

1828961

分类号:

学校代码: 10055

密 级:

学 号: 042553

论文题目: 裸土风蚀型开放源基础理论与  
控制技术研究

博士学位论文

培养院系: 环境科学与工程学院

一级学科: 环境科学与工程

二级学科: 环境科学

论文作者: 韩 旻

指导教师: 白志鹏教授

南开大学研究生院

2007年4月

126071

Y   
Y1798242

南开大学博士研究生毕业（学位）论文  
裸土风蚀型开放源基础理论与控制技术研究

（申请博士学位）

专    业：环境科学

研  究  生：韩   旻

指导教师：白志鹏教授

南开大学环境科学与工程学院

2007年4月

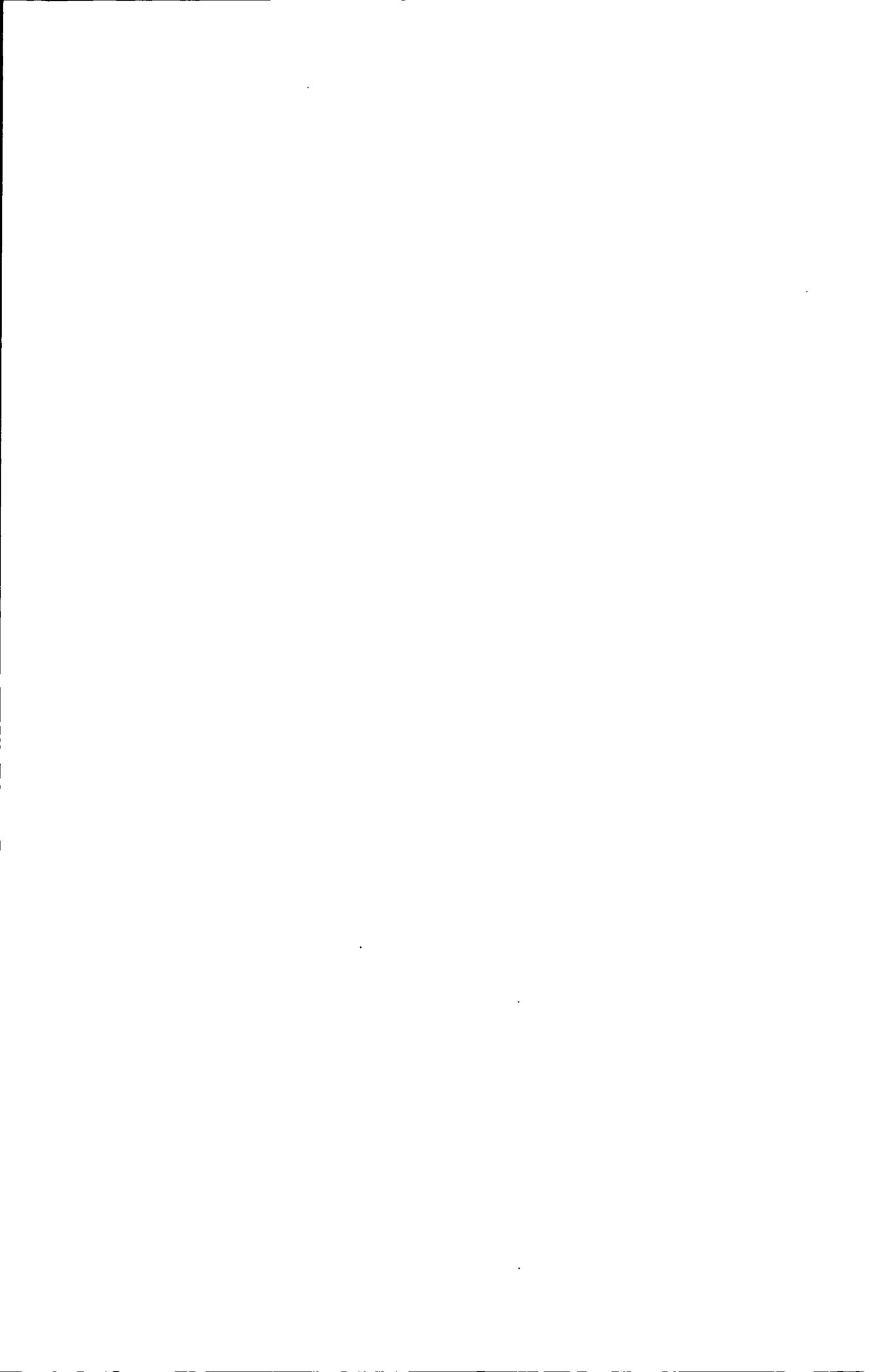


Study on the Basic Principal and Control Techniques of  
Wind Erosion Open Source

Dissertation Submitted for Degree of Doctor of Philosophy in  
Environmental Science

By  
Han Yang  
Supervised by  
Professor Bai Zhipeng

College of Environmental Science and Engineering  
Nankai University Tianjin, P.R.China  
April, 2007



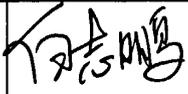
# 南开大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解南开大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名： 

2007年 5 月 31 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 5 年解密后适用本授权书。

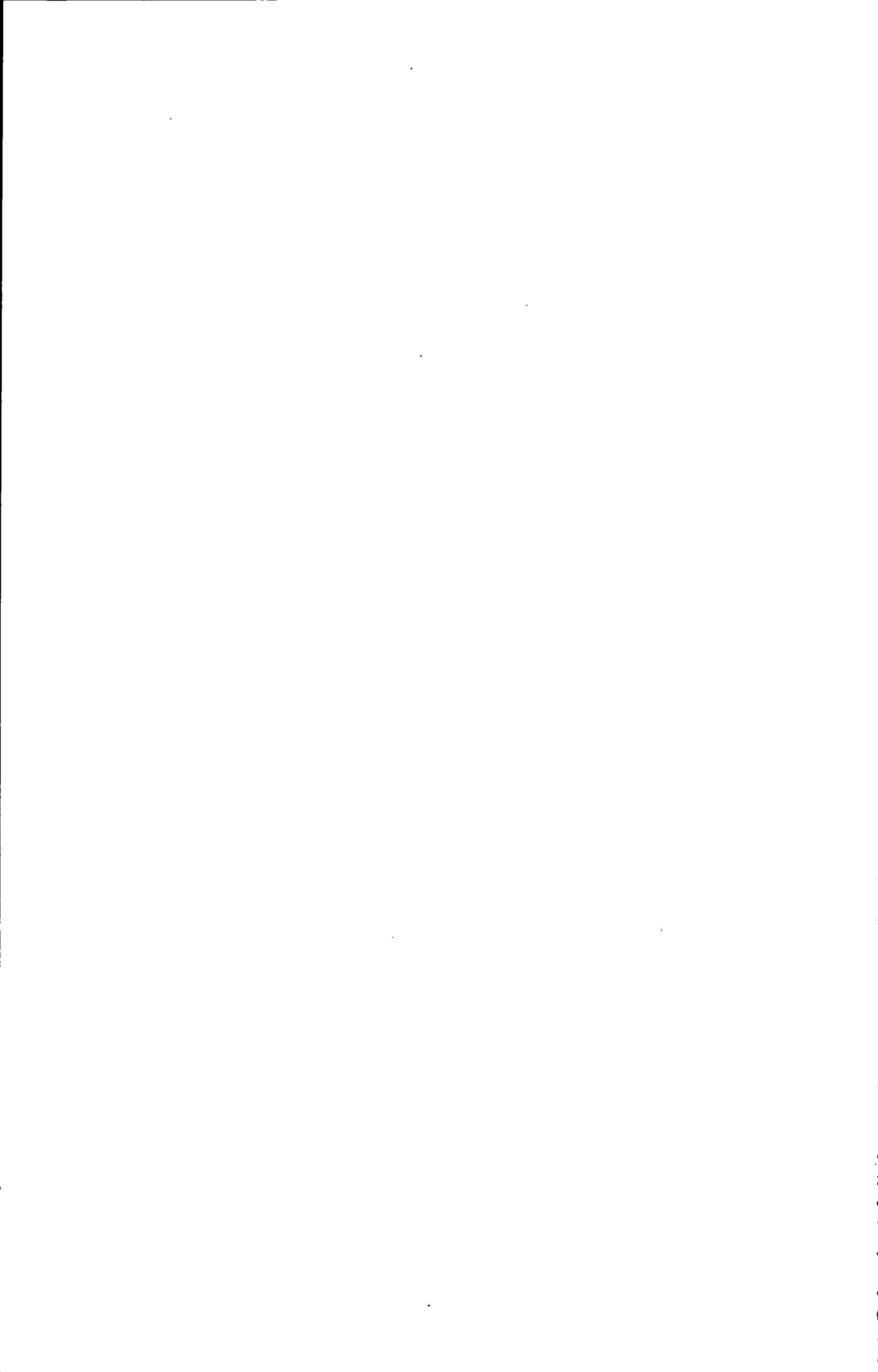
指导教师签名：		学位论文作者签名：	
解 密 时 间：	2012年 5 月 31 日		

各密级的最长保密年限及书写格式规定如下：

内部 5年（最长5年，可少于5年）

秘密★10年（最长10年，可少于10年）

机密★20年（最长20年，可少于20年）

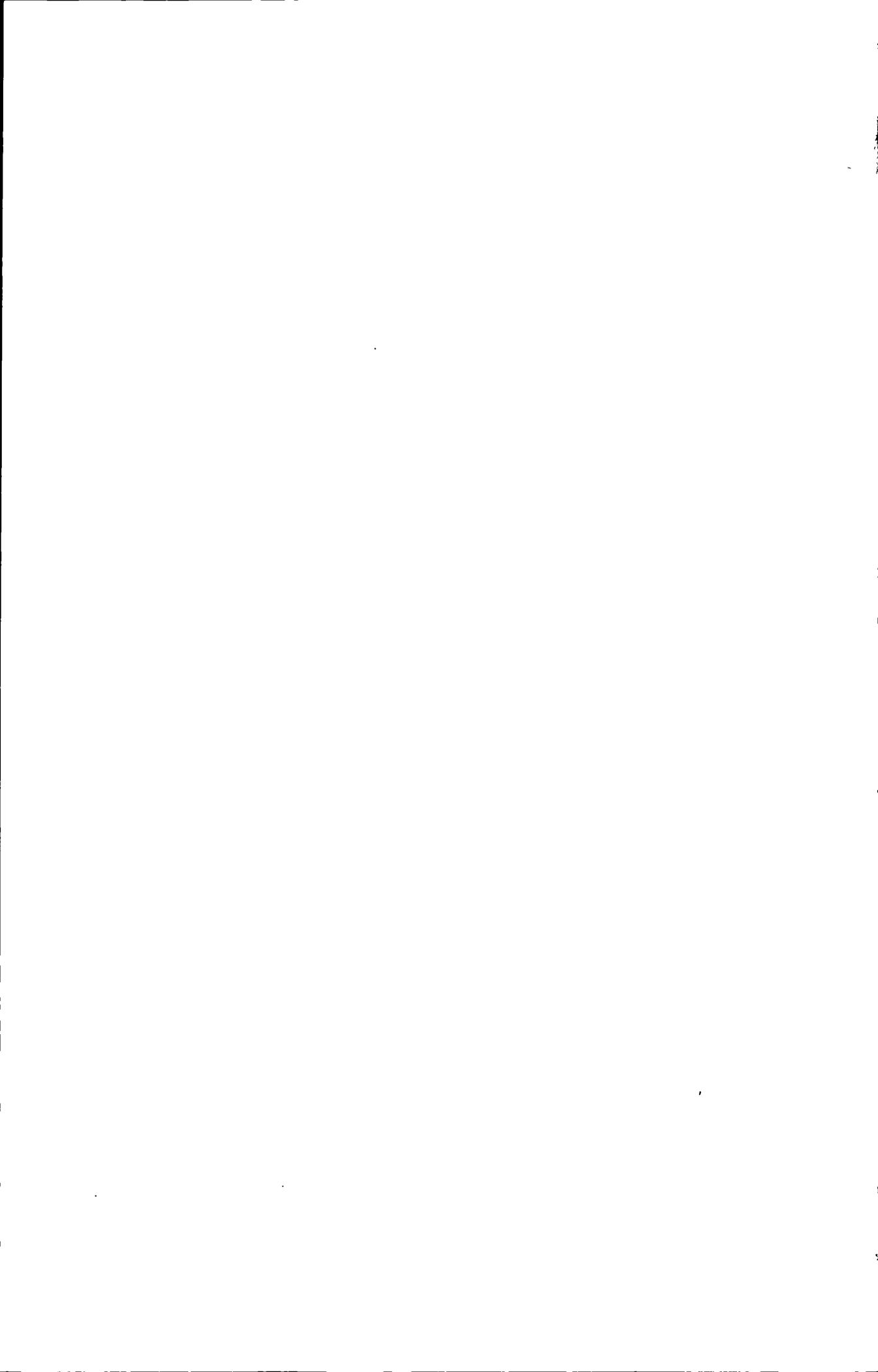


# 南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘 要

多个城市的大气颗粒物源解析结果表明, 开放源已成为北方城市环境空气中颗粒物的最主要贡献者, 是影响空气颗粒物达标的重要源类, 其中土壤尘是最主要开放源类。目前我国对于风蚀型开放源的研究还不够, 对该源缺乏有效的控制技术和管理手段。

本文结合空气动力学、气象学、土壤学、大气科学等相关学科理论或学说, 首次对裸土风蚀型开放源基本理论进行了研究。主要包括: 概括了国内外土壤风蚀研究进展, 并对风蚀起尘机理进行了研究, 首次提出了裸土风蚀型开放源、裸土风蚀尘和裸土风蚀起尘的概念; 提出了裸土风蚀尘采样方法; 包括采样地点、采样时间、采样数量和采样深度等, 为进一步开展裸土风蚀起尘研究做了铺垫。

阐述了国内外土壤风蚀采样装置和仪器, 分析了国内外采样器存在的不足, 根据城市颗粒物污染治理中存在采样仪器功能单一, 缺乏多功能全自动的设备, 开发设计了 4 个国内首创的采样仪器: 多功能大气降尘自动采样器; 扬尘、沙尘暴降尘自动采样装置; 降雨降尘分时段多功能全自动采样器; 收集罐为自动升降的大气干湿沉降多功能采样器, 并申请了相应 2 个实用新型专利和 2 个发明专利。

本文选取了天津近郊为研究区域, 结合  $PM_{10}$  的环境监测结果和气象资料, 研究了裸土风蚀季节变化规律, 分析了城市颗粒物  $PM_{10}$  在每年 2 月份偏低的原因。应用颗粒物源解析的结果和箱模型估算了城市近郊裸土风蚀尘对城市颗粒物 (TSP 和  $PM_{10}$ ) 的贡献量。应用富集因子和扫描电镜方法分析了城市降尘中本地裸土风蚀开放源和外来源在元素组成和形态上差别。分析了国内外卫星遥感在大气监测和治理上应用, 研究了卫星遥感 DVB-S 平台应用到裸土风蚀开放源的来源识别、传输路径、日常监测和治理效果评估等方面的技术方法并实际得以应用。

从影响风蚀的因素出发, 重点分析了农田风蚀治理的基本方法和技术, 并对农田防护林和保护性耕作进行了比较研究, 提出了农田风蚀防治措施和建议。

综上所述, 本文对裸土风蚀型开放源的基本理论、风蚀模型、风蚀季节变化规律和风蚀治理技术等方面进行了较为系统的研究, 对我国自主开发的卫星

遥感 DVB-S 平台在风蚀型开放源的传输途径、风蚀监测和治理上的应用进行了分析和应用。本文的基本理论、基本方法对城市开放源的治理和城市空气质量提供参考和方法指导，对城市空气颗粒物污染治理具有重要意义。

关键词：空气颗粒物；土壤风蚀起尘；风蚀预报系统；源解析；土壤背景值；模型；扫描电镜；

## Abstract

The results of a number of projects of source apportionment for Particulate Matter (PM) indicated that the open sources were important for ambient PM, compared with other sources. A certain amounts of ambient air PM are derived from soil via wind erosion dust production procedure, especially in northern China. Studies on the air quality effect of all kinds of open sources are inefficient in China or even in the World. Wind erosion open source should be paid special attention by environmental air quality management as well as agricultural management authorities.

Wind erosion open source principle and mechanism are discussed on the basis of air pollution and referring to a number of disciplines such as aerodynamics, aerography, agrology, etc. This dissertation defined wind erosion open source of soil, wind erosion dust production of soil. For field work, sampling site, sampling time/duration, sample size, and sampling methods were discussed.

Four kinds of new sampling technical and instrument were developed and applied for Chinese patents in order to collect dry deposition and wet deposition and study on wind erosion dust.

The chemical mass balance (CMB) model - a typical method of source apportionment for PM technique, combined with Box model were employed in this study in order to predict the contribution from wind erosion dust to ambient air PM concentration. The TSP and  $PM_{10}$  production amount from soil were calculated.

Metrological data and PM monitoring data for multi-years in Tianjin were used to analyze the effect of soil dust production. Enrichment Factor (EF) and Scanning Electronic Microscope (SEM) approaches were employed in this study in order to identify the source of ambient PM and the concentration contribution derived from soil dust in Tianjin area.

Satellite sensing technique was used via Digital Video Broadcast

System (DVB-S) in this study to monitor soil usage mode, soil moisture, surface vegetation, sand storm, etc.

This study will provide support to wind erosion dust production evaluation, pollution control and prevention, and air quality/agricultural soil management.

**Key word:** Ambient air particulate matter; soil wind erosion; wind erosion prediction system; source apportionment; soil background value; model; scanning electronic microscope

# 目 录

第一章 引 言 .....	1
1.1 选题背景 .....	1
1.1.1 我国大气颗粒物污染状况 .....	1
1.1.2 大气颗粒物污染对人体健康的危害 .....	3
1.1.3 大气颗粒物对环境的影响 .....	5
1.2 论文选题意义 .....	7
1.2.1 裸土风蚀开放源是环境空气中颗粒物的主要来源之一 .....	7
1.2.2 为环境影响评估提供理论依据 .....	8
1.3 裸土风蚀的概念及对环境的影响 .....	8
1.3.1 裸土风蚀的概念 .....	8
1.3.2 裸土风蚀对环境的影响 .....	10
1.4 国内外研究现状 .....	11
1.4.1 国外风蚀问题研究现状 .....	11
1.4.2 国内风蚀问题研究现状 .....	12
1.5 本文研究的目的、范围内容 .....	13
1.5.1 本文研究目的 .....	13
1.5.2 本文研究时空范围 .....	14
1.5.3 本文研究的主要内容 .....	14
1.6 研究技术路线图 .....	16
本章参考文献 .....	18
第二章 土壤背景化学组分的研究 .....	23
2.1 土壤类型概述 .....	23
2.2 研究区域土壤类型 .....	28
2.3 不同土壤类型元素背景值 .....	29
2.3.1 我国土壤元素背景值研究概述 .....	29
2.3.2 不同土壤类型土壤元素背景值分布概况 .....	30
2.4 研究区域的土壤背景值化学元素组成 .....	36
2.5 裸土风蚀尘化学元素组成 .....	37
2.6 本章总结 .....	38

本章参考文献.....	38
第三章 裸土风蚀开放源样品采集方法研究.....	40
3.1 采样方法.....	40
3.1.1 土壤样品的采样方法.....	40
3.1.2 大气环境中裸土风蚀尘的采样方法.....	45
3.2 采样季节与时间安排.....	49
3.3 采样点.....	50
3.3.1 用 DVB-S 遥感资料和风玫瑰图确定采样点.....	50
3.4 采样点数量.....	53
3.5 采样记录卡.....	54
3.6 本章总结.....	56
本章参考文献.....	56
第四章 裸土风蚀开放源风蚀机制研究.....	59
4.1 裸土风蚀起尘粒径和起动风速相关性的研究.....	60
4.1.1 裸土风蚀起尘粒径的研究.....	60
4.1.2 裸土风蚀起动风速研究.....	62
4.2 裸土风蚀与土地利用方式相关性的研究.....	64
4.2.1 不同土地利用方式下对颗粒物起动风速的影响.....	65
4.2.3 不同植被与风蚀颗粒的关系.....	65
4.3 风蚀与土壤湿度相关性的研究.....	66
4.4 本章总结.....	69
本章参考文献.....	69
第五章 裸土风蚀模型研究.....	71
5.1 风蚀预测模型.....	71
5.1.1 国内外研究状况.....	71
5.1.2 WEQ 风蚀模型.....	72
5.1.3 修正的风蚀方程(RWEQ).....	72
5.1.4 Gillette 的起尘模型.....	73
5.1.5 邵亚平的起尘模型.....	74
5.1.6 DPM 起尘模型.....	76
5.2 国内风蚀起尘量估算模型.....	77

5.3	风蚀预测模型系统 WEPS 应用研究	78
5.4	裸土风蚀颗粒扩散距离预测公式	80
5.5	$^{137}\text{Cs}$ 法在裸土风蚀中的应用	82
5.5.1	$^{137}\text{Cs}$ 示踪原理	82
5.5.2	$^{137}\text{Cs}$ 空间分布	83
5.5.3	$^{137}\text{Cs}$ 样品采集方法	84
5.5.4	$^{137}\text{Cs}$ 本地值计算模型	85
5.5.5	$^{137}\text{Cs}$ 模型研究	86
5.6	本章总结	87
	本章参考文献	88
第六章 裸土风蚀尘采样仪器研究开发		92
6.1	风蚀实验仪器应用进展	92
6.2	风蚀颗粒物采样仪器的开发研制	99
6.3.1	风蚀颗粒采集瓶	99
6.3.2	全自动降尘采集器	100
6.4	本章总结	105
	本章参考文献	106
第七章 裸土风蚀开放源起尘对城市 $\text{PM}_{10}$ 影响研究		108
7.1	国内外土壤风蚀规模和程度	108
7.2	土壤风蚀对环境的影响	109
7.3	研究区域环境概况	110
7.4	近郊裸土风蚀与城区 $\text{PM}_{10}$ 浓度季节变化规律	112
7.4.1	城市颗粒物 $\text{PM}_{10}$ 浓度变化规律	112
7.4.2	天津市 2 月份 $\text{PM}_{10}$ 浓度低于 1、3 月份浓度分析	114
7.5	裸土风蚀颗粒物对城市污染贡献量	115
7.5.1	风速、风向对 $\text{PM}_{10}$ 浓度影响	115
7.5.2	应用箱模型估算近郊裸土风蚀起尘年降尘量	119
7.6	天津市裸土风蚀尘的粒径及分布特征	121
7.6.1	近郊裸土样品	121
7.6.2	近郊裸土样品处理	122
7.6.3	近郊裸土样品粒径分布情况	122
7.7	城市颗粒物 $\text{PM}_{10}$ 近郊裸土来源与外来源的区别研究	127
7.7.1	应用 EF 富集因子分析近郊裸土源尘与外来源的区别	127

7.7.2 应用 SEM 和 TEM 分析近郊裸土来源尘与外来来源尘的区别 .....	129
7.8 本章总结 .....	132
本章参考文献 .....	132
第八章 DVB-S 遥感资料在裸土风蚀开放源中的应用 .....	135
8.1 DVB-S 遥感资料系统平台 .....	135
8.2 遥感在环境科学中的应用进展 .....	136
8.3 EOS/MODIS 遥感资料数据特性 .....	137
8.4 裸土风蚀开放源植被覆盖状况反演 .....	138
8.5 裸土风蚀开放源起尘传输途径监测 .....	142
8.6 裸土风蚀开放源土地类型分类 .....	144
8.7 本章总结 .....	146
本章参考文献 .....	147
第九章 裸土风蚀型开放源控制技术研究 .....	148
9.1 风蚀型开放源评估方法 .....	148
9.1.1 开展土地利用状况调查和遥感监测评估 .....	148
9.1.2 土地利用状况调查和遥感监测总体技术流程 .....	149
9.1.3 地表特征遥感调查 .....	151
9.2 裸土风蚀型开放源风蚀防治技术 .....	153
9.2.1 农田防护林的风蚀防治研究 .....	153
9.2.2 保护性耕作 .....	155
9.3 风蚀开放源防治其它类型技术 .....	157
9.4 本章总结 .....	159
本章参考文献 .....	160
第十章 结论与展望 .....	162
10.1 研究结论 .....	162
10.2 本文创新点 .....	163
10.3 研究展望 .....	163
个人主要简历 .....	164
攻读博士学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	164
攻读博士学位期间参研课题 .....	165
获奖情况 .....	165
致谢 .....	166

## 第一章 引言

### 1.1 选题背景

#### 1.1.1 我国大气颗粒物污染状况

大气颗粒物来源多，地区性强，是大气环境中化学组成最复杂、危害最大的污染物之一。大气中污染物可分为气态污染物和颗粒态污染物<sup>[1]</sup>。颗粒物可携带重金属和有害有机污染物。由于自然过程和人类活动，造成不断有颗粒物进入大气，大气中的物理、化学过程也会产生细颗粒物。

空气中的悬浮颗粒物通常分为总悬浮颗粒物（TSP：在我国指空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物）、可吸入颗粒物（ $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ ， $\text{PM}_{10}$ 是指空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物， $\text{PM}_{2.5}$ 是指空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物，见图1.1）。

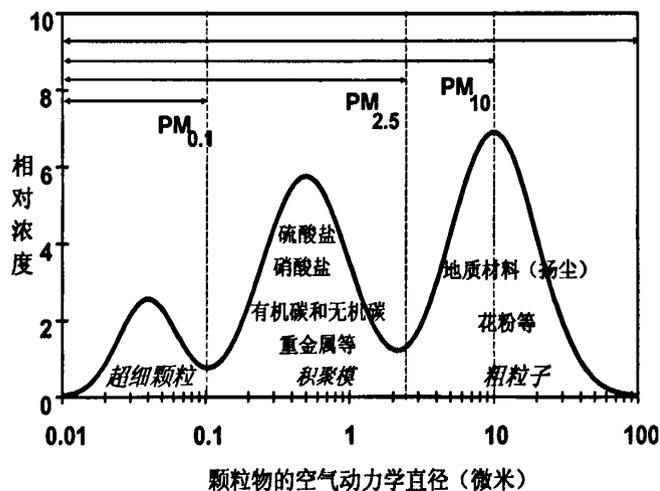


图 1.1 环境空气中不同粒径颗粒物的分布

颗粒物是影响我国城市空气质量的首要污染物，我国很多城市空气质量达不到 1996 年颁布的国家环境空气质量标准（GB3095—1996）。标准中规定颗粒物浓度限值如下表（表 1.1）所示：

表 1.1 我国环境空气质量标准中规定的颗粒物浓度限值 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

污染物名称	取值时间	浓度限值		
		一级标准	二级标准	三级标准
总悬浮颗粒物	年平均	0.08	0.2	0.3
TSP	日平均	0.12	0.3	0.5
可吸入颗粒物	年平均	0.04	0.1	0.15
PM <sub>10</sub>	日平均	0.05	0.15	0.25

国家环境保护总局发布的 2005 年《中国环境状况公报》显示, 监测的 522 个城市中空气质量达到一级标准的城市 22 个 (占 4.2%)、二级标准的城市 293 个 (占 56.1%)、三级标准的城市 152 个 (占 29.1%)、劣于三级标准的城市 55 个 (占 10.6%), 其中 39.7% 的城市空气质量处于中度或重度污染。颗粒物污染是重点城市 2010 年全面达标的最大障碍, 2000-2005 年颗粒物污染浓度分级比例见表 1.2。

表 1.2 全国城市颗粒物浓度分级比例

浓度分级	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
达到 II 级(%)	36.9	35.9	36.8	45.6	46.8	56.1
II~III 级(%)	32.8	34.9	33.4	33.2	38.9	29.1
劣 III 级(%)	30.3	29.2	29.8	21.2	14.3	10.6
监测城市数(个)	338	341	343	340	342	522

注: TSP 浓度年均值 II 级标准为  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>10</sub> 浓度年均值 II 级标准为  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

目前国内的研究结果表明 PM<sub>10</sub> 与 TSP 的重量比约为 60-80%, 比前十几年高出 10-20 个百分点, 说明我国空气中的细颗粒物的比例在上升。在美国近年的研究中, 表明 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 的重量比为 40-60%, PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 的重量比为 30-40%, 说明颗粒物的质量百分比分布中, 细颗粒物的比例较高。粗粒子 ( $>2.5\mu\text{m}$ ) 通常产生于机械过程, 细粒子 ( $<2.5\mu\text{m}$ ) 主要来源是: 燃烧产生的粒子和燃烧挥发物凝结形成的一次颗粒物, 或者是气体大气化学反应产生的二次颗粒物。一次和二次细粒子可以在空气中长时间 (几天到几个星期) 停留, 可以传输很远的距离 (几百到几千公里), 趋向于在一个城区和更大的区域均匀分布。而粗粒子在空气中停留时间短 (几分钟到几个小时), 传输距离短 ( $<$ 几

十公里), 因此, 在城区和更大的区域分布不均匀, 影响范围有限<sup>[2-4]</sup>。粒径越小在空气中存留的时间越长, 传输的距离越远。据英国环境部门的研究, PM<sub>2.5</sub> 在大气中停留的时间可长达几十天, 甚至数年以上, 颗粒物粒径与下降速度见表 1.3。

表 1.3 颗粒物直径与下降速度

直径( $\mu\text{m}$ )	0.1	1	10	100
下降速度(cm/s)	0.00004	0.004	0.3	30

颗粒物污染较重的城市主要分布在河南、山西、内蒙古、辽宁、湖南、四川及西北各省(自治区)(图1.2)。

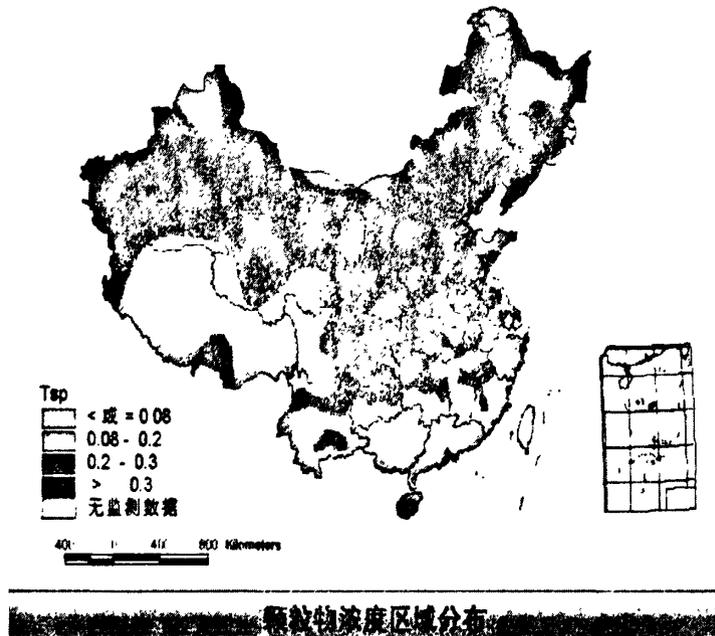


图 1.2 2002 年颗粒物浓度区域分布图

### 1.1.2 大气颗粒物污染对人体健康的危害

在全球 35 个国家和地区进行的研究表明, 空气中的颗粒物污染与人体健康存在相关关系, 颗粒物对人体健康的影响, 主要与其粒径大小及化学成分密切相关。目前已知的可吸入颗粒物对人体的影响至少包括以下几方面: 降低心肺功能、心血管病的日死亡率增加、儿童哮喘病比率增加、患癌症比率增加等<sup>[5-7]</sup>。

大气颗粒物对人体健康的影响取决于沉积于呼吸道中的位置, 在沉积位置

上对组织的影响取决于颗粒物的化学组成。粒径大小决定了其最终沉积于人体的部位：大于 10 微米粒径的粒子，绝大部分能阻留在鼻腔及咽喉部，据研究，鼻毛滤尘机能约为吸气中颗粒物总量的 30-50%。10-7 $\mu\text{m}$  的可进入鼻腔，7-2.5 $\mu\text{m}$  的可进入咽喉，小于 2.5 $\mu\text{m}$  的则可深入肺泡并沉积，进而进入血液循环影响肺部健康，导致与心、肺功能障碍有关的疾病(如心血管疾病等)。而且由于细颗粒物的比表面积大，吸附性能强，其组成和吸附的重金属等有毒有害物质更多，毒性也就更大。实际上，对人体健康和大气能见度影响最大的是粒径为 0.1-2.5 $\mu\text{m}$  之间的气溶胶粒子。

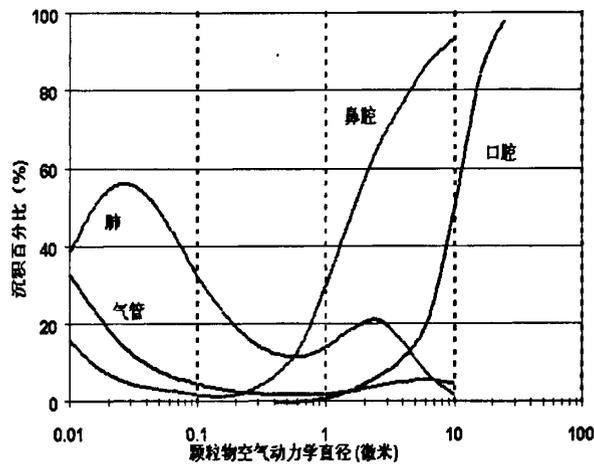


图 1.3 不同粒径的颗粒物在人体呼吸系统的沉积状况

一般状态下，当大气质量恶化时，居民的死亡率和患病率将上升，呼吸道症状会增加，尤其是老人、小孩和患有心、脑血管和呼吸系统疾患的病人。一个成年人一昼夜要呼吸 10-15 $\text{m}^3$  的空气<sup>[8-14]</sup>。颗粒物本身含有许多有害物质（如多环芳烃），也可能是其它污染物的载体（如细菌、病毒）。在目前公认的各种大气污染物中，颗粒物被公认为危害最大、代表性最强的大气污染物，在大气污染的定量健康危害评价中多被选作标志性大气污染物<sup>[15]</sup>。美国和加拿大 24 社区研究发现， $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  对气喘病症发生率有着相关<sup>[16]</sup>。美国南加州 12 社区研究发现  $\text{PM}_{10}$  与哮喘之间有着弱的相关<sup>[17]</sup>。瑞士 10 社区研究发现， $\text{PM}_{10}$  与慢性咳嗽、支气管炎之间有着暴露的相关<sup>[18]</sup>。国家环保总局 1994 年与美国国家环保局合作开展了一项“大气污染对人体呼吸健康影响研究”的课题，通过对广州、武汉、兰州、重庆 4 个城市几年的跟踪调查，数据表明，大气颗粒物浓度

尤其是小颗粒物与儿童肺功能异常率有明显的相关性<sup>[19]</sup>。

胡伟等通过研究颗粒物中各种元素与儿童呼吸病症发生率的统计关系得出结论：细颗粒物中工业污染元素对人体呼吸健康的影响比粗颗粒物大；气喘、支气管炎、慢性咳嗽、慢性咳嗽不仅与空气颗粒物中的污染元素有正关联，而且与土壤元素有正关联。慢性咳嗽与细颗粒物中土壤元素的关联性达到显著水平。土壤元素在粗颗粒物中以“土壤粒子团”的形式存在于较大的部分中，并成为空气中有害有机物、病毒的依附体，从而产生有害的呼吸健康反应。胡伟等<sup>[22]</sup>对成人的研究表明：成人呼吸健康与粗、细颗粒物中土壤元素以及某些污染元素等都有显著的正关联性。同儿童呼吸健康与颗粒物中元素的统计关联相比，相同元素浓度时成人的呼吸健康与这些元素的关联性要弱一些，但比儿童的关联性更趋稳定。

### 1.1.3 大气颗粒物对环境的影响

空气颗粒物对环境的影响主要体现在以下几个方面：能见度下降、环境空气混浊、灰霾天气、影响局部环境气温、影响大气与降水酸碱度、气候变化异常、云的形成，大气颗粒物对地球气候系统具有重要的影响。大气颗粒物的气候效应可以分为两类：一是颗粒物的直接气候效应，颗粒物粒子可以通过吸收、散射、反射太阳短波辐射以及大气长波辐射，影响地气系统的辐射收支状况，进而对地球的气候效应产生影响；二是颗粒物的间接气候效应，由于颗粒物粒子在云的形成过程中可以起到凝结核的作用，所以颗粒物粒子可以通过影响云凝结核作用，对云的形成、云滴的大小、云的寿命产生重要影响，进而影响地球气候系统<sup>[23]</sup>。

东亚地区由于自然和人为因素释放出大量矿物气溶胶和人为气溶胶，其中沙尘气溶胶、黑碳气溶胶以及硫酸盐气溶胶已经被认为具有明显的气候效应<sup>[24]</sup>。尽管气溶胶只占大气中很少的一部分，但在城市中对大气光学性质的影响甚至可达 99%<sup>[25]</sup>。大气能见度主要是由大气气溶胶对光的散射和吸收效应（统称为消光效应）决定的。在极干净的大气中能见度可达 30km 以上，而在城市污染大气中能见度可在 5km 左右甚至更低。在大气气溶胶中，主要是粒径为 0.1 $\mu\text{m}$ -1.0 $\mu\text{m}$  的颗粒物通过对光的散射而降低能见度<sup>[26-27]</sup>。PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 对光的吸收效应通常是使能见度降低的第二大因素。观测结果揭示能见度与 PM 的质量浓度存

在着明显的统计负相关关系<sup>[28-29]</sup>，这表明能见度的降低可能与细颗粒物密切相关。

Chan 等人在澳大利亚布里斯班的研究表明由颗粒物导致的光散射效应与细颗粒物的质量浓度，尤其是其中的煤烟、硫酸盐和非土壤钾的浓度具有很强的相关关系，其平均消光系数占总消光系数的 49%<sup>[30]</sup>。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、吸收和光散射系数日变化情况见图 1.4

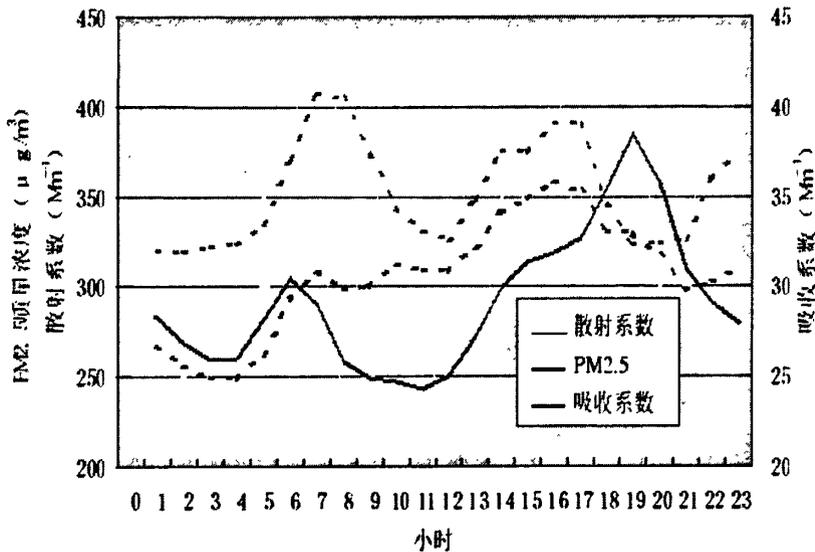


图 1.4 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、吸收和光散射系数日变化情况

裸土风蚀形成的沙尘天气是中国北方城市颗粒物污染的重要来源，沙尘影响的主要时段会导致总悬浮颗粒物 (TSP) 浓度上升几十倍<sup>[31]</sup>，同时也会导致细粒子 (PM<sub>2.5</sub>) 浓度明显上升<sup>[32]</sup>。研究表明受沙尘天气影响，北京地区气溶胶光学厚度 (550nm) 可由 0.05~0.4 上升到 0.3~0.5 之间<sup>[33]</sup>。而气溶胶对太阳辐射的这种直接消光作用与细粒子质量浓度密切相关<sup>[34-35]</sup>。由于颗粒物的存在，直接阻挡太阳光抵达地球表面，形成“遮阳伞”效应，这样使可见光的光学厚度增大，抵达地面的太阳能下降，从而使地面温度降低。资料表明<sup>[26]</sup>，当 PM<sub>10</sub> 浓度达 100μg/m<sup>3</sup> 时，到达地面的紫外线减少 7.5%；当 PM<sub>10</sub> 为 600μg/m<sup>3</sup> 时，到达地面的紫外线减少 42.7%；当 PM<sub>10</sub> 为 1000μg/m<sup>3</sup> 时，到达地面的紫外线减少 60%。

城市颗粒物作为凝结核把水气凝聚成水滴，在热岛辐合上升气流的作用下造成降水。据英国和北美几个城市统计，这些城市的降水量比郊区多。另外，

大气颗粒物除了作为云凝结核对云的宏微观特征及云中的化学过程有重要影响外，颗粒物还能影响云下雨水的酸化过程。

## 1.2 论文选题意义

### 1.2.1 裸土风蚀开放源是环境空气中颗粒物的主要来源之一

我国是干旱、半干旱及半湿润地区的面积占国土面积的52.5%，风蚀、沙化是我国北方地区突出的问题，由风蚀所引发的沙尘暴发生频率愈来愈高。据统计我国发生沙尘暴次数逐年上升；50年代5次、60年代8次、70年代13次、80年代14次、90年代23次。全国已有405Mkm<sup>2</sup>耕地，131.6Mkm<sup>2</sup>草地和3881.9Mkm<sup>2</sup>林地与灌木地沙化，而且荒漠化推进速度也从70年代以前的每年1565km<sup>2</sup>增至目前的每年2460km<sup>2</sup>，我国每年因土地沙化造成的损失达540亿元，约占全球荒漠化造成损失的16%<sup>[3]</sup>。农田裸土风蚀是造成表土层大量富含营养元素的细微颗粒的损失，致使农田表土层粗化、土壤肥力下降和土地生产力衰退；土壤风蚀过程中会产生大量的气溶胶颗粒，这些颗粒悬浮于大气中，是造成所在地区乃至周缘地区沙尘天气、空气颗粒物污染的重要来源。

土壤风蚀对区域和全球生态系统有着重要的影响，土壤风蚀是一个复杂的物理过程，其根源除了自然气候外，有94.5%是人为掠夺式经营方式所致<sup>[2]</sup>。科学家研究了风吹情况下土粒的运动，发现能被风吹到高空，运移千里之外的主要是土粒直径70 μm以下的微粒或浮尘，细颗粒主要存在于耕作的农田和草地，沙漠经过多年风蚀，易于起尘的细颗粒已经很少<sup>[3]</sup>。

多个城市的大气源解析结果表明开放源已成为城市环境空气中颗粒物的最主要来源，在中国北方城市开放源的分担率已达40%~80%，裸土风蚀往往占开放源的主要部分<sup>[4,5]</sup>。国外土壤风蚀研究表明由裸土风蚀而注入大气的颗粒物已经成为空气颗粒物的主要组分之一<sup>[6-8]</sup>。各城市源解析（CMB法）结果表明：土壤尘对大气颗粒物的贡献率比较高，例如常州市土壤尘对TSP和PM<sub>10</sub>贡献率分别为29.4%和40%，均居各排放源之首<sup>[37]</sup>；太原土壤尘对TSP的贡献率分别为35.2%（冬季，第二大源）和58.8%（夏季，第一大源）<sup>[38]</sup>；上海土壤尘的贡献率为27.6%，仅次于建筑尘（32.1%）<sup>[39]</sup>；唐山土壤尘是TSP贡献率最大的排放源，采暖期39.2%，非采暖期40.8%，全年40%<sup>[40]</sup>（详见表1.5）。可见土壤尘是颗粒物

污染的一类重要尘源。

表 1.5 部分城市源解析 (CMB 法) 土壤尘贡献率, %

序号	城市	发表年/采样年	TSP 贡献率/排次	来源
1	天津	2001	38/1	[36]
2	常州	1995	29.4/1	[37]
3	太原	2003/1991	35.2/冬季/2, 58.79/夏季/1	[38]
4	上海	1997	27.6/2	[39]
5	唐山	2004	39.97/1	[40]
6	秦皇岛	1995/1994	20.7/2, 14.9/3	[41]
7	昆明	1994	33/2	[42]
8	乌鲁木齐	1996	30/2	[43]
9	呼和浩特	1991	24.30/2	[44]
10	晋城	2005/2004	36.71/1	[45]
11	西宁	2004/2001-2002	26.98/2	[46]
12	兰州	1995/1991-1992	17/2 (采), 33 (非采) /2	[47]

目前国内外风蚀研究主要针对干旱与半干旱地区土壤风蚀引起的土地沙漠化<sup>[13]</sup>、土地退化和沙尘暴<sup>[14-17]</sup>问题上。沙尘天气对城市大气颗粒物研究已有报道, 而对于近郊裸土风蚀开放源对城市颗粒物的影响报道不多。

### 1.2.2 为环境影响评估提供理论依据

如何定性地识别大气颗粒物的来源, 定量地计算出各个源对环境污染的贡献值(分担率), 然后根据贡献大小和治理的难易程度和费用高低决定治理措施。对于决策者来说很重要, 裸土风蚀而注入大气的风蚀尘已经成为空气颗粒物的主要组分之一。因此, 开展裸土风蚀开放源基本理论研究, 可以在裸土风蚀预防和治理上提供理论依据, 减少裸土风蚀开放源颗粒物对环境空气的释放, 为城市空气污染治理、蓝天工程提供保障。

## 1.3 裸土风蚀的概念及对环境的影响

### 1.3.1 裸土风蚀的概念

科学的风蚀 (wind erosion) 概念以侵蚀概念为基础, 其形成可以追逆到

上世纪末。侵蚀erosion一词源于拉丁语erodere, 意为吃掉、挖掉。Penck于1894年首次将erosion一词引入地质学中, 用以描述河水作用下地表固体物质的损失和流水槽谷的形成。在侵蚀的概念形成之前, 已有许多词被用于描述侵蚀现象(包括风蚀)。如ablation(源于拉丁语ablatio, 意为带走)描述降水冲刷与侵蚀, corrasion(源于拉丁语corraderere, 意为刮在一起)、corrosion(源于拉丁语, 意为啃成碎片)等, abrasion(源于拉丁语abradere, 意为刮掉)和deflation等。许多学者曾建议erosion用于水侵, deflation和abrasion用于风蚀。Paul A研究了wind erosion<sup>[48]</sup>对环境空气的影响。针对各种侵蚀现象的认识和研究工作的积累促成科学的侵蚀概念及风蚀概念。侵蚀的概念被定义为: 在各种外在物质, 即外在地貌因子作用下, 土壤层或其下基岩, 即土壤圈和岩石圈的破损。上述外在地貌因子包括水、雪、冰、气(风)、风化物、有机体(植物和动物)以及人类。

由此可见, 风蚀(wind erosion)是众多侵蚀类型中的一种, 其概念可定义为: 气流(风力)作用下土壤圈或岩石圈的破损, 引起的地表物质脱离地表、搬运和再堆积。在风蚀概念形成的基础上, 根据气流性质之差异, 风蚀又可进一步分为吹蚀(deflation), 即净风侵蚀和磨蚀(abrasion), 即风沙流侵蚀两种类型<sup>[48-49]</sup>。风蚀通常发生在疏松堆积物, 或是由于自然或人为作用而使地表疏松的地方<sup>[50]</sup>。风蚀是发生于干旱、半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化的首要环节。

土壤风蚀是狭义的风蚀概念, 它是指松散的土壤物质被风吹起、搬运和堆积的过程以及地表物质受到风吹起的颗粒的磨蚀过程, 其实质是在风力的作用下使表层土壤中细颗粒和营养物质的吹蚀、搬运与沉积的过程, 这一过程直接的生态后果表现为: 一是造成表土层大量富含营养元素的细微颗粒的损失, 致使农田表土层粗化、土壤肥力下降和土地生产力衰退; 二是土壤风蚀过程中会产生大量的气溶胶颗粒, 这些颗粒悬浮于大气中, 是造成所在地区乃至周边地区沙尘天气出现的重要来源<sup>[51-53]</sup>。

目前对于城市空气颗粒物开放源(open source)尚无明确、统一的定义。有人将其界定为各种不经过排气筒无组织、无规则排放的源类, 如线源、露天放置的工业料堆、露天放置的固体垃圾堆放物、建筑工地、裸地、道路、农田、荒山等。开放源是一种复合源类, 具有源强不确定和排放不连续等特点。

本文“裸土风蚀开放源”是指各种裸露的农田、荒地、荒山、建筑工地土

堆、干涸的河床等场所。在一定自然或人为的起动风速（又称临界风速）作用下，裸土风蚀开放源表层颗粒发生滚动、跃迁、悬浮，不经过排气筒无组织、无规则向大气输送颗粒物的过程称作“裸土风蚀起尘”，所扬起扩散到空气中的尘称为“裸土风蚀尘”。裸土风蚀尘概念与风沙尘、土壤尘、区域尘、扬尘等相关概念有区别<sup>[52]</sup>，是为了更好地认识空气中颗粒物的污染来源和对开放源进行控制。

裸土风蚀开放源产生的裸土风蚀颗粒物具有如下特征：

(1) 裸土风蚀颗粒物具有开放性和无组织排放特征，即裸土风蚀颗粒物是暴露于环境空气中，又以无组织方式排放。

(2) 裸土风蚀颗粒物具有时间特异性特征。

(3) 裸土风蚀颗粒物粒度排放的颗粒物小，约在十几至几十微米之间。

本文研究的重点是北方城市近郊裸露的农田。由于占地面积大，秋末、冬、春季节，气候相对干燥、植被稀少，风场较强，这些农田容易发生风蚀，对城市颗粒物有较高贡献。

### 1.3.2 裸土风蚀对环境的影响

风蚀是干旱、半干旱以及部分半湿润地区土地沙漠化与沙尘暴灾害的首要问题，也是世界上许多国家和地区的重要环境问题之一。目前全球有 9 亿多人口、100 多个国家和地区受其危害，据估计全球受风蚀影响的土地面积有 549Mkm<sup>2</sup>，其中 296Mkm<sup>2</sup> 的面积遭受严重的土壤风蚀<sup>[54]</sup>。受风蚀沙化威胁的土地面积占全球陆地面积的 1/4，每年因风蚀沙漠化造成的经济损失达 400 多亿美元<sup>[55]</sup>。我国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占国土总面积的 1/2 以上<sup>[56]</sup>，并且许多地区处于中度和强度风蚀的影响下。据 2002 年公布的全国第二次水土流失遥感结果显示，在目前全国 356Mkm<sup>2</sup> 的水土流失总面积中，风蚀占 191Mkm<sup>2</sup>，范围涉及我国干旱、半干旱及半湿润地区。

土壤风蚀问题愈来愈受到国际社会的广泛关注。风蚀对环境的负面影响已有大量的研究报告，如风蚀引起土壤结构的退化和养分的衰减、生物量的衰退和农作物产量的下降<sup>[57]</sup>，风蚀起尘及传输影响大气的组成和气候变化以及危害人类健康，风蚀颗粒物的沉积影响水体的质量等<sup>[58]</sup>。风蚀已成为这些地区资源开发和社会经济持续发展的严重障碍。

## 1.4 国内外研究现状

### 1.4.1 国外风蚀问题研究现状

国外对风蚀研究的较早,主要集中在土壤风蚀所引起的沙尘暴、农田肥力损失等方面,而对于裸土风蚀开放源研究少有报道。本世纪80年代前风蚀过程被认为是一种重要的地质过程。早期较多的风蚀研究工作主要反映在Ehrenberg(1847), SvenHedin(1905), Richthofen (1952)和Blake(1955)等人的工作中。Ehrenberg描述了由非洲吹向欧洲的风成物质;Blake首次认识到荒漠地区风蚀地貌的发育;Richthofen认为中国北方广泛的黄土堆积主要是由其西北沙漠和戈壁地区的风蚀所致,土壤保护学家们亦开始认识到,增加土壤凝聚力(增加土壤湿度,有机质含量或改良土壤结构)或保护地表(增加作物残留物、防风带)可以减少土壤风蚀<sup>[59-61]</sup>。

国外风蚀研究可分为以下几个时期;本世纪30年代至60年代中期风蚀研究实现了定性描述到定量研究的飞跃。以W.S.Chepil为代表的美国农业部科学家等的研究工作包括风蚀物理机制,如土壤颗粒在风力作用下的运动性质、颗粒起动、气流输沙能力、风沙流的磨蚀作用、土壤粒度组成、土壤结构、土壤化学及有机质对土壤特性和抗风蚀力的影响。从研究内容、研究方法、科研队伍、研究区域以及研究成果来看,初步建立了风蚀研究的理论体系;R.A.Bagnold建立了“风沙和荒漠沙丘物理学”的理论体系,W.S.Chepil和R.A.Milne确立关于风蚀的基本原理,W.S.Chepil研究了土壤水稳性和干土块结构与土壤抗蚀性之间的关系。

W.D.Chepil在1945年发现促使田间最易侵蚀颗粒移动的最小速度,并称这一速度为“最小气体起动速度”。W.D.Chepil在1945年描述了约50%~70%土粒的移动方式。W.D.Chepil在1945年得出风蚀速率和风蚀量大部分决定于风的摩阻速度和湍流,风蚀速率随摩阻速度的三次幂而增加,而风蚀量则按照摩阻速度的五次幂而出现变化<sup>[62-67]</sup>。

60年代中期以后至80年代中期研究的重点转向土壤风蚀防止的实践。在实践中检验与完善风蚀理论,数理分析方法、计算机处理技术等被引入土壤风蚀研究。进入20世纪60年代,土壤风蚀研究逐渐从理论研究向应用研究转变,N.P.Woodruff和F.H.Sid.doway建立了世界上第一个通用风蚀方程(WEQ)。计算

被用于更复杂的研究领域,如土壤风蚀仿真研究、风蚀危险程度评价与预测以及各种风蚀模型的建立等<sup>[68-70]</sup>。20世纪80年代以来成为土壤风蚀预报模型和预测系统相对快速发展的时期。比较有影响的模型和预测系统主要有美国农业部推动建立的风蚀预报系统(WEPS)、修正风蚀方程(RWEQ)、得克萨斯侵蚀分析模型(Team)<sup>[71-73]</sup>。国外风蚀研究情况见表1.6。

表 1.6 国外风蚀研究情况

研究阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
主要研究内容	风蚀现象的认识	风沙物理、风蚀动力学、风蚀影响因子、风蚀方程、风蚀防止、风蚀研究、仪器设备。	风蚀对作物的危害、风蚀防止措施、风蚀方程应用、各种风蚀模型、风蚀研究中的数学、计算机遥感技术等应用、风蚀评价。	风蚀模型、风蚀评价、风蚀防治、风蚀的环境效应。
所属学科领域	地质学	流体力学、地貌学、空气动力学、土壤生物学。	空气动力学、土壤学、生物学、农学、自然地理学、数学、系统科学。	空气动力学、土壤学、农学、自然地理学、数学、系统科学。
研究方法	风蚀描述	野外调查、野外试验、风洞实验、实验室土壤物理分析、数理分析	野外试验、风洞模拟、微观分析测试、遥感技术、数理分析、计算机模拟	实验室模拟、野外长期定位观测实验、计算机仿真、遥感技术。
主要贡献者		R.A.Basnold、W.S.Chepil、A.W.ZmSS、N.P.Woodruff、	N.Woodruff、L.Skidmore、D.W.Fryrear、J.Hagen、A.Gillette、W.Gresory	D.W.Frycar、M.Gresory、E.D.Vorlc
标志研究成果		风沙和荒漠沙丘物理(1941)、美国农业部通用风蚀方程(1961, 1965)	德克萨斯理工大学“风蚀模”(WEQ, 1986)	修正德克萨斯理工大学“风蚀模型”(RWAEQ1993)、风蚀预报系统WEPS(1997)

#### 1.4.2 国内风蚀问题研究现状

国内风蚀研究起步较晚,主要研究方向和国外类似,也是土壤风蚀所引起的一些问题,对于裸土风蚀开放源的研究未见报道。20世纪50年代以前,中国关于土壤风蚀处于感性认识阶段<sup>[75]</sup>。20世纪50年代至70年代,研究工作处于

定性的描述阶段,基本的研究方式是对我国沙漠、沙地基本情况的调查<sup>[76]</sup>。20世纪80年代以来,风蚀研究逐渐由定性研究向半定量、定量的风洞实验研究的转变<sup>[77-78]</sup>。吴正、董光荣等通过风洞实验,探讨了土地翻耕、牲畜践踏等因素对土壤风蚀的影响<sup>[79-81]</sup>。史培军等根据相对风蚀深度、植被盖度等指标,对内蒙古土壤风蚀进行了强度分级<sup>[82]</sup>。刘玉璋等利用风洞对影响风蚀的诸因素进行了定量或半定量的模拟实验,认为土壤风蚀是自然和人为因素相互作用的产物,人为因素是叠加于自然因素之上的加速作用<sup>[83]</sup>。刘贤万发现在沙粒发生跃移前还存在着振动、滚动与滑动这三种运动形式,建立了不同运动方式的沙粒在不同运动阶段的力学模型<sup>[84]</sup>。董治宝、李振山通过对不同沙粒组成的风洞模拟实验,发现了不同粒径沙粒的不同的风蚀性质,而且建立了风蚀率与风速等因素之间的数量关系<sup>[86]</sup>。刘连友通过风洞实验证实了我国农牧交错带主要土壤的抗蚀性规律,利用风洞实验模拟测定了不同砾石覆盖密度与覆盖方式对土壤风蚀率的影响,结果表明砾石覆盖对吹蚀速率的抑制作用可表达为砾石铺压的密度效应与空间排列效应<sup>[86-90]</sup>。严平通过对<sup>137</sup>Cs剖面分布态势的分析,探讨了不同土类的现代风蚀过程,且根据<sup>137</sup>Cs模型计算出青藏高原风蚀地区的土壤风蚀速率<sup>[93]</sup>。国内风蚀研究情况见表1.7。

表 1.7 国内风蚀研究情况

研究阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段
年代跨度	上个世纪50年代以前	50年代至70年代,	上个世纪80年代以来
主要研究内容	对风蚀处于感性的时期	定性的描述	风洞实验、风蚀模型
所属学科领域	地质学	地貌学、土壤学	空气动力学、土壤学、农学、自然地理学、
研究方法	感性认识	调查沙漠、沙地基本情况	风洞实验、模拟实验 野外试验、风洞模拟、 遥感技术、数理分析、 计算机模拟
主要贡献者		朱显谟	朱振达

## 1.5 本文研究的目的、范围内容

### 1.5.1 本文研究目的

(1) 在国内外现有风蚀理论的基础上,对裸土风蚀开放源进行了深入的研

究, 提出一套裸土风蚀开放源基本理论, 为城市空气污染治理, 空气质量达标提供理论依据。

(2) 定量分析城市近郊裸土风蚀起尘对城市空气颗粒物的贡献及影响。

(3) 开发研制新一代颗粒物降尘采样器, 为大气环境质量及治理效果评估和科研提供设备支持。

(4) 利用 DVB-S 卫星遥感技术在裸土风蚀开放源监测、裸土风蚀尘传输途径的监控的方法与应用研究。

### 1.5.2 本文研究时空范围

本论文研究的主要范围是:

(1) 主要研究我国北方城市近郊裸土风蚀, 虽然城市市区中有各种类型的开放源, 但相对城市近郊裸土风蚀开放源而言, 近郊裸土风蚀开放源对城市环境空气颗粒物的影响面广, 持续的时间长, 对城市空气颗粒物的贡献突出。

(2) 研究我国北方城市近郊裸土风蚀起尘对城市空气颗粒物  $PM_{10}$  浓度的影响, 研究城市为天津市, 研究的时间主要是每年的 3 月至 5 月末, 10 月下旬到下一年的 1 月末。特别是每年 2 月份颗粒物  $PM_{10}$  浓度变化情况进行研究。

### 1.5.3 本文研究的主要内容

#### 1.5.3.1 裸土风蚀开放源背景研究

阐述研究区域的土壤类型、地块的大小、土壤可蚀性因子、土壤含水量、收集土壤背景值数据等资料。开展地表特征调查: 植被覆盖率, 绿量、绿地率, 植被类型等。通过调研, 确定研究区域的土壤类型及分布状况, 对研究区域的土壤类型、土地利用方式、作物耕种时间、土壤机械组成等进行细致描述, 为裸土风蚀机理研究奠定基础。

#### 1.5.3.2 裸土风蚀开放源样品的采集

基于国内外有关采样的地点、时间、数量、方法等资料, 初步建立一套裸土风蚀开放源的样品的采样原则、采样方法、分析测试方法、表征方法等方面的指南, 研究土壤风蚀尘成分与土壤背景值的异同点, 为城市颗粒物来源识别、定量研究提供支持。

### 1.5.3.3 裸土风蚀开放源采样仪器开发

国内外用于风蚀采样的仪器设备，主要是用于沙尘暴研究、土壤肥力损失和土壤污染研究，目前用于采集与风蚀起尘及环境空气颗粒物相关的设备比较不完善。本研究开发出多功能全自动降尘设备，用于采集环境空气中的降尘颗粒物，为城市空气污染治理、颗粒物来源解析提供技术支持。

### 1.5.3.4 裸土风蚀开放源起尘机理研究

基于国内外风蚀研究资料调研，重点研究裸露农田风蚀颗粒起尘粒径、起动风速，土地利用方式、植被覆盖等裸土发生风蚀的相关性。研究裸土风蚀尘扩散传输距离、扩散高度，中、远距离扩散模型。

### 1.5.3.5 裸土风蚀开放源与外来源的识别

比较城市空气颗粒物源解析土壤尘的成分，基于国内外研究人员对土壤尘来源研究的结论来定性分析影响城区土壤风蚀尘成分的因素；论文利用 CMB 模型结果计算出城市颗粒物裸土风蚀颗粒的贡献量，利用富集因子 (EF) 分析城市颗粒物来源，确定城市颗粒物的主要来源为近郊裸土风蚀尘。应用 SEM 区分外来尘和本地近郊裸土风蚀尘。

### 1.5.3.6 裸土风蚀开放源颗粒物对城市 $PM_{10}$ 的影响

根据天津市 2000-2005 年环境监测数据和气象数据，应用统计模型得出天津市颗粒物污染受近郊裸土风蚀影响的规律。利用 CMB 源解析的结果和箱模型 (BOX-MODEL) 计算出城市裸土风蚀尘年降尘量。

### 1.5.3.7 DVB-S 遥感平台的应用

本文应用 DVB-S 遥感资料，研究城市近郊裸土、植被覆盖等年季变化情况，研究裸土开放源的季节变化情况。

### 1.5.3.8 裸土风蚀型开放源的污染控制方法研究

农田防护林的抑制风蚀作用研究，植被覆盖、秸秆还田的防风蚀作用。DVB-S 卫星遥感平台在风蚀防治、监测上应用方法的研究，应用遥感监测生态变化与裸土风蚀的反演方法。

### 1.6 研究技术路线图

本论文研究的基本思路见图 1.5。

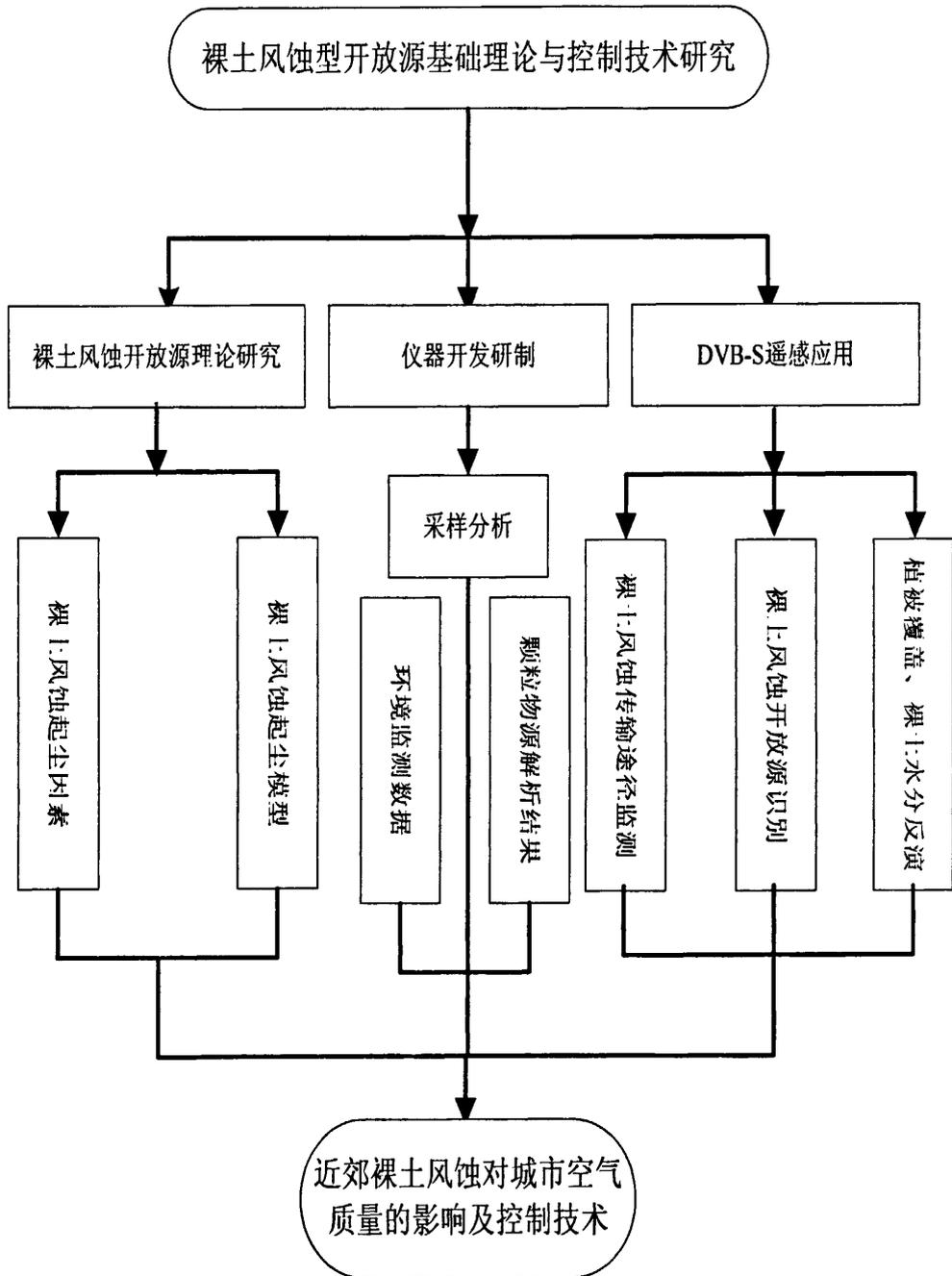


图 1.5 论文研究基本思路

本论文研究的基本路线见图 1.6。

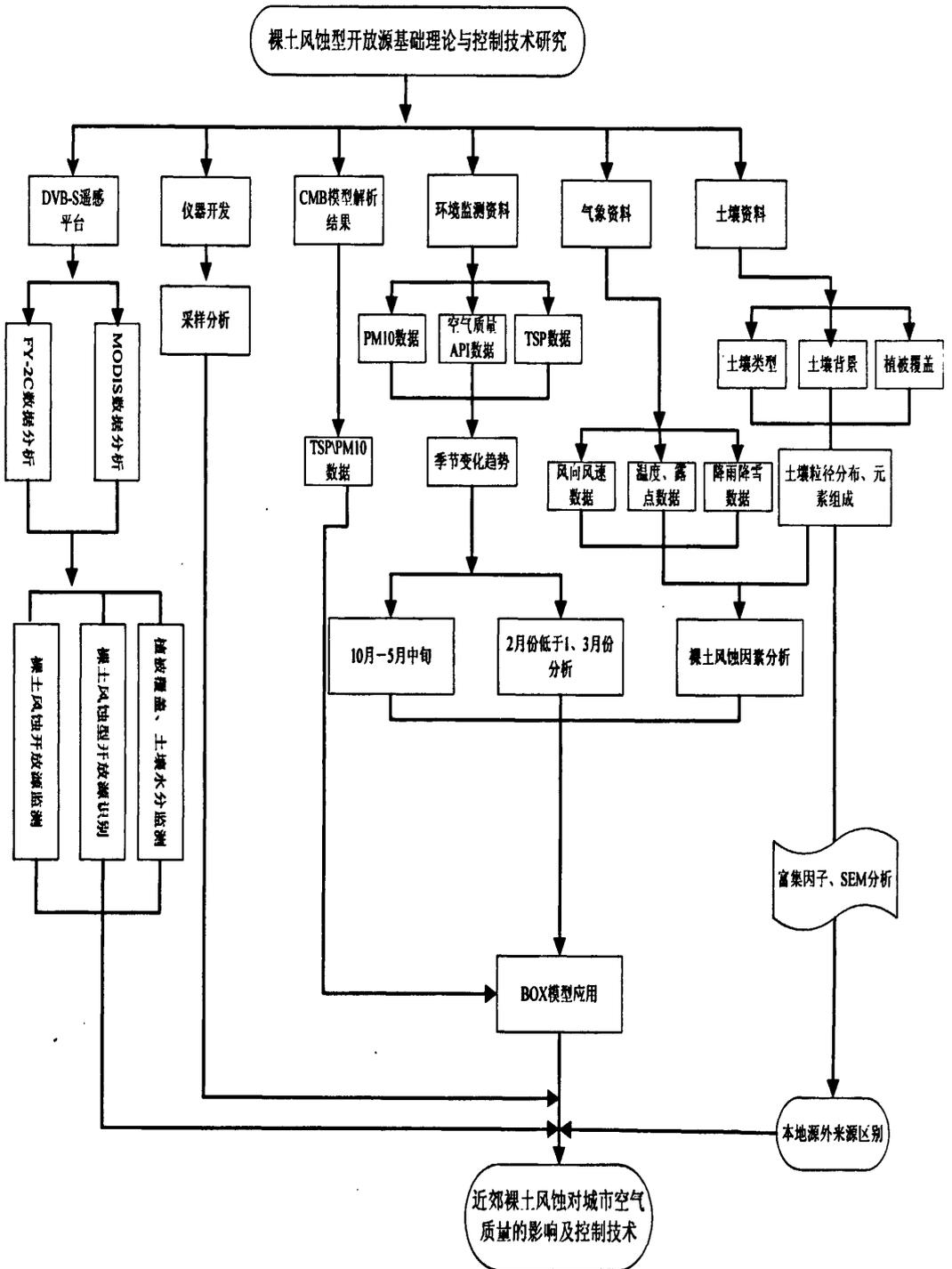


图 1.6 论文研究技术路线图

## 本章参考文献

- [1] 戴树柱, 朱坦, 白志鹏. 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展. 中国环境科学, 1995, 15(4): 252-357.
- [2] 高焕文. 机械化保护性耕作技术. 现代化农业, 2002, 4: 31~33.
- [3] 朱振达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理的对策. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 30~46.
- [4] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J], 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 422-424.
- [5] 朱广一. 大气可吸入颗粒物研究进展[J]. 环境保护科学, 2002, 28(113): 3-5.
- [6] WHO(2000). Environmental Health Criteria 210: Principles for the assessment of risks to human health from exposure to chemicals [M]. Geneva.
- [7] 国家环境保护局. 国家标准 GB309521996 环境空气质量标准, 1996212206.
- [8] 曹守仁. 煤烟污染与健康[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 33~91.
- [9] 金银龙, 何公理, 刘凡. 中国煤烟型大气污染对人群健康危害的定量研究[J]. 卫生研究, 2002, 31(5): 342~349.
- [10] 陈秉衡, 洪传洁, 阚海东. 大气污染健康危险度评价的方法研究[J]. 环境与健康杂志, 2001, 18(2): 67~69.
- [11] 李红, 曾凡刚, 邵龙义等. 可吸入颗粒物对人体健康危害的研究进展[J], 环境与健康杂志, 2002, 19(1): 85-87.
- [12] 方爱民, 郭青云, 梁保英. 火电厂灰场扬尘治理[J]. 电力环境保护, 1997, 13(2): 34-37.
- [13] Xu X, Gao J, Dockery D, et al. Air pollution and daily mortality in residential areas of Beijing, China[J]. Archives of Environmental Health, 1994, 49: 216-222.
- [14] 阚海东, 陈秉衡, 汪宏. 上海市城区大气颗粒物污染对居民健康危害的经济学评价[J], 中国卫生经济, 2004, 23(2): 8-11.
- [15] 黄世鸿, 李如祥, 沈恒华等. 常州市大气气溶胶颗粒来源解析[J], 气象科学, 1995, 15(2): 92-100.
- [16] Dockery D.W, Cunningham J, Damokosh AI, et al. Health effects of acid aerosols on north American children: Respirator symptoms[J]. Environmental Health Perspectives, 1996, 104: 500-505.
- [17] John MP, Edward A, William N, et al. A study of twelve southern California communities with differing levels and types of air pollution I. Prevalence of respiratory morbidity[J]. AMJ Respir Crit Care Med, 1999, 159: 760-767.
- [18] 胡伟, 魏复盛. 儿童呼吸健康与颗粒物中元素浓度的关联分析[J], 安全与环境学报, 2003, 3(1): 8-12.
- [19] 邹宝方, 何增耀. 钒的环境化学[J]. 环境污染与防治: 1993, 15(1): 26-31.
- [20] 胡伟, 魏复盛. 成人呼吸健康与空气颗粒物中元素浓度的关系[J], 环境与健康杂志, 2004, 21(4): 195-198.

- [21] 刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展[J], 气候与环境研究, 1999, 4(4): 406-414.
- [22] 张立盛, 石广玉. 全球人为硫酸盐和烟尘气溶胶资料及其光学厚度的分布特征[J], 气候与环境研究, 2000, 5(1): 67-74.
- [23] 董雪玲. 大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害[J], 资源. 产业, 2004, 6(5): 50-53.
- [24] 杨复沫, 马永亮, 贺克斌. 细微大气颗粒物  $PM_{2.5}$  及其研究概况[J]. 世界环境, 2000(4): 32-34.
- [25] 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析[J], 环境科学学报, 2004, 24(2): 185-189.
- [26] 宋宇, 唐孝炎, 方晨. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J], 环境科学学报, 2003, 23(4): 468-471.
- [27] 邵冬海. 大连城市空气特征污染物 TSP 源解析及污染控制系统研究, 大连理工大学硕士学位论文, 2004年6月: 4-7.
- [28] 杨东贞, 颜鹏, 徐祥德. 北京风沙天气的气溶胶特征, 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 185-194.
- [29] 张仁健. 北京春季大气颗粒物元素化学特征和来源解析. 第八届全国气溶胶会议暨第二届海峡两岸气溶胶科技研讨会文集, 2005, 166-171.
- [30] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究[J], 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 136-143.
- [31] Waggoner, AP, R. E. Weiss, et al. Optical characteristics of atmospheric aerosols. Atmospheric Environment[J], 1981, 15, 1891-1909.
- [32] Waldman, JMPJ. Liroy, et al. Wintertime measurements of aerosol acidity and trace elements in Wuhan, a city in central China, Atmospheric Environment[J], 1991, 25B, 113-120.
- [33] J. Sastre, M. Vidal, G. Rauret, T. Sauras, A soil sampling strategy for mapping trace element concentrations in a test area, The Science of the Total Environment 264(2001): 141-152.
- [34] 朱坦, 白志鹏, 陈威. 秦皇岛市大气颗粒物来源解析研究[J], 环境科学研究, 1995, 8(5): 49-55.
- [35] 黄世鸿, 李如祥, 沈恒华等. 常州市大气气溶胶颗粒来源解析[J], 气象科学, 1995, 15(2): 92-100.
- [36] 杨建军, 马亚萍, 武忠诚. 太原市大气总悬浮颗粒物来源的追踪研究[J], 海南医学院学报, 2003, 9(4): 193-197.
- [37] 陈明华. 上海市大气颗粒物高浓度区污染物的源解析[J], 上海环境科学, 1997, (10): 15-17.
- [38] 常锦会, 李茂静, 王军林. 唐山市大气颗粒物污染及防治对策[J], 能源环境保护, 2004, 18(1): 52-54.
- [39] 刘莉莉, 何宪铭, 李屏雄等. 昆明市大气总悬浮微粒污染来源识别研究[J], 云南环境

- 科学, 1994, 13(1): 21-24.
- [40] 朱建新, 周蓉. CMB 法应用及对乌鲁木齐市大气 TSP 来源解析, 新疆环境保护, 1996, 18(1): 29-35, 38.
- [41] 高春香, 宋进华, 梁秀婷. 呼市市区大气总悬浮物微粒来源解析, 内蒙古气象, 2001, (2): 46-48.
- [42] 单美, 王训, 丕华. 泰安市城区环境空气可吸入颗粒物源解析研究[J], 泰山学院学报, 2004, 26(6): 91-96.
- [43] 郭前进. 晋城市市区环境空气中 TSP 的源解析[J], 科技情报开发与经济, 2005, 15(3): 196-197.
- [44] 王伟. 西宁市市区环境空气中总悬浮颗粒物来源解析[J], 青海大学学报(自然科学版), 2004, 22(5): 65-68, 74.
- [45] 付培健, 陈长和, 侯喜福. 兰州市城关区大气颗粒物分析研究[J], 兰州大学学报(自然科学版), 1995, 31(4): 175-181.
- [46] Paul A. Baron. Klaus Willeke. Aerosol Measurement-Principles, Techniques and Applications[M], A John Wiley & Sons, inc., Publication, 2005, 845-856.
- [47] W. S. Chepil. Measurement of wind erosiveness of soils by dry sieving procedure[J], Sci Agr, 1942, 23: 154-160.
- [48] Anderson R S. A review of recent progress in our understanding of aeolian sediment transport [J]. ActaMechanica, 1991, 1: 1-19.
- [49] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.
- [50] W. S. Chepil, Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel[J]. Sci. Agr., 1939, 19: 249-257.
- [51] Woodruff N P, Siddoway F. H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1965, 29(5): 602-608.
- [52] UNEP. Managing fragile ecosystem: combating desertification and drought[J]. A genda 21, Chapter 12. Desertification Control Bulletin, 1993, 2: 122.
- [53] 陈渭南, 董光荣, 董治宝. 中国北方风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 6-11.
- [54] Frederick. R. Troeh, J. Arthur Hobbs and Roy. L. Donahue, Soil and Water Conservation: Productivity and Environmental Protection. 1999
- [55] Research Group of "Study on Combating Desertification and Degradation in China". Study on Combating Desertification and Degradation in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [56] Nordstrom K F, Hotta S. Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. Geoderma, 2004.
- [57] 董治宝, 李振山, 严平. 国外土壤风蚀的研究历史与特点[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 100-104.
- [58] Bagnold R. A. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1959. 28-52.
- [59] 李小雁. 土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1):

- 91-95.
- [60] Hagen I. J. A wind erosion prediction system to meet the users need[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(2): 107-111.
- [61] Foster G R. Advances in wind and water erosion prediction[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(2): 27-29.
- [62] Pasak V. Wind Erosion on Soil[J]. *VUM Zbraslav Scientific Monographs*, 1973, (3): 78-89.
- [63] Shao Y, Raupach M. R, Leys J. F. A model for predicting aeolian sand drift and dustent rainment on scales from paddock to region[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34: 309-342.
- [64] W. S. Chepil. Relation of wind erosion to waterstable and dry clod structure of soil[J]. *Soil Sci*, 1942, 55: 275-287.
- [65] W. S. Chepil. Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness[J]. *Soil Sci*, 1950, 69: 149-162.
- [66] W. S. Chepil. Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility[J]. *Soil Sci*, 1950, 69: 403-414.
- [67] W. S. Chepil. Properties of soil which influence wind erosion: III. The effect of apparent density and erodibility [J]. *Soil Sci*, 1951, 71: 141-153.
- [68] W. S. Chepil. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: I Soil structure[J]. *Soil Sci*, 1952, 75: 473-483.
- [69] W. S. Chepil. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: II. Waterstable structure[J]. *Soil Sci*, 1953, 76: 389-399.
- [70] W. S. Chepil. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: III. Calcium carbonate and decomposed organic material[J]. *Soil Sci*, 1954, 77: 473-480.
- [71] W. S. Chepil. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, silt and clay [J]. *Soil Sci*, 1955, 80: 155-162.
- [72] W. S. Chepil. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 1956, 20: 288-292.
- [73] 朱震达, 刘恕. 中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划[M]. 北京: 中国林业出版社, 1981. 1-83.
- [74] 朱震达, 刘恕, 邸醒民. 中国的沙漠化及其治理[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 于土壤风蚀风洞实验的某些结果[J]. *科学通报*, 1987, 32(4): 277-301.
- [75] 贺大良, 邹本功, 李长治等. 地表风蚀过程风洞实验的初步研究[J]. *中国沙漠*, 1986, 6(1): 25-31.
- [76] 史培军. 中国土壤风蚀研究的现状与展望[R]. 第十二届国际水土保持大会邀请学术报告, 2002. 1-15 马世威. 风沙流结构的研究[J]. *中国沙漠*, 1988, 8(2): 8-22.
- [77] 齐矗华, 甘枝茂. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究[M]. 西安: 陕西教育出版社, 1991. 12-89.
- [78] 陈广庭. 北京平原土壤机械组成和抗风蚀能力的分析[J]. *干旱区资源与环境*, 1991,

- 5(1): 103-113.
- [79] 邹学勇, 朱久江, 董光荣等. 风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数[J]. 科学通报, 1992, 37(23): 2175-2177.
- [80] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.
- [81] 董治宝, 陈渭南, 李振山等. 植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 1-8.
- [82] 董治宝, 陈渭南, 李振山等. 风沙土开垦中的风蚀研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 74-80.
- [83] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 1-12.
- [84] 刘连友. 风蚀地貌动力过程的实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 1999. 1-86.
- [85] 刘连友, 刘玉璋, 李小雁等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应[J]. 中国沙漠, 1999, 19(1): 60-63.
- [86] 严平.  $^{137}\text{Cs}$  法测定青藏高原土壤风蚀的初步研究[J]. 科学通报, 2000, 45(2): 199-204.

## 第二章 土壤背景化学组分的研究

土壤背景值的研究具有重要的理论和实践意义<sup>[1]</sup>，一直以来都是国内外关注的对象<sup>[1-5]</sup>，许多国家先后开展背景值的调查研究工作<sup>[2-6]</sup>。20世纪80年代，我国开始在全国范围内开展土壤重金属背景值研究<sup>[5,6]</sup>，并出版了《中国土壤元素背景值》专著<sup>[6]</sup>，为我国土壤背景值研究奠定了良好的工作基础。

本章阐述了土壤类型、剖面结构、影响土壤背景值因素，目的是根据研究区域的土壤元素的背景值，推导土壤尘的成分谱，为后面的本地裸土风蚀尘和外来尘来源分析用到的富集因子分析方法提供标准数据。

### 2.1 土壤类型概述

中国土壤分类采用六级分类制：即土纲、土类、亚类、土属、土种和变种。前三级为高级分类单元，以土类为主；后三级为基层分类单元，以土种为主。土类是指在一定的生物气候条件、水文条件或耕作制度下形成的土壤类型。将成土过程有共性的土壤类型归成的类称为土纲。全国40多个土类归纳为10个土纲，中国土壤分类见表2.1。

表 2.1 中国土壤分类表<sup>[8]</sup>

土 纲	土 类	亚 类
铁铝土	砖红壤	砖红壤、暗色砖红壤、黄色砖红壤
	赤红壤	赤红壤、暗色赤红壤、黄色赤红壤、赤红壤性土
	红壤	红壤、暗红壤、黄红壤、褐红壤、红壤性土
	黄壤	黄壤、表潜黄壤、灰化黄壤、黄壤性土
淋溶土	黄棕壤	黄棕壤、粘盘黄棕壤
	棕壤	棕壤、白浆化棕、潮棕壤、棕壤性土
	暗棕壤	暗棕壤、草甸暗棕壤、潜育暗棕壤、白浆化暗棕壤
	灰黑土	淡灰黑土、暗灰黑土
半淋溶土	漂灰土	漂灰土、腐殖质淀积漂灰土、棕色针叶林土、棕色暗针叶林土
	燥红土	
	褐土	褐土、淋溶褐土、石灰性褐土、潮褐土、褐土性土
	灰褐土	淋溶灰褐土、石灰性灰褐土

续上表

土纲	土类	亚类
钙层土	黑垆土	黑垆土、粘化黑垆土、轻质黑垆土、黑麻垆土
	黑钙土	黑钙土、淋溶黑钙土、草甸黑钙土、表灰性黑钙土
	栗钙土	栗钙土、暗栗钙土、淡栗钙土、草甸栗钙土
	棕钙土	棕钙土、淡棕钙土、草甸棕钙土、松沙质原始棕钙土
	灰钙土	灰钙土、草甸灰钙土、灌溉灰钙土
石膏盐层土	灰漠土	灰漠土、龟裂灰漠土、盐化灰漠土、碱化灰漠土
	灰棕漠土	灰棕漠土、石膏灰棕漠土、碱化灰棕漠土
半水成土	棕漠土	棕漠土、石膏棕漠土、石膏盐棕漠土、龟裂棕漠土
	黑土	黑土、草甸黑土、白浆化黑土、表潜黑土
	白浆土	白浆土、草甸白浆土、潜育白浆土
	潮土	黄潮土、盐化潮土、碱化潮土、褐土化潮土、湿潮土、灰潮土
	砂姜黑土	砂姜黑土、盐化砂姜黑土、碱化砂姜黑土
	灌淤土	
	绿洲土	绿洲灰土、绿洲白土、绿洲潮土
水成土	草甸土	草甸土、暗草甸土、灰草甸土、林灌草甸土、盐化草甸土、碱化草甸土
	沼泽土	草甸沼泽土、腐殖质沼泽土、泥炭腐殖质沼泽土、泥炭沼泽土、泥炭土
水成土	水稻土	淹育性(氧化型)水稻土、潜育性(氧化还原型)水稻土、潜育性(还原型)水稻土、漂洗型水稻土、沼泽型水稻土、盐渍型水稻土
盐碱土	盐土	草甸盐土、滨海盐土、沼泽盐土、洪积盐土、残积盐土、碱化盐土
	碱土	草甸碱土、草原碱土、龟裂碱土
岩成土	紫色土	
	石灰土	黑色石灰土、棕色石灰土、黄色石灰土、红色石灰土
高山土	磷质石灰土	磷质石灰土、硬盘磷质石灰土、潜育磷质石灰土、盐渍磷质石灰土
	山地草甸土	
	亚高山草甸土	亚高山草甸土、亚高山灌丛草甸土
	高山草甸土	
	亚高山草原土	亚高山草原土、亚高山草甸草原土
	高山草原土	高山草原土、高山草甸草原土
	亚高山漠土	
高山漠土		
高山寒冻土		

不同区域的土壤类型有所不同,中国土壤类型表现为自南向北随气温带而变化的规律,热带为砖红壤,南亚热带为赤红壤,中亚热带为红壤和黄壤,北亚热带为黄棕壤,暖温带为棕壤和褐土,温带为暗棕壤,寒温带为漂灰土,其分布与纬度变化基本一致。中国北部干旱、半干旱区域,自东而西干燥度逐渐增加,土壤依次为暗棕壤、黑土、灰色森林土(灰黑土)、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰漠土、灰棕漠土,其分布与经度变化基本一致,中国土壤类型分布见图 2.1<sup>[1,2]</sup>。

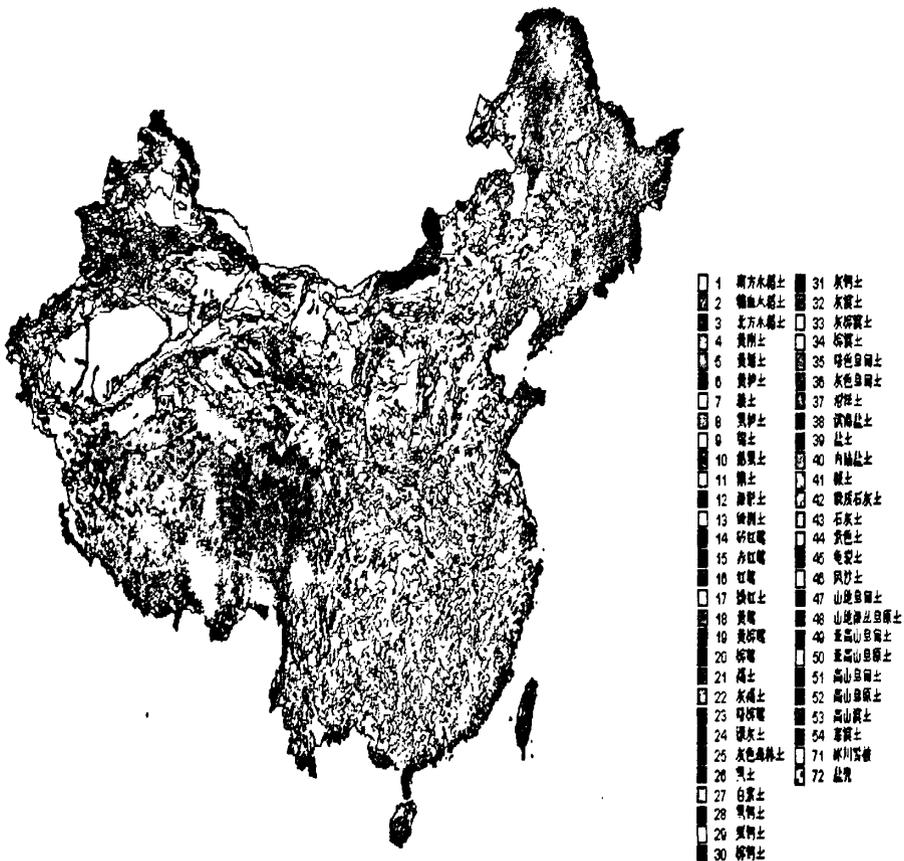


图 2.1 中国土壤类型分布图

母岩(质)是土壤形成的基础,母岩影响着土壤的性状和元素丰度<sup>[7]</sup>,同一时代,母岩不同其元素含量及其地球化学特征都有差异,而地层剖面恰好直接反映土壤母岩特性。因此,研究不同地层土壤的化学元素特征,对于土壤发生、分类和演变、土地利用、植被演替及生态环境的研究都十分重要。另外熟悉土

壤不同类型的剖面，可以在土壤风蚀开放源的治理和预防上有较大的帮助。典型土壤剖面的结构见图 2.2。

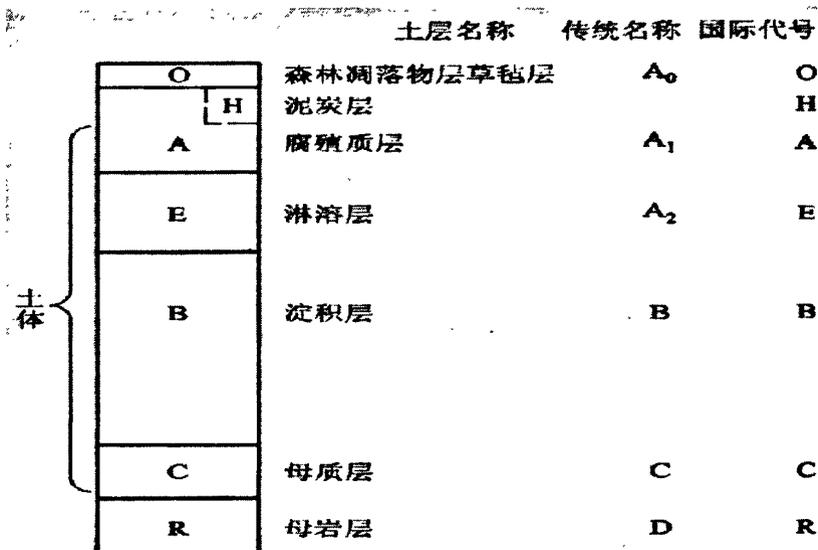


图 2.2 土壤剖面结构

红壤是我国分布面积最大的土壤，它分布在长江以南的广阔低山丘陵地区，包括江西，湖南的大部分地区，除此之外在云南、广西、广东、福建、台湾的北部以及浙江、四川、安徽、贵州的南部都有红壤的分布。红壤剖面特征是 O 层在森林植被下（当年凋落物），A 层暗棕红色，团粒结构，无人为破坏下可达 30cm 左右，土壤疏松；B 层棕红色、红色、核状或核块状结构，可达 0.5—1m，比较紧实、质地较粘，常有 Fe 结核存在；C 层母质层淋溶以溶液的形式从一处迁移到另一处的活动，土壤中有较多的游离态 Fe、Al。

砖红壤分布在热带海南岛、雷州半岛、云南和台湾南部，砖红壤的剖面深度一般都在 3 米以上，在自然植被下，O 层为当年半分解的凋落物，A 层为暗红色的富含腐殖质层次，一般厚 25 厘米左右，团粒结构或团块状结构，较疏松、多根；B 层为砖红色，紧实，核状结构或核块状结构，质地粘重，B 层下为深厚的网纹层；其下为风化的岩层或母质层，土体中有各种铁质新生体，土壤中有大量的游离态 Fe、Al，而 P 易被固定。

赤红壤分布亚热带即福建、台湾、广东、广西和云南的南部，是红壤和砖红壤的过渡地区。

黄壤分布在中亚热带山地，在南亚热带和热带的山地也有分布，主要以四川、贵州两省为主。黄壤其富铁铝化作用较红壤微弱，黄壤的剖面特征，O 层为

当年半分解的凋落物；A<sub>1</sub>层为暗黄灰色，腐殖质层厚 25—30 厘米左右，团粒结构或团块状结构，下部为络合淋溶层，淡黄灰色，核状结构或核块状结构；B 层为黄色或红黄色，紧实，核状结构或核块状结构，质地粘重，有时含有铁结核，B 层下土壤粘重，常具潜育化特征。

黄棕壤分布在北亚热带常绿阔叶林或落叶林下，主要分布在江苏、安徽、湖北北部、陕西南部。

棕壤分布在地处暖温带湿润地区，纵跨辽东半岛、山东半岛，也出现在半湿润、半干旱地区的山地中，在秦岭、燕山、伏牛山、吕梁山、太行山等一些山脉的垂直中有棕壤的分布。棕壤的剖面特征在森林植被下，O 层多由当年的凋落物组成，在阔叶林下仅见于雨季前存在；A<sub>1</sub>层为棕黑色腐殖质层，团粒结构或团块状结构，动物活动明显，腐殖质含量高；B 层呈棕色至鲜棕色，团块状结构，动物活动强烈；C 层为风化的母质层。

褐土分布在暖温带半湿润和半干旱的山地和丘陵，垂直分布于棕壤带之下。剖面特征 O 层很薄，凋落物分解块；A<sub>1</sub>层暗褐色，团粒结构或团块状结构，动物活动明显；B 层呈褐色，粘化作用明显，质地较粘，结构体面具胶膜，为粘粒淀积形成，核状结构，动物活动频繁；C 层为风化的母质层。

暗棕壤分布在温带湿润地区针阔混交林下发育的土壤。分布在大兴安岭东坡、小型安岭、长白山和完达山，其次分布在暖温带和亚热带的山地垂直带中，剖面特征在森林植被下，O 层较厚，由新鲜或半分解的凋落物组成，可见白色菌丝体；A<sub>1</sub>层为暗棕黑色，厚 10—20 厘米，腐殖质含量高，可达 20%，团粒结构或团块状结构，动物活动明显；B 层呈棕色，核状或核块状结构；C 层为风化的母质层。

棕色针叶林土分布在寒温带针叶林发育的土壤，主要分布在大兴安岭的西坡，剖面特征在森林植被下。O 层由新鲜或半分解的凋落物以及泥炭质残留物组成；A<sub>1</sub>层为棕黑色，团粒结构，疏松，动物活动明显；A<sub>2</sub>层呈灰白色，单粒结构，疏松；B 层呈棕色，紧实，富含铁或腐殖质；C 层为风化的岩石碎屑，剖面呈酸性反应，pH 在 5 左右，淀积层中的胶体物质主要是氢氧化铁、三水铝石或腐殖质，在 A<sub>2</sub>层中有大量二氧化硅。

潮土属非地带性土类，分布在我国的热带和暖温带地区的冲积平原、沟谷阶地上。黄淮海平原、长江中下游冲积平原分布面积最大，剖面形态一般分为耕作层、新土层和底土层。

## 2.2 研究区域土壤类型

天津市介于北纬  $38^{\circ} 34'$  至  $40^{\circ} 15'$ ，东经  $116^{\circ} 43'$  至  $118^{\circ} 04'$  之间，总面积  $11919.7\text{km}^2$ ，其中耕地面积  $4754.80\text{km}^2$ 。土壤母质多为河流沉积物，土壤共分 6 种类型；主要为潮土，占土地总面积的 81.35%，其余的为褐土占 7.63%、滨海盐土占 7.91%、湿土占 2.96%、棕壤占 0.078%、贝壳堤土占 0.076%。据天津市农业区划办公室土壤组 1981 年普查，北辰区土壤为潮土类，又分为普通潮土、盐化潮土和湿潮土 3 个亚类、14 个土属、52 个土种。依西高东低地形特点，普通潮土、盐化潮土、湿潮土由西向东呈现规律性分布。普通潮土亚类属近代河流冲积母质形成的潮土，主要包括沙质潮土、壤质潮土、粘质潮土、菜园潮土等土种。主要分布京山铁路以西双口、青光、上河头、双街、天穆、北仓及铁路以东高庄子、刘招庄西北、小孟庄、大张庄、小淀、宜兴埠等乡镇村，占耕地总面积的 59.3%。沙质潮土分布在双口、青光、岔房子、永青渠东侧一带地区，宜兴埠村东及朱唐庄也有分布。壤质潮土分布在北运河东侧，京山铁路两侧双街、北仓一带，宜兴埠西郊至京山铁路间及辛侯庄一带也有分布，占耕地总面积的 6.18%。粘质潮土分布在离河流稍远的浅平洼地，西部的丁庄洼、蒲口洼，东部的大张庄、小淀以东、南王平一带均有分布，占耕地总面积的 17.56%。盐化潮土多为氯化物硫酸盐盐化潮土，主要分布京山铁路以东至大张庄、北至刘招庄、南至刘安庄一带，集中在南麻疙瘩、北麻疙瘩、刘安庄北，其他地区零星分布，占耕地总面积的 14.5%。分脱水湿潮土、盐化湿潮土、菜园湿潮土 3 种。地势相对低洼，高程一般 2 至 3 米，地下水位 1 米左右，分布霍庄子、东堤头两镇大部分地区，小淀镇、南王平镇东部、北部也有分布，占耕地总面积的 26.2%。母质多为沼泽地遗留静水沉积物。天津土壤类型分布见图 2.3。

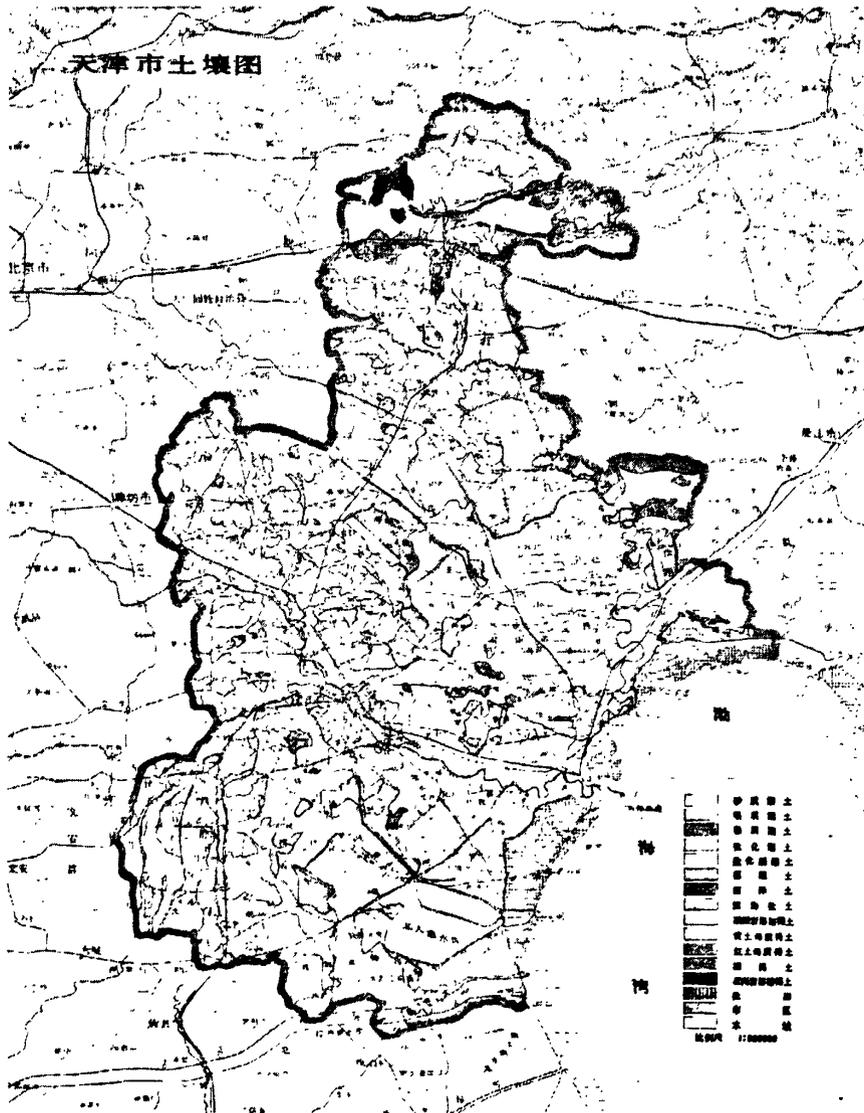


图 2.3 天津市土壤类型分布

### 2.3 不同土壤类型元素背景值

#### 2.3.1 我国土壤元素背景值研究概述

土壤环境背景值是指在不受或很少受人类活动影响的情况下，土壤的化学组成或元素含量水平。人类活动与现代工业发展的影响已遍布全球，现在很难找到绝对不受人类活动影响的土壤，严格意义上的土壤自然背景值已很难确定，

这是由于当今污染源普遍存在和影响所致,因而只能去寻找人类影响尽可能少的土壤来确定土壤环境背景值。土壤环境背景值与土壤自然背景值有所不同,它既包括自然背景部分,也可能包括微量外源污染物(如大气污染物输送沉降等);或者说它是土壤当前的环境背景值或本底值,是维持当前土壤环境质量的目标。对土壤背景值进行研究,对不同类型的土壤所含元素进行比较,确定所研究区域的土壤元素组成,为裸土风蚀尘来源解析提供理论依据<sup>[8]</sup>。

20世纪50年代中国科学院林土所对东北地区土壤中微量元素的含量状况进行了调查。我国从1973年开始了自然环境背景值研究。1978年农牧渔业部组织农业研究部门、中科院、环保部门、大专院校等34个单位对北京、天津、上海、黑龙江、吉林、山东、江苏、浙江、贵州、四川、陕西、新疆等13个省市自治区的主要农业土壤和粮食作物中的9种微量元素的含量进行了研究。1982年,国家又将土壤环境背景值的研究列入国家“六五”重点科技攻关项目,在松辽平原(24.58万平方公里)和湘江谷地(21万平方公里)进行土壤背景值广泛深入的研究,分别在934和430个采样点上采集土样,获得了Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、Hg、As八种元素的背景值。同时还选择了少部分样品,加测了20-30种元素,得到了这些项目的背景值。通过研究总结出土壤环境背景值调查研究的各种技术规定和方法。“七五”期间全国除了台湾之外的省市自治区全部做了土壤背景值调查,共完成了4095个剖面采样任务,测试了68个项目的基本统计量,包括:As、Cd、Co、Cr、Cu、F、Hg、Mn、Ni、Pb、Se、V、Zn、PH值、有机质、土壤粒级(M1/M2/M3)、Li、Na、K、Rb、Cs、Ag、Be、Mg、Ca、Sr、Ba、B、Al、Ga、In、Tl、Sc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Th、U、Ge、Sn、Ti、Zr、Hf、Sb、Bi、Ta、Te、Mo、W、Br、I、Fe、总稀土元素的基本统计量、钷组稀土和钆组稀土的统计量。获得了土壤环境信息和测试数据40万个,建立了中国土壤元素背景值数据库系统,并编辑了“中华人民共和国土壤环境背景值图集”<sup>[6-10]</sup>。

### 2.3.2 不同土壤类型土壤元素背景值分布概况

土壤类型对土壤背景值的有较大地影响,本文以土壤类型统计中国土壤元素背景值,以中国土壤元素背景值<sup>[6]</sup>一书的中数据为基础进行分析。本文主要研究As、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn、Na、K、Mg、Ca、Ba、Al、Br、Fe、Se等17个

元素背景值。对17个元素和pH值、有机质、粉砂、物理性粘粒、粘粒等共28个变量进行聚类分析,40个土类聚为8类,以姬亚芹<sup>[11]</sup>研究的分类方法命名分别为北方土类、漠土类、山地土壤、东北部土壤、风沙土、南方耕作土1、南方耕作土2、磷质石灰土。各种土壤类型所含元素情况见以下各图。

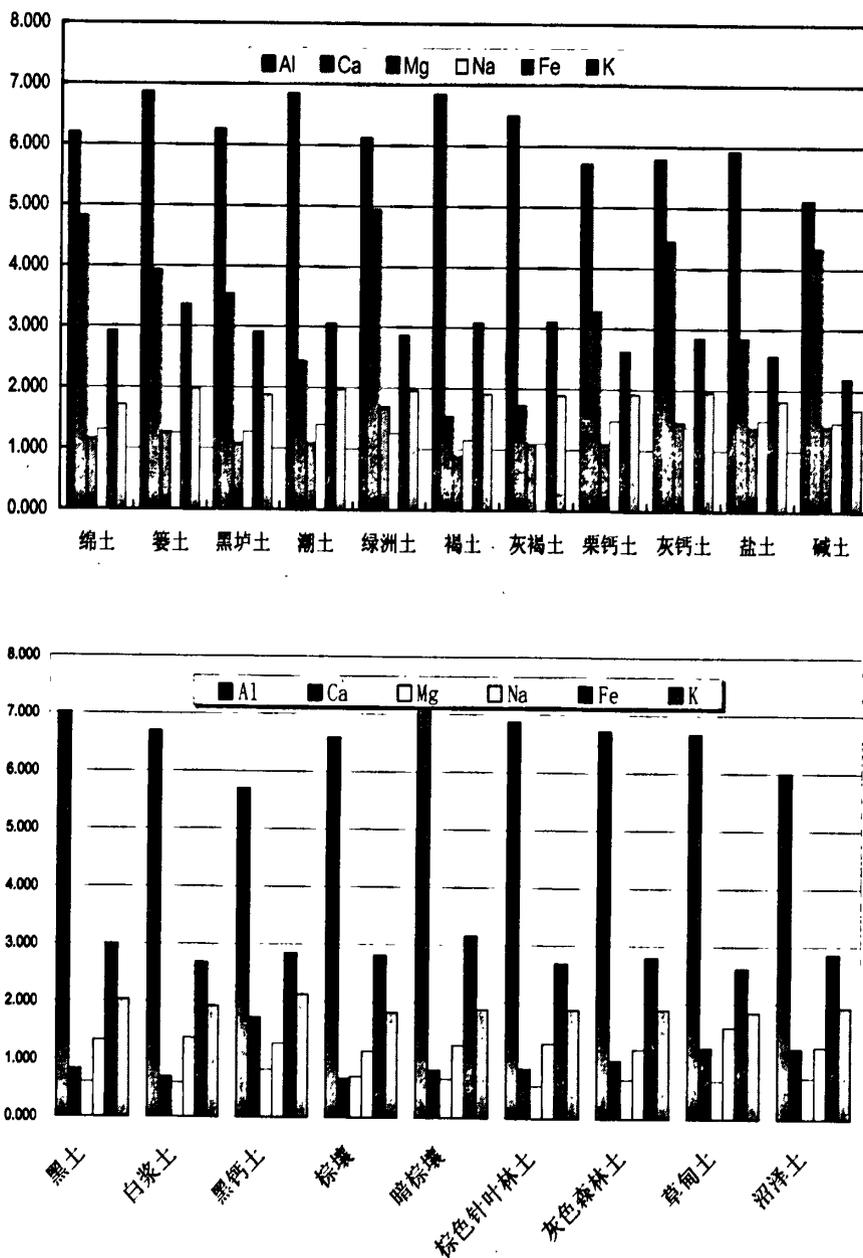


图2.4 东北部土壤主要元素Al, Ca, Mg, Na, Fe, K含量 (单位 %)

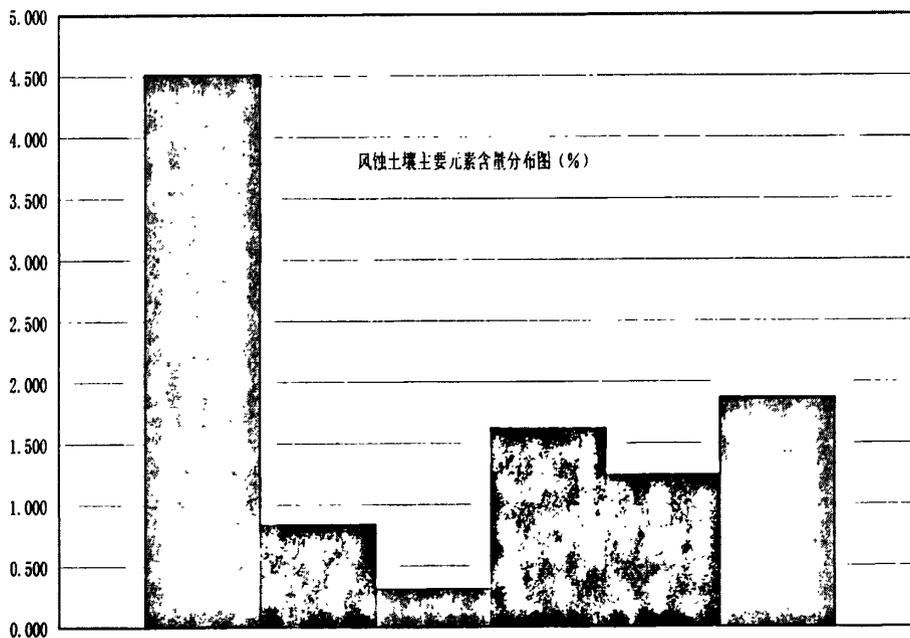
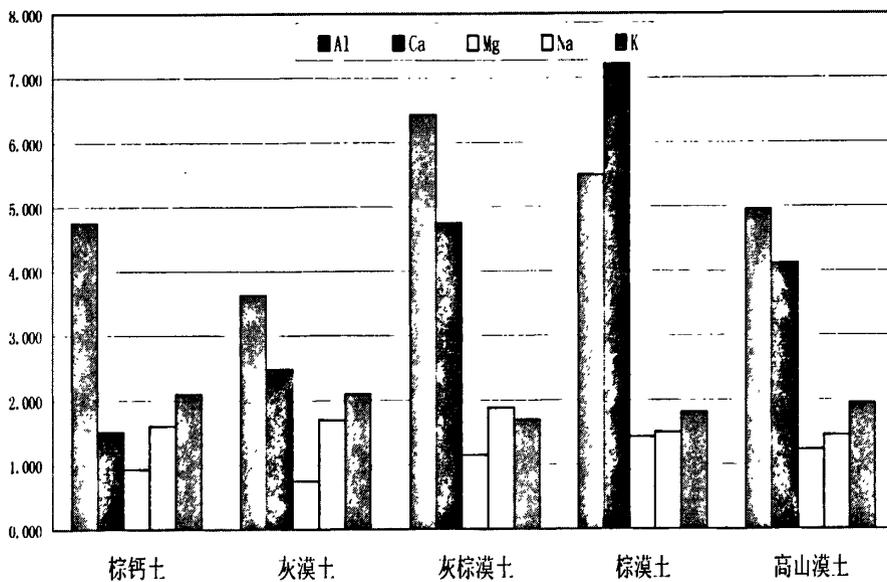


图2.5 漠土类和风蚀土壤土壤主要元素Al, Ca, Mg, Na, Fe, K含量 (单位 %)

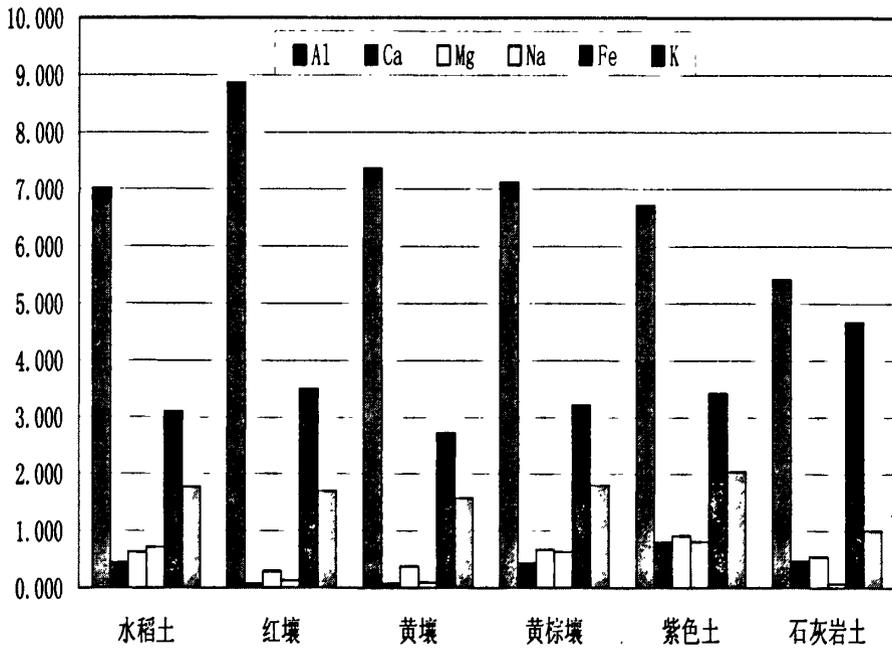


图2.6 南方耕作土1元素Al, Ca, Mg, Na, Fe, K含量 (单位 %)

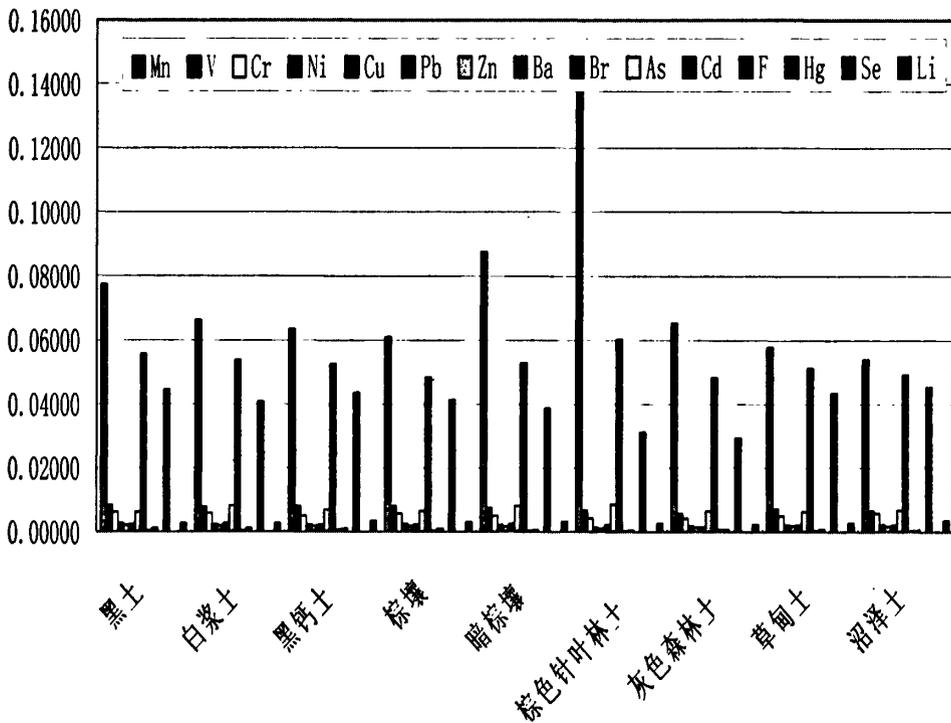


图2.7 北方土壤微量元素Mn, Cu, Pb, Zn, Ba等含量 (单位 %)

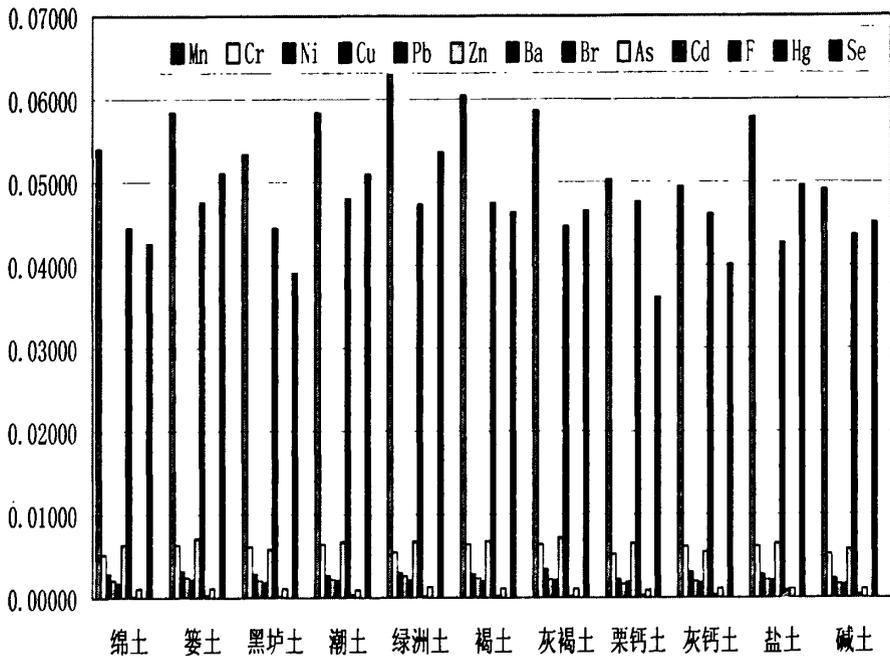


图2.8 东北部主要土壤元素Mn, Cu, Pb, Zn, Ba等含量 (单位 %)

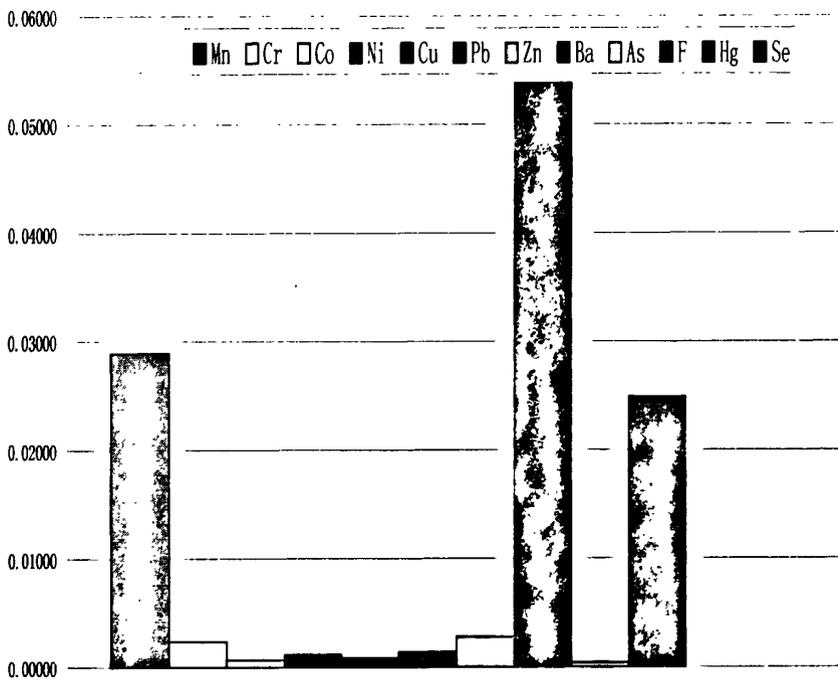


图2.9 风蚀土壤元素Mn, Cu, Pb, Zn, Ba等含量 (单位 %)

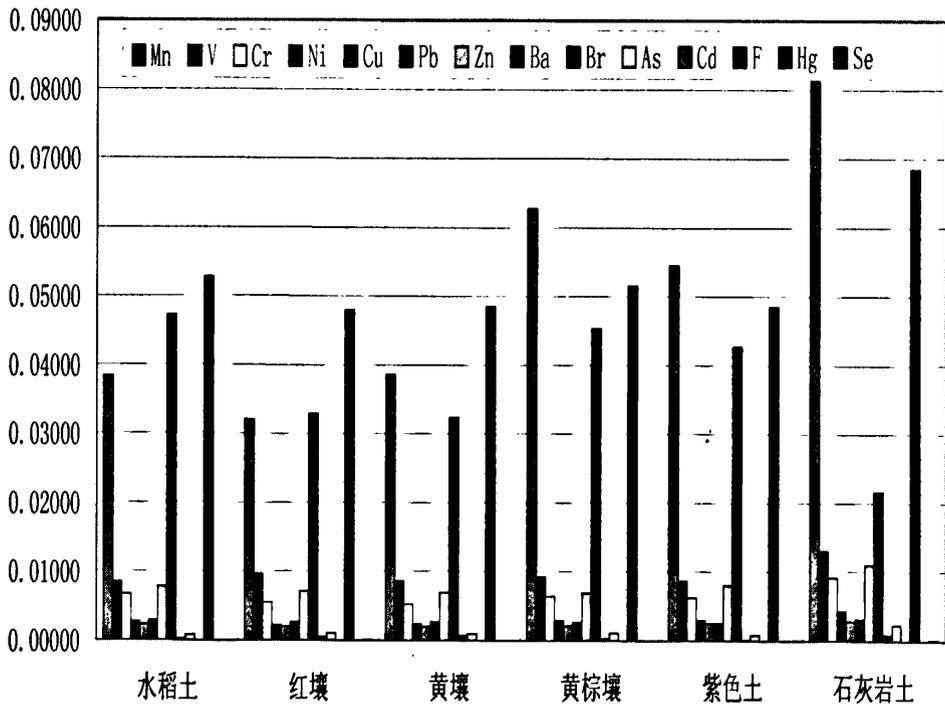


图2.10 南方耕作土<sub>1</sub>元素Mn, Cu, Pb, Zn, Ba, 等含量 (单位 %)

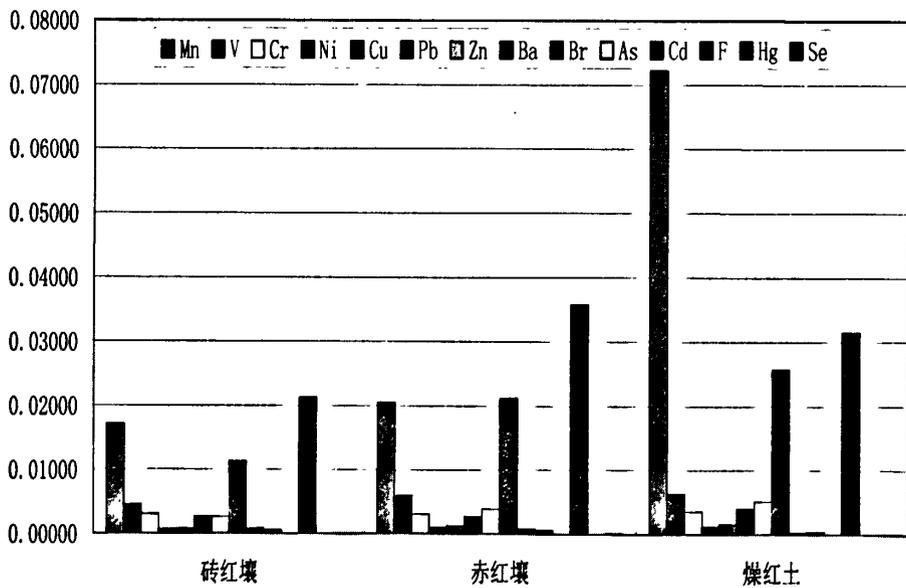


图2.11 南方耕作土<sub>2</sub>元素Mn, Cu, Pb, Zn, Ba, 等含量 (单位 %)

## 2.4 研究区域的土壤背景值化学元素组成

土壤机械组成是指各个粒级在土壤中所占的相对比例或重量百分数,土壤机械组成影响着土壤的通透性能,颗粒粗大的砂土通透性强,氧化作用占主导地位,保水能力差;颗粒小的粘土通透性差。土壤颗粒组成决定着土壤的物理、化学和生物特性。土壤机械组成不同,在矿物组成上有显著的差别,其化学成分和其它各种性质也均不相同。土壤机械组成影响土壤的形成过程,使土壤背景值产生分异。母质是与土壤有直接发生联系的母岩风化物,土壤可以从岩石原地风化或任何堆积物演变而成。在土壤形成过程中母质的某些性质被土壤继承下来。一方面母质的机械组成直接影响到土壤的机械组成,另一方面母岩的化学组成是成土物质的主要来源,母岩母质和土壤的化学组成存在发生上的联系<sup>[6]</sup>。中国东部不同区域洪积物土壤、花岗岩土壤和碳酸盐土壤中部分元素的含量变化,对自然环境最灵敏的是碱金属(主要是 Na)和碱土金属。北部地区具有较高的碱金属和中等碱土金属含量。中部地区半湿润半干旱的环境常以碳酸盐形式富集碱土金属,土壤呈碱性。华南地区 Na、Ca 显著贫化, K 变化不大,相对富集 Fe、Al,土壤呈酸性,并有富集 Hg、Se、As 等易挥发元素的趋势。由于区域地球化学的影响使确切地判断环境因素对微量元素分布的影响较困难。风化作用的程度能强烈地改变原母岩中微量元素的含量,如抗风化能力弱的碳酸盐类岩石。土壤形成过程中会有次生粘土矿物的形成,因此元素的性质导致土壤中元素的富集和分异。在土壤中贫化的元素有 Na、Mg、Ca、K、Sr、Ba、Cl、P、F,它们基本上都是在风化中易溶解的低价离子。Ca 虽属最易溶解的元素,因一部分形成  $\text{CaCO}_3$  沉淀仍在土壤中保留了一定的含量, K 较易被粘土和胶体吸附,白云母及钾长石较斜长石耐风化,使它们在土壤中含量明显高于 Na。大部分微量元素或水解成胶体或为稳定矿物而与粘土一起残留下来,或被胶体吸附而固定(如 Rb、Cs 等元素)。

土地利用方式对土壤中元素的平均含量的影响主要表现在以下两个方面,一方面不同的作物生长发育过程中要从土壤中吸收不同的元素,尤其是一些亲生物元素,另一方面人类要不断地向土壤中施加各种不同的肥料和农药。以天津市土壤背景值调查数据来说明土地利用方式对土壤背景值的影响(表 2.2)。表 2.2 表明不同土地利用方式下的土壤元素背景值差异不同,在表土元素中 Co, Ni, V, As, F 含量差异较小,其它元素差异显著,尤其是菜园土壤中元素的含

量, 显著高于其他土地利用方式的土壤元素背景值<sup>[12-14]</sup>。

表 2.2 天津市不同土地利用方式下土壤背景值的元素含量 mg/kg

元素	旱田	水田	菜园	林地	荒地
Cu	27.80	34.80	59.36	26.80	32.00
Pb	19.25	26.80	35.66	22.00	22.80
Zn	72.45	89.60	109.4	65.90	84.40
Cd	0.088	0.10	0.308	0.095	0.092
Ni	32.95	35.80	38.20	31.20	38.20
Cr	86.00	88.00	94.36	86.04	83.00
Hg	0.036	0.111	0.427	0.031	0.046
As	9.17	12.00	11.80	8.70	10.92
Se	0.149	0.175	0.457	0.166	0.17
Co	13.85	15.50	15.58	13.30	15.70
V	80.21	89.29	88.64	83.01	85.15
Mn	656.5	721.0	731.2	559.0	799.0
F	607.3	688.1	628.1	701.2	730.1

天津土壤中元素地域差异格局的重要原因是土壤中化学元素主要来自于成土母质, 天津平原分布着非地带性土壤潮土, 其母质来自于河流沉积物、海积物和湖积物。蓟县低山丘陵分布着地带性褐土, 成土母质为残坡积物和洪积物。由母岩发育的地带性土壤, 经过溶解、沉淀、氧化还原、淋溶、淀积、吸附、交换等一系列物理化学变化和生物作用, 土壤中元素的含量、形态、分布已发生了变化。而非地带性土壤的母岩来源复杂, 近代河流冲积物经过长距离搬运, 充分混合, 来自不同地区母质交互覆盖, 同时又不断受季节性地下水升降的影响, 使土壤元素间的比例、元素含量发生进一步变化。这种变化, 使母质间差异被削弱, 而粒度分选造成元素含量的差异, 逐渐上升为第一影响因素。就天津范围内土壤而言, 蓟县境内褐土中元素的变化和分布规律遵从母质分布规律, 而平原地区非地带性土壤, 在排除人类活动影响之后, 元素的地域差异的决定因素是土壤质地和地貌。当然, 城市活动的影响也是重要因素之一。

## 2.5 裸土风蚀尘化学元素组成

裸土风蚀尘元素分析数据采用 2002 年南开大学与天津市环境监测中心合作的采暖期、非采暖期和风沙季的 TSP 和 PM<sub>10</sub> 源解析结果。采样点位如下: 东丽

区李明庄田野、津南区双港田野、西青区侯台田野、北辰区董新房田野。分别选择一片裸露地面,按照梅花布点原则进行布点,在每个采样点上用笤帚扫0~20cm地表土于采样袋中,过尼龙筛。用3080E2型X射线荧光光谱分析仪分析Na、Mg、Al、Si、K、P、Ca、Fe、Mn、Ni、Cu、Ba等元素。分析结果见表2.3

表2.3 天津市裸土风蚀尘元素成份

w%

项目	Si	Al	Ca	Mg	Na	Fe	K	Mn	P	Ni	Cu	Ba
PM <sub>10</sub> 西青	12.11	9.99	7.55	2.44	1.31	2.78	2.8	0.04	0.1	0.02	0.05	0.13
PM <sub>10</sub> 津南	16.85	6.73	6.2	1.44	1.33	2.92	3.05	0.4	0.13	0.03	0.01	0.13
PM <sub>10</sub> 北辰	9.66	13.9	6.2	1.86	2.37	2.97	4.34	0.07	0.16	0.01	0.0006	0.17
PM <sub>10</sub> 东丽	11.76	9.79	14.2	2.48	2.39	3.18	4.53	0.08	0.05	0.01	0.0035	0.1
TSP 西青	17.0	5.06	4.47	1.34	1.28	1.73	1.49	0.03	0.06	0.01	0.02	0.08
TSP 津南	19.1	6.32	5.17	1.34	1.48	2.41	2.6	0.04	0.09	0.02	0	0.11
TSP 北辰	25.3	9.74	0.74	0.37	0.45	1.27	1.23	0.02	0.04	0.01	0.01	0.04
TSP 东丽	22.42	9.12	5.35	0.87	0.44	1.48	1.07	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02
土壤背景值*	28.03	7.25	1.97	1.27	1.49	3.41	2.16	0.37	0.074	0.003	0.0028	0.05

\*引自《天津市国土农业环境地球化学调查报告》

## 2.6 本章总结

(1) 本章从土壤类型、剖面结构探讨了土壤背景元素分布情况,不同的土壤类型、不同剖面元素背景值存在差异。母质和土地利用方式是影响元素背景值的根本因素。

(2) 把天津的土壤背景元素数据与全国土壤背景元素进行了对比。明确给出了研究区域天津市不同土地利用类型土壤背景值的元素含量和裸土风蚀尘的成份。

## 本章参考文献

- [1] 夏增禄, 李森照, 李廷芳等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 3.
- [2] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, et al. Arsenic background concentrations in Florida, USA, surface soils: determination and interpretation[J]. Environmental Forensics, 2001, 2: 117-126.
- [3] Ma L Q, Tan F, Harris W G. Concentration and distributions of eleven metals in Florida

- soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 769~775.
- [4] Holmgren G G S, Meyer M W, Chaney R L. Cadmium, Pb, Zn, Cu and Ni in agricultural soils of the United States of America[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22: 335-348.
- [5] Chen J S, Wei F S, Zheng C. Background concentrations of elements in soils of China[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 57/58: 699-712.
- [6] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-382.
- [7] 童潜明, 杨慧敏. 地质学对土壤学的影响[M]. 北京: 北京地质出版社, 1994. 264-270.
- [8] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 8-15.
- [9] 中国环境监测总站等, 中国土壤环境背景值研究(报告), 1990年9月, “七五”国家科技攻关环保项目, 项目编号: 75-60-01-01.
- [10] USEPA(United States Environmental Protection Agency). Soil Screening Guidance: User's Guide[Z]. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 1996.
- [11] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[J], 南开大学博士研究生学位论文, 2006: 23-24.
- [12] 杨学义. 南京地区土壤背景值与母质的关系, 环境中若干元素的自然背景值及其研究方法, 科学出版社, 1982年.
- [13] 王国庆, 骆永明, 宋静. 土壤环境质量指导值与标准研究: I. 国际动态及中国的修订考虑[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 666-673.
- [14] 田平. 从今春沙尘暴现象看西部生态建设, *衡阳师范学院学报*, 2000, 21(4): 33-36.

## 第三章 裸土风蚀开放源样品采集方法研究

实验分析测定过程中的随机和系统误差的估计在理论上已经比较成熟,然而对于采样过程中的误差估计还很不完善,因此采样过程的重要性越来越受到人们的重视。确定采样地点、采样时间、土壤样品前处理、元素分析和分析结果统计分析等过程对于背景值的测量结果是非常重要的。取样误差与实验室分析误差比较,一般来讲取样误差更大,因此应更加重视土壤取样方法及取样的代表性。一般而言样本容量愈大,抽样误差愈小,样本代表性就愈强,但样本容量过大,取样花费的成本越多。因此在制定取样计划,考虑精确度与成本之间的平衡是采样调查的主要问题,而采样时间和地点又直接影响样品的可靠性和真实性,因此,本章对于样品的采集等问题作详细的阐述。

### 3.1 采样方法

#### 3.1.1 土壤样品的采样方法

适合的取样方法有很多,如对每种土壤类型和土地利用方式下的土地进行取样、随机抽样取样等。但无论哪种方法都应该根据土壤中各组分的变异情况来确定。由于土壤的不均一性,使各个体都存在着一一定程度的变异。

风蚀土壤样品采样方法主要是随机抽取样本,即从一定区域(总体)中选择取样地块(取样单元)时,应该使区域(总体)内的每个地块(每个取样单元)均有同等机会被抽取。随机取样过程是一个非常客观的过程,而不是偶然选择,它保证了选择的无偏差。统计学家们认为这是最好的对总体的估计,因为它意味着估计值有着最小的取样方差<sup>[1,2]</sup>。

如果土壤组分在不同类型区间的标准差相差很大,则需分别估计其在各类型区所要求的取样数目而对于那些整个区域的土壤类型或作物管理方式差异较大而致使土壤性质变异较大的区域(被测组分在总体中的分布不是随机的),可采用分层取样方法,即把研究区域分成性质较为均匀的区层(类型区),层内物质相对均匀,而层间物质组成差异相对较大,分别独立地从每一类型区中随机

抽取 $n$ 个样本, 计算各类型区的有关统计量, 再根据各类型区的估计值采用加权法以估计整个区域的平均值和变异程度。分层取样的好处在于假如总体中的各个类型区之间存在明显差异, 而这一性质在调查前已经知道, 如土壤类型不同、土地利用方式不同等而造成土壤性质的较大差异。可以利用这种附加知识划分总体为几个较为均一的同质区层(如把旱坡地和沟谷稻田分为不同的类型区), 从而可以提高取样精确度, 降低取样误差。需要注意的是每个类型区内部必须采用随机抽样的方法。由于分层取样误差仅包含层内取样误差而不包含层间取样误差, 所以分层取样的精度优于纯随机取样<sup>[3-5]</sup>。

一般要求采集耕作层的平均混合土样, 最好的办法是使用混合样本的测定值来代表某一位置上真实的土壤属性状况。样本的混合过程可以理解为物理意义上的平均, 在样本中各元素不发生化学反应的前提下, 混合样本的元素含量应等于各采土点元素含量的平均值。必须取能够代表相同性质一定面积的混合土样。每一个样品要代表相同性质、一定面积的土壤情况, 采集时, 至少要在同一地形单元和同一土壤变种上选点。

首先确定取样方位, 把整个取样面积分成若干“同质”的单元, “同质”的界限是主观的。在广泛施肥、喷洒农药、灌溉的今天, 同质单元的划分要考虑土壤类型、土地利用类型、灌溉(尤其是污水灌溉)等。在野外采样田块确定上, 要根据点位图, 到点位所在的村庄, 首先向农民了解本村的农业生产情况, 蔬菜地的设施类型、棚龄或种菜的年限、主要的蔬菜种类, 确定具有代表性的田块, 依据田块的准确方位修正点位图上的点位位置, 并用 GPS 定位仪进行定位。

采样点确定后, 用干净的采样工具(木铲、竹铲、塑料铲、不锈钢土钻等)将田地表面的植物残体除去, 然后用采样工具垂直地将土壤切开, 在垂直面上取土。对于水田土样的采集, 则用有刻度的管形取土器。各采样点按层次分别取等量样品, 然后按层次分别充分混合均匀, 即为该田块的混合样品。各点取样量根据总的混合样品决定, 每个混合样品重量约 1kg。取样时, 若样品量较多时, 应混合弄碎在簸箕或塑料布上铺成 4 方形, 用 4 分法对角取 2 份再分, 一直分至所需数量。分取到的土壤样品放在洗净的干布袋或纸袋内(新布要先洗净去浆), 一袋土样填写两张标签, 内外各具, 标签主要内容见采样记录卡<sup>[6-7]</sup>。

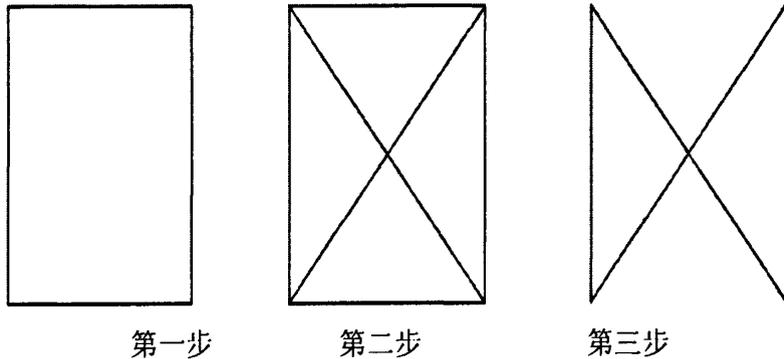


图 3.1 四分法取样步骤图

混合土样一般采集耕层土壤（0~15cm 或 0~20cm）；有时为了解各土种肥力差异和自然肥力变化趋势，可适当地采集底土（15~30cm 或 20~40cm）的混合样品。随机采样的样点分布不均匀，在有些区域，采样点可能较密，在另外一些区域，可能没有采样点。

一般确定采样点后可采表层样或土壤剖面，表层土采样深度 0~20cm，特殊要求的监测（土壤背景、环评、污染事故等）必要时选择部分采样点采集剖面样品。剖面的规格一般为长 1.5m，宽 0.8m，深 1.2m。挖掘土壤剖面要使观察面向阳，表土和底土分两侧放置。一般每个剖面采集 A、B、C 三层土样。地下水较高时，剖面挖至地下水出露时为止。地丘陵土层较薄时，剖面挖至风化层。对 B 层发育不完整（不发育）的山地土壤，只采 A、C 两层；干旱地区剖面发育不完善的土壤，在表层 5~20cm、心土层 50cm、底土层 100cm 左右采样。水稻土按照 A 耕作层、P 犁底层、C 母质层（或 G 潜育层、W 潜育层）分层采样（图 3.2），对 P 层太薄的剖面，只采 A、C 两层（或 A、G 层或 A、W 层）。

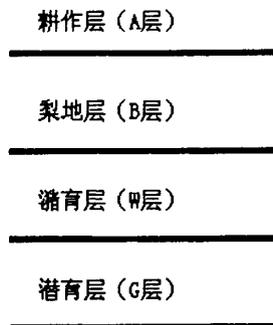


图 3.2 水稻土剖面示意

对 A 层特别深厚, 沉积层不甚发育, 一米内见不到母质的土类剖面, 按 A 层 5~20cm、A/B 层 60~90cm、B 层 100~200cm 采集土壤。草甸土和潮土一般在 A 层 5~20cm、C1 层或 B 层) 50cm、C2 层 100~120cm 处采样。采样次序自下而上, 先采剖面的底层样品, 再采中层样品, 最后采上层样品。测量重金属的样品尽量用竹片或竹刀去除与金属采样器接触的部分土壤, 再用其取样。剖面每层样品采集 1kg 左右, 装入样品袋, 样品袋一般由棉布缝制而成, 如潮湿样品可内衬塑料袋(供无机化合物测定)或将样品置于玻璃瓶内(供有机化合物测定)。采样的同时, 由专人填写样品标签、采样记录; 标签一式两份, 一份放入袋中, 一份系在袋口, 标签上标注采样时间、地点、样品编号、监测项目、采样深度和经纬度。采样结束, 需逐项检查采样记录、样袋标签和土壤样品, 如有缺项和错误, 及时补齐更正。将底土和表土按原层回填到采样坑中, 方可离开现场, 并在采样照片上标出采样地点, 避免下次在相同处采集剖面样。

一般农田土壤环境监测采集耕作层土样, 种植一般农作物采 0~20cm, 种植果林类农作物采 0~60cm。为了保证样品的代表性, 减低监测费用, 采取采集混合样的方案。每个土壤单元设 3~7 个采样区, 单个采样区可以是自然分割的一个田块, 也可以由多个田块所构成, 其范围以 200m×200m 左右为宜。每个采样区的样品为农田土壤混合样。混合样的采集主要有 4 种方法:

(1) 对角线法: 适用于污灌农田土壤, 对角线分 5 等份, 以等分点为采样分点;

(2) 梅花点法: 适用于面积较小, 地势平坦, 土壤组成和受污染程度相对比较均匀的地块, 设分点 5 个左右;

(3) 棋盘式法: 适宜中等面积、地势平坦、土壤不够均匀的地块, 设分点 10 个左右; 受污泥、垃圾等固体废物污染的土壤, 分点应在 20 个以上;

(4) 蛇形法(W 型法): 适宜于面积较大、土壤不够均匀且地势不平坦的地块, 设分点 15 个左右, 多用于农业污染型土壤。各分点混匀后用四分法取 1kg 土样装入样品袋, 多余部分弃去。

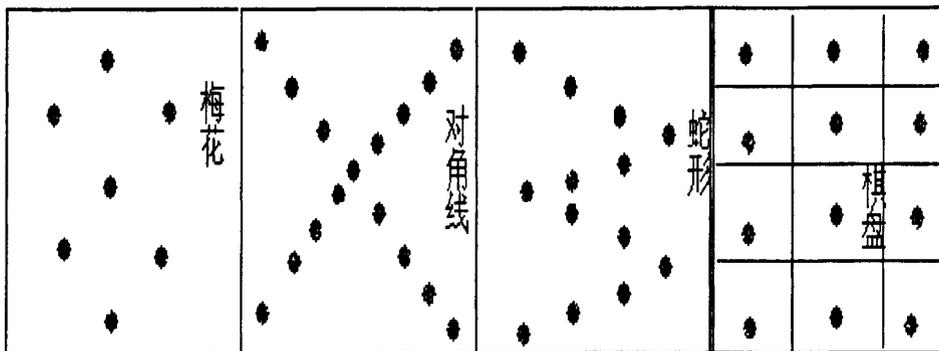


图 3.3 混合土壤采样点布设示意图

如果建设工程或生产没有翻动土层，表层土受污染的可能性最大，也不排除对中下层土壤的影响。生产或者将要生产导致的污染物，以工艺烟雾（尘）、污水、固体废物等形式污染周围土壤环境，采样点以污染源为中心放射状布设为主，在主导风向和地表水的径流方向适当增加采样点（离污染源的远于其它点）；以水污染型为主的土壤按水流方向带状布点，采样点自纳污口起由密渐疏；综合污染型土壤监测布点采用综合放射状、均匀、带状布点法。此类监测不采混合样，混合样虽然能降低监测费用，但损失了污染物空间分布的信息，不利于掌握工程及生产对土壤影响状况。表层土样采集深度 0~20cm；每个柱状样取样深度都为 100cm，分取三个土样：表层样（0~20cm），中层样（20~60cm），深层样（60~100cm）。

采样深度由下列公式计算：

$$\text{深度} = \text{剖面土壤总深} \times R_N$$

式中  $R_N = 0 \sim 1$  之间的随机数。 $R_N$  由随机数骰子法产生，GB10111 推荐的随机数骰子是由均匀材料制成的正 20 面体，在 20 个面上，0~9 各数字都出现两次，使用时根据需产生的随机数的位数选取相应的骰子数，并规定好每种颜色的骰子各代表的位数。对于本采样用一个骰子，其出现的数字除以 10 即为  $R_N$ ，当骰子出现的数为 0 时规定此时的  $R_N$  为 1。

分层随机深度采样时土壤纵向（深度）分成三层，每层采一样品，每层的采样深度由下列公式计算：

$$\text{深度} = \text{每层土壤深} \times R_N$$

式中  $R_N = 0 \sim 1$  之间的随机数。

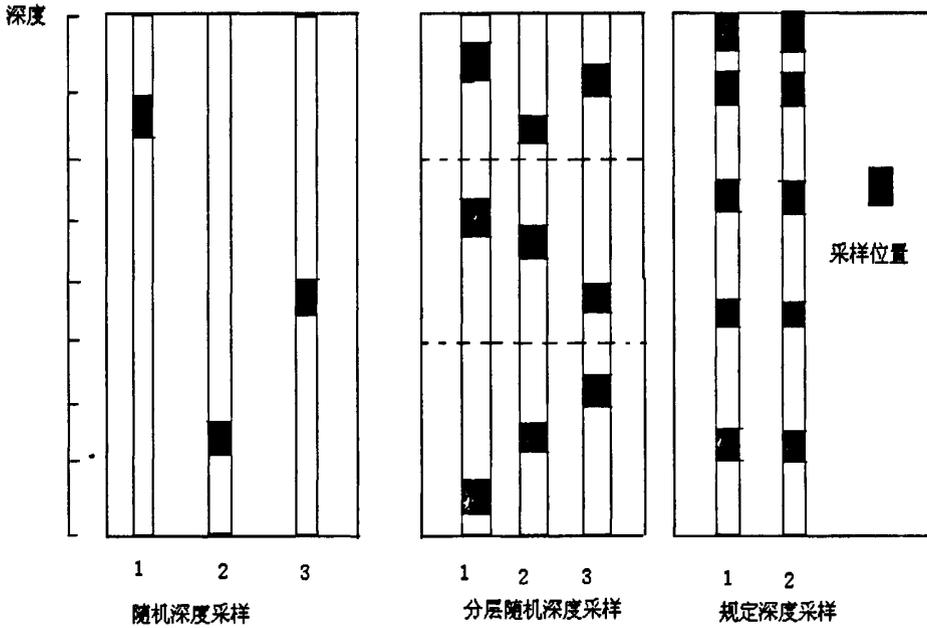


图 3.4 机械干扰土采样方式示意图

由于田间耕作深度一般为 15cm-20cm，因此，有关土壤理化性质分析的土样采集，一般要求按耕作深度来采样。J. Sastre 等对耕层 0-10 厘米和 0-20 厘米的取样分析结果表明：耕层 0-10 厘米和 0-20 厘米的取样分析结果没有显著差异，即耕作土壤取样深度（0-10、0-20）不是影响土壤组分含量的一个重要因素。J. Sastre 等对林地不同深度土壤取样结果表明不同微量元素的浓度随着深度会发生不同的变化，如 0-10 厘米深度的微量元素浓度高于（或低于）0-20 厘米相应元素的浓度，取样深度越深，微量元素会被稀释。在风沙尘采样实践中，通常要求采样深度一致，以便于比较研究。在林地、荒地等地块中采集的土样，可能会出现土壤组分分层现象，必须严格控制采样深度。

### 3.1.2 大气环境中裸土风蚀尘的采样方法

#### 3.1.2.1 大气环境中风蚀降尘的采样方法

大气环境中裸土风蚀尘的采样方法，一般用模拟自然地貌条件的容器接取大气中降落粉尘的监测做法，但容器规格和材质的选择差别很大。基本要求是取样器容积固定、内壁光滑。例如我国环境监测站采用玻璃或塑料材质、底部平整、内壁光滑的容器做集尘缸，规格一般为内径15cm，高30cm，见图3.5，放

置于距地面5-12m的建筑物，距取样平台1-1.5m。取样周期为30天，并保持集尘缸内有水。国外环保监测部门使用方法与我国类似，英国规定标准集尘器是具金属网盖的玻璃漏斗下直接连接集尘瓶<sup>[8,10]</sup>。Evyatar Erell<sup>[12]</sup>在研究以色列内盖夫沙漠北缘地区的降尘时，使用内径22cm的浅底圆碟型塑料容器搜集样品。Tomas Nihlen<sup>[13]</sup>在地中海克利特岛监测来自撒哈拉沙漠降尘，设计了专门的降尘取样器采集干、湿降尘。该采样器为一内径30cm的有网盖塑料漏斗，网盖孔密度为3×3mm，漏斗底部由1.8m的塑料管连接一20~50L的容器。取样器的围合形状可以捕获一定量的粉尘，但不能保证降尘不被再次吹扬，因此为了固定粉尘不被再次吹扬，可在取样器内添加能粘滞粉尘的介质。取样介质通常为水，也有使用丙三醇试剂<sup>[9]</sup>。我国环保部门皆采用水作为降尘取样介质。Evyatar Erell<sup>[12]</sup>在取样器底部铺放一至两层直径为12cm或16cm 的玻璃球帮助固定降尘。这种放置玻璃球的做法被认为简单、廉价而在国外较常用<sup>[13]</sup>。在我国北方干旱半干旱地区的风沙降尘研究中，因蒸发量大，多采用空容器直接收集法获得大气降尘量。师育新<sup>[14]</sup>等研究兰州尘暴降尘时直接在建筑物上搜集黄色粉砂进行分析。孙东怀<sup>[15]</sup>等研究黄土高原天然降尘使用深度为15cm的内空的塑料箱。



图3.5 风蚀尘样品采集起降尘罐

将采样罐放置于自己设计的收集罐自动升降全自动干湿沉降采样器，采集

样品分干沉降和湿沉降两种样品,采集样品的周期为30天。采集的样品除了用于测量降尘质量和元素分析之外,还可以用于降尘中 $^{137}\text{Cs}$ 比活度的测量。本文中使用的的方法不同于国内外目前现有的采样方法在于:本采样方法采集的样品是干沉降和湿沉降两个部分,而且这两个样品是连续的。国内外本文所提到的采样方法都是干沉降和湿沉降一起采集,不便于分析自然降尘(干沉降),和降雨时雨水冲刷下来的降尘(湿沉降)。

### 3.1.2.2 风蚀起尘颗粒物的采样方法

进入到大气环境中的风蚀颗粒物的采样方法,一般是采用浓度的测量,测定环境空气中颗粒物的浓度,也可以进行膜采样称重和分析。浓度的测量主要是根据颗粒物的物理性质(包括力学、电学、光学等)与颗粒物的数量或质量之间的关系,通过相应的仪器进行的。根据测量的具体操作,可将大气颗粒物的测试方法分为捕集测定法和浮游测定法。捕集测定法是指先用各种手段捕集空气中的微粒,再测定其浓度的方法;能保持空气中的悬浮游颗粒仍为悬浮状态而测定其浓度的方法为悬浮测定。根据大气颗粒物采样的经验和目前研究结果,裸土风蚀颗粒物的采样方法选取以下几种:

#### 1) 滤膜称重法

滤膜称重法是颗粒物质量浓度测定的基本方法,以规定的流量采样,将空气中的颗粒物捕集于高性能滤膜上,称量滤膜采样前后的质量,由其质量差求得捕集的粉尘质量,其与采样空气量之比即为粉尘的质量浓度。仪器主要由采样仪、分析天平等组成。根据所用的采样仪的流量大小不同,将采样仪分为大流量( $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上)、中流量( $100\text{L}/\text{min}$ 左右)和小流量( $10\sim 30\text{L}/\text{min}$ )三种,在选用采样仪时,应考虑他们之间的可比性,一般以大流量采样仪作比较。称重法单独或配合切割器可测量TSP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ ,称重法测定颗粒物质量浓度时需要的时间一般较长(3~24h)。滤膜称重法测定的是颗粒物的绝对质量浓度,其优点是原理简单,测定数据可靠,测量不受颗粒物形状、大小、颜色等的影响,但在测定过程中,存在操作烦琐、费时、采样仪笨重、噪声大等缺点,不能立即给出测试结果。颗粒物滤膜称重法一般需要较长的采样时间,很难适用于要求快速得到测量结果的场合,不能测定粒子的时空分布,测量结果是一段时间内的平均值,操作也较复杂。相比较而言,其他浓度测量方法虽然存在一定误差,但在颗粒物自动在线连续检测方面是滤膜称重法所无可比拟的,应根据不

同的测定目的来选择。在需要实时在线测定的场合要用到相对质量浓度测量方法,而在不需要在线连续测量或需要考虑可比性的情况下,要用滤膜称重法直接测量颗粒物的质量浓度,同时滤膜称重法采集的颗粒物样品可以用来进行其它分析,因此本法比较适合裸土风蚀尘样品的采集。

## 2) 光散射式测量仪

光散射式测量仪测量质量浓度的原理和光散射式粒子计数器的原理类似,是建立在微粒的米(Mie)散射理论基础上的。光通过颗粒物质时,对于数量级与使用光波长相等或较大的颗粒,光散射是光能衰减的主要形式。光散射数字测尘仪包括光源、集光镜、传感器、放大器、分析电路及显示器等,由光源发出的光线照射在颗粒物上产生散射,此散射光通过集光镜到达传感器上,传感器把感受到的信号转换成电信号,经过放大和分析电路,可以计测脉冲的发生量,即可得到以每分钟脉冲数(CPM)表示的相对浓度。光散射数字测尘仪的光源有可见光、激光及红外线等,配合切割器,可以用来测量 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 。光散射测尘仪属悬浮测定法,可以实时在线监测空气中颗粒物的浓度,可以现场直接显示质量浓度( $mg/m^3$ ),这种方法可直读测定结果,可以存储以及输出电信号实现自动控制,适于裸土风蚀起尘质量浓度的测量。

## 3) $\beta$ 射线吸收法

$\beta$ 射线在通过颗粒物时会被吸收,当能量恒定时, $\beta$ 射线的吸收量与颗粒物的质量成正比。测量时经过切割器将颗粒物捕集在滤膜上,通过测量 $\beta$ 射线的透过强度,即可计算出空气中颗粒物浓度。仪器可以间断测量,也可以进行自动连续测量,粉尘对 $\beta$ 线的吸收与气溶胶的种类、粒径、形状、颜色和化学组成等无关,只与粒子的质量有关。 $\beta$ 射线是由 $^{14}C$ 射线源产生的低能射线,安全耐用,其半衰期可达数千年,十分稳定,因此该法可以与影响风蚀因素的其它监测设备联合使用,测定裸土风蚀起尘的单位浓度与风速、湿度的关系等。

## 4) 微量振荡天平法

微量振荡天平法(TEOM法,英文名称 Tapered Element oscillating Microbalance),是近年发展起来的颗粒物浓度测量方法,测量原理是基于专利技术的锥形元件振荡微量天平原理,由美国 R&P 公司研制,符合美国 EPA 标准。此锥形元件于其自然频率下振荡,振荡频率由振荡器件的物理特性、参加振荡的滤膜质量和沉积在滤膜上的颗粒物质量决定。仪器通过采样泵和质量流量计,使环境空气以一恒定的流量通过采样滤膜,颗粒物则沉积在滤膜上。测量出一

定间隔时间前后的两个振荡频率,就能计算出在这一段时间里收集在滤膜上颗粒物的质量,再除以流过滤膜的空气的总体积,得到这段时间内空气中颗粒物的平均浓度。在大气自动监测系统中,美国 R&P 公司的 RP1400a 测尘仪用于实时连续监测空气中颗粒物的浓度,其测量精度和实时性是传统方法所无法比拟的。配以不同的切割器,RP1400a 可用于测量 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 TSP。仪器每 2 秒测量一次滤膜的振荡频率,同时仪器也可输出 0.5、1、8、24h 的平均浓度<sup>[21-28]</sup>。在风蚀机理研究中是良好的方法,特别适合于风洞实验。

### 3.2 采样季节与时间安排

裸土风蚀尘样品的采集区域为城市近郊,城市近郊由于距离中心市区比较近,土地利用类型多为耕地、果园、菜地等。这些农业用地由于受耕作、施肥、灌溉等的影响,其理化、生物性状还存在着时间上的变化。所以,对土壤的样品采集,既要考虑土壤空间上的不均一性,又要重视土壤动态变化的时间性。

由于土壤中有效养分含量随着季节而变化的,例如冬季土壤中有效磷、钾均增加。事实上,因采样时间不同,对分析结果造成的影响很大。例如土壤中有效养分的含量,随着季节的改变而有很大的变化。以速效磷、钾为例,最大差异可达 1~2 倍。因此在土壤样品采集中,采样时间是十分重要的。

土壤因化验目的不同,采样时间也不同。为制定施肥计划而进行土壤测定时,必须在收获或施基肥前采样;为弄清土壤养分和作物丰产的规律,则按作物生育期定时取样。为解决随时出现的问题而进行土壤测定时,应随时采样。若要了解施肥效果,需在作物生长期施肥的前后进行采样。分析土壤养分供应情况时,一般都在晚秋或早春采集土样<sup>[29]</sup>。对于土壤元素分析而言,加拿大阿尔伯特省农业部在《施肥指南》中规定“春播耕地在 10 月 1 日之后取样,秋播耕地在播前一个月取样”。Lowell 等<sup>[30]</sup>认为尽可能在农作物收获后采集土壤样品。辛刚等<sup>[31]</sup>认为取样时间要在 10 月 1 日以后至封冻之前。王玉丰等认为<sup>[32]</sup>大田土样一般在作物收获前取样。对于城市颗粒物源解析而言,土壤的起尘量会随着作物的生长、风速的大小、土壤和气候的干湿状况而呈现出季节性规律变化。秋季庄稼收割、其它一般作物也要凋落,地表覆盖状况发生显著改变,加上气候变化,土壤起尘量增加,此时风蚀尘对颗粒物的影响较大。裸土风蚀尘样品的取样时间从以下几方面确定,一是大气颗粒物污染比较严重季节,二

是干燥、风大的季节。分析天津市几年的  $PM_{10}$  的浓度变化，可以看出城市颗粒物污染较严重的季节为每年的 10 月中旬以后至第二年的 5 月末，见图 3.6。

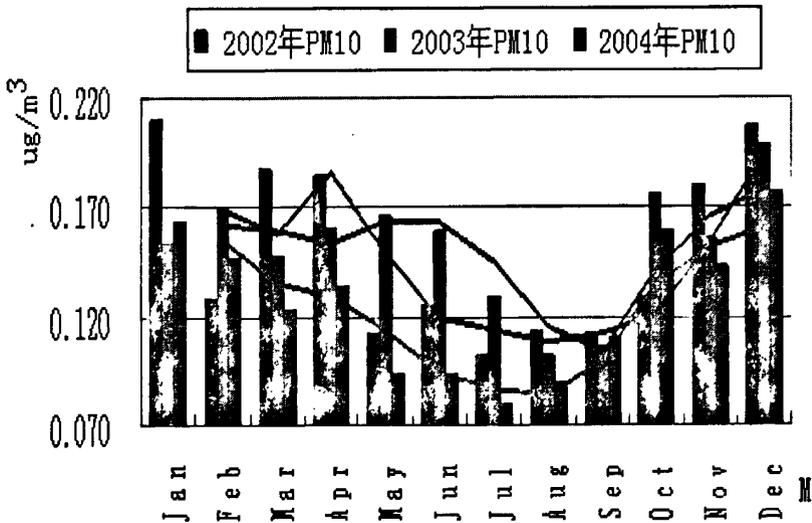


图 3.6 2002~2004 三年天津市区  $PM_{10}$  月变化曲线

对于天津市颗粒物来源解析的采样，根据上面的分析，采样的时间为每年的 10 月中旬以后至第二年的 5 月末，10 月中旬至第二年的 1 月这个期间的样品，主要研究以下两个方面，一是秋季的城市大气颗粒物污染情况，二是采暖期的颗粒物污染情况。每年的二月份单独取样，土壤样品这个期间的采样可以和气象部门的气象资料结合，每年这个期间的露点、土壤湿度、风速对于土壤风蚀影响较大。3 月末至 5 月末是研究裸土风蚀取样的重点阶段，这个期间容易发生风蚀，每年的沙尘暴多发在这个时期。

### 3.3 采样点

#### 3.3.1 用 DVB-S 遥感资料和风玫瑰图确定采样点

DVB-S 平台可以遥感监测裸土风蚀开放源的分布，在地面环境监测网配合下，辅以少量地面同步监测数据，可以定量分析裸土风蚀源的空间分布和时间变化。在正常的情况下，DVB-S 接收机每日可以收到白天两次的日常例行监测。空间分辨率为 250m~1000m，能够反映裸土开放源的变化情况。用接收到的遥感

资料(需要在无云或少云,无雾霾的天气下的资料)进行反演,可以直观的看到研究区域的植被和裸土覆盖情况,从而帮助确定裸土采样的地理位置和方向。城市近郊的裸土风蚀尘样品的采集点的确定,可以根据气象部门的气象资料,按照城市超标日主导风向来布采样点可能比较合适。天津市常年主导风向是西南风,夏季为东南风,冬季为西北风。

天津市 2007 年 2 月的裸土反演情况见图 3.7, 根据该图可以看到天津市近郊裸土风蚀采样的点应该是西青区、杨柳青区, 原因是这两个地方处于天津的上风向, 有着大片的裸露农田。风蚀起尘颗粒经过传输飘到城市, 影响城市空气质量。

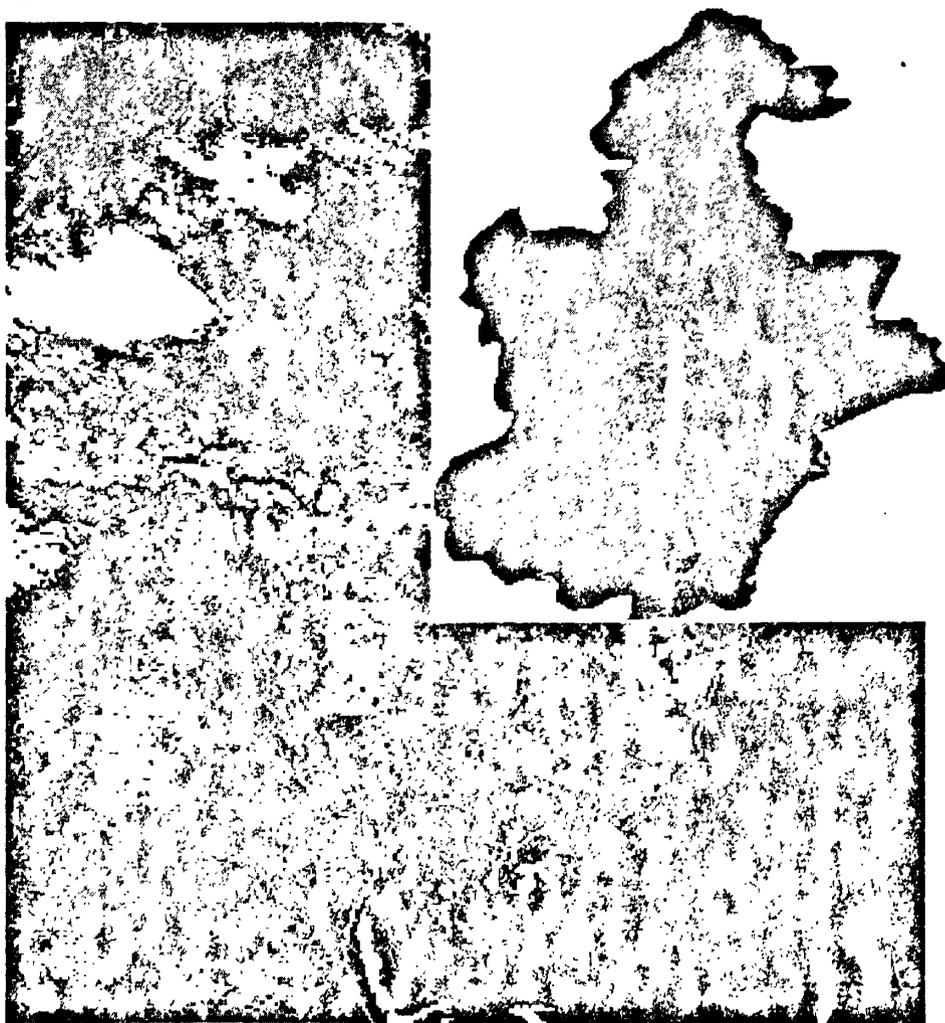


图3.7 2007年2月天津市及周边区域情况

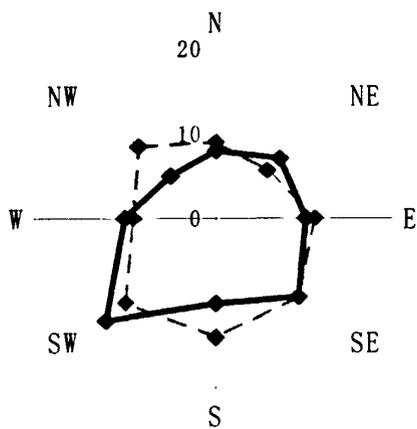


图 3.8 天津市年平均风向图

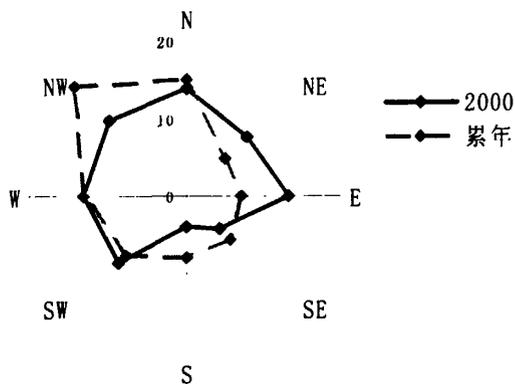


图 3.9 天津第一季度风向图

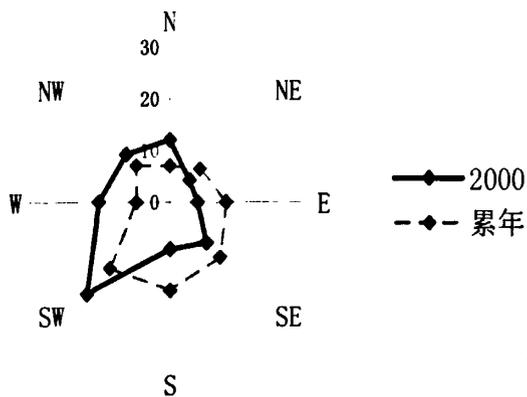


图 3.10 天津第二季度风向图

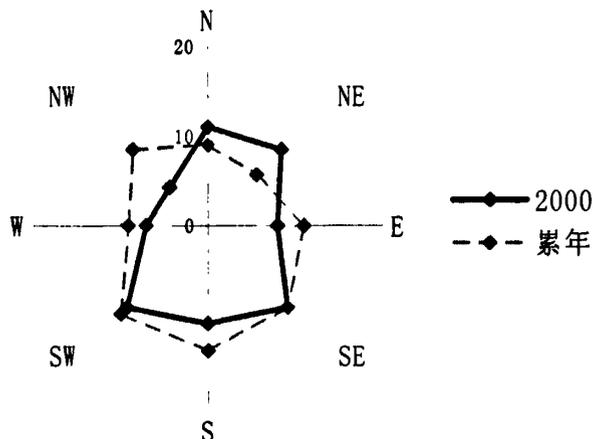


图 3.11 天津第三季度风向图

根据天津市 1、2、4 季度的风向图，在布点时多在西北，西南，东北等方向加密布点。在城市近郊的东、南、西、北、西各方向，分别选择一片裸露的地面，按照梅花布点原则进行布点，在每个采样点上首先用笞帚扫地表土于采样袋中，再用木铲取 20 厘米以下的土壤，每一样品 500 克以上，每块区域的样品按表层和 20cm 以下层分别等比例混合成一个样品采样点位和数量见表 3.1。

表 3.1 采样方位和名称

点位与市区方位	采样点位名称	采样点个数
东	东丽区李明庄农田长期裸露地	1
南	津南区双港农田长期裸露地	1
西	西青区侯台、杨柳青农田长期裸露地	1
北	武清区气象局附近农田、北辰区董新房农田长期裸露地	1

### 3.4 采样点数量

李世清<sup>[16]</sup>指出用有限的观测值去估计各参数的均值，并有足够的可靠性和精度，那么必须合理确定取样数或观测数目。采样点数量的确定经常用到的是 Cochran(1977)针对于区域纯随机取样而构造的最佳取样数量计算公式<sup>[17-22]</sup>：

$$n = t^2 \left( \frac{\sigma}{\Delta} \right)^2 = t^2 \left( \frac{\sigma}{ku} \right)^2 \quad (3.1)$$

式中： $n$ 为合理采样数；

$t$ 为与显著性水平 $\alpha$ 相对应的标准正态偏差，当置信度为95%时， $t=1.960$ ，当置信度为90%时， $t=1.645$ ；

$\sigma$ 为样本标准差；

$\Delta$ 为样本平均值\*相对误差（%）；

$k$ 为取样误差，当取样误差为10%时， $k=10\%$ ；

$u$ 为平均值。

Watson等<sup>[23]</sup>认为由于各种原因使得存在异常值，这就要求采集10个以上的样品并获得实验数据进而得到成分谱是非常重要的。作为科学研究的测定，通常要求有三次以上的测定数据。邓勃<sup>[24]</sup>认为用5-6个试验点建立标准曲线是合理的。采集布点要具有广泛的代表性、兼顾均匀性，同时具有很好的典型性。但是从目前各地的样品布点和采集上，具有很大的随意性，降低结果比较的可靠性。因此，采集样品必须按照一定采样路线和“随机”多点混合的原则。每个采样单元的样点数，一般常常是人为的决定5-10点或10-20点，视土壤差异和面积大小而定，根据国内外研究土壤风蚀尘研究中的土壤样品的采集数量至少5个样品。

### 3.5 采样记录卡

为了避免采样信息遗漏，采样的同时由专人填写样品标签、采样记录，应用全球定位系统(GPS)测定采样点的经纬度。标签一式两份，一份放入袋中，一份系在袋口，标签上标注采样时间、地点、样品编号、监测项目、采样深度和经纬度。采样结束，需逐项检查采样记录、样袋标签和土壤样品，如有缺项和错误，及时补齐更正。将底土和表土按原层回填到采样坑中，并在采样示意图上标出采样地点和拍摄照片。

样品记录卡涉及到的相关内容记录要求如下：

采样深度：以分米计，如果采样深度为10-20cm，则填为1020，其中10为样品起点深度，20为样品终止深度。如果在14cm--15cm深度的层位取样，则填为1415。

土壤颜色：黑色、灰色、褐色、灰黄色、红色、黄红色、灰绿色，根据实

际情况可增加颜色。土壤颜色可采用门塞尔比色卡比色，也可按土壤颜色三角表进行描述。颜色描述可采用双名法，主色在后，副色在前，如黄棕、灰棕等。颜色深浅还可以冠以暗、淡等形容词，如浅棕、暗灰等。

**土壤湿度：**土壤湿度的野外估测，一般可分为五级：干：土块放在手中，无潮润感觉；潮：土块放在手中，有潮润感觉；湿：手捏土块，在土团上塑有手印；重潮：手捏土块时，在手指上留有湿印；极潮：手捏土块时，有水流出。  
**污染程度：**无污染、可能污染轻、可能污染较重、明显污染严重。

**土壤类型：**中国土壤共分41个类，借助土壤分类学知识和郊区土壤类型图确定点位土壤类型。应该首先在室内确定，在野外校核调整。

**土壤质地：**即土壤机械组成，根据各个粒径在土壤中所占的百分数来划分。分为砂土、壤土和粘土。可参照参考中国土壤质地分类，土壤质地分为砂土、壤土（砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土）和粘土，野外估测方法为取小块土壤，加水潮润，然后揉搓，搓成细条并弯成直径为2.5~3cm的土环，据土环表现的性状确定质地。砂土：不能搓成条；砂壤土：只能搓成短条；轻壤土：能搓直径为3mm直径的条，但易断裂；中壤土：能搓成完整的细条，弯曲时容易断裂；重壤土：能搓成完整的细条，弯曲成圆圈时容易断裂；粘土：能搓成完整的细条，能弯曲成圆圈。标签和采样记录格式见表3.3、表3.4。

表 3.3 土壤样品标签样式

土壤样品类型		样品编号	
东 经		北 纬	
采样地点		采样日期	
示意图		照片编号	
采样层次		采样深度	
土壤特征描述			
采样人员			

表 3.4 土壤采样现场记录表

采样地点			经度		纬度	
样品编号			采样日期			
样品类别			采样人员			
采样层次			采样深度 (cm)			
样 品 描 述	土壤颜色		农作物类型			
	土壤质地		砂砾含量			
	土壤湿度		其它异物			
采样点照片			白下而上植被描述			

### 3.6 本章总结

(1) 本章阐述了样品采集方法, 裸土风蚀样品采集的数量为不少于5个样品。

(2) 农田土壤采集耕作层土样, 种植一般农作物采0~20cm, 种植果林类农作物采0~60cm。

(3) 确定了风蚀颗粒物的4种采集方法: 膜称重法、浓度测量、 $\beta$ 射线吸收法和微量振荡天平法, 其中 $\beta$ 射线吸收法和微量振荡天平法特别适合研究裸露农田风蚀起尘的在线观测和即时浓度的测量

(5) 确定了研究区域的采样时间, 每年的10月中旬以后至来年5月末以前, 2月份单独采样。

(6) 采样地点选取方法, 根据环境监测部门的资料和气象部门的资料按照城市超标日主导风向来布采样点, 可以根据卫星遥感资料进行反演, 按照反演的结果和确定的经纬度布点采样。

### 本章参考文献

- [1] 薛正平, 杨星卫, 段项锁. 土壤养分空间变异及合理取样数研究. 农业工程学报, 2002, 18 (4): 6-9.
- [2] 辛刚, 李海森, 张之一. 关于测土施肥中土壤取样问题的研究. 黑龙江八一农垦大学

- 学报, 2002, 14 (3): 12-15.
- [3] 宋清. 定量分析中的误差和数据评价. 人民教育出版社, 1983: 49-50, 91.
- [4] 杨俐苹. 评价区域性土壤肥力的取样技术的回顾与展望. 土壤肥料, 2000, (1): 3-8.
- [5] 高志, 何锡文, 李一峻. 分析化学取样理论研究进展. 分析化学, 2000, 28 (4): 497-506.
- [6] 钱华菊. 土壤养分分析的取样技术. 西昌农业科技, 2003, (3): 29-30.
- [7] 王玉丰, 董旭, 于立宏. 我省耕地地力调查布点及采样问题与建议. 土壤肥力与土壤生态: 453-457.
- [8] Lowell L. Ashbaugh, Omar F. Carvacho. Soil sample collection and analysis for the Fugitive Dust Characterization Study. Atmospheric Environment, 2003, 37: 1163-1173.
- [9] 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 127~132.
- [10] 吴鹏鸣. 环境空气监测质量保证手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 115~116.
- [11] Evyatar Erell, Haim T soar. Spatial variations in the Aeoli and eposition of dust the effect of a city: a case study in Be'er-Sheva, Isreal[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 4049~4055.
- [12] Tomas Nihlen, Jano. Mattsson, Anders Rapp, et al. Monito ring of Saharan dust fallout on Crete and its contribution to soil formation[J]. Tellus, 1995, 47B: 65~374.
- [13] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布极其对全球环境的影响[J]. 科学通报, 2001, Vol. 46 (3), 191-197.
- [14] 师育新, 戴雪荣, 李节通等. 兰州“930505”特大尘暴沉积物特征研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 76~824.
- [15] 孙东怀, 苏瑞霞, 陈发虎等. 黄土高原现代天然降尘的组成、通量和磁化率[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 171~180.
- [16] 李世清, 高亚军, 李生秀. 土壤养分的空间变异性及确定样本容量的研究. 土壤与环境, 2000, 9 (10): 56-59.
- [17] White, W. R, Macias, E. S, Nininger, R. C., et al. Size - resolved measurements of light scattering by ambientparticles in the Southwestern USA[J].Atmospheric Environment. 1994, 28(5): 909~921.
- [18] 付明鑫, 汤纯斌, 沈建萍. 新疆兵团农场农田土壤养分变异特征及合理取样数量. 新疆农业科学, 2004, 41(2): 79-82.
- [19] 何振江. 激光烟气粉尘排放量监测系统的浓度测量问题研究[J]. 华南师范大学学报. 2000(2)
- [20] Chang, C. T, Tsai, C. J, Lee, C. T, et al. Differences in PM<sub>10</sub> concentrations measured by  $\beta$ -gauge monitor andhi-vol sampler[J]. Atmospheric Environment 2001, 35(33): 5741~5748.
- [21] Chueinta, W.Hopke, P. K. Beta gauge for aerosol massmeasurement[J]. Aerosol Science and Technology 2001, 35(4): 840~843.
- [22] Shen. S, Jaques.P. A, Zhu.Y.F, et al. Evaluation of the SMPS&APS system as a continuous

- monitor for measuring  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and coarse( $PM_{2.5\sim 10}$ ) concentrations[J]. *Atmospheric Environment*. 2002(36): 3939~3950.
- [23] John G. Watson, Judith C. Chow, James E. Houck,  $PM_{2.5}$  chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995. *Chemosphere* 43(2001)1141-1151.
- [24] 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法, 北京: 清华大学出版社, 1995: 127-128.

## 第四章 裸土风蚀开放源风蚀机制研究

统计分析 2000-2005 年春季中国北方地区沙尘过程次数, 2005 年春季沙尘暴和强沙尘暴过程共有 5 次, 与 2004 年 (6 次) 接近, 但是远低于 2000 年 (9 次)、2001 年 (13 次)、2002 年 (11 次)。统计中国北方地区近 50 年的沙尘暴变化趋势看, 沙尘暴天气趋于减少趋势 (见图 4.1), 沙尘暴引发的颗粒物污染对于城市空气质量的影响天数有限。庄国顺对 2000 年北京沙尘天气期间大气悬浮颗粒物的化学成分进行了深入分析。结果表明在平常时期, 悬浮颗粒物中铜、锌、铅、镉金属元素的含量很高, 而在沙尘暴期间四种元素的含量却仅为平常的 1/5-1/3, 他认为这些元素主要来自北京市区及近郊地区。

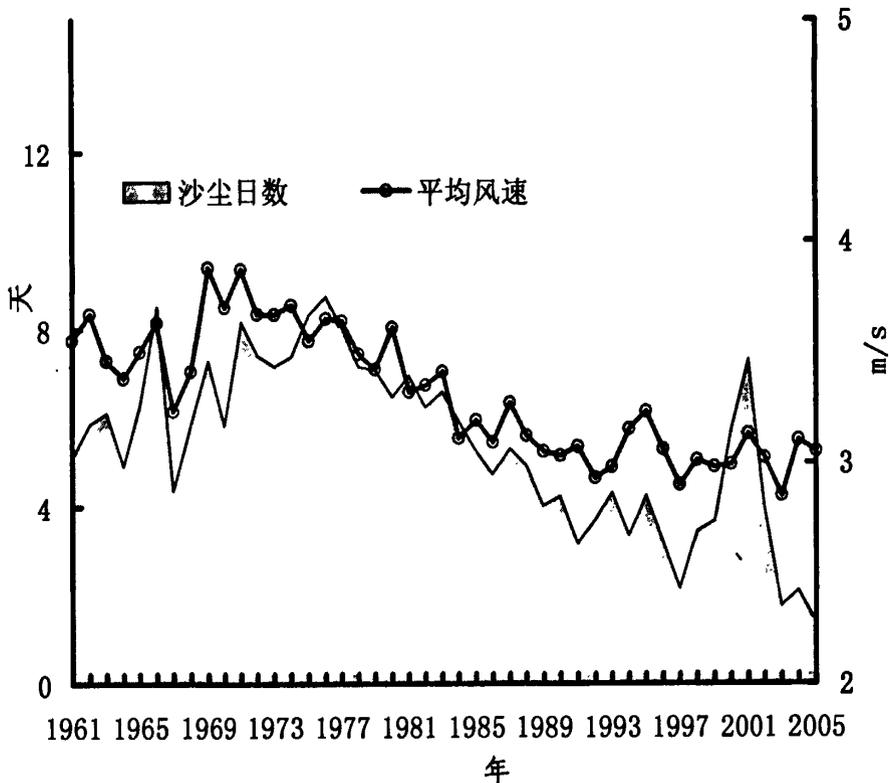


图 4.1 中国北方地区近 50 年的沙尘暴变化趋势

沙尘天气分为强沙尘暴、沙尘暴、扬沙、浮尘四个等级。强沙尘暴是指大风将地面尘沙吹起, 使空气非常混浊, 水平能见度小于 500 米的天气现象; 沙

尘暴是指强风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度小于 1km 的天气现象;扬沙是指大风将地面沙尘吹起,使空气混浊,水平能见度在 1.0~10.0km 以内的天气现象;浮尘是指尘土、细沙、均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10km 的天气现象。

沙尘暴形成的基本条件一是大风,二是地面上有裸露沙尘物质,三是不稳定的空气,三者同步出现时方能产生沙尘暴。三因素中强风是起沙尘的动力,丰富的沙尘源是形成沙尘暴的物质基础,而不稳定的空气乃是局地热力条件所致,使沙尘卷扬得更高。因此,可以说沙尘暴是特定气象和地理条件相结合的产物。在一定的风速(一般人为 $>3\text{m/s}$ )条件下,裸露的土壤颗粒随时可能发生滚动、跃迁、悬浮,发生风蚀。

## 4.1 裸土风蚀起尘粒径和起动风速相关性的研究

### 4.1.1 裸土风蚀起尘粒径的研究

根据颗粒直径的大小和相对起动风速的大小,裸土发生风蚀有滚动(Creep)、跃迁(Saltation)、悬浮(Suspension)三种形式。滚动是指大直径的粒子在地表运动或滑动的过程,粒径在 $500\mu\text{m}$ - $2.0\text{mm}$ 间的粒子较易出现滚动;跃迁是指直径在 $70\mu\text{m}$ - $500\mu\text{m}$ 间的粒子在气流的作用下或在其他粒子的碰撞下从地表跳起,从气流中不断取得能量而加速前进,并在重力作用下落回地面的过程;悬浮则是指直径小于 $70\mu\text{m}$ 的粒子飘浮在空中并随气流飘移的过程,悬浮状态的粒子其极限沉降速度必须小于气流的垂向脉动速度。风蚀过程洄游大量颗粒(粒径 $<10\mu\text{m}$ ),可以被大气搬运几千公里<sup>[1-7]</sup>。

吴正<sup>[3]</sup>野外观测表明,随着风速的增大,气流所运输的粒子量中跃迁的比例有所增加。滚动高度通常在近地表 3mm,跃迁高度因风力和地表状况而异,但 90%以上在近地表 20-30cm 高度范围,悬浮高度集中在 50cm 高度以上。当风速条件一定时,地表的起尘量大小主要取决于土壤表层中含有颗粒( $<0.063\text{mm}$ )物质量的多少。裸土风蚀三种形式与粒径关系见表 4.1,裸土颗粒风蚀过程见图 4.2。

表 4.1 裸土风蚀三种形式与粒径关系

风蚀形式	粒径	3
滚动	500 $\mu\text{m}$ -2.0mm	3mm
跃迁	70 $\mu\text{m}$ -500 $\mu\text{m}$	20-30cm
悬浮	<70 $\mu\text{m}$	>50cm

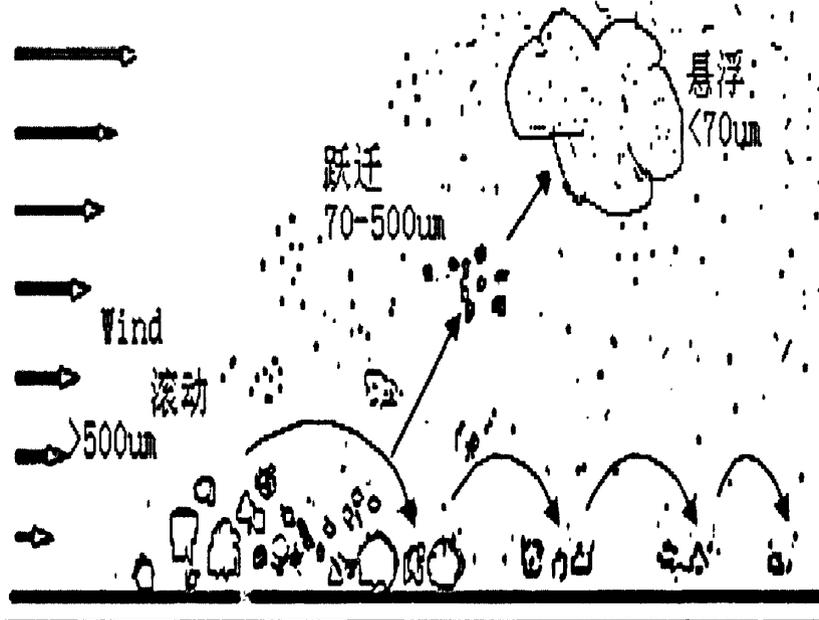


图 4.2 裸土风蚀颗粒起尘过程

风蚀中滚动、跃迁、悬浮这三种运动形式往往是同时发生的，而且其中的跃移是颗粒最主要的运动形式。以跃移方式运动的土壤颗粒最多，研究表明颗粒作跃迁运动的占(55-70)%，悬浮运动的占(3-38)%，而滚动形式的只有(7-26)%<sup>[8]</sup>，根据 Bagnold 的研究，呈悬浮状态运输的起尘量尚不足总起尘量的 5%。王元和董飞等人总结了很多研究表明：土壤表面被风吹走的颗粒的 90%是在离地面 30cm 的高度范围内运输的，而 0-5cm 高度内的气流层跃移占(60-80)%<sup>[9-13]</sup>。Butterfield 利用高分辨率光学传感器测试进一步发现在近地表 19mm 的高度范围内的起尘量占总起尘量的 80%左右<sup>[14,15]</sup>。

有资料认为 0.1mm 左右的颗粒最容易发生风蚀，起动风速也随 0.1mm 左右增大或减小<sup>[16-18]</sup>。W. s. Chepil 在研究美国西部大平原土壤风蚀问题时，经过大量观察和试验把  $\geq 0.84\text{mm}$  的颗粒称为不可蚀因子。中国科学院兰州沙漠研究所北京风沙课题组 1993 年提出，干燥土壤颗粒直径  $\geq 0.80\text{mm}$  为不可蚀因子<sup>[19]</sup>。一

旦发生风蚀, 0.1mm 直径及以下的颗粒保持悬浮状态, 吹扬到很远的地方并保持很长时间<sup>[20]</sup>, 而土壤中肥力要素主要集中在最细最轻的颗粒中<sup>[21]</sup>。

根据上面的研究成果, 采集裸土风蚀尘的土壤样品, 分析干燥土壤颗粒直径 < 0.80mm 的含量来考查裸土的风蚀程度。

#### 4.1.2 裸土风蚀起动风速研究

贺大良 (1989)、董治宝 (1995) 和杨宝 (1999) 等人对颗粒受风力作用的起动机制的有关学说进行了详细的分析和评价<sup>[13-16]</sup>。裸土风蚀颗粒物受外力作用升腾至空中而形成空气颗粒物需要一定的条件, 对某种颗粒物而言, 当风速达到或超过某一值时, 在风力作用下原来静止于表面的颗粒物才开始运动, 此风速称为该颗粒物的起动风速。起动风速与颗粒物的含水量、密度和粒径以及所在地区的空气密度有关, 起动风速反映了形成风蚀扬尘的等效动力状况。测算起动风速一般采用 Bagnold 起动风速预测公式<sup>[23-26]</sup>:

$$U^* = 0.1 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} g d_s} \quad (4.1)$$

式中:  $U^*$  相当于颗粒物凸起高度 (不超过 1.5mm) 层面上的剪切流速, 即起动风速 cm/s;

$\rho_s$  为裸土中颗粒物的密度, g/cm<sup>3</sup>;

$\rho$  为空气密度, g/cm<sup>3</sup>;

$g$  为重力加速度, cm/s<sup>2</sup>;

$d_s$  为颗粒物粒径 cm。

通常采用距地 10m 高处 ( $y=10m$ ) 的气象风速来描述风力对颗粒物的推动作用, 因此需要将  $U^*$  换算成气象风速, 换算公式如下。

$$u = \left| 5.75 \log \frac{y}{y_1} \right| U^* \quad (4.2)$$

$u$  为起动风速  $U^*$  换算成气象风速 ( $y=10$  米高处), cm/s;

$y$  为在静风条件下 ( $u=0$ ), 颗粒物能够升高的距离, mm;

$y_1$  为随颗粒物的粒径  $d_s$  的对数变化, 估算公式如下:

$$y_1 = 0.081 \log \frac{d_s}{0.18} \quad (4.3)$$

根据公式4.2、4.3计算裸土风蚀起动风速与颗粒直径关系见图4.3。

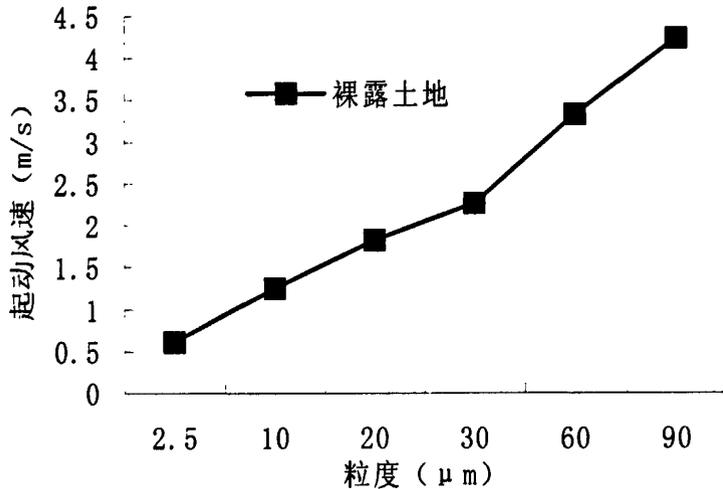


图4.3 裸土颗粒起动风速

实验测起动风速与粒径的关系服从分段函数，即在不同粒径范围内遵循不同规律，粒径为0.09mm时起动风速最小，以该点为界，将起动风速随粒径的变化曲线分为两段，当粒径<0.09mm时，起动风速随粒径的减小而增大；当粒径>0.09mm时，起动风速随粒径的增大而增大；粒径大于0.09mm，起动风速随粒径增大而增加的过程并非渐变，而是表现为陡变与缓变的交替；0.09—0.21mm，0.24—0.28mm，0.33—0.70mm为缓变区间，起动风速随粒径的增加过程比较缓慢；0.21—0.24mm，0.28—0.33mm为陡变区间，起动风速随粒径增大而增加的过程相对较快，尤以0.21—0.24mm之间最为突出。

W. S. Chepil (1953) 通过风洞实验研究将土壤粒度组成按其抗风蚀性的差异划分三部分。即小于0.42mm的高度可蚀因子；0.42—0.84mm为半可蚀因子，大于0.84mm为不可蚀因子。刘连友(1999)在沙漠所风沙物理与沙漠环境实验室的室内风洞中实验证明，不可蚀颗粒粒径是随土壤种类、结构和风力而改变的并研究了起动风速和颗粒直径的关系（见表4.2）<sup>[23-25]</sup>。

表 4.2 风洞实验<sup>[23-25]</sup>不同风速条件下测得土壤可蚀性颗粒分布 (%)

土壤类型	风速m/s	粒径mm						
		>2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	<0.05
沙质壤土	10	0.00	0.00	0.55	1.32	12.4	22.9	62.7
	12	0.00	0.22	0.91	1.85	17.8	24.5	54.7
	14	0.00	0.24	1.04	3.31	15.7	29.9	49.8
	16	0.29	0.31	1.32	3.52	18.0	31.2	45.3
	18	0.50	0.46	2.01	4.44	17.28	32.5	42.8
	20	0.81	0.81	3.40	6.09	19.0	29.9	39.9
	22	1.26	1.53	4.61	6.07	18.3	31.9	36.1
	24	2.66	4.13	5.96	6.53	18.4	30.8	31.4
	26	5.61	5.15	6.80	6.95	20.5	29.5	25.4
壤质沙土	10	0.00	0.00	0.00	6.54	32.4	26.2	34.9
	12	0.00	0.53	2.67	12.3	31.9	22.1	30.5
	14	0.00	0.73	3.47	12.8	32.4	25.4	25.3
	16	0.08	1.90	5.85	20.7	34.9	19.1	17.6
	18	0.13	1.90	6.52	18.9	35.9	20.2	16.4
	20	0.27	2.79	8.26	22.4	34.7	17.6	14.0
	22	2.06	4.30	13.2	29.0	26.3	14.9	9.9
	24	3.9	6.0	16.0	23.9	31.5	11.3	7.4
	26	6.4	7.06	20.1	25.7	25.5	9.79	5.01

## 4.2 裸土风蚀与土地利用方式相关性的研究

土地利用方式改变所造成的土壤风蚀性已成为全球性自然灾害<sup>[26]</sup>, 土壤风蚀是引起干旱半干旱地区土地退化的主要因素。土地利用、土地覆被是影响土壤风蚀的主要因素。

土壤潜在可蚀性的大小主要取决于土地利用方式, 不同土地利用方式决定不同土壤性质, 而这些性质又影响土壤可蚀性。草地受植物根系交织和枯枝落叶增加土壤表层有机质的影响, 而使土壤表层结构性能增强, 即使表层植被遭到破坏, 但良好的土壤结构受草本植物根系的作用的也不会大幅增加可蚀量, 故其潜在可蚀量最小。

从表4.3表层土壤的机械组成可以看出颗粒粒径的分布, 荒地成分最粗, 农田、林地次之, 草地土壤成分最细, 其中冬季翻耕地又比留茬地成分略粗。由

于土壤风蚀过程中细粒成分首先被风力带走, 导致地表粗化, 因此表层土壤的粒度变化直观反映了土壤抗风蚀能力的大小, 即荒地抗风蚀能力最差, 农田次之, 而草地土壤抗风蚀能力最强。林地虽然作为防风蚀的主要生物措施, 但如果缺乏贴地层灌草植被覆盖, 防风蚀效果不及覆盖良好的草地植被。就农田而言, 留茬地比冬季翻耕地明显提高了抗风蚀能力。

表4.3 不同土地利用方式下的土壤颗粒含量<sup>[27-29]</sup> (单位: %)

高度 cm	> 0.1mm				< 0.1mm			
	传统耕作	保护性耕作	草地	沙地	传统耕作	保护性耕作	草地	沙地
10	21.71	3.9	8.21	74.28	35.74	17.37	25.32	71.59
25	12.47	1.26	3.64	22.42	32.57	18.1	21.18	40.9
60	4.6	0.49	1.99	6.79	21.57	15.98	15.38	22.03
100	2.76	0.35	0.96	2.5	18.85	14.99	13.08	14.93
150	1.8	0.21	0.58	0.25	17.69	10.85	11.59	10.24

#### 4.2.1 不同土地利用方式下对颗粒物起动风速的影响

一般来说, 起动风速是确定风蚀运动发生与否的重要依据, 不同利用类型下垫面对应的起沙风速显著不同。对于不同的土地利用方式研究发现起尘风速大小顺序为: 荒草地>耕地>稀疏荒草地>流动沙地, 不同土地利用方式下的土壤风蚀起动风速见表 4.4。

表 4.4 不同土地利用方式下的土壤风蚀起动风速<sup>[28]</sup>

土地类型	平均起动风速 (m/s)	颗粒粒径mm
流动沙地	4.49	0.10-0.25
稀疏荒草地	4.91	0.10-0.25
耕地	5.10	0.10-0.25
荒草地	6.73	0.10-0.25

#### 4.2.3 不同植被与风蚀颗粒的关系

植被的茎、叶、主干对提高地表粗糙度、降低地表风速有重要作用<sup>[28]</sup>。同时植物原地的残余物、植物的根及土壤有机体含量对土壤可蚀性的影响也非常大, 尽管目前对植被防风蚀效应已有较多的研究<sup>[30]</sup>, 但对其作用形式仍缺乏定量的认识。前人的研究表明<sup>[31]</sup>, 植被通常通过三种方式阻止地表风蚀或风沙活动: 覆盖地表, 使被覆盖部分免受风的直接吹蚀; 分散地面之上一定高度内的

风速，从而减少了气流与地面物质之间的动量传递，减弱到达地表的风速；阻止被蚀物质的运动，促其沉积。上述三种形式的作用都是通过下垫面与近地表气流场的相互作用来实现的。从风蚀动力学的角度来看，植被是通过改变气流对地表物质的作用效果来影响风蚀的。不同的植被覆盖（草地、菜地、茬地）同耕地相比，相同高度处以草地的地表风速为最小，可见植被对土壤风蚀的影响。地表植被主要以影响近地表风速为主。耕地内风速较其他类型地表高，主要是由于地表裸露所致。

### 4.3 风蚀与土壤湿度相关性的研究

贺大良<sup>[32]</sup>等在土壤属性方面研究了降雨与起动风速之间的关系，发现降水使土壤湿度增加，其结果可减弱直至抑制风蚀过程；W. S. Chepil<sup>[33]</sup>利用风洞研究了土壤含水量与风蚀之间的关系，认为土壤含水量是抑制风蚀的主要因素之一；孙建中等对河北坝上地区脆弱生态环境特征进行探讨，发现风蚀与土壤水分为负相关<sup>[34]</sup>。用耕地土壤含水量的变化与风蚀量建立对应关系，可充分说明土壤含水量对风蚀的影响，也能更准确地说明土壤含水量与风蚀量之间的关系。从图 4.4<sup>[17]</sup>可以看出：用 0.5cm 或 10cm 厚度的土壤平均含水量与风蚀量建立关系，这一现象所反映出的土壤含水量与风蚀量大小之间的关系是随着含水量的增加风蚀量减少，受土壤毛管对水分传输的影响，土壤表层 10cm 之内水分的变化对风蚀的影响是一致的。即当土壤表层 10cm 含水量增加时，土壤的风蚀量明显减少，土壤含水量与风蚀量之间存在着较好的反比关系。

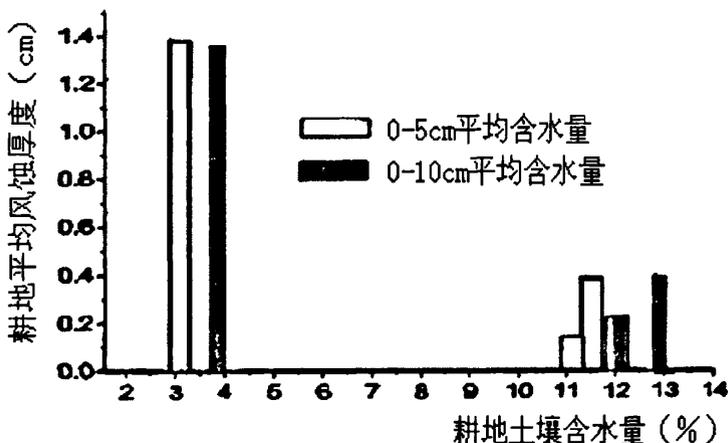


图 4.4 土壤含水量与风蚀的关系

孙建中<sup>[32,34]</sup>等研究土壤湿度与风蚀关系发现,当土壤湿度从0到10%变化时,用6、7、8和9m/s的风速各吹1min,土壤湿度与风蚀量的关系见表4.5。根据实验,当土壤水分含量接近10%时风蚀量变化已经很小,将含水量10%确定为实验土壤湿度的上限。风蚀量随着湿度的增加而急剧减少,土壤湿度与风蚀量呈负相关见图4.5。

表 4.5 土壤湿度与风蚀量的关系

风蚀量 (t/km <sup>2</sup> a)	土壤湿度(含水量%)					
	0	2	4	6	8	10
试验1	22.0	18.3	3.0	1.1	0.8	0.6
试验2	21.3	18.1	6.0	1.9	0.9	0.5
试验3	20.9	18.0	4.8	2.1	0.8	0.5
平均	21.4	18.13	4.6	1.7	0.83	0.53

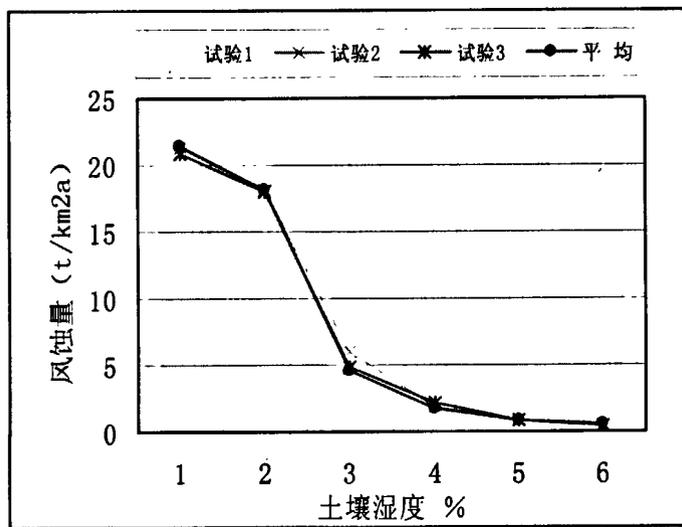


图 4.5 土壤湿度与风蚀量呈负相关

裸土风蚀程度随着干早期到来而增加,随湿润的增加而减少。土壤中的水分可以把土壤颗粒粘结在一起,而且随着土壤含水量的增加,土壤粘聚力也增大,强度必然相应增大,从而提高了土壤的抗蚀性,增大了临界起动风速,从而减少了土壤风蚀的发生。夏季雨水充沛,地表土壤湿润,不易发生风蚀;而冬春季节地表干燥,为风蚀多发季节。

当裸土的湿度增大时环境空气也相应增大,本文统计了天津市2002-2004年RH湿度和PM<sub>10</sub>变化趋势可以明显看出,RH湿度与PM<sub>10</sub>负相关,从图4.6可以

看出当湿度增大, 裸露土壤风蚀不易起尘,  $PM_{10}$  浓度也降低, 在 3 月—4 月份, 降雨少, 此时地表温度升高, 土壤水分蒸发快, 土壤干燥, 加上春季风速相对较大, 容易发生风蚀, 风蚀起尘贡献大大气中的颗粒物增加, 可以 3、4 月的  $PM_{10}$  浓度也增高。变化比较明显的月份是 1、3、4、11、12 月份, 这些月份也是风蚀易发季节见图见图 4.6。

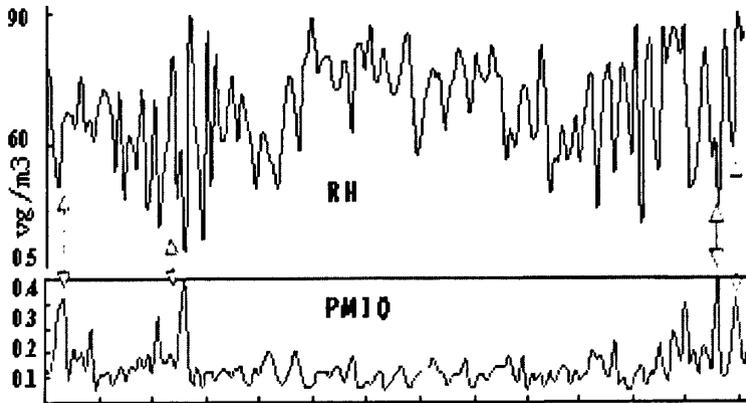


图 4.6 风蚀起尘  $PM_{10}$  浓度与湿度变化趋势

研究已表明沙尘天气的发生与土壤风蚀密切相关, 比较 1724-1904 年华北地区沙尘天气和降水序列见图 4.7, 可以看出沙尘天气和降水呈负相关, 这与土壤湿度与风蚀负相关, 湿度 RH 与  $PM_{10}$  浓度负相关一致。

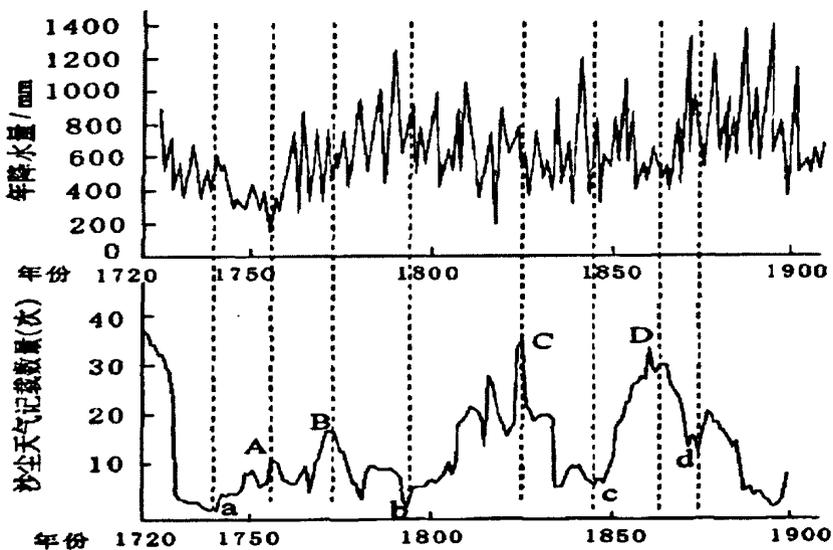


图 4.7 1724-1904 年华北地区沙尘天气序列与降水序列比较

#### 4.4 本章总结

(1) 本章主要阐述了风蚀与颗粒直径、起动风速, 以及起动风速与地表粗糙度、不同土地利用方式的关系。

(2) 起动风速与地表粗糙度呈负相关。植被覆盖较好的土地起动风速要比裸露的土地大很多。

(3) 直径小于 0.80mm 的颗粒容易发生风蚀, 直径小于  $70\mu\text{m}$  的粒子飘浮在空中并随气流飘移, 悬浮状态的粒子其极限沉降速度必须小于气流的垂向脉动速度。

(4) 裸土风蚀开放源土壤样品粒径分析时, 重点研究颗粒直径小于 0.80mm 的分布情况。

(5) 风蚀与土壤湿度的湿度负相关, 统计天津天津的  $\text{PM}_{10}$  浓度和大气 RH 的关系也负相关。

#### 本章参考文献

- [1] R. T. Pinker. Aerosol optical depths in a semiarid region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 11123-11137.
- [2] P. D. Hien, et. al. Comparative receptor modeling study of TSP,  $\text{PM}_2$  and  $\text{PM}_{2.5}$  in HoChiMinh city, *Atmospheric Environment*, 2001, 35(15): 2669-2678.
- [3] 吴正, 凌裕泉. 风沙运动的若干规律及防止风沙危害问题的研究[J]. *防沙研究*, 1965, 7(8): 7-14.
- [4] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. *土壤学报*, 1956, 4(2): 99-115.
- [5] 董治宝等. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4): 1-12.
- [6] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. *土壤学进展*, 1994, 22: 1-10.
- [7] 董光荣等. 关于土壤风蚀风洞实验的某些结果[J]. *科学通报*, 1987, 32(4): 277-301.
- [8] 戚隆溪, 王柏懿. 土壤侵蚀的流体力学的机制(II)—风蚀, *力学进展*, 1996, 26(1): 41-55.
- [9] 王元, 张鸿雁. 大气表层与风蚀现象相似参数的研究, *中国沙漠*, 1994, 14(1): 10-16.
- [10] 贺大良, 刘大有. 跃移砂粒起跳的受力机制, *中国沙漠*, 1989, 9(2): 14-21.
- [11] 贺大良, 高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影研究, *中国沙漠*, 1988, 8(1): 18-27.
- [12] 宣捷. 大气扩散的物理模拟, 北京气象出版社, 2000, 3: 191-200.
- [13] 董治宝, 董光荣, 陈广庭. 风沙物理学研究进展与展望, *大自然探索*, 1995, 14(53): 30-38.

- [14] 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势, 力学进展, 1995, 25 (3): 368-391.
- [15] 杨宝, 邹学勇, 王周龙等. 气流中跃移颗粒的受力分析, 地理科学, 1999, 19: (5): 475-478.
- [16] Woodburn R, Kozachyn J, A Study of Relative Erodibility of a Group of Mississippi Gully Soils[J]. Trans. Am. Geographical Union, 1956, 35: 745-753.
- [17] 阮伏水, 吴雄海. 关于土壤可蚀性指标的讨论[J]. 水土保持报, 1996, 16(6): 68-72.
- [18] 王力威, 石晓燕, 李国忠. 对风蚀机理的分析与认识[J]. 水利科技与经济, 1997, 3(20): 90-91.
- [19] 朱俊风, 朱振达. 中国沙漠化防治[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [20] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京, 科学出版社, 1987.
- [21] 梁海奇. 测定沙丘前移量计算沙丘风蚀模数的方法[J]. 中国水土保持报, 1995, 4: 12-14.
- [22] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4 (2): 99-115.
- [23] 董治宝等. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J], 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 1-12.
- [24] 李保国. 形理论在土壤科学中的应用及其展望[J], 土壤学进展, 1994, 22: 1-10.
- [25] 董光荣等. 关于土壤风蚀风洞实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987, 32(4): 277-301.
- [26] 董治宝, 陈渭南, 李振山等. 风沙土开垦中的风蚀研究. 土壤学报, 1997, 34 (1) : 74~80
- [27] 韩永伟, 韩建国, 张蕴薇, 农牧交错带退耕还草地土壤风蚀影响因子分析, 生态环境, 2005, 14(3): 382-386.
- [28] 董治宝, 陈渭南, 李振山. 植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 1~8.
- [29] Hagen, L. J. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 54: 39-46.
- [30] 黄富祥, 王明星, 王越思. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 627-633.
- [31] 董治宝, 陈渭南, 董光荣等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报, 1996, 16(4) : 437~443.
- [32] 贺大良, 中建友. 降水对起沙风速的影响[J]. 中国沙漠, 1988, 8(4): 18-23.
- [33] W. S. Chepil. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. Soil science society proceedings, 1956, 20 : 288 - 291.
- [34] 孙建中, 盛学斌, 刘云霞. 河北坝上地区人类活动与生态环境变化研究[J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 102-111.
- [35] 郑旭尔, 农田保护措施防治沙尘暴效果及土壤风蚀模型的研究[D]. 硕士学位论文, 河北农业大学, 2004.

## 第五章 裸土风蚀模型研究

风蚀尘已经成为大气颗粒物的重要来源之一<sup>[1]</sup>。土壤风蚀与风蚀尘输送过程对区域大气环境质量有着重要的影响<sup>[2-4]</sup>，为了定量评价风蚀对环境的影响，模拟土壤风蚀和风蚀起尘强度是现实和必要的。本章阐述了国内外风蚀模型在应用中存在的问题，明确了<sup>137</sup>Cs模型在风蚀应用中的可行性和建立模型的方法。

### 5.1 风蚀预测模型

#### 5.1.1 国内外研究状况

风蚀模型是风蚀过程定量研究的有效手段，国内外风蚀模型的发展过程，可以大致划分为经验统计模型、物理过程模型与分布式模型三个阶段。自从1877年德国土壤学家 Ewald Wollny 量化研究土壤风蚀开始<sup>[5]</sup>，到20世纪60年代美国通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)的建立，这一阶段的研究基本上是经验性的；20世纪60年代以后，随着风蚀机理的发展，逐步建立了一些能模拟风物理过程的数学模型。但是，由于风蚀问题涉及面广，风蚀基本规律中有许多问题仍然不清楚<sup>[6]</sup>；90年代以后，地理信息系统和遥感科学的发展及其在风蚀模型中的广泛应用，不仅可以将风蚀模型与GIS集成起来，而且可更方便预测预报风蚀<sup>[7]</sup>。

20世纪30年代的美国中西部的严重土壤风蚀和前苏联50~60年代干草原的黑风暴促进了美苏等国科学家对风蚀和起尘系统研究工作<sup>[4-6]</sup>。50年代以来，随着对深海陆源碎屑沉积物的研究工作的开展，科学家开始更多地关注起尘风蚀释放的颗粒度、化学和矿物学特征和风蚀尘的远距离输送问题；80年代以来随着人们对风蚀尘对全球大气、陆地和海洋影响作用认识的提高，风蚀尘的起、扬、飘、落的实地观测、卫星遥感观测和模型模拟工作得到迅速的发展<sup>[8,9]</sup>。就起尘模拟而言，在一些野外风蚀起尘观测和室内风洞的实验研究以及风沙物理学理论的支持下，提出了很多半经验的模型。迄今为止，大多数模型仅能预报某一时段和田块上的平均风蚀状况，且通过给各风蚀因子赋予一特定的平均值来实现。起尘模型主要有 Gillette 等人的模型<sup>[16]</sup>、美国 EPA 的起尘模型、邵亚

平等人的起尘起尘模型和 DPM 起尘释放模型等<sup>[17-24]</sup>。这些模型帮助我们认识起尘的机制，为治理风蚀和环境评价提供参考依据。

### 5.1.2 WEQ 风蚀模型

Woodruff 和 Siddoway 于 1965 年提出了“风蚀方程(WEQ)”模型<sup>[25]</sup>，该模型被广泛应用和不断修订。WEQ 模型表达式为：

$$E = f(I, K, C, L, V) \quad (5.1)$$

E: 年土壤流失量, t/hm<sup>2</sup>;

I: 土壤可蚀因子, t/(hm<sup>2</sup>·a);

K: 地表粗糙度参数, 无量纲;

C: 气候因子, 无量纲;

L: 植被覆盖因子, 无量纲。

该模型假定风蚀过程类似于沿山坡而下的雪崩与碎屑物<sup>[26]</sup>。WEQ 是第一个用于估算田间年风蚀量的模型，它包括气候因子、土壤可蚀性、土壤表面粗糙度、田块长度以及作物残留物 5 组 11 个变量，其中土壤可蚀性与气候因子是最重要的变量。WEQ 模型是建立在 Kansas 州 Garden City 的气候条件基础上的，显然这一地区的气候与其它地区有着不同程度的差异，在其它地方应用从而使得模型计算结果误差很大，WEQ 将气候因子、土壤可蚀性等因子均视为彼此独立的，而未考虑各种风蚀因子之间的复杂关系，各因子简单的乘积并不能完全而真实地表达风蚀的总体效应。WEQ 在精确性、应用难易度和应用范围方面，都有明显的缺点，目前已经被 RWEQ 替代。

### 5.1.3 修正的风蚀方程(RWEQ)

由于 WEQ 方程在准确性、应用范围以及不能预测高降雨量地区和极端干旱地区的土壤风蚀。随着风蚀观测仪器的发展，WEQ 的局限性愈加明显。为了及时利用新技术，专家们建议修正 WEQ，建立修正风蚀方程 RWEQ。RWEQ 可应用简单的模型变量输入方式来计算农田风蚀量<sup>[26]</sup>。RWEQ 充分考虑了气象、土壤、植物、田块、耕作以及灌溉等因子，通过(5.2)、(5.3)式来预测风蚀量。

$$Q_x = Q_{\max} [1 - e^{-\frac{Q_x}{Q_{\max}}}] \quad (5.2)$$

$$Q_{\max} = 107.8 (WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K / \cdot COG) \quad (5.3)$$

以上二式中：

$Q_x$ —在田块长度  $x$  处的风蚀量, kg/m;

$Q_{\max}$ —风力的最大输沙能力, kg/m;

$x$ —地块长度, m;

$S$ —由正坡向负坡的转折点; 无量纲

$WF$ —气象因子; 无量纲

$EF$ —土壤可蚀性成分; 无量纲

$SCF$ —土壤结皮因子; 无量纲

$K'$ —土壤粗糙度; 无量纲

$COG$ —植被因子, 包括平铺作物残留物、直立作物残留物和植被冠层, 无量纲。

RWEQ 的最大用途是估测田间引起的每季土壤风蚀, 求解 RWEQ 中的各种函数关系, 但需要准备数量很多的图表, 工作量很大, 因而限制了 RWEQ 的应用。

#### 5.1.4 Gillette 的起尘模型

Gillette 等较早开展起尘通量的野外和室内的研究<sup>[16]</sup>, 20 世纪 70 年代到 80 年代中期, 他们先后通过室内风洞实验和野外观测实验, 分别研究了土壤质地、土壤盐分、土壤碳酸盐和有机质对颗粒起动摩阻速度的影响, 分析了风蚀颗粒通量与风速及土壤质地的关系, 提出起尘的可能机制是跃移颗粒的冲击过程。利用湍流动量输送的原理提出了根据观测风蚀颗粒浓度梯度和湍流通量计算风蚀颗粒通量方法, 该方法在以后的风蚀颗粒通量观测中被很多人引用和借鉴。在这些实验的基础上, 结合其他人的观测数据 Gillette 等人提出了起尘模型<sup>[27-31]</sup>, 实际给出的是一个研究区域的起尘总量的方程, 这个方程中包括了如下的一个风蚀颗粒通量方程:

$$F_v = C \cdot U^{*3} (U^* - U_t^*) \quad (5.4)$$

$$\text{或者为 } F_v = C \cdot C_d^2 \cdot U^3 (U - U_t) \quad (5.5)$$

方程(5.4)中的起动摩阻速度  $U^*$ , 或者起动风速  $U_t$  是反映土壤质地等地表特征对风蚀影响的重要参数, 它来自野外风洞在不同土壤质地类型的测定值,  $C_d$  是与粗糙度有关的物理量。方程(5.4)主要显示了影响起尘的 2 个因素, 摩阻速度和起动摩阻速度, 前者代表了风的切应力的大小, 后者反映了土壤质地对跃移过程的影响。虽然 Gillette 较早提出起尘的可能机制是跃移颗粒的冲击作用,

但在其模式中并没有反映这个微观机制，而摩阻速度和起动摩阻速度这 2 个因素并不是影响跃移颗粒的冲击的直接因素。Nickling 等人通过在野外观测不同土壤质地、植被覆盖、土地利用和人类扰动等情况下土壤起尘通量与摩阻速度的关系，尽管数据存在很大的分散性，起尘通量可以表示为摩阻速度的幂函数，即是  $Fv \propto U_n^n$ ， $2 < n < 5$ ，因地表形态而异。最近在中国敦煌的野外实验也展示了类似的趋势。由于该模型输入参数少，公式简便，因而被应用在很多全球风蚀起尘的模型中起尘模块中。

### 5.1.5 邵亚平的起尘模型

邵亚平<sup>[16]</sup>利用风洞实验研究了跃移过程和颗粒冲击过程的关系，证实了起尘的主要机制是跃移颗粒的冲击、磨蚀和溅射而非湍流应力的直接抬升，印证了 Gillette 等关于起尘的颗粒冲击观点；认为跃移颗粒的冲击效率分别与跃移颗粒直径、风蚀颗粒颗粒直径以及起尘的起动风速有关，而这些因素反映了风蚀颗粒颗粒之间粘结力和结合能对起尘通量的影响。在此基础上，结合 Rice 等的实验，邵亚平等先后发展了基于能量过程的和基于跃移颗粒产生对弹坑体积的起尘模型。近来邵亚平对其模型作了全面的整合提出了一个新的模型。在这个新模型中对起尘的力学机制作了较为全面的分析，认为起尘的机制分别包括了为湍流携带抬升，跃移冲击引起土壤团粒的磨蚀和溅射，跃移颗粒的冲击导致风蚀颗粒团粒的分离和释放等 3 类的情形，以后 2 类为主；根据风蚀颗粒颗粒结合能研究和跃移吹沙产生的弹坑体积模拟了这 2 个微观机制，提出了如下的起尘通量方程：

$$F(d_i, d_s) = c_y [(1 - \gamma) + \gamma \frac{P_m(d_i)}{P_r(d_i)}] \cdot \frac{Q_g}{U^{*2} m} (\rho_b \eta_f \Omega + \eta_{ci} m) \quad (5.6)$$

公式(5.6)为直径  $d_i$  的起尘通量方程。

$\eta_f$  和  $\eta_{ci}$  分别为土壤在最小分散状况下和最大分散状况下风蚀颗粒直径为  $d_i$  的分布概率之和与之差；

$\Omega$  为跃移颗粒冲击弹坑的体积，它与跃移颗粒的速度、撞击的角度、跃移轨迹以及土壤力学性质有关；

$s$  和  $Pye$  是表示土壤力学性质的经验参数，方程右端中含有  $\Omega$  的因式代表的是跃移颗粒磨蚀溅射对释放的风蚀颗粒通量的影响；

$m$  为直径  $d_s$  的跃移颗粒的质量， $\eta_{ci} m$  项代表了跃移过程中风蚀颗粒团粒分

离对起尘通量的影响;

Q 是跃移通量;

g 为重力加速度;

$U^*$  为摩阻速度;

$P_m(d_i)$ ,  $P_r(d_i)$  分别为土壤在最小分散状况下和最大分散状况下风蚀颗粒直径为  $d_i$  的分布概率;

$\gamma$  为在最大和最小分散情况下风蚀颗粒直径为  $d_i$  分布概率的权重比例系数;

$\rho_s$  和  $\rho_p$  分别为土壤容重和土壤颗粒密度;

$c_y$  为  $c_0$  的 1/7, 约为 0.1,  $c_0$  为跃移通量方程的经验系数。

$$F(d_i) = \int_{d_1}^{d_2} F(d_i, d) P_s(d) \delta d \quad (5.7)$$

$$F = \sum_{i=1}^l F(d_i) \quad (5.8)$$

$$Q = c_0 \rho_0 / g U^{*3} \left(1 - \frac{U_t^{*2}}{U^{*2}}\right) \quad (5.9)$$

公式(5.7)、(5.8)分别为公式(5.6)的积分方程, 公式(5.9)是 Owen 跃移通量方程。模型的输入参数分别为摩阻速度  $U^*$  起动摩阻速度  $U_t$ , 跃移过程中土壤颗粒阻力系数和受到反弹力的垂直分量系数分别为 S 和  $P_{y0}$ 。

与 Gillette 的模型及美国 EPA 起尘模型比较, 邵亚平模型的主要贡献在于: 描述了起尘过程中跃移颗粒的冲击作用和物理机制上给出了独立的起尘方程和跃移通量方程; 通过引进反映跃移冲击强度的经验参数, 描述了跃移颗粒的冲击中风蚀尘结合能、跃移产生的弹坑体积  $\Omega$  和土壤粒度变化与起尘关系, 把风动力条件和土壤性质与起尘很好地联系在一起, 从微观方面模拟了起尘的吹沙机制, 建立了起尘模型。虽然该模型详细描述了起尘机制, 但是由于涉及了过多的参数, 而目前测量和计算这些参数还有一定难度, 因而给模式应用带来了一定程度上的不确定性和不方便, 尽管如此, 比较模拟和有限观测的起尘通量数据, 该模型仍可以看作是比较满意的模式之一。

### 5.1.6 DPM 起尘模型

DPM起尘模型是在Marticorena等的起尘模型基础上对其加以改进而形成的。Marticorena等在White跃移通量方程的基础上,鉴于土壤是一个多粒级的颗粒集合体而非均匀沙,因而考虑了每一粒级的可蚀性土壤微团粒对跃移通量的贡献,改进了White的跃移通量模型,根据Gillette的野外实验的冲击作用效率的数据,并借鉴邵亚平的风洞吹沙实验的相关结论,提出了冲击作用效率(跃移通量与起尘通量之比)与土壤粘粒含量呈现指数关系,建立了起尘通量的经验模式。

Alfaro等通过风洞吹沙实验发现:随着摩阻速度增大,释放的风蚀颗粒粒度呈现变小的趋势,中值粒径较小的风蚀尘的比例增加。根据风洞实验中摩阻速度与风蚀颗粒的粒度分布关系,风蚀尘粒度分布和冲击效率主要取决于跃移颗粒的动能和风蚀颗粒的结合能,而不是土壤粘粒的含量,这些工作为改进Marticorena等<sup>[73, 74]</sup>的起尘模型奠定了实验和理论基础。根据起尘通量正比于跃移跃移颗粒的动能通量的原理,利用Marticorena跃移通量模型,Alfaro等提出了DPM模型。该模型的方程如下:

$$F_{dust,i} = \pi \rho_p d_i^3 / 6 N_i \quad (5.10)$$

$$N_i = \beta / e_i \int_{D_p=0}^{\infty} P_i(D_p) dF_h(D_p) \quad (5.11)$$

$$F_h = EC \rho_a / g U^{*3} \int_{D_p} [1 + R](1 - R_2) dS_{rel}(D_p) dD_p \quad (5.12)$$

上式中:公式(5.10)是起尘通量方程;

$d_i$ 代表了3个对数正态分布群体的起尘粒子的中值粒径;

$N_i$ 是直径为 $d_i$ 的个数通量;

$\rho_p$ 为土壤颗粒的密度。

公式(5.11)是风蚀颗粒个数通量方程,其中:

$\beta = 16300 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,为比例系数;

$e_i$ 为3个对数正态分布群体的起尘粒子的结合能;

$P_i(DP)$ 是跃移颗粒的动能在3个对数正态分布群体的起尘粒子之间分配比例,获得的动能大小决定了风蚀颗粒粒子的粒度和个数通量;

$F_h$ 为跃移通量。

公式(5.12)为跃移通量方程,其中:

$E$  为可蚀性部分与整个风蚀地面的比率;

$U^3$  为摩阻速度;

$R=U^3t(D_p, Z_0Z_0s)/U^3$ ,  $D_p$  为土壤可蚀性组分中的颗粒直径( $<2000\mu\text{m}$ );

$C$  为经验常数取 2.61。

DPM模型采用的方法虽然和风蚀过程接近,能较好反映土壤粒度分布对起动摩阻速度的影响,但没有考虑土壤微团粒粒度在起尘前后的变化,因而也是不完满的。

综上可以看出Gillette和美国EPA的起尘模型相对地比较简单,主要考虑了摩阻速度和土壤质地对起尘的影响,没有考虑起尘过程的微观机制;邵亚平和Alfaro等人的DPM起尘模型都通过土壤粒度分布、粗糙度和起动摩阻速度等参数表达了地表特征对起尘的影响,且都描述了起尘的微观机制。然而所有的模拟工作只是从某一方面反映了起尘过程,对起尘机制还没有完全了解清楚,不能定性反应到模型中。

## 5.2 国内风蚀起尘量估算模型

我国对于风蚀起尘量的研究起步较晚,模型研究的相对也少。宣捷通过修改美国环保局(US EPA)的两个公式的相应因子,计算了中国北方地面起尘速率的分布,计算结果表明在中国北方起尘因子自东向西逐渐增大,其幅度达5个数量级。塔克拉玛干大沙漠和内蒙古高原西部的大戈壁是两个强排放源地,而其最大值在塔克拉玛干大沙漠的中心:其中 $PM_{50}$ (直径小于 $50\mu\text{m}$ 的颗粒物)的起尘速率为 $1.8(\text{t}/(\text{ha}\cdot\text{a}))$ , $PM_{30}$ (直径小于 $30\mu\text{m}$ 的颗粒物)的起尘速率为 $1.5(\text{t}/(\text{ha}\cdot\text{a}))$ 。计算得中国北方地面尘排放总量为: $43\times 10^6\text{t}/\text{a}(PM_{50})$ 及 $25\times 10^6\text{t}/\text{a}(PM_{30})$ 。计算还表明春季是起尘最严重的季节,起尘量占全年起尘量的一半以上。

根据美国EPA的堆场起尘模型给出我国的堆场起尘经验模型:

$$EF_p = k \sum_{i=1}^n p_i \quad (5.13)$$

式中: $k$ 为粒径大小因子,无量纲,它的大小随颗粒物粒径大小的变化而变化,当粒径为 $100\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 时,对应的 $k$ 值分别是2.12、0.5、0.2;

$n$  为风蚀源每年受扰动的次数;

$P_i$  为第  $i$  次扰动中观察的最大风速的风蚀潜势,  $g/m^2$ 。其中的  $k$  的取值不同的堆场取值不同。

建筑工地起尘量的计算:

$$E = P \times 0.81 \times S \times \left(\frac{V}{30}\right) \times \left[\frac{365 - W}{365}\right] \times \left(\frac{T}{4}\right) \quad (5.14)$$

式中:  $E$  单辆车引起的工地起尘量散发因子 ( $kg/km$ );

$P$  引起颗粒 (直径  $< 30 \mu m$ ) 比例数, 石子路面为 0.62; 泥土路面为 0.32;

$S$  表面粉矿成分百分数 (取 12%);

$V$  车辆平均驶过工地的平均车速 ( $km/h$ );

$W$  一年中的降水量大于 0.254mm 的天数;

$T$  每辆车的平均轮胎数。

以上的两个模型是用于估算裸露堆场和建筑工地的起尘量的经验模型, 应用范围较窄, 只能应用在特定的场所。

### 5.3 风蚀预测模型系统 WEPS 应用研究

风蚀预报系统 (WEPS) 是美国农业部组织多学科科学家开发研究的一个连续的以过程为基础的模型, WEPS 引入子模型的概念, 以模块的形式组成, 7 个子模型分别为侵蚀、气象、作物生长、分解、土壤、水文、耕作子模型。WEPS 是基于过程的连续的模拟天气、土地状况和侵蚀的风蚀模型。该模型能够模拟土地状况和土壤侵蚀、沉积的空间和时间的变化。它可以预报侵蚀物质的滚动、跃移和悬浮的情况。WEPS 是一个基于过程的计算机模型, 它通过模拟控制风蚀的基本过程, 来预报土壤侵蚀。当风速超过启动风速时, 该模型可以计算土壤迁移量、估算作物损失和预报  $PM_{10}$  排放量。WEPS 由主程序控制时间间隔的长短。为了减少计算时间, 除了水文子模型和侵蚀子模型中选定的子程序使用小时或不足小时的时间间隔外, 风蚀预报系统以日为时间间隔。主程序调用子模型的顺序如图 5.1 所示。每个子模型控制子模型内部的运算顺序, 然而, 管理子模型模拟各种田间作业是按照它们在管理计划中出现的次序进行的。目前, 管理计划必须涵盖至少 1 年, 可涵盖多年。管理计划可以从一年的任何一天开始,

而风蚀预报系模型模拟必须从没有生长作物的时间开始。风蚀预报系统模拟非均一田野的情况，是通过把非均一的田野分成若干均一的亚区，再分别模拟各均一亚区的情况。这里“均一”指一个亚区内土壤类型、生物量以及管理措施相似。为此，开发了基本风蚀预报系统子模型(侵蚀子模型除外)，各个子模型运行时不需要主程序如何处理非均一田野的信息。风蚀预报系统中大多数子模型以每日天气作为改变田间条件物理过程的自然驱动力。水分子模型说明土壤温度和水分状况的变化；土壤子模型模拟土壤性质的变化过程；作物子模型和分解子模型分别模拟植物生长过程和植物分解过程。

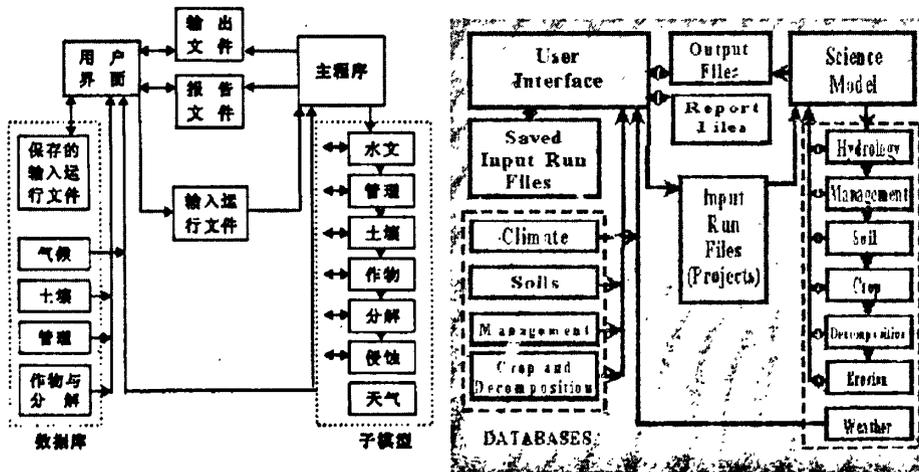


图 5.1 风蚀预报模型系统 WEPS 模型结构

风蚀预报系统中，模拟区域是一块或几块相邻的田野，如图 5.2，用户必须输入模拟区域及任何具有不同土壤、管理或作物亚区的几何图形。此外，还须输入地表及土壤的初始条件。风蚀预报系统可输出用户选定时间间隔计量区内的土壤流失量或沉积量。通过选择多样的和重叠的计量区，可获得模拟区域内不同空间尺度的输出结果。风蚀预报系统还可分别给出跃迁、滚动和悬浮土壤流失量，这对于评价风蚀对其它地区的影响是非常有用的。

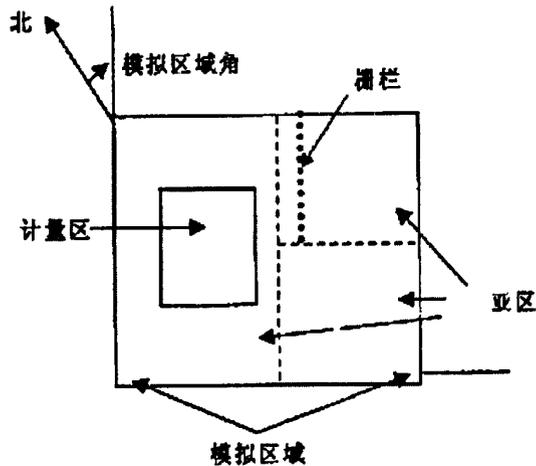


图 5.2 风蚀预报系统模拟区域图形

风蚀预报系统需要风速、风向来模拟风蚀过程，需要风速、风向及其他天气变量驱动风蚀预报系统中水文、土壤可蚀性、作物生长及作物残余物分解等随时间变化的过程。WEPS 风蚀的模拟由专门的软件 WINDGEN 模拟每日的风向、最大风速和最小风速，而且根据历史记录，提供每天最大风速出现的时间。WINDGEN 建立的数据库由 673 个地点的记录组成，该数据库由美国北卡罗来纳州国家气候数据中心风能资源信息系统 (WERIS) 数据库中每月风速风向历史记录摘要建成，除此之外还需要年平均气温、日降雨量、最高最低温度、太阳辐射和露点温度，每天都得到更新各种天气过程如干湿、露点、降雨量、降雨强度、土壤容重、团聚体大小分布数据。由于 WEPS7 个子模型侵蚀、气象、作物生长、分解、土壤、水文、耕作中对应的参数、相关因子都是以美国本土多年研究的经验而得出来的。我国的土壤类型、土地利用状况和美国相比存在较大差异，特别是我国的土地实行的联产承包制，是小块耕作，同美国机械化大面积作业存在很大的差别。修改 WEPS 模型中大量相应参数，输入我国的相关参数后，才可以用 WEPS 风蚀预报系统进行我国的风蚀预报和管理。

#### 5.4 裸土风蚀颗粒扩散距离预测公式

当风速达到或超过起动风速时，在风力作用下原来静止于堆场表面的颗粒物开始运动，颗粒物的运动主要有2种：

- (1) 风力推移较大颗粒物在地表做水平滚动；
- (2) 密度较小或粒径较小的颗粒物开始升腾并悬浮在空气中，受重力作用，

在扩散一定距离后某些颗粒物会沉降下来。

因此扩散距离可以作为评估堆场影响环境空气质量范围的重要指标，预测颗粒物扩散距离一般采用Van Kármán公式：

$$L = (40 E \mu^2 \cdot v) / (\rho_s \cdot g^2 d_s^4) \quad (5.15)$$

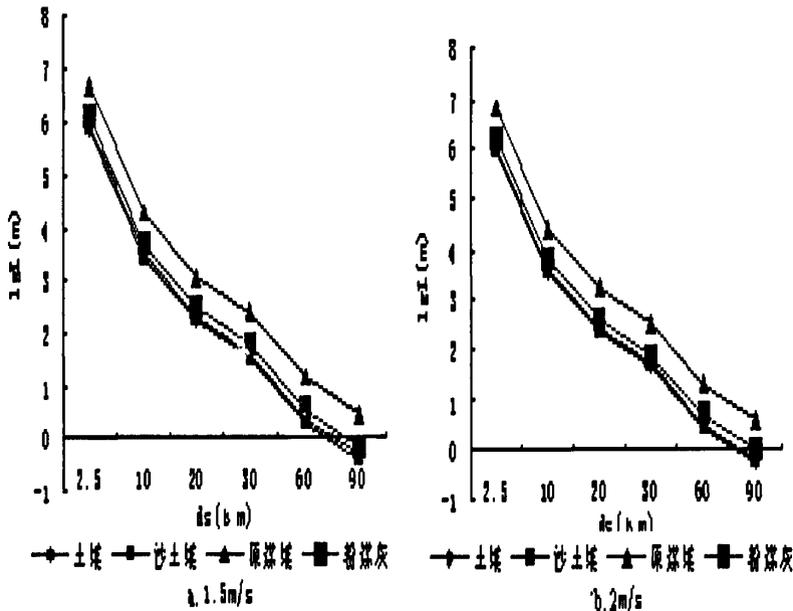
式中，E为紊动交换系数， $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ；

$\mu$ 为空气动力粘滞系数， $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ ；

v为气象风速， $\text{cm}/\text{s}$ ；

$\rho_s$ 为颗粒物和流体(空气)的密度差， $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

利用颗粒物扩散距离公式测算的 4 种裸土表面的颗粒物起动后扩散距离如图 5.3 所示。从图 5.2 可知，4 种裸土表面的颗粒物的扩散距离，基本上都遵循着同一规律，粒度大于  $90 \mu\text{m}$  的颗粒物，在不同的风速条件下，扩散距离一般在  $15\text{m}$  以下。粒度  $60 \mu\text{m}$  左右的颗粒物，扩散距离一般在  $2 \sim 70\text{m}$ 。粒度  $30 \mu\text{m}$  左右的颗粒物，扩散距离一般在  $30 \sim 1000\text{m}$ 。粒度  $20 \mu\text{m}$  左右的颗粒物，扩散距离一般在  $150 \sim 5000\text{m}$ 。粒度  $10 \mu\text{m}$  左右的颗粒物，扩散距离一般在  $2 \sim 80\text{km}$ 。粒度  $2.5 \mu\text{m}$  左右的颗粒物，扩散距离一般在数千公里以上。 $10 \mu\text{m}$  以下的颗粒物由于粒径很小，基本上不完全受重力作用，可以长期飘浮在空气中，扩散距离很远，影响范围很大。以上的估算是指在没有湿沉降的前提下。



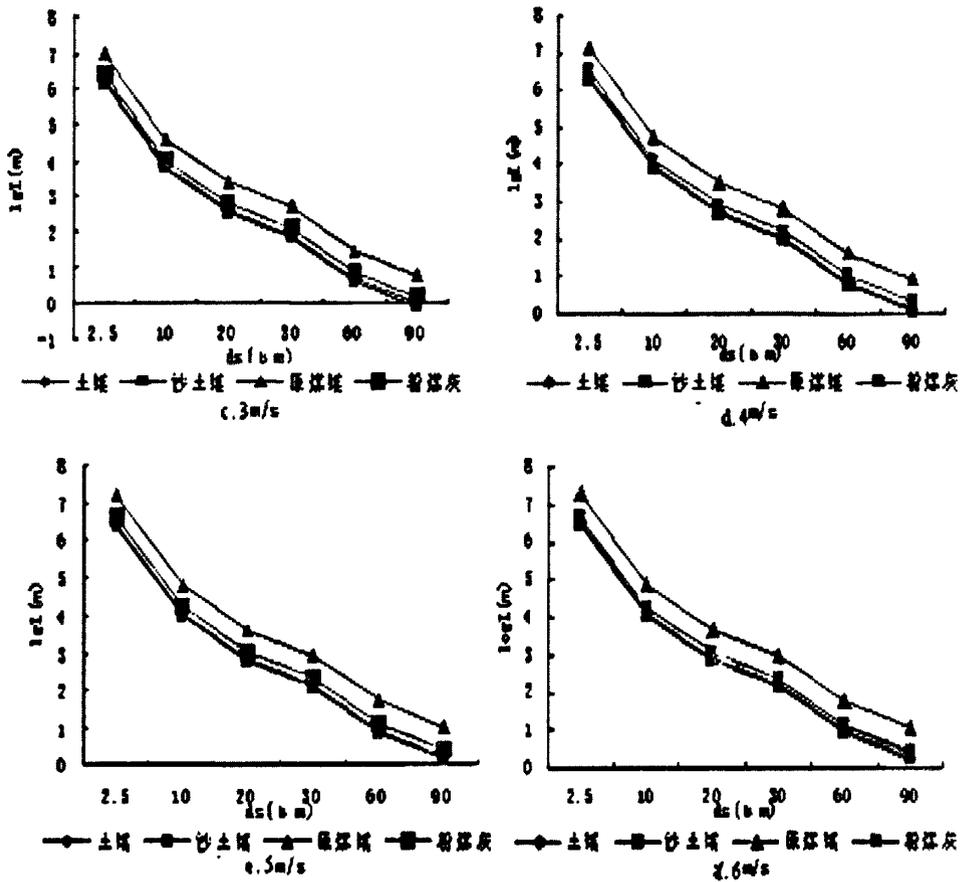


图 5.2 不同起动风速的颗粒物扩散距离

## 5.5 $^{137}\text{Cs}$ 法在裸土风蚀中的应用

### 5.5.1 $^{137}\text{Cs}$ 示踪原理

$^{137}\text{Cs}$  是铯元素的一种同位素，半衰期 30.17 年，地球表层环境中  $^{137}\text{Cs}$  主要来源于 20 世纪 50~70 年代期间的大气层核试验。 $^{137}\text{Cs}$  随干湿沉降到地表以后，一旦接触到土壤颗粒，立即被牢固吸附到土壤颗粒上<sup>[42]</sup>，主要吸附于比表面大的粘粒和细粉粒。

$^{137}\text{Cs}$  被土壤颗粒吸附后，基本不淋溶流失和被植物摄取，它以后的运动主要随土壤颗粒的再分布而迁移。全球  $^{137}\text{Cs}$  沉降始于 1954 年，到 1963 年达到最大，1963 年核禁条约生效后逐年下降，到 1980 年时  $^{137}\text{Cs}$  沉降基本可以忽略<sup>[43]</sup>。

$^{137}\text{Cs}$  作为土壤侵蚀示踪剂的基本假设: 一是  $^{137}\text{Cs}$  的全球分布虽与纬度变化及某地的降雨密切相关, 但在区域上其沉降是均匀分布的, 因此土壤  $^{137}\text{Cs}$  的初始含量(背景值)是确定的; 二是  $^{137}\text{Cs}$  被土壤尤其是土壤中的黏粒和有机质强烈吸附于阳离子交换位置, 很难被置换, 不易淋洗, 化学和生物学运移极小, 仅随土壤颗粒作机械位移, 土壤中含量的变化主要受土壤颗粒物理运动的影响。基于以上两点,  $^{137}\text{Cs}$  是一种良好的土壤侵蚀示踪剂。示踪的基本方法是通过测定取样点土壤  $^{137}\text{Cs}$  的含量相对于背景值的变化, 并将这种变化与土壤的运移量相联系, 以实现土壤侵蚀量的测定。

土壤中  $^{137}\text{Cs}$  总量的变化主要受沉降输入、放射性衰变作用与土壤侵蚀作用的共同影响。土壤中  $^{137}\text{Cs}$  的流失量与土壤的流失数量密切相关, 某一土壤剖面的  $^{137}\text{Cs}$  含量低于或高于当地  $^{137}\text{Cs}$  本底值, 一般可表明该地区土壤剖面处有侵蚀或者堆积发生。根据  $^{137}\text{Cs}$  在土壤剖面中的分布量, 并与背景值比较, 可判断采样点是受侵蚀还是沉积。根据  $^{137}\text{Cs}$  的流失量或堆积量, 可以定性分析或定量计算该处的土壤流失量或堆积量<sup>[43]</sup>。

$^{137}\text{Cs}$  用于土壤风蚀估算, 解决的两个关键问题是土壤  $^{137}\text{Cs}$  基准值的确定, 以及土壤的  $^{137}\text{Cs}$  损失量与土壤侵蚀量之间的定量模型的建立, 本节重点讨论这两方面的问题。

### 5.5.2 $^{137}\text{Cs}$ 空间分布

研究表明  $^{137}\text{Cs}$  在土壤剖面中的分布规律明显, 非农耕地土壤剖面中  $^{137}\text{Cs}$  赋存于 0~18cm 表层, 18cm 以下基本不含  $^{137}\text{Cs}$ , 其中 5cm 深度左右  $^{137}\text{Cs}$  含量最高, 向下随深度的增加急剧减少。农耕地  $^{137}\text{Cs}$  基本均匀地分布于犁底层深度内(25~30cm)。 $^{137}\text{Cs}$  的重新分布主要由侵蚀、沉积等过程引起的<sup>[44]</sup>。在此基础上不少国外学者针对不同区域进行了  $^{137}\text{Cs}$  的分布研究, 例如 Ritchie 等<sup>[45]</sup> (1974) 在研究 Mississippi 北部流域时发现,  $^{137}\text{Cs}$  的流失量林地<荒地<牧草地<耕地<沟谷地。在研究同样地区的三个不同覆盖类型的小流域土壤侵蚀时, 又提出  $^{137}\text{Cs}$  的单位面积流失量裸地>农耕地>草地>林地。在研究 Hudson 河下游的沉积时, Simpson<sup>[46]</sup> 发现  $^{137}\text{Cs}$  等在河口不同部位、不同深度有着不同的浓度。McCllan 等<sup>[47]</sup> 测定澳大利亚昆士兰达草地的  $^{137}\text{Cs}$  变化时, 发现随着地形、侵蚀和沉积模式的变化,  $^{137}\text{Cs}$  具有水平和垂直再分布。Brown 等<sup>[48]</sup> 在研究 Willamette

流域农地侵蚀时发现坡地和林地  $^{137}\text{Cs}$  含量没有差异, 而沉积剖面中的  $^{137}\text{Cs}$  含量明显增加。Lowrance<sup>[49]</sup>在研究美国东南部农林系统的土壤侵蚀与沉积时发现  $^{137}\text{Cs}$  分布最大浓度从农田到河流逐渐增加。Wallbrink<sup>[50]</sup>在研究澳大利亚 Canberra 也发现坡脚的  $^{137}\text{Cs}$  含量大于坡中的含量。这些研究说明由于风蚀和堆积,  $^{137}\text{Cs}$  发生空间再分布, 往往出现风蚀区  $^{137}\text{Cs}$  含量降低, 而沉积区  $^{137}\text{Cs}$  含量变高; 同时在不同的土地利用方式下,  $^{137}\text{Cs}$  的分布也有明显的差异。近年来我国学者也开展了一系列  $^{137}\text{Cs}$  的区域分布研究, 例如张信宝等<sup>[50-51]</sup>在研究蒋家沟小流域的  $^{137}\text{Cs}$  时发现, 土壤侵蚀强度的顺序为裸坡地>农耕地>荒草地>林地; 在研究黄土高原羊道沟土壤侵蚀时发现, 农耕地中  $0^\circ$  坡的  $^{137}\text{Cs}$  含量大于坡度为  $10^\circ$  的农耕地, 后者大于  $20^\circ$  的农耕地。刘志<sup>[52]</sup>根据土壤中  $^{137}\text{Cs}$  的含量研究了新西兰南茨特布里丘陵区的土壤侵蚀, 他认为牧草地的  $^{137}\text{Cs}$  平均含量明显比耕地高, 牧草地变化不大, 而耕地变化较大; 同样, 由于坡度坡长的不同,  $^{137}\text{Cs}$  移动流失的现象也极为明显。庄作权<sup>[53]</sup>在研究台湾德基水库流域的侵蚀时发现  $^{137}\text{Cs}$  含量顺序为: 果园土壤>森林地>崩塌地。因此裸土风蚀  $^{137}\text{Cs}$  土壤样品采样时, 应采集林地、荒土地、耕地、草地等地点, 将以上研究的结论作为参考。

### 5.5.3 $^{137}\text{Cs}$ 样品采集方法

在选定的区域内选取不同的地貌部位, 布设土壤采样点, 采取土样, 土样风干后备用。历史上未受到侵蚀或沉积的地点, 基准面的选取对于  $^{137}\text{Cs}$  基准值的可靠性相当重要, 直接影响土壤侵蚀模数计算结果的准确性。国内外现有的这方面研究通常把未受到侵蚀或沉积的大面积山顶平地和远离山体的非耕作平地作为基准面, 并且基准面的确定是建立在  $^{137}\text{Cs}$  在小流域均匀沉降的假设基础上。另外  $^{137}\text{Cs}$  本底值计算模型用到的干沉降和湿沉降采用自行开发设计的收集罐自动升降多功能干湿沉降采样器。

样品的分析按照美国农业部制土壤颗粒分级标准<sup>[54]</sup>, 并兼顾研究区现代土壤风蚀的特征, 分别用筛孔  $0.25\text{mm}$  和  $0.10\text{mm}$  尼龙网土壤筛过筛上述土样, 并将每个土样分为细粒( $\leq 0.10\text{mm}$  的极细砂、粉粒和黏粒)、细砂( $0.10\sim 0.25\text{mm}$ )和粗粒( $0.25\sim 2.00\text{mm}$  的中砂、粗砂和极粗砂)等 3 个组分, 分别称重标记以备通过多道  $\gamma$  谱仪测定  $^{137}\text{Cs}$  的比活度。

### 5.5.4 $^{137}\text{Cs}$ 本地值计算模型

$^{137}\text{Cs}$  本底值计算模型采用 Walling 和 He 的  $^{137}\text{Cs}$  本底值计算模型<sup>[55]</sup>, 该模型是以同为核爆炸产物的  $^{90}\text{Sr}$  大气沉降量与降雨的关系模型为基础, 综合考虑全球尺度  $^{137}\text{Cs}$  本底值和降雨量分布得到的<sup>[56]</sup>。该模型将每个半球分为 8 个  $45^\circ$  的区域, 区内  $^{137}\text{Cs}$  总沉降量按 Agudo 的研究结果求得<sup>[57]</sup>。模型的坐标体系为: 以  $0^\circ$  经度线为界, 正值表示东经, 负值表示西经; 以赤道为界, 北半球纬度为正, 南半球纬度为负。变量  $f_{h,z}(\phi_z)$  (其中,  $h=1$  表示北半球、2 表示南半球,  $z=1-8$ ,  $\phi_z$  表示区域位置, 如:  $135^\circ-180^\circ$  等) 表示  $^{137}\text{Cs}$  沉降量在 16 个经度区域内的变化, 每个区域的平均  $^{137}\text{Cs}$  总沉降量按全  $^{137}\text{Cs}$  沉降量求得。每个纬度带内的  $^{137}\text{Cs}$  赋存量的变化由变量  $A_{h,b}(\theta_b)$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 表示, 其中  $h=1$  表示北半球、2 表示南半球,  $b=1-9$ ,  $\theta_b$  表示纬度带的位置, 如:  $0^\circ-10^\circ$  等。按照每  $45^\circ$  经度和  $10^\circ$  纬度范围划分的独立区域区内  $^{137}\text{Cs}$  赋存量可以由下面的关系式表示:

$$A_{h,z,b}(\phi_z, \theta_b) = f_{h,z}(\phi_z) A_{h,b}(\theta_b) \quad (5.16)$$

大气中  $^{137}\text{Cs}$  沉降到地表的过程由于沉降和伴随降雨的湿沉降过程组成。任意经纬度区域内的  $^{137}\text{Cs}$  赋存量  $A(\phi, \theta)$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 可以表述为:

$$A(\phi, \theta) = A_d + A_w \quad (5.17)$$

其中,  $A_d$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 和  $A_w$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 分别代表干沉降量和湿沉降量。 $^{137}\text{Cs}$  沉降的变化也可认为是区域内降雨量变化的反映。假定每一基本区域内空气中的  $^{137}\text{Cs}$  含量为一常数, 位置  $(\phi, \theta)$  处的  $^{137}\text{Cs}$  本底值  $A(\phi, \theta)$  与年均降雨量  $P$  (mm) 之间的关系可以表示为:

$$A(\phi, \theta) = f_{h,z}(\phi_z) A_{h,b}(\theta_b) [\beta + \gamma (P, P'/\delta / a(\phi_z, \theta_b))] \quad (5.17)$$

其中,  $P' = 1\text{mm}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  和  $\delta$  为常数, 风别取 0.15、0.051 和 0.45。

研究表明<sup>[55]</sup>, 不同粒径土壤颗粒中  $^{137}\text{Cs}$  比活度的差异巨大, 表现为细粒 ( $\leq 0.10\text{mm}$  的极细砂、粉粒和黏粒) 中  $^{137}\text{Cs}$  比活度大于细砂 ( $0.10\sim 0.25\text{mm}$ ) 中  $^{137}\text{Cs}$  比活度大于粗粒 ( $0.25\sim 2.00\text{mm}$  的中砂、粗砂和极粗砂) 中  $^{137}\text{Cs}$  比活度, 即  $^{137}\text{Cs}$  易被吸附在粒径较小的土壤颗粒表面; 土壤有机质对  $^{137}\text{Cs}$  也具有较强的吸附能力, 从而使土壤颗粒中  $^{137}\text{Cs}$  比活度随土壤有机质含量的增加而有所增

加；人类耕作活动不仅会影响土壤剖面中  $^{137}\text{Cs}$  比活度随深度的分布状况，还会影响不同粒级土壤颗粒中  $^{137}\text{Cs}$  比活度的分布，即与自然土壤相比较，耕作层土壤粗颗粒中  $^{137}\text{Cs}$  比活度明显增加。

### 5.5.5 $^{137}\text{Cs}$ 模型研究

现有的  $^{137}\text{Cs}$  模型可分为两类：经验模型和理论模型，理论模型主要包括比例模型、重量模型、幂函数模型、分布模型和质量平衡模型，但集中在剖面分布模型和质量平衡模型研究上。

(1) 比例模型是一种较为简单的理论模型，并被许多研究者用于耕作土壤的侵蚀估算<sup>[58-62]</sup>。该模型的假设前提为： $^{137}\text{Cs}$  的沉降输入全部经混合后在耕作层中均一分布；自从  $^{137}\text{Cs}$  沉降开始后，土壤的侵蚀损失量与土壤剖面的  $^{137}\text{Cs}$  含量的损失率成比例。该模型可表示为：

$$Y = 10 p \frac{BdX}{T} \quad (5.18)$$

式中：

$d$  为由  $^{137}\text{Cs}$  确定的耕层深度 (m)；

$B$  为耕层土壤的风干土容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$T$  为自  $^{137}\text{Cs}$  沉降开始以来至采样时经历的时间 (a)；

$X$  为  $^{137}\text{Cs}$  相对丢失率,  $X = (A_r - A_s) / A_r$  ( $A_s$  为取样地点土壤剖面  $^{137}\text{Cs}$  的含量,  $\text{Bq}/\text{m}^2$ ;  $A_r$  为背景值,  $\text{Bq}/\text{m}^2$ )；

$P$  为考虑土壤粒径组成影响引入的校正因子, 可由冲积物中  $^{137}\text{Cs}$  浓度与原侵蚀土壤  $^{137}\text{Cs}$  的浓度的比值确定。由于土壤细粒具有富集  $^{137}\text{Cs}$  的倾向且易发生径流侵蚀, 故  $P$  值一般大于 1。

(2) 农耕地土壤流失量的理论模型：

该模型的基本形式为：

$$S_t = (S_{t-1} + F_t - E_t \times CT) K \quad (5.19)$$

其中：

$S_t$  和  $S_{t-1}$  分别为  $t$  年和  $t-1$  年末土壤剖面的  $^{137}\text{Cs}$  总量 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )；

$F_t$  是  $t$  年的  $^{137}\text{Cs}$  的年总沉降量 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )；

$E_t$  为  $t$  年的土壤侵蚀损失量 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )；

CT=犁耕层土壤  $^{137}\text{Cs}$  浓度(Bq/kg);

K 是  $^{137}\text{Cs}$  的年放射性衰减常数(0.977)。

(3) 非耕地和耕地模型:

非耕地土壤风蚀模型表达式为:

$$Y = -10000D \ln(1 - \lambda) \quad (5.20)$$

土壤风蚀模型表达式为:

$$Y = h \times D \times 10000 \quad (5.21)$$

式中:

Y 为土壤侵蚀模数 ( $\text{t}/\text{hm}^2\text{a}$ );

D 为土壤容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\lambda$  为土壤中  $^{137}\text{Cs}$  年损失量占土壤  $^{137}\text{Cs}$  量的比例; h 为年土壤侵蚀厚度(m)。

(4) 分布函数模型:

分布函数模型表达式:

$$ER = 10000D/b \cdot \ln[1 - b \lambda CR/aD] \quad (5.22)$$

式中:

ER 为土壤侵蚀模数 ( $\text{t}/\text{km}^2\text{a}$ );

D 为土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

a, b 为常数, 分别为 35.2 和 -0.23;

$\lambda$  为某一点年平均  $^{137}\text{Cs}$  流失百分比;

CR 为  $^{137}\text{Cs}$  背景值 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )。

在各种土壤风蚀定量估算模型中, 其模型的建立是基于对侵蚀机理的理论分析基础之上的, 考虑了影响土壤侵蚀的诸多因素。模型应用上在基准值的确定方面, 应进一步考虑  $^{137}\text{Cs}$  基准值的空间变异和偶发核事故(如前苏联切尔诺贝利核电站事故)的影响。为了克服  $^{137}\text{Cs}$  沉降的空间变异, 可采用来源于大气沉降的方法测量  $^{137}\text{Cs}$  的比活度。

## 5.6 本章总结

(1) WEPS 模型可以实现风蚀的预报、管理和模拟, 在我们国家开展 WEPS 模型中 7 个子模型参数的修订, 可以缩短我国风蚀预报的研究进程。

(2)  $^{137}\text{Cs}$  示踪法所建立的模型值得推广应用, 该法在应用上避免了传统模型

建立所需要的大量实验和参数的确定。

(3)  $^{137}\text{Cs}$  示踪法背景值(基准值)的确定,可以用开发的收集罐自动升降全自动多功能干湿沉降采样器进行大气干沉降和湿沉降的  $^{137}\text{Cs}$  比活度得估算。

## 本章参考文献

- [1] 王涛,吴薇,薛娴等.中国北方沙漠化土地时空演变分析[J].中国沙漠,2003,23(3): 230-235.
- [2] 王旭,马禹,陈洪武.新疆沙尘暴天气的气候特征[J].中国沙漠,2003,23(5): 539-544.
- [3] 王旭,马禹,陈洪武等.南疆沙尘暴气候特征分析[J].中国沙漠,2003,23(2): 147-151.
- [4] Meyer L D. Evaluation of the universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39: 99-104.
- [5] 白清俊.流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J].人民黄河,1999,21(4): 18-21.
- [6] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34: 309-342.
- [7] 刘光.土壤侵蚀模型研究进展,水土保持研究[J].2003,10(3): 73-75.
- [8] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 16827-16842.
- [9] Shao Y P. Physics and Modeling of Wind Erosion[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000. 95-197.
- [10] Loosmore GA, Hunt J R. Below-threshold, non-abraded dust resuspension[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 20663-20671.
- [11] Owen P R, Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20: 225-242.
- [12] White B. Soil transport by winds on Mars[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84: 4643-4651.
- [13] Gillette D A. Environmental factors affecting dust emission by wind erosion[A]. Morales C. Saharan Dust [C]. New York: John Wiley, 1979. 71-94.
- [14] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D10): 11239-11249.
- [15] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L. et al. Mineral aerosol production by wind erosion: aerosol particle size and binding energies[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(7): 991-994.
- [16] Gillette D A, Stockton P. Mass momentum and kinetic energy fluxes of saltating particles [A]. Nickling W G Aeolian Geomorphology [C]. Boston: Allen and Unwin, 1986. 35-56.
- [17] McTainsh G H, Lynch A W, Burgess R C. Particle-size analysis of Aeolian dusts, soils,

- and sediments in very small quantities using a Counter Multisizer[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 1207-1216.
- [18] Chatenet B, Marticorena B, Gomes L, et al. Assessing the microped size distributions of desert soils erodible by wind[J]. *Sedimentology*, 1996, 43: 901-911.
- [19] Losno R, Bergametti G, Carlier P, et al. Major ions in marine rainwater with attention to sources of alkaline and acidic species[J]. *Atmospheric Environment*, 1991, 25A: 763-704.
- [20] Dentener F J, Carmichael G R, Zhang Y, et al. Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 22869-22889.
- [21] Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. The role of dust in climate changes today, the last glacial maximum and in the future [J]. *Earth—Science Reviews*, 2001, 54: 43-80.
- [22] Duce R A, Tindale N W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36: 1715-1726.
- [23] Duce R A. Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. A. Charlson R J. Heintzenberg. *Aerosol Forcing of Climate*[C]New York: John Wiley & Sons Ltd., 1995. 43-72.
- [24] Zhang D. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since historic times[J]. *Science in China (Series B)*, 1984, 27: 825-836.
- [25] Woodruff, N. P. and F. H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. *Soil science society of America proceedings*, 29: 602~608.
- [26] W. S. Chepil, 1957. Width of field strips to control wind erosion. *Kansas agricultural experimental station technical bulletin*.
- [27] Gillette D A. Fine particulate emissions due to wind erosion[J]. *Transactions of the ASAE*, 1977, 20: 890-987.
- [28] Gillette D A. A wind tunnel simulation of the erosion of soil: effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production[J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12: 1735-1743.
- [29] Gillette D A, Admas J, Endo L. et al. Threshold velocities for input of soil particles into air by desert soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(C): 5621-5630.
- [30] Gillette D A, Admas J, Muhs D. et al. Threshold friction velocities and rupture module for crusted desert soils for the input of soil particles into the air[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 9003-9015.
- [31] Gillette D A. Threshold friction velocities for dust production for agricultural soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 12645-12662.
- [32] Rajot J L, Sabre M, Gomes L. Measurements of vertical fluxes of soils-derived dust during wind erosion events in a Sahelian region(Niger)[A].
- [33] Buerkert B, Allison B E. et al. *Proceedings of the International Symposium Wind erosion in West Africa: The Problems and its Control*[C]. Weikersheim, Germany: Margraft Verlag, 1994. 49-56.
- [34] Rajot J L, Alfaro S C, Gomes L. et al. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion[J]. *Catena*, 2003, 53(1): 1-16.

- [35] Gomes L, Rajot J L, Alfaro S C, et al. Validation of a dust production model from measurements performed in semi - arid agriculture areas of Spain and Niger[J]. *Catena*, 2003, 52(3~4): 257-271.
- [36] Gomes L, Arr e J L, L pezMV. et al. Wind erosion in semi2arid agricultural area of Spain: the WELSONS project[J]. *Catena*, 2003, 52(3~4): 235-256.
- [37] Nickling W G, Gilles J A. Emission of fine2grain particulates from desert soils[A]. 1989. 133-165.
- [38] Nickling W G, Gilles J A. Dust emission and transport in Mali, West Africa[J]. *Sedimentology*, 1993. 40: 859-868.
- [39] Borrmann S, Jaenicke R. Wind tunnel experiments on the resuspension of the sub-micrometer particles from a sand surface[J]. *Atmospheric Environment*, 1987, 21: 1891-1898.
- [40] Fairchild C I, Tillery M I. Wind tunnel measurements of the resuspension of ideal particles[J]. *Atmospheric Environment*, 1982, 16: 229-238.
- [41] 宣捷. 中国北方地面起尘总量分布, *环境科学学报*, 2000, 20(4), 426-428.
- [42] Richard lowrance, Sherwood McIntyre, and Clarence Lance1 Erosion and deposition in a field/forest system estimated using cesium  $^{137}\text{Cs}$  activity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 43(2): 195-198.
- [43] 严平, 董光荣, 张信宝等.  $^{137}\text{Cs}$  法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J]. *科学通报*, 2000, 45(2): 199~204.
- [44] 冯明义, 文安邦. 中国土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  法研究进展. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 61-64.
- [45] Ritchie J C, Spraberry J A, McHenry J R. Estimating soil erosion from the redistribution of  $^{137}\text{Cs}$ [J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1974, 38(1): 137~139.
- [46] Simpson H J, Olsen C R., Triver R M, Williams S C. Man made radionuclides and sedimentation in the Hudson river estuary. *Science*, 1976, 194: 1979~1982.
- [47] McCallan M E, et al. Redistribution of  $^{137}\text{Cs}$  by erosion and deposition on an Australia soim[J]. *Australia J Soil Re*, 1980, 187.
- [48] Browo KB, Cutshall N H, Kling G F. Agricultural erosion indicated by  $^{137}\text{Cs}$ [J]. *Sci Soc Amc*, 1981, 45: 1184~1190.
- [49] Lowrance R, McIntyre S. and Lance C. Erosion and deposition in a field forest system estimated using  $^{137}\text{Cs}$  activity [J]. *Soil and Water Conservation*, 1988, 2: 195~198.
- [50] Wallbrink P J, Olley J M, Murry A S. Measuring soil movement using  $^{137}\text{Cs}$  implications of reference site variability. *ISAH*, 1994:, 1~9.
- [51] 张信宝, 李少龙, 王成华等. 黄土高原小流域泥沙来源的  $^{137}\text{Cs}$  法研究[J]. *科学通报*, 1989, 3: 210~213.
- [52] 汪阳春, 张信宝, 李少龙等. 黄土崩坡侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  法研究[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(3): 34~37.
- [53] 刘志, Basher L R, Matthews KU.  $^{137}\text{Cs}$  法评价不同土地经营管理条件下的土壤面蚀 [J]. *环境与生态论丛*, 1993: 196~203.
- [54] Sumner A E. *Handbook of soil science*[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1999, 134-137.

- [55] 赵焯, 岳建华, 徐翠华等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用 [J]. 环境科学, 2005, 25(4): 562-565.

## 第六章 裸土风蚀尘采样仪器研究开发

土壤风蚀是我国干旱和半干旱及部分湿润地区土地退化或沙漠化的主要过程之一,其发生区域广,分布已经占国土的 1/2 以上,严重影响这些地区的资源的可持续发展和社会经济的稳定<sup>[1]</sup>。在环京津沙尘暴的讨论中,专家指出京津地区的沙尘主要来源于周边的农牧交错区、农耕区、退化草场、沙地以及河谷区<sup>[2]</sup>。中国农业大学高焕文教授研究表明,北京沙尘暴 70% 的沙尘来自北京外围冬季裸露的休闲的农田<sup>[3]</sup>。裸土风蚀尘对环境空气质量影响的研究,在国内外开展的还不多。目前国内外用于风蚀尘颗粒物采样仪器还不能满足研究的需要,为了有效研究土壤风蚀发生的规律、治理风蚀、研究裸土风蚀开放源对环境空气质量的影响,准确认识和掌握风蚀运动性质,需要对样品进行采集和分析,因此采样器的开发和研究具有重要的意义。本文将针对土壤风蚀颗粒采样仪器的发展历程讨论,并自行研发了采样设备。

### 6.1 风蚀实验仪器应用进展

#### 1) 集沙仪

集沙仪是用于测定风沙流中输沙量和风沙流结构的仪器,是一直用来研究土壤风蚀以及沙丘移动等风沙运动的规律,在野外和室内风洞观测风沙流结构特征时必不可少的仪器。通过集沙仪可以测定不同高度的输沙率,输沙率是单位时间内通过单位宽度的输沙量,是控制风成地貌形成与演变和形成风沙危害的基本要素。Bagnold 设计的垂直长口形集沙仪是最早的风沙野外观测仪器,但这种集沙仪不能随风向的变化而旋转。1976 年 May 设计出旋转杆采集器<sup>[7,8]</sup>,可以采集粗的颗粒,但该采集器对于不同粒径颗粒的采集率不同,50  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  粒径的颗粒采集率分别为 97%、90%、83% 和 60%。这种采集器的缺点是需要 12V 的直流电旋转 U 型杆,对不大的风蚀面积采集过低,风速超过 10m/s 时采集效率下降。Chepil 和 Merva Peterson 对已改进的采集器做了进一步改进,研制成可旋转的采集器,克服了上述不足,但其在较易风蚀土壤上,旋转边很难保持在合适的与地表平齐的位置。Cooke Mvac 和 Wilson 研制的采集

器能够保证进风管时时正对风蚀风向，单点采集不同高度的沙样，但该设备进沙口面积较小，采集到的沙样少，不能满足风蚀的研究需要。Fryrear 研制了一种不接触地面，可精确地收集侵蚀物质的通风集沙仪采集器，该仪器制作简单，操作方便，进沙口能时刻指向侵蚀风向；能够单点采集不同高度的沙样。Su Stra Fryrear 和 Janssen Tetzlaff 根据采集器原理研制了采集器，但其相对采集器结构较复杂，只能采集到一个高度的风蚀土壤，采集率较低且随风速变化较大。国内目前普遍采用的是利用惯性原理取样的阶梯式、平口式以及遥测式集沙仪，但集沙仪的进沙口指向固定，不适于野外风蚀的长期观测，而且在集沙效益方面也没有详细的研究报导。

1986 年 Fryrear 研制了比较粗糙的单点的由周围空气驱动的采集器，也就是现在国外普遍采用的用于田间风蚀试验研究的 BSNE 采集器<sup>[9,10]</sup>。示意图见图 6.1。该采集器制作简单、操作方便、价格便宜，进沙口能始终指向侵蚀风向，能够在同一位置采集不同高度的沙样，不需要频繁的维护，可以在田间进行长期观测，减少了工作量以及恶劣环境对试验人员身体的伤害，因此被广泛采用。

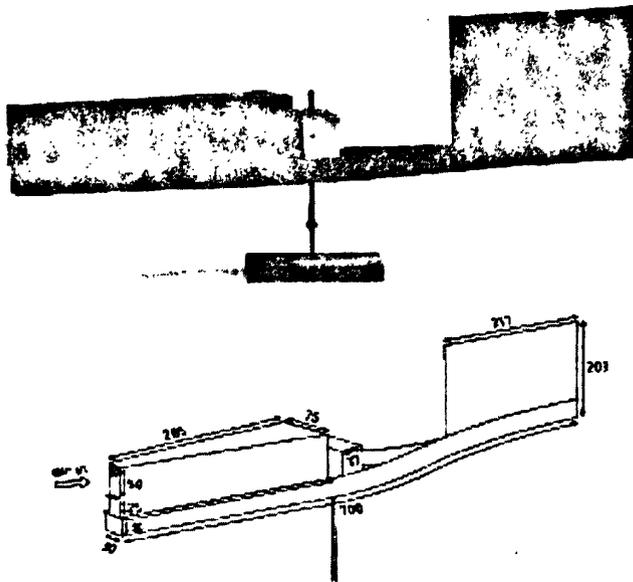


图 6.1 Bsne 采集器示意图

美国和澳大利亚风蚀研究中常用到的风洞集沙仪为狭缝采样仪，这种集沙仪为变截面设计，进沙口十分狭窄，该集沙仪由集沙盒和采集盒两部分组成，在集沙盒的侧面设计通风屏，进行风蚀采样时，采沙盒的截面沿风向由小变大，

风沙流由进沙口进入到集沙仪里面，进入风沙流集沙仪里面后风速降低，风沙流中携带的土壤颗粒随风速的降低而沉降在集沙盒内，集沙盒和采沙盒设计时为两个独立的部分，集沙盒采样后可以独立的取下<sup>[11,12]</sup>，狭缝采样仪示意图见图 6.2。

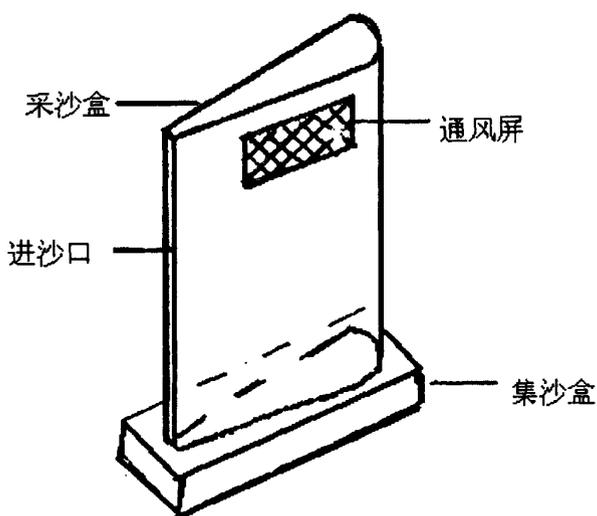


图 6.2 狭缝采样仪示意图

综上所述，以上各种集沙仪的设计主要是采集土壤风蚀直径较大的颗粒，而将集沙仪用于直径较小的土壤颗粒采样就会产生较大的影响，比如 1995 年美国开展了一项研究“哥伦比亚高原风蚀空气质量计划”，研究内容针对农田土风蚀产生的  $PM_{10}$ ，而统计结果表明，集沙仪通风使用的最细金属网围 400 目筛孔直径为 0.038mm，使用这样的集沙仪对采集  $PM_{10}$  有很大影响，测得的  $PM_{10}$  值要比实际低<sup>[18]</sup>。

## 2) 风洞装置

风洞是指在一个按一定要求设计的管道系统内，使用动力装置驱动一股可控制的气流，根据运动的相似性原理进行各种气动力实验的设备。风洞是进行空气等动力性实验的一项基本设备，迄今为止的大部分空气等动力学实验都是在风洞内完成的。

世界上公认的第一个风洞是英国人温罕姆 (F.Wenham) 于 1871 年建造的低速风洞，但风洞的真正发展是在本世纪初飞机问世以后，风洞也主要应用在航空航天领域。随着工业技术的发展，从六十年代开始，风洞实验逐渐应用于非航空航天的工业部门，包括机械、农业、林业、建筑、桥梁、车辆、船舶、

生物、气象、能源、环境保护、电力和体育等领域。例如沙风洞是农业、林业和环境保护方面应用的风洞，用来研究风沙流结构和风沙流中土壤颗粒的运动。风沙流指含有沙粒的运动气流，风沙流是一种沙粒的群体运动，是风沙活动的主要环节。随着我国对环境问题越来越重视，有很多新的研究内容需要用风洞实验来解决。目前国内外用于做风蚀模拟实验的风洞主要有两种类型：第一种是室内风洞，第二种是移动式风蚀风洞，中国农业大学和内蒙古农业大学都制造了不同尺度的移动式风洞。当用室内风洞作试验时，从野外采集的土壤样品放到风洞内，在风洞内模拟自然界的各种风力进行试验研究，与农田直接测量方法相比较，试验不受气候条件的约束，可以在短时间内获得较多的风蚀数据，试验效率比较高。但是从野外采集土样存在以下几个方面的问题：

(1) 采样过程会造成农田地表的改变，从而实验的数据要受到影响，不能够真实的反应农田的真实情况。

(2) 采样后土样运输的时间间隔、湿度、温度、震动会造成对真实土壤样品的改变，特别是土壤颗粒、湿度、抗风力影响较大。

(3) 无法在风洞内模拟自然气候条件比如周围土壤植被覆盖、温度、光照和空气湿度等。

(4) 测量的风蚀颗粒物的浓度不能够真实反映出对周边环境空气质量的影响。

以上方面的问题都会影响风蚀模拟试验结果的真实性，因此室内风洞的试验结果需要与农田直接测量的风蚀数据作对比修正，然后才能够应用。

移动式风蚀风洞又称野外风蚀风洞，即将风洞运至野外放在真实的农田地表面上进行风蚀实验，试验时风洞需要经常在不同地块之间转移，因此称作移动式风蚀风洞，国外习惯称便携式风洞 (Portable Wind Tunnel)<sup>[4]</sup>，国内习惯称野外风蚀风洞<sup>[5,6]</sup>。使用移动式风蚀风洞可以模拟各种自然风力，因此室内风洞的各项风蚀实验都可以在移动式风蚀风洞内进行，同时试验地表完全真实，因此移动式风蚀风洞的实验结果比室内风洞更真实。在国外风蚀研究中，移动式风蚀风洞应用很广泛，美国 Zingg(1956 年)的风洞应用于对风蚀方程的扩展，美国 Armbrust 和 Box(1967 年)的风洞应用于作物对土壤颗粒剥蚀阻力的研究，美国 Gillette(1978 年)的风洞应用于确定沙漠土的临界摩阻风速，美国 Fryrear (1984 年)的风洞应用于评估地垄、泥块和地表覆盖对土壤风蚀的减少。前苏联于 1959 年在哈萨克国家农业机械化和电气化科学研究所建造一个可移动式

风蚀风洞, 主要用于土壤风蚀随风速变化情况的研究; 其特点是采用旋风分离器吸气的办法收集土尘, 土壤尘粒可在不同高度上收集, 以研究风沙流的结构。

Ambrust 和 Box 等人于 1967 年在美国农业部设在 Texas 州 BigSpring 风蚀试验站建造了又一座改进型的可移动式风蚀风洞, 专用于研究地表植物对土壤颗粒的风蚀抵抗作用。此风洞的特点是能旋折 90 度的角度, 起吊、移动靠机械式卷扬机来完成。Gillette 于 1978 年在美国国家大气研究中心建造了另一座可移动式风蚀风洞, 用于测定卵石沙漠土壤和农田土壤风蚀时的起动速度。澳大利亚从上世纪 70~90 年代 20 多年间建造了两座可移动式风蚀风洞, 这两座风蚀风洞均是在 Ambrust 和 Box 的风洞基础上改进的。一座建在西澳大利亚农业部, 另一个在 New South Whales 洲水土保持服务中心。Raupach(1990) 等人利用 New South Whales 土壤保持服务站的可移动式风洞对矩形截面工作段和梯形截面工作段的空气动力学性能进行了对比研究, 得出了矩形截面形状工作段的气流品质优于梯形截面形状的结论。加拿大 Nickling 等人于 1993 年在 Guelph 大学建造一座可移动式野外风蚀风洞, 此后在北美和非洲等地进行了大量的风蚀试验研究。此风洞利用装有大容量真空泵的等动压探头式楔形集沙仪测定悬浮土粒的浓度分布。Pietersma 等人于 1995 年在美国农业部农业研究服务中心 (USDA/ARS) 设计研制了新一代风蚀风洞用于中西部平原的风蚀研究。此风洞工作段的尺寸为 1.0m 宽、1.2m 高和 7.3m 长, 由三段组成, 每段长 2.4m; 配有 1.4m 的轴流风机, 其动力由 33kW 发动机提供。该风洞采用了卡车拖车装运系统, 工作段的现场拆装和移动由升降机来完成, 具有很好的便携特性; 采用了有级调速系统, 风速在 2~13/s 的范围内有 13 个可调节的风速, 此风洞的突出特点是采用了剪切网格来人工增厚大气边界层, 并形成对数风速廓线, 是目前研究报告中报道的性能优越和功能较为齐全的可移动式风蚀风洞。

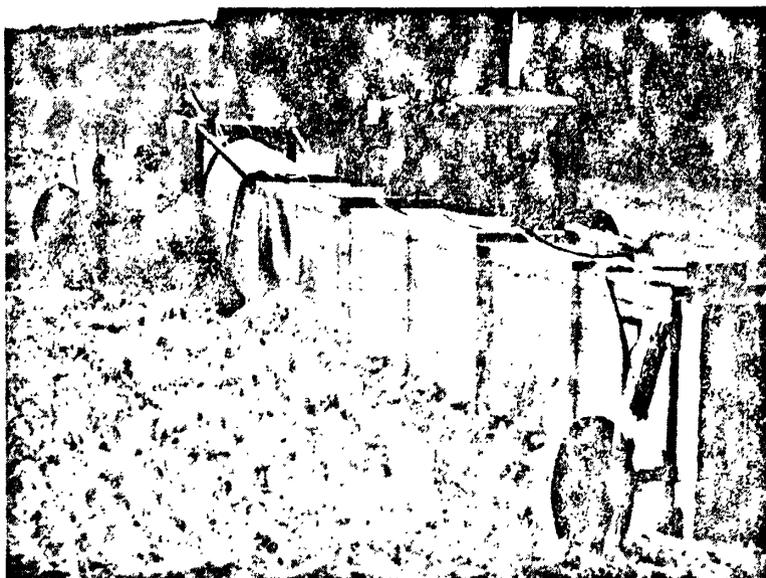


图 6.3 澳大利亚风洞 (Raupach and Leys 设计)

现在一些风蚀控制和研究较为先进的国家,如美国、澳大利亚和加拿大等国风蚀风洞,尤其是野外可移动式风蚀风洞正被广泛地应用于风蚀研究。我国的土壤风蚀研究起步较晚,60年代初才开始对沙漠地区新垦荒地的土壤风蚀问题作过一些野外观测研究,直到1968年,我国在科学院兰州寒区旱区研究所建成了第一个长16m,截面为60×90cm,洞身为木制结构的室内风沙环境风洞,这标志着我国的风蚀研究全面系统地展开。80年代后期中国科学院兰州沙漠研究所利用此风沙环境风洞对影响土壤风蚀诸自然因素:风况含沙风和风速大小)、土壤表面的覆盖状况(植被)、地表物质组成和人为因素、开垦(土地翻耕)和放牧(牲畜践踏)等,进行了初步系统的模拟实验,得出了如下的初步结论:

- (1) 挟沙风比纯气流的风蚀量大4-5倍;
- (2) 土壤风蚀量与起动风速值近似成3次方关系。

30多年来在不同地形、地段、土质和植被等风蚀问题的研究中该风洞发挥了重要的作用。原内蒙古林学院也曾于上世纪70年代从日本进口过一个可移动式风蚀风洞,用于内蒙古准格尔煤田一期工程对风蚀沙漠化环境影响的研究。现已不复存在,此风洞是我国用于风蚀研究的第一座野外可移动式风洞。2003年中国农业大学设计制造了一座可移动式风蚀风洞,由铁牛-654拖拉机装运并由其动力输出轴通过三挡变速箱驱动风机,风洞总长11m,实验段长6.2m,截面为高1.0m,宽0.8m。

为了进一步开展土壤风蚀和土地沙漠化物理过程的研究,我国于1989年自行设计和建造了亚洲最大的室内土壤风蚀风洞。在位于北京大兴县的北京风沙化土地整治实验站安装调试后,于1991年运往宁夏沙坡头工作。为使该风洞能应用于象沙丘运动和防护林建设等宏观模型方面的研究,2003年中科院寒旱所又投巨资对此风洞进行了改扩建。首先扩大了原有风洞的规模,扩建后洞长40m,实验段长21m,截面积为 $1.2 \times 1.2\text{m}^2$ ,实验室总面积由原来的 $180\text{m}^2$ 增加到 $505\text{m}^2$ ;其次采用了先进的实验手段,动力系统和控制系统由原来的手动控制改为计算机控制;在此基础上增加了模型制作间、样品处理间、地下工作间、工控间和数据处理间等,成为亚洲最大的室内风蚀风洞。尽管我国近年来在风蚀研究手段上有了长足的进步。但对于可移动式野外风蚀风洞的研究和应用,我国尚处于起步阶段<sup>[19-28]</sup>。

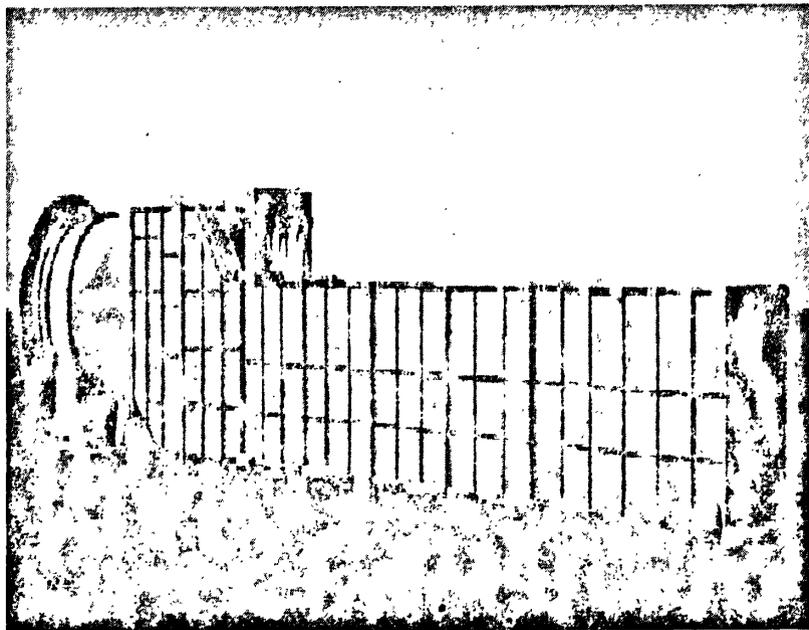


图 6.4 内蒙古农业大学可移动式风洞

综上所述,随着风蚀研究向定量模型化方向的快速发展,风洞的应用越来越体现出它在风蚀研究中的重要性和经济价值。由于能在野外实际地表上进行风蚀测试,其测试数据更趋近实际状况,加上方便快捷的野外可移动特性,风洞将成为农田地表抗风蚀能力和保护性耕作措施评估评价研究的重要工具,也可为大气环境研究服务。

## 6.2 风蚀颗粒物采样仪器的开发研制

### 6.3.1 风蚀颗粒采集瓶

风蚀颗粒采集瓶主要由作为沉降室的塑料瓶、进风管和出风管组成，主要是在 1980 年 Wilson 和 Cooke 研制的 MWAC 采集器改装而成如图 6.8 所示。

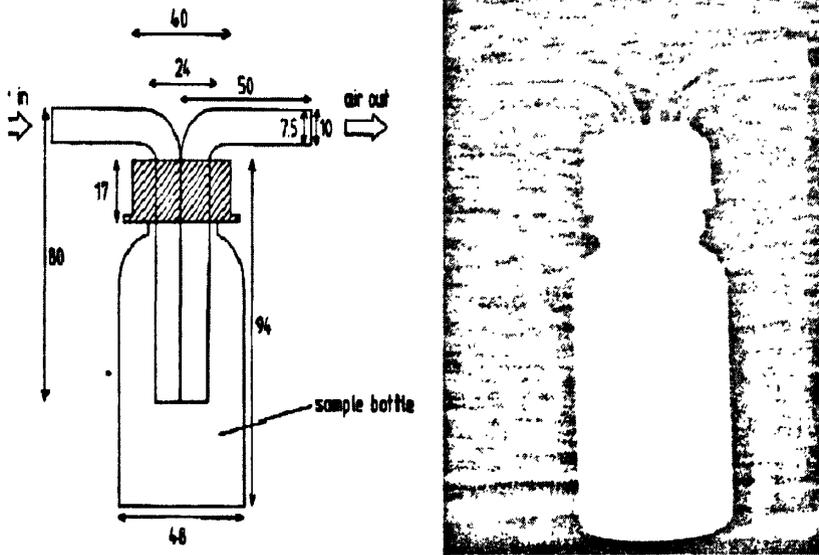


图 6.8 MWAC 采集器示意图

安装时塑料瓶水平固定在支柱上，并使进风管指向风向。其工作原理是，由于瓶子与进风管和出风管的直径不同，使得进入瓶中的沉淀物由于压力下降而沉降下来，然后洁净的空气通过出风管排出瓶外。通过翼板来调整其进风管方向，使其始终指向风向。该集沙仪的优点是能够保证进风管始终正对侵蚀风向，能够在同一位置采集不同高度的沙样，但是该设备进沙口面积较小，采集到的沙样少。为了研究风蚀颗粒扩散高度问题，自行开发了采集瓶，因此要采集不同高度的粒径，需要在固定杆上分不通距离放置采瓶，以阵列式放置，以便采集不同高度的不同粒径的风蚀颗粒，风蚀颗粒采集瓶示意图见图 6.9。

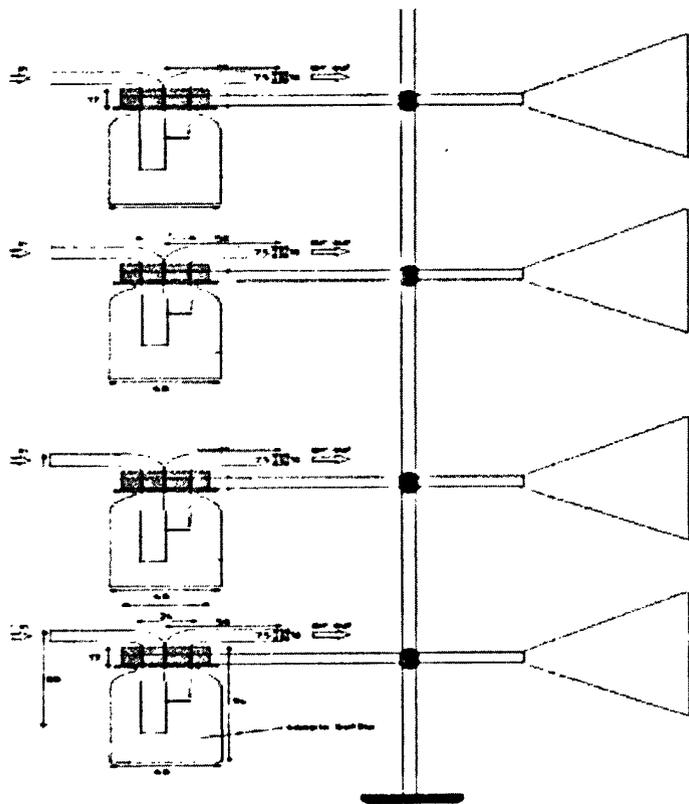


图 6.9 带有风翼的采集瓶示意图

### 6.3.2 全自动降尘采集器

#### 6.3.2.1 全自动降尘采集器设计原理

根据裸土风蚀开放源研究的需要,自行设计开发了 4 种全自动多功能采样仪器,采集大气中的降尘。大气中的颗粒物,一部分沉降附近,另一部分随风飘逸到很远的地方。城市中的降尘包含两部分,一部分为自然降尘(干沉降),另一部分为雨水冲刷下来的尘(湿沉降),同时对于这两种降尘的连续采样或分段取样的研究,报道较少。为了采集风蚀开放源降尘颗粒和传输到城市的颗粒,开发了收集罐自动升降多功能干湿沉降采样器。其特征在于控制部分包括雨水感应器、雨水感探头、时间控制器、机械传动装置。自动升降部分包括正反转电机、支架、托盘。在无雨时,控制器接通电源,上盖向左运动盖住箱体,停止后箱体中的干沉降收集罐自动升高,上口高出箱体 2cm 后自动停止;雨水感

探头在下雨时,发出信号传递给雨水感应控制器接通控制电路,上盖向右运动盖住箱体,箱体中的湿沉降收集罐自动升高,上口高出箱体 2cm 后自动停止。关闭雨水控制器,时间控制器开始工作,可以根据需求设定 10 组时间段控制箱体的开关,进行不同时间段的样品的采集。采样器包括以下几部分:降尘收集罐、雨水感应控制器、自动升降装置、可左右移动上盖等,多功能全自动干湿沉降采样器结构见图 6.10,实物见图 6.11。收集罐自动升降多功能干湿沉降采样器应满足以下条件:

(1) 采样器的外观设计合理,下雨时落在防尘盖或仪器其它部位上的雨滴不会溅入接收集罐内。

(2) 雨水传感器最低能感应到的降雨强度为 0.05mm/h 或不小于 0.5mm 直径的雨滴,相应时间为 5 秒钟,雨水感应探头断电电阻为 50k $\Omega$ ,通电电阻为 1M $\Omega$ 。

(3) 传感器应该有加热装置以防止雾、露水启动采样器,并融化雪和蒸发残留的湿沉降。

(4) 雨水传感器的高度与收集罐的高度一致;为防止鸟落在传感器表面引起误动作,其上面应竖一针状金属物。

(5) 自动左右移动上盖必须在降雨始 5 秒内打开,在降雨结束后 5 分内关闭。

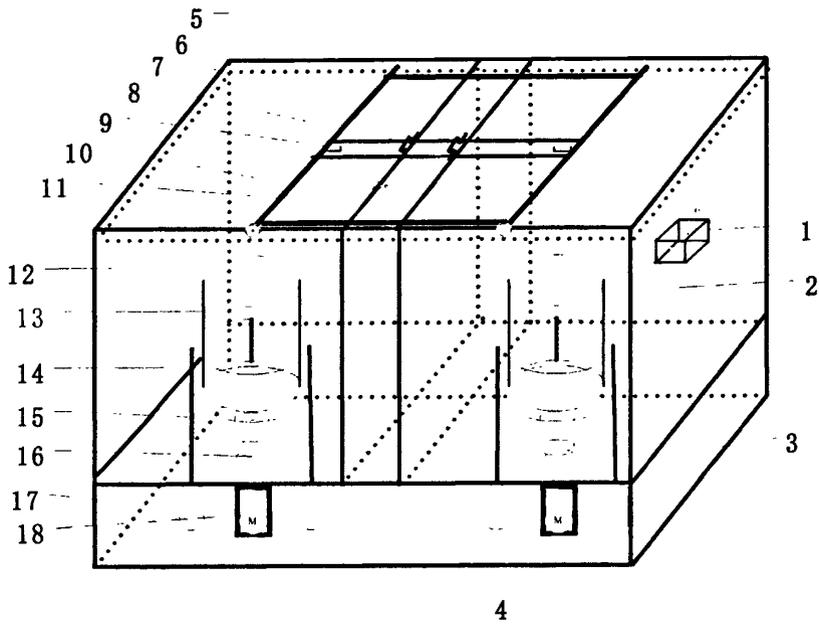
(6) 收集罐可由搪瓷罐或玻璃罐、塑料罐、不锈钢、聚乙烯、有聚四氟乙烯涂层的金属罐等材料制成。

(7) 收集罐的口径应不小于 15cm(直径),高度为 30cm。

(8) 采样器对电源的适应性强,在 180V~250V 电压范围内能正常工作,也可以用 24v 蓄电池作为电源供电。

(9) 采样器能在当地极端气候条件下正常工作;采样器正常工作时,不会有漏电、短路等现象。

(10) 采样器的机械运转灵活,其内部的电机、传动机构、防尘盖等部件,必须材质好、精度高、配合紧密。



(1)控制器包括雨水感应控制器、时间控制器和电路控制器、(2)、(3)、(4)、(12)箱体、(5)滑到、(6)尼龙滑轮、(7)上盖、(8)行程开关、(9)触片、(10)钢丝绳、(11)带有转轮的正反转电机、(13)收集罐、(14)托盘、(15)支杆、(16)转动支杆、(17)固定支杆座、(18)正反转电机

图 6.10 多功能全自动干湿沉降采样器示意图

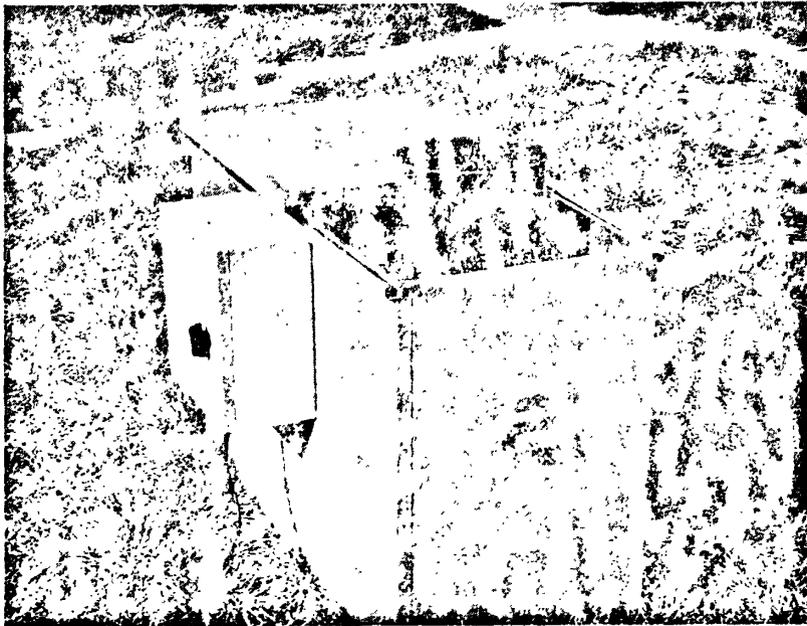
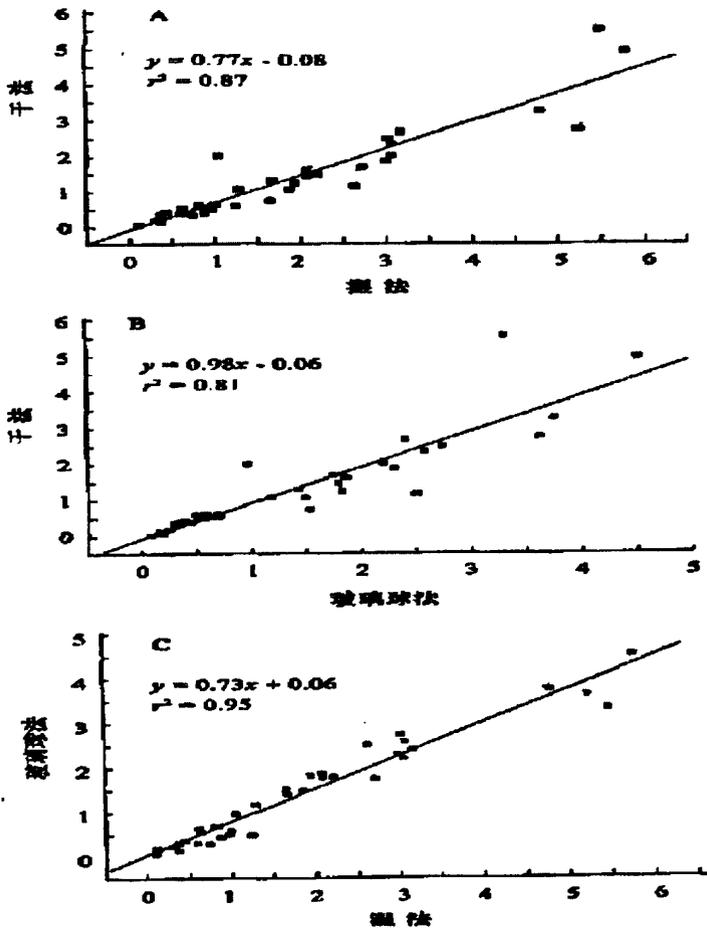


图 6.11 多功能全自动干湿沉降采样器实物图

## 6.3.2.2 全自动降尘采集器收集罐集尘效率研究

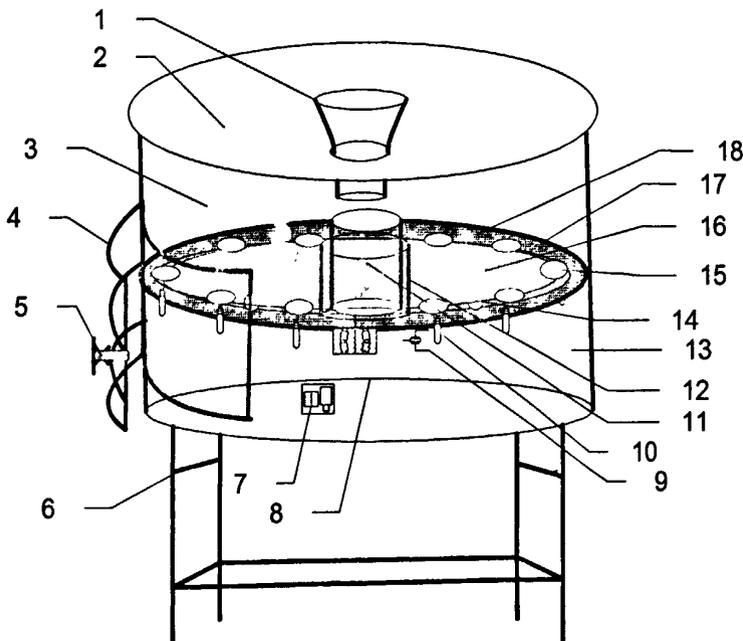
大气降尘的收集一般是模拟自然状况下的沉降过程，基于这种认识现在所采用的降尘收集装置主要有干法收集、湿法收集和玻璃球法收集 3 种，这 3 种收集装置原理基本相同，仅是根据收集容器内所加入的介质的不同而加以区分，并因此而具有不同的收集效率。收集容器一般有圆柱形玻璃缸、塑料桶、塑料箱等，规格也不尽一致。根据我国国家标准，降尘收集装置的容器为直径 150mm、高度 300mm 的圆柱形平底玻璃容器。ISO 标准沉积采样装置为向上开口的聚乙烯圆柱形容器，直径 200mm，高度 400mm，其上口边缘与容器壁成  $45^\circ$  角。这些降尘收集装置一般适宜于采样间隔在 1 个月或更长时间的降尘收集。王赞红<sup>[29]</sup>实测结果计算，干法收集的降尘量为湿法的 73%，为玻璃球法的 95%；玻璃球法收集的降尘量为湿法的 77%，三种收集方法之间的线性方程见图 6.12。

图 6.12 3 种采集方法效率图<sup>[29]</sup>

基于以上的研究,本实验装置采用的收集罐为直径 150mm、高度 300mm 的聚乙烯圆柱形容器和 ISO 标准的直径 200mm,高度 400mm,其上口边缘与容器壁成 45° 角的聚乙烯圆柱形容器,固定这两个圆柱形容器的位置上安装可调直径的旋钮,采样采用湿法取样。

### 6.3.2.3 分时段全自动干湿降尘采集器

环境空气中的降尘,由于受到风速、降雨的影响,在不同的时间内沉降的速度(质量)有所不同,特别是降雨中的降尘在降雨开始和之后明显不同。为了研究不同时间段的大气干沉降和湿沉降,开发研制了分时段收集罐自动旋转采样器,本采样器是一种收集罐自动旋转多功能干湿沉降采样器,基本功能是可以自动采集大气中由于土壤风蚀起尘而传输到环境空气中的颗粒,也能够自动采集降雨中雨水冲洗下来的空气中的颗粒或用于酸雨研究采集雨水样品。样品采集连续进行,分别采集到不同的收集杯中。采样器包括以下几部分:12 个降尘收集杯、雨水感应控制器、自动旋转升降装置等,如图 6.13 所示。



(1)收集口、(2)上盖、(3)箱体、(4)门、(5)把手、(6)支架、(7)雨水时间控制器、(8)正反转电机、(9)光偶感应器、(10)钢片、(11)第 12 号收集杯、(12)圆柱形缸、(13)仪器控制室、(14)尼龙滑轮、(15)收集杯底座、(16)旋转托盘、(17)旋转托盘支座、(18)旋转托盘滑道

图 6.13 分时段全自动干湿沉降采样器示意图

收集罐自动旋转分时段多功能干湿沉降采样器应满足以下条件:

(1) 采样器的外观设计合理,下雨时落在防尘盖或仪器其它部位上的雨滴不会溅入接收杯内。

(2) 雨水传感器最低能感应到的降雨强度为 0.05mm/h 或不小于 0.5mm 直径的雨滴,相应时间为 5 秒钟,雨水感应探头断电电阻为 50k $\Omega$ ,通电电阻为 1M $\Omega$ 。

(3) 雨水传感器的高度与收集口的高度一致;为防止鸟落在传感器表面引起误动作,其上面应竖一针状金属物。

(4) 自动旋转装置必须在降雨始 5 秒 min 内打开,在降雨结束后 5 分内关闭,每个收集杯旋转的时间根据用户的需要设定。

(5) 收集杯为直径 10cm 的玻璃材料制成,化学实验的烧杯也可用作本采样器的收集杯。

(6) 收集口径应不大于 10cm(直径),高度为 10 cm。

(7) 采样器对电源的适应性强,在 180V~250V 电压范围内能正常工作,也可以用 24v 蓄电池作为供电电源。

(8) 采样器能在当地极端气候条件下正常工作;采样器正常工作时,不会有漏电、短路等现象。

(9) 采样器的机械运转灵活,其内部的电机、传动机构、防尘盖等部件,必须材质好、精度高、配合紧密。

本采样器的集尘效率、性能等方面的研究还在进行。希望通过一段时间的实验研究,能够进一步完善性能。

## 6.4 本章总结

(1) 讨论了国内外风蚀研究中所用到的采样仪器,风洞是风蚀研究中最重要实验装置,风蚀颗粒的起动风速、风蚀量等都可以用该装置测定。

(2) 设计了两种采样仪器:收集罐自动升降多功能干湿沉降采样器,收集罐自动旋转分时段多功能干湿沉降采样器,可以用这两种仪器进行降尘样品的采集,这两个采样装置的开发,为连续采集干沉降和湿沉降样品提供了技术支撑,为进一步研究干沉降和湿沉降在城市降尘贡献问题提供了一种全新的采样方法。

(3)可以自己开发的设备采集干沉降和湿沉降中的 $^{137}\text{Cs}$ ,为后期应用 $^{137}\text{Cs}$ 建立风蚀模型提供支撑。

(4)开发研制的仪器性能方面还需继续提高。

### 本章参考文献

- [1] 路明. 防治沙尘暴和治理沙漠化土地的原理和方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2004.
- [2] 京津地区风沙主要起源于周边的农牧交错区、农耕区、退化草场、沙地以及河谷区, 北京日报, 2003年1月10日第一版.
- [3] 农业部农机化司农业部保护性精细耕作研究中心. 环北京地区沙尘暴的成因及对策研究.
- [4] D.Pietersma, L.D. Saxton. Design and aerodynamics of a portable wind tunnel erosion and fugitive dust research. Transactions of ASAE, 1996, 39(6): 2075.
- [5] 朱朝阳, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学. 京: 中国林业出版社, 1992.
- [6] 吴正等. 风沙地貌与治沙工程学, 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 臧英. 保护性耕作防治土壤风蚀的试验研究; (D) [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [8] Dirk Goossens, Zvi Y. Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps. Offer, Gary London. Geomorphology. 35 (2000)233-252.
- [9] Larry D. Stetler, Lance B. Horning, Keith E. Saxton. An Isokinetic Soil Sampler for Wind Tunnel USE. ASAE Annual International Meeting, 1997.
- [10] Goossens, Zvi Y. Offer. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers. Atmospheric Environment. 34 (2000), 1043-1057.
- [11] 倪晋仁, 李振山等. 垂直点阵集沙仪的集沙效率. (J) 泥沙研究 2003, 1: 24~31.
- [12] 胡杨编译. 集沙仪的性能实验. (J) 世界沙漠研究, 1994, 1: 42~46
- [13] 冬梅, 可移动式风蚀风洞集沙仪及排沙器的性能试验研究, (硕士学位论文), 授予单位所在地: 内蒙古农业大学, 2005.
- [14] 荣娇凤等. 蚀集沙仪的等动力性试验研究 (J). 国土水土保持, 2004, 5: 17~18.
- [15] 李振山. 洞中挟沙气流水平集沙实验研究 (J). 泥沙流研究, 2001, 4: 19~23.
- [16] Zobeck T M Fryrear DW. Chemical and physical characteristics of wind blown sediment chemical characteristics and total soil and nutrient discharge (J). Transaction of the ASAE. 1986, 29 (4) 1037-1041.
- [17] Fryrear D W. A field dust sampler J Journal of soil and water conservation. 1986, 41: 117-120.
- [18] Keith Saxton, Larry Stetler, David Chandler. Simultaneous wind erosion and  $\text{PM}_{10}$  fluxes.
- [19] W. S. Chepil. Dynamics of wind erosion: 1. Nature of movement of soil by wind, Soil Science, 1945, 60: 305-320.
- [20] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学, 科学出版社, 1995. 1-3.
- [21] D. Pietersma, L.D. Stetler, K E Saxton. Design and aerodynamics of a portable wind tunnel

- for Soil erosion and fugitive dust research, Transactions of The ASAE, 1996, 39(6): 2075-2083.
- [22] Raupach M R., J F Leys. Aerodynamics of a portable wind erosion tunnel for measuring soil erodibility by wind, Australian Journal of Soil Research. 1990, 28: 177~191.
- [23] Gillette D. Tests with a portable wind tunnel for determining wind erosion threshold velocities, Atmosphere Environment, 1978, 12: 2309-2313.
- [24] Leys J F, Raupach M R. Soil flux measurements using a portable wind erosion tunnel, Australian Journal of Soil Research, 1991, 29: 533-552.
- [25] Nickling W G, Gillies J A. Dust emission and transport in Mali, West Africa. Sedimentology, 1993, 40: 859—868.
- [26] 朱俊凤, 朱震达. 中国沙漠化防治, 北京: 中国林业出版社, 1999. 85-86.
- [27] 贺大良, 凌裕泉. 风沙现象研究的重要设备—沙风洞, 中国沙漠, 1981, 1(1): 49-51.
- [28] 董光荣, 李长治, 金炯等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果, 科学通报, 1987, 4: 297-301.
- [29] 王赞红. 大气降尘监测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 1(1): 54-59.

## 第七章 裸土风蚀开放源起尘对城市 PM<sub>10</sub> 影响研究

### 7.1 国内外土壤风蚀规模和程度

对风蚀过程的规模和程度进行定量估算一直是研究风蚀的重点，为此人们展开了基于现场观测、经验数学模型以及计算机数值过程模拟等方面的研究<sup>[1]</sup>，目前小尺度的基于现场观测的风蚀定量研究结果较为可靠，对于大尺度、大区域研究，由于缺乏有效的监测统计技术，或者是技术和标准上的不统一，或者是缺乏实测资料的验证，所有的研究基本上都是定性研究或是较粗略的估算。在全球尺度上 ISRIC(国际土壤咨询与信息中心)认为全球大约有  $2.2 \times 10^9 \text{ km}^2$  的土地遭受着风力侵蚀，全球风蚀情况及降尘来源地区分布见图 7.1。

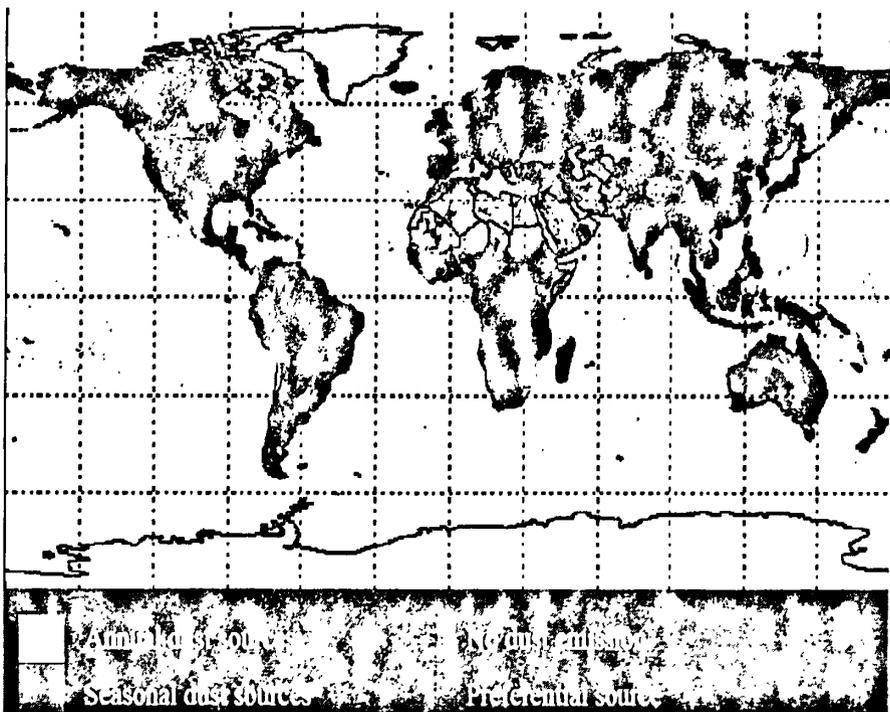


图 7.1 全球风蚀情况及降尘来源地区分布图

在中国 ISRIC 于 1993 年进行了南亚与东南亚地区土壤退化状况评估 (ASSOD) 研究，国家水利部也进行了多次全国范围的土壤侵蚀遥感调查。其中于上个世

纪 90 年代进行的第二次土壤侵蚀遥感调查表明，我国土壤风力侵蚀面积大约为  $7.7 \times 10^8 \text{ km}^2$ <sup>[2]</sup>，从轻度侵蚀到剧烈侵蚀见表 7.1 和图 7.2

表 7.1 中国土壤风蚀状况 (单位:  $10^7 \text{ km}^2$ )

微弱	轻度	中度	强度	极强	剧烈	合计	数据来源
1.8	75.1	14.5	58.15	0.05		149.55	ASSOD
	78.82	25.12	24.8	27.01	34.92	190.67	二次土壤侵蚀遥感调查

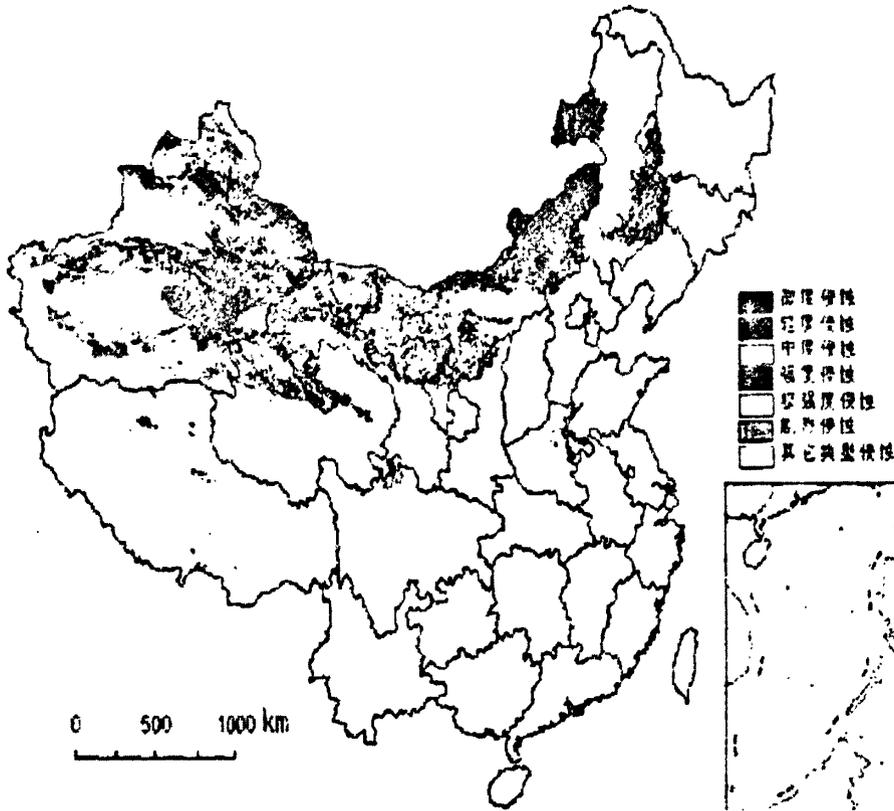


图 7.2 土壤风蚀遥感调查结果 (引自中国资源环境数据库, 1990)

## 7.2 土壤风蚀对环境的影响

中国环境状况公报表明我国城市大气颗粒物污染非常严重，城市空气质量形势相当严峻，影响空气质量的首要污染物是颗粒物。城市空气颗粒物来源复杂，多个城市的大气源解析结果表明开放源已成为城市环境空气中颗粒物的最主要贡献者，土壤风蚀尘对于城市颗粒物贡献量显著，是构成颗粒物复合污染的重要源类。在中国北方城市，开放源的分担率已达 40%~80%，裸土风蚀尘是

开放源之一<sup>[3-5]</sup>。天津市2002年大气颗粒物来源解析结果表明,土壤风蚀尘的负担率全年平均达到27%居各排放源之首。国外土壤风蚀研究表明由裸土风蚀而注入大气的风蚀尘已经成为空气颗粒物的主要组分之一<sup>[6-8]</sup>。

土壤风蚀对区域和全球生态系统有着重要的影响<sup>[9-11]</sup>。大气中的自然尘主要来自城市及邻近地区,即就地起尘;沙尘天气期间,大气颗粒物主要来源于沙尘源地以及沿途输入的沙尘,因此,可以忽略远距离输送和特殊天气条件下沙尘暴的影响,认为土壤尘主要来源于本地<sup>[12,13]</sup>。

宣捷使用美国环保局(USEPA)的两个公式计算了中国北方地面起尘速率(起尘因子)的分布,计算结果表明,在中国北方起尘因子自东向西逐渐增大,其幅度达5个数量级。塔克拉玛干大沙漠和内蒙古高原西部的大戈壁是两个强排放源地,而其最大值在塔克拉玛干大沙漠的中心,其中PM<sub>50</sub>(直径小于50 μm的颗粒物)的起尘速率为0.018(t/(km<sup>2</sup>·a)),PM<sub>30</sub>(直径小于30 μm的颗粒物)的起尘速率为0.015(t/(km<sup>2</sup>·a))。计算得中国北方地面尘排放总量为:43×10<sup>6</sup>t/a(PM<sub>50</sub>)及25×10<sup>6</sup>t/a(PM<sub>30</sub>)。计算还表明,春季是起尘最严重的季节,起尘量占全年起尘量的一半以上<sup>[14]</sup>。王帅杰计算出石家庄市市区地面起尘量总计28559t/a,计算结果可以看出农田和裸地的起尘量非常大。裸地的单位面积起尘量占总面积的16%,造成其总的起尘量也非常大,年降尘量为6048t/a,占整个市区起尘量的21.2%,而农田由于无作物时,其单位面积起尘量甚至超过裸地,全年平均值也只是稍逊于裸地,且农田面积十分广大,占总面积的53.9%,年降尘量为18896t/a<sup>[15]</sup>。

本章将以天津为研究对象,研究的目标为近郊裸土风蚀对天津市环境空气质量PM<sub>10</sub>浓度的影响,研究的方法为利用天津市2002年源解析CMB模型的结果和大气扩散箱模型估算天津市裸土风蚀年起尘量。用富集因子法研究天津市本地裸土风蚀尘来源和外地尘来源的区别,利用现有的气象、环境监测资料对天津市2002-2005年空气颗粒物污染的季节性变化规律进行了分析。

### 7.3 研究区域环境概况

天津市介于北纬38°34′至40°15′,东经116°43′至118°04′之间,降水量在720-560毫米之间,多年平均由北向南递减,属于半干旱地区,是东亚季风盛行的地区,属大陆性气候,冬、春季风速最大,干旱少雨,夏、秋季

风速小,年平均风速为 2-4m/s,多为西南风,全市多年年平均风速为 2-5m/s 大于或等于 17m/s 的大风天数,除蓟县为 17 天外,多在 31-53 天之间。天然植被为暖温带半干旱生落叶阔叶林,植被稀疏。

土壤母质多为河流沉积物天津主要受季风环流的支配,全市土壤分布从山地、丘陵、平原到滨海,依次为棕壤、褐土、潮土、湿土和盐土五个主要土类,17 个亚类,55 个土属,459 个土种,土壤质地由北向南为砾质-砂质,壤质-粘质,由西向东为砂质分壤质、粘质,这主要是由于成土母质的影响。平原地区受河流泛滥的影响,以及在不同河段泛区分选物沉积厚度、颗粒粒度不同,造成质地组成的差别较大。蓟运河与潮白河所夹持的中间地带,沉积物颗粒较匀、质地多壤质,永定河泛区在武清窦张庄一带,沉积物粘重,但永定河故道在北辰又以砂壤质呈现地表,河流分选与泛区地形使平原潮土土体构型出现千差万别的垂直覆盖构造,不同构型对土壤物理性质影响较大。机械组成与养分含量成正相关、质地愈粗养分含量愈低。质地粘重的土壤占 39.19%,多分布于各条水系的下游与滨海交接地带。

全市土地总面积为 1191970km<sup>2</sup>,共分为耕地、园地、林地、牧草地、工矿及居民点用地、交通用地、水域、未利用地共 8 个一级地类、40 个二级地类。其利用现状结构、布局分述如下:农用地面积 719966.93km<sup>2</sup>,其中:耕地 475468.84km<sup>2</sup>;园地 36817.21km<sup>2</sup>;林地 35943.04km<sup>2</sup>;牧草地 606.59km<sup>2</sup>;其他农用地 171131.21km<sup>2</sup>。全市耕地面积占全市土地总面积的 39.89%,其中有 79.14% 分布于宁河、武清、静海、宝坻和蓟县等五区县,10% 分布于新四区,滨海三区仅占 6.48%。从总体上看耕地相对集中于平原地区,而北部山区和东部滨海三区相对稀疏。在耕地中包括:灌溉水田 68001.87km<sup>2</sup>,有 42.17% 分布于宁河县,此外,东丽区、宝坻区和津南区分布比较多;水浇地 219480.86km<sup>2</sup>,主要分布于武清、蓟县、宝坻、宁河、大港等区县;旱地 162310.06km<sup>2</sup>,主要分布于静海、宝坻、武清等县;菜地 25676.05km<sup>2</sup>,主要分布于近郊的新四区,占 50.57%,宁河、武清、静海、宝坻和蓟县等五区县占 48.31%,天津地区第四季度主要土地风蚀类型情况见卫星遥感结果图 7.3。

天津市 2006 年第四季度风力侵蚀图

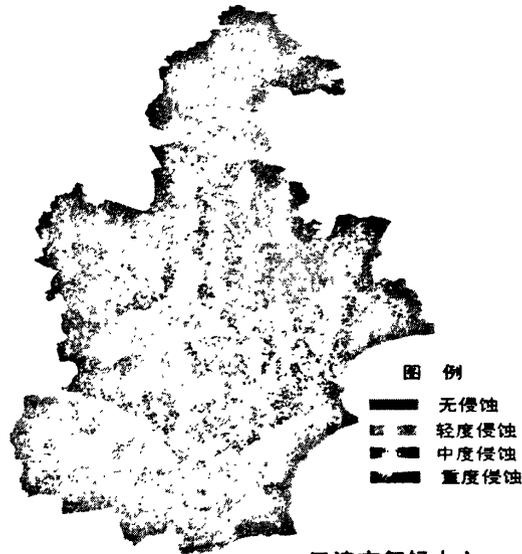


图 7.3 2006 年 12 月 28 日天津地区第四季度主要土地风蚀类型

## 7.4 近郊裸土风蚀与城区 PM<sub>10</sub> 浓度季节变化规律

### 7.4.1 城市颗粒物 PM<sub>10</sub> 浓度变化规律

城市近郊裸土风蚀尘进入城市环境空气中，在空气中通过扩散、传输等过程，直接对环境空气质量和人体健康造成影响。由于排放源源强及气象条件的周期性变化，致使大气污染物环境浓度表现出日变化、季变化及年变化特征。为了定性和定量地评估裸土风蚀对环境质量达标的影响，将天津市近 5 年有关的气象资料与同期污染物浓度进行相关分析，根据研究结果风蚀通常发生在每年的春季、秋季和冬季。根据天津地区几年的空气污染资料与风沙天气的基本特征进行分析，发现风蚀与空气主要颗粒物污染是相关的，由裸土风蚀所引起的扬沙、浮尘天气主要分布在每年的 10 月末~次年 5 月初之间，尤以春天为重，分析原因是该地区春季冰雪融化、土壤冻融交替、土质松软、风大，土壤颗粒极易被风吹起，形成扬沙、浮尘天气。颗粒物漂浮在大气中，导致空气污染出现夏秋季节浓度比较低，冬春季节比较高，从 1996-2002 年天津城区季度降尘变化趋势可以看出（见图 7.4），第二季度是污染高峰期，从以往的研究结

果看我国沙尘暴多发季节也为第二季度。

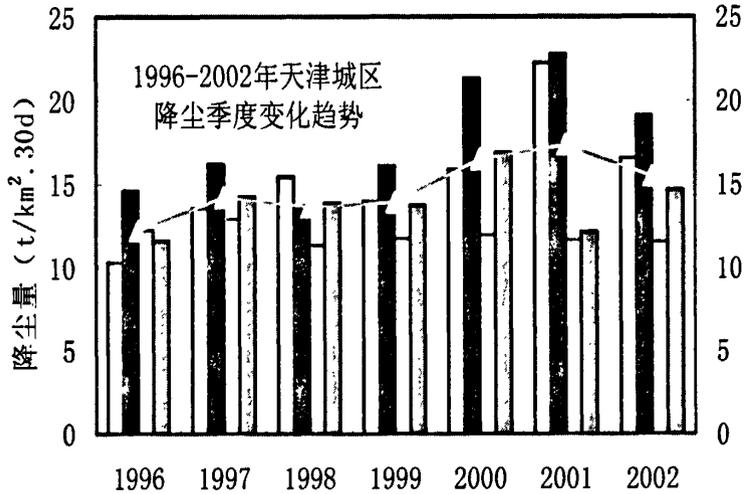


图 7.4 1996-2002 年天津市城区降尘季节变化趋势

从 2002~2004 年天津市气象观测资料统计重污染日出现日期来看见图 7.5, 发生 4 级以上重污染的时间主要集中在秋冬季节 11、12 和 3、4 月份, 5 级污染出现 31 次, 4 级污染出现 23 次。每年春季 3、4、11、12 月份重污染日期最多, 这几个月份都是风蚀易发季节, 从天津市 3 次颗粒物源解析结果分析看, 这几个月份土壤风沙尘贡献较大, 而 7、8 月份污染水平最低, 这个季节天津地区降水频繁, 植物生长旺盛, 发生土壤风蚀情况较少。

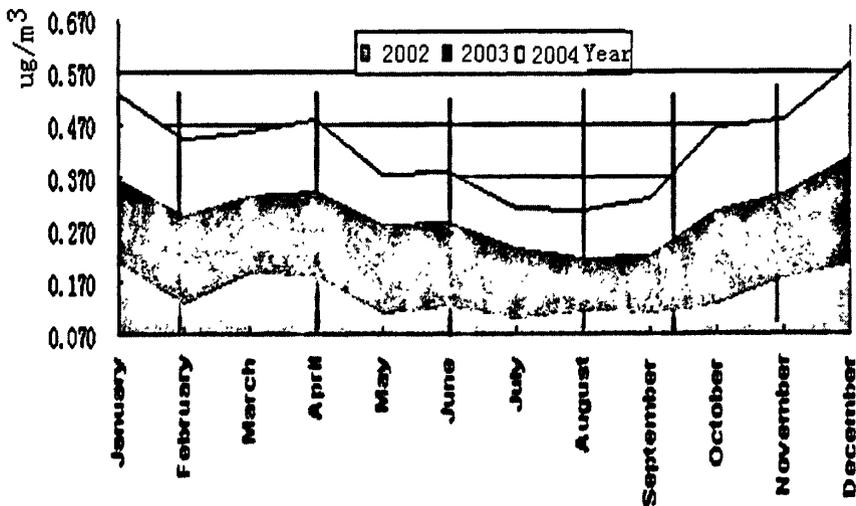


图 7.5 2002 年~2004 年天津市超过 3 级标准污染天数年变化

从 2001~2002 年天津市区 PM<sub>10</sub> 月变化趋势来看 (见图 7.6), 污染严重的时间主要集中在春季 3、4 月份, 而 7、8、9 月份污染水平最低, 这与风蚀发生季节一致。颗粒物污染要比采暖季节严重的多。

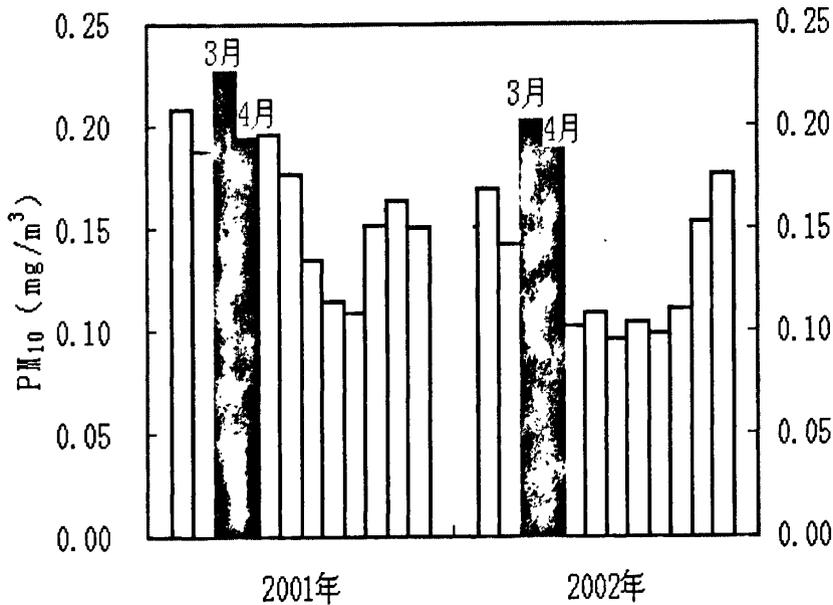


图 7.6 2001~2002 两年间天津市区 PM<sub>10</sub> 月变化趋势

#### 7.4.2 天津市 2 月份 PM<sub>10</sub> 浓度低于 1、3 月份浓度分析

从 2000 年—2005 年的天津市环境监测的 PM<sub>10</sub> 数据分析看, 天津的 PM<sub>10</sub> 浓度月变化有一个明显的特征 (见图 7.7), 明显看出 2 月份的 PM<sub>10</sub> 浓度要小于 1 月和 3 月, 从 2001 到 2004 年环境监测的数据分析看, 天津市从每年的 10 月末到第二年的 5 月中旬, 期间颗粒物污染是每年的高发期, 剔除掉每年的沙尘暴污染, 从天津市 3 次源解析的结果来看, 在采暖季节, 颗粒物的污染比较严重, 主要原因是煤烟尘对颗粒物 PM<sub>10</sub> 贡献增加, 另一方面是汽车保有量的增加。但随着近几年城市治理和环境保护政策的加强, 煤烟尘和机动车尾气排放的治理有力度加大, 2 月份的 PM<sub>10</sub> 浓度低于 1 月和 3 月, 出现这种现象原因之一, 在每年的 2 月份气温有冷暖变化比较明显, 白天气温高, 冻土开始融化, 增大了土壤湿度, 夜晚气温降低, 融化的冻土又开时冻结, 这样交替变化, 使土壤颗粒不易发生风蚀, 由于 2 月份裸露土壤风蚀对大气颗粒贡献降低, 使得城市颗粒

物的浓度也有所减少。1 月份由于有积雪覆盖地表，减少裸露土壤的面积，另一方面，由于温度较低，使得土壤冻结，这样降低土壤风蚀的可能性。3 月份气温回升，地表温度升高，土壤表面颗粒水份蒸发，土壤颗粒容易发生风蚀，致使颗粒物浓度高于 2 月份。其次产生影响的气象因素还需进一步的研究。

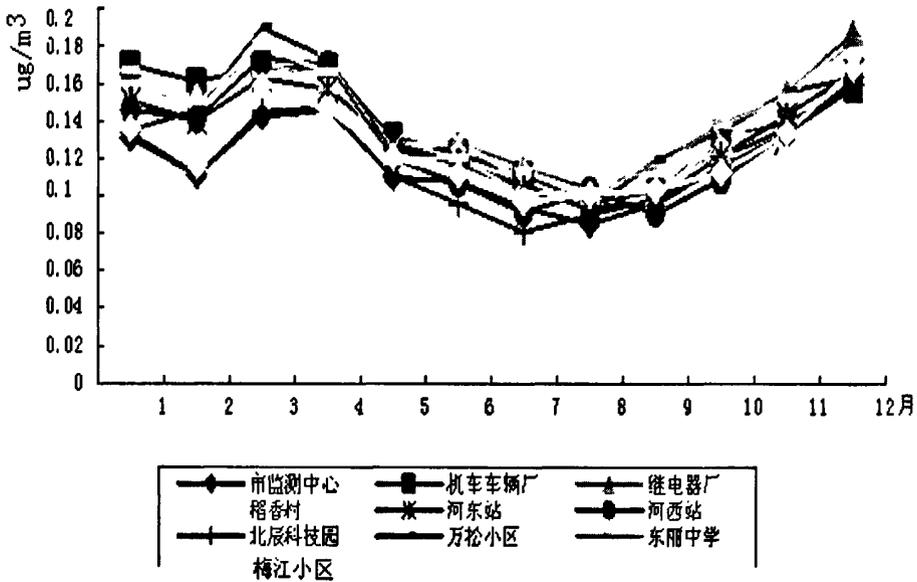


图 7.7 天津市 2002 年 PM<sub>10</sub> 浓度月变化趋势

## 7.5 裸土风蚀颗粒物对城市污染贡献量

### 7.5.1 风速、风向对 PM<sub>10</sub> 浓度影响

天津城市风场的特征是，风速偏小，风向多变。市区年平均风速比郊区小 0.4m/s。年静风出现频率多于郊区 3%-5%，静风在秋末和冬季出现最多。在 1955-1980 年中市区年平均风速 3.0m/s，静风出现频率为 10%，1961-1990 年市区年平均风速 2.7m/s，静风出现频率为 13%。同时对 2000 年静风出现的月、季分布可见，城区第三、四季度静风出现频率最高，达 16%；第二季度静风频率最低，仅为 7%。随着市区的扩大，市内风速在减小，高静风频率的增加对污染物的扩散越加不利。静风是空气污染高浓度发生的主要气象条件。静风出现规律的了解对分析空气污染来源很重要。天津市静风出现年变化规律以 8-11 月出现最多，4-5 月份出现最少。同时静风的出现还有明显的日变化规律，其原因

显然和太阳辐射和湍流传输的日变化有关,静风在清晨和夜间出现最多,最少在下午 14 时左右。静风的出现和天气形势也有着密切关系,静风多出现在弱气压场天气形势中,约占 83.9%,强高压天气形势时无静风出现。大气污染物的水平稀释和输送主要是平均风的作用。风速增加开放源的源强,近郊裸土发生风蚀,对城市空气质量产生影响。

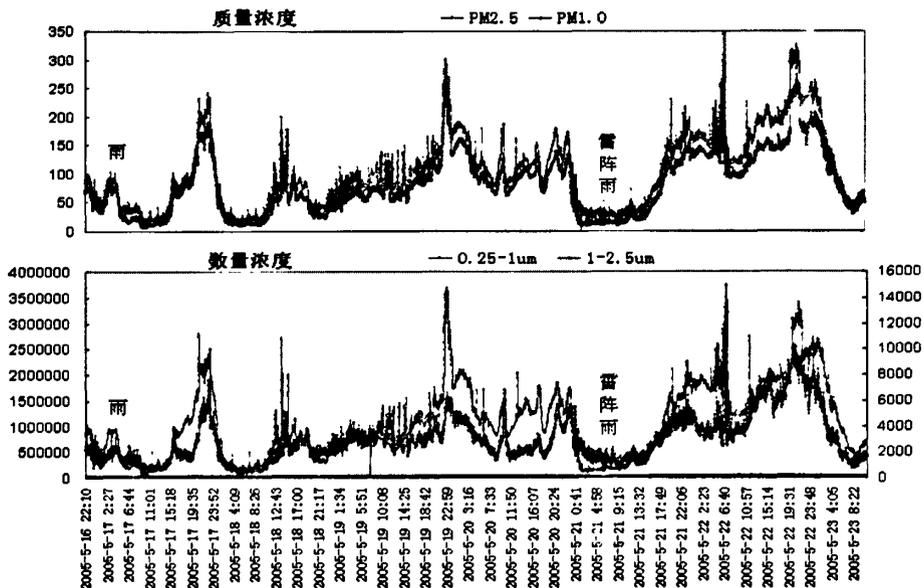
根据 2002 年气象资料与同期污染物浓度的相关分析,2 月 8 日、3 月 25 日 4 月 17 日最大风速均为 9m/s,但风向不同,分别为 NNE、SSW、NW,PM<sub>10</sub> 小时最大浓度分别为 0.683、0.624、0.986 mg/m<sup>3</sup>,浓度差异较大(见表 8),主要原因是污染物的来源不同所造成。在天津市西北方向,杨柳青有大片的农田,裸露的土壤颗粒在风力的作用下,发生风蚀起尘,致使土壤颗粒随风传输到市区,导致 PM<sub>10</sub> 小时浓度最大分别。静风或风速较低时,土壤不发生风蚀,而城市污染物在静风或风速较低时不利于扩散,加重了城市颗粒物的污染。

表 7.2 2002 年天气类型出现日期及相关统计资料

2002 年 日期	PM <sub>10</sub> 重污染(h)	PM <sub>10</sub> 小时最 大浓度mg/m <sup>3</sup>	最大风速 m/s	风向	天气 类型
2月7日	3	0.653	10	WSW	扬沙
2月8日	3	0.683	9	NNE	扬沙
3月16~18日	25	0.862	2、3、8	S 转N	浮尘、扬沙
3月21~22 日	21	0.992	9、6	N	浮尘、扬沙
3月25日	7	0.624	9	SSW	扬沙
4月1日	14	0.992	5	SW	浮尘
4月2日	8	0.992	12	SSW 转NE	沙尘暴
4月6~8 日	44	0.992	5、6、6	WSW 转NW	浮尘、扬沙
4月14日	3(中度污染)	0.411	9	SSW	扬沙
4月16日	10	0.986	6	NNE	浮尘、扬沙
4月17日	13	0.986	9	NW	浮尘、扬沙
4月18~19日	12	0.661	8、10	SW	扬沙
5月28日	2	0.440	11	SW	扬沙
11月11日	8	0.987	8	NW	浮尘、扬沙

为了验证以上的推断,2005 年 5 月 17 日至 23 日期间在天津市气象观测铁塔 10 米高的平台上,利用便携式 GRIMM 气溶胶粒谱分析仪(1.109#)对颗粒物进行连续在线观测。GRIMM 气溶胶粒谱分析仪由一个体积控制泵抽取空气样本并通过激光测量核内的散射光的原理来连续地测量运动的粒子。GRIMM 1.109#粒谱分析仪具有 31 个通道,粒子计数的空气动力学直径范围在 0.25-32um 之间,

分别为大于 0.25 $\mu\text{m}$ 、0.28 $\mu\text{m}$ 、0.30 $\mu\text{m}$ 、0.35 $\mu\text{m}$ 、0.40 $\mu\text{m}$ 、0.45 $\mu\text{m}$ 、0.50 $\mu\text{m}$ 、0.58 $\mu\text{m}$ 、0.65 $\mu\text{m}$ 、0.70 $\mu\text{m}$ 、0.80 $\mu\text{m}$ 、1.0 $\mu\text{m}$ 、1.3 $\mu\text{m}$ 、1.6 $\mu\text{m}$ 、2.0 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$ 、3.0 $\mu\text{m}$ 、3.5 $\mu\text{m}$ 、4.0 $\mu\text{m}$ 、5.0 $\mu\text{m}$ 、6.5 $\mu\text{m}$ 、7.5 $\mu\text{m}$ 、8.5 $\mu\text{m}$ 、10.0 $\mu\text{m}$ 、12.5 $\mu\text{m}$ 、15.0 $\mu\text{m}$ 、17.5 $\mu\text{m}$ 、20.0 $\mu\text{m}$ 、25.0 $\mu\text{m}$ 、30.0 $\mu\text{m}$  和 32 $\mu\text{m}$ 。粒子数浓度采样间隔为 1 分钟。质量浓度的单位是“ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ”；数浓度的单位为“粒子数/升”。观测时间为北京时间 2005 年 5 月 17 日上午 6 时 10 分至 5 月 23 日 18 时 57 分。同步利用天津市气象铁塔 250 米（15 层）的风向、风速、温度、湿度在线梯度观测资料，采样间隔为 20 秒。为了与气溶胶采样资料进行对比分析，本文将气象铁塔观测资料按 1 分钟间隔读取。与气象铁塔处于同一站址的天津市地面气象观测站提供了当地的气象要素观测资料。气溶胶采样期间经历了不同的天气过程。2005 年 5 月 16 日受地面倒槽影响天津市出现稳定性降水，一直持续到 17 日 13 时 38 分；17 日 20 时至 20 日 08 时华北地区 500hpa 高空一直受西北气流控制，期间天津地区地面形势从处于高压前部到处于高压之中，天气以晴为主，其中 18 日午后至傍晚云量较多；21 日受北部扩散的冷空气影响，中午前后锋面过境，造成短时间的雷阵雨天气；之后，高空继续受西北气流控制，地面由均压场转变为华北地形槽，天气晴好。整个采样期间的平均温度为 21.2 $^{\circ}\text{C}$ ，平均气压为 1009.3hpa，平均相对湿度为 49.0%。图 7.8 为整个采样期间气溶胶粒子质量浓度和数量浓度的演变情况。



左侧坐标为 0.25-1 $\mu\text{m}$  的数浓度，右侧坐标为 1-2.5 $\mu\text{m}$  的数浓度），时间为世界时。

图 7.8 气溶胶采样期间细粒子的质量浓度（上图）和数量浓度（下图）

采样期间气溶胶细粒子 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度的平均值为 103.82ug/m<sup>3</sup>，最大值达 348.8ug/m<sup>3</sup>，最低值为 13.7ug/m<sup>3</sup>。由图 7.8 可以看出，采样期间气溶胶细粒子的浓度随时间的分布呈现以下特点，其一是在 17 日和 21 日有降水，气溶胶质量浓度和数量浓度均处于低值；其二是 19 日和 22-23 日期间，天气以晴为主，质量浓度和数量浓度均呈累积增高的趋势，并跳跃出现高浓度值。

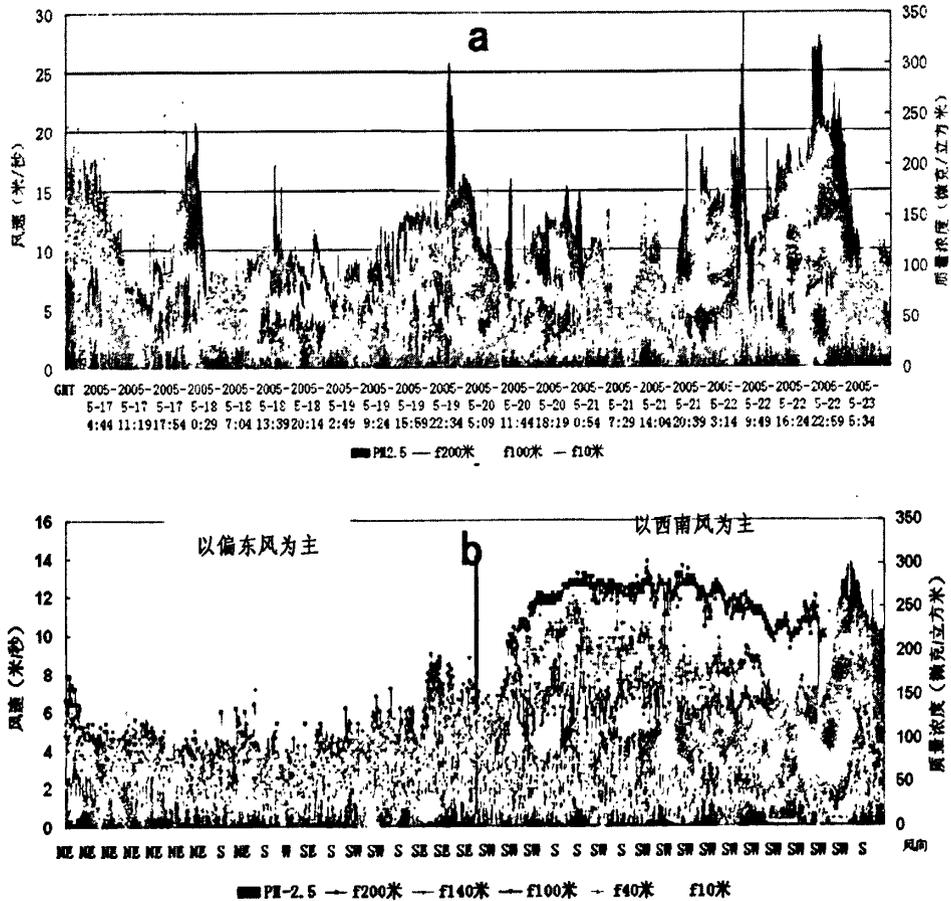


图7.9 采样期间风速及细粒子质量浓度变化

从图7.9a的平均风速来看，当低层气溶胶细粒子出现高值之前，铁塔中高层风速较大，200米以上的风速接近或大于10m/s，100米以上的风速接近或大于8 m/s而低层风速较小，40米风速不超过5m/s，10米风速不超过2m/s。当风速减小时，细粒子迅速增多。表明颗粒物通过风由外界迁移输送至铁塔站，风速减小后细粒子在铁塔站堆积，形成高值。值得注意的是，细粒子属于飘尘，单靠重力沉降到地面是很困难的，通常把小粒子当作是随空气运动的，因此细粒

子很难在短时间内通过干沉降作用形成高值。

分析天津铁塔站细粒子采样期间的风向变化可以看出，在西南风、偏北风以及偏西风的条件下，容易使细粒子的浓度增高。

### 7.5.2 应用箱模型估算近郊裸土风蚀起尘年降尘量

本文所用 TSP 和 PM<sub>10</sub> 数据来源为天津市 3 次源解析监测结果。源解析样品采集地点为城建学院(文化区)，天津市环境监测中心(文化区)，和平区监测站(商业区)，河西区监测站(居民区)，河东区监测站(居民工业混合区)，河北区机车车辆厂(工业区)，红桥区继电器厂(交通稠密区)。在城市四郊的东、南、西、北各方向，分别选择一片裸露的地面，按照梅花布点原则进行布点，在每个采样点上首先用笞帚扫地表土于采样袋中，再用木铲取 20 厘米以下的土壤，每一样品 500 克以上，每块区域的样品按表层和 20cm 以下层分别等比例混合成一个样品，共计 10 个样品。样品采样时间根据天津市的气象和污染源特点，按采暖季、非采暖季和风沙季安排采样周期和连续采样时间。2000 年 12 月 21~2001 年 1 月 4 日代表采暖季，2001 年 9 月 17~10 月 1 日代表非采暖季，2001 年 5 月 17~5 月 24 日代表风沙季。

箱模型将城市视为由一个或多个矩形箱所组成，箱底和箱顶分别对应于城市的下垫面及混合层顶，四周由城市的范围或城市中的某一些排放域范围来确定<sup>[27]</sup>。该模型的主要假设条件是：(1)不考虑污染物的细微空间分布，将城市范围由地面到混合层顶看做是一个箱体，只研究箱体内的污染物平均浓度的变化，在一个箱体内，污染源(视为面源)的源强是一个常数；(2)污染物进入箱体(大气)后，立即在垂直方向均匀分布。由于城市中的污染源分布比较均匀，垂直扩散速率较快，箱体内污染物扩散达到稳定平衡后，浓度不再随时间变化，所以上述假定具有一定的合理性。箱模型的表达式如下：

$$Q = C[A\sqrt{S_i} + 0.031536(U_d + W_r R)S_i] \quad (7.1)$$

式中：Q—城区内相应于某源类的浓度贡献值的排放量，10<sup>4</sup>t/a；

C—城区内相应裸土风蚀尘对 TSP 或 PM<sub>10</sub> 的贡献值，mg/m<sup>3</sup>；

S<sub>i</sub>—城区面积，km<sup>2</sup>；U<sub>d</sub>—颗粒物干沉降速度，cm/s；

W<sub>r</sub>—颗粒物清洗比，无量纲；

R—城区年均降水量，mm/a；

A—总量控制系数，无量纲。

本研究用源解析的浓度贡献值作为箱中的平均浓度, 比较接近实际, 以此来估算的区域排放总量一般能够满足宏观调控的精度要求, 天津市大气颗粒物源解析结果给出了开放源类对环境空气中 TSP 和 PM<sub>10</sub> 的贡献值, 本研究利用箱模型估算相对应浓度的开放源所排放颗粒物的总量。箱模型中选取的参数值如下: 城区面积  $S_i$ , 为 371km<sup>2</sup>; 颗粒物干沉降速度  $U_d$ , 为 1.72cm/s; 颗粒物清洗比  $W_r$ , 取值  $1.9 \times 10^{-3}$ ; 年均降水量  $R$ , 为 575mm/a; 总量控制系数  $A$ , 取值在 4.2-5.6 间, 均值 4.9; 计算结果如表 7.3、7.4 所示。

表 7.3 2001 年各开放源类 TSP 起尘量估算值

源类	全年 TSP			采暖季 TSP			非采暖季 TSP		
	贡献值	分担率	起尘量	贡献值	分担率	起尘量	贡献值	分担率	起尘量
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$
土壤风蚀尘	103.53	39	13.18	93.53	30	3.97	67.39	30	5.72
机动车尾气	34.71	13	4.42	32.20	10	1.37	38.35	17	3.25
燃煤尘	56.5	21	7.19	103.27	33	4.38	49.39	22	4.19
建筑尘	17.28	6	2.20	15.64	5	0.66	19.30	8	1.64
合计	212.02	79	26.99	310.30	78	10.38	228.2	77	14.80

表 7.4 2001 各类 PM<sub>10</sub> 起尘量估算值

源类	全年 PM <sub>10</sub>			采暖季 PM <sub>10</sub>			非采暖季 PM <sub>10</sub>		
	贡献值	分担率	起尘量	贡献值	分担率	起尘量	贡献值	分担率	起尘量
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$10^4\text{t/a}$
土壤风蚀尘	41.45	25	5.28	50.72	28	2.15	29.62	24	2.51
机动车尾气	23.3	15	2.97	23.50	13	0.997	39.49	32	3.35
燃煤尘	39.91	26	5.08	61.59	34	2.61	23.45	19	1.99
建筑尘	9.21	6	1.17	11.26	6	0.49	12.34	10	1.05
合计	153.50	72	14.50	179.90	81	6.25	104.9	85	8.90

从表 7.3 可知天津市区内各类开放源排放的小于 100  $\mu\text{m}$  的颗粒物的总量约 26.99 万 t, 对环境空气中的 TSP 的贡献值约 212  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 排放的小于 10  $\mu\text{m}$  的

颗粒物的总量约 14.5 万 t, 对环境空气中的 PM<sub>10</sub> 的贡献值约 153.5 μg/m<sup>3</sup>。通过对各类开放源起尘量的估算可见裸土风蚀对城市大气颗粒物的贡献是巨大的 (TSP 约占 48.8%, PM<sub>10</sub> 约占 36.4%)。在大气颗粒物控制方面, 提高城市环境空气质量急需削减的应该是开放源类, 特别是近郊裸土风蚀开放源。

## 7.6 天津市裸土风蚀尘的粒径及分布特征

土壤颗粒组成决定着土壤的物理、化学和生物特性。土壤机械组成不同, 在矿物组成上有显著的差别, 其化学成分和其它各种性质也均不相同。土壤基质由不同比例的、粒径粗细不一, 形状和组成各异的颗粒 (通称土粒) 组成, 土壤基质中土粒的粗细不同, 不但比表面积有巨大差异, 而且土粒间孔隙的孔径也有显著区别。因此研究裸土风蚀颗粒粒径的分布规律, 可以进一步分析裸土风蚀的机理和传输扩散距离。

裸土风蚀颗粒物受外力作用升腾至空中而形成空气颗粒物需要一定的条件, 对某种颗粒物而言, 当风速达到或超过某一值时, 在风力作用下原来静止于表面的颗粒物才开始运动, 裸土发生风蚀与颗粒粒径有着密切关系, 直径小于 70 μm 的粒子飘浮在空中并随气流飘移。当风速达到或超过起动风速值时, 在风力作用下原来静止于裸土表面的颗粒物开始运动。颗粒物的运动有两种主要形式, 一种是风力推移较大颗粒物在地表作水平滚动, 另一种是密度较小或粒径较小的颗粒物开始升腾并悬浮在空气中, 但是由于重力作用, 粒度大于 90 μm 的颗粒物在扩散一定距离后某些颗粒物会沉降下来。

### 7.6.1 近郊裸土样品

采样时间为 2007 年 2 月 7 日, 采样地点为武清区气象局、西青区工农联盟, 采集的土壤有玉米地、防护林地、堤坝、果树地、蔬菜套玉米混种地。采样工具塑料铲、不锈钢土钻。采样方法为蛇形法 (W 型法), 设分点 10 个, 采样时先将田地表面的植物残体除去, 然后用苕帚扫取表土并放置于样品袋终, 再用采样工具垂直地将土壤切开, 在垂直面上取不同层的样品, 各分点混匀后用四分法取 1kg 土样装入样品袋。玉米地采 0~20cm, 种植果林类农作物采 0~60cm。为了保证样品的代表性, 减低监测费用, 采取采集混合样的方案。样品袋由棉布缝制而成, 潮湿样品内衬塑料袋。采样的同时, 由专人填写样品标签、采样

记录, 标签一式两份, 一份放入袋中, 一份系在袋口, 标签上标注采样时间、地点、样品编号、监测项目、采样深度和经纬度, 同时拍摄照片。

### 7.6.2 近郊裸土样品处理

在风干室将土样放置于风干盘中, 摊成 2~3cm 的薄层, 适时地压碎、翻动, 拣出碎石、砂砾、植物残体。在磨样室将风干的样品倒在有机玻璃板上, 用木锤敲打, 用木滚、木棒、有机玻璃棒再次压碎, 拣出杂质, 混匀, 并用四分法取压碎样, 过孔径 0.25mm (20 目) 尼龙筛, 然后过孔径 0.15mm (100 目) 筛, 过筛后的样品全部置无色聚乙烯薄膜上, 并充分搅拌混匀样装入玻璃瓶中备用。

样品分析在河北科技大学进行, 分析仪器为 BT-9300H 型激光式粒度分布仪测试仪。测试分析时用到的介质为蒸馏水。

### 7.6.3 近郊裸土样品粒径分布情况

目前风蚀粒径研究的结果表明, 土壤直径小于 0.80mm 的粒子易发生风蚀, 样品土壤的粒径分布特征为, 农田玉米地土壤表面积比为 5013.38m<sup>2</sup>/kg, 土壤直径在 0.1—0.806 μm 之间 (见图 7.10);

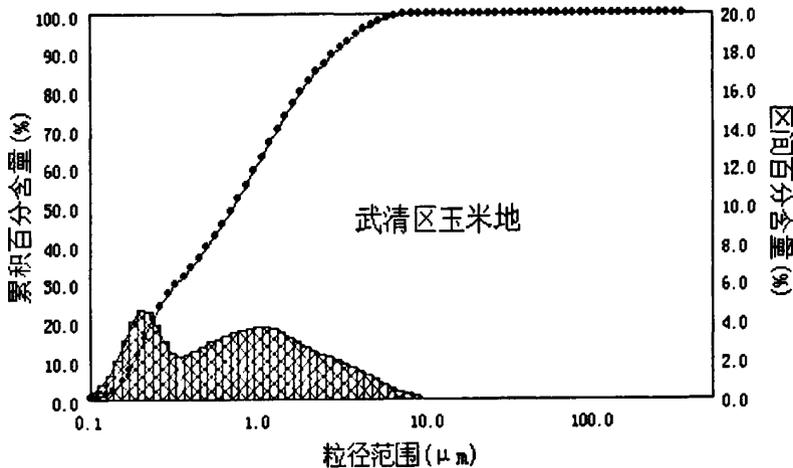


图 7.10 武清区玉米地 5cm 土壤粒径分布曲线

农田玉米地 10cm 土壤 中位直径 (D<sub>50</sub>) 为 1.24 μm, 表面积比为 3833.67m<sup>2</sup>/kg, 土壤直径在 0.1—18.98 μm 之间 (见图 7.11);

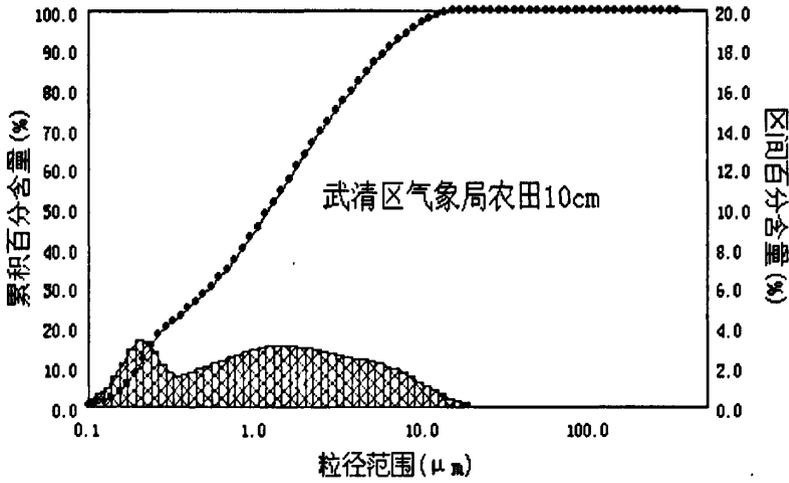


图 7.11 武清区玉米地 10cm 土壤粒径分布曲线  
农田玉米地土壤 20cm 土壤中位直径(D50)为 0.97  $\mu\text{m}$ , 表面积比为 4154.32 $\text{m}^2/\text{kg}$ , 土壤直径在 0.1—13.77  $\mu\text{m}$  之间 (见图 7.12);

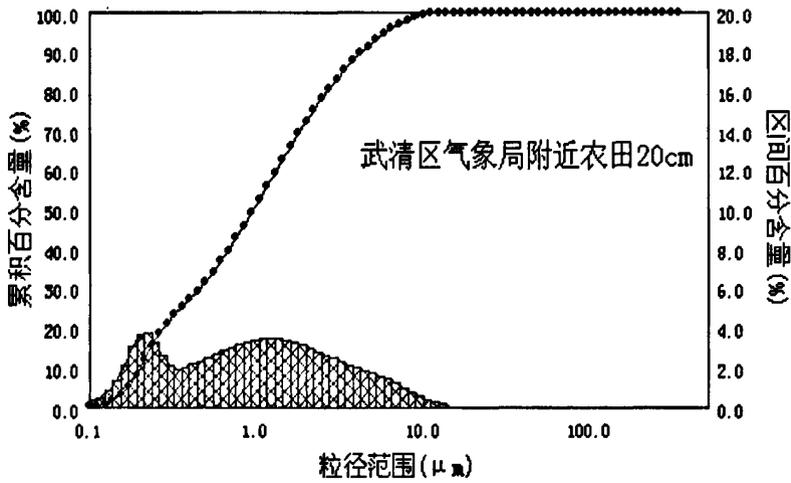


图 7.12 武清区玉米地 20cm 土壤粒径分布曲线  
林地土壤 10cm 土壤中位直径(D50)为 0.75  $\mu\text{m}$ , 表面积比为 5087.27 $\text{m}^2/\text{kg}$ , 土壤直径在 0.1—11.11  $\mu\text{m}$  之间 (见图 7.13);

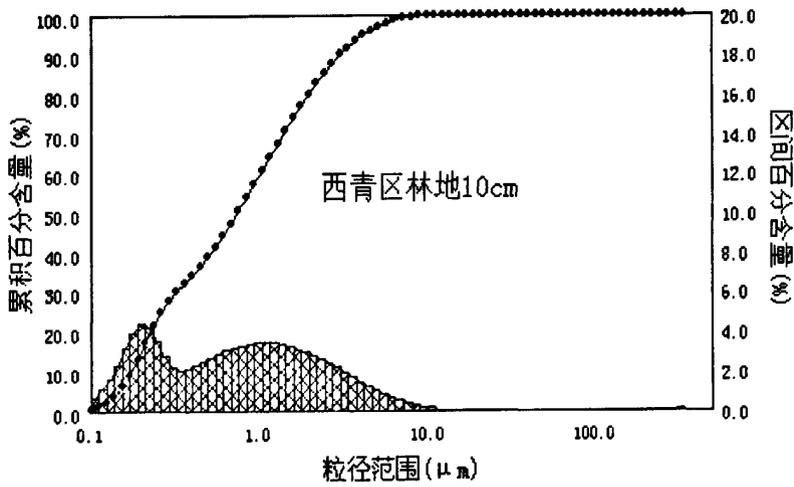


图 7.13 武清区林地 10cm 土壤粒径分布

西青区工农联盟土壤中位直径(D50)为 8.99  $\mu\text{m}$ , 表面积比为 1323.37 $\text{m}^2/\text{kg}$ , 土壤直径在 0.1—46.69  $\mu\text{m}$  之间 (见图 7.14);

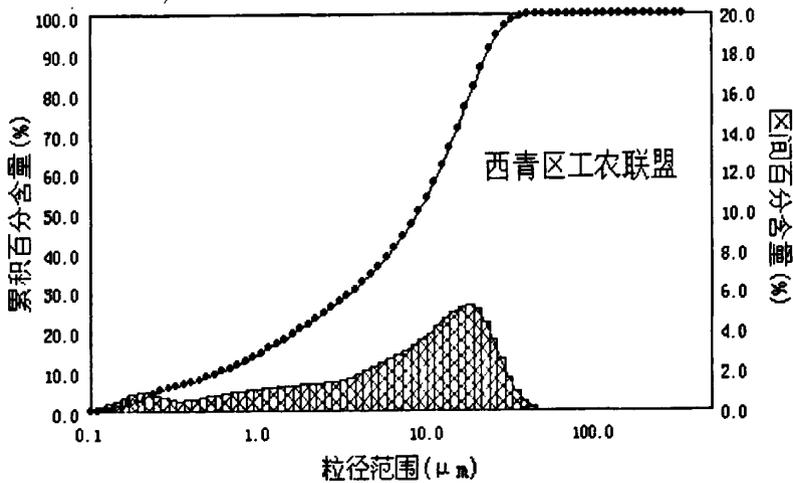


图 7.14 西青区工农联盟土壤粒径分布曲线

西青区堤坝土壤中位直径(D50)为 4.52  $\mu\text{m}$ , 表面积比为 2025.41 $\text{m}^2/\text{kg}$ , 土壤直径在 0.1—36.08  $\mu\text{m}$  之间 (见图 7.15);

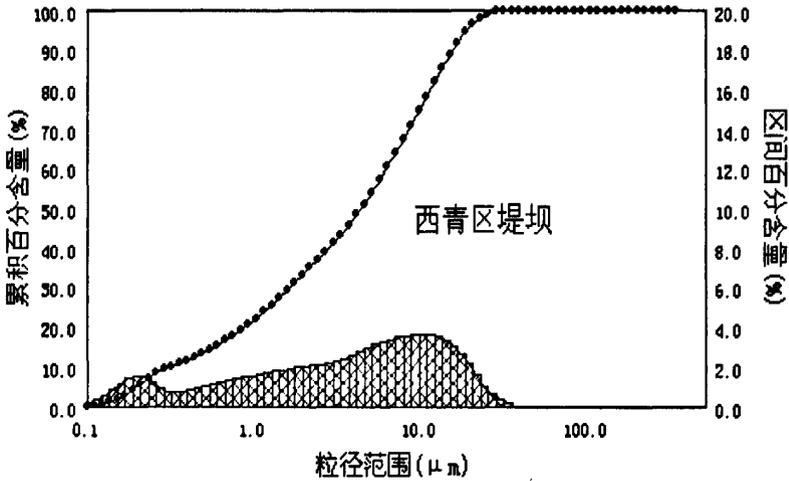


图 7.15 西青区堤坝土壤粒径分布曲线

西青区裸露农田土壤中位直径 (D<sub>50</sub>) 为 2.51 μm, 表面积比为 2602.05m<sup>2</sup>/kg, 土壤直径在 0.1—29.12 μm 之间 (见图 7.16);

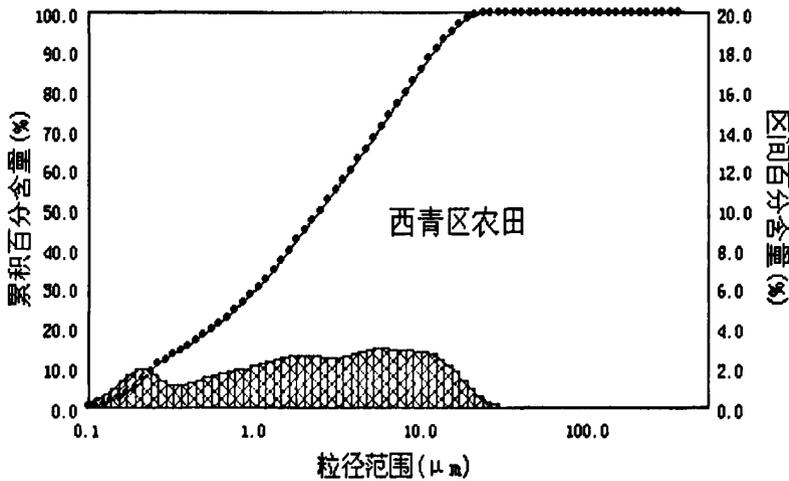


图 7.16 西青区裸露农田土壤粒径分布曲线

结合采样的观测, 林地和玉米地 (留茬) 土壤表面植被覆盖较好, 从上面的分析可以看出土壤粒径细颗粒较多, 裸露的农田和堤坝, 土壤表面全部裸露, 从采样分析结果看土壤粒径分布为, 林地 < 农田 < 裸露土地 < 堤坝。

从分析的结果可以看出土壤颗粒主要集中在 1.0—10 μm 处, 2002 年源解析测得裸土风蚀尘颗粒物直径为 50 μm 占 19.49%, 直径为 10 μm 占 25.33%, 分布规律见图 7.17, 分布特征见表 7.5。

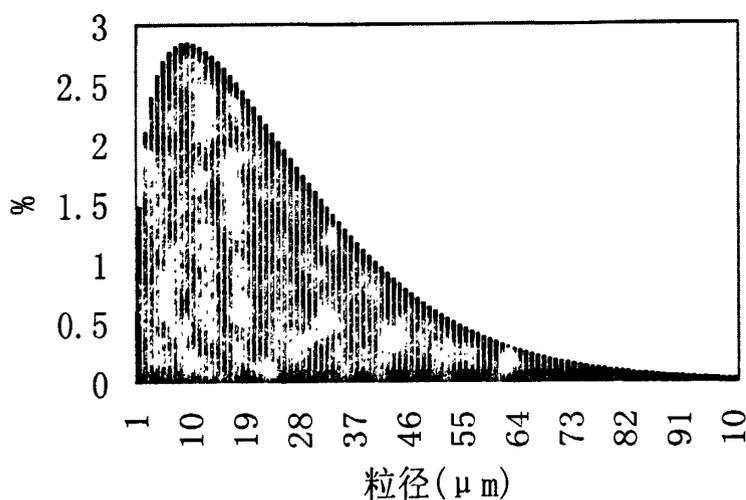


图7.17 天津市土壤风蚀尘粒径分布曲线

表 7.5 裸土风蚀颗粒物粒径分布的特征与其它尘颗粒特征比较

编号	源类	D <sub>50</sub> (μm)	R <sub>99</sub> (%)	R <sub>10</sub> (%)	R <sub>2.5</sub> (%)
1	土壤风蚀尘	19.49	99.66	25.33	4.74
2	建筑水泥尘	18.83	94.99	32.75	11.03
3	城市扬尘	20.91	99.64	22.63	3.88
4	民用锅炉烟尘	19.18	96.92	30.61	8.93
5	电厂锅炉烟尘	8.65	99.62	54.37	21.30

本次样品分析也从实验室样品库中选取了已经作过源解析的城市太原、银川两个城市的裸土风蚀样品作了粒径分析。太原市裸土风蚀尘土壤直径(D<sub>50</sub>)为 5.94 μm、, 表面积比为 1842.85m<sup>2</sup>/kg, 土壤直径在 0.1—40.15 μm 之间; 银川市裸土风蚀尘土壤直径(D<sub>50</sub>)为 7.26 μm, 表面积比为 1885.05m<sup>2</sup>/kg, 土壤直径在 0.1—40.15 μm 之间, 太原、银川风蚀尘粒径分布曲线见图 7.18、7.19。

从天津市西青区工农联盟、裸露农田、堤坝的土壤分布曲线可以看出, 粒径分布曲线的形态与银川、太原的裸土风沙尘相似。

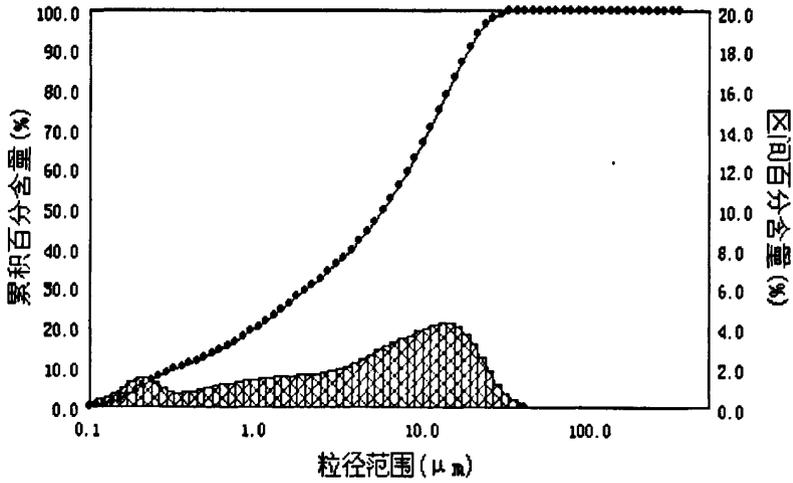


图7.18 太原市风沙尘粒径分布曲线

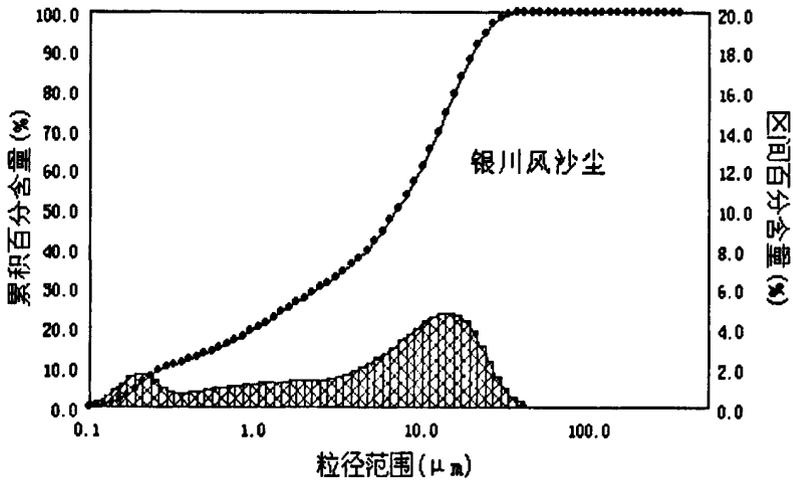


图7.19 银川市风沙尘粒径分布曲线

## 7.7 城市颗粒物 PM<sub>10</sub> 近郊裸土来源与外来源的区别研究

### 7.7.1 应用 EF 富集因子分析近郊裸土源尘与外来源的区别

选择主要土类的背景值作为参比系统进行富集因子计算，首先从《中华人民共和国土壤环境背景值图集》<sup>[16]</sup>中查到相应城市的土壤类型，再到《中国土壤元素背景值》<sup>[17]</sup>中查到相应土壤类型的 A 层土壤元素背景值。在土壤背景值调

查中分别对土壤发生层 A 层和 C 层进行背景值统计, 由于 A 层背景值数据代表表层土壤元素背景值, 故选择 A 层土壤元素背景值。各个元素的统计值包括算术平均值、几何平均值、中位值等, 各个元素的分布类型不同, 表示集中分布趋势的统计值就不同, 所以统一选择中位值数据。对于土壤类型不单一的城市, 采用算术平均值的方法算出该城市的土壤背景值<sup>[18-20]</sup>, 天津市的土壤背景值按照潮土土类来统计, 计算结果见表 7.7。

表 7.7 天津市 A 层土壤元素背景值 (质量百分数)

Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
1.4000	1.0900	6.8300	1.9800	2.4300	0.3700	0.0583	3.0500	0.0012	0.0027	0.0022	0.67

裸土风蚀尘和土壤背景值均包括 Al、Ti、Fe、Si、Mn、Ca、Cr 等元素, 而并不经常测量 Zr 和 Sc, 所以从经常测量的元素 Al、Ti、Fe、Ca、Mn、Cr、Si 中选择在土壤中比较稳定、迁移性差且人为污染比较小的元素作为参比元素是比较合适的。在所选择的参比系统中没有测试 Si 元素, Cr 和 Mn 是典型的污染元素。Ca 元素化学性质活泼, 是建筑尘的标识元素, 受城市建设的影响较大。

表 7.8 天津市 TSP 中元素富集系数

元素	年平均	风沙季	非采暖	采暖季	市站	城建	和平	河东	河北	河西	红桥
Na	4.46	2.20	5.44	4.73	4.27	5.28	4.18	3.95	3.95	4.21	4.07
Mg	4.26	2.95	4.47	5.03	3.86	4.92	3.32	5.77	3.65	4.51	4.57
Al	1.79	1.15	1.31	3.12	2.26	2.78	2.51	2.16	1.95	1.52	1.97
Si	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	13.4	10.2	19.	8.83	11.5	11.3	8.90	12.17	9.12	10.2	12.4
K	3.04	2.32	2.87	3.93	3.08	3.73	2.87	3.86	2.89	3.01	3.46
Ca	9.51	6.32	9.46	12.3	9.13	12.2	8.00	14.9	8.22	8.83	10.0
Ti	2.89	1.84	1.81	5.62	1.14	0.96	4.80	0.93	1.34	2.38	0.97
Mn	5.12	3.51	6.43	4.32	3.99	4.78	3.66	5.83	5.15	5.16	4.30
Fe	1.96	1.82	2.08	1.88	2.05	1.01	4.44	2.61	0.81	1.44	0.97
Ni	20.1	6.12	15.8	40.1	10.3	29.8	16.6	43.1	16.9	26.4	35.2

表 7.8 可见 12 个元素的富集系数均表现出风蚀季明显低于其它两季的时间变化规律, 说明来自于土壤源的贡献增加。因此, 风蚀季大气中的元素浓度受自然因素影响, 人为影响居于次要地位, 这反映了主要排放源的季节变化。Fe、Mg、Al、K、Ti、Mn、V 和 Na 等 8 个元素各季的富集系数均小于 10, 表明此类元素的富集程度不高, 基本来自本近郊或邻近地区的土壤表土风蚀。

### 7.7.2 应用 SEM 和 TEM 分析近郊裸土来源尘与外来来源尘的区别

大气降尘具有复杂的矿物和化学成分，来源可分为天然源和人为源<sup>[21]</sup>，邵龙义等对大气颗粒物特征已进行过较多研究<sup>[22-24]</sup>。随着微量分析和表面分析技术在材料科学、侵蚀研究、微电子领域以及其它高科技领域中的发展与普及，大气颗粒物的单颗粒物分析日益受到人们的重视。采取合适的微量分析方法可以研究颗粒物的来源、形成机理、传输过程、化学活性以及对环境的影响等，还可以研究某元素或化合物在单个颗粒物中的分布状态<sup>[25-27]</sup>。

扫描电镜能谱分析可以观测单个颗粒物大小、形貌并对其进行化学成分分析。基于几十甚至上百个颗粒物的分析数据，可以按颗粒物种类进行分类，计算其数目百分数，从而得到颗粒物来源及分布等重要性的信息。近年来，这一技术取得新的进展，扫描电镜能谱技术已成功应用于研究沈阳、广州、青岛三城市大气颗粒物的来源<sup>[28-31]</sup>。颗粒物的化学表征和物理表征相结合可以得到综合的信息<sup>[32]</sup>。汪安璞等利用 SEM（扫描电镜）对北京大气颗粒物进行形貌观察和主量成分分析，并研究了颗粒物的物理、化学特性与组分、形态分布的特征及其和周围环境的关系<sup>[28]</sup>。此外，意大利的 Orlic 等人、比利时 Gent 大学的 Maenhaut 等人也先后用 SEM 研究了单个大气颗粒物，这些研究都表明，可以利用单颗粒气溶胶的化学组分特征进行来源识别和解析。

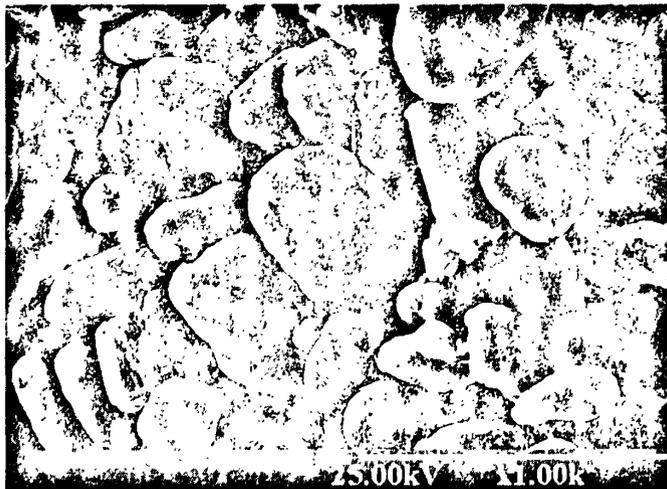


图 7.11 沙尘暴 SEM 扫描图像

李永良<sup>[29]</sup>将 2002 年 3 月 20 日采集地点为北京师范大学科技楼顶层的平台上的沙尘暴样品进行了 SEM 分析，从沙尘暴颗粒形貌照片清楚看到沙尘暴颗粒不仅形态有很大不同，而且颗粒的尺寸也有较大的变化，颗粒的磨圆度来看，有

的颗粒磨圆度很好，呈球形或椭球形，而有的颗粒磨圆度很差，呈锥形或片形等。从颗粒的形态进一步看出沙尘暴颗粒中石英颗粒形态 A 和 B，A 有很好的磨圆度，呈椭球形结构，颗粒的表面有明显的撞击坑，说明颗粒 A 在采集前已经经过了长距离的搬运过程。在搬运过程中，由于风的作用，相互撞击，从而形成磨圆度很好的石英颗粒，从而证明是外地沙尘暴来源；而颗粒 B 却有棱有角，磨圆度很差，表明这个颗粒在采集前并没有经过长途搬运，是本地风蚀颗粒来源，本地尘石英颗粒和外来石英颗粒形态区别见图 7.12。



A 球形石英颗粒，B 棱角形石英颗粒颗粒

图 7.12 沙尘暴颗粒中石英颗粒形态

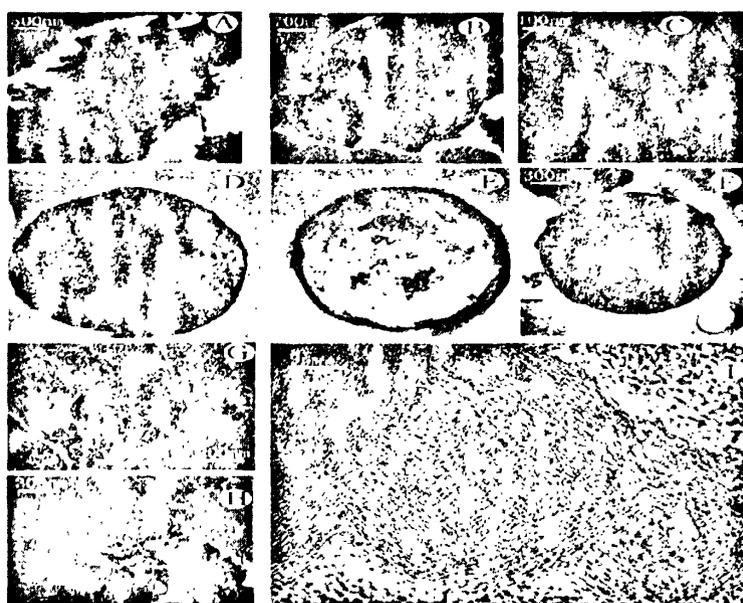
从电镜的图像上可以看到有的颗粒呈球形，有很好的磨圆度，但从放大的照片可以看到，颗粒表面并不光滑，其表面布满着条纹和碎片(见图 7.13)，这些条纹可能与风蚀作用有关。主要由于发生沙尘暴时风力很强，在风的作用下，一方面在颗粒相互撞击，形成磨圆度很好的球形或类球形颗粒，另一方面，由于风蚀的作用，在颗粒的表面容易形成这些细条纹。



图 7.13 沙尘暴颗粒形态

由于 SEM 分辨率一般也只能达到亚微米尺度，小于 100nm 的颗粒和超微观结构现象不能分辨，不能提供结构信息，TEM（透射电子显微镜）可以对同一单

颗粒完成形貌、成分和结构分析,作为大气颗粒物来源研究的补充手段,有可能揭示来源信息,陈天虎<sup>[30]</sup>对合肥市大气沉降颗粒物用透射电 TEM 观察发现,大气降尘中主要物相组成为伊利石、石膏、方解石、长石、磷灰石、纳米炭球、玻璃微珠、无定型。伊利石是大气降尘中主成分,其形态仍然保持不规则状,电子衍射反映出清晰完整衍射斑点,晶体结构没有发生变化,表明伊利石来源于地表,代表自然源地面扬尘,说明合肥地区地面裸土起尘是大气气胶的主要物源,石膏和方解石的超微结构和形貌特征显示其有连生的纳米尺度条带构造,这种结构在地质体中还没有现过,表明不是天然成因的矿物岩石机械碎屑成因,而是环境中矿物,是沉降之前大气化学反应的产物,或者是降之后与大气化学反应的产物。玻璃微珠和空心玻璃珠在样品中也有出现,它们是燃煤烟尘的主要成分和特有组分,其形成机制煤中的灰分(主要是伊利石等粘土矿物)在煤燃烧形成的高条件下熔融所致。在透射电镜纳米尺度的观察中,纳米炭球呈链状、树状、团状大量出现,具有洋葱头状高分辨晶格,结构状态处于无定型炭和石墨之间,单个纳米炭直径 40—50nm,形态和结构特征表明它们是燃油高温燃残余炭烟尘<sup>[31-34]</sup>。



A) 伊利石形貌特征; B) 伊利石颗粒形貌特征; C) 方解石石膏连生; D) 似球状准玻璃微珠; E) 空心玻璃微珠; F) 实心玻璃微珠; G) 纳米炭球团状团簇; H) 纳米炭球树枝状团簇; I) 纳米炭球高分辨晶格象。

图 7.14 大气降尘中主要特征物相的 TEM 明场像和高分辨晶格像

## 7.8 本章总结

(1) 本章主要从天津城区季度降尘、PM<sub>10</sub> 浓度月变化趋势分析了天津市 TSP 和 PM<sub>10</sub> 变化规律,并结合天津市 3 次颗粒物源解析结果,得出天津市在风蚀季节的几个月份土壤风蚀尘贡献较大。应用颗粒物源解析结果和箱模型估算了裸风蚀颗粒物对天津市区年贡献量,裸土风蚀尘 TSP 全年对城市贡献  $13.18 \times 10^4 \text{t/a}$ ,采暖季为  $3.97 \times 10^4 \text{t/a}$ ,非采暖季为  $5.32 \times 10^4 \text{t/a}$ ;风沙季  $3.89 \times 10^4 \text{t/a}$ ;裸土风蚀尘 PM<sub>10</sub> 全年对城市贡献  $5.28 \times 10^4 \text{t/a}$ ,采暖季为  $2.15 \times 10^4 \text{t/a}$ ,非采暖季为  $2.51 \times 10^4 \text{t/a}$ ,风沙季  $0.62 \times 10^4 \text{t/a}$ 。

(2) 从环境监测 PM<sub>10</sub> 分析结果明显看出 2 月份的 PM<sub>10</sub> 浓度要小于 1 月和 3 月,分析原因可以发现,在每年的 2 月份气温有冷暖变化比较明显,白天气温高,冻土开始融化,增大了土壤湿度,夜晚气温降低,融化的冻土又开时冻结,这样交替变化,使土壤颗粒不易发生风蚀,这可能是造成偏低的主要原因,其它因素还需进一步的研究。

(3) 根据气象资料与同期污染物浓度的相关分析,2002 年 2 月 8 日、3 月 25 日 4 月 17 日最大风速均为 9m/s,但风向不同,分别为 NNE、SSW、NW,PM<sub>10</sub> 小时最大浓度分别为 0.683、0.624、0.986mg/m<sup>3</sup>,浓度差异较大主要原因是污染物的来源不同所造成,在天津市西北方向,杨柳青有大片的农田,裸露的土壤颗粒在风力的作用下,发生风蚀,致使土壤颗粒随风传输到市区,导致 PM<sub>10</sub> 小时最大浓度。静风或风速较低时,土壤不发生风蚀,而城市污染物在静风或风速较低时不利于扩散。

(4) 利用元素的富集系数分析来看,Si、Fe、Mg、Al、K、Ti、Mn、V 和 Na 等 9 个元素各季的富集系数均小于 10,污染颗粒基本来自本近郊或邻近地区的土壤表土风蚀。

## 本章参考文献

- [1] Van Lynden G W J, Oldeman L R. The assessment of the status of human induced soil degradation in south and south east Asia Wageningen: Internationa Soil Reference and Information Centre, 1997 1. 655-664.
- [2] 许峰. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征[J], 地理学报, 2003, 58(1): 139-1461.
- [3] 戴树桂等. 天津市大气颗粒物主要排放源的成分谱研究[M], 城市生态系统与污染综

- 合防治, 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 425-436.
- [4] 陈宗良, 葛苏, 张晶. 北京大气气溶胶小颗粒的测量与解析[J]. 环境科学研究, 1994, 7(3): 1-9.
- [5] 戴树桂. 环境化学进展[M]. 北京: 化学工业出版社. 2005: 18-56.
- [6] 朱坦等化学质量平衡受体模型新技术的应用: TEDA 大气颗粒物来源解析实例[J]. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 9-14.
- [7] Tegen I, Fung I. Modeling mineral dust in the atmosphere: sources, transport, and optical thickness[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 22897-22914.
- [8] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D14): 19237-19244.
- [9] Andreae M O. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels[A]. enderson sellers A. Future Climate of the World[C]. Amsterdam Elsevier, 1995.341-392.
- [10] Duce R A, Tindale N W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean [J]. Limnology and Oceanography, 1991, 36 : 1715-1726.
- [11] DuceR A. Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate[A]. Charlson RJ, Heintwenberg. Aerosol Forcing of Climate [C]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1995.43-72.
- [12] 陈静生, 邓宝山, 贾振邦. 关于“外来尘”对北京大气质量影响的研究[J], 中国环境科学, 1984, 4(1): 10-17.
- [13] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J], 科学通报, 2001, 3: 191-197.
- [14] 宣捷. 中国北方地面起尘总分布, 环境科学学报, 2000, 20(4), 426-428.
- [15] 王帅杰, 朱坦, 洪刚. 石家庄市地面起尘量估算方法, 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 248-250.
- [16] 中国环境监测总站. 中华人民共和国土壤环境背景值图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 李小雁, 李福兴, 刘连友. 土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 91-95.
- [19] 许峰. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征. 地理学报, 2003, 58(1): 139-1461
- [20] 史培军. 中国土壤风蚀研究的现状与展望[R]. 第十二届国际水土保持大会邀请学术报告, 2002. 1-15.
- [21] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [22] 邵龙义, 时宗波, 黄勤. 都市大气环境中可吸入颗粒物的研究[J]. 环境保护, 2000, (1): 24-26, 29.
- [23] 陈天虎, 冯军会, 张宇等. 合肥市大气颗粒物组成及其环境指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 433-436.
- [24] 孟庆笠, 毕新慧, 储少岗等. 污染区大气中多氯联苯的表征与分布研究初探[J]. 环境化学, 2000, 19(6): 501-506.

- [25] 董树屏, 刘涛, 孙大勇等. 用扫描电镜技术识别广州大气颗粒物主要种类[J]. 岩矿测试, 2001, 20(3): 202~207.
- [26] 刘咸德, 贾红, 齐建兵等. 青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别[J]. 环境科学研究, 1994, 7(3): 10~17.
- [27] 王蕴, 李大秋. 空气颗粒物中非金属离子的特征分析[J]. 环境保护, 1999, (5): 24~25.
- [28] 叶汝求, 王家贞, 任宇征. 应用扫描电镜研究沈阳地区气溶胶颗粒特征[J]. 环境化学, 1987, 6(2): 1~7.
- [29] 叶汝求, 李永泉, 王家贞. 扫描电镜-聚类分析研究广州地区气溶胶颗粒特征[J]. 环境化学, 1992, 11(6): 14~20.
- [30] 刘咸德, 贾红, 齐建兵等. 青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别[J]. 环境科学研究, 1994, 7(3): 10~17.
- [31] Liu X D, Espen P Van, Adams F, et al. Biomass Burning in Southern Africa: Individual Particle Characterization of Atmospheric Aerosols and Savanna Fire Samples[J]. Atmospheric Chemistry, 2000, 36: 135~155.
- [32] Liu X D, Dong S P, Espen P Van, et al. Size and Chemical Characterization of Atmospheric Aerosol and Savanna Fire Samples in Southern Africa [J]. Aerosol Science, 2000, 31(Suppl.1): S186.
- [33] 李永良, 马辉, 袁慧等. 沙尘暴颗粒物的扫描电镜研究[J]. 现代仪器, 2005, 1: 14~16.
- [34] 陈天虎, 徐惠芳. 大气降尘 TEM 观察及其环境矿物学意义, 岩石矿物学杂志[J]. 2003, 12(4): 425~428.

## 第八章 DVB-S 遥感资料在裸土风蚀开放源中的应用

### 8.1 DVB-S 遥感资料系统平台

Digital Video Broadcast System (DVB-S) 是基于国家卫星气象中心三站一中心收集的覆盖全国范围的多颗遥感卫星资料及存档业务系统, 每天可以接收国家卫星气象中心三个卫星接收地面站(分别位于北京、广州和乌鲁木齐)多颗国内外的气象、资源遥感卫星资料, 覆盖范围包括整个东亚地区。通过这套接收系统主要接受中国 FY-2C、日本 MTSAT-1R、EOS/MODIS、FY-1D、NOAA-12、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18 数据, DVB-S 系统组成及用户站构成见图 8.1、图 8.2。

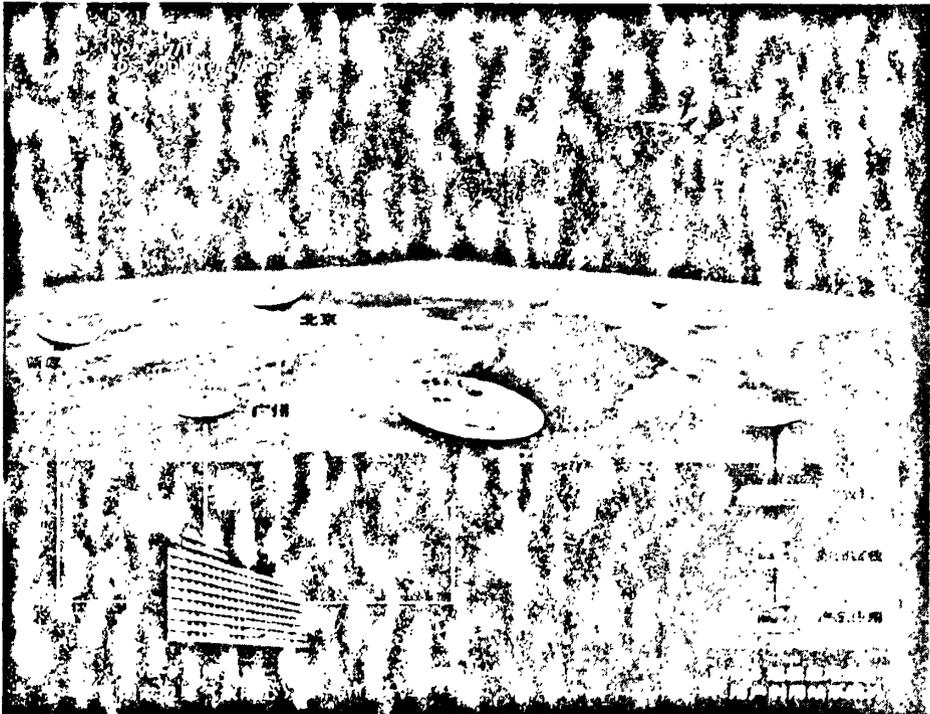


图 8.1 基于 DVB-S 平台的卫星资料接收处理系统架构

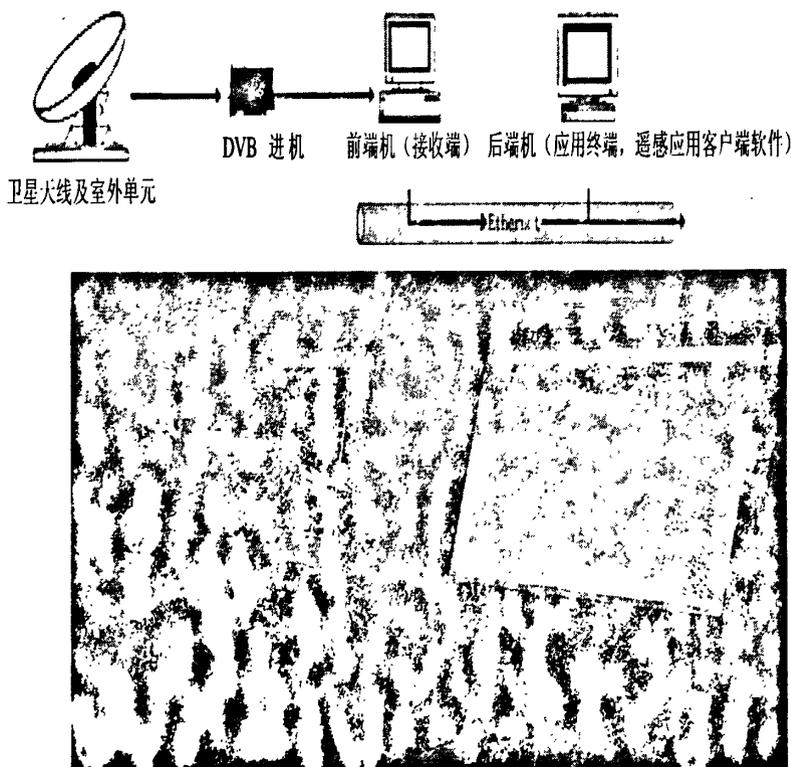


图 8.2 DVB-S 平台用户站结构图

## 8.2 遥感在环境科学中的应用进展

遥感 (Remote Sensing) 是指通过某种遥感器从空中或太空获取地表各类地物信息, 并对这些信息进行提取、分析, 以此来测量与判定地表目标地物的性质或特性。常用的遥感数据有美国的 Landsat 的 TM 与 MSS、法国的 SPOT、印度的 IRS 以及高光谱的 MODIS 等卫星遥感数据。20 世纪 80 年代后人们开始尝试间接的方法, 孙天纵等根据城市热岛情况对城市大气污染进行估计; 盛业华等利用 1989 年 11 月 30 日拍摄的航空热红外扫描数据结合地面同步辐射温度数据对山西晋城市地面热场强度对大气污染的影响进行了研究; 张韬 (1996) 等利用 1:4 万彩红外航片和 TM 图像结合地物波谱测定、叶表面内大气污染元素的定量测定制作了呼和浩特市污染等级分布图; 王雪梅 (2001) 等根据野外现场的观测将要感图像像元概化为土壤、植被、水体等基本信息类型的线性集合与污染气体信息的简单叠加, 经过图像辐射校正、大气校正、信息缺失补

偿以及图像增强等处理,以珠江三角洲为实验区,将大气污染信息定量地从地面地物信息中分解出来,得到直观、定量的污染分布结果。国外 Alfredo D Collado 等把光谱混合分析(SMA)应用于沙漠化土地监测;WangJian 等利用“多层”技术及决策树技术对沙地类型等信息进行提取,并就沙化土地盖度的遥感研究也取得了很大的进展。

国内石玉芳等运用不同时期的航片和 TM 影像,结合大量的地面资料,来研究土壤风蚀、沙化的发生及发展规律;裴浩等应用 NOAA-AVHRR 第三通道的红外辐射信息作为监测指标,对科尔沁沙地进行监测,李宝林、周成虎用 NOAA/AVHRR 数据利用适宜在低密度植被区的 MSAVI 来提取荒漠化信息;李金桐、镡拉提等利用 MODIS 数据采用改进了的归一化植被指数 DEVI 来进行荒漠化监测分布制图。

### 8.3 EOS/MODIS 遥感资料数据特性

DVB-S 接收的 MODIS 是 Terra (EOS-AM) 和 Aqua (EOS-PM) 系列卫星的主要探测仪器,也是 EOS 系列卫星平台上唯一直接发布的对地观测仪器。MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在  $0.4\sim 14\mu\text{m}$  的电磁波谱范围内。MODIS 仪器的地面分辨率分别为 250m、500m、1000m,扫描宽度为 2330k,在对地观测过程中,可同时获得 6.1MB 的来自大气、海洋和陆地表面信息,每日或每两日可获取一次全球观测数据。多波段数据可以同时提供反映陆地、云边界、云特性、海洋水色、浮游植物、生物地理、化学、大气中水汽、地表温度、云顶温度、大气温度、臭氧和云顶高度等特征的信息,用于对陆表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。EOS/MODIS 数据的量化等级为 12Bits,比 NOAA/AVHRR 的 10Bits 具有更高的精度,而且在系统的设计上也具有更高的饱和亮温。EOS/MODIS 数据的另一个优势是其具有极好的定位精度,经过 1A 处理后每个空间单元都包含地理经纬度、高度、卫星天顶角和方位角、卫星范围、太阳天顶角和方位角等 8 项内容。使得地面几何定位精度达到星下点 0.1 像元,边缘 0.3 像元的精度,而且

不需要用户进行复杂的操作，这就大大提高了定位的精度和用户的方便程度。MODIS 的传感器除在发射前进行定标外，在飞行过程中还利用黑体、阳光漫射器、阳光漫射器稳定性监测器和光谱辐射校正器对其进行定标校正，保证其图像的数据量化的准确性<sup>[6-9]</sup>，MODIS 数据的各级产品说明及通道、波段分别见表 8.1 和表 8.2。

表 8.1 MODIS 数据的各级产品说明

数据级数	数据定义
Level-0	原始分辨率的仪器数据，时序存储，删除了备份数据包
Level-1A	由定标数据和其他的辅助数据重定格式后的 Level -0 级文件。以单独的文件存储的 1km 空间像素的定位信息。
Level-1B	在 L1A 数据上应用定标算法后产生的辐射率或辐射通量密度
Level-2	由 L1B 数据应用相应的算法得到的地球物理参数数据
Level-2G	和 L2 产品相似，但包含了像素到网格的映射
Level-3	平均化、网格化后的地球物理参数数据，这些参数在时间和空间上被校正和复合
Level-4	由低级数据模型输出或分析的结果，比如由多个设备得到的参数

表 8.2 MODIS 的通道、波段及主要用途

通道	波段宽度	主要用途
1~7	0.459~2.135 $\mu\text{m}$	陆地、云特征及边界
8~19	0.405~0.965 $\mu\text{m}$	海洋水色、浮游生物、生物地化、大气水汽
20~25	3.660~4.549 $\mu\text{m}$	地球表面、云及大气温度
26~30	1.360~9.880 $\mu\text{m}$	卷云、水汽及臭氧
31~36	10.780~14.385 $\mu\text{m}$	地球表面、云顶温度及云顶高度

#### 8.4 裸土风蚀开放源植被覆盖状况反演

研究表明，利用在轨卫星的红光和红外波段的不同组合进行植被研究非常好。这些波段在气象卫星和地球观测卫星上都普遍存在，并包含 90% 以上的植被信息。这些波段间的不同组合方式统被称为植被指数。在遥感应用领域，

植被指数已广泛用来定性和定量评价植被覆盖及其生长活力。由于植被光谱表现为植被、土壤亮度、环境影响、阴影、土壤颜色。利用卫星遥感资料可以获得多种植被指数，目前已经定义了 40 多种植被指数。

由植被的反射特性可知，植物叶片组织对蓝光(470nm)和红光(650nm)有强烈的吸收，对绿光尤其是近红外光有强烈反射，植被覆盖越好，红光(Red)反射越小，近红外光(NIR)反射越大，任何强化Red和NIR差别的数学变换都可以作为植被指数描述植被状况。归一化植被指数(NDVI)是目前已有植被指数中使用最广的一种，它采用通道间的比值形式，可以部分地消除太阳高度角、卫星扫描角、大气状况等的影响。NDVI(Normalized Difference VI)归一化差异植被指数，对绿色植被表现敏感，通过比值可以消除大部分与太阳角、地形、云/暗影和大气条件有关的辐照度条件的变化，但对土壤光学特性很敏感，很难解释未知土壤背景下的低覆盖度植被。NDVI可以对农作物和半干旱地区降水量进行预测，常被用来进行区域和全球的植被状态研究。RVI(Ratio Vegetation Index)比值植被指数，能够消除土壤背景不同而引起的差异，RVI对大气影响敏感，只有在植被覆盖浓密的情况下效果最好。归一化植被指数：

$$NDVI = \frac{(X_{nir} - X_{red})}{(X_{nir} + X_{red})} \quad (8.1)$$

式中， $X_{nir}$ 和 $X_{red}$ 分别是近红外波段和红光波段的反射率，对于MODIS数据来说，分别对应于CH1波段(0.62 $\mu$ m—0.67 $\mu$ m)和CH2波段(0.841 $\mu$ m—0.876 $\mu$ m)。从MODIS资料中每月选择最为晴空资料一景，根据(8.1)式计算出晴空NDVI值，再通过最大值合成法(MVC)将每景NDVI数据合成为年度最大NDVI数据，MVC法可以进一步消除大气对NDVI削弱的影响以及消除云的影响，MVC成方法为：

$$Max\_NDVI = Max[NDVI(t)] \quad (8.2)$$

式中，Max\_NDVI为年度最大NDVI值，t为月份。利用星地通公司开发的软件，可以直接完成上面公式的运算，可以直接对接收到的资料进行反演，图8.3为反演前MODIS资料，反演的2007年4月14日华北地区土地情况见图8.4。



8.3 MODIS 原始资料

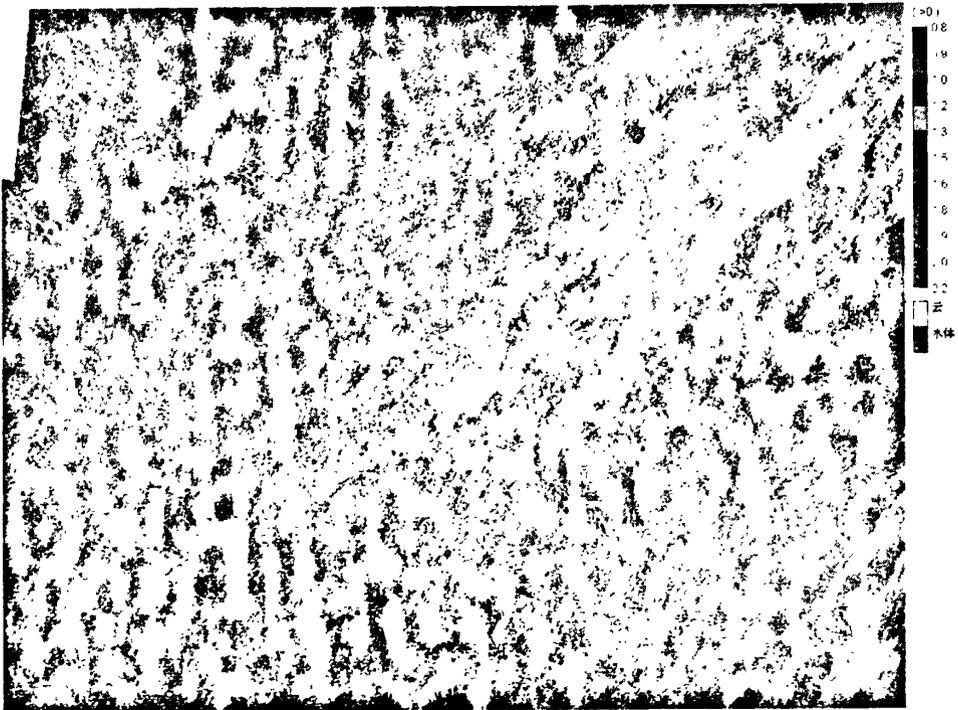


图 8.4 反演的 2007 年 4 月 14 日华北地区土地情况

以天津市为例，天津市裸土归一化植被数见图 8.5、8.6，2006 年 12 月份裸土风蚀类型和 2007 年 4 月份裸土情况。

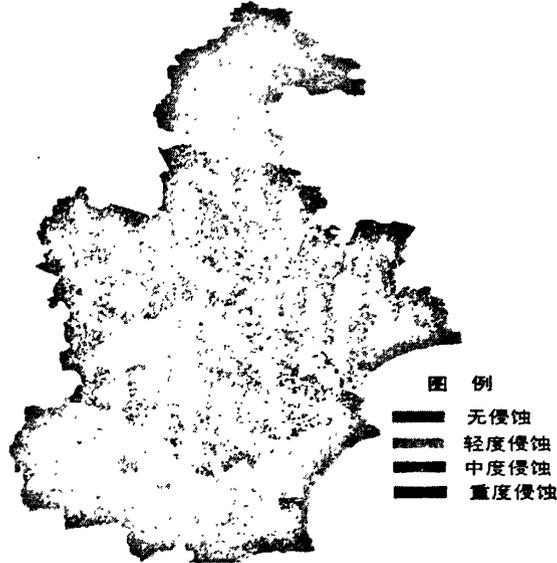


图 8.4 天津市 2006 年 12 月风蚀类型

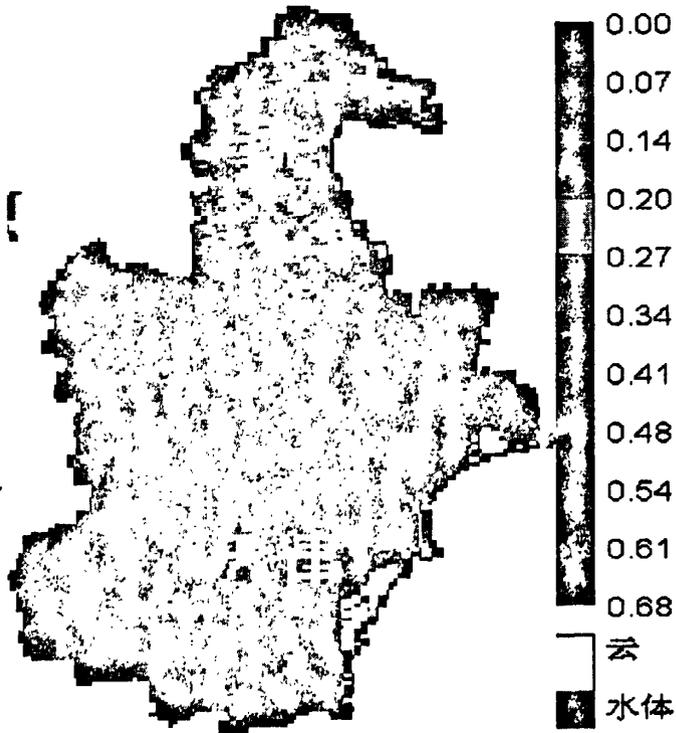


图 8.5 2007 年 4 月 28 日天津区域土地归一化植被指数

## 8.5 裸土风蚀开放源起尘传输途径监测

通过分析 NOAA 卫星的 AVHRR 资料和 FY-1D 资料,发现风蚀沙尘颗粒在各通道均有不同程度的反映。1、2 通道中沙尘的反射率较高(介于云和沙漠之间);4、5 通道的亮温低于晴空地表高于云;在 3 通道中沙尘表现的很独特,其亮度温度为所有研究目标物中最高的,表明通道 3 包含较多的沙尘信息。在此基础上对沙尘信息进行有效提取,从而达到利用遥感数据对沙尘暴实时监测。通过中红外及可见光域值法提取出包含裸土风蚀沙尘区的大致区域,然后利用像元叠加分析法,把已提取的沙尘大致区域与 B1、B2、B20—B31 彩色合成图的像元叠加分析,去除碎云和地表高亮目标,从而可以得到较精确的沙尘分布范围。B1 的域值取 0.16~0.4,因为云的表现反射率比沙尘暴要高,一般都大于 0.4,而下垫面地表在 B1 的表现反射率一般小于 0.16;B20 的域值取 308~325 K,这个区间介于云及下垫面的亮温之间。

利用星地通公司开发的 DvbsImg 极轨卫星处理软件中,通过通道计算和反演,利用遥感卫星我们可以连续监测沙尘暴的移动路线(如:2007 年 3 月 31 日),在偏西大风的输送下,沙尘暴已经移动到环渤海地区。沙尘暴监测图像见图 8.6。

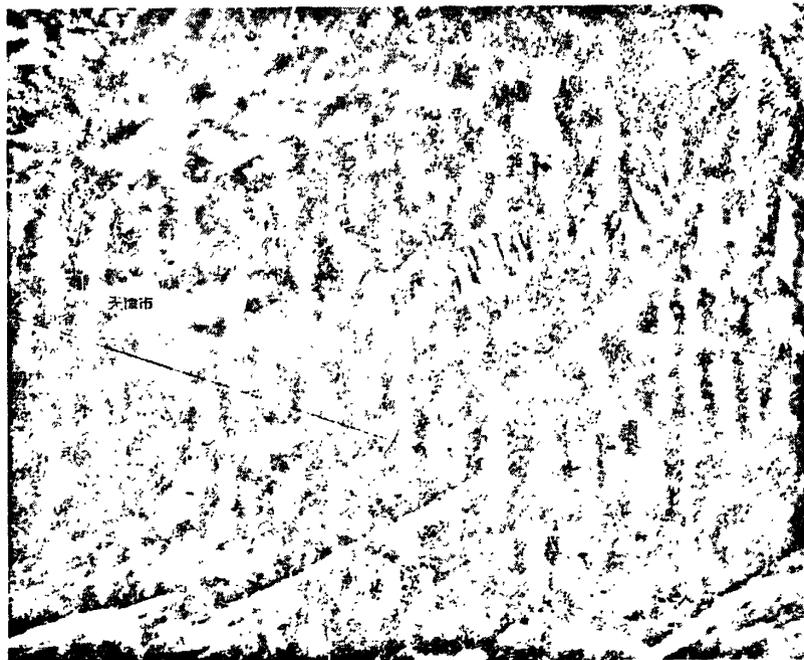


图 8.6 2007 年 3 月 31 日沙尘暴动态

以上云图的合成方法是：为了凸现分类云图中的沙尘区，在图象处理时，采用了多通道彩色合成方法，将红外通道、可见光通道和分类图分别置于图象象元的红、绿、蓝(R、G、B)三分量色，形成彩色合成图。在形成彩色合成图中，可以清晰的分辨出地表、云区、沙尘暴区(棕黄色)。利用红外通道可对沙尘暴进行 24h 不间断的动态跟踪监测。取最近时次与前一时次相同区域的辐射亮温之差，可得到红外通道辐射亮温变差图。通过对变差图中的系统位置、范围、密度及中心位置等动态分析，可获取地表以上移动目标物(云系和沙尘暴)的位置变化和高度变化等信息，并利用沙尘暴阈值分类指标识别出沙尘区域在红外通道变差图上，沙尘区域前沿的变差极值中心一般为沙尘暴移入区域的强值中心，通过分析变差极值中心的位置变化，可得出沙尘暴区域中心近一个小时的移速、向及预测未来变化趋势。

利用星地通公司开发的 DvbsImg 极轨卫星处理软件中，通过通道 2-2-1 计算和反演，整个华北地区无沙尘天气现象，而天津是却有扬尘天气发生，说明是本地裸土风蚀起尘影响，见图 8.7。

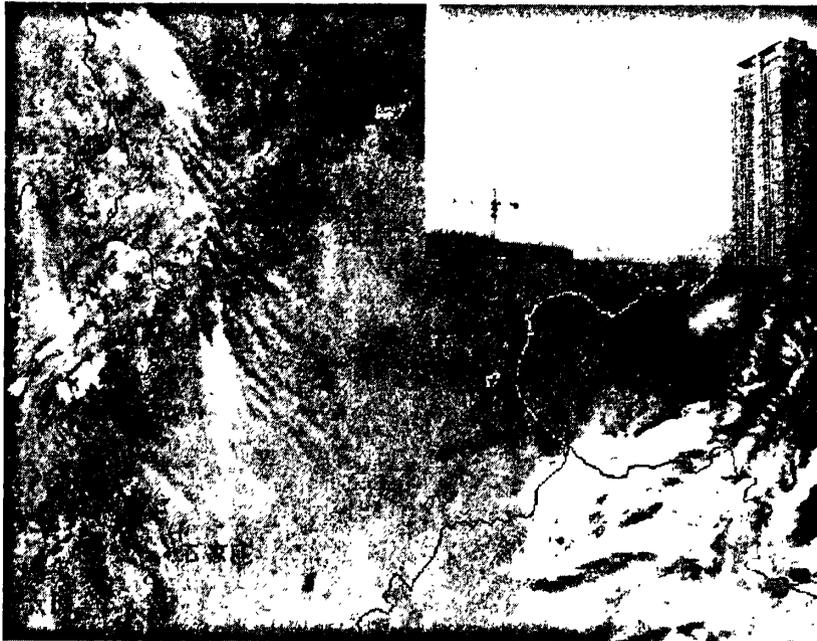


图 8.7 2007 年 5 月 8 日卫星遥感华北地区无沙尘暴发生而天津有扬沙天气

## 8.6 裸土风蚀开放源土地类型分类

植物绿叶中的叶绿素对光线有强吸收,从而导致在  $0.5\mu\text{m}\sim 0.7\mu\text{m}$  波段(可见光绿光至红光)的反射率低于 20%,在  $0.7\mu\text{m}\sim 1.3\mu\text{m}$  的反射率迅速增至约 60% (Hoffer 和 Johansen, 1969)。植被指数通常选用对绿色植物(叶绿素引起的)强吸收的可见光红波段( $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ )和对绿色植物(叶内组织引起的)高反射和高透射的近红外波段( $0.7\sim 1.1\mu\text{m}$ ),这两个波段是植物光谱、光合作用中最重要的波段,而且他们对同一生物物理现象的光谱响应截然相反,因此可以对他们用比值、差分、线性组合等多种组合来增强或揭示隐含的植被信息,根据这一特性,通过不同通道的计算来建立植被指数。归一化植被指数(NDVI)是植物生长状态及植被空间分布密度的最佳指示因子与植物分布密度呈线性相关,适合于早、中期发展阶段或低覆盖植被监测,归一化处理部分消除了由太阳高度角、卫星观测角、地形和大气有关的影响。比值植被指数是 RVI 与叶面积指数,叶干生物量,叶绿素含量相关最好。在植被高覆盖度下,对植被十分敏感,适合于植被生长旺盛,高覆盖度监测的应用以及估算和监测植物生物量,当植被覆盖度小于 50% 时,分辨能力下降,对大气状况敏感。遥感影像解译标志研究是裸露土壤风蚀监测的重要内容,主要是对影像颜色、形状特征进行分析。颜色特征是地面物体的电磁波特征在卫星相片上的反映,各种地物物质成分、表面结构以及表面温度等的不同,造成光谱特性的差异,这种差异反映在影像上则表现为色彩差异;形状特征又是色彩在空间上的组合排列,是由于地面起伏和地表不同物质对相同波段电磁波的吸收与反射不一样所造的图形差异。遥感影像解译标志的建立主要是结合野外调查与影像分析来确定。不同风蚀土地类型在影像上的色调、形状、纹理、结构特征各异。荒漠化土地解译标志主要有:①图像标志,指荒漠化土地的色调、影纹、形状、大小和阴影。②地貌形态标志,指各种反映土地风蚀化程度的微地貌景观。一定类型的风蚀地貌代表一定的土地风蚀化发展程度和阶段。同样,土地风蚀化地貌形态的组合特征也是确定风蚀化程度级别的重要标志。③数量标志,如单位面积内流沙和植被所占百分比,华北及周边地区土地利用监测图 8.8。

土地退化指数是指评价区域内水蚀、重力侵蚀、风力侵蚀和工程侵蚀的面积占评价区域总面积的比重,是生态系统退化的重要表征之一。土地退化指数 =  $(0.05 \times \text{轻度侵蚀面积} + 0.25 \times \text{中度侵蚀面积} + 0.7 \times \text{重度侵蚀面积}) / \text{区域面}$

积可计算出各区（县）2006年10~12月的土地退化指数（见天津市2006年10—12月土地退化指数图），各区县土地退化指数在0.001~0.145之间变动，由于冬季植被减少、裸地增加，其风蚀加剧，第四季度塘沽尤为严重，其土地退化指数为0.145；宁河、静海、津南、宝坻、汉沽与西青土地退化指数也在0.033~0.066之间；其他各区县均有部分地区存在风蚀现象，其土地退化指数在0.001—0.023之间。

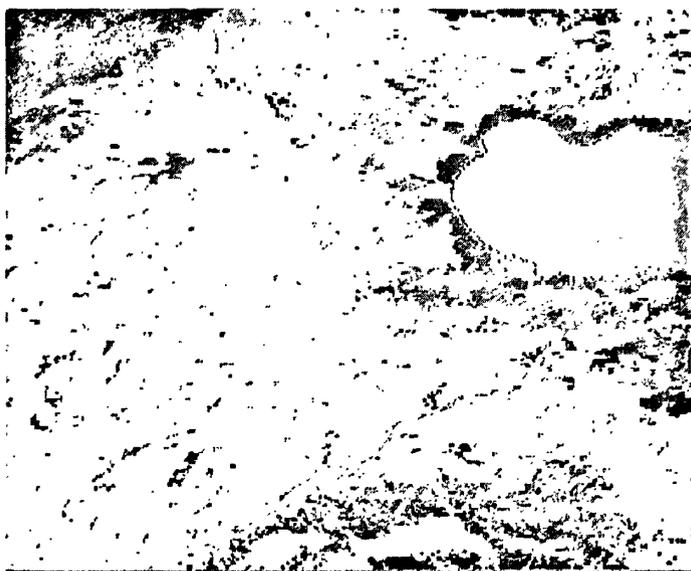


图 8.8 2007年4月26日华北及周边地区土地利用监测

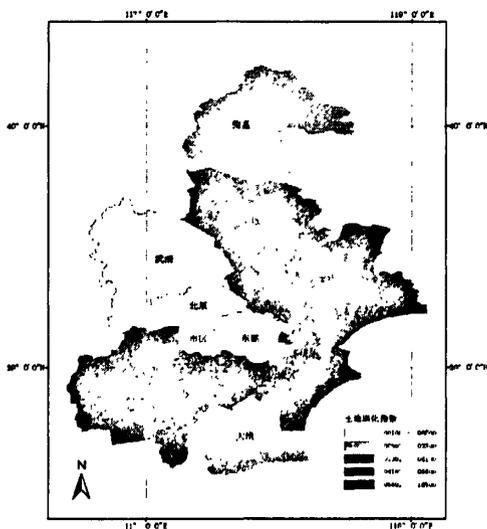


图 8.9 天津市 2006 年 10—12 月土地退化指数

## 8.7 本章总结

(1) 利用植被指数法对裸土风蚀开放源的植被覆盖情况进行监测区域的遥感反演。

(2) 利用 DVB-S 监测了 2007 年 3 月 31 日风蚀引发的沙尘暴移动途径, 并且利用卫星遥感图片和地面图片同步证明了天津市一次浮尘天气是由于本地裸土起尘而引起的。

(3) 通过归一化方法监测植被覆盖情况反演风蚀裸土开放源和类别、监控颗粒物和沙尘的传输路径、及时监测开放源的动态变化。

(4) 天津市 2006 年 10—12 月土地退化指数, 各区县土地退化指数在 0.001~0.145 之间变动, 由于冬季植被减少、裸地增加, 其风蚀加剧, 第四季度塘沽尤为严重, 其土地退化指数为 0.145; 宁河、静海、津南、宝坻、汉沽与西青土地退化指数也在 0.033~0.066 之间; 其他各区县均有部分地区存在风蚀现象, 其土地退化指数在 0.001—0.023 之间。

### 本章参考文献

- [1] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理和算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 109-130.
- [2] P. Krishna Rao, 许健民等译. 气象卫星—系统、资料及其在环境中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 20-45, 379-386, 403-411.
- [3] 魏合理, 胡欢陵. 用太阳光谱遥测大气污染气体 NO<sub>2</sub> 的含量[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 220-226.
- [4] 王雪梅, 邓孺孺, 何执兼. 应用遥感技术监测珠江口大气状况[J]. 上海环境科学, 2001, 20(11): 546-548.
- [5] 邓孺孺, 田国良, 王雪梅等. 大气污染定量遥感方法及其在长江三角洲的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(3): 184-185.
- [6] 黄中华, 王俊德, 陈作如. 遥感傅里叶变换红外光谱的大气层析术[J]. 光谱学与光谱分析, 22(3): 407-408.
- [7] 熊利亚, 季海萍, 庄大方. 应用 MODIS 数据研究沙尘信息定量化方法探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 327-332.
- [8] 王新强, 杨世植, 朱永豪等. 基于 6S 模型从 MODIS 图像反演陆地上空大气气溶胶光学厚度[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 629-634.
- [9] Claire L. arkinson, Reynold Greenstone. EOS Data Products Handbook Volume[Z]. NASA Goddard Space Flight Center. 4~7.
- [10] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000, (3): 45-48.
- [11] 唐俊梅, 张树文. 基于 MODIS 数据的宏观土地利用/土地覆盖监测研究[J]. 遥感技

术与应用, 2002, 17(2): 104-107.

- [12] 熊利亚, 李海萍, 庄大方. 应用 MODIS 数据研究沙尘信息定量化方法探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 327-332.
- [13] 刘志丽, 马建文, 张仁健等. 利用遥感综合分析西风引导气流与地形对沙尘运移路径的影响[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 330-334.
- [14] 刘闯, 陈圣波, MoDai 等. EOS/MODIS 数据在青藏高原冰雪季节性变化信息自动提取中的应用研究[J]. 遥感信息, 2001, (4): 30-31.

## 第九章 裸土风蚀型开放源控制技术研究

目前,人们还很难改变气候因素。要想控制和治理风蚀首要考虑人为因素<sup>[1-3]</sup>。国内外许多学者在60多年的时间里通过各种方法、试验装置在田间和实验室内对裸露的土地、沙地、农田等风蚀和起尘进行了一系列的调查研究,表明采取适当的保护措施,如农田防护林、作物残茬覆盖、增加地表粗糙度、改变土壤特性,改变农田起垄方向等可有效地减少农田风蚀和土壤的损失。

### 9.1 风蚀型开放源评估方法

#### 9.1.1 开展土地利用状况调查和遥感监测评估

开展土地利用和土地覆盖状况调查与监测,确定风蚀的区域及范围,为风蚀治理和防治提供必要保证。首先进行调查和资料收集,调查地块的大小、土壤类型、风蚀模数,土壤可蚀性因子。利用遥感影像调查区域遥感监测的土地利用、土地覆被分类、编制监测区域的土地利用、土地覆被分类现状图,进行土地利用、土地覆被分类统计,利用遥感影像重点监测研究区域近几年来与生态环境密切相关的土地利用变化情况。其次是应用遥感技术进行风蚀动态监测,关键是提取影像风蚀的一些因子信息,例如植被覆盖等。植被覆盖度因子是影响风蚀最为活跃的因子<sup>[4]</sup>。遥感技术能实现高精度的植被覆盖度以及土地利用现状制图,利用遥感影像提取植被覆盖度、土地利用信息在风蚀的宏观监测中有着极为重要的意义<sup>[5]</sup>。

基于以上的思路,风蚀遥感调查的一般做法是:当植被覆盖较好时,以植被覆盖度调查为主;当植被覆盖度较小时,除依据遥感影像上提取的植被信息外,要考虑坡度的影响以及地表土层的情况等;当植被覆盖度极小或无植被覆盖时,可将不同风蚀土壤在光谱特征上的差别作为判别依据。由于土壤剖面中颗粒组成分布的不均匀性,当风蚀土壤裸露出不同层次时,质地变化较大,也直接影响风蚀土壤的光谱特征<sup>[6]</sup>,以DVB-S遥感全国植被覆盖情况、土壤墒情、地表温度等为例,遥感监测结果见图9.1。

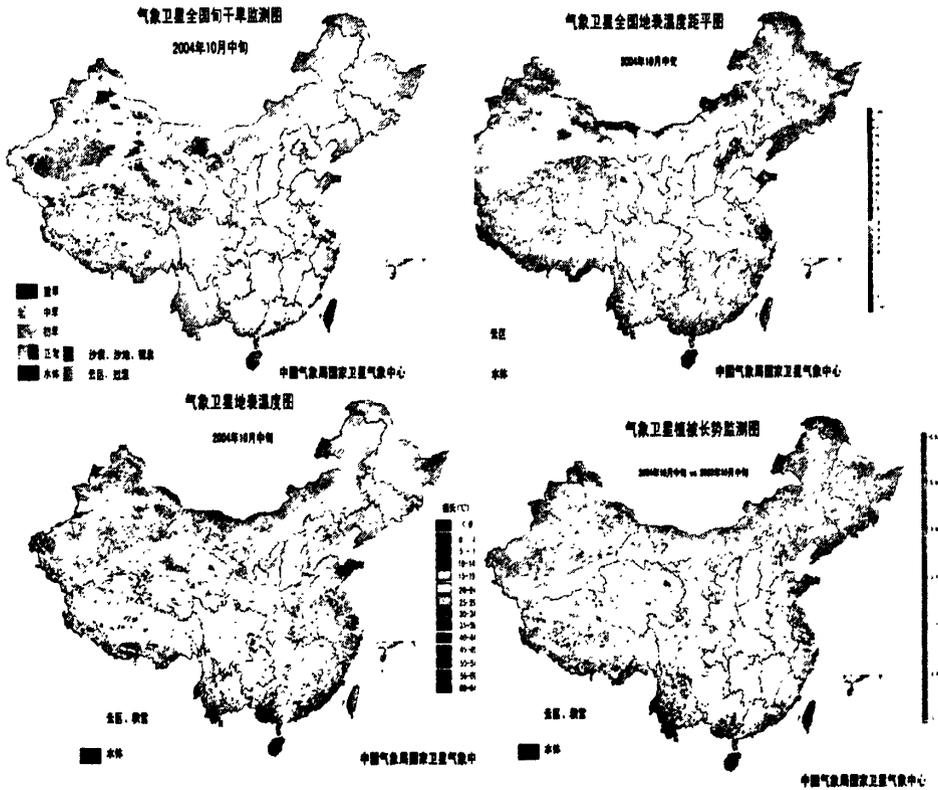


图 9.1 2004 年 10 月中旬土壤水分、干旱植被覆盖情况遥感监测

将遥感监测与 GIS 相结合，以数字遥感影像为主，结合地形图等相关资料，在计算机上通过对植被覆盖度、坡度、沟谷密度、植被结构、地表组成物质、海拔高度、地貌类型等间接指标的人工综合分析，获取风蚀信息。遥感数字图像计算机解译与地理信息系统相结合，不仅能实现地学专题信息的智能化获取，迅速更新地理数据库，而且可以利用地理信息系统的强大的空间信息处理能力，为遥感技术在深度和广度上的应用提供良好的技术环境与支持，同时也为遥感数据分类精度的提高提供有力的支持<sup>[7-9]</sup>。

### 9.1.2 土地利用状况调查和遥感监测总体技术流程

土地利用和覆盖的遥感调查、监测技术流程主要包括：前期准备、数据源获取、数据预处理、信息提取、野外调查、后处理和统计分析等环节（见图 9.2）。

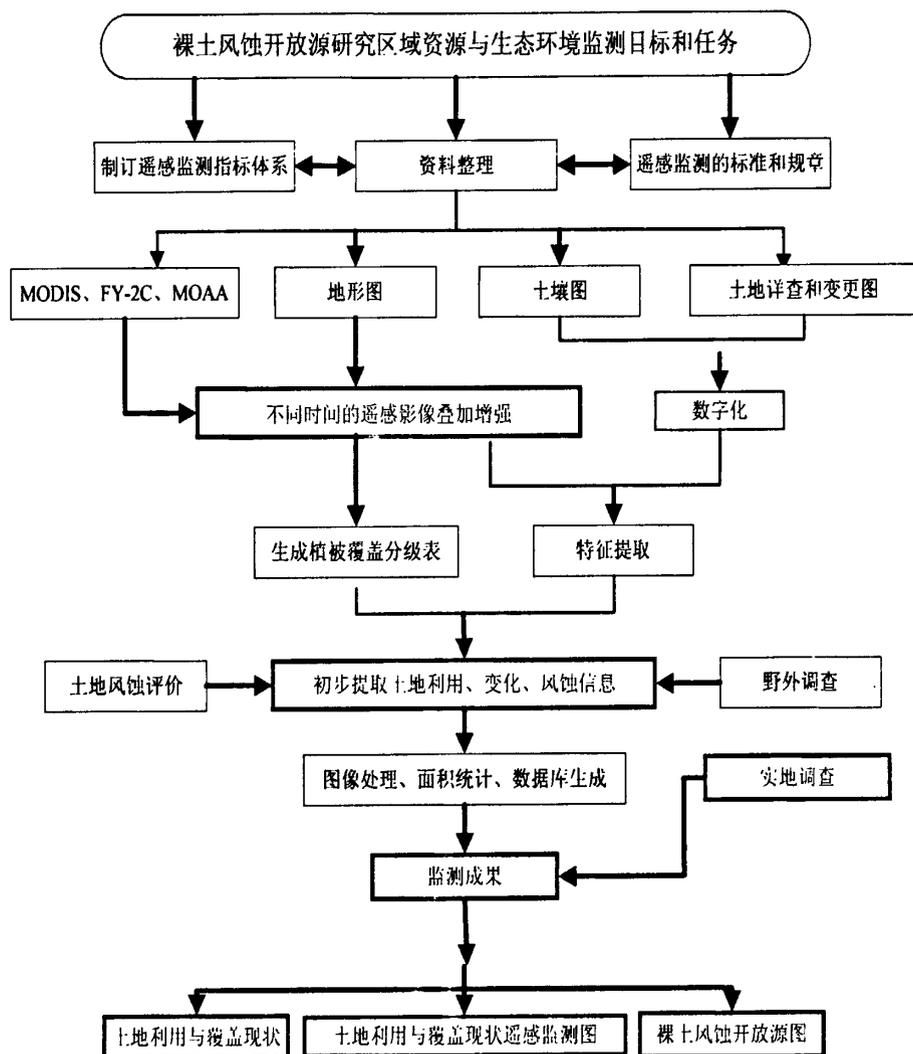


图9.2 研究区域的土地利用和覆盖的遥感调查、监测技术流程

调查的前期准备阶段主要制订遥感监测指标体系，并根据遥感动态监测的标准、规程和相关标准制定技术方案，以及搜集、分析和整理相关资料。数据预处理阶段主要根据地形图，对不同时期相遥感影像叠加、增强，并制作影像图，同时对土壤图、土壤质地图和土地利用现状图扫描数字化。信息提取阶段主要根据环境遥感监测内容，提取特征图斑，初步提取土地利用、土地覆被及其变化、土地退化和生态环境建设状况的信息。外业调查主要对信息提取阶段中的不确定信息进行外业核实。后处理是依据外业调查结果，修改提取的土地利用、土地覆被及其变化、土地退化和生态环境建设状况信息。实地抽检阶段是对后处理的监测信息进行核实和精度评价。在完成了实地调查、后处理，对

提取的信息要抽取一定比例到实地进行验证。统计分析、提交成果阶段主要包括数据汇总、成果图件制作和编写文字报告,最后提交文字、数据、图件等成果。

在遥感监测工作中关系到监测结果准确性的一个最重要环节即野外调查,在调查中收集相关资料是基础,必须收集的资料包括:土地详查、土地变更调查等文字、数据和图件资料(国土资源部门);土壤类型图、土壤质地图等图件及文字资料(农业部门);农业区划方面以及其它相关文字和图件资料(计划部门);社会经济统计资料(统计部门)等方面图件及文字资料。在完成了野外预查、室内解译分析工作后,应再次到实地对解译结果进行验证,对不同地貌类型的土地利用及变化图斑、土地退化图斑和室内解译的图斑进行验证,这样才能完成外业调查的整个工作。

### 9.1.3 地表特征遥感调查

裸土风蚀与风速、地表土壤物理特性(颗粒直径、机械组成)、地表覆盖及粗糙度状况密切相关。风速是风蚀的起动力,当风速增加时,风向上抬起裸土颗粒的力和拖曳力也相应增加,引起大颗粒侵蚀,同时搬运裸土颗粒的能力也相应增加。研究发现如果在裸地、农田等地表没有或很少保护的情况下,大风可以在短时间内搬运走大量的土壤颗粒。W. S. Chepil 和 Woodruff 研究指出直径小于 0.84mm 的颗粒最易于风蚀。因此,小于 0.8mm 的土壤颗粒增加时,易于被侵蚀的土壤粒子也相应增加,土块、结皮层以及水分增加了土壤的凝聚力,从而减少了土壤分离和产生疏松粒子的数量。

W. S. Chepil 研究表明地表土壤水量的变化也是影响裸土颗粒风蚀的重要因素,研究区域内如果降雨量少,气温偏高,土壤会变得干燥,裸土颗粒变得分散,风容易将表层土壤颗粒带到空气中,土壤水分含量高,会使裸土颗粒粘成较大的块状,不易被风吹走。

观测表明土壤风蚀危害程度与旱耕地有密切关系。土地翻耕之后风蚀量在 7~12 级风力作用下,为未翻耕土地风蚀量的 14.8 倍。已有的风洞试验表明农垦扰动作用破坏了土壤结构和地表的植被,降低了土壤表面硬度,并使大量粉尘、黏粒物质出露。在同样风力条件下,易受风蚀起尘。

另一方面,表土的裸露使大量被风吹蚀的土壤颗粒挟带在气流中,形成了

挟沙风。植被覆盖度的增加可以增大地表粗糙度，对起尘有明显的抑制作用。观测表明沙地植被盖度达 15%~25%时，地面风蚀量减少到光裸流动沙地的 21%~31%；而当植被盖度达 40%~50%时，风蚀量仅为流动沙地的 0.95%<sup>[10-13]</sup>。

因此，从影响风蚀的因素出发开展地表特征调查，才能有效控制、治理风蚀、合理利用土地，增强生态区域的保护，保障自然资源可持续发展。

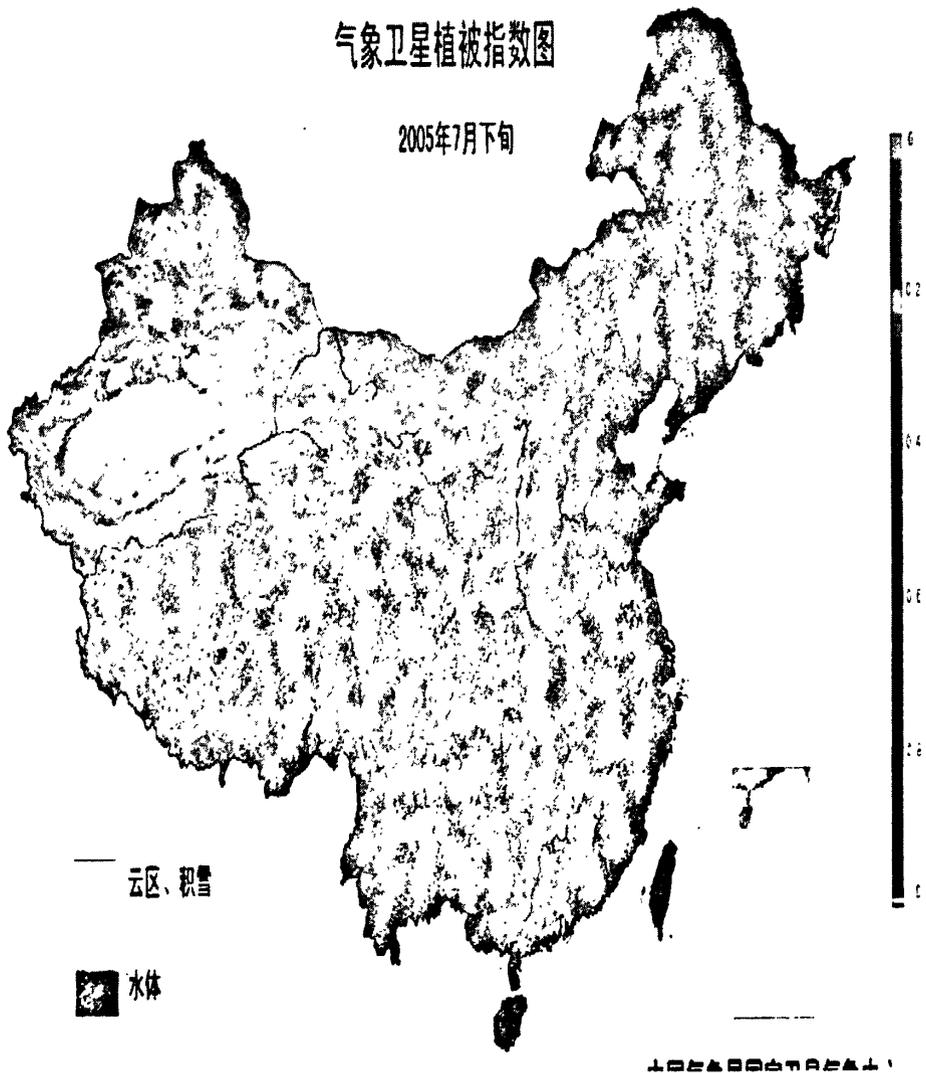


图 9.3 2005 年 7 月下旬植被指数遥感影像

## 9.2 裸土风蚀型开放源风蚀防治技术

### 9.2.1 农田防护林的风蚀防治研究

研究表明农田在休闲期非常容易发生风蚀,对于环境的影响是非常严重的,因此农田的防治风蚀问题应该放在首位。从调查来看我国农田在庄稼收割完毕后,对农田的保护预防工作做的非常不好,大片的农田处于裸露状态见图9.4。



图9.4 城市近郊秋冬季节裸露的农田(2007年2月9日,天津郊区)

国内外研究表明,裸露的农田土壤非常容易发生风蚀、降低土壤的养分、加速土壤水分的蒸发等。发达国家对农田土壤风蚀的防治主要采取的措施是设置风障,如农田防护林、灌木丛、高秆作物等,以改变风向,降低风速,减少土壤颗粒与地表的分离和输送,提高土壤抗风蚀能力,达到限制土壤颗粒运动的目的。针对我国干旱半干旱地区土壤风蚀发生机理及影响因子,一些严重沙化旱作农田已到了非退耕不可的地步,所以退耕还林还草是这些地区的主要任务。防护林具有改善小气候、涵养水源、保持水土、防风固沙和改善生态环境等功效。国内外对林带、林网防护效益的研究已有近百年的历史<sup>[14]</sup>。前苏联是开展防护林研究较早的国家之一,早在1931年就在卡明草原试验站开展了防护林的研究,此后又创建了农林改良土壤研究所,承担防护林气象效应的研究<sup>[15]</sup>。

Jensen M. 和 Hageen L. J 等都对防护林带上空气流的运动机理作了大量的研究<sup>[16-19]</sup>。20世纪70年代以来, Plate 等把流体力学的一些理论引入到林带防护效能和防风机理的研究中<sup>[20-25]</sup>。在国内高尚武等通过长期大尺度的对比观测试验, 对乌兰布和沙漠大范围绿化工程和环境质量的改善作用进行了研究。周世威等采用野外观测与风洞模拟实验相结合的方法, 对不同结构林带的防风性能进行了研究。王雪芹等对乌兰布和沙漠新开发人工绿洲防护林体系的综合效益沙尘暴和风沙灾害的研究进行了评价, 得出防护林对于防沙和治理风蚀有显著效果<sup>[26-30]</sup>。

防护林防止风蚀的功能是抵挡风沙侵袭的屏障, 在内陆地区的防护林可以起到保护农作物不受风害的作用, 主要是由于改变了林带附近风速的分布, 在林带背面形成了一个明显的弱风区, 但是随着远离林带, 风速又会回到原来的状态。防风距离为树高的35-37倍, 可降低风速60%-75%。气流遇到防护林后一部分从下部通过, 另一部分从林冠上越过。一般情况下, 防护林的防护距离与防护林带的高度成正比。最后当风向垂直于林带时, 林带减低风速和改变气流结构的效果最好。风向与林带走向的交角变小时防护距离也随之减小, 一般交角不得小于45度。

### 9.2.1.1 农田防护林的风蚀防治效果

农田防护林的预防风蚀作用已有很多报道, 汪季等人研究的结果, 说明防护林可以降低风速减少农田土壤风蚀<sup>[31]</sup>。袁嘉祖指出紧密型防护林的有效防护范围为20-50H(H为防护林的平均高度), 在风速不大的地区, 疏透型防护林比密蔽型的效益好<sup>[32]</sup>。张劲松等(2002)对防护林带的动力效应进行了研究, 发现通过其的防护作用使农田的平均风速约降低了18.9%, 距林带高0.5倍距离处(0.5H)风速的降低率可达30.0%左右, 距林带4H处至农田中心的风速降低率为1.8%, 且防护农田内理查逊数(Ri)总体的平均值比对照点约高4.6%, 动力速度总体平均值比对照点约低14.7%。刘艳萍(2003)对防护林带降尘量的研究发现: 降尘量在林带的林缘至林网中分布有差异, 其中疏透度为0.24~0.34的防护林林内降尘效果较好, 在相同疏透度条件下, 网格状结构防护林对沙尘的降解作用大于带状结构的防护林。朱廷曜(2001)经研究也认为: 透风系数与林网的防护效益密切相关, 透风系数为0.25和0.45~0.5的林带平均风速下降率分别为44%、38%, 有效防护距离则分别为20H~25H、25H~30H<sup>[33-35]</sup>。

### 9.2.2 保护性耕作

保护性耕作是相对于传统耕作的一种新型耕作技术。其前身叫“免耕法”，随着研究的深入和进一步推广，发现实行完全免耕只能适应部分土壤和自然条件，1980年后改称保护性耕作，国外保护性耕作定义为“不引起土壤全面反转的耕作方法，要求用大量的作物秸秆残茬覆盖地表”，美国要求地表作物秸秆残茬覆盖达到30%以上。据澳大利亚谷物研究发展中心（GEDC）介绍，保护性耕作在澳大利亚取得了显著效果，一是有效抑制了沙尘暴的发生，澳大利亚最近发生的沙尘暴是在1992年，此后再也没有发生过，他们总结的经验就是农田实行保护性耕作、二是增加了粮食产量、三是提高了土壤的肥力。常旭虹<sup>[36]</sup>对保护性耕作方式留茬对田间扬沙情况的影响研究表明：留茬、旋耕和常规翻耕3种不同耕作方式对田间扬沙的影响有明显差异。在60cm高度内，留茬比常规翻耕减少田间扬沙量的34.9%，而比旋耕减少61.5%，因此留茬是一种抑制田间扬沙、有效遏制沙尘暴的保护性耕作方式，是发展现代生态农业的集约型耕作方式。

目前我国的大部分农村，特别是在北方干旱、半干旱地区，人们还延续着传统的耕作方式（收割后庄稼秸秆割掉，并翻耕土地），这种耕作方式严重破坏了地表结构力，是引起农田风蚀的一个主要因素。国外一些发达国家和国内部分地区采取的保护性耕作不仅能提高土壤的抗风蚀能力，而且也能提高农作物产量，在干旱、半干旱地区是一种较为理想的耕作方式，保护性耕作是相对于传统耕翻一种新型耕作技术。由于保护性耕作技术减少了对地表的翻动，最低限度破坏土壤表层结构力，而且该措施使作物残茬更容易多年地保留在地表上，它可以减慢地面风速，保护土壤颗粒不被分散，并且留住已被吹动的土粒。因此，保护性耕作可以极大限度地减少土壤风蚀。在我国推广保护性耕作，对于预防风蚀将会取得明显的社会效益和经济效益。国外农田保护性耕作庄稼留茬、不同起垄方式见图 9.5、9.6、9.7。



图 9.5 国外农田保护性耕作庄稼茬



图 9.6 国外农田不同起垄方式



图 9.7 保护性耕作套种庄稼

### 9.3 风蚀开放源防治其它类型技术

除了本文重点研究的农田裸土风蚀开放源外，如裸露的滩涂、裸露的道路，露天矿场、建筑工地、城市绿地、城市绿化树坑等都很容易发生风蚀。这些场所的防风蚀措施和治理技术在国外已经开始实施，本文的后续工作将继续对这些的防治技术进行研究。我们从下面的图片中可以学到一些技术和方法，值得在我们的国家推广应用，见图 9.8-9.11。



图 9.8 裸露的道路洒水防治风蚀起尘

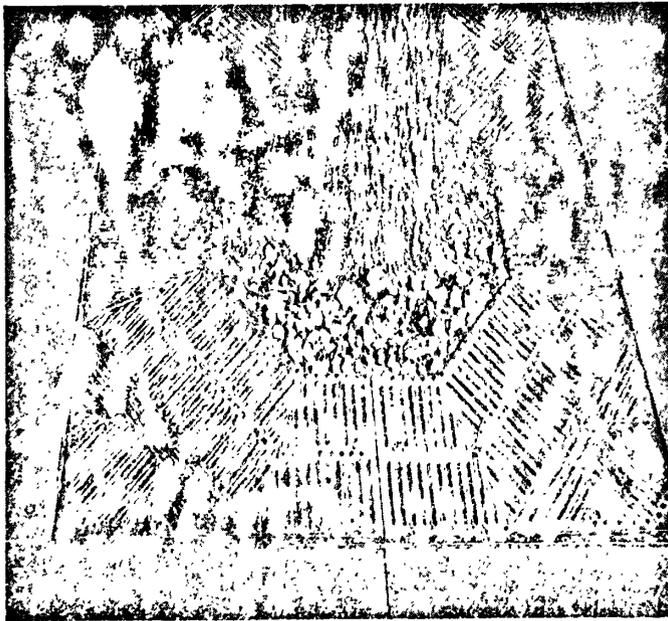


图 9.9 城市绿化树坑加盖和用覆盖鹅卵石



图 9.10 城市绿化地覆盖秸秆



图 9.11 裸露的绿地喷洒凝固剂

#### 9.4 本章总结

(1) 利用遥感卫星进行下垫面调查, 通过植被归依化方法反演调查区域植被覆盖情况, 给出了卫星遥感调查技术路线图。

(2) 实行保护性耕作。

(3) 应用降尘罐收集不同防护林降尘情况, 结果表明网状防护林优于带状防护林。

(4) 农田裸土风蚀防治上应该优化种植结构, 合理种植, 立体开发种植高秆、矮秆作物相结合, 种树与种农作物相结合; 制止毁林开荒, 破坏土地及植被资源, 从而有效地防止土地荒漠化的扩展。

(5) 除了对现有的土壤风蚀加以治理, 还要加强对广大群众的宣传, 认识保护性耕作的优点。只有形成全民意识, 才能实现土壤风蚀的可防可治。

### 本章参考文献

- [1] W. S. Chepil. Relation of wind erosion to the dry aggregate structure of a soil[J]. *Sci Agric*, 1941, 21: 488~507.
- [2] W S Chepil, Woodruff N P. Estimation of wind erodibility of field surfaces[J]. *Soil and Water Conservation*, 1954, 9(6): 257~265.
- [3] Hagen L J. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion[J]. *Theor y Appl Clima tol*, 1996, 54: 39~46.
- [4] 詹小国, 王平. 基于 RS 和 GIS 的三峡库区水土流失动态监测研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(2): 41-44.
- [5] 张登荣. 水土流失遥感方法与土地资源评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [6] 史德明, 梁音, 吕喜玺等. 江西省兴国县土壤侵蚀动态监测研究[J]. *长江流域资源与环境*, 1995, 4(3).
- [7] 颌耀文, 陈怀录, 徐克斌. 数字遥感影像判读法在土壤侵蚀调查中的应用[J]. *兰州大学学报*, 2002, 38(2).
- [8] 梅安新, 彭望, 秦其明等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [9] 刘惠平, 朱启疆. 应用高分辨率遥感数据进行土地利用与覆盖变化监测的方法及其研究进展[J]. *资源科学*, 1999, 21(3): 23-27.
- [10] Bilbro J D, Fryrear D W. Wind erosion losses asrelated to plant silhouet leand soil cover[J]. *A gron J*. 1994, 86: 550~553.
- [11] Bagnold R A. *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Chapman and Hall, 1941.
- [12] W. S. Chepil. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1956, 20(2): 288~292.
- [13] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet user needs. *J. Soil Water Cons*, 1991, 46(2): 106~111.
- [14] 高尚武, 程致力, 郭利选等. 林带防风效益的实验[J]. *林业科学*, 1998, 34(6): 12-21.
- [15] Bgnold. R A. (钱宁等译). *风沙和荒漠沙丘物理学*[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [16] Jensen M, *Shelter effect*[M].Gopenhagen: Danish Technical Press. 1961.

- [17] Caborn J M. Shelterbelts and microclimate[J]. *Bul For Comm*, 1957, (29): 10-11.
- [18] Skidore E. Aerial environment and energy budget as influenced by slat-fence windbreak[R]. Paper presented before division of climatology, American Society of Agro. Meeting Arizona, 1970, 47-61.
- [19] Plate E J. The aerodynamics of shelter Belts[J]. *Agro. Met*, 1971, 8: 203-222.
- [20] 康斯坦季诺夫 A P, (闻大钟译). 林带与农作物产量[M]. 北京: 中国林业出版社, 1983.
- [21] Seginer I. Windbreak drag calculated from the horizontal velocity field, Boundary-layer[J]. *Met*, 1972, (3): 87-97.
- [22] Wilson J D. Numerical studies of flow through a windbreak[R]. 17 the Conference Agriculture and Forest Meterology and Seventh Conference Biometerology and Agribiology, Scottsdale, Ariz, USA: 1985.
- [23] Taichi Maki. Micrometeorological improvement of paddy fields by using windbreak nets[J]. *Jarq*, 1985, 19(2): 98-102.
- [24] Hayakawa S. Study on the wind ward and leeward of windbreak structure: (1) characteristics of the horizontal flow patterns obtained from the simulation of idealized horizontal windbreak structure[J]. *J. Agr. Met.*, 1985, 41(1): 31-38.
- [25] 周世威, 程致力, 尹洁芬. 林带防风效应的实验[J]. *林业科学*, 1987, 23 (1): 11-23.
- [26] 王葆芳, 熊士平, 任培政. 乌兰布和沙地新开发人工绿洲防护林体系综合效益评价[J]. *林业科学*, 1998, 34 (6): 12-21.
- [27] 王式功, 董光荣, 陈慧忠等. 沙尘暴研究的进展[J]. *中国沙漠*, 2000, 20 (4): 350-356.
- [28] 王雪芹, 雷加强, 蒋进等. 古尔班通古特沙漠风沙活动特征与线形工程安全研究[J]. *干旱区地理*, 2003, 26 (2) 143-149.
- [29] 李向军, 陈亚宁, 欧阳辉. 运用灾害熵浅析沙尘暴强度[J]. *干旱区地理*, 2002, 25 (4): 350-353.
- [30] 徐海量, 陈亚宁, 李卫红等. 风灾危险性评价—以塔里木盆地为例[J]. *干旱区地理*, 2003, 26 (3): 250-253.
- [31] 汪季, 高永, 刘艳萍等. 防护林降解近地表沙尘的风洞模拟研究[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(1): 88-91.
- [32] 袁嘉祖. 冀西沙荒防护林的气象效果, *地理学报*, 1955, 21(4)393-402.
- [33] 张劲松, 孟平, 宋兆民等. “京九”铁路大兴段绿化模式动力效应的研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15 (3) : 317-322.
- [34] 朱廷曜, 关德新, 周广胜等. 农田防护林生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [35] 刘艳萍, 高永. 防护林降解近地表沙降尘机理的研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 162-165.
- [36] 常旭虹, 赵广才, 张雯等. 作物残茬对农田土壤风蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 28-30.

## 第十章 结论与展望

### 10.1 研究结论

本论文对裸土风蚀开放源的采样、裸土风蚀起动风速、土壤粒径分布、土壤水分、植被覆盖等基本因素进行了比较深入的综合分析和研究,定义了裸土风蚀开放源、裸土风蚀尘、裸土风蚀起尘的概念,设计了四种全自动采样器并申请了两个发明专利和两个实用新型专利,应用 DVB-S 遥感技术进行了裸土风蚀的监测和研究。主要研究内容与结论如下:

(1)阐述了采集裸土风蚀开放源的采样地点、采样方法、采样数量、采样时间、采样深度、质量控制等,为后续研究奠定了基础。

(2)根据对风蚀机理的研究,采样时考虑到土壤的剖面,不同层的颗粒分布和含水量有明显的差异。

(3)利用颗粒物来源解析结果、富集因子和 SEM 方法,分析裸土风蚀成分中各元素的自然来源和人为来源。

(4)设计了采集裸土风蚀尘的分级颗粒采样器,大气降雨降尘收集罐自动升降和分时段全自动采样器,为进一步研究裸土风蚀降尘对环境的污染情况提供了仪器保证。

(5)分析了  $^{137}\text{Cs}$  示踪建立模型方法,在应用上避免了使用其它模型建立所需要的大量实验和参数的确定,可以自行应用开发的收集罐自动升降全自动多功能干湿沉降采样器进行大气干沉降和湿沉降的  $^{137}\text{Cs}$  样品采集。

(6)结合环境监测站  $\text{PM}_{10}$  结果和气象资料,研究了裸土风蚀季节变化规律,分析了城市颗粒物  $\text{PM}_{10}$  在每年 2 月份低于 1、2 月份的原因。以天津市为例利用颗粒物源解析结果和箱模型,估算了裸土风蚀颗粒物年贡献量,裸土风蚀尘 TSP 全年对城市贡献  $13.18 \times 10^4 \text{t/a}$ ,采暖季为  $3.97 \times 10^4 \text{t/a}$ ,非采暖季为  $5.32 \times 10^4 \text{t/a}$ ,风沙季为  $3.89 \times 10^4 \text{t/a}$ ;裸土风蚀尘  $\text{PM}_{10}$  全年对城市贡献  $5.28 \times 10^4 \text{t/a}$ ,采暖季为  $2.15 \times 10^4 \text{t/a}$ ,非采暖季为  $2.51 \times 10^4 \text{t/a}$ ,风沙季为  $0.62 \times 10^4 \text{t/a}$ 。

(7)提出了利用 DVB-S 遥感平台,对裸土风蚀的预防和治理进行监测,特别是利用遥感卫星对植被覆盖进行监测,可以通过多次的监测影像进行分析合成,

研究区域裸土和植被变化情况,利用遥感卫星监测土壤水分的变化情况,也可以直接分析和监测研究区域内的裸土风蚀变化情况。

## 10.2 本文创新点

1) 首次定义了裸土风蚀开放源、裸土风蚀尘、裸土风蚀起尘的概念。

2) 根据污染治理和研究需求,设计了4种采集干湿沉降采样器,并申请了两个发明专利和两个实用新型专利,为进一步研究干湿沉降对环境的影响提供了仪器支持。

3) 应用 DVB-S 卫星遥感平台进行裸土风蚀开放源的研究,利用植被指数法对裸土风蚀类型进行了分类识别,通过监测影像反演了研究区域的裸土变化情况。

## 10.3 研究展望

本文在以下方面还需要开展工作:

(1)利用开发的采样仪器,开展降尘和风蚀起尘采样研究,结合土壤采样,对采集到的样品分类研究,建立不同类别的样品库。

(2)开展不同类型土壤光谱分析,为卫星遥感解译/反演提供依据。

(3)完善开发的采样仪器采集风蚀类干、湿沉降样品,并分析样品中 $^{137}\text{Cs}$ 的比活度,为建立风蚀模型和风蚀模数研究提供资料。

(4)开展遥感资料在风蚀起尘的起扬飘落方面的研究,形成一套完善的研究方法。

(5)加强风蚀起尘污染控制方面的工作。

## 个人主要简历

韩旸(1969-),男,中共党员,齐齐哈尔大学理学院副教授,主要从事数学与计算机、环境规划与管理、大气污染防治等方面的工作。

主要学术简历如下:

1988年9月——1992年7月,齐齐哈尔师范学院数学系学生;

1992年8月——1997年6月,齐齐哈尔师范学院数学系教师;

1997年7月——2004年8月,齐齐哈尔大学理学院数学系教师;

2004年9月——至今,南开大学环境科学与工程学院博士生。

## 攻读博士学位期间发表的学术论文与研究成果

- [1] 降雨降尘分时段多功能全自动采样器,发明专利;申请号:200710056668.8,白志鹏,韩旸,朱坦.
- [2] 收集罐为自动升降的大气干湿沉降多功能采样器,发明专利;申请号:200710056667.3,白志鹏,韩旸,朱坦.
- [3] 多功能大气降尘自动采样器,实用新型专利;申请号:200620151330.1,白志鹏,韩旸.
- [4] 扬尘、沙尘暴降尘自动采样装置,实用新型专利;申请号:2006201151327.x,白志鹏,韩旸.
- [5] Elevation of Urban Ambient Air Particulate Matter Level Causing by Suburban Area Wind Soil Erosion, 国际会议, 2006. 12, 韩旸, 白志鹏, 投寄 Atmospheric Environment.
- [6] 风蚀与天津市空气质量的研究,“城市及区域大气环境联合实验室”第一届学术报告年会会议, 2006, 7: 41-47, 韩旸, 白志鹏等, 投寄哈尔滨工业大学学报.
- [7] 裸土开放源风蚀机理的研究,“城市及区域大气环境联合实验室”第一届学术报告年会会议, 2006, 7: 301-302, 韩旸, 白志鹏.
- [8] 开放源对环境空气质量影响的评估技术与实例[J].环境科学研究, 2006,

3;18-20, 白志鹏, 郭光焕, 李志军, 韩旸.

[9] 《室内空气污染与防治》, 化学工业出版社 2006, 4 白志鹏, 韩旸, 裘著革.

[10] 《计算机在环境科学中的应用》, 化学工业出版社, 2007, 7, 韩旸, 白志鹏.

### 攻读博士学位期间参研课题

- [1] 国家自然科学基金项目“城市灰霾的理化表征和形成机制”, 批准号: 20677030, 2007-2009, 主要参加者。
- [2] 天津市灰霾的形成机理、危害评估及防控技术研究, 天津市社发项目, 编号: 06YFSYSF02900, 2006-2008, 主要参加者。
- [3] 城市空气颗粒物开放源污染评估与污染防治技术研究”, 天津市应用基础研究重点项目, 043804611, 2004-2006, 主要参加者。
- [4] “室内空气污染表征与控制技术开发”, 天津市科委科技项目, 参加者。
- [5] Huijian Petrochemical Equipment Co. Ltd Environment site Assessment Report, 主要参加者。

### 获奖情况

- 1、“室内空气污染表征与控制技术开发”项目, 获 2005 年度天津市科技进步二等奖, 参加者。
- 2、《室内空气污染与防治》获得第八届中国石油和化学工业优秀教材二等奖, 第二主编。

## 致 谢

时光如流，岁月如梭，三年的博士生活即将结束。在此之际，我的心情久久不能平静。

首先感谢导师白志鹏教授，在三年博士学习期间，白老师为我创造了良好的科研和生活条件，使我能够顺利开展各项工作。由于本人是跨专业学习，在科学研究的过程中，白老师孜孜不倦追求科学的精神，精湛而完善的学问功底给了我许多智慧的启迪，并引导我对科学问题进行深入研究，使我的科研能力有了很大的提高。在课题进行过程中遇到困难的时候，白老师对我巨大的信任给了我克服困难的勇气，激励我在困难中一步步向前迈进。在为人处事方面，白老师高尚的人格和宽厚的品德令我深感敬佩，影响着我以德交友，以宽广的胸怀容纳他人，依此为自己营造了与他人之间良好的协作关系，促成了课题许多方面问题的解决。

衷心感谢朱坦教授和郭光焕研究员在博士学习期间的指导，感谢姬亚芹老师在实验和论文撰写过程中的帮助，感谢河北气象局姚学祥研究员的指导，天津市气象科学研究所刘爱霞、解以扬所长的帮助，感谢冯银厂老师的指导，感谢郭啸洋和王瑞在采样期间的协助，对重点实验室帮助过的老师在此一并致谢。感谢师妹郭婷、蔡斌彬、董海燕、游燕师、弟赵玉杰在学习上与和生活上的帮助，感谢你们陪我一同读过美好的时光，感谢王丽华师妹在实验上的帮助。

当论文写下最后一个句号，双眼噙满泪水，为了让我安心的学习、静心的科研，我的爱人默默无闻的为我付出了很多。是在她全身心的支持和鼓励下，才使我有信心和毅力完成全部的学业。还要感谢女儿韩昕璇在学习上刻苦，生活上独立，解除了我的后顾之忧，同时女儿自信、乐观的品行也感染和鼓励着我，更使我对学业的圆满完成充满信心。感谢我年迈老父、老母的支持和关爱。

感谢所有帮助和支持过我的所有领导、老师、同学、同事和朋友。感谢学校对我的培养，衷心祝愿母校前程似锦，欣欣向荣！

祝各位师长、同仁和学友，身体健康、家庭幸福、事业有成！

韩旸于南开园

2007年4月