

中图分类号： K903

密级： 公开

UDC： 900

学校代码： 10094

河北师范大学

硕士学位论文

(学历硕士)

基于风蚀模型的河北省土壤风蚀评价

**Research on the Assessment of Soil Wind Erosion
in Hebei Province Based on Wind Erosion Model**

作者姓名： 刘红

指导教师： 王卫 教授

学科专业名称： 自然地理学

研究方向： 资源评价与可持续利用

论文开题日期： 2014年10月10日

学位论文原创性声明



本人所提交的学位论文《基于风蚀模型的河北省土壤风蚀评价》，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的原创性成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中标明。

本声明的法律后果由本人承担。

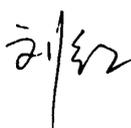
论文作者（签名）：
2015年5月18日

指导教师确认（签名）：
2015年5月18日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解河北师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权河北师范大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在年解密后适用本授权书）

论文作者（签名）：
2015年5月18日

指导教师（签名）：
2015年5月18日

摘 要

土壤风蚀是一个全球性的环境问题，是引起土地退化的主要原因之一，也是导致干旱、半干旱以及部分半湿润地区发生土地沙漠化的首要环节。我国干旱和半干旱区域面积较大，是世界上受土壤风蚀侵害最严重的国家之一，发生土壤风蚀及受其影响的面积已占到国土面积的二分之一以上。

严重的土壤风蚀不仅危害风蚀源区，带走大量的地表颗粒物质，也会造成土壤养分和有机物质的流失，引起土地的退化、沙化，导致区域农田与草地生态系统生产力降低，区域生态环境服务功能下降，影响风蚀源区的生态环境和社会经济的可持续发展，而且还会产生大范围的沙尘暴天气和大气环境污染问题，影响周边地区的大气环境质量和人们正常的生产和生活，影响人类身体健康，另外土壤风蚀还会对交通、通讯和水利等设施构成危害。近年来，中国学者对土壤风蚀的研究主要是集中在干旱和半干旱地区。事实上，半湿润区的土壤风蚀也是普遍存在的，是导致该地区大气颗粒物居高不下的重要原因。

河北省地势西北高东南低，地貌类型齐全，土壤类型众多，气候属于半湿润半干旱的温带大陆性季风气候，地处华北平原东北部，内环京津，处于我国重要的地理位置上。据调查显示，河北省是我国水土流失最严重的省份之一。其中，坝上高原为传统风蚀区，其他区域为传统水蚀区，通常不开展风蚀调查与评价。传统风蚀区的划分是以是否引起土壤退化为标准的，河北省及其毗邻地区传统水蚀区的土壤风蚀虽然不会引起土壤退化，但其对大气污染的贡献却不容忽视。

本文采用第一次全国水力普查中推荐的风蚀模型对河北省土壤风蚀进行定量评价研究，该模型的雏形是国内有关学者以我国半干旱典型草原区的风沙土和栗钙土的风洞实验结果为基础建立的，并在京津风沙源治理工程等项目中的应用并逐渐完善。该模型分别由耕地、草（林）地、沙地三种风蚀预报模型构成。本文将应用于传统风蚀区的模型推广到北方半湿润地区，同时探讨了该模型在半湿润地区应用的适宜性，主要包括土地利用类型的模型选择和非生长季植被覆盖度的确定等。

本文以河北省全部空间范围为研究区，以 MODIS 数据和站点实测数据为数据基础。应用国内主流风蚀模型方法，在地理信息系统等技术平台的支撑下，对遥感影像数据进行预处理，然后经过反演计算得到土壤风蚀各影响因子的栅格数据，将其代入土壤风蚀

模型，计算河北省 2009 年 1-5 月和 10-12 月的土壤风蚀模数，最后以各月风蚀模数为基础，以 IDL 为平台利用逐象元加和法得到河北省的年土壤风蚀模数，然后根据我国制定的土壤风蚀分类分级标准，对河北省土壤风蚀程度进行分级和定量评价，并探讨河北省年土壤风蚀和各风蚀影响因子空间分布的差异性，以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染的防治提供科学依据。

研究表明，河北省的土壤风蚀强度呈现出明显的空间差异性。微度侵蚀是河北省主要的土壤风蚀类型，约占河北省总面积的 65.36%，主要分布在河北平原和太行山地；其次为轻度侵蚀，约占河北省总面积的 12.46%，主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地，冀北山地中西部地区也有少量分布；中强度侵蚀的风蚀面积最小，合计不足总面积的 0.1%，主要分布在北部沙地。

关键词：河北省 土壤风蚀因子 风蚀模型 风蚀强度分级 空间分布

Abstract

Soil erosion which caused the land degradation is one of global environmental problems, also contributed to the occurrence of land desertification in arid, semi-arid and sub-humid region. China is one of the countries which most severely affected by soil erosion hazard in the world. The area happened and affected by soil erosion has accounted for more than half of the land area, owing to a large area of arid and semi-arid regions of our country.

Serious soil erosion is not only harm to erosion source area, taking away a lot of surface particulate matter, but also result in the loss of surface fine material, soil nutrient and organic matter. And it will cause the land degradation and desertification, leading to area of farmland and grassland ecosystem productivity reduced, declining the regional ecological service function, affecting the sustainable development of ecological environment and Social Economy of erosion source area. Soil erosion also produces a wide range of dust storms and air pollution problems, affecting people's normal production and health of surrounding area. In recent years, China scholar's research on soil wind erosion mainly concentrated in the arid and semi arid area. In fact, the soil wind erosion in semi humid area have occurred from time to time. And it can cause the area of atmospheric particulate matter increased, causing serious environmental pollution problems.

The terrain of Hebei province is from northwest to southeast, landform types is complete as well as the soil types. Hebei is located in the northeast of the North China Plain and the inner ring of Beijing and Tianjin, which is very important in geography position. According to the survey, Hebei province is one of the most serious soil erosion in China. The standard of division in traditional wind erosion area is according to whether it will cause the soil degradation. The wind erosion of traditional erosion zones in Hebei Province and its neighboring areas although not cause soil degradation. Hebei Province and its neighboring areas of wind erosion of traditional erosion zones, however, its contribution to air pollution should not be overlooked.

This article used the wind erosion Model which was used in the first national water survey. The model of traditional wind erosion region was extended to the northern

semi-humid. The embryonic form of the model is created based on wind tunnel test results by the domestic scholars, and the model is applied and gradually improved in Beijing and Tianjin sandstorm source control project. The model is composed respectively of arable land, forest and grassland, sand erosion prediction model. And the article discussed the suitability of this application, including the selection of land use types and the determination of vegetation coverage in the non-growth season.

In this paper, the study area is including all the spatial extent of Hebei Province, based on MODIS data and sites measured data. Applying the mainstream erosion model approach using GIS and Remote sensing technology to deal with the remote sensing data, and then obtained soil erosion factors. Then substituted these factors into the soil erosion model, calculating for each month of the soil erosion modulus of Hebei province. we get the annual soil erosion modulus of Hebei Province by image element addition method based on IDL platform. Then according to the classification and grading criteria soil erosion in our nation, soil erosion in Hebei province, was classified and quantitative evaluated. And the article discussed the spatial distribution differences of soil erosion and impact factors. Through the above analysis and evaluation in order to provide a scientific basis for the land degradation and the prevention of air pollution.

The evaluation result demonstrated that space difference of wind erosion intensity was obvious in Hebei province. Mired erosion accounting for about 65.36% of the total area of Hebei Province was the largest, which mainly distributed in Hebei plain, and the west and north mountain in Hebei province. Followed by the slight erosion, accounting for about 12.46% of Hebei Province, which was mainly distributed in Bashang plateau, and northwest of Hebei which is covered with mountain and basin. Moderate and strong wind erosion which accounted the smallest area, a total of less than 0.1% of Hebei province, was mainly distributed in the northern region of sand. Through the above analysis and evaluation in order to provide a scientific basis for the land degradation and the prevention of air pollution.

Key words: Hebei province Soil erosion factors Wind erosion model Erosion intensity classification Spatial distribution

目 录

摘 要.....	III
Abstract.....	V
1 绪 论.....	1
1.1 研究目的和意义.....	1
1.2 研究综述.....	2
1.2.1 国外土壤风蚀研究进展.....	2
1.2.2 国内土壤风蚀研究进展.....	5
2 研究区概况.....	8
2.1 自然地理特征.....	8
2.1.1 气候.....	8
2.1.2 地貌.....	9
2.1.3 土壤.....	10
2.1.4 水文.....	10
2.1.5 种植制度.....	10
2.1.6 植被.....	10
2.2 社会经济特征.....	11
3 研究技术与方法.....	12
3.1 总体技术路线.....	12
3.1.1 数据来源.....	13
3.1.2 技术平台.....	13
3.2 数据预处理.....	13
3.2.1 MODIS 数据预处理.....	13
3.2.2 风速数据预处理.....	15
3.2.3 TM 遥感影像的预处理.....	15
3.3 土壤风蚀因子测算技术方法.....	16
3.3.1 风力因子的测算.....	16
3.3.2 土壤湿度因子的测算.....	18
3.3.3 植被覆盖度因子的测算.....	19

3.3.4	地表粗糙度因子的测算.....	20
3.4	风蚀模型简介.....	20
3.5	风蚀地类划分与模型应用说明.....	21
3.5.1	风蚀地类划分.....	21
3.5.2	模型应用说明.....	21
4	结果分析.....	22
4.1	风蚀因子测算结果分析.....	22
4.1.1	风力因子.....	22
4.1.2	植被覆盖度因子.....	23
4.1.3	表土湿度因子.....	24
4.2	土地利用类型解译结果分析.....	24
4.3	土壤风蚀评价结果分析.....	25
4.3.1	各月土壤风蚀评价结果.....	26
4.3.2	年土壤风蚀评价结果.....	28
5	结论与讨论.....	30
5.1	结论.....	30
5.2	讨论.....	31
	参考文献.....	33
	攻读硕士期间发表论文、参与课题清单.....	37
	致 谢.....	38

1 绪 论

1.1 研究目的和意义

土地为人类的生存和发展提供了丰富的物质基础，是一切生产和存在的源泉^[1]。人类根据土地的自然特性，不断地向土地索取生活和生产资料，并且把土地作为生活场所和生产基地。但是随着人口的增加、经济的不断发展以及对土地的不合理利用，土地生态环境遭受到日益严重的威胁和破坏，土壤侵蚀程度逐渐加剧。土壤风蚀是指一定风速的气流作用于土壤或者土壤母质，土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的过程。其实质是气流和气固两相流体对地表物质的吹蚀和磨损的过程^{[2][3]}。土壤风蚀的形成主要是因为由风引起的风沙运动，而风沙运动包括沙粒的运动和风沙流两种运动形式，其中沙粒运动又可以分为三种基本形式，即悬移、蠕移和跃移^[4]。研究表明，风沙运动方式对风力侵蚀形式有直接的影响作用，不同的风力侵蚀形式是由不同的风沙运动方式造成的，风沙运动方式主要分为风蚀作用和风积作用两类。

土壤风蚀是一个全球性的环境问题，是地球景观和各种地貌形成的主要作用力之一^[5]，也是导致干旱、半干旱以及部分半湿润地区发生土地沙漠化的主要原因^[6]，同时也是引起土地退化的最主要的原因之一，土壤风蚀现象在全球分布十分广泛^[7]。目前，全球有超过 9 亿人口、100 个国家和地区受其危害；据统计，受土壤风蚀危害的土地面积约占地总面积的四分之一。另外，土壤风蚀给全球经济发展带来了巨大的危害，每年因土壤风蚀引起的土地沙漠化造成的经济损失高达四百多亿美元^[8]。我国发生土壤风蚀的区域总面积已经超过国土总面积的二分之一，是全球遭受风蚀危害程度最大的国家之一^{[9][10]}。严重的土壤风蚀不仅危害风蚀源区，带走大量的地表颗粒物质，也会造成地表细粒物质、土壤养分和有机物质的流失，进而导致土地的退化和沙化，直接使风蚀区农田的生产力下降，降低作物产量，影响区域农业发展水平。土壤风蚀还会对区域生态环境质量造成负面影响，阻碍区域的社会经济环境的可持续发展，而且还会产生大范围的沙尘暴天气和大气环境污染问题，影响周边地区的大气环境质量和人们正常的生产和生活，对人们的身体健康造成不同程度的伤害^[11]。根据全国第二次水土流失遥感调查结果显示，我国遭受土壤侵蚀的区域总面积为 356.9 万平方千米，其中受水蚀影响而引起的水土流失面积约为 165 万平方千米，约占总侵蚀面积的 46.2%。受风力侵蚀影响导致的水土流失面积约为 191 万平方千米，约占总侵蚀面积的 53.5%^[12]。年均土壤侵蚀总量高

达 45.2 亿吨，对我国土壤合理可持续利用造成了巨大的威胁，也阻碍了社会的进步并对环境造成了不良影响。近年来，中国学者们对风力侵蚀的研究主要是集中在干旱和半干旱地区，而湿润、半湿润地区的土壤风蚀问题还未能引起学者们足够重视^[13]。事实上，土壤风蚀在半湿润地区也是普遍存在的，是导致该地区大气颗粒物居高不下的重要原因之一^[14]。

河北省位于黄河流域下游地区，内环京津，地理位置尤为重要，所以河北省的水土保持状况的良好与否和北京天津以及整个华北地区都息息相关。但事实上河北省的水土保持情况却不容乐观。根据我国水利部公布的“全国第二次水土流失遥感调查成果”显示，河北省土壤侵蚀面积在全国排名第六位，是全国水土流失最严重的省份之一^[15]。严重的土壤风蚀阻碍了社会的进步，威胁和制约了河北省社会经济的可持续发展，降低了人民的生活质量，同时也明显破坏了人们的生活生产环境，影响人们的身体健康，对大气污染的影响不容小觑。

因此，本文以河北省为研究对象，采用第一次全国水力普查中使用的风蚀模型，以 MODIS 数据和站点实测数据为数据基础，应用国内主流风蚀模型方法，在 Arcgis10.0 和 ENVI4.6 等技术平台的支撑下，对河北省全部空间范围开展土壤风蚀风险评价研究，通过反演计算各土壤风蚀影响因子的数据，然后将其代入风蚀模型得到研究区土壤风蚀模数，并根据我国制定的土壤风蚀分类分级标准，对河北省 2009 年土壤风蚀强度进行分级和定量评价，探讨了研究区年风蚀和各风蚀影响因子空间分布的差异性。以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染防治提供科学依据，同时探讨风蚀模型在北方半湿润地区风蚀评价中的应用。

1.2 研究综述

1.2.1 国外土壤风蚀研究进展

人类对于土壤风蚀现象的了解和认识，在国外始于古希腊时代。直到上世纪 30 年代，由于土壤风蚀引起的沙尘暴危害和各种环境问题的严重后果，土壤风蚀才得到了全世界学者的广泛关注并逐渐发展起来。国外的土壤风蚀发展过程可以简单划分成四个阶段^[16]：

第一阶段：20 世纪 30 年代之前是土壤风蚀研究和发展的萌芽阶段。19 世纪末，西方学者就已认识到了风沙活动是地球表面各种地貌形态形成的主要营造力之一^{[17][18]}。在此阶段内，人们对于风蚀的研究主要是通过考察和描述积累起来的，研究内容局限于地

质学领域。这一阶段的风蚀研究逐渐步入了更深层次的探索领域，即使在系统性层面还存在不足，但也提供了一定的素材支持。Blake(1855)首次认识到荒漠地区风沙流的磨蚀作用和风蚀地貌的普遍发育。Ehrenberg(1990)描述了由非洲吹向欧洲的粉尘和风成物质。Richthofen(1882)提出西北沙漠以及戈壁风蚀是导致中国北方黄土堆积区域尺度较大的主要原因；但是 19 世纪大部分地质学专家的观点是风蚀为一种微弱的地质营力。瑞典探险家 Sven Hedin 在对中亚雅丹地貌考察与计算后得出结论，在一千六百年的历程中，其地貌风蚀达到了六米的深度。也可以说，土壤风蚀深度大致为 4mm 每年。20 世纪初，整个科学界开始将视线投入美国西部的土壤风蚀状况，Free(1911)所写的文献综述中，有关风蚀造成土壤物质的损失、风与土壤相互作用等的早期文献已达 2457 篇，这表明科学家们已经逐渐认识到，人们通过提高土壤有机质的含量来提高土壤凝聚力或通过建造防风带保护地表，可以减少风蚀对土壤的侵害。

第二阶段：20 世纪 30 年代到 50 年代这一阶段风蚀研究有了较大的进展，研究从感性向理性转化，实现了从定性描述向定量描述的巨大飞跃。R.A.Bagnold 和 W.S.Chepil 在这一研究阶段做出了重要的贡献。Bagnold 对风沙运动进行了大量的基本实验研究，并通过更加深层次的基于比亚沙漠案例的调查获取了重要资料，这非常有助于他们对风蚀现象的认识并且使研究更加体系化。后来他又利用其专业特长，建立了“风沙和荒漠沙丘物理学”理论体系^[19]，这是在深入发展流体力学理论（谢尔德和冯卡门、作朗特创立）的基础上形成的，这不仅推进风蚀研究步入了新的研究层次，也为之后的发展提供了理论支持。20 世纪 30 年代到 40 年代，美国的大平原地区遭受了灾难性的“黑风暴”的袭击，使科学家的注意力转移到土壤风蚀问题的研究上，系统的风蚀研究应运而生。Chepil 和美国农业部的科学家们针对风蚀防治问题进行了大量的研究，风蚀动力机制是他们的主要研究内容，风蚀动力机制包括气流运输沙粒的能力、风力作用下土粒运动的属性和特点、土壤颗粒在通过不同下垫面时候的风沙流累计程度和土壤物质的分选等。还系统地研究了土壤风蚀的影响因子，如土壤结构、土壤粒度组成、土壤有机质对土壤抗风蚀能力的影响。除此之外，还对风蚀防治措施进行了一系列的实验和研究，包括土壤风蚀防治的整治技术、生物措施、农田管理、机械措施等，对风蚀防治问题进行了全方位系统的研究。与此同时，前苏联、加拿大等受到风蚀影响比较大的国家和地区，陆续推展了一系列研究工作来解决风蚀问题。从土壤风蚀的研究内容、研究区域、研究方法和研究成果来看，二十世纪四十年代左右，关于风蚀领域的基础理论系统得到了基本的建立，是风蚀研究的大发展阶段^[20]。

第三阶段：20 世纪 60 年代至 70 年代，是土壤风蚀研究的进一步完善和检验阶段，风蚀研究逐渐开始了从理论研究向应用研究的转变。Chepil 与 Woodruff 总结了二十多年来在美国大平原的研究成果，1965 年 Woodruff 和 Siddoway 在此基础上提出了风蚀方程（WEQ），这是首个用于计算田间风蚀量的模型，目的在于确定土壤风蚀的各影响因子的作用，并为风蚀防治措施的建立提供依据^[21]。风蚀方程的建立在土壤风蚀研究历史上具有里程碑的意义，标志着土壤风蚀理论的初步形成，标志着人们对风蚀领域的探索慢慢地从风蚀现状向风蚀预测评价的跨越，同时也实现了由理论向实践的转变。

第四阶段：从 20 世纪 80 年代开始，土壤风蚀研究在广度和深度上得到了进一步的发展和完善。通过计算机软件和技术对遥感卫星影像进行解译分析，并且在在风蚀研究中广泛的应用和推广数学分析方法，风蚀研究向定量化和数值模型的方向不断深入和发展，这个阶段的研究重点是土壤风蚀预报模型，虽然 WEQ 方程具有关键作用，但由于此模型的局限性，被学者进行了数次修订。与此同时，学者们从不同角度建立了多种土壤风蚀模型。1973 年 Pasak 提出了 Pasak 模型，该模型的目的在于预测某单一风蚀事件^[22]，主要是利用简单的函数预测研究区的风蚀量，但只包括风速、土壤含水量和不可蚀颗粒三个变量，并且由于某些必要变量的缺失导致其在实际应用中存在很大的局限性。该模型为经验模型，存在类似 WEQ 模型的不足之处^[23]。20 世纪初，Bocharov（前苏联科学家）给出了 Bocharov 模型，并且提出土壤风蚀各影响因素之间的作用和影响（包括地表土壤物理性质和气流特征参数）以及对土壤风蚀程度具有的重要作用，Bocharov 模型涵盖 25 个影响因子，充分考虑各因子之间相互影响与变化，并将人们的各种生产生活活动与预报模型相结合，不过该模型是一种抽象的概念模型，无法体现出各因子间的定量关系，因此不能在实践中直接应用^[24]。1988 年 Gregory 创建了用于风蚀预测的 TEAM 预测分析模型^[25]，可以对风速轮廓线的发育状况和多种长度面积田块的不同的土壤活动状态进行模拟演示，该模型的创新点在于尝试着将理论模型与经验模型相结合，但由于纳入的风蚀影响因子较少，导致此模型不能完整的反应风蚀过程，预测结果有待检验。1996 年澳大利亚学者邵亚平等提出了风蚀评价模型(WEAM)，在综合有关风沙流及大气尘输移的实验与理论研究成果基础上，用此模型估算农田风沙流及大气沙尘输移量^[26]。该模型引进了先进的地理信息系统管理技术，并对其他环境科学研究与风蚀预报研究的结合的可能性进行了探索和尝试。但该模型只包含四个变量，未能充分考虑多风蚀影响因子之间的相互作用。20 世纪 90 年代，美国农业部的科学家们推出了一个新的土壤风蚀预测模型 WEPS，该模型是一个连续的以日为时间尺度、以地块为空间尺度、

以过程为基础的模型，能够对基于土壤蚀积过程的时间和空间变化力以及田间环境充分分析、演示和模拟，但模型对数据的要求较高^[27]。适用于农田和草地风蚀的估算，成为风蚀定量评价和指导风蚀防治的重要技术手段。

综上所述，国外土壤风蚀研究经历了从感性认识到理性研究、从定性描述到定量模型研究、从现状研究到预报评价的过程。目前土壤风蚀的研究体系已初步形成，这一科学研究体系的核心是风蚀模型，它以风蚀影响因子和风蚀动力学为基础，用定量模型关系表达各因子的相互作用关系和对风蚀过程的影响力，并将预报结果作为风蚀防治和评价的依据。因此，风蚀模型的检验和完善仍是当今风蚀研究的前沿课题之一。

1.2.2 国内土壤风蚀研究进展

国内土壤风蚀研究大致可以分为四个阶段：

第一阶段：20世纪50年代以前。我国学者对风蚀现象的认识至今大约有两千多年的历史，据历史文献显示，早在公元前1150年就出现了对“黄沙”、“雨土”等风沙灾害现象的文字记载^[28]。酈道元（北魏）通过“浚其崖岸，馀溜风吹”这一词句形象的说明了分布在罗布泊附近雅丹地貌的形成机理^[29]。著名史学家班固（东汉）在《后汉书·西域志》这一著作中描述到“白龙堆”，这也是关于雅丹地形的说明；在清代人们开始通过利用风蚀防治措施来达到保护耕地和灌溉设施的目的^[30]。在此阶段内，中国对于土壤风蚀的认识处于前期萌芽阶段，缺乏理性认识。

第二阶段：20世纪50年代至70年代。1959年成立了中国科学院治沙队，并对土壤风蚀和风沙活动的地形发育、影响因素、自然条件以及风沙运动规律展开了系统的分析与研究。60年代后期，以结合大型工程建设进行的风蚀防治的实验研究为研究重点。这个时期的研究已开始使用定位观测、实地调查、航片分析等比较先进的技术手段，获得了较以前更为详细和系统的科学资料；研究方法仍以定性分析和宏观调查为主；研究内容和研究空间也得到了大大的延伸和扩展。通过这一阶段的研究，从宏观上基本上查清了我国沙地的自然条件、风蚀沙害的空间分布、危害方式及其区域差异，风蚀分类也更加科学细致^[31]。不过整体上依然处于定性描述时期，《中国沙漠概论》是当时主要研究著作之一^[32]。

第三阶段：20世纪70年代至90年代末。此阶段我国的土壤风蚀研究逐渐实现了由定性描述向定量分析的转变。80年代以来，科学家们广泛应用遥感卫星影像和计算机等现代技术方法，通过实地调查、定位观测和实验模拟对土壤风蚀过程、风蚀动态变化及其相互作用机制进行了综合研究和定量分析。例如利用风洞模拟植被条件、土壤结构

和水分对风蚀的影响等。另外，研究领域也在不断拓宽，开始涉及风蚀对农田、河流的影响。90年代之后，学者们基于定量分析以及动态仿真、多元统计数学模型，模拟土壤风蚀过程和变化，从而找出治理风蚀的科学路径^[33]。朱震达、刘恕（1981）等揭示了我国北方干旱、半干旱区土壤沙漠化现状、过程以及分布情况，并探讨了土地沙漠化对研究区造成的危害和原因，制定了沙漠化的指标体系，提出了有效的治理措施^[34]。董光荣等（1987）在我国率先开展了风蚀影响因素的风洞模拟试验研究，重点研究了关于牲畜践踏和土地翻耕对土壤风蚀造成的影响，为日后深入研究人类社会经济活动对土壤风蚀的影响提供了新思路^[35]。董玉祥（1994）利用中国北方 233 个气象站点的气象气候数据，根据联合国粮农组织（FAO）提出的风蚀气候影响因子指数的修正方程式，绘制出中国干旱、半干旱地区年土壤风蚀气候因子等值线图^[36]。董治宝（1998）深入调查和观测陕北神木县六道沟案例区，根据所采集的资料，构建了小流域的土壤风蚀流失量的估算模型，同时依托该模型进行估算研究区的土壤年风蚀量与风蚀模数。研究表明，春季是该小流域的主要风蚀季节，并且风蚀与水蚀在时间序列上交错分布^[37]。高尚武等（1998）通过 TM 遥感资料建立了土壤质地、裸沙地占地百分比和植被覆盖度三个指标组成的较直观、实用的沙漠化检测评价指标体系，并通过对内蒙古、甘肃、宁夏三个不同气候区域的野外调查，验证此评价指标体系在遥感技术对沙化空间分布评估方面的可行性^[38]。

第四阶段：21 世纪以来，我国土壤风蚀进入定量研究阶段。学者们主要利用 3S 技术、风洞模拟实验、实验室仿真模拟和野外长期定期检测等方法进行土壤风蚀研究。研究内容主要包括风蚀测定与评估模型、风蚀强度分级、土壤风蚀容忍量和风蚀环境效应等。黄福祥等（2001）通过毛乌素沙地植被覆盖差异化状态下的风蚀输沙率野外调查资料，对观测数据进行非线性回归分析，对风速影响下的植被覆盖状况进行了研究，创建了植被覆盖率与风蚀输沙率的关系模型^[39]。张国平在 RS 与 GIS 方法研究的基础上对我国整体土壤风蚀情况展开了宏观调查，建立了全国 1：10 万土壤风力侵蚀数据库^[40]。梁海超、师华定（2010）等人在 GIS 的支持下，得到中国北方典型农牧交错区各风蚀因子的空间分布数据，并利用层次分析法构建土壤风蚀危险度评价模型，指出该区土壤风蚀危险度呈现出从东南到西北逐渐增强的趋势^[41]。王仁德（2012）采用风洞模拟实验的方法，对地处半湿润区的北京市农田土壤风蚀特征进行了研究，结果表明，随着风速的增大，各类农田的风蚀强度呈指数性增长，风蚀颗粒物粒径不断变粗^[42]。

虽然目前国内已经在沙漠化、风蚀分级、风蚀影响因素、防治策略等领域获得了较

大突破，但在土壤风蚀预报研究方面还处于初级探索阶段，与国外相比，在研究的广度和深度上都存在一定的差距，与我国普遍存在的风蚀荒漠化问题不相适应，难以满足土地可持续利用的要求^[43]。另外，中国的土壤风蚀研究主要是在荒漠化较严重的干旱、半干旱地区进行的，但是湿润、半湿润地区的土壤风蚀问题研究较少。因此，应大力推动和发展我国土壤风蚀研究，揭示风蚀规律，加深风蚀研究深度，拓宽风蚀研究范围，以期为土地可持续利用和环境治理提供可靠的理论依据。

2 研究区概况

河北省因古为“冀州之城”，故简称冀。地处华北平原东北部，内环京津，且几何中心在保定市北部和北京市交界处，紧邻京津，地理区位极具特色^[44]。河北省位于中纬度亚欧大陆的东岸，气候类型属于温带大陆性季风气候，北部与内蒙和辽宁交界，南部与河南和山东接壤，西倚太行山与山西省为临，东与天津市毗连并紧傍渤海。河北省面积为 18.77 万平方千米，占全国国土总面积的 1.96%^{[45][46]}。

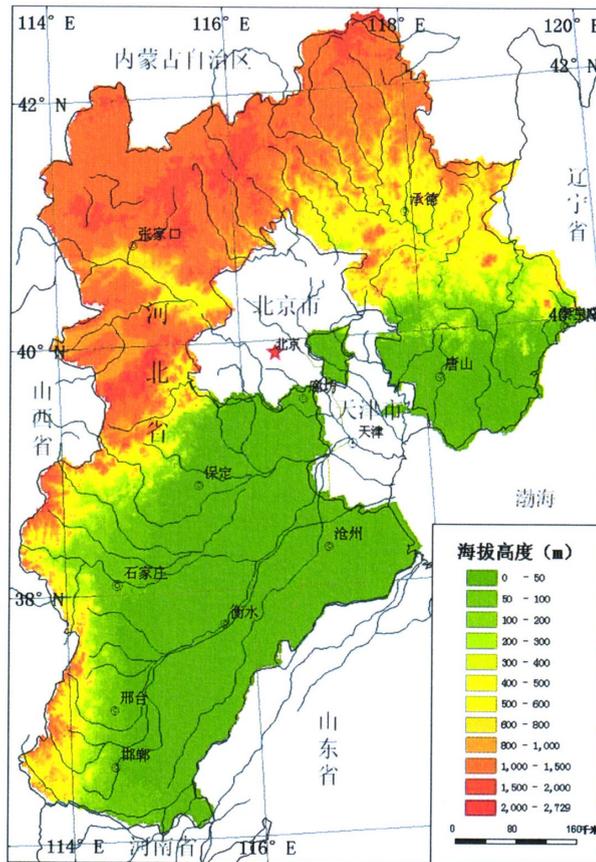


图 2.1 研究区概况

2.1 自然地理特征

2.1.1 气候

河北省的气候属于半湿润半干旱的温带大陆性季风气候，气候特征明显，雨热同期，四季分明。春季冷暖多变，干旱多风，多沙尘天气；夏季炎热潮湿，雨量集中；秋季风和日丽，凉爽少雨；冬季则寒冷干燥，雨雪稀少。

全省热量资源丰富，但北部和昼夜的温差较大。河北省的气温分布的分界线以长城为准，长城北部的坝上地区的年平均气温低至 4 摄氏度，而南部地区可高达 13 摄氏度。河北省气候类型的多样性主要是由于南北温差较大导致的，这也为不同种植制度同时存在提供了可能。另外，河北省大部分地区的昼夜温差在 10 摄氏度以上。

河北省降水量时空分布极不均匀。东南部的降水量明显多于西北部地区，全省降水最多的区域分布在燕山南麓和太行山区，年平均降水量在 700mm 左右。另外，研究区降水量从太行山和燕山的向西北和东南方向逐渐降低，河北平原的少雨区主要在衡水和新河，而全省降水量最少的地区分布在张家口坝上高原的西北部，年降雨量仅有 350 mm~400 mm。在时间分布上，夏季的降水量多而集中，河北省内一年的总降水量有一半出现在夏季，春季、秋季、冬季降水量依次减少。

2.1.2 地貌

河北省地势自西北向东南呈半环状逐级下降，整体表现出西北高东南低的趋势。省内地貌类型复杂多样，高原、山地、丘陵、平原等基本地貌类型十分齐全。将地貌成因和形态的特征差异性作为依据，又可以将河北省划分为坝上高原地区、冀北山地区、冀西北间山盆地、冀西山地区和河北平原区五个一级地貌区^[46]。

高原位于河北省的最北端，俗称“坝上”，故又称为坝上高原，隶属于内蒙古高原的南部边缘区。面积约为 2.4 万平方千米，平均海拔为 1500 米左右，地势东南高西北较低，又可以将坝上高原分为坝缘山地、波状高原和疏缓丘陵三部分，其中以丘陵为主，由于受风化作用影响较重，其上部侵蚀强烈，导致形状奇特。坝上高原又可以分为张北高原和围场高原两个亚区。

山地主要由呈南北走向的太行山地和呈东西走向的燕山山地两大山脉构成，总面积约 6.65 万平方千米。其中，太行山位于河北省西部，燕山位于河北省北部地区，又被称作冀北山地，是西辽河水系和滦河水系的分水岭，由于山地岩性复杂，导致其形态各异。

丘陵主要分布在燕山南部和太行山东部。河北省西北部（主要包括张家口坝下的大部分地区）基本地貌类型丰富，主要有盆地、丘陵和低山相间分布于其中，是冀西北间山盆地的重要组成部分。

河北平原位于太行山以东和燕山以南，被这两大山脉呈半环状怀抱。面积约为 8.16 万平方千米，主要分布于河北省东南部，是华北平原的重要组成部分。河北平原土壤肥沃、地势平坦、土地辽阔、水资源丰富，适合农业发展。此区又可以划分为沿山麓分布，由一系列河流冲积扇共同作用而形成的山麓平原，太行山以东的中部冲积平原，和由河

流三角洲和滨海洼地组成的沿渤海岸呈半环状分布的滨海平原。

2.1.3 土壤

河北省土壤类型复杂多样，其中分布最广泛的是褐土，其次为潮土和棕壤土。河北省的气候条件导致了省内植被分布从东南向西北的依次演变，土壤的地带性分布也与此相适应，从东南向西北呈现出棕壤-褐土-栗钙土的依次演变，其中棕壤的分布较为局限。人类耕作活动和地下水深埋导致非地带性因素成为河北平原土壤分布的主要因素，土壤类型的分布格局主要表现为褐土-潮褐土-潮土-盐化潮土-滨海盐土。张家口高原的土壤类型主要以栗钙土和黑土为主。山地的土壤类型分布呈现出明显的垂直地带性规律。

由于受气候和地理位置的影响，再加上土壤有机质矿化的程度较大，出现了土壤有机质难以积累的情况，导致有机质含量匮乏，通过有关科学调查，将河北省的土壤有机质含量与全国各地地区相比较，其处于中等以下水平。按土壤质地分类，研究区壤质土最多，其次为沙壤质土和黏壤质土。

2.1.4 水文

河北省河流较多，以外流河为主。内流河流域仅分布在张家口坝上高原，占全省总面积的 7%；外流河以海河和滦河为代表。海河流域面积为 31.78 万 km²，是河北省最大的河流，流域东临渤海，南界黄河，西起太行山，北倚内蒙古高原南缘，地跨京、津、冀、晋、鲁、豫、辽、内蒙古八省区，流域面积为 31.78 万平方千米。河北省第二大河是南部濒临渤海的滦河，流域的基本走势为西北高，东南低。

2.1.5 种植制度

河北省农作物种类繁多，种植制度也多样化发展，其中以一年一熟和一年两熟为主要的种植方式。一年一熟的农作物主要包括棉花、莜麦和春玉米，其中春玉米和莜麦集中分布在承德和张家口两地，棉花主要分布在冀中南地区；一年两熟作物是以冬小麦-夏玉米为主的传统种植模式，主要分布在河北平原。

2.1.6 植被

河北省内现有的植被种类复杂多样，共有植被两千多种，还包括以草本农作物为主的人工植被类型。省内自然植被类型主要包括针叶林、落叶阔叶林、灌丛和针阔叶混交林等。伴随气候的规律性变化，全省的自然植被分布表现出一定的规律性，主要表现在经度地带性、纬度地带性和垂直地带性这三个方面。另外，河北省还存在一些受区域自然条件影响的特有种的植被，如雾灵落叶松等。

2.2 社会经济特征

近年来，河北省经济发展势头良好，2009年全年的国民生产总值超过了17026.6亿元，同比增长了十个百分点。其中，第一产业、第二产业和第三产业得到了大幅增长，分别增长了3.3%、10.5%和11.4%。人均生产总值24283元，增长9.3%。全年居民消费价格相对于上一年来说减少了0.7个百分点；随着社会的进步和经济飞速前进，河北省居民的生活水平得到了巨大的改善，城镇居民人居收入同比增长9.5%，农民人均收入也得到了较大提高，增长幅为7.4%；但就整个河北省而言，经济发展十分不协调，唐山、秦皇岛的经济发展水平较高，其次为石家庄、邢台等地，全省经济发展水平最低的地区为保定和张家口。

河北省交通运输网络发展协调性较强，规划布局合理。当前河北省内高速公路的通车里程共达两千多公里，在全国大陆所有省份中排名第三；国家干线公路多达二十七条，并且公路的货物周转量在大陆所有省份中占据第二位。在铁路方面，石家庄-太原和石家庄-承德两大铁路干线贯穿河北省中部地区，北京-上海、北京-广州、北京-香港九龙三大铁路干线纵穿省域南北，这些铁路是保证河北与外界顺畅连接的重要枢纽。在海运方面，黄骅港、天津港、秦皇岛港等港口为河北省海运的发展提供了便利条件。另外，河北省内还有以石家庄和秦皇岛为中心，辐射30多个国内大中城市的航线网络；发达的交通网络加强了省内各市之间以及省内各市与其他省份的便捷联通，推动了河北省经济社会的快速发展。

据省统计局统计资料显示，全省年末常住人口达到7034.4万人，净增人口45.6万人。为提高全民的整体素质，多种教育事业得到了较快发展，全年科技投入总额同比增长了十七个百分点。并新建了三百多家技术研究中心和重点实验室，取得了显著的科技成果，为河北省的全面发展提供了有利条件。

3 研究技术与方法

3.1 总体技术路线

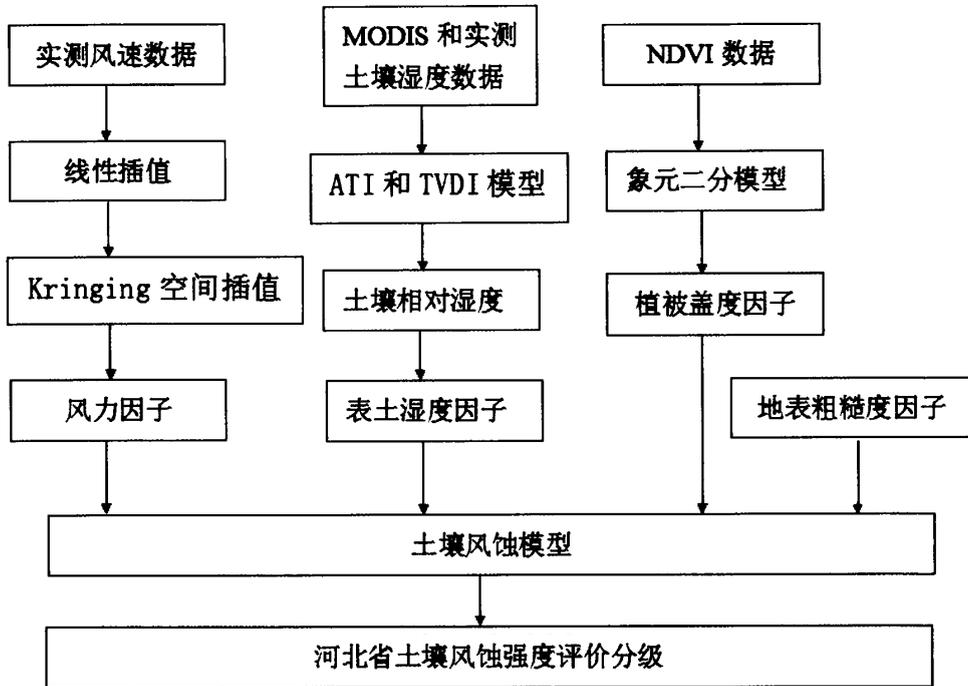


图 3.1 总体技术路线图

本文的总体技术路线主要包括：本文将河北省的全部空间范围作为研究区域，以来源于美国国家气候数据中心（NCDC）网站和河北省气候中心的风速数据、来源于中国气象科学数据共享网的实测土壤湿度数据和来源于美国 NASA 网站的 MODIS 数据为数据源，应用国内主流风蚀模型方法，在 Arcgis10.0、ENVI4.8 和 MRT 工具等技术平台的支撑下，对遥感影像数据进行预处理，通过线性插值和空间插值得到 100m 分辨率的风力因子栅格图；通过表观热惯量 ATI 模型和温度植被指数 TVDI 模型反演得到土壤相对湿度，再经公式计算得到表土湿度因子；依据像元二分模型原理，以归一化植被指数为数据基础，反演得到植被覆盖度因子；然而由于缺失研究区地块尺度耕作措施的数据，因此，根据有关学者的相关研究将研究区地表粗糙度统一赋值为 0.10。将以上风蚀影响因子数据代入土壤风蚀模型，计算河北省 2009 年 1-5 月和 10-12 月各月的土壤风蚀模数，最后以各月风蚀模数为基础，以 IDL 为平台利用逐象元加和法得到不同用地类型的年土壤风蚀模数，然后对研究区 2009 年土壤风蚀程度进行分级和定量评价，并探讨了河北

省年土壤风蚀及其各风蚀影响因子空间分布的差异性。

3.1.1 数据来源

按照土壤风蚀模型的数据要求，本文主要包括以下数据：来源于美国国家气候数据中心（NCDC）网站和河北省气候中心的风速数据，包括研究区内 14 个站点的 2009 年逐日 8 次（0 时、3 时、6 时、9 时、12 时、15 时、18 时、21 时）观测的数据和 128 个站点的每月 $\geq 6\text{m/s}$ 的大风日数数据，上述数据用于风力因子计算；来源于美国 NASA 网站的 MODIS 数据的 2009 年 MOD11A1（每天合成的空间分辨率为 1km 的陆地表面温度产品）和 MOD09GA（每天合成分辨率 500m 的 1~7 波段的反射率数据），来源于中国气象科学数据共享网的实测土壤湿度数据（包括研究区内 123 个站点的 2009 年 3 月-11 月的 10cm 深土壤相对湿度数据），以及源于中科院计算机网络信息中心科学数据中心用于地表温度订正的数字高程 DEM（空间分辨率为 30m），上述数据用于反演土壤湿度因子；来源于美国 NASA 网站的 MODIS 的 MOD13Q1 数据，为 2009 年 250m 分辨率归一化植被指数（NDVI）16 天合成产品，主要用于计算植被覆盖度因子；来源于中国科学院科学数据中心的 2008-2009 年 TM 遥感数据，用于土地利用类型的解译。

3.1.2 技术平台

本文研究中采用 MRT、ENVI4.8、ERDAS IMAGINE 8.6、Arcgis10.0 作为技术支持平台，其中利用 MRT 工具对 MODIS 数据进行投影转换；利用 ENVI4.8 软件对 NDVI 遥感数据进行反演计算，并利用其中 Bandmath 功能计算沙地和耕地的土壤风蚀模数。采用 IDL 语言编程计算土壤相对湿度反演模型所需要的参数、各月草地土壤风蚀模数和年土壤风蚀模数的累加计算；以 ERDAS IMAGINE 8.6 软件为技术平台对研究区的 DEM 影像进行拼接；在地理信息系统软件中对遥感影像进行解译，并对栅格影像图进行计算和制图。

3.2 数据预处理

3.2.1 MODIS 数据预处理

为了提高数据的利用价值和达到应用目的，在利用遥感影像进行反演计算之前需要对其进行一些必要的处理，例如图幅拼接、投影格式转换和研究区裁切等。

（1）图幅拼接 文中需要进行图幅拼接的数据主要包括：用于反演土壤湿度因子的 MODIS 数据，包括 2009 年 MOD11A1（每天合成的空间分辨率为 1km 的陆地表面温度产品）和 MOD09GA（每天合成分辨率 500m 的 1-7 波段的反射率数据）；用于计算

植被覆盖度因子的 MOD13Q1 数据（2009 年 250m 分辨率归一化植被指数 NDVI 的 16 天合成产品），以上所需 MODIS 数据均来源于美国 NASA 网站。另外，为了得到所需数据，提取影像的特征参量是进行图幅拼接的必要前提。然后利用 ERDAS IMAGINE 8.6 软件对遥感影像进行拼接处理，主要操作步骤为：Dataprep → Mosaic Image。

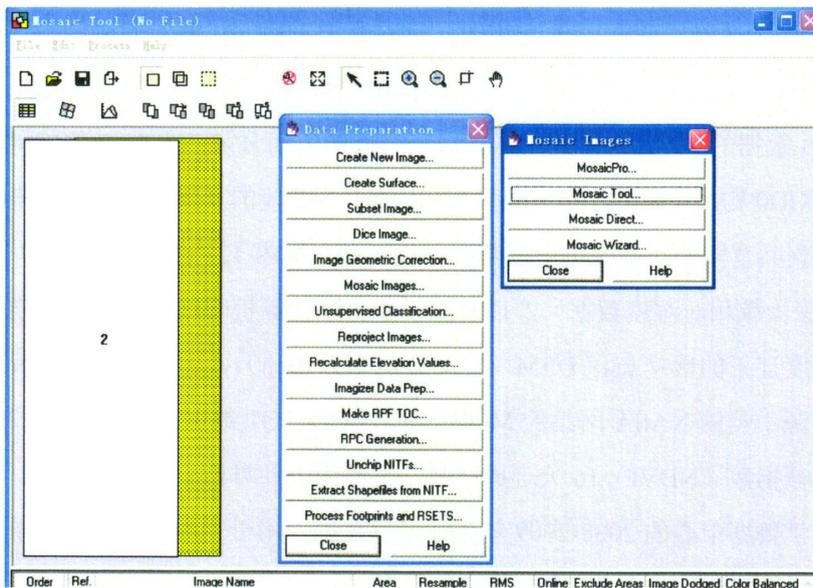


图 3.2 影像拼接

(2) 投影和格式转换 本文主要通过 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具对图幅拼接之后的 MODIS 影像进行投影转换，其中重采样方法设置为最邻近法，投影类型为阿尔伯斯圆锥等积投影 (Albers Conical Equal Area)，将输出图像的格式改为“*.tif”，输出图像分辨率设置为 100m，其他参数设置如下图 3.3 所示。

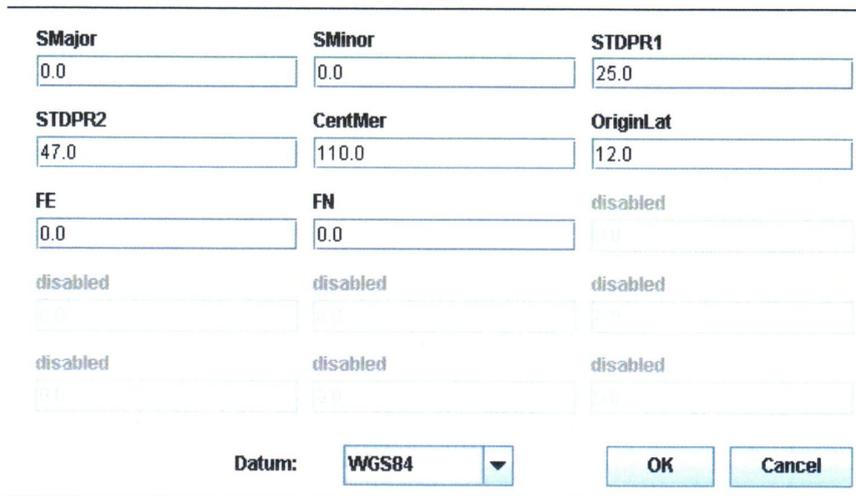


图 3.3 MRT 投影格式转换处理

(3) 研究区裁切 本文的研究区裁切是在 Arcgis10.0 中实现的。首先制作河北省掩膜, 然后利用 Arcgis10.0 中的 Extract by mask 功能对文中所需的各种 MODIS 数据逐个进行裁切, 主要操作步骤为: Arctoolbox → Spatial Analyst Tools → Extraction → Extract by mask。最终得到反演河北省土壤风蚀模型所需的各影响因子的 MODIS 数据。

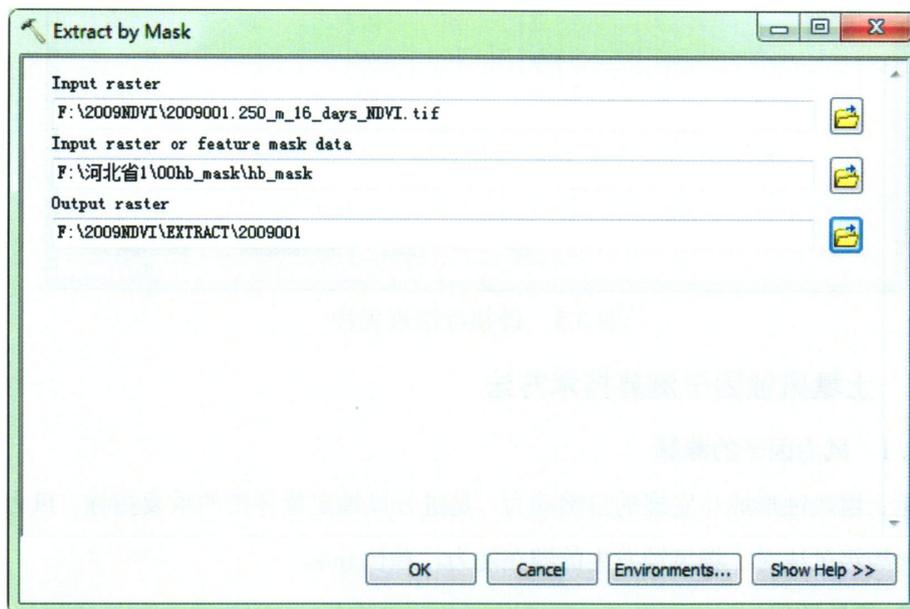


图 3.4 研究区裁切

3.2.2 风速数据预处理

风蚀数据预处理主要是根据研究区内 14 个站点逐日 8 次观测的风速数据和省内 142 个站点的每月 $\geq 6\text{m/s}$ 的大风日数数据, 计算出全省共 142 个气象站点的逐日 24 小时各整点风速的累计时间值。首先, 在 Excel 中利用线性插值, 计算出 14 个已知站点相邻时刻的整点风速, 得到每天 24 小时整点风速估计值和各等级风速的累计时间。然后建立 14 个站点的风速累计时间和大风日数之间的线性关系式, 并通过此关系式计算得到 142 站点各等级风速的累计时间。

3.2.3 TM 遥感影像的预处理

本文用于土地利用类型解译的 TM 遥感原始数据是利用 ERDAS IMAGINE 8.6 软件对河北省各区域的条带号进行拼接后得到的, 图像输出分辨率为 30m, 为了和文中的其他数据相匹配, 所以需要对其进行重采样。以 Arcgis10.0 为平台, 主要操作步骤为: ArcToolbox → Data Management Tools → Raster → Raster Processing → Resample, 栅格大小设置为 100m*100m, 重采样选用最邻近法, 如图 3.5 所示。

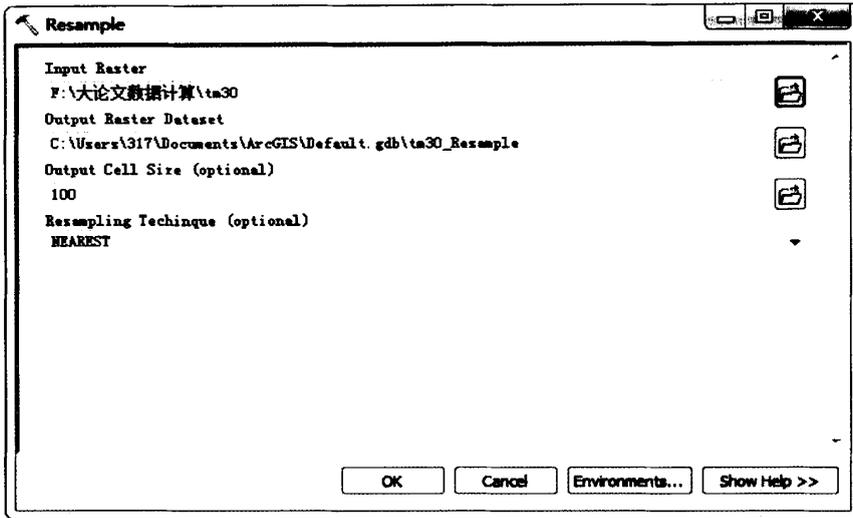


图 3.5 最邻近法重采样

3.3 土壤风蚀因子测算技术方法

3.3.1 风力因子的测算

风是土壤风蚀形成与发展的自然动力，是进行风蚀定量评价的重要指标。风力因子是指不同等级风速对土壤风蚀发生的潜在能力，单位 m/s。

(1) 线性插值

根据研究区内已知气象站点的逐日 8 次观测的风速数据，采用线性插值的方法（公式 3.1），计算站点相邻时刻的整点风速，最后得到各站点每天 24 小时的整点风速估计值；

$$\text{计算公式为: } U_i = \frac{U_{t_2} - U_{t_1}}{t_2 - t_1} \cdot (t_i - t_1) + U_{t_1} \dots\dots\dots(3.1)$$

式中： t_i 是指 t_1-t_2 之间的整点时间； $t_1、t_2$ 为逐日 8 次风速统计表中两个相邻风速记录的时刻（0 时、3 时、6 时、9 时、12 时、15 时、18 时、21 时）； U_{t_2} 是指与 t_2 相对应的风速(m/s)； U_{t_1} 是指与 t_1 相对应的风速(m/s)； U_i 是指与 t_i 相对应的整点风速(m/s)。

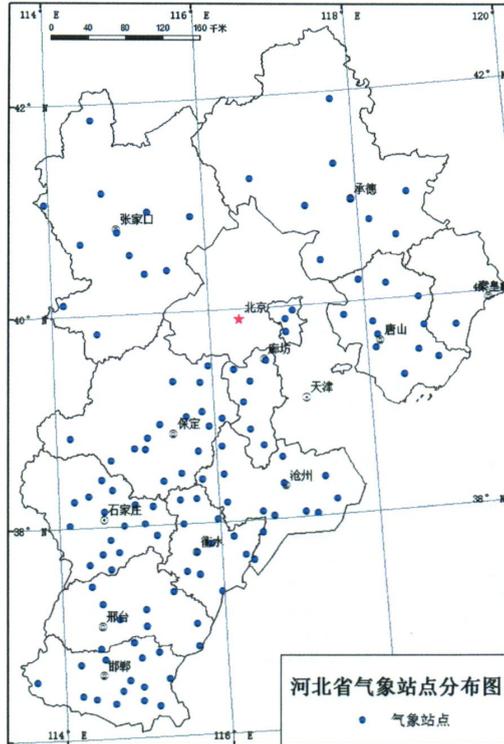


图 3.6 河北省气象站点分布图

(2) 累计时间统计

得到各站点逐日 24 小时整点风速估计值后按照 1m/s 间隔统计 1-5 月和 10-12 月大于等于临界风速 ($U_0=5\text{m/s}$) 的各等级风速发生的频数 (耕地、沙地 $U_0=5\text{m/s}$, 草地 U_0 按表 3.1 取值), 每次代表 1 小时, 按下式换算为各等级风速的累计时间。

$$\text{累积时间} = \text{频数} \times 1\text{hr/次} \times 60\text{min/hr} \dots\dots\dots(3.2)$$

表 3.1 草地的临界风速

植被覆盖度等级范围 (%)	平均盖度 (%)	临界侵蚀风速 $U_{j=1}$ (m/s)	
		风速范围	平均值
0-5	2.5	8-9	8.20
5-10	7.5	8-9	8.47
10-20	15	8-9	8.95
20-30	25	9-10	9.75
30-40	35	10-11	10.78
40-50	45	12-13	12.12
50-60	55	13-14	13.85
60-70	65	15-16	15.76

为了便于计算，各等级风速按照 5.0-5.9m/s 取其中值 5.5m/s，6.0-6.9m/s 取其中值 6.5m/s，7.0-7.9m/s 取其中值 7.5m/s，……。

(3) 克里金空间插值

考虑到风力因子在空间上是连续渐进的，相邻气象站点的风速变化呈逐渐过渡关系，因此可以在 arcgis10.0 中采用普通克里金（Kriging）插值法生成 1-5 月和 10-12 月各等级风速的 100m 分辨率的栅格图。主要步骤可以表达为：ArcToolboxes → Spatial Analyst Tools → Interpolation → Kriging。

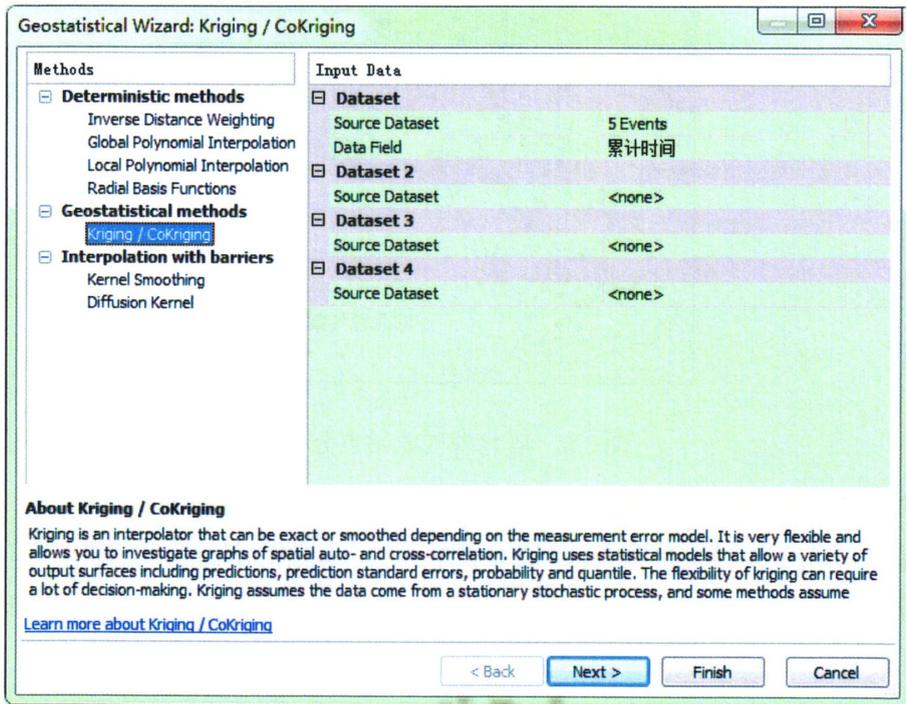


图 3.7 克里金空间插值

3.3.2 土壤湿度因子的测算

(1) 土壤相对湿度的反演

本文为了消除地表高程对温度的影响，首先利用数字高程模型对研究区的地表温度进行修正，然后以 MODIS 遥感数据和 10cm 深度的实测土壤湿度数据为数据源，针对表观热惯量 ATI 模型和温度植被指数 TVDI 模型反演的优缺点，联合应用 ATI 模型和 TVDI 模型，反演河北省土壤相对湿度值。由于温度植被指数 TVDI 模型的应用局限于中、高植被覆盖的区域，而表观热惯量 ATI 模型只适合应用于裸土和植被覆盖较低区域的土壤相对湿度反演计算。因此，本文采用 NDVI 分区的方法对 3-5 月、10 月和 11

月这五个月的土壤相对湿度进行反演计算,即应用 TVDI 模型对 $NDVI > 0.2$ 的区域进行湿度反演,在 $NDVI \leq 0.2$ 的区域采用表观热惯量 ATI 模型进行反演;1、2、12 月份由于实测土壤湿度数据的缺失和植被覆盖度较低的原因,于是采用 ATI 替代模型,即应用 3 月份的 ATI 回归模型直接反演 2 月份的土壤相对湿度,应用 11 月的 ATI 回归模型直接反演 12 月的土壤相对湿度,然后 1 月份的土壤相对湿度值是通过一个新的 ATI 模型反演得到的,而这个新的回归模型是由 11 月份和 3 月份的 ATI 模型系数的平均值产生的。最后在 ENVI4.8 中以 IDL 为平台,通过逐像元平均法将每旬的土壤相对湿度值进行叠加计算,得到 2009 年 1-5 和 10-12 月的土壤相对湿度值^[47]。

(2) 土壤含水量计算

本文中的土壤湿度因子是指土壤表层 0-10cm 深度范围内含水率对土壤风蚀的潜在影响能力,土壤含水率也称土壤绝对含水量即土壤含水量^[48]。因此可以通过以下公式利用 ARCGIS10.0 中的栅格计算器,将土壤相对湿度转化为反演风蚀模型所需的土壤含水量。

$$\text{土壤含水量} = \text{土壤相对湿度} \times \text{田间持水量} \dots\dots\dots(3.3)$$

其中,田间持水量,是指在地下水较深和排水良好的土地上经过充分灌水或降水后,允许水充分下渗,并防止蒸发,经过一定时间后,土壤剖面所能稳定保持的最高含水量^[49]。根据有关学者的研究结果表明,粘土、壤土和沙土的田间持水量分别为 28.68%、19.20%和 9.87%^[50]。

3.3.3 植被覆盖度因子的测算

植被覆盖度是指植被植株冠层或叶面在地面的垂直投影面积占植被区总面积的百分比^[51]。植被覆盖度和土壤侵蚀关系密切,是水土流失的控制因子之一,很大程度上决定着水土流失的强度^{[52][53]},成为评估土壤侵蚀、水土流失、土地沙漠化、土地退化和盐渍化的重要指标^[54]。本文以像元二分模型的两个参数为基础,改进现有的模型,建立利用归一化植被指数来定量估算植被覆盖度的模型,然后利用 NDVI 数据反演得到研究区植被覆盖度因子。

象元二分模型将一个象元的地表看作是由植被覆盖部分地表和无植被覆盖地表两部分组成^[55]。依据像元二分模型原理,一个象元的 NDVI 值是由植被覆盖部分贡献的遥感信息信息 ($NDVI_{\text{soil}}$) 和无植被覆盖部分贡献的遥感信息 ($NDVI_{\text{veg}}$) 两部分组成,因此将归一化植被指数 NDVI 代入象元二分模型可得:

$$fc = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \dots\dots\dots(3.4)$$

式中，NDVIsoil 代表裸土或无植被覆盖区域象元的 NDVI 值；NDVIveg 代表完全被植被覆盖区域象元的 NDVI 值；本文的 NDVIsoil 和 NDVIveg 分别取值遥感影像中的给定置信度的置信区间为 95% 和 5% 的值。

基于上述原理，本文可通过 ENVI4.8 中的 Bandmath 工具计算得到植被覆盖度因子。

3.3.4 地表粗糙度因子的测算

地表粗糙度，是指因植被、微地形和农田耕作技术措施导致的零风速位置的高度。地表对风速的削减作用和对风沙流造成的阻碍可以通过粗糙度来表达，而粗糙度的大小是由地表植被覆盖的类型、作物的种类和播种方向以及地表的起伏程度决定。有关研究表明，地表粗糙度越大，对风速的削减作用越明显。而且因为风是造成土壤风力侵蚀的重要影响因子，且和风蚀强度呈正相关关系，降低风速一定会导致风蚀速率的降低，因此风速和地表粗糙度呈显著的负相关关系^{[56][57]}。

然而由于缺失研究区地块尺度耕作措施的数据，因此，根据有关学者的相关研究^[58]，假定研究区一年一熟耕地在非生长季的地表状态为留茬地或深翻耒耙平地，其地表粗糙度统一赋值为 0.10。因此，本文的风蚀量估算属于土壤风蚀风险评价的范畴。

3.4 风蚀模型简介

本文采用第一次全国水力普查中使用的风蚀模型^[59]，该模型的雏形是国内有关学者以我国半干旱典型草原区的风沙土和栗钙土的风洞实验结果为基础建立的^[60]，并在京津风沙源治理工程等项目应用中应用并逐渐完善^[61]。该模型分别由耕地、草（林）地、沙地风蚀预报模型构成，具体模型如下：

(1) 耕地模型：

$$Q_{fa} = 0.018 \cdot (1 - W) \cdot \sum_{j=1} \left\{ T_j \cdot \exp \left[a_1 + b_1/z_0 + c_1 \cdot \left[(A \cdot U_j)^{0.5} \right] \right] \right\}$$

(2) 草（林）地模型：

$$Q_{fg} = 0.018 \cdot (1 - W) \cdot \sum_{j=1} \left\{ T_j \cdot \exp \left[a_2 + b_2 \cdot V^2 + c_2 / (A \cdot U_j) \right] \right\}$$

(3) 沙地模型：

$$Q_{fs} = 0.018 \cdot (1 - W) \cdot \sum_{j=1} \left\{ T_j \cdot \exp \left[a_3 + b_3 \cdot V + c_3 \cdot \ln(A \cdot U_j) / (A \cdot U_j) \right] \right\}$$

式中， Q_{fa} 为耕地模型区的土壤风蚀模数 $[t/(km^2 \cdot a)]$ ； Q_{fg} 为草（林）地模型区的土壤

风蚀模数； Q_{fs} 为沙地的土壤风蚀模数； U_j 为气象站点整点风速统计中大于临界侵蚀风速的第 j 级风速 (m/s)； T_j 为一一年内有风力侵蚀发生期间风速为 U_j 时的累计时间 (min)；我国北方旱作农田临界侵蚀风速一般略大于流沙地表的 5.0m/s，气象站点整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第一个风速等级为 5.0~5.9m/s，取其中值为 5.5m/s，因此 $U_{j=1}=5.5\text{m/s}$ 。 $U_{j=2}=6.5\text{m/s}$ ，以此类推。 U_j 最高为整点风速记录中的最大风速。 W 为表土湿度因子 (%)； Z_0 为地表粗糙度 (cm)； V 是植被盖度 (%)。 A 为与下垫面 (耕作技术措施) 有关的风速修订系数； a_1 、 b_1 、 c_1 为常数项，分别取值 -9.208、0.018 和 1.955 (无量纲)； a_2 、 b_2 、 c_2 分别取值 2.4869、-0.0014 和 -54.9472 (无量纲)； a_3 、 b_3 、 c_3 分别取值 6.1689、-0.0743 和 -27.9613 (无量纲)。

3.5 风蚀地类划分与模型应用说明

3.5.1 风蚀地类划分

在基于 TM 和 MODIS 遥感数据进行土地利用类型划分的基础上，根据风蚀模型对土地利用类型划分的要求和植被覆盖度 $\geq 70\%$ 不产生风蚀的研究结果^[59]，将土地利用类型归并为风蚀地类和非风蚀地类两大类，其中，风蚀地类主要包括 7 月植被覆盖度 $< 70\%$ 的林地、草地、一年一熟旱耕地、一年两熟旱耕地和沙地；非风蚀地类主要包括各类水体、水田、盐田、建筑用地和 7 月植被覆盖度 $\geq 70\%$ 的林地等。

3.5.2 模型应用说明

为了使风蚀模型适用于包括了半干旱和半湿润气候的研究区，根据风蚀模型应用条件，对模型应用说明如下：①根据一年两熟耕地在非生长季的作物覆盖状况，该地类的土壤风蚀模数按照草地模型计算；一年一熟耕地的土壤风蚀模数按照耕地模型计算。②由于基于 MODIS NDVI 数据反演的植被覆盖度数据并不能真实反映非生长季草 (林) 地 (含一年两熟耕地) 的植被覆盖度，因此，以生长季最后一个月 (10 月) 的植被覆盖度值代表整个非生长季 (南部平原及太行山 11-2 月，北部山区坝上 11-4 月) 的植被覆盖度值。③根据风蚀模型的应用条件，耕地的临界风速 (U_0) 为 5m/s，沙地和草 (林) 地的临界风速与植被覆盖度呈正相关，其中，基本无植被覆盖条件下的沙地临界风速为 5m/s、草 (林) 地为 8 m/s^[59]。④根据土壤风力侵蚀普查方案的要求，计算 1-5 月和 10-12 月共计 8 个月的土壤风蚀模数之和为年土壤风蚀模数。因为研究区 6-9 月份植被覆盖度和表土湿度较高、且起沙风速累计时间短，风蚀量的贡献可以忽略不计。

4 结果分析

4.1 风蚀因子测算结果分析

4.1.1 风力因子

风力因子是进行风蚀定量评估的关键参考指标之一，是土壤风蚀形成与发展的自然动力。研究表明，风蚀率与风速变化成正相关关系，随着风速的增大，风蚀率相应的增加^[62]。

河北省全年临界风速累计时间的空间分布特征如下：高值区主要分布在坝上高原和冀北山地的西部、冀西北间山盆地区的盆地部分；次高值区分布在太行山山麓平原区中部、燕山山麓及沿海平原和沧州沿海平原；次低值区主要分布在内陆平原中南部和冀北山地东部地区；低值区主要分布在燕山山地、冀西北间山盆地区的东北部山地和内陆平原北部（图 4.1）。

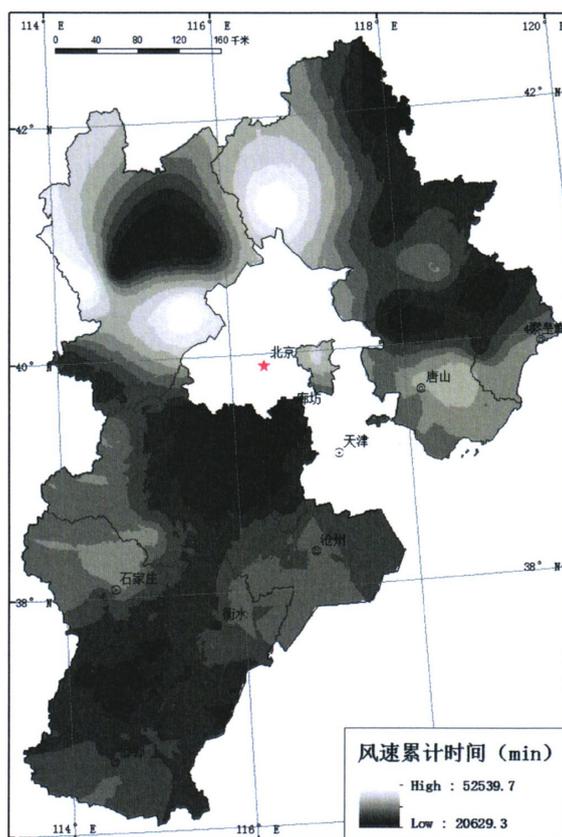


图 4.1 河北省风力因子空间分布图

4.1.2 植被覆盖度因子

植被覆盖度和土壤侵蚀关系密切，是土壤风蚀研究的重要因子。在风蚀过程中，植被覆盖度越高对风蚀的阻碍和抑制作用越强烈。研究表明，植被主要是通过分解风力，增大地表粗糙度，使作用于地表的风速减小，并且能阻碍并隔离风直接作用与土壤，可以有效的减小风对地表的侵蚀力。另外植被覆盖还可以阻挡输沙，减少扬尘对空气的危害^{[63][64][65]}。大量研究表明土壤风蚀率与植被盖度呈负指数关系，一定风速下随植被盖度的增大，土壤风蚀率迅速减小^{[66][67]}。

河北省全年植被覆盖度空间分布特征如下：冀北山地和太行山地是植被覆盖度高值区，河北平原一年两熟作物区为次高值区，次低值区为河北平原一年一熟作物区，低值区主要分布在冀西北间山盆地、坝上张北高原和沿海平原区。这主要是因为山地丘陵区水土资源丰富，有利于植被的生长和发育，因此冀北山地和太行山地植被类型种类繁多，植被繁盛茂密，覆盖度高；而高原区和冀西北间山盆地地区降水稀少、气候寒冷，不适合植被生长，因此植被稀疏且覆盖度低（图 4.2）。

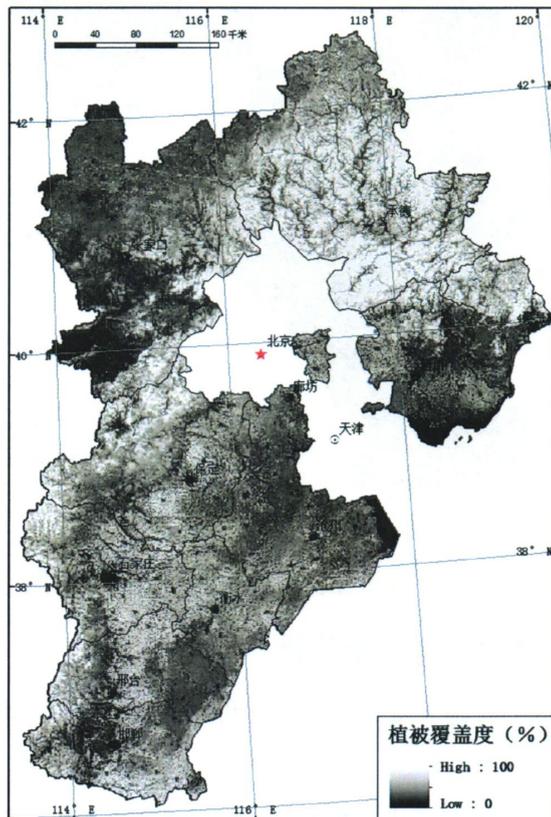


图 4.2 河北省植被覆盖度因子空间分布图

4.1.3 表土湿度因子

表土湿度是土壤风蚀的重要影响因素之一，和风蚀速率呈显著的负相关关系^[68]。河北省全年表土湿度空间分布特征如下：冀北山地、太行山地和滨海地区为表土湿度高值区，河北平原一年两熟作物种植区为次高值区，坝上高原和河北平原一年一熟作物种植区为次低值区，沙土和砾质土分布区为表土湿度低值区（图 4.3）。这主要是因为山地降水较多，且植被对土壤水分有较高的保持作用，因此土壤湿度较高；另外，农作物的灌溉可以提高耕地区的土壤湿度值。

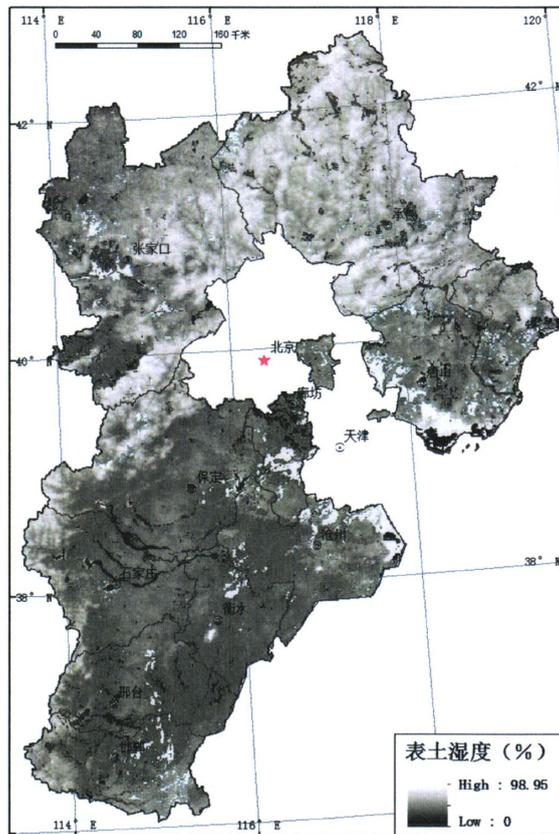


图 4.3 河北省表土湿度因子空间分布图

4.2 土地利用类型解译结果分析

在基于 TM 和 MODIS 遥感数据进行土地利用类型划分的基础上，将研究区划分为风蚀地类和非风蚀地类。

风蚀地类的空间分布特征：中低覆被林地和草地主要分布在太行山地、冀北山地和冀西北山地；一年一熟耕地主要分布在河北平原低平原农区、燕山山麓平原区、滨海平

原和坝上张北高原；一年两熟耕地主要分布在太行山山麓平原区；沙地主要分布在冀西北间山盆地和冀北山地的小部分地区。

非风蚀地类的空间分布特征：植被覆盖度 $\geq 70\%$ 的高覆被林地主要分布在冀北山地、冀西北山地和太行山地，其中冀北山地分布最广；建筑用地主要分布在广大平原和冀西北盆地；盐田和水田等主要分布在滨海平原（图 4.4）。

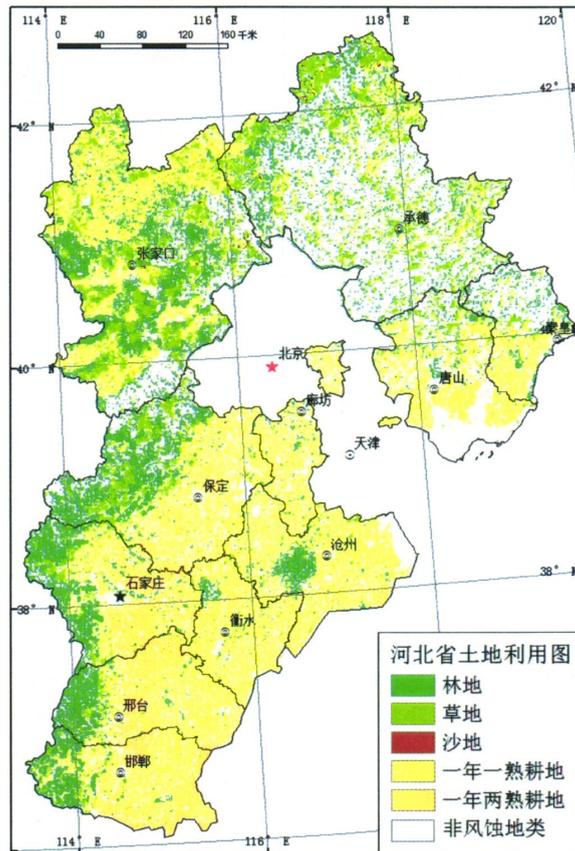
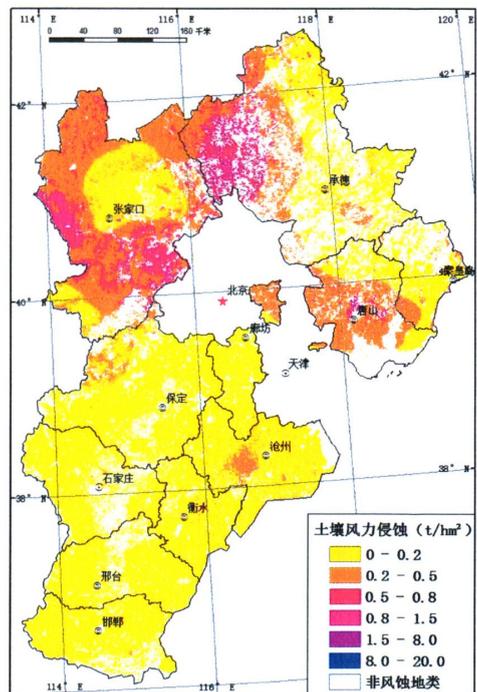
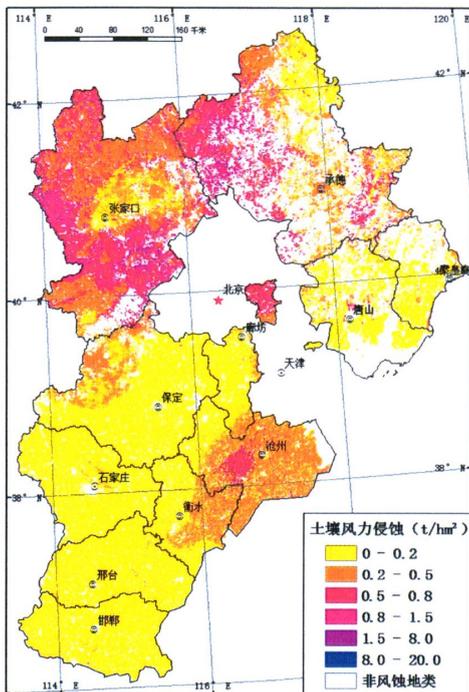
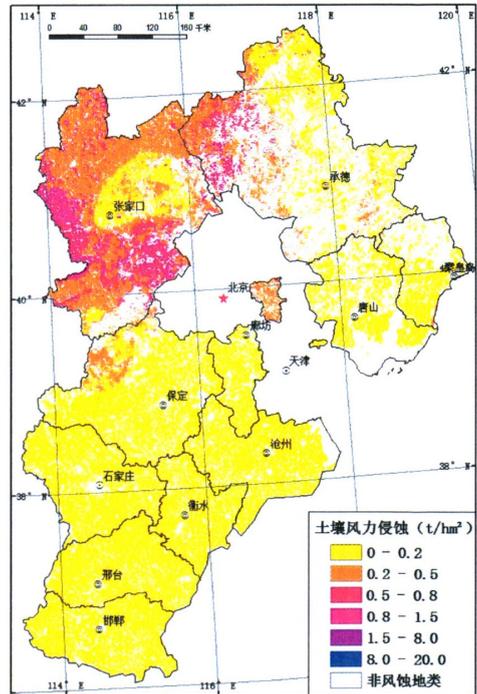
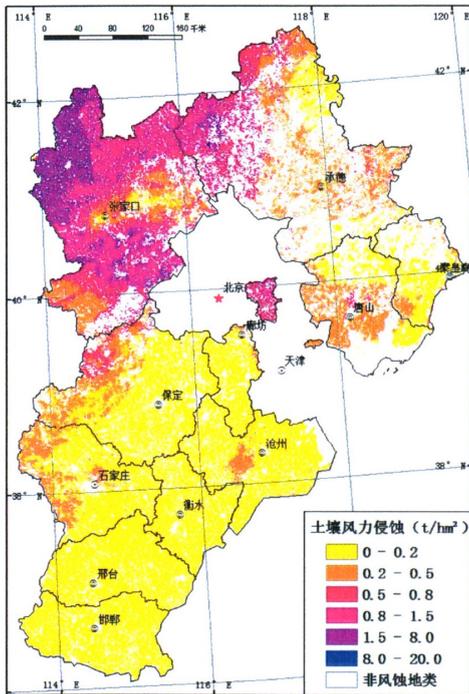


图4.4 2009年河北省土地利用图

4.3 土壤风蚀评价结果分析

本文在 Arcgis10.0、ENVI4.8 等技术平台的支撑下，对遥感影像数据进行预处理，然后经过反演计算得到土壤风蚀各影响因子数据，将其代入土壤风蚀模型，计算河北省 2009 年 1-5 月和 10-12 月各月的土壤风蚀模数，最后以各月风蚀模数为基础，以 IDL 为平台利用逐象元加和法得到不同用地类型的年土壤风蚀模数，并根据我国土壤风蚀分类分级标准对河北省土壤风蚀程度进行分级和定量评价，并探讨了河北省 2009 年土壤风蚀及其各风蚀影响因子空间分布的差异性。

4.3.1 各月土壤风蚀评价结果



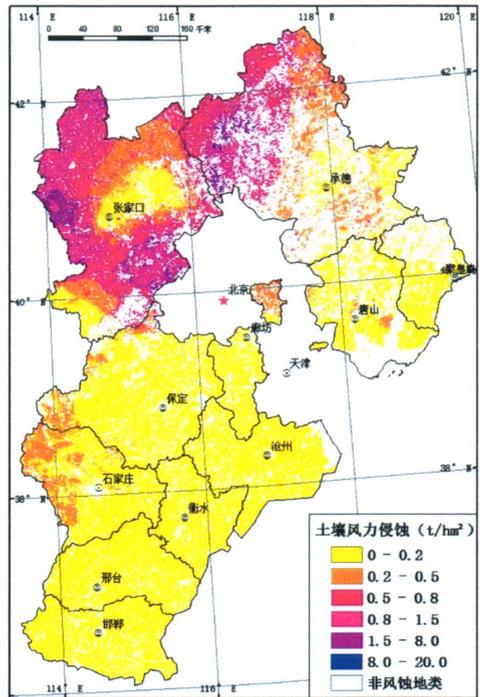
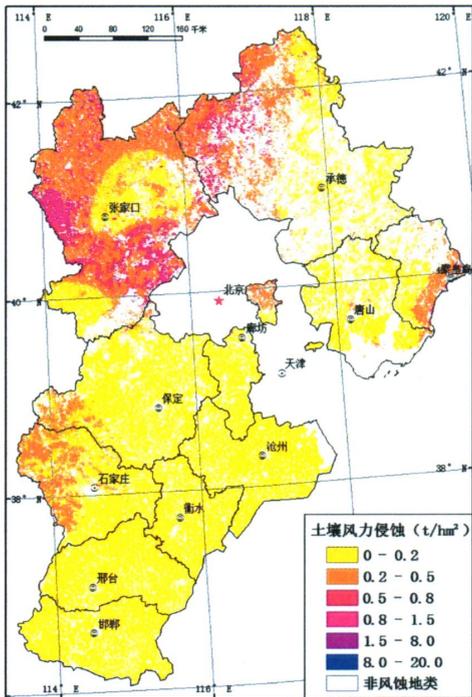
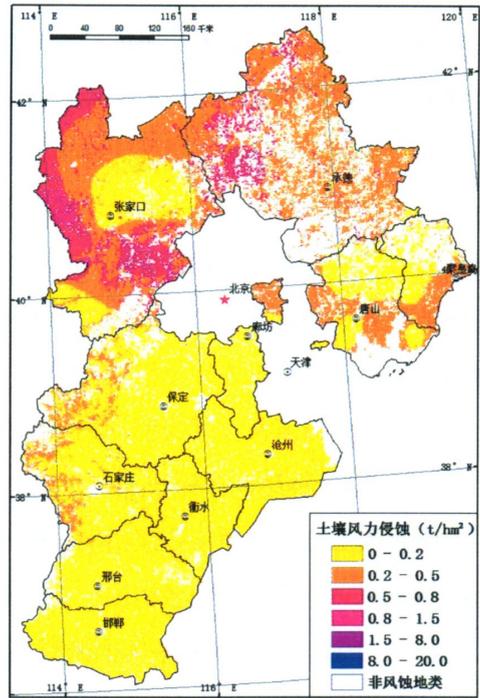
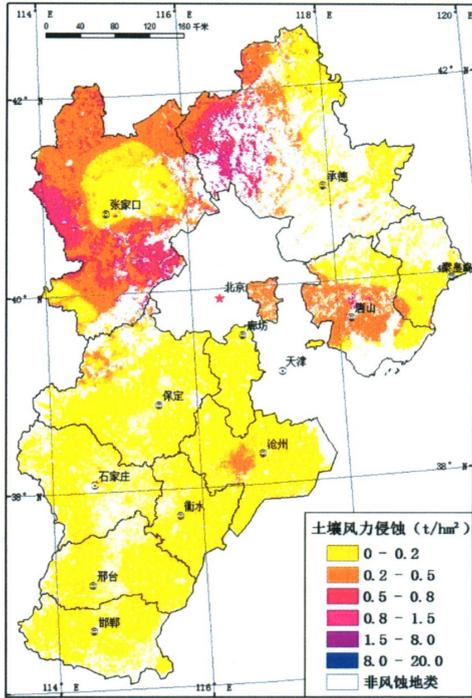


图 4.5 河北省 2009 年 1-5 和 10-12 月土壤风蚀分布图 (从左至右、从上到下)

从河北省 1-5 月和 10-12 月土壤风蚀空间分布图上可以看出，1 月份土壤风蚀高值区主要分布在风速较大且累计时间较长的坝上高原和冀西北间山盆地，中值区分布在冀北山地大部分地区和太行山山前平原，低值区主要分布在河北平原；2 月份土壤风蚀量整体下降，次高值区分布于冀西北间山盆地西部和南部；3-5 月份，土壤风蚀强度整体逐渐减弱。中值区主要分布在冀西北间山盆地和冀北山地西部地区，低值区分布在坝上高原和滨海平原。这主要是因为坝上高原一年一熟作物的种植和发育以及平原区一年两熟作物的发育和灌溉引起的植被覆盖度和土壤湿度上升引起的；10-12 月份，由于农作物灌溉和降雨量的减少导致土壤湿度降低，农作物的收割导致耕地区域植被覆盖度下降，以及各等级风速累计时间的延长，土壤风蚀开始逐渐增强。

4.3.2 年土壤风蚀评价结果

参照我国土壤风蚀强度分级标准，将河北省土壤风蚀分为四个级别，分别为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀，并将微度侵蚀和轻度侵蚀各划分为三个次级别（表 2）。从表 2 中可以看出微度侵蚀面积最大约为 125014 平方千米，约占河北省总面积的 65.36%，其中微度侵蚀 I 面积最大约为 62106 平方千米，占整个河北省总面积的 32.46%，微度侵蚀 II 面积为 48713 平方千米，微度侵蚀 III 面积约为 14195 平方千米，约占河北省总面积的 7.42%；轻度侵蚀次之，面积约为 23838 平方千米，约占河北省总面积的 12.46%，其中轻度侵蚀 I 面积较大，II 和 III 面积较小；中强度侵蚀面积最小，合计不足总面积的 0.1%。

表 4.1 河北省 2009 年土壤风蚀强度评价结果

土壤侵蚀级别	微度侵蚀				轻度侵蚀				中度侵蚀	强烈侵蚀
	I	II	III	小计	I	II	III	小计	—	—
分级标准 (t/hm ² ·a)	0-0.5	0.5-1.2	1.2-2	0-2	2-5	5-10	10-25	2-25	25-50	50-80
面积 (km ²)	62106	48713	14195	125014	19615	4133	90	23838	99	10
百分比 (%)	32.46	25.47	7.42	65.36	10.26	2.16	0.05	12.46	0.05	0.01

河北省 2009 年土壤风蚀程度具有明显的空间差异性（图 4.6），微度侵蚀是河北省主要的土壤风蚀类型，分布范围广泛，主要分布在植被覆盖度较高的河北平原和太行山地，包括保定、石家庄、沧州、衡水、邢台和邯郸的全部，廊坊的大部分以及唐山、秦

皇岛的平原区。其次分布在冀西北间山盆地和冀北山地，主要包括张家口的万全、崇礼和赤城三县，承德地区也有少量分布。微度侵蚀虽然对土壤退化影响很小，但却是大气颗粒物污染的重要来源。

轻度侵蚀主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地，其中冀西北间山盆地西部侵蚀程度较重；其次轻度侵蚀在冀北山地中西部地区也有少量分布。主要是因为这些地区的植被覆盖度和土壤湿度较低，风速累计时间较长，导致地表土壤的风蚀程度加剧。

中强度侵蚀的风蚀面积最小，主要分布在河北省北部地区，土地利用类型为沙地。轻度以上侵蚀对土壤退化和大气颗粒物污染均有贡献，是冀西北间山盆地和坝上高原地区的主要生态环境问题之一。

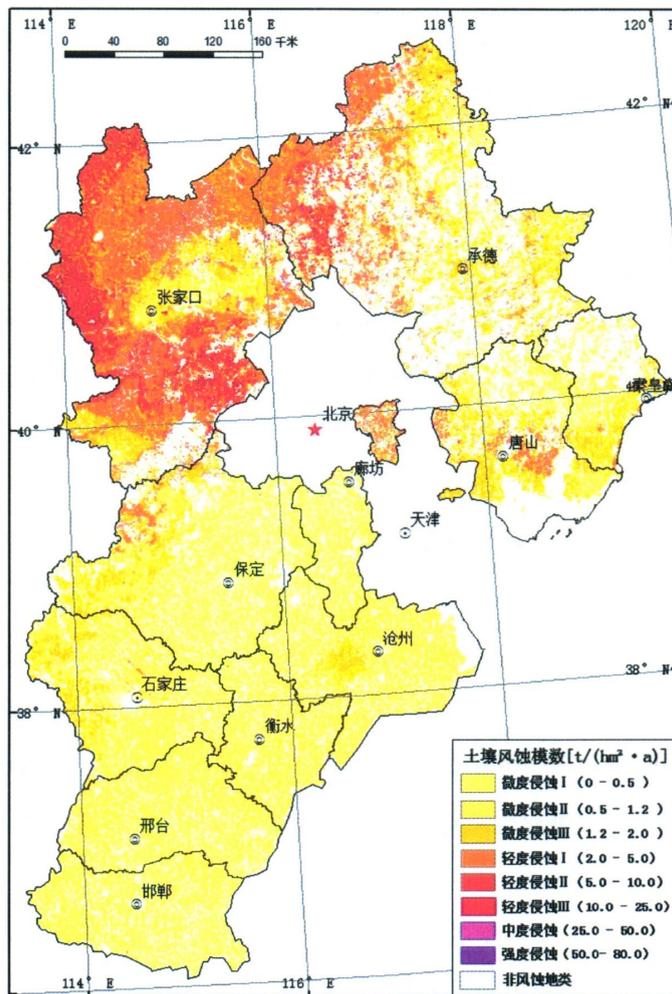


图4.6 2009年河北省土壤风蚀模数

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以河北省全部空间范围为研究区域，以站点实测风速数据、土壤湿度数据和 MODIS 数据为数据源，其中风速数据来源于美国国家气候数据中心 (NCDC) 和河北省气候中心，土壤湿度实测数据来源于中国气象科学数据共享网，MODIS 数据来源于美国 NASA 网站。然后应用国内主流风蚀模型方法，在地理信息系统等技术平台的支撑下，对遥感影像数据进行预处理，然后经过反演计算得到土壤风蚀各影响因子数据，将其代入土壤风蚀模型，计算河北省 2009 年 1-5 月和 10-12 月各月的土壤风蚀模数，最后以各月风蚀模数为基础，以 IDL 为平台利用逐象元加和法得到不同用地类型的年土壤风蚀模数，并根据我国土壤风蚀分类分级标准对河北省土壤风蚀程度进行分级和定量评价，最后探讨分析河北省 2009 年土壤风蚀及其各风蚀影响因子空间分布的差异性。从而得出以下结论：

(1) 本文的创新点在于以遥感和地理信息系统为基础平台，采用的是中科院寒旱区环境研究所提出的风蚀模型，该模型在京津风沙源工程治理项目中得到了成功的运用并且取得了良好的效果。在第一次全国水利普查中，该模型再次被选定为土壤风力侵蚀普查所用模型，也再次验证了其科学性和实用性。本文将应用于传统风蚀区的模型推广到北方半湿润地区，对河北省全部空间范围开展土壤风蚀风险评价研究，并且为了使风蚀模型适用于包括了半干旱和半湿润气候的研究区，根据风蚀模型的应用条件，对模型进行了适当的修正和调整，以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染防治提供科学依据。

(2) 在反演土壤湿度因子时，为了消除地表高程对温度的影响，首先利用数字高程模型对研究区的地表温度进行修正，然后针对表观热惯量 ATI 模型和温度植被指数 TVDI 模型的优缺点，在 3-5 月、10 月和 11 月的土壤相对湿度的反演采用 NDVI 分区的方法，1、2、12 月份由于实测土壤湿度数据的缺失和植被覆盖度较低的原因通过 ATI 替代模型计算得到。

(3) 在计算风速因子时以各气象站点逐日 8 次的实测风速数据为基础，进行线性插值和克里金插值，得到研究区分辨率为 100m 的风力因子空间分布栅格图。依据像元二分模型原理，以归一化植被指数为数据基础，反演得到植被覆盖度因子。

(4) 在各土壤风蚀因子的影响下, 河北省土壤风蚀强度呈现出明显的空间差异性。微度侵蚀河北省主要的土壤风蚀类型, 面积约为125014平方千米, 约占河北省总面积的65.36%, 主要分布在河北平原和太行山地, 其次分布在冀西北间山盆地和冀北山地; 其次为轻度侵蚀, 面积约为23838平方千米, 约占河北省总面积的12.46%, 主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地, 冀北山地中西部地区也有少量分布; 中强度侵蚀的风蚀面积最小, 合计不足总面积的0.1%, 主要分布在北部沙地。

(5) 京津风沙源研究结果表明^[13], 京津风沙源区轻度侵蚀和微度侵蚀面积最大, 而中强度侵蚀面积最小, 合计不足总面积的1%。这与本文的研究结果基本一致, 说明本文采用的土壤风蚀反演模型具有一定的可行性, 反演结果具有一定的可信度。

(6) 土壤风蚀是沙漠化的重要组成部分和首要环节, 严重的土壤风蚀带走大量的地表颗粒物, 不仅影响区域的生态环境和经济的可持续发展, 而且还会产生大范围的沙尘暴天气和大气环境污染问题, 影响周边地区人们的健康和正常的生产生活。因此本文给出以下几点土壤风蚀防治措施和减缓对策。①植树造林, 保持土壤水分, 提高植被覆盖度, 削弱风力因子对表层土壤的侵蚀, 这是土壤风蚀防治的主要措施。②调整产业结构, 合理利用土地资源。③加强科研工作, 深入研究土壤风蚀机理, 建立和完善土壤风蚀监测预报系统。④加强风蚀防治知识的普及和教育, 提高全民风蚀防治意识。

5.2 讨论

本文应用国内主流风蚀模型方法, 对河北省全部空间范围开展土壤风蚀风险评价研究, 以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染防治提供科学依据, 但在研究过程中还存在一些不足之处, 主要表现在:

(1) 在计算风力因子时, 由于部分站点缺少逐日8次的整点风速实测数据, 本文利用已知站点的整点风速实测数据和未知站点大风日数数据之间的线性关系, 获得全省142个站点的逐日24小时整点风速数据。由于部分站点并非直接实测的数据, 导致数据精度有所欠缺。

(2) 本文由于缺失研究区地块尺度耕作措施的数据, 假定研究区一年一熟耕地在非生长季的地表状态为留茬地或深翻耩平地, 将地表粗糙度统一赋值为0.10, 在今后的研究中应增加耕作措施因子的调查。

(3) 本文虽然对MODIS数据进行了预处理, 达到了一定的控制数据质量的效果, 但是在模型中仍存在一些质量较差的象元, 会对反演结果造成一定的影响, 在今后的研

究中需要进一步的探索剔除无效象元的技术和方法。

(4) 由于时间关系和数据的有限性，本文只利用各风蚀因子反演了2009年一年的土壤风蚀模数，研究的时间范围较短，应在后续研究中进行完善。

参考文献

- [1]陈百明.土地资源学[M].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [2]胡云峰,刘纪远,庄大方.土壤风力侵蚀研究现状与进展[J].地理科学进展,2003,22(3):288-295.
- [3]陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题的研究进展和趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6-12.
- [4]李玉宝.干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J].干旱区资源与环境,2000,14(2):49-52.
- [5] Fryrear D W, Lyles L. Wind erosion research accomplishments and needs. Transactions of the ASAE, 1977. 20(5): 916-918.
- [6] Greeley R, Iversen J D. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [7] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. Environment International, 2003, 29: 437-450.
- [8] 董治宝, 陈渭南, 李振山等. 风蚀性研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(2): 17-22.
- [9] 慈龙骏, 吴波. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 107-112.
- [10] 董治宝, 董光荣. 以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996(2): 31-37.
- [11] 梁海超, 师华定, 白中科. 中国北方典型农牧交错区的土壤风蚀危险度研究[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 510-516.
- [12] 刘震. 从我国水土流失现状看水土保持生态建设战略布局[J]. 中国水土保持, 2002, 6: 2-4.
- [13] 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
- [14] 杨东贞, 颜鹏, 须祥德. 北京沙尘天气的气溶胶特征[J]. 应用气象学报, 2012, 13(特刊): 185-194.
- [15] 侯秀瑞, 马为民. 河北省土壤侵蚀现状及防治对策[J]. 河北林业科技, 2001, 5: 47-49.
- [16] 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.
- [17] 张洪江. 土壤侵蚀原理[D]. 中国林业出版社, 2003, 1.

- [18]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.
- [19] Bagnold R A. The transport of sand by wind[J].Geographical Journal,1937,89:409-438.
- [20] 廖超英, 李靖, 郑粉莉,刘国彬.国外土壤风蚀预报的研究历史与动向[J].水土保持研究,2004,11(4):50.
- [21] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1965, 29(5): 602-608.
- [22] Pasak V. Wind Erosion on Soil[J]. VUM Zbraslaav Scientific Monographs, 1973, (3): 78-89.
- [23]董治宝.土壤风蚀预报研究述评[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 312-317.
- [24]Bocharov A P. A Description of De vices Used in the Study of Wind Erosion of Soils [M].New Delhi: Oxonian Press, Pvt. Ltd, 1984.
- [25]Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. TEAM : Texas erosion analysis model[A]. 1988:88-103.
- [26]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.
- [27]Hagen, L, J. A wind erosion prediction system to meet the users need[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(2):107-111,2012,32(3): 640-646.
- [28] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析 [J]. 中国科学,1984,24(3):278-288.
- [29]夏训诚.罗布泊科学考察与研究[M].北京:科学出版社,1987.7-45.
- [30]Dong Z B,Wang X M, Liu L Y.Wind erosion in arid and semiarid China : an overview[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,55(4):439-444.
- [31]Dregne HE. Soil and Water Conservation: A Global perspective [J]. INTERCINECIA,1986,11(4):166-172.
- [32]朱震达, 吴正, 刘恕等.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1978.
- [33]彭珂珊.中国耕地资源严重失衡与摆脱困境之途径[J].内蒙古财经学院学报,1994,24(3):275-79.
- [34]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.

[36]董光荣,李长治,金炯等.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.

[37]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.

[38]董治宝.建立小流域风蚀量统计模型初探[J].水土保持通报,1998,18(5):55-62.

[39]高尚武,王葆芳,朱灵益等.中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J].林业科学,1998,34(2):1-10.

[40]黄福祥,牛海山,王明星等.毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J].地理学报,2001,56(6):700-710.

[41]张国平,张增祥,刘纪远.中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J].地理学报,2001,56(2):146-158

[42]王仁德,邹学勇,赵婧妍.半湿润区农田土壤风蚀的风动模拟研究[J].中国沙漠,2012,32(3):640-646.

[43]吴正.中国沙漠与海岸沙丘研究[M].北京:科学出版社,1997.

[44]樊杰.京津冀都市圈区域综合规划研究[M].北京:科学出版社,2008.

[45]邓绶林,刘文彰,杨积余.河北省地理[M].河北人民出版社,1986:1-6.

[46]王卫,王静爱,冯忠江.河北地理[M].北京:北京师范大学出版社,2012.3-9.

[47]邸兰杰,王卫,成贺玺等.基于 ATI 和 TVDI 模型的河北平原土壤湿度遥感反演[J].中国生态农业学报,2014,22(6):737-743.

[48]马柱国,符淙斌,谢力等.土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J].地球科学进展,2001,16(4):563-568.

[49]魏胜利.田间持水量的测定与旱情分析[J].水科学与工程,2005,53-54.

[50]韩勇鸿,樊贵盛,孔令超.土壤结构与田间持水率间的定量关系研究.太原理工大学学报,2012,43(05):615-619.

[51]周国林,袁正科.常用林业技术术语.长沙:湖南科学技术出版社,1982.

[52]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.长江科学院院报,2001,18(2):41-44.

[53]卢敬华,陈伟.植被覆盖与土壤水分的动力学模型.成都气象学院学报,1998,13(3),209-216.

- [54]卢远, 华璀, 周兴. 广西土壤侵蚀敏感性特征及防治建议[J]. 中国水土保持, 2006, (6): 36-38
- [55]吴云, 曾源, 赵炎等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1417-1424.
- [56]Blumberg D G, Greeley R. Field studies of aerodynamic roughness length[J]. *Journal of Arid Environment*, 1993, (25): 39-48.
- [57]张春来, 邹学勇, 董光荣. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 474-475.
- [58]王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 北京市农田风蚀的野外观测研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 401-406.
- [59]郭索彦, 刘宝元, 李智广等. 土壤侵蚀调查与评价. 北京, 中国水利水电出版社, 2014.06.
- [60]张春来. 现代沙质荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002.
- [61]高尚玉, 张春来, 邹学勇 等. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [62]何文清, 高旺盛, 妥德宝, 等. 北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 1-4.
- [63]Van de Ven, T.A.M., D.W. Fryrear & W.P. Spaan. 1989. Vegetation characteristics and soil loss by wind. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44: 347-349
- [64]Wolfe, S.A. & W.G. Nickling. 1993. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress on Physical Geography*, 17: 50-68
- [65]张春来, 邹学勇, 董光荣等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究, 水土保持学报, 2003, 17(3): 32-33.
- [66]胡孟春, 刘玉璋, 乌兰等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究. 中国沙漠, 1991, 11(1): 22-29.
- [67]刘玉璋, 董光荣, 李长治. 1992. 影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究. 中国沙漠, 12(4): 41-49.
- [68]何文清, 高旺盛, 妥德宝, 等. 北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 1-4.

攻读硕士期间发表论文、参与课题清单

发表论文：

《基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价》，水土保持通报，第一作者。

《基于 MODIS 影像的土地覆被分类研究——以京津冀地区为例》，地理科学进展，第三作者。

参与课题清单：

1、参与《国家级研究项目（908-SJ-HB）河北省 908 海洋专项课题研究、并参与河北省 908 专项综合调查与评价报告、河北省 908 专项综合调查报告、河北省 908 专项综合评价报告、河北省海洋环境资源基本现状报告的编写。

2、参与省部级《河北省土地供给差别化调控机制研究课题研究》主要负责资源环境承载力领域评价、总体层评价、微调、分级与报告编写；

3、参与 2012 年研究生基金项目（201202020）《河北省土壤风蚀状况评价》，主要负责数据处理、模型计算和地图制作。

4、2014 年 8 月参加“自然地理学创新与区域可持续发展学术研讨会”，并参与会后地理考察。

5、2015 年参与国家自然科学基金项目（41471091）《基于土地利用的京津冀大气颗粒物浓度时空变化模拟研究》的前期数据准备工作。

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，三年的研究生生活即将结束。在毕业论文完成之际，回首这三年的学习和生活，向所有关心、帮助过我的老师和同学们表达我最诚挚的谢意！

首先特别感谢我的导师王卫教授，王老师学识渊博、治学严谨、平易近人。在平时工作中，王老师一直严以律己，宽以待人，在研究生三年里，我感触最深的莫过于王老师数年如一日的每天准时来学校工作，甚至节假日都不休息，有时感叹王老师精力甚至强过我们年轻人，我知道这是对学术研究的热爱及对工作的热情。不得不说王老师这种兢兢业业的工作态度及持之以恒的精神确实值得我们年轻人佩服和学习。在学习上王老师要求学术研究一定要严谨，在我论文撰写过程中，王老师给了我许多建议，当然也提出了许多的批评，包括对论文的理解及研究方法的选择等等，这也使我明白了做学术研究在任何时候都要保持一种严谨的态度。所以再次感谢王老师，谢谢您这三年里对我的关心与鼓励。

其次我要谢谢我的同门，三年来感谢身边有你们的一路伴行。俗语说，相遇就是一种缘分。能在同一屋檐下学习，我想更是一种前世修来的福分，感谢你们在平时学习和生活中给予我的帮助和支持。感谢贺玺师哥、牛哥和兰杰师姐给予我学习上的帮助和鼓励；感谢三年来我们一起携手走过的彦莉和玉珊，彦莉漂亮而且聪慧，玉珊学习踏实又努力，很幸运能够与你们在一个实验室度过三年研究生时光；然后感谢晓丽师姐和小伟师姐对我的关心和帮助；感谢我的师弟师妹们，翰征、韩星、赵菲你们马上也要研三了，希望你们能够继续努力完成论文，取得更好的成绩，能够有一个更好的前程。郝然和贾静也要好好努力，听王老师的话，努力学习，好好工作。

还要感谢其他帮助我的同学，感谢蓬勃和楠楠的帮助，你们总是不厌其烦的对我各种问题进行耐心解答，感谢同宿舍的娟姐、冬颖和汪莹，这三年有你们在我身边，是我最大的幸运！

我要特别感谢我亲爱的爸爸妈妈和爷爷奶奶，感谢你们对我学习上的支持和生活上的各种理解和帮助，感谢你们对我的培养和养育之恩。我会努力奋斗，以我的实际行动报答你们！

最后，祝大家生活愉快、一切顺利！