

沈阳农业大学

---

硕士学位论文

---

不同耕作方式防治农田土壤风蚀效果的比较研究

---

姓名：赵宏亮

---

申请学位级别：硕士

---

专业：作物栽培学与耕作学

---

指导教师：侯立白

---

20060508

## 独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得沈阳农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：赵宏亮

时间：2006年6月14日

导师签名：侯连白

时间：2006年6月14日

## 关于论文知识产权和使用授权的说明

本论文的知识产权为沈阳农业大学所有。本人完全了解沈阳农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意沈阳农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的内容。

学位论文中的所有内容不经沈阳农业大学授权不得以任何方式擅自对外发表。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：赵宏亮

时间：2006年6月14日

导师签名：侯连白

时间：2006年6月14日

## 摘 要

农田土壤风蚀沙化现象已成为中国北方农牧交错区农业可持续发展中最为突出的问题，并在沙尘暴中扮演着重要的角色。特别是近年来，由于沙尘暴频繁发生引起了全社会对农田土壤风蚀的广泛关注。

本文以地处中国科尔沁沙地南缘农牧交错带的农田土壤风蚀比较严重的彰武地区为研究对象，选择三种不同风速条件下的典型天气，采用野外观测与室内分析相结合的方法，对不同耕作方式、茬口的土壤风蚀状况、风蚀物随高度的变化规律、风蚀物的粒度组成以及风速对土壤风蚀的影响等方面进行了探索，并给出定性与定量的分析结果，为防治农田土壤风蚀的提供科学的依据。主要研究结果包括：

1.在风蚀过程中，距地表 0~150cm 高度范围内，不同耕作方式的土壤输沙率随高度的增加逐渐减少，且输沙率随高度变化的规律可以用幂函数近似描绘。土壤颗粒运动主要是在 0~60cm 高度范围内，并且主要集中在近地表层 0~25cm 高度范围内运动。

2.不同耕作方式和茬口对 10cm、25cm、60cm、100cm 高度的土壤输沙率的影响具有显著性差异，而对 150cm 高度的土壤输沙率的影响不显著。多重比较结果表明，保护性耕作和玉米茬减少近地表土壤颗粒运动的数量较多，随着高度的增加，减少农田土壤颗粒运动的数量，四种耕作方式和两种茬口之间的差异逐渐不明显。

3.不同耕作方式、茬口的土壤输沙率的影响因素分析表明：保护性耕作可以减少近地表土壤颗粒的运动，减少农田土壤损失，起到保护农田地表的作用，因此耕作方式对农田土壤输沙率的影响较大；玉米茬与花生茬相比，玉米茬的抗风蚀能力较强，因此茬口的不同对农田土壤风蚀有一定的影响。

4.在 4.8m/s~12.2m/s 风速范围内，不同耕作方式的 150cm 高度范围内的输沙率与风速之间的最佳拟合关系为指数函数，其函数关系式为： $Q=Ae^{Bv}$ ，且二者之间呈正相关关系。

5.地表粗糙度的测定结果表明，保护性耕作与春浅旋灭茬、秋翻地相比能够提高地表粗糙度，增强对近地面层气流的阻碍作用，从而降低近地表风速，减少土壤风蚀。

6.无论在何种处理条件下风沙流中沙粒的粒径在垂直分布上是不同的，随高度的增加，风蚀物各粒级含量中砂粒组分含量减少，粉粒及粘土含量增加，即越靠近地表（0~25cm）的气流所含的沙粒越粗，而离地表越远的气流中所含的沙粒越细。

7.对四种耕作方式和两种茬口的土壤风蚀物颗粒平均粒径的分析表明：无论在何种处理条件下土壤风蚀物颗粒的平均直径随高度增加而减小。秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作的土壤风蚀物之间的颗粒平均直径的差异随高度增加逐渐减小；而花生茬和玉米茬土壤风蚀物的颗粒平均直径的差异随着高度的增加有逐渐减小的趋势。

8.对不同处理条件下各高度层土壤风蚀物 $>0.1\text{mm}$  和 $<0.1\text{mm}$  的颗粒含量的分析表明，在土壤风蚀过程中，秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作四种耕作方式以及玉米茬的土壤颗粒的运动形式主要以悬移形式运动，花生茬土壤颗粒的运动形式主要以跃移形式运动。

**关键词：**耕作方式；土壤风蚀；防治效果；输沙率；土壤粒度

## Abstract

Farmland soil wind erosion and sandy desertification has become most prominent problem in farming - pastoral transition zone of northern China, it is acting the important role in the sand storm. Especially recent years, because of the sand storm frequent occurrence caused the entire society attention to it.

Zhangwu situated in farming-pasture transition zone at the south belt of Horqin sandy land. This article takes it as research object for its serious farmland soil wind erosion. The change rule of wind erosion with the height, soil particle composition and the effect of wind velocity on soil wind erosion under different tillage patterns and different stubbles are carried on by the unify methods of outdoor observation and indoor analysis. The results can provide the scientific basis for preventing and controlling soil wind erosion. The main findings include:

1. In the wind erosion process, from the height of 0 to 150cm, the sand transport rate quantity is decrease as the height increase, and its change rule can be described by power function approximately. Soil particle movements mainly concentrate in the scope of 60cm height, especially in the scope of 25cm height near the surface.

2. The difference of the effect of different tillage patterns and stubbles on sand transport rate quantity is significant at 10cm, 25cm, 60cm and 100cm, but it isn't significant at 150cm. The multiple comparison result indicated that: CT and MS can obviously decrease the soil particle movement quantity near surface; the differences of decreasing soil particle movement quantity between the different tillage patterns and stubbles are gradually insignificant as the height increase.

3. The factors analysis of effect of different tillage patterns and stubbles on sand transport rate indicates that: CT can reduce the movement of soil particle near the surface, reduce soil loss and protect farmland. Therefore, tillage pattern has significant effect on sand transport rate quantity; Compared with PS, the wind erosion resistant ability of MS is stronger, so the stubbles also have certain effect on farmland soil wind erosion.

4. In the circumstance of the wind velocity from 4.8m/s to 12.2m/s, best description curve of the relationship between sand transport rate and wind velocity is the exponential function,

which presents the positive correlation. The equation is  $Q=Ae^{Bv}$ .

5. The roughness survey result indicates that CT can enhance roughness, strengthen the hindrance function to the air current evidently, thus, it can reduce the wind velocity near the surface and reduce the soil erosion.

6. The vertical distribution of the soil particle in the sand flow is different regardless whatever treatment circumstance. As height increase, the content of the sand component decrease and silt and clay component increase. That is, the height is lower (0-25cm), the particle size in the air current is smaller.

7. The analysis findings of average particle diameter on four tillage patterns and two stubbles indicate that the soil particle average diameter is decrease as the height increase under whatever treatments. The difference of the soil particle average diameter between GAP, ATS, STS and CT decreases gradually as the height increase; The difference of the soil particle average diameter between PS and MS has the same tendency.

8. The analysis of different treatments on the content of  $>0.1\text{mm}$  and  $<0.1\text{mm}$  at all heights shows that: In the soil wind erosion process, the soil particle movement form mainly is suspending pattern in all treatments except for MS, whose soil particle moving as spring pattern.

Key words: Tillage patterns; Soil wind erosion; Preventing effect; Sand transport rate; Soil particle

## 第一章 绪 论

我国是世界上受到土壤风蚀、土地荒漠化危害最严重的国家之一。根据《中国荒漠化报告》，我国荒漠化土地总面积为  $262.2 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占国土面积的 27.3%，涉及新疆、内蒙古、西藏等 18 个省(市、自治区)，其中 99.6% 分布于我国北方以及西藏等 12 个省(市、区)。荒漠化土地中有  $114.8 \times 10^4 \text{km}^2$  分布在干旱地区， $91.9 \times 10^4 \text{km}^2$  分布在半干旱地区， $55.5 \times 10^4 \text{km}^2$  分布在半湿润干旱区。荒漠化土地占荒漠化地区总面积的 79%。由此造成的自然灾害频繁发生、危害越来越重、损失越来越大。据估算，每年荒漠化造成的直接经济损失约 540 亿元，而间接经济损失是直接经济损失的 2~8 倍，甚至达到 10 倍以上(董光荣等，1999)。特别是近几年，沙尘暴天气频繁袭击我国北方大部分城市，引起了社会各界的广泛关注。据统计，近年来由于土地的不合理开发与利用，使得我国西北地区沙尘暴天气逐年增加，例如 20 世纪 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，而进入 21 世纪沙尘暴天气尤为严重，仅 2000 年和 2001 年两年时间里，就分别发生了 15 次和 18 次(农业部农机化管理司，2002；路明，2004)。

### 1.1 国内土壤风蚀研究进展

土壤风蚀是干旱、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环节，也是世界上许多国家和地区的主要环境问题之一。全球极易发生土壤风蚀的地区包括：北非、近东、中亚、东南亚部分地区、西伯利亚平原、澳大利亚、南美洲南部以及北美洲的干旱、半干旱地区(臧英，2002)。土壤风蚀更是我国干旱、半干旱及半湿润易干旱地区土地退化或荒漠化的主要过程之一，我国受土壤风蚀及土地沙漠化的影响的面积占国土总面积的 1/2 以上，且主要分布于北方，尤其以旱作农田最为严重，制约着这些地区的资源开发和社会经济的可持续发展(陈渭南等，1994)。

#### 1.1.1 土壤风蚀的概念

土壤风蚀 (Soil Wind Erosion) 是指土壤及其母质在风力作用下的剥蚀、分选、搬运的过程(陈渭南等，1991)。它的实质是气流或气固两相流对地表物质的吹蚀和磨蚀塑造地球景观的基本地貌过程之一，也是干旱和半干旱地区形成风沙流、沙漠化与沙尘暴灾害的首要环节(吴正，1987；董治宝，1995)。其结果，一方面导致土壤质地变粗、结构变坏和肥力或生产力水平下降；另一方面，风蚀物不同高度的搬运和下风地区的堆积，对农作物、工矿交通等设施及大气环境造成严重的危害(哈斯，1997)。对农作物、工矿交通等设施及大气环境造成严重的危害(哈斯，1997)。

土壤风蚀的强度受风力大小、空气稳定度、地面粗糙度、沙粒或土粒的粒径及其与地表物质的联接程度等因素的影响(何文清, 2004)。由于风蚀, 土壤颗粒在空间上的重新分布和风对土壤颗粒的分选, 可能对所作用到的土壤、与土壤有关的微地形, 以及农业的生产活动等产生深刻的影响。严重的土壤风蚀不仅危害本地, 造成地表细微物质和养分、有机质的大量丧失, 土地生产力下降, 影响农业的可持续发展, 而且对周边地区, 甚至会产生大范围沙尘暴天气, 污染环境, 影响人类的身体健康(臧英, 2003)。

### 1.1.2 国外土壤风蚀研究进展

关于国外对土壤风蚀影响的关注可以追溯到古希腊时代。风蚀最初被人们认识是在19世纪末期, 当时人们只是把它看作是一种地质过程, 风蚀现象的研究仅仅局限在地质学领域, 研究方法以考察和描述为主, 虽然这一阶段的风蚀观察或是研究还相对简单, 研究工作具有很大的描述性, 风蚀研究还缺乏系统性, 但是为进一步的土壤风蚀研究提供和积累了原始的素材。Ehrenberg 在1847年描述了从非洲输送到欧洲的大气粉尘; Blake 在1855年认识到荒漠区风沙流的磨蚀作用; 奥布鲁切夫1895年分析了中亚地区的风化和吹扬作用, 注意到了风沙对岩石的磨蚀作用(Pye, 1990; 奥布鲁切夫, 1958); 瑞典探险家 Hedin 从1890年开始了他的中亚探险历程, 1903年他用“雅丹”一词来描述垄脊等风蚀地形(Hedin, 1993; 斯文赫定, 1997), Free 在1911年研究了风使土壤移动的问题, 他用“跃移”与“悬移”两词来表征土壤颗粒的移动特征(Free, 1911)。20世纪初期, 美国西部的土壤风蚀问题引起了科学界的极大关注。当时的土壤保护学家已经开始认识到通过增加土壤凝聚力, 增加土壤湿度、有机质或改良土壤结构, 保护地表, 增加作物残留物、防风带等可降低土壤风蚀。

20世纪30至40年代, 美国大平原地区遭遇了灾害性的“黑风暴”的袭击, 这使土壤风蚀的研究得到了空前的重视, 系统的土壤风蚀的研究应运而生。Bagnold 开辟了风沙研究的新纪元, 他创造性地应用和发展了冯·卡门(Von Karman)、普朗特(Prantl)及谢尔德(Shield)的现代流体力学理论, 建立了“风沙物理学”理论体系, 从而使得风蚀研究进入动力学研究的新领域(Bagnold, 1938, 1941)。Bagnold 的代表著作《风沙和荒漠沙丘物理学》总结了他多年的工作成果, 详细的论述了土壤风蚀的物理机制, 成为影响半个世纪以来风沙有关领域的理论基础, 标志着土壤风蚀科学研究的开始。Chepil 及其合作者在 Bagnold 工作的基础上, 对农田耕地的土壤风蚀问题进行了长达25年的系统的研究, 他们通过风洞和田间实验, 确立了关于风蚀的基本原理(Chepil et al, 1939)。

Chepil 还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”, 而随着风力的增加, 越来越大的颗粒被吹动, 直到风速大到所有的颗粒都被吹动, 这时的风速称为“最大气体起动风速”(Chepil, 1945)。Chepil 在 1950~1951 年对影响风蚀的土壤性质进行了系列实验, 结果表明土壤可蚀性明显地受土壤中细粉粒的含量影响, 在其它因子相同时, 风蚀量随土壤中所含易蚀部分对不易蚀部分的比例而成正比例变化(Chepil, 1950)。Chepil 还研究了土壤质地对可蚀性的影响, 发现土壤质地对土壤可蚀性有很大影响, 可蚀性随土壤中直径<0.42mm 和>0.84mm 土粒的百分数而变化, 随土壤中砂粒、粘粒与粉粒的比率而变化(Chepil, 1952)。Chepil 又通过风洞实验研究了不同粒径土壤团粒与风力的关系问题, 他发现大多数侵蚀风对直径>0.84mm 的结构单位基本上难以移动, 而具有显著抗风蚀性的团聚体则是>1mm 的团聚体, 较小的团聚体则通常形成较大的可称之为“土块”的结构单位, <0.02mm 直径和>0.84mm 直径的水稳性团聚体的含量则与产生土块的量密切相关(Chepil, 1953)。Chepil 还对具有单一机械组成的土样可蚀性问题进行了研究, 发现直径在 0.005~0.01m 的粉砂土中具有最大的团聚度和抗风蚀性, 土壤中粉砂的比率越大而砂的比率越小, 则可蚀性越小(Chepil, 1955)。这一阶段风蚀研究在定性描述向定量研究转化方面有了较大发展, 是风蚀研究从感性向理性发展与转化的阶段。

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。Chepil 与 Woodruff 总结了 20 多年来在美国大平原地区的研究成果, 在此基础上 Woodruff 和 Siddoway 建立了世界上第一个通用风蚀方程(WEQ) (Woodruff, 1965)。WEQ 是第一个用于估算田间年风蚀量的模型, 该模型包含 5 组 11 个变量, 即气候因子、土壤可蚀性、土壤表面粗糙度、田块长度以及作物残留量, 其中前二者为最重要的因变量。WEQ 模型可表示为:

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

式中: E 为土壤年风蚀量[ $t/(hm^2 \cdot a)$ ], I 为土壤可蚀性( $t/hm^2$ ), C 为气候因子, K 为土壤粗糙度因子, L 为田块裸露长度(m), V 为植被因子。

WEQ 土壤风蚀方程的提出, 可以称得上是土壤风蚀研究历史上的具有里程碑意义的重要事件, 这一风蚀方程的提出是风蚀研究实现从现状研究向预测研究、从理论研究向实践应用转变的重大标志(杨秀春等, 2003)。

20 世纪 80 年代后, 随着新资料的积累与新技术手段的采用, 众多学者利用现代化

的观测仪器和实验设备,全面的检验、完善和重建各种风蚀模型,使风蚀研究具有更广泛的应用价值。WEQ 模型的建立虽然具有重要的意义,但其局限性也日渐明显,E.L. Skidmore 认为 WEQ 中的气候不能适用于高降雨量与低降雨量的地区,必须提出新的气候因子(Skidmore, 1986),由此就导致了修正风蚀方程(RWEQ)的产生 (Fryrear, 1994)。鉴于 WEQ 的局限性美国农业部组织力量着手建立了 WEPS 模型用以取代 WEQ 模型(L.J. Hagen, 1991)。除了上述模型之外,还产生了其它一些风蚀预报模型,如原苏联 A.P. Bocharov 提出的 Bocharov 模型,该模型把人类活动因素考虑在内,为风蚀预报模型的建立提供了新的思路 (Bocharov A.P., 1984)。

此外,自 1977 年以来,与风沙研究、土壤风蚀研究和沙漠化有关的国际性的学术活动明显增多,其中重要的国际会议有四次,即 1985 年丹麦 Aarhus“风沙物理学会议”,1990 年丹麦 Sandbjerg“纪念 Bagnold 和 Owen 国际会议——风蚀机制与侵蚀环境”,1994 年美国加利福尼亚“风沙过程对全球变化的响应”国际会议,1998 年英国牛津“第四届国际风沙研究会议”。四次国际会议集中讨论的是沙漠化、沙粒运动、土壤风蚀、风沙沉积物、风蚀防治、风沙过程与全球变化及新技术应用等课题,反映了土壤风蚀研究的最新动态和发展趋势 (严平, 1999)。

从国外土壤风蚀的研究现状可以看出,土壤风蚀的研究经历由最初的感性认识到理性认识,再由现状研究到预报研究的主线。概括而言,土壤风蚀科学研究的体系已经形成,研究内容也更加丰富,包括土壤风蚀动力学、土壤风蚀因子、土壤风蚀模型、土壤风蚀防治原理、土壤风蚀环境效应、土壤风蚀评价及研究方法论等。20 世纪 90 年代以来,由于新理论、新技术的出现,土壤风蚀研究获得了巨大的推动力,从而使得土壤风蚀研究出现了新局面。

### 1.1.3 国内土壤风蚀研究进展

我国学者对于风蚀现象的关注大致距今已经有了 2000 多年的历史,公元前 1150 年在历史文献中就出现了“雨土”、“黄砂”等风沙灾害现象的文字记载 (张德二, 1984)。我国东汉时期的著名史学家班固在其所著的《后汉书·西域志》中就用“白龙堆”一词描述了罗布泊一带的雅丹地形;我国北魏地理学家郦道元最早用“浚其崖岸,馀留风吹”解释了罗布泊一带雅丹地形的形成原因 (夏训诚, 1987)。到了清代,一些地方官员开始采用风蚀防止措施来保护耕地和灌溉设施 (Dong, 2000)。在 20 世纪 50 年代以前,中国关于土壤风蚀的认识还非常少,还处于非常感性的时期。

到了 20 世纪 50 年代,在中华人民共和国成立后,我国学者开始对风蚀、风沙活动的自然条件、风蚀地形发育以及风沙运动规律开展了系统的研究(朱震达,1979)。我国在一片空白的沙漠科学领域里开始了努力,出于生产实践的需要,进行了固沙造林、沙地改良等研究,在 1959 年成立了中国科学院治沙队,从而掀开了中国有史以来对沙漠进行系统研究的新篇章。通过此阶段的努力,中国科学院治沙队对我国各大沙漠不仅进行了综合考察,建立了数个治沙实验站和中心站,而且基本上查清了中国十大沙漠、沙地的自然条件和主要特征(朱震达等,1978)。但此时期仍以宏观调查和定性分析为主,研究手段上已开始应用航片分析、定位观测、风洞实验等比较先进的方法,从而获得了较以前系统的科学资料,研究内容和涉及的空间也都大大地扩展了。通过研究,从宏观上基本搞清了我国风蚀沙害的空间分布、危害方式及其区域差异,对引起土壤风蚀的自然与人为因素方面的认识也较以前深刻(黄秉维,1953)。

1977 年联合国内罗毕沙漠化会议之后,土壤风蚀作为沙漠化的首要环节而得到前所未有的重视,我国学者广泛地应用遥感手段、实地调查、定位观测、室内实验模拟等现代技术方法,开展了大量的试验研究工作,从而使我国的风蚀研究逐渐开始了由定性研究向半定量、定量的风洞实验研究的转变。朱震达等认为土壤性质的差异会影响土壤风蚀的强度,而风蚀作用的结果也会改变土壤粒度的组成(朱震达等,1981)。贺大良等通过风洞实验,探讨了土地翻耕、牲畜践踏等因素对土壤风蚀的影响(贺大良等,1986)。吴正通过野外观测与风洞实验,发现了输沙量随高度的指数递减规律(吴正,1987)。马世威研究认为风速、下垫面与输沙率是影响风沙流结构的三个主要因素(马世威,1988)。

90 年代以来,土壤风蚀研究在定量分析的基础上开始采用多元统计数学模型与动态仿真模型模拟土壤风蚀过程,并在此基础上提出区域治理的途径与措施、区域土地资源开发利用的方向(夏训诚等,1991)。陈广庭通过研究发现土里起动风速的大小与土壤团聚体平均直径之间存在着重要的关系(陈广庭,1991)。刘玉璋、董光荣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试验,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,试验表明,由人为因素与自然因素引起的风蚀量分别占总风蚀量的 78.6%和 21.4%(刘玉璋等,1992)。刘贤万不仅发现在沙粒发生跃移前还存在着振动、滚动和滑动这三种运动形式,而且建立了不同运动方式的沙粒在不同运动阶段的力学模型(刘贤万,1995)。董治宝、陈渭南等通

过风洞试验研究了植被对土壤风蚀的影响作用,证明了植被对土壤风蚀的影响作用与效果取决于各植物特征,增加植物密度对有效防治风蚀作用尤为重要,而在于旱、半干旱地区保持一定临界指标的植被盖度对于控制土壤风蚀地发生与发展具有重要的意义(董治宝,1996)。哈斯在对河北坝上地区风蚀耕地近地面风蚀物及相应土壤表层样品的野外采集与室内分析结果表明:风蚀物含量随高度呈指数函数规律减少,随着输沙率增加,风蚀物中粗颗粒(沙粒)含量增加,而细颗粒(粉砂和粘土)含量减少,随之有机质及养分含量也减少(哈斯,1997)。董治宝、李振山利用风洞模拟实验发现,风成沙的风蚀可蚀性随粒度的变化服从分段函数,0.09mm 粒径者最被风蚀,风成沙颗粒按可蚀性可以分为3种类型,>9.7mm 和<0.05mm 为难蚀颗粒,0.7~0.4mm,0.075~0.05mm 为较难蚀颗粒,0.4~0.075mm 为易蚀颗粒(董治宝等,1998)。张胜邦等的风洞模拟实验结果表明:地表类型不同风蚀强度变化很大,流动沙地是耕地的数百倍,翻耕地与未翻耕地风蚀变化悬殊,翻耕地风蚀量是未翻耕地的10倍以上,自然植被和人为留茬均有抑制风蚀的作用(张胜邦等,1999)。黄富祥、牛海山等通过野外实地观测,建立了毛乌素沙地植被覆盖与风蚀输沙率之间的定量模型,并确定了不同风速条件下的有效植被盖度(黄福祥,2001)。

总的来说,我国的土壤风蚀研究起步较晚,中国现代科学意义上的土壤风蚀研究在时间上比国外大致晚了三、四十年的时间,由此也造成了中国的土壤风蚀研究与国外相比有较大的差距,这与我国土壤风蚀问题广泛存在是不相适应的。虽然国内目前已经在风沙地貌与沙漠化、风蚀动力学、风蚀影响因子、风蚀测定与评估模型、土壤风蚀强度分级以及风蚀防治技术等多个角度进行了一定的研究工作(史培军等,2002),但是国内在土壤风蚀研究方面的研究还基本上局限在对于流沙和固定风沙土、灰钙土、栗钙土等少数土类的少数风蚀影响因素的研究(李小雁,1998)。同时我国在治理的思路和手段上还不够全面,最重要的一点是人们没有认识到沙尘暴的尘源大部分来自农田,因而忽略了对农田的保护,缺乏对农田土壤风蚀方面的研究。遏止沙尘暴,必须寻根追源,对症下药。旱作农业区,由于生态环境脆弱,耕作技术简单粗放,尤其是在冬春季节,农田无植被覆盖、地表裸露、土壤干燥,再加之不合时宜的传统翻耕,造成了严重的农田土壤风蚀。而保护性耕作是以保土、保水与保肥为目标,以减少传统翻耕和作物残茬、秸秆覆盖为主要手段的新型农业作业体系,所以,将土壤风蚀研究与保护性耕作技术的研究结合起来无疑是土壤风蚀研究的一个重要发展方向。因此,大力推动农田土壤风蚀

防治技术的研究具有重要的理论与实践意义。

## 1.2 研究目的及意义

本研究以地处中国科尔沁沙地南缘农牧交错带的土壤风蚀比较严重、沙尘暴多发的彰武地区为研究对象，利用自制 BSNE 沙尘采集器，直接进行野外观测，对不同土壤耕作方式、茬口的农田土壤风蚀物进行收集。通过对不同耕作方式、茬口的农田土壤输沙率等的比较研究，以及对风蚀物的粒度组成的分析，给出定性与定量的分析结果，为防治农田土壤风蚀的提供科学的依据。为在干旱半干旱及部分半湿润地区，加快农业耕作制度的改革，减少农田土壤风蚀，保护农田土壤水分和肥力，提高土地生产力，促进农业可持续发展；同时减少土壤风蚀的发生发展，提高空气质量，减少由于土壤风蚀给人类带来的损失和危害，为发展生态农业治理沙漠化土地提供理论依据。

## 第二章 研究区概况与试验设计

### 2.1 研究区概况

彰武县位于辽宁西北部，地理坐标位置在北纬 42°07'至 42°51'分，东经 121°53'至 122°58'之间，属于我国沙漠化土地集中连片的北方半干旱农牧交错带的旱农耕作区。彰武县原为三陵（永陵、福陵、昭陵）的放牧地，开发历史较短，建县于清代 1908 年。因与新民县的彰武台门以北划县界故名为彰武县。全县现有 8 个镇、16 个乡，16 个居民社区，246 个村，1547 个村民小组、户，414818 口人，人口密度每平方公里 113.9 人。到 2002 年末实有耕地 122917 公顷，按 321921 农业人口计算，人均占有耕地 5.73 亩。

彰武处于辽西丘陵与辽河过渡地带。北部为科尔沁沙地的延伸地，南部为松辽平原的坡水地。东部与西部为丘陵地，北部为沙漠地，中部、南部为平洼地区，全县呈簸箕形。大体是：三丘、三沙、四平洼，地势为北高南低，海拔最高（西北部）为 313.1 米，最低（南部）为 57.6 米。

彰武气候属于温和半湿润季风大陆性气候。据彰武气象站多年资料记载，年平均气温为 7.2℃，极端最高气温 37.4℃，最低气温零下 30.4℃。无霜期 152 天，冻土平均深度为 1.12 米， $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温 3299.5℃，4~9 月有效活动积温 1644.8℃，全年平均降水量 510.3mm，最多年 744.1mm，最少年 309.0mm，降水多集中在 7、8、9 三个月，平均占 66.5%。年均日照时数为 2822.8 小时，太阳总辐射量为 133.6 千卡 / 平方厘米，生理辐射为 66.8 千卡 / 平方厘米。据彰武气象站 1959~1978 年资料记载，年均 6 级以上大风日为 69.3 天，1972 年最多，为 124 次，1962 年最少，为 23 次。年均 8 级以上大风日为 32 天，1965 年最多，为 70 次，1964 年最少，为 12 次。其特点春季多偏南大风，秋季多偏北大风，夏季则多雷雨大风。

辽宁省第二次土壤普查资料表明，彰武土壤多为风沙土，是风力搬运堆积物上形成的幼年土壤。建国以来，通过培植樟子松、黑松、杨树以及果树等，总面积达 21000 公顷，固沙造林取得一定成果，但是“局部治理、整体恶化”和贫穷的被动局面仍然存在。由于农牧业生产过程中掠夺式的生产方式，农村能源不足，农牧民为了生存，烧秸秆、铲草皮、挖中草药等原因，破坏了农田及草原表层，土地沙漠化现象十分严重，近年来，沙漠化土地速度有逐年加快的趋势，一遇大风就形成扬沙和沙尘暴天气。

## 2.2 试验设计

### 2.2.1 典型天气的选择

试验观测时间为2004年4月10日至5月1日,在观测期间共发生了3次比较有代表性的农田土壤风蚀,这3次农田土壤风蚀过程风况见表1。

表1 3次农田土壤风蚀过程的风况  
Table1 Wind conditions of three times farmland soil wind erosion

日期 Date(m-d)	风向 Wind direction	风力 Wind power	平均风速 Average wind velocity(m/s)	最大风速 Maximal wind velocity(m/s)
4-15	西北西	六级	11	20
4-22	北北西	六级	18	19
4-28	南南西	八级	19	28

注:以上资料来源于彰武县气象局

### 2.2.2 地表沙尘采集量试验设计

通过深入的调查,选择彰武县中部和北部土壤沙漠化程度不同的5个乡镇作为试验测定基点,测试基点涵盖了彰武县目前的不同作物前茬包括玉米、花生,5种不同土壤耕作方式。为保证测试数据的代表性,试验面积从1hm<sup>2</sup>至30hm<sup>2</sup>不等,近乎长方形,各项观测内容都设在试验地中部。试验包括不同耕作方式土壤输沙率的比较试验和不同茬口土壤输沙率的比较试验两部分。

#### 2.2.2.1 不同耕作方式的地表沙尘采集量试验设计

不同耕作方式的地表沙尘采集量比较试验共设4个处理,分别为:秋翻地(秋季收获后用铧式犁进行翻耕20cm左右,简称GAP)、保护性耕作(秋季玉米机械收获,整秆粉碎还田,用灭茬机浅旋处理残茬,简称CT)、秋浅旋灭茬(秋季收获后,把秸秆移走,然后用旋耕机进行浅旋灭茬,简称ATS)、春浅旋灭茬(秋季收获后,把秸秆移走,保留残茬,第二年春天再把残茬进行浅旋灭茬,简称STS)。

#### 2.2.2.2 不同茬口的地表沙尘采集量试验设计

不同茬口的土壤输沙率的比较试验共设2个处理,分别为花生茬(简称PS)和玉米茬(简称MS),其耕作方式为传统耕作方式。

### 2.2.3 土壤粒度组成试验设计

对四种耕作方式及两种茬口0~5cm表层土壤及土壤风蚀过程中各高度层所收集到的风蚀物进行粒度组成分析。

## 2.3 试验仪器

本研究采用仪器实地观测土壤风蚀的发生过程，所使用的仪器是由沈阳农业大学自制的 BSNE 沙尘采集器。该沙尘采集器主要由采沙器、支撑架、尾翼板、支撑杆和固定栓组成，沙尘采集器的结构如图 1。其中采沙器是沙尘采集仪的主要部件，尾翼(导风板)主要用于自动调整进沙口的指向，使进沙口能够时时正对风向，其面积为  $210\text{mm}\times 190\text{mm}$ 。支撑架和固定栓两部件主要用于将采集器固定在不同的的高度处。

采沙器主要由采沙盒、集沙盒、18 目筛网、60 目筛网和密封圈组成。其一端封口，另一端不封口，作为进沙口，其结构示意图见图 2。进沙口面积高  $5\text{cm}\times 2\text{cm}$ ， $285\text{mm}$  长的通道壁以  $11^\circ$  的角度渐渐向外扩展，形成一个扩散，这样可以减慢进入采沙盒内的空气的运动，从而使得充满沙尘的空气中的速度马上降下来，然后靠重力作用沉积在集沙盒里。采沙器上部是 60 目的筛网形成的一个通风屏，用于进行空气交换。18 目筛网主要用于降低沉积下来的土壤颗粒的运动，同时也可以减少杂质（如秸秆、草叶等）进入集沙盒内。为了减小采沙盒与集沙盒组装后出现的缝隙对采沙器采集率造成的影响，采用橡胶密封圈密封连接处。

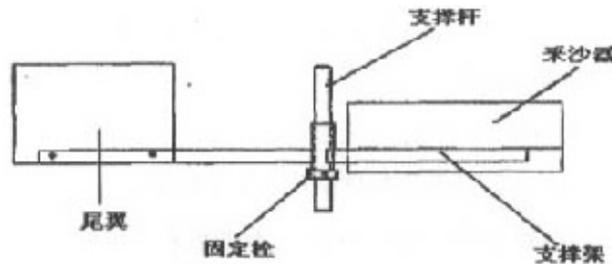


图 1 沙尘采集器结构与安装示意图

Fig.1 Structure and installment schematics of dust sampler

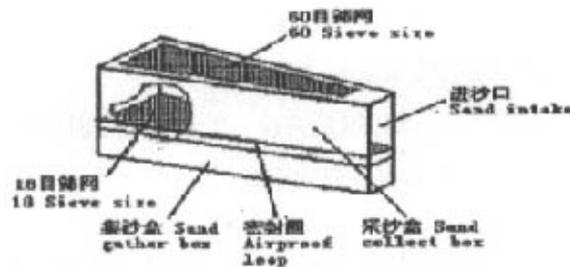


图 2 采沙器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampler

该仪器特点是结构简单，操作方便，价格便宜；进沙口能够时时指向侵蚀风向；能

够在同一位置点采集不同高度的沙样；不需工作人员时刻照看以及频繁的维修，可以在田间进行长期的观测。并且研究证明，沙尘采集器满足等动力特性要求，采集率为 85.6%，采集到的土样中 0.09-0.5mm 之间的颗粒趋于富集，平均富集率为 116.0%，适用于采集以跃移形式运动的土壤颗粒（臧英，2003）。

## 2.4 研究内容与方法

### 2.4.1 输沙率的测定

气流在单位时间内通过单位面积（单位宽度）所搬运的沙量叫输沙率。输沙率是衡量风蚀危害程度的主要指标之一，也是防风治沙工程设计的主要依据（朱朝云，1992）。因此，只有准确地确定输沙率，才能有效地控制风蚀危害。本文主要以输沙率作为比较农田土壤风蚀的指标。

风蚀过程中采用沈阳农业大学自制的 BSNE 沙尘采集器对风蚀物进行收集。每一采集器上，按入风口距地表 10cm、25cm、60cm、100cm、150cm 高度分别安装 5 个采集盒，即一套沙尘采集器。在统一的测定时间内，将采集器中的沙样清空倒入塑料袋内，带回室内于 55℃ 烘干后称重。

研究表明：风沙采集的临界地长应达到风力最大搬运能力的 63.2% 地长。通常设备安装于田间的位置至少要满足沿主风向的地长达到临界地长，一般取 150m 左右即可（John E. Stout, 1996; D.W.Fryear, 1996）。因此试验于每一试区选定垂直主风向，距上风口长度为 160m（实际距离）的 3 个观测点，使各采样器在采集过程中互不干扰，并按照主风向的不同进行调整。仪器在各测试基点布置如表 2。

表 2 彰武县测试基点的基本情况  
Table 2 Basic circumstance of experiment spots in Zhangwu County

测试基点 Spot	试验地前茬 Stubble	耕作方式 Tillage pattern	测定次数 Times	沙尘采集器（套） Dust sample
哈尔套平安村	玉米	STS	3	3
兴隆山乡示范场	玉米	CT	3	2
福兴地镇试验田	玉米	CT	3	3
福兴地镇试验田	玉米	GAP	3	3
兴隆堡镇双庙村	玉米	ATS	3	2
兴隆堡镇双庙村	玉米	MS	3	3
章古台红峰村	花生	PS	3	3

### 2.4.2 地表粗糙度的测定

地表粗糙度是指影响地表风速及土壤风蚀强度的植被、地表形态诸要素的总和，可

以反映地表对风速的减弱作用以及对风沙流的影响(姚文艺, 1994)。在农田系统中, 主要包括地表自然植被、农作物残余物(残茬)、农田防护林、土垄、土块和难蚀性碎片等。增加地表粗糙度, 在一定程度上可以控制土壤风蚀, 改善农业生态环境。地表粗糙度是衡量治沙防护效益最重要的指标之一, 归根到底人们采取的各种治沙防沙技术措施都是为了改造下垫面, 控制风沙流, 改变粗糙度, 从而使其向着有利于减轻风蚀的方向发展。不同地表的粗糙度可以利用两点高度的风速测定值计算得出。

本试验利用 DEM6 型轻便三杯风向风速表 2 只, 在 50cm 和 200cm 两观测高度, 同时观测各处理两高度的 1 分钟的平均风速值, 每种处理试区分别测量 8 组风速值, 再将每次测量结果按计算公式推算出地表粗糙度值。计算公式为:

$$\lg Z_0 = (u_1 \lg Z_2 - u_2 \lg Z_1) / (u_1 - u_2) \quad (2-1)$$

式中:  $Z_0$  为地表粗糙度;  $u_1$ 、 $u_2$  分别为  $Z_1$ 、 $Z_2$  高度上的水平风速(陈广庭, 2004)。

#### 2.4.3 土壤粒度组成的测定

本试验采用干筛法按照离散的粒径范围, 筛分每一高度层所收集到的土壤风蚀物, 确定出每个粒径级占总的风蚀物的百分比, 进而分析风蚀物粒度的分布随高度的变化情况。所用分级筛的规格(目/寸)分别为: 400、200、150、80、40, 对应筛子孔径(mm)分别是 0.0385、0.07、0.1、0.2、0.5。

### 第三章 地表沙尘采集量的结果与分析

野外观测试验从2004年4月10日开始,至5月1日结束。整个野外观测试验期间,采集有效土壤风蚀物3次,不同耕作方式和不同茬口的农田土壤风蚀物观测试验数据统计结果如表3和表4。

表3 不同耕作方式各高度层的输沙率

Table 3. Sand transport rate of different tillage patterns ( $g/cm^2$ )

采样时间 Date	高度 (cm) Height	耕作方式 Tillage patterns			
		CT	GAP	ATS	STS
2004.4.15	10	0.025	0.031	0.051	0.062
	25	0.019	0.023	0.039	0.044
	60	0.013	0.016	0.017	0.021
	100	0.009	0.011	0.007	0.012
	150	0.005	0.006	0.006	0.005
2004.4.22	10	0.041	0.07	0.084	0.105
	25	0.033	0.042	0.049	0.069
	60	0.021	0.029	0.036	0.044
	100	0.014	0.025	0.028	0.033
	150	0.009	0.013	0.015	0.016
2004.4.28	10	0.155	0.409	0.901	0.976
	25	0.045	0.362	0.478	0.49
	60	0.037	0.136	0.195	0.132
	100	0.028	0.025	0.074	0.116
	150	0.025	0.04	0.065	0.093

表4 不同茬口各高度层输沙率

Table 4 Sand transport rate of different stubbles ( $g/cm^2$ )

茬口 Stubble	采样时间 Date	高度 Height				
		10	25	60	100	150
PS	2004-4-15	0.720	0.345	0.124	0.084	0.056
	2004-4-22	4.558	0.834	0.243	0.197	0.173
	2004-4-28	6.971	1.712	0.434	0.211	0.162
MS	2004-4-15	0.031	0.023	0.016	0.011	0.006
	2004-4-22	0.07	0.042	0.029	0.025	0.013
	2004-4-28	0.409	0.362	0.136	0.025	0.04

#### 3.1 输沙率随高度的分布规律

在大风袭击下,土壤颗粒在气流中的运动存在三种方式,即:滚动、跃移和悬移(路明,2002)。由于土壤颗粒的运动方式和粒径大小不同,输沙率随高度发生变化。本研究利用沙尘采集器对10cm、25cm、60cm、100cm、150cm五个高度的农田土壤风蚀物

进行收集，以确定输沙率与高度变化的相关关系。通过对输沙率与高度进行对数、幂函数、线性函数以及指数函数的相关分析结果表明，在 0~150cm 高度范围内所测得的土壤风蚀物含量随高度的变化可近似用幂函数曲线描绘，如图 3 和图 4 所示，其关系模式如下：

$$q=az^b$$

式中：q—各高度层输沙率 (g/cm<sup>2</sup>)，z—采沙器进沙口距地表高度 (cm)，a、b 回归系数。

该方程是通过通过对不同耕作方式以及不同时期采集的样品进行分析的结果。由于不同耕作方式、不同茬口、各样地的差异性以及不同采样时期气象条件的不同，各试区之间以及不同采样时期的风蚀强度均有差异，因而输沙率随高度变化的回归模式之参数也不相同 (表 5、表 6)。

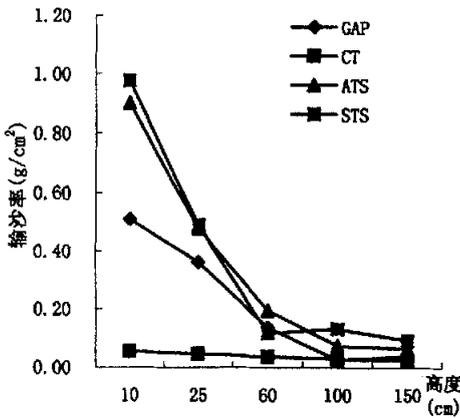


图 3 不同耕作方式输沙率与高度的关系  
Fig.3 Relationship of sand transport rate to height of different tillage patterns

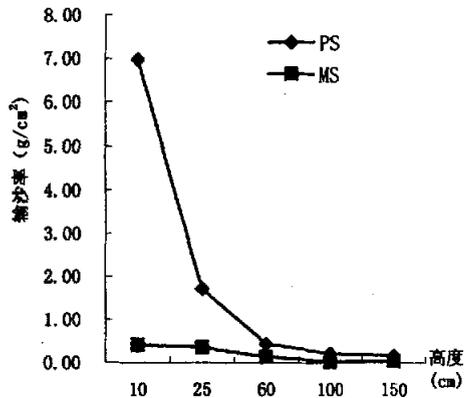


图 4 不同茬口输沙率与高度的关系  
Fig.4 Relationship of sand transport rate to height of different stubbles

由表 5 和表 6 可知，输沙率与高度的幂函数关系的相关系数在 0.01 显著性检验水平上达到 0.90 以上，说明这一关系式基本能反映在 0~150cm 高度范围内输沙率垂直分布的实际。其中系数 b 值与风速、输沙率和地表状况具有一定的关系，当风速与输沙率增加时，b 绝对值变大，风蚀土壤含量随高度的递减程度增加，反之，递减程度减小。从统计参数 b 值可以看出，四种耕作方式风蚀物含量随高度的递减程度保护性耕作<秋翻地<秋浅旋灭茬<春浅旋灭茬，说明保护性耕作这种耕作方式减少近地表风蚀土壤含量较大，能够减少土壤颗粒的近地表运动；两种茬口风蚀物含量随高度的递减程度玉米茬<

花生茬,说明玉米茬对减少近地表土壤风蚀具有一定的作用。

表 5 不同耕作方式输沙率与高度函数关系式  $q=az^b$  统计参数

Table5 Parameters of regressions of the formula ( $q=az^b$ ) relating transport rate to height of different tillage patterns

测定时间 Date	处理方式 Treatment	统计参数 Parameters		
		a	b	R
2004-4-15	CT	0.103046	-0.55331	0.911
	GAP	0.12947	-0.56083	0.909
	ATS	0.46488	-0.96018	0.937
	STS	0.61512	-0.88702	0.919
2004-4-22	CT	0.16790	-0.54733	0.933
	GAP	0.25877	-0.55339	0.936
	ATS	0.32239	-0.56847	0.938
	STS	0.50496	-0.63339	0.927
2004-4-28	CT	0.72342	-0.69661	0.984
	GAP	6.61179	-1.05333	0.910
	ATS	11.25108	-1.03561	0.971
	STS	8.19599	-0.92609	0.961

表 6 不同茬口输沙率与高度函数关系式  $q=az^b$  统计参数

Table6 Parameters of regressions of the formula ( $q=az^b$ ) relating sand transport rate to height of different stubbles

测定时间 Date	处理方式 Treatment	统计参数 Parameters		
		a	b	R
2004-4-15	PS	6.84945	-0.95989	0.996
	MS	0.12948	-0.56083	0.909
2004-4-22	PS	56.2095	-1.22734	0.938
	MS	0.25878	-0.55339	0.936
2004-4-28	PS	176.0815	-1.43441	0.992
	MS	6.61179	-1.05333	0.910

在 0~150cm 高度范围内,输沙率随高度的变化(表 3)为:输沙率随高度的增加而减少程度比较明显。不同耕作方式 0~10cm 内的土壤风蚀物含量达到总的土壤风蚀物含量的 48.66%,而 0~60cm 内的土壤风蚀物含量达到总的土壤风蚀物含量的 88.18%,这说明了在试验区的土壤风蚀更多的是近地表的风沙活动。随着风速与输沙率的增加,大约以 25cm 为界,下层风蚀物重量与百分含量均有增加;上层土壤风蚀物的重量也有所增加,但占整个风蚀物的百分含量却在减小。在 60~150cm 高度范围内,土壤风蚀物含量随高度增加而递减程度缓慢(哈斯,1994)。这说明了风沙流中悬移质和跃移质上限高度随风速及输沙率的增加而增高。进一步分析土壤风蚀物颗粒的垂直分布,0~60cm 高度范围内土壤风蚀物以跃移质为主,其含量随高度的增加而显著减少,实际上反映的是跃移质风沙流状况;而 60~150cm 高度范围以及 150cm 高度层的土壤风蚀物以悬移

质为主，风蚀物含量随高度的增加而缓慢减少，反映的是以悬移质为主的风沙流结构。因此，土壤风蚀过程中，随气流搬运或飘移的土壤风蚀物的含量并非上下均匀分布的，而是随高度递减的，即土壤风蚀物主要集中在贴近地表的气流中。

### 3.2 不同耕作方式、茬口对各高度层土壤输沙率的影响

#### 3.2.1 不同耕作方式对各高度层土壤输沙率的影响

对不同耕作方式的 10cm、25cm、60cm、100cm、150cm 高度的输沙率进行方差分析。

10 cm 高层的方差分析结果表明，在水平 0.05 下，不同耕作方式对 10cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 7）。多重比较表明春浅旋灭茬与保护性耕作在 0.01 水平上均具有极显著性差异，与秋翻地在 0.05 水平上具有显著性差异；保护性耕作与秋翻地、秋浅旋灭茬两两之间无显著性差异，春浅旋灭茬与秋浅旋灭茬无显著性差异。

25cm 高层的方差分析结果表明：在水平 0.05 下，不同耕作方式对 25cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 8）。多重比较表明春浅旋灭茬与保护性耕作在 0.01 水平上均具有极显著性差异，与秋翻地在 0.05 水平上具有显著性差异；保护性耕作与秋翻地、秋浅旋灭茬两两之间无显著性差异，春浅旋灭茬与秋浅旋灭茬无显著性差异。

60cm 高层的方差分析结果表明：在水平 0.05 下，不同耕作方式对 60cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 9）。多重比较表明春浅旋灭茬与保护性耕作在 0.01 水平上均具有极显著性差异，与秋翻地在 0.05 水平上具有显著性差异；保护性耕作与秋翻地、秋浅旋灭茬两两之间无显著性差异，春浅旋灭茬与秋浅旋灭茬无显著性差异。

表 7 不同耕作方式 10cm 高度土壤输沙率及方差分析

采样时间 Date	耕作方式 Tillage patterns					
	CT	GAP	ATS	STS		
2004-4-15	2.15	2.93	4.24	7.53		
2004-4-22	2.86	3.56	7.65	10.24		
2004-4-28	3.78	5.59	10.66	13.85		
Σ	8.79	12.08	22.55	31.62		
均值	2.93	4.03	7.52	10.54		
方差	0.6679	1.93223	10.31743	10.0531		
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	107.9223	3	35.97411	6.264356	0.017056	4.06618
组内	45.94133	8	5.742667			
总计	153.8637	11				

100cm 高层的方差分析结果表明：在水平 0.05 下，不同耕作方式对 100cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 10）。多重比较表明春浅旋灭茬与保护性耕作、秋翻地在 0.05 水平上具有显著性差异；保护性耕作、秋翻地、秋浅旋灭茬两两之间无显著性差异；秋浅旋灭茬与春浅旋灭茬无显著性差异。

150cm 高层的方差分析结果表明：在水平 0.05 下，不同耕作方式对 150cm 高层输沙率的影响无显著性差异（见表 11）。

表 8 不同耕作方式 25cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table8 Analysis of variance on sand transport rate of different tillage patterns at 25cm

采样时间 Date	耕作方式 Tillage pattern			
	CT	GAP	ATS	STS
2004-4-15	1.76	2.01	3.15	5.85
2004-4-22	2.11	2.69	4.94	8.34
2004-4-28	2.96	4.77	7.85	10.84
Σ	6.83	9.47	15.94	25.03
均值	2.28	3.16	5.31	8.34
方差	0.38083	2.0677	5.62703	6.22503

方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	65.65036	3	21.88345	6.120974	0.01815	4.06618
组内	28.60127	8	3.575158			
总计	94.25163	11				

表 9 不同耕作方式 60cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table9 Analysis of variance on sand transport rate of different tillage patterns at 60cm

采样时间 Date	耕作方式 Tillage pattern			
	CT	GAP	ATS	STS
2004-4-15	0.89	1.14	1.65	3.82
2004-4-22	1.05	1.43	3.56	4.76
2004-4-28	2.07	2.98	4.61	6.45
Σ	4.01	5.55	9.82	15.03
均值	1.34	1.85	3.27	5.01
方差	0.409733	0.9787	2.252033	1.7761

方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	24.40129	3	8.133764	6.006583	0.019086	4.06618
组内	10.83313	8	1.354142			
总计	35.23443	11				

上述分析表明，保护性耕作、秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬四种耕作方式，保护性耕作减少近地表土壤颗粒运动的数量较多，其次是秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬；但随着高度的增加，减少农田土壤颗粒运动的数量，四种耕作方式之间的差异逐渐

不明显。

表 10 不同耕作方式 100cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table 10 Analysis of variance on sand transport rate of different tillage patterns at 100cm

采样时间 Date	耕作方式 Tillage pattern			
	CT	GAP	ATS	STS
2004-4-15	0.44	0.84	1.02	2.15
2004-4-22	0.82	1.11	2.24	2.96
2004-4-28	1.03	1.42	3.07	4.85
Σ	2.29	3.37	6.33	9.96
均值	0.76	1.12	2.11	3.32
方差	0.089433	0.084233	1.0633	1.9197

方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	11.80696	3	3.935653	4.9871	0.030775	4.06618
组内	6.313333	8	0.789167			
总计	18.12029	11				

表 11 不同耕作方式 150cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table 11 Analysis of variance on sand transport rate of different tillage patterns at 150cm

采样时间 Date	耕作方式 Tillage pattern			
	CT	GAP	ATS	STS
2004-4-15	0.36	0.67	0.97	1.12
2004-4-22	0.61	0.92	1.21	1.37
2004-4-28	0.83	1.11	1.72	2.13
Σ	1.8	2.7	3.9	4.62
均值	0.60	0.90	1.30	1.54
方差	0.0553	0.0487	0.1467	0.2767

方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	1.5681	3	0.5227	3.964353	0.052951	4.06618
组内	1.0548	8	0.13185			
总计	2.6229	11				

### 3.2.2 不同茬口对各高度层土壤输沙率的影响

对不同茬口的 10cm、25cm、60cm、100cm、150cm 高度的输沙率进行方差分析。

10 cm 高层的方差分析结果表明，在水平 0.05 下，不同茬口对 10cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 12）。

25 cm 高层的方差分析结果表明，在水平 0.05 下，不同茬口对 25cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 13）。

60 cm 高层的方差分析结果表明，在水平 0.05 下，不同茬口对 60cm 高层输沙率的影响具有显著性差异（见表 14）。

表 12 不同茬口 10cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table12 Analysis of variance on sand transport rate of different stubbles at 10cm

茬口 Stubble	采样时间 Date			$\Sigma$	均值	方差
	2004-4-15	2004-4-22	2004-4-28			
MS	2.93	3.56	5.59	12.08	4.03	1.93223
PS	9.65	16.46	25.27	51.38	17.13	61.3294
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	257.415	1	257.415	8.138104	0.046268	7.70865
组内	126.5233	4	31.63083			
总计	383.9383	5				

表 13 不同茬口 25cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table13 Analysis of variance on sand transport rate of different stubbles at 25cm

茬口 Stubble	采样时间 Date			$\Sigma$	均值	方差
	2004-4-15	2004-4-22	2004-4-28			
MS	2.01	2.69	4.77	9.47	3.16	2.06773
PS	7.81	10.84	18.45	37.1	12.37	30.0504
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	127.2362	1	127.2362	7.923002	0.048082	7.70865
组内	64.23633	4	16.05908			
总计	191.4725	5				

表 14 不同茬口 80cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table14 Analysis of variance on sand transport rate of different stubbles at 60cm

茬口 Stubble	采样时间 Date			$\Sigma$	均值	方差
	2004-4-15	2004-4-22	2004-4-28			
MS	1.14	1.43	2.98	5.55	1.85	0.9787
PS	4.34	8.43	11.92	24.69	8.23	14.3941
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	61.0566	1	61.0566	7.943459	0.047905	7.70865
组内	30.7456	4	7.6864			
总计	91.8022	5				

100 cm 高层的方差分析结果表明, 在水平 0.05 下, 不同茬口对 100cm 高层输沙率的影响具有显著性差异 (见表 16)。

150 cm 高层的方差分析结果表明, 在水平 0.05 下, 不同茬口对 150cm 高层输沙率的影响无显著性差异 (见表 17)。

上述分析表明, 与花生茬相比, 由于玉米根茬对地表风速的阻挡作用, 可明显降低风能, 减少近地表土壤颗粒运动的数量, 因此在近地表差异显著, 但随着高度的增加, 两种茬口减少农田土壤颗粒运动数量的差异逐渐不明显。

### 第三章 地表沙尘采集量的结果与分析

表 15 不同茬口 100cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table15 Analysis of variance on sand transport rate of different stubbles at 100cm

茬口 Stubble	采样时间 Date			Σ	均值	方差
	2004-4-15	2004-4-22	2004-4-28			
MS	0.84	1.11	1.42	3.37	1.12	0.08423
PS	2.58	5.94	7.76	16.28	5.43	6.90573
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	27.77802	1	27.77802	7.947968	0.047866	7.70865
组内	13.97993	4	3.494983			
总计	41.75795	5				

表 16 不同茬口 150cm 高度土壤输沙率及方差分析

Table16 Analysis of variance on sand transport rate of different stubbles at 150cm

茬口 Stubble	采样时间 Date			Σ	均值	方差
	2004-4-15	2004-4-22	2004-4-28			
MS	0.67	0.92	1.11	2.70	0.90	1.1487
PS	1.32	2.48	4.33	8.13	2.71	2.3047
方差分析						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	4.91415	1	4.91415	4.176213	0.110493	7.70865
组内	4.7068	4	1.1767			
总计	9.62095	5				

### 3.3 不同耕作方式、茬口土壤输沙率差异的影响因素分析

#### 3.3.1 不同耕作方式土壤输沙率的影响因素分析

田间扬沙量的多少是评价土壤抗风蚀程度的重要指标之一，所以利用沙尘采集器对田间不同高度上的沙尘量进行收集比较，可以反映不同耕作方式对土壤抗风蚀能力的影响 (K. Saxton, 2000)。表 17 和图 5 是不同耕作方式地表各高度层在整个观测期间，同一耕作方式三次风蚀过程总的输沙率的统计结果。从表 17 可以看出，土壤风蚀物含量主要集中在近地表层 0~25cm 高度范围内，在 60~150cm 高度范围内土壤风蚀物含量明显减少。这说明在土壤风蚀过程中，输沙率在气流中的分布并非上下均匀的，土壤风蚀物的含量和输沙率随着高度的增加而递减。

由表 17 可知，四种耕作方式总的土壤输沙率，春浅旋灭茬输沙率最大，保护性耕作输沙率最小，总的土壤输沙率保护性耕作与春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和秋翻地相比分别减少了 78.4%、76.58%、61.31%。0~25cm 高度范围内保护性耕作输沙率比春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和秋翻地分别减少了 81.79%、80.15%、66.06%；60~150cm 高度范围内保护性耕作输沙率比春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和秋翻地分别减少了 65.89%、63.66%、

46.51%。以上分析说明保护性耕作这种耕作方式可以减少近地表(0~25cm)土壤颗粒的运动,减少农田土壤损失,起到保护农田地表的作用。

表 17 不同耕作方式各高度层输沙率及总的输沙率 (g/cm<sup>2</sup>)

Table 17 Sand transport rate in different heights and aggregate sand transport rate under different tillage patterns

高度 (cm) Height	耕作方式 Tillage pattern			
	CT	GAP	ATS	STS
10	0.221	0.51	1.036	1.143
25	0.097	0.427	0.566	0.603
60	0.071	0.181	0.248	0.197
100	0.051	0.061	0.109	0.161
150	0.039	0.059	0.086	0.114
Σ	0.479	1.238	2.045	2.218

从图 5 可以看出,春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬、秋翻地、保护性耕作输沙率依次减少,这说明在气候因素相同的情况下,耕作方式对农田土壤输沙率的影响较大。

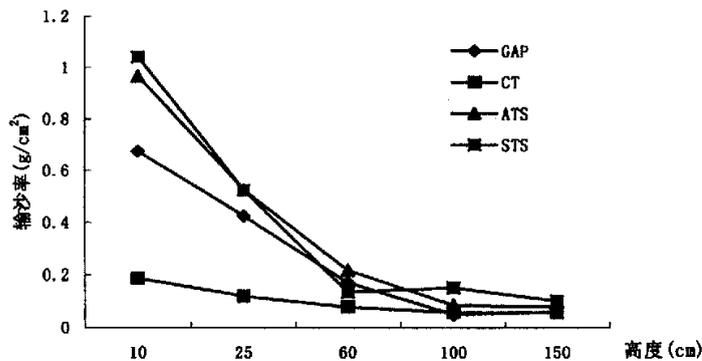


图 5 不同耕作方式各高度层与输沙率的关系

Fig.5 Relationship of sand transport rate to height under different tillage patterns

这是由于保护性耕作秋季玉米收获采用机械收获,并把秸秆整秆粉碎还田,用灭茬机浅旋(不超过 8 厘米)处理残茬,使作物残茬覆盖于地表,增加了地表粗糙度,减少了农田土壤水分蒸发量,保持了土壤水分,降低了土壤风蚀。而秋翻地则由于秋季收获后进行翻耕耙压,增加了土壤表层的紧实度,但到了春季土壤表层裸露缺少覆盖,土壤水分的容易蒸发,导致土壤表土层干燥疏松,发生风蚀的程度高于保护性耕作。秋浅旋灭茬虽然在秋季收获后也进行了浅旋灭茬,但其把秸秆全部移走,土壤表层疏松而且覆盖较少,使得春季土壤表层水分蒸发快,因此遇风易发生风蚀。春浅旋灭茬是秋收后保留根茬,但也把秸秆全部移走,在冬季期间虽然也可保留一些水分,但由于春季进行浅旋灭茬后,天气多干旱大风天气,使得土壤水分蒸发较快,导致表土层土壤裸露疏松,

风蚀强度要高于秋浅旋灭茬。综上所述,保护性耕作这种耕作方式由于作物残茬的覆盖,避免了风力对地表的直接冲击,增加了地表粗糙度,减弱了传到地表的风动量,保护了地表的可蚀性颗粒,阻碍了土壤颗粒的运动,从而降低了农田近地面起沙风速出现的次数,减少农田土壤风蚀的发生。

### 3.3.2 不同茬口土壤输沙率的影响因素分析

表 18 和图 6 是不同茬口地表各高度层在整个观测期间,同一茬口三次风蚀过程总的输沙率的统计结果。从表 18 可以看出,花生茬 90%的土壤输沙率主要集中在近地表层 0~25cm 高度范围内,而玉米茬 90%的土壤输沙率主要集中在 0~60cm 内。花生茬与玉米茬两种茬口的总的输沙率相比,玉米茬总的输沙率比花生茬减少 92.64%,0~25cm 高度层内玉米茬的输沙率比花生茬减少 93.81%,60~150cm 高度层内玉米茬的输沙率比花生茬减少 82.13%。土壤输沙率或土壤风蚀物含量的减少,表明风沙流强度的降低,从而反映了土壤风蚀量的减少。说明玉米茬与花生茬相比,玉米茬的抗风蚀能力较强,从而农田土壤损失要小于花生茬。

表 18 不同茬口各高度层输沙率及总的输沙率 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

Table 18 Sand transport rate in different heights and aggregate sand transport rate under different stubbles						
茬口 Stubble	高度 Height					$\Sigma$
	10	25	60	100	150	
PS	12.249	2.891	0.801	0.492	0.391	16.824
MS	0.510	0.427	0.181	0.061	0.059	1.238

从图 6 可以看出,花生茬各高度层的输沙率均比玉米茬各高度层的输沙率大,说明气候条件相同的情况下,茬口的不同对农田土壤风蚀有一定的影响。

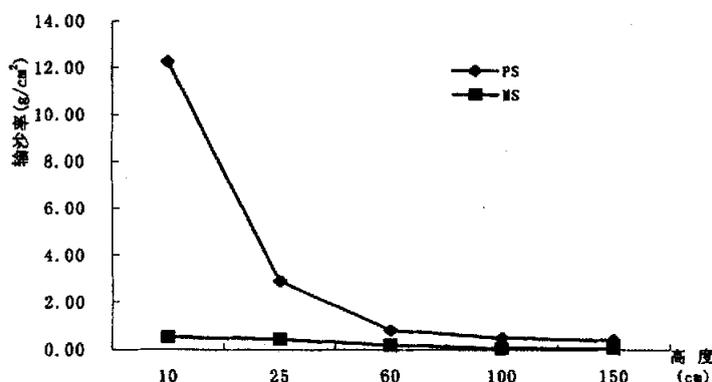


图 6 不同茬口各高度层与输沙率的关系

Fig.6 Relationship of sand transport rate to height under different stubbles

玉米茬由于其秋季收获后,对农田进行翻耕耙压,玉米根系能够使一部分土壤颗粒

凝聚在一起形成不易风蚀的团体以及这些团体的不均匀分布增加了地表粗糙度，而耙压则增加了土壤表层的紧实度，从而增加了农田土壤的抗风蚀能力。花生茬由于其在秋季收获时，必须进行深翻，而且为了获得果实人们必须把凝聚在花生根系上的土壤全部清除，而且把秸秆运走，导致在收获后农田土壤裸露疏松，到了春季由于土壤表层裸露无覆盖，土壤水分蒸发较快，造成土壤表层干旱疏松，土壤抗风蚀能力较弱，因此一旦遇到大风天气，极易发生土壤风蚀。

### 3.4 风速与输沙率的关系

风是土壤风蚀的直接动力来源，风速的大小直接影响风蚀的轻重。本文中风速与输沙率的关系主要是通过野外观测不同风速下的输沙率来实现的，试图总结出输沙率与风速之间的定量关系。四种耕作方式下不同风速对应的输沙率见表 19。对上述结果做定量分析，表 20 是将二者分别在线性、对数、指数和幂函数四种函数关系下进行拟合的结果。

由表 20 可以看出，从风速与输沙率的关系看，在 150cm 高度范围内输沙率随风速的增大迅速增大。不同耕作方式在相同风速下的输沙率大小关系为春浅旋灭茬>秋浅旋灭茬>秋翻地>保护性耕作，但在风速较小的情况下输沙率大小差异不大。

表 19 三种耕作方式在不同风速下的输沙率 ( $g/cm^2$ )

Table 19 Sand transport rate of three tillage patterns under different wind velocity ( $g/cm^2$ )			
耕作方式	风速 Wind velocity (m/s)		
Tillage pattern	4.8	9.5	12.2
STS	0.520	0.975	7.942
ATS	0.484	0.900	5.632
GAP	0.416	0.702	3.158
CT	0.280	0.648	1.920

由表 20 可知，在 4.8~12.2 m/s 风速范围内，四种耕作方式 150cm 高度范围内的输沙率与风速之间的拟合曲线，指数曲线拟合较好，其函数关系式为： $Q=Ae^{Bv}$ ，而且二者之间呈正相关关系，说明输沙率随着风速的增加而增大。由 B 值可以看出，保护性耕作、秋翻地、秋浅旋灭茬和春浅旋灭茬四种耕作方式风蚀土壤输沙率随风速增加的递增程度逐渐增加，保护性耕作分别比秋翻地、秋浅旋灭茬和春浅旋灭茬三种耕作方式风蚀土壤输沙率随风速增加的递增程度低 5.02%、21.55%和 29.38%。说明保护性耕作这种耕作方式可以削弱农田土壤风蚀的强度，从而有效防止农田土壤损失。

表 20 输沙率 (Q) 与风速 (V) 之间的曲线拟合方程  
 Table 20 The curve equations between sand transport rate (Q) and wind velocity (V)

耕作方式 Tillage pattern	曲线拟合方程 Curve equation	R <sup>2</sup>
STS	$Q=0.1042e^{1.363v}$	0.9118
	$Q=0.3999v^{2.3118}$	0.8095
	$Q=3.711V-4.2763$	0.7985
	$Q=6.099LnV-0.497$	0.6634
ATS	$Q=0.1159e^{1.2271v}$	0.9246
	$Q=0.3872v^{2.0897}$	0.8276
	$Q=2.574V-2.8093$	0.8102
	$Q=4.2459LnV-0.19727$	0.6804
GAP	$Q=0.1282e^{1.0135v}$	0.9276
	$Q=0.3469v^{1.7277}$	0.8319
	$Q=1.371V-1.3167$	0.8273
	$Q=2.2715LnV+0.0686$	0.7009
CT	$Q=0.1026e^{0.9626v}$	0.9945
	$Q=0.2558v^{1.69457}$	0.9507
	$Q=0.82V-0.6907$	0.9080
	$Q=0.3892LnV+0.1196$	0.8044

### 3.5 地表粗糙度对土壤输沙率的影响

直接作用于地表的风速是影响田间扬沙的主要因素之一，大量研究表明 (Fryrear, D.W. and Lyles, L. 1997; 刘玉璋等, 1992; 哈斯与陈渭南, 1996; 董治宝与李振山, 1998; 海春兴等, 2002)，作物残留物一方面可以吸收一部分风力，减少风对土壤的作用力；另一方面，把作物的残茬留在土壤表面，根茬留在土壤内部，都能保护土壤颗粒，不被风力移动 (路明, 2004)。本研究对保护性耕作、秋翻地和春浅旋灭茬三种耕作方式的地表粗糙度进行了测定，测得的风速及粗糙度见表 21。

由表 21 可以看出，在 50cm 高处，保护性耕作方式的风速为 200cm 处的 50.9%，春浅旋灭茬为 57.3%，而秋翻地为 63.1%，说明保护性耕作方式降低风速的程度要高于春浅旋灭茬和传统秋翻地。说明保护性耕作方式对地表风速有明显减弱作用，可降低土地的风蚀程度，相对地提高了自然起沙风速，因此对防止田间扬沙有明显效果。

地表粗糙度作为地面主要物理性状指标是一个反映地表微地貌形态的阻力特征值。对于不同的学科，有不同的含义。从风蚀角度出发，拜格诺的粗糙度理论可谓是对它的全面描述：由于地面起伏不平或地物影响，在风速廓线上风速为零的位置不在高度等于零的地表，而在离地面某一高度的地方，把这一高度定义为地表粗糙度，是反映下垫面

阻力特征的物理量,用  $Z_0$  表示(陈东, 1999; 郑子成, 2002)。土壤风蚀率与  $Z_0$  之间存在显著的相关关系。 $Z_0$  的变化导致风蚀率的明显改变,因此  $Z_0$  可以做为评价耕作土壤可蚀性的一个重要指标(郑东旭, 2004)。中国科学院兰州沙漠研究所,对不同粗糙度的原始地表所做的风洞实验表明,相同风速下,粗糙度越大风蚀强度越小,粗糙度越小风蚀强度越大。

表 21 不同耕作方式风速和地表粗糙度比较  
Table 21 Comparison of roughness among different tillage patterns

处理 Treatment	50cm 处风速 Wind velocity at 50 cm ( $m \cdot s^{-1}$ )	200cm 处风速 Wind velocity at 200 cm ( $m \cdot s^{-1}$ )	风速比 (%) Wind velocity ratio ( $v_{50} \cdot v_{200}^{-1}$ )	粗糙度 Roughness (cm)
CT	3.94	7.74	50.9aA	1.07 aA
STS	4.29	7.19	59.7bB	0.70 bB
GAP	4.52	7.16	63.1bB	0.67 bB

注: 200cm 和 50cm 高处的风速值是测定 8 次以后的平均值。

从表 21 可以看出地表粗糙度的计算结果和风速比的测定结果一致,其中保护性耕作的地表粗糙度是春浅旋灭茬和秋翻地的 1.53 倍和 1.60 倍,说明保护性耕作的地表粗糙度明显高于传统耕作地块,方差分析结果表明保护性耕作和春灭茬、秋翻地之间差异显著,而春灭茬和秋翻地之间差异不显著。表明采用保护性耕作的保护性耕作方式,可以通过提高地表的粗糙度,增强对近地面层气流的阻碍作用,降低近地面风速,减少起沙风速出现的次数,减少地表风蚀。

## 第四章 土壤粒度组成结果与分析

## 4.1 各试验区土壤粒度组成分析

风蚀一般发生于干旱区,干旱少雨是风蚀扬沙的一个基本因素,但另一方面,土壤的自然机械结构(即其物理成分),也能反映出其抗风蚀能力的大小。土壤结构优良,抗风蚀能力相对较强,相反,抗风蚀能力就弱。因此,对各试验区表土层的土壤颗粒进行了分级,以研究其抗风蚀性能。根据我国土壤颗粒分级标准,直径为 0.25~1mm 颗粒为粗沙粒,直径为 0.25~0.05mm 的颗粒为细沙粒,直径为 0.05~0.01mm 的颗粒为粗粉粒(张明柱,2000)。各试验区的土壤物理机械组成见表 22。Chepil (1955) 研究表明土壤中粉粒和粘粒的含量越高,越容易形成不可蚀的团聚体机构;相反,砂粒含量越高越难以形成团块,抗风蚀性降低。但单一的颗粒组成并不能产生高稳定性的土壤结构,土壤的稳定性还取决于各级粒径的适当的组合,Chepil 发现,由 20%~30%的粘粒,40%~50%的粉粒和 20%~40%的砂粒组成的混合结构,具有较强的抗风蚀性。农田沙漠化的实质就是表层土壤向粗粒化和单粒化的演变。如果测定土壤的粗砂粒含量较高,说明该地区沙化程度较大,因为大风不仅能带走有机质含量较丰富的粘粒和粉粒,而且还能带走一部分细砂粒,这样就形成一种恶性循环,强大的风速和土壤抗风蚀性降低使得土壤沙化更加严重。

表 22 彰武县各乡镇表层耕作土壤颗粒组成 (%)  
Table 22 Particle content of surface cultivation soil in Zhangwu county (%)

取样地点 Locations	粉粒和粘粒 Silt and clay	砂 粒 Sand	
		细砂粒 Fine sand	粗砂粒 Coarse sand
兴隆山乡	10.42	57.67	31.91
福兴地乡	3.66	27.29	69.05
哈尔套镇	5.40	66.64	27.96
兴隆堡乡	37.04	54.37	8.59

从表中可以看出,不同试验区的耕层土壤砂粒含量普遍较高。在章古台镇、兴隆山乡、福兴地乡和哈尔套镇的地表 0~5cm 土层粗砂和细砂的含量极高,分别在 27%~72% 和 26%~67%之间,粉粒和粘粒的含量相对较低,其含量在 1%~11%之间。而兴隆堡乡地表 0~5cm 土层粗砂含量相对较低,含量为 8.59%,细砂与粉粒和粘粒含量相对较高,分别为 54.37%和 37.04%。由上述分析可知,本研究所选各试验区土壤均属于不抗风蚀类型,且土壤沙化比较严重的地区。因此,在该地区推广保护土壤不受风蚀的耕作方法显得尤为重要。

## 4.2 风蚀物粒度组成随高度的变化

风力作用下土壤颗粒主要有 3 种运动类型：悬移、跃移和滚动。在风蚀过程中，悬浮一般占总的土壤颗粒的 3%~40%，搬运的高度最高、距离最远，是沙尘暴主要构成部分，土壤损失最为明显（臧英，2002）。沿着地表运动的土壤颗粒直径大小不同，研究表明：土壤颗粒的直径大小与运动形式之间的对应关系为，粒径 1~0.5mm 颗粒的运动形式为蠕动，粒径 0.5~0.1mm 颗粒的运动形式为跃移，粒径≤0.1mm 颗粒的运动形式为悬浮（哈斯，1997）。本研究采用筛析法按照离散的粒径范围，对风蚀过程中每一高度所收集到的风蚀物进行筛分，以确定每个粒径范围风蚀物含量占总风蚀物含量的百分比，试图说明风蚀物粒度的分布情况。

### 4.2.1 不同耕作方式风蚀物粒度组成随高度的变化

表 23 不同耕作方式各高度层风蚀土壤各粒径百分含量 (%)

Table 23. Percent of wind erosion soil particles diameter in different heights under different tillage patterns

处理 Treatment	高度 (cm) Height	粒径 (mm) Particle diameter					
		> 0.5	0.5~0.2	0.2~0.1	0.1~0.07	0.07~0.0385	< 0.0385
CT	10	0.86	4.28	6.49	42.74	38.61	7.02
	25	1.21	6.07	6.4	47.15	33.55	5.62
	60	0.52	4.28	7.74	45.54	36.18	5.74
	100	1.26	6.45	6.64	40.22	38.89	6.54
	150	1.05	3.48	1.7	40.39	44.72	8.66
GAP	10	0.45	5.84	15.1	51.27	23.81	3.53
	25	0.13	2.85	22.3	50.53	21.76	2.43
	60	0.36	3.12	6.44	46.67	37.5	5.91
	100	0.18	3.28	6.74	39.56	42.52	7.72
	150	0.32	5.7	7.92	41.99	37.84	6.23
ATS	10	1.04	5.44	13.78	44.05	31.9	3.79
	25	0.41	8.92	7.11	44.13	33.86	5.57
	60	0.11	1.39	4.24	47.73	40.32	6.21
	100	0	4.25	6.64	43.6	38.98	6.53
	150	0	0.31	3.17	41.18	46.18	9.16
STS	10	0.28	4	9.7	49.88	31.84	4.3
	25	0.37	2.22	7.44	55.58	30.19	4.2
	60	0.06	0.32	2.35	44.6	45.4	7.27
	100	0.14	0.63	3.63	41.55	44.96	9.09
	150	0.13	1.19	6.48	48.1	38.56	5.54

保护性耕作、秋翻地、秋浅旋灭茬和春浅旋灭茬四种耕作方式，在 0~150cm 高度范围内各高度层土壤颗粒的粒度分析结果如表 23 和图 7 所示。

由表 23 可以看出，秋翻地、保护性耕作、秋浅旋灭茬和春浅旋灭茬四种耕作方式的地表土壤风蚀物颗粒的粒径主要集中在 0.1~0.07mm 和 0.07~0.0385mm 两个粒级，而且从图中可以看出，无论在何种耕作方式下风沙流中沙粒的粒径在垂直分布上是不同的，随高度的增加，风蚀物各粒级含量中砂粒组分含量减少，粉粒及粘土含量增加，即越靠近地表（0~25cm）的气流所含的沙粒越粗，而离地表越远的气流中所含的沙粒越细。其原因在于粒径大的颗粒具有较大的重力，风力还不足以把它带到较高的层次上。

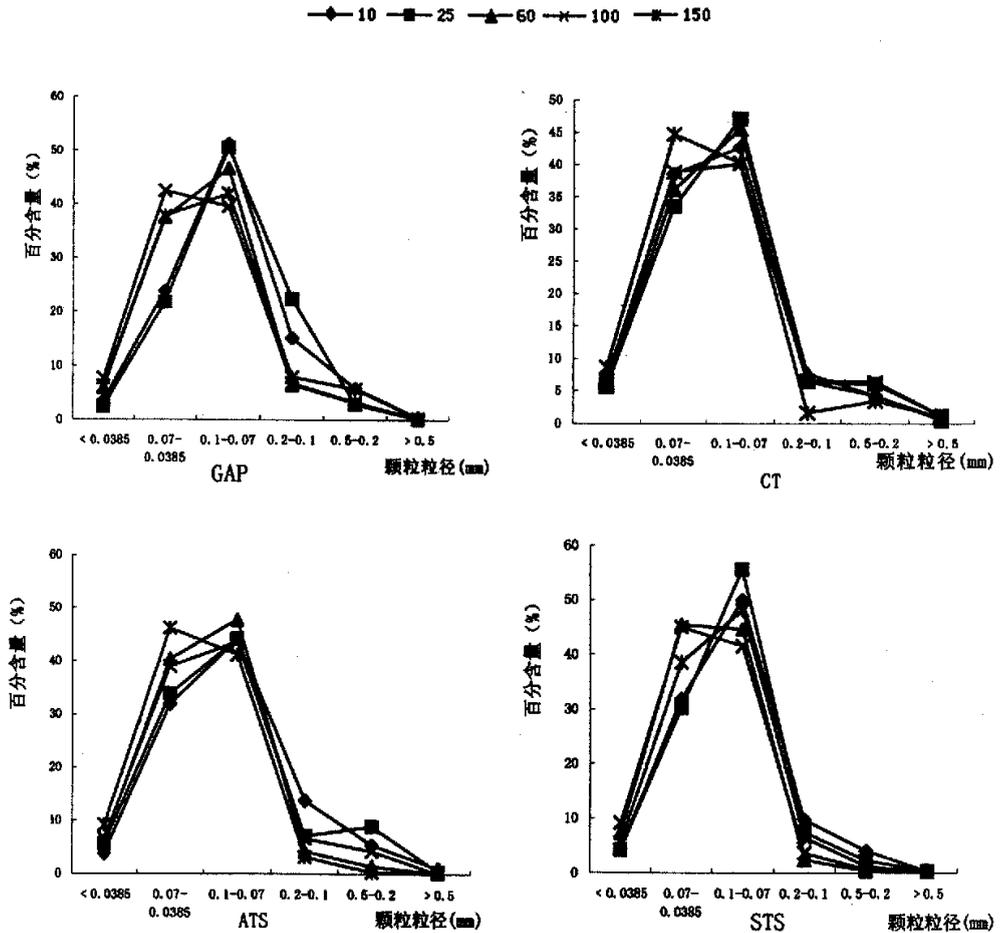


图 7 不同耕作方式不同高度颗粒大小分布

Fig.7 Distribution of particles in different heights under different tillage patterns

Zobeck 用土壤颗粒平均粒径的分布解释地表颗粒随高度的分布状况，颗粒的平均粒径是指小于某粒径的百分比等于 50%所对应的粒径值，它是通过颗粒大小分布曲线估计出来的值（Zobeck, 1986）。图 8 为同一高度层不同耕作方式下土壤风蚀物颗粒大小的分布曲线，由此图可以对不同耕作方式土壤风蚀物中的颗粒平均粒径进行简单估计，分

析出以下规律：

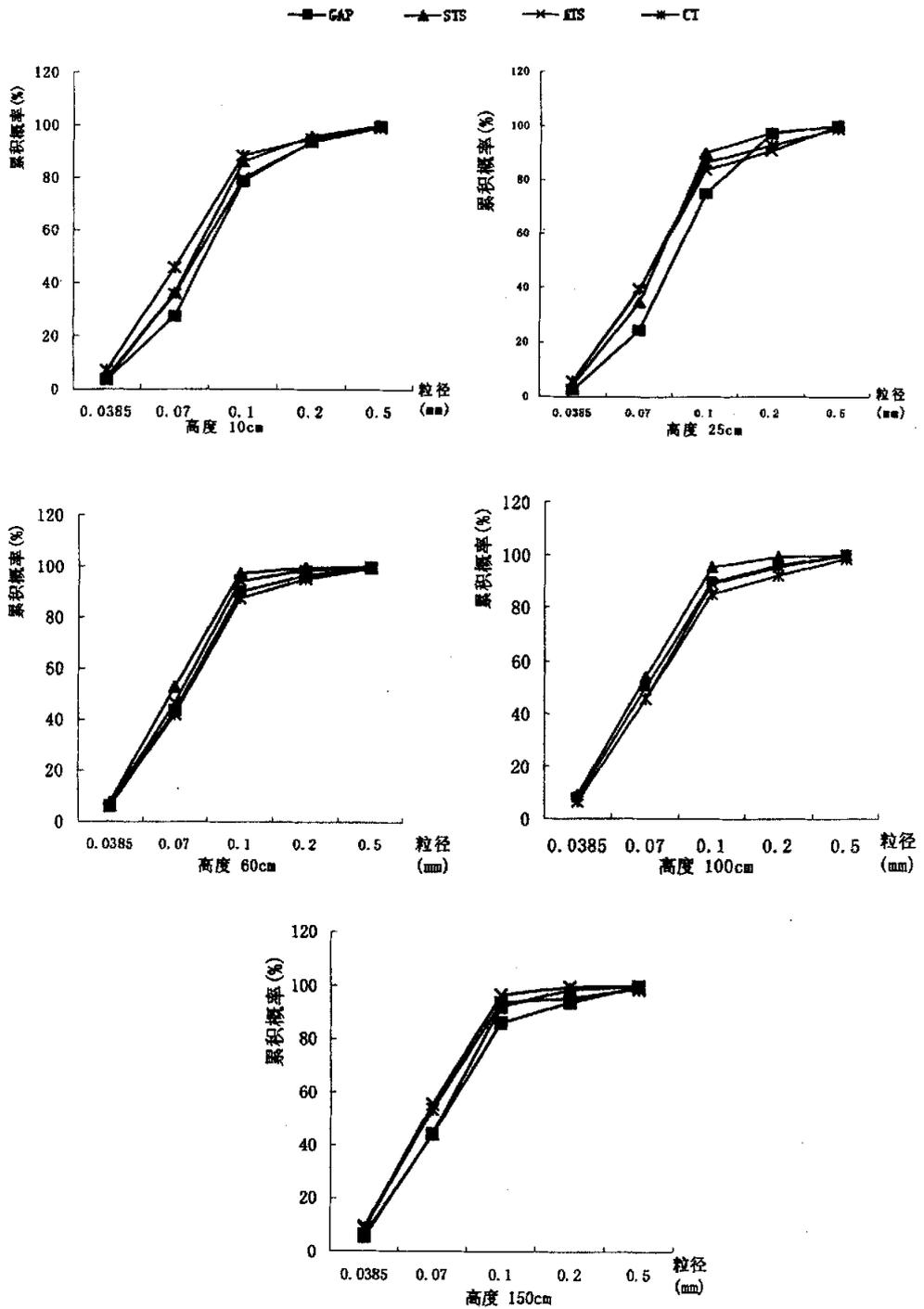


图 8 不同耕作方式同一高度层风蚀土壤颗粒大小分布曲线

Fig.8 Soil particle distribution curve of the same height under different tillage patterns

(1) 不同类型地表土壤风蚀物中的颗粒平均直径随高度增加而减小。秋翻地、春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和保护性耕作不同耕作方式在 10cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.085mm、0.077mm、0.079mm、0.075mm; 25cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.083mm、0.077mm、0.076mm、0.074mm; 60cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.073mm、0.073mm、0.072mm、0.071mm; 100cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.072mm、0.070mm、0.071mm、0.070mm; 150cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.069mm、0.069mm、0.068mm、0.068mm。

(2) 秋翻地、春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和保护性耕作四种耕作方式的土壤风蚀物之间的颗粒平均直径的差异随高度增加逐渐减小。在低于 60cm 范围内, 四种耕作方式按土壤风蚀物中的颗粒平均直径由大到小的顺序为秋翻地>春浅旋灭茬>秋浅旋灭茬>保护性耕作。在 100cm 和 150cm 高度层四种耕作方式的土壤风蚀物之间的颗粒平均直径的大小差异很小。

由上述分析可知, 保护性耕作低于 60cm 高度的土壤颗粒平均直径明显小于其他耕作方式, 说明保护性耕作能够明显减少近地表以跃移运动为主的颗粒的运动。而研究表明风沙运动中土壤颗粒的三种基本运动形式中, 以跃移运动最为重要, 不仅跃移沙粒占全部输沙率的 75%以上, 而且跃移沙粒在风场中运动时, 除受到重力、空气的拖曳力外, 还会因为碰撞等原因导致沙粒旋转, 其转速每秒高达几百至上千转(黄宁, 2001), 因此具有更大的动能, 对土壤表面直接撞击, 使风蚀量加大。此外, 它也是导致蠕移和悬移的重要原因: 表层蠕移质需要从跃移质直接获得动量, 悬移质的细砂土, 由于受附面层流层的隐蔽作用和颗粒之间本身具有的黏结性, 很难为风力所直接吹起, 只有当跃移质的冲击作用把它们驱除地面以后, 气流中的漩涡才能把他们吹到更远的地方(朱朝云, 1992)。因此, 保护性耕作这种耕作方式能够保护土壤, 减少农田土壤风蚀。

表 24 是不同耕作方式各高度层土壤风蚀物大于 0.1mm 和小于 0.1mm 的颗粒含量。从表中可以看出, 四种耕作方式大于 0.1mm 的颗粒含量随着高度的增加而减少, 小于 0.1mm 的颗粒含量随高度的增加而增加。对于不同类型地表随着风速的增加, 输沙率必然增加, 因此也必然有更多的大于 0.1mm 的颗粒以跃移的形式运动, 同时风沙流高度和浓度都得以增加, 而大量的小于 0.1mm 的极细砂、粉粒和粘粒等在更高的范围内以悬移形式运动。这说明大风沙尘暴环境中, 将有更多的土壤物质被搬运, 并在风力的作用下搬运到更远的地方。

表 24 不同耕作方式各高度层土壤风蚀物中不同粒级百分含量 (%)

高度 (cm) Height	>0.1mm				<0.1mm			
	GAP	STS	ATS	CT	GAP	STS	ATS	CT
10	21.39	13.98	20.26	11.63	78.61	86.02	79.74	88.37
25	25.28	10.03	16.44	13.68	74.72	89.97	83.56	86.32
60	9.92	2.73	5.74	12.54	90.08	97.27	94.26	87.46
100	10.2	4.4	10.89	14.35	89.8	95.6	89.11	85.65
150	13.94	7.8	3.48	6.23	86.06	92.2	96.52	93.77

研究表明, 粒径为 0.1mm 左右的砂粒的冲击起动风速最小, 这些颗粒在风力的作用下最易移动 (Chepil, 1951)。随着高度的增加, 所需起动风速也变大, 而且在粒径为 0.25~0.1mm 的细砂最易以跃移的形式运动; <0.1mm 的极细砂、粉粒和粘粒等由于其沉降的速度通常小于气流向上脉动的分速度, 故以悬移形式运动的可能性很大 (Bagnold, 1959; Iversen, 1982)。因此在土壤风蚀过程中, 秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作四种耕作方式的土壤颗粒的运动形式主要以悬移形式运动, 其 <0.1mm 土壤颗粒的含量在 60~150cm 高度范围内达到 85% 以上。中国科学院地学部风沙问题咨询专家组在呈送国务院“关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策”的报告中指出: 沙尘暴中的浮尘主要为直径小于 0.1mm 的颗粒, 这样的颗粒在沙漠中的含量是很低的, 不足 10%, 而在农田土壤中的含量却可高达 60%~70%。而秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作四种耕作方式土壤风蚀物在 60cm 高度层以上, <0.1mm 土壤颗粒的含量达到 85% 以上, 由此可以说明沙尘暴发生过程中悬浮在空中的颗粒可能来自耕作农田。

#### 4.2.2 不同茬口风蚀物粒度组成随高度的变化

玉米茬和花生茬两种茬口, 在 0~150cm 高度范围内各高度层土壤颗粒的粒度分析结果如表 25 和图 9 所示。

由表 25 和图 9 可以看出, 两种茬口风沙流中沙粒的粒径在垂直分布上是不同的, 玉米茬地表土壤风蚀物颗粒的粒径主要集中在 0.1~0.07mm 和 0.07~0.0385mm 两个粒级, 而花生茬地表土壤风蚀物颗粒的粒径主要集中在 0.5~0.2mm 和 0.2~0.1mm 两个粒级, 造成这种差异的主要原因是土壤类型的不同, 花生茬属于典型的风沙土, 而玉米茬属于褐土。随高度的增加, 两种茬口风蚀物各粒级含量中粒级小的颗粒的含量逐渐增加,

粒级大的颗粒的含量逐渐减少, 但花生茬随高度的增加, 风蚀物中粒级小的颗粒的含量的增加程度小于玉米茬。

表 25 不同茬口各高度层风蚀土壤各粒径百分含量 (%)  
Table 25. Percent of wind erosion soil particles diameter in different heights of different stubbles

处理	高度 (cm)	粒径 (mm) Particle diameter					
Treatment	Height	> 0.5	0.5~0.2	0.2~0.1	0.1~0.07	0.07~0.0385	< 0.0385
MS	10	0.45	5.84	15.1	51.27	23.81	3.53
	25	0.13	2.85	22.3	50.53	21.76	2.43
	60	0.36	3.12	6.44	46.67	37.5	5.91
	100	0.18	3.28	6.74	39.56	42.52	7.72
	150	0.32	5.7	7.92	41.99	37.84	6.23
PS	10	0.46	68.65	24.87	3.98	1.72	0.32
	25	0.62	75.72	16.48	3.21	3.05	0.92
	60	0.11	48.77	22.75	15.84	4.75	7.78
	100	0.27	56.57	22.3	11.28	5.74	3.84
	150	0.14	48.19	27.83	14.65	4.22	4.97

—◆— 10 —■— 25 —▲— 60 —×— 100 —\*— 150

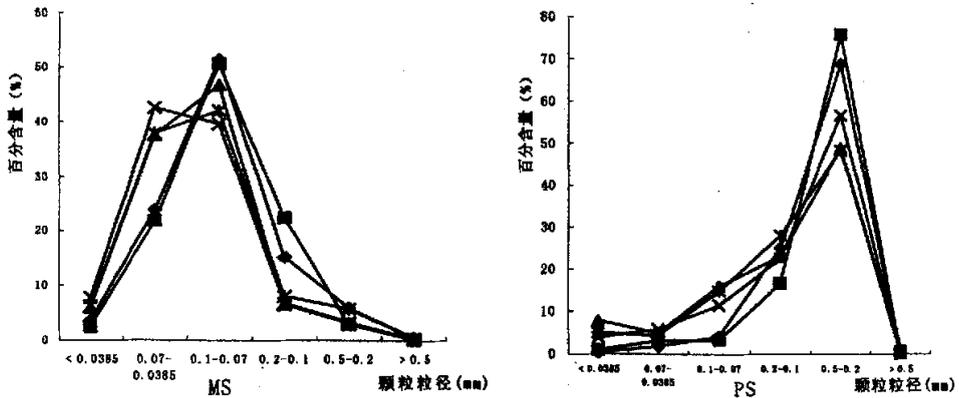


图 9 不同茬口不同高度颗粒大小分布

Fig.9 Distribution of particles in different heights under different stubbles

玉米茬与花生茬两种茬口的同一高度层下的土壤风蚀物颗粒大小的分布曲线见图 10。由图 10 可以看出不同茬口的土壤风蚀物的颗粒平均直径随高度增加而减小。花生茬与玉米茬在 10cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.325mm、0.085mm; 25cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.310mm、0.083mm; 60cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.252mm、0.076mm; 100cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.219mm、0.073mm; 150cm 高度层, 土壤风蚀物颗粒的平均直径分别为 0.182mm、0.070mm。在 0~150cm 高度范围内花生茬土壤风蚀物的颗粒平均直

径大于玉米茬，这主要是由土壤类型的不同引起的。但两种茬口土壤风蚀物的颗粒平均直径的差异随着高度的增加有逐渐减小的趋势。

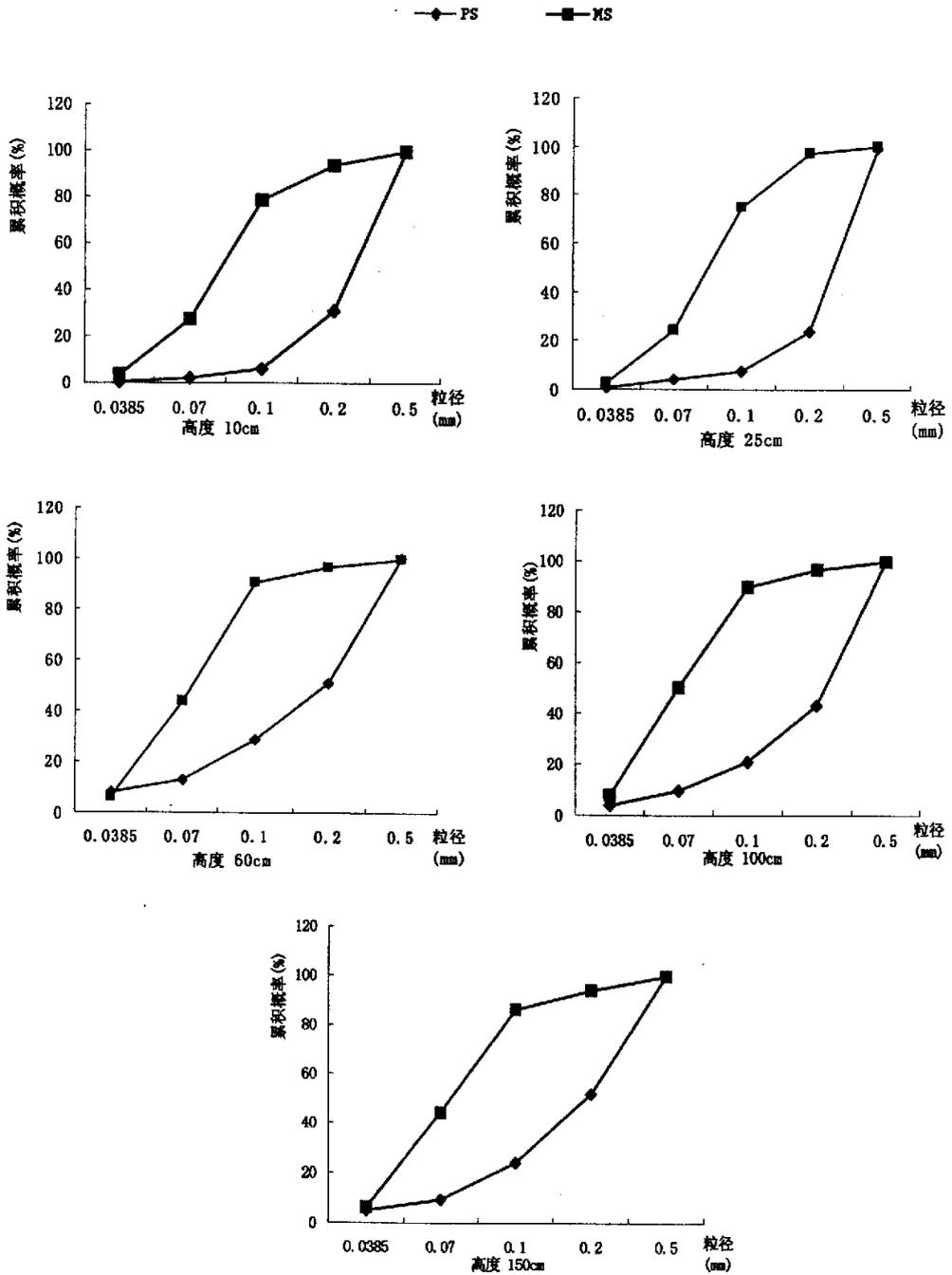


图 10 不同茬口同一高度层风蚀土壤颗粒大小分布曲线

Fig.10 Soil particle distribution curve of the same height under different stubbles

表 26 为不同茬口各高度层土壤风蚀物中大于 0.1mm 和小于 0.1mm 的颗粒含量。从表中可以看出两种茬口 <0.1mm 的颗粒含量随高度的增加而增加, >0.1mm 颗粒的含量随高度的增加而减少, 并且玉米茬各高度层的 <0.1mm 的颗粒含量均大于花生茬, 相反花生茬各高度层 >0.1mm 颗粒的含量均大于玉米茬。这种差异的造成主要是有土壤类型的不同, 花生茬属于典型的风沙土, 由于多年来的土壤风蚀的破坏, 使土壤粗粒化严重, 即土壤中粗砂和细砂的含量极高, 而粉粒和粘粒的含量相对较低, 这种土壤的结构接近沙漠中的土壤结构。

表 26 不同茬口各高度层土壤风蚀物中不同粒级百分含量 (%)

Table 26. Percent of wind erosion soil particles diameter in different heights of different stubbles

高度(cm) Height	MS		PS	
	<0.1mm	>0.1mm	<0.1mm	>0.1mm
10	78.61	21.39	6.02	93.98
25	74.72	25.28	7.18	92.82
60	90.08	9.92	28.37	71.63
100	89.8	10.2	20.86	79.14
150	86.06	13.94	23.84	76.16

上述分析表明, 玉米茬在发生土壤风蚀时, 其土壤颗粒的运动形式主要以悬移形式运动, <0.1mm 的土壤颗粒的含量在 60~150cm 高度层内达 85% 以上; 而花生茬土壤颗粒的运动形式主要以跃移形式运动, >0.1mm 的土壤颗粒的含量在 0~25cm 高度范围内达到 90% 以上。这进一步证明了沙尘暴发生过程中的悬浮颗粒来自于耕作农田, 而不是沙漠, 因为耕作农田土壤颗粒的主要运动形式为悬移运动, 而沙漠的土壤颗粒的主要运动形式为跃移形式。

综上所述, 在土壤风蚀过程中, 土壤颗粒损失的主要是细沙粒和粗粉粒, 这些颗粒是土壤中养分含量较高的部分, 因此土壤风蚀可不断造成农田土壤颗粒组成粗化, 导致农田土壤肥力不断下降。

## 第五章 结论与讨论

### 5.1 结论

本研究利用自制的 BSNE 沙尘采集器对彰武地区目前主要存在的四种耕作方式（保护性耕作、秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬）和两种茬口（玉米茬、花生茬），在同一时间内进行野外观测试验研究，并对不同耕作方式、茬口的土壤风蚀样品进行一系列实验室内分析。在不同耕作方式、茬口的土壤风蚀状况、风蚀物随高度的变化规律、风蚀物的粒度组成以及风速对土壤风蚀的影响等方面进行了探索，并得出以下结论：

1.在风蚀过程中，距地表 0~150cm 高度范围内，不同耕作方式的土壤输沙率随高度的增加逐渐减少，且输沙率随高度变化的规律可以用幂函数近似描绘。土壤颗粒运动主要是在 0~60cm 高度范围内，并且主要集中在近地表层 0~25cm 高度范围内运动。

2.不同耕作方式和茬口对 10cm、25cm、60cm、100cm 高度的土壤输沙率的影响具有显著性差异，而对 150cm 高度的土壤输沙率的影响不显著。多重比较结果表明，保护性耕作和玉米茬减少近地表土壤颗粒运动的数量较多，随着高度的增加，减少农田土壤颗粒运动的数量，四种耕作方式和两种茬口之间的差异逐渐不明显。

3.不同耕作方式、茬口的土壤输沙率的影响因素分析表明：

(1) 不同耕作方式总的输沙率由春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬、秋翻地、保护性耕作依次减少。保护性耕作与春浅旋灭茬、秋浅旋灭茬和秋翻地相比输沙率分别降低了 78.40%、76.58%、61.31%。说明保护性耕作可以减少近地表土壤颗粒的运动，减少农田土壤损失，起到保护农田地表的作用，因此耕作方式对农田土壤输沙率的影响较大。

(2) 花生茬与玉米茬两种茬口的总的输沙率相比，玉米茬总的输沙率比花生茬减少 92.64%，说明玉米茬与花生茬相比，玉米茬的抗风蚀能力较强，因此茬口的不同对农田土壤风蚀有一定的影响。

4.在 4.8m/s~12.2m/s 风速范围内，不同耕作方式的 150cm 高度范围内的输沙率与风速之间的最佳拟合关系为指数函数，其函数关系式为： $Q=Ae^{Bv}$ ，且二者之间呈正相关关系。由 B 值可以看出，保护性耕作分别比秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬三种耕作方式风蚀土壤输沙率随风速增加的递增程度低 5.02%、21.55%和 29.38%。进而说明保护性耕作可以削弱农田土壤风蚀的强度，从而有效防止农田土壤损失。

5.地表粗糙度的测定结果表明,保护性耕作与春浅旋灭茬、秋翻地相比能够提高地表粗糙度,增强对近地面层气流的阻碍作用,从而降低近地表风速,减少土壤风蚀。

6.无论在何种处理条件下风沙流中沙粒的粒径在垂直分布上是不同的,随高度的增加,风蚀物各粒级含量中砂粒组分含量减少,粉粒及粘土含量增加,即越靠近地表(0~25cm)的气流所含的沙粒越粗,而离地表越远的气流中所含的沙粒越细。

7.通过对四种耕作方式和两种插口的土壤风蚀物颗粒平均粒径的简单估计,分析发现无论何种处理下土壤风蚀物颗粒的平均直径随高度增加而减小。秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作的土壤风蚀物之间的颗粒平均直径的差异随高度增加逐渐减小;而花生茬和玉米茬土壤风蚀物的颗粒平均直径的差异随着高度的增加有逐渐减小的趋势。

8.对不同处理条件下各高度层土壤风蚀物 $>0.1\text{mm}$ 和 $<0.1\text{mm}$ 的颗粒含量的分析表明,在土壤风蚀过程中,秋翻地、秋浅旋灭茬、春浅旋灭茬、保护性耕作四种耕作方式以及玉米茬的土壤颗粒的运动形式主要以悬移形式运动,花生茬土壤颗粒的运动形式主要以跃移形式运动。说明表土层裸露疏松的耕作农田对沙尘暴发生有很大的贡献作用。

9.综上所述,保护性耕作这种方式由于作物残茬的覆盖,能够增加地表粗糙度,保护地表的可蚀性颗粒,阻碍土壤颗粒的运动,从而降低了农田近地面起沙风速出现的次数,减少农田土壤风蚀的发生。

## 5.2 讨论

### 5.2.1 风蚀研究方法

本研究采用风蚀事件发生时利用自制的 BSNE 沙尘采集直接在农田中进行测定的研究方法。该仪器特点是结构简单,操作方便;进沙口能够时时指向侵蚀风向;能够在同一观测点采集不同高度的风蚀土样;不需工作人员时刻照看以及频繁的维修,可以在田间进行长期的观测。但在研究过程中存在着以下问题:

(1) BSNE 沙尘采集器对农田土壤风蚀发生过程中的土壤风蚀物的采集不能达到 100%,也就是说采集过程中对土壤风蚀物有一定的损失,因此其所采集的风蚀物并不是真实自然状态下的,这需要我们在以后的研究工作中不断克服。

(2) 本研究只对 0~150cm 高度范围内土壤风蚀物进行了收集与分析,而对 150cm 以上的土壤风蚀物没有进行收集分析,这需要在以后的研究工作中进一步加强。

(3) 由于自然条件具有多变性,对不同耕作方式地表土壤风蚀的试验研究需要长

期的定位监测, 由于时间有限本文只作了一些初步研究。因此, 需要建立保护性耕作防治土壤风蚀的定点观测站, 以便长期的跟踪观测试验。更加深入的研究保护性耕作防治土壤风蚀的机理。

### 5.2.2 沙尘暴沙尘的主要来源

我国学者以往关于土壤风蚀和沙尘暴的沙尘源的问题的认识与研究, 更多的只是停留在对沙漠和沙地的观测研究上, 对农田土壤风蚀的观测研究并不多见, 因此导致长期存在一种错误认识, 即认为沙尘暴的沙尘源就是沙漠和沙地。在中国科学院地学部风沙问题咨询专家组在呈送国务院“关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策”的报告中指出: 沙尘暴中的浮尘主要为直径小于  $100\mu\text{m}$  的颗粒, 这样的颗粒在沙漠中的含量是很低的, 不足 10%, 而在农田土壤中的含量却可高达 60%~70%。中国农业大学(高焕文、臧英等)在河北丰宁坝上农田采集的土样中, 直径  $d < 50\mu\text{m}$  的颗粒占 46.83%; 在内蒙古克什克腾旗浑善达克沙地采集的样品中, 直径  $d < 50\mu\text{m}$  的颗粒仅占 3.01%。以上研究表明农田土壤是沙尘的主要来源, 造成沙尘暴的主要是退化的耕地和草地, 而不是沙漠。

### 5.2.3 保护性耕作的作用

经过多年的试验研究, 我国已建立了具有中国特色的保护性耕作体系, 但我国的保护性耕作研究更多的是从生产角度出发考虑问题, 侧重的是如何增产增收, 蓄水保墒等方面。而在保护性耕作的环保功能, 防治农田土壤风蚀及沙尘暴方面缺乏研究, 与国际水平相比有一定的差距, 这与我国土壤风蚀问题的广泛存在是不相适应的。

但近年来我国学者逐渐认识到保护性耕作在防治农田土壤风蚀, 遏止沙尘暴方面的重要性, 同时也针对这一方面开展了一些试验研究。如 1998~2002 年妥德宝等观察研究了粮草、粮薯、灌草间作及残茬覆盖度对减轻农田土壤风蚀的作用, 认为采用带状留茬间作轮作具有良好生态效应又可以有效地控制农田风蚀沙化, 减轻风蚀危害(妥德宝, 2002)。臧英(2003)研究认为免耕覆盖、免耕覆盖+耙和免耕无覆盖三种处理分别比传统耕作相对减少输沙率 73.75%、75.31%和 14.17%。所以由秸秆覆盖和少免耕相结合的保护性耕作可明显地减少农田土壤损失, 起到了保护地表的作用(哈斯, 1997; 张华等, 2002; 周建忠, 2004; 何文清, 2004)。张伟等利用风蚀采样器测试不同处理形式的土壤风蚀损失, 认为通过残茬覆盖可明显减少风蚀, 并当覆盖量增加到一定程度时对风蚀量的影响越来越小(张伟, 2005)。荣娇凤等研究认为与传统的秋翻耕地相比, 少耕、残茬覆盖能够减小农田土壤风蚀量, 尤其对减小  $18\text{m/s}$  以上大风侵蚀效果显著(荣娇凤, 2005)。

上述研究说明，保护性耕作能够减少农田土壤风蚀，因此在以后的研究中我们不应只注重保护性耕作的增产等功能，应借鉴国际上保护性耕作发展的经验，加强保护性耕作在防治农田土壤风蚀，遏制沙尘暴方面的系统研究，不断完善我国保护性耕作体系。

## 参考文献

1. 奥布鲁切夫 B.A. 乐铸,刘东升等译.1958.中亚细亚的风化和吹扬作用.北京:科学出版社.
2. 常旭虹, 赵广才, 张雯等.2005.作物残茬对农田土壤风蚀的影响.水土保持学报,19(1):28-31.
3. 陈广庭.1991.北京平原土壤机械组成和抗风蚀能力的分析.干旱区资源与环境, 5 (1):103-113.
4. 陈广庭编著.2004.沙害防治技术.北京:化学工业出版社.
5. 陈渭南,董光荣,董治宝. 1994.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势.地球科学进展,9(5):6- 12.
6. 陈渭南.1991.蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀实验研究.水土保持学报,5(1):33-40.
7. 董光荣, 吴波, 慈龙俊等. 1999.我国荒漠化现状、成因与防治措施.中国沙漠, 19 (4):318-332.
8. 董治宝,董光荣,陈广庭.1996.以北方旱作农川为重点开展我国的土壤风蚀的研究.干旱地区农业研究,10(2):31-37.
9. 董治宝,李振山.1995.国外土壤风蚀的研究历史与特点.中国沙漠,15(1):100-104.
- 10.董治宝,李振山.1998.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响.土壤侵蚀与水土保持学报,4(4):1-12.
- 11.高绪科等.1991.旱地麦田蓄水保墒耕作措施的研究.干旱地区农业研究,(4):1-9.
- 12.哈斯,陈渭南.1996.耕作方式对土壤风蚀的影响.土壤侵蚀与水土保持学报, 2(1):10-16.
- 13.哈斯.1994.坝上高原土壤不可蚀性颗粒与耕作方式对风蚀的影响.中国沙漠,14(4)92-97.
- 14.哈斯.1997.河北坝上地区高原土壤风蚀物垂直分布的初步研究.中国沙漠,17(1):9-14.
- 15.哈斯.1997.河北坝上地区土坡风蚀物理化性质初步研究.水土保持通报,17(1):1-6.
- 16.海春兴,刘宝元,赵焯.2002.土壤湿度和植被盖度对土壤风蚀的影响.应用生态学报.13(8):1057-1058.
- 17.何文清,高旺盛,妥德宝等. 2004.北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究.水土保持学报. 18(3):1-4.
- 18.贺大良, 邹本功, 李长治等.1986.地表风蚀过程风洞实验的初步研究.中国沙漠, 6 (1):25-31.
- 19.黄秉维. 1953.陕甘黄土区土壤侵蚀的因素和方式.地理学报,19(2): 28-35.
- 20.黄富祥,牛海山,王明星等.2001.毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系.地理学报,56 (6):700-710.
- 21.黄宁,郑晓静.2001.风沙跃移运动中的 Magnus 效应.兰州大学学报,37 (3) :19 - 25.,
- 22.贾延明,尚长青,张振国等.2002.保护性耕作适应性试验及关键技术研究.农业工程学报,18(1):78 -81.
- 23.贾永莹.1988.美国的旱地农业.世界农业, (3):25-26.
- 24.李小雁, 李福兴, 刘连友.1998.土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向.中国沙漠,18 (1):91-95.

- 25.李振山,陈广庭.1997.粗糙度研究的现状及展望.中国沙漠,17(1):99-102.
- 26.蔺海明.1996.半干旱地区少免耕对土壤水分动态的影响.甘肃农业大学学报,1(1):32-35.
- 27.刘连友,王建华,李小雁等.1998.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定.科学通报,43(15):1663-1666.
- 28.刘贤万.1995.实验风沙物理与风沙工程学.北京:科学出版社.
- 29.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):41-48.
- 30.路明.2002.现代生态农业.北京:中国农业出版社.
- 31.路明.2002.我国沙尘暴发生成因及其防御策略.中国农业科学,35(4):440-446.
- 32.路明.2004.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.
- 33.马世威.1988.风沙流结构的研究.中国沙漠,8(2):8-22.
- 34.马玉明.2002.风沙运动学.呼和浩特:远方出版社.
- 35.农业部农机化管理司.2002.保护性耕作技术手册.
- 36.荣姣凤,张海涛,毛宁.2004.土壤风蚀量随风速的变化规律研究.干旱区农业研究,22(2):149-153.
- 37.史培军.2002.中国土壤风蚀研究的现状与展望.第十二届国际水土保持大会邀请学术报告.
- 38.斯文赫定,王安洪,崔延虎译.1997.罗布泊探密.乌鲁木齐:新疆人民出版社.
- 39.妥德宝,段玉,赵沛义等.2002.带状留茬间作对防治干旱地区农田风蚀沙化的生态效应.华北农学报,17(4):63-67.
- 40.王法宏,冯波等.2003.国内外免耕技术应用概况.山东农业科学,(6):49-53.
- 41.吴正编著.1987.风沙地貌学.北京:科学出版社.
- 42.夏训诚.1987.罗布泊科学考察与研究.北京:科学出版社.
- 43.夏训诚等.1991.新疆沙漠化与风沙灾害治理.北京:科学出版社.
- 44.严平.1999.<sup>137</sup>Cs法在土壤风蚀研究中的应用.中国科学院兰州沙漠研究所博士学位研究生学位论文.
- 45.杨秀春,严平,刘连友.2003.土壤风蚀研究进展与评述.干旱地区农业研究,21(4):147-152.
- 46.姚文艺.1994.风力侵蚀及其预报方法.中国水土保持,3:16-19
- 47.臧英,高焕文,周建忠等.2003.保护性耕作防治土壤风蚀的试验研究.农业工程学报,19(2):56-60.
- 48.臧英,高焕文.2002.国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究.农业工程学报,18(3):195-198.
- 49.张德二.1984.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析.中国科学,24(3):278-288.
- 50.张华,李锋瑞,张铜会等.2002.春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征.水土保持学报,16(1):29-32.

51. 张明柱, 黎庆怀, 石秀兰. 2000. 土壤学与农作物. 北京: 中国水利水电出版社.
52. 张伟, 王福林, 汪春等. 2005. 残茬覆盖对土壤风蚀影响的试验研究. 黑龙江八一农垦大学学报, 17(2): 45-48.
53. 郑子成. 2002. 坡耕地地表糙度及其作用研究. 西北农林科技大学, 1-11.
54. 中国科学院地学部风沙问题咨询专家组呈送国务院“关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策”的报告.
55. 周建忠, 路明. 2004. 保护性耕作残茬覆盖防治农田土壤风蚀的试验研究. 吉林农业大学学报, 26(2): 170-173, 178.
56. 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 1992. 风沙物理学. 北京: 中国林业出版社.
57. 朱震达, 吴正, 刘恕等. 1978. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社.
58. 朱震达, 刘恕. 1981. 中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划. 地理科学, 4(3): 179-206.
59. 朱震达. 1979. 三十年来中国沙漠研究的进展. 地理学报, 34(4): 305-313.
60. Bagnold R.A. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen, 64-69.
61. Bagnold R. A. 1959. 泥沙与荒漠沙丘物理学(钱宇等译). 北京: 科学出版社.
62. Blake, W.P. 1855. On the grooving and polishing of hard rocks and minerals by dry sand. America Journal of Science, 20: 178-181.
63. Bocharov A P. 1984. A description of devices used in the study of wind erosion of soil. New Delhi: Oxbnian Press, Pvt, Ltd, 1- 65.
64. Chepil W S. 1951. Properties of soil which influence wind erosion: III. The effect of apparent density and erodibility. Soil Sci., 71: 141-153.
65. Chepil W S, Milne R A. 1939. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel. Sci. Agr., 19: 249-257.
66. Chepil W S. 1952. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: I. Soil structure. Soil Sci., 75: 473-483.
67. Chepil W S. 1955. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, silt and clay. Soil Sci., 80: 155-162.
68. Chepil W S. 1945. Dynamics of wind erosion: Initiation of soil movement. Soil Sci., 60: 397-411.
69. Chepil W S. 1950. Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility. Soil Sci., 69: 403-414.

70. Chepil W S. 1953. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: II. Water-stable structure. *Soil Sci.*, 76:389-399.
71. D. W. Fryrear and A. Saleh. 1996. Wind erosion: field length. *Soil Science*, 161(6):398-404.
72. Dong Z B, Wang X M, Liu L Y. 2000. Wind erosion in arid and semiarid China: an overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55 (4):439-444.
73. Ehrenberg, C. G. 1847. The sirocco dust that fell at Genoa on the 16<sup>th</sup> May 1846. *Q. J. Geol. Soc Lond.*, 3:25-26.
74. Free E. E. 1911. The movement of soil material by the wind. *U.S.D.A. Bur. Soils Bull.* 68, 45-78.
75. Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D, et al. 1994. Field tested wind erosion model. Buerkert B, Allison B E, von Oppen M. *Proceeding of International Symposium "Wind Erosion in West Africa: The problem and its Control"*. Germany: Margraf Verlag, Weikersheim, 343-355.
76. Hagen L. J. 1991. A wind erosion prediction system to meet the users need. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46 (2):107-111.
77. Hedin S. A. 1993. *Central Asia and Tibet: towards the holy city of Lhasa* two volumes. Cook, Warren and Goudie. *Desert Geomorphology*. London: UCL Press, 53-89.
78. Iversen J. D. and White B. R. 1982. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, *Sedimentology*, 29:111-119.
79. John E. Stout. 1996. The Wolforth field experiment: a wind erosion study. *Soil Science*. 16(9):616-632.
80. Pye K, Tsoar H. 1990. *Aeolian sand and sand dunes*. London: Unw in Hyman, 12-54.
81. Saxton K, Chandler D, Steter J, et al. 2000. Wind erosion and fugitive dust fluxes on agricultural lands in the Pacific Northwest. *American Society of Agricultural Engineers*, 43(3): 623~630.
82. Skidmore E L. 1986. Wind erosion climate erosivity. *Climate Change*, 9 (1-2):195-208.
83. Woodruff N P, Siddoway F H. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39: 602-608.
84. Zobeck T M, Fryrear D W. 1986. Chemical and physical characteristics of windblown sediment  
I. Quantities and physical characteristics. *Transactions of the ASAE*, 29(4):1032~1036.

## 致 谢

本论文是在导师侯立白教授的悉心指导下完成的，在此表示最诚挚地感谢！感谢导师在学习、研究、生活方方面给予我的悉心指导和热忱关爱！从论文的选题、试验设计、试验到论文的修改、定稿的整个过程中，无不渗透着导师的心血！三年研究生学习期间，老师勤奋严谨的治学态度、渊博的学术知识和循循善诱的教导使我受益非浅，导师严谨的科研态度、敏锐的思维、忘我的敬业精神深深地影响着我，使我终生受益，为我以后的工作树立了楷模！

论文中涉及的试验是在彰武县完成的，因此得到了彰武县农机局的各位领导和同仁的关怀和帮助，特别是农机局张彬局长，在此向彰武县所有提供热情帮助的人致以诚挚的谢意。

在实验研究和论文撰写的过程中，张雯师姐和王萍硕士的热情鼓励与无私的帮助，对论文提出了许多富有见地的修改意见和建议，使我甚是感悟，在此向她表示衷心地感谢！

在学习和生活中，王婧、侯玉虹、蔡万涛、张丽娟、杨业圣、盛耀辉、赵洪亮、丁雪丽、肖国杰同学以及2003级硕士1班的同学，给予了诸多的帮助，在此一并感谢！

最后，再次衷心地感谢所有给予我帮助和鼓励的人。

## 攻读学位论文期间发表文章

1. 赵宏亮, 侯立白, 王萍, 张雯. 2006. 彰武农田土壤风蚀物垂直分布规律的研究. 水土保持研究, 13 (2): 150-152.
2. 赵宏亮, 侯立白, 张雯, 张彬, 王萍. 2006. 彰武县保护性耕作防治土壤风蚀效果监测. 西北农业学报, 15 (2): 159-163.
3. 张雯, 赵宏亮, 侯立白. 2004 彰武县“四位一体”能源生态模式推广状况调查. 可再生能源, (2): 61-64.