

内蒙古农业大学

博士学位论文

作物残茬生物篱防治农田土壤风蚀及其影响机理研究——以阴
山北麓农牧交错带为例

姓名：赵沛义

申请学位级别：博士

专业：森林培育

指导教师：闫伟

20091001

摘 要

针对阴山北麓农牧交错带旱作农田严重风蚀沙化问题及野外土壤风蚀缺乏定量监测方法的现状,在典型栗钙土风沙区武川县选择草谷子、莜麦、油菜等作物茬口,安排不同宽度和残茬高度的残茬带与裸露带间作试验,采用野外观测、室内风洞模拟和野外移动式风洞原位测试相结合的方法,配合表土风蚀量定量测定装置,对研究区的风蚀模数和风蚀(积)量进行监测,统计分析带状间作宽度、残茬高度与风蚀量的相关关系,对作物残茬与秋翻裸地等宽间作的适宜宽度和留茬高度等技术指标进行系统分析,并深入研究了葵秆生物篱与作物残茬组合对农田土壤风蚀量的影响,分析总结了作物残茬生物篱防治农田土壤风蚀的影响机理。主要结果如下:

1. 遵循差减法原理,总结提出了野外土壤风蚀定量监测方法——风蚀圈法,克服了目前野外风蚀观测法的局限性,实现了风沙区风蚀季节土壤风蚀量的定量连续监测。

2. 通过室内与野外移动式风洞的多因素风蚀模拟实验,明确了在阴山北麓农牧交错带的气候与土壤条件下,风蚀模数及起动风速与土壤物理性砂粒含量、土壤含水率及风速等因素的数量关系。实验表明当土壤含水量高于 7% 时,任何土壤都不会产生沙尘暴。风速低于 9m/s,风蚀物空间分布符合指数曲线变化规律,大于 9m/s 后,符合幂函数曲线变化规律。沙粒起动风速与含水量呈线性相关,土壤含水量越大,临界起动风速越大,并将土壤临界起动风速和物理性砂粒含量与土壤含水量进行了二元回归。将物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速对风蚀模数的影响进行了三元非线性回归尝试。

3. 风洞结果表明不同残茬处理土壤风蚀模数都随风速的增加而增大,二者符合指数曲线变化规律。在一定风速吹蚀下,土壤风蚀模数随带宽的增加而减小,风蚀模数与带宽符合幂函数曲线变化规律。耕翻及不留茬是产生风蚀的主要因素,认为带状留茬间作模式土壤风蚀量的高低与有无留茬有关,与留茬高度无明显关系。土壤风蚀模数与残茬高度以线性关系拟合较好,残茬高度增加,土壤风蚀模数降低。对莜麦和油菜残茬土壤风蚀模数随带宽、茬高和吹蚀风速的变化进行了二元回归,可以以此估算不同带宽、茬高、风速下的风蚀模数。

4. 通过风洞实验和田间小区试验研究了不同作物、带宽和茬高的间作留茬及生物篱减轻风蚀效果及分布规律,为确定不同形式旱作农田防风蚀措施的技术参数提供了科学依据。研究表明,带状留茬间作与生物篱网相结合,能够有效减轻旱作农田的土壤风蚀沙化,进一步丰富了农牧交错带防沙型旱作农业的理论与技术体系。

关键词: 阴山北麓农牧交错带; 作物残茬生物篱; 土壤风蚀; 风蚀圈; 移动式风洞

Mechanism and application of crop stubble on alleviating field wind erosion in agriculture and pasture ecotone

—Taking agriculture and pasture ecotone in north foot of Yinshan Mountain as an example

Abstract

The wind erosion was serious problem in the agriculture and pasture ecotone of the North foot of Yinshan Mountain. However, it is difficult to quantify and manage wind erosion at field level. This study was carried out in Wuchuan County, Inner Mongolia, where is a typical aeolian region with chestnut soil. The wind erosion in terms of sand accumulation was observed in strip intercropping systems such as silage millet/potato, oat/potato and rape/potato, with various space arrangements. The treatments included the monoculture with bare and tilled soil in winter time, strip intercropping systems with remaining various crop stubble heights and widths of stubbles in the winter time. Field observation, indoor wind tunnel measurements, and outside wind tunnel measurements were conducted to quantify wind erosion from soil surface in different treatments. The relationship between wind erosion amount and intercropping arrangement (e.g. belt width) as well as crop stubble height were analyzed to optimize configuration of strips. The mechanism of reducing wind erosion by field crop stubble in winter time was studied. The agronomy practices for alleviation of wind erosion in potato field was suggested base on the constructing a biological fence with optimal crop stubble height and width.

The main results were:

1. A new methodology, which is defined as Wind Erosion Cycle based on the principle of weight difference, was used and validated in the field wind erosion measurements. it was verified to be good method to quantify wind erosion in the Aeolian region. It overcomes the limitations of common used methods.
2. The sand storm would not happen if the soil water content was more than 7%. The wind erosion sediment distributed exponentially when the wind velocity was lower than 9 m/s, and following a power function cure when wind velocity was higher than 9 m/s. The critical threshold of wind velocity for soil erosion showed a linear relationship with soil moisture content. The relationship between critical threshold of wind velocity for soil erosion, soil physical sand content and the soil moisture content can be expressed by a binary regression. The wind erosion modulus was expressed as a trinary quadric regression.

3. The wind erosion modulus increased exponentially with wind velocity in treatments with crop stubbles. Under same wind speed, the wind erosion modulus decreased as a power function when the strip width was increased. The tillage practice and bare soil in the winter time were main cause of wind erosion. The effect of strip width on reducing amount of wind erosion was significant. However there were no significant effects on wind erosion for crop stubble height and strip width of intercropping systems. The soil wind erosion modulus decreased linearly with crop stubble height. The wind erosion modulus can expressed as a binary regression with the strip width, crop stubble height and wind speed in oat/potato and rape/potato strip intercropping systems.

4. The effects on reducing wind erosion by crop stubbles, which are defined as biological fences with parameters of strip width and stubble height, were studied by wind tunnel and field measurements. The study provided a reliable methodology to determine wind erosion in the drought agricultural area. The results were concluded that the cropping pattern of strip intercropping with remaining stubbles at the field during winter time could significantly reduce wind erosion. The results enrich mechanism and practices of wind erosion management in drought area of agriculture and pasture ecotone.

Key words: *Agriculture and pasture ecotone; Biological fence of crop stubble; Wind erosion; Wind erosion cycle; Mobile wind tunnel*

Directed by: Prof. YAN Wei

Applicant for Doctor degree: ZHAO Peiyi (Desertification Control in Wind Erosion)

(College of forestry. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

插图和附表清单

1. 图 1 阴山北麓旱农区的地理位置	12
2. 图 2 阴山北麓农牧交错带五旗县风蚀气候因子的年内变化	13
3. 图 3 阴山北麓风速与相对湿度的年内变化	13
4. 图 4 武川县的平均月风速	15
5. 图 5 技术路线图	18
6. 图 6 OFDY-1.2 移动式风蚀风洞	19
7. 图 7 测试系统框图	20
8. 图 8 风速廓线仪外形图	20
9. 图 9 风蚀廓线仪示意图	21
10. 图 10 旋风分离式集沙仪示意图	21
11. 图 11 土壤中的风蚀圈	22
12. 图 12 田间埋置的陷阱诱捕桶	23
13. 图 13 风蚀圈的结构示意	25
14. 图 14 敞口 PVC 圈的制作及磨光	26
15. 图 15 三件套的初步嵌合	26
16. 图 16 去除多余尼龙布	26
17. 图 17 制作好的风蚀圈	27
18. 图 18 物理性砂粒含量为 22.84% 土样	30
19. 图 19 物理性砂粒含量为 31.31% 土样	31
20. 图 20 物理性砂粒含量为 43.45% 土样	31
21. 图 21 物理性砂粒含量为 52.63% 土样	31
22. 图 22 物理性砂粒含量为 58.80% 土样	32
23. 图 23 物理性砂粒含量为 67.96% 土样	32
24. 图 24 物理性砂粒含量为 77.94 % 土样	32
25. 图 25 5m/s 风速风蚀物空间动态变化	34
26. 图 26 6m/s 风速风蚀物空间动态变化	34
27. 图 27 9m/s 风速风蚀物空间动态变化	35
28. 图 28 12m/s 风速风蚀物空间动态变化	35
29. 图 29 15m/s 风速风蚀物空间动态变化	35
30. 图 30 18m/s 风速风蚀物空间动态变化	36
31. 图 31 土样 1 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	38

32.	图 32	土样 2 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	39
33.	图 33	土样 3 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	39
34.	图 34	土样 4 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	40
35.	图 35	土样 5 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	41
36.	图 36	土样 6 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	41
37.	图 37	土样 7 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化	42
38.	图 38	残茬带与等距裸露带间作风洞测试简图	48
39.	图 39	不同宽度残茬带与耕翻带田间种植布局	49
40.	图 40	风速不同时各测点的风速降低率	50
41.	图 41	秋翻裸地风蚀物空间分布规律	51
42.	图 42	20cm 高莠麦茬风蚀物空间分布规律	51
43.	图 43	莠麦茬+秋翻裸地风蚀物空间分布规律	51
44.	图 44	20cm 高油菜茬风蚀物空间分布规律	52
45.	图 45	油菜茬+秋翻裸地风蚀物空间分布规律	52
46.	图 46	不同处理风蚀模数随风速的变化趋势(莠麦)	54
47.	图 47	不同处理风蚀模数随风速的变化趋势(油菜)	54
48.	图 48	等带宽间作风蚀模数随风速的变化趋势(莠麦)	55
49.	图 49	等带宽间作风蚀模数随风速的变化趋势(油菜)	56
50.	图 50	同一风况风蚀模数随带宽的变化规律(莠麦)	57
51.	图 51	同一风况风蚀模数随带宽的变化规律(油菜)	57
52.	图 52	不同茬高时各测点的风速降低率	59
53.	图 53	不同残茬高度风速增加后的风蚀模数变化(莠麦)	60
54.	图 54	不同残茬高度风速增加后的风蚀模数变化(油菜)	61
55.	图 55	土壤风蚀模数随茬高的变化规律(莠麦)	62
56.	图 56	土壤风蚀模数随茬高的变化规律(油菜)	63
57.	图 57	茬中风积量随带宽的变化规律	64
58.	图 58	间作裸地风积量随带宽的变化规律	65
59.	图 59	茬中风蚀量随带宽的变化规律	66
60.	图 60	间作裸地带风蚀量随带宽的变化规律	67
61.	图 61	残茬+裸地风蚀量随带宽的变化规律	67
62.	图 62	生物篱保护下的作物间作留茬试验设计	72
63.	图 63	不同地块距篱(茬)不同位置风蚀量	74
64.	图 64	不同位置篱或茬的风蚀降低率	74
65.	表 1	世界部分国家和地区荒漠化分布状况	4

66.	表 2	世界荒漠化程度比较	4
67.	表 3	中国及世界荒漠化土地占荒漠化地区土地总面积比重	5
68.	表 4	不同土壤样品粒径测定	30
69.	表 5	风蚀物收集量在空间上的动态变化规律	33
70.	表 6	不同土壤临界起动风速与土壤含水量的函数式	37
71.	表 7	试验区土壤理化性状	47
72.	表 8	土壤粒径测定	47
73.	表 9	不同风速下留茬带内与背风面裸地削弱近地面 5cm 高处风速的效果	50
74.	表 10	苜蓿残茬带减轻风蚀的效果	53
75.	表 11	油菜残茬带减轻风蚀的效果	53
76.	表 12	土壤风蚀模数随风速的变化规律	54
77.	表 13	不同风速不同带宽下的土壤风蚀模数	55
78.	表 14	不同残茬与等宽裸露带间作处理风蚀模数随风速的变化规律	56
79.	表 15	土壤风蚀模数随带宽的变化规律	58
80.	表 16	残茬高度变化后的土壤风蚀模数	60
81.	表 17	不同残茬高度风蚀模数随风速的变化规律	61
82.	表 18	土壤风蚀模数随残茬高度的变化规律	62
83.	表 19	不同带宽土壤风积量变化	64
84.	表 20	不同带宽土壤风蚀量变化	65
85.	表 21	距生物篱不同位置平均风速和粗糙度对照表	70
86.	表 22	不同留茬地距篱相同点削减风速比较	71
87.	表 23	不同地块距篱(茬)不同位置风蚀量	72
88.	表 24	不同位置篱(茬)的风蚀降低率	73
89.	表 25	油葵秆生物篱降低土壤风蚀量的效果	75
90.	表 26	残茬带与间作耕翻地粗糙度比较	77
91.	表 27	留茬地和间作裸露地雪后表层土壤水分比较	78
92.	表 28	作物留茬田及裸露耕翻地耕层土壤水分变化	80
93.	表 29	留茬带对土壤粒级的影响分析	81
94.	表 30	不同处理风蚀后土壤养分变化	82
95.	表 31	带状间作对土壤水分利用效率的影响	85
96.	表 32	草田间作、轮作土壤肥力变化	86
97.	表 33	带状间作对作物产量的影响	86
98.	附表 1	不同水分条件下土壤的临界起动风速	103
99.	附表 2	不同水分条件下土壤风蚀模数变化	105
100.	附表 3	风蚀模数随风速变化的拟合关系式	107

内蒙古农业大学研究生学位论文独创声明

本人申明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包括其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括为获得我校或其他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在论文中作了明确的说明并表示谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 赵沛义 日期： 2009年10月10日

导师指导研究生学位论文的承诺

本人承诺：我的研究生 赵沛义 所呈交的学位论文是在我指导下独立开展研究工作及取得的研究结果，属于我现任岗位职务工作的结果，并严格按照国家及学校有关学术道德规范的规定要求而获得的研究结果。如果违反，我必须接受按国家及学校有关规定的处罚处理并承担相应导师连带责任。

指导教师签名： 王学军 日期： 2009.10.10

内蒙古农业大学研究生学位论文授权使用授权书

本人完全了解内蒙古农业大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在攻读学位期间论文工作的知识产权单位属内蒙古农业大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署各单位为内蒙古农业大学，且导师为通讯作者，通讯作者单位亦署名为内蒙古农业大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密内容除外），采用影印、缩印或其他手段保存论文。

论文作者签名： 赵沛义 指导教师签名： 王学军
日期： 2009.10.10

1 引言

1.1 项目的背景和研究意义

土地荒漠化是全球性的环境灾害,世界六大洲 100 多个国家和地区的 3600 万平方公里土地受到影响,约 10 亿人受到荒漠化的影响和威胁。全球每年有 5~7 万平方公里的土地沦为荒漠化土地,遭受的直接经济损失达 423 亿美元,间接经济损失是直接经济损失的 2~3 倍,甚至 10 倍^[1]。由于荒漠化的发展,全球大约有 600 万公顷的耕地被废弃,约有 50500 万公顷的土地因风蚀而发生退化、沙化,约占全球土地退化面积的 46.4%^[1]。在 2008 年 1 月 24 日闭幕的“防治荒漠化国际会议”上国家林业局副局长祝列克说:“中国是世界上荒漠化面积大、分布广、受荒漠化危害最严重的国家之一,全国荒漠化土地总面积达 263.62 万平方公里,占国土面积三分之一;沙化土地 173.97 万平方公里,占国土面积的五分之一”^[2]。我国荒漠化土地基本囊括 18 个省、市、自治区的 471 个城镇^[3],其中以风蚀荒漠化最为严重,面积达 160.7 万平方公里^[4,5]。我国的部分地区沙化土地仍在扩展,在 2006 年 5 月 29 日北京举行的“妇女与防治荒漠化国际会议”上国家林业局副局长祝列克说,中国土地荒漠状况已由“破坏大于治理”进入“治理与破坏相持”的阶段,中国荒漠化土地面积已由上世纪末年均扩展 1.04 万平方公里变为目前年均减少 0.7585 万平方公里,但防治土地荒漠化的形势依然严峻^[6]。因土地沙化每年造成的直接经济损失高达五百多亿元人民币^[2],间接经济损失是直接经济损失的 2~8 倍^[7,8]。全国有近四亿人受到荒漠化沙化的威胁,贫困人口的一半生活在这些地区,土地荒漠化已成为中华民族的心腹大患之一^[2]。

土地沙漠化是当今世界面临的重大环境、社会和经济问题,也是全球气候变化研究的重要内容^[9]。引起土地沙漠化的因素较多,有自然因素、社会因素,也有人类活动的干预因素,其中人类活动对目前我国土地沙漠化进程的影响大于自然因素^[10]。土壤风蚀是发生于干旱、半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化的首要环节^[11],它是侵蚀及塑造地球景观的基本地貌过程之一,指土壤及其母质在风力作用下发生的剥蚀、分选和搬运的过程^[12]。其实质是气流或气固两相流对地表物质的吹蚀和磨蚀过程^[13]。土壤风蚀的直接后果首先是造成土壤表层人量富含营养元素的细微颗粒和营养物质的损失,致使农田表层土壤粗化,土壤肥力和土地生产力下降,其次是在土壤风蚀过程中产生大量的悬浮于大气中的气溶胶颗粒,造成所在地区以及周边地区沙尘暴天气^[14]。

气象记录表明 50 年代以来沙尘暴次数总体上是不断下降的,部分地区确有增加,且跨世纪之交一度反弹。沙尘暴的频繁发生,直接危害西北和华北地区,并影响到我国南方和整个东亚,成为东北半球一个重要的环境问题^[15]。特别是 2000 年春季,北京地区遭受 12 次沙尘暴袭击,沙尘暴出现时间之早、发生频率之高、影响范围之广、强度之大为历史上所罕见^[16]。因此我国的沙尘暴问题,已经引起国人及周

边国家的重视^[17]。由于沙尘暴引发的“沙患”不仅影响人民生产、生活，而且导致贫富差距、东西差距拉大，进而影响社会稳定、民族团结，乃至整个国家的长治久安^[18]。

北方农牧交错带横跨我国北方中西部，无论是从生态学角度还是生产力角度来讲，农牧交错带对农区和牧区的发展变化都有不可替代的作用。一方面它是联系和沟通农区与牧区的重要纽带；另一方面，它也是东、中部平原农区天然的生态屏障——起到阻隔荒漠南侵以及为流向农区的江河涵养水源等作用^[19]。由于长期滥垦、过牧、乱挖，导致该区域生态环境严重恶化，荒漠化问题十分突出，尤其是风蚀荒漠化。据廖允成^[20]的资料，我国北方农牧交错带土地沙化面积已达 16.7 万公顷，占北方农牧交错带土地总面积的 52.73%，年增长率达到 1.39%。由于沙漠化的扩展，北方农牧交错带生态环境遭到了严重破坏，致使生物量、生物多样性和土地生产力严重下降，草场载畜量减少，有的地方退化程度已经不具备人类基本生存的条件，出现了大量的生态难民，成为我国最贫困的地区之一^[21]。

阴山北麓农牧交错带处于北方农牧交错带的中段，位于华北和北京的上风向。全年 7 级以上大风有 70 多天，其中沙尘暴日数 5~10 天，北部多达 20~25 天^[22]。由于冬春季节风大风多，降雪和降雨稀少，加上地表裸露缺少覆盖，耕层土壤被风吹蚀严重。气象部门监测的沙尘暴天气多次遥感影象表明，大范围的沙尘暴多数从西北向华北移动，阴山北麓农牧交错带是内地沙尘暴的主要加强源区之一。因此，该地区风蚀荒漠化不仅威胁当地经济发展与人民的生存，也影响到周边环境状况与经济发展。阴山北麓风蚀荒漠化势头如得不到遏制，荒漠化的威胁将进一步向南发展，北京和华北的春天就将很难消除黄尘，重见蓝天，由此带来的损失是不可估量的^[17]。

实际上早在解放初期，我国政府就意识到阴山北麓农牧交错带风蚀荒漠化的严重性，而且采取了许多治理办法并实施许多重点工程进行治理，以期扭转荒漠化地区严酷的自然环境和贫困的经济面貌，部分地区人进沙退，生态环境改善，人民收入提高^[23]。但由于重点在沙漠边缘与退化草场进行治理，忽视了北方农牧交错区大面积半年裸露的旱作农田，而这些区域恰恰是风蚀荒漠化扩展的关键^[24、25]，因此中国荒漠化治理总的趋势依然是“局部逆转，整体扩大”。

在阴山北麓农牧交错区，随着市场经济的发展，马铃薯成为该地区的主要经济作物被大面积扩大种植，致使冬春季节大面积的农田地表裸露，成为近年来西北路径沙尘源的一个重要加强带。前几年采用退耕还林还草是一项防治土地风蚀荒漠化和恢复生态的有效措施，但是由于人口压力，还不得不在这类国外弃耕的生态脆弱带进行相当程度的农业生产^[26]。就阴山北麓农牧交错带的 11 个农业旗县来说，仍然有 200 多万从事农业生产的人口，旱作农业尚需维持相当一段时期。随着当地经济结构的调整，马铃薯种植被政府定为“兴区富民”的战略，成为种植面积最大的经

济作物, 播种面积从原来的 15% 增加到 50% 以上。马铃薯每年的产值已达到农民收入的 70% 以上^[27, 28], 已成为当地农民的主要经济来源和生活支柱。但由于马铃薯特殊的种植方式, 必须进行秋耕翻作业, 使冬春季地表大面积裸露、造成表土疏松, 而同期大风日多达 40 天以上, 造成土壤严重风蚀, 也是该区域荒漠化总体上破坏速度仍然大于治理速度的潜在问题^[29, 30], 因此加强马铃薯等根茎类作物农田土壤风蚀沙化及其防治技术研究尤为迫切, 关键是研究提出适宜马铃薯生产基地的保护性耕作制并明确其防蚀机理, 只有明确了这些问题, 才能制定相应的治理措施与发展规划, 保护和提高耕地质量, 实现国家全面治理生态环境的总体目标^[31]。

本项研究重点正是结合上述学科前沿, 在我国最典型的风蚀土壤栗钙土地区对传统带状耕作方式进行改进和提高, 探索以残茬作为生物篱防治马铃薯裸露农田风蚀沙化的作用机理, 确立带状留茬耕作法在北方风蚀地区的保护性耕作地位, 研究提出适宜马铃薯生产基地应用的带状留茬间作轮作防沙型耕作技术, 进一步完善我国主要风蚀地区的保护性耕作技术体系。

1.2 全球及我国荒漠化概况

1.2.1 全球荒漠化概况

荒漠化 (desertification) 一词最早由法国的一位植物和生态学家 A. Aubreville 在 1949 年出版的《Climats, forests et desertification de Afrique tropical》^[32] 提出, 之后关于荒漠化的概念阐述争议较大, 一直到 1992 年联合国环境与发展大会召开以后, 特别是 1994 年《联合国防治荒漠化公约》签署后, 全球才对荒漠化的概念产生共识, 防治荒漠化公约上确定的最后定义为: 荒漠化是包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化^[33]。

荒漠化是全球性的环境问题, 大约占陆地面积 1/4 的土地发生了荒漠化, 相当与俄罗斯、加拿大、中国和美国国土的总和^[34], 目前荒漠化仍以每年 5000~7000 平方公里的速度在继续扩展。目前荒漠化已经遍及世界各大洲 100 多个国家和地区, 约有 10 亿多人口受到荒漠化的威胁, 由于荒漠化造成的经济损失价值由 1984 年的 260 亿美元增加到现在的 423 亿美元^[1]。表 1 列出了世界上荒漠化现象比较严重的部分国家和地区的分布状况和发展程度, 由此表可以看出, 亚洲的荒漠化面积最大, 其次是非洲, 非洲荒漠化程度最严重, 如果再不采取措施对非洲的荒漠化趋势进行遏制, 到 2025 年非洲的人均占有耕地将减少 2/3, 仅为 0.1 公顷^[34]。亚洲发生荒漠化的区域主要在中部和南部, 目前有近 100 万公顷的耕地受到荒漠化的威胁。荒漠化的发展蔓延已经对整个人类的生存环境产生了威胁, 成为制约全球经济和社会发展的重要因素。

由表 2 慈龙骏^[34]的统计结果看, 全球已发生荒漠化面积中, 有 41.42% 的面积为轻度, 56.41% 的面积为中度, 重度只占 2.17%。世界大部分地区均是发生了中轻度

荒漠化，而我国发生重度荒漠化的比重较大，急需采取措施治理，对荒漠化的发展势头加以遏制。

表 1 世界部分国家和地区荒漠化分布状况

Table 1 The distribution of desertification area in different continents and some countries

区域/国家	旱区面积 ($\times 10^3 \text{km}^2$)	荒漠化面积 ($\times 10^3 \text{km}^2$)	荒漠化程度 ($\times 10^3 \text{km}^2$)			
			轻度	中度	重度	极度
全 球	51692	27455	4273	4703	1301	75
非 洲	12860	10000	1180	1272	707	35
北美洲	7324	795	134	588	73	—
南美洲	5160	791	418	311	62	—
大洋洲	6633	875	836	24	11	4
欧 洲	2997	994	138	807	18	31
亚 洲	16718	14000	1567	1701	430	5
其 中：印度	2551	1074	—	—	—	—
中 国	3327	2622	951	641	1030	—

注：1、CCICCD，执行联合国防治荒漠化公约亚非论坛报告集，1996； 2、CCICCD，China Country Paper to Combating Desertification. China Forest Publishing House, 1997； 3、Proceeding of the Expert Meeting on Rehabilitation of Forest Degraded Ecosystems, 1996

表 2 世界荒漠化程度比较（单位：%）

Table 2 Comparison of desertification degree in China and different continents

地区	非洲	亚洲	大洋洲	欧洲	北美洲	南美洲	全球	中国
轻度	30.46	45.48	77.45	39.72	30.75	32.12	41.42	36.27
中度	68.99	53.36	14.85	59.01	66.80	62.64	56.41	24.45
重度	0.55	1.16	7.73	1.27	2.45	5.24	2.17	39.28

注：慈龙骏，我国荒漠化发生机理及防治对策，第四纪研究，1998

1.2.2 我国荒漠化概况

我国是世界上荒漠化和沙化面积大、分布广，受荒漠化危害最为严重的发展中国家之一。据《中国荒漠化和沙化状况公报》的数据^[36]，到 2004 年底中国荒漠化

土地总面积为 263.62 万平方公里, 占我国国土面积的 27.46%。其中以风蚀荒漠化最为严重, 约为 183.94 万平方公里, 占荒漠化土地总面积的 69.77%; 水蚀荒漠化 25.93 万 km^2 , 冻融荒漠化 36.37 万 km^2 , 土壤盐渍化 17.38 万平方公里。从荒漠化分布范围看, 中国荒漠化土地分布范围为东经 $74^\circ\sim 119^\circ$, 北纬 $19^\circ\sim 49^\circ$, 主要分布于新疆、内蒙古、西藏、甘肃、青海、陕西、宁夏和河北等省(自治区)。从荒漠化发展程度看, 中国发生轻度、中度和重度荒漠化的面积分别为 95.1、64.1 和 103 万平方公里, 分别占我国荒漠化土地总面积的 36.3%、24.4%和 39.3%, 与全球相应的 41.1%、56.4%和 2.2%的构成比例相比, 我国重度荒漠化土地面积所占比例高出近 37 个百分点, 相当于全世界平均水平的 18 倍(表 2)。

荒漠化土地占荒漠化地区中面积的比例往往被作为衡量一个国家或地区荒漠化发展严重程度的重要指标^[1]。从表 3 的结果看, 我国荒漠化土地的面积占旱区总面积的比例为 79%, 比世界平均水平高出 10 个百分点, 比荒漠化比例最高的北美洲还要高出近 5 个百分点, 足可以说明我国土地荒漠化的严重程度。

表 3 中国及世界荒漠化土地占荒漠化地区土地总面积比重

Table 3 Ratio of desertification area to total land of dry region

地 区	中国	世界	非洲	亚洲	北美洲	南美洲	澳大利亚
比重 (%)	79	69	73	69.7	74.1	72.7	53.6

注: 卢琦, 中国沙情, 2000

1.3 风蚀荒漠化的概况与国内外研究现状

1.3.1 风蚀的概念及其危害

风蚀(wind erosion)是塑造地球陆地表面地貌特征的基本动力过程之一, 也是发生在干旱、半干旱及部分干燥半湿润地区土地沙漠化的首要环节^[11]。土壤风蚀是指松散的土壤物质被风吹起、搬运和堆积的过程以及地表物质受到风吹起的颗粒的磨蚀过程, 其实质是在风力的作用下, 表层土壤中的细颗粒和营养物质的吹蚀、搬运与沉积的过程^[38]。

风蚀的强度受地面粗糙度、空气稳定度、风力大小、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。当气流的冲击力和剪切力大于土粒或沙粒的重力和联结力, 并克服地表的摩擦力时, 土粒或沙粒就会被卷起, 形成扬沙和尘暴^[17]。

土粒或沙粒由于风力的作用及自身的颗粒大小、质量不同在运动时表现出不同的移动方式。拜格诺·索科洛夫^[39]依据风力、颗粒大小和质量不同, 将其分为三种基本的运动形式, 即悬移、跃迁和表面蠕动。一般粒径小于 0.1mm 的沙粒运动时以

悬移为主, 它可被风卷扬到高空, 随风飘到远处; 粒径为 0.25mm~0.5mm 的沙粒最容易以跃迁的形式运动, 它会受风力作用脱离地面, 当风力减弱时受到重力和水平风力影响, 朝下风向急速下降返回地表, 然后通过它的撞击使地表较大的沙粒作近距离移动; 发生表面蠕动的沙粒一般是那些不能单独移动的粗沙粒, 这些沙粒粒径范围为 0.5mm~2mm。土粒或沙粒的这三种移动方式, 一般跃迁占到 55%~72%, 蠕动占 7%~25%, 悬移占 3%~28%。颗粒越细, 扬失的比例越大。

土壤风蚀首先造成表层大量富含营养物质的细微颗粒的损失, 造成地表细粒物质和土壤养分、有机质的大量流失, 土地生产力下降, 影响农作物的正常生长。1934 年 5 月震惊世界的美国黑风暴, 横扫美国 2/3 的国土, 把 3 亿多吨的土壤卷入大西洋, 300 多万公顷的耕地被毁, 冬小麦减产 510 万吨^[40, 41, 42]。据董光荣^[43]等研究, 由于土壤风蚀, 我国 1949~1994 年间共有 66.7 万公顷的耕地沦为沙丘和沙地, 每年丧失耕地 1480 公顷, 损失粮食 3.712 万吨, 损失土壤有机质、氮素和磷素高达 5.598×10^7 吨, 相当于价值 170 亿元的各类化肥。

土壤风蚀危害的另一方面就是导致沙尘灾害, 甚至沙尘暴。沙尘暴发生时空气中富含大量的悬浮颗粒, 除产生大范围的粉尘污染外, 还造成空气质量下降和人类生存环境的恶化。如 2006 年 4 月 17 日, 北京遭遇了近几年来最为严重的浮尘天气, 落尘量在 30 万吨以上。人和牲畜受沙尘的影响, 易患呼吸道疾病和眼疾, 如美国 30 年代的沙尘暴导致许多人患肺炎而死, 1993 年 5 月 5 日发生在我国西北地区的一次特大沙尘暴, 导致 116 人丧生、264 人受伤。沙尘暴还会对交通、通讯和水利等设施构成危害。2007 年 2 月 28 日乌鲁木齐至阿克苏的 5807 次旅客列车因沙尘暴袭击发生了脱轨翻车, 造成了很大的人员伤亡和经济损失。

1.3.2 风蚀荒漠化的现状

风蚀是一个全球性的问题, 全球极易发生土壤风蚀的地区包括非洲、中东、中亚、东南亚部分地区、西伯利亚平原、澳大利亚、南美洲南部及北美洲的内陆地区, 甚至在极地地区的格陵兰岛南部, 自中世纪以来也遭受了较为严重的土壤风蚀^[44, 45, 46]。从北纬 10 度附近向东北延伸至北纬 55 度附近, 形成一段几乎连绵不断辽阔的干旱沙漠区, 占世界干旱区和沙漠区的 67%, 主要集中在非洲、中亚和中国^[15]。

我国的风蚀荒漠化主要发生在干旱、半干旱地区, 分别占 54.5%和 30.6%^[47]。受土壤风蚀及其沙漠化影响的面积占国土面积的 1/2 以上, 沙漠化面积在世界排第三位^[48], 仅次于澳大利亚和沙特阿拉伯。沙漠化土地主要分布在内蒙古、宁夏、甘肃、新疆、青海、陕西、山西、河北、吉林、辽宁、黑龙江等北方干旱和半干旱区, 其中以新疆和内蒙古最多, 二者共占全国荒漠化总面积的 76.29%。

目前, 风沙危害仍是一个很严重的环境问题, 即使在保护性措施发展很好的美国, 土壤风蚀仍然很严重, 因此, 对风蚀的研究和防治必须持续长久地进行下去。

1.3.3 国内外土壤风蚀研究概况

1.3.3.1 国外土壤风蚀研究现状

根据国外风蚀研究的发展历史及其成果,风蚀研究大致经历了三个阶段^[49, 50]。二十世纪三十年代前为风蚀研究的萌芽阶段。19 世纪末期,在侵蚀概念的基础上,产生了科学的风蚀概念,风蚀现象的研究主要局限于地质学领域,地质学家把风蚀视为一种重要的地质过程。这一阶段的研究主要以考察和定性描述为主,把风蚀看作引起地貌变化的一个重要过程^[51, 52]。许多与风蚀相关的研究主要集中在对沙漠及其边缘地区沙丘形态的描述和认识上^[53, 54]。同时,也开始了一些关于准确揭示风沙运动机制的试验研究^[55]。

三十年代至六十年代中期是土壤风蚀研究的大发展阶段。20 世纪 30 年代风蚀研究实现了从定性描述到定量研究的飞跃,这一阶段风蚀研究开始出现突破性的进展。1941 年 Bagnold^[56]通过野外调查和风洞试验,来确定引起沙粒移动的力学机制,并研究明确沙粒主要在距地表 1m 左右的高度范围内活动而且通过对 Karman、Prant 及 Shield 建立的现代流体力学的应用,创立了“风沙物理学”理论体系,开辟了试验风蚀研究的新纪元。Bagnold 的代表作《风沙和荒漠沙丘物理学》的问世,成为影响半个世纪以来风蚀研究领域的理论基础,标志着风蚀定量研究的开始。20 世纪 30~40 年代美国“黑风暴”的发生,给美国西部农牧业经济造成了沉重的打击,使风蚀研究引起了科学界的高度重视。在 Bagnold 研究工作的基础上,Chepil、Milne 等美国科学家们利用长达 25 年的时间对农田耕地的风蚀动力学机制、土壤风蚀影响因子等进行了系统研究,并对各种防沙措施进行了评价,为“风蚀方程 (WEQ)”的形成奠定了基础。1965 年 Woodruff 和 Siddoway 正式提出了“风蚀方程 WEQ”^[56],标志着系统的土壤风蚀理论体系的形成。除美国外,加拿大、前苏联以及澳大利亚等都相继开始了土壤风蚀研究。

20 世纪 60 年代中期至今是土壤风蚀研究的进一步检验和完善阶段。随着 60 年代的计算机革命及计算机技术的应用,使风蚀研究迅速发展,由定量分析开始走向定量模型研究。70 年代初期,由于持续干旱,非洲撒哈拉地区及部分亚洲地区的土地沙漠化非常严重,再度激发科学界和国际社会对土壤风蚀研究的广泛关注,使风蚀研究由区域性走向了国际化。1977 年以来,与土壤风蚀有关的学术活动增强^[57],国际上针对沙漠化、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展开了讨论,集中反映了土壤风蚀研究的最新动态和发展趋势。80 年代以来,人们又开始加强对综合性的风蚀模型的研究。比较典型的是美国在 20 世纪 80 年代成功发表的风蚀预报方程^[58]及 90 年代的风蚀修正方程^[59]。90 年代以来,土壤风蚀预报开始与全球气候变化预测结合起来,使风蚀研究进入了更加宏观的系统研究阶段^[60]。

由此可见,国际上关于风蚀的研究已经历了定性描述、动力学试验分析和定量

模型阶段。在土壤风蚀机理、影响因子、风蚀模型、土壤风蚀危害评价及其防治机理与技术方面都取得了较大的进展,形成了比较完善的科学体系。

1.3.3.2 国内的风蚀研究进展

据研究资料^[61]我国学者公元前 1150 年就注意到风蚀现象及其危害,但专门的风蚀研究起步较晚。20 世纪 30~40 年代我国学者开始对于旱、半干旱地区农田的风蚀问题进行调查,进行初步的土壤风蚀研究,但研究方法局限于定性分析和描述,不过通过这一阶段的研究也提出了一些比较有意义的防风治沙建议,如实行营造防护林、作物轮作、种草等措施来防治风蚀沙化。

20 世纪 50~60 年代,我国学者围绕风蚀、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。这个时期研究方法仍以宏观调查和定性分析为主,但研究手段已开始应用航片分析、定位观测、风洞试验等比较先进的方法,从而获得了比较系统的科学资料。有关风蚀的论述散见于沙漠学、水土保持和林业方面的研究。在治理措施方面,科研部门与生产部门相配合,建立了一批实验站,开展了防治农田和交通沿线风蚀危害的研究^[61],从宏观上基本搞清了我国风蚀沙化的空间分布、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^[62]。

70 年代以来,随着国际上对土地沙漠化、环境退化等重大问题的关注,我国的土壤风蚀研究也进入了一个新的研究阶段。通过董光荣^[11]、贺大良^[63]等开展的影响风蚀若干因素的试验研究,树立了我国风蚀研究的里程碑,提供了试验研究人类经济活动对土壤风蚀影响的新思路,带动了我国风蚀研究的深入发展。其后,风蚀研究更加深入。在研究方法上,开始将模型引入风蚀影响因子的试验研究中。胡孟春^[64]等利用系统动力学模型对风蚀影响因子进行了系统的分析,董治宝^[65]对建立小流域风蚀量统计模型进行了探讨,董治宝^[66]对土壤水分、土壤风蚀率随植被盖度等影响因素进行系统研究,黄富祥等^[67]采用野外的试验观测数据,结合风沙动力学的经典输沙率公式,建立了植被覆盖率与输沙量之间的半经验型模型。在研究手段上,濮励杰^[68]等利用 ^{137}Cs 同位素示踪对我国西部风蚀地区土地退化的初步研究。

这一阶段,除了对沙漠、沙地的风蚀研究外,也逐步开始重视对农田、农作措施的定量化研究。哈斯^[69-71]等在河北坝上地区对不同耕作方式、不可蚀颗粒对土壤风蚀的影响以及农田土壤风蚀物空间垂直分布动态进行了系统的研究,胡孟春^[64]、刘玉璋^[72]、何文清^[15]等人利用风洞试验对风蚀影响因子进行了更加系统的定量化研究。赵羽^[73]等人提出了土壤风蚀强度分级指标体系,但这些指标并无严格的理论依据,而且人为任意性很大,但也推动了我国的风蚀强度研究进程,也为国家水利部进一步提出了风蚀危险程度分级指标体系奠定了基础。

总之,我国的风蚀研究由于起步晚,与国际研究水平相比相距较远,特别是关

于风蚀机理,模型、测试方法手段、评价预测等方面表现不足。和国际上综合治理沙尘暴的经验相比,过去我国在治理的思路和手段上还不够全面,而且由于对沙尘暴的发生源区认识不足,把研究的重点放到了沙漠边缘和退化草场,忽略了对农田的保护,在农田土壤风蚀方面还缺乏深入的研究。因此客观地讲我国虽开发出许多成功的防治模式,如以固沙造林,恢复植被、沙地人工新绿洲开发建设综合高效开发技术体系为主体的榆林半干旱地带荒漠化防治技术模式;以固为主,固阻结合、以生物固沙为主,生物固沙与机械固沙相结合的流沙固定技术体系的包兰铁路防沙模式;以沙地衬膜水稻栽培技术、小生物圈系统综合整治模式为主体的赤峰半湿润地带沙漠化防治技术模式及以发展复合农林牧业的和田绿洲荒漠化发展模式,但没有从根本上治理沙尘暴。最近几年中国科学院通过对沙尘暴的成分和来源进行的分析研究,认为造成沙尘暴的主要原因是退化的耕地和草地,得出沙尘暴的源区主要是旱作农田,而不是沙漠。针对这一现实中国科学院地学部风沙问题咨询专家组向国务院呈送了“关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策”的报告^[74],使人们对沙尘暴的认识更加清晰,研究的重心开始向旱作农田转移。通过研究,中国农业大学高焕文等认为北京沙尘暴 70%的沙尘来自北京外围冬季裸露休闲的农田^[75],由于科学界对沙尘暴发生源区的认识转变及人们意识到保护农田对防治土壤风蚀的重要性,防治土壤风蚀的措施发生了改变,除大量开荒、林草植被减少外,还和耕作方式不当、管理粗放密切联系起来,也便促进了以带状留茬间作轮作、等高耕作及丘陵单元生态治理为主体的内蒙古阴山北麓防沙型耕作模式^[15、17、76-80]和保护性耕作的推广应用。

1.3.3.3 北方农牧交错带风蚀沙化现状

我国沙化土地主要分布在北方广大干旱和半干旱以及部分半湿润地带。其中,我国北方农牧交错带是风蚀沙化最为严重的地区之一,是防沙治沙的重点地区^[16]。从荒漠化发展总的进程来看,农牧交错带地区乃是荒漠化正在发展和强烈发展的地区,其中沙质荒漠化是北方农牧交错带土地退化的一种重要的方式。

北方农牧交错带沙漠化面积在 80 年代末期占全国沙漠化总面积的 36.5%,但年均发展面积较大,约为全国年均发展面积的 83.2%,由于土地的退化和生态环境的恶化,每年有近 2000 平方公里的土地再度沦为沙漠化土地,因此导致约 30%左右的农田因风沙危害而减产,甚至绝收^[81-83]。对于北方农牧交错带草原开垦区来说,由于盲目开垦和载畜量负荷加大造成沙漠化的迅速发展,风蚀问题日益突出。

为了进一步遏制风蚀荒漠化的蔓延,中国农业大学和内蒙古农牧业科学院在上世纪 90 年代开始致力于阴山北麓农牧交错带旱作农田农牧业综合发展模式的研究,在探索农牧交错带旱作农田风蚀规律的基础上,提出了条播作物留茬与马铃薯等穴播作物带状间作轮作技术和等高耕作技术,赵沛义等^[17、76-78]曾经对带状留茬间作对

间作裸露农田的防护宽度进行过初步探索,但没有把带状间作作为一个整体进行研究,对带状间作后残茬高度对风蚀量的影响还未见报道。古书鸿^[79]、刘晓光^[80]等对带状留茬间作与生物篱营建技术进行了初步探索,但带状留茬间作与生物篱网营建技术需要进行系统总结才能更进一步在风沙区旱作农田全面推广普及。本研究将针对这些问题进行深入研究和总结,对进一步完善防沙型耕作制具有重要意义。

1.4 土壤风蚀量评估的主要方法与手段

1.4.1 野外观测

目前相关文献报道土壤风蚀量的野外观测方法主要包括风蚀盘法^[84]、插钎法^[85-86]、陷阱诱捕法^[87]、集沙仪测定法^[88-92]、风蚀观测板法^[93]和扫描摄影法^[94],利用上述方法不少研究者完成了土壤风蚀量的野外监测,但不同方法各有利弊。如风蚀盘,虽然限定了风蚀面积,但由于只是在盘状容器放置了土样,并未与测定点土壤形成上下通气透水的自然环境,测定时间越长土样含水量越小,也越不能代表测定区域的土壤条件,因而只能测定某一次大风的风蚀量,而且测定值往往大于实际值,所以不能对特定区域的土壤风蚀量进行客观评价;插钎法的误差太大,只能对所测定的区域进行风蚀量的大致估算,且只适用于风蚀非常强烈的地区,在风蚀较轻地区,表征土壤侵蚀量的插钎地上部高度变化的观测误差往往大于实际的风蚀量;陷阱诱捕法只能描述风蚀区单位面积土壤沉积的土壤量,不能监测土壤的吹蚀量,而实际上风蚀量既包括土壤被风吹蚀的部分,也包括土壤在测定区域沉积的内容,二者的叠加才是真正意义上的土壤风蚀,如果吹蚀部分大于沉积部分,则发生了土壤风蚀,否则则发生了风积,所以说用陷阱诱捕法所测定的数值描述区域的风蚀量还不太全面,但在分析风蚀土壤的养分状况时还比较实用;集沙仪测定法可以对不同高度风蚀物的粒径分布和风蚀物比例作出监测,但不能明确特定区域单位面积的风蚀量,再加上集沙仪一般是由于风标的摆动通过轴承转动来实现集沙口迎风,轴承的灵敏性是通过润滑剂来调节,而沙尘大往往又影响润滑剂的作用,所以时间长了也会影响集沙仪的灵敏性,再者集沙仪比较适宜面积较大的免耕留茬和传统耕翻农田,设备设置和安装在测定地块的位置至少需要满足沿主风向并距上风口地边长度为150m的距离^[91],因此如果监测面积较小,其适宜性不大;扫描摄影技术可以基本实现计算机自动控制、数据采集、储存和处理,但具体实践中误差很大,所以此方法的报道也较少。

1.4.2 室内风蚀模拟评估

1.4.2.1 风洞模拟

自从美国拜格诺(Bagnold)^[39]通过野外调查和风洞模拟试验研究风蚀动力机制,风洞开始运用于风蚀研究中,国内不少学者^[15, 84, 72, 85-90]也利用风洞对研究区域进行了

模拟试验,主要针对风况、地面物质组成、植被、防护林、沙障、人为行为、开垦等因素进行模拟,是目前进行风蚀模拟的较好手段,但实际操作中大型风洞的费用较高,而且对人力的需求也较大。中小型的风洞只能在一定距离的小范围内模拟所设计的风速,因而只能对盆栽或很小的样本进行不同风速的吹蚀处理,与大田的实际情况有很大的差异。所有风洞实验都只能进行短时间的吹蚀处理,不可能测定整个风蚀季节的累积效应,因而只能通过一系列的插值拟合和模型运算来估算单位面积的风蚀通量,其次由于试验时所需动力机械较大,试验后会对测定区域地表造成很大程度的毁坏,几乎3年后才能恢复,因此应用时被动性较大。

1.4.2.2 粒径对比法

粒径对比法^[85]最近才有报道,是通过室内分析土壤粒径变化对土壤风蚀量的一种大致估算,但找到具有充分代表性参照样本的难度较大,对测定区域的风蚀量评估缺乏准确性。

1.4.2.3 ^{137}Cs 同位素示踪

^{137}Cs 是 20 世纪 50~70 年代大气核试验的产物,主要以湿沉降方式从大气中沉降,并迅速与地表土壤粘粒、有机质等紧密结合,基本不被植物吸收或因淋滤流失,其迁移基本上只受土壤颗粒物理运动控制。与传统方法相比, ^{137}Cs 方法具有成本低、见效快和精度高的优点。由于 ^{137}Cs 的强放射性(662 Kev)和较长的半衰期(30.17a), ^{137}Cs 方法可以用于较长时间尺度的土壤侵蚀和定量评估,国内很多学者^[57, 68, 100-102]已经利用这一方法对研究区域进行了风蚀量监测。但如同测定土壤水分中的中子仪、TDR 等仪器一样,应用该方法得出的仍是相对值,需要与直接精确测定风蚀量的其它方法进行平行对比观测,确定出订正曲线后,才能用于实际风蚀量的观测。

1.4.2.4 土壤风蚀方程预报

利用土壤风蚀方程对区域土壤风蚀量进行预报是一种很好室内风蚀模拟方法。美国是风蚀预测技术最先进的国家,60 年代发表的风蚀方程(WEQ)^[90]在美国被广泛运用,而且 1979 年被联合国粮农组织采用,用于退化土地的评价,但 WEQ 适用于估算大块均质土地在较长时间尺度上的平均土壤风蚀量,而风蚀方程的广泛使用要求更广的自然条件适应性和更高的精度,于是通过使用者和研究者的不断改进,1991 年 Hagen 又研制出风蚀预测系统(WEPS)^[90]被广泛用于风蚀预测中,后来又被逐步完善开发出改进的风蚀方程(RWEQ)^[90],解释风蚀影响因子间的复杂的相互关系等。

1.4.2.5 遥感监测

遥感监测是随着航空、航天技术的发展逐步发展起来的一种多光谱、多空间分辨率的影像技术,属于新兴的“3S”技术中的遥感(Remote Sensing, RS)技术,后来在荒漠化监测中逐渐被广泛采用^[103],它克服了传统方法对小尺度对象监测的局限性,实现了对中大尺度(县及县以上单位)范围的监测,但遥感影像给出的主要是下垫面的植被状况和地表特征,并不能直接得出土壤风蚀量的数值,而且应用技术研究深度还不够,技术系统的开发还有待完善^[104]。

2 研究区基本概况

2.1 阴山北麓农牧交错带基本概况

阴山北麓农牧交错带地处我国北方农牧交错带的中段,宽度约70~80km,是整个农牧交错带中生态最为脆弱和最贫困的地区之一。该地区主要包括乌兰察布盟的四子王旗、察右中旗、察右后旗、商都县、化德县,包头市的固阳县和达茂旗,呼和浩特市武川县,锡林郭勒盟的太仆寺旗和多伦县,以及乌拉特中旗的东部,共173个乡镇,190.3万人口^[105]。经统计总面积约417.3万 hm^2 ,耕地面积150万 hm^2 ,草场面积为211万 hm^2 (1996年,内蒙古土地勘测院),东西长近500km,呈带状分布(图1)。

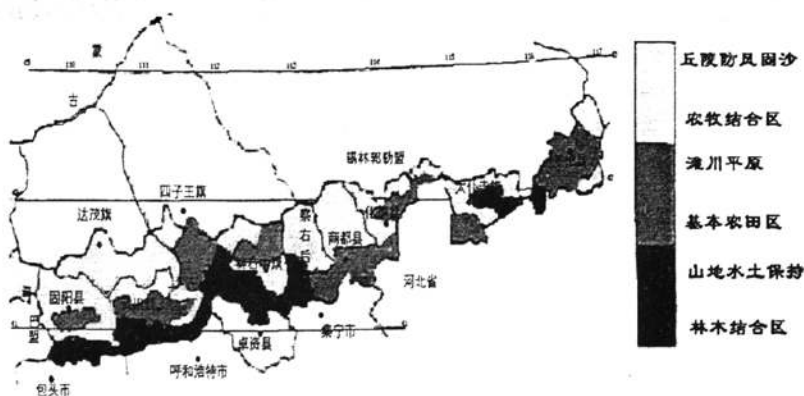


图1 阴山北麓旱农区的地理位置

Fig.1 The geographic location of dryland region in the North Foot of Yinshan Mountain

2.2 阴山北麓农牧交错带的自然条件

2.2.1 气候条件

阴山北麓地处我国中温带北部和半干旱偏旱气候区。年平均气温 $1.5\sim 3.7^{\circ}\text{C}$,大于 0°C 的天数为189~208d,积温 $2241\sim 2900^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,无霜期只有83~109天。全球温室效应导致的气候变暖在阴山北麓地区十分显著,从武川县气象站近25年的气温资料,大致每十年年平均气温升高 0.65°C 。阴山北麓最南部降雨量可达400mm,

大部分农区降雨量为 250~300mm，北部低于 200mm。阴山北麓年蒸发量在 1993~2752mm 之间，为年降水量的 5~11 倍，降水量和蒸发量极不平衡，即使在相对多雨的夏季，蒸发量仍明显超过降水量。

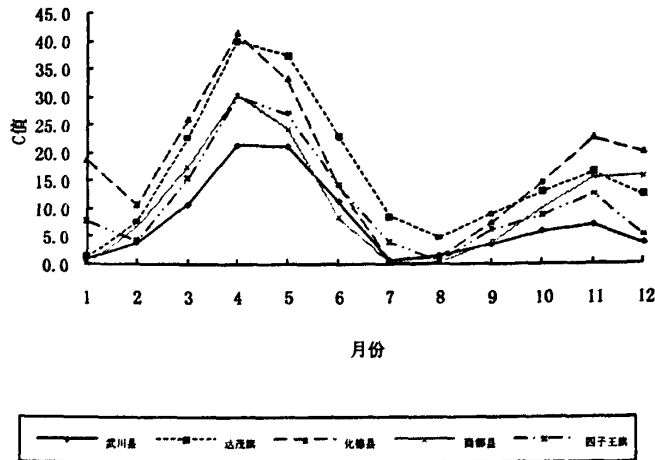


图 2 阴山北麓农牧交错带五旗县风蚀气候因子的年内变化

Fig.2 Annual variation of wind erosion climatic factors in North Foot Region of Yinshan Mountain

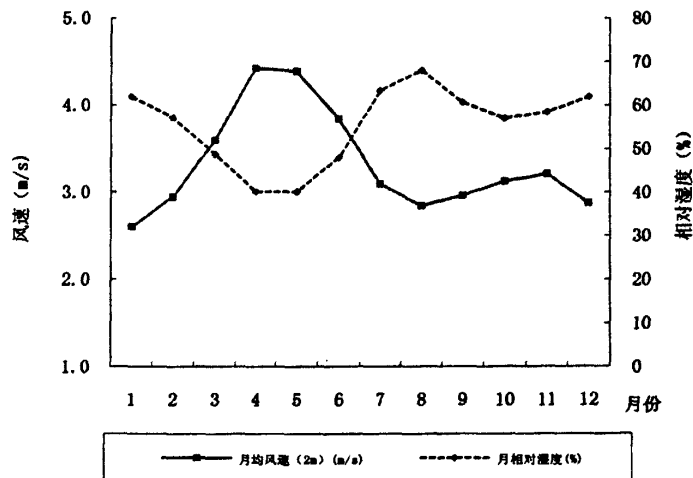


图 3 阴山北麓风速与相对湿度的年内变化

Fig.3 Annual variation of wind velocity and relative humidity in North Foot Region of Yinshan Mountain

阴山北麓的太阳辐射比较丰富，年总辐射量在 $5700 \times 10^6 \sim 6200 \times 10^6 \text{J/m}^2$ 之间，作物生长期间的日总辐射都在 $16 \times 10^6 \text{J/m}^2$ 以上，除极个别年份的特殊情况外，光照

并不是作物生产的制约因素。干旱是阴山北麓地区最常见和最严重的自然灾害,其中以春旱最为严重,平均每10年发生中度以上的干旱6.8次。土壤风蚀也是该地区主要灾害,全年8级以上大风天数平均在20~80天,从南向北增多。2002年赵举^[17]对阴山北麓的风蚀气候侵蚀力的测算认为该区域的风蚀气候因子指数平均达154.5,超过风蚀气候侵蚀力“极重”(C $\geq$ 100)的分级程度^[100]。阴山北麓风蚀气候侵蚀力季节上的分布特征基本上以秋季(9~10月)最弱,平均为16.6,依次为夏季(6~8月)18.9,冬季(11月~翌年2月)38.7,春季(3~5月)达到最强为80.3(图2)。从风蚀气候因子的季节变化来看,春季是土壤风蚀的主要季节,由此也可以认为本区土壤风蚀量基本上是春季3~5月份的风蚀量。这一结果与当地春季3~5月份干旱、风大的特点是相一致的(图3)^[17]。

2.2.2 地貌和土壤条件

阴山北麓的地貌依次从中山、低山丘陵、缓坡丘陵到波状高原。土壤分布具有地带性,属典型草原向荒漠草原过渡的土壤类型,土层厚度和土壤肥力均由南向北递减,有机质一般在1%左右,风蚀严重和马铃薯多年连作地区有机质不足1%。此外由于阴山北麓的土壤存在钙积层、砂层或干土层,使根系很难下扎,成为影响作物产量的主要障碍。

2.2.3 植被状况

阴山北麓地区的植被主要为干草原,由于受到地貌类型、降水等多方面因素的影响,植被类型呈现多样性。由于气候干燥冷凉和土层薄不利于树木生长,阴山北麓后山地区林业发展处于较低水平,森林植被类型主要有中低山森林草原植被类型和稀疏灌木草原植被类型。

2.2.4 水资源状况

阴山北麓是贫水区,地下水资源也比较贫乏。该地区几乎所有河流都是季节河,仅仅在夏季较大降水后才出现短时间的水流现象。经1994年自治区农业厅调查,阴山北麓水资源总量为33.748亿m³,可利用量为16.874亿m³。由于单位面积的水资源数量少,开发利用的难度很大。

2.2.5 生态环境评价

阴山北麓地区原为广阔的草原,随着本世纪初人口的增加,大面积草场被开垦,加上载畜量的增加,超载过牧现象严重,加速了草原生态环境的逆转。旱作农区由于种植结构的不合理和耕作措施不当,使地表的裸露程度加大,造成了土壤风蚀和土地沙化。风蚀严重地区一般开垦5~6年地表开始明显粗化,开垦30年后大多被

迫弃耕,开垦 50 年后已是遍地砾石,灌丛密布。由于农牧交错带北缘的植被极差,退耕后如不进行人工种草并加以妥善管理,还有可能加速荒漠化。

阴山北麓地区土壤障碍因素多,水土流失严重,生态环境失调,农牧业生产水平低下,水资源短缺,开发利用差。本区域水土流失的特点是风蚀与水蚀共存,复合侵蚀量非常大,水土流失面积占土地总面积的 89.8%。据有关调查结果显示,这一地区的最大风蚀模数达 $9985\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,水蚀最大模数为 $3000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[107]。风蚀和水蚀在空间上与时间上交错、叠加,结果造成表土大量流失,土地生产力下降,草场退化、沙化。

2.3 武川县概况

本研究的田间试验在阴山北麓典型旱作旗县武川县进行,是内蒙古自治区首府呼和浩特市所属的 5 个农业县之一,该县位于阴山北麓农牧交错带的中间地带,全县总土地面积约 4885 平方公里,丘陵和滩地占全县土地面积的 52%,其他为山地。该县地貌以山地和缓坡丘陵为主,土壤以栗钙土为主。武川县属中温带大陆性季风气候,南部山区年降水量可达 400mm,中部 350mm 左右,西北部只有 280mm。降水主要集中在 7~8 月份,占年降水量的 57%,并且雨量集中,强度较大,是水蚀发生的主要季节;11 月至翌年 4 月,降水量最少,仅占全年降水量的 7.2%;该区域蒸发力强,年蒸发量高达 1848.3mm,约是年降水量的 5 倍多。年平均气温 2.7°C ,无霜期 90~120 天。年平均风速 3m/s 左右,全年月平均风速达 4.5m/s,4~5 月风速最大,月均风速可达 6m/s (图 4)。大于 17m/s 的大风日数在 30 天左右,风大沙多是该地区冬春季的典型特征。

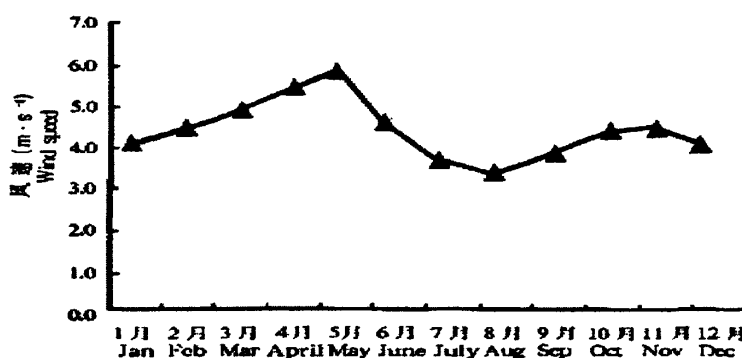


图 4 武川县的平均月风速

Fig.4 Monthly mean wind speed in Wuchuan county

近十多年,武川的风蚀荒漠化面积每年以 2.5%的比例扩大,在 1975~1987 年间曾达到 4.7%^[108]。武川县的作物布局主要有马铃薯、莜麦、草谷子、油菜、胡麻等,

由于其干旱冷凉的气候特点和大面积的沙质栗钙土分布非常适宜马铃薯的种植,目前年播种面积几乎占到作物总播种面积的 50%以上,马铃薯每年的产值已达到农民收入的 70%以上^[27, 28]。由于马铃薯播种和收获必须进行土壤耕翻,而在各种人类经济活动中,土地耕翻对风蚀及土地沙漠化的影响最为强烈,可使土壤风蚀量增加 11.9~132 倍^[11],北方旱区由于土地耕翻导致大面积的农田裸露,已成为沙尘暴的加强源区^[105, 106],因此选择武川县为研究对象进行农田风蚀沙化治理对于保护和提高耕地质量,促进农牧业协调发展就显得更加重要。

2.4 研究方法和技术路线

2.4.1 研究目标

揭示风沙严重地区作物残茬带降低近地面风速,保护相邻裸地并降低风蚀量的机理,明确以作物残茬营建生物篱网控制根茎类作物收获后所形成的裸露农田风蚀沙化的作用,建立条播作物留茬与马铃薯带状间作轮作的防沙型耕作制,解决马铃薯生产基地的风蚀沙化问题,为建立风沙地区带状间作轮作防沙型耕作制提供科学依据。

2.4.2 研究方法

在典型栗钙土风沙区武川县按照当地主栽作物,选择草谷子、莜麦、油菜等作物茬口,安排不同宽度和残茬高度的残茬带与裸露带间作试验,采用区域调查与定位试验监测相结合,野外观测、室内风洞模拟试验和移动式风洞野外原位测试相结合的方法,利用热球式微风测定仪及数据采集仪等风速测定仪器,配合表土风蚀量定量测定装置风蚀圈等,测定近地面风速和风蚀量,统计分析裸地宽度与风蚀量的相关关系,结合当地气象资料,对马铃薯与留茬作物带状间作的适宜带宽和留茬方式等技术指标进行系统总结,提出有效控制马铃薯农田风蚀沙化的残茬生物篱营建技术。

2.4.3 研究内容

(1) 野外土壤风蚀定量监测方法的研究

针对目前农田风蚀量缺乏定量监测方法的现状,采用风蚀圈测定风蚀前后土样重量变化的方法,进行单位面积土壤风蚀量定量监测,总结提出野外土壤风蚀定量监测方法——风蚀圈法。

(2) 不同梯度土壤水分、粒级与风蚀量的相关关系

针对内蒙古阴山北麓大面积种植马铃薯导致冬春季节地表裸露土壤风蚀严重的现状,按照易蚀性颗粒含量的多少,人为制造物理性砂粒含量不同的土壤,在室内风洞中通过人为设计的土壤不同水分条件及不同风速梯度的吹蚀,了解土壤临界起

动风速和风蚀模数的变化规律，客观评价由于土壤耕翻导致的土壤严重风蚀的后果及不同土壤诱发沙尘暴的潜在性，进一步说明在阴山北麓进行研究的重要意义。

(3) 残茬带与等距裸露带间作宽度与土壤风蚀量相关关系的野外风洞试验

利用野外移动式风洞在试验区自然气候条件下，通过实地监测小带宽的作物残茬和裸地间隔分布后的土壤风蚀模数，了解风蚀模数随带宽的变化规律，为进一步进行田间试验提供依据。

(4) 残茬带与等距裸露带间作宽度与土壤风蚀量相关关系的大田验证试验

通过田间不同宽度带状留茬间作农田裸地中距茬不同距离处风蚀量的定量监测，结合移动式风洞的监测结果，明确作物残茬对间作裸地有防护作用及土壤风蚀量与带宽的变化规律。

(5) 残茬带与裸露带间作的不同残茬高度对土壤风蚀量的影响

利用野外移动式风洞原位测试通过对不同留茬高度的带状间作处理的风蚀模数监测，了解作物残茬高度对带状留茬间作农田的土壤风蚀量影响，以此为依据指导生产作业。

(6) 不同作物留茬带减轻相邻裸地风蚀量的作用和机理

通过试验及前人的研究，总结提出不同作物留茬带减轻相邻裸地风蚀量的作用和影响机理。

2.4.4 技术路线

见图 5

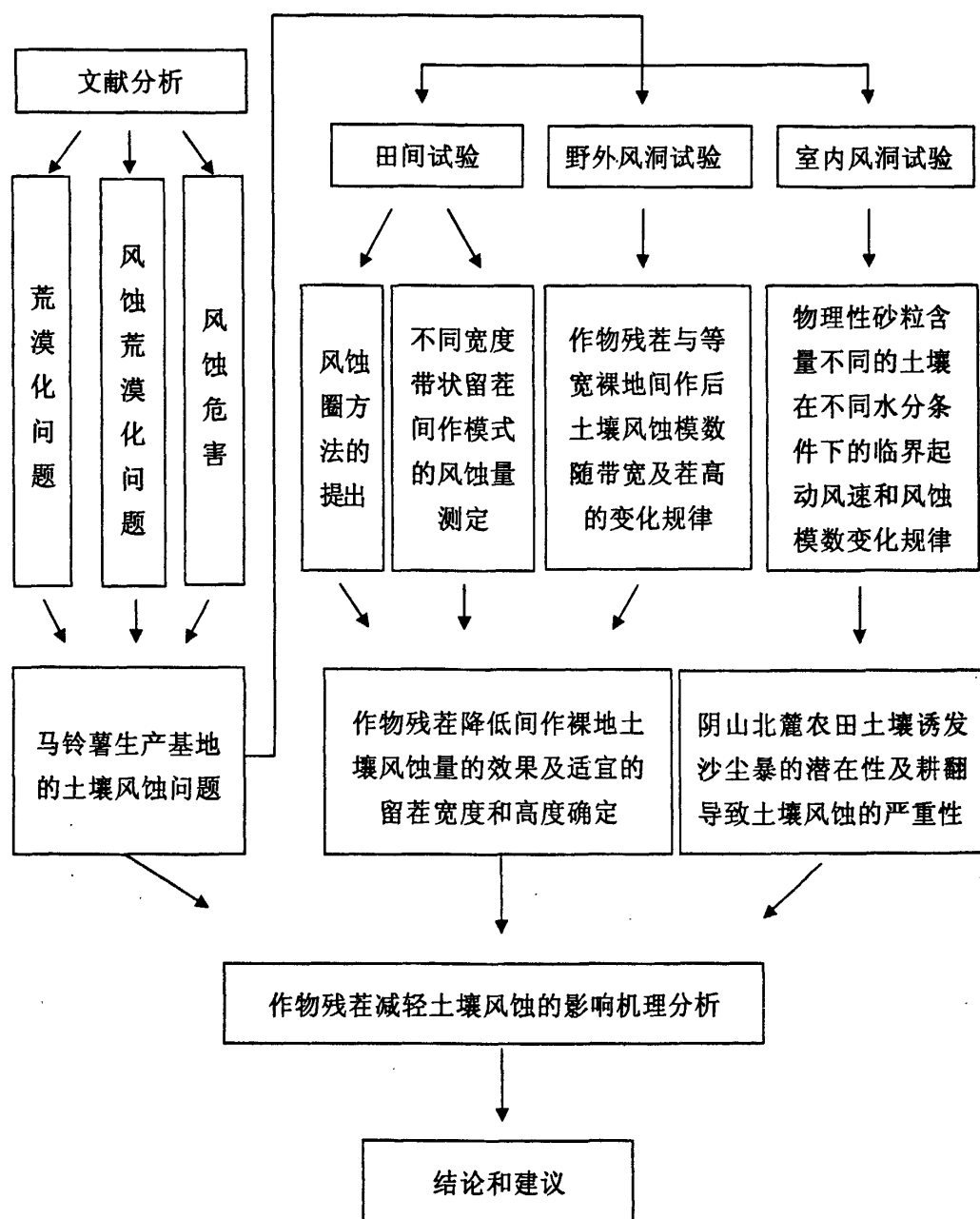


图5 技术路线图

Fig.5 Framework of the research

2.4.5 实验设备

1) 移动式风蚀风洞

试验采用内蒙古农业大学研制的移动式风蚀风洞,该风洞由过渡段,整流段(包括开孔板、蜂窝器、阻尼网和非均匀网格),收缩段和试验段组成。试验段为矩形无底截面,长7.2m,截面宽1m、高1.2m,风速范围为2~20m/s连续可调。野外测试由40kW柴油发电机提供动力(图6)。测试前已完成了风洞品质测试、测试软件的调试等工作,风洞的品质接近美国Saxton教授所设计的风洞(华盛顿州立大学Saxton教授在20世纪90年代初配合美国环境保护局的“哥伦比亚高原的风蚀空气质量计划”设计的野外风洞)。风洞试验段中的气流流场符合大气近地表层的气流特征,保证风洞实验能够真实模拟所选实验区的野外风蚀过程。

该风洞拆装、移动方便,风速控制采用无级调速,精度高,能够满足野外实验的要求。

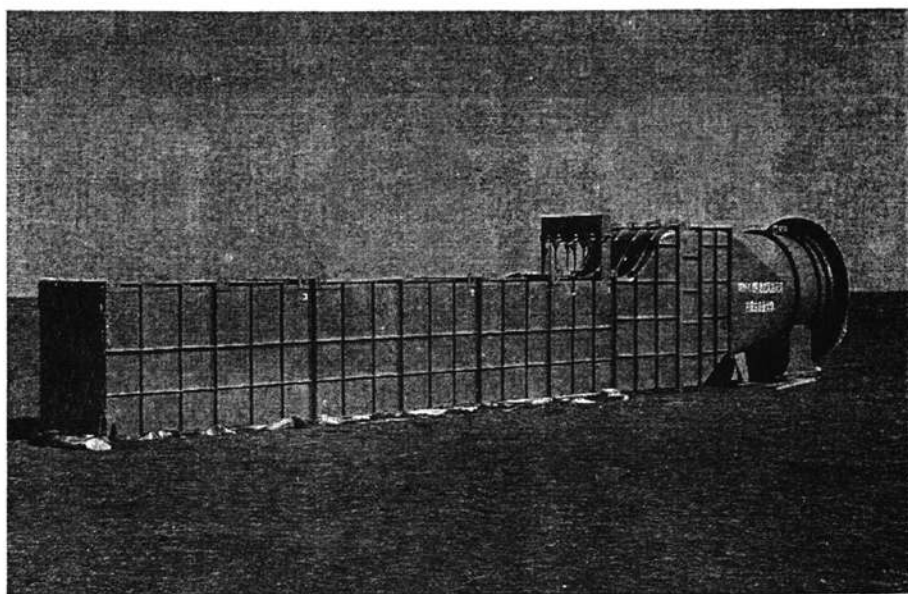


图6 OFDY-1.2 移动式风蚀风洞(内蒙古农业大学)

Fig.6 OFDY-1.2 Moveable wind erosion tunnel of Inner Mongolia Agricultural University

2) 风速测量系统

内蒙古农业大学研制的可在通用计算机上实现风洞数据采集、分析及处理的系统(图7),该系统是根据现代测试技术理论和虚拟仪器思想,在配置风洞空气动力学特性测试硬件系统的基础上,利用LABVIEW平台开发而成,它能完成对风洞流场气流品质(气流稳定性、速度均匀性、轴向静压梯度和紊流度等)的实时检测和野外实验数据的采集、分析。

3) 风速廓线仪

内蒙古农业大学自行设计制造的风速廓线仪为细长体结构，由皮托管、支架和保护箱体组成，用来测试近地表风速梯度。风速廓线仪由8套皮托管风速测试装置组成，在距地面高度上按对数坐标分布且具有一定的间距，保护箱迎风面设计成楔形结构（图8、9）。测点位置距地面高度分别为13mm、25mm、50mm、100mm、200mm、398mm、600 mm 和 795mm，测试时风速廓线仪的8个皮托管均配以微压差变送器进行同步风速采集。在使用前每支皮托管都经标准皮托管标定。

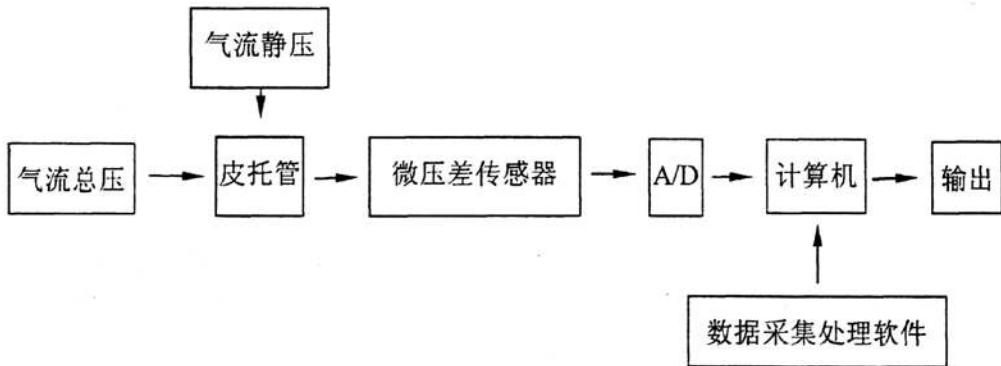


图 7 测试系统框图

Fig.7 Block diagram of measuring system

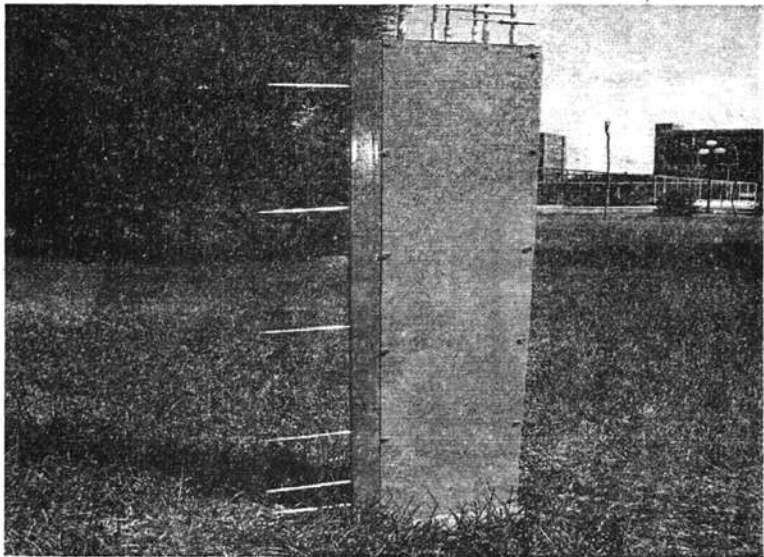


图 8 风速廓线仪外形图

Fig.8 The appearance of wind profiler

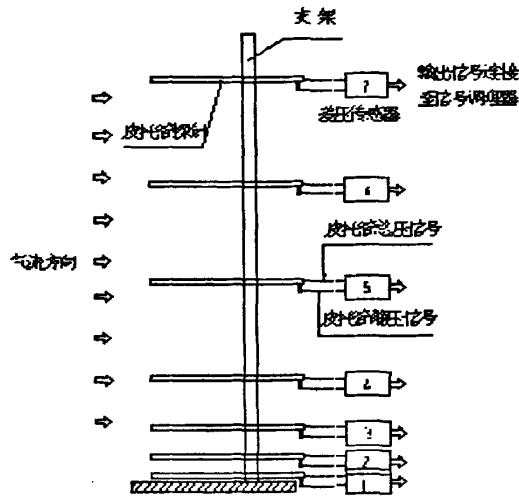


图 9 风蚀廓线仪示意图

Fig.9 Sketch map of wind profiler

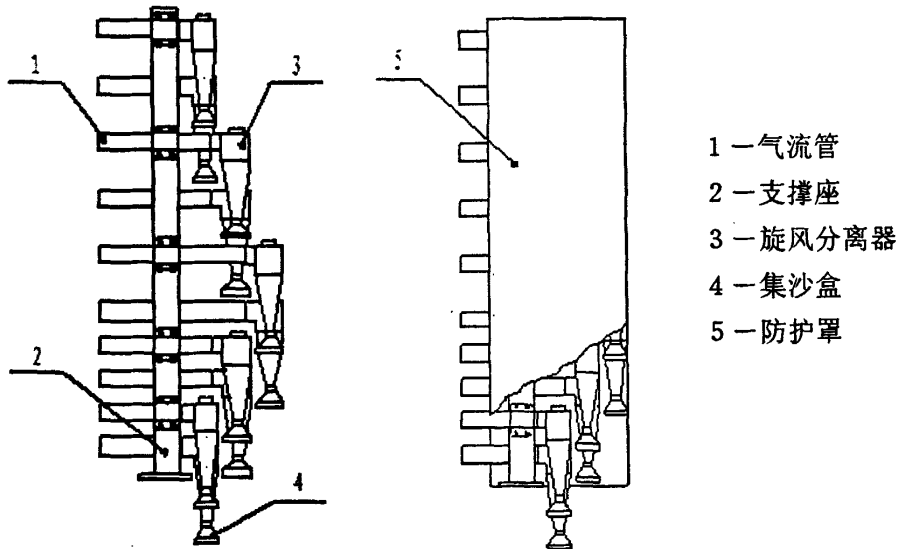


图 10 旋风分离式集沙仪示意图

Fig.10 Sketch map of cycling type sand sampler

4) 旋风式集沙仪

实验所使用集沙仪的是由内蒙古农业大学自行研制的旋风分离式集沙仪，该集沙仪由气流管、旋风分离器、防护罩、集沙盒和支撑座等组成。其中旋风分离器是集沙仪的主要部件，防护罩主要起到导向气流的作用，所以迎风面作成 45° 夹角形

状,以减少集沙仪本身对风洞气流流场的影响。集沙盒是活动的部件,可以将每个集沙盒取下来,称量盒内通过旋风分离器分离好的风蚀物。每个集沙盒的最大集沙量为 40g。支撑座主要固定气流管及与其相连的分离器和集沙盒。该集沙仪高 840mm,沿高度方向分布 10 个气流管,通过气流管可收集到垂直方向上 10 个高度(20mm、60mm、120mm、180mm、240mm、300mm、400mm、500mm、600mm、700mm)的沙蚀量。气流管宽为 10mm,高为 30mm,见图 10。

5) 风蚀圈

内蒙古农牧业科学院自行设计的野外土壤风蚀量定量监测装置风蚀圈,是由风蚀盘演变改进的一个由三个组件嵌套而成的圆形装置(图 11),其一是外径 25cm、厚 0.5cm 的硬质 PVC 给水管材通过车床加工后高 2cm 的封闭圈,另一个是同样高度的敞口 PVC 圈,第三种组件是一块儿可以透水、通气的尼龙布。通过测定风蚀前后土样重量的变化来实现土壤风蚀量测定,遵循的是差减法原理,由于其操作简单、容易携带,可长期放置在野外,实现土壤风蚀的定量观测。

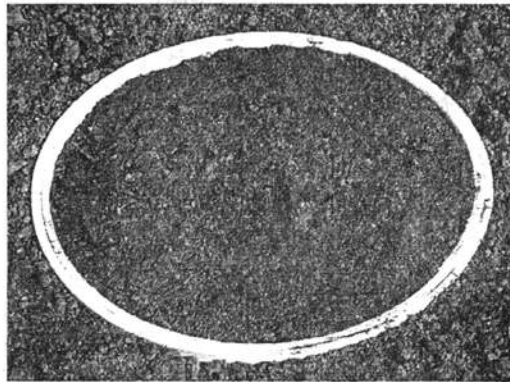


图 11 土壤中的风蚀圈

Fig.11 Wind erosion ring assembled in the field

6) 陷阱诱捕桶

本试验采用在地面埋没容器的“陷阱诱捕”法收集与测定土壤风积量。参考张华^[110]的方法:选用上口直径为 23cm、下口直径为 18cm、高 23.5cm 的塑料桶(图 12)作为土壤风蚀物的收集容器,埋置前按桶的直径和高度挖出一个基本能放入该桶的小坑,然后将塑料桶埋在样地中(桶的上口边沿与地面平齐),在观测期结束后,用软毛刷小心地将沉积在容器内的土壤风蚀物收集于特制的牛皮纸袋内,在 1/1000g 感量的电子天平称上称重,计算其风积量。

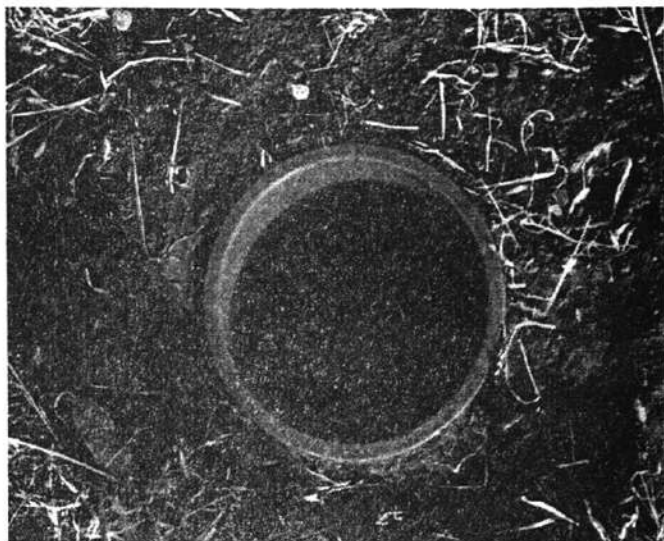


图 12 田间埋置的陷阱诱捕桶

Fig.12 Bucket traps in the field

2.4.6 测定指标

(1) 土壤含水量:

土壤含水量采用烘干法测定^[110], 用感量为 0.01g 的电子天平称重, 三次重复。

(2) 土壤基础养分:

试验前土壤基础养分采用 ASI 法测定^[111]。

(3) 土壤机械组成:

试验土样机械组成采用比重计法测定^[112]。

(4) 土壤风蚀模数:

土壤风蚀模数在 OFDY-1.2 移动式风洞中采用旋风式集沙仪收集垂直方向上 10 个不同高度的风蚀物沙蚀量, 野外试验用感量为 1/1000 的电子天平, 室内试验用感量为 1/10000 的电子天平对不同高度沙蚀量进行称重, 然后利用 MATLAB 7.4.0

(R2007) 软件采用三次样条插值拟合法对不同风速吹蚀 10 分钟后集沙仪 10 个高度沙蚀量进行积分, 通过换算计算出测试区的风蚀模数, 单位为 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 。

(5) 土壤风积量:

土壤风积量采用“陷阱诱捕桶”对冬春季节整个风蚀段不同地表土壤颗粒的沉积情况进行实测, 三次重复, 通过换算计算出风积量, 单位为 t/hm^2 。

(6) 土壤风蚀量:

土壤风蚀量采用“风蚀圈”对冬春季节整个风蚀段不同地表土壤颗粒的风蚀情况进行实测, 三次重复, 通过换算计算出风蚀量, 单位为 t/hm^2 。

2.4.7 数据处理方法

(1) 三次样条插值法:

为计算土壤风蚀模数,需要对旋风式集沙仪不同高度收集的沙蚀量数据进行数值拟合。高次多项式插值波动幅度大,系数敏感,系统稳定性差。低次分段插值光滑性差,与问题的物理意义不符。为克服这些缺点,本文采用三次样条插值(cubic spline interpolation)方法来进行计算。杨虎山^[113]研究明确三次样条插值函数适用于水利和风洞实验等许多特定专业和特定研究方向。三次样条插值函数是由经过所有数据点的分段三次多项式构成的。它在每个数据区间内都是三次函数,并且除了第一个数据点和最后一个数据点外,在其他数据点上的一次、二次导数都相等。为了三次样条插值函数的唯一性,还需要两个约束条件。考虑到较低和较高位置土壤颗粒迁移的变化较缓慢,本文采用非扭结(not-a-knot)边界条件,也就是强制使第一个点的三次导数和第二点的三次导数一样,最后一个点的三次导数和倒数第一个点一样。

在本文中,采用 Matlab 的 csapi 函数计算三次样条插值函数 pp 形式(ppform),用 fnint 函数计算风蚀量的数值积分,用 fnval 计算指定点的具体值。语句序列为:

```
cs=csapi(x,y);    intl=fnint(cs);    inty(i)=fnval(intl,x0)/width;  
fnplt(cs);
```

其中 x 和 y 表示高程和相应收集的土壤量, x0 表示积分上限, width 表示风洞宽度, 函数 fnplt 绘制三次样条插值函数的图形。

(2) 本文用 SPSS 14.0 和 EXCEL 2007 软件对数据进行相关的一元回归模拟分析,二元和多元回归方程用 SAS 9.0 软件进行模拟分析。

3 野外土壤风蚀定量观测方法的提出

风蚀量是判断土壤流失和荒漠化的重要指标^[65],也是进行土壤分级分类,制定荒漠化防治规划和确定防风蚀措施的重要依据之一,在风蚀量的估算方面,由于缺乏合适的观测仪器^[61],过去使用的各种方法所取得的结果相差悬殊,因而只能作为评估区域风蚀相对强弱趋势的参考。由于不同区域适用或应用的方法不同,所测定的数据不能在同一个水平上相互比较,因此不能用来统一进行风蚀强度分级分类和制定防风蚀措施,急需研究新的方法加以解决。本文在多年风蚀研究的基础上,对内蒙古阴山北麓旱作农田风蚀进行了长期连续监测,研究提出一种定量测定土壤风蚀量的简易装置——风蚀圈,认为风蚀圈法是现阶段进行野外观测比较实用的方法,可用于测定单位面积的土壤风蚀量,为统一制定风蚀强度分区分级和确定防治风蚀措施提供依据。

3.1 风蚀圈的制作与应用

3.1.1 风蚀圈的制作目的

目前各风蚀区采用的野外土壤风蚀量观测方法^[85-91]不同,所测定的数据只能反应某一地区的风蚀趋势,还缺乏一种能比较各风蚀区风蚀强度大小的监测装置和方法,因此不能用来统一进行风蚀强度分级分类和制定防风蚀措施。为此研究提出了定量测定土壤风蚀量的新装置——风蚀圈,由于其操作简单、容易携带,可长期放置在野外,实现土壤风蚀的定量观测;而且由于镶嵌在土壤中,表面基本与地面相持平,可以防止局部微地形对风蚀过程的影响,底部尼龙布透水通气性好,可以保持风蚀圈内土样与周围土壤状态的一致性,因而观测数据可靠、准确。

3.1.2 风蚀圈的结构与制作方法

风蚀圈由三个组件嵌套而成(图 13),其一是外径 25cm、厚 0.5cm 的硬质 PVC 给水管材通过车床加工后高 2cm 的封闭圈,另一个是同样高度的敞口 PVC 圈,第三种组件是一块儿可以透水、通气的尼龙布。加工时首先根据封闭 PVC 圈的内径计算出敞口 PVC 圈的周长,将两个封闭 PVC 圈的其中之一用锯条断开,根据计算出的周长去掉多于部分,用铁锉尽量使断面及两 PVC 圈的上下边缘光滑以便于封闭 PVC 圈与敞口 PVC 圈的嵌合(图 14);然后在封闭 PVC 圈的内表面和敞口 PVC 圈的外表面均匀涂上 PVC 粘合胶;再将透水通气性良好的尼龙布平平地放在封闭 PVC 圈上,将敞口 PVC 圈紧紧地从尼龙布上面向下挤压嵌在封闭 PVC 圈中大约 90%的位置(图 15);最后用刻刀去掉两 PVC 圈间露出外面多余的尼龙布(图 16);最后将三件套紧紧的嵌在一起,并保证上边延的平整光滑,完成风蚀圈的制作(图 17)。

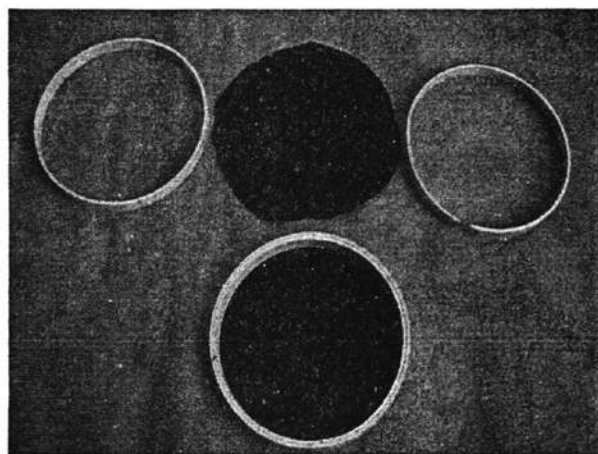


图 13 风蚀圈的结构示意

Fig.13 Schematic diagram of wind erosion ring



图 14 敞口 PVC 圈的制作及磨光

Fig.14 Process and burnish the PVC cycle



图 15 三件套的初步嵌合

Fig.15 Combination of the three parts



图 16 去除多余尼龙布

Fig.16 Remove the superfluous nylon cloth

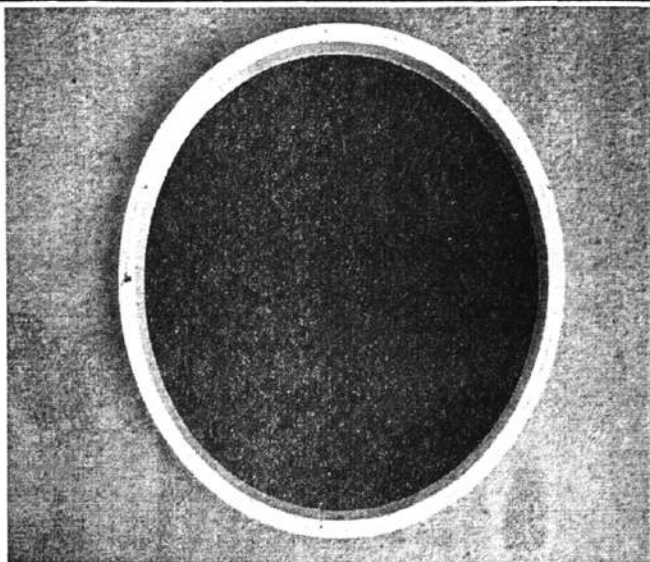


图 17 制作好的风蚀圈

Fig.17 Finished wind erosion ring

3.2 风蚀圈的测定原理

风蚀圈法是通过测定风蚀前后土样重量的变化来实现土壤风蚀量测定，遵循的是差减法原理：秋季土壤风蚀发生之前将含水量为 X_1 的适量农田土壤称重 W_1 后放置在风蚀圈中，首先使该风蚀圈中的土壤与大田自然土壤形成一个上下贯通的整体，翌年春季基本不再发生风蚀后将风蚀圈中土壤取回实验室测定其水分含量 X_2 和土壤湿重 W_2 ，将放置前后两次土壤干重的差值定为整个风蚀季节的风蚀量 (W)，以此风蚀量除以土壤风蚀面面积 (S) 即为该测定区域单位面积的风蚀量 (W_r)，其关系式表达如下：

$$W = W_1 \times (1 - X_1) - W_2 \times (1 - X_2) \quad (1)$$

$$S = (d/2)^2 \times \pi \quad (2)$$

$$W_r = W / (S \times 10^{-4}) \quad (3)$$

式中： W_r ——单位面积的风蚀量， kg/m^2

W ——整个风蚀段的风蚀量， kg

W_1 ——土壤放置前湿土重， kg

W_2 ——风蚀测定结束后土壤湿土重， kg

X_1 ——土壤放置时含水量，%

X_2 ——风蚀测定结束后土壤含水量，%

S ——土壤风蚀面表面积， cm^2

d ——风蚀圈的内径， cm

π ——圆周率

3.3 风蚀圈及圈内土壤具体放置步骤

第一步：测定放置区域耕层土壤容重 $d_{\#}$ (g/cm^3)；

第二步：估算每个风蚀圈内放置土壤重量，约为 W_1 ：

$$W_1 = [(d/2)^2 \times \pi \times 2 \times d_{\#}] / 1000 \quad (4)$$

第三步：按照预放置风蚀圈数目所估算的土壤重（一般多估 20%）将测定区域耕层土壤取回实验室混合均匀后，用铝盒多点取土测定土壤放置时的含水率 X_1 ；

第四步：根据第二步中估算的土壤重量值缩略为一个易称量的值 W_1 ，用天平称取后放置在事先准备好的塑料袋中，放多少风蚀圈则称多少袋，一般为防止放置时塑料袋损坏或其他原因导致袋中土壤跑出袋外要多称几袋备用，放置时将袋中土壤全部倒入风蚀圈，则风蚀圈中干土重为 $W_1 \times (1 - X_1)$ ；

第五步：在测定区域按照风蚀圈大小挖一个深 2cm，直径 25cm 小坑，坑中取出的土壤尽量均匀撒在风蚀圈下风向周围，尤其不能在风蚀圈上风向位置堆积造成风障，然后将风蚀圈放入，为保证测定值的准确性和代表性，尽量使周围土壤与风蚀圈齐平，然后将塑料袋中土壤放入，通过按压土壤使圈中土壤与圈持平，边沿上土壤通过毛刷刷入圈内，完成风蚀圈的放置。

第六步：风蚀测定结束后，小心将风蚀圈从土中取出，用毛刷刷去风蚀圈外围和布面下部附着的土壤，将圈中土壤倒入事先准备好的与第四步同样大小的塑料袋中，拿回实验室充分混匀后称重 W_2 ，然后用铝盒取适量土测定风蚀后土壤含水率 X_2 ，则风蚀后干土重为 $W_2 \times (1 - X_2)$ ，那么测定时段的风蚀圈中风蚀量为 W ，计算方法参考公式 (1)，然后根据需要进行折算。

3.4 小结

风蚀圈法的研究提出克服了目前野外风蚀观测法的局限性，由于其操作简单、容易携带，可长期放置在野外实现土壤风蚀的定量观测。而且由于风蚀圈镶嵌在土壤中，表面基本与地面相持平，可以防止局部微地形对风蚀过程的影响，底部尼龙布透水通气性好，可以保持风蚀圈内土样与周围土壤状态的一致性，可以实现风沙区风蚀季节的定量连续监测，而且由于本观测方法应用环境条件较宽，可以为统一制定风蚀强度分区分级和防治措施提供依据。但由于风蚀圈法还处于起步研究阶段，风蚀圈的标准化制作和实际应用的技术规程还需要进一步研究总结。

4 土壤湿度及粒级对风蚀模数的影响研究

土壤风蚀过程是可蚀性颗粒的损失和原地表不可蚀性颗粒的聚集过程。因而风蚀量之多寡必然会反映在风蚀地表可蚀性颗粒和不可蚀性颗粒的相对含量变化上。Chepil (1965) 在研究美国西部大平原地区的土壤风蚀时，将粒径大于 0.84mm 的颗粒称为不可蚀颗粒。中国科学院兰州沙漠研究所北京风沙课题组在研究北京平原的

风沙问题时, 曾将大于 0.80mm 的沙粒定为不可蚀颗粒^[114]。董治宝^[24]等根据野外实地观测以及灌丛沙堆的粒度分析, 将粒径大于 1.00mm 的颗粒定为内蒙古阴山北麓地区的不可蚀颗粒。就物理性质而言, 粒径 < 0.01mm 的颗粒, 才具有明显的吸湿性、粘结性和可塑性, 因此将粒径小于 1.00mm, 大于 0.01mm 的颗粒看做内蒙古阴山北麓地区的可蚀性颗粒不无道理, 而这个粒径范围也正是卡庆斯基描述的物理性砂粒的标准, 那么现实中土壤风蚀是不是会因为土壤中物理性砂粒含量不同发生有规律的变化呢, 值得进一步研究。土壤水分含量是影响土壤风蚀的又一个重要因子, 当土壤颗粒表面附着薄膜水时, 水膜的静电作用和表面张力使颗粒间的黏着力增大, 具有强度抗御风蚀能力。土壤水分含量不同, 产生的土壤风蚀强度不同, 而且土壤风蚀量在某种程度上可能与土壤机械组成和土壤水分建立起关系。因此带着这种疑问, 本文在室内风洞中进行了物理性砂粒含量不同的土壤在不同水分条件下的风蚀模数和起沙风速测定, 进一步对内蒙古阴山北麓旱作农田耕翻土壤隐藏的潜在风蚀问题进行分析, 对客观评价沙尘暴的发生源具有重要意义。

4.1 研究内容及方法

实验在内蒙古农业大学研制的 OFDY-1.2 移动式风蚀风洞中进行, 实验前选择物理性砂粒含量基本为 20% 和 80% 的两种土壤作为基础土样进行物理性砂粒含量分别为 20%、30%、40%、50%、60%、70% 和 80% 的 7 种土壤的人为制造。物理性砂粒含量为 20% 的土壤取自内蒙古武川县上秃亥乡下勿兰村附近的抢盘河河床新垦地, 物理性砂粒含量为 80% 的土壤取自内蒙古武川县东红胜乡双玉城村的风积土。不同土壤按水分梯度设计了土壤含水量分别为 0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 和 10% 的不同处理, 物理性砂粒含量较低的几个土壤由于无法实现高含水量配制, 水分梯度略少。实验时实测土壤含水量后, 将土壤放置在一个装土体积为 50cm×40cm×5cm 长方体木箱中, 土壤样品表面与木箱齐平, 然后将装土木箱放置在风洞试验段土壤槽中, 使土壤表面与风洞底部齐平, 旋风式集沙仪放置在土壤箱后风洞轴线距出口 1.2m 处。在 5m/s、6m/s、9m/s、12m/s、15m/s 和 18m/s 的风速下吹蚀 10min, 采用感量为万分之一的电子天平测定旋风式集沙仪不同高度的风蚀物收集量。孙悦超^[115]根据赵永来等^[116]将不同风速吹蚀下旋风式集沙仪收集的风蚀物总质量 q 通过公式 $E=q/(S \cdot t \cdot \delta)$ 计算不同地表的风蚀模数, 式中: E 指风蚀模数, 其单位为 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$; q 指旋风式集沙仪收集的风蚀物总质量, 单位为 g ; S 指风洞内被吹蚀的土壤面积, 单位为 m^2 ; t 指吹蚀时间, 单位为 min ; δ 为旋风式集沙仪标定系数。本实验把旋风式集沙仪不同高度风蚀物的收集量 q 借助 MATLAB7.4.0(R2007a) 软件采用三次样条插值拟合后求的风洞内被吹蚀的土壤单位面积单位时间的土壤风蚀量, 也将其称为风蚀模数, 其单位为 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$, 然后利用 SPSS14.0、EXCEL2007、SAS 9.0 统计软件对所得数据进行曲线拟合。

4.2 土壤样品基本情况

按照土壤物理性砂粒的含量不同对土壤进行人工配制后，采用比重计法对各土壤样品进行粒径测定后结果见表 4。样品干土地表状况见图 18、19、20、21、22、23、24。

表 4 不同土壤样品粒径测定
Table 4 Measurement of the soil particle size

土样	1-0.01	>2	2-1	1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005
1	22.84	48.81	25.24	13.21	6.51	3.11	0.52	2.60
2	31.31	41.26	21.47	11.67	11.44	8.20	0.64	5.32
3	43.45	19.64	22.68	16.48	15.44	11.54	2.86	11.37
4	52.63	18.61	17.21	12.03	22.63	17.97	1.23	10.32
5	58.80	12.28	12.33	9.14	30.07	19.60	3.02	13.57
6	67.96	9.77	6.95	5.28	36.36	26.32	3.33	11.99
7	77.94	0.00	0.00	0.00	47.85	30.09	4.19	17.87

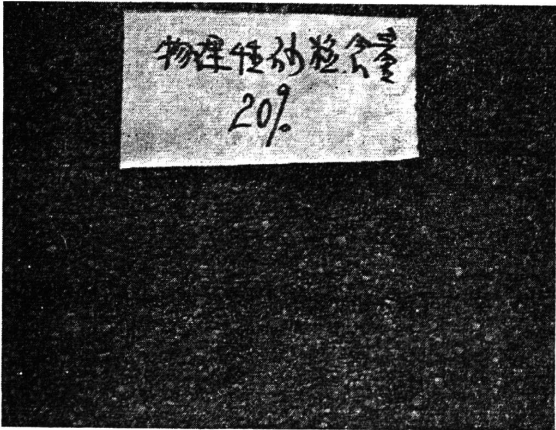


图 18 物理性砂粒含量为 22.84%土样
Fig.18 Soil sample including 22.84% physical sand

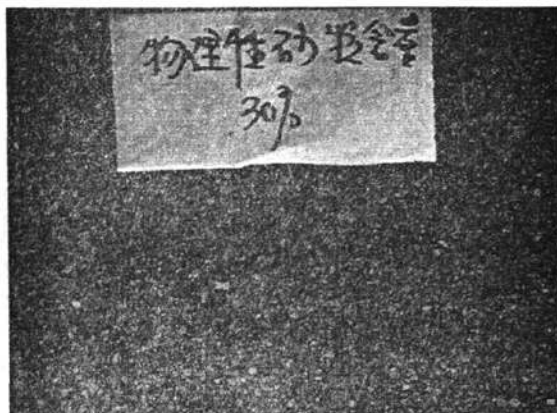


图 19 物理性砂粒含量为 31.31% 土样

Fig.19 Soil sample including 31.31 % physical sand

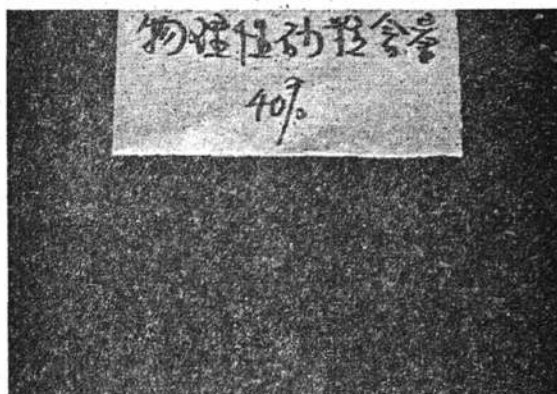


图 20 物理性砂粒含量为 43.45% 土样

Fig.20 Soil sample including 43.45% physical sand

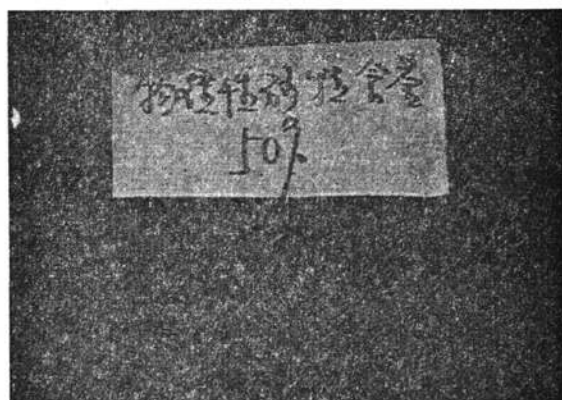


图 21 物理性砂粒含量为 52.63% 土样

Fig.21 Soil sample including 52.63% physical sand

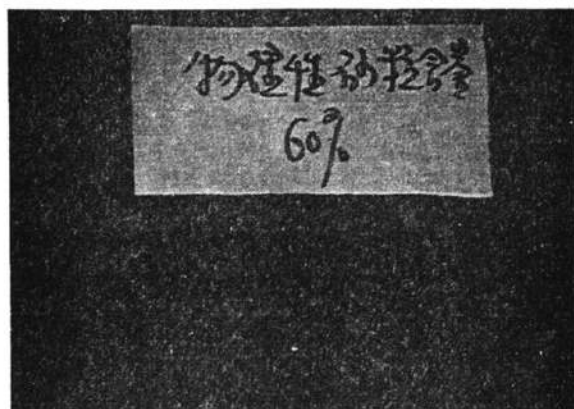


图 22 物理性砂粒含量为 58.80% 土样

Fig.22 Soil sample including 58.80% physical sand

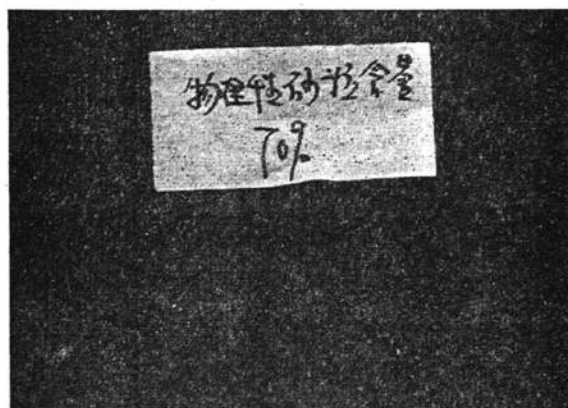


图 23 物理性砂粒含量为 67.96% 土样

Fig.23 Soil sample including 67.96 % physical sand

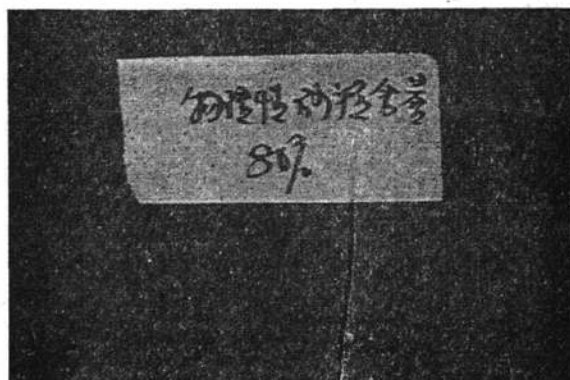


图 24 物理性砂粒含量为 77.94 % 土样

Fig.24 Soil sample including 77.94% physical sand

4.3 不同土壤的风蚀模数测定结果与分析

4.3.1 不同风速风蚀物收集量空间动态变化

土壤风蚀过程中风沙活动属于近地面运动，张小由^[117]研究表明，1m 高程内有 79.3%的沙量集中在 0~10cm 范围内。何文清^[15]对武川县旱作农田土壤（扰动土）空间不同高度的集沙动态观测后认为 0~10cm 高度范围内的集沙量占到总集沙量的 80%左右，而且土壤输沙量随着风速增大而增大，集沙量在空间上的梯度变化表现为单峰曲线，在 0~4cm 高度范围内，随着高度的增加集沙量增加，当高度大于 4cm 以后，随着集沙仪高度的增加，集沙量呈现减少的趋势。

与何文清研究结果略有差异，本文在室内风洞经过对物理性砂粒含量分别为 20%、30%、40%、50%、60%、70%和 80%共 7 种土壤，累计 59 个水分条件和 5m/s、6m/s、9m/s、12m/s、15m/s 和 18m/s 共 6 个风速梯度共 2478 次历时 10min 的吹蚀，根据旋风式集沙仪不同高度风蚀物的收集结果，发现风蚀物收集量随高度的增加而减少。物理性砂粒含量低于 40%时（尤其 20%的土壤）在各种水分条件下集沙仪不同高度风蚀物收集量均很小，几乎不发生土壤风蚀，风蚀物收集量在空间上既符合指数变化函数关系又符合幂函数关系。在物理性砂粒含量高于 40%后，风蚀物收集量在空间上呈现幂函数曲线变化规律。

表 5 风蚀物收集量在空间上的动态变化规律

Table 5 Spatial variation of the wind erosion sediment

风速m/s	拟合函数关系式	R ²
5	$Y=0.004e^{-0.064x}$	0.9701**
6	$Y=0.0004e^{-0.047x}$	0.9465**
9	$Y=0.0005e^{-0.047x}$	0.9620**
12	$Y=0.0039X^{-0.939}$	0.9386**
15	$Y=0.0103X^{-1.112}$	0.9402**
18	$Y=0.0359X^{-1.382}$	0.9186*

经过对不同土壤样品不同水分条件 5m/s、6m/s、9m/s、12m/s、15m/s 和 18m/s 风速旋风式集沙仪不同高度风蚀物收集量利用 SPSS14.0 软件回归后发现不同风速吹蚀下风蚀物空间分布趋势如图 25、26、27、28、29、30 所示，各拟合曲线对应的拟合函数关系式列于表 5，经分析认为 9 m/s 风速基本上是空间动态发生变化的临

界点，风速低于或等于此临界风速，即低风速条件下风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律，风速大于 9m/s 后，风蚀物收集量与高度符合幂函数曲线变化规律。分析其原因，可能与土壤颗粒运动形式密切相关，低风速吹蚀下土壤颗粒主要以蠕动和悬浮两种形式运动，虽然风蚀物大部分集中在近地表，但由于风速较小，未能使土壤颗粒发生跃迁，因此 2cm 集沙盒收集量相对较少，总体上风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律；当风速大于 9m/s 后，土壤颗粒除了以蠕动和悬浮两种形式运动外，增加了跃迁方式，而发生跃迁的基本为比重较大的土壤颗粒，10cm 以下高度集沙盒收集到的风蚀物重量较大，风蚀物收集量与高度呈现幂函数曲线变化规律。

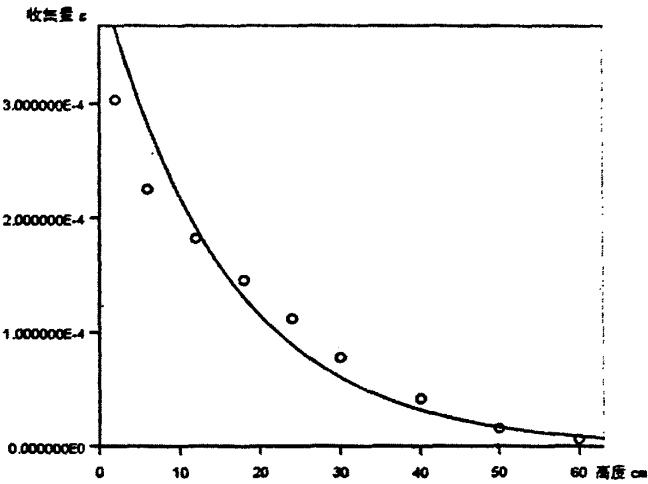


图 25 5m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.25 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment

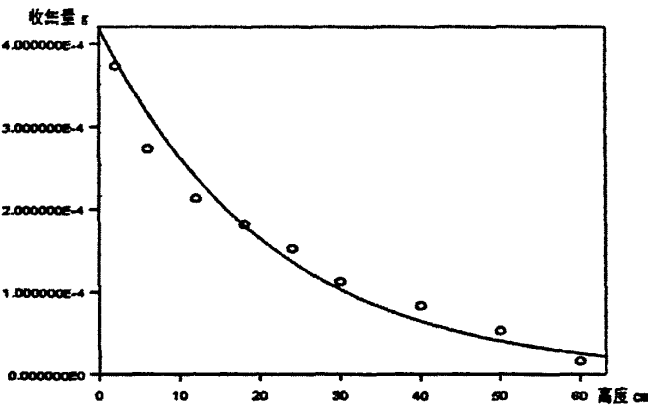


图 26 6m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.26 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment under 6m/s wind speed

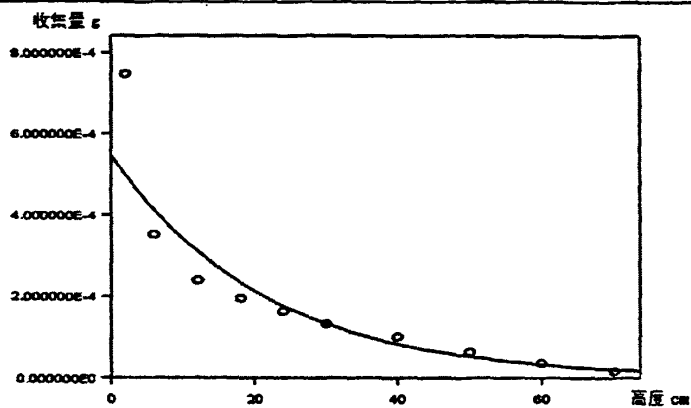


图 27 9m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.27 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment under 9m/s wind speed

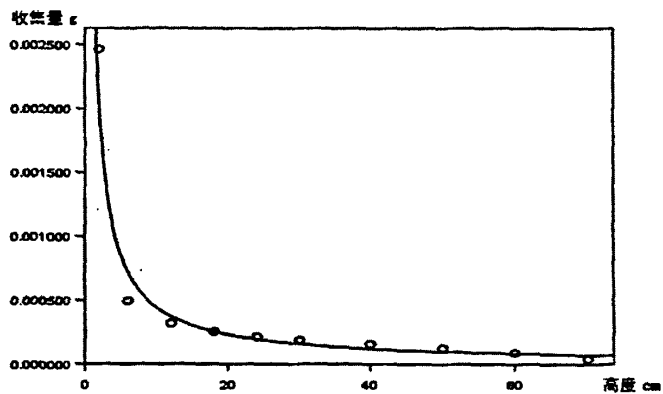


图 28 12m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.28 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment under 12m/s wind speed

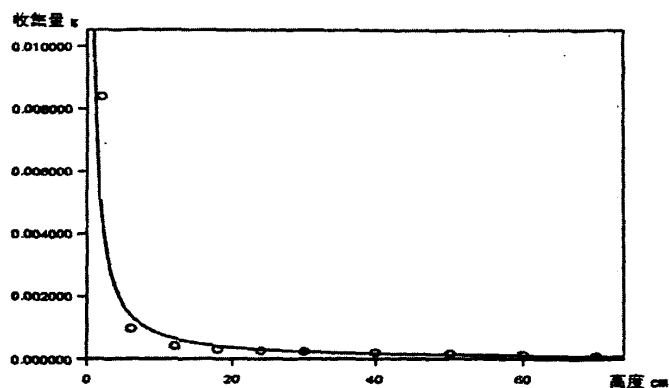


图 29 15m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.29 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment under 15m/s wind speed

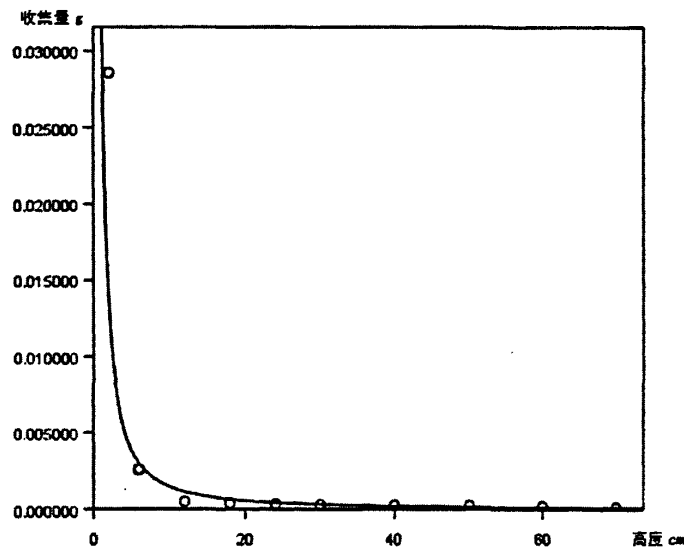


图 30 18m/s 风速风蚀物空间动态变化

Fig.30 Spatial dynamic variation of wind erosion sediment under 18m/s wind speed

旋风式集沙仪不同高度的总输沙量随风速的增加而增大，二者之间符合指数曲线变化关系。输沙量与水分呈负相关关系，水分增大输沙量降低。

4.3.2 不同水分条件下土壤的临界起动风速变化

土壤颗粒要想从气流中获取运动的能量，必须在一定风力条件下才能得到，沙粒才开始运动。当风速达到某一临界值以后，地表沙粒开始脱离静止状态而转入运动状态，这种使沙粒开始移动的风速称为起动风速，也叫临界风速。起动风速是确定风沙运动发生与否及其强度的重要判据^[118]。通过对7种土壤的临界起动风速测定，得到各土壤不同水分条件下的临界起动风速，结果见文章最后附表1。

土壤水分含量相同时，土壤物理性砂粒含量越高，临界起动风速越小。因此，7种土样中，按物理性砂粒含量的多少，临界起动风速大小顺序依次为：22.84%>31.31%>43.45%>52.63%>58.80%>67.96%>77.94%，对于物理性砂粒含量为22.84%和31.31%这两种土壤，由于大于2mm的颗粒所占的比例超过40%，必须在强大的风力作用下才能使其发生微弱的变化，因此几乎不会有风蚀现象发生，哪怕是绝干的水分条件，临界起动风速都很大，也象附表1所示的那样，临界起动风速为12.87m/s和9.79m/s，实际上这种水分条件在极易发生土壤风蚀的季节根本不存在。当物理性砂粒含量大于40%后，大于2mm的颗粒所占的比例低于20%，土壤临界起动风速降低，尤其当土壤含水量低于3%时，土壤临界起动风速均低于8m/s，象物理性砂粒含量为67.96%和77.94%这两种土样临界起动风速低于6m/s，极易发生风蚀。

霍尔卡瓦、霍塔指出,沙粒起动风速与含水量的关系为线性关系^[116]。从附表 1 结果看,不论那一种土壤,土壤含水量增加后,临界起动风速都增大,通过此次实验可知临界起动风速与土壤含水量也呈线性相关,其拟合函数式见表 6。

表 6 不同土壤临界起动风速与土壤含水量的函数式

Table 6 Functional relationship between soil critical threshold wind velocity and soil moisture

土样	物理性砂粒含量%	拟合函数关系式	R ²
1	22.84	$Y=0.6877 x+13.036$	0.9778
2	31.31	$Y=1.1591 x+8.9616$	0.9182
3	43.45	$Y=1.5018 x+3.976$	0.9045
4	52.63	$Y=1.3146 x+3.5852$	0.9568
5	58.80	$Y=1.3288x+2.3691$	0.9775
6	67.96	$Y=1.1622x+2.6375$	0.9791
7	77.94	$Y=1.3382x+1.6871$	0.9456

利用 SAS 9.0 对附表 1 数据尝试以物理性砂粒含量和土壤含水量为自变量,以土壤临界起动风速为因变量的二元回归,得到临界起动风速随物理性砂粒含量和土壤含水量变化的二元拟合关系式:

$$Y= 22.316960-0.515537X_1+0.604416X_2+0.003474X_1^2+0.000175X_2X_1+0.062116X_2^2$$

$$R^2=0.9603 \quad (5)$$

式中: X_1 —物理性砂粒含量, %;

X_2 —土壤含水量, %;

Y —土壤临界起动风速, m/s

由检验结果知, $F=256.56$, $P<0.0001$, $R^2=0.9603$, 说明该拟合方程可以对土壤临界起动风速做出估算。

由于土壤临界起动风速是受土壤质地、土壤水分、土壤团聚体、土壤养分等多种因素综合影响,而本文仅涉及了土壤物理性砂粒和土壤水分两个因素,因此需要进一步深入研究其他因素的贡献才能对不同土壤各种条件下的临界起动风速做出准确判定。

4.3.3 不同水分条件下土壤风蚀模数变化

土壤水分含量是影响土壤风蚀的一个重要因子。当土壤颗粒表面附着薄膜水时,水膜的静电作用使颗粒间的黏着力增大,具有强度抗御风蚀能力,当水分沿土壤毛细管上升时,水的表面张力也具备很强的粘结力。实验对上述提到的 7 种物理性砂

粒含量不同的土壤经过不同水分条件和 5m/s、6m/s、9m/s、12m/s、15m/s 和 18m/s 风速的历时 10min 吹蚀，利用土壤风蚀模数对不同土壤的抗风蚀能力进行评价，结果见文章后附表 2。

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^[15, 100]。附表 2 结果表明：风速越大土壤的风蚀模数越大，二者呈显著正相关，而且风蚀模数与风速按照 $E=A \times e^{Bv}$ 的指数曲线规律进行变化，式中： E —风蚀模数， $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ ； V —风速，m/s； A 、 B 为参数。各土样不同含水量情况下风蚀模数与风速的拟合关系式见附表 3。

由附表 2 的风蚀模数结果结合不同水分条件下的临界起动风速以及各土样的机械组成状况按照土壤风蚀模数大小划分为以下几个阶段进行分析：①无风蚀， $E < 0.2 g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ ；②轻微风蚀， $E = 0.2 \sim 1.0 g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ ；③土壤风蚀缓增区， $E = 1.0 \sim 2.0 g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ ；④土壤风蚀增强区， $E = 2.0 \sim 5.0 g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ ；⑤土壤风蚀极强区， $E > 5.0 g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$ 。

为直观地分析各土样风蚀模数随风速的变化趋势，根据附表 2 的结果将物理性砂粒含量分别为 22.84%、31.31%、43.45%、52.63%、58.80%、67.96%和 77.94%这 7 种土样的变化趋势列于图 31、32、33、34、35、36 和 37。由图 31 和 32 看，对于物理性砂粒为 22.84%和 31.31%的两种土样，不同水分条件下土壤风蚀模数随风速的增大而增加，但土壤风蚀模数在各种水分条件下差异不大，只有在土壤含水量很低风速很高的情况下才发生微弱的风蚀现象，和物理性砂粒含量为 77.94%的土样比较，风蚀模数要小的多。

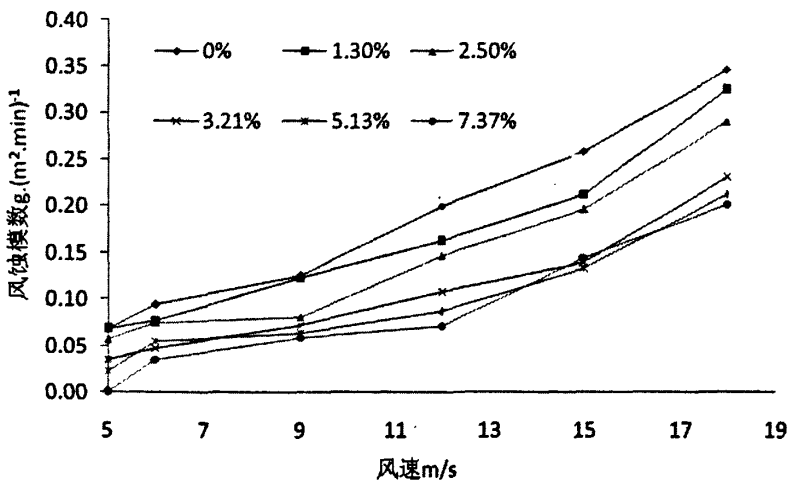


图 31 土样 1 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.31 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 1

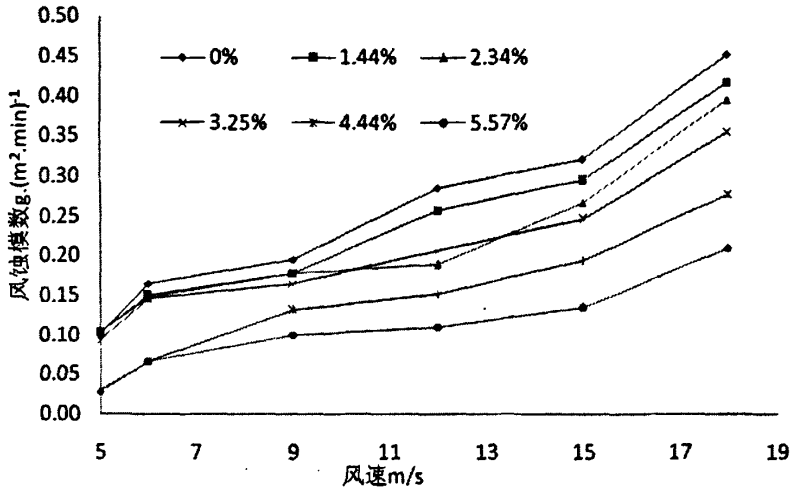


图 32 土样 2 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.32 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 2

对于旱作农田，冬春季节土壤特别干旱时，土壤含水量也能达到 2%以上，而土壤风蚀往往在春季冻融交替时比较严重，因此从本实验的土壤风蚀模数结合其临界起动风速分析都认为与这两种土样类似的土壤都不会是发生土壤风蚀的沙尘源，因此不作为重点进行分析。

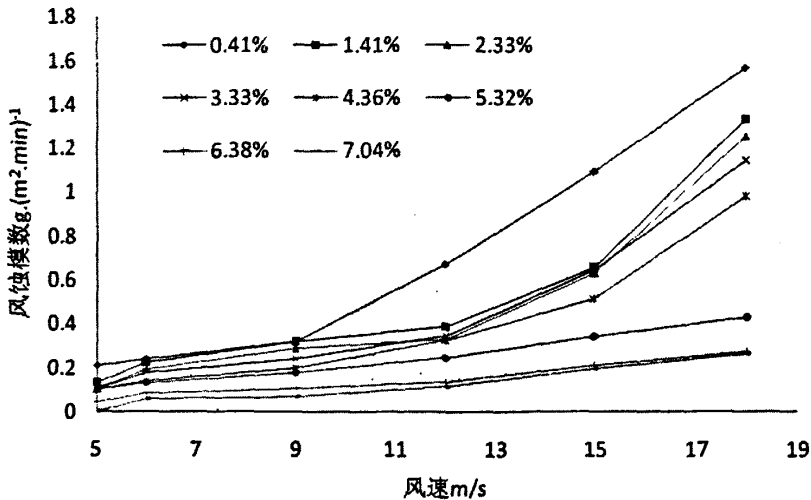


图 33 土样 3 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.33 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 3

图 33 所示,对于物理性砂粒含量为 43.45%的土样,土壤含水量低于 1%时,15m/s 以下风速仅会使土壤发生轻微的风蚀,高于 15 m/s 风蚀缓增;土壤含水量在 1%~2%±时,低于 6m/s 不会发生土壤风蚀,6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,风速几乎达 18m/s 土壤风蚀开始缓增;土壤含水量在 3%~4%±时,低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,9m/s~18m/s 的风速仅使土壤发生轻微的风蚀;土壤含水量高于 5%时,低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,高于 12m/s 使土壤发生轻微的风蚀。

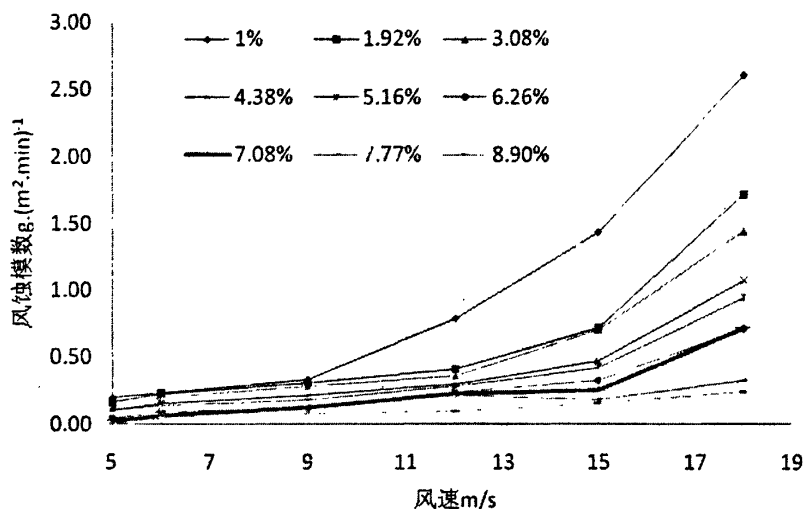


图 34 土样 4 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.34 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 4

由图 34 分析物理性砂粒含量为 52.63 %的土样的风蚀模数,土壤含水量在 1%±时,5m/s~6m/s 的风速都会使土壤发生轻微的风蚀,6m/s~15m/s 是风蚀缓增区,基本 16m/s 风速是风蚀开始增强的转折点,低于 18m/s 的风速不会发生强度风蚀;土壤含水量在 2%±时,低于 6m/s 不会发生土壤风蚀,6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,15m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区,低于 18m/s 风速土壤风蚀不会太强;土壤含水量在 3%±时,低于 6m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,15m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区;土壤含水量在 4%~5%±时,低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,9m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,达到 18m/s 土壤风蚀缓增;土壤含水量在 6%~8%时,低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,12m/s~18m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀;土壤含水量高于 9%时,基本不会使土壤发生风蚀。

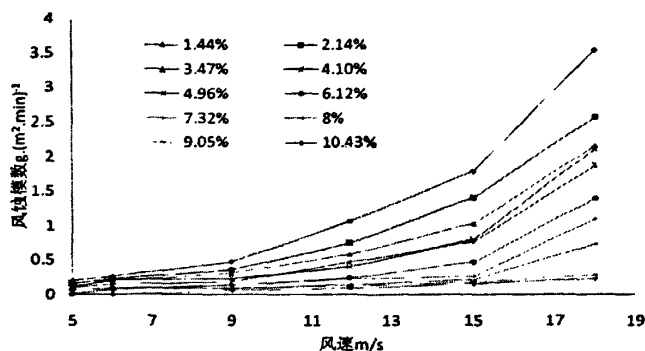


图 35 土样 5 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.35 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 5

从图 35 看,物理性砂粒含量为 58.80% 的土样,土壤含水量在 1% 时,5m/s-12m/s 的风速都会使土壤发生轻微的风蚀,12m/s~15m/s 是风蚀缓增区,基本 15m/s 风速是风蚀开始增强的转折点,低于 18m/s 的风速不会发生强度风蚀;土壤含水量在 2% 时,低于 6m/s 不会发生土壤风蚀,6m/s~13m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,13m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区,低于 18m/s 风速土壤风蚀不会太强;土壤含水量在 3%~4% 时,低于 6m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,6 m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,15m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区;土壤含水量在 5% 时,低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,9m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,高于 15m/s 土壤风蚀缓增区,18m/s 以下风速土壤风蚀不会增强;土壤含水量在 6%~8% 时,低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,12m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,风速高于 18m/s 后土壤风蚀缓增;土壤含水量高于 9% 时,低于 15m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,达 18m/s 的风速仅使土壤发生轻微的风蚀。

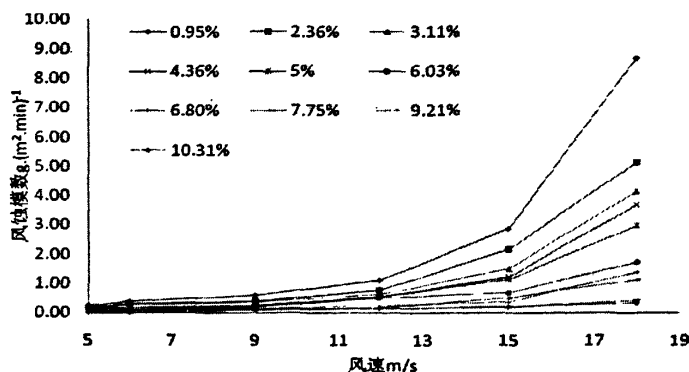


图 36 土样 6 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.36 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 6

由图 36 看出,当物理性砂粒 67.96%的土壤含水量在 1%~2%±时,5m/s~12m/s 的风速都会使土壤发生轻微的风蚀,12m/s~15 m/s 是风蚀缓增区,基本 15m/s 风蚀由弱变强的转折点,风速达到 16m/s 时发生强度风蚀;土壤含水量在 3%±时,低于 6m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,高于 15m/s 风速,土壤风蚀缓增,低于 18m/s 风速基本不会发生强度风蚀;土壤含水量在 4%~6%时,低于 12m/s 的风速基本不会使土壤发生风蚀,12 m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,高于 15m/s 后土壤风蚀缓增,高于 18m/s 土壤风蚀增强;土壤含水量在 7%~8%时,低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,12 m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,高于 18m/s 后土壤风蚀缓增;土壤含水量高于 9%时,低于 15m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,15m/s~18m/s 风速使土壤发生轻微的风蚀。

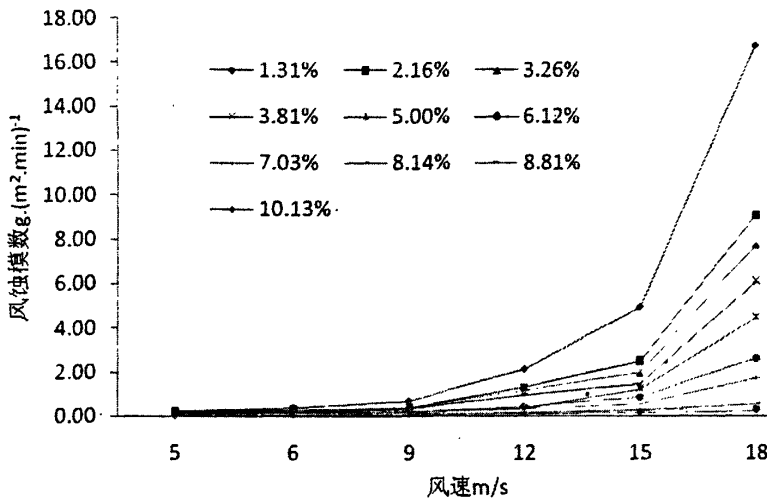


图 37 土样 7 在不同风速与土壤含水率下的风蚀模数动态变化

Fig.37 Wind erosion modulus variation with different wind speed and soil moisture of soil sample 7

对于物理性砂粒含量为 77.94%的农田实际土壤(图 37),土壤含水量在 1%±时,5m/s~9m/s 的风速都会使土壤发生轻微的风蚀,9m/s~12m/s 是风蚀缓增区,基本到 15m/s 风速时发生强度风蚀;土壤含水量在 2%±时,5m/s~12m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,12m/s~15m/s 是土壤风蚀缓增区,15m/s~17m/s 是土壤风蚀增强区,高于 17m/s 风速时发生强度风蚀;土壤含水量在 3%±时,低于 6m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,6m/s~9m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,12m/s~15m/s 是土壤风蚀缓增区,高于 17m/s 风速时发生强度风蚀;土壤含水量在 4%±时,低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,9m/s~12m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀,12m/s~15m/s 是土壤风蚀缓增区,15m/s~17m/s 是土壤风蚀增强区,高于 17m/s 风速时发生强度风蚀;土壤含水量在 5%±时,低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀,9m/s~

12m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀, 12m/s~15m/s 是土壤风蚀缓增区, 18m/s 以下风速不会发生强度风蚀; 土壤含水量在 6%~8%时, 低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀, 12m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀, 风速高于 18m/s 后土壤风蚀增强; 土壤含水量高于 9%时, 低于 15m/s 的风速不会使土壤发生风蚀, 低于 18m/s 的风速仅使土壤发生轻微的风蚀。

4.3.4 不同条件下土壤风蚀模数的三元回归

将附表 2 风洞测试结果以物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速为自变量, 以土壤风蚀模数为因变量进行三元二次回归, 得到风蚀模数随物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速变化的三元拟合关系式:

$$Y=2.557463-0.080263X_1+0.527724X_2-0.478806X_3+0.00065X_1^2-0.009108X_2X_1+0.024633X_2^2+0.007399X_3X_1-0.039447X_3X_2+0.017207X_3^2, R^2=0.6711 \quad (6)$$

式中: X_1 —物理性砂粒含量, %;

X_2 —土壤含水量, %;

X_3 —风洞中心吹蚀风速, m/s

Y —土壤风蚀模数, $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$

检验结果显示, $F=77.99$, $P<0.0001$, $R^2=0.6711$, 因此本项研究虽然对影响土壤风蚀模数的三个因子进行了尝试, 加上室内风洞模拟采用净风吹蚀, 自然气候等因素对监测结果影响较小, 田间土壤风蚀量会受到复杂多变的自然气候因素影响, 因此预报方程的普及应用需要通过大量的田间试验数据来补充完善, 值得深入研究。

4.3.5 阴山北麓诱发沙尘暴的潜在性分析

阴山北麓属典型草原向荒漠草原过渡的土壤类型, 北部和西北部为棕钙土, 南部为暗栗钙土, 中部为淡栗钙土^[64]。质地以砂壤土和轻壤土为主, 部分地区为中壤土^[118], 按照卡庆斯基土壤质地分类标准^[119], 此类土质的土壤粒径大于 0.01mm 的含量一般在 70%~90%, 粒径大于 1mm 的含量在 15%~30%之间, 因此以物理性砂粒的含量为 50%~80%来概括阴山北麓地区土壤的粒级较为客观。前已述及, 由于马铃薯被阴山北麓旱作区认为是主要的经济作物, 其种植面积占作物总播种面积的 50%左右, 部分地区几乎达到 70%^[27, 28]。在阴山北麓地区种植马铃薯必须进行耕翻, 而在各种人类经济活动中, 土壤耕翻对风蚀及土地沙漠化的影响最为强烈, 可使土壤风蚀量增加 11.9~132 倍^[17], 何文清^[15]通过风洞试验对武川旱作研究中心耕翻地和苜蓿 20cm 留茬地的监测结果表明翻耕地土壤风蚀速率是留茬未翻地的 25~108 倍, 本文第五部分的试验结果也足以说明土壤耕翻对土壤风蚀影响的严重性。土壤风蚀除造成表层大量富含营养物质的细微颗粒的损失外, 还会导致沙尘灾害, 甚至沙尘暴。沙尘暴是特定的气象和地理条件下的产物, 是指风力达到 8 级以上时

(18m/s), 被刮起的沙尘增多, 天空变得越来越浑浊、昏暗, 能见度可能小于 200m 的恶劣天气^[120]。如果不考虑土壤的其他理化性状, 单纯考虑土壤的机械组成和含水量, 本文所配制的不同物理性砂粒含量高于 50% 土样基本能代表阴山北麓旱作区各类土壤, 因此仅以此评价各类土壤由于耕翻诱发沙尘暴的潜在性。

阴山北麓旱作区土壤风蚀多发生于冬春季节, 沙尘暴一般在春季土壤冻融交替季节到作物出苗增加地表覆盖度后发生频繁, 由于这一阶段降水量较少, 土壤表层含水量一般维持在 3%~4%, 特殊干旱年型甚至低于 3%。当土壤含水量为 3%~4% 时, 物理性砂粒含量分别为 52.63%、58.80% 和 67.96% 的三种土样起动风速介于 6.26m/s~8.82m/s。结合本文风蚀模数的监测结果, 当风力达到 8 级及 18m/s 以上风速土壤风蚀模数高于 $2\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 后, 才会发生沙尘暴, 认为阴山北麓旱作区大部分地区都是沙尘暴的发生源。只有土壤含水量高于 7% 时, 各种土壤才不会诱发沙尘暴产生, 但这样的含水条件对于冬春季节降水稀少, 风大风多的阴山北麓农牧交错带很难实现。由附表 2 结果知, 土壤含水量为 3%~4% 时, 上述三种基本能代表阴山北麓旱作区土壤物理性砂粒含量的土样在风速为 18m/s 时, 风蚀模数介于 $1.439\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ ~ $7.751\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 之间, 风蚀模数随物理性砂粒含量的增加而增大, 通过单位换算后相当于 $2.07\times 10^3\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ~ $11.16\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 如果以阴山北麓农牧交错带每年 8 级及 18m/s 以上风速平均天数为 32 天, 干旱区农田面积 151.3 万 hm^2 计算^[121], 该地区旱作农田如果都进行传统的耕翻作业每年的土壤风蚀量约为 $1.01\times 10^9\text{t}$ ~ $5.40\times 10^9\text{t}$, 所以必须采取切实可行的保护性耕作措施加以防护。

4.4 小结

(1) 在室内风洞经过对物理性砂粒含量不同的 7 种土壤不同风速梯度下历时 10min 的吹蚀, 发现风蚀物收集量随高度的增加而减少。物理性砂粒含量低于 40% 时 (尤其 20% 的土壤) 在各种水分条件下集沙仪不同高度风蚀物收集量均很小, 几乎不发生土壤风蚀, 风蚀物收集量在空间上既符合指数变化函数关系又符合幂函数关系。在物理性砂粒含量高于 40% 后, 风蚀物收集量在空间上呈现幂函数曲线变化规律。9 m/s 风速基本上是风蚀物空间动态发生变化的临界点, 风速低于或等于此临界风速, 即低风速条件下风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律, 风速大于 9m/s 后, 风蚀物收集量与高度符合幂函数曲线变化规律。集沙仪不同高度的总输沙量随风速的增加而增大, 二者之间符合指数曲线变化关系。输沙量与水分呈负相关关系, 水分增大输沙量降低。

(2) 土壤水分含量相同时, 土壤物理性砂粒含量越高, 临界起动风速越小, 对于物理性砂粒含量为 22.84% 和 31.31% 这两种土壤, 由于大于 2mm 的颗粒所占的比例超过 40%, 必须在强大的风力作用下才能使其发生微弱的变化, 因此几乎不会有风蚀现象发生, 临界起动风速为 12.87m/s 和 9.79m/s, 当物理性砂粒含量大于 40% 后, 大于 2mm

的颗粒所占的比例低于20%，土壤临界起动风速降低，尤其当土壤含水量低于3%时，土壤临界起动风速均低于8m/s，象物理性砂粒含量为67.96%和77.94%这两种土样临界起动风速低于6m/s，因此极易发生风蚀。通过本项研究认为沙粒起动风速与含水量呈线性相关，土壤含水量越大，临界起动风速越大。土壤临界起动风速与物理性砂粒含量和土壤含水量的二元回归方程为：

$$Y = 22.316960 - 0.515537X_1 + 0.604416X_2 + 0.003474X_1^2 + 0.000175X_2X_1 + 0.062116X_2^2, \\ R^2 = 0.9603$$

(3) 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，风速越大土壤的风蚀模数越大，二者呈显著正相关，而且风蚀模数与风速按照指数曲线规律进行变化。对于物理性砂粒为 22.84%和 31.31%的两种土样，不同水分条件下土壤风蚀模数随风速的增大而增加，但土壤风蚀模数在各种水分条件下差异不大，只有在土壤含水量很低风速很高的情况下才发生微弱的风蚀现象，和物理性砂粒含量为 77.94%的土样比较，风蚀模数要小的多。对于旱作农田，冬春季节土壤特别干旱时，土壤含水量也能达到 2%以上，从本实验的土壤风蚀模数结合其临界起动风速分析都认为与这两种土样类似的土壤都不会是发生土壤风蚀的沙尘源。对于物理性砂粒含量为 43.45%的土样，土壤含水量低于 1%时，15m/s 以下风速仅会使土壤发生轻微的风蚀，高于 15 m/s 风蚀缓增；土壤含水量在 1%~2%±时，低于 6m/s 不会发生土壤风蚀，6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀，风速几乎达 18m/s 土壤风蚀开始缓增；土壤含水量在 3%~4%±时，低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀，9 m/s~18m/s 的风速仅使土壤发生轻微的风蚀；土壤含水量高于 5%时，低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀，高于 12m/s 使土壤发生轻微的风蚀。

物理性砂粒含量为 52.63 %的土样的风蚀模数，土壤含水量在 1%±时，5m/s~6m/s 的风速都会使土壤发生轻微的风蚀，6m/s ~15 m/s 是风蚀缓增区，基本 16m/s 风速是风蚀开始增强的转折点，低于 18m/s 的风速不会发生强度风蚀；土壤含水量在 2%±时，低于 6m/s 不会发生土壤风蚀，6m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀，15m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区，低于 18m/s 风速土壤风蚀不会太强；土壤含水量在 3%±时，低于 6m/s 的风速不会使土壤发生风蚀，6 m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀，15m/s~18m/s 是土壤风蚀缓增区；土壤含水量在 4%~5%±时，低于 9m/s 的风速不会使土壤发生风蚀，9m/s~15m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀，达到 18m/s 土壤风蚀缓增；土壤含水量在 6%~8%时，低于 12m/s 的风速不会使土壤发生风蚀，12m/s~18m/s 的风速使土壤发生轻微的风蚀；土壤含水量高于 9%时，基本不会使土壤发生风蚀。如果不考虑土壤的其他理化性状，单纯从考虑土壤的机械组成，土壤含水量在 1%~2%时，物理性砂粒含量高于 50%的土壤都能诱发沙尘暴，类似区域都可能是沙尘暴的发生源，而低于 50%的土壤不会产生沙尘暴，只能使土壤风蚀发生；土壤含水量在 3%~4%时，物理性砂粒含量高于 60%（包括 60%）的土

壤都能诱发沙尘暴,而低于此含量的土壤不会产生沙尘暴;土壤含水量为 5%±时,物理性砂粒含量高于 65%的土壤都能诱发沙尘暴;土壤含水量为 6%±时,物理性砂粒含量高于 70%的土壤都能诱发沙尘暴;土壤含水量高于 7%时,任何土壤都不会产生沙尘暴。

阴山北麓旱作区冬春季节土壤表层含水量一般维持在 3%~4%,土壤的物理性砂粒含量基本在 50%~80%,单纯考虑土壤水分和土壤物理性砂粒含量认为阴山北麓旱作区大部分地区都是沙尘暴的发生源。从试验结果看风速为 18m/s 时,风蚀模数介于 $1.439\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}\sim 7.751\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 之间,相当于 $2.07\times 10^3\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}\sim 11.16\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$,如果都采取传统的耕翻作业每年的土壤风蚀量约为 $1.01\times 10^9\text{t}\sim 5.40\times 10^9\text{t}$,所以土壤风蚀相当严重。

本文将土壤风蚀模数与物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速进行了三元二次回归,得到风蚀模数随物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速变化的三元拟合关系式为:

$$Y=2.557463-0.080263X_1+0.527724X_2-0.478806X_3+0.00065X_1^2-0.009108X_2X_1+0.024633X_2^2+0.007399X_3X_1-0.039447X_3X_2+0.017207X_3^2, R^2=0.6711。$$

5 作物残茬高度及宽度对间作农田土壤风蚀量的影响

大面积治理风蚀沙化是北方农牧交错带农牧业可持续发展长期艰巨的任务,关于风沙区农田的防蚀措施,国内外强调营造农田防护林,华北和东北推广秸秆冬季覆盖,国外普遍推广机械化免耕。但这几种方法在北方旱作地区由于多种原因简单照搬的效果都不好,难以全面普及推广。北方农牧交错带年降水量一般在 400mm 以下,植树难以成活或不能成材,农作物产量水平低秸秆产出少且大部分用作饲料,加上冬春风大易吹蚀,秸秆粉碎还田技术不被农民所采用。阴山北麓马铃薯和豆类收获必须进行翻耕,而且由于缺乏大型松耕、除草机械和轮作倒茬难等问题,都制约了机械化免耕技术的推广普及。为此,在研究农牧交错带旱作农田风蚀规律的基础上,提出了条播作物留茬与马铃薯等穴播作物带状间作轮作技术。不少学者^[25, 122]研究了机械化免耕田中作物残茬高度对地表风蚀量的影响,关于条播作物留茬与马铃薯等穴播作物带状间作后残茬带的宽度对风蚀量影响的研究也曾有论述^[17, 78-79],但没有把带状间作作为一个整体进行研究,而且带状间作后残茬高度对风蚀量的影响还未见报道,因此通过科学研究定量评价带状间作宽度及残茬高度在旱作农田抗风蚀效应中的作用,对进一步完善防沙型耕作制具有重要意义。

5.1 研究内容和试验方案选择

本研究分野外移动式风洞原位测试和大田实证试验两部分内容。野外移动式风洞原位测试试验于 2008 年 4 月利用内蒙古农业大学自行研制的 OFDY-1.2 型可移

动式风蚀风洞在位于内蒙古阴山北麓典型旱作区武川县的内蒙农牧业科学院旱作农业研究中心的旱地进行监测，参考当地主栽作物及茬口特性选择莜麦茬和油菜茬及传统秋翻地三种土壤下垫面类型，均以带状留茬间作为研究对象，为保证试验区土壤质地和粒级等理化性状的一致性，尽可能减小实验误差，在试验前一年即 2007 年春季作物播种前将整块试验田 0~25cm 耕层土壤全部用推土机推起，充分混匀后回填，试验田土壤基础养分结果见表 7，土壤机械组成情况见表 8。同时为提高作物出苗率达到预期留茬目标播种前进行了均匀喷灌，2007 年秋季将油菜和莜麦立秆留茬约 20cm，将间作马铃薯田块收获后耕翻整平。

表 7 试验区土壤理化性状

Table 7 Soil physicochemical characters on the test site

Om	pH	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
%							mg/L						
0.91	8.21	15.6	30.8	16.8	82.9	3206.6	203.9	20.1	13.6	2.8	12.1	1.5	3.35

表 8 土壤粒级测定

Table 8 Measurement of the soil partial size

不同粒级所占比例 (mm、%)							
>2	2-1	1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005	1-0.01
11.41	4.55	18.34	33.77	12.61	5.04	14.29	64.71

风洞测试分别选择莜麦和油菜两种残茬设计两组试验进行研究：

试验一：带状留茬间作宽度与风蚀模数的相关性研究，设 8 个处理，即①耕翻裸露地，②作物留茬地，③0.5m 宽残茬带加等距秋翻裸露地，④1m 宽残茬带加等距秋翻裸露地，⑤1.5m 宽残茬带加等距秋翻裸露地，⑥2m 宽残茬带留茬作物加等距裸露地，⑦2.5m 宽残茬带加等距裸露地，⑧3m 宽残茬带加等距裸露地。留茬高度均为 20cm。

试验二：作物残茬高度与风蚀量的相关关系研究，根据风洞中实验段长度，宽度设计为 3m 残茬带+等距耕翻带，吹蚀面积均为 6m²，共 7 个处理，即①耕翻裸露地，②残茬高度 0cm，③残茬高度 5cm，④残茬高度 10cm，⑤残茬高度 15cm，⑥残茬高度 20cm，⑦残茬高度 25cm。实验时将移动式风洞放置在不同处理地表，风洞轴线与农田垄向垂直（如图 38），为方便作图将风洞显示为圆柱体，实际上风洞为长方体），以风洞中心风速作为吹蚀风速，净风吹蚀 10min。每次实验结束后分别对旋风式集沙仪 20mm、60mm、120mm、180mm、240mm、300mm、400mm、500mm、600mm 和

700mm 高度的集沙盒风蚀物收集量进行称重。将 10 个高度风蚀物收集量累加值作为输沙量, 利用 MATLAB 7.4.0 软件采用三次样条插值拟合法对 10 个高度的风蚀物收集量进行积分, 通过面积换算计算出各处理不同风速的风蚀模数, 然后比较各处理减轻风蚀的效果。

大田实证试验于 2007 年秋季在与野外移动式风洞原位测试试验同一区域安排布置, 选择苜蓿残茬带与耕翻带等宽间作, 共设计 5 个带宽处理, 为考虑生产上的易操作性, 带宽均设计为播种机幅宽的整数倍, 分别为: ①1.2m 残茬+等宽耕翻裸露地, ②3.6m 残茬+等宽耕翻裸露地, ③6m 残茬+等宽耕翻裸露地, ④8.4m 残茬+等宽耕翻裸露地, ⑤10.8m 残茬+等宽耕翻裸露地, 田间布置见图 39。10 月 21 日土壤封冻前将耕翻裸地带附近墒沟填埋后耙耢整平, 然后在不同处理残茬带中央和作物残茬带下风向裸地带中距茬不同距离处按三重复多点埋置风蚀圈(图 11)、陷阱诱捕桶(图 12)等土壤风蚀量测定装置, 2008 年 4 月 26 日作物播种前将所放风蚀圈和陷阱诱捕桶中土壤取回实验室, 按照要求用 1/1000 电子天平称重并进行土壤含水量测定, 换算为单位面积的土壤风蚀和风积量, 以此对不同带宽的风蚀程度进行评价。

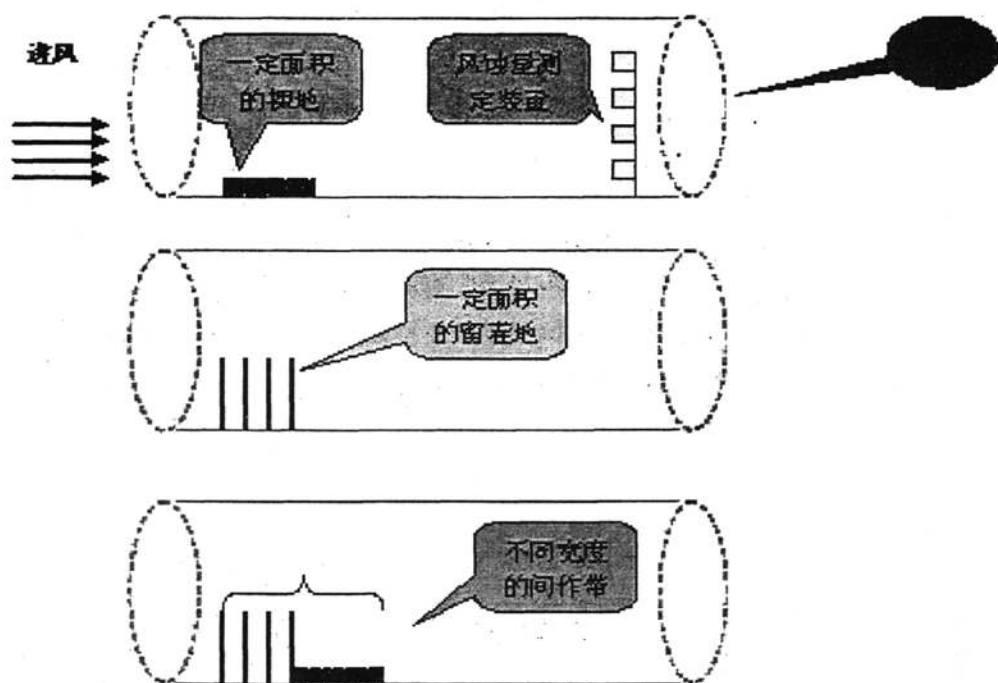
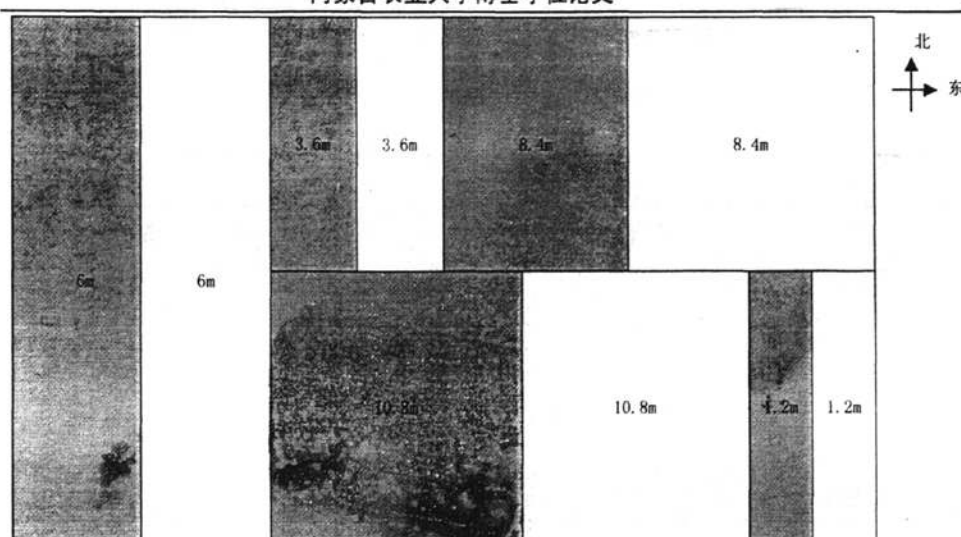


图 38 残茬带与等距裸露带间作风洞测试简图

Fig.38 Wind tunnel measurement in the intercropping of straw residue and equidistant bare/without mulch field



注:棕色区指作物残茬带, 无色区指耕翻带

图 39 不同宽度残茬带与耕翻带田间种植布局

Fig.39 Field layout of different width of mulched and ploughed field

5.2 带状留茬间作宽度与风蚀模数的相关性研究

5.2.1 作物残茬带消减间作裸露带风速的效果

作物残茬可以有效的降低近地面风速, 其除了能降低茬地自身的地表风速外, 还对茬地外背风裸地的风速有很大降低作用。赵举^[17]通过在田间实测小麦茬带对间作耕翻带的风速消减效果(表 9), 认为当外界 2m 高度处风速在 7.1m/s~17.5m/s 范围即 6~8 级大风时, 茬带内 5cm 高处风速只有自然风速的 1/4 左右, 间作秋耕裸地 5cm 处风速平均降低了 53.2% 左右。本文通过对 2m 宽苜蓿茬与等距秋翻裸地间作的风洞原位测试, 发现沿着风的吹蚀方向, 与残茬带间作的裸露带中 2.5cm 高度处风速降低率随测点距茬距离的增加而不断减少, 距茬越远残茬带所起到的保护作用越小(图 40)。风速降低率的大小与中心风速的选取有关, 但总体趋势一致。距茬相同距离测点处, 风速越小则相邻裸地带的风速降低率越大。当中心风速为 6m/s 时, 距残茬带最远处的测点所采集的风速值最大, 此时风速降低率为最小值 46.64%, 在此中心风速下, 距残 100cm 范围内的风速降低十分明显, 其 2.5cm 高度处的近地表风速值接近于零。由此认为小风速时, 作物残茬带所能起到的对裸露耕翻带风速的削弱作用比较强, 所能保护的带宽范围也较长。当中心风速选取最大值 15m/s 时, 留茬地对风速值的削弱作用要小一些, 但仍然降幅明显。其最高降低率为 52.01%, 最低降低率为 24.33%。由此可知, 以作物留茬形成保护带可有效降低相邻传统耕翻带的风速值, 进而起到减少土壤风蚀的效果。

表 9 不同风速下留茬带内与背风面裸地削弱近地面 5cm 高处风速的效果 (m/s)

Table 9 The effect of weakening wind velocity at 5cm above surface of stubble field and leeward un-mulched field under different wind velocity			
200cm 处风速	间作秋耕裸地	小麦留茬带中央	降低率%
17.5	8.9	4.4	50.6
13.3	6.8	2.9	57.4
11.5	5.8	2.7	53.4
10.0	5.1	2.5	51.0
8.8	4.6	2.1	54.3
7.1	3.8	1.8	52.6
平均 11.4	5.8	2.7	53.2

注：赵举博士论文, 2002

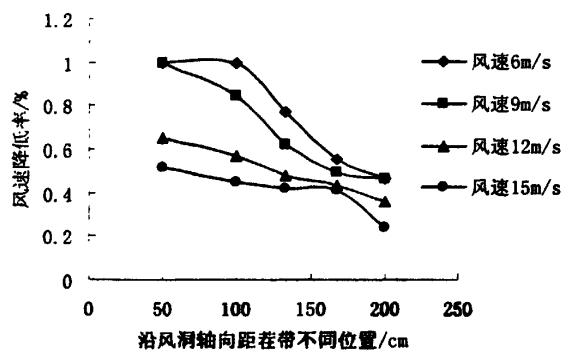


图 40 风速不同时各测点的风速降低率

Fig.40 Wind speed decrease ratio at different plots under different wind speed

5. 2. 2 不同风速吹蚀下风蚀物空间分布特征

风蚀物收集量描述的是 10min 内旋风式集沙仪各气流管收集到的风蚀物重量。秋翻裸地风蚀物空间分布规律与室内风洞模拟的物理性砂粒含量不同土壤的风蚀物空间分布规律一致，在不同风速吹蚀下，风蚀物重量随收集高度的增加而减少，风速低于 9m/s 时，二者呈指数曲线变化规律，当风速高于 9m/s 后，二者按照幂函数规律变化。这一点与孙悦超^[119]、刘汉涛^[122]、陈智^[123]在武川其他区域的监测结果不同，他们认为在不同风速下，风蚀物收集量空间上符合指数曲线关系。如图 41 所示，风蚀物在 10cm 内收集量较大，尤其在风速高于 9m/s 的情况下表现尤其明显，高于 10cm 后收集量均很小，基本低于 0.03g。对于留有不同残茬的 20cm 高全茬处理和等宽残茬+秋翻裸地间作处理来说风蚀物空间分布比较复杂，结果如图 42、43、44、45 所示，在 0~70cm 高度多次出现峰、谷。两处理相比，全茬处理收集量较小，陈

智^[145]通过在武川上秃亥的免耕留茬田测定也得出类似结果。

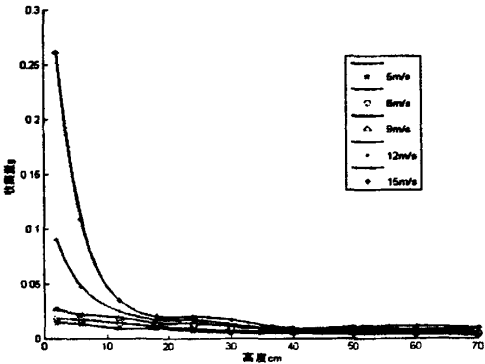


图 41 秋翻裸地风蚀物空间分布规律

Fig.41 Spatial variation of wind erosion sediment in autumn-ploughed field without mulch

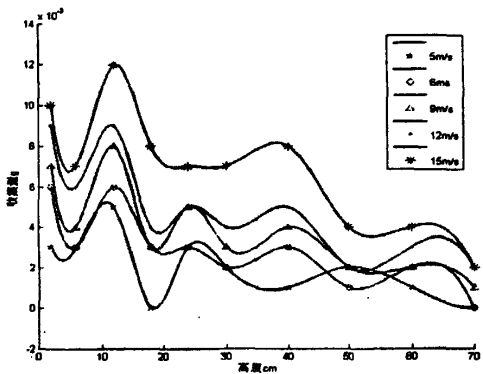


图 42 20cm 高莜麦茬风蚀物空间分布规律

Fig.42 Spatial variation of wind erosion sediment in the field with 20cm height oat straw residue

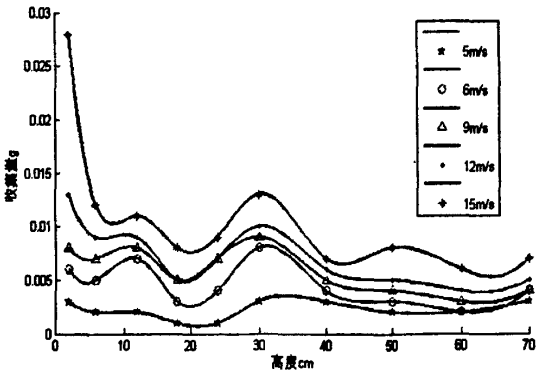


图 43 莜麦茬+秋翻裸地风蚀物空间分布规律

Fig.43 Spatial variation of wind erosion sediment in the oat straw residue and autumn-ploughed field

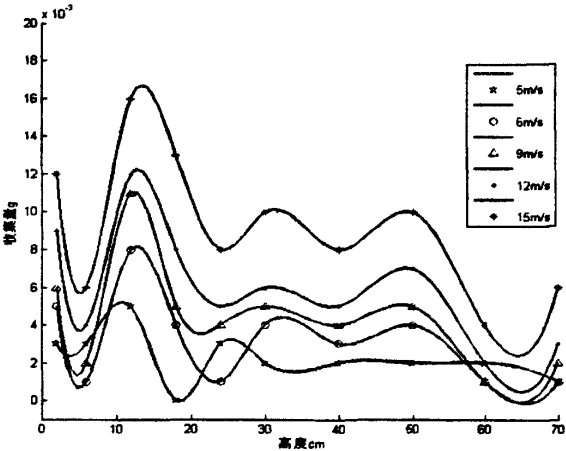


图 44 20cm 高油菜茬风蚀物空间分布规律

Fig.44 Spatial variation of wind erosion sediment in the field with 20cm height oat rape residue .

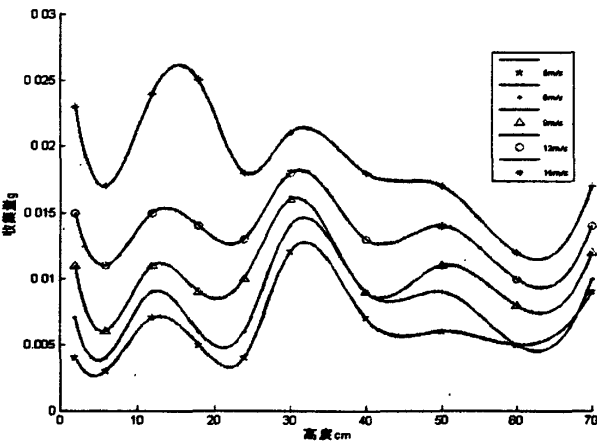


图 45 油菜茬+秋翻裸地风蚀物空间分布规律

Fig.45 Spatial variation of wind erosion sediment in the rape t straw residue and autumn-ploughed field

5. 2. 3 残茬保护下降低土壤风蚀模数的效果

由于作物立秆留茬的作用，对间作裸地形成了很好的屏蔽作用，在降低风速的同时，也减少了土壤风蚀量。洞内吹蚀面积不同或多或少对土壤风蚀模数产生影响，因此利用风洞试验一中提及的①、②和⑤处理测定结果分析作物残茬对间作裸地的保护作用。由于 2008 年春季降雪偏多，4 月 7 日进行试验时地表 0~5cm 土壤水分几乎在 7%左右，而且降雪融化后基本使地表形成土壤结皮，15m/s 风速下旋风式集沙仪不同高度风蚀物收集量均很小，针对这种情况与不少专家讨论后对间作裸地地表结皮进行了破除，隔两天后重新进行风洞试验，可能导致裸地土壤风蚀模数较干旱年增加，因此本次试验仅作为风蚀趋势参考，风蚀量以大田实际测量值为准。

表 10 莜麦残茬带减轻风蚀的效果

Table 10 Effect of oat straw residue on reducing the wind erosion

处理	不同风速风蚀模数 $g. (m^2.min)^{-1}$				
	5m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s
裸地	0.476	0.632	0.853	1.261	2.098
茬地	0.136	0.198	0.264	0.333	0.496
茬+裸	0.165	0.323	0.421	0.496	0.684

表 11 油菜残茬带减轻风蚀的效果

Table 11 Effect of rape straw residue on reducing the wind erosion

处理	不同风速风蚀模数 $g. (m^2.min)^{-1}$				
	5m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s
裸地	0.476	0.632	0.853	1.261	2.098
茬地	0.167	0.227	0.313	0.421	0.656
茬+裸	0.483	0.599	0.761	1.008	1.377

从表 10、11 结果知，裸地的风蚀模数很大，风速在 5m/s 时就达 $0.476 g. (m^2.min)^{-1}$ ，到 15m/s 达 $2.098 g. (m^2.min)^{-1}$ ，20cm 莜麦全茬处理各风速吹蚀下土壤风蚀模数与裸地风蚀模数相比要小的多，降低幅度在 68.74%~78.35%，裸地风蚀模数为莜麦茬地风蚀模数的 3.2~4.2 倍；与裸地相比 20cm 油菜全茬降低风蚀率为 63.32%~68.74%，裸地风蚀模数为油菜茬地风蚀模数的 2.7~3.2 倍，因此由于土壤耕翻导致土壤风蚀的程度是很大的。采取残茬带与等距秋翻带间作分布后，土壤风蚀模数介于秋翻裸地和全茬处理风蚀模数值之间，与秋翻裸地相比，莜麦茬+秋翻裸地土壤风蚀模数降低幅度在 48.92%~67.39%，油菜茬+秋翻裸地处理土壤风蚀模数降低幅度在 5.22%~34.36%。莜麦和油菜两种残茬虽然高度相同，但莜麦茬的密植度远远大于油菜茬，所以也显示出莜麦残茬防风蚀性能优于油菜残茬的特点，因此可以认为莜麦茬的防风蚀效果强于油菜茬。由积分结果知，各处理风蚀模数随风速的增大而增加，二者呈指数曲线变化关系，拟合结果如表 12 所示，其变化趋势见图 46、47。

表 12 土壤风蚀模数随风速的变化规律

Table 12 Wind erosion modulus changing law in different wind speed

处理	拟合函数关系式	R ²
秋翻裸地	$Y=0.25e^{0.1392x}$	0.9881
20cm高莪麦茬	$Y=0.1243e^{0.118x}$	0.8387
莪麦茬+秋翻裸地	$Y=0.0872e^{0.116x}$	0.9592
20cm高油菜茬	$Y=0.3107e^{0.0992x}$	0.9899
油菜茬+秋翻裸地	$Y=0.0966e^{0.1268x}$	0.9819

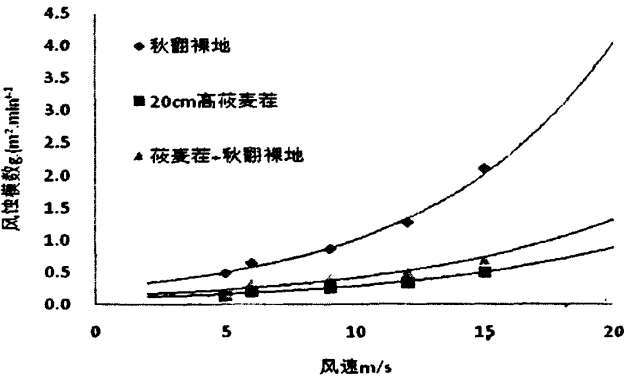


图 46 不同处理风蚀模数随风速的变化趋势（莪麦）

Fig.46 Wind erosion modulus variation under different wind speed in different treatments (oat)

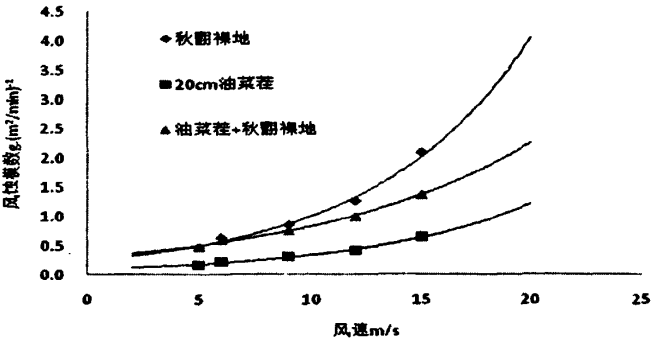


图 47 不同处理风蚀模数随风速的变化趋势（油菜）

Fig.47 Wind erosion modulus variation under different wind speed in different treatments (rape)

5.2.4 残茬带宽度变化对土壤风蚀模数的影响

从试验选择的莠麦和油菜两种作物残茬与秋翻裸地等宽度间隔分布的风蚀模数监测结果分析（表 13），莠麦茬各带宽处理土壤风蚀模数均大于油菜茬处理，等风速等带宽条件下，莠麦处理较油菜处理降低风蚀模数幅度在 12.92%~62.86%，与前面所述的风速结果一致，说明莠麦茬的防风蚀效应要强于油菜茬。宽度一定时，不同残茬处理土壤风蚀模数都随风速的增加而增大，二者符合指数曲线变化规律，其变化趋势见表 14、图 48、49。

表 13 不同风速不同带宽下的土壤风蚀模数 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$

Table 13 Wind erosion modulus with different strip width under different wind speed

处理	宽度m	风速 m/s				
		5	6	9	12	15
20cm高莠麦茬+	0.5	0.707	1.044	1.543	2.088	3.170
	1.0	0.223	0.335	0.561	0.917	1.226
	1.5	0.165	0.323	0.421	0.496	0.684
	2.0	0.142	0.227	0.290	0.423	0.568
	2.5	0.128	0.209	0.252	0.376	0.520
	3.0	0.076	0.150	0.209	0.284	0.405
20cm高油菜茬+	0.5	1.410	1.838	2.696	3.223	4.366
	1.0	0.583	0.726	1.064	1.537	2.085
	1.5	0.483	0.599	0.761	1.008	1.377
	2.0	0.310	0.448	0.715	0.925	1.101
	2.5	0.213	0.330	0.415	0.524	0.621
	3.0	0.088	0.130	0.295	0.365	0.511

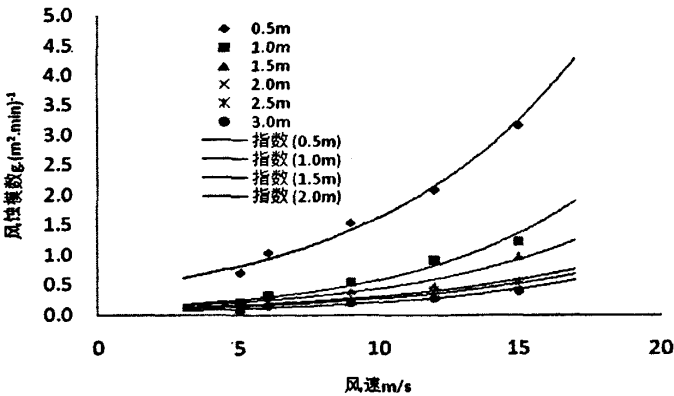


图 48 等带宽间作风蚀模数随风速的变化趋势（莠麦）

Fig.48 Wind erosion modulus variation with different wind speed in the equal width intercropping (oat)

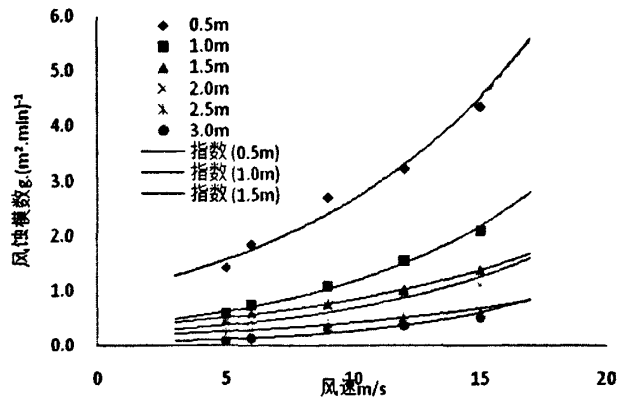


图 49 等带宽间作风蚀模数随风速的变化趋势（油菜）

Fig.49 Wind erosion modulus variation with different wind speed in the equal width intercropping (rape)

表 14 不同残茬与等宽裸露带间作处理风蚀模数随风速的变化规律

Table 14 Wind erosion modulus variation under different wind speed in intercropping strips of straw residue and bare land with different width

作物残茬	处理	宽度m	拟合函数关系式	R²
苜蓿	残茬带+等距秋翻裸地	0.5	$Y=0.4077e^{0.1384x}$	0.9704
		1.0	$Y=0.1144e^{0.1384x}$	0.9678
		1.5	$Y=0.1014e^{0.1475x}$	0.8911
		2.0	$Y=0.0904e^{0.126x}$	0.9449
		2.5	$Y=0.0813e^{0.1258x}$	0.9416
		3.0	$Y=0.0494e^{0.1455x}$	0.8963
油菜	残茬带+等距秋翻裸地	0.5	$Y=0.9264e^{0.1058x}$	0.9631
		1.0	$Y=0.3315e^{0.1255x}$	0.9919
		1.5	$Y=0.3107e^{0.0992x}$	0.9899
		2.0	$Y=0.2032e^{0.1207x}$	0.9217
		2.5	$Y=0.1610e^{0.0952x}$	0.8916
		3.0	$Y=0.0466e^{0.1695x}$	0.9212

残茬带+等宽秋翻裸地带宽从 0.5m~3.0m 变化，土壤风蚀模数也发生有规律的变化，从表 13 结果看，在一定风速吹蚀下，土壤风蚀模数随带宽的增加而减小，带宽为 0.5m 时，土壤风蚀模数最大，这可能由于旋风式集沙仪放置点距风洞气流输出端太近，加上 0.5m 宽残茬带基本只有两行苜蓿或油菜茬，因而作用在残茬和间作裸地上的剪切力较大，最终使吹蚀的土壤风蚀量较大，随着带宽的增加，如 3m 带，基

本苜蓿茬有 15 行，油菜茬有 12 行，由于立秆残茬的阻挡使气流抬升，虽然进风口风速相同，但气流在不断向前推进时受到各个残茬行的不断阻击，风力不断被消减，因而吹起的风蚀物较 0.5m 带要小的多，所以导致土壤风蚀模数的降低。作物残茬密度不同，对地表的覆盖作用不同，对于苜蓿和油菜两种作物残茬，苜蓿茬的覆盖度远远大于油菜茬，因而除了造成茬带本身的抗风蚀能力较强外，还对间作秋翻裸地造成很好的屏蔽和保护，因此宽度相同的苜蓿茬+秋翻裸露带的防风蚀效果要较油菜茬+等宽秋翻裸露带处理好的多。从表 13 结果知不同风速吹蚀下，风蚀模数随带宽的增大而减小，如图 50、51 所示，二者符合幂函数曲线变化规律，拟合关系式见表 15。

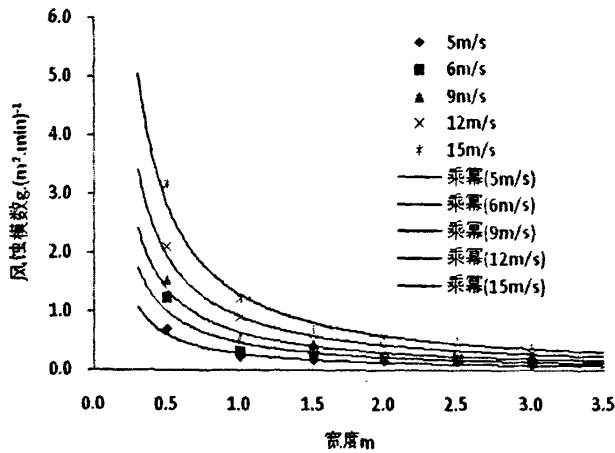


图 50 同一风况风蚀模数随带宽的变化规律（苜蓿）

Fig.50 Wind erosion modulus variation with the width of planting land in the same wind condition(oat)

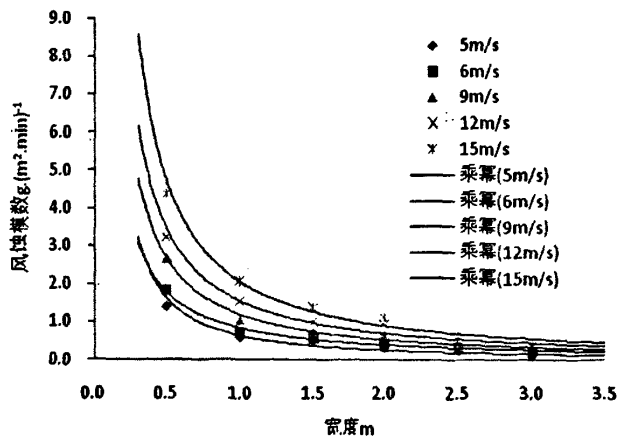


图 51 同一风况风蚀模数随带宽的变化规律（油菜）

Fig.51 Wind erosion modulus variation with the width of planting land in the same wind condition(rape)

表 15 土壤风蚀模数随带宽的变化规律

Table 15 Wind erosion modulus variation with the planting width

作物残茬	处理	风速m/s	拟合函数关系式	R ²
莠麦	残茬带+等距秋翻裸地	5	Y=0.2840x ^{-1.107}	0.9469
		6	Y=0.4838x ^{-1.070}	0.9273
		9	Y=0.6541x ^{-1.092}	0.9840
		12	Y=0.9196x ^{-1.128}	0.9825
		15	Y=1.3022x ^{-1.128}	0.9755
油菜	残茬带+等距秋翻裸地	5	Y=0.6289x ^{-1.359}	0.9078
		6	Y=0.8464x ^{-1.076}	0.9767
		9	Y=1.2038x ^{-1.143}	0.9624
		12	Y=1.5540 x ^{-1.144}	0.9605
		15	Y=2.0608x ^{-1.182}	0.9776

以表 13 的监测结果将不同残茬土壤风蚀模数随带宽和吹蚀风速的变化进行二元回归, 分别得到莠麦和油菜两种残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为 (7)、(8):
 $Y=0.750370-1.282675X_1+0.150664X_2+0.409671X_1^2-0.068253X_2X_1+0.002474X_2^2$
 $R^2=0.8886$ (7)

$Y=1.280242-1.797509X_1+0.243604X_2+0.508629X_1^2-0.087064X_2X_1+0.001018X_2^2$
 $R^2=0.9284$ (8)

式中: X_1 —残茬带宽度, m
 X_2 —风洞中心吹蚀风速, m/s
 Y —土壤风蚀模数, g. (m².min)⁻¹

检验结果显示, 莠麦带的F=38.30, P<0.0001, R²=0.8886; 油菜带的F=62.23, P<0.0001, R²=0.9284, 因此基本可以用上述方程进行风洞内不同带宽、不同风速的土壤风蚀模数预算。

5.3 残茬高度对风蚀模数的影响

5.3.1 残茬高度变化对风速的消减作用

直接作用于地表的风速是影响土壤风蚀量的主要因素, 当风速为 15m/s 时, 经过在 10cm、15cm、20cm 和 25cm 四个高度宽度均为 2m 的莠麦残茬带+等宽裸露带内不同位置 2.5cm 高度处风速测定, 得到如图 52 所示结果: 当茬高为 10cm 时, 残茬带对相邻耕翻带内的风速降低幅度较小, 最大风速降低率为 18.34%。而且在此中

心风速下,当距离残茬带 133cm 之后,风速降低率仅达到 10% 左右,对降低相邻裸地带风速的作用比较小。茬高为 15cm 时的防护效应亦不是很明显。只有当茬高达到 20cm 之后,裸露带的风速值才有了较大的降幅,距离茬带最近测点处的风速降低率达到了 44.34%,而距离茬带最远测点处的风速降低率为最小值 20.22%。总体上,作物留茬高度不同,相对应的保护程度也不同,留茬越高,对相邻裸露带的保护作用越明显。

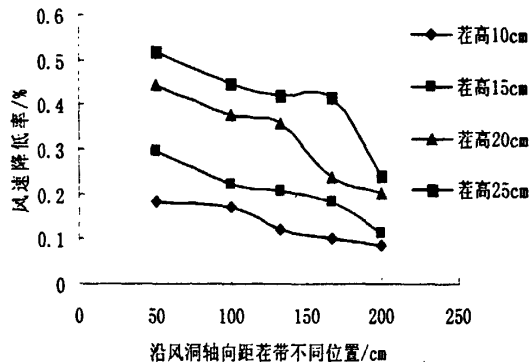


图 52 不同茬高时各测点的风速降低率

Fig. 52 Wind speed decrease ratio with different residue height at different investing plots

5.3.2 残茬高度对土壤风速模数的影响

将 3m 宽残茬带与等宽间作裸露带的风蚀模数结果列于表 16, 由表中数据知, 不论莠麦还是油菜残茬, 不同高度的间作处理, 土壤风蚀模数随风速的增大而增大, 风蚀模数按指数曲线关系递增, 拟合曲线关系式结果见表 17, 趋势图见图 53、54。

将表 16 的监测结果剔除耕翻裸地处理后将不同残茬土壤风蚀模数随茬高和吹蚀风速的变化进行二元回归, 分别得到莠麦和油菜两种残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为 (9)、(10):

$$Y = -0.023527 - 0.009268X_1 + 0.036206X_2 + 0.000625X_1^2 - 0.001650X_2X_1 + 0.001345X_2^2$$

$$R^2 = 0.8877 \quad (9)$$

$$Y = 0.025265 - 0.00709X_1 + 0.041082X_2 + 0.000431X_1^2 - 0.00157X_2X_1 + 0.001117X_2^2$$

$$R^2 = 0.8916 \quad (10)$$

式中: X_1 —残茬高度, cm

X_2 —风洞中心吹蚀风速, m/s

Y —土壤风蚀模数, $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$

检验结果显示, 莠麦带的 $F=37.95$, $P<0.0001$, $R^2=0.8877$; 油菜带的 $F=39.47$,

表 16 残茬高度变化后的土壤风蚀模数 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$

Table 16 Wind erosion modulus variation in different residue height

处理	残茬高度cm	风速 m/s				
		5	6	9	12	15
3m宽苜蓿茬+秋翻裸地	0 (耕翻)	0.476	0.632	0.853	1.261	2.098
	0 (留根不留茬)	0.125	0.244	0.378	0.636	1.049
	5	0.110	0.202	0.277	0.371	0.485
	10	0.098	0.178	0.229	0.349	0.476
	15	0.092	0.159	0.224	0.334	0.459
	20	0.076	0.150	0.209	0.284	0.405
	25	0.066	0.108	0.189	0.276	0.396
3m宽油菜茬+秋翻裸地	0 (耕翻)	0.476	0.632	0.853	1.261	2.098
	0 (留根不留茬)	0.197	0.316	0.450	0.708	1.121
	5	0.186	0.279	0.351	0.450	0.575
	10	0.182	0.261	0.317	0.444	0.566
	15	0.142	0.218	0.271	0.399	0.513
	20	0.088	0.230	0.295	0.365	0.490
	25	0.077	0.128	0.204	0.298	0.417

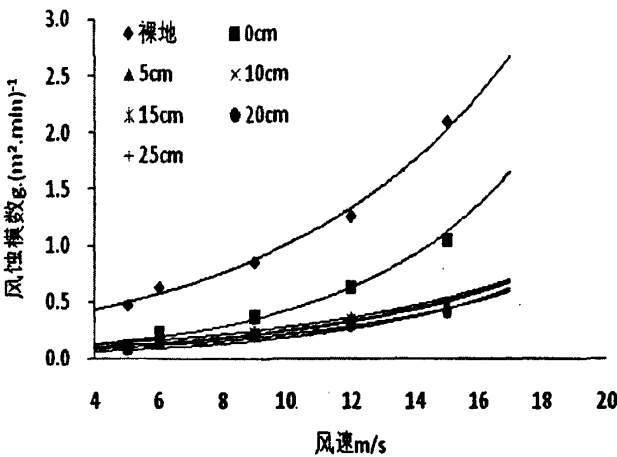


图 53 不同残茬高度风速增加后的风蚀模数变化 (莜麦)

Fig.53 Wind erosion modulus variation with different residue height under the strengthened wind (oat)

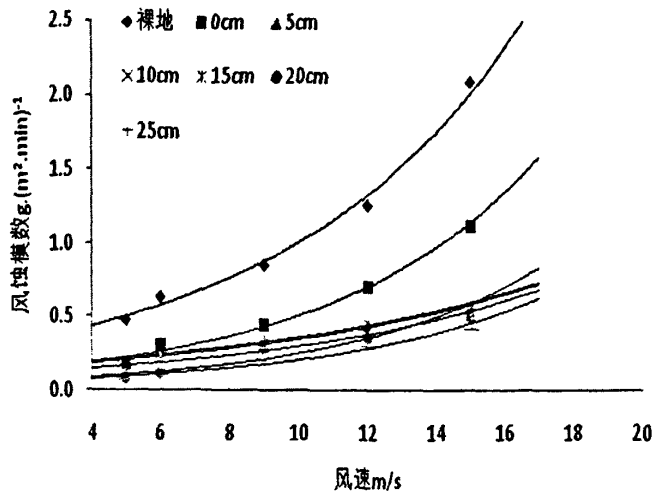


图 54 不同残茬高度风速增加后的风蚀模数变化（油菜）

Fig.54 Wind erosion modulus variation with different residue height under the strengthened wind (rape)

表 17 不同残茬高度风蚀模数随风速的变化规律

Table 17 Wind erosion modulus variation with different residue height and wind speed

作物残茬	处理	高度cm	拟合函数关系式	R ²
莠麦	3m残茬带+等宽秋翻裸地	0（耕翻）	$Y=0.25e^{0.1393x}$	0.9881
		0（留根不留茬）	$Y=0.0611e^{0.1939x}$	0.9551
		5	$Y=0.075e^{0.1307x}$	0.8929
		10	$Y=0.0612e^{0.11414x}$	0.9247
		15	$Y=0.0522e^{0.1464x}$	0.9393
		20	$Y=0.0494e^{0.1455x}$	0.8963
		25	$Y=0.0352e^{0.1684x}$	0.9522
油菜	3m残茬带+等宽秋翻裸地	0（耕翻）	$Y=0.25e^{0.1393x}$	0.9881
		0（留根不留茬）	$Y=0.1327e^{0.1009x}$	0.9296
		5	$Y=0.1227e^{0.1045x}$	0.9548
		10	$Y=0.1031e^{0.1607x}$	0.9731
		15	$Y=0.0923e^{0.118x}$	0.9459
		20	$Y=0.0476e^{0.1695x}$	0.9130
		25	$Y=0.0437e^{0.1567x}$	0.9476

在一定风速吹蚀时，残茬高度从 5cm~25cm 变化，不同残茬带+秋翻裸露带土壤风蚀模数与残茬高度以线性关系拟合较好，此结论与刘汉涛^[119]对保护性耕作免耕农田的监测结果一致。残茬高度增加，土壤风蚀模数降低，表 18 列出了不同风速下，莜麦和油菜间作处理土壤风蚀模数随残茬高度变化的拟合关系式，变化趋势如图 55、56 所示。

表 18 土壤风蚀模数随残茬高度的变化规律

Table 18 Wind erosion modulus variation with different residue height

作物残茬	处理	风速m/s	拟合函数关系式	R ²
莜麦	3m残茬带+等宽秋翻裸地	5	Y=-0.0022x+0.1214	0.9860
		6	Y=-0.0043x+0.2239	0.9518
		9	Y=-0.0039x+0.2841	0.8958
		12	Y=-0.0051x+0.3992	0.9539
		15	Y=-0.005x+0.5193	0.9185
油菜	残茬带+等距秋翻裸地	5	Y=-0.0062x+0.2284	0.9343
		6	Y=-0.0086x+0.3330	0.9225
		9	Y=-0.0063x+0.3822	0.8189
		12	Y=-0.0077x+0.5060	0.9350
		15	Y=-0.0078x+0.6296	0.9368

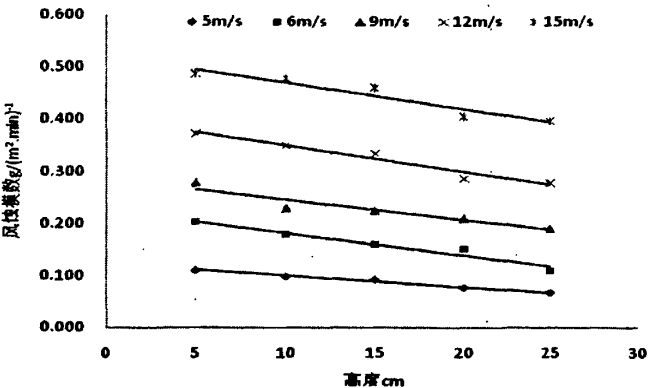


图 55 土壤风蚀模数随茬高的变化规律（莜麦）

Fig.55 wind erosion modulus variation with different residue height (oat)

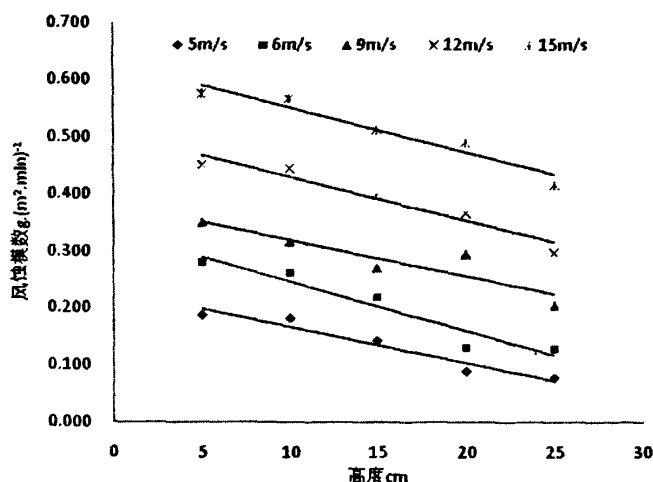


图 56 土壤风蚀模数随茬高的变化规律 (油菜)

Fig.56 Wind erosion modulus variation with different residue height (rape)

5.4 苡麦残茬与秋翻裸地不同带宽大田验证试验

由于风洞模拟的风速近似自然风, 既使在同一地表等风速吹蚀, 土壤风蚀量也会受土表水分、气温、气压和自然风力的影响, 因此实际上风洞模拟仅仅寻求的是一种风蚀趋势, 而且作物播种行距及留茬高度等完全按生产实际布置, 因此风洞中带宽超出 3m 的残茬带与等宽度裸露秋翻带的防风蚀效果无法在风洞中加以监测, 只能通过增加风洞试验段长度或按比例缩小作物播种行距和残茬高度来实现, 但在生产实际中难度很大, 因此在大田中利用风蚀圈法监测超出 3m 的残茬带与等宽度秋翻裸露地的风蚀量相当有意义。

5.4.1 不同带宽处理苡麦茬及秋翻裸地中风积规律

经过 2007 年 10 月 21 日到 2008 年 5 月 6 日基本整个风蚀阶段的吹蚀, 取得 20cm 茬高不同残茬带及间作秋翻裸露带中央的风积量及茬中和距茬不同距离处的风蚀量。从风积量的结果看 (表 19), 残茬带分别为 1.2m、3.6m、6.0m、8.4m 和 10.8m 的茬地中央风积量分别为 2.765t/hm²、1.626t/hm²、1.231t/hm²、1.657t/hm² 和 1.485t/hm² (图 57)。带宽小于 6m 时, 风积量随带宽增加而减小, 基本上带宽为 6m 时风积量最低, 其值为 1.231t/hm²; 随着残茬带宽的继续增加, 风积量又开始增加, 基本到 10m 后又开始下降, 因此在 1.2m~10.8m 基本出现波峰和波谷两个临界点, 出现波峰的临界点为 10m, 出现波谷的临界点为 6m。利用陷阱诱捕桶对大面积裸地风积量的测定结果为 4.892 t/hm², 那么残茬带宽为 1.2m、3.6m、6.0m、8.4m 和 10.8m 的茬地中央风积量与大面积裸地的风积量相比风蚀降低率分别为 43.48%、66.75%、74.84%、66.12%和 69.63%。与残茬带间作的带宽为 1.2m、3.6m、6.0m、8.4m 和 10.8m

的秋翻地中央风积量分别为 3.196t/hm²、1.950t/hm²、2.065t/hm²、2.307t/hm² 和 3.017t/hm²，与大面积裸地相比，降低风蚀率分别为 34.66%、60.13%、57.79%、52.83% 和 38.33%。如图 58 所示，随带宽加大风积量不断降低，到 3.6m 带宽左右达到最低值，约 1.950t/hm²，之后随带宽增加而不断增加。

表 19 不同带宽土壤风积量变化 (t/hm²)

Table 19 Soil accumulation quantity in different width of farmland

处 理	较大面		较大面		较大面		较大面		较大面	
	1.2m	积裸地	3.6m	积裸地	6.0m	积裸地	8.4m	积裸地	10.8m	积裸地
	减少%		减少%		减少%		减少%		减少%	
残茬带中央	2.765	43.48	1.626	66.75	1.231	74.84	1.657	66.12	1.485	69.63
间作裸地带中央	3.196	34.66	1.950	60.13	2.065	57.79	2.307	52.83	3.017	38.33
大面积裸地	4.892	--	4.892	--	4.892	--	4.892	--	4.892	--

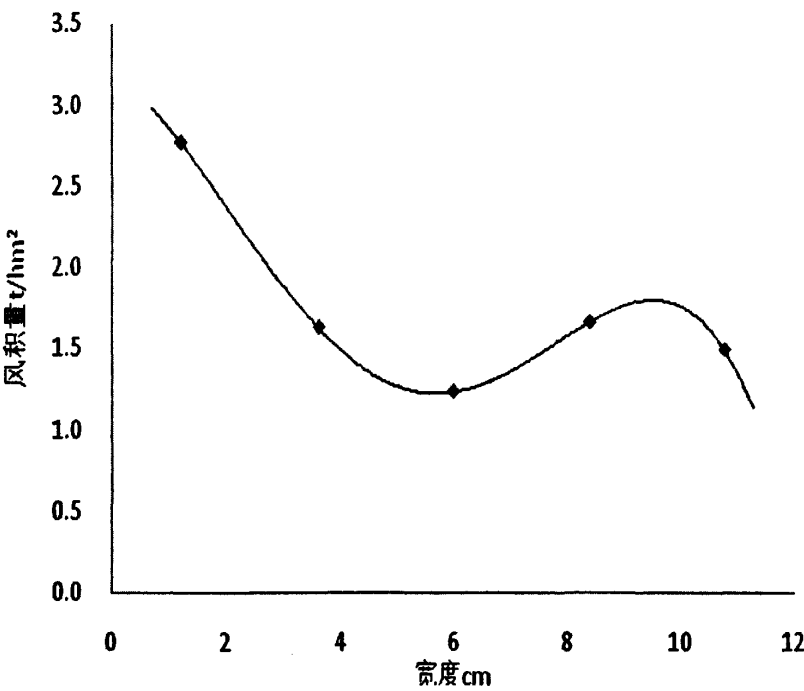


图 57 茬中风积量随带宽的变化规律

Fig.57 Wind quantity changing with the planting width in the straw residue

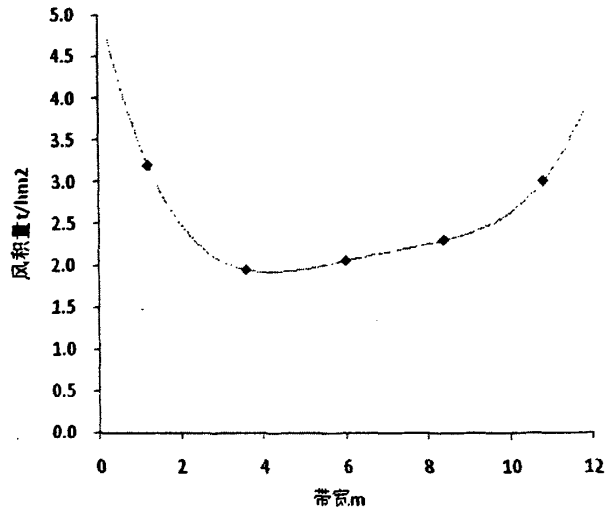


图 58 间作裸地风积量随带宽的变化规律

Fig.58 Wind sediment variation with strip width in the intercropping bare field

5.4.2 不同带宽处理土壤风蚀规律

风蚀量的大田监测结果与风积量趋势基本相同，只是在数量上略有差异，表 20 结果表明：残茬带分别为 1.2m、3.6m、6.0m、8.4m 和 10.8m 的茬地中央风蚀量分别为 0.800t/hm²、0.403t/hm²、0.387t/hm²、0.439t/hm²和 0.421t/hm²，从图 59 可以直观地看出茬中土壤风蚀量的变化规律，基本在 5m 带宽内土壤风蚀量显著降低，5m~10m 范围土壤风蚀量缓慢上升，与风积量相比不及风积量的增幅大，带宽超出 10m 土壤风蚀量又呈现稳中有降的变化趋势。与大面积裸地的风蚀量 2.905t/hm²比较，残茬带降低风蚀率分别为 72.45%、86.14%、86.68%、84.88%和 85.51%。

表 20 不同带宽土壤风蚀量变化

Table 20 Wind erosion in different strip width of farmland

处理	不同带宽风蚀量 (t/hm ²)									
	较大大面		较大大面		较大大面		较大大面		较大大面	
	1.2m	积裸地	3.6m	积裸地	6.0m	积裸地	8.4m	积裸地	10.8m	积裸地
		减少%		减少%		减少%		减少%		减少%
残茬带	0.800	72.45	0.403	86.14	0.387	86.68	0.439	84.88	0.421	85.51
间作裸地带	0.894	69.21	0.822	71.69	1.481	49.00	1.496	48.49	1.806	37.83
残茬带+裸地带	0.847	70.83	0.613	78.91	0.934	67.84	0.968	66.68	1.113	61.67
大面积裸地	2.905	—	2.905	—	2.905	—	2.905	—	2.905	—

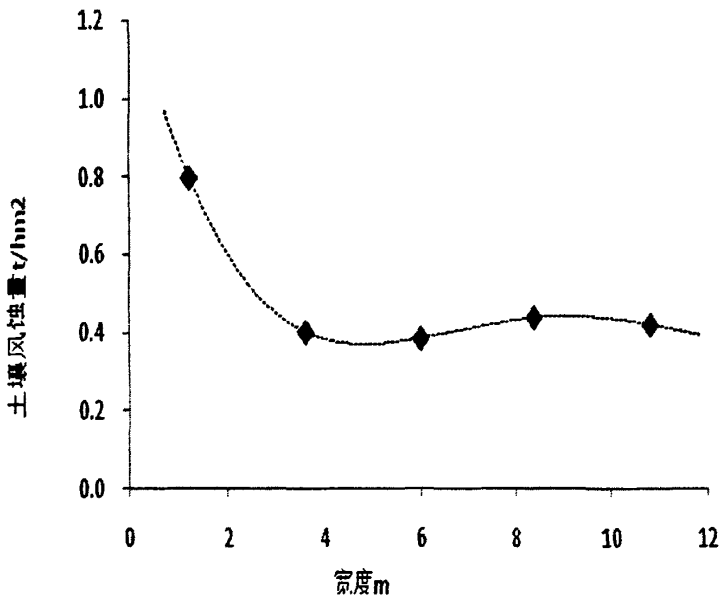


图 59 茬中风蚀量随带宽的变化规律

Fig.59 Wind erosion quantity variation with different strip width in the straw residue field

等带宽间作秋翻地距茬不同距离处风蚀量加权平均后得到间作裸露带的平均风蚀量分别为 0.894t/hm^2 、 0.822t/hm^2 、 1.481t/hm^2 、 1.496t/hm^2 和 1.806t/hm^2 ，同样可以从图 60 可以直观地分析其变化趋势，土壤风蚀量基本在带宽 3m 之内呈直线下降，基本到带宽 3m 时土壤风蚀量最低，带宽大于 3m 后小于 7m 这一阶段土壤风蚀量几乎又呈直线上升趋势，在 7m~10m 间土壤风蚀量基本保持稳定，而当带宽高于 10m 后土壤风蚀量又呈直线上升趋势，不同带宽间作裸地较大面积裸地降低风蚀率分别为 69.21%、71.69%、49.00%、48.49% 和 37.83%。由表 20 知残茬带与等带宽裸地间作的平均风蚀量分别为 0.847t/hm^2 、 0.613t/hm^2 、 0.934t/hm^2 、 0.968t/hm^2 和 1.113t/hm^2 ，较大面积裸地降低风蚀率分别为 70.83%、78.91%、67.84%、66.68% 和 61.67%。从图 61 可以看出，不同带宽残茬+等宽秋翻地即采取带状留茬间作模式后的土壤风蚀量变化规律，基本与间作裸地的变化趋势相同，因此仅从这一点分析认为带状间作农田土壤风蚀量的大小与残茬带的土壤风蚀量相关性不大，与间作耕翻地的土壤风蚀量息息相关。生产上带宽超出 10m 后土壤风蚀量呈直线递增，针对此种情况我们研究提出了油葵秆生物篱与带状留茬间作耦合技术，对进一步防治农田土壤风蚀起到了很好的作用，详见“油葵秆生物篱与作物带状留茬间作对减轻土壤风蚀的作用”的阐述。

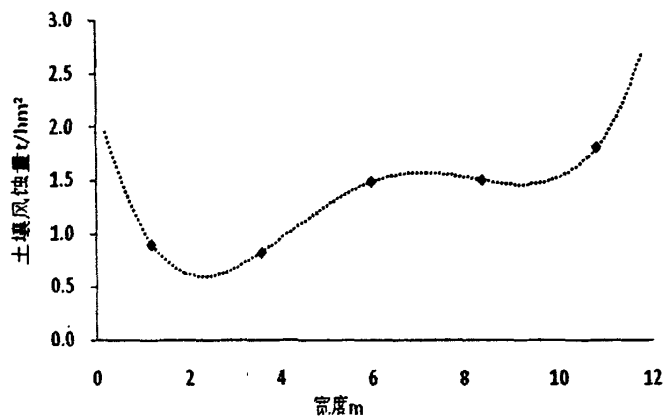


图 60 间作裸地带风蚀量随带宽的变化规律

Fig.60 Wind erosion quantity variation with different strip width in the bare land

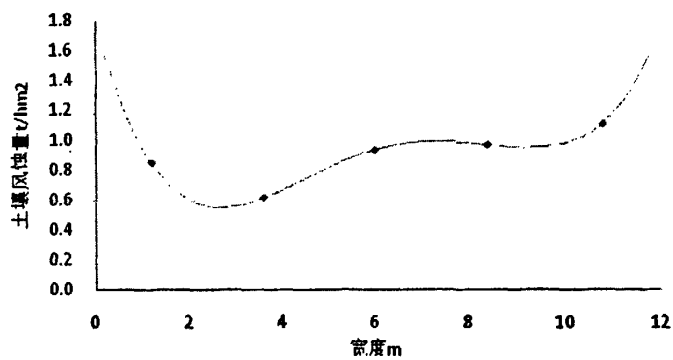


图 61 残茬+裸地风蚀量随带宽的变化规律

Fig.61 Wind erosion quantity variation with different strip width in the bare land incorporated with straw residue

土壤风蚀是一种复杂的空气动力学过程，风蚀区地表土壤颗粒物在一定区域的变化实际上可以用两部分内容加以描述，其一是土壤颗粒在运动过程中过境时发生的沉降，本文用风积量表示其数量，为与文中描述的风蚀量统一，将风积值定义为负值；另一部分是风速达到起沙风速后土壤颗粒脱离原地表发生的风蚀。真正意义上的土壤风蚀量就是二者的机械叠加，如果叠加值为正，那么表示监测区域发生了风蚀，否则则发生了风积。本文监测的土壤风蚀量实际上就是土壤颗粒发生转移和沉降的叠加值，而对于本文监测的风积量，实际上单单是风蚀物过境时的沉降值，由于没有和土壤风蚀掉的那部分发生叠加，因此数值较大，由此进一步分析认为该区域单纯意义上的风蚀要大于风积，因此可以认为研究区域发生了很大的土壤风蚀现象，表现为生态继续恶化。从本文的监测结果看单纯的风积规律和真正意义上的

土壤风蚀规律基本相同,更进一步证明了风蚀圈法对土壤风蚀量监测结果的可靠性。

5.5 小结

(1) 作物残茬可以有效的降低近地面风速,除了能降低自身的地表风速外,还对茬地外背风裸地的风速降低有很大作用。风速降低率随测点距茬距离的增加而不断减少,距茬越远残茬所起到的保护作用越小。小风速时,作物残茬带所能起到的对裸露耕翻带风速的削弱作用比较强,所能保护的带宽范围也较长。高风速时,留茬地对风速值的削弱作用要小一些。

(2) 秋翻裸地风蚀物空间分布规律与室内风洞模拟的物理性砂粒含量不同土壤风蚀物空间分布规律一致,在不同风速吹蚀下风蚀物空间变化随高度的增加而减少。对于留有不同残茬的 20cm 高全茬处理和残茬与等宽度秋翻裸地间作处理来说风蚀物空间分布比较复杂,在 0~70cm 高度多次出现峰、谷,风蚀物收集量与高度间用高阶多项式拟合较好。

(3) 由于作物立秆留茬的作用,对间作裸地形成了很好的屏蔽作用,在降低风速的同时,也减少了土壤风蚀量。裸地的风蚀模数很大,风速在 5m/s 时就达 $0.476\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$,到 15m/s 达 $2.098\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$,苜蓿全茬处理各风速吹蚀下土壤风蚀模数和裸地相比要小的多,降低幅度在 68.74%~78.35%,裸地风蚀模数为苜蓿茬地风蚀模数的 3.2~4.2 倍;与裸地相比油菜全茬降低风蚀率为 63.32%~68.74%,裸地风蚀模数为油菜茬地风蚀模数的 2.7~3.2 倍;因此由于土壤耕翻导致土壤风蚀的程度是很大的。采取残茬带与等距秋翻带间作分布后,土壤风蚀模数介于秋翻裸地和全茬处理风蚀模数值之间,与秋翻裸地相比,苜蓿茬+秋翻裸地土壤风蚀模数降低幅度在 48.92~67.39%,油菜茬+秋翻裸地土壤风蚀模数降低幅度在 5.22%~34.36%,因此可以认为苜蓿茬的防风蚀效果强于油菜茬。

(4) 宽度一定时,不同残茬处理土壤风蚀模数都随风速的增加而增大,二者符合指数曲线变化规律。在一定风速吹蚀下,土壤风蚀模数随带宽的增加而减小,带宽为 0.5m 时,土壤风蚀模数最大,风蚀模数与带宽之间符合幂函数曲线变化规律。将不同残茬土壤风蚀模数(Y)随带宽(X_1)和吹蚀风速(X_2)的变化进行二元回归,得到苜蓿与秋翻裸地等宽间作的回归方程为:

$$Y=0.750370-1.282675X_1+0.150664X_2+0.409671X_1^2-0.068253X_2X_1+0.002474X_2^2$$

$$R^2=0.8886$$

油菜与秋翻裸地等宽间作的回归方程为:

$$Y=1.280242-1.797509X_1+0.243604X_2+0.508629X_1^2-0.087064X_2X_1+0.001018X_2^2$$

$$R^2=0.9284$$

(5) 作物残茬覆盖是抑制土壤风蚀效应的关键因子,残茬的高低与风蚀量的大小息息相关。耕翻及不留茬是产生风蚀的主要因素,作物留茬哪怕是高度很低也会在

减轻风蚀方面产生重要的作用。莠麦和油菜留根不留茬分别比裸地降低风蚀量 49.54%~73.67% 和 43.83%~58.54%，消减率基本随风速增大而降低；留茬越高降低风蚀率的效果越好，但相邻两茬高的风蚀量消减率均不足 10%，因此认为带状留茬间作模式土壤风蚀量的高低与有无留茬有关，与留茬高度无明显关系，因此建议生产上采取 20cm 以下的留茬方式，既起到防风固沙的作用，又可增加饲草料的数量，同时可大幅度减少工作量。不论莠麦还是油菜残茬，不同高度的间作处理，土壤风蚀模数随风速的增大而增大，风蚀模数按指数曲线关系递增。在一定风速吹蚀时，残茬高度从 5cm~25cm 变化，不同残茬带+秋翻裸露带土壤风蚀模数与残茬高度以线性关系拟合较好，残茬高度增加，土壤风蚀模数降低。对不同残茬土壤风蚀模数(Y)随茬高(X_1)和吹蚀风速(X_2)的变化进行二元回归，得到莠麦残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y = -0.023527 - 0.009268X_1 + 0.036206X_2 + 0.000625X_1^2 - 0.001650X_2X_1 + 0.001345X_2^2$$

$$R^2 = 0.8877$$

油菜残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y = 0.025265 - 0.00709X_1 + 0.041082X_2 + 0.000431X_1^2 - 0.00157X_2X_1 + 0.001117X_2^2$$

$$R^2 = 0.8916$$

(6) 残茬中风积量在带宽小于 6m 时，风积量随带宽增加而减小，随着残茬带宽的继续增加，风积量又开始增加，基本到 10m 后又开始下降，因此在 1.2m~10.8m 基本出现波峰和波谷两个临界点，出现波峰的临界点为 10m，出现波谷的临界点为 6m。与残茬带间作的不同带宽秋翻地中央风积量随带宽加大不断降低，到 3.6m 带宽左右达到最低值，之后随带宽增加而不断增加。

(7) 不同带宽残茬中风蚀量的监测结果与茬中风积量趋势基本相同，只是在数量上略有差异，基本在 5m 带宽内土壤风蚀量显著降低，5m~10m 范围土壤风蚀量缓慢上升，风积量相比不及风积量的增幅大，带宽超出 10m 土壤风蚀量又呈现稳中有降的变化趋势；不同带宽处理秋翻地的平均风蚀量随带宽变化规律基本为：在带宽 3m 之内呈直线下降，基本到带宽 3m 时土壤风蚀量最低，带宽大于 3m 小于 7m 这一阶段土壤风蚀量几乎又呈直线上升趋势，在 7m~10m 间土壤风蚀量基本保持稳定，而当带宽高于 10m 后土壤风蚀量又呈直线上升趋势；不同带宽残茬+等宽秋翻地即采取带状留茬间作模式后的土壤风蚀量变化规律基本与不同带宽秋翻地的变化趋势相同，因此认为带状间作农田土壤风蚀量的大小与残茬带的土壤风蚀量相关性不大，与间作耕翻地的土壤风蚀量息息相关。

6 生物篱与作物带状留茬间作耦合系统对减轻土壤风蚀的作用

生物篱是风障的一种形式，它能减轻风速并改变周围的气流，以至改变小气候、植物和土壤环境，从而减轻风蚀^[124, 125]。生物篱既包括常说的树、灌木、草等植

被，也包含了农田作物、根茬，还有人们为防风蚀而建立的篱笆、植物网等等^[51, 71, 80, 126, 127]。如前所述，宽度在 10m 以内的残茬带+等宽秋翻裸地间作对防治农田土壤风蚀具有很好的作用，但带宽超出 10m 后土壤风蚀呈直线递增，带状留茬间作的防风蚀作用大大降低，针对此种情况研究提出带田生物篱营建技术。带田生物篱是农田生物篱技术与保护性耕作的耦合系统，是在研究土壤风蚀机理、影响因素、治理途径和措施的基础上，结合地区生产实际，综合考虑生态、经济、社会效应而发展起来的技术体系。在阴山北麓防护林体系不完善的地区，营建农田生物篱防护体系，是减轻风蚀危害，保证当地农业、环境可持续发展的一项简单而行之有效的措施。在生物篱的选择上，既要考虑它防蚀效果，又要保证其和临近作物不会造成大的水肥竞争，同时又要兼顾其经济效益和易操作性。内蒙古农牧业科学院和中国农业大学经过多年的攻关研究认为向日葵秆残茬是一种有效的防风蚀生物篱，由于油用向日葵耐旱耐瘠，对土壤条件要求不高，沙土和粘土都可种植，适应性强。加上内蒙古后山地区气候冷凉的特点，在该地区种植油用向日葵基本不会发生病虫害现象。另一方面，由于种植油葵所需的劳力和其它物质投入相对较少，按中低产 2250 kg/hm² 计，产值可达 5850~6750 元/hm²，其纯经济效益高于马铃薯，是现阶段种植结构调整比较理想的搭配或替代作物^[64]。这样一来秋季将葵饼割掉收获油葵籽，把油葵残茬秆留在农田，既不影响农民收入，也会由于冬春季节油葵秆生物篱的存在减轻农田土壤风蚀，实现经济和生态效益的双赢。

6.1 油葵秆生物篱降低风速的作用

2006 年秋季作物收获后，作者^[79]针对油葵生物篱下风向不同距离处翻耕地的近地面风速进行了观测，结合生物篱及仪器特性，距篱不同位置风速 2 的高度为 30cm，无篱裸地风速 2 的高度为 20cm，计算地表粗糙度的结果见表 21。

表 21 距生物篱不同位置平均风速和粗糙度对照表

Table 21 Comparison of average wind speed and roughness on different plots of the biological fence

与生物篱距离 (m)	200cm 风速 (m/s)	风速 2 (m/s)	地表粗糙度 (cm)
0.2	4.2	1.7	2.50
0.3	6.1	3.2	1.76
0.5	4.6	2.4	1.78
1.0	4.4	2.5	1.48
3.0	4.4	2.5	1.48
5.0	2.1	1.2	1.46
无篱裸地	6.31	4.63	0.23

由表 21 结果可见，生物篱下风向地表粗糙度随着与生物篱距离的增加而减小，在测定范围内，粗糙度在距离生物篱 0.2 米处最大，在 0.2~1m 之间迅速降低，到距离生物篱 1m 处时减小了 40.8%，之后变化平缓，在 1~5m 之间又减少了仅 0.8%。裸地粗糙度最小，仅为最大值的 9.2%。可见，生物篱的保留明显增大了地表粗糙度，有利于降低风速，减少地表风蚀的发生。

从 200cm 高度风速测定结果看，在距离生物篱 0.2~0.3m 之间风速迅速增加，可能是由于油葵秆生物篱的阻挡使气流抬升所致，在距离生物篱 0.3~5m 范围内呈减小趋势，其中 0.3~1m 之间降低速度较快，1~5m 之间降低缓慢。最大风速出现在距离生物篱 0.3m 处（6.1 m/s），接近大面积裸地的风速（6.31 m/s），最小风速在 5m 处，为 2.1 m/s。所以在一定范围内，油葵秆生物篱对其附近地面风速有明显的削弱作用。

风速 2 变化趋势与 200cm 高度风速变化趋势一致，在距离生物篱 0.2~0.3m 之间迅速增加，在距离生物篱 0.3~5m 范围内呈缓慢减小趋势。最大风速出现在距离生物篱 0.3m 处（3.2 m/s），远小于大面积裸地的风速（4.63 m/s），最小值在 5m 处，为 1.2 m/s。可见，与大面积裸地相比，油葵秆生物篱对间作农田土壤有很好的保护作用。

6.2 不同留茬地块在生物篱作用下的风速变化分析

不同作物残茬与油葵秆生物篱组合削减风速的能力是不一样的，刘晓光^[60]通过在内蒙古农牧业科学院武川旱作试验站旱地带状留茬间作与油葵秆生物篱耦合模式长期定位试验田的研究结果见表 22。

表 22 不同留茬地距篱相同点削减风速比较 (m/s)

Table 22 Wind velocity at different height in different crop stubble field with the same distant to the biological fence

距地面高度	草谷子留茬距离 4.5m	油菜留茬距离 4.5m	苜蓿留茬距离 4.5m
5cm	0.44	0.55	0.91
10cm	0.94	0.82	1.56
30cm	0.90	1.11	0.91
50cm	1.13	0.96	1.14
4 高度平均	0.85	0.86	1.13

表 22 表明：在距油葵秆生物篱 4.5m 处的草谷子、油菜和苜蓿残茬中，距地面 5cm 高度处的风速分别为 0.44m/s、0.55m/s 和 0.91m/s，说明油葵秆生物篱与草谷子残茬组合削减风速的能力较强，与苜蓿组合消减风速的能力较弱，与油菜残茬组合

消减风速的能力居中。说明在有油菜秆生物篱存在的情况下，草谷子茬的保护作用较强，苜蓿茬的保护作用较弱，这与草谷子茬秸秆粗壮，覆盖度大，油菜残茬立杆稀疏，覆盖度低，苜蓿残茬经过整个冬春季的吹蚀，大部分覆盖物被风吹走，留下几乎呈丛状分布的残茬低于风蚀能力下降有关。从距地面 5cm、10cm、30cm 和 50cm 的 4 个高度的风速平均值分析也得出与前面述及相同的结论。

6.3 不同留茬地块在生物篱作用下的风蚀量变化分析

通过 2007 年 10 月 21 日~2008 年 4 月 19 日在内蒙古农牧业科学院武川旱作农业研究中心生物篱配合作物带状留茬间作长期定位试验埋置的风蚀圈的风蚀量测试结果，发现油菜秆生物篱具有很好的防风蚀作用。田间布置如图 62，监测结果见表 23 和图 63，不同位置篱（茬）的风蚀降低率见表 24。

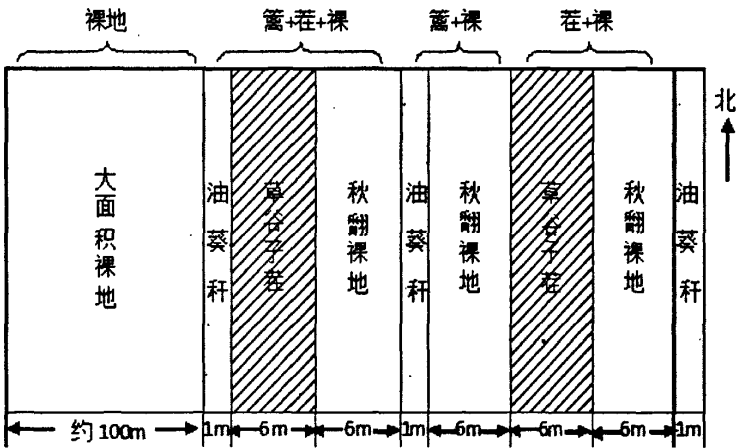


图 62 生物篱保护下的作物间作留茬试验设计

Fig.62 Design of field experiments of intercropping strips with crops stubble protected by windbreak

表 23 不同地块距篱（茬）不同位置风蚀量

Table 23 The amount of wind erosion at different distance from hedge or stubble in different field

不同地块	距篱(茬)不同位置裸地风蚀量 (t/hm ²)					茬中央
	1m	2m	3m	4m	5m	
大面积裸地			2.875			—
篱+裸地	0.851	0.771	1.443	1.955	1.269	—
篱+草谷子+裸地	0.092	0.258	0.899	1.496	-0.266	0.304
草谷子+裸地	0.389	0.431	1.017	1.842	0.982	0.888

表 23 的监测结果表明, 在没有油葵秆生物篱和草谷子茬的保护下, 大面积秋翻裸露农田的多点平均风蚀量为 $2.875\text{t}/\text{hm}^2$, 在监测结果中风蚀量最大。在有 3 行油葵秆生物篱的保护下, 距该篱下风向分别为 1m、2m、3m、4m 和 5m 的秋翻裸地不同位置处风蚀量分别为 $0.851\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $0.771\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $1.443\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $1.955\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $1.269\text{t}/\text{hm}^2$, 与大面积裸地相比不同位置油葵秆生物篱对土壤风蚀量的降低率分别为 70.40%、73.18%、49.81%、32.00%和 55.86%; 在草谷子茬+秋翻裸地处理中, 距草谷子茬分别为 1m、2m、3m、4m 和 5m 的秋翻裸地不同位置风蚀量分别为 $0.389\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $0.431\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $1.017\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $1.842\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $0.982\text{t}/\text{hm}^2$, 与大片裸地的风蚀量相比, 在草谷子残茬的保护下间作裸地距残茬不同距离处土壤风蚀量的降低率分别为 86.47%、85.01%、64.63%、35.93%和 65.84%; 在油葵秆生物篱、草谷子残茬的双重保护下, 距草谷子茬分别为 1m、2m、3m、4m 和 5m 的间作秋翻地不同位置风蚀量分别为 $0.092\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $0.258\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $0.899\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $1.496\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $-0.266\text{t}/\text{hm}^2$, 与草谷子茬+秋翻裸地处理距草谷子残茬不同距离秋翻裸地的土壤风蚀量相比, 油葵秆生物篱对土壤风蚀量的降低率分别为 76.35%、40.14%、11.60%、18.78%和 127.09%, 与油葵秆生物篱+秋翻裸地处理距篱不同距离秋翻裸地的土壤风蚀量相比, 草谷子残茬对土壤风蚀量的降低率分别为 89.19%、66.54%、37.70%、23.48%和 120.96%。总之, 如图 63 所示, 在距油葵秆生物篱或草谷子残茬下风向的间作秋翻地不同位置处, 土壤风蚀量基本呈现先增加后减小的趋势, 大致在距篱或茬 4m 左右, 土壤风蚀量达到最大, 之后又由于与下一油葵秆生物篱临近而变得逐渐减小, 尤其在油葵秆生物篱和草谷子茬的双重保护下, 在距草谷子茬 5m 处非但不发生风蚀, 反而发生风积, 因此监测结果显示为负值。从有篱和无篱的两个草谷子茬中央的风蚀圈测定结果看, 有篱时, 风蚀量为 $0.304\text{t}/\text{hm}^2$, 无篱为 $0.888\text{t}/\text{hm}^2$, 可见篱可以使作物残茬的风蚀降低率减少 65.76%, 因此不论从间作裸地还是残茬都表明油葵秆有很好的防蚀效果。

表 24 不同位置篱(茬)的风蚀降低率

Table 24 The percent to reduce wind erosion of hedge or stubble at different distance

比较	距篱(茬)不同位置风蚀降低率%				
	1m	2m	3m	4m	5m
与大片裸地比较篱降低风蚀	70.40	73.18	49.81	32.00	55.86
与草谷子+裸地比篱降低风蚀	76.35	40.14	11.60	18.78	127.09
与大片裸地比谷茬降低风蚀	86.47	85.01	64.63	35.93	65.84
与篱+裸地比谷茬降低风蚀	89.19	66.54	37.70	23.48	120.96

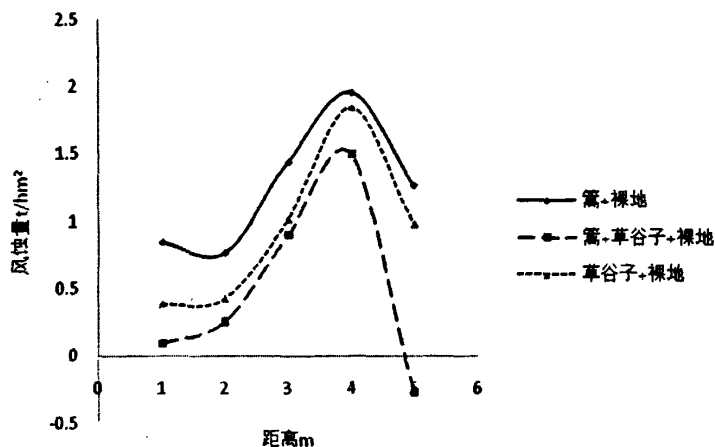


图 63 不同地块距篱(茬)不同位置风蚀量

Fig.63 The amount of wind erosion at different distance from hedge or stubble in different field

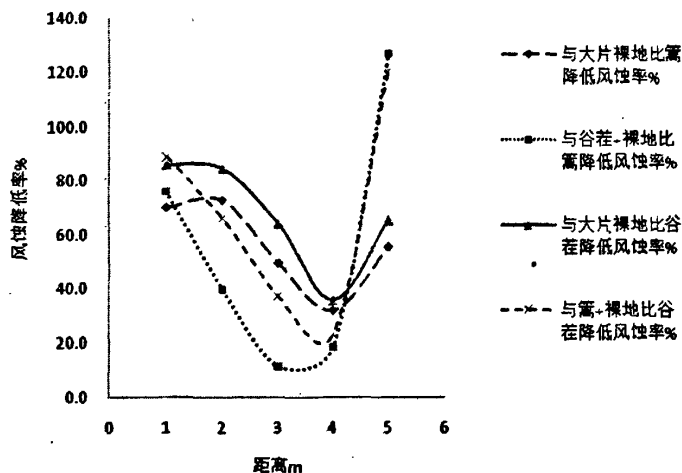


图 64 不同位置篱或茬的风蚀降低率

Fig.64 The percent to reduce wind erosion of hedge or stubble at different distance

从图 64 所示的结果看, 由于油葵秆生物篱和草谷子茬的存在, 其下风向秋翻裸地距离篱或茬不同位置土壤风蚀量降低率基本呈“V”字型分布, 距离篱或茬越近, 土壤风蚀量降低率越大, 然后逐渐减小, 临近下一生物篱时土壤风蚀量降低率又增大。与大片裸地相比, 单纯的油葵秆生物篱降低土壤风蚀量的效果不及草谷子残茬, 基本都在距离篱或茬 4m 的地方风蚀量降低率达到最小值, 在距篱或茬 5m, 也就是距下一油葵秆生物篱 1m 的地方风蚀降低率提升, 这一位置土壤风蚀量的降低率大致与距篱或茬 3m 的位置相当。将油葵秆生物篱和草谷子茬双重保护下的秋翻裸地与没有油

葵秆生物篱的草谷子茬+秋翻裸地进行比较分析此种设计下篱的保护作用,发现篱降低风蚀率在 3m 左右降低率最小,在距茬 5m 处最大,由于此处土壤风蚀量小或有富集,降低土壤风蚀率高于 100%;如果再与篱+裸地比分析草谷子茬的保护作用,发现其降低风蚀率趋势与篱类似,只是在降低风蚀的作用上更好,而且在 4m 左右最低。因此从这个角度分析认为,草谷子残茬和油葵秆生物篱对间作秋翻裸地都具有很好的保护作用,草谷子茬防风蚀效果更好,贡献率更大,如果将二者结合起来对间作秋翻裸地进行双重保护,会起到非常好的防护效果,尤其在带宽超出 10m 后,是非常好的选择。

6.4 油葵秆生物篱降低土壤风蚀量的风洞测试

2008 年作者为进一步证实生物篱对土壤风蚀量有无降低作用,在野外移动式风洞中进行了模拟测试,所用油葵秆取自武川旱作农业研究中心带田生物篱营建技术长期定位试验田,按照大田实际播种密度在风洞中设计 3 行油葵秆,行距为 40cm,株距为 50cm,贴近风洞气流入口处按三角状错位插入地表,株高约 70cm,间作裸地宽度设计为 3m,测试结果见表 25。

表 25 油葵秆生物篱降低土壤风蚀量的效果

Table 25 Effects of oil sunflower straw on reducing wind erosion

处理	不同风速下风蚀模数 $g. (m^2.min)^{-1}$				
	5m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s
裸地	0.117	0.214	0.348	0.570	1.464
篱+裸地	0.105	0.170	0.290	0.541	1.367

表 25 结果表明,在风速分别为 5m/s、6m/s、9m/s、12m/s 和 15m/s 的净风吹蚀下,裸地土壤风蚀量分别为 $0.117g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.214g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.348g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.570 g. (m^2.min)^{-1}$ 和 $1.464g. (m^2.min)^{-1}$,篱+裸地的土壤风蚀量分别为 $0.105g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.170g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.290g. (m^2.min)^{-1}$ 、 $0.541g. (m^2.min)^{-1}$ 和 $1.367g. (m^2.min)^{-1}$,与裸地相比土壤风蚀降低率为 10.26%、20.53%、16.68%、5.03%和 6.60%,充分说明油葵秆生物篱对下风向裸地具有保护作用,可以在生产中推广应用。

6.5 小结

(1) 生物篱下风向地表粗糙度随着与生物篱距离的增加而减小,体现出油葵生物篱对其附近近地面有明显的减小风速的作用,1m 范围内变化较大,3m~5m 范围内变

化不明显。结合没有生物篱保护作用下裸地的观测结果,表明生物篱的存在,有效降低了近地面风速,显著提高了地表粗糙度,从而对减轻农田风蚀具有决定性的作用。通过对不同留茬地与生物篱组合下,距篱相同位置的不同高度的风速进行测定,不同组合方式削减风速效果不同,其中油菜地内风速减小较为平缓,而草谷子地内和苜蓿地内风速减小相对要快些。

(2) 在距油菜秆生物篱或草谷子残茬下风向的间作秋翻地不同位置处,土壤风蚀量基本呈现先增加后减小的趋势,大致在距篱或茬 4m 左右,土壤风蚀量达到最大,之后又由于与下一油菜秆生物篱临近而变得逐渐减小,尤其在油菜秆生物篱和草谷子茬的双重保护下,在距草谷子茬 5m 处非但不发生风蚀,反而发生风积。从有篱和无篱的两个草谷子茬中央的风蚀圈测定结果看,篱可以使作物残茬的风蚀降低率减少 65.76%,因此不论从间作裸地还是残茬都表明油菜秆有很好的防蚀效果。

(3) 由于油菜秆生物篱和草谷子茬的存在,其下风向秋翻裸地距篱或茬不同位置土壤风蚀量降低率基本呈“V”字型分布,距离篱或茬越近,土壤风蚀量降低率越大,然后逐渐减小,临近下一生物篱时土壤风蚀量降低率又增大。草谷子残茬和油菜秆生物篱对间作秋翻裸地都具有很好的保护作用,草谷子茬防风蚀效果更好,贡献率更大,如果将二者结合起来对间作秋翻裸地进行双重保护,会起到非常好的防护效果。

(4) 野外移动式风洞的监测结果表明篱+裸地的土壤风蚀量随风速的增大而增加,与裸地相比土壤风蚀降低率为 5.03%~20.53%,充分说明油菜秆生物篱具有防风蚀作用。

7 作物残茬及带状留茬间作的防蚀增产机理分析

土壤风蚀是指土壤及其母质在风力作用下发生的剥蚀、分选和搬运的过程^[12]。其实质是气流或气固两相流对地表物质的吹蚀和磨蚀过程^[13]。风蚀过程一般可分为三个阶段:颗粒起动、颗粒输送和颗粒沉积。当气流的剪切力和冲击力大于土粒或沙粒的重力和联结力,并克服地表的摩擦力时,土壤团聚体和基本粒子分离,土粒或沙粒就会发生运动,从而发生风蚀现象。在风力的作用下,由于土粒或沙粒大小、质量的不同,沙粒运动也表现出不同的移动方式。拜格诺·索科洛夫^[14]依据风力、颗粒大小和质量不同,将其分为悬移、跃迁和表面蠕动三种基本的运动形式,其中以跃移最为主要。造成土壤风蚀的影响因素很多,不仅有自然的因素,也有人为的因素,土壤风蚀是自然因素和人为因素相互叠加作用的综合表现。如何通过合理的人为活动干预,采取切实可行的技术和措施来减轻土壤风蚀危害一直是生态治理工作者研究的重点。为防治旱作农田的风蚀沙化,国内外科技人员艰苦探索,研究出许多切实可行的防风治沙技术。关于风沙区农田的防蚀措施,国内外强调营造农田防护林,华北和东北推广秸秆冬季覆盖,国外普遍推广机械化免耕。北方农牧交错

风沙区曾进行过机械化免耕技术推广,但由于马铃薯和豆类收获必须进行翻耕,本地区缺乏大型松耕和除草机械,再加上轮作倒茬难等问题,严重制约着机械化免耕技术的推广。其次由于粮食产量低,秸秆产出少且大部分用作饲料,加上冬春季风大风多,秸秆易被吹走,秸秆粉碎还田技术也难以被农民接受。为此在研究农牧交错带旱作农田风蚀规律的基础上笔者研究提出了防沙型带状留茬间作轮作技术,由于适宜条播、穴播等多种作物,又不需专用机械,不仅保障了马铃薯等经济饲料作物的正常种植,且集防风蚀、蓄水和增产为一体,为种植结构的调整和合理轮作倒茬奠定了基础,农民自发推广应用的积极性很高,近年来在内蒙古阴山北麓旱农区大面积推广,起到了很好的防风蚀、集水和增产效果,创造了很好的社会、经济和生态效益。现就作物残茬及带状留茬间作的防蚀增产机理进行分析。

7.1 作物残茬的降低风速作用

7.1.1 增加地表下垫面粗糙度

地表下垫面粗糙度(简称粗糙度)就是能使平均风速等于零的高度,单位是 cm 或 mm,用于衡量地表的粗糙状况,一般用 Z_0 表示。在风沙运动学中,粗糙度是反映下垫面特征的一个重要指标。粗糙度的测算方法较多,有直线图解法、直接估算法、表解法、曲线图解法和计算法^[120],通常情况下粗糙度(Z_0)可由拉依特曼公式进行计算,公式为:

$$\lg Z_0 = (V_1 \lg Z_2 - V_2 \lg Z_1) / (V_1 - V_2) \quad (11)$$

式中: V_1 、 V_2 分别为距地表 Z_1 、 Z_2 高度上的水平风速,一般 Z_1 取 30cm(或 50cm), Z_2 取 200cm,因此 Z_0 可由任意两个已知高度上的水平风速测定值计算出。1999 年春季作者和赵举在内蒙古农牧业科学院武川旱作农业研究中心 6m 宽苜蓿茬+等宽裸地 200cm 和 5cm 处的风速测定 20 次后求其平均值,测定结果见表 26^[17]。

表 26 残茬带与间作耕翻地粗糙度比较

Table 26 Contrast of roughness length between strip intercropping with stubble and un-mulched field

地块	200cm 风速 (m/s)	5cm 风速 (m/s)	粗糙度 Z_0 (cm)
大面积秋翻裸地	11.4	5.8	0.12
6m 宽苜蓿茬中	13.3	3.5	1.41
间作秋翻裸地	11.4	5.2	0.25

注:赵举博士论文,2002

由表 26 结果知,苜蓿茬中央粗糙度 Z_0 值为 1.41cm,大面积秋翻裸地的地表粗

糙度为 0.12cm，二者相比莠麦茬中粗糙度显著增加，几乎为大面积秋翻裸露地的 12 倍，说明作物残茬大幅度增加了地表粗糙度，地表粗糙度的增加也就意味着零风速出现的高度增加，因而增强了近地面气流的阻碍作用，在很大程度上减少了地表风蚀。由表中知与 6m 宽莠麦茬相邻的等宽间作秋翻地中央粗糙度为 0.25cm，较大面积秋翻裸地增加粗糙度 0.13cm，说明作物立杆留茬不仅使残茬带中的粗糙度增加，也促进了间作秋翻裸露地粗糙度的增加，因此也对间作裸露带产生了防护作用，这可能是间作裸露地风蚀量降低的主要原因之一。结合表 21 油葵秆生物篱的测定结果也充分证明作物残茬显著提高了地表粗糙度，从而对减轻农田风蚀具有决定性的作用。

7.1.2 作物残茬可以降低近地面风速

作物残茬可以有效的降低近地面风速，除了能降低自身的地表风速外，还对茬地外背风裸地的风速降低有很大作用。表 9 表明：当外界 200cm 高程风速在 7.1m/s~17.5m/s 变化时，小麦残茬带中央近地面 5cm 风速只有自然风速的 1/4 左右，与小麦茬间作的秋耕裸地 5cm 处风速平均降低了 53.2%左右。结合图 40 风洞试验结果都表明以作物留茬形成保护带可有效降低相邻传统耕翻带的风速值，进而起到减少土壤风蚀的效果。

7.2 作物残茬可以提高土壤水分含量

7.2.1 作物残茬可以聚集降雪

冬春积雪的多寡一般会对春播时土壤墒情产生影响，尤其在旱作区积雪可能是的土壤墒情的主要来源之一。在内蒙古阴山北麓由于冬春季节风大风多，马铃薯的大面积种植造就了该地区大范围的耕地地表裸露，降落到裸露耕地的积雪往往尚未融化到土中就被大风吹到洼地或附近的沟谷内，融化到土壤中的积雪与降雪量相比显得了了无几，因此对增加墒情来说作用不大。

表 27 留茬地和间作裸露地雪后表层土壤水分比较 (%)

Table 27 Contrast of soil moisture between stubble field and un-mulched field after snow

测 定 位 置	0~5cm 土壤水分		5~10cm 土壤水分	
	含 量	增 量	含量	增量
大面积裸地	5.5	—	7.7	—
间作裸地距茬 1.5 m 处	9.6	4.1	8.0	0.3
留茬地内	15.3	9.8	13.7	6.0

注：赵举博士论文，2002

采用带状留茬间作的旱作农田降雪后的实测结果与大面积裸露农田表层土壤含水量却发生了很大变化,1998年4月16日作者与赵举雪后的实地观测表明(表27):在0~5cm土层中,大面积裸地土壤含水量为5.5%,留茬地和距茬1.5m间作裸地中土壤含水量分别为15.3%和9.6%,与大面积裸地土壤含水量相比留茬地和距茬1.5m间作裸地中土壤含水量分别增加了4.1%和9.8%;在5cm~10cm土层中,大面积裸地土壤含水量为7.7%,留茬地和距茬1.5m间作裸地中土壤含水量分别为8.0%和13.7%,与大面积裸地土壤含水量相比留茬地和距茬1.5m间作裸地中土壤含水量分别增加了0.3%和6.0%。两土层中都是留茬地土壤含水量>间作裸地>大面积裸地,说明作物残茬不仅聚积了降雪而且促进了降雪融化后的下渗,因而提高了土壤墒情。

7.2.2 留茬地的增墒效果

从北方自然特点和生产要求分析,秋翻和春翻相比,它能接纳、积蓄伏秋雨水,减少地面径流,贮墒防旱,能有充分的时间熟化耕层土壤,改善土壤性状,因此整个北方地区农民的传统习惯都认为都秋翻好于春翻,也就有了“秋耕耕出水,春耕耕出鬼”、“隔冬划道印,等于上道粪”、“秋天翻地如水浇,开春无雨也出苗”的谚语^[128]。但由于北方农牧交错风沙区冬春季节风大风多,如果大面积农田采取秋翻,土壤风蚀会十分严重,因此从防治土壤风蚀的角度考虑必须保留一定量的留茬田间隔分布于秋翻裸露农田中,让作物的立秆留茬降低风速,减少风蚀,实际上作物留茬地中的土壤水分含量要高于秋翻裸地,由于马铃薯种植必须进行春翻作业,这样一来作物留茬既提高了土壤水分,又防治了土壤风蚀,这也是带状留茬间作技术大面积推广的核心所在。1999年4月8日,作者和赵举通过在6.0m的带状留茬间作地与秋耕翻裸露地,对经过一个冬春季后的耕层土壤水分进行了比较分析,发现经过一个冬春,留茬地和间作耕翻地耕层的含水率都高于秋耕后的大面积裸露地,尤其留茬地在0~5cm、5~10cm、10~20cm和20~30cm各个土层的含水率依次高出28.1%、76.5%、41.1%和74.5%。

经过2008年4月16日在内蒙古农牧业科学院武川旱作农业研究中心防沙型带状留茬间作长期定位试验田0~60cm土层土壤水分测定(表28)结果知,留茬田的土壤水分明显好于秋翻裸地,10cm高莠麦茬和20cm高莠麦茬比较,各个层次都显示20cm高留茬田水分含量较高,说明留高茬更有利于土壤含水量的增加。高度相同的莠麦和草谷子两种茬口比较,草谷子茬各个层次土壤水分含量不及莠麦茬,按照传统习惯草谷子茬要比莠麦茬的覆盖度大,而且秸秆也较莠麦硬而粗壮,出现这样的结果与2007年作物出苗时特殊的干旱,而草谷子种子小,出苗后遭干旱制约大部分掉芽导致密度大幅度下降覆盖度降低有关。但仅从留茬后的土壤水分含量来分析,足可以证明作物留茬后的增墒作用。作物残茬不仅由于拦截降雪和雨水后提高了残茬田的土壤水分,而且对间作秋翻地的土壤水分提升有促进作用。

表 28 作物留茬田及裸露耕翻地耕层土壤水分变化

Table 28 Contrast of soil moisture of stubble and un-mulched fields

土层 (cm)	不同处理土壤水分含量%				
	10cm 高莜麦茬	20cm 高莜麦茬	20cm 高草谷子茬	间作秋翻裸地	大面积裸地
0~5	9.11	11.52	7.51	5.80	4.12
5~10	10.86	11.03	10.47	8.96	7.33
10~20	11.38	11.96	11.54	9.81	8.61
20~30	13.13	13.35	10.34	9.63	9.53
30~40	15.06	15.83	10.85	9.32	9.12
40~50	13.92	14.16	10.20	10.03	9.47
50~60	10.07	10.33	9.83	9.29	9.20

从表 28 间作秋翻地和大面积秋翻的土壤水分比较,各个层次都表现为间作秋翻地的土壤含水量较高,基本到 50~60cm 比较接近,这主要是由于残茬带消减了近地面风速,增加了地表粗糙度,导致大量的积雪在间作裸露带滞留,积雪在春季融化后不断向下移动,导致了土壤水分含量的增加,这种现象尤其在降雪频繁而且降雪量较多的年度(如 2007 年)表现尤为明显,也就出现了如表 28 所示的留茬田和间作秋翻田土壤含水量明显高于大面积秋翻地土壤含水量的结果。从第五章的测试结果知道,土壤水分含量(尤其表层)的高低与土壤风蚀强度息息相关,含水量越大,土壤临界起动风速越高,抵御风蚀的能力越强,因此从这个意义上也充分说明作物残茬带对间作裸地具有很好的防护作用。

7.2.3 作物残茬可以降低表土水分蒸发

陈智^[123]研究表明由于作物残茬的作用,防止了阳光对地表的直接照射,减少了土壤水分的蒸发,避免了由于土壤耕翻导致的水分大量散失。同时由于留茬带的保护,增加了间作裸露地的地表粗糙度,使得近地面风速降低,也抑制了间作裸地土壤水分的蒸发速度,进而也促进了间作裸露地土壤含水量的增加。据高可华^[129]在与留茬带迎风和背风两侧相邻的间作裸地不同位置水分蒸发快慢的监测结果表明留茬带的迎风侧 1.5m 处水分降低了 94.5%,迎风侧 0.6m 处降低了 82.9%。在背风侧秋翻裸地中,距茬分别为 0.6m、1.2m、1.8m、2.4m 和 3.0m 不同位置处水分降低率分别为 81.2%、82.2%、77.9%、82.1%和 79.4%,与迎风侧 1.5m 位置的水分降低率比较,背风侧土样水分降低率减少了 12.3~16.6 个百分点,说明由于作物留茬带的作用,减慢了间作裸地水分的蒸发速度。因此由于作物残茬的存在除降低了残茬带中的土壤水分蒸发外也减少了间作裸地的水分蒸发,进而增加了间作裸地地表土壤湿

度, 土壤湿度的增加使得土壤临界起动风速增加, 与大面积裸地相比土壤风蚀量显著降低。

7.3 作物残茬缓减土壤质地退化

就物理性质而言, 粒径 $< 0.01\text{mm}$ 的颗粒, 才具有明显的吸湿性、粘结性和可塑性, 董治宝^[24]等根据野外实地观测以及灌丛沙堆的粒度分析, 将粒径大于 1.00mm 的颗粒定为内蒙古阴山北麓地区的不可蚀性颗粒, 因此我们把 $0.01\text{mm} \sim 1\text{mm}$ 即卡庆斯基描述的物理性砂粒含量定为可蚀性颗粒。第五章的测试结果表明土壤中物理性砂粒含量越高, 土壤的临界起动风速越低, 也越易风蚀。作者和赵举通过 2000 年 11 月到 2001 年 4 月在内蒙古农牧业科学院武川旱作农业研究中心试验地内放置未改进的风蚀圈, 对风蚀后土壤采用筛分法和沉降法, 进行风蚀对土壤粒级影响的试验比较 (表 29), 结果表明经过整个冬春的风蚀分选, 莠麦留茬地和间作耕翻地距茬不同距离处土壤粒级发生了不同程度的粗化, 而且秋翻裸地的粗化程度要高于留茬田, 大面积秋翻地的粗化程度高于间作秋翻地, 因此说明该地区发生了不同程度的风蚀现象。

表 29 留茬带对土壤粒级 (mm) 的影响分析

Table 29 The effect on soil particles of strip intercropping with stubble

处理	土壤机械组成 (%)						
	$>1\text{mm}$	$1-0.25\text{mm}$	$0.25-0.05\text{mm}$	$0.05-0.01\text{mm}$	$0.01-0.002\text{mm}$	$<0.002\text{mm}$	$1-0.01\text{mm}$
原始土	4.1	18.6	18.5	10.3	16.7	31.8	47.4
莠麦茬中	4.3	20.4	19.8	12.9	14.9	27.7	53.1
1m	5.9	24.1	21.6	11.8	13.3	23.3	57.5
2m	4.6	26.6	22.4	12.2	12.2	22.0	61.2
5m	5.2	25.8	23.1	11.9	10.7	23.3	60.8
7m	5.7	25.4	22.9	12.5	13.3	20.2	60.8
大面积裸地	6.4	26.8	24.6	13.8	9.3	19.1	65.2

从表 29 的测定结果看, 风蚀圈放置前的原始土物理性砂粒含量为 47.4%, 经过冬春季的吹蚀, 莠麦茬中及距茬分别为 1m、2m、5m、7m 的不同位置和大面积秋翻地中物理性砂粒含量分别为 53.1%、57.5%、61.2%、60.8%和 65.2%, 与原始放置土相比分别增加了 5.7%、10.1%、13.8%、13.4%、13.4%和 17.8%, 物理性砂粒含量的增加使的土壤的临界起动风速减小, 进而增加土壤风蚀量。仅从土壤物理性砂粒变化看, 残茬带增量较小, 间作秋翻地增量次之, 大面积裸地增量最大, 因此从

这个意义上分析认为由于作物残茬的保护作用，抑制了间作裸地物理性砂粒含量的增加，从而提高了土壤临界起动风速，降低了风蚀量，减少了细微颗粒的吹蚀，使得土壤质地与大面积裸地相比变化较小，而且作物残茬带还由于抑制了间作裸地细微颗粒的减少，从而延缓了土壤质地的退化，也就大大延缓了土壤生产力的降低。因此从提高土壤生产力、防治土壤风蚀的角度出发，北方农牧交错带应尽可能采取保护性耕作少耕措施，提高耕地质量。

7.4 留茬间作可以增加土壤团聚体

苏永中^[130]研究表明，耕层土壤干团聚体有利于控制风蚀，如果土壤表层干团聚体的数量保持在 60%~75%，可以有效地控制裸露农田的土壤风蚀。多数研究^[131-134]均表明，留茬田的不可蚀性颗粒的团聚体含量要较耕翻地高，那么对于采取带状留茬间作轮作的农田土壤不可蚀性团聚体含量要较大面积耕翻田大的多，因此可以有效地减少土壤风蚀。

7.5 留茬间作可以提高土壤肥力

因为土壤细颗粒中含有大量的养分和有机物质，因此风蚀一方面表现为土壤中细颗粒的吹失，机械组成变粗，表土层变薄，另一方面表现为土壤中的营养物质流失，肥沃土壤发生贫瘠化。在阴山北麓农牧交错风沙区，土壤以栗钙土为主，30~80cm 以下为钙积层，在风蚀较严重的地区，每年每公顷要刮走细土 30000~60000kg，折合每公顷损失氮素 40.7kg，磷素 31.5kg^[17]。自 50 年代末以来，本区的年平均风蚀量在 0.96~2.74mm 之间^[24]。通过以上分析已经证明采取残茬带与裸露带间隔分布，可以有效的减少土壤风蚀量，降低土壤的粗化程度，从而也就有效的减少了土壤养分的流失。从表 30 的数据也可以进一步得到证实。

表 30 不同处理风蚀后土壤养分变化

Table 30 The comparison of soil nutrients after wind erosion among different managements

处理	有机质 %	全氮 %	全磷 %	全钾 %	碱解氮 mg/kg	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
大面积秋翻裸地 (ck)	1.86	0.089	0.053	1.72	51.0	8.93	80.0
7.2m 带田裸地	1.97	0.102	0.0573	1.84	76.3	9.91	92.5
7.2m 苜蓿茬带	2.08	0.118	0.0591	2.13	88.2	15.4	128.0
与对照比间作裸地增加%	5.90	14.6	11.7	7.0	49.6	11.0	15.6
与对照比茬地增加%	11.8	32.6	15.2	23.8	72.9	72.5	60.0

注：赵举博士论文，2002

表 30 结果表明, 经过一个冬春的吹蚀, 由于作物残茬的保护, 有效的减少了土壤养分的流失。大面积秋翻裸地中土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾的含量分别为 1.86%、0.089%、0.053%、1.72%、51.0mg/kg、8.93mg/kg 和 80.0mg/kg, 莠麦茬地内和茬地保护下的裸地各种养分含量都高于秋耕翻裸地的含量, 与大面积秋翻地的土壤养分相比 7.2m 间作秋翻地的土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾的含量分别增加了 5.9 %、14.6 %、11.7%、7.0%、49.6%、11.1%和 15.6%, 7.2m 莠麦茬地内土壤养分分别增加了 11.8%、32.6 %、15.2%、23.8%、72.9%、72.5%和 60.0%。土壤养分含量的增加也为来年作物的稳定增产奠定了基础。再加上作物间相互轮作倒茬, 使大部分作物根茬经分化腐烂将植株内养分回田, 年复一年, 土壤的养分状况会大幅度好转, 避免了土壤板结和作物连作造成的营养失衡。据我们在武川县可镇三盛太行政村连续 8 年种植马铃薯的农田实测, 土壤有机质几乎下降为零, 有效磷极低, 而且在以往种植马铃薯不发生病虫害的情况下出现了病害现象, 足可以证明作物长期连作的危害, 因此非常有必要推广条播作物与马铃薯带状留茬间作, 既保证了当地经济作物马铃薯的大面积种植, 也实现了作物残茬降低土壤风蚀的效果, 进一步促进旱作农业的良性循环和持续发展。

7.6 作物残茬可以增加地表覆盖度

臧英^[135]研究表明作物秸秆残茬覆盖, 具有较强的固土能力, 可增强土壤的抗风蚀能力。残茬覆盖的抗风蚀能力主要与覆盖度和高度有关, 残茬覆盖度与风蚀量存在负相关关系, 当覆盖度为 57.6%, 风速<13m/s 时, 风蚀量接于零; 随着秸秆残茬覆盖度的减少, 土壤风蚀量开始缓慢增加, 覆盖度减少至 20%时, 风蚀量开始大幅度增加。周建忠^[136]等研究表明, 残茬高度与起动风速间存在正相关关系, 而且随风速的增加风蚀量大幅度增加。随着覆盖度的变化, 风蚀的质和量均发生了变化, 当覆盖度为 57.60%时, 只有微弱的风蚀现象, 没有风沙流发生, 当覆盖度减小至 20.56%时, 出现较强的风沙流, 当覆盖度减小至 9.68%时, 土壤风蚀量明显增大, 这说明土壤风蚀量随残茬覆盖度的减小而增加。由于作物立秆留茬的作用, 使残茬带覆盖度增加, 因此与大面积裸露农田相比, 残茬带与裸露带间隔分布大幅度降低了土壤风蚀量。

7.7 留茬间作可以减少土壤风蚀量

由以上的分析知作物残茬与裸露带间隔分布可以增加地表粗糙度、消减近地面风速、在拦截降雪聚雪、减少水分蒸发的同时可以提高土壤水分含量、由于残茬的保护抑制了间作裸地物理性砂粒含量的增加从而提高了土壤临界起动风速、由于抑制了间作裸地细微颗粒的减少延缓了土壤质地的退化, 同时使土壤不可蚀性团聚体含量增加而且大幅度增加了地表覆盖度等种种因素导致了土壤风蚀量的减少。赵举

^[17]曾经对留茬带距茬带不同位置减轻风蚀的效果进行研究,认为连片的带状留茬间作形成一个整体,带与带之间互相影响,不仅使茬带的背风面的风速明显降低,而且在上风方迫使气流爬升,迎风面也形成一定的弱风区,使风速减低。因此随着距茬距离的增加,风蚀量的降低率呈“V”型分布,而且随着留茬带宽的增加,其保护的范围和效果降低。

从本文第六章的试验结果,也可以看出带宽 1.2m~10.8m 范围内间作裸地的土壤风蚀量基本在带宽 3m 之内呈直线下降,基本到带宽 3m 时土壤风蚀量最低,带宽大于 3m 后小于 7m 这一阶段土壤风蚀量几乎又呈直线上升趋势,在 7m-10m 间土壤风蚀量基本保持稳定,而当带宽高于 10m 后土壤风蚀量又呈直线上升趋势。总的来说与大面积秋翻地比较,由于残茬带的保护,间作裸露农田土壤风蚀量大幅度下降,但带宽超出 10m 后土壤风蚀量大幅度增加,因此需要采取如第七章所述的生物篱营建技术进行防护。试验表明由于油葵秆生物篱和草谷子茬的存在,其下风向秋翻裸地距篱或茬不同位置土壤风蚀量降低率基本呈“V”字型分布,距离篱或茬越近,土壤风蚀量降低率越大,然后逐渐减小,临近下一生物篱时土壤风蚀量降低率又增大。草谷子残茬和油葵秆生物篱对间作秋翻裸地都具有很好的保护作用,草谷子茬防风蚀效果更好,贡献率更大,带宽超出 10m 后,如果将二者结合起来对间作秋翻裸地进行双重保护,会起到非常好的防护效果。

7.8 带状间作可以提高光能利用率

实行合理的间作,使田间的作物结构由单一群体变为两种或多种作物的复合群体,由于作物种类不同,在种植方式上实行高矮搭配,使作物复合群体既增加了对阳光的截取与吸收,也减少了光能的浪费,因此可以实现光能的高效利用,促进作物增产。

7.9 带状间作可以提高作物水分利用效率

采用带状间作种植方式可以显著提高作物对水分的利用效率,据我们在内蒙古农牧业科学院武川旱作研究中心带状留茬间作长期定位试验田 2006 年监测(表 31),单作马铃薯和油菜耗水量分别为 280.49mm 和 281.05mm,产量分别为 3671.1kg/hm² 和 1617.6kg/hm²,水分利用效率分别为 13.09kg/(hm²·mm)和 5.76kg/(hm²·mm);采用间作轮作的马铃薯和油菜耗水量分别为 282.54mm 和 285.75mm,产量分别为 4534.8kg/hm² 和 2044.5kg/hm²,水分利用效率分别为 16.05kg/(hm²·mm)和 7.15kg/(hm²·mm),采用带状间作、轮作的马铃薯水分利用效率比单作马铃薯水分利用效率提高了 22.63%,油菜的水分利用效率较单作提高了 24.31%。因此说明带状留茬间作可以促进作物水分利用效率的提高,对作物产量产生积极的影响。

表 31 带状间作对土壤水分利用效率的影响

Table 31 The effect of intercropping on water use efficiency

处理	耗水量(mm)	产量 (kg/hm ²)	水分利用效率 (kg/hm ² .mm)	WUE 增加%
间作马铃薯	282.54	4534.8	16.05	22.63
单作马铃薯	280.49	3671.1	13.09	—
间作油菜	285.75	2044.5	7.15	24.31
单作油菜	281.05	1617.6	5.76	—

7.10 带状间作在作物生育期具有保水作用

在作物生育期间,带状间作与单作相比可以保蓄较多的水分,供作物所需。据秦红灵^[137]研究,间作马铃薯 0~30cm 土层土壤贮水量在淀粉积累期前均高于单作马铃薯,之后由于间作马铃薯长势优于单作,需要消耗更多的水分才低于单作马铃薯;通过 0~80cm 土壤水分的剖面变化也认为带状间作条件下的土壤水分优于单作。

7.11 带状间作可以增加边行优势

边行优劣势是生产实际中比较普遍现象,一般情况下两种作物如果在时间和空间上没有竞争,在同样的条件下,总是田边地埂的植株长势好,表现为秆壮、籽多、粒饱,这种现象称为边行优势或边行效应。反之,如果两种作物发生了空间和时间上的竞争,则会发生边行劣势。笔者根据内蒙古阴山北麓主要作物结构通过多年研究提出了以莜麦、饲料玉米留茬与耕翻作物箭舌豌豆间作的为牧而农模式,以草谷子、莜麦留茬与耕翻作物马铃薯间作的农牧结合模式,以油菜留茬与耕翻作物马铃薯间作的为卖而农模式由于考虑了作物间的高与矮、喜光与耐荫,使光能合理利用;时间上由于错开了生长期;按照作物地下部根系的深与浅、疏与密合理搭配作物间作组合,使不同土层水肥合理利用;而且从作物的抗逆性也进行了考虑,使耐旱与耐涝、抗病与染病、耐冷与易冻、抗虫与惹虫合理搭配作物,充分发挥了作物间的边行优势,因此具有很好的增产作用。通过设置 3.6、6.0、8.4m 不同带宽的条播作物与穴播作物间作多年定位试验,监测的条播作物带边行增产效应分别为 21.6%~31.0%、13.1%~21.9 和 7.5%~11.0%^[78]。

7.12 带状间作可以实现用地与养地相结合

不同作物,尤其是牧草与农作物带状间作、轮作是迅速恢复地力,提高牧草和农作物产量,缓减作物生长所需要的光、热、水、肥、气 5 大因子中“水肥”两个短线因子的重要途径,实行合理的间作、轮作,不仅是一种养地与用地的科学种植制度,而且是一项持续增加土地产出的省费增效措施。

表 32 草田间作、轮作土壤肥力变化

Table 32 Effects of pasture-crop intercropping and rotation on the soil fertility

项目	有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	速效氮 mg/kg	速效磷 mg/kg
试验前	2.0	0.58	31.80	0.6	2.58
试验后	2.6	0.73	38.79	0.65	2.05
增量	3.1	2.7	0.22	0.8	-0.19

注：引自赵全利，1992

据赵全利^[138]等在内蒙古和林格尔黄土丘陵区试验，采用毛苕子与谷子间作、轮作，0~50cm 土壤水分较单作提高了 106.3%~113.0%，而且各种作物对土壤水分的利用深度显著增加。由于不同牧草和农作物的合理间作、轮作，土壤的理化性状改善，土壤贮水量增加，土壤肥力在试验前后发生很大变化(表 32)，土壤有机质增加了 3.1g/kg，全氮增加了 2.7g/kg，仅速效磷减少了 0.19g/kg。

7.13 带状间作可以促进作物增产

由以上分析知道，带状间作减少了土壤养分的流失，提高了光能和水分利用率，保蓄了大量水分以及显著的边行增产优势，可以大幅度提高间作作物产量。2006 年的测产结果(表 33)可以进一步对带状间作在增产作用进行佐证。

表 33 带状间作对作物产量的影响

Table 33 The effect of intercropping on yield

模式	作物	产量 (kg/hm ²)		较单作增产(干重)%
		鲜重	干重	
间作、轮作	马铃薯	15549.5	3952.4	7.68
	草谷子	60136.1	17691.0	29.22
模式	马铃薯	17346.5	4534.8	23.55
	油菜(籽实)	2467.7	2044.5	26.39
单作模式	马铃薯	14042.4	3670.5	—
	草谷子	57703.5	13690.1	—
	油菜(籽实)	1593.0	1617.6	—

从表 33 知，与草谷子和油菜间作、轮作的马铃薯较单作马铃薯分别增产 7.688%

和 23.55%，间作草谷子和油菜较单作增产 29.22%和 26.39%，因此可以说明带状间作对作物具有增产作用。

7.14 小结

由于作物的立秆留茬，可以提高地表粗糙度，从而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；在冬春季节由于秸秆立茬的阻挡，使得残茬带内和间作裸地大量积雪滞留，而且由于残茬带可明显减慢水分的蒸发速度，从而增大了土壤湿度，加大了土粒间的结合力，也就增强了土壤的机械稳定性，积雪在春季融化后不断向下移动，导致了土壤水分含量的增加；此外由于作物残茬的保护作用，抑制了间作裸地物理性砂粒含量的增加，这一系列的作用使土壤临界起动风速大大提高。由于作物残茬的防护，增加了地表覆盖度，也减少了细微颗粒的吹蚀，延缓了土壤质地的退化，也就大大延缓了土壤生产力的降低，种种因素相互叠加，相互作用，导致了土壤风蚀量的减少，从而有效的减少了土壤养分的流失，土壤养分含量的增加也为来年作物的稳定增产奠定了基础。再加上作物合理的间作，相互轮作倒茬，使大部分作物根茬经风化腐烂将株内养分回田，在种植方式上实行高矮搭配，使作物复合群体既增加了对阳光的截取与吸收，也减少了光能的浪费，可以大幅度提高光能和水分利用率，而且由于充分发挥了作物的边行增产效应，实现了作物的稳定增产，由于用地与养地相结合，年复一年，土壤的养分状况会大幅度好转，促进了旱作农业的良性循环和持续发展。

8 结果与讨论

8.1 主要结果

8.1.1 总结提出野外土壤风蚀定量监测方法——风蚀圈法

针对目前野外土壤风蚀缺乏定量监测方法的现状，总结提出了风蚀圈法。该方法通过测定风蚀圈内放置土壤风蚀前后重量变化来描述监测区风蚀强度的大小，遵循的是差减法原理，可以对单位面积的土壤风蚀量做出监测。风蚀圈法的研究提出克服了目前野外风蚀观测法的局限性，由于其操作简单、容易携带，可长期放置在野外实现土壤风蚀的定量观测。而且由于镶嵌在土壤中，表面基本与地面相持平，可以防止局部微地形对风蚀过程的影响，底部尼龙布透水通气性好，可以保持风蚀圈内土样与周围土壤状态的一致性，实现风沙区风蚀季节土壤风蚀量的定量连续监测，而且由于本观测方法应用环境条件较宽，可以为统一制定风蚀强度分区分级和防治措施提供依据。

8.1.2 土壤湿度及粒径影响土壤临界起动风速和风蚀模数

在室内风洞经过对物理性砂粒含量不同的 7 种土壤不同风速梯度下历时 10min

的吹蚀,发现风蚀物收集量随高度的增加而减少。物理性砂粒含量低于 40%时(尤其 20%的土壤)在各种水分条件下,集沙仪在不同高度风蚀物收集量均很小,几乎不发生土壤风蚀,风蚀物收集量在空间上既符合指数变化函数关系又符合幂函数关系。在物理性砂粒含量高于 40%后,风蚀物收集量在空间上呈现幂函数曲线变化规律。9 m/s 风速基本上是风蚀物空间动态发生变化的临界点,风速低于或等于此临界风速,即低风速条件下风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律,风速大于 9m/s 后,风蚀物收集量与高度符合幂函数曲线变化规律。集沙仪在不同高度的总输沙量随风速的增加而增大,二者之间符合指数曲线变化关系。输沙量与水分呈负相关关系,水分增大输沙量降低。

土壤水分含量相同时,土壤物理性砂粒含量越高,临界起动风速越小,对于物理性砂粒含量为 22.84%和 31.31%这两种土壤,由于大于 2mm 的颗粒所占的比例超过 40%,必须在强大的风力作用下才能使其发生微弱的变化,因此几乎不会有风蚀现象发生,临界起动风速为 12.87m/s 和 9.79m/s,当物理性砂粒含量大于 40%后,大于 2mm 的颗粒所占的比例低于 20%,土壤临界起动风速降低,尤其当土壤含水量低于 3%时,土壤临界起动风速均低于 8m/s,对于物理性砂粒含量为 67.96%和 77.94%这两种土样临界起动风速低于 6m/s,因此极易发生风蚀。通过本研究,笔者认为沙粒起动风速与含水量呈线性相关,土壤含水量越大,临界起动风速越大。将土壤临界起动风速(Y)与物理性砂粒含量(X_1)和土壤含水量(X_2)进行二元回归后,方程为:

$$Y = 22.316960 - 0.515537X_1 + 0.604416X_2 + 0.003474X_1^2 + 0.000175X_2X_1 + 0.062116X_2^2, \\ R^2 = 0.9603.$$

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,风速越大土壤的风蚀模数越大,二者呈显著正相关,风蚀模数与风速按照指数曲线规律进行变化。对于物理性砂粒为 22.84%和 31.31%的两种土样,不同水分条件下土壤风蚀模数随风速的增大而增加,但土壤风蚀模数在各种水分条件下差异不大,只有在土壤含水量很低风速很高的情况下才发生微弱的风蚀现象,因此从土壤风蚀模数结合其临界起动风速分析都认为与物理性砂粒含量为 22.84%和 31.31%的类似土壤都不会是发生沙尘暴的沙尘源。如果不考虑土壤的其他理化性状,单纯考虑土壤的机械组成,土壤含水量在 1%~2%时,物理性砂粒含量高于 50%的土壤都能诱发沙尘暴,类似区域都可能是沙尘暴的发生源,而低于 50%的土壤不会产生沙尘暴,只能使土壤风蚀发生;土壤含水量在 3%~4%时,物理性砂粒含量高于 60%(包括 60%)的土壤都能诱发沙尘暴,而低于此含量的土壤不会产生沙尘暴;土壤含水量为 5%±时,物理性砂粒含量高于 65%的土壤都能诱发沙尘暴;土壤含水量为 6%±时,物理性砂粒含量高于 70%的土壤都能诱发沙尘暴;土壤含水量高于 7%时,任何土壤都不会产生沙尘暴。

阴山北麓旱作区冬春季节土壤表层含水量一般维持在 3%~4%,土壤的物理性砂

粒含量基本在 50%~80%, 单纯考虑土壤水分和土壤物理性砂粒含量认为阴山北麓旱作区大部分地区都是沙尘暴的发生源。阴山北麓如果都采取传统的耕翻作业, 风蚀模数介于 $1.439\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}\sim 7.751\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 之间, 相当于 $2.07\times 10^3\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}\sim 11.16\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 每年的土壤风蚀量约为 $1.01\times 10^9\text{t}\sim 5.40\times 10^9\text{t}$, 所以土壤风蚀相当严重。

以物理性砂粒含量、土壤含水量和吹蚀风速为自变量, 以土壤风蚀模数为因变量进行三元二次回归尝试, 得到风蚀模数(Y)随物理性砂粒含量(X_1)、土壤含水量(X_2)和吹蚀风速(X_3)变化的三元拟合关系式为:

$$Y=2.557463-0.080263X_1+0.527724X_2-0.478806X_3+0.00065X_1^2-0.009108X_2X_1+0.024633X_2^2+0.007399X_3X_1-0.039447X_3X_2+0.017207X_3^2, R^2=0.6711$$
。但由于室内风洞模拟采用净风吹蚀, 自然气候等因素对监测结果影响较小, 如果以此预报复杂多变的自然气候因素影响下的农田土壤风蚀量需要通过大量的田间试验数据来补充完善, 值得深入研究。

8.1.3 作物残茬高度及宽度会对间作农田土壤风蚀量产生影响

作物残茬可以有效的降低近地面风速, 除了能降低自身的地表风速外, 还对茬地外背风裸地的风速降低有很大作用。风速降低率随测点距茬距离的增加而不断减少, 距茬越远残茬所起到的保护作用越小。小风速时, 作物残茬带所能起到的对裸露耕翻带风速的削弱作用比较强, 所能保护的带宽范围也较长。高风速时, 留茬地对风速值的削弱作用要小一些。

秋翻裸地风蚀物空间分布规律与室内风洞实验模拟的物理性砂粒含量不同土壤的风蚀物空间分布规律一致, 在不同风速吹蚀下风蚀物空间变化随高度的增加而减少, 风速低于 9m/s 时, 二者呈指数曲线变化规律, 当风速高于 9m/s 后, 二者按照幂函数规律变化。对于留有不同残茬的 20cm 高全茬处理和残茬与等宽度秋翻裸地间作处理来说风蚀物空间分布比较复杂, 在 0~70cm 高度多次出现峰、谷, 风蚀物收集量与高度间用高阶多项式拟合较好。

由于作物立秆留茬的作用, 对间作裸地形成了很好的屏蔽作用, 在降低风速的同时, 也减少了土壤风蚀量。裸地的土壤风蚀模数很大, 风速在 5m/s 时就达 $0.476\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$, 到 15m/s 达 $2.098\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$, 莠麦全茬处理各风速吹蚀下土壤风蚀模数和裸地相比要小的多, 降低幅度在 68.74%~78.35%, 裸地风蚀模数为莠麦茬地风蚀模数的 3.2~4.2 倍; 与裸地相比油菜全茬降低风蚀率为 63.32%~68.74%, 裸地风蚀模数为油菜茬地风蚀模数的 2.7~3.2 倍; 因此由于土壤耕翻导致土壤风蚀的程度是很大的。采取残茬带与等距秋翻带间作分布后, 土壤风蚀模数介于秋翻裸地和全茬处理风蚀模数值之间, 与秋翻裸地相比, 莠麦茬+秋翻裸地土壤风蚀模数降低幅度在 48.92%~67.39%, 油菜茬+秋翻裸地土壤风蚀模数降低幅度在 5.22%~

34.36%，因此可以认为苳麦茬的防风蚀效果强于油菜茬。

宽度一定时，不同残茬处理土壤风蚀模数都随风速的增加而增大，二者符合指数曲线变化规律。在一定风速吹蚀下，土壤风蚀模数随带宽的增加而减小，带宽为0.5m时，土壤风蚀模数最大，风蚀模数与带宽符合幂函数曲线变化规律。将不同残茬土壤风蚀模数(Y)随带宽(X_1)和吹蚀风速(X_2)的变化进行二元回归，得到苳麦与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y=0.750370-1.282675X_1+0.150664X_2+0.409671X_1^2-0.068253X_2X_1+0.002474X_2^2$$

$$R^2=0.8886$$

苳麦与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y=1.280242-1.797509X_1+0.243604X_2+0.508629X_1^2-0.087064X_2X_1+0.001018X_2^2$$

$$R^2=0.9284$$

作物残茬覆盖是抑制土壤风蚀效应的关键因子，残茬的高低与风蚀量的大小息息相关。耕翻及不留茬是产生风蚀的主要因素，作物留茬即使是高度很低也会在减轻风蚀方面产生重要的作用。苳麦和油菜留根不留茬分别比裸地降低风蚀量49.54%~73.67%和43.83%~58.54%，消减率基本随风速增大而降低；留茬越高降低风蚀率的效果越好，但相邻两茬高的风蚀量消减率均不足10%，因此认为带状留茬间作模式土壤风蚀量的高低与有无留茬有关，与留茬高度无明显关系，因此建议生产上采取20cm以下的留茬方式，既起到防风固沙的作用，又可增加饲草料的数量，同时可大幅度减少工作量。无论苳麦还是油菜残茬，其不同高度的间作处理，土壤风蚀模数随风速的增大而增大，风蚀模数按指数曲线关系递增。在一定风速吹蚀时，残茬高度从5cm~25cm变化，不同残茬带+秋翻裸露带土壤风蚀模数与残茬高度以线性关系拟合较好，残茬高度增加，土壤风蚀模数降低。对不同残茬土壤风蚀模数(Y)随茬高(X_1)和吹蚀风速(X_2)的变化进行二元回归，得到苳麦残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y=-0.023527-0.009268X_1+0.036206X_2+0.000625X_1^2-0.001650X_2X_1+0.001345X_2^2$$

$$R^2=0.8877$$

油菜残茬与秋翻裸地等宽间作的回归方程为：

$$Y=Y-0.025265-0.00709X_1+0.041082X_2+0.000431X_1^2-0.00157X_2X_1+0.001117X_2^2$$

$$R^2=0.8916$$

因为风洞模拟的风速近似自然风，既使在同一地表等风速吹蚀土壤风蚀量也会受土表水分、气温、气压和自然风力的影响，所以实际上风洞模拟仅仅寻求的是一种风蚀趋势，而且作物播种行距及留茬高度等完全按生产实际布置，因此风洞中带宽超出3m的残茬带与等宽度裸露秋翻带的防风蚀效果无法在风洞中加以监测，只能通过增加风洞试验段长度或按比例缩小作物播种行距和残茬高度来实现，但在生产实际中难度很大。

8.1.4 残茬带宽度会对等宽间作裸地土壤风蚀量产生影响

陷阱诱捕桶测定的残茬中风积量在带宽小于 6m 时, 风积量随带宽增加而减小, 随着残茬带宽的继续增加, 风积量又开始增加, 基本到 10m 后又开始下降, 因此在 1.2m~10.8m 基本出现波峰和波谷两个临界点, 出现波峰的临界点为 10m, 出现波谷的临界点为 6m。与残茬带间作的不同带宽秋翻地中央风积量随带宽加大不断降低, 到 3.6m 带宽左右达到最低值, 之后随带宽增加而不断增加。

利用风蚀圈法测定的土壤风蚀量的大田监测结果与风积量趋势基本相同, 只是在数量上略有差异, 基本在 5m 带宽内土壤风蚀量显著降低, 5m~10m 范围土壤风蚀量缓慢上升, 风蚀量与风积量相比不及风积量的增幅大, 带宽超出 10m 土壤风蚀量又呈现稳中有降的变化趋势; 不同带宽处理秋翻地的平均风蚀量随带宽变化规律基本为: 在带宽 3m 之内呈直线下降, 基本到带宽 3m 时土壤风蚀量最低, 带宽大于 3m 小于 7m 这一阶段土壤风蚀量几乎又呈直线上升趋势, 在 7m~10m 间土壤风蚀量基本保持稳定, 而当带宽高于 10m 后土壤风蚀量又呈直线上升趋势; 不同带宽残茬+等宽秋翻地即采取带状留茬间作模式后的土壤风蚀量变化规律基本与不同带宽秋翻地的变化趋势相同, 因此仅从这一点分析认为带状间作农田土壤风蚀量的大小与残茬带的土壤风蚀量相关性不大, 与间作耕翻地的土壤风蚀量息息相关。

8.1.5 生物篱与作物带状留茬间作耦合系统会减轻土壤风蚀

生物篱下风向地表粗糙度随着与生物篱距离的增加而减小, 体现出油菜生物篱对地表近地面风速有明显的减小作用, 风速的减少量在 1m 范围内变化较大, 3~5m 范围内变化不明显。结合没有生物篱保护作用下裸地的观测结果表明: 生物篱的存在, 有效降低了近地面风速, 显著提高了地表粗糙度, 从而对减轻农田风蚀具有决定性的作用。通过对不同留茬地与生物篱组合下, 距篱相同位置的不同高度的风速进行测定, 不同组合方式削减风速效果不同, 其中油菜地内风速减小较为平缓, 而草谷子地内和苜蓿地内风速减小相对要快些。

在距油菜秆生物篱或草谷子残茬下风向的间作秋翻地不同位置处, 土壤风蚀量基本呈现先增加后减小的趋势, 大致在距篱或茬 4m 左右, 土壤风蚀量达到最大, 之后又由于与下一油菜秆生物篱临近而变得逐渐减小。而且在油菜秆生物篱和草谷子茬的双重保护下, 在距草谷子茬 5m 处非但不发生风蚀, 反而发生风积。从有篱和无篱的两个草谷子茬中央的风蚀圈测定结果看, 篱可以使作物残茬的风蚀降低率减少 65.76%, 因此不论从间作裸地还是残茬都表明油菜秆有很好的防蚀效果。

由于油菜秆生物篱和草谷子茬的存在, 其下风向秋翻裸地距篱或茬不同位置土壤风蚀量降低率基本呈“V”字型分布, 距离篱或茬越近, 土壤风蚀量降低率越大, 然后逐渐减小, 临近下一生物篱时土壤风蚀量降低率又增大。草谷子残茬和油菜秆生物篱对间作秋翻裸地都具有很好的保护作用, 草谷子茬防风蚀效果更好, 贡献率

更大, 如果将二者结合起来对间作秋翻裸地进行双重保护, 会起到非常好的防护效果。

野外移动式风洞的监测结果表明篱+裸地的土壤风蚀量随风速的增大而增加, 与裸地相比土壤风蚀降低率为 5.03%~20.53%, 充分说明油葵秆生物篱具有防风蚀作用。

8.1.6 分析了作物残茬及带状间作的防蚀增产机理

由于作物的立秆留茬作用, 可以提高地表粗糙度, 从而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; 冬春季节由于秸秆立茬的阻挡, 使得残茬带内和间作裸地大量积雪滞留, 而且由于残茬带可明显减慢水分的蒸发速度, 从而增大了土壤湿度, 加大了土粒间的结合力, 也就增强了土壤的机械稳定性, 积雪在春季融化后不断向下移动, 导致了土壤水分含量的增加; 此外由于作物残茬的保护作用, 抑制了间作裸地物理性砂粒含量的增加, 这一系列的作用使土壤临界起动风速大大提高。由于作物残茬的防护, 增加了地表覆盖度, 也减少了细微颗粒的吹蚀, 延缓了土壤质地的退化, 也就大大延缓了土壤生产力的降低, 种种因素相互叠加, 相互作用, 导致了土壤风蚀量的减少, 从而有效的减少了土壤养分的流失, 土壤养分含量的增加也为来年作物的稳定增产奠定了基础。由于作物合理间作、轮作, 使大部分作物根茬经风化腐烂将株内养分回田, 提高了光能利用率, 而且充分发挥了作物的边行增产效应, 实现了作物的稳定增产, 加上用地与养地相结合, 年复一年, 土壤的养分状况会大幅度好转, 促进了旱作农业的良性循环和持续发展。

8.2 讨论

风蚀圈法的研究提出克服了目前野外风蚀观测法的局限性, 由于其操作简单、容易携带及其他种种优点, 实现了风沙区风蚀季节土壤风蚀量的定量连续监测, 也可以为统一制定风蚀强度分区分级和防治措施的提供依据。但因为风蚀圈中放置的是扰动土, 尽管放置时已经参照测试区地表土壤容重等物理性状进行了尽可能与地表土壤相似的人工干预, 但其物理性状和田间原状土还会发生差异, 加上土地利用和耕作方式不同, 其地表土壤风蚀量的测试值与实际值仍有所不同, 所以需要通过大量的试验数据对经典方法与风蚀圈测定后的结果进行标定, 因此建议对风蚀圈测定技术进行深入研究, 并组织对各种风蚀量测定方法的比较和鉴定, 制定风蚀量观测的规范与国家标准。

阴山北麓农牧交错带农田土壤由于耕翻裸露, 存在诱发沙尘暴和导致土壤强度风蚀的潜在性, 必须采取切实可行的措施加以防治。国内外强调的营造农田防护林、秸秆冬季覆盖、机械化免耕等措施不能简单照搬, 建议根据本地区气候特点和作物

布局采用易留茬作物与须耕翻作物带状留茬间作轮作的种植方式,减轻由于大面积耕翻导致的土壤风蚀沙化,带宽超出 10m 后建议间隔插入油用向日葵的小带宽种植,冬春季节利用葵秆生物篱与带状留茬间作综合防护来减少风蚀。而且带状留茬间作与生物篱网减轻风蚀技术还需要全面总结,只有这样才能在风沙区旱作农田全面推广普及。在生物篱的选择上,目前向日葵秆是阴山北麓农牧交错带比较适宜的对象,向日葵地上部分由叶片、葵秆和葵饼组成,秋季收获后叶片基本全部脱落,葵饼也因为要收获葵花籽被割掉,实际上冬春季节能留在耕地中发挥防风降风速作用的只有上下粗细差不了多少的光秃秃的葵秆。尽管葵秆相对比较粗壮,但和其他如柠条、沙棘等小灌木相比没有灌幅,因此在消减风速上还存在局限性,而象柠条、沙棘等灌木由于根际较大,根扎的很深,在旱作农田隔一定宽度间隔分布会与临近作物造成很大的水肥竞争,导致作物减产,因此不可能生态、经济效益兼顾,只能在大面积退耕还林还草地中被广泛应用。鉴于此应该研究筛选一种或几种既不会与临近作物造成大的水肥竞争,又能发挥自身的经济价值,同时由于较大的灌幅存在能起到比葵秆生物篱更能消减风速降低风蚀作用的小(半)灌木来逐步替代油用向日葵的种植或补充完善生物篱种类。其次灌木生物篱的适宜栽培技术、篱与篱间的宽度确定以及与带状留茬间作如何耦合还需要通过大量的田间试验来明确,只有解决了这些问题,才能更好地总结完善生物篱网营建技术体系。

从本文结合多数学者^[77-80, 123, 130]的研究都认为带状留茬间作在降低近地面风速减轻旱作区土壤风蚀方面具有很好的作用,但目前所有的研究都是针对孤立的一带状留茬间作农田进行分析,事实上当作物留茬带与耕翻带多带间隔大面积应用后,其防风作用大大不同于一条孤立带,因此应该借鉴防护林林带的研究手段,深入研究带状留茬间作的综合效应。

本文只是尝试性的对引起土壤风蚀模数变化的土壤物理性砂粒含量、土壤水分、风速等因素进行了二元和多元回归,而实际上土壤质地、团聚体数量、土壤养分等其他理化性状及植被覆盖度、茬口特性等都会引起土壤风蚀模数的变化,建议采用风洞模拟与田间试验相结合进行多元非线性回归,建立适合我国的定量评估风蚀方程。

本文利用移动式风洞在田间监测不同残茬高度间作处理的风蚀模数后认为风蚀模数随残茬高度的增加而减小,但不同间作处理土壤风蚀模数的高低仅与有无留茬有关,与留茬高度关系不显著。此结果与周建忠^[14, 136]监测结果不同,但常旭宏^[91]也得出了相同结论,有必要进一步进行验证明确。

风蚀地区生态平衡的一个重要表现在于土壤风蚀量与沉降量及土壤母质风化成土量之间的平衡。由于干旱低温及缺乏有机肥,北方农牧交错带的成土过程非常缓慢,一般可以忽略。通常在冬春以吹蚀为主,夏秋以沉降为主;风力大时以吹蚀为主,风力小时以沉降为主;无论吹蚀走的还是沉降的都是比较细的具有一定肥力的

土粒。但目前农牧交错带绝大多数农田的吹蚀量大于沉降量,表现为生态继续恶化。在吹蚀量大于沉降量时,土层不断变薄,土壤不断粗化,形成荒漠化的恶性循环。但在推广留茬带状间作和生物篱网及增施有机肥的条件下,有可能实现旱作农田的沙尘沉降量大于吹蚀量,形成生态良性循环。建议对风沙区旱作农田、绿洲灌溉农田和草地的土壤风蚀量与沉降量进行系统观测,摸清沉降量超过吹蚀量的不同土地利用类型,探索扭转生态恶性循环,促进良性循环的技术途径。

8.3 创新点

长期以来国内外都缺乏适合中低强度风蚀定量测定的简便方法。本项研究提出了适合野外土壤风蚀定量监测的新方法并研制出风蚀圈,具有便携实用,观测结果比较接近实际和成本低廉等优点。

通过室内与野外移动式风洞的多因素风蚀模拟实验,明确了在阴山北麓农牧交错带的气候与土壤条件下,风蚀模数及起动风速与土壤物理性砂粒含量、土壤含水率及风速等因素的数量关系,为本地区的防沙治沙提供了重要的依据,对其他地区也具有重要的参考价值。实验结果还表明当土壤含水量高于7%时,任何土壤都不会产生沙尘暴。

通过风洞实验和田间小区试验研究了不同作物种类、不同带宽和不同高度的间作留茬及生物篱的减轻风蚀效果及其分布规律,为确定不同形式旱作农田防风蚀措施的技术参数提供了科学依据。研究表明,带状留茬间作与生物篱网相结合,能够有效减轻旱作农田的风蚀沙化,进一步丰富了农牧交错带防沙型旱作农业的理论与技术体系。

致 谢

历经4年多的艰辛劳作,我终于完成了这篇论文,写到此处,实难下笔。回顾这段学习过程,有许多刻骨铭心的记忆,其中有汗水和泪水,也有欢乐和喜悦,既充满了压力、困难和挑战,也得到了更多人的帮助、关心和鼓励,在此一并表达我的感激之情。

首先感谢导师闫伟教授,由于是对在职研究生培养,闫老师不能对我象全日制研究生那样强加管理,在培养途中也给闫老师增加了难度,但闫老师仍然从我的培养计划、实验方案的制定直到论文的撰写和修改给予了悉心的指导和关怀,使得我的学习和研究工作得以顺利进行,他谦逊的态度、富有条理的工作作风以及治学严谨的科学精神永远值得我学习,在此对导师表示诚挚的敬意,感谢他的培养和教导。

感谢内蒙古农牧业科学院妥德宝研究员和中国农业大学资源与环境学院郑大玮教授,从入学考试的鼓励、论文的选题、试验方案的制定和论文的撰写和修改,都倾注着他们的心血和汗水,他们严谨的治学态度、渊博的知识、谦和的人品、豁达的胸怀、务实的工作作风时刻都在对我产生影响和启迪,也正是他们的热情指导才使我得到了超乎同龄人丰富的硕果和受益终身的精神财富,在此对两位恩师表示我最衷心的感谢和诚挚的敬意。

在我进行野外风洞实验时,内蒙古农业大学机电工程学院赵士杰教授、童淑敏教授、赵满全教授冒着风沙亲临现场进行指导,给予我无比的欣慰和精神鼓励。也得到了该院硕士研究生赵颜军、董立江、李满亮、赵芳、齐志伟、田建川、王治国、王金莲、李立峰、徐志成、贾清华及农学院王林的帮助,他们不怕脏不怕累,任劳任怨,团结协作,经常为我考虑和解决实验期间出现的各种问题,保证了风洞实验顺利完成,在此对他们表示衷心的感谢。

感谢内蒙古农牧业科学院旱农课题的同事段玉副研究员、李焕春博士、付贵锁、魏福所、姚俊卿、植物营养所姚一萍研究员、郝星研究员以及武川旱作研究中心陈富贵夫妇、吕华夫妇、邱慧平夫妇在工作及试验期间给予的帮助和支持。

感谢内蒙古大学王镁副教授、内蒙古师范大学陆源硕士、内蒙古农业大学陈智副教授、孙悦超博士、齐冰洁博士,大学同学包海柱在数据处理期间给予的帮助。

感谢内蒙古农业大学刘景辉教授、高聚林教授对论文提出的宝贵修改意见。

最后,衷心感谢我的家人,由于年逾80的父母的身体健康,调皮的儿子健康成长和活泼可爱,贤惠能干的爱妻鼎力相助和大力支持,使我在学习和工作中一直没有分心,保证了论文的顺利完成,在此感谢他们的理解和鼓励。

正是缘于这样一个庞大的集体的共同努力,造就了我的博士学位论文的顺利完成,它倾注了我4年来的辛勤劳作和不懈追求,也凝聚着一个团队的集体智慧和协作精神。在此特向文中提及以及未提及到的帮助过我的所有老师、同事、同学及家人表示我最衷心的感谢。

赵沛义

二〇〇九年四月

参 考 文 献

- 1 UNEP. Status of Desertification and Implementation of the UN Plan to Combat Desertification. Nairobi, 1992
- 2 赵胜玉. 中国荒漠化土地面积占国土面积 1/3. 中国新闻网. 2008 年 1 月 25 日, 14:28:55
- 3 石元春. 走出治沙与退耕误区[J]. 草业科学, 2002, 05: 72~74
- 4 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理的对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999, 30~46
- 5 卢琦. 中国沙情[M]. 北京: 开明出版社, 2000, 12~43
- 6 易凌, 程志良. 中国荒漠化土地面积持续缩小. <http://news.qq.com>. 2006 年 05 月 29 日 22:17
- 7 CCICCD. 执行联合国防治荒漠化公约亚非论坛报告集, 1996
- 8 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000
- 9 张咏娟. 大柳塔煤矿区土地沙漠化时空演化及影响因素分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2007
- 10 宋常青. 中国青年报. 2005 年 09 月 06 日 09:08
- 11 董光荣, 李长治. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987(4): 297~301
- 12 陈渭南. 蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 33~40
- 13 李小雁. 土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 91~95
- 14 周建忠. 土壤风蚀及保护性耕作减轻沙尘暴的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004
- 15 何文清. 北方农牧交错带农用地风蚀影响因子与保护性农作制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004
- 16 王涛. 走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 1~3
- 17 赵举. 阴山北麓农牧交错带风蚀荒漠化治理的保持耕作模式研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002
- 18 史培军, 王静爱. 中国风沙灾害及其防治对策. 北京高新产业国际周“国际保护环境大会”论文集, 2005: 95~104
- 19 程序. 农牧交错带研究中的现代生态学前沿问题[J]. 资源科学学报, 1999, 21(5): 1~9
- 20 廖允成, 付增光. 中国北方农牧交错带土地沙漠化成因与防治技术[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 95~98
- 21 朱震达. 试论中国北方农牧交错带地区沙漠化土地整治的可能性和现实性[J]. 中国科学, 1984, 4(3): 197~205
- 22 朱震达. 中国北方沙漠化现状及发展趋势[J]. 中国沙漠, 1995, 5(3): 3~11
- 23 王晓方, 申茂向. 走出中国荒漠化防治误区——局部改善、整体扩大局势何时扭转[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 24 董治宝, 陈广庭. 内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 84~90
- 25 周建忠, 路明. 不同类型地表沙尘量比较研究[A]. 路明, 赵明. 土地沙漠化治理与保护性耕作[C].

- 北京:中国农业科学技术出版社.2005.29~34
- 26 程序.中国可持续农业的过去、现状及未来[J].干旱地区农业研究.1998.16(1):1~10
 - 27 An Yulin.Study on the land use sustainable and reasonable at ectone in Inner Mongolia,International Conference on Agricultural Science and Technology 2001: Promoting Global Innovation of Agricultural Science & Technology and Sustainable Agriculture Development session 3:1015~1019
 - 28 李文刚.内蒙古地区的马铃薯生产现状与技术发展[J].内蒙古农业科技,2000,3:1~5
 - 29 汪久文.当前我国干旱半干旱地区整治与开发中的几个问题[A].郭连生.荒漠化防治理论与实践[C].内蒙古大学出版社.1998:15~19
 - 30 王先礼.水土保持学[M].中国林业出版社.1995
 - 31 路明.我国沙尘暴发生成因及其防御策略[J].中国农业科学,2002,,35(4):440~446
 - 32 A.Aubreville.Climats,forests et desertification de Afrique tropical[M].Soc,deditions geographiques et colonials paris,1949
 - 33 UN.Unitied nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification particularly in Africa[Z].1994
 - 34 齐雁冰.陕北农牧交错带荒漠化土壤发生特性与演变机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006
 - 35 慈龙骏.我国荒漠化发生机理及防治对策[J].第四纪研究,1998,2:97~107
 - 36 国家林业局.中国荒漠化和沙化状况公报.2006年6月.<http://www.China.org.cn/ch-xinwen/content/news4685.htm>
 - 37 卢琦.中国沙情[M].北京:开明出版社,2000,12~43
 - 38 朱朝云,丁国栋,杨明远.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,1992
 - 39 Bagnold.The physics of blown sand and desert dunes,London:Methuen,1941
 - 40 Chepil,W.S. Dynamic of wind erosion: V. Cumulative Intensity of soil drifting across eroding fields.Soil Sci,1946,61:257~263
 - 41 Daniel.H.A.The physical changes in soils of the southern high plains due to cropping and wind. erosion and relation between and plus silt over clay ratios in these soils.J. AM.Soc.Agron.1936, 28:570~580.
 - 42 Moss, H.C. Some field and laboratory studies of soil drifting in Saskatchewan. Sci. Agric. 1935,15:665~679
 - 43 董光荣.中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M].海洋出版社北京:2002,35~36
 - 44 Chepil W.S., Woodruff N.P. The physic of wind erosion and it's control.Advances in Agronomy,1963,15:211~301
 - 45 朱震达, 刘恕.中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划[J].地理科学,1981,.4(3):179~206
 - 46 Hudson,N.W. 5011conservation.London:Batsford,1971:7~10

- 47 郭连生.荒漠化防治理论与实践[M].呼和浩特:内蒙古大学出版社,1998,23~25
- 48 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, 10(2):31~37
- 49 Fryrear,D.W.L., and L., Wind erosion researh aecomPlishments and needs.Transactions of the ASAE,1977,20(5):916~918
- 50 董治宝,李振山.国外土壤风蚀的研究历史与特点.中国沙漠,1995.15(1):100~104
- 51 Gilbert, G.K. Lake basins created by wind erosion. J. Geol.,1895,3:47~49
- 52 Bryan, K. Wind erosion near Leses Ferry, Arizona. Am. J. Sci.,1923,6:291~307
- 53 Cornish,V. On the formation of sand dunes.1897,Geog.J, 9:278~309
- 54 King, W.J.H. The Nature and formation of sand by wind. Civil Eng. (New York),1916,6:325~327
- 55 Olsson-Seffer,P. Relation of wind to topography of coastal drift sands. J.Geol.,1908,16:549~564
- 56 Woodruff, N.P., Siddoway, F H. Soil science society. American Proceedings, 1965, 29(3):602
- 57 严平.¹³⁷Cs 法在土壤风蚀研究中的应用[D].兰州:中国科学院兰州沙漠研究所,1999
- 58 Hagen L.J. A wind erosion prediction system to meet the users need.Journal of Soil and Water Conservation,1991,46(2):107~111
- 59 Fryrear D.W, Saleh A, Bilbro J.D,etal. Field tested wind erosion model.Buerkert B,Allision B.E,von Oppen M. Proceeding of International Symposium "Wind Erosion in West Africa:The problem and its Control".Germany: Margraft Verlag, Weikersheim,1994:343~355
- 60 董治宝,高尚玉.土壤风蚀预报研究述评[J].中国沙漠,1999,19(4):312~317
- 61 陈渭南,董光荣.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6~12
- 62 黄秉维.陕甘黄土区土壤侵蚀的因素和方式[J].地理学报,1953.19(2):28~35.
- 63 贺大良.地表风蚀物理过程风洞试验的初步研究[J].中国沙漠,1986,6(1):25~31
- 64 胡孟春,王周龙.土壤风蚀的自然-社会复合系统动态过程模拟研究[J].科学通报,1994,29(12):1118~1121
- 65 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,1996,10(2):31~37
- 66 董治宝,陈渭南.植被覆盖对沙质土壤风蚀的影响[J].环境科学学报,1996,16:437~443
- 67 黄富祥,高琼.毛乌素沙地不同防风材料降低风速效应的比较[J].水土保持学报,2001,15(1):27~30
- 68 濮励杰,Higg D .L. ¹³⁷Cs 应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究[J].土壤学报,1998,35(4):441~449
- 69 哈斯.河北坝上地区土壤风蚀理化性质初步研究[J].水土保持通报,1997,17(1):1~6
- 70 哈斯.河北坝上高原土壤风蚀物垂直分布的初步研究[J].中国沙漠,1997,17(1):9~14
- 71 哈斯,陈渭南.耕作方式对土壤风蚀的影响—以河北坝上地区为例[J].土壤侵蚀与水土保持学

- 报,1996,2(1):10~16
- 72 刘玉璋,胡孟春.科尔沁沙地土壤风蚀的风洞试验研究[J].中国沙漠,1991,11(1):22~29
- 73 赵羽.内蒙古土壤侵蚀研究[M].北京:科学出版社,1989
- 74 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
- 75 高焕文.农业部农机化司农业部保护性耕作研究中心.环北京地区沙尘暴的成因及对策调查研究,2001
- 76 妥德宝,段玉.带状留茬间作对防治干旱地区农田风蚀沙化的生态效应[J],华北农学报,2002,17(4):63~67
- 77 赵举,郑大玮.阴山北麓农牧交错带带状留茬间作轮作防风蚀技术[J].干旱地区农业研究,2002,20(2):5~9
- 78 赵沛义,妥德宝.带状留茬间作减轻旱作农田土壤风蚀的生态效应研究[J].中国农学通报,2007,23(10):171~174
- 79 古书鸿,潘学标.内蒙古后山地区带田生物篱防蚀增产综合效应研究[J].中国农业气象,2007,28(增):85~89
- 80 刘晓光,郑大玮.油葵科生物篱和作物残茬组合抗风蚀效果研究[J].农业工程学报,2006,22(12):60~64
- 81 朱震达,刘恕.中国沙漠化治理[M].北京:科学出版社,1989
- 82 朱震达.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1980
- 83 朱震达.最近十年中国北方农牧交错地区沙质荒漠化发展趋势的一例[J].中国沙漠,1994,14(4):1~6
- 84 王云超,张立峰.河北坝上农牧交错区不同下垫面土壤风蚀特征研究[J].中国农学通报,2006,8:575~578
- 85 李晓丽,申向东.内蒙古阴山北部四子王旗土壤风蚀量的测试分析[J].干旱区地理,2006,2:132~136
- 86 徐斌.内蒙古奈曼旗中部农田土壤风蚀及其防治[J].水土保持学报,1993,7(2):75~88
- 87 张华.春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J].水土保持学报,2002,16(1):29~32
- 88 王继和,马全林.干旱区沙漠化土地逆转植被的防风固沙效益研究[J].中国沙漠,2006,26(6):903~909
- 89 申向东,邹春霞.裸露耕地风沙运动特性试验研究[J].农业环境科学学报,2005,24(5):909~912
- 90 周建忠,路明.不同类型地表沙尘量比较研究[J].作物杂志,2006,24(4):1~4
- 91 常旭虹,赵广才.作物残茬对农田土壤风蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):28~31
- 92 马玉明,姚洪林.光电子集沙仪对毛乌素沙地沙丘蚀积过程的观测[J].中国沙漠,2001,21:68~71
- 93 刘新民.科尔沁沙地风沙环境与植被[M],北京:科学出版社,1996
- 94 赵军,雷廷武.激光微地貌扫描仪的开发研制及在坡面侵蚀研究应用初步[J].山东农业大学学

- 报,2001,32(2):201~203
- 95 何文清,高旺盛.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):1~5
- 96 杨秀春,严平.农牧交错带不同农田耕作模式土壤风蚀的风洞试验研究[J].土壤学报,2005,42(5):737~742
- 97 黄高宝,于爱忠.甘肃河西冬小麦保护性耕作对土壤风蚀影响的风洞试验研究[J].土壤学报,2007,4:10~15
- 98 和继军,蔡强国.PAM 控制土壤风蚀的风洞实验研究[J].水土保持学报,2007,2:14~17
- 99 陈渠昌,江培福.利用 PAM 防治松散扰动沙土风蚀效果的风洞试验研究[J].农业工程学报,2006,10:15~19
- 100 胡云锋,刘纪远.风蚀土壤剖面 ^{137}Cs 的分布及侵蚀速率的估算[J].科学通报,2005,50(9):933~937
- 101 严平,董光荣. ^{137}Cs 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J].科学通报,2000,45(2):199~204
- 102 赵焯,岳建华. ^{137}Cs 示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用[J].环境科学学报,2005,25(4):562~566
- 103 孙亚贤,齐万义.应用 GIS 及 RS 技术调查海滦河平原风蚀类型与盐碱土的分布[J].港工技术,2001,1:52~55
- 104 刘铁军,张瑞强.地表土壤风蚀观测方法初探[J].农村牧区机械化,2007,4:27~29
- 105 郑大玮,王砚田.内蒙古阴山北麓旱农区综合治理与增产配套技术[M].呼和浩特:内蒙古人民出版社,2000
- 106 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
- 107 陈正新,尉恩凤.内蒙古阴山北麓农牧交错带退化草地复壮对策[J].水土保持研究,2002,9(1):41~45
- 108 朱震达,王涛.基于近十年来若干典型地区研究的中国土地荒漠化发展方向分析[J].中国地理学报,1992,45(4):430~440
- 109 陈阜.内蒙古后山旱农区农业潜力及开发对策[J].干旱区农业研究,1995,01:116~120
- 110 南京农业大学主编.土壤农化分析(第二版)[M].北京:农业出版社,1992
- 111 金继运,白由路.高效土壤养分测试技术与设备[M].北京:中国农业出版社,2006
- 112 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000
- 113 杨虎山.三次样条插值在实际问题中的应用和实现[J].忻州师范学院学报,2008,24(2):47~49
- 114 陈广庭,贺大良.北京降尘成分及来源的探讨[J].中国沙漠,1989,9(3):22~35
- 115 孙悦超.内蒙古后山地区土壤抗风蚀效应测试研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008
- 116 赵永来,麻硕.旋风分离式集沙仪的标定[J].农机化研究,2007,4:95~98
- 117 张小由.沙河洼农田地表风沙运动与土壤风蚀的初步研究[J].干旱区研究,1996,13(1):76~80

- 118 内蒙古自治区土壤普查办公室编. 内蒙古土壤[M]. 科学出版社, 1994
- 119 朱祖祥. 土壤学(上册)[M]. 农业出版社, 1983
- 120 马玉明, 王林和. 风沙运动学[M]. 呼和浩特: 远方出版社, 2004
- 121 孙悦超. 阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 1~5
- 122 刘汉涛, 麻硕士. 残茬高度对土壤风蚀量影响的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 30~34
- 123 陈智. 阴山北麓农牧交错区地表土壤抗风蚀能力测试研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006
- 124 王玲玲, 何丙辉. 等高植物篱技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 131~133.
- 125 唐政洪, 蔡强国. 半干旱区植物篱侵蚀及养分控制过程的试验研究[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 593~600
- 126 许斌. 内蒙古中部农田土壤风蚀及其防治[J]. 水土保持学报, 1993, 7(2): 75~80
- 127 刘晓光. 阴山北麓生态脆弱地区的农业系统优化模型研究—以武川县为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2006
- 128 北京农业大学. 耕作学[M]. 北京: 农业出版社, 1981
- 129 高可华, 郑大玮. 内蒙古阴山北部抗风蚀措施效应的初步研究[J]. 华北农学报, 1998, 13(S): 97~102
- 130 苏永中, 赵文智. 土壤有机碳动态—风蚀效应[J]. 生态学报, 2005, 8: 2049~2054
- 131 于爱忠, 黄高宝. 保护性耕作对内陆河灌区春季麦田不可蚀性颗粒的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 6~9
- 132 张锡洲, 李廷轩. 水旱轮作条件下长期自然免耕对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 145~147
- 133 高明, 李阳兵. 稻田长期垄作免耕对土壤肥力性状的影响研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 29~33
- 134 严洁, 邓良基. 保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 中国农机化, 2005, 02: 31~34
- 135 臧英, 高焕文. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 56~60
- 136 周建忠, 路明. 保护性耕作残茬覆盖防治农田土壤风蚀的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(2): 170~173
- 137 秦红灵. 北方农牧交错带保护性耕作对农田土壤风蚀影响效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007
- 138 赵全利. 草田轮作及带状间作初探. 水土保持通报, 1992, 12(6): 82~86
- 139 高旺盛, 秦红灵. 内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 122~125

附 表

附表 1 不同水分条件下土壤的临界起动风速

Attached table 1 Critical threshold wind velocity of soil samples with different soil moisture

土样	物理性砂粒含量%		含水量%	临界起动风速 m/s
	计划含量	实际含量		
1	20	22.84	0.00	12.87
			1.30	13.94
			2.50	14.97
			3.21	15.04
			5.13	17.00
			7.37	17.82
2	30	31.31	0.00	9.79
			1.44	10.39
			2.34	11.22
			3.25	11.75
			4.44	14.24
			5.57	16.14
3	40	43.45	0.41	5.12
			1.41	6.84
			2.33	7.85
			3.33	8.10
			4.36	8.89
			5.32	10.49
			6.38	14.66
			7.04	15.79
4	50	52.63	1.00	5.60
			1.92	6.57
			3.08	7.51
			4.38	8.82
			5.16	9.38
			6.26	11.55
			7.08	12.32
			7.77	13.66
			8.90	16.75

附表 1 续

土样	物理性砂粒含量%		含水量%	临界起动风速 m/s
	计划含量	实际含量		
5	60	58.80	1.44	4.83
			2.14	5.83
			3.47	6.73
			4.10	7.74
			4.96	8.18
			6.12	10.14
			7.32	11.61
			8.00	12.33
			9.05	15.25
			10.43	16.84
6	70	67.96	0.95	4.49
			2.36	5.51
			3.11	6.26
			4.36	7.28
			5.00	7.71
			6.03	8.98
			6.80	10.75
			7.75	11.52
			9.21	14.07
			10.31	14.75
7	80	77.94	1.31	4.27
			2.16	5.35
			3.26	5.97
			3.81	6.76
			5.00	7.65
			6.12	8.75
			7.03	9.73
			8.14	12.16
			8.81	13.96
			10.13	16.91

附表 2 不同水分条件下土壤风蚀模数变化

Attached table 2 Wind erosion modulus variation in different soil moisture

土样	物理性砂粒含量	含水量	不同风速风蚀模数 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$					
	%	%	5m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	18m/s
1	22.84	0.00	0.068	0.094	0.125	0.200	0.258	0.346
		1.30	0.068	0.077	0.123	0.162	0.212	0.324
		2.50	0.057	0.075	0.081	0.147	0.196	0.290
		3.21	0.035	0.048	0.072	0.108	0.139	0.230
		5.13	0.023	0.055	0.064	0.087	0.133	0.212
		7.37	0.000	0.035	0.059	0.071	0.144	0.201
2	31.31	0.00	0.101	0.165	0.195	0.285	0.320	0.452
		1.44	0.105	0.150	0.178	0.257	0.294	0.417
		2.34	0.105	0.147	0.178	0.189	0.266	0.395
		3.25	0.094	0.146	0.165	0.207	0.245	0.355
		4.44	0.031	0.067	0.131	0.152	0.194	0.278
		5.57	0.028	0.067	0.100	0.110	0.134	0.210
3	43.45	0.41	0.209	0.244	0.320	0.670	1.095	1.568
		1.41	0.133	0.228	0.319	0.389	0.652	1.334
		2.33	0.106	0.196	0.286	0.330	0.629	1.254
		3.33	0.105	0.177	0.243	0.345	0.644	1.146
		4.36	0.101	0.143	0.200	0.324	0.514	0.984
		5.32	0.100	0.131	0.179	0.249	0.340	0.432
		6.38	0.042	0.084	0.106	0.137	0.208	0.273
		7.04	0.000	0.058	0.068	0.118	0.194	0.265
4	52.63	1.00	0.196	0.228	0.335	0.792	1.434	2.607
		1.92	0.159	0.219	0.311	0.411	0.721	1.717
		3.08	0.118	0.194	0.287	0.360	0.704	1.439
		4.38	0.101	0.152	0.217	0.301	0.471	1.076
		5.16	0.100	0.139	0.180	0.284	0.417	0.941
		6.26	0.044	0.096	0.122	0.240	0.329	0.715
		7.08	0.022	0.068	0.124	0.225	0.251	0.717
		7.77	0.000	0.056	0.135	0.211	0.183	0.328
		8.90	0.000	0.040	0.076	0.097	0.153	0.238

附表 2 续

土样	物理性砂粒含量 %	含水量 %	不同风速风蚀模数 $g \cdot (m^2 \cdot min)^{-1}$					
			5m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	18m/s
5	58.80	1.44	0.209	0.264	0.473	1.076	1.797	3.546
		2.14	0.160	0.236	0.365	0.745	1.416	2.576
		3.47	0.131	0.200	0.310	0.591	1.038	2.159
		4.10	0.103	0.225	0.230	0.411	0.811	2.113
		4.96	0.108	0.150	0.191	0.479	0.771	1.871
		6.12	0.071	0.101	0.141	0.251	0.472	1.404
		7.32	0.031	0.068	0.141	0.238	0.267	1.108
		8.00	0.000	0.095	0.102	0.152	0.225	0.733
		9.05	0.000	0.046	0.087	0.130	0.189	0.293
		10.43	0.000	0.000	0.066	0.098	0.160	0.236
6	67.96	0.95	0.247	0.392	0.583	1.101	2.853	8.662
		2.36	0.202	0.297	0.382	0.752	2.132	5.118
		3.11	0.158	0.240	0.354	0.619	1.500	4.122
		4.36	0.150	0.169	0.237	0.529	1.224	3.686
		5.00	0.124	0.164	0.198	0.521	1.122	2.963
		6.03	0.080	0.106	0.184	0.503	0.669	1.734
		6.80	0.049	0.086	0.149	0.242	0.368	1.380
		7.75	0.000	0.064	0.106	0.163	0.490	1.135
		9.21	0.000	0.058	0.088	0.141	0.204	0.422
		10.31	0.000	0.000	0.094	0.139	0.189	0.335
7	77.94	1.31	0.256	0.430	0.736	2.147	4.940	16.752
		2.16	0.227	0.302	0.394	1.285	2.490	9.098
		3.26	0.162	0.277	0.367	1.126	1.947	7.751
		3.81	0.164	0.158	0.326	0.923	1.420	6.108
		5.00	0.147	0.170	0.240	0.366	1.242	4.479
		6.12	0.080	0.121	0.190	0.419	0.840	2.627
		7.03	0.067	0.108	0.151	0.316	0.545	1.695
		8.14	0.054	0.075	0.134	0.216	0.278	0.539
		8.81	0.000	0.062	0.089	0.141	0.236	0.395
		10.13	0.000	0.044	0.064	0.096	0.140	0.254

附表 3 风蚀模数随风速变化的拟合关系式

Attached table 3 Fitted formulas between wind erosion modulus and wind speed

土样	物理性砂粒含量%	含水量%	A	B	R ²
1	22.84	0.00	0.0419	0.1210	0.9801
		1.30	0.0391	0.1170	0.9916
		2.50	0.0320	0.1215	0.9746
		3.21	0.0199	0.1356	0.9862
		5.13	0.0161	0.1436	0.9040
		7.37	0.0144	0.1470	0.9768
2	31.31	0.00	0.0758	0.1009	0.9308
		1.44	0.0748	0.0958	0.9627
		2.34	0.0755	0.0875	0.9403
		3.25	0.0728	0.0863	0.9304
		4.44	0.0241	0.1437	0.8627
		5.57	0.0241	0.1229	0.8206
3	43.45	0.41	0.0894	0.1618	0.9859
		1.41	0.0722	0.1545	0.9554
		2.33	0.0564	0.1658	0.9502
		3.33	0.0521	0.1684	0.9773
		4.36	0.0469	0.1645	0.9906
		5.32	0.0642	0.1093	0.9858
		6.38	0.0307	0.1256	0.9160
4	52.63	7.04	0.0233	0.1360	0.9756
		1.00	0.0649	0.2045	0.9908
		1.92	0.0700	0.1656	0.9624
		3.08	0.0560	0.1732	0.9679
		4.38	0.0487	0.1624	0.9696
		5.16	0.0465	0.1572	0.9725
		6.26	0.0227	0.1888	0.9565
		7.08	0.0125	0.2232	0.9056
		7.77	0.0339	0.1279	0.8465
		8.90	0.0184	0.1422	0.9846

附表 3 续

土样	物理性砂粒含量%	含水量%	A	B	R ²
5	58.80	1.44	0.0706	0.2182	0.9973
		2.14	0.0598	0.2094	0.9959
		3.47	0.0510	0.2050	0.9939
		4.10	0.0435	0.2035	0.9422
		4.96	0.0361	0.2121	0.9804
		6.12	0.0236	0.2123	0.9689
		7.32	0.0135	0.2317	0.9301
		8.00	0.0270	0.1623	0.8591
		9.05	0.0204	0.1499	0.9887
		10.43	0.0181	0.1430	0.9979
6	67.96	0.95	0.0664	0.2569	0.9751
		2.36	0.0557	0.2408	0.9699
		3.11	0.0474	0.2358	0.9760
		4.36	0.0357	0.2425	0.9654
		5.00	0.0325	0.2399	0.9705
		6.03	0.0256	0.2304	0.9860
		6.80	0.0179	0.2253	0.9580
		7.75	0.0123	0.2430	0.9688
		9.21	0.0212	0.1598	0.9850
		10.31	0.0267	0.1369	0.9832
7	77.94	1.31	0.0553	0.3083	0.9903
		2.16	0.0486	0.2275	0.9687
		3.26	0.0402	0.2770	0.9707
		3.81	0.0327	0.2741	0.9707
		5.00	0.0317	0.2510	0.9237
		6.12	0.0221	0.2536	0.9847
		7.03	0.0219	0.2287	0.9755
		8.14	0.0269	0.1654	0.9830
		8.81	0.0229	0.1559	0.9953
		10.13	0.0178	0.1433	0.9910

作者简介

赵沛义,男,汉族,中共党员,1972年3月出生于内蒙古乌兰察布市。1997年7月毕业于内蒙古农牧学院(现内蒙古农业大学)土壤农化专业,同年分配到内蒙古农牧业科学院植物营养与分析研究所从事土壤肥料和旱作农业研究工作。2002年至2005年在内蒙古农业大学农学院进行同等学力硕士研究生学习;2005年9月考取内蒙古农业大学林学院博士研究生。现为内蒙古农牧业科学院研究员,内蒙古土壤肥科学会常务理事、副秘书长,2008年内蒙古“新世纪321人才”第二层次人选。参加工作以来,先后获内蒙古科技进步一等奖、教育部二等奖、农业部科技进步三等奖、农业部农牧渔业丰收计划二等奖、内蒙古农牧渔业丰收计划二等奖、第六届内蒙古青年科技奖、内蒙古西部开发突出贡献奖、内蒙古科技承包三等奖和首届内蒙古农学会科技进步一等奖各一项;2000年被内蒙古党委、政府授予包扶乌盟贫困行政村先进个人,2008年被中国土壤学会授予优秀青年学者,获得其他荣誉奖项多次。发表论文20余篇,副主编专著1部,参编专著两部。

攻读博士期间发表论文:

1. 赵沛义,李焕春,妥德宝,潘学标,闫伟,段玉.作物残茬与生物篱组合对减轻土壤风蚀的作用[J],农业工程学报,2009,25(8): 231~235 (EI 收录)
2. P. Y. Zhao, W. Yan, D. B. Tuo, et al. Effects of Strip Intercropping Keeping Stubble Coupled With Biological Fence on Reducing Soil Wind Erosion Quantity. The Second International Conference on Science and Technology for Desertification Control, 2009 (Accepted by ISTP, Prof. Yan Wei is Corresponding author)
3. 赵沛义,妥德宝,闫伟.野外土壤风蚀定量观测方法的研究[J],安徽农业科学,2008,36(29): 12810~12812
4. 赵沛义.野外土壤风蚀量定量监测装置风蚀圈的制作与应用[J],世界农业,2008,12:42~43
5. 秦红灵,高旺盛,赵沛义.免耕条件下农田休闲期直立作物残茬对土壤风蚀的影响[J].农业工程学报,2008,24(4):66~71
6. 赵沛义,妥德宝,闫伟.带状留茬间作减轻旱作农田土壤风蚀的生态效应研究[J].中国农学通报.2007,23(10):171~174
7. 妥德宝,赵沛义,段玉.以作物残茬为生物篱在裸露农田营建防风带技术的研究[J].中国农学通报.2007,23(10):167~170
8. 赵沛义,妥德宝,闫伟.阴山北麓退耕地不同植被群落的生态适应性评价[A],国务院学位委员会办公室、中国科协组织人事部编.第五届博士生学术年会论文集<上>[C].北京:中国科学技术出版社 2008,570~574
9. Peiyi ZHAO,Debao TUO,Dawei ZHENG,Wei YAN.Spread intercropping strips keeping stubble to promote sustainable development of dry farming in Inner Mongolia.3rd international conference on environmental

enhancement and sustainable development.2006:145

10. Zhao c-x, Zheng D-W, Tuo D-B and Zhao P-Y. An index guiding temporal planting policies for wind erosion reduction[J].Arid Land Research and Management.2006,20(3):233~244
11. 古书鸿,潘学标,赵沛义.内蒙古后山地区带田生物篱防蚀增产综合效应研究[J].中国农业气象.2007,28(增):85~89
12. 高旺盛,秦红灵,赵沛义.内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J].水土保持研究.2005,12(5):122~125

攻读博士期间参加科研项目:

1. 国家“十一五”科技支撑计划“气候变化影响与适应的关键技术研究”(2007BAC03A02)子专题“草地畜牧业适应气候变化试验与技术集成”(主持);
2. 国家自然科学基金项目“作物残茬生物篱防治农田风蚀及其机理的研究”(40661009);
3. 国家“十一五”科技支撑计划项目“半干旱偏旱农牧交错带聚水保土技术集成与示范”(2006BAD29B09);
4. 国家“十一五”科技支撑计划项目“农牧交错风沙区保护性耕作技术集成研究与示范”(2006BAD15B05);
5. 国家“十一五”科技支撑计划项目“耕地质量分区评价与保育技术及指标体系研究”(92006BAD05B03);
6. 国家公益性行业项目“河套地区绿肥作物生产与利用技术集成研究与示范”(200803029-11);
7. 国家现代农业产业化项目“向日葵产业化技术体系建设(综合功能室)”;
8. 国际植物营养所(IPNI)科技合作项目“内蒙古土壤养分管理与主要作物合理施肥研究”;
9. 农业科技成果转化项目“农牧交错带防沙型带状留茬耕作技术试验示范”(2005150010519);
10. 内蒙古科技计划项目“阴山北麓生态保护旱作农业发展研究”(20071926)
11. 内蒙古农业综合开发项目“测土施用有机无机复混肥技术推广”