

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*

黄高宝 于爱忠 郭清毅 杨 荣

(甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘 要 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。我国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占国土总面积的1/2以上,主要分布于北方干旱、半干旱地区。甘肃河西走廊是我国荒漠化最严重的地带之一,该地区春小麦种植长期采用铧式犁翻耕是导致该地区农田土壤风蚀的主要原因。通过室内风洞试验揭示了冬小麦保护性耕作措施条件下风蚀量、起动风速、风速廓线、地表粗糙度的差异及相关关系。结果表明,各个处理风蚀量、起动风速均高于对照处理,风蚀量与风速存在幂函数关系, 16 m s^{-1} 风速是土壤风蚀程度由轻变重的一个转折点;在距土样表面5~50 mm范围内,随着高度的递增免耕秸秆覆盖(NTS)、免耕不覆盖(NT)处理较秸秆翻压(TIS)、传统耕作(T)处理风速增加缓慢,每个处理高度(H)与风速(V)遵循指数函数。NT、NTS处理与对照(SWT)的粗糙度K的差异在0.01水平上达到了极显著, TIS处理与对照(SWT)在0.05水平上差异显著,而T处理与对照(SWT)差异不显著。风蚀率(Q)与地表粗糙度(K)之间存在显著负相关关系。起动风速与地表粗糙度存在显著负相关关系。

关键词 河西走廊; 冬小麦; 保护性耕作; 风蚀; 风洞试验

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

风蚀(wind erosion)是侵蚀及塑造地球景观的基本地貌过程之一,也是发生于干旱、半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化的主要过程之一^[1]。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^[2]。我国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占国土总面积的1/2以上,主要分布于北方干旱、半干旱地区^[3]。甘肃河西走廊是我国荒漠化最严重的地带之一,受风沙危害的达40%以上,受害农田面积达21万 hm^2 。这些地区大面积种植春小麦,耕地长期采用铧式犁翻耕等传统耕作技术,土壤表土细碎,冬春裸露休闲,在西北季风的强劲作用下,极易扬尘,成为沙尘暴的重要源头。本试验根据春小麦改种冬小麦并采用少免耕、秸秆覆盖和秸秆翻压等保护性耕作措施,在室内风洞中模拟了不同耕作措施农田土壤风蚀状

况,揭示了土壤风蚀的基本机制,其结果对该地区农田土壤风蚀防治具有较为重要的科学与实践意义。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验于2004年9月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学教学试验场进行。该地区位于甘肃河西走廊东端,属冷温带干旱区,是典型的大陆性气候,日照充足,干燥少雨,春季多风沙,夏季有干热风。平均海拔1531 m,年均降水量160 mm左右,蒸发量1919 mm,干燥度5.85,年平均气温7.8℃,一月最低平均气温-11.8℃,七月最高平均气温24.0℃。 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温为3513℃; $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为2985℃。全年无霜期156 d,绝对无霜期118 d,年日照时数2945 h。年均大风日数12 d,年均沙尘暴日数为9 d,最多年沙尘暴日数为34 d。试区土壤

* 甘肃省科学技术攻关计划项目(2GS042A41-002-01)资助

作者简介:黄高宝(1965~),教授,博士生导师,主要从事多熟种植、水肥高效利用和宏观农业教学及科研工作。E-mail: huanggb@gsau.edu.cn; Tel: 0931-7632188

收稿日期:2006-07-07;收到修改稿日期:2007-03-26

为荒漠灌淤土, 土层厚度约 150 cm, 表土层(0~5 cm) 有机质含量为 15.8 g kg^{-1} , 耕作层土壤容重为 1.076 g cm^{-3} 。

1.2 试验设计

试验分为田间试验和室内风洞试验, 室内风洞试验土壤样品从田间试验小区内采集。

田间试验采用随机区组设计, 设置 5 个处理, 3 次重复。小区长 27 m, 宽 4 m。试验处理为: (1) 传统耕作处理(T): 前茬作物收获后深耕灭茬、耙耱整平; 不覆盖。(2) 秸秆翻压处理(TIS): 前茬作物收获后, 秸秆切碎为 5 cm, 结合秋深耕翻入土壤。秸秆还田量 6750 kg hm^{-2} 。(3) 免耕不覆盖处理(NT): 前茬作物收获后免耕, 不覆盖。(4) 免耕秸秆覆盖处理(NTS): 前茬作物收获后免耕并将秸秆切成 5 cm 长度覆盖。秸秆还田量 6750 kg hm^{-2} 。(5) 试验对照为春小麦传统耕作处理(SWT): 春小麦收获后翻耕灭茬、整平休闲至次年 3 月份播种, 休闲期地表裸露。

1.3 试验方法

由于河西地区侵蚀风集中在 3~5 月, 因此本试验取样选在冬小麦播种第二年春季返青前, 用土样箱在不破坏结构的情况下在田间试验的每个小区取体积为 $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的土样, 同时测定表层 0~5 cm 的土壤含水量。风洞试验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所风沙环境风洞重点实验室进行, 风洞为直吹闭口式, 全长 36 m, 其中实验段长 16.23 m, 截面积 $0.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。根据实验时的气压和气温, 用数字式微压差计系统调节进口风速。土样位于实验段入口下风向 12.06 m 处, 土壤样品表面与风洞底部齐平, 在土样盒中间放置多路风速廓线仪, 测定 5 mm、8 mm、13 mm、25 mm、40 mm、80 mm、120 mm、160 mm 不同高度的风速。实验过程中使洞体内土样表面与风速廓线仪的底部处于同一高度。风蚀量用感量为 0.1 g 的电子天平测定。

2 结果与分析

2.1 不同处理风蚀量分析

风是土壤风蚀的直接动力来源, 同等地表与土壤环境条件下风速的大小直接影响风蚀的轻重。董光荣等^[1]研究表明, 土壤风蚀主要是由 8 级 (17.5 m s^{-1}) 以上的大风造成的。杨秀春等^[4]的研究结果表明, 不同的耕作模式下风蚀速率与风速关系显著。本试验以不同耕作措施农田土壤为例, 土样表层

(0~5 cm) 的重量含水量为 5.2%。在不同的风速水平 (8 m s^{-1} 、 12 m s^{-1} 、 16 m s^{-1} 、 20 m s^{-1}) 下观测了不同耕作措施下的风蚀量, 结果如表 1 所示。

表 1 不同风速条件下的风蚀量

Table 1 Wind blown mass (g) under winds different in velocity

处理代号 Treatment code	风速 ¹⁾ Wind speed (m s^{-1})			
	8	12	16	20
NTS	0.00	2.15	5.95	9.10
NT	0.00	2.25	5.80	14.70
TIS	1.55	3.75	7.20	25.25
T	1.65	3.90	7.45	36.60
SWT	3.30	4.95	13.80	67.25

1) 为 30 cm 高度风速 The wind speed at 30 cm height

从实验结果可见, 在其他条件不变的情况下, 不论哪种耕作措施, 风蚀量与风速之间均表现为正相关关系(图 1), 风速越大, 风蚀越强烈。对于对照(SWT)处理, 风速小于 12 m s^{-1} 处于轻微的风蚀阶段, 风蚀不明显, 免耕(NT)和免耕秸秆覆盖(NTS)处理风蚀量为零。 $12\sim 16 \text{ m s}^{-1}$ 是风蚀强度缓增区, 当风速大于 16 m s^{-1} 后(相当于自然界 8 级大风), 风蚀量几乎呈线性增加, 这表明在净风的吹蚀下, 16 m s^{-1} 风速是土壤风蚀程度由轻变重的一个转折点。传统耕作(T)处理趋势与对照类似, 而免耕(NT)和免耕秸秆覆盖(NTS)处理风蚀率随着风速变化相对较缓慢, 秸秆翻压(TIS)处理介于 NT 与 T 之间。当风速达到 20 m s^{-1} 时传统耕作(T)、秸秆翻压(TIS)、免耕(NT)、免耕秸秆覆盖(NTS)的风蚀量分别较对照(SWT)低 30.6 g、42.0 g、52.6 g 和 58.2 g。为了进一步分析风蚀量与风速的关系, 利用非线性回归模型, 对不同处理, 风蚀量与风速观测结果进行拟合, 结果如表 2。从表中可以看出, 风蚀量与风速遵循幂函数关系, 这一结果与哈斯等^[5]的研究结果是一致的。

表 2 风蚀量(Q)与风速(V)的拟合曲线方程

Table 2 Curve equation between wind blown mass (Q) and wind speed (V)

处理代号 Treatment code	回归方程 Curve equation	相关系数 r Correlation coefficient r
NTS	$Q = 0.004037V^{2.5865}$	0.9928
NT	$Q = 0.000130V^{3.8826}$	0.9982
TIS	$Q = 0.000010V^{4.9083}$	0.9929
T	$Q = 0.000001V^{6.5653}$	0.9944
SWT	$Q = 0.000001V^{6.7612}$	0.9970

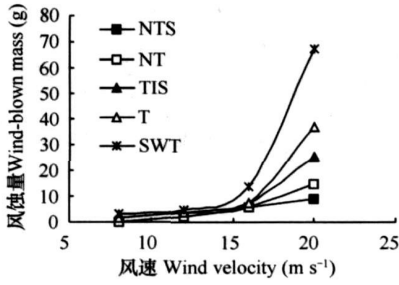


图1 不同处理风蚀量与风速关系变化
Fig. 1 Relationship between wind blown mass and wind speed

2.2 不同处理对风速廓线的影响

要研究近地表气流特性, 风速廓线是一个主要的指标, 它指的是风速沿高程的分布。屈建军等研究了携沙风风速与高度的关系^[6], 结果表明风沙活动层中风速随高度的分布遵循对数规律, 但由于不同的下垫面对气流紊动性的影响程度不同, 使得携沙气流能量分布变化很大, 最终导致沙颗粒在风沙活动层中的浓度随着风速的增加在增加, 相应地风沙活动层的范围也与风速呈正比增加。本试验测定了每个处理下的起动风速和 12 m s⁻¹、16 m s⁻¹、20 m s⁻¹的净风速廓线(如图2)。

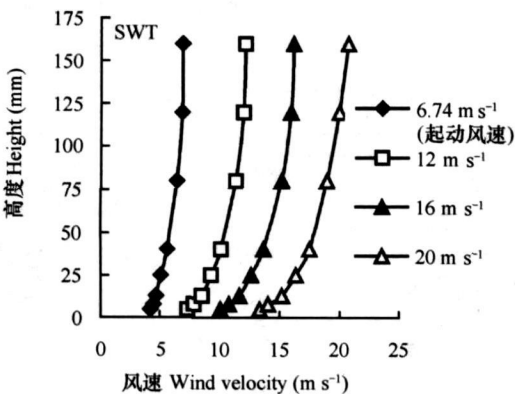
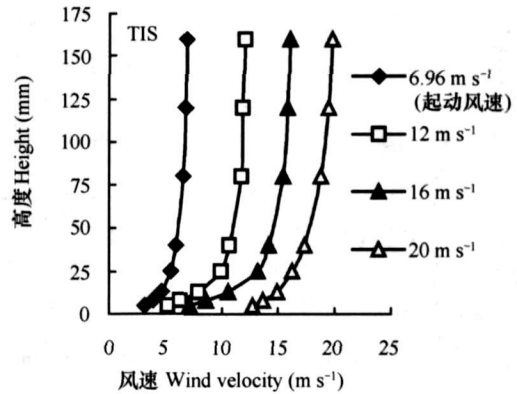
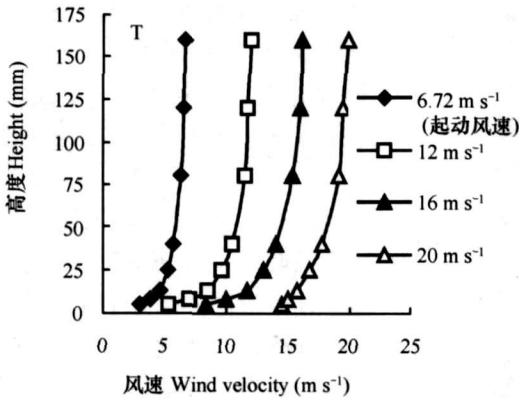
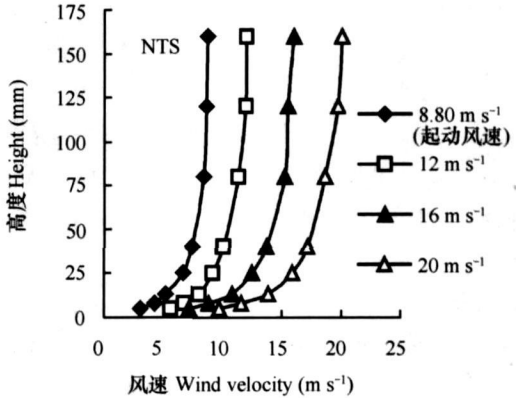
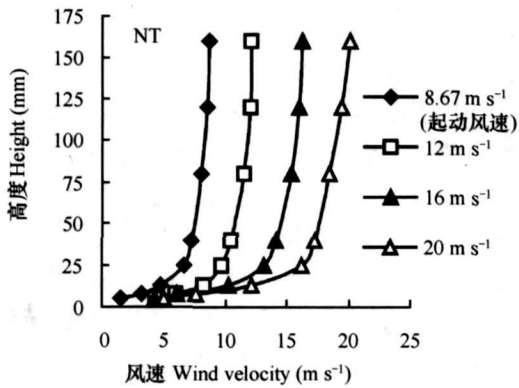


图2 不同处理地表的风速廓线

Fig. 2 Wind velocity profiles of different treatments

由图可知, 在距离土样表面 5~ 50 mm 范围内, 不同处理在 4 组风速下风速随高度变化趋势(两高度间的斜率)不同, 随着高度的递增 NTS、NT 处理较 TIS、T 处理风速增加缓慢, 这主要是因为对应处理的残茬、秸秆和可蚀性颗粒引起的粗糙度不同而造成的^[7, 8]。超过 80 mm 风速随高度的变化趋势各处理具有很大的相似性。对某一处理在不同高度段风速变化梯度近似为某一常数。为了进一步研究风速与高度的关系, 利用非线性回归模型, 对不同处理在 12 m s^{-1} 风速下的风速进行拟合, 结果如表 3。表明每个处理在 5~ 160 mm 高度范围内高度(H)与风速(V)遵循指数函数。

表 3 高度(H)与风速(V)的拟合曲线方程

Table 3 Curve equations between height (H) and wind speed (V)

处理代号 Treatment code	回归方程 Curve equation	相关系数 r Correlation coefficient
NT	$H = 0.0430 \times \text{EXP}(0.6576 \times V)$	0.9968
NTS	$H = 0.1435 \times \text{EXP}(0.5625 \times V)$	0.9996
T	$H = 0.0556 \times \text{EXP}(0.6310 \times V)$	0.9985
TIS	$H = 0.0430 \times \text{EXP}(0.6438 \times V)$	0.9949
SWT	$H = 0.0842 \times \text{EXP}(0.6067 \times V)$	0.9992

2.3 不同处理地表粗糙度结果分析

地表粗糙度是指影响地表风速及土壤风蚀强度的植被、地表形态诸要素的总和, 可以反映地表对风速减弱作用以及对风沙流的影响。在田间主要包括自然植被、农作物及其残余物(残茬)、土垄、土块和难蚀性碎片等。通过不同耕作处理试区地表粗糙度的比较, 可以说明不同耕作方式对地表粗糙度的影响。地表粗糙度一般利用各观测点两个高度的风速测定值计算, 计算公式为^[2]:

$$\lg K = \frac{u_1 \lg Z_2 - u_2 \lg Z_1}{u_1 - u_2}$$

式中: K 为地表粗糙度; Z_1 、 Z_2 为两个测风点距地表的高度; u_1 、 u_2 分别为 Z_1 、 Z_2 高度处的风速。本试验在风洞内 12 m s^{-1} 的风速下利用风速多路皮托管测定不同处理距地表 25 mm 和 300 mm 处的 2 分钟的平均风速, 每个处理分别测量 12 组风速值取平均值, 重复 3 次, 将每次测量结果按上述公式推算出地表粗糙度值, 然后进行了方差分析如表 4。由于土壤样品的采集完全保留了田间试验小区实际土壤状态, 因此在风洞条件下测定的粗糙度值基本可以反映了田间的实际情况。

表 4 不同处理地表粗糙度

Table 4 Roughness (K) of different treatments

处理代号 Treatment code	粗糙度 Roughness			
	I	II	III	平均 Mean
NTS	1.077	1.113	1.087	1.716 a A
NT	1.824	1.595	1.728	1.092 b B
TIS	0.076	0.093	0.083	0.340 c C
T	0.646	0.335	0.040	0.084 cd C
SWT	0.003	0.017	0.012	0.011 d C

由表可见 NT、NTS 处理与对照(SWT)的粗糙度 K 的差异在 0.01 水平上达到了极显著, TIS 处理与对照(SWT)在 0.05 水平上显著差异显著, 而 T 处理与对照(SWT)差异不显著。这主要是因为 NT 处理是在前茬作物收获后免耕, 有约 5 cm 高收获时的残茬, NTS 处理地表有秸秆覆盖, 在近地表的净风风能传递给茬和秸秆后风速显著降低。为了进一步研究起风地表粗糙度与土壤风蚀率(单位时间内的风蚀量)的关系, 利用非线性回归模型对 20 m s^{-1} 风速下不同处理的风蚀率与地表粗糙度进行了拟合, 如图 3。由图可以看出风蚀率(Q)与地表粗糙度(K)之间存在显著相关关系, 风蚀率(Q)随粗糙度(K)的增加呈非线性减低趋势。

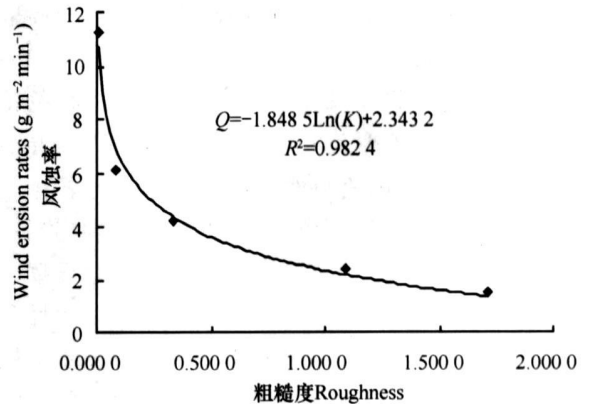


图 3 土壤风蚀率(Q)与粗糙度(K)的关系

Fig. 3 Relationship between soil wind erosion rates (Q) and roughness (K)

2.4 不同处理起风风速测定分析

一般将使沙粒开始运动的风速称为起沙风速也叫临界风速或起风风速。临界风速值的大小与沙粒的粒径大小、沙层表土湿度及的表粗糙程度有关。一般沙粒越大, 沙层表土越湿, 地表越粗糙, 植被覆盖度越大, 起风风速也越大^[9]。沙粒的运动形式主要有三种: 一是悬移, 二是跃移, 三是蠕移, 蠕移也称

滚动。风沙运动过程中,沙粒移动的方向可以相互转化,当风速增大时,跃移变为悬移,蠕移可变为跃移^[10,11]。本实验对不同耕作措施下的起动风速进行了观测,实验过程中风速逐渐缓慢升高,当土样表层土壤颗粒开始运动时的风速(用皮托管测定,距离土样表层 30 cm 的风速)即为该处理的起动风速。实验测得 NT、NTS、T、TIS 和 SWT 的起动风速分别为 8.67 m s^{-1} 、 8.80 m s^{-1} 、 6.72 m s^{-1} 、 6.96 m s^{-1} 和 6.74 m s^{-1} 。为了研究起动风速与地表粗糙度的关系,利用非线性回归模型不同处理的起动风速与地表粗糙度进行了拟合,回归方程为 $V = 6.7196 \times \text{EXP}(0.1751K)$, 相关系数 r 为 0.9546,由此可见,起动风速与地表粗糙度存在显著相关关系,起动风速随粗糙度的增加呈非线性递减趋势。

3 结 论

1) 土壤的风蚀速率随风速的增大而增大,两者成幂函数的关系。在净风吹蚀的条件下, 16 m s^{-1} 风速是风蚀强度急剧增加的一个转折点。不同处理对地表风速的减弱作用不同,免耕秸秆覆盖和免耕不覆盖表现最明显。不论哪种耕作措施其风速廓线在 0~16 cm 遵循指数变化。风蚀率与地表粗糙度之间存在显著相关关系,风蚀率随粗糙度的增加呈非线性减低趋势。

2) 不同处理起动风速的大小关系依次为:免耕秸秆覆盖 > 免耕不覆盖 > 秸秆翻压传统耕作 > 春小麦传统耕作;起动风速与地表粗糙度存在显著相关关系,起动风速随粗糙度的增加呈非线性递减趋势。

3) 甘肃河西地区春小麦地长期的翻耕是导致该地区农田土壤风蚀的主要原因。通过春小麦改种冬小麦并实施保护性耕作措施可显著降低农田土壤风蚀。春小麦改种冬小麦并采取免耕不覆盖、免耕秸秆覆盖、秸秆翻压的措施可显著减低农田土壤风蚀,风蚀量大小的关系依次为:免耕秸秆覆盖 > 免耕不覆盖 > 秸秆翻压传统耕作 > 春小麦传统耕作。

参 考 文 献

- [1] 董光荣,李长治,高尚玉,等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果. 科学通报,1987(4): 297~301. Dong G R, Li C Z, Gao S Y, *et al.* Some results about soil wind erosion of wind tunnel experiment (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1987(4): 297~301
- [2] 朱朝云,丁国栋,杨明远. 风沙物理学. 北京:中国林业出版社,1992. 8. Zhu C Y, Ding G D, Yang M Y. Blown Sand Physics (In Chinese). Beijing: Forestry Press of China, 1992. 8
- [3] 陈渭南,董光荣,董治宝. 中国北方风蚀问题研究的进展与趋势. 地球科学进展,1994,9(5): 6~11. Chen W N, Dong G R, Dong Z B. Achievements and needs of studies on wind erosion in northern china (In Chinese). Advances in Earth Science, 1994, 9(5): 6~11
- [4] 杨秀春,严平,刘连友,等. 农牧交错带不同农田耕作模式土壤风蚀的风洞试验研究. 土壤学报,2005,42(5): 737~743. Yang X C, Yan P, Liu L Y, *et al.* Wind tunnel experiment on effects of different cultivation patterns on soil wind erosion in agror grazing ecotone, Inner Mongolia (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 737~743
- [5] 哈斯,陈渭南. 耕作方式对土壤风蚀的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996, 2(1): 10~16. Ha S, Chen W N. Effect of tillage practices on soil wind erosion (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 10~16
- [6] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究. 水土保持研究,2005, 12(1): 54~58. Zhang K C, Qu J J, Zu R P, *et al.* Research on the characteristics of structure of drifting sand flux and wind velocity profile over Gobi (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 54~58
- [7] Judd M J, Raupach M R, Fininigan J J. A wind tunnel study of Turbulent flow around single and multiple wind breaks. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 80(1/2): 127~165
- [8] Lee S J, Kim H B. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80: 311~326
- [9] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control. Advance of Agronomy, 1963, 15(2): 211~302
- [10] Lal R. Soil erosion and land degradation: The global risks. Adv. Soil Sci., 1990, 11: 129~172
- [11] Ronald E P, Shirley H P. No tillage Agriculture Principles and Practices. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984

WIND TUNNEL EXPERIMENT ON EFFECT OF CONSERVATIVE TILLAGE IN WINTER WHEAT FIELDS ON SOIL WIND EROSION IN HEXI CORRIDOR, GANSU PROVINCE

Huang Gaobao Yu Aizhong Guo Qingyi Yang Rong

(College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Soil wind erosion refers to the process of loose soil substances being blown up and carried away by wind and deposited somewhere else, and the process of land surface being abraded by the blown-up soil particles. Its essential is the process of fine soil particles and nutrient matters in the surface soil being blown away by wind. In China the total area of lands exposed to wind erosion and desertification exceeds one half of its total land area. Those lands are distributed mainly in the arid and semi-arid regions in North China. The Hexi Corridor in Gansu Province is one of the areas that are subjected to most serious desertification, because of its long-term conventional tillage and prevalence of northwester. A wind tunnel experiment was designed to study effects of conservative tillage in winter wheat cultivation on wind-blown mass, critical wind speed, wind velocity profile and roughness of land surface and their relationships. Results show that all the treatments were higher than CK (SWT, spring wheat with conventional tillage) in wind-blown mass and critical wind speed. Wind-blown mass showed a power function relationship with wind speed and the wind speed of 16 m s^{-1} was the turning point from slight wind erosion to serious wind erosion. Within the height of 5 ~ 50 mm above the land surface, the rise of wind velocity with height in Treatment NTS (no tillage with stubble retention (NTS)) and Treatment NT (no tillage with no stubble) was slower than in Treatment TIS (conventional tillage with stubble incorporated) and Treatment T (conventional tillage), and height and wind speed formed an exponential function in all the treatments. Roughness of the land surface varied significantly between Treatments NT, NTS and SWT at 0.01 level, but it did not between Treatments TIS and SWT. Significant negative relationship was observed between wind speed and roughness, and also between critical wind speed and roughness.

Key words Hexi Corridor; Winter wheat; Conservation tillage; Wind erosion; Wind tunnel experiment