

保护性耕作农田风沙流空间分布规律研究

孙悦超^{1,2},麻硕士¹,陈智¹,赵永来²

(1.内蒙古农业大学机电工程学院,内蒙古呼和浩特 010018;2.内蒙古农业大学职业技术学院,内蒙古包头 014109)

摘 要: 为了解保护性耕作农田风沙流的空间分布规律,对保护性耕作农田进行了野外风洞原位风蚀测试。结果表明:保护性耕作农田在不同风速下各高度的风沙流水平分布符合三次多项式规律,经过27行残茬、5.5 m的水平距离风沙流基本达到了平衡稳定状态;在垂直方向上风沙流分布符合高阶多项式规律,具有与砾石戈壁地表输沙量垂直分布极为相似的“象鼻”效应。试验还发现保护性耕作农田风沙流主要活动在近地表40 cm高度以下范围,占到风蚀物总质量的90%左右。

关键词: 保护性耕作;风蚀;风沙流

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0180-05

保护性耕作是对农田实行免耕、少耕,尽可能减少耕作,用作物秸秆残茬覆盖地表,减少风蚀和水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力的一项先进农业耕作技术^[1]。它是控制干旱、半干旱地区土壤风蚀、降低农田扬沙、抑制沙尘暴的一种十分有效的新型农业耕作制度,对保证农业可持续发展具有重要意义。虽然对保护性耕作技术及其与土壤风蚀关系的研究很多,但在保护性耕作风沙流空间分布规律方面,以往研究者很少作深入细致研究。所以,研究保护性耕作农田风沙流的空间分布规律,对于阐明保护性耕作农田土壤风蚀机制,丰富土壤风蚀研究理论具有重要意义。本文利用可移动式风蚀风洞采用野外原位测试方法,系统研究保护性耕作风沙流的空间分布规律,为保护性耕作采取科学合理的种植措施提供依据。

1 研究区概况

研究区选择在内蒙古自治区武川县保护性耕作项目示范区,这是内蒙古自治区农业厅、科技厅和农业部等单位共同试点的保护性耕作项目区。主要种植作物为莜麦、小麦、油菜籽等,留茬平均高度为30 cm,平均植被覆盖度为60%。项目区所在的武川县地处内蒙古自治区中部,阴山北麓干旱、半干旱区,位于北方农牧交错带中段,土地退化严重,是我国农牧交错带中经济最贫困区,又是受荒漠化威胁最严重的地区之一,是中国北方典型的风蚀沙化区^[4]。年降水量300 mm左右,且集中在夏季,春天干旱少雨甚至无雨。日定时风速 ≥ 8 m/s的天数年平均为

63 d, ≥ 17 m/s的大风日数为30 d,最多年76 d^[5]。60%以上的大风集中在冬春季节,尤其是春季,风蚀极为严重。风蚀气候侵蚀力基本上以秋季(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^[6],春季是土壤风蚀发生的主要季节。

2 试验设备与方法

2.1 主要试验设备

主要试验设备为内蒙古农业大学研制的OFDY-1.2型直流吹气式可移动风蚀风洞,由过渡段、整流段、收缩段和实验段组成。风洞结构符合低速风洞设计要求,在实验段能够模拟自然风,其风速廓线与真实地表自然风速廓线基本一致。风速范围在0~20 m/s连续可调,通过改变变频器的频率进行控制。风速由风速廓线仪采集后通过数据采集卡传给以LabWindows/CVI作为平台开发的数据采集软件,并显示、记录、保存于电脑中。风速廓线仪由基本按对数规律置于不同高度上的8个精细皮托管测速装置组成。风蚀物用旋风分离式集沙仪收集,其高840 mm,沿高度方向分布10个气流管,通过气流管收集垂直方向上10个不同高度(20、60、120、180、240、300、400、500、600、700 mm)的风蚀物。风蚀物由精度为千分之一电子天平称重。挟沙风由排沙器向风洞进口处距地表15 cm处定量化排沙实现。

2.2 测试方法

试验选择在风蚀最为严重的春季进行,于2007年4月在武川县保护性耕作项目示范区进行。待测

收稿日期:2008-02-20

基金项目:高等学校博士学科点专项基金项目(20050129007)

作者简介:孙悦超(1974—),男,内蒙古通辽人,博士,主要研究方向为农业工程测试与控制。

地表为保护性耕作莜麦留茬覆盖地,留茬平均高度为 30 cm,植被平均盖度为 71%。土壤为栗钙土,粒径为 1 mm 以上的砂砾占 15.59%,粉粒和粘粒含量为 23.65%。近地表 5 cm 深度范围内土壤平均含水率为 6.56%,地表整体上有一定的结皮现象。试验时选定风洞中心风速分别为 7、9、11、14、17 m/s 的风速进行吹蚀,吹蚀时间为 10 min。集沙仪在每一风速下均放置在风洞轴线距进口 3、3.75、4.5、5.25、6 m 共 5 个测点处,分别收集称量集沙仪 20、60、120、180、240、300、400、500、600、700 mm 共 10 个高度上的风蚀物。将风速廓线仪对应安放在集沙仪前方 600 mm,距风洞左侧壁 300 mm 处,以保证不影响集沙仪的集沙。利用排沙器按一定的输沙率向风洞入口处排沙,从而人为制造挟沙风。试验仪器布置见图 1。

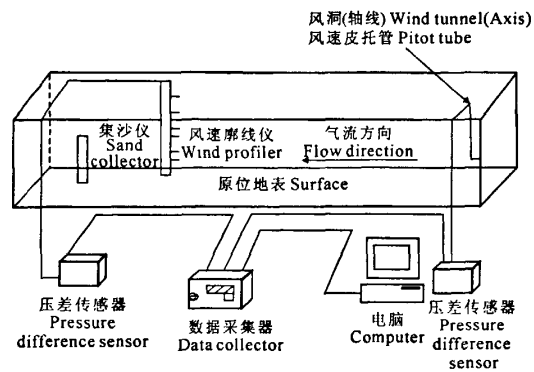


图 1 试验仪器布置图
Fig.1 Experiment arrange sketch

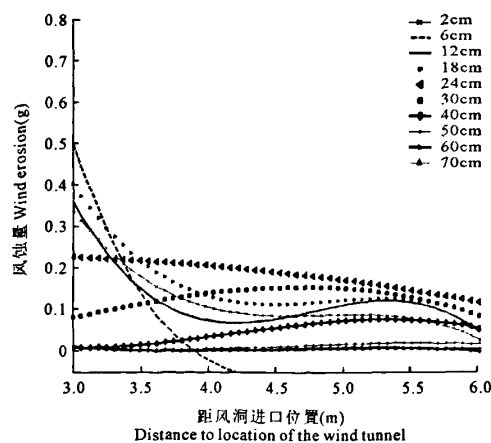


图 2 7 m/s 时风沙流的水平分布规律
Fig.2 Horizontal level distribution rule of wind erosion in the wind speed of 7 m/s

3 结果与分析

3.1 不同高度层风蚀物水平分布规律

试验数据经曲线拟合并作相关系数检验,发现不同风速下风沙流在各高度层的水平分布几乎全部以三次多项式拟合效果最好。为节省篇幅本文只列出 9 m/s 风速下各个高度的风沙流拟合方程,见表 1。根据各风速下风沙流水平分布规律拟合方程作出相应的风沙流水平分布曲线见图 2~图 6。

表 1 9 m/s 各高度风沙流水平分布规律拟合方程
Table 1 Fitting equations of horizontal distribution rule of 9 m/s wind erosion in all heights

距地表高度 (cm) Surface height	拟合方程 Fitting equation	相关系数 R^2
2	$q = -0.0027x^3 + 0.0461x^2 - 0.3012x + 0.7527$	0.997
6	$q = 0.0039x^3 - 0.0247x^2 - 0.1067x + 0.7406$	0.929
12	$q = 0.0081x^3 - 0.0984x^2 + 0.3206x - 0.066$	0.902
18	$q = -0.0014x^3 + 0.0252x^2 - 0.205x + 0.7115$	0.963
24	$q = 0.0014x^3 - 0.0585x^2 + 0.3999x - 0.4936$	0.979
30	$q = 0.0011x^3 - 0.0628x^2 + 0.5084x - 0.9159$	0.991
40	$q = -0.0128x^3 + 0.1627x^2 - 0.6368x + 0.7974$	0.906
50	$q = -0.0016x^3 + 0.0231x^2 - 0.1054x + 0.1541$	0.915
60	$q = 0.0014x^2 - 0.0138x + 0.0393$	0.956
70	$q = 0.0014x^3 - 0.0179x^2 + 0.0705x - 0.0840$	0.964

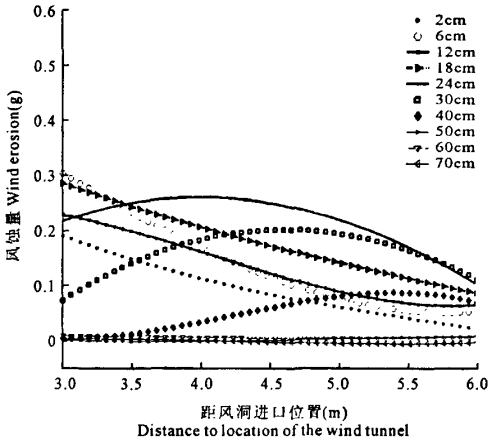


图 3 9 m/s 时风沙流的水平分布规律
Fig.3 Horizontal level distribution rule of wind erosion in the wind speed of 9 m/s

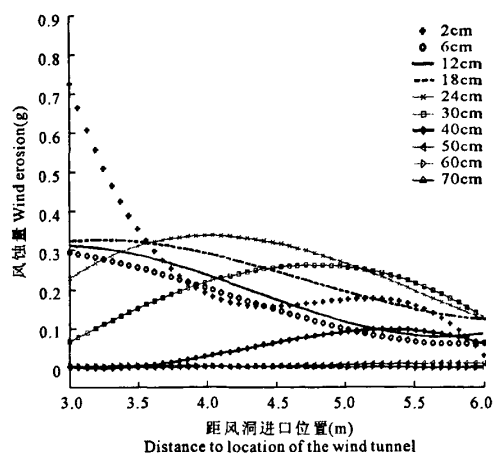


图 4 11 m/s 时风沙流的水平分布规律

Fig.4 Horizontal level distribution rule of wind erosion in the wind speed of 11 m/s

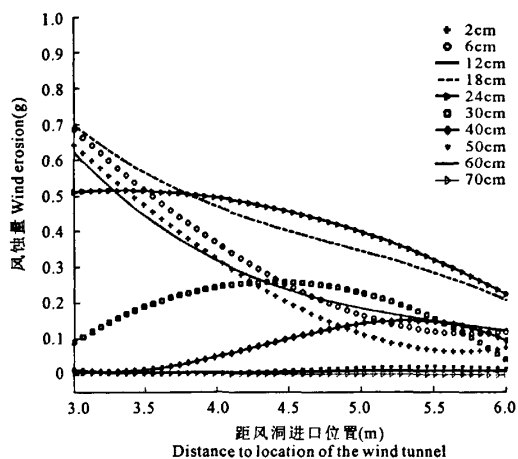


图 5 14 m/s 时风沙流的水平分布规律

Fig.5 Horizontal level distribution rule of wind erosion in the wind speed of 14 m/s

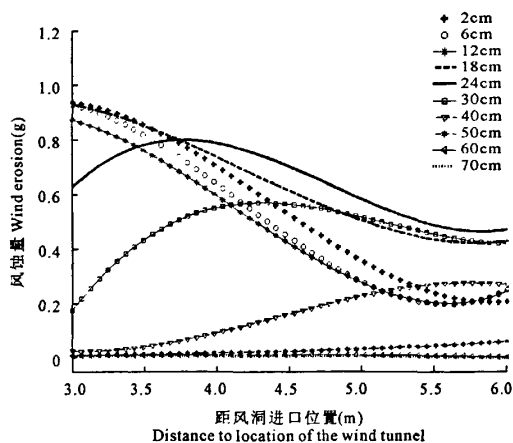


图 6 17 m/s 时风沙流的水平分布规律

Fig.6 Horizontal level distribution rule of wind erosion in the wind speed of 17 m/s

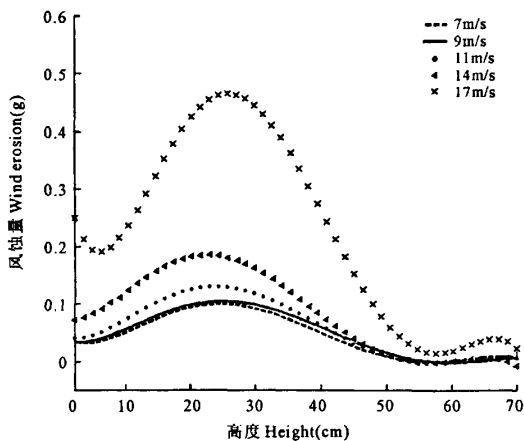


图 7 不同风速下风沙流的垂直分布规律

Fig.7 Vertical distribution rule of wind erosion in different wind speed

从图 2 ~ 图 6 可以看出:在测试长度范围内,各风速下风沙流随距风洞进口距离增加的变化规律总体上是一致的,具体情况如下:在 18 cm 以下各高度风沙流的水平分布随距风洞进口距离的增加呈快速下降的趋势;在残茬顶层附近的 24、30 cm 两个高度的风沙流水平分布基本呈先增加后减小的规律,即在试验长度范围内风沙流出现极大值,极大值出现的位置随风速的增加有向风洞进口处靠拢的趋势;40 cm 高度时风沙流的水平分布随距风洞进口距离的增加呈先增加后基本不变的趋势;50 cm 高度以上时,风沙流极少,其水平分布随距风洞进口距离的增加变化很小。另外,还可发现距风洞进口位置增加到 5 m 后各高度层风沙流曲线斜率均很低,特别

是在距风洞进口 5.5 m 以后各高度风沙流随距风洞进口位置的变化曲线已接近水平线,且距离较近。说明风沙流经过 27 行残茬 5.5 m 长的保护性耕作地表后风沙流水平运动基本达到了平衡稳定状态。

综上所述,保护性耕作在残茬顶层附近风沙流水平分布有自己独特的分布规律,这充分说明直立残茬是影响风沙流运动的一个重要因子。直立残茬可以增加地表粗糙度,降低近地表风速。当地表有留茬覆盖时,气流受直立残茬的作用而被抬升,风速廓线会相应地向上位移一高度 (Z_g)。本试验的留茬平均高度为 30 cm,行内残茬平均盖度为 71%。据留茬高度和地表粗糙度 (Z_0) 测定值按 (1) 式^[7] 计算得出风的活动层高度 (Z_g) 为 23.44 cm。

$$Z_g = Z_0 + Z_B \tag{1}$$

式中: Z_g 为风的活动层高度; Z_0 为植被冠层粗糙度; Z_B 为零平面位移高度。

其中, $\lg Z_0 = 0.997 \lg H - 0.888$,

$\lg Z_B = 0.979 \lg H - 0.154$

计算结果说明,直立残茬把风速廓线抬高了 23.44 cm,而在风的活动层高度(Z_g)以下风速很弱,风速变化受残茬的阻挡呈明显的紊流特征,随水平距离的增加风蚀物被拦截的数量随之增多。因此,集沙仪所收集到的风蚀物在水平方向上也随之减少。所以,在风的活动层高度(Z_g)以下各不同高度的风沙流随距风洞进口距离的增加而呈迅速下降的趋势。从图 2~图 6 中还可以看出:24 cm、30 cm 高度对应风沙流曲线处于较高的位置,说明大部分风沙流分布在 24~40 cm 的高度范围内。30 cm 的留茬高度使风的活动层高度抬升到距地表 23.44 cm,按沙漠地区风沙流(与传统耕作风沙流类似)的运动规律,风沙流主要集中在近地表 10 cm 的范围内,因此在边界层充分发育的情况下保护性耕作大部分风沙流集中在 30 cm 的高度范围内是符合规律的。其原因是在风的活动层高度以上,随风洞试验段距离的增长,风沙流穿透残茬到达风的活动层高度的沙粒数量随之增多,此时因受到重力作用而下落的沙粒数量远小于穿透残茬上升的沙粒数量,因此风沙

流曲线呈增加的趋势。当水平距离增大到某一值时,穿透残茬的风沙流与受到重力而下降的风沙流达到动态平衡,此时集沙仪收集到的风蚀物达到最大,风沙流曲线出现极大值。此后,随试验段距离的进一步增加,穿透残茬的风沙流少于受到重力作用而下降的风沙流,因此风沙流曲线又呈现下降的变化规律。40 cm 高度以上,受残茬的阻挡使得穿透残茬层的风沙流主要是一些粒径较小的粉尘,风蚀物较少。随实验地表长度的增加,穿透残茬层粉尘的数量增加,当地表长度达到一定值时,穿透残茬层的粉尘风蚀物与下落的粉尘风蚀物达到动态平衡,所以 40 cm 高度以上的风沙流曲线呈现图示的变化规律。

3.2 不同风速下风蚀物垂直分布规律

据风沙流水平分布规律可知:风沙流在距风洞进口约 5.5 m 处基本达到平衡稳定状态。所以,研究风沙流垂直分布规律时,选择距风洞进口 6 m 处对应集沙仪收集到的风蚀物进行分析,即风沙流水平运动达到稳定状态时是合理的。试验数据用 MATLAB 软件处理后发现其不符合传统耕作农田风沙流垂直分布的指数函数规律。经最小二乘法拟合,发现 5 阶多项式拟合效果好,精度高。拟合方程及拟合精度见表 2。

表 2 风沙流垂直分布拟合方程及精度评价指标

Table 2 The vertical distribution fitting equations and precision estimate indexes of wind erosion

风速 (m/s) Wind speed	拟合方程 Fitting equation	误差平方和 SSE Square error	相关系数 R^2	方均根 误差 RMSE
7	$y_1 = (-4.002e-009)x^5 + (7.63e-007)x^4 - (4.969e-005)x^3 + 0.001209x^2 - 0.007329x + 0.04512$	0.000805	0.9371	0.01419
9	$y_2 = (-2.896e-009)x^5 + (5.723e-007)x^4 - (3.813e-005)x^3 + 0.0009095x^2 - 0.004065x + 0.03871$	0.000809	0.9429	0.01422
11	$y_3 = (-4.37e-009)x^5 + (8.236e-007)x^4 - (5.217e-005)x^3 + 0.00117x^2 - 0.004415x + 0.04525$	0.000637	0.9722	0.01262
14	$y_4 = (-6.084e-009)x^5 + (1.114e-006)x^4 - (6.811e-005)x^3 + 0.001439x^2 - 0.004215x + 0.0764$	0.004338	0.9116	0.08293
17	$y_5 = (-1.957e-008)x^5 + (3.82e-006)x^4 - 0.0002593x^3 + 0.006903x^2 - 0.05754x + 0.3382$	0.00546	0.979	0.03695

根据风沙流垂直分布规律拟合方程,做出各风速下风沙流的垂直分布曲线如图 7 所示。由图 7 可见:保护性耕作留茬地表输沙量沿高度分布呈现出特定的“象鼻”效应,在一定高度处出现最大值,即风沙流随高度呈现递增—饱和—递减的运动规律。这与传统耕作农田、沙漠随距地表高度增加风沙流按指数规律递减的垂直分布规律完全不同。而与砾石戈壁地表输沙量垂直分布规律极为相似^[9-14],这是由于下垫面对风沙流在垂直高度上的运动有重要影响,其主要原因:一是大部分近地表土壤风蚀颗粒被直立残茬拦截下来;二是直立残茬对气流的抬升作

用使一部分风蚀物运动轨迹发生了改变;三是受残茬阻挡使得穿透残茬层的风蚀物主要是一些粒径较小的粉尘。由图 7 还可以看出,曲线鼻尖出现在距地表 20~30 cm 高度层内,鼻尖间距离随风速的增加而增加,尤其是在高风速时鼻尖距离增加更明显。

对风沙流随高度变化的拟合方程在不同高度层积分求得风沙流在各高度层的质量见表 3。表 4 为风沙流在不同高度层按质量计算的百分比(%)。由表 3 和表 4 可见,在试验各级风速下风沙流最大质量都出现在 20~30 cm 范围内,占相应风速下风沙流总质量的 28.64%~30.84%,且风沙流百分比随

风速的变化幅度较小。由表 4 还可以看出,风沙流主要活动在距地表 40 cm 高度以下范围内,占到风沙流总质量的 90%左右(14 m/s 时最大为 92.74%,9 m/s 时最小为 88.13%),50 cm 高度以下风沙流质量百分比达到 95%以上。

表 3 风沙流沿垂直高度的分布(g)

Table 3 The distributions of wind erosion in the vertical height

高度(cm) Height	风速(m/s) Wind speed				
	7	9	11	12	17
0~10	0.378	0.403	0.507	0.884	2.231
10~20	0.741	0.794	1.029	1.562	3.297
20~30	0.978	1.029	1.272	1.783	4.531
30~40	0.730	0.814	0.925	1.225	3.623
40~50	0.269	0.360	0.340	0.415	1.558
50~70	0.075	0.050	0.055	0.012	0.579
合计 Total	3.170	3.449	4.128	5.881	15.819

表 4 风沙流在不同高度层分布的百分比(%)

Table 4 The percentages of wind erosion in different heights

高度(cm) Height	风速(m/s) Wind speed				
	7	9	11	12	17
0~10	11.93	11.68	12.29	15.03	14.10
10~20	23.36	23.02	24.92	26.56	20.84
20~30	30.84	29.84	30.83	30.32	28.64
30~40	23.03	23.60	22.42	20.83	22.90
40~50	8.47	10.42	8.23	7.06	9.85
50~70	2.38	1.45	1.32	0.20	3.66
合计 Total	100	100	100	100	100

风沙流是风吹经地表时,由于风力作用使沙粒脱离地表进入气流中而被搬运,导致风蚀的发展,产生的一种风沙运动。从流体力学角度来看,风沙流是一种气体及其搬运的固体颗粒(沙粒)的混合流(气固两相流)。它的形成依赖于空气与下垫面地表两种不同密度的物理介质相互作用。如果没有风蚀过程就没有风沙流的出现,就不可能有因沙粒输送和堆积过程中引起的各种沙害。风沙危害主要以强风沙流危害为主。所以,研究保护性耕作农田风沙流的空间分布规律,弄清其风沙流结构,对于抑制或削弱风沙流强度,防治沙害、改善区域生态环境,采取合理的保护性耕作种植方式提供科学依据。

4 结 论

1) 保护性耕作农田在不同风速下各高度层的风沙流水平分布符合三次多项式规律。受直立残茬

的影响在风的活动层高度以下,风沙流随距风洞进口距离增加呈快速下降的规律;在残茬顶层高度附近,风沙流随距风洞进口距离增加呈先上升后下降的分布规律。

2) 保护性耕作农田在水平方向上,经过 5.5 m 的距离(27 行残茬)各高度风沙流水平分布曲线接近水平线,基本达到了平衡稳定状态。

3) 保护性耕作农田在不同风速下,各高度层风沙流的垂直分布符合高阶多项式规律,其垂直分布曲线具有与砾石戈壁地表相似的“象鼻”效应。风沙流主要活动在距地表 40 cm 高度以下,约占到风沙流总质量的 90%。

参 考 文 献:

[1] 路 明.现代生态农业[M].北京:中国农业出版社,2002.
[2] 臧 英.保护性耕作防治土壤风蚀的试验研究[D].北京:中国农业大学,2004.
[3] 陈 智,麻硕士,范贵生,等.麦薯带状间作农田地表土壤抗风蚀效应研究[J].农业工程学报,2007,23(3):51—54.
[4] 信乃谄.中国北方旱农区域治理与发展[M].北京:中国农业科技出版社,1997:86—88.
[5] 胡伟华.阴山北麓农牧交错地带经济发展制约因素分析[J].前沿,2005,(4):74—76.
[6] 王 永,赵 举,程玉臣.阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].华北农学报,2005,20(专辑):57—60.
[7] 马玉明,姚洪林,王林和,等.风沙运动学[M].呼和浩特:远方出版社,2004:65—66.
[8] 张正伟,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例[J].干旱区研究,2007,24(4):550—555.
[9] 陈 智,麻硕士,范贵生,等.农牧交错区地表土壤风蚀物垂直分布规律研究[J].农机化研究,2007,(4):102—105.
[10] 李振山,倪晋仁.风沙流研究的历史、现状及其趋势[J].干旱区资源与环境,1998,12(3):89—97.
[11] 张克存,屈建军,郑瑞平,等.戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J].水土保持研究,2005,12(1):54—56.
[12] 屈建军,黄 宁,拓万全,等.戈壁风沙流结构特性及其意义[J].地球科学进展,2005,20(1):19—23.
[13] 邹学勇,朱久江,董光荣,等.风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数[J].科学通报,1992,23:2175—2177.
[14] Sharp R P. Wind-driven sand in Coachella valley, California[J]. Geological Society of America, Bulletin, 1964, 75: 785—804.
[15] 丁国栋,奥村武信.风沙流结构的风洞实验研究[J].内蒙古林学院学报,1994,16(1):40—46.
[16] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen, 1941.
[17] Owen R B. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20: 225—242.

(英文摘要下转第 229 页)

Analysis of temporal and spatial variation, driving factors and trend prediction of grain yield in Gansu Province

CHENG Ying, LIU Pu-xing, BAI Yang, MA Ya-lan, PAN Jing-yuan

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on temporal and spatial variation analysis of grain yield in Gansu Province in the past, the grey correlation analysis method was employed to explore the influential factors of grain yield and analyze quantitatively the degree of correlation between grain yield and its influential factors. The GM (1, 1) model was used to simulate and predict the variation trend of yield per unit area, year-end population and total grain yield. The results showed: (1) The grain yield of Gansu Province was increased in fluctuation, and the spatial distribution of annual average increase rate of grain yield had significant difference in each city and autonomous region. (2) The yield per unit area, year-end population, effective irrigated area, disaster-stricken area, cultivated area and grain planting area were the main driving factors of grain production. (3) The increasing degree of the total grain yield will not be apparent in the future, but the growth of population will get relatively faster. In order to promote sustainable development of grain production, the population should be controlled appropriately while grain production should be developed in a sustainable way.

Key words: grain production; grey correlation analysis; GM(1,1) model; Gansu Province

(上接第 184 页)

Testing and research on space distribution rule of drifting sand flux on farmland with conservative tillage

SUN Yue-chao^{1,2}, MA Shuo-shi¹, CHEN Zhi¹, ZHAO Yong-lai²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou, Inner Mongolia 014109, China)

Abstract: The original position of field wind tunnel was tested in order to make clear the space distribution rule of drifting sand flux on farmland with conservative tillage. The result showed that horizontal distribution in all heights of drifting sand flux on farmland with conservative tillage followed cubic polynomial rule in different wind speed, and drifting sand flux in each height basically reached the balancing and stable state when passed through 27 rows stubble and 5.5 m horizontal distances; drifting sand flux distribution curve in the vertical direction followed higher polynomial rule, and there was "trunk" domino affect alike the vertical distribution of the ground surface sediment runoff in gravel Gobi. The result also showed that drifting sand flux on farmland with conservative tillage mainly moved bellow 40cm height of the ground surface, about 90% of all wind erosions.

Key words: conservative tillage; wind erosion; sand-driving wind; testing and study