

黄泛风沙区耕地土壤风蚀影响因子的通径分析

宋胜明¹, 刘霞², 张荣华¹, 张光灿¹, 邱冠军¹, 许强², 尤俊坚²

(1. 山东农业大学 林学院, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室
山东 泰安 271018; 2. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 研究黄泛风沙区影响耕地土壤风蚀量的主要因子及其相互作用关系, 为土壤风蚀的防治及改善耕作措施提供依据。[方法] 通过影响因子的野外定位观测, 及对风蚀数据进行收集整理, 在逐步回归分析的前提下, 对风蚀量主要影响因子进行通径分析。[结果] 风速累计时间、作物盖度、粗糙度是影响耕地土壤风蚀的主要因素; 风蚀量的直接影响因素作用大小的排序为风速累计时间 > 粗糙度 > 作物盖度; 风蚀量间接影响因素作用大小的排序为粗糙度 > 作物盖度 > 风速累计时间; 风蚀量决定系数排序为 $d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{风速累计时间}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{粗糙度} \cdot \text{粗糙度}}$; 风速累计时间与作物盖度主要通过其本身直接影响风蚀量, 粗糙度主要通过间接作用减少风蚀量。[结论] 可适当地增加作物种植密度, 提高粗糙度、作物盖度, 减少风蚀危害。

关键词: 风蚀; 影响因素; 通径分析; 黄泛区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0249-05

中图分类号: S157.1, F301.24

文献参数: 宋胜明, 刘霞, 张荣华, 等. 黄泛风沙区耕地土壤风蚀影响因子的通径分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 249-253. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.042; Song Shengming, Liu Xia, Zhang Ronghua, et al. Path analysis of soil wind erosion influence factors to cultivated in Yellow River flooded land wind sand area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 249-253. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.042

Path Analysis of Soil Wind Erosion Influence Factors to Cultivated Land in Yellow River Flooded Wind Sand Area

SONG Shengming¹, LIU Xia², ZHANG Ronghua¹,

ZHANG Guangcan¹, QIU Guanjun¹, XU Qiang², YOU Junjian²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018,

China; 2. College of Forestry, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: [Objective] The main influence factors of wind erosion amount and their interaction on cultivated land in flooding area of Yellow River were studied to provide preferences for wind erosion prevention and cultivation measure improvement. [Methods] Through field observation and the collection of wind erosion data, we conducted a path analysis for the main impact factors of wind erosion to cultivated land. [Results] The wind speed cumulative time, crop coverage, and roughness were the main factors affecting the wind erosion of cultivated land. According to the direct path coefficients, the rank of influence factors was wind speed cumulative time > roughness > crop coverage. Referring to the indirect path coefficients, the rank of the indirect influence factors was roughness > crop coverage > wind speed cumulative time. The rank of wind erosion decision coefficient were $d_{w \cdot w}$ (determination coefficient of wind speed cumulative time and wind speed cumulative time) > $d_{w \cdot c}$ (determination coefficient of wind speed cumulative time and crop coverage) > $d_{w \cdot r}$ (determination coefficient of wind speed cumulative time and roughness) > $d_{c \cdot r}$ (determination coefficient of crop cover-

收稿日期: 2017-01-07

修回日期: 2017-03-06

资助项目: 水利部淮河流域委员会“淮河流域黄泛风沙区水土流失分布格局与防治对策研究”(HWSBC2012001)

第一作者: 宋胜明(1990—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。E-mail: 923633314@qq.com。

通讯作者: 张荣华(1984—), 女(汉族), 山东省威海市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持监测与评价研究。E-mail: zrhua5766@163.com。

age and roughness) $>d_{c.c.}$ (determination coefficient of crop coverage and crop coverage) $>d_{r.r.}$ (determination coefficient of roughness and roughness). The wind speed cumulative time and the coverage of crops directly affect wind erosion and roughness act mainly through indirect effect to reduce wind erosion. [Conclusion] To reduce the risk of wind erosion, we can appropriately increase crop planting density and enlarge crop coverage and roughness.

Keywords: wind erosion; impact factor; path analysis; Yellow River flooded area

黄泛区风沙化严重,风沙区域分布不均匀,人口密集,风沙对人的危害大^[1]。土壤风蚀的影响因子有很多,主要包括风速、植被覆盖度、植被平均高度、空气动力学粗糙度、土壤颗粒尺寸分布、有机质含量、土壤水分含量、结皮覆盖^[2]。近年来,中国进行了许多关于土壤风蚀影响因子的研究。其中,刘艳萍等^[3]利用风洞,探讨了荒漠草原植被与植被盖度与粗糙度、风沙流结构特征及风蚀输沙率的定量关系。何清等^[4]通过对环境观测试验站和塔中气象站观测数据的整理,定量描述了气候、地表粗糙度以及地表土壤特性对风蚀的影响。安萍莉等^[5]通过野外观测与室内试验结合的方式,研究了 4 种农作制度对风速、土壤紧实度、地表粗糙度、地表覆盖度、土壤有机质含量、表层土壤含水率、土壤风蚀量等因子的影响。大量的研究^[6-12]主要集中在各个独立影响因子与风蚀量的函数关系上,而在各个风蚀影响因子间的相互关系上的研究稍显不足。为明确各个风蚀影响因子的直接作用与间接作用及其数量关系,本研究拟选取代表黄泛平原风沙区典型区域的兰考县土壤风蚀观测点为研究区域,于 2014—2016 年通过连续的土壤风蚀监测,采用回归分析,筛选出对黄泛区土壤风蚀产生显著影响的指标因素,并依据通径分析法,对各指标进行定量分析,得出各因素以及各因素相互作用对土壤风蚀的影响,以期对土壤风蚀的防治及改善耕作措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于黄泛区的河南省开封市兰考县城西北部,地理位置为 114°44′43″—114°50′38″E, 34°46′38″—34°52′8″N。属暖温带季风气候,四季分明。年平均气温 14℃,1 月平均气温最低 -10℃,7 月的平均气温最高为 27℃。降雨主要集中在夏季 7—8 月,多年平均降雨量为 678.2 mm,最大降水量 1 170 mm(1964 年),最小降水量 393.8 mm(1966 年),是典型的半湿润地区。

根据 2010 年统计数据^[13]淮河流域黄泛区风力侵蚀总面积为 8 742.95 km², 占总土地面积的

24.89%,其中:轻度侵蚀 6 341.86 km², 占总土地面积的 18.06%;中度侵蚀 1 548.84 km², 占总土地面积的 4.41%;强烈侵蚀 852.24 km², 占总土地面积的 2.43%。平均风蚀模数 674 t/(km²·a), 年风蚀总量 5.87×10⁶ t, 其中:轻度侵蚀总量为 2.89×10⁶ t/a, 中度侵蚀总量为 1.65×10⁶ t/a, 强烈侵蚀总量为 1.33×10⁶ t/a。平均风速范围为 1.22~2.72 m/s, 最大风速在 2 月, 其变化范围是 5.9~10.95 m/s。冬季平均风速为 1.71 m/s, 春季平均风速为 1.89 m/s。

2014 年兰考县土地利用现状资料显示, 兰考县耕地面积为 68 578.25 hm², 约占总土地面积的 62.16%, 其耕作方式主要为小麦花生轮作、小麦玉米轮作、小麦地瓜轮作, 属一年两熟制。耕地人为活动频繁, 春季风大、作物盖度低、含水量低, 是土壤风蚀发生的主要土地利用类型。

1.2 研究小区设置

观测小区布设: 观测场总面积约 0.33 hm², 在观测场内选取南北相邻的 3 个区域为观测小区, 每个小区面积为 30 m×30 m, 耕作方式为小麦花生轮作。在观测场内的观测小区外部, 安装一套多通道风速风向系统主机和土壤水分监测系统主机, 在各个观测小区内布设全方位集沙仪、土壤水分传感器、风速传感器。

1.3 观测指标及方法

(1) 指标选取。依照 2014—2016 年的野外观测内容, 本文共筛选出 18 组时间范围在 12 月至次年 5 月的观测数据, 每组数据包括 15 d 内的总风蚀量、风速累计时间、平均作物盖度、平均作物高度、平均粗糙度、平均含水量和平均风速。

(2) 多通道风速风向监测系统。测定 0.2, 0.5, 2 m 高度处的风速, 风速测量精度为 ±0.1 m/s, 测量范围为 0~45 m/s, 数据记录间隔为 15 min, 测定内容为 15 min 内的平均值。

(3) 集沙仪。采用中国科学院研制的全方位定点集沙仪^[14], 高 50 cm, 收集范围 16 方位, 每方位由 1 cm² 的进沙口垂直排列组成。试验处理时首先把 16 方位收集的沙子混合称重, 然后计算 3 个集沙仪沙子平均值得到风蚀量数据。

(4) 土壤水分监测系统。将传感器水平埋入地下 3 cm 处,实时监测土壤水分量,每 15 min 记录一次瞬时值。量程:0%~100%(m³/m³)。精度:±2%(m³/m³)。

(5) 风速累计时间。风蚀量取决于超过起动风速的那部分实测风速^[15],故本文首先利用自行研制的可移动风洞^[16]确定小麦地的起动风速约 4.5 m/s。起沙风速为瞬时值,难以统计,故本文以多通道风速风向系统记录的 15 min 平均值作为一个统计单元,筛选出大于起沙风速的观测数据,将 4 个符合要求的统计单元定义为一个风速累积时间(风速累积时间为 1 h),最后以小时为单位计算 15 d 内大于起沙风速的时长。

(6) 作物盖度、高度。通过样方法统计小区内作物盖度、高度值。

(7) 粗糙度。Z₀ 根据公式 $\ln(Z_0) = [U_1 \ln(Z_1) - U_2 \ln(Z_2)] / (U_1 - U_2)$ ^[17] 得到,本文选取多通道风速风向系统中观测数据中的 0.5 和 2 m,作为计算粗糙度的高度值(Z₁ 和 Z₂),相应高度值对应的风速为计算所需风速值(U₁ 和 U₂)。

1.4 数据处理

逐步回归分析首先从自变量中先选择影响最为显著的变量建立模型,然后再将其他变量依次引入模型,当原引入的变量由于后面变量的引入而变得不再显著时,将其剔除。反复进行引入剔除,直到既无显著变量引入回归方程、也无不显著变量从回归方程中

剔除为止。通径分析是简单相关分析的延伸,首先分解简单相关系数,然后研究各个因素的直接作用和间接作用,即为直接通径和间接通径。在多元回归的基础上将相关系数加以分解,通过直接通径、间接通径及总通径系数分别表示某一变量对因变量的直接作用效果、通过其他变量对因变量的间接作用效果和综合作用效果。决定系数 d_i 的方程为: $d_i = P_i^2$ 式中: P_i —— x 对 y 的通径系数。共同决定系数 d_{ij} 方程为 $d_{ij} = 2r_{ij}P_iP_j$, 其中: r_{ij} 为自变量间的相关系数; P_i, P_j 为通径系数。

2 结果与分析

2.1 影响土壤风蚀量因素的多元回归分析

利用 SPSS 19.0 软件中的线性回归功能,把风蚀量 y 选入因变量框,把风速累计时间 x_1 , 作物盖度 x_2 , 粗糙度 x_3 , 作物高度 x_4 , 含水量 x_5 , 平均风速 x_6 选入自变量框,进行多元逐步回归分析,建立最优回归方程。

表 1 黄泛风沙区土壤风蚀影响因子逐步回归模型结果输出

模型	R	R ²	调整 R ²	标准估计的误差
1 ^①	0.941	0.886	0.877	5.383 3
2 ^②	0.978	0.956	0.948	3.489 9
3 ^③	0.989	0.978	0.972	2.552 8

注:① 表示模型 1 通过逐步法选入风速累计时间;② 表示模型 2 通过逐步法选入作物盖度,风速累计时间仍在模型 2;③ 表示模型 3 通过逐步法选入粗糙度,风速累计时间,作物盖度仍在模型 3。

表 2 黄泛风沙区土壤风蚀影响因子回归系数结果输出

模型	影响因子	非标准化系数		标准化系数	t	p
		B	标准误			
1	常数	-1.578	2.344		-0.673	0.513
	风速累计时间	0.749	0.075	0.941	10.051	0.000
2	常数	13.766	3.840		3.585	0.004
	风速累计时间	0.612	0.058	0.769	10.601	0.000
	作物盖度	-0.347	0.080	-0.316	-4.351	0.001
3	常数	12.723	2.826		4.503	0.001
	风速累计时间	0.710	0.051	0.892	13.854	0.000
	作物盖度	-0.565	0.087	-0.514	-6.495	0.000
	粗糙度	43.172	12.771	0.322	3.380	0.006

表 1 表示随自变量的引入,回归方程的相关系数和决定系数不断增高。因此选取模型 3 为最优方程。

从表 2 可以得到线性回归方程: $y = 0.71 x_1 - 0.565 x_2 + 43.172 x_3 + 12.723$, 其中 $R^2 = 0.978$, 在 $p < 0.01$ 水平上显著。表明风速累计时间、作物盖度、粗糙度这 3 个因子对风蚀量有主要影响。研究表明^[18]土壤含水量对风蚀量起较大抑制作用,但本文在多元回归过程中,土壤含水量没有入选最优方程,这是因为本文的试验时间选取在冬春季节,而冬春季

节的土壤含水量均处于一个相对较低的水平,导致差异性不显著。作物高度虽然对土壤风蚀量有一定影响,但影响同样不显著。通过对回归系数输出结果和相关系数输出结果的简单计算和整理,得到各因子对风蚀量的直接通径系数、间接通径系数以及决定系数,结果见表 3—4。

2.2 风蚀量影响因子的通径分析

通过表 3 可看出,风蚀量与风速累计时间、作物盖度、粗糙度呈极显著相关。对直接通径系数进行 F 检

验得出,风蚀量与风速累计时间和作物盖度极显著相关,与粗糙度显著相关。

根据明道绪^[19]提出的决定系数检验方法对表 4 进行显著性检验。选取直接途径系数的绝对值中的最小值作为显著性水平的基准,然后按照各因子决定系数

的绝对值从大到小排序后顺序作为决定系数的显著性水平排序。因此,各自变量间的决定系数显著性水平排序为: $d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{风速累计时间}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{粗糙度} \cdot \text{粗糙度}}$ 。

表 3 黄泛风沙区土壤风蚀影响因子通径分析

影响因子	相关系数	直接途径系数	间接途径系数			
			总和	风速累计时间	作物盖度	粗糙度
风速累计时间	0.941 0**	0.892 0**	0.049 6		0.281 2	-0.231 5
作物盖度	-0.736 0**	-0.514 0**	-0.222 3	-0.487 9		0.265 7
粗糙度	-0.743 0**	0.322 0*	-1.065 4	-0.641 3	-0.424 1	

注:*表示在 $p < 0.5$ 的水平上显著相关;**表示在 $p < 0.01$ 的水平上显著相关。

表 4 黄泛风沙区土壤风蚀影响因子决定系数

影响因子	决定系数		
	风速累计时间	作物盖度	粗糙度
风速累计时间	0.795 7	0.501 6	-0.413 0
作物盖度		0.264 2	-0.273 1
粗糙度			0.103 7

分析表 3—4 得出了如下的结论:通过各因素与风蚀量的相关系数可以看出,3 个因素对风蚀量的影响程度大小关系为:风速累计时间>粗糙度>作物盖度。风速累计时间与风蚀量的相关系数为 0.941 0,呈正相关,说明风速累计时间对风蚀起到促进作用且作用大。作物盖度和粗糙度与风蚀量,相关系数分别为-0.736 0,-0.743 0,均呈负相关,说明二者都能减少风蚀的发生且作用较大。

风速累计时间对风蚀量的直接途径系数为 0.892 0,决定系数为 0.795 7,均居于首位,因此风速累计时间是影响风蚀量最重要的因素。风速累计时间的间接途径系数为 0.049 6,仅占相关系数的 5.3%,由此看来风速累计时间几乎是完全通过其本身的效应来引起地表土壤颗粒起动,产生风蚀。实际上,这一数值掩盖了风速累计时间的真实作用,这是因为风速累计时间通过作物盖度和粗糙度对风蚀产生相反的影响并且影响程度相互抵消。

风速累计时间和作物盖度共同对风蚀量的决定系数为 0.501 6,排在第 2 位。风速累计时间通过作物盖度对风蚀量的间接途径系数为 0.281 2,作物盖度通过风速累计时间对风蚀量的间接途径系数为-0.487 9,二者之和为负,故风速累计时间与作物盖度共同对风蚀量起到抑制作用。这是因为作物盖度增加到一定的值后,地面被作物覆盖,可有效增大起动风速,使风速对风蚀的影响减弱。

风速累计时间和粗糙度对风蚀量的共同决定系

数为-0.413 0,其绝对值排在第 3 位。风速累计时间通过粗糙度对风蚀量的间接途径系数为-0.231 5,粗糙度通过风速累计时间对风蚀量的间接途径系数为-0.424 1,二者之和为负,故风速累计时间与粗糙度共同对风蚀量起到抑制作用。

作物盖度的决定系数为 0.264 2,绝对值排在第 5 位,其直接途径系数等于-0.514 0,绝对值排在第 2 位。可见作物盖度对风蚀起到较强的抑制作用。作物盖度通过风速累计时间对风蚀量的间接途径系数为-0.487 9,作物盖度通过粗糙度对风蚀量的间接途径系数为 0.265 7。因此,作物盖度通过其他因素对风蚀量的间接途径系数为-0.222 3,即作物盖度通过改变其他因素来减弱土壤风蚀的结果。作物盖度对风速的削减表现在,风的剪切力在植被层内一分为二,其中大部分被植物截获,只有一小部分直接到达地面。作物盖度还通过改变粗糙度来影响风蚀状况,作物盖度越大,粗糙度越小。

粗糙度的决定系数为 0.103 7,排在最末位,其直接途径系数等于 0.322 0,其绝对值排在第 3 位。粗糙度通过风速累计时间对风蚀量的间接途径系数为-0.641 3,粗糙度通过作物盖度对风蚀量的间接途径系数为-0.424 1。故粗糙度通过其他因素对风蚀量产生的间接途径系数为-1.065 4。粗糙度的间接途径系数之和明显大于直接途径系数,即粗糙度的增加主要通过削减其他利于风蚀因素的作用来保护土壤。

3 讨论与结论

(1) 通过多元回归分析得到风蚀量的线性回归方程 $y=0.71 x_1-0.565 x_2+43.172 x_3+12.723$,其中 x_1 为风速累计时间, x_2 为作物盖度, x_3 为粗糙度。故影响黄泛区兰考县耕地风蚀的主要因素为风速累

计时间、作物盖度、粗糙度。

(2) 通过对多元回归筛选出的主要风蚀影响因子的通径分析,得到风速累计时间、作物盖度、粗糙度的直接通径系数分别为 0.892 0, -0.514 0, 0.03 220, 直接影响因素的作用大小排序为风速累计时间 > 粗糙度 > 作物盖度;间接通径系数分别为 0.049 6, -0.222 3, -1.065 4, 间接影响因素的作用大小排序为粗糙度 > 作物盖度 > 风速累计时间;决定系数排序为: $d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{风速累计时间}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{风速累计时间} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{粗糙度}} > d_{\text{作物盖度} \cdot \text{作物盖度}} > d_{\text{粗糙度} \cdot \text{粗糙度}}$, 两因子共同对风蚀量的影响作用大小排序相同。

(3) 风速累计时间与作物盖度的直接通径系数大,间接通径系数小,主要通过直接作用影响风蚀量,粗糙度的直接通径系数小,间接通径系数大,主要通过间接作用减少风蚀量。因此可通过适当增加种植密度,增加粗糙度和作物盖度的方式减少风蚀危害。

(4) 本文用风速累计时间来近似统计大于起沙风速的时间总和,以 15 min 的平均值作为一个统计单元,不统计起沙风速的实际大小,只统计大于起沙风速的近似小时数,以此得出的相关系数极高。相较于传统的用 10 min 的平均风速^[20]代替该时段的起沙风速相比,具有更高的准确性。但本文方法仍存在一些弊端,以 15 min 内的平均风速值的大小来确定是否该段时间内的风速满足起沙风速的方法还不够精确。一方面对于瞬时变化的风速来说 15 min 的统计时间过长,另一方面风速的大小对风蚀量影响也很大。因此,接下来的研究重点是应缩短起沙风速的统计时间和把大于起沙风速的风分级统计,明确不同等级的起沙风对风蚀的不同贡献度。

[参 考 文 献]

[1] 朱震达. 湿润及半湿润地带的土地风沙化问题[J]. 中国沙漠, 1986, 6(4): 1-12.
 [2] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 875-889.
 [3] 刘艳萍, 刘铁军, 蒙仲举. 草原区植被对土壤风蚀影响的

风洞模拟试验研究[J]. 中国沙漠, 2013, 4(5): 668-672.

- [4] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔中地区土壤风蚀的影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2010, 22(4): 502-508.
 [5] 安萍莉, 琪赫, 潘志华, 等. 北方农牧交错带不同农作制度对土壤风蚀因子的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 12(5): 26-29.
 [6] 邹学勇, 张春来. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, 24(8): 875-889.
 [7] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 640-646.
 [8] 黄富祥, 丁国栋. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报, 2011, 56(6): 700-710.
 [9] 何文清, 赵彩霞. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究: 以内蒙古武川县为例[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2092-2096.
 [10] 杨明远. 地表粗糙度测定的分析与研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 383-387.
 [11] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞试验[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 632-638.
 [12] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞试验研究[J]. 中国沙漠, 1992, 12(4): 44-52.
 [13] 王友胜. 淮河流域黄泛区风水侵蚀格局及其驱动因子研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2012.
 [14] 赵爱国. 全方位定点集沙仪. 中国, 97229778. 4[P]. 1997-10-13.
 [15] 董治宝, 陈渭南, 韩致文, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J]. 地理学报, 1995, 50(4): 360-367.
 [16] 邱冠军. 豫东半湿润黄泛区土壤风蚀及其影响因子特征[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2016.
 [17] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 99-102.
 [18] 移小勇, 赵哈林, 赵学勇, 等. 不同风沙土含水量因子的抗风蚀性[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 684-687.
 [19] 明道绪. 通径分析: 显著性检验[J]. 四川农学院学报, 1985, 3(1): 59-66.
 [20] 王训明, 董智宝. 起沙风统计和工程输沙量计算中的若干问题[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3): 41-45.