

土壤含水率及物理性砂粒含量对风蚀模数影响的风洞模拟

赵沛义¹, 妥德宝¹, 李焕春¹, 段玉¹, 康暄¹, 弓钦², 张君¹

(1. 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所, 农业部农牧交错带生态环境重点野外科学观测试验站, 内蒙古旱作农业重点实验室, 呼和浩特 010031; 2. 乌兰察布市土壤肥料工作站, 集宁 012000)

摘要: 为了探究土壤含水率及物理性砂粒含量对土壤风蚀模数的影响, 在室内风洞中在 5、6、9、12、15 和 18 m/s 风速下对不同含水率 (0, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% 和 10%) 的 7 种土壤 (物理性砂粒质量分数的分别为 20%、30%、40%、50%、60%、70% 和 80%) 进行了 10 min 吹蚀, 在风洞轴线距出口 1.2 m 处放置旋式集沙仪分别测定垂直方向上 10 个不同高度的风蚀物收集量 (高度分别为 20、60、120、180、240、300、400、500、600 和 700 mm), 并利用 MATLAB7.4.0 (R2007) 软件采用 3 次样条插值拟合法对旋式集沙仪不同高度的风蚀物收集量进行积分, 通过换算计算土壤风蚀模数 E 。结果表明, 物理性砂粒质量分数低于 40% 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。物理性砂粒质量分数 $\leq 20\%$ 时, 风蚀物收集量在空间上符合指数函数变化规律; $20\% < \text{物理性砂粒质量分数} < 40\%$ 风蚀物收集量在空间上利用指数函数和幂函数拟合相关性均很好, 物理性砂粒质量分数高于 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; 低于临界风速, 风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律; 高于临界风速, 二者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, 二者符合指数曲线变化关系。物理性砂粒质量分数低于 40% 的土壤, 不会有风蚀现象发生; 当物理性砂粒质量分数大于 40% 后, 土壤容易发生风蚀, 而且风蚀程度随物理性砂粒含量的增加而增大, 尤其当土壤含水率低于 3% 时, 极易发生风蚀。风速越大土壤风蚀模数越大, 风蚀模数与风速按照指数曲线规律进行变化。阴山北麓旱作区冬春季节土壤地表含水率一般维持在 3%~4%, 土壤的物理性砂粒质量分数基本在 50%~80%; 单纯从土壤水分和土壤物理性砂粒含量考虑, 阴山北麓旱作区大部分地区是沙尘暴的发生源。

关键词: 土壤水分, 砂粒, 风洞, 风蚀模数, 粒级

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.24.026

中图分类号: S157.1; S157.4; S152.4⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-24-0188-08

赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 土壤含水率及物理性砂粒含量对风蚀模数影响的风洞模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 188—195.

Zhao Peiyi, Tuo Debao, Li Huanchun, et al. Effects of soil moisture and physical sand content on wind erosion modulus in wind tunnel testing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 188—195. (in Chinese with English abstract)

0 引言

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, 风蚀量的大小与风蚀地表可蚀性颗粒和不可蚀性颗粒的相对含量变化有关^[1], 哈斯^[2]、于爱忠^[3]等研究了不可蚀颗粒对土壤风蚀的影响, 认为随着不可蚀性颗粒含量的增加风蚀量呈递减趋势; 刘连友^[4]在风洞实验室对半干旱地区 3 种典型土壤进行风蚀模拟测定, 通过粒度分析, 揭示了耕作土壤可蚀性颗粒的粒径范围; 李晓丽^[5-6]等也对内蒙古阴山北部地区已跃移颗粒进行了初步研

究, 而且利用粒径对比法对乌兰察布市四子王旗土壤风蚀量进行了估算; 李占宏等^[7]研究认为土壤粒度分布对土壤风蚀具有直接的影响作用, 就可蚀性粒径而言, 固定沙丘和耕地的颗粒物释放较少, 退化草原、移动沙丘和半固定沙丘颗粒物释放较多。国外学者^[8-9]研究认为粒径 $> 0.84 \text{ mm}$ 的颗粒为不可蚀颗粒, 粒径 $\leq 0.84 \text{ mm}$ 颗粒为可蚀性颗粒, 粒径 $0.05 \sim 0.50 \text{ mm}$ 的土粒为最易蚀性颗粒。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 0.80 mm 的沙粒定为不可蚀颗粒^[10], 董治宝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 1.00 mm 的颗粒定为内蒙古阴山北麓地区的不可蚀颗粒^[1]。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、黏结性和可塑性, 因此将粒径小于 1.00 mm , 大于 0.01 mm 的颗粒看做内蒙古阴山北麓地区的可蚀性

收稿日期: 2012-06-07 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 内蒙古自然科学基金 (2010MS0304); 国家科技支撑计划 (2012BAD09B02); 国家自然科学基金 (40661009)

作者简介: 赵沛义 (1972—), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 研究员, 博士, 主要从事旱作农业和保护性耕作研究。呼和浩特市 内蒙古农牧业科学院, 010031。Email: zhpy1972@163.com

颗粒进行研究,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。那么土壤发生风蚀时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?值得验证,但国内外在此方面未见报道。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。本文在室内风洞中对不同含水率下 7 种土壤样品的土壤风蚀模数进行了测定,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初步分析,以期为客观评价沙尘暴的发生源提供参考。

表 1 不同土壤样品粒径含量测定

Table 1 Measurements of soil particle size for different soil samples

土样编号	实际质量分数/%	不同粒径质量分数/%						
	0.01~1 mm	>2 mm	>1~2 mm	>0.25~1 mm	>0.05~0.25 mm	>0.01~0.05 mm	>0.005~0.01 mm	≤0.005 mm
1	22.83	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	43.46	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	58.81	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	0	0	47.85	30.09	4.19	17.87

1.2 土壤含水率配制

土壤按水分梯度设计了不同处理,其土壤含水率分别为 0、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%和 10%,物理性砂粒含量较低的几个土壤无法实现高含水率配制,水分梯度略少;物理性砂粒含量高于 40%土样无法实现含水率为 0 的配制。不同处理土样事先放置在塑料桶中利用烘干法^[12]实测其质量含

1 材料与方法

1.1 土壤采集及配制

试验设想将物理性砂粒质量分数基本为 20%和 80%的 2 种土壤作为基础土样,再人为配置物理性砂粒质量分数理论值分别为 30%、40%、50%、60%和 70% 5 种土壤。试验前分别采集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和东红胜乡双玉城村的风积土 2 种自然土样进行不同物理性砂粒含量土样配制,所采集的 2 种土样物理性砂粒质量分数分别为 22.83%和 77.94%,新配制的另外 5 种土样未经压实,物理性砂粒实际质量分数分别为 31.31%、43.46%、52.63%、58.81%和 67.96%,采用比重计法^[11]测定的不同土样粒径结果见表 1。

水率,测定值高于设计土壤含水率的土样放置在阳光下继续晒干直至接近需要的含水率,测定值低于设计土壤含水率的土样通过质量换算加入适量自来水搅拌均匀,然后利用塑料薄膜将桶口封好静置 6 h,实验前 5 min 再将桶中土样搅拌均匀实测土样质量含水率作为风洞试验不同处理的土壤含水率,各土样不同处理配制的土壤含水率结果见表 2。

表 2 土样含水率配制结果

Table 2 Soil moisture contents for testing soil samples

土样编号	不同理论含水率下的土壤实际含水率/%										
	0	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
1	0	1.30	2.50	3.21	/	5.13	/	7.37	/	/	/
2	0	1.44	2.34	3.25	4.44	/	5.57	/	/	/	/
3	0.41	1.41	2.33	3.33	4.36	5.32	6.38	7.04	/	/	/
4	/	1.00	1.92	3.08	4.38	5.16	6.26	7.08	7.77	8.90	/
5	/	1.44	2.14	3.47	4.10	4.96	6.12	7.32	8.00	9.05	10.43
6	/	0.95	2.36	3.11	4.36	5.00	6.03	6.8	7.75	9.21	10.31
7	/	1.31	2.16	3.26	3.81	5.00	6.12	7.03	8.14	8.81	10.13

1.3 风洞试验及数据处理方法

试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,将土壤放置在一个装土体积为 50 cm×40 cm×5 cm 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,将旋风式集沙仪放置在土壤箱后沿风洞轴线距出口 1.2 m 处。在 5、6、9、12、15 和 18 m/s 的风速下吹蚀 10 min,采用感量为万分之一的电子天平分别测定旋风式集沙仪垂直方向上 20、60、120、180、240、300、400、500、600 和 700 mm

10 个不同高度集沙盒中的风蚀物收集量, 各高度风蚀物收集量的累加值即为总输沙量。将旋风式集沙仪不同高度风蚀物的收集量数值借助 MATLAB7.4.0 (R2007a) 软件采用 3 次样条插值拟合后, 即可得到风洞内单位面积单位时间的土壤风蚀量, 即风蚀模数, 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。

2 结果与分析

2.1 风蚀物收集量空间动态变化

本研究在室内风洞经过对物理性砂粒含量不同的 7 种土壤, 在设定含水率条件 (0, 1%, 2%, 3%,

4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%和 10%) 和 6 个风速 (分别为 5、6、9、12、15 和 18 m/s) 共 2 478 次历时 10 min 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。物理性砂粒质量分数小于 40%时, 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。物理性砂粒质量分数 $\leq 20\%$, 风蚀物收集量符合指数函数变化规律, $20\% <$ 物理性砂粒质量分数 $< 40\%$ 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曲线变化规律, 物理性砂粒质量分数 $\geq 40\%$, 风蚀物收集量在空间上呈现幂函数曲线变化规律 (表 3)。

表 3 不同土样风蚀物收集量在空间上的动态变化规律
Table 3 Spatial variation of wind erosion sediments for different soil types

土样	物理性砂粒质量分数%	指数函数		幂函数	
		拟合函数关系式	R^2	拟合函数关系式	R^2
1	20	$Y=0.0004e^{-0.059X}$	0.9038	$Y=0.0015X^{-1.0053}$	0.6113
2	30	$Y=0.0004e^{-0.0343X}$	0.9065	$Y=0.0013X^{-0.7246}$	0.9440
3	40	$Y=0.001e^{-0.0477X}$	0.7922	$Y=0.0065X^{-1.0937}$	0.9705
4	50	$Y=0.001e^{-0.042X}$	0.7009	$Y=0.0058X^{-1.0237}$	0.9701
5	60	$Y=0.0013e^{-0.0483X}$	0.6874	$Y=0.0105X^{-1.1818}$	0.9606
6	70	$Y=0.0019e^{-0.057X}$	0.6301	$Y=0.0249X^{-1.438}$	0.9342
7	80	$Y=0.0025e^{-0.0638X}$	0.6287	$Y=0.0455X^{-1.6091}$	0.9312

注: X 指集沙仪高度, mm; Y 为风蚀物收集量, g, 下同。

用旋风式集沙仪测定不同风速 (分别为 5、6、9、12、15 和 18 m/s) 不同含水率 (分别为 0, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%和 10%) 的所有土壤样品在垂直方向上 20、60、120、180、240、300、400、500、600 和 700 mm 高度的风蚀物收集量, 并利用 SPSS14.0 软件进行回归, 风蚀物收集量在空间上的动态变化规律列于表 4。结果表明, 9 m/s 风速基本上是空间动态发生变化的临界点, 风速低于或等于临界风速, 即低风速条件下风蚀物收集量与高度关系符合指数曲线变化规律, 风速大于 9 m/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, 9 m/s 以下风速吹蚀时土壤颗粒主要以蠕动和悬浮 2 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 20 mm 集沙盒收集量相对较少, 总体上风蚀物收集量与高度的拟合关系符合指数曲线变化规律; 当风速大于 9 m/s 后, 土壤颗粒除了以蠕动和悬浮 2 种形式运动外, 增加了跃迁方式, 而发生跃迁时基本为比重较大的土壤颗粒, 100 mm 以下高度集沙盒收集到的风蚀物质量较大, 风蚀物收集量与高度拟合关系呈现幂函数曲线变化规律。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。

表 4 不同风速吹蚀下风蚀物收集量在空间上的动态变化规律
Table 4 Spatial variation of wind erosion sediments in different wind speeds

风速/(m·s ⁻¹)	指数函数		幂函数	
	拟合函数关系式	R^2	拟合函数关系式	R^2
5	$Y=0.0004e^{-0.0641x}$	0.9701	$Y=0.0013X^{-0.9864}$	0.7004
6	$Y=0.0004e^{-0.0467x}$	0.9465	$Y=0.001X^{-0.7861}$	0.7167
9	$Y=0.0005e^{-0.0471x}$	0.9620	$Y=0.002X^{-0.9188}$	0.8504
12	$Y=0.0008e^{-0.0419x}$	0.8008	$Y=0.0039X^{-0.9392}$	0.9386
15	$Y=0.0014e^{-0.0441x}$	0.6339	$Y=0.0103X^{-1.112}$	0.9402
18	$Y=0.0028e^{-0.0529x}$	0.5774	$Y=0.0359X^{-1.3825}$	0.9186

土壤风蚀过程中风沙活动属于近地面运动, 张小由^[13]研究表明, 1 m 高程内有 79.3%的沙量集中在 0~10 cm; 何文清等^[14]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 0~10 cm 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，其中在 0~4 cm 高度范围内，随着高度的增加集沙量增加，当高度大于 4 cm 以后，随着集沙仪高度的增加，集沙量呈现减少的趋势；哈斯等^[2,15]研究认为土壤输沙量随高度增加呈下降的趋势，输沙量随高度变化的规律可以用幂函数近似描绘；李晓丽等^[5]研究认为阴山北部裸露耕地输沙主要集中在 50 cm 高度以内，且土壤风蚀物随高度呈现指数函数显著减少；陈智等^[16]研究认为无退化草地、退化草地和传统耕作农田地表土壤风蚀物随高度的变化遵循指数函数变化规律，而保护性耕作农田土壤风蚀物随高度的变化呈明显的随机性特征，而且认为保护性耕作农田土壤风蚀物集中在距地表 18~40 cm 的高度范围内；邹春霞等^[17]研究认为风蚀物跃移颗粒体主要集中在 7.5~43.5 cm 高度，风蚀物含量沿高度呈递减趋势，对幂函数、指数函数和对数函数均具有较

好的相关性；刘振东等^[18]研究认为采用覆盖与留茬的保护性耕作措施土壤风蚀物多集中在 60 cm 以内，且以 0~26 cm 高度含量居多。

2.2 土壤风蚀模数随风速和土壤含水率变化规律

土壤含水率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黏结力^[14,19]。本研究测定结果表明，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下面的指数曲线规律进行变化

$$E=A \times e^{BV}$$

式中， E 为风蚀模数， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ； V 为风速， m/s ； A 、 B 为参数。各土样不同含水率情况下风蚀模数及其随风速变化的拟合关系式见表 5。

表 5 风蚀模数随风速变化的拟合关系式

Table 5 Parameters for relationship between wind erosion modulus and wind speeds

土样 编号	物理性砂粒 质量分数/%	含水率/%	不同风速下的风蚀模数/ $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1})$						拟合参数		R^2
			$5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	A	B	
1	20	0	0.068	0.094	0.125	0.200	0.258	0.346	0.0419	0.1210	0.9801
		1	0.068	0.077	0.123	0.162	0.212	0.324	0.0391	0.1170	0.9916
		2	0.057	0.075	0.081	0.147	0.196	0.290	0.0320	0.1215	0.9746
		3	0.035	0.048	0.072	0.108	0.139	0.230	0.0199	0.1356	0.9862
		5	0.023	0.055	0.064	0.087	0.133	0.212	0.0161	0.1436	0.9040
		7	0	0.035	0.059	0.071	0.144	0.201	0.0144	0.1470	0.9768
2	30	0	0.101	0.165	0.195	0.285	0.320	0.452	0.0758	0.1009	0.9308
		1	0.105	0.150	0.178	0.257	0.294	0.417	0.0748	0.0958	0.9627
		2	0.105	0.147	0.178	0.189	0.266	0.395	0.0755	0.0875	0.9403
		3	0.094	0.146	0.165	0.207	0.245	0.355	0.0728	0.0863	0.9304
		4	0.031	0.067	0.131	0.152	0.194	0.278	0.0241	0.1437	0.8627
		6	0.028	0.067	0.100	0.110	0.134	0.210	0.0241	0.1229	0.8206
3	40	0	0.209	0.244	0.320	0.670	1.095	1.568	0.0894	0.1618	0.9859
		1	0.133	0.228	0.319	0.389	0.652	1.334	0.0722	0.1545	0.9554
		2	0.106	0.196	0.286	0.330	0.629	1.254	0.0564	0.1658	0.9502
		3	0.105	0.177	0.243	0.345	0.644	1.146	0.0521	0.1684	0.9773
		4	0.101	0.143	0.200	0.324	0.514	0.984	0.0469	0.1645	0.9906
		5	0.100	0.131	0.179	0.249	0.340	0.432	0.0642	0.1093	0.9858
		6	0.042	0.084	0.106	0.137	0.208	0.273	0.0307	0.1256	0.9160
4	50	7	0	0.058	0.068	0.118	0.194	0.265	0.0233	0.1360	0.9756
		1	0.196	0.228	0.335	0.792	1.434	2.607	0.0649	0.2045	0.9908
		2	0.159	0.219	0.311	0.411	0.721	1.717	0.0700	0.1656	0.9624
		3	0.118	0.194	0.287	0.360	0.704	1.439	0.0560	0.1732	0.9679
		4	0.101	0.152	0.217	0.301	0.471	1.076	0.0487	0.1624	0.9696
		5	0.100	0.139	0.180	0.284	0.417	0.941	0.0465	0.1572	0.9725
		6	0.044	0.096	0.122	0.240	0.329	0.715	0.0227	0.1888	0.9565
		7	0.022	0.068	0.124	0.225	0.251	0.717	0.0125	0.2232	0.9056
		8	0	0.056	0.135	0.211	0.183	0.328	0.0339	0.1279	0.8465
5	60	9	0	0.040	0.076	0.097	0.153	0.238	0.0419	0.1210	0.9801
		1	0.209	0.264	0.473	1.076	1.797	3.546	0.0706	0.2182	0.9973
		2	0.160	0.236	0.365	0.745	1.416	2.576	0.0598	0.2094	0.9959
		3	0.131	0.200	0.310	0.591	1.038	2.159	0.0510	0.2050	0.9939
		4	0.103	0.225	0.230	0.411	0.811	2.113	0.0435	0.2035	0.9422

续表

土样 编号	物理性砂粒 质量分数/%	含水率/%	不同风速下的风蚀模数/(g·(m ² ·min) ⁻¹)						拟合参数		R ²
			5 m·s ⁻¹	6 m·s ⁻¹	9 m·s ⁻¹	12 m·s ⁻¹	15 m·s ⁻¹	18 m·s ⁻¹	A	B	
		5	0.108	0.150	0.191	0.479	0.771	1.871	0.0361	0.2121	0.9804
		6	0.071	0.101	0.141	0.251	0.472	1.404	0.0236	0.2123	0.9689
		7	0.031	0.068	0.141	0.238	0.267	1.108	0.0135	0.2317	0.9301
		8	0	0.095	0.102	0.152	0.225	0.733	0.0270	0.1623	0.8591
		9	0	0.046	0.087	0.130	0.189	0.293	0.0204	0.1499	0.9887
		10	0	0	0.066	0.098	0.160	0.236	0.0181	0.1430	0.9979
		1	0.247	0.392	0.583	1.101	2.853	8.662	0.0664	0.2569	0.9751
		2	0.202	0.297	0.382	0.752	2.132	5.118	0.0557	0.2408	0.9699
		3	0.158	0.240	0.354	0.619	1.500	4.122	0.0474	0.2358	0.9760
		4	0.150	0.169	0.237	0.529	1.224	3.686	0.0357	0.2425	0.9654
6	70	5	0.124	0.164	0.198	0.521	1.122	2.963	0.0325	0.2399	0.9705
		6	0.080	0.106	0.184	0.503	0.669	1.734	0.0256	0.2304	0.9860
		7	0.049	0.086	0.149	0.242	0.368	1.380	0.0179	0.2253	0.9580
		8	0	0.064	0.106	0.163	0.490	1.135	0.0123	0.2430	0.9688
		9	0	0.058	0.088	0.141	0.204	0.422	0.0212	0.1598	0.9850
		10	0	0	0.094	0.139	0.189	0.335	0.0267	0.1369	0.9832
		1	0.256	0.430	0.736	2.147	4.940	16.752	0.0553	0.3083	0.9903
		2	0.227	0.302	0.394	1.285	2.490	9.098	0.0486	0.2275	0.9687
		3	0.162	0.277	0.367	1.126	1.947	7.751	0.0402	0.2770	0.9707
		4	0.164	0.158	0.326	0.923	1.420	6.108	0.0327	0.2741	0.9707
7	80	5	0.147	0.170	0.240	0.366	1.242	4.479	0.0317	0.2510	0.9237
		6	0.080	0.121	0.190	0.419	0.840	2.627	0.0221	0.2536	0.9847
		7	0.067	0.108	0.151	0.316	0.545	1.695	0.0219	0.2287	0.9755
		8	0.054	0.075	0.134	0.216	0.278	0.539	0.0269	0.1654	0.9830
		9	0	0.062	0.089	0.141	0.236	0.395	0.0229	0.1559	0.9953
		10	0	0.044	0.064	0.096	0.140	0.254	0.0178	0.1433	0.9910

目前文献未报道风蚀模数大小具体划分方法,笔者为方便分析根据风蚀模数测定结果(表5)结合不同土样物理性砂粒含量按照土壤风蚀模数大小划分为以下5个阶段:无风蚀, $E \leq 0.2 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{min)}$; 轻微风蚀, $E > 0.2 \sim 1.0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{min)}$; 土壤风蚀缓增区, $E > 1.0 \sim 2.0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{min)}$; 土壤风蚀增强区, $E > 2.0 \sim 5.0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{min)}$; 土壤风蚀极强区, $E > 5.0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{min)}$ 。

对于物理性砂粒质量分数低于40%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,只发生轻微的风蚀现象。对于旱作农田,冬春季节土壤特别干旱时,土壤表层含水率也能达到2%以上,而土壤风蚀往往在春季冻融交替时比较严重,因此从本试验的土壤风蚀模数分析可知,与土样1、2类类似的土壤都不会是发生土壤风蚀的沙尘源。就土壤物理性砂粒质量分数 $\geq 40\%$ 的5种土样而言,土样3在风速 $> 15 \text{ m/s}$,土壤含水率 $\leq 3\%$,土壤风蚀进入缓增区,在 18 m/s 风速内,不会进入增强区。土样4在风速 $> 15 \text{ m/s}$, $2\% \leq$ 土壤含水率 $\leq 4\%$,土壤风蚀进入缓增区;在风速 $> 15 \text{ m/s}$,土壤含水率 $< 2\%$,土壤风蚀进入增强区。土样5在风速 $> 12 \text{ m/s}$,土壤含水率 $\leq 3\%$ 和风速 $> 15 \text{ m/s}$, $4\% <$ 土壤含水率

$\leq 7\%$,土壤风蚀进入缓增区;风速 $> 15 \text{ m/s}$,土壤含水率 $\leq 4\%$,土壤风蚀进入增强区。土样6在风速 $> 12 \text{ m/s}$, $3\% \leq$ 土壤含水率 $\leq 5\%$ 和风速 $> 15 \text{ m/s}$, $6\% \leq$ 土壤含水率 $\leq 8\%$,土壤风蚀进入缓增区;风速 $> 12 \text{ m/s}$,土壤含水率 $< 3\%$ 和风速 $> 15 \text{ m/s}$, $3\% \leq$ 土壤含水率 $< 6\%$,土壤风蚀进入增强区;风速 $> 15 \text{ m/s}$,土壤含水率 $< 3\%$,土壤风蚀进入极强区。土样7在风速 $> 9 \text{ m/s}$, $1\% <$ 土壤含水率 $\leq 3\%$ 和风速 $> 12 \text{ m/s}$, $2\% <$ 土壤含水率 $\leq 5\%$,土壤风蚀进入缓增区;在风速 $> 12 \text{ m/s}$,土壤含水率 $\leq 2\%$ 和风速 $> 15 \text{ m/s}$, $4\% <$ 土壤含水率 $\leq 6\%$,土壤风蚀进入增强区;在风速 $> 15 \text{ m/s}$,土壤含水率 $\leq 4\%$,土壤风蚀进入极强区。

总之,土壤含水率相同时,物理性砂粒质量分数低于40%的土壤,只发生轻微的风蚀现象;当物理性砂粒质量分数 $\geq 40\%$ 后,土壤临界起动风速降低,容易发生风蚀,而且风蚀的程度随物理性砂粒含量的增加而增大,尤其当土壤含水率低于3%时,极易发生风蚀;土壤含水率高于7%,也只能发生微弱的土壤风蚀。

2.3 土壤风蚀模数三元回归模拟

以物理性砂粒含量、土壤含水率和吹蚀风速为

自变量, 以土壤风蚀模数为因变量对风洞测试结果进行三元二次回归, 得到风蚀模数随物理性砂粒含量、土壤含水率和吹蚀风速变化的三元拟合关系式

$$E=2.557463-0.080263X_1+0.527724X_2-0.478806V+0.00065X_1^2-0.009108X_1X_2+0.024633X_2^2+0.007399X_1V-0.039447X_2V+0.017207V^2, R^2=0.6711$$

式中, X_1 为物理性砂粒质量分数, %; X_2 为土壤含水率, %。

检验结果显示, $F=77.99$, $P<0.0001$, $R^2=0.6711$ 。虽然本研究对影响土壤风蚀模数的 3 个因子进行了尝试, 但室内风洞模拟采用净风吹蚀, 所以自然气候等因素对监测结果影响较小, 而实际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, 需要进一步深入研究。

2.4 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^[20]。质地以砂壤土和轻壤土为主, 部分地区为中壤土^[21], 按照卡庆斯基土壤质地分类标准^[22], 砂壤土、轻壤土和中壤土的土壤粒径大于 0.01 mm 的质量分数一般在 70%~90%, 粒径大于 1 mm 的质量分数在 15%~30%, 因此以物理性砂粒的质量分数为 50%~80%来概括阴山北麓地区土壤的粒级较为客观。由于马铃薯是阴山北麓旱作区主要的经济作物, 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%^[23]。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^[24], 何文清等^[14]通过风洞试验对武川旱作研究中心耕翻地和苜蓿 20 cm 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, 阴山北麓多个试验结果^[25-29]也表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。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率, 本文所配制的不同物理性砂粒质量分数高于 50%的土样基本能代表阴山北麓旱作区各类土壤, 因此可以以此来评价各类土壤由于耕翻诱发沙尘暴的可能性。

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, 土壤表层含水率一般维持在 3%~4%, 特殊干旱年份甚至低于 3%。按照本文的结果 18 m/s 以上风

速土壤风蚀模数高于 2 g/(m²·min)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。只有表层土壤含水率高于 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。由表 5 结果知, 土壤含水率为 3%~4%, 物理性砂粒质量分数高于 50%的土样在风速为 18 m/s 时, 风蚀模数介于 1.439~7.751 g/(m²·min), 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 2.07×10³~11.16×10³ t/(km²·d), 如果以阴山北麓农牧交错带每年 18 m/s 以上风速平均天数为 32 d, 干旱区农田面积 151.3 万 hm² 计算^[30], 该地区旱作农田如果都进行传统的耕翻作业土壤风蚀量约为 1.01×10⁹~5.40×10⁹ t/a, 所以必须采取切实可行的保护性耕作措施加以防护。

3 结 论

物理性砂粒质量分数≤20%时, 风蚀物收集量在空间上符合指数函数变化规律, 20%<物理性砂粒质量分数<40%风蚀物收集量在空间上用指数函数和幂函数拟合, 物理性砂粒质量分数≥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, 风蚀物收集量与高度拟合关系符合指数曲线变化规律, 风速大于 9 m/s 后, 风蚀物收集量与高度拟合关系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。

土壤含水率相同时, 物理性砂粒质量分数低于 40%的土壤, 只发生轻微的风蚀现象; 当物理性砂粒质量分数大于 40%后, 土壤临界起动风速降低, 容易发生风蚀, 而且风蚀的程度随物理性砂粒含量的增加而增大, 尤其当土壤含水率低于 3%时, 极易发生风蚀; 土壤含水率高于 7%时, 也只能发生轻微的风蚀。

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。

阴山北麓旱作区冬春季节土壤表层含水率一般维持在 3%~4%, 土壤的物理性砂粒质量分数基本在 50%~80%, 单纯考虑土壤含水率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可能成为沙尘暴的发生源。

[参 考 文 献]

- [1] 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.

- Dong Zhibao, Chen Guangting. A preliminary insight into the wind erosion problem in houshan area of inner mongolia[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(2): 84—90. (in Chinese with English abstract)
- [2] 哈斯. 坝上高原土壤不可蚀性颗粒与耕作方式对土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 92—97.
Ha Si. Effects of unerodible soil particles and tillage way on wind erosion on bashing high land[J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(4): 92—97. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
Yu Aizhong, Huang Gaobao. Effects of different tillage treatments on unerodible soil particles of wheat-field in spring in Inland irrigation region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 6—9. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘连友, 王建华, 李小雁. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1663—1666.
Liu Lianyou, Wang Jianhua, Li Xiaoyan. The wind tunnel simulated determination on erodible soil particles in cultivated soils[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(15): 1663—1666. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李晓丽, 申向东. 裸露耕地土壤风蚀跃移颗粒分布特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 74—77.
Li Xiaoli, Shen Xiangdong. Experimental study on the distribution characteristics of the saltation particle of aeolian sediment in bare tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(5): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李晓丽, 申向东, 张雅静. 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, 29(2): 292—296.
Li Xiaoli, Shen Xiangdong, Zhang Yajing. Experimental analysis on soil wind-erosion amount in Siziwang banner north yinshan mountain, Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(2): 292—296. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李占宏, 海春兴, 刘广通. 内蒙古沙漠化土地中不同土地类型土壤表面可蚀性颗粒对比研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 4—8.
Li Zhanhong, Hai Chunxing, Liu Guangtong. Contrast of the character of erosive particles in different soil types on desertification in Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 4—8. (in Chinese with English abstract)
- [8] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of American Proceedings, 1965, 29(5): 602—608.
- [9] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index[J]. Soil Sci Soc Am J, 1982, 46(6): 1274—1279.
- [10] 陈广庭, 贺大良, 宋锦熙, 等. 北京降尘成分及来源的探讨[J]. 中国沙漠, 1989, 9(3): 22—35.
Chen Guangting, He Daliang, Song Jinxi, et al. An approach to the dustfall constituents and their origin[J]. Journal of Desert Research, 1989, 9(3): 22—35. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- Zhang Xiaoyou. Preliminary study on the erosion amount of soil and wind-sand movement on surface of farmland in Shahe[J]. Arid Zone Research, 1996, 13(1): 76—80. (in Chinese with English abstract)
- [14] 何文清, 高旺盛, 妥德宝, 等. 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—4.
He Wenqing, Gao Wangsheng, Tuo Debao, et al. Study on some factors influencing soil erosion by wind tunnel experiment in north ecotone between agriculture and pasture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵宏亮, 侯立白, 王萍, 等. 彰武农田土壤风蚀物垂直分布规律的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 150—152.
Zhao Hongliang, Hou Libai, Wang Ping, et al. Research of farmland soil erosion on vertical distribution law in Zhangwu county[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 150—152. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈智, 麻硕士, 范贵生. 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, 29(4): 102—105.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Fan Guisheng, et al. The vertical distribution laws of wind erosion matter over land surfaces in the cross region between farmland and grassland[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(4): 102—105. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邹春霞, 申向东, 李彰俊. 阴山北麓农牧交错带裸露耕地土壤风蚀物垂直分布规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 123—128.
Zou Chunxia, Shen Xiangdong, Li Zhangjun. Topsoil sediment distribution along height above bare tillage land in agro-pastoral ecotone of northern foot of Yinshan Mountain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 123—128. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘振东, 王飞, 赵云, 等. 保护性措施对农田土壤风蚀影响的室内风洞模拟[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 29—35.
Liu Zhendong, Wang Fei, Zhao Yun, et al. Impact of protective measures on soil wind erosion on cropland: a indoor wind tunnel simulation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 29—35. (in Chinese with English abstract)
- [19] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [20] 王云超, 张立峰, 侯大山, 等. 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, 22(8): 575—578.
Wang Yunchao, Zhang Lifeng, Hou Dashan, et al. Study on soil wind erosion of different underlying in ecotone between agriculture and animal husbandry in Bashang of Hebei[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 575—578. (in Chinese with English abstract)
- [21] 内蒙古自治区土壤普查办公室. 内蒙古土壤[M]. 科学出版社, 1994.
- [22] 朱祖祥. 土壤学(上册)[M]. 农业出版社, 1983.
- [23] 妥德宝, 段玉, 赵沛义, 等. 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.
Tuo Debao, Duan Yu, Zhao Peiyi, et al. Ecological effect of intercropping strips keeping stubble on preventing field from wind erosion in dryland farming areas[J]. Acta

- Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, 17(4): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵举, 郑大玮, 妥德宝, 等. 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.
- Zhao Ju, Zheng Dawei, Tuo Debao, et al. Study on the technique of strip intercropping with stubble for controlling wind erosion at ecotone in the north area of the Yinshan Mountains[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(2): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵沛义, 妥德宝, 郑大玮, 等. 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.
- Zhao Peiyi, Tuo Debao, Zheng Dawei, et al. The ecological effect of strip inter cropping together with stubble-keeping on reducing wind erosion in dry farming land[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 171—174. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵沛义, 李焕春, 妥德宝. 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.
- Zhao Peiyi, Li Huanchun, Tuo Debao. Effects of crop stubble combined with biological fences on reducing soil wind erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 231—235. (in Chinese with English abstract)
- [27] Zhao Peiyi, Yan Wei, Tuo Debao, et al. Effects of strip intercropping under stubble retention with biological fence on quantity of soil lost to wind erosion[J]. Journal of Agriculture, Biotechnology and Ecology, 2010, 3(2): 75—84.
- [28] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 带田残茬带宽度及高度对土壤风蚀模数影响的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 206—210.
- Zhao Peiyi, Tuo Debao, Li Huanchun, et al. Wind tunnel test on effect of strip width and crop stubble height on wind erosion modulus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 206—210. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵沛义, 妥德宝, 康喧, 等. 阴山北麓残茬间作带田土壤风蚀规律[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 55—58.
- Zhao Peiyi, Tuo Debao, Kang Xuan, et al. Wind erosion law in strip intercropping field in north yin-shan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙悦超, 马硕士, 陈智, 等. 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.
- Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Test and analysis of wind erosion of land surface soil in arid and semi-arid regions in north areas of Yinshan Mountain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 1—5. (in Chinese with English abstract)

Effects of soil moisture and physical sand content on wind erosion modulus in wind tunnel testing

Zhao Peiyi¹, Tuo Debao¹, Li Huanchun¹, Duan Yu¹, Kang Xuan¹, Gong Qin², Zhang Jun¹

(1. Inner Mongolia Key laboratory of Dry Farming, Key Observation Station of Ecologic Environment of Ministry of Agriculture, Institute of Resources and Environment and Testing Technology, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Huhhot, 010031, China; 2. Wu Lanchabu City Soil and Fertilizer Workstation, Jining 012000, China)

Abstract: In order to explore the effects of soil moisture and physical sand contents on wind erosion modulus, seven artificial soil type treatments with physical sand contents of 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 % and 70 %, eleven treatments with soil moisture contents from 0 to 10 % at 1 % a step, and six wind speed treatments with 5, 6, 9, 12, 15 and 18 m/s, were tested in a instrument of wind erosion tunnel. The wind erosion amount was measured after 10 min wind blowing at 10 different heights of 20, 60, 120, 180, 240, 300, 400, 500, 600 and 700 mm with a cyclone sand collector, which set at placements of 1.2 m away from the wind tunnel. The results were integrated by using cubic spline interpolation method in MATLAB 7.4.0 (R2007) and were computed to wind erosion modulus E . The results showed that the wind erosion amount was very small when the sand content was less than 40%, showed no significant effects for water contents and collecting heights. The amount of wind erosion collected fitted a exponential function at spatial scale when physical sand quality fraction was smaller than 20%, it well fitted both exponential or power functions when physical sand quality fraction was ranged between 20% to 40%, and it fitted a power function when the sand content was higher than 40%. The wind erosion showed an exponential increase against the heights when the wind speed was slower than 9 m/s, and changed to a power function when it was faster than 9 m/s. The total amount of wind erosion in collectors at different heights was exponentially increased with the wind speeds. There were no significant difference in wind erosion accrued when the sand content less than 40%. When sand content increased to more than 40%, the wind erosion increased along with increasing sand contents, especially when the soil moisture content was lower than 3%. The E showed an exponential increase against wind speeds. We concluded that the north side region of Yinshan Mountain, Inner Mongolia, China would be an important source of sandstorm with considering the soil moisture contents and physical sand contents, because the soil moisture content, in this region, was often less than 3% to 4 % in spring and winter seasons, the sand contents were more than 50% to 80%.

Key words: soil moisture, sand, wind tunnels, wind erosion modulus, size fraction