

孙宝洋,周蕊,王喆,等.黄河内蒙古段土壤风蚀特征模拟[J].中国沙漠,2020,40(4):120-127.

黄河内蒙古段土壤风蚀特征模拟

孙宝洋^{1,2,3},周蕊⁴,王喆⁵,肖俊波⁶,马建业³,李朝栋³,马波³

(1.长江水利委员会长江科学院,湖北 武汉 430010; 2.水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心,湖北 武汉 430010; 3.西北农林科技大学,陕西 杨凌 712100; 4.三峡国际能源投资集团有限公司,北京 100038; 5.山东省淄博市桓台县水务局,山东 淄博 256400; 6.广西壮族自治区水利科学研究院,广西 南宁 530023)

摘要:采集黄河内蒙古段风沙土、灰漠土、棕钙土和灌淤土,在室内进行土壤理化性质测定和风洞模拟试验。对比分析了4种土壤的理化性质和不同风速及含水量条件下的风蚀特征,并量化了不同土壤的风蚀强度与土壤理化性质间关系。结果表明:(1)相对于棕钙土和灌淤土,风沙土和灰漠土易蚀性颗粒含量较大,团聚体、有机质和碳酸钙含量较低,但相同风速和含水量条件下平均风蚀强度风沙土>棕钙土>灰漠土>灌淤土。(2)不同土壤风蚀强度与风速均呈较好的幂函数关系($R^2 \geq 0.85$, $P < 0.05$),尤其是风沙土和棕钙土,幂函数关系明显优于指数函数。(3)除灰漠土,土壤风蚀强度与土壤含水量均呈较好指数函数关系($R^2 > 0.90$, $P < 0.05$),风沙土和灰漠土的风蚀强度突降的含水量临界点在4.5%左右,灌淤土和棕钙土无明显临界点。(4)不同土壤输沙率均随距地表高度的增加而急剧减少。在距地表10 cm范围内,不同土壤输沙率占总输沙率比例风沙土(82.67%)>灰漠土(80.77%)>灌淤土(74.07%)>棕钙土(73.77%),当距地表大于30 cm后,集沙仪中基本收集不到风沙土和灰漠土风蚀颗粒。当轴心风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同土壤风沙流结构均表现为单峰曲线。(5)不同土壤风蚀强度与风速、含水量、团聚体、易蚀性颗粒和黏粒含量均呈较强的非线性相关关系($R^2 = 0.76$, $P < 0.05$)。易蚀性颗粒含量是影响风蚀强度最主要的土壤属性,其次是干团聚体和黏粒含量。

关键词:风蚀强度;含水量;风速;风沙流结构

文章编号: 1000-694X(2020)04-120-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2019.00089

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

0 引言

风力侵蚀是中国北方干旱、半干旱及部分湿润区的主要土壤侵蚀类型。黄河内蒙古段的库布齐沙漠、乌兰布和沙漠和河套平原等地区,是各路冷空气入侵中国的必经之地,尤其春季大风频发、干旱少雨,为风蚀提供了动力条件,是中国沙尘暴发源区^[1-2]。近年来,由于气候变化和人类活动的影响,风沙活动剧烈,大量风成沙堆积在黄河河道内,并引发各种自然灾害^[3]。杜鹤强等^[4]基于1986—2013年黄河宁蒙河段风蚀模数数据,发现石嘴山—巴彦高勒段的年均风沙入黄量最大,其余河段风沙入黄量无减小趋势。在该河段,除河套平原北部戈壁地区外,其余风蚀风险较大的地区均临近黄河,

大量沙土被吹入黄河,威胁下游河道安全,气候和下垫面条件是影响该区风蚀强度的主要因素^[5]。和继军等^[6]对黄河内蒙古段一级支流的壤土和砂壤土进行室内风洞模拟发现,土壤类型不同,风蚀量随风速和含水量的变化显著不同。

土壤风蚀可蚀性与土壤类型和含水量密切相关^[7-8]。土壤干团聚体结构、碳酸钙含量、有机质含量、土壤机械组成和土壤含水量等指标相继被用来评价风蚀可蚀性^[9-10]。土壤颗粒及团聚体是影响土壤风蚀可蚀性最直接因素,董治宝等^[10]通过模拟试验发现0.075~0.4 mm土壤颗粒为易蚀颗粒。土壤水分以薄膜水形式附着颗粒表面,使土壤颗粒间的黏着力增大^[11],摩阻起动风速随含水量增加而线性

收稿日期:2019-08-04; 改回日期:2019-10-10

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510705-05);长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019179/TB, CKSF2019292/TB);国家自然科学基金(41271303,41771311,41701316,41877082)

作者简介:孙宝洋(1991—),男,山东枣庄人,博士,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: sdzsun@sina.com

通信作者:马波(E-mail: mabo@126.com)

增大,风蚀强度随含水量增加呈幂函数减小^[12]。赵沛义等^[13]人工配置不同含量的物理性砂粒土样,在室内对不同风速和含水量梯度的土样进行风蚀试验模拟,发现风蚀强度随物理性砂粒含量的增加而增大,当含水量低于3%时,极易发生风蚀。目前在风蚀研究方法^[14-15]、影响因子^[9-10,16]和风蚀模型等方面开展了大量的野外和室内模拟研究。在黄河内蒙古河段,风蚀研究以大尺度野外观测和沙漠为主^[2-5],室内模拟试验条件和方法不同,导致结果差异较大,临近黄河的风蚀风险较大地区不同土壤的风蚀机理研究较少,尤其是该区风蚀强度与土壤性质间定量关系的研究鲜有报道。

因此,本文在前人研究的基础上,对黄河内蒙古段4种典型土样进行室内风洞模拟试验,定量对比分析该区土壤在不同含水量和风速条件下的风蚀特征,揭示不同土壤风蚀强度影响机制,建立风蚀强度与土壤性质间量化关系,为研究区土壤风蚀机理的研究和风蚀防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验土样

黄河中上游内蒙古段自内蒙古乌海市至头道拐,沿途经乌兰布和沙漠、河套平原与库布齐沙漠等,地理坐标为37°24′—41°52′N、104°30′—111°30′E,

属于大陆性季风气候,年降雨量150~400 mm,集中在夏季,风沙活动频繁,年平均风速2.5~5 m·s⁻¹,最大风速20 m·s⁻¹^[5]。根据中国土壤侵蚀地图集^[17],该段临近黄河的土壤类型主要包括风沙土、灌淤土、棕钙土和灰漠土(图1)。由国际制土壤质地分级标准可知,灌淤土和棕钙土属于黏壤土,而灰漠土和风沙土属于砂质壤土。试验土样主要取自研究区撂荒地表层30 cm,采集每种土样200~300 kg,供室内风洞模拟试验,采样点位置及土样质地如表1所列。

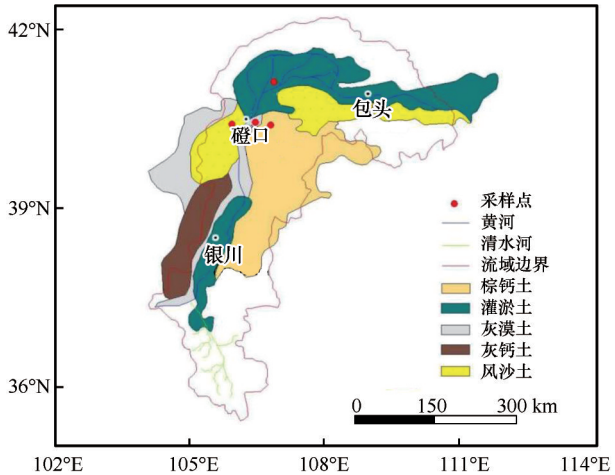


图1 黄河中上游内蒙古段土壤类型及采样点位置
Fig.1 Distribution of different soils and sampling location in Inner Mongolia reach of upstream of Yellow River

表1 试验土样地理位置及质地
Table 1 The location and texture of soil samples

试验土样	行政区位置	地理坐标	土壤颗粒含量/%		
			黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.02~0.002 mm)	砂粒(2~0.02 mm)
灌淤土	巴彦淖尔市	40°54′21″N,107°40′47″E	18.18±0.56	27.68±1.23	54.14±1.78
棕钙土	磴口县	40°13′43″N,107°16′42″E	19.17±1.02	36.04±1.56	44.79±0.49
灰漠土	磴口县	40°06′17″N,106°49′46″E	10.09±0.89	10.08±0.97	79.83±1.95
风沙土	达拉特旗	39°58′12″N,110°31′17″E	11.14±0.77	14.84±1.03	74.02±1.54

1.2 风洞试验设计

人工控制土壤含水量,室内模拟4种土壤在不同含水量(1.5%、3%、4.5%、6%、7.5%、9%)和风速(6、8、10、12、14、16 m·s⁻¹)条件下的风蚀过程。试验在中国科学院水利部水土保持研究所风洞实验室完成,风洞全长19 m,分为动力段、调节段、整流段、试验段和集沙段(图2)。风洞断面截面1 m×1.2 m(宽×高),通过变频器(0~50 Hz)调节风速,风速在

0~20 m·s⁻¹内连续可调。风洞试验段风速均匀性良好,-0.25%≤σ≤0.25%(σ为风速截面任一点气流速度与气流平均速度相对偏差的均方根)^[18]。L型皮托管总压孔和静压孔均通过软管连接手持多功能测量仪(图3),根据风洞内压强的变化可准确测量风洞内任意位置风速^[15]。在集沙段设置新型平口式集沙仪^[19],该仪器由北京市防沙治沙工程技术中心研制,总高度85 cm,沙尘采集高度60 cm,采集梯

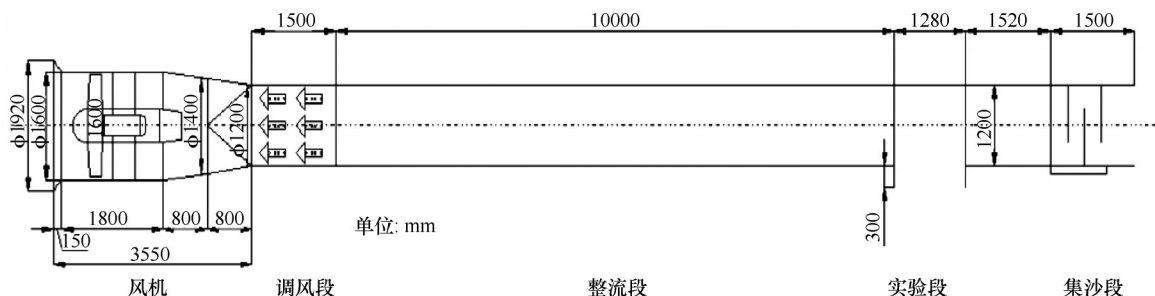


图2 风洞示意图

Fig.2 Schematic diagram of wind tunnel



图3 风洞试验装置

Fig.3 Schematic diagram of experimental setups

度为30个连续的2 cm×2 cm进沙口,采集效率>80%^[20]。在本试验中,将1个平口式集沙仪沿风洞中轴线布设在土槽的后方50 cm处,集沙仪底部与土槽上部平齐,集沙仪由下到上放置30个集沙盒(长×宽×高:10 cm×2 cm×2 cm)。集沙仪收集到的风蚀物用精确为0.01 g电子天平称量。风蚀量用量程为200 kg、分辨率为1 g的电子秤进行称量。

将野外取回土样过5 mm的筛,滤去草根、石块等杂质并风干作为试验土样。灌淤土和棕钙土自然风干后含水量大于2%,风沙土和灰漠土自然风干后含水量大于1%。用喷水壶均匀地向已风干过筛的土样中洒水,然后在塑料桶内密封放置48 h,以使土壤水分在土体中均匀分布渗透^[11],试验前4种土样实测含水量如表2所列。试验土槽为120 cm×50 cm×10 cm(长×宽×深)的长方体钢槽,为保证土样装填后,不同深度和位置的容重相同,装土前将试验土槽从下到上每2 cm高度处做一标志,将土槽平均分为5层,然后将配好水的土样按照实测容重分5次均匀地填入土槽中。电子秤(精度1 g)放置在试验段基座上,调平后将试验土槽放在电子秤上,试验开始前,称量钢槽和土样总质量 w_1 。风洞密封完全后,设置变频器频率,启动风机,在6、8、

10、12、14、16 m·s⁻¹的轴心风速下分别吹蚀10 min^[11]。每个风速吹蚀过后,称量钢槽和土样总质量 w_2 。分层称量和收集平口式集沙仪中风蚀物。每组试验重复2次。利用重铬酸钾外加热法测量不同土样有机质含量;气量法测土壤碳酸钙的含量;利用干筛法,将土样分别过孔径为0.7、0.4、0.075、0.05 mm的筛子,称取每种粒径范围的土壤颗粒或团聚体重量,可得易蚀性颗粒^[10](0.4~0.075 mm)含量和大于0.4 mm的土壤团聚体含量,每种指标测试重复3次,取平均值。

风蚀强度计算:

$$E = (w_1 - w_2) / (A \cdot t) \quad (1)$$

式中: E 为风蚀强度, g·m⁻²·h⁻¹; w_1 为风蚀前钢槽和土样质量, g; w_2 为风蚀后钢槽和土样质量, g; A 是土样受风蚀面积, m²; t 为风蚀时间, h。

输沙率通常被定义为气流在单位时间单位宽度内搬运的沙粒质量,在本研究中利用集沙仪收集到的距地表不同高度风蚀物质量表示风沙流结构,即不同高度的输沙率:

$$Q = M / (y \cdot t) \quad (2)$$

式中: Q 为输沙率, g·cm⁻¹·min⁻¹; M 为收集到沙和土粒质量, g; y 为集沙仪开口宽度, cm。

表 2 试验前实测土壤含水量平均值及标准差 (%)

Table 2 Moisture content and standard deviation of measured soil moisture before test (%)

试验土样	风速/(m·s ⁻¹)					
	6	8	10	12	14	16
灌淤土	—	3.24±0.06	4.73±0.24	5.78±0.15	7.76±0.04	9.05±0.11
棕钙土	—	3.23±0.18	4.38±0.11	6.32±0.20	7.65±0.21	9.26±0.29
灰漠土	1.37±0.22	3.09±0.11	4.27±0.13	6.16±0.16	7.09±0.18	9.17±0.35
风沙土	1.75±0.17	2.83±0.32	4.64±0.29	5.92±0.04	7.31±0.30	8.84±0.44
平均	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0

利用 SPSS 19.0 对组合试验进行单因素和多因素方差分析,用最小显著性差异(LSD)法对试验结果进行多重比较。利用皮尔逊相关性检验分析风蚀强度与土壤理化性质、风速和输沙率的相关关系,利用非线性回归分析拟合风蚀强度与各因素之间关系。

2 结果与分析

2.1 不同土壤理化性质及风蚀强度

风沙土的易蚀性颗粒^[10](0.4~0.075 mm)含量最大(61.21%±2.17%),灌淤土和棕钙土的易蚀性颗粒含量无显著差异($P>0.05$,表 3)。灰漠土和风沙土的有机质和碳酸钙含量无显著差异($P>0.05$),但均显著小于另外两种土样($P<0.05$)。不同试验土样大于 0.4 mm 的土壤干团聚体含量具有显著差异($P<0.05$),灌淤土(30.10%±1.02%)>棕钙土(23.91%±2.57%)>灰

漠土(19.57%±4.10%)>风沙土(14.05%±2.41%)。

不同风速(6~16 m·s⁻¹)和含水量(3%~9%)条件下 4 种土壤平均风蚀强度均具有显著差异($P<0.05$,表 3),风沙土平均风蚀强度最大,分别是灌淤土、棕钙土、灰漠土的 2.93、1.56、1.91 倍。

2.2 风蚀强度影响因素

将 4 种土壤风蚀强度与风速和含水量分别进行函数拟合(表 4)。不同土壤风蚀强度与风速呈较好的幂函数关系($R^2\geq 0.85$, $P<0.05$),尤其是风沙土和棕钙土,幂函数关系明显优于指数函数。随着风速增加,增幅逐渐增大,不同土壤风蚀强度差距也逐渐增加(图 4)。当风速小于 9 m·s⁻¹时,除风沙土,其他 3 种土壤风蚀强度无显著差异,随着风速继续增大,风蚀强度风沙土>棕钙土>灰漠土>灌淤土显著。当风速达到最大时(16 m·s⁻¹),灰漠土和灌淤土风蚀强度无显著差异。

表 3 试验土壤风蚀强度及物理性质

Table 3 Average wind erosion intensity and physical properties of soil samples

试验土样	易蚀性颗粒 (0.4~0.075 mm)/%	有机质 (g·kg ⁻¹)	干团聚体 (>0.4 mm)/%	碳酸钙 /%	风蚀强度 (g·m ⁻² ·h ⁻¹)
灌淤土	25.39±2.39 ^a	8.11±0.75 ^a	30.10±1.02 ^a	9.45±0.38 ^a	240.91±29.8 ^a
棕钙土	25.52±3.01 ^a	5.15±0.22 ^b	23.91±2.57 ^b	11.23±1.05 ^b	453.74±42.5 ^b
灰漠土	52.60±4.38 ^b	2.83±0.31 ^c	19.57±4.10 ^c	7.15±0.89 ^c	369.24±84.2 ^c
风沙土	61.21±2.17 ^c	3.26±0.18 ^c	14.05±2.41 ^d	6.30±0.51 ^c	706.96±156.7 ^d

同列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

除灰漠土,土壤风蚀强度与土壤含水量均呈较好指数函数关系($R^2>0.90$, $P<0.05$,表 4)。当含水量由 1.5% 增加到 3% 时,风沙土和灰漠土风蚀强度下降 51.30% 和 53.70%;当含水量为 3% 时,风沙土平均风蚀强度分别是灌淤土、棕钙土、灰漠土的 5.26、3.27、2.36 倍(图 5)。当含水量为 4.5% 和 6%

时,灰漠土风蚀强度最小;含水量大于 6% 时,风沙土风蚀强度最小,而棕钙土风蚀强度最大。因此,随含水量的增大,风沙土风蚀强度的下降幅度大于灰漠土、棕钙土和灌淤土。含水量由 3% 增加到 9%,风沙土、灰漠土、棕钙土和灌淤土风蚀强度分别下降了 99.35%、82.73%、66.08% 和 74.77%,风沙土

表4 土壤风蚀强度与风速和含水量的函数拟合

Table 4 Fitting functions between wind erosion intensity and wind velocity and water content

自变量	土壤类型	幂函数拟合		指数函数拟合	
		函数式	拟合优度(R^2)	函数式	拟合优度(R^2)
风速	风沙土	$y = 0.0005x^{5.66}$	0.85	$y = 0.92e^{0.52x}$	0.76
	棕钙土	$y = 0.000005x^{8.12}$	0.93	$y = 0.02e^{0.75x}$	0.85
	灰漠土	$y = 0.0034x^{4.52}$	0.97	$y = 2.25e^{0.38x}$	0.95
	灌淤土	$y = 0.0002x^{5.47}$	0.96	$y = 0.46e^{0.47x}$	0.96
含水量	风沙土	$y = 13247x^{-3.18}$	0.85	$y = 27569e^{-1.20x}$	0.92
	棕钙土	$y = 2475.1x^{-1.75}$	0.86	$y = 1481.5e^{-0.26x}$	0.92
	灰漠土	$y = 1746.4x^{-0.93}$	0.90	$y = 2746e^{-0.57x}$	0.75
	灌淤土	$y = 1292.2x^{-1.22}$	0.94	$y = 1014.7e^{-0.34x}$	0.94

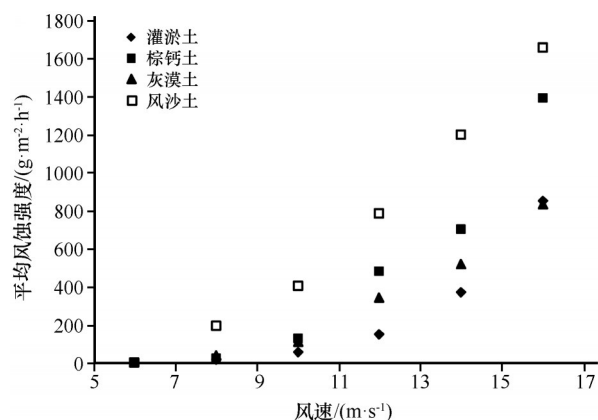


图4 平均风蚀强度与风速关系

Fig.4 Relationship between wind erosion intensity and velocity

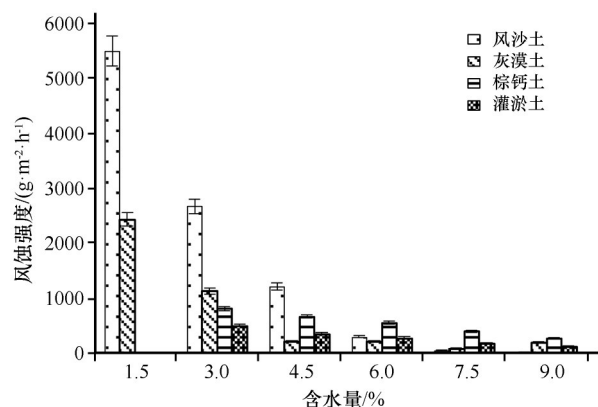


图5 不同含水量土壤风蚀强度

Fig.5 Wind erosion intensity of different moisture soil

风蚀强度受含水量影响最大,而棕钙土最小。

2.3 风沙流结构特征

4种土壤输沙率均随高度的增加呈递减趋势(图6)。当高度小于5 cm时,风沙土(1.91

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)和灰漠土($1.86 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)的输沙率显著大于灌淤土($1.33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)和棕钙土($1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), $P<0.05$;而当高度大于5 cm时,4种土壤输沙率无显著差异($P>0.05$)。集沙仪中收集到4种土壤的风蚀物基本在10 cm以下,0~10 cm输沙率占总输沙率比例风沙土(82.67%)>灰漠土(80.77%)>灌淤土(74.07%)>棕钙土(73.77%),当高度大于30 cm后,灌淤土和棕钙土的集沙仪中还有少量风蚀物,而风沙土和灰漠土集沙仪中基本收集不到风蚀颗粒。当轴心风速为 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,不同土壤输沙率在空间变化上均表现为单峰曲线,即高度小于5 cm时,随着高度的增加输沙率增加,当高度大于5 cm以后,随高度的增加,输沙率降低(图7)。

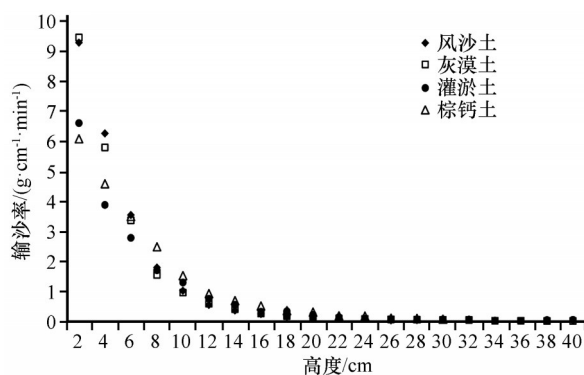


图6 输沙率随高度变化特征

Fig.6 Variation of mean transport rate with height

2.4 风蚀强度拟合

试验土样的风蚀强度与易蚀性颗粒含量、风速和输沙率极显著正相关($P<0.01$),与干团聚体含量、含水量和黏粒含量显著负相关($P<0.05$),而与粉粒、砂粒、碳酸钙和有机质含量无显著相关性($P>$

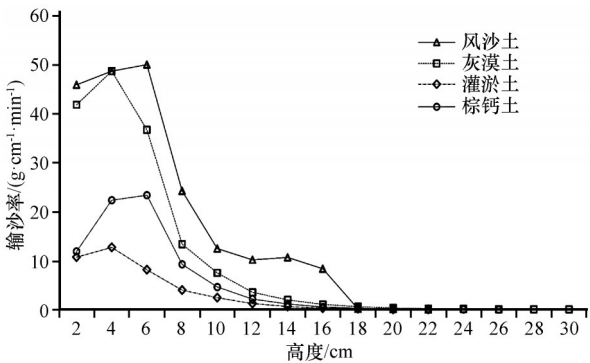


图 7 风速为 16 m·s⁻¹时的风沙流结构
Fig.7 Characteristics of drifting sand flux

0.05,表 5)。

利用非线性回归分析,拟合风蚀强度与风速、含水量、输沙率、干团聚体、易蚀性颗粒和黏粒含量之间关系,如式(3):

$$E=40.48\ V^{3.29}W^{-2.14}T^{-0.05}A^{-4.44}R^{5.74}CLA^{-3.94}$$

$(R^2=0.76,P<0.05)$

(3)

式中: E 为风蚀强度, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; V 为风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; W 为土壤含水量,%; T 为输沙率, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$; A 为干团聚体含量,%; R 为易蚀性颗粒含量,%; CLA 为黏粒含量,%。

风是导致风蚀的动力来源,输沙率是反映土壤风蚀强度的直接指标,含水量、干团聚体、易蚀性颗粒和黏粒含量是影响土壤抵抗风蚀能力的重要因素。在不考虑植被和其他防护措施的条件下,利用式(3)可以较准确预测不同裸露土壤风蚀强度($R^2=0.76,P<0.05$)。由各变量的系数大小可知,在土壤属性中,易蚀性颗粒含量是影响可蚀性最主要因素,其次是干团聚体和黏粒含量,最后是含水量。

表 5 风蚀强度与土壤理化性质、风速和输沙率相关关系

项目	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%	有机质 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳酸钙 /%	干团聚体 /%	易蚀性 颗粒/%	风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	含水量 /%	输沙率 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
风蚀强度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	-0.19*	-0.15	0.17	-0.18	-0.06	-0.27**	0.25**	0.38**	-0.49**	0.45**

*表示在 $P<0.05$ 水平上显著;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著 ($n=220$)。

3 讨论

风蚀是气流克服阻力、与土壤颗粒相互作用的结果,因此不同土壤风蚀强度均与风速呈正相关,但受下垫面影响。当风速相同时,对于裸露下垫面,土壤含水量、团聚体含量、机械组成、有机质和碳酸钙含量等共同决定着土壤抗风蚀能力^[8,21],是评价土壤风蚀可蚀性的间接指标。一般来说,土壤团聚体粒径越大,难蚀性颗粒数量越多,风蚀过程中,起动风速越大,土壤抗风蚀能力越强。土壤有机质和碳酸钙主要通过影响土壤团聚体的形成和稳定,增加抵抗风蚀能力,是影响风蚀的间接因素。因此,从土壤固有属性角度,土壤团聚体和易蚀性颗粒含量是决定土壤风蚀强度的最主要因素,其次是有有机质和碳酸钙含量。因此,土壤风蚀强度与干团聚体和易蚀性颗粒含量分别呈负相关和正相关关系,而与有机质和碳酸钙含量无明显关系。

土壤水分是影响土壤抗风蚀能力的关键因素,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,起动风速增加,抵抗风蚀的能力增强。但是,土壤水分形态与土壤机械组成和

团聚体密切相关,团聚体和黏粒含量较大时,土壤水分先形成吸湿水和膜状水,土壤颗粒形成不同大小的团聚体也需要一定的水分。因此相同含水量条件下,质地较粗糙土壤的膜状水和毛管水含量较大,水的表面张力主要通过膜状水和毛管水形成的薄膜水产生很强的黏结力,增加抗风蚀能力^[11,13]。当含水量增加到 3% 时,风沙土和灰漠土颗粒间薄膜水增多且大于灌淤土和棕钙土,但由于砂质壤土易蚀性颗粒含量较大(表 3),导致两种黏质壤土的风蚀强度小于砂质壤土。当含水量继续增加到 4.5% 时,棕钙土的风蚀强度开始大于灰漠土,当含水量为 6% 时,黏质壤土的风蚀强度大于砂质壤土(图 5)。可见,随含水量增加,质地较粗的风沙土和灰漠土受水分影响较大,风蚀强度的降低幅度显著大于壤土。风沙土和灰漠土的风蚀强度突变的含水量临界点在 4.5% 左右,而相对砂质壤土,灌淤土和棕钙土无明显临界点,这与已有研究得出的 6% 的临界含水量略有不同^[22]。

风沙流结构是风蚀输沙率随高度的分布,风蚀颗粒以蠕移、跃移、悬移形式运动^[23],本研究中 4 种土壤表面风沙流结构基本一致,输沙率随距地表高

度增加急剧减少,风蚀颗粒主要以跃移的形式在距地表 10 cm 范围运动^[24-25]。由于灌淤土和棕钙土的细颗粒含量较多,再加上水分对砂质壤土颗粒的黏结作用,当距地表高度 30 cm 以上时,这两种土壤平均风蚀颗粒量远大于风沙土和灰漠土。因此根据不同土壤风蚀强度突变的临界含水量,以及不同土壤风沙流结构特征,加强黄河中上游内蒙古河段风蚀风险区的防治工作,对防治风沙入黄具有更重要的意义。

4 结论

在黄河内蒙古段风蚀风险区,土壤类型不同,抗风蚀能力和风蚀特征显著不同。风沙土和灰漠土易蚀性颗粒含量大于棕钙土和灌淤土,而团聚体、有机质和碳酸钙含量显著小于棕钙土和灌淤土。在本研究中,相同风速和含水量条件下,风沙土平均风蚀强度最大,分别是灌淤土、棕钙土、灰漠土的 2.93、1.56、1.91 倍。

灌淤土和灰漠土风蚀强度与风速呈较好的幂函数关系,但是对于风沙土和棕钙土,幂函数关系明显优于指数函数。除灰漠土,土壤风蚀强度与含水量均呈较好指数函数关系,风沙土和灰漠土的风蚀强度存在突变的临界含水量,在 4.5% 左右,而灌淤土和棕钙土无明显含水量临界值。

不同土壤输沙率均随距地表高度的增加而急剧减少。不同土壤风蚀颗粒基本在距地表 30 cm 以内运动,超过 30 cm 后,灌淤土和棕钙土会有少量风蚀颗粒。当轴心风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同土壤风沙流结构均表现为单峰曲线。

不同土壤风蚀强度与风速、含水量、团聚体、易蚀性颗粒和黏粒含量均呈较好的非线性相关关系。易蚀性颗粒含量是影响风蚀强度最主要的土壤属性,其次是干团聚体和黏粒含量。根据不同土壤风蚀强度突变的临界含水量及风沙流结构等,制定不同防治措施,加强研究区风蚀期土壤的风蚀防护,对于防治风蚀风险区黄河泥沙淤积具有重要意义。

参考文献:

- [1] Tan M, Li X, Xin L. Intensity of dust storms in China from 1980 to 2007: A new definition[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 85(85): 215-222.
- [2] 孙宝洋,李占斌,张洋,等.黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 112-119.
- [3] Du H Q, Xue X, Wang T, et al. Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, northern China[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 193-204.
- [4] 杜鹤强,薛娴,王涛,等.1986—2013年黄河宁夏河段风蚀模数与风沙入河量估算[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 142-151.
- [5] 杜鹤强,薛娴,王涛.黄河上游宁夏-内蒙古段跃移沙粒起动风速的空间分布[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(14): 210-219.
- [6] 和继军,唐泽军,蔡强国,等.内蒙古农牧交错区农耕地土壤风蚀规律的风洞试验研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 35-39.
- [7] 董治宝,陈渭南,李振山,等.风沙土水分抗风蚀性研究[J]. *水土保持通报*, 1996, 2: 17-23.
- [8] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 204-211.
- [9] Chepil W S. Field structure of cultivated soils with special reference to erodibility by wind[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1953, 17(3): 185-190.
- [10] 董治宝,李振山.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4: 2-6.
- [11] 董治宝,钱广强.关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 934-942.
- [12] Ravi S, Zobeck T M, Over T M, et al. On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(3): 597-609.
- [13] 赵沛义,妥德宝,李焕春,等.土壤含水量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.
- [14] 王仁德,李庆,常春平,等.新型平口式集沙仪对不同粒级颗粒的收集效率[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 734-738.
- [15] 唐青,陈立平,张瑞瑞,等. IEA-I型航空植保高速风洞的设计与校测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 73-81.
- [16] Li X Y, Liu L Y, Wang J H. Wind tunnel simulation of aeolian sandy soil erodibility under human disturbance [J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1): 3-11.
- [17] 李锐,赵牡丹,杨勤科.中国土壤侵蚀地图集[Z].北京:中国地图出版社,2014.
- [18] 张庆印,樊军,张晓萍.水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 75-79.
- [19] 吴晓旭,邹学勇,王仁德,等.毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 828-835.
- [20] 王升堂,赵延治,邹学勇,等.北京郊区不同土地利用类型起沙起尘的特征研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(5): 91-95.
- [21] Smalley I J. Cohesion of soil particles and the intrinsic resistance of simple soil systems to wind erosion[J]. *Journal of Soil Science*, 1970, 21(1): 154-161.
- [22] 何文清,赵彩霞,高旺盛,等.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): 88-92.
- [23] Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Desert Dune* [M]. London, UK: Unwin Hyman, 1990.

- [24] 陈智, 麻硕士, 赵永来, 等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 118-122.
- [25] 杨欢, 李玉强, 王旭洋, 等. 半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1144-1152.

The simulation study of wind erosion characteristics of different soils in Inner Mongolia reach of Yellow River

Sun Baoyang^{1,2,3}, Zhou Rui⁴, Wang Zhe⁵, Xiao Junbo⁶, Ma Jianye³, Li Chaodong³, Ma Bo³

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010 China; 2. Engineering Technology Research Center of Mountain Flood Geological Disaster Prevention and Control, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 3. Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. China Three Gorges International Corporation, Beijing 100038, China; 5. Huantai county water bureau, Zibo, 256400, Shandong, China; 6. Institute of Water Resources Research, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guangxi 530023, China)

Abstract: In order to study the wind erosion characteristics of different textures soil, the aeolian sandy soil and gray desert soil, brown calcium soil and irrigation soil were investigated and collect in the fields. Soil physical properties and wind tunnel simulation were tested in the laboratory. The wind erosion intensity and drifting sand flux of four kinds of soil under the condition of different wind speed and soil moisture content were analyzed. The relationship between wind erosion intensity and soil physical and chemical properties was also quantified. The results showed that: (1) Compared with the brown calcium soil and the irrigated soil, the content of erodibility particles in the aeolian sandy soil and the grey desert soil was larger, and the content of aggregates, organic matter and calcium carbonate was smaller. However, the relationship of average wind erosion intensity under the same wind speed and water content was: the aeolian sandy soil > brown calcium soil > grey desert soil > irrigated soil. (2) Different soil wind erosion intensity and wind speed showed a good power function relationship ($R^2 \geq 0.85$, $P < 0.05$), especially for aeolian sandy soil and brown calcium soil, the power function relationship was significantly better than the exponential function. (3) In addition to grey desert soil, the average wind erosion intensity of soil showed a good exponential function relationship with the increase of soil water content ($R^2 > 0.90$, $P < 0.05$). The critical point of water content of wind erosion intensity of aeolian sandy soil and grey desert soil was about 4.5%, while compared with sandy loam, irrigated soil and brown calcium soil had no obvious critical point. (4) Sediment transport rates of different soils all decrease sharply with the increase of height from the surface. Within a distance of 10 cm from the surface, the size of different soil sediment transport rates in the total sediment transport rate was: aeolian sandy soil (82.67%) > grey desert soil (80.77%) > irrigated soil (74.07%) > brown calcium soil (73.77%). When the distance from the surface was greater than 30 cm, wind-eroded particles are basically not collected in the wind-blown sand soil and grey desert soil sand collector. When the axial wind speed is 16 m/s, the structures of different soil sand-wind flows all show a single peak curve. (5) Different soil wind erosion intensity has a strong non-linear correlation with wind speed, water content, aggregates, erodibility particles and clay content ($R^2 = 0.76$, $P < 0.05$). The content of erodible particles is the most important soil property, followed by dry aggregates and clay particles.

Key words: wind erosion intensity; soil moisture content; wind velocity; drifting sand flux