

宁夏中部干旱带砂田抗风蚀性能研究*

周海燕^{1,2} 王瑛珏³ 樊恒文^{1,2} 刘扬^{1,2} 刘立超^{1,2} 赵金龙^{1,2}

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站,兰州 730000)

(2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所极端环境生物抗逆特性与生物技术实验室,兰州 730000)

(3 浙江大学生命科学学院,杭州 310058)

摘要 利用风洞模拟实验,研究了净风和挟沙风对砂田土壤风蚀的影响。结果表明:在净风吹蚀下,原状砂田的风蚀速率($0.37 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)分别是农田和荒地的 1/4 和 1/5,风蚀速率随风速的增加呈指数函数递增,其中砂田的递增速度低于农田或荒地;翻耕后的砂田在常见风速下的风蚀速率与农田和荒地相近(分别为 $1.67 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $1.75 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $1.83 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$),但在大风日则低于农田和荒地(分别为 $3.61 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $58.83 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $13.92 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)。挟砂田沙的风沙流吹蚀导致农田和翻耕砂田的风蚀速率增加,原状砂田则出现轻微的风积现象;挟农田土的风沙流吹蚀使原状砂田、翻耕砂田和荒地产生显著的风积,农田则出现更强烈的风蚀;挟沙风吹蚀下的风蚀(积)速率与风速的关系呈二次曲线函数。砂田的粗糙度明显高于农田(分别为 0.023 cm 和 0.002 cm),且随着风速的增加,其间的差值越大;砂田和农田在不同风速条件下的风速廓线均可用指数函数表述。农田和荒地在压砂利用后,其抗风蚀和减尘性能显著增强。

关键词 砂田;净风;挟沙风;风蚀速率;粗糙度;摩阻速度

中图分类号 S157.9

文献标识码 A

宁夏中部干旱带东临毛乌素沙地,西接腾格里沙漠,降雨稀少、土壤风蚀强烈、生态环境脆弱、农业生产极不稳定。砂田(亦称农田砾石覆盖、铺砂地或石子田)是我国西北干旱区恶劣的自然环境下因地制宜创造的一种独特的旱作土地利用方式^[1],具有蓄水保墒、增温保温、防止土壤次生盐渍化、阻止水土流失、抑制病虫害的作用,在雨养条件下能保证作物的高产、稳产和早熟^[2-6]。在砂田耕作^[7]、砂田土壤水分与养分动态^[8]、砂田西甜瓜集雨补灌^[9]等方面已有较多深入的研究。

有关砾石覆盖抑制土壤风蚀的野外观测研究显示,在砂田和表面有直径大于 0.84 mm 颗粒的农田中,风蚀现象相对较弱^[10];砂田的集沙量远远低于裸田,砂田可极显著地减少大风天气的扬尘量^[11]。风洞实验结果显示^[12-14],随机铺压的砾石($1 \sim 4 \text{ cm}$ 的黄河冲积卵石)较条带状铺压的砾石吹蚀抑制效应为大^[12],直立植物和砾石覆盖的组合应用可以提高风蚀的防治效果^[13],粗戈壁和细戈壁的风蚀速率远低于流沙^[14]。由此可见,砾石覆盖对抑制干旱区地表风蚀、风沙活动和粉尘输送过程具有

积极的生态作用。

风洞实验是风蚀研究中常用手段之一,大量风洞实验研究已在土壤风蚀原理、植被对土壤风蚀的影响、土壤水分与粒度特征的差异对临界风蚀风速和风蚀强度的影响、风蚀率与地表破坏率之间的关系等方面取得了丰富研究结论^[15-17],但针对宁夏中部干旱带片石砂田所进行的抗风蚀性能的风洞实验研究少见报道。

宁夏中部干旱带是目前我国砂田分布最集中的地区,是我国规模最大的砂田西瓜、甜瓜的生产基地^[18],然而该区又是宁夏沙尘天气的主要沙源地之一,在国际上被认为是不适宜农耕的地区^[11]。因此,有关砂田抗风蚀性能的定量研究显得重要。本研究利用野外风蚀风洞实验模拟测定了该地区农田、荒地和砂田 3 种土地利用类型及其翻耕前后的风蚀特征,试图通过对农田和荒地压砂前后土壤风蚀速率、粗糙度、摩阻速度和风速廓线等特性的对比研究,阐明片石砂田的抗风蚀作用机理及其生态环境效应,为西北砂田产业的健康发展和可持续利用提供基础理论依据。

* 国家自然科学基金项目(30870383,31070360)和国家科技支撑项目(2011BAC07B03,2007BAD54B05)资助

作者简介:周海燕(1963—),女,内蒙古赤峰市人,博士,研究员,主要从事荒漠生态学研究。E-mail:zhouhy@lzb.ac.cn

收稿日期:2012-03-25;收到修改稿日期:2012-07-21

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市常乐乡赵麻井村, 距离中国科学院沙坡头沙漠研究试验站约 90 km ($105^{\circ}16'5''E, 37^{\circ}09'55''N$), 海拔 1 905 m。该区属黄土丘陵沟壑区, 地貌类型多样, 水土流失严重, 山地、丘陵、洼地、河谷川地等镶嵌分布。土壤类型主要为灰钙土, 土壤有机质来源少、含量低, 土壤中易形成钙积层。该区干旱少雨、风大沙多, 年降水量 247.4 mm, 年蒸发量 2 100 ~ 2 400 mm。年均温度 $6.8^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $2 332^{\circ}C$, 年日照时数在 2 800 h 以上, 昼夜温差大, 无霜期约 150 d 左右^[11]。地带性植被为干草原和荒漠草原, 荒地植被覆盖度为 15% 左右, 主要植物种有猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、荒漠锦鸡儿 (*Caragana roborovskiyi*)、骆驼蓬 (*Peganum harmala*) 等。

研究区地下水埋藏深, 属无灌溉农业区, 由于生长季雨水严重缺乏, 加之土地瘠薄, 农民遇干旱常颗粒无收, 而压砂地蓄水保墒作用可适当缓解这一问题。研究区农田和荒地压砂种植历史已有 36 年, 主要种植小麦, 其次种植马铃薯、谷子、糜子、胡

麻, 种植西瓜 13 年。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在研究区选择砂田、农田和荒地 3 个样地类型, 固定标准地, 每个类型设固定样地 2 ~ 3 个, 样地规格为 10 m × 10 m。

1.2.2 样品采集与处理 风洞实验样品均采集自固定样地, 共 3 个类型, 分别为砂田、农田和荒地。其中砂田和农田又分为原状和耕作两种类型 (原状是指地面为经过冬、春季的风力和雨雪作用后的表面, 用于研究冬季至春季翻耕前的风蚀特征; 翻耕则是将砂田和农田样品进行风洞吹蚀实验后, 用松土铲对表层进行翻耕处理, 用于分析翻耕对土壤风蚀特性的影响)。由于实验区砾石覆盖厚度为 10 ~ 15 cm, 而积沙仪的宽度为 30 cm, 因此设置了 30 cm × 20 cm × 15 cm 规格的土样箱。用土样箱装取 0 ~ 15 cm 的表层原状土 (砂)。每个类型设置 3 个重复, 共采集原状土壤样品 15 箱。实验土壤的粒径分布见表 1, 其中砂田采样区砾石粒径在 0.5 ~ 10 cm 之间, 砾石覆盖厚度为 10 ~ 15 cm。砂田土壤含水量为 13.30%, 荒地土壤含水量为 5.78%, 农田土壤含水量为 6.78%, 土壤含水量的取样深度为 0 ~ 130 cm。

表 1 实验土壤的粒径分布

Table 1 Particle size distribution of test soil (%)

土壤类型 Soil type	黏粒 Clay		粉粒 Silt	砂粒 Sand	砾石 Gravel		
	<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 2 mm	0.5 ~ 2 cm	2 ~ 6 cm	6 ~ 10 cm	
原状砂田 Original gravelly land	1.30	3.72	4.98	27	47	16	
翻耕砂田 Ploughed gravelly land	3.02	5.85	6.13	25	45	15	
荒地 Wasteland	8.12	34.60	57.28	0	0	0	
原状农田 Original farmland	21.52	38.79	38.59	0	0	0	
翻耕农田 Ploughed farmland	22.35	9.46	38.99	0	0	0	

1.2.3 风洞实验 风洞实验在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室土壤风蚀环境风洞中进行, 该风洞被国内外广泛认可。风洞洞体全长 38 m, 实验段长度为 21 m, 横截面积为 1.2 m × 1.2 m, 边界层厚度为 500 mm, 皮托管高度为 600 mm, 可以测量 0 ~ 40 m s⁻¹ 的风速范围。风速用防沙毕托管连接数字压力仪测定。

风蚀速率的测定: 将模型置于实验段, 样品置于风洞实验段中部, 样品表面与风洞底板保持水平, 样品吹蚀面积为 30 cm × 20 cm。由于在 5.0 m s⁻¹ 的实验风速下未观测到风蚀现象, 因此实验风速选择了 8.0、10.0、15.0、20.0 和 25.0 m s⁻¹ 的风

速梯度, 并在净风、挟砂田沙和挟农田土的气流状态下进行吹蚀实验。除在 25.0 m s⁻¹ 的风速下吹蚀 5 min 外, 其余风速条件下的吹蚀时间均为 10 min。在洞外窗口观察记录样品风蚀状况, 称量吹蚀前和吹蚀后样品的重量, 其差值即为风蚀量 (精度 0.01 g)。土壤抗风蚀性能以风蚀速率进行表征, 即单位时间、单位面积上的吹蚀量 ($g m^{-2} min^{-1}$)。

挟沙风风蚀实验是根据贺大良等风洞实验的模拟方法^[19], 将砂田和农田 2 种类型试样 (120 cm × 120 cm × 20 cm) 平铺于模型前 (距离 32.5 cm), 以保证气流中有充足的沙粒 (图 1)。

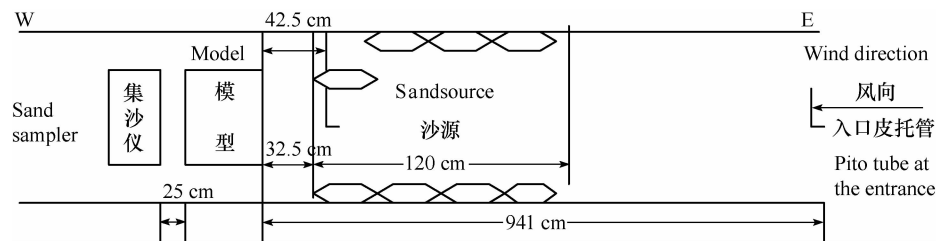


图1 挟沙风对土壤风蚀的影响实验布置示意图

Fig. 1 Sketch map of the test on effect of sand-bearing wind on soil wind erosion

风速廓线的测定与挟沙风风蚀实验同时进行:将砂田和农田 2 种类型试样(120 cm × 120 cm × 20 cm)平铺于风洞实验段,在净风条件下,以 8.0、10.0、15.0、20.0、25.0 m s⁻¹ 的实验风速进行吹蚀实验,用风速皮托管测定 0.5、5、10、20、30、60 cm 高度的风速,实验数据用于计算实验所针对的不同类型下垫面的粗糙度和摩擦速度。

中性大气层结条件下地表风速廓线一般满足下式: $U_z = (U^*/K) \ln(z/z_0)$,式中, U_z 为高度 z 处的风速(m s⁻¹), U^* 为摩擦速度, z_0 为空气动力学粗糙度, K 为冯卡曼常数(0.4)^[20]。将风速廓线测定结果应用最小二乘法做相关分析,拟合方程为: $U_z = a + b \ln z$,式中, a 和 b 为回归系数。根据实测的风速廓线方程,可以求得不同样地类型在不同风速条件下的摩擦速度(U^*),摩擦速度的计算方程为: $U^* = Kb$,式中, K 为冯卡曼常数, b 为回归系数^[21]。

地表粗糙度 z_0 是水平风速为零的高度,其计算公式为: $\lg z_0 = (U_1 \lg z_2 - U_2 \lg z_1) / (U_1 - U_2)$,式中: z_0 为粗糙度(cm), U_1 和 U_2 分别为同一时刻任意两个已知高度(z_1 和 z_2)处的风速(m s⁻¹)。本文空

气动力学粗糙度 z_0 利用风速廓线求得,即根据上述 $U_z = a + b \ln z$,令 $U_z = 0$,即可方便地求出 z_0 ^[22]。

2 结果与分析

2.1 净风风蚀

2.1.1 压砂前后风蚀速率的变化 由表 2 可见,砂田、荒地和农田的风蚀速率均随风速的增加而增大。在 8 ~ 10 m s⁻¹ 风速段,原状砂田的风蚀速率最低(0.38 g m⁻² min⁻¹),荒地(1.83 g m⁻² min⁻¹)、原状农田(1.59 g m⁻² min⁻¹)、翻耕砂田(1.72 g m⁻² min⁻¹)和翻耕农田(1.75 g m⁻² min⁻¹)的风蚀速率较高且差异不明显。在 15 m s⁻¹ 的风速下,荒地和翻耕农田的风蚀速率增加较快。

对于原状地表而言(表 2),砂田在 8 ~ 10 m s⁻¹ 风速下的风蚀速率分别为农田和荒地的 1/4 和 1/5;在 15 ~ 20 m s⁻¹ 的风速下,砂田和农田的风蚀速率相近,约为荒地风蚀速率的 1/3;当风速达 25 m s⁻¹ 时,荒地的风蚀速率大幅度增加,此时砂田的风蚀速率约为农田的 2/3 和荒地的 1/4。

表 2 净风吹蚀下砂田、荒地和农田的风蚀速率

Table 2 Wind erosion rates of gravelly land, wasteland and farmland under clean wind(g m⁻² min⁻¹)

风速 Wind speed (m s ⁻¹)	时间 Time (min)	原状砂田 Original gravelly land	翻耕砂田 Ploughed gravelly land	荒地 Waste land	原状农田 Original farmland	翻耕农田 Ploughed farmland
8	10	0.17	1.50	1.33	1.00	1.50
10	10	0.58	1.83	2.33	2.17	2.00
15	10	1.50	3.00	5.00	2.17	19.83
20	10	2.33	3.17	6.17	2.17	35.67
25	5	4.33	4.67	16.67	6.33	121.0

翻耕增加了砂田和农田的风蚀速率(表 2),翻耕后的砂田在 8 ~ 10 m s⁻¹ 风速下的风蚀速率增加了约 4.8 倍,翻耕后的农田在 15 m s⁻¹ 风速下的风蚀速率约增加了 9 倍,在 25 m s⁻¹ 风速时风蚀速率则增

加了近 20 倍。

2.1.2 风蚀速率与风速的关系 由表 2 可建立各种样品类型的风蚀速率与风速之间的定量关系(表 3)。不同样品类型的风蚀速率与风速之间服从

表 3 净风吹蚀下砂田、荒地和农田风蚀速率 (Q) 与风速 (U) 的关系

Table 3 Relationship between wind erosion rates and wind speed in gravelly land, wasteland and farmland under clean wind

土壤类型 Soil type	Q-U 关系式 Q-U relationships	R ²
原状砂田 Original gravelly land	$Q = 0.0749e^{0.1713 U}$	0.90 *
翻耕砂田 Ploughed gravelly land	$Q = 0.6515e^{0.0809 U}$	0.89 *
荒地 Wasteland	$Q = 0.5352e^{0.1347 U}$	0.96 *
原状农田 Original farmland	$Q = 1.9495e^{0.0309 U}$	0.85 *
翻耕农田 Ploughed farmland	$Q = 0.1966e^{0.264 U}$	0.96 *

注: * 表示 0.05 显著水平 (n = 5) Note: * represents statistical significance at 0.05 (n = 5)

指数函数规律, 风蚀速率与风速之间的关系均呈显著相关。每一样地类型的土壤风蚀率均随风速的

增大而增大, 其增加的速度以翻耕农田最快, 荒地居中, 砂田最慢。

2.1.3 压砂前后空气动力学特征的变化 地表粗糙度的计算结果表明 (表 4), 在 8 ~ 25 m s⁻¹ 的风速范围内, 砂田和农田的空气动力学粗糙度 z₀ 均随风速的增加而增大; 在相同的风速条件下, 砂田的地表粗糙度明显的高于农田, 且随着风速的增加, 砂田和农田粗糙度的差值呈增大的趋势。

由表 4 可见, 砂田和农田的摩阻速度均随风速的增大而增加; 同一风速梯度下, 砂田与农田的摩阻速度差别不显著; 在 8 ~ 20 m s⁻¹ 的风速范围内, 风速越大, 砂田与农田的摩阻速度差值越大, 可由 0.08 m s⁻¹ 逐渐增至 0.37 m s⁻¹。

表 4 砂田和农田的粗糙度、风速廓线和摩阻速度

Table 4 Aerodynamic roughness length, wind profile, shear velocity in gravelly land and farmland

土壤类型 Soil type	风速 Wind speed (m s ⁻¹)	粗糙度 Aerodynamic roughness length (cm)		风速廓线 Wind profile		摩阻速度 Shear velocity (m s ⁻¹)
		length (cm)	a	b	R ²	
砂田 Gravelly land	8	0.023	1.805 0	1.156 2	0.95	0.463
	10	0.055	0.566 8	1.704 5	0.95	0.682
	15	0.059	0.866 0	2.531 9	0.94	1.013
	20	0.066	1.366 1	3.425 0	0.94	1.370
	25	0.080	2.547 9	4.158 0	0.91	1.663
农田 Farmland	8	0.004	3.075 5	0.960 4	0.96	0.384
	10	0.005	2.991 0	1.249 5	0.95	0.499
	15	0.007	5.510 6	1.785 0	0.94	0.714
	20	0.010	7.082 2	2.499 1	0.92	0.999
	25	0.022	4.378 8	3.829 8	0.95	1.532

注: 拟和函数: $Uz = a + blnz$ Note: Fitting function: $Uz = a + blnz$

对实验结果的相关分析表明, 不同样地类型在不同风速条件下的风速廓线可以理想地应用 $Uz = a + blnz$ 式来表述 (式中, a、b 为回归系数, R² > 0.91) (表 4, 图 2)。图中可见, 与农田相比, 砂田的砾石层使 20 cm 高度内的风速明显降低。

2.2 挟沙风风蚀

2.2.1 挟砂田沙风蚀 由表 5 可见, 在挟沙风作用下, 原状砂田在 8 ~ 10 m s⁻¹ 风速下发生风积, 在 15 m s⁻¹ 时达到蚀积平衡, 在 20 ~ 25 m s⁻¹ 风速段产生风蚀; 荒地在 8 ~ 25 m s⁻¹ 风速范围内的风蚀速率均随风速的增加而增加; 翻耕砂田、翻耕农田和原状农田在 8 m s⁻¹ 的风蚀速率均高于 10 m s⁻¹ 风速下的风蚀速率, 在 10 ~ 25 m s⁻¹ 风速段则又随着风速的增加而增加。

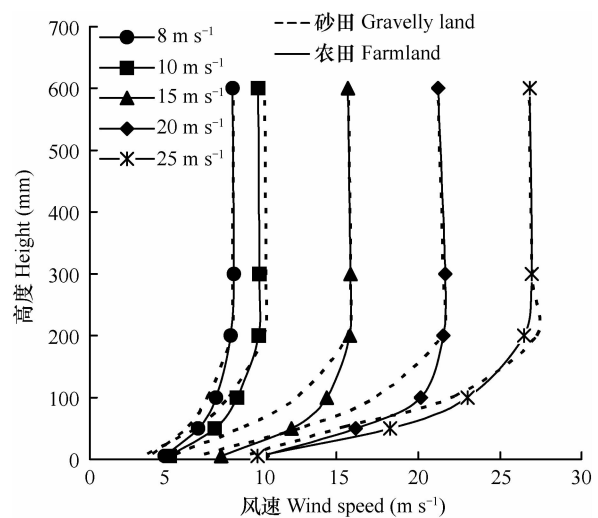


图 2 砂田和农田在不同风速下的风速廓线

Fig. 2 Wind profiles in gravelly land and farmland as affected by wind speed

在 $8 \sim 15 \text{ m s}^{-1}$ 风速段,各类型样品的平均风蚀(积)速率值依次为:原状砂田($-0.11 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、翻耕砂田($1.11 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、原状农田($3.33 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、荒地($4.11 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、翻耕农田($5.56 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)。

表 6 显示,除荒地的 Q 与 U 呈指数函数关系外,其余类型样品的 Q 与 U 均呈二次函数关系, R^2 均大于 0.94。在 $10 \sim 20 \text{ m s}^{-1}$ 风速下,风蚀速率随风速增加的速度以翻耕农田最快,以后

依次的顺序为荒地、原状农田、翻耕砂田、原状砂田。

2.2.2 挟农田土风蚀 表 7 显示,当气流中携带大量的农田土颗粒时,砂田(原状和翻耕)在 $8 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 的风速范围内均产生风积作用,风积速率随风速的增加而增加,原状砂田在各风速条件下的风积速率、风积速率随风速增加的速度均高于翻耕砂田。荒地在 $8 \sim 20 \text{ m s}^{-1}$ 的风速下亦产生风积,至 25 m s^{-1} 风速时又产生大量的风蚀。农田(原状和翻耕)在各风速条件下仍以风蚀为主,且随着风速的增加而增加,其中翻耕农田的风蚀速率在高风速段产生剧增。

表 5 挟砂田沙气流吹蚀下砂田、荒地和农田的风蚀速率

Table 5 Wind erosion rates under wind bearing sand from gravelly land in gravelly land, wasteland and farmland ($\text{g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

风速 Wind speed (m s^{-1})	时间 Time (min)	原状砂田 Original gravelly land	翻耕砂田 Ploughed gravelly land	荒地 Waste land	原状农田 Original farmland	翻耕农田 Ploughed farmland
8	10	-0.17	2.50	2.17	4.83	2.67
10	10	-0.17	0.33	3.50	2.50	2.17
15	10	0.00	0.50	6.67	2.67	11.83
20	10	0.33	1.17	10.67	4.83	13.33
25	5	1.00	9.67	54.00	10.67	43.67

表 6 挟砂田沙气流吹蚀下砂田、荒地和农田风蚀速率(Q)与风速(U)的关系

Table 6 Relationship between wind erosion rate and wind speed in gravelly land, wasteland and farmland under sand-bearing wind

土壤类型 Soil type	$Q-U$ 关系式 $Q-U$ relationships	R^2
原状砂田 Original gravelly land	$Q = 0.0048 U^2 - 0.0916 U + 0.265$	0.99*
翻耕砂田 Ploughed gravelly land	$Q = 0.0841 U^2 - 2.3737 U + 16.072$	0.96*
荒地 Wasteland	$Q = 0.5355 e^{0.1718 U}$	0.97*
原状农田 Original farmland	$Q = 0.0664 U^2 - 1.8227 U + 14.751$	0.98*
翻耕农田 Ploughed farmland	$Q = 0.1833 U^2 - 3.8188 U + 22.48$	0.94*

注:表中*表示 0.05 显著水平($n=5$) Note: * represents statistical significance at 0.05 ($n=5$)

表 7 挟农田土气流吹蚀下砂田、荒地和农田的风蚀速率

Table 7 Wind erosion rates under wind bearing soil from farmland in gravelly land, wasteland and farmland ($\text{g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

风速 Wind speed (m s^{-1})	时间 Time (min)	原状砂田 Original gravelly land	翻耕砂田 Ploughed gravelly land	荒地 Waste land	原状农田 Original farmland	翻耕农田 Ploughed farmland
8	10	-0.33	-1.00	-3.17	2.83	0.16
10	10	-3.17	-2.33	-11.50	2.00	0.33
15	10	-27.50	-23.00	-14.33	-0.50	33.16
20	10	-48.67	-33.00	-1.67	16.67	90.33
25	5	-150.7	-58.33	67.67	88.33	400.0

在 $8 \sim 15 \text{ m s}^{-1}$ 风速段,各类型样品的平均风蚀(积)速率值依次为:原状砂田($-10.33 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、荒地($-9.67 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、翻耕砂田($-8.78 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、原状农田($1.44 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、翻耕农田($11.22 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)。

挟农田土的风蚀实验表明,尽管不同类型样品的风蚀、风积特性不同,但 Q 与 U 的关系仍均呈二次函数关系(表 8), R^2 均大于 0.97。在 $10 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 风速范围内,风蚀速率随风速增加的速度以翻耕农田最快,原状农田居中,荒地最慢;风积速率随风速增加的速度是原状砂田快于翻耕砂田。

表 8 挟农田土气流吹蚀下砂田、荒地和农田风蚀速率(Q)与风速(U)的关系

Table 8 Relationship between wind erosion rate and wind speed in gravelly land, wasteland and farmland underwind bearing soil from farmland

土壤类型 Soil type	$Q-U$ 关系式 $Q-U$ relationships	R^2
原状砂田 Original gravelly land	$Q = -0.6722 U^2 + 13.917U - 73.076$	0.97*
翻耕砂田 Ploughed gravel mulch	$Q = -0.067 U^2 - 1.1492 U + 13.344$	0.98*
荒地 Wasteland	$Q = 0.6638 U^2 - 18.042 U + 101.14$	0.98*
原状农田 Original farmland	$Q = 0.6359 U^2 - 16.392 U + 97.757$	0.98*
翻耕农田 Ploughed farmland	$R_d = 2.3794 U^2 - 56.902 U + 319.58$	0.97*

注:表中*表示 0.05 显著水平($n=5$) Note: * represents statistical significance at 0.05 ($n=5$)

3 讨论与结论

观测样地的风速统计数据显示,冬春季的平均风速为 3.1 m s^{-1} ,起沙风速($5 \sim 11 \text{ m s}^{-1}$)占 39%, $>11 \text{ m s}^{-1}$ 的风速频率占 8.6%(发生日数 68 d a^{-1}),最大风速可达 15.4 m s^{-1} (偶有发生)。本实验风速范围为 $8 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ (8 m s^{-1} 以下风速未见风蚀),是研究区主要风速分布范围,因而实验结果值得在实践中借鉴。

3.1 净风吹蚀下的风蚀特征

砂田在长时间的风蚀和雨雪作用下,混杂其中的土壤颗粒多被吹蚀或冲刷,因此在当地常见风速

下(低于 10 m s^{-1}),砂田的土壤风蚀显著降低;翻耕后,下层的土壤混入砾石之间,砂田的土壤风蚀增加明显。在大风日(15 m s^{-1}),原状和翻耕的砂田均具有较强的抗风蚀性能,而翻耕的农田则产生了强烈的风蚀,这也是产生沙尘暴的主要原因。所以在宁夏中部干旱区,采用农田压砂不仅具有抗旱保墒的作用,而且具有防止风蚀、保护环境的生态作用。同时砂田要采用免耕法,才能显示出它的抗风蚀优势。

与刘连友等^[12]的实验结果相比(样品为 $1 \sim 4 \text{ cm}$ 的黄河冲积卵石,实验室人工配置,卵石里含有的土粒较少),采自大田的原状和翻耕片石砂田的风蚀速率较大。与邹学勇等^[14]的实验结果相比,原状砂田的风蚀速率高于粗戈壁和细戈壁。

3.2 挟沙风吹蚀下的风蚀特征

宁夏中部干旱区的砂田、农田和荒地相间分布,气流中携带的有一定的砂土。由于沙粒持续而猛烈地冲击地面,对地表的物质结构具有很大的破坏力,风蚀强度会急剧增大,与净风风蚀相比,可成倍甚至几十倍地增加^[14-15]。而本实验中由于气流中所含有的砂田土壤颗粒粒径较小,因此只增加了低风速段农田和翻耕砂田的风蚀强度,同时使原状砂田产生风积作用,这与挟沙风吹蚀下的粗戈壁和细戈壁的风蚀(积)特征相一致^[14]。当气流中含有大量的农田土壤颗粒时,原状和翻耕砂田均产生了显著的风积,荒地也由于地表生长的细小草本植物而发生风积,而农田则仍为风蚀作用,且尤以翻耕农田为甚。由此可见,砂田不仅可以防止土壤风蚀,还具有一定的风积作用,存在着与戈壁相似的风蚀平衡现象^[14]。然而随着砾石中土粒的逐渐增加,砂田的保墒作用将受到影响。

3.3 风蚀速率与风速的关系

一般而言,土壤风蚀速率与风速之间存在指数函数关系或是幂函数关系,揭示出风蚀速率随风速非线性的、快速的变化^[12,15,23]。我们的实验结果显示,各类型样地在净风吹蚀下均为指数关系,其中砂田的风蚀速率随风速的变化速度较慢,显示其抗风蚀性能较强。在挟沙风(挟砂田土或农田土)作用下,除荒地的风蚀速率与风速的关系呈指数函数外,各类型样地均呈二次曲线关系,这与有关硬梁地为直线相关,粗戈壁、细戈壁为无相关关系的研究结果有所不同^[14]。因此,不同的地表在含不同沙源的风沙流吹蚀下,风蚀速率随风速的变化规律有所不同。

3.4 砂田的抗风蚀机理

土壤风蚀是近地表气流与地表土壤物质之间相互作用的结果。空气动力学粗糙度是表征植物对气流影响强度的重要动力学参数,可以有效地应用于植物对风蚀抑制效应的评估^[24]。一定地表条件下的空气动力学粗糙度 z_0 并不是一个常数,一般随自由风速的增大而增大,而 z_0 的增大即意味着摩阻速度的增大。地表植被通过增大空气动力学粗糙度而改变了风力作用的强度,提高了摩阻速度和临界侵蚀风速,从而发挥抑制风蚀的作用^[22,25]。本实验的结果显示,砂田砾石层对气流的影响和对地表的保护作用则主要是通过增大空气动力学粗糙度来实现的。从空气动力学的角度看,地表粗糙度和摩阻速度随风速的增大而提高,表明砂田的空气动力学作用随风速的增大而越来越显著。

风速随高度的变化称为风速梯度或风速廓线,风速廓线决定风施于地面的切应力或拖曳力的大小,因此风速廓线在风蚀动力学的研究中具有十分重要的意义。风速廓线因地表状况而异,光滑地面之上的风速廓线服从指数函数规律,一定植被盖度下的风速廓线或存在 $U_z = a + blnz$ 的关系、或在植物之下高度无规律可循^[26]。本研究结果显示,各样地类型的风速廓线均遵从 $U_z = a + blnz$ 的关系,且在地表以上 20 cm 高度范围内,砂田风速明显的低于农田。

3.5 结论

风洞模拟实验证明,农田和荒地压砂利用后,其抗风蚀和减尘性能显著增强。因此,在宁夏中部干旱区大面积推广砂田这种土地利用方式,不仅可以保证作物的稳产,还具有巨大的生态环境保护作用,尤其在大风扬尘天气,这种作用尤其显得重要。但在砂田利用过程中的一些农业措施还要慎重,如大面积的翻耕等要坚决废除。

致 谢 本文风洞实验研究得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所董治宝研究员、韩致文研究员和赵爱国研究员的指导与帮助。

参 考 文 献

[1] 杨国强,杨敬青,张明玺. 砂田在干旱山区农业持续发展中的作用与效益. 中国水土保持, 1995 (5): 31—33. Yang G Q, Yang J Q, Zhang M X. Effect and benefit on agricultural sustained development of gravel mulch in arid mountainous zone (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1995 (5): 31—33

[2] Li X Y, Gong J D, Wei X H. *In-situ* rainwater harvesting and gravelmulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China. Journal of Arid Environments, 2000, 46: 371—382

[3] Paul W. Ungersoil profile gravel layer I. Effect on water storage, distribution, and evaporation. Soil Science Society of America Proceeding, 1971, 35: 631—634

[4] Paul W. Ungersoil profile gravel layer II. Effect on growth and water use by a hybrid forage sorghum. Soil Science Society of America Proceeding, 1971, 35: 980—983

[5] Nachtergaele J, Poesen J W, van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. Soil and Tillage Research, 1998, 46: 51—59

[6] Abdullah S M, Robert H, Don K. Soil water evaporation suppression by sand mulches. Soil Science, 1985, 139: 357—361

[7] 胡恒觉. 我国砂田免耕法//耕作制度论文集. 北京: 农业出版社, 1981: 206—217. Hu H J. The method of non-tillage sandy field in China//The symposium on farming system (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1981: 206—217

[8] 李小刚,王平,刘淑英,等. 兰州砂田蔬菜施肥现状及钾肥肥效. 土壤通报, 2001, 32(5): 220—221. Li X G, Wang P, Liu S Y, et al. Current situation of fertilizer application and effect of potassium fertilizer on vegetables in sand-mulched fields of Lanzhou (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 220—221

[9] 王亚军,谢忠奎,张志山,等. 甘肃砂田西瓜覆膜补灌效应研究. 中国沙漠, 2003, 23(3): 300—305. Wang Y J, Xie Z K, Zhang Z S, et al. Effect of rainwater harvesting for supplementary irrigation on watermelon in gravel and plastic mulched field in Gansu (In Chinese). Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 300—305

[10] 谢忠奎,王亚军,陈士辉,等. 黄土高原西北部砂田西瓜集雨补灌效应研究. 生态学报, 2003, 23(10): 2033—2039. Xie Z K, Wang Y J, Chen S H, et al. Effect of supplementary irrigation with harvested rainwater on watermelon (*Citrullus lanatus*) production in gravel-and-plastic mulched fields in the Loess Plateau of northwest China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2033—2039

[11] 许强,强力,吴宏亮,等. 砂田水热及减尘效应研究. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 180—182. Xu Q, Qiang L, Wu H L, et al. Study on sandy-field ecosystem effect (In Chinese). Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2009, 30(2): 180—182

[12] 刘连友,刘玉璋,李小雁,等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应. 中国沙漠, 1999, 19(1): 60—62. Liu L Y, Liu Y Z, Li X Y, et al. Effect of gravel mulch restraining soil deflation by wind tunnel simulation (In Chinese). Journal of Desert Research, 1999, 19(1): 60—62

[13] 董治宝,高尚玉, Fryrear D W. 直立植物—砾石覆盖组合措施的防风蚀作用. 水土保持学报, 2000, 14(1): 7—11. Dong Z B, Gao S Y, Fryrear D W. Drag measurement of standing vegetation-clod cover surface (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(1): 7—11

- [14] 邹学勇, 刘玉璋, 吴丹, 等. 若干特殊地表风蚀的风洞实验研究. 地理研究, 1994, 13(2): 41—48. Zou X Y, Liu Y Z, Wu D, et al. A study on some special ground wind erosion in the tunnel (In Chinese). Geographical Research, 1994, 13(2): 41—48
- [15] 董光荣, 李长治, 金炯, 等. 关于土壤风蚀风洞实验的某些结果. 科学通报, 1987, 32(4): 277—301. Dong G R, Li C Z, Jin J, et al. Some conclusions of wind tunnel experiment on wind erosion (In Chinese). Science Bulletin, 1987, 32(4): 277—301
- [16] 董治宝, 陈渭南, 李振山, 等. 风沙土水分抗风蚀性研究. 水土保持通报, 1996, 16(2): 17—23. Dong Z B, Chen W N, Li Z S, et al. Study on sand soil's moisture preventing wind erosion (In Chinese). Water and Soil Conservation Bulletin, 1996, 16(2): 17—23
- [17] 杨秀春, 刘连友, 严平. 土壤短期吹蚀的粒度分维研究. 土壤学报, 2004, 41(2): 176—182. Yang X C, Liu L Y, Yan P. Fractal dimension of soil particle size wind erosion in a short period (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 176—182
- [18] 赵燕, 李成军, 康建宏, 等. 砂田的发展及其在宁夏的应用研究. 农业科学研究, 2009, 30(2): 35—38. Zhao Y, Li C J, Kang J H, et al. Development of sandy field and application of research in Ningxia (In Chinese). Journal of Agricultural Sciences, 2009, 30(2): 35—38
- [19] 贺大良, 邹本功, 李长治, 等. 地表风蚀物理过程风洞实验的初步研究. 中国沙漠, 1986, 6(11): 25—31. He D L, Zou B G, Li C Z, et al. A preliminary study of the experiment of the physical process of ground surface erosion in wind tunnel (In Chinese). Journal of Desert Research, 1986, 6(11): 25—31
- [20] Wiggs G F S, Livinstone L G, Thomas D S, et al. Air flow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Karahari Desert. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 19—34
- [21] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义. 中国沙漠, 2003, 23(4): 337—346. Liu X P, Dong Z B. Review of aerodynamic roughness length (In Chinese). Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 337—346
- [22] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 31—33. Zhang C L, Zou X Y, Dong G R, et al. Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 31—33
- [23] 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实验研究. 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 agro-grazing ecotone, Inner Mongolia (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 737—743
- [24] Lee J A. Near surface wind flow around desert shrubs. Physical Geography, 1991, 12(2): 140—146
- [25] 黄高宝, 于爱忠, 郭清毅, 等. 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. 土壤学报, 2007, 44(6): 968—973. Huang G B, Yu A Z, Guo Q Y, et al. Wind tunnel experiment on effect of conservative tillage in winter wheat fields on soil wind erosion in Hexi Corridor, Gansu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 968—973

WIND TUNNEL TEST ON WIND EROSION RESISTANCE OF GRAVELLY FARMLAND IN THE ARID ZONE OF CENTRAL NINGXIA

Zhou Haiyan^{1,2} Wang Yingjue³ Fan Hengwen^{1,2} Liu Yang^{1,2} Liu Lichao^{1,2} Zhao Jinlong^{1,2}

(1 Shapotou Station of Desert Experimental Research, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(2 Extreme Stress Resistance and Biotechnology Laboratory, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(3 College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract In this study, effects of clean wind and sandy wind on wind erosion of gravelly farmland were simulated in a wind tunnel. Results show that wind erosion rate in virgin gravelly lands ($0.37 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$) is only 1/4 and 1/5 of that in cropland and wasteland, respectively. Wind erosion rate increased exponentially with wind speed, and the increasing rate is lower in virgin gravelly land than in cropland and wasteland. Once the virgin gravelly land is ploughed, its wind erosion rate is close to those in cropland and wasteland under normal wind speed, being $1.67 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, $1.75 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ and $1.83 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, respectively, whereas it is much lower than those in cropland and wasteland under a gale, reaching $3.61 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, $58.83 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ and $13.92 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, respectively. Wind bearing sands from gravelly land leads to a significant increase in wind erosion rate in cropland and ploughed gravelly land, but light sand deposition in virgin gravelly land, however, wind bearing soil from crop land leads to remarkable soil deposition in virgin gravelly land,

ploughed gravelly land and wasteland, but strong erosion in cropland. The wind erosion (deposition) under wind bearing sands shows a relationship of quadratic curve function with wind velocity. Gravelly land is obviously much higher than cropland in aerodynamic roughness length, being 0.023 cm and 0.002 cm, respectively, and the difference widens with wind speed. Wind profiles over gravelly land and cropland varying with wind speed can be described with an exponential function. Apparently, after being mulched with gravels, cropland and wasteland can greatly increase their wind erosion resistance and dust withholding capacity.

Key words Gravel mulch; Clean wind; Sandy wind; Wind erosion rate; Aerodynamic roughness length; Shear velocity

(责任编辑:卢萍)