

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.016.

朱泊年, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障防风固沙效益[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 431-437.

ZHU Bonian, DANG Xiaohong, MENG Zhongju, et al. Effects of Biodegradable Poly Lactic Acid (PLA) Sand Barrier on Wind Prevention and Sand Fixation in Urumqi Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 431-437.

乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA) 沙障防风固沙效益

朱泊年¹, 党晓宏^{1,2}, 蒙仲举¹, 蔺博¹, 刘平³

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3. 达拉特旗林业和草原站, 内蒙古 鄂尔多斯 014300)

摘要: 为了探究 PLA 沙障对乌珠穆沁沙地沙化治理的效果, 以方格状铺设不同规格(方格边长 0.5 m×0.5 m, 1 m×1 m, 2 m×2 m 和 3 m×3 m) PLA 沙障, 以不同规格沙障影响的风蚀特征为研究对象, 裸沙地设置对照(CK), 采用美国 HOBO 便携式风速采集仪观测距地表 10, 20, 50, 100, 200 cm 高度的风速, 同时使用自动旋转集沙仪收集近地表 0—30 cm 高度输沙量, 分析了防风效能、固沙效益和风沙流挟沙粒径的变化特征。结果表明: (1) PLA 沙障规格小于 3 m×3 m 时, 风速廓线呈“S”型变化趋势; PLA 沙障平均的地表粗糙度为 0.64 cm, CK 的平均粗糙度为 0.51 cm, 粗糙度提高了 25.48%。(2) 铺设 PLA 沙障后输沙量降低了 38.72%~75.69%; PLA 沙障输沙率随高度呈现良好的指数关系($R^2 > 0.77$); 1 m×1 m 和 2 m×2 m 沙障的固沙效益高于其他 2 种规格沙障, 3 m×3 m 规格的固沙效益最低, 基本接近 CK。(3) 乌珠穆沁沙地风蚀物颗粒大小介于 2~500 μm , 且大部分颗粒为 100~250 μm 的细沙; 铺设 PLA 沙障后, 障格内细沙含量增加了 8.70%~11.94%, 中沙含量减少了 10.63%~14.06% ($p < 0.05$)。综上所述, 铺设 PLA 沙障能有效降低乌珠穆沁沙地近地表风速, 增加地表粗糙度并且能够降低近地表的输沙量, 改变 0—30 cm 高度的风沙流结构, 具有较好的治理效果。

关键词: PLA 沙障; 防风固沙; 输沙量; 机械组成; 乌珠穆沁沙地

中图分类号: P941.75; S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0431-07

Effects of Biodegradable Poly Lactic Acid (PLA) Sand Barrier on Wind Prevention and Sand Fixation in Urumqi Sandy Land

ZHU Bonian¹, DANG Xiaohong^{1,2}, MENG Zhongju¹, LIN Bo¹, LIU Ping³

(1. Institute of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Ordos, Inner

Mongolia 017400, China; 3. Dalate County Forestry and Grassland Station, Ordos, Inner Mongolia 014300, China)

Abstract: In order to explore the effect of PLA sand barrier on desertification control in Urumqi sandy land, PLA sand barriers of different sizes (square length: 0.5 m×0.5 m, 1 m×1 m, 2 m×2 m and 3 m×3 m) were laid in grid shape. The wind erosion characteristics of sand barriers with different specifications were studied. The bare sandy land was set as the control (CK), and HOBO portable wind speed acquisition instrument was used to observe the wind speed at heights of 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm and 200 cm above the surface. At the same time, the automatic rotary sand collector was used to collect the sediment transport at 0—30 cm height near the surface, and the variation characteristics of windbreak efficiency, sand fixation efficiency and sand carrying diameter of wind-blown sand flow were analyzed. The results show that:

收稿日期: 2021-12-13

修回日期: 2022-01-13

资助项目: 内蒙古自治区科技计划“乌珠穆沁沙地生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2020GG0077)

第一作者: 朱泊年(1997—), 男, 陕西榆林人, 在读硕士, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: zbn1026316444@163.com

通信作者: 党晓宏(1986—), 男, 陕西合阳县人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: dangxiaohong1986@126.com

<http://stbcj.paperonice.org>

(1) when the PLA sand barrier size is less than $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, the wind speed profile presents an S-shaped change trend; the average surface roughness of PLA sand barrier is 0.64 cm, and that of CK is 0.51 cm, which is 25.48% higher than that of PLA sand barrier; (2) sediment transport decreases by 38.72% ~ 75.69% after PLA sand barrier was laid; the sediment transport rate of PLA barrier shows a good exponential relationship with height ($R^2 > 0.77$); the overall surface roughness decreased in the order: $1\text{ m} \times 1\text{ m} > 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} > 2\text{ m} \times 2\text{ m} > 3\text{ m} \times 3\text{ m} > \text{CK}$; the sand fixation benefits of $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ and $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ sand barriers are higher than these of the other two types of sand barriers, and the sand fixation benefit of $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ sand barriers is the lowest, basically close to CK; (3) the size of wind erosion particles in Urumqi sandy land is between $2 \sim 500\ \mu\text{m}$, and most of the particles are fine sand between $100 \sim 250\ \mu\text{m}$; After PLA sand barrier was laid, the fine sand content in the barrier increases by 8.70% ~ 11.94%, the contents of medium sand decreases by 10.63% ~ 14.06% ($p < 0.05$). In conclusion, laying PLA sand barriers can effectively reduce near-surface wind speed in Urumqi sandy land, increase surface roughness, reduce near-surface sediment transport, and change the aeolian sand flow structure of 0—30 cm height, which has better control effect.

Keywords: PLA sand barrier; windbreak fixation; sediment runoff; mechanical composition; Urumqi sandy land

我国草原面积广大,分布广泛^[1]。其中,位于我国北方的草地对提升生态系统稳定性具有极其重要的作用^[2]。乌珠穆沁草地是内蒙古自治区最好的天然草地之一,草地面积 $6.93 \times 10^6\text{ hm}^2$,是我国东北与华北地区的一道天然的生态屏障,它的变化对京津冀地区以及中国北方的生态安全有着重要的影响^[3]。但该地区大部分植被地处农牧交错地区,生态环境非常脆弱,并且容易受到人类生产生活的影响^[4]。近年来,由于过度放牧而造成草原退化、草原土壤肥力下降,形成了总面积为 $5.0 \times 10^4\text{ hm}^2$ 的沙地。草原沙化已给当地的生态环境和牧民的生产生活造成了极其严重的危害。因此,防治乌珠穆沁沙地快速扩张,减缓乌珠穆沁沙地沙化程度问题迫在眉睫。

机械沙障是治理和防护风沙活动所造成危害的主要措施之一,目前在我国防治沙漠化的过程中得到广泛应用^[5-7]。机械沙障通过增加地表粗糙度,降低近地表风速,进而削弱地表风蚀程度,起到防风固沙的作用^[8-9]。生物基可降解聚乳酸(PLA)沙袋沙障以常见农作物为生产原料,铺设后最终分解转化为 CO_2 和 H_2O ,其采用“以沙治沙”的理念,对生态环境不会造成污染^[10-11]。防风效能方面:袁立敏等^[12]研究表明 PLA 沙障在 10 cm 高度处可以明显降低风速,并且减弱风沙流活动强度,随着高度的增加,这种削弱能力逐渐减弱;李锦荣等^[13]发现 PLA 沙障对气流的影响作用在距地表 0.5 m 处出现分界点,在 50 cm 以下风速变化趋于一致;并且距地表 50 cm 内时,沙障高度对风速影响极显著,沙障规格对风速影响不显著;50—200 cm 时沙障规格对风速 c 影响均显著,沙障规格和障高的交互作用在 0—200 cm 内不显著。固沙效益方面:杨欢等^[14]研究表明输沙量随着风速

增加呈上升趋势,主要发生于 0—9 cm 高度,超过 90% 的输沙量发生在 0—21 cm 高度。张克存等^[15]研究发现随着风速的增加,20 cm 高度以下输沙量增加趋势明显,超过 20 cm 的高度输沙量基本保持稳定。风蚀物粒径方面:丁延龙等^[16]研究发现通过铺设 PLA 沙障,使地表土壤粒径发生变化,使得中沙、粗沙含量升高,细颗粒含量降低。刘芳等^[17]通过研究发现,在 0—100 cm 高度范围内,不同下垫面不会影响风蚀物粒度组成的分布情况,各高度层均服从单峰态分布,峰值均处在 $100 \sim 250\ \mu\text{m}$ 。上述研究中,大多数将沙障设置沙漠边缘流动沙丘上,其周围基质与沙丘接近,但不同性质的下垫面对气流的紊动性起重要作用,同时携沙气流是风沙流特性的主要影响因素^[15]。研究区选择为乌珠穆沁沙地退化斑块形成的沙丘,其周围基质为草地,铺设 PLA 沙障对地表风速、风沙流结构、风蚀物粒度特征和防风固沙效益等指标影响效果不同。

基于此,本文通过野外铺设不同规格的 PLA 沙障后,以不同规格沙障影响的风蚀特征为研究对象,观测近地表风速和输沙量,分析风速的变化、防风效果、输沙量、固沙效益和风沙流携沙机械组成等指标的变化规律,探究乌珠穆沁沙地 PLA 沙障的防风固沙效益,以期治理乌珠穆沁沙地选用合适的 PLA 沙障提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗境内,地处乌珠穆沁沙地中南部边缘。属于中温带半干旱大陆性气候,春季干旱风大、夏季短暂、秋季

寒冷短促、冬季漫长。年均气温 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$, 年均降水 345.8 mm , 年均蒸发量 $1\ 759.8\text{ mm}$ ^[18]。年均风速 4 m/s , 东南部大于 45 m/s , 西部小于 4 m/s 。中部年大风日数为 80 d 左右, 东西部少于 70 d , 夏季盛以东南风为主, 其他季节盛行西北风。该地区地带性土壤可分为栗钙土、黑钙土、风沙土、灰色草甸土、灰色森林土、粗骨土、沼泽泥炭土和盐土 8 个类型, 其中栗钙土分布最广, 且栗钙土以暗栗钙土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样点选择 2020 年 10 月至 2021 年 6 月, 选择典型沙化草地斑块且经过风蚀形成的沙丘, 沙丘土壤为栗钙土, 样点位于西乌珠穆沁旗北 40 km 处, 在试验区选取西北—东南走向的沙丘, 长 200 m , 宽 35 m , 高 42 m , 两侧不对称, 西北坡坡度 $12^{\circ}\sim 13^{\circ}$, 东南坡坡度 $25^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 。选择沙丘迎风坡分别铺设 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$, $1\text{ m}\times 1\text{ m}$, $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 和 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ PLA 沙障, 并选择沙障相邻的裸沙丘作为对照组(图 1)。沙丘上无植被生长。

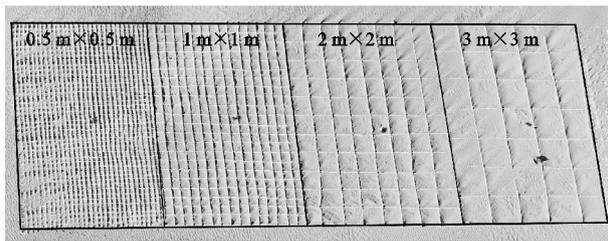


图 1 沙障铺设情况和仪器布设情况

1.2.2 风速观测 选择 2021 年 4—6 月的大风时段(瞬时风速高于 17 m/s 的风), 使用 5 组 HOBO 数采仪采集数据, 在每种规格沙障中心布设观测点, 分别观测 $10, 20, 50, 100, 200\text{ cm}$ 的高度, 数据采集频率为 1 s 。每种规格沙障观测 45 min , 同时在大小和走向相似的裸露沙丘上设置观测点作为对照。

1.2.3 野外风沙流观测 在不同规格的 PLA 沙障中心各布置 1 组集沙仪, 共 5 组。集沙仪进沙口尺寸为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$, 进沙口 15 层, 每次测定时间为 45 min , 可以收集近地表 $0\sim 30\text{ cm}$ 高度的输沙量。同时在未铺设沙障的裸沙丘上设置对照组。室内试验采用 0.01 g 精度天平进行分层称重, 土壤粒度测定使用德国 Analysette 22 Micro Tec Plus 型号激光粒度仪, 分辨率高于 $0.1\ \mu\text{m}$, 测量粒径范围为 $0.01\sim 2\ 100\ \mu\text{m}$, 每个样品重复测定 3 次。土壤机械组成颗粒粒径依据美国制(US-DA)^[19] 标准划分为: 黏粒($< 2\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim 50\ \mu\text{m}$)、极细砂($50\sim 100\ \mu\text{m}$)、细砂($100\sim 250\ \mu\text{m}$)、中砂($250\sim 500\ \mu\text{m}$)、粗砂($500\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)、极粗砂($1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$)、砾石($> 2\ 000\ \mu\text{m}$)。

1.3 指标计算

1.3.1 空气动力学粗糙度 采用普朗特-冯卡门描述风速廓线方程为:

$$\mu_z = \frac{\mu^*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中: μ_z 为高度 z 处的平均风速(m/s); μ^* 为摩擦风速(m/s); z 为风速廓线上的 1 点距地面的垂直高度(m); z_0 为空气动力学粗糙度(m); K 为卡门常数, 一般取值 0.4 。

采用对数廓线拟合的方法计算空气动力学粗糙度, 测得各高度($10, 20, 50, 100, 200\text{ cm}$)处风速, 并运用最小二乘回归得到风速廓线拟合公式。

$$\mu_z = a + b \ln z \quad (2)$$

式中: a, b 为回归系数, 令 $\mu_z = 0$ 可得出:

$$z_0 = e^{(-a/b)} \quad (3)$$

计算(2)和(3)可得摩擦风速计算方程为:

$$\mu^* = Kb \quad (4)$$

1.3.2 防风效果

$$F = \frac{v_0 - v_z}{v_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: F 为 PLA 沙障的防风效果; v_0, v_z 为在同一高度下 CK 和 PLA 沙障的平均风速。

1.3.3 风速增加率

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_1 \times h} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R 为风速增加率; v_2, v_1 分别为某两个高度层 h_2, h_1 的平均风速值($h_2 > h_1$), $h = h_2 - h_1$ (m)。

1.3.4 固沙效益

$$E = \frac{q_0 - q_z}{q_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: E 为 PLA 沙障的固沙效益; q_0, q_z 分别为 CK 和 PLA 沙障各高度内输沙量。

1.3.5 数据处理 试验数据利用 Microsoft Office Excel 2017 进行数据计算, 利用 Origin 2021 进行数据分析处理及成图。

2 结果与分析

2.1 不同规格沙障对风速的影响

由图 2 可知, 4 种规格的 PLA 沙障和 CK 的风速随着高度的增加而增大, 风速廓线均呈现不同规律。 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$, $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 和 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 规格的 PLA 沙障风速廓线在 $50\sim 100\text{ cm}$ 间出现“S”变化, 呈现“S”型曲线变化的范围表现在距地面 $50\sim 100\text{ cm}$ 高度范围内, 高度大于 100 cm 后风速快速恢复, 并在 200 cm 后与 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 和 CK 基本接近。而 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ PLA

沙障的风速廓线趋势基本接近 CK。

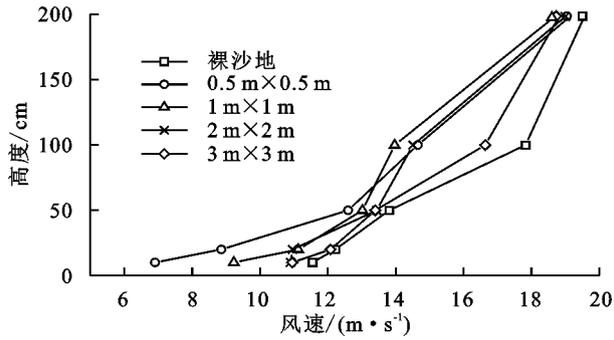


图2 4种规格的PLA沙障与CK风速廓线

由表1可知,随着沙障规格逐渐增大,防风效果逐渐减小。4种规格沙障各高度处风速小于CK,在10—20 cm高度处的防风效果值最大,越接近地表,风速削弱效果越明显。50 cm后防风效果大幅度减弱,沙障对风速的抑制也逐渐减小。但在2 m×2 m规格沙障内,20 cm处防风效果值最大,20 cm高度以上的风速迅速恢复,沙障对风速的影响减弱较快。

表1 4种规格PLA沙障防风效能比较 %

规格	高度/cm		
	10	20	50
0.5 m×0.5 m	36.90	27.50	8.76
1 m×1 m	15.71	8.92	5.72
2 m×2 m	0.46	10.31	2.68
3 m×3 m	5.19	1.15	2.97

由表2可知,不同规格的PLA沙障可以增大地表粗糙度,总体表现为1 m×1 m>0.5 m×0.5 m>2 m×2 m>3 m×3 m>CK,PLA沙障平均的地表粗糙度为0.64 cm,CK的平均粗糙度为0.51 cm,粗糙度提高了25.48%。1 m×1 m PLA沙障的粗糙度最大,比CK提高了41%,3 m×3 m规格沙障的粗糙度则与CK相近。风速增加率随着沙障规格增大,风速增加率逐渐减小。每种规格PLA沙障都有一定的固沙效益,沙障固沙效益随沙障规格增呈先增大后减少的变化,1 m×1 m规格与2 m×2 m规格的PLA沙障的固沙效益相接近,为75.64%,75.68%,3 m×3 m规格的PLA沙障固沙效益最低为38.75%,仅为1 m×1 m规格沙障的51%。

表2 4种规格PLA沙障与CK粗糙度、风速增加率和固沙效益比较

规格	粗糙度/cm	风速增加率/%	固沙效益/%
CK	0.51	0.80	
0.5 m×0.5 m	0.70	2.12	62.88
1 m×1 m	0.73	1.32	75.64
2 m×2 m	0.59	0.41	75.68
3 m×3 m	0.55	0.41	38.75

2.2 输沙量垂直分布特征

由表3可知,PLA沙障在24 cm高度内能有效减少输沙量,0.5 m×0.5 m沙障内输沙量为CK的37.12%,1 m×1 m沙障内输沙量为CK的24.36%,2 m×2 m沙障内输沙量为裸沙的24.31%,3 m×3 m沙障内输沙量为裸沙的61.28%。CK在0—9 cm高度内输沙量占总输沙量的73.3%,铺设沙障后,0—9 cm高度内输沙量占总输沙量的70.59%~94.71%。0.5 m×0.5 m沙障在0—7 cm高度下的输沙量低于CK并且远低于其他规格沙障。

表3 4种规格PLA沙障与对照输沙量对比

高度/cm	输沙含量/%			
	0.5 m×0.5 m	1 m×1 m	2 m×2 m	3 m×3 m
0—2	27.92	29.87	76.62	141.56
2—4	45.95	25.00	27.70	62.84
4—6	55.20	25.6	5.60	41.60
6—8	44.44	24.79	3.68	27.35
8—10	36.99	24.66	2.88	26.03
10—12	33.33	28.57	2.14	23.33
2—14	30.56	22.22	8.33	22.22
14—16	31.58	26.32	1.58	26.32
16—18	33.33	25.00	1.67	25.00
18—20	62.5	37.50	12.5	50.00
20—22	40.00	60.00	10.4	44.80
22—24	50.00	-150.00	15.00	96.00
24—30	-300.00	100.00	80.00	-696.00

注:表中数值以裸沙丘输沙量为基础计算所得不同规格沙障各高度输沙量百分比;表中24 cm高度后收集输沙量较少,所以将28—30 cm、26—28 cm高度处输沙量与24—26 cm高度输沙量合并分析。

由图3可知,铺设PLA沙障和CK的输沙量均随着高度呈减小趋势,总输沙量CK>3 m×3 m>0.5 m×0.5 m>1 m×1 m>2 m×2 m。对不同规格PLA沙障的风沙流结构的垂直方向上的分布进行函数拟合,结果表明,PLA沙障风沙流结构随高度呈现很好的指数关系($R^2 > 0.77$)。0.5 m×0.5 m沙障在3 cm高度下的输沙量低于裸沙并且远低于其他规格沙障,其原因应是沙障规格过于小,PLA沙障障壁会阻碍大部分输沙,无法被集沙仪收纳,导致积沙量异常小。

由表4可知,利用幂函数、指数函数、线性函数模型拟合,利用拟合完成的函数关系式分析不同规格PLA沙障的输沙量随高度的变化规律,CK输沙量随高度增加符合指数函数关系式递减,相关系数 R^2 达到0.99,指数函数对PLA沙障的拟合效果较好,相关系数 R^2 为0.77~0.99。说明指数函数对铺设沙障后输沙量随高度的分布变化规律能够较好的反映。

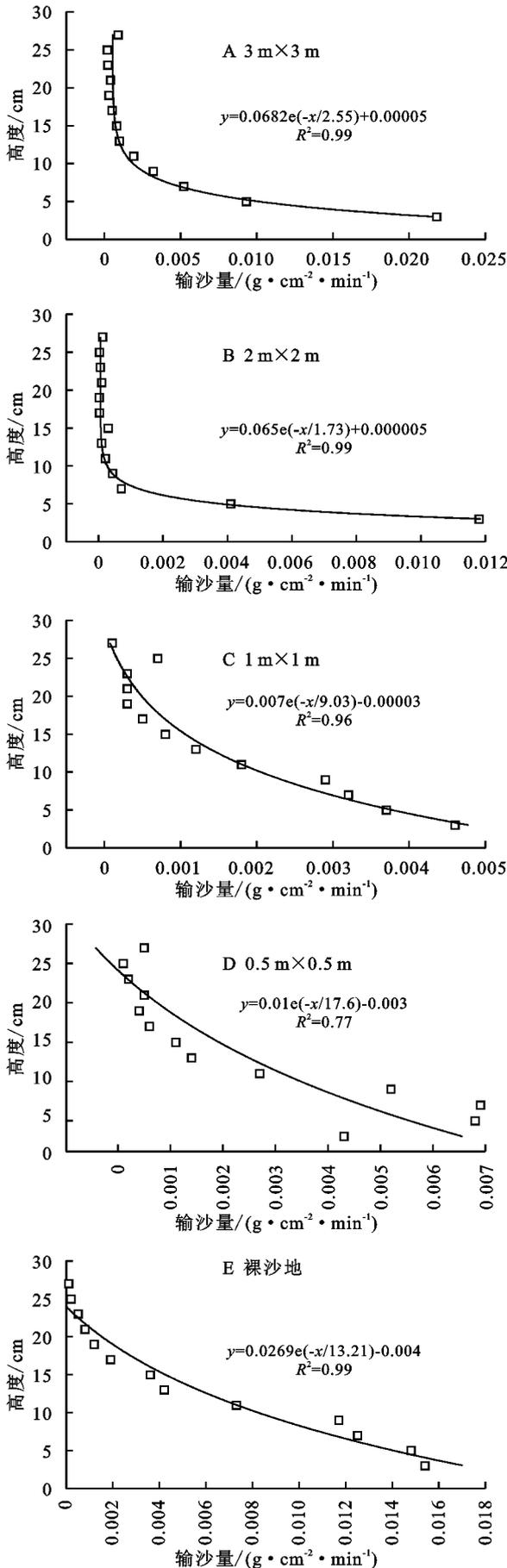


图 3 4 种规格 PLA 沙障与 CK 风沙流结构对比

表 4 4 种规格 PLA 沙障与 CK 输沙率函数拟合关系

规格	函数	公式	R ²
CK	指数函数	$y=0.0269e^{-x/13.21}-0.004$	0.96
	线性函数	$y=-0.0007x+0.1642$	0.89
	幂函数	$y=0.0509x^{-0.9113}$	0.77
3 m×3 m	指数函数	$y=0.0682e^{-x/2.55}+0.00005$	0.99
	线性函数	$y=-0.0006x+0.0119$	0.51
	幂函数	$y=0.1596x^{-1.804}$	0.99
2 m×2 m	指数函数	$y=0.0650e^{-x/1.73}+0.000005$	0.99
	线性函数	$y=0.0053-0.0003x$	0.37
	幂函数	$y=0.1892x^{-2.5174}$	0.98
1 m×1 m	指数函数	$y=0.0070e^{-x/9.03}-0.00003$	0.96
	线性函数	$y=-0.0007x+0.0043$	0.84
	幂函数	$y=0.0147x^{-0.9423}$	0.85
0.5 m×0.5 m	指数函数	$y=0.01e^{-x/17.6}-0.0030$	0.77
	线性函数	$y=-0.0003x+0.0072$	0.76
	幂函数	$y=0.0160x^{-0.78}$	0.84

2.3 风蚀物粒度特征

由于 PLA 沙障内收集到沙物质较少,所以分为 3 层(0—10 cm,11—20 cm 和 21—30 cm)。由表 5 可知,研究区内粒径成分主要由细沙和中沙组成,中沙含量随着高度增加由 9.71% 增加至 25.78% ($p < 0.05$),细沙、极细沙和粉粒含量随着高度增加而逐渐减小。铺设沙障后,中沙含量显著降低,细沙、极细沙和粉粒含量显著升高。3 m×3 m,1 m×1 m 和 0.5 m×0.5 m 规格内中沙含量随着高度增加呈先减小后增加的趋势,细沙、极细沙和粉粒含量则呈相反趋势。细沙含量较 CK 显著增加 ($p < 0.05$),0—10 cm 高度内细沙含量分别增加了 4.57%,3.76%,4.51%,5.59% ($p < 0.05$),中沙含量分别减少了 4.89%,2.06%,1.71%,6.90% ($p < 0.05$);11—20 cm 高度内细沙含量分别增加了 10.75%,11.44%,11.43%,10.18% ($p < 0.05$),中沙含量分别减少了 14.4%,13.01%,10.76%,15.02% ($p < 0.05$);21—30 cm 高度内细沙含量分别增加了 10.74%,14.06%,17.74%,9.89% ($p < 0.05$),中沙含量分别减少了 17.06%,16.19%,22.38%,20.01% ($p < 0.05$)。

由表 6 可知,4 种规格 PLA 沙障与 CK 处风蚀物粒径组成含量拟合效果较差,可得出粒径含量随高度变化不具有增加或减少的拟合关系。

3 讨论

本研究中随着沙障规格增大,防风效能逐渐减少,并且随着高度增加,防风效能同时也在减小。0.5 m×0.5 m PLA 沙障内各高度防风效能最高,并且明显高于其他 3 种规格沙障,3 m×3 m 规格 PLA 沙障影响效果较差。该研究与党晓宏等^[20]对吉兰泰盐湖

附近铺设 PLA 沙障的研究结果相似,其研究表明铺设沙障对削弱近地表风速效果明显,不同规格沙障对风速的影响不同,影响程度 PLA 沙障 $1\text{ m}\times 1\text{ m}> 2\text{ m}\times 2\text{ m}> 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。这是由于沙障的铺设,地表粗糙度增大,当气流经过沙障区域时,不透风的障体

对近地表携沙气流起到了阻挡作用,底层受到阻挡后的一部分越过障体继续向前行进,一部分滞留在障体前侧,一部分在障体的抬升下向上运移,所以,低于沙障障体的风速数值明显小于其他高度的风速,防风效能明显高于其他高度。

表 5 4 种规格 PLA 沙障风蚀物粒度构成

规格	高度/cm	含量/%			
		中沙(250~500 μm)	细沙(100~250 μm)	极细沙(50~100 μm)	粉粒(2~50 μm)
CK	0—10	9.71±0.39 ^{Ac}	62.17±0.53 ^{Ba}	4.78±0.12 ^{Ba}	11.96±0.06 ^{BCa}
	11—20	15.36±0.35 ^{Ab}	56.53±0.55 ^{Bb}	4.46±0.06 ^{Db}	10.73±0.10 ^{Db}
	21—30	25.78±0.59 ^{Aa}	50.02±0.90 ^{Dc}	1.20±0.02 ^{Ec}	9.62±0.19 ^{Cc}
	均值	16.83±0.39 ^(a)	56.26±0.50 ^(c)	3.55±0.06 ^(e)	10.76±0.06 ^(d)
0.5 m×0.5 m	0—10	4.82±0.21 ^{Cb}	66.74±0.36 ^{Aa}	4.32±0.60 ^{Cc}	12.07±0.18 ^{Bb}
	11—20	0.96±0.10 ^{Dc}	67.28±0.74 ^{Aa}	7.76±0.50 ^{Ba}	13.95±0.23 ^{Ba}
	21—30	8.72±0.30 ^{Ca}	60.76±1.00 ^{Cb}	6.91±0.04 ^{Ab}	12.05±0.43 ^{Bb}
	均值	4.53±0.18 ^(d)	65.11±0.68 ^(b)	6.44±0.04 ^(b)	12.79±0.20 ^(b)
1 m×1 m	0—10	7.65±0.29 ^{Bb}	65.93±0.39 ^{Ab}	3.48±0.08 ^{Db}	12.13±0.18 ^{Bb}
	11—20	2.35±0.48 ^{Cc}	67.97±0.47 ^{Aa}	5.86±0.09 ^{Ca}	13.71±0.45 ^{Ba}
	21—30	9.59±0.19 ^{Ba}	64.08±0.23 ^{Bc}	3.10±0.02 ^{Dc}	12.27±0.10 ^{Bb}
	均值	6.21±0.17 ^(b)	66.15±0.36 ^(b)	4.28±0.06 ^(c)	12.78±0.24 ^(b)
2 m×2 m	0~10	8.00±1.26 ^{Ba}	66.68±1.95 ^{Aa}	2.85±0.06 ^{Ec}	11.65±0.23 ^{Cb}
	11—20	4.60±0.57 ^{Bb}	67.96±1.14 ^{Aa}	4.56±0.04 ^{Da}	12.46±0.32 ^{Ca}
	21—30	3.40±0.14 ^{Eb}	70.03±0.41 ^{Aa}	4.30±0.03 ^{Cb}	12.45±0.27 ^{Ba}
	均值	5.28±0.55 ^(c)	68.2±0.92 ^(a)	3.95±0.04 ^(d)	12.21±0.25 ^(c)
3 m×3 m	0—10	2.81±0.17 ^{Db}	67.76±0.27 ^{Aa}	5.37±0.10 ^{Ac}	11.98±0.15 ^{Ab}
	11—20	0.34±0.03 ^{Dc}	66.71±0.32 ^{Aa}	8.05±0.14 ^{Aa}	14.92±0.20 ^{Aa}
	21—30	5.77±0.09 ^{Da}	59.91±0.62 ^{Cb}	10.5±0.11 ^{Bb}	13.53±0.15 ^{Ab}
	均值	2.77±0.09 ^(e)	64.94±0.40 ^(b)	7.98±0.11 ^(a)	13.59±0.10 ^(a)

注:同 1 列不同大写字母表示不同规格沙障在同 1 高度下风蚀物粒度构成差异显著($p<0.05$);同 1 列不同小写字母表示同 1 规格沙障不同高度风蚀物粒度构成差异显著($p<0.05$);括号内同 1 列不同字母表示不同规格沙障粒径组成差异显著($p<0.05$)。

表 6 4 种规格 PLA 沙障风蚀物粒径组成含量

规格	粒径含量	线性拟合方程	R^2
CK	中沙	$y=0.96x+4.34$	0.47
	细沙	$y=-0.76x+66.09$	0.36
	极细沙	$y=-0.39x+6.30$	0.6
	粉粒	$y=-0.27x+12.65$	0.77
0.5 m×0.5 m	中沙	$y=0.39x+1.83$	0.07
	细沙	$y=-0.66x+69.84$	0.23
	极细沙	$y=0.31x+4.24$	0.34
	粉粒	$y=0.02x+12.66$	0.002
1 m×1 m	中沙	$y=0.21x+4.75$	0.02
	细沙	$y=-0.21x+67.65$	0.02
	极细沙	$y=-0.04x+4.55$	0.01
	粉粒	$y=0.02x+12.63$	0.01
2 m×2 m	中沙	$y=-0.27x+9.30$	0.58
	细沙	$y=0.20x+65.26$	0.68
	极细沙	$y=0.08x+2.73$	0.22
	粉粒	$y=0.05x+11.50$	0.43
3 m×3 m	中沙	$y=0.21x-0.31$	0.08
	细沙	$y=-0.43x+71.37$	0.35
	极细沙	$y=0.29x+3.60$	0.18
	粉粒	$y=0.07x+12.54$	0.07

PLA 沙障的总输沙量仅为 CK 的 24.31%~61.28%,

2 m×2 m 和 1 m×1 m 规格 PLA 沙障固沙效益相近,分别为 75.68%和 75.64%,3 m×3 m 规格 PLA 沙障最低,为 38.75%,说明 PLA 沙障的固沙效益以 2 m×2 m 和 1 m×1 m 规格最好,随着沙障规格改变,固沙效益均减小。该研究与王雨浩^[21]对库布齐沙漠边缘铺设不同规格的 PLA 沙障和麦草沙障的研究结果相似,其研究表明不同规格的沙障与裸沙丘相比均能减少输沙量,具有一定的固沙效果。同时,本研究中 0.5 m×0.5 m PLA 沙障在 0—7 cm 高度下的输沙量低于 CK 并且远低于其他规格沙障,这是由于 PLA 沙障障体内注入地表积沙,形态相对固定、不透风,在携沙气流经过沙障障体时被阻拦在障体外侧,使低于沙障障体的大部分沙粒沉降下来。

沙障障格内细沙含量随高度升高分别增加了 3.76%~17.74%,中沙含量则分别减少了 2.06%~22.38%($p<0.05$)。该研究与石涛等^[22]对库布齐沙漠布设沙障的研究结果相似,其研究表明,铺设沙障后,中

沙含量随着高度增加而逐渐降低,细沙和极细沙含量随高度增加均呈现递增趋势。这是由于铺设沙障降低了近地表的风速,减弱了风沙流的携沙能力,进而导致风沙流中颗粒较粗的中沙由于风速降低导致气流向上的托力不足以携带沙粒,而无法输送到更高的位置,细沙在跃移过程中能量消耗较低,可以跃移到更高的气流层中,使得输沙量垂直分布发生较大改变。

4 结论

(1) 铺设沙障后,风速在各高度处均小于 CK,风速廓线呈“S”型分布;不同规格的 PLA 沙障能增大地表粗糙度;沙障的防风效能随着高度和规格的增加而降低,50 cm 高度后,防风效能迅速衰减。

(2) 障格内输沙量均较 CK 低,2 m×2 m PLA 沙障的输沙量最低,为 CK 的 24.31%;PLA 沙障输沙量函数拟合结果为指数函数拟合效果最好, R^2 高于其他函数,为 0.96。

(3) 铺设沙障后,3 m×3 m,1 m×1 m 和 0.5 m×0.5 m 规格内中沙含量随着高度增加呈先减小后增加的趋势,细沙、极细沙和粉粒含量则呈相反趋势。

参考文献:

[1] 闵庆文,刘寿东,杨霞.内蒙古典型草原生态系统服务功能价值评估研究[J].草地学报,2004,12(3):165-169,175.

[2] 白永飞,黄建辉,郑淑霞,等.草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制[J].植物生态学报,2014,38(2):93-102.

[3] 张存厚,王明玖,乌兰巴特尔,等.内蒙古典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[J].西北植物学报,2012,32(6):1229-1237.

[4] 刘军会,高吉喜,马苏,等.内蒙古生态环境敏感性综合评价[J].中国环境科学,2015,35(2):591-598.

[5] 袁立敏,黄海广,闫德仁,等.不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J].农业工程学报,2019,35(16):172-179.

[6] 居炎飞,邱明喜,朱纪康,等.我国固沙材料研究进展与应用前景[J].干旱区资源与环境,2019,33(10):138-144.

[7] 张登山,吴汪洋,田丽慧,等.青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J].地理科学,2014,34(5):627-634.

[8] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站 60 年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.

[9] 张克存,屈建军,董治宝,等.格状沙障内风速波动特征初步研究[J].干旱区研究,2006,23(1):93-97.

[10] 党晓宏,高永,虞毅,等.新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益[J].北京林业大学学报,2015,37(3):118-125.

[11] 党晓宏,虞毅,高永,等.PLA 沙障对沙丘土壤粒径的影响分析[J].水土保持研究,2014,21(3):16-19,24.

[12] 袁立敏,高永.PLA 沙障防风效益研究[J].内蒙古林业科技,2010,36(3):14-18,39.

[13] 李锦荣,孙保平,高永,等.基于空气动力学的沙袋沙障气流场模拟[J].北京理工大学学报,2010,30(6):749-752.

[14] 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.

[15] 张克存,屈建军,俎瑞平,等.不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J].干旱区地理,2004,27(3):352-355.

[16] 丁延龙,高永,汪季,等.生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J].中国沙漠,2018,38(2):262-269.

[17] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J].中国沙漠,2014,34(5):1200-1207.

[18] 苏日古嘎,通嘎拉,刘素军.西乌珠穆沁草原灌丛化群落对土壤粒径的响应研究[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2020,49(4):320-326,332.

[19] 杨世荣,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠生态光伏电站不同覆盖类型下土壤粒度特征[J].水土保持研究,2020,27(1):112-118.

[20] 党晓宏,高永,虞毅,等.可降解纤维沙障控制风蚀沙埋的作用规律[J].科技通报,2015,31(5):41-46,52.

[21] 王雨浩.麦草、PLA 及其混合沙障防风固沙效益研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2019.

[22] 石涛,蒙仲举,崔向新,等.库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障的防风固沙效益[J].水土保持通报,2020,40(5):166-171.