

布袋沙障对流动沙丘地表风沙和土壤湿度的影响

袁立敏^{1,2}, 高永¹, 张文军², 党晓宏¹, 胡小龙², 纳钦³

1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018
2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010
3. 内蒙古自治区农牧业科学研究院, 呼和浩特 010031

摘要 为了解布袋沙障对风沙流和土壤湿度的影响, 通过测定风速和采集地表0~30 cm输沙, 同时对地下0~40 cm土壤含水率进行测试, 分别研究1 m×1 m、2 m×2 m、3 m×3 m规格布袋沙障防风效能、粗糙度、输沙量和土壤湿度差异。结果表明, 布袋沙障能够有效提高0~30 cm高度范围的防风效能, 增加地表粗糙度, 显著降低0~30 cm地表输沙量和改变风沙流结构。3种布袋沙障的防风效能顺序为1 m×1 m>2 m×2 m>3 m×3 m, 1 m×1 m与其他两种规格布袋沙障的防风效能差异显著($P<0.05$), 2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障的防风效能间无显著差异; 粗糙度顺序为1 m×1 m>2 m×2 m>3 m×3 m>对照, 1 m×1 m、2 m×2 m和3 m×3 m规格沙障粗糙度分别比对照高91.31%、78.88%和76.26%, 差异极显著($p<0.001$); 0~30 cm输沙量顺序为对照>3 m×3 m>2 m×2 m>1 m×1 m, 对照的0~30 cm输沙量达到了71.43 g/(min·cm²), 是布袋沙障的32.98倍, 3种规格布袋沙障与对照沙丘2~10 cm和0~1 cm两层沙量的比值 λ 均大于1, 说明在监测期内地表均处于风蚀状态。土壤含水率顺序为对照>3 m×3 m>2 m×2 m>1 m×1 m, 在0~20 cm土层此变化趋势明显, 对照的土壤含水率分别比3 m×3 m、2 m×2 m、1 m×1 m规格沙障样地的土壤含水率高55.15%、58.63%和67.45%。

关键词 库布齐沙漠; 布袋沙障; 防风效能; 地表粗糙度; 输沙量; 土壤含水率

中图分类号 S157.1, S288 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.011

Effect of Hop-pocket Sand Barrier on the Wind and Sand Flow and Soil Moisture of Mobile Dune

YUAN Limin^{1,2}, GAO Yong¹, ZHANG Wenjun², DANG Xiaohong¹, HU Xiaolong², NA Qin³

1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China
2. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, China
3. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010031, China

Abstract To understand the influence of hop-pocket sand barrier on wind and sand flow and soil moisture, the wind-break potency, surface roughness, parameters of sediment transport rates and soil moisture of 1 m×1 m, 2 m×2 m, 3 m×3 m square hop-pocket sand barrier were studied through anemometry, sand collection of ground 30 cm and soil moisture of underground 0~40 cm on sand dune. The results showed that hop-pocket sand barrier can improve the wind-break potency of 0~30 cm height range effectively, increasing the sand dune surface roughness, reducing the sediment discharge of 0~30 cm height range significantly. The order of wind-break potency of hop-pocket sand barrier was 1 m×1 m>2 m×2 m>3 m×3 m. The difference of 1 m×1 m was significant compared to 2 m×2 m and 3 m×3 m, and there was no significant difference between 2 m×2 m and 3 m×3 m. The order of surface roughness was 1 m×1 m>2 m×2 m>3 m×3 m>CK; the roughness of 1 m×1 m, 2 m×2 m and 3 m×3 m were increased by 91.31%, 78.88% and 76.26%

收稿日期: 2013-09-26; 修回日期: 2013-12-23

基金项目: 国家林业局“948”引进项目(2012-4-72)

作者简介: 袁立敏, 博士研究生, 研究方向为荒漠土壤资源利用与保护, 电子信箱: yuan_limmin@163.com; 高永(通信作者), 教授, 研究方向为荒漠化防治, 电子信箱: 13948815709@163.com

引用格式: 袁立敏, 高永, 张文军, 等. 布袋沙障对流动沙丘地表风沙和土壤湿度的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 71-76.

higher than the control and the differences were significant ($P < 0.001$). 0–30 cm sediment discharge of the control reached $71.43 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$, and it was 32.98 times more than hop-pocket sand barrier. λ eigenvalues was the sediment discharge ratio of 2–10 cm and 0–1 cm of hop-pocket sand barrier and the control, and $\lambda > 1$, deducing that their surfaces were wind eroded during the monitoring period. The order of soil moisture was $\text{CK} > 3 \text{ m} \times 3 \text{ m} > 2 \text{ m} \times 2 \text{ m} > 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, the trend of 0–20 cm layer was obvious, and soil moisture of the control was increased by 55.10%, 58.63% and 67.45% higher than $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ and $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ hop-pocket sand barrier.

Keywords Kubuqi Desert; hop-pocket sand barrier; wind-break potency; surface roughness; sediment discharge; soil moisture

中国土地荒漠化整体得到初步遏制,荒漠化土地面积持续减少,但局部地区仍有扩展,荒漠化土地治理任务依然不容忽视。第4次全国荒漠化和沙化监测结果显示^[1],截至2009年底,全国荒漠化土地面积262.37万 km^2 ,沙化土地面积173.11万 km^2 ,分别占国土总面积的27.33%和18.03%;流动沙丘(地)40.61万 km^2 ,占全国沙化土地面积的23.46%。与2004年相比,荒漠化土地面积净减少12454 km^2 ,年均减少2491 km^2 ;沙化土地面积净减少8587 km^2 ,年均减少1717 km^2 ,绝大部分省(自治区、直辖市)荒漠化土地面积有不同程度的减少。由于荒漠化地区自然环境恶劣,干旱、风沙盛行、土壤贫瘠、植被种类稀少且覆盖度较小,造成区域植被修复及治理任务难度较大。

机械沙障在荒漠化治理工作中占有重要位置,特别是在流沙强烈、植被措施无法单一实施的流动沙地,机械沙障已成为一种非常实用、有效的治沙措施。沙袋沙障是近年来较为常见的一种机械沙障,也是一种较为实用的“以沙治沙”措施,其施工工序简单、材料便宜且易获取,可以形成立式、平铺式沙袋沙障,能够有效阻挡风沙,削弱地表风蚀,减少沙粒移动,快速促进沙丘形态稳定。相关研究认为,不同类型沙障防护原理不同^[2-9],即使同种材料、同种类型沙障,不同的设置规格^[10-13],其产生的防护效果也有很大差异。本研究设计的布袋沙障是沙袋沙障的一种。目前,对布袋沙障防风固沙效益等方面的研究很少^[9,14,15]。为此,本研究从布袋沙障对风、风沙流及土壤含水率的影响角度出发,比较研究3种尺寸方格布袋沙障防风效能、粗糙度、输沙参数及土壤含水率差异,旨在为这种沙袋沙障在流沙治理的应用提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于库布齐沙漠东北缘,黄河以南的二级阶地,即达拉特旗白土梁林场解放滩作业区,地理位置为北纬 $40^\circ 21' 30'' \sim 40^\circ 22' 30''$,东经 $109^\circ 50' 30'' \sim 109^\circ 51' 50''$ 。属中温带大陆性季风气候,年平均降水量240–360 mm,年平均蒸发量2160 mm,极端最高气温 40.2°C ,极端最低气温 -34.5°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 年平均积温为3197.4 $^\circ\text{C}$,无霜期为130–140 d,8级以上大风日数27 d,扬沙日数58 d,一般出现在3–5月,年平均风速3.3 m/s,最大瞬时风速可达30 m/s。该区分布大量的流动沙丘和半固定沙丘,沙生植被主要有北沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)、油蒿(*Artemisia ordosica* L.)、柠条(*Car-*

gana korshinskii Kom.)、虫实(*Corispermum hyssopifolium* L.)、沙米(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.)、沙竹(*Psammo-chloa villosa* (Trin.) Bor.)及猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)等。土壤以栗钙土、灰漠土、风沙土为主。

2 研究方法

2.1 布袋材料及沙障设置

布袋沙障外层材料为纤维70%、棉30%的普通布料,白色,在沙丘上至少能够持续4~5年不腐烂。将布料加工为长6 m、截面直径6 cm的布袋,一端系死结,另一端开口。布袋材料弹性较差,灌装沙土后沙袋横截面直径基本不变。

2011年4月在鄂尔多斯市达拉特旗境内的解柴公路南侧,选择坡度、坡向相近的3个裸沙丘进行布袋沙障铺设,沙丘坡向为西北向,坡度 $5^\circ \sim 7^\circ$,具体设置为:采用自制工具沙铲(一端为铲,后面焊接70 cm不锈钢管,外径5 cm)灌沙,首先将一根布袋全部套在沙铲的不锈钢管上(套布袋的最大长度为6 m),沙铲铲沙后倾斜经不锈钢管进入布袋内,松开部分套在管上的布袋,继续铲沙灌入,直到装满整根布袋,打死结后,沿沙面上已经布设的工程线进行摆放(图1)。分别在3个沙丘的迎风面中部布设 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 和 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 方格布袋沙障,按照规格尺寸要求,一根布袋灌装完毕后可与新布袋一端打死结,继续灌沙,直到完成设计尺寸,剩余布袋可以剪下。 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 和 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 方格布袋沙障的布设面积分别为 $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 、 $34 \text{ m} \times 28 \text{ m}$ 、 $36 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。选择一个坡度坡向、形态及大小相似的裸沙丘为对照。

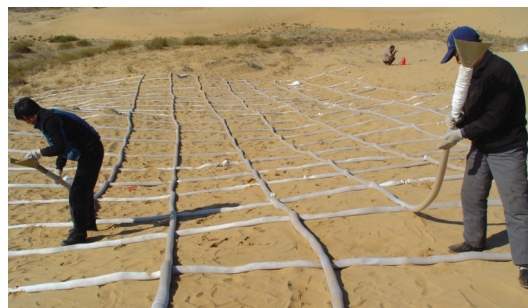


图1 布袋沙障设置现场

Fig. 1 Scene of laying hop-pocket sand barrier

2.2 成效调查

布袋沙障布设完毕后于当年9月19–22日进行风速风向、输沙采集与土壤含水率测试供试土取样,具体采集与测

试方法如下。

1) 风速测定。选择大风天气,在 1 m×1 m、2 m×2 m 和 3 m×3 m 规格布袋沙障样地内架设 HOBO 风速仪,在沙障方格内中心点设置风杯架,风杯的设置高度分别为 10、30、50、100 和 200 cm,并在对照沙丘迎风坡的对应位置架设 HOBO 风速仪,同时进行风速测定,风速仪记录数据时间间隔为 2 s,测定时间段为 30 min,重复 3 次。

2) 防风效能计算。防风效能采用式(1)^[6]计算:

$$E_h = (V_{h1} - V_{h2}) / V_{h1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, E_h 代表沙障样地内高度为 h 处防风效能,%; V_{h1} 代表对照沙丘高度为 h 处平均风速,m/s; V_{h2} 代表沙障样地内高度为 h 处平均风速,m/s。

3) 粗糙度计算。通过式(2)^[7]确定粗糙度 Z_0 :

$$\lg Z_0 = (\lg z_2 - A \lg z_1) / (1 - A) \quad (2)$$

式中, Z_0 为地表平均粗糙度,cm; z_1, z_2 为距离地表高度,cm; u_1 为高度 z_1 处风速,m/s; u_2 为高度 z_2 处风速,m/s;其中, $A = u_2 / u_1$ 。

4) 输沙采集与输沙参数。采用阶梯式集沙仪,测定高度为 30 cm,共 15 层,集沙口宽 2 cm,方形。设置集沙仪进沙口对准来风方向,底部与沙面平齐。同时,在对照沙丘进行同步观测,并选择附近位置(无干扰处)架设 HOBO 风速仪,记录 2 m 高处风速,记录时间与集沙仪采沙时间相同。测定时间段为 10 min,重复 3 次。观测结束后,分别对每层采集的沙粒进行称重,2~10 cm 和 0~1 cm 两层沙量的比值用 λ 表示:

$$\lambda = \frac{\sum_{h=2}^{10} m}{\sum_{h=0}^1 m} \quad (3)$$

式中, m 为输沙量,g,文中的输沙量是指 1 min 内通过 1 cm² 面积的沙粒重量; h 为距离地面高度,cm。

另一输沙参数 $\sum_{h=a}^b m$ 指距地面 a cm 与 b cm 高度之间各层输沙量之和,其中 $b > a$;

5) 土壤含水率测试。分别在 1 m×1 m、2 m×2 m、3 m×3 m 布袋沙障铺设区随机选择 3 个方格,在方格内中心位置向下分 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土层进行取样,同时,在对照沙丘迎风坡对应位置进行分层取样。土样分别装入铝盒内,用防水胶布密封后带回实验室,采用烘干法测试(110℃,8 h)。

3 结果与分析

3.1 防风效能研究

防风效能是沙障降低近地表风速强度的直观指标之一,能够快速评判沙障对气流的削弱能力,特别是与没有做处理的裸沙丘之间的比较更为直观。布袋沙障地面裸露高度约 4~5 cm,其对贴近地表的气流影响较大,主要起控制风蚀基准面不变,促使沙丘地表稳定的作用。进行风速测定时,主风向为西北风。防风效能的计算以 200 cm 高度平均风速为 7.99、6.66、5.58 和 4.70 m/s 为准,选取 10、30、50 和 100 cm 高度的风速(图 2)。

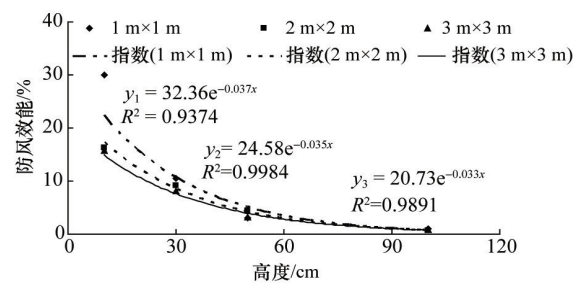


图 2 3 种规格布袋沙障样地不同高度处防风效能
Fig. 2 Wind-break potency of 3 kinds of square hop-pocket sand barrier at different heights

由图 2 可以看出,3 种规格布袋沙障的防风效能服从指数函数变化,均是随着距离地表高度的增加而减小。布袋整体防风效能均值为 8.84%,1 m×1 m 布袋沙障 4 个高度防风效能均值为 11.66%,2 m×2 m 规格布袋沙障的防风效能均值为 7.88%,两者分别比 3 m×3 m 规格沙障的防风效能均值高 40.10% 和 11.34%,3 种规格布袋沙障对防风效能的影响大小顺序为 1 m×1 m > 2 m×2 m > 3 m×3 m。经单因素方差分析,1 m×1 m 规格布袋沙障的防风效能与 2 m×2 m 和 3 m×3 m 的差异显著($F=12.68, P<0.05$),2 m×2 m 和 3 m×3 m 的防风效能之间无显著差异($F=0.58, P=0.60$)。

由图 2 还可以看出,随着高度的增加防风效能呈现逐渐递减的趋势,3 种规格沙障 10、30、50 及 100 cm 4 个高度处的防风效能平均值分别为 20.70%、9.28%、3.88% 和 1.51%。10 cm 和 30 cm 高度处防风效能高于整体平均值,10 cm 高度处的防风效能平均值与其他 3 个高度处的相比差异极显著($F=14.47, P<0.005$),30、50 及 100 cm 高度防风效能之间差异不显著($F=1.63, P=0.27$)。布袋沙障对 10 cm 高度处防风效能的影响最大,这与其本身裸露在沙表面的高度有关,自然状态下横截面直径约 6 cm,放置于松软沙表上裸露高度有所下降,约 4~5 cm,布袋沙障对相对较高的过境气流或风沙流的阻挡作用较弱,这也是选择 200 cm 处风速为基准计算防风效能的原因之一。布袋沙障对 0~30 cm 高度的气流和风沙流强度有较明显的削弱作用,但随着沙障方格尺寸增大,其对近地表的气流和风沙流强度的影响逐渐减小。

3.2 粗糙度比较

粗糙度是表征下垫面的一个重要物理指标,更是衡量防风固沙效益的重要指标之一。本实验以 200 cm 和 10 cm 高处风速值计算得出布袋沙障和对照沙丘地表粗糙度。

由图 3 可以看出,随着沙障规格的增大,地表粗糙度呈现降低趋势,但均显著高于对照。1 m×1 m、2 m×2 m 和 3 m×3 m 规格布袋沙障粗糙度分别比对照高 91.31%、78.88% 和 76.26%,3 者与对照相比差异极显著($F=30.96, P<0.001$)。1 m×1 m 规格沙障粗糙度与 2 m×2 m 和 3 m×3 m 规格沙障粗糙度的差异显著($F=43.44, P<0.005$),而 2 m×2 m 和 3 m×3 m 规格沙障粗糙度之间无显著差异($F=2.21, P=0.28$)。布袋沙障裸露于沙表,使原本光滑的沙表面凹凸不平,地表粗糙程

度增大,并且不同规格方格沙障,不论其是何种材料,经过一定时间、一定强度气流吹蚀后,便会在沙障方格内形成凹曲面,而这种地表结构更加稳定^[18]。本实验布袋沙障经几次大风后,方格内也形成了凹曲面,1 m×1 m规格沙障形成的凹曲面较深,与可降解聚乳酸纤维沙袋沙障的1 m×1 m规格有最大蚀积系数的结论一致^[19]。凹曲面较深,地表凹凸程度加大,粗糙度也增大,对地表气流扰动及阻碍作用增强。

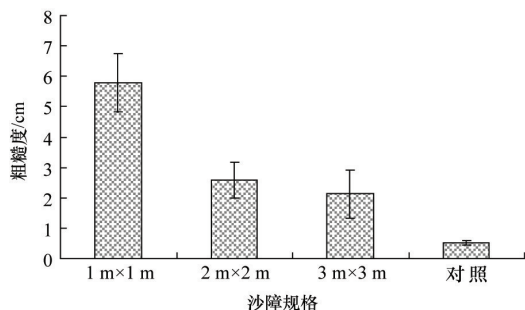


图3 3种规格布袋沙障样地及对照粗糙度

Fig. 3 Roughness of 3 kinds of square hop-pocket sand barrier and the control

3.3 输沙参数研究

当地表受到强度大于起动风速(临界风速)气流时,沙粒会以蠕移、跃移、悬移3种方式运动,大量的风沙颗粒进入运动气流中形成风沙流。风沙流结构是刻画土壤风蚀程度的物理量之一,是气流中的沙粒在搬运层垂直高度内的分布特征,也是不同轨迹的运动沙粒在垂直方向上的宏观表现,对不同地表风沙流特性研究大都从风沙流结构入手。吴正^[20]在相关研究中指出,地上0~30 cm高度内传输绝大部分沙量;朱震达^[21]研究认为地表0~10 cm高度内传输沙量约占整体的90%。本研究在同一时间段内对1 m×1 m、2 m×2 m、3 m×

3 m和对照沙丘样地内0~30 cm高度的沙粒进行采集,采集时2 m高度处的平均风速是7.1 m/s,各层的输沙量及特征值见表1。

由表1可以看出,3种规格沙障0~30 cm输沙量的平均值显著小于对照,对照沙丘0~30 cm输沙量达到71.43 g,是布袋沙障的32.98倍。沙丘布设布袋沙障后,0~30 cm输沙量显著减小,说明其对0~30 cm风沙流的影响相当大,能够阻挡地表沙粒进入气流中,有效减小地表风蚀。对照沙丘0~10 cm输沙量约占0~30 cm输沙量的88.06%,与朱震达的研究结果一致,而布袋沙障0~10 cm输沙量约占0~30 cm输沙量的67.25%。对照沙丘11~30 cm输沙量是布袋沙障输沙量平均值的12.03倍,0~1 cm输沙量是布袋沙障输沙量平均值的44.67倍,此层沙障作用效果最明显。沙丘在布袋沙障的保护下,近地表处气流或风沙流强度明显减小,表层仅有部分沙粒运动,且其对地上较高处风沙流干扰也很小。

吴正等^[20]认为在地层10 cm高度内,1~2 cm层的沙量在各种风速下均保持在20%左右,而0~1 cm和2~10 cm两层中的沙量各占40%左右,并提出特征值 λ 的计算公式,根据 λ 判断风沙流的饱和程度,当 $\lambda < 1$ 时,沙粒呈现堆积状态;当 $\lambda = 1$ 时,地面呈现既无堆积也无吹蚀状态,或者可认为处于蚀积平衡状态;当 $\lambda > 1$ 时,沙粒呈现吹蚀状态^[22]。布袋沙障样地与对照沙丘 λ 特征值均大于1,说明在监测时间段内均处于风蚀状态,布袋样地由于沙障的阻挡,使过境风沙流无法带走地表沙粒,导致其处于不饱和状态,而对照沙丘无任何保护措施,随着风速的增加,风沙流会带走更多的沙粒。从表1还可看出,3种规格布袋沙障输沙量也存在差异,且差异显著($F = 12.06, P < 0.005$),但均表现为随着沙障规格的增大而增大,并且各值均显著小于对照($F = 7.92, P < 0.005$)。

表1 不同类型下垫面输沙量与特征值

Table 1 Eigenvalue and sediment discharge of different kinds of underlying surface

沙障规格	输沙量/g					λ
	0~1 cm	2~10 cm	0~10 cm	11~30 cm	0~30 cm	
1 m×1 m	0.26	0.40	0.73	0.23	0.96	1.52
2 m×2 m	0.57	0.88	1.59	0.72	2.31	1.54
3 m×3 m	0.65	1.24	2.05	1.18	3.23	1.90
平均	0.49	0.84	1.46	0.71	2.17	1.65
对照	22.1	35.28	62.9	8.53	71.43	1.60

3.4 土壤含水率比较

对对照及3种规格布袋沙障样地0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土壤含水率进行测定,结果见图4。

由图4可以看出,1 m×1 m、2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障样地0~40 cm土层平均土壤含水率均小于对照,3者分别比对照低33.12%、33.16%和30.70%。分土层比较,0~10 cm土壤含水率顺序为对照>3 m×3 m>2 m×2 m>1 m×

1 m、3 m×3 m、2 m×2 m和1 m×1 m布袋沙障样地分别比对照低52.85%、53.16%和63.96%,3 m×3 m和2 m×2 m布袋沙障样地间土壤含水率无显著差异,1 m×1 m布袋沙障样地的土壤含水率与其他两种规格布袋沙障样地的土壤含水率差异显著,3种规格沙障样地的土壤含水率与对照差异显著($F = 181.91, P < 0.0001$);10~20 cm土壤含水率与0~10 cm土壤含水率规律一致,3 m×3 m、2 m×2 m和1 m×1 m布袋沙障样地

土壤含水率分别比对照低 56.34%、61.48% 和 69.27%，3 m×3 m 和 2 m×2 m 布袋沙障样地间土壤含水率无显著差异，3 种规格沙障样地的土壤含水率与对照差异显著 ($F=103.43, P<0.0001$)；20~40 cm 土层，3 种规格沙障样地土壤含水率与对照无显著差异 ($F=0.21, P=0.88$)。对照 0~20 cm 土壤含水率显著高于沙障设置区，20~40 cm 土壤含水率与沙障设置区无显著差异。说明布袋沙障对 0~20 cm 土壤含水率产生了较大的影响，随着规格减小，土壤含水率降低。

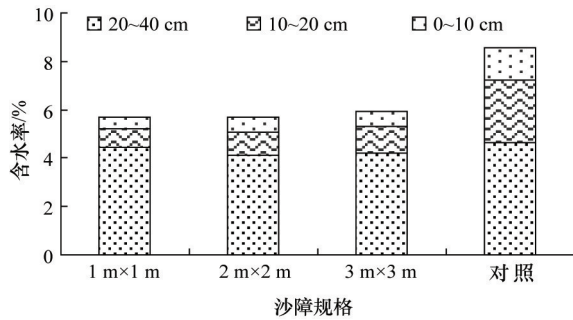


图4 3种规格布袋沙障样地与对照0~40 cm土壤含水率

Fig. 4 0~40 cm soil moisture of 3 kinds of square hop-pocket sand barrier and the control

4 讨论

布袋沙障对过境气流或风沙流产生了一定的影响，使防风效能、粗糙度增大，输沙量降低。沙障放置于沙表上裸露高度仅为4~5 cm，对较高的过境气流或风沙流的阻挡相对较弱，对近地（地上0~30 cm）气流和风沙流强度有较明显的削弱作用。气流经过沙障上方时，在接近沙障的低空区域，湍流、乱流等形式得到更为充分的发展，这也是地表重塑形成凹曲面的原因之一。凹曲面形成后，沙障方格内部已处于平衡状态^[18]，此时地表的粗糙程度最大，对风的阻挡能力也达到最强，风沙流中携带的沙粒受到沙障等阻碍作用，动能损失后落入沙障方格内，但此时又受到增强的湍流、乱流及坠落沙粒的撞击等作用，重新进入气流内，并且95%以上的沙物质集中在20 cm以下的高度进行搬运^[23]。

机械沙障的功能就是固定流沙^[2]，随着沙障规格的变化，其对近地表的气流和风沙流的影响程度也存在差异。高永等^[2]研究沙柳沙障也得出相同结论，规格越小防护效果越好。从1 m×1 m规格沙障开始，随着沙障面积的增大，粗糙度下降很快，到3 m×3 m规格沙障后，粗糙度下降幅度减小。在沙障高度相同的前提下，随着沙障规格的增大，防护效果逐渐减小，当沙障规格大到一定程度后，起不到应有的防护效果。赵明彦等^[24]对浑善达克沙地高速公路沙袋沙障综合防护效益进行分析，也得出相似结论。3种规格的布袋沙障相比，规格越小，单位面积内沙障密度越大，即单位面积内沙障出现的次数增多，对近地表气流或风沙流能够产生连续的阻碍作用，最终达到有风过而不起沙的效果。

布袋沙障对防护区内土壤含水率产生了一定的影响，特

别是对0~20 cm层土壤含水率产生的影响较大。与对照沙丘迎风坡土壤含水率相比，铺设布袋沙障沙丘含水率较低，而有学者研究黄柳活沙障认为，沙障设置后，土壤含水率与对照相比明显增大^[25]。结合防风效能、粗糙度等指标结果分析认为，布袋沙障的设置对过境气流或风沙流产生了一定的扰动作用，增大了防风效能和粗糙度，沙障方格内形成了凹曲面，地表结构达到稳定状态。同时地表受到紊流、乱流的作用，使地表土壤水分加速散失，造成土壤含水率较低。在对照沙丘迎风面，没有任何防护措施，地表土壤风蚀严重，表层干沙散失，裸露了下层湿沙，是导致对照土壤含水率高于沙障布设区的主要原因，但研究认为这种结果是季节性的^[26]，特别是在风季此规律明显。本文对土壤含水率的研究仅仅是动态监测的一部分，要了解 and 掌握土壤水分的季节性动态变化，需要进行长期监测和进一步研究。

5 结论

布袋沙障能够有效控制沙丘地表流沙，但是对过境风沙的拦截较弱。通过风速测试、输沙采集及土壤含水率的测定发现，1 m×1 m、2 m×2 m 和 3 m×3 m 规格布袋沙障的防风效能、粗糙度、输沙量及土壤含水率与对照沙丘相比均有一定差异。对3种规格布袋沙障的防风固沙能力与土壤含水率对比分析，得到如下结论

1) 布袋沙障能够有效影响地表1 m高度以内的风速，防风效能与对照沙丘相比降低了8.84%，在30 cm高度内防风效能降低程度较大。3种规格布袋沙障对防风效能的影响大小顺序为1 m×1 m > 2 m×2 m > 3 m×3 m，其中1 m×1 m规格布袋沙障防风效能与2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障防风效能的差异显著，2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障防风效能间无显著差异。

2) 布袋沙障粗糙度平均值达到3.43 cm，是对照的6.82倍。1 m×1 m、2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障粗糙度分别比对照高91.31%、78.88%和76.26%，1 m×1 m规格沙障粗糙度与2 m×2 m和3 m×3 m规格沙障粗糙度的差异显著，而2 m×2 m和3 m×3 m规格沙障粗糙度间无显著差异。

3) 布袋沙障大大降低了0~30 cm的输沙量，仅为2.17 g/(min·cm²)，而对照的输沙量达到71.43 g/(min·cm²)，是布袋沙障的32.91倍。1 m×1 m规格布袋沙障对0~30 cm输沙量的影响程度最大，2 m×2 m次之，3 m×3 m最小 ($P<0.01$)，随着规格的增大，输沙量也增大。布袋沙障样地与对照沙丘λ特征值均大于1，说明在监测时间段内均处于风蚀状态，如果无沙障防护，还将会有大量沙粒进入空气中。

4) 1 m×1 m、2 m×2 m和3 m×3 m规格布袋沙障样地0~40 cm层平均土壤含水率均小于对照，3者分别比对照低33.12%、33.16%和30.70%。随着布袋沙障规格的减小，土壤含水率降低，此规律在0~20 cm土层明显，在20~40 cm土层3种规格沙障间无显著差异。说明布袋沙障对0~20 cm层土壤含水率产生了较大的影响，对深层土壤的含水率无影响。

参考文献 (References)

- [1] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[EB]. [2013-12-26]. <http://www.forestry.gov.cn/uploadfile/main/2011-1/file/2011-1-5-59315b03-587b4d7793d5d9c3aae7ca86.pdf>.
State Forestry Administration. Chinese Bulletin desertification and desert conditions[EB]. [2013-12-26]. <http://www.forestry.gov.cn/uploadfile/main/2011/oL1/file/2011-1-5-59315b03587b4d7793d5d9c3-aae7ca86.pdf>.
- [2] 高永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 365-370.
Gao Yong, Qiu Guoyu, Ding Guodong, et al. Effect of salix psammophila checkerboard on reducing wind and stabilizing sand[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 365-370.
- [3] 韩志文, 刘贤万, 姚正义, 等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立式方格沙障防风机理风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 1982, 2(1): 13-20.
Han Zhiwen, Liu Xianwan, Yao Zhengyi, et al. Wind tunnel test on sand-preventing mechanism of double-filmed sand-bag obstacle and upright Checkerboard Sand-barrier[J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(1): 13-20.
- [4] Caput C, Belot Y, Guyot G, et al. Transport of a diffusing material over a thin wind break[J]. Atmospheric Environment, 1973, 7(1): 75-86.
- [5] 董治宝, Fryrear D W, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 260-263.
Dong Zhibao, Fryrear D W, Gao Shangyu. Modeling the roughness effect of blown-sand-controlling standing vegetation in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(3): 260-263.
- [6] 董智, 李红丽, 汪季, 等. 土工格栅沙障防风积沙效应风洞模拟实验[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 35-39.
Dong Zhi, Li Hongli, Wang Ji, et al. Wind tunnel test on effect of controlling wind and deposited sand of geogrid sand-barrier[J]. Chinese Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 35-39.
- [7] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 276-280.
Qu Jianjun, Liu Xianwan, Lei Jiaqiang, et al. Simulation experiments on sand arresting effect of nylon net fence in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 276-280.
- [8] 刘虎俊, 王继和, 李毅, 等. 塑料网方格沙障对新月形沙丘迎风坡的风沙流影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 26-29.
Liu Hujun, Wang Jihe, Li Yi, et al. Effects of plastic checkerboard sand-barrier on wind-sand flux of leeward of crescentic dune[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 26-29.
- [9] 袁立敏, 高永, 虞毅, 等. PLA沙障对土壤硬度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(3): 172-177.
Yuan Limin, Gao Yong, Yu Yi, et al. Research on the effect of PLA sand barrier on soil hardness[J]. Chinese Soil and Water Conservation, 2010, 8(3): 172-177.
- [10] 王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229-232.
Wang Zhenting, Zheng Xiaojing. A simple model for calculating measurements of straw checkerboard barriers[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 229-232.
- [11] 龚福华, 何兴东, 彭小玉, 等. 塔里木沙漠公路不同固沙体系的性能和成本比较[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 45-49.
Gong Fuhua, He Xingdong, Peng Xiaoyu, et al. Comparison of the performance and cost of different sand stabilization systems along the Tarim Desert highway[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 45-49.
- [12] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 455-457.
Chang Zhaofeng, Zhong Shengnian, Han Fugui, et al. Research of the suitable row spacing on clay barriers and straw barriers[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 455-457.
- [13] 万玲玲, 董智, 李红丽, 等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠沙丘粒度分布的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 165-170.
Wan Lingling, Dong Zhi, Li Hongli, et al. Effects of *Salix psammophila* checkerboard sand barrier on the distribution and characteristics of sand particle size in Kubuqi Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 165-170.
- [14] 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.
Li Jinrong, Sun Baoping, Gao Yong, et al. Simulation of sand-bag barrier wind flow field based on aerodynamics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 749-752.
- [15] 周丹丹. 生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
Zhou Dandan. The research on biodegradable polylactic acid (PLA) material in the desert control [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [16] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 17-20.
Zhu Chaoyun, Ding Guodong, Yang Mingyuan. Sand physics[M]. Beijing: China Forestry Press, 1991: 17-20.
- [17] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 147-220.
Liu Xianwan. Experimental blown sand physics and drift sand control engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995: 147-220.
- [18] 屈建军, 凌裕泉, 俎瑞平, 等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 330-335.
Qu Jianjun, Ling Yuquan, Zu Ruiping, et al. Study on comprehensive sand-protecting efficiency of semi-buried checkerboard sand-barriers [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 330-335.
- [19] 袁立敏. PLA沙障对土壤物理性质影响及其防护效益研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
Yuan Limin. Study on effects of soil physical properties and protection benefits by PLA sand barrier[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [20] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 81-89.
Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1987: 81-89.
- [21] 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 22-27.
Zheng Xiaojing. On mechanism of wind-blown sand movement[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 22-27.
- [22] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 47-52.
Sun Baoping. Desertification control engineering[M]. Beijing: China Forestry Press, 2000: 47-52.
- [23] 王训明, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 120-127.
Wang Xunming, Chen Guangting, Han Zhiwen, et al. The benefit of the prevention system along the desert highway in Tarim basin[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(2): 120-127.
- [24] 赵名彦, 丁国栋, 罗俊宝, 等. 浑善达克沙地高速公路沙袋沙障的综合防护效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 105-109.
Zhao Mingyan, Ding Guodong, Luo Junbao, et al. Study on comprehensive protecting efficiency of sand-bag obstacle of highway in Otindag Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(7): 105-109.
- [25] 诺民达来. 不同规格黄柳活沙障防风固沙效益研究—以多伦县为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
Nuomindalai. Study on the effects of wind-breaking and sand-fixation of different sizes of living salix gordejewii barrier: For example Duolun county[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [26] 展秀丽, 严平, 王宁, 等. 青海湖防沙工程措施区土壤水分及入渗特征初步研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 33-36.
Zhan Xiuli, Yan Ping, Wang Ning, et al. Preliminary study on soil water and permeability characteristics of desertification combating areas exerted by engineering measures around Qinghai lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 33-36.

(责任编辑 王媛媛)