

# 和田—若羌铁路戈壁盐碱区高立式“Z”字形沙障配置的风洞试验

王伟<sup>1</sup>, 宋彦宏<sup>2,3</sup>

(1.新疆和若铁路有限责任公司, 新疆 巴音郭楞 841900;

2 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3 西部灾害与环境力学重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 探究多排“Z”字形沙障的合理配置模式, 为和田—若羌铁路沿线戈壁盐碱区的风沙防护提供科学参考。[方法] 在风洞中模拟当地的风沙环境, 对孔隙率为40%的多排“Z”字形高立式沙障的防沙效果进行试验。[结果] 多排沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时, 沙障后积沙出现分离现象; 沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时, 沙障后积沙出现聚集现象。防沙效率随着风速增加都有所下降, 当风速为12 m/s(7级风)时, 设置两道高立式沙障和三道高立式沙障的防沙效率分别为74.0%和100%, 当风速增加至15 m/s(9级风)时, 设置两道高立式沙障和三道高立式沙障的防沙效率分别为72.7%, 88.9%。[结论] 鉴于该研究区风沙条件, 建议采用三道沙障, 沙障的迎风面与风向尽量呈钝角布置。

**关键词:** 高立式“Z”字形沙障; 布置方式; 防沙效益; 风洞试验; 和田—若羌铁路

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0050-07

中图分类号: X169

**文献参数:** 王伟, 宋彦宏. 和田—若羌铁路戈壁盐碱区高立式“Z”字形沙障配置的风洞试验[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 50-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.006; Wang Wei, Song Yanhong. Wind tunnel experimental study on actual setup of upright Z-shaped sand barriers in gobi saline zone along Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 50-56.

## Wind Tunnel Experimental Study on Actual Setup of Upright Z-Shaped Sand Barriers in Gobi Saline Zone Along Hetian-Ruoqiang Railway

Wang Wei<sup>1</sup>, Song Yanhong<sup>2,3</sup>

(1.Xinjiang Heruo Railway Co. Ltd., Bayingol, Xinjiang 841900, China;

2.College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3.Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The reasonable configuration pattern of multi-row Z-shaped sand barriers was studied in order to provide a reference for wind and sand protection in the gobi saline-alkaline area along the Hetian-Ruoqiang Railway (HRR). [Methods] Experiments were carried out in a wind tunnel to simulate the local blown-sand environment and to test the sand-control effect of multiple rows of Z-shaped upright sand barriers with a porosity of 40%. [Results] Sand accumulation behind the folded corner of the sand barrier was separated when the angle between the face of sand barrier and the wind direction was an obtuse angle. Sand accumulation behind the folded corner of the sand barrier was aggregated when the angle between the face of the sand barrier and the wind direction was an acute angle. The sand prevention efficiency of two and three high vertical sand barriers decreased with increasing wind speed. When the wind speed was 12 m/s (level 7 wind), the sand prevention efficiency of two and three high vertical sand barriers were 74.0% and 100% respectively. When the wind speed increased to 15 m/s (level 9 wind), the respective sand prevention values were 72.7% and 88.9%. [Conclusion] It is recommended that three sand barriers should be used, with the

收稿日期: 2023-12-08

修回日期: 2024-01-31

资助项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目“和若铁路防沙综合技术研究”(N2022G068); 中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司科技研发计划“植物防沙体系配置防护效益评价与模式优化试验研究”(WLMQ-KGHZGS-HRTLGGGB-2020-0031)

第一作者: 王伟(1969—), 男(汉族), 四川省乐山市人, 学士, 高级工程师, 主要从事铁路风沙防治与工程造价方面的工作。Email: 992272432@qq.com。

通信作者: 宋彦宏(1993—), 男(汉族), 甘肃省渭源县人, 硕士, 博士研究生, 研究方向为风沙环境力学。Email: 1039496288@qq.com。

windward side of the barriers positioned at an obtuse angle to the wind direction as far as possible.

**Keywords:** upright Z-shaped sand barrier; arrangement of sand barriers; sand-control effect; wind tunnel experiment; Hetian-Ruoqiang Railway

和田—若羌铁路位于塔克拉玛干沙漠的东南边缘(图 1a),该区域气候干燥,铁路西侧为大面积的戈壁盐碱区,土壤 pH 值超过 8.5,植被很难成活,加之风速大,导致风沙活动频繁<sup>[1-3]</sup>。因此需要设置有效的风沙防护工程来减缓风沙活动对铁路的威胁。关于铁路风沙防护工程最早的系统研究是由前苏联研究者彼得洛夫开展的<sup>[4]</sup>,此后的几十年,国内外研究者不管在理论还是在技术层面的研究都取得了重大突破<sup>[5-9]</sup>。相关研究指出,在缓解风沙威胁的诸多有效措施中,高立式沙障在阻滞流沙方面表现出很大优势<sup>[8-9]</sup>,被广泛应用于沙漠铁路的平面风沙防护体系中<sup>[10-11]</sup>。考虑减轻风沙活动对铁路的威胁,铁路选线一般与风向呈近平行状态<sup>[12-13]</sup>,为节约土地资源,风沙防护措施一般情况下沿着铁路沿线两侧布置。本文研究区的主风向与铁路夹角范围 20°~50°,大规模使用了高立式“Z”字形沙障<sup>[5]</sup>(图 1b)以阻滞铁路外围不同方向(相对于铁路走向)来流风沙对铁路造成威胁。

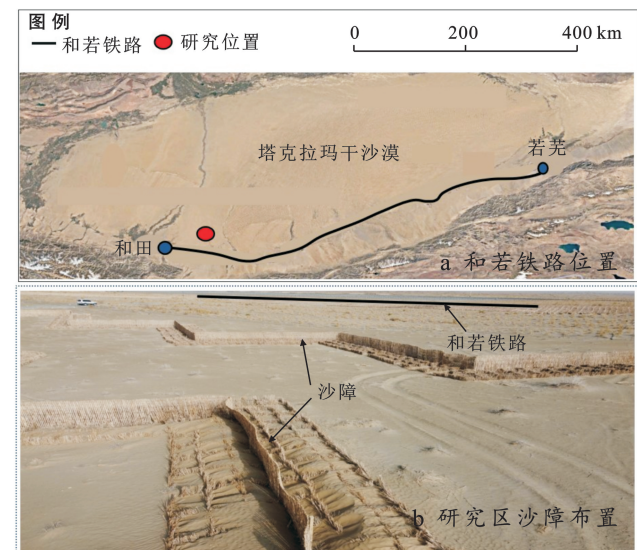


图 1 和田—若羌铁路及其沙障布置

Fig.1 Hetian-Ruoqiang railway and arrangement of sand-fences

关于高立式沙障,大多数研究者常利用数值模拟、风洞试验和野外观测等手段对沙障的风沙防护效果进行了一系列的系统研究<sup>[14-15]</sup>,主要包括沙障的防风效果<sup>[16-18]</sup>、防沙效果<sup>[16-18]</sup>、沙障周围流场结构<sup>[19-20]</sup>以及沙障自身结构(孔隙率、高度)对防护效果的影响<sup>[21-22]</sup>。具体地,对直线型和“Z”字形沙障,目前开展了大量研究<sup>[15,23-26]</sup>,主要集中在单道沙障或双道沙障的设置和防护效率等方面,但对于更多排“Z”字

障的配置,目前还没有可靠的指导准则。如何合理地设置多排沙障在严重风沙环境中的配置,需要综合考虑当地沙源、风速状况以及沙障的自身结构等参数。本文基于和田—若羌铁路沿线的风沙特征<sup>[1-3]</sup>和前人对沙障结构的研究成果,利用风洞试验对“Z”字形沙障不同配置方案的防护效果进行研究,最终给出适合于该区域的多排“Z”字形沙障的配置方案。

## 1 环境条件

为了解该区域风速状况,我们在该区域进行为期半年(2021 年 3—7 月)的野外观测,并根据蒲福(Beaufort)风力等<sup>[27]</sup>级(离地面 10 m 高的风速为 10.8~13.8 m/s 属于 6 级风;风速为 13.9~17.1 m/s 属于 7 级风;风速为 17.2~20.07 m/s 属于 8 级风;风速为 20.8~24.4 m/s 属于 9 级风)对当地进行风速状况分析。统计距地高 10 m 处的风速数据可发现,主风向为西风,最高风速为 21.39 m/s,属于 9 级风,其中 7~9 级风为当地主要的输沙风速。并对 10, 5 和 2 m 高度的平均风速按对数拟合〔公式(2)〕获得风速廓线,摩阻风速  $u_* = 0.223$  m/s,动力粗糙度  $z_0 = 0.003 3$  m,决定系数  $R^2 = 0.99$ 。风洞模拟时,选择 7 级和 9 级风进行研究。

## 2 风洞试验

### 2.1 试验布置

试验采用直流式风洞,风洞试验段尺寸为 1.35 m×1.45 m×20 m,(宽×高×长)。在风洞中模拟风沙运动很难做到完全相似,本文考虑了几何相似和运动相似,并采用 Nemoto 相似准则<sup>[28]</sup>:

$$\frac{u_m}{u_a} = \left( \frac{L_m}{L_a} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $u_m$ ,  $L_m$  分别为研究模型的风速和几何尺寸; $u_a$ ,  $L_a$  为实际模型的所在风速和几何尺寸。

由于该研究区铁路走向与主风向并不垂直或平行,主要呈小夹角分布(20°~50°),加之,该区域风沙活动较强烈,故采用“Z”字形沙障进行防护。根据前人研究成果<sup>[14,23-25]</sup>,30%~50% 孔隙率的高立式沙障具有较好的阻沙效果和较长的使用寿命,并且当孔隙度为 40% 时,联合沙障具有较好阻沙效率<sup>[24]</sup>。因此,本文所研究的“Z”字形高立式沙障的孔隙率选为 40%,高度为 1.5 m。风洞试验布置如图 2 所示,依据 Nemoto 相似准则<sup>[28]</sup>,将沙障和路基等按照 1:15

的缩尺比例在风洞中布置。整个试验器材布置如图 2a, 2b 所示, 风洞入口处布置 3 m 粗糙元, 粗糙元由劈尖和粗糙元方块组成 (图 2c); 粗糙元后布置 3 m 沙床 (图 2d), 厚度 5 cm; 距沙障前 1.5 m 处 ( $-10h$ ,  $h$  为沙障高度) 布置集沙仪用来获得沙障前不同高度  $z$  上的来流输沙通量  $q_z$ , 集沙仪 (图 2e) 高度 60 cm,

集沙口尺寸  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ , 共 30 个集沙口; 沙源后 3 m 为沙障布置区域 (图 2f), 沙障后 3 m 布置铁路路基模型 (图 2g), 高度为 30 cm; 风速廓线仪由 8 根皮托管组成, 用来监测风洞入口风速廓线, 可测量  $0 \sim 10\text{ h}$  ( $0 \sim 60\text{ cm}$ ) 高度上 8 个高度上的风速; 集沙仪的集沙质量由电子天平进行称量。

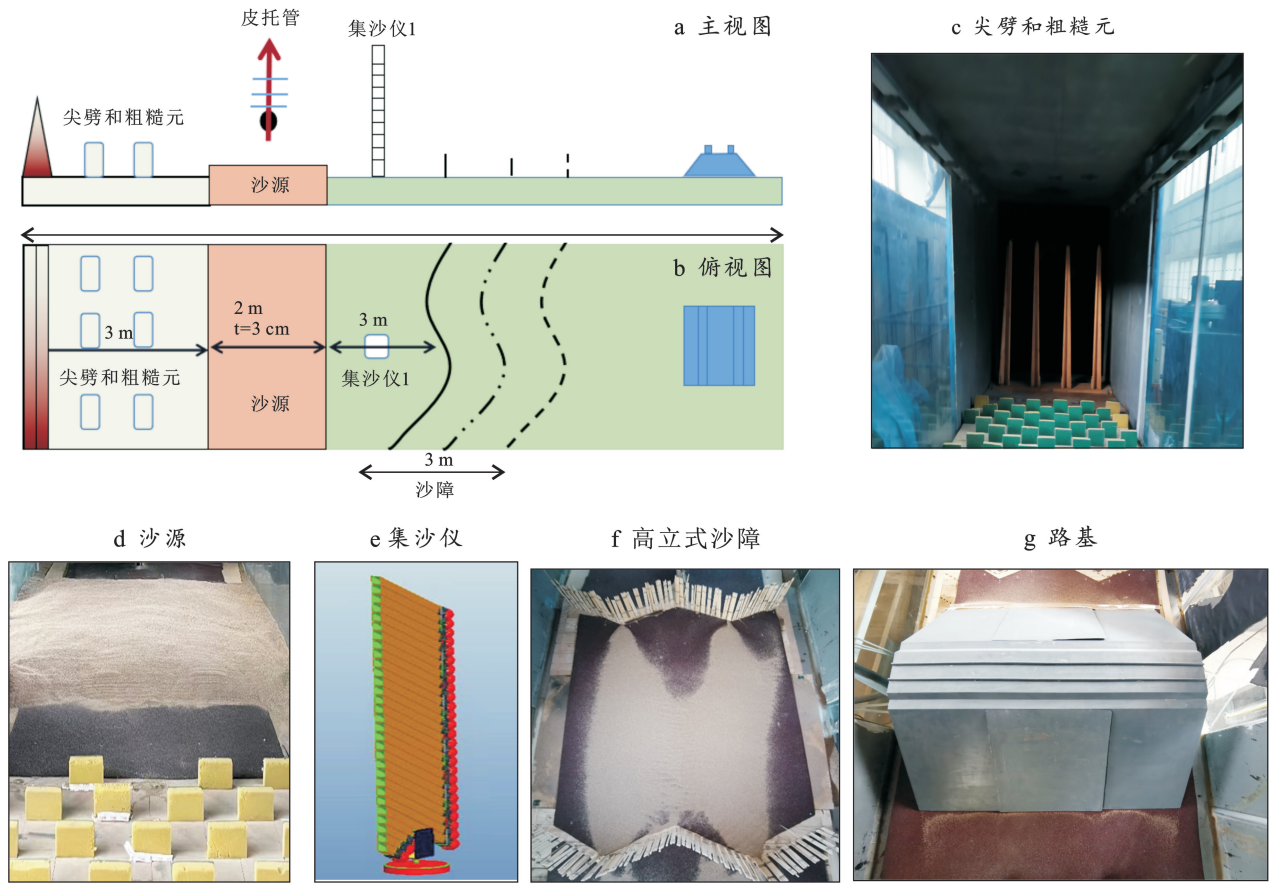


图 2 风洞试验布置图

Fig.2 Wind tunnel experimental arrangement

## 2.2 试验工况

本试验模拟野外现场 7~9 级的风速, 试验开始前, 去除集沙仪和沙源, 利用风速廓线仪进行风洞入口风速调试, 并将其进行对数拟合 [公式 (2)] 获得风速廓线, 当入口风速为 12 和 15 m/s 时, 分别等效为 10 m 高度处的 17.1 和 22.1 m/s 的风速, 相当于风速蒲福风力的 7 级和 9 级风, 因本文采用 12 和 15 m/s 的风洞入口风速进行试验。风速为 15 m/s 时, 入口风速廓线对应的摩阻风速  $u_{*1}$ , 动力学粗糙度  $z_{01}$  和决定系数  $R^2$  分别为 0.768 65 m/s, 0.007 64 cm 和 0.982, 风速为 12 m/s 时, 入口风速廓线对应的摩阻风速  $u_{*2}$ , 动力学粗糙度  $z_{02}$  和决定系数  $R^2$  分别为 0.553 08 m/s, 0.00313 cm 和 0.984。风场测试完毕后, 去掉风速廓线仪, 布置集沙仪和沙源, 进行沙障防沙效果试验。铺设沙床所采用的沙子为沙漠沙, 平

均粒径  $240\text{ }\mu\text{m}$ , 每次试验结束要将沙床作刮平处理。

## 2.3 关键物理量

(1) 风速廓线。对于风速廓线仪测量的风洞入口风速进行对数拟合 [5]:

$$\frac{u_z}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

式中:  $u_z$  为高度  $z$  处的平均风速 (m/s);  $u_*$  摩阻风速 (m/s);  $z$  测量高度 (cm);  $z_0$  动力学粗糙度 (cm);  $K$  为卡门常数 (取 0.41)。

(2) 输沙廓线。对输沙通量进行负指数幂函数拟合 [1]:

$$q_z = a \times \exp(-z/c) + b \quad (3)$$

式中:  $q_z$  为高度  $z$  处的输沙通量 [ $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ];  $z$  为测量高度 (cm);  $a$ — $c$  为拟合参数。

(3) 拦截效率。沙障后的无量纲沉积  $E_s$  用来评



估阻沙沙障的拦截效率,其计算公式为:

$$E_s = \frac{m_i}{Q_0 L t} \quad (4)$$

式中: $m_i$  为监测时间内第  $i$  道高立式沙障后的沙子沉积量(g);  $Q_0$  为距离沙障 10 h(前)的单宽输沙率 [ $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ ],  $Q_0$  由  $q_z$  沿垂向积分获得;  $L$  为沙源展向宽度(cm);  $t$  为测试时间(min),本文取 5 min。

### 3 结果与分析

#### 3.1 三道沙障配置

布置三道高立式沙障,孔隙率均为 40%,间距为 10 h。来流输沙廓线如图 3a 所示,输沙通量  $q_z$  满足负指数规律[公式(3)]。风速为 12 m/s (7 级风)时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 2.10, -0.014, 6.72, 0.97, 单宽输沙率为 13.00  $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ ; 风速为 15 m/s (9 级风)时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 2.54, -0.023, 6.47, 0.88, 单宽

输沙率为 15.00  $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ 。

三道沙障组成的体系的拦截效率  $E_s$  如图 3b 所示。风速为 12 m/s 时,总的  $E_s$  为 100.0%; 风速为 15 m/s 时,总的  $E_s$  为 88.9%,随着风速增加,总拦截效率逐渐降低。风速为 12 m/s 时,第 1 道沙障,第 2 道沙障和第 3 道沙障的拦截效率  $E_s$  分别为 75.56%, 19.4% 和 5.6%,上道和路基后的积沙量分别为 0.002 1% 和 0.070%; 风速为 15 m/s 时,第 1 道沙障,第 2 道沙障和第 3 道沙障的拦截效率  $E_s$  分别为 64.9%, 19.7% 和 4.3%,上道和路基后的积沙量分别为 0.003 1% 和 0.058%。在 12 和 15 m/s 风速下的三道沙障的真实的沙子沉积分布如图 4 所示。积沙位置逐渐沿流向向后移动。沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时,沙障后积沙出现分离现象,如图 4 虚线椭圆区域所示; 沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时,沙障后积沙出现聚集现象,如图 4 实色椭圆区域所示。

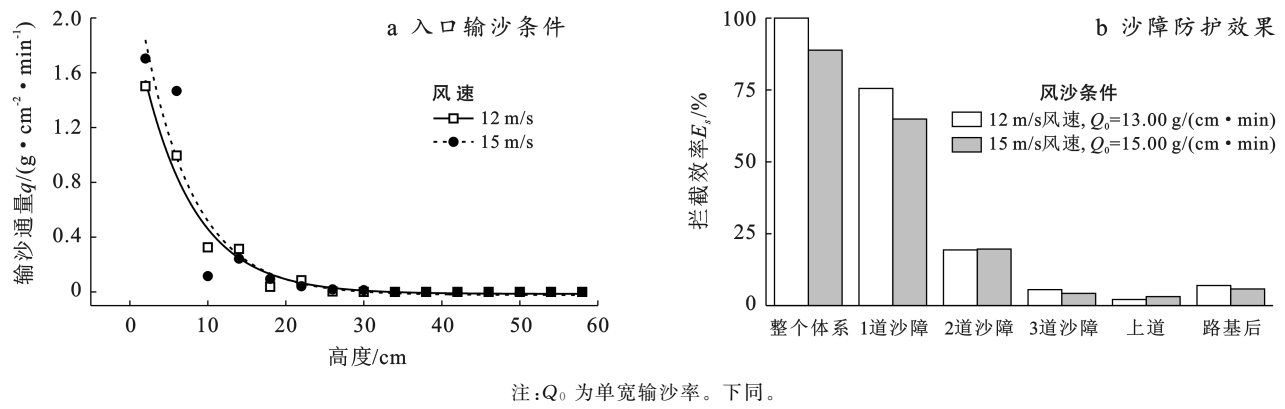


图3 三道沙障的试验条件及防护效果

Fig.3 Experimental sand transport condition and protection effects of 3 sand fences

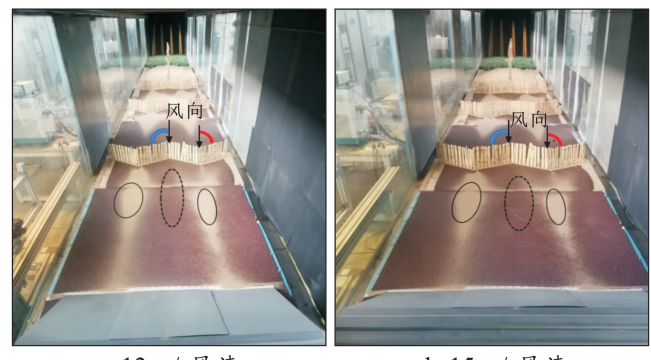


图4 三道沙障的沙子的沉积情况

Fig.4 Deposition of sand under the influence of 3 sand fences

#### 3.2 两道沙障配置

布置两道高立式沙障,孔隙率为 40%,布置间距为 10 h (h 为沙障高度)。来流输沙廓线如图 5 所示,输沙通量  $q_z$  满足负指数规律[公式(3)],风速为 12 m/s (7

级风)时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 3.66, 0.01, 3.09 和 0.99, 单宽输沙率为 11.16  $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ ; 风速为 15 m/s (9 级风)时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 3.33, -0.001 6, 4.37 和 0.97, 单宽输沙率为 13.97  $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ 。两道沙障组成的体系的拦截效率  $E_s$  如图 5 所示。风速为 12 m/s 时,总的  $E_s$  为 74.0%, 风速为 15 m/s 时,总的  $E_s$  为 72.7%, 并随着风速增加,总拦截效率逐渐降低。风速为 12 m/s 时,第 1 道沙障和第 2 道沙障的拦截效率  $E_s$  分别为 55.5% 和 18.6%, 上道和路基后的积沙量分别为 0.0063% 和 0.076%; 风速为 15 m/s 时,第 1 道沙障和第 2 道沙障的拦截效率  $E_s$  分别为 51.1% 和 21.7%, 上道和路基后的积沙量分别为 0.002% 和 0.147%。12 和 15 m/s 风速下的两道沙障的真实的沙子沉积分布如图 6 所示,随着风速增加,积沙位置逐渐沿流向向后移动。沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时,由于气流分散作用,沙障折角后



的积沙出现分离现象,如图 6 虚线椭圆区域所示;沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时,由于气流的聚合

作用,沙障折角后面的积沙出现聚合现象,如图 6 实线椭圆区域所示。

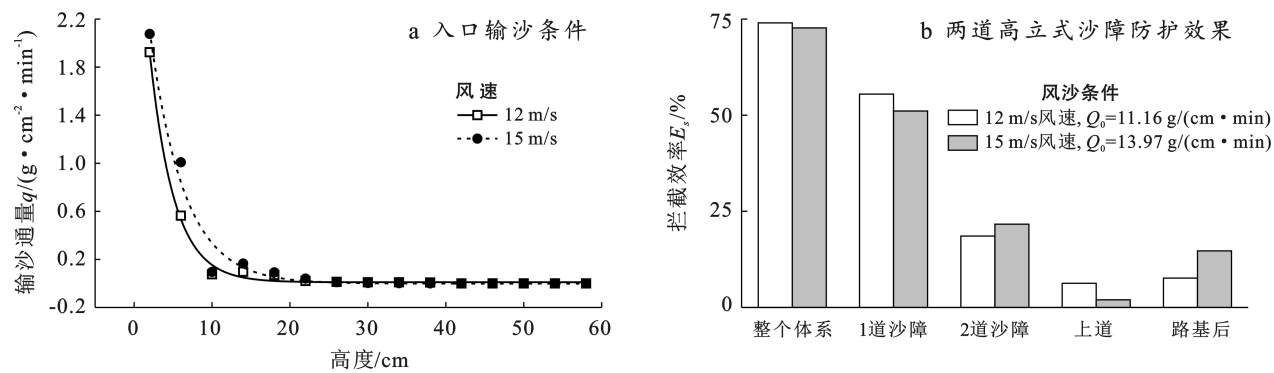


图 5 两道沙障的试验条件及防护效果

Fig.5 Experimental sand transport condition and protection effect of 2 sand fences

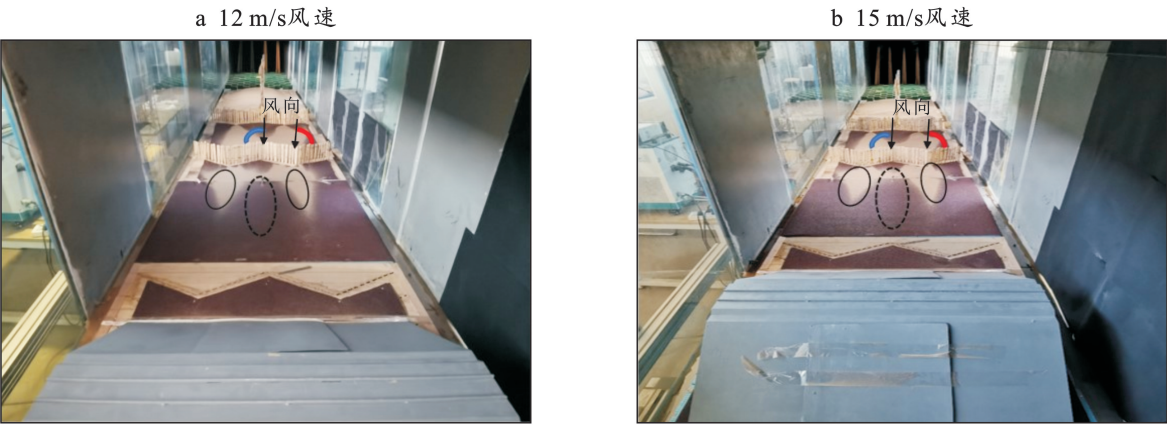


图 6 两道沙障的沙子的沉积情况

Fig.6 Deposition of sand under influence of 2 sand fences

3.3 一道沙障配置

布置一道高立式沙障,孔隙率为 40%。来流输沙廓线如图 7a 所示,输沙通量  $q_s$  满足负指数规律变化,风速为 12 m/s (7 级风) 时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 3.78, 0.023, 2.55, 0.99, 单宽输沙率为 10.10  $g/(cm \cdot min)$ ; 风速为 15 m/s (9 级风) 时,  $a, b, c$  和  $R^2$  分别为 2.91, -0.012, 5.06, 0.99, 单宽输沙率为 13.62  $g/(cm \cdot min)$ 。一道沙障组成的体系的拦截效率  $E_s$  如图 7b 所示, 风速为 12 m/s 时, 总的  $E_s$  为 45.1%, 风速为 15 m/s 时, 总的  $E_s$  为 44.8%, 并随着风速增加, 总拦截效率逐渐降低。风速为 12 m/s 时, 第 1 道沙障拦截效率  $E_s$  分别为 45.1%, 上道和路基后的积沙量分别为 0.002 4% 和 0.144%; 风速为 15 m/s 时, 第 1 道沙障的拦截效率  $E_s$  为 44.8%, 上道和路基后的积沙量分别为 0.002 6% 和 0.102%。

12 m/s 和 15 m/s 风速下的一道沙障的真实的沙子沉积分布如图 8 所示。随着风速增加, 积沙位置逐渐沿流向向后移动, 较多的积沙已到达路基底部。

沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时, 由于气流分散作用, 沙障后积沙出现分离现象, 如图 8 虚线椭圆区域所示; 沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时, 由于气流聚合作用, 沙障后积沙出现聚集现象, 如图 8 实线椭圆区域所示。

对比图 3b, 5b 和图 7b, 风速为 12 m/s (7 级风) 时, 三道沙障、两道沙障和一道沙障对沙子的拦截效率  $E_s$  分别是 100%, 74.0% 和 45.1%; 风速为 15 m/s (9 级风) 时, 三道沙障、两道沙障和一道沙障对沙子的拦截效率  $E_s$  逐渐降低, 其值分别是 88.9%, 72.7% 和 44.8%。沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时, 由于气流分散作用, 沙障后的积沙堆积形态出现分离现象(图 4, 6, 8 所示); 沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时, 由于气流的聚合作用, 沙障后的积沙堆积形态出现聚合现象(图 4, 6, 8 所示)。考虑沙障的时效性, 布置沙障时, 沙源丰富位置的沙障要保证迎风面与风向的夹角为钝角。此状况下, 由于气流分散作用, 总积沙量被分散, 这样可以延长沙障局部位置被积沙掩埋的时间。

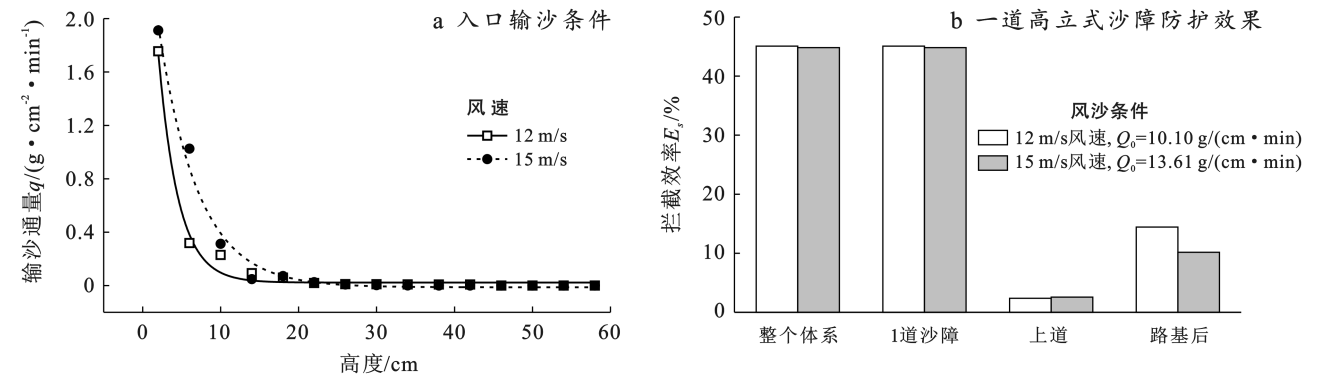


图 7 一道沙障的试验条件及防护效果

Fig.7 Experimental sand transport condition and protection effect of 1 sand fence

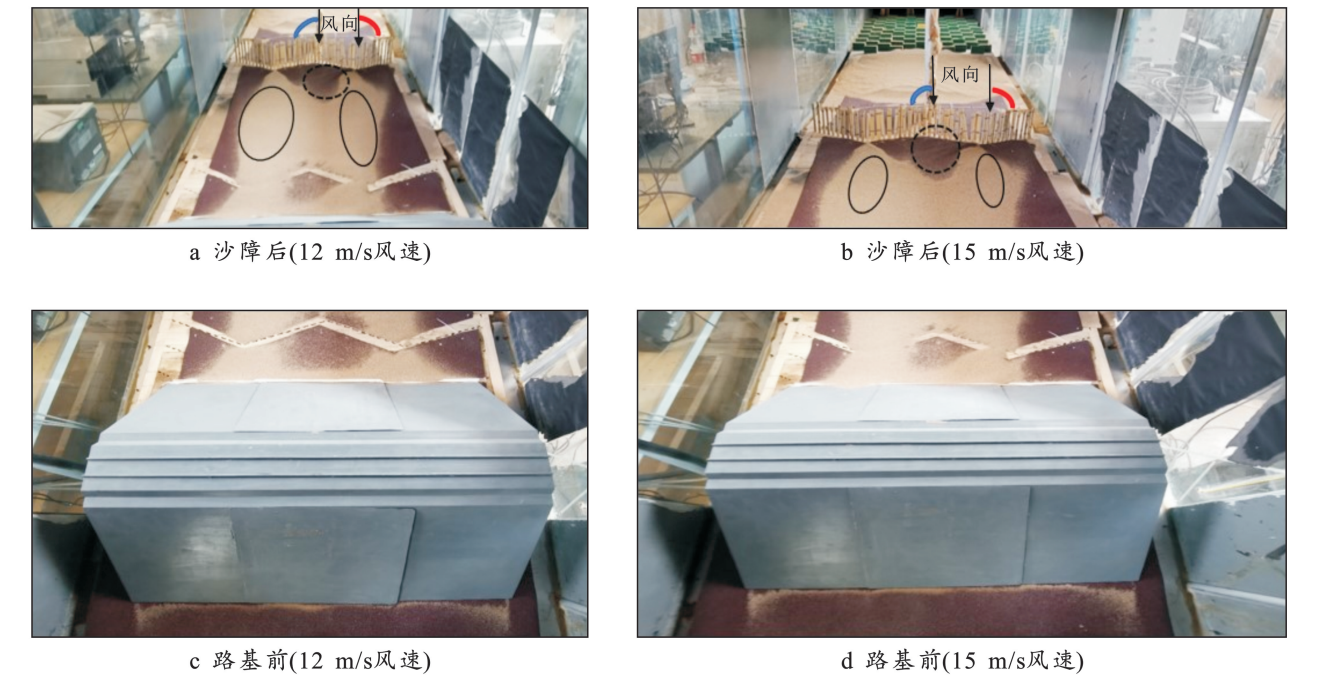


图 8 一道沙障的积沙

Fig.8 Deposition of sand under influence of 1 sand fence

## 4 结论

(1) “Z”字形沙障兼备阻沙和导沙的双重作用,阻沙功能可有效拦截过境风沙;导沙作用造成了沙障周围的积沙不均匀。其导沙效果表现为,当“Z”字形沙障的迎风面与风向的夹角为钝角时,沙障后积沙出现分离现象;当“Z”字形沙障的迎风面与风向的夹角为锐角时,沙障后积沙出现聚集现象。考虑沙障的时效性,布置“Z”字形沙障时,应合理利用该沙障的导沙作用,在沙源丰富位置,“Z”字形沙障迎风面尽量与输沙风向成钝角布置,使得沙障周围积沙分散,延长其使用寿命。

(2) 沙障的拦沙效果随风速的增加而降低,风速为 12 m/s 时,两道沙障和三道沙障的防护效率分别为

74.0% 和 100%,风速为 15 m/s 时,两道沙障和三道沙障的防护效率分别为 72.7% 和 88.9%。不考虑沙障的风蚀破损情况,设置三道“Z”字形高立式沙障可有效地减缓和田—若羌铁路戈壁盐碱区的风沙威胁。

**致谢:**此次风洞试验在兰州大学多功能试验风洞中完成,在此对辅助本次试验的工作人员成子旭、党鸿钟、徐立航和徐建刚等表示衷心的感谢!

## 参考文献 (References)

[1] Wang Jiancheng, Song Yanhong, Huang Ning. Field observation on the spatial characteristic of wind-blown sand along the Hetian-Rouqiang railway [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2468(1): 012174.

[2] Huang Ning, Song Yanhong, Xu Lihang, et al. The

- method for quantitative assessment of sand-drift rate along the southeastern fringe of the Taklimakan Desert [J]. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2024,12(1):27-45.
- [3] Ma Benteng, Gao Li, Cheng Jianjun, et al. Characteristics and hazards of an aeolian sand environment along railways in the southeastern fringe of the Taklimakan Desert and sand control measures [J]. *Applied Sciences*, 2022,12(18):9186.
- [4] 彼得洛夫.流沙的固定[M].徐国镒,译.北京:中国林业出版社,1960.
- Petrov M.I. Fixation of Blown Sand [M]. Xu Guoyi, Translation. Beijing: China Forestry Press, 1960.
- [5] 王涛.中国风沙防治工程[M].北京:科学出版社,2011.
- Wang Tao. Wind and Sand Control Engineering in China [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [6] 王涛.中国风沙防治实践与沙漠科学发展的 70 年:Ⅲ.发展篇(1)[J].*中国沙漠*,2024,44(1):1-10.
- Wang Tao. The practice on prevention and control of aeolian desertification and the development of desert science in China for 70 years: Ⅲ. Development part(1) [J]. *Journal of Desert Research*, 2024,44(1):1-10.
- [7] 邴丹晖,谈嫣蓉,陈文业,等.我国沙障的研究进展与应用综述[J].*中国水土保持*,2023(7):37-40.
- Bing Danhui, Tan Yanrong, Chen Wenyue, et al. Research progress and application of sand barriers in China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(7):37-40.
- [8] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
- Wu Zheng. Wind-sand Geomorphology and Sand Control Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] Ning Baoying, Ma Jianxia, Jiang Zhide, et al. Evolution characteristics and development trends of sand barriers [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017,8(4):398-404.
- [10] Zhang Kecun, Qu Jianjun, Liao Kongtai, et al. Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet railway in China [J]. *Aeolian Research*, 2010,1(3/4):143-146.
- [11] Bruno L, Horvat M, Raffaele L. Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018,177:340-365.
- [12] 赵性存.包兰铁路中卫地区沙漠路基修筑的回顾与展望[J].*路基工程*,1987(4):12-18.
- Zhao Xingcun. Review and prospect of desert subgrade construction in Zhongwei area of Baotou-Lanzhou railway [J]. *Subgrade Engineering*, 1987(4):12-18.
- [13] Li Liangying, Tao Zhizhong, Yin Wenhua, et al. Numerical simulation research on plane alignment parameters of desert highway [J]. *Applied Sciences*, 2022,12(19):9579.
- [14] Li Bailiang, Sherman D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review [J]. *Aeolian Research*, 2015,17:33-48.
- [15] Eichmanns C, Lechthaler S, Zander W, et al. Sand trapping fences as a nature-based solution for coastal protection: An international review with a focus on installations in Germany [J]. *Environments*, 2021,8(12):135.
- [16] Ning Qingqian, Li Bailiang, Ellis J T. Fence height control on sand trapping [J]. *Aeolian Research*, 2020,46:100617.
- [17] Huang Ning, Gong Kang, Xu Bin, et al. Investigations into the law of sand particle accumulation over railway subgrade with wind-break wall [J]. *The European Physical Journal E, Soft Matter*, 2019,42(11):145.
- [18] Yu Yanping, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. The blocking effect of the sand fences quantified using wind tunnel simulations [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020,17(10):2485-2496.
- [19] Alghamdi A A, Al-Kahtani N S. Sand control measures and sand drift fences [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005,19(4):295-299.
- [20] 崔晓宁,梁柯鑫,王起才,等.新建格库铁路挡沙堤阻沙机理研究[J].*干旱区资源与环境*,2019,33(7):85-92.
- Cui Xiaoning, Liang Kexin, Wang Qicai, et al. Sand-control mechanism of sand blocking embankment at Geku Railway [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019,33(7):85-92.
- [21] Dun Hongchao, Huang Ning, Zhang Jie. Optimization designs of artificial facilities in deserts based on computational simulation [J]. *Journal of Arid Land*, 2021,13(3):290-302.
- [22] Xin Guowei, Huang Ning, Zhang Jie, et al. Investigations into the design of sand control fence for Gobi buildings [J]. *Aeolian Research*, 2021,49:100662.
- [23] Xin Guowei, Zhang Jie, Fan Liqiang, et al. Numerical simulations and wind tunnel experiments to optimize the parameters of the second sand fence and prevent sand accumulation on the subgrade of a desert railway [J]. *Sustainability*, 2023,15(17):12761.
- [24] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益[J].*水土保持学报*,2024,38(1):368-377.
- Wang Maolin, Song Ling, Liu Jie, et al. Optimized configuration and sand control benefits of double-row high vertical nylon mesh sand barrier and grass lattice sand barrier [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(1):368-377.



- ogy Resource Announcements, 2021,10(44):e87121.
- [35] Oksanen J. Vegan: ecological diversity [J]. R Project, 2013,368(1):11.
- [36] Fan Jun, Wang Quanjiu, Jones S B, et al. Soil water depletion and recharge under different land cover in China's Loess Plateau [J]. Ecohydrology, 2016,9(3): 396-406.
- [37] 刘西刚,王勇辉,焦黎.夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究[J].水土保持学报,2019,33(3): 121-128.
- Liu Xigang, Wang Yonghui, Jiao Li. Study on soil water conservation function of typical vegetation in Xialxili nature reserve [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):121-128.
- [38] Mei Xuemei, Zhu Qingke, Ma Lan, et al. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes [J]. Catena, 2018,162:333-344.
- [39] 张晓梅.陇东黄土高原中沟小流域刺槐人工林土壤水分特征研究[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学:2019.
- Zhang Xiaomei. Study on soil water characteristics of *Robinia acacia* plantation in Zhonggou Small Watershed of Longdong Loess Plateau [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2019.
- [40] 姜霞,吴鹏,郭金鹏,等.雷公山自然保护区森林土壤的持水性能及其海拔响应[J].江苏农业科学,2019,47(4):273-277.
- Jiang Xia, Wu Peng, Guo Jinpeng, et al. Water holding capacity and altitudinal response of forest soil in Leigongshan Nature Reserve [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(4):273-277.
- [41] 韩美荣,宋同清,彭晚霞,等.喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的组成特征与作用[J].应用生态学报,2012,23(3): 685-693.
- Han Meirong, Song Tongqing, Peng Wanxia, et al. Compositional characteristics and roles of soil mineral substances in depressions between hills in Karst Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(3): 685-693.
- [42] 杜姣姣,周运超,白云星,等.阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究[J].水土保持研究,2021, 28(4):105-112.
- Du Jiaojiao, Zhou Yunchao, Bai Yunxing, et al. Research of soil hydrophysical properties of pinus massoniana plantation after the introduction of broad-leaved tree species [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):105-112.
- [43] Xiong Kangning, Kong Lingwei, Yu Yanghua, et al. The impact of multiple driving factors on forest ecosystem services in karst desertification control [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6(6): 1220436.
- [44] Xiang Ting, Qiang Fangfang, Liu Guangquan, et al. Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in loess hilly and gully areas [J]. Forests, 2023,14(9).
- [45] 杨牧蓉.滇东南喀斯特地区石漠化植被恢复过程中的生态效应研究[D].云南 昆明:云南大学,2022.
- Yang Muron. Ecological effects of vegetation restoration in karst area of Southeast Yunnan Province [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University, 2022.
- [46] 吴庆贵,邹利娟,吴福忠,等.涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J].水土保持学报,2012,26(6): 254-258.
- Wu Qinggui, Zou Lijuan, Wu Fuzhong, et al. Water conservation capacity of five main forest in the hilly area of Fujiang River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(6):254-258.

(上接第 56 页)

- [25] 刘畅,王海龙,孙婧.铁路沿线联合沙障阻风固沙机理的数值模拟研究[J].铁道学报,2023,45(7):178-184.
- Liu Chang, Wang Hailong, Sun Jing. Numerical simulation study on the wind prevention and sand fixation mechanism of combined sand barriers along the railway line [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(7):178-184.
- [26] 李选民,辛国伟,宋彦宏,等.铁路沿线不同沙害区域机械防沙措施设计研究[J].铁道勘察,2023,49(4): 82-89.
- Li Xuanmin, Xin Guowei, Song Yanhong, et al. Study on design of mechanical sand prevention measures in different sand damage areas along railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023,49(4):82-89.
- [27] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Beaufort scale" [OL]. Encyclopedia Britannica, 3 (2023-03-03) [2023-05-19]. <https://www.britannica.com/science/Beaufort-scale>. Accessed 19 May 2023.
- [28] 王元,张鸿雁.大气表面层与风沙现象相似参数的研究[J].中国沙漠,1994,14(1):10-16.
- Wang Yuan, Zhang Hongyan. The study on similapity rarameters of the atmospheric surface layer and phenomena of drift sand [J]. Journal of Desert Research, 1994,14(1):10-16.