

不同铺设形式对固沙砖沙障防风沙效果影响的风洞试验

孙婧^{1,2,3}, 王君¹, 洪俊哲¹, 贾小静¹, 张少云¹

(1.河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2.河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3.河北省高校道桥结构健康监测与维修加固应用技术研发中心, 河北 张家口 075000)

摘要: [目的] 研究带孔沙砖的铺设形式对风场特性和防风沙效果的影响, 旨在为选择新型防风固沙材料提供理论依据。[方法] 通过风洞试验, 探究净风条件下方格沙障、梯度行列式沙障的风压分布及平均风压系数波动情况; 重点对比分析了风沙条件下这 2 种不同沙障形式的障后风速、防风效能和积沙效果。[结果] 相比于梯度行列式沙障, 方格沙障内部平均风压系数均为负值, 内部风流循环产生涡旋使其受压更稳定, 且障后平均风速衰减率更高; 防风效能沙障高度出现了先升高后下降的趋势, 在 10 cm 高度方格沙障的防风效能为 64.3%, 比梯度行列式沙障高 4.2%; 方格沙障第 1 排、第 2 排后方格内总沙粒沉积率分别是梯度行列式沙障的 1.14, 1.66 倍, 且方格沙障的障后沉积沙粒量、障后沉积范围均要小于梯度行列式沙障。[结论] 方格沙障具有使风流明显衰减的功能, 阻沙率大于梯度行列式沙障, 沙粒主要沉降在方格内部, 其防风沙效果最好, 为最优铺设形式。

关键词: 风洞试验; 带孔固沙砖沙障; 铺设形式; 防风效能; 沙粒沉积率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0044-09

中图分类号: X915.5, S157.1

文献参数: 孙婧, 王君, 洪俊哲, 等. 不同铺设形式对固沙砖沙障防风沙效果影响的风洞试验[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 44-52. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.006; Sun Jing, Wang Jun, Hong Junzhe, et al. Wind tunnel experiment on impacts of different sand barrier layouts on windbreak and sand-fixing [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 44-52.

Wind Tunnel Experiment on Impacts of Different Sand Barrier Layouts on Windbreak and Sand-fixing

Sun Jing^{1,2,3}, Wang Jun¹, Hong Junzhe¹, Jia Xiaojing¹, Zhang Shaoyun¹

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2.Hebei Key Laboratory for Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 3.Hebei University Road and Bridge Structure Health Monitoring and Maintenance and Reinforcement Application Technology Research and Development Center, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: [Objective] The influences of porous sand-fixing bricks layout on wind field characteristics, windbreak effect and sand-fixing were studied in order to provide a theoretical basis for the selection of new windbreak and sand-fixing materials. [Methods] The wind pressure distribution and the fluctuation of average wind pressure coefficient of a grid sand barrier and a gradient determinant sand barrier under wind conditions were explored by wind tunnel experiment. It was compared and analyzed emphatically for wind speed, windbreak efficiency, and sand accumulation for the two different types of sand barrier under sand storm. [Results] The average wind pressure coefficient inside the grid sand barrier was negative compared with the gradient determinant sand barrier, and the vortex generated by the internal wind circulation made it more stable under pressure. The average wind speed attenuation rate behind the grid sand barrier was higher

收稿日期: 2023-02-03

修回日期: 2023-03-18

资助项目: 河北省科技厅重点研发计划项目“冀北风沙地区废弃铁尾矿道路阻沙屏障关键技术研究”(20373802D); 河北省建设科技研究计划项目(2020-266); 河北省教育厅 2022 年省级研究生创新资助项目(CXZZSS2022059); 张家口市科技局重点研发科技项目(2021012B)

第一作者: 孙婧(1980—), 女(汉族), 山东省济南市人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事防灾减灾工程方面的研究。Email: kathy2001joy@163.com。

than that behind the gradient determinant sand barrier. The windbreak efficiency first increased and then decreased with the increases of height along the height direction of sand barrier in barrier height. At 10 cm height, the windbreak efficiency of the grid sand barrier was 64.3%, which was 4.2% higher than that of gradient determinant sand barrier. The total sand deposition rates in the first row and the second row of the grid sand barrier were 1.14 and 1.66, respectively, times higher than that of the gradient determinant sand barrier. The amount of sand deposited behind the grid sand barrier and the deposition range behind the grid sand barrier were smaller than those values observed for the gradient determinant sand barrier. [Conclusion] The grid sand barrier had a significant attenuation effect on wind flow, and the sand resistance rate was higher than that of the gradient determinant sand barrier. Sand particles mainly settled inside the grid sand barrier, and its windbreak effect was better than observed for the gradient determinant sand barrier. The grid sand barrier was, therefore, judged to be the optimal sand barrier layout.

Keywords: wind tunnel test; porous sand-fixing brick sand barrier; layout; windbreak efficiency; sand deposition rate

交通干线是国家经济发展的大动脉,也是国家军事安全的保障,具有举足轻重的战略地位^[1],目前,中国公路通车里程已达 5.28×10^6 km,高速公路和国道分别已经达到 1.36×10^5 km 和 2.65×10^5 km。随着京津冀一体化发展进程的推进,冀北地区干线公路建设进入高峰期,便捷安全的交通在推动经济社会发展,助力乡村振兴方面起着基础先导作用^[2]。但是在交通干线不断发展过程中,由于沙害的存在,交通设施不断遭受破坏,因此,防治风沙灾害,保障穿越沙漠区公路的正常运营是亟需解决的工程技术问题。公路风沙防治措施需要根据沿线风沙危害的现状和特点选择。目前常利用机械沙障来固定沙区公路沿线流沙、削弱风蚀。麦草、石方格、防风栅栏、尼龙网等不同种类的机械沙障均被应用于不同区域的公路风沙灾害防治。学者们发现^[3-4]在塔克拉玛干沙漠公路沿线可设置芦苇方格和尼龙网沙障来进行风沙防护,但进一步研究发现草方格在不同起伏地区均可有效固沙,尼龙网只适合较平坦地貌;鱼燕萍等^[5]研究发现在内蒙古 S315 一级公路黑风口路段背风侧多设置几道阻沙栅栏和固沙方格,其防治沙害效果最好;Pan Xia 等^[6]对沙粒沉积物粒度特征进行了评估并通过现场试验研究,发现乌兰布和沙漠公路设置复合沙障对流沙具有截留作用,可稳定原地表;Xin Guowei 等^[7]在新疆南部库尔勒的沙漠公路利用混凝土拦沙栅栏进行风沙灾害防治,得到了有关栅栏沙障的高度、孔隙率、倾角的最优设计。近年来,学者主要利用野外试验、风洞试验和数值模拟方法^[8-10],对不同形式和规格的机械沙障进行了防风沙效果对比和参数优化研究。Zhang Shuai 等^[11]利用风洞试验研究不同规格的沙柳沙障,发现风速为 11.0 m/s 时,只有孔隙率为 20%,边长为 1.0 m 的沙障有效防护面

积超过 10%;Wang Tao 等^[12]对孔隙率相同的圆孔板沙障和金属丝网栅栏的防护效果进行风洞试验研究,结果表明圆孔板沙障比金属丝网防护网对风速的降低程度更大,防护效益较好;田美荣等^[13]对条形孔、方形孔、圆形孔的挡风墙进行野外试验,发现圆形挡风墙制作成本中等,但其防风效能和土壤保水能力最好;康向光等^[14]研究不同叠加模式尼龙网的阻沙量,结果显示:阻沙网叠加>迎风坡叠加方式>背风坡叠加方式。综上所述,国内外关于公路沿线不同形式机械沙障的风沙效益和治沙机理研究表明,最适合实际工程的防风沙设施是根据沙区公路所在区域地理、气候特点及风速大小设计的。

由于公路风沙灾害严重地区,常年有风积流沙堆积,因此本文为节省远距离运输成本,以沙治沙地利用沿线沙源制备多孔固沙砖块,并铺设成新型多孔机械沙障。该沙障为近地表结构,无需固定,和环境相容性好,体现了经济循环和因地制宜。通过课题组前期固化试验和数值模拟研究^[15],确定单块多孔长方体固沙砖结构参数是 40.0 cm×11.5 cm×20.0 cm (长×宽×高),开孔半径 3.6 cm,孔隙率为 10%。根据风沙发育特点,本文设计了 2 种不同铺设形式的近地表机械沙障,一种是由单块多孔砖铺设成上下 2 层,规格为 1.0 m×1.0 m 对称结构的方格沙障;另一种是同样是上下 2 层,但铺设成单向横排、排与排成梯度平行的梯度行列式沙障。这 2 种沙障为多孔结构,沙障材料相同,但铺设形式的不同会导致二者周围风场特性和积沙效果不同。因此,本文通过风洞试验,对比分析方格沙障和梯度行列式沙障这 2 种多孔近地表沙障结构的表面风压特性、沙障周围沙粒分布规律、积沙效果和防风效能,优选出最佳铺设形式,为公路沿线新型风沙防护措施的制定提供理论依据。

1 试验设计

1.1 风洞参数

风洞试验于 2022 年 3 月 21 日至 4 月 1 日在北京市延庆区中国科学院电工所的直流式风沙型风洞内进行,风洞试验段长度为 20 m,宽度 3 m,高度 2.5 m,试验段风速在 0~30 m/s 范围内可调。风洞试验段速度场的不均匀性 $\leq 1.0\%$,方向场的非均匀性系数, $\Delta\alpha \leq 1.0^\circ$, $\Delta\beta \leq 1.0^\circ$,轴向静压梯度小于 0.003 m^{-1} [16]。该风洞可进行净风条件下的试验,也可通过试验段顶部的漏沙装置进行风沙条件下的试验,风洞具有供沙、沙粒回收装置。研究发现沙粒在 2 m 高度范围内,风速 $>7.0 \text{ m/s}$ 时,就会快速运动发育[17],且交通干线风沙灾害严重区域常年现场风速值在 5.0~11.5 m/s 的频次较多,因此本文风洞试验风速均采用 10.0 m/s。

1.2 模型设计

本试验由单块固沙砖铺设成上下两层不同形式的机械沙障,由于原型高度才 40 cm,为了满足风洞试验相似性理论,使得试验模型与试验原型形成几何相似[18],同时充分考虑风沙流场的稳定性,确定两种铺设形式的沙障模型缩尺比均为 1:3,具体模型铺设参数详见表 1。

单块固沙砖试验模型为多孔长方体砖块,具体尺寸为长 13.33 cm,宽 3.83 cm,高 6.67 cm,孔半径为 1.2 cm,孔隙率为 10%。方格和梯度行列式机械沙障规格尺寸如图 1 所示,是由单块多孔固沙砖堆砌成上下 2 层的方格阵列和梯度行列式形式。考虑测试模型与风洞边壁的最短距离不应小于试验段宽度的 15%[19],设计 2 种铺设形式的沙障均摆放 2 层 3 排。单块固沙砖模型之间均使用胶水连接,以确保试验过程中的稳定性(图 2)。

表 1 不同铺设形式沙障模型的规格参数

Table 1 Specification parameters of sand barrier models with different laying forms

种类名称	铺设形式	模型尺寸规格
方格	铺设 3 排,铺设成方格形式,铺设间距 22.83 cm	沙障长 134.31 cm,高 13.33 cm
梯度行列式	铺设 3 排,铺设成横排平行形式,排与排分别错开 20 cm,铺设间距 22.83 cm	沙障长 126.65 cm,高 13.33 cm

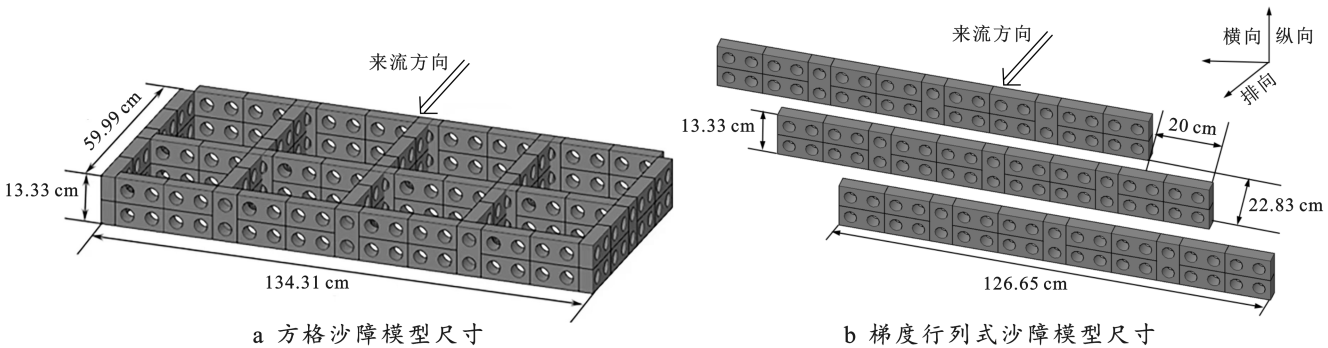


图 1 固沙砖机械沙障模型

Fig.1 Sand barrier model of sand fixing brick machinery

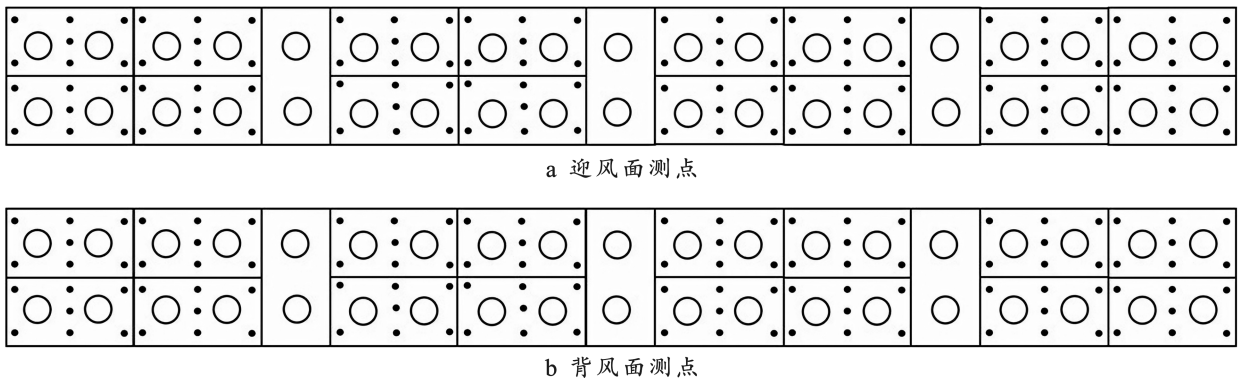


图 2 沙障模型风压测点布置

Fig.2 Layout of wind pressure measuring points in sand barrier model

根据对多孔固沙砖机械沙障的数值模拟研究^[20],随着排数增加,固沙砖所受风压影响越小,因此重点研究了这2种沙障形式前2排固沙砖的风压情况。试验模型的测点布置如图2所示。单块固沙砖迎风面和背风面各设置了7个测点,每排共计224个测点,共计448个测点。由于在方格沙障中的纵向固沙砖主要起连接支撑作用,试验时无法布置测压管,且该位置处风流受到阻挡,受风压力作用小,为了保证两种沙障形式风压对比变量的统一性,故纵向砖块不再布置测点。

1.3 工况设计

1.3.1 净风试验 在净风条件(风速10 m/s)下,对比分析多孔固沙砖方格沙障、梯度行列式沙障结构表面的风场特性和风压分布情况,沙障模型摆放在风洞试验段圆盘。在净风条件下进行测压试验时,采集如图2中所示所有测点的风压时程,利用Matlab和Furfer软件处理分析风压时程数,通过计算平均风压系数来对比分析方格沙障、梯度行列式沙障表面风压变化规律。在测压管输出风压时程数据时进行数学畸变修正^[21],以防止测压管道弯曲和挤压造成试验误差,平均风压系数(精确到0.01),计算公式为:

$$C_{p,\text{mean}} = \frac{\bar{p} - p_{\text{ref}}}{0.5\rho\bar{U}_{\text{ref}}^2} \quad (1)$$

式中: $C_{p,\text{mean}}$ 为平均风压系数; p_{ref} 为相对参考静压(Pa),即在风洞试验中连通外界大气压作为参考静压; \bar{p} 为采样周期内得到的平均风压(Pa); ρ 为试验时的空气密度,1.225 kg/m³; U_{ref} 为来流风向在参考高度处的平均风速(m/s);本文风洞试验参考高度为0.4 m,模型周边风场干扰小。本文规定平均风压系数正负只代表方向,不代表大小。平均风压系数为正时,试验模型受风压力;为负时受风吸力。

1.3.2 风沙试验 对多孔固沙砖方格沙障、梯度行列式沙障在风速10.0 m/s的试验条件下,进行风沙风洞试验,对比分析这2种不同铺设形式沙障的防风效能、障内沙粒沉积率和沙障周围沙粒分布规律,研究其防风沙效果。本文风沙试验是在风洞试验室前段顶部安装了输沙和漏沙装置,先通过升降桶输送沙粒到梯形漏斗;再通过控制螺旋塞的开闭来控制漏斗底部等间距设置的9个漏沙孔的数量与直径,得到可控的风沙浓度。现本文风沙试验中风速测量仪采用的是中国科学院寒区旱区环境与工程研究所开发的防沙风速廓线仪,该测试仪共设10个皮托管探针,风速测点高度分别为5,10,15,50,100,250,500,750,1000和1250 mm,采样频率均为2 Hz,在试验之前,采用标准皮托管对风速廓线仪的所有皮托管进行校

准,使得各探头的测量误差均小于0.15%^[22];沙粒采集使用的是梯度集沙测量仪,集沙仪共设置50个截面积是20 mm×20 mm连续沙盒,通过记录集沙盒内沙粒质量(精度至0.001 g),风沙试验设备如图3所示。

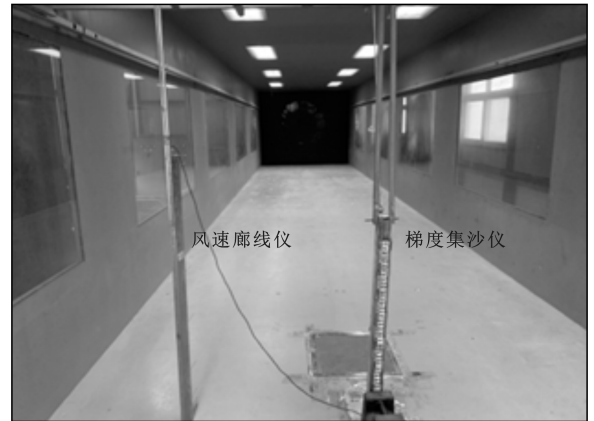


图3 风沙试验设备

Fig.3 Wind sand test device

风沙试验下,利用风速廓线仪对障后风速进行收集,从而计算防风效能,防风效能是衡量沙障对气流削减程度的重要指标^[23],沙障的防风效能计算公式为:

$$E_{x,z} = \frac{\bar{U}_{0,z} - \bar{U}_{x,z}}{\bar{U}_{0,z}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $E_{x,z}$ 为沙障高度为 Z 处的防风效能(%); $\bar{U}_{x,z}$ 为沙障高度为 Z 处的平均风速(m/s); $\bar{U}_{0,z}$ 为无沙障时 Z 处的平均风速(m/s)。

风沙试验结束后收集障后不同位置处积沙,通过计算一定沙浓度条件下的阻沙率和沙粒沉积率^[24],来研究机械沙障的固沙效果。其中,沙浓度、阻沙率和沙粒沉积率计算公式为:

$$W(z) = \frac{Q(z)}{tA_0V_H} \quad (3)$$

式中: $W(z)$ 为高度 z 处的沙质量浓度(g/m³); $Q(z)$ 为高度 z 处的集沙量(g); t 为集沙时间(s); A_0 为集沙测试仪的进沙孔截面积(m²); V_H 为参考高度处的平均风速(m/s)。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{10} \frac{Q_{qi} - Q_{hi}}{Q_{qi}}}{10} \times 100\% \quad (4)$$

式中: K 为阻沙措施的阻沙率(%); Q_{qi} 为障前1 m处输沙量(g); Q_{hi} 为障后1 m处输沙量(g)。

$$\lambda = \frac{m}{tS} \quad (5)$$

式中: λ 为多孔固沙砖沙障单个方格内的沙粒沉积率[g/(m²·s)]; m 为单个固沙砖方格内沙粒总沉积质量(g); t 为落沙时间(s); S 为方格面积(m²),本研究设置为0.11 m²。

2 不同铺设形式下沙障表面风压对比分析

在净风条件(试验风速为 10 m/s)下进行多孔固沙砖方格沙障、梯度行列式沙障模型的测压试验。图 4 为不同铺设形式沙障的平均风压系数分布等值线图。

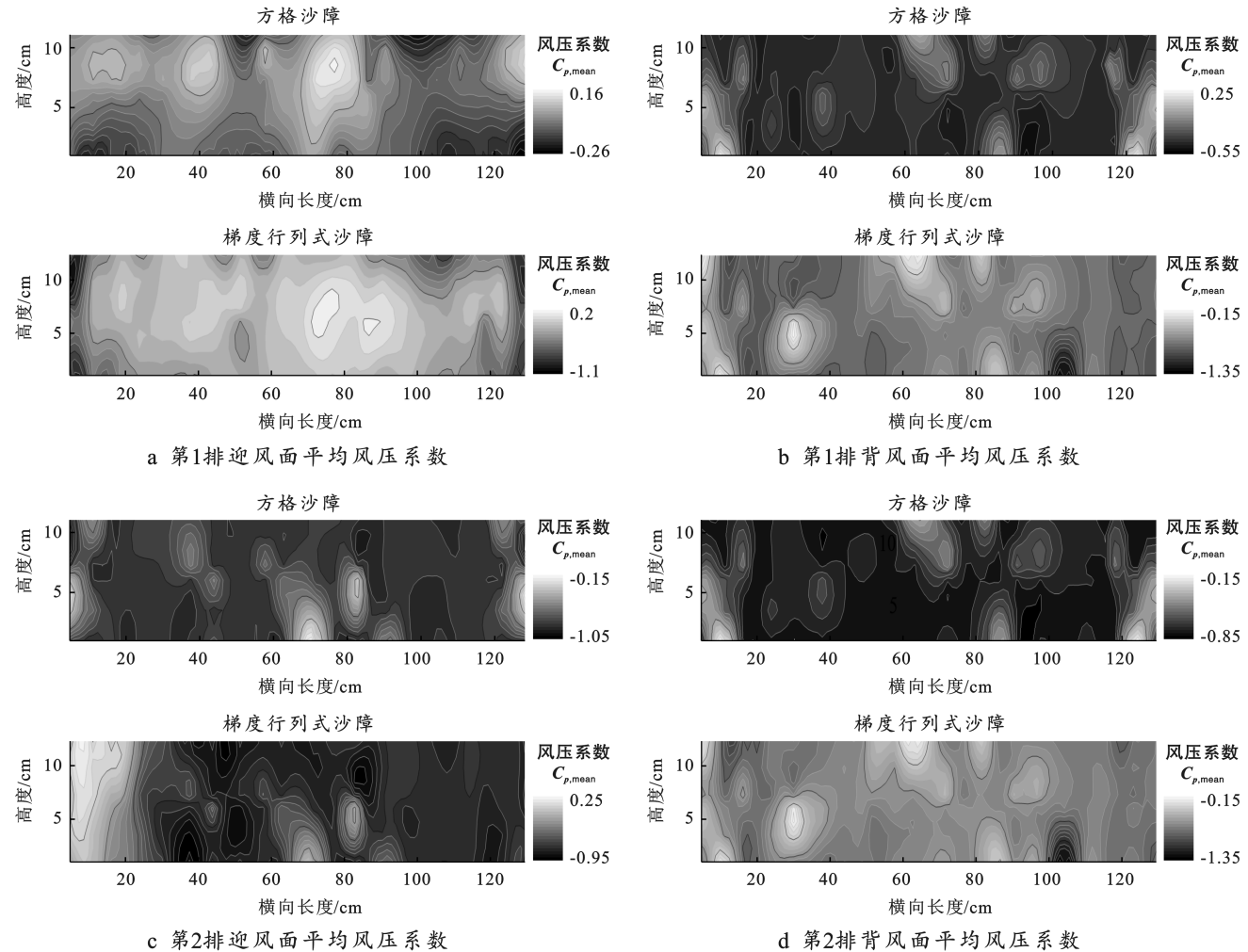


图 4 不同铺设形式沙障的平均风压系数等值线对比

Fig.4 Comparison of average wind pressure isolines of different sand barriers

两种沙障第 1 排背风面的平均风压系数均为负值,说明风流通过第一排固沙砖时,均在固沙砖上的孔洞发生了分离,风向改变,背面均受风吸力;方格沙障第 1 排背风面的风压系数数值在 0.9~1.1 之间波动,但梯度行列式沙障的风压系数值主要在 0.6~0.9 范围波动,仅有小部分区域数值达到 1.5,对比方格沙障风压变化规律,梯度行列式沙障背面受压不均,风压波动较大,这主要由于方格内风流循环产生涡旋,风压稳定。方格沙障第 2 排迎风面受风吸力,方格内壁整体受压均匀且稳定(沙障第 1 排背风面和第 2 排迎风面的平均风压系数值近似),此处产生稳定涡旋。

由图 4 可知,方格沙障的平均风压系数数值在 0.02~0.16 之间波动,该处主要承受风压力且风流形成的风压作用较弱。对比方格沙障,梯度行列式沙障第 1 排迎风面风压波动变化范围均较大,平均风压系数数值在 0.15~0.25 之间波动,且在迎风面左右边缘处出现较大负压。这说明由于梯度行列式沙障的不对称结构,该处受风荷载作用大,受压不稳定。

梯度行列式沙障第 2 排迎风面未被前排遮挡区域(横向 0~20 cm)受风压力,但受到前排遮挡作用的区域均因风流产生回流,受到风吸力作用,其平均风压系数在 0.25~-0.95 大范围波动,所受风压不稳定;对比方格沙障的第 2 排迎风面风压,梯度行列式沙障受压较小,风流从孔洞直接穿过流失,不产生涡旋。方格沙障第 2 排背风面处风流不断循环,方格内部受涡旋作用,此时均受风吸力,其平均风压系数数值在 0.1~0.85 之间波动,且方格沙障风压随排数增加而逐渐减少,但梯度行列式沙障的每一排可为独立个体,每排仅有迎风面受前排遮挡风压会发生变化,背面均受压

相同;对比方格沙障第 2 排背风面,梯度行列式第 2 排背风面风压系数波动范围比较大,最小风压系数为 0.15,但最大风压系数值达到了 1.35,整体风压波动较大,因此梯度行列式沙障风压不稳定。综合对比图 4 来看,方格沙障和梯度行列式沙障的风压变化分布规律有相似处,二者风压自地表沿沙障高度方向随高度增加而增大(纵向 0~13.33 cm)增加而增大;受孔结构影响,在横向 0~134.31 cm 铺设方向上,沙障左右边缘处风压均有波动但平均风压系数值较中间位置处偏小,主要原因是风流穿过每排固沙砖孔洞时,沙障边缘处部分风流通过固沙砖与风洞侧壁形成的通道快速流失。不同之处是方格沙障每排受压均要比梯度行列式沙障小;方格沙障随着排数增加,受到前排固沙砖的遮挡作用,后排固沙砖风压逐渐减小,但是梯度行列式沙障受遮挡作用弱,后排迎风面受压会变大;梯度行列式沙障每一排可为独立个体,每一排背风面受压大小和分布均相同。梯度行列式沙障受风荷载作用较大,风压波动较大,沙障所受风压不稳定;但方格沙障风压分布规律对称,风流在方格内部来回循环,内部产生涡旋,在涡旋的作用下,平均风压系数波动较小,因此方格沙障比梯度行列式沙障受压更稳定。

3 不同铺设形式下沙障防风沙效果对比分析

3.1 风沙试验概况

通过风洞顶部漏沙装置来调节漏沙量,利用梯度

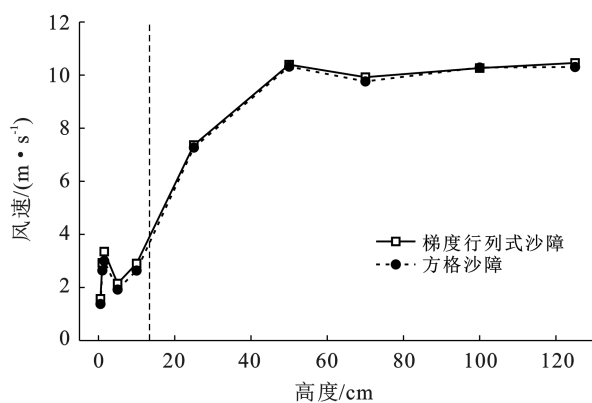


图 6 不同铺设形式沙障的防风效果对比

Fig.6 Comparison of windproof effects of different forms of sand barriers

如图 6 所示,在沙障高度 13.33 cm 范围内,方格沙障和梯度行列式沙障均对 10.0 m/s 的初始风速起到了明显的衰减作用,障后风速均不超过 4 m/s,小于风沙流发育的范围(风速 < 7.8 m/s)^[26],因此风流携沙能力明显减弱,沙粒沉积下来;在沙障高度

集沙仪测试沙浓度。如图 5 所示,垂直方向上不同高度处不同管数沙浓度的分布情况,此时沙浓度剖面图是稳定的。又根据学者们^[25]研究发现沙尘浓度大约在 5~10 g/m³ 时,易发生沙尘暴天气,因此,最终风沙试验均是设置入口风速为 10 m/s,开放 1/2 管沙浓度进行落沙试验。

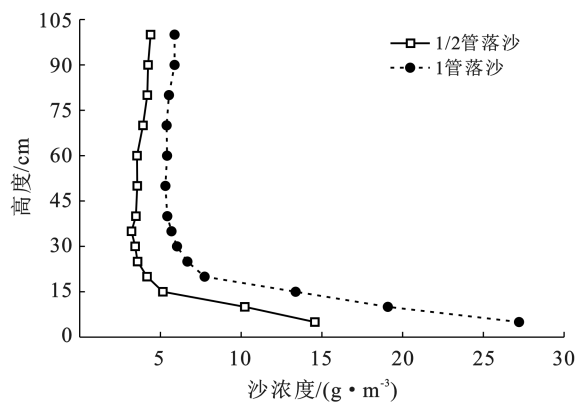
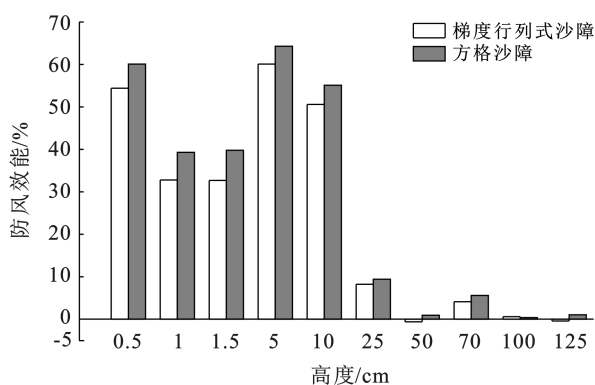


图 5 1/2 管、1 管落沙量的沙浓度变化

Fig.5 Sand concentration variation of falling sediment in 1/2 pipe and 1 pipe

3.2 方格沙障与梯度行列式沙障风沙条件下防风效果对比分析

风沙条件下,利用风速廓线仪对方格沙障、梯度行列式沙障后 20 cm 处、不同高度位置的风速进行了测试和计算,得到不同铺设形式沙障的防风效果对比图(图 6)。



13.33 cm 范围内,方格沙障最低风速为 1.92 m/s,最高风速为 2.99 m/s,障后平均风速衰减率为 75.5%,梯度行列式沙障最低风速 1.57 m/s,最高风速为 3.35 m/s,障后平均风速衰减率为 75.4%,说明 2 种沙障在风沙条件下均对风速有衰减作用,但方格沙障

的障后风速要比梯度行列式沙障衰减更快。2 种沙障的防风效能沿沙障高度出现了先升高后下降的趋势,方格沙障的防风效能均要大于梯度行列式沙障,防风效能均在高度 10 cm 时达到峰值,其中,方格沙障的防风效能为 64.3%,梯度行列式沙障的防风效能为 60.1%;在高度 25 ~ 125 cm 范围内(超过沙障高度),2 种沙障的防风效能均小于 10%,并且在 50 和 125 cm 处,梯度行列式沙障的防风效能出现了负值,说明梯度行列式沙障在该处对空气中的气流有一定加速作用;综合图 6 数据说明方格沙障对风速衰减作用更明显,防风效能也要强于梯度行列式沙障。

3.3 方格与梯度行列式沙障积沙结果对比分析

风沙试验结束后,利用集沙仪收集障前和障后沙粒,利用公式(4)计算 2 种沙障的阻沙率。图 7 为沙障阻沙率对比图,并且收集方格沙障、梯度行列式沙障内部沉积沙粒,根据公式(3)计算各沙障内沙粒沉积率,结果详见表 2。方格沙障模型布置和梯度行列式沙障模型如图 8 所示。图 8 中沙障方格编号从第 1 排左侧开始依次为 1-1-1-4,第 2 排左侧开始依次为 2-1-2-4。梯度行列式沙障模型第一排单排后的空间位置为 T-1,第 2 排单排后的空间位置为 T-2。由图 7 可知,2 种沙障的阻沙率和高度呈负相关,高度越低阻沙效果越好,这是因为方格沙障和梯度行列式沙障均是低立式沙障,一旦超过沙障高度到距离地面 25 cm 时,两种形式的沙障阻沙效果差不多,2 种沙障的阻沙率均小于 10%,主要是因为大颗粒沙粒被拦截在障前和障内,小颗粒沙粒和一些沙尘在沙障上方,表明沙障的存在使近地表风沙被拦截,上层沙量沿气流方向在降低。综合看出方格沙障对沙粒阻截作用更明显,防沙效果要强于梯度行列式沙障。

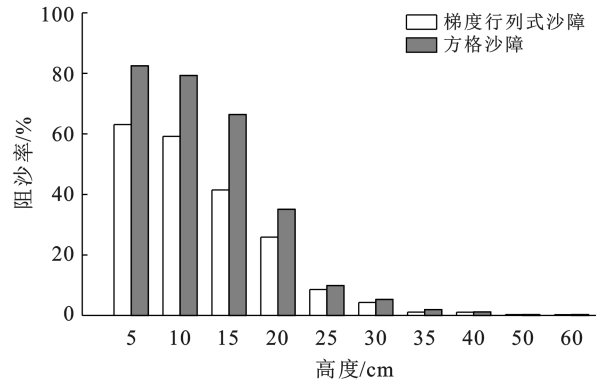


图 7 沙障阻沙率对比

Fig.7 Comparative map of sand barrier sand resistance rate

由表 2 数据可知,梯度行列式沙障 T-1 位置处的沙粒总沉积率为 $327.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,梯度行列式沙障 T-2 位置处的沙粒总沉积率为 $29.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,T-1 位置处的积沙占梯度行列式沙障内总积沙量的 91%,说明沙粒一部分主要被第 1 排单排阻拦在沙障前,其余主要通过孔洞和越过沙障第一排沉降在 T-1 位置处,经过第 2 排孔洞到达 T-2 位置处的沙粒比较少。同时,方格沙障第 1 排和第 2 排后方格的平均沙粒沉积率分别为 116.8 和 $13.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其积沙量分别占方格沙障总积沙量的 88% 和 11.5%,此时第 1 排方格内的沙粒总量远大于第 2 排方格内,说明当风沙流运动时,沙障的第 1 排固沙砖拦截沙粒的作用最强,固沙效果最好。对比表 2 可知,方格沙障第一排后方格内总沙粒沉积率为 $375.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比梯度行列式沙障 T-1 位置处的粒沉积率多了 $47.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,方格沙障第 2 排后方格内总沙粒沉积率是梯度行列式沙障 T-2 位置处的 1.66 倍,此时方格沙障沙粒积沙量均要大于梯度行列式沙障,方格沙障的固沙效果要比梯度行列式沙障好。

表 2 不同铺设形式沙障各位置的沙粒沉积率

Table 2 Sand deposition rate at different locations of sand barriers with different laying forms

项目		第 1 排				第 2 排			
方格沙障	格子编号	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4
	沙粒沉积率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	32.3	91.0	127.4	124.4	11.0	12.0	15.5	10.3
	总计沙粒沉积率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	375.1				48.8			
梯度行列式沙障	位置编号	T-1				T-2			
	总计沙粒沉积率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	327.6				29.4			

由图 8 可以看出,沙粒受到方格沙障阻挡作用主要堆积在障前;部分沙粒在方格内部涡旋作用下发生沉降堆积;极少部分沙粒越过方格沙障在障后侧沉降。梯度行列式沙障单排前都有积沙,均因为该处存

在回流^[27],沙障此时主要起到了固沙的作用,将沙粒均拦截到单排迎风面处;梯度行列式沙障每排有不重合区域,整体沙障不对称,因此造成障后沙粒不是对称均匀分布,而是呈细条带状分布在梯度行列式沙障

后;并且障后沙粒总量较多,大部分沙子无法沉降在障内,而是越过沙障沉降,说明梯度行列式沙障的固沙作用较弱。综合分析图7—8可知,方格对沙粒拦截作用强,阻沙效果好,且方格沙障的障后沙粒沉积量、障后沉积范围均要小于梯度行列式沙障,说明方

格沙障能有效积沙,可将沙粒主要拦截和沉降在障内;同时,梯度行列式沙障的障后沙粒范围大会造成实际工程要不断增设沙障排数,会带来工程难度,因此在交通干线沿线设置方格沙障比梯度行列式沙障要更能有效积沙。

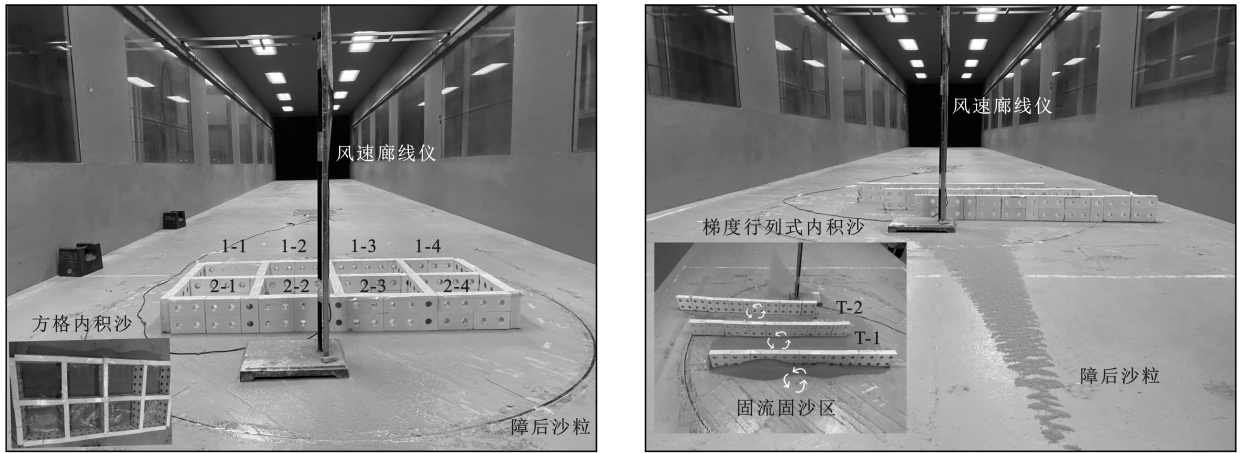


图8 不同铺设形式沙障积沙对比

Fig.8 Comparison of sand accumulation in different laying forms of sand barrier

4 结论

(1) 净风条件下,方格沙障的多孔对称结构使得风流在内部不断循环产生小型涡旋,方格内部均受风吸力且受压稳定;梯度行列式沙障结构不对称,每排受压互不影响且风压波动不稳定,迎风面不被遮挡位置处均受风压力,其余位置均受较大风吸力。

(2) 在沙障高度 13.33 cm 范围内,2 种不同铺设形式的沙障在风沙条件下,障后风速均小于 4 m/s,且方格沙障的障后风速要比梯度行列式沙障小,方格沙障的障后风速衰减得更快。

(3) 2 种沙障的防风效能沿沙障高度先增后减,在高度 10 cm 时达到峰值,其中,方格沙障的防风效能为 64.3%,梯度行列式沙障的防风效能为 60.1%;超过沙障高度时,2 种沙障的防风效能均小于 10%,但方格沙障的防风效能均要大于梯度行列式沙障,防风效果更好。

(4) 在沙障高度 13.33 cm 范围内,方格沙障阻沙率大于梯度行列式沙障,最大阻沙率为 82.5%;方格沙障第 1 排、第 2 排后方格内总沙粒沉积率分别是梯度行列式沙障 T-1、T-2 位置处的 1.14、1.66 倍;在方格沙障遮挡下,沙粒主要沉降在方格内部,但梯度行列式沙障沙粒主要呈细条带状分布在障后,且方格沙障的障后沉积沙粒量、障后沉积范围均要小于梯度行列式沙障,因此方格沙障积沙效果好。

[参 考 文 献]

- [1] 张克存,安志山,何明珠,等.中国沙区公路风沙危害及防治研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):222-232.
- [2] 李昂,王扬,薛建国,等.北方风沙区生态修复的科学原理、工程实践和恢复效果[J].生态学报,2019,39(20):7452-7462.
- [3] Li Congjuan, Wang Yongdong, Lei Jiaqiang, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China [J]. Journal of Arid Land, 2021,13(1):98-106.
- [4] 马学喜,王海峰,李生宇,等.两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J].水土保持通报,2015,35(3):344-349.
- [5] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.不同坡角公路路基流场的风洞试验[J].中国沙漠,2018,38(3):464-472.
- [6] Pan Xia, Wang Zhenyi, Gao Yong. Effects of compound sand barrier for habitat restoration on sediment grain-size distribution in ulan buh desert [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-9.
- [7] 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.
- [8] Li Bailiang, Sherman D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: a review [J]. Aeolian Research, 2015,17:33-48.
- [9] Liu Li, Bo Tianli. Effects of checkerboard sand barrier belt on sand transport and dune advance [J]. Aeolian Research, 2020,42:100546.

- [10] 程建军, 智凌岩, 薛春晓, 等. 铁路沿线下导风板对风沙流场的控制规律[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 16-23.
- [11] Zhang Shuai, Ding Guodong, Yu Minghan, et al. Application of boundary layer displacement thickness in wind erosion protection evaluation: case study of a salix psammophila sand barrier [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(4): 592-608.
- [12] Wang Tao, Qu Jianjun, Ling Yuquan, et al. Shelter effect efficacy of sand fences: a comparison of systems in a wind tunnel [J]. Aeolian Research, 2018, 30: 32-40.
- [13] 田美荣, 傅馨逸, 杨伟超, 等. 挡风墙设计及其在呼伦贝尔沙地治理中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(5): 970-975.
- [14] 康向光, 李生字, 王海峰, 等. 高立式沙障不同叠加模式的阻沙量对比分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 550-555.
- [15] 王海龙, 刘畅, 孙婧, 等. 沙漠铁路固沙砖设计参数的数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 59-64.
- [16] 丛顺, 李正农, 宫博, 等. 风沙流场特性及对建筑物影响的风洞试验研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(6): 1989-2001.
- [17] 鲁涛, 刘维, 徐玉波, 等. 台特玛湖干涸湖盆区风蚀起沙研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 119-126.
- [18] Yang Wei, Yu Meng, Yan Bowen, et al. Wind tunnel tests of wake characteristics for a scaled wind turbine model based on dynamic similarity [J]. Energies, 2022, 15(17): 61-78.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T338-2014 建筑工程风洞试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [20] 刘畅. 防风沙设施力学行为的研究及工程应用[D]. 河北张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
- [21] 陈波, 骆盼育, 杨庆山. 测压管道系统频响函数及对风效应的影响[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 130-134.
- [22] Huang Bing, Li Zhengnong, Zhao Zhefei, et al. Near-ground impurity-free wind and wind-driven sand of photovoltaic power stations in a desert area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 483-502.
- [23] 孙涛, 王祺, 刘世增, 等. 单排光伏板防风固沙功能的风洞模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 111-119.
- [24] Tominaga Y, Okaze T, Mochida A. Wind tunnel experiment and CFD analysis of sand erosion/deposition due to wind around an obstacle [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182: 262-271.
- [25] 郝负洪, 刘艳晨, 郭健, 等. 风沙环境变量相似理论及其应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 640-649.
- [26] 杨具瑞, 方铎, 毕慈芬, 等. 非均匀风沙起动规律研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 136-139.
- [27] 辛林桂, 程建军, 张志平, 等. 铁路侧向导沙沙障流场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 621-628.

(上接第 30 页)

- [25] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.
- [26] 姚贤良. 土壤物理学的研究动态及展望[J]. 土壤, 1985, 17(6): 281-289.
- [27] 刘锋. 阜新矿区排土场土壤质量对坡向与坡位的响应[D]. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [28] 张剑, 宿力, 王利平, 等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响: 以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.
- [29] 史沛雨. 采煤沉陷对西部风沙区土壤理化特性和细菌群落的影响[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [30] 裴宗阳, 胡振华, 刘瑞龙, 等. 我国煤矸石山水分研究进展[J]. 山西水土保持科技, 2011, 6(2): 4-6.
- [31] 冀雯霞, 赵峰侠, 张瑞, 等. 晋西北黄土丘陵区土壤和地形因子对草地植被优势种功能性状的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 749-758.
- [32] 郑彬. 煤矸石自然风化进程中风化物理性质变化研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [33] 胡振琪, 张光灿, 毕银丽, 等. 煤矸石山刺槐林分生产力及生态效应的研究[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 621-628.
- [34] 张宏芝, 朱清科, 王晶, 等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 55-58.
- [35] Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2011, 87(3): 357-367.
- [36] Zhu Yuanjun, Shao Mingan. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale dump slope in Liudaogou catchment on the Northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008, 147(3/4): 185-191.