

固沙剂沙障防风固沙效益的风洞模拟

陈丹丹¹, 陈阳¹, 董智^{1,2}, 张晨旭¹, 单小凤¹,

陈晓龙¹, 刘增哲¹, 珊丹³, 李锦荣³

(1. 山东农业大学林学院, 泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018; 2. 山东省高等学校黄河流域水土保持与林草生态保育协同创新中心, 山东 泰安 271018; 3. 黄河几字弯区域生态环境变化与综合治理内蒙古自治区野外科学观测研究站, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要: [目的] 阐明固沙剂沙障对气流场、地表蚀积变化与沙粒输移的影响, 为设置固沙剂沙障控制流沙提供依据。[方法] 在风洞内布设 0°(平坦沙面)、15°、30° 坡度下模型实物比为 1:1 喷洒固沙剂的方格沙障, 模拟测定 5 种风速下沙障对气流场、输沙量及障格内蚀积状况的影响。[结果] 1) 气流场存在障前风速减弱区、障上风速增加区及障后风速减弱区, 第 1 道沙障前—10H~1H 为障前风速减弱区, 障上—1H~0H 为风速增大区, 障后 0H~5H 为风速减弱区, 5H~8H 为风速恢复区; 第 2、3 道沙障也表现出类似规律。连续 3 道沙障障格内风速呈现降低-抬升-降低的变化趋势, 风速降低百分比分别为 51.97%~59.05%、28.14%~32.25%、47.15%~53.97%。2) 不同坡度与风速下输沙量与高度间呈指数函数关系, 平坦沙面输沙量随高度的增加而呈降低趋势, 15° 与 30° 时, 输沙量随高度呈增加趋势; 各高度上输沙量和总输沙量随坡度增大而减小, 随风速增大而增加, 且输沙量集中分布高度呈上升趋势。3) 平坦沙面沙障内风蚀深度与面积随风速增大而加大; 坡度对风蚀影响显著, 随坡度增大, 迎风坡前沙障风蚀减弱, 迎风坡沙障风蚀加重, 背风坡沙障积沙明显, 背风坡后沙障仅在高风速下(>18 m/s) 出现风蚀; 沙障障埂在不同风速与坡度下均保存完全。[结论] 固沙剂沙障具有良好的防风固沙效益, 且喷施固沙剂的沙体可避免风蚀, 研究结果为沙障的设置提供了理论支撑, 为荒漠化防治提供了一种新材料与新思路。

关键词: 风洞试验; 气流场; 输沙量; 防风固沙; 固沙剂方格沙障

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0222-09

Wind Tunnel Simulation of Windbreak and Sand-Fixation Benefits of Sand-Fixing Agent Sand Barriers

CHEN Dandan¹, CHEN Yang¹, DONG Zhi^{1,2}, ZHANG Chenxu¹, SHAN Xiaofeng¹,

CHEN Xiaolong¹, LIU Zengzhe¹, SHAN Dan³, LI Jinrong³

(1. Taishan Forest Ecosystem Positioning Research Station, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Co-Innovation Center for Soil and Water Conservation and Ecological Conservation in Yellow River Basin of Shandong Universities, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Field Scientific Observation and Research Station for Ecological Environment Change and Comprehensive Management in Yellow River Great Bend Region, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the effects of sand-fixing agent sand barriers on the airflow field, surface erosion-deposition variations, and sand particle transport, thereby providing a basis for the deployment of such barriers to control shifting sand. [Methods] In a wind tunnel, grid sand barriers sprayed with sand-fixing agent with a scale ratio of 1:1 were set up on slope gradients of 0° (flat sand surface), 15°, and 30°. The effects of

收稿日期: 2025-10-21

修回日期: 2025-12-10

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-27

资助项目: 内蒙古揭榜挂帅项目(2024JBGS0013); 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0153); 国家自然科学基金项目(42177347)

第一作者: 陈丹丹(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 15265807280@163.com

通信作者: 董智(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、盐碱地治理与生态恢复研究。E-mail: nmgdz@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

the barriers on the airflow field, sand transport amount, and erosion-deposition conditions within the grid sand barriers were simulated and measured at five wind speeds. **[Results]** 1) The airflow field comprised three zones: a wind deceleration zone in front of the barrier, a wind acceleration zone above the barrier, and a wind deceleration zone behind the barrier. The area from $-10H$ to $-1H$ in front of the first sand barrier was the wind speed reduction zone, the area from $-1H$ to $0H$ above the barrier was the wind speed increase zone, and the area from $0H$ to $5H$ behind the barrier was the wind speed reduction zone. The area from $5H$ to $8H$ was the wind speed recovery zone. Similar patterns were observed for the second and third sand barriers. Within the grids formed by three consecutive barriers, the wind speed showed a variation trend of decreasing, increasing, and decreasing. The wind speed reduction percentages were 51.97%–59.05%, 28.14%–32.25%, and 47.15%–53.97%, respectively. 2) At different slope gradients and wind speeds, the relationship between sand transport amount and height followed an exponential function. On the flat sand surface, the sand transport amount decreased with height, while at 15° and 30° slope gradients, it increased with height. The sand transport amount at each height and total sand transport amount decreased with increasing slope but increased with increasing wind speed. Additionally, the height at which the sand transport amount was concentrated showed an upward trend. 3) On the flat sand surface, both the depth and area of wind erosion within the barriers increased with increasing wind speed. Slope had a significant impact on wind erosion. With increasing slope gradient, erosion in front of the windward barrier weakened, erosion on the windward barrier intensified, sand deposition on the leeward barrier became pronounced, and erosion behind the leeward barrier occurred only at high wind speeds (>18 m/s). The barrier ridges remained completely intact at all tested wind speeds and slope gradients. **[Conclusion]** Sand-fixing agent sand barriers demonstrate good windbreak and sand-fixation benefits. Moreover, sand sprayed with the sand-fixing agent can avoid wind erosion. These findings provide theoretical support for sand barrier configuration and offer a new material and approach for desertification control.

Keywords: wind tunnel test; airflow field; sand transport amount; windbreak and sand fixation; sand-fixing agent grid sand barrier

Received: 2025-10-21

Revised: 2025-12-10

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-27

我国是世界上荒漠化危害最为严重的国家之一,风沙侵袭严重影响了区域生态、生产和生活安全及社会经济的可持续发展,因地制宜、多措并举、费省效宏是防治荒漠化发生、扩张的根本原则与方法。沙障是在流沙上设置的具有防风固沙阻沙功能、控制地表风沙运动的各种形式的障蔽物^[1],不仅可重塑地表微地貌以降低风蚀强度,还可为土壤种子库定植及植被修复营造基础生境^[2-3],在防沙治沙工程中发挥着极其重要的基础作用。沙障材料主要有植物材料、无机材料及有机化工材料等,不同材料设置的沙障其特点各异^[1-10]。麦草、树枝、芦苇等天然植物材料易获取,设置工艺简单易操作,但存在铺设慢、易腐烂、维护难等缺点^[3,9,11];而塑料(PE)网、高分子聚合物等有机化工材料则具有抗老化、工业化生产的特点^[10,12-13],但因铺设成本高、不易分解或易引起二次污染,难以大面积推广,因而,急需研发切实可行、操作方便、绿色环保的新型沙障材料。近些年的聚乳酸纤维(PLA)沙袋沙障因绿色可降解特性而得到青睐^[14],但人工灌装沙粒的施

工方式成为其大面积布设及机械化施工的瓶颈。土壤凝结剂喷施而成的沙障实现了“以沙治沙”的目的,成为新型固沙沙障材料研发的突破点^[8,10],但其施工成本相对偏高影响了生产实践的应用。受土壤凝结剂沙障启发,本文以喷施成本低、绿色无污染的新型液态多羟基固沙剂为试验材料,采用喷洒固沙剂的方式制作实物模型比1:1的沙土方格沙障,在风洞内开展不同风速下的固沙剂方格沙障气流场、输沙量及障格内蚀积状况的模拟实验,揭示了固沙剂方格沙障的防风固沙机理及效益,以期流沙固定及沙地风蚀控制提供科学依据与生产实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2021年10月在中国科学院西北院环境资源研究院沙坡头沙漠研究站野外环境风洞进行,试验风洞系统总轴向长度40 m,试验段长度21 m,截面 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$,边界层发育厚度达0.5 m,可精确模拟自然风场特征参

数。风速 0~40 m/s 内连续可调(精度 $\pm 0.5\%$),并配有高精度电子天平、集成梯度式集沙仪、皮托管及数字压力采集仪器。试验沙为研究站附近腾格里沙漠流动沙丘表层沙,沙子经晾晒干燥、去除杂物、过 2 mm 筛后备用。

试验使用的液态多羟基固沙剂由润涵(山东)生态科技有限公司生产并提供,该固沙剂为易溶于水、环保可降解的改性淀粉材料,色泽呈乳白色,常温下密度为 $1.00\sim 1.10\text{ g/cm}^3$,黏度 $>5\text{ MPa}\cdot\text{s}$,pH 为 6~8。使用时按喷施浓度加水并搅拌均匀后定量喷洒于沙面即可形成沙结壳,实现固沙功能。

1.2 试验方法

1.2.1 固沙剂方格沙障气流场测定 为保障试验满足几何相似与动力相似的要求,试验中沙障采用原型沙布设 3 个连续的 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 规格的 1:1 缩尺比的沙土方格沙障,障高 10 cm、底宽 20 cm。结合不同浓度固沙剂(1:30、1:50、1:70 和 1:100)固沙结皮在不同坡度(平坦沙面 0° 、 15° 和 30°)净风与挟沙风条件下 30 min 的风蚀率,综合考虑固沙效益与成本^[15],本试验选用在障埂上喷施 1:70 浓度固沙剂溶液,喷施量为 800 g/m^2 。喷施后静置 24 h,待表面形成沙结壳后进行气流场测定试验(图 1)。

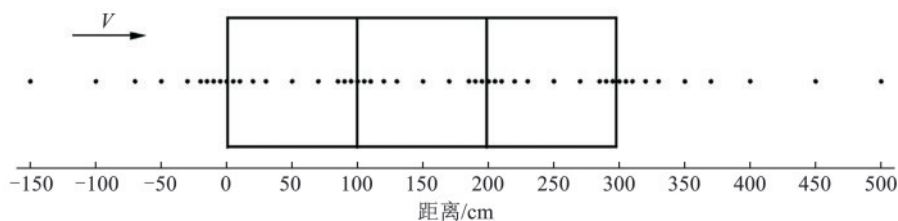


图 1 固沙剂方格沙障风速测定点位布设示意

Fig. 1 Layout of wind speed measurement points for sand-fixing agent grid sand barriers

1.2.2 固沙剂方格沙障输沙率测定 在试验段用沙子分别堆积 0° (平坦沙面)、 15° 和 30° 3 个坡度的沙地和沙丘,以模拟测定其输沙率。模拟平坦沙面时,在试验段水平设置 3 个连续的 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的沙方格,模拟 15° 和 30° 沙丘时,在试验段分别用沙子堆积成与风洞底板呈 15° 和 30° 的沙丘,相对于风洞地表分别抬升 0.25、0.5 m。在沙丘迎风坡、背风坡、迎风坡前与背风坡后各设置 1 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的沙障方格,共 4 个连续沙障方格。试验时在障格内铺设 4 cm 厚的沙子,选用 6、10、14、18、22 m/s 5 种风速进行吹蚀试验,根据预试验结果,吹蚀持续时间分别设置为 20、10、7、2、1 min。吹蚀试验时,平坦沙面与 15° 、 30° 沙丘分别在靠近风洞出风口一侧的方格沙障后方 20 cm 处布设集沙仪收集沙尘,平坦沙面后布设高度为 20 cm 的阶梯式集沙仪、 15° 、 30° 沙丘后设置高度为 60 cm 的垂直阵列集沙仪(图 2),2 种集沙仪入口断面分别为 $2.0\text{ cm}\times 2.0\text{ cm}$ 和 $1.0\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 。吹

流场测定时沿风洞试验段中心轴线位置布设皮托管定位装置。皮托管可沿主气流方向实现轴向平移,风速剖面测量高度为 4、8、12、16、32、64、120、200、350、500 mm,数据由计算机自动记录,风速记录时长为 20 s,记录频率为 2 s。

试验以迎风面第 1 道沙障坡顶对应风洞底部位置为基准原点(0H, H=10 cm, 为障埂高度),第 1 道沙障障前区域测定 -15H、-10H、-7H、-5H、-3H、-2H、-1.5H、障埂迎风坡底部(-1H)、中部(-0.5H)、顶部(0H)10 个点位,障后区域测定背风坡坡中(0.5H)、坡底(1H)、2H、3H、5H、7H、8.5H、9H 8 个点位,第 2、3、4 道障前区域与第 1、2、3 道障后区域测点位置相同且重叠,第 4 道障埂后测定至 20H 处,各测点位置见图 1,共计 49 个测点(图 1),包含固沙剂沙障的障前、障上及障后等风速变化范围,以便于分析布设固沙剂沙障对气流场的影响范围及空间分布。结合不同浓度固沙剂固沙效果的预试验结果,试验选用 6、10、14、18、22 m/s 5 个风速,其中 6 m/s 用于模拟起动风速,10~22 m/s 模拟不同等级(5~9 级)的风速,通过测定各测点不同高度上的试验风速的变化,可获得单个沙障及 3 个连续沙障的气流场,分析其防风效应。

蚀试验结束后,收集集沙仪各层沙量并采用高精度电子天平称重,计算输沙率并绘制分布图。

1.2.3 固沙剂方格沙障内沙面的蚀积状况测定 在 0° 、 15° 和 30° 模拟平沙地和沙丘沿主风向第 1 个方格沙障前铺设长 2 m、厚 10 cm 的沙粒作为沙源,沙障内铺设厚 4 cm 的沙粒作初始厚度,在 10、14、18、22 m/s 风速下观测试验过程中沙障内沙面的蚀积状况。试验前在每个障格内的沙层上布设 17 根测钎,测钎直径 0.15 cm,高度 20 cm,刻度间隔 1 mm。记录每根测钎露出沙面的初始位置,吹蚀完成后再次测定出露高度,测钎前后 2 次的高度差 $\Delta H = H_{\text{前}} - H_{\text{后}}$ 即为该点位的蚀积深度(负值为风蚀、正值为沙埋)。

1.2.4 数据处理与分析 对于获取的风速数据,采用使用 Surfer 26 软件绘制气流场图,对于输沙率与蚀积状况数据,使用 Origin 2022 软件绘图,并使用 SPSS 27 软件进行数据拟合和相关性分析。



图 2 输沙量与沙障内蚀积状况测定

Fig. 2 Measurement of sand transport amount and erosion-deposition conditions within sand barriers

2 结果与分析

2.1 气流场变化状况

由图 3 可知,不同风速下 3 个方格沙障的气流场变化趋势相同,在 3 个障格间形成障前风速减弱区、障埂上方风速增大区和障后风速减弱区,且第 1、2、3 道障埂障后风速减弱区与第 2、3、4 道障埂障前风速减弱区相连并叠加,障后风速减弱区对风速的减弱更为明显。不同风速下,气流经过第 1 个方格沙障时,在障前 $-10H \sim -1H$ 区域内风速减弱,且以 $-5H \sim -1H$ 区域风速迅速降低;在 $-1H \sim 0H$ 区域随着障埂的抬高,风速上升,且在 $0H$ (障埂顶部)达到最大;此后在障埂后方风速迅速下降,在 $0H \sim 8H$ 形

成障后的低速区,且以 $1H \sim 5H$ 区域内风速降低最大,在 $5H \sim 8H$ 区域风速开始恢复,但受后续沙障障前减速区的影响,风速恢复较慢,并在障后 $8H \sim 10H$ 区域又呈减弱趋势。在第 2、3 个方格沙障内气流场的变化与第 1 方格沙障内的相同,进而在 3 个方格沙障间形成风速降低-抬升-降低的连续变化。在第 3 个方格沙障后,风速明显减弱区域可达到障后 $8H$ 的区域,此后风速开始恢复,直到 $20H$ 恢复至试验风速的 $70\% \sim 80\%$ 。就 5 个不同风速而言,随着风速的增大,障前低速区和障后风速减弱区的范围逐渐缩减,在沙障障格中心位置 $5H$ 后风速开始有所增大,这也正是方格沙障中心最易风蚀的原因所在。

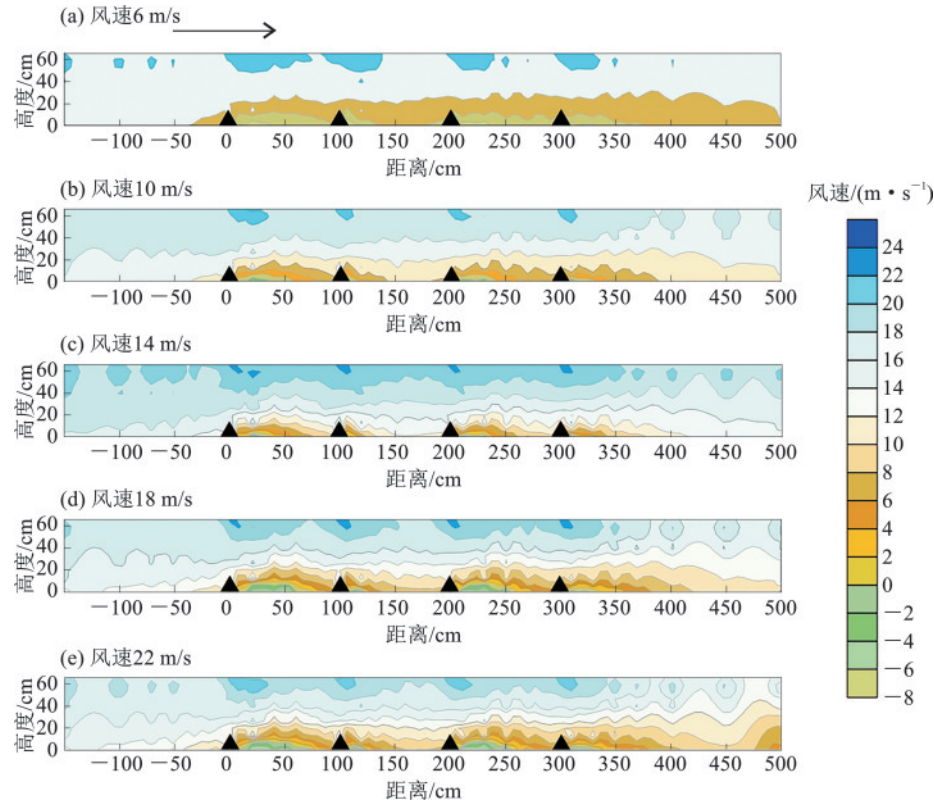


图 3 不同风速下固沙剂沙障的气流场

Fig. 3 Airflow fields of sand-fixing agent sand barriers at different wind speeds

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

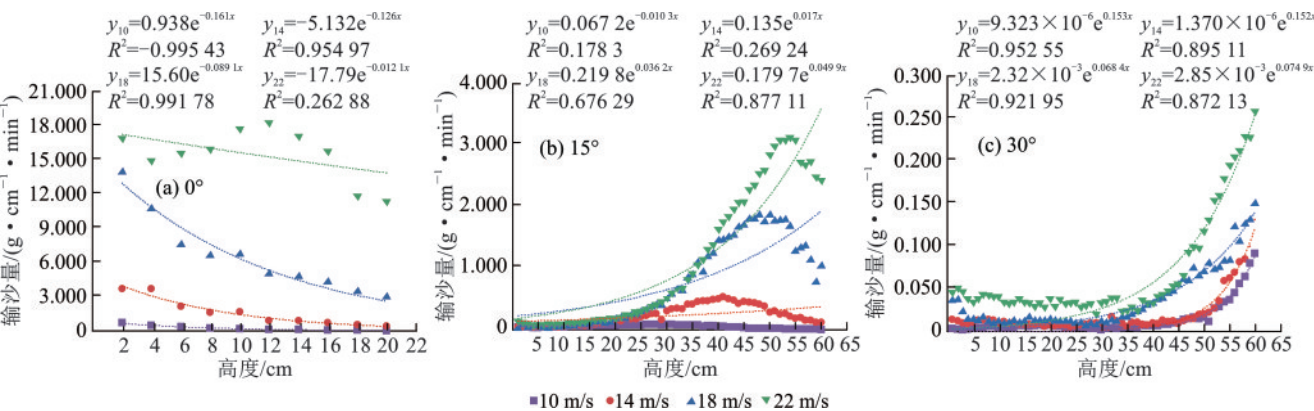
风速在连续方格沙障间及障后的降低呈现明显的空间分异特征,风速降低值见表 1。第 1 障格风速降低最为显著,达到 51.97%~59.05%,第 2 障格风速降低幅度有所减弱,第 3 障格风速降低幅度再次增大为 47.15%~53.97%,由此可知,连续铺设的方格沙障,可使风速处于衰减状态,并使障格内的风速多处于试验风速的 50% 左右。而在第 3 障格后区域,风速降低百分比随距离增加呈逐步递减趋势,至 20H 处,风速恢复至试验风速的 70%~80%,因而方格沙障后 20H 区域均为有效防护距离。

表 1 固沙剂沙障不同障格及障后区风速降低百分比
Table 1 Wind speed reduction percentage at different barrier grids and behind-barrier areas of sand-fixing agent sand barriers

位置	风速降低百分比/%
第 1 方格沙障	51.97~59.05
第 2 方格沙障	28.14~32.25
第 3 方格沙障	47.15~53.97
第 3 方格沙障后 10H	33.17~40.20
第 3 方格沙障后 15H	25.13~32.79
第 3 方格沙障后 20H	20.85~30.63

2.2 方格沙障输沙量的变化

不同坡度下 6 m/s 风速时方格沙障内未出现风蚀,输沙量为 0,其他 4 种风速条件下的输沙量见图 4。不同风速下平坦沙面输沙量随着高度的增加而呈降低趋势,随着风速的增大,各高度上对应的输沙量和总输沙量都明显增加,且垂直空间的差异也越大。风速为 10 m/s 时,0~20 cm 高度的总输沙量为 2.374 g/(m²·min),风速为 14、18、22 m/s 时,总输沙量分别是 10 m/s 时的 6.92、28.25、65.74 倍。随着风速增大,6 cm 以上层次的输沙量占总输沙量的比例急剧增大,风速为 10 m/s 时,6 cm 以上层次的输沙量占比为 51.24%,而在 14、18、22 m/s 时,其占比增大为 54.80%、62.76% 和 79.49%。特别是风速为 22 m/s 时,6~16 cm 高度范围内输沙量呈明显的增大趋势,输沙量均大于 2~4 cm 和 16 cm 以上各层的输沙量,且在 12 cm 达到最大。这说明伴随着风速增大,近地表风速会不断增大,沙表始终处于强烈的风蚀状态,沙尘可被吹蚀到中上层的高度,使得中上层的输沙量呈现出增大的趋势,但输沙量与高度间的指数函数关系的拟合度不高,R²仅为 0.258 6。而在 10、14、18 m/s 3 种风速下,输沙量与高度间呈现指数函数关系,且相关系数均达 0.945 3~0.995 2,表现为极显著相关。



注:从左至右坡度依次为 0°、15°、30°。

图 4 不同坡度下固沙剂沙障输沙量的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of sand transport amount in sand-fixing agent sand barriers at different slope gradients

坡度为 15° 时,输沙量随着风速的增大而增大,但不同风速下的总输沙量均明显低于平坦沙面的输沙量;输沙量随高度的变化呈现出下层(0~10 cm)小-中层大(>10 cm)-上层(>50 cm)小的趋势,但不同风速下中层达到最大输沙量的高度不同,且最大输沙量高度随风速增大而不断上移,增加幅度明显。4 个风速下,10 cm 以下层次的输沙量均低于 0.12 g/(cm·min),其输沙量占总输沙量的 25.12%、3.89%、1.35%、1.38%。10 m/s 时,不同高度上输沙量变化不大,均未

超过 0.10 g/(cm·min),最大输沙量 0.090 g/(cm·min)出现在 31 cm,即中层输沙量增大的层次发生于 20~31 cm 间;而在 14、18、22 m/s 风速下,中层的范围增大为 20~41、20~51、20~54 cm,41、51、54 cm 处最大输沙量分别为 0.536、1.879、3.112 g/(cm·min),该层次输沙量占总输沙量的比例分别为 50.42%、55.36%、67.96%、74.40%。中层至 60 cm 的层次,输沙量再次减小,该层次的输沙量占总输沙量的比例依次为 24.46%、40.75%、30.70%、24.23%。不同风速下输沙

量与高度间呈指数函数变化,10 m/s下的相关性不大,随风速增大,相关系数明显增大(图4)。

不同风速下30°坡度的输沙量比平坦沙面和15°坡度的输沙量显著降低(图4),且变化趋势也明显不同,不同风速下输沙量的垂直变化趋势相同,均随着高度、风速的增加而增大。在0~40 cm层次内,不同风速下的输沙量为0.190~1.371 g/(cm·min),占总输沙量的24.13%~34.05%,而41~60 cm层次的输沙量为0.596~2.656 g/(cm·min),占总输沙量的65.95%~75.87%,即70%左右的沙粒在上层输移。不同风速下,各层输沙量与高度间呈指数函数关系,相关系数均在0.87以上。

2.3 固沙剂方格沙障内沙面蚀积

平坦沙面方格沙障内沙面蚀积见图5。由图5

可知,10 m/s时,第1个障格内出现较浅的波纹状侵蚀,平均侵蚀深度<1 cm,但在垂直于风向的障格中部和两侧出现较小的风蚀凹坑,深度可达1.6~2.0 cm;在靠近边缘的障埂处有明显的积沙,厚度最厚可达2.4 cm。随着风速的增加,侵蚀现象更加明显,并向第2个沙障靠近,在第2、3个障格也表现出相同规律,即第2、3个格中部则出现明显的凹形风蚀坑,且风蚀面变大且后移,风蚀面积由最初的小范围集中于沙障的中部逐渐向四周蔓延。在18、22 m/s风速条件下,3个连续的方格沙障内风蚀坑连成一片,各方格沙障内沙面全部遭受风蚀,除在中线位置附近和障埂处还保留有少量沙粒堆积外,障格内大部分沙粒尤其是障格两侧沙粒侵蚀深度可达4 cm(图5)。

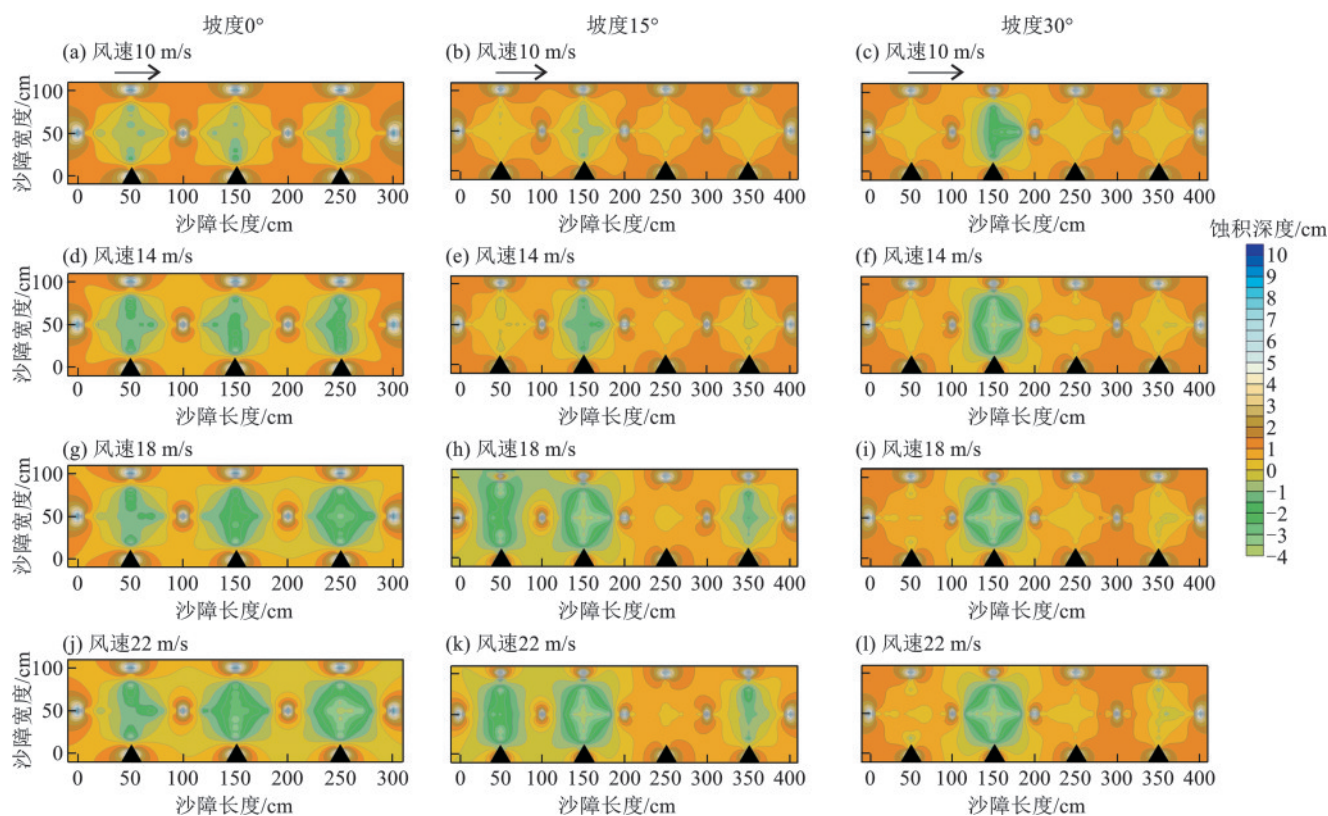


图5 不同风速、不同坡度下方格沙障蚀积变化

Fig.5 Erosion-deposition variations in grid sand barriers at different wind speeds and slope gradients

坡度为15°时,整体上迎风坡沙障以风蚀为主,背风坡沙障以积沙为主(图5)。10~14 m/s风速条件下,迎风坡前的沙障中部出现轻微风蚀,风蚀深度<0.5 cm,障内大部分区域积沙,积沙厚度0.2~1.6 cm,在障埂附近及中心部位,积沙厚度最高可达10 cm。而在18 m/s时,迎风坡前的沙障内则出现了明显的风蚀坑,风蚀深度平均>1.5 cm,最深可达4 cm;22 m/s时,风蚀坑加大且后移,除障埂附近有积沙外均被吹蚀。15°迎风坡坡面上方格沙障内的风蚀

深度随风速的增加而增大,10 m/s时迎风坡沙障除中部有较为明显的风蚀外,四周及障埂处有明显积沙,积沙厚度0.2 cm以上;14 m/s时障格中部的风蚀加深并出现风蚀波纹,风蚀向后方延伸,形成明显的凹面;18、22 m/s时除障埂处有积沙外,整个障格中部均被风蚀,风蚀深度4 cm。背风坡坡面沙障受风速遮蔽效应的影响,在不同风速下均明显积沙,且积沙量随风速的增加而增加,积沙厚度在0.2~10 cm。背风坡后的沙障尽管也受沙丘本身对风速遮蔽效应

的影响,但其影响效应随风速增大而下降,因而在 10、14 m/s 风速下无明显风蚀且整体上表现为积沙,18 m/s 时沙障中部及两侧出现风蚀,22 m/s 时风蚀范围进一步扩展,并在沙障中部形成明显的风蚀凹面,风蚀最深可达 3 cm。

坡度为 30°时,不同风速下障内的蚀积状况基本相似,但不同部位沙障的蚀积状况与坡度为 15°时的规律不尽相同(图 5)。迎风坡前的沙障内以积沙为主,仅在个别点位有少许风蚀;但迎风坡面上沙障内整体表现为风蚀,风蚀深度和风蚀面积随风速增大而逐渐增强并在中部形成明显的风蚀坑,风蚀深度由 10 m/s 时的 2 cm 左右加深为 14、18、22 m/s 时的 4 cm,风蚀凹面明显,障格中部沙子完全被风蚀掏空。背风坡面沙障与背风坡前的沙障整体上均表现出稳定的积沙特征,且积沙量呈现出由前至后递增的趋势,在各风速下积沙均形成前低后高的凸起形态;但值得注意的是,背风坡后部的沙障呈现出前部积沙、后部风蚀现象,且随着风速增大,后部风蚀面积与深度有所扩展。此外,本研究还发现,坡度对沙面的风蚀具有较好的缓滞作用,有坡度沙障内部的蚀积状况较无坡度设置时有所减弱,其表现特征不如后者明显。这一系列现象揭示了风速与地形因素对沙障防护效能的综合影响机制。

3 讨论

3.1 连续固沙剂方格沙障气流场特征

5 种试验风速下 3 个连续 1:1 的方格沙障的气流场变化有所区别,但总体趋势均表现为存在障前障后风速减弱区及沙障上方的风速加速区,风速在障格间呈现出“减弱-增强-减弱-恢复”的循环变化。方格沙障流场的这种变化规律与直立式纱网沙障、土工格栅沙障、石方格沙障、植物纤维网沙障、羽翼袋沙障在风洞试验下的流场变化特征相同^[8-10,12,16-18],但不同材料与不同布设方式沙障的弱风区范围有所不同。本研究的方格沙障在障前—10H~—1H、障后 0H~8H 出现弱风区,0H 表现为高速区,而直立式纱网沙障(障高 10 cm)的障后 0H~2H、4H~6H 和障前—3H~0H 范围内形成弱风区,0H 为高速风涡旋^[12];植物纤维网的障后减速区发生在 1H~8H^[17];带状布设的羽翼袋沙障弱风区范围可达 10.6H~15.2H^[19],而与本材料相似的土壤凝结剂方格沙障的弱风区范围在 8H^[8,10]。显然,各种材料的沙障在不同风速下的流场变化规律尽管相同,但受材料孔隙度、布设方式等的影响而有所差异,纱网或纤维网沙障的材料为透风式且带状布设,其障后的弱风区范围变窄,而羽翼袋沙障受随风波动的“羽翼”消风作用的影响,

其弱风区范围增大^[19],同为方格且材料为“刚性”不透风的土壤凝结剂沙障与本研究结果相似^[8,10]。此外,沙障还可起到增大地表粗糙度的作用,地表粗糙度的增加会使得沙障前后产生风速涡旋,导致风速发生衰减而降低,进而在沙障前后对沙粒进行阻截、阻挡而使沙粒堆积^[12-13,16]。

当连续设置多个方格沙障后,每个障格均具有降低风速的作用效益,但降速效益有所差异^[13,17,19],本研究中,固沙剂方格沙障降低风速呈“波浪”式变化,第 1 个障格沙障降低风速效益最为突出,第 2 个障格内风速降幅减弱,第 3 个障格内风速降幅有所恢复,在第 3 个障格后的空沙地上风速降低幅度继续增强,这与朱志昊等^[20]在格状沙障风洞试验研究得出的结论相一致。但与姚正毅等^[21]、韩雪莹^[19]带状布设的沙障对风速减弱作用的持续增强不完全相同,这与沙障布设方式不同有关。

3.2 固沙剂沙障输沙量与蚀积状况

平坦沙面与 15°时,不同风速下的输沙量随高度上升表现为先增加后降低的趋势,且随着风速的增加,最大输沙量出现的高度呈增大趋势,形成一个明显的凸起,这一现象在众多研究^[16,20-22]中均有出现输沙量呈现的不同高度处的增大现象由前文对于气流场的研究可以得出,气流在沙障上方抬升,使得沙障斜上方喷射流更强,会带动沙粒向较高高度运动;而且,由于喷施固沙剂的方格沙障较硬,沙粒和沙障之间的碰撞导致的弹性冲击可促使沙子再次被反弹回空中^[16],因而可在更高的空间上积沙。而当坡度为 30°时,总输沙量与各层输沙量均较 0°和 15°时显著降低,且上层(41~60 cm)的输沙量大于下层(0~40 cm),与 0°和 15°时的表现明显不同。随着坡度增大,坡面上沙粒的起动风速亦增大,相应地输沙量会有所减小^[24],且在沙丘顶部导致的喷射流也会沿运动轨迹被输移得更远更高,加之背风坡坡度增大后带来的涡旋效应及沙丘本身的遮蔽效应,使贴近沙丘运行的沙粒沉积在背风坡,而以喷射流输移的沙粒则在较高位置运行,因而在集沙仪上层仍可收集到较多的沙粒,下层则因沙子在障格内的沉积而收集到少量的沙粒,这一点可通过障格的蚀积状态得到证实(图 5)。

从不同坡度、风速组合下的试验结果可知,低风速下,障格内的沙面凹凸不平,有沙波纹出现,而当风速过大时,障格内边缘出现严重的掏蚀现象,障格中部多数被风蚀成稳定的凹曲面,甚至有的已被完全侵蚀,产生凹曲面的重要原因则是受沙障后方风沙流的回流所致,这一试验结果在野外和风洞内的

若干种方格沙障中均被证实^[16,20-21,24]也可在本研究的气流场中得到验证,在障埂中部及障后1H处会测到风向完全相反的“负”风速,即风速涡旋回流^[25]。

本研究还表明,随着坡度的增大,遭受风蚀的障格的数量减少,但侵蚀深度加大,尤其在迎风坡障格表现明显,坡度达到30°时背风坡以积沙为主,仅在坡脚后的障格有轻微侵蚀。在平坦沙面上,沙面所受作用力小,风沙流一直未达到饱和状态,因而连续障格一直处于风蚀状态,输沙量也最大。而当障格有坡度时,风速逐渐增强,挟沙能力也逐渐增强,沙面受运动沙粒的直接撞击力、磨蚀力和风压力均增强,使得风蚀量较平坦沙面的输沙量增大,导致迎风坡上部积沙较少,而在气流由迎风坡向背风坡流动的过程中,气流在背风坡形成涡旋引起风速下降,使气流中携带的大量沙粒在背风坡沉积,形成较大范围的积沙(图5)。本研究还表明,喷洒固沙剂之后的方格沙障,在试验过程中,形态未造成破坏,能够更好地发挥沙障固定沙丘的作用,也意味着在沙面喷洒固沙剂后即可形成沙面结皮,能够很好地固定流沙,在试验风速条件下不会发生风蚀。

4 结论

1)气流场存在障前风速减弱区、障上风速增加区及障后风速减弱区,且第1道沙障降低风速能力最强,第2道沙障降低风速的能力下降、第3道沙障的降低风速能力增加。其中第1道沙障前—10H~1H为障前风速减弱区,障上—1H~0H为风速增大区,障后0H~8H为风速减弱区,5H~8H风速开始恢复,第2、3道沙障也表现出类似规律。且固沙剂沙障不同障格风速降低百分比分别为51.97%~59.05%、28.14%~32.25%、47.15%~53.97%。

2)不同坡度与风速下输沙量与高度间呈指数函数关系,平坦沙面输沙量随高度的增加而呈降低趋势,15°与30°时,输沙量随高度变化呈增加趋势;各高度上输沙量和总输沙量随风速增大而增加,随坡度增大而减小;随着坡度的增加,输沙量开始由下层向上层集中,且风速越高,输沙量集中的高度越高。

3)随着风速的增加平坦沙面障格内沙面的风蚀深度增大,风蚀面则由中部向边缘蔓延直至全部风蚀;坡度对风蚀影响显著,坡度为15°和30°时,迎风坡沙障以风蚀为主、背风坡沙障以积沙为主,且风蚀深度和面积随风速增大而增强;迎风坡前和背风坡后沙障在低风速(<14 m/s)下以积沙为主,高风速下(>18 m/s)以风蚀为主,且前者的风蚀深度与面积大于后者。喷洒固沙剂的障埂在试验风速与吹蚀时间下未发生风蚀。

参考文献:

- [1] 丁国栋,董智.荒漠化防治工程学[M].中国林业出版社,2020,12.
DING G D, DONG Z. Desertification Combating engineering[M]. China Forestry Press, 2020, 12.
- [2] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.我国沙障固沙技术研究进展及展望[J].中国水土保持,2019(1):35-37.
DING X H, LIU X Y, LIU G Q. Research progress and prospects of sand barrier sand-fixation technology in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1):35-37.
- [3] 万玲玲,董智,李红丽等.沙柳方格沙障对土壤种子库的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(4):78-85.
Wan L L, DONG Z, LI H L, et al. Effects of salix psammophila grid sand barriers on soil seed banks[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(4):78-85.
- [4] 猛克,蒙仲举.沙漠地区光伏电站典型格状沙障防风固沙综合效益评估[J].中国沙漠,2025,45(5):360-368.
MENG K, MENG Z J. Comprehensive benefit assessment of typical grid sand barriers for wind prevention and sand fixation in desert-area photovoltaic power stations[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(5):360-368.
- [5] 屈建军,朱志昊,李启航,等.双层网盾状沙障防风固沙效益的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(3):141-151.
QU J J, ZHU Z H, LI Q H, et al. Wind tunnel test on windbreak and sand-fixing effect of double-layer net shield sand barrier[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3):141-151.
- [6] 杜晟仲,何明珠,郭源上,等.麦草和高密度聚乙烯沙障对地表温度的影响[J].中国沙漠,2025,45(3):191-197.
DU S Z, HE M Z, GUO Y S, et al. Effects of straw and high-density polyethylene sand barriers on surface temperature[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3):191-197.
- [7] 丁庆军,许祥俊,陈友治,等.化学固沙材料研究进展[J].武汉理工大学学报,2003,25(5):27-29.
DING Q J, XU X J, CHEN Y Z, et al. The research advances of chemical sand-fixing materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(5):27-29.
- [8] 李红丽,董智,孙保平,等.土壤凝结剂沙障固沙机理及流沙控制的研究[J].水土保持学报,2004,18(4):7-11.
LI H L, DONG Z, SUN B P, et al. Study on sand-fixing mechanism and shifting-sand control of soil coagulant sand-barrier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4):7-11.
- [9] 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 Z, LI H L, WANG J, et al. Wind tunnel test on effect of controlling wind and deposited sand of geogrid sand-barrier[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1):35-39.

- [10] 董智,李红丽,左合君,等.土壤凝结剂沙障防风固沙实验研究[J].中国水土保持科学,2004,2(2):45-49.
DONG Z, LI H L, ZUO H J, et al. Wind protection and sand fixation effects of soil coagulant sand barrier[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 45-49.
- [11] 韩雪莹,王涛,杨文斌,等.中国沙障研究进展与热点分析:基于Vosviewer和Citespace的图谱量化分析[J].中国沙漠,2021,41(2):153-163.
HAN X Y, WANG T, YANG W B, et al. Research progress and hotspot analysis of sand barrier in China quantitative analysis of atlas based on Vosviewer and Citespace[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 153-163.
- [12] 闫德仁,胡小龙,黄海广,等.直压立式纱网沙障风洞试验研究[J].防护林科技,2017(12):1-4.
YAN D R, HU X L, HUANG H G, et al. Wind-tunnel experiment by using vertical PE-yarn-net sand-barrier[J]. Protection Forest Science and Technology, 2017(12): 1-4.
- [13] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排尼龙阻沙网-草方格联合沙障防风效应的风洞实验[J].中国沙漠,2024,44(3):9-17.
WANG M L, SONG L, LIU J, et al. Wind tunnel experiment on windproof effect of double-row nylon sand-blocking net-grass square combination [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 9-17.
- [14] 张帅,原伟杰,刘卉,等.附面层位移厚度对沙障防风效益评价的适用性研究:以聚乳酸(PLA)沙障为例[J].干旱区地理,2023,46(12):1973-1983.
ZHANG S, YUAN W J, LIU H, et al. Applicability study of the boundary layer displacement thickness to the evaluation of sand barrier windbreak benefits: A case of polylactic acid sand barrier [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 1973-1983.
- [15] 张晨旭.基于风洞模拟实验的固沙剂防风固沙效果研究[D].山东泰安:山东农业大学,2024.
ZHANG C X. Study on wind-proof and sand-fixing effect of sand-fixing agent based on wind tunnel simulation experiments [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2024.
- [16] 潘加朋,张克存,安志山,等.基于风洞模拟试验的典型机械防沙工程防护效益对比[J].水土保持学报,2023,37(6):104-110.
PAN J P, ZHANG K C, AN Z S, et al. Comparative analysis of protective benefits of typical mechanical sand control projects based on wind tunnel simulation experiment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 104-110.
- [17] 邓雅文,俎瑞平,宗玉梅,等.植物纤维网沙障防风效能的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(1):242-248.
DENG Y W, ZU R P, ZONG Y M, et al. Wind tunnel simulations on windbreak efficiency of sand barriers made of plant fiber nets [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1): 242-248.
- [18] 钟卫,刘涌江,杨涛.3种沙障防风固沙效益比较的风洞实验研究[J].水土保持学报,2008,22(6):7-12.
ZHONG W, LIU Y J, YANG T. Wind tunnel test study on effect contrast of wind-breaking and sand-fixing of three sand-barriers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 7-12.
- [19] 韩雪莹.羽翼袋沙障防护机理与防沙效益研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
HAN X Y. Study on mechanism and benefit of wing bag sand barrier [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [20] 朱志昊,屈建军,赵爱国,等.两种形状镁水泥板沙障防风积沙效益的风洞试验[J].中国沙漠,2024,44(2):1-10.
ZHU Z H, QU J J, ZHAO A G, et al. Wind tunnel test on wind-blown sand prevention effects of two kinds of magnesium cement board sand barriers [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(2): 1-10.
- [21] 姚正毅,屈建军,肖建华,等.刷状沙柳沙障固沙性能风洞模拟[J].中国沙漠,2024,44(3):290-297.
YAO Z Y, QU J J, XIAO J H, et al. Wind tunnel simulation on the sand fixation performance of a kind of brush shaped Salix psammophila sand barrier [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 290-297.
- [22] 闫德仁,胡小龙,黄海广,等.不同几何形状纱网沙障输沙量风洞模拟实验研究[J].内蒙古林业科技,2017,43(3):14-17.
YAN D R, HU X L, HUANG H G, et al. Wind tunnel modeling test on sediment discharge of PE yarn net sand barrier with different geometrical shapes [J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2017, 43(3): 14-17.
- [23] 张惜伟,汪季,海春兴,等.呼伦贝尔沙质草原风蚀坑地表风沙流结构特征[J].干旱区研究,2018,35(6):1505-1511.
ZHANG X W, WANG J, HAI C X, et al. Structure of drifting sand flow over the surface of blowouts in the Hulun Buir sandy grasslands [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1505-1511.
- [24] 丁国栋,赵媛媛.风沙物理学[M].3版.北京:中国林业出版社,2021.
DING G D, ZHAO Y Y. Aeolian physics [M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.
- [25] 周娜,张春来,田金鹭,等.半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J].地理研究,2014,33(11):2145-2156.
ZHOU N, ZHANG C L, TIAN J L, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments [J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2145-2156.