

风水交互作用下乌兰布和沙漠东缘地表沉积物粒度特征

李思瑶^{1,2}, 蒙仲举^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 为揭示黄河上游乌兰布和沙漠段沿岸风沙入黄的物质输运特征与空间分异模式。[方法] 选取沙漠-河流直接接触的典型过渡区, 基于地表湿度梯度与沉积物粒度分异, 将研究区域细分为边缘区(X1)、过渡区(X2)和近岸区(X3)3个子区域, 系统分析表层沉积物粒度组成和输沙特征。[结果] 边缘区以中细沙为主, 平均粒径 145.03 μm , 风蚀作用强烈; 过渡区中沙主导, 平均粒径 217.13 μm ; 近岸区以粉粒为主, 平均粒径 24.95 μm , 水动力影响明显。各区域地表沉积物分选性差, 偏度为极负偏-近对称-极负偏, 峰态为尖窄-中等-尖窄。边缘区跃移组分占比 > 95%, 呈两段式分布, 表征长距离风沙搬运, 过渡区以跃移为主, 悬移组分仅占 3%, 近岸区悬移、跃移和蠕移组分分别占 26.1%、67.2% 和 6.7%。风沙流垂向分选显著, 输沙量随高度呈指数衰减, 0~10 cm 土层贡献率达 62%~78%。边缘区、过渡区和近岸区易蚀颗粒粒径分别为 170.3~446.5、137.5~401.2、123.6~291.0 μm 。[结论] 边缘区是风蚀治理的重点区域, 可通过布设沙障和提高植被盖度等方式削弱其风蚀作用, 减少颗粒的释放。

关键词: 乌兰布和沙漠; 风水复合侵蚀; 粒度特征; 风蚀颗粒

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0139-09

Grain Size Characteristics of Surface Sediments at the Eastern Margin of Ulan Buh Desert under the Interaction of Wind and Water

LI Siyao^{1,2}, MENG Zhongju^{1,2}

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Hohhot 010018, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to reveal the material transport characteristics and spatial differentiation pattern of wind-blown sand into the Yellow River along the Ulan Buh Desert in the upper reaches of the Yellow River. [Methods] A typical transition zone where the desert directly contacts the river was selected. Based on surface humidity gradients and sediment grain size differentiation, the study area was subdivided into three sub-regions, i.e. the marginal zone (X1), transition zone (X2), and nearshore zone (X3). The grain size composition and sediment transport characteristics of surface sediments were systematically analyzed. [Results] The marginal zone was dominated by medium-fine sand, with an average particle size of 145.03 μm and strong wind erosion. The transition zone was dominated by sand, with an average particle size of 217.13 μm . The nearshore area was dominated by silt, with an average particle size of 24.95 μm , and the hydrodynamic influence was obvious. The sorting of surface sediments in each region was poor, the skewness was extremely negative deviation-near symmetry-extremely negative deviation, and the kurtosis was narrow-medium-narrow. The proportion of saltation components in the marginal zone was more than 95%, showing a two-stage distribution indicative of long-distance

收稿日期: 2025-01-25

修回日期: 2025-03-21

录用日期: 2025-04-16

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFHH0076); 国家重点研发计划项目 (2024YFF1306300); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目 (BR22-13-03)

第一作者: 李思瑶 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 1109405178@qq.com

通信作者: 蒙仲举 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mengzhongju@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

aeolian sand transport. The transition zone was dominated by saltation, and the suspended component accounted for only about 3%. The suspended, saltation, and creep components in the near-shore area accounted for 26.1%, 67.2% and 6.7%, respectively. The contribution rate of 0–10 cm layer was 62%–78%, and the near surface was the core area of wind-blown sand activity. The particle size ranges of the erodible particles in the marginal zone, the transition zone, and the nearshore zone were 170.3–446.5, 137.5–401.2 and 123.6–291.0 μm , respectively. [Conclusion] The marginal zone is the key area for wind erosion control. The wind erosion effect can be weakened and the release of particles can be reduced by setting sand barriers and increasing vegetation coverage.

Keywords: Ulan Buh Desert; wind-water erosion; grain size characteristics; wind-eroded particle

Received: 2025-01-25

Revised: 2025-03-21

Accepted: 2025-04-16

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

在全球干旱与半干旱区的沙漠河流系统中,风沙与河流的交互作用深刻影响着地表物质迁移与地貌演化过程^[1-2]。宁蒙河段位于黄河上游,是风沙入黄的主要区域,严重威胁着黄河的生态安全^[3]。自 20 世纪 80 年代以来,国内外学者围绕该河段,对风沙入黄量估算^[4-5]、粗泥沙来源^[6-7]和河道演变^[8-10]等关键问题开展大量的研究,揭示风沙—水沙相互作用对河道演变的复杂影响。风水复合侵蚀使沿岸风成沙不断输入河道,是黄河泥沙中粗沙的重要来源,并显著加剧宁蒙沙漠河段的河道淤积^[11]。据估算^[12],石嘴山—巴彦高勒段的年均风沙入黄量达 $9.31 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。干湿交替与冻融循环作用能够降低土壤抗剪强度,进一步提升风沙土的可蚀性^[13]。沙漠边缘因风沙流与河岸水体的直接接触,成为风水能交换的高频作用区,乌兰布和沙漠段作为该河段的主要风沙源区,沙丘前沿距黄河河道最近处不足 500 m,风沙通过风沙流、沙丘迁移及河岸坍塌等方式持续输入河道,直接导致河床淤积、河道摆动加剧及沿岸土壤侵蚀恶化,形成“沙逼水退”的恶性循环。

沉积物粒度特征(如平均粒径、分选系数、偏度)能够有效反映风沙活动强度、土壤可风蚀性及沙漠化进程^[14]。然而,现有研究对于界定该区域沉积物易蚀颗粒粒径阈值仍存在一定的局限性。国内学者^[15-16]在探究沉积物粒度分布与侵蚀强度的关联性时,大多沿用董治宝等^[17]基于风洞模拟试验提出的经验性假设,即直接采用 0.075~0.4 mm 粒径作为易蚀性判定标准,对区域沉积物源岩性特征及地质演化背景下的物源异质性缺乏系统性考量。

本研究以乌兰布和沙漠东缘典型风水交互带为对象,基于原位沉积物样本采集与风蚀物粒度谱的系统分析,深入探究河岸带风沙入黄的物质输运规律与空间分异模式,并对易蚀颗粒粒径范围进行判定,以为黄河上游生态屏障构建与风沙入黄精准防控提供理论支撑,对推动联合国 2030 年可持续发展目标

中“土地退化零增长”的实现具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河西侧、乌兰布和沙漠东缘,地理坐标为 $40^{\circ}04'22'' \sim 40^{\circ}04'26''\text{N}$, $106^{\circ}45'28'' \sim 106^{\circ}45'31''\text{E}$,行政区隶属于阿拉善左旗巴彦木仁苏木(图 1)。该区域是黄河沿线唯一与沙漠直接相接的地区,具有典型的中温带大陆性季风气候,年平均气温约 8.0°C ,年降水量约 140 mm,年日照时间 2 800~3 400 h。多年平均大风日数超过 30 d,年平均风速为 3.7 m/s,每年起沙风次数不少于 200 次,多则可达 250 次以上,主要受西风、西北风及西南风影响^[18]。该区域是黄河沿线风沙灾害最严重且最具代表性的地段。

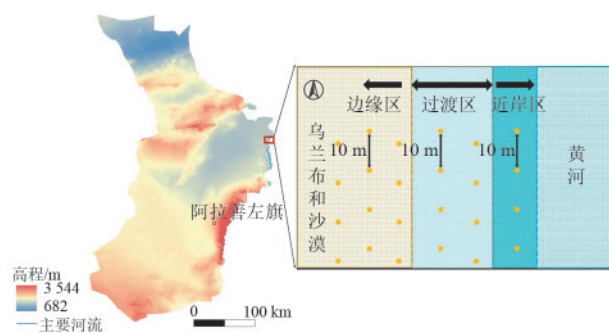


图 1 研究区概况及采样点

Fig.1 General situation of the study area and schematic diagram of the sampling points

1.2 野外调查取样

2024 年 11 月,选取黄河内蒙古段与乌兰布和沙漠东北缘交界处作为典型风水交互带采样区,该区域沿河道走向延伸 500 m,属于沙漠—河岸生态过渡带的高活跃侵蚀界面。基于地表湿度梯度和沉积物粒径分异特征,将采样区自沙漠腹地向河岸依次划分为边缘区(X1)、过渡区(X2)和近岸区(X3),各区域基本特征见表 1。采用随机采样法(间距 $10 \pm 2 \text{ m}$)沿河道走向布设采样点,共采集 0~2 cm 表层沉积物样品 257 个(X1、X2、X3 分别采样 122、82、

53 个)。为确保样品的代表性与重复性,所有采样点的 GPS 坐标均被精确记录。采集后将样品密封于自封袋中,保存备用,供土壤机械组成等相关指标的测定。

表 1 不同区域地表特征介绍

Table 1 Introduction of the surface characteristics of different regions

采样区域	地表特征
X1(边缘区)	地表干燥且土质疏松,主要为沙质土壤,地下土壤保持潮湿状态,植被稀疏
X2(过渡区)	土壤沙质明显,颗粒较粗,植被稀少,以低矮草类为主。夏季河水流经,冬季河道水位明显下降,露出河漫滩
X3(近岸区)	地表土壤质地较细腻,植被生长受限。夏季河道频繁摆动,水动力作用强,冬季河道水位明显下降,露出河漫滩

2024 年 11—12 月,在 3 个典型区域沿主害风方向分别选取监测点位,放置自研式可旋转集沙仪用于监测不同高度的风沙流输沙量。集沙仪总高度为 50 cm,每 2 cm 为 1 层,共分 25 层;每个集沙口的规格为 2 cm×2 cm,后端连接尼龙集沙袋以收集风蚀颗粒。为确保数据的准确性和可靠性,每个观测点布设 3 个平行集沙仪。

1.3 指标测定与计算

土壤样品在内蒙古农业大学风沙物理学实验楼进行风干处理,采用 Malvern MS 3000 型激光粒度分析仪进行土壤机械组成测定。试验中采用中国土壤粒径分类标准^[19],其中包括砾石(>2 000 μm)、极粗沙(1 000~2 000 μm)、粗沙(500~1 000 μm)、中沙(250~500 μm)、细沙(100~250 μm)、极细沙(50~100 μm)、粉粒+黏粒(<50 μm)。

1)土壤粒度参数的计算

利用 GRADISTAT 软件计算平均粒径(M_z)、中值粒径(D₅₀)、分选系数(σ)、偏度(Sk)、峰度(Kg)等粒度参数。具体计算过程遵循 FOLK 等^[20]方法。

2)单宽输沙率的计算

采用自研式可旋转集沙仪收集数据,计算公式为^[21]:

$$Q=\frac{W}{L\Delta T}$$

(1)

式中:Q 为输沙率,g/(cm·h);W 为总集沙量,g;L 为

集沙仪进沙口宽度,cm;ΔT 为观测时间,h。

3)风沙流特征值的计算

根据该地区地表的蚀积情况,结合吴正等^[22]研究方法,计算公式为:

$$\lambda=\frac{Q_{2\sim 10}}{Q_{0\sim 2}}$$

(2)

式中:Q_{2~10} 为风沙流中 2~10 cm 输沙率,g/(cm·h);Q_{0~2} 为风沙流中 0~2 cm 输沙率,g/(cm·h)。

1.4 数据处理

本研究使用 Excel 2018 软件进行数据预处理,SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)及 LSD 法检验不同区域地表土壤粒度组成及其参数的显著性差异,置信区间为 95%。采用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同区域地表沉积物的粒度特征

2.1.1 地表沉积物的粒度组成特征 由表 2 可知,X1 和 X2 地表沉积物以沙粒为主,沙粒平均体积分数分别为 85.32% 和 97.63%,而 X3 沙粒仅占 24.99%。进一步分析沙粒组成,X1、X2 细沙体积分数超过 50%,显著高于 X3(p<0.05),中沙体积分数超过 20%,显著高于 X3(p<0.05),X3 极细沙体积分数显著高于 X1 和 X2(p<0.05),达 20% 以上。X3 土壤主要由粉粒+黏粒组成,其平均体积分数达 75.03%,显著高于 X1 和 X2(p<0.05),而 X1 和 X2 的黏粒均不足 15%。

表 2 地表沉积物的粒度组成

Table 2 Grain size composition of surface sediments

采样区域	粉粒+黏粒 (<50 μm)	极细沙 (50~100 μm)	细沙 (100~250 μm)	中沙 (250~500 μm)	粗沙 (500~1 000 μm)	极粗沙 (1 000~2 000 μm)
X1	14.67±0.76B	11.62±0.44B	51.19±0.32B	22.47±0.91B	0.04±0.06B	-
X2	2.37±0.12C	3.71±0.06C	60.59±0.36A	33.18±0.46A	0.15±0.06A	-
X3	75.03±1.44A	20.86±0.12A	3.60±1.27C	0.54±0.29C	-	-

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同采样区域间差异显著(p<0.05)。下同。

2.1.2 地表沉积物的粒度参数特征 由表 3 可知,X1、X2 和 X3 的表层沉积物平均粒径分别为 145.03、217.13、24.95 μm,依次属于细沙级、细沙级和粉粒级,三者间存在显著差异(p<0.05),表明沉积动力环境的空间分异性。中值粒径与平均粒径呈相似变化

趋势(X2<X1<X3),且组间差异显著(p<0.05),X1 和 X3 的中值粒径分别为 180.67、24.95 μm,显著低于其平均粒径,结合 X1 偏度-0.46、X3 偏度-0.38 的极负偏态特征,进一步揭示二者沉积物呈细粒组分主导的分布模式,暗示细颗粒物占比显著偏高且分选

性较差,其中 X1、X3 的分选系数分别为 1.21、1.61。分形维数随细颗粒增加呈阶梯式递增,其中 X3 的分形维数最大,与其粉粒级高占比(>50%)及复杂颗

粒形态一致。相较而言,X2 沉积物表现出近对称偏度、中等峰态及最优分选性,说明其颗粒分布集中、粗细组分比例均衡。

表 3 地表沉积物的粒度参数

Table 3 Grain size parameters of surface sediments

采样区域	平均粒径/ μm	中值粒径/ μm	标准偏差	偏度	峰态	分形维数
X1	145.03 $\pm$ 4.69B	180.67 $\pm$ 3.33B	1.21 $\pm$ 0.03B	-0.46 $\pm$ 0.01C	1.35 $\pm$ 0.01A	2.17 $\pm$ 0.01B
X2	217.13 $\pm$ 1.10A	220.70 $\pm$ 1.08A	0.58 $\pm$ 0C	-0.09 $\pm$ 0A	1.01 $\pm$ 0C	1.97 $\pm$ 0.02C
X3	24.95 $\pm$ 0.87C	32.52 $\pm$ 0.66C	1.61 $\pm$ 0.02A	-0.38 $\pm$ 0.03B	1.24 $\pm$ 0.04B	2.56 $\pm$ 0.01A

2.1.3 地表沉积物的土壤颗粒粒径分布曲线 土壤颗粒粒径分布曲线可用于分析偏度、峰度等参数,并通过波峰特性推测沉积动力与物源特征。由图 2 可知,X1、X2 和 X3 的地表土壤频率分布曲线差异显著。X1 表现为双峰型,主峰出现在 210 μm 附近,

次峰出现在 30~60 μm 附近且较为平坦。X2 呈单峰对称分布,波峰在 210 μm 附近,颗粒分布集中。X3 表现为双峰型,主峰出现在 30~40 μm 附近,在 210 μm 附近存在 1 个不甚明显的起伏,整体粒径跨度较大。

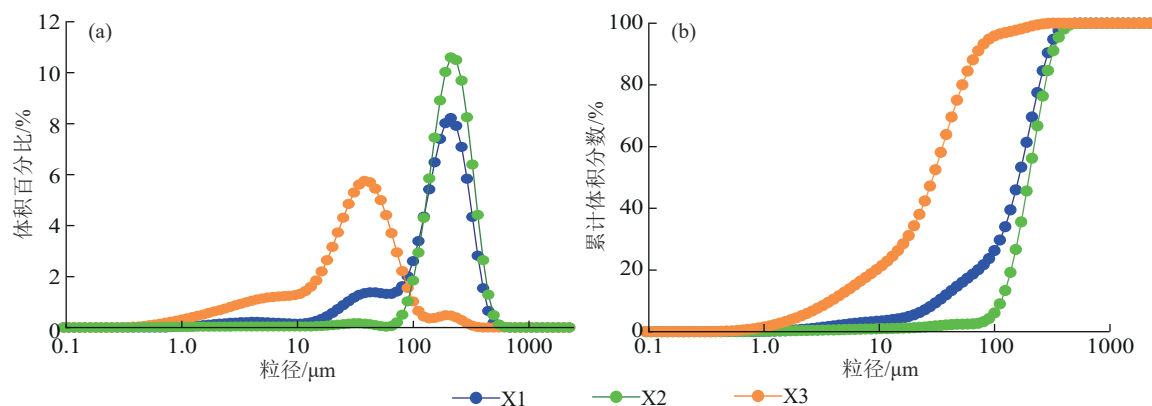


图 2 地表沉积物颗粒粒径分布

Fig. 2 Surface sediment particle size distribution curve

X1 和 X2 土壤颗粒的累积频率分布曲线呈相似趋势,在初期变化较为平缓,100 μm 后陡升,表明颗粒主要集中在>100 μm 的范围内。且 X2 土壤标准偏差最小,可见其颗粒更粗,分选性优于 X1,表明在风水交互作用下,沉积物颗粒的均匀性有所增强。X3 受水动力作用强烈,其土壤颗粒累积频率分布曲线在 2~80 μm 内较陡,表明该区域细颗粒物质沉积显著,粒径分布集中。该特征暗示水流在流速减缓时沉积大量细颗粒,使得沉积物分选性较差。

不同区域近地表沉积物的搬运方式和颗粒组分存在显著差异。X1 近地表沉积物颗粒的搬运方式以跃移为主,体积分数达 95% 以上,悬移组分不足 5% 且滚动组分缺失。跃移组分较高且呈两段式分布,2 段跃移组分的截点在 100 μm 附近,粗跃移(100~360 μm)组分多于细跃移(16~100 μm)组分,跃移与悬移组分截点在 16 μm 附近。X2 近地表沉积物主要以悬移和跃移的方式搬运,其中悬移组分约占 3%,跃移组分和悬移组分的分界点出现在 80 μm 附近。X3 近地表沉积物的搬运方式为

悬移、跃移和蠕移,悬移组分和跃移组分之间的分界点在 15 μm 附近,跃移组分和蠕移组分之间的分界点在 80 μm 附近。该沉积物中,悬移组分、跃移组分分别占比 26.1%、67.2%,粒径在 80~300 μm 的沙质颗粒主要通过蠕移方式搬运,蠕移组分占比约为 6.7%。

2.2 不同区域的输沙特征

2.2.1 地表蚀积变化 当风沙流结构特征值(λ)>1 时,风沙流处于非饱和状态,此时气流的搬运能力较强,研究区主要发生风蚀搬运过程;当风沙流结构特征值(λ)<1 时,风沙流处于过饱和状态,研究区主要进行堆积过程。由表 4 可知,3 个区域的风沙流结构特征值(λ)均>1,表明 3 个区域的风沙活动均以风蚀和搬运为主。X1、X2 和 X3 的平均风沙流结构特征值分别为 2.66、2.30、1.49,说明与近岸区相比,边缘区的风蚀过程更为强烈。

2.2.2 风沙流中沙粒的粒度特征 由图 3 可知,在特定风速条件下,3 个区域风沙流中沙粒粒度参数随高度变化的特征各有不同。平均粒径随高度的升高均

呈波动降低趋势,边缘区平均粒径为 230~290 μm , 30 cm 以下属于中沙,30 cm 以上属于细沙,过渡区、近岸区平均粒径分别为 200~250、160~200 μm ,均属于细沙。分选系数随高度增加波动上升,为 0.60~0.78,整体反映沉积物分选性较好。偏度值随高度升高呈波动上升趋势,在 0~30 cm 高度内,边缘区和过渡区的偏度值为-0.08~-0.10,接近对称分布,近岸区的偏度值为-0.11~-0.21,表现为负偏分布。峰度值则随高度增加呈波动上升趋势,在 0~30 cm 高度内,

3 个区域风蚀物的峰度值为 0.98~1.08,属于中等峰态,在 30~50 cm 高度内,近岸区的峰度值为 1.12~1.18,属于尖锐峰态。

表 4 不同区域的近地表风沙流结构特征指示值
Table 4 Indication values of near-surface wind-sand flow structure characteristics in different regions

特征指示	X1	X2	X3
$Q_{0-2}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.19	0.04	0.01
$Q_{2-10}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	0.52	0.09	0.02
λ	2.66	2.30	1.49

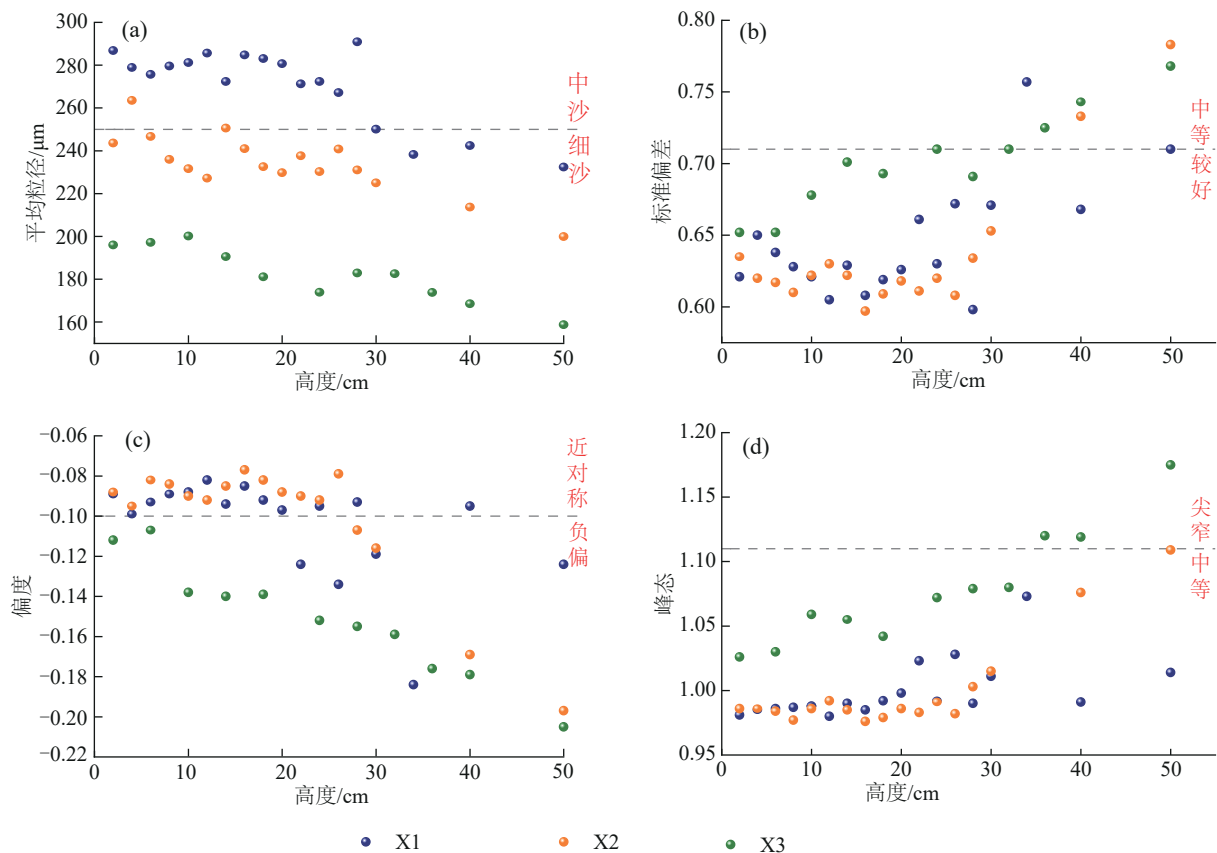


图 3 不同区域风蚀物粒度参数随高度的变化

Fig. 3 Changes of particle size parameters of wind erosion with height in different regions

2.2.3 风沙流结构 由图 4 可知,不同观测点的输沙量均随着高度的增加逐渐减少,总体表现为 X1>X2>X3,且 X1 收集的风蚀物显著多于其他区域。表明 X1 风沙流活动最为强烈,是风蚀和输沙的主要发生区域。
对 3 个区域各观测点 0~50 cm 的输沙量进行分层统计,共分为 5 层(每层 10 cm)。结果显示,各区域 0~10 cm 高度的输沙量占比最高,分别为 61.44%、62.37% 和 77.19%,在 0~20 cm 高度,各区域输沙量占比分别达到 84.06%、85.72 和 92.54%,表明风沙流的主要活动集中在近地表层。与此同时,累积输沙量随河岸距离的减少逐渐降低(图 4a),说明靠近河岸的区域风沙流的侵蚀效应逐渐减弱。

为进一步分析输沙量随高度的分布规律,对 3 个区域各观测点不同高度的输沙量进行函数拟合(图 4b)。在地表 0~50 cm 内,各观测点的输沙量随高度增加呈指数函数关系,拟合相关度均在 0.95 以上。表明指数函数能够很好地反映近地表沙颗粒物运动的规律,适用于描述风沙流输沙量随高度变化的特征。

2.3 不同区域易蚀颗粒粒径范围判定

在风蚀研究中,确定各区域的易蚀颗粒粒径范围是分析风沙活动和评估风蚀潜力的关键。本研究基于罗凤敏等^[21]提供的多年平均起沙风速(6.77 m/s),于 2024 年风季(11—12 月)采用多级梯度集沙仪(0~50 cm 垂向分层)进行连续采样,系统

捕获临界风速(≥ 5 m/s)至强风事件(> 8 m/s)全风速区间的输沙物。采集后统计各高度层输沙物粒度分布状况,选择优势粒径范围作为易蚀颗粒粒径的阈值。由图 5 可知,X1 区域的易蚀颗粒粒径为 $170.3 \sim 446.5 \mu\text{m}$,X2 区域的易蚀颗粒粒径为 $137.5 \sim 401.2 \mu\text{m}$,X3 区域的易蚀颗粒粒径为 $123.6 \sim 291.0 \mu\text{m}$,易蚀颗粒大致集中在细沙和中沙区

间。前人^[23]研究表明,在干旱和半干旱地区,风力作用下最容易被搬运的颗粒粒径通常为 $0.1 \sim 0.5$ mm,即中细沙粒径范围。尽管不同地区的具体情况可能有所不同,但该粒径范围的颗粒普遍表现出较强的风蚀敏感性。本研究所确定的易蚀颗粒粒径范围与此理论相符,进一步验证中细沙颗粒在风蚀过程中的主导作用。

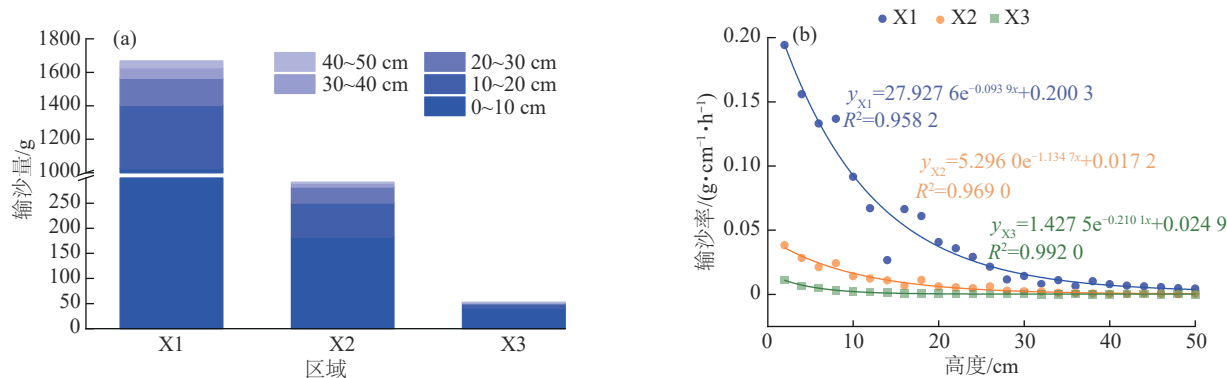


图 4 不同区域近地表沙流结构

Fig. 4 The structure of near-surface wind-sand flow in different regions

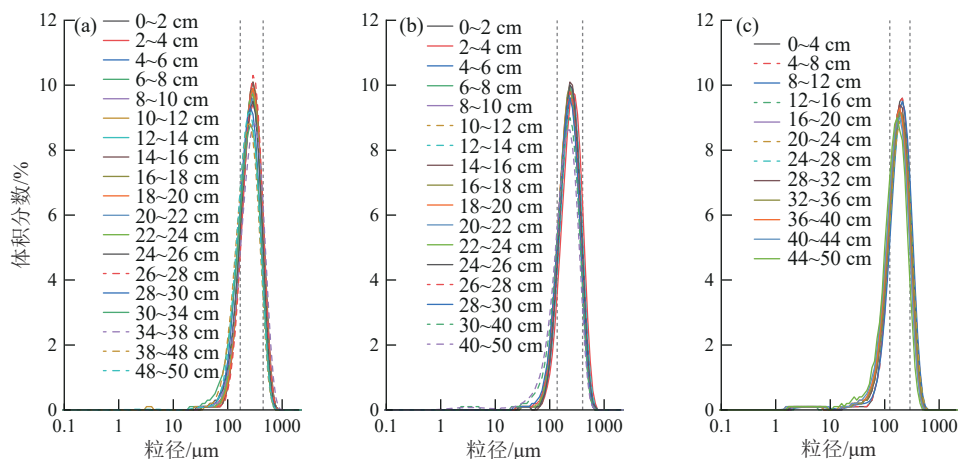


图 5 不同区域风蚀物频率分布

Fig. 5 Distribution curves of wind-eroded particles in different regions

3 讨论

土壤抗风蚀能力主要取决于其颗粒组成和颗粒间的黏结力^[24]。粉粒和黏粒占比越高,土壤抗风蚀能力越强;而粗沙、中沙和细沙因缺乏黏结性较易受风蚀影响。极细沙因其适中的粒径与表面粗糙度,可通过颗粒间嵌合作用增强稳定性,表现出较好的抗风蚀能力^[25-26]。在强风季节,边缘区地表沉积物细沙和中沙的比例较高,是因为较大的沙粒通过跃移和滚动的方式在短距离内沉积在地表,形成风成沙沉积^[27]。该区域地势较高,缺乏水流作用,强风成为颗粒迁移的核心驱动力,粗颗粒优先以跃移形式迁移,而细颗粒因缺乏水力黏结易持续流失,局部障碍物背风侧弱风区则捕获部分细粒,形成粗-细混杂的

“拖尾”分布。由于分选紊乱和粗粒骨架松散共存,表层稳定性受到削弱。过渡区分选性最优,颗粒分布高度集中,反映稳定的风-水动力平衡。该区域地势较低,风力和水流协同作用促使粗颗粒均匀沉降,形成分选良好的粗颗粒富集层。在枯水期,水流减弱导致风力主导侵蚀,细颗粒流失加剧,土壤质地粗化,进一步削弱抗风蚀潜力。近岸区沉积物以粉沙为主,分选性最差且呈极负偏态,中值粒径显著低于平均粒径,揭示细颗粒高度富集且分选紊乱的特征。此类单峰型分布与郭鑫^[28]研究结果一致,表明河水动力主导下,细小颗粒被持续带入并在流速降低时沉积,形成以粉粒($> 50\%$)为主的稳定层。

研究区乌兰布和沙漠沿黄河段地形呈西南-东北走向,常年受西风环流控制,位于阴山支脉狼山与贺

兰山之间,终年盛行西北风(WNW),该风向与黄河走向垂直^[29]。实测气象数据^[4]显示,1—2月几乎没有起沙风,全年起沙风主要集中在3—5月,风速较大,达到5.1~5.3 m/s。此风向和风速使得黄河岸边的沙丘沉积物极易受风蚀作用,尤其是在边缘区,风力成为主要的侵蚀动力。分析地表沉积物粒径分布发现,边缘区、过渡区和近岸区的沉积物波峰位置相似,表明沙物质主要来自上风向。边缘区的双跃移组分及颗粒波峰显示,沙物质由强风持续搬运至该区。过渡区粒径分布与边缘区相似,支持沙物质的连续搬运。近岸区沉积物中130~300 μm 颗粒的蠕移现象表明,风力依然为主力,水流也在部分颗粒搬运中发挥作用。风沙流在地表输送过程中,主要集中在地表一定高度。闫敏等^[30]通过野外观测表明,0~10 cm高度内的输沙量占总输沙量80%以上;陈宇鑫等^[31]通过研究库布齐沙漠5种典型下垫面的风沙运动过程发现,各下垫面风沙流活动主要集中在0~20 cm高度内;肖雨婷等^[32]通过野外观测对巴丹吉林沙漠0~85 cm高度的5种典型地表沙尘水平通量比较发现,0~10 cm高度层内输沙量(54%~72%)占比最大。本研究中,各个测点位置集中在0~20 cm高度内输沙量分别占各位置总输沙量的84.06%、85.72%和92.54%,表明风沙流运动以贴近地表的沙粒搬运为主。由于细沙粒的质量较轻且尺寸较小,更容易受到风力的作用被提升到较高的空中,从而形成长距离的输沙和扩散;而较大的沙粒因受重力影响更快沉降。前人^[33-35]研究表明,随着高度的增加,风沙流中细颗粒物增多,粗颗粒物减少,与本文的研究结果一致。近地层输沙量随高度变化通常表现为指数或幂函数趋势。本研究基于最大 R^2 分析得出,不同区域近地表输沙量均随高度呈指数衰减关系。

4 结论

1)边缘区以细沙(51.19%)和中沙(22.47%)为主,平均粒径145.03 μm ,分选性较差且呈极负偏态,风蚀作用强烈;过渡区中沙占比60.59%,平均粒径217.13 μm ,分选性较好且偏度接近对称,峰态中等,反映风水交互的均衡分选机制;近岸区粉粒+黏粒占比75.03%,平均粒径为24.95 μm ,分选性最差,偏度极负偏,峰态尖窄,受水动力作用影响显著。

2)边缘区跃移组分达95%以上,呈两段式分布,是长距离风力搬运的典型特征;过渡区以跃移为主,悬移组分仅占3%;近岸区悬移、跃移和蠕移组分分别占26.1%、67.2%和6.7%。3个区域的粒径波峰相似性表明,沉积物主要来自上风向风力输送。

3)风蚀作用垂向分选显著,输沙量随高度呈指

数衰减,0~10 cm层贡献率达62%~78%,近地表为风沙活动核心区。全区风沙流结构特征值均 >1 ,边缘区最高(2.17),表明风蚀-搬运主导。

4)边缘区、过渡区和近岸区的易蚀颗粒粒径分别为170.3~446.5、137.5~401.2、123.6~291.0 μm ,易蚀颗粒集中在中细沙区间,验证中细沙颗粒在风蚀过程中的主导作用。

整体来看,边缘区是颗粒释放最严重的区域,且在风力作用下,沙物质能够被输送到下风向的近岸区甚至是河流中,是风蚀治理的重点区域,应通过布设沙障、提高植被盖度等措施削弱风蚀作用,减少颗粒的释放。

参考文献:

- [1] JIA X P, WANG H B, LI Y S. Desert channel erosion, accretion characteristics and their implications for aeolian-fluvial interactions: A case study in a desert watershed in the Ordos Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(10): e371.
- [2] 李小妹, 严平, 刘保莉. 基于流域尺度的中国北方沙地空间分布特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(4): 104-111.
LI X M, YAN P, LIU B L. Spatial distribution characteristics of sandy land in northern China based on watershed scale landscape pattern characteristics of aeolian-fluvial interactions at the scale of watersheds in northern China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(4): 104-111.
- [3] LI Y S, JIA X P, WANG H B, et al. Desert river channel deposition characteristics and their implications for lateral infusion of aeolian sand in the Ulan Buh Desert reaches of the Yellow River [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(22): e525.
- [4] 赵宏胜. 西柳沟流域中段风沙运动特征及入黄沙量研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
ZHAO H S. Study on the characteristics of aeolian sand movement and the amount of yellow sand in the middle section of Xiliugou River basin [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [5] 李振全. 黄河石嘴山至巴彦高勒段风沙入黄量研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LI Z Q. Study on the aeolian sand amount into the Yellow River in Shizuishan and Bayangaole hydrological stations [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [6] 贾晓鹏, 王海兵, 李永山, 等. 风沙对黄河宁夏河段的影响研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 152-157.
JIA X P, WANG H B, LI Y S, et al. Research progress on effect of the coarse aeolian sand on the Ningxia-Inner Mongolian reach of the Yellow River [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 152-157.

- [7] 郭建英,李锦荣,陈新闯,等.黄河乌兰布和沙漠段不同区域入黄沙物质粒度特征及其来源分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(1):15-24.
GUO J Y, LI J R, CHEN X C, et al. Grain size characteristics and source analysis of aeolian sediment feed into river in Ulanbuh Desert along bank of Yellow River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2021, 19(1): 15-24.
- [8] 李永山,贾晓鹏,王海兵,等.1966—2019年黄河乌兰布和沙漠宽谷段河道深泓横向摆动特征[J].中国沙漠, 2023, 43(5): 59-65.
LI Y S, JIA X P, WANG H B, et al. Talweg lateral shift characteristics in the Ulan Buh Desert reach of the Yellow River from 1966 to 2019 [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5): 59-65.
- [9] 李永山,彭文昌,任亮,等.近50年黄河乌兰布和沙漠段辫状河道演变[J].中国沙漠,2016,36(6):1689-1694.
LI Y S, PENG W C, REN L, et al. Evolution of Ulan Buh Desert braided channel of the Yellow River in recent 50 years [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1689-1694.
- [10] QIN Y H, JIN X, DU K, et al. Changes in river morphology and influencing factors in the upper Yellow River over the past 25 years [J]. Geomorphology, 2024, 465: e109397.
- [11] 郑玉峰,贾晓鹏,王远征.黄河宁夏段河道粗细双组分泥沙分选沉积特征[J].中国沙漠,2022,42(3):233-240.
ZHENG Y F, JIA X P, WANG Y Z. Selective deposition of coarse and fine sediments in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 233-240.
- [12] 杜鹤强,薛娴,王涛,等.1986—2013年黄河宁夏河段风蚀模数与风沙入河量估算[J].农业工程学报,2015,31(10):142-151.
DU H Q, XUE X, WANG T, et al. Wind erosion modulus and quantity evaluation of aeolian sediment feed into river in watershed of Ningxia-Inner Mongolia Reach of Yellow River from 1986 to 2013 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 142-151.
- [13] 王陇.乌兰布和沙漠风沙土风蚀可蚀性特征及其量化模型研究[D].北京:北京林业大学,2019.
WANG L. Characteristics of aeolian soil wind erodibility and the quantitative model in the Ulanbuh Desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [14] 孟惠聪,胡光印,董治宝,等.若尔盖盆地流动沙丘治理前后表层沉积物粒度变化特征[J].中国沙漠,2024,44(3):96-107.
MENG H C, HU G Y, DONG Z B, et al. Characteristics of grain size variation of dunes surface sediments before and after wandering dune control in Zoige basin, China [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 96-107.
- [15] 李锦荣,韩兆恩,唐国栋,等.冻结对沙丘土壤抗风蚀能力的影响[J].水土保持学报,2025,39(1):38-45.
LI J R, HAN Z E, TANG G D, et al. Effect of freezing on wind erosion resistance of sand dune soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 38-45.
- [16] 高睿瑜,李文龙,魏文杰,等.豫东北黄泛区易风蚀性土壤特征[J].水土保持学报,2021,35(6):55-61.
GAO R Y, LI W L, WEI W J, et al. Characteristics of wind-erodible soil in the Yellow River alluvial area of northeast Henan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 55-61.
- [17] 董治宝,李振山.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(4):1-5.
DONG Z B, LI Z S. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by grain size parameters [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 12(4): 1-5.
- [18] 郝需婷,黄雅茹,张帅,等.黄河乌兰布和沙漠段不同生长时期植物叶功能性状特征[J].生态学报,2025,45(5):2386-2400.
HAO X T, HUANG Y R, ZHANG S, et al. Characteristics of leaf functional traits of plants at different growth stages in the Ulan Buhe Desert section of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2386-2400.
- [19] 马玉明,王林和,姚云峰,等.风沙运动学[M].呼和浩特:远方出版社,2004.
MA Y M, WANG L H, YAO Y F, et al. Aeolian kinematics [M]. Hohhot: Yuanfang Publishing House, 2004.
- [20] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar [Texas]; A study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [21] 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征[J].农业工程学报,2019,35(4):145-152.
LUO F M, GAO J L, XIN Z M, et al. Characteristics of sand-driving wind regime and sediment transport in northeast edge of Ulan Buh Desert [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 145-152.
- [22] 吴正,凌裕泉.风沙运动的若干规律及防止风沙危害问题的初步研究[M].北京:科学出版社,1965.
WU Z, LING Y Q. A preliminary study on some laws of aeolian sand movement and its prevention [M]. Beijing: Science Press, 1965.
- [23] 钱广强,杨转玲,邢学刚,等.砾波纹地表风沙颗粒蠕移特征及其地貌学意义[J].中国沙漠,2024,44(6):287-298.
QIAN G Q, YANG Z L, XING X G, et al. Creep characteristics of aeolian sand particles on gravel corrugated surface and its geomorphological significance [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(6): 287-298.

- [24] 郭春秀,安富博,刘虎俊,等.青土湖人工输水区白刺群落结构及土壤特性研究[J].水土保持通报,2019,39(6):44-51.
GUO C X, AN F B, LIU H J, et al. Community structure and soil characteristics of *Nitraria tangutorum* in artificial water transfer area of Qingtu Lake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6):44-51.
- [25] 徐涛,蒙仲举,党晓宏,等.乌兰布和沙漠绿洲农田不同土地利用方式地表风蚀特征研究[J].土壤,2018,50(3):606-612.
XU T, MENG Z J, DANG X H, et al. Wind erosion characteristics of oasis farmland surfaces under different land uses in Ulan Buh Desert [J]. Soils, 2018, 50(3):606-612.
- [26] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J].生态环境学报,2009,18(4):1395-1401.
ZHANG J Y, ZHAO H L. Changes in soil particles fraction and their effects on stability of soil-vegetation system in restoration processes of degraded sandy grassland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4):1395-1401.
- [27] 杨宇哲,岳大鹏,赵景波,等.陕西横山地区 L_3 黄土与 S_3 古土壤元素地球化学特征与环境变化[J].地理科学进展,2023,42(2):364-379.
YANG Y Z, YUE D P, ZHAO J B, et al. Characteristics of geochemical weathering of L_3 and S_3 loess-paleosol section in the Hengshan area, Shaanxi Province [J]. Progress in Geography, 2023, 42(2):364-379.
- [28] 郭鑫.库布齐沙漠东缘地表沉积物特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
GUO X. Characteristics of surface sediments in the eastern edge of the Kubuqi Desert [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [29] 陈新闯.乌兰布和沙漠黄河沿岸磴口段风积沙运移过程与规律[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.
CHEN X C. The migration process of aeolian sand in Ulanbuh Desert along the bank of the Yellow River, Dengkou [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2016.
- [30] 闫敏,左合君,贾光普,等.不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分异特征[J].干旱区地理,2022,45(5):1513-1522.
YAN M, ZUO H J, JIA G P, et al. Vertical distribution characteristics of wind-sand flow and its grain size under different sand control measures [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5):1513-1522.
- [31] 陈宇鑫,左合君,王海兵,等.库布其沙漠不同下垫面风沙流结构及元素特征[J].绿色科技,2022,24(16):10-15.
CHEN Y X, ZUO H J, WANG H B, et al. Aeolian sand flow structures and trace element transport characteristics on different underlying surfaces in Kubuqi Desert [J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(16):10-15.
- [32] 肖雨婷,张国明,洪畅,等.巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量[J].中国沙漠,2023,43(2):104-113.
XIAO Y T, ZHANG G M, HONG C, et al. Sand-dust horizontal flux of different surfaces in the western margin of Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):104-113.
- [33] 崔健,高君亮,乔靖然,等.乌兰布和沙漠公路“麦草沙障-梭梭”的防护效益[J].水土保持研究,2024,31(1):250-259.
CUI J, GAO J L, QIAO J R, et al. Research on the protective benefits of the 'wheat grass sand barrier *Haloxylon ammodendron*' on the Ulanbuh Desert highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):250-259.
- [34] 郭树江,杨自辉,王强强,等.青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J].生态学杂志,2021,40(4):1166-1176.
GUO S J, YANG Z H, WANG Q Q, et al. The structure and grain size of wind-sand flow in the dry bottom of Qingtu Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4):1166-1176.
- [35] 闫影影.不同放牧强度苏尼特右旗荒漠草原风沙流结构与养分特征[D].山东 泰安:山东农业大学,2021.
YAN Y Y. Structure and nutrient characteristics of aeolian sand flow in desert steppe under different grazing intensities in Sunit Right Banner [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2021.