

黄河中游沙家湾小流域风沙环境 特征及其入沟过程

郭志文¹, 秦富仓^{1,2,3}, 张铁钢^{4,5}, 张晓明⁶, 郭乾坤⁶, 董菲菲¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

010018; 3. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 水利部

牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 5. 黄河几字湾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 呼和浩特 010020; 6. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: [目的] 解析黄河中游多沙粗沙区风沙入沟量及其在沟坡内的运移路径与沉积过程, 为黄河流域风沙防治提供科学依据。[方法] 以沙家湾小流域为对象, 基于集沙仪野外监测与室内分析, 计算沙家湾小流域输沙势(DP), 引入降雨抑制效应计算实际风蚀潜力(DP_a); 采用函数拟合法估算沟道风沙沉降量, 结合沟坡土壤粒度特征, 系统解析风沙输移路径与沉积特征。[结果] ①沙家湾小流域为高风险环境, 年输沙势为 441.95 VU, 方向变率指数为 0.42, 年合成输沙势方向与主沟道垂直, 沟道年风蚀模数为 -0.40 t/hm²。春季的输沙势和沟道风沙沉降最高, 分别占全年 53.74% 和 40.25%; ②考虑降雨抑制的年实际风蚀潜力(DP_a)为 293.04 VU, 较输沙势降低 27%, 抑制作用在高风险与强降雨同步时最为显著; ③随坡位的降低, 沉积物组成由粉粒(76.20%)变为以细砂(74.70%)为主, 平均粒径由 5.52φ 变为 2.89φ, 土壤颗粒显著粗化, 运动方式由悬移变为跃移。[结论] 风沙入沟过程是在高风险环境和沟道地形阻滞共同作用下, 沉积物以跃移方式进入沟道。

关键词: 输沙势; 风蚀模数; 风沙入沟; 土壤粒径; 多沙粗沙区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0043-10

中图分类号: P931.1

文献参数: 郭志文, 秦富仓, 张铁钢, 等. 黄河中游沙家湾小流域风沙环境特征及其入沟过程[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 43-52. Guo Zhiwen, Qin Fucang, Zhang Tiegang, et al. Characteristics of wind-sand environment and gully entering process in Shajiawan small watershed in middle reaches of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 43-52.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.017

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.017

Characteristics of wind-sand environment and gully entering process in Shajiawan small watershed in middle reaches of Yellow River

Guo Zhiwen¹, Qin Fucang^{1,2,3}, Zhang Tiegang^{4,5}, Zhang Xiaoming⁶, Guo Qiankun⁶, Dong Feifei¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. State Forestry and

Grassland Administration Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences,

Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 4. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water

Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 5. Yellow River Great Bend Region, Eco-environmental

Change and Integrated Management Field Observation and Research Station of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 6. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The amount of wind-blown sand entering gullies and its migration paths and deposition processes within the gully slopes in the coarse sand area in the middle reaches of the Yellow River were analyzed in order to provide a scientific basis for wind and sand prevention and control in the Yellow River basin. [Methods]

收稿日期: 2025-10-10

修回日期: 2025-11-18

采用日期: 2025-11-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“风沙侵蚀动力特征及空间分布”(2022YFF130080102)

第一作者: 郭志文(1997—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: guozhiwen@Emails.imau.edu.cn。

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: qinfcc@126.com。

Taking the Shajiawan small watershed as the study area, sand drift potential (DP) was calculated based on field monitoring and laboratory analysis using sand samplers, and the actual wind erosion potential (DP_a) was derived by incorporating the rainfall inhibition effect. The wind-sand deposition amount in the gully was estimated using a function fitting method. Combined with the soil particle size characteristics of the gully slopes, the wind-sand transport paths and sedimentary characteristics were systematically analyzed. [Results] ① The Shajiawan small watershed was characterized by a high wind energy environment. The annual sand drift potential was 441.95 VU, with a directional variability index of 0.42. The direction of the annual synthetic sand drift potential was perpendicular to the main channel, and the annual wind erosion modulus of the channel was -0.40 t/hm^2 . Sand drift potential and wind-sand deposition were highest in spring, accounting for 53.74% and 40.25% of the annual total, respectively. ② The annual actual wind erosion potential (DP_a) considering rainfall suppression was 293.04 VU, which was 27% lower than the sand drift potential. The suppression effect was most pronounced when high wind speeds occurred simultaneously with heavy rainfall. ③ As the slope position decreased, the sediment composition changed from silt (76.20%) to predominantly fine sand (74.70%), with the average particle size changing from 5.52ϕ to 2.89ϕ . The soil particles became significantly coarser, and the movement mode changed from suspension to saltation. [Conclusion] The process of wind-blown sand entering gullies occurs under the combined effects of high wind energy and gully terrain obstruction, with sediments entering the gullies through saltation.

Keywords: sand drift potential; wind erosion modulus; wind-blown sand entering gullies; soil particle size; coarse sand area

黄河中游多沙粗沙区是黄河流域泥沙问题的核心区域,也是生态治理的关键地带^[1]。该区位于季风气候与干旱半干旱气候的过渡带,特殊的气候条件形成了风水复合侵蚀类型,导致生态环境脆弱,水土流失严重。尽管该区面积仅为黄土高原水土流失面积的 17.3%,但其年产沙量却高达 $1.18 \times 10^9 \text{ t}$,占黄河总输沙量的 62.8%^[2],大量的泥沙入黄,对下游河道防洪与水资源可持续利用产生压力^[3]。厘清风沙物质从坡面进入河道的输移路径及其输沙通量是入黄沙量估算、流域治理策略制定的关键过程。其中,风沙从坡面进入沟道(即“风沙入沟”)是坡面风蚀与河道输沙的关键环节。

准确评估风能环境是理解风沙输移的基础^[4]。输沙势作为表征风能对沙粒搬运能力的关键指标,在干旱、半干旱区的风沙环境研究中被广泛应用^[5-8],但在其应用中会忽略降雨对风沙活动的抑制作用^[9]。而黄河中游多沙粗沙区降雨时空变异性大,短时强降雨与季节性湿润交替,导致表层土壤含水率频繁波动,降雨通过改变土壤湿度增强颗粒间黏结力、提高起沙风速阈值,对实际风能环境产生不可忽视的抑制作用^[10]。试验表明,当表层土壤含水率从 1% 增至 5% 时,临界起沙风速可提高至 14 m/s ^[11];若忽略降雨会导致估算的起沙风速误差达 60%,加入该因子后精度提高 90.5%^[12]。因此,在本区域高降雨背景下的风能环境评估中,亟需在输沙势模型的基础上,量化降雨对实际风蚀的抑制效应。目前关于风沙入沟的研究多集中于区域沉降总量的估算^[13],而对其

运移路径、堆积特征及空间分异规律的研究相对较少。土壤粒径是风力对源区物质搬运和分选作用的反映。李恩菊等^[14]在巴丹吉林沙漠的研究表明,从沙丘迎风坡脚至沙丘顶部,平均粒径变细而分选性变好;赵龙飞等^[15]对腾格里沙漠灌丛沙堆的研究中,用粒度概率累积曲线反映出沉积物的主要运移方式。这些研究为分析沟坡中风沙物质的运移路径与沉积机制提供了重要的方法论支撑。

基于此,本研究选取黄河中游多沙粗沙区的沙家湾小流域,通过野外监测与室内分析相结合的方法,在阐明输沙势的基础上,量化降雨对实际风蚀潜力的抑制效应,精准评估研究区的风沙环境特征;通过沟道沉降量观测与土壤粒度的参数特征,解析风沙入沟量及其在沟坡内的运移路径与沉积过程,为黄河流域风沙防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沙家湾小流域位于黄河中游多沙粗沙区的丘陵沟壑区 ($38^{\circ}00'05'' - 38^{\circ}00'10''\text{N}$, $109^{\circ}29'50'' - 109^{\circ}30'00''\text{E}$),地处毛乌素沙地的东南缘,属温带干旱半干旱大陆性季风气候,年均风速 $2.3 \sim 2.6 \text{ m/s}$,风蚀多发生于 3—6 月,风速最高可达 14 m/s ,降雨年内分配不均,多年平均降雨量 $350 \sim 500 \text{ mm}$,65% 以上集中在 7—9 月^[16]。小流域沟道发育显著,主沟道长 319 m,最宽处 24 m,呈东北—西南走向。沟道西北侧植被盖度为 30%~45%,主要为小叶锦鸡儿 (*Caragana*

microphylla)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)和阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*),东南侧为撂荒地。

1.2 野外监测布设

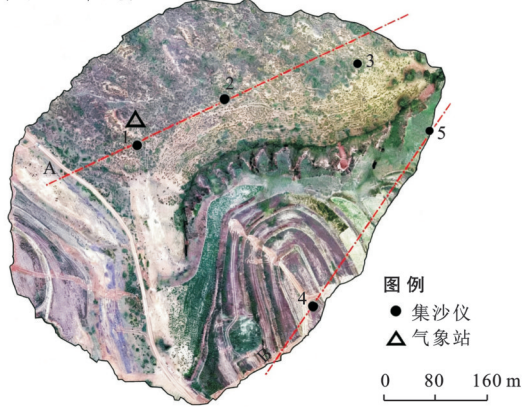
1.2.1 集沙仪布设与样品采集

本研究以沟道为研究尺度,在沟岸两侧布设集沙仪,通过下风向风蚀通量减去上风向风蚀通量计

算沟道的风蚀量。

2023年7月,利用无人机航拍获取高分辨率正射影像与数字表面模型(DSM),提取小流域主沟道的自然特征。2024年3月中下旬,在小流域主沟道两侧布设2排集沙仪(图1),观测沟道风蚀特征。BA区段中,A为上风向,B为下风向。

a 集沙仪布设点位



b 集沙仪布设现场

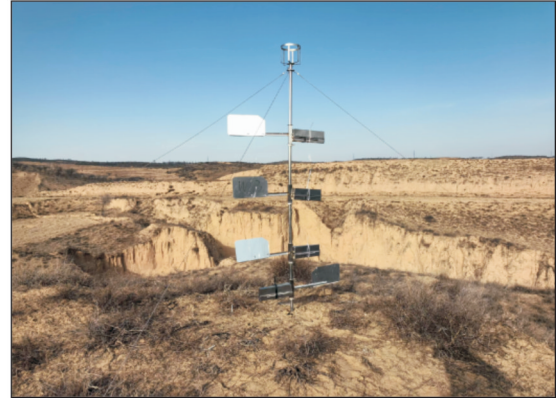


图1 研究区BSNE集沙仪布设情况

Fig.1 Layout of BSNE sand sampler at study area

BSNE(Big Spring Number Eight)集沙仪^[17]集沙盒规格为5 cm×2 cm。集沙盒安装高度分别为0.2, 0.5, 1.0和1.5 m。观测时间为2024年4月至2025年3月,采样频率为每月1次,每个月28号取样。取样时使用毛刷将每个集沙盒内的积沙扫入塑封袋,带回实验室,使用万分之一电子天平称重。若集沙盒内有水,则将湿样一同收集,晾干后称重。

1.2.2 气象数据采集

在沙家湾小流域安装自动气象站1台,主要指标为风速、风向、降雨量等,其中风速传感器安装高度为2.0 m,分辨率为0.1 m/s,数据采集间隔为10 min。

1.3 风蚀计算方法

1.3.1 输沙势与降雨抑制效应计算

输沙势反映风在一定时间内搬运沙子的能力^[18]。其计算公式为

$$DP = (V_i - V_t) \times V_i^2 \times t \quad (1)$$

式中:DP为输沙势(VU); V_i 为大于起沙风速的风速(m/s); V_t 为起动风速(m/s); t 为大于起沙风速的次数占总风速次数的百分比(%)。

$$RDP = \sqrt{\left[\sum DP \times \cos(\theta_i) \right]^2 + \left[\sum DP \times \sin(\theta_i) \right]^2} \quad (2)$$

$$RDD = \text{Arctan} \left[\frac{\sum DP \times \sin(\theta_i)}{\sum DP \times \cos(\theta_i)} \right] \quad (3)$$

$$UDI = \frac{RDP}{DP} \quad (4)$$

式中:RDP表示所有风向输沙势的矢量和(VU); θ_i 为第*i*个风向的角度(°);RDD为合成输沙方向(°);

UDI为方向变率,取值范围为0~1,反映风向稳定性,其值越小,表示风向越复杂。

由于输沙势的计算需要10 m高度处的大于起沙风速的数据,而本研究观测风速为2 m高度,因此需将2 m高度的起沙风速换算至10 m高度。

2 m高度的起沙风速为

$$U_2 = 5.75 \times U_* \times \lg \frac{Z}{Z_0} \quad (5)$$

式中: U_2 为2 m高度的起沙风速(m/s); Z 为高度($Z=2.0$ m); U_* 为临界摩阻速度(m/s); Z_0 为地表粗糙度(m)。参考榆林地区实测值^[19],取 U_* 和 Z_0 分别为0.31 m/s和0.002 6 m。计算得出2 m的起沙风速为5.14 m/s。

换算至10 m高度处起沙风速:

$$U_{10} = \frac{U_2 \times (\ln 10 - \ln Z_0)}{\ln 2 - \ln Z_0} \quad (6)$$

式中: U_{10} 为10 m处的起沙风速(m/s)。

为了更加准确地描述输沙能力,本文根据Fryberger等^[20]制定的风能分类标准对风能环境和风况方向变率进行了划分(表1)。

表1 风能环境划分

Table 1 Classification of wind energy environment			
风能环境	评价指标(VU)	风况方向变率	评价指标
低能	<200	低变率	UDI>0.8
中能	200~400	中等变率	0.3≤UDI≤0.8
高能	>400	高变率	UDI<0.3

为量化降雨对实际风蚀的抑制效应,参考 Bergametti 等^[21]的研究方法,量化降雨事件对风蚀的影响。即当日降雨量 ≥ 0.4 mm 时,降雨事件结束后 12 h 内风蚀被完全抑制,受降雨影响的输沙势即为 DP_{wet} 。计算公式为

$$DP_a = DP - DP_{wet} \quad (7)$$

$$\partial = \frac{DP_{wet}}{DP} \times 100\% \quad (8)$$

式中: DP_a 为实际风蚀潜力(VU),表示扣除了因降雨抑制后的有效风能; ∂ 为降雨对风蚀的抑制率(%),反映了降雨使理论风能潜力降低的比例。

1.3.2 输沙通量

输沙通量(Q)是指水平穿过垂直于风向的单位长度垂直断面的沉积物质量,通过对输沙高度上的沉积物质量进行积分得到^[22]。根据每个观测阶段各观测点的不同高度范围输沙量求拟合函数,但在幂函数模型中,高度接近 0 m 时输沙通量会趋近于无穷大,导致输沙量估算存在误差。为了解决这一问题,本研究采用分段积分的方式进行计算^[23],将 2 m 的积分高度划分成 40 个分段,第 5, 11, 21, 31 段分别对应集沙仪安装高度,将其风蚀物质量与段数拟合:

$$q_n = ae^{bn} \quad (9)$$

$$q_n = an^b \quad (10)$$

式中: q_n 是第 n 段收集的沉积物量(g); n 为区段数,从 1 到 40; a , b 是参数。

$$Q_i = \sum_{n=1}^{40} \frac{q_n}{20} \quad (11)$$

$$Q_A = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} \quad (12)$$

$$Q_B = \frac{Q_4 + Q_5}{2} \quad (13)$$

$$W_{BA} = \frac{(Q_{S_{JW-B}} - Q_{S_{JW-A}}) \times L_{S_{JW}}}{S_{S_{JW-BA}}} \quad (14)$$

式中: Q_i 为第 i 个集沙仪 0~2 m 的单宽通量(kg/m), i 为 1~5,用拟合函数估计 40 段的风蚀物总和,除以进沙口的宽度(2 cm)计算。 Q_A 和 Q_B 分别为沙家湾西北侧沟道(A)和东南侧(B)集沙仪平均单宽通量(kg/m); $L_{S_{JW}}$ 为主沟道长度(m); $S_{S_{JW-BA}}$ 为沟道面积(m²); W_{BA} 为沟道的风蚀模数(t/hm²), $W_{BA} > 0$,表示沟道发生风蚀, $W_{BA} < 0$,表示沟道发生沉降。

1.4 土壤粒径测定

1.4.1 样品采集

2024 年 4 月,在沙家湾小流域西北侧沟坡的坡顶、坡中和坡底 3 个位置取样,取样深度为 0~2 cm。每个位置附近取 3 次,混合均匀后带回实验室,将阴干后的土壤样品用 2 mm 土壤筛筛去植物根系和地

表杂物,土壤机械组成用马尔文 3000 激光粒度分析仪测定,粒径分级采用美国制标准(表 2)。

表 2 土壤分类标准

Table 2 Soil classification standards

土壤粒径	粒径范围/ μm
极粗砂粒	2 000~1 000
粗砂	1 000~500
中砂	500~250
细砂	250~100
极细砂	100~50
粉粒	50~2
黏粒	<2

1.4.2 土壤粒度参数计算

平均粒径(M_z)、分选系数(δ)、偏度(S_k)和峰度(K_g)计算公式如下:

$$\phi = -\log_2 d \quad (15)$$

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (17)$$

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2 \times \phi_{50}}{2 \times (\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2 \times \phi_{50}}{2 \times (\phi_{95} - \phi_5)} \quad (18)$$

$$K_g = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 \times (\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (19)$$

式中: ϕ 为粒径的对数值; d 为土壤颗粒直径(mm)。 ϕ_5 , ϕ_{16} , ϕ_{25} , ϕ_{50} , ϕ_{75} , ϕ_{84} , ϕ_{95} 依次为颗粒物样品占 5%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84% 和 95% 的颗粒物所对应的粒径对数值。粒度参数分级标准见表 3。

分形维数计算公式如下:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \quad (20)$$

式中: \bar{d}_i 为两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 之间粒径的平均值(μm); \bar{d}_{\max} 为最大粒级颗粒物的平均直径(μm); D 为粒径分布的分形维数; $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为小于 \bar{d}_i 的累积颗粒物重量(g); W_0 为颗粒物各粒级重量的总和(g)。

2 结果与分析

2.1 不同季节输沙势变化特征

研究区年输沙势为 441.95 VU,属高风能环境,具备较强的潜在输沙能力(图 2)。合成输沙势为 186.53 VU,方向变率指数为 0.42,属中等变率,年合成输沙方向 85.79°,为 EN 方向。

DP 和 RDP 存在显著的季节性差异。依据 DP 排序,春季最大(237.52 VU),占全年总输沙势的 53.74%,

其次为夏季(85.33 VU),最小为冬季(53.88 VU)。合成输沙势力的 58.82%,其次为秋季(52.95 VU),RDP 同样呈现春季最大的特征(109.72 VU),占全年 夏季最小(10.69 VU)。

表 3 粒度参数分级标准
Table 3 Grading standards for particle size parameters

分选系数 δ		偏度 S_k		峰度 K_g	
分选级别	取值范围	偏度等级	取值范围	分选级别	取值范围
分选极好	$\delta \leq 0.35$	极负偏	$-1.0 \leq S_k \leq -0.3$	很宽平	$K_g \leq 0.67$
分选好	$0.35 < \delta \leq 0.50$	负偏	$-0.3 \leq S_k \leq -0.1$	宽平	$0.67 < K_g \leq 0.90$
分选较好	$0.50 < \delta \leq 0.71$	近于对称	$-0.1 \leq S_k \leq 0.1$	中等	$0.90 < K_g \leq 1.11$
分选中等	$0.71 < \delta \leq 1.00$	正偏	$0.1 \leq S_k \leq 0.3$	尖窄	$1.11 < K_g \leq 1.56$
分选较差	$1.00 < \delta \leq 2.00$	极正偏	$0.3 \leq S_k \leq 1.0$	很尖窄	$1.56 < K_g \leq 3.00$
分选差	$2.00 < \delta \leq 4.00$			极尖窄	$K_g > 3.00$
分选极差	$\delta > 4.00$				

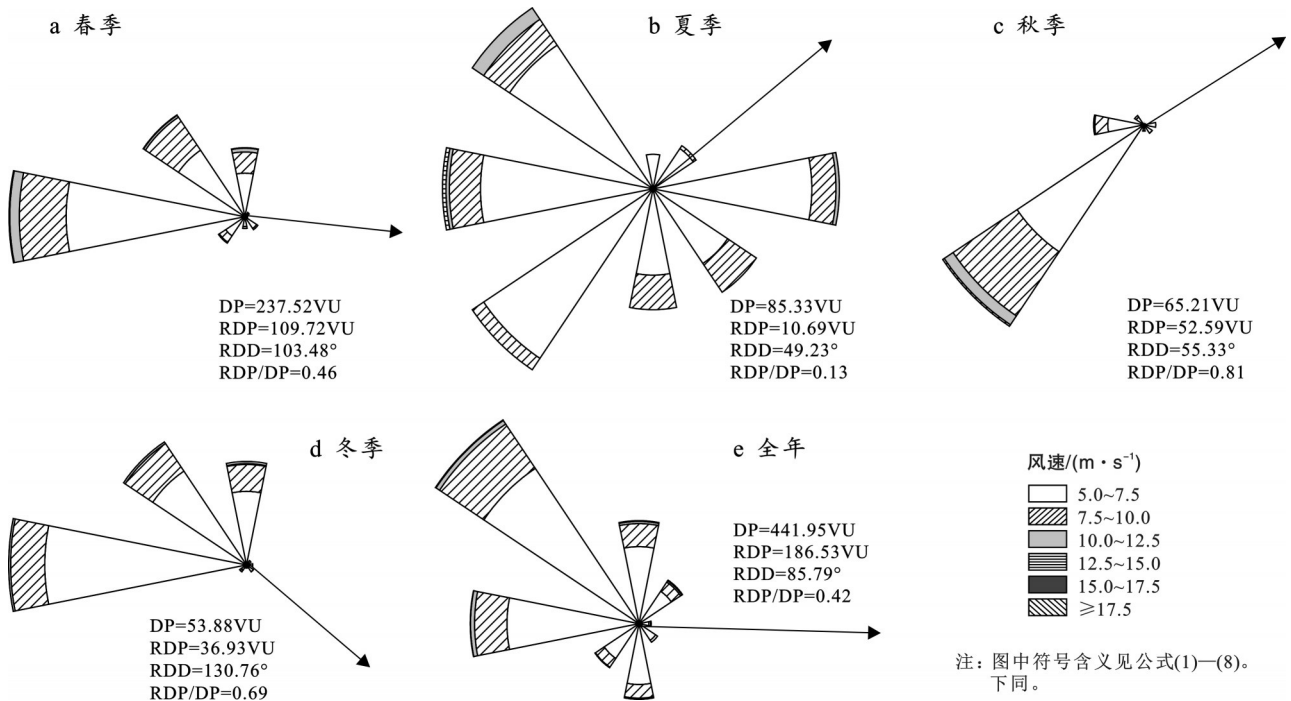


图 2 沙家湾小流域年及季节输沙势

Fig.2 Annual and seasonal sand drift potential in Shajiawan small watershed

风向变率反映输沙势与合成输沙势的差异程度,变率越高,两者差异越明显。春季和冬季都为中等变率,RDD 分别为 103.48° 和 130.76° ,均为 ES 方向,与年合成输沙方向为基本一致。夏季和秋季的风向变率分别为 49.23° 和 55.33° ,均为 EN 方向,但夏季为高变率($UDI=0.13$),风向复杂,虽 DP 较高,但东风和东北风的出现抵消了部分西风、西北风的作用,导致 RDP(10.69 VU)低于秋季(52.59 VU)。

2.2 降雨对实际风蚀潜力的抑制效应

根据公式(7)得到实际风蚀潜力(DP_a)为 293.04 VU (图 3)。与输沙势($DP=441.95$ VU)相比,降雨使实际风蚀潜力减少 27%。表明尽管研究区属于高能环

境,但降雨的作用使得实际风蚀潜力处于中等水平。因此,在评估当地风能环境时,不应忽视降雨的影响。

降雨的抑制效应存在明显的季节性差异(图 3,表 4)。从抑制量(DP_{wet})来看,春季最大(58.14 VU),占全年总量的 64%。而从抑制效率(θ)来看,夏季平均抑制率最高(68%),春季为 27%,秋、冬季则分别为 4% 和 12%。这种差异主要源于风速与降雨事件的时空匹配关系。春季虽 DP_{wet} 最高,但 3 月和 4 月大风天气频繁而有效降雨较少(图 4),导致该时段抑制率较低(分别为 0 和 29%)。5 月高风速和多雨同时出现,使得该月抑制率达到 52%。夏季尽管抑制率最高(如 8 月为 85%),但由于该季节风速较低,降

雨量大,使得 DP_{wet} 有限。秋、冬季风速增大但降水稀少,地表长期处于干燥状态,导致降雨的抑制量最低(分别为2%和5%)。因此,该地区的潜在风蚀强度主要受风力控制,其季节性变化主要由风速驱动;降雨对风蚀有一定抑制作用,但相对有限,在高速与强降雨同步的时段(如5月)最为明显。

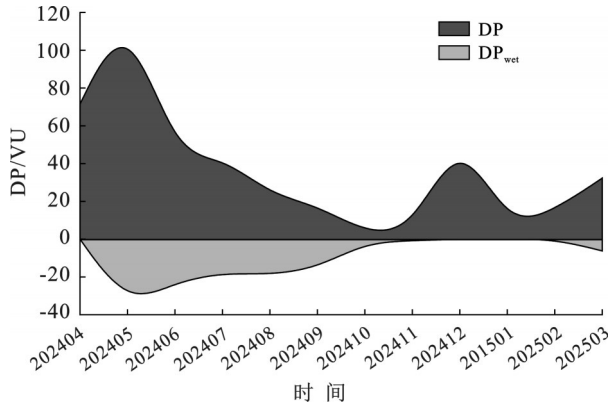


图3 2024年4月至2025年3月输沙势(DP)和受降雨影响的输沙势(DP_{wet})变化情况
Fig.3 Variations in DP and DP_{wet} from April 2024 to March 2025

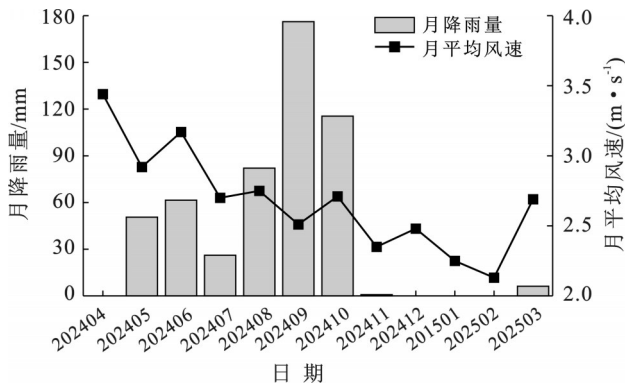
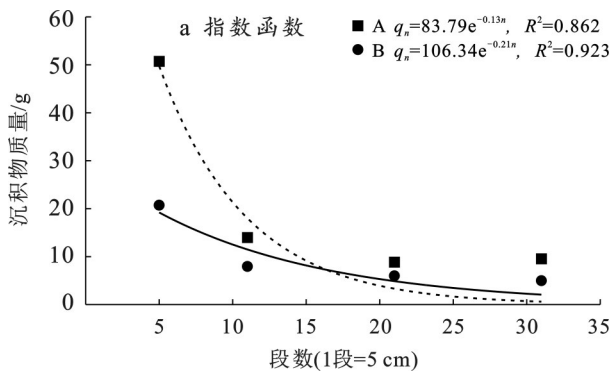


图4 2024年4月至2025年3月平均风速及降雨情况
Fig.4 Average wind speed and rainfall from April 2024 to March 2025



2.3 沟道风沙沉降

研究区夏季(7—9月)风速较小,降雨量和植被覆盖度较高,不易发生风蚀,但当地表土壤疏松时,降雨容易引发水蚀击溅现象,导致该时期的沉积物明显高于其他时期,尤其是15~20 cm高度范围内。在此期间可能发生了雨滴击溅和径流搬运等水蚀过程,而非风蚀作用。因此年风蚀模数估算时不考虑受水蚀影响的期间。

幂函数和指数函数均可用于估算风蚀模数,2种函数在沟道两侧(A, B)均表现出较好的拟合效果,其中,幂函数的决定系数优于指数函数(图5)。因此本研究采用幂函数[公式(9)—(14)]对沟道风蚀模数进行估算。

表4 输沙抑制率
Table 4 Sand drift suppression rate

月份	DP/VU	DP _{wet} /VU	DP _{wet} /DP	季节平均抑制率
3	71.57	0	0%	
4	122.09	35.22	29%	27%
5	43.87	22.92	52%	
6	43.64	17.75	41%	
7	23.82	18.92	79%	68%
8	17.88	15.22	85%	
9	3.51	1.88	54%	
10	3.95	0.80	2%	4%
11	57.76	0	0%	
12	6.04	0	0%	
1	15.53	0	0%	12%
2	32.32	6.20	19%	
全年	411.95	118.91		27%

注:季节平均抑制率为季节对应月份的抑制率的平均值。

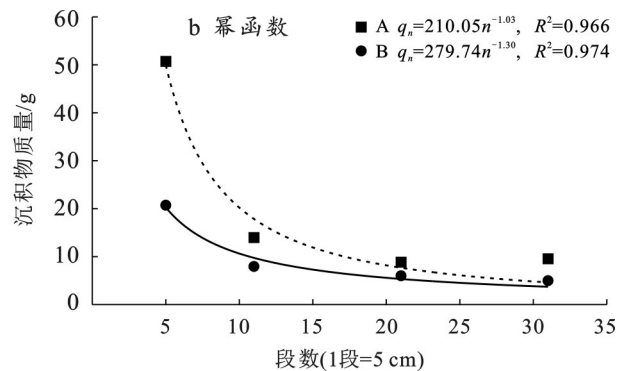


图5 2024年4月至2025年3月采集的风蚀沉积物垂直分布

Fig.5 Vertical distribution of wind-eroded sediments collected from April 2024 to March 2025

研究期间,沙家湾沟道(BA)发生了风沙沉降(图 6),年风蚀模数为 -0.40 t/hm^2 。风蚀模数小于 -0.06 t/hm^2 的月份为 10,4,5 月,其中,10 月最小,为 -0.12 t/hm^2 ,3 个月总和为 -0.27 t/hm^2 。此外风蚀模数从小到大为 12,2,3,1,6,11 月,在 $-0.440 \sim -0.001 \text{ t/hm}^2$ 之间,总和为 -0.13 t/hm^2 。风沙沉降主要集中在春季(4—5 月),占全年的 40.25%,土壤易被风蚀。

2.4 沟坡沉积物的土壤粒径特征

2.4.1 土壤粒径组成及粒度参数特征

由表 5 可知,入沟沉积物主要以细砂为主,表明随坡位降低,砂粒组分(粗中砂、细砂)含量持续增加,而细颗粒组分(粉粒、黏粒)含量显著减少。坡顶的沉积物以粉粒为主(76.20%),其含量显著高于坡中和坡底,其次为极细砂(20.87%),黏粒含量(2.07%)显著高于坡中和坡底,细砂和粗中砂含量极低;坡中的沉积物以细砂为主(61.53%),含量显著低于坡底,极细砂含量(30.30%)显著高于坡顶和坡底,

粉粒(6.70%)和黏粒(0.70%)含量显著低于坡顶。坡底以细砂(74.70%)为主,其含量显著高于坡顶和坡中,粗中砂含量(5.20%)显著高于其他坡位,其次为极细砂(15%),黏粒含量最低(0.63%),且与坡中无显著差异。

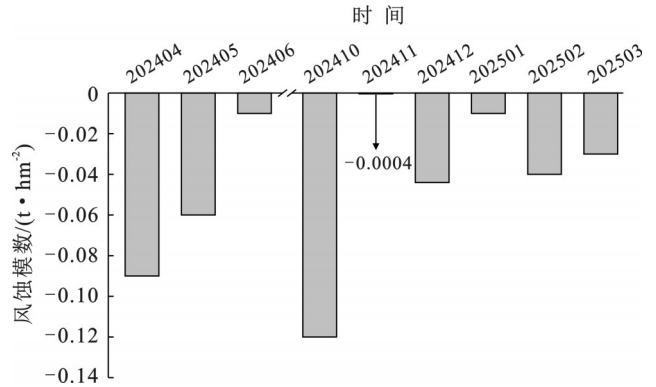


图 6 2024 年 4 月至 2025 年 3 月研究区的风蚀模数
Fig.6 Wind erosion modulus at study area from April 2024 to March 2025

表 5 沟坡沉积物的土壤粒径组成

Table 5 Soil particle size composition of gully slope sediments

单位: %

坡位	粗中砂含量	细砂含量	极细砂含量	粉粒含量	黏粒含量
坡顶	0.00 ± 0.00^c	0.87 ± 0.15^c	20.87 ± 1.27^b	76.20 ± 1.22^a	2.07 ± 0.21^a
坡中	0.77 ± 0.15^b	61.53 ± 1.97^b	30.30 ± 1.21^a	6.70 ± 0.92^b	0.70 ± 0.17^b
坡底	5.20 ± 0.52^a	74.70 ± 0.87^a	15.00 ± 0.46^c	4.27 ± 0.75^c	0.63 ± 0.12^b

注:不同小写字母表示沟坡不同坡位之间差异显著性($p < 0.05$)。下同。

沟坡沉积物的平均粒径存在显著差异(表 6),坡顶(5.52ϕ , 极细) $>$ 坡中(3.25ϕ , 中细砂) $>$ 坡底(2.89ϕ , 中砂),颗粒呈现减小的趋势。标准偏差坡顶 $<$ 坡中 $<$ 坡底,坡顶的分选极好(-1.53)。坡中和坡底分选性逐渐变差,但仍属分选较好范围。坡顶处于负偏,坡中和坡底接近对称(分别为 -0.21 和

-0.31)。峰态值方面,坡顶极尖窄(3.88) $>$ 坡中尖窄(1.28) $>$ 坡底中等(0.92),沉积物的颗粒分布呈现出尖窄向宽平变化趋势;分形维数从坡顶到坡底呈现减小趋势。

除平均粒径,其余土壤粒度参数坡顶与坡中和坡底有显著差异,而坡中和坡底无显著差异。

表 6 沟坡沉积物的土壤粒度参数

Table 6 Soil particle size parameters of gully slope sediments

坡位	平均粒径/ ϕ	标准偏差	偏度值	峰态值	分形维数
坡顶	5.52 ± 0.78^a	-1.53 ± 0.04^b	-0.46 ± 0.4^b	3.88 ± 0.22^a	2.20 ± 0.02^a
坡中	3.25 ± 0.00^b	-0.84 ± 0.17^a	-0.21 ± 0.12^a	1.28 ± 0.53^b	2.10 ± 0.05^b
坡底	2.89 ± 0.06^c	-0.73 ± 0.14^a	-0.31 ± 0.11^a	0.92 ± 0.24^b	2.07 ± 0.04^b

2.4.2 土壤粒配曲线

不同坡位土壤粒度频率分布曲线存在差异(图 7a),坡中和坡底均为单峰型,峰值粒径为 $2.47 \sim 3.25 \phi$,分布在 $9.4\% \sim 10.4\%$ 之间。坡顶为双峰型,峰值粒径为 $4.32 \sim 4.64 \phi$ 的含量(6.3%)高于峰值粒径 $7.42 \sim 7.57 \phi$ (1.5%)。峰值大小在不同坡位表现为:

坡底 $>$ 坡中 $>$ 坡顶。根据不同坡位土壤粒径累积频率曲线,可将土壤颗粒区分为蠕移、跃移和悬移组分(图 7b)。坡顶以悬移为主,占土壤体积的 77.3%;坡中和坡底以跃移为主,占 93.8%~96.1%。累积频率曲线的斜率越大分选越好,坡顶的分选程度:悬移 $>$ 跃移 $>$ 蠕移,坡中和坡底为:跃移 $>$ 悬移 $>$ 蠕移。

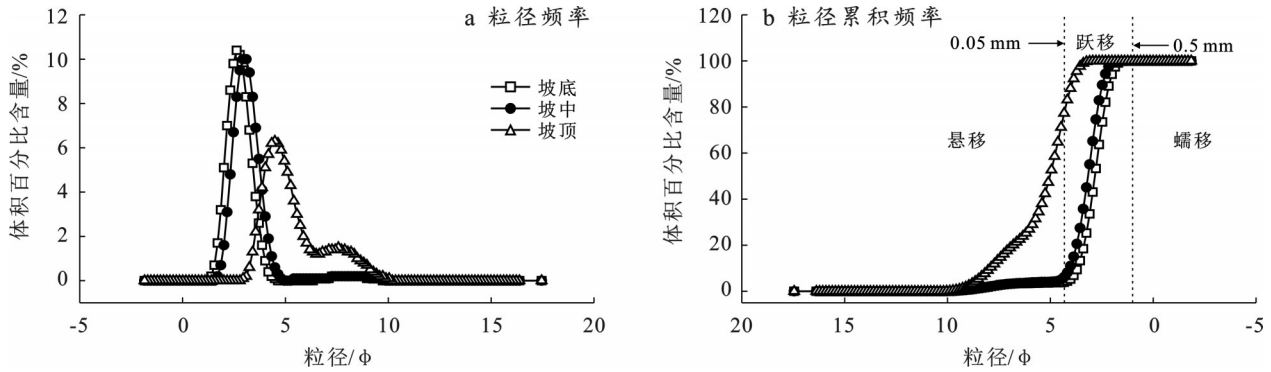


图7 沟坡不同坡位土壤颗粒频率分布曲线

Fig.7 Soil particle frequency distribution curves at different slope positions of gully slope

3 讨论

3.1 输沙势特征

输沙势是评价区域风沙活动强度和沙尘运动的重要方法^[6]。研究区年输沙势为441.95 VU,属于高风能环境,远高于庞营军等^[24]在毛乌素沙地核心区的研究。可能有以下两方面因素:①风速采集时间间隔不同,庞营军采集时间间隔(2 h)远大于本研究(10 min),导致短时强风(如阵风)被平滑掉,使得起沙风频率和风速值被低估^[25]。②区域风场的空间异质性,毛乌素沙地西北部(187.1 VU)与西南部(81.7 VU)的输沙势差异达2.2倍^[26]。

研究区中高空终年受西风与季风两大环流系统影响,呈现明显的季节分异特征。冬春季受西伯利亚冷高压(或称蒙古冷高压)控制,盛行强劲西北风,但春季DP(237.52 VU)远大于冬季(53.88 VU),可能是由于冬季地表冻结,有效抑制了风沙活动,而春季温度上升使表层沙粒松散化^[27],形成全年最活跃的风沙期(输沙势和合成输沙势均达峰值)。夏季DP(85.33 VU)大于秋季(65.21 VU),但夏季风系复杂,多风向相互抵消使夏季RDP(10.69 VU)低于秋季(52.59 VU)。

3.2 风沙入沟过程

风沙入沟是一个在高风能环境驱动下,由沟道对沙粒捕获,并通过风力分选沉积物的过程。首先,高风能环境及与沟道走向垂直的输沙方向是风沙入沟的驱动力。研究区年输沙势441.95 VU,在降雨抑制下,实际风蚀潜力(DP_a)仍达293.04 VU,属中风能环境,具备较强的输沙能力。年合成输沙方向(EN)与主沟道(NE-SW)走向近乎垂直,为沙粒高效进入沟道提供了路径。其次,沟道呈凹陷或低洼形态,有助于沙粒在重力作用下发生沉降,同时沟道的坡度与横断面形态会改变风流场,减弱湍流强度,从而促进沙粒沉积。最后,风力分选了入沟沉积物的物质

组成与运移方式。坡顶以粉粒为主(76.20%),平均粒径(5.52ϕ)属极细砂,分选性极好($\delta=-1.53$),呈负偏态和极尖窄(3.88),具有典型风成黄土的粒度特征^[28],坡顶的频率分布曲线呈双峰型,可能是由于不同风力强度或不同物源的粉尘叠加。坡顶细颗粒物沉降速率低,大部分可能越过相对狭窄的沟道继续向下风向输运,而非直接沉降于沟道之内,对沟道内部的直接沉降贡献有限。随着坡位降低,由坡顶粉粒(76.20%)为主逐渐转为以细砂(74.70%)为主,平均粒径减小至 2.89ϕ ,沉积物整体粗化,运动方式由悬移转变为跃移。粗粒物质(细砂及更粗颗粒)则因惯性大,主要以跃移方式沿沟坡迁移,并在沟道地形阻滞下快速富集,成为沟道沉降量的主要贡献者,这与研究区(多沙粗沙区)的背景粒径组成一致^[29]。

4 结论

(1) 沙家湾小流域为高风能环境,年输沙势为441.95 VU,方向变率指数为0.42,年合成输沙势方向与主沟道垂直,沟道年风蚀模数为 -0.40 t/hm^2 。春季的输沙势和沟道风沙沉降最高,分别占全年的53.74%和40.25%。

(2) 考虑降雨抑制的年实际风蚀潜力(DP_a)为293.04 VU,较输沙势降低了27%,抑制作用在高速与强降雨同步时最为显著。

(3) 从坡顶至坡底,沉积物组成由粉粒为主(76.20%)变为以细砂为主(坡底74.70%),平均粒径显著增大,运动方式从悬移主导转变为跃移主导。

参考文献(References)

- [1] 刘颖,张茂省,冯立,等.榆林黄河中游粗泥沙区生态问题与生态格局构建[J].西北地质,2023,56(3):58-69.
Liu Hao, Zhang Maosheng, Feng Li, et al. Ecological problems, systematically protection and restoration strategies of Yulin coarse sand area in the middle Yellow River [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 58-69.

- [2] 李敏,王白春,许林军.多沙粗沙区综合治理规划与减沙作用[J].人民黄河,2013,35(10):124-126.
Li Min, Wang Baichun, Xu Linjun. Comprehensive control planning of the area with abundant and coarse sediment and the analysis of the sediment reduction effect [J]. Yellow River, 2013, 35(10):124-126.
- [3] 王敏,刘志刚,张攀,等.黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J].中国水利,2023(10):42-45.
Wang Min, Liu Zhigang, Zhang Pan, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River [J]. China Water Resources, 2023(10):42-45.
- [4] 杨根生,刘阳宣,史培军.黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J].科学通报,1988,33(13):1017-1021.
Yang Gensheng, Liu Yangxuan, Shi Peijun. Estimation of the amount of aeolian sand entering yellow sand along the Yellow River [J]. Chinese Science Bulletin, 1988, 33(13):1017-1021.
- [5] 苗恒录,王健,张瑞强,等.内蒙古阴山北麓荒漠草原风况与输沙势研究:以希拉穆仁草原为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(4):102-110.
Miao Henglu, Wang Jian, Zhang Ruiqiang, et al. Characteristics of wind regime and drift potential of the desert steppe in northern slope of Yinshan Mountains, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(4):102-110.
- [6] 张钰佳,张媛.黑河中游沙漠-绿洲过渡带起沙风况及输沙势特征:以临泽县为例[J].兰州工业学院学报,2024,31(5):48-54.
Zhang Yujia, Zhang Yuan. Wind conditions and characteristics of sand transport potential in the desert-oasis transition zone in the middle reaches of the Heihe River: Taking Linze County as an example [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2024, 31(5):48-54.
- [7] 古拉依赛木·艾拜都拉,张峰,吴枫,等.腾格里沙漠沙丘沉积物粒度特征及其空间差异[J].中国沙漠,2022,42(5):133-145.
Aibaidoula Gulayisaimu, Zhang Feng, Wu Feng, et al. Grain size characteristics of dune sands and spatial variation in the Tengger Desert [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5):133-145.
- [8] 张令光,沈才生,黄艳丽,等.雅鲁藏布江流域输沙势空间特征[J].中国沙漠,2025,45(1):304-317.
Zhang Lingguang, Shen Caisheng, Huang Yanli, et al. The spatial variations of sand drift potential in Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1):304-317.
- [9] 黄翠华,张伟民,李爱敏.莫高窟窟顶风况及输沙势研究[J].中国沙漠,2006,26(3):394-398.
Huang Cuihua, Zhang Weimin, Li Aimin. Study on wind regime and drift potential atop Mogao Grottoes [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3):394-398.
- [10] 陈红星,李法虎,郝仕玲,等.土壤含水率与土壤碱性对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):21-25.
Chen Hongxing, Li Fahu, Hao Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2):21-25.
- [11] 董治宝.中国风沙物理研究五十年(I) [J].中国沙漠,2005,25(3):293-305.
Dong Zhibao. Research achievements in aeolian physics in China for the last five decades (I) [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3):293-305.
- [12] 包为民.沙土含水率对起沙临界风速影响[J].中国沙漠,1996,16(3):315-318.
Bao Weimin. Analysis of the effects of sand moisture on the threshold wind velocity [J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(3):315-318.
- [13] 迟文峰,王月甜,党晓宏,等.黄河流域土壤侵蚀时空演变与格局特征[J].中国沙漠,2023,43(3):305-317.
Chi Wenfeng, Wang Yuetian, Dang Xiaohong, et al. Temporal variation and spatial pattern of soil erosion in the Yellow River basin [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3):305-317.
- [14] 李恩菊,董治宝,赵景波.巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J].干旱区地理,2011,34(3):471-478.
Li Enju, Dong Zhibao, Zhao Jingbo. Grain size distribution of the aeolian sediments on the stoss slope of a typical mega-dune in the Badain Jaran Desert [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3):471-478.
- [15] 赵龙飞,秦富仓,董晓宇,等.腾格里沙漠两种白刺生境土壤粒度和养分的评价[J].水土保持通报,2025,45(3):213-223.
Zhao Longfei, Qin Fucang, Dong Xiaoyu, et al. Assessing soil particle size and nutrients of two *Nitraria tangutorum* nebkha habitats in Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3):213-223.
- [16] 师长兴.风力侵蚀对无定河流域产沙作用定量分析[J].地理研究,2006,25(2):285-293.
Shi Changxing. A quantitative analysis of the effects of wind erosion on sediment yield in the Wudinghe River watershed [J]. Geographical Research, 2006, 25(2):285-293.
- [17] Bouza M E, Silenzi J C, Echeverría N E, et al. Analysis of erosive events for a soil in the southwest of Buenos Aires Province, Argentina [J]. Aeolian Research, 2012, 3(4):427-435.
- [18] 赵宏胜,党晓宏,蒙仲举,等.黄河流域西柳沟中游输沙

- 势及风沙入黄量估算[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2606-2618.
- Zhao Hongsheng, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Study on sediment transport potential and contribution of wind-blown sand into Yellow River in Xiliugou Valley and middle reaches of Yellow River basin [J]. China Environmental Science, 2024, 44(5): 2606-2618.
- [19] 赖志强, 张承中, 高建华, 等. 半干旱农田地区 DPM 模型适用性初步研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 126-130.
- Lai Zhiqiang, Zhang Chengzhong, Gao Jianhua, et al. Applicability of DPM model to farmland in semi-arid area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(3): 126-130.
- [20] Fryrear D W, Saleh A. Field wind erosion: Vertical distribution [J]. Soil Science, 1993, 155(4): 294-300.
- [21] Bergametti G, Marticorena B, Rajot J L, et al. Dust uplift potential in the central Sahel: An analysis based on 10 years of meteorological measurements at high temporal resolution [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(22): 12,433-12,448.
- [22] Bouet C, Labiadh M T, Pierre C, et al. What drives wind erosion in cropped areas? A case study in southern Tunisia [J]. Catena, 2023, 223: 106964.
- [23] Guo Qiankun, Cheng Congcong, Jiang Hongtao, et al. Comparative rates of wind and water erosion on typical farmland at the northern end of the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2019, 352: 104-115.
- [24] 庞营军, 吴波, 贾晓红, 等. 毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 62-67.
- Pang Yingjun, Wu Bo, Jia Xiaohong, et al. Characteristics of wind regime and drift potential in Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 62-67.
- [25] 张正德, 董治宝, 赵爱国. 输沙势计算中的“时距”问题[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 177-182.
- Zhang Zhengsi, Dong Zhibao, Zhao Aiguo. Effect of different time intervals in assessing sand drift potential [J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 177-182.
- [26] 顾立霞, 吕萍, 马芳, 等. 不同数据源下毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 54-62.
- Gu Lixia, Lv Ping, Ma Fang, et al. Drift potential characteristics of Mu Us sandy land calculated with different data sources [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 54-62.
- [27] Alamusa, Niu Cunyang, Zong Qin. Temporal and spatial changes of freeze-thaw cycles in Ulan' Aodu region of Horqin sandy land, northern China in a changing climate [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(1): 89-96.
- [28] 宋昊南, 王恩宝, 刘沐筱, 等. 松嫩平原东部巴彦黄土的粒度特征及成因探讨[J]. 地质科学, 2024, 59(6): 1748-1758.
- Song Haonan, Wang Enbao, Liu Muxiao, et al. Grain-size characteristics and genesis of Bayan loess in the eastern of Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(6): 1748-1758.
- [29] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2000, 30(5): 540-548.
- Xu Jiongxin. Sediment yield process of wind-water two-phase erosion in sandy and coarse sand areas in the middle reaches of the Yellow River [J]. Science in China, Ser D, 2000, 30(5): 540-548.

(上接第 31 页)

- [22] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [23] 王丽琴, 鹿忠刚, 邵生俊. 岩土体复合幂-指数非线性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1269-1278.
- Wang Liqin, Lu Zhonggang, Shao Shengjun. A composite power exponential nonlinear model of rock and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1269-1278.
- [24] Ling Xianzhang, Tian Shuang, Tang Liang, et al. A damage-softening and dilatancy prediction model of coarse-grained materials considering freeze-thaw effects [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22: 100307.
- [25] 梁志超, 胡再强, 郭婧, 等. 非饱和石灰黄土土水特征与压缩湿陷特性研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(3): 66-75.
- Liang Zhichao, Hu Zaiqiang, Guo Jing, et al. Study on soil-water characteristics and compressive collapsibility of unsaturated lime loess [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(3): 66-75.
- [26] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [27] 陈晔, 张登良, 吴家惠. 石灰加固黄土的研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 1988, 8(1): 145-159.
- Chen Ye, Zhang Dengliang, Wu Jiahui. A study on lime stabilization of loess [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 1988, 8(1): 145-159.
- [28] Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120: 96-107.