

雷云竹,王思琦,韩兰英,等.阿拉善高原东部戈壁区地表沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2026,46(3):11-21.

阿拉善高原东部戈壁区地表沉积物粒度特征

雷云竹¹,王思琦¹,韩兰英¹,张思豆¹,胡光印¹,李超¹,
董治宝¹,乌力吉德力格尔²,张文慧¹,张正偲¹

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院/钱学森沙产业陕西省高等学校重点实验室/榆林沙漠黄土过渡带生态与环境
陕西省野外科学观测研究站,陕西西安710119;2.乌拉特后旗林业和草原局,内蒙古乌拉特后旗015500)

摘要:风沙灾害的形成是风与沙物质互馈的结果。阿拉善高原是中国沙尘暴核心源区,内蒙古乌拉特后旗作为其东部关键过渡带,风沙灾害频发但灾害成因不明。收集了该地区的沙丘、戈壁、干涸河床等7种不同地表类型样品,通过粒度分析并结合风况数据,探讨沉积物粒度特征的分异规律及其对沙尘释放的影响特征,为科学治理风沙灾害提供依据。结果表明:(1)地表沉积物粒度以细沙(13.94%±4.86%~53.04%±6.76%)和中沙(17.62%±5.22%~43.06%±7.51%)为主,具有形成沙尘暴的物质基础。(2)2014—2023年平均风速为4.18±0.13 m·s⁻¹,输沙势为353.72±63.24 VU,属于中等风能环境,具有形成沙尘暴的动力条件。(3)河湖冲积物地表是该地区的主要沙尘释放地表类型。戈壁砾石覆盖层被破坏后,细颗粒裸露也会成为次生沙源。结合研究区的地形、风况条件和地表沉积物特征,研究认为干涸河床等富含粉沙和黏土的地区为优先治理区,同时需加强戈壁原始地表的保护。

关键词:地表沉积物;风况;粒度;阿拉善高原;乌拉特后旗

文章编号:1000-694X(2026)03-011-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00075

中图分类号:P931.3

文献标志码:A

0 引言

风沙沉积物是地表过程的物质基础,也是风沙危害的直接物质来源^[1-2]。风是干旱半干旱地区地貌形态塑造的重要动力,影响风沙运动过程。沙尘暴的发生是风沙活动的极端形式,是风与地表可蚀性物质相互作用的过程^[3],对发生地、区域乃至全球大气辐射、自然环境以及人类社会造成不利影响,致使空气质量下降、能见度降低,危害人体的呼吸系统^[4]。

区域地表沉积物特征影响风沙运动过程。受风沙沉积物物源和搬运过程差异的影响,戈壁、沙漠和干涸湖盆地表沉积物具有明显差异^[5-8]。乌兰布和沙漠优势粒级为中沙,无植被覆盖地表和沙漠沙丘是该沙漠的尘源^[5];阿拉善高原的干涸湖盆极易发生土壤风蚀,粒度特征存在明显的空间差异性,是华北地区沙尘暴发生的主要物源^[6-7];戈壁地

表上粉沙、黏土(<63 μm)和细沙(125~250 μm)也是中国北方沙尘天气的重要来源^[8]。沉积物粒度及其分布反映了风力对源区风沙物质的搬运以及分选作用^[9-10],影响沙粒的起动过程,对于探讨沙尘源区地表沉积物特征,解释沙尘暴形成过程,为沙尘暴预报预警提供了数据支撑^[5]。

沙尘物质的运动和扩散范围受风的影响^[4]。粗沙(>500 μm)以蠕移的方式运动,细沙与中沙(63~500 μm)以跃移方式运动,而粉沙和黏土(<63 μm)以悬移的方式运动,并进入大气,形成沙尘天气^[4]。风力影响沙粒的平均粒径和分选系数^[11]。如腾格里沙漠属于低风能环境,风成沙搬运距离较长,沙粒平均粒径较细,分选较好^[12]。在风沙科学研究中,常用输沙势(DP)衡量区域风沙活动的强度,其反映了风沙活动搬运沙粒的潜在能力^[13]。输沙势越大,分选过程越强烈^[14]。除风力作用外,地表属

收稿日期:2025-03-14; 改回日期:2025-05-15

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2024JBGS0003-1-1);陕西省2021年自然科学基金基础研究计划(定向委托)项目(2021JCW-17);科技部科技基础资源调查专项(2022FY202304);中央高校基本业务经费项目(GK202306002,GK202309006,GK202502004,GK202301003)

作者简介:雷云竹(2002—),女,山西汾阳人,硕士研究生,研究方向为干旱区资源与环境。E-mail: leiyanzhu020909@163.com

通信作者:张正偲(E-mail: zhangzhengcai@snnu.edu.cn)

性也影响沙粒的平均粒径和分选系数,如戈壁地表沙物质的平均粒径总体较大,分选较差^[9]。

研究区位于内蒙古乌拉特后旗北部,属于阿拉善高原的组成部分,该地区是沙尘暴的源区与途经区^[15]。地表呈现戈壁、流沙、季节性河道交错分布和共存的特点。2021年1月10—14日巴彦淖尔市出现近30年以来最强连续大风沙尘天气,乌拉特后旗日极大风速突破1月历史极值,直接经济损失125万元,给当地农牧业设施带来危害^[16]。阿拉善高原为中国沙尘暴核心源区^[6-7],已有研究指出阴山西部沙漠、低山和丘陵盆地的地形影响沙尘暴形成过程^[11]。乌拉特后旗作为沙尘源区与东部关键过渡带,地表沉积物粒度特征与风沙活动机制的系统研究仍属空白^[17]。为此,2024年7月,作者团队对乌拉特后旗进行调研,发现地表沉积物在空间分布上差异明显。本研究通过分析多地表类型沉积物粒度参数,结合区域风沙动力环境特征,分析影响风沙活动过程的因素,有助于辨识该地区地表沉积物的物质来源、探究该区域风沙运动的过程,以期沙漠治理、沙漠化防治及沙产业的发展提供重要的数据支撑。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

乌拉特后旗位于内蒙古自治区西北部,地处阴山北麓,阴山山脉横亘东西。全旗地势呈现中间高两边低的特点,平均海拔1500 m,境内的地貌景观囊括了山地、低山丘陵、砾石戈壁高原、沙丘、戈壁以及山前冲积平原等多种形态(图1A)。其中沙丘形态类型丰富,流动沙丘、灌丛沙丘、横向沙丘与格状沙丘错落分布,固定沙丘主要分布在旗内的西北部地区,半固定沙丘和流动沙丘分布在本区广大的山谷和盆地^[11]。研究区戈壁为主要的地表类型,分布着博克台沙漠、海里沙漠和白音查干沙漠等。

乌拉特后旗呈现出的地表类型以及沙丘的形成与发育过程与该地温带大陆性气候紧密关联。春季温差大,风沙活动频繁;夏季降雨稀少且蒸发强烈,气候干燥。该地区年均温为8.7℃,年降水量为149 mm,年平均风速8 m·s⁻¹,最大风速可达27 m·s⁻¹^[18]。乌拉特后旗流沙分布于乌兰布和沙漠的东端,与狼山山前冲积扇毗邻,二者共同塑造了沙

漠-山地特殊景观,区内沙丘-戈壁荒漠物质供给及其内部沙尘循环造成了沉积物特征的明显空间分异^[11]。地理位置上,乌拉特后旗位于黑河流域和巴丹吉林沙漠的下风向,是沙尘的途经区。在气候要素与地形条件的协同影响下,该地风蚀现象强烈,沙尘天气频发,给当地荒漠化治理工作增加了复杂性与难度。

1.2 样品采集与分析方法

通过遥感影像与野外实地验证相结合的方法,将乌拉特后旗地表类型划分为线性沙丘、格状沙丘、灌丛沙丘、横向沙丘、半固定沙丘、戈壁地表及河湖冲积物。2024年7月在研究区选取了21个样点,采集地表20 cm×20 cm范围、深度为1~5 cm的表层样品,共计82个样品。为了实现样点采集的全面性,沙丘采样点分布在迎风坡坡底、迎风坡坡中、丘顶、背风坡坡中和背风坡坡底部位,同时采集了研究区季节性河流的冲积物(图1B)。确保每类地表样点空间分布均匀且覆盖典型的地貌单元。在粒度实验前将从野外采集的沙样阴干,过2 mm的土壤筛剔除大颗粒样品和植物根系等杂物。粒度的测定采用激光粒度仪法,实验在陕西师范大学地理科学与旅游学院激光粒度仪实验室完成。所用仪器为Mastersizer 3000型激光粒度仪,将其测量的粒径范围设置为0.01~3 500 μm,遮光度为10%,实验时取适量干沙放入粒度仪中进行测定,每份样品自动测算3次,最后取平均值作为最后的测量结果。

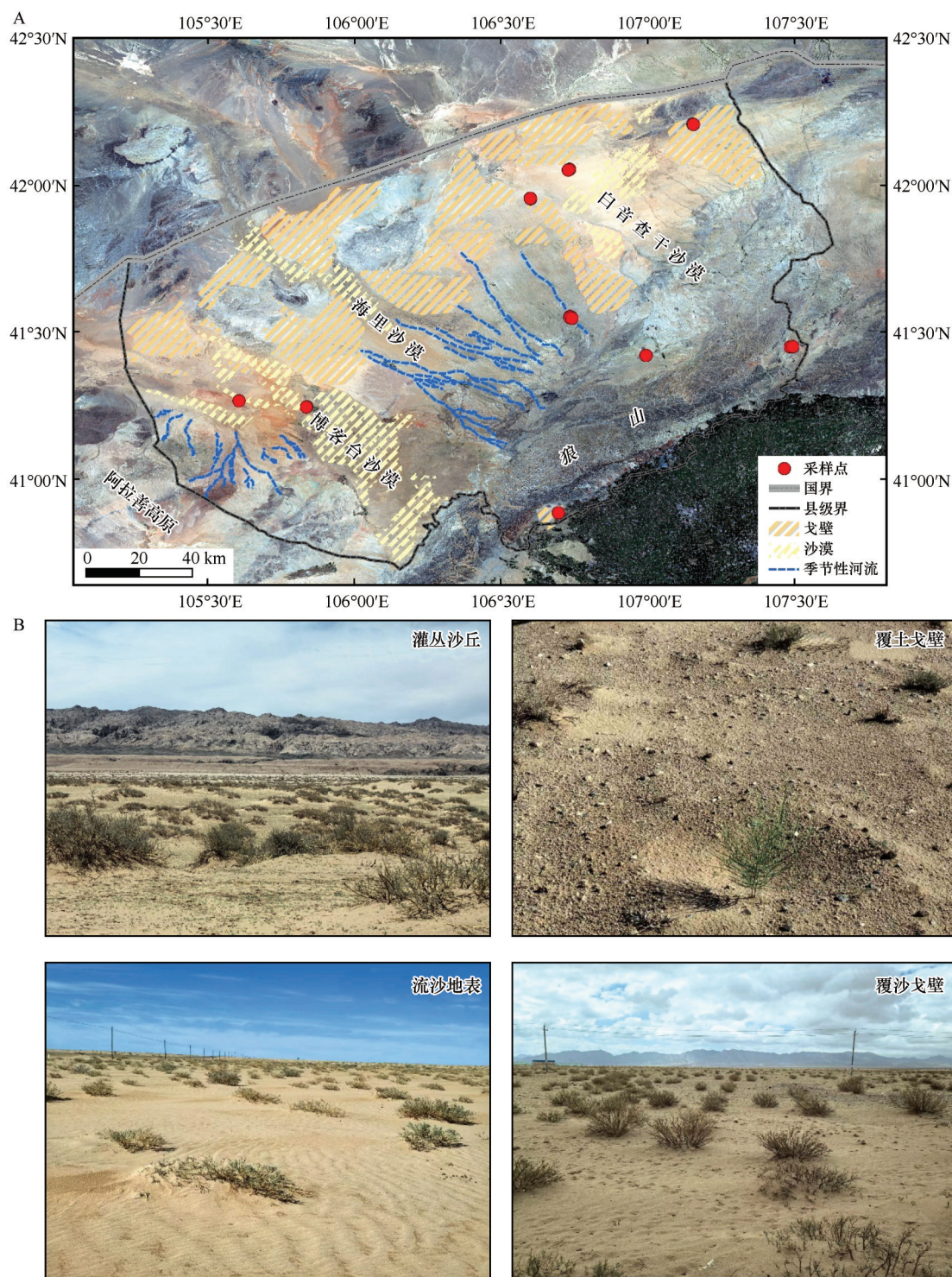
粒度划分按照Udden-Wentworth粒度分类标准进行划分,粒径用Φ值表示,换算公式为:

$$D = -\log_2 d \quad (1)$$

式中: D 表示粒径(单位Φ); d 表示粒径(单位mm)。

采用Folk-Ward图解法^[19]计算平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(SK)和峰度(K_g),单位为Φ。运用单因素方差分析法(One-way ANOVA)比较不同地表沉积物粒度含量与粒度参数的差异性。

气象数据来自国家气象数据中心(<http://data.cma.cn>),根据乌拉特后旗站点数据统计得到该地区的平均风速、平均起沙风速和输沙势(DP)。根据Fryberger的方法计算输沙势(DP)、合成输沙势(RDP)、合成输沙方向(RDD)和方向变率指数(RDP/DP)^[13]。



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2024)0650号)制作,底图边界无修改

图 1 研究区地理位置(A)、不同地表类型特征(B)

Fig.1 Locations of the study region (A), and characteristics of four surface types (B)

$$DP = u^2(u - u_c)t \quad (2)$$

式中:DP为输沙势(VU);u为10 m高度处起沙风速(n mile·h⁻¹);u_c为10 m高度处起动风速(n mile·h⁻¹);t为起沙风时间数^[20]。由于地表类型较多,暂定起沙风速为6 m·s⁻¹。

2 结果与分析

2.1 粒度组分与空间分异特征

研究区地表沉积物粒径范围广泛(粉沙和黏

土-极粗沙),整体以细沙(13.94%±4.86%~53.04%±6.76%)和中沙(17.62%±5.22%~43.06%±7.51%)为主,二者合计占比超过60%(表1)。粗沙(1.71%±4.72%~20.86%±10.17%)与极细沙(5.00%±3.18%~18.32%±8.29%)次之,再次为粉沙和黏土(0.36%±0.66%~21.48%±12.78%),砾石(0~2.54%±2.54%)含量最低。不同地表沉积物的沙粒级配呈现显著差异(图2, $P<0.05$)。线性沙丘粗沙(20.86%±10.17%)、中沙(43.06%±7.51%)含量最高,格状沙丘粗沙(1.71%±4.72%)、中沙(17.62%±5.22%)含量最低,指示其物源存在局地基岩风化输入或沙物质在运移过程中受到了地形的阻截。格状沙丘细沙含量最高(53.04%±6.76%),河湖冲积物细沙含量最低(13.94%±4.86%)。横向沙丘极细沙含量最高(18.32%±8.29%),线性沙丘极细沙含量最低(5.00%

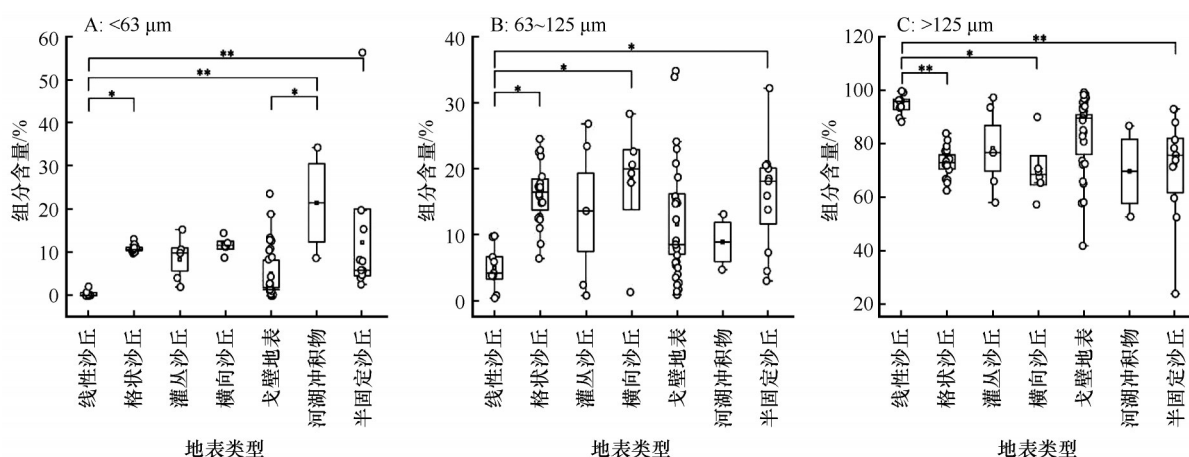
±3.18%)。河湖冲积物粉沙和黏土含量(21.48%±12.78%)显著高于戈壁(5.05%±6.22%)以及其他地表,地表粉沙和黏土组分含量越高,沙尘释放潜能越强^[16],表明河湖冲积物地表是该地区的主要尘源。

不同地表类型的粒度频率曲线呈现显著空间分异规律(图3)。线性沙丘与灌丛沙丘表现为单峰型,峰形尖锐,表明强烈的风力分选作用及单一物源特征。河湖冲积物与戈壁呈现宽峰或多峰型分布,峰形宽缓或出现次峰,河湖冲积物峰值跨度最宽(272~756 μm),次峰值位于1 110 μm。前者反映了季节性河流的间歇性水动力的影响,后者反映了多物源的混合输入。横向沙丘与格状沙丘为双峰尖峰型,主峰与次峰并存。格状沙丘峰值跨度最窄(163~211 μm),次峰值位于756~859 μm,指示双风向主导下的分选过程。

表1 不同地表类型的沙粒级配

Table 1 The sand particle size distribution of different surface types

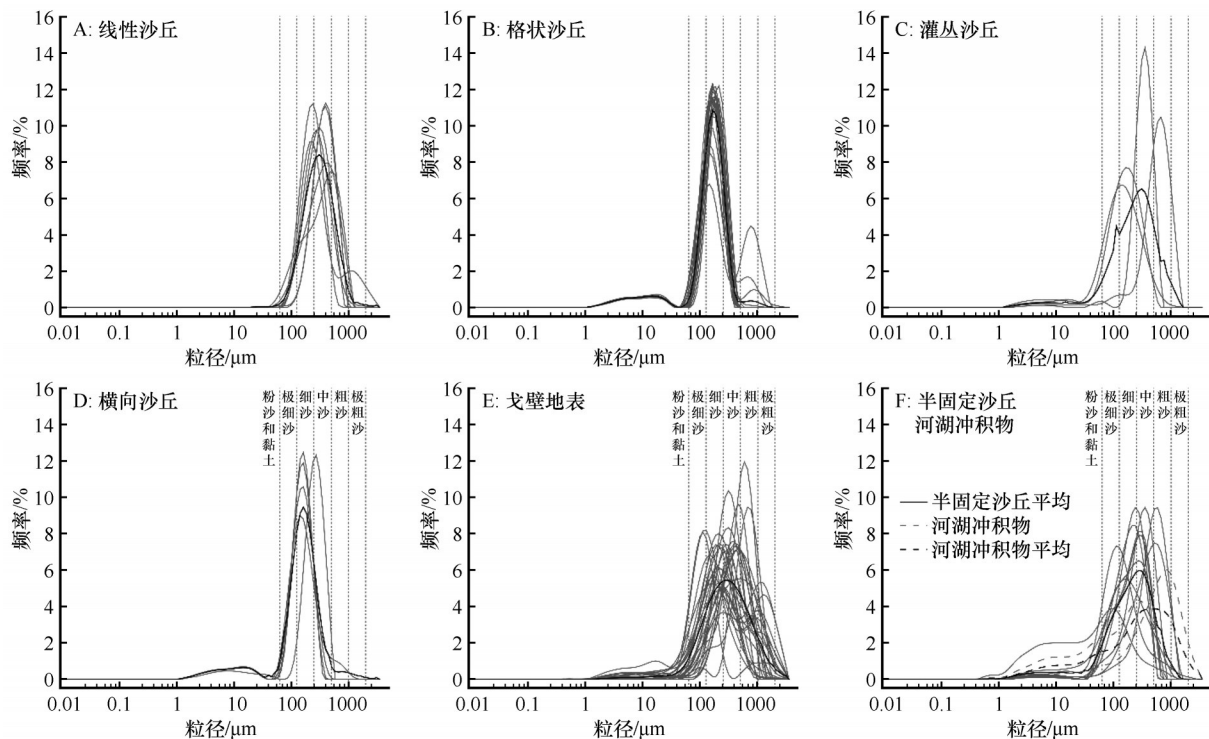
粒级	沙粒级配/%						
	线性沙丘	格状沙丘	灌丛沙丘	横向沙丘	戈壁	河湖冲积物	半固定沙丘
砾石	0.36±0.97	0.01±0.66	0.00	0.24±0.53	1.55±2.49	2.54±2.54	0.02±0.07
极粗沙	2.00±2.99	0.72±2.12	3.11±6.08	1.31±2.62	7.95±7.52	12.48±11.07	1.84±3.24
粗沙	20.86±10.17	1.71±4.72	15.61±18.82	2.55±2.82	20.29±12.59	20.40±9.70	13.02±13.72
中沙	43.06±7.51	17.62±5.22	33.05±17.50	18.91±15.08	28.69±9.69	20.26±1.45	30.17±11.77
细沙	28.36±10.14	53.04±6.76	26.44±14.75	46.99±9.83	24.86±8.93	13.94±4.86	26.75±9.89
极细沙	5.00±3.18	16.08±4.60	13.39±10.60	18.32±8.29	11.62±8.98	8.90±4.22	15.86±8.05
粉沙黏土	0.36±0.66	10.82±0.73	8.39±4.78	11.69±1.68	5.05±6.22	21.48±12.78	12.34±14.73



注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

图2 沉积物粒级级配

Fig.2 The grain size contents for sediment



注:黑色实线为平均粒度曲线

图3 不同地表类型粒度分布曲线

Fig.3 The grain size distribution of different surface types

2.2 粒度参数特征

2.2.1 平均粒径与风蚀响应

乌拉特后旗地表沉积物平均粒径为 $0.74\sim 4.81\ \Phi$ (粉沙-粗沙),分异特征与地表类型密切相关(图4A)。半固定沙丘粒径范围最广($1.03\sim 4.81\ \Phi$,均值为 $2.37\pm 0.95\ \Phi$),反映了植被覆盖对细颗粒的拦截作用。线性沙丘粒径范围最小($1.32\sim 2.04\ \Phi$,均值 $1.63\pm 0.23\ \Phi$),与单峰尖锐自然频率曲线印证了风力对细沙的持续分选(图3A)。格状沙丘粒径最均一($2.04\sim 2.78\ \Phi$,均值 $2.58\pm 0.16\ \Phi$),细沙占比高。河湖冲积物平均粒径最大($0.95\sim 3.38\ \Phi$,均值 $2.17\pm 1.21\ \Phi$),表明受风-水联合搬运作用的共同影响,地表细颗粒物易悬移,风蚀贡献显著。

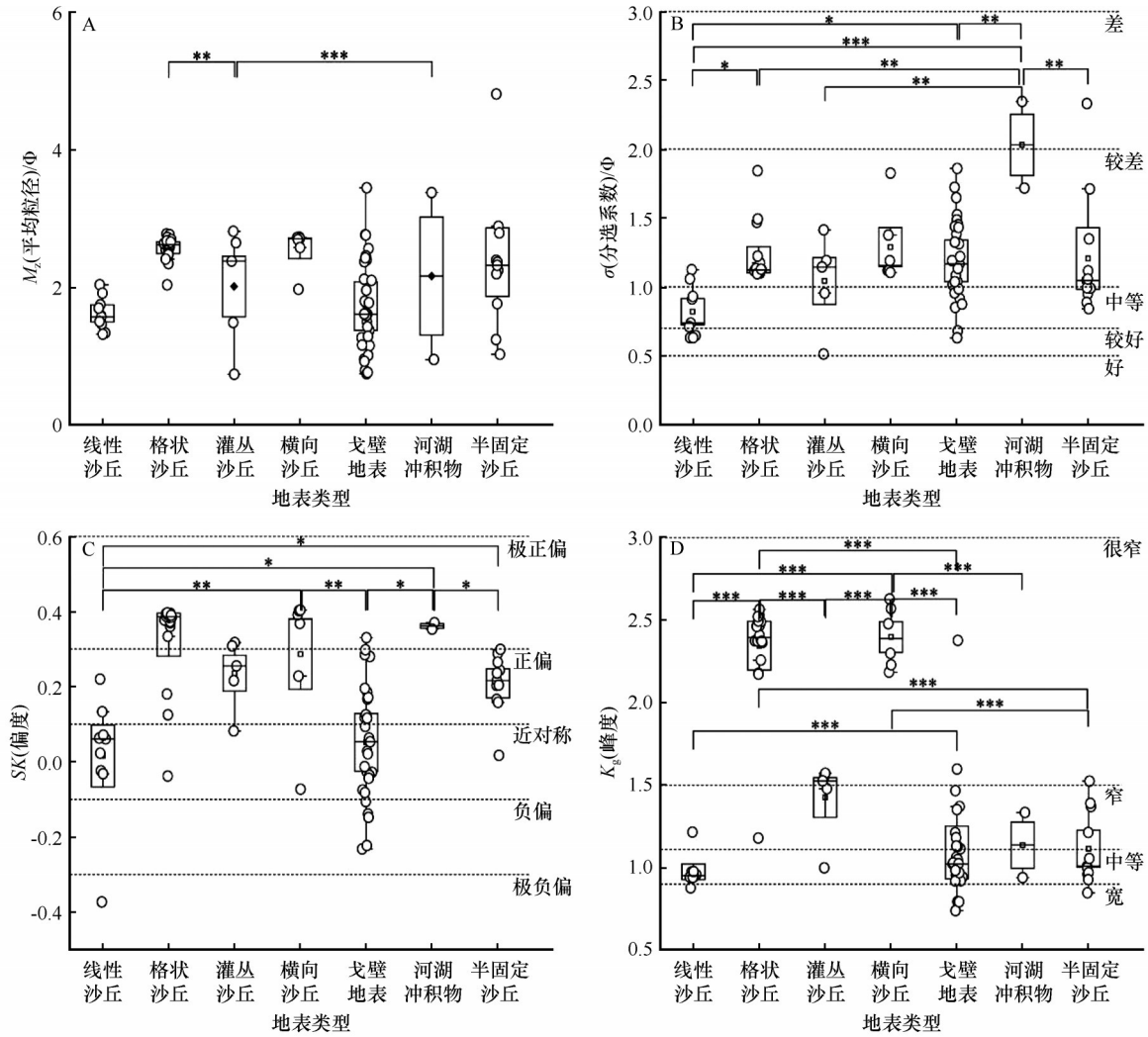
2.2.2 分选系数与风力作用

研究区地表沉积物的分选系数呈现显著空间分异性($0.51\sim 2.35\ \Phi$,均值 $1.17\pm 0.34\ \Phi$,图4B)。总体表现为线性沙丘分选最优($0.82\pm 0.18\ \Phi$),其次为灌丛沙丘($1.04\pm 0.3\ \Phi$)、戈壁地表($1.19\pm 0.3\ \Phi$)、格状沙丘($1.2\pm 0.18\ \Phi$)、半固定沙丘($1.21\pm 0.43\ \Phi$)、横向沙丘($1.29\pm 0.26\ \Phi$),反映了沙丘形态的阻截作用、地表控制的差异以及沙丘表层植被对沙粒的拦截和抑制细组分的悬移。如格状沙丘分选系数随

粒径增大而变好($P<0.05$,图5A),反映了风力持续分选作用。河湖冲积物分选性最差($2.03\pm 0.31\ \Phi$),与宽双峰频率曲线揭示冲积-风蚀的复合过程(图3F),粗颗粒保留原地而细颗粒被搬运。戈壁地表的砾石能够降低近地表风速而抑制细颗粒悬移,但中沙组分($28.69\pm 9.69\%$)仍可以跃移,形成较差的分选特征。

2.2.3 偏度-峰度的环境指示

研究区所有地表沉积物偏度在 $-0.37\sim 0.4$ (平均值 1.17 ± 0.34 ,图4C),表现为极负偏和极正偏,表明地表沉积物既有细颗粒组分,也有粗颗粒组分。横向沙丘呈现正偏(0.29 ± 0.17),峰度最窄 $2.18\sim 2.63$ (平均值 2.40 ± 0.17),研究区盛行风向比较单一,沉积环境相对稳定,双峰形态与正偏共同反映了其组分分布最为集中(图3D);线性沙丘偏度趋近对称(0.02 ± 0.16),峰度为 $0.85\sim 2.63$ (平均值 1.50 ± 0.64 ,图4D),呈现中等峰态和窄峰态,能够指示单向风场主导下的分选,各粒级组分混合分布。河湖冲积物的偏度属于极正偏(0.36 ± 0.01),峰度为 $0.94\sim 1.33$ (平均值 1.14 ± 0.20),属于尖窄峰态,指示季节性河流冲积与风力分选的交替作用。戈壁地表的偏度表现为近对称(0.05 ± 0.15),峰度最平缓($0.74\sim 2.38$,平均



注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

图4 不同地表类型粒度参数特征

Fig.4 The grain-size parameters of different surface types

值 1.09 ± 0.31), 与多峰形态(图 3E)共同反映了阴山山体碎屑物以及季节性河流冲积物等多物源的混合影响, 其地表粗颗粒虽然能够抑制风蚀, 但细颗粒仍可通过碰撞磨蚀释放粉尘。

2.2.4 粒度参数交互关系

粒度参数之间的关系能够反映不同地表沉积物的物质分选差异。戈壁与半固定沙丘分选性随粒径增大而变差(图 5A), 但反映的分选过程不同, 前者与地表物源相关, 后者与植被拦截粗颗粒有关。格状沙丘随着平均粒径的增大分选变好(图 5A), 偏度与平均粒径显著正相关 ($R^2 = 0.16$, $P < 0.05$, 图 5B), 峰度随粒径增大而变窄(图 5C), 反映长期风力分选对粒级分布的影响。横向沙丘的分选系数与偏度之间存在明显的相关关系 ($R^2 = 0.99$, $P < 0.05$, 图 5D)。线性沙丘、灌丛沙丘、河湖冲积物

的粒度参数不存在明显的相关关系 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 地表沉积物粒度分异特征

粒度特征差异与其下垫面属性和风沙活动中的搬运与堆积过程密切相关^[21]。灌丛沙丘与格状沙丘、河湖冲积物平均粒径差异显著 ($P < 0.05$, 图 4A), 灌丛沙丘细颗粒占比高(粉沙和黏土 8.39%), 表明植被覆盖能够通过增加地表粗糙度拦截过境沙粒, 抑制地表风蚀作用和细颗粒的悬移过程, 从而造成不同地表沉积物平均粒径以及分选系数的差异。

线性沙丘、河湖冲积物与其他地表类型的分选系数差异显著 ($P < 0.05$, 图 4B)。线性沙丘分选性最

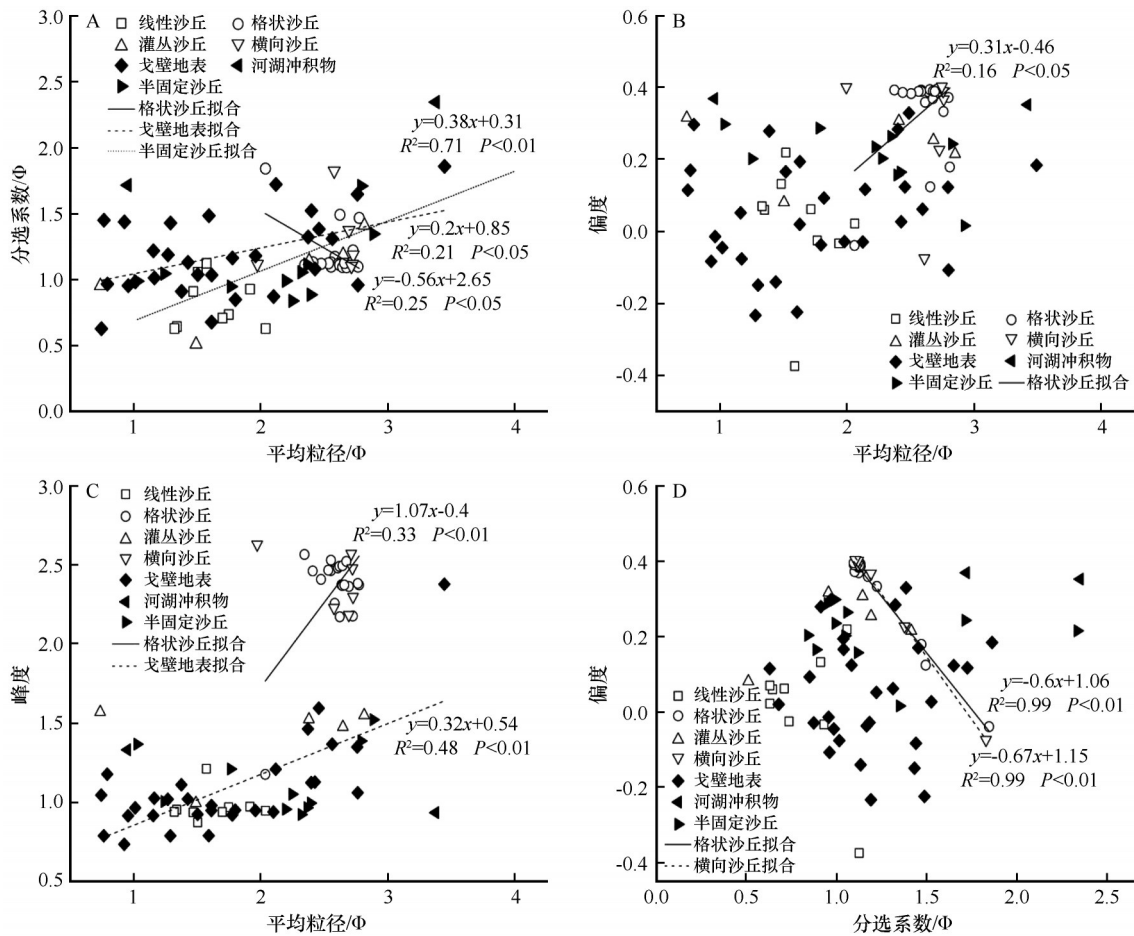


图5 粒度参数散点关系图

Fig.5 Scatter diagrams of grain size parameters of sediments

优(0.82 ± 0.18), 河湖冲积物分选最差(2.03 ± 0.31), 前者与其沙丘形态和风力分选的互馈作用有关, 后者源于季节性流水扰动细颗粒再悬浮。乌拉特后旗位于风力强劲峡谷区^[16], 年均风速达 $4.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图6A), 增强了跃移沙粒动能并延长搬运距离; 同时在中等输沙势条件(353.72 VU , 图6C)下, 沉积物运移呈现细沙(53.04%)与中沙(43.06%)协同主导的特征。

3.2 沙尘源区物源

粉沙和黏土含量直接影响大气中粉尘的浓度^[22]。研究区河湖冲积物粉沙和黏土含量最高(21.48%), 远大于周边沙漠地区。同时, 多峰形态的自然频率曲线(主峰 $250\sim 850\text{ }\mu\text{m}$, 次峰 $<63\text{ }\mu\text{m}$)表明该物质来源于季节性河流的冲积物, 丰水期输送上游粉沙和黏土至下游堆积, 地表板结层被破坏^[23]; 枯水期裸露河床受到风力侵蚀, 释放下层细颗粒, 导致地表表层物质松散且风蚀敏感性高, 该

特征与阿拉善高原东南部干涸湖盆易受风蚀的地表属性具有相似性^[6], 因此是沙尘暴悬移物质的核心来源。

研究区戈壁的主要物质来源与阴山山脉的山前冲积物、河流冲刷的沉积物密切相关^[11], 该地区山体风化后的碎屑物质在强风作用下能够搬运到山前, 通过季节性河流搬运至干涸河床, 经风力再分选后参与局地沙尘循环。这与河西走廊新月形沙丘物质来源相似^[21]。已有研究证明沙尘的主要物源并不是戈壁本身, 而是戈壁被破坏地表所释放的沙尘物质^[4]。旗内地貌类型的多样化影响了沉积物的来源, 表现出了风-水联合搬运和沉积的过程。

研究区西部毗邻阿拉善高原沙尘源区, 在蒙古气旋冷空气的影响下, 受西风环流驱动(输沙方向西北-东南, 图6C), 强风在经过巴丹吉林沙漠时, 松散的流动沙丘及半固定沙丘在传输过程中提供了沙尘^[24]。远程粉尘($<63\text{ }\mu\text{m}$)可悬移输入至此, 在阴山山脉的阻挡下, 形成二次沉积。

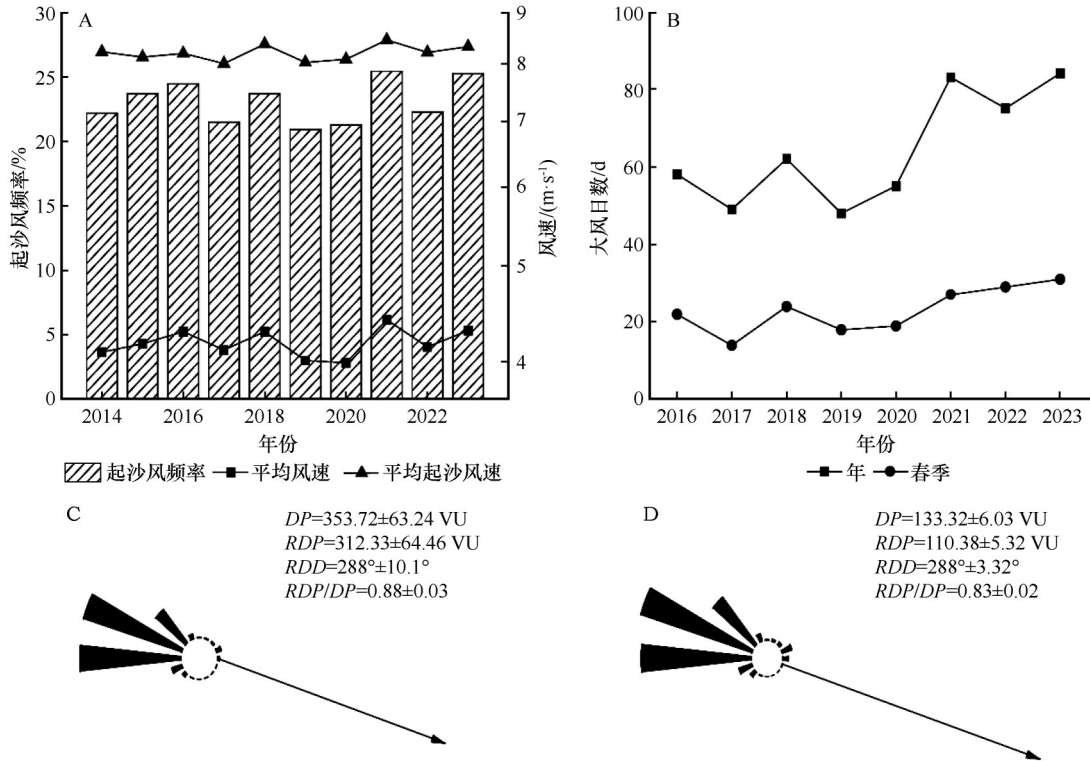


图6 2014—2023年年均风速、起沙风速及起沙风频率(A)、大风日数(B)、2014—2023年年均输沙势(C)、春季输沙势(D)

Fig.6 Average annual wind speed, sand-driving wind speed and sand-driving wind frequency in 2014–2023 (A), Number of windy days (B), annual sediment transport potential from 2014 to 2023 (C), and sand transport potential in spring (D)

3.3 地表粒度特征对沙尘释放的响应

3.3.1 尘源物质的空间分异特征

研究区粉沙和黏土($<63\ \mu\text{m}$)含量(10.02%)高于巴丹吉林沙漠($<1\%$)与腾格里沙漠($<8.59\%$),低于乌兰布和沙漠^[5,9,12],构成了沙尘暴发生的物质基础。不同地表的粉沙和黏土空间分布呈现显著差异(图2A):河湖冲积物粉沙和黏土占比最高(21.48%),分选差,在主导风西和西北风的作用下(起沙风西方向占35%,西北方向占45.23%),其成为区域主要沙尘释放地表类型。这与Wang等^[25]对黑河流域的研究结果一致,通过对干涸河床等地表类型的沙尘排放通量的研究表明西北地区干涸河床沉积物是粉尘的主要来源。

灌丛沙丘与半固定沙丘粉沙和黏土含量次之(8.39%~12.34%),与其他无植被覆盖的沙丘相比,平均粒径较大,已有研究证明灌丛沙丘表面的地表起伏和植被改变了近地面风场,增强了对风沙流的拦截作用^[26]。戈壁地表粉沙和黏土占比最低(5.05%),尽管砾石覆盖(1.55%)形成抗风蚀表层,但研究区地表风蚀强,其松散的结构仍允许细颗粒在强风($\geq 17\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)下逃逸^[27]。

沙尘源处于粉砂黏土组分丰富的边缘沙漠与冲洪积扇缘戈壁相互交错的区域^[28]。研究区干涸河床与戈壁地表错落分布,在频繁的粉尘物质内循环中,为研究区沙尘过程提供了主要的物质基础。

地表沉积物也可来源于粗颗粒物与地表弹性碰撞破坏地表而形成的新的沙源^[29]。研究区河湖冲积物地表粗颗粒含量最高(35.42% \pm 7.31%),戈壁(29.79% \pm 7.78%)与线性沙丘(23.23% \pm 9.30%)含量次之(表1)。起沙风速为 $8.21\pm 0.14\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,年均起沙风频率23.08%(图6A),当风速超过阈值时,粗颗粒($>500\ \mu\text{m}$,占比17.69%)通过碰撞磨蚀产生次生细颗粒,将直接引起地表粉尘的释放^[4],形成侵蚀—搬运—再侵蚀循环。戈壁粗颗粒抑制风蚀,但细沙和中沙的含量较多(53.54% \pm 9.31%),在运动过程中碰撞地表,导致粉沙和黏土释放,这与阴山西部沙漠戈壁地表沙尘释放潜力具有一致性^[11]。

3.3.2 沙尘释放的驱动机制

研究区沙尘释放潜力体现为以下3个耦合机制:①多尘源复合系统呈现三级释放链特征,河床为主尘源,沙丘为跃移载体,戈壁为次尘源。②地形呈现南高北低的趋势,且西北方向地表大部分为

荒漠,城镇建设以及植被覆盖对于风速的削弱作用都很小,利于西北方向的风直驱南下,在地形上对于风速起到了加速作用。年均风速达 $4.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,高于周边的腾格里沙漠($3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),驱动沙粒远程迁移^[30]。③人为干扰脆弱性突出,采矿活动与过度放牧已造成戈壁砾质覆盖层破坏。已有研究表明人为扰动作用导致稳定戈壁表面的砾石覆盖度减少,下伏可蚀性物质上翻^[31],该干扰可能使尘源贡献度提升。

风速与输沙能力密切相关^[32]。风洞实验表明,在地表有丰富的沙尘物质的前提下,风沙搬运能力会随风速的增加而提高^[15]。近年来乌拉特后旗上空的大气环流出现了异常情况,使该地区降水量异常减少。而春季作为植被复苏生长需水的关键时期,却面临着持续恶化的旱情,进一步加重了地表的干旱程度^[33]。乌拉特后旗近10年来春季输沙势较大(占比36.32%,图6D),地表植被覆盖稀疏,在冻融作用与风蚀协同下,沙尘释放强度增大,与周边的腾格里沙漠形成协同尘源。

沙尘天气发生前降水稀少以及气温偏高^[34]。研究区冬春季节的平均风速较大,降水量减少,土壤含水率下降,植被发育状况偏差,导致地表土质疏松,抗剪强度降低,风蚀易发性增加。春季气压活动中心不稳定,同时天气系统频繁地过境,致使大风天气比其他季节增多^[35]。乌拉特后旗近10年大风日数($\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)年均51.4 d,春季大风日数最多,达到了18.4 d(图6B)。

风况对风蚀强度的影响更为显著^[36]。强烈的大风天气吹拂疏松地表细颗粒物使地表粉尘释放出来。已有研究发现,内蒙古中西部地区夏季植被覆盖率与次年沙尘暴日数呈现负相关关系^[37]。良好的植被覆盖对于粉尘释放具有一定的抑制作用。但极端大风(如夏季瞬时强风)仍可突破植被防护。

乌拉特后旗粉沙和黏土并不是地表沉积物粒度组成中的优势粒级,沙尘释放潜力较弱,在理论上对沙尘的释放几乎没有贡献^[38]。但因其地表类型多样,尤其以河湖冲积物与沙丘中粉沙和黏土含量较高,为沙尘释放提供了物质条件,从而使得该地区沙尘天气频发。同时,大风天气为粉尘释放营造了充分的动力条件,风沙物质撞击地表致使粉尘释放,这与内蒙古西部不同地表类型对沙尘释放强度的影响结果相契合^[39],进而使乌拉特后旗演变成

潜在的沙尘源区。

3.4 针对性治理策略

研究区地表沉积物粒度特征与沙尘释放潜力呈现显著的空间分异特征。年平均风速较大且大风日数较多,在治理过程中可采取多种措施。植物措施是防治沙尘暴的最有效方法之一^[40]。研究区年平均风速较大,大风日数较多。在主导风向上风向区域优先布设阻沙栅栏,作为防沙体系的首道屏障,能够拦截沙粒沉降于该区域^[41]。营造乔灌草复合防护林带,通过植被冠层削减风速并截留悬移粉尘。对无植被覆盖的流动沙丘,在迎风坡关键区域铺设草方格沙障,利用提高地表粗糙度来抑制沙粒起同时减少沙丘的移动。

研究区河湖冲积物地表粉沙和黏土含量较高,地表植被发育状况不佳,风蚀敏感性高,是该地区主要的粉尘源区。因此,未来的防沙治沙过程中应特别注意该地表类型。可通过实施地表覆盖工程措施,如铺设人工黏土层或者种植耐盐碱植被,有利于增加沙质土壤的团聚性和稳定性,减少粉沙和黏土的释放。

戈壁表面的砾石层和土壤结皮在减少地表细颗粒逃逸到大气中发挥着重要作用,同时也能够有效提高地面的摩阻起风速和粗糙度。然而,一旦戈壁地表遭到破坏,下伏细颗粒沉积物上翻,在大风吹蚀下将释放大量沙尘^[4]。在治理过程中,要重视对戈壁原始地表的保护,避免对其扰动引起的砾石覆盖度减少和风沙活动加剧。此外,在交通干线沿线设置透风式防护网,并采用砾石压盖的方式,减少风蚀对道路的影响,从而有效保护交通设施。在治理过程中避免采矿等人为扰动破坏抗风蚀表层。同时,限制过度放牧,防止地表植被覆盖度下降而增大风蚀能力。需要制定严格的监督管理制度和制定合理的补偿政策^[40]。

4 结论

乌拉特后旗地表沉积物粒径范围广泛,从粉沙和黏土至极粗沙均有分布。整体以细沙和中沙为主,粗沙和极细沙次之,粉沙和黏土和砾石含量最低。不同地表沉积物粒度参数存在明显差异,表明地表类型影响其分布特征。

研究区富含粉沙和黏土的河湖冲积物属于土壤风蚀的极高敏感区,是该地区的主要沙尘释放地表

类型。戈壁砾石覆盖层被破坏后风蚀敏感性上升,其粗颗粒破碎也会产生次生沙源。旗内地表沉积物粉沙和黏土(10.02%)的组分高于周边沙漠地区,年均风速较大及大风天气加速了细沙的跨区域输送,表明乌拉特后旗是北方沙区的重要沙尘源地。

在未来防沙治理过程中建议以植物措施为主。特别注意该河湖冲积物地表类型的治理,同时保护戈壁原始地表,避免人为扰动引起的砾石覆盖度减少。

尽管本研究系统分析了乌拉特后旗地表沉积物粒度参数的空间分异特征及其风沙活动指示意义,但仍存在一定局限性:受地表类型过渡带微地形影响,部分样点空间匀质性仍可提升。此外,防护措施的长期生态效应仍需深化研究。未来工作可加入人类活动对地表稳定性的影响;同时系统评估固沙技术的时效性与生态适应性以及季节性水文过程对沉积物的动态影响过程。

参考文献:

- [1] 董治宝,吕萍.70年来中国风沙地貌学的发展[J].地理学报,2020,75(3):509-528.
- [2] 宋洁,春喜,白雪梅,等.中国沙漠粒度分析研究综述[J].中国沙漠,2016,36(3):597-603.
- [3] 杨晓军,张强,叶培龙,等.中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J].中国沙漠,2021,41(3):245-255.
- [4] 张正偲,潘凯佳,张焱,等.中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J].中国沙漠,2023,43(2):130-138.
- [5] 宋洁,春喜.乌兰布和沙漠不同土地覆被类型粒度特征及空间分异[J].中国沙漠,2018,38(2):243-251.
- [6] 于海云,张正偲,王志军.阿拉善高原东南部干涸湖盆沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2021,41(4):177-184.
- [7] 岳乐平,杨利荣,李智佩,等.阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J].第四纪研究,2004(3):311-317.
- [8] Zhang Z C, Han L Y, Pan K J. Sediment transport characteristics above a gobi surface in northwestern China, and implications for aeolian environments[J]. Aeolian Research, 2021, 53: 100745.
- [9] 钱广强,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J].中国沙漠,2011,31(6):1357-1364.
- [10] Zhang Z C, Dong Z B, Li J Y. Grain-size characteristics of dune networks in China's Tengger Desert [J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2015, 97(4): 681-693.
- [11] Liu X Y, Wang H B, Zuo H J, et al. Wind and sand environment and spatial differentiation of sediment in the west desert of Yinshan Mountain in China [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(5): 139.
- [12] 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.
- [13] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.输沙量与输沙势的关系[J].中国沙漠,2011,31(4):824-827.
- [14] 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.
- [15] Zhang C X, Wang X M, Dong Z B, et al. Aeolian process of the dried-up riverbeds of the Hexi Corridor, China: a wind tunnel experiment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(8): 419.
- [16] 30年一遇!巴彦淖尔1月极大风速屡破历史极值天气[EB/OL].[2025-01-08]. https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/448601184_201317.
- [17] 李宽,熊鑫,王海兵,等.内蒙古西部高频沙尘活动空间分布及其成因[J].干旱区研究,2019,36(3):657-663.
- [18] 莎日娜.乌拉特后旗植被覆盖度时空变化及影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2018.
- [19] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [20] Zhang Y, Zhang Z C, Ma P F, et al. Wind regime features and their impacts on the middle reaches of the Yarlung Zangbo River on the Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(10): 1174-1195.
- [21] 潘凯佳,张正偲,董治宝,等.河西走廊新月形沙丘表层沉积物的理化性质[J].中国沙漠,2019,39(1):44-51.
- [22] 钱亦兵,吴兆宁,陈冬梅,等.准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2005,25(6):39-45.
- [23] Wang H B, Zuo H J, Jia X P, et al. Full particle size distribution characteristics of land surface sediment and their effect on wind erosion resistance in arid and semiarid regions of Northwest China [J]. Geomorphology, 2021, 372: 107458.
- [24] Yang Y Y, Qu Z Q, Shi P J, et al. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger Deserts, central Alxa Plateau, China [J]. Aeolian Research, 2014, 12: 143-156.
- [25] Wang G X, Tuo W Q, Du M Y. Flux and composition of wind-eroded dust from different landscapes of an arid inland river basin in north-western China [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(3): 373-385.
- [26] Zou X Y, Li J F, Liu B, et al. The protective effects of nebkhas on an oasis [J]. Aeolian Research, 2016, 20: 71-79.
- [27] 李宽,贾晓鹏,熊鑫,等.额济纳旗典型地表沙尘释放潜力及沙尘天气频发成因[J].中国沙漠,2019,39(3):191-198.
- [28] 张晔,王海兵,左合君,等.中国西北春季沙尘高发区及沙尘源解析[J].中国环境科学,2019,39(10):4065-4073.
- [29] 潘凯佳,张正偲,梁爱民,等.基于倾斜摄影技术的戈壁灌丛沙丘形态反演及其对粉尘释放研究的意义[J].中国沙漠,2020,40(2):24-32.
- [30] 张克存,屈建军,俎瑞平,等.腾格里沙漠东南缘风沙活动动力条件分析:以沙坡头地区为例[J].干旱区地理,2008(5):

- 643-649.
- [31] 董治宝, 屈建军, 刘小平, 等. 戈壁表面阻力系数的实验研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2001(11): 953-958.
- [32] Zhang Z C, Dong Z B, Li C X. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 1-13.
- [33] 梁凤娟, 张保龙. 乌拉特草原2018年上半年干旱监测与成因浅析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1147-1153.
- [34] 常兆丰, 赵明, 韩福贵, 等. 民勤沙尘暴分布的地理因素及其前期气象特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 412-417.
- [35] 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.
- [36] 王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 313-319.
- [37] 顾卫, 蔡雪鹏, 谢锋, 等. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨: 以内蒙古中西部地区为例[J]. 地球科学进展, 2002(2): 273-277.
- [38] Wang H B, Jia X. Field observations of windblown sand and dust in the Takimakan Desert, NW China, and insights into modern dust sources[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(4): 323-333.
- [39] 李宽. 内蒙古西部风蚀地表沙尘释放与输沙过程研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [40] 缙倩倩, 韩致文, 杜鹤强, 等. 中国沙尘暴源区及其治理研究述评[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1559-1564.
- [41] 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529-533.

Grain size characteristics of surface sediments in the gobi area of the eastern Alxa Plateau

Lei Yunzhu¹, Wang Siqi¹, Han Lanying¹, Zhang Sidou¹, Hu Guangyin¹, Li Chao¹,
Dong Zhibao¹, Deligeer Wuliji², Zhang Wenhui¹, Zhang Zhengcai¹

(1. School of Geography and Tourism / Key Laboratory of Qian Xuesen Deserticulture of Shaanxi Higher Education Institute / Yulin Desert-Loess Transition Zone Ecology and Environment Shaanxi Provincial Field Scientific Observation Station, Shanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Urad Rear Banner Forestry and Grassland Bureau, Urad Rear Banner 015000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Aeolian disasters result from the interaction between wind dynamics and exposed sand sources. The Alxa Plateau is a major source region for sandstorms in China, and the Urad Rear Banner in Inner Mongolia functions as a critical transitional zone where sandstorms occur frequently, yet the mechanisms driving these events remain insufficiently understood. To address this gap, this study conducted a systematic investigation of surface sediments across seven different surface types, including dunes, gobi surfaces, and dry riverbeds. Combining grain size analysis with wind regime characterization, this study aims to reveal the spatial variability of sediment grain size characteristics and their implications for dust emission. The findings can support targeted mitigation strategies. The results reveal that: (1) Surface sediments in the Urad Rear Banner are dominated by fine sand (13.94%±4.86% to 53.04%±6.76%) and medium sand (17.62%±5.22% to 43.06%±7.51%), providing the material foundation for dust storm formation. (2) Over the past decade, the region's average wind speed was 4.18±0.13 m·s⁻¹, with an annual sand transport potential of 353.72±63.24 VU, indicating it as a medium wind energy environment with sufficient dynamic force to generate dust storms. (3) Among the various surface types, dry riverbeds were identified as the primary sources of aeolian dust. Additionally, when the protective gravel armor of Gobi surfaces is disrupted, the exposure of underlying fine sediments significantly increases the potential for dust emission. Based on the integration of topographic features, wind conditions, and sediment characteristics, dry riverbeds and other silt and clay rich surfaces should be prioritized for dust control, while greater efforts are needed to preserve the natural integrity of Gobi surfaces.

Key words: surface sediment; wind condition; grain size; Alxa Plateau; Urad Rear Banner