

马艳梅,王仁德,宋淑红,等.疏勒河下游北路井地区泥漠与戈壁、稀疏灌丛风沙活动特征的比较研究[J].中国沙漠,2026,46(4):217-227.

疏勒河下游北路井地区泥漠与戈壁、稀疏灌丛 风沙活动特征的比较研究

马艳梅^{1,2},王仁德¹,宋淑红³,李庆¹,蒋红军¹,
苑依笑¹,常春平²,郭中领²

(1.河北省科学院 地理科学研究所/河北省地理信息开发应用技术创新中心,河北 石家庄 050011; 2.河北师范大学 地理科学学院/河北省环境演变与生态建设省级重点实验室,河北 石家庄 050024; 3.中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061)

摘要: 泥漠是中国西北干旱区特有的一类地表类型,其风沙活动较为强烈,但目前学界对其风沙活动特征及形成机制的认识仍不够深入,尤其缺乏与其他风蚀地类的系统比较。本研究选取疏勒河下游北路井地区为研究区,采用实地调查、长期野外观测和室内实验相结合的方法,对泥漠与邻近的戈壁和稀疏灌丛两种地表的风沙活动特征进行了比较分析。结果表明:与戈壁和稀疏灌丛相比,泥漠风沙活动更为强烈,并且空间差异较小,是当地主要的沙尘释放源。这与泥漠土壤中细颗粒物含量更高、表土含水率更低、砾石或植被覆盖更少、龟裂纹发育等多种因素的共同作用有关。在一个完整观测年度(2024年5月至2025年4月),3种地类的风沙活动均呈现出夏季最强、春季次之的特征,这与以往普遍认为的春季风沙活动最强有所不同,可能与观测期间夏季风力最大有关,反映出区域风动力条件对风沙活动的控制作用。

关键词: 泥漠; 风沙活动; 沙尘源; 时空变化; 北路井地区

文章编号: 1000-694X(2026)04-217-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00062

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

西北干旱区是中国生态环境脆弱地区之一^[1]。由于干旱少雨、植被稀疏、大风事件频发,面临着非常严重的风沙问题。西北干旱区分布着沙漠、戈壁、泥漠等多种风蚀敏感地类。泥漠多由内陆河或间歇性洪水带来的细颗粒物经不断沉积、蒸发作用而成^[2],主要分布在塔里木盆地^[3]、额济纳旗盆地^[4]及河西走廊^[5]等干旱区低洼地带。尽管分布面积不是最大,但因其独特的地表属性与强风蚀潜力,近年来引起特别的关注。与沙漠、戈壁相比,泥漠风蚀形成的粉尘中含有大量粒度极细的颗粒,可以被

气流携带,影响范围可达数千千米^[6],被怀疑是一类重要的沙尘源。但目前对泥漠的风蚀研究仍较弱,需要开展针对性的风沙活动研究。

泥漠作为西北干旱区一种特殊荒漠地类^[3],具有地面干燥、植被稀疏、结皮发育且伴有龟裂等地表特征,土壤以细粒物质为主,黏粒含量较高^[7]。该特殊地类主要发育于蒸发强烈的内陆河流域下游、冲积扇末端及干涸湖床边缘^[6,8],地表物质来源于河湖相沉积物。其风蚀活动受控于结皮发育情况、沉积物特征及间歇性洪水作用^[9-10]。不同结构类型的泥漠在风力作用下表现出差异显著的侵蚀率和释尘能力^[11]。未受扰动的泥漠地表由细颗粒碎屑沉

收稿日期:2026-02-04; 改回日期:2026-04-29

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42077069);河北省科学院基础科研业务费制度试点项目(2026PF01);疏勒河流域地下水生态调查项目(2023zfcg00874)

作者简介:马艳梅(1989—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事土壤风蚀与粉尘释放研究。E-mail: mymbnu@163.com

通信作者:王仁德(E-mail: wangrende10@163.com)

积物构成,质地坚硬,粉尘释放较少^[12],但当结皮受到扰动,在跃移颗粒磨蚀撞击下,可产生持续且显著的 PM_{10} 排放^[13-14]。尽管泥漠的风蚀潜力与环境意义已得到初步关注,但当前的研究多基于单点观测^[15]、短期观测^[2],难以反映泥漠风蚀的时空异质性。泥漠含有较高的黏粒和粉砂,沙生物源充足,具有较高的粉尘释放潜力^[16],但其是否为西北干旱区主要沙尘源仍然存在一定的争议^[17-18],亟须开展泥漠地表及其与其他地类的比较研究。

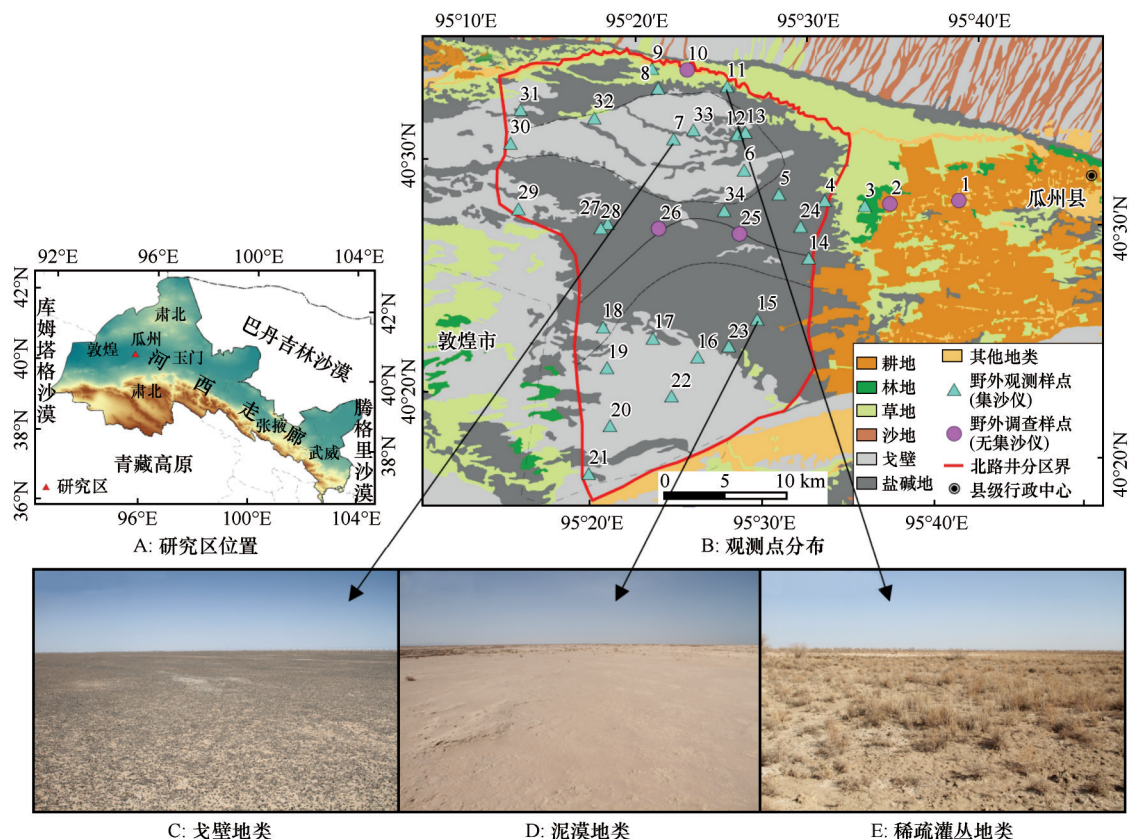
北路井地区位于西北干旱区疏勒河下游,分布有面积广泛的泥漠、戈壁、稀疏灌丛等地类,生态系统脆弱,风沙活动强烈,是开展泥漠地表及其与其他地类风沙活动比较研究的理想区域。基于此,本文以北路井地区为研究区,以2024年5月至2025年4月一个完整观测年的野外观测数据和室内实验分析数据为基础,开展不同地类风沙活动特征与规律的比较研究,以期深化对泥漠地表风沙活动及其影响的认识,为该地类的风沙灾害防治工作提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

北路井地区位于甘肃省瓜州县西部,地处 $40^{\circ}10' - 40^{\circ}40'N, 95^{\circ}10' - 95^{\circ}35'E$,面积 $679.55 km^2$ (图1A),属于阿拉善-河西走廊生态脆弱带。气候类型为温带大陆性干旱气候,年平均气温 $9^{\circ}C$,年平均降水量不足 $50 mm$,集中在7—8月(占全年约70%)。年蒸发量大于 $2500 mm$ 。地类以泥漠、戈壁、稀疏灌丛为主(图1C~E),其中,泥漠面积最大,占北路井地区面积的55.99%;其次为戈壁,占区域面积的38.53%;稀疏灌丛占区域面积的4.17%。土壤类型以灰棕漠土、盐渍土、风沙土为主,灰棕漠土主要分布在戈壁区,盐渍土主要分布在泥漠区。植被以梭梭、红柳、沙蒿、碱蓬等为主,植被覆盖度低,生态系统脆弱。

研究区所在的瓜州县风力强劲,素有“世界风库”之称,年平均风速为 $3.57 m \cdot s^{-1}$,最大风速大于 $30 m \cdot s^{-1}$ 。年均7级以上大风日约122 d。主要为东



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区概况及野外观测点位置

Fig.1 Overview of the study area and locations of field observation sites

风和西风,风力侵蚀作用强烈,沙尘天气频发。

1.2 研究方法

1.2.1 野外风沙观测

野外实地风沙观测工作于2024年5月至2025年4月进行。在先期野外调查的基础上,于研究区内均匀布设28个观测点,其中泥漠地表7个,戈壁地表15个,稀疏灌丛地表6个(图1B)。选择观测点时,要求周围为该地类的集中分布区,500 m范围内必须为同一地类,以减小地类之间风沙活动的相互影响。

每个观测点安装一台 Modified Wilson and Cooke(MWAC)集沙仪(图2C),用于收集风蚀物。

MWAC可随风旋转,保证进气口始终正对风向,进气口距地面的高度分别为0.1、0.25、0.5、0.85 m。集沙仪安装完毕后,按月收取集沙仪中的风蚀物样品并称重,以确定年内不同月份、不同季节各观测点的风蚀起沙量。

在研究区中间位置安装一套便携式移动气象站(图2A),观测平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、阵风速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、风向(度)、降水量(mm)等,数据采集频率为0.5 h,用于分析研究区平均风动力条件。由于研究区面积不大(东西长28.12 km,南北长36.56 km),地面平坦开阔,因此,本研究假定各观测点的风动力条件一致,暂不考虑其对风蚀特征空间差异的影响。



图2 观测仪器布设及样品采集
Fig.2 Layout of observation instruments and sample collection

1.2.2 野外调查与土壤取样

在开展野外观测的同时,对研究区各观测点进行详细的调查和取样工作。调查内容包括植被盖度、砾石盖度、土壤紧实度(土壤硬度)、土壤含水率

等。其中植被盖度和砾石盖度采用拍照目估法确定,以植被盖度、砾石盖度作为风沙活动粗糙干扰因子分析指标^[19]。为有效控制目估误差,使用统一的标准进行拍摄和解译,同时选取部分样点结合样

方实测校验。每月收集风蚀物样品的同时,测量每个观测点的土壤紧实度及土壤含水率。使用TYD-1型土壤硬度计测定土壤紧实度(图2D),同一观测点附近随机选择6个点位,取平均值作为测量结果;采用铝盒取样+烘干法测定土壤含水率,同一观测点附近随机选择2个点位采集地表0~3.0 cm土壤样品。此外,在每个观测点采用十字取样法,采集表层0~3 cm和0~10 cm深度土壤样品各1.0 kg(图2B),用于分析表土理化性质。

1.3 实验分析

野外采集的0~3 cm层和0~10 cm层土壤样品带回实验室自然晾干后,0~3 cm表层土壤样品使用平筛进行一次5 min的干筛筛分,分为>10、5~10、2~5、0.85~2、<0.85 mm 5个粒径,确定表层土壤干团聚体粒度组成和土壤可蚀性,以<0.85 mm干团聚体含量作为反映土壤可蚀性的指标^[20]。将经过筛分的样品再次混合碾压破碎后,使用2.0 mm平筛,再进行一次5 min的干筛筛分,确定其中粒径>2.0 mm砾石的含量。

对0~10 cm层的样品进行研磨,过2 mm土壤筛粗磨,去除粒径>2 mm的砾石。粗磨后的样品一部分使用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000, Malvern Instruments Limited)进行分散粒度组成分析,并按照国际制标准进行土壤质地分类。另取一部分粗磨后的样品使用Pulverisette 2型臼式研磨机研磨至样品全部通过0.15 mm土壤筛细磨,细磨后的样品使用重铬酸钾容量法分析土壤有机质含量,使用气量法分析土壤碳酸钙含量。以土壤含水率、土壤颗粒粒度组成、土壤有机质含量、土壤碳酸钙含量、土壤硬度等土壤理化性质作为土壤抗蚀因子指标^[19]。

使用激光粒度分析仪,对各观测点的风蚀物样品进行粒度组成分布的分析,分别得到3种主要地类的平均风蚀物粒度组成,以其中粒径<50 μm细颗粒的含量作为粉尘在风蚀物中的占比参数^[21]。

1.4 指标计算

风蚀强度:依据MWAC集沙仪收集的已称重风蚀物,计算不同高度的输沙通量:

$$q_z = \frac{Q}{S \cdot \Delta T} \quad (1)$$

式中: q_z 为高度 z 处的输沙通量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Q 为风蚀物质量(g); S 为集沙口面积(m^2); ΔT 为集沙时间

(d)。拟合输沙通量 q_z 随高度 z 垂直分布的最优函数 $f(z)$,对 $f(z)$ 在0~0.85 m高度积分,得到该高度区间的输沙强度记作 $T_i(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$:

$$T_i = \int_0^{0.85} \frac{f(z) dz}{z} \quad (2)$$

根据王根绪等^[22]提出的转换公式,将MWAC集沙仪观测得到的输沙强度结果转化为地表风蚀速率:

$$q_i = \frac{T_i}{L \cdot W} \quad (3)$$

式中: q_i 为第 i 种地类的地表风蚀速率($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); L 为风蚀区域到采样器之间的距离(m); W 为单位宽度(m),取1.0 m。

风蚀起沙量计算公式:

$$Q_i = q_i \cdot S_i \cdot T \quad (4)$$

式中: Q_i 为第 i 种地类的风蚀起沙量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); S_i 为第 i 种地类的面积(hm^2); T 为时间长度(d)。

粉尘释放量:地表向大气释放粉尘是由土壤风蚀引起的。粉尘颗粒物来自风蚀颗粒物,是风蚀物中粒径较细,能够被风力远距离悬移搬运的部分^[23],本文中将粒径<50 μm的风蚀颗粒物定义为粉尘^[21],粉尘释放量使用风蚀起沙量与风蚀物中粉尘含量的乘积进行估算:

$$E_i = Q_i \cdot P_i \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 种地类的粉尘释放量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); P_i 为粉尘在第 i 种地类风蚀物中的占比(%)。

2 结果

2.1 输沙强度的比较

北路井地区28个观测点一年来的野外风沙活动观测结果表明,本地区的风蚀活动强度较大,各观测点年均输沙强度为 $248.91 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,风蚀速率为 $3\,950.06 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图3)。其中,泥漠地表的输沙强度最大,各观测点平均值达 $339.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,风蚀速率平均为 $5\,391.43 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据中华人民共和国水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),属于强烈风蚀。戈壁地表次之,各观测点输沙强度平均为 $290.87 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,风蚀速率平均为 $4\,616.98 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,属于中度风蚀;稀疏灌丛地表输沙强度最弱,各观测点平均仅为 $38.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,风蚀速率平均为 $605.40 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,属于轻度风蚀。泥漠地表

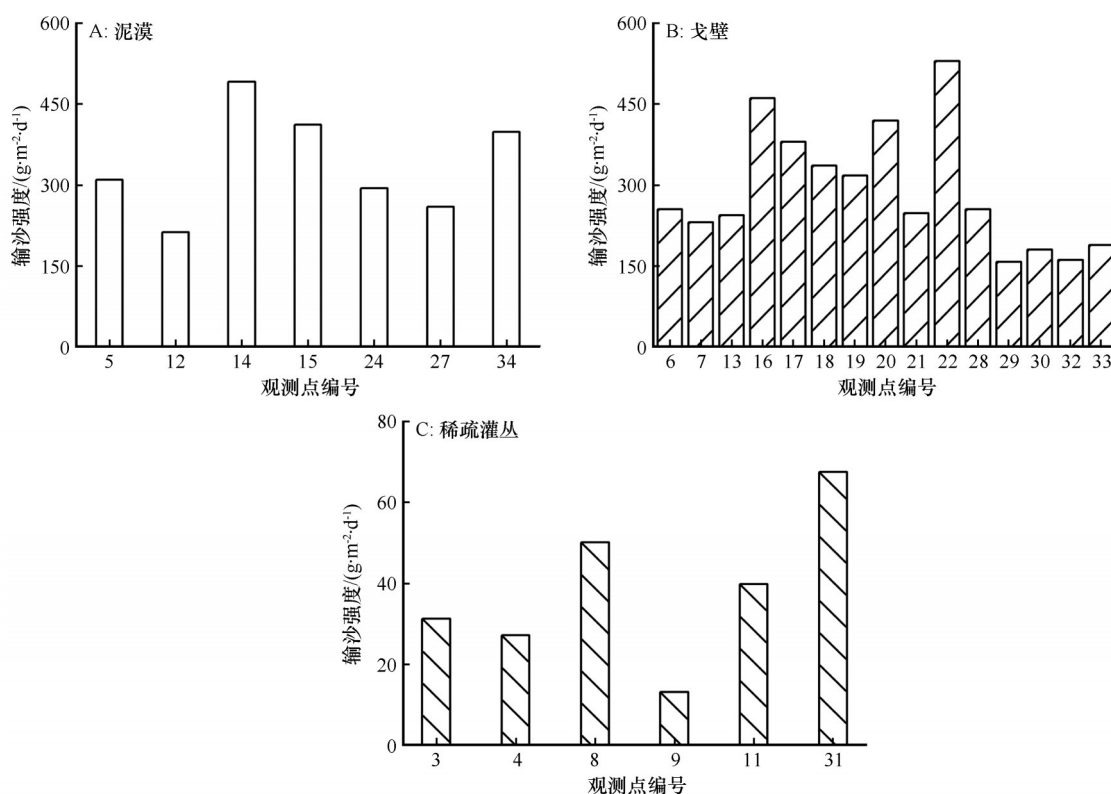


图3 北路井地区各地表观测点年均输沙强度

Fig.3 Annual average sand transport intensity of each surface observation site in Beilujing area

的输沙强度是稀疏灌丛地表的近9倍。考虑到泥漠和戈壁是北路井地区面积最大的两种地类,面积合计占北路井地区面积的94.52%。因此,北路井绝大部分区域风沙活动都非常活跃。

2.2 输沙强度空间差异的比较

3种地类风沙活动的空间变化不同。其中,泥漠地表最大输沙强度为 $461.83 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点14),最小为 $234.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点12)。戈壁地表最大输沙强度为 $520.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点22),最小为 $144.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点29)。稀疏灌丛最大输沙强度为 $67.45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点31),最小为 $13.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (观测点9)。由此可见,3种地类中,泥漠地表输沙强度的空间差异性最小,戈壁次之,稀疏灌丛最大。

泥漠地表之所以输沙强度普遍较大,且空间差异较小,与泥漠土壤质地和地表状况比较均一有关。戈壁输沙强度空间差异较大,主要体现在南部戈壁区的输沙强度明显高于北部。从实际调查和采样分析结果来看,不同戈壁区多数性质上都相差不大,只是南部戈壁区的土壤紧实度(平均 $14.36 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)明

显比北部戈壁区(平均 $18.55 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)要低,这可能是南部戈壁区输沙强度更大的主要原因。稀疏灌丛输沙强度的巨大空间差异则与植被覆盖和土壤硬度显著的空间异质性有关。总之,泥漠是3种地类中,风蚀和粉尘释放能力普遍比较强的一种地类。

2.3 输沙强度年内变化的比较

3种地类输沙强度的年内变化趋势基本一致:7—8月(夏季)是风沙活动高峰期,3—4月(春季)是另一个小高峰期,10—11月(秋季)是风沙活动的低谷期,不同月份之间输沙强度相差几十倍(图4)。其中,泥漠地表7月的平均输沙强度最大,为 $1239.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,11月的平均输沙强度最低,为 $14.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,前者是后者的80多倍,表明泥漠地表风沙活动的年内变化非常显著。戈壁地表8月的平均输沙强度最大,为 $1047.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,11月的平均输沙强度最低,为 $12.94 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,前者也是后者的80多倍,表明戈壁地表风沙活动的年内变化同样非常显著。稀疏灌丛地表7月的平均输沙强度最大,为 $76.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,11月的平均输沙强度最低,为 $8.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,前者是后者的9.25倍,其风沙活

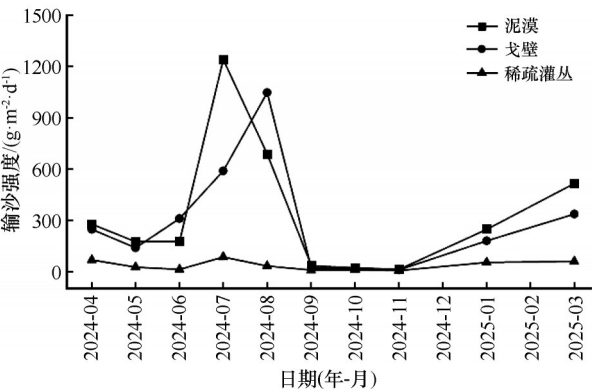


图4 北路井地区主要地类输沙强度年内变化
Fig.4 Annual variation of sand transport intensity for major land types in the Beilujing area

动年内变化最小。

2.4 不同地类风蚀物粒度组成特征的比较

沙粒的运动方式与粒径关系密切。粒径>500 μm的粗沙粒主要以蠕移方式运动,粒径50~500 μm的沙粒主要以跃移方式运动,粒径<50 μm的颗粒主要

以悬移方式运动,能够被远距离输送^[24]。对风蚀物粒度组成的分析表明(表1),泥漠地表风蚀物粒度组成以黏粒和粉粒为主,平均粒径48.57 μm,粒径<50 μm细颗粒的平均含量为52.33%;戈壁地表风蚀物极细沙占比较高,平均粒径67.77 μm,粒径<50 μm细颗粒的平均含量为38.85%;稀疏灌丛地表风蚀物粒径<50 μm细颗粒的平均含量为59.18%。泥漠地表不仅面积大、风沙活动强烈,风蚀物中可远距离搬运的细颗粒含量也远高于戈壁地表,略低于稀疏灌丛地表。

本研究通过实地观测初步确定了各种地类的输沙强度,计算了各种地类的风蚀速率和风蚀起沙量,结合风蚀物中<50 μm细颗粒含量,计算得到各地类的粉尘释放量。在北路井地区3种主要地类中,泥漠地表的风蚀速率为5 391.43 t·km⁻²·a⁻¹,且其分布面积最为广泛,每年风蚀起沙量约205.09万t,占整个北路井地区风蚀起沙量的62.59%,每年粉尘释放量约为107.32万t,占北路井全部粉尘释放量的69.11%,这说明泥漠是该区域主要的沙尘源(表2)。

表1 北路井地区不同地类风蚀物粒度组成

地类	粒径/μm					
	0~20	20~50	50~100	100~200	200~500	>500
戈壁	14.93%	23.92%	35.66%	19.41%	5.21%	0.86%
泥漠	28.33%	24.00%	29.75%	14.21%	3.35%	0.36%
稀疏灌丛	30.74%	28.44%	26.51%	10.58%	3.07%	0.64%

表2 北路井地区各地类年均风蚀速率、风蚀起沙量、粉尘释放量

地类	风蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	面积/hm ²	年风蚀起沙量/万t (占比)	年粉尘释放量/万t (占比)
戈壁	4 616.98	26 180.73	120.85(36.93%)	46.95(30.23%)
泥漠	5 391.43	38 049.93	205.09(62.59%)	107.32(69.11%)
稀疏灌丛	605.40	2 836.17	1.72(0.48%)	1.02(0.66%)

3 讨论

3.1 泥漠地表风蚀较强烈的原因

土壤风蚀本质上是气流与土壤表面相互作用的连续动力学过程^[25],其影响因子分为风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子3类^[19]。由于北路井地区面积不大,地面平坦,无高山等地形遮挡,风力侵蚀因子的差异可以忽略不计。不同地类之

间风沙活动强度的差异,可以认为主要是由地表粗糙因子和土壤抗蚀因子的差异造成的。因此,本研究主要从地表粗糙因子和土壤抗蚀因子两方面分析泥漠地表风沙活动较强烈的原因。

地表粗糙因子中的土壤表层植被盖度和砾石盖度能够通过增加地表粗糙度、降低近地表风速,从而显著削弱风蚀作用^[26-28]。野外调查和实验室分析表明(表3),泥漠地表平均植被盖度为4.54%,平

表 3 北路井地区各地类土壤理化性质表

Table 3 Soil physicochemical properties of different land types in the Beilujing area

地类	含水率 /%	土壤硬度 /(kg·cm ⁻²)	有机质 含量/%	碳酸钙 含量/%	可蚀性颗 粒含量/%	0~2 μm /%	2~20 μm /%	20~2 000 μm /%	砾石盖 度/%	植被盖 度/%
戈壁	2.36	16.11	0.40	16.55	5.08	1.90	41.70	56.40	22.84	3.74
泥漠	1.16	22.57	0.76	28.24	2.33	5.95	79.50	14.55	0.04	4.54
稀疏灌丛	2.09	13.73	1.83	15.00	5.98	2.13	48.22	49.65	1.07	6.96

均砾石盖度不足 1%，均处在较低水平，而戈壁地表平均植被盖度为 3.74%，平均砾石盖度可达 22.84%。较高的砾石覆盖使戈壁地表抗风蚀能力加强。稀疏灌丛的砾石盖度普遍较低，但植被盖度比泥漠地表高。从地表粗糙因子角度出发，各地类中泥漠地表的抗风蚀能力最差。

土壤抗蚀因子中的表土含水率、土壤质地、土壤结皮均显著影响土壤风蚀速率^[29]。一般认为，土壤含水率增加可以提高地表抗风蚀能力^[30-31]，土壤有机质和碳酸钙可以使土壤颗粒相互黏结，促进土壤团聚体的形成，从而抑制风蚀^[32-34]。实验室分析结果显示，泥漠地表的土壤含水率和土壤有机质含量极低（表 3），使土壤颗粒之间的胶结作用减弱，从这一角度来看泥漠地表的抗风蚀能力较差。泥漠地表土壤中黏粒和粉砂含量很高（两者之和的平均含量达到 85% 以上），加之碳酸钙含量较高，有利于土壤团聚体发育形成板结层并提高地表紧实度，但这种板结结构往往具有较强的脆性，在跃移颗粒撞击或磨蚀作用下容易破碎，使富含黏粒和粉砂颗粒的泥漠地表释放大量的粉尘^[16,35]。

此外，泥漠沉积物因黏粒占比高，导致其渗透性极差，虽然研究区整体降水稀少但 7—8 月高度集中，短时降水无法快速下渗而形成表面汇流，直接冲刷地表破坏板结层结构。加之强烈的干湿交替与蒸发作用，泥漠地表广泛发育龟裂纹，风对泥漠的侵蚀通常从龟裂纹开始，风沙流的磨蚀作用使龟裂纹加宽，细颗粒物充分暴露，土体抗剪强度降低，地表可蚀性大幅提升。

与典型沙漠或沙地不同，泥漠地表可供跃移运动的粗颗粒沙源相对匮乏，使得近地表风沙流处于极度不饱和状态，不饱和风沙流具有强烈的侵蚀作用，会对泥漠地表暴露的细粒沉积物进行持续剥蚀，进一步强化了风蚀过程和沙尘释放能力。野外调查发现，泥漠地表有明显的磨蚀痕迹且广泛发育

雅丹地貌，这也证实部分泥漠区确实存在强烈的风蚀作用。加之泥漠地表产生的风蚀物中细颗粒含量较高，导致泥漠区是北路井地区最主要的沙尘源。考虑到泥漠区域集中分布的特点，其对临近地区沙尘活动的影响不容小觑，应针对不同泥漠分布区加强专门研究。

3.2 各地类夏季风沙活动最强的原因

在 2024 年 5 月至 2025 年 4 月的一个完成观测年内，3 种地类的风沙活动的年内变化趋势基本一致，表现为 7—8 月最强、3—4 月次之的特征，这与传统认为的 3—5 月是风沙活动高峰期的现象不同。在影响北路井地区风沙活动的各因子中，粗糙干扰因子（植被覆盖、砾石覆盖）在年内的变化不大；土壤抗蚀因子中的土壤基本性质，如土壤质地、有机质含量、碳酸钙含量、砾石含量等，年内也不会发生明显的变化。造成风沙活动夏季最强的主要因子：一是土壤抗蚀因子中的土壤临时性质，如土壤湿度、土壤硬度等；二是风力侵蚀因子。因此，本文重点从土壤湿度、土壤硬度和风力 3 方面分析风沙活动夏季最强的主要驱动力。

一般而言，土壤含水率越低，输沙量越大^[36]，对各观测点土壤含水率季节变化的分析表明，北路井地区 3 种地类的土壤含水率总体均表现出春秋低、冬夏高的趋势（图 5A）。春季各观测点平均土壤含水率为 1.62%，夏季各观测点平均土壤含水率为 2.27%，秋季各观测点平均土壤含水率为 1.8%，冬季各观测点平均土壤含水率为 2.45%。冬夏两季土壤含水率较高，可能是由降水事件造成；春秋季节降水较少，光照、蒸发强烈，使这两个季节的土壤含水率较低，这一结果与该地区 7—8 月风沙活动最强相悖。

各观测点土壤硬度测定结果显示（图 5B），北路井地区 3 种地类土壤硬度季节变化趋势一致，春季

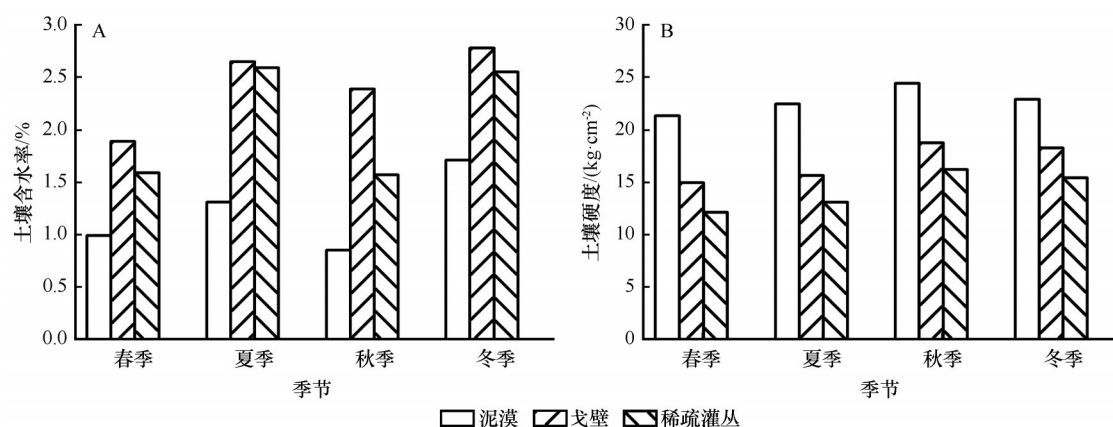


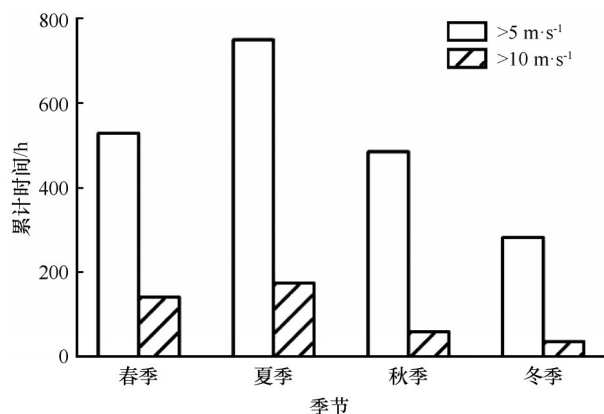
图5 北路井地区主要地类平均土壤含水率、土壤硬度季节变化

Fig.5 Seasonal variations in average soil moisture content and soil hardness of major land types in the Beilujing area

(4月)的土壤硬度最低,可能是由于春季地面冻土层开始融化,冻融作用强烈使地面松软;秋季(10月)土壤硬度最大,可能与秋季蒸发作用强烈、盐分表聚、地面板结严重有关。观测期内,3种地类土壤硬度均表现出秋冬高、春夏低的趋势。因此,土壤硬度也不能很好地解释夏季风沙活动最强的特点。

风是土壤风蚀的直接驱动力^[25],但并不是所有的风都与土壤风蚀有关,只有能把沙尘搬离地表,风速大于沙粒临界启动风速的风才是对风沙活动有意义的^[37]。本文以 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为临界起沙风速,对2024年5月至2025年4月期间便携式移动气象站采集的风速数据进行了统计分析。结果显示(图6),观测期内,北路井地区风力整体表现为夏季最强,春季次之,与风沙活动年内变化趋势基本一致。

各地类风沙活动强度与风蚀因子相关性分析

图6 北路井地区各季节 $>5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $>10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速累计时间Fig.6 Cumulative hours with wind speeds $>5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $>10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in each season in the Beilujing area

结果显示,3种地类的输沙强度与土壤含水率和土壤硬度相关性都较差,与起沙风速的累计时数具有一定的正相关(图7),表明风动力因子可能是造成各地表风沙活动夏季最强的主要因素。特别是 $>10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速累计时间与荒漠和戈壁地表的输沙强度呈显著正相关($P<0.05$),说明大风是风动力因子中决定风沙活动强弱更加关键的因素。3种地类风沙活动特征均表现为7—8月强度最大,很有可能与该时段大风时数较多有关。

需要指出的是,对瓜州县广至乡2020—2023年 $>5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 日均风速的统计结果显示,在更长时段内北路井地区长期风速的季节变化特征仍是春季最大,夏季次之,之后是秋季和冬季。因此,长期来看春季仍然是风力最强劲的季节,本文只进行了一个完整年的野外观测工作,结果具有一定的偶然性。未来需要结合多年度风动力条件及下垫面要素特征,开展长期定位观测,厘清研究区风沙活动季节格局规律与年际波动特征,进一步验证风动力因子的主控作用及多要素耦合影响机制。

4 结论

本文基于一个完整观测年度的野外观测与实验分析,系统比较了北路井地区荒漠与戈壁、稀疏灌丛两种地类的风沙活动特征及差异。

荒漠是研究区风沙活动最为强烈且空间差异性最小的风蚀地类,平均输沙强度为 $339.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均风蚀速率为 $5391.43 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,达到强烈风蚀的程度。该地类风蚀起沙量占区域总量的62.59%,粉尘释放量占区域总量的69.11%,均高于其面积在

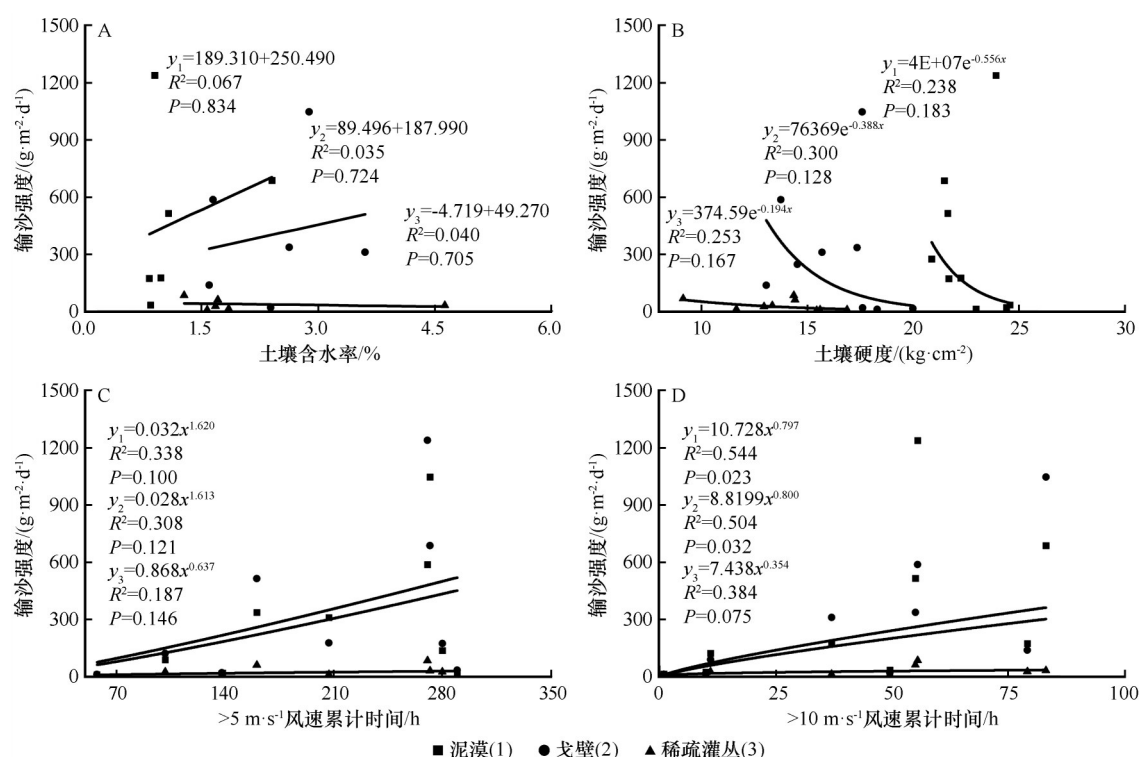


图7 北路井地区不同地类各月份输沙强度与风蚀影响因子的相关关系

Fig.7 Correlation between sand transport intensity and wind erosion influencing factors in different land types across months in the Beilujing area

区域的占比。泥漠地表风沙活动强烈是土壤中细颗粒含量高、土壤含水率低、砾石和植被覆盖少和地面龟裂发育等多种因素的综合作用的结果。鉴于泥漠在西北干旱区集中分布的特点,其对区域沙尘循环的潜在影响值得关注,应加强针对性的研究。

持续一年的野外观测表明,3种地类风沙活动均呈现出夏季最强、春季次之的时间变化特征,这与传统认识的春季为沙尘活动高峰期的结果有所不同。对同时段风动力因子的分析表明,其季节变化同样呈现夏季最强、春季次之的变化特征,说明风动力条件应是造成本研究中出现夏季风沙活动最强的主要驱动因素。需要指出的是,本研究中的气象数据是基于单一年份、单一站点取得的,而长期气象统计则显示该区域仍是春季风力最强,因此,当前结论具有一定偶然性,未来需通过更长时序的观测进一步验证。

参考文献:

[1] Wang H F, Zhang R, Cai Y, et al. Ecological uniqueness and the determinants in arid desert ecosystems of northwest China[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 34: e02005.

[2] Tan L, Wang H, An Z, et al. Aeolian sand transport over a dry playa surface: sand flux density profiles, saltation layer height, and flux scaling laws and implications for dust emission dynamics[J]. CATENA, 2023, 224: 106970.

[3] 杨发相, 李生字, 岳健, 等. 新疆荒漠类型特征及其保护利用[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 12-19.

[4] 周建秀, 谷雨, 达来, 等. 阿拉善地区荒漠化遥感监测及动态变化[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 126-130.

[5] 刘志飞, 杨雪梅, 王景瑞, 等. 基于高光谱反射特征的荒漠类型可分性评价[J]. 干旱区研究, 2025, 42(1): 141-153.

[6] 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气[J]. 沉积学报, 2004(2): 325-331.

[7] 冯建森, 盛洪英. 浅谈河西走廊土地沙漠化的根源与防治[J]. 防护林科技, 2004(1): 34-35.

[8] 吴吉龙, 杨发相, 周杰, 等. 策勒河流域荒漠类型特征研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 803-811.

[9] 于海云, 张正德, 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.

[10] 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): 1-11.

[11] Dickey H, Schreuder M, Schmid B, et al. Quantifying dust emission potential of playa and desert surfaces in the Salton Sea Air Basin, California, United States[J]. Aeolian Research, 2023, 60 (c): 100850.

[12] Reynolds R L, Yount J C, Reheis M, et al. Dust emission from

- wet and dry playas in the Mojave Desert, USA [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(12): 1811–1827.
- [13] 曲书锋, 张国明, 刘连友, 等. 干涸尾间湖盆地泥漠地表磨蚀释尘特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 81–88.
- [14] Todd M C, Washington R, Martins J V, et al. Mineral dust emission from the Bodélé Depression, northern Chad, during BoDEx 2005 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D6): D007170.
- [15] 江艳冰, 周倩, 王洪涛, 等. 洪积扇末端泥漠近地表风沙流结构特征[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(3): 568–576.
- [16] Alfaro S C. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion [J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3/4): 157–167.
- [17] Chen S Y, Huang J P, Li J X, et al. Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60: 1228–1355.
- [18] Zhang Z C, Bird A, Zhang C X, et al. Not all gravel deserts in northern China are sources of regionally deposited dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, 273: 118984.
- [19] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 875–889.
- [20] 王仁德, 蒋红军, 李庆, 等. 土壤粉尘释放能力与土壤性质关系的初步研究[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(1): 43–49.
- [21] 王仁德, 李庆, 常春平, 等. 土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 85–103.
- [22] 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.
- [23] Field J P, Belnap J, Breshears D D, et al. The ecology of dust [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, 8(8): 423–430.
- [24] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [25] 张春来, 宋长青, 王振亭, 等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(1): 27–41.
- [26] 刘树林, 王涛, 郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 356–361.
- [27] 麻虹宇, 李保国, 蔡斌, 等. 干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 29–35.
- [28] 谭立海, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石覆盖度戈壁床面风蚀速率定量模拟[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 581–588.
- [29] Iversen J D, White B R. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus [J]. *Sedimentology*, 1982, 29: 111–119.
- [30] 陈渭南. 蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀实验研究[J]. *水土保持学报*, 1991, 5(1): 33–40.
- [31] 陈银萍, 曹雯婕, 余沛东, 等. 土壤含水率对风沙流结构及风蚀量的影响[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 173–180.
- [32] 陈涛, 武会会, 耿润哲. 放牧对中国天然草地土壤有机碳含量影响的Meta分析[J]. *草地学报*, 2024, 32(12): 3924–3931.
- [33] 陈宇轩, 丁国栋, 高广磊, 等. 呼伦贝尔沙地风沙土有机质和碳酸钙含量特征[J]. *中国水土保持学*, 2019, 17(4): 104–111.
- [34] 董苗, 严平, 孟小楠, 等. 碳酸钙含量对土壤风蚀强度的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 18–23.
- [35] Aymar S F, Mendez M J, Funk R, et al. Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM10) of sandy soils [J]. *Aeolian Research*, 2012, 2: 437–443.
- [36] 李玄姝, 常春平, 王仁德. 河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 23–28.
- [37] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 等. 沙漠地区风沙活动特征: 以中国科学院风沙观测场为例[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(4): 550–555.

Comparison of aeolian sand activity characteristics among dry playa, gobi and sparse shrubland in the Beilujing area, lower reaches of the Shule River

Ma Yanmei^{1,2}, Wang Rende¹, Song Shuhong³, Li Qing¹, Jiang Hongjun¹,
Yuan Yixiao¹, Chang Chunping², Guo Zhongling²

(1. Institute of Geographical Sciences/Hebei Technology Innovation Center for Geographic Information Application, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 2. School of Geographical Sciences/Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 3. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Dry playa is a unique land surface type in the arid regions of northwestern China, characterized by intense aeolian sand activity. However, current understanding of its aeolian activity characteristics and formative mechanisms remains insufficient, especially lacking systematic comparisons with other wind-eroded land types. This study selected the Beilujing area in the lower reaches of the Shule River as the study region. Using a combination of field investigation, long-term in-situ observation, and laboratory analysis, we compared and analyzed the differences in aeolian sand activity characteristics among dry playa and adjacent gobi and sparse shrubland surfaces. The results show that, compared with gobi and desert, dry playa exhibits the strongest average aeolian activity with weak spatial heterogeneity, serving as the primary local dust emission source. This is jointly controlled by higher fine-particle content, lower topsoil moisture content, sparse gravel or vegetation cover, and well-developed desiccation cracks in dry playa soils. During the full annual observation period (May 2024 – April 2025), aeolian activity in all three land types peaked in summer followed by spring, which deviates from the conventional view that aeolian activity is most intense in spring. This discrepancy may be attributed to the strongest wind conditions occurring in summer during the observation period, reflecting the dominant control of regional wind dynamics on aeolian sand activity.

Key words: dry playa; aeolian activity; dust source; spatio-temporal variation; Beilujing area