

张宏雪,张克存,安志山,等.敦煌-格尔木铁路沿线荒漠灌丛风动力环境与沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(5):49-58.

# 敦煌-格尔木铁路沿线荒漠灌丛风动力环境与沉积物粒度特征

张宏雪<sup>1,2</sup>, 张克存<sup>1</sup>, 安志山<sup>1</sup>, 鱼燕萍<sup>3</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站/沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 敦煌-格尔木铁路穿越西北干旱荒漠区,地表裸露、沙源丰富、风沙活动强烈。通过野外风沙定位监测和地表沉积物粒度特征分析,揭示了铁路沿线灌丛路段风动力环境和地表沉积物特征。结果表明:研究区年均风速和起沙风频率分别为 $2.13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3.91\%$ ,年输沙势 $19.89\text{ VU}$ ,属低风能环境,年际变率小,季节变化明显,冬季输沙势最高。主导风向相对单一,以南风和西风为主,且随季节变化差异显著。灌丛地表细颗粒占绝对优势, $<250\text{ }\mu\text{m}$ 细颗粒含量超过 $85\%$ ,并以 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 粉沙为主;无植被覆盖路基边坡 $<250\text{ }\mu\text{m}$ 细颗粒含量 $60\%\sim 80\%$ , $>500\text{ }\mu\text{m}$ 粗颗粒含量高达 $22\%$ 。灌丛沉积物平均粒径 $43.85\text{ }\mu\text{m}$ 、偏度 $0.29$ 、峰度 $1.41$ 、分选系数 $2.06$ ,边坡处对应值分别为 $117.18\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.16$ 、 $1.00$ 、 $2.09$ ,两地沉积物分选较差,灌丛沉积物更细且粒径分布更集中,说明灌丛保护下地表物质较为稳定,细颗粒被较好地保存。

**关键词:** 荒漠灌丛; 敦煌-格尔木铁路; 风动力环境; 输沙势; 粒度特征

文章编号: 1000-694X(2023)05-049-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00034

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

## 0 引言

灌木是干旱、半干旱及半湿润地区的优势植物,灌木群落不仅在当地有着重要的生态地位,还在防风固沙方面有着重要的作用<sup>[1]</sup>。灌丛通过遮阴效果来保护植被冠幅下土壤资源,增加地表粗糙度来改变植被区的微气候、土壤理化性质<sup>[2]</sup>,还可以拦截沙物质,避免其成为新的沙源<sup>[3-4]</sup>。中国西北干旱区年均降水量低于 $100\text{ mm}$ <sup>[5]</sup>,为典型的大陆性荒漠气候<sup>[6-8]</sup>,由于气候干燥、降水稀少、蒸发强烈、昼夜温差大,戈壁和沙漠广布,灌丛群落较少,只有地下水较为充足的条件下,耐旱耐寒的灌丛植被才能成片地生长。

西北荒漠地区植被稀疏、地表裸露、沙源丰富,在风力作用下易产生风沙流,造成不同形式的风沙危害。随着中国西部大开发战略持续推进和铁路工程的快速发展,西北地区铁路里程逐年增加,铁

路沿线风沙危害日益凸显,已影响列车安全运营。携沙气流在途经铁路时由于路基和道床等构筑物的阻挡,改变了局地流场结构与风沙输移环境,对铁路路基、动力设施及其附属物造成打磨、风蚀和沙埋等危害,影响列车安全运营和线路养护。荒漠铁路风动力环境研究能够明晰沿线各路段铁路沙害时空分布、等级划分和成因等,从而为荒漠铁路风沙防治措施的选择和合理布局提供科学依据,提高铁路风沙防治效率,保障铁路安全运营。戈壁和沙漠风沙活动更频繁,铁路沙害致灾机理和防治更为复杂,因此其铁路沙害问题受到更多关注<sup>[9-13]</sup>,而荒漠灌丛的路段风沙研究较少。

敦煌-格尔木铁路北起甘肃敦煌,南至青海格尔木,线路全长 $616.79\text{ km}$ 。铁路横跨阿尔金山脉,穿越柴达木盆地,毗邻库姆塔格沙漠,沿线多为沙砾质戈壁、流动沙丘和半固定沙丘。在次级地貌单元当金山山前冲洪积倾斜平原有成片的灌丛群落

收稿日期:2022-12-14; 改回日期:2023-04-05

资助项目:国家自然科学基金项目(42171083,41871016)

作者简介:张宏雪(1994—),女,河南商城人,博士研究生,主要从事风沙灾害防治研究。E-mail: zhanghongxue@niger.ac.cn

通信作者:张克存(E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn)

分布,便于开展荒漠灌丛路段铁路风动力环境和沙害特征研究。鉴于此,本文利用敦格铁路沿线定点风况资料和路基两侧典型断面沉积物粒度数据,分析荒漠灌丛路段风动力环境与沉积物粒度特征,为深入揭示敦格铁路和类似地区铁路工程沙害的形成机理和制定合理的风沙防治措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省酒泉市下属的阿克塞哈萨克族自治县,处于甘肃、青海、新疆3省区交界处,位于青藏高原最北端。年平均气温 $3.1^{\circ}\text{C}$ ,最低 $-34.3^{\circ}\text{C}$ ,最高 $35.9^{\circ}\text{C}$ ,平均相对湿度30%,平均年降水量127 mm,平均年蒸发量为 $3\,297.9\text{ mm}^{[14]}$ 。该区南侧为当金山,处于阿尔金山与祁连山的结合部位,海拔 $2\,866\sim 3\,110\text{ m}$ ,地势南高北低,山体南坡相对平缓,北坡陡峻<sup>[15]</sup>。

研究区位于冲洪积平原,地势平坦广阔,由于

南侧当金山地表风化严重,岩体破碎,地表碎屑丰富,存在许多粒径在厘米到分米级的大块石头,砾石覆盖度较高,属于典型的戈壁滩地貌,地表存在较厚的物理结皮,质地较为坚硬。该区地下水较发育,以基岩裂隙水和构造裂隙水为主,主要受大气降水、冰雪融水及地表沟水补给<sup>[16]</sup>。山前冲洪积平原有针茅(*Stipa capillata*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等天然灌丛植被,发育较好。灌丛分布不均匀,一些区域成片分布,根据野外考察推测其植被覆盖度在40%以上,一些区域零散分布,盖度不足10%。灌丛植被以白刺和针茅草分布最多,其余类型植物数量较少且零星分布。白刺灌丛高度在 $20\sim 30\text{ cm}$ 左右,叶片较小,叶片长或宽不超过 $2\text{ cm}$ ,但枝叶较丰富,闭郁度较高,冠幅可达 $50\text{ cm}$ ,对地表的保护能力较强。针茅草植株高度可达 $50\text{ cm}$ ,有叶无茎,叶片细长且纵向生长,冠幅仅 $10\sim 20\text{ cm}$ ,对地表保护能力较弱。风况监测站点位于山前冲洪积平原( $39^{\circ}29'52''\text{N}$ 、 $94^{\circ}35'20''\text{E}$ ),为更好监测灌丛地表风况,将气象仪安装在灌丛中。

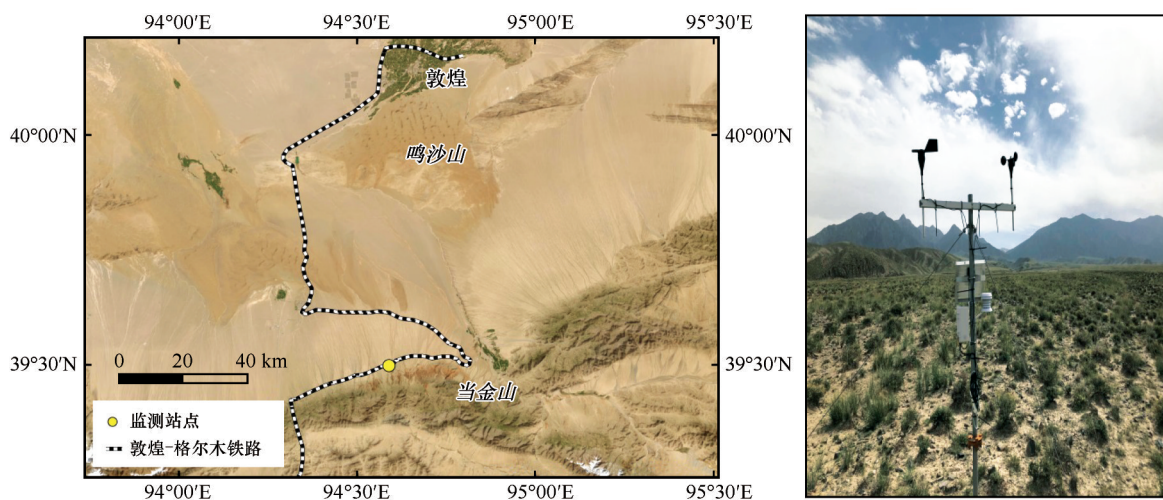


图1 研究区概况和监测站点照片

Fig.1 Location of study area and photo of the meteorological station

### 1.2 研究方法

风况数据是HoBo自动气象站记录的16个方位的风速与风向,观测高度为 $2\text{ m}$ ,观测间隔为 $10\text{ min}$ 。观测时间为2019年6月至2021年5月,采用中国气象学上四季划分方法<sup>[17]</sup>,即3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至翌年2月为冬季,观测时间正好覆盖每个季节。本文计算了研

究区的平均风速、起沙风频率以及输沙势等参数。采用Fryberger<sup>[18]</sup>的方法计算了对应时段16个方向的输沙势:

$$DP = V^2(V - V_c)t \quad (1)$$

式中: $DP$ 为输沙势(VU); $V_c$ 为临界起沙风速,为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[19-21]</sup>;  $V$ 为各级别起沙风速的每 $10\text{ min}$ 平均风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),本文计算使用的风速级别为 $5\sim 6$ 、 $6\sim 7$ 、 $7\sim 8$ 、 $8\sim 9$ 、 $9\sim 10$ 、 $10\sim 11$ 、 $>11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,共7个级别; $t$

为起沙风作用时间,用占观测总时间的百分比表示。16个方向的输沙势相加得到总输沙势,然后进行矢量合成可得到合成输沙势( $RDP$ )与输沙势合成方向( $RDD$ ), $RDP$ 指示各种风向下的净输沙势, $RDD$ 表示输沙净走向。合成输沙势与输沙势的比值称为方向变率指数( $RDP/DP$ ),用来指示风向组合情况。

为了分析铁路沿线荒漠灌丛的粒度特征,分别在研究区铁路北侧边坡、北侧灌丛、南侧边坡、南侧灌丛各自采集3个表层沙土样品。采集到的每个土样采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行3次测量,取其平均值。采用 Folk-Ward 公式<sup>[22]</sup>,利用粒度的累积频率计算得到了沙物质的平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $\sigma$ )、偏度( $SK$ )、峰度( $K_g$ )等参数。

平均粒径:

$$M_z = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})}{3} \quad (2)$$

分选系数:

$$\sigma = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6.6} \quad (3)$$

偏度:

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

峰度:

$$K_g = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

式中: $\Phi_5$ 、 $\Phi_{16}$ 、 $\Phi_{25}$ 、 $\Phi_{50}$ 、 $\Phi_{75}$ 、 $\Phi_{84}$ 、 $\Phi_{95}$ 分别是体积累积频率为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%所对应的粒径,单位为 $\Phi$ 。为便于作图和运算,将 $M_z$ 通过 Krumbein<sup>[23]</sup>的公式进行转化:

$$D = -\log_2 d \quad (6)$$

式中: $D$ 为颗粒直径,单位 $\Phi$ ;  $d$ 为颗粒直径,单位mm。粒级划分按照乌登-温特沃斯粒级标准(Udden-Wentworth scale)<sup>[24-25]</sup>进行,即黏土 $>9\Phi$ ( $<0.002$  mm),粉沙 $4\sim 9\Phi$ ( $0.002\sim 0.063$  mm),极细沙 $3\sim 4\Phi$ ( $0.063\sim 0.125$  mm),细沙 $2\sim 3\Phi$ ( $0.125\sim 0.25$  mm),中沙 $1\sim 2\Phi$ ( $0.25\sim 0.5$  mm),粗沙 $0\sim 1\Phi$ ( $0.5\sim 1$  mm),极粗沙 $-1\sim 0\Phi$ ( $1\sim 2$  mm),砾石 $<-1\Phi$ ( $>2$  mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 荒漠灌丛风况特征

荒漠灌丛年均风速为 $2.13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年均起沙风频率为3.91%。其中2019—2020年均风速为 $2.08\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,起沙风频率为3.65%;2020—2021年均风速为 $2.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,起沙风频率为4.16%,可见荒漠灌丛风速较低,风动力环境稳定,年际变化小。图2A显示,2月起沙风频率最高,为7.78%,其次为1月,为6.42%;10月起沙风频率最低,为1.06%。起沙风年均风速为 $5.93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其中11月起沙平均风速最大,为 $6.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其次为2月,为 $6.56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;10月最低,为 $5.51\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其次为8月,为 $5.60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图2B显示,春季平均风速最高,为 $2.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,秋季最低,为 $1.98\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;冬季起沙频率最高,为5.34%,秋季最低,为2.58%。

荒漠灌丛区起沙风集中在偏南和偏西方向,其中S和SSW方向起沙风共占比46.55%,W、WNW、NW方向起沙风共占比43.82%。就单个方向而言,SSW方向起沙风频率最高,为23.10%,其次为WNW方向起沙风频率,为21.72%,S方向为20.46%(图3)。这说明灌丛荒漠受偏西和偏南方向起沙风的影响比较大。

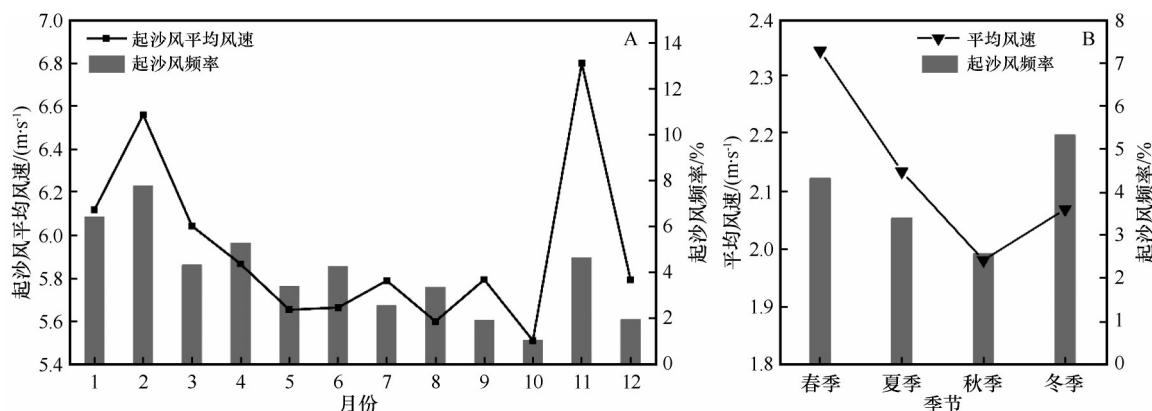


图2 2019—2021年各月起沙风平均风速与起沙风频率(A)及四季平均风速与起沙风频率(B)

Fig.2 Monthly average sand-driving wind speed and sand-driving wind frequency (A) and seasonal average wind speed and sand-driving wind frequency (B) during 2019-2021



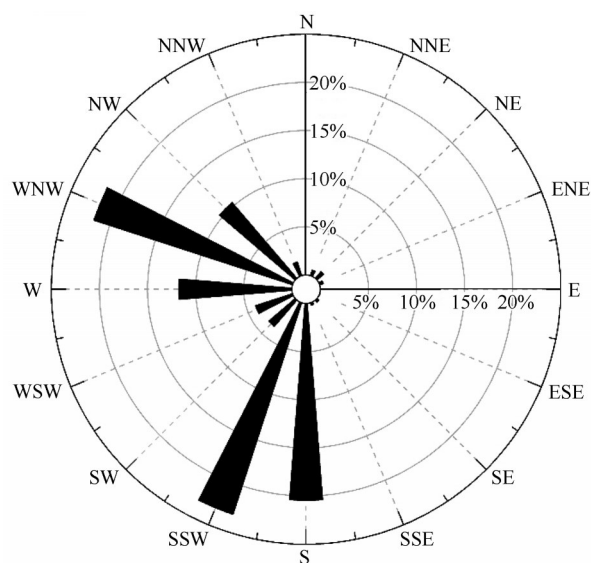


图3 荒漠灌丛区2019年6月至2021年5月起沙风玫瑰  
Fig.3 Sand-driving wind rose in desert shrub from June of 2019 to May of 2021

## 2.2 荒漠灌丛输沙势特征

### 2.2.1 年输沙势特征

荒漠灌丛地表年均 $DP$ 为19.89 VU,其中2019—2020年 $DP$ 为16.39 VU,2020—2021年为23.39 VU,属于低风能环境,且输沙势年际变化不大,说明该区域风动力环境相对稳定。年输沙势集中在S和SSW方向(图4),2019—2020年S和SSW方向 $DP$ 占全年的70.34%,2020—2021年为66.03%,说明输沙风能主要来自南方。两年 $RDD$ 分别为 $27.91^\circ$ 和 $35.91^\circ$ ,方向变率0.71和0.68,为中高比率,指示风向较为单一。起沙风速都在 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,2019—

2020年风速集中在 $5\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,占比69.6%,2020—2021年集中在 $6\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,共占比78.35%。

### 2.2.2 输沙势季节分布特征

如图5所示,灌丛地表2019—2020年和2020—2021年期间都是冬季 $DP$ 最高,分别占年 $DP$ 的48.50和45.66%。2019—2020年夏季 $DP$ 最低,仅占全年的11.10%,2020—2021年秋季 $DP$ 最低,仅占全年的13.47%。2019—2020年和2020—2021年4个季节 $DP$ 的主导方向基本是一致的,秋、冬季 $DP$ 主要为SSW和S方向, $RDD$ 都偏北;春季 $DP$ 主要为WNW和S方向, $RDD$ 偏东北;夏季 $DP$ 集中在WNW方向, $RDD$ 偏向东南。2019—2020年和2020—2021年夏、秋、冬季的方向变率高达0.8~0.9,属于高比率,说明夏、秋、冬季灌丛地表输沙方向较单一;春季 $DP$ 较低,属于中比率。通过对比可以发现,2019—2020年和2020—2021年相同季节的数据参数都比较接近,说明灌丛地表相同季节的风况变化较小,尤其是输沙方向基本保持不变,如秋、冬季以南风为主,夏季是西风,春季受南向和西向风双重影响。此外,冬季输沙势最高,且方向变率最高,具有明显风力优势。

## 2.3 荒漠灌丛沉积物粒径

不同地貌部位沉积物的粒径变化存在明显的规律,因此本文在穿越荒漠灌丛铁路的不同位置都采集了沉积物样品。铁路南、北灌丛土样在铁路路堤坡脚附近灌丛下采集,因此南、北灌丛的土样才能够代表荒漠灌丛区的沉积物特征,南、北边坡的土样是在铁路路堤边坡上采集,其反映的是无植被

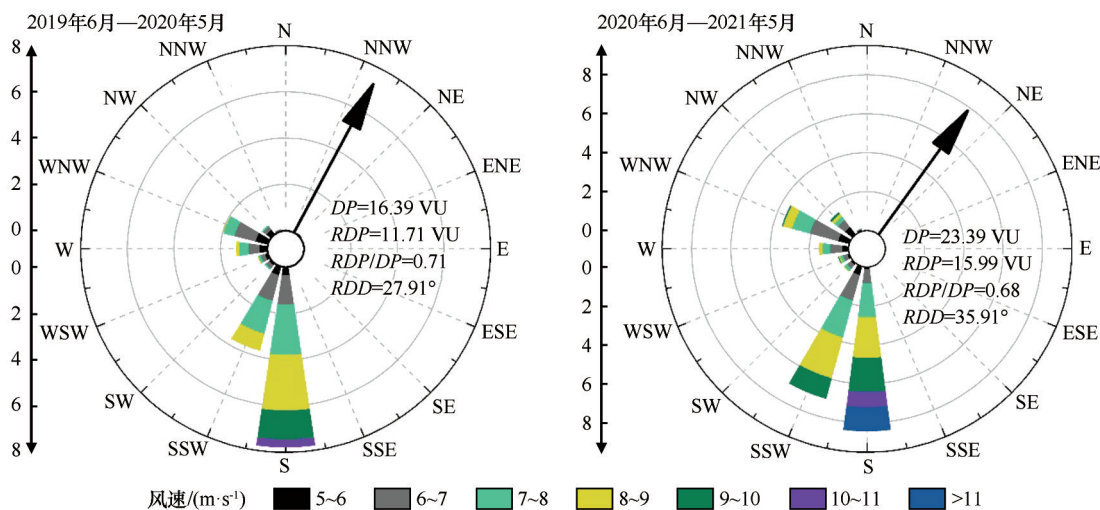


图4 荒漠灌丛区年输沙势  
Fig.4 Annual sand drift potential in the shrub desert

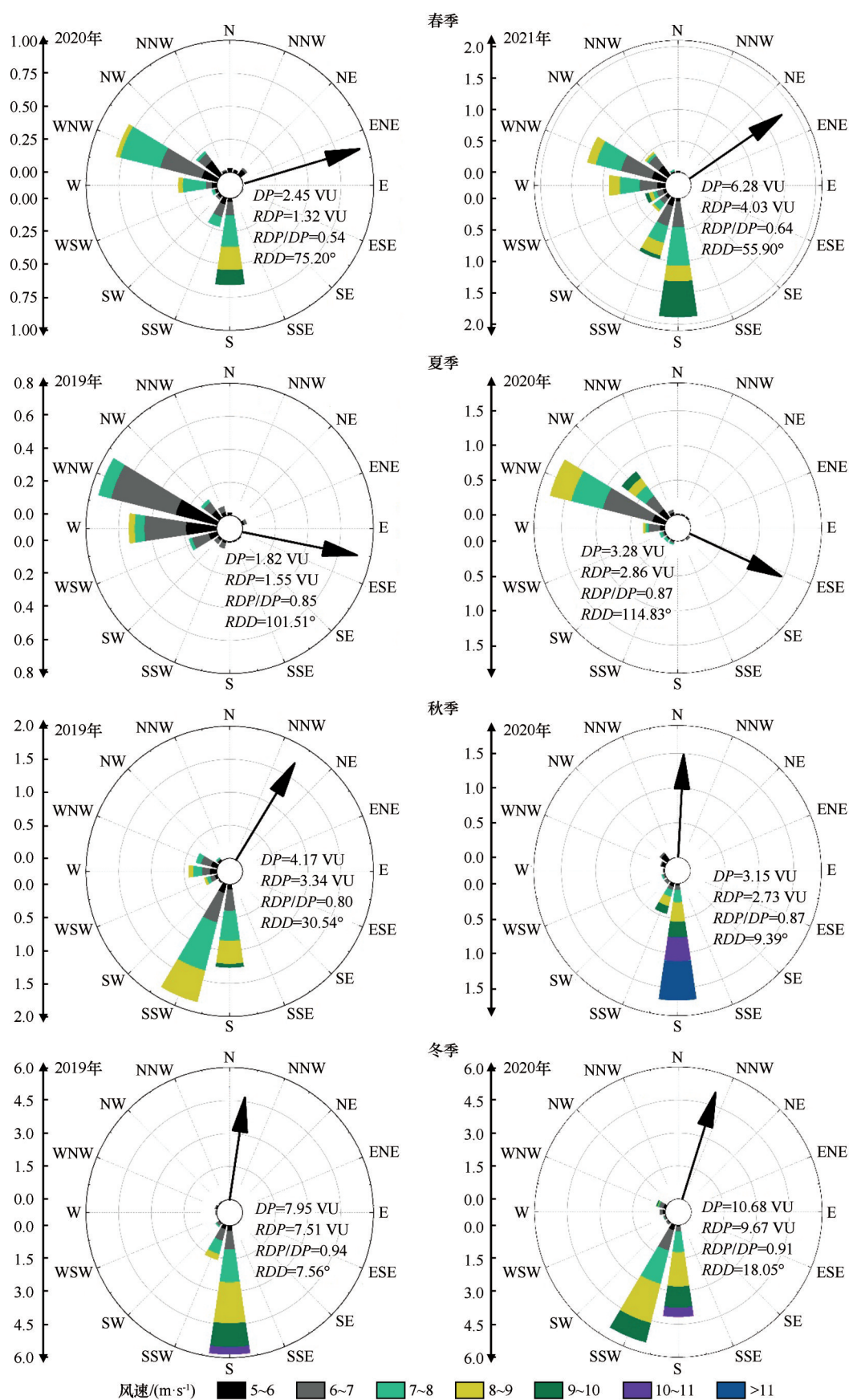


图5 荒漠灌丛区输沙势的季节分布

Fig.5 Seasonal distribution of sand drift potential in the shrub desert

保护下的路堤沉积物特征。如图6所示,灌丛下沉积物粒度频率累积曲线和频率分布曲线和路堤边坡差别很大。灌丛下沉积物频率累积曲线较陡,组分集中在粉沙、极细沙、细沙范围,边坡沉积物频率累积曲线较缓,表明其粒级分布区间大。灌丛下粒度频率分布曲线在粉沙、极细沙、细沙组分范围出现锐峰,峰值位于73~83  $\mu\text{m}$ (极细沙粒径范围),在极粗沙、砾石组分范围出现钝峰,其中粒径<63  $\mu\text{m}$ 粉沙含量41%~63%,<250  $\mu\text{m}$ 的细颗

粒含量超过85%,>500  $\mu\text{m}$ 粗颗粒含量0~14%,粗颗粒含量较少,部分样品甚至不含粗颗粒,说明灌丛地表下沙物质分布非常集中,且细颗粒物占绝对优势。铁路南、北边坡沉积物粒径曲线为典型的双峰型,粒径分布范围宽,从粉沙到极粗沙组分都有包含,其中粒径<250  $\mu\text{m}$ 组分含量60%~80%,>500  $\mu\text{m}$ 的粗颗粒含量3%~22%,边坡沉积物以细颗粒为主,粗颗粒含量相对较少,但明显多于灌丛沉积物。

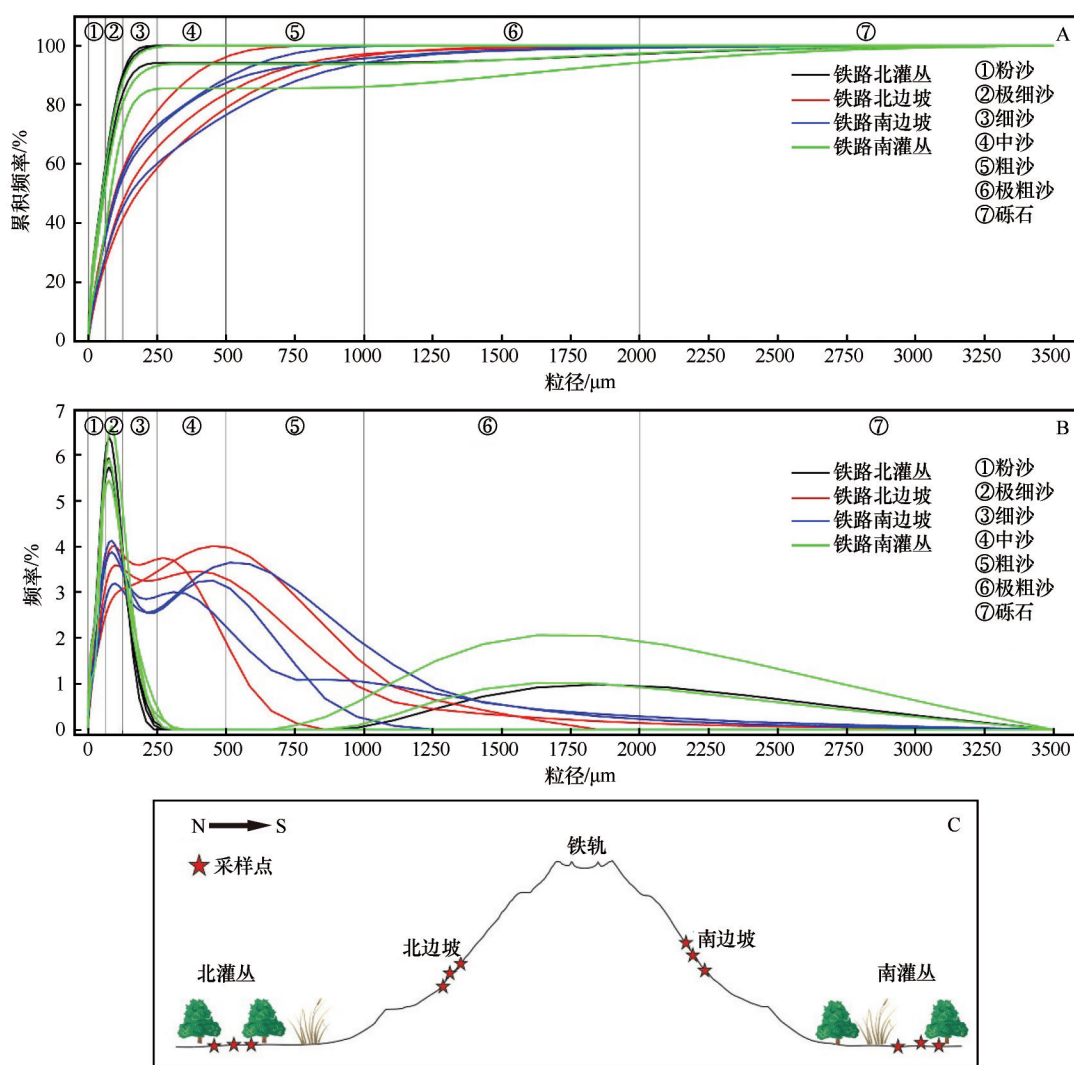


图6 荒漠灌丛区沉积物粒度频率累积曲线(A)、粒度频率分布曲线(B)及采样位置示意图(C)

Fig.6 Grain-size probability accumulation curves (A), grain-size frequency distribution curves (B) and sampling location (C) of desert shrub sediments

铁路南、北侧灌丛沉积物组分含量差别不大,其中粉沙含量最高,41%~63%,其次为极细沙,含量26%~31%,再其次为细沙,含量9%~14%,中沙、粗沙组分含量极低,基本可以忽略不计,部分样品存在少量极粗沙和砾石(表1)。铁路南、北边坡沉积

物组分差别也较小,边坡位置也是粉沙含量最高,28%~39%,极细沙、细沙、中沙含量大致相当,14%~22%,粗沙含量3%~18%,极粗沙含量0~4%,基本不存在砾石。灌丛与边坡沙物质对比表明,灌丛下的粉沙含量明显高于边坡,沉积物更细。



表 1 荒漠灌丛区不同位置的粒径组分含量与参数

Table 1 Grain-size component content and parameters at different position along the railway in the shrub desert

采样 位置	样品 编号	粒径组分							粒径参数			
		粉沙 <63 μm	极细沙 63~125 μm	细沙 125~250 μm	中沙 250~500 μm	粗沙 500~ 1 000 μm	极粗沙 1 000~2 000 μm	砾石 >2 000 μm	$M_z$ /μm	$\sigma$	SK	$K_g$
北侧 灌丛	1	61.23	29.58	9.19	0.00	0.00	0.00	0.00	35.92	1.85	0.47	1.04
	2	57.44	26.75	10.03	0.00	0.04	3.29	2.44	41.56	2.30	0.16	1.63
	3	62.73	27.17	10.05	0.05	0.00	0.00	0.00	35.05	1.87	0.43	1.03
北侧 边坡	1	27.58	14.06	19.28	18.99	17.88	2.21	0.00	149.54	2.08	0.24	0.95
	2	30.26	17.31	20.07	16.98	13.27	1.83	0.28	128.91	2.03	0.15	0.99
	3	38.68	19.56	22.06	16.47	3.23	0.00	0.00	85.24	1.96	0.22	1.02
南侧 边坡	1	36.69	18.84	18.27	14.30	8.41	3.07	0.42	99.56	2.18	0.10	1.07
	2	37.17	20.03	17.50	15.04	10.18	0.08	0.00	99.28	2.06	0.11	1.02
	3	30.04	15.45	16.40	15.60	18.24	3.68	0.60	140.56	2.25	0.16	0.95
南侧 灌丛	1	61.16	27.34	11.25	0.25	0.00	0.00	0.00	36.26	1.88	0.43	1.03
	2	55.42	25.52	12.65	0.24	0.09	3.85	2.23	44.45	2.32	0.15	1.61
	3	40.66	31.22	13.68	0.05	0.97	8.52	4.89	69.84	2.19	0.08	2.12

为便于比较,分别计算了灌丛和边坡沉积物样品  $M_z$ 、 $\sigma$ 、SK、 $K_g$  的平均值。 $M_z$  平均值灌丛为 43.85 μm,边坡为 117.18 μm;  $\sigma$  平均值灌丛为 2.06,边坡为 2.09; SK 平均值灌丛为 0.29,边坡为 0.16,二者都为正偏,偏度越大沉积物越细;  $K_g$  平均值灌丛为 1.41,峰度窄,边坡为 1.00,属于中等峰度。灌丛沉积物平均粒径明显小于边坡,偏度更大,说明沉积物整体比边坡更细。灌丛沉积物  $K_g$  更大,其峰态更尖锐,沉积物分布更加集中,边坡沉积物峰态较平缓,组分较分散。灌丛和边坡分选系数基本接近,且都大于 2,说明沉积物分选性都较差。

2019—2021 年风况数据显示,荒漠灌丛年均风速 2.13 m·s<sup>-1</sup>、年均起沙频率 3.91%,年均 DP 为 19.89 VU,说明研究区风力较弱,扰动频率低。根据铁路南北灌丛沉积物的粒度数据可以发现,灌丛下粉沙含量最多,以细组分粉沙、极细沙为主,沉积物基本仅由细颗粒构成,且分选性较差,说明细颗粒被较好地保留下来。结合研究区较弱的风力环境,我们可以断定荒漠灌丛地表沙物质受风力影响较小,风力导致的物质迁移较少,地表物质较为稳定。

3 讨论

研究区地表年均 DP 仅为 19.89 VU,年均风速 2.13 m·s<sup>-1</sup>,年均起沙频率 3.91%,风动力环境较弱,远远低于铁路沿线其他站点。大量研究发现区域

内由于地形、土地利用、植被覆盖、沙源等因素造成风动力环境存在空间异质性<sup>[12,26-28]</sup>。本研究区荒漠灌丛风力较弱原因可能有两点:由于受南面高山地形阻挡,风力大大减弱;地表植被覆盖大大降低风速<sup>[29-30]</sup>,灌丛植被增加了地表粗糙度<sup>[31-33]</sup>,粗糙度的增加意味着风速廓线会被抬高,则同等高度下的植被地表的风速相对于粗糙度较低的裸地会有所降低,因此导致风速被削弱。

荒漠灌丛年输沙势图显示,风能主要来自南方(图 4),南风具有稳定少变的特点。2019—2020 年春、秋、冬季偏南方向 DP 占比分别为 40.15%、79.86% 和 97.21%,2020—2021 年占比分别为 56.29%、92.34% 和 93.01%,唯有夏季南风方向 DP 减弱。敦煌莫高窟秋、冬季节也出现了南风频率大大增加的现象<sup>[20]</sup>。此现象的原因可能是秋、冬季节青藏高原上空的热低压逐渐转变为冷高压,使得南风频率和风力增加。此外,研究区南侧为当金山脉,冬季冷空气沿山坡下沉会形成山风,导致南风增加。铁路在研究区大致呈东西走向,若在沙源丰富的裸露地表,主导的南风携带的风沙流会对铁路造成较大的威胁,但是在野外考察中发现铁路轨道上基本没有积沙,可能与植被的保护有关。

沉积物粒度参数可以反映当地风沙地貌及风沙尘动力环境<sup>[34-36]</sup>。平均粒径代表粒度分布的集中趋势,能够反映搬运介质的平均动能<sup>[37]</sup>,一般在频

繁扰动的大风环境中,大量细颗粒物会被风带走,导致平均粒径偏粗。但沉积物粒度分布也受表层物质结构、植被等因素的影响。铁路南北侧灌丛植被粉沙含量极高,说明地表物质的风力搬运能力极弱,首先是因为研究区属于弱风能环境,平均风速低;其次,灌丛的存在增加了地表粗糙度,为地表物质提供一层保护屏障,还会改变植被区土壤理化性质,形成厚的地表结皮,保护细组分免受风蚀,如铁路边坡沉积物没有灌丛植被的保护,细组分含量明显低于灌丛;此外,植被往往通过增加风沙流动阻力,对过往风沙流进行截留,促进泥沙淤积<sup>[38]</sup>,灌丛作为风沙流运行障碍,能够拦截风沙流中细颗粒使其沉积于灌丛下方。分选系数反映颗粒在风力、水力等动力作用下按粒度的富集现象,表示固体颗粒大小的均匀程度<sup>[39]</sup>,也是衡量风沙强度的客观指标<sup>[40]</sup>。研究区各位置沉积物样品的分选性都较差,由于处于山前冲洪积平原较前沿的位置,原始沉积物的分选性较差,而且大量灌丛的存在降低了风沙活动对地表扰动的强度,所以分选特征保留较好。此外,野外考察发现在铁路沿线的戈壁和流沙路段积沙较为严重,荒漠灌丛路段铁轨上却不存在积沙,也证明了灌丛能够有效维持地表沙物质的稳定,防止铁路沙害。

## 4 结论

2019—2021年,敦煌—格尔木铁路荒漠灌丛路段年均风速 $2.13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年均起沙风频率 $3.91\%$ ,年均 $DP$ 为 $19.89\text{ VU}$ ,属于低风能环境,风力较弱,风环境稳定。输沙势年际变化小,季节变化明显,冬季输沙势最高。主导风向相对单一,以南风和西风为主,且随季节变化差异显著,秋、冬季主导风向为南风 and 偏南风,夏季为偏西风,春季为偏西风和南风。

灌丛地表沉积物细颗粒物占绝对优势,其中粒径 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 的粉沙含量 $41\%\sim 63\%$ , $<250\text{ }\mu\text{m}$ 的粉沙、极细沙、细沙总含量超过 $85\%$ , $>500\text{ }\mu\text{m}$ 粗颗粒最大含量 $14\%$ ;边坡 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 粉沙含量 $28\%\sim 39\%$ , $<250\text{ }\mu\text{m}$ 细颗粒含量在 $60\%$ 以上, $>500\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒最大含量为 $22\%$ 。灌丛沉积物 $M_z$ 为 $43.85\text{ }\mu\text{m}$ , $\sigma$ 为 $2.06$ , $SK$ 为 $0.29$ , $K_g$ 为 $1.41$ ,边坡分别为 $117.18\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.09$ 、 $0.16$ 、 $1.00$ ,两地沉积物分选较差,灌丛明显比边坡沉积物细,细颗粒更多且分布集中,说明在灌丛保护下地表物质较为稳定,细颗粒被较好地

保存。

## 参考文献:

- [1] 郭向东.不同干扰程度下巴音温都尔沙漠球果白刺灌丛沙堆特征的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [2] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠,2009,29(5):845-852.
- [3] 杜建会,严平,董玉祥.干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J].地理学报,2010,65(3):339-350.
- [4] 李月飞,陈林,李学斌,等.2018.荒漠草原灌丛沃岛的结构特征和生态效应[J].草业科学,35(10):2327-2335.
- [5] 毕超,单楠,毕华兴.西北极端干旱区近54年降水量和温度变化趋势[J].中国水土保持科学,2015,13(3):90-96.
- [6] 陈国祥,董治宝,李超,等.察尔汗盐湖北侧沙丘沉积物颗粒微结构特征[J].中国沙漠,2018,38(5):954-962.
- [7] 李超,董治宝,陈国祥,等.柴达木盆地察尔汗盐湖北侧沙丘黏性沉积物特征[J].中国沙漠,2018,38(1):68-75.
- [8] 李继彦,赵二丹,柳文龙,等.察尔汗盐湖线形沙丘沙物质来源及输移路径[J].中国沙漠,2018,38(5):909-918.
- [9] 王锡来,张登绪,蒋育华,等.南疆铁路沿线风沙危害与工程防治[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):59-63.
- [10] 程建军,蒋富强,杨印海,等.戈壁铁路沿线风沙灾害特征与挡风沙措施及功效研究[J].中国铁道科学,2010,31(5):15-20.
- [11] 蒋富强,石龙,李凯崇.兰新二线挡风墙下部开口疏导线路积沙试验[J].铁道工程学报,2015,32(7):13-17.
- [12] Cheng J J, Jiang F Q, Xue C X, et al. Characteristics of the disastrous wind-sand environment along railways in the gobi area of Xinjiang, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 344-354.
- [13] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.
- [14] 刘利伟,何文社,路仕洋,等.当金山隧道防寒泄水洞适宜埋设位置数值分析[J].铁道标准设计,2018,62(4):130-135.
- [15] 李玉波.当金山特长隧道钻爆法与TBM施工地质条件分析[J].铁道建筑,2012(12):64-66.
- [16] 马殿军.当金山隧道施工关键措施[J].中国铁路,2017(4):76-80.
- [17] 朱瑞兆,谭冠日,王石立.应用气候学概论[M].北京:气象出版社,2005:2-3.
- [18] Fryberger S G. Dune forms and wind regime [M]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: US Geological Survey, 1979: 137-169.
- [19] 凌裕泉.最大可能输沙量的工程计算[J].中国沙漠,1997,17(4):30-36.
- [20] 黄翠华,张伟民,王涛,等.莫高窟顶输沙势研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(5):116-120.
- [21] 张克存,牛清河,屈建军,等.敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析[J].中国沙漠,2012,32(4):896-900.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Re-



- search, 1957, 27(1): 3-26.
- [23] Krumbein W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. *Journal Sediment Petrology*, 1941, 11: 64-72.
- [24] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 1-3, 44-53.
- [25] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 8-9, 14-16.
- [26] Zhang K, Qu J, Han Q, et al. Wind tunnel simulation of wind-blown sand along China's Qinghai-Tibet railway[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 25(3): 244-250.
- [27] Zhang C L, Shen Y P, Li Q, et al. Sediment grain-size characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 586-599.
- [28] Liu Z Y, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Spatial and temporal variation of the near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, Northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1/2): 433-447.
- [29] Wang X M, Zhou Z J, Dong Z B. Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China: an examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003 [J]. *Geomorphology*, 2006, 81 (3/4): 292-308.
- [30] Zhang K C, An Z S, Cai D W, et al. Key role of desert-oasis transitional area in avoiding oasis land degradation from aeolian desertification in Dunhuang, Northwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 28(1): 142-150.
- [31] 吕萍, 董治宝. 戈壁风蚀面与植被覆盖面地表性质粗糙度长度的确定[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 25-31.
- [32] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 37-39.
- [33] 贺晶, 吴新宏, 杨婷婷, 等. 基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究[J]. *中国草地学报*, 2013, 35(5): 103-107.
- [34] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits* [M]. London, UK: Academic Press, 1987: 108-115.
- [35] Warren A. *Dunes: Dynamics, Morphology, History* [M]. Blackwell, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2013: 14-20.
- [36] 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.
- [37] 吴汉, 常凤琴, 张虎才, 等. 泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素[J]. *沉积学报*, 2016, 34(4): 679-687.
- [38] Zhang K, Qu J J, Zhang X X, et al. Protective efficiency of railway arbor-shrub windbreak forest belts in gobi regions: numerical simulation and wind tunnel tests[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 885070.
- [39] 肖靖安, 裴亮, 孙莉英, 等. 额济纳旗两种地貌类型戈壁纵剖面沉积物粒度特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 38-44.
- [40] Zhang C, Zou X Y, Pan X H, et al. Near-surface airflow field and aerodynamic characteristics of the railway-protection system in the Shapotou region and their significance[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(2): 169-187.

## Wind dynamic environment and sediment grain size characteristics of shrub desert along Dunhuang-Golmud Railway

Zhang Hongxue<sup>1,2</sup>, Zhang Kecun<sup>1</sup>, An Zhishan<sup>1</sup>, Yu Yanping<sup>3</sup>

(1. *Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station / Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The Dunhuang-Golmud Railway passes through the desert area in northwest China, with bare surfaces, abundant sand sources and strong windblown sand activities. This paper reveals the wind dynamic environment and surface sediment characteristics of the shrub sections along the railway through field wind fixed position monitoring and surface sediment grain size analysis. The results show that the annual average wind speed and the frequency of sand-driving in the study area are  $2.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and 3.91%, and the annual sand transport potential is 19.89 VU, which is a low wind environment with little inter-annual variation and obvious seasonal variation, and the highest sand transport potential in winter. The dominant wind direction is relatively homogeneous, mainly south wind and west wind, and with significant seasonal variation. The sediment in the shrub desert is dominated by fine particles, with  $<250 \mu\text{m}$  fine particles exceeding 85% and dominated by  $<63 \mu\text{m}$  silt; The  $<250 \mu\text{m}$  fine particles content on the unvegetated roadbed slopes ranges from 60% to 80%, with  $>500 \mu\text{m}$  coarse particles content reaching up to 22%. The mean grain size of the shrub sediment was  $43.85 \mu\text{m}$ , with a skewness of 0.29, kurtosis of 1.41 and sorting coefficient of 2.06, and the corresponding value at roadbed slope is  $117.18 \mu\text{m}$ , 0.16, 1.00 and 2.09, respectively. The sediments on the two sampling points are poor sorting, and the sediments under shrub are finer with a more concentrated grain size distribution, indicating that the surface material is stable due to shrub protection and fine particles are well preserved.

**Key words:** shrub desert; Dunhuang-Golmud Railway; wind dynamic environment; sand drift potential; grain size characteristics