

乌玛高速公路中卫段风沙环境及输移规律

王金国¹, 安志山^{2,3}, 张克存², 屈建军², 何明珠²

(1.宁夏交投工程建设管理有限公司, 银川 750000; 2.中国科学院 西北生态环境资源研究院

沙漠与沙漠化重点实验室 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站, 兰州 730000; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:作为宁夏自治区南北向交通运输通道, 乌玛高速公路对于带动区域经济发展有着重要意义。为保证公路正常运行, 该文采用野外定位监测和室内分析方法, 揭示了公路沿线风沙活动规律。结果表明: (1) 区域 0~5 m/s 等级的风速频次占全年风速的 90.45%, 起沙风向主要集中在西北、东和偏南方向, 合成输沙方向为偏东南方向; 研究区输沙势小于 200 VU, 属于低风能环境。(2) 沿乌玛高速公路自东北向西南方向, 所有样品均以细沙和中沙为主, 粒径范围集中在 1.0~2.76 Φ 。除 5 号采样点 20 cm、50 cm 和 100 cm 深度沉积物的百分含量分布曲线呈双峰态, 其余样品全部为单峰态, 表明研究区域表层沉积物经过了充分分选。随着深度的增加, 不同粒径范围百分含量的变化规律并非十分明显, 即区域风能环境比较稳定。(3) 所有样品分选性较好或很好, 偏度为正偏或极正偏, 粒径偏粗。(4) 区域内风沙流主要集中在 30 cm 以下, 占总输沙量的 89.46%, 地表 0~20 cm 高度内的输沙量占总输沙量的 63.81%。基于防护体系走向与区域合成输沙方向垂直时可取得较好防护效益, 建议乌玛高速防护体系走向设计为东北—西南, 且固沙措施的高度不低于 20 cm。

关键词:乌玛高速公路; 输沙势; 粒度特征; 风沙流

中图分类号:P425.5⁺5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0183-07

Surface Sand Grain Characteristics Along Zhongwei Section of Wuhai-Maqin Highway

WANG Jinguo¹, AN Zhishan^{2,3}, ZHANG Kecun², QU Jianjun², HE Mingzhu²

(1.Ningxia Investment Engineering Construction Management Company, Yinchuan 750000, China; 2.Dunhuang Gobi and Desert Research Station, Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important north-south traffic channel in the Ningxia Autonomous Region, the Wuhai-Maqin highway is of great significance for driving economic development in the autonomous region and transportation pressure in the environmental region. Through field investigation and sampling, combining with indoor analysis experiments, the distribution characteristics of surface sand particles along the Tengger Desert section of Wuhai-Maqin highway were studied. The results show that: (1) the frequency of wind speed of 0~5 m/s level in the area accounted for 90.45% of the annual wind speed; the winds of sand blowing mainly concentrated in the northwest, east and south directions, the direction of sand transport was combined, and the synthetic transport potential was in the southeast direction; the area where the transport potential was less than 200 VU belonged to a low wind energy environment; (2) from northeast to southwest, the particle size range of all samples concentrated in 1.0~2.76 Φ , and mainly belonged to fine sand and medium sand; except for the No.5 plot, the cumulative frequency distribution curves of the sediments at the depths of 20 cm, 50 cm and 100 cm were bimodal, and the rest of the samples were all unimodal, indicating that the sediments had been fully sorted, and sedimentary environment was dominated by the early two groups of dominant wind directions; (3) with the increase of depth, the change of percentage content in different particle size ranges was not very obvious, and the sorting performance was good or very good, the skewness was positive or extreme-

收稿日期:2020-08-18

修回日期:2020-12-30

资助项目:宁夏交通厅公路工程科研项目(乌玛合同 WMKY1);国家自然科学基金(41871016)

第一作者:王金国(1979—),男,宁夏银川人,硕士,高级工程师,主要从事高速公路建设与管理研究。E-mail:250723180@qq.com

通信作者:安志山(1986—),男,河南安阳人,博士研究生,高级工程师,主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail:an1986wen@163.com

ly positive; (4) the sand flow in the area mainly concentrated below 30 cm, accounting for 89.46% of the total sediment transport, and the sediment transport within the height of 0~20 cm on the surface accounted for 63.81% of the total sediment transport. The direction of the Wuhai-Maqin Highway protection system should be northeast-southwest which is perpendicular to the direction of the regional synthetic sand transport. It is suggested that the height of the sand fixation measures should not be less than 20 cm.

Keywords: Wuhai-Maqin Highway; drift potential; particle size characteristics; sand flow structure

乌玛高速公路是内蒙古乌海至青海玛沁高速公路的简称,设计时速 100 km/h,采用双向四车道标准建设,途径内蒙、宁夏、甘肃和青海四省份,是“一带一路”战略重要的运输通道,其建成与通车对于缓解宁夏自治区运输压力有着重要意义。但穿越的腾格里沙漠由于流动沙丘广布,其对乌玛高速公路的建设、维护及安全运营带来了极大挑战。虽我国有包括塔克拉玛干石油公路、京新高速公路等穿越沙漠或边缘公路的既有建设和维护经验,但前者或公路设计等级略低,或风沙环境略弱,加之区域环境的异质性,故以往既得经验无法直接应用在乌玛高速公路防护体系的设计之中^[1-2]。

自包兰铁路在腾格里沙漠东南缘修建之日起,研究者对区域的风沙环境、沙丘类型及移动规律等进行了详细分析,为包兰铁路沙坡头段的建设和正常运行提供了理论依据^[3-8]。后期随着包兰铁路防护体系的建设与运营,铁路防护措施防护效益、防护机理以及周边生态环境效益逐渐得到明晰^[9-16],成为我国防沙治沙工程的标杆。包兰铁路沙坡头段防护体系的有效性为乌玛高速公路的建设和维护提供可借鉴的现有经验,充分验证了乌玛高速公路的建设可行性。但受区域风况环境、地形等因素影响,乌玛高速公路所经区域的风能环境、沉积物及沉积环境均有别于前者,甚至存在明显差异。因此亟需对乌玛高速公路沿线风能环境、沉积物特征等风沙输移规律进行研究,继而为乌玛高速公路的建设及沿线风沙防护体系的设计提供参考和指导,具有重要的科学和实践意义。

1 研究区概况和数据来源

腾格里沙漠是我国第四大沙漠,常年受蒙古高压控制,干旱少雨,区域内流动沙丘广布,沙丘类型以格状沙丘为主^[1,3,17],线性沙垄和金字塔沙丘偶有分布。乌玛高速公路腾格里沙漠段共计 21 km,自东北向西南方向延伸。本文采样点共设置 5 个,两两相距 4 km。其中,1 号采样点东侧和东北侧为太阳能光伏电站,2 号、3 号、4 号采样点为流动沙丘,5 号采样点靠近包兰铁路,属于包兰铁路防护体系内部,周边沙丘已经固定,植被覆盖度超过 30%,植被以人工灌木花棒(*Hedysarum scoparium*)等为主。

区域风速观测采用定位观测,仪器型号为 HOBO U30,风速风向统一架设高度为 2.0 m(图 1)。风沙流观测采用中科院沙漠与沙漠化重点实验室自制的口琴式集沙仪,仪器高 60 cm,共 30 层,单个进样口径 2 cm×2 cm。沙样采集采用人工剖挖法,采集深度分别为 5,10,20,50,100 cm,使用环刀取样。于实验室内对样品进行粒度分析,粒度分析使用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪完成,采用 Folk-Ward 图解法计算平均粒径、偏度、峰态及分选参数,具体计算公式如下^[13,18]:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{15} + \Phi_{84}}{3} \quad (1)$$

$$S_d = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (2)$$

$$S_k = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

$$K_u = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

式中: M_z 为平均粒径; S_d 为标准偏度或分选系数; S_k 为偏度; K_u 为峰态; Φ 为尤登温德华氏等比例粒级。

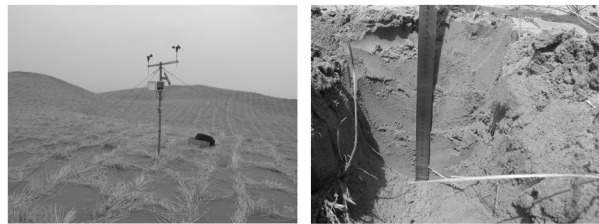


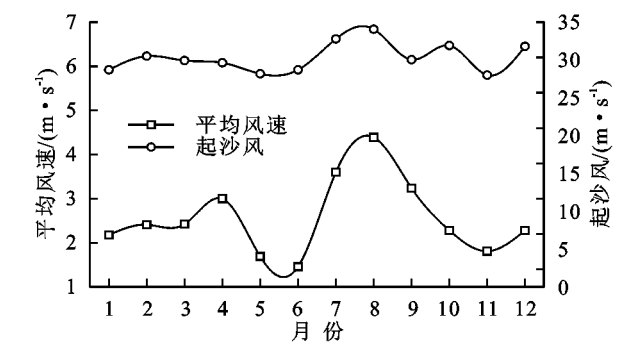
图 1 野外采样

2 区域风速分布

如图 2 所示,最大平均风速值出现在 8 月,7 月次之,最小风速值出现在 6 月,仅为 1.46 m/s。总体来看,5 月、6 月的风速较小,到了 7 月风速开始突变,增加 2.5 倍左右,持续到 9 月结束,1—4 月、10—12 月风速变化较为平稳,平均为 2.34 m/s。与平均风速变化趋势相比,月平均起沙风(>5 m/s)的分布规律略有差别,1—6 月平均起沙风速变化幅度较小,7 月、8 月起沙风速达到最大值,之后开始减小。

从风速分布情况看,0~5 m/s 等级风速占全年风速的 90.45%,仅有不足 10%左右分布在其他风速等级,并且随着风速的增加,高风速频次的比重逐渐减小。进一

步分析可知,0~5 m/s 的风速频率最大月份为 6 月,接近 20%,而本月平均风速为全年最小,可见 6 月的风速特征是频次高、风速低。5~6,6~7 m/s 等级的风速主



要分布在 4 月份,其他较高风速等级出现在 8 月份。大于 12 m/s 的风速值多数出现在 4 月和 8 月,频次分别为 13,10 次,其余月份较少或没有。

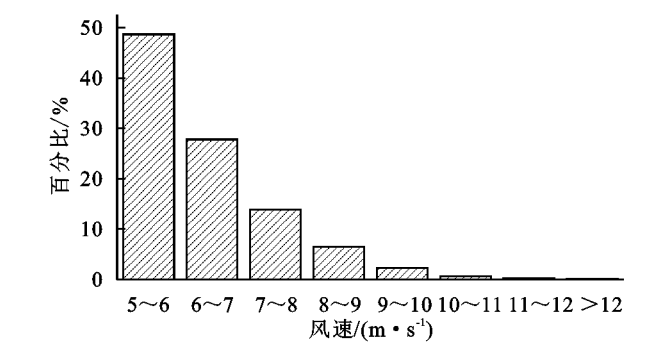


图 2 风速分布

3 输沙势变化

输沙势是衡量区域风沙活动强度及风沙地貌演变的重要指标,也是目前应用较为广泛的方法^[1,3,7]。如图 3 所示,2019 年输沙势为 37.93 VU,合成输沙势 9.35 VU,合成输沙方向 107.46°,方向变率 0.25。2020 年输沙势较 2019 年有所减小,为 19.17 VU,合成输沙势 7.02 VU,合成输沙方向 117.91°,方向变率

0.37。进一步分析可知 2019 年和 2020 年输沙势主要集中在西北方向、东方向和偏南方向,方向相对稳定,但强度略有变化。其中,2019 年上述三个方向的输沙势分别为 5.69 VU,4.56 VU 和 2.11 VU,2020 年则为 4.16 VU,2.42 VU 和 1.32 VU。可见研究区各个风向的输沙势虽有变化,但风能环境基本稳定,属于低风能环境,且风向较为稳定,主要集中西北、东和偏南方向。

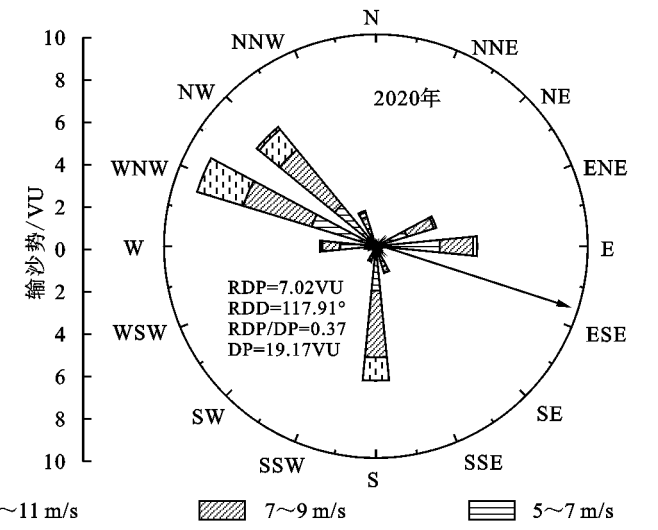
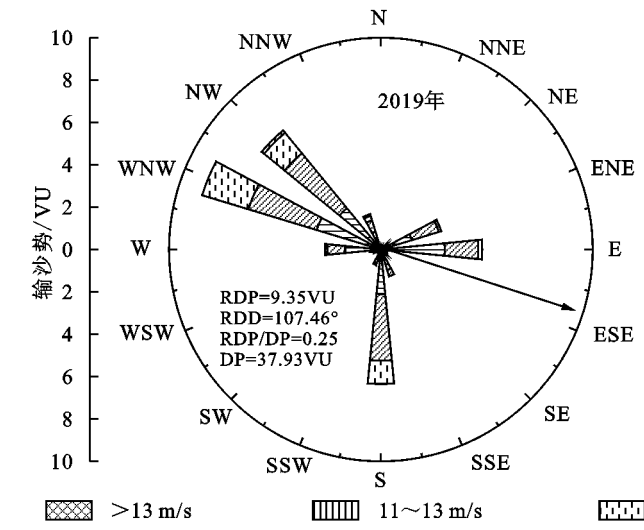


图 3 输沙势分布

4 沉积物粒度特征

4.1 沉积物空间分布

如图 4 所示,1 号采样点 5 cm 深度处沉积物的粒径主要分布在 1.26~1.76 Φ,百分含量为 65.03%。随着深度的增加,上述范围内的颗粒百分含量有增加趋势,分别为 70.68%,84.69%,74.03%,78.46%,且分布范围扩大至 1.5~2.76 Φ,但平均粒径呈减小趋势。进一步分析不同深度沉积物百分含量分布曲线可知 5 cm 和 50 cm 沉积物的百分含量分布曲线峰形较窄,其余深度沉积物分布曲线峰形较宽,但均为单

峰态分布。从累计百分比曲线可以看出,5 cm 和 50 cm 深度处沉积物的累计百分比增长速率最快,斜率最大,表明该深度的土壤粒径分布最为集中。

与 1 号采样点沉积物百分含量分布曲线相比,2 号采样点沉积物分布曲线也为单峰态分布,但峰态较 1 号窄,粒径分布范围也存在差异。其中,5 cm 深度处沉积物粒径范围集中在 2.0~2.51 Φ,百分含量为 74.71%,其余深度分布范围集中在 1.76~2.76 Φ,分布范围较 1 号点宽,百分含量集中在 70.77%~85.33%。与 1 号采样点累计百分比曲线相比,2 号采样点所有深度沉积物的累计百分比曲线相似性较 1 号高。

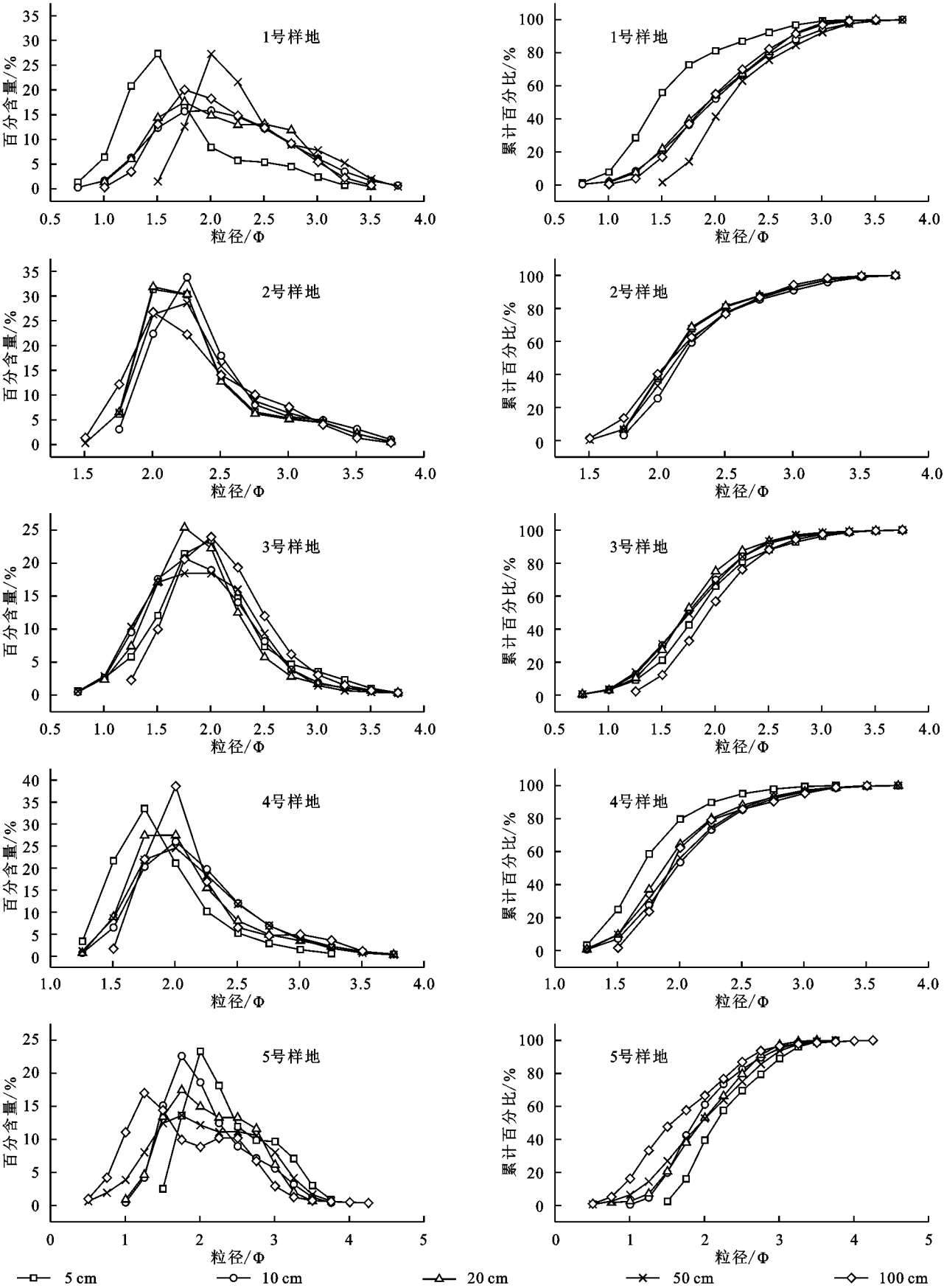


图 4 沉积物粒径百分含量和累积频率

3 号采样点粒径分布范围集中在 1.25~2.5 Φ , 4 号采样点粒径分布范围集中在 1.5~2.5 Φ , 均为单峰态分布。3 号采样点不同深度沉积物的累计百分比曲线差异性较小, 4 号采样点 5 cm 和 100 cm 深度处

的沉积物粒径分布相对集中,其他深度沉积物累计百分比曲线相似性较高。

5号采样点沉积物粒径分布范围较上述4个采样点宽,分布范围为 $1.0\sim 2.76\Phi$,但粒径分布曲线相似性较高。受区域内植被影响,5 cm和10 cm深度沉积物百分含量分布曲线呈单峰态,20,50,100 cm深度沉积物粒径百分含量分布曲线呈双峰态。分析累计百分比曲线可知20,50,100 cm处累计百分含量图中出现两次斜率陡增,拐点均为粒径分布的峰值处。

综上可知,上述所有采样点粒径范围集中在 $1.0\sim 2.76\Phi$,即所有颗粒均属于沙,以细沙和中沙为主,不含粉沙和砾石。除5号采样点部分深度沉积物百分含量分布曲线呈双峰态,其余均为单峰态,峰形较窄,说明沉积物经过了充分分选,离物源区相对距离远。5号采样点从表层至深层粒径百分含量分布曲线由单峰态逐渐过渡为双峰态,说明区域风况发生过改变,由早期两组主导风向转变为近期的单组风向。

4.2 沉积物垂直分布

分析不同采样点相同深度沉积物粒度特征可知(图4):5个采样点相同深度沉积物百分含量分布曲线和累计百分比曲线存在差异。以5 cm深度沉积物百分含量分布曲线为例,1号、2号和4号沉积物百分含量分布曲线呈单峰态,峰形略窄,3号采样点百分含量分布曲线峰态较宽,5号采样点为双峰态分布。分析峰值所对应的粒径大小,可知2号、3号和5号采样点峰值处粒径最大,4号采样点其次,1号采样点最小。

与5 cm深度沉积物百分含量分布曲线趋势相比,1号、3号和5号采样点10 cm深度处沉积物百分含量分布曲线峰态平缓,即沉积物粒径分布范围较广,分选性较差,2号和4号采样点10 cm深度处沉积物粒径分布范围较窄,沉积物粒径分布较为集中,优势粒径位于 2.25Φ 。

1号和5号采样点20 cm深度处沉积物土壤粒径分布规律存在相似性,两者分布相对集中,如 $1.5\sim 2.76\Phi$ 粒径范围百分含量分别为84.69%,84.06%。其他采样点20 cm深度处沉积物粒径则集中分布在 $1.5\sim 2.5\Phi$ 。除5号采样点50 cm和100 cm深度处沉积物百分含量分布曲线呈双峰态,其余均呈单峰态分布。

4.3 粒度参数

平均粒径、分选系数、偏度和峰度是沙粒的基本参数特征,是解析风沙环境的重要参考^[1],见表1。通过分析各样品粒度参数可知,1号采样点除5 cm深度处沉积物以中沙为主,其余以细沙为主。随着深度的增加,粗沙比例逐渐减小,20 cm深度后粗沙消失。除5 cm深度处沉积物中沙百分含量为71.44%

和50 cm深度中沙百分含量为14.1%外,其余深度沉积物中沙百分含量均维持在30%左右。细沙和极细沙含量随深度增加呈现先增加后减少趋势,50 cm深度处,细沙和极细沙百分含量最大,分别为70.38%,15.52%。沉积物平均粒径随着深度增加逐渐变小,分选性和峰度则无明显变化规律,分选性均为较好,偏度为正偏,峰态属于宽峰态。

2号采样点以细沙为主,粗沙含量极少。随着深度的增加,中沙百分含量呈上升趋势,细沙百分含量呈下降趋势,极细沙含量与深度无明显相关性。与1号采样点相比,2号采样点平均粒径偏小,说明此地区沉积物受风力侵蚀较弱,样品分选性除10 cm深度分选性最差外,其余沉积物分选性很好,偏度为正偏和极正偏。

3号采样点沉积物以中沙和细沙为主,沉积物平均粒径介于 $0.24\sim 0.29$,与深度相关性较小。除5 cm深度处沉积物分选性中等,其余分选性好或较好,正偏或极正偏,宽峰态分布。

4号采样点仍以中沙和细沙为主,且细沙含量大于中沙。随着深度的增加,中沙百分含量逐渐减小,细沙百分含量增加,说明此处前期风力侵蚀能力较弱,后期风能环境增强,粒度变粗。沉积物平均粒径随深度增加逐渐变小,沙粒逐渐变细。分析粒度参数可知10 cm、20 cm和50 cm深度处沉积物分选性较好,5 cm和100 cm深度处沉积物分选性很好,百分含量分布曲线为宽峰和中等峰态。

5号采样点5 cm深度处沉积物以细沙为主,占比为63.26%,极细沙百分含量是所有样品的最大值,达到20.63%。除100 cm深度处沉积物以中沙为主外,10 cm、20 cm和50 cm深度处沉积物均以细沙为主。各粒级百分含量随深度无明显变化规律,分选性随深度先变好后变差,表明区域风沙环境存在一定变化。50 cm深度处沉积物为对称分布,其余为极正偏分布,峰态为宽峰或常峰。

5 风沙流结构

风沙流结构是指沙量随高度的变化特征,是沙粒运动的基本形式和过程。风沙流结构可以反映沙粒的跃移高度和运动轨迹,是揭示区域风沙活动的重要参数,更是设置风沙工程的重要参考标志之一^[3]。风沙流结构与地形、沙粒粒径组成、湿度密切相关,但气流的波动和速度对其影响更大。依据野外多梯度口琴式集沙仪的观测数据可知:研究区内的风沙流主要集中在30 cm以下,占总输沙量的89.46%。地表0—20 cm高度内的输沙量占总输沙量的63.81%,进一步拟合输沙量与高度的关系可知两者符合指数函数,见图5。

表 1 沉积物粒度特征

样地	深度/ cm	粗沙	中沙	细沙	极细沙	粒度参数			
		(0.5~1 mm)/%	(0.25~0.5 mm)/%	(0.125~0.25 mm)/%	(0.063~0.125 mm)/%	平均 粒径/mm	分选 系数	偏度	峰度
1	5	1.34	71.44	24.08	3.14	0.34	0.58	0.32	0.85
	10	0.31	36.00	51.67	12.02	0.25	0.74	0.15	0.76
	20	0.00	39.39	52.74	7.87	0.25	0.64	0.18	0.77
	50	0.00	14.10	70.38	15.52	0.22	0.52	0.32	0.86
	100	0.00	36.93	54.58	8.49	0.25	0.62	0.19	0.77
2	5	0.31	36.00	51.67	12.02	0.25	0.74	0.15	0.76
	10	0.00	3.09	82.20	14.71	0.26	0.65	0.27	0.82
	20	0.48	50.46	45.02	4.04	0.24	0.55	0.31	0.84
	50	0.00	27.50	64.68	7.82	0.29	0.67	0.26	0.81
	100	0.00	42.42	47.18	10.40	0.21	0.44	0.39	0.94
3	5	0.64	41.89	50.21	7.26	0.27	0.70	0.22	0.78
	10	0.48	50.46	45.02	4.04	0.24	0.55	0.31	0.84
	20	0.63	52.18	43.26	3.93	0.29	0.66	0.27	0.81
	50	0.58	48.81	47.68	2.93	0.29	0.67	0.25	0.80
	100	0.00	32.85	61.48	5.67	0.25	0.54	0.33	0.86
4	5	0.00	58.53	39.38	2.09	0.30	0.42	0.41	0.97
	10	0.00	27.50	64.68	7.82	0.29	0.67	0.26	0.81
	20	0.00	37.07	55.89	7.04	0.26	0.52	0.36	0.89
	50	0.00	31.66	61.73	6.61	0.25	0.54	0.32	0.85
	100	0.00	23.68	66.66	9.66	0.25	0.43	0.41	0.96
5	5	0.00	16.11	63.26	20.63	0.21	0.57	0.29	0.83
	10	0.00	42.42	47.18	10.40	0.21	0.44	0.39	0.94
	20	1.63	36.39	53.18	8.80	0.21	0.44	0.39	0.94
	50	2.54	37.97	45.05	14.44	0.25	0.84	0.31	0.74
	100	5.19	52.45	36.01	6.35	0.31	0.83	0.30	0.84

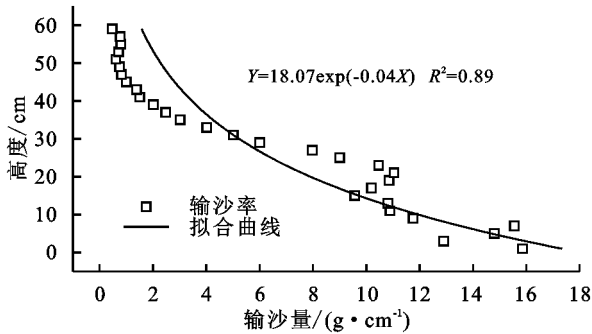


图 5 风沙流结构

6 讨论与结论

表层沉积物的粒径分布曲线及特征参数对于研究区域的风况环境和沉积环境有着重要指示意义^[18]。研究表明:沿乌玛高速公路自东北向西南方向,沉积物粒径范围集中在1.0~2.76 Φ,以细沙和中沙为主,不含粉沙和砾石。除5号采样点20 cm、50 cm和100 cm深度沉积物的百分含量分布曲线呈双峰态,其余样品全部表现为单峰态,说明区域内沉积物经过了充分分选和运移,局地沉积环境由早期的两组主导风向转变为近期的单组风向,主要原因是包兰铁路防护体系的影响。随着深度的增加,1号采样点的粗沙百分含量减小,细沙和极细沙含量随深

度增加呈先增加后减少趋势。2号采样点中沙百分含量呈现上升趋势,细沙百分含量呈下降趋势。3号采样点和4号采样点沉积物以中沙和细沙为主,随着深度的增加,4号采样点中沙百分含量逐渐减小,细沙百分含量增加。5号采样点沉积物以细沙为主,各粒级百分含量随深度无明显变化规律。区域0~5 m/s等级的风速频次占全年风速的90.45%,仅有不足10%的频次分布在其他等级,起沙风向集中在西北、东和偏南方向,合成输沙方向为偏东南方向,属于低风能环境。区域内沙粒的运移高度集中在30 cm以下,且超过50%的沙粒在20 cm高度以下运移,即本区域内沙粒的跳跃高度不超过20 cm^[3],建议区域固沙措施的设置高度不低于20 cm。

综上可知,沿乌玛高速公路腾格里沙漠段,沉积物粒径分布范围、百分含量及累计曲线存在一定的差异性,区域风况环境发生过变化。但从固定气象观测设备的分析结论可知上述差异性较小,对乌玛高速公路的影响范围和程度也弱,故在防护体系的设置中,设计者也应恰当考虑,建议收集当地长时间序列的气象资料,研究其风能环境变化趋势,并在公路沿线增加固定气象观测点,获取更多更详细的风况资料,继而为防护体系的设置和高速公路的安全运营保驾护航。

参考文献:

[1] 黄磊,张余,何明珠,等.腾格里沙漠东南缘风沙环境及其退交通干线生态防护体系的影响[J].水土保持通报,2018,38(2):135-139.

[2] 左合君,董智,魏江生,等.沙漠地区高速公路防沙体系效益分析[J].水土保持学报,2005,12(6):222-225.

[3] 张克存.风沙活动特征及其工程防沙主要措施研究[D].北京:中国科学院大学,2006.

[4] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.

[5] 张正偲,董治宝,管梦鸾.腾格里沙漠东南缘反向沙丘形态演化过程[J].中国沙漠,2018,38(4):709-715.

[6] 哈斯,王贵勇,董光荣.沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义[J].沉积学报,2001,19(1):96-100.

[7] 安志山,张克存,谭立海,等.不同高度阻沙栅栏的防沙效益野外观测[J].水土保持通报,2011,31(6):37-41.

[8] Ping L, Narteau C, Dong Z, et al. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment[J]. Nature Geoscience, 2014,7(2):99-103.

[9] 甄计国.腾格里沙漠东南缘沙坡头地区流沙治理后地表形态的变化[J].中国沙漠,1987,7(1):9-17.

[10] 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.

[11] 马风云,李新荣,张景光,等.沙坡头固沙植被若干土壤物理因子的空间异质性研究[J].中国沙漠,2005,25(2):207-215.

[12] 康文岩,王立,屈建军,等.包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟[J].中国沙漠,2020,40(2):94-99.

[13] 庞红丽,程捷,丛殿阁,等.腾格里沙漠北缘沙丘粒度特征即区域差异分析[J].宁夏大学学报:自然科学版,2015,36(3):267-273.

[14] 徐丽恒,王继和,李毅,等.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J].中国沙漠,2008,28(4):691-695.

[15] 贾晓红,李新荣,王新平,等.流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J].水土保持学报,2003,17(4):46-50.

[16] 陈玉福,董鸣.毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析[J].植物生态学报,2001,25(3):265-269.

[17] 张正偲,董治宝.腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J].中国环境科学,2011,31(11):1789-1794.

[18] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2001,26(11):1237-1248.

[30] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing and Environment,1979,8(2):127-150.

[31] 梁华为.直接从双峰直方图确定二值化阈值[J].模式识别与人工智能,2002,15(2):253-256.

[32] Hsieh P F, Lee L C, Chen N Y. Effect of spatial resolution on classification errors of pure and mixed pixels in remote sensing[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2002,39(12):2657-2663.

[33] 郭震冬,顾正东,许盛,等.利用无人机技术进行社区植被覆盖率调查[J].北京测绘,2017(5):88-91.

[34] 李德仁,王密,潘俊.光学遥感影像的自动匀光处理及应用[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(9):753-756.

[35] 刘建涛.光学遥感影像的自动匀光处理及应用[D].西安:长安大学,2008.

[36] 王密,潘俊.一种数字航空影像的匀光方法[J].中国图象图形学报,2004,9(6):104-108,127.

[37] 史宁.基于 Mask 方法的无人机航拍影像匀光处理[D].长春:吉林大学,2013.

[38] 程俊毅,张显峰,孙敏,等.基于空地协同采样的植被覆盖度随机森林估算方法[J].北京大学学报:自然科学版,2020,56(1):143-154.

[39] 卢建华.基于直方图阈值法的遥感图像分割算法研究[D].福州:福建农林大学,2013.

[40] Ali Z M, Abdullah M M, Asadalla N B, et al. A comparative study of remote sensing classification methods for monitoring and assessing desert vegetation using a UAV: based multispectral sensor[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020,192(6):1-14.

[41] 黄艳伟,朱红雷,郭宁戈,等.基于无人机多光谱影像的冬小麦倒伏提取适宜空间分辨率研究[J].麦类作物学报,2021,40(2):1-8.

[42] Cruzan M B, Weinstein B G, Grasty M R, et al. Small unmanned aerial vehicles (micro-uavs, drones) in plant ecology[J]. Applications in Plant Encees,2016,4(9):16-25.

[43] Bipul N, Teerayut H. Deep learning based banana plant detection and counting using high-resolution red-green-blue (RGB) images collected from unmanned aerial vehicle(UAV)[J]. Plos One,2019,14(10):1-23.

(上接第 182 页)