

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.006; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.006.

李良英, 王振强, 王旭, 等. 乌玛高速沙漠段风沙环境特征及格状沙丘移动规律[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 160-171.

Li Liangying, Wang Zhenqiang, Wang Xu, et al. Characteristics of wind-sand environment and the movement pattern of lattice dunes in the desert section of Wuhai-Maqin highway[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 160-171.

乌玛高速沙漠段风沙环境特征及格状沙丘移动规律

李良英, 王振强, 王旭, 辛国伟, 李琦, 吕乐乐

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730000)

摘要: [目的] 沙丘移动与风沙环境特征和沙丘形态具有直接关系, 探究多种因素作用下的格状沙丘移动规律, 能为沙区公路风沙防治提供科学依据。 [方法] 以乌玛高速沙漠段格状沙丘为研究对象, 基于当地气象数据、Google Earth 卫星影像, 研究了 2019—2021 年乌玛高速沙漠段 K167+300, K172+300, K177+300 里程处风沙环境及格状沙丘的形态演变和移动规律。 [结果] (1) 研究区年平均起沙风速介于 6.07~6.84 m/s, 春夏为主要输沙季节, 主风向为西北风, 次风向为东南风; 年输沙势介于 31.77~38.89 VU, 方向变率指数(RDP/DP)介于 0.73~0.78, 属于低风能环境、中变率风况。(2) 研究区自东北向西南方向, 格状沙丘主梁向东偏移, 副梁向南偏移, 主副梁走向几乎保持垂直, 沙丘形态整体上变化较小; 格状沙丘的主副梁长度、主副梁间距、沙丘高度均呈现出增加的趋势, 主副梁长度增长率、主副梁偏移率呈减小趋势。(3) 沙丘移动方向介于 140.43°~152.64°, 与年 RDD 变化基本一致, 即向东南偏移; 沙丘平均高度介于 5.24~8.31 m, 沙丘移动速率介于 2.31~2.86 m/a, 两者表现为负相关关系。(4) 输沙势、年均温度与沙丘移动速率为正相关关系, 相较而言, 年均温度对沙丘移动速率的影响更为显著; 年均降水量、植被覆盖度与沙丘移动速率为负相关关系, 其中年均降水量对移动速率的影响尤为重要。 [结论] 格状沙丘的移动与当地风况、降水量、温度、植被覆盖度及沙丘自身形态息息相关, 其中输沙势及温度增加会加速沙丘前移, 不利于对风沙的防治, 而提高降水量及植被覆盖度, 对防治沙丘移动引起的公路风沙灾害具有积极作用。

关键词: 格状沙丘; 输沙势; 空间插值; 沙丘移动; 形态演变

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0160-12

Characteristics of wind-sand environment and the movement pattern of lattice dunes in the desert section of Wuhai-Maqin highway

Li Liangying, Wang Zhenqiang, Wang Xu, Xin Guowei, Li Qi, Lyu Lele

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: [Objective] The movement of sand dunes is directly related to the characteristics of wind-sand environment and the morphology of sand dunes. The aims of this study are to explore the movement pattern of lattice sand dunes under the action of multiple factors, and to provide scientific basis for the prevention and control of wind-sand on highways in sandy areas. [Methods] Based on the local meteorological data and Google Earth satellite images, the wind-sand environment and the morphological evolution and movement pattern of lattice dunes at K167+300, K172+300 and K177+300 in the desert section of Wuhai-Maqin Highway from 2019 to 2021 were studied. [Results] (1) The annual average sand-driving wind speed in the study area ranged from 6.07 to 6.84 m/s. Spring and summer were the main sand-transporting seasons, with the main wind direction being northwest and the secondary wind direction being southeast. The annual sand transport potential was between 31.77 VU and 38.89 VU, and the directional variability index (RDP/DP) was between 0.73 and 0.78, which belonged to low wind energy environment and medium variability wind condition. (2) From the northeast to

收稿日期: 2023-11-14

修回日期: 2024-03-18

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“沙区铁路机械防沙措施的失效机理及评估方法研究”(12302511); 宁夏交通运输厅科技项目(20200173); 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)

第一作者: 李良英(1979—), 男, 山西原平人, 副教授, 主要从事道路交通安全研究。E-mail: liliangying@mail.lzjtu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

the southwest of the study area, the main beam of the lattice sand dune shifted eastward, and the auxiliary beam shifted southward. The direction of the main and auxiliary beams was almost vertical, and the shape of the sand dune changed little as a whole. The length of the main and auxiliary beams, the distance between the main and auxiliary beams, and the height of the dune all showed an increasing trend, while the growth rate of the length of the main and auxiliary beams and the offset rate of the main and auxiliary beams showed a decreasing trend. (3) The direction of dune movement was between 140.43° and 152.64° , which was basically consistent with the annual RDD change, that is, moving southeastward. The average height of the dunes ranged from 5.24 m to 8.31 m, and the dune movement rate ranged from 2.31 m/a to 2.86 m/a, which showed a negative correlation. (4) There was a positive correlation between sand transport potential, annual average temperature and sand dune movement rate. In contrast, annual average temperature had a more significant effect on sand dune movement rate. The average annual precipitation and vegetation coverage were negatively correlated with the moving rate of sand dunes, and the influence of average annual precipitation on the moving rate was particularly important. [Conclusion] The movement of checkerboard dunes is closely related to local wind conditions, precipitation, temperature, vegetation coverage and dune morphology. The increase of sand transport potential and temperature will accelerate the forward movement of dunes, which is not conducive to the prevention and control of wind and sand. Increasing precipitation and vegetation coverage has a positive effect on the prevention and control of highway wind and sand disasters caused by dune movement.

Keywords: latticed dune; sand potential; spatial interpolation; dune movement; morphological evolution

乌玛高速穿越腾格里沙漠东南部,境内以格状沙丘为主要类型的流动沙丘对乌玛高速公路建设和安全运营带来了极大挑战^[1],而风能环境是评价区域风沙活动强度的重要方法,风沙是引起灾害的根本来源^[2-3],沙丘移动是沙漠化的主要运动形式,对公路主要危害有风蚀、沙埋等,同时沙丘形态演变及沙丘的移动方向、移动速度这些均为防风固沙工程提供重要的参考指标^[4-6]。

近年来,国内外不少学者对不同类型的沙丘进行了研究,大多集中于新月形以及格状沙丘。对于新月形沙丘的研究程度较高,乌友罕等^[7]通过模拟试验的方法研究了新月形沙丘形态变化。邹桐等^[8]基于两期高分一号卫星影像和气象资料,得知新月形沙丘链可改变气流运动轨迹和减弱风力强度,对新月形沙丘移动产生影响。李爱敏^[9]用华测 X90 GNSS 接收机开展地形三维坐标详测,研究了新月形沙丘移动速度与移动方向、沙丘高度、沙丘走向的函数关系。罗霖炎等^[10]利用 CFD 数值模拟的方法,研究了在不同几何参数和来流风速下新月形沙丘表面的流场特征,结果表明新月形沙丘高度越高、迎风坡坡度越大。对于格状沙丘,邸耀全等^[11]认为格状沙丘是在多风向作用下形成的,主梁是主风作用下的横向新月形沙丘链,副梁是两个或两个以上锐角相交的次风向形成纵向沙丘。Wilson^[12]提出横纵向气流在沙质地表的相互交织作用下形成格状沙丘。刘英姿等^[13]通过研究格状沙丘的形态成因,得出腾格里沙漠东南边缘的格

状沙丘主要是在主风向西北风的作用下形成的横向沙丘和在次风向东北风与主风向相互交替作用下形成的纵向沙丘叠置而成的。屈建军等^[14]通过地形测量对格状沙丘移动规律和形态变化进行分析,发现沙丘移动表现为格状沙丘主梁沿主风向前后摆动,以缓慢的速度向前推移,且移动量为 $2\sim 5$ m/a。哈斯等^[15-16]通过野外观测的方法对格状沙丘的区域气流、表面气流、沉积物粒度特征和内部沉积构造等进行了研究。杨馥宁等^[17]利用影像资料对两种格状沙丘的形态变化和移动特征进行了研究,发现沙丘的体积是影响沙丘移动速率差异的主因。虽然对格状沙丘的研究很多,但大多集中于某个沙漠中沙丘的粒度特征、形成原因^[18]、风能环境^[19]及风沙活动特征^[20-21],对公路沿线风沙环境和格状沙丘形态变化及移动规律方面的研究程度较低。

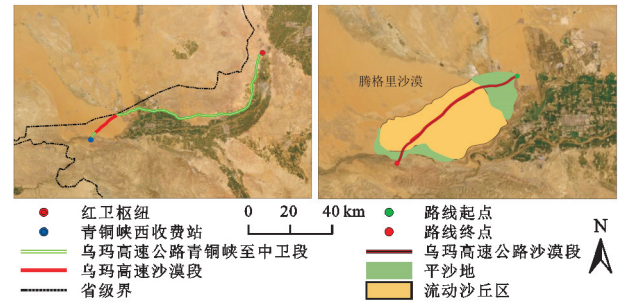
本文以乌玛高速沙漠段格状沙丘为研究对象,利用当地气象数据及 Google Earth 卫星影像,探讨了 2019—2021 年乌玛高速沙漠段不同里程处的风沙环境特征,揭示了格状沙丘的形态变化与移动规律,分析了影响沙丘移动速率的主要因素,研究结果可为沙区公路风沙防治提供参考和借鉴。

1 研究区概况及数据采集

1.1 研究区概况

风沙区段道路位于宁夏回族自治区中卫市西北侧腾格里沙漠内,路段长 25.58 km,起点(K157+580)位

于中卫迎水桥南,自东北向西南方向穿越腾格里沙漠,终点(K183+160)止于红卫枢纽(图 1)。地理位置介于东经 104°49′1″—105°6′29″,北纬 37°26′51″—37°36′14″,属中卫沙坡头区^[22]。道路周围存在大量格状沙丘链,地形起伏较为明显,风大且沙源丰富的环境条件使风积沙在公路沿线分布广泛。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)3333 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 乌玛高速沙漠段地理位置
Fig. 1 Location of the desert section of the Wuhai-Maqin Expressway

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 在现场流动沙丘区腹地 K171+800 位置处布设了野外自动气象站进行气象数据采集,将气象仪 2019—2021 年的气象数据进行统计,计算 16 方向起沙风频率及输沙势,并与相对应的 ERA5 数据进行比值分析(图 2),所得比值均在“1”上下轻微波动,说明 ERA5 数据基本符合现场情况,验证了 ERA5 数据的准确性。

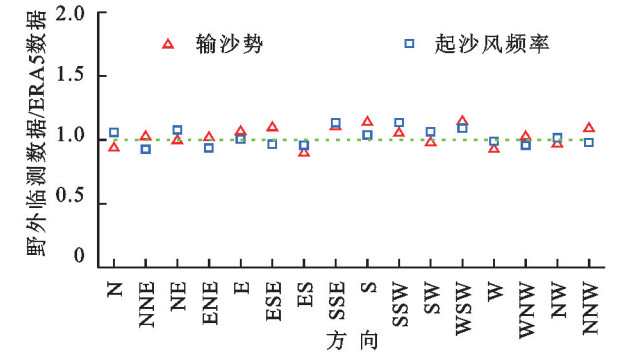


图 2 K171+800 处气象站及野外实测与 ERA5 数据比值
Fig. 2 The ratio of K171+800 meteorological station and field measurement to ERA5 data

自东北向西南方向选取流动沙丘区三处线路里程(K167+300,K172+300,K177+300,图 3A),由于 3 个里程位置处没有相应野外气象仪,故利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)官网,获取各里程处气象数据,其时空分辨率分别可达到 1 h 和 0.01°×0.01°,所获得的 ERA5 数据距地面高度 10 m,时间范围为 2019—2021 年(青铜峡至中卫段施工至通车时间),气象要素包括风速、风向、温度、降水量、蒸发量等。

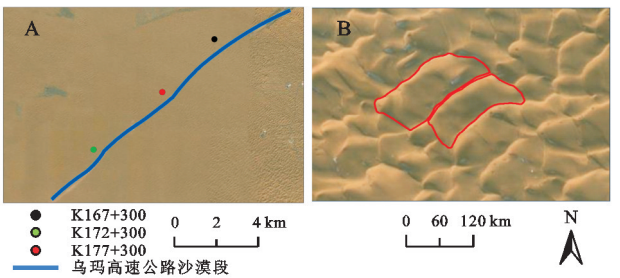


图 3 监测区位置及格状沙丘形态
Fig. 3 The location of the monitoring area and the lattice dune morphology

1.2.2 影像数据 数据来源于 Google Earth 卫星影像。将 Google Earth 影像在 Arcmap 中加载,在 Word Imagery Wayback 显示 2019—2021 年每月的历史影像,利用 2019-01-09,2021-12-21 两个时期的卫星影像进行格状沙丘形态(图 3B)参数的测量,卫星影像信息如表 1 所列。

表 1 卫星影像信息
Table 1 Information of satellite images

里程	时期	中心坐标	区域
K167+300	2019-01-09	104.97°E,37.56°N	流动沙丘区
K172+300	2021-12-21	104.91°E,37.52°N	流动沙丘区
K177+300		104.89°E,37.48°N	流动沙丘区

1.3 研究方法

1.3.1 风况 起沙风对沙丘的形态、移动速率和方向有着重要影响。根据该区域已有研究成果,2 m 高度起动风速为 5 m/s^[23]。由于野外自动气象站仪器风杯高度为 2 m,而对于起沙风风速与临界起动风速的要求均为距地面 10 m 处的风速,所以在进行输沙势计算时,需将 2 m 高度的风速观测结果换算为 10 m 高度的风速。根据吴正等^[24]建立的速度与高度的正相关公式,梁晓磊等^[25]通过进一步推导,得到 2 m 与 10 m 风速换算的对数演化公式为:

$$U_{10}=U_2 \frac{\ln Z_{10}-\ln Z_0}{\ln Z_2-\ln Z_0} \tag{1}$$

式中: U_2 和 U_{10} 分别代表距地表 2 m 和 10 m 高度处的风速(m/s); Z_0 为地表粗糙度(m)。

输沙势 DP(Drift Potential)可反映某一方位起沙风在一定时间内搬运沙的能力,是用来衡量区域风沙强度的重要指标,通常使用 Fryberger-Dean^[26] 公式计算输沙势。

$$DP=V^2(V-V_i)t \tag{2}$$

式中:DP 为输沙势(VU); V 为起沙风风速的平均值(n mile/h); V_i 为当地沙粒临界起动风速(n mile/h); t 为起沙风作用时间,以频率表示(%)。

RDP (Resultant Drift Potential)为合成输沙势,

RDD 为合成输沙方向(Resultant Drift Direction),方向变率指数 RDP/DP 为合成输沙势与输沙势的比值,用以表示该地区的风向组合情况及风信复杂程度。

表 2 风能环境及风向变率等级划分标准

Table 2 Classification criteria for wind energy environment and wind direction variability

输沙势 DP	风能环境	RDP/DP	风向变率	对应风况
<200 VU	低等风能环境	<0.3	高变率	复杂或钝双峰型
200~400 VU	中等风能环境	0.3~0.8	中变率	钝双峰型或锐双峰型
>400 VU	高等风能环境	>0.8	低变率	宽单峰型或窄单峰型

1.3.2 沙丘移动速率及方向 格状沙丘是一种沙丘类型,若主副梁间距的比值大于 0.8 或小于 1.2,则为方格状,比值大于 1.2,则为长格状^[13]。格状沙丘形态主要通过 Google Earth 高清影像目视解译量取。为了消除卫星历史影像的偏移,对影像进行几何校正,以获取更为精确的沙丘形态参数和移动特征。形态参数包括主副梁长度(L_1, L_2)、主梁高度(H)、主副梁走向以及主副梁间距 S_1, S_2 (图 4A)。沙丘主梁高度(H)采用经验公式 $H=L_D\times\tan 32^\circ$ 进行估算, L_D 为主梁背风坡的水平长度(m), 32° 为格状沙丘背风坡的休止角^[17]。

测量沙丘移动特征时,将主副梁端点之间对角线的交点作为特征点,记录其在两期影像间隔时间移动的距离 d (m)和方位 $\theta(^{\circ})$ (图 4B)。

沙丘移动速率= d/t (3)

移动方向= θ (4)

式中: t 为两期影像的时间间隔。

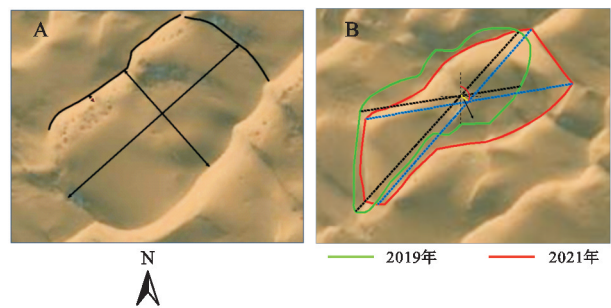


图 4 格状沙丘的形态参数及移动

Fig. 4 Morphological parameters and movement of lattice du

1.3.3 沙丘移动影响因素 根据已有研究成果^[27]得知沙丘高度、输沙势、温度、降水、植被覆盖度在影响沙丘移动速率方面占主要地位。将与沙丘移动速率具有显著相关性的沙丘高度(沙丘高度可间接代表沙丘体积)视为影响沙丘移动速率的内部因素,将输沙势、温度、降水、植被覆盖度(采用目前应用最广泛的归一化植被指数 NDVI 用以表征植被覆盖度,NDVI 越大,植被覆盖度越高)视为外部因素。

对于沙丘高度及移动速率,分别在 20 个沙丘样点逐一进行空间插值,由于密度较大、空间分布较均匀,故采用 IDW(反距离权重法);对于气象数据,以

K167+300,K172+300,K177+300 区域中心为样点进行空间插值,由于沙丘样点较为稀疏、具有空间自相关性等特点,所以采用经验贝叶斯克里金法进行插值,建立沙丘移动速率和各影响因素等值线图,得出每个沙丘样点移动速率及对应各影响因素值的大小。

2 结果与分析

2.1 气候条件

在 2019—2021 年,研究区的平均气温维持在 10.22~10.86℃,而每年的冬季往往是极端最低气温出现的时期,2021 年 1 月达到最小值-23.64℃;极端最高气温一般出现在每年的夏季,2019 年 7 月达到最大值 38.26℃。通过对比不同季节气温变化(表 3),发现秋季温差变化幅度最大,可达 44.77~45.47℃,其次为冬、春两季,最大温差变化幅度可达 39.14~40.80℃,夏季温差变化幅度最小,为 29.02~29.61℃。

表 3 2019—2021 年不同里程处四季温度变化

Table 3 Temperature changes of four seasons at different mileages in 2019—2021

里程	参数	春	夏	秋	冬
K167+300	最高温度	32.36	38.26	32.75	17.35
	最低温度	-7.29	8.65	-12.72	-23.45
	平均温度	12.52	23.77	10.00	-3.13
K172+300	最高温度	31.92	37.75	32.34	16.92
	最低温度	-7.48	8.37	-12.92	-23.61
	平均温度	12.14	23.38	9.71	-3.29
K177+300	最高温度	31.45	37.13	31.89	16.48
	最低温度	-7.69	8.11	-12.88	-23.64
	平均温度	11.78	22.95	9.40	-3.53

研究区不同里程处 2019—2021 年的月平均蒸发量、降雨量、起沙风速如图 5 所示。9 月份月平均蒸发量最多,8 月、6 月次之,12 月份月平均蒸发量最少。年平均降水量为 89.91~96.19 mm,9 月份降水量最多,8 月、6 月次之,12 月份最少,和平均蒸发量分布情况一致。研究区东北向西南方向年平均起沙风速呈减小趋势,平均起沙风速最大值出现在 5 月,9 月平均起沙风速最小。

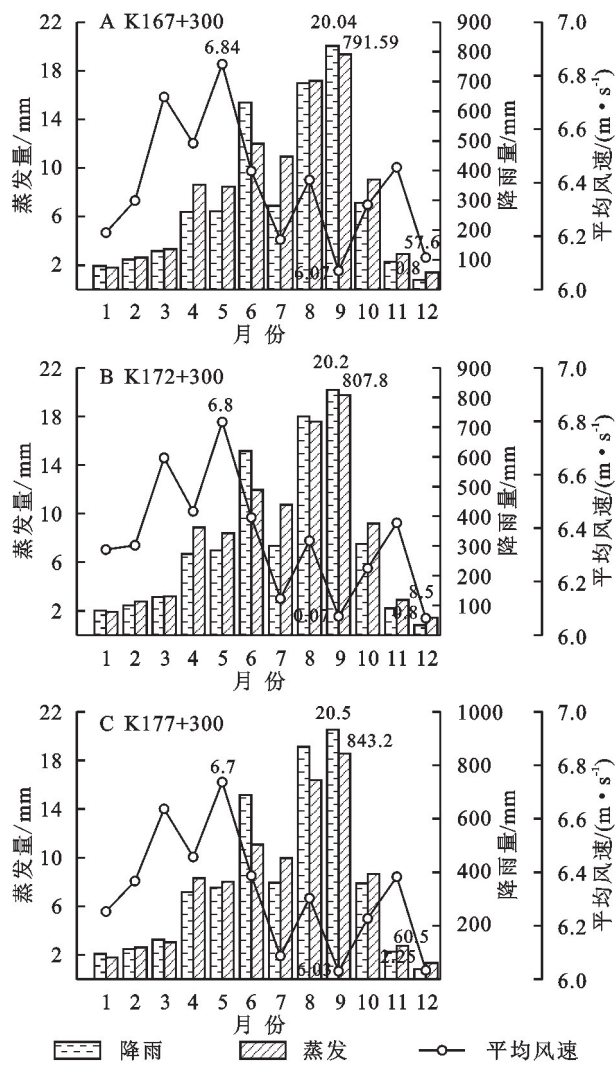


图 5 2019—2021 年不同里程处月平均起沙风速、降水量、蒸发量

Fig. 5 Monthly average wind speed, precipitation and evaporation at different mileages in 2019–2021

2.2 起沙风特征

2.2.1 年起沙风特征 2019—2021 年研究区内年起沙风频率自东北向西南方向呈现出递减的趋势,依次为 36.01%, 33.03%, 30.95%, 且存在明显的主次风, 风况复杂(图 6)。不同里程处最大起沙风频率与最大平均起沙风速均发生在 NW 方向, 其次为 WNW, NNW 方向。研究区自东北向西南, NW 方向起沙风频率逐渐增加, 依次为 29.27%, 30.78%, 31.71%, 而平均起沙风速保持稳定, 依次为 7.0 m/s, 7.0 m/s, 6.9 m/s, 3 个风向占全年起沙风频率的比例, 自东北向西南依次为 53.75%, 55.79%, 58.25%, 同时大于 10 m/s 的风速均出现在 WNW, NW, NNW 方向, 表现出高频大风的趋势, 所以研究区不同里程处主风向均为西北风。

2.2.2 季节起沙风特征 研究区内季节起沙风特征有着时空变化的特点。时间维度上, 不同里程处季节起沙风频率均呈现出春夏秋冬递减的趋势, 分别为

33.17%, 32.47%, 21.16%, 13.20% (K167+300); 34.53%, 32.54%, 20.36%, 12.57% (K172+300); 35.45%, 32.46%, 20.09%, 12.05% (K177+300), 平均起沙风速亦是如此(图 7A)。空间维度上, 季节平均起沙风速自东北向西南呈现出递减趋势(图 7B)。

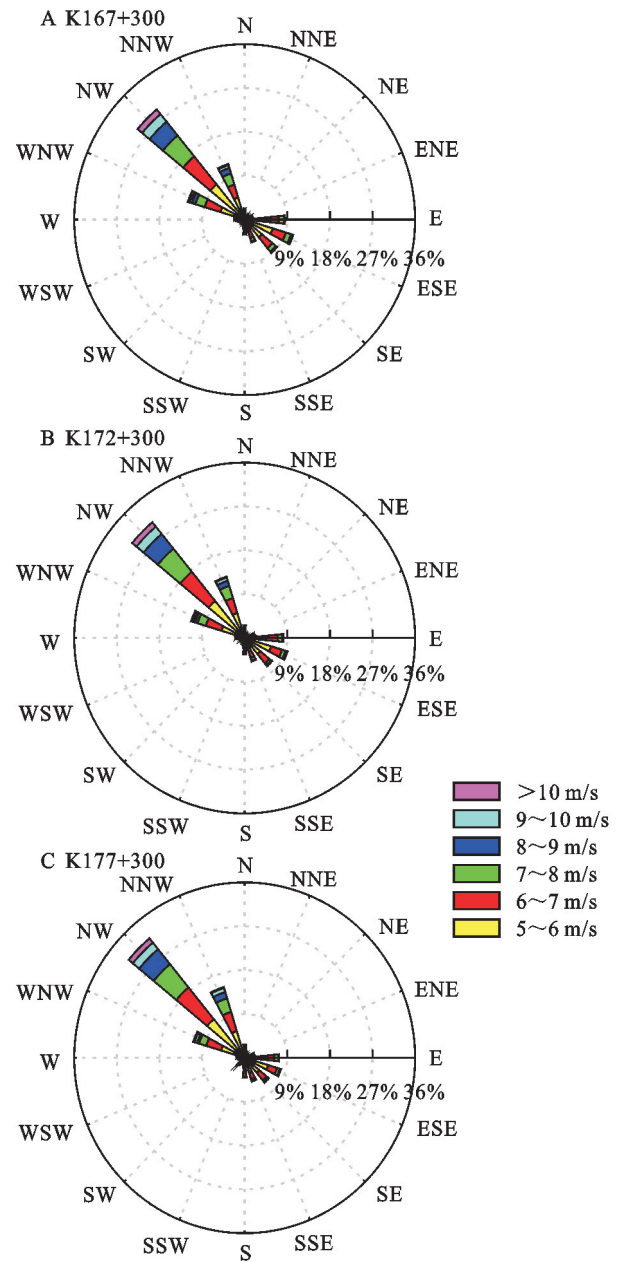


图 6 年起沙风特征

Fig. 6 Characteristics of annual sand wind

不同里程处春季主导起沙风向均为 NW, WNW, NNW, 次风向均为 ESE, E(图 8)。研究区自东北向西南方向, WNW, NW, NNW 风向起沙风频率呈现出增加趋势, 依次为 58.47%, 59.18%, 61.51%; ESE, E 风向起沙风频率呈现出减少趋势, 依次为 18.59%, 17.73%, 15.56%; 夏季除了全年起沙风频率均最高的 NW 方向外, 较春季而言, ESE, E, ES 方向起沙风频率显著增加, 自东北向西南 3 个方向起沙风频率呈现出递减的趋势,

分别为 40.51%, 36.87%, 33.96%; 秋冬和春季相似, 主起沙风向均为 NW, WNW, NNW, 不同的是秋季和春季

相比, SSE 方向起沙风频率有着明显的增加, 而冬季相比于其他三季, 次风向起沙风频率大幅度减小。

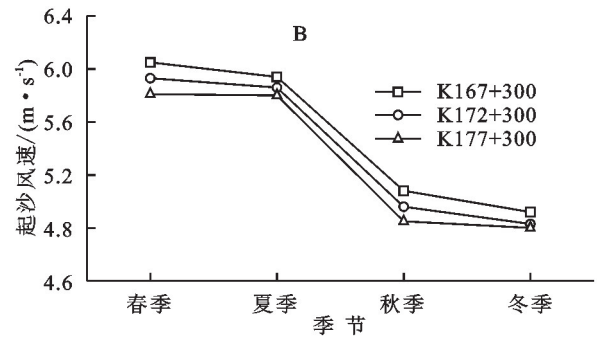
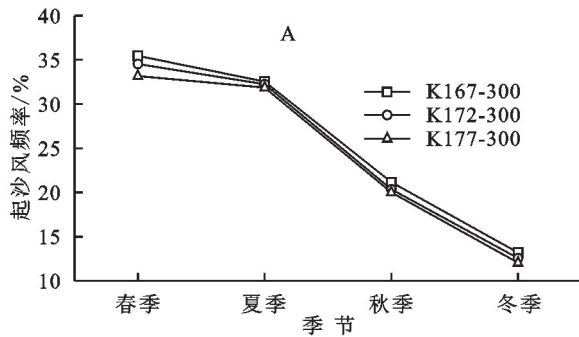


图 7 不同里程处季起沙风特征

Fig. 7 Characteristics of monsoon sandstorms at different mileages

2.3 输沙势

2.3.1 年输沙势 通过输沙势玫瑰图, 可以诠释风力作用下道路沙埋的动态趋势, 以及沙粒运动的方向性。研究区内自东北向西南方向, 年 DP, RDP, RDD 均呈减小趋势(图 9)。年 DP 依次为 38.89 VU, 34.78 VU, 31.77 VU, 与年起沙风频率保持一致, 属于低风能环境, 且输沙势较强的方向均表现在 NW, NNW, WNW; 年 RDP 依次为 28.22 VU, 26.05 VU, 24.77 VU; 年 RDD 依次为 152.53°, 150.91°, 150.04°, 表明输沙方向有着向东南偏移的趋势。年 RDP/DP 介于 0.73~0.78, 均属于中变率、锐双峰风况, 故研究区内风向较为稳定。

2.3.2 季节输沙势 受季节性风力影响, 沙尘常常以多重方向覆盖公路, 进而形成沙埋现象, 因此, 对不同季节输沙势变化进行研究具有重要意义。从图 10 可以看出, 季 DP, RDP, RDD 均呈现出时空变化特征。

时间维度上, 季 DP 随着春夏秋冬递减, 输沙活动强度依次减弱, 春夏两季为主要输沙季节。在输沙主导方向上, 季 DP 与年 DP 相同, 春季风向较为集中, 输沙更易于发生, 夏季风况复杂, 表现为多方向输沙。空间维度上, 自东北向西南方向季 DP 呈现出递减的趋势, 春季(57.52~67.48 VU)、夏季(35.14~44.65 VU)、秋季(22.05~28.20 VU)、冬季(13.87~17.42 VU)。

时间维度上, 季 RDP 呈现递减趋势, 同时在空间上自东北向西南方向季 RDP 也逐渐减小。RDD 在时间维度上呈现出先增大后减小的趋势, 夏季最大, 冬季最小, 空间上 RDD 整体保持一致, 表明输沙活动方向稳定。

RDP/DP 在时间维度上呈现出先减小后增大的趋势, 夏季最小, 冬季最大。春夏两季 RDP/DP 介于 0.62~0.79, 为中变率, 双峰型风况, 秋冬两季 RDP/DP 介于 0.79~0.92, 为低变率, 单峰型风况, 整体上四季风向比较稳定, 且自东北向西南方向季 RDP/DP 逐渐增大, 表明越靠近西南风向越为稳定。

2.4 沙丘形态变化

2019—2021 年研究区格状沙丘的主副梁长度、主副梁间距、沙丘高度均呈现出增加的趋势(表 4)。但不同里程处沙丘形态变化率有所差异, K167+300 处沙丘的主梁长度增长率、副梁长度增长率、主梁偏移率、副梁偏移率是 K172+300 处的 1.38 倍、1.25 倍、1.21 倍、1.22 倍, 是 K177+300 处的 1.89 倍、1.55 倍、1.74 倍、1.42 倍。沙丘高度平均值分别增加了 0.75 m, 0.66 m, 0.43 m, K167+300 处沙丘高度的增长率是 K172+300, K177+300 处的 1.14 倍和 1.74 倍。

研究区自东北向西南方向, 格状沙丘主副梁走向表明主梁向东偏移, 副梁向南偏移, 主副梁走向交角依次为 88.78°, 88.87°, 90.56°, 摆动幅度较小, 且主副梁走向几乎保持垂直, 故 2019—2021 年研究区内沙丘形态整体上变化较小。

形态测量结果显示在 2019—2021 年, 71.7% 的沙丘主梁长度增加, 不同里程处(依次为 K167+300, 172+300, 177+300)分别有 17, 15, 11 个; 63.3% 的沙丘副梁长度增加, 不同里程处分别有 16, 12, 10 个; 66.7% 的沙丘主梁走向角度减小, 不同里程处分别有 16, 12, 12 个; 70% 的沙丘副梁走向角度增大, 不同里程处各有 14 个。

从沙丘形态上看, 2019—2021 年研究区自东北向西南方向, 由于主风西北方向输沙势依次为 28.22 VU, 25.91 VU, 24.40 VU, 导致主梁长度增长率呈减小趋势, 同样由于次风东南方向输沙势依次为 6.66 VU, 5.10 VU, 3.89 VU, 副梁长度增长率亦减小, 但由于次风向输沙势较小, 不足以成为副梁长度变化的单一因素。可见主梁的形成主要依赖于主风, 副梁则是在主次风共同作用下形成, 与前人研究结果一致^[13]。

从沙丘走向上看, 研究区自东北向西南, 沙丘主梁向东偏移, 副梁向南偏移, 偏移的速率呈现出减缓的趋势。首先合成输沙方向(RDD)从 152.53°减少至

150.04°, 沙丘脊线随之摆动, 导致沙丘的主梁向东偏移, 副梁向南偏移。其次 2019—2021 年研究区自东北向西南, 西北和东南方向输沙势均呈减小趋势, 是主副梁偏移速率减缓的主要原因。

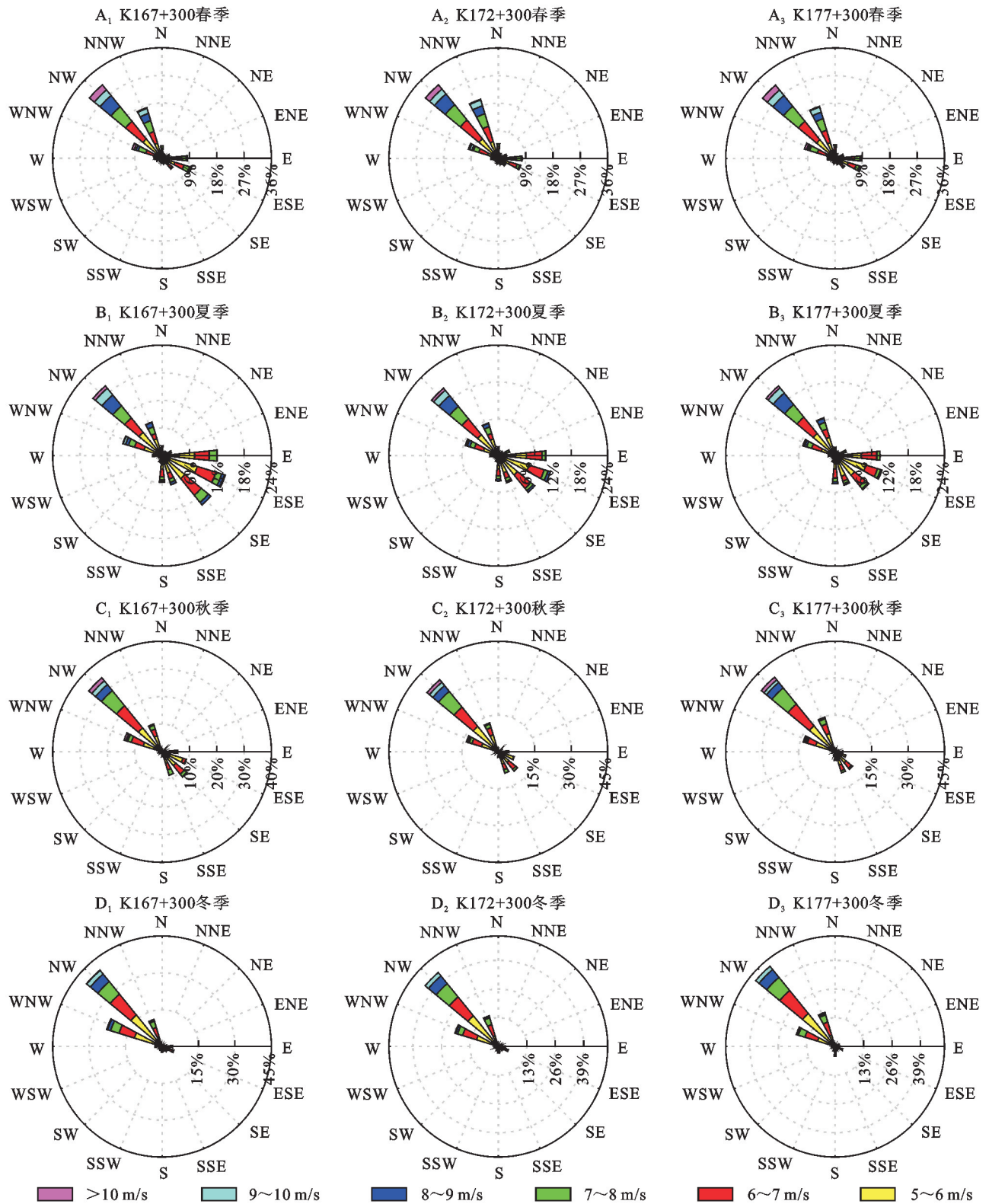


图 8 季节起沙风玫瑰图

Fig. 8 Seasonal sand wind rose

2.5 沙丘移动方向及速率

2019—2021 年研究区内自东北向西南沙丘平均移动方向依次为 152.64°, 144.41°, 140.43°, 沙丘移动方

向呈现出向东南偏移的趋势。沙丘平均移动速率递减, 依次为 2.86 m/a, 2.59 m/a, 2.31 m/a (表 5)。根据

沙丘移动速率,分别以 K167+300,K172+300,K177+300 区域中心为样点进行插值建立等值线图,从而可

以直观表现出沙丘整体移动的快慢,并且可以看出沙丘移动方向与 RDD 变化趋势几乎保持一致(图 11)。

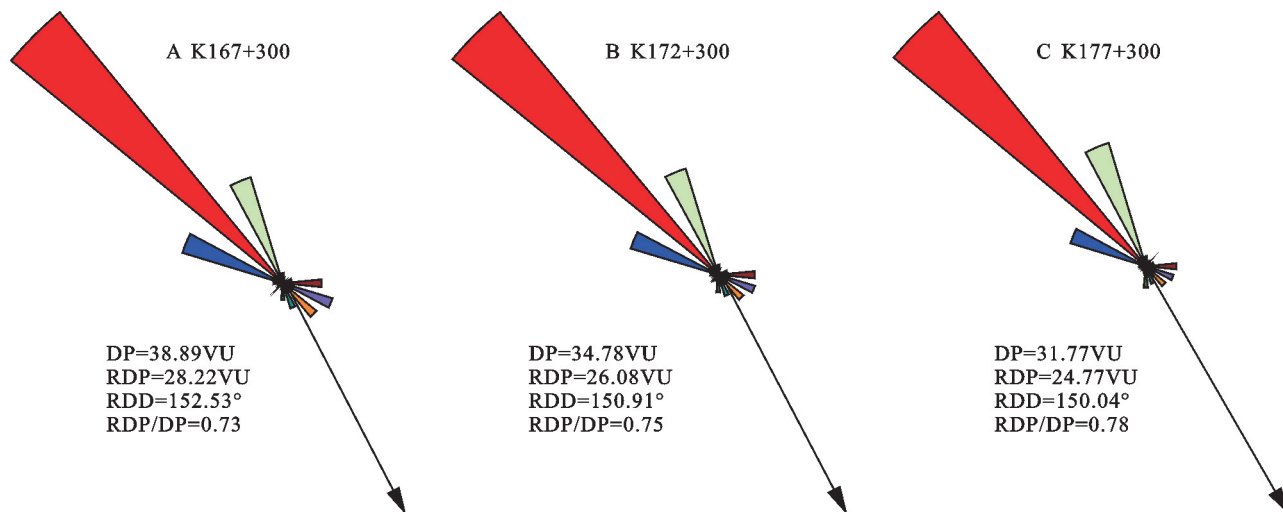


图 9 年输沙势

Fig. 9 Annual sand transport potential

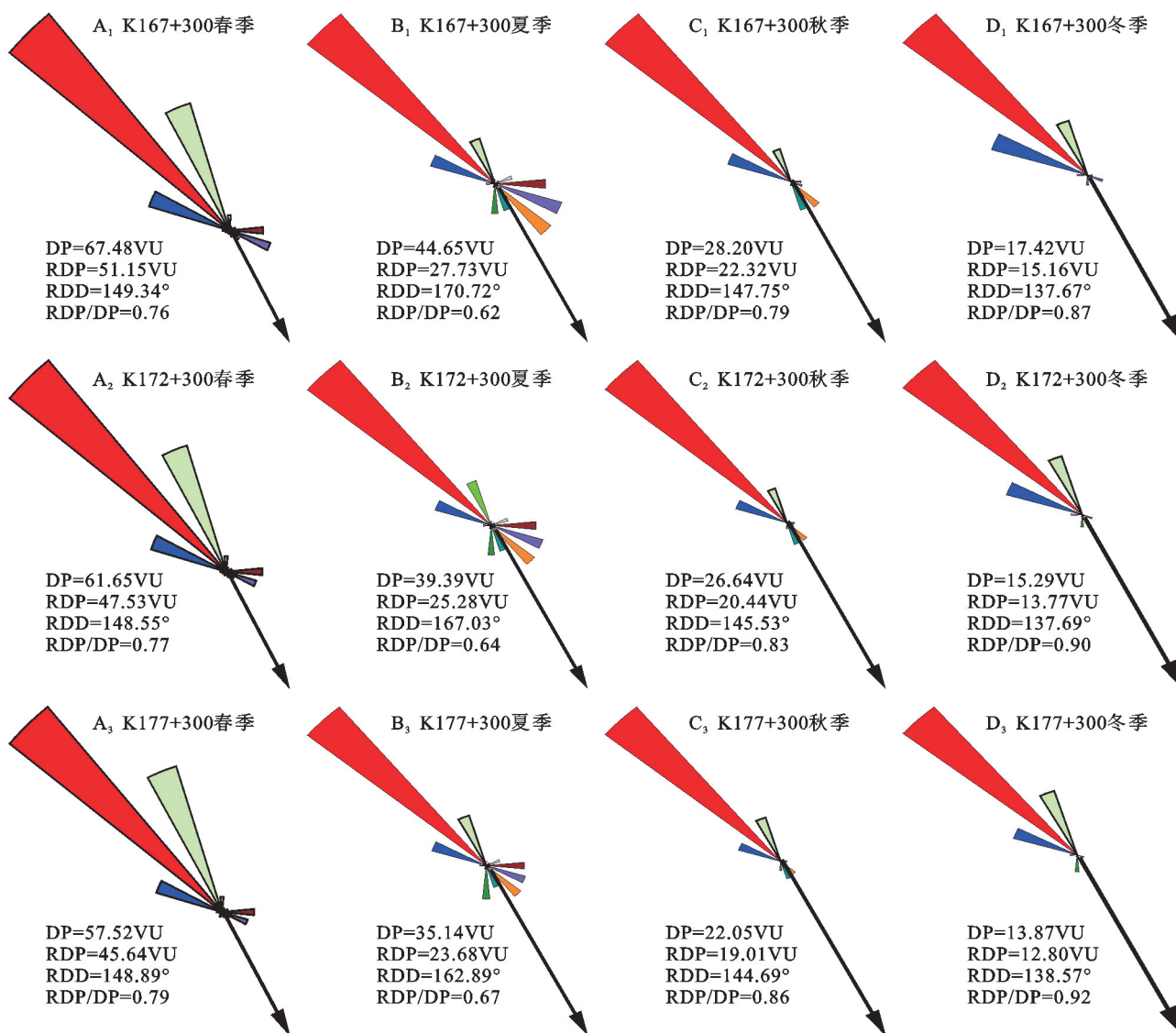


图 10 季节输沙势

Fig. 10 Seasonal sand transport potential

表 4 沙丘形态参数

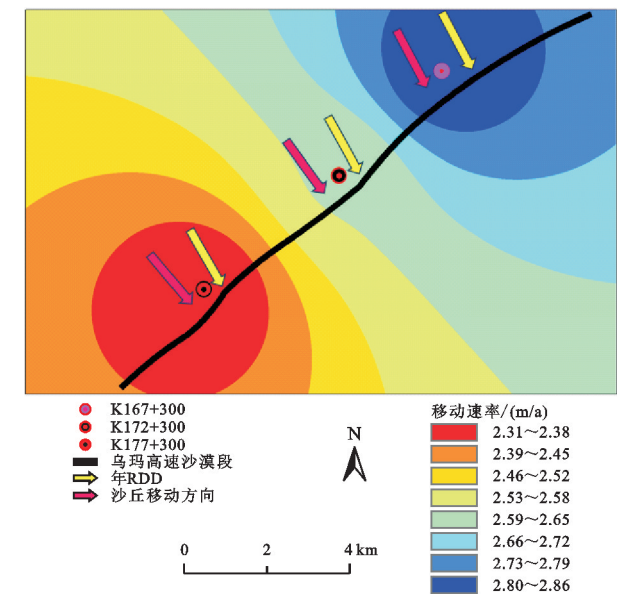
Table 4 Dune morphological parameters

形态参数		K167+300		K172+300		K177+300	
		2019 年	2021 年	2019 年	2021 年	2019 年	2021 年
主梁长度/m	范围	70.46~143.77	68.32~133.28	88.04~222.06	91.17~218.43	91.57~239.08	128.99~246.14
	均值	110.06	113.96	116.44	119.26	124.21	126.27
副梁长度/m	范围	49.79~84.71	50.28~76.91	51.98~91.71	53.28~97.27	50.48~97.09	61.49~83.07
	均值	52.72	54.24	57.87	59.09	63.38	64.36
主梁走向/(°)	范围	26.80~57.26	22.32~55.53	20.52~53.13	20.67~54.93	17.26~43.43	15.90~45.01
	均值	45.02	47.16	49.21	50.98	52.51	53.73
副梁走向/(°)	范围	112.3~144.9	112.5~145.6	105.9~141.1	106.1~143.2	108.9~151.3	108.7~154.2
	均值	133.75	135.98	138.13	139.96	142.89	144.46
主梁间距/m	范围	56.83~91.34	57.52~83.52	60.06~99.37	61.25~10.5.49	59.06~106.36	70.84~93.51
	均值	59.36	61.08	65.58	68.01	74.23	76.41
副梁间距/m	范围	62.53~135.38	60.16~125.63	78.13~211.59	81.06~208.96	79.37~229.54	116.06~232.29
	均值	102.01	104.58	106.36	108.95	112.64	114.06
背风坡长度/m	范围	5.23~9.48	6.91~10.89	4.70~11.80	6.64~11.98	5.23~13.08	6.85~14.32
	均值	7.78	8.98	10.03	11.25	12.96	14.07
沙丘高度/m	范围	3.27~5.92	4.32~6.80	2.94~7.37	4.15~7.49	3.27~8.17	4.28~8.95
	均值	4.86	5.61	6.37	7.03	8.10	8.53

表 5 研究区不同里程处沙丘移动速率及方向

Table 5 Dunes movement rate and direction at different mileages in the study area

里程	时间	移动距离/m		移动方向/(°)		移动速率/(m·a ⁻¹)	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
K167+300	2019—2021	5.94~9.67	8.58	126.23~171.89/152.64	152.64	1.98~3.22/2.86	2.86
K172+300		5.60~11.06	7.77	134.58~178.10/144.41	144.41	1.87~3.69/2.59	2.59
K177+300		6.12~10.74	6.93	141.26~155.37/140.03	140.03	2.04~3.58/2.31	2.31



注：RDD 为合成输沙方向。

图 11 沿线年 RDD 与沙丘移动方向变化

Fig. 11 Annual RDD and dune movement direction along the line

从沙丘移动方向看,K167+300 处年 RDD 与沙丘移动方向保持高度一致,但研究区自东北向西南,年

RDD 与沙丘移动方向的夹角逐渐增大(最大为 10°),故相对于 K167+300 处沙丘,K72+300,K177+300 处沙丘有着向东南偏移的趋势。原因在于 2019—2021 年研究区西北方向输沙势和东南方向输沙势均减小,但自东北向西南方向,西北方向(WNW-NNW)输沙势减少了 13.54%,东南方向(SE-E)输沙势减少了 41.59%,使得沙丘向东南偏移。可见不同方向起沙风的相对强弱变化一定程度上控制着沙丘的移动方向。

3 讨论

通过沙丘移动速率和影响因素等值线图,可得出沙丘样点移动速率及对应影响因素值的大小(图 12)。在沙丘形态对移动速率的影响方面,同一风况下,将沙丘高度间接代表沙丘体积^[27],得出沙丘高度与移动速率为负相关关系,相关系数 R^2 为 0.76($p < 0.01$)。原因在于研究区自东北向西南,沙丘平均高度增加,沙丘高度越大,移动速率越慢。

在外部因素对沙丘移动速率的影响方面,年平均降水量和植被覆盖度对沙丘移动速率表现为负相关关系,相关系数 R^2 分别为 0.78,0.50。这是因为降水

量越多,湿润条件下的沙子,粘滞性提高,迫使沙粒起沙风速增加,起动沙粒减少,沙丘移动速率降低。植物覆盖度是通过提高地表粗糙度,进而削弱地表风速,减少沙粒吹蚀搬运的数量,使得沙丘移动速率减

小。相反,年输沙势和年平均温度对沙丘移动速率表现为正相关关系,相关系数 R^2 分别为 0.74, 0.88, 原因在于气温升高使得沙粒更为干燥,起沙风速减小,起动沙粒增多,沙丘移动速率相应增加(图 13)。

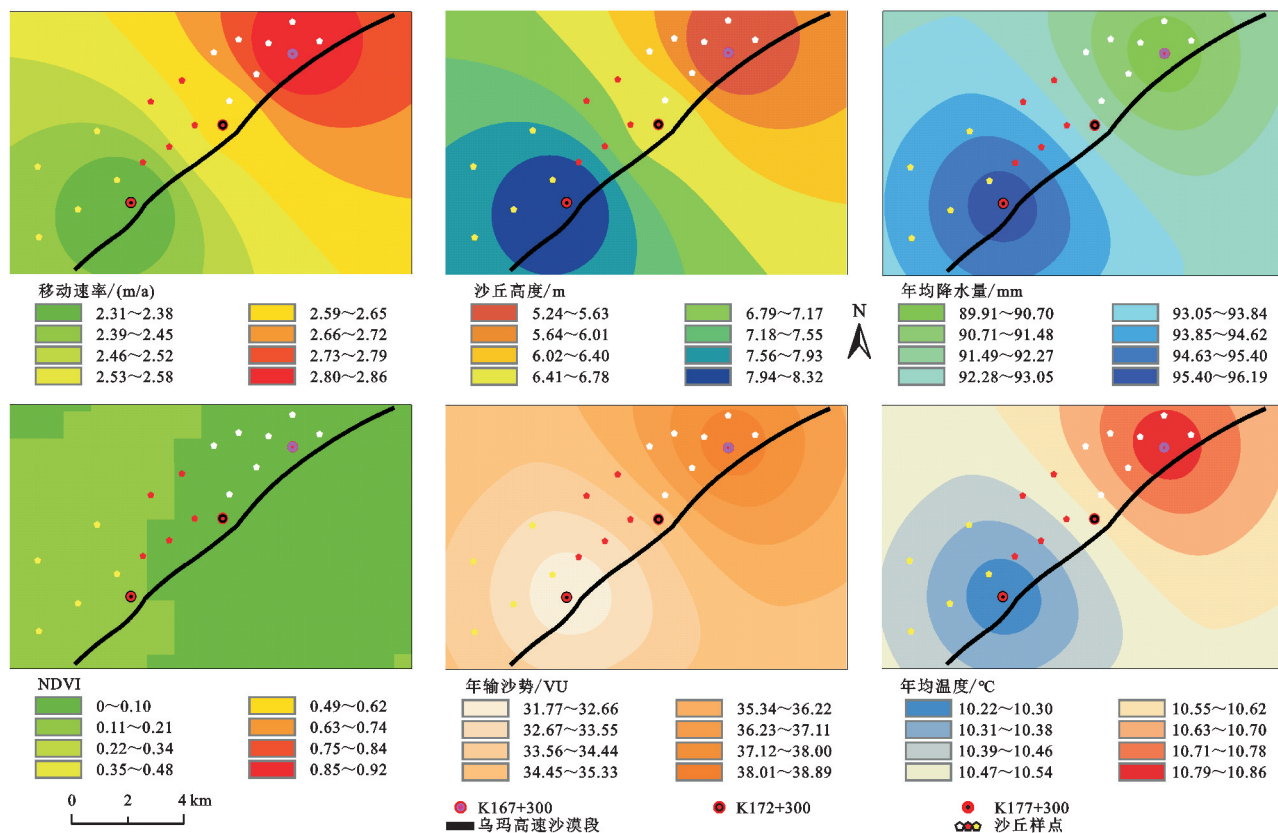


图 12 各影响因素空间插值示意图

Fig. 12 Spatial interpolation diagram of each influencing factor

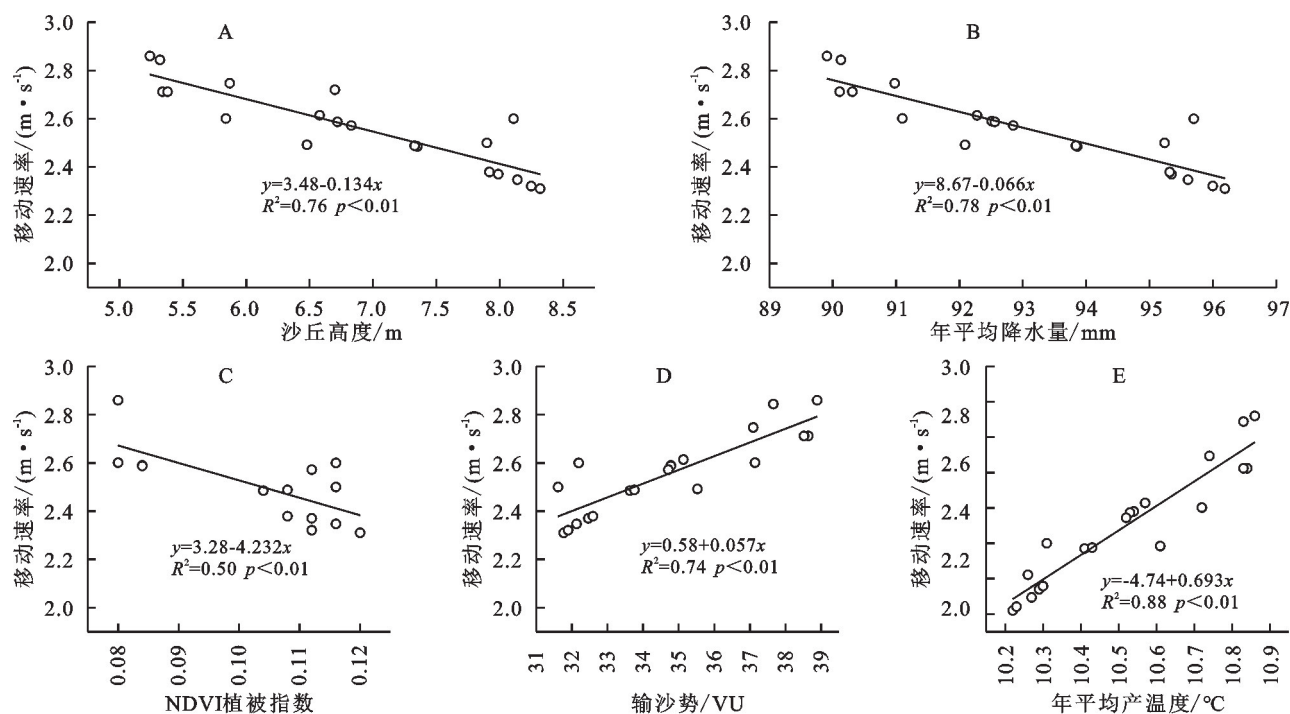


图 13 沙丘移动速率影响因素分析

Fig. 13 Analysis of influencing factors of sand dune movement rate

与沙丘移动速率表现为负相关的影响因素中,年平均降水量和 NDVI 相比,后者与沙丘移动速率的相关程度较小,主要由于研究区植被覆盖度较低缘故。在正相关关系中,年输沙势和年平均温度相比,前者与沙丘移动速率的相关程度较小,可能是由于风向变率(RDP/DP)的影响,当输沙势相同,风况变化越大,沙丘移动速率越慢,因为一部分风能用于改变沙丘形态,推动沙丘移动的风能随之减少。本文由于研究区为公路沿线,尺度范围较小,研究结果中影响因素与沙丘移动速率的相关性较已研究成果^[27]较好。且对于沙丘移动速率的影响,由于沙丘移动及形态演化是在多种因素综合影响下的复杂过程,本研究得出的影响因素与沙丘移动速率的关系是在单因素条件下进行的,在多因素共同作用下的影响还有待研究。

4 结论

(1) 2019—2021 年研究区自东北向西南方向年起沙风频率递减,依次为 36.01%,33.03%,30.95%。主风向为西北风,次风向为东南风,季节起沙风频率按春夏秋冬递减,与年起沙风频率保持一致;整体属于低风能环境、中等变率风况;年 DP、季 DP 递减,春夏两季为主要输沙季节;年 RDD 表现为输沙方向向东南偏移。

(2) 研究区自东北向西南,格状沙丘主副梁走向表明沙丘主梁向东偏移,副梁向南偏移,主副梁走向几乎保持垂直,沙丘形态整体上变化较小;格状沙丘的主副梁长度、主副梁间距和沙丘高度均呈现增加趋势。主副梁长度增长速率和主副梁偏移速率则呈现减小趋势,以 K167+300 处的沙丘为例,其主副梁长度分别是 K172+300 处的 1.38 倍、1.25 倍、1.21 倍、1.22 倍,相对于 K177+300 处则分别为 1.89 倍、1.55 倍、1.74 倍、1.42 倍。

(3) 西北方向(WNW-NNW)输沙势减少了 13.54%,东南方向(SE-E)输沙势减少了 41.59%,使得沙丘向东南偏移,且与年 RDD 变化几乎保持一致(K167 至 K177,依次为 152.53°,150.91°,150.04°),可见不同方向起沙风的相对强弱变化可控制沙丘的移动方向。

(4) 输沙势、年均温度与沙丘移动速率为正相关关系, R^2 依次为 0.74,0.88,相比之下,年均温度对沙丘移动速率的影响更加显著;年均降水量、植被覆盖度与沙丘移动速率为负相关关系, R^2 依次为 0.78,0.50,其中尤以年均降水量对移动速率的影响最重要。

参考文献(References):

[1] 文青.腾格里沙漠风沙地貌特征的空间变化[D].北京:

中国科学院大学,2016.

Wen Q. Spatial changes of aeolian geomorphology in the Tengger desert[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[2] 赵亚洲,李生宇,王世杰,等.2001—2020 年新疆风沙环境致灾潜力特征[J].中国沙漠,2023,43(3):274-283.

Zhao Y Z, Li S Y, Wang S J, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of hazard potential of wind blown sand environment in Xinjiang from 2001 to 2020 [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(3):274-283.

[3] 谢虎雄,马发跃,武生智.风沙环境中公路风沙灾害的数值模拟[J].中国沙漠,2019,39(2):151-157.

Xie H X, Ma F Y, Wu S Z. Numerical Simulation of Sand transport around the Highway in Sandy Desert Area [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(2):151-157.

[4] 马奔腾,程建军,雷加强,等.南疆塔中-38 团沙漠公路沿线风沙输移规律与防沙体系研究[J].干旱区研究,2022,39(5):1663-1672.

Ma B T, Cheng J J, Lei J Q, et al. Transport law and control system of wind-blown sand along the desert highway of South Xinjiang Tazhong-38th Corp[J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1663-1672.

[5] Thomas E. Barchyn; Chris H. Hugenholtz. A process-based hypothesis for the barchan-parabolic transformation and implications for dune activity modelling [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012,37(13): 1456-1462.

[6] Elbelrhiti Hicham. Initiation and early development of barchan dunes: a case study of the Moroccan Atlantic Sahara desert[J]. Geomorphology, 2012,138(1):181-188.

[7] 乌友罕,殷婕,武子丰,等.巴丹吉林-乌兰布和沙漠输沙带新月形沙丘动态[J].中国沙漠,2024,44(2):78-89.

Wu Y H, Yin J, Wu Z F, et al. Barchan dune dynamics in the sand belt between the Badain Jaran Desert and Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(2):78-89.

[8] 邹桐,杨转玲,韦锦芝,等.柴达木盆地西南缘新月形沙丘移动特征及其影响因素[J].中国沙漠,2023,43(1): 212-221.

Zou T, Yang Z L, Wei J Z, et al. Migration and influencing factors of barchan dunes in southwestern Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43 (1):212-221.

[9] 李爱敏,韩致文.新月形沙丘形态参数与移动速度的关系[J].中国沙漠,2020,40(1):29-40.

Li A M, Han Z W. Relationship between moving speed and morphological parameters of barchan dunes [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(1):29-40.

[10] 罗霖炎,高鑫,赵永成.新月形沙丘表面流场特征[J].中

- 国沙漠, 2023, 43(4): 41-54.
- Luo L Y, Gao X, Zhao Y C. The surface flow pattern characteristics of barchan dunes[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4): 41-54.
- [11] 邸耀全, 王锡来, 刘贤万. 沙障工程防治格状沙丘前移的风洞实验研究[J]. 干旱区研究, 1996, 13(1): 14-19.
- Di Y Q, Wang X L, Liu X W. The wind tunnel experiment on sandbreak project preventing the forward movement of square dunes[J]. Arid Zone Research, 1996, 13(1): 14-19.
- [12] Wilson I G. Desert sandflow basins and a model for the development of ergs[J]. Geographical Journal, 1971: 180-199.
- [13] 刘英姿. 腾格里沙漠中格状沙丘形态及成因研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- Liu Y Z. Study on the Morphology and Genesis of Lattice Dunes in Tengger Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2013.
- [14] 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.
- Qu J J, Ling Y Q, Jing Z F, et al. Interaction between sand blown activity and protection system in Shapotou section of Baotou-Lanzhou railway [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 529-533.
- [15] 哈斯, 王贵勇. 沙丘背风侧气流的变化特征及其意义[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 573-576.
- Ha S, Wang G Y. Variation in dune lee-side airflow and its significance[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(6): 573-576.
- [16] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘沉积构造的解析[J]. 地质前缘, 2004, 11(1): 277-278.
- Ha S. Analysis of the sedimentary structure of lattice dunes in the southeastern margin of Tengger Desert [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 277-278.
- [17] 杨馥宁, 吕萍, 马芳, 等. 腾格里沙漠南部格状沙丘的形态演变及移动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 107-115.
- Yang F N, Lü P, Ma F, et al. Morphological evolution and migration characteristics of reticulate dunes at southern fringe of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(1): 107-115.
- [18] 管超, 武子丰, 哈斯额尔敦. 库布齐沙漠西缘格状沙丘动态特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2024, 44(2): 239-253.
- Guan C, Wu Z F, Hasi Eerdun. Dynamic characteristics and genesis of reticulate dunes on the western fringe of the Hobq Desert [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(2): 239-253.
- [19] 郑智鹏, 马奔腾, 程建军, 等. 尉犁-且末沙漠公路沿线风沙环境特征及沙害防治对策研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(10): 1680-1691.
- Zheng Z P, Ma B T, Cheng J J, et al. Characteristics of wind-sand environment and control measures of sand damage along Yuli-Qiemo Desert Highway[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(10): 1680-1691.
- [20] 张克存, 安志山, 何明珠, 等. 乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 983-991.
- Zhang K C, An Z S, He M Z, et al. Aeolian sand environments and disaster prevention along Zhongwei section of the Wuhai-Maqin Highway[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 983-991.
- [21] 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.
- Zhang Z C, Dong Z B, Zhao A G, et al. Features of sand drift movement in desert: a case study at sand drift observation station of Chinese Academy of Sciences[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(4): 550-555.
- [22] 刘志博. 沙漠高速公路地理环境数据库构建及风沙响应规律研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- Liu Z B. Study on Construction of Geographic Environment Database and Wind-Sand Response Law of Desert Expressway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [23] 王金国, 安志山, 张克存, 等. 乌玛高速公路中卫段风沙环境及输移规律[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 183-189.
- Wang J G, An Z S, Zhang K C, et al. Surface sand grain characteristics along Zhongwei section of Wuhai-Maqin highway[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 183-189.
- [24] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Wu Z. Geomorphology of wind-drift sands and their controlled engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [25] 梁晓磊, 牛清河, 安志山, 等. 甘肃瓜州锁阳城南雅丹地貌区起沙风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 48-55.
- Liang X L, Niu Q H, An Z S, et al. Sand-driving wind regime and sand drift potential in the Yardang landform areas of southern Suoyang town, Guazhou, Gansu, China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 48-55.
- [26] Fryberger S. G. Dune forms and wind regime [M]. Usa: Us Geological Survey, 1979: 137-169.
- [27] 杨军怀. 塔克拉玛干沙漠沙丘移动研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- Yang J H. Study on dune movement in Taklimakan desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.