

褚佳琦, 严平, 苏志珠, 等. 雅鲁藏布江米林段爬坡沙丘形态演变及移动规律[J]. 中国沙漠, 2024, 44(6): 220–230.

雅鲁藏布江米林段爬坡沙丘形态演变及移动规律

褚佳琦^{1ab}, 严平^{1b}, 苏志珠², 袁文杰^{1ab}, 王晓旭^{1b}, 张潇^{1b}, 赵华刚^{1b}

(1. 北京师范大学 a. 防沙治沙教育部工程研究中心, b. 地理科学学部, 北京 100875; 2. 山西大学 历史文化学院, 山西 太原 030006)

摘要: 雅鲁藏布江流域同时具备沙源、风动力和堆积场所等风沙沉积的理想条件, 风沙地貌在河流宽谷段广泛分布。基于1970—2022年多期高分遥感影像解译和气象数据分析, 研究了雅鲁藏布江米林宽谷段麦村爬坡沙丘的形态演变及移动规律。结果表明: (1) 1970—2010年, 爬坡沙丘整体规模明显增长, 此后相对稳定; 1970年至今, 爬坡沙丘表层沙垄分布越来越密集, 交会情况也越来越复杂; 对爬坡沙丘整体而言, 各形态参数间相关性不大, 而爬坡沙丘表层沙垄的大多形态参数两两之间有良好的相关性。(2) 米林风向以N和NNE为主, 起沙风风向以SW和SSW为主, 合成输沙方向为53.87°, 多年来属于低风能环境($DP=28.18$ VU), 中风向变率($RDP/DP=0.72$)。(3) 2010—2022年, 表层沙垄整体向NNE方向移动15.71 m, 沙垄移动速度 $0.23\sim 26.79\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均 $2.57\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究区风能环境低导致沙垄移动速度较慢。受地形影响, 近地表层气流与大区域风况共同控制沙垄移动, 使其实际移动方向与合成输沙方向存在一定夹角。地形、风况、植被、降水及沙丘本身的特性共同造就了形态特殊的爬坡沙丘, 使其成为了独具特色且引人注目的风沙地貌景观。

关键词: 爬坡沙丘; 沙丘形态; 沙丘移动; 动态变化; 雅鲁藏布江

文章编号: 1000-694X(2024)06-220-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00132

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

雅鲁藏布江位于青藏高原南部, 独特的地理位置和气候环境使雅鲁藏布江流域内同时具备了沙源、风动力和堆积场所等风沙沉积的理想条件, 流水作用输沙、风蚀起沙和古沙丘活化供沙等过程都为风沙地貌的形成提供了丰富的物质来源^[1]。在高原季风和副热带西风急流的双重影响下, 一年中表现出了两种基本相反的温压场和风场特征, 为其提供了充足的风动力^[2]; 开阔平坦的河滩地、河谷平原、河岸阶地及河谷山麓带为风成堆积提供了有利的场所。李森等^[3]根据沙丘沉积发育的床面不同, 将雅鲁藏布江的河谷风沙地貌分为谷底沙丘和谷坡沙丘, 其中发育在谷坡上的爬坡沙丘形态特殊, 沙丘坡度通常随海拔上升逐渐增加, 表面直线曲线

相互交错, 沙丘链或沙垄高低起伏不断, 具有独特的纹理感和立体感, 其独具特色且引人注目的景观受到了社会和学术界的广泛关注。

沙丘的形态演变和移动规律可以直观反映出沙丘的形成发育过程和区域气候条件^[4-5], 进一步反映出沙丘的活化程度、沙漠扩缩的发展趋势和风沙运动对地表地貌的塑造过程^[6], 是描述风沙地貌特征和建设防风固沙工程的重要参考指标^[7]。已有学者针对塔克拉玛干沙漠的新月形沙丘^[8-9]、浑善达克沙地的抛物线沙丘^[10]、腾格里沙漠的格状沙丘^[11]的形态变化与移动规律等方面做出过许多研究, 研究对象多为成片的沙丘或沙丘群, 而针对某一个沙丘内部的小尺度研究却很少。目前对爬坡沙丘的研究则多是集中于地球化学元素^[12-13]、粒度特征及其环境指示^[14-15]等方面, 但关于爬坡沙丘动态变化的

收稿日期: 2024-07-15; 改回日期: 2024-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42371008, 41871010); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0906)

作者简介: 褚佳琦(2000—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事风沙地貌研究。E-mail: chujq@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 严平(E-mail: yeping@bnu.edu.cn)

相关研究较少,其形成演化机制尚未得以明确。

在雅鲁藏布江米林段的麦村东侧分布着规模高大的风沙堆积体,是研究爬坡沙丘形态变化及演化过程的理想场所。因此对麦村爬坡沙丘展开研究,阐明其形态特征及变化过程,探讨其演化机理,有利于丰富和完善风沙地貌的理论体系,为保护和管理风沙地貌景观提供数据支撑;保护爬坡沙丘的自然和文化价值,也有助于揭示风沙地貌美学现象,进而为西藏地区风沙危害防治和生态环境建设提供科学指导。

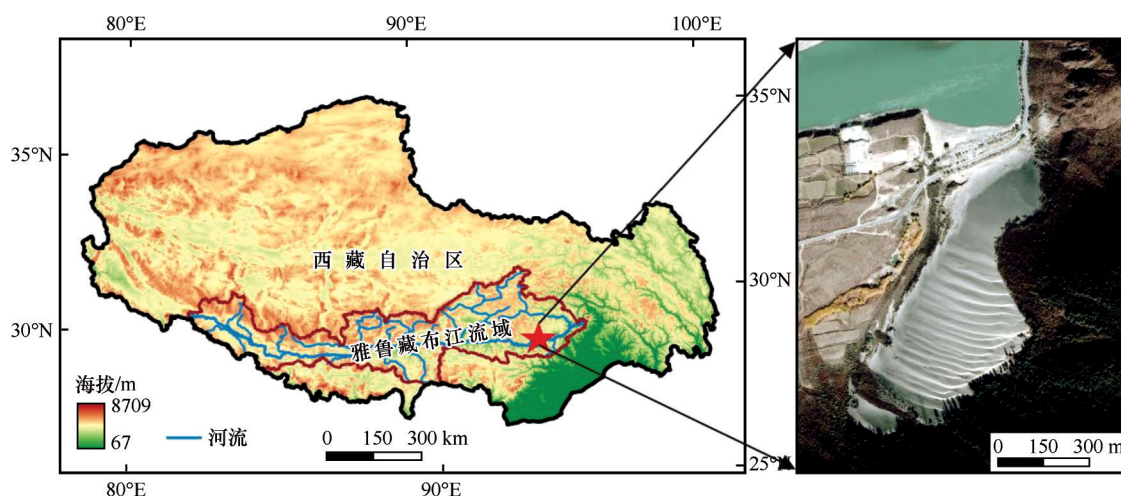
1 数据与方法

1.1 研究区概况

米林市为西藏自治区林芝市的县级市,地处雅鲁藏布江流域的中游下段、喜马拉雅山脉的东南边缘地带,全市东西狭长,西高东低,多宽谷,相对高度相差较小,平均海拔2 950 m(图1)。米林市属

高原温带半湿润季风气候,夏季温暖多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温9.7℃,年降水量670 mm,主要发生在6—9月。植被类型主要包括高山草甸、高山灌丛、针叶林和阔叶林等,土壤以高山棕壤和高山黄壤为主。

该爬坡沙丘发育在雅鲁藏布江河道右岸、米林麦村东侧的山体上(29°08′29″N、93°40′39″E),山体坡度约37°,海拔2 950~3 250 m。沙丘整体呈“凹”字型,长约1 000 m,宽150~380 m,相对高差90~220 m,面积约300 000 m²。爬坡沙丘南部表层叠置有十余道狭长的条带状沙垄,在山体西侧沿坡WNW-ESE方向延伸,整个爬坡沙丘表面槽脊相间,沙垄相对高差约1 m,垄间距20~40 m,部分沙垄在爬坡沙丘顶部出现交会现象。远处看去,沙丘形状像趴在山坡上的大象,条带状的沙垄位于大象腹部如其肋骨,因此被当地人称为“大象沙丘”。独特的造型和壮丽的景观使其成为了雅鲁藏布江流域热门的沙丘景点,具有极高的旅游价值。



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

图1 研究区位置(A)及卫星影像(B,来自 Google Earth)

Fig.1 Location (A) and satellite image (B, obtained from Google Earth) of the study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 气象数据

从国家气象科学数据中心(National Meteorological Scientific Data Centre)下载2016—2022年米林气象站的气象观测数据,包括风向、风速、气温、降水量等要素,时间精度为1 h(米林气象站为国家一般气象站,2016年之前仅有时间精度较低的逐日数据,故本文选用2016—2022年逐小时风向和风速数据以更准确地反映该地风况)。取 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

作为研究区起沙风速^[16-17],通过Fryberger-Dean公式^[18]计算输沙势(DP),结合合成输沙势(RDP)、合成输沙方向(RDD)、风向变率(RDP/DP)分析风能环境。

1.2.2 影像数据

在ESRI World Image和Google Earth中获取麦村爬坡沙丘1970、2010、2018、2019、2020、2021年和2022年的高清影像,经纬坐标投影为WGS84坐标系,像素分辨率0.5~2 m,以保证可以清晰识别沙丘

内部的具体形态特征,并对爬坡沙丘整体形态变化及表层沙垄移动变化情况进行监测。通过各期影像中道路、建筑物等多个共同的参照物进行地理配准,以消除不同年代影像的偏移。由于识别沙丘的形态及动态变化需足够高的空间分辨率,但卫星及拍摄条件有限,所选影像的时间间隔无法保证一致,在有条件的年份下,尽可能保持时间间隔一致(2020年受阴影遮挡,仅能识别沙丘整体轮廓,无法清晰识别沙丘表层沙垄形态)。

1.2.3 形态参数提取

通过对高清影像进行目视解译,针对麦村爬坡沙丘及爬坡沙丘表层沙垄的形态特点,选择并提取不同形态特征参数,建立该爬坡沙丘形态特征判别指标。形态特征提取参数如图2,包括爬坡沙丘投影面积(S)、爬升路径长度(L)、宽度(W)、沙丘表面沙垄个数(N)、沙垄交会点个数(M)、垄间距(d)、沙垄脊线长度(L_s)等参数。

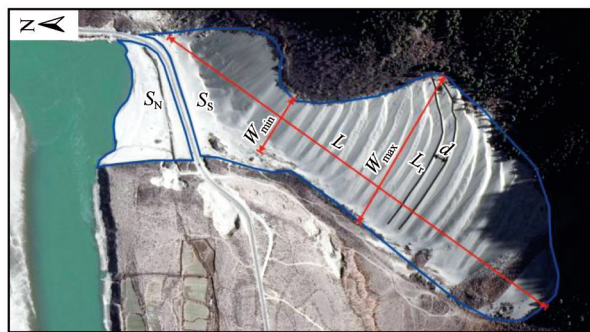


图2 麦村爬坡沙丘形态参数提取示意图

Fig.2 Schematic diagram of morphological parameters of climbing dune in Maicun Village

沙丘爬升路径长度(L)为公路南侧部分沙丘最东北端至最西南端直线距离;沙丘宽度(W)为沙丘底部至沙丘顶部的距离;爬升高度(H)为沙丘底部与沙丘顶部的相对高差。沙丘表面的沙垄在近沙丘顶部存在交会现象,故将沙垄个数分为沙丘中部沙垄个数(n)与沙丘顶部沙垄个数(N)两个参数以进一步统计分析;垄间距(d)为两个相邻沙垄顶点之间的距离。

2 结果

2.1 风况

2016—2022年,米林多年平均风速为 $1.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向以N和NNE为主,分别占19.87%和17.13%,其次是NNW和NE方向,分别占14.97%和10.00%。月平均风速通常在2—4月最大,约 $1.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;在8—10月最小,约 $1.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;起沙风多在3—5月,占全年起沙风的48.65%。2016—2022年输沙势 DP 为28.18 VU,风向变率 RDP/DP 为0.72,4个季节的多年输沙势分别为17.84、5.79、1.84、2.83 VU(图3)。合成输沙势季节分布与起沙风速的变化趋势一致。各年输沙势24.33~31.05 VU,合成输沙势为11.93~25.70 VU,合成输沙方向为 $49.17^\circ\sim 64.34^\circ$,风向变率 RDP/DP 为0.48~0.88(表1)。根据Fryberger^[18]风能环境评定标准,研究区2016—2022年均属于低风能环境,2018年和2020年风向变率低, RDP/DP 分别为0.81和0.88,其余年份均为中等风向变率(0.48~0.76)。

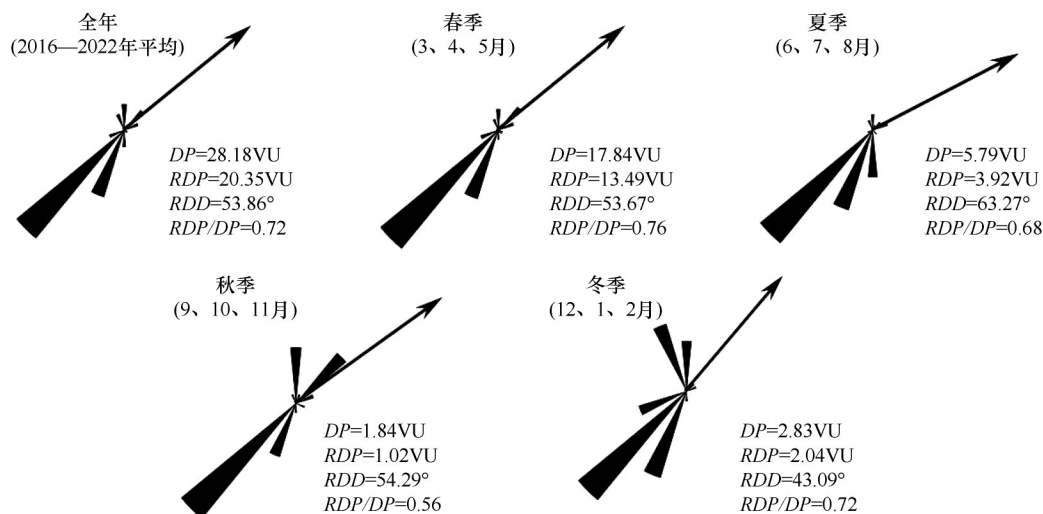


图3 2016—2022年输沙势和各季节输沙势

Fig.3 Sediment drift potentiality for in each season from 2016 to 2022

表 1 2016—2022 年气象要素及风能环境
Table 1 Meteorological elements and wind energy from 2016 to 2022

年份	年降水量 /mm	平均风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	起沙风频 $t/\%$	输沙势 $DP/(\text{VU})$	合成输沙势 RDP	输沙方向 RDD	风向变率 RDP/DP
2016	777.40	1.28	0.27	29.87	20.21	64.34	0.68
2017	688.00	1.26	0.20	27.88	20.04	50.10	0.72
2018	515.70	1.30	0.37	31.00	25.05	49.17	0.81
2019	703.40	1.28	0.37	31.05	22.21	51.35	0.72
2020	606.00	1.29	0.26	29.27	25.70	51.58	0.88
2021	588.10	1.47	0.57	24.33	18.50	51.69	0.76
2022	793.60	1.48	0.58	25.06	11.93	63.85	0.48

2.2 爬坡沙丘形态参数

1970—2010 年期间喀纳斯—东兴公路修建,将爬坡沙丘分为南北两部分,爬坡沙丘的爬升情况与面积扩缩受道路限制,故将沙丘面积(S)划分为公路南北两侧面积(S_s 、 S_n)进行对比分析,并将爬坡沙丘爬升宽度分为最宽和最窄处(W_{\max} 、 W_{\min})进行对比分析。

2.2.1 爬坡沙丘整体形态变化

1970 年以来爬坡沙丘形态变化较为复杂,整体呈先扩大再缩小趋势。1970—2010 年,公路两侧的沙丘总面积由 277 794.10 m^2 增至 311 322.62 m^2 ,扩

大了 33 528.52 m^2 ;沙丘的爬升路径长度由 1 078.48 m 延长至 1 098.47 m,共增长 20.26 m;爬坡沙丘的最宽处从 317.22 m 增至 371.88 m,最窄处从 135.61 m 增至 145.44 m,分别增长了 54.66 m 和 9.83 m。2010—2022 年,沙丘面积整体呈减少趋势,总面积从 311 322.62 m^2 逐渐降至 276 171.10 m^2 ,共减少 35 151.52 m^2 。随着公路北侧阶地上大量植被的种植生长,沙丘面积从 32 967.54 m^2 减小至 10 674.04 m^2 ,缩小了 67.62%,平均每年减少 1 013.34 m^2 ;公路以南的沙丘面积从 278 355.07 m^2 降至 265 497.07 m^2 ,缩小了 12 858.00 m^2 ;沙丘爬升路径长度和宽度年间没有显著变化,仅在 5% 范围内波动(表 2)。

表 2 1970—2022 年爬坡沙丘形态参数
Table 2 Morphological parameters of climbing dune from 1970 to 2022

年份	S_n/m^2	S_s/m^2	总面积/ m^2	L/m	W_{\max}/m	W_{\min}/m
1970	32 198.63	245 595.47	277 794.10	1 078.48	317.22	135.61
2010	32 967.54	278 355.07	311 322.62	1 098.74	371.88	145.44
2018	18 815.66	268 505.97	287 321.63	1 081.73	373.03	129.19
2019	16 541.98	275 037.95	291 579.93	1 079.02	375.66	134.55
2020	16 063.67	267 015.94	283 079.61	1 087.05	378.41	128.18
2021	15 052.05	267 657.16	282 709.21	1 091.07	366.99	122.49
2022	10 674.04	265 497.07	276 171.10	1 086.83	365.21	123.11

2.2.2 爬坡沙丘表层沙垄形态变化

如图 4 所示,1970 年,爬坡沙丘内部共 14 道沙垄且分布较为零散,2010 年沙垄个数增至 18 道,且此后相对稳定,没有明显的增减。2010—2018 年,沙垄形态相对简单,在沙丘中部各沙垄呈平行状态分布,在近沙丘顶部,部分相邻沙垄的东翼出现两两交会现象,形成“Y”形接头。2019 年之后,沙丘内部形态变得更复杂,出现个别沙垄的东西两翼都发生相交

的现象,及沙丘顶部有多条沙脊线交会至一条的情况,“Y”形接头由 2010 年的 3 个增至 2022 年的 8 个。
随着爬坡沙丘爬升高度的增加,沙脊线总长度在 1970—2019 年也一直呈增加趋势,由 3 105.55 m 增至 4 676.48 m,共增加 1 570.93 m,增长速度为 32.06 $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$;沙脊线平均长度也由 1970 年的 207.04 m 增至 2018 年的 267.46 m,年平均增长 1.23 m;之后随着沙丘表层沙垄个数增多,交会情况越来越多且

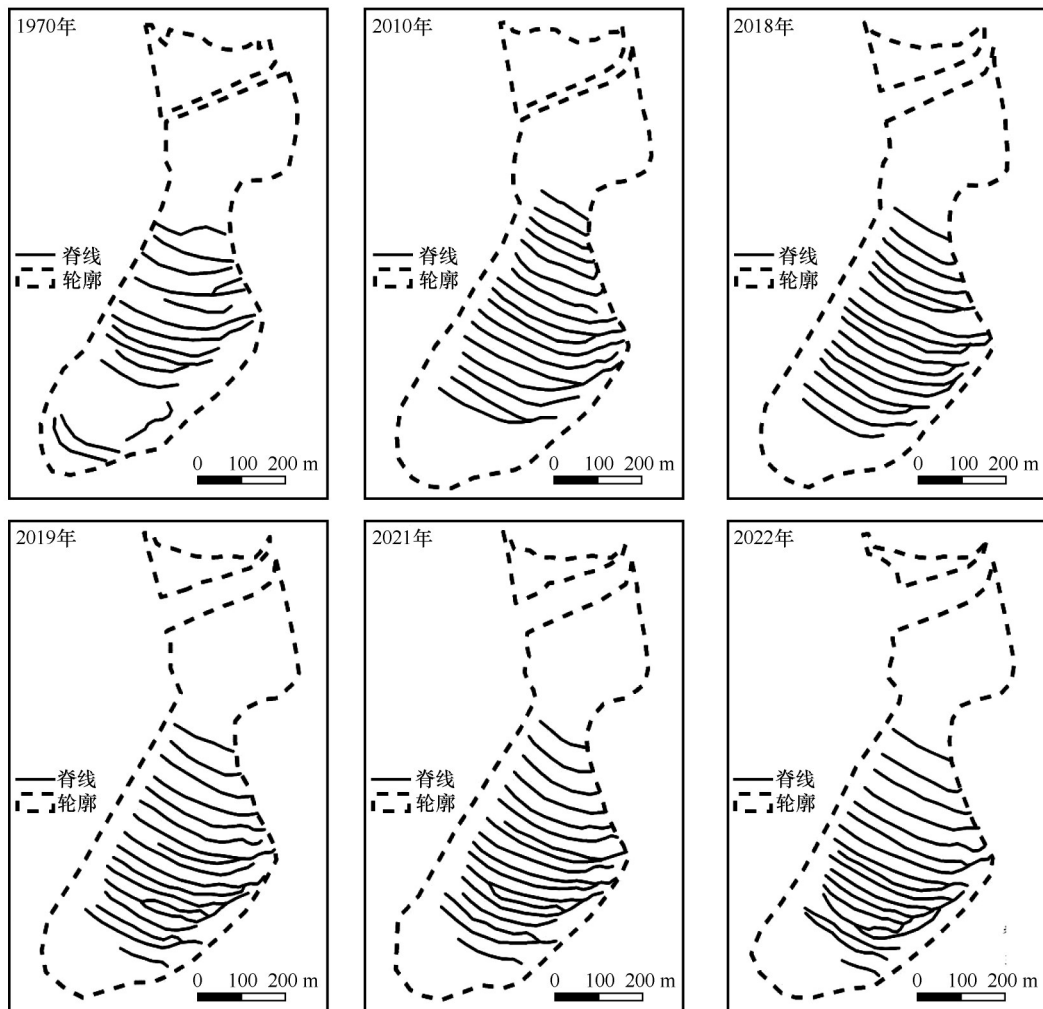


图4 1970—2022年爬坡沙丘形态变化

Fig.4 Morphological changes of climbing dune from 1970 to 2022

越来越复杂,相对完整的较长的沙垄个数变少, 在2019年之后,沙脊线总长度和平均长度均较为稳定,变化幅度不大(表3)。

表3 1970—2022年沙丘表层沙垄形态参数

Table 3 Morphological parameters of surface sand ridges during 1970–2022

年份	沙垄个数		“Y”形接头个数	脊线总长度/m	脊线平均长度/m	平均垄间距/m
	中部	顶部				
1970	14	13	1	3 105.55	207.04	38.79
2010	18	14	3	4 362.77	256.63	31.93
2018	17	12	5	4 546.90	267.46	31.84
2019	18	13	6	4 676.48	259.80	30.63
2021	18	13	5	4 663.46	259.08	30.04
2022	18	13	8	4 649.59	258.31	30.70

从北至南对各沙垄顺次编号,垄间距由北至南则呈现出先缩短后增大的趋势,通常第一、二道沙垄之间的垄间距最大,第七至十二道沙垄分布最密集,垄间距出现最小值(图5)。

2.3 沙丘形态参数相关性

对1970—2022年研究区爬坡沙丘公路以南的投影面积(S_s)、爬升长度(L)、宽度(W_{\max} 、 W_{\min})进行线性拟合,并对爬坡沙丘表层沙垄个数(N)、“Y”形接头个

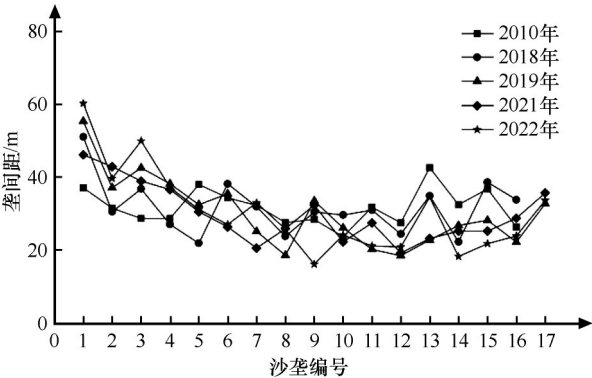


图5 2010—2022年各沙垄垄间距
Fig.5 Spacing of surface sand ridges during 2010 to 2022

数(M)、脊线总长度(L_r)、脊线平均长度(l_r)、垄间距(d)等形态参数进行线性拟合,拟合结果如表4。

对麦村爬坡沙丘整体而言,公路南侧沙丘的投影面积与沙丘的最大爬升宽度具有较高的相关性

($R^2 = 0.8149$),其余参数两两之间相关性极弱甚至不相关($R^2 \leq 0.29$)。由于爬坡沙丘的形成发育过程与更常见的新月形沙丘或抛物线沙丘有所不同,其整体形态也存在差异,各形态参数的相关性与以往学者的研究结果相差较大^[19-20]。

随着爬坡沙丘的发育演变,表层沙垄仍保持相对稳定的形态,说明各形态参数间应具有良好的依赖性,并呈现一定的相关关系^[21-22]。“Y”形接头个数与沙丘表层沙垄的其余参数之间相关性不强($0.54 \leq R^2 \leq 0.68$),而除此以外的各参数间均表现出良好的相关性($R^2 \geq 0.83$),其中沙垄脊线总长度和平均长度均与沙垄个数呈正相关($R^2=0.92, R^2=0.83$),与垄间距呈负相关($R^2=0.99, R^2=0.90$),脊线总长度与平均长度之间呈显著正相关($R^2=0.94$),垄间距与沙垄个数之间呈显著负相关($R^2=0.95$)。

表 4 沙丘形态参数的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of morphological parameters of sand dune

类型	参数	线性关系	相关系数
爬坡沙丘整体形态	投影面积与爬升长度	$S_s = 783.08L - 583720.00$	$R^2 = 0.29$
	投影面积与最大宽度	$S_s = 446.22W_{\max} + 104360.00$	$R^2 = 0.81$
	投影面积与最小宽度	$S_s = 251.87W_{\min} + 233759.00$	$R^2 = 0.04$
	爬升长度与最大宽度	$L = 0.14W_{\max} + 1036.90$	$R^2 = 0.16$
	爬升长度与最小宽度	$L = 0.20W_{\min} + 1059.30$	$R^2 = 0.05$
	沙丘最宽值与最窄值	$W_{\max} = -0.39W_{\min} + 415.58$	$R^2 = 0.02$
沙丘表层沙垄形态	脊线总长度与沙垄个数	$L_r = 366.35N - 1954.90$	$R^2 = 0.92$
	脊线总长度与平均长度	$L_r = 27.01l_r - 2455.70$	$R^2 = 0.94$
	脊线总长度与垄间距	$L_r = -187.05d + 10380.00$	$R^2 = 0.99$
	脊线总长度与“Y”形接头个数	$L_r = 209.51M + 3356.40$	$R^2 = 0.68$
	脊线平均长度与沙垄个数	$l_r = 366.35N - 1954.90$	$R^2 = 0.83$
	脊线平均长度与垄间距	$l_r = -0.14d + 67.47$	$R^2 = 0.90$
	脊线平均长度与“Y”形接头个数	$l_r = 6.69M + 220.19$	$R^2 = 0.54$
	垄间距与沙垄个数	$d = -1.98N + 66.31$	$R^2 = 0.95$
	垄间距与“Y”形接头个数	$d = -1.08M + 37.36$	$R^2 = 0.65$
	沙垄个数与“Y”形接头个数	$N = 0.49M + 14.89$	$R^2 = 0.55$

2.4 沙垄移动规律

由于1970—2010年年际跨度较大且沙垄形态出入较大,故仅对2010年及之后的沙垄移动情况进行判读分析。通过对各年份爬坡沙丘内部各沙垄的形态特点、相对位置等特征进行一一匹配对应,

利用3个特征点(沙垄脊线的上、中、下点)移动的距离及方向来代表沙垄的移动情况,并监测各个沙垄的移动方式、移动速率、移动轨迹等以分析沙垄的移动规律。根据朱震达等^[23]对沙丘移动速度的分类,沙丘移动强度分为4个等级:①慢速类型,沙丘年均前移小于1 m;②中速类型,沙丘年均前移1~

5 m;③快速类型,沙丘年均前移6~10 m;④特别快速类型,沙丘年均前移10 m以上。

2010—2022年爬坡沙丘表层沙垄整体上由SSW向NNE方向(约20°)移动15.71 m,各沙垄移动速度为0.23~26.79 m·a⁻¹,年平均移动速度为2.57 m·a⁻¹。位置发生明显变化的沙垄主要为中部较长的沙垄,南北两端较短的沙垄移动幅度较小。具体表现为

2010—2018年,沙垄整体向北移动,其中发生明显移动的沙垄个数有12道,均为慢速或中速移动型,平均移动距离8.67 m;2018—2019年,10道沙垄明显向南移动,其中6道为快速移动型,总平均移动距离6.44 m,2019—2021年和2021—2022年均有15道沙垄明显向北发生位移,分别以中速和快速移动型为主,平均移动距离分别为5.98 m和7.50 m(表5)。

表5 沙丘表层沙垄移动情况

Table 5 Migration of surface sand ridges during 2010 to 2022

时间	方向	移动距离/m		沙丘个数			
		范围	均值	慢速移动	中速移动	快速移动	特别快速移动
2010—2018年	NNE	3.11~20.87	8.67	7	5	—	—
2018—2019年	SSW	0.23~12.50	6.44	1	2	6	1
2019—2021年	NNE	2.94~11.26	5.98	1	13	1	—
2021—2022年	NNE	1.23~26.79	7.50	2	2	9	2

3 讨论

研究区地处高原温带半湿润季风气候,同时具备了沙源、风动力和堆积场所等风沙沉积的理想条件,加之区域内脆弱的生态环境、河流-山地的复合系统,以及近几十年来的气候暖湿化都使得风沙活动更加频繁且强烈^[24-25]。沙丘的形态演变和移动与地形、沙源、风况、降水等因素有关,对于爬坡沙丘而言,地形对形态演变的影响更为突出^[26-27]。在山体的阻挡下,近地层气流发生改变,进而影响沙粒的搬运和堆积过程,导致爬坡沙丘的形态变化及表层沙垄的移动^[28]。

3.1 沙丘形态变化及其影响因素

3.1.1 沙丘形态变化的影响因素

丰富的沙源、广阔的堆积场所和强劲的风动力为麦村爬坡沙丘的发育和扩张提供了理想的环境条件。河、湖相沉积物和风成沙沉积物为沙丘的形成与扩张提供了充足的物源。米林宽谷段的谷坡为沙丘的沉积发育提供了广阔的场地,水流速度慢、坡度平缓,更有利于沙粒的累积和爬坡沙丘的发育。大区域风况和近地表层气流同时控制沙丘的形成与演变,雅鲁藏布江流域夏冬两季分别以高原季风和副热带西风为主导风^[29-30],在河流-山脉的复合地貌系统下,地表受热严重不均,山谷风得以加强,进一步促进了爬坡沙丘的爬升发育。

地形、植被和人类活动也间接影响着沙丘规模

的变化^[22,31]。从已有影像数据来看,1970—2010年,麦村爬坡沙丘处于发育扩张阶段,其爬升路径长度、宽度及沙丘面积均明显增加。随着山体坡度和沙粒爬升高度的增加,沙粒爬升难度逐渐增大,当爬坡沙丘达到一定规模后,进一步的发育扩张则受到一定程度的限制。山体中上部生长的茂盛灌丛或林带不仅能够减缓风速,还能稳固土壤,从而减缓或限制爬坡沙丘的扩张。21世纪以前,随着人口的增长,人类活动对自然的开发利用强度增大,对土壤的破坏作用不断增强,沙丘规模也随之不断扩大;而此后随着人类对自然的态度的转变,人为活动对土层的破坏减弱,植被生长状况越来越好,加上地形障碍的阻挡,2010年之后爬坡沙丘的活动范围受到了限制,其爬升长度、高度与沙丘面积均没有明显扩张,甚至自2019年以来呈缓慢缩减的态势。

3.1.2 沙丘表层沙垄形态变化的影响因素

爬坡沙丘的表层形态通常也受沙源、局部地形、区域风况等多种因素的共同影响^[32]。雅鲁藏布江流域内充足的沙源有利于爬坡沙丘表层沙丘链或纵向沙垄的形成,山体的坡度、高度也会在很大程度上影响爬坡沙丘表层形态的发育,随着沙丘沿山体爬升,其形态通常会由新月形沙丘链逐渐向狭长的线性沙垄发展^[29,33]。麦村爬坡沙丘北部平均宽度180 m,南部平均宽度330 m,南部风程长度明显长于北部,可搬运堆积的沙物质更多,于是在爬坡沙

丘的南部具备更宽阔的空间和更丰富的物源,使得沙丘向狭长型的沙垄演变发育,致使爬坡沙丘北部的表面相对平整,而在爬坡沙丘南部出现表面槽脊相间的现象。

新旧脊线的产生或消失,都会在很大程度上改变沙垄的形态^[34]。研究区一年内受西南季风、西风环流、山谷风及局地微气流等多种风力影响^[2,35],风向复杂多变,山体不同部位的风速也有所差异。1970年以来,在不同风向、不同风速及不同尺度的风力的交替控制或共同作用下,新的沙垄不断形成,导致沙垄的分布越来越密集,垄间距逐渐减小。沙粒粒度直接决定了沙粒的移动能力,麦村爬坡沙丘表层沉积物的粒度沿坡脚至坡顶递减^[15],风力作用下,同一沙垄不同部位的沙粒移动速度和移动距离不同,以及当风况发生变化时,对沙粒移动的影响程度不同,进而在沙垄随风摆动的过程中,沙垄相交或分叉的现象越来越频繁,“Y”形交会点增多,而相对完整的、较长的沙垄个数变少,导致沙垄的脊线平均长度呈下降趋势。植被、地形等障碍的阻挡也会使沙垄形态发生变化,山体上茂盛生长的林带,在减缓风速、稳固土壤、限制沙丘爬升的同时,也限制了沙垄的延伸;另外由于坡度逐渐变陡,迎坡而上的气流可能发生回旋反向的现象^[23,28],使沙粒回弹、沉积、聚集,因此在爬坡沙丘顶部出现了多条沙垄汇至一条的情况,也在沙丘与林带的交会处出现落沙坡。

3.2 沙垄移动影响因素

风况是沙丘移动的动力条件,沙丘的移动方向

与合成输沙势方向密切相关^[11,36-37];而地形会在一定程度上改变大区域风况,形成复杂的局地微气流,近地层气流在大区域风况的基础上进一步改变沙丘的形态与演化^[38-39]。由于米林气象站与研究区距离较远,两地之间河流弯曲度高,河流两岸起伏错落的漫滩、台地或山脉,以及河床的浅滩、沙洲等都会对风况造成影响,因此气象站的数据与研究区的真实风况存在一定出入,进而导致了合成输沙方向与沙垄实际移动方向存在一定夹角。如图6所示,麦村爬坡沙丘发育在河流的凹岸一侧谷坡上,作为雅鲁藏布江流域主导风的西风环流和西南季风在山体的阻挡下,风向可能会从原本的W和E转为SSW和NNE方向,进而使爬坡沙丘表层沙垄沿SSW或NNE方向移动。冬春季以西风环流为主导,加之河谷走向与风向平行,流域内地势东高西低,风速大、风力强且持续时间长^[40];夏季的季风由东向西逆江而上,风力强度明显小于冬季的西风,且暖湿的气团对沙丘也会起到固定作用。因此,起沙风多发生在冬春两季,方向以SW和SSW为主,在地形影响下,近地表的气流特征会在大区域风况的基础上进一步控制爬坡沙丘发育与演变,使爬坡沙丘表层沙垄总体向NNE方向移动。

当风速大于起沙风速时,沙粒发生移动^[41-42]。2016、2017、2020年的起沙风频明显小于其他年份,故2018—2019年和2021—2022年的移动距离和移动强度明显大于其他时段。由于部分年份的数据无法获取,最终呈现的沙丘移动情况为多年综合作

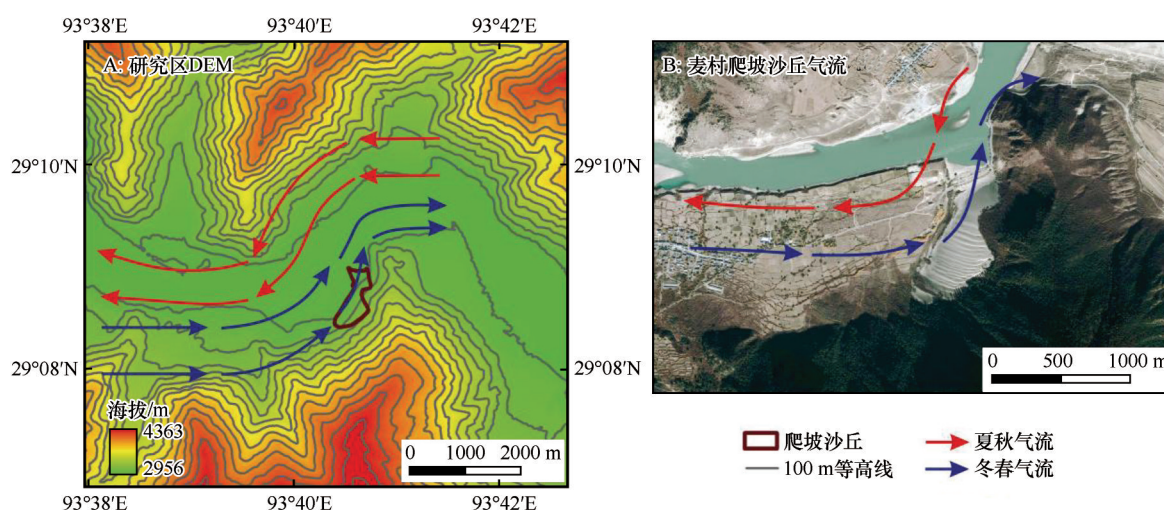


图6 地形障碍下的风况变化

Fig.6 Changes in air flow under topographic obstacles

用的结果,使得沙丘在2018—2019年和2021—2022年逐年的移动距离明显高于2010—2018年和2019—2021年的年平均移动距离。另外,更为丰富的降水和更潮湿的空气也会对沙粒产生固定作用^[43],使沙垄相对更加稳定。

相比于其他沙漠/沙地的新月形沙丘^[22,35,42],更为开阔平坦的地形条件下,风场受到的影响更小,且相对于雅鲁藏布江两岸的谷坡能为沙丘的移动提供更加广阔的范围,因此麦村爬坡沙丘的移动速度较慢。但被植被覆盖的新月形沙丘或部分地区的格状沙丘的移动速率比麦村爬坡沙丘更慢^[20,34],说明植被覆盖也是影响沙丘移动的因素之一,对于格状沙丘而言通常是在不同风向的两组风的共同作用下形成的,风力方向不统一,导致了移动速度更慢。因此地形条件、风能环境、地表糙度及沙丘形态等也是影响沙丘移动的重要因素。

4 结论

麦村爬坡沙丘整体呈先扩大再缩小趋势。1970—2010年,爬坡沙丘面积、爬升路径长度和宽度均有明显增长;2010年之后爬坡沙丘规模相对稳定,面积缓慢缩减,沙丘的爬升路径长度和宽度无明显变化。2010年以来,爬坡沙丘表层沙垄分布越来越密集,交会情况也越来越复杂;对爬坡沙丘整体而言,各形态参数间相关性不大,而沙丘表层沙垄的大多形态参数两两之间有良好的相关性。

2016—2022年,米林风向以N和NNE为主,而起沙风风向以SW和SSW为主,合成输沙方向为NE方向。由于年际间风能环境、降水等气候情况不尽相同,爬坡沙丘表层的沙垄呈现的移动情况也有所区别。总体而言,研究区风能环境低($DP=28.18$),爬坡沙丘表层沙垄移动较慢,多年来平均移动速度为 $2.57 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,沿NNE—SSW方向摆动,最终表现为整体向 20° 方向移动15.71 m。受地形影响,近地表的气流特征在大区域风况的基础上进一步控制爬坡沙丘发育与演变,使沙垄实际移动方向与合成输沙方向存在一定夹角。

沙丘的形态演化和移动是受多种因素影响的过程,地形、风况、植被、降水及沙丘本身特性等方面的作用共同造就了形态特殊的爬坡沙丘,使其成为了雅鲁藏布江沿岸一带独具特色且引人注目的风沙地貌景观。

参考文献:

- [1] 李森,董光荣,董玉祥,等.西藏“一江两河”中部流域地区土地沙漠化防治目标、对策与治沙工程布局[J].中国沙漠,1994,14(2):55-63.
- [2] 杨逸畴,高登义,李渤生.雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探[J].中国科学:B辑,1987,17(8):893-902.
- [3] 李森,王跃,哈斯,等.雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题[J].中国沙漠,1997,17(4):10-18.
- [4] 朱震达,吴正,李钜章,等.塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[J].科学通报,1966(13):620-624.
- [5] 黄鹏展,阿布都热西提·阿布都外力,赵建平.沙丘移动的研究现状与未来研究思路[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(1):1-5.
- [6] 王宁波,李生宇,王海峰,等.塔克拉玛干沙漠腹地垄间地上覆沙丘形态的空间变化特征及其成因[J].干旱区地理,2014,37(1):89-96.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘鑫,高鑫.塔克拉玛干沙漠南缘新月形沙丘移动特征[J].干旱区研究,2024,41(4):661-673.
- [10] 任孝宗,王嵩松,王亚梅,等.浑善达克沙地西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的地貌特征[J].干旱区研究,2023,40(12):2016-2030.
- [11] 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.
- [12] 董苗,严平,王晓旭,等.青藏高原不同气候带爬坡沙丘沉积物特征及其环境指示[J].地理学报,2023,78(7):1825-1846.
- [13] 王晓枝,董治宝,南维鸽,等.拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J].中国沙漠,2022,42(4):22-31.
- [14] 田伟东,杨军怀,王树源,等.雅鲁藏布江河谷沙丘沉积物粒度特征及其环境指示[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):128-134.
- [15] 周娜,张春来,刘永刚.雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究[J].地理研究,2012,31(1):82-94.
- [16] 刘婷,贾晓鹏,陈定梅,等.雅鲁藏布江中游平坦流沙地表空气动力学特征[J].中国沙漠,2023,43(5):194-203.
- [17] Yang J H, Xia D S, Wang S Y, et al. Near-surface wind environment in the Yarlung Zangbo River basin, southern Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(6): 917-936.
- [18] Fryberger S G. Dune forms and wind regime [M]//McKee E D. A study of Global Sand Seas. Washington, USA: U. S. Survey-Geological, 1979: 137-169.
- [19] 贾光普.阿拉善戈壁地区新月形沙丘形态特征与动态演变过程研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [20] 许明静,吕萍,肖南,等.毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响[J].中国沙漠,2020,40(4):71-80.
- [21] Norri R M. Barchan dunes of Imperial Valley, California [J].

- The Journal of Geology, 1966, 74(3): 292.
- [22] 王嵩松. 基于遥感影像的新月形沙丘动态监测[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 187-191.
- [23] 朱震达, 郭恒文, 吴功成. 塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘移动的研究[J]. 地理学报, 1964(1): 35-50.
- [24] 马鹏飞, 张正偲, 论珠群培, 等. 雅鲁藏布江曲水-泽当段风沙活动动力条件分析与风沙灾害防治建议[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 10-18.
- [25] 秦豪君, 杨晓军, 马莉, 等. 2000-2020年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 53-64.
- [26] Rasmussen K R. Some aspects of flow over coastal dunes[J]. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B-Biological Sciences, 1989, 96: 129-147.
- [27] Arens S M. Transport rates and volume changes in a coastal foredune on a dutch wadden island[J]. Journal of Coastal Conservation, 1997, 3(1): 49-56.
- [28] White B R, Tsoar H. Slope effect on saltation over a climbing sand dune[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 159-180.
- [29] 李森, 董光荣, 申建友, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1999(1): 88-96.
- [30] 杨军怀, 夏敦胜, 高福元, 等. 雅鲁藏布江流域风成沉积研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(8): 863-877.
- [31] Rendell H M, Clarke M L, Warren A, et al. The timing of climbing dune formation in southwestern Niger: fluvio-aeolian interactions and the role of sand supply[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(10/13): 1059-1065.
- [32] Blight, Geoffrey, Blight, et al. South Africa's mountain-climbing sand dunes mechanism of formation and present status[J]. Civil Engineering: Magazine of the South African Institution of Civil Engineering, 2013, 21(7): 11-19.
- [33] 落桑曲加, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游不同地表输沙量特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 6-13.
- [34] 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.
- [35] 夏敦胜, 杨军怀, 王树源, 等. 雅鲁藏布江流域风成沉积空间格局、沉积模式及其环境效应[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 229-244.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 王瑞明, 张晓东, 李帅, 等. 某受地形阻挡风场的CFD数值模拟[J]. 风能, 2023(10): 68-76.
- [39] 张正偲, 董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 734-747.
- [40] 孙赫, 苏凤阁, 黄敬恒, 等. 第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 91-104.
- [41] Yang Z L, Qian G Q, Dong Z B, et al. Migration of barchan dunes and factors that influence migration in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea, China[J]. Geomorphology, 2021, 378: 107615.
- [42] Bogle R, Redsteer H M, Vogel J. Field measurement and analysis of climatic factors affecting dune mobility near Grand Falls on the Navajo Nation, southwestern United States[J]. Geomorphology, 2015, 228: 41-51.
- [43] 杨军怀, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 库鲁克沙漠风沙地貌与沙丘移动[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 1-8.

Morphological evolution and migration characteristics of a climbing dune in Mainling Great Valley section of Yarlung Zangbo River

Chu Jiaqi^{1ab}, Yan Ping^{1b}, Su Zhizhu², Yuan Wenjie^{1ab}, Wang Xiaoxu^{1b}, Zhang Xiao^{1b}, Zhao Huagang^{1b}

(1.a.MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control / b.Faculty of Geographical Science,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.School of History and Culture, Shanxi University, Taiyuan 030006,
China)

Abstract: The Yarlung Zangbo River basin has the ideal conditions for aeolian sand deposition, such as sand source, wind power and accumulation site, and aeolian geomorphology are widely distributed in the wide valley of the river. Based on high-resolution remote sensing images from 1970 to 2022 and meteorological data, this study analyzed the morphological evolution and migration characteristics of typical climbing dune in Mainling Great Valley section of Yarlung Zangbo River. The results showed that: (1) From 1970 to 2010, the overall scale of climbing dune in Maicun Village increased significantly, and then remained relatively stable. From 1970 to now, the surface sand ridges of climbing dunes are more and more densely distributed, and the intersection is more and more complicated. For the climbing dune as a whole, there is little correlation between the morphological parameters, but there is a good correlation between most of the morphological parameters of the surface sand ridges. (2) The prevailing wind direction in Mainling County was N and NNE, while the sand-driving wind direction is SW and SSW. The resultant drift direction is 53.87° , and the region has experienced a low wind energy environment ($DP=28.18$ VU) and moderate wind direction variability ($RDP/DP=0.72$) over the years. (3) From 2010 to 2022, the surface sand ridges of climbing dunes moved 15.71 m towards the NNE. The sand ridges migration rate is $0.23\text{--}26.79\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, and the average migration rate is $2.57\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. The low wind energy environment in the study area leads to slow sand ridges movement. Additionally, influenced by topography, near-surface air currents and large-scale wind conditions jointly govern the movement of the sand ridges, resulting in a discrepancy between their actual movement direction and the resultant drift direction. Terrain, wind conditions, vegetation, precipitation and the characteristics of the dunes themselves combine to create special climbing dune, making it a unique and eye-catching aeolian geomorphology landscape.

Key words: climbing dune; dune morphology; dune migration; dynamic change; Yarlung Zangbo River