

库姆塔格沙漠西缘风况特征及沙丘运移规律

赛亚热·赛都拉^{1,2}, 毛东雷^{1,2}, 徐佳瑞^{1,2}, 张勇^{1,2}, 杨帆³, 咎梅^{1,2}

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2.新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用风况资料和 Google Earth 卫星影像, 分析研究区域的风况特征及沙丘运移特征, 并研究沙丘年运移速度、方向及其规律, 对防沙治沙手段的提高具有重要意义。结果表明: (1) 研究区年平均风速为 1.535~1.768 m/s, 起沙风平均风速最高值出现在 5、6 月, 全年起沙风平均风速的最低值出现在 1 月。(2) 起沙风和输沙势主要分布在 WSW、W、WNW 和 NW 方位。(3) 输沙势为 0~26 VU, 属于低风能环境; 风向变率为 0.5~0.9, 属于中风向变率, 钝双峰风况。(4) 研究区沙丘年平均移动速度为 12.26 m/a, 沙丘平均年前移值在 10 m 以上, 属最快速类型, 平均移动方向为 125.13°, 与当地合成输沙方向基本一致。(5) 沙丘运移速度与沙丘高度、宽度呈负相关关系, 除沙丘高度、宽度以外, 风速、输沙势、沙丘密度也影响沙丘的运移速度。

关键词: 风况; 输沙势; 运移规律; 库姆塔格沙漠西缘

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0062-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.009

Characteristics of Wind Conditions and Dune Movement Rules on the West Edge of Kumtag Desert, China

SAIDOU LA Saiyare^{1,2}, MAO Donglei^{1,2}, XU Jiarui^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, YANG Fan³, ZAN Mei^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054;

2. Key Laboratory of Lake Environment and Resources, Xinjiang Drought Zone, Urumqi 830054;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830002)

Abstract: Using the wind condition data and Google Earth satellite images, the wind condition characteristics and dune movement characteristics were analyzed in this paper. And the annual movement speed and direction and rules were studied, which was of great significance to the improvement of sand prevention and control means in the studied region. The results showed that: (1) The annual average wind speed in the study area was 1.535~1.768 m/s, the highest average wind speed of sand blowing occurred in May and June, while the lowest in January. (2) Sand blowing wind and sand transport potential were mainly distributed in the directions of WSW, W, WNW and NW. (3) The sand transport potential was between 0 and 26 VU, which was a low wind energy environment. The variability of wind direction was between 0.5 and 0.9, which belonged to the variability of stroke direction and blunt bimodal wind conditions. (4) The average annual moving speed of the dunes in the study area was 12.26 m/a, and the average forward movement of the dunes was above 10 m, which was the fastest type; the average moving direction was 125.13°, which was basically the same as the local synthetic sand transport direction. (5) Sand dune moving speed was negatively correlated with its height and width. In addition to height and width, wind speed, sand transport potential, and sand dune density also affected the moving speed of sand dunes.

Keywords: wind condition; sand transport potential; movement rule; west edge of Kumtag Desert

荒漠化是当今人类面临的一个重要环境问题, 作为荒漠化 3 种不同运动形式之一, 沙丘运移对人类生存和发展带来了严重的威胁^[1], 因此荒漠化研究越来越

越受到人们的高度重视。沙丘运移是判断荒漠化扩张的重要指标, 认识沙丘运移规律是区域风沙灾害防治的前提, 通过研究沙丘运移, 进而预测沙丘运移方

收稿日期: 2021-06-04

资助项目: 教育部人文社会科学规划基金项目(18YJAZH064); 新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心项目(XJNURWJD2019A06); 新疆师范大学“十三五”校级重点学科地理学项目(17SDKD0701)

第一作者: 赛亚热·赛都拉(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事风沙地貌及荒漠化防治研究。E-mail: 319489249@qq.com

通信作者: 毛东雷(1975—), 男, 博士, 主要从事风沙地貌及荒漠化防治研究。E-mail: donglei6325@sina.com

向与速度,为防沙治沙提供科学依据^[1-3]。目前诸多学者对我国沙漠地区,如塔克拉玛干沙漠^[4-8]和巴丹吉林沙漠^[9-10]、毛乌素沙地^[11-13]、乌兰布和沙漠^[14-16]等地区的沙丘运移状况进行了大量研究,对区域风沙灾害的治理发挥着重要的作用。杨军怀^[4]利用 Google Earth 卫星影像系统监测了塔克拉玛干沙漠沙丘运移速度与方向,并对沙丘运移的驱动因素以及沙丘运移过程中的形态特征变化进行了详细的讨论和分析。王静璞等^[11-12]、许明静等^[13]研究了毛乌素沙地新月形沙丘的运移过程指出,沙丘运移过程中受较多因素的多重影响;陈芳等^[10]利用 Landsat TM 影像对巴丹吉林沙漠沙丘运移变化进行分析发现,沙梁线的移动速度与沙丘高度呈负相关关系,沙丘越高,移动速度越慢,反之亦然。本文利用 Google Earth 卫星影像分析并探讨库姆塔格沙漠西缘的风况特征和沙丘的运移特征以及影响研究区沙丘运移速度的主要因素,为更深入研究沙丘运移规律及研究区风沙灾害的预防与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国西北干旱区鄯善库姆塔格沙漠西缘(42°37'N,89°41'E),属于极端干旱大陆性气候,多年平均降水量在 25 mm 以下,但年均蒸发量超过 2 800 mm,沙漠区甚至超过 3 000 mm,气候极端干旱少雨,故被称为“早极”^[17]。库姆塔格沙漠风沙活动强烈,并呈现从沙漠的北部向南部逐渐降低趋势^[18],年平均风速 3 m/s,8 级以上大风天数 100 天以上,最高风速可达 25 m/s,沙漠流动性大,多沙尘和浮尘天气,是我国沙尘暴频发区,其风蚀区面积居我国第二位^[17],强劲的风力特征为沙漠的形成发育提供了动力条件。

1.2 研究方法

本文主要采用吐鲁番东坎气象站(42°50'N,89°15'E)15 年(2005—2020 年)1 h 间隔 2 min 观测的风速和风向数据进行统计,分析风速、风向特征的月、年际变化,并计算出起沙风平均风速、起沙风频率等。库姆塔格沙漠的临界风沙起动速度为 6.0 m/s,在处理风速数据的过程中,首先选取数据中风速 ≥ 6.0 m/s 的风速,其次对 16 个方位的起沙风进行统计^[17]。另外,利用 Fryberger-Dean^[19]的输沙势计算方法对研究区风能环境和输沙强度进行了分析。计算公式为:

$$DP = V^2(V - V_c)t$$

式中:DP 为输沙势,其单位为矢量单位(VU),反映在一段时间内某一方位起沙风的输沙能力;V 和 V_c 分别为 10 m 高度的起沙风速与起动风速(nmile/h)。经过矢量合成,将 16 个方位的输沙势进行合成,得

到合成输沙势(RDP)和合成输沙方向(RDD)。合成输沙势与输沙势之比(RDP/DP)称为方向变率指数,该指数能反映起沙风的方向变率^[20]。根据输沙势大小,Fryberger 等^[19]将风能环境分为低风能环境($DP < 200$)、中等风能环境($200 < DP < 400$)和高风能环境($DP > 400$)。按照输沙玫瑰图,风向分布划分为窄单峰风况、宽单峰风况、锐双峰风况、钝双峰风况与复杂风况。按照风向变率,风况可分为高变率($RDP/DP < 0.3$)、中等变率($0.3 \leq RDP/DP \leq 0.8$)和低变率($RDP/DP > 0.8$)。

沙丘运移是根据 Google Earth 提供的遥感影像,选择库姆塔格沙漠西缘较为典型的 18 个新月形沙丘。沙丘运移特征则通过对比 3 期(2003 年、2010 年和 2013 年)的历史影像来获取,从而监测其在 3 期影像中选择沙丘的运移方向、速度及其形态特征变化。沙丘运移示意图首先是使用 Google Earth 的多边形工具来绘制,其次采集沙丘几个时期的垂直投影形状,将采集到的所有结果导入在 Arcgis 里面,生成沙丘的基本轮廓,最终用于绘制沙丘运移示意图。对于沙丘前移距离的计算,利用 Google Earth 的监测路径工具测量 2 期卫星影像中沙丘背风坡脚点与最新一期卫星影像中沙丘背风坡脚点之间的距离,从而计算出沙丘的运移距离和运移速度。

2 结果与分析

2.1 风况特征

风速和风向是分析风况特征的 2 个主要内容,风速取决于区域风蚀能力的强度,对于沙丘只有当起动风速 ≥ 6 m/s 时才算是有效的起沙风,风向决定于区域沙丘的运移及堆积方向。

2.1.1 风速月际变化特征 平均风速是衡量某一区域风沙活动状况的重要指标^[2]。库姆塔格沙漠西缘年平均风速为 1.54~1.77 m/s,平均值为 1.64 m/s,其中平均风速最大值出现在 2016 年,为 1.77 m/s;总体上研究区风速波动较小。由图 1 可知,研究区月平均风速 5、6 月最大,分别为 2.07、2.06 m/s;11、12 月平均风速较小,分别为 1.19、1.15 m/s。从季节变化来看,夏季平均风速最大,冬季平均风速最小,起沙风的最大风速最高值出现在 5、6 月,最低值出现在 1 月。此外,起沙风日数较大比例集中在 4—8 月,其 5 月为最高,而 10 月至翌年 3 月起沙风日数的比例较小,最低值出现在 1 月(几乎为 0)。因此,在库姆塔格沙漠全年中风速 ≥ 6.0 m/s 的日数在春夏季所占的比例相对较大,全年起沙风日数至少为 49 天,最多可达 100 天。

2.1.2 风向季节变化特征 起沙风决定沙丘运动的方向,通过对研究区风向统计资料分析可知,研究

区起沙风风向变化范围较小(图 2),具有较单一起沙风风向的特点。研究区年起沙风中以 WSW、W、WNW、NW 风向频率最大,起沙风频率分别为 10.17%、21.00%、24.76%、11.77%。主风向较集中,占全年起沙风出现的频率为 67.70%。总体来看,研究区 70.90% 以上风速 6~8、8~10 m/s 风速在该区域出现的频率为 20.43%,10~12 m/s 风速出现的频率为 5.74%,而 12 m/s 及以上的风速只占整个研究区起沙风频率的 2.92%。从图 2 可以看出,随着风速越大,各等级风速出现的频率越来越小。

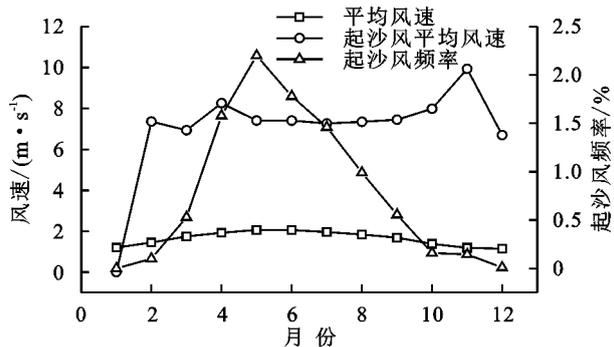


图 1 月平均风速、起沙风平均风速及起沙风频率的变化

由图 3 可知,全年各季节起沙风频率存在较大的差异,春季在全年各季节中起沙风频率最大,为 47.74%,风向主要为 W 和 WNW,其中 WNW 风向起沙风占全年起沙风频率最大,为 12.71%,其次是 W 风向占年

起沙风频率的 9.79%。夏季在全年各季节中起沙风频率也相对较高,占全年起沙风频率的 46.8%,风向也以 W 和 WNW 为主,频率分别为 10.17%和 9.32%。秋季各风向起沙风占全年起沙风频率的 9.32%,WNW 风向占年起沙风频率的 2.92%,且起沙风的频率最大。而冬季在全年各季节中起沙风出现频率最低,频率为 0.94%,以 NW 风向为主,起沙风频率为 0.19%。可以看出,库姆塔格沙漠西缘一年四季风向较为稳定,以 WSW、W、WNW 和 NW 风向为主,其中 WNW 风向占全年起沙风的频率最大,为 24.95%。

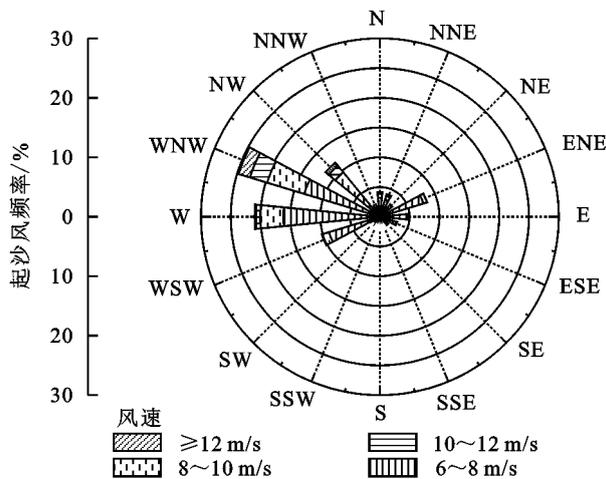


图 2 全年起沙风风向玫瑰图

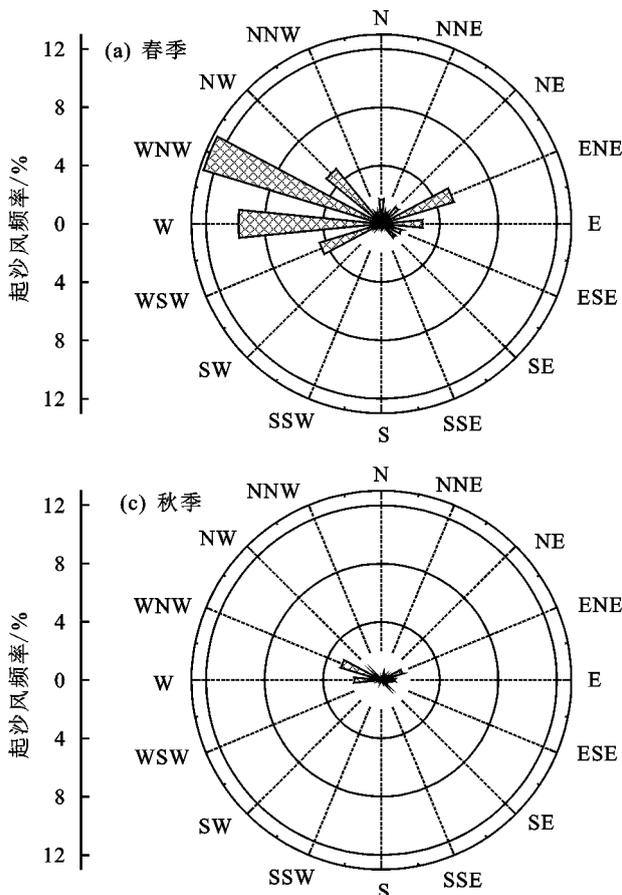
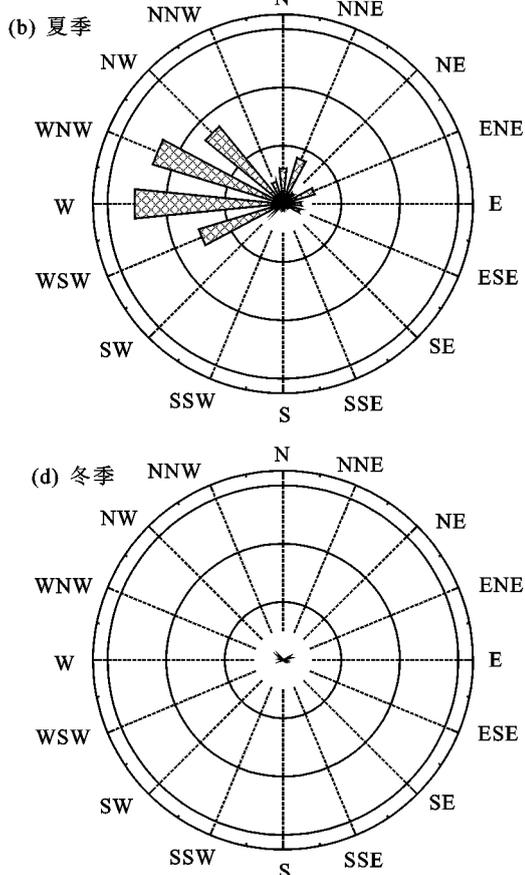


图 3 各季节起沙风风向玫瑰图



2.2 输沙势年际差异分析

输沙势指风在一定方向和时间内搬运沙粒的潜在能力。研究区输沙势为 0~26 VU,按照 Fryberger 等^[19]风能环境划分标准 $DP < 200$ VU 属于低风能环境,因此该区域属于低风能环境。由表 1 可知,该地区的输沙势存在明显的年际差异:其中 2012 年输沙势最大,为 26 VU,其次是 2019 年,输沙势为 13.53 VU。2006 年和 2008 年相对较小,分别为 2.54,3.31 VU。由图 4 可知,库姆塔格沙漠西缘输沙方向以 W、WNW 和 NW 风向为主,最大输沙势在

WNW 方位上。另外,该区域合成输沙势和输沙势呈现出同样的年际变化,年际变化趋势基本一致,合成输沙势在输沙势大的年份较大,而合成输沙势在输沙势较小的年份较小。合成输沙势风向变率指数描述了输沙势与合成输沙势之间的比率关系^[21-22]。库姆塔格沙漠西缘合成输沙势风向变率为 0.5~0.9,属于中风向变率,说明研究区风向变化较大,属钝双峰型。研究区的合成输沙方向为 $105.85^{\circ} \sim 169.93^{\circ}$,主要在东东南和南方位之间(ESE—SE)。

表 1 研究区 2005—2020 年风能环境变化

年份	参数				年份	参数			
	DP	RDP	RDD	RDP/DP		DP	RDP	RDD	RDP/DP
2005	7.43	5.58	125.05	0.75	2013	3.76	2.37	126.14	0.63
2006	2.54	1.23	169.93	0.49	2014	6.22	4.48	126.72	0.72
2007	3.44	1.97	123.57	0.57	2015	3.51	2.56	124.30	0.73
2008	3.31	1.69	139.38	0.51	2016	10.06	7.77	105.23	0.77
2009	5.73	4.91	108.85	0.86	2017	10.47	8.58	119.06	0.82
2010	12.83	10.71	124.22	0.84	2018	8.79	6.20	127.87	0.71
2011	3.88	2.13	131.49	0.55	2019	13.53	11.50	110.36	0.85
2012	26.00	23.83	120.17	0.92	2020	9.04	7.65	119.73	0.85

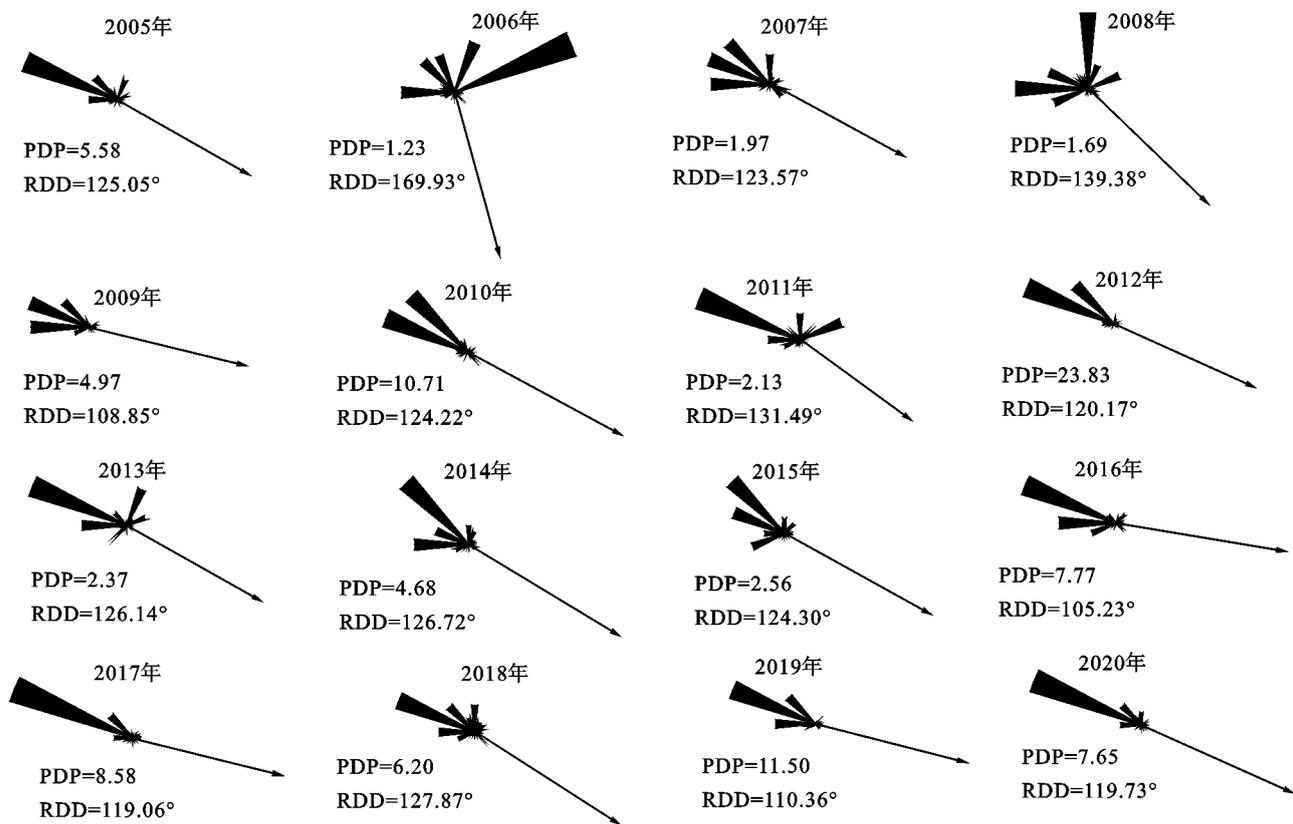


图 4 研究区 2005—2020 年输沙势玫瑰图

2.3 沙丘运移特征

2.3.1 沙丘运移速度 沙丘的形态不同,运移的速度也不一样,一般规律为单个新月型沙丘运移速度快^[23]。沙丘的运移速度主要受到风况(风速、风向)

的影响,区域风况决定着沙丘的形态,即风速与风向决定着沙丘高度、宽度及体积。研究区典型新月形沙丘的运移距离是通过测量沙丘背风坡脚移动的距离而得出,年平均运移速度是以运移距离除以

年数计算而得出。由表 2 可以看出,1 号沙丘运移速度为 22.8 m/a,为研究区年运移速度最快的沙丘,15 号沙丘运移速度最小,为 7.4 m/a。研究区沙丘年平均运移速度为 12.26 m/a,根据朱震达等^[24]对塔克拉玛干沙漠沙丘移动强度划分标准,沙丘平均年前移值在 10 m 以上,属于最快速的类型。图 5 为研究区典型新月形沙丘在 3 个时期的运移过程,可以看出该库姆塔格沙漠西缘沙丘运移的速度比较快,18 个沙丘都有很明显的的前移。此外,沙丘走向为 ESE—SSE,高度在 1~10 m,沙丘间距在 100~800 m,沙丘前移很明显,平均前移方向为 125.13°,与当地合成输沙方向基本一致。

表 2 沙丘年运移速度

编号	运移距离/m			年平均运移速度/ (m·a ⁻¹)
	2003—2010 年	2010—2013 年	2003—2013 年	
1 号	153	75	228	22.8
2 号	117	34	151	15.1
3 号	90	33	123	12.3
4 号	100	33	133	13.3
5 号	86	25	111	11.1
6 号	57	39	96	9.6
7 号	75	41	116	11.6
8 号	101	40	141	14.1
9 号	85	24	109	10.9
10 号	72	27	99	9.9
11 号	71	28	99	9.9
12 号	88	28	116	11.6
13 号	89	23	112	11.2
14 号	102	47	149	14.9
15 号	51	23	74	7.4
16 号	82	24	106	10.6
17 号	96	28	124	12.4
18 号	94	26	120	12.0

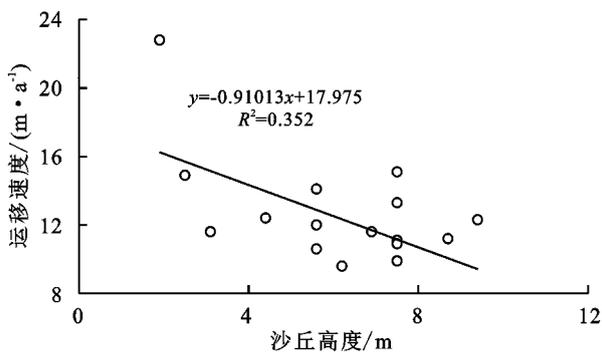


图 6 沙丘高度、宽度与运移速度的线性拟合

库姆塔格沙漠西缘沙丘运移速度与沙丘高度在 0.01 水平上呈极显著负相关性(表 3),沙丘运移速度与沙丘宽度、沙丘高度与宽度无显著相关性,说明总体上研究区沙丘运移速度与沙丘高度的相关程

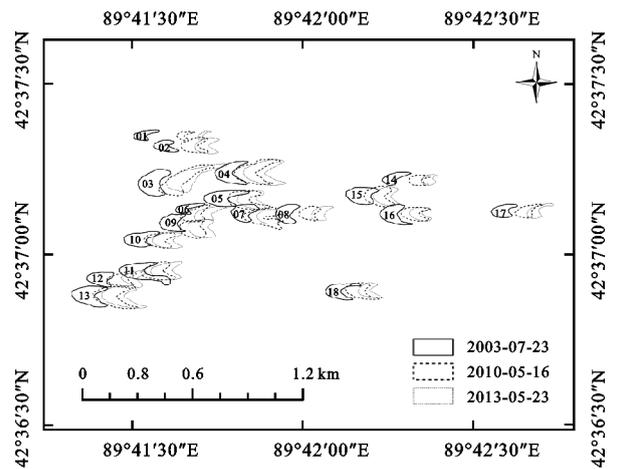
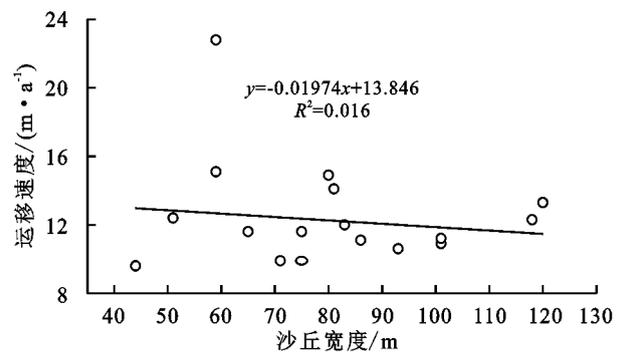


图 5 研究区沙丘运移示意

2.3.2 沙丘运移速度与高度、宽度间的关系分析

通过回归分析(图 6)发现,沙丘运移速度与高度、宽度之间存在着较稳定的线性负向关系,说明随着沙丘高度和宽度的增加,沙丘运移速度减小。研究区沙丘高度在 1~10 m,宽度在 50~120 m,根据杨军怀^[4]的研究证实,沙丘运移速度与高度之间具有强烈的负向关系,表明沙丘越高,沙丘运移速度越慢。这是因为在同样的风力环境和时间下沙丘高度越高,需要搬运更多的沙粒才能使沙丘移动,因此导致沙丘运移速度越慢。本研究结论与前人^[12]结论相似,但拟合程度较低($R^2 = 0.352$),表明在库姆塔格沙漠西缘影响沙丘运移的因素更为复杂,沙丘移动还与风速、沙丘的大小、排列密度等多种因素有关。沙丘宽度与沙丘运移速度也存在着负向线性关系,说明随着沙丘宽度增加,沙丘运移速度减小。但与高度相比,沙丘宽度与沙丘运移速度之间的线性相关性不是很强($R^2 = 0.016$),表明高度对沙丘运移速度的影响更大。



度较好。

2.3.3 沙丘运移速度与其他因子间的相关性 风是影响沙丘运移的主要因素之一,沙丘运移速度与风速之间有着密切关系;在风力条件下沙丘运移是由于沙

丘表面沙粒的位移来实现。相关研究^[25]已证实,沙丘运移速度与风速、输沙量之间存在着较稳定的正相关关系。按照 Bagnold^[26]的研究,沙丘运移速度和输沙势呈正比关系,而输沙势与起沙风速的立方呈正比。可知库姆塔格沙漠西缘输沙势虽小,但对沙丘运移速度也有一定影响,除了这些影响因素之外,沙丘的运移速度也与风向有关,在较为单一的风向条件下,沙丘的运移速度快于多风向条件下的运移速度。研究区风向单一,以西北风为主,风向单一也是影响库姆塔格沙漠西缘沙丘运移速度加快的一个重要因素。

表3 沙丘运移速度与高度及宽度的相关性分析矩阵

项目	沙丘运移速度	沙丘高度	沙丘宽度
沙丘运移速度	1		
沙丘高度	-0.593**	1	
沙丘宽度	-0.128	0.449	1

注:*表示在0.05水平(双尾)相关性显著;**表示在0.01水平(双尾)相关性显著。

另外,沙丘运移速度还与沙丘的排列密度、地形与地表的性质之间具有较强的相关关系^[25],沙丘的排列密度也是研究区沙丘运移的另一个重要驱动因素^[27]。沙丘排列密度的增加会导致地表粗糙度增加,这降低了近地表风速携沙的能力和沙丘的前移速度^[28]。从图6可以看出,6,9,11,12,15号等沙丘排列密集,造成沙丘的运移速度减小,而1,2,3,4,17,18号等独立沙丘的运移速度比排列密集的沙丘相对较大,表明沙丘密度越大,沙丘运移速度减小。

从上述分析表明,影响研究区沙丘运移的驱动因素较为复杂。风速和风向、沙丘的形态与排列密度均对研究区沙丘运移有一定的影响,除这些因素以外,还有地形等因素影响该区域沙丘的运移速度。

3 讨论

风况在沙丘形成与演变中发挥着重要作用,从风能环境来看,区域的风况特征会影响风沙地貌的空间分布^[29]。本研究表明,在同一风力条件下,每个沙丘的前移速度不同,研究区前移速度最快的沙丘速度为22.8 m/a,最慢的沙丘为7.4 m/a,表明风速对沙丘移动速度的影响被其他因素削弱,导致沙丘移动速度差异较大。因此,对研究区而言风速并非是影响沙丘移动的最大因素,它对研究区沙丘运移速度的影响相对比较弱,但其他可能因素如沙丘高度对沙丘运移速度的影响占主要地位。风向与风向变率也对沙丘运移速度有一定的影响。

本研究结果表明,沙丘的平均移动方向与合成输

沙方向基本一致。沙丘移动速度与高度、宽度之间的相关性分析得出,它们之间存在着线性负相关关系,但相关性较其他地区弱,这与许明静等^[13]、杨军怀^[4]的研究结果相同。这是因为影响研究区沙丘移动速率的因素复杂,除风速、风向、沙丘高度、宽度和排列密度外,还有其他影响沙丘运移速度的因素,需要进一步研究确定。

研究区沙丘的移动造成周边的部分电线杆被掩埋,这对工农业设施产生了一定的影响,因此政府应采取一些防治风沙灾害的措施,以减缓沙丘移动的速度,降低其危害。本研究对库姆塔格沙漠西缘风沙灾害的预防与治理具有参考价值,但还有不足之处:(1)风速、风向数据较少,且气象站和研究区之间存在着一定的距离,不能更好地反映该区域总体风况特征;(2)利用 Google Earth 所测的高度、宽度、移动距离可能存在误差,后需实地观测与验证;(3)沙丘高度、宽度和密度等因素与沙丘移动之间关系的研究有待加强。

4 结论

(1)库姆塔格沙漠年平均风速为1.54~1.77 m/s,平均值为1.64 m/s,其中2016年平均风速最大。5,6月份月平均风速最大,11,12月份月平均风速最小。夏季平均风速最大,冬季平均风速最小。起沙风平均风速最高值出现在5,6月,全年最低值出现在1月。

(2)研究区年起沙风以WSW、W、WNW、NW风向频率最大,主风向较集中,输沙势为0~26 VU,属于低风能环境,合成输沙方向为105.85°—169.93°,主要在ESE和SE风向之间。研究区的合成输沙势风向变率除了2006年之外,其他年份均在0.5~0.9,属于中风向变率,钝双峰型。

(3)1号沙丘移动速度最快,15号沙丘移动速度最慢。研究区沙丘年平均移动速度为12.26 m/a,平均移动方向为125.13°,与当地合成输沙方向基本一致,沙丘移动速度属最快速类型。

(4)研究区典型新月形沙丘的运移速度与沙丘高度、宽度均呈负相关关系,沙丘越高越宽,运移速度越慢,与宽度相比,高度对沙丘运移速度的影响比较大;风速和风向、沙丘排列密度均对库姆塔格沙漠西缘沙丘运移速度有一定的影响,除这些因子以外,还有其他因子影响沙丘运移,但均对研究区沙丘移动的影响较小。

参考文献:

- [1] Kilibarda Z, Shillinglaw C. A 70 year history of coastal dune migration and beach erosion along the southern shore of Lake Michigan[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 263-273.
- [2] 毛东雷, 雷加强, 周杰, 等. 新疆策勒不同类型流动和半流动沙丘运移规律[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 278-282.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert [J]. *Geomorphology*, 2002, 42(3/4): 183-195.
- [6] 李爱敏, 韩致文, 钟帅, 等. 基于 CASS 和 ArcGIS 的新月形沙丘属性参数提取[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 484-491.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zhang Z C, Dong Z B, Li C X. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 1-13.
- [10] 陈芳, 刘勇. 巴丹吉林沙漠典型地域沙丘多年变化的遥感动态分析[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(4): 501-507.
- [11] 王静璞, 王光镇, 韩柳, 等. 毛乌素沙地不同固沙措施下沙丘的移动特征[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(2): 54-60.
- [12] 王静璞, 刘连友, 沈玲玲. 基于 Google Earth 的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 1094-1100.
- [13] 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.
- [14] 赵纳祺. 乌兰布和沙漠沿黄段冻结对沙丘坡面风积沙运移特征影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [15] 郭建英, 董智, 李锦荣, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘形态及其运移特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 40-44.
- [16] 何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 71-77.
- [17] 董治保, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 805-814.
- [18] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 等. 库姆塔格沙漠风沙活动特征[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(6): 939-946.
- [19] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]// Mckee E D. A Study of Global Sand Sea. Washington, USA: U. S. Government Printing Office, 1979.
- [20] 胡光印, 董治宝, 张正偲, 等. 若尔盖盆地起沙风况与输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 20-24.
- [21] 鲍锋, 董治宝, 张正偲. 柴达木盆地风沙地貌区风况特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3): 549-554.
- [22] 马倩, 武胜利, 吴焯, 等. 艾比湖流域风沙强度特征及其空间差异[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 21-27.
- [23] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春, 等. 柴达木盆地风况及输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 195-203.
- [24] 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.
- [25] 韩福贵, 仲生年, 常兆丰. 民勤沙区沙丘的基本特征及其移动规律研究[J]. *防护林科技*, 2005(3): 4-6.
- [26] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London, UK: Methuen, 1941.
- [27] 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.
- [28] 张正偲, 董治宝. 黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 332-341.
- [29] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 145-152.