

田敏,钱广强,杨转玲,等.柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风况特征及其对风沙地貌发育的影响[J].中国沙漠,2021,41(1): 1-9.

# 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风况特征及其对风沙地貌发育的影响

田敏<sup>1,2</sup>, 钱广强<sup>1</sup>, 杨转玲<sup>3</sup>, 罗万银<sup>1</sup>, 逯军峰<sup>1</sup>

(1.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,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.贵州师范学院 贵州省流域地理国情监测重点实验室,贵州 贵阳 550018)

**摘要:** 风况是影响风沙地貌发育的重要因子,在一定程度上决定了沙丘类型。为探究区域风沙地貌发育与风况之间的关系,对哈勒腾河流域不同区域一个完整年度的风况进行分析。结果表明:流域年平均风速为 $2.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,起沙风集中在春夏季,平均风速为 $7.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,起沙风事件平均持续时间为 $4.1\text{ h}$ ;流域输沙势 $122\text{--}254\text{ VU}$ ,属中低风能环境,风向变率 $0.51\text{--}0.58$ ,呈中等风向变率。区域风况表现有所差异,西部为中等风能环境,中部和东部为低风能环境。从西到东沙丘类型由穹状沙丘、新月形沙丘等简单类型向格状沙丘、金字塔沙丘等复杂类型过渡,风况变化与沙丘形态复杂程度具有一致性,沙丘整体沿合成输沙方向自西向东移动。结合风况与沙丘分布,推测流域风沙地貌是东部山体风化碎屑物经河流搬运和风力分选改造形成的。该研究结果对于全面认识区域风沙地貌分异规律以及理解风况与沙丘关系具有重要意义,能够为进一步研究沙丘演化及沙丘间相互作用提供基础资料。

**关键词:** 哈勒腾河流域; 风况; 风力持续时间; 输沙势; 风沙地貌

**文章编号:** 1000-694X(2021)01-001-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00086

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

风沙地貌是风和沙相互作用的产物,风是塑造地表形态的重要外营力,为沙粒的移动提供动力<sup>[1]</sup>。在风沙地貌发育过程中,风力作用不断改变沉积物的颗粒形状、机械组成和矿物成分等<sup>[2]</sup>。微观上,近地面气流状况影响单个沙粒的运动方式。宏观上,风况不同,沙丘类型和沙丘走向也存在差异。前人在风况与沙丘方面的研究已经相当成熟,风沙地貌研究者们通常根据合成输沙方向与沙丘排列之间的关系,对沙丘进行形态动力学分类<sup>[3]</sup>,通过风能环境、风向分布和风向变率等参数量化近地面风况与沙丘形态的关系<sup>[4-6]</sup>。近年来,研究者们还将区域风况与风沙地貌格局相联系,发现了不同沙漠风沙地貌组合规律与区域风况之间的联系<sup>[2,7-10]</sup>,提出了区域风沙地貌发育过程中风况的影

响和控制作用<sup>[11-18]</sup>。

然而,由于沙漠地区开放型的区域环境,沉积物来源复杂,沙丘发育时间尺度长,风沙地貌格局的形成演化难以用现代风况充分阐释,限制了学者对风沙地貌过程的深入认识。相对而言,柴达木盆地东北部的哈勒腾河流域,是一个近似椭圆的半封闭高原内陆盆地,沉积物来源简单,风沙地貌发育时间尺度短且区域差异明显,不仅塑造了多种沙丘类型,而且涵盖沙丘发育生命周期的不同阶段,为开展风况与区域风沙地貌发育之间关系研究提供了理想场所。目前,对该地区风沙地貌的认识还仅仅停留在类型划分方面,其形成演化的动力条件尚不明确。因此,分析该区域风况特征,探讨其与风沙地貌发育之间的关系,对于认识区域风况与沙丘形态演化之间关系、丰富和完善风沙地貌学理论具有重要意义。

收稿日期:2020-06-08; 改回日期:2020-08-04

资助项目:国家自然科学基金项目(41671009,41271022)

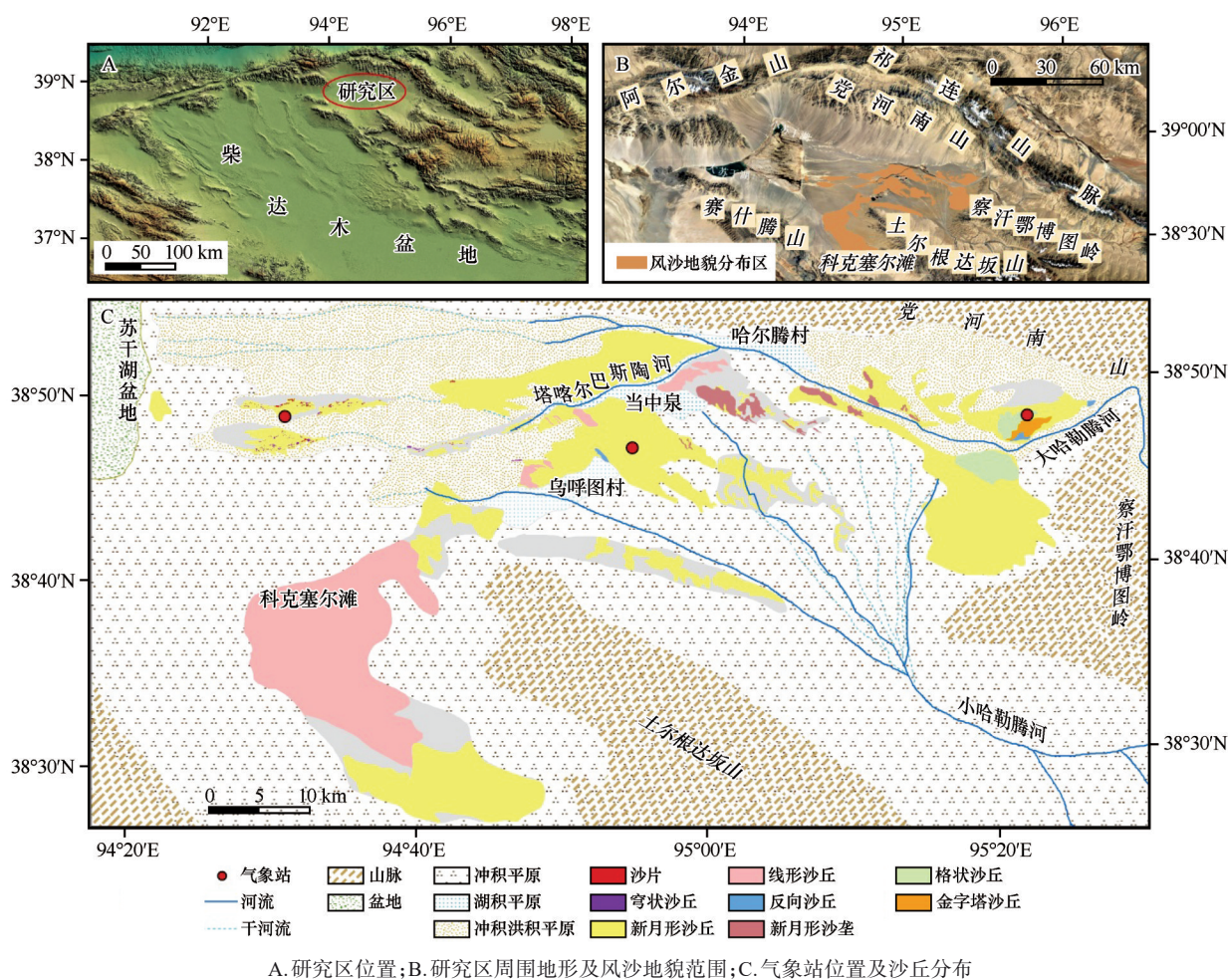
作者简介:田敏(1996—),女,山西高平人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: tianmin@lzb.ac.cn

通信作者:钱广强(E-mail: gqqian@lzb.ac.cn)

## 1 研究区概况

哈勒腾河流域位于柴达木盆地东北部,东靠祁连山脉和党河南山,西邻阿尔金山,南以赛什腾山、土尔根达坂山为界,38°30′—39°10′N、94°30′—95°20′E,呈近似椭圆的半封闭状。该流域深居大陆腹地,海拔2 800—5 400 m,气候寒冷干燥,年平均气温4.11℃,1月最低,7月最高,气温年较差高达30.3℃;年降水量14.93 mm,降水季节变化大,集中在夏季,冬春季降水少,不到1 mm。沙丘主要分布在大、小哈勒腾河两岸。流域穹状沙丘平面上呈椭圆形,长轴呈东北—西南走向,主要分布在流域西部干涸河床上,高度一般小于1 m。新月形沙丘和沙丘

链分布广泛,东部大哈勒腾河下游、中部当中泉附近、西部平原区以及苏干湖盆地周围均有分布。西部以单个沙丘为主,其形成受西北风影响较大,轴线走向基本平行于盛行风向<sup>[19]</sup>,沙丘高不足2 m。中部和东部新月形沙丘链、沙垄较多,沙丘脊线呈东北—西南走向,沙丘高5—20 m。反向沙丘零星分布在流域中部西南位置和东部大哈勒腾河北岸,近南—北走向,沙丘高10 m左右。线形沙丘大多是新月形沙丘演化形成的,分布在科克塞尔滩、塔喀尔巴斯陶河南侧和乌呼图村附近,近东—西走向<sup>[20]</sup>。格状沙丘和金字塔沙丘出现在东部近山前地区,沙丘高30—50 m。受西风和地形的影响,沙丘主要自低处向高处由西向东移动<sup>[21]</sup>(图1)。



A. 研究区位置; B. 研究区周围地形及风沙地貌范围; C. 气象站位置及沙丘分布

图1 区域概况图

Fig.1 The map of regional general situation

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

为研究风况空间差异,在流域的西、中、东部各

架设一台标准型自动气象站(图1),地理坐标分别为38°48′N、94°31′E,38°46′N、94°55′E,38°47′N、95°22′E。风速和风向观测采用Gill公司生产的二维超声风速仪,测风塔高度为2 m,风向资料采用0°—360°记录,数据采集时间间隔为10 min。由于



气象站架设的时间不同,在西部、中部、东部气象站分别选取2015、2012、2012年的10 min间隔数据。

## 2.2 研究方法

主要统计风速和风向特征,其中风速特征从全部风速和起沙风风速两个角度统计,风向特征主要使用16方位统计起沙风在各方位上出现的频率。使用Fryberger-Dean公式<sup>[4]</sup>计算输沙势( $DP$ )来表示流域潜在的最大输沙量,公式如下:

$$DP = U^2 \times (U - U_t) \times t \quad (1)$$

式中: $DP$ 为输沙势,单位为矢量单位(VU); $U$ 为10 m高度风速,单位为节( $1.852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $U_t$ 为10 m高度起动风速,单位为节; $t$ 为风速 $U_t$ 出现次数占总观测次数的百分比。该式要求的风速是距离地面10 m高处的风速,而测风塔高度只有2 m,所以在进行输沙势计算时首先要进行高度换算。根据普朗特-冯卡门方程和拜格诺的风速廓线公式<sup>[22]</sup>:

$$U_z = U_* / k \times \ln(Z/Z_0) \quad (2)$$

$$U_{10} = U_* \times [(\ln Z_{10} - \ln Z_0) / (\ln Z_2 - \ln Z_0)] \quad (3)$$

式中: $U_z$ 为高度 $z$ 处的风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $U_*$ 为摩阻速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $k$ 为冯卡门常数; $Z_0$ 为地面粗糙度。考虑到地表状况并参考国外同类文献中的方法, $Z_0$ 取值为0.0001 m,则 $U_{10}=1.16U_*$ 。根据矢量合成法则将16方位的输沙势进行合成,可以得到合成输沙势

( $RDP$ )和合成输沙方向( $RDD$ )。 $RDP$ 表示一个地区净输沙能力, $RDD$ 则反映沙粒搬运的总体方向。 $RDP/DP$ 称为风向变率,表示风向变化情况。

根据输沙势大小,Fryberger等<sup>[4]</sup>将风能环境分为低风能环境( $DP < 200 \text{ VU}$ )、中等风能环境( $200 \text{ VU} \leq DP \leq 400 \text{ VU}$ )和高风能环境( $DP > 400 \text{ VU}$ )。根据输沙玫瑰图,将风向分布分为窄单峰风况、宽单峰风况、锐双峰风况、钝双峰风况和复杂风况。根据风向变率,将风况分为高变率( $RDP/DP < 0.3$ )、中等变率( $0.3 \leq RDP/DP \leq 0.8$ )和低变率( $RDP/DP > 0.8$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 风速与风向

#### 3.1.1 风速分布特征

平均风速是衡量区域风况的指标之一。研究区年平均风速为 $2.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中春季平均风速最大,为 $3.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同区域风速差异较大,西部年平均风速为 $3.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,一年中春季风速最大( $3.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),冬季最小( $2.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ );中部年平均风速为 $3.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,各季节平均风速均在 $3.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,春季略大于其他季节;东部年平均风速为 $2.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,冬季风速最小,仅 $1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他季节均大于 $2.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图2)。

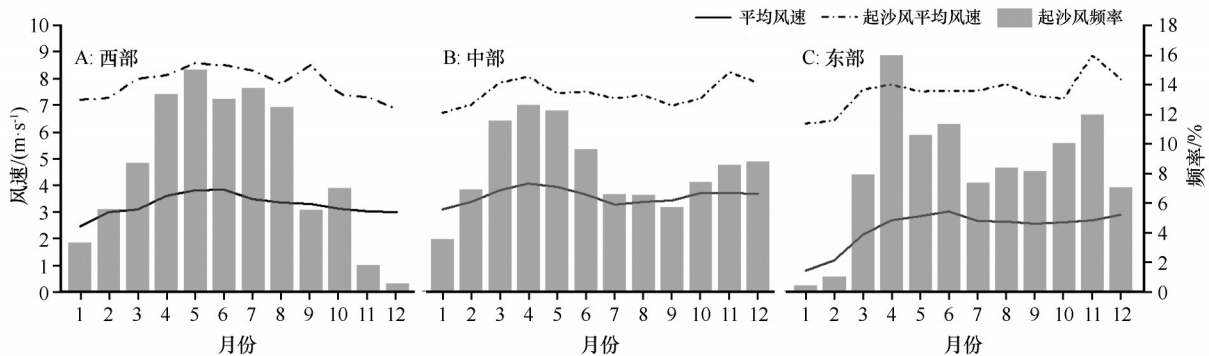


图2 不同区域平均风速、起沙风平均风速及起沙风频率月际变化

Fig.2 Monthly variation of mean wind speed, mean sand-driving wind and wind frequency in different regions

在风沙地貌动力学中,并非所有的风都对沙丘形成和沙丘移动起作用<sup>[22]</sup>,通常将能够产生风沙运动的最小风速定义为起动风速,经野外考察,本流域起动风速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大于起动风速的风称为起沙风<sup>[2]</sup>,它是评价地区风况的重要指标<sup>[23]</sup>。起沙风平均风速指所有大于起动风速的风的平均速度。流域起沙风平均风速为 $7.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,西部、中部、东部分别为 $8.07$ 、 $7.55$ 、 $7.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图2显示西部起沙风

频率5月最高,12月最低,春夏两季达76.3%。起沙风速春季最大( $8.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),冬季最小( $7.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。中部起沙风主要出现在春季,11、12月也较多,1、2月最少,二者仅占10%。起沙风月平均风速11月最大,1月最小,起沙风频率与风速月际变化较为一致。东部起沙风4月最多,占全年的15%,1、2月最少,频率和仅占1.4%。起沙风平均风速季节变化小( $7.60$ — $7.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。流域从西到东春季起沙风频率

减少,平均风速增大,其他季无明显规律。整体来看,流域80%以上风速 $6\text{--}9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,随着风速增大,各等级风速出现频率逐渐减小, $12\text{--}15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风在3

个区域出现频率均小于4%。而 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上的大风就更少,整个流域仅占0.4%,且主要出现在东部(图3)。

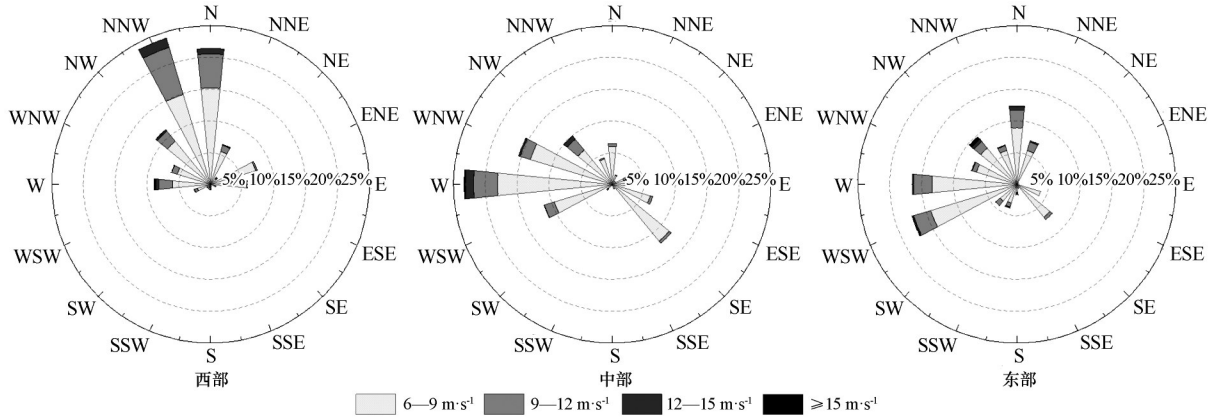


图3 不同区域起沙风玫瑰

Fig.3 Sand-driving wind roses in different regions

### 3.1.2 风向变化

风向决定地表沙物质的运动方向,风向变化影响风沙地貌类型与分布。流域西部以NW-N为主,在年起沙风中出现的频率为55.8%;中部呈明显的双风向,主风为W-WNW(38.8%),次风为SE(12.1%);东部起沙风主要来自WSW-W,N风次之,出现频率分别为33.8%和12.3%。主次风向频率和反映了不同区域的风向复杂程度,从西到东频率和减小,风向趋于复杂(图3)。

年风向区域差异反映风向在空间上的变化规律,而季节差异则体现风向的时间变化特征。表1显示西部春、夏、秋季主要为偏西偏北风,冬季是重要的风向转换期,风向集中在ENE-E。中部春夏季以北风、东南风和西风为主,而秋冬季北方向风明显减少,呈双风向。东部春季主要是西风和北风,夏季风向较为复杂,N、NNE、SE和WSW风频率相近,秋季以偏西风 and 北风为主,东南风也占有一定比例,冬季呈单一西风。

### 3.1.3 风力持续时间

风的输沙能力是风速大小和风力持续时间的函数<sup>[8]</sup>,风速越大,风力持续时间越长,输沙能力就越强,沙丘形态演化也越快。将出现时间间隔至少为12 h的两个起沙风称为风事件。将两个相邻风事件之间的所有起沙风作用时间累加得到一次风事件的风力持续时间。在观测期间流域西部共出现237次风事件,中部和东部风事件分别为249次和209次。相邻起沙风之间的时间间隔大于或等于

12 h的则称为单风事件,这种风事件的风力持续时间一般较短,携沙能力也较弱,东部单风事件发生率最高。流域风事件平均风速为 $6.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,平均风力持续时间为4.1 h,最长持续时间出现在春季为34.7 h,持续时间在10 h以上的仅占总数的7%。

风事件次数和风力持续时间月变化的空间差异明显。西部4—8月风力持续时间均超过125 h,12月最短仅5.9 h,9月风事件次数多但风力持续时间却很短,说明9月短风事件多,6月则相反。中部风事件次数月际变化小,但3—5月和11月的风力持续时间明显高于其他月份,1月风力持续时间最短。东部各月风力持续时间均在95 h以下,其中4月最长(93 h),1、2月均未超过6 h。东部的年风力持续时间明显低于西部和中部(图4)。

### 3.2 输沙势特征

输沙势是衡量区域风沙活动强度的重要指标<sup>[24-27]</sup>,在风能环境判断和风沙地貌形成及演变中广泛应用<sup>[28-31]</sup>,通常用输沙玫瑰图来表示。哈勒腾河流域西部年输沙势为254 VU,属于中风能区,合成输沙势和合成输沙方向分别为130 VU和SSE,呈锐双峰风况和中等风向变率;中部和东部地区年输沙势分别为193 VU和122 VU,属于低风能环境,合成输沙方向和风向变率均为ESE和中等变率。中部呈钝双峰风况,东部为锐双峰。从西到东年输沙势和合成输沙势逐渐变小,风能环境由中等变为低风能环境(图5)。

表 1 不同区域起沙风季节风向频率(%)

Table 1 The seasonal wind direction frequency of sand-driving wind in different regions (%)

区域	季节	风向							
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
西部	春季	7.33	1.50	0.30	1.73	1.65	0.18	0.00	0.17
	夏季	12.55	4.56	1.01	0.89	0.91	0.64	0.08	0.08
	秋季	1.21	0.51	0.07	1.83	0.84	0.03	0.00	0.05
	冬季	0.28	0.00	0.07	3.24	2.41	0.08	0.00	0.03
	合计	21.37	6.57	1.44	7.70	5.81	0.94	0.08	0.33
中部	春季	2.78	0.61	0.12	0.71	1.23	1.68	3.46	0.20
	夏季	3.12	0.92	0.50	1.06	0.78	1.43	1.58	0.53
	秋季	0.59	0.05	0.00	0.11	0.59	1.24	3.48	0.05
	冬季	0.00	0.00	0.00	0.47	0.93	2.31	3.53	0.00
	合计	6.49	1.57	0.62	2.35	3.53	6.66	12.05	0.78
东部	春季	5.32	2.35	0.00	0.00	0.03	0.46	1.26	0.31
	夏季	3.98	3.55	0.03	0.00	0.23	1.40	3.03	0.40
	秋季	3.00	1.03	0.00	0.00	0.06	1.57	2.23	0.00
	冬季	0.09	0.31	0.37	0.11	0.09	0.49	0.69	0.00
	合计	12.39	7.24	0.40	0.11	0.40	3.92	7.21	0.72

区域	季节	风向								总计
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
西部	春季	0.05	0.12	0.12	1.44	5.68	2.97	4.26	9.51	37.01
	夏季	0.26	0.05	0.10	0.33	0.68	1.54	4.53	11.03	39.24
	秋季	0.55	0.40	0.35	0.91	1.75	1.45	1.67	2.69	14.30
	冬季	0.05	0.21	0.15	0.07	0.81	0.53	0.71	0.81	9.45
	合计	0.91	0.78	0.71	2.74	8.92	6.49	11.16	24.05	100.00
中部	春季	0.08	0.08	0.34	2.38	8.26	7.78	5.14	1.51	36.36
	夏季	0.05	0.12	0.57	2.52	3.32	2.16	2.16	1.96	22.77
	秋季	0.00	0.00	0.09	2.14	5.64	4.22	2.58	0.89	21.67
	冬季	0.00	0.00	0.23	4.22	6.14	1.30	0.05	0.02	19.20
	合计	0.12	0.20	1.24	11.26	23.36	15.47	9.93	4.36	100.00
东部	春季	0.23	0.83	0.69	5.61	7.98	3.46	3.29	2.60	34.41
	夏季	1.49	2.43	1.52	2.95	1.14	0.80	2.12	2.00	27.06
	秋季	0.00	0.66	0.89	6.61	5.38	2.86	3.98	1.83	30.09
	冬季	0.00	0.06	1.26	2.15	2.00	0.40	0.37	0.06	8.44
	合计	1.72	3.98	4.35	17.31	16.50	7.52	9.75	6.49	100.00

从图 5 可以看出流域输沙势特征季节变化显著。西部从春季到冬季风况由锐双峰到单峰再到钝双峰,输沙势逐渐减少,秋末冬初是重要的风向转换期。中部春季输沙势最大,冬季最小,除夏季呈高风向变率、复杂风况外,其他季节均为中等变率和双峰风况。东部输沙势秋季最大,冬季最小。春秋季节为锐双峰和中等风向变率,夏季呈明显的钝双峰,属于高变率,冬季呈单峰风况,属低风向变

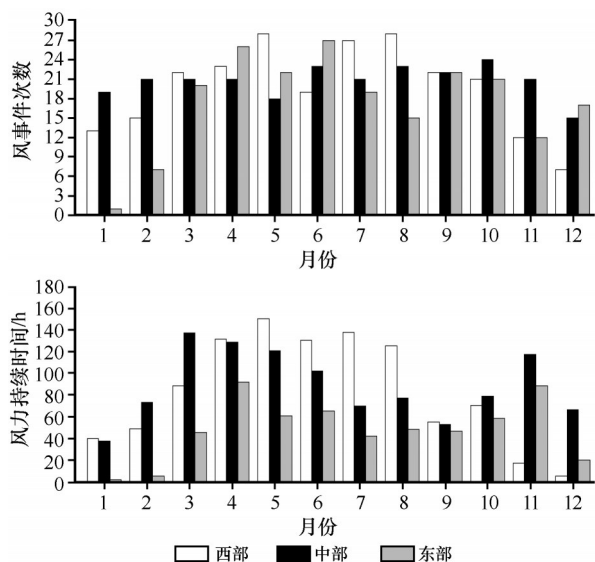


图4 不同区域风事件次数及风力持续时间月际变化

Fig.4 Monthly variation of the wind events and wind duration in different regions

率。流域西部输沙势年较差大于中部和东部。

## 4 讨论

该流域年平均风速  $2.39\text{--}3.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均值为  $2.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 低于其西南部的柴达木盆地沙漠<sup>[8]</sup> ( $3.03\text{--}4.23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均值为  $3.70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。年平均风速的空间分布受周围地形影响明显, 东部由于党河南山等高大山体阻挡, 风速明显低于西部, 流域中部地势较低且地形平坦, 年平均风速最高。年输沙势  $122\text{--}254\text{ VU}$ , 大于塔克拉玛干沙漠<sup>[10]</sup> ( $<100\text{ VU}$ ), 但小于柴达木盆地沙漠<sup>[8]</sup> ( $199\text{--}328\text{ VU}$ ) 和库姆塔格沙漠<sup>[32]</sup> ( $145\text{--}360\text{ VU}$ )。风向变率介于  $0.51\text{--}0.58$ , 风向变化程度高于柴达木盆地沙漠<sup>[8]</sup> ( $0.74\text{--}0.91$ ) 和塔克拉玛干沙漠<sup>[10]</sup> ( $0.66$ ), 与库姆塔格沙漠<sup>[32]</sup> ( $0.4\text{--}0.6$ ) 较为接近, 流域整体属于中低等风能环境和中等风向变率。

区域风况特征影响风沙地貌的空间分布。根据 Fryberger 等<sup>[4]</sup> 的风况与沙丘类型对应关系图, 中等风向变率下的新月形沙丘主要存在于中低等风能环境中, 对应风向为单一风向或窄风向组合风。流域西部以西北风为主, 且该方向平均风速 ( $4.75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 高于西部年平均风速 ( $3.31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 而其余方向起沙风频率小且风速低, 新月形沙丘单体主要分布在西部。风向变率对穹状沙丘的形成影响较大<sup>[32]</sup>, 高变率更利于其发育。西部冬季起沙风频率仅占  $9.4\%$ , 且风速小, 风向变率较高 ( $0.4$ ), 再加上

气温低, 降水后沙粒湿结, 适合近圆形的穹状沙丘发育。同时穹状沙丘的长轴走向与主导风向垂直, 反映了主导风的影响。流域中部属低风能环境, 主导风为西风, 次级风为西北风, 合成输沙方向为东, 在两个不对称的锐角相交风影响下, 新月形沙丘东北翼残留, 西南翼向东南方向延伸并纵向连接在中部形成大面积类似耙状的线形沙丘, 沙丘沿合成输沙方向向东延伸, 与 Tsoar 等<sup>[33]</sup> 提出的线形沙丘发育模式相符。格状沙丘反映两个接近垂直方向风<sup>[34]</sup>, 东部主导风来自西北, 次级风来自西西南, 格状沙丘的主、副梁走向分别与主次风向近乎垂直, 反映出风向对沙丘形态及走向的影响。一般来说, 在风向较为单一的地方, 沙丘走向与合成输沙方向的交角较小, 而在风况复杂的地方交角较大<sup>[11]</sup>。该流域沙丘走向与合成输沙方向基本一致, 但从西到东随着风况复杂性的增强, 交角却呈现西大东小的现象。沙丘走向与季节合成输沙方向对比表明, 西部沙丘走向与冬季合成输沙方向交角最小, 最为吻合, 说明冬季是西部沙丘形成演化的重要季节, 处于发育初期阶段的风沙地貌区受风况的季节变化影响大。另外, 流域从西到东沙丘高度整体增大, 反映了沙量供应的空间差异。

## 5 结论

对哈勒腾河流域不同位置 3 个气象站获取风况进行分析, 发现该流域平均风速  $2.39\text{--}3.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 起沙风平均风速  $7.55\text{--}8.07\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 春季是主要风季。起沙风以西北风和北风为主, 从西到东主次风向百分比减小, 风向渐趋复杂。流域风事件的平均风速为  $6.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均持续时间为  $4.1\text{ h}$ 。从区域来看, 起沙风平均风速西部最大, 东部次之, 中部最小, 西、中部起沙风平均风速春季最大, 冬季最小, 而东部的最大、最小值分别出现在秋季和夏季。东部起沙风速季节变化小于中、西部, 但风向季节变化大于中部和西部。流域年输沙势和合成输沙势从西向东减少, 西部年输沙势为  $254\text{ VU}$ , 属于中风能环境, 中部和东部为低风能环境, 年输沙势分别为  $193\text{ VU}$  和  $122\text{ VU}$ , 风向变率区域差异小, 均呈中等变率, 合成输沙方向为东南。

风况对区域风沙地貌具有重要的影响与控制作用。流域范围内从西到东输沙势减小, 风向分布趋于复杂, 同一方向上沙丘由单个沙丘体到沙丘链, 从穹状沙丘等简单沙丘到格状沙丘、金字塔沙



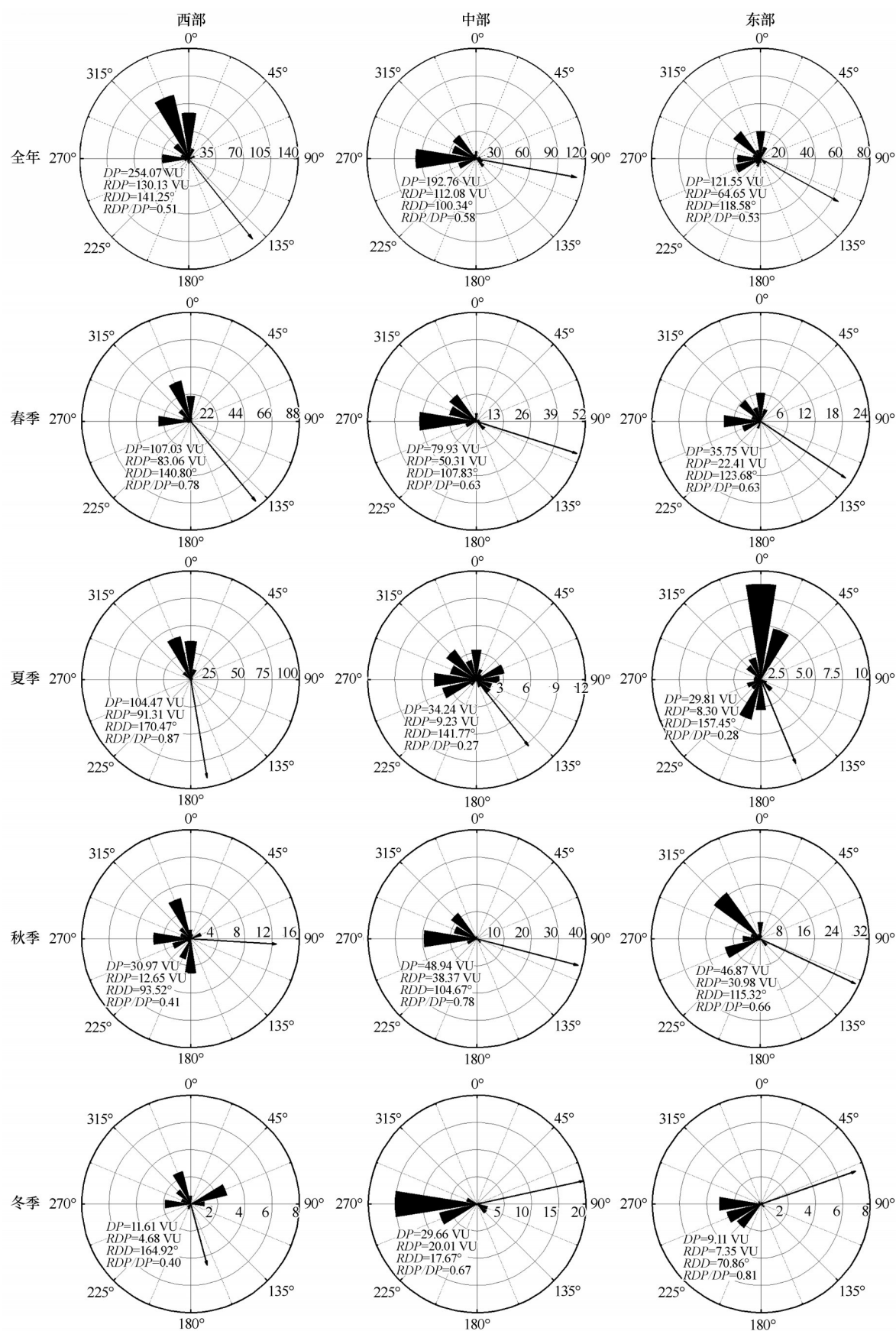


图5 不同区域年输沙势和季节输沙势

Fig.5 Annual and seasonal sediment transport potential in different regions

丘等复杂类型,风况特征与沙丘形态和类型具有较好一致性。同时,与年合成输沙方向相比,季节合成输沙方向与沙丘走向更加吻合,说明风况的季节变化对风沙地貌发育初期阶段具有重要意义。本文基于流域风况,分析了其区域差异与风沙地貌特征之间的关系;在将来的研究中,还需加强不同区域风力作用下沙丘形态演化、移动规律以及沙丘间相互作用研究,以期丰富和完善流域风沙地貌演变规律,尤其是区域差异方面的认识。

### 参考文献:

- [1] Qian G Q, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: morphology, grain size and influencing factors[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1888–1901.
- [2] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] Lancaster N. *Geomorphology* [M]. London, UK: Routledge, 1995.
- [4] 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.
- [5] Fryberger S G, Ahlbrandt T S. Mechanisms for the formation of eolian sand seas [J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1979, 23(4): 440–460.
- [6] Fryberger S G, Al-sari T S, Clisham T J. Wind sedimentation in the Jafurah sand sea, Saudi Arabia [J]. *Sedimentology*, 1984, 31: 413–431.
- [7] 李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌区风况分析[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1293–1298.
- [8] Pedersen A, Kocurek G, Mohrig D, et al. Dune deformation in a multi-directional wind regime: White Sands Dune Field, New Mexico [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(7): 925–941.
- [9] 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.
- [10] Qian G Q, Yang Z L, Luo W Y, et al. Morphological and sedimentary characteristics of dome dunes in the northeastern Qaidam Basin, China [J]. *Geomorphology*, 2020, 350: 106923.
- [11] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [12] 俎瑞平, 张克存, 屈建军, 等. 塔克拉玛干沙漠风况特征研究 [J]. *干旱区地理*, 2005(2): 167–170.
- [13] 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及其地貌学意义[J]. *中国沙漠*, 2000(1): 31–35.
- [14] 张正偲, 董治宝, 钱广强, 等. 腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1528–1533.
- [15] Zhang K C, Qu J J, An Z S. Characteristics of wind-blown sand and near-surface wind regime in the Tengger Desert, China [J]. *Aeolian Research*, 2012, 6: 83–88.
- [16] 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.
- [17] Hereher M E. Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt [J]. *Geomorphology*, 2018, 304: 113–120.
- [18] 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.
- [19] 钱广强, 杨转玲, 董治宝, 等. 基于多旋翼无人机倾斜摄影测量的沙丘三维形态研究 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 18–25.
- [20] 田敏, 钱广强, 杨转玲, 等. 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风成沉积物粒度特征与空间差异 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 68–78.
- [21] 董治宝. 青藏高原风沙地貌图集 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2017.
- [22] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 王训明, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠公路沿线的起沙风与输沙强度 [J]. *中国沙漠*, 1997, 17(2): 64–68.
- [24] Wasson R J, Hyde R. A test of granulometric control of desert dune geometry [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1983(8): 301–312.
- [25] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune types [J]. *Nature*, 1983, 304(5924): 337–339.
- [26] Thomas D S G. The nature and deposition setting of arid and semi-arid Kalahari sediments, southern Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 1988(14): 17–26.
- [27] Bullard J E. A note on the use of the "Fryberger method" for evaluating potential sand transport by wind [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997(67): 499–501.
- [28] Yang Y Y, Qu Z Q, Shi P J, et al. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger deserts, central Alxa Plateau, China [J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 143–156.
- [29] 柳本立, 张伟民, 刘小宁, 等. 莫高窟顶戈壁偏东风作用下输沙率变化的观测研究 [J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 516–521.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Gao X, Gadal C, Rozier O, et al. Morphodynamics of barchan and dome dunes under variable wind regimes [J]. *Geology*, 2018, 46: 743–746.
- [33] Tsoar H, Beer-Sheva. The formation of seif dunes from barchans: a discussion [J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1984, 28: 99–103.
- [34] 鲍锋. 柴达木盆地察尔汗盐湖地区风沙地貌发育环境与过程 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.



## Characteristics of wind regime and its influences on the development of aeolian landforms in the Haertenghe Reach, northeastern Qaidam Basin, China

Tian Min<sup>1,2</sup>, Qian Guangqiang<sup>1</sup>, Yang Zhuanling<sup>3</sup>, Luo Wanyin<sup>1</sup>, Lu Junfeng<sup>1</sup>

(1. 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. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China)

**Abstract:** Wind regime is one of the most important factors affecting the development of aeolian landforms. For wind-accumulated landforms (e.g. dunes), wind also determines the dune types partly. In order to explore the relationship between aeolian landforms and wind, we analyzed the wind pattern in different regions of the Haerteng River for a whole year. The results show that the mean wind speed is  $2.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the sand-driving wind mainly occurs in spring and summer with a speed of  $7.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the average duration of sand-driving wind events is 4.1 h. Annual drift potential range from 122 to 254 VU, which generally belongs to the intermediate-low wind environment and the index of directional variability ( $RDP/DP$ ) is mostly intermediate from 0.51 to 0.58. Regional wind regime is different and the western part is intermediate wind environment while central and eastern are low. From the west to the east, the dune types transform from simple (e.g. dome and barchan dunes) to complex (e.g. reticulate and star dunes) with the variation of wind direction and the dune morphology is consistent with wind pattern. Dunes move generally from west to east along the direction of sediment transport. Combined with wind regime and dune distribution, it is speculated that the aeolian landforms of the basin are formed by weathered debris from the eastern mountain that undergo river transportation and wind modification. This study is of great significance for comprehensive understanding the law of regional wind-sand landform differentiation and the relationship between wind regime and sand dunes. It also can provide basic data for further study about the interaction and evolution of dunes.

**Key words:** Haerteng River; wind regime; wind duration; sand drift potential; aeolian landforms