

武怡霏, 吕萍, 余军林, 等. 新月形沙丘在与线形沙丘共生区和单一类型区的形态及风况对比[J]. 中国沙漠, 2026, 46(3): 195–208.

新月形沙丘在与线形沙丘共生区和单一类型区的形态及风况对比

武怡霏, 吕萍, 余军林, 王欣瑶, 韦弈辰

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 中国以及世界其他沙漠新月形沙丘与线形沙丘的共生现象较普遍, 以往的研究集中在新月形沙丘与线形沙丘共生区域(共生区)或单一新月形沙丘分布区(典型区), 但缺乏对这两类区域的系统对比研究, 难以全面揭示不同环境下新月形沙丘的演变规律。本研究以中国12个共生区与7个典型区内的新月形沙丘为研究对象, 基于Google Earth高清影像和ERA5再分析数据分析沙丘的形态和发育风况。结果表明:(1)两类区域内沙丘形态存在明显差异。共生区内新月形沙丘尺度更小且形态更胖, 胖型沙丘占比超过50%, 苗条型最少; 典型区沙丘正常型居多, 其他形态占比差异不大。(2)两类区域内风况特征存在明显差异。共生区与典型区均处于低风能环境, 但共生区输沙势、平均风速更大, 起沙风风向更复杂、风向变率范围更广, 对应风况类型主要为钝双峰和宽单峰。(3)共生区与典型区内沙丘形态差异受风向变率和下垫面盐分胶结作用影响较大。此外, 沙源分配可能也是造成共生区沙丘尺寸较小的因素之一。针对共生区与典型区沙丘形态与风况特征的对比研究, 进一步弄清不同区域内新月形沙丘形态与发育环境之间的关系, 为今后风沙地貌的数值模拟提供帮助。

关键词: 新月形沙丘; 沙丘共生; 沙丘形态; 风况

文章编号: 1000-694X(2026)03-195-14

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00045

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

沙丘是沙漠中主要的地貌类型, 是风力作用下沙粒的堆积体^[1]。根据沙丘形态与风况之间的关系, 将沙丘分为横向沙丘、纵向沙丘与多方向风作用下的沙丘, 具体类型包括新月形沙丘、格状沙丘、线形沙丘、金字塔沙丘等^[2], 而沙丘的形态主要与风况的复杂程度有关^[3]。

目前, 已有众多学者对各类沙丘进行了相关研究, 而对于新月形沙丘的研究主要集中在沙丘的形态与移动特征、发育环境、分布与相互作用等^[4]。传统地貌学理论认为, 新月形沙丘形成于单一风向的地区, 常分布于沙漠边缘或风沙传输地区, 是分布广泛的一种风沙地貌类型^[1,5]。新月形沙丘具有多种形态, 按照迎风坡长度和宽度的比值, 可以将其分为苗条型、正常型、矮胖型、肥胖型^[6]。有学者提出, 部分地区的新月形沙丘通过一翼的延伸, 形态发生变化, 演化为线

形沙丘^[7], 从而形成新月形沙丘与线形沙丘共生现象, 即两种不同类型沙丘在同一区域内存在。在世界各地的沙漠中, 广泛存在新月形与线形沙丘的共生现象, 如北非、西亚的撒哈拉沙漠、马里卜等地区^[8-9]。中国新月形与线形沙丘的共存现象出现于塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地、巴丹吉林沙漠等地^[8-10]。

新月形与线形沙丘共生的研究主要集中在沙丘共生的发育环境。Rubin等^[11]发现柴达木盆地新月形沙丘与线形沙丘共生区内沉积物盐分、泥含量较高。鲍锋等^[12]指出柴达木盆地沙漠中的单一稳定风况是沙丘共生的基本条件。石唯康等^[9]针对撒哈拉沙漠17处共生沙丘区域进行探讨, 发现共生沙丘在低、中、高风向风能环境和不同风向变率下均可发育。马芳等^[8]对世界6个区域新月形沙丘与线形沙丘的风况进行了分析, 结果表明不同共生区域风况条件差异较大。已有研究表明, 在沙丘共生区

收稿日期: 2026-01-22; 改回日期: 2026-03-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271006)

作者简介: 武怡霏(2001—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为风沙地貌学。E-mail: wuyifei0115@163.com

通信作者: 吕萍(E-mail: lvping@snnu.edu.cn)

域内,新月形沙丘也可发育为苗条型、正常型、矮胖型、肥胖型4种类型,但不同区域内主要的沙丘类型存在差异^[9]。

上述针对新月形沙丘形态及风况的研究仅局限于单独的新月形沙丘典型分布区(典型区)或新月形沙丘与线形沙丘共生区(共生区),尚未将两类区域内沙丘形态及其风况特征联系起来进行系统的对比分析。因此本研究选取中国范围内共生区与典型区的新月形沙丘为研究对象,系统地对比两类区域内沙丘形态特征与风况特征的异同,为进一步全面揭示不同区域内新月形沙丘的发育及演变规律提供参考,同时为今后风沙地貌的数值模拟提供帮助。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

中国沙漠主要分布于干旱半干旱地区,大致范围在 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $75^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 。由于海陆位置及青藏高原的影响,中国西北地区冬季受西伯利亚-蒙古冷高压控制,气候异常干燥寒冷;夏季青藏高原阻挡了湿润的季风进入,使得西北地区的气候极度干旱,形成了世界上最大且具有典型干燥大陆性气候的温带、暖温带干旱区^[13]。

本研究共选取中国新月形沙丘与线形沙丘共生区12个、新月形沙丘典型区7个,各点位地理位置如图1所示,具体信息如表1所示。从遥感影像可知,新月形沙丘典型区与共生区在中国西北地区

的塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地沙漠、库姆塔格沙漠、阿拉善高原均有分布。

1.2 数据来源

沙丘形态参数通过 Google Earth (<http://map.google.com>) 遥感影像获取,影像分辨率最高可达0.5 m,在 ARCGIS 软件中对影像进行投影转换后,使用矢量化工具对沙丘形态进行测量。

风况数据来源于欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)发布的 ERA5 再分析数据集(1950 年至今 ERA5-Land 小时数据),该数据集使用了大量实测和卫星数据对资料进行数据同化,提供了1950年以来的全球大气数据^[14],近年来 ERA5 再分析数据的可靠性已得到了广泛的验证^[15-16]。ERA5 再分析数据集的时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 。因新月形沙丘发育时间均较长,本研究选取各研究区影像时间前15年的风况数据(V、U分量),将其转化为对应的风速风向数据,并计算起沙风频率、输沙势等,以此衡量共生区及典型区的长期平均风能环境及风沙输运强度。

1.3 方法

1.3.1 沙丘形态参数

本研究通过 Google Earth 遥感影像获取新月形沙丘的形态参数,其主要形态参数如图2所示,包括迎风坡长度(L)、背风坡长度(L_r)、宽度(W)、高度(H)、底面积(S)。根据新月形沙丘迎风坡长度(L)

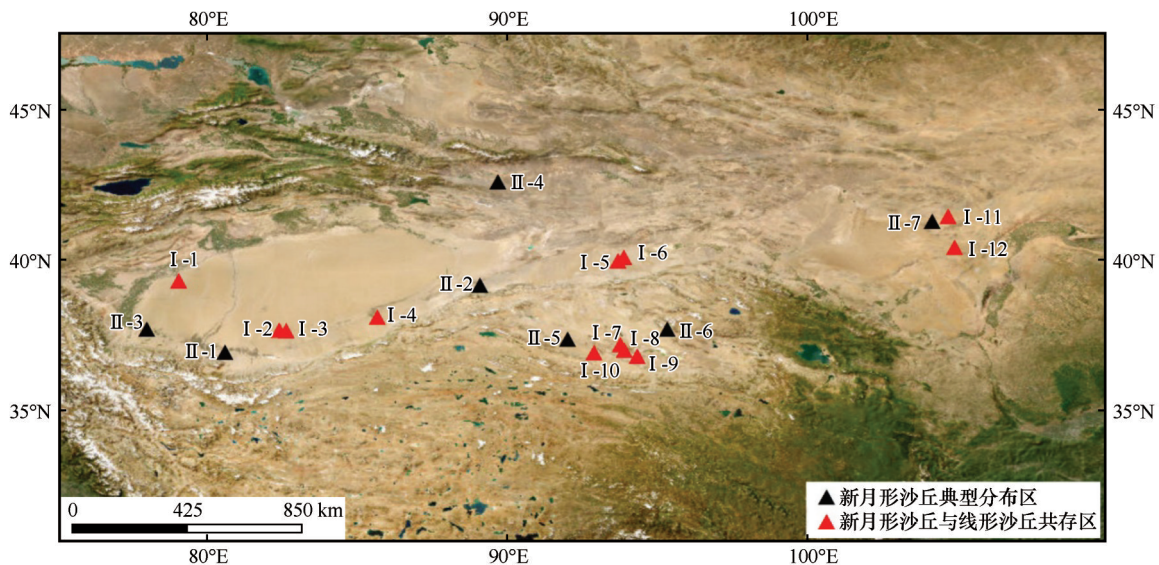


图1 研究区位置分布

Fig.1 The location of the study regions

表 1 新月形沙丘共生区与典型区分布位置

Table 1 The location of the typical regions and the coexisting regions of barchan dunes

区域	经度(E)	纬度(N)	地理位置	样本数量	
共生区	I-1	79°2'31"	39°19'29"	塔克拉玛干沙漠西北部	50
	I-2	82°24'10"	37°40'40"	塔克拉玛干沙漠南部	50
	I-3	82°37'42"	37°39'39"	塔克拉玛干沙漠南部	50
	I-4	85°40'14"	38°6'35"	塔克拉玛干沙漠东南部	50
	I-5	93°41'00"	39°59'33"	库姆塔格沙漠	50
	I-6	93°53'29"	40°6'06"	库姆塔格沙漠	50
	I-7	93°46'31"	37°12'16"	柴达木盆地沙漠南部	25
	I-8	93°54'01"	37°0'34"	柴达木盆地沙漠南部	25
	I-9	94°20'09"	36°49'22"	柴达木盆地沙漠南部	25
	I-10	92°54'01"	36°56'01"	柴达木盆地沙漠西南部	17
	I-11	104°42'10"	41°27'53"	阿拉善高原	50
	I-12	104°54'50"	40°26'15"	阿拉善高原	50
典型区	II-1	80°35'57"	36°57'9"	塔克拉玛干沙漠西南部	48
	II-2	89°5'11"	39°10'38"	塔克拉玛干沙漠东南部	22
	II-3	77°59'01"	37°42'19"	塔克拉玛干沙漠西南部	49
	II-4	89°41'0"	42°37'0"	吐鲁番盆地	41
	II-5	92°0'30"	37°20'58"	柴达木盆地沙漠西南部	50
	II-6	95°20'14"	37°42'40"	柴达木盆地沙漠东南部	6
	II-7	104°9'41"	41°17'42"	阿拉善高原	32

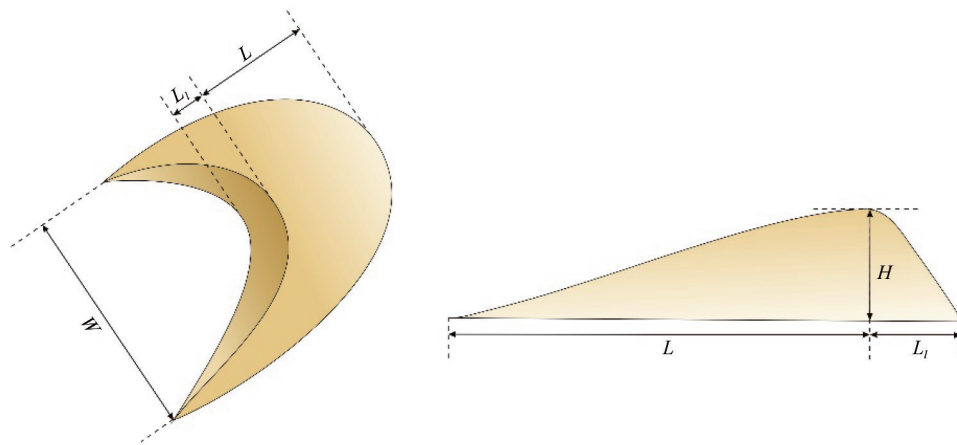


图 2 沙丘形态参数示意图

Fig.2 Sketch map of dune morphological parameters

与宽度(W)的比值,可将其分为苗条($L/W < 0.5$)、正常($0.5 \leq L/W < 0.75$)、矮胖($0.75 \leq L/W < 1$)、胖($L/W \geq 1$) 4 种类型^[6,17]。

新月形沙丘高度由经验公式计算:

$$H = L_1 \times \tan 30^\circ \quad (1)$$

式中: H 为沙丘高度; L_1 为沙丘背风坡长度; θ 为沙丘

背风坡的休止角,一般沙丘的背风坡休止角为 $28^\circ \sim 34^\circ$,本研究采用 30° 进行计算。

1.3.2 风况分析

风是决定风沙地貌形态的主要动力^[18],但并不是所有风都对沙丘的形成与演变起作用,在研究中只统计能使沙粒发生运动的风,即起沙风。

起沙风风向对沙丘的移动方向起决定作用,根据前人研究结果,本研究将10 m高度的起动风速确定为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [4,19-20]。按16方位统计各区域所有时间段内的起沙风发生频率,再统计各月平均风速、最大风速,通过输沙玫瑰图等表示结果。

输沙势是表示区域风沙活动强度的重要指标[18],表示区域潜在的输沙能力,也是目前风沙活动强度计算中使用最广泛的指标[18,21]。本研究采用Fryberger等[22]的输沙势计算方法计算输沙势(Drift Potential, *DP*)、合成输沙势(*RDP*)、合成输沙势方向(*RDD*)及风向变率(*RDP/DP*)等参数。其中*DP*表示风速统计中某一方向在一定时间内搬运沙的能力;*RDP*表示净输沙势,为16个方位输沙势的矢量合成;*RDD*指合成输沙势的方向;*RDP/DP*指合成输沙势与输沙势的比值,反映起沙风的单一程度,比值越大,起沙风风向越单一。

输沙势计算公式为:

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

式中:*DP*为输沙势;*V*和*V_c*分别为10 m高度的起沙风风速和临界起沙风速;*t*为起沙风频率。本研究确定10 m高度临界起沙风速为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [23]。

2 结果与分析

2.1 沙丘形态特征对比

本研究在共生区与典型区内分别选取248和492个新月形沙丘样本。统计结果表明,共生区与典型区内各形态参数的整体分布特征及不同区域内的分布特征均存在明显差异,如图3所示。

整体来看,共生区沙丘迎风坡更短,平均为42.72 m。其中,45.53%的沙丘集中分布在0~20 m,27.85%的沙丘分布在20~60 m;典型区平均迎风坡长度为52.65 m,主要分布在0~20、20~40、40~60 m,占比分别为21.37%、20.56%、23.79%,分布较为离散。在宽度方面,共生区宽度明显小于典型区,平均为46.70 m。其中,65.65%的沙丘宽度集中在0~50 m,20.53%分布在50~100 m,宽度大于100 m的沙丘仅占5.89%。典型区平均宽度为79.56 m,相比共生区分布较为离散,39.92%的沙丘分布在0~50 m,33.47%分布在50~100 m,宽度大于100 m的沙丘达26.61%。在高度方面,共生区沙丘高度存在明显的集中范围,而典型区分布相对离散。同时,共生区

沙丘显著低于典型区,其平均高度为4.22 m,75.00%的沙丘高度分布在0~6 m,其中44.72%的沙丘高度分布在0~2 m,沙丘高度整体较低。典型区沙丘平均高度为6.26 m,72%的沙丘高度处于0~8 m,且分布较为分散;19.76%的沙丘高度大于10 m,沙丘高度明显高于共生区。在底面积方面,共生区与典型区均存在显著的集中范围,但整体来看,共生区沙丘的底面积更加集中,且平均底面积更小。在共生区内,沙丘平均底面积为5 389.88 m²,69.72%的沙丘集中在0~5 000 m²。在典型区内,沙丘平均底面积为7 959.09 m²,60.48%的沙丘集中在0~50 000 m²,接近25%的沙丘底面积大于10 000 m²。

由于在塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地沙漠及阿拉善高原地区均同时存在共生区与典型区,因此对不同区域内新月形沙丘的形态也进行了对比。

在塔克拉玛干沙漠内,两类区域内沙丘形态规模差异最大,共生区沙丘规模显著小于典型区。其中,共生区沙丘整体形态分布最为集中,且集中在较小区间内,平均迎风坡长度、宽度、高度、底面积分别为18.02 m、17.26 m、2.11 m、868.12 m²;典型区沙丘形态分布相对分散,且在较大区间内分布也较多,平均迎风坡长度、宽度、高度、底面积分别为39.54 m、72.75 m、4.73 m、5897.38 m²。

在柴达木盆地沙漠内,两类区域内沙丘形态也存在明显的差异,除迎风坡长度外,共生区沙丘其他形态参数也相对较小。共生区整体形态参数分布较为集中,且集中在较小区间。共生区迎风坡长度略大于典型区,为77.67 m。沙丘宽度、高度、底面积均小于典型区,分别为77.81 m、8.12 m、12 179.67 m²。典型区内沙丘形态相对分散,且在较大区间内也有分布。平均迎风坡长度、宽度、高度、底面积分别为75.72 m、109.46 m、9.81 m、14 967.52 m²。

在阿拉善高原内,共生区沙丘整体形态偏大,且分布相对分散,与塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地沙漠区域内相反,平均迎风坡长度、宽度、高度、底面积分别为86.84 m、109.50 m、7.31 m、9 899.75 m²。典型区沙丘形态偏小,且分布相对集中,平均迎风坡长度、宽度、高度、底面积分别为65.86 m、87.71 m、5.49 m、8 658.38 m²。

除上述形态参数的差异,共生区与典型区内沙丘的胖瘦程度也存在显著的区别,如图4、表2所示。

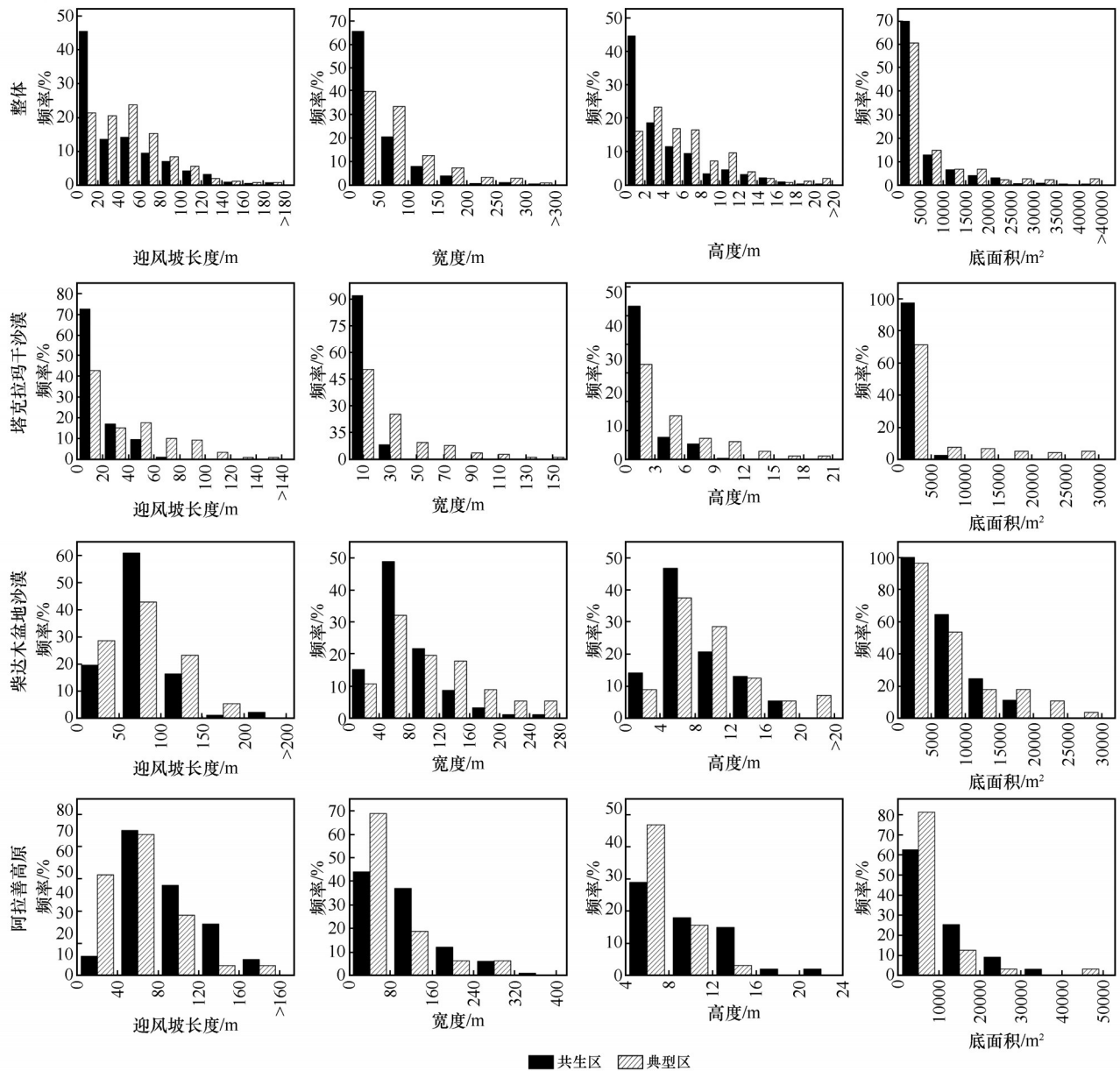
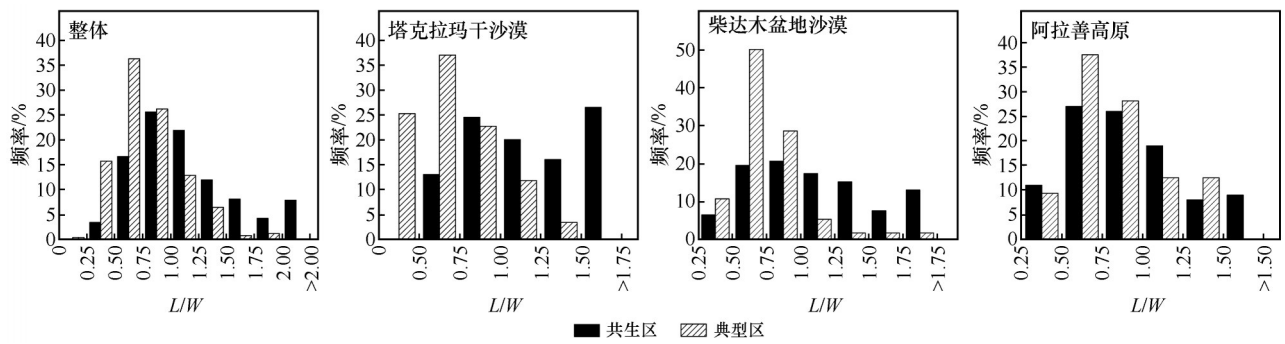


图3 新月形沙丘共生区与典型区沙丘形态参数频率直方图对比

Fig.3 Comparison of morphological parameter frequency histograms between coexisting areas and typical areas of barchan dunes



注:L为迎风坡长度;W为宽度

图4 新月形沙丘共生区与典型区L/W值频率直方图对比

Fig.4 Comparison of the overall average L/W values frequency histograms between coexisting areas and typical areas of barchan dunes

表2 新月形沙丘共生区与典型区新月形沙丘形态类型
Table 2 Barchan dune morphological types in coexisting regions and typical regions of barchan dunes

区域	编号	L/W	平均形态	
共生区	塔克拉玛干沙漠	I-1	0.97	矮胖型
		I-2	2.11	胖型
		I-3	0.99	矮胖型
		I-4	1.20	胖型
	库姆塔格沙漠	I-5	0.92	矮胖型
		I-6	1.33	胖型
	柴达木盆地沙漠	I-7	0.98	矮胖型
		I-8	1.71	胖型
		I-9	0.91	矮胖型
		I-10	0.95	矮胖型
	阿拉善高原	I-11	1.00	矮胖
		I-12	0.82	矮胖型
典型区	塔克拉玛干沙漠	II-1	0.68	正常型
		II-2	0.49	苗条型
		II-3	0.80	矮胖型
	吐鲁番盆地	II-4	1.04	胖型
	柴达木盆地沙漠	II-5	0.73	正常型
		II-6	0.89	矮胖型
	阿拉善高原	II-7	0.82	矮胖型

共生区内新月形沙丘整体形态明显偏胖, L/W值为0.82~2.11, 平均值为1.16。沙丘形态主要为矮胖型、胖型, 两者占比高达79.88%, 正常型占16.67%, 苗条型仅占3.46%。而典型区内各区域沙丘胖瘦程度不

同, 4种沙丘形态均有分布。其中, L/W值为0.49~1.04, 平均L/W值为0.78, 主要为正常型, 占比36.29%, 其次为矮胖型、胖型, 占比分别为26.21%、21.37%, 苗条型较少, 占16.13%。

在不同沙漠内, 共生区沙丘形态也明显偏胖。其中, 塔克拉玛干沙漠内共生区与典型区沙丘平均L/W值差异最大, 分别为1.32、0.79, 且共生区内存在26.50%的沙丘L/W值大于1.5, 明显大于典型区。柴达木盆地沙漠共生区与典型区平均L/W值差异也较大, 分布为1.15、0.75。在阿拉善高原内, 共生区内沙丘L/W也比典型区大, 但二者差异最小, 平均L/W值分别为0.91、0.82。

已有研究^[24-30]与本研究结果表明, 共生区沙丘各形态参数范围及其均值整体小于典型区。如图5所示, 共生区迎风坡长度为3.52~329.33 m, 而典型区范围较广, 为5.42~417.10 m。共生区宽度为3.51~396.84 m, 典型区内宽度范围跨度较大, 为7.24~837.7 m, 各区域均值为13.12~435.00 m。共生区沙丘高度范围较窄, 为0.36~23.89 m, 典型区为0.63~39.69 m, 各区域均值为1.02~22.94 m。各共生区沙丘平均宽高比为13.82, 介于新月形沙丘宽高比8~18^[4]。整体来看, 相比于典型区, 共生区内的新月形沙丘形态参数范围分布较窄, 且沙丘尺寸较小, 这可能与其风况环境有着密切联系。

2.2 风况特征对比

2.2.1 平均风速

由图6可知, 共生区与典型区月平均风速的变

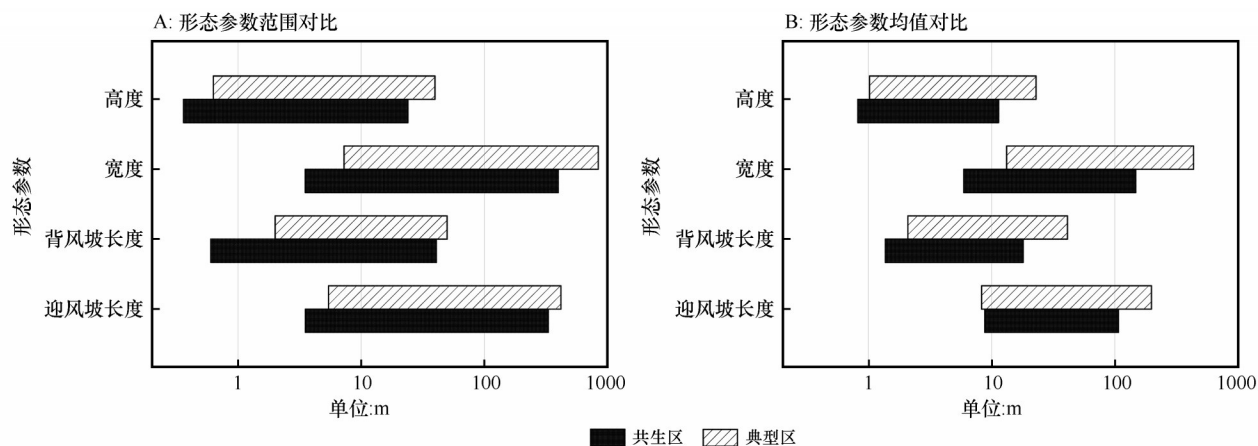


图5 新月形沙丘共生区与典型区新月形沙丘形态参数对比
Fig.5 Comparison of crescent-shaped dune morphological parameters between the coexisting regions and the typical regions of barchan dunes

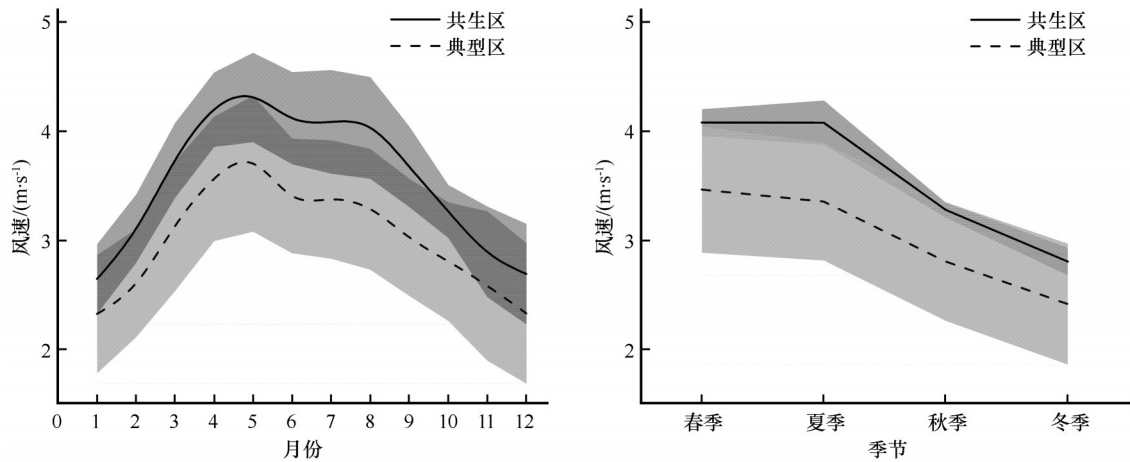


图6 新月形沙丘共生区与典型区平均风速对比

Fig.6 Comparison of Average Wind Speed Between coexisting regions and typical regions of barchan dunes

化趋势相似,存在明显的风季,但共生区季节平均风速与月平均风速整体大于典型区,且各共生区内风速一致性较好。两类沙丘区域内春季平均风速最大,夏、秋季次之,冬季最小,春季为主要风季。共生区春、夏、秋、冬4个季节平均风速均大于典型区,夏季差值最大,为 $0.72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

共生区各月平均风速也大于典型区。共生区月平均风速为 $2.64\sim 4.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年平均风速为 $3.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;典型区月平均风速为 $2.32\sim 3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年平均风速为 $3.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。共生区与典型区月平均风速极大值均出现在5月,分别为 4.31 、 $3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,极小值均出现在1月,平均风速分别为 4.31 、 $3.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整体来看,共生区与典型区年内风速变化趋势相同,但共生区整体平均风速大于典型区。

2.2.2 起沙风风向频率

起沙风风向频率表示各方向起沙风占总起沙风的频率。由图7可知,共生区与典型区起沙风风向整体均较稳定,大部分地区起沙风单一,少数地区存在明显的次风向。但相比之下,典型区内的风向更加单一,主风向占全年起沙风的 $66.01\%\sim 95.9\%$,其中,吐鲁番盆地东南部与柴达木盆地沙漠东南部风向最为集中,主风向占比超过 90% 。而共生区内风向相对分散,主导风向占比为 $37.99\%\sim 83.30\%$,其中,库姆塔格沙漠区域(I-5)起沙风最为分散,主次风向占比差异不大,分别为 37.99% 、 36.91% 。

2.2.3 输沙势

输沙势(DP)是表示区域风沙活动强度的重要指标,体现区域潜在的输沙能力^[18,21]。图8与表3展

示了对应卫星影像前15年的年输沙势特征,结果表明,共生区与典型区风能特征存在显著差异。

共生区与典型区均主要处于低风能环境,但共生区整体输沙势偏大,且集中范围较广,主要集中在 $61.18\sim 184.64 \text{ VU}$,除柴达木盆地沙漠为宽单峰风况,其他区域均以钝双峰为主,风况相对分散;而典型区DP集中范围窄,且整体偏小,主要在 $12.15\sim 78.31 \text{ VU}$,与共生区相比风况更加单一,以单峰风况为主。

此外,共生区与典型区内风向变率及其对应风况类型也存在明显的差异。如图9A所示,共生区的风向变率分布更加分散,其比值为 $0.25\sim 0.87$,高、中、低风向变率均有分布,对应风况主要为钝双峰和宽单峰(图9B);而典型区内风向变率较集中,其比值为 $0.67\sim 0.98$,主要为中、低变率,对应风况包括窄单峰、宽单峰和钝双峰。

以往研究及本文研究结果表明,在钝双峰风况下,两类区域均能发育新月形沙丘^[9,30],但所对应的风向变率范围存在差异。如图9B所示,当两类区域内风况均为钝双峰时,共生区对应风向变率较高,其比值为 $0.25\sim 0.59$,风况趋于复杂,受次风影响较大,对应的沙丘形态更胖,沙丘L/W值为 $0.92\sim 2.11$;而典型区对应风向变率更低,其比值为 $0.67\sim 0.73$,风向趋于集中,而对应的沙丘形态相比共生区较瘦,沙丘L/W值为 $0.49\sim 0.82$ 。因此,风向变率可能是导致共生区沙丘形态较胖的重要因素。

通过进一步分析共生区沙丘形态及其发育环境发现,各共生区发育环境与沙丘形态的组合关系大致可分为以下3类:

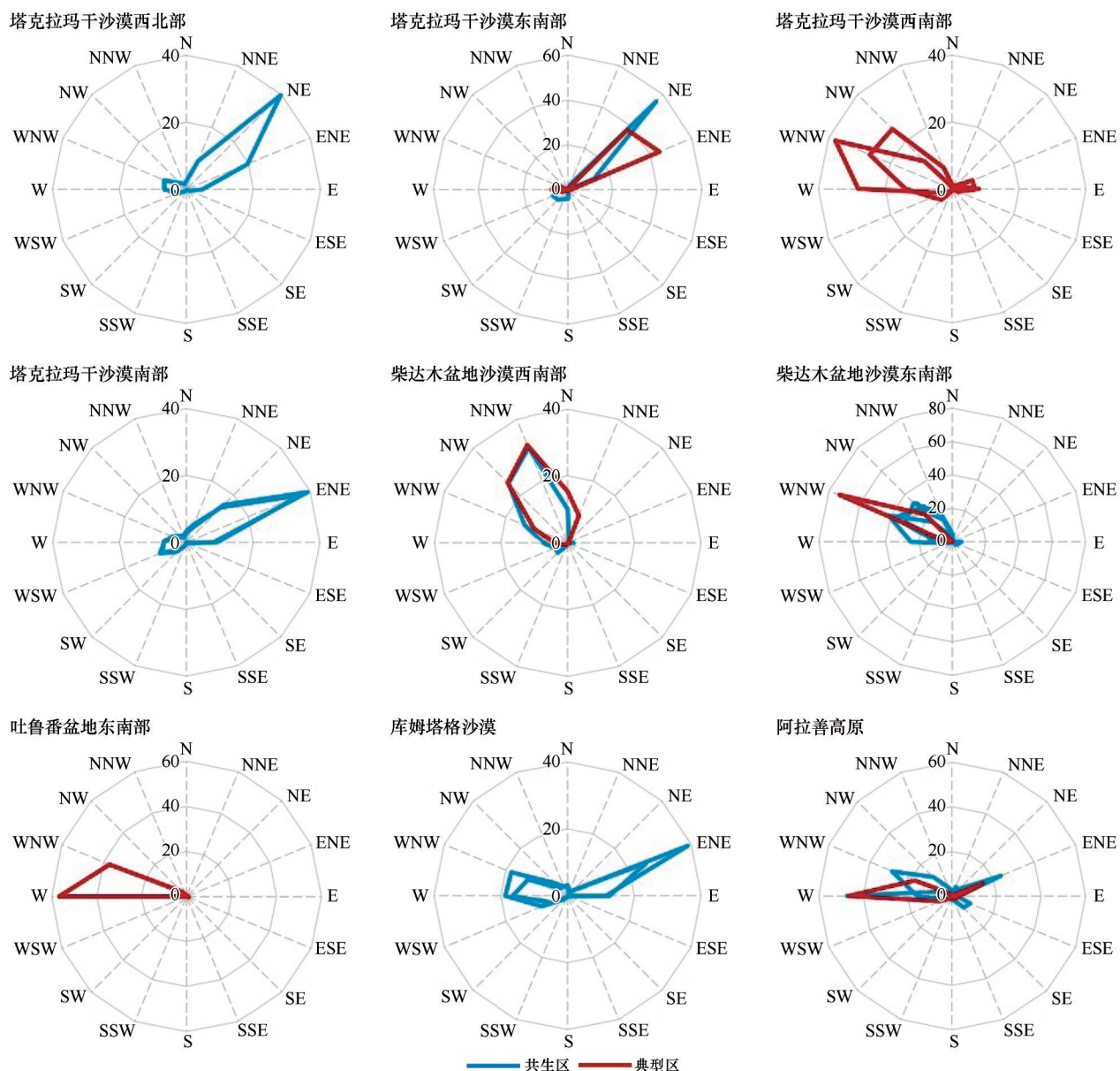


图7 新月形沙丘共生区与典型区起沙风频率

Fig.7 Frequency chart of sand-raising winds in coexisting regions and typical regions of barchan dunes

(1) 风向变率为0.25~0.38, 主次风向接近 180° , 沙丘迎风坡明显偏长, 而与主风向近乎相反方向的风在一定程度上抑制翼角的发育, 使其翼角出现退化现象, 沙丘长宽比明显较大, 平均为1.39, 且沙丘高度也较低, 为0.82~2.22 m。

(2) 风向变率为0.49~0.61, 主次风呈钝角或 180° , 沙丘翼角明显, 长宽比相对较小, 平均为0.93, 沙丘高度为3.78~10.83, 平均为6.58 m。

(3) 风向变率为0.83~0.90, 风向单一, 沙丘新月形特征明显且整体形态偏大, 高度为4.53~11.40 m, 平均为7.99 m。

3 讨论

3.1 沙丘形态差异的影响因素

已有研究表明, 柴达木盆地沙漠区域下垫面的可溶性盐分随水分蒸发后, 在沙丘表面形成盐结壳, 使沙丘表面被固结(盐分胶结作用), 进而沙丘移动时, 迎风坡被逐渐拉长, 从而导致沙丘长宽比变大, 形态偏胖^[31]。

而本研究表明, 除了柴达木盆地沙漠地区, 其他共生区沙丘形态同样偏胖, 与典型区呈现出明显的形态差异, 说明除了下垫面, 还存在其他因素影

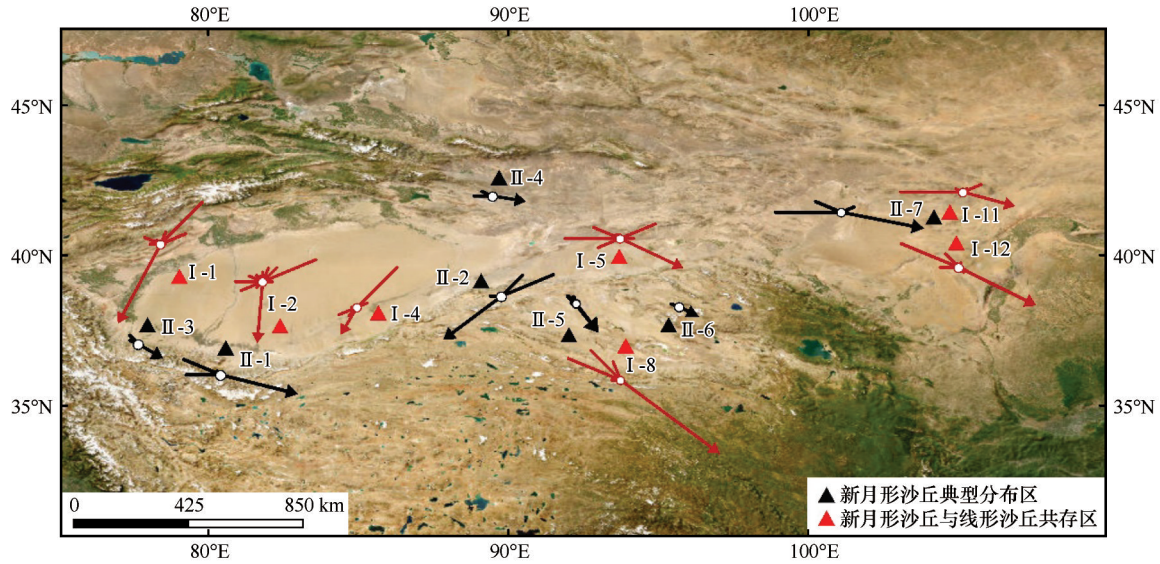


图 8 新月形沙丘共生区与典型区输沙势

Fig.8 Sediment transport patterns in coexisting and typical regions of barchan dunes

表 3 新月形沙丘共生区与典型区风况特征

Table 3 Wind regime in coexisting and typical regions of barchan dunes

区域	共生区	DP/VU	RDP/VU	RDP/DP	风能环境	风向变率	风况	
共生区	塔克拉玛干沙漠	I-1	61.18	36.34	0.59	低风能	中变率	钝双峰
		I-2	71.50	20.80	0.29	低风能	高变率	钝双峰
		I-3	70.12	17.40	0.25	低风能	高变率	钝双峰
		I-4	134.26	34.52	0.26	低风能	高变率	钝双峰
	库姆塔格沙漠	I-5	64.33	24.31	0.38	低风能	中变率	钝双峰
		I-6	87.80	21.99	0.25	低风能	高变率	钝双峰
	柴达木盆地沙漠	I-7	157.07	137.30	0.87	低风能	低变率	宽单峰
		I-8	184.64	165.34	0.90	低风能	低变率	宽单峰
		I-9	169.70	147.52	0.87	低风能	低变率	宽单峰
		I-10	18.18	15.14	0.83	低风能	低变率	宽单峰
	阿拉善高原	I-11	260.92	128.96	0.49	中风能	中变率	钝双峰
		I-12	143.94	87.95	0.61	低风能	中变率	宽单峰
典型区	塔克拉玛干沙漠	II-1	52.62	46.53	0.88	低风能	低变率	窄单峰
		II-2	78.31	52.62	0.67	低风能	中变率	钝双峰
		II-3	17.52	12.78	0.73	低风能	中变率	钝双峰
	吐鲁番盆地	II-4	29.10	28.00	0.96	低风能	低变率	窄单峰
	柴达木盆地沙漠	II-5	15.26	13.19	0.86	低风能	低变率	宽单峰
		II-6	12.15	11.92	0.98	低风能	低变率	窄单峰
	阿拉善高原	II-7	246.87	170.10	0.69	中风能	中变率	钝双峰

注:DP为输沙势,RDP为合成输沙势,RDP/DP为风向变率。

响共生区的沙丘形态。综合风况和沙源条件,本文认为共生区沙丘形态偏胖是风况特征、下垫面性质与沙源共同作用的结果,但不同区域,各因素影响

程度存在差异。

沙丘形态与区域风况密切相关,风力作用是风沙地貌形成与演化的动力,是解释沙丘形态关键的

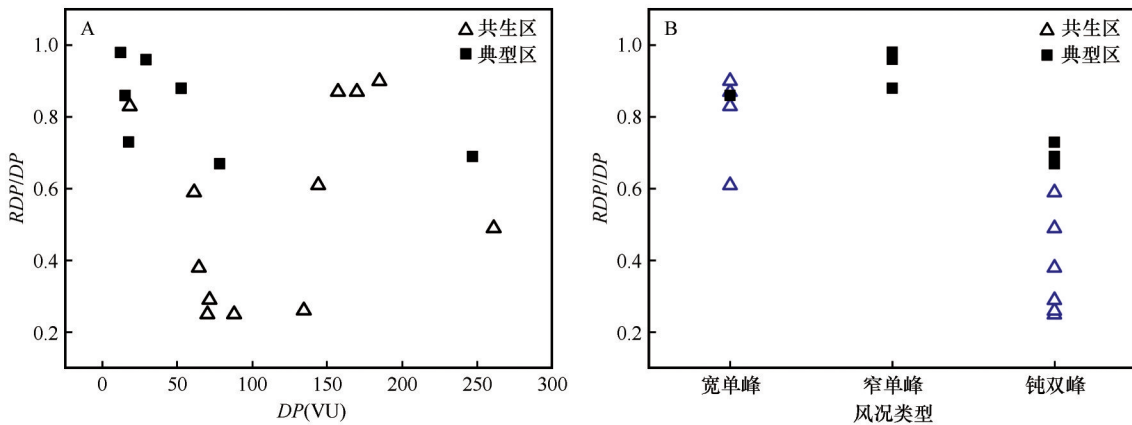


图9 新月形沙丘共生区与典型区风况特征

Fig.9 Wind characteristics of coexisting and typical regions of barchan dunes

内容^[32-33]。本文研究结果表明,各共生区沙丘 L/W 值整体均偏大,但具体形态存在差异。同时,共生区与典型区的风况特征也存在明显差异,因此风况的不同可能是沙丘形态差异的重要因素。Jiang 等^[24]研究发现,随着 DP 的增加,沙丘宽度明显增加,而迎风坡呈不显著的增加趋势。而本文研究结果表明,共生区内沙丘迎风坡长度和宽度随风速的增加均呈先减小后增加的趋势(图 10A),沙丘 L/W

值随着风速的增加没有明显的变化趋势,主要集中在 0.82~1.33,呈矮胖型、胖型,如图 10B 所示。这说明在共生区内,风速的变化对共生区新月形沙丘胖瘦程度的影响较小。但与典型区相比,共生区整体平均风速较高。Andreotti 等^[34]观察到,强风下的新月形沙丘的宽度比微风下小,且翼角更明显。因此在其他风能条件相同的情况下,共生区风速较高可能会使沙丘宽度偏小,从而导致其形态偏胖。

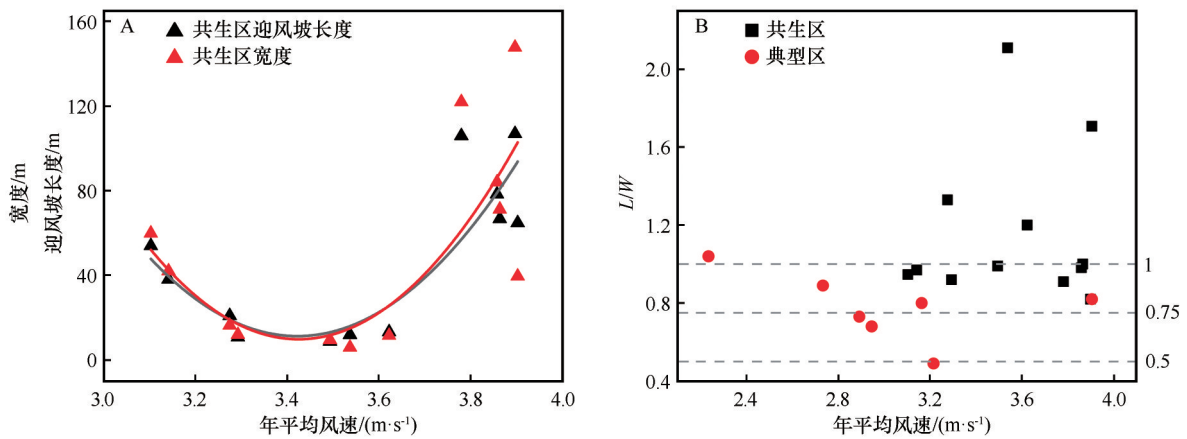


图10 新月形沙丘共生区与典型区年平均风速与沙丘形态

Fig.10 Average annual wind speed and dune morphology of coexisting and typical regions of barchan dunes

对起沙风频率与风向变率的研究表明,虽然共生区与典型区均存在钝双峰风况,但典型区起沙风的主风向占比较高,且主要为中低变率,整体风向较单一;在共生区内,起沙风主风向占比相对较低,主要为中高变率,风向相对分散。同时,如图 11 所示,高风向变率条件下,共生区内沙丘形态与风向变率之间存在较好的正相关性($R^2=0.68$),沙丘长宽比随风向变率比值的增加而增大,且高风向变率下的沙丘长宽比最大,平均为 1.41。在中风向变率情

况下,沙丘长宽比无明显变化趋势,但共生区风向变率比值偏低且沙丘 L/W 相对较大。在低风向变率条件下,共生区沙丘 L/W 值与风向变率之间无明显关联,而典型区内沙丘长宽比随风向变率比值的增加呈现增大的趋势,但相对于典型区,共生区风向变率比值也相对较低。

整体来看,不同风向变率条件下沙丘形态响应存在差异,但共生区整体风向变率偏高,可能是其沙丘形态偏胖的重要影响因素。较高风向变率下,

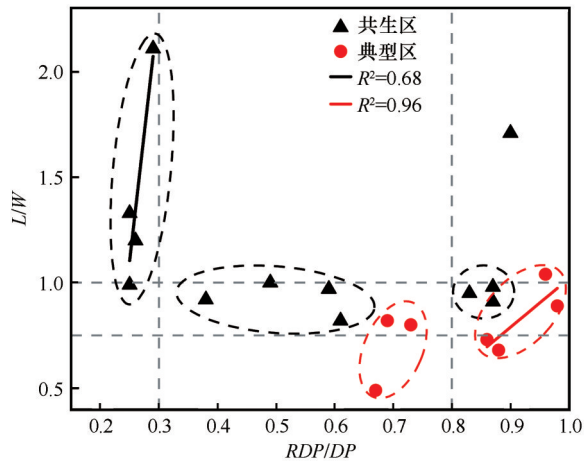


图11 新月形沙丘共生区与典型区风向变率与沙丘L/W
Fig.11 Wind direction variability and dune L/W of coexisting and typical regions of barchan dunes

沙丘形态需要适应变化的风况,这种形态调整消耗了部分风能,从而抑制了沙丘的纵向发育,使沙丘形态偏胖。

以往研究表明^[35-36],共生区内的沙源在新月形沙丘与线形沙丘之间的分配比例,在一定程度上对沙丘长宽比也有影响。如在柴达木盆地沙漠共生区内,新月形沙丘与线形沙丘沉积物厚度比值与沙丘长宽比之间存在负相关($R^2=0.60$),如表4、图12所示。相比于线形沙丘,新月形沙丘分流到的沙源占比越少,沙丘长宽比就越大,形态越胖(I-8);新月形沙丘沙源占比越大,沙丘长宽比就越小(I-9)。这证明共生区内沙源分流对沙丘胖瘦也起着重要作用。

表4 柴达木盆地沙漠共生区沙丘沉积物厚度与沙丘形态
Table 4 Sediment thickness and morphology of dunes in the symbiotic area of the Qaidam Basin

柴达木盆地沙漠共生区	I-7	I-8	I-9
新月形沙丘沉积物厚度/m	1.22	1.39	2.93
新月形与线形沙丘沉积物厚度比值	1.79	1.22	3.21
新月形沙丘长宽比(L/W)	0.98	1.71	0.91
新月形沙丘高度/m	9.55	4.53	11.40

注:新月形沙丘沉积物厚度数据引自文献^[35-36],新月形与线形沙丘沉积物厚度比值根据引用数据进一步计算得出。

综上所述,共生区内沙丘形态受风况、沙源、下垫面共同影响,但其响应机制存在差异。在风况较单一的情况下,下垫面与沙源分流对沙丘形态偏胖起着决定性作用(如柴达木盆地沙漠);而在风况较复杂的区域,高风向变率与沙源分流是沙丘形态偏

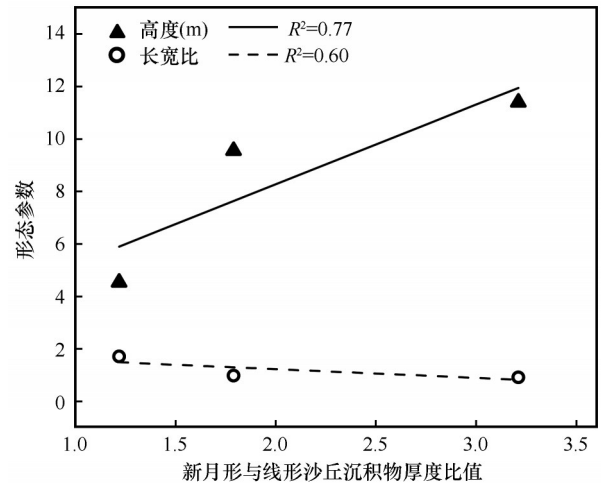


图12 柴达木盆地沙漠共生区沙丘沉积物厚度比值与形态之间的关系
Fig.12 Relationship between sediment thickness ratio and morphology of sand dunes in the desert symbiosis area of the Qaidam Basin

胖重要影响因素。

3.2 沙丘尺寸差异的影响因素

研究表明,共生区新月形沙丘的尺寸明显低于典型区,这一现象与风况特征、沙源及下垫面有关。以往研究表明,风况与沙丘类型之间存在密切联系,新月形沙丘通常与窄单峰型风况联系,线形沙丘通常与双峰风况联系^[37]。结合本文研究可知,相比于典型区,共生区风向变率明显高于典型区,主风向占全年起沙风的频率更低,风况更复杂,主要为钝双峰风况,这种风况下更利于线形沙丘的发育与维持。而新月形沙丘的发育更依赖于单一、稳定的风向,当风向趋于复杂时,风能更多地被消耗于不断地调整沙丘形态^[29],而非有效地促进沙丘的纵向增长。如在共生区I-2、I-3、I-4、I-6内,风向变率为0.25~0.29,风向较复杂,沙丘处于动态变化中,其沙粒的堆积速率相对较低,对应的沙丘高度明显偏低(图13),底面积也更小,分别为0.82~2.22 m、150.93~524.75 m²,此时风向变率对沙丘尺寸的影响较大。同时,在此类双峰风况下,沿合成输沙势方向排列较紧密的新月形沙丘受到两侧风影响,沙物质从上风向沙丘的两翼流向下风向的沙丘迎风坡,形成多个沙丘连接起来的现象,并随着稳定的双峰风况逐渐发育为线形沙丘。而在中等风向变率(RDP/DP为0.30~0.80)内,随着风向趋于单一,共生区沙丘高度呈增高趋势($R^2=0.71$),而典型区内

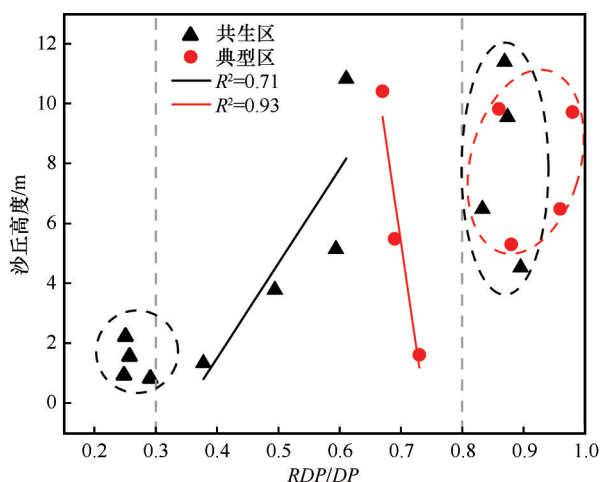


图13 新月形沙丘共生区与典型区风向变率与沙丘高度

Fig.13 Wind direction variability and dune height of coexisting and typical regions of barchan dunes

沙丘高度呈降低趋势($R^2=0.93$)。其中,共生区内存在明显的主次风,主风向使新月形沙丘迎风坡的沙物质流向一翼,并出现延伸的情况,因此沙丘高度相对偏低,而次风向会进一步影响沙丘形态,使其形态处于动态变化之中。在低风向变率下,共生区与典型区沙丘高度整体偏高,但无明显变化趋势。

整体来看,共生区与典型区内风向变率与沙丘尺寸之间存在较好的对应关系,较复杂的风况会增加沙丘形态的不稳定性,制约沙丘发育的尺寸;而单一风况下沙丘高度相对偏高。但风向变率与沙丘尺寸之间并不是简单的线性关系,说明还存在沙源或下垫面等其他因素影响沙丘高度。

前人对柴达木盆地沙漠共生区内新月形沙丘与线形沙丘局地沉积物厚度的研究表明^[35-36],在同一区域内,沉积物厚度与沙丘高度之间存在正相关性,但不同共生区(I-7、I-8、I-9)内的新月形沙丘的平均沉积物厚度与新月形沙丘平均高度之间并未存在明显的相关性。而新月形沙丘与线形沙丘沉积物厚度的比值,与新月形沙丘高度之间呈现明显的正相关性($R^2=0.77$),如图12所示。新月形与线形沙丘的沉积物厚度比值越大,新月形沙丘的高度也就越高,比值越小,沙丘高度越低。这进一步证实,在共生区内,新月形沙丘与线形沙丘之间沙源的分配比例,影响着沙丘高度。同时,在柴达木盆地沙漠内,共生区与典型区的风能环境与下垫面条件接近,但共生区内沙丘明显偏小,这也说明沙源在共生区的分流可能是影响沙丘形态偏小的重要因素。

综上所述,在共生区内,沙丘形态偏小受风向变率、下垫面与沙源分流共同影响,但不同区域内主导因素存在差异。

4 结论

新月形沙丘与线形沙丘共生区与新月形沙丘典型区的沙丘形态存在明显差异。共生区内新月形沙丘整体呈胖型,占比53.86%,矮胖型、正常型次之,苗条型最少,仅占3.46%。而典型区内正常型最多,占比36.29%,其次分别为矮胖型、胖型,苗条型最少,为16.13%。同时,相比于典型区,共生区沙丘尺寸整体偏小,迎风坡长度、高度及底面积均小于典型区。

共生区与典型区的风况特征存在一定差异。从平均风速来看,共生区的年、季节、月平均风速整体偏大。同时,共生区主导风向的起沙风频率相比典型区明显偏小。从输沙势结果来看,共生区与典型区均主要处于低风能环境,但风向变率及其对应风况均存在差异。共生区平均风向变率更高,跨度更广,介于0.25~0.90,存在高、中、低3种风向变率,风向相对复杂。典型区平均风向变率更低,且分布较集中,为0.67~0.98,主要为中、低风向变率,风向更加单一。

在柴达木盆地沙漠内,下垫面的盐分胶结作用与沙源分配(新月形与线形沙丘沉积物厚度比值)是共生区沙丘形态偏胖的主要因素。而在其他共生区,风向变率是导致共生区内沙丘形态与典型区产生显著差异的重要因素。

参考文献:

- [1] 李振山,倪晋仁.国外沙丘研究综述[J].泥沙研究,2000(5):73-81.
- [2] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:139-143.
- [3] 朱震达.三十年来中国沙漠研究的进展[J].地理学报,1979(4):305-314.
- [4] 杨岩岩,刘连友,屈志强,等.新月形沙丘研究进展[J].地理科学,2014,34(1):76-83.
- [5] Slattery M C. Barchan migration on the Kuisieb river delta, Namibia [J]. South African Geographical Journal, 1990, 72 (1): 5-10.
- [6] Long J T, Sharp R P. Barchan-dune movement in imperial valley, California [J]. Geological Society of America Bulletin, 1964, 75(2): 149-156.
- [7] 李继彦,董治宝.线形沙丘研究进展评述与展望[J].中国沙漠,2018,38(6):1153-1165.

- [8] 马芳,吕萍.新月形沙丘与线性沙丘共存区域风况特征[J].中国沙漠,2019,39(3):98-106.
- [9] 石唯康,董治宝,陈国祥,等.新月形沙丘与线形沙丘共生现象探讨:以撒哈拉沙漠为例[J].中国沙漠,2020,40(3):135-144.
- [10] 徐贵江,董治宝,王中原.柴达木盆地新月形沙丘和线性沙丘共生现象[J].中国沙漠,2017,37(3):407-413.
- [11] Rubin D M, Hesp P A. Multiple origins of linear dunes on Earth and Titan[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 653-658.
- [12] 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.
- [13] 王涛,赵哈林.中国沙漠科学的五十年[J].中国沙漠,2005,25(2):3-23.
- [14] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [15] Meng X, Guo J, Han Y. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38: 91-99.
- [16] Olauson J. ERA5: the new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable energy*, 2018, 126: 322-331.
- [17] Yang J, Dong Z, Liu Z, et al. Migration of barchan dunes in the western Quruq Desert, Northwestern China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(10): 2016-2029.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Hereher, E M. Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt [J]. *Geomorphology*, 2018, 304: 113-120.
- [21] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.输沙量与输沙势的关系[J].中国沙漠,2011,31(4):824-827.
- [22] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]// *A Study of Global Sand Seas*. Washington, USA: US Government Printing Office, 1979: 137-169.
- [23] Zu R, Xue X, Qiang M, et al. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China [J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1/2): 39-47.
- [24] Jiang N, Cheng H. Probability density distributions of morphological parameters of barchan dunes and their responses to the climate environment [J]. *Geomorphology*, 2024: 109164.
- [25] 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.
- [26] 石学刚,李广,刘世增,等.河西走廊绿洲边缘新月形沙丘的动态变化及其与气象因子的关系[J].甘肃农业大学学报,2018,53(2):86-93.
- [27] 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],2018,38(3):484-491.
- [28] 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.
- [29] 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):1-13.
- [30] 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.
- [31] 马芳.不同类型沙丘共存成因[D].西安:陕西师范大学,2024.
- [32] 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.
- [33] Bourke C M. Barchan dune asymmetry: observations from Mars and Earth [J]. *Icarus*, 2010, 205(1): 183-197.
- [34] Andreotti B, Claudin P, Douady S. Selection of dune shapes and velocities-part 1: dynamics of sand, wind and barchans [J]. *European Physical Journal B*, 2002, 28(3): 321-339.
- [35] 马芳.风况和沙源供应对新月形沙丘和线形沙丘共存的影响[D].兰州:中国科学院西北生态环境资源研究院,2019.
- [36] Ma F, Lü P, Cao M. The effects of wind regime and sand supply on the coexistence of barchans and linear dunes in China's Qaidam Basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 897640.
- [37] Wasson R, Hyde R. Factors determining desert dune type [J]. *Nature*, 1983, 304(5924): 337-339.

Comparative study on the morphology and wind regime of barchan dunes in coexisting regions with linear dunes and single-type regions

Wu Yifei, Lü Ping, Yu Junlin, Wang Xinyao, Wei Yichen

(*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

Abstract: The coexistence of barchan and linear dunes is common in deserts across China and elsewhere. Previous studies have largely focused on either areas where both dune types coexist (coexisting regions) or regions dominated solely by barchan dunes (typical regions). However, a systematic comparison between these two landscape types is lacking, hindering a comprehensive understanding of barchan dune evolution under contrasting environmental settings. Here, we investigate barchan dunes from 12 coexisting regions and 7 typical regions in China. We analyzed dune morphology and the associated wind regimes using high-resolution Google Earth imagery and ERA5 reanalysis data. Our results reveal that: (1) Barchan morphology differs significantly between the two region types. In coexisting regions, dunes are smaller and plumper, with "plump" barchans accounting for over 50% of the population and "slender" forms being the least common. In contrast, typical regions are dominated by "normal" shaped barchans, with the proportions of other morphological types showing only minor differences. (2) The wind regimes also differ markedly. Although both regions are classified as low wind energy environments, coexisting regions exhibit higher drift potential, higher mean wind speed, greater directional variability of sand-moving winds, and a wider range of wind direction variability. The corresponding wind regimes are primarily obtuse bimodal and wide unimodal types. (3) These morphological differences are strongly influenced by wind direction variability and substrate salt cementation. Additionally, the partitioning of sand availability between dune types may also contribute to the smaller dune size observed in coexisting regions. This comparative study of dune morphology and wind regime characteristics refines our understanding of the relationship between barchan dune morphometry and its developmental environment, providing a foundation for future numerical simulations of aeolian landforms.

Key words: barchan dune; dune coexistence; dune morphology; wind regime