

张碧优,胡光印,胡菁菁.黄河源区玛多盆地风况与输沙势特征[J].中国沙漠,2026,46(3):88-96.

黄河源区玛多盆地风况与输沙势特征

张碧优,胡光印,胡菁菁

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 黄河源区玛多盆地位于青藏高原东北部,处于西风带与亚洲季风交汇处,区域内广泛分布沙漠化土地,局部地区风沙活动强烈,风沙灾害频发,但目前该区域的风况特征尚不清楚。本文基于2013—2017年鄂陵湖区域逐小时风速风向数据,对黄河源区玛多盆地起沙风况与输沙势进行了分析。结果表明:(1)玛多盆地年平均风速为 $4.48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,春季最高,为 $4.71\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,冬季次之,为 $4.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夏季最低,2月风速最大,9月最小。(2)起沙风年平均风速为 $8.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,频率为23.5%,以西风为主导风向,冬春两季起沙风合计占比达58.5%。(3)研究区年输沙势为394 VU,其中3年输沙势超过400 VU,在中等与高等风能环境之间波动。合成输沙势为244 VU,合成输沙方向 92° ,方向变率指数0.62,属中变率。(4)输沙势冬季最大(157 VU),春季次之(126 VU),分别占全年的39.8%、31.9%;输沙势2月最高(75.36 VU),1月与3月次之(均超过50 VU),9月最低,6月合成输沙方向反向。研究区输沙活动主要受西风环流影响,春、秋、冬季输沙方向以东向为主,夏季西风带北移,导致输沙方向变为西向。总体而言,玛多盆地的风能环境具有季节差异性和相对稳定性,冬春强,夏秋弱。风能环境在季节与月份上的差异,不仅反映了青藏高原风沙活动对大气环流的响应,而且对理解区域风沙地表过程提供了重要的科学依据。

关键词: 起沙风; 输沙势; 风况; 黄河源区; 青藏高原

文章编号: 1000-694X(2026)03-088-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00200

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风是塑造地貌形态的重要外营力,是风沙地貌形成的重要驱动力,风成沉积物、风沙地貌的形成、风沙灾害的发生都是风力作用的结果^[1]。而记录和描述这种风力作用特性的关键指标就是风况,它可以反映某一地区在特定时期内的风动力环境特征,通常包括不同风向的出现频率以及各等级风速的分布情况。风况特征不仅可以明确风沙活动的方向与强度,还能为风沙灾害的防治提供依据。在风况的研究中,输沙势作为评估区域风能环境强度、判定风沙输运方向的核心指标,得到广泛应用^[2-3]。该指标不仅可以表示潜在输沙能力,而且可以衡量风沙活动强度及风沙地貌的时空演变趋势^[4],因此在风沙地貌成因分析与风沙灾害防治研究中得到了广泛应用^[5-6]。Abbasi等^[7]通过输沙势分析出伊朗与巴基斯坦交界处莫克兰地区的物源,并解释了

沙丘形态、类型与风动力环境的关系;Sadid^[8]分析了沙丘迁移与风沙流动的动态过程,并探讨了风沙输送与当地环境因素之间的关系。国内基于输沙势的研究也取得了很多进展。张令光等^[9]根据39个气象站分析了雅江流域的上、中、下游的风况差异,并据此提出该流域的风沙灾害防治措施;Hu等^[10]基于多年风速数据对青海湖的风况与风沙地貌进行研究,揭示了该地区复杂的风沙活动过程及其对地貌演化的影响。

中国沙漠化危害严重,沙漠化土地面积广泛,主要分布在北方干旱、半干旱地区以及部分半湿润地区^[11]。青藏高原地处高海拔区域,气候寒冷干旱,风力强劲,生态环境脆弱,易发生沙漠化。青藏高原内部沙漠化土地面积达 $392\ 914\text{ km}^2$,占高原面积的15.1%^[12]。青藏高原位于副热带高压和中纬度西风带之间,其风速变化主要受中纬度西风与东亚冬季风调控,且空间差异显著,高原中

收稿日期:2025-10-24; 改回日期:2025-12-22

资助项目:国家自然科学基金项目(42071004,42241110);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0403)

作者简介:张碧优(2002—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事沙漠化与风沙活动研究。E-mail: you18092174860@163.com

通信作者:胡光印(E-mail: guangyinhu@snnu.edu.cn)

西部风速较强,东部及柴达木盆地则相对较弱^[13]。尽管青藏高原西部风速较大,但受东部基础设施与工程建设需求的直接驱动,目前关于输沙势的研究主要在高原东部各盆地及青藏高原铁路沿线区域。

玛多盆地位于青藏高原东北部,受亚洲季风与西风环流控制,气候系统对大气环流变化敏感^[14-15],区内广泛分布由强烈的风沙活动导致的风成沉积^[16]及沙漠化土地。根据青藏高原风沙地貌的四大分布特征,玛多盆地的风沙地貌属于典型的河谷风沙地貌类型^[17],其形成与演化与黄河及其支流的河谷环境密切相关。尽管已有许多关于黄河源地区沙漠化的研究^[18-20],但风作为风沙活动最直接的驱动力,在该区域的相关研究却较为匮乏。虽有学者对黄河源区玛多盆地沙漠化的驱动因素进行过探讨^[21],但对于季节与月尺度上输沙势的变化规律

与风况特征却并未进一步剖析。基于上述背景,对黄河源区玛多盆地的风能环境和输沙势特征进行分析,以期对风沙环境形成的演化动力分析和风沙灾害治理提供科学依据。

1 研究区概况

玛多盆地位于黄河源区,地处中国青藏高原东北部(图1A),其范围北抵布青山,南至巴颜喀拉山,东至阿尼玛卿山,盆地内部地势由西北向东南倾斜,黄河干流贯穿其中(图1B)。玛多盆地平均海拔超过4 000 m,广泛分布有高寒草甸、沼泽湿地及沙漠化土地。其中,沙漠化土地集中分布于河谷和湖岸地带^[16,19],总面积达5 467 km²,约占区域面积的13.6%。该地气候呈现出典型的高寒干旱特征,冬季漫长而干冷多风,夏季短促而温凉多雨^[22],年平均气温较低,约-4.1℃,年降水量345 mm。

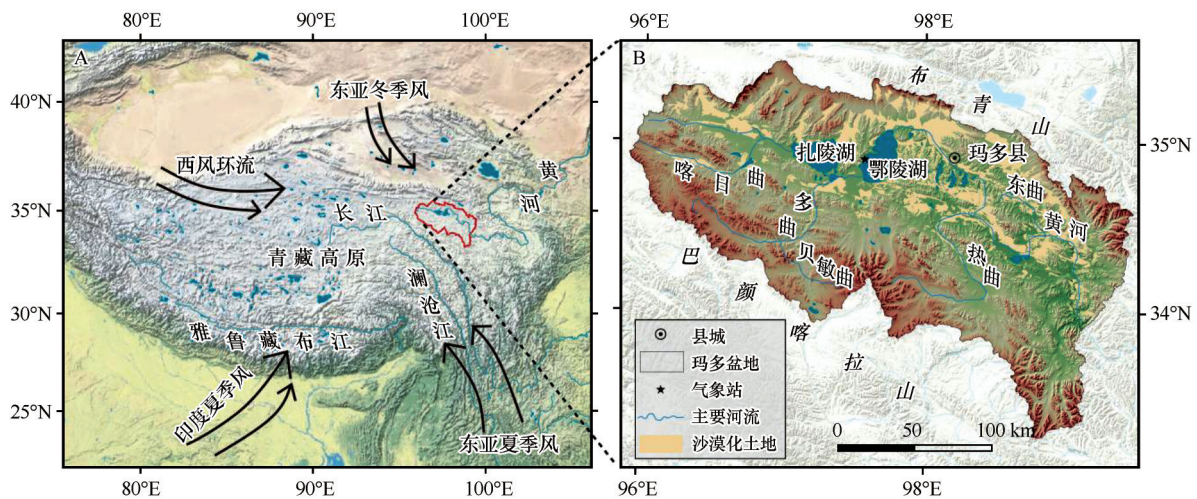


图1 玛多盆地在青藏高原的位置(A)及其沙漠化土地的分布(B)

Fig.1 The location of the Madoi Basin on the Tibetan Plateau (A), and the distribution of its aeolian desertified land (B)

2 数据及方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>) 发布的青海省玛多县鄂陵湖流域气象观测数据集^[23]。该数据集时间跨度为2012—2019年,时间分辨率为半小时,观测高度为2 m。气象站位于海拔4 275 m处,地理坐标为34.91°N、97.57°E,主要观测设备包括Kipp & Zonen CNR4 辐射传感器、Vaisala HMP155A 温湿度传感器以及PTB110 气压传感器,观测要素涵盖风速、风向、气温、相对湿度、气压、

向下/向上短波辐射和向下/向上长波辐射。由于2012、2018、2019年数据中存在较多缺失,本研究最终选用2013—2017年逐小时风速与风向数据进行分析。

2.2 输沙势计算

根据国家气象局标准气象站规定,风速的测量高度为10 m,而本文使用的气象站建立在2 m高度,为了便于计算输沙势,根据Karman-Prandtl速度分布定律进行转换^[24]:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中： u 为高度 z 处的风速； u_* 为摩阻速度； k 为卡曼常数($k=0.4$)； z_0 为空气动力学粗糙度长度。

本文将此式变形,进一步计算10 m高度风速数据:

$$u_{10} = u_2 \frac{\ln z_{10} - z_0}{\ln z_2 - z_0} \quad (2)$$

式中： u_{10} 和 u_2 分别为高度10 m和2 m高度处的风速； z_0 为地面粗糙度(m),本文使用 $0.00001 \text{ m}^{[25]}$ 。

采用Fryberger^[26]提出的方程计算各风向的输沙势:

$$DP = V^2 (V - V_i) t \quad (3)$$

式中： DP 为输沙势,矢量单位(VU)； V 为10 m高度高于起沙风速的实际风速值,单位为节； V_i 为10 m高度临界起沙风速,单位为节,本文取 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1[20]}$ ； t 为起沙风累计作用时间,一般以频率表示。

用矢量合成法,对16个方向的输沙势进行计

算,最终得出合成输沙势(Resultant Drift Potential, RDP)及其输沙方向(Resultant Drift Direction, RDD),合成输沙势与输沙势的比值称为方向变率指数,用来反映起沙风方向情况。

3 结果与分析

3.1 风速特征

研究区域的年平均风速为 $4.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,范围在 $4.26\sim 4.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图2A)。月尺度上(图2B),2月平均风速最高,达 $5.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,9月平均风速最低,为 $4.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。季节变化方面,春季风速最大,为 $4.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,冬季次之,为 $4.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夏秋两季的平均风速均较低,分别为 4.35 、 $4.29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且秋季平均风速略高于夏季平均风速,这与11月较高的风速有关。

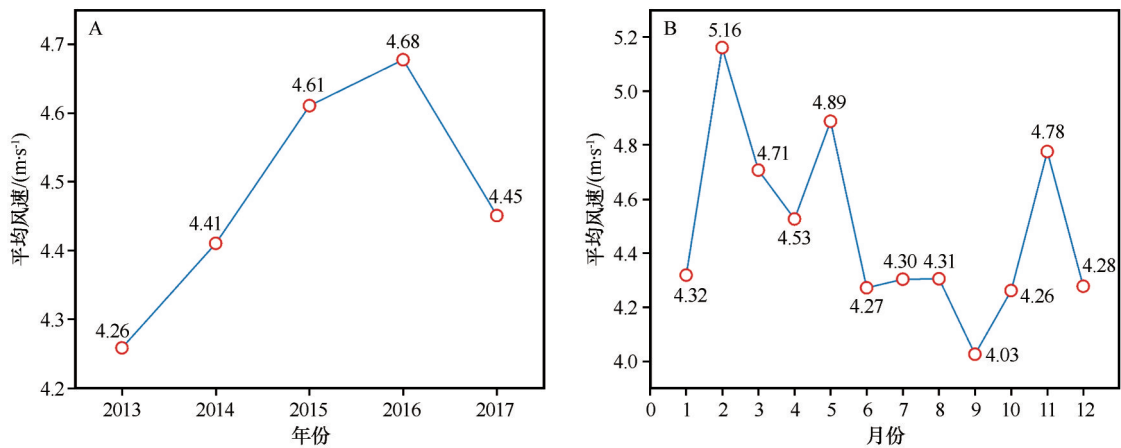


图2 玛多盆地年平均风速(A)与月平均风速(B)

Fig.2 Average wind speed (A) and monthly average wind speed (B) in the Madoi Basin

起沙风年平均风速为 $8.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表1),其中冬季起沙风最大,春季次之,月平均风速变化特征如图3所示。整体来看,年起沙风平均风速的变幅较小,差值在 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,但月际变化显著(图3):1—2月风速上升,2—6月急剧下降,6—8月略有回升,9月再度下降,10—12月重新上升。最大风速出现在2月,为 $9.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最小风速出现在6月,为 $7.53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速变化具有明显的季节性特征,表现为冬春季节较高、夏秋季节较低。

研究区平均起沙风频率为23.5%(表1),春季和冬季的起沙风占比较高,分别为29.0%和29.5%,而夏季和秋季较低,分别为20.8%和29.5%。从月起沙风频率占全年比例来看(图3),2月最高,9月最低,1—5月及11—12月频率比例均高于8%。

3.2 风向特征

从2013—2017年起沙风风向统计结果来看,年间表现出较高的一致性(图4)与季节性转换规律(图5)。冬季、春季和秋季的起沙风主导风向为西风,冬季西风起沙作用最强,其次为春季。这与该区域地处中纬度西风带的地理位置密切相关,反映了大尺度西风环流对局部风沙活动的强烈控制。夏季则显著区别于其他季节,起沙风风向主要为东北风(NE)和东北偏东风(ENE)。这种相对于西风主导方向的季节性逆转,明确指示了青藏高原夏季季风环流对局地风场的显著影响。四季起沙风风向存在较明显的季节性差异,整体上,西风系统较强,尤其以西风(W)和西南偏西风(WSW)为主,W

表1 玛多盆地年起沙风频率和起沙风平均风速

Table 1 Frequency and average wind speed of sand-driving winds in the Madoi Basin

年份	起沙风频率/%				全年	起沙风平均风速/($m \cdot s^{-1}$)				全年
	春季	夏季	秋季	冬季		春季	夏季	秋季	冬季	
2013	25.8	22.9	20.6	30.8	19.9	8.33	7.61	7.80	9.02	8.27
2014	28.4	20.7	21.0	29.9	22.7	8.02	7.55	8.06	8.40	8.05
2015	29.8	17.3	21.9	30.9	25.5	8.54	7.55	7.91	8.82	8.32
2016	28.7	20.7	21.8	28.8	26.1	8.30	7.78	8.07	8.58	8.22
2017	32.4	22.3	18.4	27.0	23.4	8.50	7.74	7.73	8.73	8.25
平均值	29.0	20.8	20.8	29.5	23.5	8.35	7.65	7.93	8.70	8.22

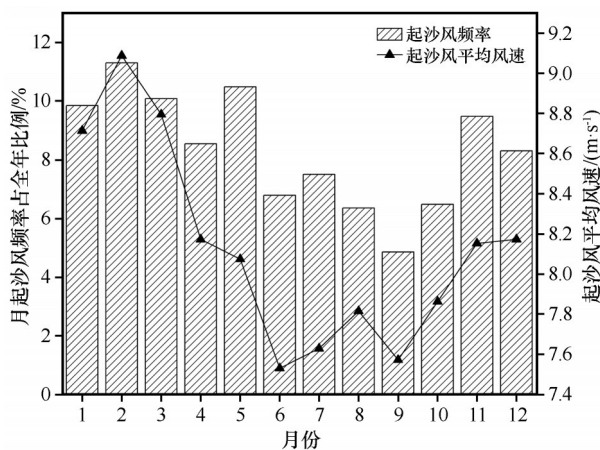


图3 玛多盆地年内起沙风频率和起沙风平均风速月变化

Fig.3 Monthly variations of frequency and average wind speed of sand driving winds in the Madoi Basin

方向的比例最高,大部分年份可达30%以上,远高于西北偏西(WNW)和西南风(WSW)方向。相比之下,其他方向起沙风出现频率较低。总体而言,该区起沙风呈现出明显的单一主导格局,即以西风—西南偏西风为控制方向,揭示出区域风沙活动的物质来源主要来自西部与西南部。

3.3 输沙势

3.3.1 输沙势年际变化

根据输沙势(DP)的大小,Fryberger^[26]将风能环境分为低能(<200 VU)、中能($200\sim 400$ VU)和高能(>400 VU)环境。而当变率指数 <0.3 时,为高变率,一般对应复杂风况;当变率指数为 $0.3\sim 0.8$ 时,为中变率,一般对应钝双峰或锐双峰风况;当变率指数 >0.8 时,为低变率,风向较为单一,一般对应窄单峰或宽单峰风况。本研究区在观测期间的年平均输沙势为394 VU,合成输沙势为244 VU,风向变率指数为0.62,显示该区域整体属于中等风能环境,并

具有中等风向变率,对应锐双峰风况。

从年际变化来看, DP 值在324~468 VU,平均值为394.4 VU, RDD 方向均为东向。2015、2016年和2017年输沙势超过400 VU,属于高能环境;而2013年和2014年则低于400 VU,属于中等风能环境,这表明,研究区的风能强度在中等风能与高等风能环境之间波动,整体表现为较高的风能水平。此外, RDP 值在193~341 VU,平均值为244.8 VU,最高 DP 、 RDP 值均出现在2015年,最低 DP 、 RDP 值均出现在2014年(图6)。

3.3.2 输沙势年内变化

在月度和季节尺度上, DP 与 RDP 均表现出显著变化。具体来看, DP 最大值在2月(75 VU),最小值在9月(10 VU); RDP 最大值在2月(71 VU),最小值在9月(6 VU)。从季节分布来看,冬季总体的 DP (157 VU)与 RDP 值(150 VU)最高, DP 占全年39.8%;其次是春季的 DP (126 VU)与 RDP 值(79 VU)较高, DP 占全年31.9%。 DP 与 RDP 最小值均出现在9月,但夏季的 DP (49 VU)与 RDP (26 VU)值较秋季的值更低,分别占全年的12.4%、16.0%(图7)。

春季、秋季和冬季主要的起沙风风向均为W与WSW,且W风的潜在输沙能力最强(图5)。其中,春季合成输沙方向为E(97°), RDP/DP 值为0.63,属于中等风向变率(图7A)。在月尺度上,3月的合成输沙方向为E,4月和5月的合成输沙方向均为ESE(图7B)。秋季合成输沙方向也为E(91°), RDP/DP 值为0.61,属于中等风向变率,其中9月的合成输沙方向为SW,10月和11月的合成输沙方向都为E。冬季的 RDP/DP 最高(0.96)属于高风向变率,合成输沙方向(84°)与1月、2月和12月

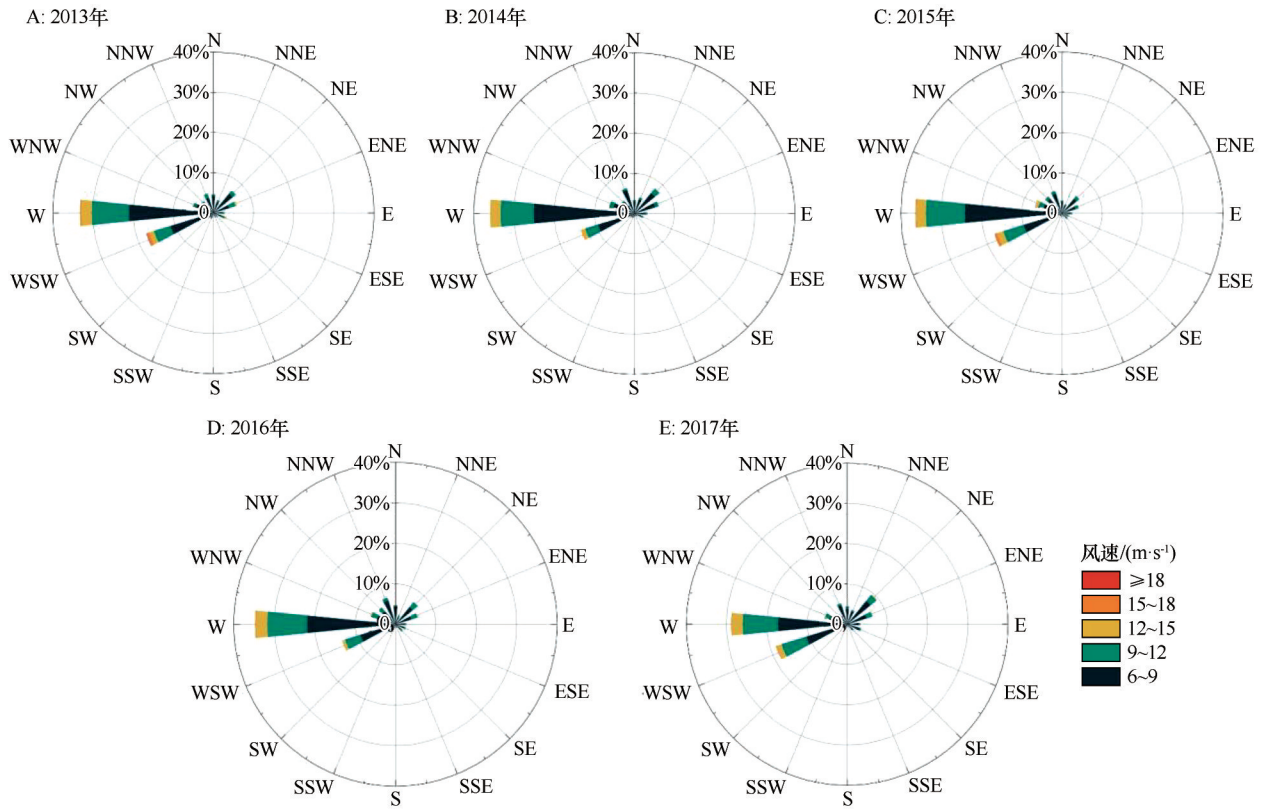


图4 玛多盆地年起沙风玫瑰图

Fig.4 Sand driving wind rose diagrams in the Madoi Basin

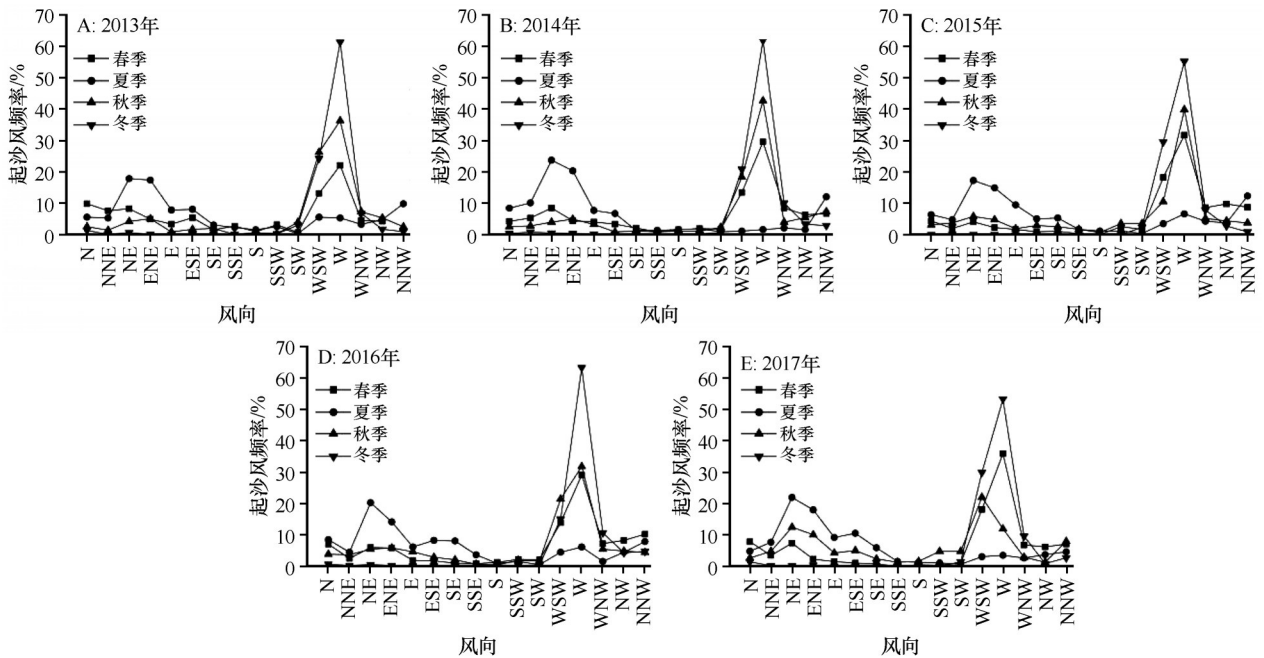


图5 玛多盆地2013—2017年各年起沙风风向及频率的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of sand-driving wind frequency and direction in the Madoi Basin

的合成输沙方向均为E(图7)。夏季显著区别于其他季节,起沙风风向主要为NE与ENE,两个风向的潜在输沙能力较为接近,但均明显弱于其他季节

主导的起沙风(图5)。该季节合成输沙方向为SW, RDP/DP 值最小(0.54),但仍属于中等方向变率(图7),其中6月的合成输沙方向为SSW,7月和

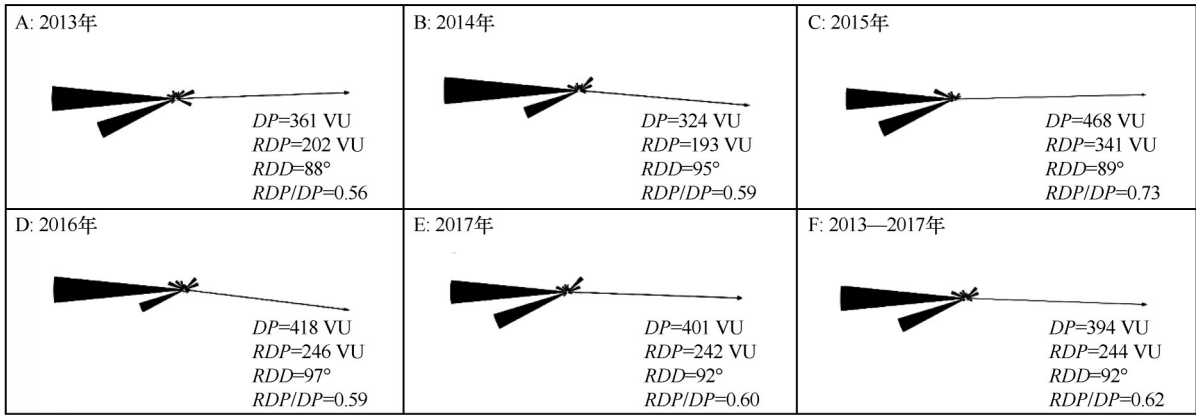


图 6 玛多盆地年输沙势玫瑰图
Fig.6 Annual sand drift potential rose diagram in the Madoi Basin

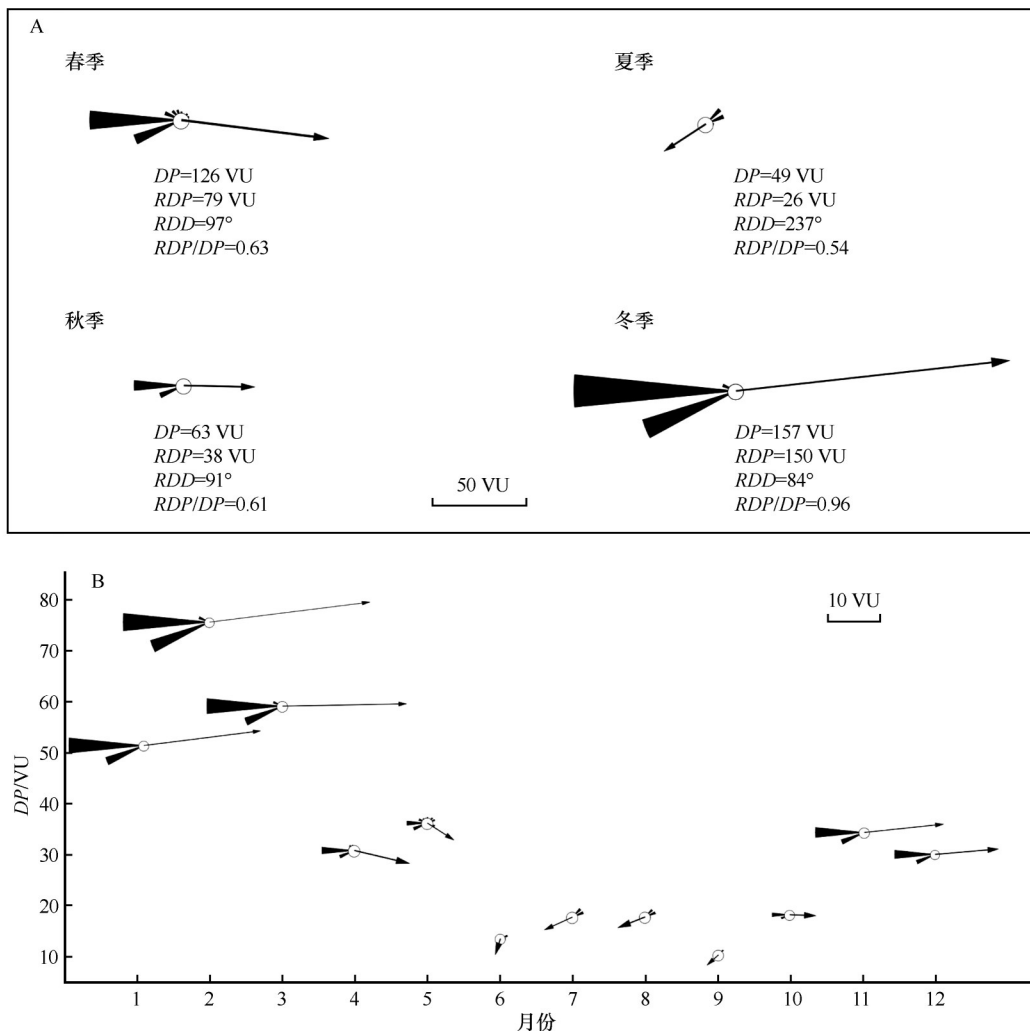


图 7 玛多盆地季节输沙势(A)与月输沙势(B)玫瑰图
Fig.7 The sand drift potential rose diagram of the Madoi Basin by season (A) and by month (B)

8月的合成输沙方向都为WSW。值得注意的是，研究区的合成输沙方向在6月发生显著反向，此后随着高原夏季风在9月后逐步减弱，该地区重新被

西风带所主导。前述分析表明，研究区的输沙势、合成输沙势与合成输沙方向，均呈现出季节性差异与月际变化。

4 讨论

研究结果显示,研究区平均风速与起沙风平均风速在季节尺度上表现出显著差异。冬春季风速和起沙风频率明显高于夏秋季,冬春季输沙势占全年71.7%,是风沙活动的最强季节。这一季节性特征与青藏高原整体风速变化规律一致,即冬春季风能环境更加显著^[27]。起沙风总体以西风(W)和西南西风(WSW)为主导(图4),且在季节尺度上,起沙风的主导风向存在显著的差异(图5)。冬、春、秋三季以西风(W)和西南西风(WSW)为主导,夏季起沙风风向发生逆转,转为东北风向(NE、ENE)。总体而言,研究区起沙风风向季节转换模式稳定,变化特征明显。这些风速与风向的季节性差异直接控制了输沙势的变化特征,并进一步影响地表物质运输过程。

区域风况特征及其强弱与风沙地貌形态有密切的关系,风向的稳定性与沙源条件是决定沙丘类型的关键因子^[28]。研究区的主导合成输沙方向为东向,在年内表现出明显的季节性变化:冬、春、秋季以较稳定的西风-东向输运为主,这种相对单一且持续的物质输运格局有利于新月形沙丘的形成与保持;而夏季则以东北风为主,风向的季节性变化可能会导致输沙方向的变化,从而进一步影响沙丘在季节尺度上的蚀积过程,并可能对沙丘的形态与沉积结构产生潜在影响。总体而言,该区季节性风况的特征与其沙丘类型基本吻合——该区沙丘以新月形沙丘和新月形沙丘链为主,局部地区还可见少量新月形沙丘垄和灌丛沙丘^[17]。这种风向的季节性差异,也为解释区域内沙丘形态多样性提供了动力学依据。

玛多盆地作为黄河的“水源摇篮”,对维持黄河水资源的整体稳定性具有重要作用,同时,该地区的风沙活动也会对黄河源区环境产生重要影响。玛多盆地的降水较少,可能导致土壤湿度偏小。较低的土壤湿度可降低风蚀启动的临界风速,使得在相同风力条件下土壤更易被启动和输送^[29]。与青藏高原其他地区相比(表2),玛多盆地的输沙势整体偏高^[30-37],体现出更强的风沙活动强度。从季节尺度来看,冬春季节,降水减少、湖泊水位下降,为风沙活动提供了充足的松散物源。同时强盛的偏西风主导了以W-ENE方向为主的潜在输沙风向(图1B),增加了沙物质向黄河干支流及附近湖泊输

表2 青藏高原地区输沙势

Table 2 Sediment transport potential in the Qinghai-Tibet Plateau

研究区	DP/VU	RDP/VU
玛多盆地	394	244
若尔盖盆地	66	36
共和盆地	87	84
红梁河风沙活动地区	250	243
雅鲁藏布江干旱河谷米林段	35	9
通天河七渡口	93	31
青藏铁路格拉段	232~727	189~651
雅鲁藏布江流域	0.5~840	0.1~652

送的可能性。进入暖季后,随着气温回升,表层冻土逐渐解冻,土壤结构趋于松散^[38],其对风蚀的敏感性进一步提高。冻土融化还削弱了土壤的持水能力,加速地表干燥化^[39],从而放大了夏秋季风沙活动的响应,即便此时风速和输沙势较冬春有所下降,风沙过程仍可能持续发生。总体来看,玛多盆地的风况与输沙势特征与区域环境密切相关,其季节性变化可对地表形态与环境过程产生一定影响。

需要指出的是,本研究基于单一气象站点的数据,虽能为理解盆地风沙活动提供参考,但其空间代表性有限,可能难以充分体现盆地尺度上风场与输沙势的空间异质性。未来研究应结合更多气象站点长序列尺度数据,以更全面地表征该区域的风况特征及其空间变化格局。

5 结论

本研究基于2013—2017年鄂陵湖气象站逐小时风速风向数据,系统分析了黄河源区玛多盆地的风况与输沙势特征。结果显示,玛多盆地的平均风速与起沙风平均风速均表现出明显的季节性变化,冬春季风速高、起沙风频率大;夏秋季风速显著减弱。起沙风总体受西风(W)和西南西风(WSW)控制,但在夏季转为以东北风(NE、ENE)为主导,表现出季节性风向转换模式。

玛多盆地输沙势较高,且方向具有稳定的季节性变化。年输沙势在324~468 VU,平均值为394.4 VU,风能强度在中等风能与高等风能环境间波动,总体呈现较高的风能水平。冬春季输沙势占全年71.7%,表明冬春季为研究区风沙活动最强时段,与青藏高原整体风能季节性规律一致。

参考文献:

- [1] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 864–901.
- [2] Pearce K I, Walker I J. Frequency and magnitude biases in the ‘Fryberger’ model, with implications for characterizing geomorphically effective winds [J]. *Geomorphology*, 2005, 68(1): 39–55.
- [3] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Formation mechanism and suitable controlling pattern of sand hazards at Honglianghe River section of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 855–871.
- [4] Hu Z H, Gao X, Lei J Q, et al. Geomorphology of aeolian dunes in the western Sahara Desert [J]. *Geomorphology*, 2021, 392: 107916.
- [5] 马芳, 吕萍, 曹敏, 等. 柴达木盆地新月形和穹状沙丘共存形态和成因 [J]. *中国沙漠*, 2025, 45(1): 185–194.
- [6] 潘加朋, 张克存, 安志山, 等. 风沙治理工程综合效益分析: 以敦煌黑山嘴风沙口为例 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 233–242.
- [7] Abbasi H, Gohardoust A, Mohammadpour F, et al. Erosive wind characteristics and aeolian sediment transport and dune formation in Makran Region of Baluchistan, Iran [J]. *Atmosphere*, 2025, 16(6): 650.
- [8] Sadid N. Sand dune migration and flux into the lower Helmand and Arghandab valleys [J]. *Sedimentologica*, 2024, 2(1).
- [9] 张令光, 沈才生, 黄艳丽, 等. 雅鲁藏布江流域输沙势空间特征 [J]. *中国沙漠*, 2025, 45(1): 304–317.
- [10] Hu G Y, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Wind regime and aeolian landforms on the eastern shore of Qinghai Lake, Northeastern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 188: 104451.
- [11] Tao W. Aeolian desertification and its control in Northern China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2014, 2(4): 34–41.
- [12] Zhang C L, Li Q, Shen Y P, et al. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619/620: 1648–1659.
- [13] Minola L, Zhang G F, Ou T H, et al. Climatology of near-surface wind speed from observational, reanalysis and high-resolution regional climate model data over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 2024, 62(2): 933–953.
- [14] Chen F H, Zhang J F, Liu J B, et al. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: a comprehensive review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106444.
- [15] 唐道斌, 杨坤美, 曾兰华, 等. 1.5 ka 以来青藏高原东北部风沙活动增强的时空差异 [J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2284–2298.
- [16] Hu J J, Hu G Y, Yang L H, et al. Periglacial aeolian activities in the Headwater Region of the Yellow River, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2025, 671: 112984.
- [17] 青藏高原风沙地貌图集 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2017.
- [18] 朱刚, 高会军, 曾光. 近 45 a 来黄河源区沙质荒漠化土地景观格局变化 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(12): 79–85.
- [19] Hu G Y, Jin H J, Dong Z B, et al. Driving forces of aeolian desertification in the source region of the Yellow River: 1975–2005 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3245–3254.
- [20] Dörwald L, Lehmkühl F, Delobel L, et al. Dune behavior in the Source Area of the Yellow River under climate changes observed from various remote sensing datasets [J]. *Aeolian Research*, 2024, 67/69: 100928.
- [21] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河流域沙漠化空间格局与成因 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 213–224.
- [22] 胡菁菁, 胡光印, 董治宝. 黄河源区玛多盆地沙漠化土地粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 242–252.
- [23] 孟宪红, 吕世华. 鄂陵湖流域湖畔观测点常规气象观测数据 [DS/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2022. <http://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/f85ec683-61ca-43de-a7a3-3e956d88ac36>.
- [24] 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [25] Qian G Q, Yang Z L, Xing X G, et al. Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China [J]. *Geomorphology*, 2024, 444: 108951.
- [26] Fryberger S G. Dune forms and wind regime [M]// *Dune Forms and Wind Regime*. Washington, D.C. USA: United States Government Printing Office, 1979: 137–169.
- [27] Zhang G F, Azorin-Molina C, Chen D L, et al. Variability and trends of near-surface wind speed over the Tibetan Plateau: the role played by the westerly and Asian monsoon [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15(3): 525–536.
- [28] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune type [J]. *Nature*, 1983, 304(5924): 337–339.
- [29] 董治宝, 钱广强. 关于土壤水分对风蚀起砂风速影响研究的现状与问题 [J]. *土壤学报*, 2007(5): 934–942.
- [30] 胡光印, 董治宝, 张正德, 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.
- [31] 谢胜波, 喻文波, 屈建军, 等. 青藏高原红梁河风沙动力环境特征 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 219–224.
- [32] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春. 青海共和盆地风况及风沙地貌 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 492–499.
- [33] 卢佳雪, 刘雅丹, 王学林, 等. 雅鲁藏布江干旱河谷米林段风况及输沙势特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(4): 145–155.
- [34] 张可盈, 张娴, 谢胜波. 柳格高速公路沿线风沙环境特征 [J]. *中国沙漠*, 2025, 45(5): 277–288.
- [35] 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.

- [36] 王涛, 谢胜波, 屈建军, 等. 通天河七渡口风沙环境特征及沙害防治[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 70-78.
- [37] 蔡迪文, 张克存, 安志山, 等. 青藏铁路格拉段风动力环境及其对铁路沙害的影响[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 40-47.
- [38] Xie S B, Qu J J, Xu X T, et al. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Natural Hazards*, 2017, 85(2): 829-850.
- [39] Xue X, Guo J, Han B W, et al. The effect of climate warming and permafrost thaw on desertification in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2009, 108(3): 182-190.

Wind regime and sand drift potential characteristics in the Madoi Basin of the source region of Yellow River

Zhang Biyou, Hu Guangyin, Hu Jingjing

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

Abstract: The Madoi Basin in the source region of the Yellow River is located in the northeastern Tibetan Plateau, at the convergence of the westerlies and the Asian monsoon. The region is widely covered by desertified land, with intense local aeolian activity and frequent aeolian hazards. However, the wind characteristics of this area remain poorly understood. This study analyzes the sand driving wind regime and sand drift potential in the Madoi Basin based on hourly wind speed and direction data from the Eling Lake region between 2013 and 2017. The results indicate that the annual average wind speed in the region is $4.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, with the highest in spring at $4.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, followed by winter at $4.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and the lowest in summer. Monthly variations show that February has the highest wind speed, while September has the lowest. The average annual sand driving wind speed is $8.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, with a frequency of 23.5%, and westerly winds dominate. The annual sand transport potential is 394 VU, with three years exceeding 400 VU, indicating that the wind energy environment of the study area fluctuates between moderate and high levels. sand drift potential is 244 VU, with a resultant drift direction of 92° and a direction variability index of 0.62, which is considered moderate directional variability. On a seasonal scale, the maximum sand drift potential occurs in winter (157 VU), followed by spring (126 VU), accounting for 39.8% and 31.9% of the annual total, respectively. Monthly analysis shows that February has the highest sand drift potential (75.36 VU), followed by January and March (both exceeding 50 VU), with a minimum in September, and that the resultant drift direction reverses in June. Sand transport in the study area is primarily influenced by westerly circulation, with eastward transport dominating in spring, autumn, and winter, while northward displacement of the westerlies in summer shifts transport to the west. Overall, the wind energy environment of the Madoi Basin exhibits seasonal variability with relative stability, strong in winter-spring and weak in summer-autumn. These seasonal and monthly variations not only reflect the response of aeolian processes on the Tibetan Plateau to atmospheric circulation but also provide important scientific insights for understanding regional wind-sand surface processes.

Key words: sand driving wind; sand drift potential; wind regime; the source region of Yellow River; Tibetan Plateau