

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.

雅鲁藏布江流域输沙势空间特征

张令光¹, 沈才生^{1,2}, 黄艳丽³, 扎多⁴, 拉珍⁵, 张焱⁶, 张正偲¹

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院 钱学森沙产业陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710119; 2.中国共产党西藏自治区委员会政策研究室, 西藏 拉萨 850000; 3.西藏自治区气象局, 西藏 拉萨 850005; 4.山南市气象局, 西藏 山南 856000; 5.西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨 850000; 6.中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 风是风沙灾害形成的动力条件。雅鲁藏布江(简称“雅江”)流域风沙危害严重,但目前对该地区输沙势的时空差异研究不足,限制了对该地区风沙灾害形成过程、灾害防治措施的合理布局以及沙尘天气形成与发展的深入理解。对沿江39个气象站2022年全年风速和风向数据进行分析,计算输沙势,以评估雅江流域风沙活动强度。结果表明:(1)雅江流域输沙势空间差异明显,上游年输沙势最大(418.2 ± 149.2 VU),下游其次(197.8 ± 68.9 VU),中游最小(94.1 ± 22.1 VU)。上游的仲巴和亚热,中游的曲松3个站点属于高风能环境;中游的昌果、定结、吞巴等9个站点属于中风能环境,其他站点属于低风能环境。上、中、下游地区不同季节之间输沙势均无统计学差异,意味着该地区全年均具有形成风沙灾害的动力条件。(2)上游和中游地区年合成输沙方向集中在ENE方向(50%和22%),下游地区集中在SW方向(50%)。(3)上游和下游地区不同季节合成输沙方向无显著差异,中游地区不同季节合成输沙方向存在明显差异,夏季集中在WSW-NNW方向(44%),其余季节则集中在N-E方向(38%~55%)。(4)根据合成输沙方向,雅江流域沙尘传输方向主要为NE和ENE,这与沿江地区沙丘分布位置相吻合。根据输沙势的研究结果,雅江流域的风沙灾害防治应该以高风能地区的河流宽谷、河漫滩和江心洲为主。

关键词: 雅鲁藏布江流域; 输沙势; 空间分布

文章编号: 1000-694X(2025)01-304-14

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00188

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

青藏高原作为世界第三极,是气候形成的主要驱动区,强烈的高原季风改变了大气环流格局,对区域和全球地理环境产生深远影响^[1]。雅鲁藏布江(简称“雅江”)流域是青藏高原最主要的人居区,也是青藏高原风沙活动强烈的地区。强烈的风沙活动导致风沙灾害与沙尘天气频发,严重影响该地区自然环境与社会经济发展^[2-3]。

风是风沙活动的主要动力因素,是沙丘发育、沙尘天气形成和风沙危害的动力条件,因此,对风况的研究是风沙灾害防治的基础和前提^[4-5]。输沙势(Drift Potential, DP)又称输沙环境,是衡量区域风沙活动强度的重要指标^[6],在风沙地貌及其格局成因分析、土壤风蚀研究、风沙灾害评估等方面应

用广泛^[7-9]。国际上,风沙观测已在亚非沙漠地区系统开展,Abbasi等^[10]借助输沙势分析了伊朗胡齐斯坦沙漠的物源,并解释了沙漠内部沙丘形态、类型与风沙环境之间的关系;Louassa^[11]通过建模探究了阿尔及利亚西部地区沙丘运动状态(流动性)与输沙环境之间的定量关系。在中国,对各个沙漠/沙地的输沙势均有研究,如庞营军等^[6]发现毛乌素沙地整体处于低风能环境,输沙势主要分布于西北方向;Meng等^[12]利用风速数据和Google Earth影像分析了局地环流对巴丹吉林沙漠湖泊与高大沙山之间沙物质运移的影响;Hu等^[13]基于多源气象数据对青海湖周围地区风况进行监测,发现剧烈振荡的风沙活动可能是导致当地多种风沙地貌并存的主要原因;孙小云等^[4]根据22个气象站的合成输沙势将

收稿日期:2024-11-27; 改回日期:2024-12-30

资助项目:西藏自治区“十三五”重点规划项目“雅江北岸易地扶贫搬迁区沙尘监测与预报预警系统建设”;科技部科技基础资源调查专项(2022FY202304);中央高校基本业务经费项目(GK202306002, GK202309006);山南市科学技术局项目(2022BJKJJHXM-007)

作者简介:张令光(1998—),男,山东平阴人,博士研究生,研究方向为干旱区资源与环境。E-mail: lgzhang@caf.ac.cn

通信作者:张正偲(E-mail: zhangzhengcai@snnu.edu.cn)

塔克拉玛干沙漠输沙环境划分为5个类型;张正偲等^[5]和王永胜等^[14]分别探讨了风沙活动对库姆塔格沙漠羽毛状沙丘和灌丛沙丘形成的影响。上述研究在认识区域风沙活动规律、探索风沙地貌形成机理等方面取得了长足进展。

输沙势的计算受实测风速和起沙风速的影响^[15-16]。风速在数据采集间隔(即时距)内被平均化,丢失部分信息,导致计算输沙势时出现误差;时距越大,丢失信息越多,计算误差越大^[15]。正因如此,目前对雅江流域输沙势的计算结果差异很大,如Zhou等^[17]采用日最大风速数据,发现山南河谷输沙势为311.7 VU,而Zhang等^[18]同样采用日最大风速数据,计算结果却小于50 VU;Yang等^[19]采用日平均风速(当地时间02:00、08:00、14:00和20:00测得风速的平均值)数据,计算得到定日地区输沙势超过2 000 VU,而Zhang等^[18]采用日最大风速数据,认为当地输沙势仅为77.6 VU。数据采集频率过低,导致风沙观测精度下降,输沙势计算结果的可信度大打折扣^[19]。因此,需要更高精度的数据来解释该地区的风沙灾害问题。

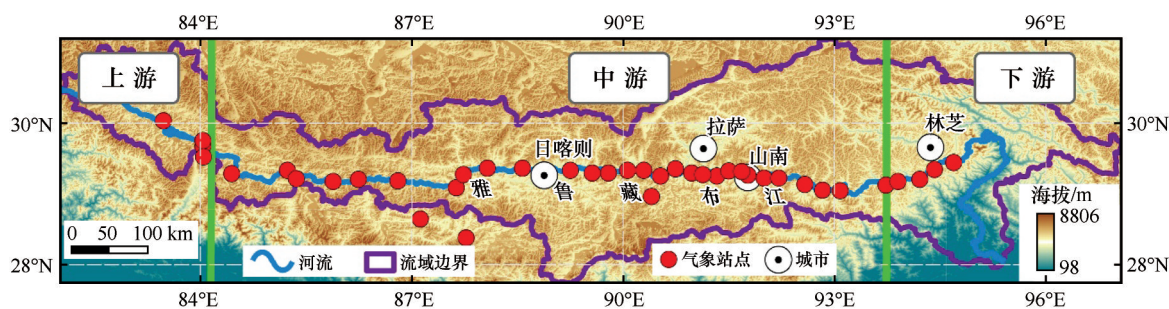
雅鲁藏布江流域地表拥有丰富的松散风成沉积物,加之风旱同期的气候,导致流域内风沙灾害十分严重^[20]。当前雅江流域风沙研究集中于风沙地貌^[21-22]、沙尘释放^[23-24]、空气动力学特征^[20,25]、物源^[18]、沉积物理化特征^[26-27]、荒漠化^[3]等领域,缺乏对风况和输沙势的系统研究^[28]。科学、准确掌握雅江流域风沙运动规律是防灾减灾、风险管控等工

作的基础和前提,然而相关研究仍较为薄弱^[1]。高原地区风沙活动研究有助于深入理解环境演化和气候变迁对地表过程的影响,全面认识风沙灾害的发生机理^[1,20]。为此,本研究采用更加翔实的流域风况数据,全面、准确计算输沙势,分析雅江流域输沙势的时空差异,探究输沙势与沙丘分布和沙尘传输的关系,揭示大气环流对风沙运动过程的影响,以期当地风沙灾害防治提供科学依据与理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江发源于西藏自治区仲巴县境内,自西向东穿过青藏高原南部,流经日喀则市、山南市和林芝市,流域平均海拔超过4 000 m,以里孜和派镇为界划分为上、中、下游^[3,29](图1)。上游地区属温带干旱、半干旱气候,年降水量200 mm左右,年均气温1.5 °C^[17,30];中游地区为半湿润气候,年降水量350~400 mm,年均气温8.6 °C^[17,20,25];下游地区为湿润气候,年降水量大于600 mm,年均气温8.8 °C^[31]。流域受中纬西风和南亚季风的共同影响,风沙活动强烈,冬春两季风力强劲,风速可达32.5 m·s⁻¹,月均最大风速为4.7 m·s⁻¹,年均有风日数172 d^[3]。径流季节性波动明显,夏季水位较高,冬春季水位低,河漫滩出露,在强风作用下,与山麓—河流宽谷沙丘一同构成风沙灾害的重要物源^[20,24]。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

图1 研究区概况与气象站点分布

Fig.1 Location and distribution of stations in study area

1.2 数据来源

风速观测数据来源于国家气象数据中心(<https://data.cma.cn/>)。在研究区内总共有39个气象站,上游和下游分别有4个站,中游有31个站(表1)。统计时间段为2022年全年,数据采集间隔为10 min。

1.3 输沙势计算

参照Fryberger等^[32]提出的方法,计算所有站点的年、季节和月输沙势:

$$DP = u^2(u - u_c)t \quad (1)$$

式中:DP为输沙势,单位为VU;u为10 m高度处起

表1 雅鲁藏布江流域气象站点基本情况

Table 1 Synopsis of stations in Yarlung Zangbo River Basin

流域划分	站点名称	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	海拔/m
上游	帕羊	30.04	83.47	4 583.6
	拉让	29.76	84.03	4 583.0
	仲巴	29.68	84.03	4 558.8
	亚热	29.53	84.04	4 561.0
中游	昌果	29.29	84.44	4 576.0
	萨嘎	29.34	85.23	4 523.6
	折巴	29.22	85.36	4 511.0
	差那	29.18	85.88	4 442.0
	夏如	29.21	86.24	4 429.7
	多白	29.19	86.80	4 131.9
	定日	28.65	87.12	4 322.0
	定结	28.38	87.77	4 200.4
	拉孜	29.09	87.63	4 001.2
	曲玛	29.28	87.73	3 970.0
	彭措林	29.37	88.07	3 952.0
	谢通门	29.37	88.57	3 898.0
	江当	29.34	89.25	3 808.9
	联乡	29.30	89.56	3 934.0
	仁布	29.30	89.79	3 792.9
	尼木	29.34	90.06	3 757.2
	吞巴	29.34	90.29	3 695.0
	浪卡子	28.97	90.40	4 432.9
	茶巴拉	29.26	90.53	3 631.0
	曲水	29.36	90.74	3 589.2
	贡嘎	29.30	90.97	3 565.8
	杰德秀	29.28	91.13	3 566.0
	扎囊	29.26	91.33	3 567.6
	桑耶寺	29.33	91.50	3 569.8
	多颇章	29.32	91.68	3 710.2
	泽当	29.27	91.77	3 561.2
	桑日	29.23	92.00	3 584.5
	曲松	29.23	92.21	4 210.8
	加查	29.14	92.58	3 261.2
	仲达	29.06	92.83	3 143.0
	朗县	29.05	93.08	3 118.5
下游	卧龙	29.13	93.73	2 984.2
	扎西绕登	29.18	93.90	2 978.7
	羌纳	29.35	94.42	3 014.2
	丹娘	29.45	94.69	2 986.5

沙风速,单位为 $\text{n mile}\cdot\text{h}^{-1}$ (节); u_i 为10 m高度处临界起动风速($6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1[28]}$); t 为起沙风时间数,用起沙风频率表示。同时计算了合成输沙势(Resultant drift potential, RDP)、合成输沙方向(Resultant drift direction, RDD)和风向变率(RDP/DP)。 $DP>400\text{ VU}$ 为高风能环境, DP 在 $200\sim 400\text{ VU}$ 为中风能环境, $DP<200\text{ VU}$ 为低风能环境^[33]。 $RDP/DP<0.3$ 时为高变率,对应复合或钝双峰风况; RDP/DP 在 $0.3\sim 0.8$ 为中变率,对应钝双峰或锐双峰风况; $RDP/DP>0.8$ 时为低变率,对应宽单峰或窄单峰风况^[6]。

1.4 统计分析方法

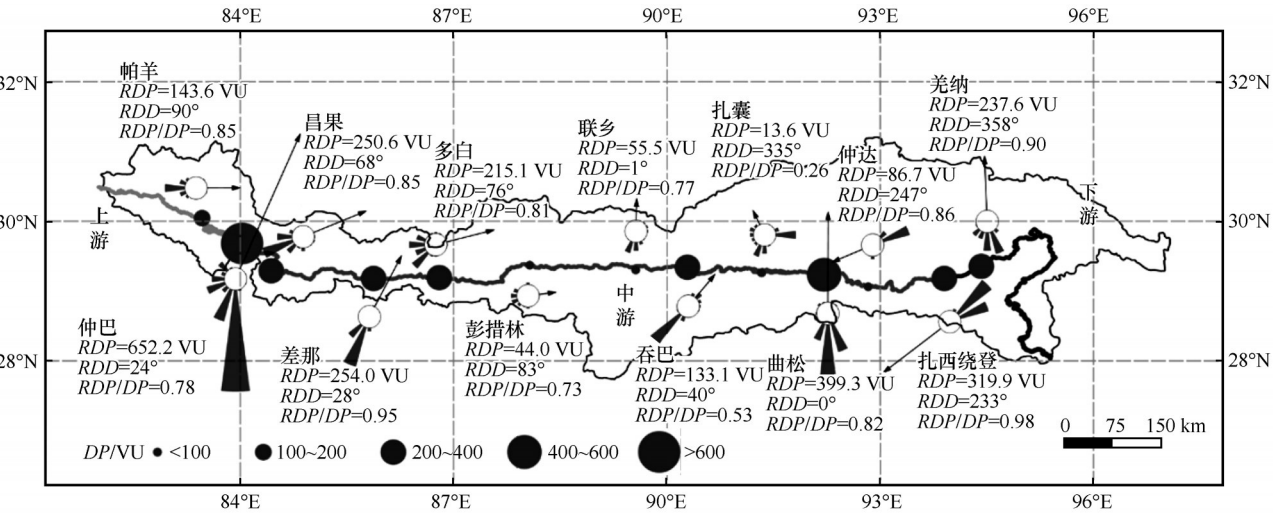
为了分析输沙势的空间差异,本文采用单因素方差分析(One-way ANOVA)及最小显著差异法(LSD)检验雅江流域上、中、下游地区以及不同季节之间输沙势、合成输沙势等的差异显著性,置信水平设置为95%。上述分析均在IBM SPSS Statistics 23中完成。借助Origin 2021和ArcGIS 10.7绘制输沙势玫瑰图及输沙势空间图。

2 结果与分析

2.1 雅鲁藏布江流域年输沙势特征

雅江流域年输沙势空间分布如图2和表2所示。仲巴站输沙势最高,为 839.7 VU ($RDP=652.2\text{ VU}$),其次是曲松站,为 487.8 VU ($RDP=399.3\text{ VU}$);加查站最低,仅为 0.5 VU ($RDP=0.1\text{ VU}$)。年输沙势表现为上游大、下游居中、中游小的分布特征。上游地区S和SSW方向输沙势最大,分别占总输沙势的29.2%和28.7%。中游地区SW和S方向输沙势最大,分别占总输沙势的18.8%和17.5%。下游地区NE方向输沙势最大,占总输沙势的28.4%。上游地区年输沙势 $169.0\sim 839.7\text{ VU}$ ($418.2\pm 149.2\text{ VU}$, $n=4$),仲巴站最高(839.7 VU),帕羊站最低(169.0 VU)。中游地区年输沙势 $0.5\sim 487.8\text{ VU}$ ($94.1\pm 22.1\text{ VU}$, $n=31$),曲松站最高(487.8 VU),加查站最低(0.5 VU)。下游地区年输沙势 $7.5\sim 325.5\text{ VU}$ ($197.8\pm 68.9\text{ VU}$, $n=4$),扎西绕登站最高(325.5 VU),丹娘站最低(7.5 VU)。

雅江流域合成输沙方向以东北方向为主,其中偏北方向(N和NNE)占38%,偏东方向(E和ENE)占31%(图2)。上游地区包含两组输沙方向



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

图 2 雅鲁藏布江流域年输沙势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of drift potential in Yarlung Zangbo River Basin

表 2 雅鲁藏布江流域气象站点年输沙势

Table 2 Annual drift potential of stations in Yarlung Zangbo River Basin

流域划分	站点名称	DP/VU	RDP/VU	RDD/(°)	RDP/DP	流域划分	站点名称	DP/VU	RDP/VU	RDD/(°)	RDP/DP
上游	帕羊	169.0	143.6	90	0.85	中游	吞巴	251.2	133.1	40	0.53
	拉让	252.6	190.6	67	0.75		浪卡子	3.2	2.2	117	0.68
	仲巴	839.7	652.2	24	0.78		茶巴拉	1.7	0.8	114	0.48
	亚热	411.7	385.5	29	0.94		曲水	0.7	0.6	97	0.88
中游	昌果	294.6	250.6	68	0.85		贡嘎	10.6	8.1	61	0.76
	萨嘎	9.5	0.3	135	0.04		杰德秀	5.1	2.7	316	0.53
	折巴	269.8	210.9	61	0.78		扎囊	53.1	13.6	335	0.26
	差那	267.0	254.0	28	0.95		桑耶寺	35.2	20.9	198	0.59
	夏如	163.2	14.2	68	0.09		多颇章	20.6	13.1	194	0.63
	多白	265.3	215.1	76	0.81		泽当	9.5	6.8	26	0.72
	定日	52.0	49.6	88	0.95		桑日	45.0	20.8	3	0.46
	定结	256.9	233.7	359	0.91		曲松	487.8	399.3	0	0.82
	拉孜	11.6	8.1	71	0.70		加查	0.5	0.1	69	0.21
	曲玛	15.3	2.9	110	0.19		仲达	100.8	86.7	247	0.86
	彭措林	59.9	44.0	83	0.73		朗县	19.9	18.6	254	0.94
	谢通门	62.2	30.1	112	0.48	下游	卧龙	194.3	141.2	213	0.73
	江当	12.5	10.1	75	0.80		扎西绕登	325.5	319.9	233	0.98
	联乡	72.4	55.5	1	0.77		羌纳	264.0	237.6	358	0.90
	仁布	19.8	9.7	72	0.49		丹娘	7.5	7.3	296	0.97
	尼木	41.5	30.7	38	0.74						

(NNE 和 ENE)，分别占上游地区站点总数的 50%。中游地区出现频率最高的合成输沙方向为 ENE 和 N，分别占中游地区站点总数的 22% 和 10%，其余方向占 68%。下游地区主输沙方向为 SW，占下游地区站点总数的 50%，次输沙方向为 N，占 25%(表 2)。

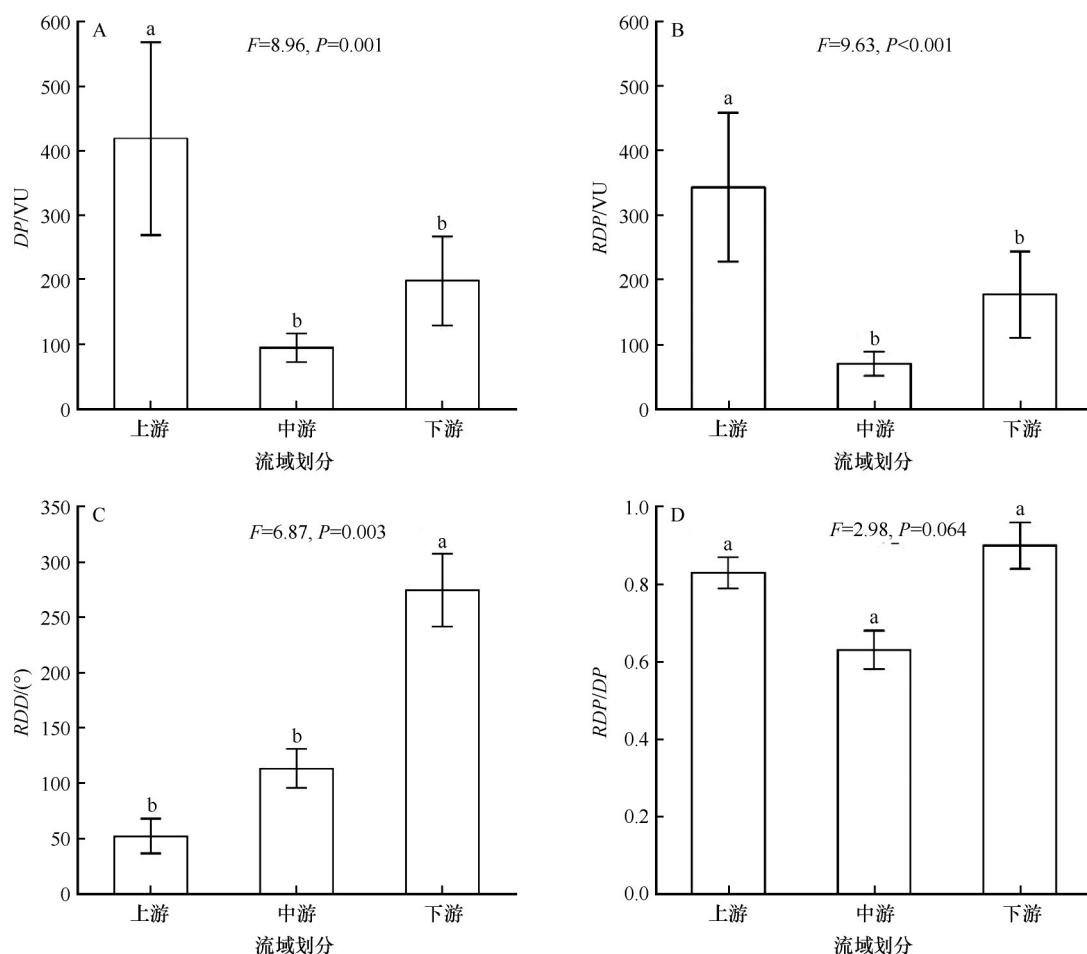
雅江流域风向变率以低变率为主,占流域站点数61%,高变率仅占8%(图2)。上游地区整体表现为低变率($0.75 < RDP/DP < 0.94$, 0.83 ± 0.04 , $n=4$)、窄单峰风况,其中帕羊站($RDP/DP=0.85$)、亚热站($RDP/DP=0.94$)的方向变率属低变率,仲巴站($RDP/DP=0.78$)和拉让站($RDP/DP=0.75$)属中变率。中游地区整体表现为中变率($0.04 < RDP/DP < 0.95$, 0.63 ± 0.05 , $n=31$)、宽单峰或锐双峰风况,其中扎囊站($RDP/DP=0.26$)、加查站($RDP/DP=0.21$)、萨嘎站($RDP/DP=0.04$)的风向变率为高变率、钝双峰风况,定日站($RDP/DP=0.95$)、定结站($RDP/DP=0.91$)、曲水站($RDP/DP=0.88$)、朗县站($RDP/DP=0.94$)的风向变率为低变率、窄单峰风况,其余站点均为中变率。下游地区整体表现为低变率($0.73 < RDP/DP < 0.98$, 0.90 ± 0.06 , $n=4$)、窄单峰风况,除卧龙站($RDP/DP=0.73$)风向变率为中变率外,其余站

点均为低变率(表2)。

总体来看,上游地区整体为高风能环境,中、下游地区整体为低风能环境,上游地区输沙势、合成输沙势均显著高于中、下游地区($P < 0.05$),中、下游之间则无显著差异(图3A、B);下游地区整体合成输沙方向为偏W方向,与上、中游存在明显差异($P < 0.05$),而上、中游分别为偏N和E方向,二者无显著差异(图3C)。中游地区风向变率整体为中变率,上游和下游地区为低变率,但不同地区之间风向变率无显著差异($P > 0.05$,图3D)。

2.2 雅鲁藏布江流域不同季节输沙势特征

春季雅江流域输沙势最大的站点是仲巴站($DP=242.5$ VU, $RDP=164.6$ VU),最小的是曲水站($DP=0.2$ VU, $RDP=0.2$ VU)。空间分布与年输沙势类似,呈上游大、下游其次、中游最小的趋势(图4)。

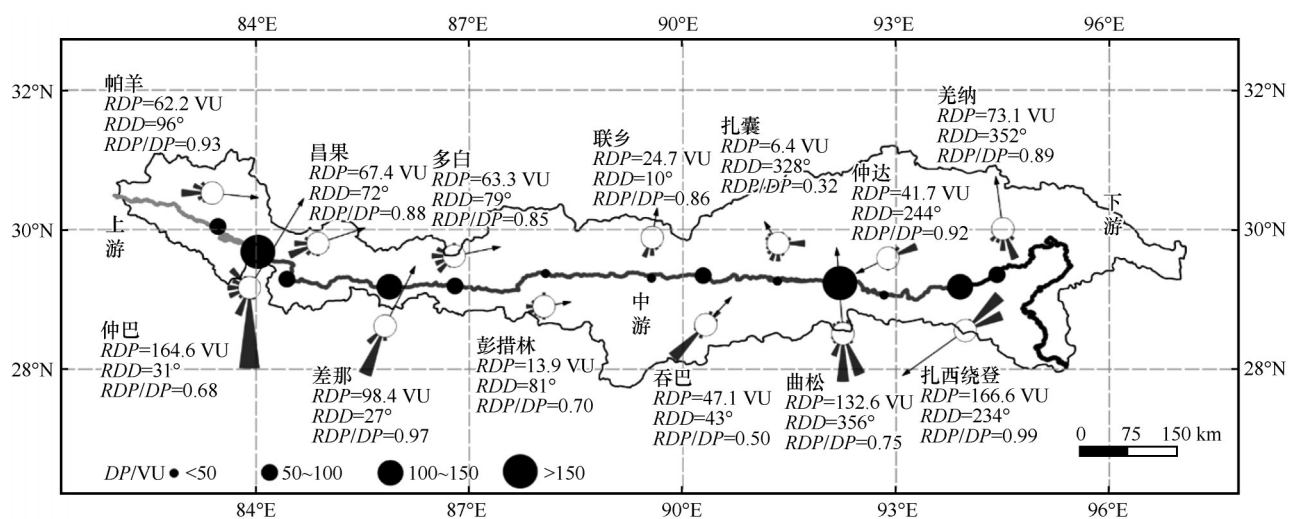


注:a, b, c表示上、中、下游之间差异显著($P < 0.05$)

图3 流域不同分段全年输沙势

Fig.3 Drift potential of the whole year among upper, middle and downside reaches of Yarlung Zangbo River Basin.

a, b and c indicate significant differences among different regions



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

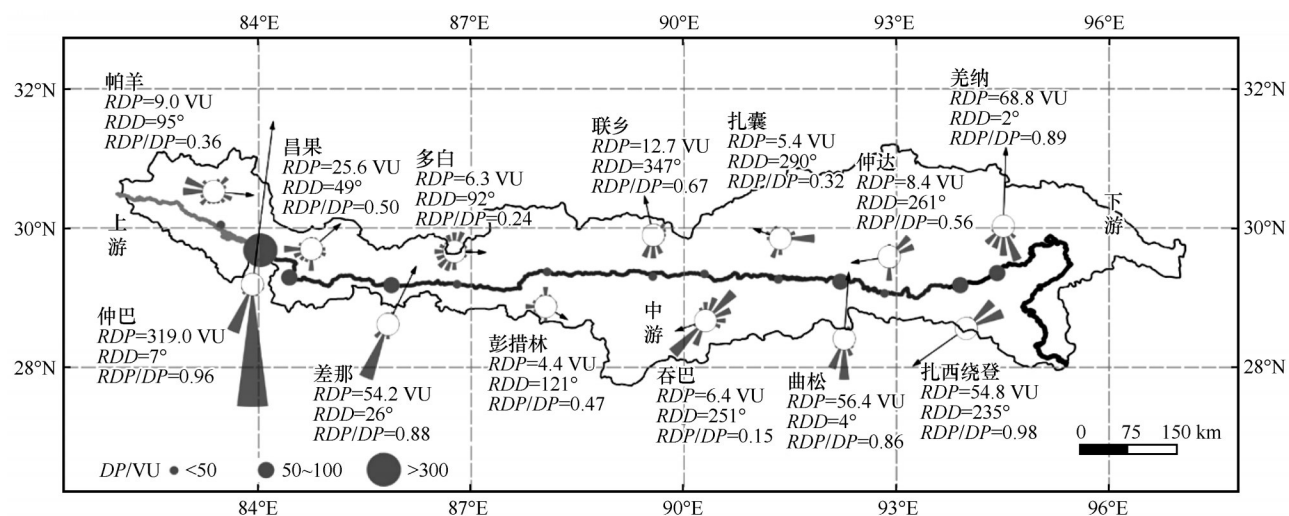
图 4 雅鲁藏布江流域春季输沙势空间分布

Fig.4 Spatial distribution of drift potential in Spring in Yarlung Zangbo River Basin

上游地区S和SSW方向输沙势最大,分别占总输沙势的25.3%和26.7%。中游地区S和SW方向输沙势最大,分别占总输沙势的17.2%和18.4%。下游地区NE方向输沙势最大,占总输沙势的24.4%。上游地区两组合成输沙方向分别为NE和E。中游地区主输沙方向为E(占33%),其次为N(占22%)。下游两组合成输沙方向分别为SW和N方向。春季流域内风向变率为低变率的站点占62%,中变率占38%。帕羊、昌果、差那、吞巴和扎西绕登等站为窄单峰风况,多白、曲松、美纳等站为宽单峰风况,仲巴、扎囊等站为锐双峰风况。

夏季输沙势空间分布总体呈现均匀分布的特

征(图5)。输沙势最大的站点是仲巴站($DP=331.2$ VU, $RDP=319.0$ VU),其余站点普遍小于100 VU。上游地区S和SSW方向输沙势最大,分别占总输沙势的43.3%和39.2%。中游地区S和SSW方向输沙势依然最大,分别占总输沙势的17.4%和18.1%。下游地区ENE和SSE方向输沙势最大,分别占总输沙势的19.6%和18.7%。上游地区两组合成输沙方向分别为N和E。中游地区合成输沙方向复杂多变,自昌果至仲达依次为NE、NNE、E、ESE、NNW、WSW、WNW、N和W。下游地区两组合成输沙方向分别为SW和N。夏季流域内风向变率为低变率、窄单峰或宽单峰风况的站点占38.5%,主要分布



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

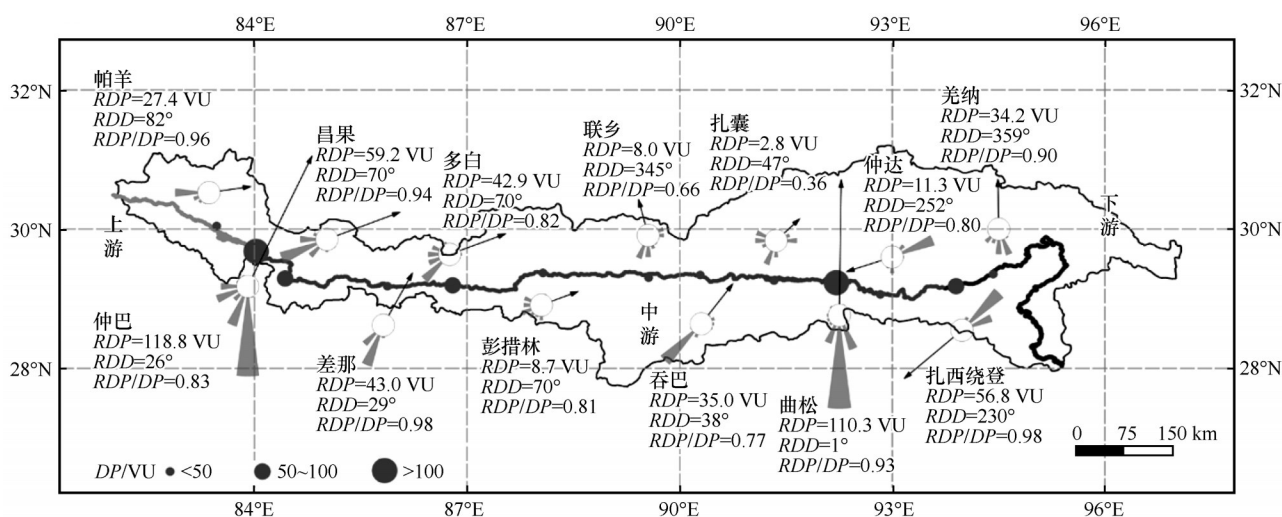
图 5 雅鲁藏布江流域夏季输沙势空间分布

Fig.5 Spatial distribution of drift potential in Summer in Yarlung Zangbo River Basin

于下游地区及中、上游地区的仲巴、差那站;中变率、锐双峰或钝双峰风况占46.1%,主要分布于中游地区;高变率、钝双峰或复合风况占15.4%,主要为多白、吞巴等站,均位于中游地区。

秋季多数站点输沙势小于50 VU,超过50 VU的站点有仲巴站、亚热站、昌果站、多白站、曲松站、卧龙站和扎西绕登站等(图6)。上游地区S和SSW方向输沙势最大,分别占总输沙势的25.5%和27.7%。中游地区S和SW方向输沙势最大,分别占总输沙势的21.1%和17.5%。下游地区NNE和

NE方向输沙势最大,分别占总输沙势的23.0%和27.4%。上游地区两组合成输沙方向分别为NNE和E。中游地区主输沙方向为ENE(占23%),其次为NE(占15%),其余方向占62%。下游地区两组合成输沙方向分别为SW和N。秋季流域内风向变率为低变率、窄单峰或宽单峰风况的站点占77%;中变率占23%,主要为中游地区的联乡站($RDP/DP=0.66$,锐双峰风况)、吞巴站($RDP/DP=0.77$,窄单峰风况)和扎囊站($RDP/DP=0.36$,复合风况)等。



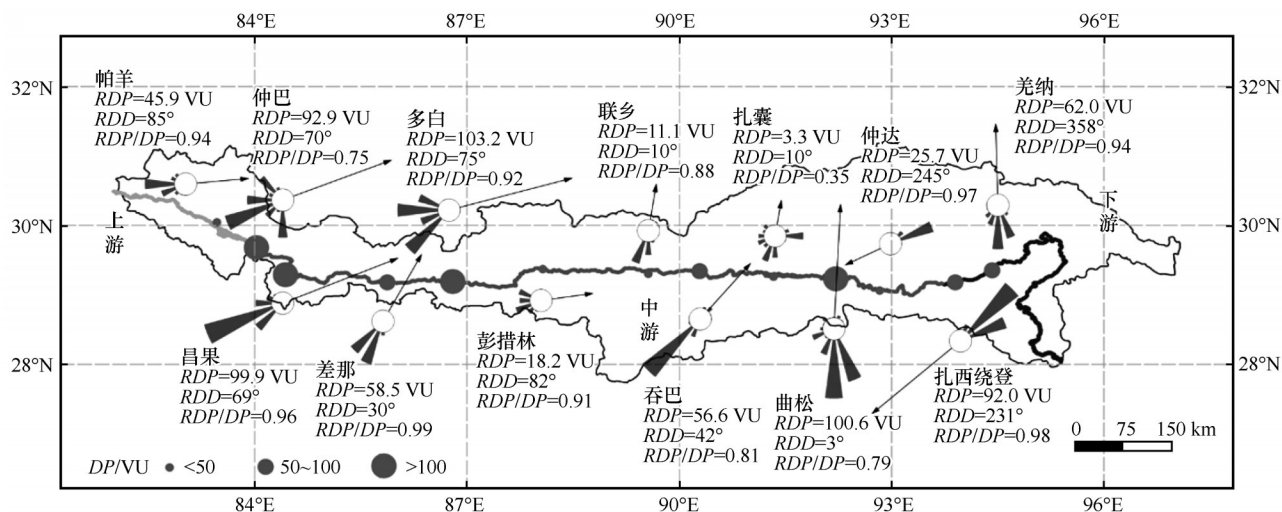
注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

图6 雅鲁藏布江流域秋季输沙势空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drift potential in Autumn in Yarlung Zangbo River Basin

冬季雅江流域输沙势最大的站点为曲松站($DP=$ 127.5 VU, $RDP=100.6$ VU),最小的站点是加查站

($DP=0.0$ VU, $RDP=0.0$ VU),空间分布特征与春季相似(图7)。上游地区W和WSW方向输沙势最



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

图7 雅鲁藏布江流域冬季输沙势空间分布

Fig.7 Spatial distribution of drift potential in Winter in Yarlung Zangbo River Basin

大,分别占总输沙势的24.8%和25.3%。中游地区SW方向输沙势最大,占总输沙势的19.8%。下游地区NE方向输沙势最大,占总输沙势的30.0%。上游地区两组合成输沙方向分别为ENE和E。中游地区主输沙方向为N(占23%),其次为ENE(占15%),其余方向占62%。下游地区两组合成输沙方向分别为SW和N。冬季流域内风向变率为低变率、窄单峰或宽单峰风况的站点占77%,中变率占23%,主要有仲巴站($RDP/DP=0.75$,锐双峰风况)、扎囊站($RDP/DP=0.35$,钝双峰风况)和曲松站($RDP/DP=0.79$,窄单峰风况)等。

不同季节之间输沙势特征存在明显差异(表3)。雅江流域春季输沙势占全年的35%,贡嘎站春季 DP 占全年比例最高(55%),其次是多颇章站(50%),仁布站最低(19%)。夏季输沙势占全年的21%,亚热站夏季 DP 占全年比例最高(40%),其次是仲巴站(39%),定日站最低(2%)。秋季输沙势占全年的15%,卧龙站秋季 DP 占全年比例最高(26%),其次是朗县站(25%),茶巴拉站最低(3%)。冬季输沙势占全年的29%,定日站冬季 DP 占全年比例最高(52%),其次是曲水站(51%),亚热站最低(12%)。上游地区春、秋季之间合成输沙方向相差小于 15° ,夏、冬季之间平均相差 30° 。中游地区不同站点不同季节之间合成输沙方向差异较大,定结站不同季节之间 RDD 相差小于 5° ,桑日站春、秋季之间 RDD 相差 173° 。下游地区不同季节之间合成输沙方向差异小于 10° 。夏季站点风向变率以中变率为主,春、秋、冬季以低变率为主。

上游地区春季和夏季平均输沙势分别为129.5 VU和142.1 VU,显著高于中游和下游地区($P<0.05$),中游与下游无显著差异;秋冬季节,上、中、下游无显著差异(图8A、B)。夏季雅江中、下游合成输沙方向无显著差异,但与上游地区存在显著差异($P<0.05$);春、秋和冬季下游地区合成输沙方向与上游和中游存在显著差异($P<0.05$),上游和中游无显著差异(图8C)。不同季节的上、中、下游风向变率均无显著差异($P>0.05$,图8D)。

上游地区春、夏季输沙势、合成输沙势高于秋、冬季,中游及下游地区冬、春季输沙势、合成输沙势略高于夏、秋两季,但无论是在上游、中游还是下游,不同季节输沙势、合成输沙势均无显著差异($P>$

0.05,图8A、B)。上游和下游不同季节合成输沙方向无显著差异($P>0.05$);中游地区夏季合成输沙方向与冬季差异显著,与春、秋季差异不显著(图8C)。上游及下游地区不同季节风向变率无显著差异,总体为低变率、宽单峰或窄单峰风况;中游地区不同季节风向变率均为中变率、钝双峰或锐双峰风况,但夏季风向变率仅为0.55,显著低于其他季节($P<0.05$),春、秋、冬季之间则无显著差异(图8D)。

2.3 雅鲁藏布江流域月输沙势特征

上游地区输沙势与合成输沙势随月份增加整体呈先增大、后减小的趋势,最大值出现在6月,分别为77.5 VU和75.4 VU,最小值出现在1月,分别为14.3 VU和10.3 VU(图9A、B)。合成输沙方向总体无较大变化,1—4月以ENE方向为主,进入5月后转变为NNE-NE方向,7—8月转变为E或偏E方向,9月以后又转变为偏NE和ENE方向(图9C)。风向变率呈先增大、后减小、再增大的趋势,1—6月从0.76增至0.93,为年内最大值,至8月下降至0.72,为年内最小值(图9D)。

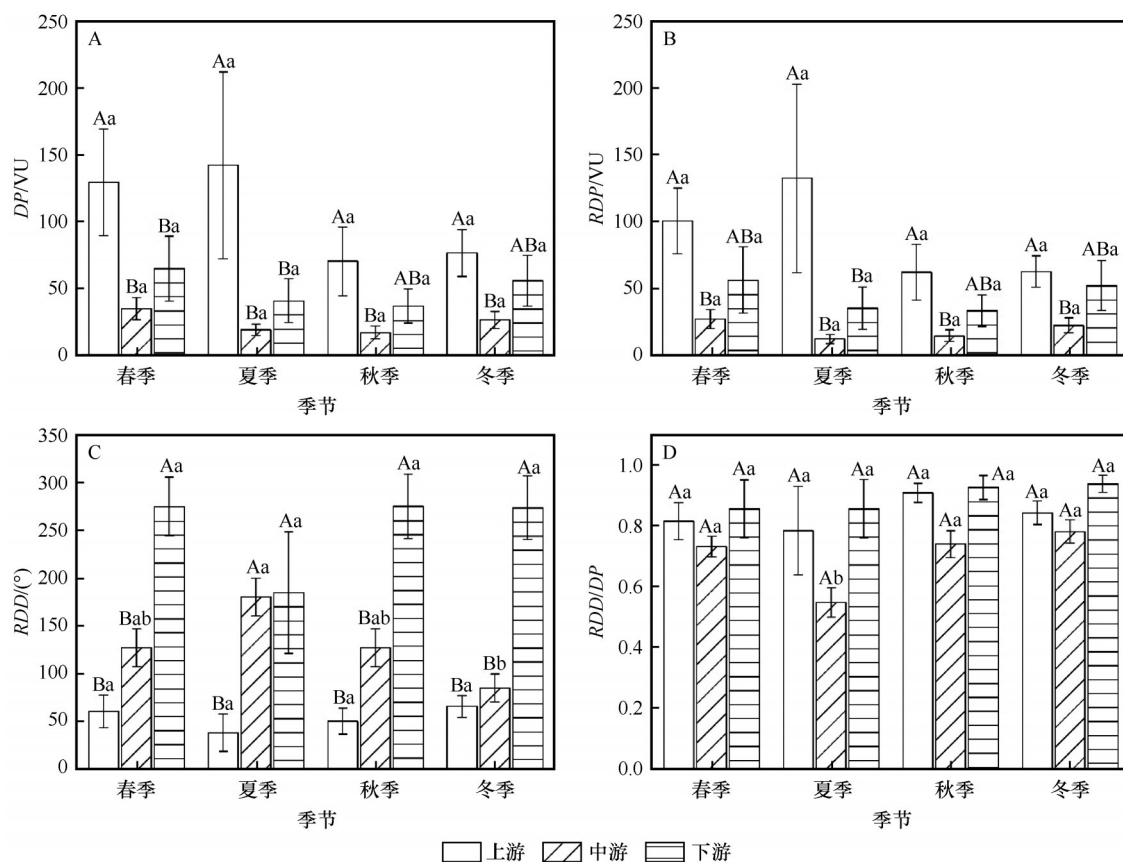
中游地区输沙势与合成输沙势年内无较大波动,不同月份 DP 均小于20 VU;4月最大,为15.2 VU,9月最小,仅为3.4 VU(图9A)。合成输沙方向发生偏SE(1—4月)—SSE(5月)—偏S(6—7月)—偏SW(8月)—SSE(9月)—偏SE(10—12月)的周期性变化,偏东南风向的时间占据全年的75%(图9C)。风向变率则呈先减小、后增大的趋势,6月最小,为0.61,12月最大,为0.87(图9D)。

下游地区输沙势总体变化平稳,月输沙势最大不超过25 VU,最小不低于5 VU(图9A)。上半年合成输沙方向为偏W方向,变动较小,下半年变动较大,6、7月为偏S方向,8月为WNW方向,9月为偏S方向,10、11月为偏W方向,12月偏S方向(图9C)。风向变率整体平稳,不同月份均表现为低变率(图9D)。

综合来看,5—7月雅江流域上、中、下游之间输沙势差异最大,其次是8—10月,这种差异不仅体现在输沙势大小上,也体现在合成输沙方向与风向变率中。上游地区的输沙势与风向变率,中游地区的合成输沙方向与风向变率,以及下游地区的合成输沙方向均存在明显的月度变动。

表 3 雅鲁藏布江流域气象站季节输沙势
Table 3 Seasonal drift potential of stations in Yarlung Zangbo River Basin

	站点	DP/VU				RDP/VU				RDD/(°)				RDP/DP			
		春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
上游	帕羊	66.6	25.0	28.6	48.8	62.2	9.0	27.4	45.9	96	95	82	85	0.93	0.36	0.96	0.94
	拉让	81.6	48.3	39.5	83.1	61.0	39.7	34.8	69.6	84	23	64	75	0.75	0.82	0.88	0.84
	仲巴	242.4	331.2	142.7	123.4	164.6	319.0	118.8	92.9	31	7	26	70	0.68	0.96	0.83	0.75
	亚热	127.2	164.0	70.3	50.2	114.2	162.0	67.6	42.0	31	27	29	33	0.90	0.99	0.96	0.84
中游	昌果	76.2	51.02	63.2	104.1	67.4	25.6	59.2	99.9	72	49	70	69	0.88	0.50	0.94	0.96
	萨嘎	2.1	3.4	0.6	3.4	1.2	1.7	0.1	0.2	23	192	62	4	0.58	0.49	0.16	0.06
	折巴	115.6	76.6	32.5	45.1	97.2	60.2	27.1	37.0	60	43	58	98	0.84	0.78	0.83	0.82
	差那	101.9	61.9	44.0	59.3	98.4	54.2	43.0	58.5	27	26	29	30	0.97	0.88	0.98	0.99
	夏如	46.2	59.4	16.2	41.4	13.8	27.7	7.3	28.1	99	291	352	110	0.30	0.47	0.45	0.68
	多白	74.9	26.5	52.0	111.9	63.3	6.3	42.9	103.2	79	92	70	75	0.85	0.24	0.82	0.92
	定日	17.0	0.9	7.2	26.9	16.6	0.1	7.1	26.1	89	86	77	91	0.97	0.07	0.99	0.97
	定结	113.1	59.8	38.8	45.1	105.4	56.3	36.0	36.2	358	357	359	0	0.93	0.94	0.93	0.80
	拉孜	4.1	2.0	1.8	3.6	3.3	1.3	1.5	2.7	64	36	60	104	0.80	0.63	0.85	0.75
	曲玛	6.0	4.7	1.7	2.8	2.4	1.8	0.5	1.7	117	192	63	17	0.40	0.38	0.31	0.59
	彭措林	19.7	9.4	10.7	20.1	13.9	4.4	8.7	18.2	81	121	70	82	0.70	0.47	0.81	0.91
	谢通门	16.1	12.1	12.1	21.8	9.3	7.3	7.0	15.2	105	194	125	81	0.57	0.61	0.58	0.70
	江当	4.1	0.7	2.4	5.3	3.3	0.5	2.1	5.3	85	267	71	71	0.79	0.67	0.87	0.99
	联乡	28.7	19.0	12.0	12.6	24.7	12.7	8.0	11.1	10	347	345	10	0.86	0.67	0.66	0.88
	仁布	3.8	7.7	2.5	5.9	2.5	1.6	2.3	5.6	74	184	61	61	0.65	0.20	0.94	0.96
	尼木	17.1	6.2	6.5	11.7	13.8	1.7	5.7	10.2	42	347	41	39	0.81	0.28	0.88	0.87
	吞巴	94.5	41.4	45.2	70.1	47.1	6.4	35.0	56.6	43	251	38	42	0.50	0.15	0.77	0.81
	浪卡子	1.5	0.5	0.3	0.9	1.0	0.4	0.2	0.7	125	116	122	102	0.63	0.84	0.62	0.73
	茶巴拉	0.6	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1	0.1	0.5	155	161	100	68	0.81	0.16	0.98	0.90
	曲水	0.2	0.0	0.1	0.4	0.2	0.0	0.1	0.3	110	135	85	92	0.89	1.00	0.92	0.89
	贡嘎	5.8	0.7	1.9	2.1	4.5	0.1	1.7	1.8	56	47	76	62	0.78	0.17	0.88	0.84
	杰德秀	1.6	0.7	0.6	2.1	0.9	0.4	0.2	1.5	339	257	338	313	0.55	0.52	0.26	0.72
	扎囊	19.8	16.5	7.6	9.3	6.3	5.4	2.7	3.3	328	290	47	10	0.32	0.32	0.36	0.35
	桑耶寺	13.1	10.5	3.4	8.1	7.8	8.9	1.4	2.9	201	196	183	201	0.59	0.85	0.42	0.35
	多颇章	10.4	3.1	1.6	5.5	6.5	1.8	1.1	3.8	199	191	202	186	0.63	0.58	0.67	0.69
	泽当	3.2	1.2	1.3	3.9	2.6	0.6	0.9	3.0	18	77	31	22	0.82	0.53	0.67	0.77
	桑日	19.0	10.3	8.6	7.1	16.9	6.7	8.2	5.5	2	352	175	7	0.89	0.65	0.95	0.77
	曲松	176.0	65.6	118.7	127.5	132.6	56.4	110.3	100.6	356	4	1	3	0.75	0.86	0.93	0.79
	加查	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	107	321	—	—	0.56	0.60	—	—
	仲达	45.2	15.0	14.1	26.6	41.7	8.3	11.3	25.7	244	261	252	245	0.92	0.56	0.80	0.97
	朗县	7.1	3.4	4.9	4.4	6.5	3.2	4.6	4.3	257	249	252	254	0.92	0.94	0.94	0.98
下游	卧龙	56.5	27.6	50.3	59.9	32.6	15.8	41.5	51.3	217	208	213	211	0.58	0.57	0.83	0.86
	扎西绕登	118.3	55.8	57.7	93.7	116.6	54.8	56.8	92.0	234	235	230	231	0.98	0.98	0.98	0.98
	羌纳	81.9	77.6	38.1	66.3	73.1	68.8	34.2	62.0	352	2	359	358	0.89	0.89	0.90	0.94
	丹娘	2.4	1.8	0.7	2.6	2.4	1.8	0.7	2.5	296	295	299	295	0.97	0.98	0.99	0.98



注:不同大写字母表示同一季节上、中、下游之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一流域分段不同季节之间差异显著($P<0.05$)

图8 雅鲁藏布江流域不同地区季节输沙势特征

Fig.8 Seasonal drift potential statistics among upper, middle and downside reaches of Yarlung Zangbo River Basin.

Different capital letters indicate significant differences among different regions in the same season, and different lowercases indicate significant differences among different seasons in the same region ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 大尺度环流系统对雅鲁藏布江流域风况及沙尘传输的影响

雅江流域风沙活动频繁,沙尘天气活跃^[19-20]。本文研究结果表明,上游地区输沙势显著高于中、下游地区,下游合成输沙方向显著不同于上游和中游,说明输沙势具有较强的空间异质性。上游地区风沙环境总体表现为高能环境,合成输沙方向为偏东北方向,其中仲巴站的输沙势与Zhou等^[17]的计算结果接近。大气环流是影响风况及沙尘传输的重要因素^[22]。上游地区常年受到西风急流的影响,而高原季风又起到了加强的作用,导致当地风力强劲^[34]。此外,由于受到地形的影响,盛行风向(西风)稍有偏斜,最终形成了偏向东北的输沙方向^[35]。

中游地区输沙势减小,合成输沙方向复杂多变,季节性差异明显,但总体上以ENE和N方向为

主。本研究中,定日、泽当等站点的输沙势计算结果与Zhang等^[18]一致,贡嘎站输沙势计算结果则比Zhang等^[18]偏小,但合成输沙方向基本一致。当地受中纬西风和印度夏季风的交替控制,两大环流系统互相“博弈”,导致大气层结稳定性较差,近地表风况错综复杂^[28]。下游地区整体属于中、低风能环境,合成输沙方向集中于SW。下游海拔降至3 000 m以下,印度季风可通过大峡谷进入该地区,影响当地风况^[34]。而多数站点合成输沙方向与印度夏季风方向相反,但与冬季风方向相同,说明冬、春季是风沙活动的活跃期,夏季风的作用更多的是携带来自印度洋的湿润水汽,丰富降水,改善气候^[36]。

上游地区输沙势大,输沙方向较为稳定,而且因为海拔高,缺少地形上的阻碍,总体上有利于沙尘传输^[37]。中游地区尽管存在丰富的沙尘物源区^[27],但年内合成输沙方向的变动较大,且河谷两岸均存在高大的正地形,导致沙尘的传输过程和影

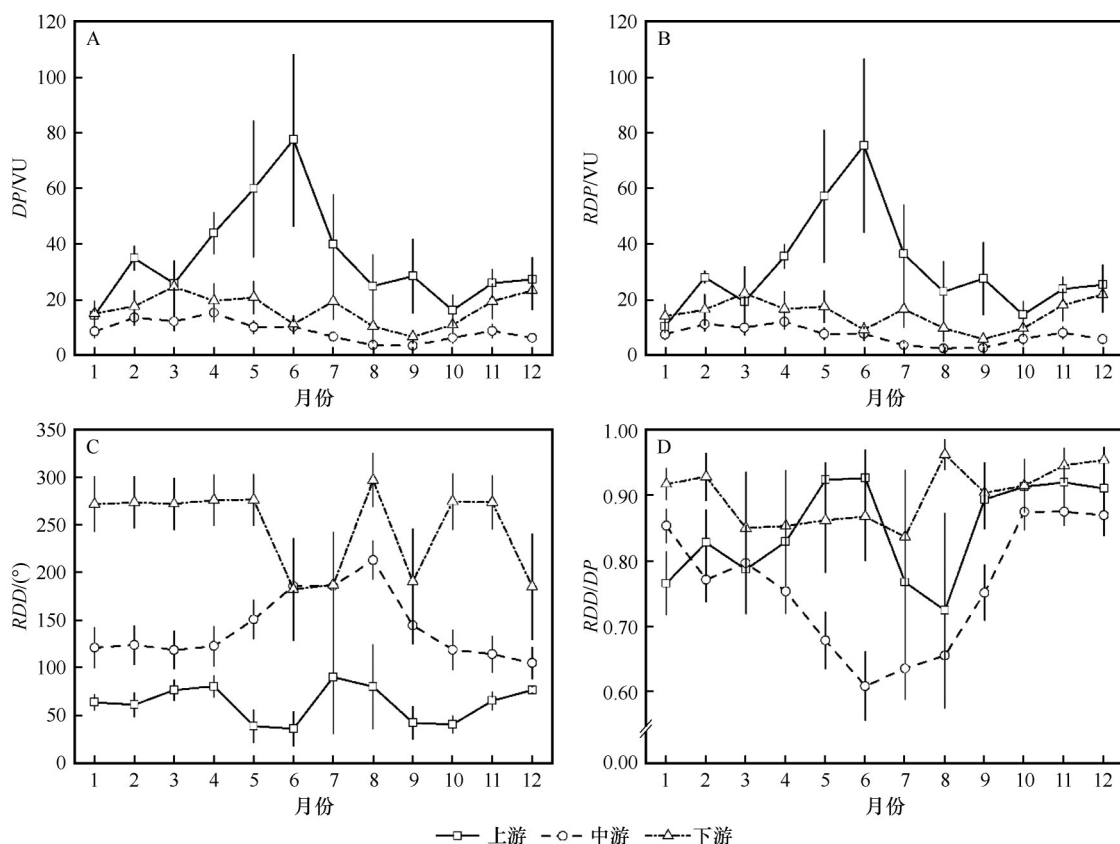


图9 雅鲁藏布江流域月输沙势变化

Fig.9 Monthly drift potential of Yarlung Zangbo River Basin

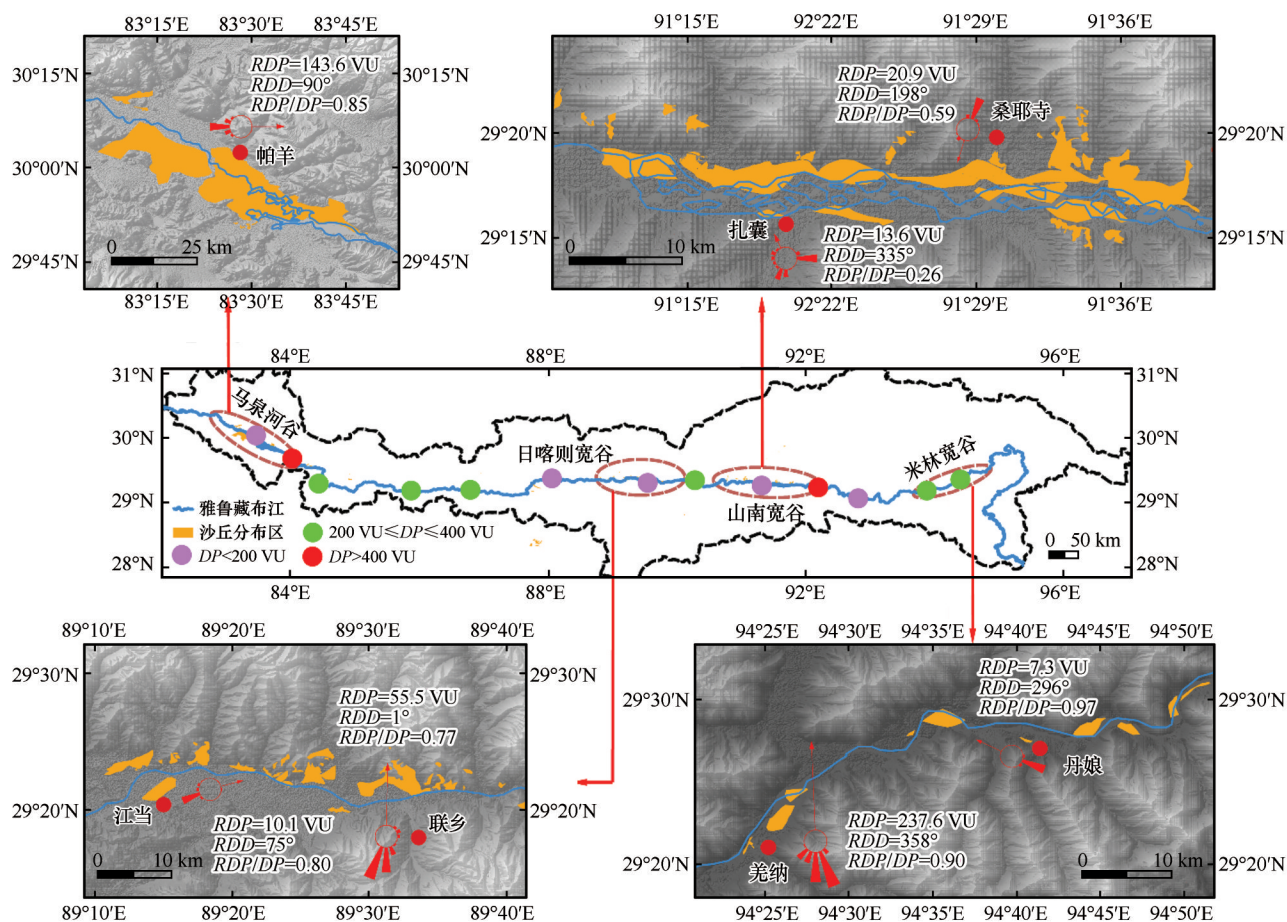
响空间范围受到较大限制。而与上、中游相比,下游地区合成输沙方向发生明显变化,以致主要城区分布于沙尘传输方向的上风向,使得下游的沙尘源地对城市和人居环境的威胁大打折扣。因此,上游地区可能才是真正的沙尘源地。在大尺度环流系统和地貌背景的影响下,雅江流域沙尘传输方向以NE和ENE方向为主,对拉萨河流域、青藏高原北部及全球沙尘循环产生了重要影响^[37]。

3.2 局地环流对雅鲁藏布江流域风况及沙丘分布的影响

输沙势影响沙丘动态,是解释沙丘形态、分布和迁移的关键因子^[5,38-39]。下垫面差异(如地形、海拔等)导致地表受热不均,影响风能的分布、转化与扩散,改变了局地环流特征,进一步影响输沙势及沙丘的空间分布^[3]。雅江流域沙丘主要分布于上游的马泉河谷,中游的日喀则、山南宽谷和下游的米林宽谷区,其中马泉河谷沙丘集中连片分布,日喀则、山南宽谷区沙丘集中分布于河流北岸,米林宽谷沙丘呈不连续分布格局(图10)^[19]。马泉河是雅

江上游,来自喜马拉雅山脉和冰川的碎屑物或成为风积沙丘的重要物源,是沙丘发育的物质基础^[34];同时,强劲的风力也为沙源的搬运提供了动力条件。受地形影响而产生的山谷风改变了环流特征,影响输沙势的时空分布^[35]。仲巴站的观测结果表明,夏季(5—6月)输沙势最大,与流域内其他站点明显不同。可能的原因是夏季山地与谷地,冰川与谷地之间的热力差异达到最大,下山风(东北风)的风力远远超过山谷微风(西南风)^[28,35]。

在日喀则和山南宽谷处,合成输沙方向与沙丘空间位置高度吻合(图10)。中游两大宽谷位于喜马拉雅山北麓,辫状水系发育,谷地平坦开阔^[26],谷地与山坡之间存在明显的热力差异,从而产生对流,形成偏南方向的山谷风^[28];积雪和冰川上方由于空气干冷,下沉气流引发强劲的冰川风进一步向谷地扩散,加强了山谷风^[40]。在山谷风和冰川风的影响下,风积物逐渐在河流北岸沉积,形成一系列沙丘。米林河谷处河流蜿蜒曲折,地势复杂,宽谷与狭谷交错分布,因此风沙运动过程遇到阻碍,导致沉积物间断在河岸沉积,形成沙丘间断分布



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)3333号)制作,底图边界无修改

图10 雅鲁藏布江流域沙丘分布

Fig.10 Spatial distribution of sand dunes in Yarlung Zangbo River Basin

格局^[31]。

此外,沙丘空间分布还与物源有关。风沙运动过程中发生近源沉积的概率较大^[41]。马泉河谷风沙沉积物在风的作用下进入河道,可为中、下游地区提供物源^[17];同时河流沉积物细颗粒组分含量较高,也可成为物源,尤其是在冬、春季河流水位下降,河漫滩出露之时^[27,42]。因此,沙丘分布格局是环流与物源共同作用的结果。治理风沙灾害应从源地着手,重点关注高能地区河流宽谷以及河漫滩、江心洲等地的治理与保护,减少人为干扰,以达到减轻土壤风蚀、降低风险、消除沙患的目的。

4 结论

雅鲁藏布江流域上、中、下游平均年输沙势分别为418.2、94.1、197.8 VU;上游和中游地区合成输沙方向集中于ENE方向,下游地区集中于SW方向;上游、中游、下游地区风向变率分别为0.83、0.63、0.90,上游和下游为低变率,中游为中变率。

雅鲁藏布江流域春、夏、秋、冬季输沙势分别占年输沙势的35%、21%、15%、29%,上、中、下游地区不同季节之间输沙势均无统计学差异;上游和下游地区不同季节合成输沙方向相差小于45°,中游地区相差5°~173°;上游地区月输沙势极大值出现在6月(77.5 VU),极小值出现在1月(14.3 VU),中游地区月均输沙势小于20 VU,下游地区小于25 VU。

雅鲁藏布江流域沙尘传输方向以NE和ENE为主,合成输沙方向与沙丘分布位置一致,高能地区的河流宽谷、河漫滩和江心洲是风沙灾害治理的核心区域,应予以重点关注和保护。

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] Dong Z B, Hu G Y, Yan C Z, et al. Aeolian desertification and its causes in the Zoige Plateau of China's Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59 (8) : 1731-

- 1740.
- [3] Shen W S, Li H D, Sun M, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86: 37–44.
- [4] 孙小云, 房彦杰, 赵景峰, 等. 塔克拉玛干沙漠输沙势时空分布特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 38–47.
- [5] 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.
- [6] 庞营军, 吴波, 贾晓红, 等. 毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 62–67.
- [7] Shen Y P, Zhang C L, Zhang Y J. Assessment of wind erosivity based on wind speed conversion over different averaging times [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(5): 2037–2047.
- [8] Zhang C L, Shen Y P, Li Q, et al. Sediment grain-size characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 586–599.
- [9] 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.
- [10] Abbasi H R, Opp C, Groll M, et al. Wind regime and aeolian sand transport in Khuzestan Sand Sea [J]. *Aeolian Research*, 2021, 53: 100746.
- [11] Louassa S. Sand drift potential in western Algerian Hautes Plaines [J]. *Aeolian Research*, 2018, 34: 27–34.
- [12] Meng N, Wang N A, Zhao L Q, et al. Wind regimes and associated sand dune types in the hinterland of the Badain Jaran Desert, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(5): 473–489.
- [13] 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.
- [14] 王永胜, 杨文斌, 李永华, 等. 库姆塔格沙漠东缘荒漠绿洲过渡带风况及输沙势[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 140–144.
- [15] 张正偲, 董治宝, 赵爱国. 输沙势计算中的“时距”问题[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(2): 177–182.
- [16] Zhang Z C, Dong Z B, Zhao A G. The effect of the time interval used to calculate mean wind velocity on the calculated drift potential, relative drift potential, and resultant drift direction for sands from three deserts in northern China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(1/2): 151–160.
- [17] Zhou N, Li Q, Zhang C L, et al. Grain size characteristics of aeolian sands and their implications for the aeolian dynamics of dunefields within a river valley on the southern Tibet Plateau: a case study from the Yarlung Zangbo river valley [J]. *CATENA*, 2021, 196: 104794.
- [18] Zhang Z C, Ma P F, La Z, et al. Aeolian sediment provenance and transport in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibet Plateau [J]. *Basin Research*, 2022, 35(2): 762–783.
- [19] 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.
- [20] 张正偲, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游风沙区典型下垫面空气动力学参数研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 997–1005.
- [21] 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: 地球科学*, 1999, 29(1): 88–96.
- [22] Li T Y, Zhang J F, Wu Y Q, et al. Holocene aeolian activities linked to Indian summer monsoon in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(12): 2002–2014.
- [23] Ma P F, Zhang Z C, Zhang Y, et al. Effect of meteorological conditions on PM_{10} concentrations in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibet Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, 151(1/2): 725–737.
- [24] Zhang Z C, Zhang Y, Ma P F, et al. Aeolian sediment transport rates in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibet Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154238.
- [25] 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.
- [26] 马鹏飞, 高佳佳, 扎多, 等. 雅鲁藏布江中游风沙灾害区地表沉积物养分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6): 96–101.
- [27] 张焱, 马鹏飞, 潘凯佳, 等. 雅鲁藏布江中游江心洲和河漫滩沉积物粒度特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(8): 161–168.
- [28] Zhang Y, Zhang Z C, Ma P F, et al. Wind regime features and their impacts on the middle reaches of the Yarlung Zangbo River on the Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(10): 1174–1195.
- [29] 刘佳驹, 李金城, 郭怀成, 等. 基于人工神经网络的雅鲁藏布江水化学变化趋势研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(6): 1043–1051.
- [30] 李世剑, 康满春, 刘流, 等. 雅鲁藏布江上游干、支流沉积物总有机碳分布特征初探[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(2): 443–456.
- [31] Zhou N, Zhang C L, Wu X X, et al. The geomorphology and evolution of aeolian landforms within a river valley in a semi-humid environment: a case study from Mainling Valley, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomorphology*, 2014, 224: 27–38.
- [32] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]// McKee E D. *A Study of Global Sand Seas*. Hawaii, USA: University Press of the Pacific, 1979.
- [33] 赵宏胜, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 黄河流域西柳沟中游输沙势及风沙入黄量估算[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2606–2618.
- [34] 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]. *地学前沿*, 2023, 30(4): 229–244.
- [35] 田越, 苗峻峰. 中国地区山谷风研究进展[J]. *气象科技*, 2019, 47(1): 41–51.
- [36] 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.
- [37] 苟诗薇,伍永秋,夏冬冬,等.青藏高原冬、春季沙尘暴频次时空分布特征及其环流背景[J].自然灾害学报,2012,21(5):135–143.
- [38] 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.
- [39] Zamani S, Mahmoodabadi M, Yazdanpanah N, et al. Meteorological application of wind speed and direction linked to remote sensing images for the modelling of sand drift potential and dune morphology[J]. *Meteorological Applications*, 2020, 27(1): e1851.
- [40] Liu Y, Wang Y S, Shen T. Spatial distribution and formation mechanism of aeolian sand in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9): 1987–2000.
- [41] Du S S, Wu Y Q, Tan L H, et al. Geochemical characteristics of fine and coarse fractions of sediments in the Yarlung Zangbo River Basin (southern Tibet, China) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(9): 337.
- [42] Wang B N, Gong J F, Zuza A V, et al. Aeolian sand dunes alongside the Yarlung River in southern Tibet: a provenance perspective [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(5): 2625–2636.

The spatial variations of sand drift potential in Yarlung Zangbo River Basin

Zhang Lingguang¹, Shen Caisheng^{1,2}, Huang Yanli³, Zaduo⁴, Lazhen⁵, Zhang Yan⁶, Zhang Zhengcai¹

(1. Key Laboratory of Qian Xuesen Deserticulture of Shaanxi Higher Education Institute, School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Policy Research Office of the CPC Xizang Autonomous Region Committee, Lhasa 850000, China; 3. Xizang Meteorological Administration, Lhasa 850005, China; 4. Shannan Meteorological Bureau, Shannan 856000, Xizang, China; 5. Xizang Climate Center, Lhasa 850000, China; 6. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Wind is the power for the aeolian hazards formation. The Yarlung Zangbo River Basin is one of the serious aeolian hazard regions in the Qinghai-Xizang Plateau. However, there was few studies about the spatial-temporal variations of wind regime in this basin, which limited the comprehension and cognition of the features of aeolian transportation, the combats of aeolian hazards, and the occurrences and processes of dusty weather. We selected 39 meteorological stations along the river and analyzed the wind velocities and directions in 2022. Drift potential was calculated to evaluate the intensity of aeolian activities. The results showed that: (1) Drift potential in the upper reaches was the highest (418.2 ± 149.2 VU), second was the lower reaches (197.8 ± 68.9 VU), and the middle reaches least (94.1 ± 22.1 VU). Zhongba, Yagra (upper reaches) and Qusum (middle reaches) belonged to the high wind energy environment. 9 stations, including Changguo, Dinggyê, and Tumba (middle reaches) belonged to the medium wind energy environment. The other stations belonged to the low wind energy environment. Drift potential had no significant difference among spring, summer, autumn, and winter ($P > 0.05$), which means the power conditions for aeolian hazards exist in the whole year. (2) Annual resultant drift direction in the upper and middle reaches was primary from ENE (50% and 22%), and from SW in the lower reaches (50%). (3) Seasonal drift potential displayed that there was no significant difference among different seasons in the upper and lower reaches, but the middle reaches were opposite. In summer, resultant drift directions in the middle reaches were between WSW and NNW (44%), while other seasons were between N and E (38%–55%). (4) According to the resultant drift directions, the dust transportation directions in the Yarlung Zangbo River Basin were mainly NE and ENE, which were consistent with the spatial position of dunes. Based on the research of drift potential, the wide valley, floodplain, and central island in the river exposed in the high wind energy environment need to be paid more attention to prevent the aeolian hazards in Yarlung Zangbo River.

Key words: Yarlung Zangbo River Basin; drift potential; spatial distribution