

马鹏飞,张正偲,论珠群培,等.雅鲁藏布江曲水-泽当段风沙活动动力条件分析与风沙灾害防治建议[J].中国沙漠,2021,41(1):10-18.

雅鲁藏布江曲水-泽当段风沙活动动力 条件分析与风沙灾害防治建议

马鹏飞¹,张正偲²,论珠群培³,高佳佳⁴,戴睿¹,次旺¹,潘凯佳²

(1.西藏自治区气候中心,西藏拉萨 850000; 2.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; 3.山南市气象局,西藏山南 856000; 4.西藏高原大气环境科学研究所 西藏高原大气环境重点实验室,西藏拉萨 850000)

摘要:雅鲁藏布江河流宽谷区是青藏高原风沙活动最为强烈地区之一。本文选择雅鲁藏布江曲水-泽当段为研究区,分析该地区1981—2010年以来的风动力条件变化特征。结果表明:1981年以来年平均风速明显降低,月平均风速2—4月最大。受河流-山地复合系统的影响,风向复杂且具有明显的空间差异性,贡嘎以西风和东风为主,泽当包括西风、南风和东北风。日极大风速超过起沙风速的天数所占比例较大(>83%),且自西向东逐渐增加(泽当达96%)。冬春季输沙势所占比例最大,扎囊地区年输沙势最大(77 UV),其次为桑耶地区(37 UV),泽当地区最小(5.4 UV)。近年来,沙尘天气有增加的趋势。风动力条件特点和该段河流宽谷区广泛分布的风沙沉积物是形成该区风沙地貌空间格局、导致沙尘天气频发的主要原因。基于该区河流-山地复合系统下风沙环境的复杂性和野外实地调查结果,提出了科学布置防沙治沙措施的建议。

关键词:雅鲁藏布江;风沙活动;风动力;风沙灾害防治

文章编号: 1000-694X(2021)01-010-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00092

中图分类号: X169

文献标志码: A

0 引言

风沙活动动力条件是风沙地貌、沙漠化过程和防沙治沙措施合理布局等沙漠学研究的基本内容。目前,对平原地区的风沙地貌形成与演化过程^[1]、沙漠化成因^[2]和防沙工程合理布局^[3-4]开展了大量的研究。然而在西藏自治区,尽管中国科学院西北生态环境资源研究院(原中国科学院沙漠研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)相关学者早在20世纪80年代已展开风沙物理、风沙地貌、沙漠化和防沙工程技术等方面的工作,并取得的丰硕的研究成果^[5-10]。但2000—2015年,对该地区的风沙活动研究几乎空白。2015年以来,在科技部国家重大科学研究计划项目“青藏高原沙漠化对全球变化的响应”等的支持下,对青藏高原的沙漠化和防沙

工程进行了研究^[11-17],出版了《青藏高原风沙地貌图集》^[11]《城镇防沙理论与工程》^[18]。受全球气候变化和人类活动的共同影响,西藏自治区风沙活动过程导致的风沙灾害问题仍然非常严重^[17-19]。

造成风沙灾害问题研究不足的原因在于:一是气象站点少,可用于风沙活动动力过程分析的资料缺乏;二是基础研究薄弱。高海拔、低气压以及独特的地理环境造成风沙活动机理研究欠缺,导致防沙治沙措施的合理布局缺乏理论基础,风沙灾害防治效果不明显;三是环境复杂。河流-山地复合系统下沙粒的起动过程、输送过程和沉降过程与平原地区截然不同。为此,本文选择西藏自治区风沙灾害最为严重的雅鲁藏布江曲水-泽当段为研究区域,对该地区的风沙活动动力条件进行系统分析,旨在为该地区风沙地貌形成与演化过程、防沙治沙

收稿日期:2020-06-03; 改回日期:2020-08-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41930640,41771011);西藏自治区科技重点研发计划项目“西藏主要地表特征科学考察及研究”;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”

作者简介:马鹏飞(1982—),男,山东栖霞人,高级工程师,主要从事气候与气候变化研究。E-mail: 85777975@qq.com

通信作者:张正偲(E-mail: zhangzhisi@lzb.ac.cn)

措施的合理布局提供理论依据。同时,根据近年来该地区沙尘天气增加的趋势和野外调查,以及针对西藏自治区易地扶贫搬迁和青山绿水工程建设的需要,提出加强雅鲁藏布江流域风沙灾害防治的建议。

1 研究方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江曲水-泽当段是雅鲁藏布江流域最典型的宽谷段,发育了雅鲁藏布江典型的风沙地貌^[5],也是雅江风沙灾害最为严重的地区(图1)。风

沙地貌叠加于河流地貌上,形成过程受风力作用和流水作用共同影响^[5],具有与平原地区完全不同的风沙活动特征、地貌形成与演化过程。风动力是影响风沙活动的最主要动力条件。前人研究表明,西风急流和局地环流是雅鲁藏布江中段风沙地貌形成的动力条件^[8]。雅鲁藏布江中游的宽谷段,即拉萨市曲水县至山南市乃东区泽当镇,河谷西窄东宽,呈葫芦形,辫状或乱流状水系极为发育。河流输沙率为 $458—603\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,年总输沙量为 $1\,405—1\,900\text{ 万 t}^{[5]}$,具有水沙同步的特点,枯水季节水位下降 $3—4\text{ m}$ 。因此,流水作用对风沙活动过程的影响不容忽视。

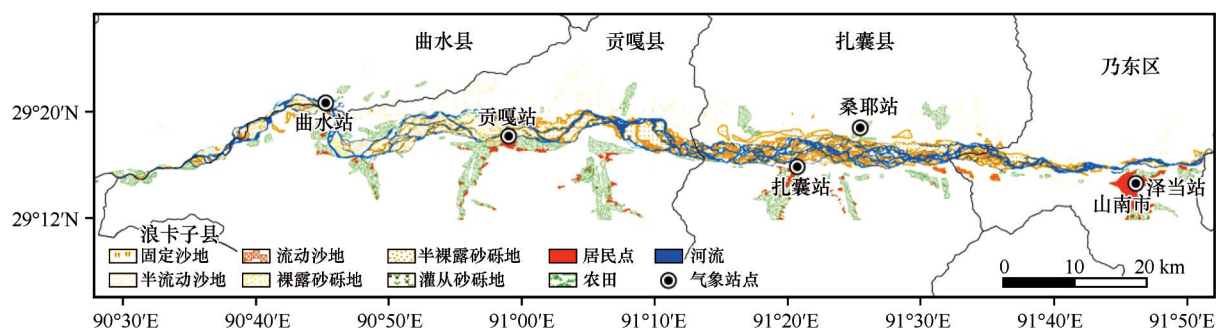


图1 雅鲁藏布江宽谷段沙地和气象站点分布(地物信息由2019年高分一号2 m全色和16 m多光谱影像融合解译得到)

Fig.1 Spatial distribution of sand land and weather stations in the Yarlung Zangbo River wide valley

沙源是影响风沙活动的另外一个主要因子。沙源包括3个部分:①阶地上大量分布的第四纪松散沉积物;②冬春枯水季节沿江裸露的江心洲和河漫滩;③沿江分布的农田、撂荒地、沙地等。河床沙以极细沙为主(58%),为河道北岸的风沙地貌发育提供最主要的物源^[8],并以“就地起沙”的方式在河道北岸、江心洲、河漫滩和山麓地带形成新月形沙丘(链)、格状沙丘、反向沙丘、星状沙丘、灌丛沙丘和爬坡沙丘等,主要分布在河流北岸(69%),其次为河道(31%)。沙丘的移动速度最大可达 $12\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,河岸沙丘形成年代较晚(0.33 ka BP),但爬坡沙丘年龄较老(贡嘎附近的沙丘为49 ka BP)^[5]。

地形也是影响风沙活动的重要因子。该地区地形对风沙地貌的形成过程的影响主要体现为迎风阻滞堆积、背风回流堆积、弯道绕流堆积^[5]。江心洲、河岸流沙面积的变化不仅控制风程长度变化,而且控制了沙源的变化。因此,该地区的风沙地貌形态演化过程是河流-山地复合系统相互作用的结果。

灾害性天气(大风、浮尘、扬沙和沙尘暴)多发生在研究区的西部。如贡嘎县灾害性天气年发生

次数最多,多年平均为45 d,且逐年降低^[17]。灾害性天气主要发生在冬春季,占全年的87%,冬春季的气温和降水是最主要的控制因子^[17]。区域气候具有暖湿化趋势。1981—2016年,每10年年平均气温升高 $0.18—0.63\text{ }^{\circ}\text{C}^{[17]}$,冬季升温幅度更明显,每10年升温达 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量呈明显的增加趋势,平均每10年增加 $1.8—34.7\text{ mm}^{[17]}$;冬、春季相对湿度呈明显上升趋势,每10年增加5%—11%。

1.2 研究方法

风动力条件包括风速、风向、大风日数、输沙势和沙尘天气。气象数据来自曲水、贡嘎、扎囊、桑耶和泽当5个气象站(图1)。由于研究区气象站点建立时间不同,论文中尽量使用长序列的数据进行分析,所以不同区域所分析的数据源时间段不同。贡嘎和泽当数据为1981—2019年,曲水、扎囊和桑耶为2010—2019年。输沙势计算利用2018年每小时数据,计算方法为Fryberger方法^[1]。沙尘天气资料仅来自贡嘎和泽当气象站,其他气象站无相关资料。

2 结果

2.1 风速时空变化特征

月、年平均风速具有明显的时空变化特征(图2)。月平均风速2—4月最大,桑耶3月平均风速可达 $4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但贡嘎3月平均风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。扎囊月平均风速明显大于其他站点,贡嘎月平均风速最小。贡嘎和扎囊月平均风速自3月逐渐减小,月平均风速最小为12月,但曲水、桑耶7月平均风速最小,自7月开始,平均风速逐渐增加。

2010—2019年,年平均风速扎囊最大($2.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),其次为桑耶($2.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),贡嘎最小($1.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。自2013年以来,曲水、桑耶年和四季平均风速逐渐减

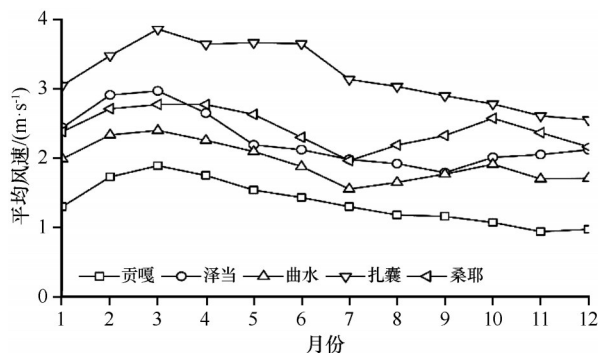


图2 5个气象站月平均风速

Fig.2 Month wind speed for the five weather stations

小,春季平均风速明显大于年和其他季节平均风速,夏秋季节平均风速最小,但扎囊几乎没有变化(图3)。

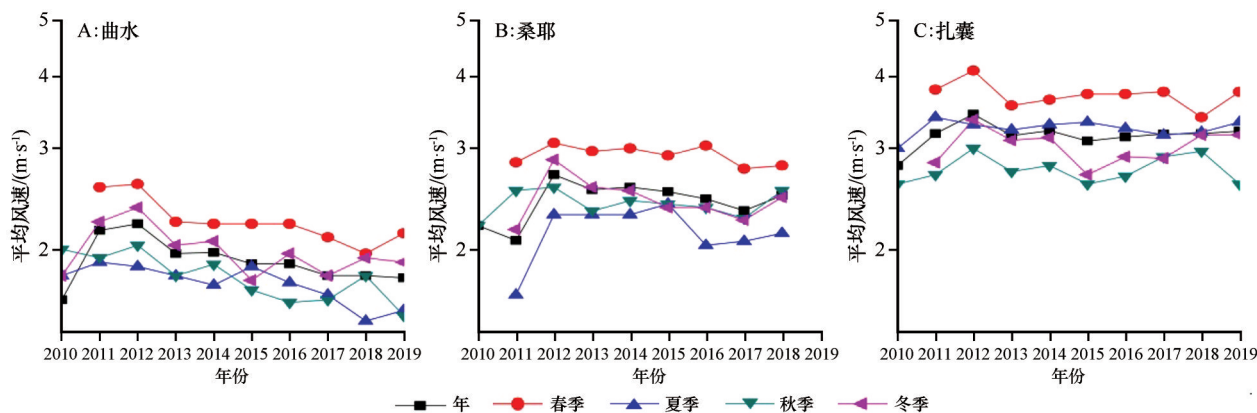


图3 曲水、桑耶和扎囊年、季平均风速

Fig.3 Annual and seasonal wind speed for the Qushui, Sangye and Zhanang

泽当、贡嘎年平均风速自1981至2010年呈明显的减小趋势,每10年减幅分别为 $0.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中贡嘎减小趋势尤为显著(图4)。四季风速变化趋势与年平均风速变化一致,均呈下降趋势(图4)。泽当、贡嘎春季平均风速下降率最大,每10年分别下降 $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;冬季平均风速下降率最小,每10年分别下降 $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于泽当和贡嘎站在2012年和2013年分别进行气象站迁移和更换设备,所以风速突然增加,但在此之后,泽当的平均风速逐渐减小,而贡嘎几乎无变化。

2.2 风向时空变化特征

研究区的日极大风速最大可达 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5)。曲水日极大风速超过起动风速($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的天数站全年的83%,贡嘎占85%,桑耶占93%,扎囊占95%,泽当占96%。雅鲁藏布江中游风向复杂,几乎各个方

向均有分布。泽当主风向为东北偏北风,贡嘎主风向为东风和西风,曲水主风向为西北风,扎囊主风向为西南风,桑耶主风向为东北风。极大风速 $<6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的日数自曲水至泽当逐渐减少(图5),表明泽当地区的风沙活动更加强烈。但极大风速 $<10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风向日数频率贡嘎最大(58%),扎囊最小(25%),表明扎囊的风沙活动最为强烈,这与输沙势的计算结果吻合。

极大风速风向的空间变化特征反映了地形对局地气流的影响。曲水位于雅鲁藏布江宽谷段的上游北岸,受西风的控制,近地层的风向以西北风($270^\circ\text{—}337.5^\circ$)为主(占46%),但在气流运动过程中,受雅鲁藏布江南岸山脉的阻挡,气流反射转为西南风($180^\circ\text{—}247.5^\circ$),所以西南风为次风向(37%)。桑耶位于雅鲁藏布江宽谷段的北岸,近地层的风向以山脉阻挡的反射气流——西南风($180^\circ\text{—}247.5^\circ$)为主(41%),同时,东风在受到雅鲁藏布

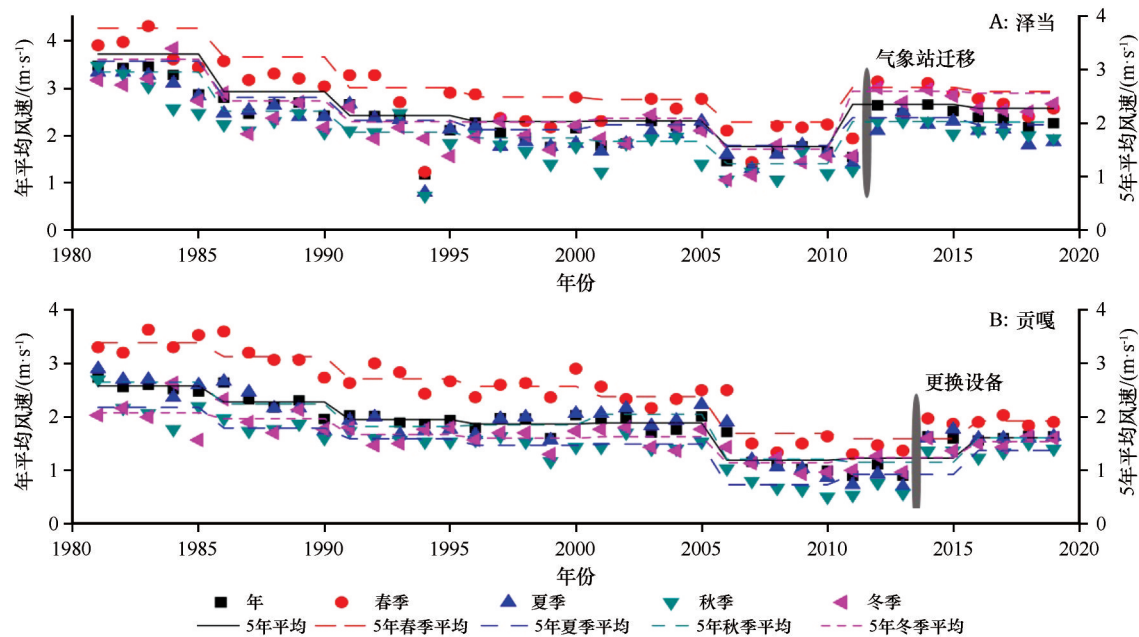


Fig.4 Annual and seasonal wind speed for the Zidane and Gonggar

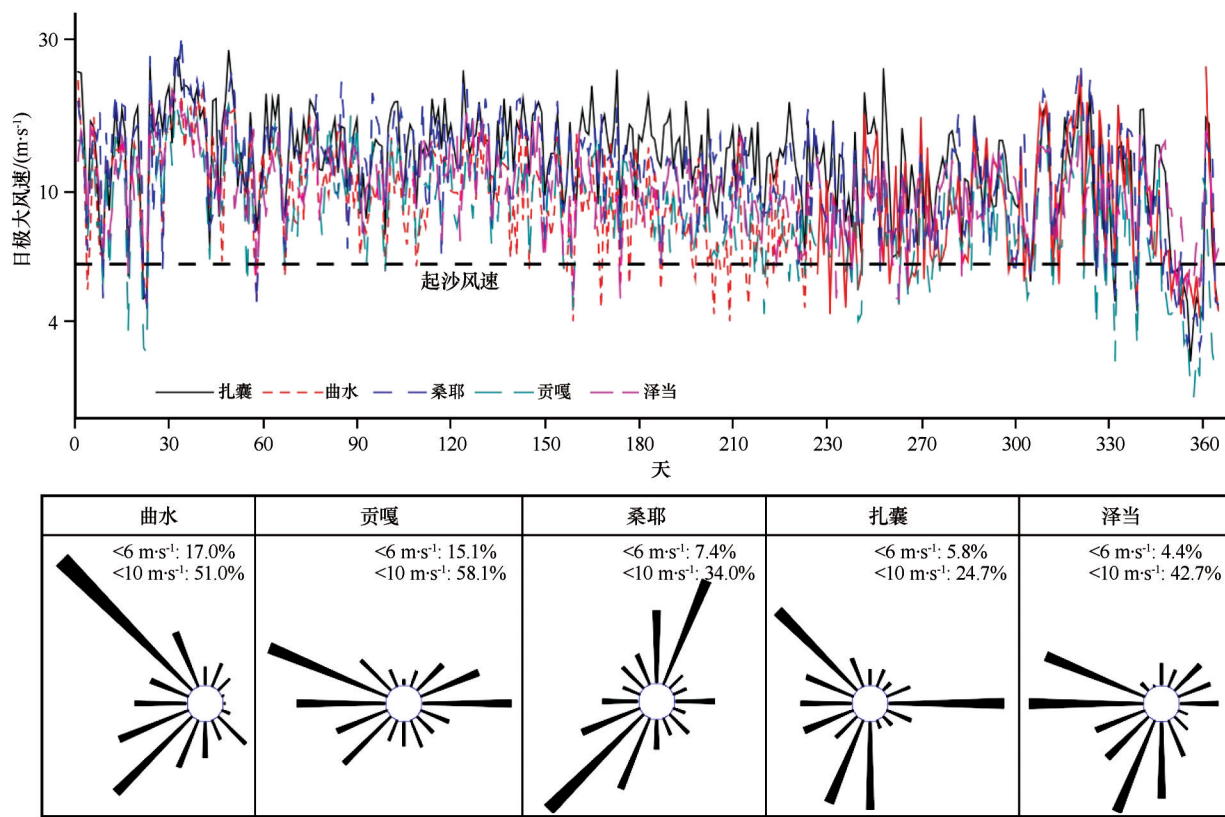


Fig.5 Wind direction for the five weather stations

江北岸山脉阻挡时，亦形成反射流——东北风（0°—67.5°），占30%。而对于泽当，以沿江运动的西风气流西北风（270°—337.5°）为主（39%），其次为反射气流——西南风（180°—247.5°），占32%。由此可见，该地区的风向非常复杂，风沙活动特征的详细研究非常重要。

2.3 输沙势时空变化特征

输沙势是衡量区域风沙活动强度的重要指标。研究区属于低等风能环境(图6)。扎囊年输沙势最大($DP=77VU$),其次为桑耶($DP=37VU$),表明输沙能力强;而曲水、泽当输沙势较小($DP<10VU$),输沙能力较弱。贡嘎和泽当方向变率为大比率(>0.8),风向变化小;其余站为中比率($0.3\sim 0.8$),说明风向比较复杂。输沙方向总体为东北(图6)。研究区四季输沙势具有明显的时空变化特征。冬季输沙势

最大,泽当输沙势比例最大(56%),其次为曲水(53%),扎囊最小(21%)。其次为春季,扎囊的输沙势所占比例最大(47%),其次为贡嘎(44%),曲水最小(27%)。冬春两季的输沙势所占比例各站均超过三分之二,最大可达93%(泽当)。不同地区的方向变率也具有明显时空差异性。总体来讲,春季桑耶方向变率最高(<0.3),说明该地区的风向最为复杂,其他地区属于中等变率/低变率(>0.3);冬季方向变率属于中等变率($0.3\sim 0.8$,曲水、桑耶和泽当)和低变率(>0.8 ,贡嘎和扎囊)。输沙方向为东北和东南。

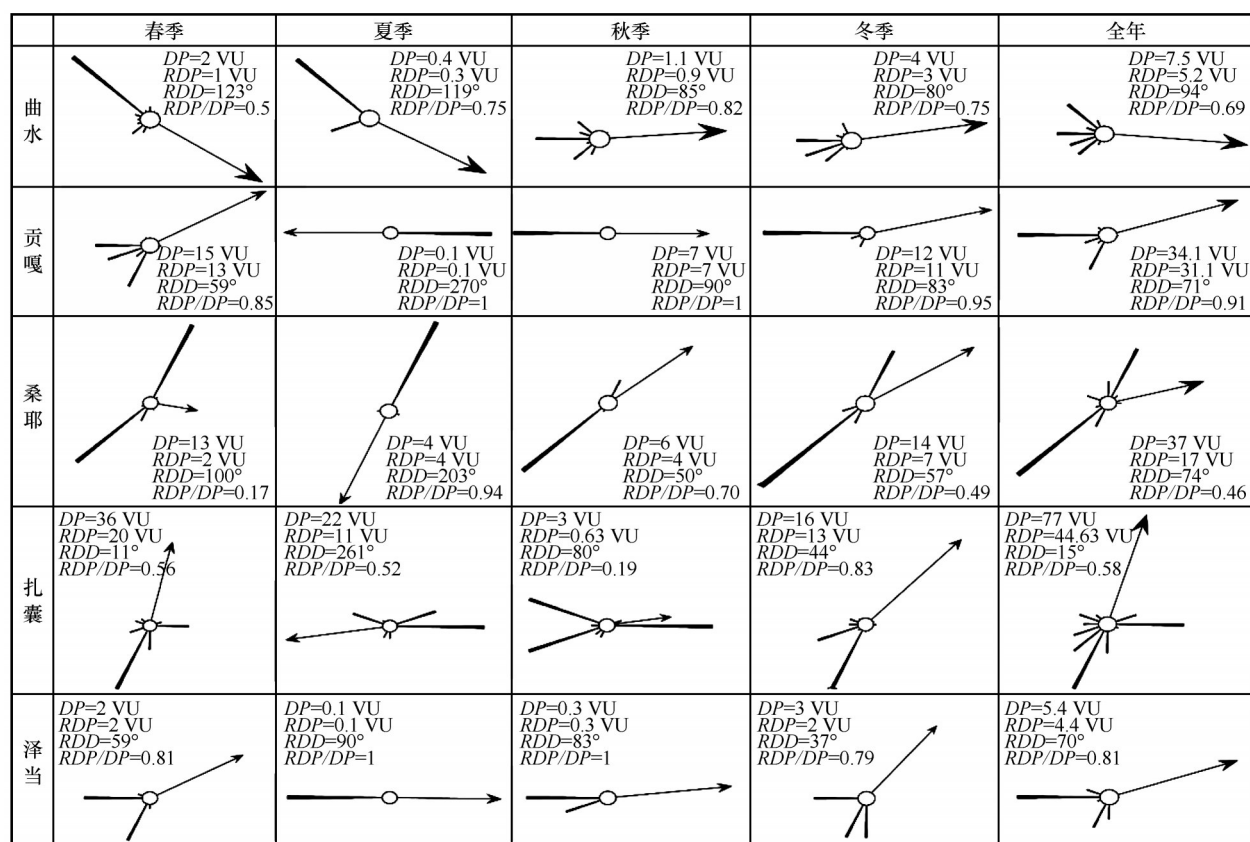


图6 5个气象站2018年输沙势

Fig.6 Drift potential using 2018 wind data for the five weather stations.

2.4 沙尘天气时空变化特征

尽管贡嘎和泽当位于同一地区,除沙尘暴日数均减少外,其他沙尘天气的变化不同(图7)。受风速、风向和沙源的影响,泽当沙尘天气日数明显多于贡嘎(图7)。沙尘天气变化可以划分为3个阶段。2000年之前,以沙尘暴和扬沙为主,均逐年减少;2000—2010年,以浮尘和扬沙为主,浮尘增加,扬沙减少;2010年之后,以浮尘和扬沙为主,扬沙增加,浮尘减少。在贡嘎地区,扬沙和浮尘天气总体减

少,2016年之后逐渐增加,但大风日数逐渐增加(图7)。

泽当、贡嘎年大风日数在20世纪80年代初最多,分别为80 d和57 d。从年代际变化看,每10年分别减少10.9 d(贡嘎)、15.3 d(泽当),呈显著减少趋势(图7)。大风多发生在春季,冬季次之,3月最多,8月最少(图7)。泽当扬沙天气多发生在20世纪80年代和近5年,贡嘎主要发生在20世纪80年代。两站扬沙日数均呈减小趋势,每10年减幅分别

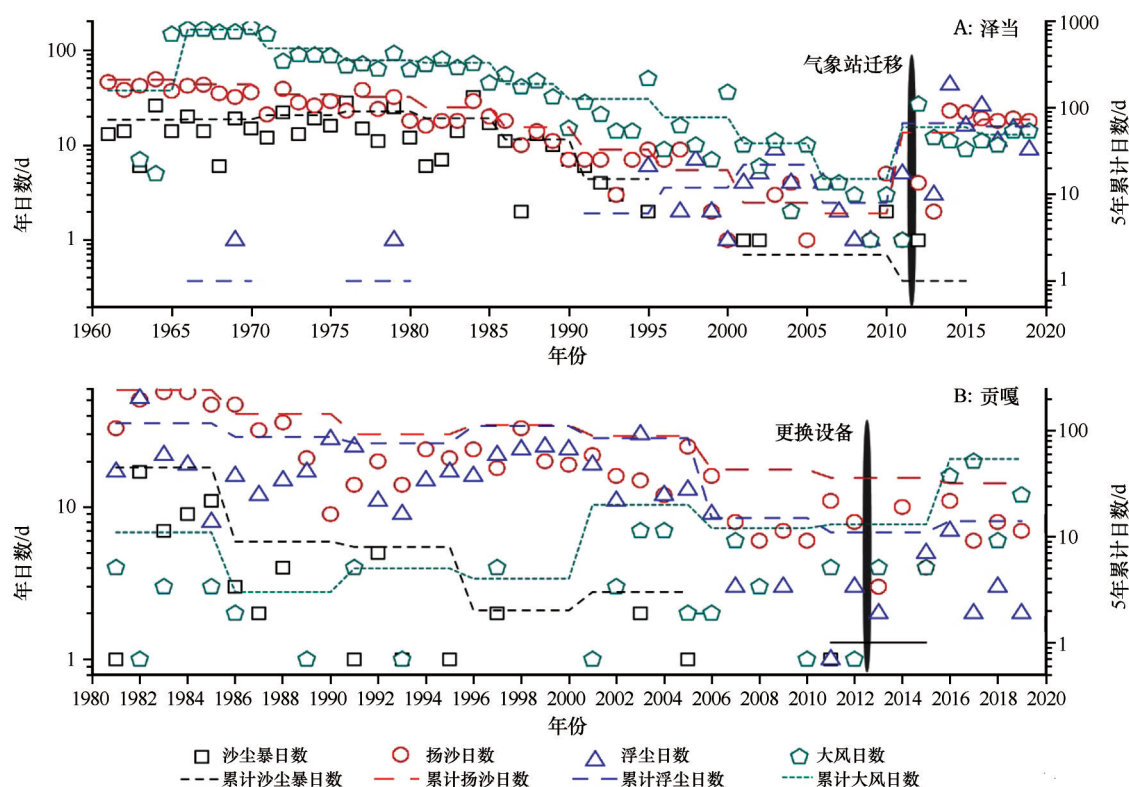


图7 泽当、贡嘎年大风日数、浮尘日数、扬沙日数和沙尘暴日数

Fig.7 Annual strong wind, sand blowing, dust storm and floating dust for Zidang and Gonggar

为1.8、6.3 d,其中贡嘎减小趋势尤为突出。

3 讨论

研究区地处高原温带季风半干旱气候区,生态环境要素十分脆弱,且自身孕育着风沙活动的自然条件。1981—2019年研究区气候趋于暖湿化^[12]。气候暖湿化过程不仅导致风沙动力条件变化,而且导致沙源和下垫面特征发生变化。气温上升,周边山脉冰雪融化,流水过程携带大量沉积物进入雅鲁藏布江流域,导致沙源增加。同时,气温升高,蒸发强度增大,土壤水分减少,严重时可能导致地表植被的枯萎和退化,使得土壤抗风蚀能力减小,风沙沉积物更加容易起动。而降水的增加补充了土壤水分,对植物生长更有利,也有利于防止沙尘物质起动。但冬春降水量仅占全年降水量的10%—20%,对风沙灾害的防治作用不大。研究表明,冬季降水量和气温与年风沙日数正相关,且气温对风沙日数的影响大于降水量^[12]。由此可见,气候暖湿化过程导致风沙活动过程异常复杂,为此,对该地区风沙活动过程和机理的研究迫在眉睫。

风动力条件是影响风沙活动强度的动力要素。

受沉积物起动、输送和沉降过程动力学特征的影响,仅使用平均风速对于评价风沙活动过程稍显不足。如沙尘的起动过程对风速的响应频率在1秒至1分钟。所以,本文利用日瞬时资料探讨研究区风动力特征。整体来说,自西向东,日极大风速小于起沙风($6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的日数逐渐减少(图5),意味着沙尘起动的概率逐渐增加。但对于小于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速,曲水和贡嘎所占频率最大(>50%),而桑耶和扎囊最小(25%和34%),意味着桑耶和扎囊更加具有发生沙尘灾害的动力条件。而对于风向,受地形的影响,雅鲁藏布江中游风向复杂,但总体体现为西北风、西南风和东风(图5)。

输沙势是评价区域风沙活动的主要方式。扎囊输沙势最大(图6),且合成输沙势方向为东北方向,因此,河道的沉积物能够堆积在雅鲁藏布江的北岸,从而形成形态各异的沙丘,同时造成泽当地区的沙尘天气多于贡嘎(图7)。研究区的输沙势计算结果最大仅为77 VU,其一方面受分析风速数据的采集频率所限,其二是由于计算过程所需最主要参数——起动风速,是根据经验所得。由日极大风速(图4),以及野外调查、流沙分布和走访当地居民可知,研究区的风沙活动相当严重。

除风动力条件外,沙源、地形、下垫面类型和人类活动,如人工防护林建设,对风沙活动具有明显作用。2000年后雅鲁藏布江河谷和拉萨河曲水段河谷人工林面积大幅度增加,沙漠化土地面积减少了20.47 km²。2003年沙漠化土地面积为272.6 km²,其中固定沙地和半流动沙地面积最大,分别为91.0 km²和68.9 km²,2019年沙漠化土地面积为252.2 km²(图1),减少了20.5 km²,减少率为7.51%。人工防护林和植被恢复力度比20世纪90年代进一步加强,沿江防护林带的建设在一定程度上减缓了河床、河滩地沙源向河岸及山坡的搬运,同时对于降低近地层风速效果明显。近40年,研究区平均风速在2010年以前呈减小趋势,之后不断增加(泽当站因迁站,2012年1月开始启用新站址;贡嘎站2013年更换仪器)。但2011年平均风速开始增加,这说明研究区风沙活动过程具有一定的反弹。大风对沙尘天气的影响特征不同,近40年,泽当地区沙尘暴和扬沙天气随大风日数增加而增加,但浮尘天气随大风日数增加而减小。而在贡嘎地区,沙尘暴、浮尘和扬沙天气均随大风日数增加而减少。不同的沙尘天气发生的气候背景不同,沙尘暴主要受大气环流的影响,而浮尘和扬沙对局地气流更加敏感。研究区浮尘天气的减少,主要是由于近年来人工防护林的建设,降低近地层风速,导致沙尘物质难以释放。但扬沙天气几乎没有变化,说明人工防护林建设还存在一定的缺陷。

4 结论与建议

4.1 结论

雅鲁藏布江中游是青藏高原风沙活动最为强烈地区之一。河流-山地复合系统造成风动力系统、沙源和下垫面类型复杂多样。由日极大风速风向和输沙势可知,风沙活动过程和机理复杂。近年来,大风、浮尘和扬沙日数的增加说明风沙活动过程有增加的趋势。扎囊、桑耶输沙能力强,曲水、贡嘎、泽当输沙能力低,是风沙灾害防御的重点区域。

4.2 建议

尽管雅鲁藏布江流域受风沙活动危害的区域较小,但该地区是西藏自治区最主要的居民点和易

地扶贫搬迁区。在“绿水青山就是金山银山”理念和“关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见”的政策下,如何实现雅鲁藏布江流域的绿水青山,展现大美西部新面貌,并与《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》相结合,首先要解决的是风沙灾害的防治与预报预警,而其前提是要阐明风沙活动机理。在此基础上,才能实现科学的防沙治沙、生态恢复、区域大气污染联防联控和提高重点污染天气应对能力。为此,根据风动力研究结果以及野外调查的发现,提出以下建议:

抓紧进行风沙灾害评估。西藏自治区是仅次于新疆和内蒙古的风沙灾害区,风沙灾害对铁路、公路、民航和居民基础设施危害严重。雅鲁藏布江流域是西藏自治区风沙灾害最严重的地区,已有对雅鲁藏布江风沙活动、沙漠化和防沙工程措施的研究均在20世纪80、90年代。在气候变化和人类活动影响下,风沙灾害的致灾因子、孕灾环境和承灾体均发生明显变化。因此,对当前和今后河流-山地复合系统的致灾因子危险性、孕灾环境敏感性和承灾体易损性的评估迫在眉睫。

加强基础科学研究。雅鲁藏布江河流-山地复合系统的风沙活动过程具有独特性。风沙活动受气流和下垫面的双重影响。高原地区的低气压环境,必然影响沙粒的起动过程、输送过程和沉降过程。同时,受沙源、地形、降水和温度的多重影响,沙粒的起动、输送过程和沉降过程与平原地区明显不同。本研究认为扎囊、桑耶输沙能力强,曲水、贡嘎、泽当输沙能力弱,但沉积物运动方向复杂。受气象站点数量的限制,难以准确确定沙源、输送路径和沉降过程,为此,应加强对研究区沙源、输沙方向、沉降点的气象监测和风沙活动机理的研究,为防沙治沙提供科学依据。

进行多学科交叉融合研究。沙丘的形成与演化过程是风沙地貌学研究的主要内容,而河道变迁是流水地貌的主要研究内容,任何单方面的研究都难以全面了解雅鲁藏布江的沙丘形成与演化过程、沙丘空间格局,进而难以准确评价风沙灾害的形成过程。因此,建立河流-山地复合系统的地貌演化过程、确定物质迁移转化过程和机制、明晰风沙活动-河道-人居基础设施的相互作用过程,是风沙活动减灾调控和预警的唯一途径。

多技术综合应用。实施天地一体化监测,实现理论-实际-预报预警结合。鉴于研究区内测站少,并且泽当、贡嘎、扎囊、曲水4个气象站均位于雅鲁藏布江南岸的县城内,因此,观测的风速和风向直接影响输沙能力、输沙方向以及沉降点的判别。为了全面开展研究区沙源、输沙方向、沉降区域,并合理开展防沙治沙措施,应加强沙尘的监测和预测。一是合理布局地面自动气象站,重点选择雅鲁藏布江北岸,增加风沙活动、沙丘移动过程,沙尘释放过程等方面的自动观测;二是充分利用卫星遥感,特别是利用高分卫星、风云4号卫星等遥感资料,摸清沙尘源区、移动方向、沉降点;三是利用野外实测资料优化国家气象局的沙尘天气预报产品,使其适用于雅鲁藏布江流域的沙尘天气预报预警服务。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王涛.中国沙漠与沙漠化[M].石家庄:河北科技出版社,2003.
- [3] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34:225-231.
- [4] 吴正.中国沙漠及其治理[M].北京:科学出版社,2009.
- [5] 李森,杨萍,董玉祥,等.西藏土地沙漠化及其防治[M].北京:科学出版社,2010.
- [6] 刘志民.西藏“一江两河”中部流域荒漠化土地综合整治研究[M].北京:中国环境科学出版社,1998.
- [7] 董光荣,董玉祥,李森,等.西藏“一江两河”中部流域土地沙漠化防治规划研究[M].北京:中国环境科学出版社,1986.
- [8] 杨逸畴.雅鲁藏布江河谷风沙地貌的初步观察[J].中国沙漠,1984,4(3):12-15.
- [9] 刘连友,刘志民,王建华,等.雅鲁藏布江当宽谷地区沙源物质与现代沙漠化过程[J].中国沙漠,1997,17(4):377-382.
- [10] 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(D辑),1999,29(1):88-96.
- [11] 董治宝.青藏高原风沙地貌图集[M].西安:西安地图出版社,2017.
- [12] Dong Z, Hu G, Qian G, et al. High-altitude Aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55: 864-901.
- [13] 李庆,张春来,周娜,等.青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J].中国沙漠,2018,38(4):690-699.
- [14] 周娜,张春来,刘永刚.雅鲁藏布江米林宽谷段新月形沙丘粒度分异研究[J].地理科学,2011,31:958-963.
- [15] 刘淑珍,范建容,朱平一,等.西藏自治区雅鲁藏布江中游地区环境灾害成因分析[J].自然灾害学报,2001,10:25-30.
- [16] 谢胜波,屈建军,赖远明,等.拉日铁路沙害成因分布特征及防治研究[J].干旱区资源与环境,2016,30:170-175.
- [17] 张核真,周刊社,多杰桑珠,等.1981-2016年雅鲁藏布江流域风沙日数时空变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2018,32:131-136.
- [18] 邹学勇,张春来,程宏,等.城镇防沙理论与工程[M].北京:科学出版社,2018.
- [19] 李海东,沈渭寿,赵卫,等.西藏高寒河谷沙地生态恢复与安全屏障建设的对策建议[J].环境科学与技术,2013,36:160-163.

Analysis on the sand transport wind power conditions and suggestions on the sand disaster preventions in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, China

Ma Pengfei¹, Zhang Zhengcai², Lunzhu Qunpei³, Gao Jiajia⁴, Dai Rui¹, Ci Wang¹, Pan Kaijia²

(1. *Tibet Climate Center, Lhasa 850000, China*; 2. *Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 3. *Shannan Meteorological Bureau, Shannan 856000, Tibet, China*; 4. *Key Laboratory of Tibet Atmospheric Environment, Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science, Lhasa 850000, China*)

Abstract: The wide valley area in Yarlung Zangbo River is one of serious aeolian disaster affected regions in Tibet Plateau. For this reason, the Yarlung Zangbo River (Qushui to Zidane) was selected as study region; wind power condition change was analyzed since 1981. The results indicated that averaged annual and monthly wind speed decreased since 1981. Wind speed is largest from February to April. Dust storm mainly occurred at winter and spring. Wind directions are complex for the river channel, sand land and mountains compound system in the study region and are primary west and east in the Gonggar, and west, south and northeast in the Zidane. The frequency of daily maximum wind speed larger than threshold wind speed is more than 83% for all stations, and these values increased from west to east, arrive to about 96% in Zidane. Drift potential is largest in the Zhanang (99 VU), and then Sangye (56 VU). The above mentioned complex wind power system and the widely distributed sediment in the river are the main reasons for spatial distributions of aeolian geomorphology and frequently occurrence of dust storm. Based on the complex wind power system for the river channel, sand land and mountains compound system, we provide some suggestions for the rational sand disaster prevention.

Key words: Yarlung Zangbo River; aeolian sediment transport; wind power; sand disaster prevention