

吴培滢,赵媛媛,陈江波,等.雅鲁藏布江中游地区典型沙地沙尘传输特征[J].中国沙漠,2026,46(3):371-380.

雅鲁藏布江中游地区典型沙地沙尘传输特征

吴培滢,赵媛媛,陈江波,阎水明,丁国栋

(北京林业大学 水土保持学院,北京 100083)

摘要:本研究旨在评估雅鲁藏布江(以下简称雅江)沿岸沙丘分布与沙尘传输对流域内重要经济区的影响,为区域沙尘污染精准防控提供科学依据。研究聚焦于雅江中游典型沙丘区,综合运用地面颗粒物监测、HYSPLIT与MetecoInfo轨迹模拟及PSCF沙尘污染物扩散分析,系统揭示了沙尘传输的时空特征与环境影响范围。结果表明:(1)雅江河谷区核心风蚀带总面积为416.35 km²,其中流动沙地面积为11 km²,半固定沙地面积为32.42 km²,固定沙地面积为39.67 km²。(2)每日颗粒物浓度呈双峰分布,主峰(17:00—22:00)与次峰(09:00—10:00)为沙尘活跃时段,凌晨和午间空气质量较好;PM10日极差达8.23 μg·m⁻³,易受局地风扰;PM2.5与PM1日极差分别为6.55 μg·m⁻³和1.56 μg·m⁻³,反映不同粒径尺度对气候相应敏感度有所差别;(3)典型风沙季节沙尘事件轨迹聚类表明,西北方向(频率38.36%)与西北北方向(频率20.55%)为关键输送路径,其中西北北路径气团占比48.21%且PM10浓度最高(10.36 μg·m⁻³);(4)PSCF模型识别出13个沙尘高风险村落,包括朗村、阿沛村、米林镇等,其中帕朗莎村与达帕莎村位于西北路径核心影响区。雅江中游沙尘传输具有明显的方向性与时段集中性,沿岸特定村落为沙尘释放与传输的关键节点,需实施重点防控。

关键词:雅鲁藏布江;沙源地;沙尘传输;MetecoInfo;颗粒物浓度

文章编号:1000-694X(2026)03-371-10

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00297

中图分类号:P4

文献标志码:A

0 引言

雅鲁藏布江(以下简称“雅江”)中游区域地处青藏高原东南边缘,是重要的生态过渡带。其独特的地形、气候与地表覆盖特征,使之成为高原风沙活动强烈的典型地区^[1]。近年来,气候变暖导致该地区地表干燥度加剧,造成沙尘释放潜力提高的不良局面^[2]。受特殊地貌控制,雅江流域上游马泉河谷地区、中游日喀则地区、山南宽谷段及米林宽谷段均发育有沙丘地貌^[1]。其中,雅江中游米林地区是西藏的重要社会经济区,也是沙尘灾害的高风险区。因此,系统分析雅江中游沙尘传输特征,不仅有助于改善城乡居民的生活质量、提升区域生态环境质量,更能深化对沙尘传输过程的认识,进而为制定更科学的联防联控治理方案提供依据^[3]。

当前沙尘传输研究普遍采用多学科方法整合技术。传统地面观测基于密集布设的沙尘监测站,

可获取高时间分辨率的PM10、PM2.5浓度等数据,为研究提供高精度点位尺度信息。在大尺度区域研究中,为获取精确空间覆盖数据,需布设高密度气象观测站网,其存在建设难度大且观测成本较高的问题。遥感技术如MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)、TROPOMI及静止轨道卫星可有效弥补传统地面观测的空间异质性局限^[4]。其优势在于显著降低观测成本的同时,提供沙尘空间分布、沙尘和云层的光谱区分、气溶胶垂直廓线信息以及沙尘暴动态追踪等关键数据^[5-6]。传统遥感手段在三维动态传输过程分辨率上仍有不足,可利用HYSPLIT对沙尘传输路径进行动态模拟补足。该模型融合遥感信息和大气环流风场数据,能够模拟特定时间段内、不同离地高度下沙尘物质从观测点移动的传输路径,进而多维度解析沙尘传输特征。HYSPLIT的

收稿日期:2025-10-22; 改回日期:2025-12-16

资助项目:中央高校基本科研业务费专项(PTYX202526,PTYX202530,PTYX202533)

作者简介:吴培滢(2001—),女,天津人,硕士研究生,主要从事风蚀荒漠化研究。E-mail:wupeixi1221@163.com.

通信作者:赵媛媛(E-mail:yuan0402@bjfu.edu.cn)

计算结果可进一步结合 Meteoinfo 三维大气数值模型,集成多源遥感及地面观测数据,构建沙尘传输路径动态模拟体系^[7]。其嵌套式数据同化系统能有效提升复杂山地风场模拟精度,而轨迹追踪算法和动态识别机制则能实现传输路径的自适应矫正,提高模拟准确性^[8]。这种三维动态模拟能力为解析高原特殊地形下的沙尘传输机制提供了关键技术支撑。

雅江中游地表松散、沉积物丰富,且风季与旱季同期,导致该流域内风沙灾害频发^[9]。目前,针对雅江中游沙尘传输的研究已取得一定进展。局地尺度 50 km 以下的研究,聚焦于环流驱动沙尘释放机制,沙尘日间受谷风的驱动沿山坡爬升,夜间随山峰沿河谷移动,形成温度变更下昼夜交替的呼吸式传输;冬季西风盛行时期河滩沉积物风蚀通量达到最高;春季热力湍流时,富含粉砂的新裸露冰碛物更容易悬浮,令冰川退缩区成为高海拔沙尘的潜在源区^[10-11]。局地尺度 50~500 km 的研究,侧重于分析西风与季风调控的沙尘跨境传输以及空气动力学特征^[11-15]。雅江沙尘的跨区域传输具有显著的季节依赖性,春季西风急流轴北移,沙尘则向东被传输至横断山区;夏季印度季风暴发,沙尘与湿沉降结合,可能会对下游降水产生影响;冬季沙尘则随南风穿越喜马拉雅山脉隘口^[16-18]。尽管雅江中游沙尘研究体系正逐步完善,但现有工作仍缺乏对沙尘传输路径的多尺度综合解析,未能有效耦合当地高分辨率气象数据与详细下垫面信息。野外实地观测为模型校准与验证提供了不可替代的基础数据支撑,能够有效提升沙尘源区识别与传输模拟的准确性,从而为区域沙尘精准防控提供更可靠、更具针对性的科学依据。

因此,本研究选取雅鲁藏布江中游米林-朗县一带作为研究区域,采用 HYSPLIT 模型与 Meteoinfo 模型相结合的方法,在河谷区地类划分基础上进一步识别出 4 处典型沙尘源,以典型沙源为起点模拟沙尘传输路径。同时,在米林市中心布设一处气象观测站,用于连续监测当地 PM₁₀、PM_{2.5} 及 PM₁ 数据,利用观测数据在小尺度上模拟沙尘释放绘出沙尘扩散情况,对雅江中游地区沙尘传输进行再分析。对于沙尘传输路径进行充分的研判有助于明确沙源地沙尘的影响区域及范围,量化局地沙源与跨境传输的贡献,并为当地政府制定合理的沙尘防

治政策和措施提供有力的依据,为青藏高原生态屏障建设及“一带一路”环境合作提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区

研究区位于雅鲁藏布江中游米林至朗县段,海拔 2 209~7 339 m,地势总体由西北向东南倾斜,高低悬殊(图 1)。河谷区域内存在丰富的固定半固定沙地、流动沙地、沙丘、江心滩及河漫滩,是附近沙尘天气的重要沙尘来源。该地区年际平均气温 10.04 °C,气温年较差可达 15.45 °C。年均降水量达 677.59 mm,降水年较差达 130 mm^[19]。研究区属高原温带半湿润季风气候,夏季温凉多雨,冬季干燥多风^[20]。大风为沙尘天气提供必要的动力条件,是造成沙尘天气的重要因素。雅江流域多年平均年风沙日数为 14.9~54.9 d,且季节性较强,冬春季风沙日数占全年的 87%,在春季大风日数最多^[21]。

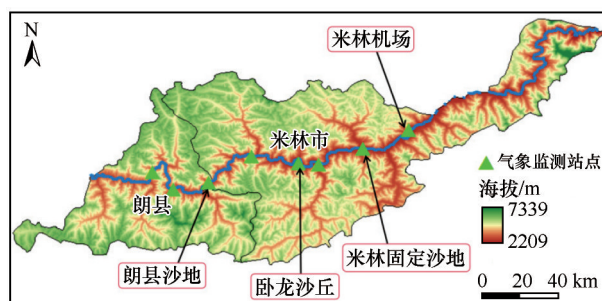


图1 研究区及气象监测站点

Fig.1 Schematic diagram of elevation and meteorological monitoring stations in the study area

1.2 数据

所有用于计算沙尘后向轨迹聚类及潜在贡献源分析的气象数据均来自全球资料同化系统(GLDAS),该系统数据集为美国国家环境预报中心(NCEP)所开发,空间分辨率 0.25°×0.25°。选取空间分辨率为 30 m×30 m 的 Landsat TM 遥感影像作为数据源,同时为了增强野外实地调查数据与遥感数据的一致性,选择 12.5 m 的 DEM 影像数据,以朗县-派镇区间河谷区作为研究区域。采用 ERDAS IMAGE 软件和 ENVI 软件对图像进行预处理,包括辐射定标、大气校正、几何校正、正射校正、影像的均色拼接和图像镶嵌。

1.3 典型沙尘源识别

采用人机交互目视解译方法结合2022年生长季的高分辨率遥感影像对风蚀类型区划分进行首次解译,掌握雅鲁藏布江中游风蚀区不同土地利用类型的位置、沙化土地表面色泽、纹理及其分布特征。根据消落带地形地貌、植被覆盖类型和潜在侵蚀风险等特点和连同性原则,通过人工目视解译

遥感影像,划分为冲洪积扇、河漫滩、河流阶地和峡谷浅山坡地4类,河流阶地又分为流动沙地、草滩、固定沙地、农田和半固定沙地。野外调查进一步确认了不同土地利用中风蚀现象的实际分布特征、沙化土地表面色泽与纹理差异(图2)。在此基础上,从地形分类结果中精确提取沙尘范围,并结合当地经济生活区分布情况,科学选取沙尘传输路径模拟的起点。



图2 雅鲁藏布江中游地区典型沙地

Fig.2 Typical sandy land in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River

1.4 区域颗粒物浓度变化与模拟时段的确定

为减少近地面地表粗糙度的不同对沙尘活动及风速风向的影响,在典型区距离地面15 m处布设地表可吸入污染物自动监测装置,连续记录河谷区PM₁、PM_{2.5}及PM₁₀浓度。由于雅江地区每年2月至5月为大风季节,选定2024年4月17—28日进行连续监测,监测结果能够反映区域内可吸入颗粒物的浓度变化并展示出一定的变化特征。根据实地监测数据可以推测,在可吸入颗粒物浓度较高的时间范围内发生沙尘事件的可能性较大,因此选定可吸入颗粒物浓度最高的时间点(4月17日、4月18日、4月27日、4月28日)作为沙尘传输模拟时段,100 m为起始高度,计算逐小时的24 h后向轨迹,根据欧式聚类对后向轨迹进行聚类并结合空间总方差曲线选择聚类轨迹量。

1.5 沙尘传输路径模拟

沙尘后向轨迹聚类分析。本文采用HYSPLIT模型计算沙尘传输轨迹,并进一步使用Metcoinfo模型及Trajstat插件对雅江中游地区关键沙丘及沙地沙尘传输路径进行绘制。目前已广泛应用于轨迹聚类分析^[22-24]轨迹计算原理如下:假设被动示踪的粒子随风移动,在 t 时刻处于 $P(t)$ 位置,时间步长 Δt 之后的位置为 $P(t + \Delta t)$ 。

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t \quad (1)$$

式中: V 为风速; P' 为中间猜想位置。计算过程中对于时间步长 Δt 则要求:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t \quad (2)$$

聚类分析将相似路径逐类划分,将计算出的路径归纳总结为3条具有代表性的路径,在一定程度上可以反映出沙尘传输路径的主要类别特征。

沙尘潜在影响范围(PSCF)分析。潜在贡献因子是基于条件概率函数原理,识别潜在污染物来源的研究方法,计算原理是当污染物经过某一特定点时,对设定阈值的条件概率进行计算,若概率大,则是研究区大气中的潜在污染物贡献源区^[25]。采用前向轨迹进行计算,则为计算该污染物所在地区在设定时间节点条件下的扩散情况。

$$PSCF = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (3)$$

式中: m_{ij} 为污染轨迹数; n_{ij} 为经过该网格的所有轨迹数。

以米林市气象监测仪器布设点为起始用坐标(29.210340°N, 94.211949°E),结合检测时间段内选定的4月17日、4月18日、4月27日、4月28日的每小时PM₁₀数据进行分析,高于阈值浓度区域即可判定为高污染事件发生范围。该方法首先对风沙

轨迹进行网格化,利用聚类结果采用上述公式计算得出研究地阈值分别为9.89、9.95、10.62、10.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,高于此值将被认定为污染物轨迹。

2 结果与分析

2.1 沙尘源地识别

根据消落带地形地貌、植被覆盖类型和潜在侵蚀风险等特点和连同性原则,河谷区消落带各地类总面积为416.35 km^2 。通过人工目视解译遥感影像,划分为冲洪积扇、河漫滩、河流阶地和峡谷浅山坡地4类,其中河漫滩面积为29.68 km^2 ,河流阶地的

面积为157 km^2 ,峡谷浅山坡地的面积为196.19 km^2 ,冲洪积扇的面积为33.48 km^2 。将河流阶地分为流动沙地、草滩、固定沙地、农田和半固定沙地,其中流动沙地面积为11 km^2 ,草滩面积为18.6 km^2 ,农田55.31 km^2 ,半固定沙地面积为32.42 km^2 ,固定沙地面积为39.67 km^2 。根据野外调查发现周围村镇沙尘天气的形成主要与流动沙地、固定和半固定沙地的沙尘活动有关,结合当地实际情况和沙地的分布,选取卧龙沙丘(29.134°N, 93.773°E)、朗县沙地(29.042°, 93.350°E)、米林固定沙地(29.203°N, 94.075°E)、米林机场附近沙地(29.271°N, 94.291°E)4处作为典型沙地(图3)进行传输路径模拟。

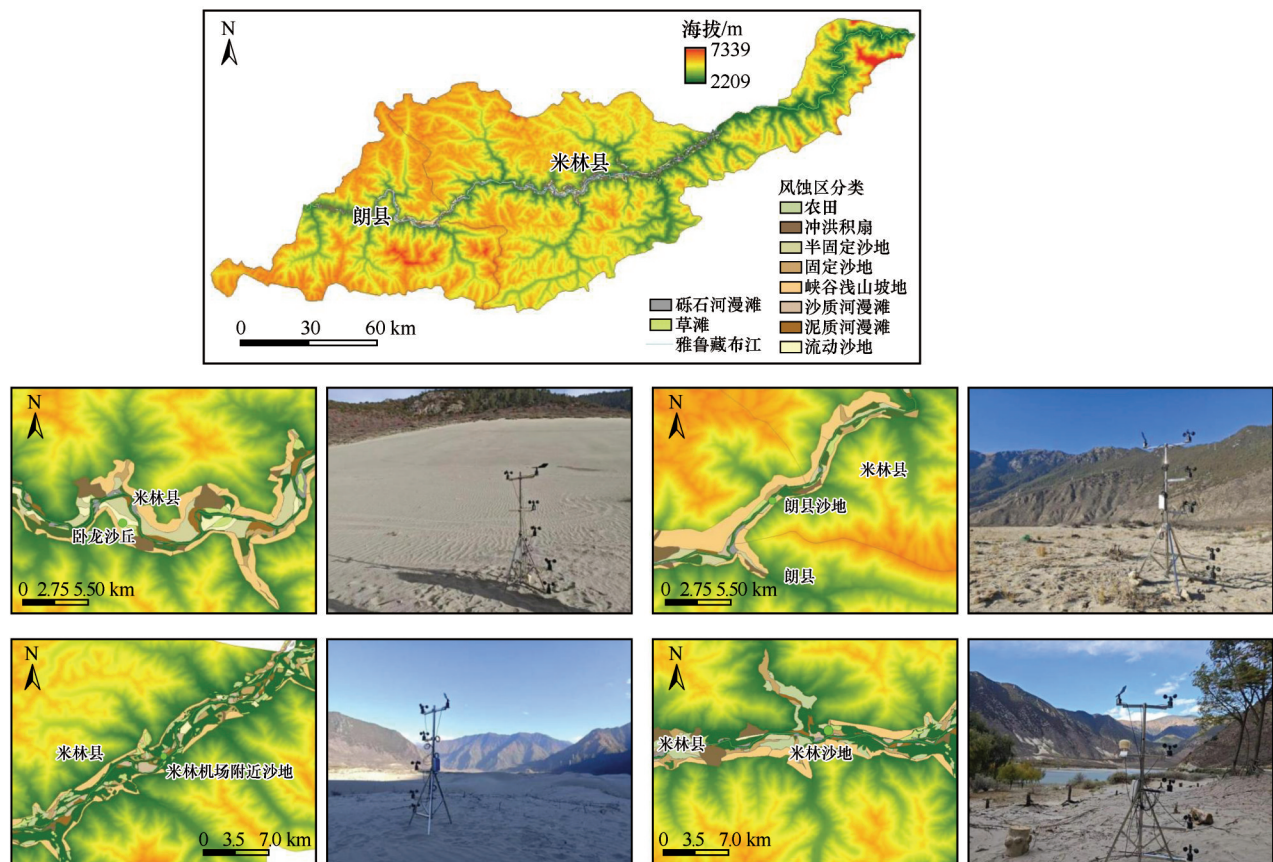


图3 雅鲁藏布江中游地区河谷地类划分与气象信息监测

Fig.3 Valley land classification and meteorological information monitoring in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River

2.2 颗粒物浓度变化特征

通过实地监测每小时PM10、PM2.5及PM1数值,计算当天PM10、PM2.5和PM1的平均值(图4)。监测结果显示,PM1较为稳定,日平均值极差为1.56 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,波动性最小,峰值出现在4月17日,达到2.81 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,谷值出现在4月23日,颗粒物浓度为1.25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

PM2.5在监测期间日平均值极差为6.55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,处于中位,峰值出现在4月17日,达到10.60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,谷值出现在4月23日,颗粒物浓度为4.05 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; PM10在监测期间日平均值极差为8.23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,波动性最强,峰值出现在4月28日,达到11.39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,谷值出现在4月20日,颗粒物浓度为3.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对比发现4月17日、4月18日、4月27日、4月28日3

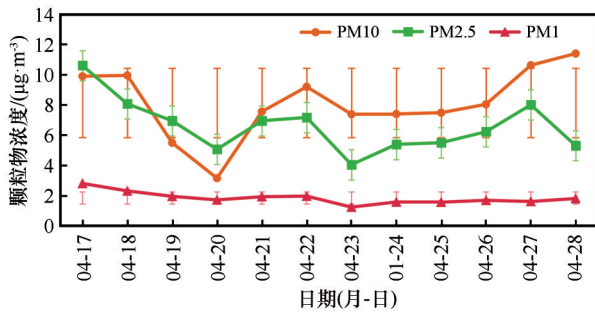


图4 2024年4月17—28日颗粒物浓度日平均值

Fig.4 Daily average variation curve of particulate matter concentration (April 17–28, 2024)

项指标的总和达到最高,与沙尘事件有较强的关联性,因此在监测期内选择这4天作为沙尘传输路径模拟时间节点。

根据每小时监测数据,计算各时间段内的颗粒物浓度平均值(图5)。PM10在一天内的波动幅度明显大于PM2.5和PM1,颗粒物浓度极差在一天内达到 $6.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值出现在20:00,颗粒物浓度为 $11.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值出现在13:00,颗粒物浓度为 $5.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。PM2.5在一天内的极差为 $3.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值出现在22:00,颗粒物浓度为 $8.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值出现在14:00,颗粒物浓度为 $4.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。PM1波动幅度最小,极差仅为 $1.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值出现在22:00,颗粒物浓度为 $2.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值出现在14:00,颗粒物浓度为 $1.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。一天颗粒物浓度总值在17:00—22:00时为一个高峰,09:00—10:00为次高峰,03:00—06:00、12:00—14:00通常空气质量较为良好,颗粒物浓度处于较低水平。

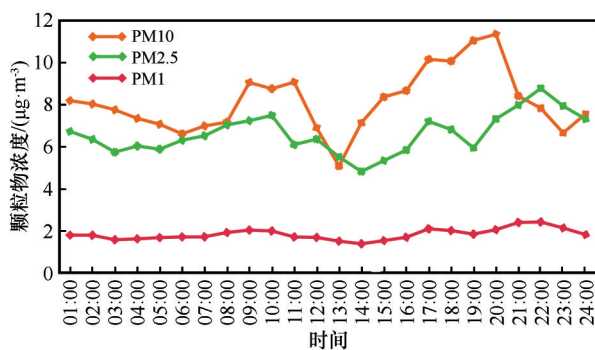


图5 颗粒物浓度小时平均值变化曲线

Fig.5 Variation curve of average particulate matter concentration by time period

2.3 沙尘传输路径聚类分析

选取北京时间2024年4月17日、18日、27日、28日00:00(对应UTC起点为前一日16:00),在离地

500 m高度模拟了朗县沙地、林芝机场沙地、米林沙地和卧龙沙丘4个起点的24小时沙尘气团前向轨迹。4月各区域主风向及频率如图6所示。

2.3.1 朗县沙地沙尘传输路径

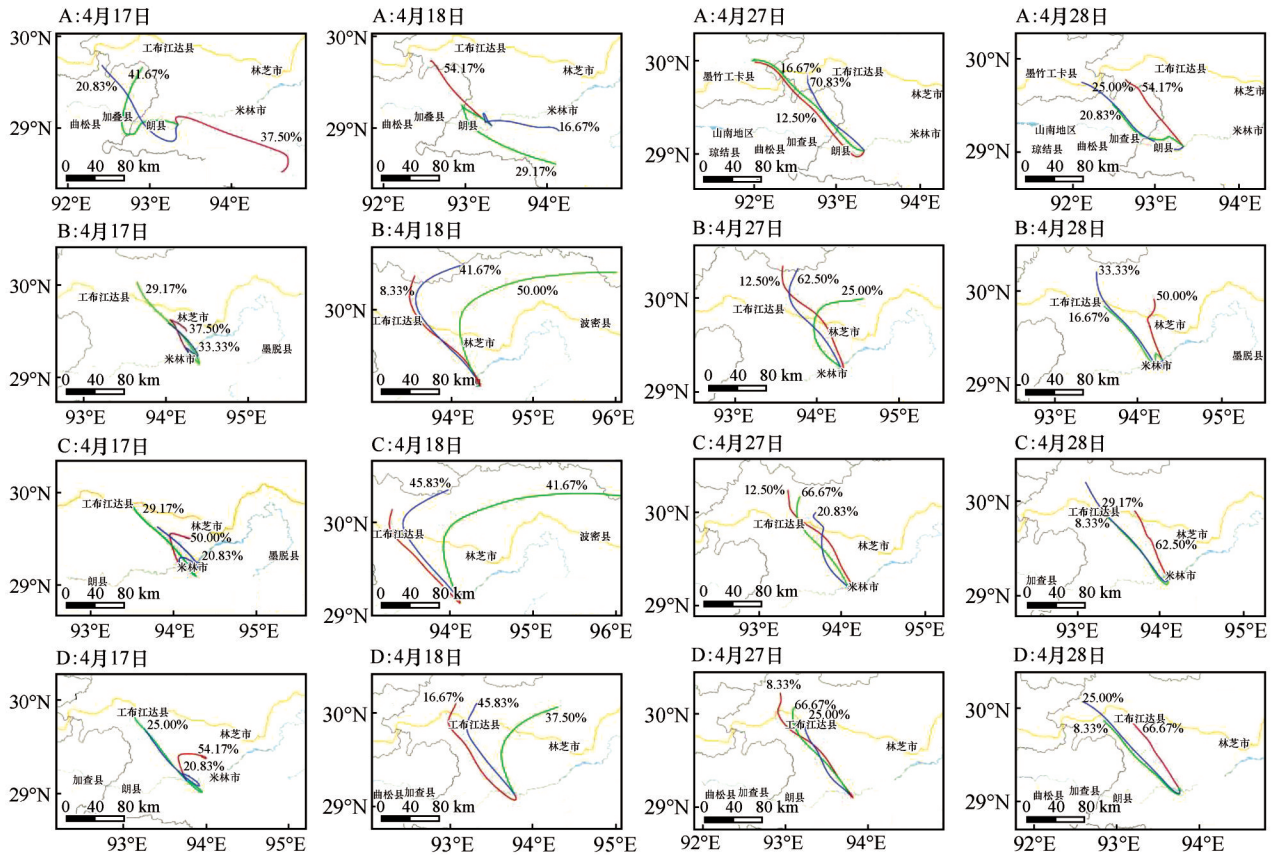
朗县沙地位于米林市与朗县交界处(29.042°N , 93.350°E),整体上,西北(NW)及北西北(NNW)方向是沙尘输送的主要通道,且通常伴随较高的PM10浓度;东南(EES/ES)或偏东路径输送距离较长,但对应的颗粒物浓度较低。从风速间接表征(输送距离与稳定性)来看,西北路径气团移动较快、输送集中,而局部往复或转向路径显示风速较低或风向不稳定。其中,在4月18日、27日及28日,NW与NNW方向均为最主要输送路径,且持续对应较高浓度的PM10污染($12.58\sim 14.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),表明该方向是雅鲁藏布江中游地区沙尘输送的关键通道,尤其来自西北上游远距离源区的输送贡献显著。4月17日的气团来源复杂,涵盖WWN、S→NW及EES等多个方向。尽管路径多样,但浓度高值仍出现在偏西北方向路径,进一步说明西北路径对污染物的强输送能力;而东南方向长距离输送则对应最低浓度。

2.3.2 米林机场附近沙地沙尘传输路径

米林机场附近沙地毗邻米林机场(29.271°N , 94.291°E),整体来看,北西北(NNW)和西北(NW)是主导输送方向,但气团路径往往呈现回溯、往复或转向等复杂特征;浓度高值多与西北方向的中长距离输送密切相关,而路径曲折或转向频繁的气团常伴随较低浓度,反映出源区距离与输送稳定性的显著影响。在4月17日、18日和28日,西北(NW/NNW)方向均为最主要输送路径,且对应较高PM10浓度($13.82\sim 15.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。尽管路径中可能出现小幅转向或回溯,但西北上游源区始终是高空沙尘的关键来源,尤其远距离输送对污染贡献显著。4月27日出现一类特殊路径(路径2:先北后西),其占比不高(25%)但浓度显著偏高($17.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),推测可能存在局地强沙尘源或特定气象条件(如强风速、特殊环流配置)导致该路径输送效率异常升高。

2.3.3 米林沙地沙尘传输路径

米林沙地位于雅江中游北侧(29.203°N , 94.075°E),整体来看,西北(NW)及北西北(NNW)方向是沙尘输送的主要路径,浓度高值普遍与来自



注:A、B、C、D起点分别为朗县沙地、米林机场附近沙地、米林沙地以及卧龙沙丘

图6 各研究地监测时间内沙尘传输路径

Fig.6 Dust transport pathways during the monitoring period at each study site

西北方向的中长距离输送相关;路径中发生转向(如向东、东南或向南)或出现回溯现象的气团,对应的颗粒物浓度通常较低。此外,输送距离的远近与气团重合度也对浓度有显著影响。在4月17日、27日和28日,来自西北(NW)或北西北(NNW)方向的远程输送是导致PM₁₀浓度峰值(13.77~16.08 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的主要路径。即便路径中发生局部偏转(如17日转向EES、28日先S后NW),或路径占比不高(如27日仅20.83%),西北上游沙尘源仍持续起主导作用,4月18日路径3显示,气团在NNW中距输送后继续向东(E)远距离传输,仍对应浓度高值(13.39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。这说明在特定天气系统作用下,东向路径亦可成为沙尘中远程输送的重要载体,其污染贡献不容忽视。输送路径的稳定程度与浓度呈负相关。例如4月28日路径2因出现方向往复导致输送不稳定,浓度显著降低;相反,4月27日各路高度重合、方向一致,整体浓度偏高。这表明气团移动越稳定,沙尘输送效率越高。

2.3.4 卧龙沙丘沙尘传输路径

卧龙沙丘位于卧龙镇雅江南岸(29.134°N, 93.773°E),整体来看,西北(NW)及北西北(NNW)方向是沙尘输送最显著的主导路径,且长距离的NW输送普遍对应着更高的PM₁₀浓度。路径中发生转向(如向东南、东北或出现往复运动)或短距离输送的气团,对应的颗粒物浓度通常较低。此外,即使在主导风向相近的情况下,气团输送距离与稳定性的差异仍是造成浓度分异的关键因素。4月17日的气流虽去向分散(NW/SE),且路径发生短距离、多方向转换,但浓度最高值(13.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)依然出现在具有西北来源成分的路径上。这表明在复杂输送条件下,西北上游源区仍是导致污染峰值的关键因素。4月27日的情况尤为特殊,当日所有气团主向西北(NW),方向高度一致,但占比仅25%的路径3却贡献了最高浓度(17.83 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。这揭示了在风向相同的背景下,上游源地的排放强度或输送过程中的气象条件(如风速、湍流)存在显著差异,是导致浓度分异的主要原因。

2.4 PSCF 沙尘污染物扩散分析

沙尘扩散情况整体影响范围以N及NW方向为主,浓度扩散呈中间高四周低状态(图7)。4月17日,潜在高污染区域占全部潜在污染区域的40.95%,为潜在高污染区占比最高的日期;4月18日和4月27日潜在高污染区域分别占全部潜在污染区域的14.46%和16.22%;4月28日,潜在高污染区域占全部潜在污染区域的2.12%,为潜在高污染区占比最低的日期。4月17日污染范围最小,但高污染浓度范围较

大,除山体等明显无人居住区域以外,主要污染区域集中在工布江达县吾路岗村至仲莎乡之间。4月18日和4月28日呈现两个高数值区域的“双峰”态。监测时间范围内PSCF指数最高点出现在4月18日,影响范围在工布江达县吾路岗村至仲莎乡之间,包括朗村、阿沛村、帕朗莎村、达帕莎村和比久村。此外,监测点北侧也出现了高数值区域,影响范围较小,除明显无人居住的山地区域外,还包括帕立丁村、米林镇以及多嘎、罗布穷则、雪嘎、朗嘎、罗布帮嘎、萨玉村。

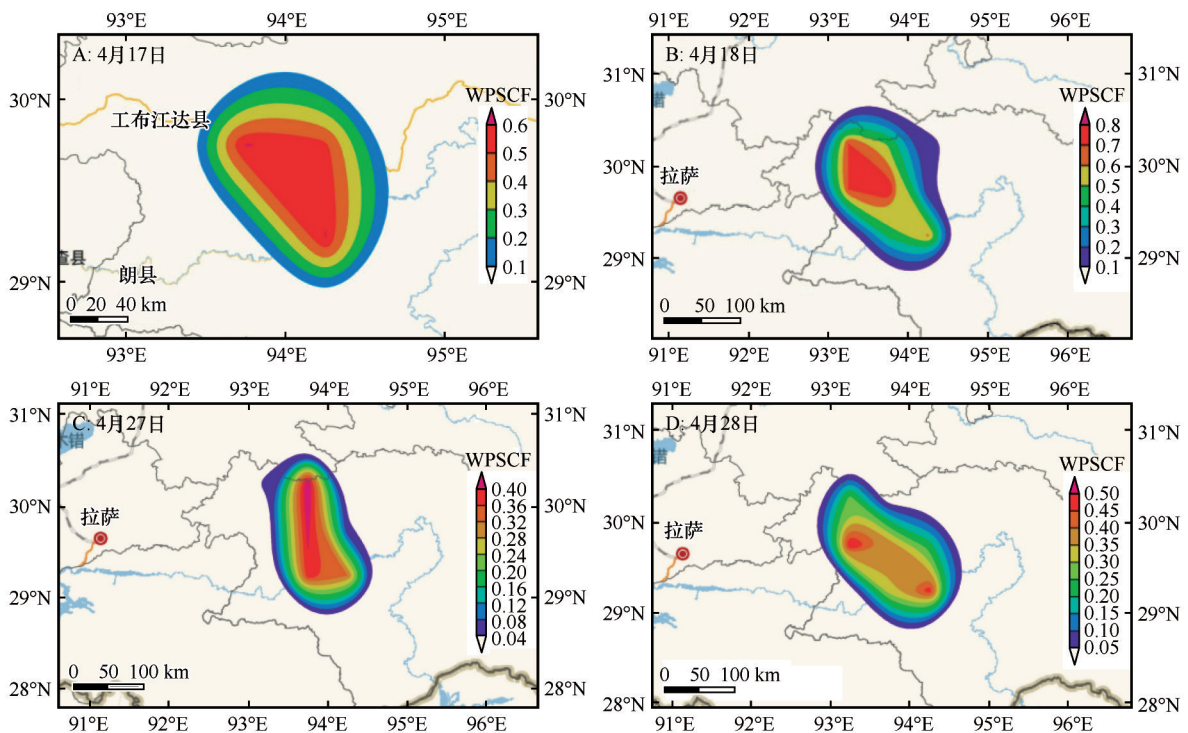


图7 气象监测点PSCF潜在源区污染物浓度扩散

Fig.7 Potential source contribution function (pscf) and pollutant concentration dispersion at meteorological monitoring points

3 讨论

研究采用Meteoinfo模型对监测期内沙尘路径进行聚类分析,并结合实地PM10监测数据,解析了不同路径上的污染物浓度特征;进一步借助PSCF(潜在源贡献因子)模块量化了污染物的空间来源与扩散影响范围,识别出多个高污染潜在源区及影响区域。与以往研究相比,实现了“传输路径—污染浓度—源区贡”的多维度、定量化集成分析,不仅揭示了雅江中游沙尘的关键输送通道,还明确了重点源区的空间分布,克服了以往仅依赖轨迹模拟或孤立浓度分析的局限,显著提升了对复杂地形下沙尘迁移过程系统识别的能力。PSCF沙尘污染物扩散

分析进一步从空间上量化了高风险源区的分布特征。聚类分析后的气团路径占比仅代表各气团所包含路径在全部计算路径中所占的比例,高占比路径与高污染物浓度路径无直接关联,高占比路径指示沙尘输送的“可能性”,而高浓度路径则指示“污染强度”,二者共同支撑关键时段、关键区域的精准防控。

针对研究区内不同下垫面土壤进行分层采样并进行土壤颗粒组成分析,结果显示流动沙地与固定沙地中黏粒(<0.002 mm)和粉粒(0.002~0.05 mm)在深度为0~20 cm的表层土壤中的占比均高于其他深度土壤。表层土壤中的黏粒和粉粒易随起沙风

迁移,是可远距离搬运的土壤组成成分^[26-27],也是林芝地区大气污染物的主要来源^[28]。康世昌等^[29]发现,研究区大气污染物存在明显季节变化,变化规律与季风时期相吻合。因此本研究在监测时间和污染物因子选择上能够在一定程度上体现研究区域的沙尘传输规律。由于该地区还存在煤炭、畜禽等燃料燃烧情况^[30],在后续研究中可以考虑细化大气污染物来源,客观讨论人为大气污染物可能造成的影响,结合更加详细的化学组分监测和大气模型对自然污染物来源和人为污染物来源进行定量分离。

针对PSCF识别出的高风险源区(如朗村、帕朗莎村等)应实施重点治理,结合地表覆盖(如砾石压沙、耐旱植被种植)等方式降低起沙潜力^[31];其次,依据输送路径和日浓度双峰特征(如午后及傍晚高峰),在污染高发时段加强实时监测与动态预警^[32];此外,还应考虑雅江河谷特殊地形引发的局地环流(如谷风/山风交替)对沙尘垂直输送的影响,在关键地段和时段实施固沙剂喷洒等针对性抑尘措施^[33],以缓解沙尘“缓慢攀升”或“波动沉降”带来的污染累积。本研究结果为雅江地区沙尘污染的系统防控提供了空间靶向与时段精准的科学依据,提升了治理策略的可行性与效率,尤其在多源数据融合与复杂地形区沙尘溯源方法上较以往研究^[34]有所深化。

4 结论

本研究通过对河谷风蚀区进行地类划分,确定沙尘来源,利用HYSPLIT与Meteoinfo对沙源轨迹进行模拟,利用PSCF模型进行沙尘污染物扩散分析。研究表明,雅江河谷区核心风蚀带总面积为416.35 km²,其中流动沙地面积为11 km²,半固定沙地面积为32.42 km²,固定沙地面积为39.67 km²。PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁监测结果显示,三类颗粒物中,PM₁₀日波动最大(极差8.23 μg·m⁻³),易受局地大风等天气事件影响;PM₁最为稳定(极差1.56 μg·m⁻³)。浓度日变化呈双峰分布,主峰出现在17:00—22:00,次峰为09:00—10:00,凌晨和午间空气质量最佳。沙尘传输路径分析表明,NW(西北)和NNW(北西北)为最主要输送方向,出现频率分别为38.36%和20.55%。其中NNW方向气团占比最高(48.21%),且路径平均PM₁₀浓度达10.36 μg·m⁻³,是核心影响

路径。根据PSCF模块PM₁₀浓度扩散情况,能够初步锁定沙尘影响具体地区范围,主要包括朗村、阿沛村、帕朗莎村、达帕莎村、比久村、帕立丁村、米林镇以及多嘎、罗布穷则、雪嘎、朗嘎、罗布帮嘎、萨玉村。建议风沙主要影响地区做好防沙减沙措施,以减少沙尘对居民生活的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] IPCC.Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M].London, UK:Cambridge University Press,2021.
- [3] 拉珍,唐叔乙,坚参扎西,等.雅鲁藏布江中游沙尘天气频率及传输过程[J].中国沙漠,2023,43(4):10-16.
- [4] Huang J, Kang S, Zhang Q, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects[J]. National Science Review, 2020, 7(9): 1492-1503.
- [5] Liu Z, Liu T, Han Z, et al. Detection and monitoring of super sandstorm and its impacts on Arabian Sea: remote sensing approach [J]. Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(12): 129-136.
- [6] Yoshida M, Kikuchi M, Nagao T M, et al. Himawari-8/AHI hourly aerosol optical depth retrieval over land using a time series method [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(2): 433-451.
- [7] 陈瑞敏,张玉婷,韩冰,等.衡水市三类臭氧重污染事件特征及其潜在源区研究[J].环境生态学,2024,6(5):120-126.
- [8] Kaspari S, Skiles S M, Delaney I, et al. Accelerated glacier melt on Snow Dome, Mount Olympus, Washington, USA, due to deposition of Asian dust [J]. The Cryosphere. 2021, 15(1): 443-457.
- [9] 张正德,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.
- [10] Ma P F, Zhang Z C, Zhang Y, et al. Effect of meteorological conditions on-PM₁₀ concentrations in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibet Plateau[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023, 151(1/2): 725-737.
- [11] 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: 154-158.
- [12] Zhang X, Kang S, Zhang G, et al. Dust emission and transport over the Tibetan Plateau: a case study of the Yarlung Tsangpo Valley[J]. Atmospheric Environment, 2020, 223: 117-123.
- [13] Wang X, Huang J, Ji M, et al. Modeling the impact of dust-radiative forcing on the mountain-valley circulation over the

- Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(19): 12767–12780.
- [14] Webb N P, Chappell A, Edwards B L, et al. Aeolian sediment transport following wildfire in sagebrush steppe[J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 172: 104–121.
- [15] 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.
- [16] Li C, Bosch C, Kang S, et al. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: recent progresses and future directions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 190: 60–77.
- [17] Jin Q, Wei J, Yang Z L, et al. Tibetan Plateau dust modulates the Indian summer monsoon rainfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(8): 18–21.
- [18] Chen Z, Li G, Yang J. Sr-Nd isotopic evidence for modern aeolian dust sources in the western Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): 859–865.
- [19] 王薇, 邬光剑, 范丽行, 等. 2000–2020年雅鲁藏布江中部流域大气气溶胶时空变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7003–7011.
- [20] 张平平, 李滨, 高浩源, 等. 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(6): 44–57.
- [21] 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(12): 131–136.
- [22] 王琰玮, 王媛, 张增凯, 等. 不同季节天津市PM_{2.5}与O₃潜在源区及传输路径分析[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(3): 673–682.
- [23] 蔡敏, 谷欣, 赵正昱, 等. 2016–2021年运城市区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(9): 229–243.
- [24] 王蕾, 杨震, 刘笑, 等. 关中地区沙尘输送路径及潜在源区分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(10): 109–117.
- [25] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 88–96.
- [26] 史忠林, 张信宝, 张润川. 2021年“3·15”沙尘暴沙尘来源核素示踪研究[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 1–5.
- [27] 张昊, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 乌珠穆沁沙地主要风沙环境特征及形成机制研究[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(10): 1687–1697.
- [28] 伍永秋, 王立辉, 杜世松, 等. 青藏高原典型地区沉积物地球化学特征与矿物组成的粒度效应[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1140–1149.
- [29] 康世昌, 丛志远, 王小萍, 等. 大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2876–2884.
- [30] 黎凌翀, 叶芝祥, 周丽君, 等. 青藏高原牛粪燃烧PM_{2.5}排放因子及组成特征[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(12): 187–194.
- [31] 缙倩倩, 韩致文, 杜鹤强, 等. 中国沙尘暴源区及其治理研究述评[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1559–1564.
- [32] 关敏, 张勇, 李云, 等. 我国风云气象卫星发展现状与未来展望[J]. *地球科学进展*, 2025, 40(2): 138–154.
- [33] 刘玥, 郭强, 袁立敏, 等. 三种植物基固沙剂对风沙土水分入渗和蒸发的影响[J]. *干旱区研究*, 2025, 4(9): 1–12.
- [34] 苗运法, 雷艳, 赵永涛, 等. 亚洲内陆干旱区空气孢粉研究现状及展望[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(3): 688–703.

Dust transport characteristics in typical sandy lands of the middle reaches of the Yarlung Zangbo River

Wu Peixi, Zhao Yuanyuan, Chen Jiangbo, Yan Shuiming, Ding Guodong

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study aims to evaluate the impact of dune distribution and dust transport along the Yarlung Zangbo River (hereinafter referred to as the YZR) on important economic zones within the basin, providing a scientific basis for precise prevention and control of regional dust pollution. Focusing on typical dune areas in the middle reaches of the YZR, this research comprehensively utilized ground-level particulate matter monitoring, HYSPLIT and Meteoinfo backward trajectory simulations, and PSCF analysis of dust pollutant dispersion to systematically reveal the spatiotemporal characteristics of dust transport and its environmental impact range. The main findings include: (1) The total area of the core wind erosion zone in the Yarlung Zangbo River Valley amounts to 416.35 km², including 11 km² of mobile sandy land, 32.42 km² of semi-fixed sandy land, and 39.67 km² of fixed sandy land. (2) Daily particulate matter concentrations showed a bimodal distribution, with the primary peak (17:00–22:00) and secondary peak (09:00–10:00) indicating periods of high dust activity, while air quality was better in the early morning and at noon; the daily range of PM₁₀ reached 8.23 μg·m⁻³, indicating high susceptibility to local wind disturbances; the daily ranges of PM_{2.5} and PM₁ were 6.55 μg·m⁻³ and 1.56 μg·m⁻³, respectively, reflecting varying sensitivity to climatic conditions across different particle size scales. (3) Trajectory clustering analysis of a dust event in April 2024 revealed that NW (frequency 38.36%) and NNW (frequency 20.55%) were the key transport pathways, with the NNW pathway accounting for 48.21% of air masses and exhibiting the highest PM₁₀ concentration (10.36 μg·m⁻³). (4) The PSCF model identified 13 villages at high risk of dust impact, including Lang Village, Apê Village, and Mainling Town, with Palungsha Village and Dapasha Village located in the core influence area of the NW pathway. Dust transport in the middle reaches of the YZR exhibits distinct directionality and temporal concentration, with specific villages along the river serving as key nodes for dust emission and transport, necessitating targeted prevention and control measures. This study provides theoretical support and spatial guidance for air quality management and ecological protection in the YZR economic belt.

Key words: Yarlung Zangbo River; dust source region; dust transport; Meteoinfo; particulate matter concentration