

拉珍,白玛央宗,沈才生,等.基于复杂网络模型的沙尘天气空间交互影响研究——以雅鲁藏布江中游为例[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(3):136-142.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.03.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于复杂网络模型的沙尘天气空间交互影响研究——以雅鲁藏布江中游为例

拉珍^{1,2},白玛央宗¹,沈才生³,格桑丹增¹,德庆卓嘎^{3*}

(1.西藏自治区气候中心,西藏 拉萨 850000;2.日喀则国家气候观测台,西藏 日喀则 857000;3.西藏自治区党委政研室,西藏 拉萨 850000;4.西藏高原大气环境科学研究所,西藏 拉萨 850000)

摘要:利用2017—2020年冬春季(10月—次年4月)雅鲁藏布江中游的15个气象站逐小时最低能见度数据,采用转移熵方法构建区域沙尘传输矩阵,基于复杂网络理论分析沙尘天气的空间传输及交互影响特征。结果表明:(1)雅鲁藏布江中游沙尘天气系统是一个稳健性网络,站点之间的沙尘天气互相影响,说明沙尘可以跨区域输送。(2)申扎、南木林和尼木处于沙尘天气空间关联网络的核心,这三个地区是研究区的主要沙尘分布区;拉萨和墨竹工卡沙尘天气受其他站点影响程度最小。(3)研究区沙尘天气影响时间短。沙尘持续时间以1 h为主,说明以局地起沙为主;3 h持续时间次之,说明各站点之间相互传输;6 h持续时间最少,说明沙尘不能长时间输送。雅鲁藏布江中游沙尘天气既有局地供应,又有区域传输,各站点之间相互影响,形成复杂的空间交互网络。为了减少研究区沙尘灾害的影响,应该立足于全面协调协作进行治理。

关键词:复杂网络;雅鲁藏布江;沙尘天气;空间传输

中图分类号:P445.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)03-0136-07

沙尘天气是指悬浮在大气中的沙粒、尘埃及其他细颗粒物,使水平能见度小于10 km的天气^[1]。雅鲁藏布江中游是青藏高原的主要沙尘天气分布区。沙尘天气不仅影响人居环境、基础设施安全运营,而且影响生态环境恢复过程,并对社会经济和人类健康造成重大损害^[2]。沙尘天气的影响范围不仅包括源区,还对下风向的区域也产生显著影响。由于沙尘影响范围的空间关联性,利用沙尘数据建立空间关联网络,不仅能够说明沙尘的发生位置、传输路径和

影响区域,还可为区域沙尘灾害防治、区域联防联控和跨区域协同治污提供理论依据^[3]。

目前,学者采用了不同的方法研究沙尘/污染物的传输路径和影响区域。采用的方法包括:CMAQ模式^[4]、后向轨迹模型^[5]、概率空间^[6]等。研究方法主要包括3类:基于不同空气质量模式的方法、基于遥感技术和后向轨迹的方法及基于统计技术和复杂网络的方法,其中复杂网络分析方法不仅能够可视化系统之间信息传递的统计相关性,还可检测系统之间信息传递的动态性和相互作用的非对称性。复杂网络模型针对雾霾、PM_{2.5}和臭氧等大气污染物为对象的研究较多,但在以沙尘天气为背景研究揭示其动态关联特征、空间联动因果和跨区域协同治理的研究相对较少。目前研究区域主要分布在:中国西北地区^[7]、新疆和蒙古国^[8]、京津冀地区^[9]、四川盆地^[10]等。对雅鲁藏布江沙尘运动路径和影响范围的研究几乎是空白。雅鲁藏布江中游作为西藏最重要的经济区,

收稿日期:2023-04-07;修回日期:2023-09-17

基金项目:第二次青藏高原综合科考项目(2019QZKK0604);国家自然科学基金项目(42065008);西藏自治区科学技术协会项目“雅江流域沙尘天气的空间联动及动态交互影响定量分析”;山南市科学技术局项目(2022BJKJJHXM-007)

作者简介:拉珍(1989—),女,高级工程师,主要从事生态环境研究。
E-mail:lhakdron0920@163.com

通信作者:德庆卓嘎(1972—),女,正高级工程师,主要从事大气环境研究。E-mail:1248384548@qq.com

是遭受沙尘污染影响最严重的区域。雅鲁藏布江河谷中游是宽窄相间河谷,在宽谷盆地有现代风成沙和古风成沙堆积,谷地与高空西风气流一致,就地起沙形成沙尘天气^[11]。近年来,区域土地荒漠化加剧,地表粉尘活动强烈,对生态环境和人类活动产生了重要影响^[12]。但对雅江流域沙尘天气的研究还处在气候特征与变化趋势^[13-14]、沙尘天气个例分析^[15]的最基本阶段,区域内的传输和相互影响等相关研究尚未进行。因此本文以复杂网络理论为基础,利用逐日能见度数据研究了近3年冬春季沙尘天气特征,建立雅鲁藏布江中游沙尘天气的空间交互影响关系的矩阵,进一步分析网络结构特征,为雅江流域沙尘污染区域联防联控治理提供科学依据。

1 研究区域、数据及方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江中部地处青藏高原腹心,包括拉萨、日喀则和山南地区。地势西高东低,河谷地带中间低,南北两侧高,形成广泛分布的江心洲和河漫滩。江心洲和河漫滩在冬春季节大量裸露,在强风作用下极易形成沙尘天气^[16-17]。受孟加拉湾暖湿气流、西风环流以及高原地理环境的影响,雅鲁藏布江中游属于高原温带半干旱季风气候,主导风为西南偏西。由雅鲁藏布江中游沙尘天气出现频率(图1)可知,有两个区域沙尘天气出现频次最多,分别是山南市贡嘎县(13.78)为中心的雅鲁藏布江与拉萨河汇合区和那曲市班戈县(12.92)为中心的雅鲁藏布江北北部高海拔区。雅鲁藏布江北侧泽当和日喀则市次之,分别为7.36和6.15。研究区有11个气象站/沙尘站,加上北侧高海拔区3个站和定日,总共有15个气象站。

1.2 数据

能见度变化可以定量反映沙尘天气的发生和强度,这为研究沙尘天气空间动态关系提供了很好的

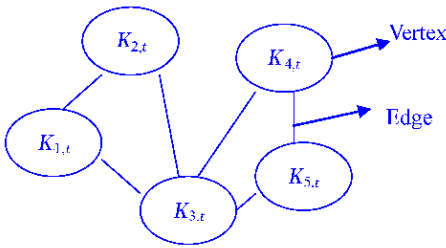
机遇^[18]。本文利用2017—2020年冬春季(10月—次年4月)15个雅鲁藏布江中游气象站逐小时最低能见度数据,并用逐小时降水数据排除降水对能见度影响。将浮尘、扬沙、沙尘暴三种天气现象统称为沙尘天气。根据《地面气象观测规范》^[19]中能见度与沙尘天气关系,确定最低能见度<10 km作为一次沙尘天气,>10 km为无沙尘天气。数据由西藏自治区气象局信息中心提供。

1.3 方法

复杂网络具有直观地分析一个复杂系统的传递、演化及预测发展的功能,被广泛应用于大气污染物,如PM₁₀、PM_{2.5}的传输过程。以往构建的网络大多数为无向加权网络,区域间沙尘天气是相互影响且网络的矩阵不一定是对称的。因此,本文采用转移熵方法构建沙尘天气传输有向加权网络:网络的节点/Vertex是各气象站点沙尘天气时间序列数组($K_{1,t}, K_{2,t}, \dots$),而节点的链接/Edge是两个气象站之间沙尘天气的传输(图2)。利用Gephi软件将网络可视化。

根据转移熵算法得出的熵值,构建雅鲁藏布江中部沙尘天气的传输矩阵,求解各个城市节点转移熵的均值为0.054,将此作为阈值,为网络连边的判别标准。若转移熵大于阈值0.054,则连接两个城市,否则不建立连接关系^[20]。以气象观测站作为节点,计算每个节点自贡献率和节点间传输贡献率,节点之间沙尘天气相互的传输贡献率作为连边权重,对雅江流域沙尘天气网络进行可视化。

从复杂网络演化中发现其深层次的机理,还需



(a) 动态网络

	$K_{1,t}$	$K_{2,t}$	$K_{3,t}$	$K_{4,t}$	$K_{5,t}$
$K_{1,t}$	1	1	1	0	0
$K_{2,t}$	1	1	1	0	0
$K_{3,t}$	1	1	2	1	1
$K_{4,t}$	1	0	1	1	1
$K_{5,t}$	0	0	1	1	1

(b) 区域间沙尘天气相互影响网络

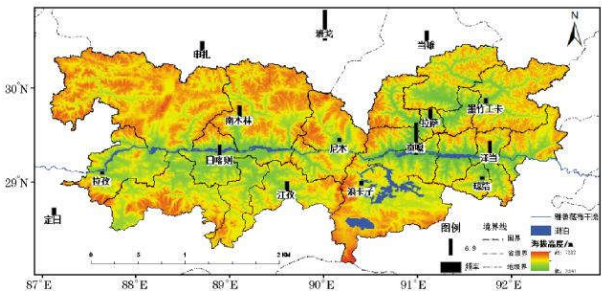


图1 雅鲁藏布江中游沙尘天气频率及气象站点分布

图2 区域间沙尘天气相互影响动态网络(a)及矩阵(b)构建示意图

对整个动态的网络参数进行量化计算^[21-22]。本文结合复杂网络的理论、内容及特性,计算与动态特性相关的主要参数,即平均聚类系数 c ,平均路径长度 L ,平均度 k ,网络直径 D 和网络密度 p 。

节点 i 的聚类系数定义,即:

$$c_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (1)$$

式中: k_i 是节点 i 相邻边的数量或节点 i 的度,节点 i 的 k_i 个邻居节点之间实际存在的边数为 E_i ,所有节点的整个网络的平均聚类系数为 c ,公式为:

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i \quad (2)$$

式中, $0 \leq c \leq 1$ 。当 $c=0$ 时,网络中所有节点均为孤立节点,即没有任何连边。 $c=1$ 时,说明网络中任意两个节点都直接相连,即网络是全局耦合网络。

节点 i 和节点 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径上边的数目。网络的平均路径长度 L 就是任何两个节点之间距离的平均值。公式为:

$$L = \frac{2}{N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (3)$$

通常,较大的距离意味着节点之间的相关性较小,共现的可能性较低。相反,较小的距离表示相关性强(即,较大的共现机会)。

网络中所有节点 i 的度的平均值称为网络的平均度 k ,公式为:

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (4)$$

网络直径 D 被定义为网络中任何两个节点之间距离的最大值,,公式为:

$$D = \max_{1 \leq i, j \leq N} d_{ij} \quad (5)$$

网络密度 p 是指网络中实际存在的边数与最多可能存在的边数的比值。

$$p = \frac{2M}{N(N-1)} \quad (6)$$

式中: M 表示网络中的实际边数^[23]。

小世界网络最早是由 Duncan J.Watts 和 Steven Strogatz 提出^[24],将高平均聚集系数 c 和低平均路径长度 L 作为特征提出的网络模型。与该网络有相同节点数和连边数目的随机网络的路径长度 L_g ,聚集系数记为 c_g 。如果 $L_g \geq L$ 且 $c > c_g$,则认为网络具有小世界效应。这种网络属性意味着没有相关的两个节点,通过一条很短路径被联系在一起,这也就是小世界现象。

Schreiber^[25]定义了转移熵的计算方法,衡量系

统中子系统的非对称互信息。

$$TE_{Y \rightarrow X} = -\sum P(x_{n+u}, x_n, y_n) \log \frac{P(x_{n+u}|x_n, y_n)}{P(x_{n+u}|x_n)} \quad (7)$$

$TE_{Y \rightarrow X}$ 具有非负特性,表示序列 Y 传递给 X 的信息量,即时间序列 y_n 到 x_n 的转移熵。转移熵值越大,说明 Y 传递给 X 的信息量越大,序列 y_n 对 x_n 影响越大。 u 为从 Y 到 X 信息传递的交互延迟时间。

2 结果与分析

2.1 雅鲁藏布江中游沙尘空间关系

由研究区不同站点沙尘能见度空间关系(图 3)可知,各站点构成一个完整的网络系统。各气象站之间互相连接,说明沙尘在区域之间相互传输,互相影响。节点最大的为拉孜、定日、日喀则 3 个,表示自贡献率高,分别为 54%、41%、40%,其次是高海拔班戈、申扎、当雄 3 个站和江孜、贡嘎、泽当,自身贡献率在 29%~37%;尼木、墨竹工卡、琼结 3 个节点较小,自贡献率低,主要受上游和南部的沙尘传输的影响。15 个气象站中,连入度最高的是拉萨河下游的拉萨、尼木和墨竹工卡,达 8~9 站,说明这两个站点在沙尘天气网络中属于输入沙尘大的站。最低的是拉孜和定日,为输入沙尘较少的站。申扎连出度最高,拉萨最低,表明申扎站对外输出的沙尘最多,而拉萨只对邻近站有沙尘输送。

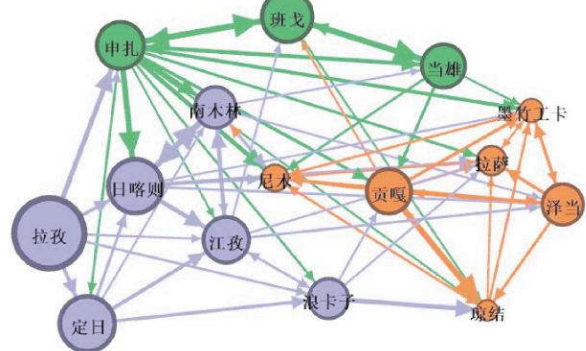


图 3 雅鲁藏布江中游沙尘天气联动网络图

由雅鲁藏布江中游沙尘天气整体网络结构特征(表 1)可知,雅江中游沙尘天气传输网络由 15 个节点(N)和 75 条边(M)组成,网络密度 p 为 0.357,表示节点之间的沙尘天气联动关系占全部联动关系的 36%,任何两个节点之间的最大距离长度为 5,平均度 k 是 5,以上参数值说明沙尘整体网络密度大、各点具有较强的传输效率。平均聚类系数 c 为 0.425,平均路径长度 L 为 1.923,平均路径长度较小且聚类系数较大,表明该网络具有明显的小世界现象。意

味着整个沙尘天气网络具有较高的集聚性,说明气象站之间沙尘天气相互影响较强。

表 1 雅鲁藏布江中游沙尘天气整体网络结构特征

参数	节点 N	边 M	平均聚类 系数 c	平均路径 长度 L	平均度 k	网络直径 D	网络密度 p
值	15	75	0.425	1.923	5	5	0.357

雅鲁藏布江中段沙尘天气空间联动在网络可视化上区域特点和整体网络参数上具有小世界现象,表明沙尘天气空间网络存在区域性特性,为进一步揭示不同节点在沙尘天气联动网络中的角色和作用,本文采用建立在社区网络理论基础上的聚类分析^[26],通过社区算法将雅鲁藏布江中游 15 个节点分为 3 类沙尘天气区域主题(表 2),雅鲁藏布江中游北部高海拔站分为聚类 I,包括申扎、班戈和当雄 3 个站;聚类 II 是由日喀则市的站和山南市南部高海拔浪卡子站组成;聚类 III 包括山南市宽谷区和沿拉萨河的 6 个站。聚类分区结果基本上与各气象站所在地理位置和沙源区相一致。主题聚类 I 向外发出关系有 20 个,接收关系为 11 个,区域内部联动关系为 9 个,为净溢出聚类;主题聚类 II 向外发出关系有 30 个,接收关系为 21 个,区域内部联动关系为 34 个,聚类 II 表现为内溢出聚类,该主题聚类既发出也接收联动关系,但区域聚类内部联动关系较多;主题聚类 III 向外发出关系有 43 个,接收关系为 25 个,区域内部联动关系为 43 个,为以区域内传输循环为主的内循环聚类。

中介中心性越高,对其他地区沙尘天气传输的影响越大。计算结果见表 2,申扎、南木林和尼木的中间中心度在 30 以上,拉孜为零。再次证明申扎、南木林和尼木处于雅鲁藏布江中游沙尘天气空间关联网络的核心,对整个网络的沙尘传输有最大的影响力。接近中心性越小,表明该气象站越不受控制,不受其他站点的影响。拉萨和墨竹工卡的值较小,说明两站沙尘天气受其他站点影响程度小于其他站点,与空间关联的可视化网络图完全相符。

2.2 雅鲁藏布江中游沙尘天气不同滞后时间空间联动

图 4 为 1~6 h 不同延迟时间气象站之间的可视化空间联动。随着延迟时间推迟,熵值逐渐减小,特别是延迟 6 h 后熵值小于 0.001 比特。雅鲁藏布江中游各站沙尘天气相互传输起主要作用,空间交互传输方式主要特点为:1 h 内沙尘天气主要传输在周围站和自贡献;2 h 出现小世界现象,如申扎、班

表 2 雅鲁藏布江中游沙尘天气空间联动
聚类及网络特性

聚类	气象站	连入度	连出度	中介中心性	接近中心性
聚类 I	申扎	4	12	32.1	0.93
	班戈	4	3	18.8	0.54
	当雄	3	5	10.9	0.62
聚类 II	南木林	5	5	31.5	0.59
	日喀则	4	6	4.2	0.57
	拉孜	0	5	0	0.61
	定日	2	5	0.3	0.62
	江孜	6	5	16.7	0.59
	浪卡子	4	4	3.3	0.48
聚类 III	尼木	9	5	30.1	0.51
	贡嘎	5	6	15.7	0.54
	拉萨	9	2	1.5	0.35
	墨竹工卡	8	3	2.4	0.38
	泽当	6	5	9.9	0.45
	琼结	6	4	3.7	0.43
平均值		5	5	12.07	0.55

戈和当雄 3 个站相互传输;其他相近站之间近距离相互传输。3 h 除了拉孜站,其他各站之间相互都有了连接,1~6 h 属于传输最强时间段;4 h 开始连接主要集中在中部,周围各气象站开始断连;5 h 沙尘天气传输开始减弱,只有几个气象站有连接;6 h 只有申扎站对拉萨市和墨竹工卡的输送及浪卡子站对南木林的输送,沙尘传输基本断开,影响减弱。雅鲁藏布江中游北部高海拔区沙尘向主干流及北侧输送范围广、强度大,尤其是申扎站沙尘天气输送最强持续时间最长,沙尘天气传输以局部区域为主,即日喀则、拉萨、贡嘎和泽当 4 个站内循环,同时跨区域传输贡献也明显。主要原因是受风和地形影响,丰富的局地气流(山谷风)为沙尘天气发生提供了动力条件,东西向河谷及特殊地形的狭管效应使高空西风急流的动量下传效应更加显著,具备了 2~4 h 沙尘传输的条件。

2.3 雅鲁藏布江中游典型城市对沙尘天气空间联动的影响

选取雅鲁藏布江中游的拉萨、日喀则、泽当、贡嘎作为典型城市进行分析。拉萨市作为西藏的首府,位于雅鲁藏布江的主支流拉萨河中段,是西藏的政治、经济、文化和科教中心。拉萨市发生的沙尘天气主要以扬沙和浮尘为主,持续时间长,天气过程较为复

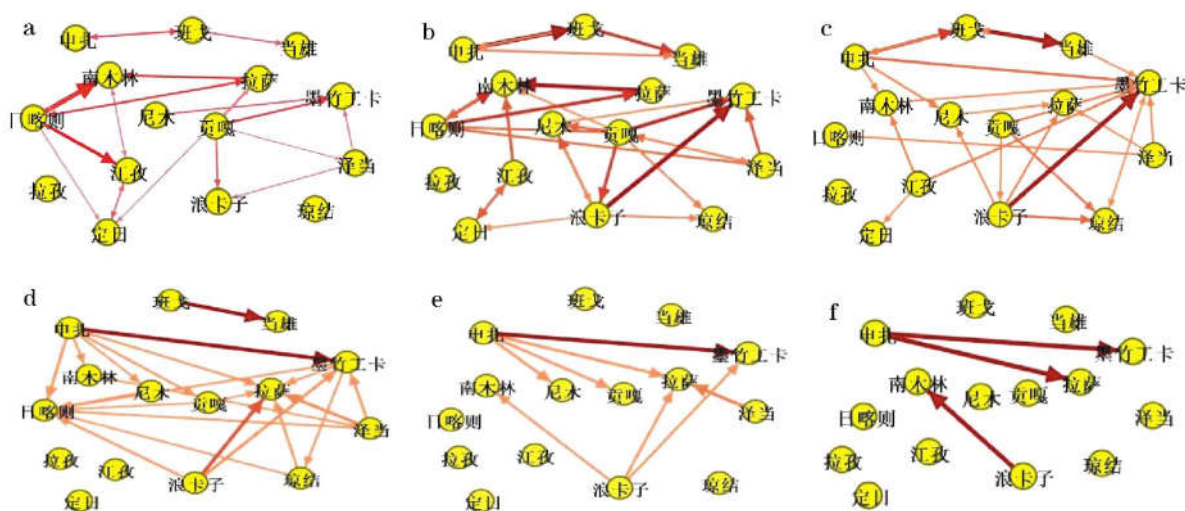


图4 沙尘天气6 h滞后空间联动可视化
(a~f为滞后1~6 h)

杂, 扬尘期间还夹杂着扬沙和高吹沙等天气现象^[15]。拉萨以尼木、泽当、贡嘎、墨竹工卡、琼结、浪卡子、江孜、日喀则和申扎等城市的沙尘天气输入为主, 从边的厚度可以看出传输影响较大的为日喀则、泽当、申扎和贡嘎, 传输贡献率分别为10%、9%、8%和7%; 墨竹工卡和尼木与拉萨之间为相互传输, 形成小世界。结合图1可知, 拉萨河流域3个站的自贡献率最小, 传输贡献率最大, 说明拉萨的沙尘天气受周边两市和北部高海拔城市影响大, 防沙治沙难度很大。

泽当和贡嘎地处雅鲁藏布江南岸的河谷地带, 两个城镇直线距离不到100 km, 是山南市重要经济社会区域。西藏最大的国际机场座落在贡嘎, 每年都因沙尘天气影响飞机正常起降, 机场每年平均间歇关闭20余天, 积压旅客数达万人^[14]。由于贡嘎至泽当处于雅鲁藏布江宽谷沙源区, 受西风急流和地形影响易发生沙尘天气, 是雅鲁藏布江中游沙尘天气出现频率最高区域(图1), 自贡献率贡嘎达为32%、泽当为29%。除自身贡献外, 山南宽谷区的西部贡嘎站受北部高海拔的申扎、当雄和东部邻近站泽当、琼结和南部浪卡子站影响大, 传输贡献率分别是9%、8%、7%、6%、6%, 而东部泽当主要受上游的贡嘎、日喀则、江孜、墨竹工卡和南木林等站传输贡献, 分别为9%、7%、7%、7%、6%, 说明了雅鲁藏布江贡嘎至泽当段是风沙灾害最为严重的地区^[27]。同时, 贡嘎和泽当作为沙尘天气源对周边城镇的沙尘传输贡献率也较大, 在沙尘传输网络中最重要沙尘源之一。

日喀则北依雅鲁藏布江, 东临年楚河, 被誉为“西藏粮仓”, 是西藏第二大城市。由于日喀则市区以东是雅鲁藏布江流域面积最大的宽谷风沙化土地,

自贡献率最大, 达40%, 沙尘天气主要输入源为北部南木林、申扎和上游拉孜、定日, 输入最大的为南木林和申扎, 贡献率达15%, 日喀则节点自贡献和市内节点传输贡献合计达70%, 表明日喀则市区以宽谷沙源区产生的沙尘和上游沙尘的传输为主。日喀则对外输出较多且较远, 主要沙尘输出节点是南木林、江孜、拉萨、尼木和泽当, 传输贡献率分别为16%、12%、10%、8%、7%, 影响最远的节点是墨竹工卡。日喀则站也是沙尘天气传输网络结构中最重要节点之一。

3 结论

3.1 结论

本文基于复杂网络方法解析了雅鲁藏布江中游沙尘天气空间网络联动, 得到以下结论:

(1) 网络由15个节点(气象站)和75条边组成, 每个气象站之间都有连边, 是一个稳健性网络, 节点之间可以相互解释和预测。节点之间的沙尘天气联动关系占全部联动关系的36%, 沙尘整体网络密度大, 各点具有较强的传输效率。网络结构不仅为区域联防联控提供科学依据, 也为沙尘天气政策的制定带来新的视角。

(2) 在整体网络特征的分析中, 节点最大的为拉孜、定日、日喀则, 表示自贡献率高。拉萨、尼木和墨竹工卡在沙尘天气网络中属于输入沙尘大的站, 拉孜和定日为输入沙尘较少的站。申扎站对外输出的沙尘最多, 拉萨只对邻近站有沙尘输送。该网络具有明显的小世界现象, 说明整个沙尘天气网络具有较高的集聚性, 气象站之间沙尘天气相互影响较强。

(3)雅鲁藏布江中游沙尘天气根据聚类分为3种不同颜色的主题,基本上与各气象站所在地理位置和沙源区相一致。雅鲁藏布江中游北部高海拔站为聚类I,为净溢出聚类;聚类II是由日喀则市的站和山南市南部高海拔浪卡子站组成,表现为内溢出聚类;聚类III包括山南市宽谷区和沿拉萨河的6个站,以区域内传输循环为主的内循环聚类。申扎、南木林和尼木中心度在30以上,处于雅鲁藏布江中游沙尘天气空间关联网络的核心,对整个网络的沙尘传输有最大影响力。

(4)1 h内沙尘天气主要传输在周围站和自贡献,3 h内相互传输影响最强,6 h仅有几个站之间的连接,沙尘传输基本断开,影响减弱。雅鲁藏布江中游北部高海拔区沙尘向主干流及北侧输送范围广、强度大,尤其是申扎站沙尘天气输送最强持续时间最长,沙尘天气传输以局部区域为主即日喀则、拉萨、贡嘎和泽当4个站内循环,同时跨区域传输贡献也明显。

3.2 建议

根据以上研究结论,联系雅鲁藏布江中游的生态环境治理实践,有以下对策启示:

一是,雅鲁藏布江沙尘传输在空间上即有跨行政区传输,又有区内相互影响,形成复杂的空间交互影响,没有孤立的区或城市,所以,沙尘治理必须要摆脱单个区的孤立观点,转向整体协同理念,从整体视角形成跨区的联防联控机制。二是,不论从区域尺度还是站点,在丰富的沙源和西风副热带急流带作用下雅江中部两大宽谷区的自身贡献和区内沙尘传输贡献最大,使得沙尘天气次数最多,而且对其它区或站的传输也最强,是沙尘治理关键区。三是,鉴于研究区内测站少,应加强沙尘的监测和预测,开展对雅鲁藏布江沙尘天气的预报预警服务。此外,在借鉴其他地区防沙治沙经验时,应该考虑高海拔风沙灾害的特点,在明确防沙治沙措施机理的基础上,科学合理地布置防沙治沙措施。

参考文献:

- [1] 李晓岚,张宏升.我国沙尘天气微气象学和湍流输送特征研究进展[J].干旱气象,2010,28(3):256-264.
- [2] 刘毅华,董玉祥.西藏沙漠化程度及其分区评价[J].干旱区资源与环境,2008,(11):1-5.
- [3] 刘华军,孙亚男,陈明华.雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):74-81.
- [4] 陈敏,邵建,杨苑媛,等.基于WRF-CMAQ模式的银川市空气质量预报效果检验分析[J].气象与环境科学,2023,

- 46(2):83-91.
- [5] 王小兰,闫世明,王雁,等.太原市冬季一次霾和沙尘“混合型污染”过程天气成因分析[J].气象与环境科学,2021,44(4):43-52.
- [6] 刘华军,张耀,孙亚男.中国区域发展的空间网络结构及其影响因素——基于中国2000—2013年省际地区发展与民生指数[J].经济评论,2015,(5):59-69.
- [7] 柳丹,张武,陈艳,等.基于卫星遥感的中国西北地区沙尘天气发生机理及传输路径分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1605-1616.
- [8] FU X, WANG S X, CHENG Z, et al. Source, transport and impacts of a heavy dust event in the Yangtze River Delta, China, in 2011[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014, 14(3): 1239-1254.
- [9] 张迎新,李林,曹晓冲,等.京津冀地区一次持续时间较长浮尘天气的分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(4):123-129.
- [10] 连俊标,王式功,罗彬,等.四川盆地一次当地排放和沙尘输送双重影响的区域空气重污染过程研究[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(5):122-131.
- [11] 孙明,沈渭寿,李海东,等.雅鲁藏布江源区风沙化土地演变趋势[J].自然资源学报,2010,25(07):1163-1171.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Zhengcai, MA Pengfei, LA Zhen, et al. Aeolian sediment provenance and transport in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibet Plateau[J]. Basin Research, 2023, 35: 762-783.
- [14] 林志强,王鹏祥,唐叔乙,等.西藏贡嘎沙尘天气气候及环流特征[J].中国沙漠,2015,25(5):1312-1319.
- [15] 何晓红,次仁德吉,林志强.拉萨一次浮尘天气过程分析[J].气象,2007,33(9):691-73.
- [16] 袁磊,沈渭寿,李海东,等.雅鲁藏布江中游河谷区域风沙化土地演变趋势及驱动因素[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):301-305.
- [17] 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.
- [18] 李霞,王胜利.1980—2007年新疆地区能见度的变化特征及其影响因子研究[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(3):14-20.
- [19] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
- [20] BROOKES B C. The foundations of information science: Part I. Philosophical aspects [J]. Journal of Information Science, 1980, 2(3/4), 125-133.
- [21] Albert-László Barabási. Network Science [M]. Cambridge University Press, 2016.

- [22] 柴立和.信息主义视野下世界图景的科学及哲学诠释[J].系统科学学报,2014,22(1):21–25.
- [23] 拉珍.基于共词网络视角的环境质量透析与评价[D].天津:天津大学,2017.
- [24] WATTS D J,STROGATZ S H.Collective dynamics of “small-world” networks [J].Nature,1998,393:440–442.
- [25] SCHREIBER T.Measuring Information Transfer [J].Physical Review Letters,2000,85(2):461–464.
- [26] NEWMAN M E J,GIRVAN M.Finding and evaluating community structure in networks [J].Physical Review,2004,69(2):026113.
- [27] 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.

Research on Spatial Interaction of Dust Weather Influences Based on Complex Network Model: A Case Study of the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River

LA Zhen^{1,2}, Baima Yangzong¹, SHEN Caisheng³, Gesang Danzeng¹, Deqing Zhuoga⁴

(1.Tibet Climate Center, Lhasa 850000, China;

2.Shigatse National Climatological Observatory, Shigatse 857000, China;

3.Political Research Office of the Party Committee of the Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China;

4.Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science, Lhasa 850000, China)

Abstract Based on the hourly minimum visibility data from 15 meteorological stations along the middle reaches of the Yarlung Zangbo River during the winter and spring from 2017 to 2020 (October to April of the following year), combining the transfer entropy method and theory of complex networks, the regional dust transport matrix was constructed, and the spatial transport and interactive impact characteristics of dust weather were also analyzed. The results indicated that (1) The dust weather system in the mid-reaches of the Yarlung Zangbo River was a resilient network, and the dust events of different weather stations exhibited mutual influences, indicating that dust can be transported across regions. (2) Shenzha, Namulin, and Nimu were at the core of the spatial correlation network for dust weather, suggesting these were the main distribution areas of dust. Conversely, Lhasa and Mozhuogongka were least affected by other sites. (3) The duration of dust event in the research area was mainly 1 h, followed by 3 h, and the minimum was 6 h, indicating that local dust emission was the main cause and dust could not be transported for a long time. In conclusion, dust weather in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River had both local supply and regional transmission, and the stations interacted with each other to form a complex spatial interactive network. Therefore, in order to reduce the impact of dust disasters in the research area, comprehensive coordination and cooperation should be based on governance.

Key words complex network; Yarlung Zangbo River; dust weather; space transmission