

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.005

基于复杂网络的珠江流域片极端降水空间特征及时间规律分析

黎晓东¹, 赵铜铁钢¹, 郭成超¹, 田雨², 杨芳^{1,3}, 陈文龙^{1,3}

(1. 水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室(筹), 中山大学, 广东广州 50275; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 珠江水利科学研究院, 广东广州 510611)

摘要: 研究极端降水特征和演变规律对流域防灾减灾具有重要意义。采用长期逐日高分辨率卫星降水数据, 结合统计显著性检验构建无向网络和有向网络, 分别编码极端降水的连接与传播, 以珠江流域片为例, 分析极端降水的空间特征与时间规律。结果表明: 西江流域有最大的极端降水发散源和汇聚地, 红水河、黔浔江、左江交界处度中心性大于0.5, 韩江流域和东江上游平均传播距离超过400 km, 根据最大5%聚类系数辨识出五大流域极端降水中心; 空间上, 存在韩江流域、东江流域、珠江三角洲中心, 长安-桂林场次中心来自柳江流域中心, 海南岛中心对珠江流域片有传入影响; 时间上, 极端降水主要在5月下旬至6月上旬从珠江流域片向韩江流域、东江流域和珠江三角洲中心传入, 在6月上中旬从韩江流域、东江流域、珠江三角洲和柳江流域中心向红水河、柳江、黔浔江及左江交界处传出。

关键词: 复杂网络; 极端降水; 连接与传播; 空间特征; 时间规律

中图分类号: TV125; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)03-0374-14

极端降水对人类生命及社会经济安全构成重大风险^[1-2]。2000—2019年, 极端降水及其引发的自然灾害已在全世界范围内威胁近16.5亿人的生命安全, 造成逾万亿元人民币的经济损失, 加剧了世界各国间的发展不平衡^[2]。长期历史观测结果表明, 在中国超过50%地区的极端降水总量、强度和频率呈现出每10 a增加1%~8%的趋势^[3], 其概率密度函数在近20 a相比过去发生了右偏^[4]; 模式未来预估表明, 在气候变化的影响下, 未来30 a中国更多地区的极端降水变化幅度将比现在增强2%~12%, 预示着更严重的洪水、内涝等灾害^[5]。因此, 理解和掌握极端降水的变化对国家防灾减灾及制定气候变化适应策略具有重要意义^[3,5]。

诸多研究针对极端降水的演变规律和内在特征开展了广泛调查^[3-5]。一方面, 依托年最大值、超门限阈值等极端降水指数构建评价体系, 探究了极端降水的时空格局与演变^[5-6]、概率分布^[7-8]、重现期和重现水平^[8-9]、非平稳性^[10-11]及与气候因子之间的相关性^[11]等演变规律的问题; 另一方面, 基于统计归因分析和模式数值模拟等方法, 探究了人类活动、下垫面要素及局地至大尺度天气系统等^[12-15]内在特征的问题。然而, 在气候背景、成雨机制、地形特征等因素共同作用下, 解析极端降水在不连续时空中的高度非线性演化规律仍然存在困难^[16-17]。

复杂网络方法为分析极端降水的时空非线性演化提供了新途径^[18-20]。基于图论的描述, 复杂网络方法将离散在时空中的极端降水以网络的形式建立相互间的连接, 将极端降水的时空连接结构和动力传播特征映射在具有拓扑性质的系统中, 可从整体的角度解析极端降水的时空非线性演化^[17,19]。例如, Boers等^[20]构建

收稿日期: 2023-03-21; 网络出版日期: 2023-07-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1309.P.20230717.1528.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3001000); 广东省“珠江人才计划”青年创新团队项目(2019ZT08G090)

作者简介: 黎晓东(1996—), 男, 广西百色人, 博士研究生, 主要从事极端降水变化研究。

E-mail: lixd56@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 赵铜铁钢, E-mail: zhaottg@mail.sysu.edu.cn

全球尺度的复杂网络描述全球极端降水的事件同步遥相关特征; Mondal 等^[18]面向美国夏季降水构建复杂网络, 从拓扑学的不同角度分析极端降水的时空传播特征; 何苏红等^[21]应用复杂网络分析了东亚夏季降水的空间同步性并进行非线性预测。另一方面, 为确保基于复杂网络的极端降水时空非线性演化分析有意义, 除了采用不同的数据集进行方法的验证之外^[20,22], 所构建的复杂网络能否捕捉或反映极端降水的区域气候特征及属性也应该被纳入考虑。

本文采用长期逐日高分辨率卫星降水数据, 面向极端降水的连接和传播, 结合统计显著性检验构建极端降水无向复杂网络和向有复杂网络, 以珠江流域片为研究案例, 通过辨识流域极端降水中心来检验所构建的复杂网络, 在此基础上分析极端降水的空间特征与时间规律, 以期研究极端降水的时空非线性演化提供参考。

1 研究方法

1.1 事件同步

发生在空间上不同位置的极端降水, 若在上时间上间隔很近则预示着其间存在离散时空上的连接^[22]。事件同步(Event Synchronization)^[19,23]可以定量地描述这种连接, 为编码极端降水的连接和传播提供了基础。设空间中任意2个格点*i*和格点*j*上所有极端降水的发生时间分别构成集合 $\{t_i^u\}$ 和 $\{t_j^v\}$, 其中, $1 \leq u \leq l_i$, $1 \leq v \leq l_j$, t_i^u 和 t_j^v 分别代表在格点*i*和格点*j*观测到的第*u*个和第*v*个极端降水的发生时间, 单位为d; l_i 和 l_j 分别代表格点*i*和格点*j*上发生的极端降水事件总数。 t_i^u 和 t_j^v 之间的延迟记为 $t_{i,j}^{u,v} = t_i^u - t_j^v$, 单位为d。定义动态延迟:

$$\tau_{i,j}^{u,v} = \frac{\min\{t_{i,i}^{u,u-1}, t_{i,i}^{u+1,u}, t_{j,j}^{v,v-1}, t_{j,j}^{v+1,v}\}}{2} \quad (1)$$

式中: $t_{i,i}^{u,u-1} = t_i^u - t_i^{u-1}$, d; $t_{i,i}^{u+1,u}$, $t_{j,j}^{v,v-1}$ 和 $t_{j,j}^{v+1,v}$ 同样定义, 单位均为d。当 $|t_{i,j}^{u,v}| < \tau_{i,j}^{u,v}$ 时, 认为 t_i^u 时刻发生的极端降水与 t_j^v 时刻发生的极端降水是同步的。因不同位置极端降水事件总数和密度分布存在差异, 导致 $\tau_{i,j}^{u,v}$ 可能取到异常大值。借鉴 Boers 等^[20]的研究, 本文规定 t_i^u 和 t_j^v 之间的延迟超过 $\tau_{\max} = 10$ d时认为不发生同步。 $t_{i,j}^{u,v}$ 的正负代表 t_i^u 和 t_j^v 的先后顺序, 预示着极端降水事件同步的传播方向, 为量化总体传播特征, 定义 $c(i|j)$ 为极端降水先在格点*j*发生而后在格点*i*发生的总数, 同理定义 $c(j|i)$, 即:

$$c(i|j) = \sum_{i=1}^{l_i} \sum_{j=1}^{l_j} J_{ij} \quad c(j|i) = \sum_{i=1}^{l_i} \sum_{j=1}^{l_j} J_{ji} \quad (2)$$

其中, J_{ij} 和 J_{ji} 的定义为:

$$J_{ij} = \begin{cases} 1 & -\tau_{i,j}^{u,v} < t_{i,j}^{u,v} < 0 \text{ 且 } |t_{i,j}^{u,v}| < \tau_{\max} \\ 0.5 & t_{i,j}^{u,v} = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad J_{ji} = \begin{cases} 1 & 0 < t_{i,j}^{u,v} < \tau_{i,j}^{u,v} \text{ 且 } |t_{i,j}^{u,v}| < \tau_{\max} \\ 0.5 & t_{i,j}^{u,v} = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

考虑极端降水事件总数空间分布不均, 定义标准化的同步强度(Q_{ij})和延迟强度(q_{ij}):

$$Q_{ij} = \frac{c(i|j) + c(j|i)}{\sqrt{l_i \cdot l_j}} \quad q_{ij} = \frac{c(i|j) - c(j|i)}{\sqrt{l_i \cdot l_j}} \quad (4)$$

式中: $Q_{ij} \in [0, 1]$, Q_{ij} 的大小代表2个格点的总体同步程度, Q_{ij} 越大, 表明格点*i*和格点*j*中任意一个格点发生极端降水时, 在 τ_{\max} 内另一个格点发生极端降水的频率越大; $q_{ij} \in [-1, 1]$, q_{ij} 的大小代表2个同步极端降水的倾向传播程度, $q_{ij} = 0$ 时表明在 τ_{\max} 内格点*i*领先于格点*j*的极端降水与落后于格点*j*的极端降水总数相同, 总体不表现传播特征, q_{ij} 越趋近于1表明在 τ_{\max} 内极端降水先在格点*j*发生后在格点*i*发生的频率越大, 极端降水倾向于从格点*j*向格点*i*传播, 相反地, q_{ij} 越趋近于-1表明在 τ_{\max} 内极端降水倾向于从格点*i*向格点*j*传播。

由 Q_{ij} 组成的同步强度矩阵 \mathbf{Q} 代表了极端降水的时空连接, 由 q_{ij} 组成的延迟强度矩阵 \mathbf{q} 代表了极端降水

的传播特征, 即:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & \cdots & Q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & \cdots & Q_{nn} \end{bmatrix} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & \cdots & q_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: n 为降水场中的格点总数。

1.2 网络构建

每一对格点 i 和格点 j 的 Q_{ij} 、 q_{ij} 及 i 到 j 的距离 (d_{ij}) 存在如图 1 所示的关系。可以看到, Q_{ij} 与 q_{ij} 、 d_{ij} 在总体上呈现反比关系。相关研究^[16,18,21]取 \mathbf{Q} 和 \mathbf{q} 的 95% 分位数 θ_Q 和 θ_q 作为构建无向和有向网络的阈值, 可在图 1 中划出 4 个分区。显然, 这些研究所构建的网络仅建立在 I 区的极端降水上, 忽略了 III 区的远距离传播极端降水。在局地尺度极端降水天气系统的有限影响范围内, 极端降水间呈现高同步性以及因天气系统移动而传播是显而易见的^[15,24], 但那些从远距离在很短时间内传播来的突发致洪极端降水往往不容易被发现^[25]。为更好地服务于防灾减灾提前预警, 将这些同步强度低但存在明显传播的极端降水考虑进复杂网络的构建中具有重要实际意义, 故需要扩大构建极端降水复杂网络的范围至 III 区。

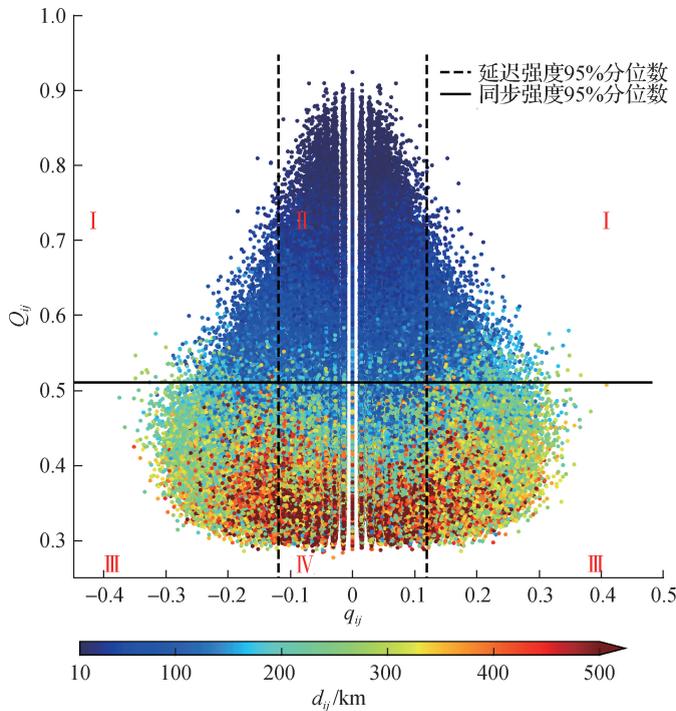


图 1 极端降水同步强度—延迟强度—距离关系

Fig. 1 Relationship of the synchronization intensity—time delay intensity—distance of extreme precipitation

III 区极端降水的低同步连接意味着偶然性的存在, 为筛选出那些有稳健物理意义的连接, 需要对 Q_{ij} 进行显著性检验^[20]。按照 Boers 等^[20]的方法, 本文进行显著性检验的方法如下: ① 随机打乱降水场有雨日的时间序列, 得到一个在时间上无序的随机降水场; ② 基于随机降水场计算对应的同步强度矩阵; ③ 重复 ①② 步骤 100 次, 构建得到同步强度矩阵的零模型 \mathbf{Q}_{null} ; ④ 取 $Q_{ij, null}$ 的 99.9% 分位数 (显著性水平为 0.001) 为一对格点发生显著连接的阈值 ($\theta_{ij, sig}$), 定义显著同步强度矩阵 (\mathbf{A}_Q):

$$A_{ij, Q} = \begin{cases} 1 & Q_{ij} > \theta_{ij, sig} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_{ij, Q} = 1$ 的编码格点 i 和格点 j 的连接通过了显著性检验。

至此,极端降水在降水场中的显著连接通过编码的方式记录在矩阵 A_Q 中,构成了极端降水的无向复杂网络。 A_Q 中记录的显著同步同时包含了从格点 i 到格点 j 传播、从格点 j 到格点 i 传播的 2 个方向,但不能有效地从 A_Q 的编码中区分出来。为此,在 A_Q 的基础上,根据延迟强度矩阵赋予其对应的传播方向,进一步编码极端降水有向复杂网络 A_q :

$$A_{ij,q} = \begin{cases} 1 & q_{ij}A_{ij,Q} > \theta_q \\ -1 & q_{ij}A_{ij,Q} < -\theta_q \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A_{ij,q} = 1$ 为编码由格点 j 向格点 i 显著传播的连接; $A_{ij,q} = -1$ 为编码由格点 i 向格点 j 显著传播的连接; θ_q 为延迟强度矩阵 q 的 95% 分位数。 A_q 记录的连接既显著同步,又存在很强的传播特征,但不包含那些显著同步且倾向于同时发生的连接。

1.3 网络性质

描述复杂网络的统计性质依赖于合理的指标^[18]。借鉴 Mondal 等^[18]的研究,本文采用度中心性(D_C)、散度(D_V)、聚类系数(C)和平均传播距离(D_{MP})来描述复杂网络的统计性质。

(1) 度中心性用来衡量一个格点与整个网络发生连接的总体程度,其定义为

$$D_{C_i} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij,Q}}{n-1} \quad (8)$$

式中: $D_{C_i} \in [0, 1]$; n 为降水场中的格点总数。格点 i 的 D_{C_i} 越大,表明格点 i 与整个降水场中发生显著连接的格点占所有格点的比例越大。

(2) 散度用来衡量一个格点与整个网络发生连接的总体方向,预示着极端降水传播的总体汇聚与发散,其定义为

$$D_{V_i} = k_{i,\text{in}} - k_{i,\text{out}} \quad (9)$$

式中: 格点 i 的 D_{V_i} 有正负之分,正值代表了极端降水的总体汇聚,负值代表了极端降水的总体发散,趋近于 0 则代表在显著传播上的收支平衡; $k_{i,\text{in}}$ 和 $k_{i,\text{out}}$ 分别为入度和出度,按下式计算:

$$k_{i,\text{in}} = \sum_{j=1}^n A_{ij,Q}, A_{ij,q} = 1; \quad k_{i,\text{out}} = \sum_{j=1}^n A_{ij,Q}, A_{ij,q} = -1 \quad (10)$$

(3) 聚类系数用来衡量一个格点所连接的其他格点间的连接情况。由式(8)可知,格点 i 与整个场发生显著连接的格点总数为 $k_i = \sum_{j=1}^n A_{ij,Q}$, k_i 个格点之间最多可能产生的连接数为 $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$, 统计 k_i 个格点之间实际产生的连接数(β), 则格点 i 的 C 为

$$C_i = \frac{2\beta}{k_i(k_i-1)} \quad (11)$$

式中: $C_i \in [0, 1]$ 。格点 i 的 C_i 越大说明格点 i 所连接的多个格点之间越存在密切的相互关联,预示强大的局地尺度气候特征。

(4) 平均传播距离用来衡量一个格点在整个场中发生显著传播的平均空间尺度。借鉴 Mondal 等^[18]提出的平均同步距离,平均传播距离被定义为

$$D_{MP_i} = \frac{\sum_{j=1}^n |q_{ij}| A_{ij,Q} d_{ij}}{\sum_{j=1}^n |q_{ij}| A_{ij,Q}}, |q_{ij}| A_{ij,Q} > \theta_q \quad (12)$$

式中: $D_{MP_i} \in [0, +\infty)$ 。如图 1, Q_{ij} 与 q_{ij} 、 d_{ij} 呈现反比关系,当呈现显著传播特征时 Q_{ij} 反而不大,这就导致平均同步距离着重于突出格点 i 周边倾向于同时发生极端降水的平均空间尺度,而对远距离传播的显著连

接产生了惩罚。为突出极端降水短时间内在流域尺度上的传播特征,本文使用 q_{ij} 的绝对值对远距离的格点赋予更大权重,以着重表征极端降水传播的平均影响范围。

2 研究数据

本文降水数据来自全球降水测量计划(Global Precipitation Measurement, GPM)多卫星联合降水反演(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM, IMERG)系列产品中经过地面观测站点数据订正的后处理产品(IMERG Final-run, IMERG-F, <https://gpm.nasa.gov/data/directory>),包含2000年6月以来全球 60°S — 60°N 范围内 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 最高30 min分辨率的降水数据。研究表明IMERG-F在表征珠江流域片区的降水上有较高的准确性^[26-27],本文提取如图2(a)所示的珠江流域片18个水资源三级流域上的IMERG-F逐日降水数据,相应的年均降水量见图2(b)。根据Mondal等^[18]和Boers等^[20]的研究,按照如下方式确定用于构建复杂网络的极端降水:①选取2001—2020年4—9月的有雨日(日降水量 $\geq 1\text{ mm/d}$);②对有雨日降水序列,日降水量超过降水序列95%分位数的确定为极端降水,相应阈值的空间分布如图2(d)所示;③若多个极端降水在时间上连续,则视其为单一事件,并取其第一天为单一事件的发生时间,相应的极端降水事件总数的空间分布如图2(e)所示。借鉴Agarwal等^[16]的研究,本文通过计算降水场中各格点的降水月变化的质心(T_i)来表征降水的季节性:

$$T_i = \frac{\sum_{m=1}^{12} mP_m}{\sum_{m=1}^{12} P_m} \quad (13)$$

式中: m 为月份; P_m 为月份 m 的总降水量。珠江流域的降水季节性如图2(f)所示,可以看到,珠江流域的雨季总体上是从东北向西南演进,绝大部分的降水集中发生在5—6月的主汛期,与以往的研究相一致^[24,28]。考虑季节性变化的时效,在后续分析中本文对 T_i 的结果按旬进行划分。

本文使用由业务规定和相关研究指出的珠江流域片极端降水中心^[24,29-31]来检验所构建的极端降水复杂网络。一般地,流域尺度的极端降水中心可以通过年降水量、极端降水阈值、极端降水日数或发生频率等来确定^[24,29-31]。长期上,在历史站点观测及更新、更丰富的站点观测均指出珠江流域片内存在有清远-佛冈-龙门-河源、阳江-阳春-恩平-上川-斗门、海丰-陆丰-揭西-普宁三大长期稳定极端降水中心^[29-31]。典型场次上,根据9场致洪暴雨归纳出来的英德-清远、河源-龙门地区极端降水中心^[24]对应了前述的清远-佛冈-龙门-河源中心;由于成因不完全一致,长安-桂林、都安-迁江和桂平-昭平典型场次极端降水中心^[24]可能不是长期稳定的,待进一步验证。将这些极端降水中心的关键位置以不同的符号标记于图2中,相同符号代表同一极端降水中心,相同符号的不同位置以其名称进行区别并标注于图2(b)中。可以看到,三大极端降水中心和长安-桂林场次中心落在了图2(b)年均降水量大于1 900 mm、图2(d)降水95%分位数大于60 mm的地区,明显高于周边,既突出了这几个极端降水中心的长期稳定性,也强调了其在复杂网络分析中的重要性。

3 结果分析

3.1 极端降水复杂网络

基于IMERG-F逐日降水数据构建的珠江流域片极端降水复杂网络的度中心性、散度、聚类系数和平均传播距离如图3所示。图3(a)中,度中心性整体呈现由流域片内部向周边递减的格局,度中心性较大的区域在红水河、柳江、黔浔江及左江交界处,这里发生的极端降水与珠江流域中超过50%的极端降水存在显著连接。图3(b)中,散度在整体上呈现东部收支平衡、西部交互频繁、南汇聚、北发散的分布格局;西江流域既有珠江流域片最大的极端降水发散源,位于红水河、南盘江和柳江北部高程1 000 m以上的较高海拔

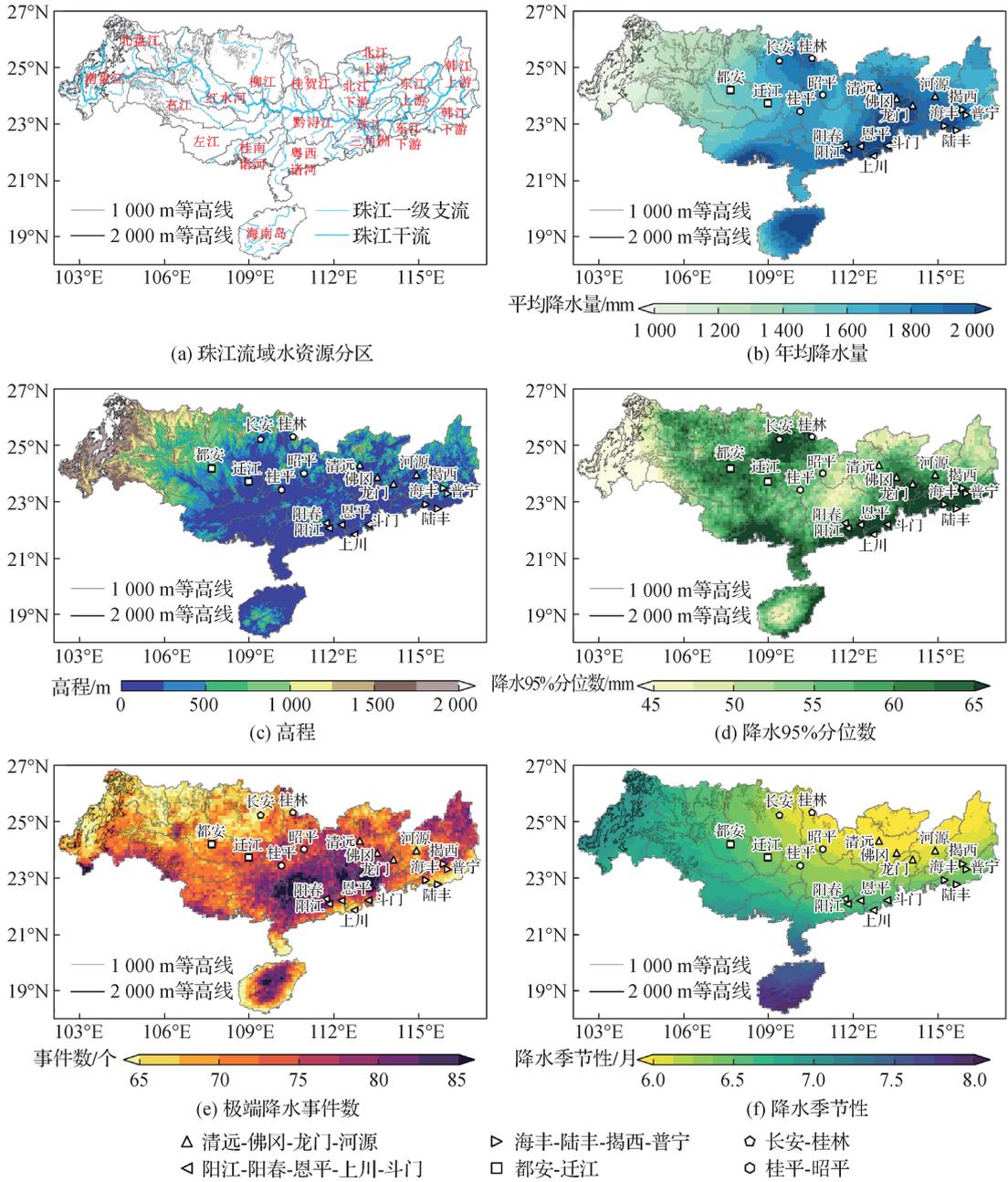


图2 研究区及研究数据概况

Fig.2 Profile of the Pearl River basin and the research data

复杂地形区, 也有最大的汇聚地, 位于红水河、柳江、黔浔江及左江交界处, 且与度中心性极大的地区相匹配; 此外, 都安-迁江和桂平-昭平场次中心位于此, 预示其形成由流域上各处极端降水传入, 在长期上通常不是极端降水第一发生地。图3(c)中, 聚类系数的分布与度中心性的分布总体上呈现反比, 即来自相似气候背景、成雨机制、地形条件的极端降水数量少但关联密切, 而这些极端降水传入汇聚地时因不同的属性而无法形成聚类, 符合复杂网络的拓扑性质^[19]; 韩江中下游、东江中游、珠江三角洲、柳江北部和海南岛聚类系数超过0.75, 同时这些地区很好地捕捉到了海丰-陆丰-揭西-普宁、上川-斗门、龙门-河源稳定中心和长安-桂林场次中心, 对应了图2中的分析, 进一步强调了其长期稳定性。图3(d)中, 平均传播距离总体上

呈现西北小、东南大的分布格局；韩江流域和东江上游平均传播距离超过 400 km；红水河、南盘江和柳江北部较高海拔复杂地形区的发散源的传播距离基本在 200 km 以内，意味着发散源的极端降水传播存在一定的自限性；柳江、黔浔江、红水河及左江交界处汇聚地，以 300 km 为分界呈现出明显差异，预示传入这里的极端降水在传播源地上有差别。

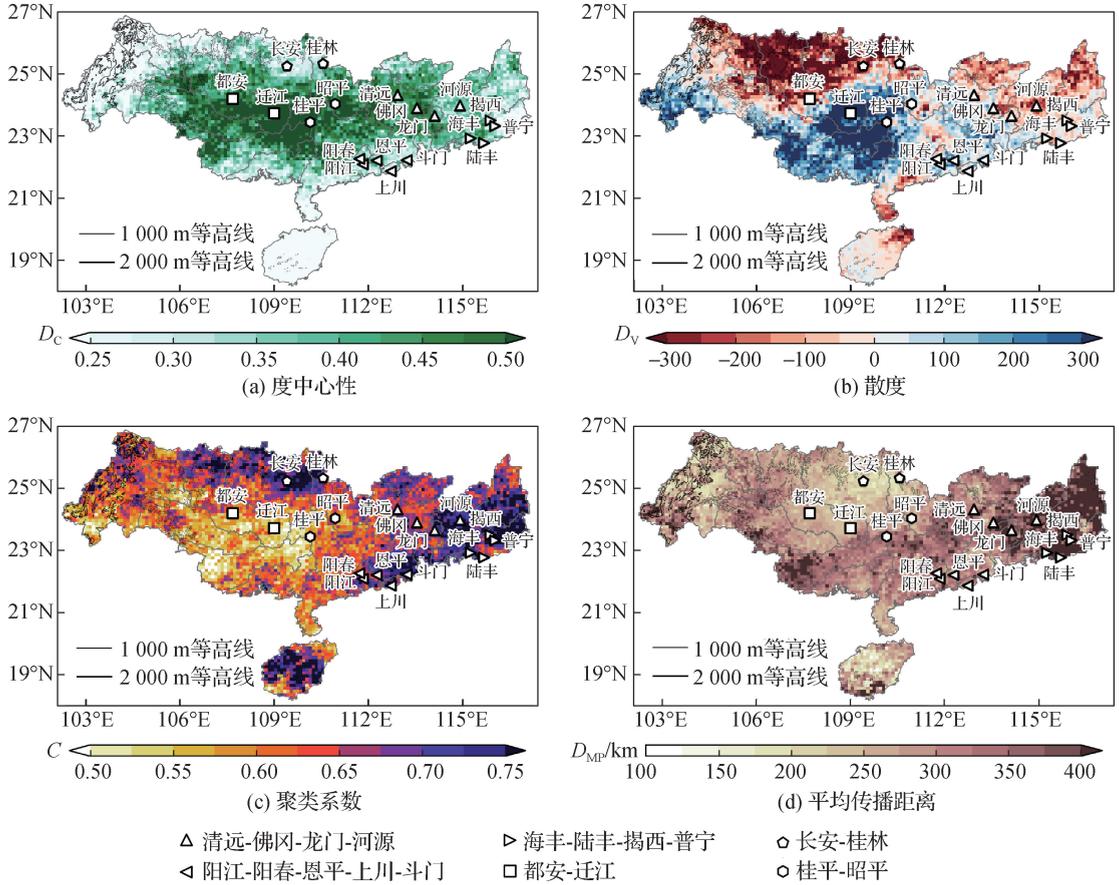


图3 珠江流域片极端降水复杂网络的统计性质

Fig.3 Statistical characteristics of the extreme precipitation complex network for the Pearl River basin

3.2 极端降水空间特征

借鉴相关研究^[16,18,21]，以最大5%聚类系数(对应阈值为0.779 7)作为辨识标准，得到如图4(a)所示的韩江流域、东江流域、珠江三角洲、柳江流域及海南岛五大高聚类系数地区。可以看到，最大5%聚类系数很好地捕捉到了海丰-陆丰-揭西-普宁、龙门-河源、上川-斗门和长安-桂林中心，既从另一个角度印证了三大极端降水中心的存在，也突出了所构建极端降水复杂网络的可信度，同时验证了长安-桂林场次中心来自于稳定的柳江流域中心。此外，最大5%聚类系数还发现了海南岛地区，这在以往的研究中未提及，结合图2(b)和图2(e)中年降水量大、极端事件频率高的特点，说明海南岛也是影响珠江流域的极端降水中心之一。五大中心的极端降水空间特征分别展示于图4(b)—4(f)。对于韩江流域中心，显著传入的极端降水往往来自近距离的韩江上游、北江上游和远距离的桂贺江北部；在这里发生的极端降水总体向西传播，往河源-龙门-佛冈、桂平方向传出较为密集，主要影响东江流域中部、珠江三角洲、北江下游、黔浔江和右江等地区。对于东江流域中心，在传出空间特征上与韩江流域相似，但传入的极端降水主要限制在距离东江流域最近的韩江上游和东江上游。对于珠江三角洲中心，传入主要来自环绕珠江三角洲的各个子流域，发生在这里的极端降水很少传出。对于柳江流域中心，较小的平均传播距离预示了传播范围的有限性，影响局限于柳江、红

水河、桂贺江等周边地区。对于海南岛中心, 主要向珠江流域片传入极端降水, 影响桂南粤西诸河的沿海地区, 传入的极端降水主要来自海洋。

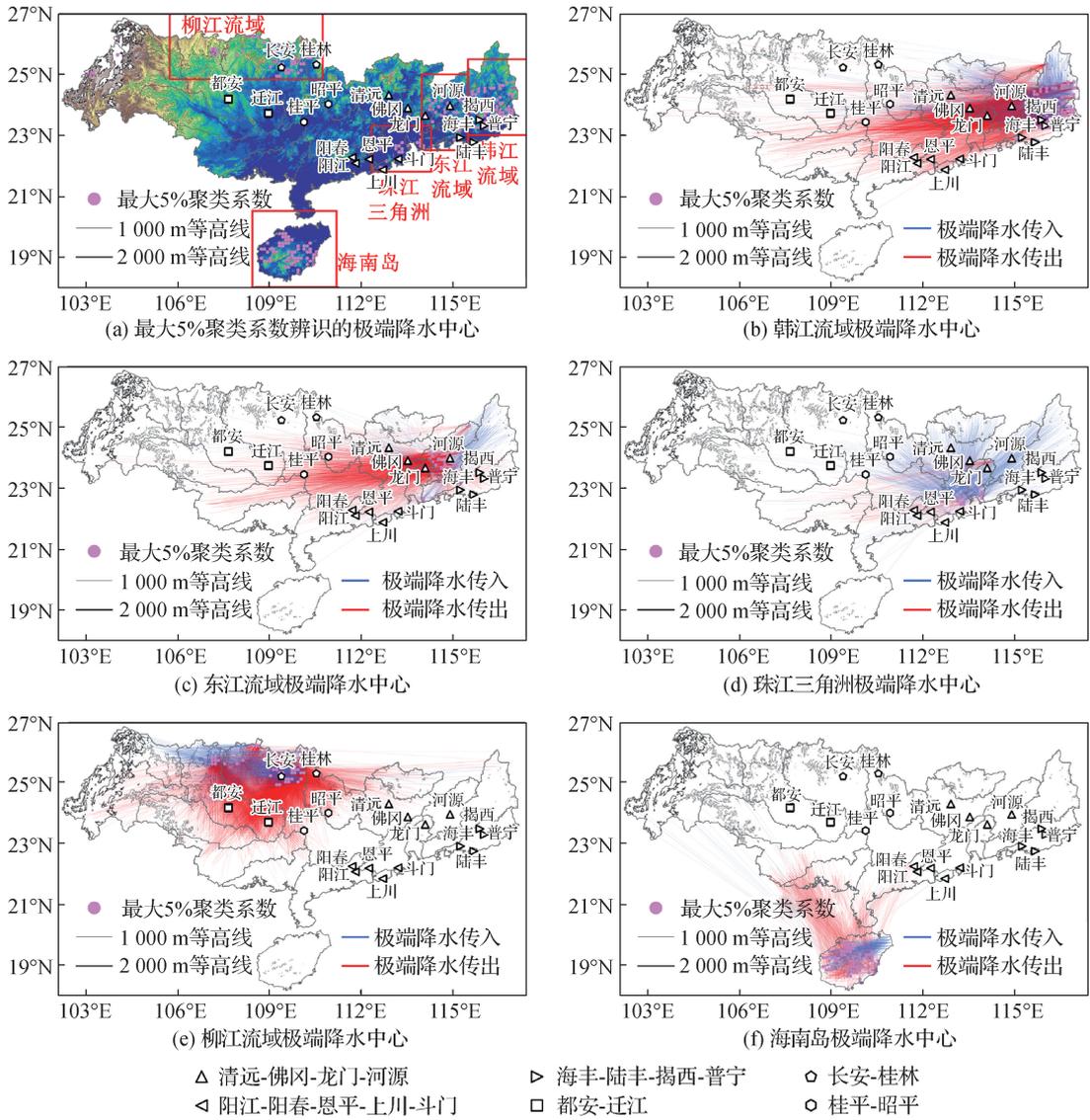


图4 珠江流域片五大高聚类系数极端降水中心及其空间特征

Fig. 4 Five extreme precipitation centers identified by high clustering coefficient and their spatial characteristics for the Pearl River basin

3.3 极端降水时间规律

极端降水对季节性的依赖^[32]表明在流域尺度上五大极端降水中心的空间特征存在季节性差异。为此, 将流域尺度上的最大5%聚类系数按旬进行季节性划分, 同时将传入的极端降水按其来源的季节性进行标记, 以阐释极端降水从珠江流域片传入五大中心的时间规律, 结果见图5。在5月下旬至6月上旬, 极端降水主要来自北江、东江、韩江、桂贺江和黔浔江, 主要传入珠江三角洲、东江流域、韩江流域中心, 此时传入极端降水的季节性总体领先, 当北江、东江、韩江、桂贺江和黔浔江发生极端降水时, 应注意极端降水中心范围内可能出现突发强降雨; 6月中旬至7月上旬, 极端降水主要来自珠江流域片北部高程1000 m以上的较高海拔复杂地区, 主要传入柳江流域中心, 此时传入极端降水的季节性总体滞后, 应注意柳江流域中心在其季节性之后仍可能面临突发的山洪暴雨; 7月中、下旬, 极端降水的传入基本集中在海南岛, 但仍需要注意发生在6月下旬南北盘江极端降水的远距离传入。

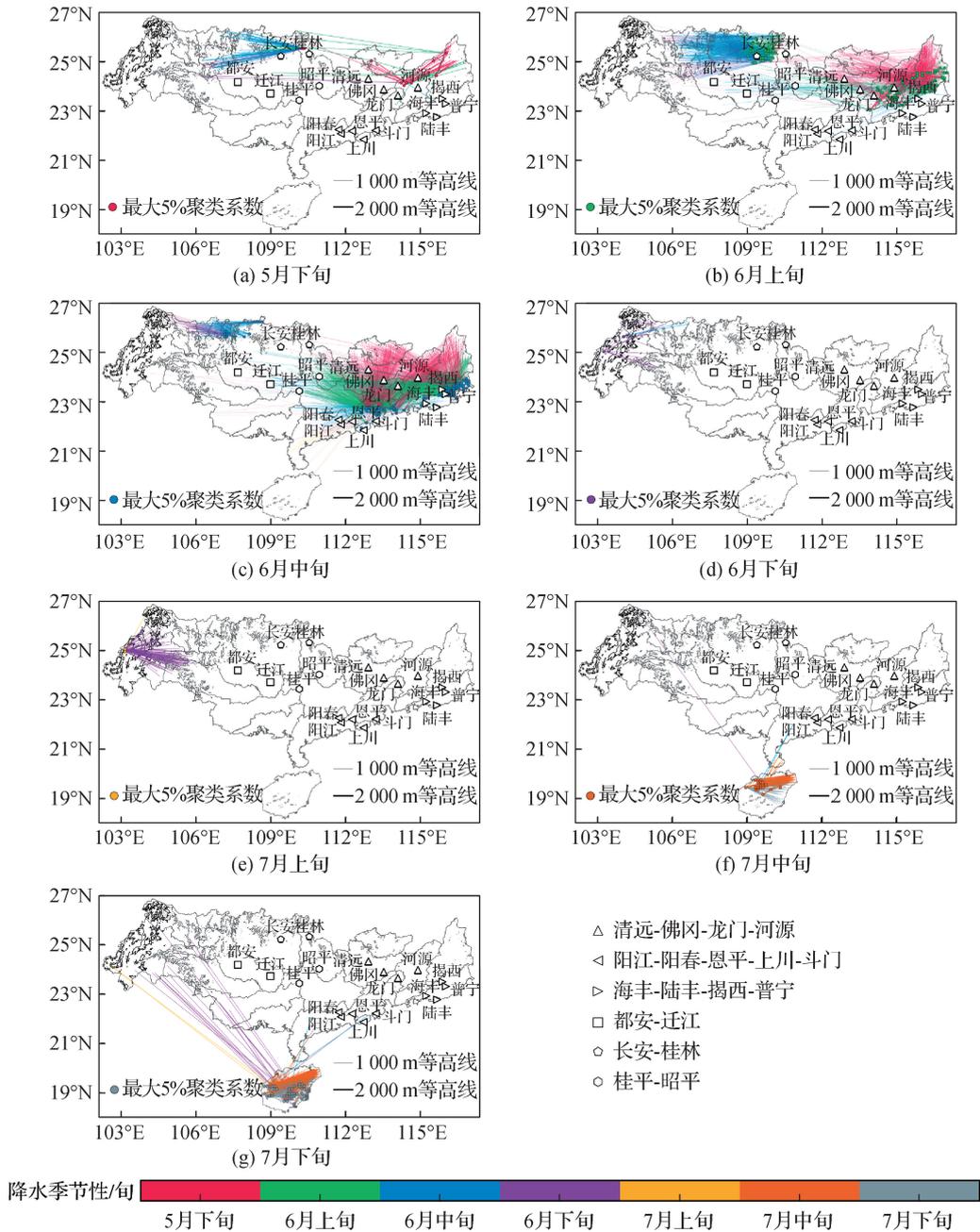


图5 极端降水从珠江流域片传入五大中心的时间规律

Fig. 5 Influx temporal regime of the extreme precipitation from the Pearl River basin to the five extreme precipitation centers

类似地，为阐释极端降水从五大中心传入珠江流域片的时间规律，在划分最大5%聚类系数季节性的基础上，将传出的极端降水按其来源的季节性进行标记，结果见图6。由五大中心传入至珠江流域片的极端降水绝大多数都集中在6月上旬至中旬，韩江流域中心、东江流域中心和柳江流域中心是主要的极端降水发散源，这一时期珠江三角洲北部、北江下游、黔浔江、桂贺江下游以及左江流域需要关注发生在东江流域和韩江流域中心的极端降水自远距离传入，同时桂贺江上游、柳江南部、红水河下游、右江中下游需要关注柳江流域中心发生的极端降水自近距离传入；进入后汛期，海南岛中心成为珠江流域片极端降水的主要发散源，传入的极端降水主要集中在7月下旬，影响粤西桂南诸河地区。此外，由海南岛中心传出的极端降水明显晚于粤西桂南诸河的季节性，预示在其极端降水集中发生时期之后仍然会有遭受暴雨洪水灾害的风险。

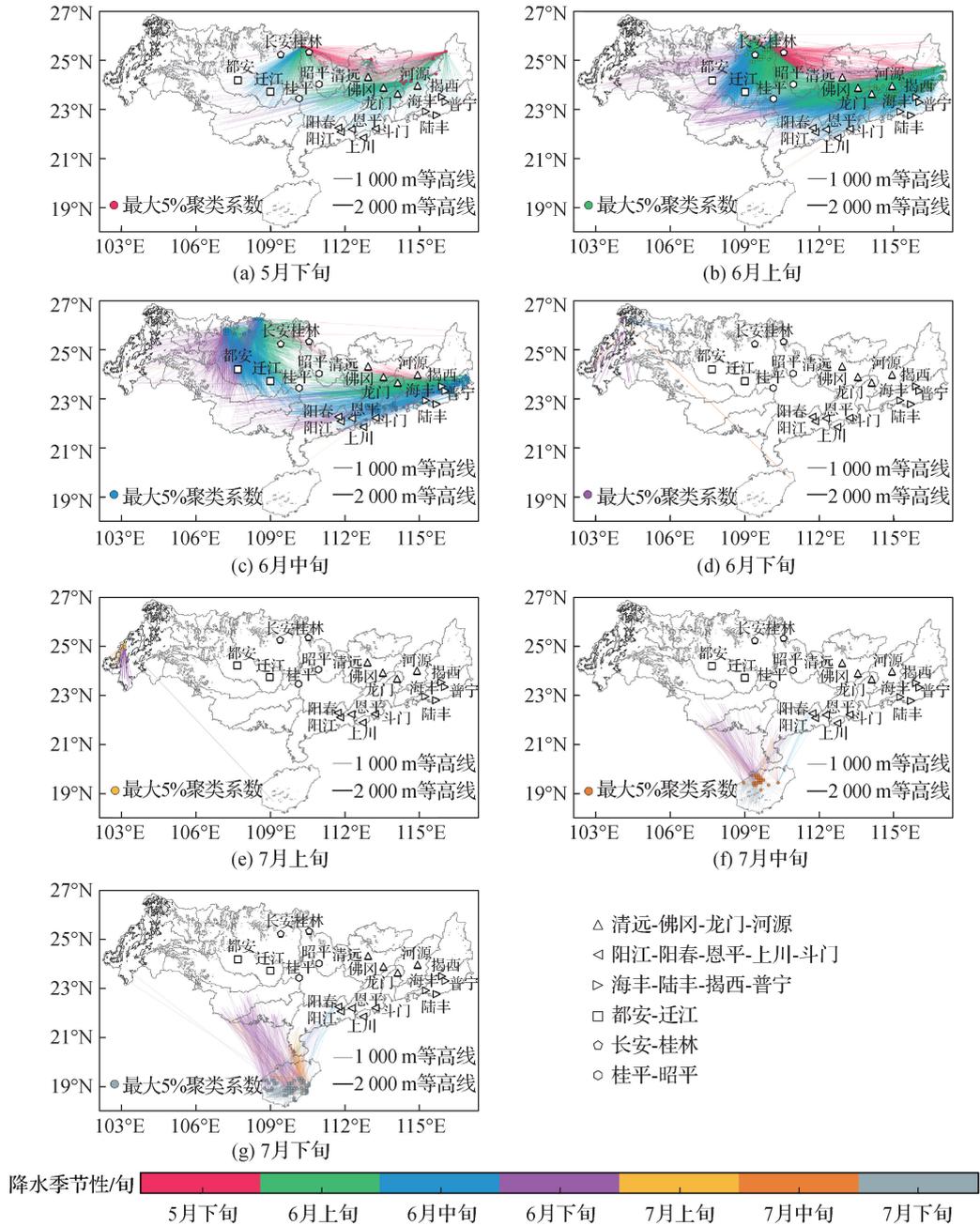


图6 极端降水从五大中心传出至珠江流域片的时间规律

Fig. 6 Efflux temporal regime of the extreme precipitation from the five extreme precipitation centers to the Pearl River basin

4 讨 论

极端降水复杂网络高聚类系数可辨识流域极端降水中心。本文以珠江流域片为例, 在最大5%聚类系数的标准下印证了与已知的海丰-陆丰-揭西-普宁、龙门-河源、上川-斗门长期稳定中心相匹配的韩江流域、东江流域、珠江三角洲中心, 验证了长安-桂林场次中心来自于稳定的柳江流域中心, 新发现了之前研究没有提及的海南岛中心, 相关信息总结于表1。应用这一框架和标准, 可以进一步探究不同流域辨识极端降水中心的高聚类系数阈值差异。另一方面, 都安-迁江和桂平-昭平场次中心主要是由开始于红水河上游、柳江上

游、桂贺江上游、黔浔江、北江中下游、东江中下游的强降水在短时间内随着锋面、槽、切变线、低涡或者热带气旋等天气系统移动至此停滞而形成, 发生时间也相对处于场次极端降水过程的中后期^[24,33]。这对应了图3中这2个场次中心所在位置呈现出度中心性高、散度极大但无法形成聚类的特征; 此外, 因天气系统的移动, 水汽沿传播路径逐渐减小^[34], 传递至这里的极端降水尽管频率高但总量小, 如图2(b)所示。

表1 极端降水复杂网络最大5%聚类系数辨识的珠江流域极端降水中心

Table 1 Extreme precipitation centers of the Pearl River basin identified by the strongest 5% clustering coefficient in the extreme precipitation complex network

文献中的 极端降水中心	辨识的极端 降水中心	极端降水空间特征与时间规律
上川-斗门 ^[30-31]	珠江三角洲	6月上中旬, 极端降水汇聚, 黔浔江、北江、东江、韩江传入
龙门-河源 ^[30-31]	东江流域	5月下旬至6月中旬, 极端降水收支平衡, 北江下游、韩江上游、东江上游传入, 远距离传出至北江下游、黔浔江、左江
海丰-陆丰-揭西-普宁 ^[30-31]	韩江流域	6月上中旬, 极端降水收支平衡, 韩江上游、北江上游、东江上游传入, 远距离传出至北江下游、黔浔江、左江
长安-桂林 ^[24]	柳江流域	6月上、中旬, 极端降水发散, 较高海拔复杂地区传入, 近距离传出至右江、红水河、柳江下游、桂贺江上游
—	海南岛	7月中、下旬, 极端降水收支平衡, 岛内传入, 近距离传出至左江、桂南粤西诸河

不同气候背景、成雨机制和地形特征影响流域极端降水中心的空间特征和时间规律。韩江流域、东江流域中心贴近东部海岸线, 其极端降水季节性集中在6月上、中旬, 此时西太平洋副热带高压往往控制中国南海一带并逐渐增强, 水汽通道向西扩展, 带动极端降水向西传播^[28,35]; 同时, 受制于两侧紧贴的青云-九连-罗浮山、云开大山等山脉, 东江流域和韩江流域极端降水的传播呈现出狭长远距离的特征, 直达黔浔江、左江汇聚地而难以向北扩散, 对应图3(b)和图3(c)。在6月上、中旬, 孟加拉湾水汽通道在西南季风影响下在陆地上向北远距离推进, 当遭遇北部较高海拔复杂地形时因抬升动力不足难以翻越, 在山脉迎风面形成地形雨并回流至柳江、红水河下游交界处, 故在柳江流域中心形成短距离传播的发散源^[28,35], 对应图4(e)。珠江三角洲平原是一个大尺度的喇叭口地形, 城市化水平极高^[14,30], 在地形加强的海陆热力差异、平原-山脉环流及城市热岛效应的共同影响下, 极端降水日变化和海风引起的对流不会向内陆传播太远^[18,34], 对应图4(d)。

面向极端降水的连接和传播, 从长期变化中找到流域尺度的极端降水发散源和汇聚地, 有助于突发致洪极端降水的提前预警。但是, 基于复杂网络的极端降水时空非线性演化也需要检验。本文的极端降水中心辨识提供了一个检验的参考, 由于不同的流域在空间尺度、下垫面特征、主要天气系统和降水季节性上存在差异, 还应针对性地结合不同流域的暴雨天气系统特征进一步检验。此外, 本文从复杂网络的视角为解析极端降水空间特征和时间规律提供了一个参考, 但复杂网络与物理机制背后的关联与解释仍需要进一步探讨, 例如, 需要结合天气系统的发生、发展和传播特征, 给出更详细的天气、气候动力的诊断与判定依据, 以得到物理意义更明确的结论。

5 结 论

本文采用长期逐日高分辨率卫星降水数据构建极端降水复杂网络, 在通过显著性检验的无向网络和有向网络中编码极端降水的连接和传播, 以珠江流域片为例, 通过辨识流域极端降水中心来检验所构建的复杂网络, 以此为基础分析流域极端降水的空间特征和时间规律。主要结论如下:

(1) 西江流域拥有最大的极端降水发散源和汇聚地, 但影响范围有限; 红水河、黔浔江、左江交界处度

发生的极端降水与珠江流域片超过50%的极端降水发生显著连接;韩江流域和东江上游的平均传播距离超过400 km。

(2)以最大5%聚类系数为标准辨识了五大极端降水中心,印证了与海丰-陆丰-揭西-普宁、龙门-河源、上川-斗门中心相匹配的韩江流域、东江流域、珠江三角洲中心,验证了长安-桂林场次中心稳定来自于柳江流域中心,新发现了对珠江流域片有传入影响的海南岛中心。

(3)极端降水的时间规律为:从珠江流域片传入至极端降水中心以5月下旬至6月上旬为主,主要传入至韩江流域、东江流域和珠江三角洲中心;从极端降水中心传出至珠江流域片以6月上旬至6月中旬为主,普遍传出至红水河、柳江、黔浔江及左江交界处。

参考文献:

- [1] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 1-9. (WANG Z F, QIAN Y F. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 1-9. (in Chinese))
- [2] UNDRR. Human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000—2019)[R]. Switzerland; UN Office for Disaster Risk Reduction, 2020: 1-29.
- [3] 江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 707-724. (JIANG J, ZHOU T J, ZHANG W X. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 707-724. (in Chinese))
- [4] LI X, ZHANG K, BAO H J, et al. Climatology and changes in hourly precipitation extremes over China during 1970—2018[J]. Science of the Total Environment, 2022, 839: 156297.
- [5] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 116-125. (SHU Z K, LI W X, ZHANG J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 116-125. (in Chinese))
- [6] 黄国如, 陈易偲, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 161-170. (HUANG G R, CHEN Y S, YAO Z J. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 161-170. (in Chinese))
- [7] GU X Z, YE L, XIN Q, et al. Extreme precipitation in china: a review on statistical methods and applications[J]. Advances in Water Resources, 2022, 163: 104144.
- [8] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲. 基于极值理论的北京市极端降水概率分布研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(6): 639-650. (SONG X M, ZHANG J Y, KONG F Z. Probability distribution of extreme precipitation in Beijing based on extreme value theory[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(6): 639-650. (in Chinese))
- [9] 高延康, 赵铜铁钢, 田雨, 等. 台风活动对中国沿海地区极端降水的影响[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 1-11. (GAO Y K, ZHAO T T G, TIAN Y, et al. Effects of typhoon activities on extreme precipitation in coastal areas of China[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 1-11. (in Chinese))
- [10] 吴雷, 许有鹏, 王强, 等. 长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 730-742. (WU L, XU Y P, WANG Q, et al. Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 730-742. (in Chinese))
- [11] 顾西辉, 张强, 陈晓宏, 等. 中国多尺度不同量级极端降水发生率非平稳性研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 505-515. (GU X H, ZHANG Q, CHEN X H, et al. The spatiotemporal rates of heavy precipitation occurrence at difference scales in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 505-515. (in Chinese))
- [12] WANG J, CHEN Y, NIE J, et al. On the role of anthropogenic warming and wetting in the July 2021 Henan record-shattering rainfall[J]. Science Bulletin, 2022, 67(20): 2055-2059.
- [13] LI W, JIANG Z H, ZHANG X B, et al. On the emergence of anthropogenic signal in extreme precipitation change over China [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(17): 9179-9185.
- [14] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 138-150. (HU Q F, ZHANG J Y, WANG Y T, et al. A review of urbanization impact on precipitation[J]. Advances in Water Science, 2018, 29

- (1): 138-150. (in Chinese))
- [15] 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 419-450. (LUO Y L, SUN J S, LI Y, et al. Science and forecast of rainstorm in China: research achievements in 40 years of reform and opening up[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 419-450. (in Chinese))
- [16] AGARWAL A, GUNTU R K, BANERJEE A, et al. A complex network approach to study the extreme precipitation patterns in a river basin[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2022, 32(1): 013113.
- [17] SIVAKUMAR B, WOLDEMESKEL F M. A network-based analysis of spatial rainfall connections[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69: 55-62.
- [18] MONDAL S, MISHRA A K, LEUNG L R. Spatiotemporal characteristics and propagation of summer extreme precipitation events over united states: a complex network analysis[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(15): e2020G-e88185G.
- [19] FAN J F, MENG J, LUDESCHER J, et al. Statistical physics approaches to the complex Earth system[J]. Physics Reports, 2021, 896: 1-84.
- [20] BOERS N, GOSWAMI B, RHEINWALT A, et al. Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections [J]. Nature, 2019, 566(7744): 373-377.
- [21] 何苏红, 龚志强, 叶芳, 等. 复杂网络方法在东亚地区夏季极端降水研究中的应用[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 894-902. (HE S H, GONG Z Q, YE F, et al. Application of complex network method to summer extreme rainfall in East Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(6): 894-902. (in Chinese))
- [22] SU Z, MEYERHENKE H, KURTHS J. The climatic interdependence of extreme-rainfall events around the globe[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2022, 32(4): 043126.
- [23] KREUZ T, GRASSBERGER P, QUIAN QUIROGA R. Event synchronization: a simple and fast method to measure synchronicity and time delay patterns[J]. Physical Review E, 2002, 66(4): 041904.
- [24] 姚章民, 杜勇, 张丽娜. 珠江流域暴雨天气系统与暴雨洪水特征分析[J]. 水文, 2015, 35(2): 85-89. (YAO Z M, DU Y, ZHANG L N. Analysis of storm weather system and flood characteristics in Pearl River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2): 85-89. (in Chinese))
- [25] 刘超, 聂锐华, 刘兴安, 等. 山区暴雨山洪水沙灾预警预报预警关键技术研究构想与成果展望[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 1-8. (LIU C, NIE R H, LIU X N, et al. Research on conception and achievement prospect of key technologies for forecast and early warning of flash flood and sediment disasters in mountain rainstorm[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 1-8. (in Chinese))
- [26] 杜懿, 王大洋, 张智, 等. GPM IMERG 降水产品在珠江流域的适用性分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 1-6. (DU Y, WANG D Y, ZHANG Z, et al. Applicability of GPM IMERG satellite precipitation product in Pearl River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 1-6. (in Chinese))
- [27] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156. (CHEN X H, ZHONG R D, WANG Z L, et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1147-1156. (in Chinese))
- [28] 汪卫平, 张祖强, 许遐祯, 等. 中国降水集中期之特征[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1052-1065. (WANG W P, ZHANG Z Q, XU X Z, et al. Characteristics of the precipitation concentration period in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(6): 1052-1065. (in Chinese))
- [29] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 86-150. (LIN L X, FENG Y R, HUANG Z, et al. Handbook of weather forecasting technology in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 86-150. (in Chinese))
- [30] 廖一帆, 林炳章, 丁辉. 广东省暴雨高风险区划[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 7-16. (LIAO Y F, LIN B Z, DING H. High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 7-16. (in Chinese))
- [31] 陈芳丽, 李明华, 姜帅, 等. 粤东暴雨中心的降水气候统计特征和成因分析[J]. 广东气象, 2019, 41(4): 6-10. (CHEN F L, LI M H, JIANG S, et al. On the statistical characteristics of precipitation climatology of heavy rain centers in Eastern Guangdong and analysis of its causation[J]. Guangdong Meteorology, 2019, 41(4): 6-10. (in Chinese))
- [32] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 744-

751. (CHEN H S, FAN S D, ZHANG X H. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years[J]. 2009, 32(6): 744-751. (in Chinese))
- [33] 何丽丽, 张润琦, 张戈, 等. 珠江流域暴雨洪水特性[J]. 水文, 1987(3): 45-50. (HE L L, ZHANG R Q, ZHANG G, et al. Characteristics of the heavy rain and flood in Pearl River basin[J]. Journal of China Hydrology, 1987(3): 45-50. (in Chinese))
- [34] SUN X Y, LUO Y L, GAO X Y, et al. On the localized extreme rainfall over the great bay area in South China with complex topography and strong UHI effects[J]. Monthly Weather Review, 2021, 149(8): 2777-2801.
- [35] 孙博, 王会军, 周波涛, 等. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 644-653. (SUN B, WANG H J, ZHOU B T, et al. A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 644-653. (in Chinese))

Analysis of the spatial characteristics and the temporal regime of extreme precipitation for the Pearl River basin: complex network perspective*

LI Xiaodong¹, ZHAO Tongtiegang¹, GUO Chengchao¹, TIAN Yu², YANG Fang^{1,3}, CHEN Wenlong^{1,3}

(1. Key Laboratory for Water Security in the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area (Preparatory), Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Analysis of the characteristics and evolution of extreme precipitation is of great importance for basin disaster prevention and mitigation. Based on the long-term daily high-resolution satellite precipitation data, the undirected and directed complex network are constructed with the techniques of statistical significance tests, encoding the connection and propagation of extreme precipitation respectively. Taking the Pearl River basin as an example, the aim of this study is to investigate the spatial characteristics and temporal regime of extreme precipitation. The results show that the Xijiang River basin has the largest extreme precipitation divergence and convergence sources; degree centrality higher than 0.5 are observed in the junction of Hongshui River, Qianxun River and Zuojiang River basins; in the meantime, the Hanjiang River and Dongjiang River basins exhibit mean propagation distance larger than 400 km; the strongest 5% of the clustering coefficient identify the five major basin extreme precipitation centers. In terms of the spatial characteristics, the existence of the Hanjiang River Center, Dongjiang River Center, and Pearl River Delta Centers are verified, the Chang'an-Guilin Event Center is originated from the Liujiang River Center, and the Hainan Island Center is discovered to be an extreme precipitation influx source of the Pearl River basin. In terms of the temporal regime, from late May to early June extreme precipitation mainly propagates from the whole Pearl River basin to the Hanjiang River Center, Dongjiang River Center and Pearl River Delta Center, while from early to mid-June extreme precipitation mainly propagates from Hanjiang River Center, Dongjiang River Center, Pearl River Delta Center and Liujiang River Center to the junction of Hongshui River, Liujiang River, Qianxun River and Zuojiang River basins.

Key words: complex network; extreme precipitation; connection and propagation; spatial characteristics; temporal regime

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3001000) and the Guangdong Provincial Department of Science and Technology, China (No. 2019ZT08G090).