

中南半岛和华南地区极端降水时空特征

成泽伦^{1,2}, 谢作威^{*2}, 布和朝鲁², 巩远发¹, 简俊³, 赖晟⁴

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 大连海事大学, 大连 116026

4 广西壮族自治区气象局气候中心, 南宁 530022

摘要 全球变暖使得极端降水事件的强度和频率均呈上升趋势, 位于亚洲季风区的中南半岛和华南地区更易受到极端降水影响而发生洪涝灾害。本文利用逐日降水资料对 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季(5~10 月)的极端降水事件进行客观分类, 并对每一类极端降水事件的大尺度流型特征及年际、年代际和长期趋势特征进行了分析。结果表明:(1)根据降水中心位置, 中南半岛和华南地区的极端降水可客观分为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和海南南部—越南北部类, 它们所联系的大尺度流型以中高纬波列和热带偶极子环流为主。其中, 华南类的大尺度流型在对流层高层为类似于东亚—太平洋(East Asia-Pacific, 简称 EAP)遥相关型的“+ - +”经向型波列, 但中心位置较典型 EAP 型偏西南, 中东部的负异常环流为关键系统, 低层为位于低纬度地区的“+ -”经向型波列。中南半岛类大尺度流型为热带偶极子异常环流, 对流层低层较高层更为显著宽广。其余两类极端降水大尺度流型特征为在对流层高层受 Rossby 波列影响, 低层主要为偏弱的热带偶极子异常环流。(2)中南半岛和华南地区极端降水的频次呈显著上升的趋势, 主要来自于华南类和中南半岛类极端降水的贡献。其中, “+ - +”经向型波列的频发是造成华南类极端降水增多的原因。(3)中南半岛与华南地区极端降水的空间分布具有反对称特征。

关键词 中南半岛; 华南; 极端降水; 大尺度流型; 东亚—太平洋遥相关型

文章编号 2021120C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2021-07-10; **网络预出版日期**

作者简介 成泽伦, 男, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端降水事件研究。E-mail: chengzelun@126.com

通讯作者 谢作威, E-mail: xiezuowei@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41861144014、41630424、41875078, 国家重点研发项目 2016YFA0601501

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41861144014, 41630424, 41875078), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601501)

Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in the Indochina Peninsula and South China

CHENG Zelun^{1,2}, XIE Zuowei², GONG Yuanfa¹, JIAN Jun³, LAI Sheng⁴

1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Dalian Maritime University, Dalian 116026

4 Climate Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022

Abstract Global warming has increased the intensity and frequency of extreme precipitation events. The Indochina Peninsula and South China (INCSC) are located in the monsoon region and thus are vulnerable to extreme precipitation with flood disaster. Using daily precipitation data, this study objectively classified the extreme precipitation events in the INCSC region during the wet season (May to October) over 1951–2015. The circulation features, interannual, interdecadal and long-term trend characteristics of each extreme precipitation cluster were analyzed. The results suggest that (1) According to the location of precipitation center, the extreme precipitation in the INCSC region can be objectively grouped into South China, Indochina Peninsula, Burma–Yunnan, and Southern South China–Northern Vietnam clusters. Their associated large-scale meteorological patterns (LMP) are mainly characterized by mid-high latitude wave trains and tropical dipole circulation. The LMP of the South China cluster features a "+ – +" meridional wave train in the upper troposphere, which bears some resemblance with the East-Asia Pacific (EAP) teleconnection pattern. However, the centers of LMP lie southwestward to the EAP counterparts. The negative anomaly circulation in central East China is the key system. In the lower troposphere, LMP features a "+ –" meridional wave train located at low latitudes. The LMP of the Indochina Peninsula cluster is associated with a dipole anomaly circulation of enhanced monsoon trough and Mascarene high pressure, which is broader in the lower troposphere than the upper troposphere. The LMPs of the other two clusters of extreme precipitation have a combination of Rossby wave train in the upper troposphere and the moderate tropical dipole in the lower troposphere. (2) The occurrence of extreme precipitation days in the INCSC region exhibits a significant upward trend, which is

contributed by the South China and Indochina Peninsula clusters. The occurrence frequency of meridional wave-train LMP increased the extreme precipitation days in the South China cluster. (3) The extreme precipitation of Indochina Peninsula and South China clusters are antisymmetric with each other.

Key Words Indochina Peninsula, South China, Extreme precipitation, Large-scale meteorological pattern, East Asia-Pacific teleconnection pattern

1 引言

在全球气候变暖的背景下, 极端降水事件的频率和强度呈显著上升的趋势 (Alexander et al., 2006; Goswami et al., 2006; IPCC, 2014)。极端降水事件通常会导致强风、闪电和严重的洪涝并引发其它的次生灾害, 对人类生命安全、财产经济、生态环境带来严重的危害 (Jones et al., 2004)。例如, 2011 年夏季, 受台风和强季风的影响, 泰国地区连降暴雨, 遭受长达 4 个多月的洪灾, 800 多人死亡, 1360 多万人受灾, 造成 46 亿左右美元经济损失 (Promchote et al., 2016)。中南半岛和华南地区地处亚洲季风区, 受南亚、东亚、澳大利亚季风的共同影响, 水汽条件充沛, 更易受到气候变化的影响导致极端降水频发 (Ge et al., 2017)。同时, 大量降水所释放的凝结潜热是驱动大气环流的一个重要能量来源, 并对周边的天气气候产生影响 (He et al., 2016)。因此, 研究中南半岛和华南地区在全球气候变暖背景下极端降水的时空特征具有重要的科学意义和应用价值。

中南半岛和华南地区降水和极端降水的气候特征和形成机制已成为气象工作者研究的热点问题之一 (陈锐丹等, 2012; 孙靖超等, 2019)。研究表明, 中南半岛和华南地区的降水具有明显年代际特征, 其中华南地区的降水量在 20 世纪 70 年代末至 80 年代有显著减少的趋势, 而在 90 年代初发生转折, 转折后华南地区降水量明显增加 (黄荣辉等, 1999; Ding et al., 2008)。在中南半岛地区, Endo et al. (2009) 发现越南南部、缅甸北部的降水量在 20 世纪 50 年代至 21 世纪呈显著增加趋势。中南半岛和华南地区降水的空间分布在季节内和年际尺度上都表现出了不同特征。在季节内时间尺度, 华南前汛期降水主要集中在广东、广西北部内陆和福建内陆地区, 而后汛期降水偏多地区为海南及两广沿海 (张婷, 2008)。在年际尺度, 华南地区年降水量最多的地区位于广东省中部滨海地区, 广西中南部滨海地区和海南省东南部也为年降水量高值区 (卢晓雄, 2020)。对于中南半岛地区, 吕翔 (2007) 发现其夏季降水量大值区分布在西侧沿海地区和长山山脉西侧迎风坡。Yang and Wu (2019) 指出中南半岛年降水总量的大值区主要集中在西海岸和东部的山区附近。

中南半岛和华南地区降水的变化是通过大气环流的直接作用导致的, 因此需要深入探讨大尺度大气环流在降水变化过程中作用。大尺度大气环流型是介于天

气扰动至行星尺度之间的环流,是衔接局地天气和气候系统的重要环流(Grotjhan et al., 2016)。研究表明,西太平洋副热带高压、南亚高压、欧亚中高纬阻塞和切断、东亚副热带西风急流等都是影响华南地区降水的环流系统(Tao and Chen, 1987)。夏季南亚高压和对流层中低层西太平洋副热带高压能够协同影响华南地区降水,即南亚高压偏西和西太平洋副热带高压异常偏东时,华南地区低层辐合高层辐散,上升运动增强,降水偏多(谭晶等, 2005)。孟加拉湾槽是冬季华南降水的直接影响系统,其形成和发展的能量来源于沿着非洲和亚洲副热带急流的Rossby波能量频散(Zong et al., 2012)。中高纬东亚大槽加深时,有利于冷空气向南发展,与此同时,低纬度的南支槽加强,将大量暖湿空气向北输送,与冷空气在华南地区交汇,有利于华南前汛期降水偏多(张玉琴和李栋梁, 2019)。对于中南半岛地区,Chen and Yoon (2000)发现,夏季季风降水的年际变率受西太平洋季风槽中西传的天气扰动影响。Zhang et al. (2002)指出,苏门答腊岛地区的强对流向北扩展和加强是中南半岛夏季季风降水爆发的原因。

上述研究均是针对中南半岛和华南地区的降水,那么对于该地区的极端降水,其时间变化、空间分布和所联系的大尺度环流型又有什么样的特征?针对这些问题,国内外也有不少学者对此进行研究。研究表明,自20世纪90年代初以来,华南地区极端降水强度和频率呈显著的年代际上升趋势,且极端降水频次的年代际上升趋势主要来自夏季极端降水的贡献(Ning and Qian, 2009; 李丽平等, 2010)。Limsakul and Singhruck (2016)发现泰国1955~2014年极端降水事件的发生越来越频繁,并且在拉尼娜年和太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, 简称PDO)冷位相,泰国极端降水事件的发生频次更多、强度更强。中南半岛和华南地区极端降水的空间分布也具有多样性,华南地区极端降水主要分布存在广西北部、广西东南部、广东中部和沿海地区和海南(陈杨瑞雪, 2018; 韦志刚等, 2021)。中南半岛极端降水强度的大值区主要位于缅甸北部西海岸、越南北部东海岸和泰国南部东海岸,而频次的大值中心在缅甸北部海岸附近(Yazid and Humphries, 2015)。对于中南半岛和华南地区极端降水的大尺度环流型,研究表明,西太平洋副热带高压、南海季风以及热带海洋的低空越赤道气流等系统对华南地区极端降水具有重要影响(李秀珍等, 2010; 王东海等, 2011; 方浩和乔云亭, 2019)。而东北冷涡等中高纬天气系统对于华南前汛期期间极端降水也具有指示意义(苗春生

等, 2006; 胡娅敏等, 2014)。对于中南半岛地区, 地表温度的升高和对流活动的加剧加深了季风槽, 从而有利于印度洋低空急流加强, 使得更多的水汽输送至中南半岛。同时, 加深的季风槽可以在孟加拉湾—中国南海引发更多的热带气旋活动 (Faikura et al., 2020)。热带气旋或台风也是影响中南半岛极端降水的重要天气系统, 有研究表明中南半岛第一个雨季 (5~6 月) 的极端降水主要受西南季风加强的影响, 第二个雨季 (8~9 月) 的极端降水主要来自于台风 (Takahashi and Yasunari, 2006)。

目前对于中南半岛和华南地区的极端降水的研究多为局地性, 主要关注不同天气系统的影响, 对于该地区极端降水的主要空间类型及其大尺度环流型尚不明确。针对中南半岛和华南地区的极端降水, 本文主要回答以下三个问题: (1) 该地区极端降水有哪些空间类型? 相应的大尺度流型是什么? (2) 该地区极端降水有什么样的年际、年代际和长期趋势特征? (3) 中南半岛和华南两个主要地区的极端降水是否存在联系? 围绕上述三个问题, 本文使用一套长时间高分辨率的格点降水资料, 界定出中南半岛和华南地区极端降水事件, 并对极端降水事件进行客观分类, 分析不同类型极端降水事件的时空特征及其相联系的大尺度大气环流型。本文的剩余部分组织如下: 第 2 节描述了数据和研究方法。第 3 节报告研究结果。第 4 节进行讨论, 第 5 节对结果进行总结。

2 资料和方法

2.1 研究区域

在本研究中定义的中南半岛和华南地区包括中南半岛的六个国家 (缅甸、泰国、老挝、越南、柬埔寨、马来西亚) 和我国华南地区八个省份 (云南、贵州、湖南、江西、福建、广西、广东、海南)。中南半岛和华南地区地形十分复杂 (图 1a), 地势北高南低, 多山脉和高原, 其西北毗邻地球第三极—青藏高原, 周边海洋为全球最大的暖池, 是全球海—陆—气相互作用最为复杂的地区之一, 雨量充沛, 极端降水频发。

2.2 资料

本文使用的降水资料为日本气象厅气象研究所和日本综合地球环境研究所共同研究建立的亚洲逐日高分辨率网格化降水资料 APHRODITE (Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources)。APHRODITE 通过整编亚洲各国和地区的雨量站的观测资料,之后采用基于降水分布的 Spheremap 方案将观测资料插值到格点而建立(Yatagai et al., 2012)。该资料也是目前唯一一套覆盖整个亚洲地区的高分辨率长时间(从 1951 年开始)陆地降水资料,其共有四个子数据集,分别为中东(ME)、俄罗斯(RU)、季风区(MA)和日本(JP)。考虑研究范围,本文选取了描述季风区的 APHRO_MA_V1101 子数据集,空间范围为(15°~55°N, 60°E~150°E),分辨率为 0.5°×0.5°。研究表明,中南半岛和华南地区 5~10 月为湿季,受夏季风影响,降水丰富;而 11~4 月为干季,受冬季风影响,降水较少(Zhang et al., 2002; Yang and Wu, 2019)。因此,我们选取资料时段为 1951~2015 年每年降水量较多的湿季(5~10 月)。图 1b 给出了中南半岛和华南地区 APHRODITE 资料网格点分布情况,共包含 1232 个网格点。

除此之外,还使用了同期欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代大气再分析全球气候数据(ERA5; Hersbach et al., 2020),时间分辨率为 1 小时,空间分辨率为 1°×1°,要素场包括 300 hPa、500 hPa 和 850 hPa 水平风场(u 和 v)和位势场(z),以及整层水汽含量和整层水汽通量场。以上各要素场的日平均场为每日 24 时次资料平均结果,流函数场由水平 u 和 v 风计算得来。

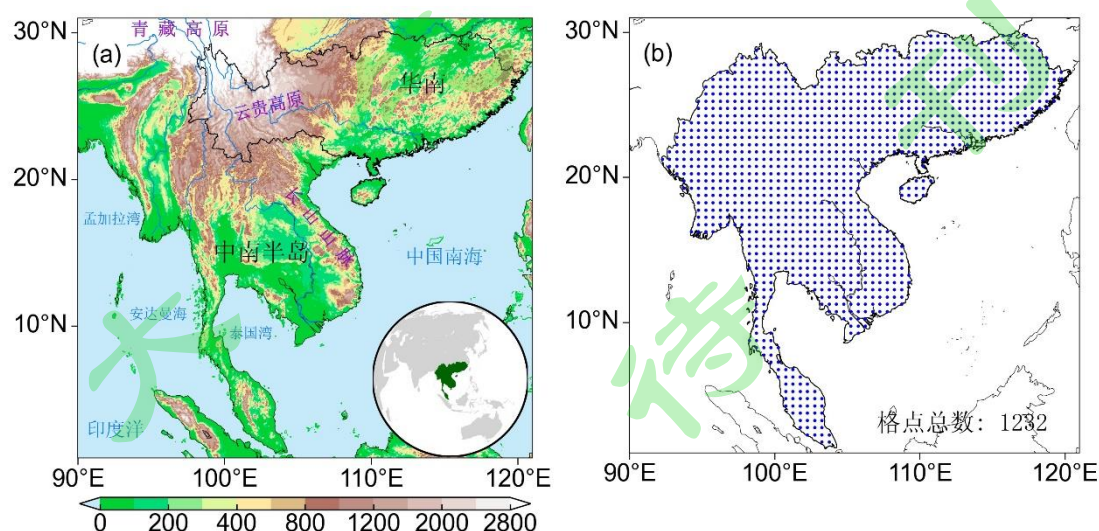


图 1 (a) 中南半岛和华南地区的研究区域和地形特征, 填色代表海拔高度 (单位: m) 和 (b) APHRODITE 资料网格点的分布

Figure 1 (a) Analysis domain and topographic features in the Indochina Peninsula and South China (INCSC) region, in which colored shading indicates the altitude (unit: m), and (b) the distribution of APHRODITE grid points

2.3 方法

2.3.1 极端降水的定义

由于降水空间分布的不均匀性, 本文采用百分位法来定义极端降水 (翟盘茂和潘晓华, 2003), 当某网格点某日降水量超过该网格湿日 ($\geq 1 \text{ mm d}^{-1}$) 降水量升序排列的第 95 百分位数, 则称该网格点该日发生了极端降水。相比于固定的极端降水阈值, 例如大雨为 20 mm d^{-1} 、暴雨为 50 mm d^{-1} , 使用基于百分位的数值来定义每个网格点的极端降水阈值可以消除地域、气候和季节因素的影响, 使定义的事件更具有可比性 (王冀等, 2008)。本文计算极端降水阈值的具体步骤如下:

(1) 首先, 在某格点日降水序列中, 取出所有湿日 (降水量 $\geq 1.0 \text{ mm d}^{-1}$) 构成新的子序列。将新的子序列按升序排序, 得到升序序列 X 。

(2) 其次, 利用 Hyndman and Fan (1996) 推荐的百分位数计算模型求出升序序列 X 的 95% 分位数作为该格点的极端降水阈值, 计算模型如下:

$$X_q = X_{Ni1} + r(X_{Ni2} - X_{Ni1})$$

其中:

$$\begin{aligned} Ni1 &= \text{int} \left(q \times \left[n + \frac{1}{3} \right] + \frac{1}{3} \right) \\ r &= q \times (n + 1) - \text{int}(q \times (n + 1)) \\ Ni2 &= Ni1 + 1 \end{aligned}$$

对于排序序列 X 的第 p 个百分位数, $q = p/100$ 。 n 为序列 X 的长度, 即每个网格点降水量为 1.0 mm d^{-1} 及以上的总天数。

另外, 如上所述, 中南半岛和华南地区地形十分复杂, 特别是北部地区, 以横断山脉为主。为了进一步去除地形的局地影响和确定具有大范围区域影响的极端降水事件, 我们将中南半岛和华南地区至少有 5% 的格点在某日发生极端降水称为该地区该日发生极端降水事件 (Zhao et al., 2017)。同时, 我们还做了当该参

数分别为 3%和 7%时对后文分类结果的影响,发现基于这两个阈值的极端降水空间分布型与 5%阈值的结果相似(图略),特别是 7%。通过 5%和 7%阈值的结果对比,我们认为 5%阈值所得出主要的极端降水型及其环流特征等结果已比较具有代表性。

2.3.2 极端降水的客观分类

为探寻中南半岛和华南地区极端降水事件的主要空间类型,我们利用自组织映射神经网络(Self-organizing maps,简称 SOM; Kohonen, 2001)对该地区极端降水进行客观分类。SOM 作为一种基于竞争学习的无监督神经网络模型,于 1981 年由芬兰赫尔辛基大学教授 Teuvo Kohonen 提出,现已在天气和气候分型中得到了广泛的研究和应用(Gao et al., 2019)。SOM 模拟人脑中处于不同区域的神经细胞分工不同的特点,根据原始大型高维气象数据集的拓扑关系,在非监督的条件下进行反复自我学习,得到相应的优势模态,并在有序的低维数组上可视化这些优势模态。为了刻画极端降水的类型,首先,我们将研究时段内中南半岛和华南地区 1232 个格点在极端降水日的降水量转换为其在整个降水时间序列中的百分位,每个极端降水日的百分位场作为 1 个向量场;然后,把所有极端降水日的向量场输入 SOM 并指定分类数(N),进行 50000 次训练,每次训练都对所有最优神经元(BMU)调整权重,最后输出这些最优神经元。

在 SOM 分类过程中,指定分类数目(N)越多,每个分类成员间的差异就越小,类间距离(D)也越小。然而在实践中,为了使分类结果具有实际意义,分类数目 N 不宜太多,应当足够少以确保类与类之间具有显著差异。因此,我们通过以下步骤来确定最优的分类类数(Lee et al., 2017):①不断重复 SOM 分类数以获得 $2 \leq N \leq 20$ 的所有分类结果;②对于第 i 类,令类内各成员与相应 SOM 型之间的平均空间相关系数为 $cor(i)$,则第 N 类整体平均的空间相关系数(R)可表示为:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N cor(i)$$

分类数目(N)越多整体平均的空间相关系数(R)越大,反之则 R 相应减小。因此,确定最优类数要求 R 应尽量大,以保证所有类的类内成员之间具有一定相似性;同时,为保证所有类彼此之间具有显著差异,整体平均的类间距离(D)

也应尽量大， D 可根据每对类之间的华氏距离（ d ）计算（Ward, 1963）：

$$D = \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} d_n(r, s)$$

$$d(r, s) = \sqrt{\frac{2n_r n_s}{n_r + n_s}} \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|_2$$

其中， $d(r, s)$ 为第 r 类与第 s 类间的华氏距离； n_r 和 n_s 分别为第 r 类和第 s 类的成员数量， $\bar{x}_r$ 和 $\bar{x}_s$ 分别为第 r 类和第 s 类的类中心。 N_p 为 N 类中的对偶数量。在之后的3.2节将举例说明确定最优类数的具体细节。

2.3.3 Rossby 波作用通量

本文采用 Takaya and Nakamura（2001）定义的 Rossby 波作用通量来描述 Rossby 波能量的传播特征，它能够很好地描述纬向非均匀气流中的 Rossby 波能量的传播。在水平方向，计算波作用通量的公式为：

$$\vec{W}_h = \frac{p \cos \varphi}{2|\vec{U}_c|} \begin{pmatrix} \frac{U_c}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V_c}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ \frac{U_c}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V_c}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \end{pmatrix}$$

其中 $\vec{U}_c = (U_c, V_c)$ 为 1951~2015 年气候平均风场， ψ' 为针对于气候平均的扰动流函数， φ 、 λ 分别表示纬度和经度， a 代表地球半径， p 为气压除以 1000 hPa。

3 结果

3.1 极端降水分布特征

图 2 为 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季（5~10 月）气候平均总降水量、极端降水阈值和频次的空间分布图。在湿季（图 2a），总降水量的大值中心主要位于孟加拉湾、南海的海岸边和缅甸西北部，中心强度可达 2400 mm 以上。中南半岛和华南地区极端降水阈值的空间分布（图 2b）总体上与气候平均总降水量的分布较为相似，特别是在中南半岛地区，而在华南地区阈值普遍较大。阈值的最大值带分别位于东南丘陵、长山山脉、若开山脉及横断山脉，达到 40 mm d^{-1} 以上。中南半岛和华南地区极端降水频次的空间分布与阈值的分布有反对称

特征（图 2c），即中南半岛发生极端降水的频次较华南地区明显偏多，华南地区发生极端降水的频次较少。在中南半岛有两个主要的频次最大值区，分别位于西北部的山区和泰国至缅甸的西海岸。造成极端阈值和频次反对称分布的原因可能是中南半岛地区降雨日较多但强度不大，因而阈值较小而极端降水频次较多，华南地区则相反。与 Yazid and Humphries（2015）的研究结果相比，我们发现，中南半岛极端降水频次的大值区均在缅甸北部山区一带，而不是海岸，出现这种差异的原因可能是界定极端降水事件的方法以及研究时段略有差别。

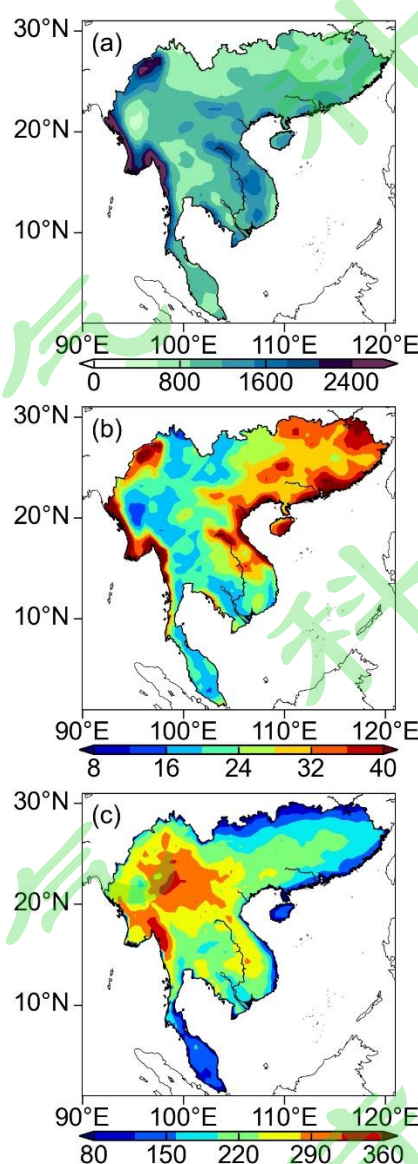


图 2 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季 (a) 气候平均降水总量 (单位: mm), (b) 极端降水阈值 (单位: mm d^{-1}) 和 (c) 极端降水频次 (单位: d) 的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of (a) climatological mean precipitation (unit: mm), (b) extreme

precipitation threshold values (unit: mm d^{-1}) and (c) extreme precipitation frequencies (unit: d) in the INCSC region during the wet season over 1951 to 2015

在研究时段内,中南半岛和华南地区共发生 1428 个极端降水事件,共为 2775 天,平均持续天数为 1.94 天。大多数极端降水事件的持续天数为 1~3 天(图 3),约占总事件数的 88.5% (1265 个),其中以持续 1 天的极端降水事件数为最多,达到了 760 个。随着持续天数的增加,极端降水的事件数急剧减少,持续大于 5 天的极端降水事件仅有 42 个,约占总事件数的 3%。极端降水事件的最长续天数为 12 天。

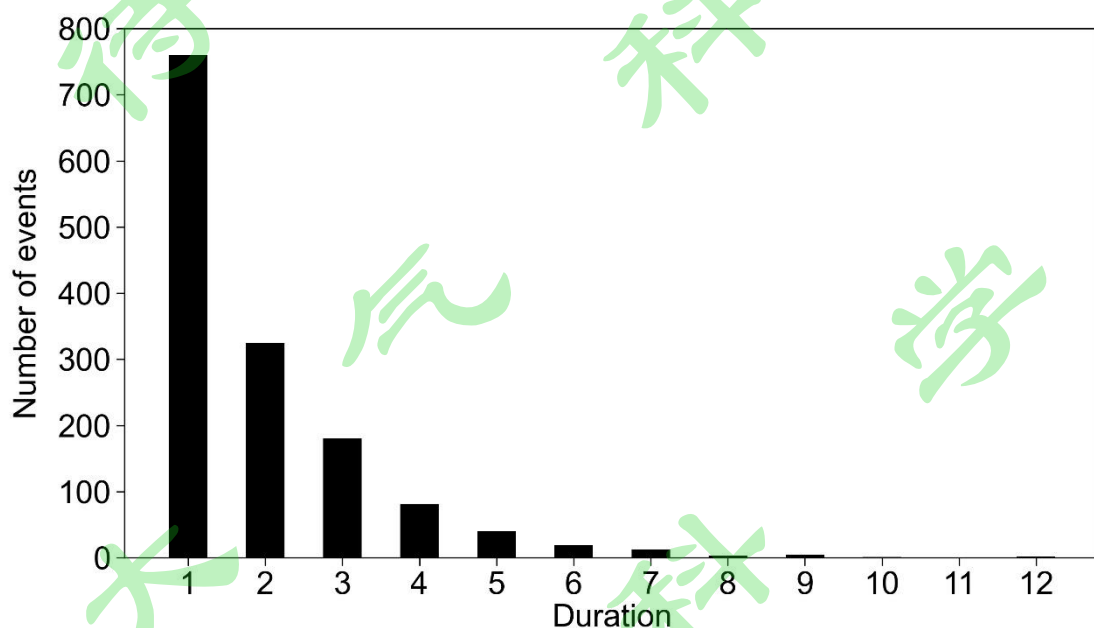


图 3 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季极端降水持续时间及其相应的极端降水事件数。横轴为持续时间,纵轴为事件数

Figure 3 Distribution of occurrence number of extreme precipitation as a function of event duration in the INCSC region during the wet season over 1951 to 2015. Horizontal axis indicates the duration, while vertical axis indicates the number of events

3.2 极端降水的典型类型

根据第 2.3.2 节中所述的确定最优类数的方法,我们将 2775 个降水百分位向量场 (1232 个格点) 输入到 $1 \times N$ 网格图的输出层中,通过重复 SOM 分类过程获得类数 (N) 为 2 至 20 的所有分类结果,并计算整体平均的类内相关系数 (R) 和类间距离 (D)。由图 4 可知,随着类数 N 的增加,整体平均的空间相关系数 R 逐渐增大,而类间距离 D 逐渐减小。值得注意的是,随着 N 不断增加到较大

值时， R 和 D 的变化趋于稳定，即当分类数目越多时，类与类之间差异可忽略。可以观察到，当 N 由2增加到4类的这一阶段， R 的增加幅度较大，然而当 N 大于4时， R 的增加幅度相对稳定， D 也存在类似的变化。这表明，4类之间空间差异较大，但继续合并后类间差异较小，因此，中南半岛和华南地区极端降水分为四类较为合理。

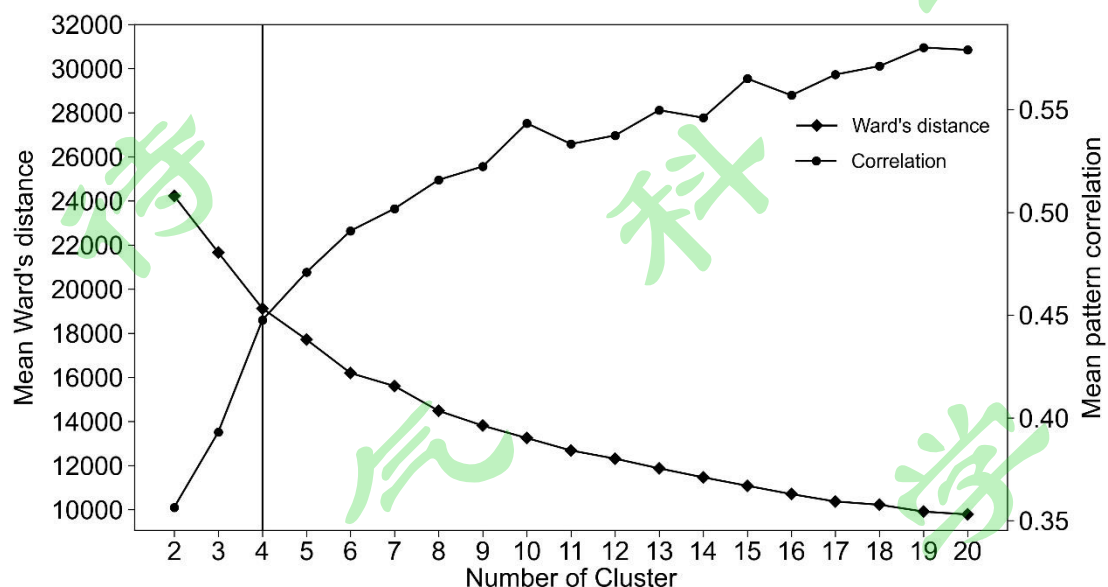


图4 整体平均的类内每个向量与相应的类中心的空间相关系数（ R ）及整体平均的不同类中心之间的华氏距离（ D ）。右纵轴、左纵轴和横轴分别为相关系数、华氏距离和分类数目

Figure 4 Mean correlation coefficient (R) between each vector of clusters and the corresponding cluster centroid, and the mean Ward's distance (D) between each pair of cluster centroids. Right vertical, left vertical and horizontal axes indicate the correlation coefficient, left the Ward's distance, and the number of clusters, respectively

图5给出了中南半岛和华南地区四类极端降水的空间分布及相应的天数。因为SOM的四个神经元具有空间结构的连续性特征，所以我们按照神经元的顺序给出合成结果。可以看出，四类极端降水的空间分布具有明显的差异性，大致分布于中南半岛和华南地区的东北部、南部、西北部和中部。第一类极端降水高百分位主要分布于华南地区（图5a），共625天，占极端降水总天数的22.5%。第二类极端降水的空间分布与第一类表现出反对称的特征（图5b），主要分布于中南半岛地区，共543天，占极端降水总天数的19.6%。第三类最为频繁（图5c），共1187天，占总极端降水天数的42.8%，高百分位区落在了缅甸和云南一带，与极端降水主要频发地区（图2c）分布较为相似。第四类包含的极端降水天数最

少，为 420 天，占总极端降水天数的 15.1%，高百分位区落在了华南南部至中南半岛中部地区（图 5d）。

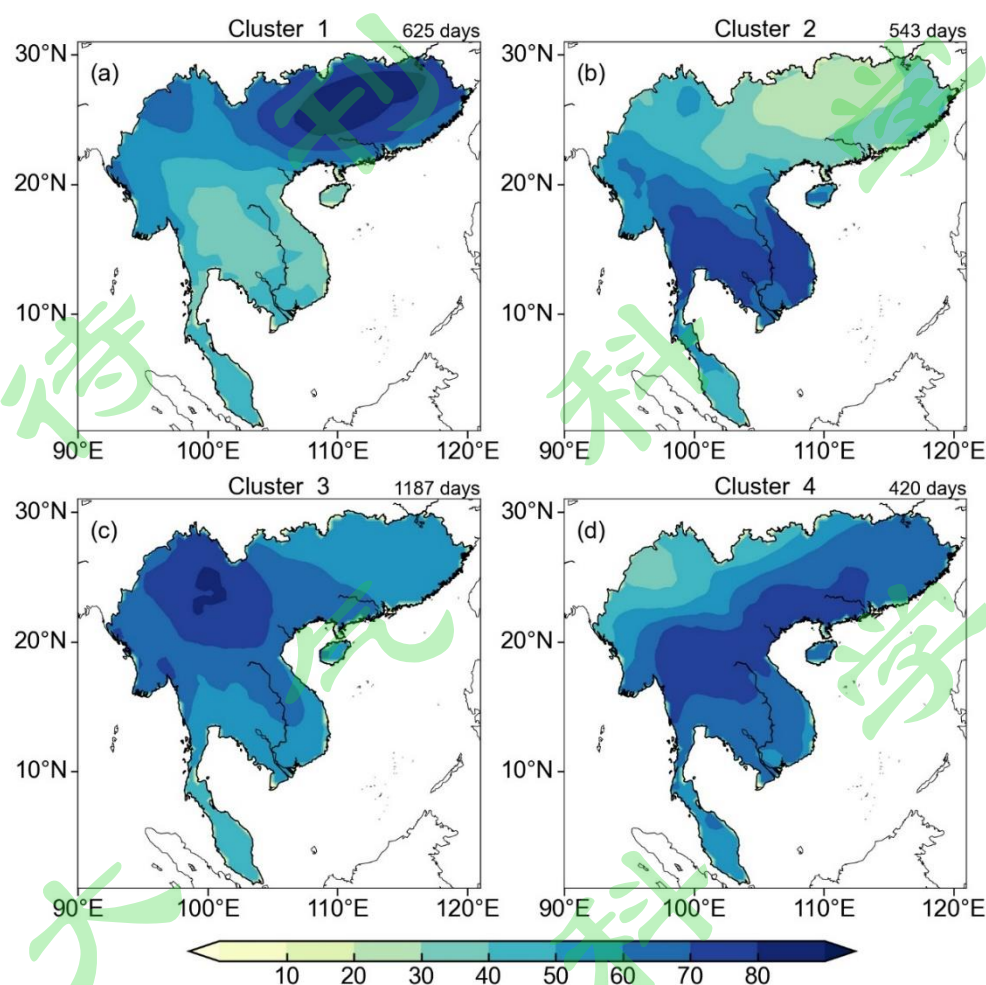


图 5 中南半岛和华南地区四类极端降水的降水百分位合成场（单位：百分位）。（a-d）分别为第一至第四类，右小标题表示每类极端降水的天数

Figure 5 Composite precipitation percentile for the four clusters of extreme precipitation in the INCSC region (unit: percentile). (a-d) are clusters 1 to 4, and right subtitle indicates the days for each cluster of extreme precipitation

上述结果表明中南半岛和华南地区四类极端降水百分位合成场的空间分布具有很大的差异性，为探寻具体降水量的空间分布是否存在类似特征，图 6 给出了该地区四类极端降水的降水异常合成场。可见，中南半岛和华南地区四类极端降水的降水异常场与百分位合成场的空间分布基本吻合，每一类极端降水的高百分位地区也为正降水异常中心区。对于第一类（图 6a），整个华南地区均为正异常区，中心位置较百分位中心偏西南，位于贵州和广西，中心值约为 16 mm

d^{-1} 。第二类降水异常的分布与第一类有反对称分布的特征（图 6b），与百分位分布所不同的是，正降水异常中心主要位于越南海岸。对第一和第二类极端降水的降水异常合成场作了空间相关，二者的相关系数达到 -0.76 ，通过 99%置信度，表明二者之间的极端降水事件可能存在一定联系，之后会针对这个问题进行讨论。在第三类（图 6c），正降水异常中心较百分位中心位置略偏东，位于云贵高原，中心值为 10 mm d^{-1} 。第四类（图 6d），正降水异常中心位于北部湾地区，强度可达 18 mm d^{-1} 。

SOM 分类表明，不同类或神经元的降水空间分布不同，即极端降水主要发生的位置不同，体现了不同类成员之间具有明显的差异。根据极端降水中心的地理位置，我们将中南半岛和华南地区四类极端降水分别称为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和华南南部—越南北部类。

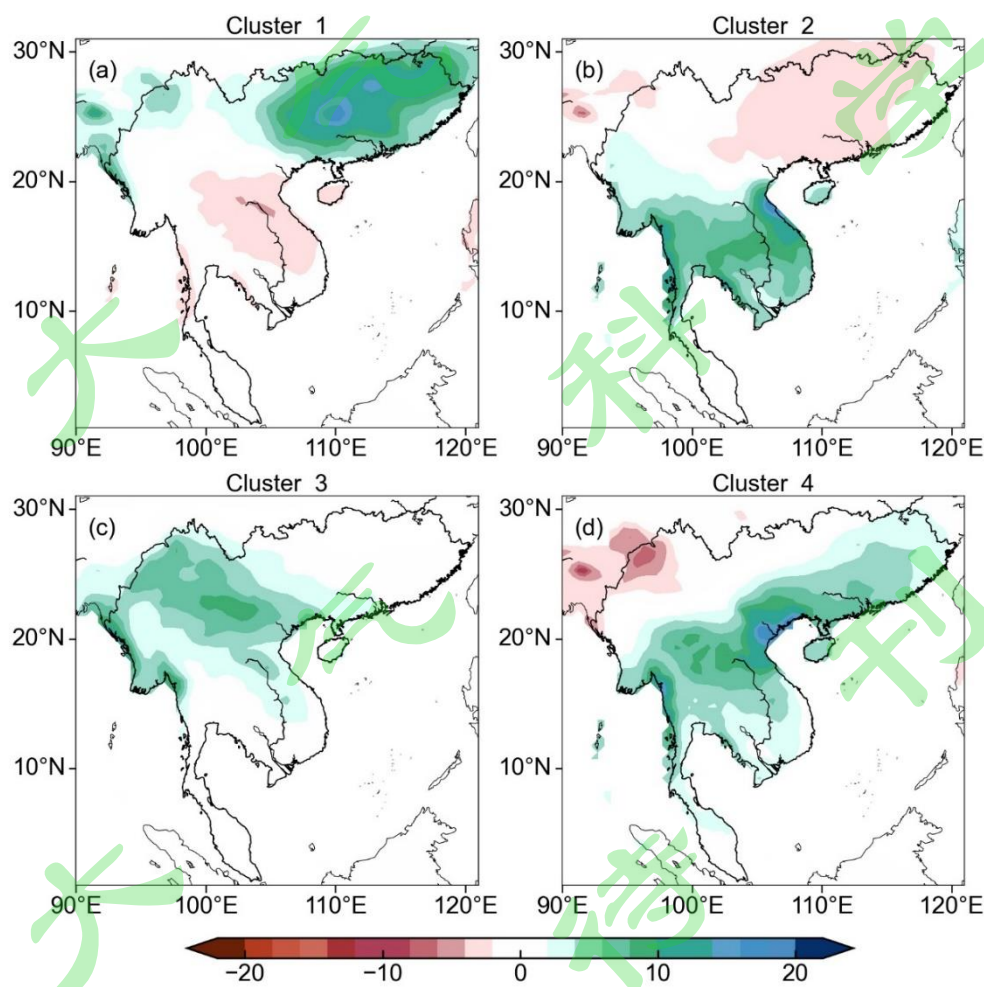


图 6 如图 5，但为降水异常合成场（单位： mm d^{-1} ），填色代表合成结果通过 95%显著性检验

Figure 6 As in Figure 5 but for the composite precipitation anomalies (unit: mm d⁻¹). Colored shading indicates regions where the composite anomalies are significant at the 95% confidence level

3.3 极端降水环流特征

上述分析表明中南半岛和华南地区的极端降水有四种类型，那么，与不同类型极端降水所联系的水汽来源和环流特征也必然有所差异。本小节基于上述分类结果，对每一类极端降水的整层水汽异常、整层水汽通量异常和环流特征进行了合成分析。由图 7 可知，总体而言，中南半岛和华南地区极端降水的水汽来源主要有孟加拉湾、南海和中纬度地区这三条通道。对于华南类极端降水（图 7a），有一气旋式水汽通量异常将这三条水汽通道汇聚于华南，造成华南地区水汽明显偏多，有利于极端降水的发生。而中南半岛类极端降水的水汽主要来源于孟加拉湾和南海（图 7b），孟加拉湾水汽通道较华南类偏南，强度明显偏强，范围偏广，水汽源地可追溯至印度洋地区，气旋式水汽通量异常在中南半岛地区，使两个水汽通道在中南半岛形成辐合，从而有利于形成极端降水。缅甸—云南类极端降水的水汽供应源主要为孟加拉湾（图 7c），由孟湾而来的水汽向东北方向输送至缅甸—云南一带，并在该地区形成辐合带，造成该地区水汽含量增多。华南南部—越南北部类极端降水水汽源地与中南半岛类较为相似（图 7d），但整个气旋式水汽通量异常位置偏北，南海的水汽主要向北输送至华南南部地区，这两个水汽通道造成华南南部—越南北部的水汽含量异常增多，形成极端降水。

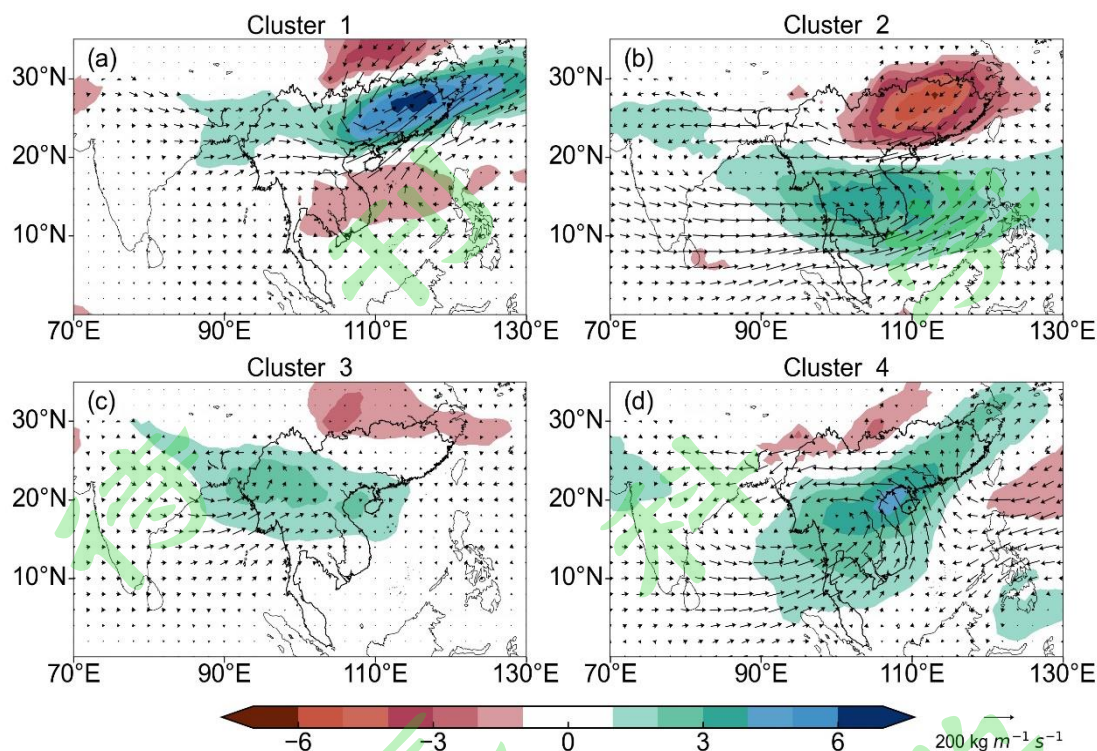


图7 中南半岛和华南地区四类极端降水整层水汽含量异常（填色，单位： kg m^{-2} ）和整层水汽通量异常（箭头，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）合成场。填色代表合成结果通过 95%显著性检验。（a-d）分别为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和华南南部—越南北部类

Figure 7 Composite total column water vapour anomalies (shading, unit: kg m^{-2}) and total column water vapour flux anomalies (arrows, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) for the four clusters of extreme precipitation in the INCSC region. Colored shading indicates regions where the composite anomalies are significant at the 95% confidence level. (a-d) are South China, Indochina Peninsula, Burma-Yunnan and Southern South China-Northern Vietnam clusters, respectively

上述分析表明四类极端降水均与气旋式水汽通量异常有关，为了说明该气旋式异常环流形成的可能原因，我们合成了中南半岛和华南地区四类极端降水 300 hPa 和 850 hPa 的流函数异常场以及相应 Rossby 波作用通量，如图 8 所示。由图可见，四类极端降水的大尺度流型表现出以中高纬波列和热带偶极子环流为主的特征。其中，华南类大尺度流型特征在对流层高层 300 hPa 表现为一位于东亚的地区的“+ - +”经向型波列（图 8a），与东亚—太平洋（East Asia-Pacific, 简称 EAP）遥相关型（黄荣辉和李维京, 1988）有所相似，但中心与典型 EAP 型的三个区域异常中心（从低纬到高纬分别位于西太平洋地区、东亚中纬度地区、东北亚地区）相比，位置略偏西南。Rossby 波能量主要由贝加尔湖地区的正异常中心向中国中东部的负异常中心频散。对流层中层 500 hPa 依然为“+ - +”经向型波

列，但强度稍弱（图略）。而在对流层低层 850 hPa，大尺度流型特征为一位于低纬度地区的“+ -”经向型波列（图 8e），且异常中心的位置较中高层均有所偏南，Rossby 波能量主要来自于菲律宾暖池上空的正异常中心。华南类对流层高层大尺度流型和 EAP 型中心位置略有差异，这主要是研究出发点有所不同，我们从极端降水的角度出发，而前人工作主要从环流角度出发（布和朝鲁等, 2008; 施宁等, 2009），尽管如此，但 Rossby 波能量频散过程基本上与前人所得出的结论相似，说明造成华南极端降水的大尺度流型仍属于 EAP 理论框架。

与华南类不同的是，中南半岛类大尺度流型在对流层高层至低层均为宽广的热带偶极子异常环流。在对流层高层，正异常环流位于赤道附近的印度洋至马来半岛，负异常环流分布于孟加拉湾至华南地区（图 8b）。对流层中层（图略）和低层（图 8f）环流较高层有所偏南，但更为显著宽广，负异常环流范围延伸至阿拉伯海—西太平洋地区，正异常环流由索马里向东南扩展至阿拉伯海，这意味着季风槽和马斯克林高压的加强，从而有利于印度洋低空急流加强，使得更多水汽输送至中南半岛。且位于低层的波作用通量具有明显局地性特征，说明该负异常环流主要是局地强迫而来。

缅甸—云南类的大尺度流型在对流层高层清晰可见有一支由乌拉尔山经中亚至中国中东部的“- + -” Rossby 波列（图 8c）。在对流层中层，由于青藏高原的阻挡，无明显 Rossby 波能量经中亚向中东部频散（图略）。低层环流特征与中南半岛类有所相似，但负异常强度偏弱，位置偏北，位于印度至中国东部，马斯克林高压也偏北偏弱（图 8g）。另外，在乌拉尔山也有一负异常中心，但较高层明显偏弱，且无 Rossby 波能量向下游频散。华南南部—越南北部类环流特征与中南半岛类也较为相似，主要为热带偶极子异常环流，但较为深厚，且相当正压（图 8d 和 8h）。并且，在对流层高层有蒙古地区向西北太平洋的 Rossby 波能量频散（图 8d），同时对流层中层（图略）和低层（图 8h）有来自低纬度负异常环流向西北太平洋的 Rossby 波能量频散，这使得西太平洋地区有显著的正异常，特别是在低层。这意味着西太平洋副热带高压的加强西伸，有利于其西南侧的东南气流将水汽输送至华南南部一带地区。

综上所述，四类极端降水与不同地区的气旋式异常环流直接相联系，华南类大尺度环流型在对流层高层为类似于 EAP 遥相关型的“+ - +”经向型波列，低

层为“+ -”经向型波列，将孟加拉湾、南海和中纬度水汽汇聚于华南地区。中南半岛类大尺度流型为偶极子特征，有利于将印度洋和南海水汽汇聚于中南半岛。缅甸—云南类大尺度流型在对流层高层受由乌拉尔山经中亚至中国中部的“- + -” Rossby 波影响，低层与中南半岛较为类似，负异常主要由局地强迫而来，且表现出明显的斜压特征，水汽主要来自孟加拉湾。华南南部—越南北部类大尺度环流特征也与中南半岛类似，但负异常环流较为深厚且相当正压，对流层高层中纬度的 Rossby 波能量和低层来自负异常环流的 Rossby 波能量向西太平洋地区频散，使得西太平洋副热带高压加强西伸，有利于南海水汽与印度洋水汽在华南南部和越南北部辐合。

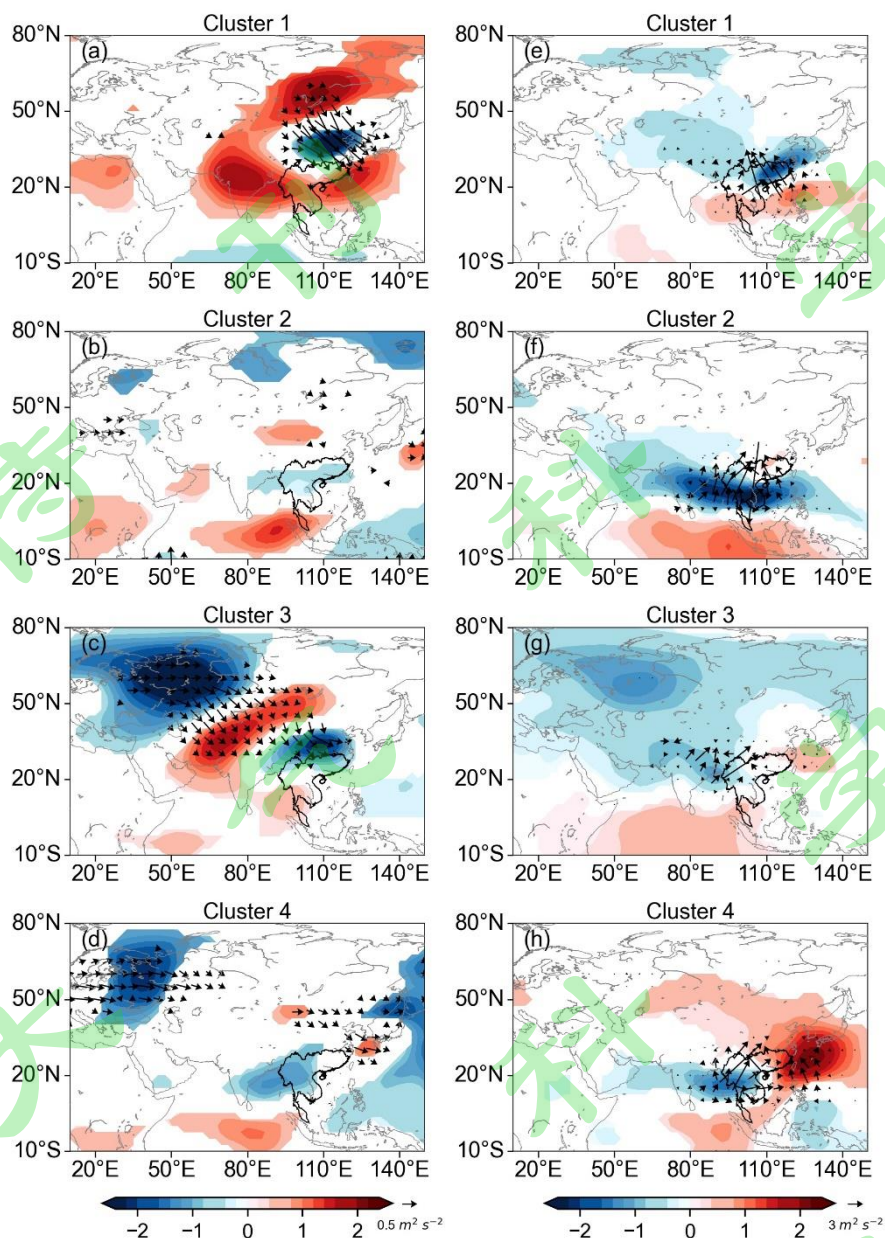


图 8 中南半岛和华南地区四类极端降水的 300 hPa 流函数异常合成场（填色，单位： $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）和波作用通量（箭头，单位： $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ ）。填色代表合成结果通过 95%显著性检验。（a-d）分别为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和华南南部—越南北部类。（e-h）：同（a-d），但为 850 hPa

Figure 8 Composite stream function anomalies (shading, unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and Rossby wave activity fluxes (arrows, unit: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$) at 300 hPa for the four clusters of extreme precipitation in the INCSC region. Colored shading indicates regions where the composite anomalies are significant at the 95% confidence level. (a-d) are South China, Indochina Peninsula, Burma-Yunnan and Southern South China-Northern Vietnam clusters, respectively. (e-h): as in (a-d) but for 850 hPa

3.4 极端降水年际和年代际特征

如引言所述,中南半岛和华南两个地区的各自的极端降水频率近年来有所上升,那么对于中南半岛和华南整体地区的极端降水,存在什么样的年际和年代际变率特征?对此,我们统计了 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季整体和四类极端降水的年际频次,图 9 给出了极端降水年际频次的变化曲线及其年代际变化和长期趋势。总体上,1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季极端降水频次呈显著上升的线性趋势(图 9a),为 0.133 d a^{-1} ,通过了 99% 的显著性检验,平均每年发生极端降水的频次为 43 天。在年代际尺度即十年高斯滤波结果上,1968~1973 和 1994~2015 年极端降水偏多,而 1951~1978 和 1974~1993 年偏少。

由四类极端降水年际频次的变化曲线及长期趋势可见(图 9b~图 9e),中南半岛和华南地区极端降水增多主要受华南类和中南半岛类极端降水的影响,这两类极端降水的频次有着显著的上升趋势,分别为 0.061 d a^{-1} 和 0.076 d a^{-1} ,均过了 99% 置信度,平均每年发生极端降水的天数为 9.6 和 8.4 天。在年代际尺度上,华南类于 1966~1970 和 1996~2015 年极端降水明显偏多,中南半岛类于 1986~1991 和 2004~2014 年极端降水明显偏多。

缅甸—云南类和华南南部—越南北部类极端降水频次并无明显上升或下降的长期趋势,平均每年发生极端降水的天数为 18.3 和 6.5 天。在年代际尺度上,缅甸—云南类极端降水在 1965~1974 和 1991~2000 年偏多,华南南部—越南北部类极端降水在 1970~1982 和 2001~2011 年偏多。

综上,中南半岛和华南地区极端降水的频次总体呈显著上升的趋势,主要来自于华南类和中南半岛类极端降水的贡献,其中,1994~2015 年中南半岛和华南整体地区极端降水偏多在 2004 年之前主要来自于华南类的贡献,而之后主要来自于中南半岛类的贡献。

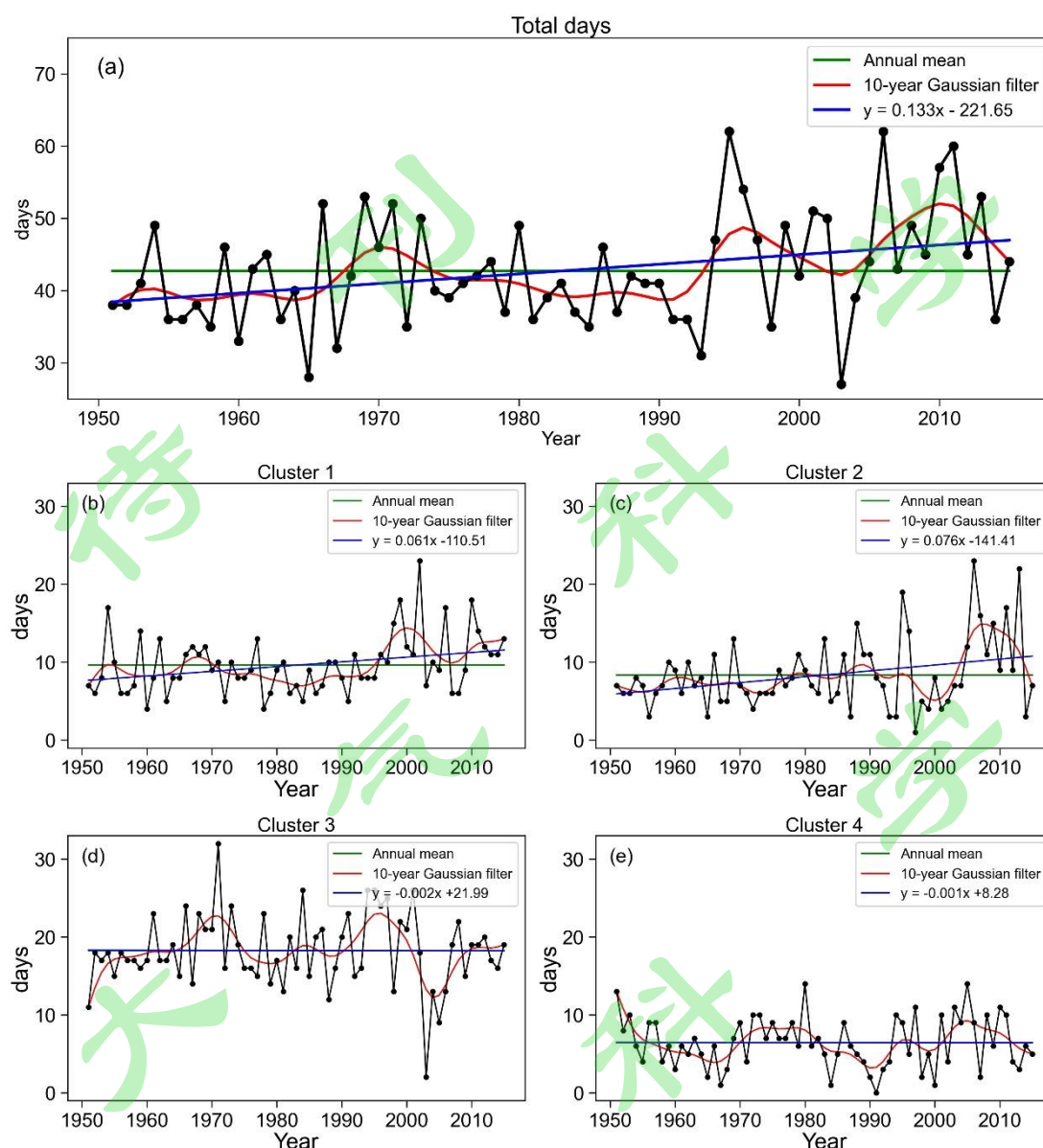


图9 1951~2015年中南半岛和华南地区湿季极端降水年际频次时间序列（黑线）及其年代际变化（红线）和长期趋势（蓝线）。绿线代表年平均值。（a）为极端降水总频次，（b-e）分别为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和华南南部—越南北部类频次。

Figure 9 Time series of the Interannual frequency of extreme precipitation (black), and the decadal variability (red) and long-term trend (blue) in the INCSC region during wet season over 1951 to 2015. Green line indicates the annual mean value. (a) is over the whole region of INCSC and (b-e) are South China, Indochina Peninsula, Burma-Yunnan and Southern South China-Northern Vietnam clusters, respectively

3.3 小节分析表明，不同类型极端降水与不同的大尺度流型相联系，例如华南类极端降水在对流层高层与经向型“+ - +”波列的大尺度流型相联系。那么中南半岛和华南地区极端降水频率的上升趋势是否由大尺度流型的变化所贡献？

为了说明这个问题，我们以华南类极端降水为例，采用 Xie et al. (2017) 的方法，把 (10°S~80°N, 10°~150°E) 地区 300 hPa 流函数异常合成场作为大尺度流型的基本场 (ψ'_{LMP} ，即图 8a) 并建立相应的大尺度流型指数。具体地，将 1951~2015 年湿季 (10°S~80°N, 10°~150°E) 地区的逐日 300 hPa 流函数异常场 (ψ') 投影到大尺度流型基本场 (ψ'_{LMP}) 计算得到每日的大尺度流型指数 (LMP index)，其公式如下：

$$LMP\ index = \frac{\sum_{\lambda, \varphi} \psi'(\lambda, \varphi) \psi'_{LMP}(\lambda, \varphi) \cos \varphi}{\sum_{\lambda, \varphi} \psi'^2_{LMP}(\lambda, \varphi) \cos \varphi}$$

式中 λ 为经度， φ 为纬度，这个指数同时反映了大尺度流型的强度与位相 (Jiang and Deng, 2011; Xie et al., 2017)。

为了验证指数所代表的环流，图 10 给出了研究时段 (1951~2015 年湿季) 逐日大尺度流型指数对 300 hPa 流函数异常的回归场以及研究时段和极端降水日大尺度流型指数的概率密度函数 (Probability Density Function, 简称 PDF) 分布。该指数很好地反映了华南类极端降水所对应的经向型 “+ - +” 波列 (图 10a 和图 8a)，但负异常中心偏弱，这主要是回归场包含了没有极端降水的环流场，说明中国中东部的负异常环流是华南类极端降水的关键环流系统。通过两个时段的大尺度流型指数的 PDF 分布 (图 10b) 可知，华南类极端降水日对应的指数的 PDF 向大值偏移，说明指数偏大很好的对应着极端降水。

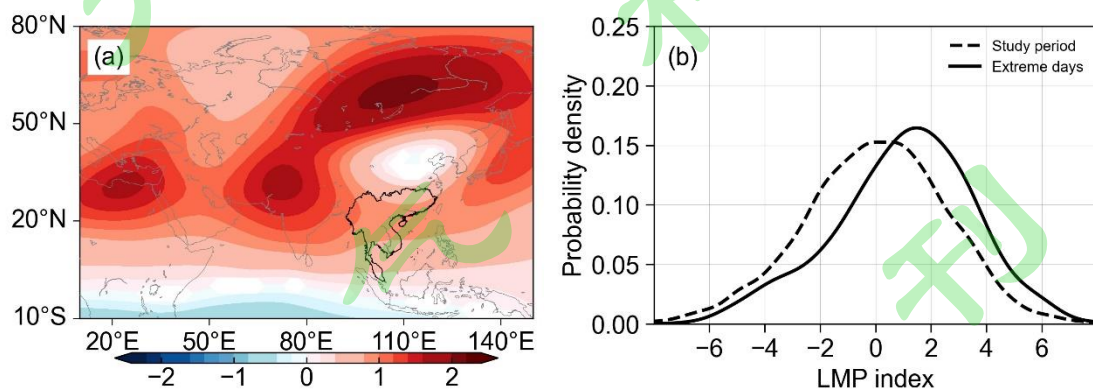


图 10 华南类 (a) 300 hPa 流函数异常对大尺度流型指数 (1 个标准差) 的回归场 (填色，单位： $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 和 (b) 研究时段 (虚线) 和极端降水日 (实线) 大尺度流型指数的 PDF 分布

Figure 10 (a) Regressed 300 hPa stream function anomaly fields against LMP index (1sd, unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and (b) PDF distribution of LMP index during the study period (dotted line) and extreme precipitation days (solid line) of the South China cluster

为了说明大尺度环流型变化对极端降水可能的影响，与图 9b 相类似，图 11

给出了华南类极端降水大尺度流型指数的年际变化曲线及其年代际变化和长期趋势。可见，华南类极端降水的大尺度流型指数呈显著上升的线性趋势，在 1955~1968 和 1990~2014 年明显偏大。将华南类年际平均的该指数和极端降水年际频次的时间序列做相关分析，发现二者相关系数为 0.41，通过 95%显著性水平。另外，根据滑动 T 检验（符淙斌和王强, 1992），大尺度流型指数和频次都在 1990 年后发生一次突变（图略），表明 90 年代后华南类极端降水明显增多可能与大尺度流型的变化密切相关。因此，对于华南极端类降水，经向型“+ - +”波列的大尺度流型指数是影响其频次的年际、年代际和长期趋势变化的直接环流。对于中南半岛类极端降水的长期增加趋势，由于受全球变暖影响，高度场有增高的趋势（Christidis and Stott, 2015），难以反映低压环流的趋势。

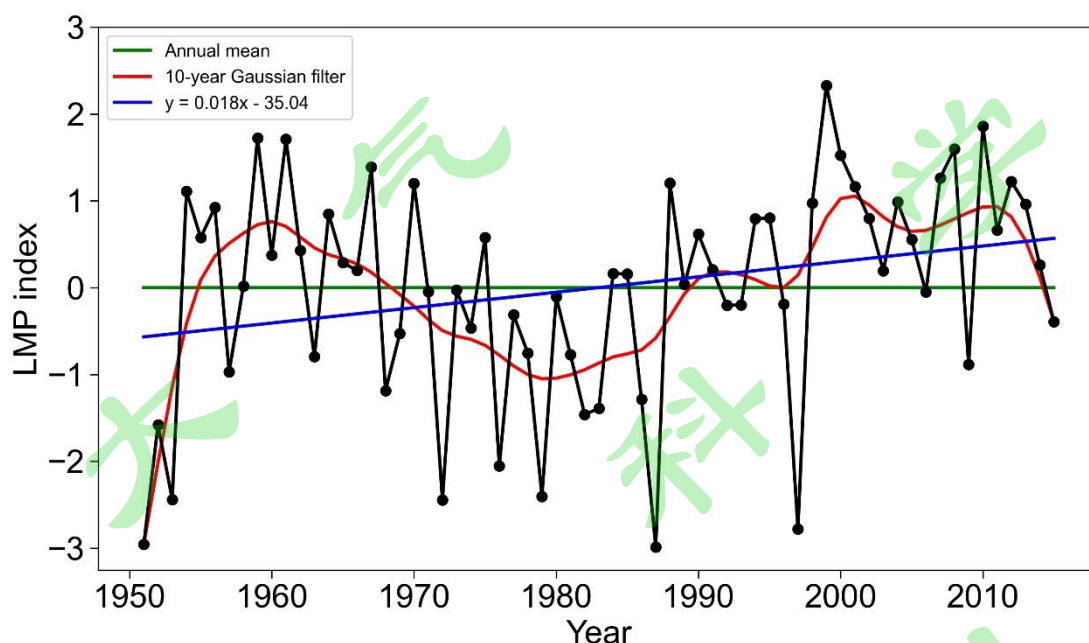


图 11 如图 9（b），但为华南类年际大尺度流型指数

Figure 11 As in Figure 9 (b) but for the annual LMP index of the South China cluster

4 讨论

为验证 APHRODITE 资料的可靠性，我们使用中国地面气候资料日值数据集（V3.0, 共包含 699 个站点）作为对比，从中挑出包含华南地区 8 省的所有站点（共 192 站）并计算极端降水阈值。我们发现，对于华南地区，站点资料与 APHRODITE 资料得到的极端降水阈值的空间分布大致相同，两套资料的阈值高

值区均分布在海岸线一带，相比之下，二者主要差别为站点资料的阈值偏大约 8 mm d^{-1} 。这主要是插值的平滑作用造成了格点资料少雨日增多（原本无降水）和雨量值偏小，从而导致基于百分位的极端阈值偏小，但这对本文的结论产生影响并不大（Lai et al., 2020）。

文中 3.2 小节分析表明，华南类和中南半岛类极端降水的空间分布存在显著的反相关关系，那么很自然的一个问题，为什么不用一个模态来表示两地区极端降水的正负位相，而用 SOM 客观分类得到单独的两类？为了说明这一问题，我们采用经验正交函数（Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF 方法对中南半岛和华南地区的极端降水进行时空分解，将 SOM 算法的输入场（即研究时段内中南半岛和华南地区所有极端降水日的数据反算其在整个降水时间序列中的百分位）作为 EOF 分解场。图 12 给出了 EOF 的第一空间模态及其相应的时间变化系数（即主成分），第一模态占总解释方差的 19.2%，并且通过了 North 检验（North et al., 1982）。中南半岛和华南地区湿季极端降水主模态在华南和中南半岛呈现明显的“-+”的反对称分布型（图 12a），即在该模态中，两地区极端降水存在反向变化的特点，中南半岛地区的极端降水偏多（偏少）时，华南地区极端降水偏少（偏多）。同时我们发现，EOF 第一模态与华南类极端降水的降水异常合成场（图 6a）的空间相关系数为-0.92、与中南半岛类极端降水的降水异常合成场（图 6b）的空间相关系数为 0.89，均通过 99%置信度，表明了华南和中南半岛两地极端降水与 EOF 第一模态密切相关。但从主成分来看（图 12b），长期趋势反应的是这种反对称分布的趋势显著增加，即中南半岛地区极端降水增加，特别是在 2004 年后，难以反应华南地区极端降水线性增加。

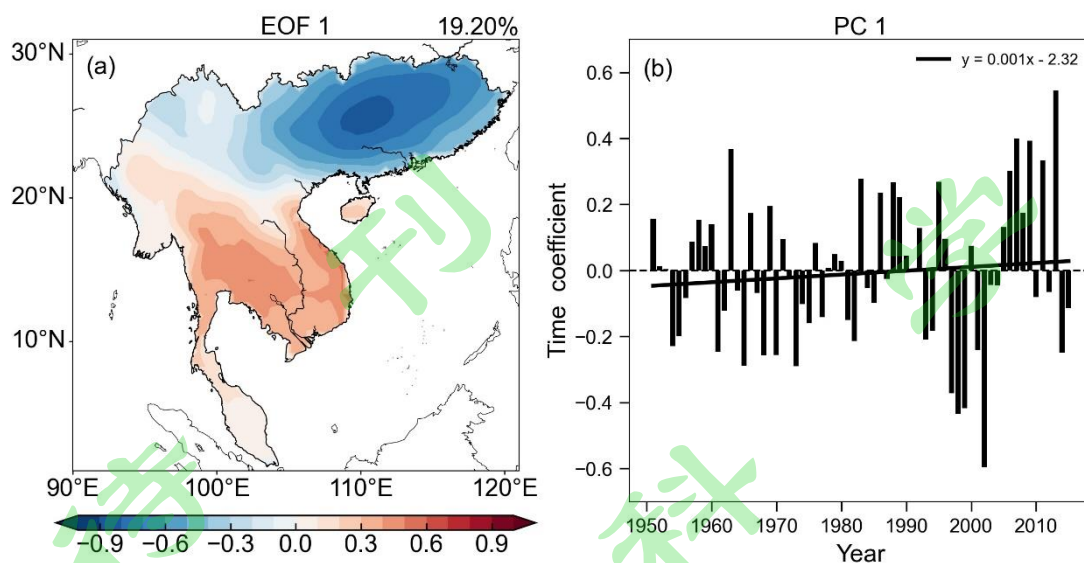


图 12 (a) 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季极端降水 EOF 第一空间模态及其 (b) 主成分

Figure 12 (a) First spatial mode (EOF1) of extreme precipitation in the INCSC region during wet season over 1951 to 2015 and (b) corresponding principal component

5 结论

本文研究了 1951~2015 年中南半岛和华南地区湿季（5~10 月）极端降水事件的主要时空特征，采用 SOM 对该地区的极端降水进行了客观分类，分析了不同类型极端降水环流特征及其频次的年际、年代际和长期趋势特征，得到主要结论如下：

中南半岛和华南地区的极端降水可客观分为华南类、中南半岛类、缅甸—云南类和华南南部—越南北部类。这四类极端与不同的大尺度环流型相联系，以中高纬波列和热带偶极子异常环流为主。华南类的大尺度流型在对流层高层为一类似于 EAP 遥相关型的经向“+ - +”波列，以中东部的负异常环流最为关键，低层高纬度影响减弱，为“+ -”经向型波列，将孟加拉湾、南海和中纬度地区三条水汽通道的水汽汇聚于华南。中南半岛类大尺度流型特征在对流层高层至低层为宽广的热带偶极子异常环流，其主要的水汽来源为孟加拉湾和南海。缅甸—云南类大尺度流型在对流层高层受中高纬“- + -”波列影响，低层与中南半岛较为类似，负异常主要由局地强迫而来，且表现出明显斜压特征，水汽供应源以孟加拉湾为主。华南南部—越南北部大尺度环流特征表现为局地深厚且相当正压的负异

常，将孟加拉湾水汽输送至越南北部，对流层高层来自中纬度的 Rossby 波能量和低层来自负异常环流的 Rossby 波能量向西太平洋地区频散，使得西太平洋副热带高压加强西伸，将南海水汽输送至华南南部地区。

中南半岛和华南整体地区极端降水频次呈现显著上升的线性趋势，主要来自于华南和中南半岛这两类极端降水的贡献。其中，中南半岛和华南整体地区在 1968~1973 和 1994~2015 这两个时间段极端降水偏多，而在 1951~1978 和 1974~1993 年偏少。其中 1994~2015 年极端降水偏多在 2004 年之前主要受华南类极端降水增多的影响，之后主要受中南半岛类极端降水增多的影响。华南类极端降水在 1966~1970 和 1996~2015 年极端降水明显偏多，中南半岛类极端降水在 1986~1991 和 2004~2014 年极端降水明显偏多。华南类极端降水增多的趋势受到经向型“+ - +”波列的大尺度流型的调控。

中南半岛和华南两个主要地区（中南半岛和华南）的极端降水事件存在一定联系，这两类极端降水的降水异常场存在反对称的空间分布特征，特别是在 2004 年后。中南半岛和华南整体地区湿季极端降水的主模态在中南半岛和华南地区呈现的“+ -”分布型很好的体现了两地极端降水反向变化的特点，即中南半岛地区极端降水偏多（偏少）时，华南极端降水偏少（偏多）。

本文主要研究中南半岛和华南地区极端降水的空间分布特征、大尺度环流特征及年际和年代际特征。研究表明，四类极端降水的大尺度流型不尽相同，意味着受不同的外强迫因素所影响，而目前我们主要以华南类为例说明了大尺度流型多时间尺度变化对极端降水变化的影响，未来的研究将从外强迫的角度来说明它们如何通过大尺度流型来影响极端降水。此外，我们初步给出了中南半岛极端降水和华南地区极端降水的反相关，未来的研究我们将使用数值试验来探讨中南半岛极端降水对华南地区极端降水影响的具体物理过程。

致谢 感谢三位匿名审稿人宝贵的意见和建议，这些意见和建议对本文质量的改进有很大的帮助。

参考文献 (References)

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate

- extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D5): D05109. doi: 10.1029/2005JD006290
- 布和朝鲁, 施宁, 纪立人, 等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与中高纬 Rossby 波活动 [J]. *科学通报*, 53(1): 111–121. doi: 10.1007/s11434-008-0005-2. Bueh Cholaw, Shi Ning, Ji Liren, et al. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the mid-and high-latitude Rossby wave activities during Meiyu period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(1): 111–121. doi: 10.1007/s11434-008-0005-2
- Chen T C and Yoon J H. 2000. Interannual variation in Indochina summer monsoonrainfall: possible mechanism [J]. *J. Climate*, 13(11): 1979–1986. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1979:IVIISM>2.0.CO;2
- 陈锐丹, 温之平, 陆日宇, 等. 2012. 华南 6 月降水异常及其与东亚—太平洋遥相关的关系 [J]. *大气科学*, 36(5): 974–984. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11209. Chen Ruidan, Wen Zhiping, Lu Riyu, et al. 2012. Variation of South China rainfall in June and its association with the East Asia-Pacific teleconnection [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(5): 974–984. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11209
- Christidis N, Stott P A. 2015. Changes in the geopotential height at 500 hPa under the influence of external climatic forcings [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42(24): 10798–10806. doi: 10.1002/2015GL066669
- 陈杨瑞雪. 2018. 华南前汛期极端降水多尺度特征的统计分析与个例研究 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文. Chen Yangruixue. 2018. Multiple-scale characteristics of the extreme rainfall over South China during the presummer rainy season: statistic analysis and a case study [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *Int. J. Climatol.*, 28(9): 1139–1161. doi: 10.1002/joc.1615
- Endo N, Matsumoto J, Lwin T. 2009. Trends in precipitation extremes over Southeast Asia [J]. *SOLA*, 5(43): 168–171. doi: 10.2151/sola.2009-043
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. *大气科学*, 16(4): 482–493. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 16(4): 482–493. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11
- 方浩, 乔云亭. 2019. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景 [J]. *热带气象学报*, 35(4): 517–527. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.047. Fang Hao, Qiao Yuntin. 2019. Temporal and spatial distribution of summer extreme precipitation and circulation background over Eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 35(4): 517–527. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.047
- Faikrua A, Pimonsree S, Wang L, et al. 2020. Decadal increase of the summer precipitation in

- Thailand after the mid-1990s. *Climate Dyn.*, 55: 3253–3267. doi: 10.1007/s00382-020-05443-8
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science*, 314(5804): 1142–1145. doi: 10.1126/science.1132027
- Grotjahn R, Black R, Leung R, et al. 2016. North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: a review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends [J]. *Climate Dyn.*, 46(3–4): 1151–1184. doi: 10.1007/s00382-015-2638-6
- Ge F, Zhi X F, Babar Z A, et al. 2017. Interannual variability of summer monsoon precipitation over the Indochina Peninsula in association with ENSO [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 128(3–4): 523–531. doi: 10.1007/s00704-015-1729-y
- Gao N, Bueh C, Xie Z W, et al. 2019. A novel identification of the Polar/Eurasia pattern and its weather impact in May [J]. *J. Meteorol. Res.*, 33(5): 810–825. doi: 10.1007/s13351-019-9023-z
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12(S1): 107–116. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12(S1): 107–116. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18(4): 465–476. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18(4): 465–476. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001
- Hyndman R J, Fan Y N. 2012. Sample quantiles in statistical packages [J]. *Am. Stat.*, 50(4): 361–365. doi: 10.1080/00031305.1996.10473566
- 胡娅敏, 翟盘茂, 罗晓玲, 等. 2014. 2013 年华南前汛期持续性强降水的大尺度环流与低频信号特征 [J]. *气象学报*, 72(3): 465–477. doi: 10.11676/qxxb2014.042.
- Hu Yamin, Zhai Panmao, Luo Xiaoling, et al. 2014. Large scale circulation and low frequency signal characteristics for the persistent extreme precipitation in the first rainy season over South China in 2013 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(3): 465–477. doi: 10.11676/qxxb2014.042
- He B, Yang S, Li Z N. 2016. Role of atmospheric heating over the South China Sea and Western Pacific regions in modulating Asian summer climate under the global warming background [J]. *Climate Dyn.*, 46(9–10): 2897–2908. doi: 10.1007/s00382-015-2739-2
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor.*

- Soc., 146(730): 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: The Scientific Basis [M]. Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 151pp.
- Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. 2004. Global occurrences of extreme precipitation and the Madden–Julian Oscillation: observations and predictability [J]. *J. Climate*, 17(23): 4575–4589. doi: 10.1175/3238.1
- Jiang T Y and Deng Y. 2011. Downstream modulation of North Pacific atmospheric river activity by East Asian cold surges [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38(20): L20807. doi:10.1029/2011GL049462
- Kohonen T. 2001. Self-Organizing Maps, 3rd Edition [M]. Berlin: Springer Press. doi: 10.1007/978-3-642-56927-2
- 吕翔, 徐海明. 2007. 中南半岛地区夏季降水日变化特征 [J]. *南京气象学院学报*, 30(5): 632–642. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2007.05.008. Lü Xiang, Xu Haiming. 2007. Diurnal variations of rainfall in summer over the Indo-China Peninsula [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30(5): 632–642. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2007.05.008
- 李秀珍, 梁卫, 温之平. 2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系 [J]. *热带气象学报*, 26(5): 626–632. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.05.016. Li Xiuzhen, Liang Wei, Wen Zhiping. 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in South China in northern autumn, winter and spring [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*. 26(5): 626–632. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.05.016
- 李丽平, 章开美, 王超, 等. 2010. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征 [J]. *气候与环境研究*, 15(4): 443–450. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.12. Li Liping, Zhang Kaimei, Wang Chao, et al. 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15(4): 443–450. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.12
- Limsakul A, Singhruck P. 2016. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmos. Res.*, 169(1): 301–317. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.10.015
- Lee M H, Lee S, Song H J, et al. 2017. The recent increase in the occurrence of a boreal summer teleconnection and its relationship with temperature extremes [J]. *J. Climate*, 30(18): 7493–7504. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0094.1
- 卢晓雄. 2020. 华南地区降雨的时空特征研究 [D]. 湘潭大学硕士学位论文. Lu Xiaoxiong. 2020. Research on temporal and spatial characteristics of precipitation in South China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Xiangtan University.
- Lai S, Xie Z W, Bueh C, et al. 2020. Fidelity of the APHRODITE dataset in representing extreme precipitation over Central Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.* 37(12), 1405–1416. doi: 10.1007/s00376-020-0098-3
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关

- 系分析 [J]. 大气科学, 30(6): 1249–1256. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the Northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(6): 1249–1256. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 111(7): 699–706. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2
- Ning L and Qian Y F. 2009. Interdecadal change in extreme precipitation over South China and its mechanism [J]. Adv. Atmos. Sci., 26(1): 109–118. doi: 10.1007/s00376-009-0109-x
- Promchote P, Simon Wang S Y, Johnson P G. 2016. The 2011 great flood in Thailand: climate diagnostics and implications from climate change [J]. J. Climate, 29(1): 367–379. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0310.1
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中期演变过程的影响 [J]. 大气科学, 33(5): 1087–1100. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.18.
- Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2009. Impacts of mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid- and late summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 1087–1100. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.18
- 孙婧超, 管兆勇, 李明刚, 等. 2019. 华南地区 7–10 月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比 [J]. 气象学报, 77(1): 43–57. doi: 10.11676/qxxb2018.044. Sun Jingchao, Guan Zhaoyong, Li Minggang, et al. 2019. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extreme over South China from July to October [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(1): 43–57. doi: 10.11676/qxxb2018.044
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. J. Atmos. Sci., 58(6): 608–627. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- 谭晶, 杨辉, 孙淑清, 等. 2005. 夏季南亚高压东西振荡特征研究 [J]. 南京气象学院学报, 28(4): 452–460. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.003. Tan Jing, Yang Hui, Sun Shuqing, et al. 2005. Characteristics of the longitudinal oscillation of South Asia High during summer [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28(4): 452–460. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.003
- Takahashi H G, Yasunari T. 2006. A climatological monsoon break in rainfall over Indochina—A singularity in the seasonal march of the Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 19(8): 1545–

1556. doi: 10.1175/JCLI3724.1

- Ward J H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function [J]. *J. Am. Stat. Assoc.*, 58(301): 236–244. doi: 10.1080/01621459.1963.10500845
- 王冀, 江志红, 宋洁, 等. 2008. 基于全球模式对中国极端气温指数模拟的评估 [J]. *地理学报*, 63(3): 227–236. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2008.03.001. Wang Ji, Jiang Zhihong, Song Jie, et al. 2008. Evaluating the simulation of the GCMS on the extreme temperature indices in China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 63(3): 227–236. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2008.03.001
- 王东海, 夏茹娣, 刘英. 2011. 2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比分析 [J]. *气象学报*, 69(1): 137–148. doi: 10.11676/qxxb2011.012. Wang Donghai, Xia Rudi, Liu Ying. 2011. A preliminary study of the flood causing rainstorm during the first rainy season in South China in 2008 [J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 69(1): 137–148. doi: 10.11676/qxxb2011.012
- 韦志刚, 李娴茹, 刘雨佳, 等. 2021. 1961–2018 年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析 [J/OL]. *高原气象*. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk001. Wei Zhigang, Li Xianru, Liu Yujia, et al. 2021. Comparative analysis of the characteristics of annual and seasonal extreme precipitation in South China during 1961–2018 [J/OL]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk001
- Xie Z W, Black R X, Deng Y. 2017. The structure and large-scale organization of extreme cold waves over the conterminous United States [J]. *Climate Dyn.*, 49(11–12): 4075–4088. doi: 10.1007/s00382-017-3564-6
- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. 2012. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(9): 1401–1415. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1
- Yazid M, Humphries U. 2015. Regional observed trends in daily rainfall indices of extremes over the Indochina Peninsula from 1960 to 2007 [J]. *Climate*, 3(1): 168–192. doi: 10.3390/cli3010168
- Yang Y Y, Wu R G. 2019. Seasonal variation of precipitation over the Indochina Peninsula and its impact on the South China Sea spring warm [J]. *Int. J. Climatol.*, 39(3): 1618–1633. doi: 10.1002/joc.5904
- Zhang Y S, Li T, Wang B, et al. 2002. Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: climatology and interannual variations [J]. *J. Climate*, 15(22): 3206–3221. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<3206:OOTSMO>2.0.CO;2
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58(7s): 1–10. doi: 10.11821/xb20037s001. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th Century [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(7s): 1–10. doi: 10.11821/xb20037s001
- 张婷. 2008. 华南地区强降水概率分布特征及环流背景 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位

- 论文. Zhang Ting. 2008. Probability distribution and circulation background of heavy rainfall in South China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Zong H F, Bueh C, Wei J, et al. 2012. Intensity of the trough over the Bay of Bengal and its impact on the Southern China precipitation in winter [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5(3): 246–251. doi: 10.1080/16742834.2012.11446998
- Zhao S Y, Deng Y, Black R X. (2017). A dynamical and statistical characterization of U.S. extreme precipitation events and their associated Large-scale meteorological patterns [J]. J. Climate, 30(4): 1307–1326. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0910.1
- 张玉琴, 李栋梁. 2019. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 430–444. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18024. Zhang Yuqin, Li Dongliang. 2019. Drought-flood abrupt alternation and its atmospheric circulation characteristics during flood season in Southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese). 24(4): 430–444. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18024