

# 面向事件过程的长江流域极端降水时空变化特征

何锦屏 李双双 段克勤 延军平<sup>1</sup>

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

**【摘要】**: 基于 1961~2019 年逐日降水格点数据, 对长江流域偏前型、偏后型、均衡型和单日型极端降水时空变化特征进行分析。结果表明: (1) 在变化过程上, 1961~2019 年, 长江流域偏前型极端降水先增加后下降, 偏后型、均衡型极端降水变化以平稳波动为主, 单日型极端降水持续上升; (2) 在空间格局上, 长江流域偏前型、偏后型极端降水量呈现“东南高一西北低”的分布格局, 均衡型极端降水高值区分布于金沙江、鄱阳湖流域, 单日型极端降水空间特征表现为“中间高、两侧低”; (3) 在影响因素上, 长江流域及其子流域不同类型极端降水与两类厄尔尼诺(东部型-Ni1o1+2 区和中部型-Ni1o3.4 区) 正相关占比为 79.2%, 且与 Ni1o1+2 区的相关性高于 Ni1o3.4 区; (4) 1998 年长江流域极端降水以偏前型为主导, 7 月 20~26 日偏前型极端降水事件为 1998 年夏季洪涝灾害的核心致灾因子。

**【关键词】**: 气候变化 极端降水 时空分析 厄尔尼诺 长江流域

**【中图分类号】**: P426.6 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2022)06-1381-12

全球变暖背景下, 极端天气与气候事件频发, 极端高温愈高、极端低温愈低、干旱热浪耦合等极端事件成为普遍现象<sup>[1,2,3]</sup>。现阶段, 极端降水研究领域不断扩展, 涉及极端降水的时空特征、影响因素、环流机制、未来趋势等方面, 涌现了大量研究成果<sup>[4,5,6,7,8,9]</sup>。与此同时, 面向极端降水事件的发展过程, 许多学者尝试细分极端降水事件类型, 弥补绝对或相对阈值判断降水量、频次和强度变化, 忽视极端降水过程的不足, 从新的角度理解极端降水与全球变暖的响应关系<sup>[10,11,12]</sup>。值得一提的是, 2018 年 Pendergrass 在 Science 发表文章, 指出预测极端降水比极端气温更加复杂, 不同的极端降水定义, 不同的研究视角, 将导致不同的变暖响应结论<sup>[13]</sup>。基于上述认识, Wu 等<sup>[10]</sup>按照极端降水事件发展过程, 将极端降水分为偏前型、偏后型、均衡型和单日型, 分析了中国不同极端降水类型的趋势变化规律; 李双双等<sup>[11]</sup>在此基础上, 关注中国南北过渡带气候响应差异, 对秦岭南北偏前型、偏后型、均衡型和单日型极端降水与区域变暖响应关系进行了分析; Shang 等<sup>[12]</sup>从环流异常角度, 对中国南北过渡带偏前型和均衡型极端降水的水汽输送、环流遥相关机制进行了深入分析。随着面向事件过程极端降水研究的深入, 以流域尺度为视角, 细化极端降水类型时空变化规律, 衔接不同极端降水与区域洪水的响应关系, 成为新的研究增长点。

长江流域, 横跨中国东中西部, 是中国三大战略发展区之一, 也是早涝急转、极端降水影响的重点区域<sup>[14,15,16]</sup>。研究表明, 1961~2100 年, 全球升温 1.5℃ 目标下, 长江流域极端降水量上升趋势明显, 面临极端降水强度与频次增加的风险<sup>[17]</sup>。胡思等<sup>[18]</sup>应用模糊 C 均值分类和异质性检验, 将长江流域划分为 7 个一致性子区域, 指出四川盆地和长江中下游地区易发生高风险洪涝灾害。在机理分析方面, 厄尔尼诺是全球气候系统重要的年际变化信号, 中部型、东部型两类 ENSO (ElNiño-Southern Oscillation) 事件与中国东部降水响应机制存在明显的差异<sup>[19,20,21]</sup>。关注不同类型厄尔尼诺事件与极端降水的响应关系, 明晰区域极端降水的环流机制, 成为当前大气和海洋学界的研究热点。值得一提的是, 2020 年, 长江流域出现 1998 年以来最严重汛情, 长江中下游等地梅雨期及梅雨量达到历史峰值, 暴雨洪涝灾害严重<sup>[22]</sup>。从极端降水事件发展过程切入, 理清不同类型极端降水时空变化规

<sup>1</sup>作者简介: 何锦屏(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化与区域灾害防治. E-mail: JPH1116@126.com; 李双双 E-mail: lss40609010@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877519, 41701592, 41771030); 陕西师范大学研究生创新团队项目(TD2020035Y)

律，对长江流域洪涝综合风险防范体系建设具有重要现实意义。

基于此，本文利用 1961~2019 年中国高分辨率 ( $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ) 逐日降水格网数据，辅以趋势分析、相关分析等方法，对长江流域 4 类极端降水 (偏前型、偏后型、均衡型和单日型) 时空特征进行分析，挖掘中部型、东部型 ENSO 事件与长江流域不同类型极端降水的相关关系；以 1998 年长江流域 7 月特大洪涝事件为切入，探讨极端降水与区域洪涝灾害的响应机制，以为长江流域提高气候适应能力提供理论依据。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

长江流域地势西高东低，地形单元包括青藏高原、横断山区、云贵高原、四川盆地和长江中下游平原等 (图 1)。受东亚季风影响，长江流域降水集中在夏季，年降水量时空分布不均匀<sup>[23]</sup>。长江流域是涵盖长江经济带发展和长三角一体化发展的重要战略发展区域。受人口压力和高强度的水土资源开发影响，长江流域遭遇极端降水所造成的损失具有放大效应，严重制约流域可持续发展<sup>[24,25]</sup>。为分析极端降水变化的空间差异性，参照已有研究<sup>[26]</sup>，将长江流域划分为 11 个子流域。

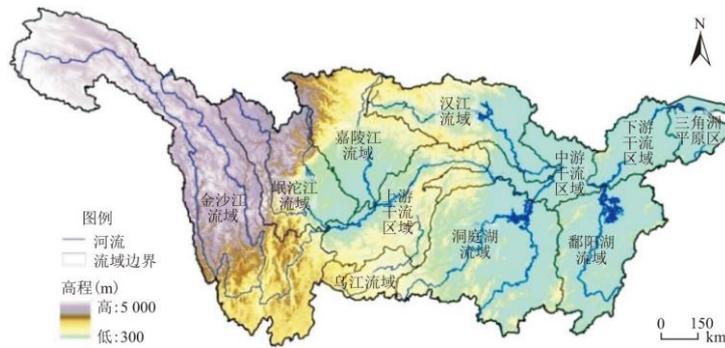


图 1 长江流域地理位置与流域分区<sup>[26]</sup>

### 1.2 数据来源

1961~2019 年，中国地面高分辨率 ( $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ) 降水日值数据集来源国家气象科学数据中心，该数据集基于中国 2474 个国家级地面站基础气象资料，经严格质量检测、控制和更正，能准确反映降水的变化特征<sup>[27]</sup>；Niño1+2 区和 Niño3.4 区厄尔尼诺指数，来源于中国气象局国家气象中心发布的气候系统指数集 (<https://cmdp.ncc-cma.net/cn/download.htm>)。

## 2 研究方法

### 2.1 极端降水类型划分

参考已有研究<sup>[10]</sup>，面向事件过程，对长江流域不同类型极端降水事件 (Event-based extreme precipitation, EEP) 进行识别 (图 2)。

(1) 识别极端降水事件。

以逐日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 为判断标准，筛选连续降水事件；再以降水量超过90.0%阈值为判断标准，识别极端降水事件。

(2) 划分极端降水类型。

明确极端降水事件中间时刻，将极端降水发生过程分为时间相等的两部分，图2中以 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 表示。根据降水量超过90.0%阈值极端降水事件的分布位置，将极端降水事件划分为偏前型、偏后型、均衡型、单日型4种类型<sup>[10]</sup>。

具体划分过程为：一次极端降水事件中，若降水量超过90.0%阈值极端降水事件分布在中间时刻之前或中间时刻之后，则对应极端降水事件类型为偏前型或偏后型极端降水；若中间时刻前后均有降水量超过90.0%阈值极端降水事件分布，则此次极端降水事件为均衡型降水；若降水时间仅持续一天，且当日降水量超过90.0%阈值，则识别为单日极端降水。

(3) 明确极端降水含义。

偏前型极端降水事件，强降水分布在中间时刻之前，表征前期发生极端降水，后期降水量减少，且无极端降水事件发生；偏后型极端降水事件，强降水分布在中间时刻之后，表征前期降水偏弱，未形成极端降水，后期遭遇极端降水事件，致灾过程呈现出“缓慢叠加”的特征，不易提前预警；均衡型极端降水事件，强降水在中间时刻前后均有分布。整个降水过程中，降水持续性强，前后强降水叠加，致灾强度大，易造成区域性洪涝灾害；单日型极端降水，属于非持续极端降水类型，表示强降水具有突发性，前后日无降水。

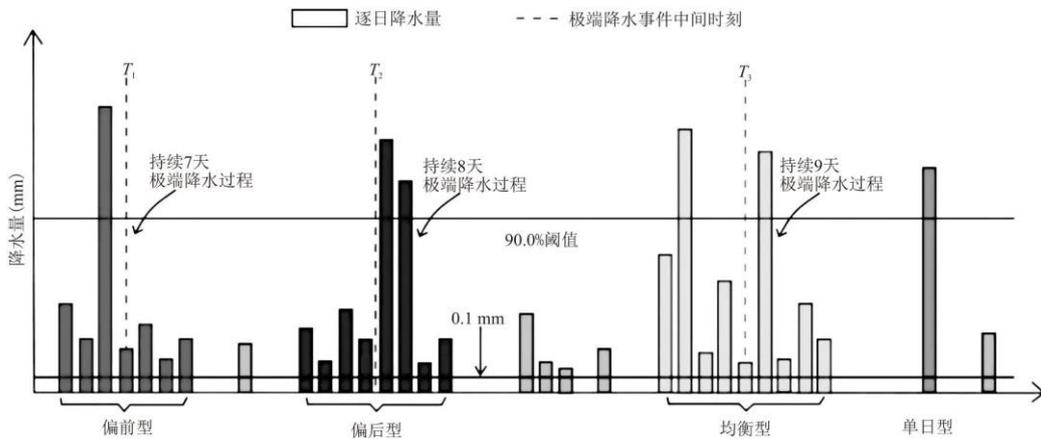


图2 面向事件过程的极端降水事件定义<sup>[10]</sup>

2.2 趋势分析

本文采用 Theil-Sen 趋势分析，对长江流域4类极端降水事件变化趋势进行分析，使用 Modified Mann-Kendall (MMK) 对趋势的显著性进行判断<sup>[28]</sup>。计算公式如下：

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}\right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中： $\beta$  为不同类型极端降水年降水量的变化趋势，当 $\beta > 0$ 时，极端降水呈现上升趋势，反之则为下降趋势； $t_i$  和  $t_j$  表示

时间序列,  $x_i$  和  $x_j$  分别表示  $i$  和  $j$  时刻不同类型极端降水判断指标值。当 MMK 统计值  $Z$  绝对值大于 1.68 时, 表示趋势通过 0.10 显著水平检验。

### 2.3 相关分析

使用相关分析, 衡量两类 ENSO 事件(东部型、中部型)与长江流域及其子流域极端降水的相关性。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中:  $r$  为厄尔尼诺指数与极端降水量相关系数;  $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  年极端降水量和厄尔尼诺指数;  $\bar{x}$  为极端降水年均值;  $\bar{y}$  为厄尔尼诺指数年均值;  $n$  为研究时段年份。

## 3 结果分析

### 3.1 长江流域极端降水年代变化特征

1961~2019 年, 长江流域 4 类极端降水均呈波动增加的趋势, 仅是不同类型极端降水年代变化特征存在差异(图 3)。具体特征如下:

对偏前型极端降水变化而言, 1961~1983 年, 长江流域年降水量波动上升, 降水量逐渐由负距平转为正距平; 1983~1998 年, 降水量先下降后上升; 对比 1998 年同期其他极端降水类型发现, 仅有偏前型极端降水量异常偏多, 其他 3 类极端降水异常量并不显著, 说明 1998 年, 长江流域特大洪涝与偏前型极端降水更为相关。全球变暖停滞期<sup>[29]</sup>(1998~2011 年), 长江流域偏前型降水量呈现下降趋势; 2011 年后, 偏前型极端降水量有回升趋势(图 3a)。

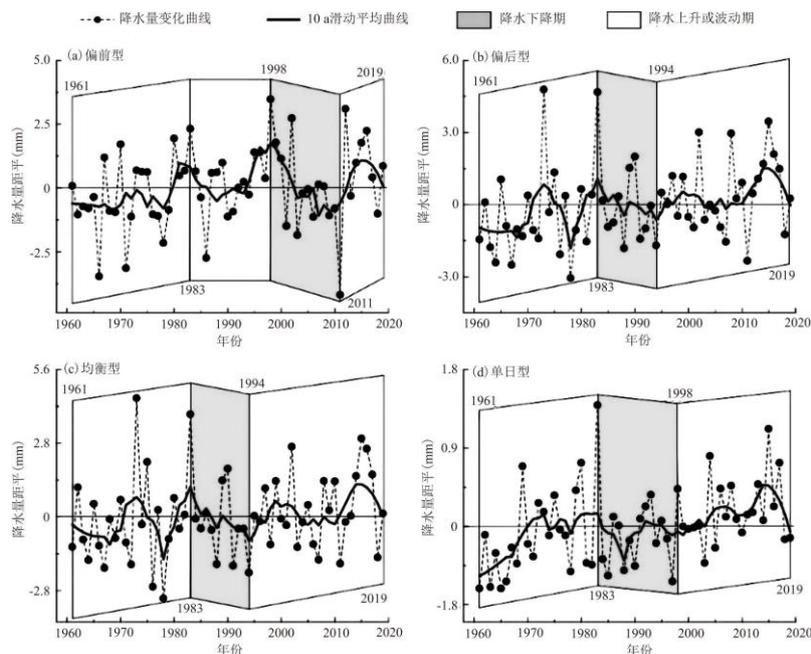


图 3 1961~2019 年长江流域极端降水年代变化特征

与偏前型相比,长江流域偏后型极端降水变化更为平稳,且与均衡型变化相似。具体而言,除 20 世纪 60 年代和 21 世纪初,偏后型和均衡型极端降水量小幅上升之外,两者多数时期降水表现为震荡波动;特别是变暖停滞期,与偏前型极端降水量不同,偏后型和均衡型极端降水量并未呈现明显下降趋势,说明长江流域极端降水对变暖停滞响应,偏前型要明显大于偏后型、均衡型极端降水(图 3b、c)。

长江流域单日型降水量正负距平量级低于其他类型极端降水(图 3d)。以 1998 年为时间节点,前期降水量先上升后平稳波动,且于 1983 年达到降水峰值;1998 年之后单日型降水量持续上升,近 5 年降水量呈现下降趋势。整体来看,1961~2019 年,单日型极端降水量呈明显上升趋势。

### 3.2 长江流域极端降水空间变化特征

1961~2019 年,长江流域不同极端降水类型年降水量存在空间差异(图 4)。其中,偏前型、偏后型年降水量表现出“东南高一西北低”的分布特征,以长江主干道为界,长江干流区域(即上、中、下游干流区)、洞庭湖和鄱阳湖流域降水明显偏多(图 4a 和 4b);对于均衡型而言,金沙江中下游、岷沱江、洞庭湖、鄱阳湖等流域为降水高值区,汉江、嘉陵江流域和金沙江上游为降水低值区(图 4c);单日型极端降水则呈现“中间高、两侧低”的空间分布特征,其中,长江流域西部,如金沙江、岷沱江流域,单日型极端降水量明显少于流域其他地区(图 4d)。

从变化趋势分析,1961~2019 年,整个长江流域偏前型、偏后型极端降水量上升趋势大致相当,均衡型极端降水量呈现微弱下降趋势,单日型极端降水量则呈现显著上升趋势。说明长江流域长时间、高强度极端降水呈现减少趋势,短历时、高强度极端降水在逐年增加(表 1)。

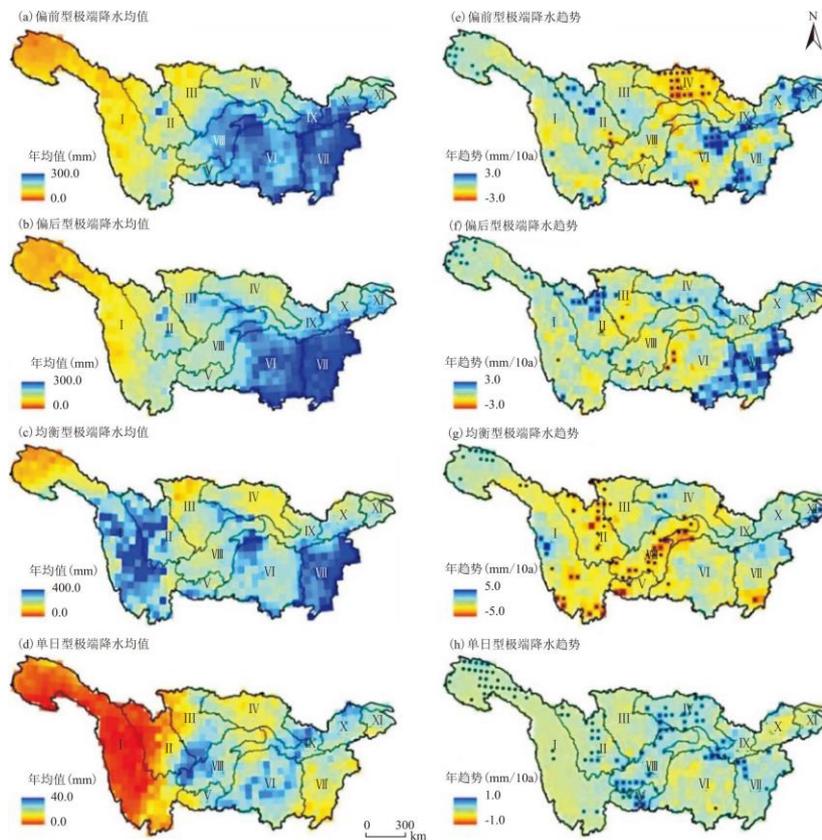


图 4 1961~2019 年长江流域极端降水量空间变化

注：黑点表示变化趋势通过 0.05 显著性检验。数字表示长江流域子流域，即：I：金沙江流域，II：岷沱江流域，III：嘉陵江流域，IV：汉江流域，V：乌江流域，VI：洞庭湖流域，VII：鄱阳湖流域，VIII：上游干流区域，IX：中游干流区域，X：下游干流区域，XI：三角洲平原区。

以极端降水量变化趋势通过 0.10 显著水平检验为标准，分析不同子流域 4 类极端降水类型降水量变化特征发现，(1)对于偏前型极端降水而言，汉江流域偏前型极端降水呈现明显下降趋势，变化速率为-6.3mm/10a ( $p < 0.10$ )。空间上，汉江流域有 33.9% 的区域偏前型极端降水量呈现显著下降 ( $p < 0.05$ )；而下游干流区 (10.9mm/10a) 和三角洲平原 (15.2mm/10a) 为极端降水量显著上升的两个区域 (图 4e)；(2)对于偏后型极端降水而言，鄱阳湖流域偏后型极端降水显著增加，变化速率为 12.2mm/10a，其他流域变化趋势多不显著；(3)均衡型极端降水显著下降区主要分布在上游干流区 (11.7mm/10a)，显著上升区主要位于三角洲平原区 (14.4mm/10a)，整体变化格局呈现“东增西减”的空间特征；(4)对于单日型极端降水而言，有 6 个子流域极端降水量变化趋势显著增加。其中，乌江流域 (4.2mm/10a)、中游干流区域 (3.3mm/10a)、三角洲平原区 (3.0mm/10a) 为单日型极端降水显著增加排名前 3 位的子流域。

表 1 1961~2019 年长江流域及其子流域极端降水变化趋势

流域名称	变化趋势 (mm/10a)			
	偏前型	偏后型	均衡型	单日型
金沙江流域	0.8	0.8	-0.6	0.6**
岷沱江流域	1.1	-1.1	-3.5	0.8
嘉陵江流域	3.6	-1.1	-0.9	0.4
汉江流域	-6.3*	6.7	1.2	2.5**
乌江流域	-0.9	-2.5	-7.6	4.2**
洞庭湖流域	6.1	2.4	0.1	0.80
鄱阳湖流域	8.6	12.2*	4.4	2.5**
上游干流区域	-3.6	-0.7	-11.7**	1.9
中游干流区域	5.2	4.6	-1.6	3.3**
下游干流区域	10.9*	5.9	13.6	1.6
三角洲平原区	15.2**	8.3	14.4*	3.0**
长江流域	2.6	2.6	-0.4	1.4**

注：\*表示趋势显著，显著性水平为 0.10；\*\*表示趋势极显著，显著性水平为 0.05。

### 3.3 长江流域极端降水主导类型

从主导类型看，长江流域年均极端降水量为 565.9mm，均衡型极端降水量占比 34.1%，略高于偏前型和偏后型，单日型极端降水量占比最低(表 2)。

从子流域角度分析，长江流域 11 个子流域中，金沙江、岷沱江、鄱阳湖流域和下游干流区域主导极端降水类型为均衡型；嘉陵江、洞庭湖流域主导类型为偏后型；上游干流区域以偏前型为主导。与此同时，中游干流区域和三角洲平原区，偏前型、偏后型、均衡型极端降水量占比差距不大，为 3 类极端降水共同主导区域；汉江流域为偏后型和均衡型极端降水共同主导区，乌江流域为偏前型和均衡型极端降水主导区。

结合主导类型与变化趋势发现，长江流域极端降水主导类型趋于复杂化。具体而言，随着长江流域极端降水强度增加<sup>[16]</sup>，多数子流域不再以单一类型极端降水主导，未来偏前型、偏后型、均衡型极端降水可能成为长江流域极端降水主导类型。同时，单日型极端降水强度呈显著上升趋势，表明流域面临洪涝灾害加剧的风险。

表 2 1961~2019 年长江流域及其子流域不同类型极端降水均值与主导类型判断

流域名称	年均值 (mm)				主导类型与变化趋势
	偏前型	偏后型	均衡型	单日型	
金沙江流域	111.0	118.6	170.8	9.5	均衡型 ↓
岷沱江流域	142.4	163.8	196.9	24.0	均衡型 ↓
嘉陵江流域	129.2	153.3	133.5	35.6	偏后型 ↓
汉江流域	135.3	159.7	156.0	30.9	偏后型 ↑ 均衡型 ↑
乌江流域	179.3	165.4	180.5	38.4	偏前型 ↓ 均衡型 ↓
洞庭湖流域	223.3	241.1	221.7	41.7	偏后型 ↑
鄱阳湖流域	259.0	282.5	312.7	29.9	均衡型 ↑
上游干流区	201.5	173.4	164.5	46.8	偏前型 ↓
中游干流区	216.1	200.4	207.4	43.8	偏前型 ↑ 偏后型 ↑ 均衡型 ↓
下游干流区	205.9	206.9	227.7	41.5	均衡型 ↑
三角洲平原区	167.9	176.4	178.0	33.2	偏前型 ↑ 偏后型 ↑ 均衡型 ↑
长江流域	167.2	176.8	192.9	29.0	均衡型 ↓

注：↑、↓ 分别表示对应主导极端降水类型呈上升、下降趋势。

### 3.4 厄尔尼诺与长江流域极端降水的相关关系

对长江流域及其子流域 4 类极端降水与前冬(前一年 12 月至当年 2 月)中部型(Niño3.4 区)、东部型(Niño1+2 区) ENSO 事件的相关性进行分析，探讨极端降水与两类厄尔尼诺的响应关系(图 5)。

整体而言，不同海区厄尔尼诺指数与长江流域及其子流域 4 类极端降水的相关性均以正相关为主，占比为 79.2%，说明前冬赤道中东太平洋海温异常偏高时，次年长江流域极端降水异常偏多。

从不同海区来看，Niño1+2 区与长江流域极端降水的相关性强于 Niño3.4 区，具体表现为：长江流域偏前型、均衡型和单日型极端降水与 Niño1+2 区呈显著正相关，Niño3.4 区仅与均衡型极端降水呈显著正相关。

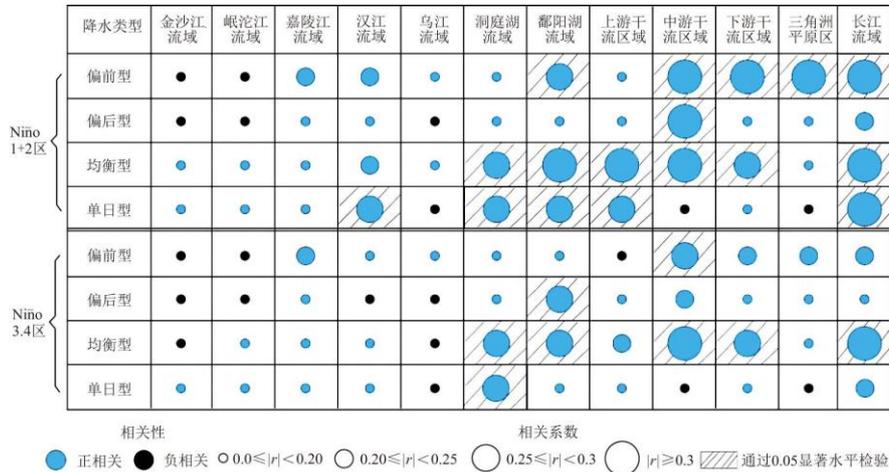


图 5 长江流域极端降水与前冬厄尔尼诺指数的相关分析

对于流域而言，与长江流域全流域类似，Niño1+2 区与子流域极端降水的相关性强于 Niño3.4 区，同时，位于长江流域东部的子流域与厄尔尼诺的响应关系强于西部子流域。具体表现为，鄱阳湖流域、三角洲平原区和中、下游干流区域偏前型极端降水与 Niño1+2 区显著正相关，洞庭湖、鄱阳湖流域和长江干流区域均衡型极端降水与 Niño1+2 区显著正相关，汉江、洞庭湖、鄱阳湖流域和上游干流区域单日型极端降水与 Niño1+2 区显著正相关；偏后型极端降水与 Niño1+2 区相关性较弱，仅是中游干流区域偏后型极端降水与 Niño1+2 区显著相关。值得一提的是，中游干流区域偏前型、偏后型、均衡型极端降水与 Niño1+2 区相关性显著 ( $p < 0.05$ )，是与厄尔尼诺响应关系较突出的子流域。

Niño3.4 区与子流域极端降水的相关性明显减弱，以偏前型、单日型极端降水尤为显著，仅有中游干流区域偏前型降水、洞庭湖流域单日型降水与 Niño3.4 区显著相关；对偏后型极端降水而言，相比于 Niño1+2 区，与厄尔尼诺响应关系显著的子流域由中游干流区域转为鄱阳湖流域；均衡型极端降水中，与 Niño3.4 区响应关系显著的子流域为洞庭湖、鄱阳湖流域和中、下游干流区域。

## 4 讨论

1998 年，夏季中国长江流域发生特大洪涝灾害，特别是 110° E 以东的江南地区、湖南东北部、江西北部降水均超出多年均值 400mm 以上。1998 年长江流域主要经历了 2 次明显的强持续性降水过程，第 1 降水阶段为：5 月中旬到 6 月中下旬，属于中国雨带正常由华南地区北移至江南地区；第 2 降水阶段为：7 月下旬，与第 1 阶段相比，降水过程具有局地突发性，并非华南地区向北传播的雨带<sup>[30]</sup>。其中，武汉 7·21 特大暴雨是 1998 年长江流域洪涝的标志性天气事件，引发 1998 年洪水顶峰。

为了更好地验证结果分析 3.1 节中，1998 年洪水与偏前型极端降水的关系，利用武汉站降水数据，统计全年极端降水事件 (表 3)。结果表明：(1) 1998 年，武汉地区共发生极端降水事件 12 次，主要集中在 4~7 月。在极端降水类型上，偏后型极端降水发生频次最多，为 4 次，其次是偏前型与均衡型降水；(2) 从极端降水量分析，1998 年，长江流域 3 次偏前型极端降水事件降

水量累计为 590.9mm, 占全年极端降水量的 45.0%; 偏后型、均衡型极端降水量比重之和与偏前型极端降水相当; 单日型极端降水量占比为 9.2%。说明 1998 年, 长江流域洪水与偏前型极端降水密切相关; (3) 从极端降水阶段分析, 第 1 阶段极端降水量约为 300mm, 极端降水天数为 15d; 第 2 阶段极端降水天数为 9d, 极端降水量比第 1 阶段降水量多一倍。由此可知, 相比于第 1 阶段极端降水事件, 第 2 阶段极端降水事件历时短, 降水强度大, 是造成 1998 年长江流域特大洪涝的重要原因。

表 3 1998 年武汉极端降水类型识别结果

序号	开始时间	结束时间	持续天数	极端降水类型	降水量
1	3-31	4-01	2.0d	偏后型	50.6mm
2	4-04	4-08	5.0d	偏前型	79.3mm
3	4-11	4-12	2.0d	偏前型	40.3mm
4	4-11	4-24	3.0d	偏后型	155.3mm
5	5-07	5-14	8.0d	均衡型	115.2mm
6	5-21	5-24	4.0d	偏后型	57.2mm
7	6-11	6-13	3.0d	均衡型	44.0mm
8	6-27	7-04	8.0d	偏后型	84.4mm
9	7-13	7-13	1.0d	单日型	48.4mm
10	7-17	7-17	1.0d	单日型	72.3mm
11	7-20	7-26	7.0d	偏前型	471.3mm
12	7-28	7-30	3.0d	均衡型	96.3mm

基于前文结果, 结合降雨空间分布图(图 6), 将长江流域第 2 阶段(7 月 20~31 日)突发性降雨过程分为 3 个时期:

(1) 首次发展期(7 月 20~26 日):

7 月 20 日, 长江流域强降雨范围相对较小; 7 月 21~23 日, 降雨中心范围扩大, 主要位于长江干流区、洞庭湖和鄱阳湖流域北部, 且在长江干流附近形成一条雨带; 后期降水中心向鄱阳湖流域北部转移, 范围逐渐缩小。该时期降水过程属于偏前型极端降水事件。

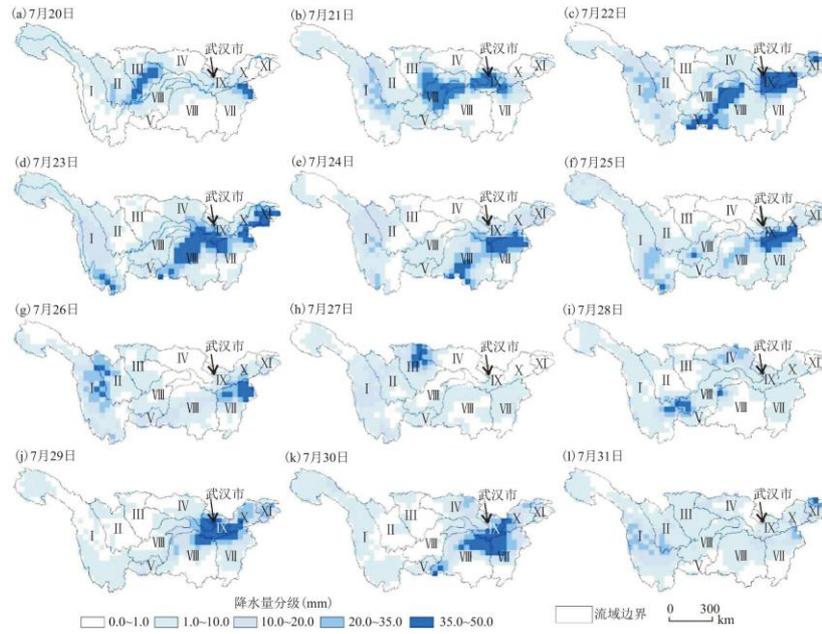


图6 1998年长江流域特大洪涝第2阶段(7月20~31日)降水变化过程

(2) 衰退过渡期(7月27日):

降雨中心向北移动且范围缩小, 无极端降水事件发生。

(3) 二次发展期(7月28~31日):

降雨再次增强, 区域降雨中心主要分布在长江中游干流区, 以及洞庭湖和鄱阳湖流域; 7月31日, 随着副高逐渐西伸北移, 降水量减少, 降雨过程趋于消退。

对第2阶段武汉关水位和武汉降水量变化过程进行分析发现: 受6月27日至7月17日极端降水影响, 7月20日, 武汉关水位(27.37m)已超警戒水位; 随后, 7月24~25日, 武汉关涨幅最大, 但同期降水量并未超过极端降水阈值。从极端降水类型分析, 武汉关洪水水位逐渐上升过程, 前后经历了1次偏前型和1次均衡型极端降水事件, 分别持续7、3d。其中, 7月21日降水量达285.7mm, 远超过极端降水阈值(21.3mm), 是引发武汉洪水水位快速上升的主要原因。

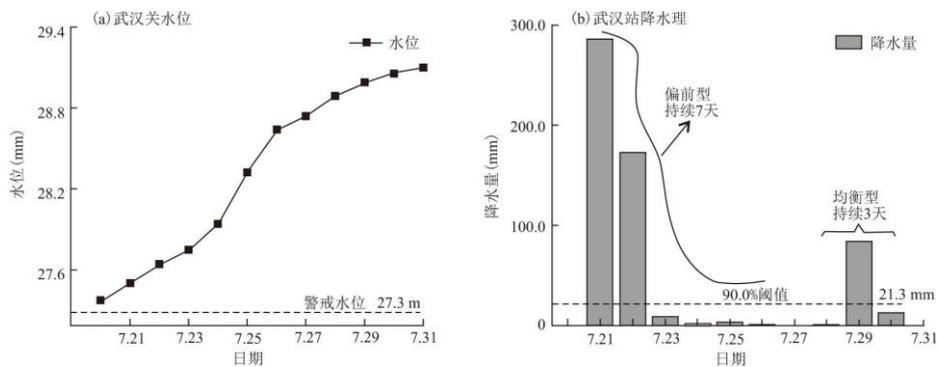


图 7 1998 年长江流域特大洪涝第 2 阶段(7 月 20~31 日)武汉水位与降水量变化

1998 年长江流域特大洪涝淹没土地面积  $21 \times 10^6 \text{hm}^2$ , 经济损失超 200 亿美元<sup>[31]</sup>。结合图 4 和图 6 分析结果, 笔者认为, 1998 年, 长江流域 7 月特大洪涝主要为偏前型极端降水所致。此次偏前型极端降水来势凶猛, 在地表形成径流引发洪水。上述结果启示, 在未来研究中, 需深入特大洪涝年份极端降水过程, 明确不同洪涝年份极端降水主导类型, 凝练规律, 探讨极端降水与区域洪水的响应关系。

## 5 结论与展望

基于中国地面逐日降水格点数据, 面向极端降水事件过程, 对偏前型、偏后型、均衡型和单日型等 4 类极端降水事件进行识别。结合趋势分析、相关分析等研究方法, 挖掘 1961~2019 年长江流域不同极端降水类型降水量时空变化特征, 探讨东部型、中部型 ENSO 事件对长江流域及其子流域极端降水的影响。得出结论如下:

(1) 在年代变化上, 以 1998 年为时间节点, 将 1961~2019 年分为快速增暖期和变暖停滞期两个阶段。在快速增暖期, 长江流域偏前型极端降水波动增加, 偏后型、均衡型和单日型极端降水以平稳波动为主; 在变暖停滞期, 偏前型极端降水呈下降趋势, 其余 3 类极端降水量呈增加趋势。

(2) 在趋势变化上, 长江流域偏前型、偏后型极端降水上升趋势大致同步, 均衡型极端降水逐渐减少, 单日型极端降水上升趋势最为显著。值得一提的是, 位于长江主干道东南部的子流域, 如洞庭湖、鄱阳湖、下游干流区域、三角洲平原区等流域, 4 类极端降水均呈现出上升趋势。

(3) 在空间变化上, 长江流域偏前型、偏后型降水量呈现“东南高一西北低”的空间分布特征; 均衡型降水量在金沙江、鄱阳湖流域表现为高值区, 汉江和金沙江上游为降水低值区; 单日型极端降水在空间上表现为“中间高、两侧低”的分布特征。

(4) 在影响因素上, 长江流域极端降水与两类厄尔尼诺指数以正相关关系为主, 且与 Niño1+2 区的相关性高于 Niño3.4 区。对不同子流域而言, 长江干流区、三角洲平原区、洞庭湖和鄱阳湖流域与两类厄尔尼诺事件的相关性高于其他子流域。

面向事件过程的长江流域极端降水时空变化研究, 未来有许多工作值得探索。

(1) 多源数据的不同极端降水事件致灾过程验证。本文从资料可获得性、流域性大洪水等角度, 选取 1998 年武汉站降水数据和武汉关水文站水位数据, 分析偏前型极端降水的致灾过程, 尚未对长江流域其他洪水事件与极端降水过程进行分析; 空间上, 主要集中于长江中游的江汉平原, 长江流域其他区域洪水事件与极端降水过程的响应关系尚不明晰。不同极端降水过程, 形成流域洪水的机制不同。在未来研究中, 如何有效衔接极端降水与区域洪水的关系, 需甄别更多案例, 深刻认识偏前型、偏后型、均衡型和单日型极端降水致灾的时空差异性。

(2) 丰富流域极端降水主导类型的判断视角。本文以 4 类极端降水年均降水量为基础, 以降水量相对量最大值为判断标准, 识别长江流域 11 个子流域极端降水的主导类型。在未来研究中, 可从不同类型极端降水持续时间、降水强度的时空差异性, 丰富流域极端降水主导类型含义, 探讨不同年代流域极端降水主导类型的时间变化, 探讨不同区域主导类型的空间差异, 探讨不同类型极端降水持续性和致灾强度的时空差异, 以期更好理解极端降水时空变化规律, 进而服务于流域洪涝灾害风险管理决策。

(3) 重新界定不同类型极端降水概念。随着逐小时降水数据、逐小时洪水数据集的发布, 使得精细化降水过程成为可能。将不同极端降水过程, 由逐日尺度提高到逐小时尺度, 重新界定面向过程的极端降水事件概念, 衔接逐小时尺度洪水数据, 提高极端降水事件的时间分辨率, 可以更加真实反映极端降水的致灾过程, 为极端降水综合致灾研究提供新的视角。

---

## 参考文献:

- [1] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts [J]. *Science*, 2000, 289 (5487): 2068-2074.
- [3] MIRALLES D G, GENTILE P, SENEVIRATNE S I, et al. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2019, 1436 (1): 19.
- [4] 孔锋, 孙劭, 王一飞, 等. 近 56a 来中国东部地区雨涝事件时空演变特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27 (7): 1554-1564.
- [5] 孔锋, 方建, 乔枫雪, 等. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征 (1961~2013 年) [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28 (12): 3051-3067.
- [6] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮南北极极端降水时空变化特征及其影响因素 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34 (3): 354-363.
- [7] 邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30 (5): 1264-1274.
- [8] JANSSEN E, SRIVER R L, WUEBBLES D J, et al. Seasonal and regional variations in extreme precipitation event frequency using CMIP5 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (10): 5385-5393.
- [9] 尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇. 基于情景的 1951-2011 年中国极端降水风险评估 [J]. *地理学报*, 2018, 73 (3): 405-413.
- [10] WU X, GUO S, YIN J, et al. On the event-based extreme precipitation across China: Time distribution patterns, trends, and return levels [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 305-317.
- [11] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极极端降水时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75 (5): 989-1007.
- [12] SHANG W, LI S, REN X, et al. Event-based extreme precipitation in central-eastern China: Large-scale anomalies and teleconnections [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54 (3): 2347-2360.
- [13] PENDERGRASS A G. What precipitation is extreme? [J]. *Science*, 2018, 360 (6393): 1072-1073.
- [14] 唐承丽, 陈伟杨, 吴佳敏, 等. 长江经济带开发区空间分布与产业集聚特征研究 [J]. *地理科学*, 2020, 40 (4): 657-664.
- [15] 闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系 [J]. *地理学报*, 2018, 73 (1): 25-40.
- [16] GUAN Y, ZHENG F, ZHANG X, et al. Trends and variability of daily precipitation and extremes during 1960-2012

---

in the Yangtze River Basin, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(3):1282-1298.

- [17] 王艳君, 刘俸霞, 翟建青, 等. 全球升温 1.5°C 与 2.0°C 目标下长江流域极端降水的变化特征[J]. *气象科学*, 2019, 39(4):540-547.
- [18] 胡思, 曾祎, 王磊, 等. 长江流域极端降水的区域频率及时空特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(8):2008-2018.
- [19] 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. *大气科学*, 2018, 42(3):640-655.
- [20] 李艳, 马百胜, 杨宣. 两类 ENSO 事件对中国东部地区极端降水的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2):469-482.
- [21] 孔锋. 中国不同强度降雨量的多属性时序变化特征及其对 ENSO 的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6):1387-1400.
- [22] 中国气象局国家气候委员会. 2020 年中国气候公报[R]. 北京: 中国气象局国家气候委员会.
- [23] 孙占东, 黄群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11):2703-2710.
- [24] 杨荣金, 孙美莹, 傅伯杰, 等. 长江流域生态系统可持续管理策略[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5):1091-1099.
- [25] 吴志广, 陈述. 长江流域水资源开发保护中的关键科学和技术问题[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(4):1-6.
- [26] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(5):611-625.
- [27] 国家气象信息中心. 中国地面降水  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集(V2.0)评估报告[R]. 北京: 国家气象信息中心, 2012.
- [28] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American statistical association*, 1968, 63(324):1379-1389.
- [29] 杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J]. *地理学报*, 2018, 73(9):1748-1764.
- [30] 齐艳军, 张人禾, Tim LI. 1998 年夏季长江流域大气季节内振荡的结构演变及其对降水的影响[J]. *大气科学*, 2016, 40(3):451-462.
- [31] 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. *气候与环境研究*, 1998(4):13-26.