

# 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征

王 婷, 李双双, 延军平, 何锦屏

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** 利用 1961—2019 年中国地面降水月值格点数据, 结合趋势分析、合成分析及  $T$  检验等气候诊断方法, 对中国夏季降水时空变化特征进行分析, 进而探讨不同类型 ENSO 事件对应夏季降水规律。结果表明: 20 世纪 60—90 年代末, 长江、淮河夏季降水波动增加, 海河降水持续下降, 符合“南涝北旱”空间特征; 21 世纪后, 除淮河夏季降水下降之外, 其他流域降水均呈增加趋势; 对于不同 ENSO 发展类型而言, 以厄尔尼诺为主导的事件, 副高脊线西伸增强, 中国夏季多雨区集中在江淮地区, 由南向北呈现“中间涝, 南北旱”的空间格局; 以拉尼娜为主导的事件中, 副高脊线东移、控制面积缩小, 中国夏季降水在胡焕庸线两侧、华南降水明显偏少; 对于两种转换型事件而言, 当前冬发生厄尔尼诺、夏季转为拉尼娜时, 副高西伸且面积扩大, 中国夏季降水偏多; 反之, 副高东移且面积缩小, 中国夏季降水整体偏少。

**关键词:** 夏季降水; 时空变化; ENSO; 九大流域; 中国

全球气温较工业化前高出约  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这种变暖趋势仍在继续<sup>[1]</sup>。气温升高, 导致大气持水能力增强, 更易形成极端降水<sup>[2]</sup>。对于社会—经济系统而言, 短时间强降水易引发洪涝灾害, 给人民的生产、生活带来严重经济损失<sup>[3]</sup>。以 2020 年夏季降水为例, 长江和淮河流域遭遇较大洪水, 中国共有 634 条河流超过警戒水位, 共计造成 6346 万人次受灾、直接经济损失达 1789.6 亿元<sup>[4]</sup>。中国降水主要集中在夏季, 且雨带随季风进退早晚和强度变化, 导致区域洪涝灾害呈现年代转化特征<sup>[5]</sup>。

具体而言, 中国夏季降水在 20 世纪 70 年代末发生明显转折, 前期东部降水呈现南北涝中间旱, 后期转变为中间涝南北旱; 90 年代初中国东部降水再次转变为南涝北旱的偶极型分布<sup>[6-8]</sup>。关于中国夏季降水年代转折原因, 许多学者以北极涛动、ENSO (El Nino-Southern Oscillation)、青藏高原积雪、太平洋年代际震荡等环流机制为切入, 进行夏季降水年代转变的机理解释, 并取得丰富成果<sup>[9-14]</sup>。值得一提的是, ENSO 作为海洋和大气作用遥相关影响降水的重要胁迫因子之一, 探讨 ENSO 与中国夏季降水异常的遥相关关系, 也是地理学研究气候变化与区域适应的热点<sup>[15-19]</sup>。

近年来, 学界对于 ENSO 的认识呈现新趋势, 即空间细化、时间细化和强度细化<sup>[20]</sup>。其中, 空间细化关注赤道太平洋最大海温异常区域的差异, 分析东部型和中部型 ENSO 事件对中国东部降水异常的影响<sup>[21-23]</sup>; 对时间细化而言, 更关注 ENSO 事件从前冬到夏季发展特征。相关研究发现在厄尔尼诺发展期, 西太平洋副热带高压 (以下简称“西太副

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771030, 41877519); 中央高校基本科研业务费科研发展专项 (GK202003061); 陕西师范大学研究生创新团队项目课题 (TD2020035Y)

作者简介: 王婷 (1997-), 女, 陕西商洛人, 硕士, 研究方向为区域灾害防治。E-mail: Jieyan7991@163.com

通讯作者: 李双双 (1988-), 男, 陕西潼关人, 博士, 讲师, 研究方向为全球变化与区域灾害防治。

E-mail: lss40609010@126.com

高”)偏弱,西南气流北上偏弱,导致中国北方降水偏少;而在厄尔尼诺衰减期,西北太平洋低层受异常反气旋影响,导致中国雨带明显北移<sup>[24]</sup>。前期研究中,ENSO事件发生区空间差异与东亚降水响应关系的研究相对较多,对时间细化研究相对较少;以ENSO发展型或衰减型事件探讨降水异常的研究相对较多,系统对比不同ENSO发展事件响应差异的研究相对较少;关注不同ENSO发展型环流机制的研究相对较多,以地理学时空分异角度为切入,分析ENSO发展型与中国夏季降水响应差异相对较少。基于此,细化前冬—夏季ENSO事件发展过程,利用中国地面降水格网数据,辅以趋势分析、合成分析等气候诊断方法,本文对中国夏季降水异常与不同发展型ENSO事件的响应关系进行分析,以期为不同流域旱涝异常适应和厄尔尼诺气象服务提供理论基础。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源

本文降水数据源于国家气象信息中心提供的中国地面降水月值格点数据集,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,该数据集涵盖中国地面2472个国家级气象观测站的降水资料,数据质量状况较好。ENSO数据来源于美国海洋与大气管理局(<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>),大气环流资料来源于美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)(<https://psl.noaa.gov>)的月尺度再分析资料。参考已有研究<sup>[25]</sup>,将中国划为九大流域,即松辽流域、海河流域、淮河流域、黄河流域、长江流域、珠江流域、东南诸河流域、西南诸河流域以及内陆河流域(图1)。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 ENSO事件类型划分

利用美国国家海洋和大气管理局提出以Niño 3.4区3个月海温平均值偏离基准期的程度来衡量ENSO事件,进而划分出厄尔尼诺、正常、拉尼娜三类事件。根据前冬、春季和夏季ENSO发展状况,将ENSO事件细分为7个类型(表1)。

具体而言,若前冬和春季海温距平正常,夏季形成厄尔尼诺;或者前冬为正常,春季和夏季为厄尔尼诺,则该年被定义为厄尔尼诺发展型;若前冬、春季和夏季均为厄尔尼诺,则该年被定义为厄尔尼诺持续型;若前冬为厄尔尼诺,春季海温维持偏高或转为正常,夏季海温转为正常,则该年为厄尔尼诺衰退型;若前冬为厄尔



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 中国九大流域分布

Fig. 1 Distribution of the nine major basins in China

表1 1961—2019年以来发生的不同发展型 ENSO 事件  
Table 1 The patterns of different development ENSO events from 1961 to 2019

类型	年份
厄尔尼诺持续型	1987, 2015
厄尔尼诺发展型	1963, 1982, 1991, 1997, 2002, 2004
厄尔尼诺衰退型	1966, 1969, 1977, 1978, 1980, 1983, 1992, 1995, 2003, 2005, 2016, 2019
拉尼娜持续型	1971, 1974, 1975, 1985, 1999, 2000, 2011
拉尼娜衰退型	1976, 1984, 1989, 1996, 2001, 2006, 2008, 2012, 2017, 2018
厄尔尼诺—拉尼娜转换型	1964, 1970, 1973, 1988, 1998, 2007, 2010
拉尼娜—厄尔尼诺转换型	1965, 1972, 2009

厄尔尼诺，春季或夏季转为拉尼娜，则为厄尔尼诺—拉尼娜转换型。

1.2.2 趋势分析

对 1961—2019 年中国夏季降水进行逐栅格趋势拟合，以分析降水空间趋势特征。计算公式如下：

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Pr_i) - \left( \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n Pr_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

(1)

式中： $slope$  表示流域夏季降水变化趋势； $i$  为时间序列； $Pr_i$  表示第  $i$  年夏季降水量 (mm)； $n$  为研究时段长度。当  $slope>0$  时，表示降水呈增加趋势；反之，当  $slope<0$  时，表示降水量呈减少趋势。

1.2.3 水汽输送通量与散度

本文计算不同发展类型 ENSO 事件中国夏季水汽通量散度，以描述水汽的辐合辐散状况。其中，水汽输送通量指单位时间内流经单位截面积的水汽质量，通常包括水平水汽输送通量和垂直水汽输送通量。由于水汽通量数值和方向仅表示水汽来源和输送路径，区域降水的空间分布和量级则与水汽通量散度密切相关<sup>[20]</sup>。在单位气柱内，整层水汽输送通量  $Q$  和水汽通量散度  $D$  的计算公式分别为：

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q \vec{V} dP$$

(2)

$$D = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} \nabla (q \vec{V}) dP$$

(3)

式中： $g$  为重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )； $q$  为大气比湿 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )； $P_s$  和  $P_t$  分别为所选气柱底气压 (hPa) 和顶气压 (hPa)， $P_s$  为积分下界气压，取地面气压， $P_t$  为 300 hPa； $\vec{V}$  为该单位气柱内各层大气风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。 $Q$  包括纬向  $qu$  和经向  $qv$  的水汽通量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )。其中，水汽通量散度为正时，表征区域水汽辐散，不利于区域降水形成；水汽通量散度为负时，表征区域水汽辐合，有利于区域降水形成。

1.2.4 合成分析

为了分析大尺度环流异常影响中国降水的物理机制，从厄尔尼诺、拉尼娜为主导和两种类型转化三个角度，计算不同发展型 ENSO 事件发生年份对应的夏季降水、水汽通

量和散度均值,并减去1961—2019年夏季三个变量平均态,进而对不同发展型ENSO事件下夏季降水、水汽通量和散度空间格局差异进行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 中国夏季降水年代变化特征

按照区域空间位置,将黄河、淮河和海河归并为黄淮海平原,将长江、珠江、西南诸河、东南诸河归并为南方河流,将内陆河(主体为西北地区)和松辽流域归为内陆和东北流域;并结合20世纪70年代末中国东部呈现“南涝北旱”的降水年代转化,21世纪初雨带北移,黄淮降水增多的规律,对1961—2019年中国夏季降水年代变化特征进行分析(图2)。

(1) 黄淮海平原。黄河、淮河和海河夏季降水年代变化具有不同的特征。其中,黄河流域夏季降水并未表现出明显的线性趋势。从10年滑动平均曲线看,1961—1964年、1975—1982年、1991—1996年和2003—2011年形成降水偏多期,1965—1974年、1983—1990年、1997—2002年和2012—2017年为降水偏少期(图2a)。

淮河流域夏季降水最明显的特征是:20世纪60年代至21世纪初降水波动上升,

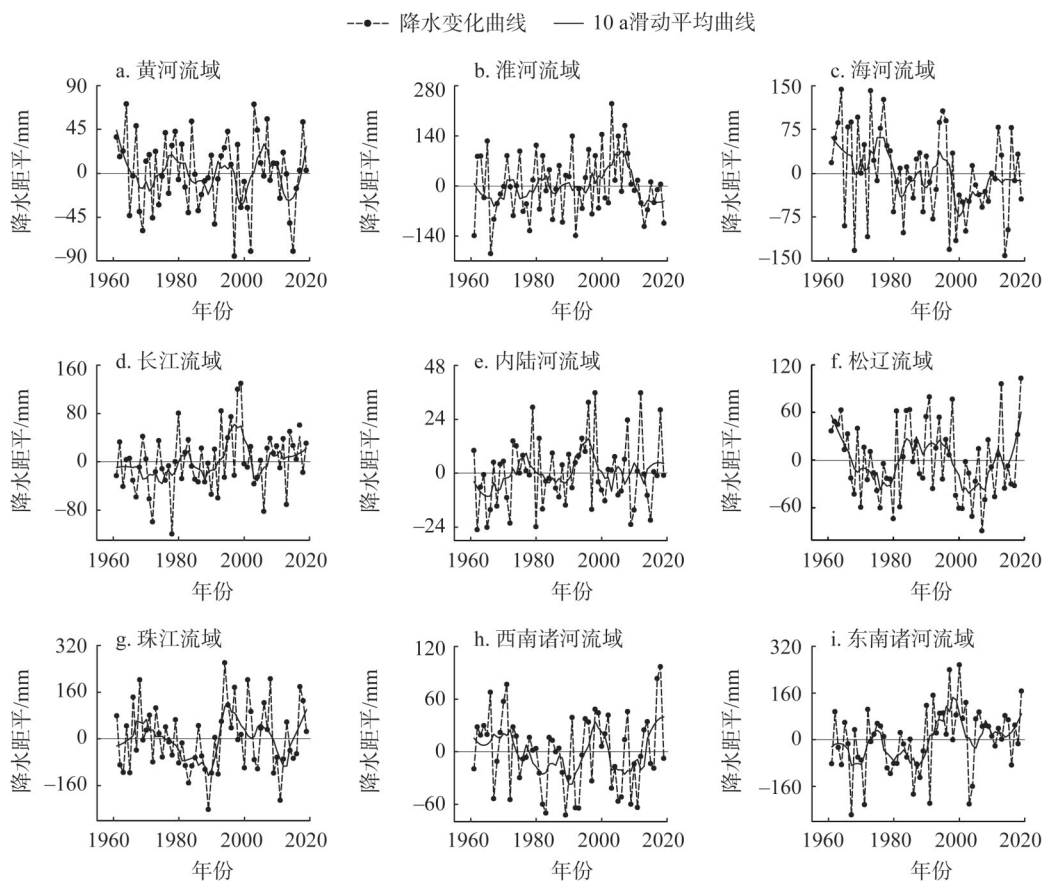


图2 1961—2019年中国九大流域夏季降水变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of summer precipitation of the nine major basins in China from 1961 to 2019



1993—2008 年形成相对多雨期; 2008 年后降水骤然下降, 且多年处于负距平 (图 2b)。海河与淮河流域同处东部季风区, 受雨带南北移动影响, 当东亚夏季风偏弱时, 雨带偏南, 往往造成淮河流域多雨、海河流域少雨, 形成典型的“南涝北旱”, 进而两者夏季降水变化规律呈现相反趋势, 即 20 世纪 60 年代至 21 世纪初海河流域降水波动下降, 2000—2010 年是海河流域近 60 年降水最低值期 (图 2c)。

(2) 南方流域。珠江和西南诸河流域 20 世纪 90 年代前夏季降水特征相似, 降水较常年均偏少 (图 2g、图 2h)。其中, 珠江流域 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初期, 降水先增多后波动下降, 2012 年之后有增加趋势; 需要关注的是, 进入 21 世纪之后, 中国干旱中心逐渐由华北转为西南, 西南流域降水在 2000—2012 年形成降水低值区, 持续性降水偏低对区域社会、经济和生态系统造成严重影响<sup>[27]</sup>。

对于长江流域和东南诸河而言, 两者降水年代变化也具有相似性, 大致可分为三个阶段: 20 世纪 60—80 年代末, 降水距平多为负距平, 且有微弱增加趋势; 1987—2003 年, 区域降水先增加后减少; 2004 年之后, 降水呈现波动增加趋势 (图 2d、图 2i)。

(3) 松辽流域与内陆河流域。1961—2019 年, 松辽流域夏季降水整体呈“W”型, 表现为 2 个谷值期和 1 个峰值期。其中, 降水偏低期为 20 世纪 60 年代中期至 80 年代初、90 年代末至 21 世纪初; 降水偏多期为 20 世纪 80—90 年代 (图 2f)。

20 世纪 60—70 年代, 内陆河流域夏季降水偏多; 90 年代至 21 世纪初降水先增加后减少, 较常年形成一个峰值期; 进入 21 世纪, 内陆河降水转为低值波动, 到 2012 年后有所回升 (图 2e)。

综上所述, 对于中国北方河流而言, 淮河和海河夏季降水呈现反向变化, 黄河流域夏季降水呈现 5~8 a 周期波动变化; 相对内陆河流域降水波动变化, 松辽流域年代波动特征更加明显, 特别是 20 世纪 90 年代末, 松辽流域出现年代际减少; 对于中国南方河流而言, 长江流域和东南诸河年代更为相似, 西南诸河和珠江变化更为相似。

## 2.2 中国夏季降水空间变化特征

1961—2019 年, 西南诸河、海河流域、松辽流域南部夏季降水呈现显著下降, 而长江中下游、东南诸河、内陆河流域的河西走廊、天山南北和青藏高原西部降水呈现显著增加, 两者降水变化趋势均通过 95.0% 的置信水平 (图 3a)。近 20 年来中国夏季降水变化呈现不同的变化趋势。其中, 淮河流域夏季降水呈现显著减少, 东北平原北部、黄土高原中部和海河流域降水显著增加, 使得中国东部季风区“华南干旱—长江中下游湿润—淮河干旱—华北湿润”的降水格局更加明显; 对于西部而言, 河西走廊东部依然是夏季降水显著增加区, 天山北麓和西藏地区夏季降水增加趋势有所减缓 (图 3b)。

## 2.3 中国夏季降水空间异常与不同类型 ENSO 事件响应关系

对于厄尔尼诺为主导的三类事件, 中国东部夏季降水异常形成南北旱中间涝的“三极型”空间分布, 由南向北呈现出“珠江偏少—江淮偏多—华北偏少”的空间格局 (表 2)。

相对于正常年, 前冬为厄尔尼诺, 并持续到次年夏季, 中国沿淮河南部和长江流域形成异常多雨带 (图 4a)。其中, 60.0% 的淮河流域降水偏多, 且 31.0% 的区域降水异常偏多,  $t$  检验通过 95.0% 的显著水平; 雨带以北的内陆河、黄河流域、海河流域、松辽流域以及山东半岛降水则偏少, 特别是黄河和海河流域降水偏少区占比均超过 90.0%。

对于厄尔尼诺发展型和衰退型而言, 中国夏季降水异常格局变化不大, 依然呈现

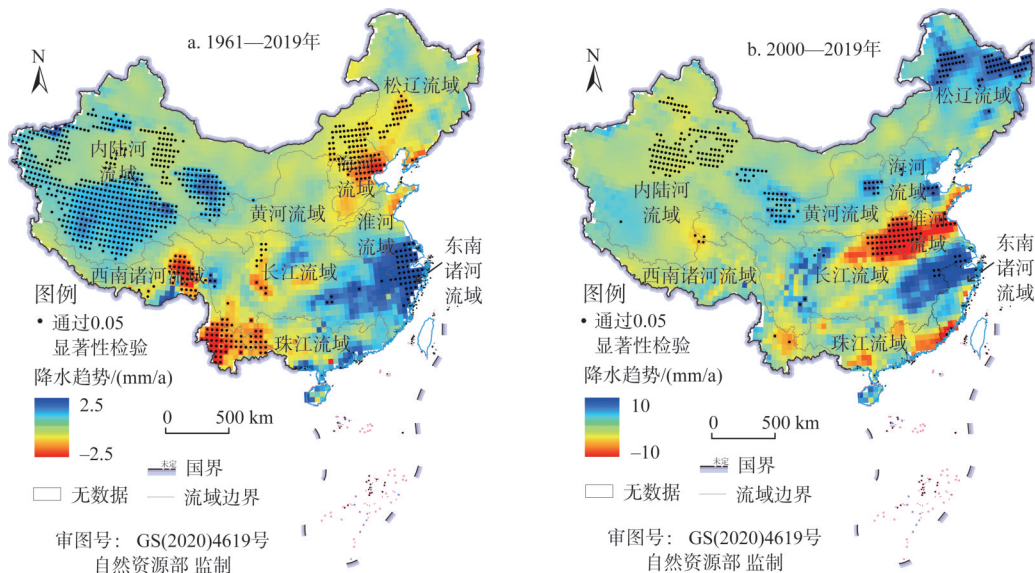


图3 1961—2019年中国夏季降水空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of summer precipitation in China from 1961 to 2019

“三级型”空间分布，仅是降水异常强度有所减弱（图4b、图4c）。其中，黄河流域厄尔尼诺发展期有34.0%的区域降水显著偏少，空间范围向四川盆地扩展；对于衰退期而言，黄河流域降水显著下降区则减少到7.0%，降水显著偏多区转变为青藏高原西部（图4c）。

对于拉尼娜为主导的两类事件，中国夏季降水沿“胡焕庸线”两侧形成“东北—西南向”的少雨带。其中，拉尼娜持续年，松辽流域、黄河流域、长江中游以及珠江流域降水偏少，特别是黄河流域有34.0%的区域降水显著偏少；而降水偏多区主要集中在淮河流域、长江中下游北部（图4d）。值得一提的是，2000年后，10次拉尼娜衰退型事件有6次发生。21世纪之后，青藏高原西北部降水显著偏多（图4e）。结合夏季降水趋势空间分布图（图3），内陆河流域趋于湿润化，与拉尼娜衰退型事件频发具有很好的对应性。

对于两种转换型ENSO事件，中国夏季降水格局具有明显的空间差异。其中，厄尔尼诺—拉尼娜型，除松辽流域、东南诸河流域和珠江流域之外，其他流域夏季降水均趋于偏多，黄河、海河流域显著增加区超过90.0%以上（图4f）。

拉尼娜—厄尔尼诺年，中国夏季降水整体偏少，降水偏多区主要集中在淮河流域、东南诸河流域和长江上游；而内陆河、黄河、海河流域、东北平原、长江流域南部、珠江流域以及云南南部降水偏少（图4g）。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

基于Niño 3.4区海温异常数据，细分7种不同发展类型的ENSO事件；结合中国地面降水月值格点数据集和再分析数据，辅以趋势分析、合成分析等气候诊断方法，探讨中国夏季降水对不同发展型ENSO事件的响应。得到主要结论如下：

（1）在趋势变化上，1961—2019年，青藏高原、长江中下游、东南诸河流域降水呈

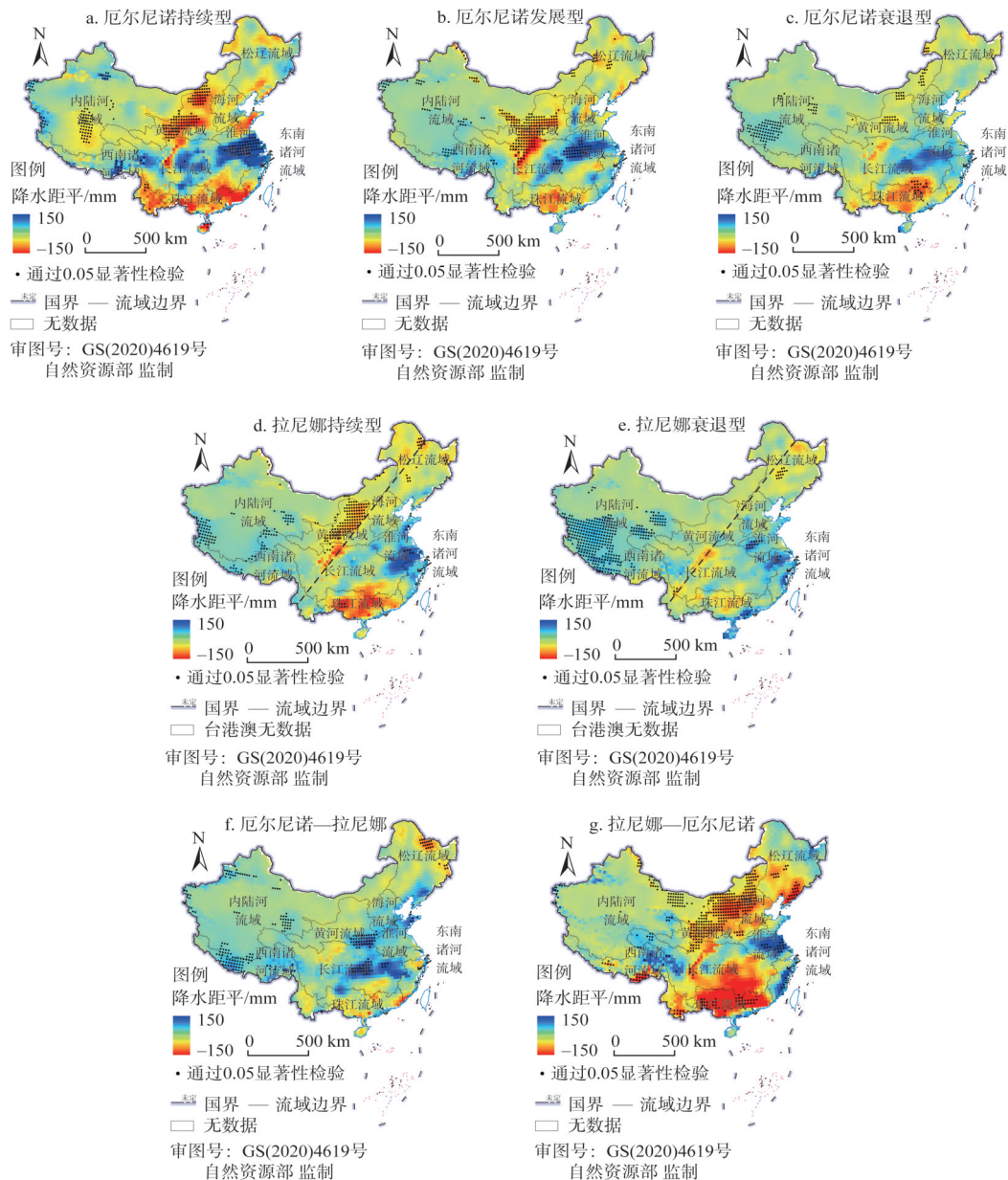


图4 不同发展型ENSO事件类型下中国夏季降水异常空间分布

Fig. 4 Spatial pattern of summer precipitation anomaly of different development ENSO events in China

现显著的增加趋势，海河流域、东北平原南部、西南诸河流域降水显著下降；2000—2019年，夏季降水空间分异明显，淮河流域降水为显著减少趋势，松辽流域北部、黄土高原、祁连山地降水呈现显著增加趋势。

(2) 在响应关系上，以厄尔尼诺为主导，中国夏季降水自南向北呈现“少—多—少”的格局。拉尼娜持续和发展年，在“胡焕庸线”两侧地区夏季降水偏少，青藏高原降水显著偏多。转换型ENSO中，前冬发生厄尔尼诺，夏季转为拉尼娜，中国降水偏



表2 不同发展型ENSO事件下中国九大流域夏季降水异常

Table 2 Summer precipitation anomalies in the nine major basins of China with different development ENSO events (mm)

类型	松辽河流域	内陆河流域	海河流域	黄河流域	淮河流域	长江流域	西南诸河流域	东南诸河流域	珠江流域
厄尔尼诺持续型	-17.3	-9.9	-35.7	-68.3	87.7	24.7	-0.6	30.1	-93.0
厄尔尼诺发展型	-23.0	1.3	-17.9	-49.6	74.6	2.1	20.8	21.7	-53.7
厄尔尼诺衰退型	-13.7	1.9	7.4	-13.4	33.4	6.1	1.4	13.8	-65.7
拉尼娜持续型	-32.4	6.8	-18.4	-38.4	58.6	1.7	22.5	41.7	-91.8
拉尼娜衰退型	-21.2	13.8	5.9	-0.7	45.9	5.6	15.2	46.6	0.2
厄尔尼诺—拉尼娜	-16.2	10.5	40.1	11.5	39.6	33.1	34.6	-11.4	-27.9
拉尼娜—厄尔尼诺	-23.6	-11.3	-80.4	-61.4	88.3	-41.0	-15.0	99.8	-152.9

多；反之，拉尼娜—厄尔尼诺，中国夏季降水偏少。

(3) 在环流影响上，以厄尔尼诺为主导，副高西伸增强，是造成长江流域、淮河以及东南诸河降水偏多的主要原因；35°N以北的松辽流域南部、海河流域以及黄河流域，受异常偏北风影响，降水偏少。拉尼娜持续和发展年，受西太平洋影响形成了异常的气旋，阻碍水汽北上，造成长江下游、淮河流域降水偏多。转换型ENSO中，厄尔尼诺—拉尼娜，无异常北风影响，副高脊线向西延伸，中国降水偏多；拉尼娜—厄尔尼诺，受异常北风影响，副高脊线东移，面积缩小，水汽输送减弱，中国夏季降水偏少。

3.2 讨论

3.2.1 不同类型ENSO事件年代变化特征

相关研究表明，近百年ENSO事件强度发生具有年代际变化，20世纪70—90年代末ENSO强度达到最强，且2000年以后强度有所减弱<sup>[28]</sup>。本文统计1961—2019年20次ENSO事件前冬—夏季Niño 3.4区海温异常，可印证与ENSO强度年代变化结论，2001—2012年超过±0.5℃海温ENSO事件仅有2次。2012年后，全球变暖停滞结束，ENSO事件强度有所增加，且以厄尔尼诺为主（图5a）。

统计不同类型ENSO事件发生频次年代变化，可以看出：1961—1980年、1981—2000年和2001—2019年三个时间段，拉尼娜衰退型事件占比增加，拉尼娜持续型事件和正常年所占减小，而厄尔尼诺衰退型事件占比经历了“多—少—多”的变化过程（图5b）。依据前文结论，当拉尼娜和厄尔尼诺衰退型事件逐渐增加时，淮河、长江流域和青藏高原降水将异常偏多。因此，如何将ENSO强度和不同类型事件年代变化结合，对中国夏季降水的影响机制进行分析，是未来研究的重要方向。

3.2.2 内陆河流域夏季降水空间规律的不确定性

受气象站点分布影响，内陆河流域夏季降水空间插值具有不确定性。其中，青藏高原由于地形和气候的影响，高寒气象台站数量相对较少，且主要集中在中、东部，这使得降水的空间插值具有不确定性，进而影响中国夏季降水空间格局的精度<sup>[29]</sup>。在未来研究中，需借助卫星遥感监测，获取较高精度的空间数据资料，对内陆河流域特别是青藏高原和天山山地夏季降水时空变化特征进行分析。

3.2.3 不同类型ENSO事件下中国夏季水汽输送特征

中国夏季降水是一个复杂的过程，受多种复杂因素影响，为厘清不同发展型ENSO



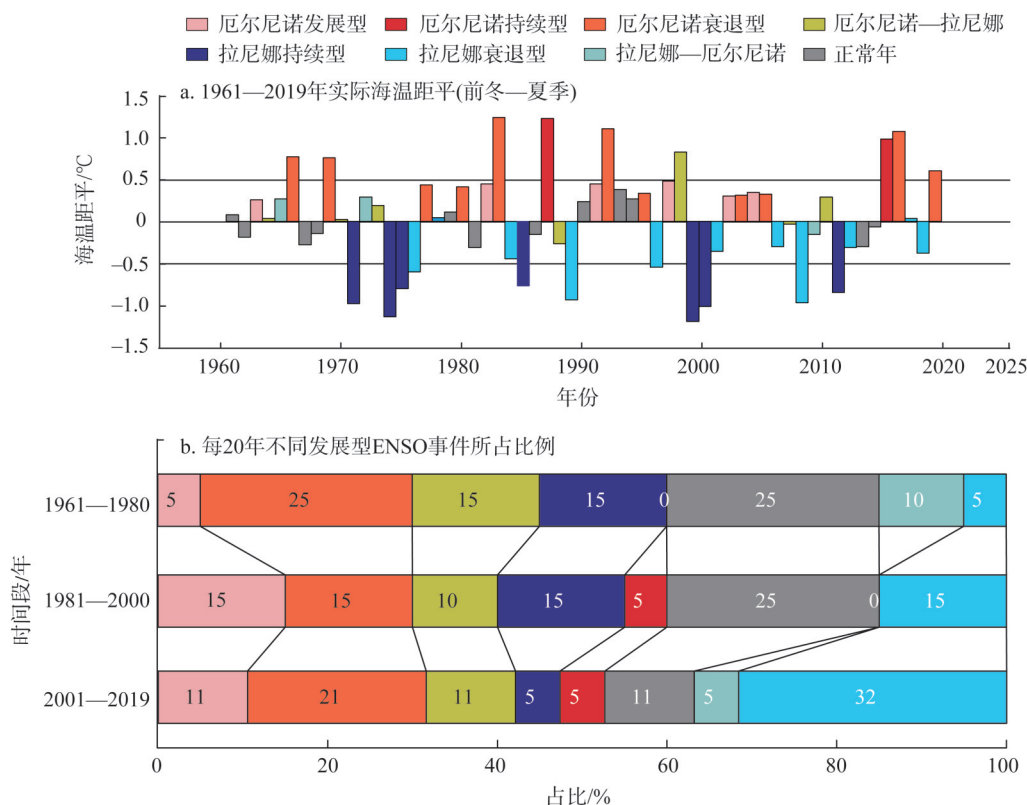


图5 1961—2019不同发展型ENSO事件年际变化特征

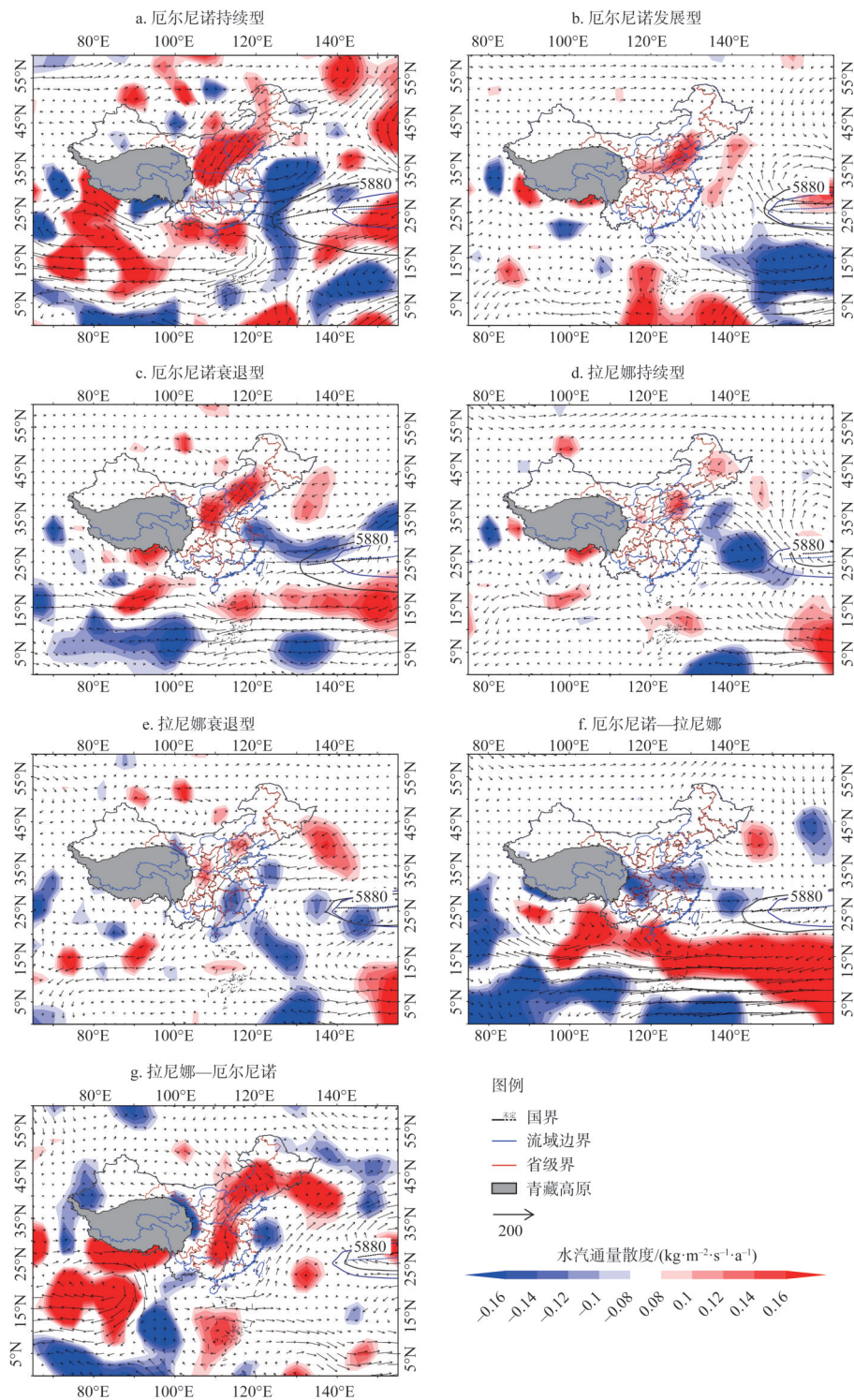
Fig. 5 Interannual variation characteristics of different development ENSO events from 1961 to 2019

事件下中国降水格局成因, 以下分别从水汽输送异常、副热带高压异常分析中国夏季降水异常的水汽输送特征(图6)。

在厄尔尼诺持续型事件中, 黄河中游、海河以及东北平原西部, 出现偏北风异常, 导致来自中国南海和孟加拉湾水汽向北输送偏弱, 华北地区降水偏少, 而长江流域形成了一个较弱的水汽辐合区, 降水偏多(图6a); 厄尔尼诺发展型和厄尔尼诺衰退型, 水汽辐散区与厄尔尼诺持续型大致相似, 但两者水汽辐散强度有所减弱(图6b、图6c)。值得一提的是, 厄尔尼诺持续型西太副高西伸最大, 厄尔尼诺衰退型次之, 厄尔尼诺发展型西伸最小。当西太副高偏西、偏强时, 加强南海和孟加拉湾夏季水汽向北输送, 且在脊线以北 $2\sim 10^\circ$ 的范围内形成异常雨带, 使得长江中下游降水异常偏多。

在拉尼娜持续型事件中, 水汽辐散区在黄河、海河和松辽流域。副高脊线面积缩小, 且发生东伸北移, 长江下游和江淮地区降水偏多, 长江中游降水强度明显减少(图6d); 拉尼娜衰退型, 华北异常水汽辐散区减弱, 西太平洋异常气旋偏南, 在 $30\sim 40^\circ\text{N}$ 之间形成异常东风, 导致淮河、长江中下游和东南诸河降水偏多(图6e)。

在转换型事件中, 厄尔尼诺—拉尼娜事件下, 中国北方地区无异常北风, 而来自于孟加拉湾、南海水汽向北输送异常偏强, 副高脊线面积扩大并向西伸, 长江流域、淮河流域形成纬向分布的水汽辐合带, 降水偏多(图6f); 拉尼娜—厄尔尼诺事件下, 受异常西北风影响, 削弱了向北输送水汽, 副高脊线面积缩小且脊线东移, 松辽流域南部、海



注：图中蓝色和黑色实线分别表示正常年和不同类型 ENSO 事件年 5880 gpm 特征线。

图6 不同发展型 ENSO 事件下中国夏季水汽通量、水汽通量散度和 5880 gpm 特征线

Fig. 6 The moisture transport, moisture divergence and 5880 gpm characteristic line of summer in China under different development ENSO events

河、黄河流域中部以及长江中游形成水汽辐散带, 中国降水偏少, 仅在长江中下游出现降水辐合区, 导致降水异常偏多 (图 6g)。

### 参考文献(References):

- [1] 中国气象局气候变化中心. 2020 年中国气候变化蓝皮书. 北京: 科学出版社, 2020: 1-2. [China Meteorological Administration Climate Change Center. Blue Book on Climate Change in China (2020). Beijing: Science Press, 2020: 1-2.]
- [2] LENDERINK G, FOWLER H J. Hydroclimate: Understanding rainfall extremes. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 391-392.
- [3] 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. *地理学报*, 2018, 73(3): 405-413. [YIN Z E, TIAN P F, CHI X X. Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951-2011). *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 405-413.]
- [4] 唐婷. 洪涝已致六千多万人次受灾主汛期防汛还需全力以赴. *科技日报*, 2020-08-14 (04). [TANG T. Floods have affected more than 60 million people, and we still need to devote effort to control the flood. *Science & Technology Daily*, 2020-08-14 (04).]
- [5] DING Y H, WANG Z Y, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part I: Observed evidences. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(9): 1139-1161.
- [6] DING Y H, SUN Y, WANG Z Y, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(13): 1926-1944.
- [7] ZHU Y L, WANG H J, ZHOU W, et al. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7-8): 1463-1473.
- [8] 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因. *大气科学*, 2014, 38(4): 782-794. [LYU J M, ZHU C W, JU J H, et al. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(4): 782-794.]
- [9] 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. *大气科学*, 2018, 42(3): 640-655. [CHEN W, DING S Y, FENG J, et al. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 640-655.]
- [10] GU W, LI C Y, LI W J, et al. Interdecadal unstationary relationship between NAO and East China's summer precipitation patterns. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13): L13702, Doi: 10.1029/2009GL038843.
- [11] WANG C H, YANG K, LI Y L, et al. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in Eastern China. *Journal of Climate*, 2017, 30(3): 885-903.
- [12] WANG L, QIAN Y, ZHANG Y C, et al. Observed variability of summer precipitation pattern and extreme events in East China associated with variations of the East Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(8): 2942-2957.
- [13] WANG Z B, WU R G, CHEN S F, et al. Influence of Western Tibetan Plateau summer snow cover on East Asian summer rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(5): 2371-2386.
- [14] LI W K, GUO W D, QIU B, et al. Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-9.
- [15] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960—2013 年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 354-363. [LI S S, YANG S N, LIU X F. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe Region and influencing factors during 1960-2013. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 354-363.]
- [16] 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. *地理学报*, 2018, 73(1): 25-40. [SHAN L J, ZHANG L P, ZHANG Y J, et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 25-40.]
- [17] 郭政昇, 郑国璋, 曹富强, 等. ENSO 事件对珠江中下游地区降水氢氧同位素的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2454-2468. [GUO Z S, ZHENG G Z, CAO F Q, et al. Influence of ENSO events on the hydrogen and oxygen isotopes of precipitation in the middle and lower reaches of Pearl River. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2454-2468.]
- [18] 尚程鹏, 章新平, 孙葭, 等. 洞庭湖流域冬季降水的时空变化及与全球海温的关系. *自然资源学报*, 2018, 33(11):

- 1953-1965. [SHANG C P, ZAHNG X P, SUN J, et al. Temporal and spatial variation of winter precipitation over Dongting Lake Basin and its relationship with global sea surface temperature. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33 (11): 1953-1965.]
- [19] 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. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1387-1400. [KONG F. Multi-attribute temporal variation of rainfall with different intensities in China and its response to ENSO. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1387-1400.]
- [20] 徐华, 徐建军, 范伶俐. ENSO 多样性研究进展. *热带气象学报*, 2019, 35(2): 281-288. [XU H, XU J J, FAN L L. ENSO diversity: A review. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(2): 281-288.]
- [21] 王黎娟, 蔡聪, 张海燕. 两类 ENSO 背景下中国东部夏季降水的环流特征及关键系统. *大气科学学报*, 2020, 43(4): 617-629. [WANG L J, CAI C, ZHANG H Y. Circulation characteristics and critical systems of summer precipitation in Eastern China under the background of two types of ENSO events. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(4): 617-629.]
- [22] 滕宇威, 张文君, 刘超, 等. ENSO 空间形态变异对 ENSO-IOD 关系年代际减弱的可能作用. *气象学报*, 2020, 78(2): 210-220. [TENG Y W, ZHANG W J, LIU C, et al. Possible role of ENSO spatial pattern variation in interdecadal weakening of ENSO-IOD relationship. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(2): 210-220.]
- [23] PARK C K, PARK D S R, HO C H, et al. A dipole mode of spring precipitation between Southern China and Southeast Asia associated with the Eastern and Central Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 2020, 33(23): 10097-10111.
- [24] 张人禾, 闵庆桦, 苏京志. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(5): 544-553. [ZHANG R H, MIN Q Y, SU J Z. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous Western North Pacific anticyclone. *Science China Earth Sciences*, 2017, 47(5): 544-553.]
- [25] 邓海军, 郭斌, 曹永强, 等. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局. *地理研究*, 2020, 39(10): 2415-2426. [DENG H J, GUO B, CAO Y Q, et al. Spatial and temporal patterns of daytime and nighttime precipitation in China during 1961-2016. *Geographical Research*, 2020, 39(10): 2415-2426.]
- [26] SUN B, ZHU Y L, WANG H J. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over Eastern China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 1039-1048.
- [27] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因. *地理学报*, 2014, 69(5): 632-639. [HAN L Y, ZHANG Q, YAO Y B, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 632-639.]
- [28] 史珩瑜, 张祖强, 任宏利. 近百年来 ENSO 强度的变化特征. *气候变化研究进展*, 2017, 13(1): 1-10. [SHI H Y, ZHANG Z Q, REN H L. Observed ENSO intensity changes during 1900-2015. *Climate Change Research*, 2017, 13(1): 1-10.]
- [29] 刘田, 阳坤, 秦军, 等. 青藏高原中、东部气象站降水资料时间序列的构建与应用. *高原气象*, 2018, 37(6): 1449-1457. [LIU T, YANG K, QIN J, et al. Construction and applications of time series of monthly precipitation at weather stations in the Central and Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(6): 1449-1457.]



## Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process

WANG Ting, LI Shuang-shuang, YAN Jun-ping, HE Jin-ping

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Continuous global warming will bring more extreme precipitation events. Summer precipitation in China has obvious chronological changes, which is closely related to El Niño-Southern Oscillation. Thus, based on the gridded dataset of monthly precipitation with a spatial resolution of  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  during 1961-2019, this paper analyzes the spatio-temporal variation of summer precipitation in the nine major basins of China using the trend analysis, *t*-test, and synthetic analysis. Based on seven ENSO events, the summer precipitation patterns were discussed. Results are shown as follows. (1) The summer precipitation increased significantly ( $p < 0.05$ ) in inland river basins such as Hexi Corridor, areas north and south of the Tianshan Mountains, and areas west of the Qinghai-Tibet Plateau, Southeast River drainage basins and the middle and lower reaches of the Yangtze River, while precipitation in both Haihe River Basin and Songliao River Basin decreased significantly during the period 1961-2019. (2) From the 1960s to the late 1990s, the precipitation fluctuations in the Yangtze and Huaihe River Basins increased, while that in the Haihe River Basin continued to decline, which was in line with the spatial characteristics of "Southern Floods and Northern Droughts". After 2000, except in the Huaihe River, and the summer precipitation in other river basins showed an increasing trend. (3) In the events dominated by El Niño, the ridge line of the Western Pacific Subtropical High (WPSH) extended westward, and the summer precipitation areas were concentrated in the Jianghuai area, showing a spatial pattern of three-pole-type from south to north, with more precipitation in Jianghuai Basin and less precipitation in the north of China and the Pearl River Basin in summer. In the events dominated by La Nina, the ridge line of the WPSH moved eastward and the control area narrowed. The summer precipitation obviously decreased on both sides of the "Hu Huanyong Line" and in South China. As for the two conversion ENSO events, when El Niño occurs in winter and La Nina changes in summer, the WPSH extends westward and its area expands, and there is more summer precipitation in China. On the contrary, the WPSH moves eastward and its area shrinks, resulting in less summer precipitation. This study highlighted that the spatio-temporal differentiation of ENSO events in the previous winter and summer, and analyses the abnormal laws of summer precipitation in the nine major basins in China, which has an important theoretical and practical significance to taking effective measures in regional flood prevention.

**Keywords:** summer precipitation; spatio-temporal variation; ENSO; nine major river basins; China