

中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应

顾西辉^{1,2}, 张 强^{1,2}, 孔冬冬^{1,2}

(1. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275;

2. 中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275)

摘要: 基于中国1951-2014年728个气象站点日降水数据, 利用POT抽样、变异点分析、趋势分析、分段回归等方法全面分析中国极端降水事件(量级、频率与发生时间)非平稳性特征及其对夏季温度响应。研究结果发现中国极端降水量级有明显变异特征, 但无显著趋势变化, 中国极端降水频率则相反。并且中国极端降水次数在全国大部分区域有显著增加趋势。另外, 研究还表明变异点对中国极端降水量级和频率趋势特征有明显的改变, 对极端降水发生时间趋势特征改变较弱; 中国极端降水发生时间在中南部呈显著上升趋势, 其他区域趋势性不显著。中国大部分区域夏季温度呈上升或显著上升趋势, 且变异特征显著。在转折点前, 中国大部分区域如西部干旱区东南部、东部干旱区西南部、华北区、华中区和西南区北部夏季温度呈下降或显著下降趋势; 在转折点后, 上述区域夏季温度转为上升或显著上升趋势。

关键词: 极端降水; POT抽样; 分段回归; 非平稳性; 夏季温度; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201605002

1 引言

气候模式模拟结果表明, 在全球变暖影响下, 全球水文循环呈加剧趋势^[1], 中国21世纪极端降水事件也将发生显著变异^[2-3]。极端降水及其引发的洪旱灾害事件对人类社会和经济发展带来巨大影响, 气象水文极值事件的研究已成为当前国际学术前沿与研究热点。近几十年来, 中国极端降水事件呈增加趋势^[4], 并对农业生产带来巨大损失^[5], 因此, 中国各区域极端降水特征及成因已成为当前研究热点^[6-8]。张强等^[6]通过对新疆极端降水的研究指出北疆发生极端强降水的概率较大, 南疆发生极端弱降水的概率较大; 余敦先等^[7]发现淮河流域年最大日降水多集中于20世纪60-70年代; 任正果等^[8]指出中国南方各极端降水指数的多年平均值分布规律, 越靠近西北方向越干旱, 越靠近东南方向越湿润。

基于年极端降水指标等对中国极端降水事件的研究已开展较多^[6-8], 然而基于超阈值抽样(POT抽样)分析中国极端降水量级、频率和发生时间的非平稳性特征, 并进一步揭示中国极端降水潜在影响因子的研究却鲜有报导。值得注意的是, 基于超阈值的极端降水事件(POT抽样)相比年极端降水指标能够提供更多、更丰富的极端降水事件信息^[9]。而平稳性假设是一切城市防洪排涝工程、水利工程施工等设计标准的基础。Villarini等^[10]

收稿日期: 2015-12-17; 修订日期: 2016-03-02

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 香港特别行政区研究资助局项目(CUHK441313) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.51425903; Research Grants Council of the Hong Kong Special Administrative Region, China, No.CUHK441313]

作者简介: 顾西辉(1990-), 男, 河南信阳人, 博士, 主要从事非平稳性气象水文极值过程研究。E-mail: guxihui421@163.com

通讯作者: 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制与机理以及流域生态需水等领域的研究工作。

E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

定义平稳性为时间序列无趋势性、变异性和周期性，常用趋势和变异点分析检验平稳性假设是否合理^[10-12]。关于中国极端降水事件非平稳性特征潜在的影响因子，已有研究表明温度增加导致中国东南地区降水加强，且冬季趋于湿润^[13]。因此，本文研究目的为：①基于POT抽样的中国极端降水量级、频率和发生时间的非平稳性特征（变异和趋势）时空规律；②中国极端降水量级、频率和发生时间对温度转折的响应规律。

2 研究数据

中国气候差异大（图1）。张家诚等^[14]主要根据热量和水分两级指标，同时参考光照时数，将中国划分为8个气候一级区域：西部干旱区、青藏高原区、东部干旱区、西南区、东北区、华北区、华中区和华南区（图1）。一级气候区域的划分标准，除大高原及山地外，从北到南以气候带为根据，从东到西以干燥度划分^[14]。本文将分析每个分区

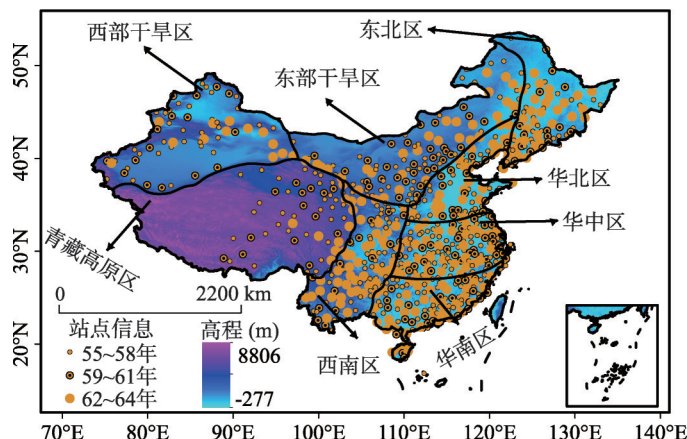


图1 中国气象站点地理位置及气候分区

Fig. 1 Locations of precipitation stations and climate partitions in China

极端降水事件的非平稳性及对夏季温度的响应特征。

从中国气象局收集到839个站点1951-2014年日降水和温度（日最小、日平均和日最高温度）数据。为了严控数据质量，删除累积缺测时间超过365天的站点，剩余728个站点用作本文分析（图1）。缺测数据采用Zhang等^[15]提出的方法进行插值。气象数据最少有55年，最大有64年，各分区中青藏高原区气象站点最少，有56站，华中区气象站点最多，有128站（图1）。长时间降水序列能够为研究中国极端降水事件提供更详细的信息，且更小的估计误差。

3 研究方法

基于POT抽样（设置一个阈值，然后抽样每一次极端降水发生的量级及时间，每一年极端降水事件次数）。阈值设置一般采用两种：一种以绝对值作为阈值（例如50 mm/天），一种以降水经验概率分布为基础（例如95%分位数）。本文采用非零降水序列95%分位数作为阈值。

3.1 变异分析

变异分析方法已有多种，不同的方法基于不同的假设（例如单变异点和多变异点，检验前是否预设变异点位置，是否符合高斯分布等）。Killick等^[16]于2014年提出一个综合集成的“change point”检验方法，该方法基于似然函数框架，具有较大的灵活性。可以克服序列高斯分布假设的限制，不需要预先设置变异点位置，可进行单变异点和多变异点检测。同时包含了以往多种算法，例如二进制分割算法、分段邻域算法和PELT算法，因而具有强大的功能。相较于以往变异点检测方法仅能检测时间序列均值变异，“change point”法可同时用来检测均值和方差变异。时间序列 $y_{1:n} = (y_1, \dots, y_n)$ ，对于单变异点检验，构建两个假设：空假设 H_0 不存在变异点，非空假设 H_1 存在变异点。在非空

假设 H_1 中, 假设变异点位于 τ_1 ($\tau_1 \in \{1, 2, \dots, n-1\}$), 相应于 τ_1 的最大对数似然估计为^[16]:

$$ML(\tau_1) = \log p(y_{1:\tau_1}|\hat{\theta}_1) + \log p(y_{(\tau_1+1):n}|\hat{\theta}_2) \quad (1)$$

式中: $p(\cdot)$ 为时间序列的概率密度函数; $\hat{\theta}$ 为最大对数似然估计的参数。基于公式 (1) 可以计算每个可能变异位置上的最大对数似然估计, 然后根据检验统计值 λ 确定最终变异点的位置^[16]:

$$\lambda = 2 \left[\max_{\tau_1} ML(\tau_1) - \log p(y_{1:n}|\hat{\theta}) \right] \quad (2)$$

根据公式 (2), 当检验统计值达到显著性水平 0.1 时, 认为时间序列发生了变异。

“changepoint” 法常用来检测连续型时间序列的变异点位置, 另外由于本文采用的降水序列在 60 年左右, 因此, 选择 “changepoint” 法检测中国极端降水量级和发生时间单变异点。对于中国极端降水频率 (年发生次数序列) 等具有离散特征的时间序列, 则采用分段回归法检测变异点^[17-18]:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon & t \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \alpha) + \varepsilon & t > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为时间 (年); y 为响应变量 (例如极端降水频率序列); α 为响应变量转折点的位置, 当检验显著性水平达到 0.1 时, 转折点达到了变异程度, 可称为变异点。

3.2 趋势分析

Mann-Kendall (MK) 法由于其为非参数检验方法, 对异常值不敏感, 从而被国际气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 推荐用来检测连续性时间序列 (中国极端降水量级和发生时间) 的趋势^[19]:

$$\begin{cases} S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(X_j - X_i) \\ \text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & X_j - X_i > 0 \\ 0 & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_i 和 X_j 分别为时间序列第 i 和 j 个值; N 为时间序列的长度。由公式 (4) 进一步推导出 MK 检测统计值 Z :

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: 统计值 Z 大于 0, 表示时间序列呈上升趋势, 统计值 Z 小于 0, 表示时间序列呈下降趋势, 统计值 Z 的绝对值大于 1.96 表示趋势达到 0.05 显著性水平。

对于离散性时间序列 (中国极端降水年发生次数), 常用泊松回归判别其时间趋势^[17]:

$$P(N_i = k|\lambda_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^k}{k!} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中: N_i 为第 i 年极端降水发生次数; λ_i 为极端降水发生率, 是潜在的随机变量。本文通过假设 λ_i 依赖时间呈线性关系 (通过对数函数连接) 来判断极端降水频率是否存在上升或下降趋势:

$$\lambda_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 t_i) \quad (7)$$

式中: 当 β_1 大于 0 时, 极端降水频率呈上升趋势; 当 β_1 小于 0 时, 极端降水频率呈下降趋势; 当 β_1 不等于 0 达到 0.05 显著性水平时, 趋势达到显著性。

在趋势分析中,以往的研究通常没有考虑变异点对趋势结果的影响。变异点的存在可能表明时间序列影响机制从一个气候机制转变为另一个或时间序列非均质。如果不考虑变异点,时间趋势的分析结果可能导致对人类引起的气候变化进行错误的表述^[17, 20]。因此,本文以变异点为时间分割点,将序列分割为变异前、后两个子序列,分别检测两个子序列的时间趋势。为了保证子序列的时间长度,在变异点的选择中采取以下原则:① 变异点的位置必须保证两个子序列均至少有10年的时间长度;② 如果均值和方差均检测到变异点,以均值变异点作为最终的变异点。

4 研究结果

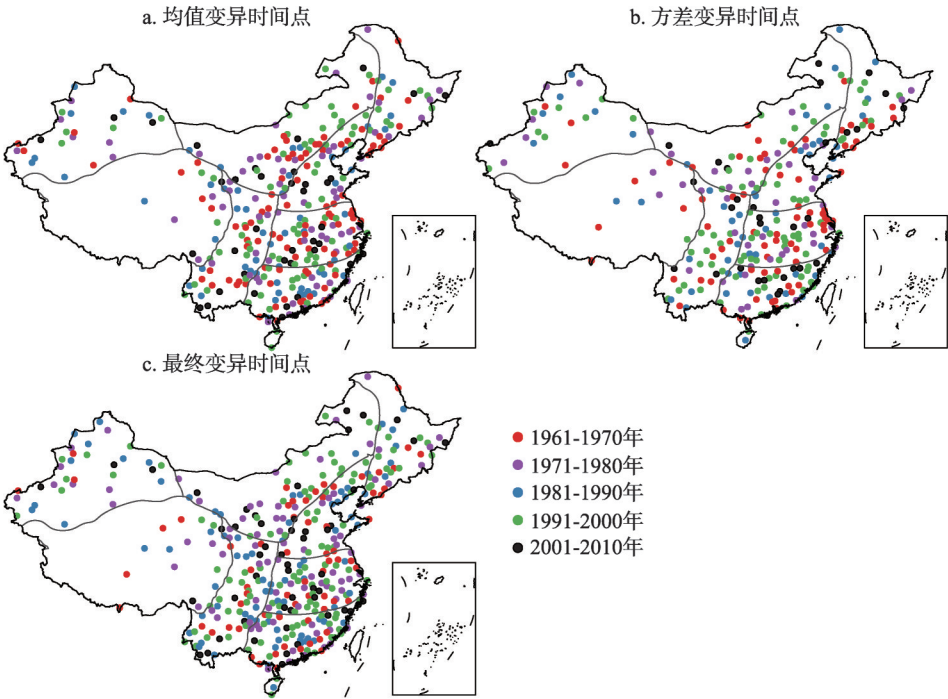
4.1 中国极端降水量级非平稳性分析

中国728个站点中的353个站点(约占48%)极端降水量级存在显著均值变异,291个站点(约占40%)极端降水量级存在显著方差变异,综合确定最终变异点站点为404个(约占55%)(图2)。均值变异点和方差变异点在空间上没有明显分布规律,在某些局部区域上呈现出一致特征。就均值变异时间来看,变异时间位于1961-1980年的站点共有166个(约占353个站点的47%),主要分布在中国东部干旱区西南部、东北区北部、华北区和华中区沿海区域及西南区;变异时间位于1981-2000年的站点共有147个(约占353个站点的42%),主要分布在东部干旱区东北部、东北区中部、华南区西北部和西南区中部。就方差变异时间来看,变异时间位于1961-1980年的站点共有121个(约占291个站点的42%),主要分布在中国东北区北部、华中区沿海区域、东部干旱区东部和青藏高原区;变异时间位于1981-2000年的站点共有138个(约占291个站点的47%),主要分布在中国西部干旱区、东部干旱区东部、东北区北部、西南区中部和华中区西部。从最终确定的变异点时间来看,变异时间位于1980年之前为151个,约占404个站点的37%,大部分站点变异时间位于1980年之后,共有253个,约占404个站点的63%。

对于所有站点整体序列,中国西部干旱区、华中区及华南区北部和西南部极端降水量级呈上升趋势,东部干旱区中部、华北区北部、华南区东南部及青藏高原区东部呈下降趋势(图3)。然而在整个中国区域内,只有少量站点极端降水量级趋势达到显著性水平,呈显著下降趋势的站点主要位于东部干旱区和华北区,而呈显著上升趋势的站点主要位于西部干旱区、东北区、西南区、华中区和华南区。无变异点的站点中,极端降水量级趋势的空间分布与所有站点整体序列的空间分布较为吻合一致,但具有显著趋势的站点数明显减少。在存在变异点的序列中,变异前东部干旱区中部、华北区东部、华中区中南部及华南区中北部极端降水量级呈上升趋势,西部干旱区北部、东部区南部和华中区北部呈下降趋势;变异后东部干旱区东北部、东北区东南部、华中区西北部和西南区中部极端降水量级呈上升趋势,西北区、东部干旱区西部、华中区东部、华南区西部及西南区南部呈下降趋势。变异前、后极端降水量级趋势的空间分布具有差异性,例如东北区南部由下降趋势转为上升趋势,华南区西北部由上升趋势转为下降趋势等。变异后序列和整体序列趋势的空间差异性更加明显,西部干旱区、华中区和华南区多数站点整体序列呈上升趋势,变异后转为下降趋势,东部干旱区和青藏高原区多数站点整体序列呈下降趋势,变异后转为上升趋势。上述区域如果不考虑变异点的存在,只分析整体序列的趋势性,会误导对极端降水量级变化特征的理解。变异点的存在也表明极端降水量级整体序列不符合均质性,影响极端降水量级潜在的气候机制已发生较为明显的变化。

4.2 中国极端降水频率非平稳性分析

采用分段回归检测具有离散性质的极端降水频率序列的变异特征(图4)。相对于极



注：图中每个有颜色的圆点均代表变异时间达到0.1显著性水平的站点。

图2 中国极端降水量级变异时间地理分布

Fig. 2 Change point distribution of magnitude of extreme precipitation with 0.1 significant level

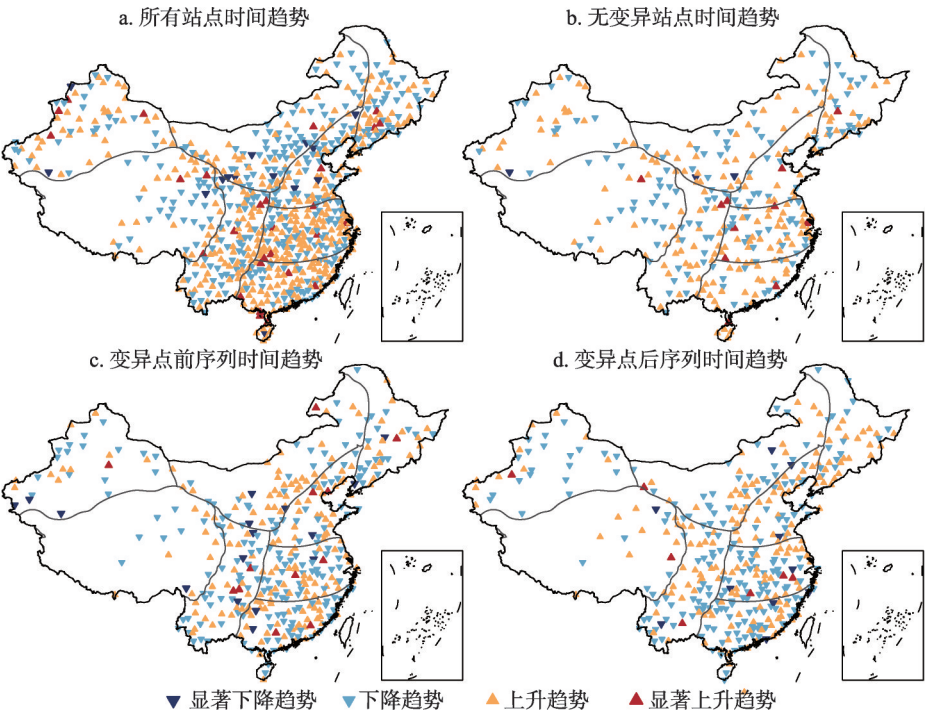


图3 中国极端降水量级趋势地理分布

Fig. 3 Trend distribution of magnitude of extreme precipitation

端降水量级变异特征，大多数站点极端降水频率不具有显著的变异特征，仅有42个站点显著性水平达到0.1（图4）。具有显著变异点主要位于西部干旱区北部，东部干旱区东部和华北区等。中国大部分区域极端降水频率转折点位于1980年之后，仅西部干旱区北部、西南区南部及华中区西部等转折点位于1980年之前。

采用泊松回归分析极端降水频率的时间趋势（图5）。在所有站点整体序列中，中国西部干旱区、东部干旱区西部、西南区北部、华中区南部和华南区东部极端降水频率呈显著上升趋势；东部干旱区东部、东北区南部、华北区北部及西南区南部极端降水频率呈下降或显著下降趋势（图5）。由于极端降水频率多数站点均不具有显著性变异水平，因此，无变异点站点极端降水频率与所有站点整体序列时间趋势空间分布基本吻合。在有变异点的站点中，几乎所有站点在变异前极端降水频率呈下降或显著下降趋势，在变异后转为显著上升趋势。

中国极端降水量级和频率非平稳性特征具有明显的差异性。中国极端降水量级多数站点具有显著的变异特征，但不具有显著的趋势性；中国极端降水频率则与量级特征相反。Mallakpour等^[21]通过研究美国中部774个水文站点洪水量级和频率特征，指出洪水发生量级没有显著增加，但洪水发生次数显著上升；Hirsch等^[22]证实了这一现象，并认为极端降水特征对美国中部地区洪水发生次数显著增加有重要的影响。比较图3和图5，中国极端降水量级没有显著变化，但中国极端降水频率大部分区域有显著加强。中国极端降水特征和Mallakpour等在美国中部地区的研究较为吻合一致，因此，同样可能引发中国洪水特征也呈现出量级没有发生明显变化，但洪水次数有着显著加强这一现象。极端降水事件是洪水过程的重要影响因素，但洪水过程还受到地形地貌、土地利用及水利工程等人类活动的影响，因此，还需要实测的水文资料进行上述可能结果的验证。

4.3 中国极端降水发生时间非平稳性分析

中国极端降水发生时间主要发生均值变异，共有263个站点（占总站点728的36%），仅有3个站点出现方差变异（图6）。与极端降水量级一样，极端降水发生时间均值变异点的年份在空间上没有统一明显的分布规律，在某些局部区域上呈现出一致特征。从均值变异点来看，共有133个站点（占总站点263的51%）变异时间位于1980年以前，主要分布在西部干旱区西北部、东部干旱区中东部、华北区东部和华南区中部；共有130个站点（占总站点263的49%）变异时间位于1980年以后，主要分布在西部干旱区南部、华北区中部、西南区南部和华南区东部。由于极端降水发生时间序列几乎不存在方差变异，所以最终变异点空间分布与均值变异点较为吻合一致。

再对极端降水发生时间的趋势进行检测（图7）。从所有站点整体序列来看，中国西部干旱区西部、东部干旱区南部、西南干旱区北部和华中区南部，极端降水发生时间呈上升趋势，其中华中区南部极端降水发生时间呈显著上升趋势；西部干旱区东部、东部干旱区东北部、东北区南部和西南区南部极端降水发生时间呈下降趋势，且均不显著

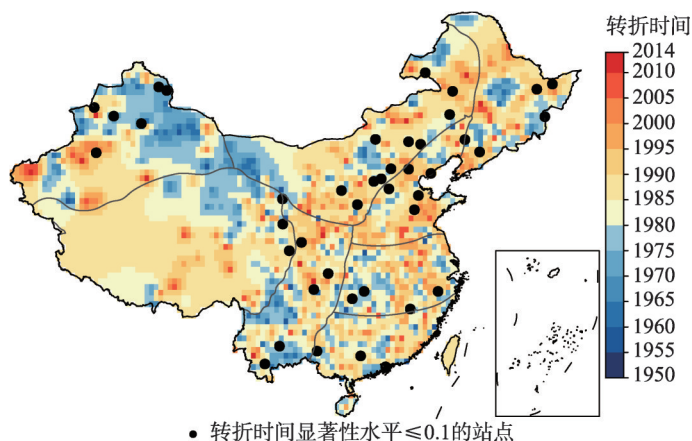


图4 中国极端降水发生次数变异时间地理分布

Fig. 4 Turn point distribution of frequency of extreme precipitation

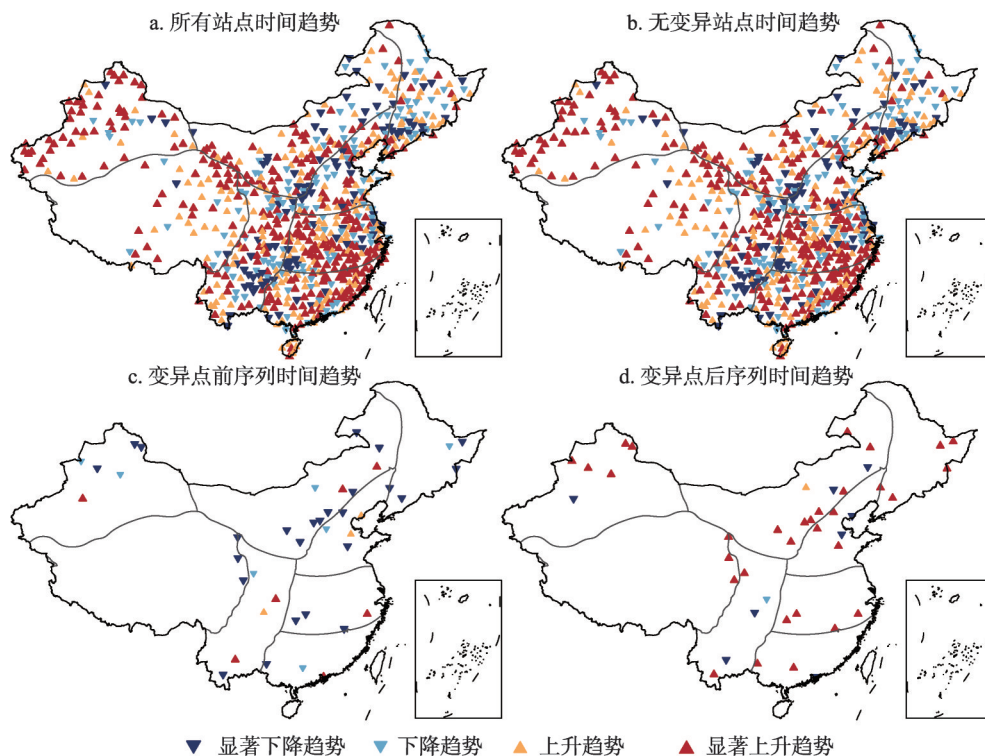
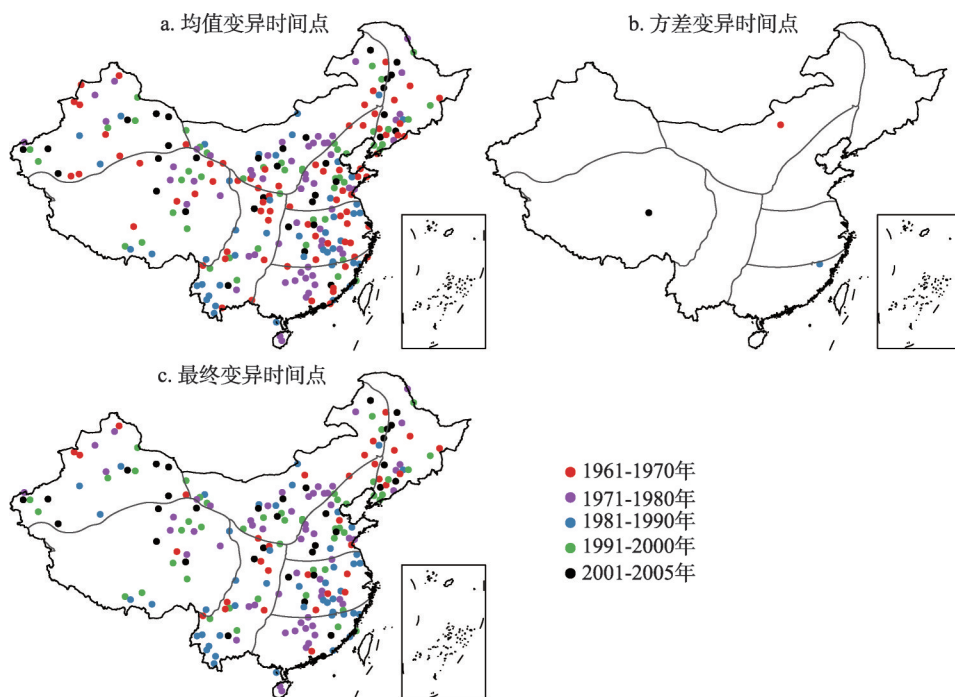


图5 中国极端降水发生次数趋势地理分布

Fig. 5 Trend distribution of frequency of extreme precipitation with 0.1 significant level



注：图中每个有颜色的圆点均代表变异时间达到0.1显著性水平的站点。

图6 中国极端降水发生时间变异点地理分布

Fig. 6 Change point distribution of occurrence timing of extreme precipitation with 0.1 significant level

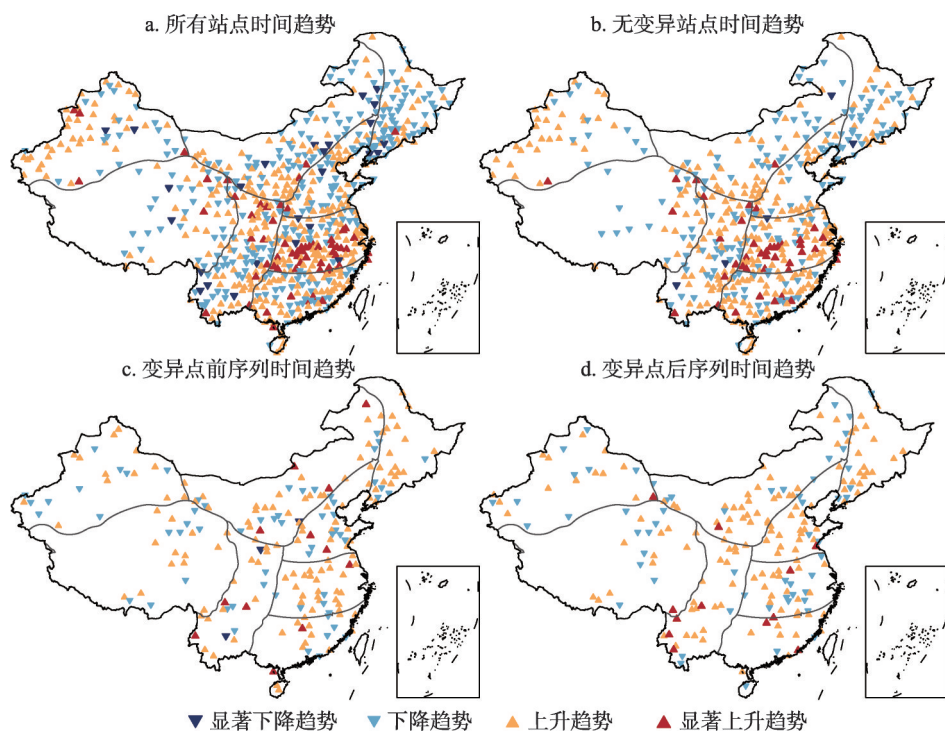


图7 中国极端降水发生时间的趋势地理分布

Fig. 7 Trend distribution of occurrence timing of extreme precipitation with 0.1 significant level

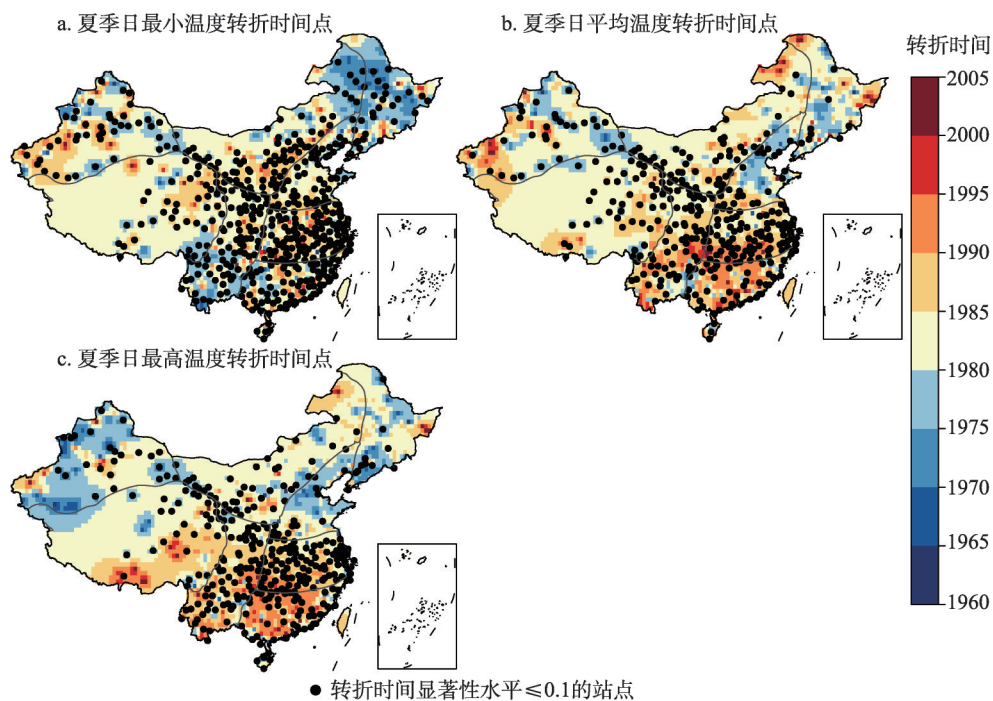


图8 中国夏季日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度均值转折点空间分布

Fig. 8 Turn point distribution of the minimum, mean and maximum of summer temperature with 0.1 significant level

(图7)。在无变异点的站点中,中国极端降水发生时间与所有站点整体序列趋势的空间分布较吻合,但呈上升趋势的站点在空间分布上更加明显。变异前极端降水发生时间在东北区和华中区呈上升趋势,变异后进一步扩展到东部干旱区中部、西南区和华南区。相比极端降水量级和频率,变异点对中国极端降水发生时间趋势方向的改变相对较弱。

4.4 中国极端降水对夏季温度的响应

通过月频率法^[23]分析得出中国极端降水发生时间多集中在夏季。采用分段回归检验1951-2014年中国各站点夏季日最小温度、日平均温度和日最高温度的转折点(图8),并分析转折前后的时间趋势性(图9)和分析夏季温度趋势的差异如何影响中国极端降水事件(图10)。夏季日最小温度中(图8),多数站点(共有489个,占总728个站点的67%)具有显著的转折,达到了0.1显著性水平;东北区、西南区南部和西部干旱区北部转折点时间在1980年以前,西部干旱区西南部、东部干旱区东南部、华中和华南区中部转折点时间在1985年以后。夏季日平均温度341个站点(占总728个站点的47%)转折点达到0.1显著性水平;东北区东南部、西部干旱区东部和华北区东北部转折点时间位于1980年之前,中国大部分地区转折点均位于1980年以后,其中西部干旱区西南部、华中区、华南区和西南区西南部转折点位于1985年以后。夏季日最高温度(Tmax)326个站点(占总站点数的45%)转折点达到0.1显著性水平;日最高温度转折时间和日平均温度转折时间在空间分布上几乎吻合一致,主要差别在于西部干旱区大部分区域日最高温度的转折点在1980年以前。总体来看,夏季日最小温度与日平均温度和日最高温度的转折

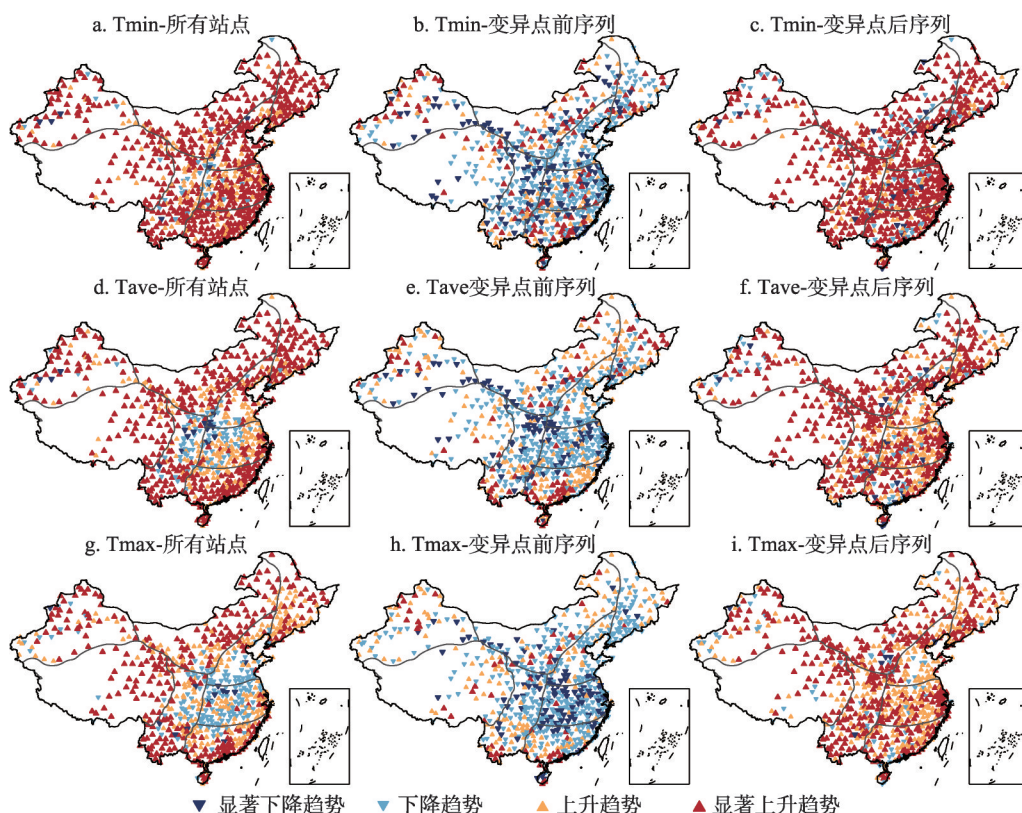


图9 中国夏季日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度均值趋势空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the minimum, mean and maximum of summer temperature change during different periods according to turn points of summer temperature

点空间分布具有较大差异,预示日最小温度与日平均温度和日最高温度具有不同的演变机制。从区域上看,华中区夏季温度在日最小温度、日平均温度和日最高温度的转折程度上明显高于其他区域(多数站点均达到0.1显著性水平),且转折时间均基本保持在1980年以后,表明华中区夏季温度有着显著的变异。

进一步分析夏季温度的趋势特征(图9)可看出,对于所有站点整体序列,夏季日最小温度、日平均温度和日最高温度在中国大部分区域均呈上升或显著上升趋势,呈下降或显著下降趋势的区域由华北区西南角扩展到西南区东北部和华中区西北角,在进一步扩展到华北区南部和华中区南部。转折前、后,夏季日最小温度、日平均温度和日最高温度空间变化特征基本吻合一致。在转折点前夏季温度在西部干旱区东南部、东部干旱区西南部、华北区、华中区和西南区北部呈下降或显著下降趋势;在转折点后,夏季温度在中国大部分区域由转折前的下降或显著下降趋势转为上升或显著上升趋势。中国大部分夏季温度在演变趋势和方向上发生了显著的改变。

分析中国极端降水量级、频率和发生时间序列在夏季日最小温度、日平均温度和日最高温度转折点前、后的时间趋势(图10)可看出,中国极端降水量级对夏季温度的转折响应最显著的区域位于东部干旱区南部和青藏高原区,上述区域由转折前的下降趋势转变为转折后的上升趋势。中国极端降水发生时间对夏季温度转折响应最显著的区域位于华中区和华南区;华中区由转折前的上升趋势转变为转折后的显著上升趋势,华南区中部对夏季平均温度和最高温度的响应更显著,由转折前的下降趋势转为转折后的上升或显著上升趋势。中国极端降水频率对夏季温度转折响应最显著的区域位于西部干旱区西北部、东部干旱区南部和东北区东南部,上述区域由转折前的下降或显著下降趋势转变为转折后的上升或显著上升趋势。总体而言,中国极端降水频率相对量级对夏季温度的响应更剧烈。宏观来看,夏季温度上升导致中国北方极端降水量级上升,频率显著增加。陈亚宁等同样观察到了中国西北地区温度升高和降水增加这一现象^[24]。从热力学角度看,随着温度增加,饱和水汽压大概指数增加,降水系统会有更多的水汽可供利用^[25]。水汽散度的时空变化可能导致降水机制的改变。中国北方升温明显会引发气团的热动力性质的变化和水汽输送的加强,进而导致极端降水量级上升,频率增加。而中国北方极端降水主要分布在夏季,因而对夏季温度响应较弱。中国南方(主要集中在华中区和华南区中部)由于夏季温度上升,极端降水发生时间提前或显著提前;而极端降水量级和频率对夏季温度上升响应较弱,可能因为台风等热带气旋对极端降水的影响较大^[26]。

5 结论

基于POT抽样,分析中国728个站点1951-2014年极端降水量级、频率和发生时间的非平稳性特征及其对夏季温度变化的响应,得到以下有意义的结论:

(1) 中国极端降水量级有明显的均值和方差变异,综合确定最终的变异站点数为404个,占总站点数728的55%。均值和方差变异时间在1980年之前主要分布在东部干旱区东部、东北区北部和华中区沿海区域;在1980年之后主要分布在东部干旱区东北部、东北区中北部和西南区中部。中国极端降水量级大多数站点不具有显著的趋势性特征,且变异前、后趋势的空间分布有较大差异性:西部干旱区、华中区和华南区多数站点整体序列呈上升趋势,变异后转为下降趋势,东部干旱区和青藏高原区多数站点整体序列呈下降趋势,变异后转为上升趋势。

(2) 中国极端降水频率变异特征不显著,仅有42个站点具有显著的变异性,主要集

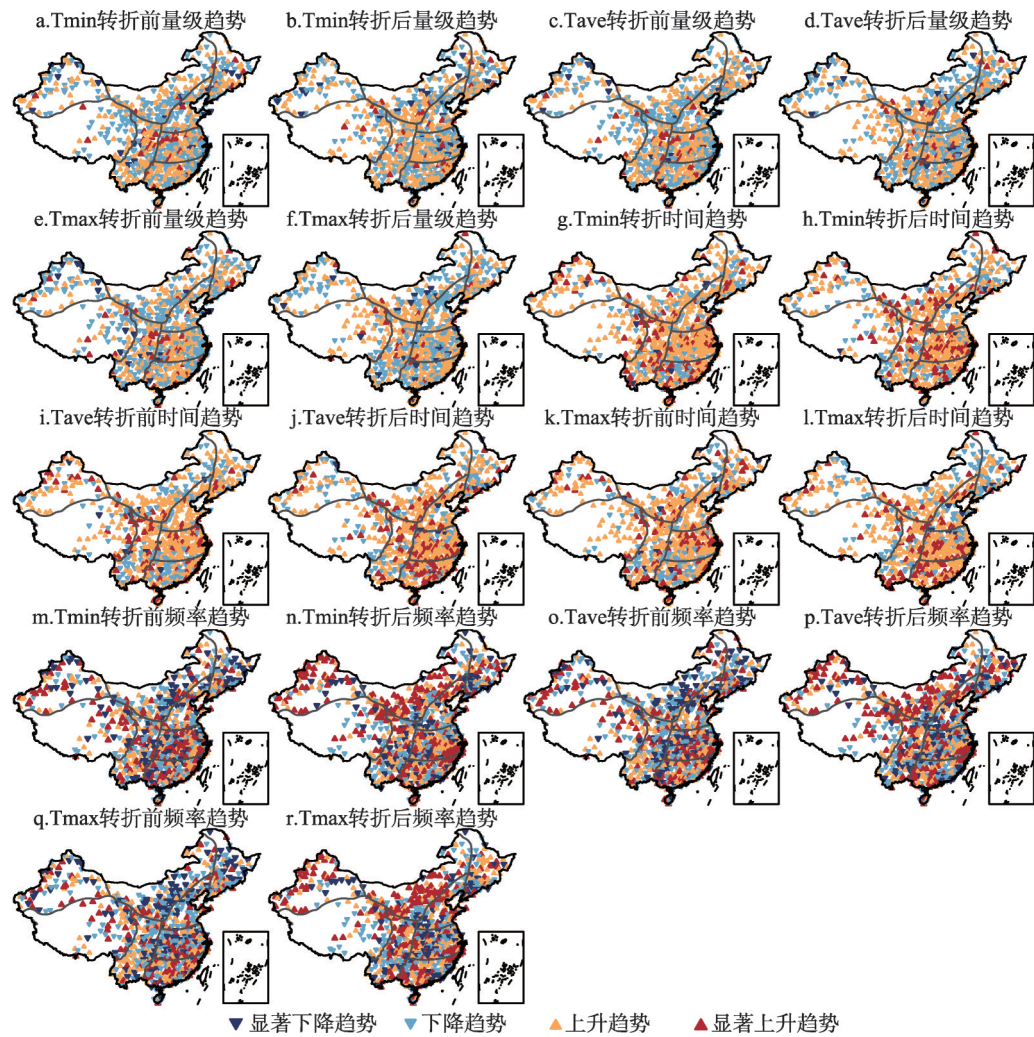


图 10 中国极端降水量级、发生时间和发生次数在夏季温度影响下的空间变化特征
Fig. 10 Spatial distribution of the magnitude, frequency and occurrence timing of extreme precipitation change during different periods according to turn points of summer temperature

中在西部干旱区北部、东部干旱区东部和华北区。中国大部分区域极端降水频率转折点位于1980年之后，仅西部干旱区北部、西南区南部及华中区西部等转折点位于1980年之前。但中国极端降水频率具有显著的趋势性，西部干旱区、东部干旱区西部、西南区北部、华中区南部和华南区东部极端降水频率呈显著上升趋势；东部干旱区东部、东北区南部、华北区北部及西南区南部极端降水频率呈下降或显著下降趋势。综合分析中国极端降水量级和频率的非平稳性特征，可以认为：中国极端降水的量级没有发生显著的变化，但极端降水频率在大部分区域有显著的加强。

(3) 中国极端降水发生时间变异特征上主要为均值变异，仅3个站点发生方差变异。均值变异在1980年以前主要分布在西部干旱区西北部、东部干旱区中东部、华北区东部和华南区中部；在1980年以后主要分布在西部干旱区南部、华北区中部、西南区南部和华南区东部。中国极端降水时间在华中区南部呈显著上升趋势，其他区域趋势均不显著。相比中国极端降水量级和频率，变异点对中国极端降水发生时间趋势方向的变化

相对较弱。

(4) 夏季温度有着明显的变异特征,且大部分区域转折点位于1980年后,仅东北区、华中区和西部干旱区的部分区域位于1980年之前。转折点引发中国大部分区域夏季温度在演变趋势和方向上发生显著改变。就整体序列而言,中国大部分区域夏季温度呈上升或显著上升趋势;然而在转折点前中国大部分区域如西部干旱区东南部、东部干旱区西南部、华北区、华中区和西南区北部夏季温度呈下降或显著下降趋势;在转折点后,上述区域夏季温度转为上升或显著上升趋势。

参考文献(References)

- [1] Allen M, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 2002, 419: 224-232.
- [2] Li J, Zhang Q, Chen Y D, et al. Changing spatiotemporal patterns of extreme precipitation regimes in China during 2071-2100 based on Earth system models. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(19): 12537-12555.
- [3] Li J, Zhang Q, Chen Y D, et al. GCMs-based spatiotemporal evolution of climate extremes during the 21st century in China. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(19): 11017-11035.
- [4] Zhang Q, Li J, Singh V P, et al. Copula-based spatio-temporal patterns of precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(5): 1140-1152.
- [5] Zhang Q, Sun P, Singh V P, et al. Spatial-temporal precipitation changes (1956-2000) and their implications for agriculture in China. *Global and Planetary Change*, 2012, 82/83: 86-95.
- [6] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Chen Xiaohong, et al. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 3-12. [张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于Copula函数的新疆极端降水概率时空变化特征. *地理学报*, 2011, 66(1): 3-12.]
- [7] She Dunxian, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1200-1210. [余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200-1210.]
- [8] Ren Zhengguo, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Changes in precipitation extremes in South China during 1961-2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 640-649. [任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961-2011年中国南方地区极端降水事件变化. *地理学报*, 2014, 69(5): 640-649.]
- [9] Gu Xihui, Zhang Qiang, Sun Peng, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River, Xinjiang: Characteristics, causes and impacts. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1390-1401. [顾西辉, 张强, 孙鹏, 等. 新疆塔河流域洪水量级、频率及峰现时间变化特征、成因及影响. *地理学报*, 2015, 70(9): 1390-1401.]
- [10] Villarini G, Serinaldi F, Smith J A. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): W08417.
- [11] Gu Xihui, Zhang Qiang. Non-stationary flood risk analysis in Pearl River Basin, considering the impact of hydrological trends. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1680-1693. [顾西辉, 张强. 考虑水文趋势影响的珠江流域非一致性洪水风险分析. *地理研究*, 2014, 33(9): 1680-1693.]
- [12] Gu Xihui, Zhang Qiang, Liu Jianyu, et al. Characteristics, causes and impacts of the changes of the flood frequency in the Pearl River drainage basin from 1951 to 2010. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(5): 661-670. [顾西辉, 张强, 刘剑宇, 等. 变化环境下1951-2010年珠江流域洪水频率变化特征、成因及影响研究. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 661-670.]
- [13] Zhang Q, Li J, Singh V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76.
- [14] Zhang Jiacheng, Lin Zhiguang. *Climate of China*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 467-506. [张家诚, 林之光. *中国气候*. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 467-506.]
- [15] Zhang Q. Regional frequency analysis of droughts in China. *Water Resources Management*, 2015, 29(6): 1767-1787.
- [16] Killick R. Changeoint: an R package for Changeoint analysis. *Journal of Statistical Software*, 2014, 58(3): 1-19.
- [17] Villarini G. Changing frequency of heavy rainfall over the Central United States. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 351-357.
- [18] Toms J D. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [19] Gu Xihui, Zhang Qiang, Chen Xiaohong. Spatiotemporal patterns of uniformity of precipitation and runoff over China and related influencing factors. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1714-1724. [顾西辉, 张强, 陈晓宏. 中国降水及流域径流均匀度时空特征及影响因子研究. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1714-1724.]

- [20] Gu Xihui, Zhang Qiang, Wang Zongzhi. Evaluation on stationarity assumption of annual maximum peak flows during 1951-2010 in the Pearl River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 824-835. [顾西辉, 张强, 王宗志. 1951-2010年珠江流域洪水极值序列平稳性特征研究. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 824-835.]
- [21] Mallakpour I, Villarini G. The changing nature of flooding across the central United States. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 250-254.
- [22] Hirsch R M, Archfield S A. Flood trends: Not higher but more often. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 198-199.
- [23] Mediero L, Kjeldsen T R, Macdonald N, et al. Identification of coherent flood regions across Europe by using the longest streamflow records. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 341-360.
- [24] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [25] Allan R P. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321(5895): 1481-1484.
- [26] Shen Qian, Zhang Shixuan, Zhao Junhu, et al. Contribution of typhoon over coastal waters to summer rainfall in eastern China. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 189201. [申茜, 张世轩, 赵俊虎, 等. 近海台风对中国东部夏季降水的贡献. *物理学报*, 2013, 62(18): 189201.]

Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature

GU Xihui^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, KONG Dongdong^{1,2}

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Daily precipitation and temperature data at 728 stations covering a period of 1951 to 2014 across China were analyzed to investigate extreme precipitation regimes in terms of spatiotemporal patterns, precipitation magnitude, precipitation frequency, occurrence timing, non-stationarity of extreme precipitation regimes and also their responses to summer temperature changes. The methods adopted in this study are Peak over Threshold (POT) sampling technique, change point analysis, trend analysis and piecewise regression method. Results of this study indicated that magnitude of extreme precipitation events was subject to evident alterations but free of significant trends. However, occurrence rates of extreme precipitation were subject to adverse changing properties when compared to changes in magnitude of extreme precipitation. The entire China was dominated by apparent increase of occurrence rates of extreme precipitation. Besides, change points within magnitude and occurrence rates of extreme precipitation tended to modify the changing tendency therein. However, occurrence timing of extreme precipitation events seemed to be free of impacts from change points. In most regions of China, occurrence time of extreme precipitation events was delayed and no changes in occurrence time of extreme precipitation could be observed in other regions of China.

Keywords: extreme precipitation; POT resampling; piecewise regression; non-stationarity; summer temperature; China