

# 1970-2015年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征

汪成博<sup>1,2</sup>, 李双双<sup>1,2</sup>, 延军平<sup>1,2</sup>, 武亚群<sup>1,2</sup>

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710119)

**摘要:** 基于汉江流域63个气象站点逐日降水数据, 辅以超阈值抽样、极端降水集中度(EPCD)和集中期(EPCP)、Mann-Kendall趋势检验等分析方法, 对1970-2015年汉江流域多尺度极端降水变化特征进行分析。结果表明:(1)在旬尺度上, 汉江流域EPCD较高, 呈现出“西高东低”空间特征; 汉江EPCP多年均值为七月下旬, 空间呈现出“东部早, 西部迟”的分布特征, 不同流域表现出不同的年代变化规律。(2)在月尺度上, 汉江流域极端降水各月分布不均, 主要集中在5-9月, 同年10月至次年4月为极端降水少发期。(3)在季尺度上, 汉江流域极端降水夏季占比50%以上, 但近期全流域夏季极端降水比例下降, 其中上游主要为春季占比增加, 中下游为秋季占比增加, 说明夏季是影响汉江极端降水非均匀变化的关键季节。(4)在影响因素上, 当东亚季风和南亚II区季风偏强时, 汉江流域夏季极端降水量整体减少; 当东亚季风偏弱时, 夏季极端降水增幅呈南北分异, 而南亚II区季风偏弱时, 极端降水增幅呈东西分异。

**关键词:** 极端降水; 非均匀性; 集中度; 集中期; 汉江流域

气候变暖背景下, 强降水事件在全球大部分地区很可能增加<sup>[1-3]</sup>。极端降水引发洪涝灾害, 对区域社会经济和生态系统的可持续发展造成严重损害, 而不同区域极端降水事件对气候变化呈现不同的响应<sup>[4-7]</sup>。中国气候区过渡地带, 极端降水变化趋势更为复杂<sup>[8]</sup>。利用CMIP 5模式对中国干湿区范围变化进行评估, 发现未来中国大部分区域降水呈现增加趋势, 湿润区、干旱区和极端干旱区在缩小, 气候敏感的半湿润、半干旱区在扩大<sup>[9]</sup>。因此, 需要关注中国东部湿润一半湿润过渡带极端降水变化特征。

汉江位于中国中部, 是长江最长的支流, 地处中国南北分界线, 是东南季风与西南季风的过渡带, 气候动力机制复杂<sup>[10]</sup>。随着社会经济的快速发展, 加之生态建设不断推进, 汉江流域水资源变化对跨区域调水可持续发展具有重要的影响<sup>[11]</sup>。

当前, 许多学者选取汉江流域为研究对象, 对区域气候要素变化、植被响应, 湿地生境动态、生态系统服务权衡以及水资源利用等做了大量的工作, 并取得丰富的成果<sup>[12-17]</sup>。分析已有汉江流域极端降水研究, 发现前期多数研究以年或季节为切入, 对月或旬尺度极端降水特征分析相对较少; 值得一提的是, 在旬或候尺度上, 由于极端降水事件频次较少, 利用降水集中度和集中期对极端降水非均匀特征分析, 其方法是否依然具有适应性, 以及不同时间尺度规律的识别准确性问题, 需要在方法层面进一步探讨; 在极端降水筛选阈值方面, 前期研究时间序列多由年或季节最大降水量构成, 其易受降水丰枯年的

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701592)

作者简介: 汪成博 (1994-), 男, 陕西安康人, 硕士, 研究方向为全球变化与区域灾害防治。

E-mail: 15802958629@sina.cn

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

E-mail: lss40609010@126.com

影响。为了避免上述问题,超阈值抽样被提出,其能够反映更丰富的极端降水信息<sup>[18-20]</sup>。因此,需要结合超阈值抽样确定极端降水阈值,再认识区域极端降水非均匀性特征。

基于此,结合汉江流域63个气象站逐日降水数据,首先对集中度和集中期指数衡量不同尺度极端降水非均匀性的适用性进行分析;利用时空分析、趋势分析等气候统计方法,分析1970-2015年汉江流域“旬—月—季节”三个尺度极端降水非均匀性特征,并探讨区域夏季极端降水年代波动与东亚、南亚季风强弱之间的时空响应关系,以期对水资源可持续利用与区域暴雨灾害防治提供理论依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

汉江流域位于中国中部,涉及鄂、陕、豫、川、渝、甘6省市,地质构造以浙川—丹江口—南漳为界,以西为褶皱隆起中低山区,以东为平原丘陵区。在气候类型上,汉江流域属亚热带季风气候,多年平均降水量在700~1800 mm。根据汉江流域的特征,丹江口以上为上游,地形起伏较大,南北分别为大巴山和秦岭山地;丹江口—碾盘山为中游,地势相对平坦,河道弯曲,北部为伏牛山,南部为武当山,中间为南阳盆地;碾盘山以下为下游,地势平坦,形成江汉平原<sup>[10]</sup>。

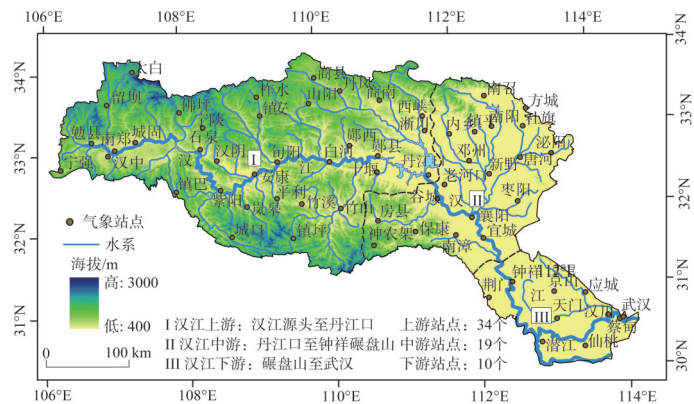


图1 汉江流域气象站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of the weather stations in the Hanjiang River Basin

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源

本文63个气象站点逐日降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网,为了保证数据完整性和连续性,将研究时段确定为1970-2015年。其中,汉江上游站点有34个,中游站点有19个,下游站点有10个。

依据气象台站简史,城固气象站1957年5月建站,1971年迁址城固县谢家井村南。由于迁站导致前期记录资料丢失,故研究数据时段为1971年1月至2015年12月。十堰气象站数据起始时间为1971年1月,神农架气象站1975年1月建站,数据从此时开始<sup>[21]</sup>。

由于观测时长造成的缺测数据,均赋值为空,避免插值导致误差。对于环流指数而言,东亚夏季风指数(East Asian Summer Monsoon Index, EASMI)、南亚夏季风指数(South Asian Summer Monsoon Index, SASMI)逐月数据来自中科院大气物理研究所,

计算为850 hPa风场时空变化特征<sup>[22]</sup>。利用ANUSPLIN软件对汉江流域极端降水非均匀性特征进行插值,其中DEM数据来源于中科院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台,分辨率为90 m×90 m。

### 1.2.2 超阈值抽样

超阈值 (Peaks-Over-Threshold, POT) 抽样,是通过设定一个阈值,抽样超过该阈值极端降水量及发生时间,形成POT极端降水序列<sup>[23]</sup>。在本文中,使用汉江流域各站点非零降水序列的95%分位数作为阈值进行抽样。

### 1.2.3 Mann-Kendall趋势分析

修正MK趋势检验(MMK),在检测时间趋势前对序列进行“预白化”处理,以减少气候序列自相关性对趋势检验的影响<sup>[24]</sup>。MMK趋势分析法用于汉江流域极端降水年内分布的变化趋势显著性分析。趋势量化使用非参数估计方法Theil-Sen趋势度分析,Sen趋势度计算公式为:

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

式中: $\beta$ 为极端降水序列的Sen趋势度; $x_i, x_j$ 为极端降水非均匀性指数; $x, j$ 分别为极端降水序列年份。若 $\beta$ 值为正,表示极端降水非均匀性呈增加趋势; $\beta$ 值为负,表示极端降水非均匀性呈下降趋势。

### 1.2.4 极端降水集中度和集中期

降水集中度 (precipitation concentration degree, PCD) 和集中期 (precipitation concentration period, PCP), 是分析年内降水非均匀性的主要指标<sup>[25]</sup>。本文利用极端降水集中度 (Extreme precipitation concentration degree, EPCD) 和极端降水集中期 (extreme precipitation concentration period, EPCP), 分析汉江流域极端降水的年内分布特征。

EPCD、EPCP与PCD、PCP的概念基本相同,是根据向量原理定义时间分配特征参数,可以描述极端降水的集中程度和集中时段。其公式如下:

$$EPCD_i = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \sin \theta_j \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \cos \theta_j \right)^2} / R_i \quad (2)$$

$$EPCP_i = \arctan \left( \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \sin \theta_j / \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \cos \theta_j \right) \quad (3)$$

式中: $EPCD_i$ 和 $EPCP_i$ 分别表示第*i*年极端降水集中度和集中期;*i*为年份;本文以旬为时间单位,*j*为旬序; $R_i$ 为某测站第*i*年总极端降水量(mm); $r_{ij}$ 为第*i*年第*j*旬内极端降水量(mm); $\theta = 360^\circ \times (j-1)/36$ ,为研究时段各旬中间对应矢量角度,第1旬范围为355~5°,  $\theta_1 = 0^\circ$ 。当 $EPCP_i$ 为1.0,表示极端降水量集中在年内某一句, $EPCD_i$ 为0.0,表示年极端降水量均匀分布在每个旬; $EPCP_i$ 为合成向量的方位角,它反映了最大旬极端降水量发生时间。

相对正常降水,极端降水事件较少,导致年内分配规律有所差异。为了说明集中度和集中期指数,对汉江流域极端降水非均匀性识别的有效性,选取武汉站2015年极端降水和正常降水为研究案例,分别计算候、旬和月三种尺度的集中度和集中期指数(图2)。结果表明:(1)对于降水集中期而言,无论是候尺度、旬尺度,还是月尺度,正常降水和极端降水均有效识别年内最大降水量所在位置,即图中红色节点位置。说明武汉2015

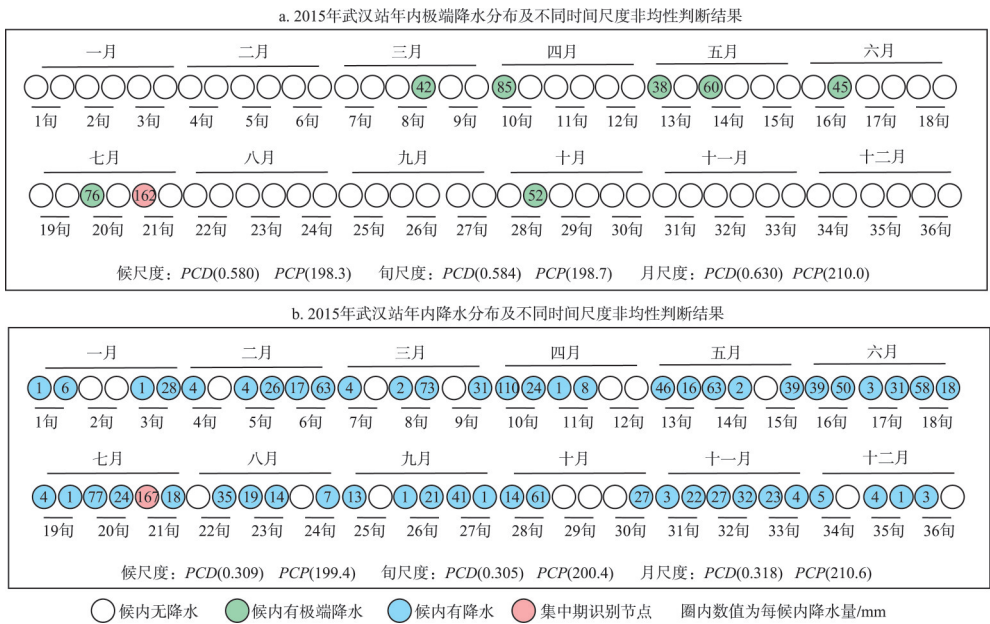


图2 极端降水与正常降水集中度 and 集中期识别结果对比

Fig. 2 Comparison of  $PCD$  and  $PCP$  between normal and extreme precipitation

年降水集中期为7月下旬，且不同类型序列对集中期影响相对较小；（2）对于降水集中度而言，正常降水不同时间尺度计算结果偏差相对较小。极端降水序列计算结果略有不同，候尺度和旬尺度偏差较小，但月尺度降水集中度偏高。

综上，对于极端降水序列，集中期和集中度指数依然适用。因此，综合考虑数据质量、研究内容和计算效率等，在保证结果精度基础上，选择旬尺度研究极端降水集中度和集中期的变化特征。

2 结果分析

2.1 极端降水旬尺度变化特征

1970-2015年，汉江流域 $EPCD$ 呈现出“西高东低”空间分布，说明中下游极端降水发生相对分散。但是 $EPCD$ 波动范围为：0.70~0.80，说明全区 $EPCD$ 具有一致性。对于汉江流域 $EPCP$ 而言，空间格局总体上为“东部早，西部迟”的分布特征，除汉江源头汉中盆地集中期在八月上旬外，汉江流域大部分区域 $EPCP$ 在七月下旬（图3）。

利用Sen+MMK趋势分析方法，对不同流域 $EPCD$ 和 $EPCP$ 变化曲线进行分析，所有区域趋势均未通过0.05显著水平检验，说明近46年汉江流域极端降水非均匀性并未呈现出明显的线性趋势（图4）。在变化阶段上：（1）汉江上游除1984-1990年小幅提前外，总体保持平稳波动；（2）汉江中游 $EPCP$ 具有明显的年代变化，先后经历了“推迟—提前—波动—推迟”的变化过程；（3）汉江下游 $EPCP$ 变化略有差异，可分为3个阶段：20世纪70年代 $EPCP$ 呈提前趋势，1978-2003年则先波动后推迟，2003-2015年 $EPCD$ 再次提前。

在 $EPCD$ 上，汉江流域极端降水非均匀性较高，且不同流域表现出不同的年代响应规律（图4）。主要表现为：（1）1970-2015年汉江上游 $EPCD$ 变异系数为0.084，低于中游0.095和下游0.156，说明上游地区 $EPCD$ 相对于均值变化较小，在1980-2015年处于平



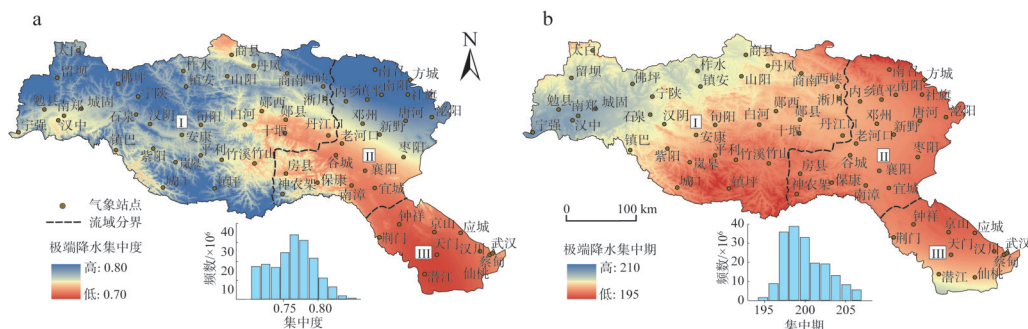


图3 1970-2015年汉江流域年均极端降水集中度 and 集中期的空间特征

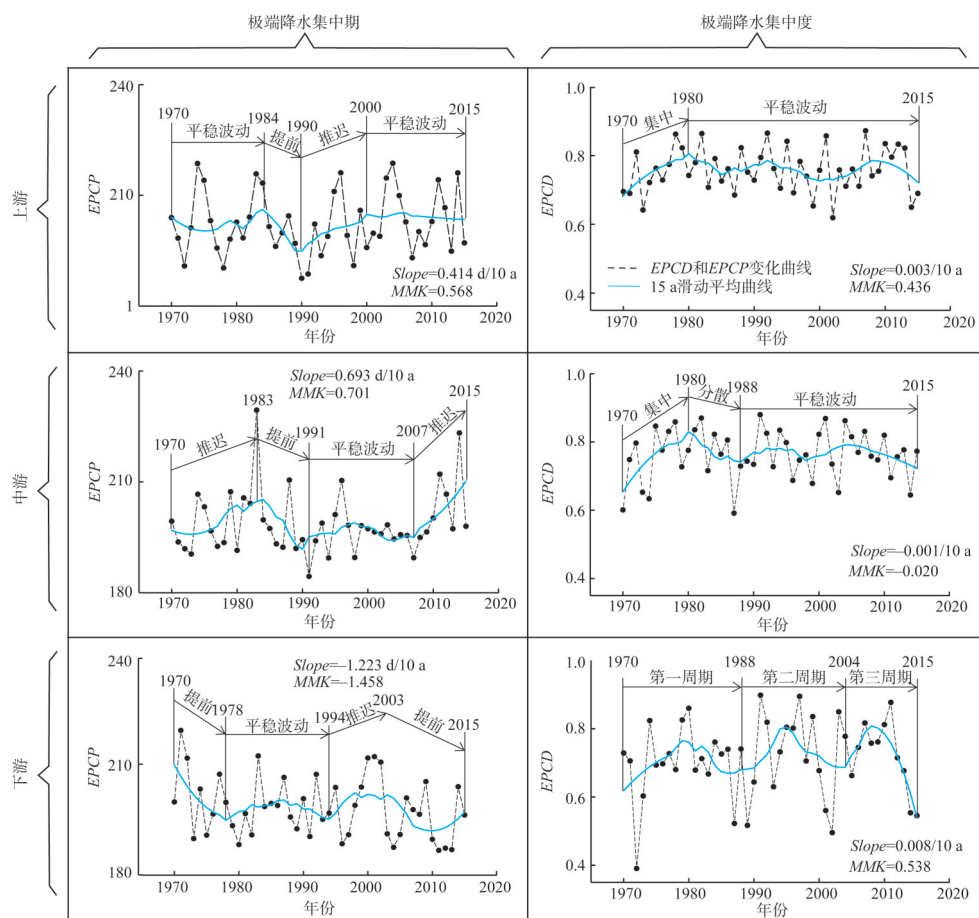
Fig. 3 Spatial pattern of *EPCD* and *EPCP* in the Hanjiang River Basin during 1970-2015

图4 1970-2015年汉江流域极端降水集中期和集中期变化特征

Fig. 4 Variation of *EPCD* and *EPCP* in the Hanjiang River Basin during 1970-2015

稳波动变化；(2) 汉江中游 *EPCD* 在 1970-1988 年先集中后分散，而 1988-2015 年 *EPCD* 变化和上游类似，维持平稳波动；(3) 对于汉江下游而言，*EPCD* 年际变率较大，高值在 0.9 左右，低值在 0.5 以下。通过 15 a 滑动平均曲线可以看出，年际变化分为三个峰谷交替阶段，对应时段分别为：1970-1988 年、1988-2004 年和 2004-2015 年。

2.2 极端降水月尺度变化特征

1970-2015年，汉江流域极端降水量月尺度分布不均，极端降水多发生在5-9月，且在7-8月最集中，同年10月至次年4月为极端降水少发期（图5）。在起止月份上，汉江中游地区在6月进入极端降水多发期，而上游地区多数站点在7月开始增多且持续到9月。极端降水发生时间受汉江流域所处地理位置影响，东亚夏季风水汽主要来源于热带和太平洋副热带，通常在5月初开始影响中国华南地区，随后北移形成江南梅雨，并在6月左右进入汉江流域，形成连续性降水<sup>[26]</sup>。

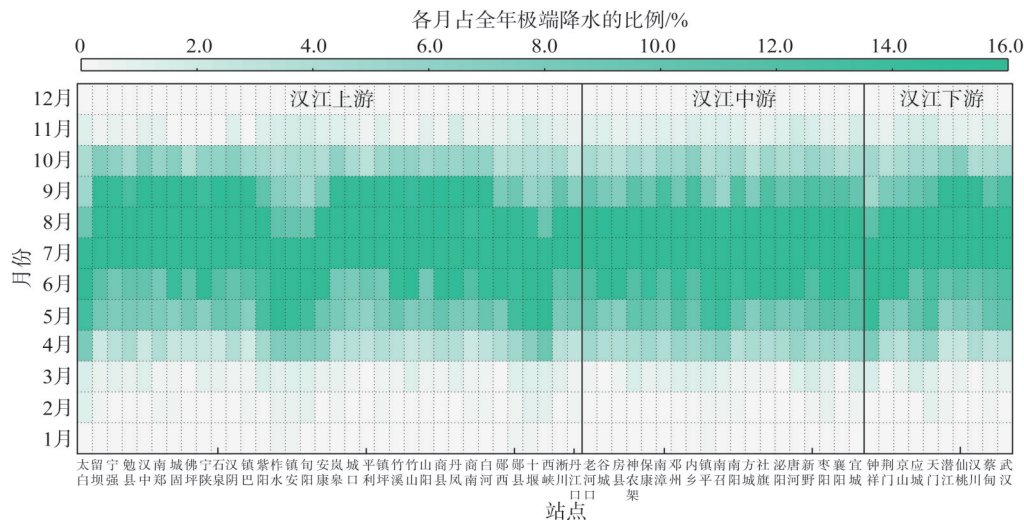


图5 汉江流域极端降水量年内分布特征

Fig. 5 Intra-annual distribution of extreme precipitation in the Hanjiang River Basin

2.3 极端降水季尺度变化特征

统计汉江流域各季节极端降水占比年际变化，发现汉江流域极端降水季节分布与旬、月两尺度规律一致，夏季极端降水比例维持在50%以上。在变化趋势上，除下游夏季极端降水受20世纪70年代快速上升影响，变化趋势MMK检验通过0.01显著水平检验外，其他区域趋势均未呈现明显的线性变化（图6）。

具体特征如下：（1）汉江上游夏季极端降水占比在50%以上，秋季明显多于春季；进入21世纪后，夏季极端降水占比有所下降，春季增加，秋季则无明显趋势。（2）汉江中游各季节极端降水波动强于上游，且夏季极端降水占比在60%以上；与上游变化不同的是，2005年之后，中游夏季极端降水下降，秋季极端降水增加，春季极端降水则保持平稳波动。（3）汉江下游夏季极端降水比例最高，其次为春季，秋季极端降水比例最低，这与中上游极端降水季节变化特征呈现明显差异。在变化过程上，20世纪70年代初汉江下游，夏季极端降水占比先降后升，并在后期维持在高位波动，同期春秋两季极端降水占比出现下降趋势，之后秋季降水呈低位波动，而春季则呈大幅波动。

2.4 环流异常对汉江流域夏季极端降水的影响

不同时间尺度分析结果表明，汉江流域极端降水具有明显的季节差异，夏季极端降水比例明显高于其他季节。值得一提的是，降水年代波动研究结论在东部平原区（淮河流域、长江中下游平原）更加典型，而受秦岭—巴山地形阻挡的影响，汉江流域上游多

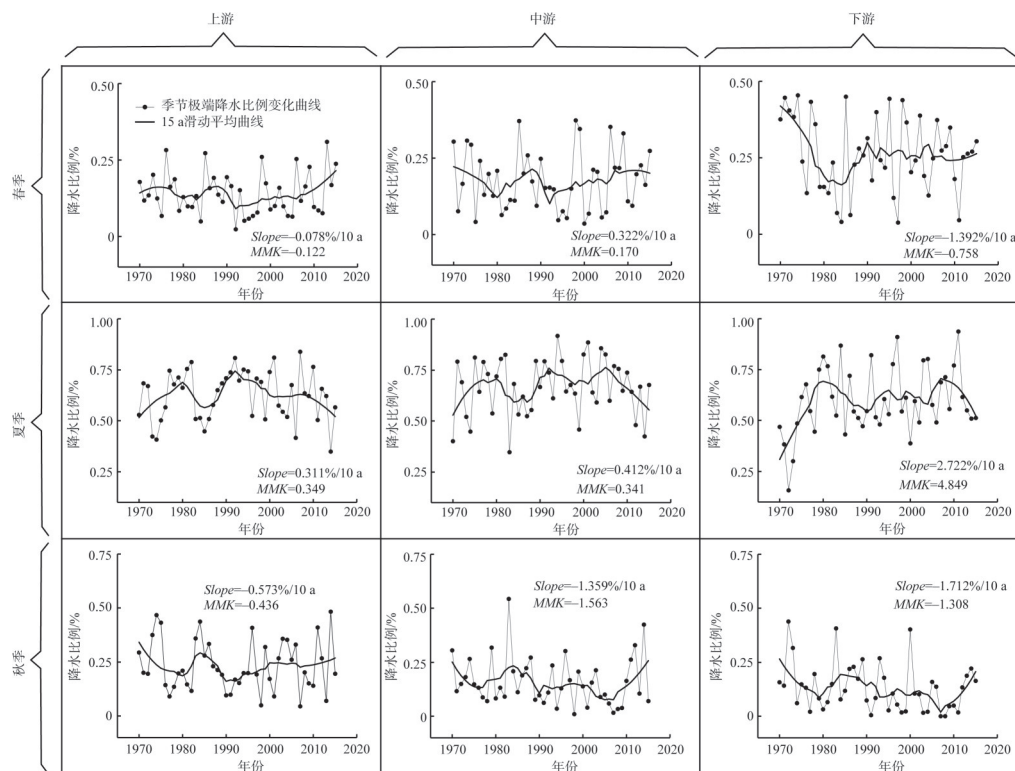


图6 1970-2015年汉江流域不同季节极端降水量比例变化特征

Fig. 6 The variation of seasonal extreme precipitation ratio in the Hanjiang River Basin during 1970-2015

处于过渡状态<sup>[27-29]</sup>。东亚季风和南亚季风异常变化对汉江流域夏季极端降水年代际波动影响如何,极端降水响应是否具有空间差异需要研究。

中国东部季风区夏季具有四种雨型:北方型、中间型、长江型和华南型,主要的水汽通道有6条:印度洋通道、高原南侧通道、太平洋通道、孟加拉湾通道和南海通道<sup>[27]</sup>。中国不同地区夏季降水异常与水汽输送存在明显差异<sup>[28]</sup>。汉江流域处于中间型与长江型的过渡,夏季降水异常既受太平洋水汽输送异常的影响,也受高原南侧水汽输送的影响。中国东部夏季极端降水偏多年,850 hPa风场及整层水汽输送距平场表征的东亚季风明显偏弱,有利于更多水汽输送到长江中下游地区<sup>[29]</sup>。

因此,选取东亚夏季风指数、南亚夏季风指数,分析汉江流域夏季极端降水年代际波动的影响因素。其中,南亚夏季风指数I表征印度洋水汽通道异常;南亚夏季风指数II表征孟加拉湾向北的水汽输送异常;东亚夏季风指数表征西太平洋水汽输送异常(图7a)。计算夏季、逐月季风指数与汉江流域各站点夏季极端降水变化的相关系数,发现东亚夏季风、南亚II区夏季风与部分站点相关性呈显著负相关,其他指数相关性均较弱,并且没有明显的滞后效应(图7b)。

随后,定义以 $\pm 0.5$ 标准差为判断标准,分别统计东亚夏季风、南亚夏季风II区指数强弱异常年(表1)。可以看出,20世纪80年代,无论是东亚夏季风,还是南亚II区夏季风负异常年明显偏多,尤其2000-2015年16年间,东亚夏季风负异常年数为8年,而正异常年仅有4年,南亚II区夏季风表现同样的规律,说明季风水汽输送能力减弱,导致中国

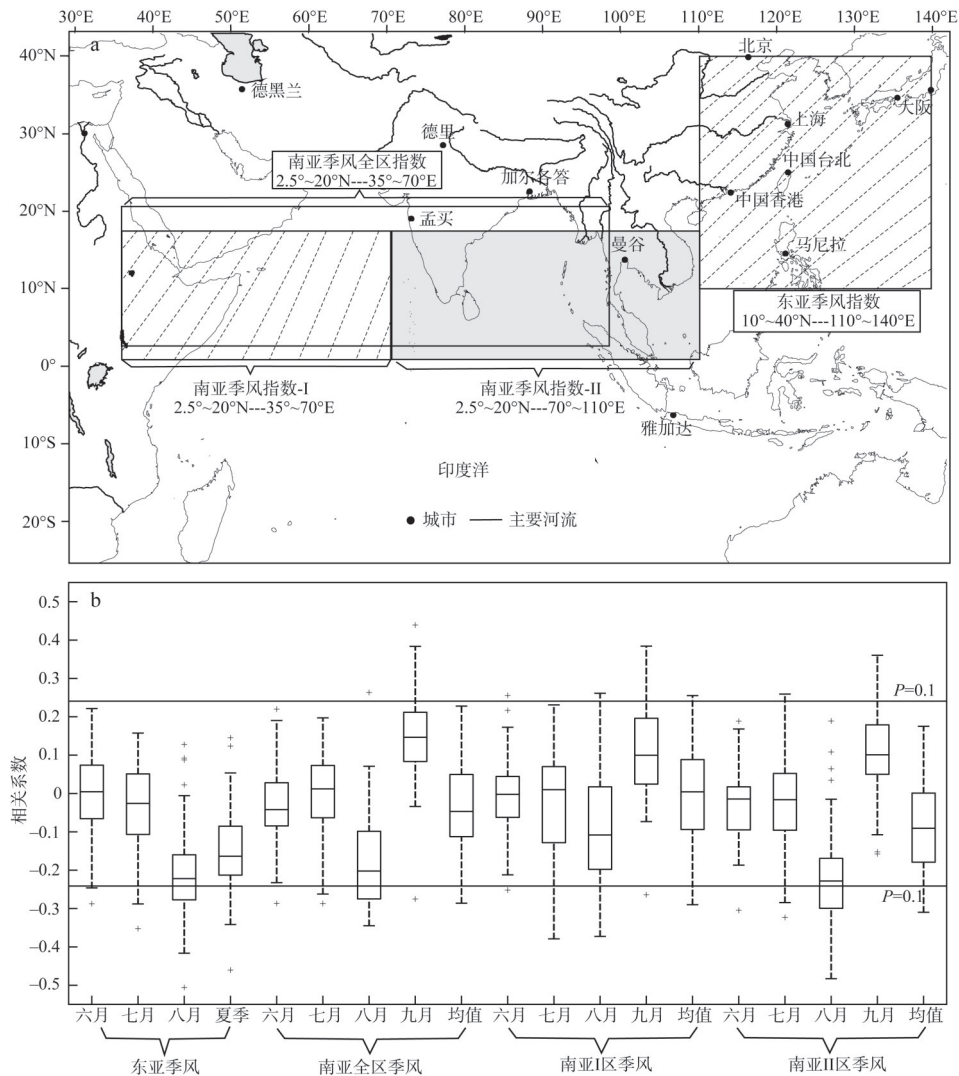


图7 东亚夏季风、南亚夏季风指数与汉江流域不同站点夏季极端降水的相关性  
Fig. 7 The correlation between EASMI, SASMI and summer precipitation in Hanjiang River Basin

表1 东亚季风与南亚季风正负异常年份

Table 1 Positive and negative anomaly year of EASMI and SASMI

季风类型	正异常年	负异常年
东亚夏季风	1972、1974、1975、1978、1981	1971、1977、1980、1983、1987、1988、1989
	1984、1985、1990、1994、1997	1993、1995、1996、1998、2003、2007、2008
	1999、2002、2004、2006、2012	2010、2011、2013、2014、2015
南亚II区夏季风	1972、1978、1982、1985、1990	1979、1983、1987、1988、1989、1992、1995
	1994、2002、2012	1996、1998、2000、2003、2004、2007、2008
		2010、2014、2015

东部季风区多雨区主要分布在淮河平原和长江中下游，符合中国“南涝北旱”雨型特征。

以1980-2010年夏季极端降水量为平均态，分别计算不同季风异常背景下汉江流域夏季极端降水变化率（图8）。通过对站点尺度和空间插值极端降水空间格局进行分析，结果表明：

（1）当东亚夏季风、南亚II区夏季风处于正异常年时，汉江流域极端降水明显偏少，



并且全区响应具有一致性。以中国东部季风区为视角,降水变化格局为北方型,即华北地区降水异常偏多,长江中下游地区降水偏少,其水汽通道主要为太平洋通道,其次为西风带水汽输送,两者水汽输送能力偏强,导致副热带高压控制,汉江流域极端降水相对偏少。

(2) 对东亚夏季风而言,从汉江上游到下游极端降水异常偏少趋势增强,其规律在站点尺度体现的尤为明显,说明西太平洋季风异常偏强,导致南北经向水汽输送偏北,对东部江汉平原和南阳盆地的影响高于汉江上游谷地地区;对于南亚Ⅱ区夏季风而言,受西风带纬向水汽输送的影响,水汽输送异常偏北时,汉江流域整体极端降水减少,降水偏少的东西分异较弱。

(3) 当东亚夏季风、南亚Ⅱ区夏季风处于负异常年时,汉江流域极端降水偏多,增多幅度在10%左右,且降水增幅存在空间差异。对于东亚夏季风而言,极端降水增幅呈现南北分异,秦岭南麓迎风坡是降水相对偏多的区域;受南亚Ⅱ区夏季风偏弱影响,极端降水增幅呈现东西分异。其中,汉江上游极端降水偏多幅度相对较低,基本维持在10%以内,汉江中下游地区明显偏多。

(4) 值得一提的是,少数站点对东亚和南亚夏季季风强弱响应并不明显,其空间主要

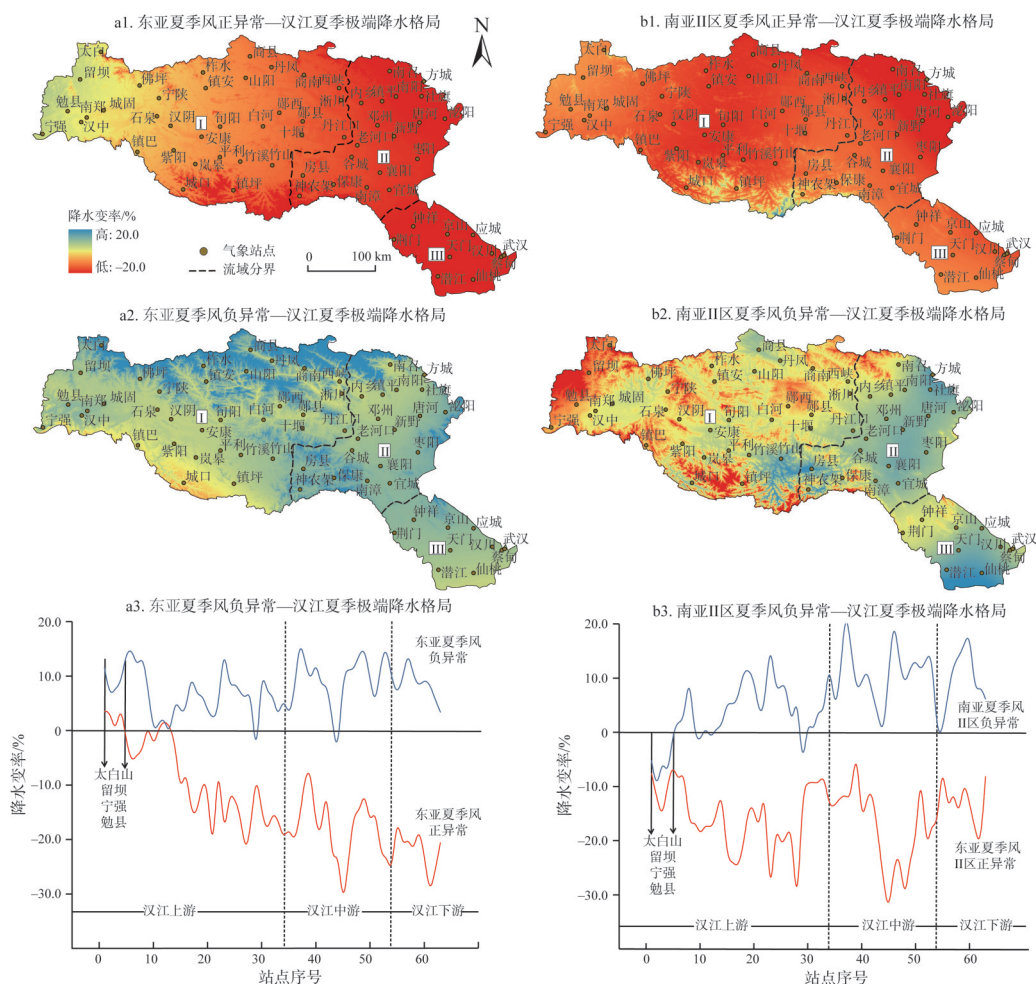


图8 南亚季风指数与汉江流域夏季极端降水量合成分析的空间分布

Fig. 8 The relationship between summer monsoon index and extreme precipitation in the Hanjiang River Basin

分布于汉江上游的山区,如太白山、留坝、宁强和勉县,可能原因是受局部地形的影响,也说明汉江流域夏季极端降水变化具有复杂性。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

利用1970-2015年63个气象站逐日降水数据,对汉江流域极端降水多尺度时空变化特征进行分析,并探讨了东亚、南亚季风与汉江流域夏季极端降水的时空响应关系,得到主要结论如下:

(1) 旬尺度非均匀特征。1970-2015年,汉江流域极端降水集中程度较高,呈现出“西高东低”分布特征,且近期中上游地区EPCD维持稳定。在EPCP方面,汉江极端降水集中在七月下旬,空间呈现出“东部早,西部迟”的分布特征,同时不同流域表现出不同的年代响应规律,即上游EPCP平稳波动,中游呈“推迟—提前—波动—推迟”的交替变化,下游总体呈现波动提前。

(2) 月尺度非均匀分布。汉江流域极端降水各月分布不均,极端降水多发于每年5-9月,7、8月最多,冬半年月份极端降水则相对偏少。在降水发生起止月份上,汉江下游极端降水发生时间相对较早,且流域自东向西起始时间逐渐推后,这与汉江流域所处地理位置有关,受东亚夏季风爆发时间和水汽输送强弱有关。

(3) 季尺度非均匀变化。汉江流域极端降水季节分布特征基本不变,夏季极端降水比例维持在50%以上,但是不同区域变化趋势呈现出不同的变化特征。进入21世纪,汉江上游夏季极端降水占比下降,春季极端降水占比上升;2005年后汉江中游和下游夏季极端降水占比均有所下降,秋季极端降水占比上升。

(4) 极端降水影响因素。东亚夏季风和南亚II区夏季风强弱对汉江夏季极端降水具有重要影响。在东亚夏季风、南亚II区夏季风正异常年,汉江流域极端降水明显偏少;在东亚夏季风偏弱年,汉江流域极端降水整体偏多,且极端降水增幅呈现南北分异,而在南亚II区夏季风偏弱年,极端降水增幅呈现东西分异。

#### 3.2 讨论

关于汉江流域极端降水多尺度时空变化特征,未来还有许多工作值得探索。

(1) 在研究内容上,全球变暖使得极端降水与总降水呈现出新的特点<sup>[30]</sup>。研究极端降水与总降水、极端降水与正常降水非均匀性的关系,对流域水资源开发具有重要的现实意义。同时,需要分析多因子耦合对汉江流域极端降水的影响,特别是分析厄尔尼诺—南方涛动、北大西洋涛动等环流因子相互作用。

(2) 在研究方法上,降水集中期和集中度指数基于矢量的分解与合成原理,提供了一种分析年内降水分布特征的方法,能够描述年内降水的不均匀性特征。在本文中,将降水集中度和集中期用于极端降水分析,发现存在以下几个问题:时间尺度选择问题、集中期识别准确性问题、极端降水指标适应性问题。

对于不同时间尺度选择,大尺度(月)对于总体格局描述更好,小尺度(旬、候)对于区域间的差异描述更好。考虑极端降水格局与发生过程、时空分布等特性存在尺度依存,建议尺度选择参考以下原则:研究区范围较大,降水特征差异明显,可选择月尺度;研究区降水特征相似时,建议选择候、旬尺度。

同时,  $PCD$  时间尺度选择存在一个悖论, 即时间分辨率越高时, 分析结果越精确; 但时间分辨率越高, 对数据质量要求越高。逐日降水数据易受系统误差影响, 如数据缺失、记录偏低等, 系统误差叠加后, 会在非均匀特征识别中放大。因此, 随着时间分辨率提高, 识别偏差逐渐减小, 可选择旬尺度进行研究。

对于  $EPCP$  识别准确性, 旬候尺度识别更为准确。但是,  $EPCP$  识别存在一个问题: 受时间尺度切割影响,  $EPCP$  仅反映固定时段的最大降水, 易忽略时段之间最大降水量。在未来研究中, 需要完善极端降水集中期定义, 以“连续  $n$  天最大降水所在的时段”为切入, 时间尺度不以旬候为单位。尽管这个方法计算比较繁琐, 但是可以突破固定时段的限制, 更好的反映最大降水时段。

为了说明极端降水指标适应性问题, 对汉江流域 63 个站点 46 年不同时间尺度降水非均匀性结果进行分析, 并绘制旬一月 (X-Y)、候一月 (H-Y)、候一句 (H-X) 集中度值差异分布图 (图 9)。可以看出, (1) 不同时间尺度间差值呈正态分布, 极端降水不同尺

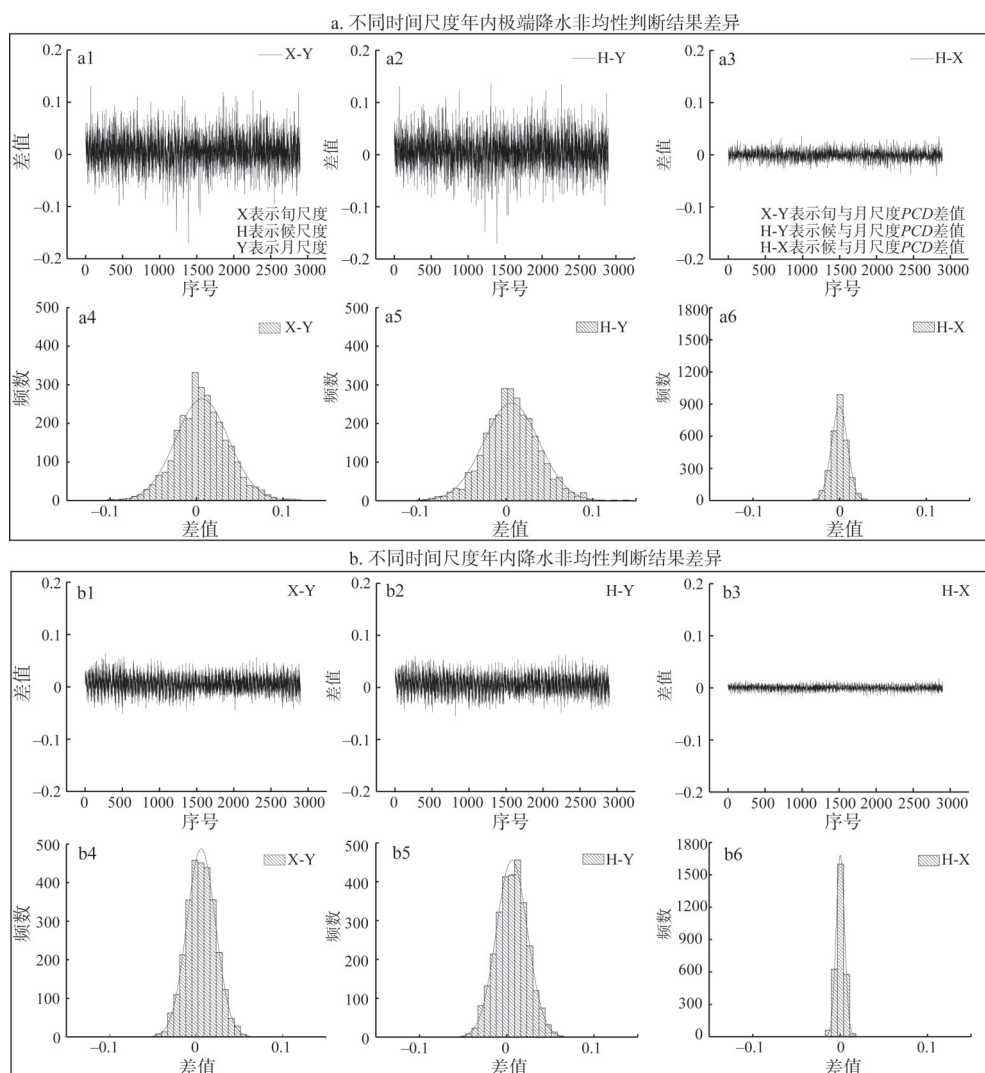


图9 时间尺度对极端降水与正常降水集中度和集中期识别结果的影响

Fig. 9 Influence of time scale on the  $PCD$  and  $PCP$  between normal and extreme precipitation

度间差值均比正常降水高;(2)在时间尺度上,极端降水和正常降水旬候两个尺度集中度指数差值相对较小,而旬月、候月差异相对较大。说明时间尺度增大,方位角间隔增加,月尺度不能很好反映降水非均匀性特征,而旬和候尺度误差相对稳定,数据准确性符合要求,这也是本文选择旬尺度的原因之一。在未来研究中,需要关注旬候尺度误差,突破固定时段限制,定量衡量时间尺度变化对集中度的影响。

### 参考文献(References):

- [1] PFAHL S, O'GORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 423-427.
- [2] 景丞, 陶辉, 王艳君, 等. 基于区域气候模式 CCLM 的中国极端降水事件预估. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 266-277. [JING C, TAO H, WANG Y J, et al. Projection of extreme precipitation events in China based on regional climate model CCLM. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 266-277.]
- [3] SIEPIELSKI A M, MORRISSEY M B, BUORO M, et al. Precipitation drives global variation in natural selection. *Science*, 2017, 355(6328): 959-962.
- [4] KNAPP A K, AVOLIO M L, BEIER C, et al. Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments: Recommendations for simulating wet and dry years. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1774-1782.
- [5] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1015-1026. [WU W B, YOU Q L, WANG D. Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1015-1026.]
- [6] WANG Y Q, ZHOU L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): 1-4.
- [7] 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. [GU X H, ZHANG Q, CHEN X H. Spatiotemporal patterns of uniformity of precipitation and runoff over China and related influencing factors. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1714-1724.]
- [8] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应. *地理学报*, 2016, 71(5): 718-730. [GU X H, ZHANG Q, KONG D D. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 718-730.]
- [9] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估. *大气科学*, 2017, 41(1): 43-56. [JIANG J, JIANG D P, LIN Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2017, 41(1): 43-56.]
- [10] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(3): 340-345. [CHEN H, GUO S L, GUO H J, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 340-345.]
- [11] 白景锋. 基于县域的生态脆弱区人均粮食时空格局变动及驱动力分析: 以南水北调中线水源区为例. *地理科学*, 2014, 34(2): 178-184. [BAI J F. Spatial pattern changes and its driving forces per capita grain possession at county level in ecologically sensitive region: A case of water source area for the the middle route project of South to North Water Transfer. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 178-184.]
- [12] 张静, 任志远. 基于 MOD 16 的汉江流域地表蒸散发时空特征. *地理科学*, 2017, 37(2): 274-282. [ZHANG J, REN Z Y. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration based on MOD 16 in the Hanjiang River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 274-282.]
- [13] 易凤佳, 李仁东, 常变蓉, 等. 2000-2010 年汉江流域湿地动态变化及其空间趋向性. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1412-1420. [YI F J, LI R D, CHANG B R, et al. Dynamic change analysis of wetland and its spatialtemporal trend in from 2000 to 2010. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1412-1420.]
- [14] 李丹, 郭生练, 洪兴骏, 等. 汉江流域 1960-2014 年降雨极值时空变化特征. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1448-1456. [LI D, GUO S L, HONG X J, et al. Temporal and spatial variation of rainfall extremes in Han River Basin from 1960 to 2014. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1448-1456.]
- [15] 李小燕, 任志远, 张翀. 汉江流域 NDVI 与水热指数时空变化及相关性分析. *地理研究*, 2013, 32(9): 1623-1633. [LI



- X Y, REN Z. Y, ZHANG C. The correlation analysis and space-time changes of NDVI and hydro-thermal index in Hanjiang basin. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1623-1633.]
- [16] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078. [WANG P T, ZHANG L W, LI Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reachers of Hanjiang River Basin. *Acta Geographica sinica*, 2017, 72(11): 2065-2078.]
- [17] 陈心池, 张利平, 闪丽洁, 等. 基于Copula函数的汉江中上游流域极端降雨洪水联合分布特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1425-1433. [CHEN X C, ZHANG L P, SHAN L J, et al. Joint distribution of the extreme rainfall and flood for the upper-middle reaches of the Hanjiang River Basin on Copula function. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1425-1433.]
- [18] 郑江禹, 张强, 史培军, 等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究. *地理科学*, 2017, 37(2): 283-291. [ZHENG J Y, ZHANG Q, SHI P J, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation regimes and related driving factors in the Pearl River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 283-291.]
- [19] GU X H, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Nonstationarity in timing of extreme precipitation across China and impact of tropical cyclones. *Global and Planetary Change*, 2017, 149: 153-165.
- [20] KHOUAKHI A, VILLARINI G, VECCHI G A. Contribution of Tropical Cyclones to rainfall at the global scale. *Journal of Climate*, 2017, 30(1): 359-372.
- [21] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970-2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24. [LI S S, LU J Y, YAN J P, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13-24.]
- [22] LI J P, ZENG Q C. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic & Environmental Research*, 2005, 10(3): 351-365.
- [23] ANGÉLIL O, STONE D, WEHNER M, et al. An independent assessment of anthropogenic attribution statements for recent extreme temperature and rainfall events. *Journal of Climate*, 2017, 30(1): 5-16.
- [24] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1): 182-196.
- [25] ZHANG L J, QIAN Y F. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2): 146-163.
- [26] 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 中国气候. 北京: 科学出版社, 2013. [DING Y H, WANG S W, ZHENG J Y, et al. *Climate in China*. Beijing: Science Press, 2013.]
- [27] 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异. *大气科学*, 2018, 42(1): 81-95. [YANG L, ZHAO J H, FENG G L. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(1): 81-95.]
- [28] 邹梦, 乔少博, 吴永萍, 等. 热带印度洋—西太平洋水汽输送异常对中国东部夏季降水的影响. *大气科学*, 2017, 41(5): 988-998. [ZOU M, QIAO S B, WU Y P, et al. Effects of anomalous water vapor transport from tropical Indian ocean-western pacific on summer rainfall in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(5): 988-998.]
- [29] 武文博, 游庆龙, 王岱, 等. 中国东部夏季极端降水事件及大气环流异常分析. *气候与环境研究*, 2018, 23(1): 47-58. [WU W B, YOU Q L, WANG D, et al. Characteristics of extreme precipitation and associated anomalous circulations over eastern China during boreal summer. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(1): 47-58.]
- [30] LIU R, LIUS C, RALPH J C, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(8): 1027-1037.

## Spatiotemporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang River Basin during 1970-2015

WANG Cheng-bo<sup>1,2</sup>, LI Shuang-shuang<sup>1,2</sup>, YAN Jun-ping<sup>1,2</sup>, WU Ya-qun<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi  
Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** With the rapid development of social economy and the continuous development of ecological construction, the change of water resources in the Hanjiang River Basin plays an important role in the sustainable development of trans-regional water transfer. Thus, it is worthy to analyze the variation characteristics and influencing factors of extreme precipitation in the Hanjiang River Basin, using the peaks-over-threshold approach, extreme precipitation concentration degree (*EPCD*) and extreme precipitation concentration period (*EPCP*). The results show that (1) In terms of the "10-day" scale, the extreme *EPCD* in the river basin is relatively high, and it shows the distribution characteristics of "high in the west and low in the east", which illustrated that the precipitation is more uniform in the eastern part than in the western. And the *EPCD* in the lower reaches of Hanjiang River has a decreasing tendency in recent years, which indicated that the precipitation tends to disperse. The annual average value of *EPCP* in the Hanjiang River is concentrated in late July, and it shows the spatial distribution features of "early in the east, and late in the west", that is, there is earlier arrival of the flood season in the east than in the west. (2) For the monthly scale, the extreme precipitation in the study basin is concentrated in May and September, and extreme precipitation rarely occurs during the period from October of the same year to April of the following year. (3) At the seasonal scale, since the start of the 21st century, the proportion of extreme precipitation in summer in the basin has decreased, and the summer extreme precipitation has mainly changed to spring in the upper reaches, which turned into autumn in the middle and lower reaches of the basin, indicating that summer is the key season that leads to the uneven variation of the extreme precipitation. (4) As for influencing factors, the East Asian summer monsoon and South Asia II have a negative correlation with the extreme precipitation. When the East Asian summer monsoon and South Asia II are strong, the extreme precipitation in the whole river basin decreases. However, when the East Asian monsoon and South Asia II are weak, the correlations with extreme precipitation present spatial difference. The weaker the East Asian monsoon, the increase of extreme precipitation varies from north to south, while in South Asia region II, the increase of extreme precipitation varies from east to west.

**Keywords:** extreme precipitation; heterogeneity; precipitation concentration degree; precipitation concentration period; Hanjiang River Basin