

黄璐,刘贤赵,莫宏伟. 1987~2016年武汉市极端降水事件特征分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 103-110. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.015

Huang L, Liu X Z, Mo H W. Characteristic Analysis of Extreme Precipitation Events in Wuhan from 1987 to 2016 [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3): 103-110. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.015

# 1987~2016年武汉市极端降水事件特征分析

黄璐<sup>1,2</sup>, 刘贤赵<sup>1\*</sup>, 莫宏伟<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201 ;  
2. 萍乡学院 初等教育学院, 江西 萍乡 337055 )

**摘要:** 基于1987~2016年武汉市及附近共5个格点的日降水量资料, 选取5个极端降水指数 Rx1day(单日最大降水量)、Rx5day(5日最大降水量)、R95p(极端降水量)、R20(大雨日数)、SDII(降水强度), 采用百分位阈值法、气候倾向率法、滑动平均法和 Mann-Kendall 突变检验等方法, 对武汉极端降水事件的时空变化进行了分析. 结果表明: 1987~2016年武汉市极端降水事件的阈值整体上呈中部小、周边大的空间分布特征. 极端降水事件发生频次的高值中心位于南部, 低值区为北部. 频次年际波动大, 呈微弱减少趋势, 年代际频次则呈现明显的逐年代递减的规律. 极端降水指数的空间分布中, Rx1day 和 R95p 的空间变化差异较大, 而 Rx5day, R20 和 SDII 的空间变化差异较小. Rx1day 与 R95p 变化趋势均为北部下降、南部上升; Rx5day 则为南部下降、北部上升; 所有地区的 R20 均呈下降趋势; 只有位于西南部的 SDII 呈上升趋势, 其他地区均下降. 1987~2016年, 极端降水指数年际波动剧烈, Rx1day, Rx5day 和 R95p 波动幅度相似, 且均呈微弱的上升趋势, R20 和 SDII 波动幅度类似, 均呈微弱的下降趋势, 总体表明这30年间极端降水量随时间变化而增加, 但是降水强度在减弱.

**关键词:** 极端降水; 时空变化; 趋势; 武汉

中图分类号: P467 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2019)03-0103-08

## Characteristic Analysis of Extreme Precipitation Events in Wuhan from 1987 to 2016

Huang Lu<sup>1,2</sup>, Liu Xianzhao<sup>1</sup>, Mo Hongwei<sup>1</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. School of Primary Education, Pingxiang University, Pingxiang 337055, China)

**Abstract:** Based on the data of the daily precipitation of 5 grid points in Wuhan and nearby, from 1987 to 2016, 5 extreme precipitation indexes, including Rx1day (maximal 1-day rainfall), Rx5day (maximal 5-day total rainfall), R95p (extreme precipitation), R20 (days of precipitation more than 20 mm), SDII (precipitation intensity), were selected. The spatial and temporal changes of extreme precipitation events in Wuhan were analyzed by using the percentile threshold method, the climate inclination rate method, the sliding average method, the Mann-Kendall mutation test. The results showed that the spatial distribution in threshold of extreme precipitation events is characterized by small in central part and large in surrounding part in Wuhan from 1987 to 2016; the maximum value of frequency of extreme precipitation events is in the south, and the minimum value is in the north. The inter-annual fluctuation of frequency is fierce, and it shows a slight trend of reduction, and the

收稿日期: 2018-07-11

\* 通信作者, E-mail: xianzhaoliu@ sina. com

inter-decadal value decreases gradually. Among the spatial distribution of these extreme precipitation indexes, Rx1day and R95p varies greatly while the spatial variation differences of Rx5day, R20 and SDII is very small. Both Rx1day and R95p decrease in the north and increase in the south, while Rx5day decreases in the south and increases in the north; R20 declines in all regions; SDII increases in the south-west and decreases in other regions. The inter-annual fluctuation of these extreme precipitation indexes is fierce, from 1987 to 2016. Rx1day, Rx5day, R95p shows a trend of increase, while R20 and SDII displays a trend of decrease, which indicates that the extreme precipitation increases while the precipitation intensity decreases over the course of 30 years.

**Keywords:** extreme precipitation; spatial and temporal changes; tendency; Wuhan

近年来,在全球变暖的影响下,极端气候事件的发生频率和强度出现了很大的变化,其中极端降水事件成为国内外学者关注的焦点<sup>[1-2]</sup>. Alexander 等在研究全球气候变化时发现,20世纪中后期以来极端气温和极端降水均表现出上升趋势<sup>[3]</sup>. Rahimzadeh 等发现极端降水事件在更大区域里出现,特别是在陆地高纬度地区<sup>[4]</sup>. Russo 等指出,世界各地大部分地区降水量最大值将会增加<sup>[5]</sup>. Karl 等研究表明,美国极端降水量在年总降水量中所占的比例在增大,降水总量的增加主要归因于极端降水强度和频次的增加<sup>[6]</sup>. Evans 等的研究表明,在拉尼娜现象中,澳大利亚东北部地区海水的表面温度上升,从而增加了该地区的极端降水量<sup>[7]</sup>.

国内学者中,杜予罡等利用中国 532 个台站的日降水资料,对 1990~2010 年的极端降水事件进行了研究,结果表明,1990~2010 年 1 月~3 月为我国极端降水频次增加较多的月份,而 6 月~7 月为我国极端降水量增加最大的月份<sup>[8]</sup>. 任正果等基于格点数据研究了我国南方地区的极端降水事件变化特征,研究表明,越靠近东南方越湿润,越靠近西北方越干旱<sup>[9]</sup>. 王苗等研究表明我国东部地区极端降水具有显著的南北差异,北方尤其是华北东部,极端降水量及其所占降水量比例均有下降趋势,而南方尤其是在长江中下游地区二者均呈增加趋势<sup>[10]</sup>. 王炳钦等利用 1961~2010 年 49 个气象站点的逐日降水数据集,分析了我国北方半干旱区近 50 a 来的极端降水时空变化特征,研究发现,各极端降水指数均呈减少趋势,指数变化趋势存在空间差异,中部部分地区指数值增加,而东部主要是减少<sup>[11]</sup>. 学者们对大区域范围内极端降水进行了大量研究,然而小区域范围内的研究却很少,我国地形地貌相当复杂,因此针对特定小区域的研究具有极大意义,本文从小区域的角度出发,研究了武汉市极端降水在时间和空间上的变化特性.

本文选取武汉市及周边 1987~2016 年地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集,研究武汉市极端降水事件的阈值和频次空间分布、频次年际和年代际变化以及 5 个极端降水指数(Rx1day, Rx5day, R95p, R20 和 SDII)的时空变化,旨在揭示武汉市极端降水的变化趋势和演化规律,为城市管理以及提高应对极端降水事件的能力提供决策参考<sup>[12]</sup>.

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

武汉市地处长江中游,是华中地区的中心城市,面积为  $8.48 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,包括主城区、黄浦区、东西湖区、新洲区、蔡甸区、汉南区和江夏区 7 个区(如图 1),长江及其最大支流汉江横贯市境中央.由于地处亚热带季风区,武汉夏季高温多雨,4 月~8 月份为其主要降水量时间段,降水量占全年的 65%,其年均降水日数达 124.9 d,降水量达 1 180 mm<sup>[13]</sup>.

本文所用数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集(V2.0),共选取武汉市及周边共 5 个格点 1987~2016 年的逐日降水数据.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 百分位阈值法

我国气象部门规定,日降水量在 50~100 mm 之间的降水事件称为暴雨,在 100~250 mm 之间称为大

暴雨,大于 250 mm 则成为特大暴雨<sup>[14]</sup>.事实上,不同地区存在不同的降水极值,因而简单地把极端降水事件用固定的单日降水量定义可能不够准确.为了避免这一现象,本文运用国际通用的百分位阈值法<sup>[15]</sup>对武汉市及周边共 5 个格点的日降水量进行处理,以确定各个格点的阈值,即把武汉市 1987~2016 年逐年湿日(日降水 $\geq 0.1$  mm)降水量序列的第 95 个百分位值的 30 a 平均值称为极端降水事件的阈值,若某个格点某日降水量超过这一阈值,则将其定义为极端降水事件<sup>[16-17]</sup>.

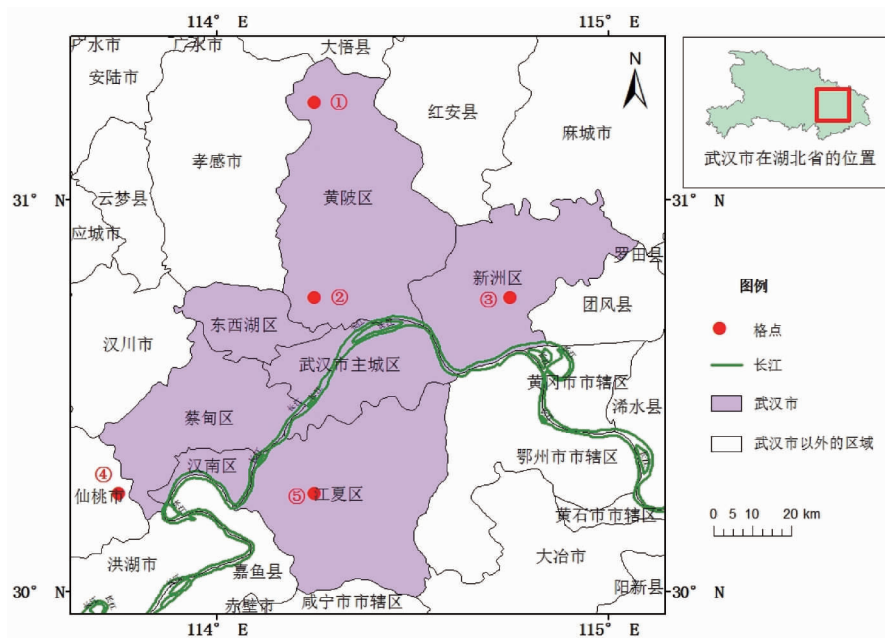


图1 湖北省武汉市地理位置

### 1.2.2 极端降水指数的定义

确定极端降水的阈值后,选取 5 种来自世界气象组织推荐的极端气候指数来分析武汉市极端降水的时空变化特征<sup>[18]</sup>,5 个指数的定义如表 1,各指数值均通过 RCLIMDEX3.3.3 计算得到.

表1 极端降水指数及其定义

指数名称	定义	单位
Rx1day	年内最大一日降水量	mm
Rx5day	年内连续 5 d 最大降水量	mm
R95p	日降水量大于 1987~2016 年第 95 个百分位 30 a 平均数值的降水量	mm
R20	日降水量大于或等于 20 mm 的日数	d
SDII	年降水总量与降水日数之比	mm/d

### 1.2.3 滑动平均法

滑动平均法是一种常用时间序列分析方法,本文通过对动态实测数据做平滑处理,即对总共  $n$  个数据逐步分割成小区间然后进行局部的数据求均值,以抑制数据较为频繁的随机起伏,使数据的变化趋势更加平滑.滑动平均法的计算公式为

$$\bar{y}_t = (y_{t-1} + y_{t-(l-1)} + \dots + y_{t-1} + y_t + y_{t+1} + \dots + y_{t+l}) / (2l + 1). \quad (1)$$

式中: $\bar{y}_t$  是  $t$  的滑动平均值; $l$  是单侧平滑时距;当  $l=1$  时,式(1)为 3 点滑动平均,当  $l=2$  时,式(1)为 5 点滑动平均<sup>[19]</sup>.

### 1.2.4 气候倾向率法

气候倾向率法是一种定量描述气候要素变化趋势的方法,气候要素  $y_i$  的长期变化趋势采用一元线性回归方程分析:

$$y_i = a + bt_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中:  $t_i$  表示  $y_i$  对应的时间;  $a$  为常数;  $b$  为回归系数,  $b$  的 10 倍为气候倾向率.  $b > 0$  时, 表示气候要素序列随时间递增呈上升趋势, 反之, 递减呈下降趋势, 绝对值越大, 趋势越明显<sup>[20]</sup>. 对  $a$  和  $b$  的最小二乘法估计见式(3)和式(4)<sup>[21]</sup>.

$$a = \bar{x} - b \bar{t}; \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2}. \quad (4)$$

式中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (5)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (6)$$

### 1.2.5 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall (M-K) 法是一种非参数检验法, 它以气候序列平稳为前提, 且该序列是随机独立的, 它的特点为不受异常值干扰, 检测样本不必遵循一定分布. 在原假设  $H_0$ : 气候序列稳定的前提下, 记序列为  $x_1, x_2, x_n, \dots, m_i, m_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i$  大于  $x_j$  的累积数<sup>[22]</sup>. 定义统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i. \quad (7)$$

假设原序列随机独立, 则  $d_k$  的均值、方差为

$$\begin{cases} E[d_k] = k(k+1)/4; \\ \text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72, 2 \leq k \leq n. \end{cases} \quad (8)$$

将  $d_k$  标准化:

$$u(d_k) = (d_k - E[d_k]) / \sqrt{\text{var}[d_k]}. \quad (9)$$

式中:  $u(d_k)$  为标准分布, 其概率可通过计算或查表获得. 给定显著水平  $\alpha_0$ , 若  $a_1 > \alpha_0$ , 接受原假设. 它表示该序列存在一个较强的增长或减少趋势<sup>[23]</sup>. 所有  $u(d_k)$  将构成曲线 UF, 通过信度检验可知其是否存在变化趋势. 在反序列中采用这种方法, 得到另一条曲线 UB. 若  $UF > 0$ , 则表示序列呈上升趋势, 若  $UF < 0$ , 则表示序列呈下降趋势, 当 UF 值超过临界值时, 表明趋势变化明显, 若曲线 UF 和 UB 的交点在 2 条临界值信度线之间, 则此交点为开始突变的点<sup>[24]</sup>. 本研究中, 显著性水平确定为  $\alpha = 0.05$ , 则临界值为 1.96 和 -1.96.

## 2 结果与分析

### 2.1 极端降水事件阈值和频次的空间分布

图 2a 给出了 1987~2016 年武汉市市内 4 个格点及附近 1 个格点的极端降水事件阈值的空间分布, 红色圆点为格点, 将 5 个格点分别标记为①, ②, ③, ④, ⑤. 可以看出介于 21.95~24.60 mm/d 之间, 整体上, 中部阈值小, 周边阈值大, 最大值位于南部的江夏区. 空间分布差异小, 变异系数为 0.045, 全市阈值平均值为 23.10 mm/d.

图 2b 为武汉市 1987~2016 年极端降水事件发生频次的空间分布, 可以发现, 极端降水事件频次在 10.6~12.3 d/a 之间. 最大值位于江夏区, 其频次为 12.3 d/a; 最小值位于黄陂区, 频次为 10.6 d/a. 总体上看来武汉市极端降水事件频次的空间差异较小, 其变异系数为 0.058, 全市频次平均值为 11.76 d/a.

### 2.2 极端降水事件频次变化特征

#### 2.2.1 极端降水事件发生频次的线性斜率

计算武汉市 1987~2016 年各地区极端降水事件发生频次的线性斜率, 发现其均呈减少趋势. 其中, 位

于江夏区的格点⑤减少斜率最大,为 $-9.8/10$  a,位于蔡甸区附近的格点④减少斜率最小,为 $-1.4/10$  a,格点①~格点③的极端降水事件发生频次的线性斜率分别为 $-5.9/10$  a,  $-5/10$  a,  $-4.7/10$  a,各格点位置见图1.各个格点均未通过 $P=0.05$ 显著性检验,表明减少趋势均不明显.

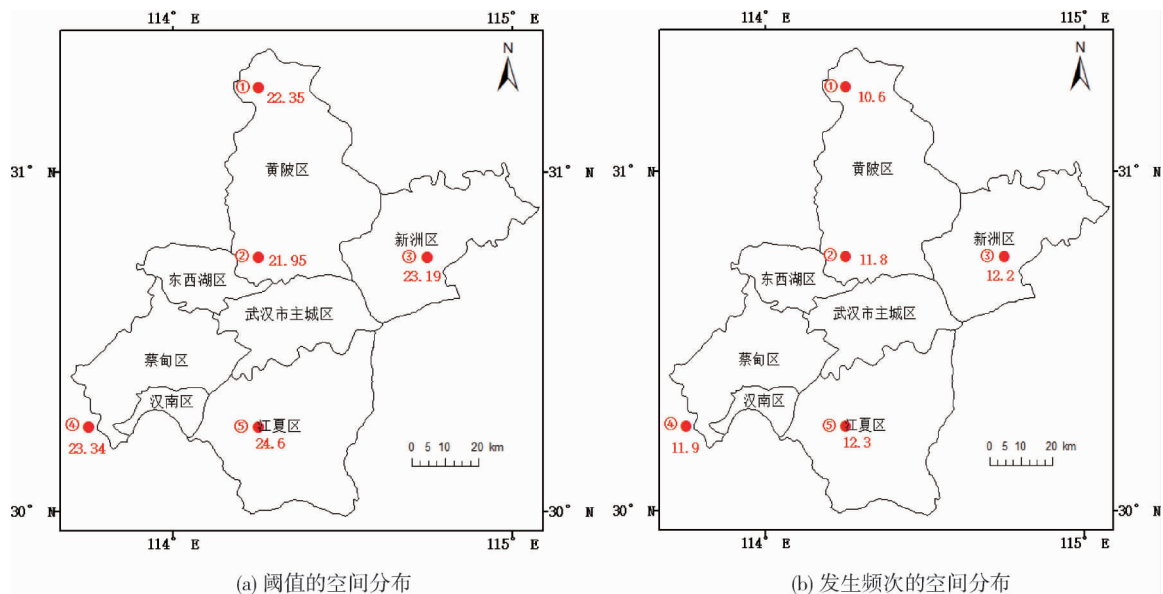


图2 武汉市极1987~2016年端降水事件空间分布

### 2.2.2 极端降水事件频次的年际和年代际变化特征

图3是武汉市1987~2016极端降水事件发生频次的年际变化图,由图3可知频次年际波动大,气候倾向率为 $-0.54$  d/10 a,  $R^2$ 为0.0267,表明两者的线性相关趋势不明显.频次最大值为在1987年,为18.0 d/a,次大值是1998和2002年,均为15.8 d/a,最小值是在2001年,为5.8 d/a,多年均值为11.75 d/a.

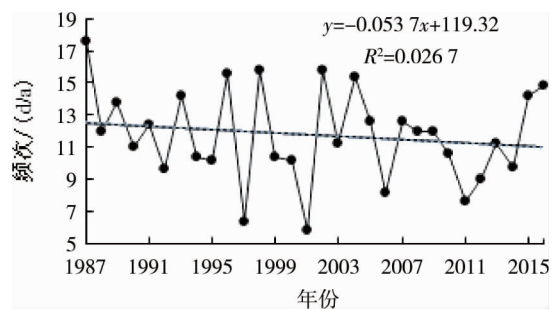


图3 武汉市极端降水事件发生频次的年际变化

统计武汉市1987~2016年极端降水事件的年代际频次,发现其存在明显的逐年代递减的特征:1987~1996年为12.68 d/a,1997~2006年为11.59 d/a,2007~2016年为11.38 d/a.

## 2.3 极端降水指数的时空变化特征分析

### 2.3.1 极端降水指数倾向率的空间分布

$Rx1day$ (单日最大降水量)、 $Rx5day$ (5日最大降水量)、 $R95p$ (极端降水量)、 $R20$ (大于日数)、 $SDII$ (降水强度)的倾向率空间分布如表2所示.降水量指数中,对于单日最大降水量,只有位于黄陂区北部的格点1呈下降趋势,其他地方均呈上升趋势,其中,只有位于黄陂区南部的格点2的倾向率通过了 $P=0.05$ 的显著性检验;对于连续5d最大降水量,只有格点1呈上升趋势,其他地方均呈下降趋势,只有位于新洲区的格点3通过了 $P=0.05$ 的显著性检验;极端降水量中,位于北部的3个格点呈下降趋势,位于南部的2个格点呈下降趋势.各地区的大雨日数均呈现微弱下降趋势.而降水强度中,只有位于西南部呈现微弱上升趋势,其他地区均呈微弱下降趋势.

极端降水指数的空间分布中,单日最大降水量和极端降水量的空间变化差异较大,其变异系数分别为6.13和-5.09,连续5d最大降水量、大雨日数和降水强度的空间变化差异较小,其变异系数分别为-0.59, -0.42和-0.82.

表2 Rx1day, Rx5day, R95p, R20, SDII 的倾向率空间分布

	①黄陂区北部	②黄陂区南部	③新洲区中部	④蔡甸区西南部	⑤江夏区中部
Rx1day	-3.95	2.21	3.15	6.54	6.13
Rx5day	0.65	-28.57	-33.49	-25.28	-30.60
R95p	-29.88	-6.86	-8.43	30.28	38.25
R20	-0.75	-0.67	-0.61	-0.96	-1.56
SDII	-0.48	-0.20	-0.34	0.03	-0.18

2.3.2 极端降水指数的年际变化特征

图4为武汉市 Rx1day, Rx5day, R95p, R20, SDII 的年际变化图.1987~2016年,武汉市各指数的年际值波动剧烈,3个降水量指数 Rx1day, Rx5day 和 R95p 均呈现微弱的增加趋势,倾向率分别为 2.82/10 a, 3.49/10 a和 5.73/10 a,而大雨日数(R20)和降水强度(SDII)均呈现微弱的下降趋势,倾向率分别为 -0.68/10 a和-0.23/10 a.

降水量指数中,Rx1day 在这 30 a 间的均值为 86.042 mm,除了 2001 年,其他年份均超过 50 mm,最大值为 158.44 mm,出现在 2016 年.Rx5day 的均值为 140.41 mm,各年份的连续 5 d 降水总量均围绕均值上下波动,波动幅度和频率较高,最大值出现在 2006 年,年内连续 5 d 最大降水量为 249.64 mm.R95p 的年际变化均值 86.042 mm,极端降水量的最大值为 628 mm,出现在 2008 年.

降水日数指数 R20 最大值出现在 1987 年,大雨日数达到了 21 天,最小值出现在 1997 年,大雨日数为 8 d,30 年均值为 14.03 mm.降水强度指数 SDII 最大值出现在 2008 年,降水强度达到了 13.42 mm/d,最小值出现在 2001 年,降水强度为 7.76 mm/d,均值为 10.71 mm/d.

观察各指数的 5 年滑动平均曲线,可以发现:3 个降水量指数 Rx1day, Rx5day 和 R95p 的波动情况类似,大致分为 6 个阶段,1994 年之前、1998~1999 年、2009~2013 年呈现下降趋势,1994~1998 年、2013~2016 年呈现增加趋势,1999~2009 年为正常波动状态;R20 和 SDII 的波动情况类似,大致分为 5 个阶段,1998 年之前为正常波动状态,1998~1999 年、2003~2011 年呈下降趋势,1999~2003 年、2011~2016 年呈上升趋势.

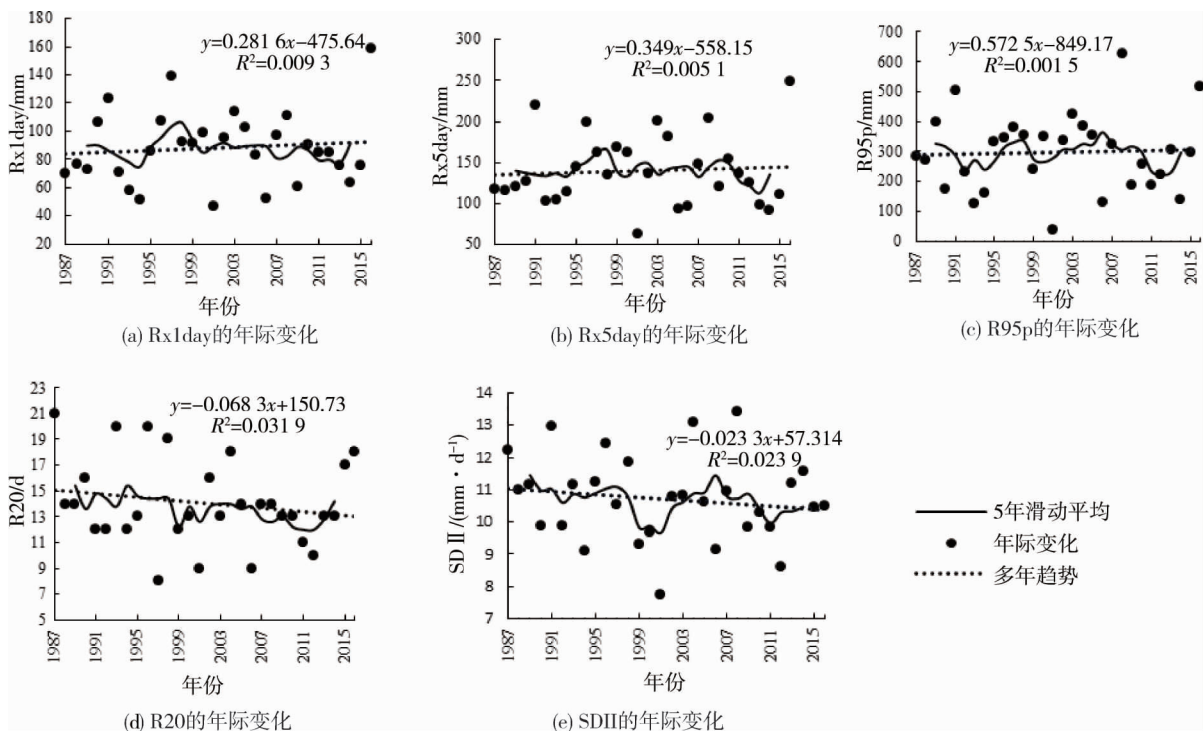


图4 武汉市各指数的年际变化



### 2.3.3 极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验分析

图5给出了 Rx1day, Rx5day, R95p, R20, SDII 的 Mann-Kendall 突变检验结果.可以看出,从1978年开始,单日最大降水量呈现先增后减的趋势,1994年左右发生突变,开始呈增加趋势,直到2012年左右发生突变,开始下降.20世纪80年代末,5 d最大降水量发生突变,开始上升,直到2013年左右发生突变,开始下降.2008年之前,R95p反复发生升高和降低的突变,波动剧烈,之后呈减少趋势.R20和SDII在这30 a中没有突变点,一直呈下降趋势.各指数的UF值均在信度线之间,所以趋势不明显.由于所选数据为中国地面降水日值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集,各格点间距离相差超过50 km,所以突变检验可能不够准确,需进行更深入的分析.

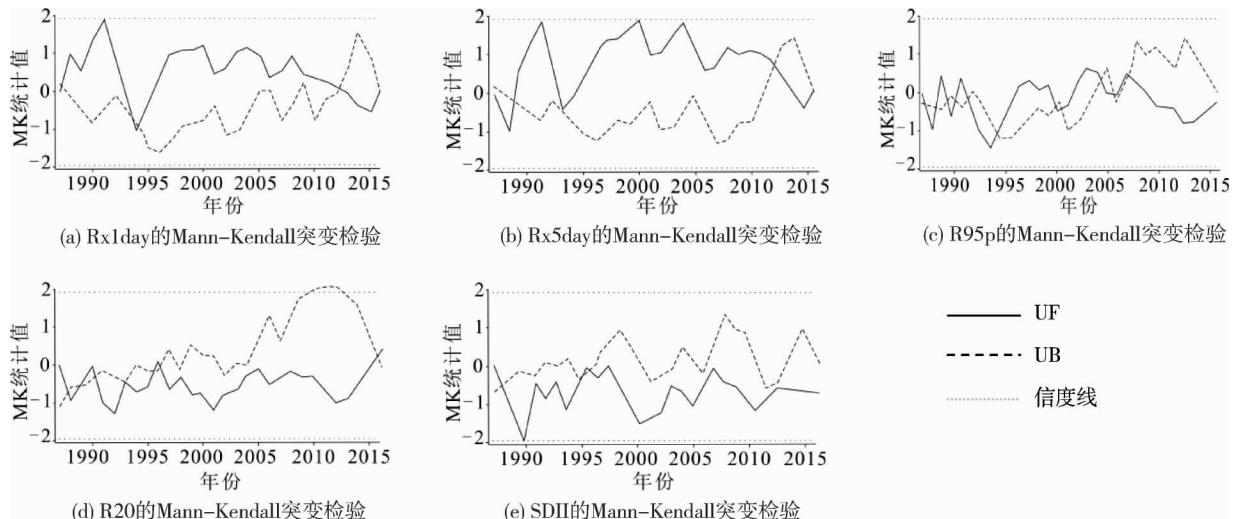


图5 各指数的 Mann-Kendall 突变检验

## 3 结论

1) 1987~2016年武汉市极端降水事件阈值的空间特征整体上呈中部阈值小,周边阈值大的空间分布特征,全市均值为23.10 mm/d.

2) 1987~2016年武汉市极端降水事件的频次分布的空间差异较小,空间变异系数为0.058.高值中心位于南部的江夏区,为12.3 d/a,低值区为北部的黄陂区,为10.6 d/a,全市平均为11.75 d/a.

3) 1987~2016年武汉极端降水事件发生频次年际波动大,呈微弱的减少趋势,气候倾向率为 $-5.4 \text{ d}/10 \text{ a}$ ,极端降水事件的年代际频次则呈明显的逐年代递减的规律.

4) 极端降水指数的空间分布中,单日最大降水量和极端降水量的空间变化差异较大,空间变异系数分别为6.13和-5.09,连续5 d最大降水量、大雨日数和降水强度的空间变化差异较小,空间变异系数分别为-0.59,-0.42和-0.82.单日最大降水量与极端降水量变化趋势类似,北部呈下降趋势,南部呈上升趋势;5 d最大降水总量则相反,南部下降,北部上升;所有地区的大于日数均呈下降趋势;只有位于西南部的降水强度呈上升趋势,其他地区均呈下降趋势.

5) 1987~2016年,极端降水指数年际波动剧烈,单日最大降水量、5 d最大降水总量和极端降水量波动幅度相似,且均呈微弱的上升趋势,大雨日数和降水强度波动幅度类似,均呈微弱的下降趋势,表明这30 a间极端降水量随时间变化而增加,但是降水强度在减弱.

### 参考文献:

- [1] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3):417-426.

- [2] Hulme M. Estimating global changes in precipitation[J]. *Weather*, 1995, 50(2):34-42.
- [3] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(d5):1042-1063.
- [4] Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(3):329-343.
- [5] Russo S, Sterl A. Global changes in seasonal means and extremes of precipitation from daily climate model data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(d1):1108.
- [6] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA[J]. *American Meteorological society*, 1998, 79(2):231-241.
- [7] Evans J P, Boyer - Souchet I. Local sea surface temperatures add to extreme precipitation in northeast Australia during La Niña[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(10):L10803-L10805.
- [8] 杜予罡,徐昕,王元.1990-2010年中国极端温度和降水事件的月变化特征[J].*气象与减灾研究*,2016,(1):9-15.
- [9] 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[J].*地理学报*,2014,(5):640-649.
- [10] 王苗,郭品文,邬响.中国东部极端降水变化特征及其与大气稳定度的关系[J].*大气科学学报*,2014,37(1):47-56.
- [11] 王炳钦,江源,董满宇,等.1961-2010年北方半干旱区极端降水时空变化[J].*干旱区研究*,2016,(5):913-920.
- [12] 吴雷,许有鹏,杨倩,等.1951年~2014年武汉市极端降水事件变化特征[J].*华中师范大学学报(自然科学版)*,2016,(3):457-463.
- [13] 朱俊华.夏热冬冷地区湖泊湿地型城市水环境规划策略研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [14] 李莹,朱益民,夏淋淋,等.长江流域夏季不同强度降水日数的时空变化特征[J].*气象科学*,2017,37(6):808-815.
- [15] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2010, 14(9):1959-1976.
- [16] Folland C, Anderson C. Estimating changing extremes using empirical ranking methods.[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(15):2954-2960.
- [17] Zoysa A K N, Loganathan P, Hedley M J. A technique for studying rhizosphere processes in tree crops: soil phosphorus depletion around camellia (*Camellia japonica* L.) roots[J]. *Plant & Soil*, 1997, 190(2):253-265.
- [18] 张爱英,高霞,任国玉.华北中部近45a极端降水事件变化特征[J].*干旱气象*,2008,(4):46-50.
- [19] 刘宇峰,孙虎,原志华.1960年至2007年汾河流域气温年际和季节性变化特征分析[J].*资源科学*,2011,(3):489-496.
- [20] 戴声佩,李海亮,刘海清,等.全球气候变暖背景下华南地区农业气候资源时空变化特征[J].*中国农业资源与区划*,2014,(1):52-60.
- [21] 王琼.1962-2011年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [22] 张鹏,张钰,罗颖,等.疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J].*水资源与水工程学报*,2013,(5):165-172.
- [23] 姚小英,王劲松,王莺,等.广东近40年气候变化特征及对农业的影响[J].*中国农学通报*,2015,(26):222-228.
- [24] 刘贤赵,张安定,李嘉竹,等.地理学数学方法[M].北京:科学出版社,2009:203-204.