张艺玄, 胡正华. 2019. 长江中下游地区近60年暴雨变化特征研究 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 755−768. ZHANG Yixuan, HU Zhenghua. 2019. Variation Characteristics of Rainstorms in Middle−Lower Reaches of the Yangtze River in Recent 60 Years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 755−768. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19075

长江中下游地区近60年暴雨变化特征研究

张艺玄[1] 胡正华[1,2]

1 南京信息工程大学应用气象学院，南京210044
2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京210044

摘 要 为了揭示长江中下游地区暴雨变化特征，基于1958～2017年426站点的逐日降水资料，定义4个暴雨特征变量，通过线性趋势分析、累积距平检验、滑动 t 检验和Pettitt检验进行趋势变化分析以及突变检验。结果表明：1）年暴雨量和年暴雨日数从江西中部向周围递减，年暴雨强度和年暴雨变异系数从南到北逐渐增加；4个暴雨特征变量存在明显的季节差异，夏季是全年暴雨的主要贡献者，春季暴雨明显多于秋季，冬季最少，但其暴雨变异系数最大，波动性强。2）74%站点的年均暴雨量、暴雨日数和暴雨强度呈增加趋势；从西北往东南，年均暴雨量、暴雨日数的线性趋势率逐渐增加。暴雨量和暴雨日数显著增加的站点比分别为17.8%和16.7%（$p < 0.05$）。3）累积距平检验、滑动 t 检验和Pettitt检验结果表明1988年是近60年长江中下游地区暴雨变化显著的突变点，且1988年后三个暴雨特征变量的平均值和趋势率较1988年前有明显增加。

关键词 长江中下游地区 暴雨 趋势分析 突变检验
文章编号 1006-9585(2019)06-0755-14 **中图分类号** P468 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19075

Variation Characteristics of Rainstorms in Middle−Lower Reaches of the Yangtze River in Recent 60 Years

ZHANG Yixuan[1] and HU Zhenghua[1,2]

1 *School of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract To investigate the variation characteristics of rainstorms in the middle−lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017, four rainstorm characteristic variables were defined based on daily precipitation data of 426 stations. The tendency analysis and mutation test were conducted using a linear trend analysis, cumulative anomaly test, sliding *t*-test, and the Pettitt test. Results showed that: 1) There was a gradual decrease of the average annual rainstorm and rainstorm days from central Jiangxi to the surrounding areas, and a gradual increase of the average annual rainstorm intensity and rainstorm variation coefficient from south to north. The four rainstorm characteristics variables showed evident seasonal differences. Most rainstorms occurred in the order: summer > spring > autumn > winter. However, the largest rainstorm variation coefficient can be found in winter, showing strong volatility in winter. 2) An increasing tendency in average annual rainstorms, rainstorm days, and rainstorm intensity was observed at 74% of all the stations. The linear trend rates of the average annual rainstorms and rainstorm days gradually increase from northwest to

收稿日期 2019-05-17；**网络预出版日期** 2019-09-09
作者简介 张艺玄，女，1996年出生，硕士研究生，主要从事气象灾害风险评估的研究。E-mail: 605482602@ qq.com
通讯作者 胡正华，E-mail: zhhu@nuist.edu.cn
资助项目 公益性行业（气象）科研专项（重大专项）GYHY201506001-6
Funded by Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major Projects) (Grant GYHY201506001-6)

southeast. In addition, the ratio of stations having significant increasing ($p < 0.05$) in the annual rainstorms and rainstorm days were 17.8% and 16.7%, respectively. 3) Results of the cumulative anomaly test, sliding *t*-test, and Pettitt test indicated that a significant change of rainstorms occurred in 1988 in the middle–lower Yangtze River Valley. Meanwhile, the average and trend rates of three rainstorm characteristic variables significantly increased after 1988.

Keywords Middle–Lower Reaches of Yangtze River, Rainstorm, Trend analysis, Mutation test

1 引言

随着全球变暖的加剧，各种极端事件频发（Goswami et al., 2006），IPCC（The Intergovernmental Panel on Climate Change）第五次全球气候评估报告（AR5）指出，1951～2003年中高纬度地区的强降水事件频率有所增加，特别是暴雨引起的洪水灾害损失严重，因其季节性、突发性等特点，对人民的生产生活产生了严重的影响（陆虹等，2010；Stocker et al., 2013；谢星旸等，2018）。我国是一个暴雨频发的国家。据政府统计，2012年7月21日北京大暴雨造成77人死亡，160.2万民众受灾，经济损失高达116.4亿元（高涛和谢立安，2014）。而长江中下游地区又是我国经济及工农业发展的核心区，20世纪90年代以来该地区受亚热带季风影响，先后发生了6次洪涝灾害。诸多学者已经从天气学的角度对暴雨进行分析（张立生等，2007；陈玥等，2016；江丽俐等，2018），指出东亚季风环流异常（陈栋等，2016；陈迪和闵锦忠，2017）、El Niño-南方涛动（李春晖等，2016；Lü et al., 2018）和西太平洋副高异常（陈栋等，2015）对于暴雨的发生和维持都有一定影响。

但目前长江中下游地区暴雨气候学方面研究不多，综合现有研究，大致可归为两类，其一是分析近几十年该流域一个或者多个暴雨特征变量的年际趋势。如龙妍妍等（2016）和卞洁等（2012）研究表明，长江中下游地区夏季暴雨强度存在增加趋势。Hu et al.(2015)分析了1961～2012年长江三角洲12个降水指数的长期趋势，结果表明其中9个都呈现增加趋势，包括暴雨量和暴雨日数。Cui et al.(2019)的最新研究同样表明长江流域暴雨量和暴雨日数呈现较显著的增加趋势，这种变化趋势在空间上存在明显的差异性，这与任国玉等(2015a, 2015b)基于降水特征变量的气候态分析得出的结论一致。白淑英等(2015)利用1961～2010年的降水资料分析长江流域暴雨日数的时空变化，发现年暴雨日数呈增加趋势，尤其是下游。潘欣等(2017)用气候平均态衡量暴雨指标时发现，长江中下游地区各极端降水指数均大于上游，其年际变化也比上游更剧烈，这种变化存在很强的区域性。周晶等（2018）最新的研究还发现暴雨在各季节变化特征明显不同，不同量级的极端降水之间也存在差异。

另一类是对长江中下游地区的极端降水进行突变检验。鲍名和黄荣辉(2006)研究指出长江流域暴雨日数在20世纪70年代末和80年代末显著增加两次。何书樵等(2013)以及王蒙和殷淑燕(2015)都选取长江中下游地区84个测站，研究指出极端降水存在明显的年代际波动，特别是在1990年之后进入降雨量偏多的时期。周晶等（2018）基于1966～2015年的461站点数据通过Mann-Kendall检验，发现暴雨在1985年前后存在明显的年代际跃变，并且跃变的区域增幅显著，这与Hu et al.(2016)研究结果中突变时间点基本一致。此外，还有不少学者对长江流域洪涝灾害的未来情景进行预估（Guo et al.，2013；Wu et al., 2016；周莉等，2018；Zobel et al.，2018），表明未来长江中下游地区的极端降水呈增加趋势，暴雨强度会进一步增强，洪涝灾害会更加严重。

但以往的研究用到的站点资料时空相对有限，且大多从某一方面采用极端性较强的指标，对暴雨的研究往往集中在汛期，对季节性的时空趋势变化研究较少，尤其是春秋这两个仍然会发生暴雨的季节。不仅如此，现有研究中极端降水的突变分析往往采取单一的检测方法，导致研究结果存在一定的差异和不确定性。因此，利用时间跨度更长（1958～2017年），站点分布更密集均匀的462站点逐日资料，选取4个暴雨特征变量(任国玉等, 2015)，采用线性趋势分析法和3种突变检验方法，探讨长江中下游地区暴雨的年际和季节的时空趋势变化特征以及年代际变化，能更加全面细致地揭示长江中下游地区的暴雨分布特征和历史演变规律，为未来情景下区域降水预报、防灾减灾及科学决策提供帮助。

2 资料与方法

2.1 资料来源

资料来源于国家气象信息中心提供的1958～2017年国家站逐日降水资料。为了保证数据的精度，对站点进行了挑选。选择站点的标准是：1）最短资料时间序列不少于57年；2）气候平均态（1981～2010年）中记录完整；3）所有数据中逐日降水资料缺测率低于1%。

长江中下游地区7个省市（湖北省、湖南省、江西省、安徽省、江苏省、浙江省、上海市）共498个国家站，根据上述标准选择全部基准站23个，从141个基本站挑选了符合条件的132个，从334个一般站挑选了符合条件的271个。图1为所挑选的长江中下游地区426个站点分布示意图，这426个站点分布均匀且密集，基准站和基本站资料的均一性较好，一般站的选择增加了资料密度。

2.2 研究方法

选取了4个特征变量来分析暴雨变化规律（如表1所示）。基于426站点的逐日24 h降水资料，通过表格定义对暴雨进行筛选、统计各站点、各年、各季节的暴雨量和暴雨日数，并计算出相应的暴雨强度，从而得到了426站点的暴雨量、暴雨日数、暴雨强度的年际变化和季节变化；基于暴雨量的时间变化序列可以求出暴雨变异系数的空间分布。

需要注意的是，气象上对于季节的划分标准：3～5月为春季，6～8月为夏季，9～11月为秋季，12月至次年2月为冬季。

为了更好地反应长江中下游地区近60年暴雨时空的趋势变化和年代际突变，采用线性趋势法（魏凤英，2007；李敏敏，2014）和突变检验对暴雨进行趋势分析和突变分析，突变检验方法包括累积距平检验（李荣波等，2017）、滑动t检验（李艳春和李艳芳，2001；马尚谦等，2018；王昊等，2019）、Pettitt检验（刘佳等，2012；孟秀敬等，2012；王庆等，2014）。通过多种突变检验方法更准确地分析长江中下游地区的暴雨特征变量的突变点。

表1 暴雨特征变量的定义

Table 1 Definition of rainstorm characteristic variables

暴雨特征变量	定义	单位
暴雨量	24 h内降水量达到或超过50 mm的降雨	mm
暴雨日数	24 h内降水量达到或超过50 mm的天数	d
暴雨强度	暴雨量与暴雨日数的比值	mm/d
暴雨变异系数	某时段内某观测站的平均暴雨量序列标准差与均值的比值，表示暴雨的波动性强弱	

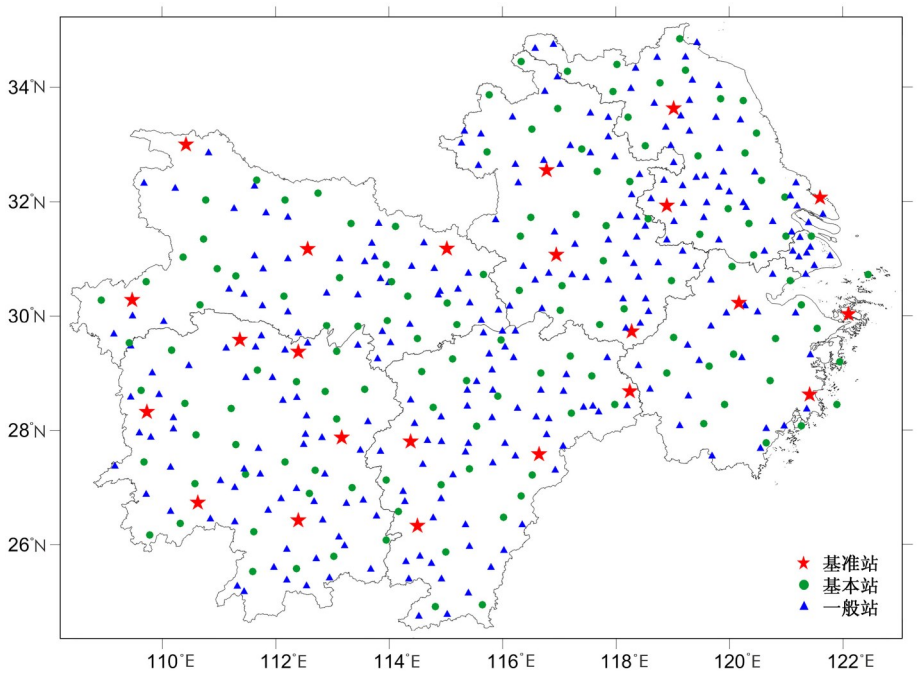

图1 长江中下游地区426个气象站点分布

Fig. 1 Distribution of 426 meteorological stations in middle–lower reaches of the Yangtze River

2.2.1 累积距平检验

累积距平是由曲线直观判断气候变化趋势的一种方法，从曲线的上下起伏可以判断降水量长期显著的演变趋势及持续变化。具体原理是对于样本容量为n的气候序列$x_1,x_2,...,x_n$，求出其对应的距平值为$\Delta x_1,\Delta x_2,...,\Delta x_n$，然后计算累积距平值为

$$Z_k = \sum_{i=1}^{k} \Delta x_i, \quad i = 1,2,...,n, \tag{1}$$

其中，x_i为某时刻的要素值，i表示时次，k表示时间序列的长度。如果在第E年出现显著突变，则有

$$Z_E = \max_{1 \leqslant k \leqslant n} |Z_k|, \tag{2}$$

其中，Z_E是累积距平最大值。这种方法只能辅助判断突变时间，通常还需借助其他方法综合检测判断。

2.2.2 滑动t检验

滑动t检验法是把气候序列中两段子序列均值有无差异看作来自两个总体均值有无显著性差异的问题来检验，其原理是对序列逐点进行t检验，在数据时间序列的滑动点前后分别取两个子样本，数据长度分布分别为n_1和n_2，再分别计算取得两个数据序列的均值$\bar{x}_1$、$\bar{x}_2$及方差S_1^2、S_2^2。然后构造检验统计量：

$$Z = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{s\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \tag{3}$$

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}, \tag{4}$$

其中，Z是检验统计量，s是序列方差，α是显著性水平。这里Z服从$t(n_1 + n_2 - 2)$的分布，若$Z > t_{\alpha/2}$，原假设被拒绝，说明两个样本存在显著性差异，存在突变；若$Z < t_{\alpha/2}$，原假设被接受，说明两个样本不存在显著性差异，不存在突变。

2.2.3 Pettitt检验

Pettitt检验是一种非参数检验的方法，最初是由Pettitt（1979）用于检验突变点，即对于样本容量为n的气候序列$x_1,x_2,...,x_n$，其对应的秩序列为$r_1,r_2,...,r_n$，构造统计检验量：

$$S_k = 2\sum_{i=1}^{k} r_i - k(n+1), \quad k = 1,...,n, \tag{5}$$

其中，r_i为第i个要素的秩，k为时间序列的长度。如果在第E年出现显著突变，则有

$$S_E = \max_{1 \leqslant k \leqslant n} |S_k| \text{ 且 } |S_E| \geqslant S_\alpha, \tag{6}$$

其中S_α为对应样本数的临界Pettitt检验值。

3 结果与分析

3.1 暴雨特征变量分析

3.1.1 年暴雨量

长江中下游地区1958～2017年期间的年暴雨量从中心向周边递减（图2a）。年暴雨量的高值中心出现在江西中部和东南部，超过了420 mm；低值中心出现在湖北西北部，年暴雨量不足100 mm。暴雨量季节变化明显，主要集中在夏季（图2c），从中心向周围逐渐递减，与年暴雨量分布类似。此时高值中心集中在湖北、安徽和江西的交界处，其值超过了240 mm。春季的暴雨量次之并多于秋季，

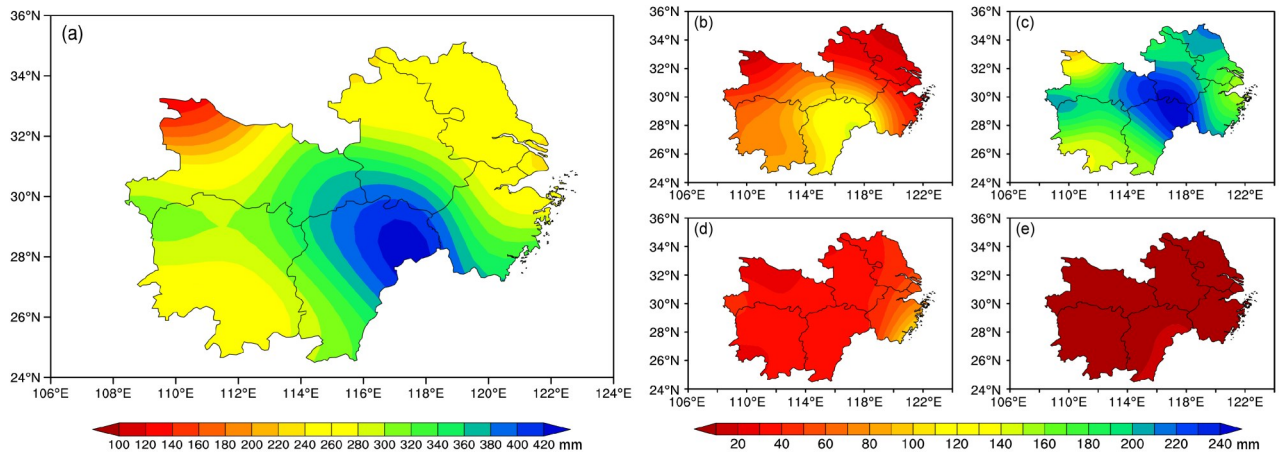

图2 长江中下游地区1958～2017年多年平均（a）全年、（b）春季、（c）夏季、（d）秋季、（e）冬季的暴雨雨量分布

Fig. 2 Average annual and seasonal rainstorm rainfall distribution in middle-lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017: (a) Whole year; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter

冬季的暴雨量最少，区域平均暴雨量仅有3.5 mm。

3.1.2　年暴雨日数

年暴雨日数（图3a）及季节暴雨日数（图3b-3e）的空间分布与图2有较好的一致性，江西中部和东南部暴雨中心的平均年暴雨日数超过了5.5 d，并向周围逐渐递减，江西西南部、湖北东部、安徽南部、浙江西南部、湖南东南部全年暴雨日数大约是4 d，湖北西北部暴雨日数最少，年暴雨日数不到2 d。夏季暴雨日数最多，超过3 d，春季次之并且多于秋季，冬季最小，区域平均年暴雨日数为0.1 d。

3.1.3　年暴雨强度

图4是长江中下游地区1958～2017年多年平均年与四季暴雨强度分布图。暴雨强度自西南向东北逐渐增加，高值中心位于长江中下游地区的东北部，达到80 mm/d，低值中心出现在湖北西北部、湖南和江西南部，接近70 mm/d。暴雨强度的季节分布也很明显，夏季，暴雨强度高值中心位于湖北省东部；达到84 mm/d，其次是安徽省、江苏省北部和江西省北部；秋季，高值区位于浙江省东部，达到了80 mm/d（图4c），高值中心位于湖北和安徽的交界处，区域平均的暴雨强度达到了79.1 mm/d；冬季暴雨强度最小（图4e），区域平均的暴雨强度为38.1 mm/d。

3.1.4　年暴雨变异系数

暴雨变异系数能够反映暴雨的年际变化，该流域年暴雨变异系数从南到北逐渐增加（图5a），大部分地区都在0.6以下，如湖南、江西以及浙江的大部分地区，暴雨变异系数的高值中心出现在湖北省西北部，超过了0.8，说明该地区的年暴雨的波

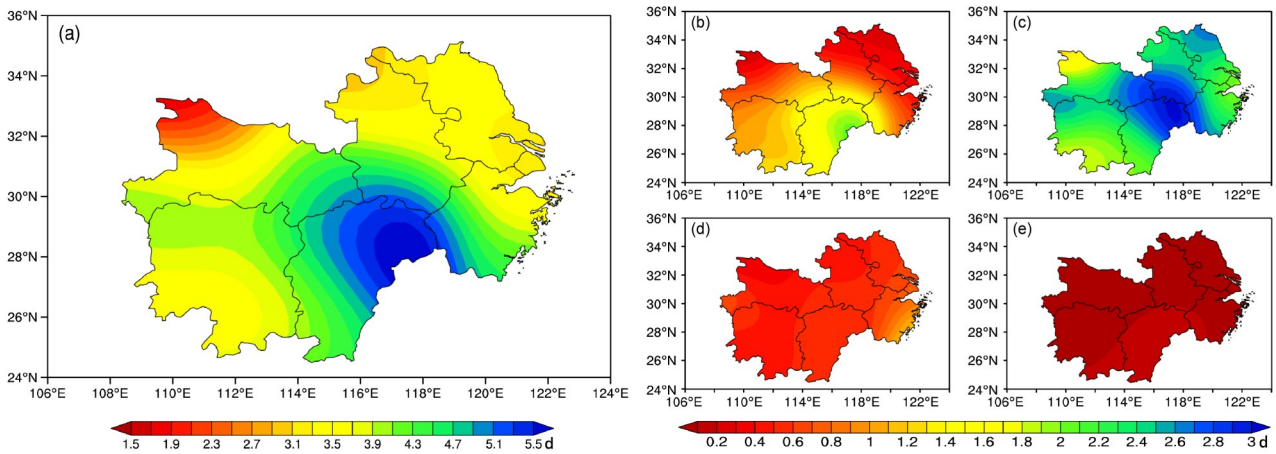

图3　同图2，但为多年平均的年及四季暴雨日数

Fig. 3　Same as Fig. 2, but for rainstorm days

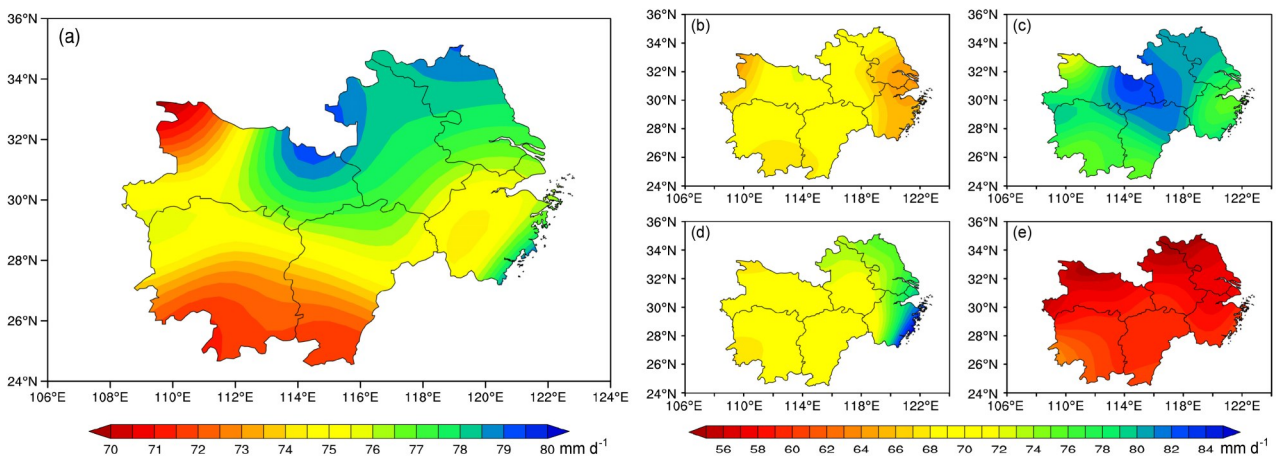

图4　同图2，但为多年平均的年及四季暴雨强度

Fig. 4　Same as Fig. 2, but for rainstorm intensity

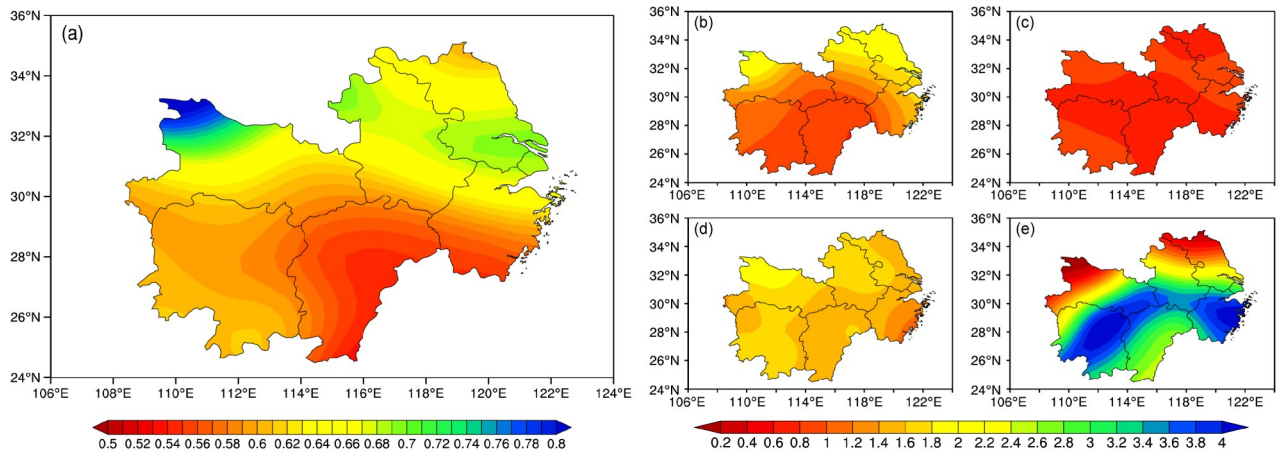

图5 同图2，但为多年平均的年及四季暴雨变异系数

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for rainstorm variation coefficient

表2 1958～2017年长江中下游地区年和季节的暴雨特征变量

Table 2 Annual and seasonal rainstorm characteristic variables from 1958 to 2017 in middle-lower reaches of the Yangtze River

	暴雨量/mm	暴雨日数/d	暴雨强度/mm d^{-1}	暴雨变异系数
年	302.8	4.0	75.8	0.6
春季	67.4	1.0	68.3	1.3
夏季	191.5	2.4	79.1	0.8
秋季	40.1	0.5	71.9	1.6
冬季	3.5	0.1	38.1	2.8

动性较大。冬季的暴雨变异系数最大，沿流域中心地带，其值达4.0，区域平均的变异系数达到了2.8（表2），其值在冬季最大，夏季最小，表明冬季暴雨的波动最强，最不稳定。

进一步对这426个站点求平均，得到了区域年平均与春、夏、秋、冬各季暴雨特征变量的值（表2）。4个暴雨特征变量都存在明显的季节差异，夏季是全年暴雨的主要贡献者，暴雨量和暴雨日数远超过其他3个季节的和，春季暴雨量为67.4 mm，暴雨日数为1 d，从暴雨量和暴雨日数来看，暴雨在春季的发生仅次于夏季；就暴雨强度而言，秋季的暴雨问题也不容忽视，该地区春、夏、秋季的暴雨强度维持在68～79 mm/d；除了夏季，春秋也是暴雨频发的季节。冬季的暴雨事件最少。冬季的变异系数最大，表明暴雨在冬季的波动性最大；夏季的变异系数最小，与该地区夏季暴雨频发的实际情况相吻合。

3.2 暴雨趋势变化

3.2.1 空间趋势分析

为了研究长江中下游地区暴雨的趋势变化，计算了1958～2017年长江中下游地区3个暴雨特征变量的线性趋势率（图6）。长江中下游地区年暴雨量和暴雨日数的空间分布较为类似，存在着自西北向东南地区逐渐增加的趋势（图6a和6b），大部分区域呈现增加趋势，在湖北西北部和江苏北部存在小范围的减小趋势。趋势变化最大的地方在江西省东部，暴雨量的线性变化率达到了2.6 mm/a，暴雨日数的变化率达到了0.036 d/a，并且该区域不少站点通过了90%的显著性检验，部分地区还通过了95%的显著性检验。暴雨强度同样有明显的上升趋势，两个高值中心分别位于湖南西部以及安徽江苏的中部地区，达到了0.24 mm d^{-1} a^{-1}，这一结论同样通过了显著性检验。这表明近60年长江中下游地区整体暴雨特征变量存在很明显的增加趋势。

统计了3个暴雨特征变量中通过95%显著性检验的站点数及其比例（表3），74%以上站点近60年的暴雨量、暴雨日数和暴雨强度都呈现增加的趋势。16%以上站点的暴雨量和暴雨日数显著增加，其中显著减小的站点数几乎为0，表明长江中下游地区近60年暴雨特征变量有很明显的增加趋势。

3.2.2 突变检验分析

前文表明长江中下游地区的暴雨量、暴雨日数、暴雨强度整体都存在明显的增加趋势。为了研究这种变化趋势是否存在突变，进一步通过累积距平、15年滑动t检验及Pettitt检验3种方法对3个暴雨特征变量进行下一步综合分析。

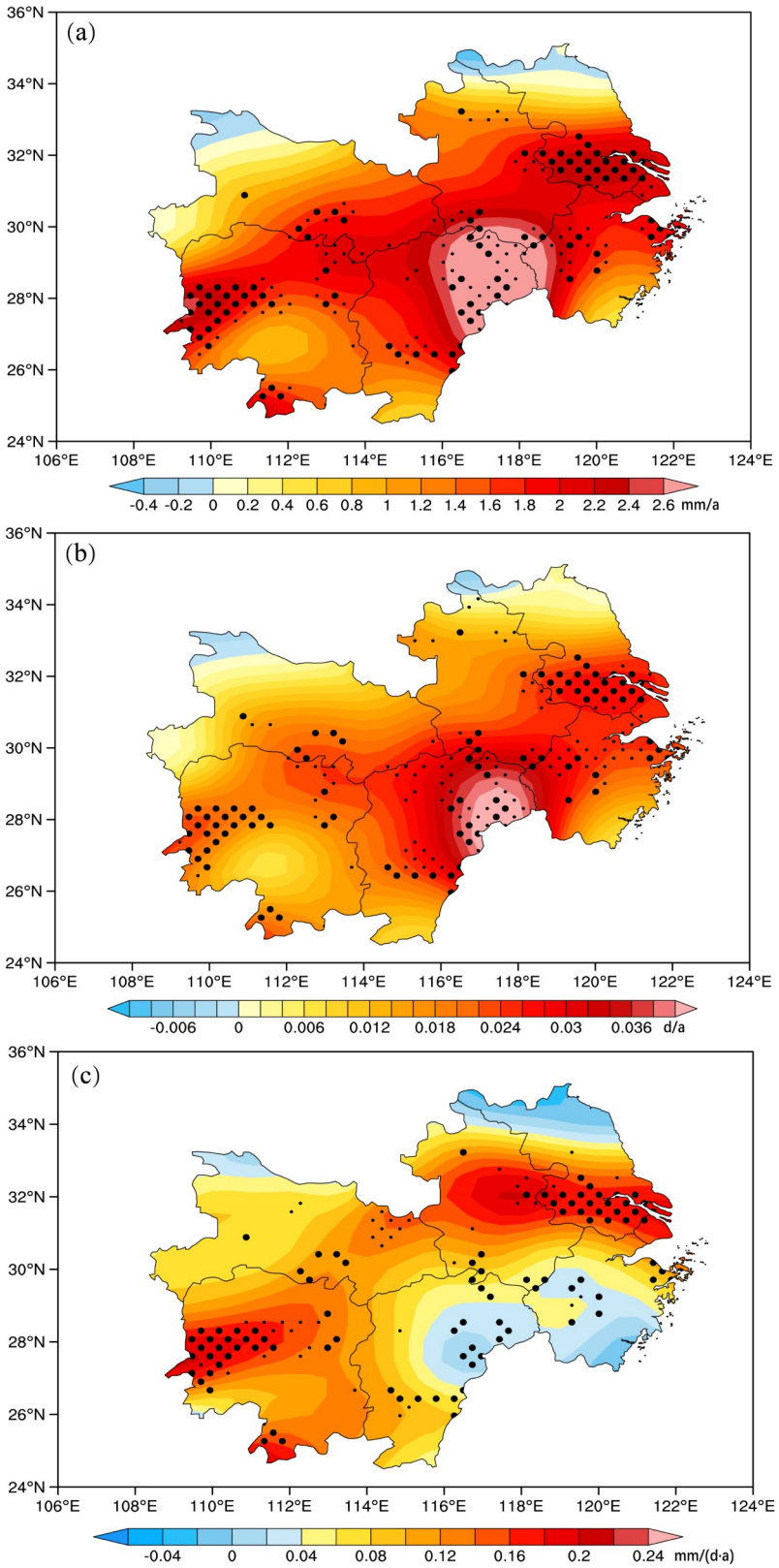

图6　长江中下游地区1958～2017年（a）暴雨量、（b）暴雨日数、（c）暴雨强度的线性趋势分布（大小实心点分别表示通过了95%和90%的显著性检验）

Fig. 6 Linear trend distribution of (a) rainstorm rainfall, (b) number of rainstorm days, and (c) rainstorm intensity in middle-lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017 (large solid dots and small solid dots indicate 95% and 90% significance levels)

图7为1958～2017年长江中下游地区暴雨量、暴雨日数、暴雨强度的累积距平检验的结果，可以直观看出从1958～1988年3个暴雨要素整体呈现下降的趋势，1988年后则开始呈现上升趋势。这表明1988年之前，3个要素基本上为负距平；1988年之后，3个要素为正距平，即1988年附近可能为一个明显的突变点。

进一步利用滑动t检验对长江中下游地区1958～2017年的3个暴雨特征变量进行突变分析，这里主要关注暴雨特征变量的年代际变化，因此选取n=15，取置信度为$\alpha = 0.05$（结果如图8所示）。暴雨量与暴雨日数整体呈现先下降后上升的趋势，在1988年附近取得最小值并且都通过了显著性检验，暴雨强度在1980年和1995年附近通过了95%的显著性检验，在1988年通过了90%的显著性检验。因此初步判断暴雨强度的突变可能发生在20世纪80年代。

为了验证累积距平分布图和滑动t检验的突变结果，再用Pettitt检验进行验证（图9）。3个暴雨特征变量同样也是呈现先下降后上升的趋势，在1988年附近绝对值取得最大值，并且通过了95%的显著性检验。

结合以上3种突变检验的结果：可以认为在1988年前后该流域暴雨量、暴雨日数以及暴雨强度存在一个显著突变。

表3　暴雨特征变量的站点数及其比例

Table 3　Number and proportion of stations of rainstorm characteristics

	暴雨量		暴雨日数		暴雨强度	
	站点数	比例	站点数	比例	站点数	比例
增加	375	88.0%	363	85.2%	316	74.2%
减少	51	12.0%	63	14.8%	110	25.8%
显著增加	76	17.8%	71	16.7%	36	8.5%
显著减少	0	0	1	0.2	0	0

注：表中的显著为通过0.05显著性检验。

3.2.3　突变前后暴雨特征变量的对比分析

以1988年为分界点，分段分析1958～1988和1989～2017年长江中下游地区3个暴雨特征变量的变化趋势情况（图10）。图中的实线分别表示1988年前和后的暴雨特征变量平均值；虚线表示暴雨特征变量的线性趋势；折线表示暴雨特征变量的年际变化。1988年之后，3个暴雨特征变量的平均值都

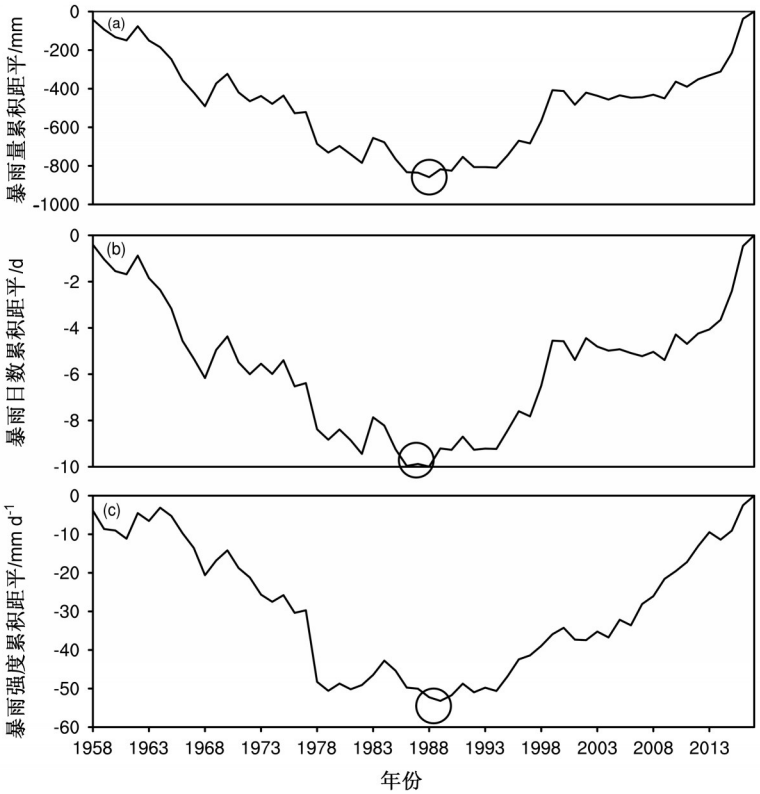

图7　长江中下游地区1958～2017年3个暴雨特征变量的累积距平

Fig. 7　Cumulative anomalies of three rainstorm characteristic variables in middle-lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017

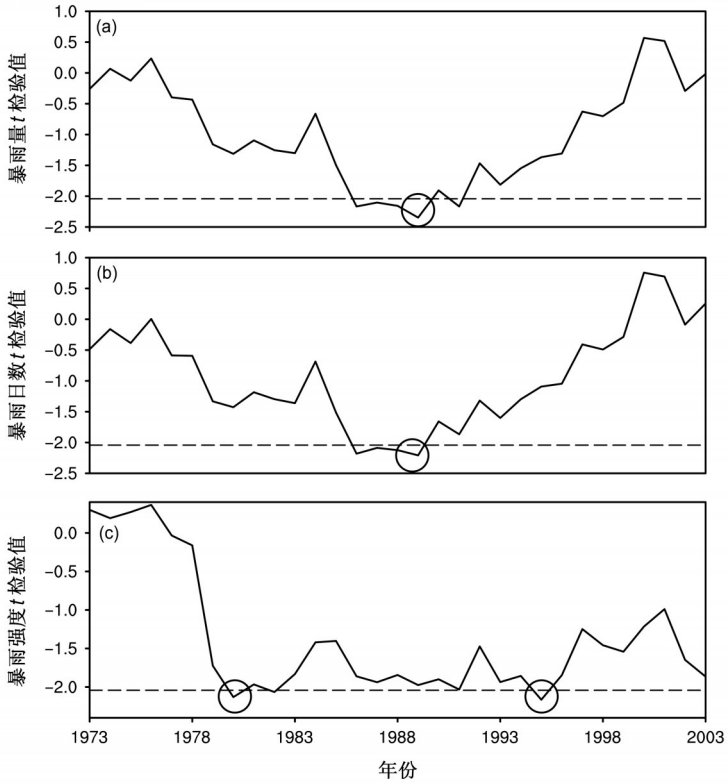

图8　长江中下游地区1958～2017年暴雨特征变量15年滑动 t 检验结果

Fig. 8 Results of 15-year sliding t-test conducted on rainstorm characteristic variables in middle−lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017

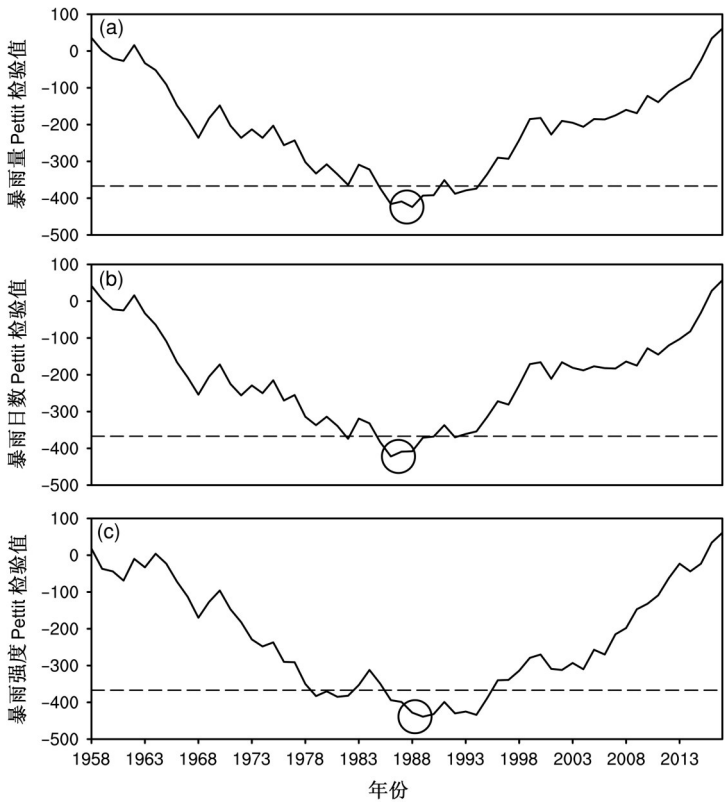

图9　长江中下游地区1958～2017年3个暴雨特征变量Pettitt检验

Fig. 9　Pettitt test for three rainstorm characteristic variables in middle−lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017

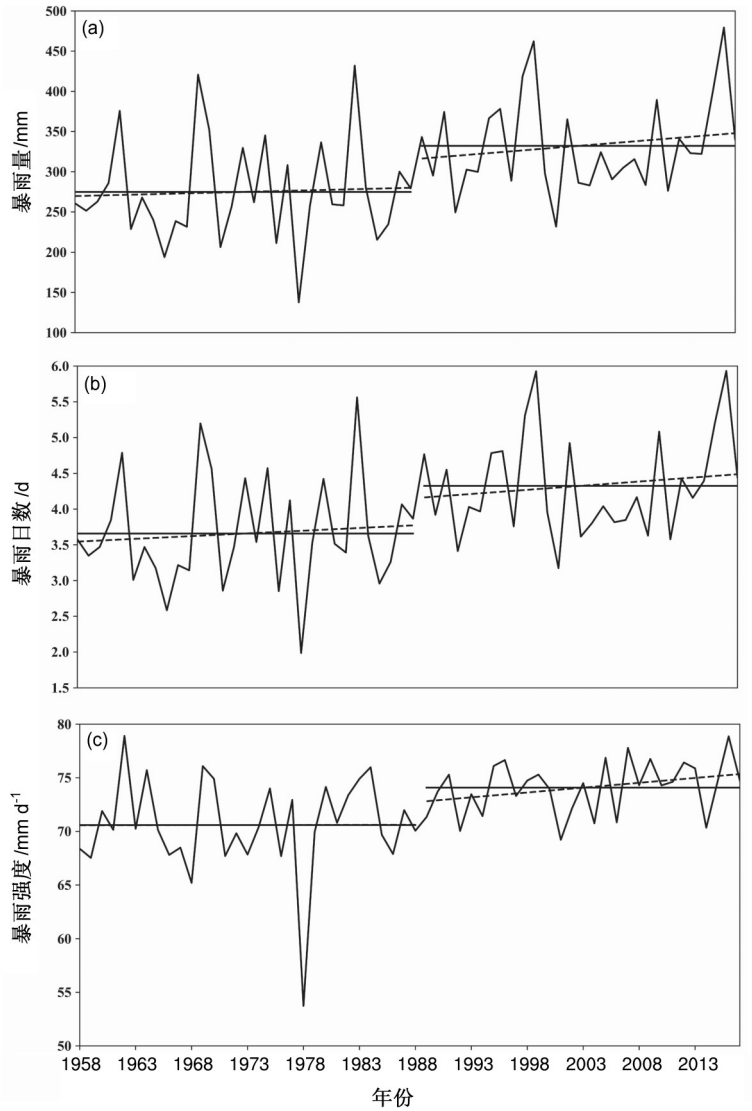

图10 长江中下游地区1958～2017年暴雨特征变量的分段趋势图（直线表示该阶段的平均值，虚线表示该阶段的线性趋势分布）

Fig. 10 Segmentation trends of rainstorm characteristic variables in middle-lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2017 (solid line indicates average during the period and dotted line indicates linear trend distribution)

有显著增加，并且线性趋势率在1988年之后也更大，上升的趋势较之前更加显著。这表明1988年前后该地区的暴雨特征变量发生显著变化，1988年后其变化趋势更加明显。

对比1988年前后暴雨特征变量的平均值（表4）发现，暴雨量和暴雨日数的平均值有较大的增加，增加率分别达到了20.85%和18.31%，而暴雨强度增加幅度较小，仅为4.93%。相较于平均值的变化，线性趋势的增加更为明显，即暴雨特征变量在1988年之后的增加趋势较1988年之前更明显。

表4 长江中下游地区1988年前后暴雨特征变量的平均值

Table 4 Average rainstorm characteristic variables in middle-lower reaches of the Yangtze River before and after 1988

特征变量	1958～1988年平均值	1989～2017年平均值	相对变化率
暴雨量	274.86 mm	332.16 mm	20.85%
暴雨日数	3.66 d	4.33 d	18.31%
暴雨强度	70.59 mm/d	74.07 mm/d	4.93%

4 结论和讨论

4.1 结论

本文基于1958～2017年长江中下游地区426站

点的逐日降水资料，利用暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨变异系数作为暴雨特征变量进行分析，并通过线性趋势分析、累积距平检验、滑动*t*检验和Pettitt检验进行趋势变化分析以及突变检验得出如下结论：

（1）年暴雨量和年暴雨日数从中心向周围递减，最大值都出现在江西中部，分别达到了420 mm和5.5 d；年暴雨强度从西南往东北方向是逐渐增加，高值中心位于长江中下游地区的东北部，超过了80 mm/d；年暴雨变异系数从南到北逐渐增加，大部分区域都在0.6以下。

（2）4个暴雨特征变量都存在很明显的季节差异，在夏季，暴雨量和暴雨日数远超过其他3个季节的和，暴雨强度也高于其他3个季节，春季的暴雨量和暴雨日数高于秋季，但暴雨强度比秋季低，冬季则最少。暴雨变异系数夏季最小，冬季最大，表明其波动性更大。

（3）暴雨量、暴雨日数和暴雨强度趋势率从西北向东南地区逐渐增加，呈现增加趋势的站次比都在74%以上，其中暴雨量和暴雨日数有16%以上的站次比通过95%的显著性检验。暴雨量和暴雨日数的线性趋势变化高值中心位于江西东部，分别达到2.6 mm/a和0.036 d/a，暴雨强度高值中心分别位于湖南西部以及安徽江苏的中部地区，达到了0.24 mm d^{-1} a^{-1}。

（4）通过累积距平检验、滑动*t*检验和Pettitt检验，综合表明近60年长江中下游地区的暴雨变化在1988年存在一个显著的突变。并且1988年后3个暴雨特征变量的平均值和趋势率较1988年前有很大的增加。暴雨特征变量的增加意味着该流域洪涝灾害的发生频率增强，这对预测未来暴雨天气，防汛抗洪等工作具有实际的指导意义。

4.2 讨论

本文通过3种突变方法综合分析，发现长江中下游地区的暴雨特征变量在1988年前后存在突变，这与一些学者的结果存在略微的差异，如梅伟和杨修群（2005）研究表明长江中下游地区降水日数在1977年发生了由多到少的突变；张永领等（2006）指出该地区降水量的突变发生在1974年；何书樵等（2013）进一步指出降水强度突变发生在2000年，但其余降水指标的突变出现在1970年。造成突变年结果的差异的可能有两个原因，其一是以往研究的站点资料精确较低，如梅伟和杨修群（2005）仅选取了10个代表性站点，无法准确反映该区域的特征变量年代际变化趋势，其二是以往研究使用的突变检验方法比较单一。因此基于462站点采用三种突变方法进行突变检验的结果可信度相对更高。

另一方面对于年际趋势和年代际变化的成因和机理未做进一步的分析。近年来，诸多学者对其年代际变化的原因进行了研究，揭示了东亚大气环流异常（陈迪和闵锦忠，2017；Pei et al.，2018）、副高压强变化（Wei et al.，2014；刘蕾等，2018）等可能是暴雨的影响因子之一。如刘蕾等（2018）指出1989年以前长江中下游地区暴雨频次减少主要由于1965～1988年冷空气活动较弱，与此同时低纬度副高偏弱，使得上升运动被抑制，水汽输送减少。东亚季风变化是影响长江中下游暴雨的因子之一，Pei et al.(2018)指出季风指数在20世纪70年代末期开始显著减弱，1988年之后暴雨量、暴雨日数、暴雨强度的增加可能受东亚季风强度减弱的调控，因其导致水汽动力输送不足，难以到达华北地区，从而使暴雨更频繁的集中在长江中下游地区，但长江中下游地区的暴雨还会受其他影响因子的调控，东亚季风对暴雨的相对贡献还有待进一步研究，例如印度洋海温的增温、中东太平洋海温异常增温、北大西洋三极子、青藏高原积雪（Wang and Zhang，2002；Ren et al.，2016；任宏昌等，2017；Liu et al.，2018）等等，它们通过影响菲律宾反气旋来控制长江中下游地区的水汽输送，从而影响该地区的降水。在未来的研究中将进一步分析特征变量趋势变化的影响因子以及年代际突变的原因，明确长江中下游流域暴雨的形成机制。并考虑将暴雨划分为不同量级，对大暴雨和特大暴雨的年际趋势和年代际变化的特征和原因做深入的探讨。

参考文献（References）

鲍名, 黄荣辉. 2006. 近40年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 30(6): 1057–1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(6): 1057–1067.

卞洁, 何金海, 李双林. 2012. 近50年来长江中下游汛期暴雨变化特征 [J]. 气候与环境研究, 17(1): 68–80. Bian Jie, He Jinhai, Li Shuanglin. 2012. Heavy rain variation characteristics in flood seasons in the middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17

(1): 68−80. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10062

白淑英, 顾海敏, 史建桥, 等. 2015. 近50a长江流域暴雨日数时空变化分析 [J]. 长江流域资源与环境, 24(7): 1255−1262. Bai Shuying, Gu Haimin, Shi Jianqiao, et al. 2015. Spatial and temporal variation analysis of rainstorm days for last 50 years in the Yangtze River catchment [J]. Resources Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 24(7): 1255−1262. doi:10.11870/cjlyzyyhj201507024

陈迪, 闵锦忠. 2017. 长江中下游夏季极端降水指数的变化特征 [J]. 气象科学, 37(4): 497−504. Chen Di, Min Jinzhong. 2017. Analysis on the variation of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 37(4): 497−504. doi:10.3969/2016jms.0042

陈栋, 黄荣辉, 陈际龙. 2015. 我国夏季暴雨气候学的研究进展与科学问题 [J]. 气候与环境研究, 20(4): 477−490. Chen Dong, Huang Ronghui, Chen Jilong. 2015. Recent progress and prospective scientific problems concerning climatological research on summer heavy rainfall in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(4): 477−490. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15038

陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 2016. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 40(3): 581−590. Chen Dong, Chen Jilong, Huang Ronghui, et al. 2016. Interdecadal changes of summertime heavy rainfall in eastern China and their large-scale circulation backgrounds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(3): 581−590. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144

陈玥, 谌芸, 陈涛, 等. 2016. 长江中下游地区暖区暴雨特征分析 [J]. 气象, 42(6): 724−731. Chen Yue, Chen Yun, Chen Tao, et al. 2016. Characteristics analysis of warm-sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(6): 724−731. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.008

Cui Lifang, Wang Lunche, Qu Sai, et al. 2019. Spatiotemporal extremes of temperature and precipitation during 1960−2015 in the Yangtze River Basin (China) and impacts on vegetation dynamics [J]. Theoretical and Applied Climatology, 136(1−2): 675−692. doi:10.1007/s00704-018-2519-0

高涛, 谢立安. 2014. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述 [J]. 地球科学进展, 29(5): 577−589. Gao Tao, Xie Li'an. 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 29(5): 577−589. doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166.2014.05.0577

Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. Science, 314(5804): 1442−1445. doi:10.1126/science.1132027

Guo Jiali, Guo Shenglian, Li Yu, et al. 2013. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27(2): 459−475. doi:10.1007/s00477-012-0643-4

何书樵, 郑有飞, 尹继福. 2013. 近50年长江中下游地区降水特征分析 [J]. 生态环境学报, 22(7): 1187−1192. He Shuqiao, Zheng Youfei, Yin Jifu. 2013. An analysis on precipitation characteristics over middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 22(7): 1187−1192. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2013.07.016

Hu Chunsheng, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. 2016. Long-term trends in daily precipitation over the Yangtze River Delta region during 1960−2012, Eastern China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 125(1−2): 131−147. doi:10.1007/s00704-015-1493-z

江丽俐, 钱卓蕾, 陈蔚, 等. 2018. 形成2015年浙江省梅汛期暴雨的控制环流及梅雨锋结构 [J]. 气象科学, 38(1): 66−75. Jiang Lili, Qian Zhuolei, Chen Wei, et al. 2018. Circulation and Meiyu front in responsible for persistent heavy rainfall over Zhejiang during summer of 2015 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 38(1): 66−75. doi:10.3969/2017jms.0056

李春晖, 李霞, 刘燕, 等. 2016. 春季和夏季爆发型ENSO事件对夏季中国降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 21(3): 258−268. Li Chunhui, Li Xia, Liu Yan, et al. 2016. Impact of spring and summer onset type ENSO on summer precipitation in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(3): 258−268. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15133

李敏敏. 2014. 长江流域旱涝灾害的统计灾害学研究 [D]. 陕西师范大学硕士学位论文, 93pp. Li Minmin. 2014. Statistical disaster research of drought and flood disasters in the Yangtze River Basin [D]. M. S. thesis (in Chinese), Master's thesis of Shaanxi Normal University, 93pp.

李荣波, 魏鹏, 纪昌明, 等. 2017. 雅砻江流域近60 a径流趋势特征分析 [J]. 人民长江, 48(5): 38−42. Li Rongbo, Wei Peng, Ji Changming, et al. 2017. Analysis of runoff tendency characteristics of Yalong River for past 6 decades [J]. Yangtze River (in Chinese), 48(5): 38−42. doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.05.009

李艳春, 李艳芳. 2001. 宁夏近百年来的气候变化及突变分析 [J]. 高原气象, 20(1): 100−104. Li Yanchun, Li Yanfang. 2001. Period and jump analyses of climatic variation in Ningxia in recent hundred years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20(1): 100−104. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.017

刘佳, 马振峰, 范广洲, 等. 2012. 多种均一性检验方法比较研究 [J]. 气象, 38(9): 1121−1128. Liu Jia, Ma Zhenfeng, Fan Guangzhou, et al. 2012. Research on the comparison of different homogeneity test methods [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(9): 1121−1128.

Liu Jingpeng, Ren Hongli, Li Weijing, et al. 2018. Remarkable impacts of Indian Ocean sea surface temperature on interdecadal variability of summer rainfall in Southwestern China [J]. Atmosphere, 9(3): 103−115. doi:10.3390/atmos9030103

刘蕾, 周晶, 刘俊杰, 等. 2018. 长江中下游地区持续性暴雨年代际变化特征及环流形势 [J]. 气象与环境学报, 34(3): 28−36. Liu Lei, Zhou Jing, Liu Junjie, et al. 2018. Decadal characteristics of persistent heavy precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its circulation pattern [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 34(3): 28−36. doi: 10.3969/j. issn. 1673-503X.2018.03.004

龙妍妍, 范广洲, 段炼, 等. 2016. 中国近54年来夏季极端降水事件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 21(4): 429−438. Long Yanyan, Fan Guangzhou, Duan Lian, et al. 2016. A study on the characteristics of summertime extreme precipitation events over China in recent 54 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(4): 429−438. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15130

陆虹, 何慧, 陈思蓉. 2010. 华南地区1961～2008年夏季极端降水频次的时空变化 [J]. 生态学杂志, 29(6): 1213−1220. Lu Hong, He Hui, Chen Sirong. 2010. Spatiotemporal variation of extreme precipitation frequency in summer over South China in 1961−2008 [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 29(6): 1213−1220. doi: 10.13292/j.1000-4890.2010.0177

Lü M, Wu Shengjun, Chen Jilong, et al. 2018. Changes in extreme precipitation in the Yangtze River basin and its association with global mean temperature and ENSO [J]. International Journal of Climatology, 38(4): 1989−2005. doi:10.1002/joc.5311

马尚谦, 张勃, 唐敏, 等. 2018.1960～2015年淮河流域初终霜日时空变化分析 [J]. 中国农业气象, 39(7): 468−478. Ma Shangqian, Zhang Bo, Tang Min, et al. 2018. Analysis on the temporal and spatial changes of frost date in the Huaihe River basin from 1960 to 2015 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 39(7): 468−478. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.07.005

梅伟, 杨修群. 2005. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 41(6): 577−589. Mei Wei, Yang Xiuqun. 2005. Trends of precipitation variations in the mid-lower Yangtze River valley of China [J]. Journal of Nanjing University (in Chinese), 41(6): 577−589. doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2005.06.001

孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 2012. 河西走廊57年来气温和降水时空变化特征 [J]. 地理学报, 67(11): 1482−1492. Meng Xiujing, Zhang Shifeng, Zhang Yongyong. 2012. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67(11): 1482−1492.

潘欣, 尹义星, 王小军. 2017.1960～2010年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 26(3): 436−444. Pan Xin, Yin Yixing, Wang Xiaojun. 2017. Spatio-temporal characteristics and future trend of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1960 to 2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 26(3): 436−444. doi: 10.11870/cjlyzyyhj201703014

Pettitt A N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society (Ser. C: Applied Statistics), 28(2): 126−135. doi:10.2307/2346729

Pei Fengsong, Wu Changjiang, Liu Xiaoping, et al. 2018. Detection and attribution of extreme precipitation changes from 1961 to 2012 in the Yangtze River Delta in China [J]. CATENA, 169: 183−194. doi:10.1016/j.catena.2018.05.038

任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 2015a. 中国大陆降水时空变异规律II. 现代变化趋势 [J]. 水科学进展, 26(4): 451−465. Ren Guoyu, Ren Yuyu, Zhan Yunjian, et al. 2015a. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China II : Trends [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 26(4): 451−465. doi: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.001

任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 2015b. 中国大陆降水时空变异规律——I. 气候学特征 [J]. 水科学进展, 26(3): 299−310. Ren Guoyu, Zhan Yunjian, Ren Yuyu, et al. 2015b. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China I: Climatology [J]. 26(3): 299−310. doi:10.14042/j. cnki.32.1309.2015.03.001

Ren Hongchang, Li Weijing, Ren Hongli, et al. 2016. Distinct linkage between winter Tibetan Plateau snow depth and early summer Philippine Sea anomalous anticyclone [J]. Atmospheric Science Letters, 17(3): 223−229. doi:10.1002/asl.646

任宏昌, 左金清, 李维京. 2017. 1998年和2016年北大西洋海温异常对中国夏季降水影响的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 75(6): 877−893. Ren Hongchang, Zuo Jinqing, Li Weijing. 2017. Role of the North Atlantic SST anomalies in the 1998 and 2016 summer floods in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(6): 877−893. doi:10.11676/qxxb2017.063

Stocker T, Qin D, Plattner G, et al. 2013. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Computational Geometry, 18(2): 95−123.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术（第二版）[M]. 北京: 气象出版社, Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M] . Beijing: China Meteorological Press, 37.

王昊, 姜超, 王鹤松, 等. 2019. 中国西南部区域雨季极端降水指数时空变化特征 [J]. 中国农业气象, 40(1): 1−14. Wang Hao, Jiang Chao, Wang Hesong, et al. 2019. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in southwestern China in the rainy season [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 40(1): 1−14. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2019.01.001

王蒙, 殷淑燕. 2015. 近52a长江中下游地区极端降水的时空变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 24(7): 1221−1229. Wang Meng, Yin Shuyan. 2015. Spatio-temporal variations of the extreme precipitation of middle and lower reaches of the Yangtze River in recent 52 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 24(7): 1221−1229. doi:10.11870/cjlyzyyhj201507020

王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 2014. 最近50年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究 [J]. 地理科学, 34(2): 220−228. Wang Qing, Ma Qianqian, Xia Yanling, et al. 2014. Spatial−temporal variations and influential factors of summer precipitation in Shandong region during the last 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 34(2): 220−228. doi: 10.13249/j. cnki. sgs. 2014. 02.024

Wang Bin, Zhang Qin. 2002. Pacific−East Asian teleconnection. part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development [J]. J. Climate, 15(22): 3252−3265. doi: 10. 1175/1520-0442(2002)015

Wei Wei, Zhang Renhe, Wen Min, et al. 2014. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian High and its influence on summer rainfall over China [J]. Clim. Dyn., 43(5−6): 1257−1269. doi:10.1007/s00382-013-1938-y

Wu Yanjuan, Wu Shuangye, Wen Jiahong, et al. 2016. Future changes in mean and extreme monsoon precipitation in the middle and lower Yangtze River basin, China, in the CMIP5 models [J]. J. Hydrometeor., 17(11): 2785−2797. doi:10.1175/jhm-d-16-0033.1

谢星旸, 游庆龙, 王雨枭. 2018. 1961～2014年中国冬季极端低温变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23(4): 429−441. Xie Xingyang, You Qinglong, Wang Yuxiao. 2018. Changes in extreme low temperature in China in the winters from 1961 to 2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(4): 429−441. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034

张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 2007. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 12(2): 165−180. Zhang Lisheng, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2007. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(2): 165−180.

张永领, 高全洲, 丁裕国, 等. 2006. 长江流域夏季降水的时空特征及演变趋势分析 [J]. 热带气象学报, 22(2): 161−168. Zhang Yongling, Gao Quanzhou, Ding Yuguo, et al. 2006. Analysis of time−spatial characteristics and evolutional trends of summer precipitation in the Yangtze River catchment [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22(2): 161−168. doi: 10.3969/j. issn. 1004-4965.2006.02.008

周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等. 2018. 21世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析 [J]. 气象学报, 76(1): 47−61. Zhou Li, Lan Mingcai, Cai Ronghui, et al. 2018. Projection and uncertainties of extreme precipitation over the Yangtze River valley in the early 21st century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1): 47−61. doi:10.11676/qxxb2017.076

周晶, 翟伶俐, 高辉. 2018. 近50a长江中下游不同量级暴雨的年代际变化特征 [J]. 气象科学, 38(6): 780−789. Zhou Jing, Zhai Lingli, Gao Hui. 2018. Analysis on the inter-decadal variation features of rainstorms with different magnitudes over the middle and lower reaches of Yangtze River in recent 50 years [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 38(6): 780−789. doi: 10.3969/2018jms.0054

Zobel Z, Wang Jiali, Wuebbles D J, et al. 2018. Analyses for high-resolution projections through the end of the 21st century for precipitation extremes over the United States [J]. Earth's Future, 6(10): 1471−1490. doi:10.1029/2018ef000956