

# 中国近 30 年短时极端降水特征分析

赵煜飞<sup>1</sup> 张强<sup>1</sup> 鞠晓慧<sup>1</sup> 肖栋<sup>2</sup> 杨和平<sup>1</sup> 陈杰<sup>1</sup> 廖捷<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国家气象信息中心, 北京 100081

<sup>2</sup> 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海, 200030

**摘要** 由于观测资料的限制, 以往对于日尺度以下的短时极端降水特征和短时极端降水阈值的研究较少。本文基于中国气象局最新研制的 1991~2021 年中国 2464 个台站逐小时降水资料, 分析了全国 1 小时、3 小时降水频率特征, 采用百分位法分别统计 1 小时和 3 小时极端降水阈值, 探究了中国短时极端降水气候特征。分析结果表明四川、贵州、湖南、江西、福建和浙江等省的部分台站 1 小时降水频率较大, 可达 12%, 西北地区 1 小时降水频率普遍偏低, 大部分台站低于 3%。1991~2021 年期间, 1 小时、3 小时极端降水频率呈减少趋势。共有 64.7% 的站 3 小时极端降水频率线性趋势与 1 小时极端降水频率线性趋势一致。我国降水极值和极端降水阈值空间特征明显, 1 小时降水极端降水阈值基本呈东南大、西北小的空间特征, 广东、广西、海南阈值相比我国其他地区偏大。海南、广东、广西和江苏省 1 小时降水历史平均极值超过 80mm/h, 其中海南省平均极值最高, 达 102.7mm/h。

**关键词:** 地面观测 降水 质量控制 日变化

文章编号 1006-9895(2022)03-0000-00

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22118

## Analysis on the characteristics of short-term extreme precipitation in China in recent 30 years

**作者简介** 赵煜飞, 女, 1979 年出生, 博士、正高级工程师, 主要从事气象数据集研制工作。 E-mail: 12163176@qq.com

**通讯作者** 张强, E-mail: zhangq@cma.gov.cn

**资助项目** 国家自然科学基金重大项目课题 42090033, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2022J050, 国家自然科学基金项目 42175053

**Funded by** Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42090030), China Meteorological Administration Innovation and Development Project(CXFZ2022J050), National Basic Program of China, National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42175053)

**收稿日期:** 2022-07-04. Received 04 Jul. 2022.

**网络预出版日期:**

ZHAO Yufei<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, JU Xiaohui<sup>1</sup>, Xiao Dong<sup>2</sup>, Yang Heping<sup>1</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>, Liao Jie<sup>1</sup>

*1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China*

*2 Key laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, P. R. China*

Abstract Due to the limitation of observational data, there are few studies on the characteristics of short-term extreme precipitation and the threshold of short-term extreme precipitation below the daily scale in the past. Based on the hourly precipitation data of 2464 stations in China from 1991 to 2021 newly developed by the China Meteorological Administration, this paper analyzes the frequency characteristics of 1-hour and 3-hour precipitation in China, uses the percentile method to count the 1-hour and 3-hour extreme precipitation thresholds respectively, and explores the climatic characteristics of short-term extreme precipitation in China. The analysis results show that the hourly precipitation frequency of some stations in Sichuan, Guizhou, Hunan, Jiangxi, Fujian and Zhejiang provinces is relatively high, up to 12%, and the hourly precipitation frequency in Northwest China is generally low, most stations are less than 3%. From 1991 to 2021, the frequency of 1-hour and 3-hour extreme precipitation showed a decreasing trend. A total of 64.7% of the stations have the linear trend of 3-hour extreme precipitation frequency in phase with that of 1-hour extreme precipitation frequency. The spatial characteristics of extreme precipitation and extreme precipitation threshold in China are obvious. The extreme precipitation threshold of one hour precipitation basically shows the spatial characteristics of large in the southeast and small in the northwest. Compared with other regions in China, the thresholds of Guangdong, Guangxi and Hainan are larger. The historical average extreme value of one hour precipitation in Hainan, Guangdong, Guangxi and Jiangsu provinces exceeded 80mm/h, of which the average extreme value in Hainan Province was the highest, reaching 102.7mm/h.

Key words: surface observation, precipitation, quality control, diurnal variation

# 1 引言

降水是全球能量和水循环过程的重要组成部分，是天气、气候变化研究的重点问题。我国处于东亚季风区，受季风和复杂地形的影响，降水存在着较为复杂的时空分布特征；另一方面，我国也是气候脆弱区之一，近年来，洪涝、干旱、寒潮、高温等极端天气气候事件频繁发生，随之而来的气候灾害对我国经济社会发展的影响日益加剧（纪忠萍等，2021；）。我国幅员辽阔，不同地区承载体脆弱性和敏感程度差异较大，例如对于较为干旱的西北地区和降水偏多的华南地区，同样级别的降水可能会造成不同级别的灾害。其中，极端降水事件在气候灾害中居关键性地位，暴雨及其造成的洪涝灾害是我国主要自然灾害之一，分析旱涝特征、发展预测技术是当前业务科研的重点内容（马杰等，2021；庞轶舒等，2021；江洁等，2021）。对于不同的时间尺度，设定不同的降水阈值来定义强降水或者极端降水事件。我国通常把日降水量 $\geq 50\text{mm}$ 的降水事件称为暴雨，把小时降水量 $\geq 20\text{mm}$ 的降水事件定义为短时强降水（陈炯等，2013）。

由于观测资料的限制，以往对极端降水事件和降水阈值的研究主要集中在日及以上时间尺度。Li et al. (2012) 分析了中国西南地区极端气温和极端降水事件的频率、强度和持续时间，认为我国西南地区极端降水量变化相对较小。Klein et al. (2006) 研究了中亚和南亚极端气候指数的变化，认为大多数极端降水事件的区域指数在 1961~2000 年期间几乎没有变化，这是由于空间趋势一致性较低，不同站的正负趋势混合在一起导致。Fu et al. (2013) 研究了 1961~2009 年中国极端降水事件频率的时空变化，认为东北、华北和黄河流域在 1961~2009 年经历了极端降水事件的减少趋势，而长江流域、东南沿海、华南、内蒙古、西北和青藏高原等六个地区，经历了越来越多的极端降水事件。为了不同地区可对比，以日降水量作为样本的极端降水事件的阈值研究（龚道溢等，2004；Zhang et al., 2005；翟盘茂等，2003）中，通常采用第 95 或 99 等百分位值作为极端降水的阈值，超过这个阈值被认为发生了极端降水事件（李庆祥等，2018）。

短时强降水持续时间短、突发性强、破坏性大，常引发山洪、泥石流等严重自然灾害。对短时极端降水事件和降水阈值的研究需要逐小时的降水资料。2005 年以来，我国地面自动站建设迅猛发展，逐小时观测资料得以广泛应用。然而自动站建站时间尚短、迄今不足 20 年。在自动站建站之前，我国广泛使用着各类

自记仪器进行小时乃至分钟尺度的要素观测，如降水自记、风自记观测等，但是大部分都以纸质介质的形式保存，使用不便，严重制约了这些资料的应用（赵煜飞等，2017）。近年来，中国气象局经过一系列拯救工作，最终形成了记录 2200 余国家站建站至自动站业务运行前的地面自记观测数据文件（包括小时降水（张强等，2016）、小时风（赵煜飞等，2017）、分钟降水（Ju et al., 2019）等）。通过整合自记文件和自动站观测降水资料，中国气象局国家气象信息中心建立了全国 2400 余站建站以来逐小时降水量序列，研制并逐步更新数据质量控制方案，对小时降水观测数据进行有效的质控，研制完成中国国家站小时降水数据集（V3.0）。

由于资料的限制，以往的研究中鲜有对中国 2400 站短时极端降水阈值及其特征的研究，本文拟利用中国气象局最新研制的中国国家站小时降水数据集（V3.0），采用百分位方法统计不同短时时效降水阈值，分析我国极端降水气候特征。分析结果将有助于规范气象部门气象灾害预警信号，由此建立的短时极端降水阈值标准也将更加适应各地防灾减灾需求。

## 2 资料选取

本文选取的资料来自于国家气象信息中心研制的中国国家站小时降水数据集（V3.0）（以下简称“新版数据集”）。图 1 给出了新版数据集中 2474 个国家站数据起始年代。据统计，50、60、70、80 年代起始观测逐小时降水的站分别有 997、715、417、141 个，分别占台站总数的 40.3%、28.9%、16.9%、5.7%，2000 年前有小时降水观测数据的台站数占总台站数的 93.2%。各站开始观测年代见图 1，我国西部国家站网密度相对稀疏，且因年降水量较少，大部分西部台站开始布设降水自记仪器的年份均晚于东部地区，只有少数国家站 90 年代起开始有数据。东部地区站小时降水数据大多始于 1951~1970 年间。

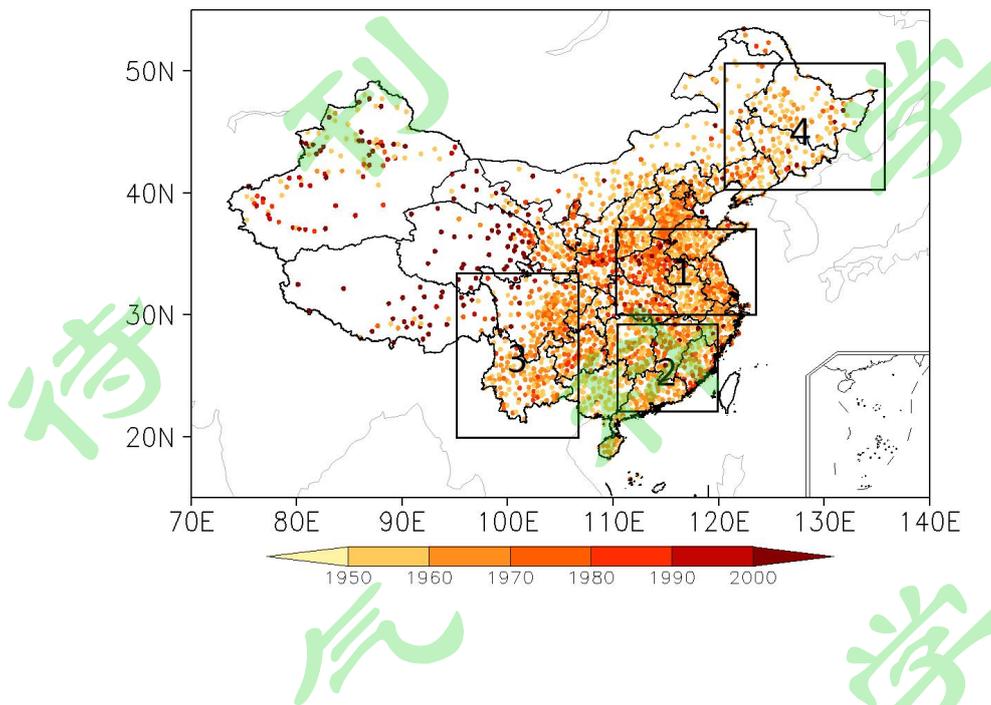


图 1 中国国家级站小时降水数据起始年代空间分布（图中矩形分别代表东区（1）、南区（2）、西南区（3）、东北区（4））

Fig.1 Spatial distribution of hourly precipitation starting year of National Stations in China (The rectangles in the figure represent the eastern region (1), the southern region (2), the southwestern region (3), and the northeastern region (4), respectively)

2015 年，国家气象信息中心通过收集、整理中国各类降水数据源，建立了中国国家级站小时降水数据集（V2.0）（简称“旧版数据集”）（张强等，2016）。相比旧版数据集，新版数据集补充了近年来建设的降水数字化成果，新增了约 10 万个站月小时降水数据，提高总数据量达 10%。新增的数据主要集中在 50 年代中后期至 70 年代末，80 年代至 90 年代末也有少量数据的补充，有效延长了 459 个国家站小时降水序列（图 2）。

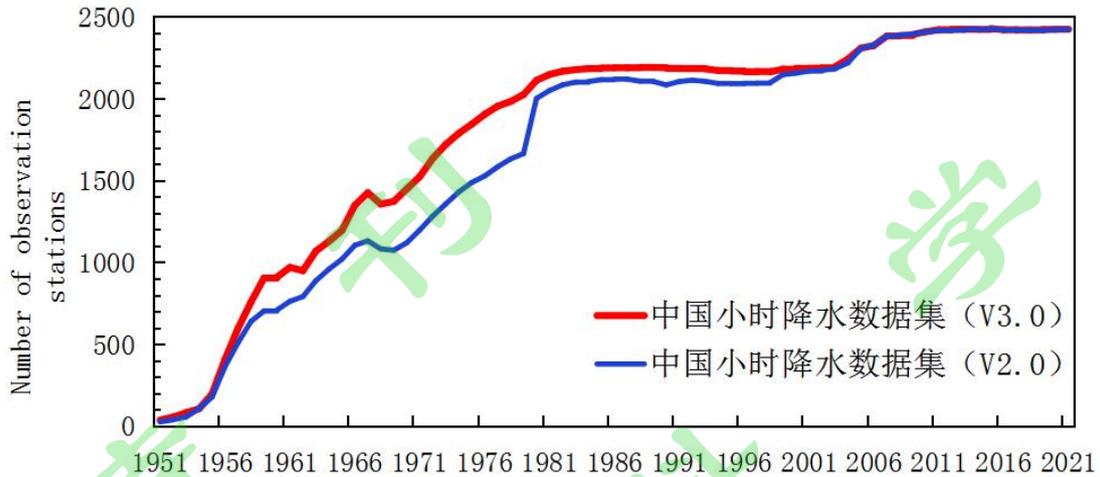


图 2 新版和旧版数据集中有小时降水站数逐年变化

Fig.2 Number of hourly precipitation general observation stations in 1951-2021

数据质量方面，对 80mm/h 以上的强降水，通过人工查阅原始档案方式逐一核实；对降水异常时段的错误，经核查原始档案后，将合计降水量平均分配到异常时段，以完成此类错误修正，使新版数据集对强降水的描述更加准确客观。此外，升级了小时降水数据质量控制方案，更加明晰了数据质量。升级后的质量控制方案主要包括界限值检查、内部一致性检查（包括小时合计值与日降水一致性检查、单个小时值与日降水差异检查）、时间一致性检查（包括连续无变化检查、连续强降水检查），并对各项检查的质控信息进行了综合判断，最终为各站小时降水数据标注质量控制码。

用正确率、可疑率、错误率、修正率、缺测率等指标评估新版数据集的数据质量。假设有  $n$  个站进行观测资料数据质量统计，其中第  $i$  个站在观测运行期间的数据个数为应有数据个数  $i$ ，对正确数据个数  $i$ 、可疑数据个数  $i$ 、错误数据个数  $i$ 、修正数据个数  $i$ 、缺测数据个数  $i$  进行统计，则该站统计结果为：

$$\text{正确率}_i = \frac{\text{正确数据个数}_i}{\text{应有数据个数}_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{可疑率}_i = \frac{\text{可疑数据个数}_i}{\text{应有数据个数}_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{错误率}_i = \frac{\text{错误数据个数}_i}{\text{应有数据个数}_i} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{修正率}_i = \frac{\text{修正数据个数}_i}{\text{应有数据个数}_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{缺测率}_i = \frac{\text{缺测数据个数}_i}{\text{应有数据个数}_i} \times 100\% \quad (5)$$

从 1951~2021 年逐小时降水正确率、错误率、可疑率、缺测率和修正率逐年变化（图 3）可见，正确率在 1959~1961 年突然降低，平均为 99.0%，另一个正确率低值出现在 2004~2005 年，这主要是由于 2004~2005 年前后正值我国地面气象观测由人工观测方式向自动观测方式转变，仪器相对不稳定，出现较多的可疑数据。2006 年以后，正确率普遍高于 99.9%。上述时段经质量控制检测到的可疑数据较多，因此正确率偏低。本文选取了 1991~2021 年完整性较好的 2464 个站中质控码为正确、可疑、修正的小时降水数据进行统计，缺测和错误的的数据不参与统计。

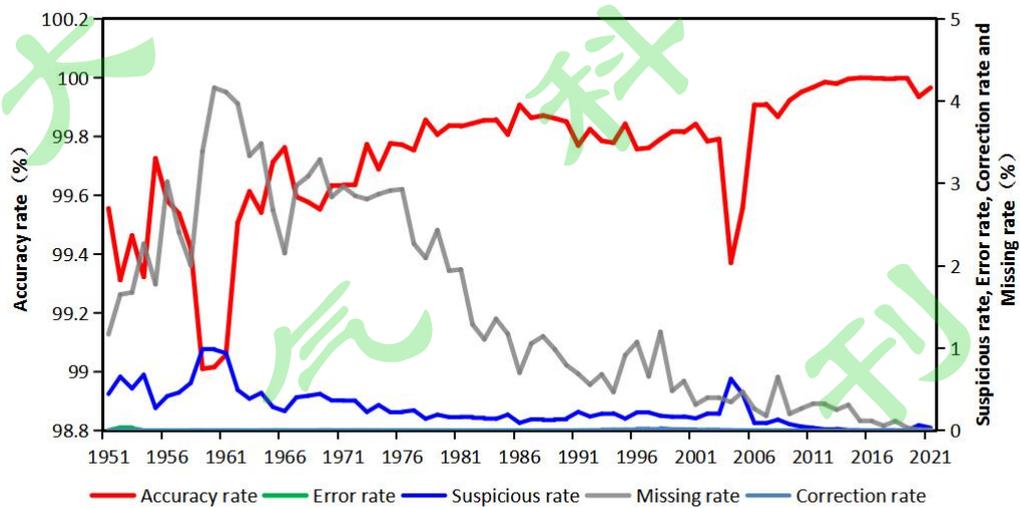


图 3 1951~2021 年小时降水数据正确率、可疑率、错误率、修正率、缺测率 (%)  
Fig.3 Annual accuracy rate, suspicious rate, error rate, correction rate, missing rate of hourly precipitation data in 1951-2021

### 3 统计方法

#### 3.2 降水阈值计算

阈值是引发系统从一种主要状态变为另一种状态的非线性过程的临界值 (Patwardhan et al., 2007)。气象要素阈值划分标准和计算方法有很多种, 根据李庆祥等 (2011) 对极端气候事件的阈值计算方法, 本文极端降水的定义按照百分位法进行统计, 把各站 1991~2021 年逐小时或滚动逐 3 小时降水量序列的第 99 个百分位值定义为该站极端降水的阈值, 当该站某小时或某滚动逐 3 小时降水量超过此阈值时, 该小时或 3 小时降水就称之为极端降水。本文分析了 1 小时和 3 小时降水累计雨量的降水阈值和极端降水变化, 以 1 小时降水阈值为例, 具体计算方法如下:

把 1991~2021 年  $\geq 0.1\text{mm}$  的 1 小时降水量按照升序排列, 序列为  $X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_n$ , 某个值小于  $X_m$  的概率为

$$p = (m - 0.31) / (n + 0.38) \quad (6)$$

$$m = [p(n + 0.38) + 0.31] \quad (7)$$

$$a = p(n + 0.38) + 0.31 - m \quad (8)$$

$p$  为百分位值对应的概率,  $m$  为  $X_m$  的序号,  $n$  为降水序列中样本的总个数。百分位数  $y$  为  $x_m$  和  $x_{m+1}$  的线性插值,  $a$  为插值系数。

$$y = (1 - a)x_m + ax_{m+1} \quad (9)$$

#### 3.3 降水频率计算

某站 1 小时/3 小时降水频率被定义为该站 1991~2021 年中 1 小时/3 小时降水  $\geq 0.1\text{mm}$  的样本数占总样本数 (不包括无观测和缺测) 的百分比。把 1 小时降水超过阈值的样本称为极端降水, 某站 1 小时极端降水频率被定义为该站 1991~2021 年中 1 小时降水超过 1 小时极端降水阈值的样本数占有降水样本 (1 小时降水  $\geq 0.1\text{mm}$ ) 的百分比。

## 4 中国近 30 年小时降水阈值

图 4 是基于中国国家站小时降水数据集 (V3.0) 统计的全国 2464 个国家站 1 小时降水频率、降水阈值、降水极值空间分布。我国 1 小时降水频率最高的站为四川峨眉山站, 1 小时降水频率达 23.1%。此外, 四川、贵州、湖南、江西、福建和浙江等省的部分台站降水频率较大, 可达 12%。1 小时降水频率最低的站为新疆托克逊站, 1 小时降水频率为 0.2%, 我国西北地区 1 小时降水频率普遍偏低, 大部分台站降水频率低于 3%。我国 1 小时降水的极端降水阈值基本呈东南大、西北小的空间特征, 广东、广西、海南阈值相比我国其他地区偏大。极端降水阈值最大的站为海南昌江站 (36.9mm), 新疆吐鲁番东坎、吐鲁番站 1 小时极端降水阈值最小 (2.3mm)。1991~2021 年我国国家级台站 1 小时降水量最大值位于河南郑州, 小时降水量达 201.9mm, 江苏如皋为次大 (161.9mm), 分别发生在 2021 年 7 月 20 日 17 时和 2019 年 7 月 17 日 21 时, 由于郑州和如皋周围台站密度较高, 因此在填色图图 4 (c) 的极值不明显。

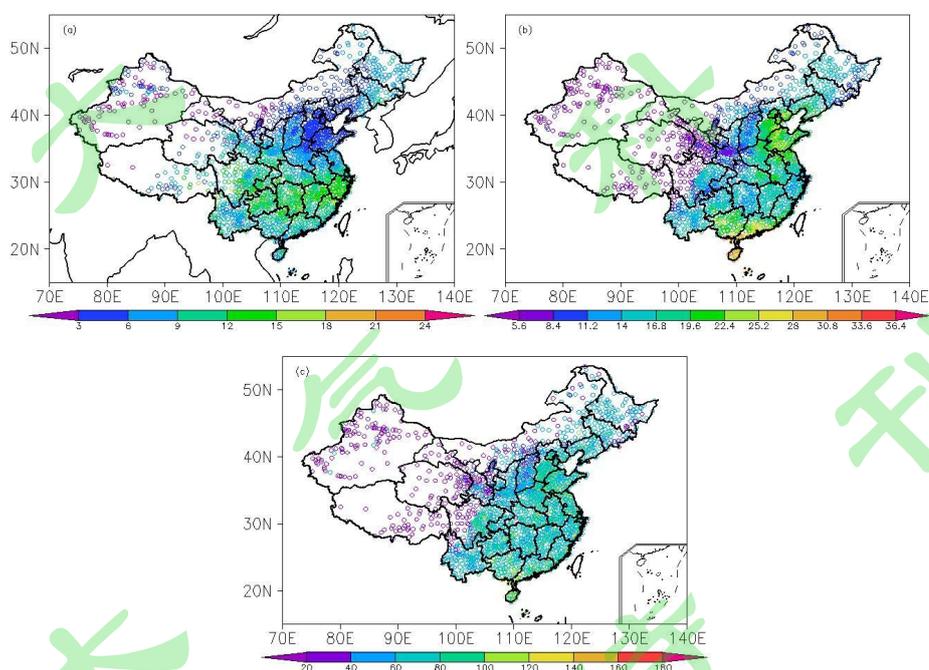


图 4 中国国家级站 1 小时 (a) 降水频率 (%)、(b) 极端降水阈值 (mm)、(c) 降水极值 (mm) 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of (a) precipitation frequency (%), (b) extreme precipitation threshold

(mm), (c) precipitation extreme value (mm) within one hour in national stations

我国降水极值和极端降水阈值空间特征明显, 为了更细致的分析不同地区 1 小时降水历史极值和极端降水阈值, 对 31 个省 (自治区) 内国家站 1 小时降水极值和极端降水阈值进行了算术平均, 得到各省平均极值和平均阈值, 并将省内各站 1 小时降水极值的最大值作为该省极端极值, 依照极端极值对各省进行了降序排列 (图 5, 表 1)。在 2021 年 7 月 20 河南郑州的极端降水事件中, 出现建站以来全国最高 1 小时降水量 201.9mm, 江苏和山东省 1 小时降水极端极值次之, 分别为 161.9mm 和 161.0mm, 福建、广西、湖北、海南、安徽、山东、浙江、四川、湖南、河北、上海、贵州、江西、北京、辽宁、云南、内蒙古、天津和陕西共 22 个省 1 小时降水极端极值大于 100mm, 其余 9 个省 1 小时降水极端极值小于 100mm, 其中西藏 1 小时降水极端极值最小, 为 33.8mm。我国共有 4 个省 1 小时降水历史极值超过 80mm/h, 主要位于我国华南和江淮部分地区, 分别是海南、广东、广西和江苏省, 其中海南省平均极值最高, 为 102.7mm/h; 我国共有 6 个省 (自治区) 1 小时降水历史极值小于 50mm/h, 主要位于我国西北和东北部分地区, 分别是西藏、新疆、青海、宁夏、甘肃、内蒙古, 其中西藏平均极值最低, 为 20.7mm/h; 其余 21 个省降水平均极值为 50~80mm/h。各省按照第 99 个百分位确定的 1 小时极端降水阈值相比平均极值要小很多, 其中海南、广东、天津、山东、广西共 5 个省 (自治区) 平均极端降水阈值大于 20mm/h, 同时符合中国气象局业务中对短时强降水的定义 (小时降水量  $\geq 20$ mm/h); 北京、河北、江苏等 10 个省平均极端降水阈值为 15~20mm/h, 浙江、上海、湖南等 11 个省平均极端降水阈值为 10~15mm/h, 新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏共 5 个省 (自治区) 极端降水阈值最小, 为 5~10mm/h。

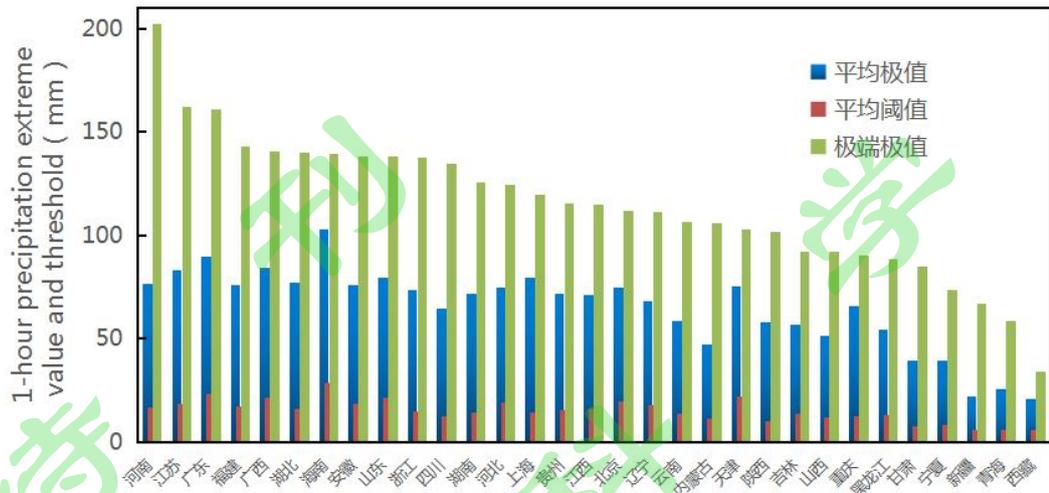


图 5 各省 1 小时降水平均极值、极端降水阈值和极端极值 (mm)

Fig.5 One-hour average precipitation extreme value, extreme precipitation threshold value and extreme extreme value (mm) in each province

表 1 各省 1 小时降水平均极值、极端降水阈值和极端极值

Table 1 One-hour average precipitation extreme value, extreme precipitation threshold value and extreme extreme value in each province

| 序号 | 省 (自治区) | 平均极值 (mm) | 极端降水阈值 (mm) | 极端极值 (mm) |
|----|---------|-----------|-------------|-----------|
| 1  | 河南      | 76.4      | 16.9        | 201.9     |
| 2  | 江苏      | 82.8      | 18.5        | 161.9     |
| 3  | 广东      | 89.5      | 23.4        | 161.0     |
| 4  | 福建      | 75.8      | 17.4        | 143.2     |
| 5  | 广西      | 84.0      | 21.3        | 140.5     |
| 6  | 湖北      | 76.9      | 15.8        | 139.8     |
| 7  | 海南      | 102.7     | 28.9        | 139.2     |
| 8  | 安徽      | 75.8      | 18.4        | 138.0     |
| 9  | 山东      | 79.7      | 21.3        | 137.9     |
| 10 | 浙江      | 73.5      | 14.6        | 137.6     |
| 11 | 四川      | 64.5      | 12.2        | 134.6     |
| 12 | 湖南      | 71.9      | 14.0        | 125.4     |
| 13 | 河北      | 74.7      | 19.1        | 124.2     |
| 14 | 上海      | 79.6      | 14.5        | 119.6     |
| 15 | 贵州      | 71.9      | 15.4        | 115.4     |
| 16 | 江西      | 71.3      | 16.3        | 114.5     |
| 17 | 北京      | 74.8      | 19.9        | 111.9     |
| 18 | 辽宁      | 68.3      | 18.1        | 111.0     |
| 19 | 云南      | 58.8      | 13.4        | 106.6     |
| 20 | 内蒙古     | 47.3      | 11.5        | 106.0     |

|    |     |      |      |       |
|----|-----|------|------|-------|
| 21 | 天津  | 75.5 | 22.2 | 102.8 |
| 22 | 陕西  | 58.1 | 10.3 | 101.5 |
| 23 | 吉林  | 56.9 | 13.4 | 92.3  |
| 24 | 山西  | 51.2 | 12.0 | 92.1  |
| 25 | 重庆  | 65.9 | 12.4 | 90.0  |
| 26 | 黑龙江 | 54.1 | 12.9 | 88.4  |
| 27 | 甘肃  | 39.3 | 7.6  | 84.7  |
| 28 | 宁夏  | 39.3 | 8.3  | 73.5  |
| 29 | 新疆  | 22.1 | 5.7  | 67.2  |
| 30 | 青海  | 25.9 | 6.0  | 58.5  |
| 31 | 西藏  | 20.7 | 5.8  | 33.8  |

图 6 为利用逐小时降水资料统计的 1991~2021 年中国各站极端（小时）降水频率线性趋势，全国 2464 个站中，865 个站极端降水频率增多，主要位于我国长江以南大部分地区，1180 个站极端降水频率减少，极端降水减少的台站主要位于我国华北地区和东北地区，1991~2021 年我国西部地区大多台站极端降水持平。已有研究表明，利用逐日降水资料，中国极端（日）降水趋势有三个显著区域：东南地区和西北地区为正趋势区，华北地区为负趋势区（韦志刚等，2021）。这与上述 1 小时极端降水趋势的分析结果有相似之处，但在我国西北地区，小时极端降水没有日极端降水所体现的正趋势。

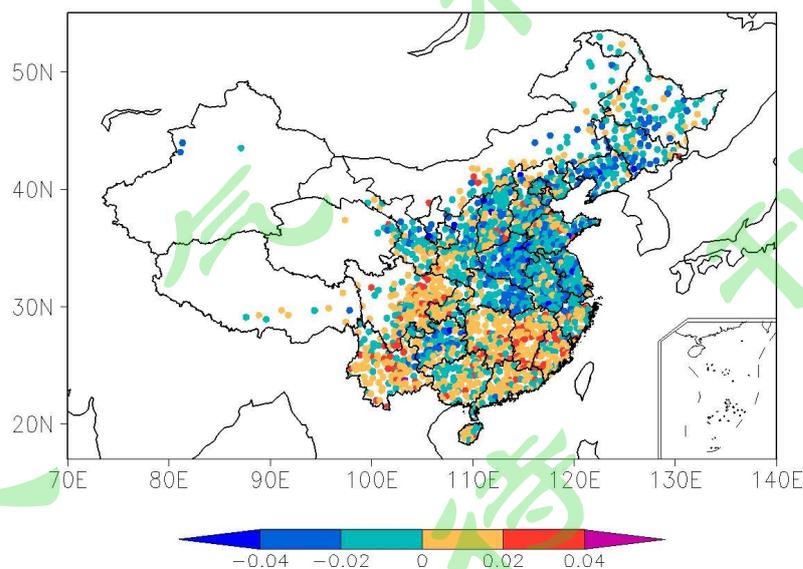
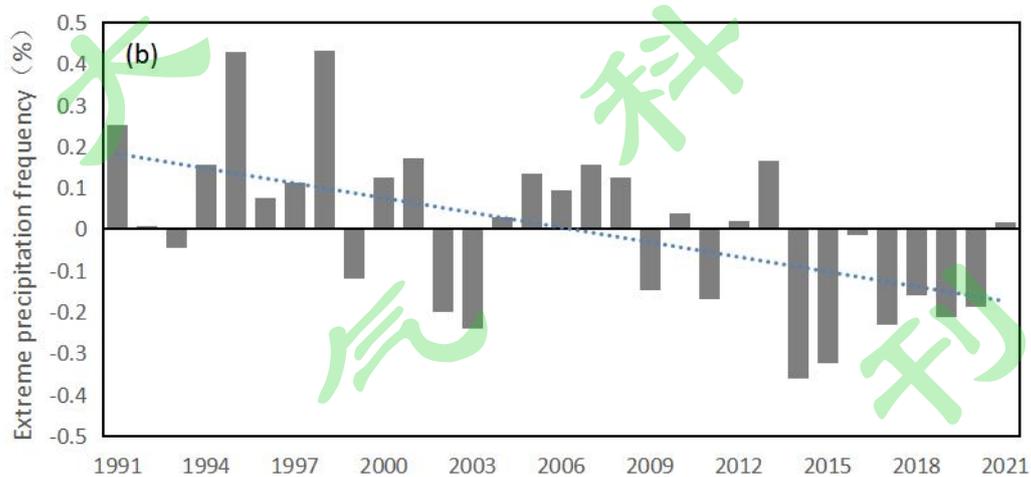
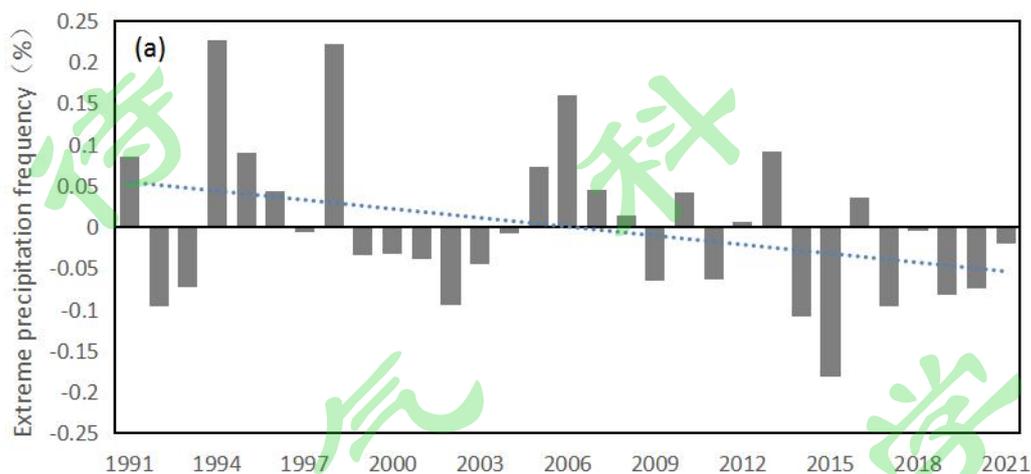


图 6 1991~2021 年中国各站 1 小时极端降水频率线性趋势

Fig.6 Linear trend of one-hour extreme precipitation frequency in China stations from 1991 to 2021

极端降水存在三个频发时期：1960 年代早期，1990 年代中晚期和 21 世纪早期（Sun and Zhang, 2017）。1991~2021 年我国 1 小时极端降水频率平均为 0.5%，1991~2021 年我国 1 小时极端降水频率存在年际变化特征（图 7a），90 年代中后期和 2006 年前后我国极端降水偏多，2015 年以后极端降水偏少。整体来看，1991~2021 年期间，极端降水呈减少趋势，1 小时极端降水频率平均单站每十年减少 0.04%。其中，1994 年和 2015 年分别是 1 小时极端降水频率最大值和最小值年份，分别为 0.76%和 0.35%。滑动  $t$  检验法可以用来检验一个时间序列中某一时间尺度的多次突变（肖栋等，2011）。本文所采用的突变检测的时间尺度为  $n_1=n_2=10$ ，对 1991~2021 年中国 1 小时极端降水频率距平进行突变检测，可以发现 1 小时降水频率距平存在显著的年代际转变特征，序列于 2013 年检测出突变信号（超过 0.05 显著性水平，图略），1 小时极端降水频率减少。根据图 6 中我国不同地区 1 小时极端降水频率线性趋势空间分布特征，选定东区（ $30^{\circ} \text{N} \sim 37^{\circ} \text{N}$ ， $110^{\circ} \text{E}$  以东）、南区（ $22^{\circ} \text{N} \sim 29^{\circ} \text{N}$ ， $110^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ）、西南区（ $20^{\circ} \text{N} \sim 33^{\circ} \text{N}$ ， $95^{\circ} \text{E} \sim 107^{\circ} \text{E}$ ）、东北区（ $40^{\circ} \text{N}$  以北， $120^{\circ} \text{E}$  以东）共四个区域（见图 6），分别计算 1991~2021 年东区、南区、西南区、东北区平均 1 小时极端降水频率距平序列（图 7b、7c、7d、7e）。东区 1 小时降水频率距平在 2013 年发生了减少突变（超过 0.05 显著性水平），突变时间与全国平均的 1 小时降水频率距平一致。2013 年东区降水频率距平发生的年代际减少突变是一次新的年代际变化，可能和全球变暖停滞结束和北太平洋的年代际增暖有关。一、全球变暖停滞期发生在 1998~2013 年，在 2013 年结束（Trenberth, 2015）；二、Xiao et al. (2022) 指出北太平洋地区的海表温度在 2013/2014 年发生了显著的升温突变，发生升温突变的区域包括北美西海岸沿岸和北半球热带中东太平洋。这二者与东区 1 小时降水频率距平年代际变化的具体联系和可能机制值得进行详细的研究。东区 1 小时极端降水频率平均每十年减少 0.1%，比全国各站平均的降水频率减少得快得多。1995 年和 2014 年分别是东区 1 小时极端降水频率最大值和最小值年份，分别为 0.98%和 0.19%。南区 1 小时极端降水频率平均每十年增加 0.09%，2014 年极端降水频率最高，为 0.76%，2001 年最低，为 0.28。西南区 1991~2021 年 1 小时极端降水频率呈增大趋势，线性趋势为 0.05%/10a，

2018~2021年连续4年1小时极端降水频率高于1991~2021年平均值，是西南区1991年以来首次出现1小时极端降水频率连续2年以上（不包括2年）为正异常。东北区1991~2021年1小时极端降水频率呈减少趋势，线性趋势为 $-0.12\%/10a$ 。



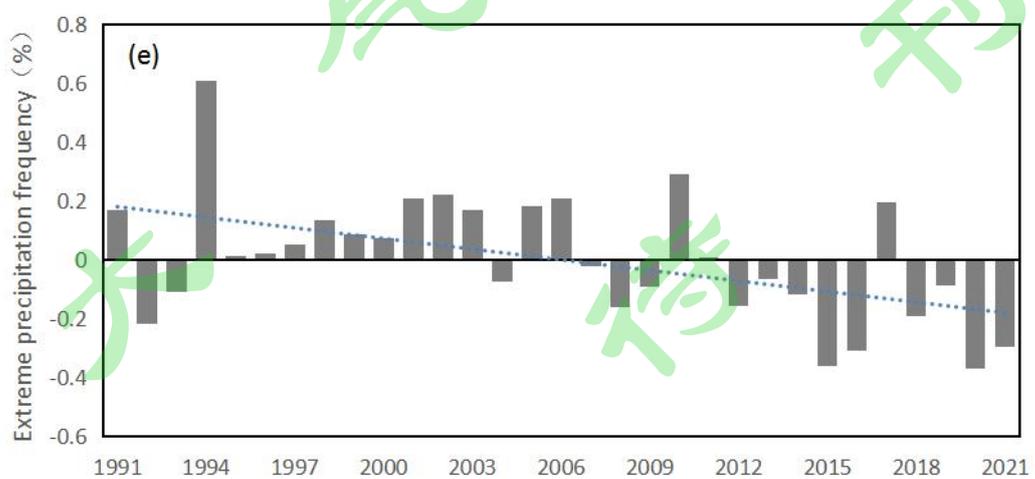
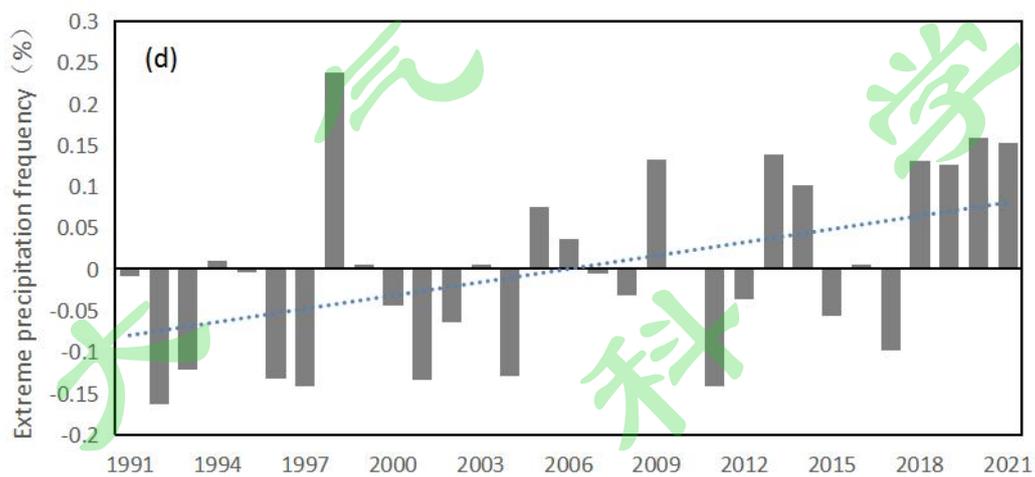
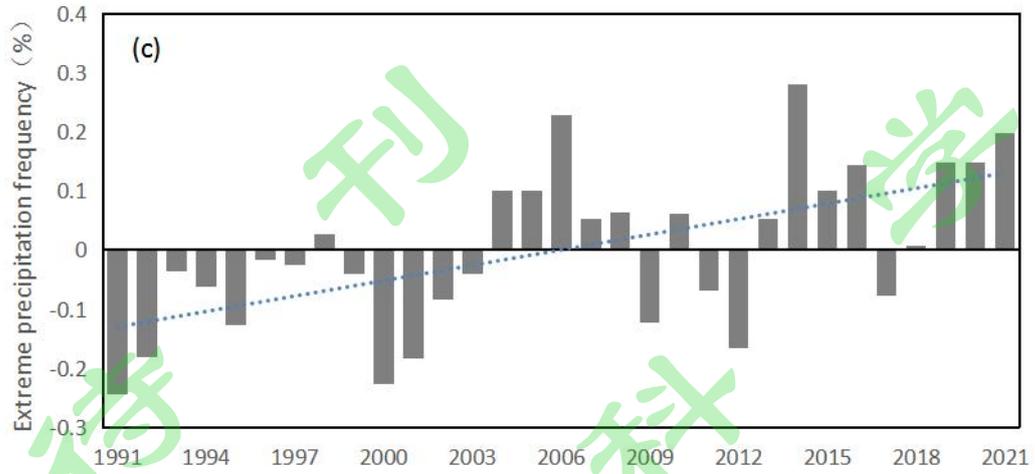


图 7 中国极端降水频率距平时间序列 (%) 及其线性趋势: (a) 全国; (b) 东区; (c) 南区; (d) 西南区; (e) 东北区)

Fig. 7 The time series and linear trend of annual average extreme precipitation frequency anomalies from 1991 to 2021: (a) the whole country; (b) the eastern region; (c) the southern region; (d) the southwest region; (e) the northeastern region

我国降水存在显著的季节变化特征, 极端降水频率的季节变化也值得进一步分析。由图 8, 我国 7 月极端降水频率为一年中最高, 为 1.8%, 其次是 8 月和 6 月, 分别为 1.6% 和 0.9%。12 个月中, 只有夏季的 6、7、8 月极端降水频率高于年平均极端降水频率 (0.4%), 5 月和 9 月极端降水频率与年平均极端降水频率最为接近, 11、12、1、2、3 月极端降水频率为 0.0%。

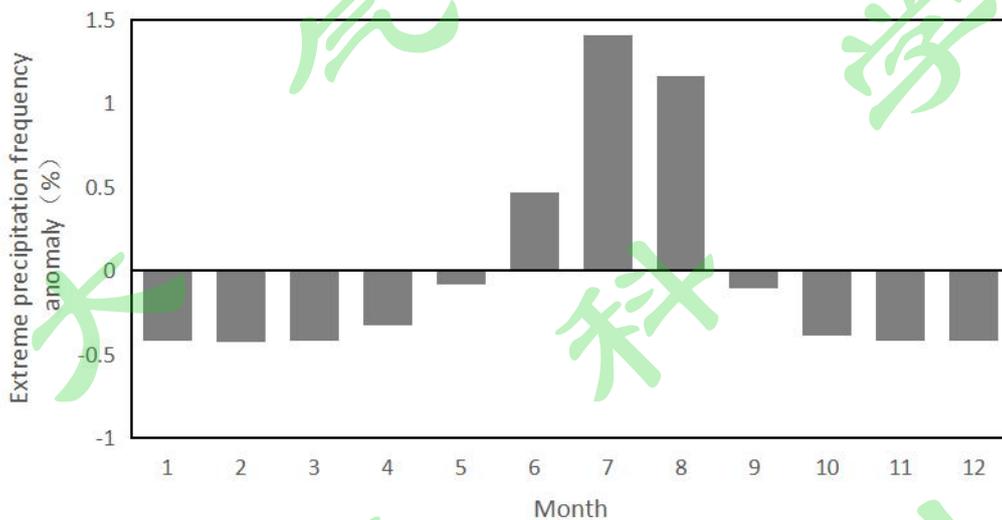


图 8 中国极端降水频率异常季节变化 (%)

Fig. 8 Anomalous seasonal variation of extreme precipitation frequency in China (%)

## 5 中国近 30 年 3 小时累计降水阈值

类似于图 4, 图 9 给出全国 2464 个国家站滚动 3 小时降水频率、降水阈值、

降水极值空间分布。1 小时降水频率最高的四川峨眉山站，其 3 小时降水频率仍为全国最高，达 32.3%。四川和长江以南的部分台站降水频率可达 18%。1 小时降水频率最低新疆托克逊站，3 小时降水频率为 0.5%，同样为全国最低（图 9a）。3 小时降水的极端降水阈值有两个大值区，分为位于在华南地区南部和华北地区中东部，阈值超过 35mm/3h，阈值最大为 61.3mm/3h，出现在海南昌江站，广西防城港站阈值次大，为 60.4mm/3h（图 9b）。各站 1991~2021 年降水极值呈现东南地区大、西北地区小的整体特征，全国共有 5 个站，3 小时降水历史极值超过 300mm/3h，分别为四川芦山、广东上川、浙江温州、河南郑州、广西东兴站，历史极值分别为 324.2、322.9、322.8、310.8 和 309.4mm/3h（图 9c）。3 小时极端降水频率距平变化趋势（图略）与 1 小时极端降水频率距平趋势类似，1991~2021 年期间，极端降水呈减少趋势，线性趋势为-0.03%/10a。

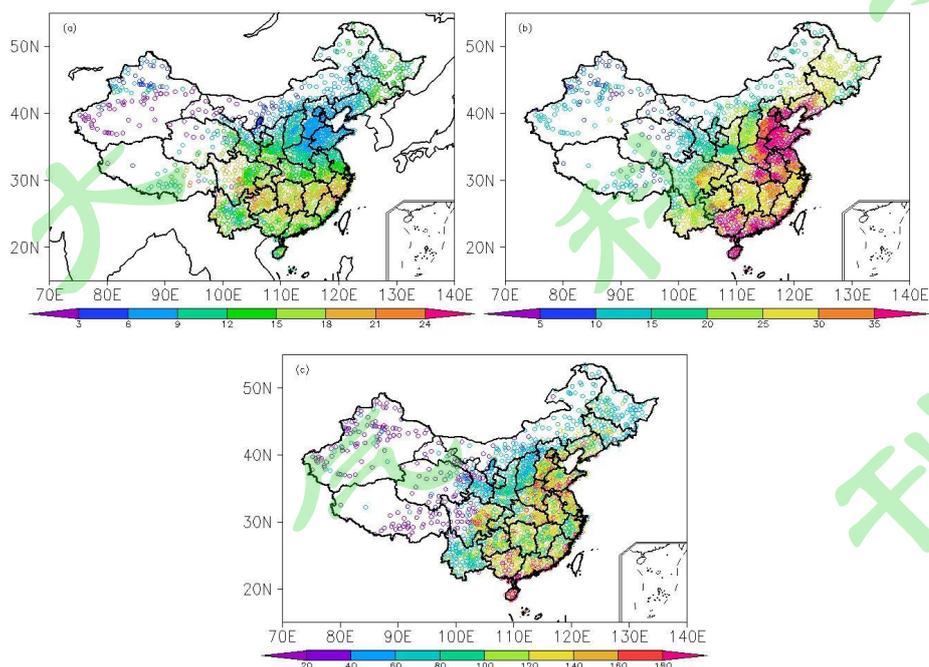


图 9 中国国家级站 3 小时 (a) 降水频率 (%)、(b) 降水阈值 (mm)、(c) 降水极值 (mm) 空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of (a) precipitation frequency (%), (b) precipitation threshold (mm), (c)

precipitation extreme value (mm) within 3 hours of national stations

与图 5 类似，图 10 给出 31 个省滚动 3 小时降水的平均极值、极端降水阈值和极端极值（表 1）。极端极值超过 300mm/3h、200mm/3h、200mm/3h 的省分别有 5 个、10 个和 13 个。我国共有 2 个省 3 小时降水平均极值超过 150mm/3h，分别是海南（185.9mm/3h）和广东省（157.6mm/3h）。3 小时滚动降水各省平均阈值在 10.5~49.2mm/3h 范围内变化，其中海南阈值最大，新疆最小。

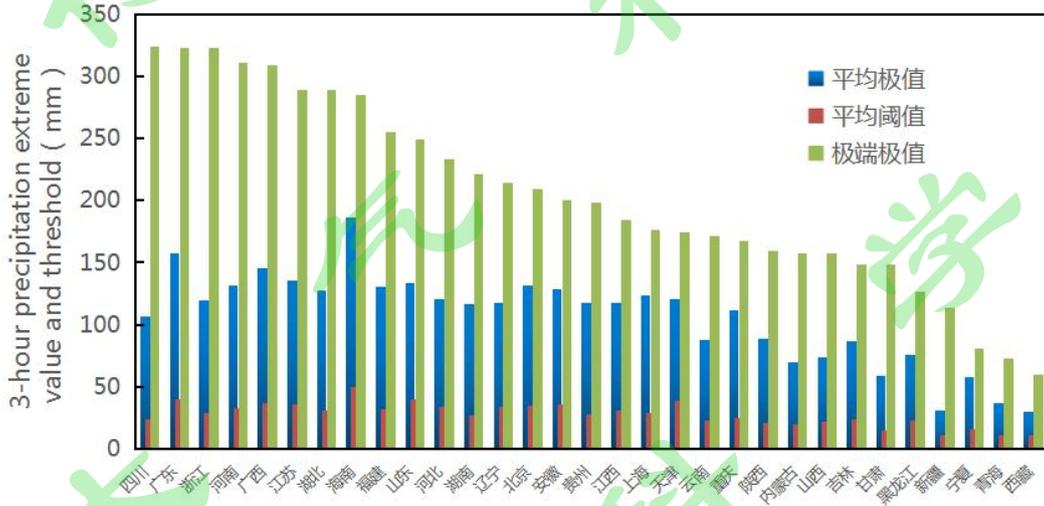


图 10 各省 3 小时降水平均极值、极端降水阈值和极端极值 (mm)

Fig. 10 Three-hour precipitation average extreme value, extreme precipitation threshold and extreme extreme value (mm) in each province

表 2 各省 3 小时降水平均极值、极端降水阈值和极端极值

Table 2 Three-hour precipitation average extreme value, extreme precipitation threshold and extreme extreme value in each province

| 序号 | 省 (自治区) | 平均极值 (mm) | 极端降水阈值 (mm) | 极端极值 (mm) |
|----|---------|-----------|-------------|-----------|
| 1  | 四川      | 106.9     | 24.0        | 324.2     |
| 2  | 广东      | 157.6     | 39.9        | 322.9     |

|    |     |       |      |       |
|----|-----|-------|------|-------|
| 3  | 浙江  | 120.0 | 28.4 | 322.8 |
| 4  | 河南  | 131.7 | 32.6 | 310.8 |
| 5  | 广西  | 145.4 | 36.8 | 309.4 |
| 6  | 江苏  | 135.4 | 35.4 | 289.0 |
| 7  | 湖北  | 127.5 | 30.9 | 288.6 |
| 8  | 海南  | 185.9 | 49.3 | 284.7 |
| 9  | 福建  | 130.7 | 31.9 | 255.0 |
| 10 | 山东  | 133.3 | 39.2 | 249.6 |
| 11 | 河北  | 120.5 | 33.6 | 233.2 |
| 12 | 湖南  | 116.2 | 26.8 | 221.7 |
| 13 | 辽宁  | 117.4 | 33.6 | 214.7 |
| 14 | 北京  | 131.1 | 34.5 | 209.2 |
| 15 | 安徽  | 128.2 | 35.3 | 200.6 |
| 16 | 贵州  | 117.3 | 28.0 | 197.9 |
| 17 | 江西  | 117.7 | 30.4 | 183.9 |
| 18 | 上海  | 123.8 | 28.4 | 176.6 |
| 19 | 天津  | 120.2 | 38.8 | 174.5 |
| 20 | 云南  | 87.6  | 23.2 | 171.0 |
| 21 | 重庆  | 111.9 | 24.8 | 167.8 |
| 22 | 陕西  | 88.9  | 20.9 | 159.5 |
| 23 | 内蒙古 | 69.4  | 20.0 | 157.7 |
| 24 | 山西  | 73.9  | 22.2 | 157.0 |
| 25 | 吉林  | 86.7  | 24.0 | 148.9 |
| 26 | 甘肃  | 58.8  | 14.8 | 148.2 |
| 27 | 黑龙江 | 76.1  | 22.3 | 126.7 |
| 28 | 新疆  | 31.1  | 10.5 | 113.3 |
| 29 | 宁夏  | 57.4  | 16.2 | 80.8  |
| 30 | 青海  | 36.6  | 11.2 | 72.6  |
| 31 | 西藏  | 29.4  | 10.7 | 60.0  |

全国 2464 个站的 1991~2021 年中国各站极端 (3 小时) 降水频率线性趋势, 900 个站极端降水频率增多, 1191 个站极端降水频率减少, 我国西部地区大多台站极端降水持平 (图略)。由图 11, 3 小时极端降水频率线性趋势与 1 小时极端降水频率线性趋势一致的站共有 1594 个 (占 64.7%) ; 趋势相反的站共有 422 个 (占 17.1%) , 除新疆以外的 30 个省 (自治区) 均存在 3 小时极端降水频率与 1 小时极端降水频率相反趋势的站, 在华北地区和长江以南地区相对较多; 其余台站线性趋势为 0。

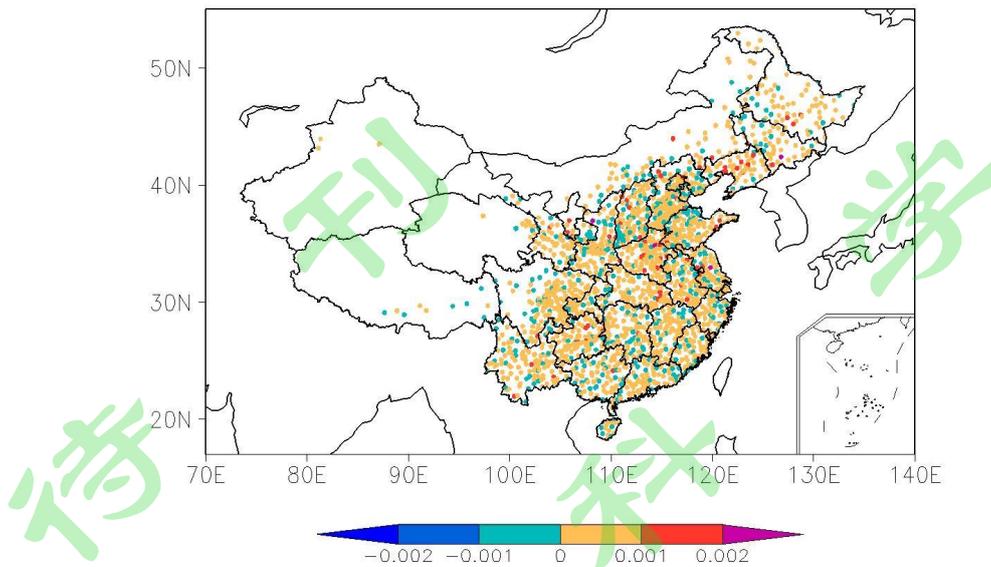


图 11 1991~2021 年中国各站极端降水频率线性趋势(1 小时和 3 小时降水趋势相同或相反)

Fig. 11 Linear trend of extreme precipitation frequency at each station in China from 1991 to 2021 (One-hour and three-hour precipitation trends are the same or opposite)

## 7 结论

本文基于中国气象局最新研制的中国国家站小时降水数据集 (V3.0)，对 1991~2021 年 2464 个国家级地面气象站 1 小时、3 小时降水量进行排序，以第 99 百分位作为 1 小时、3 小时极端降水阈值，分析了中国短时极端降水时空特征。得出以下结论：

(1) 由于补充了 2016~2018 年降水自记纸数字化成果，中国国家站小时降水数据集 (V3.0) 相比中国国家站小时降水数据集 (V2.0) 新增了约 10 万个站月的小时降水数据，提高总数据量 10%，有效延长了 459 个国家站小时降水序列。数据质量方面，升级了小时降水数据质控方法，对 80mm/h 以上的强降水逐一核实，检测并修正了降水异常时段的错误处理，使新版数据集对强降水的描述更加准确客观。

(2) 1 小时和 3 小时降水频率最高的站均为四川峨眉山站，最低的均为新疆托克逊站。四川、贵州、湖南、江西等省的部分台站 1 小时降水频率较大，西

北地区 1 小时降水频率偏低。近 30 年来,我国国家站短时极端降水频率呈减少趋势,极端降水减少的台站主要位于我国华北地区和东北地区。共有 64.7%的站 3 小时极端降水频率线性趋势与 1 小时极端降水频率线性趋势一致。

(3) 采用滑动  $t$  检验法检验了我国东区 ( $30^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}$  以东)、南区 ( $22^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )、西南区 ( $20^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ ,  $95^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ ) 1 小时极端降水频率突变信号。分析结果表明东区降水频率距平在 2013 年发生了减少突变。南区、西南区与全国、东区、东北区有所不同,1991~2021 年 1 小时极端降水频率呈增大趋势。

(4) 我国降水极值和极端降水阈值空间特征明显,1 小时降水极端降水阈值基本呈东南大、西北小的空间特征,广东、广西、海南阈值相比我国其他地区偏大。海南、广东、广西和江苏省 1 小时降水历史平均极值超过 80mm/h,其中海南省平均极值最高,达 102.7mm/h。3 小时降水的极端降水阈值有两个大值区,分为位于在华南地区南部和华北地区中东部,阈值超过 35mm/3h。

## 参考文献

- 陈炯, 郑永光, 张小玲, 朱佩君. 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J], 气象学报, 71(3): 367-382. doi: 10.11676/qxxb2013.035. Chen Jiong, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, Zhu Peijun. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(3) :367-382. doi : 10.11676/qxxb2013.035
- Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al. 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961 - 2009 [J]. J. Hydrol., 487: 48-59. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.021
- 龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2004.02.009. Gong Daoyi, Han Hui. Extreme climate events in Northern China over the last 50 years[J]. Acta

Geographica Sinica, 2004, 59(2): 230-238. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2004.02.009

纪忠萍, 源艳芬, 徐艳虹, 等. 2021. 2019年广东前汛期连续暴雨与大气季节内振荡的联系[J]. 大气科学, 45(3): 588 - 604. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20136. Ji Zhongping, Yuan Yanfen, Xu Yanhong, et al. 2021. The Relationship between Continuous Rainstorms and Atmospheric Intraseasonal Oscillation during the First Rainy Season in Guangdong in 2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 588 - 604. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20136

江洁, 周天军, 张文霞. 2022. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 46(3): 707-724. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21187. Jiang Jie, Zhou Tianjun, Zhang Wenxia. 2022. Temporal and Spatial Variations of Extreme Precipitation in the Main River Basins of China in the Past 60 Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 707-724 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21187

Ju, X H, Huang S P, Li C J, et al. 2019. Development of a self-recording per-minute precipitation dataset for China[J]. J. Meteor. Res., 33(6): 1157 - 1167. DOI: 10.1007/s13351-019-9061-6

Klein Tank, A. M. G., T. C. Peterson, D. A. Quadir, et al., 2006, Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia[J]. J. Geophys. Res., 111. D16105, doi:10.1029/2005JD006316.

李庆祥, 黄嘉佑. 2011. 对我国极端高温事件阈值的探讨[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2): 138-144. doi: 10.11898/1001-7313.20110202. Li Qingxiang, Huang Jiayou. 2011. Threshold values on extreme high temperature events in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science.2011, 22(2): 138-144. doi: 10.11898/1001-7313.

李庆祥, 廖捷, 徐文慧, 等. 2018. 基准气候数据及气候变化观测[M]. 北京: 气象出版社, 352pp. Li Qingxiang, Liao Jie, Xu Wenhui, et al. 2018. Baseline climate data and climate change observation(in Chinese)[M]. Beijing: China

Meteorological Press, 352pp.

Li Z X, He Y Q, Wang P Y ,et al., 2012, Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961-2008[J], *Global and Planetary Change*, 80-81: 255-272, doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.06.008.

马杰,尹姗,金荣花,等. 2021. 一次梅汛期极端降雨过程雨带位置模式预报性能对比分析 [J]. *大气科学*, 45(3): 487 - 498. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20116. Ma Jie, Yin Shan, Jin Ronghua, et al. 2021. Comparative Analysis of Forecast Evaluation for Rain Band Position in an Extreme Meiyu Rainfall Event [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3): 487 - 498 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20116

庞轶舒,周斌,祝从文,等. 2021. 西南夏季降水多因子降维客观预测方法研究 [J]. *大气科学*, 45(3): 471 - 486. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.20120. Pang Yishu, Zhou Bin, Zhu Congwen, et al. 2021. Multifactor Descending Dimension Method of Objective Forecast for Summer Precipitation in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3): 471-486. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.20120

Patwardhan A, Semenov S, Schnieder S, et al. 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[M], 779-810.

Sun J, Zhang F Q, 2017. Daily extreme precipitation and trends over China. [J], *Science China (Earth Sciences)*, 60: 2190-2203, doi: 10.1007/s11430-016-9117-8.

Trenberth, K.E. 2015. Has there been a hiatus?[J] *Nature* 349, 691-692.

韦志刚,李娴茹,刘雨佳,等,2021. 1961 -2018 年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析 [J]. *高原气象*, 40 (6) : 1513-1530. Wei Zhigang, Li Xianru,

- Liu Yujia, et al, 2021. Comparative Analysis of the Characteristics of Annual and Seasonal Extreme Precipitation in South China during 1961-2018 [J]. *Plateau Meteorology*, 40(6): 1513-1530. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk001.
- 肖栋, 李建平, 2011. 皮纳图博火山爆发对 20 世纪 90 年代初平流层年代际变冷突变的影响机理 [J]. *科学通报*, 56(4-5), 333 - 341. 763 - 778. doi: 10.1007/s11434-010-4287-9. Xiao Dong, Li Jianping. 2011, Mechanism of stratospheric decadal abrupt cooling in the early 1990s as influenced by the Pinatubo eruption[J]. *Chinese Sci Bull*, 56, doi: 10.1007/s11434-010-4287-9.
- Xiao D, Ren H L. 2022 A regime shift in North Pacific annual mean sea surface temperature in 2013/14 [J]. *Frontiers in Earth Sciences*, Under review.
- 翟盘茂, 潘晓华, 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58(增刊):1-10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica*. 58(Supplement):1-10.
- 张强, 赵煜飞, 范邵华. 2016. 中国国家级气象台站小时降水数据集研制 [J]. *暴雨灾害*, 35(2): 182-186. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.011. Zhang Qiang, Zhao Yufei, Fan Shaohua. 2016. Development of hourly precipitation datasets for national meteorological stations in China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 35(2): 182-186. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.011
- Zhang X, Hegerl G, Zwiers F W, et al, 2005. Avoiding Inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes [J]. *Journal of Climate*, 18(11):1641-1651. doi:10.1175/JCLI3366.1
- 赵煜飞, 张强, 余予. 等. 2017. 中国小时风速数据集研制及在青藏高原地区的应用 [J]. *高原气象*, 36(4): 930-938. Zhao Yufei, Zhang Qiang, Yu Wu, et al. 2017. Development of hourly wind speed dataset in China and application on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 36(4): 930-938. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00001.