

伍红雨,李芷卉,李文媛,等,2020.基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J].气象,46(6):801-812. Wu H Y, Li Z H, Li W Y, et al, 2020. Characteristics analysis of extremely severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong[J]. Meteor Mon, 46(6):801-812(in Chinese).

基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析^{*}

伍红雨^{1,2} 李芷卉¹ 李文媛¹ 郑 璟¹

1 广东省气候中心,广州 510641

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州 510641

提 要: 利用 2003—2017 年广东 2000 多个区域自动气象站逐小时降水资料,分析了不同历时的广东极端强降水的年和月变化特征,在此基础上分析汛期 4—9 月的极端强降水频次的时空分布特征。结果表明:近 15 年来,广东不同历时极端强降水出现频率的年变化趋势存在明显差异,在年以及前、后汛期,24 h 呈减少趋势;3、1 h 呈上升趋势,其中 1 h 极端强降水频率在年和后汛期呈显著增加趋势。5—6 月是广东极端强降水最易出现的时段,频次大值主要出现在粤西南阳江、江门、茂名,中部和北部的广州、清远以及粤东的汕头、揭阳等地。后汛期极端强降水主要出现在粤中南部地区,特别是南部沿海。1 h 极端强降水次数在珠江三角洲以及茂名信宜、高州等地增加趋势明显,而粤东的大部分地区为减少趋势。地形和大气环流等可能是广东极端强降水频次中心形成的重要因素。

关键词: 极端强降水,区域自动气象站,空间分布,时间变化,广东

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.007

Characteristics Analysis of Extremely Severe Precipitation Based on Regional Automatic Weather Stations in Guangdong

WU Hongyu^{1,2} LI Zhihui¹ LI Wenyuan¹ ZHENG Jing¹

1 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510641

2 Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510641

Abstract: Based on the hourly precipitation data of more than 2000 regional automatic weather stations during 2003—2017 in Guangdong, the characteristics of the annual and monthly variations of extremely severe precipitation with different durations in Guangdong were analyzed. On this basis, the spatio-temporal distributions of the frequency of extreme precipitation in the flood season from April to September were analyzed. The results showed that there are obvious differences among the annual frequency variation trends of extremely severe precipitation with different durations in Guangdong in the last 15 years. The frequency of 24 h precipitation tends to decrease in the annual, the first and the second flood seasons but those of the 3 h and 1 h precipitation increase. The frequency of 1 h extremely severe precipitation shows a significant increase in the annual and the second flood season. May—June is the most prone period for extreme precipitation in Guangdong, whose frequency is mainly found in Yangjiang, Jiangmen and Maoming in the southwest of Guangdong, Guangzhou and Qingyuan in the central and northern parts, as well as Shantou and Jieyang in the east of Guangdong. The extremely severe precipitation in the second flood season is mainly

^{*} 广东省科技计划项目(2017B020244002 和 2017B030314140),广东省气象局科技项目(GRMC2019M10 和 GRMC2017Z04)共同资助

2018 年 12 月 10 日收稿; 2019 年 10 月 11 日收修定稿

第一作者:伍红雨,主要从事气候和气候变化研究. Email:492019784@qq.com

seen in the south-central region, especially in the southern coast of Guangdong. The number of extremely severe precipitation for 1 h shows an increasing trend in the Pearl River Delta, Xinyi of Maoming and Gaozhou, while the trend for most of the eastern Guangdong decreases. Terrain and atmospheric circulation may be the important factors for the frequency center of extremely severe precipitation in Guangdong.

Key words: extremely severe precipitation, regional automatic weather station, spatial distribution, temporal variation, Guangdong Province

引 言

广东($20^{\circ}13' \sim 25^{\circ}31'N$ 、 $109^{\circ}39' \sim 117^{\circ}19'E$)地处低纬,属于亚热带、热带季风气候区。北依南岭,南邻南海,境内地势北高南低,地形复杂。广东区域山脉纵横交错,多呈东北—西南向,粤北有南岭山脉、粤东有莲花山脉、罗浮山脉和九连山脉,粤西南有云开大山。在粤西南的阳江市和茂名市境内有云雾山,其主峰大田顶的海拔高度达 1704 m,是粤西南的最高峰;在阳春、恩平、新兴境内有天露山等。暴雨形成的必备条件之一是具有丰富的水汽输送和地形及山地作用(梁必骐,1995)。在适当的大气流场和特定的地形地势配合下,广东形成强降水的水汽、热力及动力条件皆强于我国大陆其他区域,故广东暴雨发生频次之多、强度之大、季节之长皆居全国前列(林良勋等,2006)。

随着全球气候变暖,我国极端强降水平均强度和极端强降水值都有增加的趋势,极端强降水事件也趋于增多(翟盘茂等,2007),如杭州 1961—1987 年的 100 年一遇日最大降水已演变为 1988—2015 年的 50 年一遇甚至是 20 年一遇(李正泉等,2018),台风以及江淮气旋导致的极端降水在 2000 年以后更加突出(江漫和漆梁波,2016;谢惠敏等,2016;沈阳等,2019)。极端强降水事件作为一种小概率事件,具有突发性强、局地性明显的特点,且常导致洪涝灾害,已引起气象学者广泛关注(徐桂玉和杨修群,2002;杨金虎等,2008;孙继松等,2015;景丞等,2016;彭冬冬等,2016;孙婧超等,2019;李湘瑞等,2019)。极端强降水往往由中小尺度天气系统直接产生,由于这种系统时空尺度较小,因此必然会存在一些历史极端强降水事件未被国家级气象站观测到的情况(田付友等,2018)。采用区域自动气象观测站(以下简称自动站)资料进行分析可以弥补国家级常规观测资料在时间和空间上观测密度不够的缺陷,更细致地分析极端降水的特征和成因。孙继松

等(2015)利用北京地区 5 min 间隔的自动气象站降水观测资料以及雷达、卫星、探空和环流资料分析了 10 次北京不同类型的极端暴雨事件的基本特征并进行对比,重点是分析中尺度对流系统的异同。沈澄等(2015)利用自动气象站逐时降水资料分析了南京短时强降水的特征后指出,2008—2012 年南京雨强大于 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的致灾性短时强降水过程的发生次数呈显著增长的趋势,短时强降水天气的空间分布具有明显的城郊差异,城市化效应不能引起城区的局地降雨。黄元森等(2016)利用闽北逐小时雨量资料和乡镇自动站雨量资料分析了闽北前汛期强降水气候特征后指出:武夷山国家级观测站与周围乡镇自动站相关关系较好,地理位置分布相近的相关更好。

针对广东极端强降水个例,气象学者进行了很有意义的研究。何立富等(2010)利用实时地面加密观测和实况探空资料探讨“05·6”华南持续性暴雨中低纬度系统活动。程正泉等(2014)对“尤特”台风给广东带来有气象记录以来最极端的一次连续大范围强降水过程的特征和其热力学条件进行分析。孔期和林建(2017)利用常规资料和自动站资料、雷达卫星等对 2015 年 5 月 19—20 日华南地区不同性质暴雨成因进行分析。伍志方等(2018)、傅佩玲等(2018)、田付友等(2018)针对广州 2017 年 5 月 7 日出现极端强降水的区域自动站观测事实和成因等进行了分析。陈芳丽等(2018)利用区域自动站资料分析了 2018 年 8 月 30—31 日惠州惠东—汕尾陆河出现的极端强降水过程特征,并对其边界层触发条件进行分析。可见气象学者主要是利用区域自动站资料等从天气学的角度对广东极端强降水个例特征和成因进行分析。目前还没有利用区域自动站资料从气候的角度来分析广东极端强降水的时空分布特征。

对于广东或华南已有的极端降水气候特征研究,一直是采用国家级气象观测站降水资料进行。如伍红雨等(2011)利用华南 110 个国家站资料分析

华南特大暴雨后指出华南沿海和海南是大暴雨出现的大值区,广东海丰(4.0 d)和上川岛(3.9 d)进入华南大暴雨日数前三名。华南年暴雨日数呈微弱增加趋势,但不显著。陆虹等(2012)利用华南国家级气象观测站日降水资料,采用百分位法分析了华南极端强降水频次的时空变化特征,指出华南各站极端强降水频次除中部呈减少趋势外,其余大部呈上升趋势,华南区域各站极端强降水频次的平均序列也呈不显著上升趋势。陈冰等(2018)利用茂名地区5个国家站逐日降水资料分析了茂名极端强降水的时空分布特征,指出极端降水事件均较集中在汛期,6月为高峰,茂名地区极端降水总量、频数以及强度均呈增加趋势,年际变化明显。

由于国家级观测站少,分辨率低,降水的极端性会被低估。2003年后广东大力建设区域自动气象观测站,到2017年已有2099个有效数据的自动观测站,站点加密后,新的乡镇自动气象站观测到很多的极端强降水。如受季风低压影响,2018年8月27日至9月1日,广东省出现了持续强降水过程(即“18·8”特大暴雨洪涝灾害过程),惠州高潭镇录得1056.7 mm的24 h雨量(8月30日05时至31日05时)和1394.6 mm的过程累积雨量(8月27日20时至9月1日20时),均刷新了广东省历史极值,这次极端强降水过程造成珠江三角洲和粤东部分地市遭受严重洪涝灾害。所以有必要采用空间分辨率达5~10 km的2003—2017年广东两千多个区域自动气象站的逐时降水观测资料,对不同历时(1、3和24 h)的广东极端强降水在年、月时间变化特征进行分析,在此基础上分析广东汛期(4—9月)逐月的空间分布特征和重点月(5—8月)的旬分布特征,以此得到空间分辨率达到乡镇,时间分辨率为小时的广东精细化极端强降水的时空特征及变化,这是对广东国家气象观测站强降水分析的补充,也是当前防灾减灾和气象决策服务的迫切需求,具有重要的现实和科学意义。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料是广东省气候中心整理的2003年1月1日至2017年12月31日广东区域自动站小时降水资料,24 h降水统计时段为20时至次日

20时。2003年广东自动站(这里仅指有效降水记录的站点)只有469个,以后逐年增加,2013—2017年就达2000个以上(图1),2016年、2017年达到2099个,但有部分自动站存在资料缺测、资料错误等问题,因此对所有自动站降水资料采用界值、时间、空间等一致性检查进行了分析、处理和剔除。区域自动站的间距在5~10 km,密度较大,空间分布比较均匀,在珠江口附近更为稠密(图2),可以有效地监测到时空分辨率较小的短时极端强降水过程。

对自动站降水资料的处理具体如下。

(1) 界限值检查

根据2003—2017年广东区域自动站资料的统计核对分析和实际业务、服务的分析结果,广东1 h降水量最大值为184.4 mm,出现在2017年5月7日广州增城新塘镇;广东3 h降水量最大值382.6 mm,也是出现在广州增城新塘镇;广东日降水量(20时至

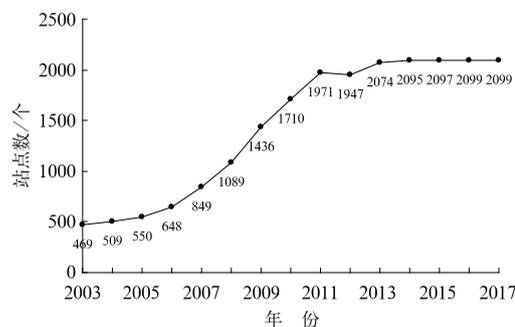


图1 2003—2017年广东区域自动站点数变化

Fig. 1 The number change of regional automatic weather stations in Guangdong during 2003—2017

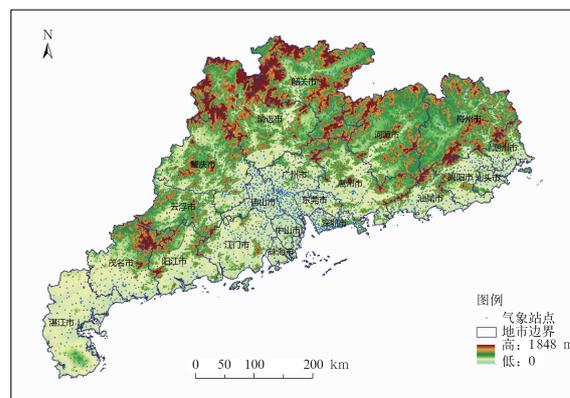


图2 广东地形高度和区域自动站分布

Fig. 2 Terrain height and regional automatic weather stations in Guangdong

次日 20 时)最大值为 707.6 mm,出现在 2010 年 9 月 21 日茂名高州市马贵镇。对广东区域自动站 1、3、24 h 的极端强降水量的界限值范围分别设置为:50~184.4 mm、120~382.6 mm、250~707.6 mm。统计设置的控制界限对于界限以外的资料是作为可疑值被标注或作为错误值而被剔除(任芝花等,2005)。所以对本界限值的设定,是与邻近站、历史档案、实况灾情等进行了反复核对后确定的。

(2) 时间一致性检查

由于降水的时间非连续性很强,对通过了界限值检查的数据再进行时间一致性检查,发现小时降水 2 h 及以上连续无变化的数据核实后剔除;同时由于小时降水量在 50 mm 以上,持续时间最长超过 6 h 以上的数据给予剔除,因为自动站小时极端强降水持续时间最长就是 6 h。统计持续时间超过 4 h 的极端强降水过程有 26 次,逐一和同期的国家级观测站资料以及降水实况过程进行核对,删掉 4 次,得到小时极端强降水持续时间为 4 h 或以上的过程有 22 次。

(3) 空间一致性检查

对通过界限值检查、时间一致性检查的数据,参照任芝花等(2010)的方法对邻近站点的选择和邻近站数据进行比较,剔除未通过数据。

通过以上界限值检查、时间、空间的一致性检查,得到的数据再和国家站的数据、实际的暴雨过程进行比较,从 14 676 个 1 h 极端强降水原始数据,剔除 413 个,最终得到 14 263 个,正确率 98.2%,这与任芝花等(2010)对 2006—2009 年全国自动站小时降水资料的正确率(98.6%)相近。从 2 343 个 3 h 极端强降水原始数据,剔除 6 个,最终得到 2 337 个,正确率 99.7%;从 852 个 24 h 极端强降水原始数据,剔除 20 个,最终得到 832 个,正确率 97.7%。可见,区域自动站极端强降水的 3 个系列数据正确率均在 97.7% 以上,能客观反映极端强降水的特征。

1.2 方法

1.2.1 极端强降水相关定义

1) 极端强降水的定义

本文分析的 1、3、24 h 的广东极端强降水的标准分别定义为:1 h 降雨量 ≥ 50 mm,3 h 降雨量 ≥ 120 mm,24 h 降雨量 ≥ 250 mm。

2) 极端强降水多年平均频次

分别对每个自动站计算 24 h(20 时至次日 20 时)、3、1 h 极端强降水的多年平均次数(频次),即对每个站分别统计 3 个历时的极端强降水的次数除以该站的总年数。这样消除了自动站建站时间长短不一对极端强降水计数的影响。此外,为减少统计误差,建站时间不到 5 年的站点不参加统计。

3) 极端强降水频率

由于逐年自动站的站数有变化,我们分别对广东 1、3、24 h 这 3 种历时出现极端强降水的总次数与对应的年份自动站总站数点的比值(%)分别定义为这 3 个历时极端强降水出现频率。用逐月发生的极端强降水次数占年总次数的比值(%)来分析极端强降水的月变化特征。此外,还分析了前汛期(4—6 月),后汛期(7—9 月)和重点月(5—8 月)的旬变化特征。

1.2.2 方法

本文采用线性趋势分析、计算气候趋势系数等方法对广东极端强降水的时空特征及变化进行研究,方法详见施能等(1995)和施能(1996;2009)。

2 结果分析

2.1 广东极端强降水的年变化

2.1.1 广东区域平均的极端强降水年变化

从 2003—2017 年广东极端强降水站点出现频率在年(图 3a)、前汛期(图 3b)、后汛期(图 3c)逐年变化可见,都存在显著的年际变化。24 h 极端强降水出现频率在 2008 年最高,这与 2008 年广东出现史上最强“龙舟水”(王婷等,2008),暴雨日数最多(伍红雨等,2011;刘雨佳等,2017)相吻合。近 15 年来,频率最高的前 5 年中 3 年均出现在 2012 年以来,说明 2012 年以来广东极端强降水出现频繁。不同历时的极端强降水出现的年变化(图 3a)和前汛期(图 3b)的变化很相似,说明汛期极端强降水出现的频率是前汛期明显大于后汛期。

统计表明,2003—2017 年平均的前汛期出现极端强降水频率为 2.33%,后汛期为 1.36%。前汛期大于后汛期。计算极端强降水发生的频率在年、前、后汛期三个系列的相关系数得到,年系列和前汛期系列的相关系数为 0.89,通过了 0.001 显著性水平

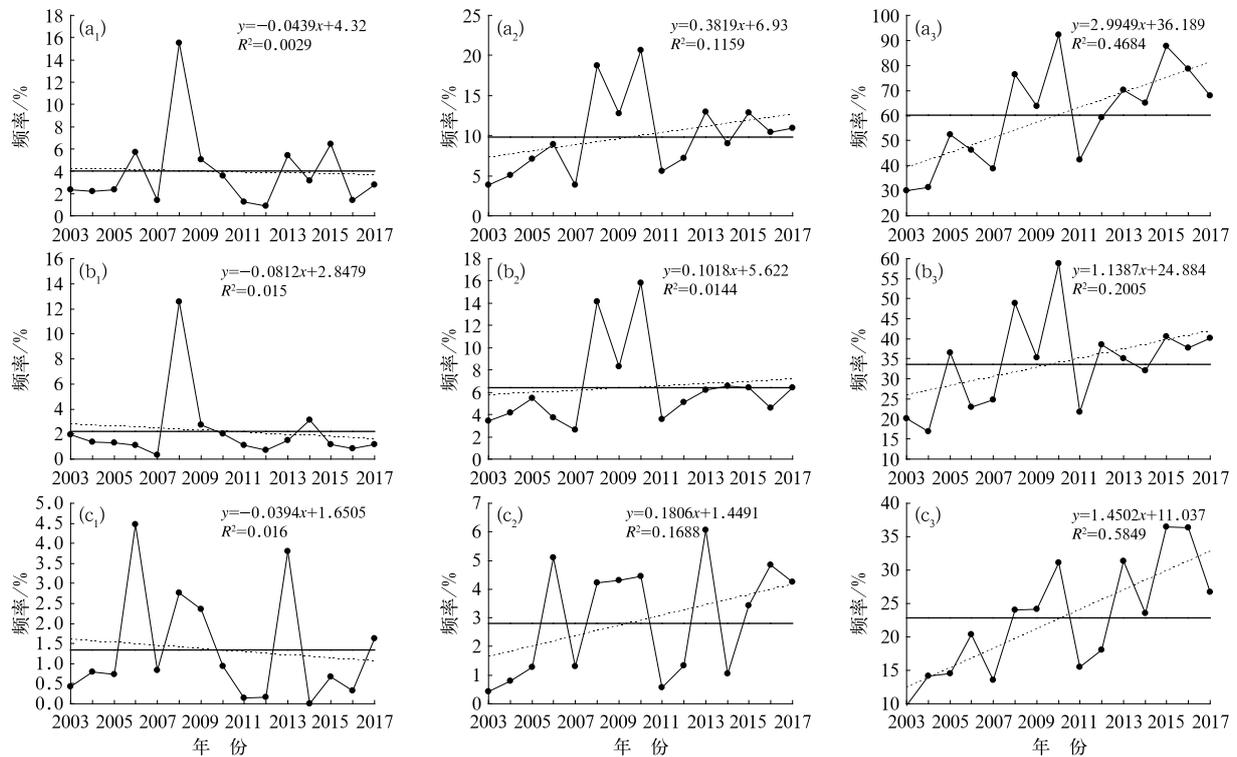


图 3 2003—2017 年广东极端强降水站点出现频率在年(a),前汛期(b),后汛期(c)的逐年变化
(a₁, b₁, c₁) 24 h, (a₂, b₂, c₂) 3 h, (a₃, b₃, c₃) 1 h

Fig. 3 Frequency variation of the extremely severe precipitation stations in Guangdong during 2003—2017
for (a) annual, (b) the first flood season, (c) the second flood season
(a₁, b₁, c₁) 24 h, (a₂, b₂, c₂) 3 h, (a₃, b₃, c₃) 1 h

检验,相关性非常显著;年系列和后汛期系列的相关系数为 0.57,通过了 0.05 显著性水平检验,相关性显著;而前、后汛期系列的相关系数为 0.25,没有通过 0.05 显著性水平检验,相关性不显著。

从 2003—2017 年不同历时的广东极端强降水出现频率的趋势系数(表 1)可见,1 h 广东极端强降水出现频率在年及后汛期的趋势系数分别为 0.68、0.76,通过 0.01 显著性水平检验,增加趋势明显,特别是后汛期还通过了 0.001 的显著性水平检验,增加趋势非常明显;在年以及前、后汛期,24 h 极端强降水出现频率呈减少趋势,但不显著,这与伍红雨等(2011)分析指出的华南暴雨日数变化趋势不明显相一致。3 h 极端强降水出现频率呈不显著的上升趋势,

2.1.2 站点 1 h 极端强降水年次数的趋势变化

计算广东 469 个自动站 2003—2017 年 1 h 极端强降水的年次数的趋势系数,得到其趋势系数分布如图 4,趋势系数介于 -0.48~0.75。469 个有 310 个自动站(占 66%)的趋势系数为正趋势,8 个

自动站(占 2%)无变化趋势(趋势系数为 0),150 个自动站(占 32%)的趋势系数为负趋势。其中有 26 个自动站的趋势系数介于 0.54~0.75,通过 0.05 的显著性水平检验,增加趋势明显。趋势系数最大出现在深圳福田区(0.75),其次是佛山高明名城镇(0.74),第三是江门开平赤水镇(0.70),第四是清远英德犀牛镇(0.69),第五是江门台山端芬镇(0.69),第六是茂名信宜合水镇(0.67)。从图 4 可见,通过 0.05 显著性水平检验的区域站主要位于珠江三角洲以及茂名信宜、高州等地。趋势系数为正,即小时极端强降水次数有增加趋势的区域主要位于珠江三角洲及以西的大部分地区,而粤东的大部分地区为减少趋势,大部分自动站的趋势系数均没有通过 0.05 显著性水平检验,变化趋势不明显。可见珠江三角洲城市化的发展导致极端强降水增加的趋势比广东其余地区大,这与王萃萃和翟盘茂(2009)对我国大城市极端降水的分析结果一致,与聂安祺等(2011)指出珠江三角洲城市化效应会导致极端降水增多一致。

表 1 不同历时的广东极端强降水出现频率的趋势系数

Table 1 Trend coefficient of the frequency of extremely severe precipitation with different durations in Guangdong

| 历时/h | 趋势系数 | | |
|------|----------|-----------|-----------|
| | 年(1—12月) | 前汛期(4—6月) | 后汛期(7—9月) |
| 24 | -0.05 | -0.12 | -0.13 |
| 3 | 0.34 | 0.12 | 0.41 |
| 1 | 0.68 | 0.45 | 0.76 |

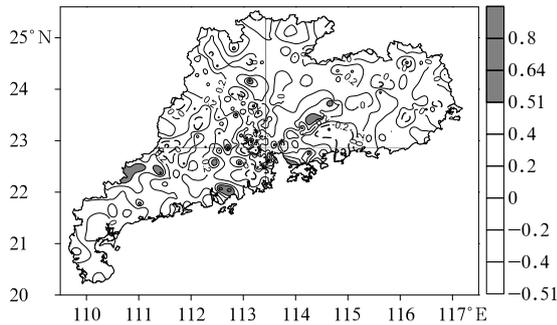


图 4 2003—2017 年广东自动站 1 h 极端强降水年次数的变化趋势系数分布 (阴影区为通过 0.05 显著性水平检验的地区)

Fig. 4 Distribution of variation trend coefficient for 1 h extremely severe precipitation at automatic weather stations in Guangdong during 2003—2017 (Shaded areas have reached the significance level test of 0.05)

2.2 广东极端强降水最大值的年变化

由于洪涝损失与极端降水量密切相关,下面分析 2003—2017 年广东不同历时极端强降水最大值的逐年变化。如图 5 可见,近 15 年来,24 h(图 5a)、

3 h(图 5b)、1 h(图 5c)的极端强降水最大值的年际变化明显,3 和 1 h 的变化图非常相似。24 h 降水量最大值出现在 2010 年 9 月 21 日茂名高州马贵镇(707.6 mm);第二是 2013 年 8 月 16 日,惠东高潭镇(682.7 mm),近 15 年平均为 514.9 mm。近 15 年 24 h 极端降水量年最大值以 $60.50 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率增加,趋势系数为 0.25,没有通过 0.05 显著性水平检验,增加趋势不明显。对于 3 h 和 1 h 的降水最大值均出现在广州增城新塘镇,分别为 382.6 mm(出现在 2017 年 5 月 7 日 06—08 时)和 184.4 mm(出现在 2017 年 5 月 7 日 06 时),最小值均出现在 2003 年,分别为 166.0 和 97.3 mm。近 15 年来,3、1 h 的极端降水量的年最大值分别以 $94.0、31.08 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率增加,趋势系数分别为 0.68 和 0.63,均通过 0.05 显著性水平检验,增加趋势明显。可见,1、3 h 极端强降水的年最大值都呈显著增加的趋势,而 24 h 极端强降水增加不明显。

同期 2003—2017 年,广东国家气象观测站 24 h 最大降水量(566.3 mm)出现在 2013 年 6 月 11 日的台山上川岛;梅州市平远县气象观测站在 2009 年 6 月 22 日 07—09 时记录得广东 3 h 最大降水量为

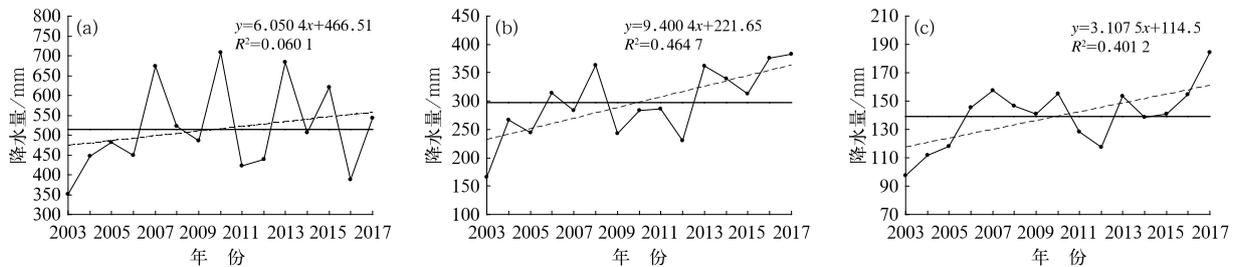


图 5 广东极端强降水最大值的年变化

(a) 24 h, (b) 3 h, (c) 1 h

Fig. 5 Annual variation of the maximum values of extremely severe precipitation in Guangdong during 2003—2017

(a) 24 h, (b) 3 h, (c) 1 h

247.4 mm,其中09时记录得1 h最大降水量为138.9 mm。可见观测站加密后,区域自动站比国家站观测到的24 h最大降水量多了141.3 mm,3 h多了135.2 mm,1 h多了45.5 mm。说明加密的区域自动站有利于观测到更加极端的降水,而国家观测站点相对区域自动站站点稀少,观测到降水的极端性会受到低估。

2.3 广东极端强降水的月变化

以2003—2017年各月发生极端强降水次数占年总次数的频率(%)来分析极端降水的月变化。

2.3.1 24 h 极端强降水

2003—2017年广东自动站出现24 h极端强降水共831次,其中汛期(4—9月)出现709次,占总次数的85.32%,前汛期出现443次,占53.31%;后汛期出现266次,占32.01%。非汛期(10月至次年3月)仅出现122次,占14.68%。从广东24 h极端强降水频率的月变化(图6)可见,6月出现的频率最高(27.32%),这与陆虹等(2012)对华南国家级观测站极端强降水频次的月分布分析后指出6月极端强降水最多,徐明等(2016)对华南前汛期暴雨过程统计结果指出6月最多,刘雨佳等(2017)指出在月分布上,6月暴雨日数最多相吻合。其次是5月(24.19%),第三是8月(17.33%),最小出现在2月和12月,仅为0.12%。说明24 h区域强降水出现的月变化与广东前、后汛期降水特征有关,第一个峰值对应广东“龙舟水”,第二个峰值对应广东后汛期的8月,因为8月影响广东台风最多,导致极端强降水也最多。

2.3.2 3 h 极端强降水

2003—2017年广东自动站共发生3 h极端强降水共2336次,其中汛期发生了2150次,占总次数的92.04%,其中62.54%出现在前汛期,29.55%出现在后汛期。从其月变化(图6)可见,5月出现的频率最高(34.46%),其次是6月(22.47%),第三是8月(13.18%),1月和12月没有出现过3 h极端强降水。可见3 h与24 h极端强降水月变化存在异同,最大峰值24 h出现在6月,而3 h出现在5月,而次峰值均出现在8月。

2.3.3 1 h 极端强降水

2003—2017年广东自动站共发生1 h极端强降水共14263次,其中汛期发生了13317次,占总

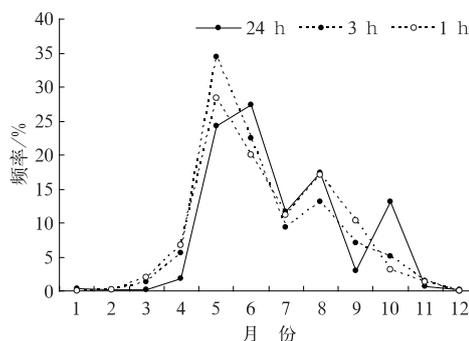


图6 2003—2017年广东极端强降水出现频率的月变化

Fig. 6 Monthly frequency variation of extremely severe precipitation in Guangdong during 2003—2017

次数的93.37%。55.01%出现在前汛期(4—6月),38.37%出现在后汛期。从其月变化(图6)可见,5月出现的频率最高(28.31%),其次是6月(20.03%),第三是8月(16.99%),第四是7月(11.13%),最少出现在1月(0.06%)。1 h极端强降水出现的月变化与3 h的变化相似,最大峰值出现在5月,次峰值出现在8月。

可见不同历时的极端强降水的月变化得到和暴雨月变化一致的结果,主峰值出现在前汛期的5月、6月,次峰值出现在后汛期的8月。

2.4 广东极端强降水频次的空间分布

2.4.1 极端强降水年平均频次在4—9月的逐月空间分布

由于不同历时的极端强降水在相同时段空间分布很相似,只是随着历时的减少,发生极端强降水的频次增加、范围增大,但强降水中心位置很相似。因此以1 h极端强降水在2003—2017年的年平均频次为例来分析其在5—9月的逐月空间分布(图7)以及在重点月5—8月的逐旬变化(图8)。

1 h极端强降水年平均频次在5月范围最大(图7a),有三个中心,分别位于粤西南沿海的台山—恩平—阳东—信宜一带;珠江口附近以及粤北的清远—佛冈一带;东南沿海的汕尾—梅州一带。6月(图7b)极端强降水的范围比5月减小,但粤东南沿海的陆丰、普宁、惠来以及汕头有强降水中心出现。7月(图7c)与6月和8月相比,是频次相对较少的月份,极端强降水主要出现在西南沿海。8月(图7d)极端强降水主要出现在中南部沿海,其中雷

州半岛为极端强降水中心。9月(图7e)是汛期极端强降水最少的月份,强降水主要出现在西南沿海,特别是雷州半岛。从全年12月(图7f)广东1h年频次的分布可见,极端强降水中心主要位于西南沿海的阳江、江门、湛江、茂名、云浮等地,以及粤东南沿海的汕尾、汕头,粤中北部的广州、清远等地。而极端强降水在粤北的韶关、清远北部、肇庆北部以及梅州、河源很少出现。

从前面的分析表明,广东极端强降水中心主要出现在西南部的云雾山和天露山南侧的江门台山和阳江阳东的乡镇,茂名信宜、湛江遂溪一带乡镇;东部的莲花山南侧的汕尾海丰到普宁的乡镇,以及位于北部南岭的清远、佛冈的乡镇。邱军等(2008)指出广东持续性暴雨中心主要位于迎风向的山前和迎

风坡,前汛期主要以沿海的恩平、阳江和斗门为中心;后汛期主要以海丰、南澳为中心。林良勋等(2006)指出广东的三大暴雨中心为:阳江市和江门市的恩平和开平一带,海丰到普宁一带,清远和龙门一带。可见极端强降水除了存在传统认知的广东三大暴雨中心外,在茂名信宜北界镇、云浮罗定分界镇、湛江遂溪县、雷州半岛还存在极端强降水中心,这是高分辨率区域自动站得到的更加细致的结果。

从2003—2017年广东1h极端强降水频次排名前10位的自动站统计(表2)可见,前10位的乡镇均位于南部沿海,其中江门台山市端芬镇、赤溪镇、川岛镇,阳江江城区埠场镇、白沙镇,阳东县大八镇;中山三乡镇;湛江遂溪县遂城镇,云浮罗定市分界镇等乡镇是极端强降水中心。水汽近距离输送且

表2 2003—2017年广东1h极端强降水频次排名前10位自动站统计
Table 2 The top 10 automatic weather stations with 1 h extremely severe precipitation frequency in Guangdong during 2003—2017

| 站号 | 镇 | 县(区) | 市 | 年平均频次 |
|-------|-----|------|----|-------|
| G6520 | 端芬镇 | 台山市 | 江门 | 3.88 |
| G2187 | 赤溪镇 | 台山市 | 江门 | 3.13 |
| G6503 | 川岛镇 | 台山市 | 江门 | 3.00 |
| G2305 | 埠场镇 | 江城区 | 阳江 | 2.67 |
| G2054 | 三乡镇 | | 中山 | 2.63 |
| G2323 | 大八镇 | 阳东县 | 阳江 | 2.60 |
| G2308 | 白沙镇 | 江城区 | 阳江 | 2.56 |
| G2479 | 遂城镇 | 遂溪县 | 湛江 | 2.50 |
| G2106 | 端芬镇 | 台山市 | 江门 | 2.47 |
| G3095 | 分界镇 | 罗定市 | 云浮 | 2.44 |

受沿海地形抬升影响,有利于极端强降水的形成,同时广东西部、北部和东北部有山脉阻挡,江门、阳江等处于迎风坡,而南面有开口,珠江三角洲喇叭口地形以及海陆风等的共同作用,从而引起局地中小尺度对流的发展,造成极端强降水的发生(林应河,1984;林良勋等,2006;周武等,2008;钟平威等,2009;徐道生等,2015),其中珠江三角洲喇叭口地形对广东暴雨有明显增强作用(孙建华和赵思雄,2002;赵玉春等,2007;李博等,2013),而沿海暖区暴雨是单一暖气团降水,雨强远高于锋面降水(王坚红等,2017),所以极端强降水前10位的乡镇中除湛江遂溪县遂城镇主要由于台风降水造成外,其他位于南部沿海的江门和阳江主要是暖区暴雨和台风暴雨所导致。而广东的暖区暴雨主要是变性高压脊后部气流辐合或者出现暖切变所产生的暴雨、强西南季

风爆发所产生的暴雨以及高空槽前和副热带急流共同作用产生的暖区暴雨(林良勋等,2006)。而中北部的清远、佛冈等地相对较小的极端强降水中心主要是锋面降水所导致。同时喇叭口地形对降水的影响与低层风向和风速、水汽辐合有关,当风速、水汽辐合达到一定的阈值,在有利的风向并与地形配合下,就会产生极端强降水天气。

2.4.2 极端强降水年平均频次在5—8月的逐旬空间分布

为了得到1h极端强降水年平均频次的详细时空变化,下面进一步分析重点月(5—8月)的逐旬空间分布(图8),可见,5月上旬到6月中旬,是广东极端强降水最易出现的时期,广东“龙舟水”(5月下旬到6月中旬)也出现在这个时段。频次大值区主要出现在粤西南阳江、江门、茂名,中部和北部的广州、

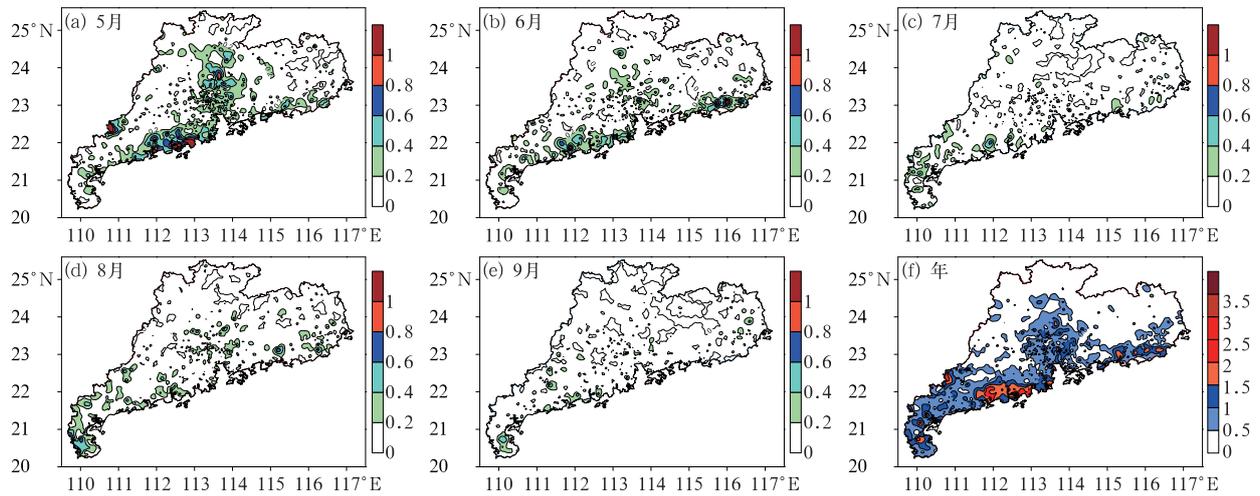


图 7 广东 1 小时极端强降水年平均频次在 5—9 月的空间分布

(a)5 月,(b)6 月,(c)7 月,(d)8 月,(e)9 月,(f)年

Fig. 7 Annual average frequencies of 1 h extremely severe precipitation in Guangdong

(a) May, (b) June, (c) July, (d) August, (e) September, and (f) years

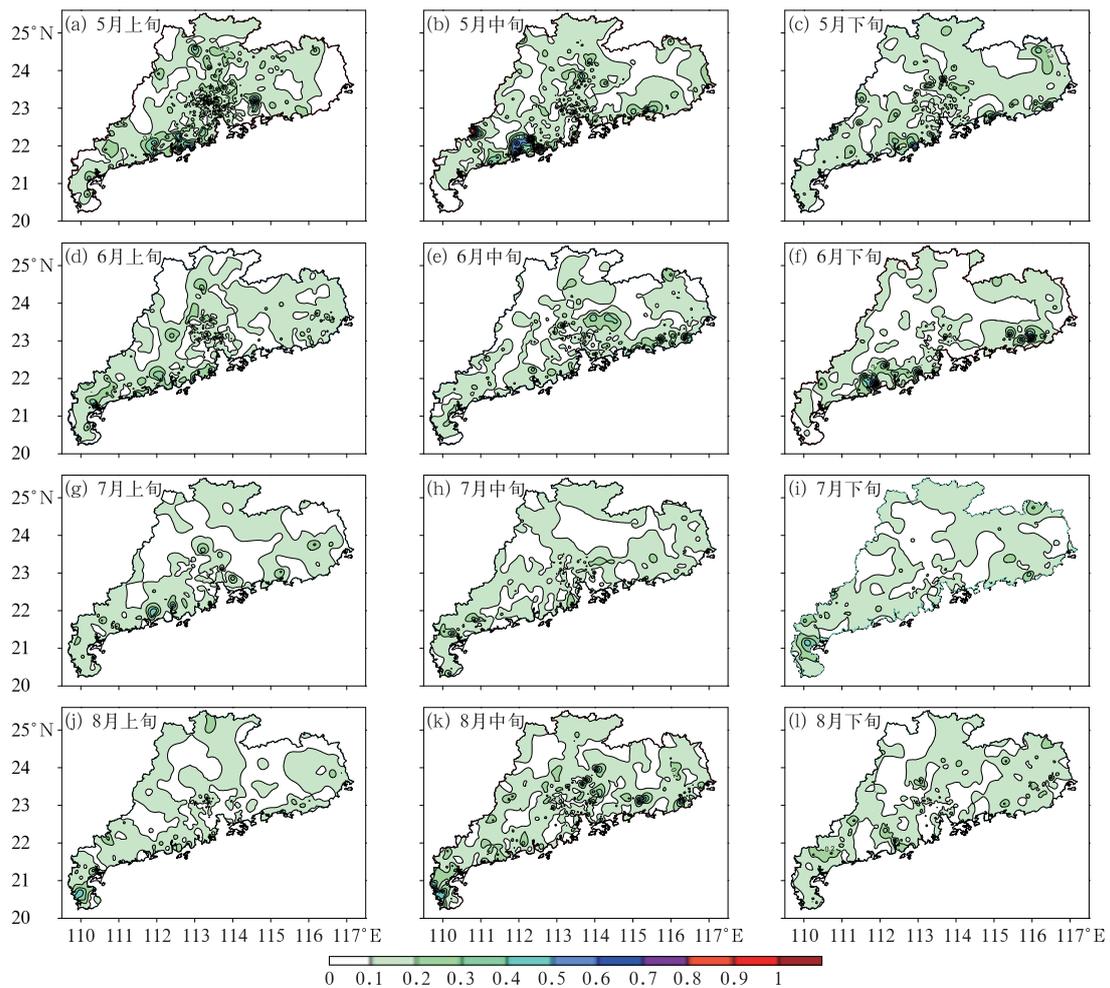


图 8 2003—2017 年广东 1 h 极端强降水频次在 5—8 月的逐旬分布

Fig. 8 Dekad frequencies of 1 h extremely severe precipitation in Guangdong from May to August during 2003—2017

清远以及粤东的汕头、揭阳等地,对应广东前汛期锋面降水、夏季风降水,而粤东北和粤北为频次小值区。旬频次最大中心也均出现在江门、台山、湛江、汕头的乡镇。年平均频次的第一个峰值出现在 5 月上旬(图 8a):中心在江门台山赤溪镇(1.0);中旬(图 8b):江门恩平(1.33);下旬(图 8c):台山赤溪镇(0.78)。6 月上旬(图 8d):江门台山赤溪镇、湛江赤坎区,均为 0.60;中旬(图 8e):汕头潮南区雷岭镇(0.75)。6 月下旬到 8 月下旬,极端强降水主要出现在广东中南部地区,特别是南部沿海,频次最大中心位于阳江、江门、茂名、湛江等的乡镇,这与后汛期广东主要受台风影响有关。6 月下旬(图 8f):中心在阳江江城区白沙镇(1.11);7 月上旬(图 8g):江门开平金鸡镇、东莞高埗镇、阳江阳东县塘坪镇,均为 0.50;7 月中旬(图 8h):江门台山川岛镇、茂名茂南区金塘镇、湛江遂溪县遂城镇,频次均为 0.5;7 月下旬(图 8i):湛江遂溪县城月镇(0.50);8 月上旬(图 8j):湛江雷州龙门镇(0.50)。年平均频次的第二个峰值出现在后汛期的 8 月中旬,这也是后汛期台风影响和登陆广东最频繁的时段(林良勋等,2006),导致广东极端强降水的出现。8 月中旬(图 8k),极端强降水频次大值主要位于湛江雷州企水镇(0.83)。8 月下旬(图 8l)频次大值中心出现在江门台山深井镇(0.45)。

3 结 论

采用广东省气候中心整理的 2003—2017 年 2000 多个广东区域自动气象站小时降水资料,详细分析了不同历时的极端强降水的时空变化特征,结果如下:

(1)广东不同历时极端强降水出现频率的年变化趋势存在明显差异,在年以及前、后汛期,24 h 呈减少趋势;3、1 h 呈上升趋势,其中 1 h 极端强降水频率在年和后汛期呈显著增加趋势。

(2)广东极端强降水出现频率存在明显的月变化。广东不同历时(24、3、1 h)极端强降水有 85%~93%发生在汛期,其中前汛期占总次数的 53%~63%,后汛期占总次数的 29%~38%。非汛期(10 月至次年 2 月)仅占总次数的 7%~14%。5 月出现的频率最高,其次是 6 月,第三是 8 月。1 月和 12 月没有出现。

(3)广东站点 1 h 极端强降水次数增加趋势的

区域主要位于珠江三角洲及以西的大部分地区,特别是珠江三角洲以及茂名信宜、高州等地增加趋势明显,而粤东的大部分地区为减少趋势,珠江三角洲城市化的发展导致极端强降水增加的趋势比广东其余地区大。

(4)近 15 来,广东 3、1 h 的极端降水量年最大值都呈显著增加的趋势,而 24 h 极端强降水增加不明显。

(5)广东极端强降水频次存在明显的区域差异。年平均频次在粤西南、东南和粤北存在三个中心。频次排名前 10 位的乡镇均位于南部沿海,其中江门台山市端芬镇、川岛镇,阳江阳东县大八镇等乡镇是极端强降水中心。极端强降水中心与近距离海上水汽输送、迎风坡,珠江三角洲喇叭口地形、海陆风等,以及风向、风速等大气环流密切相关。

(6)5—6 月是广东极端强降水最易出现的时段,频次大值主要出现在粤西南的阳江、江门、茂名,中部和北部的广州、清远以及粤东的汕头、揭阳等地,对应广东前汛期锋面降水、夏季风降水。后汛期降水主要位于中南部地区,特别是南部沿海,对应广东后汛期以台风降水为主,峰值出现在 8 月中旬。

参考文献

- 陈冰,陆卫华,宋祖钦,等,2018. 茂名地区极端降水时空分布特征分析[J]. 气象研究与应用,39(1):6-10. Chen B, Lu W H, Song Z Q, et al, 2018. Temporal and spatial distributions of extreme precipitation in Maoming area[J]. J Meteor Res Appl, 39(1): 6-10(in Chinese).
- 陈芳丽,李明华,曾丹丹,等,2018. “8·31”广东极端强降水过程边界层触发条件分析[J]. 广东气象,40(5):1-5. Chen F L, Li M H, Zeng D D, et al, 2018. Analysis of triggering conditions of the boundary layer for an extremely intense rain in Guangdong on August 31, 2018[J]. Guangdong Meteor, 40(5): 1-5(in Chinese).
- 程正泉,林良勋,沙天阳,等,2014. “尤特”特大暴雨过程的热力条件分析[J]. 气象,40(12):1507-1512. Cheng Z Q, Lin L X, Sha T Y, et al, 2014. Analysis of atmosphere stratification in extremely heavy rainfall event associated with Severe Typhoon Utor[J]. Meteor Mon, 40(12): 1507-1512(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).
- 何立富,周庆亮,陈涛,2010. “05.6”华南暴雨中低纬度系统活动及相互作用[J]. 应用气象学报,21(4):385-394. He L F, Zhou Q L,

- Chen T, 2010. The evolution characteristics of mid-latitude and low-latitude synoptic systems during the "05. 6" heavy rain event in South China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 21(4): 385-394 (in Chinese).
- 黄元森, 林毅, 陈小梅, 2016. 近50年闽北前汛期强降水气候特征分析[J]. *气象研究与应用*, 37(S1): 56-58. Huang Y S, Lin Y, Chen X M, 2016. Analysis of climatic characteristics of heavy rain in the flood season in North Fujian in the past 50 years[J]. *J Meteor Res Appl*, 37(S1): 56-58 (in Chinese).
- 江漫, 漆梁波, 2016. 1959—2012年我国极端降水台风的气候特征分析[J]. *气象*, 42(10): 1230-1236. Jiang M, Qi L B, 2016. Analysis on climatic characteristics of extreme precipitating typhoon in China during 1959—2012[J]. *Meteor Mon*, 42(10): 1230-1236 (in Chinese).
- 景丞, 姜彤, 王艳君, 等, 2016. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. *气象学报*, 74(4): 572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al, 2016. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China [J]. *Acta Meteor Sin*, 74(4): 572-582 (in Chinese).
- 孔期, 林建, 2017. 2015年5月19—20日华南地区不同性质暴雨成因和预报分析[J]. *气象*, 43(7): 792-803. Kong Q, Lin J, 2017. Analysis on causes and forecasts of the torrential rainfall with different features over South China during 19 to 20 May 2015 [J]. *Meteor Mon*, 43(7): 792-803 (in Chinese).
- 李博, 刘黎平, 赵思雄, 等, 2013. 局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验[J]. *高原气象*, 32(6): 1638-1650. Li B, Liu L P, Zhao S X, et al, 2013. Numerical experiment of the effect of local low terrain on heavy rainstorm of South China[J]. *Plateau Meteor*, 32(6): 1638-1650 (in Chinese).
- 李湘瑞, 范可, 徐志清, 2019. 2000年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征[J]. *大气科学*, 43(5): 1109-1124. Li X R, Fan K, Xu Z Q, 2019. Decrease in extreme precipitation in Summer over east northern China and the water-vapor transport characteristics after year 2000 [J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(5): 1109-1124 (in Chinese).
- 李正泉, 宋丽莉, 梁卓然, 等, 2018. 杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J]. *气象*, 44(6): 781-789. Li Z Q, Song L L, Liang Z R, et al, 2018. Precipitation characteristics and projection of extreme precipitation trend in Hangzhou City [J]. *Meteor Mon*, 44(6): 781-789 (in Chinese).
- 梁必骐, 1995. 天气学教程[M]. 北京: 气象出版社: 544-545. Liang B Q, 1995. *Weather Course* [M]. Beijing: China Meteorological Press: 544-545 (in Chinese).
- 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等, 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社: 86-149. Lin L X, Feng Y R, Huang Z, et al, 2006. *Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province* [M]. Beijing: China Meteorological Press: 86-149 (in Chinese).
- 林应河, 1984. 地形对两阳、清远、海陆丰前汛期暴雨的作用[J]. *热带地理*, 4(1): 30-37. Lin Y H, 1984. The terrain effect on rainstorm in Sanyang, Yangjiang, Qingyuan and Hailufeng in the flood season [J]. *Trop Geogr*, 4(1): 30-37 (in Chinese).
- 刘雨佳, 张强, 余予, 2017. 华南地区1961—2014年暴雨及典型暴雨事件统计分析[J]. *暴雨灾害*, 36(1): 26-32. Liu Y J, Zhang Q, Yu Y, 2017. Analysis of heavy rain and typical torrential rain event in southern China during 1961—2014 [J]. *Torr Rain Dis*, 36(1): 26-32 (in Chinese).
- 陆虹, 陈思蓉, 郭媛, 等, 2012. 近50年华南地区极端强降水频次的时空变化特征[J]. *热带气象学报*, 28(2): 219-227. Lu H, Chen S R, Guo Y, et al, 2012. Spatio-temporal variation characteristics of extremely heavy precipitation frequency over South China in the last 50 years [J]. *J Trop Meteor*, 28(2): 219-227 (in Chinese).
- 聂安祺, 陈星, 冯志刚, 2011. 中国三大城市带城市化气候效应的检测与对比[J]. *气象科学*, 31(4): 372-383. Nie A Q, Chen X, Feng Z G, 2011. Detection and comparison of effect of urbanization on climate in three mega city agglomerations of China [J]. *J Meteor Sci*, 31(4): 372-383 (in Chinese).
- 彭冬冬, 周天军, 邹立维, 等, 2016. FGOALS-g2模式模拟和预估的全球季风区极端降水及其变化[J]. *大气科学*, 40(5): 1059-1072. Peng D D, Zhou T J, Zou L W, et al, 2016. The FGOALS-g2 simulation of global monsoon extreme precipitation and future projection [J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(5): 1059-1072 (in Chinese).
- 邱军, 李江南, 梁毅进, 等, 2008. 广东省持续性暴雨的气候特征[J]. *热带地理*, 28(5): 405-410. Qiu J, Li J N, Liang Y J, et al, 2008. The climatic characteristics of persistent rainstorm in Guangdong [J]. *Trop Geogr*, 28(5): 405-410 (in Chinese).
- 任芝花, 刘小宁, 杨文霞, 2005. 极端异常气象资料的综合性质量控制与分析[J]. *气象学报*, 63(4): 526-533. Ren Z H, Liu X N, Yang W X, 2005. Complex quality control and analysis of extremely abnormal meteorological data [J]. *Acta Meteor Sin*, 63(4): 526-533 (in Chinese).
- 任芝花, 赵平, 张强, 等, 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J]. *气象*, 36(7): 123-132. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al, 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. *Meteor Mon*, 36(7): 123-132 (in Chinese).
- 沈澄, 颜廷柏, 刘冬晴, 等, 2015. 2008—2012年南京短时强降水特征分析[J]. *气象与环境学报*, 31(1): 28-33. Shen C, Yan T B, Liu D Q, et al, 2015. Characteristics of short-time heavy precipitation from 2008 to 2012 in Nanjing [J]. *J Meteor Environ*, 31(1): 28-33 (in Chinese).
- 沈阳, 孙燕, 蔡凝昊, 等, 2019. 一次引发极端降水事件的江淮气旋发生发展分析[J]. *气象*, 45(2): 166-179. Shen Y, Sun Y, Cai N H, et al, 2019. Analysis on the generation and evolution of a Jianghuai cyclone responsible for extreme precipitation event [J]. *Meteor Mon*, 45(2): 166-179 (in Chinese).
- 施能, 1996. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系[J]. *气象学报*, 54(6): 675-683. Shi N, 1996. Secular variation of winter atmospheric teleconnection pattern in the Northern Hemisphere and its relation with China's climate

- change[J]. *Acta Meteor Sin*, 54(6):675-683(in Chinese).
- 施能, 2009. 气象统计预报[M]. 北京: 气象出版社: 30-34, 229-234.
- Shi N, 2009. *Meteorological Statistical Forecast* [M]. Beijing: China Meteorological Press: 30-34, 229-234(in Chinese).
- 施能, 陈家其, 屠其璞, 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. *气象学报*, 53(4): 431-439. Shi N, Chen J Q, Tu Q P, 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. *Acta Meteor Sin*, 53(4): 431-439(in Chinese).
- 孙继松, 雷蕾, 于波, 等, 2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. *气象学报*, 73(4): 609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing Area[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(4): 609-623(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J]. *大气科学*, 26(5): 633-646. Sun J H, Zhao S X, 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall in South China part II: effect of physical processes, initial environmental fields and topography on meso- β convective system[J]. *Chin J Atmos Sci*, 26(5): 633-646(in Chinese).
- 孙婧超, 管兆勇, 李明刚, 等, 2019. 华南地区 7—10 月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比[J]. *气象学报*, 77(1): 43-57. Sun J C, Guan Z Y, Li M G, et al, 2019. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extremes over South China from July to October[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(1): 43-57(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. *气象*, 44(4): 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4): 469-484(in Chinese).
- 王萃萃, 翟盘茂, 2009. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析[J]. *气候与环境研究*, 14(5): 553-560. Wang C C, Zhai P M, 2009. Changes of precipitation extremes in China's large cities[J]. *Clima Environ Res*, 14(5): 553-560(in Chinese).
- 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等, 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. *大气科学*, 41(4): 784-796. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al, 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(4): 784-796(in Chinese).
- 王婷, 胡娅敏, 潘蔚娟, 2008. 2008 年广东“史上最龙舟水”的气候成因[J]. *广东气象*, 30(4): 5-7. Wang T, Hu Y M, Pan W J, 2008. Climate causation analysis of the strongest Dragon-boat precipitation in Guangdong Province in 2008 [J]. *Guangdong Meteor*, 30(4): 5-7(in Chinese).
- 伍红雨, 杜尧东, 秦鹏, 2011. 华南暴雨的气候特征及变化[J]. *气象*, 37(10): 1262-1269. Wu H Y, Du Y D, Qin P, 2011. Climate characteristics and variation of rainstorm in South China[J]. *Meteor Mon*, 37(10): 1262-1269(in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良助, 等, 2018. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. *气象*, 44(4): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4): 485-499(in Chinese).
- 谢惠敏, 任福民, 李国平, 等, 2016. 超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用[J]. *气象*, 42(2): 156-165. Xie H M, Ren F M, Li G P, et al, 2016. Role of Supper Typhoon Danas in the extreme precipitation caused by Severe Typhoon Fitow[J]. *Meteor Mon*, 42(2): 156-165(in Chinese).
- 徐道生, 陈子通, 谢东东, 等, 2015. 地形效应引起的局地扰动对华南降水预报的影响研究[J]. *热带气象学报*, 31(2): 173-181. Xu D S, Chen Z T, Xie D D, et al, 2015. Influence of local perturbation induced by orographic effect on forecast of precipitation in South China[J]. *J Trop Meteor*, 31(2): 173-181(in Chinese).
- 徐桂玉, 杨修群, 2002. 我国南方暴雨一些气候特征的统计分析[J]. *气候与环境研究*, 7(4): 447-456. Xu G Y, Yang X Q, 2002. Climatic features of rainstorm days in South China[J]. *Clim Environ Res*, 7(4): 447-456(in Chinese).
- 徐明, 赵玉春, 王晓芳, 等, 2016. 华南前汛期持续性暴雨统计特征及环流分型研究[J]. *暴雨灾害*, 35(2): 109-118. Xu M, Zhao Y C, Wang X F, et al, 2016. Statistical characteristics and circulation pattern of sustained torrential rain during the pre-flood season in South China for recent 53 years[J]. *Torr Rain Dis*, 35(2): 109-118(in Chinese).
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等, 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 13(1): 75-83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al, 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China[J]. *Clim Environ Res*, 13(1): 75-83(in Chinese).
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威, 2007. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 3(3): 144-148. Zhai P M, Wang C C, Li W, 2007. A review on study of change in precipitation extremes[J]. *Adv Clim Change Res*, 3(3): 144-148(in Chinese).
- 赵玉春, 李泽榕, 肖子牛, 等, 2007. 一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值研究[J]. *气象学报*, 65(4): 561-577. Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N, et al, 2007. A diagnostic and numerical study on a rainstorm in South China triggered by northward-moving tropical system[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(4): 561-577(in Chinese).
- 钟平威, 陈敏, 孙喜艳, 2009. 海丰县暴雨的气候特征[J]. *广东气象*, 31(3): 26-28. Zhong P W, Chen M, Sun X Y, 2009. Climate features of rainstorm in Haifeng[J]. *Guangdong Meteor*, 31(3): 26-28(in Chinese).
- 周武, 黄小丹, 黄忠, 等, 2008. 阳江地区海陆风特征及其影响[J]. *气象*, 34(12): 44-53, 132. Zhou W, Huang X D, Huang Z, et al, 2008. The characteristic of sea-land breeze in Yangjiang area and its impact on precipitation and temperature[J]. *Meteor Mon*, 34(12): 44-53, 132(in Chinese).