

伍红雨,李春梅,刘蔚琴,2017. 1961—2014 年广东小时强降水的变化特征[J]. 气象,43(3):305-314.

# 1961—2014 年广东小时强降水 的变化特征<sup>\* 1</sup>

伍红雨<sup>1,2</sup> 李春梅<sup>1</sup> 刘蔚琴<sup>1</sup>

1 广东省气候中心, 广州 510640

2 中国气象局广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510640

**提 要:** 利用 1961—2014 年广东 32 个气象观测站逐小时降水资料, 采用线性趋势分析、Mann-Kendall 检验、功率谱分析、计算趋势系数等统计诊断方法, 分析了广东小时强降水在年以及前、后汛期的气候特征及变化。结果表明, 广东年、前、后汛期多年平均小时强降水的次数、强度、降水量和贡献率的空间分布均呈沿海向内陆递减。近 54 年来, 广东平均小时强降水的次数、强度、降水量和贡献率在年以及前、后汛期的时间尺度上均为显著上升的趋势, 与同期广东年暴雨次数和年降水变化无明显差异。广东大部分测站小时强降水量均呈增加的趋势, 其中珠三角增加最为显著。近 54 年来广东年和前汛期小时强降水次数存在 3.7 年和 22 年、后汛期存在 3 年左右的显著周期震荡。广东年和后汛期小时强降水次数在 1993—1994 年发生增加的突变, 前汛期小时强降水次数没有突变发生。

**关键词:** 小时强降水, 变化特征, 广东, Mann-Kendall 检验, 功率谱分析

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.006

## Variation Characteristics of Hourly Heavy Precipitation in Guangdong During 1961—2014

WU Hongyu<sup>1,2</sup> LI Chunmei<sup>1</sup> LIU Weiqin<sup>1</sup>

1 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510640

2 Guangdong Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510640

**Abstract:** Based on the hourly precipitation data of 32 meteorological observational stations in Guangdong during 1961—2014, the climatic characteristics and variation of hourly heavy precipitation in annual, the pre- and latter flood season in Guangdong were studied by using statistical diagnostic methods, such as linear regression analysis, Mann-Kendall test, power spectrum analysis and the computation of trend coefficients. The results showed that the mean hourly heavy precipitation hours, intensity, precipitation and contribution in annual, the pre- and latter flood season in Guangdong has a decreasing trend from coastal regions to inland. The change of annual torrential rain days and precipitation is not obvious in the same time. There are obvious differences among the annual hourly heavy precipitation hours and torrential rain days or precipitation. The hourly heavy precipitation hours at most stations in Guangdong has increased obviously, especially in Pearl River Delta. The changes of hourly heavy precipitation hours in annual or the pre-flood season in Guangdong have 3.7 and 22 year periods, and 3 year period in the latter flood season. The hourly heavy precipitation hours in annual and the latter flood season in Guangdong has an abrupt change in 1993—1994, but which is in the pre-flood has not an abrupt change.

\* 广东省气象局科技项目(2014B04)、广东省水利科技创新项目(2016-31)、广东省气候中心项目(QH201508)和广东省农业厅项目(201501)共同资助

2016 年 4 月 13 日收稿; 2016 年 8 月 16 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: wuhy@grmc.gov.cn

**Key words:** hourly heavy precipitation, climate characteristic, Guangdong, Mann-Kendall test, power spectrum analysis

## 引 言

全球气候变暖导致极端天气气候事件显著增多,其中暴雨、洪涝、滑坡、泥石流等自然灾害不仅与降水量有关,还与降水强度密切相关,尤其是短时间的强降水事件具有突发性强,小时雨强大等特点,常常导致城市内涝、山洪、泥石流等地质灾害。如 2010 年 8 月 7 日晚甘肃舟曲县发生突发性强降雨,其中 22:00—23:00 降雨量达 77.3 mm,引发特大山洪泥石流,造成 1400 多人死亡(曲晓波等,2010)。2010 年 5 月 7 日广州大暴雨,降水仅持续了 6 h,降水量达 213 mm,最大小时雨量 99.1 mm,导致严重的城市内涝,直接经济损失约 5.4 亿元(伍志方等,2011)。2008 年 6 月 13 日深圳出现大暴雨,最大小时雨量 96.8 mm,深圳出现大面积水浸,直接经济损失超 5 亿元(陈元昭等,2016)。华南是我国年降水量最多的区域,暴雨次数多,强度强,因此华南暴雨一直是关注和研究的重点,气象学者对华南和广东暴雨进行了很多研究并取得有意义的成果(余功梅,1996;李江南等,2002;彭丽英等,2006;郑彬等,2006;2007;李晓娟等,2012;林爱兰等,2013;2015;寿亦萱等,2014;钟权加等,2016),但过去的研究大多是从日、月、年的时间尺度对华南、广东的暴雨进行研究,而从小时的角度,特别是利用近几年广东站点长序列小时雨量资料来研究强降水特征和变化则没有看到,主要是由于小时降水资料的不完善和未处理,因此本文利用 1961—2014 年广东小时降水资料研究强降水的气候特征和变化,这是对日、月、年降水分析的补充,同时也是当前防灾减灾以及气象服务的迫切需求。

## 1 资料与方法

采用广东省气候中心整理的 1961 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日广东 32 个气象观测站逐小时降水资料。本文把单站 1 h 降水量超过 20 mm 定义为一次小时强降水事件,小时强降水次数定义为出现小时强降水事件的次数,即小时数(单位:h);小时强降水量定义为所有小时强降水事件降水量的

总和(单位:mm)。小时强降水强度定义为所有小时强降水事件降水量与次数(小时数)之比,单位即  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;小时强降水量的贡献率为小时强降水量与同期降水总量之比(单位:%)。考虑广东汛期(4—9 月),其中前汛期(4—6 月),后汛期(7—9 月)降水对年降水的重要贡献,分析广东年、前、后汛期小时强降水的次数(单位:h)、强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、降水量(单位:mm)、贡献率(单位:%)这 12 个序列的变化特征。

使用方法有线性趋势分析、计算趋势系数等,具体步骤见施能等(1995)和施能(2004);Mann-Kendall 检验、功率谱分析、突变分析,具体步骤见魏凤英(2007);计算场相似系数,具体步骤见王颖等(2006)。

## 2 结果分析

### 2.1 多年平均的广东小时强降水的空间分布

图 1 为广东 32 站 1961—2014 年平均小时强降水量的年、前汛期、后汛期和整个年降水量的空间分布。可见,近 54 年平均小时强降水在年、前、后汛期和年总降水量呈现沿海多、内陆少的分布形势,且从南向北递减。

图 1a 是广东年平均小时强降水量分布图。可见大值中心均位于南部沿海和珠三角,最多小时强降水量出现在西南沿海的阳江(696.5 mm),其次是上川岛(629.7 mm),第三出现在珠江口的珠海(540.9 mm),第四出现在湛江(513.0 mm)。最少小时强降水量出现在粤北的南雄(150.5 mm)、曲江(158.9 mm)和连州(170.3 mm),其他降水不足 200 mm 的站有五华(188.3 mm)和梅县(191.9 mm)。珠三角和南部沿海大部的小时强降水量介于 350.0~696.5 mm,其余地区介于 100.0~350 mm。广东小时强降水量的最大和最小相差近 4.6 倍。

图 1b 是广东近 54 年前汛期平均小时强降水量分布图。可见,前汛期小时强降水量的大值区出现在南部沿海和珠三角,其中最多出现在西南沿海的阳江(418.6 mm)、上川岛(332.5 mm)、珠海(283.7 mm)和佛岗(279.4 mm)。最少降水出现在粤北的南雄(87.0 mm)、五华(91.2 mm)、梅州(92.5 mm)

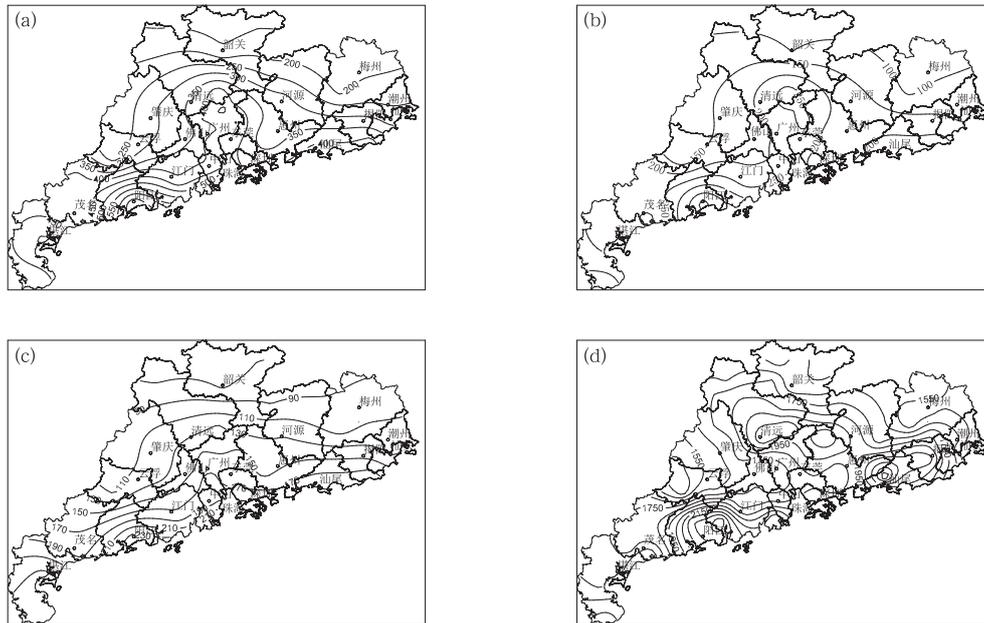


图1 广东1961—2014年平均小时强降水量的分布(单位:mm)

(a)年,(b)前汛期,(c)后汛期,(d)总的年降水量

Fig.1 Distribution of mean hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014 (unit: mm)

(a) annual, (b) the pre-flood season, (c) the latter flood season, (d) total annual precipitation

和曲江(98.2 mm),降水均不足100 mm。珠三角和南部沿海大部的前汛期小时强降水量介于200.0~418.6 mm,其余地区介于87.0~200.0 mm。

图1c是广东近54年后汛期平均小时强降水量分布图。可见,后汛期小时强降水量的大值区出现在南部沿海(包括雷州半岛)和珠三角,最多出现在西南沿海的上川岛(245.3 mm)、阳江(243.3 mm)、珠海(229.1 mm)以及雷州半岛的徐闻(238.5 mm)和湛江(237.5 mm),这与广东后汛期降水主要是热带气旋导致相吻合(郑彬等,2006;2007),广东南部沿海特别是粤西南沿海是热带气旋登陆广东最频繁的地区。最少降水出现在粤北的曲江(66.7 mm)、连州(66.8 mm)和南雄(71.1 mm),降水均不足80 mm。珠三角和南部沿海大部的后汛期小时强降水量介于150.0~245.3 mm,其余地区介于66.7~150.0 mm。

图1d是广东近54年平均年总降水量的空间分布,可见,广东年平均总降水量的分布与小时强降水的分布非常相似,也有三个降水中心,分别位于粤西南沿海、珠三角北部和粤东南沿海。

同样分析广东32站1961—2014年平均的小时

强降水次数、强度、贡献率的年、前、后汛期的空间分布(图略),得到和同期对应的小时强降水量相一致的结果,且分别计算同期广东平均小时强降水次数、强度、贡献率的场相似系数在0.96~0.99,说明广东年、前汛期或后汛期小时强降水的次数、强度、降水量与贡献率几乎都是完全相似的,即年或前、后汛期小时强降水次数多的地方也是强度高,降水量多、贡献率高的地方,反之亦然。这与姚莉等(2009)指出年降水量大的地区雨强出现频次也较大相一致。

## 2.2 广东平均小时强降水次数的变化

### 2.2.1 小时强降水次数的年际、年代际变化

图2a是广东32个观测站空间平均后的小时强降水次数的逐年变化。可见,广东平均的小时强降水次数具有显著的年际变化特征,2001年最多(17.9 h),1963年最少(11.9 h),近54年以 $0.73 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率增加(相关系数为0.44),通过了0.001的显著性水平检验,增加趋势非常显著。从多项式曲线看,广东小时强降水次数也存在明显的年代际波动变化特征,在20世纪60—90年代前中期处于偏少时段,20世纪90年代后期到2014年处

于偏多阶段,特别是 2005 年以来,除 2011 年小时强降水次数偏少外,其余年以偏多为主。

图 2b 是广东 32 个观测站空间平均后的前汛期小时强降水次数的年变化。可见,前汛期小时强降水次数在 2005 年最多(10.6 h),其次是 2008 和 1993 年,均为 10.4 h,1999 年最少(2.8 h),近 54 年来以  $0.38 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速率增加(相关系数为 0.32),通过了 0.05 的显著性水平检验,增加趋势显著,但低于广东年小时强降水次数的增加速率 [ $0.73 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]。从多项式曲线看,前汛期小时强降水次数在 20 世纪 90 年代前期和 90 年代中期到 2014 年处于偏多时段,其余年代处于次数偏少阶段。

图 2c 是广东 32 个观测站空间平均后的后汛期小时强降水次数的逐年变化。可见,后汛期小时强降水次数 2001 年(8.6 h)最多,其次是 2002 年(8.1 h),第三是 1994 年(7.8 h);最少出现 1969 年和 1978 年,均为 3.2 h,近 54 年来以  $0.28 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速率增加(相关系数为 0.32),通过了 0.05 的

显著性水平检验,增加趋势显著,但低于广东年和前汛期的小时强降水次数的增加速率。从多项式曲线看,广东后汛期小时强降水次数在 20 世纪 90 年代前期由之前的偏少转为之后的偏多,阶段变化明显。

图 2d 是 1961—2014 年广东年暴雨日数的逐年变化。可见,年暴雨日数最多出现在 2001 年(10.3 d),其次是 2008 年和 2013 年,均为 10.0 d,第三是 1973 年 9.7 d;最少出现 1962 年(3.6 d),第二少是 2004 年(4.6 d),第三少是 1962 年(4.8 d),近 54 年来以  $0.19 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速率增加(相关系数为 0.20),没有通过 0.05 的显著性水平检验,增加趋势不显著。这与伍红雨等(2011a)指出华南年、前、后汛期暴雨日数变化都不显著相一致,与孙秀博等(2012)指出 1960—2009 年华南地区年降水量有上升趋势但不显著吻合。张焕等(2011)利用小时资料分析指出西南地区夏季大部分地区降水有减少的趋势,而极端强降水为增加的趋势。曾颖婷和陆尔(2015)指出 1961—2010 年夏季华南地区年降水量和极端强降水量都为增加的趋势。殷水清等(2012)

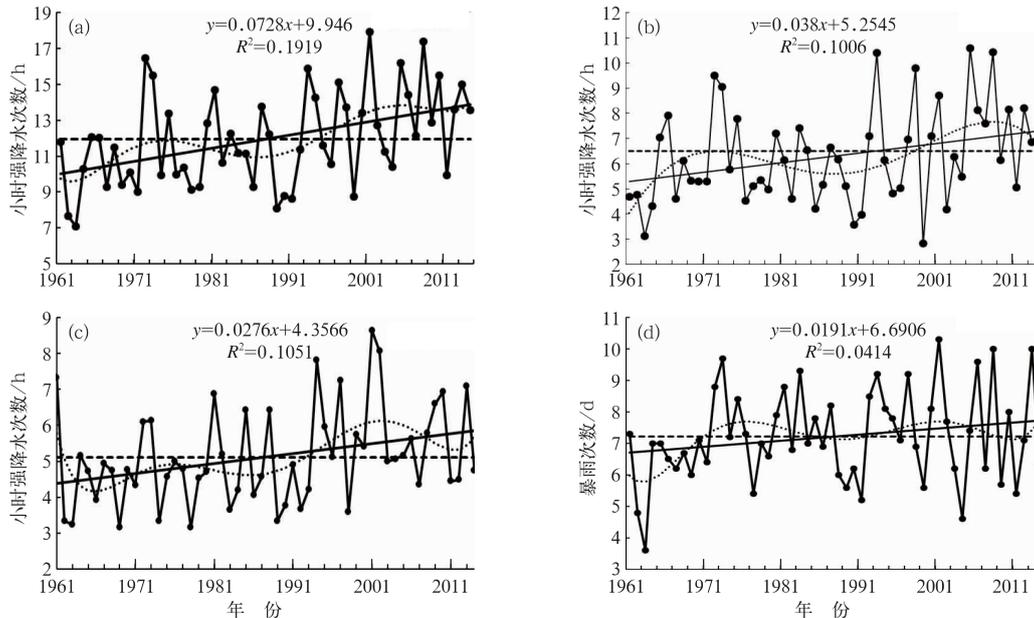


图 2 1961—2014 年广东平均小时强降水次数的年际变化

(a) 年, (b) 前汛期, (c) 后汛期, (d) 年暴雨次数

(实直线:线性趋势,曲线:多项式拟合,水平虚线:1981—2010 年平均)

Fig. 2 Interannual variations of the times of mean hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014

(a) annual, (b) the pre-flood season, (c) the latter flood season, (d) annual torrential rain days

(Solid straight line is linear trend; curve is polynomial fitting; horizontal dashed line is the mean during 1981—2010)

利用海河流域站点夏季逐时降水资料分析指出海河流域夏季总降水量和总降水小时数以及长、短历时降水量均呈减少趋势。可见降水变化存在明显区域差异,而南方大部地区极端强降水事件在明显增多,导致的洪涝灾害有增多趋势,这是要密切关注的。

计算 1961—2014 年的广东小时强降水次数与年暴雨日数两序列的相关系数为 0.79,通过 0.001 显著性水平检验,相关非常显著,表明广东小时强降水多的年份对应的暴雨次数也多,反之就少。

对 1961—2014 年广东小时强降水次数的年、前、后汛期三个序列求相关得到,年与前汛期的相关系数是 0.84,年与后汛期的相关系数是 0.58,都通过 0.001 显著性水平检验,相关非常显著,说明广东前汛期小时强降水次数在年小时强降水次数中占据重要位置。但广东前、后汛期小时强降水次数的相关系数为 0.10,没有通过 0.05 的显著性水平检验,相关不显著,说明前、后汛期的小时强降水次数没有对应关系。

2.2.2 小时强降水次数的日变化

图 3 为近 54 年平均的广东小时降水次数的日变化。可见,广东小时强降水次数呈双峰型分布,16 时是一天的峰值,次峰出现在 08 时,即广东小时强降水在白天出现的次数高于夜间,午后到傍晚是高发时段,夜间是低发时段。这是由于午后到傍晚太阳辐射强,近地面温度加热明显,午后出现一天中的最高温度,这时空气中垂直方向的温差增大,常在近地层形成绝对不稳定的层结,最容易产生空气对流,如果水汽丰富,那么午后到傍晚就易出现短时强降水等强对流天气。

2.2.3 小时强降水次数的突变和周期分析

对 1961—2014 年广东年(a),前汛期(b)、后汛期(c)小时强降水次数进行 M-K 突变分析(图 4)可

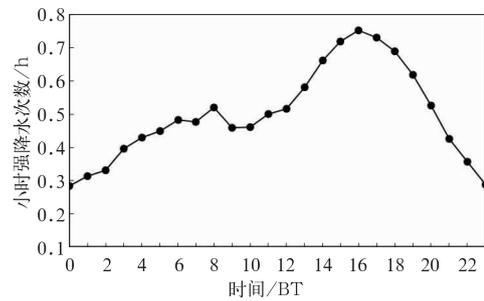


图 3 1961—2014 年平均的广东小时强降水次数的日变化特征

Fig. 3 The daily variation of mean hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014

见,广东年(图 4a)和后汛期(图 4c)小时强降水次数在 20 世纪 90 年代前期有一个增加的突变,具体发生在 1993—1994 年,并且在 2005 年后增加趋势更明显,这与前面的分析相吻合。前汛期小时强降水次数(图 4b)的 UB 和 UF 多次相交,不能判定有突变发生,而 1961—2008 年华南年和前、后汛期暴雨日数均没有发生突变(伍红雨等,2011b),可见广东暴雨日数和小时强降水次数变化存在差异。

1961—2014 年广东年和前、后汛期短时强降水次数的功率谱分析(图略)得出广东小时强降水次数具有多尺度震荡的特点,且在年和前汛期存在 3.7 年和 22 年的显著周期震荡,后汛期存在 3 年左右的显著周期震荡。

2.3 广东平均小时强降水强度的变化

图 5a<sub>1</sub>, 5b<sub>1</sub>, 5c<sub>1</sub> 为广东 32 站平均的小时强降水强度的变化,其中图 5a<sub>1</sub> 为年小时强降水强度的变化。可见,年小时强降水强度的年际变化明显,强度最大的前三位都出现在 2008 年以后,分别是 2010

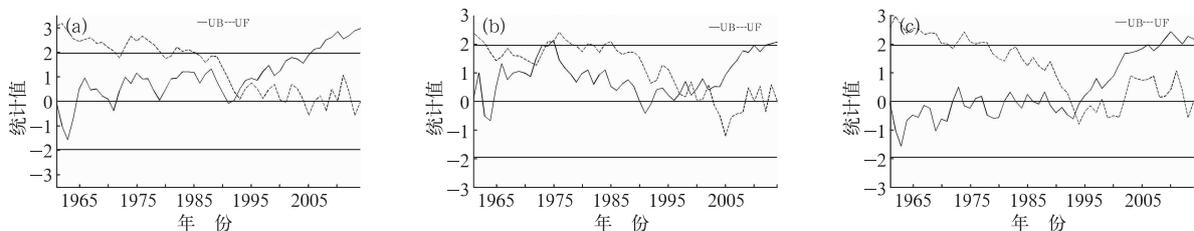


图 4 广东(a)年,(b)前汛期,(c)后汛期小时强降水次数的 M-K 突变检验 (水平线:M-K 检验 0.05 显著性水平)

Fig. 4 Mann-Kendall test of hourly heavy precipitation in Guangdong (a) annual, (b) the pre-flood season, (c) the latter flood season (The horizontal lines indicate the 0.05 significance level of the M-K test)

年( $31.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、2014 年( $31.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和 2008 年( $31.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );强度最小的前三位都出现在 1970 年以前,分别是 1968 年( $28.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、1970 年( $28.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和 1961 年( $29.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。1961—2014 年广东年小时强降水强度介于  $28.4 \sim 31.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均为  $30.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,近 54 年广东年小时强降水的强度以  $0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a} \cdot \text{h})^{-1}$  的速率增加(趋势系数为 0.44),通过了 0.001 显著性水平检验,说明年小时强降水的强度增加趋势非常明显。

图 5b<sub>1</sub> 为广东 32 站平均的前汛期小时强降水强度的变化。可见,近 54 年来广东前汛期小时强降

水强度同样也存在明显的年际和年代际变化,强度最强出现在 2002 年( $33.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),其次是 2010 年( $32.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),第三是 1998 年和 1999 年(均为  $31.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。近 54 年前汛期小时强降水强度前 8 位的年份,有 7 年出现在 1998 年以后。强度最小的前三位都出现在 1990 年以前,分别是 1974 年( $28.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、1990 年( $28.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和 1968 年( $28.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。1961—2014 年广东前汛期小时强降水强度介于  $28.0 \sim 33.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均为  $30.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,近 54 年来以  $0.3 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a} \cdot \text{h})^{-1}$  的速率增加(趋势系数为 0.43),通过了 0.001 显著性水平检验,增加趋势非常明显,可见高

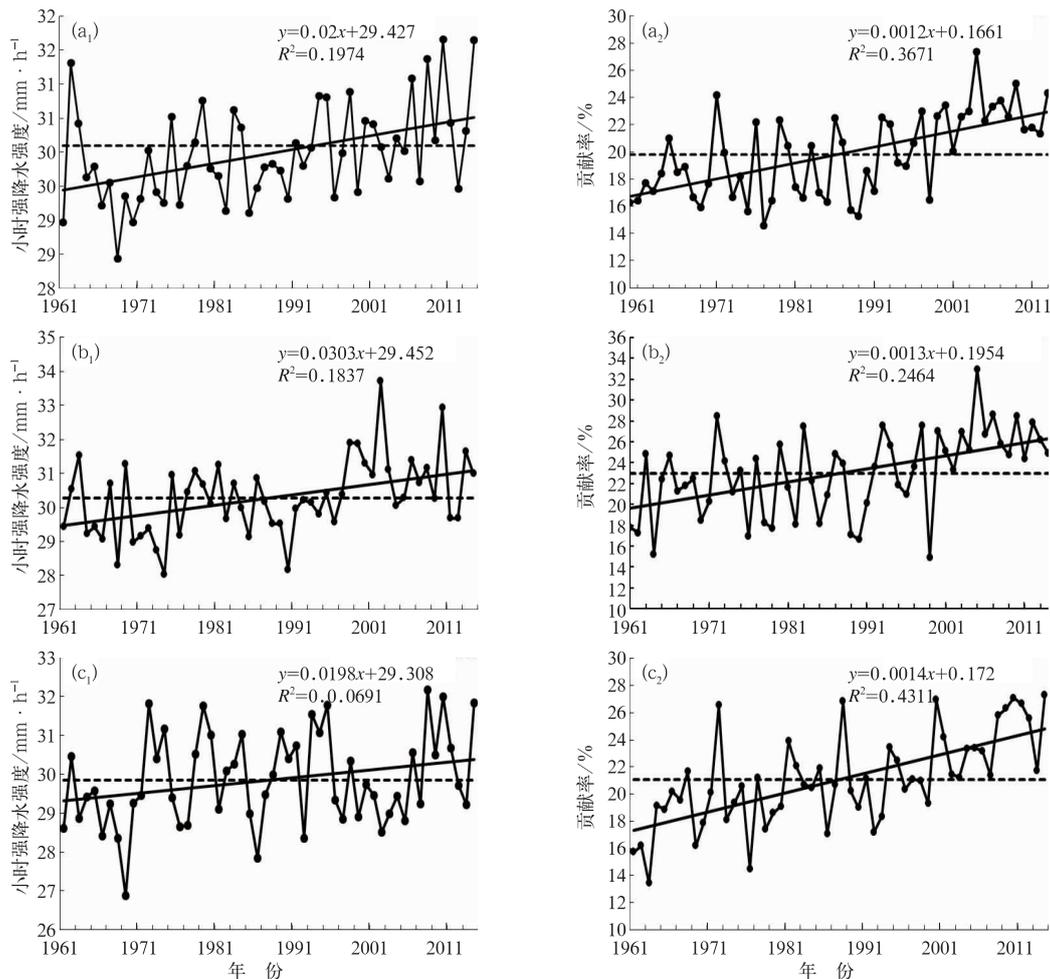


图 5 1961—2014 年广东年(a),前汛期(b),后汛期(c)平均小时强降水强度(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)和贡献率(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)的年际变化

(实线:线性趋势,水平虚线:1981—2010 年平均)

Fig. 5 Interannual variations of mean hourly heavy precipitation intensity (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>), and contribution (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) in Guangdong during 1961—2014

(a) annual, (b) the pre-flood season, (c) the latter flood season

(Straight solid line is linear trend, horizontal dashed line is the mean during 1981—2010)

于年小时强降水强度的增加速率。

图 5c<sub>1</sub> 为广东 32 站平均的后汛期小时强降水强度的变化。可见其年际波动较前汛期更加明显。强度最大出现在 2008 年(32.2 mm·h<sup>-1</sup>)、其次是 2010 年(32.0 mm·h<sup>-1</sup>)；强度最小出现在 1969 年(26.9 mm·h<sup>-1</sup>)、次小是 1986 年(27.9 mm·h<sup>-1</sup>)。1961—2014 年广东后汛期小时强降水强度介于 26.9~32.2 mm·h<sup>-1</sup>，平均为 29.9 mm·h<sup>-1</sup>，近 54 年来以 0.2 mm·(10 a·h)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.26)，通过了 0.05 显著性水平检验，增加趋势明显。

从上面的分析可见，近 54 年广东小时强降水的强度增加速率在前汛期高于后汛期和年，均呈显著增加的趋势，这与伍红雨等(2011a)指出的年和后汛期一般降水的雨强明显增加相一致，而与前汛期雨强变化趋势不明显有区别，与黄伟等(2012)分析指出我国东南沿海地区盛夏小时降水强度呈显著上升趋势吻合。

### 2.3 广东平均小时强降水贡献率的变化

图 5a<sub>2</sub>, 5b<sub>2</sub>, 5c<sub>2</sub> 为 1961—2014 年广东 32 站平均小时强降水贡献率的逐年变化图。图 5a<sub>2</sub>, 5b<sub>2</sub>, 5c<sub>2</sub> 分别为年、前、后汛期尺度。从图 5a<sub>2</sub> 可见近 54 年贡献率最大的前三位分别出现在 2005 年(27.4%)、2010 年(25.0%)和 2014 年(24.3%)；贡献率最小的前三位分别出现在 1978 年(14.6%)、1990 年(15.3%)和 1976 年强降水贡献率为 19.8%，近 54 年来以 0.012%·(10 a)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.61)，通过了 0.001 显著性水平检验，增加趋势非常显著。

图 5b<sub>2</sub> 为 1961—2014 年广东 32 站平均的前汛期小时强降水贡献率的逐年变化。可见近 54 年前汛期贡献率最大的前三位分别出现在 2005 年(32.9%)、2007 年(28.6%)和 2010 年(28.5%)；贡献率最小的前三位分别出现在 1999 年(14.6%)、1964 年(15.2%)和 1990 年(16.6%)；1961—2014 年平均为 23.0%，近 54 年来以 0.013%·(10 a)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.50)，通过了 0.001 显著性水平检验，增加趋势很显著。

图 5c<sub>2</sub> 为 1961—2014 年广东 32 站平均的后汛期小时强降水贡献率的逐年变化。可见近 54 年后汛期贡献率最大的前三位分别出现在 2014 年(27.3%)、2010 年(27.16%)、2000 年(27.0%)；贡

献率最小的前三位出现在 1963 年(13.4%)、1976 年(14.52%)和 1961 年(15.7%)；1961—2014 年广东后汛期小时强降水贡献率平均为 21.1%，低于前汛期的贡献率(23.0%)。近 54 年来以 0.014%·(10 a)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.66)，通过了 0.001 显著性水平检验，增加趋势非常显著。

可见近 54 年来广东小时强降水的次数、强度、降水量以及贡献率在年、前、后汛期的长期变化均为显著上升的趋势，与近 54 年来广东年暴雨次数和降水变化不明显有明显差异，进一步说明广东极端降水事件增加的事实。近 45 年来长江中下游大部极端降水量也表现为增加趋势(张文等, 2007; 张天宇等, 2007; 罗伯良等, 2008)。

### 2.4 广东平均小时强降水量的长期变化

图 6a 为 1961—2014 年广东 32 站平均的年小时强降水量的逐年变化。统计表明近 54 年小时强降水量最大的前三位分别出现在 2001 年(557.8 mm)、2008 年(552.9 mm)和 1972 年(500.9 mm)；小时降水量最小的前三位分别出现在 1963 年(214.7 mm)、1962 年(242.9 mm)和 1989 年(243.8 mm)；1961—2014 年广东年小时强降水量介于 214.7~557.8 mm，平均为 365.7 mm。近 54 年广东年小时强降水量以 25.2 mm·(10 a)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.47)，通过了 0.001 显著性水平检验，增加趋势非常显著。近 54 年广东年小时强降水与年总降水量的相关系数为 0.69，通过 0.001 显著性水平检验，相关很显著，也进一步说明小时强降水增加，年降水总量也相应增加。

图 6b 为 1961—2014 年广东 32 站平均的前汛期小时强降水量的逐年变化。可见近 54 年前汛期降水量的前三位分别出现在 2008 年(339.3 mm)、2005 年(329.4 mm)和 1998 年(325.2 mm)；降水最少的前三位分别出现在 1999 年(90.0 mm)、1963 年(99.8 mm)和 1990 年(102.1 mm)；1961—2014 年广东前汛期小时强降水量平均为 196.0 mm，近 54 年广东前汛期小时强降水量以 14.0 mm·(10 a)<sup>-1</sup> 的速率增加(趋势系数为 0.36)，通过了 0.01 显著性水平检验，增加趋势显著。

图 6c 为 1961—2014 年广东 32 站平均的后汛期小时强降水量的逐年变化。可见后汛期降水量的前三位分别出现在 2001 年(259.4 mm)、1994 年(250.0 mm)和 2002 年(236.8 mm)；降水最少的前

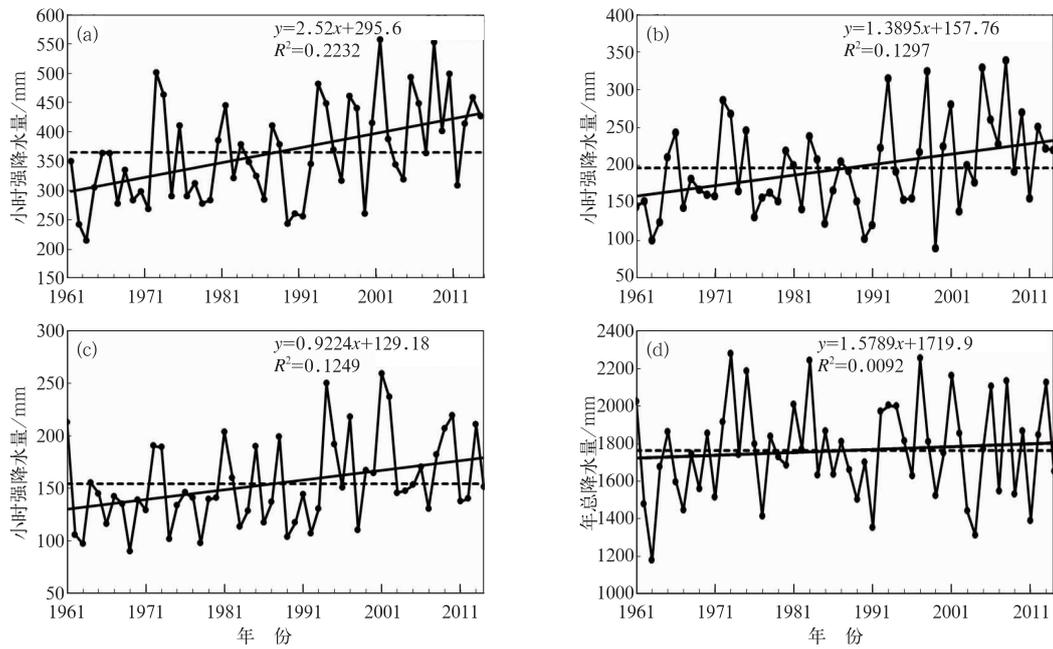


图 6 1961—2014 年广东年(a),前汛期(b),后汛期(c)小时强降水量和年总降水量(d)的 annual 变化  
(实线:线性趋势,水平虚线:1981—2010 年平均)

Fig. 6 Interannual variations of mean hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014

(a) annual, (b) the pre-flood season, (c) the latter flood season, (d) total annual precipitation  
(Straight solid line is linear trend, horizontal dashed line is the mean during 1981—2010)

三位分别出现在 1969 年(90.1 mm)、1963 年(97.0 mm)和 1978 年(97.8 mm);1961—2014 年广东后汛期小时强降水量平均为 154.5 mm,近 54 年广东后汛期小时强降水量以  $9.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速率增加(趋势系数为 0.35),通过了 0.01 显著性水平检验,增加趋势显著。

图 6d 为 1961—2014 年广东年降水量的逐年变化。可见广东年降水量前三位分别出现在 1973 年(2277.5 mm)、1997 年(2254.1 mm)和 1983 年(2244.6 mm);降水最少的前三位分别出现在 1963 年(1178.4 mm)、2004 年(1314.1 mm)和 1991 年(1354.7 mm);1961—2014 年广东年降水量平均为 1763.3 mm,近 54 年广东年降水量以  $15.8 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速率增加(趋势系数为 0.10),没有通过 0.05 显著性水平检验,增加趋势不明显,且增加速率低于广东小时强降水量的增加速率[ $25.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]。说明虽然广东年降水量变化不显著,但极端强降水有显著增加的趋势,其造成的灾害损失会加大,这需要密切关注。

从以上分析可见,近 54 年来广东年降水量增加

趋势不明显,而年、前、后汛期小时强降水量均为显著增加的趋势,特别是前汛期增加最显著,说明极端强降水在增加,前汛期增加趋势最为显著。

对 1961—2014 年广东小时强降水量的年、前、后汛期三个序列求相关,得到年与前汛期的相关系数是 0.85,年与后汛期的相关系数是 0.61,都通过 0.001 显著性水平检验,相关非常显著,其中与前汛期相关最高,进一步说明广东前汛期小时强降水量在年小时强降水量中占据重要地位。但广东小时强降水量的前、后汛期次数的相关系数为 0.16,没有通过 0.05 的显著性水平检验,相关不显著,说明前、后汛期的小时强降水量没有对应关系。

1961—2014 年广东小时强降水量平均为 364.9 mm,其中前汛期小时强降水量平均为 196.0 mm,占年小时强降水量的 53.7%;后汛期小时强降水量平均为 154.5 mm,占 42.3%;汛期小时强降水量平均为 350.5 mm,占年小时强降水量的 96.1%,说明广东小时强降水有 96% 出现在汛期,非汛期很少出现小时强降水,仅占 4%,可见广东小时强降水几乎都出现在汛期,且前汛期多于后汛期。

## 2.5 广东站点小时强降水量的气候变化

由广东站点年小时强降水量的变化趋势(图7a)可见,32个站中除佛岗(-0.02)为弱的负趋势外,其余31个站均为正趋势,趋势系数最大的前五位分别出现在番禺(0.46),南海(0.43),东莞(0.42)、广州(0.41)和惠阳(0.36),均通过0.05的显著性检

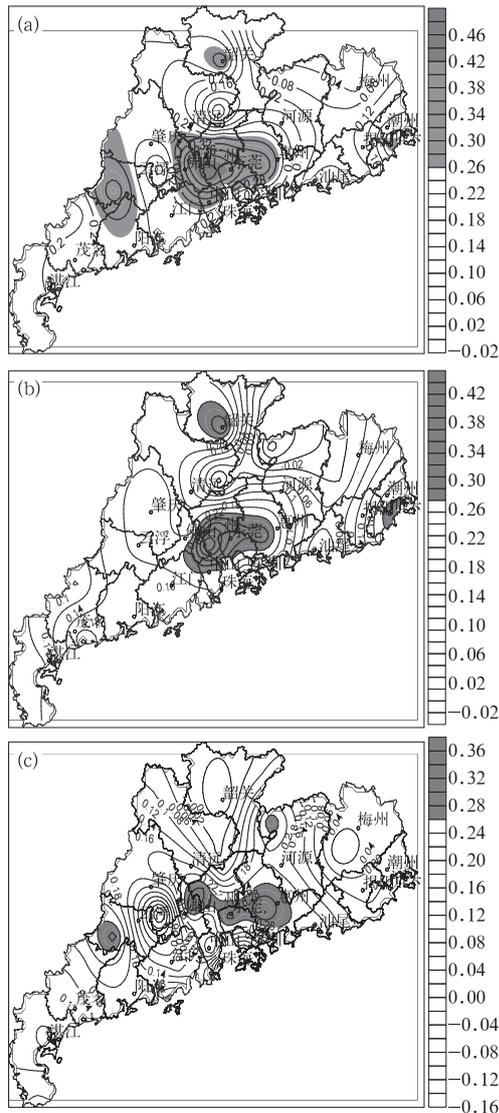


图7 1961—2014年广东年(a),前汛期(b),后汛期(c)小时强降水的趋势系数分布(阴影为通过0.05显著性水平检验的地区)

Fig.7 Distribution of trend indices of hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014  
(a) annual, (b) the pre-flood season,  
(c) the latter flood season  
(Shading represents the area having passed the 0.05 significance level test)

验,增加趋势明显。近54年来广东年小时强降水量均呈增加的趋势,增加明显的地区在珠三角、罗定、曲江。

由广东站点前汛期小时强降水量的变化趋势系数分布(图7b)可见,32站中除连平(-0.14)、佛岗(-0.06)、汕尾(-0.01)和五华(-0.01)4站呈不明显的负趋势外,其他28个站均为正趋势,其中正趋势系数最大前5位出现在番禺(0.46)、广州(0.35)、曲江(0.33)、惠阳(0.31)和东莞(0.31),均通过了0.05显著性水平检验,增加趋势明显。说明近54年来广东大部前汛期小时强降水量均呈增加的趋势,增加明显的地区在珠三角、曲江和汕头。

由广东站点后汛期小时强降水量的变化趋势系数分布(图7c)可见,32站中除高要(-0.18)、珠海(-0.07)、曲江(-0.06)和五华(-0.02)4站呈不明显的负趋势外,其他28个站均为正趋势,其中正趋势系数最大前5位出现在南海(0.35)、惠阳(0.35)、上川岛(0.33)、罗定(0.32)和东莞(0.32),均通过了0.05显著性水平检验,增加趋势明显。图6c还可见近54年来广东后汛期小时强降水量绝大部分地区均呈增加的趋势,增加明显的地区在珠三角、上川岛和罗定。可见广东大部分地区小时强降水量在年、前后汛期时间尺度上均呈增加的趋势,其中珠三角增加最为显著。研究表明城市有使降水趋势增加的效应,特别是城市下风区,被称为城市“雨岛效应”(梁萍等,2011;白莹莹等,2013;郑祚芳等,2013)。江志红和李杨(2014)分析指出1960—2009年间,长三角和珠三角城市群的城市化发展均有使降水增加的作用。因此珠三角城市群的城市化快速发展使得小时强降水量有明显增加的趋势。

## 3 结论与讨论

利用广东32个气象观测站1961年1月1日至2014年12月31日逐小时降水资料,通过统计诊断方法,分析了广东年和前、后汛期的小时强降水次数、强度、降水量以及贡献率的时空特征和变化,得到以下结果:

(1) 近54年广东32个站的年、前汛期和后汛期平均小时强降水的次数、强度、降水量和贡献率的空间分布存在明显的区域差异,呈现出沿海多、内陆少的分布形势。

(2) 近54年来,广东平均的年、前汛期、后汛期

小时强降水次数、强度、降水量和贡献率均呈显著增加的趋势,而广东年降水量、年暴雨日数增加不显著。说明虽然广东年降水总体变化不显著,但极端强降水呈显著增加的趋势,会导致更多的气象灾害发生,这需密切关注。

(3) 近 54 年来广东年、前汛期小时强降水次数存在 3.7 年和 22 年的显著周期震荡。后汛期小时强降水次数存在 3 年左右的显著周期震荡,同时还存在 3.7 年和 22 年左右的次周期震荡。广东年和后汛期小时强降水次数在 1993—1994 年发生增加的突变,并且在 2005 年后增加趋势更明显。前汛期小时降水次数没有突变发生。

(4) 广东大部分地区小时强降水量在年、前后汛期时间尺度上均呈增加的趋势,其中珠三角增加最为显著,这与珠三角城市群的城市化快速发展有关。

## 参考文献

- 白莹莹,张焱,何泽能,等,2013.城市化进程对重庆都市圈降水空间分布的影响[J].气象,39(5):592-599.
- 陈元昭,俞小鼎,陈训来,2016.珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J].气象,42(2):144-155.
- 黄伟,宇如聪,李建,2012.1967—2006年中国东南沿海盛夏降水强度特征分析[J].气候变化研究进展,8(3):164-170.
- 江志红,李杨,2014.中国东部不同区域城市化对降水变化影响的对比研究[J].热带气象学报,(4):601-611.
- 李江南,王安宇,蒙伟光,等,2002.广东省前汛期和后汛期降水的气候特征[J].中山大学学报(自然科学版),41(3):91-94.
- 李晓娟,简茂球,方一川,等,2012.广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征[J].气象,38(11):1339-1347.
- 梁萍,丁一汇,何金海,等,2011.上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J].热带气象学报,27(4):475-483.
- 林爱兰,谷德军,李春晖,等,2013.广东6月持续性暴雨期间的大气环流异常[J].气象学报,73(5):803-818.
- 林爱兰,李春晖,郑彬,等,2015.广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势[J].气象学报,71(4):628-642.
- 罗伯良,张超,林浩,2008.近40年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征[J].气象,34(1):80-85.
- 彭丽英,王谦谦,马慧,2006.华南前汛期暴雨气候特征的研究[J].南京气象学院学报,29(2):249-253.
- 曲晓波,张涛,刘鑫华,等,2010.舟曲“8.8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析[J].气象,36(10):102-105.
- 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,1996,54(6):675-683.
- 施能,陈家其,屠其璞,1995.中国近100年四个年代际的气候变化特征[J].气象学报,53(4):431-439.
- 寿亦萱,陆风,王捷纯,等,2014.华南冷季暴雨中热带卷云羽特征研究[J].气象,40(6):687-696.
- 孙秀博,李清泉,魏敏,2012.1960—2009年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J].气象,38(12):1464-1472.
- 王颖,施能,顾骏强,等,2006.中国雨日的气候变化[J].大气科学,30(1):162-170.
- 魏凤英,2007.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社(第二版),23-71.
- 伍红雨,杜尧东,陈桢华,等,2011a.华南雨日、雨强的气候变化[J].热带气象学报,27(6):877-888.
- 伍红雨,杜尧东,秦鹏,2011b.华南暴雨的气候特征及变化[J].气象,37(10):1267-1275.
- 伍志方,曾沁,吴乃庚,等,2011.广州5-7高空槽后和5-14槽前大暴雨过程对比分析[J].气象,37(7):838-846.
- 姚莉,李小泉,张立梅,2009.我国1小时雨强的时空分布特征[J].气象,35(2):80-87.
- 殷水清,高歌,李维京,等,2012.1961—2004年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J].中国科学:地球科学,42(2):256-266.
- 余功梅,1996.华南地区近40年降水的气候特征[J].热带气象学报,2(3):252-256.
- 曾颖婷,陆尔,2015.1961—2010年我国夏季总降水和极端降水的变化[J].气候变化研究进展,11(2):79-85.
- 张焕,翟盘茂,唐红玉,2011.1961—2000年西南地区小时降水变化特征[J].气候变化研究进展,7(1):8-13.
- 张天宇,程炳岩,刘晓冉,2007.近45年长江中下游地区汛期极端强降水事件分析[J].气象,33(10):80-87.
- 张文,寿绍文,杨金虎,2007.长江中下游地区汛期极端降水量的异常特征分析[J].气象,33(3):61-67.
- 郑彬,谷德军,李春晖,等,2007.华南前汛期的锋面降水和夏季风降水Ⅱ.空间分布特征[J].大气科学,31(3):495-504.
- 郑彬,梁建茵,林爱兰,等,2006.华南前汛期的锋面降水和夏季风降水Ⅰ.划分日期的确定[J].大气科学,30(6):1207-1216.
- 郑祚芳,王在文,高华,2013.北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响[J].气象,39(12):1635-1641.
- 钟权加,张李凤,丁瑞强,等,2016.华南夏季降水的变化特征及其与热带太平洋海温异常的关系[J].气候变化研究进展,12(1):28-36.