

文章编号: 1008-2786-(2020)3-384-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000518

福建省前后汛期最大一日降水量的时空变化

林思婷¹, 陈兴伟^{1, 2*}, 黄 婕¹

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007)

摘 要: 极端降水是洪涝灾害发生的主要原因之一。为了进一步揭示福建省极端降水的时空变化规律, 根据福建省 25 个气象站点 1960—2013 年的逐日降水数据, 应用平均值、相对值、频次统计等方法, 统计比较了福建省前后汛期最大一日降水量的时间变化及其空间差异。结果表明: (1) 根据前后汛期最大一日降水量变化, 福建省极端降水可分为单汛期、双汛期, 其中单汛期包括前汛期和后汛期, 双汛期包括前高后低型和前低后高型。 (2) 前后汛期最大一日降水量具有明显的空间差异, 从西部内陆向东部沿海呈现出前汛期—前高后低型—前低后高型—后汛期的转变。 (3) 前汛期最大一日降水量在 54 年间的变化趋势并不显著, 而后汛期的最大一日降水量在大多数站点都呈现比较明显的增加趋势, 即台风降水的影响趋于增大。

关键词: 极端降水; 日最大降水; 空间差异; 前后汛期; 福建省

中图分类号: P467

文献标志码: A

极端降水是洪涝灾害发生的主要原因之一。美国^[1]、加拿大^[2]、欧洲^[3]、日本^[4]、加勒比海地区^[5]及非洲西南部^[6]等地区的极端降水特征研究结果表明, 全球多数区域极端降水呈增加趋势, 且与全球气候变暖有着密切的关系。同时近五十多年来地处东亚地区的中国极端降水发生频率增加, 极端降水平均强度和降水量都呈现增加的趋势^[7]。其中, 中国部分地区年极端降水事件表现为减少的趋势, 如东北、西北地区东部、华北等地, 而呈现增加趋势的地区有西北地区西部、长江中下游、华南及青藏高原等地^[8]。

最大一日降水量是极端降水研究的一个重要指数。研究表明全球年最大一日降水量在 1900—2009 年间呈现增加趋势, 和气温的升高有正相关关系^[9]。对于中国沿海地区来说, 其最大一日降水量

多年平均值呈现南高北低的状态, 其中华北沿海最低, 且除东北沿海、江南沿海和华南沿海地区最大一日降水量在 1961—2014 年呈上升趋势, 华北沿海、黄淮沿海和江淮沿海地区均呈现下降的趋势^[10]。而地处华南沿海的福建省在 1960—2010 年间, 省内 50 个站点的年最大一日降水量均呈线性增大趋势, 其中三明、南平和漳州南部为年最大一日降水量的增大中心^[11]。表明极端降水事件存在明显的时空差异。

我国浙江、福建和广东等位于沿海的省份, 其暴雨主要由两类天气系统造成, 一类是静止锋、切变线低涡造成的暴雨, 另一类则是受到台风影响的暴雨^[12]。要分析两类天气系统生成的暴雨, 可以将每年的 6 月 30 日作为界限, 将全年分为以锋面降水为主的前汛期和以强对流活动、台风降水为主的后汛

收稿日期 (Received date): 2019-12-29; 改回日期 (Accepted date): 2020-05-10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41877167)。[National Natural Science Foundation of China (41877167)]

作者简介 (Biography): 林思婷 (1996-), 女, 福建福清人, 本科生, 专业方向: 地理科学 [LIN Siting (1996-), female, born in Fuqing, Fujian province, B. S. candidate, major in geographical science] E-mail: 493090162@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 陈兴伟 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 流域水沙污染物过程与防灾减灾。[CHEN Xingwei (1963-), male, Ph. D., professor, research on water-sediment-nutrient processes simulation of watershed scale and disaster prevention and mitigation] E-mail: cxwchen215@fjnu.edu.cn

期。已有较多学者对我国沿海地区前后汛期的极端降水特征进行比较研究,发现沿海地区前汛期和后汛期的降水强度及其时空分布特征存在明显差异^[13-16]。其中华南后汛期的极端降水总量和最大一日降水量极值的强度均强于前汛期^[17]。

福建省位于中国东南沿海,典型亚热带季风气候使其降水受到很多因素的影响,例如东南季风、洋流、热带气旋等,导致其降水在时空分布上存在很大差异。以往对极端降水的研究主要集中在极端降水时空分布特征、暴雨特征、前汛期降水、台风降水^[18-20]等方面,而从两类天气系统出发,开展前后汛期最大一日降水量的研究较少。有学者通过统计福建省25个站点在1960—2013年间年最大一日降水发生在各月份的频次,发现全年各月份均会出现年最大一日降水及其发生时间的年内分布具有明显的空间差异^[21]。显然,年最大一日降水发生时间的时空变化研究,还不足以揭示年最大一日降水的时空变化规律,还需要进一步研究最大一日降水的降水量大小的时空变化。因此,本文拟进一步分析福建省前后汛期最大一日降水的降水量时空变化,以深化东南沿海极端降水时空变化规律的研究。

1 研究方法

1.1 研究数据

数据采用福建省25个气象站点从1960年至2013年逐日降水资料作为原始资料,各站点分布相对均匀,代表性较强,站点分布如图1。

1.2 研究方法

(1) 前后汛期及其最大一日降水量

最大一日降水量是指某一时段内记录的最大24 h降雨量,其中的24 h在中国一般是指北京时间20:00至次日20:00。根据曾秀娟等^[21]的结果,1960—2013年福建省25个站点中的大多数站点各月份均有出现年最大一日降水量,所以定义前汛期和后汛期的时间分别为前半年(1—6月)和后半年(7—12月),研究前后汛期的最大一日降水量即研究前后半年的最大一日降水量,分别统计25个站点在1960—2013年各年内前半年和后半年的最大一日降水量,获得共计2700个数据。

对每个气象站54年间前汛期最大一日降水量与后汛期最大一日降水量求多年平均值,其中*i*为

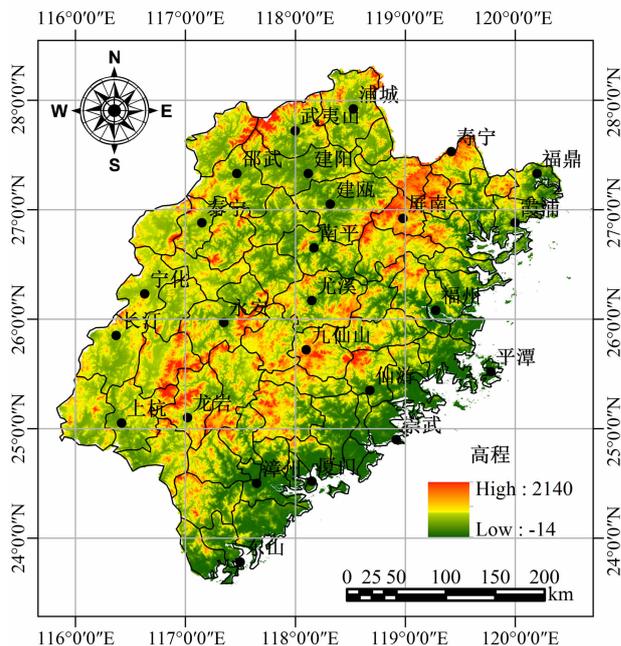


图1 福建省气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Fujian Province, China

1960—2013年中的第*i*年,即:

$$P_{\text{Max前}} = \frac{\sum_{i=1}^{54} P_{\text{Max前}i}}{54} \quad (1)$$

$$P_{\text{Max后}} = \frac{\sum_{i=1}^{54} P_{\text{Max后}i}}{54} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{Max前}i}$ 为前汛期最大一日降水量(mm); $P_{\text{Max后}i}$ 为后汛期最大一日降水量(mm)。

(2) 前汛期最大一日降水量相对值

定义前汛期最大一日降水量除以前后汛期最大一日降水量之和得到的比值为前汛期最大一日降水量的相对值,对每一个气象站点,得到每年的相对值,即:

$$X_{Pi} = P_{\text{Max前}i} / (P_{\text{Max前}i} + P_{\text{Max后}i}) \quad (3)$$

式中, X_{Pi} 为前汛期最大一日降水量相对值。

(3) 前后汛期最大一日降水相对重要性划分

X_{Pi} 的大小,实际上反映的是前后汛期最大一日降水的相对重要性。当 $X_{Pi} = 0.5$ 时,说明前后汛期最大一日降水同等重要;而当 $X_{Pi} > 0.5$ 时,前汛期最大一日降水量大于后汛期;反之,则前汛期小于后汛期。但从统计角度看,出现 $X_{Pi} = 0.5$ 的可能性基本为零,也即基本不可能出现前后汛期最大一日降

水量完全相等的情况。因此将 $X_{p_i} = 0.5$ 上下浮动 0.05, 当 $0.45 \leq X_{p_i} \leq 0.55$ 时, 认为前后汛期最大一日降水量相当。这样, 从前后汛期最大一日降水的相对重要性来看, 就可以分为 3 类, 一类是如前所述的前后汛期最大一日降水量相当, 另外两类分别是 $X_{p_i} > 0.55$ 和 $X_{p_i} < 0.45$ 的前汛期最大一日降水量远大于后汛期和后汛期最大一日降水量远大于前汛期。分别统计每个站点 54 年间出现三种类型的频次 N_i , 即:

$$N_{X_{p_i} > 0.55} = \sum_{i=1}^{54} N_i \quad (4)$$

$$N_{0.45 \leq X_{p_i} \leq 0.55} = \sum_{i=1}^{54} N_i \quad (5)$$

$$N_{X_{p_i} < 0.45} = \sum_{i=1}^{54} N_i \quad (6)$$

式中, $N_{X_{p_i} > 0.55}$ 、 $N_{0.45 \leq X_{p_i} \leq 0.55}$ 、 $N_{X_{p_i} < 0.45}$ 分别为各站点 54 年间出现前汛期最大一日降水量远大于后汛期、前后汛期最大一日降水量相当和后汛期最大一日降水量远大于前汛期三种类型的频次。

2 结果分析

2.1 前后汛期最大一日降水量的空间差异

2.1.1 前后汛期多年平均最大一日降水量的差异

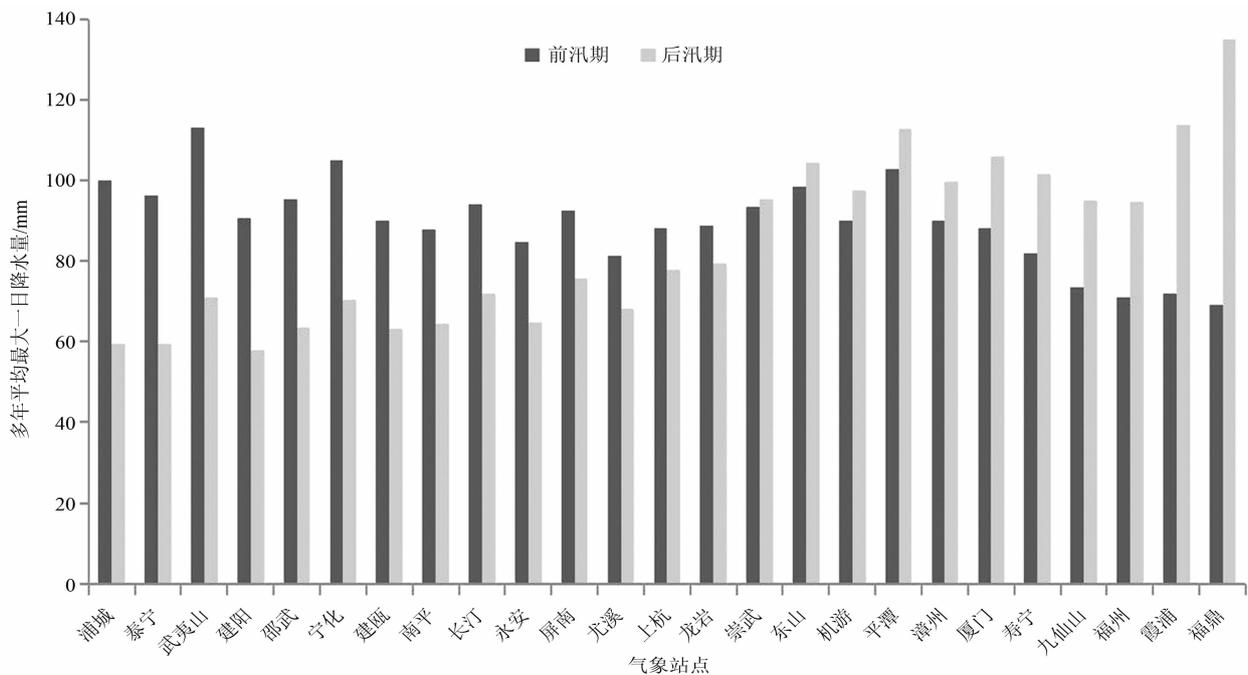


图 2 福建省 25 个气象站点前后汛期多年平均最大一日降水量

Fig. 2 Annual average maximum daily precipitation of 25 meteorological stations in the first and the second rainy seasons in Fujian Province

图 2 表示福建省各气象站点 1960—2013 年前后汛期多年平均最大一日降水量。为反映福建省前后汛期多年平均最大一日降水量的空间差异性, 绘制各气象站点前后汛期多年平均最大一日降水量的空间分布图(图 3)。

根据图 3 进行分析, 首先, 位于福建省内陆地区的浦城、泰宁、武夷山、建阳、邵武、宁化、建瓯、南平、长汀、永安、屏南、尤溪、上杭、龙岩这 14 个气象站点, 前汛期的多年平均最大一日降水量大于后汛期。后汛期的多年平均最大一日降水量大于前汛期的 11 个站点中, 除了仙游、寿宁、九仙山这 3 个站点属于内陆站点外, 崇武、东山、平潭、漳州、厦门、福州、霞浦、福鼎这 8 个气象站点均位于沿海地区。第二, 比较各站点前后汛期多年平均最大一日降水量, 大致分为前汛期多年平均最大一日降水量远大于后汛期、前后汛期多年平均最大一日降水量相差不大、后汛期多年平均最大一日降水量远大于前汛期三种类型; 且第一种类型基本上位于内陆, 第三种类型基本上位于沿海或靠近沿海, 第二种类型又可以分为前汛期略大于后汛期和后汛期略大于前汛期两种亚类, 这两种类型的站点既有位于内陆也有位于沿海。第三, 前汛期多年平均最大一日降水量最大值 113.17 mm 出现在武夷山站, 最小值 69.10 mm 出现在福鼎站, 差值为 44.07 mm; 后汛期多年平均最

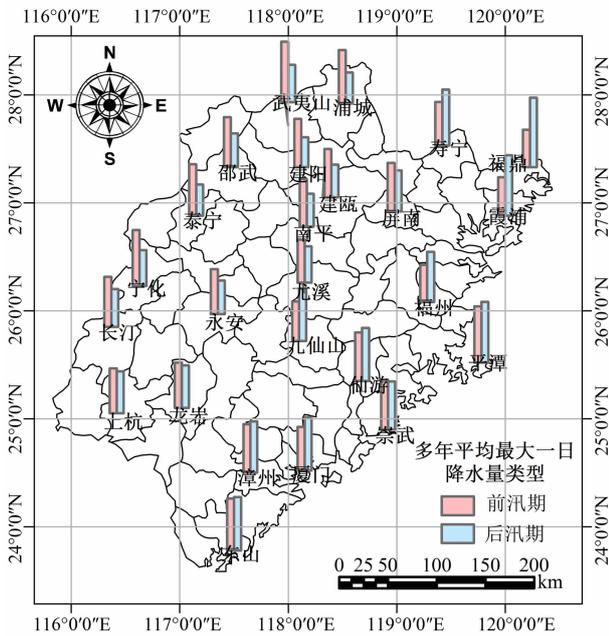


图 3 福建省 25 个气象站点前后汛期多年平均最大一日降水量空间分布情况

Fig. 3 Spatial variation of annual average maximum daily precipitation of 25 meteorological stations in the first and the second rainy seasons in Fujian Province, China

最大一日降水量最大值 135.10 mm 出现在福鼎站, 最小值 57.87 mm 出现在建阳站, 差值为 77.23 mm。另一方面, 前汛期多年平均最大一日降水量除闽西北偏多、闽东北偏少外其余各站并无太大差异, 后汛期多年平均最大一日降水量是呈现东部沿海向西部内陆递减的趋势。也即后汛期最大一日降水量的空间差异大于前汛期。

2.1.2 前汛期最大一日降水量相对值的空间变化

为进一步比较分析前后汛期多年平均最大一日降水量, 根据每个站在 1960—2013 年间出现 $X_{pi} > 0.55$ 、 $0.45 \leq X_{pi} \leq 0.55$ 、 $X_{pi} < 0.45$ 三种类型的频次的统计, 得到图 4。

分析图 4 可知: (1) 出现 $X_{pi} > 0.55$ 、 $0.45 \leq X_{pi} \leq 0.55$ 、 $X_{pi} < 0.45$ 的最大频次分别为 40、18、39, 最小频次分别为 5、8、3; (2) 出现 $X_{pi} > 0.55$ 频次最大的站点为浦城站和建阳站, 频次最小的站点为霞浦站, 出现 $0.45 \leq X_{pi} \leq 0.55$ 频次最大的站点为寿宁站, 频次最小的站点为福鼎站, 出现 $X_{pi} < 0.45$ 频次最大的站点为福鼎站, 最小的站点为建阳站; (3) 出现 $X_{pi} > 0.55$ 的频次大致呈现自西部内陆向东部沿海递减的趋势, 出现 $X_{pi} < 0.45$ 的频次大致呈现自东部沿海向西部内陆递减的趋势。其空间变化与上文中前后汛期多年平均最大一日降水量的空间变化基本相符。沿海与内陆的站点出现 $0.45 \leq X_{pi} \leq 0.55$ 的频次并无太大差别。

为了更好地反映各个站点出现 $X_{pi} > 0.55$ 和 $X_{pi} < 0.45$ 频次大小的差异, 当出现 $X_{pi} > 0.55$ 的频次大于 $X_{pi} < 0.45$ 的频次时, $X_{pi} > 0.55$ 的频次除以 $X_{pi} < 0.45$ 的频次; 如果 $X_{pi} > 0.55$ 的频次小于 $X_{pi} < 0.45$ 的频次, 则相反, 从而得到如图 5 的比值变化。比值越大, 反映该站点出现 $X_{pi} > 0.55$ 和 $X_{pi} < 0.45$ 频次的差异越大, 也反映了该站点前汛期最大一日降水量或后汛期最大一日降水量的相对重要性越大。当比值大于某个阈值时, 可以认为该

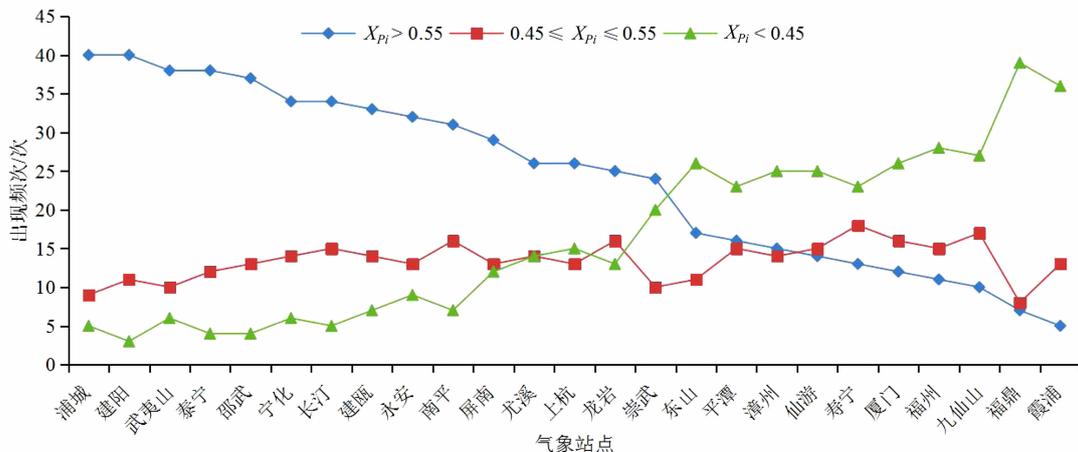


图 4 1960—2013 年福建省 25 个气象站点前后汛期最大一日降水量相对重要性类型出现频次

Fig. 4 Frequency of the relative importance of the maximum daily precipitation in the first and the second rainy seasons at the 25 meteorological stations in Fujian Province from 1960 to 2013

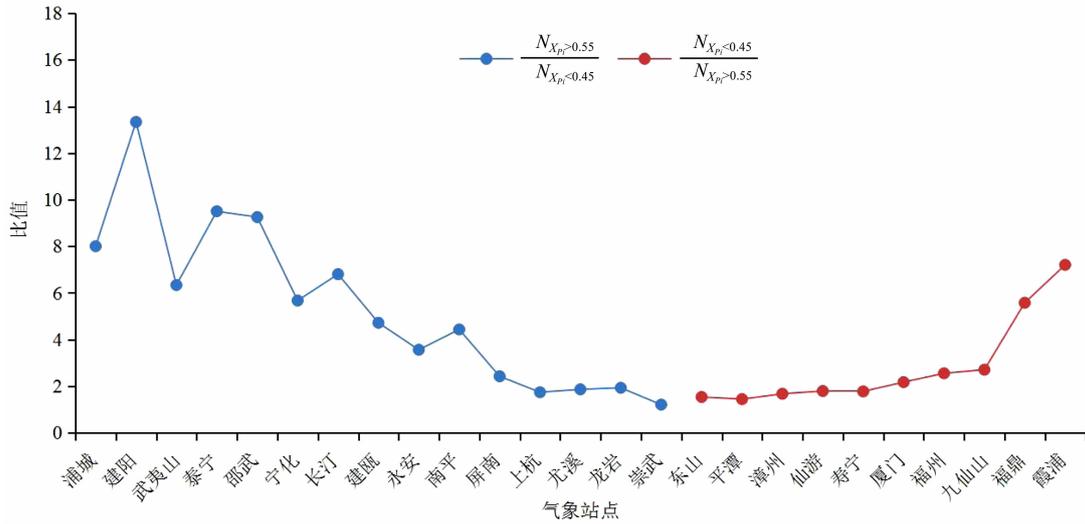


图5 1960—2013年福建省25个气象站点前后汛期最大一日降水量相对重要性类型出现频次的比值

Fig. 5 The ratio for the frequency of the relative importance of the maximum daily precipitation in the first and the second rainy seasons at the 25 meteorological stations in Fujian Province from 1960 to 2013

站点主要受前汛期最大一日降水量或后汛期最大一日降水量的单一影响。因此,根据图5结果,可以设置阈值,将25个气象站点划分为两个大类,分别为单汛期型和双汛期型。双汛期型为前后汛期并重。单汛期型又分为前汛期型和后汛期型,前汛期型是以前汛期为主, $X_{pi} > 0.55$ 出现频次大于 $X_{pi} < 0.45$ 的频次;反之为后汛期型,以后汛期为主。相似地,双汛期型也可以分为前高后低型和前低后高型两种。

当阈值取为3时,浦城、建阳、武夷山、泰宁、邵武、宁化、长汀、建瓯、永安、南平共10个气象站点为前汛期型,福鼎、霞浦2个站点为后汛期型,其余为双汛期型。其中前高后低型站点有屏南、尤溪、上杭、龙岩、崇武共5个站点,前低后高型站点有东山、平潭、漳州、仙游、寿宁、福州、厦门、九仙山共8个站点。单汛期型和双汛期型站点的空间分布见图6。

由图6可知:(1)前汛期型站点全部分布在福建省西部内陆地区;(2)双汛期型站点中,前高后低型站点除崇武站,其它站点均分布在福建省中部地区;前低后高型站点除位于福建省北部的寿宁站和中部的九仙山站外,其余位于沿海地区;(3)属于后汛期型站点的福鼎站和霞浦站均位于福建省东北部的沿海地区。总体上看,从内陆到沿海大体呈现前汛期型—前高后低型—前低后高型—后汛期型的变化趋势。

2.2 前后汛期最大一日降水量时间变化的空间差异
运用线性回归方法分别对前后汛期最大一日降

水量的变化趋势进行了分析,以斜率的正负反映序列的增加与减小趋势,从而将各站点变化趋势划分为两种类型,即增加趋势和减小趋势,分别得到表1和表2。表1表明,25个气象站点中,前汛期最大一日降水量在54年间呈现增加趋势的有13个站点,增加最快的为东山站,趋势系数为0.54;呈现减少趋势的有12个站点,减小最快的为武夷山站,趋势系数为-0.38,但25个站点均未通过显著性检验。

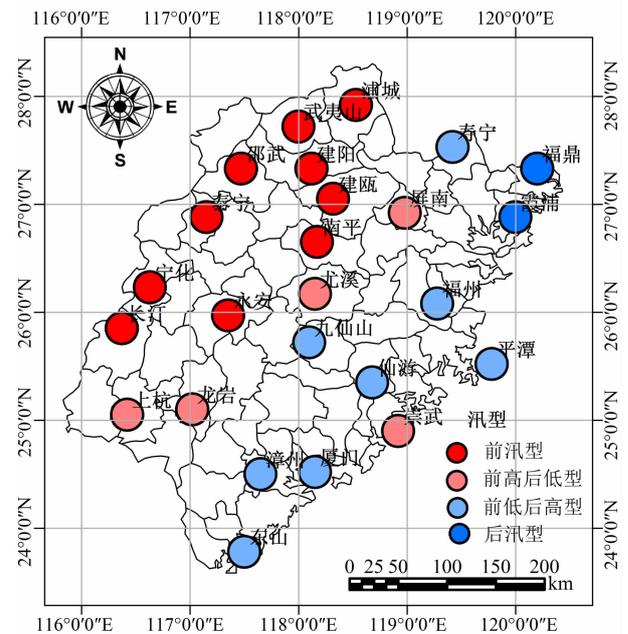


图6 福建省汛期分布图

Fig. 6 Distribution map of flood type in Fujian Province, China

而后汛期最大一日降水量(表 2)在 54 年间呈现减少趋势的仅有福鼎站、龙岩站、崇武站 3 个站点,减小最快的为龙岩站,趋势系数为 -0.34 ;其余 22 个站点均呈现增加的趋势,增加最快的为厦门站,趋势系数为 1.02 ,呈现增加趋势的站点变化趋势较明显,其中建瓯站、永安站、九仙山站通过 90% 的显著性检验,泰宁站、厦门站通过 95% 的显著性检验。

表 1 1960—2013 年福建省 25 个站点前汛期最大一日降水量线性变化趋势

Tab.1 Linear variation trends of maximum daily precipitation in the first rainy season of 25 stations in Fujian Province from 1960 to 2013

站点	趋势系数	站点	趋势系数	站点	趋势系数
邵武	-0.18	福州	-0.33	厦门	0.12
武夷山	-0.38	长汀	-0.08	东山	0.54
浦城	-0.11	上杭	0.15	建阳	0.03
建瓯	-0.20	永安	-0.09	福鼎	0.12
寿宁	-0.34	九仙山	0.14	南平	0.13
宁化	0.24	屏南	-0.01	龙岩	0.30
泰宁	-0.08	仙游	0.08	崇武	0.09
尤溪	-0.11	平潭	0.05		
霞浦	0.05	漳州	-0.04		

表 2 1960—2013 年福建省 25 个站点后汛期最大一日降水量线性变化趋势

Tab.2 Linear variation trends of maximum daily precipitation in the second rainy season of 25 stations in Fujian Province from 1960 to 2013

站点	趋势系数	站点	趋势系数	站点	趋势系数
邵武	0.24	福州	0.13	厦门	1.02**
武夷山	0.10	长汀	0.27	东山	0.69
浦城	0.16	上杭	0.41	建阳	0.02
建瓯	0.30*	永安	0.37*	福鼎	-0.23
寿宁	0.40	九仙山	0.58*	南平	0.06
宁化	0.29	屏南	0.13	龙岩	-0.34
泰宁	0.59**	仙游	0.16	崇武	-0.13
尤溪	0.28	平潭	0.57		
霞浦	0.24	漳州	0.14		

注: * 表示 $p < 0.1$, ** 表示 $p < 0.05$ 。

从空间变化看,福建省西北地区的大多数站点前汛期最大一日降水量在 54 年间表现为减小趋势,西南地区的大部分站点表现为增加趋势,沿海站点除福州站、漳州站表现为减小趋势外,其余站点均呈

现增加趋势(图 7)。后汛期最大一日降水量在 54 年间呈现减小趋势的站点仅龙岩站位于内陆,福鼎站和崇武站均位于沿海,呈现增加趋势的 22 个站点其增加的显著程度与所处地理位置并无太大联系,即增加趋势较明显和不明显的站点既有分布于沿海的也有分布于内陆的(图 8)。

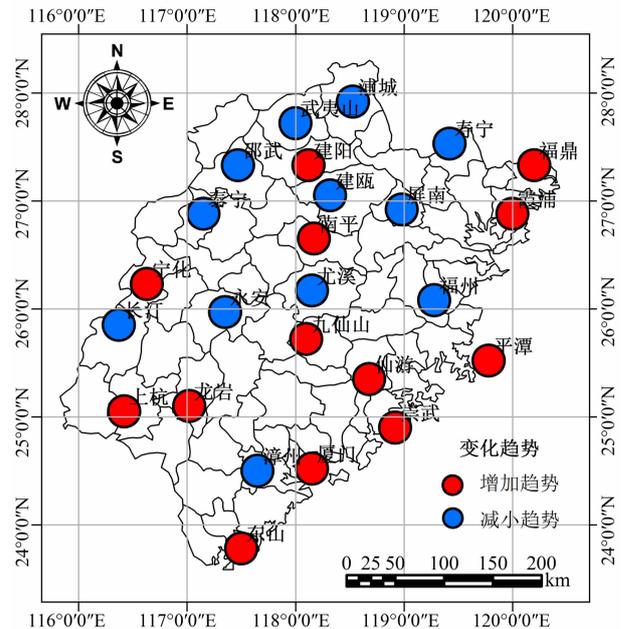


图 7 1960—2013 年福建省前汛期最大一日降水量变化趋势

Fig.7 Trends of maximum daily precipitation in the first rainy season from 1960 to 2013 in Fujian Province, China

福建省各站点前后汛期最大一日降水量的时间变化趋势均不明显,且仅有建瓯、永安、九仙山和泰宁、厦门的后汛期最大一日降水量的时间变化分别通过 90% 和 95% 的显著性检验。该结果仅为初步分析,尚需运用其它方法进一步研究其变化趋势。

3 讨论

3.1 汛型空间差异成因分析

福建省的地形变化如图 1 所示。境内山地、丘陵广布,占总面积的 80% 以上。地势总体上西北高、东南低,横断面呈马鞍形,西部和中部在新华夏构造的控制下形成了北(北)东斜贯全省的闽中、闽西大山带,其间为不相连的河谷、盆地,而东部沿海的地貌以丘陵、台地和滨海平原为主。

福建省前汛期降水是由于北方冷空气南下遇低

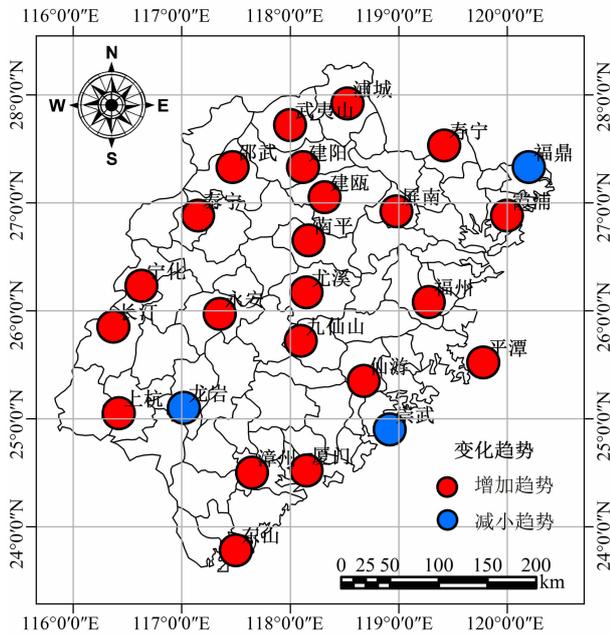


图 8 1960—2013 年福建省后汛期最大一日降水量变化趋势

Fig. 8 Trends of maximum daily precipitation in the second rainy season from 1960 to 2013 in Fujian Province, China

纬暖湿气流,使暖湿气流抬升形成锋面雨带来的,而后汛期降水主要来自于登陆或影响福建省的台风。

前汛期站点基本都位于福建省西部和西北部内陆地区,造成这种现象的原因是福建省西高东低的地形特别是闽西、闽中两大呈东北—西南走向的山带对来自南和北的气流形成阻挡(如图 1),这时 5 月和 6 月的冷暖空气势力相当,就会被山带形成的屏障抬升,往往使冷暖空气在此交汇,进而导致闽西北地区成为福建省前汛期暴雨发生的高频区。而后汛期台风在进入闽西、闽西北地区时,已经被削弱,所以台风降水对该地区的影响较小,使该地区形成前汛期。

后汛期站点是位于闽东北地区的福鼎站和霞浦站,从图 2 可以看出福鼎和霞浦站的后汛期多年平均最大一日降水量远高于其余地区,主要是因为台湾岛对台风路径产生影响,使福建沿海南北的风力大,而中间的风力小,加上沿海海岸对风的摩擦辐合作用,可能会削弱福建省中部沿海的台风暴雨,却增强南北沿海台风暴雨,最终使最大台风降水出现在闽南大部及闽东北部分地区^[19]。而福鼎、霞浦站背靠太姥山脉,台风降水在迎风坡抬升作用下明显变多,所以形成后汛期。

双汛型的气象站点既有位于中部内陆地区,也有位于东部沿海地区。对这些区域而言,相对前后汛期站点,福建省西高东低的地形特别是闽西、闽中两大呈东北—西南走向山带的作用减弱,而台湾岛对台风路径产生影响作用较强,是双汛期形成的主要原因。

总体上看,汛期空间差异成因复杂,值得今后进一步深入研究。

3.2 时间变化原因分析

3.2.1 前汛期最大一日降水量变化

福建省前汛期降水主要来自锋面降水,导致其最大一日降水量时间变化的原因可能与以下事件的变化有关:(1)与中西太平洋海温的变化有一定的关系,中西太平洋海温可能是通过影响中西太平洋副热带高压来影响福建前汛期降水^[22],中西太平洋海温异常升高会导致极端降水强度异常增加^[14];(2)与大气环流异常有着密切的关系,位于太平洋地区的异常反气旋环流,其后部的偏南暖湿气流与中国东部对流层中高层的一个槽后偏北干冷气流在我国华南地区交汇,辐合形成极端降水^[23];(3)与二氧化碳浓度有一定关系,人类活动产生的二氧化碳而引起的温室效应会使部分地区降水增加,日降水量增加^[24]。以上事件综合影响前汛期最大一日降水量大小,但具体原因仍需进一步探讨。

3.2.2 后汛期最大一日降水量变化

已有研究表明在 1958—2012 年间造成福建省极端降水(大于 100 mm)的台风数量呈现上升的趋势,且强度越大,上升趋势越明显,即影响福建省的台风造成的降水强度在增大^[25],与本文研究结果基本一致。同时较多学者对于台风移动速度、移动路径、台风强度、台风的热力和动力结构的研究也表明了这些因素均对台风降水有不同程度的影响^[25]。钮学新等人研究发现台风及其倒槽影响时间长短同样会影响降水量^[26]。但尚需从台风的演变进一步研究后汛期极端降水的变化。

4 结论

(1)根据前后汛期最大一日降水量的相对变化,可将福建省 25 个气象站点分为单汛期型和双汛期型,其中单汛期型包括前汛期型和后汛期型,双汛期型包括前高后低型和前低后高型。

(2)福建省前后汛期最大一日降水量具有明显的空间差异,在西部地区前汛期明显大于后汛期,形成前汛型,在中部地区和东部沿海形成双汛型,东北部沿海地区形成后汛型,西部内陆向东部沿海呈现出前汛型—前高后低型—前低后高型—后汛型的转变。

(3)福建省前汛期最大一日降水量在54年间的变化趋势并不显著,而后汛期的最大一日降水量在大多数站点都呈现比较明显的增加趋势,即台风降水的影响趋于增大。

因此,对于我国东南沿海地区,应区分两类天气系统对气候变化的响应,进一步分析前后汛期极端降水的时空变化规律。

参考文献 (References)

- [1] KARL T R, KNIGHT R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(2): 231–241.
- [2] STONE D A, WEAVER A J, ZWIERS F W. Trends in Canadian precipitation intensity [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2000, **38**(2): 321–347.
- [3] TANK A M G K, KONNEN G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99 [J]. *Journal of Climate*, 2003, **16**(22): 3665–3680.
- [4] YAMAMOTO R, SAKURAI Y. Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years [J]. *World Resources Review*, 1999, **11**(7): 271–281.
- [5] PETERSON T C, TAYLOR M A, DEMERITTE R, et al. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, **107**(21): 4601–4609.
- [6] NEW M, HEWITSON B, STEPHENSON D B, et al. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, **111**(14): 3007–3021.
- [7] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, **3**(3): 144–148. [ZHAO Panmao, WANG Cuicui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extremes [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, **3**(3): 144–148]
- [8] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(1): 75–83. [YANG Jinhua, JIANG Zhihong, WANG Pengxiang, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, **13**(1): 75–83]
- [9] WESTRA S, ALEXANDER L V, ZWIERS F W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation [J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**(11): 3904–3918.
- [10] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究 [D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017: 106–108. [WANG Xiaoli. Variation of extreme climate and its impact on NDVI in the coastal area of China [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017: 106–108]
- [11] 苏志重, 石顺吉, 张伟, 等. 1960–2010年福建省极端降水事件变化趋势分析 [J]. *暴雨灾害*, 2016, **35**(2): 166–172. [SU Zhizhong, SHI Shunji, ZHANG Wei, et al. Analysis of the trends of extreme precipitation events over Fujian Province from 1960 to 2010 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, **35**(2): 166–172]
- [12] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1–71. [TAO Shiyan. *The Rainfall in China* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1980: 1–71]
- [13] 任广成, 范飞龙, 沈爱华. 东南沿海前汛期与后汛期降水的比较分析 [J]. *海洋预报*, 2007, **24**(1): 16–24. [REN Guangcheng, Fan Feilong, SHEN Aihua. Comparison researches on the rainfall of the former and latter flood season in the southeast coastal area of China [J]. *Marine Forecasts*, 2007, **24**(1): 16–24]
- [14] 江秀芳. 福建省前后汛期极端降水时空特征对比 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 9–16. [JIANG Xiufang. Characteristics of spatial and temporal variations of extreme precipitation during the pre-flood and post-flood seasons in Fujian [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013: 9–16]
- [15] 黄婕, 高路, 陈兴伟, 等. 东南沿海前汛期降水极值变化特征及归因分析 [J]. *地理学报*, 2016, **71**(1): 153–165. [HUANG Jie, GAO Lu, CHEN Xingwei, et al. Variation of extreme precipitation and its causes during the first rainy season in the southeast coastal region of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(1): 153–165]
- [16] GAO L, HUANG J, CHEN X W, et al. Risk of extreme precipitation under nonstationarity conditions during the second flood season in the southeastern coastal region of China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, **18**(3): 669–681.
- [17] 张婷, 魏凤英. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征 [J]. *气象学报*, 2009, **67**(3): 442–451. [ZHANG Ting, WEI Fengying. Probability distribution of precipitation extremes during raining seasons in South China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, **67**(3): 442–451]
- [18] 许金镜, 林新彬, 温珍治, 等. 福建暴雨频数的变化特征 [J]. *台湾海峡*, 2004, **23**(4): 514–520. [XU Jinjing, LIN Xinbin, WEN Zhenzhi, et al. Discussing on variation and influence factor of rainstorm frequency in Fujian [J]. *Journal of Oceanography In Taiwan Strait*, 2004, **23**(4): 514–520]
- [19] 林小红, 任福民, 刘爱鸣, 等. 近46年影响福建的台风降水的

- 气候特征分析 [J]. 热带气象学报, 2008, **24**(4): 411 - 416. [LIN Xiaohong, REN Fumin, LIU Aiming, et al. Climate variation features of typhoon precipitation influencing Fujian for the past 46 years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, **24**(4): 411 - 416]
- [20] 聂明华, 严平勇. 福建省降水时空分布规律分析 [J]. 广东农业科学, 2008(6): 147 - 148. [NIE Minghua, YAN Pingyong. Analysis of precipitation temporal and spatial distribution of Fujian Province [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(6): 147 - 148]
- [21] 曾秀娟, 陈兴伟. 福建省年最大一日降水发生时间的空间差异 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, **13**(4): 41 - 46. [ZENG Xiujuan, CHEN Xingwei. Spatial variation of the time of maximum daily precipitation in Fujian Province [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2018, **13**(4): 41 - 46]
- [22] 李宏毅, 林朝晖, 陈红. 我国华南 4、5 月份降水年代际变化的特征及其与中西太平洋海温的可能关系 [J]. 气候与环境研究, 2012, **17**(4): 481 - 494. [LI Hongyi, LIN Zhaohui, CHEN Hong. Characteristics of the interdecadal variability of precipitation in April and May over South China and possible relationship with the mid-West Pacific SST [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, **17**(4): 481 - 494]
- [23] 刘静, 管兆勇, 龚振彬, 等. 近 30a 福建省前汛期极端降水事件特征及其成因 [J]. 气象科学, 2016, **36**(1): 28 - 35. [LIU Jing, GUAN Zhaoyong, GONG Zhenbin, et al. Characteristics and causes of extreme precipitation events over Fujian Province during May and June in recent three decades [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, **36**(1): 28 - 35]
- [24] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估 (I): 中国气候与环境变化及未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2005, **1**(1): 4 - 9. [QIN Dahe, DING Yihui, SU Jilan, et al. Assessment of climate and environment changes in China (I): Climate and environment changes in China and their projection [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, **1**(1): 4 - 9]
- [25] 邱文玉. 我国东南沿海台风极端降水特征及成因初探 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014: 27 - 30. [QIU Wenyu. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes in China's southeast coast [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014: 27 - 30]
- [26] 钮学新, 杜惠良, 滕代高, 等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析 [J]. 暴雨灾害, 2010, **29**(1): 76 - 80. [NIU Xuexin, DU Huiliang, TENG Daigao, et al. Main factors affecting the rainfall caused by landing typhoons [J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, **29**(1): 76 - 80]

Temporal and Spatial Variations of Maximum Daily Precipitation in the First and the Second Rainy Seasons in Fujian Province, China

LIN Siting¹, CHEN Xingwei^{1, 2*}, HUANG Jie¹

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In the past few decades, extreme precipitation has caused severe droughts and floods. In the region of the southeastern coast of China, the Asian monsoon and typhoons are the two most important systems for producing precipitation. The period of precipitation induced by the Asian monsoon, which is called the first rainy season. The second rainy season is the period with the typhoon-induced rainfall. To further understand the temporal and spatial variations of extreme precipitation in Fujian Province, in this paper it analyzed the variations of the maximum daily precipitation in the first and the second rainy season from 1960 to 2013 in 25 meteorological stations respectively with the statistical characteristics of the mean value of the maximum daily precipitation, relative value of the maximum daily precipitation in the first rainy season to the second rainy season. The temporal variation characteristics were also researched based on liner trend method. The results showed that: (1) The flood season in Fujian Province could be classified into single flood season type and double flood season type based on the temporal and spatial characteristics of the maximum daily precipitation of the first and second rainy seasons. And the single

flood season type could also be classified into first rainy season-dominated and second rainy season-dominated type respectively. (2) There was obvious spatial variation from the western inland mountains to the eastern coast of Fujian Province in the maximum daily precipitation of the first and second rainy seasons. (3) During the 54 years, the maximum daily precipitation did not change significantly for the first rainy season, but increased substantially in most stations for the second rainy season, which indicated the impact of increased typhoon precipitation. The different effect of climate change on the maximum daily precipitation of the first and second rainy seasons was worth to be further more investigated.

Key words: extreme precipitation; maximum daily precipitation; spatial differences; the first and second rainy seasons; Fujian Province