

# 西南地区极端降水变化特征分析

汪靖<sup>1, 2</sup> 张少波<sup>1</sup> 袁利平<sup>3</sup>

(1 成都信息工程大学 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;

2 贡山县气象局, 怒江 673500; 3 怒江州气象局, 怒江 673200)

**摘要:** 利用我国西南地区1971—2017年的逐日降水和气温数据对极端降水的变化进行了研究, 采用百分位阈值法来定义极端降水, 并通过对逐日降水的计算和统计得出6个极端降水指数, 经分析发现: 从时间上看, 近47年来西南地区总降水量减小, 但极端降水的频次和强度增大; 从空间上看, 西南地区东部的极端降水比率和强度都大于西部。此外, 夏季平均气温的升高会导致极端降水量的平稳增加, 但日平均气温的升高却会导致极端降水量先缓增后骤减, 说明西南地区极端降水随温度的升高有更多不确定性的同时极端降水趋于一个频次更高、时间更短、强度更强的趋势发展, 极端降水量随夏季平均气温升高的变化率为8.52%/°C, 大于C-C方程的理论解。

**关键词:** 极端降水, 西南, 温度, 相关性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.005

## Analysis on the Characteristics of Extreme Precipitation in Southwestern China

Wang Jing<sup>1, 2</sup>, Zhang Shaobo<sup>1</sup>, Yuan Liping<sup>3</sup>

(1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information

Technology, Chengdu 610225 2 Gongshan County Meteorological Bureau, Nujiang 673500

3 Nujiang Prefecture Meteorological Bureau, Nujiang 673200)

**Abstract:** In this paper, the daily precipitation and temperature data from 1971 to 2017 in Southwestern China were used to study the changes in extreme precipitation. The percentile threshold method was used to define extreme precipitation, and six extreme precipitation indexes were obtained through the calculation and statistics of daily precipitation. After research and analysis, the following conclusions were obtained: from the time point of view, the total precipitation in Southwestern China decreased in the past 47 years, but the frequency and intensity of extreme precipitation have increased. From the spatial point of view, the ratio and intensity of extreme precipitation in the east part of Southwestern China were higher than those in the west part of Southwestern China. The increase in summer averaged temperature will lead to a steady increase in extreme precipitation. Still, the increase of daily average temperature will cause the extreme precipitation to increase slowly and then suddenly decrease, it shows that extreme precipitation in Southwestern China has more uncertainty with the increase of temperature, and extreme precipitation tends to develop in a trend of higher frequency, shorter time, and more vigorous intensity. The change rate of extreme precipitation with summer averaged temperature was 8.52%/°C, which was higher than that of the C-C equation.

**Keywords:** extreme precipitation, Southwestern China, temperature, correlation

### 0 引言

在全球气候变暖的大背景下, 我国整体上极端降水事件呈现出了不断增长的趋势<sup>[1]</sup>。全球地表温度的升高也可以改变海陆热力差异, 使大尺度环流的结构发生变化, 加速全球水循环, 从而影响降水以及强降水的空间分布<sup>[2-3]</sup>, 带来更多的平均降水和极端降水事

件<sup>[4]</sup>。极端降水时间尺度小、强度大的特征, 给水利工程和气象防灾减灾带来很大的压力。目前对极端降水的研究主要以全球、国家和区域为主, 在我国也多以全国或省份以及江河流域为单位。

对于西南地区极端降水的变化特征, 国内外许多学者进行了深入的分析。王春学等<sup>[5]</sup>、袁文德等<sup>[6]</sup>和丁文荣等<sup>[7]</sup>一致得到极端降水事件整体呈上升趋势。陈活泼<sup>[8]</sup>利用国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)模式对我国极端降水和东亚大气环流未来演变特征进行了预估, 得出21世纪末我国极端降水的频率和强度有增加和增强的趋势。对于具体省份的

收稿日期: 2020年4月10日; 修回日期: 2020年7月12日

第一作者: 汪靖(1996—), Email: 643203125@qq.com

通信作者: 张少波(1987—), Email: zsb@cuit.edu.cn

基金项目: 四川省教育厅重点项目(18ZA0095), 成都信息工程大学引进人才启动项目(KYTZ201737)

研究, 杨晓静等<sup>[9]</sup>对云南省极端降水特征的分析中表明, 云南省极端降水量有显著的增加趋势。综上得到一个较为一致的观点是, 在近几年来我国西南地区的极端降水趋于增长, 并且频次增多、强度增强。

在全球变暖背景下, 研究者对温度和降水的关注度也越来越高。对于气温和降水的相关性, Wentz等<sup>[10]</sup>和Lenderink等<sup>[11]</sup>的研究都表明温度升高会增加大气中的饱和水汽压, 增强大气持水力。而Allan等<sup>[12]</sup>的研究表明, 在高温条件下极端降水事件的发生频率会比温度较低时更高。Xiao等<sup>[13]</sup>对我国极端降水变率与温度的相应关系的研究中发现, 气温的上升会增加极端降水事件的概率。

本研究包括四川、云南、贵州和重庆三省一市在内的我国的西南地区, 该地区西北接壤青藏高原, 南部是孟加拉湾和南海, 境内包括横断山脉、高原、丘陵、盆地等不同地貌, 地形十分复杂, 海拔落差大, 局地因子影响很大, 是一个典型的气候多变区。本文针对西南地区极端降水的变化趋势做分析, 并考虑其与气温的相关性。通过研究加深对气候变化及其影响的认识, 从而有利于政府有效开展防涝、抗旱、水利设施建设等工作。

## 1 数据和研究方法

观测资料来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中1951—2017年国家级地面站点的逐日降水、日间和夜间降水资料以及逐日的气温和最高最低

气温资料。考虑到缺测及台站搬迁所造成的观测资料的不完整性, 选取了西南范围内的122个站点, 对1971—2017年这47年的降水和温度资料进行研究与分析。

极端降水的定义采用的是百分位阈值法, 将1971—2000年各站点每次降水过程的降水量序列升序排序, 把第95个百分位值定义为极端降水事件的阈值, 当某站点某次降水过程的降水量大于该站点的阈值, 就把此次降水记为一次极端降水过程。

极端降水指数有多种定义, 根据实际情况, 本文通过对逐日降水的计算和统计得出以下6个极端降水指数(表1)。

表1 极端降水指数及其定义  
Table1 Extreme precipitation index and its definition

指数符号	指数名称	定义	单位
rmax	1 d最大降水量	全年日降水量的最大值	mm
r5max	5 d最大降水量	全年每个连续5 d降水量最大值	mm
tr95	极端降水量	全年日降水量>第95百分位值的降水总量	mm
nd95	极端降水日数	全年日降水量>第95百分位值的降水日数	d
tr95pct	极端降水比率	年极端降水量占年降水总量的百分比	%
tr95str	极端降水强度	年极端降水量与极端降水日数的比值	mm/d

## 2 西南地区夏季降水的变化特征

### 2.1 夏季总降水量的空间分布和变化趋势

图1为1971—2017年西南地区夏季总降水量及其趋势变化的空间分布。图1a为20时一次日20时降水的

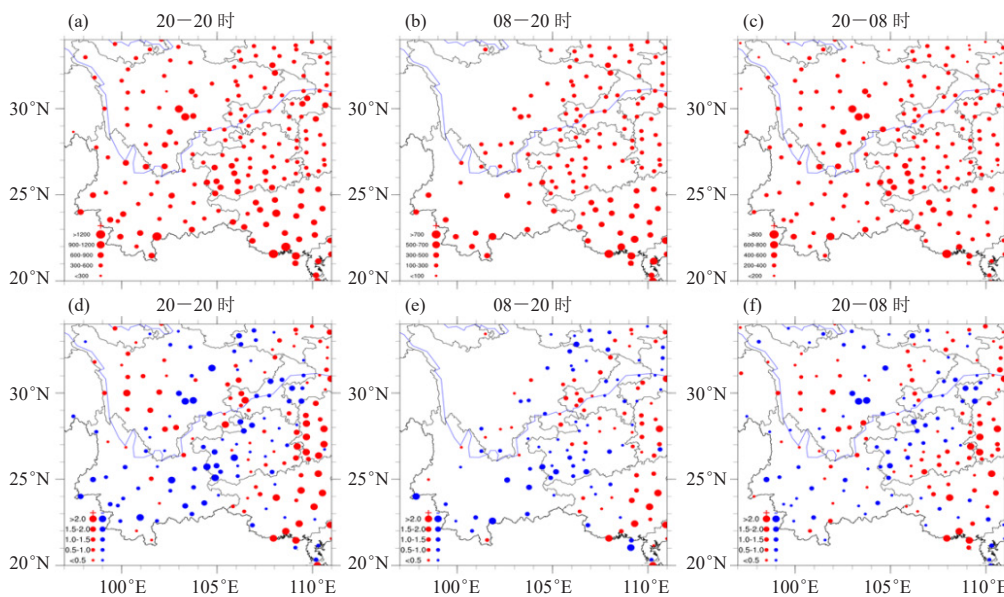


图1 1971—2017年夏季总降水量的空间分布和变化趋势

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水, (d) 全天降水的趋势变化, (e) 日间降水的趋势变化, (f) 夜间降水的趋势变化

Fig. 1 Spatial distribution and trend change of total precipitation in summer from 1971 to 2017

(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation, (d) daily precipitation trend change,

(e) daytime precipitation trend change, (f) nighttime precipitation trend change

空间分布, 可看出四川盆地降水量最大, 贵州和云南两省的总降水量都有明显的由北向南递增趋势。图1b和1c分别为日间降水与夜间降水的空间分布, 可看出在整个西南地区夜间降水明显大于日间。

图1d、1e和1f分别为全天、日间及夜间降水变化趋势的空间分布情况。其中不同大小的圆点对应不同程度的变化趋势, 红色表示增长, 蓝色表示下降。图1d为20时一次日20时的总降水, 整个西南地区约60%的站点呈下降趋势, 40%的站点呈上升趋势。日间降水有更明显的下降趋势, 约63%的站点下降, 37%的站点上升。夜间降水上升与下降的站点数基本持平, 分别约为49%和51% (图1f)。总体来看下降趋势的站点多于上升趋势的站点, 说明西南地区的夏季总降水量在近47年来呈现出减小趋势, 并且夜间降水的下降趋势更为明显。

## 2.2 极端降水量的空间分布和变化趋势

图2为1971—2017年西南地区第95百分位阈值的

极端降水量空间分布和趋势变化。图2a为20时一次日20时极端降水量 (tr95) 的空间分布, 可看到西南地区东部的极端降水量要明显大于西部, 西部的极端降水量基本在140 mm左右, 而东部大部分站点的极端降水量在200~260 mm。图2b和2c分别为日间和夜间的极端降水量, 可明显看到夜间的极端降水量大于日间。图2d为20时一次日20时极端降水量的变化趋势, 其中约66%的站点为增长趋势, 34%的站点为减小趋势。空间分布上看出川东以及贵州大部分地区都呈明显增长的趋势。川西一带也呈现出较为一致的增长趋势, 但增长幅度较小。图2e为日间极端降水的变化趋势, 约有60%的站点增加, 40%的站点减小。图2f为夜间极端降水的变化趋势, 约65%的站点增加, 仅35%的站点减小。说明西南地区的极端降水在不断上升, 并且夜间的极端降水占总降水的比重越来越大。由此看来, 西南地区近47年来夏季总降水量呈减小趋势, 而极端降水量却与之相反, 呈现出上升趋势。

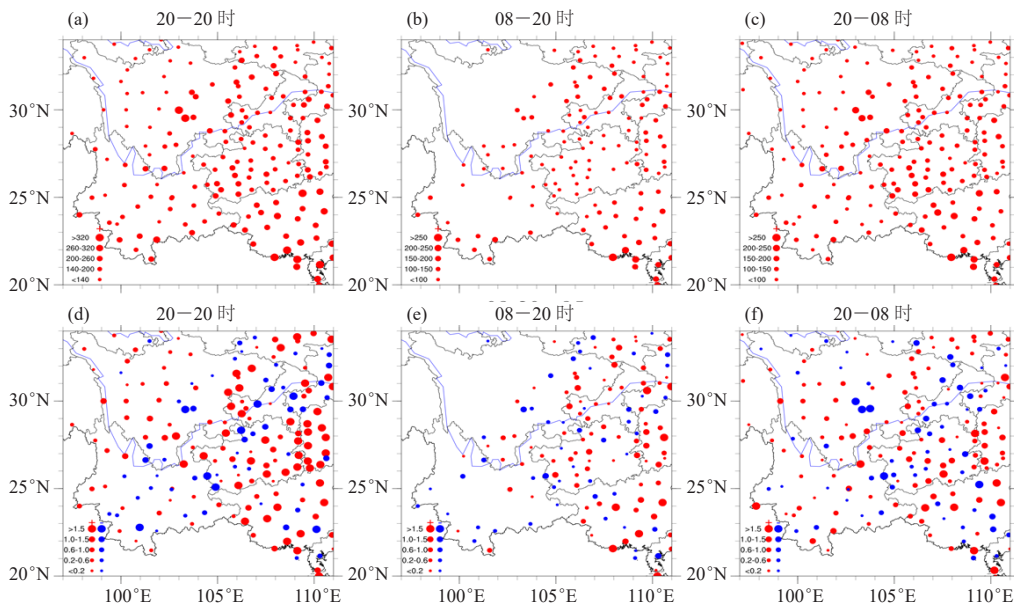


图2 1971—2017年极端降水量的空间分布和变化趋势

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水, (d) 全天降水的趋势变化, (e) 日间降水的趋势变化, (f) 夜间降水的趋势变化

Fig. 2 Spatial distribution and trend of extreme precipitation from 1971 to 2017

(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation, (d) daily precipitation trend change, (e) daytime precipitation trend change, (f) nighttime precipitation trend change

## 3 极端降水指数的总体特征

### 3.1 极端降水指数的空间分布

图3为1971—2017年西南地区各极端降水指数平均值的空间分布。图3a为极端降水日数 (nd95), 西南地区约78%的站点都在4~5 d, 只有22%的站点在4 d以下。总体来看西南地区东北部的极端降水日数明显小于其他地区。但从图3b的极端降水量 (tr95)

来看, 在整个西南地区, 东部的极端降水量要大于西部。对比发现西南地区的东部极端降水频次少、强度大, 西部极端降水频次多、强度小。图3c, 1 d最大降水量 (rmax) 的特征也是西部小于东部。图3d为5 d最大降水量 (r5max), 与1 d最大降水有相似的特征。图3e表明, 在我国西南地区, 极端降水比率 (tr95pct) 的空间分布呈现出东部较大西部较小的趋

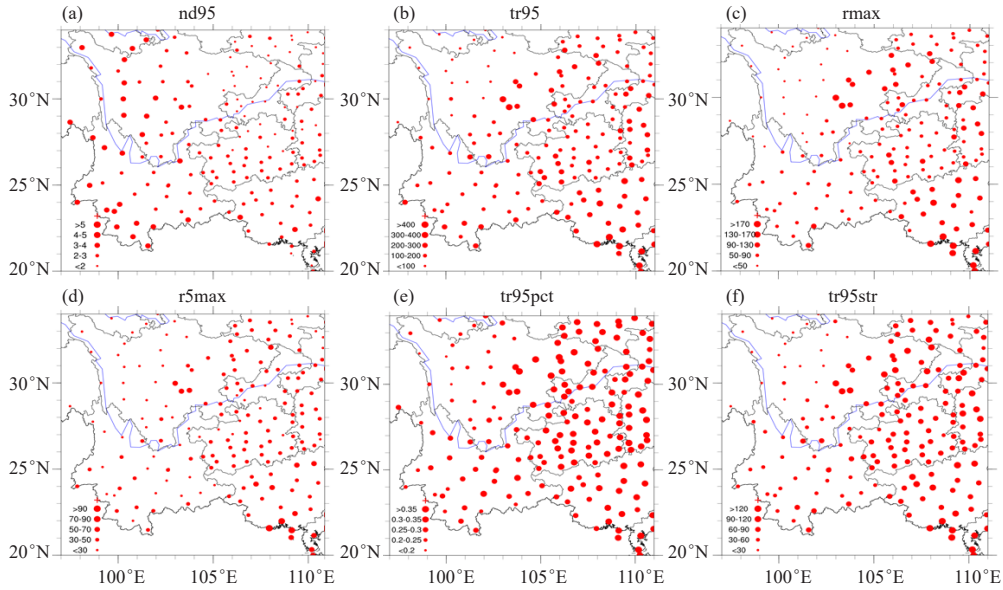


图3 1971—2017年各极端降水指数的空间分布

(a) 极端降水日数, (b) 极端降水量, (c) 1 d最大降水, (d) 5 d最大降水, (e) 极端降水比率, (f) 极端降水强度

Fig. 3 Spatial distribution of extreme precipitation indexes from 1971 to 2017

(a) days of extreme precipitation, (b) amount of extreme precipitation, (c) maximum precipitation in 1 d, (d) maximum precipitation in 5 d, (e) extreme precipitation ratio, (f) extreme precipitation intensity

势。盆地地区最大, 极端降水占年总降水量的35%甚至更高。重庆贵州一带极端降水比率也比较高, 约在30%~35%。图3f为年极端降水量与极端降水日数的比值(tr95str)。从空间分布上看西南的东部地区明显大于西部地区, 四川盆地及川东北的极端降水强度最大, 在90~120 mm/d。

综合多个极端降水指数来看, 我国西南地区西部极端降水的频次高而极端降水量低, 西南地区东部极端降水的频次低而极端降水量高, 即东部的极端降水强度要明显大于西部。

### 3.2 极端降水指数的变化趋势

如图4, 图4a为极端降水日数(nd95)变化趋势的空间分布, 约有63%的站点呈现出上升趋势, 37%的站点为减小趋势。从空间分布上看, 整个西南呈现出西部增长而东部减小的趋势。图4b为1 d最大降水量(rmax)变化趋势的空间分布, 约有65%的站点呈现为增长趋势, 35%的站点为减小趋势。贵州南部一带增长明显, 另外, 虽然增长幅度不大, 但在川西一带有较为一致的上升趋势。图4c为5 d最大降水量(r5max), 与1 d最大降水量呈现出基本一致的趋势。川西一带的站点为增大趋势。贵州和云南两省大部分站点都为减小趋势, 但减小趋势并不显著。图4d为西南地区极端降水强度(tr95str)变化趋势的空间分布图, 约60%的站点为上升趋势, 40%为减小趋势。从整体上看, 处于西南东部的重庆和贵州上升趋

势最为明显。图4e为极端降水比率(tr95pct)变化趋势的空间分布, 约有71%的站点呈上升趋势, 28%的站点呈下降趋势。

通过对西南地区总降水量和多个极端降水指数变化趋势的分析可以看到, 近47年来西南地区夏季总降水量呈减小趋势, 下降趋势的站点中约有86%, 而极端降水却出现了增加趋势, 极端降水日数、极端降水量以及极端降水强度等指数都呈现出了不同程度的上升趋势, 说明极端降水发生的频次和强度都有明显增大的趋势, 造成的结果为降水发生的更集中、时间更短、强度更大。

## 4 极端降水与气温的相关性

在全球变暖的背景下, 极端降水相对于平均降水对气候变化的响应更加显著, 并且极端降水与温度的关系也较为密切<sup>[14-18]</sup>, 因此温度和极端降水的关系越来越受到大家的关注, 而近年来我国大部分地区的夏季平均温度呈上升或显著上升的趋势<sup>[19]</sup>。不同区域的气候特征都有着明显差异, 因而不同区域的极端降水量与其温度的相关性也并不都是一致的。我国西南地区处于内陆, 地形复杂多变, 降水和其他气象要素受诸多因素影响, 因此更值得研究和探讨。

### 4.1 极端降水与日平均气温的相关性

图5为西南地区不同时次多个阈值的降水极值与日平均气温的相关性曲线。将不同阈值的降水量与发生降水时对应的气温进行统计, 细化为极小的温

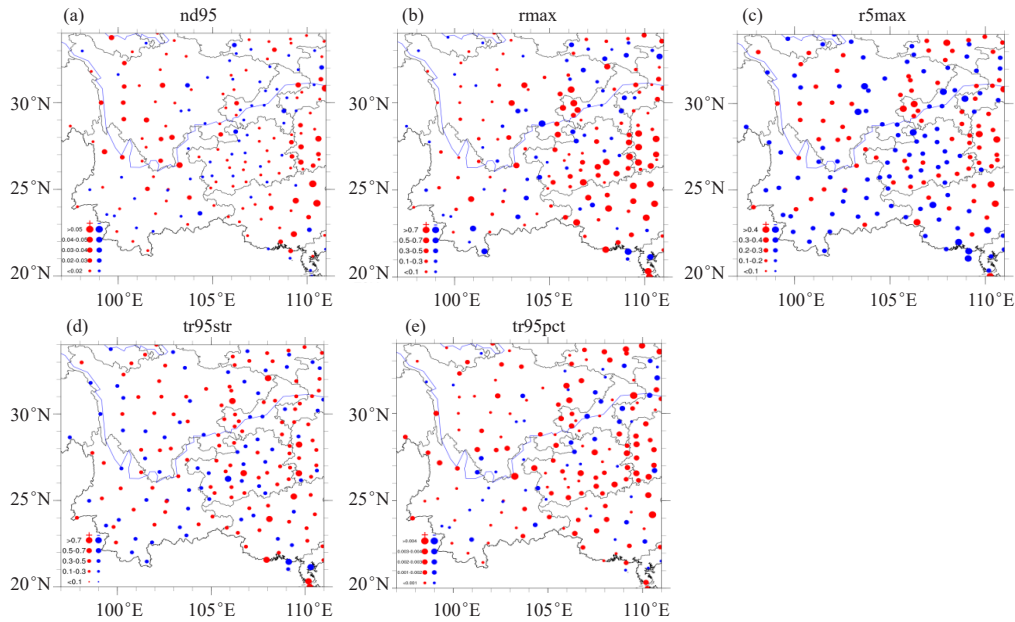


图4 1971—2017年各极端降水指数的变化趋势

(a) 极端降水日数, (b) 1 d最大降水, (c) 5 d最大降水, (d) 极端降水强度, (e) 极端降水比率

Fig. 4 Trend change of extreme precipitation indexes from 1971 to 2017

(a) days of extreme precipitation, (b) maximum precipitation in 1 d, (c) maximum precipitation in 5 d, (d) extreme precipitation intensity, (e) extreme precipitation ratio

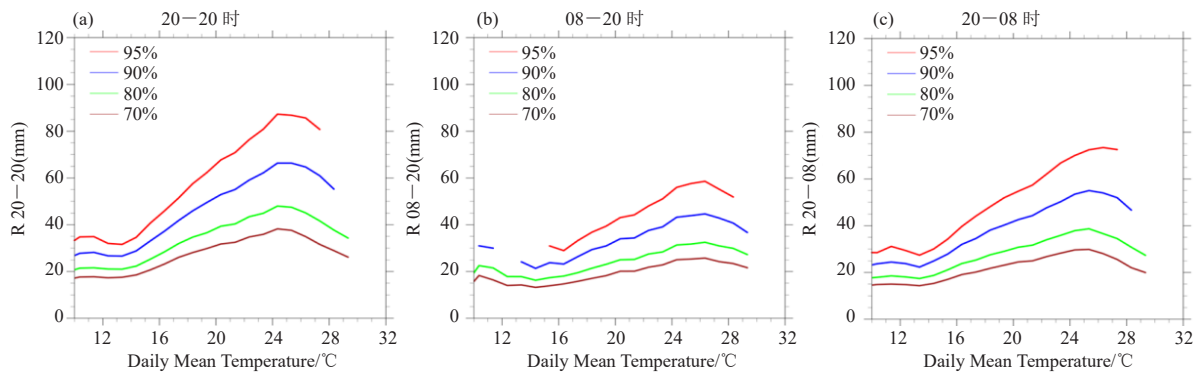


图5 极端降水量与日平均气温关系折线图

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 5 Correlation between extreme precipitation and daily mean temperature

(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

度区间后将气温和降水分别求平均,再连成一条几近平滑的曲线。图5a为20时一次日20时不同阈值的降水极值,可看出95、90、80和70百分位阈值内的降水在一定的温度范围内均呈现出了一致的上升趋势,二者呈正相关关系,但在超过这个温度范围以后极端降水量则随着温度的上升而下降,二者呈负相关关系。08—20时的日间降水与20时一次日08时的夜间降水也出现了同样的转折。在极端降水量与温度值呈正相关关系时,95百分位阈值的降水量随温度的升高增长最快,90、80和70百分位阈值降水的斜率依次递减,说明极端降水量随温度的升高会有更为显著的增加,而

当超过这个温度范围则出现反转,随温度的升高而迅速减小。从不同时段比较来看,夜间的极端降水量要大于日间,这说明夜间发生的极端降水事件强度更强。

#### 4.2 极端降水与气温相关性的空间分布

图6为极端降水量与气温相关性的空间分布。图6a中为20时一次日20时的极端降水量,西南地区约有28%的站点呈正相关关系,即温度越高极端降水量越大,约72%的站点呈现负相关关系。图6b为08—20时的日间降水与日最高气温的相关性空间分布,约有48%的站点为正相关关系,约52%的站点为负相关关

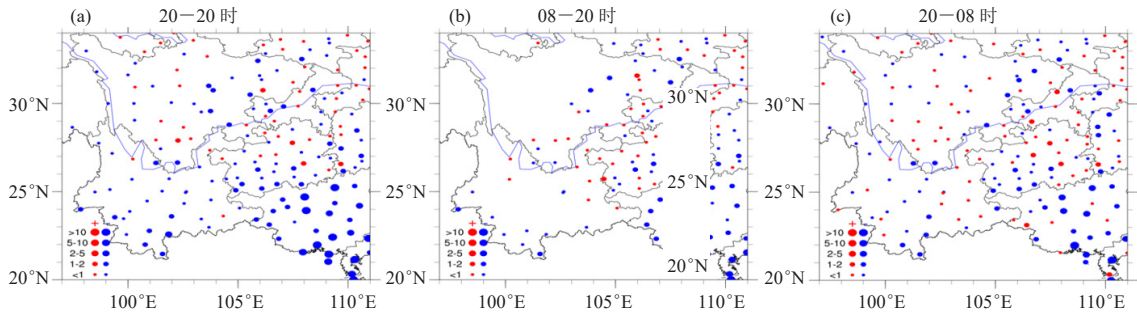


图6 极端降水与气温相关系数的空间分布  
(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 6 Spatial distribution of the correlation between extreme precipitation and temperature  
(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

系。图6c中为20—次日08时的夜间降水与日最低气温相关性的空间分布, 其中约56%的站点呈正相关关系, 约44%的站点为负相关关系。

对比3个时段范围内的降水与气温的相关性, 夜间约56%的站点极端降水与气温呈正相关关系, 而20—次日20时的站点则仅有28%的站点呈正相关关系, 气温较低的夜间极端降水量随气温的上升而增加的趋势较20—次日20时要明显得多, 说明当极端降水发生时, 气温越低降水量随温度上升而增加的趋势越明显。而日间有52%的站点呈负相关趋势, 20—次日20时有72%的站点为负相关趋势。这反映了极端降水与气温的正相关性仅维持在温度较低条件下, 温度越低, 正相关关系越明显, 极端降水随温度的升高而增加; 温度越高时负相关关系则越显著, 极端降水量随温度的升高而减少的趋势也就越明显。与上文的研究相对应, 验证了西南地区温度的上升虽然增加了大气的饱和水汽压, 大气的持水力增强, 降水量增加, 但当温度超过一定的范围之后则会出现反转, 极端降水量与温度呈显著的负相关关系。

### 4.3 极端降水与夏季平均气温的相关性

根据克劳修斯-克拉伯龙 (Clausius-Clapyeron) 方程, 极端降水量随气温而增加的变化率约为  $(6.0\% \sim 7.0\%) / ^\circ\text{C}$ 。同时根据历史观测数据和气候模拟结果表明, 全球大尺度下的极端降水变化率接近或高于  $7\% / ^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。而我国整体上因平均气温上升的极端降水变化率为  $(6.4\% / ^\circ\text{C})$ <sup>[1]</sup>, 接近C-C方程的理论解。但是由于不同地区地势地形差异较大, 受季风影响情况不同, 极端降水随温度的变化与C-C方程的适应性会有所不同。尤其在我国西南地区, 地形地貌复杂, 海拔较高, 有诸多因素影响降水。而西南地区的极端降水又多发生在夏季<sup>[20]</sup>, 因此做了极端降水与夏季平均气温的相关性分析以探讨气温的上升对西南地

区极端降水的影响。

图7为3个不同时次的极端降水量与夏季平均气温的散点图, 并做了线性拟合来研究二者的相关性。通过公式  $R_2 = R_1 \times (1 + P) \Delta t$ <sup>[21]</sup> 来计算极端降水的变化率, 其中:  $R_1$  为第一个温度值对应的降水量 (mm);  $R_2$  为第二个温度值对应的降水量 (mm);  $P$  为极端降水变化率 ( $\% / ^\circ\text{C}$ );  $\Delta t$  为温度差 ( $^\circ\text{C}$ )。可看出3个时次的极端降水主要集中在  $16 \sim 30^\circ\text{C}$ , 随平均气温的升高而呈现出了一致的增加趋势。其中20—20时的降水与气温的相关系数达到了5.14, 在  $16 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内, 计算得出极端降水的变化率为  $8.52\% / ^\circ\text{C}$ ; 08—20时的相关系数为3.51, 极端降水的变化率为  $9.21\% / ^\circ\text{C}$ ; 20—08时的相关系数为4.16, 极端降水的变化率为  $8.19\% / ^\circ\text{C}$ , 所得结果都超出了C-C方程的理论解。可能因为西南地区受季风影响显著, 东亚夏季风年代际尺度上的变化和西太平洋副热带高压的年代际位置变化, 对整个区域气候产生显著影响, 其中海温异常变化是影响西南地区气候变化的间接原因<sup>[6]</sup>。在地形上, 西南地区是世界上地形最复杂的地区之一, 地理海拔变化是影响西南地区极端降水变化的直接原因<sup>[22]</sup>。西南地区受到季风和地形显著影响, 其极端降水随温度升高的变化率大于C-C方程的理论解。

## 5 结论

此次研究采用了多个极端降水指数对1971—2017年间西南地区的122个台站的逐日降水数据与气温数据进行了分析与讨论。得出了以下结论。

1) 从时间上看, 近47年来我国西南地区的总降水量呈下降趋势, 但极端降水的频次和强度却有显著的增加, 降水趋于集中, 并且强度更强、时间更短。从空间上看, 夏季总降水量西南地区的东部要大于西部。西部地区极端降水日数多, 但极端降水量小, 东部的极端降水日数少而降水量大。极端降水的比率和

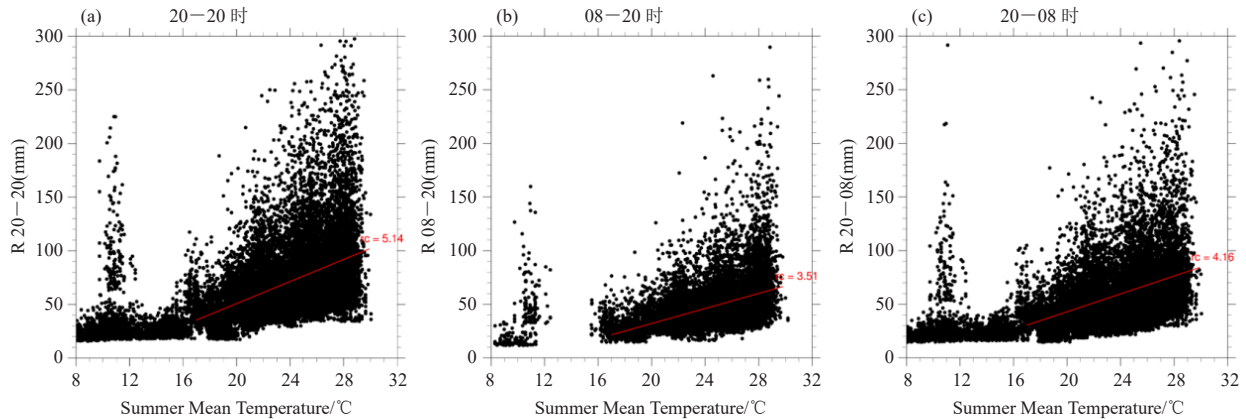


图7 极端降水量与夏季平均气温的散点图

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 7 Scatter plot of extreme precipitation and summer mean temperature  
(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

强度也都出现了与之对应的结果, 西南地区东部的极端降水比率和强度都大于西部。

2) 对于夏季平均气温与极端降水量的关系, 二者在16~30°C呈现出一个较为平稳的增长趋势, 反映夏季平均气温的升高会导致极端降水量的增加, 但在日平均气温与极端降水的关系中却表明仅靠温度的升高无法保证极端降水量的稳定增加。反映了西南地区的极端降水伴随温度的升高有更多不确定性的同时极端降水又趋于一个频次更高、时间更短、强度更强的趋势发展。

3) 我国西南地区的极端降水量随夏季平均气温升高而稳定增加, 全天的极端降水变化率为8.52%/°C, 日间极端降水随温度的变化率为9.21%/°C, 夜间极端降水随温度的变化率为8.19%/°C, 大于C-C方程的理论解。

#### 参考文献

- [1] 章杰, 鱼京善, 来文立. 全球变暖背景下极端降水变化率与气温的响应关系. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 722-726.
- [2] Overland J E, Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A*, 2010, 62(1): 1-9.
- [3] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, 2011, 36 (11/12): 2399-2417.
- [4] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change*, 1998, 39(4): 667-694.
- [5] 王春学, 马振峰, 秦宁生, 等. 近50年川渝盆地夏季降水多尺度变化特征. 高原气象, 2016, (5): 1191-1199.
- [6] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962—2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征. 资源科学, 2014, (4): 766-772.
- [7] 丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1071-1079.
- [8] 陈活泼. CMIP5模式对21世纪末中国极端降水事件变化的预估. 科学通报, 2013, (8): 743-752.
- [9] 杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 等. 云南省1958—2013年极端降水时空变化特征分析. 灾害学, 2015, 30(4): 178-186.
- [10] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 317: 233-235.
- [11] Lenderink G, Meijgaard E V. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 511-514.
- [12] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321: 1481-1484.
- [13] Xiao C, Wu P, Zhang L, et al. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1-9.
- [14] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [15] Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 413-416.
- [16] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [17] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [18] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D5), doi: 10.1029/2005JD006290.
- [19] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应. 地理学报, 2016, 71(5): 718-730.
- [20] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近50 a极端降水事件变化特征的季节性差异. 大气科学学报, 2009, 32(6): 744-751.
- [21] 王佳雯, 廖威林, 王大刚, 等. 中国大陆地区极端降水与温度的相关性. 中山大学学报:自然科学版, 2017, 56(6): 22-30.
- [22] 徐晓, 肖天贵, 麻素红. 西南地区气候季节划分及特征分析. 高原山地气象研究, 2010, 30(1): 35-40.