

文章编号: 2096-1618(2025)02-0192-09

四川省夏、秋季极端降水演变特征分析

答俊昇, 王禹涵, 谭诺峰, 王伟

(成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 频繁发生的极端降水对安全与经济发展造成了严重威胁。为应对极端降水灾害, 利用中国气象局提供的1980–2014年逐日降水资料, 采用趋势、相关等分析方法分析四川省夏、秋季日均降水量和极端降水指数(极端降水量R99P、强降水量R95P、降水强度SDII、降水日数R1)的时空变化规律, 讨论随时间发展各极端降水指数与地形相关性的演变特征。结果表明:(1)四川省多年平均日降水主要集中在夏、秋两季。均呈自西向东逐渐增加的空间分布形势, 大值区多集中在盆地西部; 两季多地的历年降水量演变呈下降趋势, 但降水强度呈现一定差异; 夏、秋两季四川省各地日均降水与海拔显著相关。(2)根据降水与地形之间的关系将四川省分为3个子区域: 一区为四川盆地, 二区为四川省南部中海拔地区, 三区为四川省西部高海拔地区。四川省夏、秋两季各极端降水指数在空间分布上, R99P、R95P与SDII多呈现自西向东渐增分布, 夏季大值多在一区西部等地, 表明一区为极端降水出现可能性较高的区域; 在时间分布上, 四川省的极端降水夏季呈减少趋势, 多集中在一区西部, 秋季相反。夏季各极端降水指数在1980–2007年与海拔均呈现较强的正相关性, 近年R95P与SDII海拔依赖性更强且与海拔呈负相关, 秋季相关性不如夏季明显。

关键词: 极端降水指数; 区域特征; 时空演变; 海拔依赖性

中图分类号: P466

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.02.010

0 引言

在全球变暖的大环境下, IPCC发布了第六次评估报告《气候变化2022:影响、适应和脆弱性》^[1], 指出随着全球升温人类活动已经导致全球范围的极端降水事件频率的增长, Alexander等^[2]利用全球600个降水站点发现自20世纪50年代以来, 全球降水日数增加趋势较为明显。Zolina等^[3]发现, 在北欧、中欧以及俄罗斯持续降水时间显著增长, 在冬季趋势尤为明显, Gao等^[4]研究证实21世纪末北美极端降水天数显著增加, Badji等^[5]也证实了非洲部分地区降水年际变化超出了季节总量。中国极端降水事件频率也有增加趋势^[6–9], 陈星任^[10]发现西南地区极端降水事件有明显增加趋势。其北部极端降水频率呈显著上升趋势, 南部则相反^[11–12]。张焕等^[13]表明极端强降水时数虽然在四川盆地西部减少, 但在西南大部分地区却为增加趋势。张顺谦等^[14]发现四川各区域极端降水趋势有着较大差异。

四川省主要处于亚热带季风气候区, “干变干”“湿变湿”干湿季节分明, 全年降水量分配极不均匀^[15]。王伟等^[16]发现西南地区上空伴随高度场出现的气旋性环流和反气旋性环流是直接影响中国西南地

区夏季降水的重要环流因子。中高纬阻塞槽、西太平洋副热带高压^[17–19]、西南低涡^[20]等对川西地区强降水的形成影响也越来越受到重视。李跃清^[21]发现前期高原地面加热场通过持续影响后期青藏高原上空100 hPa高度场会导致未来高原东侧川渝地区夏季降水异常。李永华等^[22]发现西南地区东部夏季降水与高原主体东南部的热源变化关系密切。唐佑民等^[23]、李永华等^[24]也发现东太平洋海表温度是影响西南地区夏季降水的重要环流因子。

四川省地势西高东低, 地貌多样, 天气过程复杂多变^[25], 是中国的极端降水多发地^[26–28]。研究表明四川省的极端降水发生频率出现整体上的提升^[29], 极端降水会对农业、健康有一定影响^[30–32]。因而有必要细化对四川地区极端降水时空变化规律的研究, 探讨不同区域与季节的差异性, 为四川地区应对极端降水灾害, 建立系统防灾减灾体系提供参考, 具有重要的现实意义。

1 研究区域及资料与方法

1.1 研究区域介绍及资料来源

选用中国气象局提供的逐日降水台站数据^[33–34]。为保证数据的完整性, 挑选1980–2014年共145个台站的日降水数据进行相关分析工作(图1)。

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY201506001)

通信作者: 王伟. E-mail: wei2009@cuit.edu.cn

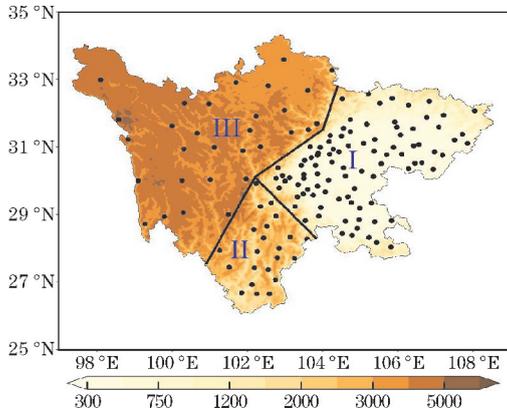


图1 四川省地形高度与中国气象测站的分布图以及分区情况(黑色圆点为台站位置,I为一区低海拔地区,II为二区中海拔地区,III为三区高海拔地区。下同)

表1 选取的极端降水指数

指数	名称	定义	单位
R99P	极强降水量	日降水量大于99%分位值的总降水量	mm
R95P	强降水量	日降水量大于95%分位值的总降水量	mm
SDII	降水强度	降水总量与湿日日数(日降水量>1 mm)之比	mm · d ⁻¹
R1	降水日数	日降水量≥1 mm的天数	d

1.2.2 Mann-Kendall 显著性检验

选择由 Mann(1945)^[40] 和 Kendall(1975)^[41] 最先提出的非参数 Mann-Kendall 方法进行显著性检验来判断趋势是否显著。用 Mann-Kendall 方法来做显著性检验是一种基于秩或排序的方法,不需要提前假设数据的分布,适用于水文、气象等非正态分布的数据,计算方便,因此与其他检验方法相比更加稳健。对于时间序列 x 是 n 个独立的随机分布独立样本,且 $i \neq j$, Mann-Kendall 检验的统计量 S 计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i)$$

式中 x_j, x_i 为时间序列第 j 和第 i 个数值,且 x_j, x_i 分布不同,sign 为定义的函数,其定义如下:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

假设 S 为无趋势分布,其均值为 0,标准差(方差)只是与样本个数和排序结果有关的正态分布。构造 S 的标准正态分布 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}}} & S < 0 \end{cases}$$

其中 var 表示统计量 S 的标准差(方差)。表达式为

$$\text{var} = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5) - a}{18}}$$

1.2 方法介绍

1.2.1 极端降水指数

世界气象组织^[35]在1998-2001年的气候变化监测会议中提出了一套极端气候指数,并成为了气候变化研究的统一标准。其中有27个指数被认为是核心指数,具有弱极端性、显著性强等特点。本文选取其中4个应用广泛的极端降水指数^[36-39]进行分析:极强降水量(R99P)、强降水量(R95P)、降水强度(SDII)、降水日数(R1),详细信息如表1所示。

$$a = \sum_{i=1}^m n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)$$

其中 n 为样本数, m 为样本重复的数量, n_i 表示第 i 组重复值的数量。无重复值则:

$$\text{var} = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}$$

$Z > 0$ 时是上升趋势, $Z < 0$ 时是下降趋势。 $|Z| \geq 1.28, 1.64$ 和 2.32 时, 分别表示通过了 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平检验。

1.2.3 相关性分析

本文相关分析选择皮尔逊相关系数来检验两种统计量的相关性, r 为 $-1 \sim +1$, 如果 $r > 0$, 表示两个量成正相关; 如果 $r < 0$, 则两个量成负相关; 如果 $r = 0$, 则两个向量不相关。皮尔逊相关系数的定义如下:

$$\text{Pearson} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中 \bar{x}, \bar{y} 表示样本均值。

2 夏、秋季降水特征

从多年平均降水总量上看,四川省降水事件多发生在夏、秋两季,两季多年平均(1980-2014年)总降水量各占比全年为55.3%和22.4%(表略),故本文只对夏、秋两季降水特征进行分析。

2.1 夏、秋季平均降水空间分布

从图2可明显看出,四川省夏、秋两季平均日降水

变化呈东高西低分布,且日均降水量大值区均集中在四川省中部即盆地西部附近。

夏季日均降水量最高出现在四川省中部盆地西部地区雅安站,达10.6 mm/d,最低出现于四川省北部山地地区茂县站,仅2.4 mm/d。四川盆地的日降水呈现西南东北走向,日降水量表现为左端向外渐减的趋势(图2a)。四川省中部往南地区,海拔快速上升为2000 m左右,以下称中海拔地区,其日均降水量呈现自北向南逐渐上升的趋势,最大升至8 mm/d,日降水量

相较于盆地地区减少。四川省中部以西地区多为山地,海拔4000 m左右,以下称高海拔地区,该地区日均降水量明显偏少,整体呈现东多西少的分布形势,越靠近四川省中部降水越多。

秋季日均降水量最高为天全站达3.8 mm/d,最低日均降水量为四川省西部高海拔地区得荣站0.6 mm/d(图2b)。降水多集中于中海拔地区南部和低海拔地区西部、东北部。

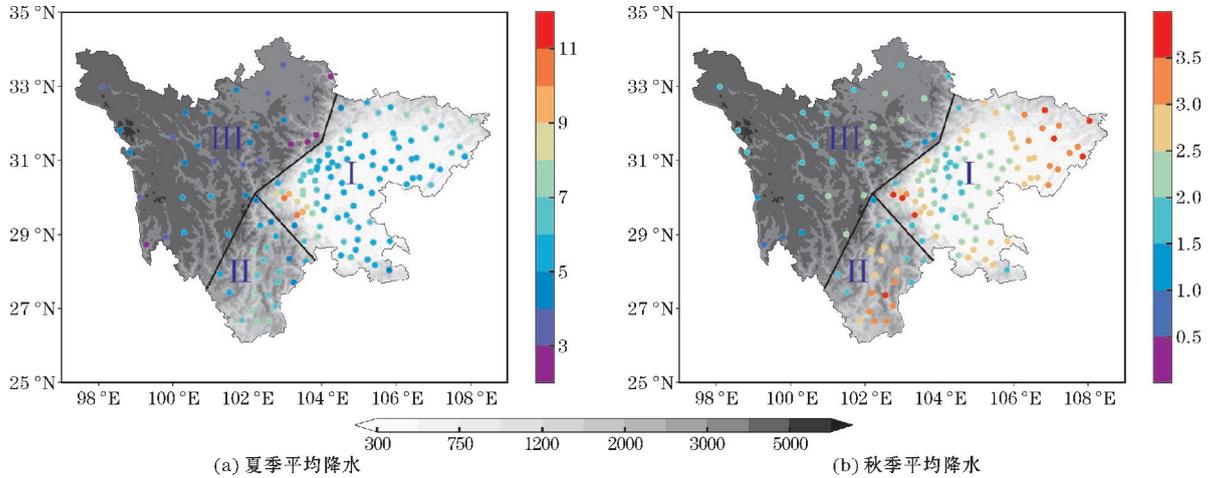


图2 1980-2014年四川省夏、秋季多年平均日均降水量的空间分布

2.2 夏、秋季平均降水与地形的相关性

针对日平均降水量和地形之间的关系^[42],本文选用海拔、经度和纬度3个变量对夏、秋季日均降水量进行趋势和相关性分析。如图3所示,夏、秋季日均降水量与经度呈正相关,其余呈负相关,所有指标均通过

0.01显著性水平检验。在降水与海拔的关系上,降水大值区海拔多小于1000 m(图3a、b),这与前文四川省日均降水呈东高西低分布和低海拔地区降水量相对较高相互印证,即降水多集中在四川省中东部低海拔地区,表明四川省不同区域的海拔与降水呈显著相关。

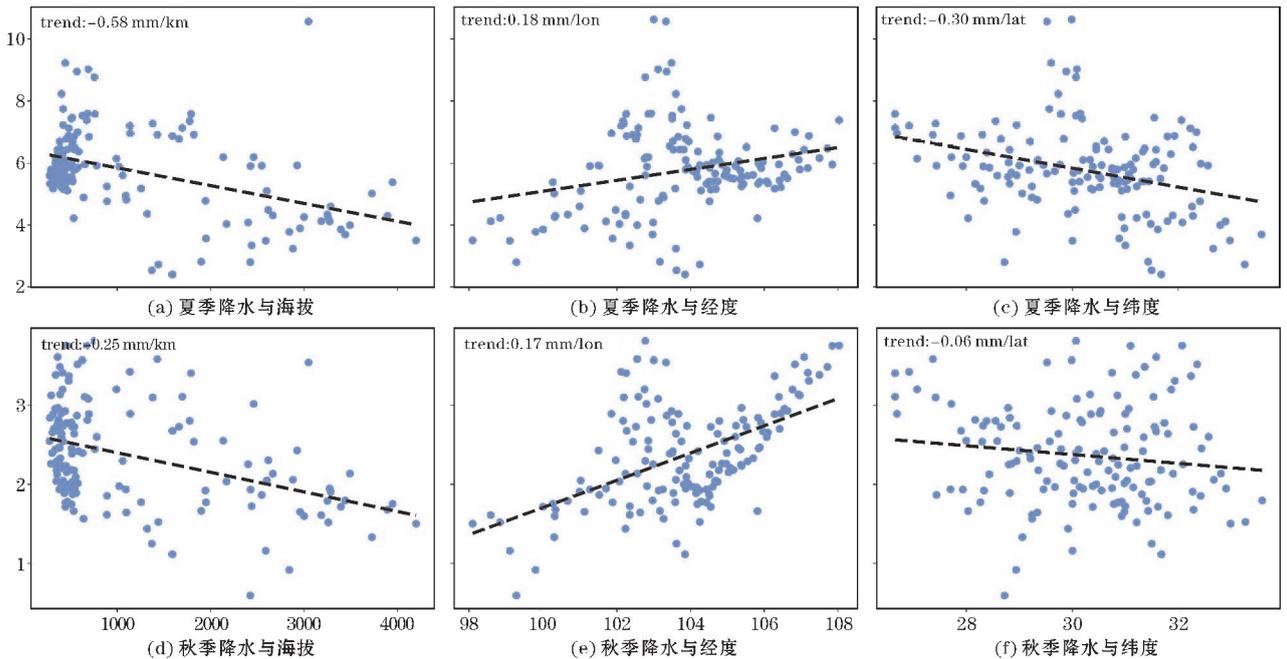


图3 1980-2014年四川省夏、秋季多年平均日均降水量与海拔、经度、纬度的变化关系(trend表示线性趋势)

2.3 夏、秋季降水趋势空间分布

从整体上看,大部分台站日均降水量皆呈下降趋势(图4)。两季日均降水量下降有一定差异,日均降水量在夏季下降更为显著,约有73.1%的台站日均降水量呈下降趋势,秋季约有62.1%呈下降趋势。这表明在一定程度上四川省夏、秋季降水量有一定减小且

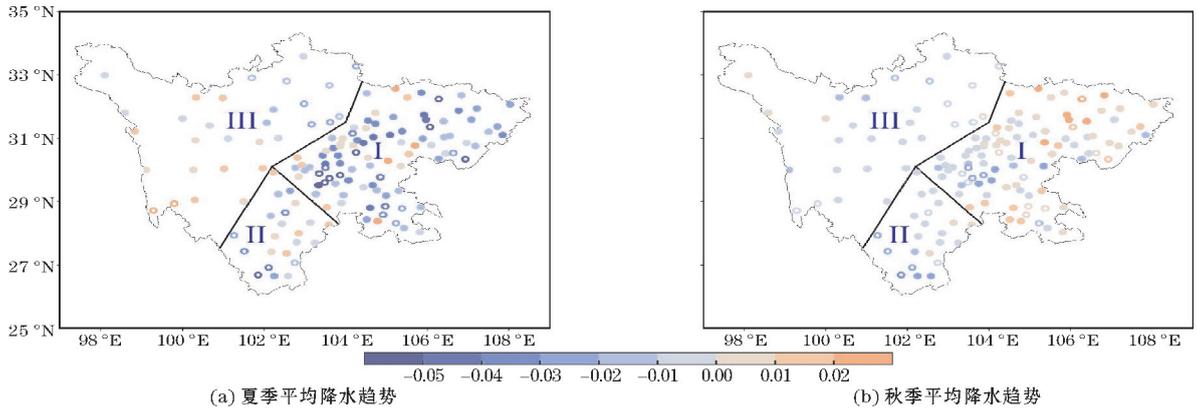


图4 1980-2014年四川省夏、秋季平均日降水量趋势的空间分布(白色打点为通过90%显著性水平的台站)

3 夏、秋季极端降水特征

为更精准讨论四川省不同区域的极端降水特征,通过上述日均降水量与地形相对关系的分析,可知地形对降水有显著影响^[43]。如图1所示将四川省分为3个区域:一区为低海拔地区(93个台站);二区为中海拔地区(22个台站);三区为高海拔地区(30个台站),由此对四川省不同区域日均降水趋势展开分析。

3.1 夏、秋季极端降水空间分布

WMO提供的极端降水指数是研究极端降水常用的方法之一^[44]。本文选择R99P、R95P、SDII、R1极端降水指数^[45-47]分析四川省夏、秋两季极端降水的时空特征。由图5可知,四川省1980-2014年多年平均的夏季极强降水量(R99P)在空间上大体呈现由一区左部向四周渐减的趋势,最大值为峨眉站157.5 mm,次之为雅安站144.5 mm,均位于一区左部即四川盆地西部(图5a);秋季极强降水量有明显的东西差异,呈西向东渐增趋势,最大一区东北部万源站达75.6 mm(图5b)。

夏、秋季强降水量(R95P)在空间分布上与极强降水量(R99P)相似,夏季最大区域在雅安—峨眉一带(雅安站461.6 mm、峨眉站441.6 mm)(图5c);秋季最大值同为该区东北部万源站达205.6 mm,二区南部也出现过大大值区(图5d)。

降水强度(SDII)也呈现出东多西少的空间分布,夏季在一区西部较大,最大值为峨眉站 $23 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图5e);秋季在一区东北部和二区南部较大,在

日均降水量下降显著的台站多集中在低海拔地区。从夏、秋两季看,夏季日均降水量趋势呈自西向东渐减分布,下降最快的为盐边站,10年约下降 0.76 mm/d ;上升最快的为青川站,10年约上升 0.34 mm/d ,秋季日均降水增加台站多集中在四川东部及东北部,下降最快的同为盐边站,10年约下降 0.38 mm/d ;上升最快的为南江站,10年约上升 0.40 mm/d 。

11 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 之上,最大值同为万源站 $13.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图5f)。

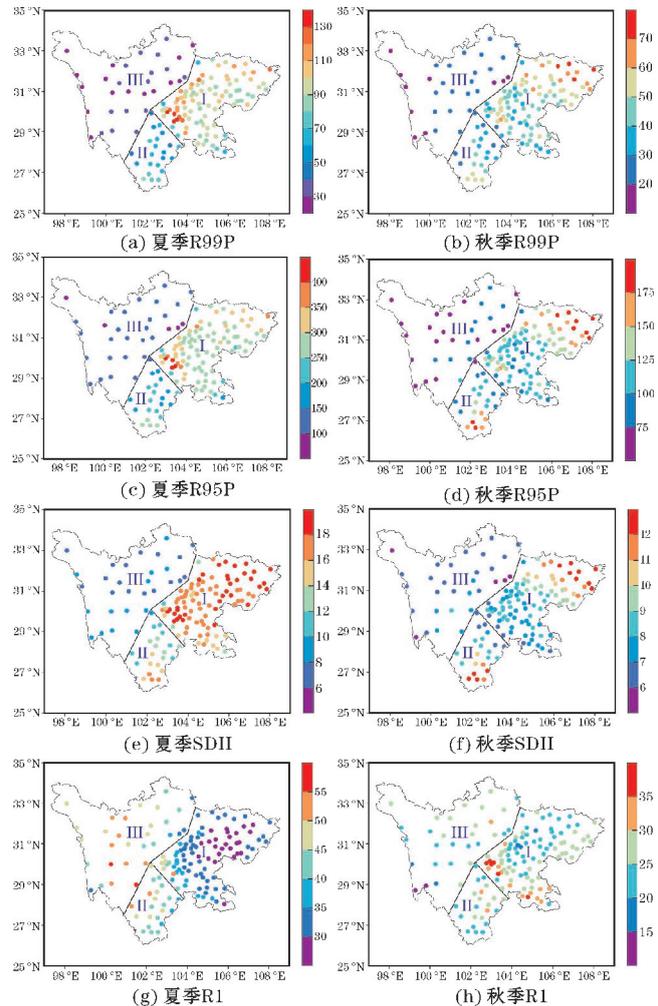


图5 1980-2014年四川省夏、秋季多年平均极端降水指数空间分布

降水日数(R1)夏季多呈现由西往东渐减的趋势,最大值为三区南部九龙站达59 d,一区台站普遍未超过35 d(图5g),秋季在一区西部和南部较大,最大为一区西部天全站达43 d(图5h)。结合前面的分析可知;R99P、R95P、SDII呈自西向东渐增趋势,R1则相反,这与各极端降水指数定义有所关联;夏季一区西部降水多以强降水形式呈现,秋季多在一区东北部;一区为极端降水出现可能性较高的区域,二区次之,三区极端降水出现的可能性较低。

3.2 夏、秋季极端降水趋势空间分布

图6给出了四川省各台站1980-2014年夏、秋两季4个极端降水指数的时间演变趋势,四川省夏季极强降水量(R99P)的演变趋势空间分布中约38.0%台站随时间呈上升趋势,随时间呈下降趋势的台站集中在一区的峨眉—邛崃一带(峨眉-21.2 mm/10a、邛崃-16.5 mm/10a),显著下降的台站多在一区西部(0.1显著性水平检验)。秋季(图6b)约60.0%台站的极强降水量(R99P)演变趋势呈上升趋势,多集中在一区东北部,乐山—浦江一带下降趋势明显(乐山-14.4 mm/10a、浦江-8.9 mm/10a)(图6b)。

夏季强降水量(R95P)随时间呈上升趋势的台站约占总站数的37.2%,随时间呈现下降趋势多集中在一区的中西部,显著下降为峨眉—洪雅一带(峨眉-39.7 mm/10a、洪雅-41.9 mm/10a)(图6c)。秋季约64.8%台站(94个)的强降水量呈上升趋势,最大值分布在一区东北部(南江35.0 mm/10a、射洪22.6 mm/10a)和南部(图6d)。

夏季降水强度(SDII)随时间呈上升趋势的台站约45.2%,上升趋势的大值区位于一区东部遂宁—乐至一带(遂宁1.4 mm·d⁻¹/10a,乐至1.4 mm·d⁻¹/10a)和北部青川—剑阁一带,一区西部为下降趋势大值区(夹江-1.2 mm·d⁻¹/10a、米易-1.2 mm·d⁻¹/10a)(图6e)。秋季约68.3%台站呈上升趋势,一区东部、南部和二区南部为上升趋势的大值区(图6f)。

夏季降水日数(R1)随时间呈上升趋势的台站约占19.3%,一区东部武胜一带及南部兴文一带、二区东南部木里—盐边一带和三区北部九寨沟—红原—理县一带为下降趋势的大值区(图6g)。秋季呈上升趋势的台站约11.0%(16个),降水日数随时间均为下降趋势,有45个台站的降水日数随时间的演变趋势通过了0.1显著性水平检验(图6h)。结合上述趋势分析可知;R99P、R95P、SDII在趋势分布上仍具有较高的相似性,多以一区西部下降、东北部上升为主;R1多以全域下降分布;四川省整体极端降水呈现减少趋势,且多集中在一区西部。

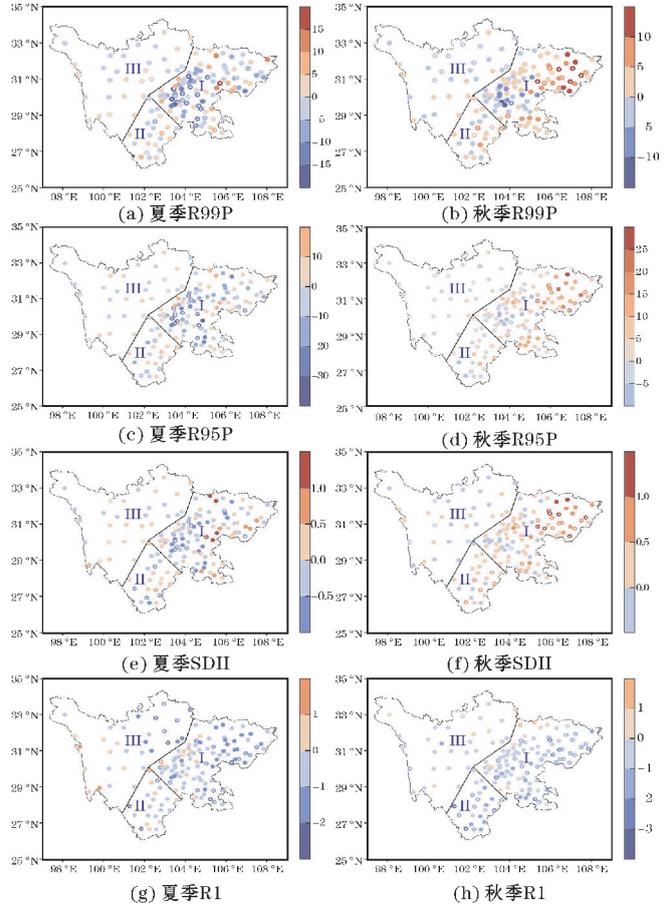


图6 1980-2014年四川省夏、秋季极端降水指数趋势分布(点为通过0.1显著性水平检验的台站)

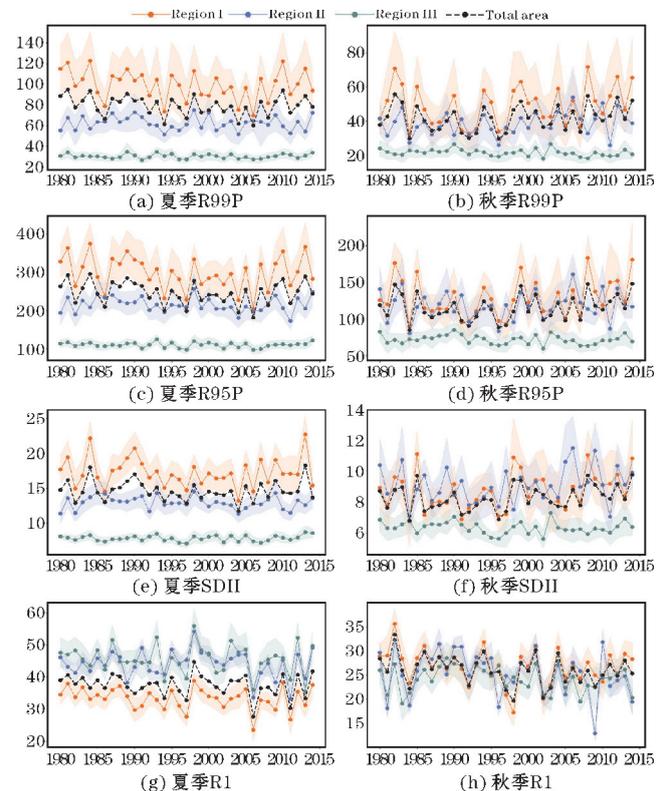


图7 1980-2014年夏、秋季四川省以及各子区域极端降水指数时间分布(阴影为0.5倍标准差)

图 7 为 1980-2014 年各区夏、秋季 4 个极端降水指数的时间演变序列,4 个极端降水指数在夏、秋两季均表现出显著的年际波动。夏、秋两季,三区的 R99P、R95P 与 SDII (图 7a~f) 变化幅度均明显弱于一、二区。夏季(图 7a、c、e)一区的 R99P、R95P 与 SDII 变化幅度和量级最大,二区 R99P、R95P 与 SDII 的量级与变化幅度低于全区平均;秋季,R99P(图 7b)各区的情况与夏季相当,但整体减弱,R95P(图 7d)与 SDII(图 7f)的情况有所改变,一区的优势消失,二区相对提升;夏季极端降水指 R1(图 7g)的变化幅度三区基本相当,但一区的量级明显小于二区和三区;秋季(图 7h),三区的 R1 情况基本相当。夏季,各区 R99P

(图 7a)、R95P(图 7c)、SDII(图 7e)在 2004 年之后有明显上升趋势;秋季一区与二区(图 7b、d、f),在 1996 年前后也出现了变化趋势的转折。由表 2 知,1980-2014 年就四川省整体而言,夏季各极端降水指数均呈现为下降趋势,其中 R99P、R95P 通过 0.01 显著性水平检验;秋季除 R1 外均呈现上升趋势,R95P、SDII、R1 通过 0.01 显著性水平检验。各子区域夏季除三区 SDII 指数外均为下降趋势,其中一区 R99P、R95P 分别通过 0.05、0.01 水平显著性检验,呈显著下降;秋季仅一、二区 R99P、R95P、SDII 呈上升趋势,其中二区 R99P 呈显著上升,二区 R1 和三区 R95P、SDII 呈显著下降。

表 2 1980-2014 年夏、秋季四川省及各子区域极端降水指数线性趋势

区域	R99P/(mm/a)		R95P/(mm/a)		SDII/(mm·d ⁻¹ /a)		R1/(d/a)	
	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋
四川省	-0.221**	0.145*	-0.587**	0.329**	-0.01	0.023**	-0.066*	-0.084**
一区	-0.331*	0.206*	-0.840**	0.518*	-0.02	0.033**	-0.073**	-0.086**
二区	-0.048	0.170**	-0.260**	0.149	-0.12**	0.020*	-0.048	-0.130**
三区	-0.005	-0.061**	-0.042	-0.126**	0.005	-0.007**	-0.058	-0.43*

注:*和**分别表示为通过 0.05、0.01 显著性水平检验

表 3 是 1980-2014 年夏秋两季各区各极端降水指数的最大值及其年份。四川省与一区夏季 R95P、SDII、R1 最大值年份为同一年,表明这 3 个极端指数

与地域之间具有一定的相关性。一区夏、秋季 R99P、R95P、SDII 最大值均远超其他区和全省平均,这与一区降水强度相对较大相互印证。

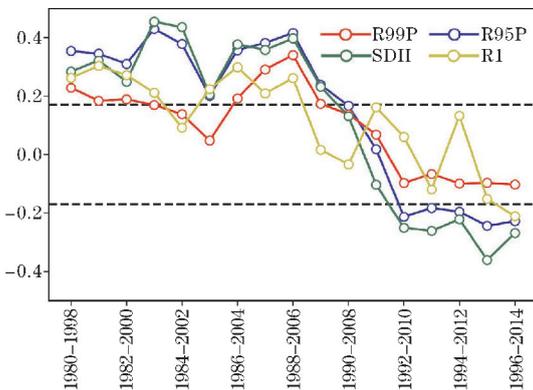
表 3 1980-2014 年夏、秋季四川省及各子区域极端降水指数最大值及其年份

区域	季节	R99P/mm		R95P/mm		SDII/(mm·d ⁻¹)		R1/d	
		值	年份	值	年份	值	年份	值	年份
全省	夏	95.0	1981	296.0	1984	18.3	2013	44.7	1998
	秋	55.7	1982	148.5	2014	9.7	2014	33.4	1982
一区	夏	122.8	1984	374.5	1984	22.7	2013	38.9	1998
	秋	71.7	2008	183.6	2008	11.1	1985	35.6	1982
二区	夏	75.0	1998	256.8	1998	14.6	1998	54.2	1998
	秋	53.9	2003	141.4	2006	11.5	2006	32.8	1982
三区	夏	34.7	1989	125.0	1993	8.7	2013	55.9	1998
	秋	26.7	2003	85.3	1999	7.3	2003	28.5	1989

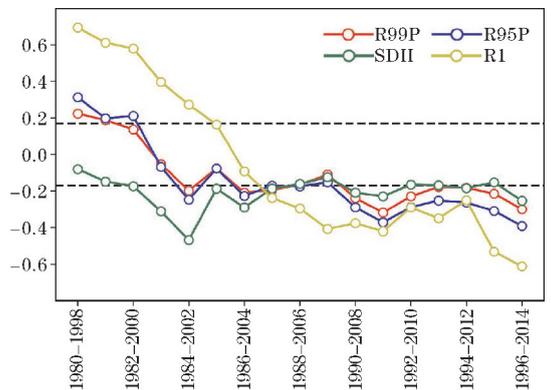
3.3 夏、秋季极端降水海拔依赖性

图 8 给出了 1980-2014 年 19 年窗口所得 17 个时

期 4 个极端降水指数趋势海拔依赖性的演化。可以看出,R99P、R95P 与 SDII 趋势海拔依赖性在演化趋势上具有高度一致性,夏季 1980-2007 年各指数与海拔均



(a) 不同时期夏季各指数与海拔的相关性



(b) 不同时期秋季各指数与海拔的相关性

图 8 不同时期四川省多年平均夏、秋季极端降水指数趋势与海拔的相关系数(黑色虚线代表其统计显著性水平为 95% 的临界值)

呈现较强的正相关性,但随着时间的推移,R95P与SDII趋势海拔依赖性更强且与海拔呈负相关(图8a);秋季,R1趋势海拔依赖性最强且存在明显的转折,1980年中期之后各指数趋势与海拔同样多呈负相关(图8b)。这表明在近期海拔越低,极端降水指数变化幅度越大,多发生在四川盆地等地。这与全球变暖背景下极端事件发生频率增多^[48]的结论一致。

4 结论与讨论

选用中国气象局提供的四川省145个台站逐日降水资料对其夏、秋季平均日降水和极端降水指数特征进行时空特征统计分析,并依据降水与海拔之间的关系将四川省分为3个子区域,揭示四川省不同季节、不同子区域极端降水的变化特征及其对海拔依赖性随时间的演变特征。主要结论如下:

(1)四川省多年平均日降水在时间分布上主要集中在夏、秋两季。两季平均日降水变化呈东高西低分布,且日均降水量大值区均集中在盆地西部附近,但两季日均降水强度有所差异。在与地形的关系上与海拔显著相关。

(2)根据降水与地形之间的关系将四川省分为3个子区域:一区为四川盆地,二区为四川省南部中海拔地区,三区为四川省西部高海拔地区,由此讨论极端降水。在空间分布上R99P、R95P与SDII多呈现西向东渐增分布,其夏季大值多在一区西部等地,秋季多在一区东北部,R1与之相反;夏季一区西部降水多以强降水形式呈现,秋季多在一区东北部;一区为极端降水出现可能性较高的区域,二区次之,三区极端降水出现的可能性较低。

(3)1980–2014四川省夏季各极端降水指数均也呈现下降趋势,秋季除R1外均呈现上升趋势。对于3个子区域而言,夏季除三区SDII外均为下降趋势,秋季仅一、二区R99P、R95P、SDII呈上升趋势,一区夏、秋季R99P、R95P、R1极端降水指数最为突出。

(4)夏季极端降水指数在1980–2007年与海拔均呈现较强的正相关性,2007年后R99P、R95P与SDII与海拔呈负相关且R95P与SDII趋势海拔依赖性更强;秋季极端降水指数R1趋势海拔依赖性最强,对于2007年之后各指数趋势与海拔均呈负相关。

致谢:感谢2023年大学生创新创业训练计划校级项目(202310621041)对本文的资助

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and

vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

- [2] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111 (D5): 1–22.
- [3] Zolina O, Simmer C, Belyaev K, et al. Changes in the Duration of European Wet and Dry Spells during the Last 60 Years [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(6): 2022–2047.
- [4] Gao Y, Lu J, Leung R, et al. Dynamical and thermodynamical modulations on future changes of landfalling atmospheric rivers over western North America [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, 42 (17): 7179–7186.
- [5] Badji, Aïssatou, Elsa Mohino, et al. Decadal Variability of Rainfall in Senegal: Beyond the Total Seasonal Amount [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35 (16): 5339–5358.
- [6] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003(S1): 1–10.
- [7] 高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. *地球科学进展*, 2014, 29 (5): 577–589.
- [8] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116–125.
- [9] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 1–9.
- [10] 陈星任. 中国持续极端降水时空变化特征及其未来预估[D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- [11] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007(10): 1066–1075.
- [12] 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[J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 718–730.
- [13] 张焕, 翟盘茂, 唐红玉. 1961–2000年西南地区小时降水变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(1): 8–13.
- [14] 张顺谦, 马振峰. 1961–2009年四川强降水变化的时空特征[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(23): 14202–14207.
- [15] Wang B, J Liu, H J Kim, et al. Recent change of the

- global monsoon precipitation (1979–2008)[J]. *Climate Dynamics*,2012,39(5):1123–1135.
- [16] 王伟,周洁. 1951–2008年西南地区夏季旱涝的环流特征[J]. *高原山地气象研究*,2012,32(2):47–50.
- [17] Hu D Q, Lu R Y, Su Q, et al. Interannual Variation in the Mid-Summer Rainfall over the Western Sichuan Basin and the Associated Circulation Anomalies[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2014,38(1):13–20.
- [18] Shi R, Chen Y, Wang C. Comparative Analysis of the Influence of the Subtropical High on the Torrential Rainfall in Sichuan Basin[J]. *Plateau & Mountain Meteorology Research*,2010,30(4):18–25.
- [19] 周长艳,李跃清,卜庆雷,等. 盛夏川渝盆地东西部旱涝并存的特征及其大气环流成因[C]. 第七届全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集,2010:1375–1382.
- [20] Huang C H, Li G P, Niu J L, et al. Moist Helicity Analysis of a Heavy Rainstorm in Sichuan Basin Induced by Plateau Vortex Moving Eastward[J]. *Plateau Meteorology*,2011,30(6):1427–1434.
- [21] 李跃清. 青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系[J]. *大气科学*,2003,27(1):107–114.
- [22] 李永华,卢楚翰,徐海明,等. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. *大气科学*,2011,35(3):422–434.
- [23] 唐佑民,翟武全,许金洪. 我国西南地区夏季降水异常与太平洋海温季节演变的关系[J]. *海洋与湖沼*,1997,28(1):88–95.
- [24] 李永华,卢楚翰,徐海明,等. 热带太平洋–印度洋海表温度变化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响[J]. *热带气象学报*,2012,28(2):145–156.
- [25] 沈程锋,李国平. 基于GPM资料的四川盆地及周边地区夏季地形降水垂直结构研究[J]. *高原气象*,2022,41(6):1–12.
- [26] 段汀,陈权亮,王悦,等. 2007–2020年四川省极端降水的时空演变特征[J]. *云南大学学报(自然科学版)*,2022,44(2):317–327.
- [27] 胡豪然,毛晓亮,梁玲. 近50年四川盆地汛期极端降水事件的时空演变[J]. *地理学报*,2009,64(3):278–288.
- [28] 于灏,周筠珺,李倩,等. 基于CMIP5模式对四川盆地湿季降水与极端降水的研究[J]. *高原气象*,2020,39(1):68–79.
- [29] 甘露,刘睿,冀琴,等. 四川省极端降水事件时空演变特征[J]. *山地学报*,2021,39(1):10–24.
- [30] 艾思奇,姜宝法. 极端降水事件对广元市0~14岁儿童手足口病的影响[J]. *环境与健康杂志*,2017,34(12):1062–1065.
- [31] 柏会子,肖登攀,刘剑锋,等. 1965–2014年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J]. *地理与地理信息科学*,2018,34(5):99–105.
- [32] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*,2003(S1):1–10.
- [33] Hua S, Xu M, Zhao F, et al. Spatial and Temporal Variations in Precipitation Amount, Frequency, Intensity, and Persistence in China, 1973–2016[J]. *Journal of Hydrometeorology*,2019,20(11):2215–2227.
- [34] Mao Y N, Wu G C, Xu G Z, et al. Reduction in Precipitation Seasonality in China from 1960 to 2018[J]. *Journal of Climate*,2022,35(1):227–248.
- [35] World Meteorological Organization (WMO). The role of climatological normals in a changing climate[J]. *WCDMP-61*,2007,1377:130.
- [36] Hu W F, Chen L L, Shen J Y, et al. Changes in Extreme Precipitation on the Tibetan Plateau and Its Surroundings: Trends, Patterns, and Relationship with Ocean Oscillation Factors[J]. *Water*,2022,14(16):2509.
- [37] Liu C Y, Li Y G, Ji X, et al. Observed Changes in Temperature and Precipitation Extremes Over the Yarlung Tsangpo River Basin during 1970–2017[J]. *Atmosphere*,2019,10(12):815.
- [38] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y. Extreme climate events and agricultural climate indices in China: CMIP5 model evaluation and projections[J]. *International Journal of Climatology*,2016,36(1):43–61.
- [39] Zhang D D, Yan D H, Wang Y C, et al. Changes in extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai River basin of China during 1960–2010[J]. *Theoretical and Applied Climatology*,2015,120(1/2):195–209.
- [40] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*,1945,13(3):245–259.
- [41] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M].

- London; Charles Griffin & Co, 1975.
- [42] Tang G Q, Di L, H Yang, J Y Gao, et al. Documentation of multifactorial relationships between precipitation and topography of the Tibetan Plateau using spaceborne precipitation radars [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 82–96.
- [43] 王建宇. 基于场显著性检验的中国极端降水信号检测 [D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [44] Atallah E, Gyakum J, Isphording R, et al. The Extreme Precipitation Index (EPI): A Coupled Dynamic-Thermodynamic Metric to Diagnose Midlatitude Floods Associated with Flow Reversal [J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(5): 1257–1276.
- [45] 戴声佩, 李茂芬, 罗红霞, 等. 华南地区极端气温事件时空变化及其因子分析 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(14): 194–203.
- [46] 韦志刚, 李娴茹, 刘雨佳, 等. 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*, 2021, 40(6): 1513–1530.
- [47] 姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. ERA5 再分析降水数据在长江三角洲的性能评估 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 178–189.
- [48] Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16063.

Characterization of the Evolution of Extreme Precipitation in Sichuan Province in Summer and Fall

ZAN Junsheng, WANG Yuhan, TAN Nuofeng, WANG Wei

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Frequent extreme precipitation poses a serious threat to people's safety and economic development in Sichuan, in order to cope with extreme precipitation disasters this paper utilizes the day-by-day precipitation data provided by China Meteorological Administration (CMA) from 1980–2014, and adopts trend, correlation, and other analytical methods, to analyze the temporal and spatial changes of average daily precipitation and extreme precipitation indices (very heavy precipitation R99P, heavy precipitation R95P, precipitation intensity SDII, precipitation days R1), and discusses the evolution characteristics of the correlation between each extreme precipitation index and topography over time. The results show that: (1) the average daily precipitation in Sichuan Province is mainly concentrated in the summer and fall seasons. The spatial distribution situation is gradually increasing from west to east, and the large-value areas are mostly concentrated in the western part of the basin; the evolution of annual precipitation in many places in the two seasons shows a decreasing trend, but the intensity of precipitation shows some differences; the average daily precipitation in various parts of Sichuan Province in summer and fall is significantly correlated with the altitude. (2) According to the relationship between precipitation and topography, Sichuan Province is divided into three sub-regions: Zone 1 is the Sichuan Basin, Zone 2 is the middle-altitude region in southern Sichuan Province, and Zone 3 is the high-altitude region in western Sichuan Province. The spatial distribution of the extreme precipitation indices in Sichuan Province in summer and fall, R99P, R95P and SDII show a gradual increase in the distribution from west to east, and the large values in summer are mostly in the western part of Zone 1, indicating that Zone 1 is a region with a higher likelihood of extreme precipitation; in terms of time distribution, extreme precipitation in Sichuan Province shows a decreasing trend in summer, mostly concentrated in the western part of a region, and the opposite in fall; each extreme precipitation index in summer shows a strong positive correlation with elevation in 1980–2007, and the elevation dependence of R95P and SDII is stronger and negatively correlated with elevation in recent years, and the correlation in fall is not as obvious as that in summer.

Keywords: extreme precipitation index; regional characteristics; spatial and temporal evolution; altitude dependence