

文章编号: 2096-1618(2025)03-0376-08

川藏铁路康定到拉萨段 1980–2019 年极端降水变化特征

李春爽, 徐晨翔, 李金建

(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:为研究川藏铁路沿线极端干湿事件的变化特征,利用 1980–2019 年川藏铁路康定到拉萨段沿线 13 个气象站点的逐日降水数据,基于 RClimDex 模型计算 9 种极端降水指数。采用线性倾向估计、小波分析、相关分析方法研究极端降水的时空变化特征及其与大尺度环流的联系。结果表明:自 1980 年以来,铁路沿线极端降水指数除持续湿润日数(CWD)为下降趋势外,其他指数呈增加趋势,其中持续干燥日数(CDD)显著上升。空间上,东部站点在多个极端降水指数中上升趋势最显著。强降水量(R95p)占年降水量(PRCPTOT)的比例逐年升高。除 CDD 外,其他降水指数存在 1–3 a 振荡周期。大西洋年代际振荡(AMO)等大气环流因子对极端降水事件具有明显的影响。

关键词:川藏铁路;极端降水;时空变化;大气环流;气候变化

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.019

0 引言

随着全球变暖趋势加剧,极端气候事件发生得更加频繁,对人类生存环境及经济生活都产生了不同程度的影响^[1–4]。其中极端降水事件变化复杂、空间差异较大、且突发性强,它的发生发展往往会带来经济损失、地质灾害甚至人员伤亡^[5–7]。研究显示中国极端降水在过去几十年有增长的趋势,极端事件多发生于夏季,空间上以长江中下游地区、华南地区及高原东南部更显著^[8]。青藏高原地区大部分极端降水与全球变化趋势一致,呈上升趋势,且极端降水对总降水的贡献率逐年上升^[9–10]。

川藏铁路是中国“十三五”规划的重要组成部分,它的建设对中国西部地区的经济和社会发展均有着重大意义^[11–12]。铁路穿越高低错落的横断山脉,截至 2021 年,成都至雅安段、林芝至拉萨段已完成通车。在建的雅安至林芝段则地处地质灾害频发的青藏高原东南缘,是世界上地质结构最复杂、气候条件最恶劣、建设和维护最困难的铁路工程^[13–14]。川藏铁路工程的推进面临着诸多挑战,其中极端气候事件是引发各类灾害的关键原因,它会对高铁建设及运营维护等方面产生影响,是铁路建设需要解决的关键难题^[15–17]。铁路沿线大部分位于高原东南区域,其在气候上属高原型季风气候,且海拔差异、地域差异显著。夏半年东南季风和西南季风自东西两侧进入高原。降水自东、西两侧向中部递减^[18]。由于高原大地形引起的西风

绕流作用,使高原东侧产生辐合上升运动,则高原东侧为对流活动的高发区^[19]。而降水尤其是极端降水是诱发山区泥石流的重要因素之一,水资源的时空变化规律会对工程分配调度、水文风险管理等产生影响^[20–21]。研究表明川藏铁路沿线地质灾害发生频率与降水的变化规律一致,且灾害多发生于汛期^[22]。郭国和等^[23]认为气候变化引起的冰湖溃决及其次生灾害对川藏公路等交通道路有很大危害;林志强等^[24]通过定义工程施工气象指数发现气温和降水是影响西藏地区施工建设的最主要的气象要素。因此,在铁路路线规划、路基施工建设、铁路运行安全维护等环节需要考虑气候变化,特别是极端干湿事件的影响。

综上所述,针对地势起伏大、地形复杂、气象站点比较稀疏的川藏铁路沿线,需要构建较长的干湿变化序列,从而掌握铁路沿线区域极端干湿事件的时空变化规律。本文通过探讨川藏铁路康拉段极端降水指数的逐年变化趋势、周期等问题,为极端降水事件的监测和预报提供关键因素,为铁路沿线的生态保护、资源管理及气象防灾减灾提供一定的科学依据。

1 资料和方法

1.1 资料来源

川藏铁路横跨四川省及西藏自治区,海拔高且跨度大。本文研究区域为 90°E ~ 103°E, 28°N ~ 33°N 的四川省西部横断山脉处及西藏东南部地区,选取康定到拉萨段沿途 13 个气象站作为代表站点(图 1),气象数据采用中国气象数据服务中心提供的 1980–2019

收稿日期:2023-10-24

基金项目:四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0215);第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010304)

通信作者:李金建, E-mail:lj@cuit.edu.cn

年逐日降水数据。

为研究极端降水与大气环流因子之间的联系,选取了大西洋多年代际振荡 (AMO)、热带南大西洋海温 (TSA)、北太平洋副高脊线位置指数、NINOA 区海表温度距平指数等,数据来自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 地球系统研究实验室 (earth system research laboratory, ESRL) (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/#NAOJONES>) 及国家气候中心 (http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php) 。

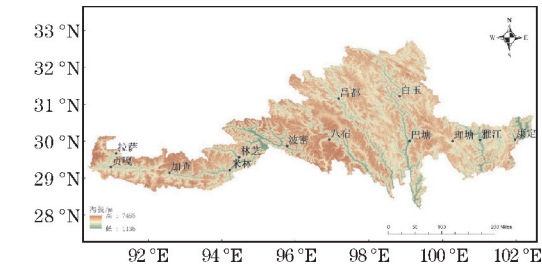


图 1 川藏铁路康定到拉萨段研究区域及气象站点分布示意图

1.2 研究方法

极端降水指数选用 ETCCDMI (expert team on climate change detection monitoring and indices) 定义的 9 个降水指数,其分类及定义如表 1 所示,包含降水量指数、降水强度指数及降水日指数,可从不同方面描述极端降水的变化特征^[25–28]。本文极端降水指数的计算采用的是加拿大气象研究中心 (climate research branch of meteorological service of Canada, CMC) 研发的 R 语言下的 RCLimDex^[29]。对于极端降水指数的时空变化特征,采用线性倾向估算气候倾向率描述各个指数及各个站点的极端降水的长期变化趋势,当倾向值大于零时表明极端降水指数呈上升趋势,小于零时则为下降趋势;利用 Morlet 小波分析找出极端降水指数的周期规律。利用相关分析、交叉小波分析、小波相干分析找出极端降水指数与大尺度环流因子的关系。

表 1 极端降水指数定义

分类	名称	定义	英文缩写
降水量指数	年降水量/mm	日降水量≥1 mm 的降水总量	PRCPTOT
	强降水量/mm	日降水量>95% 分位值的累计降水量	R95p
	单日最大降水量/mm	每月最大单日降水量	R×1day
	连续 5 d 最大降水量/mm	连续 5 d 最大降水量	R×5day
降水强度指数	降水强度/mm·d ⁻¹	单日降水量≥1 mm 的总量与总天数之比	SDII
降水日指数	持续湿润日数/d	日降水量≥1 mm 的最长连续天数	CWD
	持续干燥日数/d	日降水量<1 mm 的最长连续天数	CDD
	中雨日数/d	每年日降水量≥10 mm 的总天数	R10
	大雨日数/d	每年日降水量≥20 mm 的总天数	R20

2 结果与分析

2.1 极端降水指数的时间变化特征

从长期变化趋势来看,1980 年以来,研究区域的极端降水量指数 (图 2a~d) (PRCPTOT、R95p、R×1day、R×5day) 均呈不显著的增长趋势 ($P>0.05$),其变化速率分别为 $6.161\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $3.902\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.853\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $1.342\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。极端降水强度指数 (图 2e) (SDII) 为不显著增长趋势 ($P>0.05$),变化速率为 $0.113\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。极端降水日数指数 (图 2f~i) (CWD、CDD、R10、R20) 中,CWD 为不显著的下降趋势 ($P>0.05$),而 CDD 表现为显著的上升趋势 ($P<0.05$); R10、R20 则是不显著的上升趋势 ($P>0.05$),它们的变化速率分别为: $-0.166\text{ d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $4.605\text{ d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.176\text{ d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.065\text{ d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。由以上可知,仅有 CWD 为不显著下降,CDD 呈显著增加,其余各指数均呈不显著增加趋势。从各个极端降

水指数的变化趋势情况,可以发现,1980 年以来,川藏铁路康拉段 CDD 的上升及 CWD 的下降趋势,意味着近 40 年研究区持续干旱呈高发趋势。结合其他表征极端降水量及极端降水强度指数 (PRCPTOT、R95p、SDII 等) 的增长趋势可以看出,铁路沿线的单次降水量将更大、降水强度更强,也就是降水更趋向于极端^[30–31]。有研究表明青藏高原东南区域的 CWD 为不显著下降趋势,而 CDD 则显著上升且增幅最大^[32];而对于青藏高原暖湿季节的研究中,又显示出 CWD、CDD 均呈不显著的下降趋势^[31]。表明持续干日 (CDD) 及持续湿日 (CWD) 的变化趋势具有显著的时空差异性,其在相对湿度、对流抑制能等作用下,在不同经纬度、不同海拔上有着明显不同^[31,33–35]。

由表 2 及图 2 中滑动平均可以看出,自 20 世纪 80 年代以来,研究区域内极端降水指数表现出比较明显的年代际变化特征。极端降水量指数中,PRCPTOT 及 R95p 在 20 世纪 90 年代末达到最高值,之后出现小幅下降;R×1day、R×5day 于 21 世纪 10 年代达到最高值。极端降水强度指数 SDII 呈波动变化,于 21 世纪

10 年代达到最高。极端降水日指数中,CWD 在 20 世纪 90 年代最强,之后逐渐下降至最低;CDD 从 20 世纪 80 年代波动上升,并于 21 世纪 10 年代达到最高;R10 及 R20 最高值均出现在 20 世纪 90 年代。

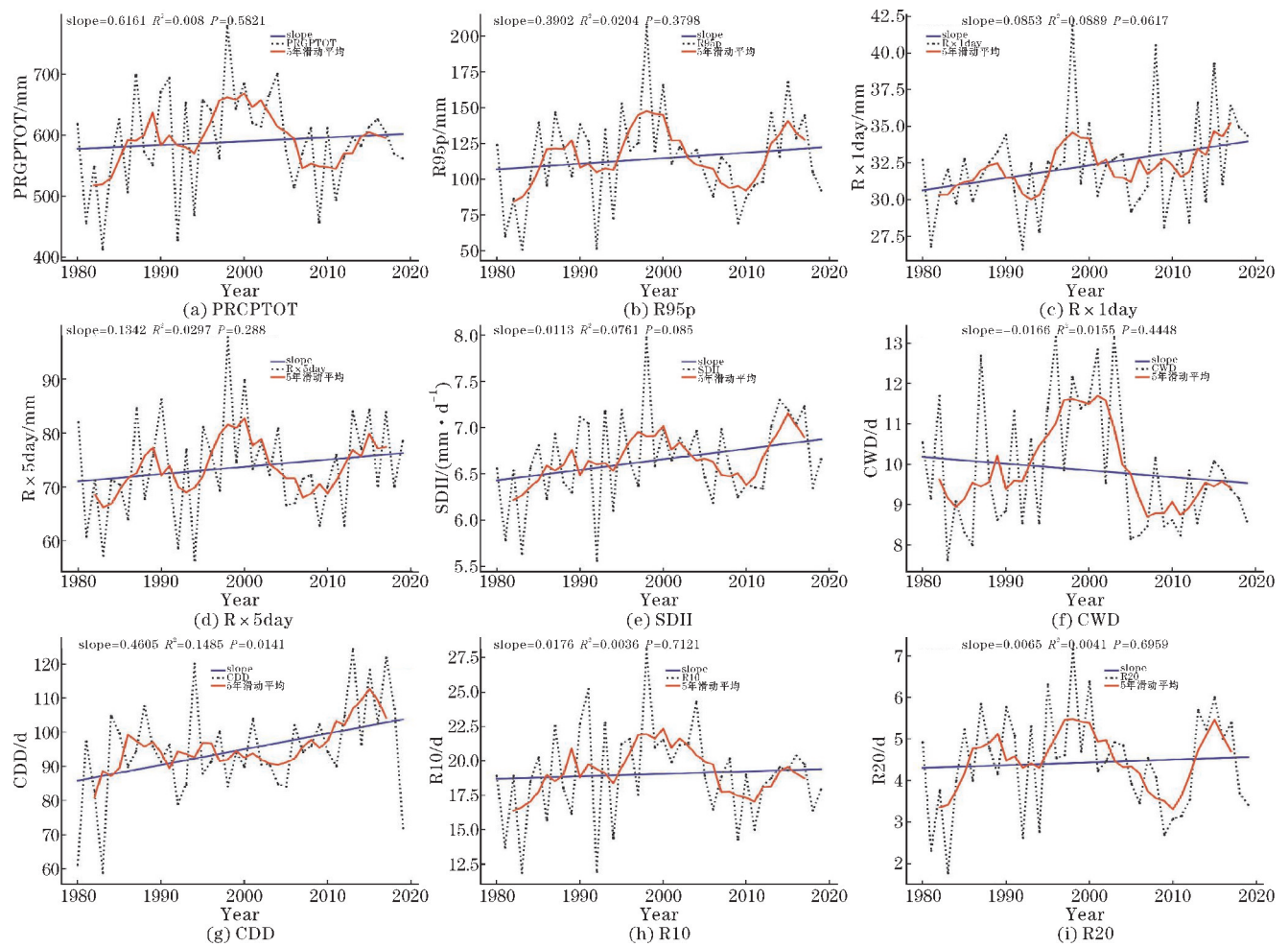


图2 1980–2019 年极端降水指数线性趋势

表2 1980–2019 年极端降水指数年代际变化

年份	PRCPTOT/mm	R95p/mm	R×1day/mm	R×5day/mm	SDII/(mm · d ⁻¹)	CWD/d	CDD/d	R10/d	R20/d
1980–1989	554.5	102.88	31.17	70.53	6.38	9.53	89.18	17.45	4.08
1990–1999	619.95	124.83	32.22	74.9	6.78	10.58	92.9	20.65	4.88
2000–2009	601.49	112.12	32.25	73.46	6.66	10.14	93.85	19.68	4.35
2010–2019	582.61	118.18	33.56	75.7	6.79	9.17	103.14	18.42	4.42

2.2 极端降水指数的空间变化趋势

利用研究区内 13 个气象站点的极端降水指数进行空间趋势分析。极端降水量指数(图 3a ~ d) (PRCPTOT、R95p、R×1day、R×5day) 中,PRCPTOT 及 R95p 均有 8 个站点为上升趋势,其中雅江站的 PRCPTOT 上升显著($P<0.05$);R×1day、R×5day 均有 10 个站点为上升趋势,其中 R×1day 显著上升的站点为巴塘战($p<0.05$)和理塘站($P<0.01$),而 R×5day 上升显著的是雅江站($P<0.05$)。极端降水强度指数(图 3e) (SDII)有 11 个站点上升,2 个站点下降,显著上升的站点有 2 个,分别是拉萨站($P<0.05$)和雅江站($P<$

0.01)。极端降水日数指数(图 3f ~ i) (CWD、CDD、R10、R20)中,CWD 呈下降趋势的为 8 个站点,其中白玉站显著下降($P<0.01$);CDD 除东部康定站呈下降趋势,其余 12 个台站则呈上升趋势,且各站均未通过显著性检验;R10、R20 均有 7 个站点呈下降趋势,6 个站点呈上升趋势,且只有雅江站的 R10 指数显著上升($P<0.05$)。综合以上信息,除表征干旱程度的 CDD 指数外,东部站点(99 °E 以东)的各极端降水指数整体呈上升趋势,其中雅江站有 4 个极端降水指数显著上升;而偏北部的白玉站则与东部站点相反,且在 CWD 上表现出显著的下降;其余中部及西部各站则为不显著的上升或下降。

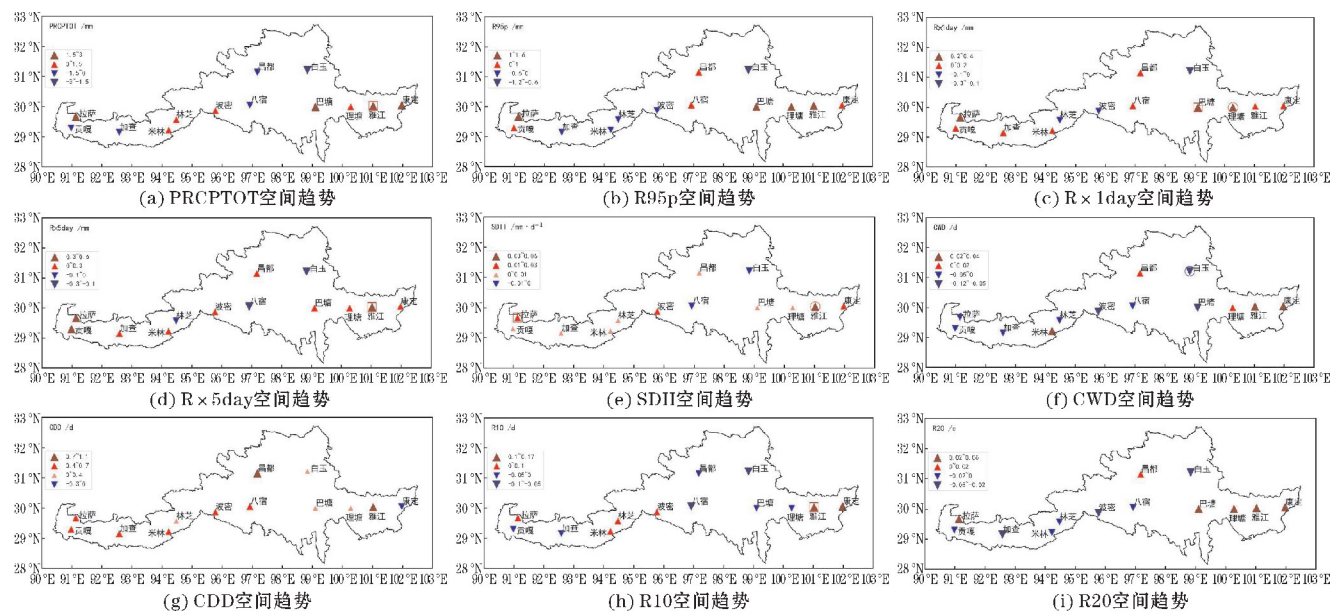


图3 1980-2019年极端降水趋势空间分布特征(方框和圆框分别代表通过0.05、0.01显著性检验)

2.3 极端降水与年降水量的关系

将1980-2019年降水量与其他极端降水指数进行相关分析(表3),结果显示CWD、R10、R20、R95p、R×1day、R×5day、SDII均与PRCPTOT呈显著相关($P<0.01$),特别是R10与PRCPTOT的相关系数超过了0.93,这说明R10指数可以在一定程度上代表PRCPTOT的逐年变化。而CDD则与PRCPTOT以及其他指数之间没有显著的相关关系。此外,除CDD之外的其

他极端降水指数之间也存在着良好的相关关系。为进一步探究极端降水量占总降水量的逐年比例,选取代表强降水量的R95p及代表年降水量的PRCPTOT,分析1980-2019年R95p在PRCPTOT中的逐年占比情况(见图4),结果显示R95p对PRCPTOT的贡献比例平均为19.1%,其线性趋势显示贡献比例随着时间逐渐增加,也就是极端降水对年降水量的贡献是逐年增多的,降水随着时间逐渐向极端趋势发展。

表3 1980-2019年各极端降水指间相关系数

降水指数	PRCPTOT	CDD	CWD	R10	R20	R95p	R×1day	R×5day	SDII
PRCPTOT	1								
CDD	0.01	1							
CWD	0.69 *	-0.08	1						
R10	0.97 *	-0.01	0.66 *	1					
R20	0.86 *	0.16	0.52 *	0.82 *	1				
R95p	0.85 *	0.2	0.49 *	0.81 *	0.97 *	1			
R×1day	0.55 *	0.08	0.21	0.49 *	0.59 *	0.7 *	1		
R×5day	0.79 *	-0.01	0.46 *	0.74 *	0.85 *	0.86 *	0.72 *	1	
SDII	0.84 *	0.16	0.45 *	0.86 *	0.89 *	0.89 *	0.59 *	0.83 *	1

注: * 表示通过了0.01 的显著性检验。

2.4 极端降水与大气环流指数的关系

选取AMO、TSA、NINOA区海表温度距平指数、西太平洋副高强度指数、北半球副高脊线指数等12个大气环流指数,计算它们与研究区域极端降水指数的相关系数,如图5所示。可以发现,AMO与各极端降水指数均呈正相关,其与PRCPTOT(0.35, $P<0.05$)、R95p(0.32, $P<0.05$)、R×1day(0.36, $P<0.05$)、R×5day(0.35, $P<0.05$)和SDII(0.37, $P<0.05$)呈显著正相关,表明AMO对极端降水有明显的影

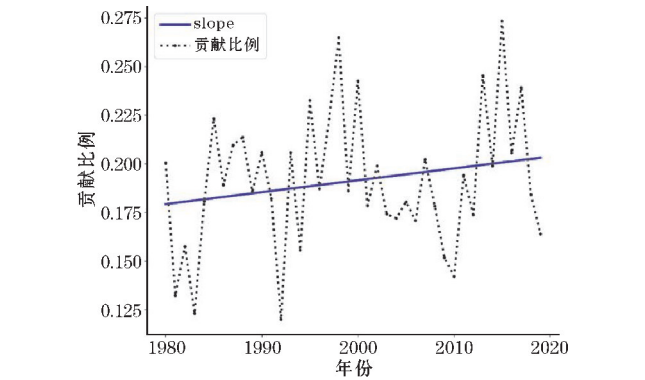


图4 1980-2019年R95p对PRCPTOT的逐年贡献比例

表温度距平指数、黑潮区海温指数呈显著正相关关系。各降水指数中,SDII 及 $R\times 1\text{day}$ 和各个指数相关性最好,CDD、CWD 与各个环流指数相关性并不显著。

各类大气环流因子及海温异常,会通过大气遥相关、季风、西风急流等影响着高原地区的降水变化特征。如 ENSO 和 AMO 对青藏高原上的极端降水在准 3 年周期振荡和多年代际时间尺度上产生影响^[31]。

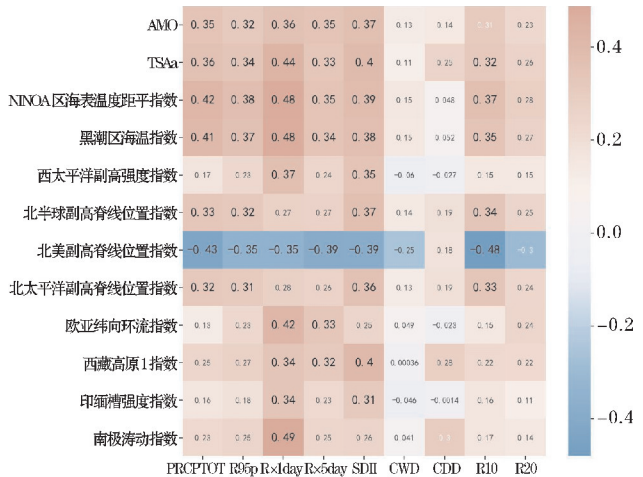


图5 极端降水指数与大气环流指数的相关系数
(加粗黑色字体为通过 0.05 显著性水平检验)

ENSO 影响印度洋海温,如 ENSO 处于暖位相(冷位相)时,Walker 环流减弱(加强),印度洋偶极子为正(负)位相,印度洋偶极子正位相年会引起高原东南部降水增加,而印度洋海温又通过海陆热力差异及印度季风、南海季风等影响着高原地区的水汽输送等影响高原降水^[36-38]。AMO 作为背景场,其不同的位相会激发位势高度场的响应,如 AMO 冷、暖位相下,NAO 引起的高层 Rossby 波能量强度及传播方向差异使高原东部夏季降水产生南北偶极型和全区一致型的转变^[39]。

2.5 极端降水指数及大气环流指数的周期分析

基于小波分析对 1980–2019 年极端降水指数进行连续小波变换并绘制连续小波功率谱(图 6)。由图可知,除 CDD 外,其他各指数在不同时期均存在 1~3 a 的周期,且通过了显著性检验。这其中有 6 个指数的 1~3 a 周期出现在 1995 年附近,分别是 PRCPTOT、R95p、 $R\times 5\text{day}$ 、SDII、R10、R20。而 $R\times 1\text{day}$ 在 2010 年前后、CWD 在 1986 年前后出现了 1~2 a 周期。此外, $R\times 1\text{day}$ 在 1995–2000 年附近存在 9 a 左右的振荡周期; $R\times 5\text{day}$ 在 2000 年前后出现 10~12 a 周期。

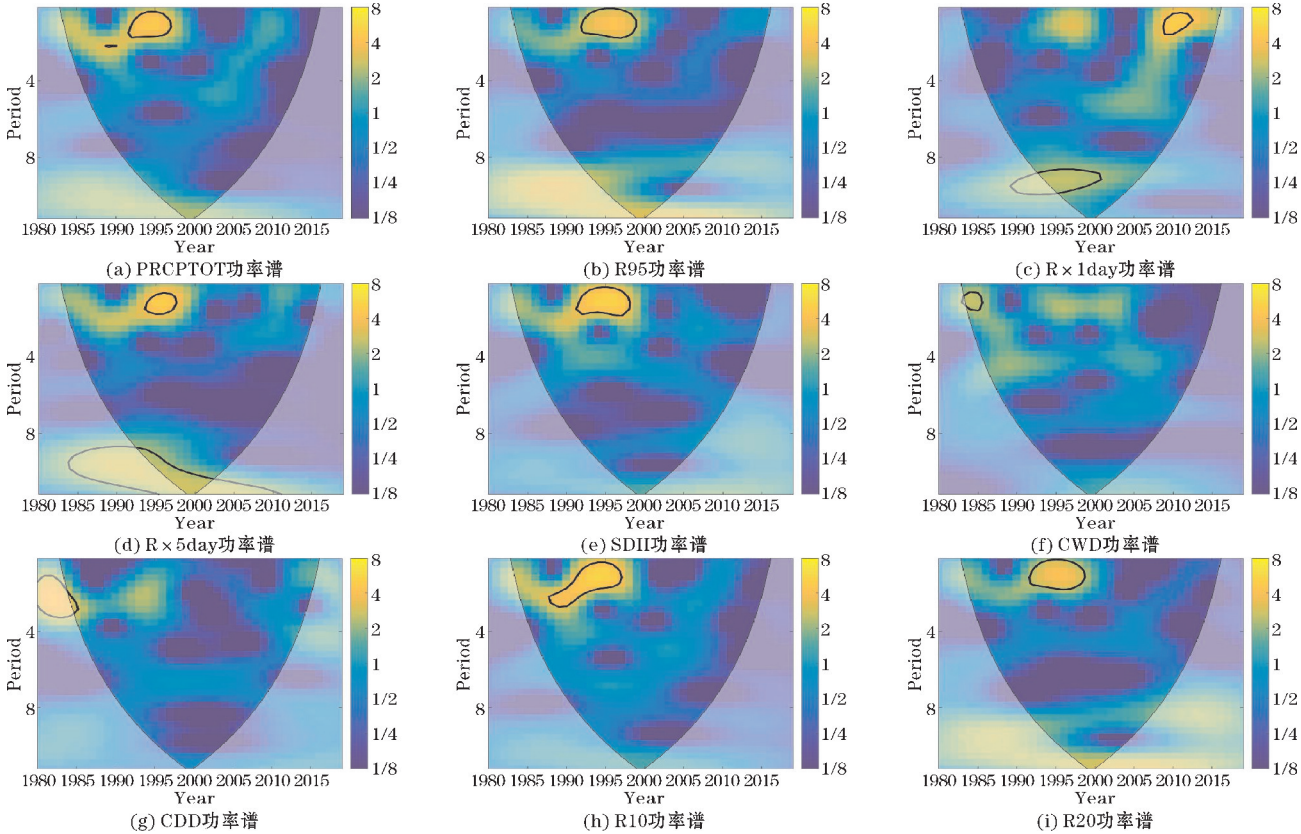


图6 1980–2019 年极端降水指数的连续小波功率谱

为进一步确定大气环流对极端降水指数的影响,选取相关关系最好的几个极端降水指数及大气环流指数进一步分析。利用小波相干变换(WTC)和交叉小波变换(XWT)对极端降水指数与大气环流指数的共

振周期及相位关系等展开讨论。图 7 和图 8 分别为 1980–2019 年极端降水指数 R10、R95p、 $R\times 1\text{day}$ 、SDII 和大气环流指数 AMO、NINO3.4 区海表温度距平指数、TSA 指数之间的交叉小波变换和小波相干谱,粗实线

表示通过 95% 的信度检验。

由图 7 可知,极端降水指数 R10、R95p、 $R \times 1\text{day}$ 、SDII 和大气环流指数 AMO、TSA 之间在 1995-2000 年均存在 1~3 a 的同相位共振周期,其中 $R \times 1\text{day}$ 和 AMO、TSA 之间在 2006-2010 年出现一个 2 a 左右的共振周期。R10、R95p、SDII 和 NINOA 之间在 1990-1995 年附近及 1995-1997 年附近有 3~4 a、1~3 a 的共振周期。 $R \times 1\text{day}$ 和 NINOA 在 1995-2005 年也存在 8~10 a 的共振周期。

图 8 中,R10、 $R \times 1\text{day}$ 与 AMO 分别在 2007-2014 年

和 2006-2009 年存在 1~3 a 的共振周期。SDII 与 AMO 在 1995-2001 年存在 3~6 a 的同相位周期。对于 NINOA 指数,R10 与其在 2003-2010 年有 1~4 a 同相位周期;R95p 与其在 1995-2002 年及 1990-2010 年分别存在 4 a 和 7~9 a 周期; $R \times 1\text{day}$ 和 NINOA 在 1990-2010 年上有 5~11 a 的周期,其中 5~8 a 周期位于 1995-2005 年, $R \times 1\text{day}$ 超前于 NINOA,8~11 a 则整体上为同相位共振周期;SDII 则是在 1994-2005 年及 1995-2010 年分别存在 3~5 a 和 5~10 a 的周期。R95p、 $R \times 1\text{day}$ 、SDII 和 TSA 则在 1992-2000 年附近存在 1~3 a 的周期。

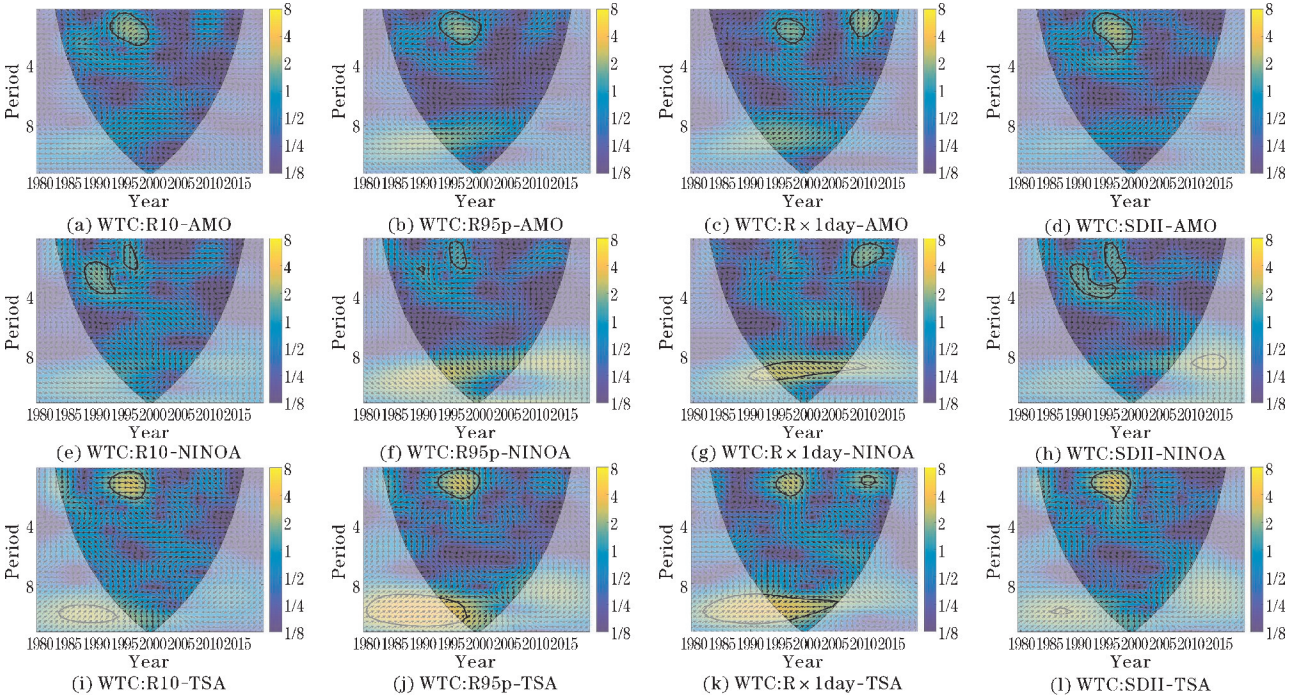


图 7 1980-2019 年极端降水指数 R10、R95p、 $R \times 1\text{day}$ 、SDII 和 AMO、NINOA、TSA 的交叉小波谱

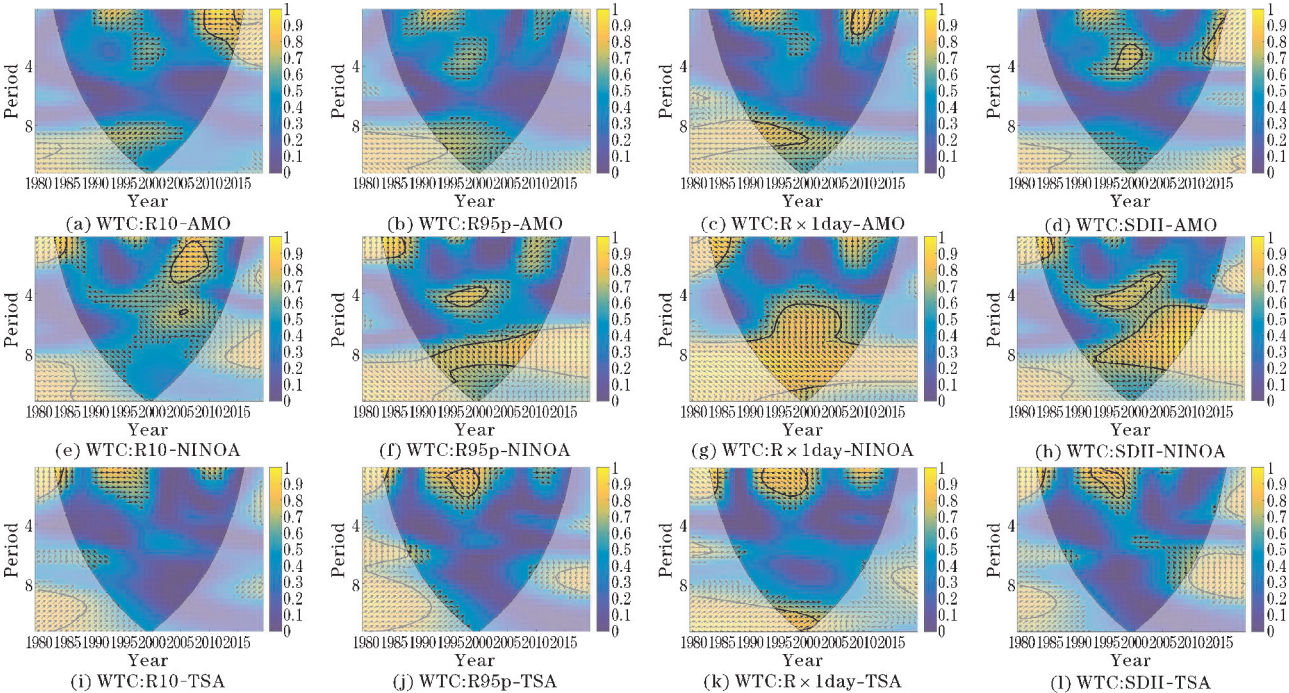


图 8 1980-2019 年极端降水指数 R10、R95p、 $R \times 1\text{day}$ 、SDII 和 AMO、NINOA、TSA 的小波相干谱

3 结论

选用1980–2019年川藏铁路康定到拉萨段13个地面气象站点的逐日降水实测数据,利用R语言开发的RCLIMDEX模型计算各个站点的9种极端降水指数,分析铁路沿线1980–2019年极端降水事件的时空分布情况及影响因子,得出以下主要结论。

(1)时间尺度上,自1980年以来,极端降水量指数(PRCPTOT、R95p、 $R \times 1 \text{ day}$ 、 $R \times 5 \text{ day}$)均呈上升趋势;极端降水强度指数SDII为不显著的增加;而极端降水日数指数(CWD、CDD、R10、R20)除CWD逐年减少外,其余呈逐年增加趋势,其中CDD显著增加。

(2)空间尺度上存在明显空间差异。极端降水量指数(PRCPTOT、R95p、 $R \times 1 \text{ day}$ 、 $R \times 5 \text{ day}$)整体呈现东西两侧上升,中部站点减少趋势。极端降水日数指数中CDD东部减小,西部增加,其余指数则与CDD呈相反分布。整体上看东部站点的极端降水指数上升趋势更显著。

(3)除CDD外,各指数均与其他极端降水指数之间相关性良好,R95p对PRCPTOT的贡献比例逐年上升,降水逐年趋向于极端。

(4)各极端降水指数中,SDII及 $R \times 1 \text{ day}$ 和大气环流指数相关性最好。周期变化上,存在准1~3 a的周期振荡。其中有6个指数的周期振荡位于1995年前后。极端降水指数与AMO、NINO4和TSA存在共振周期,但是其在不同时期中的相关性有着一定的差别,其中AMO、TSA指数与极端降水指数在1995年前后多存在1~3 a共振周期,这说明大气环流因子是影响极端降水指数变化的一个重要因素。

参考文献:

- [1] 史培军,应卓蓉.中国气象灾害对宏观经济增长的影响分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(6):747–753.
- [2] IPCC,2021:Climate change 2021-the physical science basis[J]. Interaction,2021,49:44–45.
- [3] 袁宇锋,翟盘茂.全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知[J].大气科学学报,2022,45(2):161–166.
- [4] Xu H,Chen H,Wang H. Increased populations will be exposed to the dangerous precipitation extremes across China in the future[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:963042.
- [5] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J].岩土力学,2007,136(5):1055–1060.
- [6] 景可,焦菊英.基于全球气候变暖的土壤侵蚀态势初见[J].中国水土保持,2011,351(6):7–9+69.
- [7] 郭晓军,范江琳,崔鹏,等.汶川地震灾区泥石流的诱发降雨阈值[J].山地学报,2015,33(5):579–586.
- [8] 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.
- [9] 杜军,路红亚,建军.1961–2012年西藏极端降水事件的变化[J].自然资源学报,2014,29(6):990–1002.
- [10] 马伟东,刘峰贵,周强,等.1961–2017年青藏高原极端降水特征分析[J].自然资源学报,2020,35(12):3039–3050.
- [11] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017,37(8):1049–1054.
- [12] Lu C, Cai C. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet railway project[J]. Engineering,2019,5(5):833–838.
- [13] 潘桂棠,任飞,尹福光,等.洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J].地球科学,2020,45(7):2293–2304.
- [14] 徐正宣,张利国,蒋良文,等.川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题[J].工程科学与技术,2021,53(14):29–42.
- [15] 崔鹏,陈容,向灵芝,等.气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J].气候变化研究进展,2014,10(2):103–109.
- [16] 陈鲜艳,梅梅,丁一汇,等.气候变化对我国若干重大工程的影响[J].气候变化研究进展,2015,11(5):337–342.
- [17] 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377–2389.
- [18] 李秀珍,崔云,张小刚,等.川藏铁路康定至昌都段滑坡崩塌灾害特征及空间分布规律[J].四川地质学报,2019,39(3):441–446.
- [19] 李国平.青藏高原天气动力学研究的新进展[J].气象科技进展,2021,11(3):58–65.
- [20] 李德心,何思明,朱兴华,等.前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J].灾害学,2011,26(3):41–45.
- [21] 铁永波,周洪福,倪化勇.西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J].灾害学,2013,28(4):110–113+187.
- [22] 刘佳,郭海燕,邓国卫,等.川藏铁路四川段沿

- 线诱发地质灾害降水阈值研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 83–91.
- [23] 郭国和, 程尊兰, 吴国雄, 等. 川藏公路南线典型冰湖及其溃决危险性评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 50–55.
- [24] 林志强, 路红亚, 宁斌. 气候变暖背景下西藏地区工程施工气象条件分析[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 978–985.
- [25] Peterson T, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs [M]. World Meteorological Organization Geneva, 2001.
- [26] 赵一飞, 邹欣庆, 许鑫, 等. 珠江流域极端降水事件及其与大气环流之间的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2528–2537.
- [27] 戴声佩, 罗红霞, 李茂芬, 等. 1959–2016年华南地区极端降水事件变化特征[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(3): 128–142.
- [28] 黄鑫, 焦黎, 马晓飞, 等. 基于 RClimDex 模型的近 60 a 中亚极端降水事件变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1039–1051.
- [29] Zhang X, Yang F. RClimDex (1.0) user manual [J]. Climate Research Branch Environment Canada, 2004, 22: 13–14.
- [30] 邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1264–1274.
- [31] 冯晓莉, 申红艳, 李万志, 等. 1961–2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 694–705.
- [32] 白宇轩, 杜军, 王挺, 等. 1971–2020 年藏东南极端降水指数的时空变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(3): 31–40.
- [33] 周天军, 张文霞, 陈晓龙, 等. 青藏高原气温和降水近期、中期与长期变化的预估及其不确定性来源[J]. 气象科学, 2020, 40(5): 697–710.
- [34] Dai A, Rasmussen R M, Liu C, et al. A new mechanism for warm-season precipitation response to global warming based on convection-permitting simulations[J]. Climate Dynamics, 2020, 55: 343–368.
- [35] Chen J, Dai A, Zhang Y, et al. Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming[J]. Journal of Climate, 2020, 33(6): 2025–2050.
- [36] Chen X, You Q. Effect of Indian Ocean SST on Tibetan Plateau precipitation in the early rainy season[J]. Journal of Climate, 2017, 30(22): 8973–8985.
- [37] Cr  tat J, Terray P, Masson S, et al. Indian Ocean and Indian summer monsoon: relationships without ENSO in ocean-atmosphere coupled simulations[J]. Climate Dynamics, 2017, 49: 1429–1448.
- [38] 黄怡陶, 张文君, 薛奥运. ENSO 对印度洋偶极子非对称性的影响及机制研究[J]. 气象科学, 2023, 43(1): 1–14.
- [39] 陈涛. AMO 不同位相下 NAO 与青藏高原东部夏季降水关系的变化[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.

Analysis of Extreme Precipitation Changes in the Section of Kangding to Lhasa along the Sichuan-Tibet Railway from 1980 to 2019

LI Chunshuang, XU Chenxiang, LI Jinjian

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

Abstract: In order to study the change characteristics of extreme wet and dry events along the Sichuan-Tibet Railway, daily precipitation data from 13 meteorological stations along the Kangding to Lhasa section of the Sichuan-Tibet Railway during 1980–2019 were used, and nine extreme precipitation indices were calculated based on the RClimDex model. The temporal and spatial characteristics of extreme precipitation and its relationship with large-scale circulation are studied by linear tendency estimation, wavelet analysis and correlation analysis. The results show that, since 1980, the extreme precipitation index along the Sichuan-Tibet Railway has shown an increasing trend except for the decreasing trend of continuous wet days (CWD), continuous dry days (CDD) showed a significant upward trend. Spatially, the eastern stations showed the most significant upward trend among various extreme precipitation indices. The proportion of intense precipitation (R95p) to annual total precipitation (PRCPTOT) is increasing year by year. Except for CDD, other precipitation indexes have 1–3 a oscillation periods. Atmospheric circulation factors such as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) have significant effects on extreme precipitation events.

Keywords: Sichuan-Tibet railway; extreme precipitation; spatio-temporal change; atmospheric circulation; climate change