

文章编号: 2096-1618(2021)04-0434-09

# 近50年云南省极端气候事件时空变化特征

张汉声, 李谢辉, 刘子堂, 徐佳奥

(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:**为研究云南省极端气候事件的时空变化特征,利用云南省28个气象站点1965–2014年逐日气象数据,首先分析了年均气温和年均降水量的时空变化特征,然后通过计算22个极端气候指数,对近50年来的12个极端气温指数和10个极端降水指数进行了时空变化特征分析。结果表明:(1)云南省1965–2014年年均气温总体上呈波动上升趋势,年际气温距平升温率为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,年均降水总体上则呈波动下降趋势,年际降水距平递减率为 $18.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,年均气温和降水的空间分布大致都呈现从南向北递减的趋势;(2)12个极端气温指数中,冷夜日数 $TN_{10p}$ 、冷昼日数 $TX_{10p}$ 、霜冻日数 $FD_0$ 、冰冻日数 $ID_0$ 和冷持续指数 $CSDI$ 的线性倾向率都呈下降趋势,暖夜日数 $TN_{90p}$ 、暖昼日数 $TX_{90p}$ 、最高气温极大值 $TX_x$ 、最高气温极小值 $TX_n$ 、最低气温极大值 $TN_x$ 、最低气温极小值 $TN_n$ 和热持续指数 $WSDI$ 的线性倾向率都呈上升趋势,表明冷指数变暖或减少,暖指数变暖或增加;(3)10个极端降水指数中,湿日降水量 $PRCPTOT$ 、强降水量 $R95p$ 、极强降水量 $R99p$ 、低强度降水日数 $R10mm$ 、中等强度降水日数 $R20mm$ 、最大5日降水量 $RX5day$ 和连续湿润日数 $CWD$ 整体都呈下降趋势,降水强度 $SDII$ 、最大1日降水量 $RX1day$ 和连续干旱日数 $CDD$ 整体都呈上升趋势,表明云南省整体年均降水量和降水次数在减少,但极端降水事件和降水强度反而在增加,干旱化趋势明显。

**关键词:**应用气象学;极端气候;极端气温指数;极端降水指数;时空变化特征;云南省

**中图分类号:**P461

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.013

## 0 引言

近百年来全球气候变暖速度远远超出预估,特别是近10年的增暖幅度尤为显著。随着气温不断升高,水循环加快,极端气候事件的发生频次趋于增多,对生产生活和区域经济发展造成了巨大的影响和损失。在全球气候变暖的背景下,目前不同尺度下的极端气候变化已成为国内外学者关注的热点问题之一。

已有的研究对极端气温事件的频率、强度、变化特征关注较高,相对于中国,国外对极端气温事件研究起步较早,数据更加丰富。Kark等<sup>[1]</sup>的研究发现,过去的几十年,极端冷事件(如极端低温和霜冻日数)有逐渐减少的趋势,在北半球的北美及南半球的澳大利亚和新西兰等地也均有这样的变化趋势<sup>[2]</sup>。在东南亚和南太平洋地区,暖日和暖夜的日数显著增多,而冷日和冷夜的日数却有减少的趋势<sup>[3]</sup>。近60年的研究表明,中国除青藏高原外,大部分地区都处于变暖趋势,极端暖事件发生概率从南向北逐渐递减,极端高温事件发生概率最大的地方是东南部的赣闽和新疆吐鲁番地区,极端低温事件主要在东北、青藏高原和新疆阿尔泰山地区<sup>[4]</sup>。目前,对西南地区极端气温事件的研究还不多,班军梅等<sup>[5]</sup>通过分析西南地区近50年的气温

变化得出,自1985年以来西南地区的年平均最高和最低气温都呈上升趋势。袁文德等<sup>[6]</sup>分析了西南地区1962–2012年的极端气温事件时空变化特征,得出极端高温事件和极端低温事件分别呈上升和下降趋势,但有部分区域呈相反变化的趋势。

极端降水事件相对于极端气温事件来说并没有体现出全球一致性,相反因地区的不同降水强度、持续时间、变化趋势等都有明显的差异。在全球气候变暖的大背景下,国外学者对不同地区的极端降水事件也进行了广泛的研究。Stephenson等<sup>[7]</sup>通过分析加勒比地区1961–2010年的极端降水事件,得出该地区降水年际变化幅度相对较小,研究区极端降水指数的空间变化不一致的结论。Abbasnia等<sup>[8]</sup>通过对土耳其马尔马拉地区1961–2016年极端降水事件的变化趋势分析得出,大部分区域的年降水量和强降水量有所增加,降水事件趋于短时且更强烈,且大气含水量有所增加的结论。目前,中国学者对极端降水事件的研究也较为细致,刘学华等<sup>[9]</sup>使用极端降水指数对中国近40年极端降水的分布特征进行了分析,得出中国极端降水指数和年降水量呈线性上升趋势,极端降水指数线性变化存在明显分区的结论。严中伟等<sup>[10]</sup>指出近几十年来,中国极端降水事件强度并无明显变化,但是微量降水频率已大大减少,特别是北方地区微量降水记录减少10多天,同时降水呈现极大降水量明显增加,但总体降水不明显,具有明显地区分布的特征。在西南地

收稿日期:2020-10-28

基金项目:科技部第二次青藏高原综合科学考察研究资助子项目(2019QZKK0105);2020年大学生创新创业训练计划资助项目(202010621007)

区极端降水的研究中,罗玉<sup>[11]</sup>指出其总降水量在减少,而强降水和降水强度在增加,极端降水变化趋势具有东西或西北东南向的梯度变化特征。

云南省作为一个位于中国西南边陲以低纬高原山地为主的农业大省,由于地形复杂且易受季风气候影响,近年来频发的极端气候事件严重影响了云南省当地的经济。云南省自 2009 年秋冬以来出现的持续 3 年的严重干旱,其旱情让云南省仅农业经济损失就超过了 170 亿元<sup>[12]</sup>。目前对云南省极端气候事件的研究还不多,因此研究全球变暖背景下云南省极端气候事件的时空变化特征有助于预测云南未来的气候变化趋势,并为应对极端气候事件的发生提前做准备,从而最大限度地减少极端气候事件造成的危害,其研究结果能为云南省极端气候事件预测、预警和防灾减灾等方面提供理论科学依据和实际应用价值。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究资料

利用中国气象科学数据共享服务网提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),依据连续性和最长时间原则,选取了云南省 1965–2014 年 28 个站点的逐日气温和降水数据资料。同时为保证所选气象数据的科学性和准确性,对站点数据进行了极值和一致性检验,剔除了部分异常值,对个别缺失数据也采用相邻站点

线性回归方法进行了插补。图 1 为选取的 28 个气象站点的空间分布位置和高程图。

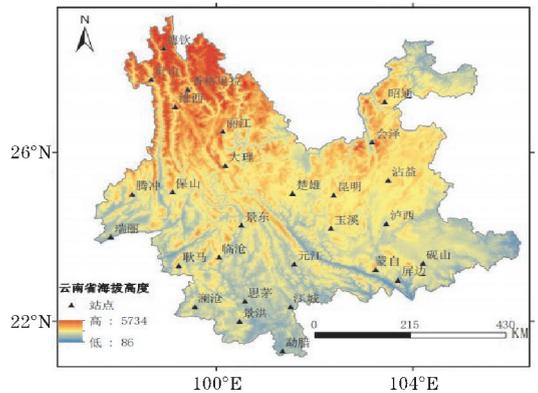


图 1 云南省 28 个气象站点的空间分布位置图

### 1.2 研究方法

由于对极端气候事件变化特征的分析可以通过采用定义与极端事件相关的代用气候指数变化时空特征分析的方法来进行,研究从世界气象组织“气候变化检测和指标”推荐的极端气候指数中选取了 12 个极端气温指数和 10 个极端降水指数,通过编程提取这些指数,主要使用线性趋势估计和趋势显著性检验方法,以及利用 ArcGIS 空间插值方法对近 50 年云南省极端气温和降水事件进行时空变化特征分析。表 1 为所选 22 个极端气候指数的具体定义<sup>[13–14]</sup>。

表 1 所选 22 个极端气候指数定义

类别	指数名称	单位	定义
极端气温 指数	冷夜日数(TN10p)	d	每年日最低气温<10%分位值的日数
	暖夜日数(TN90p)	d	每年日最低气温>90%分位值的日数
	冷昼日数(TX10p)	d	每年日最高气温<10%分位值的日数
	暖昼日数(TX90p)	d	每年日最高气温>90%分位值的日数
	最高气温极大值(TXx)	℃	每年日最高气温的最大值
	最低气温极大值(TNx)	℃	每年日最低气温的最大值
	最高气温极小值(TXn)	℃	每年日最高气温的最小值
	最低气温极小值(TNn)	℃	每年日最低气温的最小值
	霜冻日数(FD0)	d	每年日最低气温<0℃的日数
	冰冻日数(ID0)	d	每年日最高气温<0℃的日数
极端降水 指数	热持续指数(WSDI)	d	每年至少连续 6 d 最高气温>90%分位数的天数
	冷持续指数(CSDI)	d	每年至少连续 6 d 最低气温<10%分位数的天数
	湿日降水量(PRCPTOT)	mm	一年中降水日的降水量总和(日降水量≥1 mm)
	降水强度(SDII)	mm/d	年降水量/年降水日数(日降水量≥1 mm)
	强降水量(R95p)	mm	日降水量超过 95%分位数的降水总量
	极强降水量(R99p)	mm	日降水量超过 99%分位数的降水总量
	低强度降水日数(R10mm)	d	年内日降水量≥10 mm 天数
	中等强度降水日数(R20mm)	d	年内日降水量≥20 mm 天数
	最大 1 日降水量(RX1 day)	mm	每年最大的 1 d 降水量
	最大 5 日降水量(RX5 day)	mm	每年最大的连续 5 d 降水量
	连续干旱日数(CDD)	d	每年日降水量连续<1 mm 的最大日数
	连续湿润日数(CWD)	d	每年日降水量连续≥1 mm 的最大日数

## 2 结果与分析

### 2.1 年均气温和年均降水量时空变化

#### 2.1.1 时间变化特征

图2为1965–2014年云南省年均气温距平和年均降水距平随时间的变化趋势。由图2(a)可以看出,50年间云南省的气温距平随时间变化总体上呈现波动上升趋势,这与全球变暖关系密切,年际气温距平升温率为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,表明云南省对气候变暖较为敏感。其中,相对较冷的年份出现在1994年前,较暖年份出现在1994年后。年均气温距平最低年份在1971年,达到 $-0.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高年份在2010年,达到 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,未来云南省年平均温度仍然有上升的趋势。由图2(b)可以看出,50年间云南省的年均降水距平随时间变化总体上呈现波动下降的趋势,年际降水距平递减率为 $18.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,表明云南省在此期间整体上呈现降水减少的态势,未来会继续有干旱增加的趋势。年均降水距平最低年份出现在2009年,为 $-210\text{ mm}$ ;最高年份在2000年,为 $180\text{ mm}$ 。

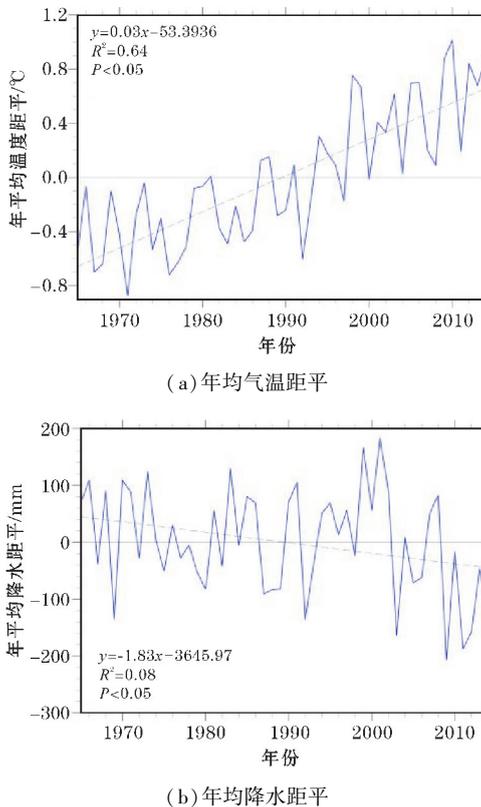


图2 1965–2014年云南省年均气温和年均降水距平随时间的变化趋势

#### 2.1.2 空间变化特征

对1965–2014年28个气象站点的年均气温和年均降水量在ArcGIS软件中进行空间插值,可以得到云南省近50年来年均气温和年均降水的空间分布图3。

由图3(a)可以看出,年均气温出现了两个极值中心,其中冷中心主要位于云南省西北部,其温度在 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,暖中心主要位于云南省南部,温度值为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。这种年平均温度的空间分布与云南省北高南低的地势一致,说明地形是影响气温空间分布的重要因素。由图3(b)可以看出,年均降水也出现了两个极值中心,其中高值中心在云南省的南部,年均降水达 $1700\text{ mm}$ 以上,低值中心在云南省的东北部,年均降水在 $800\text{ mm}$ 以下。同时还可以看出,降水从南向北在伴随纬度的升高而逐渐递减,且有明显的分界,在西南和南部地区降水大致在 $1100\text{ mm}$ 以上,中部和北部地区降水大致在 $1100\text{ mm}$ 以下。

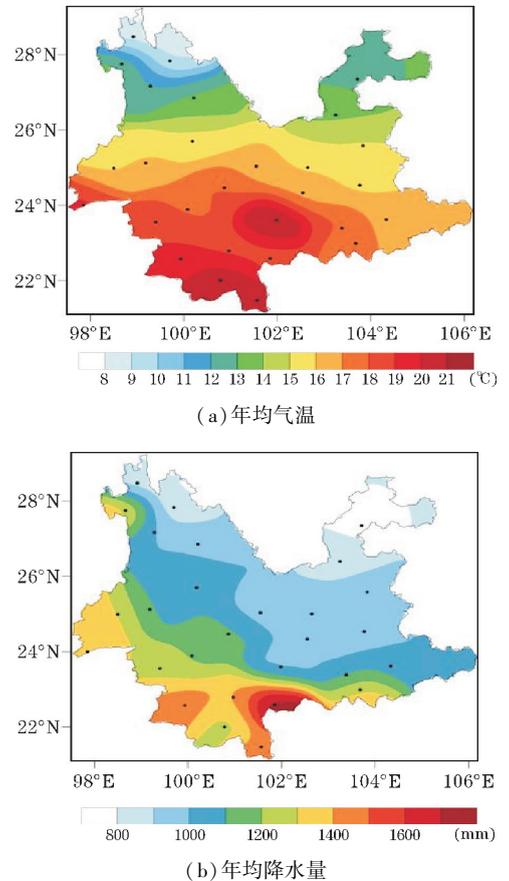


图3 1965–2014年云南省年均气温和年均降水量空间分布

### 2.2 极端气温指数时空变化趋势

#### 2.2.1 时间变化趋势分析

图4为云南省1965–2014年12个极端气温指数的时间变化趋势图。可以看出,冷夜日数 $\text{TN}10\text{p}$ 和冷昼日数 $\text{TX}10\text{p}$ 的线性倾向率均呈现变暖或减少趋势,而暖夜日数 $\text{TN}90\text{p}$ 和暖昼日数 $\text{TX}90\text{p}$ 的线性倾向率均呈现变暖或增加趋势。 $\text{TN}10\text{p}$ 和 $\text{TX}10\text{p}$ 的年际变化倾向率为 $-6.1\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $-2.9\text{ d}/10\text{ a}$ ,说明 $\text{TN}10\text{p}$ 比 $\text{TX}10\text{p}$ 的减小幅度大,而 $\text{TN}90\text{p}$ 和 $\text{TX}90\text{p}$ 的年际变化倾向率为 $9.1\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $5.1\text{ d}/10\text{ a}$ ,说明 $\text{TN}90\text{p}$ 的增加

幅度比 TX90p 大。云南省夜间气温的增加幅度比白天气温的增加幅度大,且近 50 年的气候在逐渐变暖,与云南省呈现干旱化相联系。最高气温极大值 TXx、最高气温极小值 TXn、最低气温极大值 TNx、最低气温极小值 TNn 的线性倾向率都呈上升的趋势,年际变化倾向率分别为 0.2 °C/10a, 0.2 °C/10a, 0.2 °C/10a, 0.4 °C/10a,霜冻日数 FDO 和冰冻日数 IDO 的线性倾向率都呈下降的趋势,年际变化倾向率为 -2.4 d/10a, -0.2 d/10a,表明云南省气温最大值和最小值都在增

大,而冷天气日数在减少,呈变暖趋势。热持续指数 WSDI 的线性倾向率整体呈上升趋势,而冷持续指数 CSDI 呈下降趋势,年际变化倾向率为 0.4 d/10a, -0.5 d/10a,表明云南省热天气持续日数增加。由于 12 个极端气温指数的年际变化趋势都通过了置信度为 95% 的显著性水平检验,表明其结果具有统计学意义,能较好地反映其近 50 年的时间变化趋势。总体来看,云南省的气温以变暖趋势为主,是对全球气候变暖有正响应的地区。

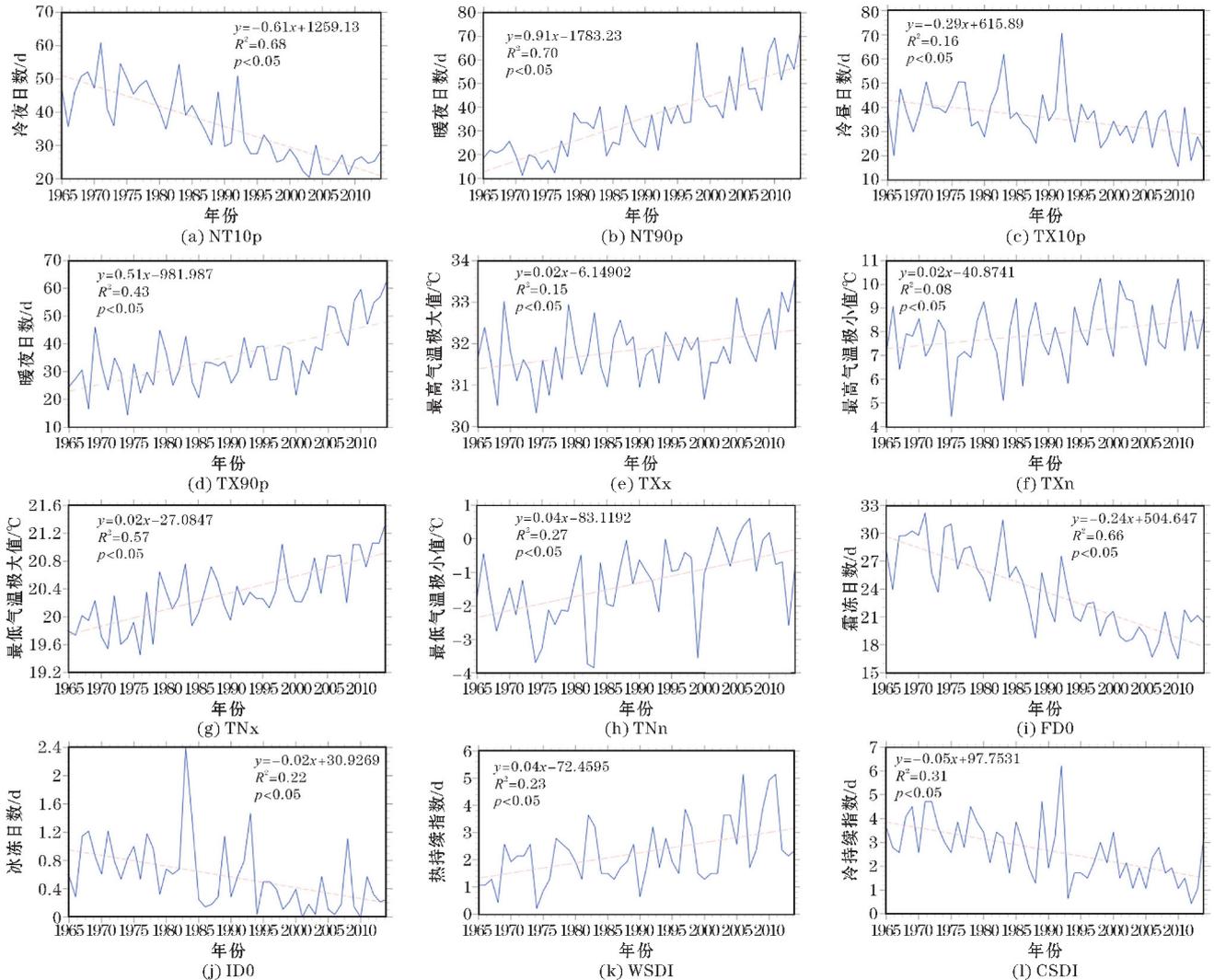


图 4 1965—2014 年云南省 12 个极端气温指数时间变化趋势

### 2.2.2 空间变化趋势分析

图 5 为云南省 1965—2014 年 12 个极端气温指数回归系数( $r_c$ )的空间变化趋势图。可以看出,冷夜日数 TN10p 和冷昼日数 TX10p 在空间上呈现整体下降的趋势,两个指数的下降站点数占总站点数都为 100%, TN10p 的数值分布无明显规律,大致呈现中部和南部大于西北和东南部,并存在一个低值和两个高值中心; TX10p 则呈现中部和东北部大于其他地区的空间分布规律,且两个指数的绝大部分站点  $|r_c| \geq 0.1$ ,表明其下

降幅度大。暖夜日数 TN90p 和暖昼日数 TX90p 在全省则呈现整体上升趋势,两个指数的上升站点数占总站点数分别为 100% 和 96.43%, TN90p 的数值在云南省的分布呈现中部大于 4 周的趋势,且所有站点的  $|r_c| \geq 0.1$ ,表明其上升幅度大; TX90p 在云南省中部、西北边界处、南部边界处数值较大,其他地区数值相对较低,且绝大部分地区  $|r_c| \geq 0.1$ ,表明其上升幅度也大。总体而言,前述 4 个极端气温指数的变化表明了云南省近 50 年变暖的特点。最高气温极大值 TXx 和

最高气温极小值  $TX_n$  在全省大部分地区也都呈上升趋势,其中  $TX_x$  和  $TX_n$  的上升站点数占总站点数分别为 92.86% 和 85.71%,  $TX_x$  的数值大体在西南地区较大,其他地区相对较小,存在 1 个低值和 1 个高值中心,低值区位于西北部边界,高值区位于中南部; $TX_n$  的数值大体呈现从西南向东北逐渐减小的空间趋势,存在 1 个低值和 2 个高值中心,低值区位于东北部边界处,高值区位于西部和南部边界处,2 个指数绝大部分站点的  $|rc| \leq 0.05$ ,说明其上升幅度小。最低气温

极大值  $TN_x$  和最低气温极小值  $TN_n$  在全省整体也呈现上升趋势,其中  $TN_x$  和  $TN_n$  的上升站点数占总站点数分别为 100% 和 89.29%,  $TN_x$  的数值呈现由南向北逐渐减少的趋势,存在 1 个低值和 1 个高值中心,且绝大部分地区的  $|rc| \leq 0.05$ ,表明上升幅度小,  $TN_n$  的数值大体呈现由南向北逐渐减小的趋势,存在 1 个低值和 3 个高值中心,低值区位于西北部边界,高值区位于中南部和南部边界处,且绝大部分地区的  $0.05 < |rc| < 0.1$ ,说明其上升幅度较大。

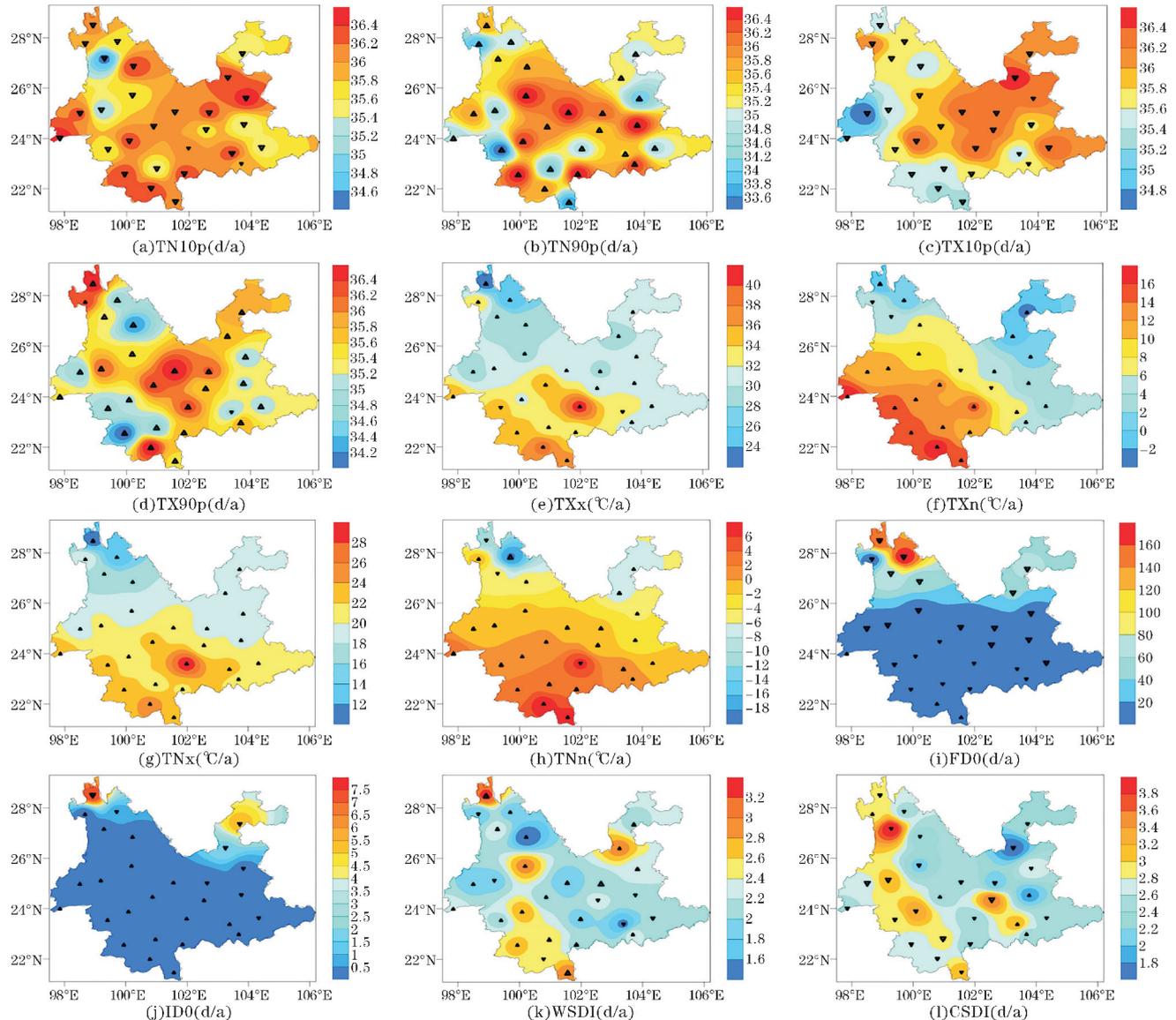


图5 云南省 1965-2014 年 12 个极端温度指数回归系数空间变化趋势(▲▼  $|rc| \leq 0.05$  ▲▼  $0.05 < |rc| < 0.1$  ▲▼  $|rc| \geq 0.1$ )

霜冻日数  $FDO$  在全省大部分地区都呈下降趋势,下降站点数占总站点数的 89.29%,其数值在全省分布并无明显的规律,大致呈现西北部较大,中部和南部较小的趋势,存在一个低值和一个高值中心,低值区和高值区都位于西北部,且数值相差不大,由于在北部绝大部分地区的  $|rc|$  大于在南部绝大部分地区的  $|rc|$ ,表明  $FDO$  在云南省北部的下降幅度大于在南部的下降

幅度。冰冻日数  $ID0$  在大部分地区都呈上升趋势,上升站点数占总站点数的 71.43%,其数值除去西北边界和东北地区外,其他地区数值都相对较低,存在一个高值中心,位于西北边界处,绝大部分地区的  $|rc| \leq 0.05$ ,表明其上升幅度小。热持续指数  $WSDI$  在云南省大部分地区都呈上升趋势,上升站点数占总站点数的 75%,其数值存在一个高值和两个低值中心,高值

区位于西北边界处,低值区位于西北和东南部,由于  $|rc|$  的大小分布不均匀,表明其各地大小和变化幅度差异不同。冷持续指数 CSDI 在云南省大部分地区都呈下降趋势,下降站点占总站点数的 82.14%,其数值存在一个高值和一个低值中心,高值区位于西北边界处,低值区位于北部边界处,  $|rc|$  的大小分布则呈现西部大和东部小的特点。

### 2.3 极端降水指数时空变化趋势

#### 2.3.1 时间变化趋势分析

图 6 为云南省 1965–2014 年 10 个极端降水指数的时间变化趋势。可以看出,湿日降水量 PRCPTOT 呈现整体下降的趋势,其年际变化倾向率为  $-18.3 \text{ mm}/10\text{a}$ ,下降幅度较大。降水强度 SDII 呈现整体上升的趋势,年际变化倾向率为  $0.1 \text{ (mm/d)}/10\text{a}$ ,相对增幅较小。

强降水量 R95p、极强降水量 R99p、低强度降水日数 R10mm 和中等强度降水日数 R20mm 都呈现整体下降的趋势,其年际变化倾向率分别为  $-4.3 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-0.2 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-0.6 \text{ d}/10\text{a}$ 、 $-0.2 \text{ d}/10\text{a}$ 。最大 1 日降水量 RX1day 整体呈上升趋势,年均变化倾向率为  $0.6 \text{ mm}/10\text{a}$ ,最大 5 日降水量 RX5day 整体呈下降趋势,年际变化倾向率为  $-0.3 \text{ mm}/10\text{a}$ ,两者的变化幅度都较小。连续干旱日数 CDD 整体呈上升趋势,年际变化倾向率为  $1.3 \text{ d}/10\text{a}$ ,增幅较大,而连续湿润日数 CWD 整体呈下降趋势,年际变化倾向率为  $-0.4 \text{ d}/10\text{a}$ ,下降趋势较小。综合来说,云南省近 50 年极端降水指数的年际变化不大,但其振幅波动较大。而由显著性检验结果可知,10 个指数中只有 PRCPTOT、R10mm、CWD 3 个指数通过了 95% 的显著性水平检验,不足以说明整体极端降水指数的变化趋势。

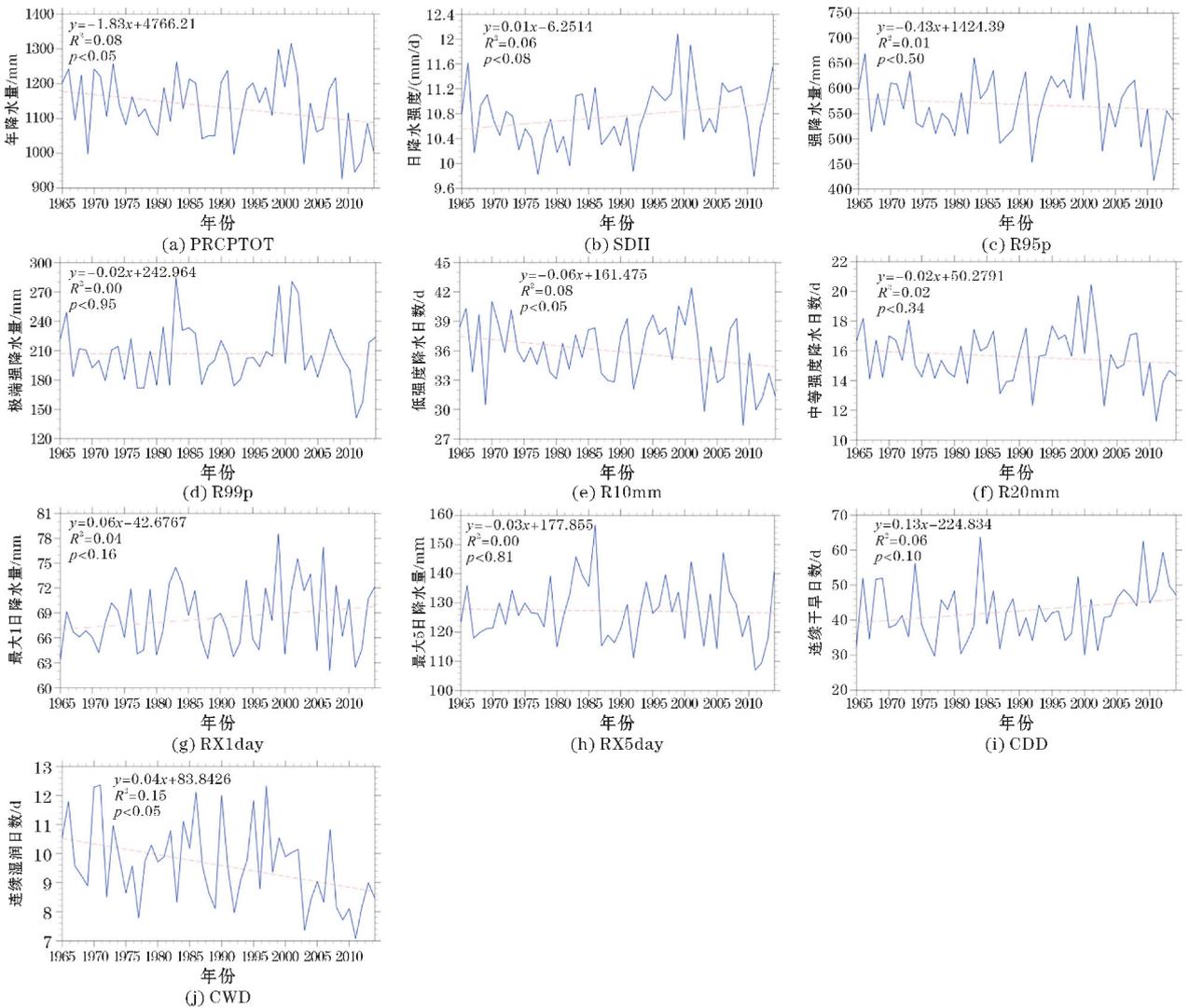


图 6 云南省 1965–2014 年 10 个极端降水指数时间变化趋势

#### 2.3.2 空间变化趋势分析

图 7 为云南省 1965–2014 年 10 个极端降水指数回归系数 ( $rc$ ) 的空间变化趋势图。可以看出,湿日降水量

PRCPTOT 在云南省大部分地区呈下降的趋势,而降水强度 SDII 则呈上升的趋势,在空间分布上都是从南向北逐渐减少,且下降和上升的站点数占总站点数都为 82.14%,

PRCPTOT 的大部分  $|rc| \geq 0.1$ , 表明下降幅度大, SDII 的大部分  $|rc| \leq 0.05$ , 表明上升幅度小。结合两个指数的时空变化趋势可以发现, 年降水量的减少和日降水强度的增加则意味着降水次数的减少和极端降水强度的增加。强降水量 R95p 在云南省大部分地区呈现下降的趋势, 而极强降水量 R99p 则呈上升的趋势, 且两者都存在相同的极值中心, 分别在云南省的西北部和南部; 两个指数下降和上升的站点数占总站点都为 60.71%, 两者在大部分地区的  $|rc| \geq 0.1$ , 表明两个指数的变化幅度大。低强度降水日数 R10mm 和中等强度降水日数 R20mm 在云南省大部分地区呈下降趋势, 下降站点数占总站点数分别为 78.57% 和 71.43%, 且 R10mm 由云南省西南部向东北部逐渐减小, R10mm 的大部分地区的回归系数为  $0.05 < |rc| < 0.1$ , 表明变化幅度较大, R20mm 的大部分地区的  $|rc| \leq 0.05$ , 说明变化幅度小, 且低强度降水日数的变化幅度比中等强度降水日数的变化幅度大。

最大 1 日降水量 RX1day 在云南省大部分地区都

有上升的趋势, 上升的站点数占总站点数的 64.28%, 变化幅度有大有小, 且分布无明显规律。最大 5 日降水量 RX5day 在云南省呈不明显的下降趋势, 下降站点数占总站点数的 53.57%, 大部分地区  $|rc| \geq 0.1$ , 说明变化幅度大。连续干旱日数 CDD 在云南省大部分地区呈现上升趋势, 上升站点数占总站点数的 85.71%, 全省整体的 CDD 数值较高, 有一个高值中心和一个低值中心, 其中在云南省中部、西南部以及西北部其数值较大, 在西部和东部数值较小, 且大部分地区的  $|rc| \geq 0.1$ , 表明上升幅度大和云南省大部分地区都呈现持续干旱的状态。连续湿润日数 CWD 在全省几乎都呈下降趋势, 下降站点数占总站点数的 92.86%, 大部分地区的  $|rc| \leq 0.05$ , 说明下降幅度大, 空间分布上在云南省西南部数值较大, 在其他地区相对较小。结合 CDD 和 CWD 两个指数可以得出在近 50 年里, 云南省连续湿润日数较短, 全省长时间都处于持续干旱状态, 干旱化趋势明显, 与实际灾情数据相符。

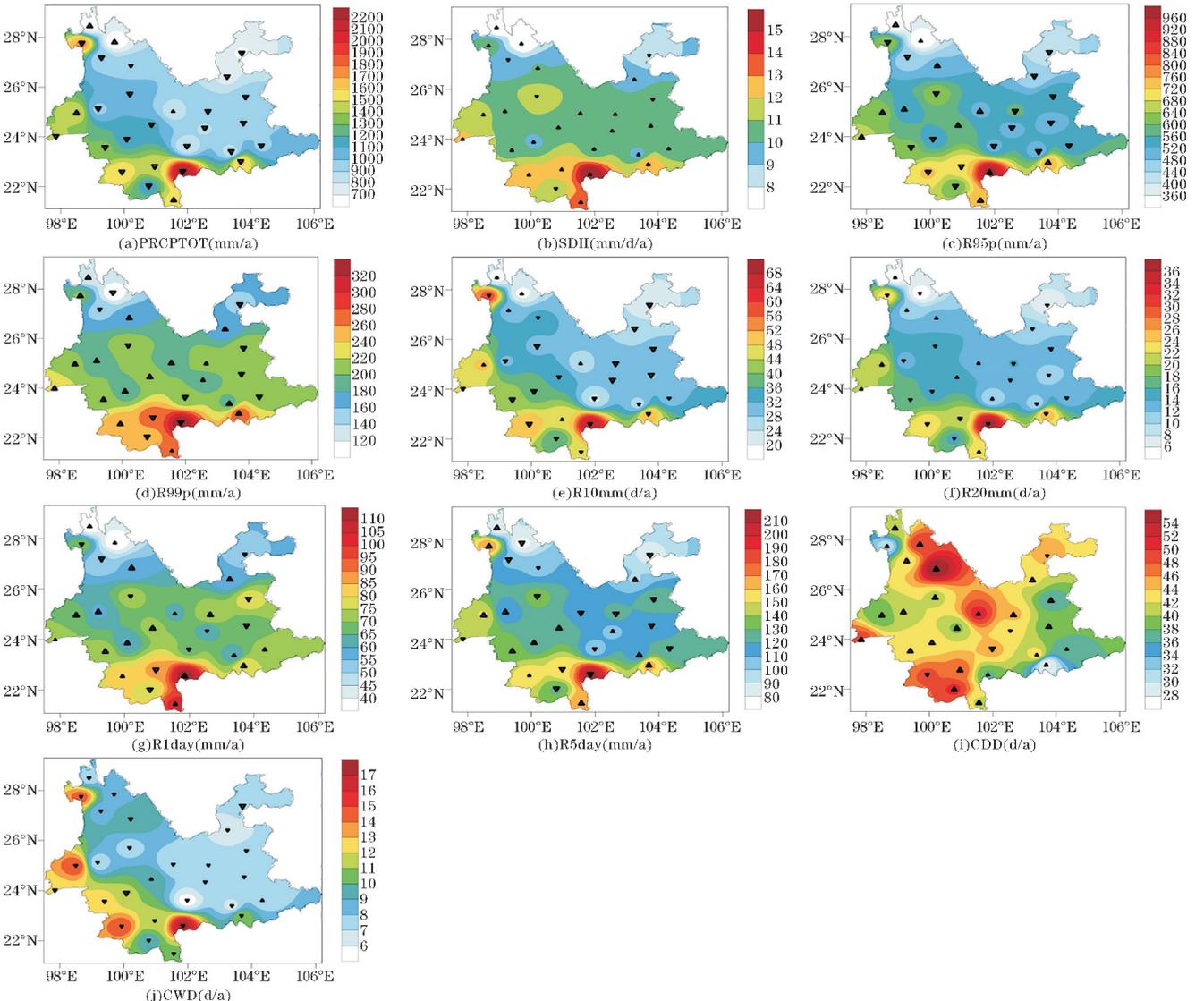


图7 云南省 1965-2014 年 10 个极端降水指回归系数空间变化趋势 (▲  $|rc| \leq 0.05$  ▲  $0.05 < |rc| < 0.1$  ▲  $|rc| \geq 0.1$ )

### 3. 结论与讨论

(1) 云南省近50年(1965–2014年)年均气温总体上呈现波动上升趋势,年均降水总体上则呈现波动下降趋势,其中年际气温距平升温率为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,年际降水距平递减率为 $18.3\text{ mm}/10\text{a}$ 。年均气温和降水的空间分布大致都呈现从南向北递减的趋势,其中年均气温的冷中心位于云南省西北部,其温度在 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,暖中心在云南省南部,温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,此结果与张万诚等<sup>[15]</sup>的研究结论大致相同;年均降水的高值中心位于云南省南部,年均降水量在 $1700\text{ mm}$ 以上,低值中心在云南省东北部,年均降水量在 $800\text{ mm}$ 以上,这主要与云南省地形南低北高有关,另外也与云南省雨季从南向北推进有关。

(2) 通过计算12个极端气温指数后发现,云南省近50年TN10p和TX10p均呈下降趋势,TN10p的下降趋势较明显,年际变化倾向率为 $-6.1\text{ d}/10\text{a}$ ;TN90p和TX90p均呈上升趋势,TN90p的增加幅度较大,年际变化倾向率为 $9.1\text{ d}/10\text{a}$ ,4个指数的变化表明冷暖指数之间具有对称性,这与罗玉<sup>[11]</sup>对西南地区极端气温变化趋势的研究结论相一致。其他指数中,TXx、TXn、TNx、TNn和WSDI的线性倾向率都呈上升趋势,FDO、IDO和CSDI的线性倾向率都呈下降趋势,且12个极端气温指数均通过95%的显著性水平检验,表明云南省近50年的气温以变暖为主,是对全球气候变暖有正响应的地方。云南省极端气温指数近50年在空间分布上均处于上升态势,冷指数变暖或减少,暖指数变暖或增加,且中部和南部地区变化趋势大于北部地区。

(3) 通过计算10个极端降水指数后发现,云南省近50年PRCPTOT、R95p、R99p、R10mm、R20mm、RX5day和CWD整体都呈下降趋势,SDII、RX1day和CDD整体都呈上升趋势,其年际变化率的大小反映出云南省近50年极端降水指数的年际变化不大,但振幅波动较大。由于10个指数中只有3个指数通过了95%的显著性水平检验,不足以代表整体的变化趋势。云南省近50年在空间分布上,虽然整体年均降水量在减少,但极端降水事件和降水强度确在普遍增加,低强度降水日数的变化幅度比中等强度降水日数的变化幅度大,连续湿润日数较短,全省长时间都处于持续干旱状态,干旱化趋势明显。

(4) 文中的研究还存在一些不足,如在筛选站点数据时,因选取的起始时间较早,筛选出的气象站点相对较少,由于数据的缺乏,终止年也没有更新到最新的

年份;在进行极端气候指数的分析时,未能结合云南省的地形和气候特征进行更细致的分区讨论;同时限于篇幅也没有对极端气候事件发生的影响因素进行分析,这些都有待在后续研究中进一步的深入和完善。

### 参考文献:

- [1] T R Kark, G Kukla, V N Razuvayev, et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change [J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(12): 2253–2256.
- [2] P Frich, L V Alexander, P Della-Marta, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193–212.
- [3] M J Manton, P M Della Marta, K J Haylock, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(3): 269–284.
- [4] 蒋卓亚. 中国极端气温及降水事件的时空特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [5] 班军梅, 缪启龙, 李雄. 西南地区近50年来气温变化特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(3): 346–351.
- [6] 袁文德, 郑江坤. 1962–2012年西南地区极端温度事件时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1246–1254.
- [7] T Stephenson, L Vincent, T Allen, et al. Trends and variability of daily and extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961–2010 [C]. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2013, 15.
- [8] M Abbasnia, H Toros. Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey [J]. *Pure Appl. Geophys*, 2018, 175: 3861–3973.
- [9] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 中国近40年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. *热带气象学报*, 2006(6): 618–624.
- [10] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 267–272.
- [11] 罗玉. 西南地区极端降水和气温的变化特征及其与高原夏季风的关系研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2015.

- [12] 曾少聪. 生态人类学视野中的西南干旱——以云南旱灾为例[J]. 贵州社会科学, 2010, 251(11): 24-28.
- [13] 尹明丽, 徐华君, 赵国永, 等. 1961-2016年黑龙江省极端气温事件变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 238-245.
- [14] 王晓宁, 岳大鹏, 赵景波, 等. 黑龙江省 1958-2017年极端降水时空变化与灾害效应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 138-146.
- [15] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961-2012年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.

## Spatial and Temporal Change Characteristics of Extreme Climate Events in Yunnan Province in Recent 50 Years

ZHANG Hansheng, LI Xiehui, LIU Zitang, XU Jiaao

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

**Abstract:** In order to study the spatio-temporal change characteristics of extreme climate events in Yunnan Province, the daily meteorological data of 28 meteorological stations from 1965 to 2014 were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of annual average temperature and annual average precipitation in Yunnan Province. Then, by calculating 22 extreme climate indices, the temporal and spatial change characteristics of 12 extreme temperature indices and 10 extreme precipitation indices in recent 50 years were analyzed. The results show that: (1) The annual average temperature in Yunnan Province from 1965 to 2014 showed an overall upward trend, and the interannual temperature anomaly warming rate was  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , while the annual average precipitation showed a fluctuating downward trend, and the interannual precipitation anomaly decline rate was  $18.3\text{ mm}/10\text{a}$ . The spatial distribution of annual average temperature and precipitation was decreasing from south to north. (2) Among the 12 extreme temperature indices, the linear tendency rates of TN10p, TX10p, FD0, ID0 and CSDI showed a downward trend, while those of TN90p, TX90p, TXx, TXn, TNx, TNn and WSDI showed an upward trend. These indicated that the cold index was warming or decreasing, and the warm index was warming or increasing; (3) Among the 10 extreme precipitation indices, PRCPTOT, R95p, R99p, R10mm, R20mm, RX5day and CWD all showed a downward trend, while SDII, RX1day and CDD showed an overall upward trend. These indicated that the overall annual average precipitation and precipitation frequency were decreasing, but the numbers of the extreme precipitation events and precipitation intensity were increasing, and the drought trend was obvious in Yunnan Province.

**Keywords:** applied meteorology; extreme climate; extreme temperature index; extreme precipitation index; spatial and temporal change characteristics; Yunnan Province