

喀斯特流域极端气候变化特征及对 NDVI 的影响

刘 炜, 焦树林

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了解贵州省极端气候时空变化及其对植被 NDVI 的影响, 结合箱型图、相关分析、Sen+MK 等方法对 1961—2020 年贵州省极端气候指数进行分析。结果表明: (1) 贵州省夜指数的变化幅度大于昼指数的变幅, 极端高温指数呈上升趋势, 极端低温指数在下降, 气候整体呈变暖趋势。除赤水河流域 SU25(夏日日数)以 -0.08 d/a 显著下降外, 其余流域高温指数均显著上升, 而低温指数均显著下降。(2) 量级指数的变化幅度大于强度指数的变幅, 年总降水量在减少, 但强降水和极强降水事件呈增加趋势; 强度指数中南盘江流域均未通过显著性检验, 量级指数在沅江流域的变化速率最大。(3) 气温及降水持续指数中, 低值集中在牛栏江横江流域; 其中 CSDI(冷持续指数)、WSDI(热持续指数)、CDD(持续干燥指数)未通过显著性检验; GSL(作物成长期)以 0.26 d/a 显著上升。(4) 近 21 年, 极端高温指数对植被生长以促进作用为主, 且受 TN90P(暖夜日数)的影响最大; 极端低温指数以抑制为主, 且受 TN10P(冷夜日数)的影响最大; 气温持续指数以促进为主, 且受 WSDI 的影响最大。极端降水指数中, 降水强度、量级指数以促进为主, 且受 R25 mm(大雨以上日数)和 R99P(极强降水量)的影响最大, 降水持续指数以抑制为主且, 受 CDD(持续干燥指数)的影响较大。

关键词: 贵州省; 极端气候; 箱型图; Sen+MK 趋势分析; 植被 NDVI

中图分类号: P423.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)05-0220-13

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.028

Characteristics of Extreme Climate Change in Karst Basin and Its Impact on NDVI

LIU Wei, JIAO Shulin

(College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to understand the temporal and spatial changes of extreme climate in Guizhou Province and its impact on NDVI of vegetation, the extreme climate index of Guizhou Province from 1961 to 2020 was analyzed by combining box chart, correlation analysis, Sen+MK and other methods. The results show that: (1) The change range of night index is larger than that of day index, the extreme high temperature index is increasing, the extreme low temperature index is decreasing, and the climate is warming as a whole. Except that the SU25 (summer days) in Chishui River Basin decreased significantly by -0.08 d/a, the high temperature index increased significantly in other basins, while the low temperature index decreased significantly. (2) The change range of magnitude index is larger than that of intensity index. The annual total precipitation is decreasing, but the heavy precipitation and extremely heavy precipitation events are increasing; The intensity index in the central and southern Panjiang River Basin failed to pass the significance test, and the magnitude index had the largest change rate in the Yuanjiang River Basin. (3) The low values of temperature and precipitation persistence index are concentrated in Niulan River and Hengjiang River Basin; CSDI (cold duration index), WSDI (heat duration index) and CDD (continuous drying index) failed to pass the significance test; GSL (crop growth period) increased significantly at 0.26 d/a. (4) In recent 21 years, extreme high temperature index mainly promoted vegetation growth and was most affected by TN90P (warm night days); The extreme low temperature index was mainly inhibited and was most affected by TN10P (cold night days); The temperature persistence index is mainly promoted and is most affected by WSDI. Among the extreme precipitation indexes, the precipitation intensity and magnitude indexes are mainly promoted and are

收稿日期: 2022-02-27

资助项目: 贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号); 黔科合基础[2020]1Y252; 贵州省水利厅科技专项(KT201602)

第一作者: 刘炜(1995—), 女, 硕士, 主要从事岩溶水资源与 GIS 研究。E-mail: 2735346180@qq.com

通信作者: 焦树林(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事喀斯特水文水资源与流域地表过程和环境变化研究。E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

most affected by R25 mm (days above heavy rain) and R99P (extremely strong precipitation). The precipitation persistence index is mainly inhibited and is greatly affected by CDD (continuous drying index).

Keywords: Guizhou Province; extreme climate; box diagram; Sen + MK trend analysis; vegetation NDVI

气候变化不仅包括平均气候的变化,还包括极端气候的变化^[1]。极端气候事件是指一定地区在一定时间内出现的历史上罕见的气象事件,其发生概率通常小于 5%或 10%,极端气候事件总体可分为极端高温、极端低温、极端干旱、极端降水等^[2]。20 世纪 50 年代以来,全球气候变化已逐步成为不争的事实,IPCC 第 5 次评估报告^[3]指出,从 1880 年以来,全球地表持续升温,到 2012 年升高了 0.85℃,且升温速率不断加快。IPCC 第六次评估报告^[4-5]相关解读指出,过去 10 年,地球气温比 19 世纪后半叶高 0.95~1.20℃,最佳估计值为 1.10℃;报告警告称,即使只升温 1.50℃,热浪、旱灾等气候事件也可能比以往所见更严重,在全球和区域层面都是如此。极端降水事件在不同地区表现出各自的演变趋势和独特的分布格局^[6-7],在我国,由于山丘面积较大,人为活动较为强烈,极端降水事件往往会造成严重的水土流失:我国大部分地区水土流失一般主要由少数几次大雨或暴雨造成,如 2017 年 7 月陕西无定河特大暴雨事件造成低洼道路淤积,山坡生产道路遭到毁灭性破坏,为该区 500 年一遇的暴雨;2021 年 7 月河南郑州遭遇“千年一遇”的特大暴雨,由于降水持续时间比较长,发生的区域比较集中,造成河南省西部、西北部山区山洪地质灾害风险明显增高,同时还造成了大范围城市内涝、农田积涝等。

从相关学者的研究现状来看,贵州境内流域极端气候的相关研究较少,仅黄维等^[8]、朱大运等^[9]对贵州省极端气候进行过时空变化分析;周德全等^[10]、张丹丹等^[11]、冉仙果等^[12]、张锦等^[13]、谢仁波等^[14]基于县域或草海进行过极端降水事件的时空变化分析;而在贵州省境内流域的相关研究中,魏星宇等^[15]、刘纯军等^[16]主要集中在土地利用时空变化及重金属污染方面。贵州省的气候变化直接关系到省内人们的生存及工农业生产,并对全国的生态环境、水资源、粮食安全以及社会经济可持续发展产生重要影响。文中以贵州境内流域为研究对象,基于气温、降水日值数据利用 RClimDex 软件提取 17 个国际通用的极端气候指标,从定性和定量的角度了解不同流域极端气候指标变化的异同及与植被 NDVI 的关系,以达到在区域尺度上,更好理解气候极端事件的广泛时间和空间尺度的目的,从而提高对有着“喀斯特王国”的贵州省极端气温和极端降水事件变化特征及规律的认识,为科学适应、减缓和应对极端气候异常提供参考和依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

贵州省地处中国西南内陆地区腹地,103°36′—109°35′E,24°37′—29°13′N(图 1),处于云贵高原向东部低山丘陵过渡的斜坡地带;境内地势西高东低,平均海拔 1 100 m。全省共划分为 2 个水资源 1 级区,即长江和珠江 2 大水系,8 大流域,苗岭是长江和珠江两大水系的分水岭,其中苗岭以北属于长江水系,主要包括牛栏江横江流域、乌江流域、赤水河流域、沅江流域,珠江水系主要包括南盘江流域、北盘江流域、红水河流域、都柳江流域^[17]。境内大部分地区雨日在 160 天以上,小雨多,占全年总雨日的 80%,多年平均降水量在 1 100~1 300 mm,最大降水量接近 1 600 mm,降雨量较为充沛,但时空分布不均,受季风的影响降水多集中于夏季,境内各地阴天日数一般超过 150 天,常年相对湿度在 70%以上;气温变化小,最热月(7 月)平均气温一般是 22~25℃,为典型夏凉地区,年均气温 14~16℃^[18],极端最高温多不超过 38℃,极端最低温很少低于-8℃,生长期达 230~270 天,南部海拔较低的河谷盆地生长期可达 290~300 天以上,有霜日仅 10~15 天。

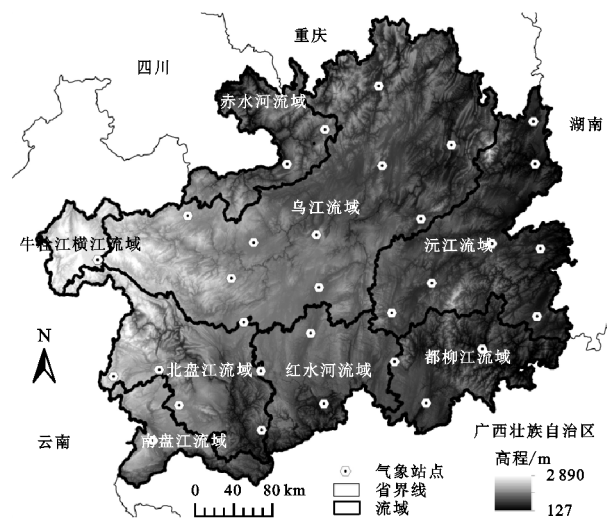


图 1 研究区概况

1.2 数据来源及处理

1.2.1 数据类型 文中数据主要包括基础地理信息数据及气象数据 2 种,基础地理信息数据主要包括贵州省界矢量数据,来源于资源环境数据云平台(<https://www.resdc.cn/>),数字高程模型(Digital Elevation Model)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),并根据 1:1 900 000 万的贵州省水系图进行屏幕跟踪矢量化,获取贵州省 8 大流域

的矢量边界图;气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取日值数据集(V3.0),剔除缺测值年份较多的站点后提取 1961—2020 年贵州省 31 个气象站点的气温和降水日值数据并进行异常值处理,对部分缺测数据结合多元线性内插法^[19]进行插补以获取完整的基础数据。植被 NDVI(归一化植被指数)数据为 MODIS 数据 MOD13Q1 产品,来源于(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),时间范围为 2000—2020 年,行列号 h27v06,时间分辨率 16 天,空间分辨率 250 m,利用 NASA 官网上的 HEG (HDF—EOS TO GeoTIFF Conversion Tool)工具

对数据进行投影转换、裁剪,去除异常值,最后采用平均值法将数据融合为逐年 NDVI 数据。

1.2.2 极端气候指标 RCLimDex 可用于计算 16 个极端气温指数和 11 个极端降水指数,共 27 项(<https://github.com/ECCC-CDAS/RCLimDex>)。文中基于 1961—2020 年贵州省 31 个气象站点的逐日气温降水数据,结合 RCLimDex 软件计算 17 个国际通用的极端气候指标^[20](9 个极端温度指标和 8 个极端降水指标),其中极端气温指数主要包括高温指数、低温指数、持续指数;极端降水指数主要包括强度指数、量级指数、持续指数(表 1)。

表 1 极端气候指数名称及释义

类型	缩写	指数名称	定义	单位
气温指数	SU25	夏日日数	日最高气温>25℃的日数	天
	表征高温指数	TX90P	日最高温>90%分位值的日数	天
		TN90P	日最低温>90%分位值的日数	天
		FD0	霜日	天
	表征低温指数	TX10P	日最高温<10%分位值的时间	天
		TN10P	日最低气温<10%分位值的时间	天
降水指数	RX1day	日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
	表征强度指数	R25 mm	日降水量≥25 mm 的时间	天
		SDII	降水强度	mm
		PRCPTOT	年总降水量	mm
	表征量级指数	R95P	日降水量>95%分位值的总降水量	mm
		R99P	日降水量>99%分位值的总降水量	mm
持续指数	气温持续指数	CSDI	冷持续指数	天
		WSDI	热持续指数	天
		GSL	作物生长期	天
	降水持续指数	CDD	日降水量<1 mm 的最长持续时间	天
		CWD	日降水量≥1 mm 的最长持续时间	天

1.3 研究方法

在数值分布范围上采用箱型图对 1961—2020 年贵州省及 8 个流域的极端气候指数进行描述统计分析,以反映数据的离散分布情况,尽可能排除异常值的影响,箱子的宽度在一定程度上反映了数据的波动程度。在空间变化特征上,ANUSPLIN 气象插值软件是目前比较流行的气象插值软件,更适合对贵州省复杂地形下的气象数据进行插值^[21],文中用到的功能模块主要包括 SPLINA 和 LAPGRD 模块,其中 SPLINA 模块适用于小于 2 000 个要素的点文件,允许一个或者多个独立变量的任意数量的(局部)薄盘光滑样条(thin plate splines,TPS)函数,且光滑系数通常用 GCV 决定,GCV 的值越小,插值精度越准确;LAPGRD 模块主要是进行局部薄盘光滑样条函数表面估值并计算贝叶斯标准误差,并生成一个规则的矩形栅格文件。所以以高程为协变量,经纬度为变量,选择 3 变量薄盘光滑样条函数对极端气候数据进行空间插值,因计算机运算内存限制,将插值数据空间分辨率重采样为 250 m 以计算空间变化特征。Sen 斜率估

计,用于计算趋势值,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,文中利用 Sen+MK 的方法先计算极端气候指数 Sen 趋势值,然后当 Z 的绝对值高于 1.96 则认为通过了 95%显著性检验,从而获知极端气候指数空间变化显著性。最后利用相关分析法分析极端气候因子与植被 NDVI 的相关关系^[22]。

2 结果与分析

2.1 气温指数的变化特征

2.1.1 指数数值的分布范围 由图 2 可知,高温指数中 SU25(夏日日数)在贵州省存在异常值,在省域及流域间的波动程度较小;其中牛栏江横江、红水河、沅江、北盘江流域均存在偏大的异常值,说明 SU25 的值存在异常偏高的现象。南盘江、红水河、都柳江、沅江流域的 SU25 均高于贵州省的整体值 133 天,其中南盘江流域波动最大;牛栏江横江、乌江、赤水河、北盘江流域的 SU25 均低于贵州省的整体值,其中以牛栏江横江流域的异常值较多、均值最低 25 天、波动最大。省 8 个流域的 TX90P(暖昼日数)波动较大,除牛栏江横江、乌江、赤水河流域存在异常值偏高外,其余流域不存在异

常值。南盘江、都柳江、赤水河、沅江流域均值与贵州省均值相同,为 11 天,其中南盘江、赤水河流域数值波动较大;牛栏江横江、乌江、红水河、北盘江流域的均值(10 天)均低于贵州省整体值。即 TX90P 在北盘江流域的均值较小且数值较为集中,波动性不大,而在南盘江、赤水河流域的均值较大且数值分布区间较大,即暖昼日数波动性较大。TN90P(暖夜日数)在 8 个流域之间的波动较大,除在牛栏江横江、都柳江、北盘江流域存在异常值,且都柳江的异常值较多外,其余流域及贵州省均没有异常值;在牛栏江横江、红水

河流域的值域区间较大。

由图 2 可知,低温指数中的 FD0(霜日日数)在牛栏江横江流域的波动程度较大;除牛栏江横江、乌江、都柳江流域没有异常值外,其余流域均存在偏大的异常值。牛栏江横江、乌江及沅江流域的 FD0 均高于贵州省的整体值 15 天。TX10P(冷夜日数)在省域内及各个流域内的波动均较大,除南盘江流域存在异常值外,其余流域不存在异常值。TN10P(冷昼日数)在省域内及流域内的波动程度是最大的,但除红水河流域存在异常值外,其余流域均不存在异常值。

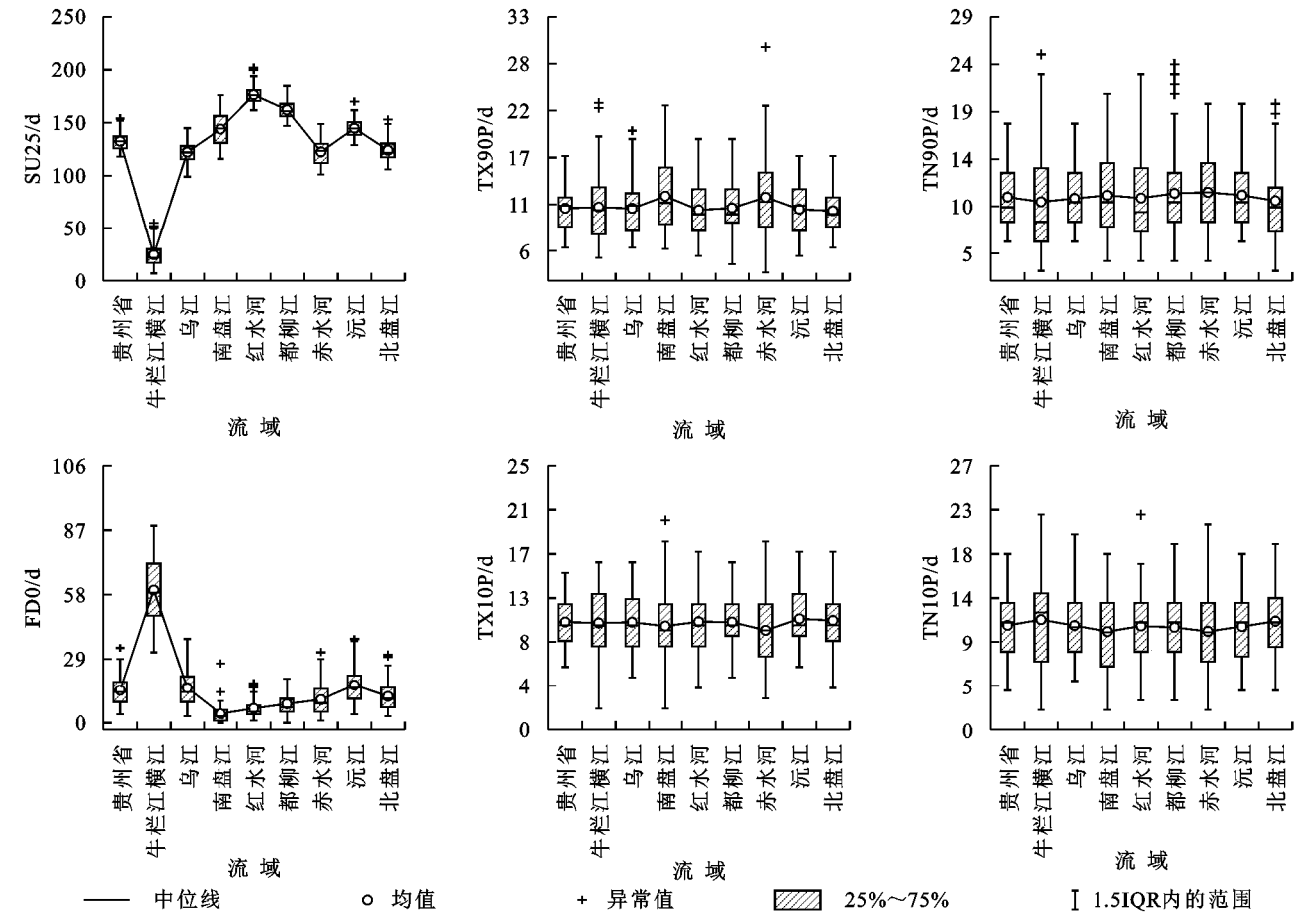


图 2 1961—2020 年贵州省气温指数(高、低温)的箱型图

2.1.2 空间变化趋势 对极端高温指数的空间分布进行趋势分析及 95%显著性检验(图 3 和表 2、表 3),SU25(夏日日数)变化趋势的范围为-1.25~0.66 d/a,显著下降趋势的像元占 1.91%,显著上升趋势的像元占 43.67%,总体以 0.25 d/a 显著上升;流域中,除赤水河流域以-0.08 d/a 显著下降外,其余流域均呈显著上升趋势,且牛栏江横江流域的上升趋势最快为 0.34 d/a。TX90P(暖昼日数)变化趋势的范围为-0.10~0.18 d/a,显著下降趋势的像元占 0.01%,显著上升趋势的像元占 74.32%,总体以 0.07 d/a 显著上升;所有流域均呈显著上升趋势,其中南盘江、都柳江流域上升最快,均为 0.09 d/a。TN90P(暖夜日数)变化趋势的范围为-0.10~0.33 d/a,显著下降趋势

的像元占比 0,显著上升趋势的像元占比 92.46%,总体以 0.12 d/a 显著上升;所有流域均呈显著上升趋势,且牛栏江横江流域上升最快,为 0.19 d/a。

从表 4、表 5 贵州省极端低温指数变化趋势特征值的统计及空间分布(图 4)可知,FD0(霜日日数)的变化趋势范围为-0.82~0 d/a,显著下降趋势的像元占 89.78%,显著上升趋势像元占 0,总体以-0.23 d/a 显著下降;所有流域均呈显著下降趋势,其中牛栏江横江流域下降趋势最快,为-0.40 d/a。TX10P(冷昼日数)的变化趋势范围为-0.15~0.06 d/a,显著下降趋势的像元占 25.59%,显著上升趋势的像元占 0,总体以-0.07 d/a 显著下降;所有流域均呈显著下降趋势,且南盘江流域的下降趋势最快,为-0.09 d/a。TN10P(冷夜日数)的

变化趋势范围为 $-0.29\sim-0.04$ d/a,显著下降趋势的像元占 94.0%,显著上升趋势的像元占 0,总体以 -0.14 d/a 显著下降;所有流域均呈显著下降趋势,且牛栏江横江流域下降趋势最快,为 -0.19 d/a。

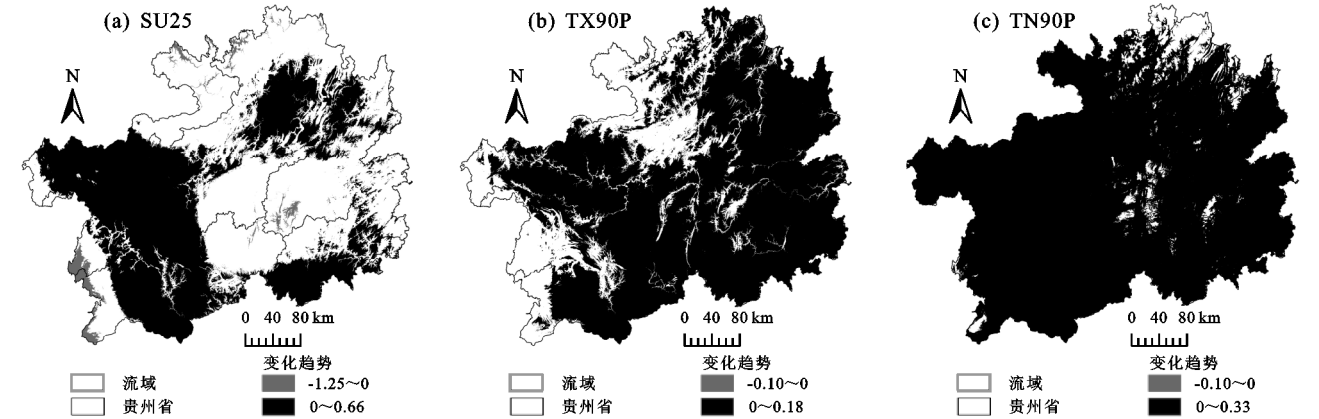


图 3 1961—2020 年贵州省极端高温指数的空间变化趋势

表 2 1961—2020 年贵州省极端高温指数像元占比及变化趋势			
		单位: %	
项目	SU25	TX90P	TN90P
下降像元	1.91	0.01	0
上升像元	43.67	74.32	92.46
Sen's slope	0.25(↑)	0.07(↑)	0.12(↑)

注: ↑表示上升趋势。下同。

表 3 1961—2020 年贵州省 8 大流域高温指数变化趋势			
指数	SU25	TX90P	TN90P
分区	Sen's slope	Sen's slope	Sen's slope
牛栏江横江	0.34(↑)	0.08(↑)	0.19(↑)
乌江	0.26(↑)	0.07(↑)	0.10(↑)
南盘江	0.17(↑)	0.09(↑)	0.15(↑)
红水河	0.23(↑)	0.07(↑)	0.13(↑)
都柳江	0.23(↑)	0.09(↑)	0.12(↑)
赤水河	-0.08(↓)	0.08(↑)	0.15(↑)
沅江	0.16(↑)	0.08(↑)	0.11(↑)
北盘江	0.30(↑)	0.07(↑)	0.16(↑)

注: ↓表示下降趋势。下同。

表 4 1961—2020 年贵州省极端低温指数像元占比及变化趋势			
		单位: %	
项目	FD0	TX10P	TN10P
下降像元	89.78	25.59	94.40
上升像元	0	0	0
Sen's slope	-0.23(↓)	-0.07(↓)	-0.14(↓)

2.2 降水指数的变化特征

2.2.1 指数数值的分布范围 由图 5 可知,降水强度指数中的 RX1day(日最大降水量)在南盘江流域的波动程度最大,除赤水河流域无异常值外,贵州省及其余 7 个流域均存在异常值,且异常值出现在高值部分,说明降水存在增加的概率。南盘江、红水河、沅江、北盘江流域的 RX1day 均高于贵州省的整体值 88.10 mm;牛栏江横江、乌江、都柳江、赤水河流域的 SU25 均低于贵州省的整体值;R25 mm(大雨以上日数)在流域之间存在差

异,值的波动较大,除南盘江、北盘江流域存在偏小的异常值外,其余流域及省域范围不存在异常值。南盘江、红水河、都柳江、沅江、北盘江流域的 R25 mm 均值均高于省域均值(12.3 天);牛栏江横江、乌江、赤水河流域均低于省域均值。SDII(降水强度)的波动较大,异常值以偏大的居多,省域范围内 SDII 的均值为 10.60 mm。南盘江、红水河、都柳江、沅江、北盘江流域均高于省域均值,其中红水河流域的 SDII 最大,意味着降水强度最大,年均值为 11.70 mm;牛栏江横江、乌江、赤水河流域的均值均低于省域均值。

表 5 1961—2020 年各流域低温指数变化趋势			
指数	FD0	TX10P	TN10P
分区	Sen's slope	Sen's slope	Sen's slope
牛栏江横江	-0.40(↓)	-0.07(↓)	-0.19(↓)
乌江	-0.26(↓)	-0.07(↓)	-0.13(↓)
南盘江	-0.12(↓)	-0.09(↓)	-0.15(↓)
红水河	-0.14(↓)	-0.06(↓)	-0.13(↓)
都柳江	-0.24(↓)	-0.06(↓)	-0.15(↓)
赤水河	-0.18(↓)	-0.06(↓)	-0.14(↓)
沅江	-0.27(↓)	-0.06(↓)	-0.14(↓)
北盘江	-0.19(↓)	-0.07(↓)	-0.16(↓)

由图 5 可知,省域范围内,降水量级指数中的 PRCPTOT(年总降水量)的异常值主要分布在牛栏江横江、南盘江、赤水河流域,贵州省异常值偏小,各个流域的波动程度较大,波动程度最大的是南盘江流域;牛栏江横江、乌江、红水河、赤水河流域的 PRCPTOT 均值均小于省降水总量(1 181.90 mm);南盘江、都柳江、沅江、北盘江流域的 PRCPTOT 总量均高于省域均值。R95P(极端降水量)除牛栏江横江、赤水河、沅江流域外,其余分区不存在异常值,各流域及贵州省的 R95P 波动程度均较大,最大的为南盘江流域;牛栏江横江、乌江、红水河、赤水河流域的 R95P 均小于省域均值(338.10 mm)。R99P(极端强降水量)在贵州省、牛栏江横江、赤水河、沅江、北盘江流域均存在异常值,贵州省的 R99P 波动最小,异常值偏大,南盘江流域的波动最

大;牛栏江横江、乌江、红水河、赤水河流域的 R99P 均值均小于省域均值(106.00 mm)。

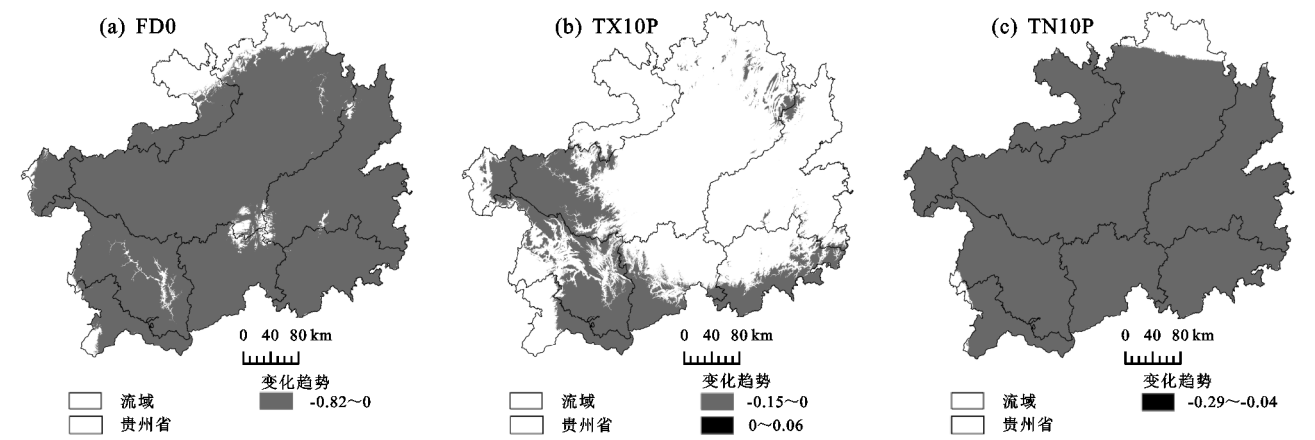


图 4 1961—2020 年贵州省极端低温指数的空间变化趋势

2.2.2 空间变化特征 对贵州省极端降水强度指数的空间分布进行趋势分析及 95%显著性检验(图 6),并对变化趋势的像元占比进行统计分析(表 6、表 7),RX1day(日最大降水量)变化趋势的范围为 0.17~0.74 mm/a,显著下降趋势的像元占 0,呈显著上升的像元占 17.55%,总体以 0.31 mm/a 显著上升;牛栏江横江、南盘江、北盘江流域未通过显著性检验,乌江、红水河、都柳江、赤水河、沅江流域呈显著上升趋势,其中沅江流域的上升趋势最快,为 0.36 mm/a。R25 mm(大雨以上日数)的变化趋势范围为-0.08~0.07 d/a,呈显著下降的像元占比 0.07%,呈显著上

升的像元占比 3.30%,总体以 0.04 d/a 显著上升;在南盘江、都柳江、北盘江流域未通过显著性检验,在沅江流域以-0.07 d/a 显著下降,在牛栏江横江、乌江、红水河、赤水河流域呈显著上升趋势且在红水河、赤水河流域的上升趋势最快,为 0.05 d/a。SDII(降水强度)的变化趋势范围为-0.03~0.05 mm/a,其中呈显著下降趋势的像元占比为 0.46%,呈显著上升趋势的像元占 10.07%,总体上以 0.02 mm/a 显著上升;在牛栏江横江、南盘江流域未通过显著性检验,其余流域均呈显著上升趋势,其中红水河、北盘江流域的上升趋势最快,为 0.03 mm/a。

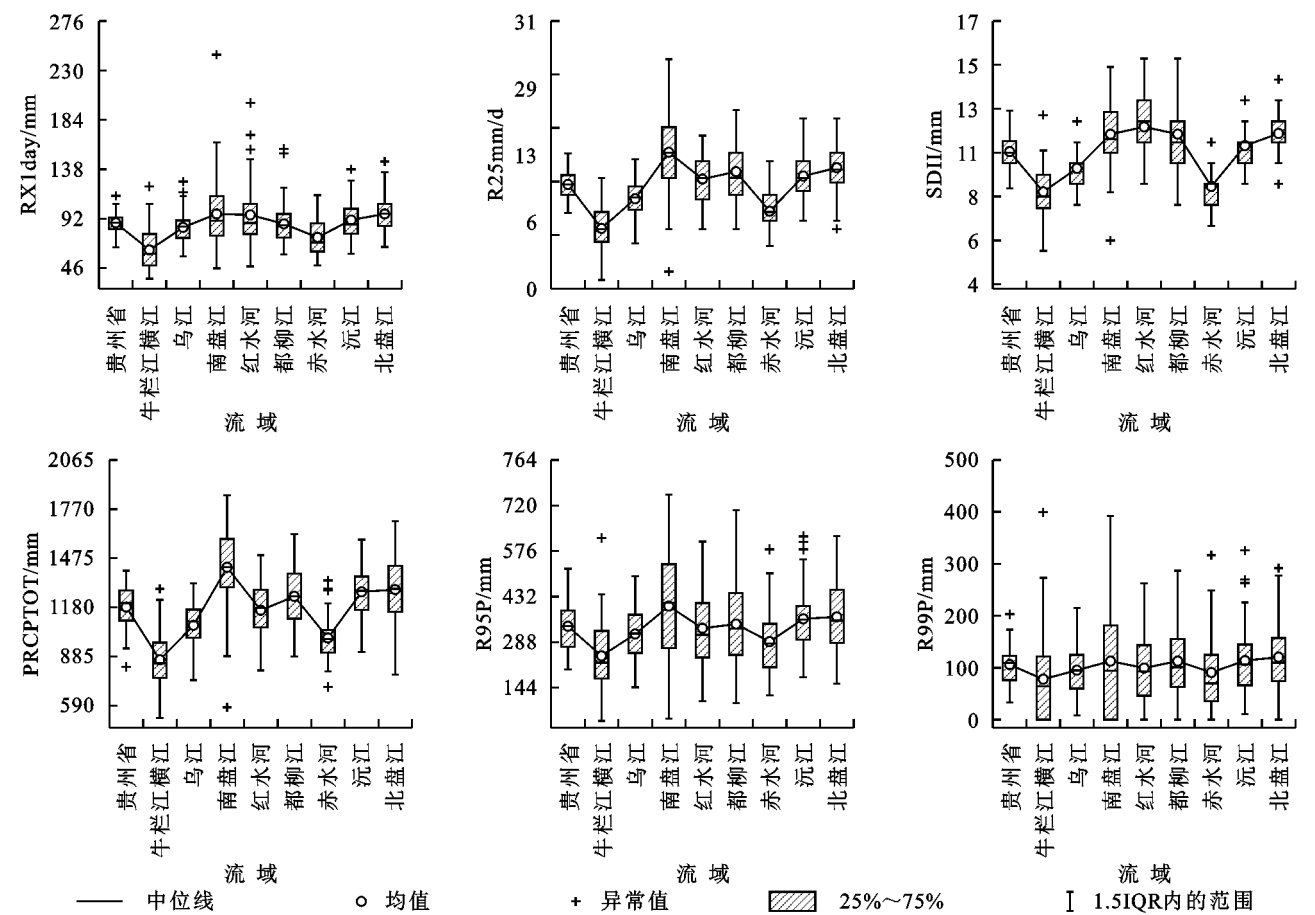


图 5 1961—2020 年贵州省降水指数(强度、量级)的箱型图

从通过 95%显著性检验的降水量级指数空间分布(图 7)及像元占比(表 8、表 9)可知,PRCPTOT(年总降水量)的变化趋势范围为-9.12~4.09 mm/a,呈显著下降趋势的像元占 6.20%,呈显著上升趋势的像元占 0.91%,总体以-2.83 mm/a 显著下降;红水河、都柳江流域未通过 95%显著性检验,除赤水河流域以 2.94 mm/a 的速率呈显著上升趋势外,牛栏江横江、乌江、南盘江、沅江、北盘江均呈显著下降趋势,且沅江流域以-4.34 mm/a 下降最快。R95P(强降水量)的变化趋势范围为-2.75~3.64 mm/a,呈下

降趋势的像元占 0,呈上升趋势的像元占 3.96%,总体上以 2.36 mm/a 显著上升;其中牛栏江横江、乌江、南盘江、红水河未通过显著性检验,除北盘江流域以-2.40 mm/a 显著下降外,都柳江、赤水河、沅江流域呈显著上升趋势,且沅江流域的上升趋势最快,为 2.36 mm/a。R99P(极强降水量)的变化趋势范围为 0.55~2.02 mm/a,呈显著下降趋势的像元占 0,呈显著上升趋势的像元占 25.33%,总体以 1.02 mm/a 显著上升;除南盘江流域未通过显著性检验外,其余流域均呈显著上升趋势且沅江流域的上升趋势最快,为 1.19 mm/a。

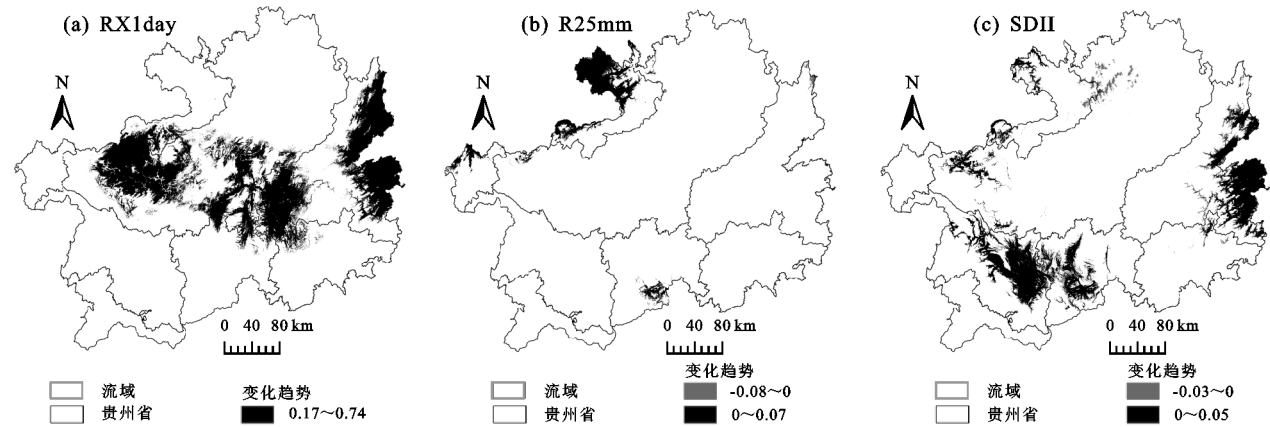


图 6 1961—2020 年贵州省降水强度指数的变化趋势

表 6 1961—2020 年贵州省降水强度指数像元占比及变化趋势

项目	RX1day	R25mm	SDII
下降像元	0	0.07	0.46
上升像元	17.55	3.30	10.07
Sen's slope	0.31(↑)	0.04(↑)	0.02(↑)

表 7 1961—2020 年各流域降水强度指数变化趋势

指数	RX1day	R25 mm	SDII
分区	Sen's slope	Sen's slope	Sen's slope
牛栏江横江	—(—)	0.04(↑)	—(—)
乌江	0.27(↑)	0.03(↑)	0.002(↑)
南盘江	—(—)	—(—)	—(—)
红水河	0.29(↑)	0.05(↑)	0.03(↑)
都柳江	0.26(↑)	—(—)	0.02(↑)
赤水河	0.23(↑)	0.05(↑)	0.02(↑)
沅江	0.36(↑)	-0.07(↓)	0.02(↑)
北盘江	—(—)	—(—)	0.03(↑)

2.3 持续指数的变化特征

2.3.1 分布箱型图 由图 8 可知,气温持续指数中的 CSDI(冷持续指数)在贵州省及流域内的波动程度较大,除贵州省、沅江、北盘江、乌江流域外,其余 5 个流域均出现异常值。红水河流域的 CSDI 与贵州省均值相等,为 6 天,而南盘江、北盘江流域则高于省域均值。除赤水河流域外,在流域内及贵州省的 WSDI

(热持续指数)总体来说波动不大;除贵州省、都柳江、沅江流域外,其余流域均存在异常值。乌江、南盘江、沅江流域的 WSDI 均值与贵州省相同为 5 天,而赤水河流域高于省域均值。GSL(作物生长期)在 8 个流域的波动较大,流域之间存在明显差异,且除北盘江流域外,其余流域均存在偏低的异常值。沅江流域与省域均值相同,为 346 天,而南盘江、红水河、都柳江、北盘江流域的均值均高于省域均值;而牛栏江横江、乌江、赤水河流域的均值均低于省域均值。

由图 8 可知,CDD(持续干燥指数)在 8 个流域的波动均较大,除牛栏江横江、南盘江、沅江流域外,其余分区均存在异常值,且异常值均分布在高值部分,说明极端干燥的日数增加的概率较大;牛栏江横江流域的波动最大。乌江、南盘江、赤水河、沅江流域的 CDD 均值均低于省域均值(26 天);而牛栏江横江、红水河、都柳江、北盘江流域的 CDD 均值均高于省域均值。除贵州省、牛栏江横江、乌江、红水河、北盘江流域存在异常值,异常值偏高外,其余流域不存在异常值;牛栏江横江、南盘江流域较其他流域的波动性更大。以省域 CWD(持续湿润指数)均值(7 天)为参照标准,牛栏江横江、乌江、红水河、都柳江、赤水河与省域均值相同,而南盘江、沅江、北盘江流域的均值比省域均值高,其中南盘江流域为 9 天,说明南盘江流域的降水日数较多。

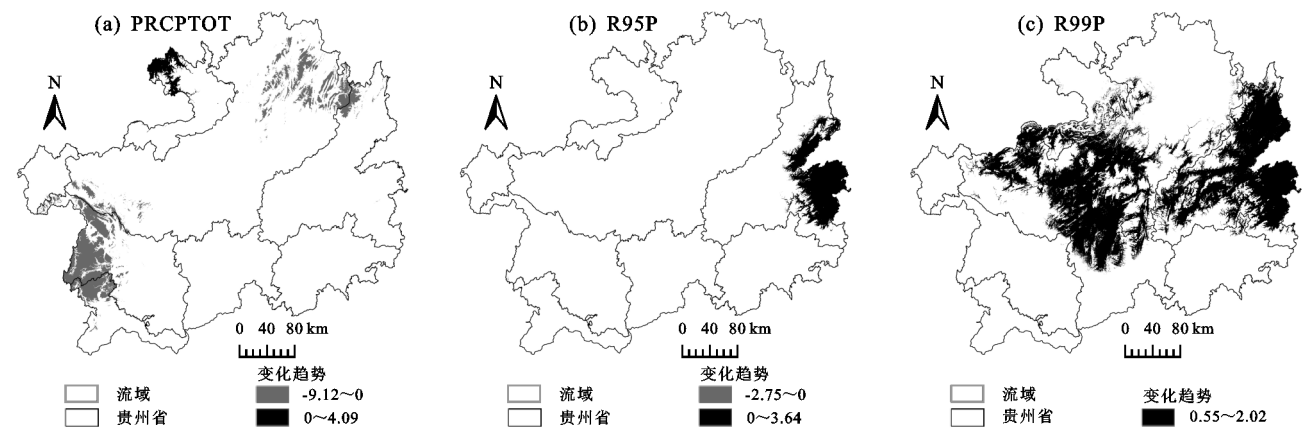


图 7 1961—2020 年贵州省降水量级指数变化趋势

表 8 1961—2020 年贵州省降水量级指数像元占比及变化趋势

项目	PRCPTOT	R95P	R99P
下降像元	6.20	0	0
上升像元	0.91	3.96	25.33
Sen's slope	-2.83(↓)	2.36(↑)	1.02(↑)

2.3.2 空间变化特征 由图 9、表 10、表 11 可知，CSDI(冷持续指数)、WSDI(热持续指数)像元均未通过 95%显著性检验，变化趋势为 0；而 GSL(作物生长期)的变化趋势范围为-0.12~0.45 d/a，显著下降趋势的像元占 0.11%，显著上升的像元占 7.58%，总体以 0.26 d/a 显著上升；流域中，都柳江、赤水河、沅江流域的像元未通过显著性检验，红水河流域以

-0.07 d/a 显著下降，牛栏江横江、乌江、南盘江、北盘江流域呈显著上升趋势，且牛栏江横江流域的上升趋势最快，为 0.34 d/a(表 11)。

表 9 1961—2020 年各流域降水量级指数变化趋势

指数	PRCPTOT	R95P	R99P
分区	Sen's slope	Sen's slope	Sen's slope
牛栏江横江	-3.30(↓)	—(—)	1.02(↑)
乌江	-3.45(↓)	—(—)	0.92(↑)
南盘江	-3.88(↓)	—(—)	—(—)
红水河	—(—)	—(—)	0.90(↑)
都柳江	—(—)	1.76(↑)	0.97(↑)
赤水河	2.94(↑)	1.07(↑)	0.77(↑)
沅江	-4.34(↓)	2.36(↑)	1.19(↑)
北盘江	-3.71(↓)	-2.40(↓)	0.86(↑)

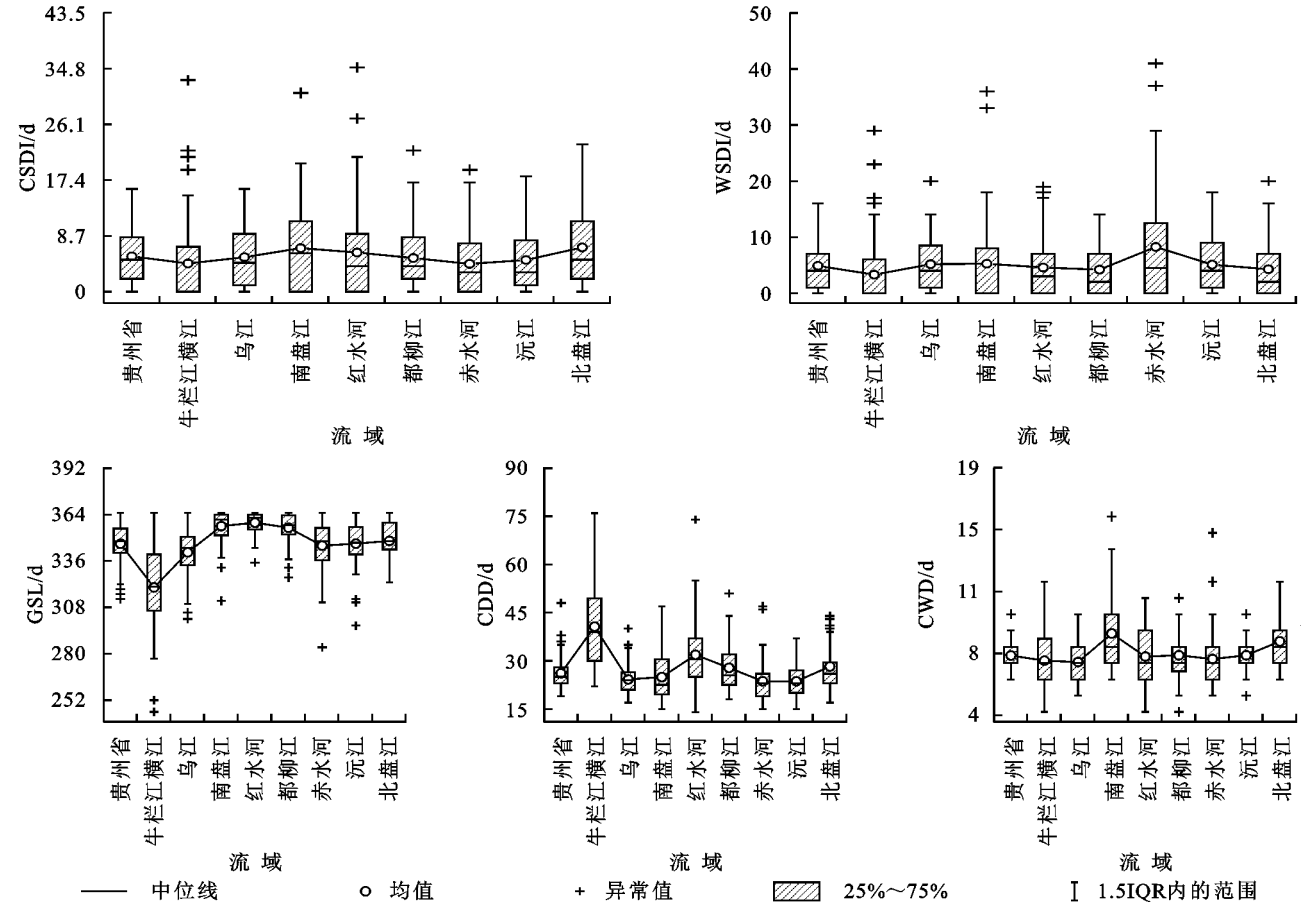
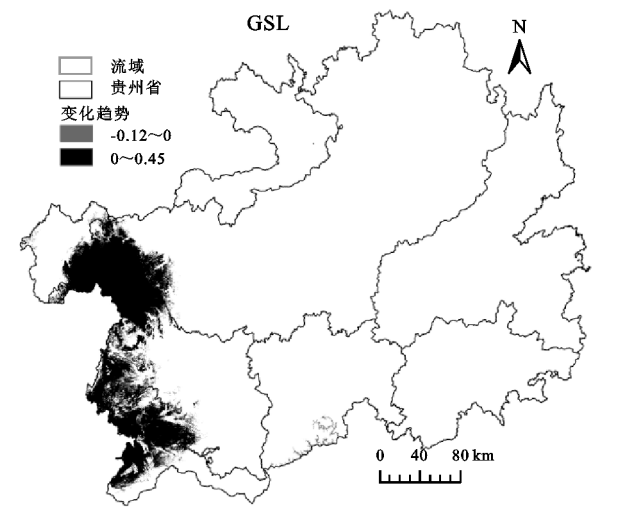


图 8 1961—2020 年贵州省持续指数(气温、降水)的箱型图



注：CSDI(冷持续指数)和 WSDI(热持续指数)像元均未通过 95% 显著性检验变化趋势为 0。

图 9 1961—2020 年贵州省气温持续指数的变化趋势

表 10 1961—2020 年贵州省持续指数像元占比及变化趋势			
单位：%			
项目	CSDI	WSDI	GSL
下降像元	—	—	0.11
上升像元	—	—	7.58
Sen's slope	—(—)	—(—)	0.26(↑)

表 11 1961—2020 年各流域持续指数变化趋势			
指数	CSDI	WSDI	GSL
分区	Sen's slope	Sen's slope	Sen's slope
牛栏江横江	—(—)	—(—)	0.34(↑)
乌江	—(—)	—(—)	0.31(↑)
南盘江	—(—)	—(—)	0.19(↑)
红水河	—(—)	—(—)	−0.07(↓)
都柳江	—(—)	—(—)	—(—)
赤水河	—(—)	—(—)	—(—)
沅江	—(—)	—(—)	—(—)
北盘江	—(—)	—(—)	0.25(↑)

由图 10、表 12、表 13 可知,CDD(持续干燥指数)的空间变化趋势未通过显著性检验,CWD(持续湿润指数)的变化趋势范围为−0.05~−0.01 d/a,呈显著下降趋势的像元占 29.89%,呈显著上升趋势的像元占 0,总体以−0.03 d/a 显著下降;除红水河、都柳江流域未通过显著性检验外,其余流域均呈显著下降趋势,且牛栏江横江、乌江、南盘江、赤水河、北盘江流域的下降速度均一致,为−0.03 d/a,沅江流域以−0.02 d/a 显著下降。

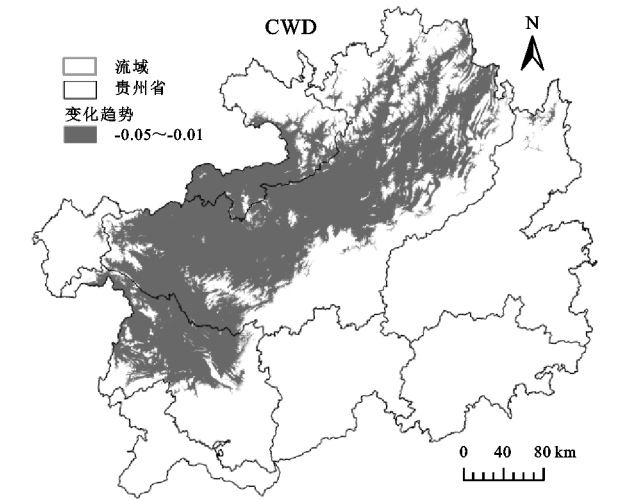
3 极端气候与植被 NDVI 的关系

基于相关分析法将 2000—2020 年的极端气温指数、极端降水指数分别与植被 NDVI 进行分析,并对结果在 95%的置信度上进行显著性检验,通过逐像元统计分析了解极端气候指数与 NDVI 的相关性,并对各流域的相

关性进行统计比较。正相关表示对植被生长起促进作用,负相关表示对植被生长起抑制作用。

3.1 NDVI 对极端气温的响应

对通过 95%显著性检验的极端气温指数按照极端高温、低温、持续指数以平均值法进行像元合成及统计,发现极端高温指数通过显著性检验的像元占总像元的 41.22%,其中呈正相关的像元占 39.05%,呈负相关的像元占 2.17%,说明极端高温指数总体上对植被 NDVI 的生长以促进作用为主;在极端低温指数中,通过显著性检验的像元占比 19.24%,正相关像元占比 2.91%,负相关的像元占比 16.35%,即极端低温指数对植被的生长作用以抑制作用为主;持续指数中,通过检验的像元占比 21.01%,正相关像元占 18.44%,负相关像元占 2.57%,即持续指数主要对植被 NDVI 的生长以促进作用为主。



注：CDD(持续干燥指数)像元未通过 95%显著性检验变化趋势为 0。

图 10 1961—2020 年贵州省降水持续指数的变化趋势

表 12 1961—2020 年贵州省降水持续指数像元占比及变化趋势		
单位：%		
项目	CDD	CWD
下降像元	—	29.89
上升像元	—	0
Sen's slope	—(—)	−0.03(↓)

结合图 11a~图 11c 的空间分布及对各指数的像元占比进行统计发现,极端高温指数正相关像元主要分布在省西部,对植被 NDVI 的促进、抑制作用以 TN90P 的像元占比为主;低温指数的促进、抑制作用以 TN10P 的像元占比为主;持续指数的正相关像元主要分布在省北部,促进作用以 WSDI 像元占比为主,抑制作用以 GSL 的像元占比为主。图 11d~图 11e 中对 8 个流域 9 个极端高温指数与植被 NDVI 的相关系数进行统计发现,除在牛栏江横江流域 SU25 与植被 NDVI 的相关系数为负外($r = -0.21^{**}$),其余高温指数与植

被 NDVI 均呈正相关;低温指数中,除牛栏江横江、红水河流域 TX10P 与植被 NDVI 呈正相关外($r=0.43^{**}$ 、 $r=0.12^{**}$),其余低温指数与植被 NDVI 均呈负相关;持续指数中,WSDI 与植被 NDVI 的系数均为正,CSDI 在乌江、红水河、沅江流域为负相关,其余流域为正相关;GSL 在乌江、都柳江、沅江流域为正相关,其余为负相关。

表 13 1961—2020 年贵州省 8 大流域降水持续指数变化趋势

指数	CDD	CWD
分区	Sen's slope	Sen's slope
贵州省	—(—)	−0.03(↓)
牛栏江横江	—(—)	−0.03(↓)
乌江	—(—)	−0.03(↓)
南盘江	—(—)	−0.03(↓)
红水河	—(—)	—(—)
都柳江	—(—)	—(—)
赤水河	—(—)	−0.03(↓)
沅江	—(—)	−0.02(↓)
北盘江	—(—)	−0.03(↓)

有研究^[23]表明,热量的增加对云贵高原和四川

接壤地区的灌木有积极作用。极端高温指数对植被生长以促进作用为主,且主要集中在省西部地区,其中以 TN90P 的促进作用最强。这主要是因为随着夜间气温升高,夜间积温充足,可以避免植被受极端低温危害,有利于植被生长^[24];此外,夜间植被进行暗反应将二氧化碳固定的过程中,需要有关酶的催化,而夜间高温会增强酶的活性,促进植被积累糖类,从而对植被生长起到积极作用。极端低温指数对植被生长以抑制作用为主,且 TN10P 的抑制作用最强,这主要是因为夜间气温过低,导致积温不足,甚至引发低温冻害,进而影响植被生长。山区温度的升高不仅可以使植被避免低温冻害,提高植被细胞内的酶活性,同时还可以诱使山区土壤有机质分解加快,使土壤活性提高,有利于植物根系的生长和发育^[25]。低温不仅限制植被参与光合作用的酶活性,降低叶片的光合速率,也会减少二氧化碳的吸收,降低光合作用的能量产生^[26],还对植被产生低温胁迫,使得植被生长发育受到严重影响,使植物植株矮小,叶片生长速率慢,光合速率低,这一规律经前人^[27-28]研究证实具有普适性。

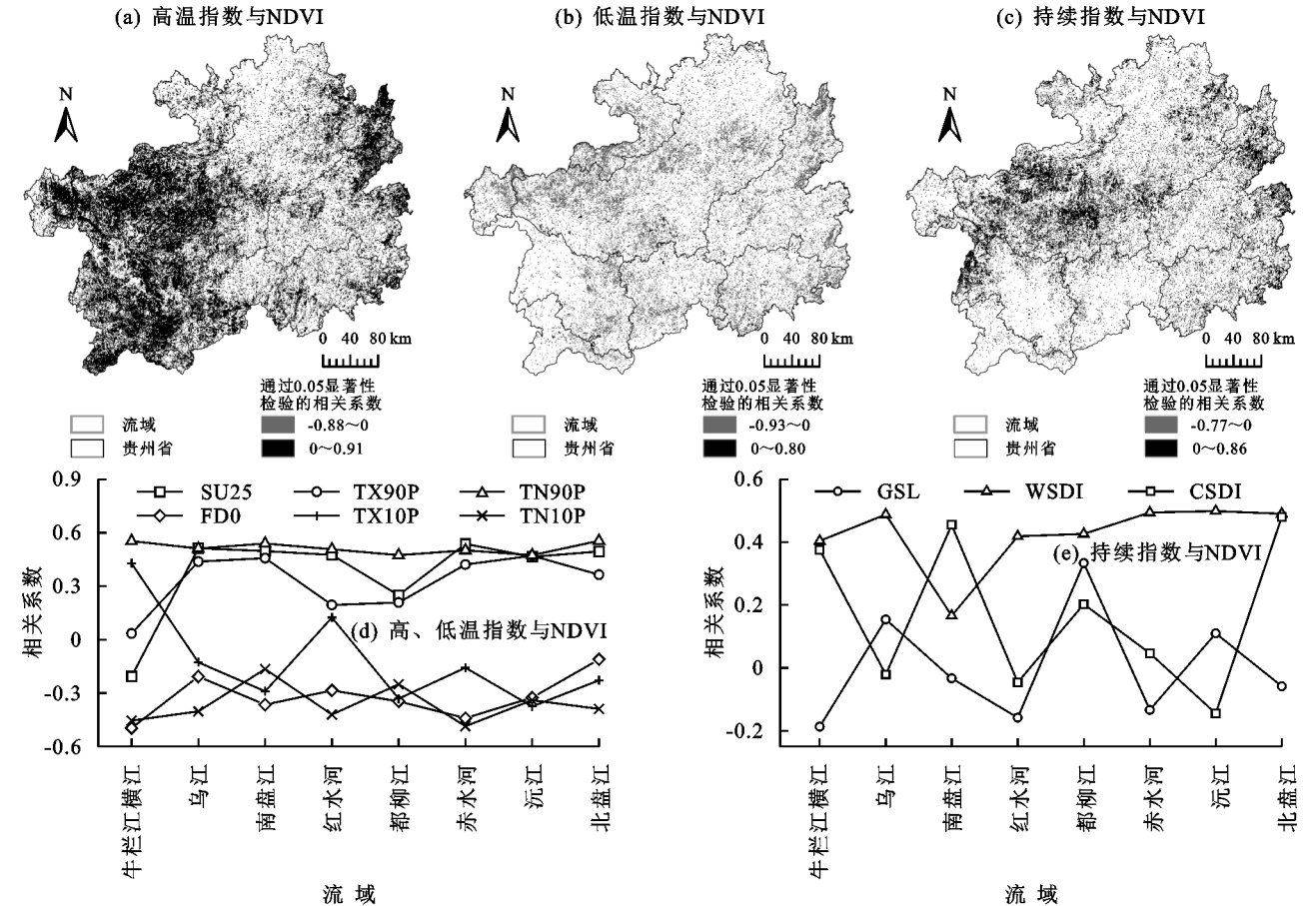


图 11 NDVI 与极端气温指数的相关性

3.2 NDVI 对极端降水的响应

对通过显著性检验的极端降水强度、量级、持续指数及各个极端降水指数进行像元占比统计发现,极

端降水强度指数通过 95%显著性检验的像元占总像元的 11.94%,其中与植被 NDVI 呈正相关的像元占 9.78%,呈负相关的占 2.16%;其中以 R25 mm(大雨

以上的日数)为主,说明降水越多,渗透作用越强,根部得到足够的水分补给,对植被的生长起着重要促进作用。降水量级指数中,通过显著性检验的像元占总像元的 18.22%,其中正相关像元为 16.42%,负相关像元为 1.80%,其中以 R99P(极强降水量)像元占比为主(图 12b),对植被生长起促进作用。持续指数中,通过显著性检验的像元占 11.87%,呈正相关的像元占 3.08%,呈负相关的像元占 8.79%,负相关像元以 CDD 占比为主,正相关像元 CWD 占比为主(图 12c)。总体而言,降水持续指数说明降水持续的时间越长,植被的根部呼吸作用受到抑制,从而影响植被生长。

图 12d 中对贵州省 8 个流域的极端降水指数与植被 NDVI 的相关系数进行统计发现,极端降水指数中,

RX1day 在沅江流域的系数为负($r=-0.15^{**}$),R25 mm 在北盘江流域为负($r=-0.16^{**}$),SDII 在南盘江、北盘江流域为负($r=-0.04^{**}$ 和 $r=-0.30^{**}$),R99P 在沅江流域为负($r=-0.08^{**}$),CWD 在赤水河、北盘江流域为负($r=-0.21^{**}$ 和 $r=-0.45^{**}$),CDD 指数在流域全为负值,在北盘江流域抑制作用最强($r=-0.51^{**}$),其余相关系数均为正。总体而言,除 CDD 与植被 NDVI 的相关系数均为负外,其余流域均以正相关系数为主,说明 CDD 对植被的生长起抑制作用,即持续干燥、无雨或少雨影响植被的生长。相关研究^[29]表明,干旱会引发水分胁迫,导致气孔关闭水分损失,所以干旱缺水会导致植被生态系统损失严重。

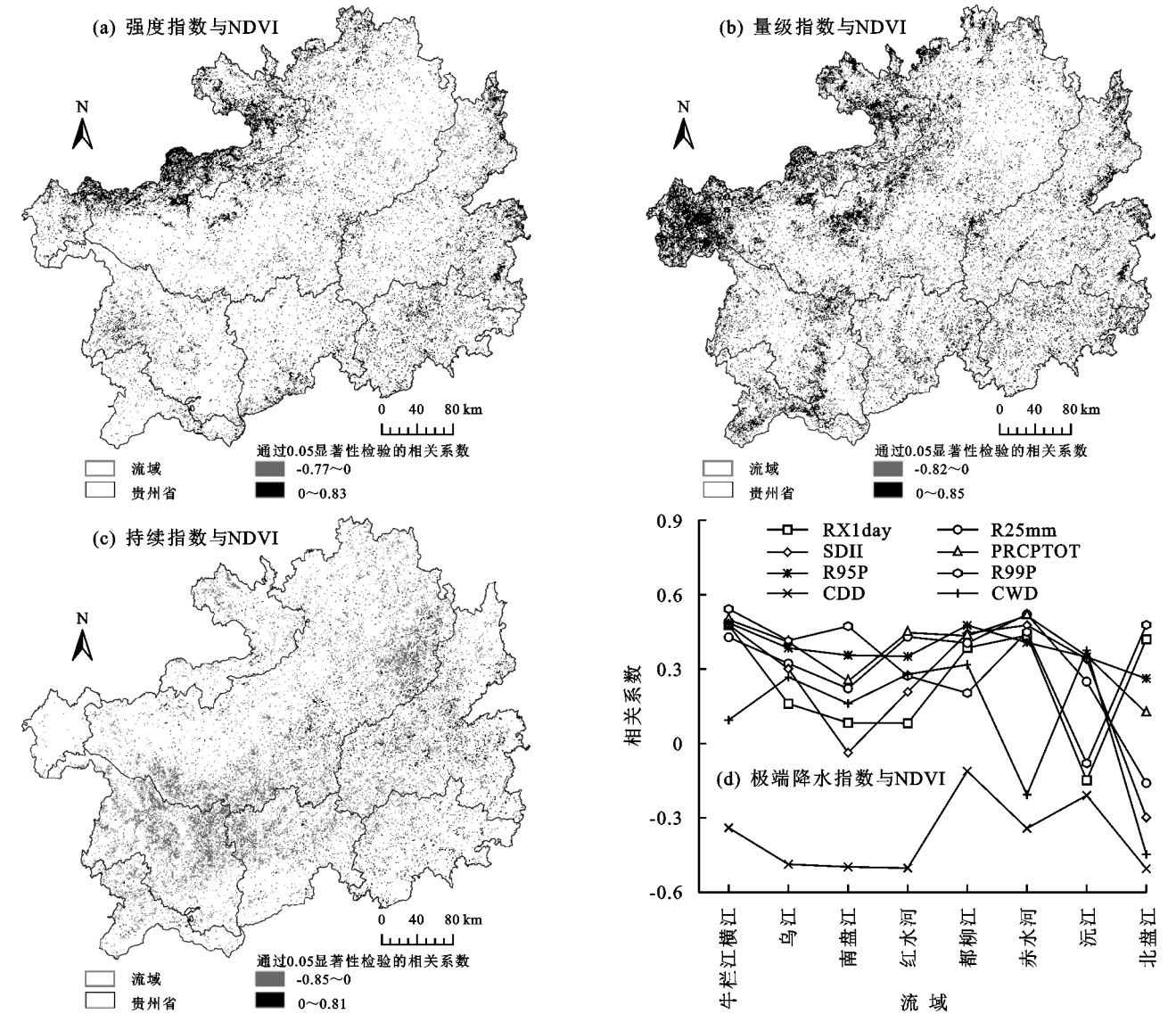


图 12 极端降水指数与 NDVI 的相关性

4 讨论

气候影响本地动植物的生长,水是构成植物体的主要物质,植物生长要进行光合作用,所以需要适宜的光照,而光合作用、呼吸作用都与温度有关。韩丹

丹^[30]研究发现,黄土高原的极端高温指数呈极显著增加趋势,极端低温呈下降趋势,与文中研究结果相同。冯磊^[31]研究发现,川渝地区整体变暖趋势明显,与本文贵州省气温趋暖发展相同,但川渝地区降水总

量呈微弱增加,而贵州省呈显著减少趋势。魏佳珩^[32]研究发现,青藏高原地区极端偏暖现象,与本文极端低温日数减少、高温日数增加、整体趋暖发展结果相似。王昊^[33]研究发现,云贵广 3 省交界处降水状况逐年变差,干旱趋于严重;陈子凡等^[34]研究发现,西南地区极端降水呈增加趋势;罗玉^[35]研究发现,西南地区强降水、降水强度呈上升趋势,但总降水量呈减少趋势,与文中 PRCPTOT 呈减少趋势,而 R95P、R99P 呈增加趋势结果相同;李茜荣^[29]研究发现,贵州极端气温呈变暖趋势,这与文中极端高温指数呈增加趋势,低温指数呈减少趋势,整体趋暖发展结果相同。

在极端气候时空变化及其与植被 NDVI 的关系的相关研究成果中,高滢等^[24]研究发现,陕西省 NDVI 与 TN90P 呈显著正相关,与本文 NDVI 与极端高温指数呈正相关且主要受到 TN90P 的促进作用为主结果相同;陈丽娟^[36]研究发现,相较于极端降水指数,福建省 NDVI 与极端气温类指数相关性更高;倪铭等^[23]研究发现,西南地区 NDVI 与极端高温指数显著正相关,与低温日数显著负相关,与 RX1day 显著正相关,与 R1 mm(降水日数)显著负相关;王昊^[25]发现,西南地区高温频次及气温强度类指数与 NDVI 呈正相关,低温频次类指数与 NDVI 呈负相关,降水指数中仅 CWD 与 NDVI 呈显著负相关;李茜荣等^[29]研究发现,云贵两省极端气温暖指数与 NDVI 呈正相关关系,与极端气温冷指数呈负相关关系。总体而言,在西南地区或者贵州省的关于极端气候指数与植被 NDVI 的关系相关研究内容中,极端高温指数对植被生长起促进作用,极端低温指数起抑制作用,极端降水指数对植被既有促进亦有抑制的结果相似,本文在此基础上,对各指数的像元占比进行统计分析 & 主要贡献要素进行析出。

文中虽然对贵州省极端气候指数进行时空变化分析,并分析了其与植被 NDVI 的关系,但所选取的指数不够全面,没有考虑到地面指数及地下指数,同时极端气候对植被生长影响的季节性、滞后性之间的关系缺乏讨论,有待进一步完善补充。

5 结论

(1)贵州省夜指数的变化幅度大于昼指数的变幅,极端高温指数呈上升趋势,极端低温指数在下降,气候整体呈变暖趋势。气温指数中 SU25 与 FD0 在流域之间的均值差异较大,其中牛栏江横江流域主要以低温为主,且霜日日数较多。除赤水河流域 SU25 以 -0.08 d/a 显著下降外,其余流域高温指数均呈显

著上升趋势。SU25、TN90P 在牛栏江横江流域上升最快, TX90P 在南盘江、都柳江流域上升最快。低温指数均呈显著减少趋势, FD0、TN10P 在牛栏江横江流域的下降趋势最快, TX10P 在南盘江流域下降趋势最快。

(2)量级指数的变化幅度大于强度指数的变幅,年总降水量在减少,但强降水和极强降水事件在增加。强度指数均呈增加趋势,波动幅度不大,异常值以偏大为主,高值为南盘江流域但均未通过显著性检验。量级指数在流域内波动幅度均较大,异常值较少,高值集中在南盘江流域。

(3)气温及降水持续指数中,低值集中在牛栏江横江流域,其余指数异常值以偏大为主。其中, CSDI、WSDI、CDD 的像元未通过显著性检验; GSL 以 0.26 d/a 显著上升,其中都柳江、赤水河、沅江流域的像元未通过显著性检验。CWD 以 -0.03 d/a 显著下降,除红水河、都柳江流域未通过显著性检验外,其余流域均以 -0.03 d/a 的速度显著下降。

(4)近 21 年,极端高温指数对植被生长以促进作用为主,且受 TN90P 的影响最大;极端低温指数对植被生长以抑制作用为主,且受 TN10P 的影响最大;气温持续指数以促进作用为主,且受 WSDI 的影响最大。极端降水指数中,降水强度、量级指数以促进作用为主,且受 R25 mm、R99P 的影响最大,降水持续指数以抑制作用为主,且受 CDD 的影响较大。

参考文献:

- [1] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5 (6): 560-564.
- [2] 杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [3] Stocker T, Plattner G K, Dahe Q. IPCC climate change 2013: The physical science basis-findings and lessons learned [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014: e17003.
- [4] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响: 解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告 第三章[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 654-657.
- [5] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展 [J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 667-671.
- [6] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] Li L C, Zou Y, Li Y, et al. Trends, change points and spatial variability in extreme precipitation events from 1961 to 2017 in China [J]. *Hydrology Research*, 2020, 51

- (3):484-504.
- [8] 黄维,杨春友,张和喜,等.贵州省极端气候时空演变分析[J].人民长江,2017,48(增刊 1):109-114,159.
- [9] 朱大运,熊康宁,肖华.贵州省极端气温时空变化特征分析[J].资源科学,2018,40(8):1672-1683.
- [10] 邹德全,邹承立,田洪进,等.遵义市极端降水指数时空变化特征[J].现代农业科技,2020(24):159-164,166.
- [11] 张丹丹,雷霆,王棚,等.德江县极端降水事件特征及天气模型[J].中低纬山地气象,2020,44(3):39-44.
- [12] 冉仙果,胡萍,付瑞滢,等.贵州沿河县两次极端强降水的对比分析[J].中低纬山地气象,2020,44(2):31-39.
- [13] 张锦,毛春旭,赵虎,等.水城县降水气候特征及极端干旱年形势场分析[J].现代农业科技,2017(9):230-232.
- [14] 谢仁波,史向阳,白琴琴,等.铜仁西部极端降水基本特征分析[J].贵州气象,2015,39(5):28-30.
- [15] 魏星宇,杨永琼,王敬富,等.贵州草海流域下不同土地类型重金属污染空间分布特征及评价[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2021,39(4):39-45.
- [16] 刘纯军,周国富,黄启芬,等.基于地形梯度的贵州乌江流域土地利用时空演变分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(6):45-54.
- [17] 罗志远,吴名剑,尹智力,等.贵州省河流水系概况及基本特征分析[J].吉林水利,2017(12):29-32.
- [18] 张克新,王娟娟,彭娇婷,等.贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(2):10-18.
- [19] 金凯.中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [20] 万露宇,张正栋,李英杰,等.韩江流域近 50 年极端气候事件的时空变化特征[J].中国农业大学学报,2017,22(9):133-144.
- [21] 张继.中国西南喀斯特地区遥感蒸散发变化研究[D].贵阳:贵州师范大学,2020.
- [22] 王彦颖.中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究[D].长春:东北师范大学,2016.
- [23] 倪铭,张曦月,姜超,等.中国西南部地区植被对极端气候事件的响应[J].植物生态学报,2021,45(6):626-640.
- [24] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(3):1022-1033.
- [25] Alba G G, Eugenio D P, Agustín R, et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils [J].Geoderma,2015,237/238:1-8.
- [26] 吴路华,王世杰,白晓永,等.近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响[J].生态学报,2022,42(3):960-981.
- [27] Li C, Wang J, Hu R, et al. Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013 [J].Ecological Indicators,2018,89:101-109.
- [28] Tan Z Q, Tao H, Jiang J H, et al. Influences of climate extremes on NDVI (normalized difference vegetation index) in the Poyang Lake Basin, China [J].Wetlands,2015,35(6):1033-1042.
- [29] 李茜荣.2000—2019 年云贵两省极端气温对植被 NDVI 变化的影响研究[D].兰州:西北师范大学,2021.
- [30] 韩丹丹.黄土高原植被变化及其对极端气候的响应[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [31] 冯磊.川渝地区极端气候变化特征及其对 NDVI 的影响研究[D].兰州:西北师范大学,2020.
- [32] 魏佳珩.青藏高原植被的时空变化及其对极端气候事件的响应[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [33] 王昊.西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [34] 陈子凡,王磊,李谢辉,等.西南地区极端降水时空变化特征及其与强 ENSO 事件的关系[J].高原气象,2022,41(3):604-616.
- [35] 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.
- [36] 陈丽娟.近半个世纪以来福建省极端气候事件及其植被 NDVI 响应[D].福州:福建师范大学,2017.