

滇东南岩溶区极端气候变化特征及其与大气环流的关系

刘俊枫, 吴利华, 吴坤德, 袁立, 高浩男, 刘伟

(西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: [目的] 旨在探究滇东南岩溶区极端气候的变化特征及成因。[方法] 基于滇东南岩溶区内的 16 个气象站点 1969—2018 年的日最高气温、最低气温和降水量, 选取 12 个极端气候指数, 采用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验、Morlet 复小波分析、反距离权重插值、Pearson 相关分析、相干小波和交叉小波变换的方法分析该区极端气候指数的时空变化特征及其与大气环流因子之间的关系。[结果] 1) 1969—2018 年滇东南岩溶区年平均气温呈上升趋势, 年总降水量呈下降趋势, 极端气温暖指数呈上升趋势, 冷指数呈下降趋势, 大部分极端降水指数呈下降趋势, 降水强度(SDII)呈缓慢上升趋势。极端气温和降水指数大部分突变点集中在 20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 极端气温指数存在 1~5 个周期, 介于 5~25 a; 极端降水指数存在 3~5 个周期, 介于 4~31 a。2) 极端气温暖指数在研究区西南部上升更为明显, 极端气温冷指数中冷夜日数(TN10p)、冷昼日数(TX10p)在西南部下降更为明显, 霜冻日数(FD0)在北部下降更为明显, 极端降水指数在研究区西南部下降更为明显。3) 大气环流因子与滇东南岩溶区极端气候指数存在多个显著振荡周期, 大西洋多年代际振荡(AMO)对滇东南岩溶区极端气候指数影响最大, AMO 与滇东南岩溶区极端气温暖指数呈同相位的变化, 冷指数呈负相位的变化, 大部分降水指数呈负相位的变化关系, AMO 对研究区东北部和西南部极端降水影响显著。[结论] 滇东南岩溶区呈暖干化趋势, 区域极端气候的变化受大气环流的调控, 不同环流因子对滇东南岩溶区极端气候的影响存在差异性。

关键词: 滇东南岩溶区; 极端气候; 变化特征; 大气环流; 影响因素

中图分类号: P461

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0080-15

Characteristics of Extreme Climate Change in Karst Region of Southeastern Yunnan and Their Relationship with Atmospheric Circulation

Liu Junfeng, Wu Lihua, Wu Kunde, Yuan Li, Gao Haonan, Liu Wei

(College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the characteristics and causes of extreme climate change in the karst region of southeastern Yunnan. [Methods] Based on daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation data from 16 meteorological stations in the karst region of southeastern Yunnan during 1969—2018, twelve extreme climate indices were selected. Linear tendency estimation, Mann-Kendall mutation test, Morlet complex wavelet analysis, inverse distance weighting interpolation, Pearson correlation analysis, and cross-wavelet and coherence wavelet transform analysis were employed to analyze the spatiotemporal variation characteristics of extreme climate indices and their relationships with atmospheric circulation factors. [Results] 1) From 1969 to 2018, the annual mean temperature showed an increasing trend, while the annual total precipitation exhibited a decreasing trend. The extreme warm temperature indices presented an upward trend, and the extreme cold temperature indices displayed a downward trend in the karst region of southeast Yunnan, respectively. Most extreme precipitation indices showed decreasing trends, while the

收稿日期: 2026-04-23

修回日期: 2026-05-14

录用日期: 2026-05-22

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(42061012); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放课题项目(SBK20240019); 西南林业大学科研基金项目(110822129)

第一作者: 刘俊枫(2003—), 男, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: 15971935687@163.com

通信作者: 吴利华(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒区水文与气候变化研究。E-mail: wulhmail@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

precipitation intensity (SDII) exhibited a slight increasing trend. Most of the abrupt change points for extreme temperature and precipitation indices were concentrated between the 1980s and the early 2000s. The extreme temperature indices exhibited 1—5 cycles with periods of 5—25 years, whereas the extreme precipitation indices showed 3—5 cycles with periods of 4—31 years. 2) The extreme warm temperature indices increased more evidently in the southwestern part of the study area. Among the extreme cold temperature indices, the cold night days (TN10p) and cold days (TX10p) decreased more markedly in the southwest, while frost days (FD0) showed a more pronounced decreasing trend in the northern part. Similarly, the extreme precipitation indices also exhibited a prominent decreasing trend in the southwestern study area. 3) Multiple significant oscillation periods existed between atmospheric circulation factors and extreme climate indices in the karst region of southeastern Yunnan. The Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) had the greatest influence on the extreme climate indices in this region. The AMO exhibits an in phase relationship with the extreme warm temperature indices, a negative relationship with the extreme cold temperature indices, and a negative relationship with most precipitation indices, respectively. Furthermore, the AMO significantly influenced extreme precipitation in the northeastern and southwestern parts of the study area. [Conclusion] The karst region of southeastern Yunnan exhibits a warming and drying trend. The changes in regional extreme climate are regulated by atmospheric circulation, and the impacts of different circulation factors on the extreme climate in this region are heterogeneous.

Keywords: karst region of southeastern Yunnan; extreme climate; variation characteristics; atmospheric circulation; influencing factors

Received: 2026-04-23

Revised: 2026-05-14

Accepted: 2026-05-22

Online(www.cnki.net): 2026-09-05

极端气候是指气候现象中出现的极端情况^[1],通常包括极端气温、极端降水、极端干旱等^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称IPCC)第六次评估报告^[3]明确指出,2011—2020年全球平均气温比工业化前(1850—1900年)上升约1.1℃,而未来几十年气温可能加速升高^[4]。全球变暖导致极端气候频发,对人类社会的经济发展产生巨大影响,也对陆地生态系统的能量物质循环构成严重威胁,引起国内外学者的广泛关注^[5]。Alexander等^[6]对近半个世纪以来全球极端气温事件进行深入研究发现,全球陆地整体呈现明显的变暖趋势。我国极端气温各地区变化比较一致,异常偏冷事件减少减弱,极端高温事件呈显著上升趋势^[7]。我国极端强降水发生的频次和强度呈增加趋势,极端强降水事件趋于增多^[8],受不同地区大气、水文、地貌等因素的影响,极端气候事件具有显著的区域差异性^[9]。为有效推动世界各国开展极端天气气候事件变化检测研究,世界气象组织(world meteorological organization, WMO)成立气候变化监测和指标专家组(expert team on climate change detection and indices, ETCCDI),并定义27个典型的气候指数^[10]。

滇东南岩溶区是云南省岩溶地貌最发育的区域之一,基岩广泛裸露及其强烈的发育强度是导致该地区生态系统稳定性差、承载力低的根本原因。加

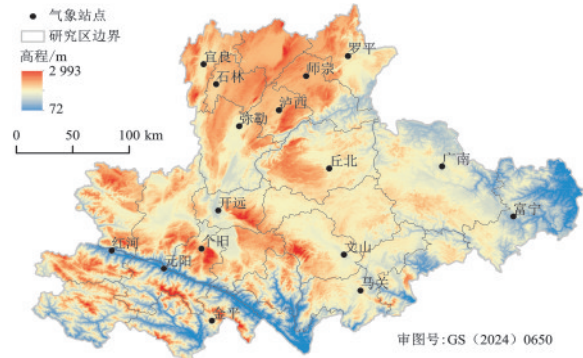
之长期水资源不合理利用,共同引发严重的石漠化、水土流失和生境破碎化等生态问题,致使生态环境十分脆弱^[11]。而极端气候加重该地区水资源短缺,制约该区域自然生态平衡、环境保护和经济发展。以往对云南省极端气候的研究多集中在分析云南省各市极端气候指数的时空变化规律^[12],或研究云南省河流流域、山脉极端气候指数的变化特征^[13],或研究云南岩溶区部分极端降水指数的时空变化^[14],针对滇东南岩溶区极端气候指数变化特征及其与大气环流间关系的研究鲜见。因此,本文以滇东南岩溶区为研究区,探究极端气候指数长时间尺度变化规律及其与大气环流的关系,以期为该地区水资源合理利用和经济社会可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇东南岩溶区(22°30′~25°30′N, 103°00′~106°30′E)位于云南省东南部(图1),自西向东包括红河州全境、文山州全境、昆明市的石林彝族自治县和宜良县、曲靖市的师宗县、罗平县和陆良县,总面积为 $7.32 \times 10^4 \text{ km}^2$,占云南省总面积的18.6%。该区域属亚热带高原季风气候,年平均降水量为700~1 500 mm,该区横贯北回归线,太阳辐射的热量极其丰富,蒸发作用强烈,多年平均气温为15.0~20.0℃^[15]。境内地势复杂,海拔为72~2 993 m,岩溶区覆盖面积广,土壤

以红壤、石灰岩土和黄棕壤土为主,土壤肥力较低,岩石裸露率高,土层瘠薄且连续性差,生态承载力相对脆弱^[16]。在人类活动的影响下,表层土壤被大量冲刷,石漠化范围扩大,土地生产能力持续下降。该地区面临着土地退化、水土流失和水资源短缺等问题。



注:文中地图均是基于标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)下载的底图为GS(2024)0650号的中国地图制作,底图边界无修改。

图 1 滇东南岩溶区及其气象站点概况
Fig. 1 Overview map of karst region in southeastern Yunnan and its meteorological stations

1.2 数据来源

本文所使用的气象数据来源于国家气象科学中心(<https://data.cma.cn/>)提供的《中国地面国际交换

站气候资料日值数据集(V3.0)》和基于统一的数据环境 CIMISS 平台,涵盖 16 个气象站 1969—2018 年的逐日最高气温、逐日最低气温和日降水量数据(20:00 至翌日 20:00),在计算极端气候指数之前,所有的气象数据均利用 R 软件中的 RClimate1.1 程序进行异常值和错误值的筛选。大气环流数据来源于美国国家大气与海洋局物理科学实验室(National Oceanic and Atmospheric Administration Physical Sciences Laboratory, PS�)发布的大气环流指数数据(https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/)。研究选取太平洋-北美遥相关型指数(Pacific-North American Pattern, PNA)、大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)、北极涛动(Arctic Oscillation, AO)、印度洋偶极子模态指数(Indian Ocean Dipole Mode Index, DMI)、北大西洋涛动指数(North Atlantic Oscillation, NAO)、西太平洋遥相关型指数(Western Pacific Pattern, WP)、“Niño 3.4 区”海面温度(Niño 3.4 Sea Surface Temperature, Niño 3.4)、“Niño 4 区”海面温度(Niño 4 Sea Surface Temperature, Niño 4)8 个大气环流因子(表 1)。文中所使用的 30 m 分辨率的 DEM 来源于 NASA-SRTM3 数据集(<https://www.earthdata.nasa.gov>)。

表 1 大气环流指数定义
Table 1 Definition of atmospheric circulation indices

大气环流因子	含义	大气环流因子	含义
PNA	北半球中高纬 500 hPa 位势高度场的四极子遥相关模态	NAO	亚速尔高压与冰岛低压的标准化海平面气压差
AMO	北大西洋海表温度在 65~70 a 的准周期性冷暖异常变化	WP	北半球西太平洋中高纬与低纬副热带之间大气环流的南北反向变率特征
AO	北极地区与北半球中纬度地区气压差别变化	Niño 3.4	赤道中东太平洋区域平均海温距平
DMI	热带西印度洋与热带东南印度洋海温距平之差	Niño 4	赤道中太平洋区域平均海温距平

1.3 研究方法

参考以往研究,本文从 ETCCDI 定义的 27 个极端气候指数中选取 7 个极端气温指数和 5 个极端降水指数对滇东南岩溶区极端气候指数进行研究(表 2),并根据以往研究^[17]将极端气温指数划分为极端气温暖指数和极端气温冷指数。采用线性倾向估计法^[18]分析研究区内极端气候指数的时间变化特征,通过 ArcGIS 反距离权重插值法^[19]描述研究区极端气候指数的空间变化特征;运用 Mann-Kendall 突变检验^[20](简称 M-K 突变检验)分析研究区内极端气候指数的突变特征;运用 Morlet 复小波的方法^[21]分析研究区极端气候指数的周期特征,并结合小波方差图判断极端气候指数的周期;采用皮尔逊(Pearson)相关分析法^[22]研究极端气候指数和大气环流的关系;采用交叉

小波和相干小波功率谱^[23]确定极端气候指数和大气环流因子的时频相关特征和周期共振关系。

2 结果与分析

2.1 滇东南岩溶区极端气候指数时间变化特征

2.1.1 年平均气温和年降水量的时空变化特征 极端气候本质上是气温和降水长期变化规律及变异累计的结果,采用线性倾向估计法和反距离权重插值法(inverse distance weighting, IDW)分析滇东南岩溶区年平均气温和年降水量的时空变化特征。从图 2 可以看出,滇东南岩溶区年平均气温呈显著上升趋势,线性倾向率为 3.713 °C/(10 a)(图 2a),年降水量呈显著下降趋势,线性倾向率为 -29.408 mm/(10 a)(图 2b),年平均气温的变化趋势通过 0.001 水平的显著性检验,年降水量的变化趋势通过 0.05 水平的显著性检验。

表 2 极端气候指数定义
Table 2 Definition of extreme climate indices

分类	代码	指数名称	指数定义	单位
极端气温暖指数	TN90p	暖夜日数	日最低气温>90%分位值的日数	d
	TX90p	暖昼日数	日最高气温>90%分位值的日数	d
	SU25	夏季日数	1 a 中日最高气温>25℃的日数	d
极端气温冷指数	TN10p	冷夜日数	日最低气温<10%分位值的日数	d
	TX10p	冷昼日数	日最高气温<10%分位值的日数	d
	FD0	霜冻日数	1 a 中最低气温<0℃的日数	d
其他指数	DTR	月平均日较差	日最高气温与日最低气温之差的月平均值	℃
	CWD	持续湿期	日降水量≥1 mm 的最大持续日数	d
	R10	中雨日数	日降水量≥10 mm 的日数	d
	RX1day	1 d 最大降水量	月最大 1 d 降水量	mm
	PRCPTOT	年总降水量	日降水量≥1 mm 的年累计降水量	mm
	SDII	降水强度	年降水总量与湿日日数(日降水量≥1 mm)的比值	mm/d

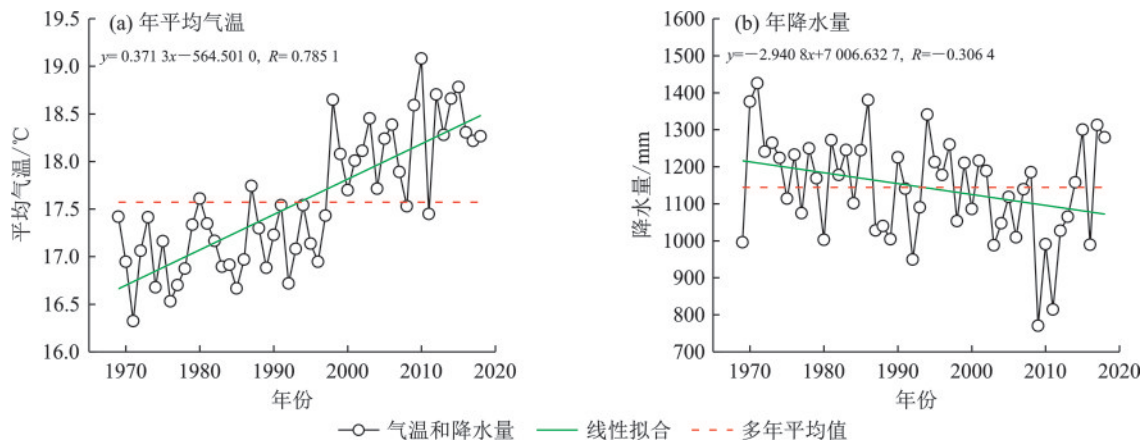


图 2 滇东南岩溶区年平均气温和年降水量的时间变化
Fig. 2 Annual mean temperature and annual precipitation over time in karst region of southeastern Yunnan

从站点层面来看,滇东南岩溶区年平均气温的线性倾向率在0.17~2.34℃/10 a(图 3a),线性倾向率最大值出现在元阳站,为2.34℃/10 a;线性倾向率最小值出现在金平站,为0.17℃/10 a。

年降水量的线性倾向率为-162.44~-1.79 mm/10 a(图 3b),线性倾向率最大值出现在红河站,为-1.79 mm/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站,为-162.44 mm/10 a。

综合年平均气温和年降水量的时空变化趋势来看,滇东南岩溶区呈暖干化趋势。

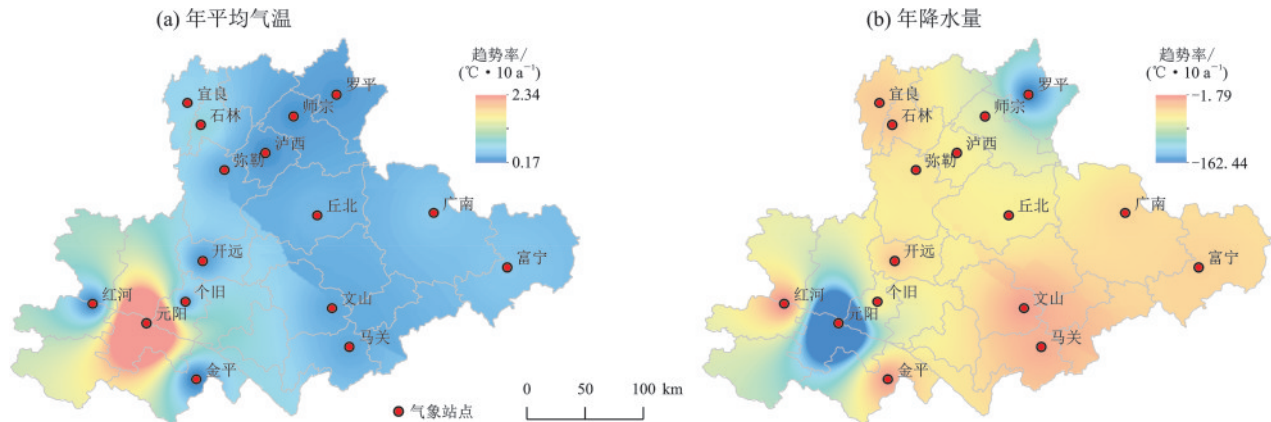


图 3 滇东南岩溶区年平均气温和年降水量的空间变化
Fig. 3 Spatial variations in annual mean temperature and annual precipitation in karst region of southeastern Yunnan
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

2.1.2 趋势性特征分析 为探究滇东南岩溶区极端气候指数的时间变化趋势,采用线性倾向估计法分析该区 1969—2018 年 12 个极端气候指数的时间变化趋势。从图 4 可以看出,1969—2018 年滇东南岩溶区极端气温暖指数均呈显著上升趋势(图 4a~图 4c), TN90p、TX90p、SU25 的线性倾向率分别为 3.645、2.199、7.934 d/10 a。

滇东南岩溶区极端气温冷指数均呈显著下降趋势(图 4d~图 4f), TN10p、TX10p、FD0 的线性倾向率分别为 -2.600、-0.840、-1.525 d/10 a。DTR 的线性倾向率为 -0.117 °C/10 a(图 4g),说明滇东南岩溶区

气温日较差在减小。极端气温指数 TN90p、TX90p、SU25、TN10p、TX10p、FD0、DTR 的变化趋势均通过 0.001 水平的显著性检验。滇东南岩溶区极端降水指数 CWD、R10、PRCPTOT 呈显著下降趋势(图 4h、图 4i、图 4k), 线性倾向率分别为 -0.440 d/10 a、-0.926 d/10 a、-27.999 mm/10 a, R10、PRCPTOT 的变化趋势通过 0.05 水平的显著性检验, CWD 的变化趋势通过 0.01 水平的显著性检验。RX1day 呈不显著下降趋势, 线性倾向率为 -0.574 mm/10 a(图 4j)。SDII 呈不显著上升趋势, 线性倾向率为 0.099 mm/(d·10 a)(图 4l)。

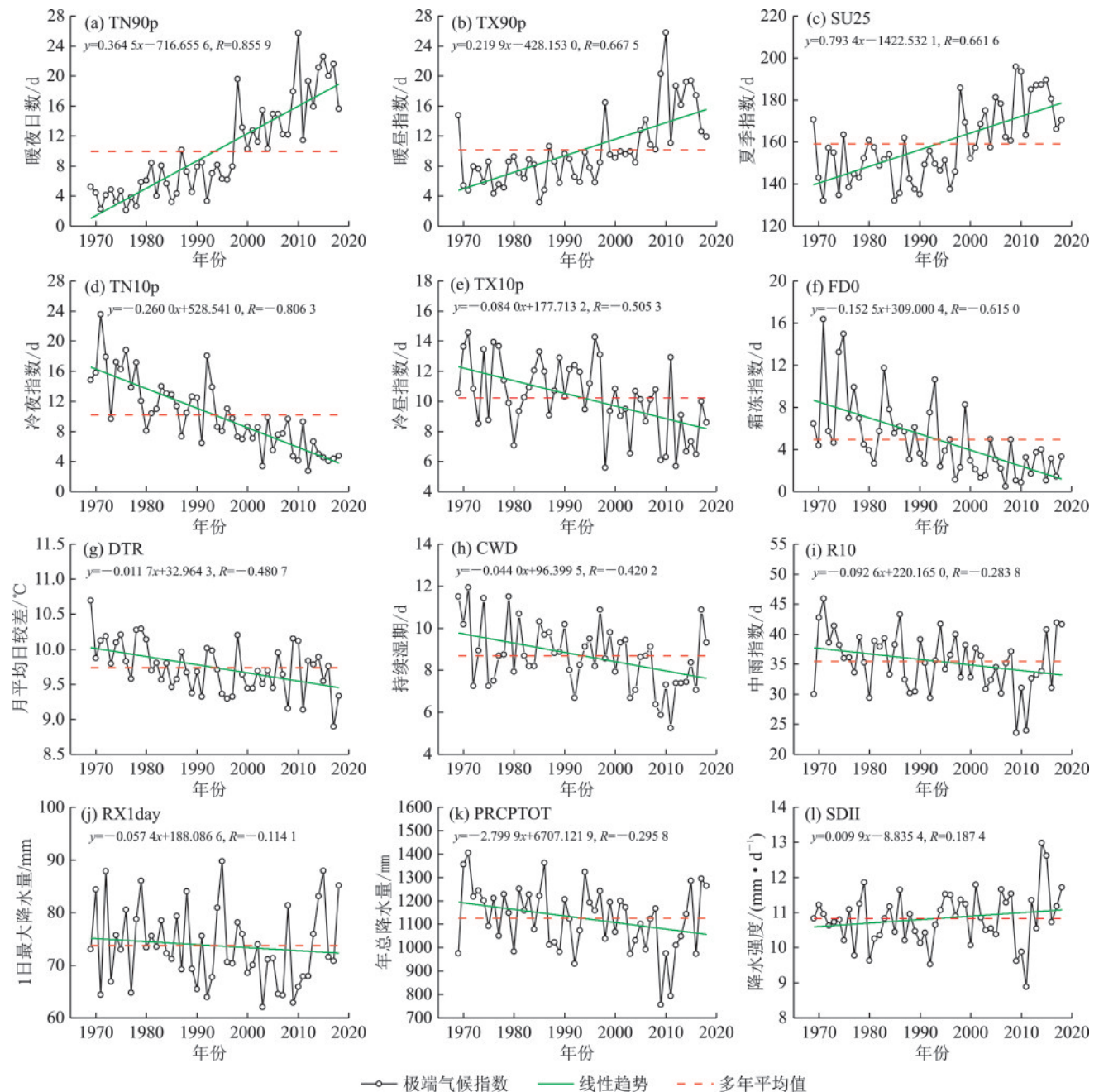


图 4 滇东南岩溶区极端气候指数的年际变化

Fig. 4 Interannual variations in extreme climate indices in karst region of southeastern Yunnan

2.1.3 突变分析 为研究滇东南岩溶区极端气候指数的突变特征,采用M-K突变检验法对滇东南岩溶区同一极端气候指数的算术平均值进行分析,M-K突变检验结果见图5。UF和UB的交点为突变点,极端气温和降水指数大部分突变点集中在1980—2000年。TN10p、TX10p、FD0的UF曲线在突变点之后呈下降趋势,而TN90p、TX90p、SU25的UF曲

线在突变点之后呈上升趋势,DTR的UF曲线在突变点之后呈下降趋势;CWD、R10、RX1day、PRCPTOT的UF曲线在突变点之后呈下降趋势,而SDII在突变点之后呈上升趋势。表明滇东南岩溶区极端气温暖事件的发生频率呈上升趋势,极端气温冷事件的发生频率呈下降趋势,极端降水事件的发生频率呈下降趋势。

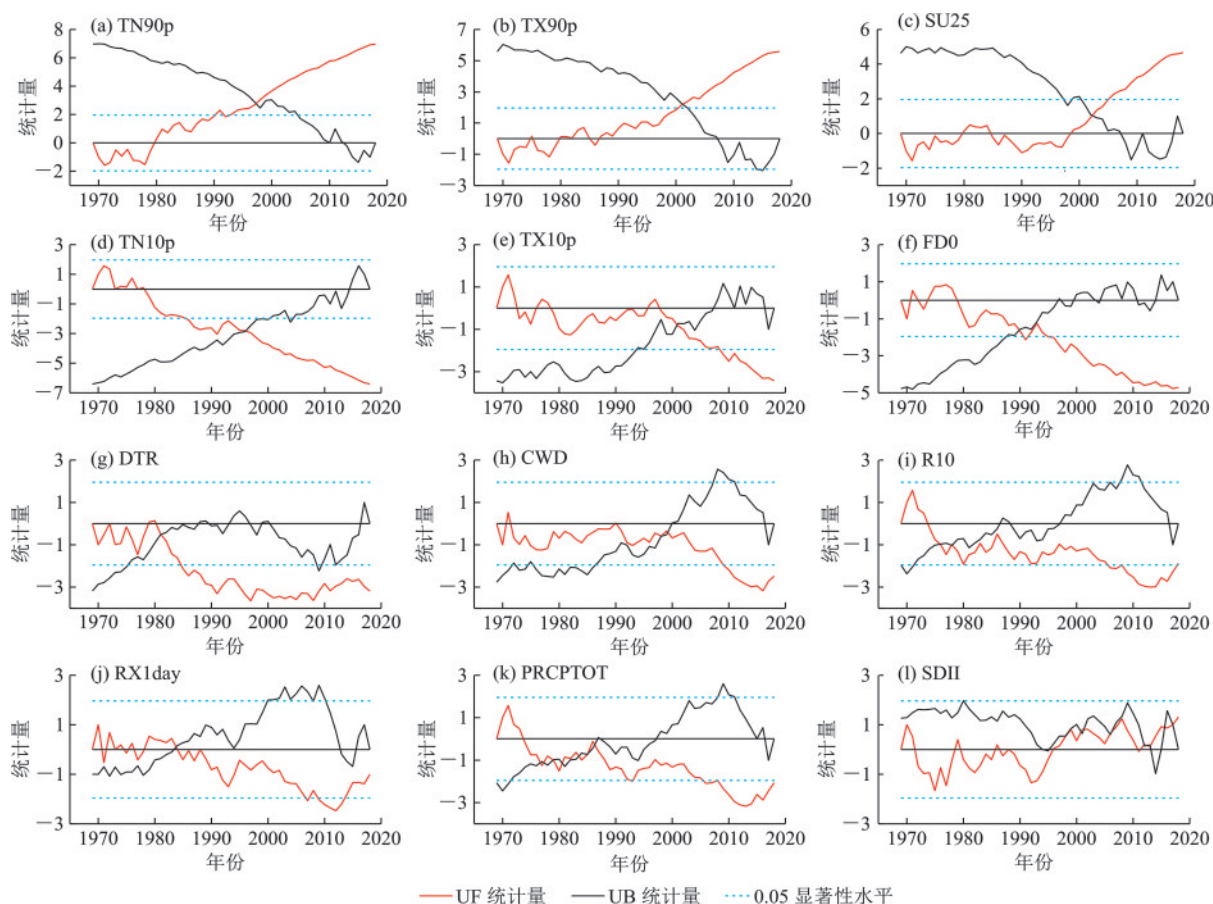


图5 滇东南岩溶区极端气候指数的M-K突变检验

Fig. 5 M-K mutation test of extreme climate indices in karst region of southeastern Yunnan

2.1.4 周期分析 采用Morlet复小波方法对滇东南岩溶区1969—2018年的12个极端气候指数进行分析并绘图,结果见图6和图7。小波系数实部等值线图等值线的正负表示极端气候指数值的大小,等值线为正值时表示极端气候指数值较大,等值线为负值时说明极端气候指数值较小,小波方差图的峰值所处位置表示极端气候指数的主要振荡周期。滇东南岩溶区各极端气候指数均具有显著的周期性振荡特征,极端气温指数存在1~5个周期,介于5~25 a。从小波系数实部等值线图(图6a~图6c)可以看出,TN90p、TX90p、SU25在5~10、15~20、25~31 a存在多次周期变化。综合小波方差图的峰值(图7a~图7c)得出,TN90p的周期为5、8、15、22 a, TX90p的周期为5、8、22 a, SU25的周期为5、8、25 a, TN10p、

TX10p、FD0在5~10、15~25 a存在多次周期变化(图6d~图6f),综合小波方差图的峰值(图7d~图7f)得出,TN10p的周期为6、9、13、25 a, TX10p的周期为6、9、13、18、25 a, FD0的周期为6、13、16 a, DTR在20~30 a存在多次周期变化(图6g),综合小波方差图的峰值(图7g)得出,DTR的周期为25 a。

极端降水指数存在3~5个周期,介于4~31 a,从小波系数实部等值线图可以看出,CWD、R10、RX1day、PRCPTOT、SDII在3~6、13~20、25~31 a存在多次周期变化(图6h~图6l)。综合小波方差图的峰值可以得出,CWD的周期为3、6、9、15、31 a, R10的周期为6、18、31 a, RX1day的周期为5、13、25 a, PRCPTOT的周期为3、6、9、18、31 a, SDII的周期为6、13、18 a(图7h~图7l)。

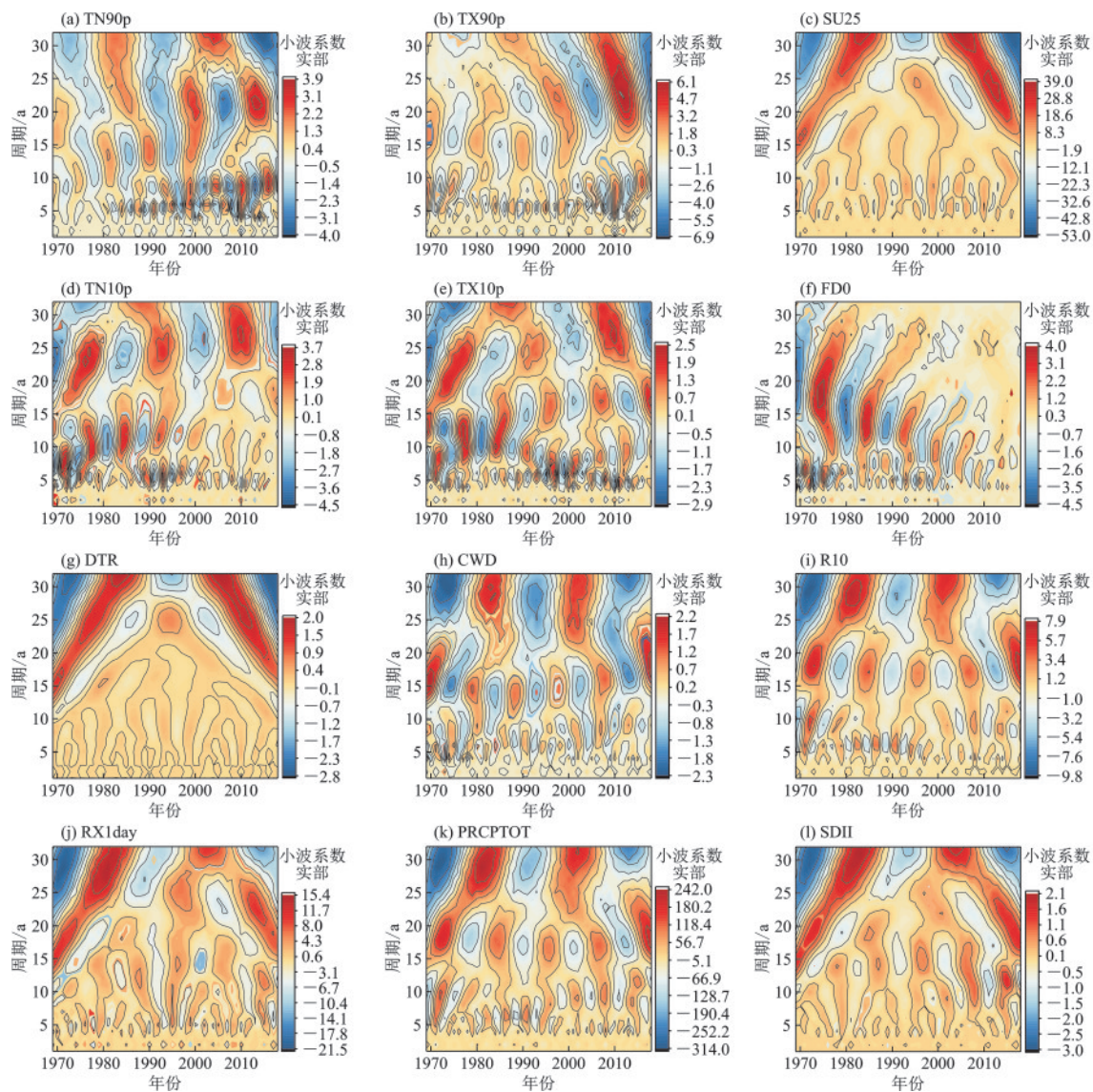


图 6 滇东南岩溶区极端气候指数的小波系数实部等值线

Fig. 6 Contours of real part of wavelet coefficients of extreme climate indices in karst region of southeastern Yunnan

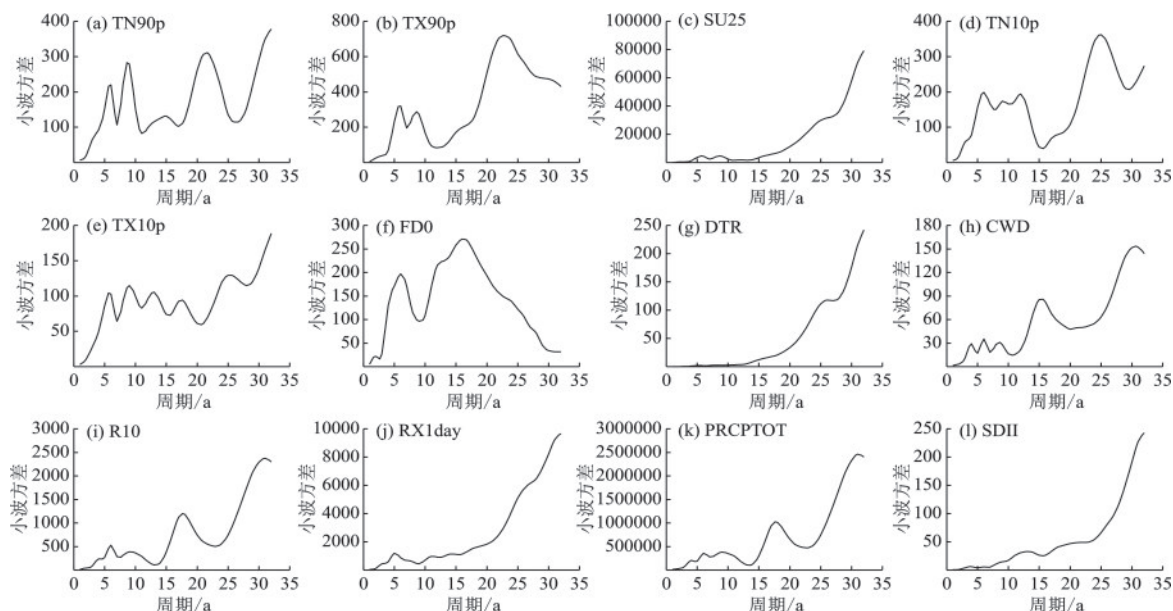


图 7 滇东南岩溶区极端气候指数的小波方差

Fig. 7 Wavelet variance of extreme climate indices in karst region of southeastern Yunnan

2.2 滇东南岩溶区极端气候指数空间变化特征

为了解1969—2018年滇东南岩溶区极端气候指数的空间变化特征,采用IDW反距离权重插值法分析研究区内16个气象站点的12个极端气候指数的空间变化趋势。由图8和图9可知,1969—2018年滇东南岩溶区极端气候指数空间变化差异性显著。从站点层面来看,TN90p的线性倾向率为2.14~6.69 d/10 a,线性倾向率最大值为6.69 d/10 a,出现在元阳站,线性倾向率最小值为2.14 d/10 a,出现在泸西站,TN90p整体呈上升趋势,西南部、中部上升趋势较大(图8a)。

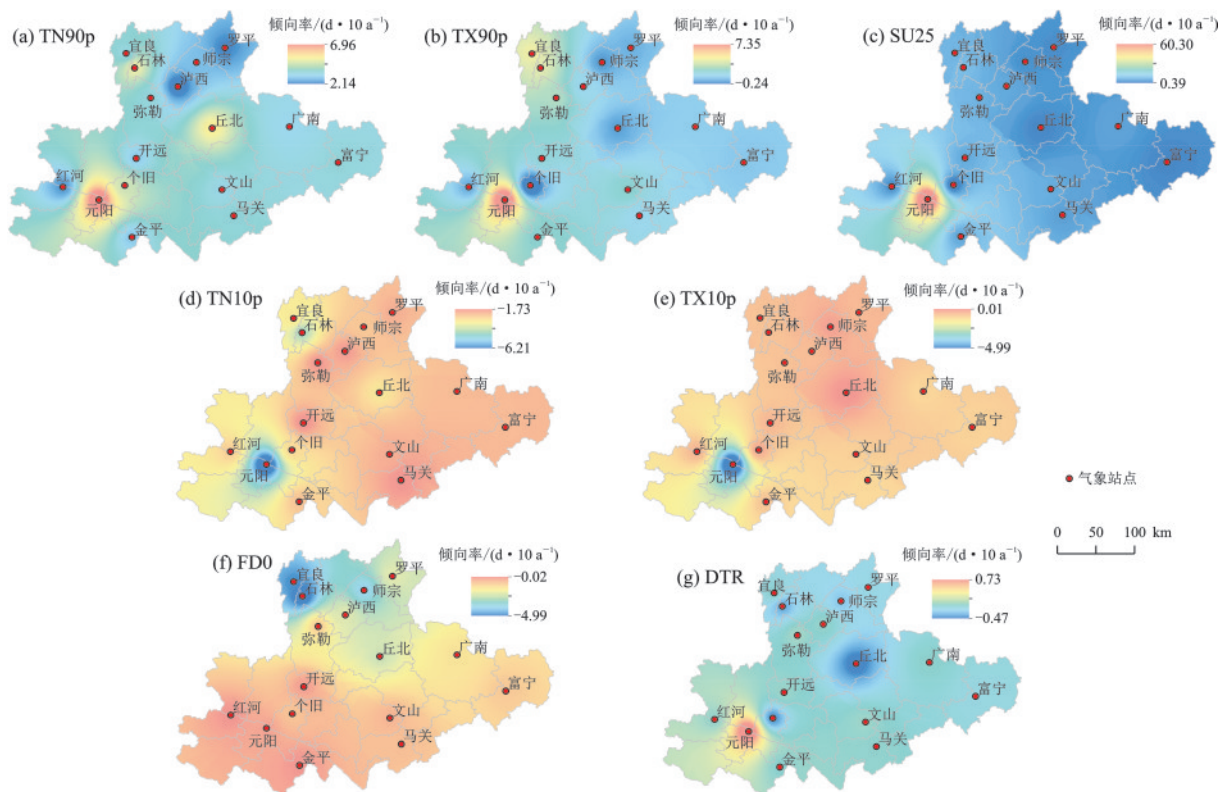


图8 滇东南岩溶区极端气温指数的空间变化

Fig. 8 Spatial variations in extreme climate indices in karst region of southeastern Yunnan

TN10p的线性倾向率为-6.21~1.73 d/10 a,线性倾向率最大值出现在开远站,为1.73 d/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站,为-6.21 d/10 a,TN10p整体呈下降趋势,西南部下降趋势最大(图8d);TX10p的线性倾向率为-4.99~0.01 d/10 a,线性倾向率最大值出现在丘北站,为0.01 d/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站,为-4.99 d/10 a(图8e);FD0线性倾向率为-4.99~0.02 d/10 a(图8f),线性倾向率最大值出现在红河站,为0.02 d/10 a,线性倾向率最小值出现在石林站,为-4.99 d/10 a。TN10p和TX10p整体呈现从西南向东北递增趋势(图8d、图8e),FD0呈从北向南递增趋势(图8f)。DTR线性倾向率在-0.47~0.73 °C/10 a,最大线性倾向率出现在元阳站为0.73 °C/10 a,最小线性倾向

率出现在丘北站为-0.47 °C/10 a,DTR在研究区西南部呈现出上升趋势(图8g)。

TX90p的线性倾向率为-0.24~7.35 d/10 a,线性倾向率最大值出现在元阳站,为7.35 d/10 a;线性倾向率最小值出现在个旧站,为-0.24 d/10 a,TX90p整体呈上升趋势,北部、西南部上升趋势较大(图8b);SU25的线性倾向率为0.39~60.30 d/10 a,线性倾向率最大值出现在元阳站,为60.30 d/10 a;线性倾向率最小值出现在个旧站,为0.39 d/10 a,SU25整体呈上升趋势,西南部上升趋势最大(图8c);1969—2018年滇东南岩溶区极端气温指数线性倾向率总体上从东北向西南呈递增趋势(图8a~图8c)。

率出现在元阳站为0.73 °C/10 a,最小线性倾向

极端降水指数也存在一定的空间分异特征,CWD的线性倾向率在-1.6~0.2 d/10 a,线性倾向率最大值出现在师宗站为0.2 d/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站为-1.6 d/10 a,CWD南部和西南部呈现出减少趋势,北部呈现出增加趋势(图9a);R10的线性倾向率在-4.97~0.003 d/10 a,线性倾向率最大值出现在金平站为0.003 d/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站为-4.97 d/10 a,R10整体呈现出下降趋势,西南部下降趋势最为显著(图9b);RX1day的线性倾向率为-7.46~6.97 mm/10 a,线性倾向率最大值出现在富宁站,为6.97 mm/10 a,线性倾向率最小值出现在元阳站,为-7.46 mm/10 a,RX1day东部

呈上升趋势,北部和西南部呈减少趋势(图 9c);PRCPTOT 的线性倾向率为 $-156.8\sim 1.61\text{ mm}/10\text{ a}$,线性倾向率最大值出现在红河站,为 $1.61\text{ mm}/10\text{ a}$,线性倾向率最小值出现在元阳站,为 $-156.8\text{ mm}/10\text{ a}$,PRCPTOT 整体呈减少趋势,西南部减少趋势最大(图 9d);SDII 的线性倾向率为 $-0.19\sim 0.29\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{ a})$,线性倾向率最大值出现在开远站,为 $0.29\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{ a})$,线性倾向率最小值出现在罗平站,为 $-0.19\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{ a})$,北部和西南部呈减少趋势,东南部呈增加趋势(图 9e)。

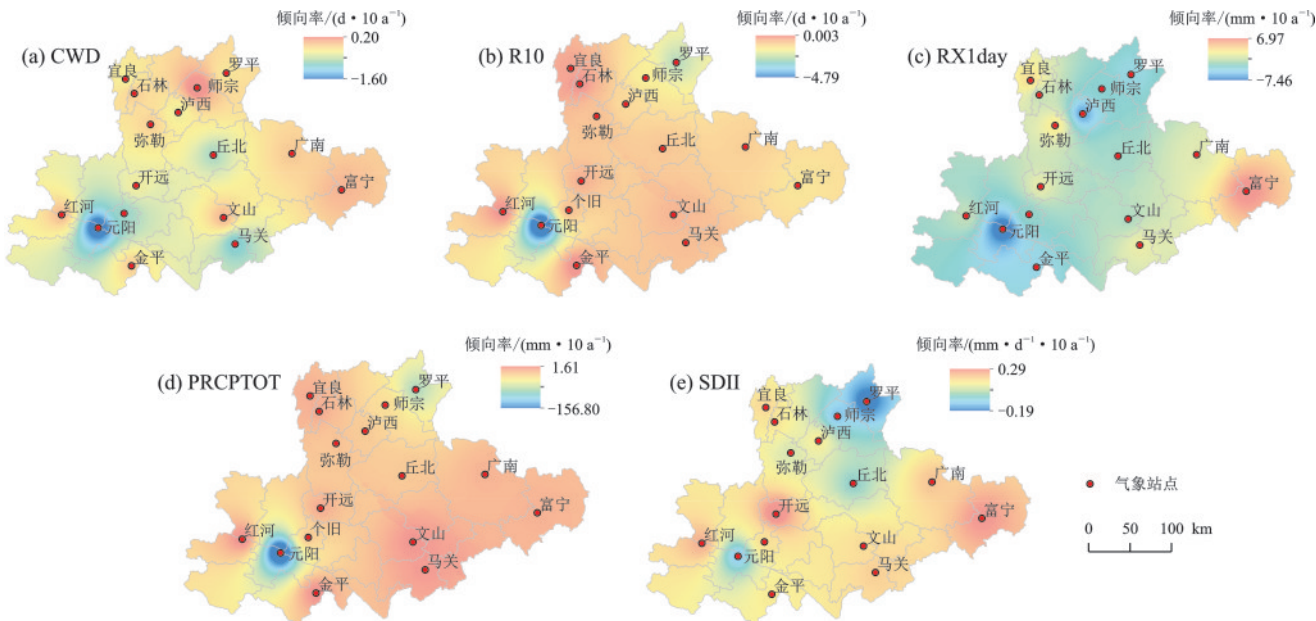
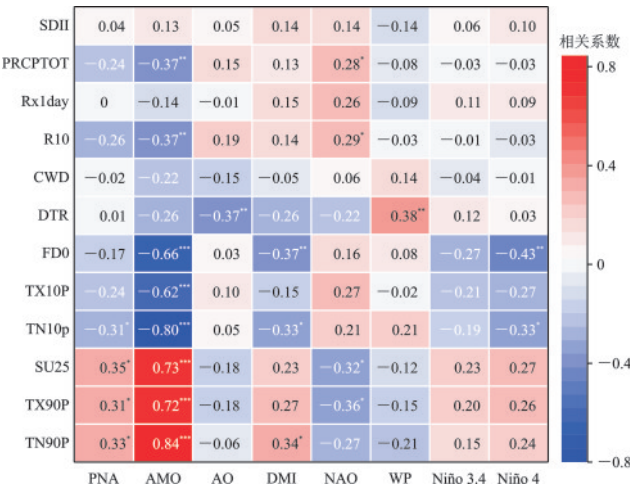


图 9 滇东南岩溶区极端降水指数的空间变化

Fig. 9 Spatial variations in extreme precipitation indices in karst region of southeastern Yunnan

2.3 滇东南岩溶区极端气候指数和大气环流的关系

极端气候事件的频率与强度在很大程度上受大气环流因子的影响,根据滇东南岩溶区所处的地理位置,选取 8 个大气环流因子(PNA、AMO、AO、DMI、NAO、WP、Niño 3.4、Niño 4)基于皮尔逊相关性分析其与极端气候指数之间的相关性(图 10)。



注:***表示通过 0.001 水平的显著性检验;**表示通过 0.01 水平的显著性检验;*表示通过 0.05 水平的显著性检验。

图 10 滇东南岩溶区极端气候指数与大气环流因子的 Pearson 相关系数

Fig. 10 Pearson correlation coefficients of extreme climate indices with atmospheric circulation factors in karst region of southeastern Yunnan

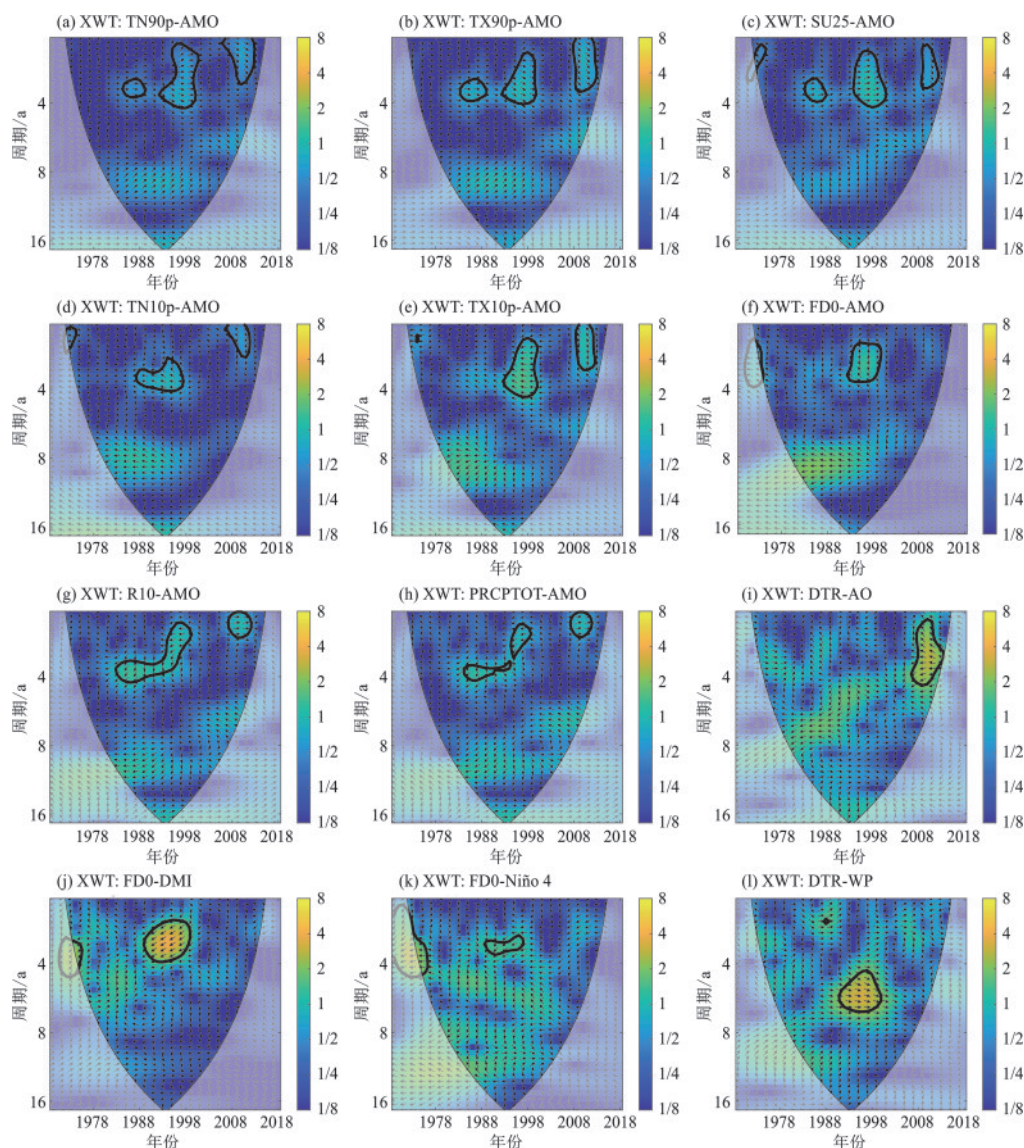
由图 10 可知,PNA 与 TN90p、TX90p、SU25 均呈显著正相关,相关系数分别为 0.33、0.31、0.35(通过 0.05 水平的显著性检验);PNA 与 TN10p 呈显著负相关,相关系数为 -0.31 (通过 0.05 水平的显著性检验)。AMO 与 TN90p、TX90p、SU25 呈显著正相关,相关系数分别为 0.84、0.72、0.73(通过 0.001 水平的显著性检验);AMO 与 TN10p、TX10p、FD0 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.80 、 -0.62 、 -0.66 (通过 0.001 水平的显著性检验);AMO 与 R10、PRCPTOT 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.37 、 -0.37 (通过 0.05 水平的显著性检验)。

AO 与极端气温暖指数呈负相关,与绝大部分极端气温冷指数呈正相关,AO 与 DTR 呈显著正相关,相关系数为 0.37(通过 0.05 水平的显著性检验)。DMI 与 TN90p 呈显著正相关,相关系数为 0.34(通过 0.05 水平的显著性检验);DMI 与 TN10p、FD0 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.33 、 -0.37 (分别通过 0.05、0.01 水平的显著性检验)。NAO 与 TX90p、SU25 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.36 、 -0.32 (通过 0.05 水平的显著性检验),NAO 与 R10、PRCPTOT 呈显著正相关,相关系数分别为 0.29、0.28(通过 0.05 水平的显著性检验)。WP 与极端气温暖指数和大部分极端降水指数呈负相关,与大部

分极端气温冷指数基本呈正相关,WP与DTR呈显著正相关,相关系数为0.38(通过0.05水平的显著性检验)。Niño 3.4与极端气温暖指数呈正相关,与极端气温冷指数呈负相关。Niño 4与极端气温暖指数呈正相关,与极端气温冷指数呈负相关,其中Niño 4与FD0和TN10p呈显著负相关,相关系数分别为-0.43(通过0.01水平的显著性检验)、-0.33(通过0.05水平的显著性检验)。分析表明,大气环流对滇东南岩溶区极端气候有一定的影响。基于皮尔逊相关分析的结果,选取与极端气候指数相关系数通过0.01和0.001水平的显著性检验的大气环流因子AMO、AO、DMI、WP、Niño 4,采用交叉小波变换和相干小波变换分析这些大气环流因子与极端气候

指数(即AMO与TN90p、TX90p、SU25、TN10p、TX10p、FD0、R10、PRCPTOT,AO与DTR,DMI与FD0、WP与DTR,Niño 4与FD0)的时频相关特征和周期共振关系。

交叉小波变换与相干小波变换能够揭示极端气候指数与大气环流因子在时频域中的相互关系。从图11可以看出,TN90p与AMO的交叉小波变换功率谱高能量区集中在1986—1990年、1993—2002年、2007—2014年,分别存在3~3.5、0.5~4.5、0~3 a的共振周期,相位箭头的方向显示,3个周期TN90p与AMO均呈现同相位的变化,TN90p在第1、3个周期领先于AMO,在第2个周期0~2 a滞后于AMO,2~4 a领先于AMO(图11a)。



注:箭头方向表示第1序列和第2序列的相位关系;向右的箭头表示2个序列呈同相位变化;向左的箭头表示2个序列呈负相位变化;箭头向上表示第1个序列(极端气候指数)滞后于第2个序列(大气环流指数)90°;箭头向下表示第1个序列(极端气候指数)领先于第2个序列(大气环流指数)90°。

图11 滇东南岩溶区极端气候指数和大气环流因子的交叉小波功率谱

Fig. 11 Cross-wavelet power spectra between extreme climate indices and atmospheric circulation factors in karst region of southeastern Yunnan

相干小波功率谱表示, TN90p 与 AMO 存在 3 个显著正相关的共振周期(图 12a)。TX90p 与 AMO 的交叉小波功率谱高能量区集中在 1984—1990 年、1993—2001 年和 2009—2014 年, 分别存在 3~4、1~4、0~3.5 a 的共振周期, 相位箭头的方向显示, 3 个周期 TX90p 与 AMO 均呈同相位的变化, TX90p 在第 2、3 个周期领先于 AMO(图 11b)。相干小波功率谱

表示, TX90p 与 AMO 存在 3 个显著正相关的共振周期(图 12b)。SU25 与 AMO 的交叉小波功率谱高能量区集中在 1984—1988 年、1995—2002 年和 2010—2013 年, 分别存在 2.5~4、1~4.5、0.5~3 a 的共振周期, 相位箭头的方向表示, 3 个周期 SU25 与 AMO 均呈同相位的变化, SU25 在第 1、2 个周期滞后于 AMO, 在第 3 个周期领先于 AMO(图 11c)。

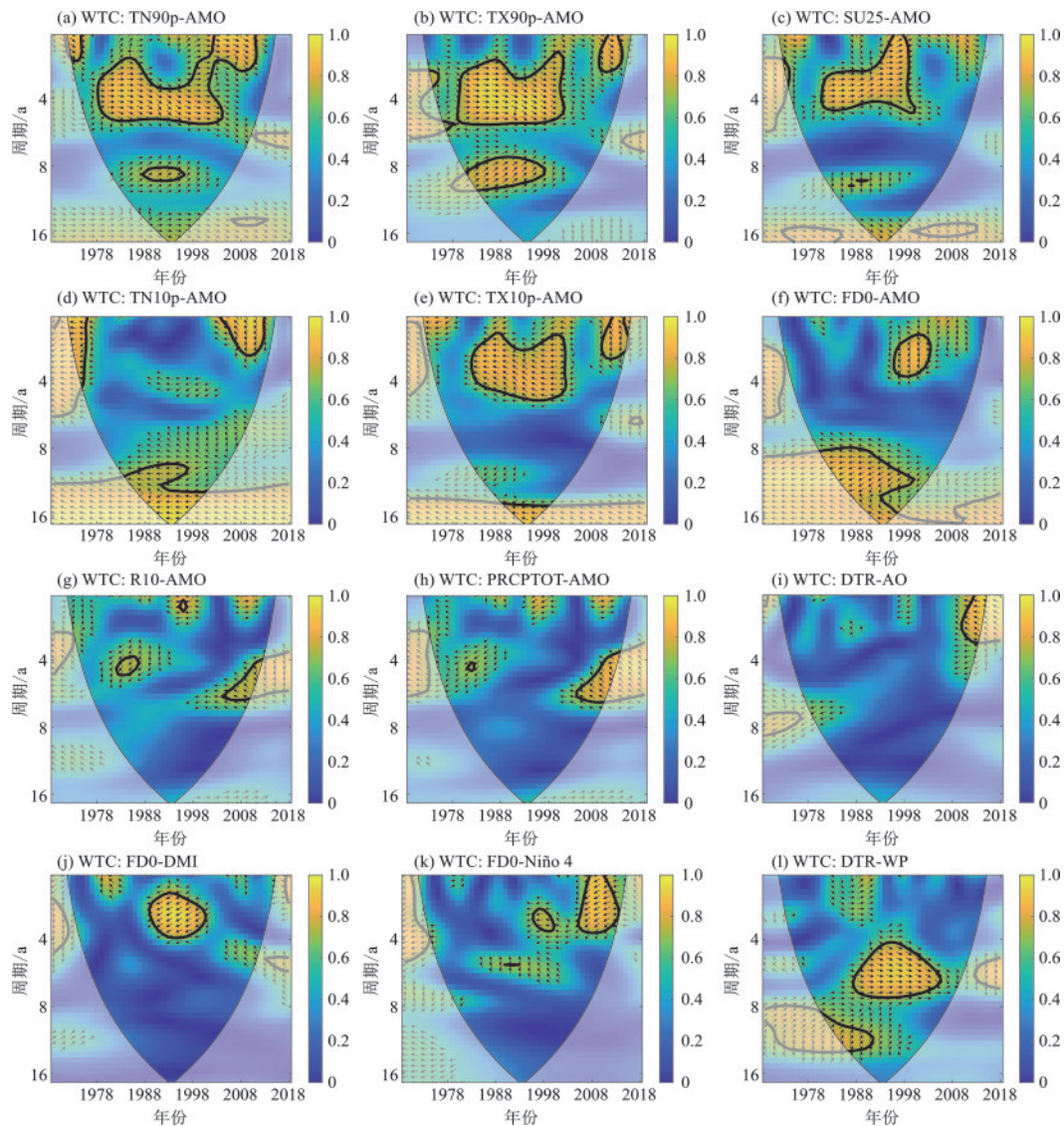


图 12 滇东南岩溶区极端气候指数和大气环流因子的相干小波功率谱

Fig. 12 Coherent wavelet power spectra of extreme climate indices and atmospheric circulation factors in karst region of southeastern Yunnan

相干小波功率谱表示, SU25 与 AMO 存在 1 个显著正相关的共振周期(图 12c)。TN10p 与 AMO 的交叉小波功率谱高能区集中在 1988—1998 年和 2007—2013 年, 分别存在 2~4、0~2 a 的共振周期, 相位箭头的方向表示, 在 2 个周期 TN10p 均滞后于 AMO, 且与 AMO 呈负相位变化(图 11d)。相干小波功率谱表示, TN10p 与 AMO 存在 3 个显著负相关的共振周期(图 12d)。TX10p 与 AMO 的交叉小波功率谱高能量区集中在 1994—2001 年和 2009—2013 年, 分别存在

1~4.5、0~3 a 的共振周期。相位箭头的方向表示, 在 2 个周期 TX10p 均滞后于 AMO 且与 AMO 呈负相位变化(图 11e)。

相干小波功率谱表示, TX10p 与 AMO 存在 3 个显著负相关的共振周期(图 12e)。FD0 与 AMO 的交叉小波功率谱高能量区集中在 1993—2001 年, 存在 1.5~3.5 a 的共振周期, 相位箭头的方向表示 FD0 在该周期内与 AMO 呈负相位的变化, 且滞后于 AMO(图 11f)。

相干小波功率谱表示,FD0与AMO存在2个显著负相关的共振周期(图12f)。R10与AMO的交叉小波功率谱高能量区集中在1983—2000年和2007—2013年,分别存在1~4.5、0~1.5 a的共振周期,相位箭头的方向表示,在第1个周期R10与AMO呈负相位变化,且领先于AMO,在第2个周期R10与AMO呈同相位变化(图11g)。相干小波功率谱表示,R10与AMO存在3个显著负相关的共振周期(图12g)。PRCPTOT与AMO的交叉小波功率谱高能量区集中在1985—1995年、1995—2000年和2007—2013年,分别存在3~4、1~3、0~1.5 a的共振周期,相位箭头的方向表示在第1、2个周期PRCPTOT和AMO呈负相位变化,且领先于AMO,在第3个周期PRCPTOT与AMO呈同相位变化(图11h)。相干小波功率谱表示,PRCPTOT和AMO存在2个显著负相关的共振周期(图12h)。

DTR与AO的交叉小波功率谱高能量区集中在2007—2014年,存在1~5 a的共振周期,相位箭头的方向说明DTR与AO呈负相位变化,DTR在该周期1~3 a内滞后于AO,3~5 a内领先于AO(图11i)。相干小波功率谱表示,DTR与AO存在1个显著负相关的共振周期(图12i)。FD0与DMI的交叉小波功率谱高能量区集中在1988—1998年,存在2~4 a的共振周期,相位箭头的方向表示在该周期内FD0与DMI呈负相位变化,且领先于DMI(图11j)。相干小波功率谱表示,FD0与DMI存在显著负相关的共振周期(图12j)。FD0与Niño 4的交叉小波功率谱高能量区集中在1990—1998年,存在3~4 a的共振周期。相位箭头的方向表示,FD0与Niño 4呈负相位变化,

且领先于Niño 4(图11k)。相干小波功率谱表示,FD0与Niño 4存在2个显著负相关的共振周期(图12k)。DTR与WP的交叉小波功率谱高能量区集中在1992—2001年,存在4.5~7 a的共振周期,相位箭头的方向表示DTR与WP呈同相位变化,且领先于WP(图11l)。相干小波功率谱表示,DTR与WP存在2个显著正相关的共振周期(图12l)。

全球陆地呈普遍变暖趋势,极端气温指数的变化在全球范围内较为统一,而极端降水的变化因地域的差异而有所不同。为进一步探究大气环流因子对极端降水的地域差异影响,选取与极端降水指数PRCPTOT、R10相关系数通过0.05显著性水平检验的大气环流因子AMO、NAO(即AMO与PRCPTOT、R10,NAO与PRCPTOT、R10),采用IDW反距离权重插值法分析大气环流指数与不同站点之间极端降水指数的相关性地域差异(图13)。滇东南岩溶区PRCPTOT与AMO总体呈负相关,从站点层面来看,AMO与元阳站、个旧站、开远站、师宗站、罗平站的PRCPTOT呈显著负相关(图13a);PRCPTOT与NAO总体呈正相关,从站点层面来看,NAO与开远站、文山站、马关站的PRCPTOT呈显著正相关(图13b)。滇东南岩溶区R10与AMO总体呈负相关,从站点层面来看,AMO与开远站、泸西站、师宗站、罗平站的R10呈显著负相关(图13c);R10与NAO总体呈正相关,从站点层面来看,NAO与马关站、开远站、泸西站的R10呈显著正相关(图13d)。总体来看,AMO对滇东南岩溶区东北部和西南部的极端降水指数影响显著(图13a、图13c),NAO对滇东南岩溶区东南部和中部的极端降水影响更为明显。

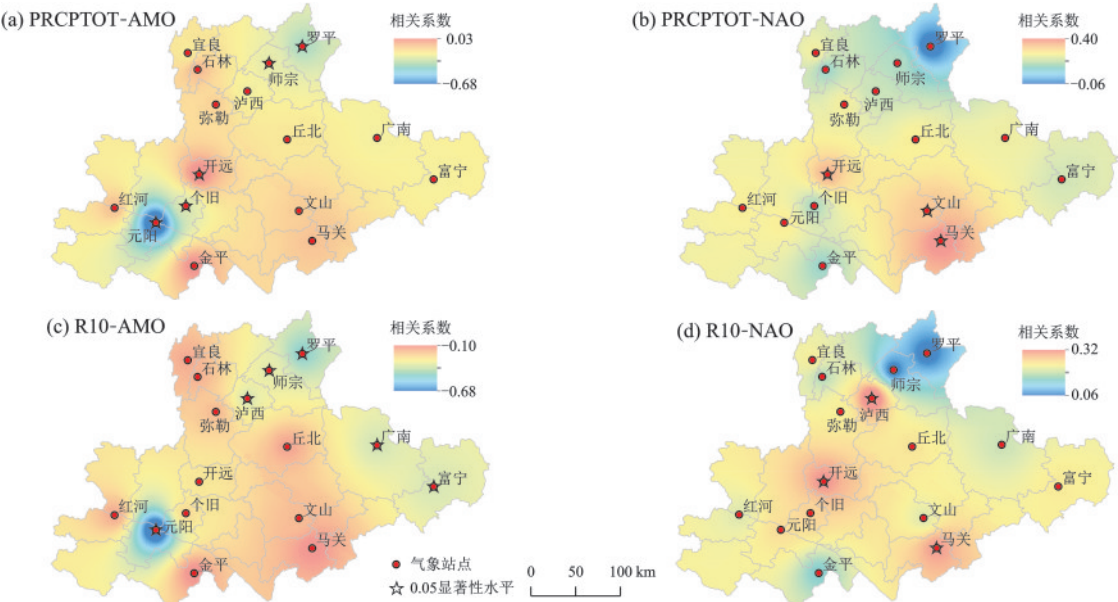


图 13 滇东南岩溶区极端降水指数 PRCPTOT、R10 和大气环流因子 AMO、NAO 相关系数的空间变化

Fig. 13 Spatial variation of correlation coefficients between extreme precipitation indices (PRCPTOT, R10) and atmospheric circulation factors (AMO, NAO) in the karst area of southeastern Yunnan

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

3 讨论

气候变化导致全球极端气候事件频发。本研究得出,滇东南岩溶区极端气温暖指数呈上升趋势,极端气温冷指数呈下降趋势,与已有研究^[24]得出的极端暖事件增加、极端冷事件减少结果一致。滇东南岩溶区极端降水强度(SDII)呈上升趋势,也与研究^[25]得出的极端降水平均强度呈增加趋势一致。其他极端降水指数呈下降趋势,与已有研究^[26]得出的结果不符,可能受到多种因素影响。首先,地形对降水产生影响,在迎风,坡海拔高度和降水呈较好的正相关^[27];其次,大尺度环流变化也是影响水汽输送和降水变化的主要原因^[28]。

有研究^[29]表明,极端气候事件发生的频率与强度和大气环流模式密切相关。滇东南岩溶区极端气候指数与大气环流因子之间存在一定的相关性,其中大西洋多年代际振荡(AMO)对滇东南岩溶区极端气候影响最为显著。AMO正位相引起欧亚大陆对流层温度升高,从而加大亚洲大陆与周边大洋之间的海陆热力差异,使得东亚夏季风加强^[30]。滇东南岩溶区位于东亚季风和南亚季风的交汇地带,东亚季风加强使岩溶区气温升高,降水量减少,气候极端性增强^[31]。AMO也与滇东南岩溶区极端气候指数存在共振周期,更说明大气环流因子对滇东南岩溶区极端气候存在影响。

本研究仅选取部分极端气候指数来研究滇东南岩溶区极端气候变化特征,在指数选取方面存在局限性。极端气候的发生受多种因素的影响^[32]。大气环流因子并不是其唯一的影响因素,本文仅考虑部分大气环流因子对极端气候的影响,在后续的研究中还可纳入地形、海拔等因素对极端气候的影响。

4 结论

1)极端气候指数的时间变化特征。滇东南岩溶区呈暖干化趋势,1969—2018年滇东南岩溶区极端气温暖指数(TN90p、TX90p、SU25)呈上升趋势,极端气温冷指数(TN10p、TX10p、FD0)呈下降趋势,除SDII呈缓慢上升趋势外,其余极端降水指数(CWD、R10、Rx1day、PRCPTOT)均呈下降趋势。在突变特征方面,极端气温和降水指数大部分突变点集中在20世纪80年代至21世纪初,极端气温暖指数在突变点后呈显著上升趋势,极端气温冷指数和绝大部分极端降水指数在突变点后呈显著下降趋势。在周期特征方面,极端气温指数存在1~5个周期,介于5~25 a,极端降水指数存在3~5个周期,介于4~31 a,部分极端气候指数的周期相近。

2)极端气候指数的空间变化特征。1969—2018年滇东南岩溶区极端气温暖指数总体呈上升趋势,TN90p、TX90p、SU25在西南部上升更为明显;极端气温冷指数总体呈下降趋势,TN10p和TX10p在西南部下降更为明显,FD0在北部下降更为明显。极端降水指数CWD、R10、RX1day、PRCPTOT、SDII均在西南部下降趋势更为明显,RX1day和SDII在北部地区下降趋势也较为明显。RX1day在东部呈增加趋势。

3)极端气候指数与大气环流的关系。通过皮尔逊相关分析选取的大气环流因子中,PNA、AMO、AO、DMI、NAO、WP、Niño 3.4、Niño 4均对滇东南岩溶区极端气候产生不同程度的影响。其中,AMO对滇东南岩溶区极端气候的影响最为明显。交叉小波变换显示,AMO与滇东南岩溶区极端气温暖指数均呈同相位的变化,AMO的值越大,极端气温暖指数的值越大;AMO与极端气温冷指数呈负相位变化,AMO的值越大,极端气温冷指数的值则越小,AMO与SDII呈同相位变化,与其余极端降水指数呈负相位变化。相干小波变换结果显示,AMO与滇东南岩溶区极端气候指数在多个周期上存在显著共振关系。AMO对滇东南岩溶区极端降水的影响存在地域差异,对滇东南岩溶区东北部和西南部极端降水影响显著。

参考文献:

- [1] Tellman B, Eakin H. Risk management alone fails to limit the impact of extreme climate events [J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 41-43.
- [2] 刘炜, 焦树林. 喀斯特流域极端气候变化特征及对NDVI的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 220-232. Liu Wei, Jiao Shulin. Characteristics of extreme climate change in karst basin and its impact on NDVI [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 220-232.
- [3] Li Fengjiao, Wang Juanle, Li Pengfei, et al. Vegetation changes from 2014 to 2023 in the Mongolian Plateau permafrost region under climate change [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(5): 1147-1159.
- [4] IPCC. Summary for Policymakers [M] // Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. *Climate change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [5] Cataldi M, Sancho L, Esposte Coutinho P, et al. Teleconnection patterns and synoptic drivers of climate

- extremes in Brazil (1981—2023)[J]. *Atmosphere*, 2025, 16(6):e699.
- [6] 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):e2005JD006290.
- [7] 杨阳, 赵娜, 岳天祥. 1980—2018年中国极端高温事件时空格局演变特征[J]. *地理科学*, 2022, 42(3):536-547.
- Yang Yang, Zhao Na, Yue Tianxiang. Spatio-temporal variations of extreme high temperature event in China from 1980 to 2018 [J]. *Geographical Science*, 2022, 42(3):536-547.
- [8] 于芯桐, 高超, 路帅锋, 等. 基于Copula函数的前山河流域雨潮联合遭遇风险演变[J]. *水文*, 2025, 45(6):36-42.
- Yu Xintong, Gao Chao, Lu Shuaifeng, et al. Evolution of rainfall-tide joint risk probability in the Qianshan River basin based on Copula function [J]. *Journal of China Hydrology*, 2025, 45(6):36-42.
- [9] 蒋帅, 张黎, 景元书, 等. 1981—2015年中国区域极端气候事件的时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6):295-306.
- Jiang Shuai, Zhang Li, Jing Yuanshu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of regional extreme climate events in China from 1981 to 2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):295-306.
- [10] 侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 等. 1961—2019年中国北方沙漠土地极端气候变化特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2023, 43(8):1495-1505.
- Hou Chengzhi, Huang Danqing, Gui Dongwei, et al. Spatiotemporal variations of climate extremes and influential factors in deserts and sandy fields of northern China from 1961 to 2019 [J]. *Geographical Science*, 2023, 43(8):1495-1505.
- [11] 李思楠. 滇东南喀斯特地区国土空间优化与管控研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- Li Sinan. Optimization and control of territorial space in karst areas of southeast Yunnan [D]. Kunming: Yunnan University, 2020.
- [12] 徐用兵, 雷秋良, 周脚根, 等. 1960—2015年云南省极端气候指数变化特征研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(11):15-27.
- Xu Yongbing, Lei Qiuliang, Zhou Jiaogen, et al. Study on the change characteristics of extreme climate indices from 1960 to 2015 in Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(11):15-27.
- [13] 任钊潼, 程清平, 金韩宇, 等. 轿子山国家级自然保护区气候变化特征及对NDVI的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4):168-177.
- Ren Yitong, Cheng Qingping, Jin Hanyu, et al. Climate change characteristics of Jiaozishan national nature reserve and its impact on NDVI [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):168-177.
- [14] 曾学梅, 丁文荣. 云南高原岩溶区极端降水变化规律研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(2):28-35.
- Zeng Xuemei, Ding Wenrong. Study on the variation characteristics of extreme precipitation events of karst area in Yunnan Plateau [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(2):28-35.
- [15] 周豹, 赵俊三, 陈国平, 等. 多情景模拟下滇东南喀斯特地区生态系统服务评估与网络优化[J]. *环境科学*, 2025, 46(7):4615-4627.
- Zhou Bao, Zhao Junsan, Chen Guoping, et al. Ecosystem services assessment and network optimization under multiple scenario simulations in the karst area of southeast Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7):4615-4627.
- [16] 周豹, 陈国平, 赵俊三, 等. 滇东南喀斯特地区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(11):123-142.
- Zhou Bao, Chen Guoping, Zhao Junsan, et al. Spatio-temporal evolution and trade-offs and synergies of ecosystem services in the karst region of southeast Yunnan [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(11):123-142.
- [17] 程文举, 席海洋, 张经天. 黑河上游径流对极端气候变化的响应研究[J]. *高原气象*, 2020, 39(1):120-129.
- Cheng Wenju, Xi Haiyang, Zhang Jingtian. Response of runoff to extreme climate change in the upper reaches of the Heihe River [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1):120-129.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007:63-66.
- Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007:63-66.
- [19] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2012:289-292.
- Tang Guoan, Yang Xin. Experimental course of spatial analysis of ArcGIS Geographic Information System [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012:289-292.
- [20] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992(4):482-493.
- Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climate change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992(4):482-493.
- [21] 吕翠美, 吴泽宁, 刘文立, 等. 伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J]. *人民黄河*, 2007, 29(5):26-28.

- Lü Cuimei, Wu Zening, Liu Wenli, et al. Wavelet analysis of the periodic variation characteristics of runoff in the Ili River basin[J]. Yellow River, 2007, 29(5): 26-28.
- [22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 315-322.
- Xu Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017: 315-322.
- [23] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26.
- Shao Jun. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 22-26.
- [24] 靖娟利, 钟国强, 陈美容, 等. 西南地区极端气候变化及其对 NDVI 的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 256-268.
- Jing Juanli, Zhong Guoqiang, Chen Meirong, et al. Extreme climate change and its effects on NDVI in Southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 256-268.
- [25] 王若骥, 黄丹青. 我国近 46 年暖季复合极端高温-极端降水事件特征[J]. 地球科学进展, 2025, 40(9): 974-986.
- Wang Ruoji, Huang Danqing. Characteristics of compound heatwaves and precipitation extremes of warming season in China from 1979 to 2024[J]. Advances in Earth Science, 2025, 40(9): 974-986.
- [26] 占龙飞, 董保华, 辛佳洁, 等. 1961—2020 年中国极端降水指数时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2025, 30(3): 359-372.
- Zhan Longfei, Dong Baohua, Xin Jiajie, et al. Spatio-temporal variation characteristics in the extreme precipitation index in China during 1961—2020[J]. Climatic and Environmental Research, 2025, 30(3): 359-372.
- [27] 马文倩, 陈小华, 李华宏, 等. 云南一次极端强降水过程成因和地形影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(4): 25-34.
- Ma Wenqian, Chen Xiaohua, Li Huahong, et al. Analysis on cause and topographical influence of an extremely heavy precipitation event over Yunnan Province[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2021, 41(4): 25-34.
- [28] 边巴卓嘎, 赤曲, 周顺武, 等. 雅鲁藏布江河谷盛夏降水年际变化及其与环流的联系[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 469-479.
- Bian Bazhuoga, Chi Qu, Zhou Shunwu, et al. Interannual variations of midsummer precipitation in the Yarlung Zangbo River valley area and its relationship with circulation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(3): 469-479.
- [29] Malhomme N, Podvin B, Faranda D, et al. Evaluation of the atmospheric circulation of CMIP6 models for extreme temperature events using latent dirichlet allocation[J]. Journal of Climate, 2025, 38(5): 1289-1304.
- [30] 姜大膀, 司东, 缪家鹏. 大西洋年代际振荡对东亚气候影响的综述[J]. 大气科学, 2024, 48(1): 261-272.
- Jiang Dabang, Si Dong, Miao Jiapeng. Impacts of Atlantic Multidecadal Oscillation on the East Asian climate: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(1): 261-272.
- [31] 潘锋, 李双海, 徐学飞, 等. CMIP6 模式下基于机器学习的云南省干旱模型构建及性能评估[J/OL]. 中国防汛抗旱, 1-10 [2026-06-22]. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2025475>.
- Pan Feng, Li Shuanghai, Xu Xuefei, et al. Construction and performance evaluation of Yunnan Province drought model based on machine learning in CMIP6 mode [J/OL]. China Flood and Drought Management, 1-10 [2026-06-22]. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2025475>.
- [32] 阮慧星, 邓煜, 欧洲, 等. 洞庭湖流域复合高温干旱事件的时空演变特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 57(6): 21-37.
- Ruan Huixing, Deng Yu, Ou Zhou, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of compound drought and heatwave events in Dongting Lake basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 57(6): 21-37.