

1964—2017 年南盘江流域主要极端气候事件 时空演变特征

柴素盈¹, 曹言², 窦小东³, 张星梓¹

(1.云南省环境科学研究院, 昆明 650034; 2.云南省水利水电科学研究院, 昆明 650228; 3.云南省气象局, 昆明 650034)

摘 要:根据 1964—2017 年南盘江流域 25 个气象站点逐日最高、最低和降水数据,采用 M-K 秩次检验法和小波分析法,分析了南盘江流域主要极端气候指标的时空变化特征。结果表明:(1)近 54 年南盘江流域表征高温事件的夏日日数 SU25,极端最高气温 TXx 和热持续指数 WSDI 均呈极显著上升趋势,表征低温事件的霜日日数 FD0 和冷持续指数 CSDI 均呈极显著减小趋势,极端最低气温 TNn 呈极显著上升趋势;强降水日数 R10、湿天降水总量 PRCPTOT、日最大降水量 RX1、5 日最大降水量 RX5、强降水量 R95p 和极强降水量 R99p 呈显著或极显著减小趋势,普通降水强度 SDII 呈弱减小趋势,持续湿润指数 CWD 呈极显著减小趋势,持续干燥指数 CDD 呈弱上升趋势;各极端气候指数均在 2001 年以后发生了显著变化,其中强降水量 R95p 和极强降水量 R99p 上升趋势较为明显。(2)与温度相关的极端气温指数呈现出北低南高的分布特征,冷持续指数 CSDI 呈现出东高西低的分布特征,热持续指数 WSDI 则呈现出相反分布特征;极端降水指数基本上呈现出东高西低的分布特征;南盘江流域中部干暖化趋势最为显著。(3)暖指数的变暖幅度大于冷指数的变冷幅度,极端最低气温变暖幅度大于极端最高气温变暖幅度;极端降水量级 PRCPTOT 减小幅度大于强降水量 R95p 和极强降水量 R99p,极端降水强度 RX5 减小幅度明显大于 RX1、R10 和 SDII,持续干燥指数 CDD 的变干幅度明显大于持续湿润指数 CWD。(4)极端降水事件对 SU25 和 TNn 的变化响应更为显著。

关键词:极端气温;极端降水;时空演变;突变分析;南盘江流域

中图分类号:P423.3; P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0151-10

Analysis Temporal and Spatial Changes of Extreme Climatic Events in Nanpan River Basin from 1964 to 2017

CHAI Suying¹, CAO Yan², DOU Xiaodong³, ZHANG Xingzi¹

(1.Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China; 2.Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China; 3.Yunnan Meteorological Service, Kunming 650034, China)

Abstract:Based on the data of daily maximum, minimum and precipitation from 25 meteorological stations in the Nanpan River from 1964 to 2017, temporal and spatial variation characteristics of extreme climate events in Yunnan Province were analyzed by using the Mann-Kendall rank test and wave-let analysis methods. The results showed that: (1) in recent 54 years, SU25, TXx and WSDI characterizing extremely high temperatures presented the significant increasing trend, FD0 and CSDI characterizing extremely low temperatures presented the significant decreasing trend, TXx presented the significant increasing trend; R10, PRCPTOT, RX1, RX5, R95p and R99p showed marked or extremely significant decreasing trend, SDII showed weak decreasing trend, CDD showed extremely significant decreasing trend, CWD showed weak increasing trend; the extreme climatic indices had all changed significantly after 2001, and the increasing trend of R95p and R99p was obvious; (2) the main space characteristics of the extreme temperature index characterizing extremely low temperatures were high in north and low in south, the main space characteristics of CSDI were high in east and low in west, WSDI showed the opposite distribution, the extreme precipitation index basically showed the distribution characteristic of the high level in the east and the low level in the west; the trend of dry-warming was the most obvious in the middle of Nanpan River Basin; (3) the warming range of

收稿日期:2019-01-25

修回日期:2019-03-14

资助项目:云南省科技计划项目(2012CA021;2015BB019)

第一作者:柴素盈(1988—),女,云南芒市人,工程师,博士,主要从事大气物理与大气环境、气候变化等相关研究。E-mail:340119230@qq.com

通信作者:曹言(1987—),男,陕西郿邑人,工程师,硕士,主要从事水文水资源等相关研究。E-mail:359851137@qq.com

the warming index was larger than that of the cold index, and the warming range of the extreme minimum temperature was larger than that of the extreme maximum temperature, the decrease of extreme precipitation level PRCPTOT was larger than that of R95p and R99p, the decrease of extreme precipitation intensity RX5 was larger than that of RX1, R10 and SD II, the drying range of CDD was obviously larger than that of CWD; (4) the response of extreme precipitation to the changes of SU25 and TNn was more significant.

Keywords:extreme temperature; extreme precipitation; temporal and spatial characteristics; Mann-Kendall test; Nanpan River Basin

近年来全球变暖加剧水循环,极端暖事件和极端强降水事件呈增多特征^[1-2],而极端气候事件相较于气候的平均状态对气候变化的响应更为敏感,其频率、强度变化对社会和生态环境具有更为显著的影响^[3],因此成为研究气候变化的热点。王冀等^[4]、董庆林^[5]、齐月等^[6]和刘琳等^[7]分别对华北、东北、西北和西南地区极端气候进行了研究分析,发现极端冷事件呈下降趋势,极端暖事件呈上升趋势,具体表现为极端最高和最低气温上升幅度的显著不对称性,而华北和东北地区极端降水事件呈减小趋势,西北地区极端降水事件则呈微上升趋势,西南地区降水总量呈减小趋势,但降水强度却有所增加;王琼等^[8]、黄强等^[9]、郑江禹等^[10]和吴灿等^[11]分别对长江流域、珠江流域和黄河流域极端气候进行了研究分析,结果表明 3 个流域均呈变暖趋势,且表现为冷指数和夜指数的变暖幅度明显大于暖指数和昼指数的变暖幅度,这一规律与中国其他区域变化趋势高度一致^[12],珠江流域极端降水频率和量级呈上升趋势的区域主要集中在珠江流域下游及流域南部,极端降水频次上升趋势不显著或呈下降趋势的区域主要集中在流域上游高海拔地区,面临高温干旱和暴雨洪涝的危险;杨晓静等^[13]和王晓等^[14]研究结果表明云南省极端气温事件变化趋势存在与上述研究区一致的变化趋势;杨晓静等^[15]研究结果表明云南省极端降水在发生频率、持续日数和降水强度均呈增加趋势。上述研究,针对云南省多种极端气温和降水的综合研究还相对较少,且研究时间主要集中在 2013 年以前,而将各极端气候指数分类对比研究、探索极端气候指标关系的研究则更为鲜有,因此在气候变暖背景下开展云南省不同流域极端气候事件的研究具有着重要的科学和现实意义。

南盘江流域主要包括曲靖市、昆明市、玉溪市、红河州和文山州,属于云南省水污染防治重点的水系之一。南盘江流域位于珠江上游,属珠江流域西江水系,气候属于亚热带季风气候区,汛期(5—10 月)降水量时空分布不均匀,单点性强降水天气发生频率较高,极易引发洪涝干旱等自然灾害。而近年来,随着云南省极端气候事件频发,如 2011 年雨季干旱、2012 年旱季干旱,及 2013 年冬春干旱等,2016 年曲靖、丘北等地暴雨洪灾,2018 年昆明、曲靖、玉溪等地洪涝

灾害等,多次洪涝干旱均为历史罕见,造成了巨大的损失,影响范围极广^[16]。加之南盘江流域是云南省粮食产区的重要集中地,受地形和地质条件的影响,坡耕地居多,多属于雨养型农业,对气候极端变化敏感性较高^[17],因此本文基于 1964—2017 年南盘江流域 25 个气象站逐日气温和降水数据,研究南盘江流域主要极端气候事件的时空演变规律,探索南盘江极端气候指标关系,以期能够本地区极端气候事件灾害风险预测和规避、农业区划提供一定的科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网和云南省气象局,选取 1964—2017 年南盘江流域 25 个气象站点逐日最高、最低和降水数据,其气象站点具体分布如图 1 所示。在数据选择过程中选用的站点需要尽量没有数据缺少,各站点气温和降水数据均通过标准正态一致性检验,并对数据进行质量控制,如剔除异常值和错误值等。

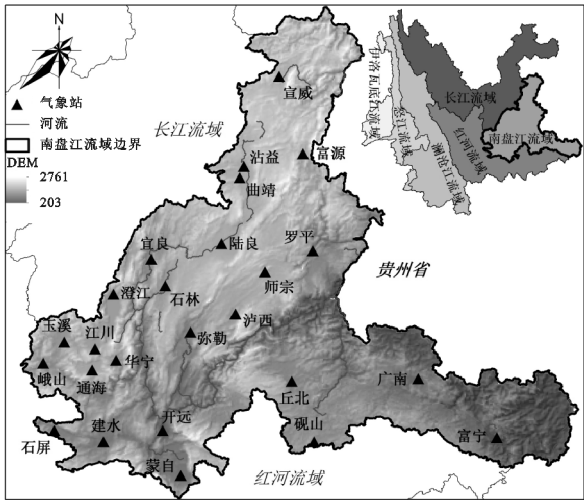


图 1 南盘江流域气象站点分布

1.2 研究方法

基于 RClimDex 1.0 软件分别计算南盘江流域 29 个气候极端指数,并从中选取与研究区密切相关的 6 个极端气温指数和 9 个降水指数,选取的指数具体定义^[18]见表 1。

其中 SU25, TXx 和 WSDI 表征极端高温事件,

FD0,TNn 和 CSDI 表征极端低温事件,PRCPTOT,和 RX5 表征极端降水强度,CDD 和 CWD 表征极端 R95p 和 R99p 表征极端降水量级,SD II ,R10,RX1 降水持续时间。

表 1 极端气候指数的定义

分类	符号	气候指数	定义	单位
极端气温指数	FD0	霜日	日最低气温<0℃的天数	d
	SU25	夏日	日最高气温>25℃的天数	d
	TXx	极端最高气温	日最高气温的最大值	℃
	TNn	极端最低气温	日最低气温的最小值	℃
	CSDI	冷持续指数	连续 6 d 最低气温在 10%分位值日数	d
	WSDI	热持续指数	连续 6 d 最高气温在 90%分位值日数	d
极端降水指数	SD II	普通日降水强度	降水量≥1 mm 的总量与日数之比	mm/d
	R10	强降水日数	每年日降水量≥10 mm 的总日数	d
	RX1	日最大降水量	每年(季、月)的最大日降水量	mm
	RX5	5d 最大降水量	每年(季、月)连续 5 日的最大降水量	mm
	PRCPTOT	湿天降水总量	一年中湿天(日降水量≥1 mm)的降水量之和	mm
	R95p	强降水量	日降水量>95%分位值的总降水量	mm
	R99p	极强降水量	日降水量>99%分位值的总降水量	mm
	CDD	最多连续无雨日天数	日降水量<1 mm 的最长连续日数	d
	CWD	最多连续雨日天数	日降水量≥1 mm 的最大持续日数	d

1.3 分析方法

利用 Mann-Kendall 非参数检验和线性趋势法对南盘江流域各极端气候指数进行趋势分析和突变检验,同时计算各极端气候指数的变化倾斜度β,采用 ArcGIS 10.0 软件中普通克里金(Kriging)和反距离权重(IWD)空间插值方法,分析各极端降水指数在空间分布和空间变化趋势。在趋势分析中,著性水平α为 0.05,0.01,当α≤0.01,即|Z|>2.58 时,说明检验具有高度显著性水平,当 0.01<α≤0.05,即|Z|>1.96 时,说明检验是显著的,当α计算结果满足上述二条件情况时,统计量 Z 为正则说明具有显著(或极显著性)上升趋势,统计量 Z 为负则说明具有显著(或极显著性)下降趋势,统计量 Z 为零则无趋势。当α>0.1,即-1.96<Z<1.96 时,为无显著趋势。

2 结果与分析

2.1 极端气候指数时间变化特征

2.1.1 极端气温指数 图 2 为南盘江流域极端气候指数的年际变化趋势和 Mann-kendall 突变检验,近 53 a 表征高温事件的 SU25(Z=4.588 1)、TXx(Z=2.738 0)、和热持续指数 WSDI(Z=5.214 8)均呈极显著上升趋势,表征低温事件的 FD0(Z=-5.804 2)和冷持续指数 CSDI(Z=-2.655 9)均呈极显著减小趋势,TNn(Z=3.961 5)呈极显著上升趋势,且均通过了 0.01 的显著区间。从各极端气温指数阶段性变化情况可以看出(图 2),SU25, TXx 和 WSDI 相对较小的时段普遍出现在 1970—1978 年,FD0, TNn 和 CSDI 相对较小的时段普遍出现在 2000—2017 年;SU25, TXx, TNn 和 WSDI 相对较大的时

段普遍出现在 2000—2017 年,FD0 和 CSDI 相对较大的时段普遍出现在 1964—1978 年。

2.1.2 极端降水指数 由图 3 可知,1964—2017 年反映降水量级和强度的极端降水指数 PRCPTOT(Z=-3.118 4)、R95p(Z=-2.864 8)、R99P(Z=-3.536 2)、R10(Z=-2.409 7)、RX1(Z=-3.700 4)和 RX5(Z=-2.790 2)均呈显著(显著水平 0.05)或极显著(显著水平 0.01)减小趋势,反映平均降水情况 SDII(Z=-1.492 1)呈弱减小趋势,反映干湿持续变化情况 CWD(Z=-2.081 5)呈显著减小趋势,CDD(Z=0.567 0)呈弱上升趋势。从各极端降水指数阶段性变化情况可以看出(图 3),SD II ,R10,CWD, PRCPTOT, RX1, RX5, R95p 和 R99p 相对较小的时段普遍出现在 2003—2013 年,CDD 相对较小的时段出现在 1964—1983 年;SD II ,R10,CWD, PRCPTOT, RX1, RX5, R95p 和 R99p 相对较大的时段普遍出现在 1964—1978 年,CDD 相对较大的时段出现在 2001—2013 年。

根据 Mann-Kendal 突变检验法得到各极端气候指数年平均值的检验统计量 U 的顺序、逆序变化曲线 UB_k 和 UF_k,取显著水平 0.05 得到两条临界线 y=+1.96(图 2 和图 3),得到的交点即可能为突变点。SU25,FD0, TXx, TNn, CSDI 和 WSDI 突变年份分别可能为 2003 年、1991 年、2008 年、1994 年、1994 年、2004 年,且 SU25, TXx, TNn 和 WSDI 分别在 2005 年、2013 年、2002 年、2004 年呈显著上升趋势,FD0 和 CSDI 分别在 1993 年、2004 年呈显著减小趋势;SDII, R10, CDD, CWD, PRCPTOT, RX1, RX5, R95p 和 R99p 突变年份分别可能为 1977 年、1977 年、1983 年、2002 年、1979 年、

1980 年、1982 年、1980 年、1980 年,且 R10,CWD,PRCPTOT,RX1,RX5,R95p 和 R99p 分别在 2008 年、2001 年、2002 年、1986 年、2002 年、1988 年、1984 年以后呈显著减小趋势。由此可知,表征极端低温事件的 FD0,TNn 和 CSDI 突变年份多发生在 20 世纪 90 年代初,表征极端高温事件的 SU25,TXx 和 WSDI 突变年份多发生在 21 世纪 00 年代初;极端降水事件突变年份多发生 20 世纪 70 年末 80 年代初,且各极端气候指数发生显著变化的

年份基本上在 2001 年以后,其中 PRCPTOT,RX1,RX5,R95p 和 R99p 呈现上升趋势,R95p 和 R95p 上升幅度最为明显,分别为 20.612 mm/10 a 和 20.094 mm/10 a,强降水量 R95p 和极强降水量 R95p 的快速上升,增加流域短历时暴雨山洪灾害的频发,这与云南省进入 21 世纪后 00 年代升温明显加剧^[19],2000 年后云南降水量呈减小变化趋势相一致^[20],也与近年来云南省山洪灾害发生更加频繁相符合^[21]。

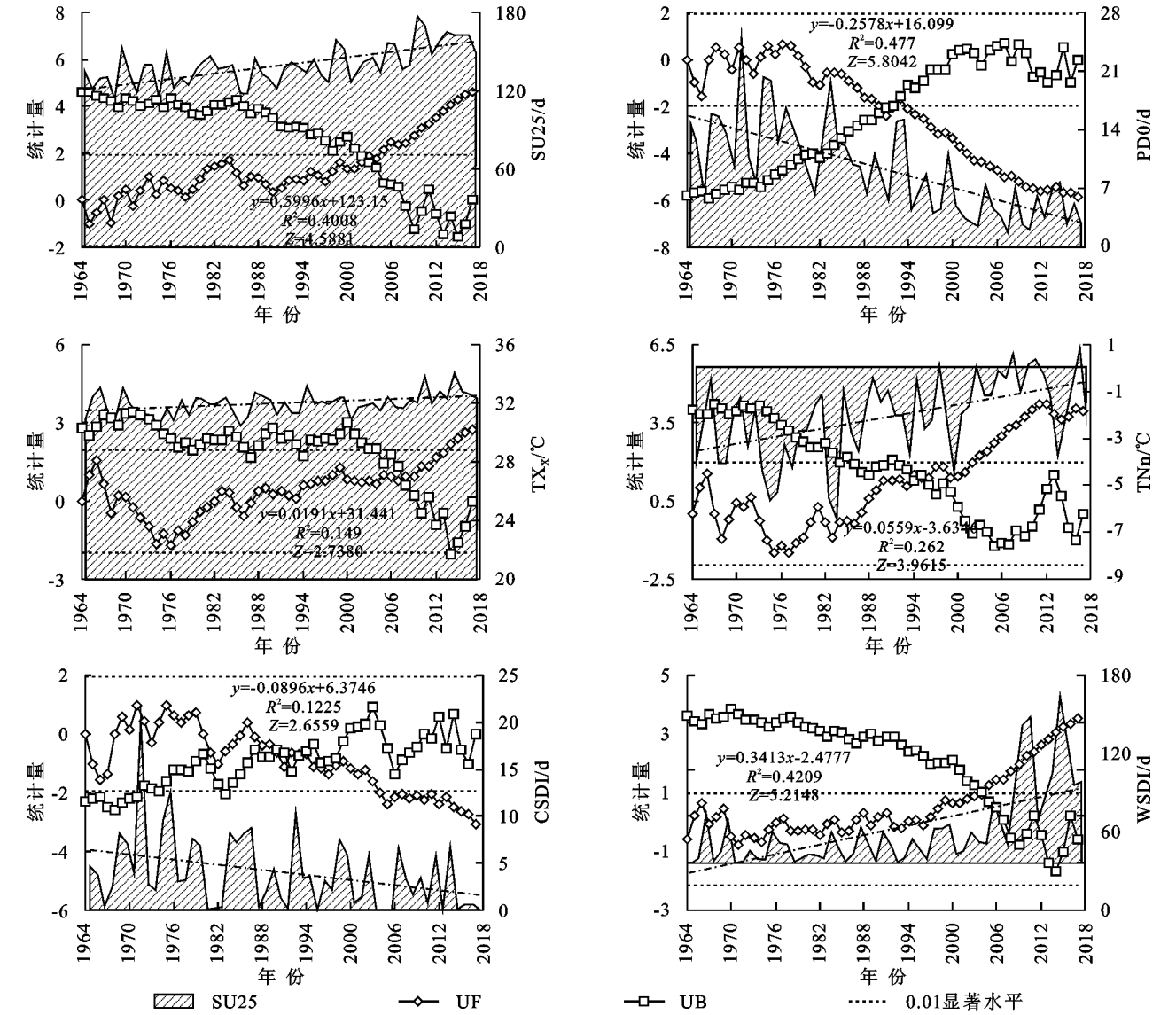


图 2 南盘江流域极端气温指数的年际变化趋势和 Mann-Kendall 突变检验

2.2 极端气候指数空间变化特征

2.2.1 极端气候指数空间分布特征 从南盘江流域各极端气候指数多年平均值的空间分布特征(图 4)可以看出,极端气候指数的空间分布表现出明显地域差异性。在极端气温指数方面,SU25 和 TNn 整体上表现出北低南高的分布特征,FD0 与 SU25 和 TNn 呈现出相反的分布特征;TXx 整体上呈现出东南高西北低的分布特征;CSDI 整体上呈现出东高西

低的分布特征,WSDI 则呈现出相反的分布特征。在极端降水指数方面,SD II,R10,CWD,PRCPTOT,RX1,RX5,R95p 和 R99p 整体上均呈现出东高西低的分布特征,CDD 则呈现出相反的分布特征。可见,与温度相关的极端气温指数呈现出北低南高的分布特征,冷持续指数呈现出东高西低的分布特征,热持续指数则呈现出相反的分布特征;与降水量和降水强度相关的极端降水指数则均呈现出东高西低的分布

特征,持续湿润指数也呈现出东高西低的分布特征,持续干燥指数则呈现出西高东低的分布特征。其原因一方面由于极端气候指数值向南基本随纬度的降低而递增^[22],加之南盘江流域北部易受冬季冷空气影响;另一方面南盘江流域多受东亚季风系统影响,雨季开始时间大多从东向西推进有关^[23]。

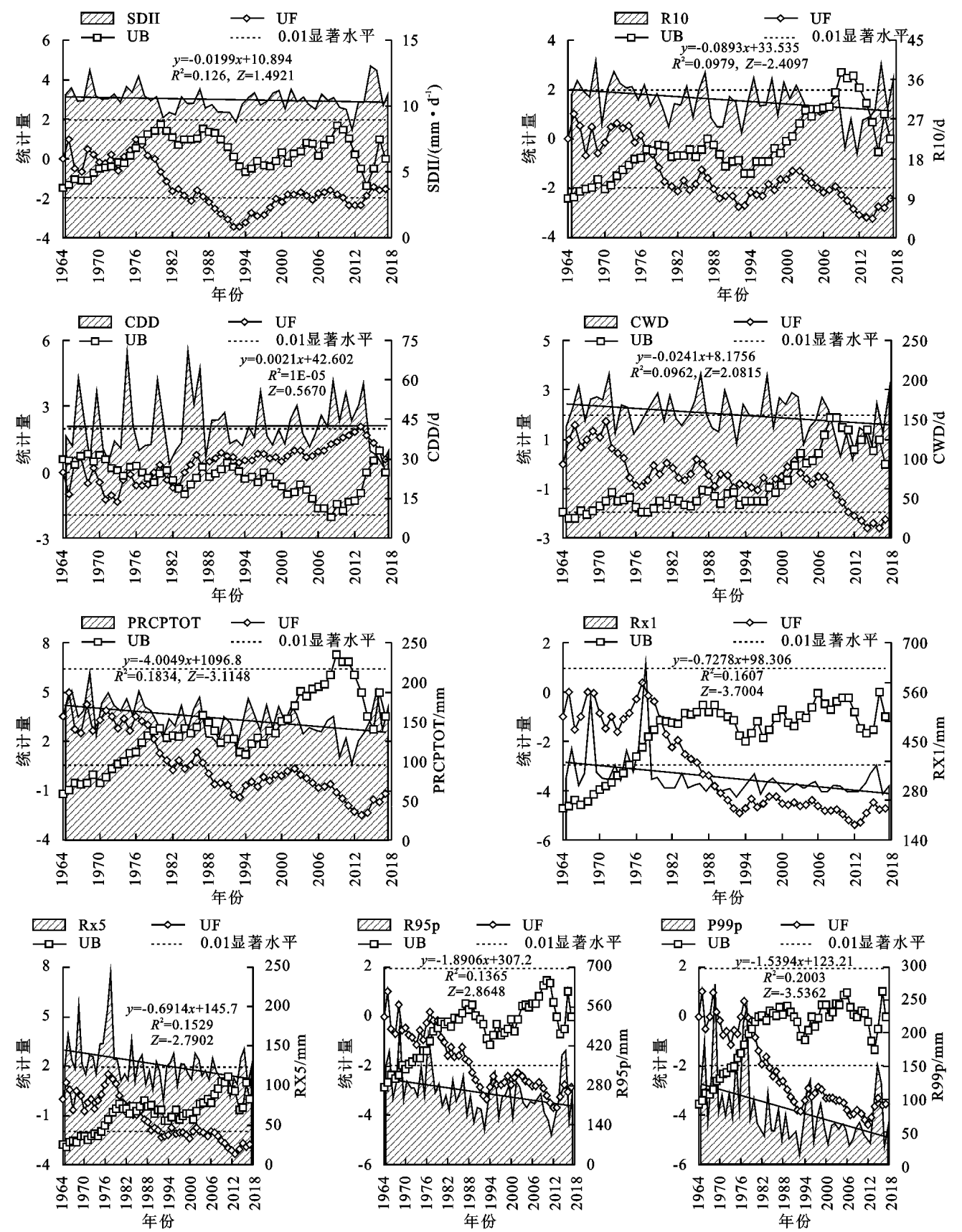


图3 南盘江流域极端气候指数的年际变化趋势和 Mann-Kendall 突变检验

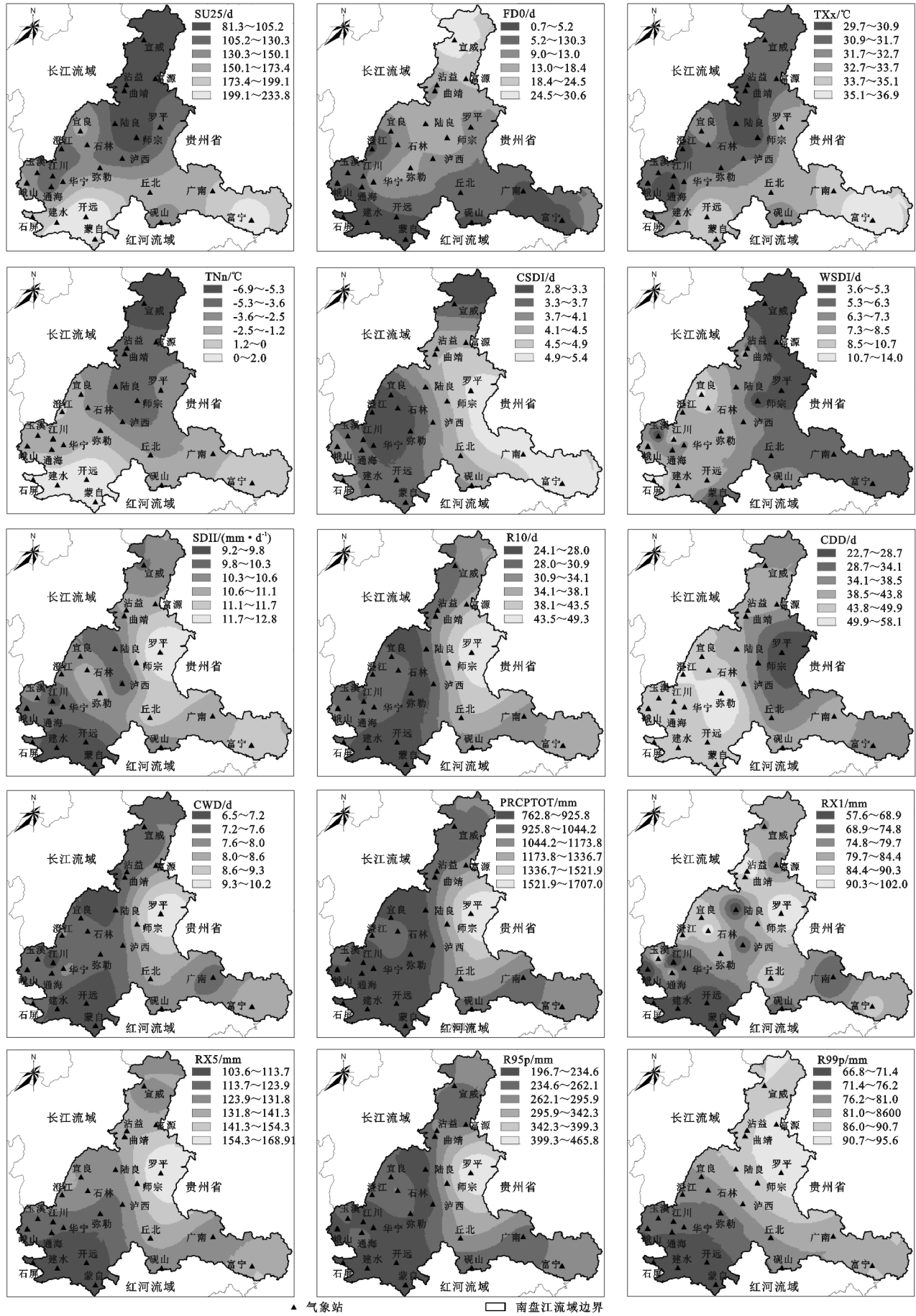


图 4 南盘江流域极端气候指数的空间分布

2.2.2 极端气候指数空间变化趋势 由南盘江流域极端气候指数的空间变化趋势(图 5)可以看出,在极端气温指数方面,100%站点 SU25 呈上升趋势,上升幅度由东南向西北越来越大,曲靖、江川和澄江等 22 个站点 SU25 呈极显著(显著水平 0.01)或显著(显著水平 0.05)减小趋势;与 SU25 对应的 FD0 则均呈减小趋势,减小幅度与 SU25 呈现相反的变化趋势,弥勒、宣威和华宁等 21 个站点呈极显著或显著减小趋势;92%站点 TXx 呈上升趋势,上升幅度由中东部向西部越来越大,曲靖、富宁和江川等 11 个站点 TXx 呈极显著或显著上升趋势,师宗和蒙自站 TXx 呈减小趋势;100%站点 TNn 呈上升趋势,上升幅度与之对应 TXx 基本上呈现出相反的变化趋势,富宁、宜良和蒙自等 22 个站点 TNn 呈极显著或显著上升趋势;96%站点 CSDI 呈减小趋势,减小幅度由西南部向东北部越来越大,富宁、曲靖、石林、弥勒、丘北和罗平站 CSDI 呈极显著或显著减小趋势,仅开远站 CSDI 呈上升趋势;100%站点 WSDI 呈上升趋势,上升幅度与之对应的 CSDI 呈现相反的变化趋势,石屏、江川和开远等 21 个站点呈极显著或显著上升趋势。综上所述,南盘江流域变暖趋势整体上表现出中西部高,东南和西南部低。

在极端降水指数方面,72%站点 SD II、100%站点 R10,88%站点 CWD,100%站点 PRCPTOT,92%站点 RX1,96%站点 RX5,96%站点 R95p 和 100%站点 R95p 均呈减小趋势,减小幅度均表现出由西南部向中东部越来越大的趋势,其中丘北、师宗和曲靖等 7 个站点 SDII 和宣威、富源和师宗等 9 站点 RX1 均呈极显著或显著减小趋势,江川、华宁和建水等 6 个站点的 SDII、开远和富宁站的 RX1 则均呈上升趋势;罗平、师宗和沾益等 9 个站点 R10,罗平、沾益和师宗等 16 个站点 PRCPTOT、罗平、丘北和师宗等 11 个站点 R95p、罗平、宣威和泸西等 10 个站点 R99p 均呈极显著或显著减小趋势,其中均是罗平站减小幅度最大;丘北、曲靖、陆良、宜良和江川站 CWD 呈极显著或显著减小趋势,砚山、建水和峨山站 CWD 呈上升趋势;石林、宣威和罗平等 7 个站点 RX5 呈极显著或显著减小趋势,仅富宁站 RX5 呈上升趋势;76%站点的 CDD 呈上升趋势,其中泸西和富宁站 CDD 呈极显著上升趋势,上升幅度表现出中东部大,西南部小的趋势,玉溪和广南站 CDD 上升幅度较小,而砚山、丘北、石屏、峨山、澄江和华宁站 CDD 呈减小趋势。综上所述,南盘江流域变干趋势整体上呈现出中东部高,西南部低;南盘江流域中部干暖化趋势最为显著,这也与流域中部干旱强度显著增加趋势一致^[24]。

2.3 极端气候指数的对比及相关分析

2.3.1 极端气候指数的对比分析 由表 2 可知,南盘江流域 92%站点 SU25 变化幅度大于 FD0,且 SU25 的平均变化幅度是 FD0 的 2.72 倍;88%站点 TNn 变化幅度大于 TXx,且 TNN 的平均变化幅度是 TXx 的 3.69 倍;68%站点的 WSDI 变化幅度大于 CSDI,且 WSDI 的平均变化幅度是 CSDI 的 1.35 倍;68%站点 RX5 变化幅度大于 RX1,84%站点 RX1 变化幅度大于 R10,92%站点 R10 变化幅度大于 SDII,且 RX5 的平均变化幅度是 RX1 的 1.46 倍,RX1 的平均变化幅度是 R10 的 3.03 倍,R10 的平均变化幅度是 SDII 的 6.91 倍;96%站点 PRCPTOT 变化幅度大于 R95p 和 R99p,且 PRCPTOT 的平均变化幅度是 R95p 的 2.33 倍,R95p 的平均变化幅度是 R99p 的 6.31 倍;76%站点 CDD 变化幅度大于 CWD,且 CDD 的平均变化幅度是 CWD 的 3.71 倍。综合可知,暖指数 SU25 和 WSDI 的变暖幅度明显大于冷指数 FD0 和 CSDI 的变冷幅度,冷指数 TNn 的变暖幅度明显大于暖指标 TXx 的变暖幅度,其主要原因是冬季变暖幅度大于夏季造成的,也与其他研究结果极端最低气温的变暖幅度大于极端最高气温一致^[8];极端降水量级 PRCPTOT 减小幅度大于强降水量 R95p 和极强降水量 R99p,极端降水强度 RX5 减小幅度明显大于 RX1,R10 和 SDII,持续干燥指数 CDD 的变干幅度明显大于持续湿润指数 CWD,这也与云南省变干趋势一致^[25]。

2.3.2 极端气温和极端降水指数相关分析 地面温度的增加致使地表蒸发加剧,导致大气保持水分能力增强,进而改变降水和极端降水事件的频率和强度,同时极端降水的变化也与总降水量变化密切相关^[26]。由表 3 可知,PRCPTOT 和 CDD 呈不显著负相关,且未通过显著检验,说明年降水量的增加未缓解干旱持续天数;PRCPTOT 与其他 7 个极端降水指数呈极显著正相关,且通过 0.01 水平的显著检验,说明年降水总量越大,SDII,R10,CWD,RX1,RX5,R95p 和 R99p 极端降水指数则越大。PRCPTOT 与 R10 和 R95p 相关系数最大,分别为 0.957,0.832,说明南盘江流域强降水日数和强降水量变化对年降水量影响最为显著。由表 4 可知,表征高温事件的 SU25,表征低温事件的 TNn 与各极端降水指数相关性最为密切,且基本上呈负相关关系,其中 SU25 与 R10,CWD,PRCPTOT 和 RX5 均通过 0.01 水平的显著检验,与 RX1,R95p 和 R99p 均通过 0.05 水平的显著检验,其相关系数介于-0.333~-0.552,而与 SDII 和 CDD 相关性较差;TNn 与 PRCPTOT,RX1,RX5,R95p 和 R99p 均通过 0.01 水平的显著检验,与 R10 和 SDII 通过 0.05 水平的显著检验,相关系数介于-0.292~

极端降水事件对 SU25 和 TNn 的变化响应更为显著。

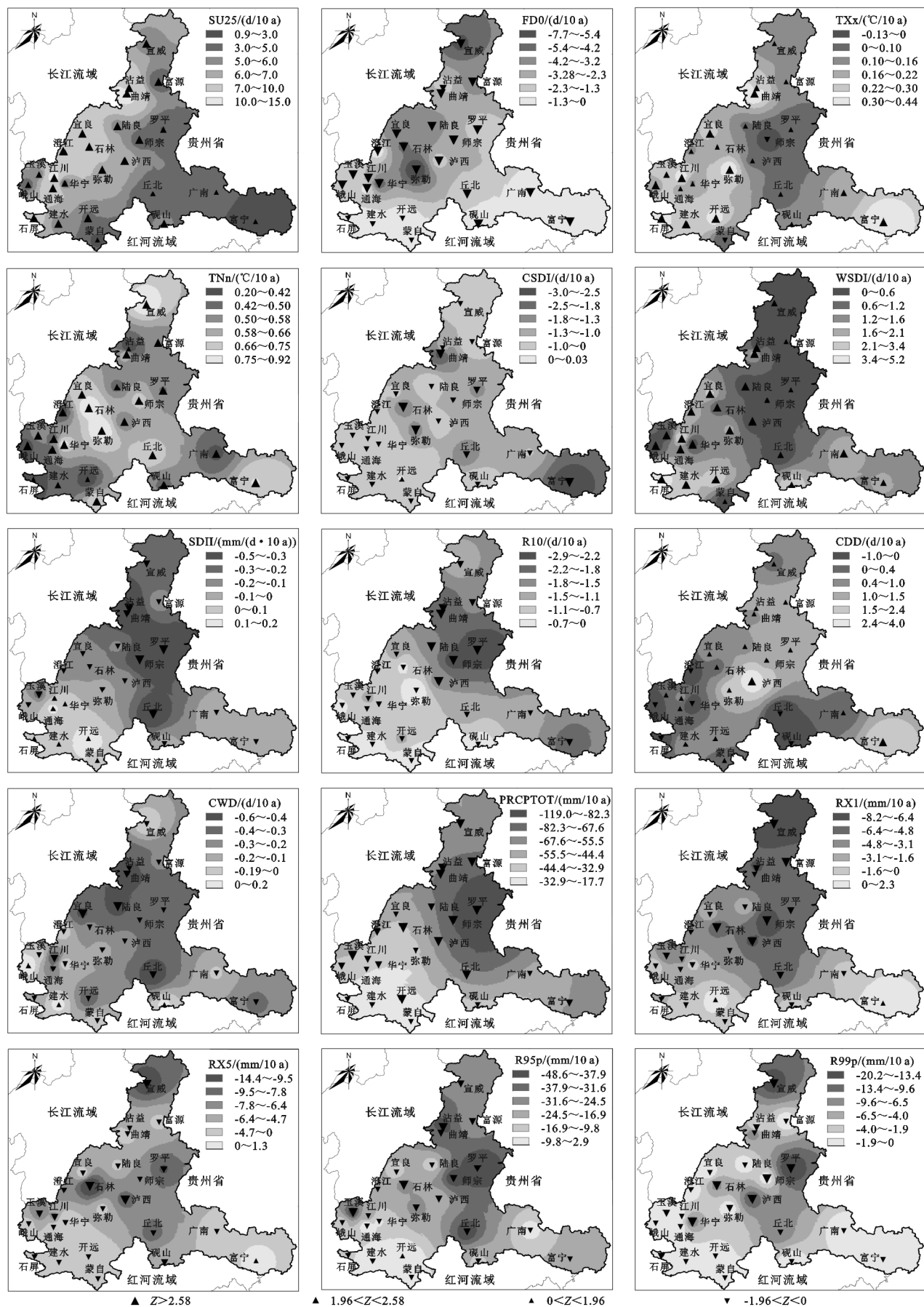


图 5 南盘江流域极端气候指数的空间变化趋势

表 2 各极端气候指数变化幅度绝对值的对比分析

指数对比	FD0>SU25	TXx>TNn	CSDI>WSDI	PRCPTOT>R95p>R99p	RX5>RX1>R10>SDⅡ	CDD>CWD
符合条件的 站点百分率	8%	12%	32%	96%/96%	68%/84%/92%	76%

表 3 1964—2017 年极端降水指数和年降水量相关性分析

年降水量	SDⅡ	R10	CDD	CWD	RX1	RX5	R95p	R99p
PRCPTOT	0.702**	0.957**	−0.200	0.575**	0.538**	0.700**	0.832**	0.657**

注：“*”表示显著水平为 0.01。

表 4 1964—2017 年极端气温和极端降水指数相关性分析

极端气温指数	SDⅡ	R10	CDD	CWD	PRCPTOT	RX1	RX5	R95p	R99p
SU25	−0.093	−0.517**	−0.051	−0.494**	−0.552**	−0.312*	−0.393**	−0.333*	−0.334*
FD0	0.153	0.232	−0.018	0.108	0.337*	0.404**	0.384**	0.290*	0.392**
TXx	0.022	−0.277*	0.001	−0.240	−0.304*	−0.137	−0.173	−0.129	−0.115
TNn	−0.292*	−0.334*	0.051	−0.098	−0.406**	−0.399**	−0.408**	−0.384**	−0.426**
CSDI	0.122	0.163	0.177	0.188	0.203	0.139	0.190	0.123	0.121
WSDI	0.191	−0.224	0.046	−0.367**	−0.246	−0.106	−0.126	−0.045	−0.061

注：“*”表示显著水平为 0.05,“**”表示显著水平为 0.01。

3 结论与讨论

(1) 近 54 a 南盘江流域表征高温事件的 SU25, TXx 和 WSDI 均呈极显著上升趋势,表征低温事件的 FD0 和 CSDI 均呈极显著减小趋势,TNn 呈极显著上升趋势,其中 6 月、8 月、9 月 TXx 上升幅度较大,2 月、6 月、10 月 TNn 上升幅度较大;反映降水量级和强度的极端降水指数 PRCPTOT, R95p, R99p, R10, RX1 和 RX5 均呈显著或极显著减小趋势,反映平均降水情况 SDⅡ呈弱减小趋势,反映干湿持续变化情况 CWD 呈极显著减小趋势,CDD 呈弱上升趋势。表征极端低温事件的 FD0, TNn 和 CSDI 突变年份多发生在 20 世纪 90 年代初,表征极端高温事件的 SU25, TXx 和 WSDI 突变年份多发生在 21 世纪 00 年代初;极端降水事件突变年份多发生 20 世纪 70 年末 80 年代初。

(2) 与温度相关的极端气温指数呈现出北低南高的分布特征,冷持续指数呈现出东高西低的分布特征,而热持续指数则呈现出相反的分布特征;与降水量和降水强度相关的极端降水指数则均呈现出东高西低的分布特征,持续湿润指数也呈现出东高西低的分布特征,持续干燥指数则呈现出西高东低的分布特征;南盘江流域变暖趋势整体上表现出中西部高,东南和西南部低;变干趋势整体上呈现出中东部高,西南部低。南盘江流域中部干暖化趋势最为显著。

(3) 暖指数(SU25 和 WSDI)的变暖幅度明显大于冷指数(FD0 和 CSDI)的变冷幅度,冷指数 TNn 的变暖幅度明显大于暖指标 TXx;极端降水量级 PRCPTOT 减小幅度大于强降水量 R95p 和极强降

水量 R99p,极端降水强度 RX5 减小幅度明显大于 RX1, R10 和 SDⅡ,持续干燥指数 CDD 的变干幅度明显大于持续湿润指数 CWD;强降水日数 R10 和强降水量 R95p 变化对年降水量影响最显著,极端降水事件对 SU25 和 TNn 的变化响应更为显著。

研究结果与云南省干暖化趋势基本一致^[25,27],各极端气温指数均表明南盘江流域呈暖化趋势,各极端降水指数表明南盘江流域呈干旱化趋势。各极端气候指数基本上在 2001 年以后发生了显著变化,其中极端气温指数中夏日 SU25 和极端最低气温 TNn 上升幅度最大,且 SU25, TNn 与各极端降水指数呈极显著负相关关系;加之极端降水指数中强降水量 R95p 和极强降水量 R95p 呈明显上升趋势,表明未来一段时间内南盘江流域干暖化趋势更为显著,尤其是流域中部,同时短历时暴雨山洪灾害可能会频发。因此,必须充分认识流域干暖化现状,加强流域内干旱、洪涝及地质灾害监测和预防。

参考文献:

[1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (1):1-6.

[2] 王米雪, 延军平, 李双双. 1960—2013 年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其变化趋势分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11):79-87.

[3] 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, 22(10):1066-1075.

[4] 王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2):166-173.

[5] 董庆林. 东北地区近 50 年来极端气候事件时空变化特

- 征[D].长春:东北师范大学,2011.
- [6] 齐月,陈海燕,房世波,等.1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J].干旱气象,2015,33(6):963-969.
- [7] 刘琳,徐宗学.西南 5 省市极端气候指数时空分布规律研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):294-301.
- [8] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625.
- [9] 黄强,陈子荣.全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J].地球科学进展,2014,29(8):956-967.
- [10] 郑江禹,张强,史培军,等.珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J].地理科学,2017,37(2):283-291.
- [11] 吴灿,赵景波,王格慧.黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析[J].中国农业气象,2015,36(5):525-535.
- [12] 王婷婷,冯起,李宗省,等.1960—2012 年祁连山东段古浪河流域极端气候事件研究[J].冰川冻土,2018,40(3):1-9.
- [13] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省 1958—2013 年极端气温时空变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):523-536.
- [14] 王晓,李佳秀,石红彦,等.1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布[J].资源科学,2014,36(9):1816-1824.
- [15] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省 1958—2013 年极端降水时空变化特征分析[J].灾害学,2015,30(4):178-186.
- [16] 杨丹丽,王杰,曹言.再分析资料 ERA Interim 在云南省的精度评估[J].人民珠江,2018,39(7):51-56.
- [17] 韩会庆,张娇艳,苏志华,等.2011—2050 年贵州省极端气候指数时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(2):341-346.
- [18] 曹永旺,延军平.1961—2013 年山西省极端气候事件时空演变特征[J].资源科学,2015,37(10):2086-2098.
- [19] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等.云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J].灾害学,2010,25(1):39-44.
- [20] 任菊章,黄中艳,郑建萌.基于相对湿度指数的云南干旱气候变化特征[J].中国农业气象,2014,35(5):567-574.
- [21] 杜俊,陈晶,熊执中.云南省山洪灾害防治非工程措施项目建设综述[J].人民长江,2016,47(9):12-16.
- [22] 杨茂灵,王龙,杨蕊,等.南盘江流域季节性干旱时空分布特征研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):251-256.
- [23] 谭顺萍,吴巩胜,李丽,等.1961—2010 年云南省极端降水时空变化特征[J].云南师范大学学报:自然科学版,2015,35(1):67-72.
- [24] 何娇楠,李运刚,李雪,等.1961—2012 年干旱时空变化特征[J].山地学报,2016,34(1):19-27.
- [25] 曹言,王杰,黄英,等.云南省气候干湿状况时空变化特征研究[J].水电能源科学,2017,35(8):6-9,22.
- [26] 杜亮亮,周雪英,赵有谱,等.河北邯郸地区极端降水指数气候特征及其与降水量、气温的关系[J].干旱气象,2017,35(6):968-974.
- [27] 张雷,王杰,黄英,等.1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(4):141-146.

~~~~~  
(上接第 150 页)

- [21] Jim C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong [J]. Environmental Management, 1998,22(5):683-695.
- [22] 马建刚,王克勤.昆明市城市绿地蓄水滞洪效益研究[J].中国水土保持,2012(2):34-37.
- [23] 李晨.榆林市绿地生态系统土壤水文调控过程及土壤微生物群落特征[J].水土保持研究,2017,24(3):80-85.
- [24] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.城镇化人为扰动下垫面类型影响水源涵养功能的评价[J].农业工程学报,2017,33(22):100-110.
- [25] 娄义宝,史东梅,蒋平,等.紫色丘陵区城镇化不同地貌单元的水文特征及土壤重构[J].土壤学报,2018,55(3):650-663.
- [26] 尹光彩,周国逸,唐旭利,等.鼎湖山不同演替阶段的森林土壤水分动态[J].吉首大学学报:自然科学版,2003,24(3):62-68.
- [27] 梁晶,方海兰,张浪,等.基于城市绿地土壤安全的主要生态技术研究及应用[J].中国园林,2016,32(8):14-17.
- [28] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等.六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响[J].山地学报,2007,25(5):541-547.
- [29] 祝景彬,贺慧丹,李红琴,等.牧压梯度下高寒草甸土壤容重及持水能力的变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):76-81.
- [30] 于法展,李保杰,尤海梅,等.徐州泉山自然保护区人工林下土壤容重与孔隙度时空变化研究[J].水土保持研究,2007,14(6):162-164.