

甘肃省极端降水指数时空变化特征

王军德, 苏振娟, 张丽娜, 张育斌

(甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000)

摘要:为了明确甘肃省极端降水事件的时空发生规律和变化特征,根据气候变化监测与指数专家组(ETCCDI)推荐的 11 个极端降水指数,分析了极端降水指数的时间变化特征,基于 GIS 技术采用空间地统计方法,研究了极端降水指数空间分布特征。结果表明:在时间分布上,持续干期呈显著减弱,变化速率为 $-2.129(p<0.05)$,持续湿期微弱下降,变化速率为 $-0.005(p<0.05)$,其余 10 个极端降水指数呈增强趋势($p<0.05$),尤其年降水总量增加显著,变化速率为 $2.56(p<0.05)$ 。总体来看,极端指数变化存在明显周期性,大致可分为 2~3 个周期;突变多发生在 20 世纪 60 年代中后期。在空间分布上,全省极端降水指数的空间变化特征较为明显,包括年降水量在内的 10 个极端指数由河西走廊向东递增,持续干期与之相反。综上,甘肃省极端降水指数变化具有明显的时间和空间差异。

关键词:极端降水; 时空分布; 甘肃省

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0270-07

Characteristics of Temporal and Spatial Variation of Extreme Precipitation Index in Gansu Province

WANG Junde, SU Zhenjuan, ZHANG Lina, ZHANG Yubin

(Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to clarify the temporal and spatial regularity and variation characteristics of extreme precipitation events in Gansu Province, based on the daily precipitation data of 23 meteorological stations in Gansu Province, 11 extreme precipitation indexes recommended by the Expert Group on Climate Change Monitoring and Indexes (ETCCDI) were selected, and the temporal change characteristics of extreme precipitation indexes were analyzed. Statistical methods were used to study the spatial distribution characteristics of extreme precipitation indices. The results show that: in terms of time distribution, the continuous dry period in Gansu Province had being significantly weakened, the continuous wet period had decreased slightly, and the remaining 10 extreme precipitation indexes showed an increasing trend, especially the total annual precipitation had increased significantly; on the whole, the extreme index changes had obvious periodicity, which could be roughly divided into 2 to 3 periods; sudden changes mostly which occurred in the middle and late 1960s; in terms of spatial distribution, the extreme precipitation index of Gansu Province had obvious spatial variation characteristics; the 10 extreme indexes, including annual precipitation, increased eastward from the Hexi Corridor, and the opposite was true for the continuous dry period. In conclusion, there are obvious temporal and spatial differences in the changes of extreme precipitation index in Gansu Province.

Keywords: extreme precipitation; temporal and spatial distribution; Gansu Province

全球气候变暖已经成为世界各国政府共识,在全球气候变暖的大趋势下,极端气候事件的发生也日益引起人们的重视^[1-3]。地处西北内陆的甘肃,降水省内三大内陆河流域水资源的主要补给来源,为区域社会经济发展和生态环境改善提供水资源保障。然

而,近年来的极端降水产生了极端干旱、城市内涝、荒漠洪水和特大暴雪等灾害事件,给当地社会经济生态环境造成了严重损失,研究极端降水时空变化特征能够为政府部门提供决策依据及理论基础。

甘肃省极端降水研究尚处于起步阶段,主要采用两

收稿日期:2021-05-24

修回日期:2021-07-05

资助项目:甘肃省创新引导项目[甘财科(2019)23 号];国家重点研发计划项目(2017YFC0403504);甘肃水利科研计划项目[甘水科外发(2019)8 号,甘水建管发(2020)46 号]

第一作者:王军德(1981—),男,甘肃凉州人,正高级工程师,主要从事水资源及生态水文研究。E-mail:jundwang@163.com

种方式;其一主要采用时间序列法、小波分析、突变理论对降水序列进行分析,从而探究极端降水在某一局部区域、一定时间序列、年内某一时间段的变化特点。张小明等^[4]分析了甘肃省近 50 a 夏季极端强降水量的气候特征,认为甘肃省夏季极端强降水具有 5 个气候带,不同气候带极端强降水变化趋势有所不同;武金慧等^[5]分析了甘肃省近 50 a 降水量及气候变化趋势,认为近 50 a 来甘肃省年平均降水量存在下降趋势,但河西中部、西部大部分地区出现降水量增加的趋势;赵一飞等^[6]分析了黄土高原甘肃区降水变化与气候指数的关系,认为降水量与太平洋年代际涛动(PDO)、厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)存在着多时间尺度的显著相关性。其二采用单一降水指数研究某一季节降水特征。马中华等^[7]分析了近 50 a 甘肃省夏季日极端降水频数与强度变化特征,认为近 50 a 来,极端降水频数呈减少趋势,极端降水强度呈增加趋势。

综上所述,针对降水量变化过程研究较多而对极端降水指数变化研究较少,且存在降水指数单一的不足,致使缺乏综合系统分析甘肃极端降水事件,相关分析研究有待进一步加强。因此,本文基于气候变化监测与指数专家组(ETCCDI)定义的相关极端降水指数,选取 23 个地面气象站点日降水序列,研究和分析甘肃省 1959—2019 年极端降水指数变化特征。

1 研究区概况

甘肃省(92°13′—108°46′E,32°11′—42°57′N)位于中国西北地区,是黄土高原、青藏高原、内蒙古高原三大高原和西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区三大自然区域的交汇处,呈东南—西北走向,面积 42.58 万 km²,地形呈狭长状,宛如一柄玉如意。地貌类型多样,山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁,类型齐全,交错分布,地势自西南向东北倾斜,大致可分为陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地、河西走廊以北地带六大地形区域。大部分地区气候干燥,属大陆性很强的温带季风气候。

1.1 数据来源

本文所用数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的甘肃省 23 个地面气象站的逐日降水数据,资料序列为 1959 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日(表 1),数据质量完整连续且可靠性高。为提高数据分析过程的准确可靠性,本文通过 R 语言中的 climact1.2 模块中的 check data 功能对原始数据进行了数据质量检查和控制。

1.2 研究方法

运用世界气象组织委员会(WMO-CCD)推荐的

极端指数软件 RClimdex 选用了 11 个极端降水指数,具体见表 2。并对降水指数做了描述性统计及降雨频率累计图(表 3、图 1)。本文采用线性回归法和滑动平均法(5 年滑动)分析各极端降水指数的年际变化特征;利用 R 中的 corrplot package 制作 Mann Kendall's tau-b, Spearman 指数相关图;利用 MATLAB 中滑动 T 检验(5MTT,10MTT)和 Mann-Kendall 检验检测突变点的可靠性;利用小波分析各极端降水指数的周期变化特征并用 Surfer 进行了绘图。利用 ArcGIS 10.1 中地统计学法对不同站点降水指数进行插值,分析甘肃省极端降水指数空间变化特征。

表 1 各气象站点信息

站点名称	编号	纬度 N	经度 E	数据时期
马鬃山	52323	41°48′	97°02′	1959-01-01—2019-12-31
酒泉	52533	39°46′	98°29′	1959-01-01—2019-12-31
高台	52546	39°22′	99°05′	1959-01-01—2019-12-31
张掖	52652	39°05′	100°17′	1959-01-01—2019-12-31
永昌	52674	38°14′	101°58′	1959-01-01—2019-12-31
武威	52679	37°55′	102°04′	1959-01-01—2019-12-31
民勤	52681	38°38′	103°05′	1959-01-01—2019-12-31
乌鞘岭	52787	37°12′	102°52′	1959-01-01—2019-12-31
景泰	52797	37°11′	104°03′	1959-01-01—2019-12-31
皋兰	52884	36°21′	103°57′	1959-01-01—2019-12-31
靖远	52895	36°34′	104°41′	1959-01-01—2019-12-31
榆中	52983	35°52′	104°09′	1959-01-01—2019-12-31
临夏	52984	35°35′	103°11′	1959-01-01—2019-12-31
临洮	52986	35°22′	103°02′	1959-01-01—2019-12-31
华家岭	52996	35°23′	105°01′	1959-01-01—2019-12-31
环县	53821	36°34′	107°18′	1959-01-01—2019-12-31
崆峒	53915	35°33′	106°04′	1959-01-01—2019-12-31
西峰	53923	35°44′	107°38′	1959-01-01—2019-12-31
玛曲	56074	34°00′	102°05′	1967-01-01—2019-12-31
合作	56080	35°00′	102°54′	1959-01-01—2019-12-31
岷县	56093	34°26′	104°01′	1959-01-01—2019-12-31
武都	56096	33°24′	104°55′	1959-01-01—2019-12-31
麦积	57014	34°34′	105°52′	1965-01-01—2019-12-31

2 结果与分析

2.1 甘肃省 61 a 极端降水指数年际变化特征及相关性分析

通过计算甘肃省近 61 年来 23 个站点的极端降水指数,运用线性回归和 5 年滑动平均法做出 11 个极端指数线性趋势图(图 2),计算了 11 个指数的 10 a 变化速率值(表 4),并利用 R 语言中的 corrplot package 制作 Mann Kendall's tau-b, Spearman 对 11 个指数得相关系数图(图 3—4)。各指数的主要特征如下:

(1) 强度指数(PRCPTOT, RX1day, RX5day, SDII)。RX1day 与 RX5day 的变化速率相差不大,均呈较小的增

加趋势、降水强度以 0.035 (mm/d · 10 a) 的速率微弱增加、年总降水量以 2.56 mm/10 a 的速率显著增加;从 5 年滑动曲线来看,5 日最大降水量和降水强度在 20 世纪 70 年代前后期和 21 世纪初出现较大波动,日最大降水

量和年总降水量波动幅度不大;相关性结果表明,无论是 Mann Kendall's tau-b 相关还是 spearman 相关,强度指数与 CDD 负相关不显著。RX1day 和 SDII 与 CWD 都呈显著正相关关系($p<0.01$)。

表 2 极端降水指数名称及其定义

指标	缩写	指数名称	定义	单位
强度	PRCPTOT	年降水量	日降水量≥1 mm 降水日累积量	mm
	RX1day	日最大降水量	年内最大一日降水量	mm
	RX5day	5 日最大降水量	年内最大连续 5 日降水量	mm
	SDII	降水强度	年降水量/降水日数	mm/d
绝对	R10	小雨日数	日降水量≥10 mm 日数	d
	R20	中雨日数	日降水量≥20 mm 日数	d
	R25	大雨日数	日降水量≥25 mm 日数	d
相对	R95p	强降水量	日降水量>95%分位的总降水量	mm
	R99p	极端强降水量	日降水量>99%分位的总降水量	mm
持续性	CDD	持续干期	最长连续无降水日数	d
	CWD	持续湿期	最长连续降水日数	d

表 3 极端降水指数描述性统计

指标	平均值	标准偏差	最小值	最大值	百分位数		
					第 25 个	第 50 个(中位数)	第 75 个
PRCPTOT	408.928	47.2735	328.2	529.2	372.300	408.500	442.750
RX1Day	32.877	4.3618	25.2	44.5	29.700	32.800	35.200
RX5Day	52.962	10.6773	35.7	108.7	46.700	51.100	56.550
SDII	6.882	0.7173	5.5	9.2	6.400	6.900	7.250
R10	10.03	1.798	7	15	9.00	10.00	11.00
R20	2.98	1.072	1	8	2.00	3.00	4.00
R25	1.70	0.803	1	6	1.00	2.00	2.00
R95p	81.721	49.3620	30.1	415.3	61.800	71.300	91.150
R99p	22.616	11.5094	3.2	59.2	15.600	21.300	31.550
CDD	87.51	15.533	47	125	77.50	87.00	97.00
CWD	4.49	0.887	3	9	4.00	4.00	5.00

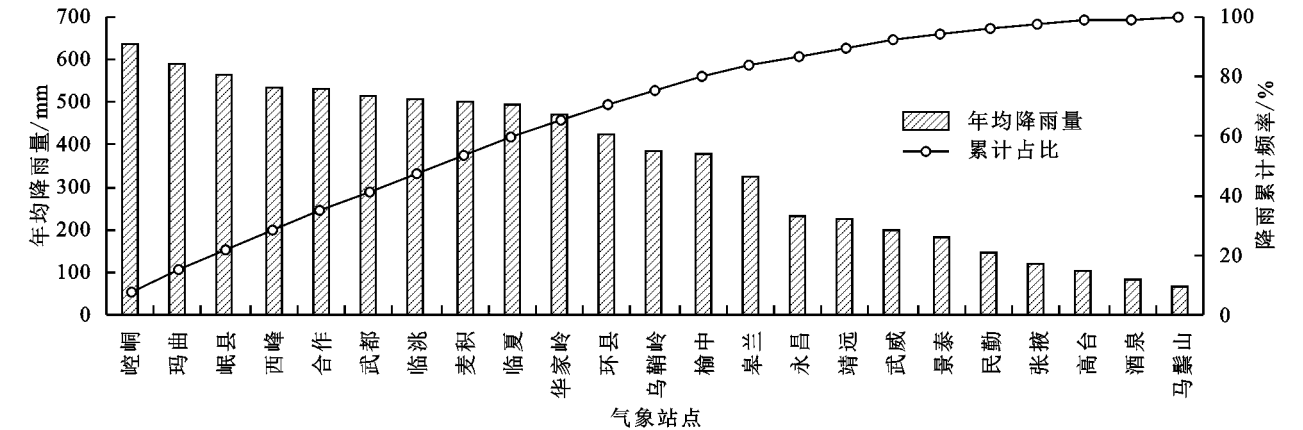


图 1 年均降雨频率累计

(2) 绝对指数(R10,R20,R25)。所有指数的速率都呈增加趋势,小雨日数增加趋势明显高于中雨、大雨日数;从滑动平均来看,小雨日数波动幅度不大,中雨日数和大雨日数在 2015 年前后波动较大;

相关性结果表明,R20 和 R25 都与 CDD 呈负相关关系($p<0.05$)。

(3) 相对指数(R95p,R99p)。强降水指数增加速率远大于极端强降水指数;两个相对指数的滑动曲

线都是在 20 世纪 70 年代前后期和 21 世纪初出现较大波动。相关性结果表明,R95p,R99p 仅与 CDD 无显著相关性,均与其他指数相关性显著($p<0.001$)。

(4) 持续性指数(CDD,CWD)。持续干期呈 -2.129 mm/10 a 的速率显著减弱,持续湿期呈 -0.005 mm/10 a

的速率轻微减弱;两个指数的滑动波动不大;相关性结果表明,CDD 仅与 R20,R25 呈显著负相关关系($p<0.05$),与其他指数无显著相关性;CWD 仅与 RX1day,SDII 在显著性水平($p<0.01$)正相关性,与其他指数在显著性水平($p<0.001$)显著相关。

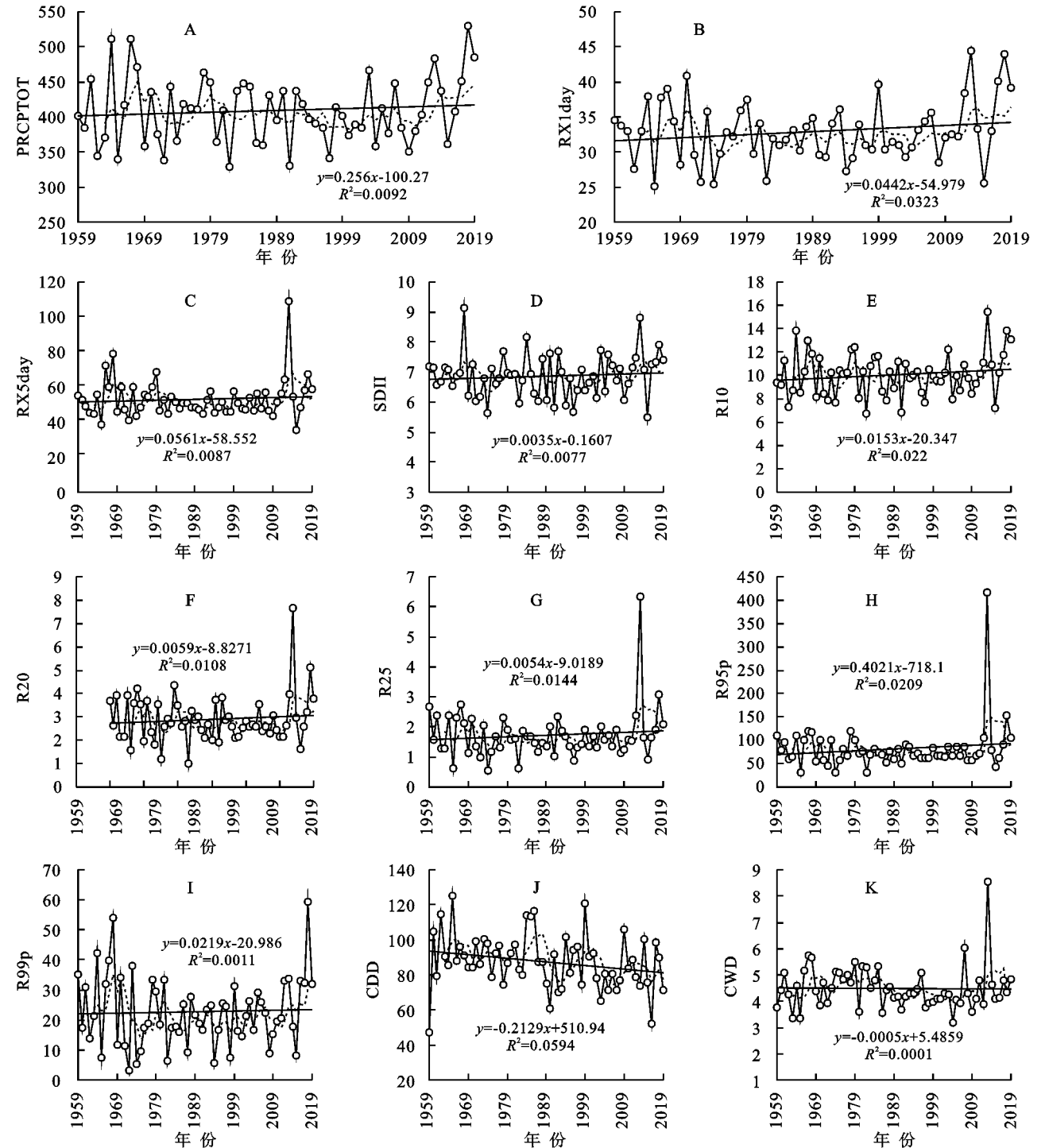
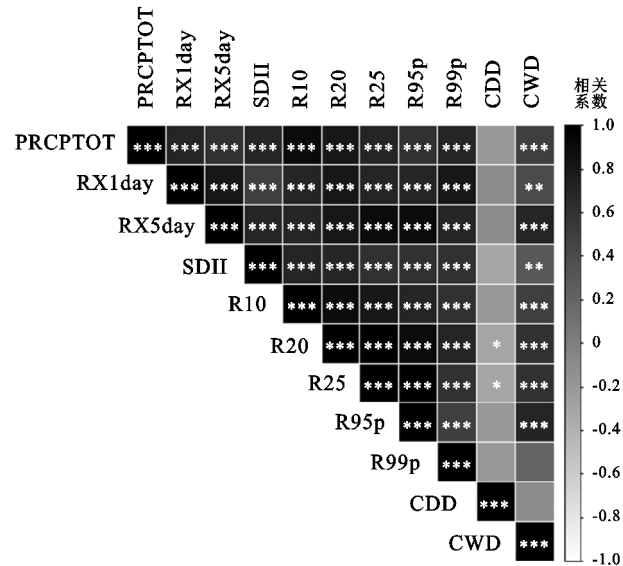


图 2 极端降水指数线性趋势(5 年滑动)

表 4 极端降水指数变化速率

名称	PRCPTOT	RX1day	RX5day	SDII	R10	R20	R25	R95p	R99p	CDD	CWD
变化率	2.56	0.442	0.561	0.035	0.153	0.059	0.054	4.021	0.219	-2.129	-0.005

注:置信水平为 $p<0.05$ 。



注:*** 代表 99.9% 的显著性水平,** 代表 99% 的显著性水平上,* 代表 95% 的显著性水平,下同。

图 3 甘肃省 1959—2019 年降水指数
Mann Kendall's tau-b 相关

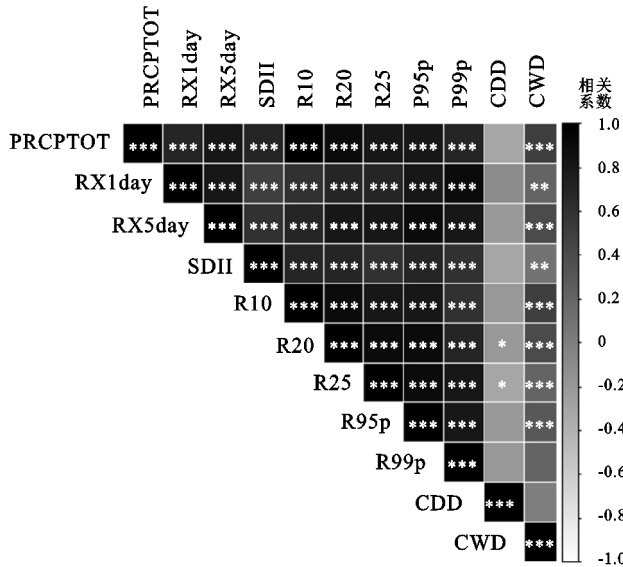


图 4 1959—2019 年降水指数 spearman 相关

2.2 甘肃省 61 a 极端降水指数突变分析

各降水极端指数存在突变年份不确定性较大,所以利用 5 年 MTT 和 10 年 MTT 方法检验给定年数子序列突变情况;利用 M-K 方法检验序列整体突变情况。11 个极端降水指数突变结果见表 5。

强度指数 PRCPTOT 的 M-K 检验表明年降水量在 1961 年前后突变,在此后有增加趋势,这与甘肃省 1961 年后发生洪涝灾害的实情相符,5 年 MTT 无显著突变,10 年 MTT 在 2009 年发生减小趋势的突变;RX1day 的 M-K 检验表明最大日降水量在 2013 年前后突变,5 年 MTT 在 1970 年前后发生突变;RX5day 的 M-K 检验表明 5 日最大降水量在 1968 年突变,5 年 MTT 是在 1965 年和 1970 年突变,10 年 MTT 在 2009 年发生减小趋势的突变,这与年降水量、日最大降水量的突变趋势一样;SDII 的 M-K 检验表明降水强度在 2017 年发生突变,5 年 MTT 无显著突变,10 年 MTT 在 2002 年发生突变。

绝对指数 R10 和 R20 的 M-K 检验表明小雨日数和中雨日数在 20 世纪 60 年代发生突变,5 年 MTT 和 10 年 MTT 都无显著突变;R25 的 M-K 检验表明大雨日数在 21 世纪初发生突变,5 年 MTT 在 20 世纪 60 年代突变,10 年 MTT 无显著突变。

相对指数的 M-K 检验表明 R95p 强降水量在 20 世纪 60 年代突变,而极端 R99p 是在 21 世纪初突变,5 年 MTT 也都在 20 世纪 60 年代突变,10 年 MTT 无显著突变。

持续性指数的 M-K 检验表明 CDD 持续性干期和 CWD 持续性湿期都在 20 世纪 80 年代后期发生突变、5 年 MTT 和 10 年 MTT 也都在 20 世纪 90 年代左右突变。

综上所述,不同突变检验方法降水指数的突变结果也有一定差异。

表 5 1959—2019 年降水指数突变检验结果

指标	PRCPTOT	RX1day	RX5Day	SDII	R10	R20	R25	R95p	R99p	CDD	CWD
M-K 检验	1961 年	2013 年	1968 年	2017 年	1968 年	1961 年	2018 年	1968 年	2016 年	1989 年	1985 年
5 年 MTT		1970 年	1965 年、1970 年				1970 年	1970 年	1970 年	1988 年、2001 年	1973 年、1985 年、1996 年
10 年 MTT	2009 年	2009 年	2009 年	2002 年						1986 年、1988	1982 年、1985 年、1996 年

注:置信水平为 $p<0.05$ 。

2.3 甘肃省 61 a 极端降水指数周期变化分析

结合前述结果,筛选相关性较低且变化趋势比较显著($p<0.05$)的降水指数进行 Morlet 小波分析,通过对 PRCPTOT, RX1day, SDII, R10, R95p 和 CWD 的年际变化进行小波分析得到 6 个指数小波系数实部等值线图(图 5)。图 5 中实线为正值区,表明极端降水指数值较大,虚线为负值区,表明极端降水指数值较小。

PRCPTOT, RX1day 均存在 3~8 a, 8~17 a, 27~31 a 三类尺度的周期变化规律。年降水总量的 8~17 a 在 1960—1980 年表现明显, 27~31 a 周期变换经历了“增—减—增—减—增—减”的交替变化,有 3 个丰水期和 3 个枯水期,方差分析表明 28 a 为它的第一主周期。日最大降水量的 8~17 a 周期震荡能量最大,贯穿整个分析时段, 13 a 为主周期。日最大降水量存在 6 个丰水期和 6 个枯水期交替变换。

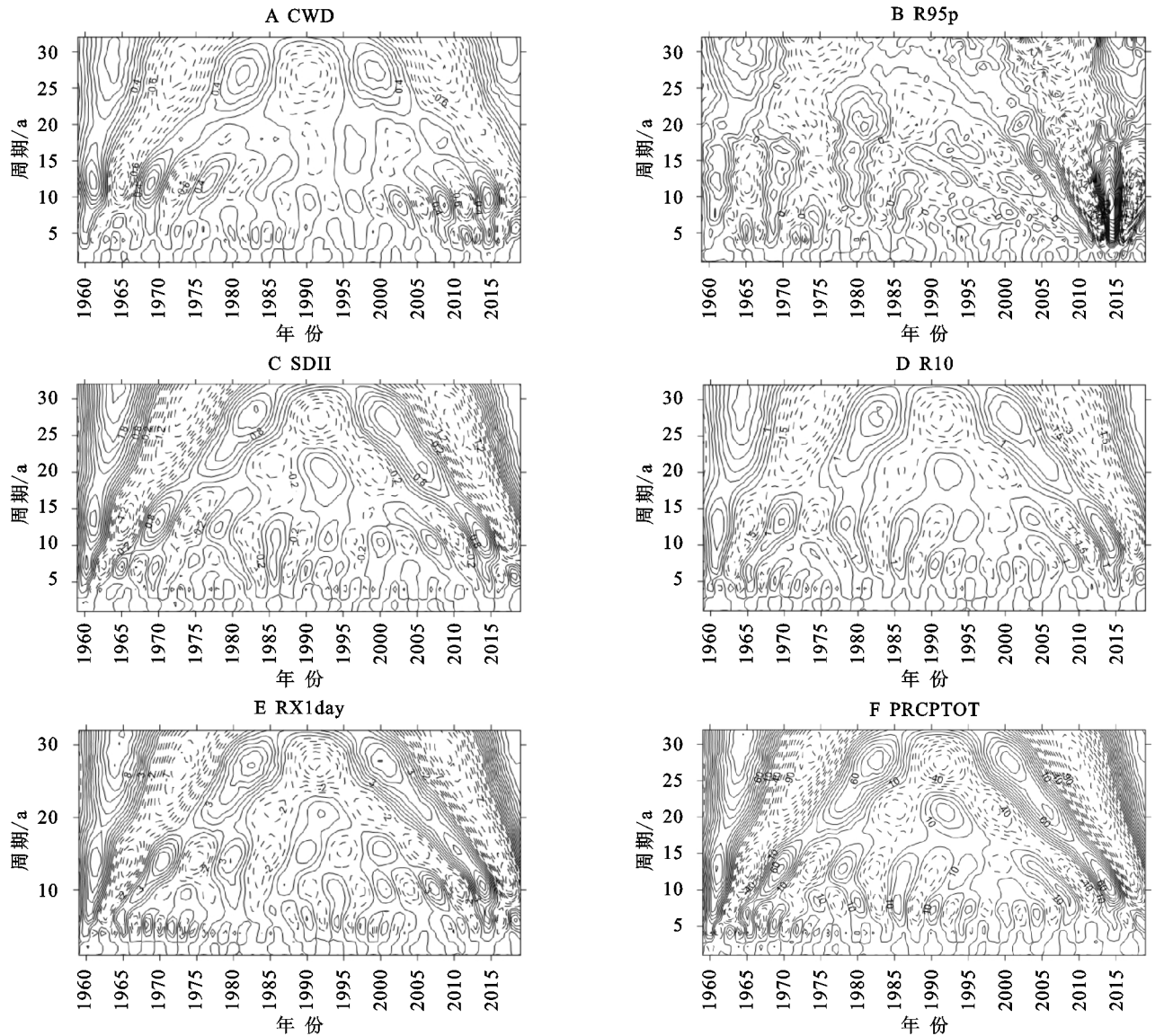


图5 极端指数周期分析

SDII 存在 7~15 a, 20~30 a 两类尺度的周期变化规律。其中 7~15 a 贯穿了整个分析时段, 周期震荡能量最大, 13 a 也是主周期; 20~30 a 在 1970—2000 年表现明显, 周期变换经历了“减—增—减—增”的趋势变换。R10 也存在 7~15 a, 20~30 a 两类尺度的周期变化规律, 13 a 也是主周期。R95p 的周期变化规律不太明显, 通过方差分析表明, 8 a 为第一主周期。

CWD 存在 3~8 a, 8~17 a, 21~29 a 三类尺度的周期变化规律。其中 21~29 a 周期震荡能量最大, 经历了“增—减—增—减—增—减”的交替变换, 28 a 为主周期。

2.4 甘肃省 61 a 极端降水空间变化分析

各站点降水极端指数空间差异性较大, 利用 ArcGIS 的克里金插值法绘制 11 个指数在研究区的空间分布图, 空间分布见图 6。

(1) 强度指数(PRCPTOT, RX1day, RX5day, SDII)。

PRCPTOT 的东西向变化趋势显著, 较大值集中分布在陇东、陇南和甘南高原地区; RX1day 值从河西地区到陇中、陇东地区依次递增, 相比之下, RX5day 值从河西地区大部到陇中、陇东地区依次递增, 部分甘南高原区的 RX1day 值也较大; SDII 在河西地区、陇中地区分布较为均匀, 在陇东地区分布较高。

(2) 绝对指数(R10, R20, R25)。R10, R20 和 R25 空间分布图表明小雨日数、中雨日数和大雨日数在河西和陇中地区分布趋势大体一致, 在陇东地区差异明显。小雨日数较大值在陇东分布区明显大于中雨日数分布区、大雨日数分布区。

(3) 相对指数(R95p, R99p)。R95p 较小值分布在河西马鬃山、酒泉和高台地区民勤地区, 较大值集中在甘南高原区和华家岭以东地区; 极端强降水量 R99p 的较小值分布在河西的永昌、民勤和武威部分区域, 较大值集中分布在陇中部分区域、陇东大部、陇

南和甘南全部区域。

(4) 持续性指数(CDD, CWD)。持续性干期

CDD 与持续性湿期 CWD 较大值、较小值分布区域正好相反。

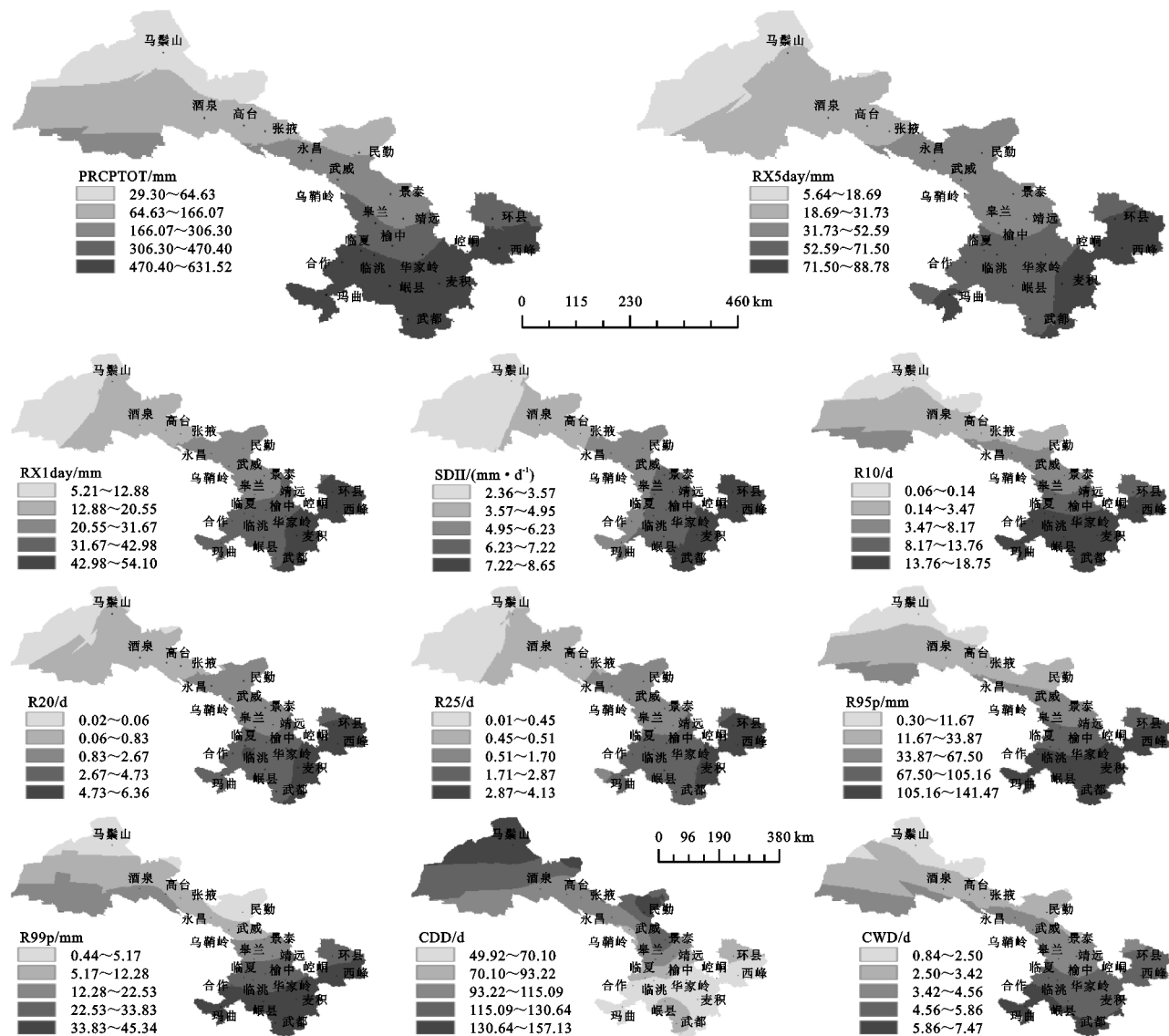


图 6 极端指数空间分析

3 讨论与结论

(1) 在时间分布上,持续干期呈显著减弱,变化速率为 $-2.129(p < 0.05)$,持续湿期微弱下降,变化速率为 $-0.005(p < 0.05)$,其余 10 个极端降水指数呈增强趋势($p < 0.05$),尤其年降水总量增加显著,变化速率为 $2.56(p < 0.05)$ 。总体来看,极端指数变化存在明显周期性,大致可分为 2~3 个周期。

(2) 各极端降水指数中,突变多发生在 20 世纪 60 年代中后期。

(3) 在空间分布上,全省极端降水指数的空间变化特征较为明显,包括年降水量在内的 10 个极端指数由河西走廊向东递增,持续干期与之相反。

影响极端降水指数变化的因素很多,大致可分为全球变暖、地形差异以及太平洋年代际涛动(PDO)、

厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)、城市化进程加速和温室气体排放增多等原因^[8-9]。就甘肃而言,影响降水指数显著差异化可能原因是地形因素造成。就甘肃来说,地形主要分为陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地、北山山地。甘肃省从河西走廊到陇东地区方向,年降水量呈增加趋势,最大值出现在甘南高原、陇南山地和部分陇东地区。这些地区山岭较多,具备良好的迎风坡,能够很好地进行地形抬升,各类天气系统过境后降雨频发,因此这类地区降水相对较多,容易出现降雨最值。

参考文献:

- [1] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change[J]. Climatic Change, 1998,39(4):667-694.

(下转第 291 页)

演变特征及格局优化:以七里河区为例[J].经济地理, 2015,35(1):126-133.

[15] 郭晓东,马利邦,张启媛.陇中黄土丘陵区乡村聚落空间分布特征及其基本类型分析:以甘肃省秦安县为例[J].地理科学,2013,33(1):45-51.

[16] 李莺国,石培基,刘春芳,等.黄土丘陵区乡村聚落时空演变特征及格局优化:以七里河区为例[J].经济地理, 2015,35(1):126-133.

[17] 郭晓东,马利邦,张启媛.基于 GIS 的秦安县乡村聚落空间演变特征及其驱动机制研究[J].经济地理,2012, 32(7):56-62.

[18] 马晓蓉,查小春.秦巴山区乡村聚落空间格局演变及影响因子:以陕西宁强县为例[J].山地学报,2020,38(5): 726-739.

[19] 艾丽娅,马勇,陈甫,等.2012—2017 年呼包鄂城市群夜间灯光动态变化特征及其驱动因素分析[J].遥感信息,2021,36(1):77-86.

[20] Arya S, Mount D M, Narayan O. Accounting for boundary effects in nearest-neighbor searching[J]. Discrete & Computational Geometry,1996,16(2):155-176.

[21] 李月连,韦严,黄乐.基于泰森多边形的那坡县农村居民点空间分布特征研究[J].广西城镇建设,2020(8):89-91.

[22] 邓平,王志城.基于 Voronoi 图的农村居民点空间分布特征研究[J].地理空间信息,2015,13(1):125-127.

[23] Duyckaerts C, Godefroy G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurones [J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2000,20(1):83-92.

[24] 张军,顾盼.东北地区乡村聚落空间分布特征及影响因素分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(10):110-115.

[25] 游上,江景峰,谢蕴怡.自组织理论视角下乡村民宿聚落“三生”空间的重构优化:以海南省代表性共享农庄为例[J].东南学术,2019(3):71-80.

[26] 杨忍.基于自然主控因子和道路可达性的广东省乡村聚落空间分布特征及影响因素[J].地理学报,2017,72 (10):1859-1871.



(上接第 276 页)

[2] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. Science, 2008,321(5895):1481-1484.

[3] 赵翠平,陈岩,王卫光,等.黄河流域近 50 a 极端降水指数的时空变化[J].人民黄河,2015,37(1):18-22.

[4] 张小明,杨金虎,高伟东,等.甘肃省近 50 a 夏季极端强降水量的气候特征[J].干旱气象,2008,26(2):48-52.

[5] 武金慧,李占斌,沈中原.甘肃省近 50 年降水量及气候变化趋势研究[J].干旱区资源与环境,2008(11):24-29.

[6] 赵一飞,邹欣庆,张勃,等.黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J].地理科学,2015,35(10):1325-1332.

[7] 马中华,张勃,王兴梅,等.近 50 a 甘肃省夏季日极端降水频数与强度变化特征[J].干旱区研究,2012,29(2): 296-302.

[8] Zhang J S, Shen X J, Wang B L. Changes in precipitation extremes in Southeastern Tibet, China[J]. Quaternary International, 2015,380/381:49-59.

[9] 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.



(上接第 284 页)

[25] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000—2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.

[26] 张依依,陈起伟.典型示范区石漠化治理工程生态效益监测研究:以毕节撒拉溪、关岭花江示范区为例[J].乐山师范学院,2018,33(8):58-67,84.

[27] 杨军昌,吴青芬,李绍练.基于生态足迹的滇桂黔石漠化片区人口与环境:以黔西南州为分析对象[J].生态经济,2019,35(10):136-142,190.

[28] 钱莉莉,贺中华,梁虹,等.基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):10-14.

[29] 程东亚,李旭东,安芬,等.高原山区小流域植被覆盖度演变时空格局[J].贵州师范大学学报:自然科学版, 2020,38(1): 6-13,57.

[30] 史晓亮,吴梦月,丁皓.SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J].农业机械学报,2020,51(12): 184-192.

[31] 孔冬冬,张强,顾西辉,等.植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J].生态学报,2016,36(24): 7908-7918.

[32] 董颖苹,熊康宁,李开忠,等.中国西南喀斯特潮湿气候下干旱胁迫人工牧草地土壤水生态系统服务研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):116-122.