

1961 – 2012 年贵州省极端降水时空变化特征

陈学凯, 徐建新, 胡娟萍, 张泽中, 黄鑫

(华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

摘要: 利用贵州省 1961 – 2012 年日值降水资料, 选取并计算了 6 个极端降水指数, 结合 ArcGIS 空间分析工具与 Mann – kendall 非参数检验、滑动 T 检验、小波理论以及 R/S 分析等方法, 就贵州省极端降水的时空变化规律进行了分析。结果表明: ①贵州省近 52 年以来, 连续湿日 (CWD) 呈显著下降趋势, 年最大 1 日降水量 (RX1day) 和降水强度 (SDII) 增多但不显著, 年最大 5 日降水量 (RX5day)、强降水量 (R95) 和年极强降水日数 (R20mm) 表现为不显著的下降趋势; ②RX1day、RX5day、SDII 和 R20mm 分别在 1973、1972、1981 和 1992 年发生明显的突变现象; ③极端降水普遍存在 6 ~ 7a 的主周期和 10 ~ 12a 的次周期; ④极端降水的高值区位于黔西南和黔东南地区, 而低值区集中在黔西北地区; ⑤各极端降水指数与年总降水量之间存在显著的正相关性; ⑥极端降水在未来变化趋势中具有长期记忆性。极端降水的变化对贵州当地农业生产 and 水资源利用造成负面影响, 增加了自然灾害发生的风险。

关键词: 极端降水指数; 时空变化; 突变; 周期性; 贵州省

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0050-07

Feature of spatial and temporal variation of extreme precipitation in Guizhou Province from 1961 to 2012

CHEN Xuekai, XU Jianxin, HU Juanping, ZHANG Zezhong, HUANG Xin

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: By use of precipitation data in Guizhou province from 1961 to 2012, the paper chose six indexes of extreme precipitation, and combined ArcGIS spatial analysis tool, Mann – Kendall test, sliding T – test, Morlet wavelet cycle analysis, rescaled range analysis to analyze the law of spatial variation of extreme climate events. Result showed that ①The continuous wet days (CWD) exhibit significant decreasing trend during 52 years, the maximum 1 – day precipitation and density of precipitation (SDII) increase but is not notable, the maximum 5 – day precipitation (RX5day), strong precipitation (R95) and annual very heavy precipitation days (R20mm) present the unnotable decrease trend, but the variation trend of them was not significant. In contrast, there was not an obvious increasing trend in maximum 1 – day precipitation (RX1day) and simple daily intensity index (SDII). ②Abrupt change points of RX1day, RX5day, SDII and R20mm were at 1973, 1972, 1981 and 1992, respectively; ③Almost all extreme precipitation indexes exist the major cycle of 6 to 7 and minor cycle of 10 to 12; ④The high value zone of extreme precipitation is southwest and southeast areas in Guizhou province, while the low value zone is northeast areas in Guizhou province. ⑤There are significant positive correlation between precipitation indexes and total precipitation; ⑥The extreme precipitation indexes will keep long – term memory in the future. The change of extreme precipitation has negative impacts on the agricultural production and water resources development in the Guizhou province and increases the risk of natural disasters.

Key words: extreme precipitation index; spatio – temporal variation; abrupt change; periods; Guizhou Province

收稿日期: 2015-03-05; 修回日期: 2015-03-19

基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (201301039); 贵州省水利厅科技专项经费项目 (KT201313); 河南省科技攻关计划项目 (142102110058); 华北水利水电大学创新计划项目 (HSCX2004059)

作者简介: 陈学凯 (1990-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究区域水资源高效利用。

通讯作者: 徐建新 (1954-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为区域水资源高效利用及灌排发展战略研究。

1 研究背景

随着全球气温上升及人类活动的进一步加剧,导致自然循环系统的平衡性逐渐被打破。近百年来,作为改变气候系统驱动力之一的极端降水,其发生频率显著增加^[1],导致暴雨洪涝和高温干旱等极端气候事件频发,是目前人类面临的最为复杂的挑战之一^[2]。中国由于地处东亚季风区且具有特殊的地理环境,已成为受气象灾害威胁最为严重的国家之一^[3]。以干旱灾害为例,1951–2006年以来,我国年均农作物受旱面积达2175.4万hm²,尤其是在20世纪80年代以后,受旱面积和因旱成灾面积均呈显著增加的趋势^[4]。鉴于此现象,我国一些学者对此进行了大量的研究,王志福等^[5]认为中国极端降水事件的多发区位于长江中下游和江南地区以及高原东南部;杨素英等^[6]指出东北地区极端降水事件阈值由东南沿海向西北内陆递减;杜军等^[7]分析得出西藏地区各极端降水指标具有明显的周期变化和空间分布差异特征。不同区域的极端降水变化规律各具特点,因此有必要对具体区域进行详细的分析评估。

西南地区是世界上海拔较高、地形较复杂的区域,地质灾害和洪涝灾害频发,尤其近几年干旱事件的多发区逐渐从我国北方向西南地区蔓延^[8]。而贵州省作为以水稻、玉米为主要粮食作物的农业大省,绝大部分地区属雨养农业区,易受气候灾害的影响,素有“无灾不成年”之说。在2009–2010年西南五省特大干旱中,贵州省农作物受旱面积达156.831万hm²,其中成灾112.003万hm²,绝收51.863万hm²,因旱直接经济损失139.99亿元^[9]。可见,由于极端降水引起的气候灾害对贵州省经济可持续发展、水资源利用、生态环境变化以及人民生活造成了严重影响^[10]。因此从正确认识自然、科学应对灾害的角度,客观地反映在自然灾害频发区域内极端降水的变化情况,不仅对进一步预防和监测自然灾害有重要意义,而且也是当前研究气候变化的重点。

以往对贵州省降水的分析多侧重于年际、年代际的多年平均状态,缺乏对多种极端降水指数进行分析探讨。本文在总结前人大量工作成果的基础上,从不同方面选取6种极端降水指数,从多角度全面、深入分析贵州省多年极端降水的时空变化规律,以期当地制定防灾减灾措施提供理论依据。

2 数据来源及分析方法

2.1 研究区域概况

贵州省位于我国西南部,区域地理坐标103°36'E~109°35'E,24°37'N~29°13'N;土地总面积176167km²,地处青藏高原东南侧、云贵高原东斜坡面上,地势西高东低,平均海拔1100m;地貌类型复杂多样,全省73%的面积为喀斯特地貌;属亚热带湿润季风气候,年均气温在15℃左右,年雨量在800~1700mm之间,光照适中,雨热同季,无霜期270d左右。

2.2 数据来源

气象数据来源于国家气象共享数据网站提供的1951–2012年日值数据集,在综合考虑各站点的空间分布及地理位置、资料序列的完整性和统一性的前提下,选取贵州19个典型代表气象站点1961–2012年逐日降水量资料。数据集在发布前经过了严格的质量评估,主要气象要素资料的可疑率不超过1/1000。考虑到极个别站点存在的资料缺失现象,通过与该站邻近的,相关性较高的其他站点补齐;同时研究资料还受到站点明显迁移、观测技术以及人为操作等原因影响,因此采用MW检验方法对每个站点长序列资料进行均一性检验,结果表明19个站点全部通过检验,可以保证研究结果的可信度。研究区域及站点分布见图1。

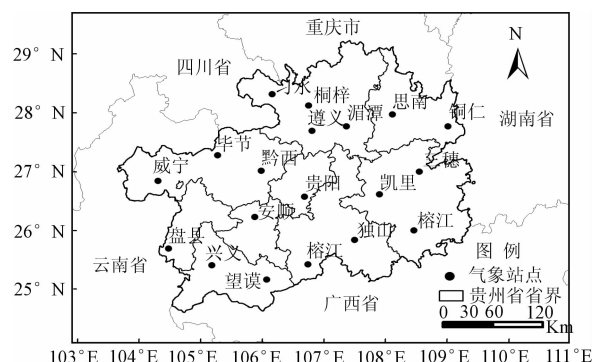


图1 贵州省气象站点分布

2.3 分析方法

为了全面分析降水在不同方面的变化,选取世界气象组织气候委员会(WHO-CCI)推荐^[11]以及在国内应用较为广泛的6个极端降水指数,见表1。通过RClimDex软件计算得到各站点的极端降水指数值,贵州省极端降水指数值为19个站点的算术平均值。

在Arcgis10.0环境下,基于反距离插值方法

(IDW)绘制极端降水指数的空间分布图,用来分析极端降水指数的空间分布特征;采用 Mann – kendall 非参数检验(以下简称 M – K 法)和滑动 T^[12]联合对极端降水指数进行突变分析;运用 Morlet 小

波^[13-14]对极端降水指数进行周期探讨;应用 Hurst 指数^[15]对极端降水指数的未来发展趋势进行预测;同时分析、探讨极端降水指数与年总降水量之间的相关性。

表 1 本文选取的极端降水指数的说明

指标 ID	降水指数	定义
RX1day	年最大 1 日降水量/mm	每年日降水量的最大值
RX5day	年最大 5 日降水量/mm	每年连续 5 日降水量的最大值
CWD	连续湿日/d	每年的日降水量≥1mm 的最大持续日数
R20mm	年极强降水日数/d	每年的日降水量超过 20mm 的总天数
R95	强降水量/mm	日降水量大于 1961 – 2012 年第 95 个百分位 52a 平均值
SDII	降水强度/(mm · d ⁻¹)	日降水量≥1mm 的总量与日数之比

3 结果与分析

3.1 贵州省极端降水变化趋势特征分析

为了了解贵州省多年极端降水的变化特征,基于省内 19 个代表气象站点 1961 – 2012 年日降水资料,分别计算了各站点 RX1day、RX5day、CWD、R20mm、R95 以及 SDII 逐年变化值,以各站点的平均值来代表贵州省极端降水的整体变化情况,并用变化倾向率和 kendall 法来衡量极端降水的变化趋势与程度,结果见图 2。

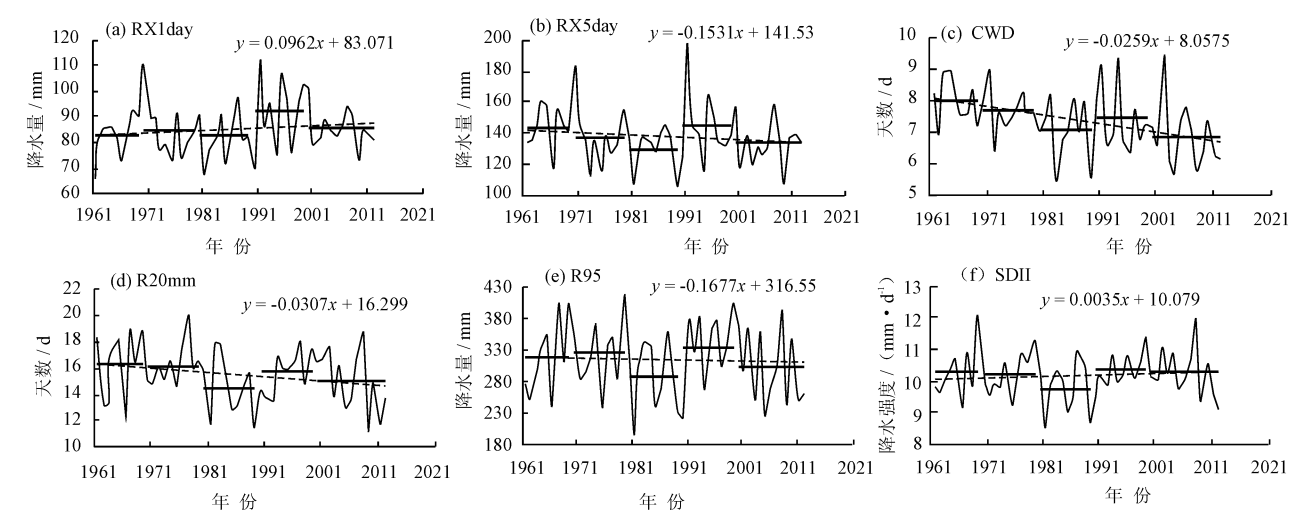
由图 2 可知,RX1day 序列总体表现为不显著的上升趋势,未通过 $\alpha = 0.01$ 水平显著性检验,变化倾向率为 0.96 mm/10a(图 2a);从年代际变化来看,20 世纪 90 年代前,RX1day 变化幅度不大,平均为 83.51 mm;从 80 年代末至 2012 年,RX1day 经历了先增加后减少的局部变化过程,90 年代连续出现极端强降水事件,平均为 92.09 mm,1991 年 RX1day 达到 113.24 mm,为时间序列的最大值;21 世纪初平均 RX1day 为 85.34 mm。RX5day 的变化倾向率为 -1.53 mm/10a(图 2b),整体上呈不显著的下降趋势,未通过 $\alpha = 0.01$ 水平显著性检验;从年代际变化特征来看,RX5day 总体上表现为先减少后增加再减少的变化趋势;20 世纪 80 年代平均 RX5day 最小,为 130.04 mm,其中 1989 年 RX5day 为 106.76 mm,是研究序列的最小值;90 年代平均 RX5day 最大,达 144.35 mm,其中 1991 年为 144.38 mm,为研究序列的最大值;进入 21 世纪后,平均 RX5day 有一定幅度的下降,较 20 世纪 90 年代减少 7.47%。CWD 在研究时域内以 0.26d/10a 的速率显著下降(图 2c),显著性通过了 99% 的置信水平($\alpha = 0.01$);总体上年代际变化呈阶梯状特征,20 世纪 90

年代较 80 年代相比,平均 CWD 有小幅度上升,进入 21 世纪以来平均 CWD 值最小,为 6.87d。R20mm 的变化倾向率为 -0.31 mm/10a(图 2d),未通过 $\alpha = 0.01$ 水平显著性检验,整体上呈不显著的下降趋势;20 世纪 60 至 70 年代 R20mm 变化不大,平均 R20mm 为 16.26 mm,80 年代至 2012 年,R20mm 经历了先增加后减少的变化过程。

强度是衡量极端降水的重要方面,其大小变化与灾害的发生有紧密的联系。R95 在整个研究时域内呈一定的减少趋势,变化倾向率约为 -1.68 mm/10a,但下降趋势不显著,未通过 $\alpha = 0.01$ 水平显著性检验(图 2e);年代际变化特征与 RX1day 相似,但各年代之间变化幅度较大,20 世纪 60、70 年代,R95 平均约为 320.70 mm;80 年代 R95 迅速减少,与 70 年代相比减少 36.63 mm,1981 年平均 R95 为 194.12 mm,是时间序列的最小值;90 年代较 80 年代相比,增加显著,涨幅为 16.47%;21 世纪初以来平均 R95 为 301.51 mm,较 90 年代减少 9.81%。SDII 整体上呈现先减少后增加的变化趋势,平均每 10a 增加 0.035 mm/d,但上升趋势不显著,未通过 $\alpha = 0.01$ 水平显著性检验(图 2f)。20 世纪 80 年代以前,SDII 几乎无变化,平均 SDII 值为 10.25 mm/d,70 年代末到 80 年代初出现了一次比较明显的下降过程,较 70 年代减少 4.48%,80 年代末到 90 年代初,SDII 又呈现快速增加的趋势,较 80 年代增加 5.94%,之后 SDII 变化较为稳定。

综上可以发现,贵州省 1961 – 2012 年极端降水除 RX1day、SDII 外,其余极端降水指数均呈现下降趋势。袁文德等^[16]研究近 50 年西南地区极端降水变化特征,发现贵州省极端降水量及日数,5 日最大降水量呈下降趋势,而降水强度和 1 日最大降水量

呈上升趋势,这与本文研究结果相一致。



注:折线为历年值,加粗直线为年代际平均值,虚线为线性趋势

图2 1961–2012年贵州省极端降水指数的时间变化趋势

3.2 贵州省极端降水突变性检验

采用M–K法和滑动T联合对贵州省极端降水进行突变分析,M–K法是国际上广泛使用的非参数分析方法,但在其检验结果中常会出现多个突变时间节点,通常会结合滑动T检验来精确判断突变时间和排除伪突变点。图3是贵州省1961–2012年极端降水指数突变检验过程,可以发现,RX1day、RX5day、R20mm和SDII发生了明显的突变现象,但突变时间并不一致。RX1day在两条统计曲线之间相交于1966、1973、1981以及1984年(图3a),采用滑动T精确判别,RX1day在1973年通过了 $\alpha = 0.05$ 的置信度检验,因此可以判断RX1day在1973年发生了突变。同理可以得到,RX5day在1972年发生了突变现象(图3b、图3h);1992年是R20mm在研究时域内的突变点(图3e、图3k);SDII的突变点为1981年(图3f、图3l)。

3.3 贵州省极端降水周期性分析

小波分析是一种窗口大小固定但形状可变的时频局部化分析方法,在时域和频域上同时具有良好的局部化功能,被誉为数学“显微镜”,随着小波理论的形成和发展,逐渐被许多水科学工作者重视并引入到了水文学科中。

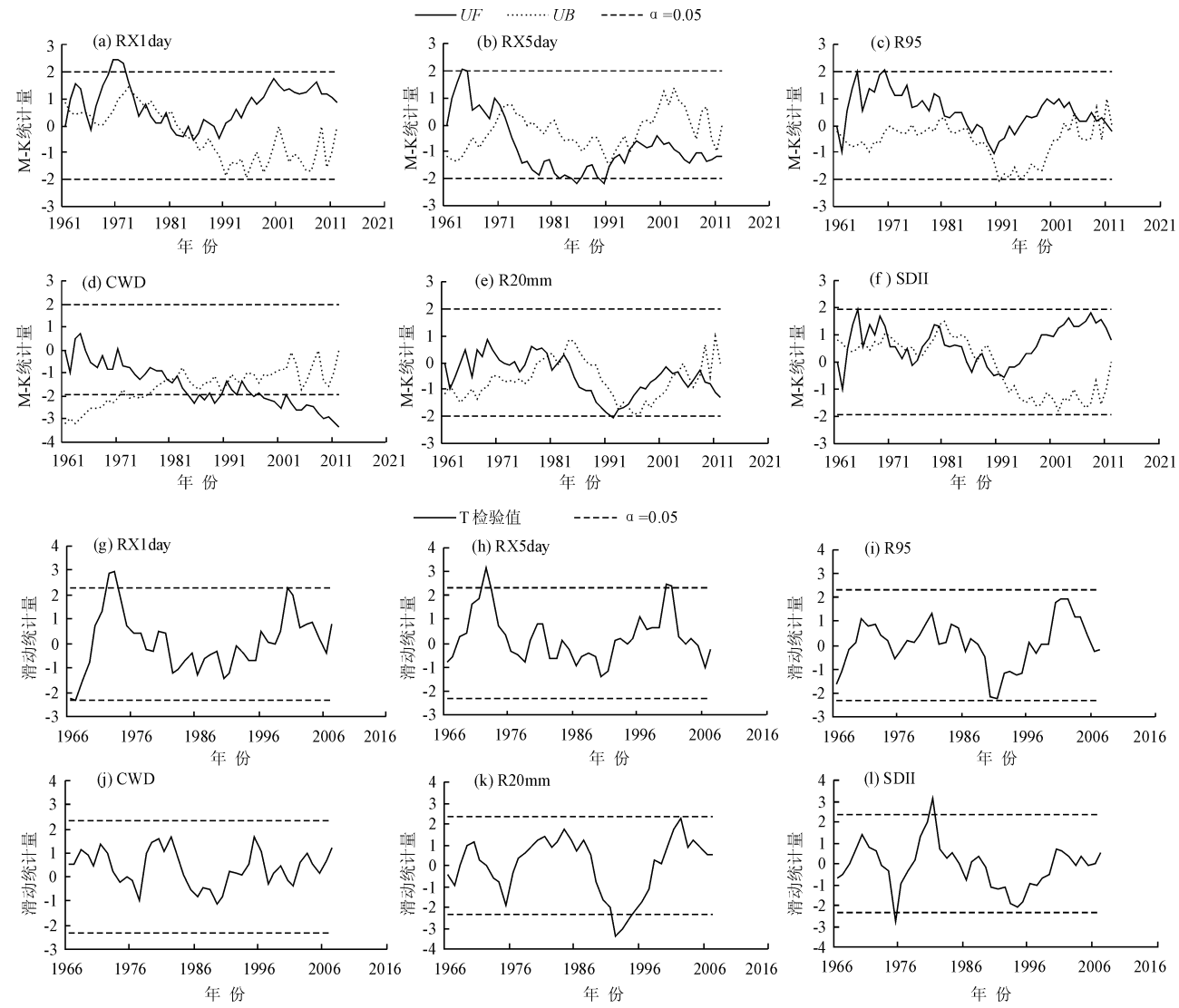
本研究对贵州省1960–2012年各极端降水指数时间序列进行消噪处理后,采用Morlet小波分析方法进行周期分析,绘制相应的小波方差图来判断主周期,其结果如图4所示。由图4可知:RX1day小波方差具有3个比较明显的峰值,分别为6、11以

及3a;其中6a时间尺度上具有能量最高,为第1周期,其次10a时间尺度为第2周期,第3周期为3a。同理可知,RX5day小波方差具有3个峰值,分别对应6、11以及21a,6a为第1主周期,11、21a分别为第2、3周期;R95的第1周期为22a,第2、3周期分别为6、11a;CWD小波方差有2个明显峰值,可以判定CWD第1周期为6,19a为第2周期;R20mm的第1周期为6a;SDII小波方差前3个明显的峰值为6、18以及14a,因此可以说明SDII时间序列的第1周期为6a,第2、3周期为18、13a。

综上所述可以看出,贵州省极端降水普遍存在6a的主周期、11~13a的次周期变化。贺晋云等^[8]对西南地区极端干旱变化特征进行分析得出,年极端干旱具有5、12a的周期变化,与本文所得结果基本一致,表明贵州省极端降水的周期变化与西南地区整体干旱周期变化保持一致;同时也可以发现,极端降水的周期变化与太阳黑子活动周期11a^[17]和ENSO事件2~7a发生周期^[18]相似,说明太阳黑子处于峰值或谷值年附近时以及在厄尔尼诺事件发生的高峰期间,贵州省均出现了极端降水事件,从而导致了重大自然灾害现象的发生。

3.4 贵州省极端降水空间分布特征分析

计算贵州省各站点1961–2012年各极端降水指数值,基于IDW插值方法将各站点极端降水指数值转化为2 km×2 km的栅格图,在Arcgis10.0运行环境中绘制各极端降水指数空间均值分布图,其结果如图5所示。



a ~ f 是 MK 突变检验;g ~ l 是滑动 T 检验

图 3 1961 – 2012 年贵州省极端降水指数突变检验过程

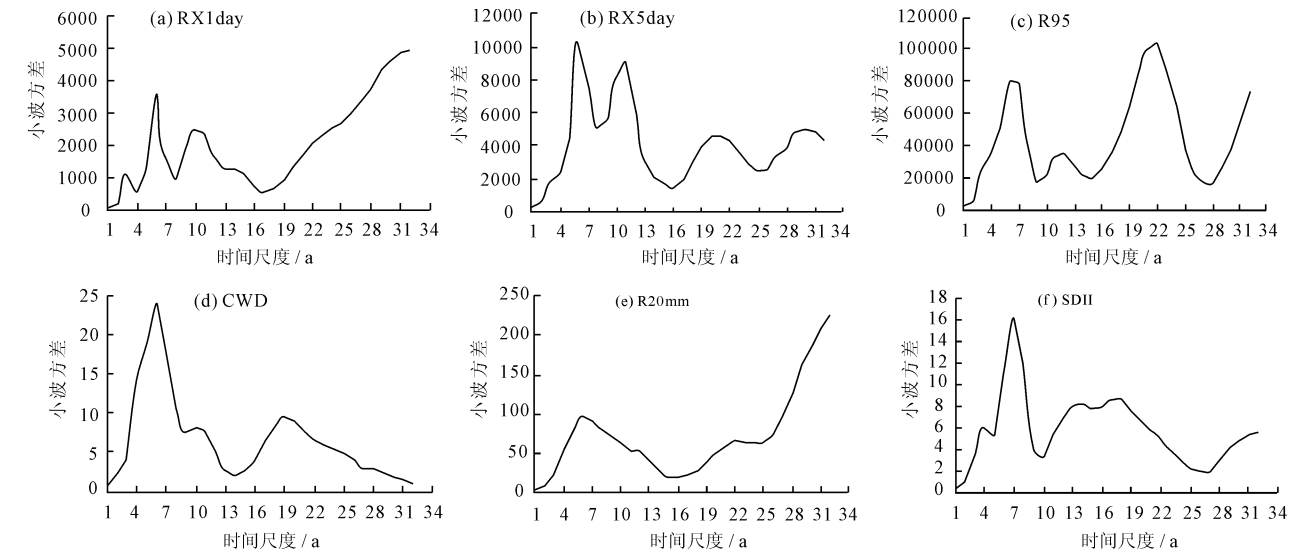


图 4 1961 – 2012 年贵州省极端降水指数小波变换方差图

从图5可以看出,RX1day空间分布具有明显的空间差异性,总体上呈现由西北向东南的递增趋势(图5a),RX1Dday的低值区位于黔西北的威宁、毕节一带,在75 mm以下,逐渐过渡到黔中的安顺和黔西南的兴义、望谟、罗甸一带的高值区,在95 mm以上。RX5day具有与RX1day相似的空间趋势分布特征(图5b),均值主要集中在120~150 mm之间,黔中的安顺、黔西南的盘县、兴义、望谟以及黔东北的铜仁一带,达到150 mm以上,而黔西北的高海拔地区为低值区,在120 mm以下。从图5c可以看出,R95值普遍高于RX5day,高值区与RX5day相似,可达到330 mm以上,而低值区较RX5day相比范围有所减小,主要集中在黔西北的威宁、毕节以及黔西一带,均值则在230 mm以下,表现出较大的区域差异。

由CWD空间分布图可知(图5d),CWD表现为由西南、西北向东部递减的特征,黔西北的习水一带以及黔西南的兴义、盘县一带均值较大,达8d以上,

而东部地区均值较小,普遍在7d以下。R20mm具有鲜明的区域变化规律,表现为由西北向东南呈阶梯状逐渐增多的趋势(图5e),黔西南、黔东南以及黔东北的铜仁一带多在17 d以上,而黔西北一带则在13 d以下。SDII的空间变化趋势与R20mm相似(图5f),低值区主要涉及到黔西北地区,普遍在9 mm/d以下,然后逐渐过渡到黔西南的望谟、罗甸一带的高值区,其值在11 mm/d以上。

综上所述可以看出,贵州省极端降水具有显著的空间差异,这与贵州省近50年来年总降水量的空间分布相吻合^[19]。高值区主要集中在黔西南和黔东南地区,尤其是RX5day、R95以及R20mm在黔西南和黔东南地区分布值较高,相比于其他地区,贵州省西南部和东南部更容易发生由持续极端强降水引发的洪涝、泥石流等自然灾害;而低值区分布在黔西北地区,尤其是CWD的高值区在全省范围内相对较小,说明贵州省发生干旱的风险逐渐加剧,应当引起相关部门的重视。

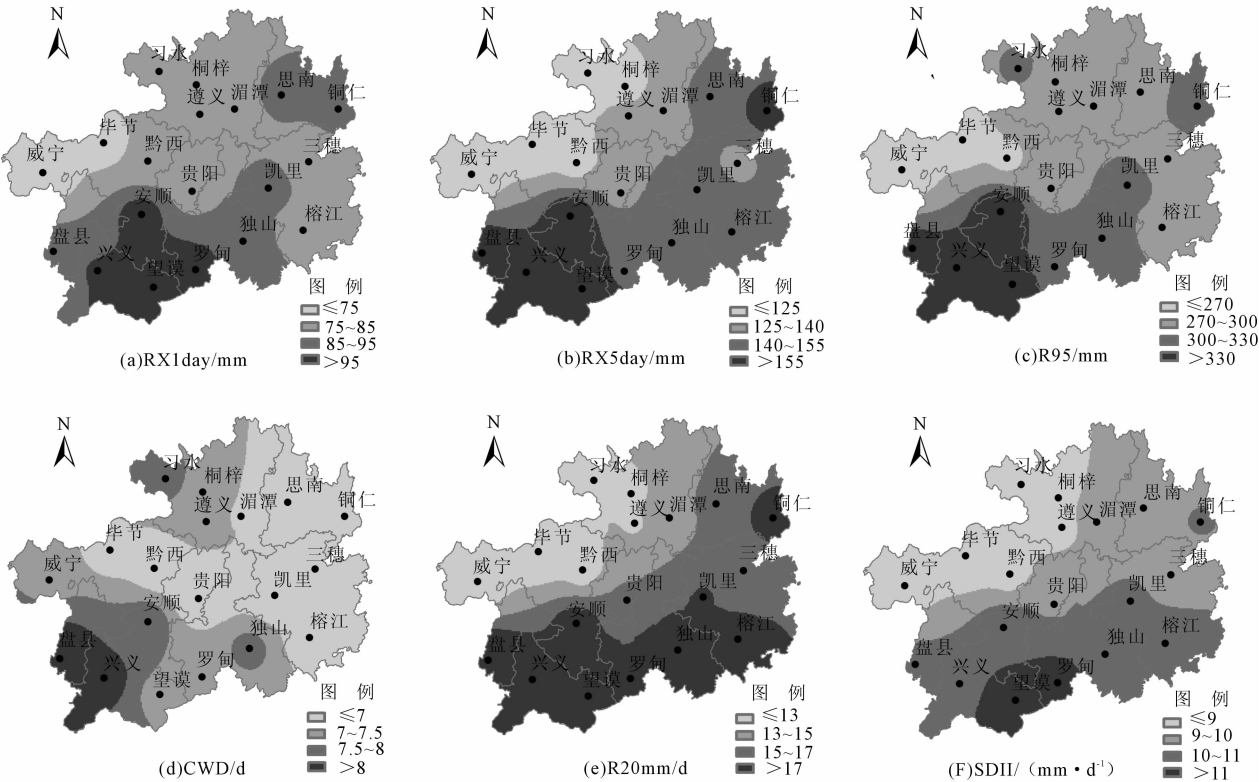


图5 1961-2012年贵州省极端降水指数空间分布特征

3.5 贵州省极端降水变化一致性分析

各极端降水指数与总降水量之间存在很好的相关性(表2),其结果均通过了99%的置信水平($\alpha = 0.01$)检验,呈现显著的正相关性,说明随着总降水量

的上升(下降),极端降水事件也相应增多(减少),其中年总降水量与R95、R20mm相关性最好,达到0.7以上。综上所述可以说明,本文所选取的极端降水指数能较好的反映贵州省降水的整体变化情况;同时也可以

分析得出,除 CWD 外,其余指数之间存在着很好的关联性。任正果等^[20]在对中国南方近 50 年来极端降

水事件的研究中发现,极端降水对年总降水量有较好的指示作用,与本文的研究结果一致。

表 2 1961 – 2012 年贵州省极端降水指数的相关性分析

	年总降水量	RX1 day	RX5 day	R95	SDII	CWD	R20mm
年总降水量	1						
RX1 day	0.436 **	1					
RX5 day	0.428 **	0.749 **	1				
R95	0.704 **	0.592 **	0.607 **	1			
SDII	0.588 **	0.395 **	0.373 **	0.831 **	1		
CWD	0.380 **	0.081	0.274 *	0.020	0.004	1	
R20mm	0.900 **	0.293 *	0.286 *	0.690 **	0.730 **	0.191	1

注: *、** 分别表示通过 0.05、0.01 水平显著性检验。

3.6 贵州省极端降水未来变化趋势分析

研究发现,根据 Hurst 指数可以判断时间序列中趋势成分在未来变化中的发展走向^[21]。表 3 是极端降水指数变化的 Hurst 值,可以看出,所有值均在 0.5 ~ 1 之间,说明未来的趋势将与现在的状况相吻合。RX1day 和 SDII 在过去的近 50 年中呈上升趋势,预示着未来趋势的变化发展方向仍将保持这种上升趋势;RX5day、R95、CWD 以及 R20mm 过去为下降趋势,说明将来总体趋势仍将持续下降。

表 3 1961 – 2012 年贵州省极端降水变化的 Hurst 值

RX1 day	RX5 day	R95	SDII	CWD	R20mm
0.74	0.67	0.63	0.70	0.60	0.67

4 结 语

本研究基于贵州省 19 个气象基准站点 1961 – 2012 年日值降水资料,选取了 RX1day、RX5day、R95、SDII、CWD 以及 R20mm 6 个极端降水指标,采用气候倾向率、M – K 突变检验、滑动 T 检验、小波分析、Hurst 指数、相关性分析以及 IDW 插值方法,对贵州省近 50 年来极端降水从时空层面进行了全面的分析和探讨,主要结果如下:

(1)从时间变化规律来看,RX1day、SDII 呈不显著的上升趋势,而 CWD 表现为显著的下降趋势,RX5day、R95 和 R20mm 具有不显著的下降趋势;贵州省极端降水指数具有 6a 的主周期和 10 ~ 12a 左右的次周期;RX1day、RX5day、SDII、R20mm 分别在 1973、1972、1981、1992 年发生突变。

(2)从空间分布特征来看,贵州省西南、东南部地区为极端降水的高值区,而西北部为低值区,极端

降水总体呈现由东南向西北逐渐递减的梯度变化特征,这与贵州省年降水量空间分布相吻合。

(3)极端降水指数与年总降水量之间有显著的正相关性,说明贵州省的极端降水能较好的反映年总降水量的变化规律。此外, RX1day、RX5day、R95、SDII 以及 R20mm 之间有较好的关联性。

(4)从极端降水今后的发展方向来看,RX1day、SDII 在未来将继续保持上升趋势,RX5day、R95、CWD 和 R20mm 在未来将呈现下降趋势。需要引起注意的是,CWD 的持续减少趋势在一定程度上反映贵州省干旱风险加剧的态势,对农业生产影响较大;同时在贵州省年总降水量减少的大背景下,短历时强降水的增多,不利于水资源汇集和利用,并在一定程度上增加了城市内涝、山区洪水以及泥石流、滑坡等次生灾害发生的风险。

参考文献:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Managing the risk of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2012.

[2] Min Seung – Ki, Zhang Xuebin, Zwiers F W, et al. Human contribution to more – intense precipitation extremes [J]. Nature, 2011,470(7334):378 – 381.

[3] 陈 峪,陈鲜艳,任国玉. 中国主要河流域极端降水变化特征[J]. 气候变化研究进展,2010,6(4):265 – 269.

[4] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010,26(7):50 – 59.

[5] 王志福,钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征 [J]. 水科学进展,2009,20(1):1 – 9.

参考文献:

- [1] 延军平,等. 秦岭南北环境响应程度比较[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [2] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62–70.
- [3] 傅丽昕, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河源流区近 50a 径流量与气候变化关系研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 204–209.
- [4] 王战平, 沈冰, 吕继强. 气候变化及人类活动对澜沧源流区径流的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 97–99.
- [5] IPCC. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [6] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2001.
- [7] Xu Jiongxin. The water fluxes of the Yellow River to the Sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities [J]. Environmental Management, 2005, 35(5): 620–631.
- [8] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区 1956–2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 29–33.
- [9] 王国庆, 张建业, 何瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853–858.
- [10] Leavesley G H. Modeling the effects of climate change on water resources: a review [J]. Climatic Change, 1994, 28(1–2): 159–177.
- [11] Fu Guobin, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow [J]. Water Resources Research, 2007, 43(11): W11419.
- [12] 张晓龙, 黄领梅, 沈冰. 河北省降水时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 140–143 + 148.
- [13] 牛玉国. 黄河流域水资源演变驱动力识别及响应模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [14] 白红英, 侯钦磊, 马新萍, 等. 50 年来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1229–1235.
- [15] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生, 等. 降水变化和人类活动对延河流域径流影响的定量评估[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(5): 357–362.
- ~~~~~
- (上接第 56 页)
- [6] 杨素英, 孙凤华, 马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. 地理科学, 2008, 28(2): 224–228.
- [7] 杜军, 路红亚, 建军. 1961–2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 990–1002.
- [8] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1179–1190.
- [9] 贵州省人民政府防汛抗旱指挥部办公室, 贵州省水利科学研究院. 贵州省 2009–2010 年特大干旱灾害及抗旱工作评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [10] Easterling D R, Evans J L, Grossman P Yaw, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417–426.
- [11] Peterson T C, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs (1998–2001) (2001-03-05) [EB/OL]. http://eprints.soton.ac.uk/30144/1/048_wgced.pdf.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [13] 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 295–300 + 306.
- [14] 雷江群, 黄强, 畅建霞, 等. 渭河流域气候要素演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 1–5.
- [15] 谢平, 雷红富, 陈广才, 等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文, 2008, 28(5): 6–10.
- [16] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962–2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 766–772.
- [17] 赵新华, 冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性[J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1284–1292.
- [18] 吴梦初, 延军平. 太阳活动与 ENSO 事件对云南省旱涝灾害的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 280–284.
- [19] 徐建新, 陈学凯, 黄鑫, 等. 贵州省近 50 年降水量时空分布及变化特征[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 10–14.
- [20] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961–2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 640–649.
- [21] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32–39.