

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0095

杨家祯, 杨云川, 杨淇淇, 等. 1951—2015年广西极端降雨时空演变特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 84-93. YANG J Z, YANG Y C, YANG Q Q, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in Guangxi from 1951 to 2015[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 84-93. (in Chinese)

1951—2015年广西极端降雨时空演变特征

杨家祯¹, 杨云川^{1,2,3}, 杨淇淇¹, 韦钧培¹, 陀静超¹, 韦明宝¹, 韩奥博¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要:基于两种高时空分辨率的1951—2015年日降雨序列数据,选择11个极端降雨指数,采用Mann-Kendall(M-K)检验法和极点对称模态分解法,分析了广西极端降雨事件的多尺度非线性时空演变特征。结果表明:1951—2015年广西11个极端降雨指数除连续湿润日CWD、中雨日数 R_{10} 总体呈现下降趋势外,其余9个指数均呈现较显著的增强趋势;广西连续干日指数CDD高值区位于桂东和桂西,其余指数均呈现出从桂东北及南部向桂西南、桂西北递减的空间分布特征;各极端降雨指数显示,广西极端降雨演变多在2008—2010年发生显著的突变;广西极端降雨演变存在2.85~3.34 a和5.34~9.19 a的年际准周期,存在10.09~17.11 a和22.35~35.62 a的年代际准周期,其多重周期的波动振荡主要以极端降雨的年际变化贡献为主。

关键词:广西;极端降雨;时空演变;趋势与突变;多重周期

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in Guangxi from 1951 to 2015

YANG Jiazhen¹, YANG Yunchuan^{1,2,3}, YANG Qiqi¹, WEI Junpei¹, TUO Jingchao¹, WEI Mingbao¹, HAN Aobo¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on two kinds of high spatial and temporal resolution daily rainfall time series data from 1951 to 2015, 11 extreme rainfall indices are selected to comprehensively characterize the multi-scale non-linear spatial and temporal evolution of extreme rainfall events in Guangxi using Mann-Kendall (M-K) test and pole symmetric mode decomposition. The results show that: except for continuous wet days (CWD) and moderate rainy days (R_{10}), the other 9 extreme rainfall indices showed a downward trend, and the rest of the other 9 indices showed a significant increasing trend from 1951 to 2015 in Guangxi, the high-value area of the CDD (continuous dry-day) index in Guangxi is located in western and eastern Guangxi, while the other indexes show the decreasing spatial distribution characteristics from northeast and south to southwest and northwest Guangxi, various extreme rainfall indices show that the evolution of extreme rainfall in Guangxi occurs mainly in the vicinity of 2008 to 2010, there are 2.85-3.34 a and 5.34-9.19 a interdecadal quasi-cycles in the evolution of extreme rainfall in Guangxi, and 10.09-17.11 a and 22.35-35.62 a interdecadal quasi-cycles, respectively, and the fluctuation of multiple cycles is mainly due to the contribution of

收稿日期:2019-04-18 修回日期:2019-12-08 网络出版时间:2019-12-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191219.1455.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51609041;41901132);广西教育厅科研项目(2018KY0027);广西大学“大学生创新创业训练计划”国家级项目(201810593030)

作者简介:杨家祯(1998—),男,广西防城港人,主要从事极端降雨研究。E-mail: yang691218@163.com

通信作者:杨云川(1982—),男,宁夏中宁人,副教授,硕士生导师,博士(后),主要从事生态水文学研究。E-mail: yyc_sciences@163.com

the interannual variation of extreme rainfall.

Key words: Guangxi; extreme rainfall; spatial and temporal evolution; trend and catastrophe; multiple cycle

伴随着全球气候变暖^[1-2],极端降雨事件及其所导致的洪涝、滑坡、泥石流等灾害的频次、强度总体呈增加趋势,对区域经济社会发展、人民生命财产和自然生态系统等的安全造成了极大威胁^[3]。中国是极端降雨事件频繁发生的典型国家,近年来开展了大量相关研究。在全国尺度上,代表性成果有:武文博等^[4]基于602个气象站均一化的日降雨数据,采用11个极端降雨指数,分析发现中国极端降雨长期变化趋势具有明显的年际和年代际变化特征,且总体呈现显著的增加趋势;顾西辉等^[5-6]基于中国728个气象站日降雨数据,分析发现全国极端降雨在不同地区之间特征差异显著,并随着量级的增加而呈现不均匀性、离散性增强现象,年内尺度上极端降雨发生率显著依赖于气候指标的变化;尹占娥等^[7]基于全国637个气象站点日降雨数据,采用Pearson-III分布函数模拟不同重现期情景下极端降雨量和频次分布,进而结合人口和GDP指标分析了不同重现期的中国极端降雨风险及其空间分布特征。在省域或流域尺度上,代表性成果有:宋晓猛等^[8]分析了北京地区,发现该区域极端降雨发生频次、量值和贡献率均呈下降趋势,空间分布受地形和城市化发展影响而呈现城区与郊区的显著异质性;赵国永等^[9]对河南省的研究表明,其极端降雨指数存在显著的区域差异,且与纬度的相关性高于经度和海拔因素;王昊等^[10]分析了西南7省的极端降雨,发现各省及内部区域的特征差异显著,并与海拔有显著的关系;赵安周等^[11]对黄土高原的分析表明,该区域各极端降雨指数在时间变化、空间分布、贡献率等方面均存在较大差异,且影响因素众多;潘欣等^[12]对长江流域的分析表明,其极端降雨总体呈上升趋势且空间异质性显著,流域下游变化比上游更为剧烈;郑江禹等^[13]对珠江流域的分析发现,其极端降雨发生频率在年内分布不均,而雨季及年际间分布较为均匀,温度和ENSO对该流域的极端降雨过程影响显著。

上述研究都采用气象站点日降雨数据开展具体分析,而对省域、乃至市县域或中小流域空间尺度上(尤其在山区),因气象站点数量相对较少且空间分布不均匀性显著,还有不少站点缺乏长序列

观测资料,仅基于气象站数据开展空间分异性日益增强的区域极端降雨时空演变及其空间非均匀性特征^[14]则凸显不足。为此,借助卫星遥感降雨产品^[15]、多源融合的再分析降雨资料^[16]等具有的大尺度均匀分布且空间分辨率较高的优势(尤其对无资料或地形复杂地区是重要补充),已成为区域尺度精细化极端降雨时空演变及其分异特征研究的重要途径。

广西作为典型的亚热带季风湿润区^[17],年降雨量丰沛但时空分布不均^[18],岩溶发育的石山丘陵、洼地广泛分布,土层浅薄且保水能力差,产汇流过程复杂^[19],多年来区域极端降雨及其洪涝灾害频繁,损失巨大^[20-21]。陆虹等^[22]研究表明,20世纪90年代中期以来,华南地区年极端强降雨频次呈增加趋势;李建鸿等^[23]、孙桂凯等^[24]对广西极端连续降雨的分析亦表明总体呈增加趋势,并存在多重周期的波动震荡特征。但这些研究亦均采用气象站点日降雨数据,对区域极端降雨的空间异质性特征表达略显不足;另一方面,极端降雨具有显著区域差异,其他地区的相关研究成果毕竟不能直接指导广西地区的极端洪涝灾害预防和应对。因此,有必要对广西地区开展多指标、多方法的极端降雨趋势、突变、时空异质性及其内在演变规律研究,进而为揭示该区域极端降雨对洪涝灾害形成及其风险、农业生产等的影响规律提供科学支撑。籍此,基于高时空分辨率的TRMM(tropical rainfall measuring mission)卫星遥感降雨^[15]和数据融合再分析降雨APHRODITE(asian precipitation-highly resolved observational data integration towards evaluation of water resources)资料^[16],采用11个极端降雨指数,开展广西地区极端降雨的精细化时空演变综合特征研究,以期为广西地区极端降雨事件的预报预警及其多方面的影响研究奠定科学基础。

1 数据与方法

1.1 研究数据

相关研究^[20,25]表明,采用的TRMM和APHRODITE日降雨资料在广西地区具有较好的精度和

应用价值。其中:TRMM 数据具体为 3B42 V7 的 3 h 降雨序列^[26],经过累加得到日降雨,其空间范围为 50°N~50°S,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时段为 1998—2015 年;APHRODITE 数据具体为 APHRO_MAV1003R1 逐日降雨资料^[20],其空间范围为 15°S~55°N、60°~150°E,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时段为 1951—2007 年。本研究综合上述两组降雨数据集,提取广西及其周边 0.5°缓冲区范围共 546 个格点逐日降雨数据(图 1),数据序列长度为 1951—2015 年。利用格点降雨数据,计算广西 65 年来 11 个极端降雨指数,进而分析广西极端降雨的时空分布、突变及多重周期等综合特征。

1.2 研究方法

1.2.1 极端降雨指数

根据气候变化监测、检测和指数专家组(expert team on climate change detection and indices,ETC-

CDMI)对极端气候事件的定义^[20],极端降雨特征常按表 1 的 11 个极端降雨指数来描述^[21],利用极端气候指数计算软件 RCLimDex^[22]计算广西 546 个格点日降雨序列的极端降雨指数。

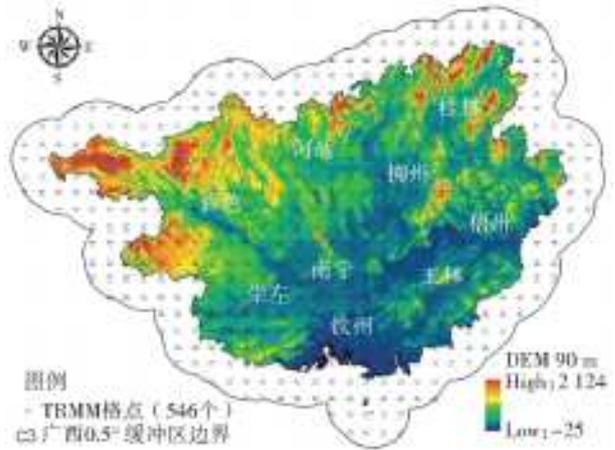


图 1 研究区域降雨格点及范围分布

Fig. 1 Location map rainfall distribution points and elevation ranges in the study area

表 1 极端降雨指数定义

Tab. 1 Definitions of extreme rainfall indices

指数类型	代码名称	指数名称	指数定义
持续性指数	CDD	连续干旱日数/d	日降雨量<1 mm 的最大持续日数
	CWD	连续湿润日数/d	日降雨量>1 mm 的最大持续日数
	PRCPTOT	年总降雨量/mm	日降雨量>1 mm 的年累计降雨量
绝对指数	R ₁₀	中雨日数/d	日降雨量≥10 mm 的日数
	R ₂₀	大雨日数/d	日降雨量≥20 mm 的日数
	R ₅₀	暴雨日数/d	日降雨量≥50 mm 的日数
	R _{95p}	强降雨量/mm	日降雨量>95%分位值的年累计降雨量
相对指数	R _{99p}	特强降雨量/mm	日降雨量>99%分位值的年累计降雨量
	RX _{1day}	1 日最大降雨量/mm	每月最大 1 日降雨量
强度指数	RX _{5day}	5 日最大降雨量/mm	每月连续 5 日最大降雨量
	SDII	降雨强度/(mm·d ⁻¹)	年降雨总量除以降雨日数

1.2.2 M-K 趋势与突变检测方法

采用 Mann-Kendall(M-K)法^[23-25]对日降雨序列进行趋势分析。M-K 法具有计算简单、对样本分布无特定要求等特点,近年来在气象、水文等领域得到了广泛的应用。目前 M-K 检验法是国际气候突变的一种常用方法,它不仅可用于检测序列的变化趋势,也可以用于检测气候的突变。趋势分析见式(1)^[26]。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & X_j - X_i > 0 \\ 0 & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases}$$

式中: X_i 和 X_j 分别为时间序列第 i 和 j 个值; N 为时间序列的长度。

M-K 检测统计值^[26]

$$Z = \begin{cases} (S-1) \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1) \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:统计值 Z 大于 0,表示时间序列呈上升趋势;统计值 Z 小于 0,表示时间序列呈下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.96、2.56 时分别表示通过了置信度为 95%、99%的趋势检验。

M-K 检验进一步用于检验序列突变时,构造一秩序列

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (3)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (j=1,2,3,\dots,i) \quad (4)$$

秩序列 s_k 是第 i 个时刻数值大于 j 个时刻时, 数值个数的累加。在时间序列为随机的假设下, 定义统计量

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中: $E(s_k)$ 为 s_k 均值; $\text{Var}(s_k)$ 为 s_k 方差。

UF_k 为标准正态分布, 它是按时间序列 X 的顺序 (x_1, x_2, \dots, x_n) 计算出的统计量序列, 给出一定显著性水平 α , 通过查询正态分布表, 出现 $|UF_i| > U_\alpha$ 的情况则表明序列存在明显的变化趋势, 再按时间序列 X 的逆序 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 重复上述过程, 并且令

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (6)$$

将统计序列 UF_k 与 UB_k 绘制在同一张图上, 通过分析 UF_k 和 UB_k 不但可以进一步分析降雨序列的趋势变化, 还可以确定开始突变的时间。当 UF_k 值大于 0 时, 表明序列呈上升趋势; 当 UF_k 值小于 0 表明序列呈下降趋势。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 这两条曲线在临界直线内有交点, 则可判断交点对应的时刻为开始突变的时刻。

1.2.3 多重周期分析方法

采用极点对称模态分解 (extreme-point symmetric mode decomposition, ESMD) 方法进行降雨序列的多重周期识别。ESMD 方法是 Wang 等^[27] 提出的基于 Hilbert-Huang 变换的经验模态分解新方法, 是经验模态分解方法 (empirical mode decomposition, EMD) 的改进算法, 可解决 EEMD (ensemble empirical mode decomposition) 分解中的“模态叠加”问题。其主要计算步骤如下。

(1) 找出序列 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 的极值点 (含极大值、极小值), 依次标记为 $q_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

(2) 用线段将相邻的极值点连接起来, 且线段中点记为 $F_j (j=1, 2, 3, \dots, n-1)$, 对于 F_0 和 F_n 采用线性插值延长。

(3) 通过样条插值对 F_j 序列构造出两条插值曲线并计算均值曲线 L 。

(4) 对 $x-L$ 序列重复上述步骤, 直到 L 小于容许误差或设置的最大筛选次数, 即得到第一个分量 IMF_1 (intrinsic mode function, IMF)。

(5) 对 $x-IMF_1$ 重复上述步骤, 依次得到各分量及模态余量 R 。

(6) 基于 ESMD 分解得到的多个分量, 通过 Hilbert-Huang 变换可求得每个分量的中心频率,

即得每个分量的多重周期^[27]。

2 广西极端降雨时空特征分析

2.1 极端降雨的时空变化特征

2.1.1 极端降雨指数时间变化趋势

1951—2015 年广西极端降雨指数的年际变化趋势见图 2。从时间序列上看, 持续性指标 CDD 在 1951—2005 年间存在长期波动的现象, 上升趋势不明显, 2005 年后有较显著的递增, 65 年内的倾向率为 0.270 2 d/a, 并且通过了 0.01 显著性水平检验。PRCPTOT 指标于 1980—1990、1994—2005 年两个时间段内存在较显著的下降趋势, 但总体倾向率为 2.173 8 mm/a, 且未通过 0.05 显著性水平检验。CWD 则在 1980 年左右存在极大值, 并于 2005 年后存在较大的下降趋势, 其倾向率为 -0.052 5 d/a, 未通过 0.05 显著性水平检验。

绝对指标 R_{10} 以每 10 a - 0.006 d 的速率下降, 未通过 0.05 显著性水平检验, R_{20} 、 R_{50} 分别以每 10 a 0.976、0.593 d 的速率增加, 且都通过了 0.05 显著性水平检验。从时间序列上看, 65 年内, R_{10} 出现了两个极小值点, 分别对应于 1963 年和 1989 年。广西地区大雨日数 (R_{20}) 20 世纪 50 年代至 70 年代表现缓慢的上升趋势, 随后至 20 世纪 90 年代趋于减少, 2006 年后表现出显著的上升趋势。在过去的 65 年内, R_{50} 在 1951 年至 2005 年存在长期平稳波动的现象, 2005 年后呈现显著的上升趋势。

相对指标 R_{95p} 、 R_{99p} 分别以 6.116 5、5.783 5 mm/a 的速率增加, 都通过了 0.05 显著性水平检验; 强度指标 RX_{1d} 、 RX_{5d} 、SDII 分别以每 10 年 0.187 mm、0.195 mm、0.894 mm/d 的速率增加, 且都通过了 0.05 显著性水平检验。

通过分析可以发现: 11 个极端降雨指数除连续湿润日 (CWD)、中雨日数 (R_{10}) 总体呈现下降趋势外, 其余 9 个指数均呈现出上升趋势; 但这 11 个指数均在 2008 年附近出现了突然增加 (减少) 的现象, 说明 2008 年附近可能存在突变点。

2.1.2 极端降雨指数空间分布特征

根据广西 546 个格点日降雨数据, 计算出 11 个极端降雨指数, 借助 GIS 软件技术, 利用反距离权重插值法, 绘制出 11 个极端降雨指数的空间分布见图 3。从图 3 可以看出: 连续干日指数 CDD 表现为西部以及东南部地区的数值较大, 东北部较小的分布特征, 这与广西的实际地理位置相吻合^[19]。连续湿日指数 CWD 较大值则集中分布在东部及沿海地

区,并形成以百色,河池,桂林北部等部分地区为中心的低值区。其余极端指数 PRCPTOT、 R_{10} 、 R_{20} 、 R_{50} 、 R_{95p} 、 R_{99p} 、 RX_{1d} 、 RX_{5d} 、SDII 表现出相似的空间分布特征,主要有 2 个高值区和 1 个低值区。其中:高值区分布在北部湾一带,包括防城港、钦州、北海大部分地区;次高值区位于桂东北一带,包括桂林、蒙山大部分地区;低值区位于桂西北,包括百色、平

果等大部分地区。主要表现为以桂东北以及南部向桂西南、桂西北减少的空间趋势。对比图 3 中各极端指数发现,桂东北一带防城港、钦州、北海的年总降雨量大,上述区域的降雨强度,中雨、大雨、暴雨日数,1 日、5 日最大降雨量也同样偏大,这些指数与降雨量阈值分布基本一致,说明这些指数能很好反映广西极端降雨的空间分布特征。

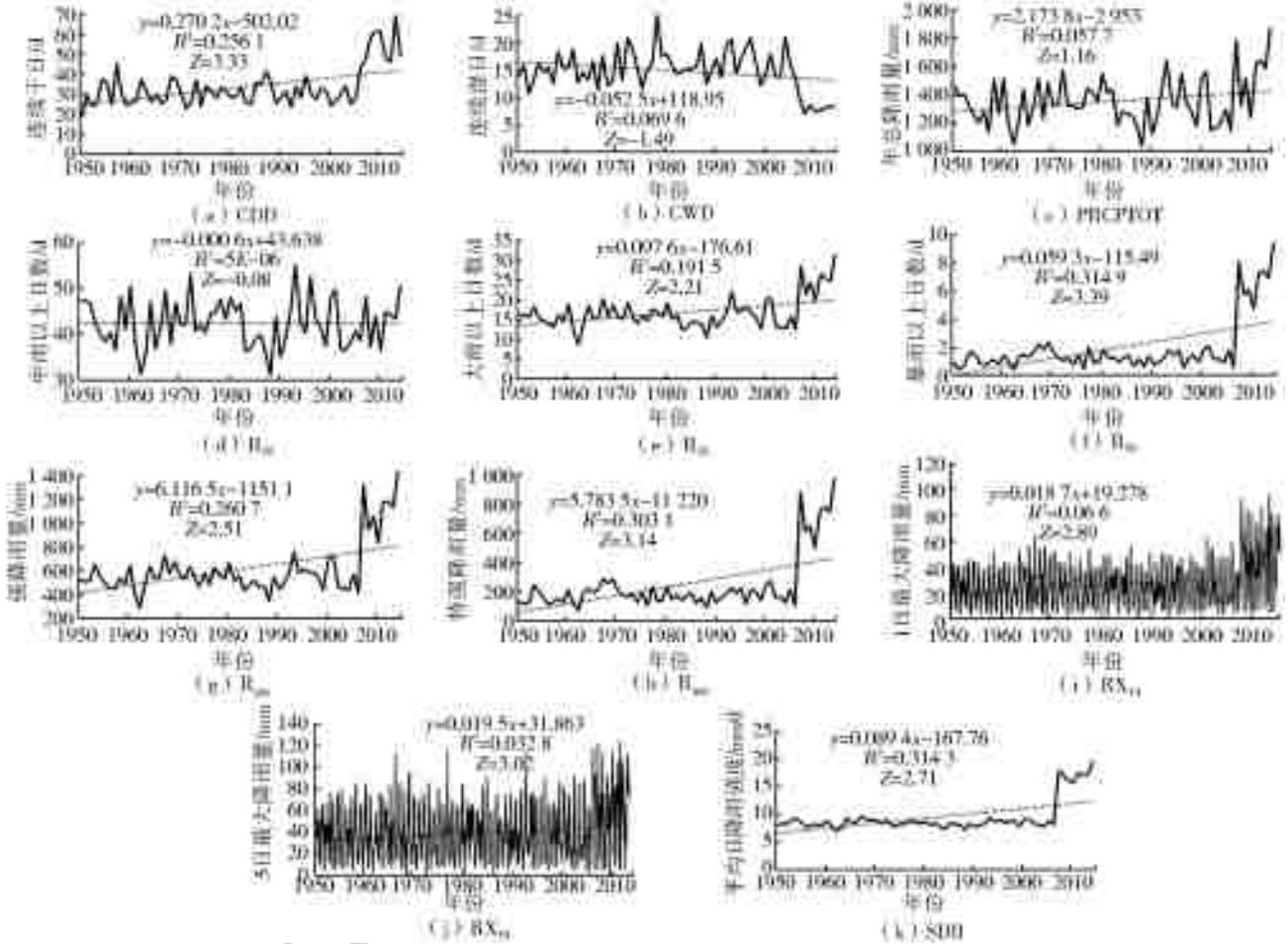


图 2 1951—2015 年广西极端降雨年际变化

Fig.2 Inter-annual variation of rainfall extremes over Guangxi from 1951 to 2015

2.2 极端降雨强度突变特征分析

由 M-K 突变检测对广西地区 65 年内 11 个极端降雨指数时间序列进行突变检测,绘制出顺序列的统计变化曲线 UF 和逆序列的统计变化曲线 UB,并给出显著性水平 $\alpha=0.05$ 时的临界值 $U_{0.05}=\pm 1.96$,见图 4。

从图 4(a)至(c)中可以看出:持续性指标 CDD 在 2010 年以前呈不明显上升趋势,此时段内波动较剧烈,随后呈显著性上升趋势,甚至超过显著性水平 0.01 的值($U_{0.01}=2.56$)。UF 年降雨顺序统计曲线和 UB 逆序统计曲线交点在 2008 年,且交点处于 0.05 显著性水平内,说明交点通过显著性检验,即

CDD 开始突变的时间为 2008 年,突变后由偏少期跃变到偏多期。连续湿日数(CWD)从 1953—2010 年呈上升趋势,其中,2007—2008 年的统计值在显著水平以外,根据 UF 和 UB 的交点位置(2008 年),可判断 CWD 开始突变时间为 2008 年,此后从偏多期跃变到偏少期。年总降雨量(PRCPTOT)从 1951—1973 年呈下降趋势,其中,1956—1958 年的统计值在显著水平以外,下降趋势显著,1974—1987 年呈不明显上升趋势,2012 年以后呈不明显上升趋势。由于 UF 曲线超出了显著水平临界线,且在显著水平临界线内有交点,故认为年总降雨量的突变时间为 2014 年,此后由偏少期跃变到偏多期。

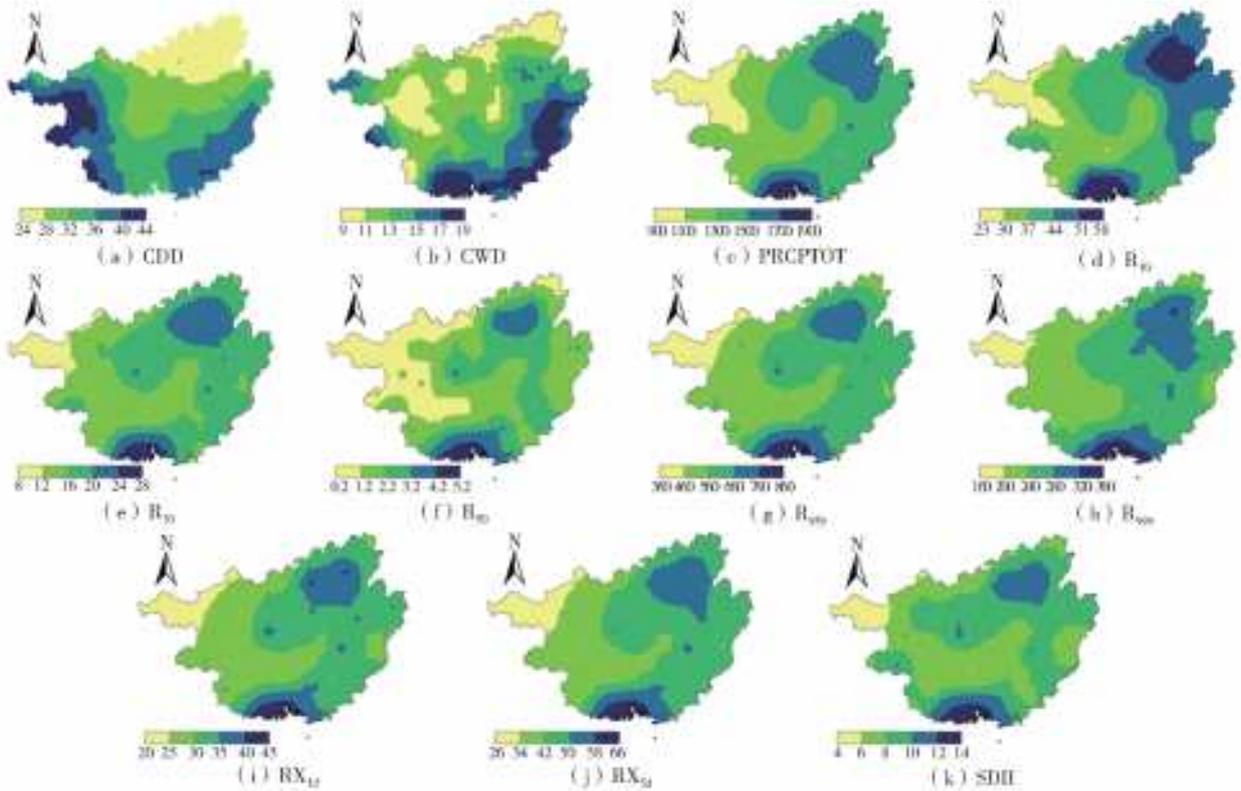


图3 1951—2015年广西极端降雨指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of the extreme precipitation indices over Guangxi from 1951 to 2015

从图4(d)至(f)可以看出:绝对指标 R_{1d} 在 1951—1978 年呈下降趋势,1954—1959 年统计值超出显著水平线,此时段的下降趋势较为显著,1979—1985 年呈不明显上升趋势,1985 年后基本呈不显著的下降趋势,1980 年为序列的突变点,由偏少期跃变到偏多期。大雨日数(R_{2d})1954—1970 年呈下降趋势,1971—1983 年以及 1998—2003 年呈不明显上升趋势,2008 年以后呈上升趋势且 2015 年后呈显著上升趋势。暴雨日数(R_{5d})从 1953 年后呈上升趋势,且处于波动状态。其中,1967—1975 年以及 2010 年以后呈显著性上升趋势,2009 年为暴雨日数的突变点,突变后的上升趋势更为显著。

从图4(g)至(h)中可以看出:相对指标强降雨量(R_{95p})1956—1967、1986—1994 年呈下降趋势,但不显著,1968—1985、1995—2014 年呈不显著上升趋势、2015 年后呈显著上升趋势,突变点在 2010 年。1951—1955 年特强降雨量(R_{99p})呈下降趋势,1965 年后呈上升趋势,其中,1969—1973 年和 2011 年以后的增长较显著,突变点为 2010 年。

从图4(i)至(k)可以看出:强度指标 SDII 在 1951—1958、1968—1983、1998—2012 年呈上升趋势,但不显著,2013 以后上升趋势显著,广西 65 年降雨强度的突变发生在 2010 年,突变后降雨强度趋

于显著上升趋势。1 日最大降雨量(RX_{1d})从 1953 年后基本呈上升趋势,其中,1968—1975 年以及 2012 年以后的统计值均在显著水平界线外,说明此时段的上升趋势显著,UF 曲线和 UB 曲线有 3 个交点,分别为 1968、1972、2008 年。但 1972 年的交点处于 0.05 显著性水平外,说明此交点不是突变点,其余 2 个交点均处于 0.05 显著性水平内,为突变点。5 日最大降雨量(RX_{5d})1954—1988、1995—2011 年呈不明显上升趋势,2012 年后上升趋势显著,2006 年左右开始突变,突变后上升趋势趋于显著。

综上,各指数在突变前的 UF 曲线绝大部分在临界线内,说明这些指数的增加(减小)趋势不显著,这与前面极端降雨指数时间变化趋势的分析基本一致。由 M-K 突变检测得出的 11 个极端降雨指数的突变时间多发生在 2008—2010 年,说明 21 世纪后极端降雨事件的频次和强度将可能持续增大。

2.3 极端降雨的多重周期特征

利用 ESMD 方法对 1951—2015 年广西极端降雨时间序列进行周期分析,选取 CWD、 R_{95p} 为例进行周期分析(图 5),结果表明:经 ESMD 分解后的 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 的振幅明显大于 IMF_4 (各分量贡献率见表 2),说明广西地区的降雨变化的时间序列主要由 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 组成。

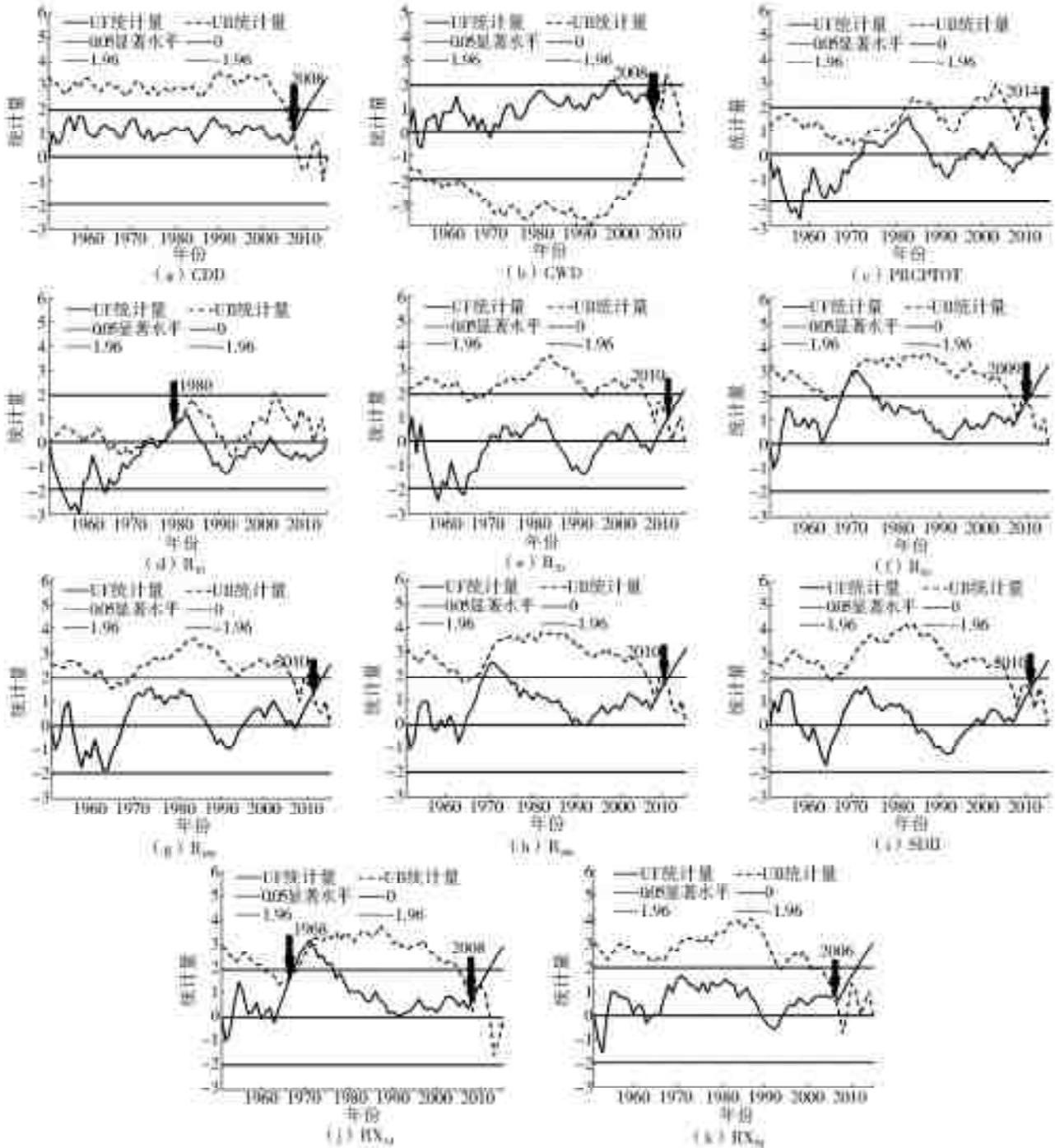


图 4 广西 1951—2015 年极端降雨指数 M-K 检验

Fig. 4 M-K test of extreme rainfall indices over Guangxi from 1951 to 2015

从图 5(a)可以看出:CWD 的 IMF_1 分量表示一个准 3~4 a 的振荡周期,振幅能量较大,对原序列的贡献率较大,达到了 35.36%,且 65 年内大致经历了 19.5 个周期; IMF_2 表示的分量贡献率达到 21.05%,自 1951 年以来大致经历了 9.8 个周期,在 1980 年左右出现最大值; IMF_3 分量贡献率占 9.16%,2006 年左右的变幅明显大于其余时期,65 年以来大致经历了 4.4 个周期; IMF_4 分量贡献率达 0.54%,在时间尺度上,极端指数的变幅趋于平缓,无较大波动,自 1951 年以来大致经历

了 2.9 个周期;趋势项分量的方差贡献率高达 33.89%,表征了广西连续湿润日数在 1951—2015 年间整体呈现出非线性下降趋势,尤其是 21 世纪后下降较为显著。

结合表 2 和图 5(b)可以看出; R_{95p} 在年际尺度上,广西强降雨量以 2.91 a(IMF_1)和 7.41 a(IMF_2)周期振荡为主;在年代际尺度上,则以 14.62 a(IMF_3)和 35.62 a(IMF_4)周期振荡为主。结合表 2 可看出: R_{95p} 的 IMF_1 分量表示的 2.91 a 方差贡献率为 16.63%,在 20 世纪 50 年代至 70 年代以及进

入 21 世纪后振荡剧烈;IMF₂ 表示的 7.41 a 方差贡献率为 14.66%,在 21 世纪后振荡剧烈;IMF₃ 表示的 14.62 a 方差贡献率为 13.16%,在 20 世纪 90 年代到 21 世纪间振荡剧烈;IMF₄ 表示的 35.62 a 方

差贡献率为 18.16%,在 2000 年附近出现了极小值点。趋势项分量的方差贡献率高达 37.40%,表明了 65 年以来广西强降雨量整体呈现出非线性的上升趋势,进入 21 世纪后特别显著。

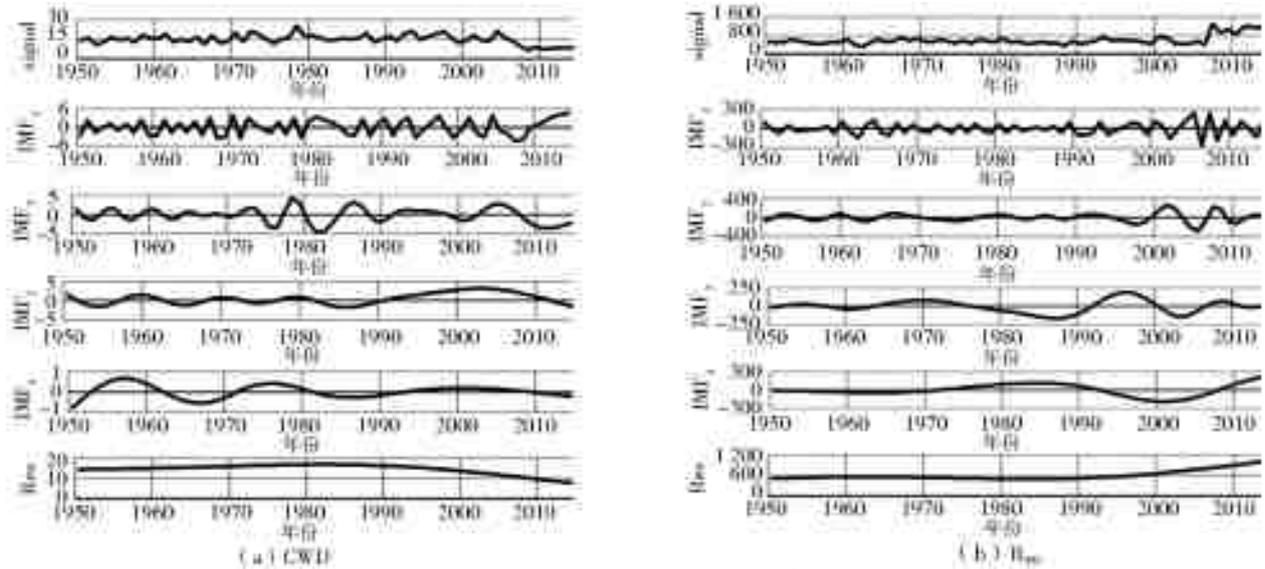


图 5 1951—2015 年广西 CWD、R_{95p} 极端指数标准序列及 ESMD 分解后的各个 IMF 分项和趋势项

Fig. 5 Trends of CWD, R_{95p} extreme index standard series and various IMF sub-items after ESMD decomposition in Guangxi from 1951 to 2015

表 2 各极端降雨指数的前 4 个 IMF 分量方差贡献率、各分量振荡周期

Tab. 2 Variances contribution of the first four vectors of extreme rainfall indices expended by IMF and the primitive series and the time scale of vectors

极端降雨指数	IMF 分量	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	Res
CWD	方差贡献率/%	35.36	21.05	9.16	0.54	33.89
	周期/a	3.34	6.64	14.61	22.35	
CDD	方差贡献率/%	20.49	13.02	7.40	—	59.10
	周期/a	3.26	9.19	16.97	—	
PRCPTOT	方差贡献率/%	49.46	29.17	14.37	—	7.00
	周期/a	2.94	8.03	15.22	0	
R ₁₀	方差贡献率/%	40.47	17.87	26.31	7.72	7.64
	周期/a	3.04	7.24	15.94	34.84	
R ₂₀	方差贡献率/%	30.65	20.35	21.11	7.48	20.41
	周期/a	2.91	7.47	12.00	34.13	
R ₅₀	方差贡献率/%	8.57	8.59	4.69	9.91	68.24
	周期/a	2.85	5.47	13.11	23.02	
R _{95p}	方差贡献率/%	16.63	14.66	13.16	18.16	37.40
	周期/a	2.91	7.41	14.62	35.62	
R _{99p}	方差贡献率/%	11.80	11.95	7.83	10.46	57.96
	周期/a	2.85	6.01	13.31	22.62	
RX _{1d}	方差贡献率/%	19.73	44.72	15.08	1.89	16.49
	周期/a	3.21	9.03	16.67	33.00	
RX _{5d}	方差贡献率/%	19.71	48.25	17.43	2.32	8.66
	周期/a	3.16	9.11	17.11	28.11	
SDII	方差贡献率/%	4.50	17.56	1.90	6.13	66.91
	周期/a	3.00	5.34	10.09	22.86	

通过表 2 各极端指数的各 IMF 分量的贡献率可以看出:在年际振荡和年代际振荡中,年际振荡在各极端指数变化中占主导地位。图 6 显示的是极端指数 CWD、 R_{95p} 年际和年代际变化与其相应的原始数据进行比较,其中年际 CWD(R_{95p})由 IMF₁、IMF₂

与趋势项相加而得,而年代际 CWD(R_{95p})由 IMF₃、IMF₄ 与趋势项相加而得。由图 6 可知,重构的年际 CWD(R_{95p})与原始序列的变化趋势几乎完全一致,这说明了年际振荡在广西各极端指数的变化中占主导地位。

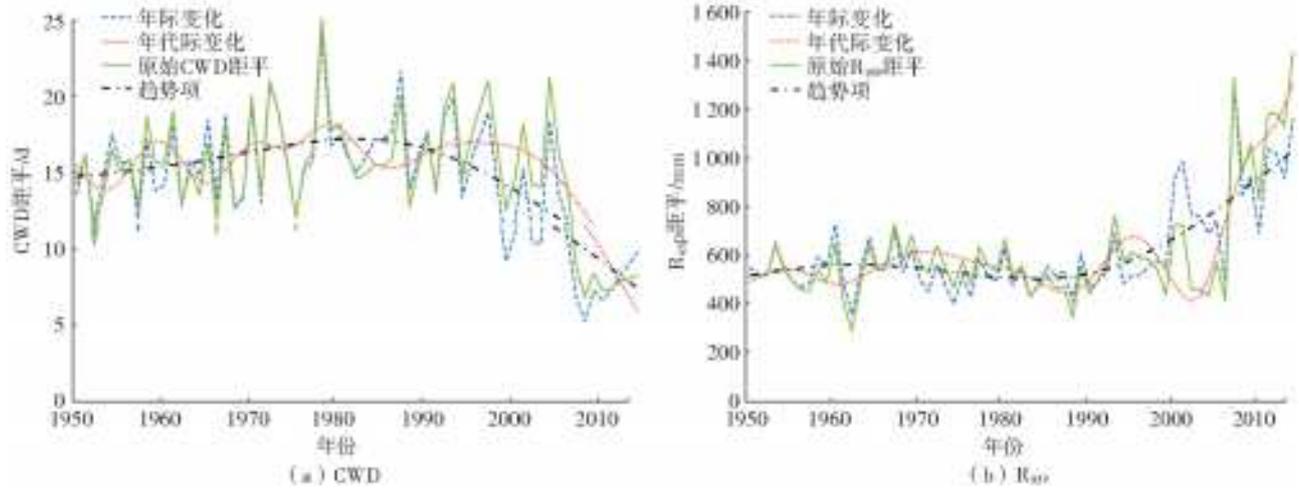


图 6 年际和年代际 CWD、 R_{95p} 重构序列与原始数据的对比

Fig. 6 Comparison of interannual and interdecadal CWD, and R_{95p} variations with original data

3 结论

(1)时间尺度上,近 65 年来广西极端降雨指数中,除 CWD、 R_{10} 等 2 个指数外,其余 9 个指数均呈现较为显著的增强趋势,其中,强降雨量的增长速度最快。除 CWD、 R_{10} 、PRCPTOT 未通过 0.05 显著性水平检验外,其余 8 个指数均通过 0.05 显著性水平检验。

(2)空间尺度上,除连续干日指数 CDD 表现为西部以及东南部地区的数值较大外,其余极端降雨指数均呈现出以桂东北以及南部向桂西南、桂西北减少的空间分布特征,且在防城港、钦州、北海以及桂东北北部地区存在高值区,上述区域的防洪防汛压力较大。

(3)广西 11 个极端降雨指数均发生了气象突变,其中 RX_{1d} 和 R_{10} 的突变时间相对较早,分别为 1968、1980 年;其余 9 个指数的突变时间多发生在 2008—2010 年。这表明 21 世纪后广西极端降雨事件的发生率逐步增强,对应的洪涝、滑坡等灾害发生频次也随之增强。

(4)广西各极端降雨指数总体存在 2.85~3.34 a 和 5.34~9.19 a 的年际准周期,存在 10.09~17.11 a 和 22.35~35.62 a 的年代际准周期;广西极端降雨时间序列主要由表征年际变化的 IMF₁、IMF₂ 分量组成,即年际振荡在极端降雨变化中占主导地位。

参考文献:

- [1] WANG X, HOU X, WANG Y. Spatiotemporal variations and regional differences of extreme precipitation events in the Coastal area of China from 1961 to 2014[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 94-104. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2017. 06. 022.
- [2] IPCC AR5. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change Fifth Assessment Report (AR5)[M]. Cambridge: London Cambridge University Press, 2013.
- [3] 孔锋,史培军,方建,等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165-174. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2017. 02. 029.
- [4] 武文博,游庆龙,王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 1015-1026. DOI: 10. 11849/zrzyxb. 20150209.
- [5] 顾西辉,张强,陈晓宏,等. 中国多尺度不同量级极端降水发生率非平稳性研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 505-515. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160454.
- [6] 顾西辉,张强,孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 718-730. DOI: 10. 11821/dlxb201605002.
- [7] 尹占娥,田鹏飞,迟潇潇. 基于情景的 1951—2011 年中国极端降水风险评估[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 405-413. DOI: 10. 11821/dlxb201803002.
- [8] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 161-173. DOI:

- 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.001.
- [9] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1961—2013年河南省极端降水事件时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(6):115-120. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.017.
- [10] 王昊,姜超,王鹤松,等.中国西南部区域雨季极端降水指数时空变化特征[J].中国农业气象,2019,40(1):1-14. DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2019.01.001.
- [11] 赵安周,朱秀芳,潘耀忠.1965—2013年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):43-50. DOI:10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.01.009.
- [12] 潘欣,尹义星,王小军.1960—2010年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):436-444. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201703014.
- [13] 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. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.015.
- [14] 刘永林,延军平,岑敏仪.中国降水非均匀性综合评价[J].地理学报,2015,70(3):392-406. DOI:10.11821/dlxb201503004.
- [15] 刘少华,严登华,王浩,等.中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J].水科学进展,2016,27(5):639-651. DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2016.05.001.
- [16] 韩振宇,周天军.APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J].大气科学,2012,36(2):361-373. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11043.
- [17] 张行清,丁美花,陈燕丽,等.基于 HJ-1 卫星遥感的广西水库水面监测[J].水利学报,2014,45(4):427-434. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2014.04.007.
- [18] 刘绿柳,姜彤,徐金阁,等.西江流域水文过程的多气候模式多情景研究[J].水利学报,2012,43(12):1413-1421. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2012.12.006.
- [19] 周蕊,郭纯青,潘林艳.中国西南岩溶区多因素组合下旱涝灾害分析[J].中国农村水利水电,2015(4):101-104.
- [20] 梁驹,梁骏,雍阳阳.广西极端降水事件气候态及其对 ENSO 的潜在响应[J].气候变化研究进展,2017,13(2):117-127. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.109.
- [21] 莫建飞,钟仕全,陈燕丽,等.极端降水事件下广西流域洪涝社会经济暴露度分析[J].灾害学,2018,33(2):83-88. DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.016.
- [22] 陆虹,陈思蓉,郭媛,等.近 50 年华南地区极端强降水频次的时空变化特征[J].热带气象学报,2012,28(2):219-227. DOI:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.009.
- [23] 李建鸿,蒙歆媛,翟禄新,等.1951—2006年广西极端连续降水的时空变化分析[J].广西师范大学学报(自然科学版),2016,34(1):187-196. DOI:10.16088/j.issn.1001-6600.2016.01.029.
- [24] 孙桂凯,余璇,高沫,等.广西极端连续降水变化趋势及周期性研究[J].水电能源科学,2018,36(2):6-9,19.
- [25] 李燕,周游游,胡宝清,等.基于 TRMM 数据的广西西江流域降水时空分布特征[J].亚热带资源与环境学报,2017,12(1):75-82,88.
- [26] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究:以东江和北江为例[J].水科学进展,2017,28(2):174-182. DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.002.
- [27] WANG J L, LI Z J. Extreme-point symmetric mode decomposition method for data analysis[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2013, 5(3): 1350015 (36pages). DOI:10.1142/S1793536913500155.