

赣江上游章水流域极端降水时空变化特征

刘裕辉, 刘惠英, 卢怡诗

(南昌工程学院 水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:以赣江上游章水流域内15个雨量站1957–2016年逐日降水资料为基础,获取了12个极端降水指数。分别采用线性趋势、Modified Mann–Kendall非参数检验法、累积距平法、Pettitt突变检验法、小波分析、Hurst指数分析和克里金插值等方法对12个极端降水指数的时空变化特征进行探讨。结果表明:1957–2016年间,暴雨量及日数、强降水量及贡献率和最大湿润日数均呈现上升趋势,极强降水量及贡献率、最大干旱日数、年最大雨量、连续5日最大雨量呈现下降趋势,且其未来趋势均将得到加强;大雨量及日数呈现上升趋势,但未来趋势将可能减弱;所有极端降水指数的过去趋势均不具有显著性,同时未发生显著的突变,并且普遍存在以1988年为中间轴的33~34 a主周期;大雨量及日数、暴雨量及日数、强降水量、最大湿润日数、年最大雨量、连续5日最大雨量的高值中心均在流域西南区域的内良站附近,并呈上升趋势,低值区域主要分布在流域的东部区域,并呈下降趋势,且其整体空间分布大致相同,均为西南向东北递减;而强降水贡献率及极强降水贡献率为东南向西北递减,最大干旱日数是从东向西的递减趋势。未来章水流域极端降水的变化趋势可能还会增强,加强流域极端降水事情的预防对流域水旱灾害防治意义重大。

关键词:极端降水;时空变化;章水流域;赣江流域

中图分类号:P426.62⁺3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)02-0065-09

Spatial – temporal variation of the extreme precipitation events in Zhangshui River Basin in the upper reaches of Ganjiang

LIU Yuhui, LIU Huiying, LU Yishi

(School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: Based on daily precipitation data of 15 rainfall stations in Zhangshui River Basin in the upper reaches of Ganjiang from 1957 to 2016, 12 extreme precipitation indexes were selected to analyze the spatial – temporal variation characteristics of this area using linear trend test, Modified Mann – Kendall non-parametric test, cumulative anomaly method, Pettitt test, Morlet analysis, Hurst index analysis and Kriging interpolation method. The results showed that over the last 60 years, the volume of rainstorm and its duration days, the heavy precipitation and its contribution rate, and the maximum number of wet days all showed an increasing trend, whereas the extremely strong precipitation and its contribution rate, the maximum number of dry days, the maximum annual rainfall and the maximum rainfall of five consecutive days showed a decreasing trend, which would be further strengthened in the future. Nevertheless heavy rainfall and its duration days showed an upward trend, with an inclination of weakening in the future. It is concluded that all the past trends of extreme precipitation indexes are not significant with no sign of abrupt changes, and the main cycle of 33 – 34 a with 1988 as the intermediate axis generally exists. The high value centers of heavy rainfall and its duration days, rainstorm and its duration days, heavy precipitation, maximum number of wet days, annual maximum rainfall and maximum rainfall of five consecutive days are all located near the Neiliang station in the southwest region of the basin, and show an upward trend. The low value areas are mainly distributed in the eastern region of the basin and present a downward

收稿日期:2019-06-09; 修回日期:2019-08-15

基金项目:江西省教育厅科研项目(GJJ161098);国家自然科学基金项目(41761058)

作者简介:刘裕辉(1998-),男,江西新干人,本科生,水文学与水资源工程专业。

通讯作者:刘惠英(1973-),女,陕西凤翔人,硕士,副教授,主要研究方向流域水沙变化和水体监测方面研究。

trend. Their overall spatial distributions are roughly the same, both decreasing from southwest to northeast; However, the contribution rate of heavy precipitation and extremely strong precipitation decreases from southeast to northwest, and the maximum number of dry days decreases from east to west. In the future, the change trend of extreme precipitation in Zhangshui River Basin may deteriorate, and strengthening the prediction of extreme precipitation is of great significance to the prevention of flood and drought disasters in this river basin.

Key words: extreme precipitation; spatial-temporal variation; Zhangshui River Basin; Ganjiang River Basin

1 研究背景

降水是检验气候变化、揭示气候变化对生态环境响应的重要因子之一^[1]。其时空变化特征及其对地表生态系统的影响是水文学和生态学的重要议题,已引起学术界的高度关注^[2-3]。降水尤其是极端降水事件所引起洪水、滑坡、水土流失等的自然灾害,已经直接或间接地对全球生态系统稳定及社会经济发展造成严重影响,对极端气候事件的研究已经成为了全球变化研究的重要课题之一^[4-6]。目前,国内外学者在极端降水事件研究方面已经取得了大量成果^[6-10],时光训等^[11]利用 M-K 检验法、主成分分析等方法分析了长江流域 14 个极端降水指数的时空变化特征,发现强降水在鄱阳湖流域大部分区域呈显著增加趋势;任玉玉等^[12]运用绝对阈值和相对阈值法对江西省近 50 年的极端降水事件进行研究,指出该地区极端降水事件的强度和频率均有增加趋势,高冰等^[13]采用百分位阈值对鄱阳湖 1961-2010 年的极端降水事件进行研究,指出赣江流域的极端降水强度存在增大趋势;吴丹瑞等^[14]对赣南地区 1956-2013 年极端气候研究,指出赣南地区极端降水事件正在加剧;王永文等^[15]发现赣江上游章水流域 1955-2015 年降水量存在增加趋势;目前学者们对于长江流域、鄱阳湖流域的极端降水研究^[16-21]中缺乏对赣江西源头章水流域的相关研究,且研究时选用的极端降水指数偏少,未能充分描述出区域极端降水的时空演变规律,对于极端降水未来持续性的研究还不够深入^[18]。本文采用线性趋势、modified Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法、Pettitt 突变检验法、小波分析、Hurst 指数分析和克里金插值等方法对赣江上游章水流域 12 个分别由绝对阈值法、相对阈值法、持续指标法^[22]选取的极端降水指数的时空变化特征及未来趋势进行分析,本研究对研究区域降水极值事件的时空变化特征与未来持续性具有重要意义,并可为长江流域资源的开发与保护提供科学的参考依据。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况与数据来源

赣江是鄱阳湖水系的最大支流,长江的八大支流之一,赣州市以上为其上游区域,有东、西两源,即西源章水、东源贡水^[23]。西源章水是赣江上游左岸一级支流,位于罗霄山脉东南面(113°43'~115°00'E, 25°15'~26°12'N)。流域跨越江西、湖南两省 7 个县(市、区),南接桃江和珠江流域,北毗遂川江流域,西邻洞庭湖水系,东入赣江^[23-25],总集水面积 7 683 km²。章水发源于崇义县聂都乡,干流自西南向东北流经崇义、大余、南康、章贡 4 县(区),全长 230 km;上犹江是章水的最大支流,发源于诸广山脉东侧,长 204 km,集水面积 4 647 km²,于南康区三江口并入章水;章水在赣州市八镜台左岸与贡水汇流始称为赣江^[15,24]。流域地貌以丘陵和低山为主,西南高,东西低,边缘岩层为变质岩^[24],河流多数起源于边缘山脉,且河流密布,共有各级支流 500 多条,为混合水系,山间河谷发育良好,大小盆地散落其间^[23-25]。流域属亚热带湿润季风气候区,年均水面蒸发量 1 060 mm,年均气温 18.7℃,无霜期长,多暴雨,是江西省的四大暴雨中心之一^[15,23-25]。

本文所用的日降水资料均来源于长江水利委员会编撰的水文资料年鉴,考虑到数据序列的连续性和完整性,舍弃了建站较晚的站点后最终选取了 1957-2016 年章水流域内具有代表性的 15 个雨量站点逐日降水资料。选用的日降水数据在进行极端降水指数计算前,已经进行过多次的严格审核及一致性检验,筛查数据中的异常值。章水流域水系、地形和雨量站点分布见图 1。

2.2 研究方法

2.2.1 指数选取 对于极端降水事件的研究方法很多,一般有绝对阈值法、相对阈值法及持续性指数^[22]。根据我国气候特征,绝对阈值通常选取大雨及以上的事件为极端降水事件,而由于流域的大暴雨事件较少,故将极端降水仅分为大雨和暴雨两种,将

大暴雨划分至暴雨中,共选取了大雨量(P25)、大雨日数(R25)、暴雨量(P50)、暴雨日数(R50)4个极端降水指数。同时研究发现,我国地域之间气候差异明显,仅采用绝对阈值法定义会与实际情况产生偏差。因此亦采用了国际上通用的百分数阈值法,即相对阈值法,取95%、99%作为极端降水事件的阈值,共选取了强降水量(R95p)、强降水贡献率(R95t)、极强降水量(R99p)、强降水贡献率(R99t)4个极端降水指数,其具体算法参照文献[26]。除此之外,还根据持续性指数法选取了最大湿润天数(CWD)、最大干旱天数(CDD)、年最大日雨量(RX1)和年连续5日最大雨量(RX5)极端降水指数^[27],利用这些极端降水指数能够充分对区域极端降水事件进行分析。各极端降水

指数及其定义见表1。

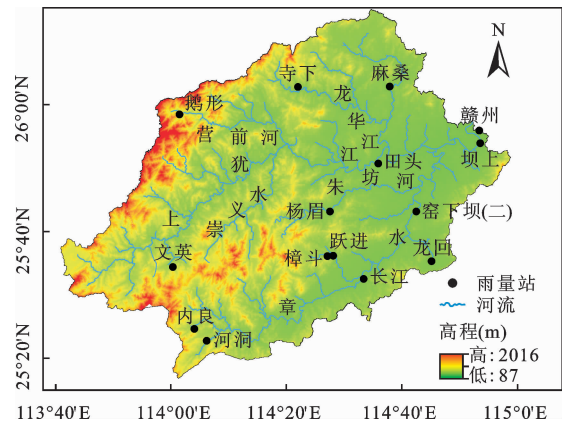


图1 章水流域水系、地形和雨量站点分布

表1 各极端降水指数的类型、名称及定义

类型	名称(缩写)及单位	定义
阈值指数	大雨量(P25)/mm	年内日降水量25~50mm的总雨量
	大雨日数(R25)/d	年内日降水量25~50mm的总日数
	暴雨量(P50)/mm	年内日降水量≥50mm的总雨量
	暴雨日数(R50)/d	年内日降水量≥50mm的总日数
百分指数	强降水量(R95p)/mm	年内日降水量≥95%阈值的总雨量
	强降水贡献率(R95t)/%	强降水量/年内≥0.1mm的总雨量
	极强降水量(R99p)/mm	年内日降水量≥99%阈值的总雨量
	强降水贡献率(R99t)/%	极强降水量/年内≥0.1mm的总雨量
绝对指数	最大湿润天数(CWD)/d	年内日降水量≥1mm的最长连续日数
	最大干旱天数(CDD)/d	年内日降水量<1mm的最长连续日数
	年最大日雨量(RX1)/mm	年降水量最大的日雨量
	连续5日最大雨量(RX5)/mm	年内持续5日最大的雨量

2.2.2 研究方法

(1) 趋势分析。采用线性趋势及 modified Mann – Kendall(MMK)非参数趋势检验法进行趋势分析,线性趋势被广泛运用到水文时间序列的趋势特征分析中^[28];目前的研究很少考虑到降水数据之间存在的自相关性,而MMK非参数趋势检验法首先对原数据的自相关性进行处理后再进行计算,并且在计算过程中考虑了序列中出现数据相同的状况,其原理见参考文献[29]。

(2) 突变分析。采用累计距平突变检验法、Pettitt法来检测突变。累计距平突变检验法可以利用其曲线明显的上下变化,诊断出其发生突变的大致时间^[28,30];Pettitt突变检验法只能检测出一个突变点,并且判断出突变点是否具有显著性^[31]。两种方法同时进行突变检验,相互验证,能有效地避免单个检验方法出现的局限性,提高突变点的确定性和可信度。

(3) 周期分析。采用小波分析法对周期变化进行研究,Morlet小波是非正交小波,具有良好的时频域局部性。在对时间序列进行分析时,小波系数的实部变化可用来判断数据的变化趋势,小波方差随尺度的变化过程可以用来判断多长周期的振动强度,也可以用来确认某时间序列中主要存在的周期成分^[28,32]。

(4) 持续性分析。未来持续性预测分析采用R/S理论进行研究,其中Hurst指数值的大小可用来判断趋势性成分的持续性及反持续性强度的大小。Hurst指数分级如表2所示^[33]。

3 结果分析

3.1 极端降水指数的时间变化特征

3.1.1 极端降水基本特征 为了分析赣江上游章水流域1957–2016年不同类型下的12种极端降水指数的基本特征,统计在流域尺度上各极端降水指

数的平均值、最大值、最小值及变差系数,统计结果 见表3。

表2 Hurst 指数分级表

等级	Hurst 指数值域	持续性强度	等级	Hurst 指数值域	反持续性强度
I	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱	- I	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
II	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	- II	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
III	$0.65 < H \leq 0.75$	较强	- III	$0.25 \leq H < 0.35$	较强
IV	$0.75 < H \leq 0.80$	强	- IV	$0.20 \leq H < 0.25$	强
V	$0.80 < H \leq 1.00$	很强	- V	$0.00 \leq H < 0.20$	很强

由表3可知,章水流域多年平均大雨量(P25)和暴雨量(P50)达到767.80和302.94 mm/a,分别占多年平均年降雨量的49.42%和19.50%。大雨日数(R25)达到了17.86 d,暴雨日数(R50)达到了4.34 d。而强降水量(R95p)和极强降水量(R99p)分别为410.92 mm/d和139.16 mm/d,分别占年降雨总量的26.45%(R95t)和8.96%(R99t)。对比两种不同阈值发现,章水流域日强降水强度大于25 mm/d,极强降水强度大于50 mm/d。因此导致两种不同指数的年占比不一致,阈值指数的占比大于百分指数的占比。最大湿润天数(CWD)和最大干旱天数(CDD)分别达到8.99 d/a和32.42 d/a,流域年最大日降雨量(RX1)为91.51 mm,连续5日最大雨量(RX5)达到164.10 mm,尤其是CWD与CDD的极大值分别为14.33、66.15 d,以上特征均表明章水流域是一个洪、旱频发且洪、旱严重的区域。

表3 1957-2016年章水流域各极端降水指数的特征值

指数	平均值	最大值	最小值	变差系数(C_v)
P25/mm	767.80	1304.05	408.98	0.26
R25/d	17.86	28.40	11.40	0.24
P50/mm	302.94	639.71	52.93	0.37
R50/d	4.34	8.10	0.90	0.34
R95p/mm	410.92	791.20	137.25	0.31
R95t/%	24.56	40.70	14.71	0.19
R99p/mm	139.16	411.01	7.14	0.52
R99t/%	8.96	18.62	0.68	0.43
CWD/d	8.99	14.33	5.79	0.22
CDD/d	32.42	66.15	15.50	0.31
RX1/mm	91.51	139.63	56.19	0.17
RX5/mm	164.10	245.66	114.02	0.18

3.1.2 极端降水指数的变化趋势 分别采用线性趋势和MMK非参数检验法分析12个极端降水指数的年际变化趋势。1957-2016年章水流域各极

端降水指标的年际变化趋势见图2。图2显示,阈值指数的P25、R25、P50、R50均表现为不显著性的上升趋势,其变化率分别为11.36 mm/10a、0.27 d/10a、2.60 mm/10a和0.06 d/10a(图2(a)~2(d));除P50的最大值为1961年外,P25、R25、R50的最大值均为2016年,而所有阈值指数的区域平均最小值均为1963年。百分指数的R95p、R95t呈不显著上升趋势,其变化率分别为4.46 mm/10a和0.14%/10a(图2(e)~2(f));R99p、R99t整体呈现不显著性的下降趋势,其倾向率分别为-1.62 mm/10a、-0.11%/10a;R95p、R95t的最大值出现在2016年,而R99p、R99t的最大值出现在1961年,最小值与阈值指数相同,均出现在1963年(图2(g)~2(h));除了CWD倾向率为0.09 d/10a,呈现不显著的上升趋势外,其他绝对指数CDD、RX1、RX5的倾向率分别为-0.57 d/10a、-0.72 mm/10a、-0.42 mm/10a,均表现为不显著的下降趋势,其最大值出现的时间各不相同,分别为1994年(CWD)、2007年(CDD)、1961年(RX1)、2002年(RX5),RX1、RX5的最小值均为1963年,CWD为2004年、CDD为2002年(图2(i)~2(l))。综上所述,阈值指数、百分指数的R95p、R95t及绝对指数的CWD均呈现不显著的上升趋势,而其余5个指数为不显著的下降趋势,所有指数均未通过modified Mann-Kendall(MMK)非参数趋势检验法的 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验。P50、R99p、R99t、RX1的区域平均最大值均出现在1961年,而P25、R25、R50、R95p、R95t均为2016年,所有阈值指数和百分指数、绝对指数的RX1、RX5的区域平均最小值均为1963年。

3.1.3 极端降水指数的突变检验 为分析赣江上游章水流域1957-2016年不同类型的12种极端降水指数(区域平均值)的突变年份,选择累积距平和Pettitt法两种方法进行突变检验。Pettitt法可以检验突变点是否具有显著性,而累积距平可用于序列整体的变化趋势检测。

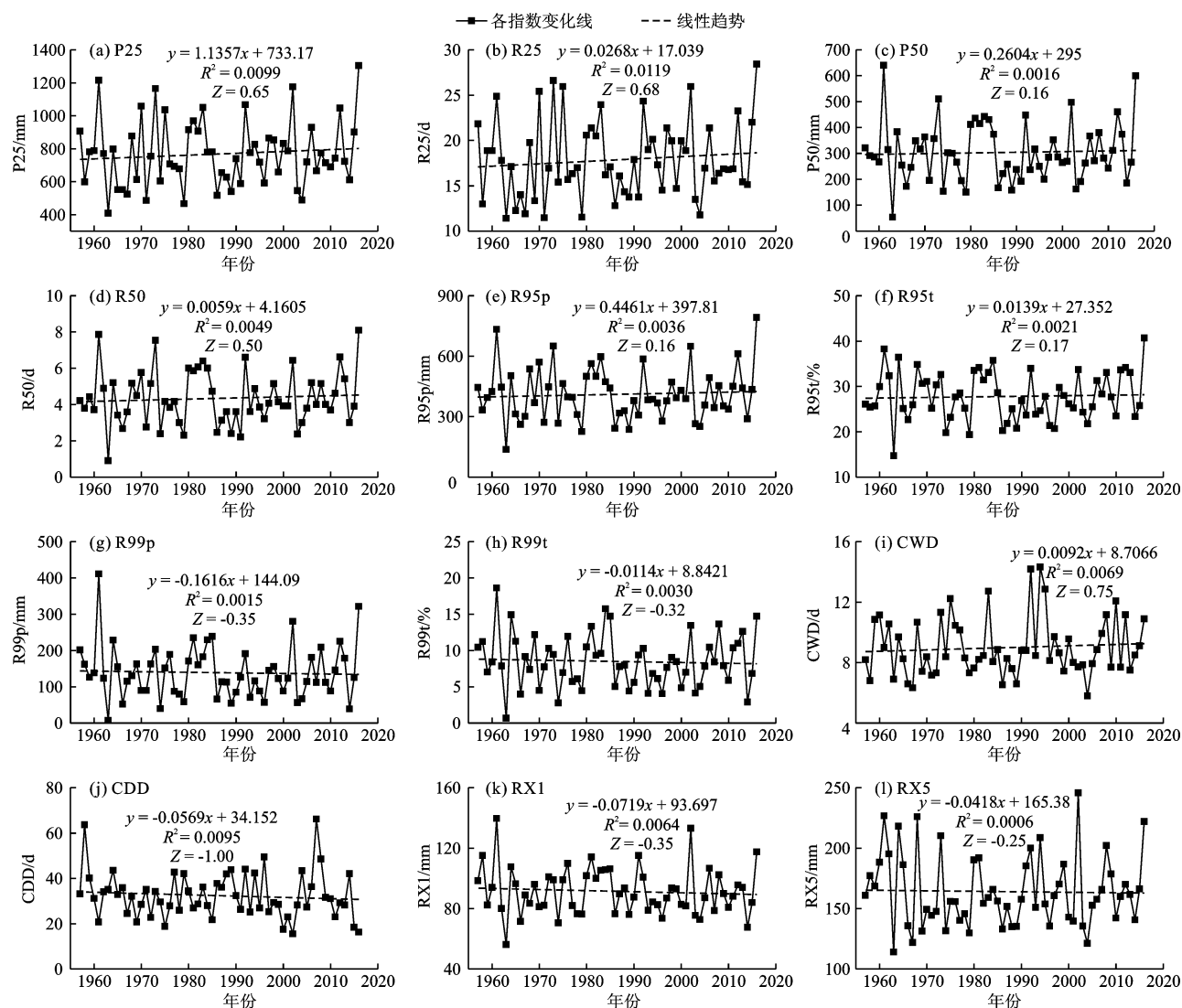


图2 1957-2016年章水流域各极端降水指标的年际变化趋势

用累积距平和 Pettitt 法对 12 个极端降水指数进行检测,对突变结果进行对比发现:大雨量(P25)和大雨日数(R25)的突变发生在 1991 年;而暴雨量及日数(P50、R50)、强降水量及贡献率(R95p、R95t)、极强降水量及贡献率(R99p、R99t)共 6 个指数的突变均发生在 1985 年;而 CDD 和 RX5 的突变分别发生在 1996 和 1965 年,CWD 和 RX1 的突变分别发生在 1989 和 1992 年。虽然各指数突变年份不一,但总体来看,大强度降雨突变发生在 1985 年前后。而绝对指数类在 20 世纪 90 年代先后发生了突变。但所有的突变均不显著。

3.1.4 极端降水指数的周期变化 对 1957-2016 年研究流域 12 个极端降水指数进行 Morlet 小波分析,结果见图 3。图 3 表明,所有的极端降水指标普遍存在 33~34 a 的变化周期,其变化大致为“偏多-偏少-偏多”,且其震荡周期表现最为显著,振幅

最强。除了 33~34 a 的第一主周期外,阈值指数的 P25、R25 及绝对指数的 CWD 均存在较为显著的 14 a 震荡周期,其历经了 7 个“偏多-偏少”的周期变化,而阈值指数的 R50 及百分指数的 R95p 则存在较为显著的 9 a 震荡周期,其历经了 11 个“偏多-偏少”的周期变化,百分指数的 R95t、R99p、R99t 和阈值指数的 P50 及绝对指数的 CDD、RX1、RX5 则存在较为显著的 20 a 震荡周期,其历经了 5 个“偏多-偏少”的周期变化。不同类型的各极端降水指数的变化周期均是以 1988 年为中间轴呈左右对称的分布状况。

3.1.5 极端降水指数的未来持续性 对研究区各极端降水指数的未来趋势采用线性趋势与 Hurst 指数相结合的方法进行预测,各极端降水指数的时间变化特征及持续性分析见表 4。结果发现阈值指数的 P25、R25 具有很弱的反持续性强度,即 P25、R25

的未来趋势可能与过去不同,其增加趋势将可能减弱,R95p、CWD、CDD 具有很弱的持续性强度,P50、R50、R99p、CDD 具有较弱的持续性强度,R95t、R99t 及 RX5 具有较强的持续性强度,表明这些指数的未

来趋势将与过去趋势相同,百分阈值的 R99p、R99t 及绝对指数的 CDD、RX1、RX5 的减少趋势将更为显著,阈值指数的 P50、R50、百分指数的 R95p、R95t 及绝对指数的 CWD 的增加趋势将更为显著。

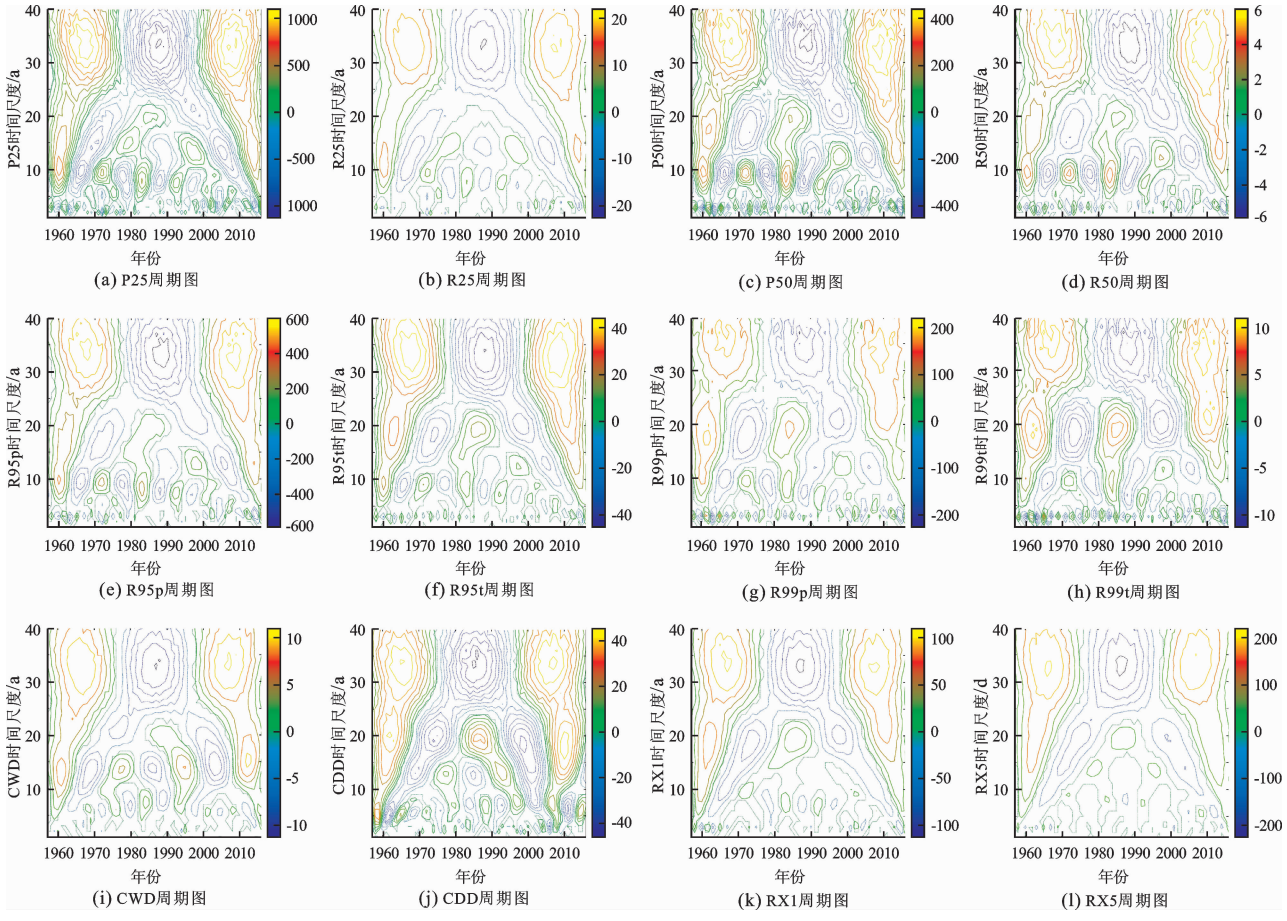


图3 1957-2016年章水流域各极端降水指标的小波变化实部值分布

表4 各极端降水指数的时间变化特征统计及持续性分析

指数	趋势分析			突变年份			周期分析/a		持续性	
	斜率	Z 值	显著性	Pettitt 法	累积距平	显著性	第一周期	第二周期	Hurst 指数	等级
P25	11.36	0.65	无	1991	1985,1991	无	33	14	0.45	- I
R25	0.27	0.68	无	1991	1983,1991	无	33	14	0.49	- I
P50	2.60	0.16	无	1985	1979,1985	无	34	20	0.60	II
R50	0.06	0.50	无	1985	1979,1985	无	34	9	0.58	II
R95p	4.46	0.16	无	1985	1979,1985	无	34	9	0.52	I
R95t	0.14	0.17	无	1985	1985,2005	无	34	20	0.66	III
R99p	-1.62	-0.35	无	1985	1979,1985	无	34	20	0.59	II
R99t	-0.11	-0.32	无	1985	1979,1985	无	34	20	0.66	III
CWD	0.09	0.75	无	1989	1989,1995	无	33	14	0.51	I
CDD	-0.57	-1.00	无	1996	1985,1996	无	34	20	0.62	II
RX1	-0.72	-0.56	无	1992	1979,1992	无	34	20	0.55	I
RX5	-0.42	0.25	无	1965	1965,1990	无	34	20	0.66	III

3.2 极端降水指数的空间特征

3.2.1 极端降水指数的空间分布 对赣江上游章水流域各站点的12种极端降水指数(多年平均值)的空间分布特征采用 ArcGIS10.1 软件的普通克里金法进行插值分析^[34],如图4所示。由图4可看出,阈值指数的高值中心均在章水流域西南区域的内良站附近,低值区域主要分布在流域的东部区域田头-麻桑-赣州一带,所有阈值指数的整体空间分布大致相同,均为由西南向东北递减;百分指数的R95p高值中心也在章水流域西南区域的内良站附近,整体空间分布与阈值指数相同,而R95t的高值区域为东南区域,低值中心为西北区域的鹅形站附近,空间分布为由东南向西北递减,R99p的高值区域为流域西部区域,低值区域与阈值指数大致相同,

整体空间分布为内良-文英-鹅形一带向两边递减,其极强降水量为西多北少,R99t的空间分布大致与R95t相同,其高值区域位于为东南区域,低值中心为西北区域的鹅形站附近;绝对指数的CWD的高值中心为流域西南区域的内良站附近,低值区域位于流域的东部区域,整体空间分布为从西向东呈现递减趋势,而CDD的高值区域位于流域东南边缘区域,低值区域为流域西北区域的鹅形站一带,整体空间分布为由东南向西北区域递减,RX1的高值区域有两个,分别是西南区域的内良-河洞一带及西北区域的鹅形站附近,其低值区域与阈值指数相同,整体空间分布为两个高值区域向低值区域递减,RX5的高值区域与RX1相似,低值区域亦位于流域东部的田头-赣州一带,空间分布与RX1相似。

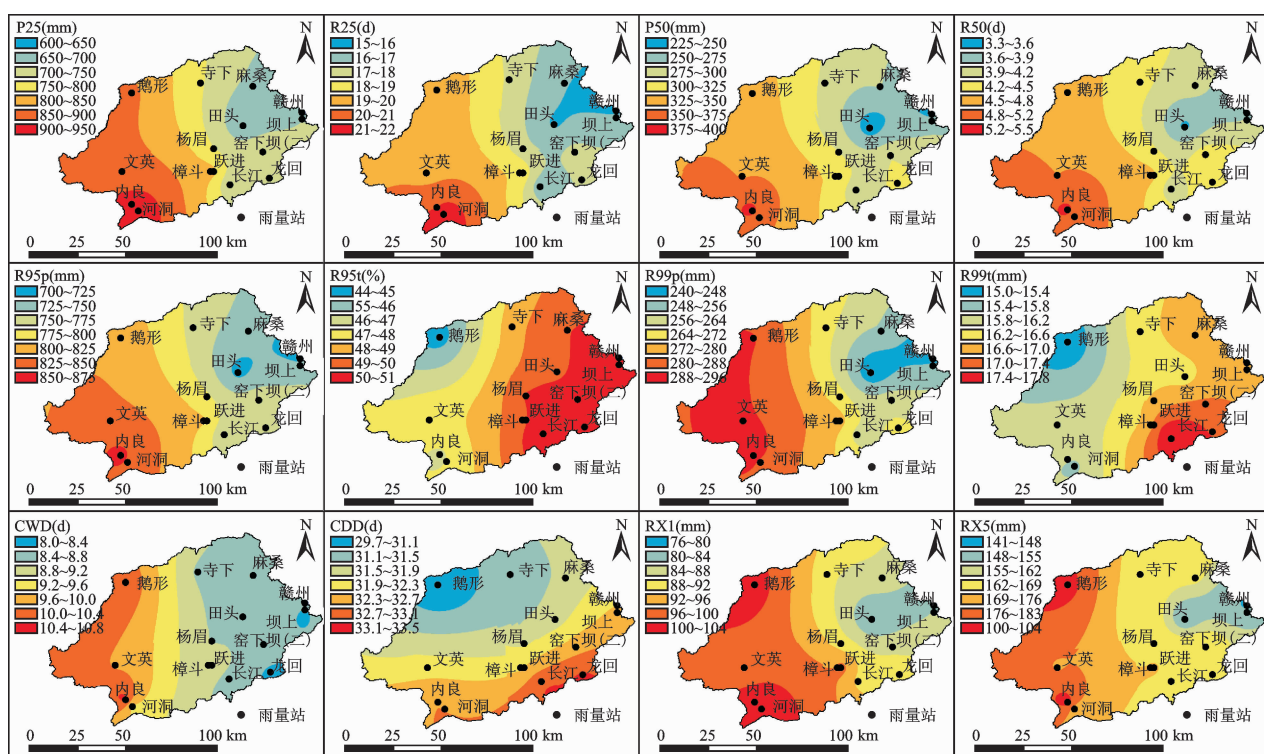


图4 1957-2016年章水流域极端降水指标多年平均值的空间分布

3.2.2 极端降水指数的空间变化 将1957-2016年研究流域各极端降水指数变化趋势的空间分布特征采用线性趋势的倾向率及MMK非参数检验法的Z值($\alpha=0.05$)进行分析,结果见图5。图5表明,所有阈值指数站点趋势以上升趋势为主,这与流域均值的多年趋势检验一致,其中呈现上升趋势的站点比例为66.7%(P25)、53.3%(R25)、66.7%(P50)、80%(R50),主要集中在流域东南部部分区域,其中P25的内良站呈明显上升趋势且具有显著性。R25有4个站点具有明显上升趋势,且其中3

个站点具有显著性,R50的鹅形站呈现明显下降趋势且具有显著性,窑下坝(二)站也具有显著下降趋势。百分位指数除了R95p的站点趋势以上升趋势为主外,其余指数的站点呈现正负趋势的数目差别不大,只有R99p的两个站点存在明显的下降趋势,且其中的樟斗站具有显著性,其中R95p、R99t呈上升趋势的站点主要分布在流域的西南区域及下游的东北区域。绝对指数的CWD与RX5的站点趋势以上升趋势为主,且两者呈上升趋势的站点主要分布在流域的西南部区域及东部区域,而CDD与RX1

站点趋势以下降趋势为主,CDD 呈现下降趋势的站点主要分布在流域的中部区域,而 RX1 主要分布在流域内的大部分区域,只有流域东南部的边沿区域

呈现上升趋势,其中 CDD 有两个明显下降的站点且其中的内良站具有显著性,RX1 也有两个明显下降的站点且其中的樟斗站具有显著性。

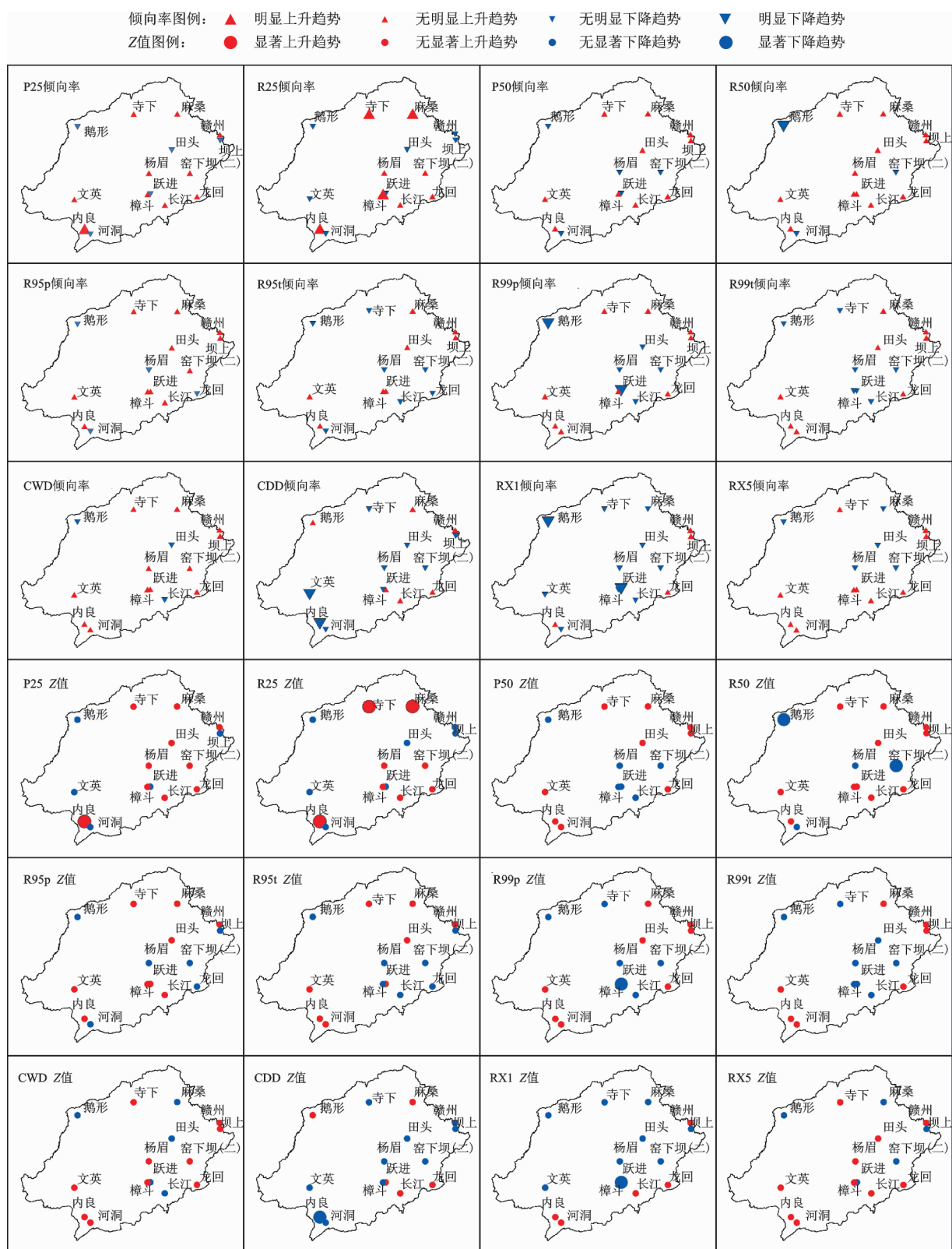


图5 1957-2016年章水流域各极端降水指数的倾向率及MMK非参数趋势检验空间分布

4 结 论

本文采用趋势、突变、周期、Hurst 指数、克里金插值等方法对 1957–2016 年赣江上游章水流域不同类型的 12 个极端降水指数的时空变化特征及未来持续性进行分析,主要结论如下。

(1) 所有的阈值指数 (P25、R25、P50、R50) 均呈上升趋势,但 P25、R25 的上升趋势将可能减弱,而 P50、R50 的上升趋势将得到加强;百分指数的 R95p、R95t 呈上升趋势,而 R99p、R99t 却呈下降趋势,并且两者的趋势将得到加强;绝对指数中,除 CWD 呈上升趋势外,其余指数 (CDD、RX1、RX5) 均呈下降趋势,且所有绝对指数的过去趋势在未来将得到加强,所有极端降水指数的过去趋势均不具有显著性。

(2) 所有的极端降水指数在 1957–2016 年均未发生显著的突变,但是大强度降雨在 1985 年前后有较明显的变化。

(3) 所有的极端降水指标普遍存在 33~34 a 的变化周期,其变化大致为“偏多–偏少–偏多”,且其变化周期均是以 1988 年为中间轴呈左右对称的分布状况。

(4) 所有的阈值指数、百分指数的 R95p 及绝对指数的 CWD、RX1、RX5 的高值中心均在章水流域西南区域的内良站附近,低值区域主要分布在流域的东部区域,且其空间整体分布大致相同,均为由西南向东北递减;而极端降水贡献率却是由东南向西北呈现递减趋势,CDD 是从东向西呈现递减趋势。多数极端降水指数的高值中心 (内良站) 呈上升趋势,低值的流域东部呈现下降趋势。

参考文献:

- [1] CANNAROZZO M, NOTO L V, VIOLA F. Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921–2000) [J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2006, 31 (18): 1201–1211.
- [2] DELITALA A M S, CESARI D, CHESSA P A, et al. Precipitation over Sardinia (Italy) during the 1946–1993 rainy seasons and associated large-scale climate variations [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20 (5): 519–541.
- [3] CHEN, Fenli, CHEN Hongmei, YANG Yanyan. Annual and seasonal changes in means and extreme events of precipitation and their connection to elevation over Yunnan Province, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 374: 46–61.
- [4] 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.
- [5] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 377.
- [6] 孙鹏, 肖名忠, 张强, 等. 水文气象极值事件研究进展 [J]. *武汉大学学报 (理学版)*, 2018, 64 (1): 28–36.
- [7] FU Guobin, YU Jingjie, YU Xiubo, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009 [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 48–59.
- [8] LIAN Lishu, XU Shujing, LI Zhifu, et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events in Northwest China During 1961–2010 [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2014, 5 (1): 12–19 + 23.
- [9] 张卉, 薛联青, 刘远洪, 等. 洞庭湖流域极端降水变化特征分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28 (4): 6–12.
- [10] 何佳, 薛亚永, 周旗, 等. 近 63 年陕西宝鸡极端强降水事件变化特征诊断 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27 (5): 53–58.
- [11] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970–2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究 [J]. *水文*, 2017, 37 (4): 77–85.
- [12] 任玉玉, 任国玉. 1960–2008 年江西省极端降水变化趋势 [J]. *气候与环境研究*, 2010, 15 (4): 462–469.
- [13] 高冰, 任依清. 鄱阳湖流域 1961–2010 年极端降水变化分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36 (1): 31–35.
- [14] 吴丹瑞, 吴安琪, 何新玥, 等. 赣南地区近 58 年来极端气候变化趋势分析 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34 (1): 24–29 + 39.
- [15] 王永文, 刘惠英. 赣江上游章水流域 1955–2015 年降雨量时空变化 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (4): 105–110.
- [16] 孙惠惠, 章新平, 罗紫东, 等. 近 53a 来长江流域极端降水指数特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27 (8): 1879–1890.
- [17] 马小芳, 林爱文, 方建. 1960–2012 年长江中下游极端降水与极端径流时空演变研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41 (2): 157–160 + 163.
- [18] 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.
- [19] 王蒙, 殷淑燕. 近 52a 长江中下游地区极端降水的时空变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24 (7): 1221–1229.
- [20] 尹义星, 陈海山, 赵君, 等. 鄱阳湖流域 1951–2010 年极值降水指数变化趋势分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2015 (3): 1–5 + 9.

(下转第 80 页)

- 分析[J]. 水文, 2010, 30(4): 92-96.
- [3] 莫莉, 穆兴民, 王勇, 等. 近 50 多年来北洛河水沙变化特征及原因分析[J]. 泥沙研究, 2009(6): 30-36.
- [4] 鲁俊, 朱信华, 崔振华, 等. 北洛河流域水沙特性与变化原因[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 20-24.
- [5] 董起广, 周维博, 刘雷, 等. 北洛河径流量变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(2): 20-22+29.
- [6] 康玲玲, 魏义长, 张胜利, 等. 北洛河流域近期水沙变化原因水文分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 41-43+48.
- [7] 古明兴. 北洛河流域水沙演变情势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 120-122.
- [8] 梁国亭, 姜乃迁, 丁宏生, 等. 北洛河改道入黄对渭河及潼关高程的影响分析[J]. 人民黄河, 2008(2): 23-25+79-80.
- [9] 侯素珍, 王平, 侯志军, 等. 北洛河下游改道后新河道稳定性及影响分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 28-29+31.
- [10] 陈抒晨, 赵安周, 朱秀芳, 等. 径流对气候变化和人类活动的响应——以渭河流域为例[J]. 北京示范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 472-478.
- [11] 赫晓慧, 郑紫瑞, 高亚军. 降水和人类活动对北洛河径流变化的量化研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 125-129.
- [12] 张连鹏, 刘登峰, 张鸿雪, 等. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 55-66.
- [13] 谢敏, 张晓明, 赵阳, 等. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 39-44.
- [14] 陈政君, 穆兴民, 高鹏, 等. 北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 1-8.
- [15] 秦伟, 朱清科, 刘广全. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1325-1332.
- [16] 刘晓燕, 高云飞, 王略. 黄河主要产沙区近百年产沙环境变化[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 1-5+9.
- [17] 刘二佳, 张晓萍, 谢名礼, 等. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响——以北洛河上游为例[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 622-629.
- [18] 石长伟, 张英, 梁林江, 等. 渭河下游近期冲淤变化及其原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 134-137+143.
- [19] 林秀芝, 董晨燕, 李丹丹. 三门峡水库淤积分析和运用方式研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 18-22.
- [20] 陈妮, 李谭宝, 张晓萍, 等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 206-210+327.
- [21] 屠新武, 蔡石林, 刘社强. 渭河下游水沙变化分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(12): 23-24.
- [22] 陆中臣. 三门峡水库淤积末端位置确定和预估的地貌学方法[J]. 地理研究, 1982, 1(3): 43-54.

(上接第 73 页)

- [21] 章茹, 孔萍, 蒋元勇, 等. 近 50 年鄱阳湖流域降水时空特征及其对水文过程的驱动[J]. 南昌大学学报(理科版), 2014, 38(3): 268-272.
- [22] 程诗悦, 秦伟, 郭乾坤, 等. 近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 155-161.
- [23] 江西省水利厅. 江西河湖大典[M]. 武汉: 长江出版社, 2010.
- [24] 刘惠英, 白桦. 赣江上游章水流域水沙变化的驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 615-623.
- [25] 江西省水利厅. 江西水旱灾害[M]. 江西省水利厅, 1995.
- [26] 刘铮瑶, 董治宝, 殷淑燕, 等. 济南市极端降水变化特征及趋势分析[J]. 地球环境学报, 2013, 4(6): 1506-1512.
- [27] POWELL E J, KEIM B D. Trends in daily temperature and precipitation extremes for the Southeastern United States: 1948-2012[J]. Journal of Climate, 2015, 28(4): 1592-1612.
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [29] TABARI H, TALAEE P H. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3-4): 313-320.
- [30] 蔡霞, 蔡琳, 李春华, 等. 晋北地区降水量时空变化及突变分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 247-254.
- [31] 孙周亮, 刘冀, 谈新, 等. 近 50a 渭河上游汛期降雨径流多尺度时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1324-1332.
- [32] 王文圣, 丁晶, 衡彤, 等. 水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J]. 工程勘察, 2003(1): 32-35.
- [33] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立, 等. 中国雨日变化趋势的分形研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 112-117.
- [34] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性及空间插值方法的比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 25-28.