

文章编号:1673-9469(2021)01-0078-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.012

松花江流域极端气象水文要素分析

章晓梦¹, 郝洁², 鞠琴^{1*}, 萧峻琼¹, 次旦多杰³, 陈玺⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏南京 210000; 3. 西藏水文水资源勘测局林芝水文水资源分局, 西藏林芝 860000; 4. 长江水利委员会水文局, 湖北武汉 430010)

摘要: 利用松花江流域1961—2018年逐日降水及逐日径流数据资料, 基于11个极端降水指标和5个极端径流指标, 采用趋势分析法、Mann-kendall非参数检验方法、Mann-kendall突变检验法、克里金插值法、皮尔逊相关系数等方法分析了松花江流域极端降水及极端径流事件的变化特征、地区性差异和规律, 同时分析了极端降水和极端径流事件间的关联性。结果表明: 除持续干期指数(Consecutive dry days, CDD)和降水强度指数(Simple daily intensity index, SDII)外, 其余指数多年平均值均呈现出第二松花江流域为高值区, 松花江干流流域次之, 嫩江流域为低值区, 各极端降水指数的空间趋势分布和突变年份也体现出区域差异性; 各极端径流指数的变化趋势和突变年份分别相近, 且都呈微弱变化趋势; 在不同时间尺度下, 极端降水与极端径流事件的相关系数均通过99%显著性检验, 由于松花江流域汇流速度较慢, 当时间尺度为30天时极端降水与极端径流事件表现出最为显著的关联性。

关键词: 极端气象水文事件; 时空变化特征; 皮尔逊相关分析; 极端降水指数; 松花江流域
中图分类号: P339 **文献标识码:** A

Analysis of Extreme Meteorological and Hydrological Elements in Songhua River Basin

ZHANG Xiaomeng¹, HAO Jie², JU Qin^{1*}, XIAO Junqiong¹, CIDAN Duojie³, CHEN Xi⁴

(1. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;
3. Linzhi Branch of the Tibet Autonomous Region Hydrology Bureau, Linzhi, Tibet 860000, China;
4. Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Using the daily precipitation and daily runoff data in the songhua river basin during 1961 ~ 2018, based on the 11 extreme precipitation index and five extreme runoff indicators, taking the trend analysis method, Mann-Kendall nonparametric test methods, Mann-Kendall mutation test, kriging interpolation method, Pearson correlation coefficient and other methods, this paper analyzed the change characteristics and regional differences of extreme precipitation and extreme runoff events in songhua river basin and, at the same time, analyzed the correlation between the extreme precipitation and extreme runoff events. The results show that, except the CDD and SDII indexes in the continuous dry period, the perennial average values of the other indexes all show that the songhua River basin is the high-value region, the songhua River main stream basin is the second-highest value region, and the Nenjiang River basin is the low-value region. The spatial trend distribution and abrupt transition years of each extreme precipitation index also reflect regional differences. The variation trend of each extreme runoff index was similar to that of the abrupt change year, and all showed a slight variation trend. Under different time

收稿日期:2020-11-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508001)

作者简介:章晓梦(1997-),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为水文物理规律及水文预报。

* 通讯作者:鞠琴(1980-),女,江苏泰兴人,博士,副教授,研究方向为流域水文模拟和气候变化影响研究。

scales, the correlation coefficients of extreme precipitation and extreme runoff events all passed the 99% significance test. Due to the slow confluence of the Songhua River Basin, extreme precipitation and extreme runoff events show the most significant correlation when the time scale is 30 days.

Key words: extreme meteorological hydrological events; Spatio-temporal variation characteristics; Pearson correlation analysis; extreme precipitation index; Songhua River basin

松花江流域内各地区有显著的气候差异,且降水空间分布不均匀^[1]。任国玉等^[2]的研究指出,东北偏高纬度地区的降水量呈增加或者不明显变化趋势。曹小磊等^[3]研究结果表明气温呈显著升高趋势,降水量和径流量呈不显著下降趋势,影响天然径流的主要气象要素是降水量。袁杰等^[4]研究结果表明松花江各流域年径流量均有下降的趋势。已有学者针对极端气候事件定义方法、极端降水事件规律特点进行研究^[5-8]。目前针对松花江流域气候变化的研究大部分集中在单个气象、水文要素,如降水、气温或径流的研究,缺少对极端气象水文要素变化的分析以及其成因的研究。

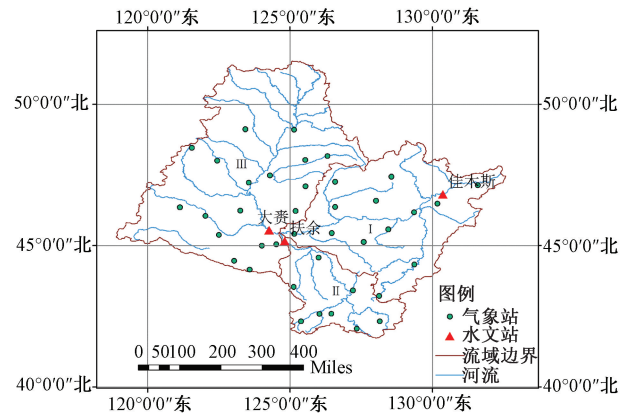
本文拟以 1961—2018 年间松花江流域 39 个气象站点的逐日降水观测资料,以及 1961—2018 年间松花江流域佳木斯、大赉、扶余 3 个水文站点的日径流量资料为研究对象,采用趋势分析法、Mann-kendall 非参数检验方法、Mann-kendall 突变检验法、克里金插值法、皮尔逊相关系数等方法进行松花江流域极端降水和极端径流的时空变化规律和变异点诊断,分析松花江流域及各子流域极端气象水文特征以及极端降水与极端径流事件的关联性,为该流域极端气象水文事件的预测及防灾减灾规划提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况及数据来源

松花江流域位于中国东北的北部地区,其经纬度范围为北纬 41°42′至 51°38′、东经 119°52′至 132°31′,流域内有内蒙古、黑龙江、吉林三个省份,总流域面积为 $55.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。将松花江流域分为松花江干流流域、二松流域、嫩江流域三个子流域进行分析,选择流域内 39 个气象站点及 3 个具有代表性的水文站点,3 个水文站分别为嫩江的大赉站、第二松花江的扶余站以及松花江干流的佳木斯站。松花江流域站点分布图见图 1。

所用降水数据为中国气象数据网提供的 1961—2018 年的逐日降水实测资料。对数据资料进行筛选和质控处理,并对存在降水数据缺失的



注: I:松花江干流流域,II:第二松花江流域,III:嫩江流域。

图 1 松花江流域站点分布图

Fig. 1 Site distribution map in Songhua River Basin

日期进行了剔除,最终提取出所选 39 个站点的相关信息,得到了完整连续的逐日降水实测数据。径流实测数据为佳木斯、扶余、大赉水文站 1961 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日的逐日径流数据。

1.2 研究方法

世界气象组织气候委员会等组织成立了气候变化监测和指标专家组,并定义了 27 个典型气候指数,包括 16 个气温指数和 11 个降水指数^[9],目前这些指数已被广泛应用于极端气候研究。本文选取其中 11 个降水指数(表 1)进行研究。极端径流事件采用洪量作为标准,用最大 1 日洪量、最大 3 日洪量、最大 7 日洪量、最大 15 日洪量、最大 30 日洪量作为标准^[10](表 2)。

运用趋势分析法、Mann-kendall 非参数检验方法^[11]对极端降水指数和极端径流指数进行趋势分析,采用克里金插值绘制极端降水指数的空间分布图,采用 Mann-kendall 突变检验法^[11]得到各极端指数的突变点,利用皮尔逊相关系数分析极端降水与极端径流的关联性。

2 结果分析

2.1 极端降水要素

2.1.1 极端降水要素的空间分布特征

松花江流域的极端降水指数空间分布特征见

表 1 极端降水指数定义

Tab. 1 Definition of extreme precipitation index

指数类型	指数名称	缩写	定义
强度指数	最大 1 日降水量/mm	Rx1day	年内最大 1 日降水量
	最大 5 日降水量/mm	Rx5day	年内最大连续 5 日降水总量
	降水强度/(mm·d ⁻¹)	SDII	年总降水量与湿日日数(日降水量≥1.0 mm)的比值
绝对指数	中雨日数/d	R10	日降水量≥10 mm 的日数
	大雨日数/d	R20	日降水量≥20 mm 的日数
	日降水量≥1 mm 的日数/d	R1	日降水量≥1 mm 的日数
相对指数	强降水量/mm	R95pTOT	日降水量>基准期内第 95%分位值的年累计降水量
	特强降水量/mm	R99pTOT	日降水量>基准期内第 99%分位值的年累计降水量
持续指数	持续干期/d	CDD	日降水量<1 mm 的最大持续日数
	持续湿期/d	CWD	日降水量>1 mm 的最大持续日数
	年总降水量/mm	PRCPTOT	日降水量>1 mm 的年累计降水量

表 2 极端径流指数定义

Tab. 2 Definition of extreme runoff index

指数类型	指数名称	缩写	定义
强度指数	最大 1 日洪量/×10 ⁸ m ³	Rx1day	年内最大 1 日洪量
	最大 3 日洪量/×10 ⁸ m ³	Rx3day	年内最大连续 3 日洪量
	最大 7 日洪量/×10 ⁸ m ³	Rx7day	年内最大连续 7 日洪量
	最大 15 日洪量/×10 ⁸ m ³	Rx15day	年内最大连续 15 日洪量
	最大 30 日洪量/×10 ⁸ m ³	Rx30day	年内最大连续 30 日洪量

图 2。强度指数中,降水强度(SDII)分布较均匀,最大降水强度 9.14 mm/d 出现在长春,最小降水强度 7.49 mm/d 出现在富锦,其余强度指数在松花江干流流域由西向东先增加再减小,第二松花江流域由西南向东北部逐渐减小,嫩江子流域由西南向东北呈先增加后减小趋势,Rx1day、Rx5day 这两个强度指数的最大值均出现在流域最南部,分别为 67.99 mm 和 107.69 mm。

绝对指数中,在嫩江子流域,R1 和 R10 指数由东南向西北呈增加趋势,R20 指数由东南向西北先增大后减小;在第二松花江和松花江干流附近,三个绝对指数的分布特征相同,呈中南部大,西部、东部小的分布特点。

持续指数中,持续干旱指数和持续湿润指数是长时间内持续降雨情况的反映,其中持续干旱指数反映长时间内无降雨的情况,是研究干旱的方法之一^[12]。持续干期(CDD)与持续湿期(CWD)、年总降水量(PRCPTOT)呈完全相反的空间分布,CDD 指数在嫩江子流域呈南部大、北部小的趋势,在二松子流域及松花江干流子流域呈南部小、北部大的分布趋势,最大值出现在嫩江流域南部的富锦,约达 75.07 d,最小值出现在第二松花江流域南部的东岗,为 27.84 d。

相对指数在嫩江流域从东南到西北呈增大趋势,在松花江干流和第二松花江附近从西到东先增大后减小,从南到北先减小后增大。

极端降水指数存在区域性差异,除 CDD 和 SDII 外,其余指数的分布特征均呈现出第二松花江流域为高值区,松花江干流流域次之,嫩江流域为低值区。说明在松花江流域,嫩江流域降水量、降水日数、降水强度较小,第二松花江流域极端降水事件强度高且持续性强,应成为重点防护对象。

2.1.2 极端降水要素的空间趋势分布

极端降水要素在不同空间的趋势性反映了其变化趋势的总体规律,可借助 M-K 趋势检验对松花江流域各极端降水指标的变化趋势进行检验,其空间分布情况如图 3 所示。松花江流域极端降水事件表现出明显的区域差异性。

强度指数是一个衡量是否发生洪涝灾害的重要指标,23 个站点的 Rx1day 指数表现出上升趋势,其中 5 个站点通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;有 21 个站点的 Rx5day 指数表现出上升趋势,18 个站点表现出下降趋势;25 个站点的 SDII 指数表现出上升趋势,14 个站点表现出下降趋势。Rx1day、Rx5day、SDII 三个强度指数显著增加的站点大多分布在嫩江子流域南部和松花江干流子流

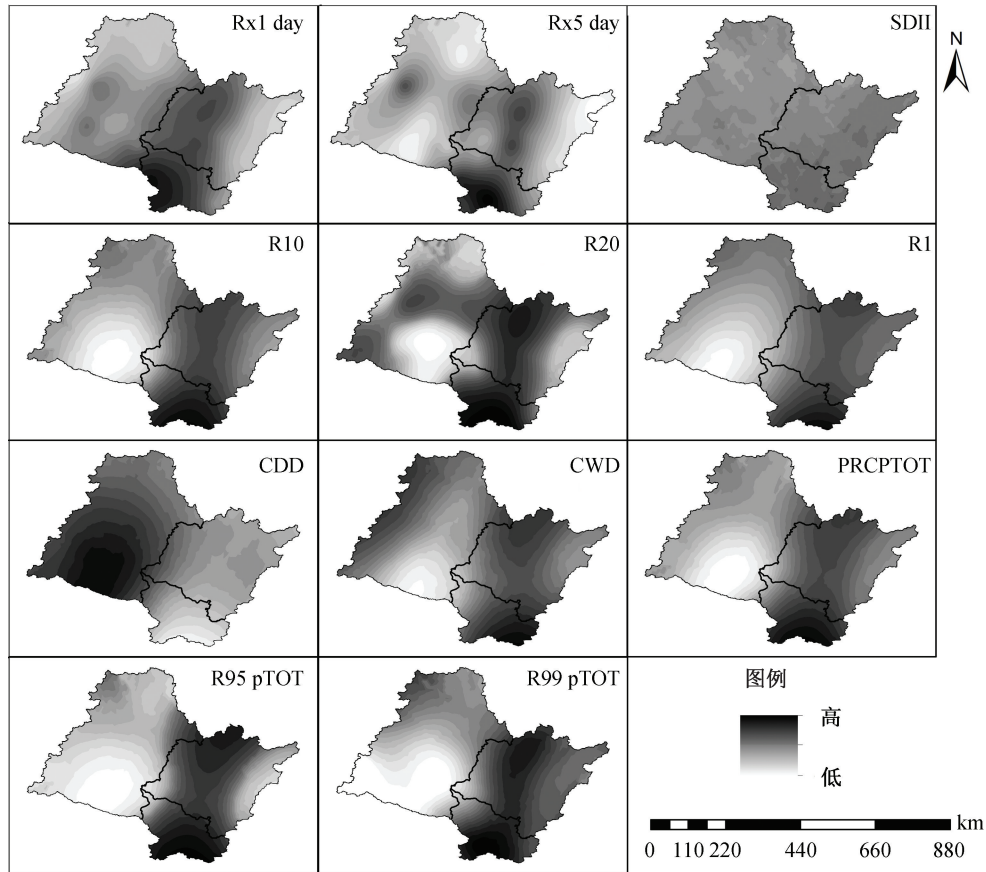


图 2 极端降水指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of extreme precipitation index

域西部,且最大增幅均出现在明水站。

绝对指数中,R10 指数趋于增加站点数为 27 个,仅有安达站变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;R20 指数趋于增加站点数为 25 个,仅有安达站和白城站变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;有 29 个站点的 R1 指数表现出上升趋势,其中 5 个站点呈显著上升趋势。与下降趋势相比,绝对指数在松花江流域的上升趋势更加明显,但变化趋势并不显著,大多呈微弱上升趋势。

持续指数中,仅有 5 个站点的 CDD 指数呈微弱上升趋势,34 个站点呈下降趋势,呈显著下降趋势站点主要分布在嫩江流域中部和松花江干流流域北部;有 19 个站点的 CWD 指数表现出上升趋势,20 个站点表现出下降趋势;年总降水量 (PRCPTOT) 趋于增加的站点数为 32 个,仅有 7 个站点 PRCPTOT 指数趋于减小,大多集中在嫩江流域南部,代表松花江流域整体降水量有所增加。

相对指数中,19 个站点的 R95pTOT 指数表现出上升趋势,其中 4 个站点通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,22 个站点的 R99pTOT 指数表现出上升趋势,其中 4 个站点呈显著上升趋势。由此可见,同

一个极端降水指标在不同时间段和不同区域的变化趋势均不同,体现了极端降水事件在时间和空间上的复杂性和差异性。

2.1.3 极端降水要素的突变分析

掌握径流演变规律,除分析其总体趋势外,还必须判断并检验突变发生的时间、次数以及变化幅度^[13]。水文学或气候学上的突变是指系统从一种稳定状态跳跃到另一种稳定状态的现象^[14]。借助 M-K 突变检验方法对松花江流域三个子流域 1961—2018 年的极端降水指数进行突变分析,突变分析结果见表 3。

在松花江干流流域,强度指数和绝对指数无突变点,持续指数 CDD、CWD、PCRPTOT 的突变年份分别为 1998 年、1972 年、1963 年,相对指数 R95pTOT、R99pTOT 的突变年份为 1964 和 1966 年左右;二松流域仅有持续干期 CDD 指数在 1967 年有明显突变;嫩江流域的强度指数中的 Rx1day、Rx5day 指数分别在 1970 年、1963 年发生突变;整个松花江流域各极端降水指数中仅有 Rx5day 和 CDD 指数分别在 1964 年和 1993 年左右开始突变。松花江流域及各子流域在突变点后的指数

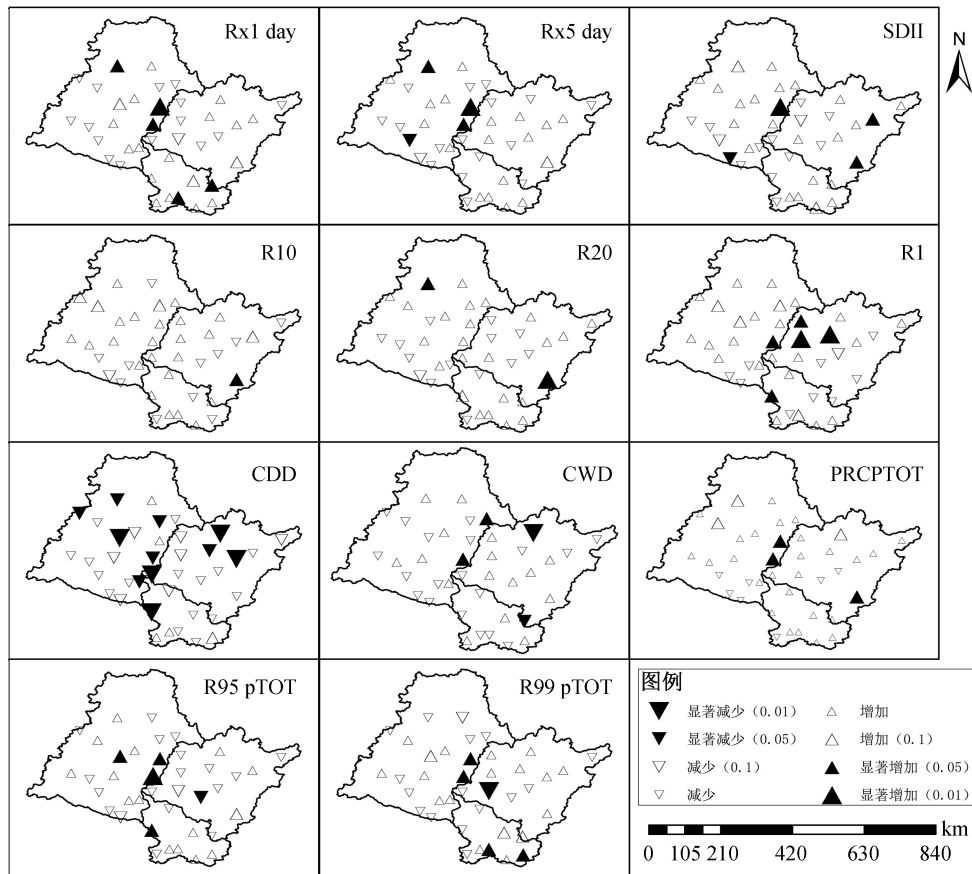


图3 极端降水指数空间趋势分布

Fig. 3 Spatial trend distribution of extreme precipitation index

表3 极端降水指数突变检验

Tab. 3 Abrupt change test of extreme precipitation index

指数	松花江干 流域	二松 流域	嫩江 流域	全流域
Rx1day	无	无	1970 ↓	无
Rx5day	无	无	1963 ↓	1964 ↓
SDII	无	无	无	无
R10	无	无	无	无
R20	无	无	无	无
R1	无	无	无	无
CDD	1998 ↓	1967 ↓	无	1993 ↓
CWD	1972 ↓	无	无	无
PRCPTOT	1963 ↓	无	无	无
R95pTOT	1964 ↓	无	无	无
R99pTOT	1966 ↓	无	无	无

序列均为突变减小的过程,各指数的突变时间表现出明显的空间差异性。

2.2 极端径流要素

不同时间尺度下年最大洪量的变化趋势和突变年份相近,见表4,佳木斯站、扶余站、大赉站1961—2018年各极端径流指数M-K检验的临界值

$|Z|$ 均小于1.96,未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,在佳木斯站和大赉站呈微弱下降趋势,在扶余站Rx1day、Rx3day指数呈微弱下降趋势,Rx7day、Rx15day、Rx30day指数呈微弱上升趋势,各指数总体变化趋势较为稳定。图4以年最大7日洪量(Rx7day)为例分析各水文站变化趋势和突变情况。

三个水文控制站中佳木斯站和大赉站极端径流量较大,扶余站的径流量较小。从图4可以看出,佳木斯站RX7day指数M-K检验图的UF和UB曲线在0.05显著性水平阈值线内有多个交点,其中1967年为突变点,在1976年左右UF曲线超过了置信曲线,指数值有一个突变减小的过程,其余交点可以看出RX7day有突变减小的趋势,但减小趋势尚未达到0.05显著性水平;指数值年际变化较大,在20世纪60年代至80年代初呈下降趋势,20世纪80年代至2000年左右呈上升趋势,21世纪初呈现减少再增加的趋势。

扶余站RX7day指数M-K检验图的UF和UB曲线在0.05显著性水平阈值线内有多个交点,但UF曲线从未超过置信曲线,代表RX7day指数在

表 4 极端径流指数趋势及突变

Tab. 4 Trend and mutation of extreme runoff index

极端径流指数	佳木斯站			扶余站			大赉站		
	气候倾向率 $/(\times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a})$	M-K 检验 Z 值	突变 年份	气候倾向率 $/(\times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a})$	M-K 检验 Z 值	突变 年份	气候倾向率 $/(\times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a})$	M-K 检验 Z 值	突变 年份
Rx1day	-0.018	-1.301	1967 ↓	-0.003	-0.376	无	-0.016	-1.328	1964 ↓
Rx3day	-0.040	-1.134	1967 ↓	-0.005	-0.067	无	-0.019	-1.134	1964 ↓
Rx7day	-0.066	-0.912	1967 ↓	0.021	0.060	无	-0.026	-0.979	1964 ↓
Rx15day	-0.103	-0.832	1967 ↓	0.052	0.215	无	-0.053	-1.328	1964 ↓
Rx30day	-0.258	-1.087	1967 ↓	0.072	0.027	无	-0.122	-1.073	1964 ↓

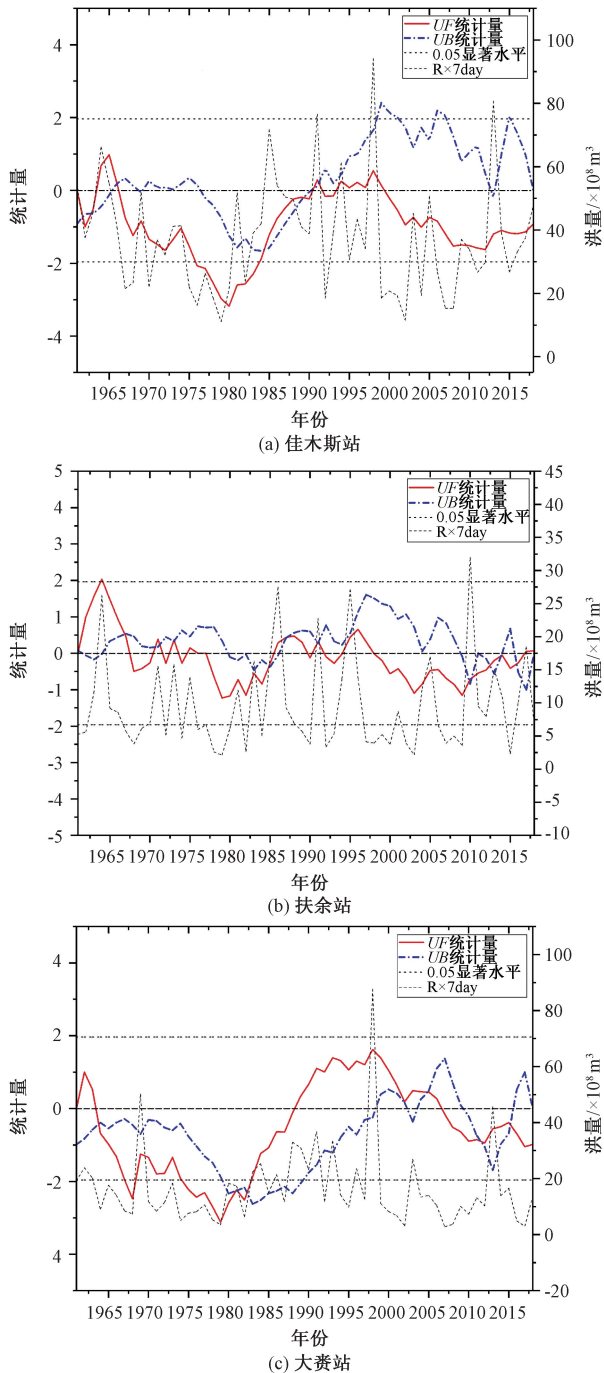


图 4 最大 7 日降水量 (Rx7day) 突变分析
Fig. 4 Mutation test of Rx7day

扶余站无突变点,指数值呈波动性变化,总体变化趋势不明显。

大赉站 Rx7day 指数 M-K 检验图的 UF 和 UB 曲线在 0.05 显著性水平阈值线内有多个交点,其中突变点为 1964 年,在 1975 年左右 UF 曲线超过了置信曲线,径流量有一个突变减小的过程。在置信区间外 UF 曲线和 UB 曲线交于 1983 年,说明在该点 Rx7day 指数有增加的趋势,但变化趋势没有达到突变的水平,因此不是突变点;指数值年代际变化幅度较大,20 世纪 50 年代至 80 年代初、21 世纪以后相对减少,20 世纪 80 年代至 2000 年相对增加。

嫩江流域和松花江全流域的强度指数均在 20 世纪 60 年代发生突变,其控制站大赉站和佳木斯站的年最大洪量也于 20 世纪 60 年代发生突变。在二松流域,1953 年丰满水库开始进行人工调节之后,对大洪水洪峰的削减效果十分显著,对防洪起到了很大作用,因此扶余站极端径流指数的年代际变化不明显,且无突变点。

2.3 极端降水和极端径流事件的关联性

根据极端径流指数所定义的一年最大 1、3、7、15、30 日洪量,取其中相对较长时间尺度,分析松花江流域在时间尺度为 7 日、15 日、30 日时极端降水和径流事件两者间的关联性,通过皮尔逊相关系数对松花江流域不同时间尺度下的年最大降水量与年最大洪量进行相关性分析。由表 5 可知,在松花江流域,各极端降水指数和极端径流指数的相关系数均通过 99% 置信度检验,表现出显著的正相关关系,表明这两者之间存在一定的关联性,极端降水量的变化必然带来极端径流量的变化。在各控制站所对应流域范围内,年最大 30 天降水量与年最大 30 天洪量表现出最为显著的关联性,其相关系数分别为 0.678、0.713、0.807。时间尺度为 30 天的极端降水和极端径流的关联性最为明

显,说明松花江流域面积较大,支流较多,汇流时间较长,所以随着时间尺度的增大,其极端降水与极端径流的相关性更加显著。

表5 极端降水与极端径流相关系数

Tab.5 Rainstorm and flood correlation coefficient

流域分区	极端降水	极端径流		
		Rx7day	Rx15day	Rx30day
第二松花江	Rx7day	0.552**	0.578**	0.573**
	Rx15day	0.581**	0.594**	0.584**
	Rx30day	0.671**	0.677**	0.678**
嫩江	Rx7day	0.664**	0.663**	0.676**
	Rx15day	0.648**	0.647**	0.660**
	Rx30day	0.689**	0.694**	0.713**
全流域	Rx7day	0.620**	0.634**	0.637**
	Rx15day	0.704**	0.716**	0.712**
	Rx30day	0.787**	0.801**	0.807**

注:*为相关系数通过95%置信度检验,**为相关系数通过99%置信度检验。

3 结论

本文基于1961—2018年松花江流域39个气象站点逐日降水资料和3个水文站点逐日流量资料,对极端降水要素和极端径流要素的变化趋势、时空分布特征及关联性进行了分析。

1)松花江流域极端降水指数值变化规律呈现出区域差异性,除持续干期CDD和降水强度SDII外,其余指数的分布特征均呈现出第二松花江流域为高值区,松花江干流流域次之,嫩江流域为低值区。各控制水文站极端径流指数变化趋势均未通过95%显著性检验,且仅扶余站极端径流指数未出现突变点。

2)反映强降水量的极端降水指数在大部分地区表现为增加趋势,但极端径流指数却大多表现为减少趋势或不显著上升趋势,未显示出同步变化趋势。降水量与径流量之间关系密切,但复杂的气象活动和大坝、水库等水利工程的修建都是出现该现象的重要影响因素,例如二松流域上的丰满水库会使径流过程逐渐改变,从而影响极端径流事件的演变规律,导致在极端降水增加的情况下,极端径流指数却呈减少趋势。

3)不同时间尺度下各极端降水指数与极端径流指数的相关系数均通过99%显著性检验,由于松花江流域面积较大,支流较多,汇流时间较长,当时间尺度为30天时,极端降水与极端径流表现出最为显著的关联性。

参考文献:

- [1]孟悦.松花江流域气候年代际变化分析及预测[D].兰州:兰州大学,2007.
- [2]任国玉,吴虹,陈正洪.我国降水变化趋势的空间特征[J].应用气象学报,2000(03):322-330.
- [3]曹小磊,周祖昊,许翼,等.流域水文气象变化趋势及相关性分析[J].东北水利水电,2016,34(08):29-31.
- [4]袁杰,李弘义,李胜军.松花江流域径流变化特征及趋势分析[J].海河水利,2013(05):33-36.
- [5]EASTERLING D R, MEELIL G A, PARMESM C, et al. Climate Extremes: Observations, Modeling, and IMPacts [J]. Science, 2000, 289(5487): 2068.
- [6]封国林,龚志强,支蓉.气候变化检测与诊断技术的若干新进展[J].气象学报,2008,66(06):892-905.
- [7]GARNER G, VAN LOON A F, PRUDHOMME C, et al. Hydroclimatology of Extreme River Flows [J]. Freshwater Biology, 2015, 60(12):2461-2476
- [8]FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P, et al. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century [J]. Climate Research, 2002, 19: 193-212.
- [9]翟盘茂,刘静.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J].中国工程科学,2012,14(09):55-63.
- [10]张利平,杜鸿,夏军,等.气候变化下极端水文事件的研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1370-1379.
- [11]魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [12]吴徐燕,杨德保,王式功,等.近50年我国大陆无雨日的时空变化特征分析[C]//中国气象学会.第28届中国气象学会年会——S3天气预报灾害天气研究与预报.中国气象学会:中国气象学会,2011:13.
- [13]袁杰,李弘义,李胜军.松花江流域径流变化特征及趋势分析[J].海河水利,2013(05):33-36.
- [14]符淙斌,王强.气象突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482.

(责任编辑 王利君)