

黄河流域极端气候事件的时空变异特征研究

王 芸^{1,2}, 赵鹏祥³

(1. 河北开放大学 教务处, 河北 石家庄 050080; 2. 国家开放大学 农林医药教学部, 北京 100039;
3. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:以黄河流域为例,充分考虑降水要素的空间异质性,将其划分为8个子区域;选定持续干燥指数(CDD)、持续湿润指数(CWD)、强降水日数(R10)和5 d最大降水量(RX5)4个极端降水指标,采用数理统计、一元线性回归等方法对各子区域极端降水特征进行趋势性分析;并采用基于贝叶斯理论的可逆跳跃马尔科夫蒙特卡洛算法(RJMCMC),识别并量化了各子区域不同极端降水指标的突变位置及其变异程度。结果表明:1)黄河流域暖干化趋势明显,流域北部尤为突出。2)CDD、CWD、R10和RX5指数空间上趋势变化较大,但相邻区域之间存在相似的分布规律。3)不同子区域不同极端气候指标的突变年份不同,但多集中于90年代。研究结果可有效提高极端气候预测的准确性和可靠性。识别并量化气候时空变异特征对防洪、抗旱布控工作的顺利开展具有现实意义。
关键词:极端气候;贝叶斯理论;时空变异特征;黄河流域
中图分类号:S165 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0190-07

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Extreme Climate Events in the Yellow River Basin

WANG Yun^{1,2}, ZHAO Peng-xiang³

(1. Academic Affairs Office, Hebei Open University, Shijiazhuang 050080, Hebei, China;
2. School of Agroforestry & Medicine, The Open University of China, Beijing 100039, China;
3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Affected by global warming, floods and droughts caused by extreme climate change are frequent and widespread. Thus, it is of practical significance to identify and quantify the spatio-temporal variation characteristics of extreme climate for the smooth development of flood control and drought control. Taking the Yellow River Basin as an example, the basin was divided into eight sub-regions based on the spatial heterogeneity of precipitation. The trends of four extreme precipitation indices (CDD, CWD, R10 and RX5) in each sub region were analyzed by mathematical statistics and linear regression. Based on Bayesian Theory, Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo (RJMCMC) was used to identify and quantify the mutation position and degree of extreme precipitation index in each sub-region. The results showed that 1) the trend of warming and drying was obvious in the Yellow River Basin, especially in the northern part of the basin. 2) Meanwhile, the spatial trends of CDD, CWD, R10 and RX5 indices changed greatly, but there were similar distribution rules between adjacent regions. 3) The abrupt change years of 4 extreme climate indices in each sub-regions were different, but most of them were concentrated in the 1990s. The results can effectively improve the accuracy and reliability of extreme climate prediction.
Key words: extreme climate; Bayesian Theory; spatiotemporal variation characteristics; Yellow River Basin

全球气候变暖导致的极端气候事件呈广发、频发的态势,破坏程度增强,应对难度加大^[1],这极大地阻碍了流域水管部门防洪、抗旱工作的顺利开展。据统计,2020 年 6 月全国平均降水量 110.90 mm,较常年同期(99.30 mm)偏多 12%,为 1961 年以来第 9(1998 年为历史同期第 1),造成全国 20 余省上千万人次受灾。中国因旱致灾所占比例最大,约占受灾总面积的 55%,每年大约 $21.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 农田因旱受灾,经济作物损失高达 $100 \times 10^8 \text{ kg}$,占多年平均 GDP 的 0.05%^[2-3]。降水直接决定了流域的丰枯变化特征,因此,开展极端气候事件的时空变异特征研究,对流域水资源的准确评估具有重要价值。

近年来,国内外学者针对极端气候事件开展了大量研究,并取得了较好的研究结果。柴素盈等^[4]以南盘江流域为研究对象,采用 Mann-Kendall 秩次检验法和小波分析法,分析了极端气候指数的时空变化规律,结果显示该流域呈暖干化趋势,且 2001 年以后尤为明显。洪美玲等^[5]以怒江流域为例,采用反距离权重插值法、Kendall 非参数检验等方法对流域内年际降雨特征、年内强度特征和极端降雨事件进行了分析,发现流域上中下游极端降水事件均呈上升趋势。周旗等^[6]选用 9 种与降水相关的极端降水指标,利用线性趋势法、Mann-Kendall 突变点检验和方差分析等方法,揭示渭河流域极端降水事件的趋势性、突变性以及上、中、下游降水情况的差异特征,表明极端降水强度、极端降水总量均呈上升趋势,且极端降水强度上升趋势高于极端降水量。汪成博等^[7]利用汉江流域 63 个气象站点降水数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验等分析方法,对 1970—2015 年多尺度极端降水变化特征进行分析,得出该流域极端降水在年尺度分配不均,其主要集中于 5—9 月,但 2000 年之后春季极端降水有所增加。通过分析上述研究发现,不同区域极端降水事件在不同年份发生了突变,可以诊断出突变点位置,但未能定量诊断出各突变年份发生的可靠程度。因此,从概率视角对符合泊松分布的极端气候事件进行变异诊断,根据概率更全面地判断某点为突变点的可能性大小。

本研究以地处干旱、半干旱地区的黄河流域为例,充分考虑降水的空间分布和下垫面要素的空间异质性影响,将黄河流域按照流域二级分区划分为 8 个子区域。首先,选取 4 个极端气候指标,持续干燥指数(CDD)、持续湿润指数(CWD)、强降水日数(R10)和 5 d 最大降水量(RX5),采用数理统计、一

元线性回归等方法对各子区域极端降水指标进行时空特征分析;最后,采用基于贝叶斯理论的可逆跳跃马尔科夫蒙特卡洛算法(RJMCMC)方法,识别并量化各子区域 4 个极端气候指标的突变点位置及其突变年份的可能性大小,以期提高极端气候预测的准确性和可靠性。

1 研究区概况

黄河干流全长 5 464 km,流域面积约 79.5 万 km^2 ,属于典型的复杂气候区(干旱、半干旱)。降水量年内分配不均,主要集中在 6—10 月,占 1970—2016 年多年平均降水量的 70%左右,降水量呈自东南至西北逐渐递减的趋势变化特征。多年平均气温介于 $-4 \sim 14^\circ\text{C}$,西部和北部低、东部和南部高^[8-10]。

选取流域内部及周边 95 个气象站点 1970—2016 年共 47 a 逐日降水数据,且所有站点数据均通过三性检验(一致性、代表性和可靠性)。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。考虑到降水空间分布和下垫面要素的空间异质性影响,将黄河流域按照流域二级分区划分为 8 个子区域,依次为龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至河口镇、内流区、河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口以及花园口以下(分别简称为 I、II、III、IV、V、VI、VII 和 VIII)^[11]。流域地理位置及气象站点空间分布位置见图 1。

2 研究方法

2.1 极端气候指标

极端气候指标用于表征流域的干湿状态,选取与极端降水事件密切相关的 4 个极端降水指数来分析黄河不同子区域的极端降水事件特征,分别为持续干旱指数(CDD)、持续湿润指数(CWD)、强降水日数(R10)和 5 d 最大降水量(RX5),具体含义见表 1。

2.2 可逆跳跃马尔科夫链蒙特卡洛方法(RJMC-MC)

可逆跳跃马尔科夫蒙特卡罗方法是建立在极端事件序列的数学模型,把各极端事件的时间序列看成是可逆跳的马尔科夫链,首先采用可逆跳跃马尔科夫链识别出该序列中共存在几个突变年份,然后利用贝叶斯理论获得该序列中各备选假设处对应的“突变点”概率,并由此识别出其突变点位置,该方法用于检测由几个不同参数下的泊松分布随机数组成的时间序列突变点,并取得较满意的结果。同时,通常认为极端事件服从泊松分布^[12]。其具体计算过程为:

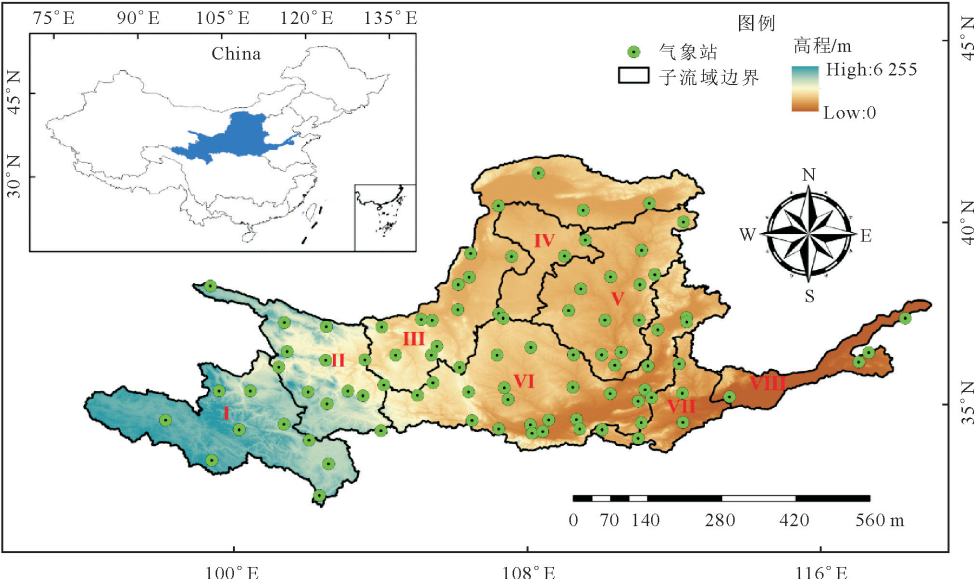


图 1 流域地理位置及气象站点空间分布

Fig. 1 Geographical location of the river basin and spatial distributions of meteorological stations

表 1 极端气候指数的定义

Table 1 Definition of extreme climate index

指标	符号	物理意义
持续干旱指数/d	CDD	日降水量<1 mm 的最长连续无雨日天数
持续湿润指数/d	CWD	日降水量≥1 mm 的有雨日天数
强降水日数/d	R10	每年日降水量≥10 mm 的总日数
5 d 最大降水量/mm	RX5	每年连续 5 日的最大降水量

给定参数 λ , 则极端事件发生次数的似然概率目标函数为:

$$P(h|\lambda,T)=\exp(-\lambda T)\frac{(\lambda T)^h}{h!},h=0,1,2,\cdots,\lambda>0,T>0\tag{1}$$

式中, T 代表一段时期, 本文中为一次极端事件的时段长度; λ 为尺度参数的改变率; h 为一次极端事件发生的次数; $h!$ 为极端事件的阶乘; $P(h|\lambda,T)$ 为极端事件发生次数的后验概率。

取其共轭先验分布进行研究, 即伽马分布, 则有:

$$P(\lambda;h',T')=\frac{H'^{h'}\lambda^{h'-1}}{\Gamma(h')}\exp(-\lambda T'),h>0,h'>0,T'>0\tag{2}$$

式中, Γ 为伽马函数; h' 和 T' 分别为参数 λ 符合伽马分布下的尺度参数改变率和一次极端事件时段长度; $P(\lambda;h',T')$ 为尺度参数 λ 符合伽马分布的极端事件发生次数的后验概率。

极端事件的发生次数在满足泊松分布时, 其泊松参数先验密度为参数 h', T' 的伽马分布。且 λ 的后验分布为伽马分布, 参数为 $h+h'$ 和 $T+T'$, 并且 λ 的先验分布期望为 $E\lambda=h'/T'$ 。 h 的边际密度函数则为:

$$P(h|T;h',T')=\int_0^\infty P(h|\lambda,T)P(\lambda;h',T')d\lambda\tag{3}$$

式中, $P(h|\lambda;h',T')$ 代表一次极端事件发生次数的边际密度函数;

其中, $h=0,1,2,\cdots,h'>0,T'>0,T>0,P_{nb}$ 服从负二项分布。

在使用贝叶斯推断方法处理极端事件突变过程中, 首先需要计算其后验期望, 为:

$$E(a|h)=\int_{\theta}a\cdot\theta\cdot P(\theta|h)d\theta\tag{4}$$

式中, a 为假设一个模型含 θ 个参数的任何分布函数; θ 为模型参数; $E(a|h)$ 为极端事件的后验期望。

采用 MCMC 算法来进行积分的求解问题。MCMC 算法又称马尔科夫链的蒙特卡罗模拟算法, 其计算公式为:

$$E(a|h)\approx\frac{1}{N}\sum_{i=1}^Na(\theta^{(i)})\tag{5}$$

式中, $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \cdots, \theta^{(N)}$ 是从服从先验概率分布为 $P(\theta|h)$ 的模拟马尔科夫链中抽样的平均值, 其值为无偏估计。

完整的可逆跳跃马尔科夫蒙特卡罗方法 RJMCMC 算法的计算步骤如下:

- 1) 确定出不同模型假设间的跳跃概率矩阵 $J(H_k\rightarrow H_{k'})$ 。
- 2) 从模拟分布 $Q(u_k|H_k,H_{k'})$ 中进行抽样得到 u_k 。
- 3) 设定转换矩阵 $Q_{k'}, u_{k'}=g_{k,k'}\theta_k u_k$ 。
- 4) 计算从 H_k 到 $H_{k'}$ 的让渡比 $r, H_{k'}$ 优于 H_k 的概率定义为 $\min(1,r)$, 如果 $\min(1,r)=1$, 则拒绝 H_k 跳到 $H_{k'}$; 如果 $\min(1,r)<1$, 则拒绝 $H_{k'}$, 保留原假设 H_k , 其中 r 由下

$$r = \frac{P(h|\theta_{k'}, H_{k'})P(\theta_{k'}|H_{k'})P(H_{k'})J(H_{k'} \rightarrow H_k)Q(u_{k'}|\theta_{k'}, H_{k'}, H_k)}{P(h|\theta_k, H_k)P(\theta_k|H_k)P(H_k)J(H_k \rightarrow H_{k'})Q(u_k|\theta_k, H_k, H_{k'})} \left| \frac{\partial g_{k,k'}\theta_k, u_k}{\partial(\theta_k, u_k)} \right| \quad (6)$$

5)返回第一步继续运行,直到所有假设均满足停止。

3 结果与分析

3.1 不同子区域不同极端降水指数的时程变化特征

图 2 为采用一元线性回归方法和滑动平均方法得到的黄河流域 8 个子区域 4 个极端降水指数的时程变化趋势结果。分析图 2 可知,1)受流域下垫面和降水分布的空间异质性影响,不同极端降水指标在不同子区域中的呈现形式不同,如 CDD 指标在黄河上游(Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ)呈微弱的下降趋势,龙羊峡以上区域(Ⅰ)尤为明显(由 10 a 滑动变化趋势线斜率可知);同时,近 10 a 来,CDD 呈下降趋势,CWD 呈微弱上升趋势,这表明龙羊峡以上区域受全球变暖影响,暖干化过程加剧;2)黄河中游(Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ)的 4 个极端降水指标的变化趋势基本一致,但局部时段略有差异,这可能与局地小气候水文循环过程密切相关,但 2005 年之后,各指数均有明显的增加趋势,强降水日数(R10)和 5 d 最大降水量(RX5)尤为突出,该结果与周旗等^[6]得到的结论一致;3)黄河下游(Ⅶ和Ⅷ)的 CDD、CWD、R10 和 RX5 指数在时间上呈现出“先上升-后下降-再上升”的趋势变化特征,即近年来,每年持续干旱事件、洪涝事件呈增强的趋势,存在明显的连旱、连涝事件,流域水管部门应予以重视。

3.2 不同子区域不同极端降水指数的空间分布规律

图 3 为采用数理统计方法得到的黄河流域 8 个子区域 4 个极端降水指数的空间分布结果。由图 3 可以发现,不同指数在不同子区域差异明显,但明显存在着地域性的分布特征:1)由西北至东南方向,CDD、R10 和 RX5 指数呈现减少的趋势变化特征,该变化特征与降水的空间分布趋势基本一致,而 CWD 指数由北至南呈现出增加的趋势变化特征,即流域上游和渭河流域湿润,而内流域和内蒙古河套平原相对干旱;2)从上游至下游,CDD 指数分布范围为 34.65~58.74 d、CWD 指数的分布范围为 5.00~12.46 d、R10 指数介于 3.40~22.61 d,RX5 指数介于 6.73~25.50,这表明自上游至下游,持续干旱时间逐渐减少,而持续湿润时间相差较小;3)不同指标在空间上存在明显的聚集性分布特征,如龙门至三门峡和三门峡至花园口的 CDD 指数空间分布相同、河口镇至龙门和龙门至三门峡的 R10 和 RX5 指数空间分布基本一致,这意味着流域水管部

门在制定极端降水应对方案时可以统筹管理。

3.3 各子区域不同极端降水指数的突变检验结果

图 4 为采用可逆跳跃马尔科夫链蒙特卡洛方法(RJMCMC)得到的极端气候指标的突变检验结果。

本研究同一指标随机选取一个子区域(CDD 和 CWD 指数均选取第 1 个子区域、R10 和 RX5 指数分别选取第 8 个和第 7 个子区域)进行展示,并将各突变检验结果列于表 2 中。由图 4 可以看出,1)图 4 左列为不同子区域 4 个极端气候指标序列突变检验的各备选假设的后验概率分布结果,由 4(a)可以看出,子区域Ⅰ的 CDD 指数的突变点个数为 1 个,其后验概率为 0.45 左右,即仅有 1 个突变年份 2000 年,其后验概率接近 1,称之为强突变;2)CWD、R10 和 RX5 指数均存在 1 个突变年份(突变点个数为 1 时,其后验概率最大),其突变年份对应的后验概率分别为 0.41、0.29 和 0.23,突变年份分别为 1990 年、2003 年和 1986 年;其中,CWD 指数在 1993 年的后验概率也相对较大,这也是诸多研究者采用 Mann-Kendall 方法识别出多个突变点(伪突变)的原因^[4];3)由表 2 可知,不同子区域极端气候指标的突变年份不同,但集中于 20 世纪 90 年代,这可能归因于 90 年代黄河流域的人类活动加剧,经济社会快速发展,导致区域水文循环过程增强,同时,2000 年之后植树造林措施的实施以及宁蒙灌区等大量引用河道水,导致流域整体蒸发减少、进而使得降水减少^[13-17];4)CDD 指数在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ子区域的突变年份分别为 2000、1989/2015、2010、2001、1990、2000 年和 1983 年,其突变后验概率分别为 0.45、0.34/0.39、0.29、0.42、0.31、0.47 和 0.29,需要说明的是子区域Ⅱ存在 2 个突变年份,而子区域Ⅷ不存在突变年份;5)同理,CWD 指数下,子区域Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅶ和Ⅷ均存在 1 个突变点,而其他子区域不存在突变;R10 指数下,子区域Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅷ均存在 1 个突变年份,而其余子区域不存在突变;RX5 指数在子区域Ⅱ、Ⅴ、Ⅶ和Ⅷ的突变年份分别为 1999、2008、1986 年和 1993 年,其后验概率分别为 0.32、0.31、0.23 和 0.30;6)总而言之,基于贝叶斯假设基本理论方法不仅识别出黄河流域各子区域的不同极端气候指标的突变点位置,同时采用概率的形式量化评估了其突变点处对应的可能性大小,从而减少了其他方法(如 Mann-Kendall 突变检验)检测出的伪突变点位置,进而提高了极端气候预测的准确性和可靠性。

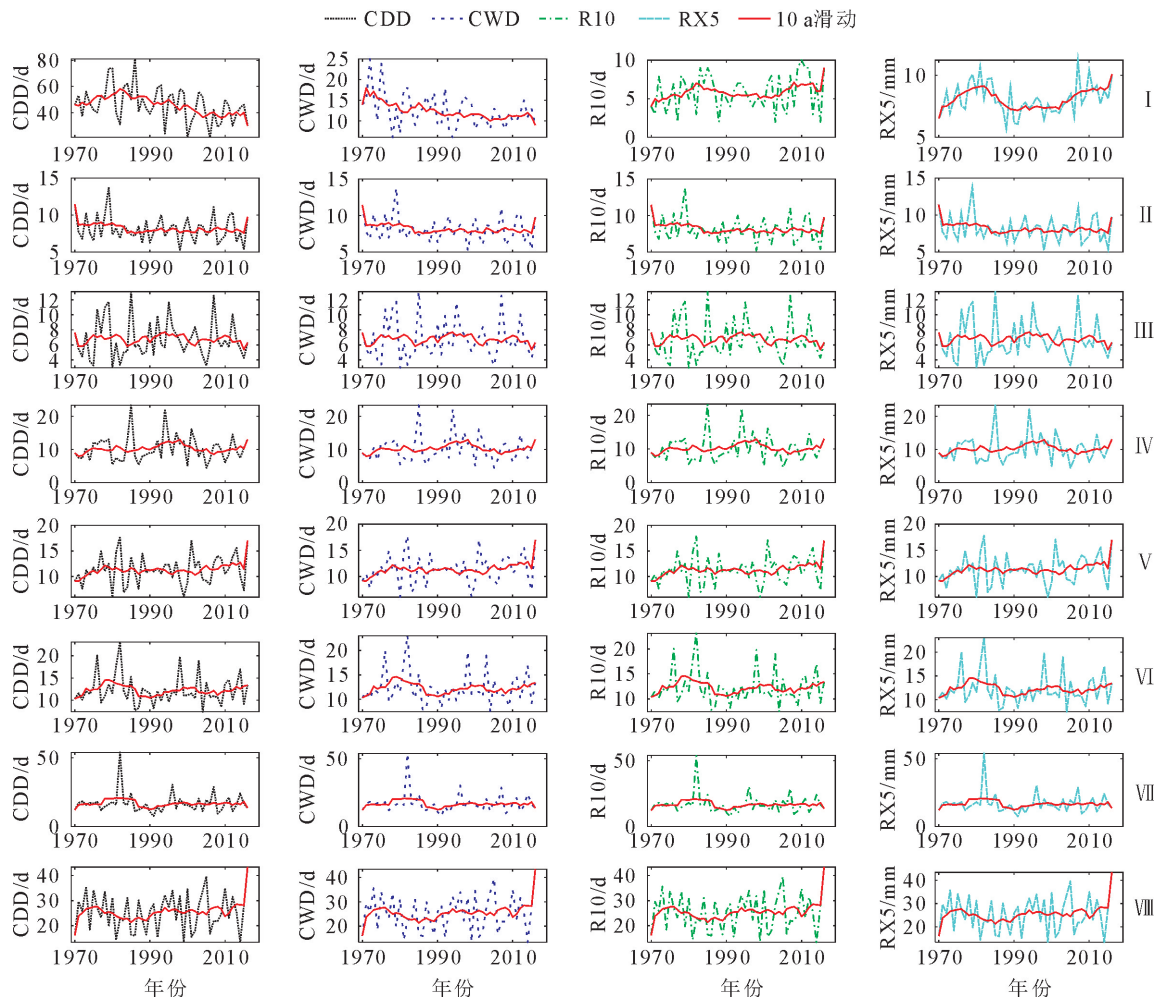


图 2 不同子区域不同降水指数的时程变化特征

Fig. 2 Temporal variation characteristics of different precipitation indices in different sub-basins

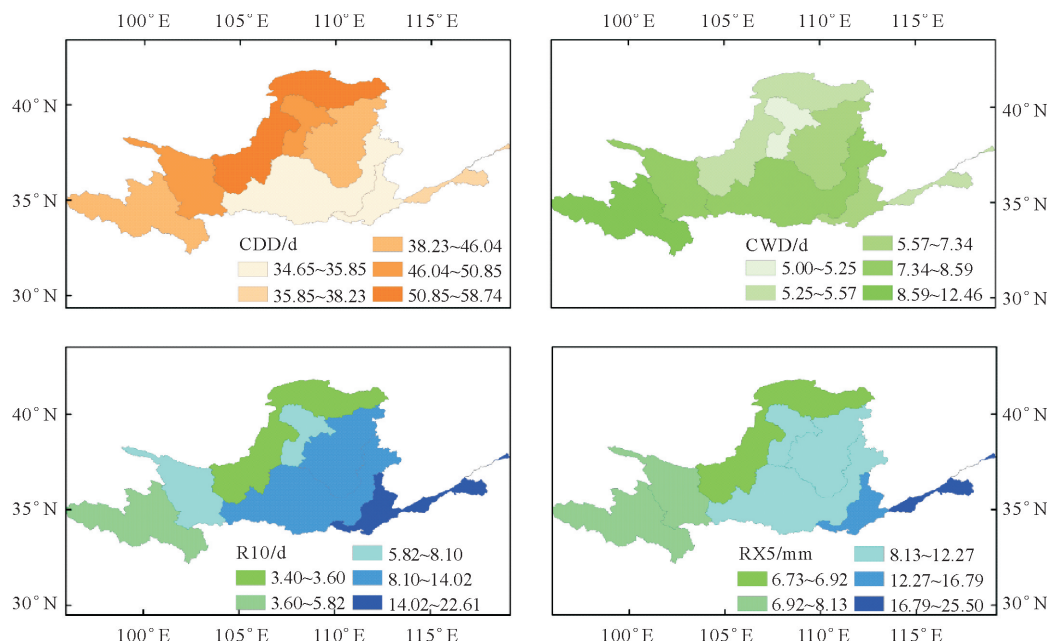


图 3 不同子区域不同降水指数的空间分布规律

Fig. 3 The spatial distribution of different precipitation indices in different sub-basins

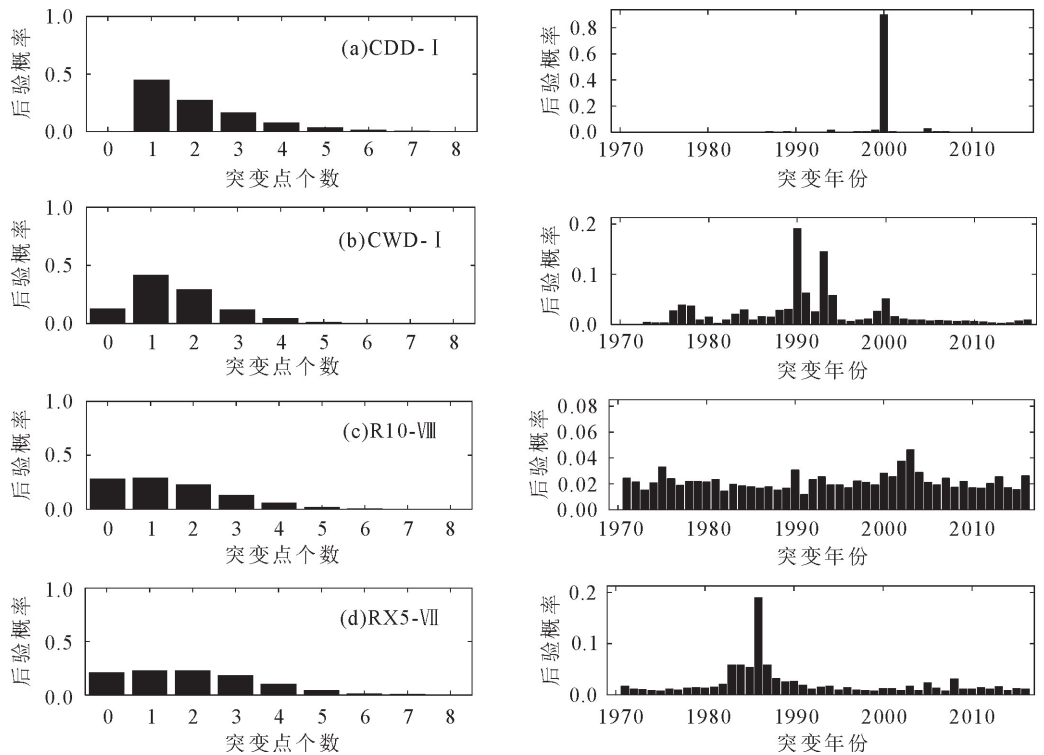


图 4 不同子区域 4 个序列对应的突变检验结果

Fig. 4 Mutation test results corresponding to four sequences in different sub-basins

表 2 不同子区域不同指标的 RJMCMC 突变检验结果

Table 2 RJMCMC mutation test results of different indices in different sub-basins

子区域	CDD/d			CWD/d			R10/d			RX5/mm		
	突变 个数	突变 年份	后验 概率	突变 个数	突变 年份	后验 概率	突变 个数	突变 年份	后验 概率	突变 个数	突变 年份	后验 概率
I	1	2000	0.45	1	1990	0.41	1	1997	0.31	0	/	/
II	2	1989/2015	0.34/0.39	0	/	/	0	/	/	1	1999	0.32
III	1	2010	0.29	0	/	/	0	/	/	0	/	/
IV	1	2001	0.42	1	2005	0.31	1	1996	0.33	0	/	/
V	1	1990	0.31	1	1998	0.31	1	2008	0.31	1	2008	0.31
VI	1	2000	0.47	0	/	/	1	1986	0.29	0	/	/
VII	1	1983	0.29	1	1981	0.31	0	/	/	1	1986	0.23
VIII	0	/	/	1	1987	0.32	1	2003	0.29	1	1993	0.30

4 结论

以黄河流域为研究对象,充分考虑了流域下垫面分布和气象要素的空间异质性特征。采用数理统计、一元线性回归和 RJMCMC 等方法,揭示了 4 个极端气候指标(CDD、CWD、R10 和 RX5)在上中下游 8 个子区域的时空变化规律,并量化评估了各极端气候序列在备选假设出对应的后验概率,得到的重要结论为:

受流域下垫面和降水分布的空间异质性影响,不同极端降水指标在不同子区域中呈现形式不同,但各指标近年来均呈增大的趋势变化特征,即极端事件增多;

从上游至下游,CDD、CWD、R10 和 RX5 指数的变化范围分别为 34.65~58.74 d、5.00~12.46 d、3.40~22.61 d 和 6.73~25.50 mm,这表明自上游至下游,持续干旱时间逐渐减少,而持续湿润时间相差较小;

同一子区域,不同极端气候指标多于 20 世纪 90 年代发生突变,且其突变年份对应的后验概率差异较大,即不同极端事件发生突变的可能性不同;同时,RJMCMC 方法精确地筛选出“伪突变”事件,从而提高了极端气候预测的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] 郭旭新,赵英,高志永,等. 基于 SPEI 的陕北黄土丘陵区干旱

特征及影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 69-76.

GUO X X, ZHAO Y, GAO Z Y, *et al.* SPEI based drought characters and factors in Loess Hilly regions of northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 69-76. (in Chinese)

[2] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[C]//WILHITE D A. Drought: a global assessment. New York: Routledge, 2000.

[3] 屈艳萍, 酃建强, 吕娟, 等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 297-304.

QU Y P, LI J Q, LÜ J, *et al.* A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 297-304. (in Chinese)

[4] 柴素盈, 曹言, 窦小东, 等. 1964-2017 年南盘江流域主要极端气候事件时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 151-160.

CHAI S Y, CAO Y, DOU X D, *et al.* Analysis temporal and spatial changes of extreme climatic events in Nanpan River basin from 1964 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 151-160. (in Chinese)

[5] 洪美玲, 何士华. 1961-2010 年怒江流域降雨时空变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 248-252.

HONG M L, HE S H. Spatial and temporal change of rainfall in Nuijiang basin in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 248-252. (in Chinese)

[6] 周旗, 张海宁, 任源鑫. 1961-2016 年渭河流域极端降水事件研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 833-841.

ZHOU Q, ZHANG H N, REN Y X. Extreme precipitation events in the Weihe river basin from 1961 to 2016[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 833-841. (in Chinese)

[7] 汪成博, 李双双, 延军平, 等. 1970-2015 年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1209-1222.

WANG C B, LI S S, YAN J P, *et al.* Spatiotemporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang river basin during 1970-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1209-1222. (in Chinese)

[8] TANG K L, ZHANG K L, LEI A. Critical slope gradient for compulsory abandonment of farmland on the hilly Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(5): 409-412.

[9] LIU L, LIU Z, REN X, *et al.* Hydrological impacts of climate change in the Yellow River basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model [J]. Quaternary International, 2011, 244(2): 211-220.

[10] 周师, 王义民, 郭爱军, 等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 28-39.

ZHOU S, WANG Y M, GUO A J, *et al.* Spatial and temporal features of future changes in water resources in Yellow River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 28-39. (in Chinese)

[11] 张冉, 王义民, 畅建霞, 等. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274-287.

ZHANG R, WANG Y M, CHANG J X, *et al.* Response of land use change to human activities in the Yellow River basin based on water resources division [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 274-287. (in Chinese)

[12] ZHAO X, CHU P S. Bayesian change point analysis for extreme events (typhoons, heavy rainfall, and heat waves) [J]. Journal of Climate, 2010, 23(5): 1034-1046.

[13] 赵勇, 何国华, 李海红, 等. 基于 Choudhury-Yang 公式的泾河流域蒸散发归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 8-14.

ZHAO Y, HE G H, LI H H, *et al.* Attribution analysis on evapotranspiration changes in the Jinghe river basin based on Choudhury-Yang equation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 8-14. (in Chinese)

[14] 赵腾飞, 郭准, 郭净净, 等. 黄河湿地孟津段生态环境状况及对策研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 170-174, 197.

ZHAO T F, GUO Z, GUO J J, *et al.* Ecological environment of Mengjin Yellow River wetland and improvement measures [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 170-174, 197. (in Chinese)

[15] 董玉峰, 王月海, 韩友吉, 等. 黄河三角洲地区耐盐植物引种现状分析及评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 117-119, 163.

DONG Y F, WANG Y H, HAN Y J, *et al.* Present situation analysis and evaluation of salt tolerant plant introduction in the Yellow River delta area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 117-119, 163. (in Chinese)

[16] 都彦廷, 张冬有. 大兴安岭地区 2001—2019 年地表温度时空分布及影响因素分析[J]. 森林工程, 2020, 36(6): 9-18.

DU Y T, ZHANG D Y. Spatio-temporal distribution of surface temperature and its influencing factors in Daxing'an Mountains from 2001 to 2019[J]. Forest Engineering, 2020, 36(6): 9-18. (in Chinese)

[17] 陈文静, 杨从从. 2001—2017 年青海省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. 森林工程, 2020, 36(5): 54-61.

CHEN W J, YANG C C. Spatiotemporal change characteristics of NDVI and its response to climate factors in Qinghai from 2001 to 2017[J]. Forest Engineering, 2020, 36(5): 54-61. (in Chinese)