

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.005

考虑降雨和径流协调关系的长江上游流域入汛指标

王浩先,朱 坚,钟平安

(河海大学水文水资源学院)

摘要: 利用 1979—2019 年长江上游流域 79 个雨量站日降雨资料以及三峡逐日流量资料,探究了不同阈值判别条件下长江上游流域雨季入汛与流量入汛之间的协调关系,基于不同阈值下雨季入汛日期和流量入汛日期的相关系数,确定了降雨和径流关系最显著时降雨和径流各自对应的阈值,并依此确定了长江上游流域雨季入汛指标和流量入汛指标。结果表明:长江上游流域降水量增加提前于三峡入库流量上涨 2~4 候,入汛前降水量最显著的增加出现在第 30 候,相应的三峡入库流量在第 32 候亦出现明显的上涨;雨季入汛和流量入汛日期的多年平均值分别为 5 月 31 日和 6 月 11 日,1979—2019 年大部分年份雨季入汛日期早于流量入汛日期,但有 8 年雨季入汛稍晚于流量入汛,主要原因是雨季入汛指标中达标雨量站数量不足;采用流域降雨体积指标优化雨季入汛指标后,优化效果显著,仅 2 年雨季入汛日期晚于流量入汛日期。

关键词: 长江上游流域;雨季入汛;流量入汛;累计降水量;滑动平均

Flood season onset index of the upper reaches of the Yangtze River Basin considering concurrent relationship between rainfall and runoff

Wang Haoxian, Zhu Jian, Zhong Ping'an

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on the daily rainfall data of 79 rainfall stations in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 1979 to 2019 and the daily runoff data at the Three Gorges, the concurrent relationship between the rainy season onset and the runoff-based flood season onset in the upper reaches of the Yangtze River Basin under different threshold discrimination conditions was explored. Based on the correlation coefficients between the rainy season onset dates and the runoff-based flood season onset dates under different thresholds, the respective thresholds for rainfall and runoff when their relationship was the most significant were determined, and accordingly, the rainy season onset index and the runoff-based flood season onset index of the upper reaches of the Yangtze River Basin were determined. The results indicate that the increase in rainfall in the upper reaches of the Yangtze River Basin precedes the rise of the inflow at the Three Gorges by 2-4 pentads. Before the flood season onset, the most significant increase in rainfall occurs at the 30th pentad, and the corresponding inflow at the Three Gorges shows an obvious rise at the 32nd pentad; the multi-year average dates of the rainy season onset and the runoff-based flood season onset are May 31 and June 11, respectively. In most years from 1979 to 2019, the rainy season onset date is earlier than the runoff-based flood season onset date, but there are eight years when the rainy season onset is slightly later than the runoff-based flood season onset, mainly because the number of rainfall stations meeting the standard in the rainy season onset index is insufficient. After optimizing the rainy season onset index using the basin rainfall volume index, the optimization effect is remarkable, and there are only two years when the rainy season onset date is later than the runoff-based flood season onset date.

Key words: the upper reaches of the Yangtze River Basin; rainy season onset; runoff-based flood season onset; cumulative rainfall; moving average

三峡水库在防洪、发电和综合利用方面发挥了重要作用,显著减轻了四川、重庆河段的防洪压力,有效保障了长江中下游地区的防洪安全^[1]。近年来,三峡工程和嘉陵江等一些具有防洪调度功能的蓄水发电工程有效利用了长江上游水资源并且带来了良好的经济效益^[2-3]。

三峡水库在入汛及出汛阶段水位会出现明显抬升与回落,因此需依据入库流量对汛期与非汛期进行划分^[4]。在工程初步设计阶段^[5],结合长江中下游防洪需求,确定三峡水库于每年 6 月 10 日至 9 月 30 日按汛

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202801)

作者简介: 王浩先(2001—),男,硕士研究生,主要从事气候变化研究。E-mail:231301010039@hhu.edu.cn

通信作者: 朱坚(1983—),男,副教授,博士,主要从事气候成因机制分析研究。E-mail:levoca@hhu.edu.cn

期防洪限制水位 145.00 m 运行^[6]。此后,众多学者围绕三峡水库汛期划分开展了优化研究;刘攀等^[7]采用变点分析法的 3 种模型,结合不同取样方法开展汛期分期,并通过统计分析法进行对比评价,发现基于超定量取样的概率变点分析模型具有更优的无偏性与有效性,分期成果最佳;刘克林等^[8]验证了 Fisher 最优分割法可实现多指标聚类且不破坏样本序列顺序,据此提出以最优分期数为依据开展汛期分期;汪肖雅等^[9]采用均值变点、矢量统计等方法,基于入库流量初步划分出丹江口水库的夏汛期、过渡期与秋汛期;秦智伟等^[10]分析了三峡上游流域汛期暴雨时空特征及洪水量级变化,将三峡水库洪水划分为主汛期与汛末期两个阶段;丁胜祥等^[11]综合数理统计与成因分析,通过探究流域洪水与西太平洋副热带高压位置的关联,揭示了三峡水库与瀑布沟水库汛期洪水的分期特征;薄会娟等^[12]对三峡水库 6 月 1 日至 9 月 30 日多年逐日入库流量开展矢量统计分析,将 6 月 1 日至 6 月 30 日划分为前汛期,7 月 1 日至 9 月 10 日划分为主汛期。

随着当前长江上游梯级水库防洪、兴利库容占河道径流比例不断增大,固定单一的汛期运行水位限制了洪水资源化的水平^[13]。如何实现三峡汛期的动态划分及预测,对三峡水库发电、长江流域水资源调蓄等工作具有一定的指导意义^[14-16]。本文参照 QX/T 396—2017《中国雨季监测指标 西南雨季》,通过不断变换各项阈值揭示长江上游流域雨季入汛日期与流量入汛日期的相关关系,尝试给出基于降雨和流量的长江上游入汛日期预判方法。

1 研究区概况与研究数据

长江上游流域位于 24°N~36°N、90°E~112°E 之间,包含乌东德、溪洛渡等众多重要大型水电站^[17]。流域东临海拔差异大,气温和降水量主要呈现自上游至下游、自东向西递减的趋势,气候类型主要为亚热带季风气候^[18],降雨的季节分布变化很大^[19],暴雨多发生在雨季,雨季降水占全年降水的 50% 以上^[20-21]。三峡水库位于四川盆地和长江中下游平原交界处,长江上游流域降水对三峡径流量变化会造成至关重要的影响^[22-23],三峡库区的多年平均降水量约为 1 200 mm^[24],且年降水量以 1.02 mm/a 的速率增长^[25]。

本文降水数据采用中国气象局提供的 1979—2019 年长江上游流域 79 个雨量站逐日降水观测资料,流域地形及雨量站分布如图 1 所示。同时,选取三峡水库 1979—2019 年经还原处理的逐日入库流量序列作为研究数据。

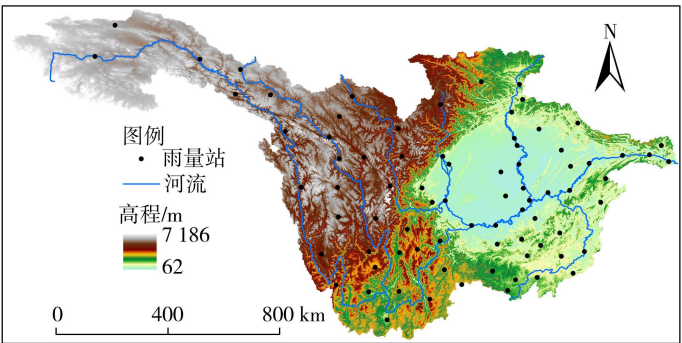


图 1 长江上游流域地形及雨量站分布

Fig.1 Topography and distribution of rainfall stations in the upper reaches of the Yangtze River Basin

2 研究方法

2.1 滑动累计降水量

滑动累计降水量是指在给定时间窗口内连续数日的降水量总和,并把最后一日记为该滑动累计降雨的日期。例如,5 月 5 日滑动 5 d 累计降水量表示 5 月 1—5 日的降水量总和,5 月 6 日滑动 5 d 累计降水量表示 5 月 2—6 日的降水量总和,以此类推,直至整个研究期间的时间序列均被覆盖。这种计算方式能够平滑日降雨数据的波动,便于分析降水量的变化趋势,常用于雨季的划分。文中滑动平均流量的定义与累计降水量类似,区别在于使用的是多日平均流量。

2.2 滑动 t 检验

滑动 t 检验是用于识别序列突变点的常用统计方法,其核心思路是将某一气候序列中两段子序列的均值差异等效为两个独立总体均值的显著性差异进行检验。如果两段子序列的均值差异超过一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突变发生。

对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本量分别为 n_1 和 n_2 。两段子序列方差的平均值为 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$,两段子序列的方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 ,定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$$

(1)

其中
$$s = \sqrt{(n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)}$$
 式(1)遵循自由度为 $\nu = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

3 结果与分析

3.1 三峡入库流量和长江上游流域降雨过程分析

由图 2 可知,长江上游流域降水量增长超前于流量上涨 10~20 d,降水量与入库流量峰值出现时间相差 15~20 d,降水量峰值出现在第 37 候,超过 30 mm,三峡入库流量峰值出现在第 40 候,最大入库流量超过 30 000 m³/s。 t 检验结果表明,降水量序列和入库流量序列分别在第 30 候和第 31、32 候通过显著性检验, t 统计量大于 $\alpha = 0.05$ 水平下的临界值,说明入汛前降水量最显著的增加出现在第 30 候,相应的三峡入库流量在第 31、32 候亦出现明显的上涨。

黄青兰等^[26]通过分析我国东部地区降雨的时间-纬度剖面图得到东部雨带的演进过程规律,本文参照其统计方法得到长江上游流域滑动 5 d 雨带演进过程(图 3)。由图 3 可知,流域内降雨由东部向西部逐渐减少,全流域滑动 5 d 累计降水量在 6 月 1 日前后开始完全超过 15 mm,与流域平均降水量在第 30 候明显增多这一结论相符。

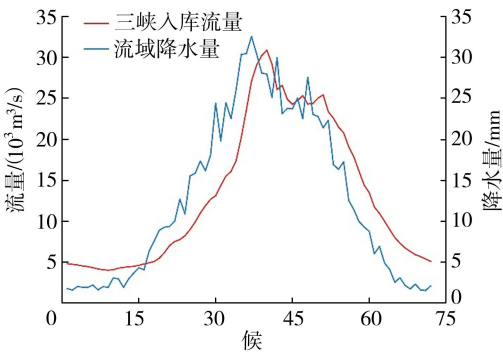


图 2 长江上游流域逐候累计降水量和三峡逐候平均入库流量过程

Fig. 2 Variation process of pentad-based cumulative rainfall in the upper reaches of the Yangtze River Basin and pentad-based average inflow at the Three Gorges

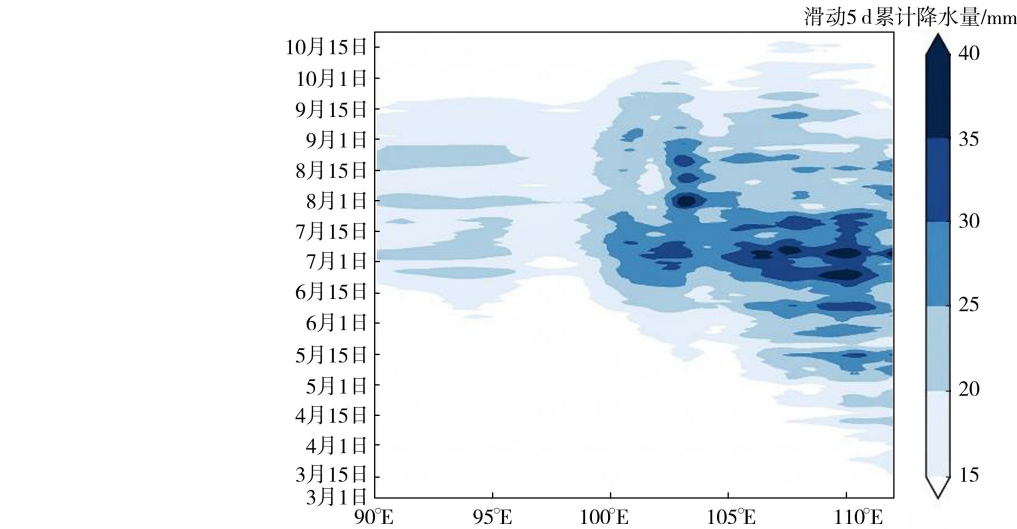


图 3 长江上游流域雨带演进过程

Fig. 3 Evolution process of rain belt in the upper reaches of the Yangtze River Basin

3.2 雨季入汛与流量入汛指标的协调确定

参考 QX/T 396—2017《中国雨季监测指标 西南雨季》确定长江上游流域雨季入汛日期的指标。各雨量站雨季入汛阈值 K 为:

$$K = R/R_l \tag{2}$$

式中: R 为滑动 5 d 平均降水量; R_l 为 5—10 月多年平均候累计降水量。

若某雨量站在 4 月 21 日后的任意 20 日内,当 $K \geq 1$ 至少 i 次时,将日降水量超过 j mm 的首日日期作为该雨量站的雨季入汛日期;但若在 4 月 21 日后的 10 d 之内未出现 i 次 $K \geq 1$ 的情况,则直接将日降水量超过 j mm 的首日日期作为该雨量站的雨季入汛日期。在整个流域尺度上,当长江上游流域中占比为 p 的雨量站雨季入汛日期都在某日之前,则将该日日期作为流域的雨季入汛日期。其中 i, j, p 为变量,通过不断调整其取值,可改变单站及全流域雨季入汛日期,进而筛选出最优雨季入汛日期并确定相应的雨季入汛指标。

当连续 y 个滑动 5 d 的三峡平均入库流量均大于流量阈值 x 时,将首个滑动 5 d 日期作为流量入汛日期。通过调整变量 x, y 的取值改变流量入汛日期,以找出合理的流量入汛日期并确定流量入汛指标。

基于上述两类指标定义。遍历 i (2~10 次)、 j (10、15、20 mm)、 p (40%、45%、50%、55%、60%) 的各项值可以得到不同 i, j, p 对应的 1979—2019 年长江上游流域雨季入汛日期序列,再利用得到的各 i, j, p 对应雨季入汛日期序列分别与不同 x, y 对应的流量入汛日期序列进行相关性分析,可以得到各 i, j, p 对应的相关系数和流量入汛日期分布情况,随后对分布图中的相关系数求平均即可得到各 i, j, p 对应的平均相关系数。由图 4 可知,当 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 时对应的平均相关系数最大 (0.343),于是可以得到 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 对应的相关系数及流量入汛日期分布情况 (图 4(b))。由图 4(b) 可知,相关系数大致随 x, y 增加而减小,流量入汛日期随着 x, y 的增加而逐渐推迟,相关系数在 $y=6$ 个、 $x=17\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时达到最大,对应流量入汛日期为 6 月 11 日,与国家规定三峡每年维持汛限水位开始日期 (6 月 10 日) 大致相符。因此可以初步将 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 对应的雨季监测指标作为长江上游流域雨季入汛指标, $y=6$ 个、 $x=17\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 对应指标作为流量入汛指标。

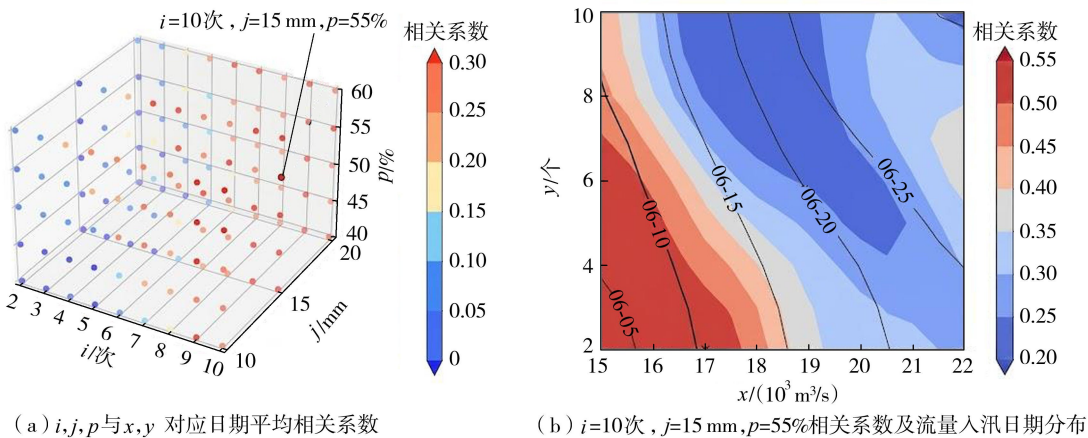


图 4 不同阈值相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients under different thresholds

长江上游流域雨季入汛指标和流量入汛指标确定出的逐年日期序列如图 5 所示。1979—2019 年长江上游流域平均雨季入汛日期为 5 月 31 日,与第 3.1 节中流域平均降水量在第 30 候明显上升这一结论相符,多年平均流量入汛日期为 6 月 11 日,与第 3.1 节中三峡入库流量在第 32 候明显上涨这一结论相符,雨季入汛日期比流量入汛日期提前约 11 d。雨季入汛日期和流量入汛日期最早年分别为 2013 年 (5 月 10 日) 和 1992 年 (5 月 12 日),最晚年分别为 1979 年 (6 月 15 日) 和 2006 年 (7 月 3 日)。1979—2019 年中,多数年份雨季入汛日期早于流量入汛日期,有 8 年晚于流量入汛,分别是 1983 年、1985 年、1990 年、1991 年、1992 年、2005 年、2018 年、2019 年。雨季入汛日期与流量入汛日期相关系数为 0.533,通过 99.9% 信度检验,说明两类指标下,入汛日期序列具有较好的相关性。

3.3 雨季入汛较迟原因分析及指标优化

长江上游流域有 8 个年份流量入汛日期早于雨季入汛日期,主要是由于流量入汛前已入雨季的雨量站集中分布在青藏高原以东 (图 6,分图名括号中百分数代表进入雨季的雨量站占比),且此类雨量站个数不足 (p 未达到 55%),降雨笼罩范围偏不足。虽然降雨笼罩面积没有达到雨季入汛指标要求,但是考虑到上游来水量可能已满足三峡入库流量上涨的需求,因此进一步探讨流量入汛前长江上游流域降雨体积的变化情况。

定义当流域连续 n 个滑动 5 d 的平均雨量体积大于阈值 m 时,首个滑动 5 d 日期作为降雨体积入汛日

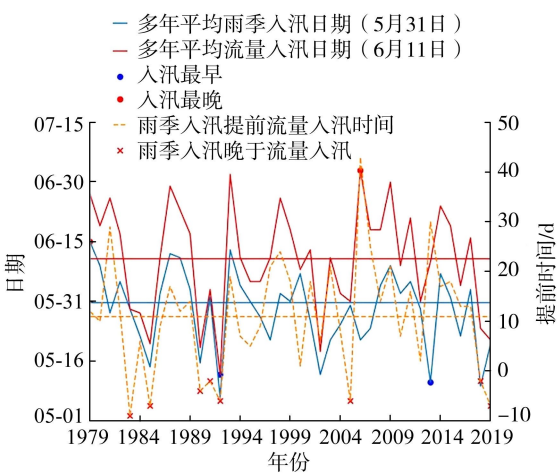


图 5 雨季入汛指标和流量入汛指标对应的日期序列及两者超前滞后特征

Fig. 5 Corresponding date series of rainy season onset index and runoff-based flood season onset index and their lead-lag characteristics

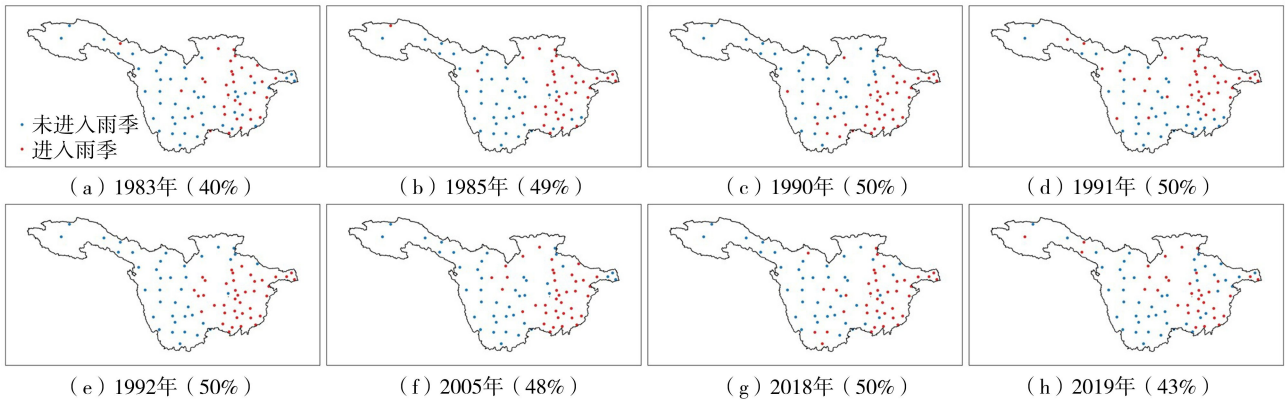


图 6 流量入汛日期早于雨季入汛日期年份流量入汛前已进入雨季的雨量站分布

Fig. 6 Distribution of monitoring stations that have entered rainy season before runoff-based flood season onset in years when runoff-based flood season onset date is earlier than rainy season onset date

期。通过变换变量 m 、 n 的值改变降雨体积入汛日期,以找出合理的降雨体积入汛日期并确定降雨体积入汛指标。

三峡入库流量与上游流域降雨体积过程(图 7(a))表明多年平均雨季入汛日期(5 月 31 日)前后,流域内单日降雨总体积可以达到 400 万~500 万 m^3 ,根据这一特征初步限制降雨体积阈值 m 的范围,并将连续滑动 5 d 数 n 的范围限制在 1~9 个,得到不同 m 、 n 对应降雨体积入汛日期与流量入汛日期的相关系数(图 7(b))。 $m=410$ 万 m^3 、 $n=6$ 个时对应相关系数最大(图 7(b) 黑色 x 处),将其对应的降雨体积指标作为长江上游流域降雨体积入汛的标准,可以得到逐年降雨体积入汛日期序列(图 7(c))。降雨体积入汛平均日期(5 月 28 日)较雨季入汛平均日期(5 月 31 日)提前 3 d,降雨体积入汛指标确定出的日期仅有 2 年(1991 年和 2019 年)晚于流量入汛日期,但与流量入汛日期序列的相关系数有所降低,仅为 0.524,且 1991 年与 2019 年的降雨体积入汛日期相比雨季入汛日期更晚。

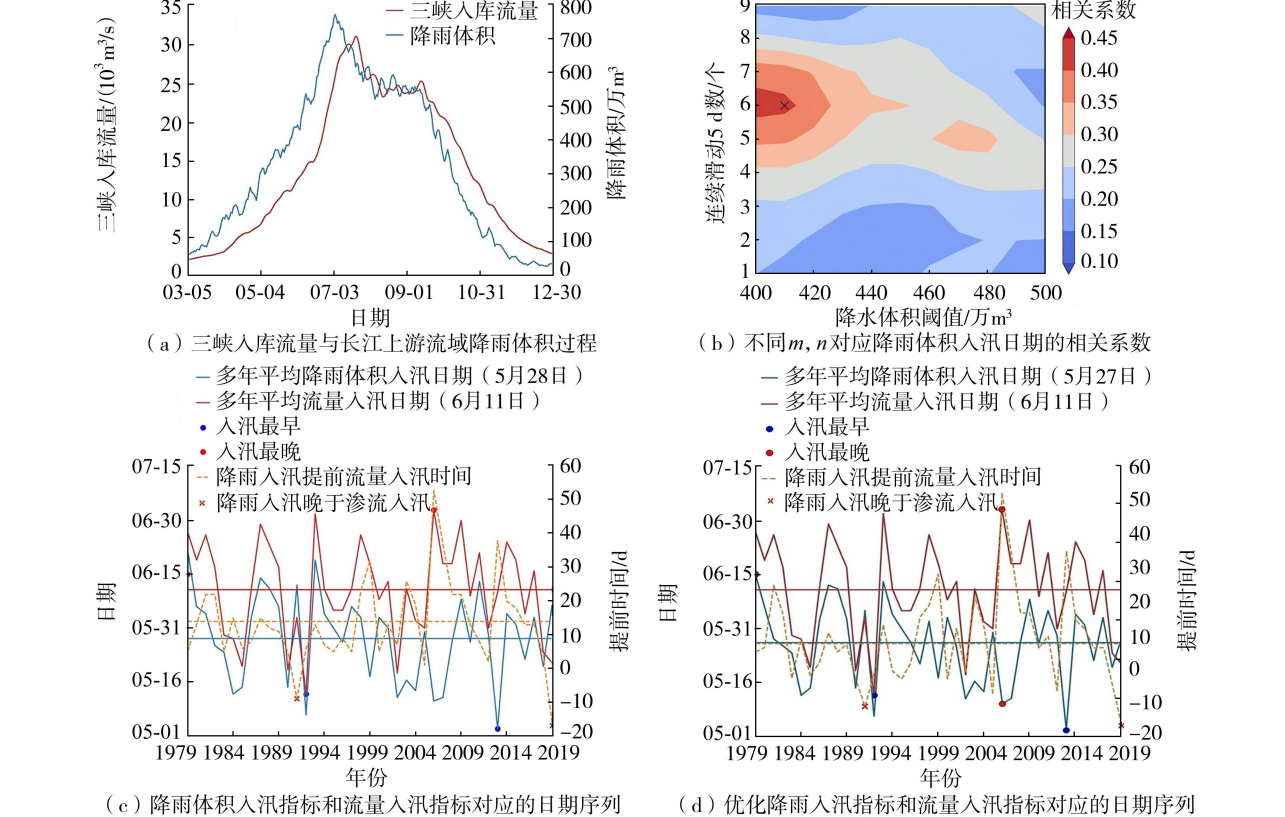


图 7 基于降雨体积入汛的指标优化

Fig. 7 Optimization of flood season onset index based on rainfall volume

为改善雨季入汛日期晚于流量入汛日期的问题,提出优化的雨季入汛指标:将原雨季入汛指标与降雨体积入汛指标确定出较早的入汛日期作为当年的雨季入汛日期。由图 7(d)可知,优化后的雨季入汛与流量入汛日期间的相关系数比原指标有所提高,并且雨季入汛晚于流量入汛的年份减少至 2 年,雨季入汛多年平均日期为 5 月 27 日,相比流量入汛(6 月 11 日)提前约 15 d。

4 结 论

- a. 滑动 t 检验结果表明,三峡入库流量在第 31 候和第 32 候出现明显上涨,长江上游流域降雨在第 30 候明显增多。长江上游流域降水量总体呈现由东部向西部逐渐减少的趋势,全流域滑动 5 d 累计降水量在 6 月 1 日前后开始超过 15 mm,与流域降水量在第 30 候明显增多结论相符。
- b. 根据不同 i,j,p 的平均相关系数,将 $i=10$ 次 $j=15\text{ mm}$ $p=55\%$ 对应的指标作为长江上游流域雨季入汛指标,并根据雨季入汛指标下 x,y 相关系数分布确定出 $x=17\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $y=6$ 个对应的流量入汛指标。
- c. 根据雨季入汛日期迟于流量入汛日期的主要原因以及滑动 5 日降雨体积过程,引入降雨体积入汛指标,并确定了 $m=410\text{ 万 m}^3$, $n=6$ 个对应的降雨体积入汛指标。将原雨季入汛指标与降雨体积入汛指标确定出的较早入汛日期作为当年优化后的雨季入汛日期,优化指标下雨季入汛日期晚于流量入汛日期的年份由 8 年减少至 2 年,且雨季入汛日期与流量入汛日期间相关系数也有所提高。

参考文献:

[1] 郭生练,熊丰,王俊,等. 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位初探[J]. 水利学报,2019,50(11):1311-1325. (Guo Shenglian,Xiong Feng,Wang Jun,et al. Preliminary exploration of design flood and control water level of Three Gorges Reservoir in operation period[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(11):1311-1325. (in Chinese))

[2] 张轩,张行南,王高旭,等. 长江上游水库入库流量的中长期预报[J]. 水资源保护,2022,38(4):131-136. (Zhang Xuan,Zhang Xingnan,Wang Gaoxu,et al. Medium and long term forecast of reservoir inflow in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):131-136. (in Chinese))

[3] 茅昌平,肖衡,王帅,等. 三峡库区表层沉积物有机碳、氮同位素特征及对有机质来源的指示[J]. 水资源保护,2023,39(6):160-168. (Mao Changping,Xiao Heng,Wang Shuai,et al. Characteristics of organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediment of Three Gorges Reservoir region and their implications for sources of organic matter[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):160-168. (in Chinese))

[4] Mo Chongxun,Deng Juan,Lei Xingbi,et al. Flood season staging and adjustment of limited water level for a multi-purpose reservoir[J]. Water,2022,14(5):775.

[5] 水利部长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告[R]. 武汉:水利部长江水利委员会,1992.

[6] 李肖男,傅巧萍,张松,等. 三峡水库汛期运行水位运用方式研究[J]. 人民长江,2022,53(2):21-26. (Li Xiaonan,Fu Qiaoping,Zhang Song,et al. Study on operating water level during flood season of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2022,53(2):21-26. (in Chinese))

[7] 刘攀,郭生练,方彬,等. 汛期分期变点分析方法的原理及验证[J]. 长江科学院院报,2006(6):27-31. (Liu Pan,Guo Shenglian,Fang Bin,et al. Change Point Analysis Methods for Flood Seasonality Determination[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research,2006(6):27-31. (in Chinese))

[8] 刘克琳,王银堂,胡四一,等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进步,2007,27(3):14-16. (Liu Kelin,Wang Yintang,Hu Siyi,et al. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(3):14-16. (in Chinese))

[9] 汪肖雅,郭生练,王俊,等. 考虑梅雨和华西秋雨特征的丹江口水库汛期分期研究[J]. 长江科学院院报,2025,42(8):68-75. (Wang Xiaoya,Guo Shenglian,WANG Jun,et al. Study of flood season division for Danjiangkou Reservoir considering Meiyu and autumn rain characteristics[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research,2025,42(8):68-75. (in Chinese))

[10] 秦智伟,戴明龙,陈炼钢,等. 三峡水库汛期分期洪水特征及成因研究[J]. 人民长江,2018,49(22):1-6. (Qin Zhiwei,Dai Minglong,Chen Liangang,et al. Study on staged flood characteristics and climatic causes for flood of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2018,49(22):1-6. (in Chinese))

[11] 丁胜祥,张莉,张明波. 长江流域洪水分期规律对水库优化蓄水运用方式的科学支撑作用[J]. 水文,2012,32(5):62-68. (Ding Shengxiang,Zhang Li,Zhang Mingbo. Division of flood seasonal phases for Yangtze River Basin and its scientific supporting role in the optimization of reservoir impoundment process[J]. Journal of China Hydrology,2012,32(5):62-68. (in

Chinese))

[12] 薄会娟,董晓华,邓霞. 三峡水库汛期分期方法研究[J]. 人民黄河,2011,33(2):43-44. (Bo Huijuan,Dong Xiaohua,Deng Xia. Study on flood stage method of Three Gorges Reservoir[J]. Yellow River,2011,33(2):43-44. (in Chinese))

[13] 郭生练,李娜,王俊,等. 华西秋雨与梅雨对三峡水库蓄水调度影响分析[J]. 人民长江,2023,54(7):69-74. (Guo Shenglian,Li Na,Wang Jun,et al. Influence of autumn rain of West China and Meiyu on impoundment operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2023,54(7):69-74. (in Chinese))

[14] 蒋海艳,莫崇勋,韦逗逗,等. 水库汛期分期研究综述[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):75-80. (Jiang Haiyan,Mo Chongxun,Wei Doudou,et al. Review of reservoir flood season staging[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):75-80. (in Chinese))

[15] 李文杰,冯志刚,李晓丽,等. 洪泽湖汛期划分综合分析[J]. 中国农村水利水电,2023(6):74-78. (Li Wenjie,Feng Zhigang,Li Xiaoli,et al. A comprehensive analysis of the flood season division of Hongze Lake[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(6):74-78. (in Chinese))

[16] 徐泗鑫. 联系数方法在水库流域汛期分期中的应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2023.

[17] 谭乔凤,施颖,闻昕,等. 大渡河流域汛期涨水阶段径流相似性预报[J]. 水资源保护,2024,40(6):139-147. (Tan Qiaofeng,Shi Ying,Wen Xin,et al. Runoff similarity forecast during water rise stage of flood season in the Dadu River Basin[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):139-147. (in Chinese))

[18] 王文鹏,陈元芳,刘波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):14-21. (Wang Wenpeng,Chen Yuanfang,Liu Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(1):14-21. (in Chinese))

[19] 朱艳欣,桑燕芳. 青藏高原降雨季节分配的空间变化特征[J]. 地理科学进展,2018,37(11):1533-1544. (Zhu Yanxin,Sang Yanfang. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography,2018,37(11):1533-1544. (in Chinese))

[20] Wu Chunyu,Li Qingquan,Dong Lili,et al. Rainy season onset date in Southwest China and the related atmospheric circulations [J]. Atmospheric Research,2024,298:107127.

[21] Chen Xiaoyang,You Qinglong. Effect of Indian Ocean SST on Tibetan Plateau precipitation in the early rainy season[J]. Journal of Climate,2017,30(22):8973-8985.

[22] 李林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报,2004(6):694-700. (Li Lin,Wang Zhenyu,Qin Ningsheng,et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources,2004(6):694-700. (in Chinese))

[23] 施晓晖,徐祥德. 三峡库区来水流量与长江流域上游前期降雨的关系研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(9):1062-1066. (Shi Xiaohui,Xu Xiangde. Relationship between runoff of the three gorges reservoir area and anterior precipitation in upstream of the Yangtze River valley [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(9):1062-1066. (in Chinese))

[24] 王雨潇,孙营营,张天宇,等. 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降雨的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):10-18. (Wang Yuxiao,Sun Yingying,Zhang Tianyu,et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):10-18. (in Chinese))

[25] 王艳君,姜彤,施雅风. 长江上游流域 1961—2000 年气候及径流变化趋势[J]. 冰川冻土,2005(5):709-714. (Wang Yanjun,Jiang Tong,Shi Yafeng. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961-2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005(5):709-714. (in Chinese))

[26] 黄青兰,王黎娟,李熠,等. 江淮梅雨区域入、出梅划分及其特征分析[J]. 热带气象学报,2012,28(5):749-756. (Huang Qinglan,Wang Lijuan,Li Yi,et al. Determination of the onset and ending of regional Meiyu over Yangtze-Huaihe river valley and its characteristics[J]. Journal of Tropical Meteorology,2012,28(5):749-756. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 06 编辑:刘晓艳)