

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.001

富春江水库流域径流变化及其量化归因分析

司伟¹, 黄思琦¹, 王培霞², 张永康¹, 张健³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省常山县水文站, 浙江 衢州 324200;
3. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

摘要: 为探明富春江水库流域径流演变的主要驱动因子, 基于对富春江水库流域 1970—2022 年径流深、降水量、潜在蒸散发的趋势性和突变性分析, 采用 Budyko 假设归因法量化降水量、潜在蒸散发、下垫面条件对径流变化的贡献。结果表明: 降水量和径流深均呈不显著上升趋势, 潜在蒸散发呈显著上升趋势; 径流深突变年份为 2012 年; 径流深增大的主要原因是降水量的增加、由不透水区域面积增加与森林面积减少导致的下垫面参数改变, 其贡献率分别为 51.61% 和 52.55%; 径流深减小由潜在蒸散发的增加造成, 贡献率为 4.16%。

关键词: 径流变化; Budyko 假设归因法; 量化归因分析; 富春江水库流域

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)03-0001-07

Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution

SI Wei¹, HUANG Siqi¹, WANG Peixia², ZHANG Yongkang¹, ZHANG Jian³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrological Station of Changshan County, Quzhou 324200, China;
3. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China)

Abstract: To clarify the main driving factors of runoff evolution in the Fuchunjiang Reservoir Basin, the trend and mutation of annual runoff depth, precipitation, and potential evapotranspiration from 1970 to 2022 in the basin were analyzed. The contributions of precipitation, potential evapotranspiration, and underlying surface conditions to runoff evolution were quantified by using the Budyko hypothesis attribution method. The results indicate that both precipitation and runoff depth exhibit a non-significant upward trend, while potential evapotranspiration shows a significant increase. The mutation year for runoff depth is identified as 2012. Increased runoff depth is mainly induced by rising precipitation and changing underlying surface parameters caused by the expansion of impermeable area and the reduction of forest land area, with contribution rates of 51.61% and 52.55%, respectively. The reduction in runoff depth is caused by the increase in potential evapotranspiration, with a contribution rate of 4.16%.

Key words: runoff change; Budyko hypothesis attribution method; quantitative attribution analysis; Fuchunjiang Reservoir Basin

随着人类社会技术的进步和经济的发展, 为了有效利用水资源以达到防洪兴利的目的, 人类对自然流域进行了大量改造, 据统计, 目前世界上 60% 以上的河流均修建有水利工程, 预计到 2050 年会增加至 70%^[1-2]。人类活动会改变流域下垫面, 水资源时空分配也会随之发生改变, 这将会对流域的土壤性质、蒸散发及产汇流等过程造成一定的影响, 破坏径流序列的一致性, 进而影响对水资源的管理和利用^[3]。因此, 研究人类活动影响下的流域径流变化十分必要。时间序列趋势分析的主流方法有滑动平均法、累积距平法、Mann-Kendall 趋势检验法等, 其中滑动平均法由于计算简便, 结果直观, 得到大量应用。Mann-Kendall 趋势检验法计算简便, 检测范围宽, 定量化程度高, 不受少量异常值干扰, 也不需要样本遵从特定分布, 因此十分适用于水文、气象等非正态分布的数据^[4]。识别时间序列突变点的常用方法有 Mann-Kendall 趋势检验法、Pettitt 法、累积距平法等。径流变化归因研究方面, 常用方法有水文模型法、多元统计分析法、累积斜率法和

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230201030); 江西省“科技+水利”联合计划项目(2022KSG01006)

作者简介: 司伟(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟及预报研究。E-mail: siwei@hhu.edu.cn

引用本文: 司伟, 黄思琦, 王培霞, 等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 1-7.

SI Wei, HUANG Siqi, WANG Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 1-7.

Budyko 假设归因法等。其中,Budyko 假设归因法因具有明确的物理意义、参数相对较少且易于推求,在径流变化量化归因方面有较多应用^[5-6]。

富春江水库流域位于浙江省中西部的钱塘江上游,近年来其上游水利工程建设逐步加快,建设了新安江、湖南镇、分水江、白水坑、碗窑、芙蓉江、沐尘等大型水库以及干流上的安仁辅、塔底、红船豆、小溪滩、游埠和姚家6座梯级船闸。这些水利工程大大改变了富春江水库流域下垫面条件,一定程度上影响了流域的水文循环,进而影响了流域的产汇流机制。因此,明晰富春江水库流域径流演变特征并进行径流变化归因分析十分必要。目前针对富春江水库流域的研究主要集中在利用水文模型或误差修正提高流域洪水预报精度以及防治流域洪涝灾害方面^[7],已有的关于富春江水库流域径流变化归因的研究只考虑了气候变化的影响^[8],针对人类活动方面的归因分析还少有涉及,且目前研究成果中并未对富春江水库流域的径流变化成因进行量化分析。鉴于此,本文采用1970—2022年富春江水库流域径流数据,采用突变检验法识别径流基准期和变化期,利用Budyko假设归因法量化各影响因子对径流变化的贡献,识别导致富春江水库流域径流变化的主导因素,重新审视水资源评价中的各影响因素,以期为指导该流域水资源开发利用提供参考。

1 研究区概况

富春江水库流域位于浙江省中西部,属于钱塘江中上游,占钱塘江全流域面积的64.73%,发源于衢州、金华地区。该流域属于亚热带季风气候,雨量丰沛,降水主要集中在3—10月,降水空间分布不均,西部多高山山地,并处于东南季风的迎风面,降水量较大;东部地势平坦,降水量较小,局部区域洪涝灾害频发。根据富春江水库流域1970—2022年降水径流资料计算得出该流域多年平均降水量1625 mm,多年平均径流深为907 mm。富春江水库上游新安江水库为多年调节水库,发电、生态流量规律且稳定,本文采用的富春江实测径流资料已扣除新安江水库发电及下泄流量,因此不考虑富春江水库上游新安江水库流域。流域地理位置、雨量站分布等如图1所示。

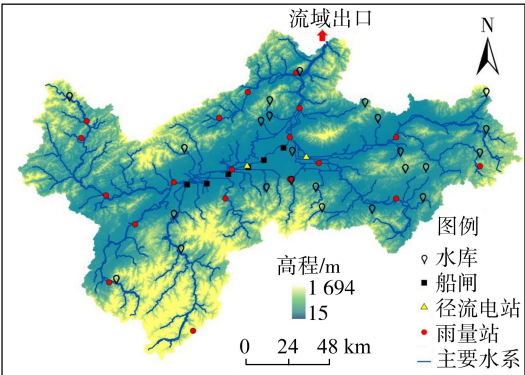


图1 富春江水库流域概况

Fig. 1 Overview of Fuchunjiang Reservoir Basin

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

数据资料主要包括水文资料、气象资料、地理资料(表1)。水文资料为富春江水库1970—2022年入库的实测径流深。气象资料包括降水量和潜在蒸散发数据。降水数据为基于富春江水库流域18个雨量站1970—2022年的日降水量,利用各雨量站控制面积权重计算得出的流域多年平均面降水量;潜在蒸散发数据来自中国1 km逐月潜在蒸散发数据集([https://www. tpdc. ac. cn/zh - hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dcca4/](https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dcca4/))。地理资料为多年土地利用数据,采用Yang等^[9]提供的中国1985—2022逐年30 m土地利用数据。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势性分析

滑动平均法通过依次计算一定时间内数据时间序列的平均值,反映长期趋势,该方法可以弱化径流序列中一些短期的不规则变化,发现较长时间的变化趋势^[10-11]

Sen's斜率法常用于计算时间序列的变化趋势程度^[12],能够避免时间序列数据缺失、不同分布形态以及异常值对结果造成的影响,因此在气象水文研究中得到了广泛应用^[13-14]。

2.2.2 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall趋势检验法是由Mann提出,并经过Kendall完善发展起来的一种非参数检验方法,被广

表1 数据资料

Table 1 Data information

数据	时段	分辨率	精度
径流深	1970—2022年		日尺度
降水量	1970—2022年		日尺度
潜在蒸散发	1901—2022年	1 km	月尺度
土地利用	1985—2022年	30 m	年尺度

泛用于水文和气象要素的时间序列趋势变化分析^[15-16]。该方法将统计量值绘制成一条统计曲线,同时对反序列进行相同绘制得到反序列统计曲线。将统计曲线、反序列统计曲线和临界值(±1.96)绘于图上,当两条统计曲线在两条临界值线之间范围内相交,相交点即为突变点。

2.2.3 Budyko 假设归因法

Budyko 假设是将年度水平衡表示为水分和能量的函数,Choudhury^[17]在 Budyko 假设中引入了年蒸发量经验方程,杨汉波等^[18]在年平均时间尺度上解析推导了水能平衡方程,因此研究者们将两者结合提出了 Choudhury-Yang 方程^[19],并将其运用在各种类型的研究区域。本文通过结合流域水平衡方程(式(1))和 Choudhury-Yang 方程(式(2))对富春江水库流域径流变化进行归因识别。

$$R = P - ET \tag{1}$$

$$ET = PET_0 / [(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}] \tag{2}$$

式中: R 为径流深; P 为降水量; ET 为实际蒸散发; ET_0 为年平均潜在蒸散发; ω 为下垫面参数。

ω 是控制 Budyko 曲线形状的参数,主要与反映下垫面特征的植被特性、土壤特征等有关^[20],在某种程度上可以反映人类活动的影响。由于 R 、 P 、 ET_0 已知,因此根据式(1)(2)可求得 ω 。

影响因子的弹性系数是反映径流对气候与下垫面变化敏感性的重要参数,某变量弹性系数的正负值分别表示 R 与该变量的正负相关性。降水量弹性系数(ε_P)、潜在蒸散发弹性系数(ε_{ET_0})、下垫面参数弹性系数(ε_ω)分别为

$$\varepsilon_P = (dR/R) / (dP/P) \tag{3}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = (dR/R) / (dET_0/ET_0) \tag{4}$$

$$\varepsilon_\omega = (dR/R) / (d\omega/\omega) \tag{5}$$

将 P 、 ET_0 、 ω 假设为自变量时, R 可以表示为 $R=f(P,ET_0,\omega)$,因此 R 的全微分为

$$dR = \frac{\partial f}{\partial P}dP + \frac{\partial f}{\partial ET_0}dET_0 + \frac{\partial f}{\partial \omega}d\omega \tag{6}$$

由式(3)~(6)可得:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_\omega \frac{d\omega}{\omega} \tag{7}$$

令 $\varphi=ET_0/P$,则各弹性系数为^[21]

$$\begin{cases} \varepsilon_P = \frac{(1+\varphi^\omega)^{\frac{1}{\omega}+1} - \varphi^{\omega+1}}{(1+\varphi^\omega)[(1+\varphi^\omega)^{1/\omega} - \varphi]} \\ \varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1+\varphi^\omega)[1 - (1+\varphi^{-\omega})^{1/\omega}]} \\ \varepsilon_\omega = \frac{\ln(1+\varphi^\omega) + \varphi^\omega \ln(1+\varphi^{-\omega})}{\omega(1+\varphi^\omega)[1 - (1+\varphi^{-\omega})^{1/\omega}]} \end{cases} \tag{8}$$

根据突变分析结果,将研究期划分为基准期 and 变化期,基准期的径流深为 R_1 ,变化期的径流深为 R_2 ,平均径流深之差 $dR=R_2-R_1$ 。同理,降水量、潜在蒸散发和下垫面参数的变化量为

$$\begin{cases} dP = P_2 - P_1 \\ dET_0 = ET_{02} - ET_{01} \\ d\omega = \omega_2 - \omega_1 \end{cases} \tag{9}$$

利用弹性系数可以分别估算降水量、潜在蒸散发和下垫面变化引起的径流变化量:

$$\begin{cases} dR_P = \varepsilon_P \frac{dP}{P} R \\ dR_{ET_0} = \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} R \\ dR_\omega = \varepsilon_\omega \frac{d\omega}{\omega} R \end{cases} \tag{10}$$

式中 dR_p 、 dR_{ET_0} 、 dR_{ω} 分别为降水量、潜在蒸散发和下垫面变化引起的径流变化量。

降水量、潜在蒸散发和下垫面对径流变化的贡献率 C_p 、 C_{ET_0} 和 C_{ω} 分别为

$$\begin{cases} C_p = \frac{dR_p}{dR} \times 100\% \\ C_{ET_0} = \frac{dR_{ET_0}}{dR} \times 100\% \\ C_{\omega} = \frac{dR_{\omega}}{dR} \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

3 结果与分析

3.1 水文气象要素变化趋势

根据富春江水库流域 1970—2022 年长序列水文(降水量、潜在蒸散发以及径流深)资料,采用滑动平均法和 Sen's 斜率法对其进行趋势分析,结果如图 2 所示。

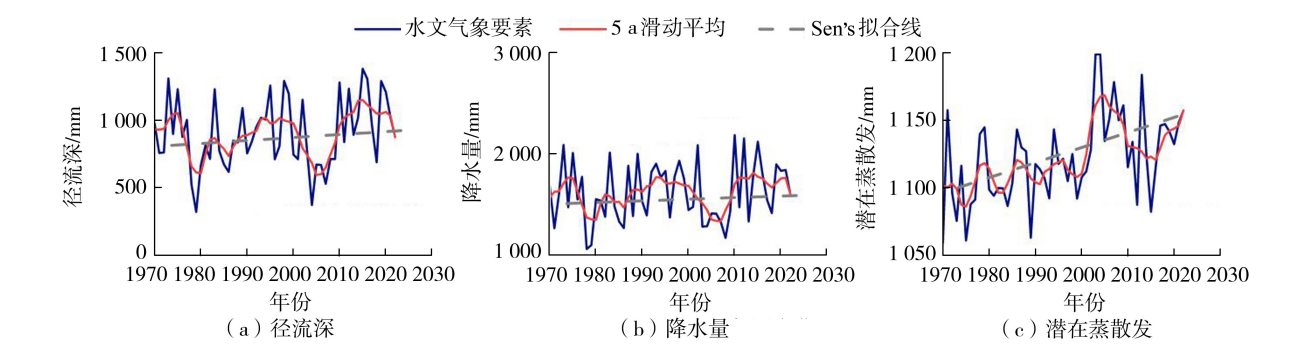


图 2 富春江水库流域水文气象要素年际变化曲线
Fig. 2 Interannual variation curves of hydro-meteorological elements in Fuchunjiang Reservoir Basin

整体上降水量、潜在蒸散发以及径流深年际分配不均,且均呈上升趋势,上升速率分别为 1.59、1.12、2.207 mm/a。降水量和径流深的上升趋势不显著, p 分别为 0.45 和 0.303 ($p>0.05$),潜在蒸散发则呈现显著上升趋势, p 为 0 ($p<0.05$)。通过 5 年滑动平均线可以发现,降水量的变化趋势与径流深的变化趋势相似,表明径流深与降水量间具有较强的相关关系,而潜在蒸散发与径流深则存在一定的负相关关系。

3.2 径流量变化归因分析

3.2.1 径流量突变分析

根据富春江水库流域 1970—2022 年长序列径流资料, Mann-Kendall 趋势检验法得到结果如图 3 所示。根据富春江水库流域径流深绘制的统计曲线、反序列统计曲线有且仅有一个交点在 2012 年(图 3 垂直虚线处),同时该点位于 95% 的置信区间内,因此可以确定径流深在 2012 年发生突变。2012 年为梯级船闸开始建设的年份,同时流域内还有其他水利工程施工建设,共同影响了流域产汇流过程。基于此,富春江水库流域径流量变化归因分析中将 1970—2012 作为基准期,2013—2022 年作为变化期。

3.2.2 敏感性分析

根据富春江水库流域完整时期、基准期、变化期的流域水文气象数据,计算各弹性系数,结果见表 2。富春江水库流域变化期的径流深、降水量、潜在蒸散发以及径流系数相比基准期均有不同程度上升。径流深上升幅度最大,为 22.57%;潜在蒸散发仅上升了 1.85%,上升幅度最小;唯一降低的是干旱指数,降低了 5.09%,表明富春江水库流域没有表现出干旱趋势,这与下垫面参数减小有关;Budyko 曲线原理表明,当降水不变时,下垫面参数减小会引起蒸发降低,从而使得干旱情况减弱,径流深增大。

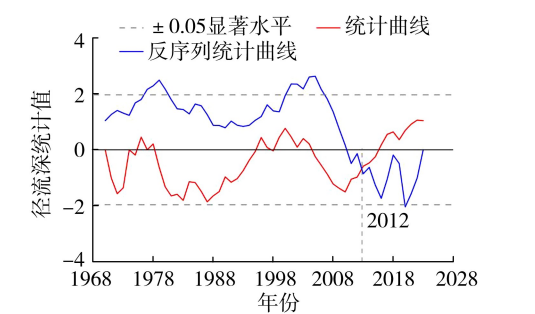


图 3 富春江水库流域径流深突变检验结果
Fig. 3 Mutation test results of runoff depth in Fuchunjiang Reservoir Basin

表 2 各时期的流域水文气象要素及弹性系数

Table 2 Hydro-meteorological elements and elastic coefficients in the Fuchunjiang Reservoir Basin at different periods										
时期	时段	R/mm	P/mm	ET_0/mm	R/P	ET_0/P	ω	ε_P	ε_{ET_0}	ε_ω
完整时期	1970—2022 年	907.63	1 613.54	1 121.34	0.56	0.69	1.11	1.47	-0.47	-0.47
基准期	1970—2012 年	871.22	1 603.19	1 117.51	0.54	0.70	1.19	1.51	-0.51	-0.48
变化期	2013—2022 年	1 067.83	1 720.34	1 138.15	0.62	0.66	0.93	1.36	-0.36	-0.44

注: R/P 为径流系数, ET_0/P 为干旱指数。

基准期弹性系数计算结果表明,降水量每增加 1%会导致径流深增大 1.51%,潜在蒸散发和下垫面参数每增加 1%会导致径流深减少 0.51%和 0.48%,降水量弹性系数绝对值最大,说明径流深变化对降水量最敏感。变化期内径流深变化最敏感的影响因子仍然是降水量,弹性系数为 1.36,相较基准期减小了 0.15,表示降水量增加 1%,变化期径流深增加量比基准期径流深增加量减小 0.15%。变化期潜在蒸散发和下垫面参数每增加 1%会导致径流深相应地减小 0.36%和 0.44%,其绝对值相较基准期分别减小了 0.15 和 0.04,表示潜在蒸散发增加 1%的情况下,变化期径流深减小量比基准期径流深减小量减小 0.15%;下垫面参数增加 1%的情况下,流深减小量比基准期减小 0.04%。将基准期和变化期的弹性系数绝对值对比发现:降水量、潜在蒸散发和下垫面参数的弹性系数绝对值均减小,表明变化期这些因子对流域径流深的影响更小。

3.2.3 归因识别

计算结果表明,径流深相对误差(计算的径流深变化总量(187.20 mm)与实际径流变化量(196.61 mm)的相对误差)为 4.78%,误差较小,因此本文的归因方法有效。潜在蒸散发的增加导致径流深减小了 7.79 mm,贡献率为 4.16%,降水量的增加导致径流深增加了 96.62 mm,贡献率为 51.61%,下垫面参数的减小使得径流深增大了 98.37 mm,贡献率为 52.55%。由此可知,降水量和下垫面参数的变化是导致富春江水库流域径流变化的主要原因,潜在蒸散发的增加带来的径流减少的影响较低。

3.2.4 土地利用类型变化分析

骆月珍等^[8]的结果表明富春江水库流域降水量、径流深及蒸发量都呈上升趋势,其中降水量对径流量的影响最重要,蒸发对径流量的减少也有一定的影响,与本文结果相同。但本文通过 Budyko 假设归因法量化了降水量和潜在蒸散发对径流深的影响程度,并通过与人类活动密切相关的下垫面参数^[22]表征富春江水库流域径流变化受人为影响的程度,补充了有关富春江水库流域径流变化的研究。

产流过程中的填洼、下渗和土壤蓄水能力,汇流过程中地表糙率、地表蓄水量和河道汇水路径等一些水文过程会随着土地利用的变化而改变^[23]。为了明确人类活动如何导致下垫面参数的变化从而影响径流量,本文采用土地利用变化分析人类活动对径流特征变化的驱动机制^[24]。将土地利用分为森林、灌木、草地、农田、不透水区域(即城乡、居民用地等)、水域 6 类,统计分析径流突变年 2012 年、基准期的 1992 年、变化期的 2022 年的土地利用转移情况,结果如表 3 所示。

表 3 富春江水库流域不同时期土地利用类型面积及占比

Table 3 Area and proportion of land use types in Fuchunjiang Reservoir basin at different periods						
类型	基准期(1992 年)		突变年(2012 年)		变化期(2022 年)	
	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%
森林	15 229.40	71.099	15 270.56	71.291	14 755.73	68.888
灌木	1.04	0.005	0.31	0.001	0.30	0.001
草地	5.21	0.024	1.91	0.009	0.98	0.005
农田	5 513.14	25.738	4 672.59	21.814	4 925.17	22.993
不透水区域	398.69	1.861	1 115.28	5.207	1 423.87	6.647
水域	272.55	1.272	359.37	1.678	313.97	1.466

基准期到突变年主要呈现灌木、草地和农田的减少,森林、不透水区域和水域的增加,突变年到变化期主要呈现森林、灌木、草地和水域的减少,不透水区域进一步增加。森林的减少会导致径流量增加^[25]或导致蒸散发减少进而使径流量上升^[26];不透水区域的降水入渗率低,汇流速度快,因此不透水区域面积增大时,径流量也会增加^[27],与本文归因结果一致。降水量的增加是导致富春江水库流域径流增加的主要因素,同时经济的快速发展使得流域内不透水区域的增加以及森林面积的减少也是造成富春江水库流域径流增加的关键原因。

4 结 论

- a. 富春江水库流域的降水量、潜在蒸散发、径流深均呈上升趋势,其中降水量和径流深呈不显著上升趋势,潜在蒸散发呈现显著上升趋势。径流深与降水量具有较强正相关关系,潜在蒸散发与径流深存在负相关关系。
- b. 富春江水库流域径流深在 2012 年发生突变;降水量为影响径流深的最敏感的因子;降水量、潜在蒸散发和下垫面参数的弹性系数绝对值较突变前均有所减小,表明突变后三者对径流深影响均有所减小。
- c. 富春江水库流域径流变化的增量主要来源于降水量增加和下垫面参数改变,其贡献率分别为 51.61% 和 52.55%,径流的减少量则来源于潜在蒸散发的增加,其贡献率为 4.16%。土地利用变化表明,下垫面参数变化的主要原因是多种人类活动导致的不透水区域面积的增加以及森林面积的减少,从而进一步导致的流域径流的增加。

参考文献:

- [1] 万惠,黄会勇,袁迪,等. 水利工程影响下的洪水预报研究进展[J]. 人民长江,2017,48(7):11-15. (WAN Hui, HUANG Huiyong, YUAN Di, et al. Advances in flood forecasting under impacts of water projects [J]. Yangtze River, 2017, 48(7): 11-15. (in Chinese))
- [2] 张劲松,沈菊琴,郭宁,等. 水利工程运行精细化管理的理论与实践探索[J]. 水利经济,2023,41(2):33-40. (ZHANG Jinsong, SHEN Juqin, GUO Ning, et al. Exploration on the theory and practice of fine management of water conservancy project operation[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2): 33-40. (in Chinese))
- [3] MA Huan, YANG Dawen, TAN S K, et al. Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 317-324.
- [4] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):230-234. (ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese))
- [5] 何玉芬,杨汉波,唐莉华,等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):95-101. (HE Yufen, YANG Hanbo, TANG Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 95-101. (in Chinese))
- [6] 沈嘉聚,杨汉波,刘志武,等. 长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):119-126. (SHEN Jiaju, YANG Hanbo, LIU Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 119-126. (in Chinese))
- [7] 司伟,余鸿慧,包为民,等. 面平均雨量的系统响应曲线修正方法及其在富春江流域洪水预报中的应用[J]. 水力发电学报,2016,35(1):38-45. (SI Wei, YU Honghui, BAO Weimin, et al. Area-mean rainfall updating by system response curve method and application to real-time flood forecasting of Fuchunjiang basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 38-45. (in Chinese))
- [8] 骆月珍,潘娅英,张青,等. 富春江流域径流量变化及其气候因子影响分析[J]. 水土保持研究,2019,26(2):223-226. (LUO Yuezheng, PAN Yaying, ZHANG Qing, et al. Runoff change of Fuchunjiang River Basin and its impact factor analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 223-226. (in Chinese))
- [9] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [10] 周婷,于福亮,李传哲,等. 1960—2005 年湄公河流域径流量演变趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):608-613. (ZHOU Ting, YU Fuliang, LI Chuanzhe, et al. Evolution trend of runoff in Mekong River Basin during 1960-2005 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(6): 608-613. (in Chinese))
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京:北京气象出版社,1999.
- [12] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [13] CHATTERJEE S, KHAN A, AKBARI H, et al. Monotonic trends in spatio-temporal distribution and concentration of monsoon precipitation (1901-2002), West Bengal, India [J]. Atmospheric Research, 2016, 182: 54-75.
- [14] 刘维成,张强,傅朝. 近 55 年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. 高原气象,2017,36(6):1533-1545. (LIU Weicheng, ZHANG Qiang, FU Chao. Variation Characteristics of Precipitation and Its Affecting Factors in Northwest China over

the Past 55 Years[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1533-1545. (in Chinese))

[15] 甘容,李丹丹,杨峰,等. 1952—2017 年出山店水库上游降水时空变化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 150-158. (GAN Rong, LI Dandan, YANG Feng, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in upper upstream of Chushandian Reservoir from 1952 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 150-158. (in Chinese))

[16] SHEN Qining, CONG Zhentao, LEI Huimin. Evaluating the impact of climate and underlying surface change on runoff within the Budyko framework: a study across 224 catchments in China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 554: 251-262.

[17] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.

[18] 杨汉波,杨大文,雷志栋,等. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 610-617. (YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. Derivation and validation of watershed coupled waterenergybalance equation at arbitrary time scale[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 610-617. (in Chinese))

[19] RODERICK M L, FARQUHAR G D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties[J]. Water Resources Research, 2011, 47(12): W00G07.

[20] YANG Hanbo, QI Jia, XU Xiangyu, et al. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 607-616.

[21] NING Tingting, LI Zhi, LIU Wenzhao. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China[J]. CATENA, 2016, 147: 80-86.

[22] 王卫光,陆文君,邢万秋,等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))

[23] YANG Hao, LUO Peng, WANG Jun, et al. Ecosystem evapotranspiration as a response to climate and vegetation coverage changes in Northwest Yunnan, China[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0134795.

[24] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 25-32. (in Chinese))

[25] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等. 泾河流域近 50 年来的径流时空变化与驱动力分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 721-727. (ZHANG Shulan, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Spatio-temporal variance of annaul runoff in Jinghe River Basin of northwest China in past 50 years and its main causes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 721-727. (in Chinese))

[26] 唐丽霞,张志强,王新杰,等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 800-810. (TANG Lixia, ZHANG Zhiqiang, WANG Xinjie, et al. Streamflow response to climate and landuse changes in Qingshui River watershed in the loess hilly-gully region of Western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7): 800-810. (in Chinese))

[27] 苗正伟,李娜,路梅,等. 滹沱河上游流域径流变化归因分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 756-767. (MIAO Zhengwei, LI Na, LU Mei, et al. Attribution analysis of runoff variations in the upper reaches of Hutuo River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2021, 57(6): 756-767. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 07 - 25 编辑: 刘晓艳)