

李珠, 桑燕芳, 杨默远, 等. 基于多因素分析的密云水库流域径流变化归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 482-490. LI Z, SANG Y F, YANG M Y, et al. Attribution analysis of runoff changes in the Miyun Reservoir basin based on multi-factor analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 482-490. (in Chinese)

## 基于多因素分析的密云水库流域径流变化归因

李珠<sup>1,2,6</sup>, 桑燕芳<sup>1,2,3,6</sup>, 杨默远<sup>4</sup>, 赵雪花<sup>5</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院山地自然灾害与工程安全重点实验室, 北京 100101; 3. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 北京 100085; 4. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 5. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为准确揭示密云水库流域径流变化的物理成因, 基于降水、径流非平稳特征诊断结果, 采用 SWAT(soil and water assessment tool)水文模型, 基于 Budyko 理论的弹性系数法和水量平衡法揭示该流域径流变化原因; 对比验证各模型归因结果差异, 进一步探究归因方法和基准期选择对流域径流变化归因结果的影响。结果表明: 基于 Budyko 理论的水量平衡方法更适用于水利工程众多、跨流域调水活动频繁的密云水库流域径流变化归因计算; 利用该方法进行分析, 当基准期长度达到 16 年及以上时, 流域径流变化归因分析结果逐渐趋于稳定, 而基准期选取过短会高估人类活动对径流的减水效应; 此外, 基准期选取靠近研究初始时段时, 计算得到人类活动的减水效应相对较大。综合考虑上述各因素的影响, 认为人类活动是密云水库流域径流变化的主导因素; 在变化期 I, 其减水效应在 $-128.32\% \sim -119.56\%$  波动, 在变化期 II, 其对径流的削减作用为 $-75.58\% \sim -70.70\%$ 。研究结果有助于提升对密云水库流域径流复杂演变规律和物理成因的科学认识。

**关键词:** 径流; 归因分析; 基准期; 人类活动; 密云水库

**中图分类号:** TV121 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0050

在当前河川径流呈现显著非平稳特征的背景下, 揭示径流变化的物理成因, 明晰气候变化和人类活动对径流变化的影响机理, 是水文水资源学领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>。在径流变化归因分析研究过程中, 基准期选定、归因分析方法选取是影响归因结果的 2 个关键因素。目前, 归因分析基准期划定主要借助时间序列分析方法诊断降水、径流序列的突变点, 常用的归因分析方法主要包括试验流域对比分析法、统计分析法以及水文模型法等。

目前关于密云水库流域径流变化归因的研究, 使用序列长度和非平稳特征诊断方法不同导致基准期选择不同。相关研究采用了 10、11、14、20、39 a 等<sup>[4-7]</sup> 多种基准期长度与年份段。此外, 水量平衡、年径流累计曲线、AWY(annual water yield)模型、基于 Budyko 理论的水量平衡法、SWAT

(soil and water assessment tool)模型、新安江模型等<sup>[4,5,7-9]</sup> 各类方法和模型被应用于径流归因分析, 得到的径流变化主要影响因素和各因素影响程度均存在明显差异。部分研究<sup>[5,6,10-11]</sup> 表明人类活动是密云水库流域径流减少的主导因素, 但另有研究<sup>[4,7,9]</sup> 指出气候变化对流域径流减少的影响程度更大。以人类活动为主导因素的研究给出了人类活动减水 54%~91.9% 的差异结果; 相关研究关于气候变化的增水效应和减水效应也未达成共识, 存在气候变化贡献率 $-59.3\% \sim -172.51\%$  的明显差异<sup>[4,6,8-9]</sup>。已有径流归因研究结果呈现出的巨大差异导致无法形成对该流域径流复杂演变规律的科学认识, 也难以高效支撑该流域的水资源管理等工作。

针对上述问题, 本文基于密云水库流域长序列降水、径流突变诊断结果, 重点考虑基准期选定、归

收稿日期: 2023-11-01 修回日期: 2024-03-11 网络出版时间: 2024-05-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240520.0840.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0606903); 国家自然科学基金项目(41971040; 52209005)

作者简介: 李珠(1998—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: [lizhu2125@igsrr.ac.cn](mailto:lizhu2125@igsrr.ac.cn)

通信作者: 桑燕芳(1983—), 男, 山西黎城人, 研究员, 博士, 主要从事水文气象与自然灾害防治研究。E-mail: [sangyf@igsrr.ac.cn](mailto:sangyf@igsrr.ac.cn)

因分析方法选取的综合影响,对该流域径流变化进行重新归因,旨在提高对该流域径流变化的科学认识。具体研究过程中,综合对比径流演变基准期和变化期选择的影响,分别选用 SWAT 水文模型、基于 Budyko 理论的弹性系数法和水量平衡法进行归因计算;通过交叉验证对比各方法的归因结果,并结合密云水库流域水资源开发的实际情况,阐明基准期长度和位置选取对流域径流变化归因结果的影响。研究结果有助于厘清对密云水库流域径流复杂演变规律的科学认识,也可为流域水资源管理提供科学支撑。

## 1 数据资料

收集整理密云水库流域 1960—2019 年降水、径流数据,进行非平稳特征诊断,并划分归因分析的基准期和变化期。降水数据由流域内各雨量站数据处理得到,径流数据由入库水文站径流计算得到。采用水文变异综合诊断系统诊断其突变点,结果显示该流域径流在 1979 年发生了向下跳跃的强变异。结合降水在 1998 年的局部突变特征,初步划定基准期(1960—1979 年)、变化期 I(1980—1998 年)和变化期 II(1999—2019 年)<sup>[12]</sup>。

除长序列降水、径流数据外,本文另收集该流域 DEM、土地利用、土壤类型等数据,构建流域 SWAT 模型;考虑到数据资料的完整性与站点的空间分布,选取赤城、丰宁、上甸子气象站的降水量、气温、相对湿度、风速等数据用于驱动 SWAT 模型模拟并计算流域潜在蒸散发量。密云水库流域各数据资料详见表 1。

表 1 密云水库流域数据资料  
Tab. 1 Data information from the Miyun Reservoir basin

数据类型	来源	精度
DEM	<a href="http://www.resdc.cn">www.resdc.cn</a>	30 m
气象数据	<a href="http://www.resdc.cn">www.resdc.cn</a>	日尺度
土地利用类型	<a href="http://www.resdc.cn">www.resdc.cn</a>	30 m
土壤类型数据	<a href="http://data.tpdac.ac.cn">data.tpdac.ac.cn</a>	1:100万

## 2 研究方法

选取典型水文模型——SWAT 模型和统计分析模型——基于 Budyko 理论的弹性系数和水量平衡法,进行密云水库流域径流变化归因分析。对比验证各模型归因结果,探究模型选取对流域径流变

化归因结果的影响,最终选取适合的模型,更新对该流域径流变化物理机制的科学认识。各方法归因原理简要描述如下。

### 2.1 SWAT 模型法

SWAT 模型通过分析流域内的空间数据及属性数据,构建能够反映流域空间异质性的分布式水文模型,并依靠气象数据驱动,模拟流域水文过程,具有较强的物理基础和较高的运算效率,目前得到了广泛应用<sup>[13-15]</sup>。依托 ArcGIS 构建密云水库流域 SWAT 模型,主要步骤包括:导入流域 DEM 数据,经投影、剪裁、填洼等预处理后,借助水文分析工具生成河网与子流域;构建并导入土地利用、土壤类型数据库;依据 DEM 数据划分坡度;设置上述各类阈值后生成流域水文响应单元,完成模型构建;最后导入气象数据库驱动模型模拟计算。

为准确模拟流域径流过程,SWAT 模型需依据流域实测水文数据进行参数率定和验证。采用 SUFI-2(sequential uncertainty fitting algorithm-version 2)算法,基于张家坟和下会水文站基准期实测径流数据率定和验证已构建模型参数,采用确定性系数( $R^2$ )、纳什效率系数( $E_{NS}$ )等指标评价模型模拟效果<sup>[16-18]</sup>。 $R^2$  值越接近 1,则模拟结果和实测数据的拟合度越高。 $E_{NS}$  表示模型模拟结果的可信度,值越接近 1,表示模拟结果与实测结果之间的拟合程度越好,模型可信度较高。

基于 SWAT 模型的径流变化归因分析以率定和验证的流域基准期模型为基础,通过输入变化期气象数据,模拟不受人活动影响的变化期径流( $R_m$ )。该模拟值与实测值( $R_{\text{变}}$ )的差值为人类活动对径流的影响量( $\Delta R_h$ ),由此各因素对径流变化的贡献率可表示为

$$\eta_h = \frac{\Delta R_h}{\Delta R} \quad (1)$$

$$\eta_c = 1 - \eta_h \quad (2)$$

式(1)和(2)中: $\eta_h$ 为人类活动对径流变化的贡献率; $\eta_c$ 为气候变化对径流变化的贡献率; $\Delta R$ 为径流变化量, $\Delta R = R_{\text{基}} - R_{\text{变}}$ ,其中  $R_{\text{基}}$  为基准期实测径流。

### 2.2 基于 Budyko 理论的弹性系数法

基于 Budyko 理论的弹性系数法依据流域水热耦合与水量平衡理论,引入弹性系数概念,分析流域内各因子对径流变化的影响程度。采用考虑水分、能量及下垫面条件的 Mezentsev-Choudhury-Yang 公式 [式(3)],并结合水量平衡方程 [式(4)] 分析计算:

$$E = \frac{P \times ET}{(P^w + ET^w)^{1/w}} \quad (3)$$

$$P = E + R \quad (4)$$

式(3)和(4)中:  $E$  为多年平均实际蒸散发量, mm;  $ET$  为多年平均潜在蒸散发量, mm;  $P$  为流域多年平均降水量, mm;  $R$  为流域多年平均径流量, mm;  $w$  为综合反映流域土地利用情况、地形条件及土壤条件的下垫面参数<sup>[19]</sup>。

径流对各因子的敏感性称为弹性系数, 表示为单位因子的变化引起的径流变化量<sup>[20]</sup>。弹性系数为负值, 表明该变量与径流呈负相关关系; 反之, 表明变量与径流呈正相关关系。根据式(3)和式(4), 可将其表示为

$$\varepsilon_i = \frac{\partial R}{\partial i} \frac{i}{R} \quad (5)$$

式中:  $i$  为影响径流变化的因子, 包括降水、潜在蒸散发、下垫面参数;  $\varepsilon_i$  为各因子的弹性系数。

基于此计算各因子对径流变化的贡献量和贡献率分别为

$$\Delta R_i = \varepsilon_i \frac{R}{i} \Delta i \quad (6)$$

$$\eta_i = \frac{\Delta R_i}{\Delta R} \quad (7)$$

式(6)和(7)中:  $\Delta R_i$  为各因子变化引起的径流变化量;  $\Delta i$  为各因子变化量,  $\Delta i = i_{\text{基}} - i_{\text{变}}$ ;  $\eta_i$  为各因子对径流变化的贡献率, 当  $\eta$  为负数时表示该因素表现出减水效应, 反之为增水效应。

上述影响径流变化的因子中, 降水和潜在蒸散发变化均属于流域气候变化; 而下垫面参数的变化则主要由人类活动引起, 属于人类活动对径流的间接影响。因此可将气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别表示为

$$\eta_c = \eta_p + \eta_{ET} \quad (8)$$

$$\eta_h = 1 - \eta_c \quad (9)$$

式(8)和(9)中:  $\eta_c$  为气候变化对径流变化的贡献率;  $\eta_p$  和  $\eta_{ET}$  分别为降水和潜在蒸散发对径流变化的贡献率;  $\eta_h$  为人类活动对径流变化的贡献率。

### 2.3 基于 Budyko 理论的水量平衡法

基于 Budyko 理论的水量平衡方法与弹性系数法的基本原理相同, 区别在于径流变化量计算的差异。水量平衡方法借助流域水热耦合平衡方程 [式(3)] 与流域水量平衡方程 [式(4)], 将流域内降水、径流、潜在蒸散发的关系表示为

$$P - R = \frac{P \times ET}{(P^w + ET^w)^{1/w}} \quad (10)$$

根据式(10), 反映基准期流域下垫面条件的参数  $w$  可由该时期多年平均降水、径流及潜在蒸散发量进行推求。采用该方法进行归因分析计算时, 假定流域下垫面参数不变, 将其代入式(10), 利用变化期实测降水和潜在蒸散发数据计算不受人类活动影响的变化期径流 ( $R_m$ )。该值与变化期实测径流量 ( $R_{\text{变}}$ ) 的差值反映了人类活动导致的径流变化量 ( $\Delta R_h$ ), 相应贡献率可由式(1)推求; 其 ( $R_m$ ) 与基准期实测径流 ( $R_{\text{基}}$ ) 的差值反映了气候变化引起的径流变化量 ( $\Delta R_c$ ), 相应贡献率可表示为

$$\eta_c = \frac{\Delta R_c}{\Delta R} \quad (11)$$

式中:  $\eta_c$  为气候变化对径流变化的贡献率;  $\Delta R_c$  为气候变化引起的径流变化量;  $\Delta R$  为径流变化量。

## 3 结果分析

### 3.1 模型选择对归因结果的影响

利用密云水库上游张家坟与下会水文站基准期实测径流数据, 率定和验证已构建的 SWAT 模型参数。考虑率定运算效率与模拟准确性, 研究设置模型预热期为 1 a, 单次率定迭代 500 次。经过迭代率定后, 率定期 (1961—1973 年) 张家坟和下会水文站的平均  $E_{\text{NS}}$  和  $R^2$  分别为 0.75 和 0.92; 验证期 (1974—1979 年) 相应评价指标分别为 0.79 和 0.83 (图 1), 满足  $E_{\text{NS}} > 0.65$ 、 $R^2 > 0.6$  的应用标准<sup>[21-22]</sup>, 表明其可以反映所研究流域基准期的水文特征。

将变化期 I 和变化期 II 的气象数据输入模型, 模拟不受人类活动影响的变化期径流, 依据径流模拟结果进行径流变化归因计算 (图 2)。结果显示: 在变化期 I, 流域气候变化对径流变化的贡献率为 -47.00%, 表现为减水效应; 该时期人类活动对径流的削减程度略高于气候变化, 为 -53.00%。在变化期 II, 气候变化对径流的削减程度大幅增加, 达到了 -81.48%, 远超人类活动的减水效应 (-18.52%), 成为变化期 II 流域径流变化的主导因素。

采用基于 Budyko 理论的弹性系数法定量分析流域径流变化原因, 结果见图 2。变化期 I 内, 流域气候变化表现为增水效应; 人类活动对径流变化的影响程度达到了 -110.61%, 其减水效应远超气候变化的增水效应, 导致流域径流显著减少; 在变化期 II, 流域气候变化对径流的影响转变为削减作用, 贡献率为 -27.16%; 人类活动对径流也表现为削减作用 (-72.84%), 且仍是径流减少的主导因素。

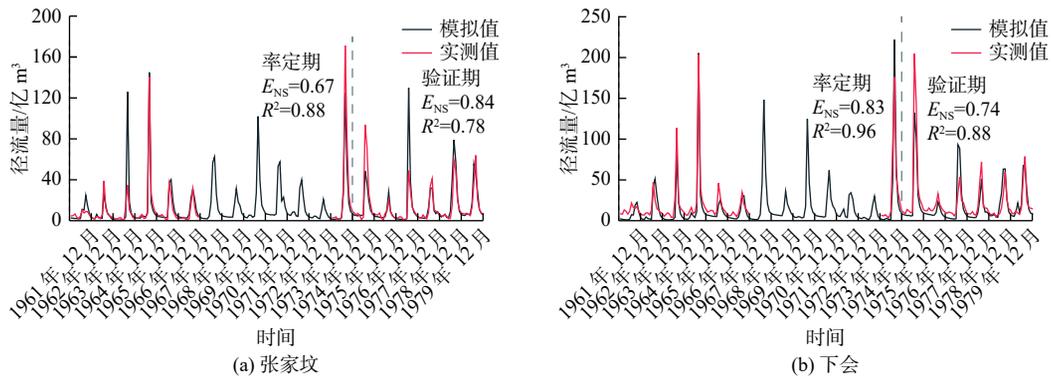


图1 率定、验证期径流模拟值和实测值对比

Fig. 1 Comparison of simulated and observed runoffs in calibration and validation periods

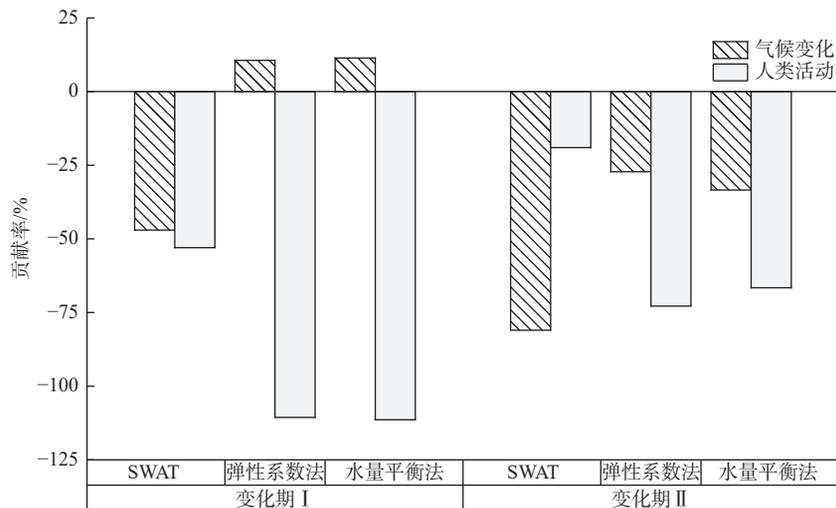


图2 径流变化归因计算结果汇总

Fig. 2 Summary of calculation results of runoff change attribution

基于 Budyko 水量平衡方法的流域径流变化归因结果(图2)表明:在变化期 I,气候变化导致流域径流增加,贡献率为 11.40%;人类活动对径流的削减作用达到了-111.40%,影响远大于气候变化。在变化期 II,气候变化与人类活动均表现出减水效应,影响程度分别为-33.40%和-66.60%,二者叠加作用使流域径流大幅度减少。

综合比较 3 种方法的归因结果,基于 Budyko 理论的弹性系数法与水量平衡法归因结果较为相近,SWAT 模型法与上述两种结果差异较大。在变化期 I,各方法计算得到的人类活动对径流变化的削减程度表现为 SWAT<弹性系数<水量平衡;在变化期 II,各方法计算得到的主要贡献因素有所不同。基于 Budyko 理论的两归因结果均显示人类活动是径流减少的主要原因,与已有部分研究<sup>[6,8,11]</sup>结论一致;但 SWAT 模拟结果显示,该时期气候变化对径流的削减作用远超人类活动的影响,已有基于

SWAT 模型的归因研究<sup>[9]</sup>也得到了类似结论。

分析各归因结果的差异性,推断模型模拟误差可能是其结果偏差的主要原因。SWAT 模型作为具有较强物理基础的分布式水文模型,能够反映流域空间异质性,但同时流域资料数量、质量要求较高<sup>[23]</sup>。本文构建的基准期密云水库流域 SWAT 模型考虑了流域土地利用类型、土壤类型和气象特征,但由于流域水文站部分观测资料缺失,模拟评价指标计算可能存在一定偏差,加之流域部分调水活动等相关资料难以收集,流域内的云州水库和白河堡水库未纳入模型产汇流计算,构建的密云水库流域分布式水文模型未能全面反映水库对流域水资源的调蓄作用,最终径流模拟值在非汛期偏低而汛期偏高。虽经率定和验证后,模型模拟精度符合应用要求,但由于模拟精度不够高,归因分析结论存在误差。

除 SWAT 模型外,其余两种方法均以水热耦合

平衡理论与水量平衡理论为基础。弹性系数法借助径流对各因子变化的敏感性进行归因计算,能够细化各因子对径流的影响。但当跨流域调水和引水活动发生时,流域内水量平衡遭到破坏,采用该方法计算将导致归因结果存在偏差。当流域向外调水时,该方法会导致流域实际蒸散发量被高估,进一步通过水热耦合公式[式(3)],流域下垫面参数( $w$ )被高估,由此计算得到的人类活动对径流的影响程度偏高,相应气候变化的影响则偏低。相反,当流域中发生跨流域引水活动时,依据该方法计算得到的人类活动对径流的影响程度将会偏低,气候变化影响则相对偏高。因此,跨流域调水和引水活动可能是弹性系数法归因分析误差的主要来源之一。

SWAT 模型法和 Budyko 弹性系数法无法全面反映流域特性,导致归因分析结果存在一定程度的偏差。基于 Budyko 理论的水量平衡法通过求解并应用流域天然状态的下垫面参数还原实际蒸散发,由降水与实际蒸散发计算不受人类活动影响的变化期径流,进而计算人类活动对径流变化的贡献率。在该计算过程中,跨流域调水产生的径流变化量被计入人类活动对径流的影响,克服了 SWAT 模型和 Budyko 弹性系数法的计算缺陷,更适用于本研究流域,因此下节利用该方法进一步分析基准期选取对径流变化归因结果的影响。

### 3.2 基准期选取对归因分析结果的影响

#### 3.2.1 基准期长度选取对归因分析结果的影响

当前不同归因分析研究除在方法选取上存在差异外,在基准期选取上也有所不同。本文在 19 a (1960—1978 年)基准期长度划分的基础上,另设 14 种基准期长度情景(表 2),采用基于 Budyko 理

论的水量平衡法计算并对比各情景径流变化归因结果的差异。

表 2 基准期长度情景设置  
Tab. 2 Scenarios of baseline periods with different years

基准期长度/a	基准期时间	基准期长度/a	基准期时间
5	1974—1978年	12	1967—1978年
6	1973—1978年	13	1966—1978年
7	1972—1978年	14	1965—1978年
8	1971—1978年	15	1964—1978年
9	1970—1978年	16	1963—1978年
10	1969—1978年	17	1962—1978年
11	1968—1978年	18	1961—1978年

各基准期长度对应得到的归因分析结果(图 3)表明:随着基准期长度增加,归因结果呈现阶梯状波动后逐渐趋于稳定。在变化期 I,不同基准期长度情景下,人类活动始终表现为减水效应,贡献率在 $-180.03\%$ ~ $-97.06\%$ 波动,当基准期长度达到和超过 16 a 时,归因结果逐渐趋于稳定;与人类活动效应相似,在基准期长度为 16 a 及以上时,气候变化的增水效应也逐渐趋于稳定,稳定后的贡献率在 $8.88\%$ ~ $12.65\%$ 波动。在变化期 II,改变基准期长度,人类活动和气候变化对径流的影响始终呈现削减作用。随着基准期长度增加,人类活动的减水效应呈阶梯状减小,基准期长度达到 16 a 时,该减水效应逐渐趋于稳定,在 $-65.50\%$ ~ $-67.20\%$ 内波动。同时期,气候变化对径流的减水效应呈现出与人类活动完全相反的发展态势,其减水效应随基准期长度的增加而逐步增加,在基准期长度达到 16 a 时开始趋于稳定,贡献率在 $-32.80\%$ ~ $-34.50\%$ 波动。

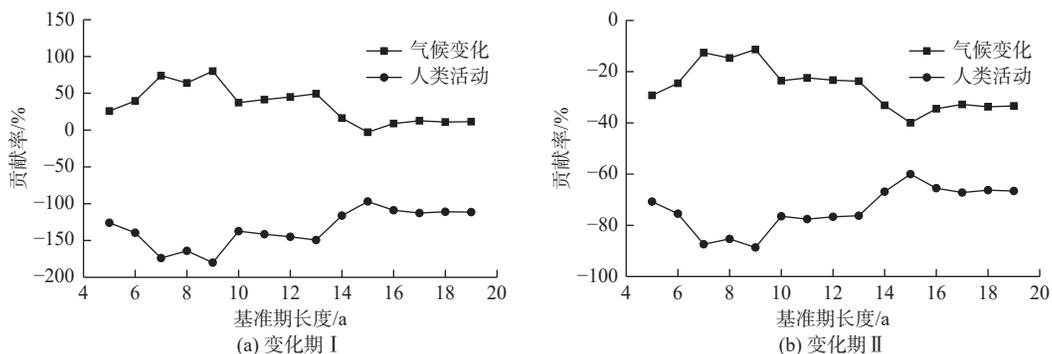


图 3 基准期长度情景与径流变化归因结果的对应关系

Fig. 3 Attribution results of runoff changes obtained by various lengths of baseline periods

对比两个变化期的径流变化归因结果可以发现:在基准期长度为 9 a(1970—1978 年)和 14 a(1965—1978 年)时,归因结果均出现明显跳跃。结合流域资料分析:1962 年密云县提出“增加粮食生产”建设目标,开始大力发展农业,到 1965 年全县粮食产能超建库前的最高水平;1970 年,密云县再次掀起农业建设高潮,同时带动化肥、水泥、煤矿等产业迅速发展<sup>[24]</sup>。工农业迅速发展,流域土地利用类型、蒸散发量和生产、生活用水量发生明显变化是导致上述归因结果出现较大波动的主要原因。

综上所述,基于密云水库流域近 60 a 降水、径流归因分析结果显示,当基准期长度达到 16 a 及以上时,径流变化归因结果逐渐趋于稳定。现有部分研究由于基准期选取普遍较短,径流变化归因结果存在一定偏差,具体体现为:在变化期 I,基准期选取较短会高估人类活动和气候变化对径流的影响程度;相反在变化期 II,基准期选取较短则会低估气候变化对径流的削减作用、高估人类活动产生的减水效应。

### 3.2.2 基准期位置选取对归因分析结果的影响

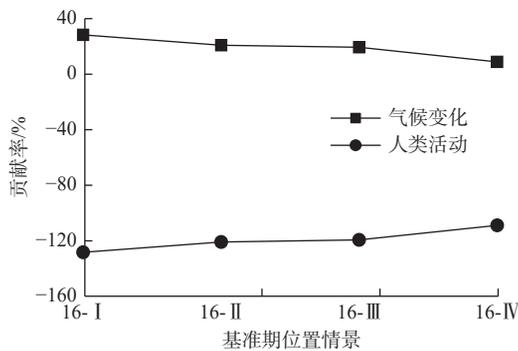
基准期选取对归因分析结果的影响不仅体现在时段长度的选取上,还取决于时段位置的选定上。结合基准期长度对归因分析影响的结果,进一步选取归因结果趋于稳定时的基准期长度并改变基准期位置,计算并对比归因结果差异。综合考虑基准期与整体研究时段长度,设置基准期位置情景见表 3。

表 3 基准期位置情景设置

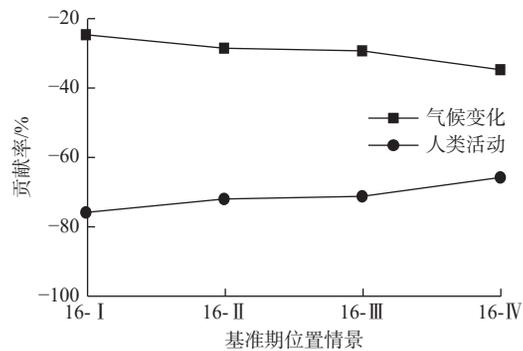
Tab. 3 Scenarios of baseline periods with different starting-year and different years

基准期/a	编号	基准期时间
16	16-I	1960—1975年
	16-II	1961—1976年
	16-III	1962—1977年
	16-IV	1963—1978年
17	17-I	1960—1976年
	17-II	1961—1977年
	17-III	1962—1978年
18	18-I	1960—1977年
	18-II	1960—1978年

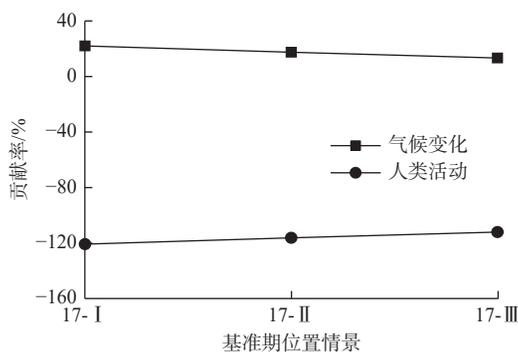
采用 Budyko 水量平衡方法计算各基准期位置情景对应的径流归因结果见图 4,基准期位置情景与归因结果呈规律性变化。在变化期 I,相同基准期长度情景下,当基准期位置选取靠近研究初始时段时,归因计算得到的人类活动和气候变化对径流的影响程度相对较大;在变化期 II,当基准期位置选取靠近研究初始时段时,人类活动对径流变化的影响程度增大,气候变化的影响程度相对减小。分析认为出现该现象的主要原因是当基准期选取靠近初始时段时,流域环境更加接近不受人类活动影响的自然状态,以此为基准计算得到的变化期人类活动影响则相对较大。



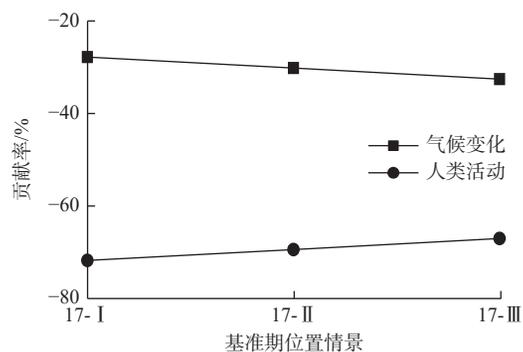
(a) 基准期 16 a, 变化期 I



(b) 基准期 16 a, 变化期 II



(c) 基准期 17 a, 变化期 I



(d) 基准期 17 a, 变化期 II

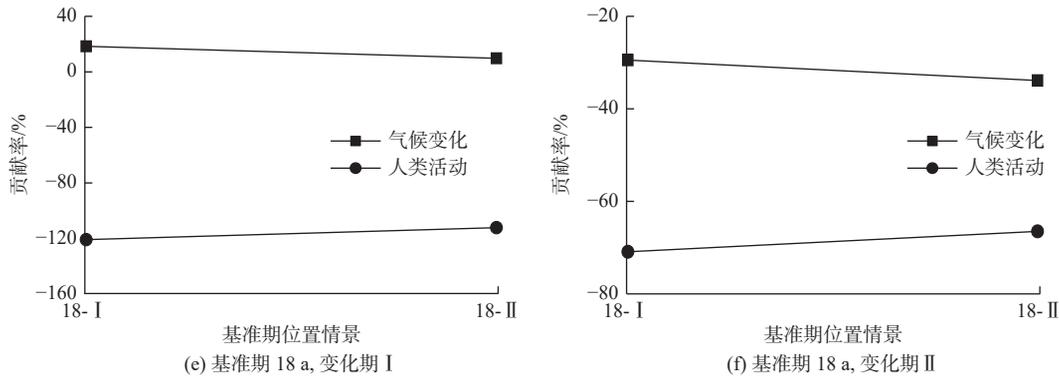


图 4 基准期位置情景与归因分析结果对应关系

Fig. 4 Attribution results of runoff changes obtained by different starting-year and different years

## 4 结论与讨论

本文基于密云水库流域降水、径流非平稳特征诊断结果,通过构建流域 SWAT 模型、基于 Budyko 理论的弹性系数法和水量平衡法等方法进行径流变化归因分析;交叉验证并对比各方法归因结果,优选适用于该流域的径流变化归因模型;借助优选模型,进一步探究基准期长度和位置选取对径流归因结果的影响。综合分析结果显示:基于 Budyko 理论的水量平衡方法更适用于水利工程众多、跨流域调水频繁的密云水库流域径流变化归因分析;当基准期长度为 16 a 及以上时,径流变化归因结果开始趋于稳定;此外,当基准期选择靠近研究初始时段时,计算得到的人类活动对径流变化的影响程度相对较大。综合考虑归因方法和基准期选取的影响,认为人类活动是密云水库流域径流变化的主导因素:在变化期 I,其贡献率在 $-128.32\%$ ~ $-119.56\%$ ;在变化期 II,其贡献率在 $-75.58\%$ ~ $-70.70\%$ 。

目前已有研究的归因方法和基准期选取不同,造成该流域径流归因结论存在明显差异。本文针对密云水库流域长序列降水、径流资料,合理划定归因计算基准期,依据流域特点对比选择合适的归因方法,进行流域径流变化归因分析,研究结果有助于提升对密云水库流域径流复杂演变规律的科学认识,同时也可为其他流域径流变化归因分析方法和基准期选取提供参考。在流域人类活动影响方式不断增多、影响程度不断加深的背景下,如何依据各流域特性选取合理的归因计算方法,是需要进一步探讨的问题;此外,基准期长度的选取与流域降水、径流特征的关系仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 李秋菊,李占玲,王杰.黑河流域上游径流变化及其归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):31-39. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0057.
- [2] 徐宗学,班春广,张瑞.雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J].水科学进展,2022,33(4):519-530. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.001.
- [3] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.014.
- [4] 赵阳,余新晓,郑江坤,等.气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J].农业工程学报,2012,28(22):252-260. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.22.035.
- [5] 姚治君,管彦平,高迎春.潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J].地理科学进展,2003(6):599-606. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2003.06.008.
- [6] 秦丽欢,周敬祥,李叙勇,等.密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J].生态学报,2018,38(6):1941-1951. DOI: 10.5846/stxb201609301980.
- [7] 王晓颖.基于改进新安江模型的密云水库流域径流变化归因研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- [8] 王纲胜,夏军,万东晖,等.气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J].自然资源学报,2006(1):86-91. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2006.01.011.
- [9] 章燕喃.密云水库流域近三十年径流变化及归因分析[D].北京:清华大学,2014.
- [10] 高迎春,姚治君,刘宝勤,等.密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J].地理科学进展,2002(6):546-553. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2002.06.004.
- [11] 庞树江,王晓燕.密云水库流域入库径流量变化特征及归因研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):144-148. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.297.8.
- [12] 李珠,杨默远,桑燕芳,等.密云水库流域降水径流非平稳特征识别及归因分析[J].南水北调与水利

- 科技(中英文), 2024, 22(1): 1-8.
- [13] TAN M L, GASSMAN P W, YANG X Y, et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 143: 103662. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103662. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.128817.
- [14] 彭慧. 基于地理信息技术和SWAT模型的城市水资源评价方法研究[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(6): 686-693. DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2022.06.007.
- [15] 钟小敏, 钟科元, 高怡婷, 等. SWAT模型子流域划分引起的土地利用变化对径流和输沙模拟结果的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 52-58. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220620.001.
- [16] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 等. 基于SWAT的沁河流域水源涵养能力分析及其预测[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230926.0907.006.html>.
- [17] 焦丽君, 刘瑞民, 王林芳, 等. 基于SWAT模型的汾河流域生态补水研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5778-5788.
- [18] OZDEMIR A, LELOGLU U M. A fast and automated hydrologic calibration tool for SWAT[J]. *Water and Environment Journal*, 2019, 33: 488-498. DOI: 10.1111/wej.12419.
- [19] YANG D, SHAO W, YEH P J F, et al. Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A14. DOI: 10.1029/2008WR006948.
- [20] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. *中国科学:技术科学*, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [21] 肖军仓, 周文银, 罗定贵, 等. 非点源污染模型: SWAT用户应用指南[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [22] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- [23] 黄霄翔, 李润杰, 甘永德, 等. 基于Budyko假设的布哈河流域径流变化归因分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 480-490. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0048.
- [24] 北京市密云水库管理处. 密云水库志[Z]. 北京: 北京市密云水库管理处, 1990.

## Attribution analysis of runoff changes in the Miyun Reservoir basin based on multi-factor analysis

LI Zhu<sup>1,2,6</sup>, SANG Yanfang<sup>1,2,3,6</sup>, YANG Moyuan<sup>4</sup>, ZHAO Xuehua<sup>5</sup>

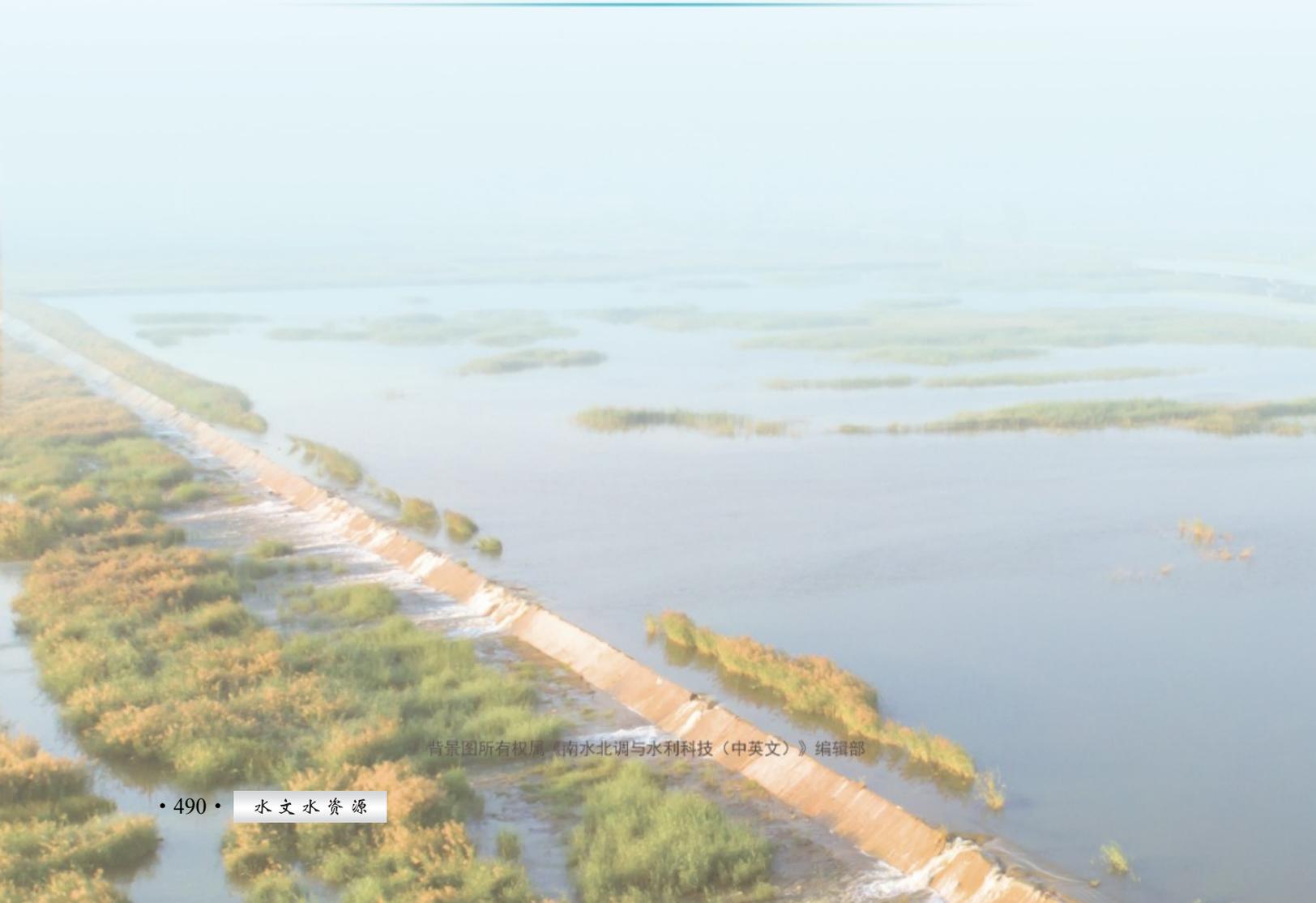
(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing, 100085, China; 4. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 5. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the non-stationary hydrological time series, it is of great importance to explore its formation with attribution analysis to understand the hydrological process and solve the problem of water resources. Under the influence of both climate change and human activity, hydrological process in the Miyun Reservoir basin shows significantly non-stationary characteristics, while there are great differences in the results of attribution in this basin. In order to accurately reveal the causes of runoff changes in the Miyun Reservoir basin, the whole period (1960-2019) was divided into three parts: 1960-1979 for the baseline period, 1980-1998 for the change period I, and 1999-2019 for the change period II based on the detection result of the non-stationary characteristics of precipitation-runoff. The SWAT method, the elastic coefficient method, and the water balance method based on Budyko theory were used for attribution, and then model suitable for attribution in the Miyun Reservoir basin was selected according to the attribution results and basin characteristics. Based on the selected model, length and position of baseline period were changed to further explore the influence of baseline period on the attribution result.

It was shown that attributions of elastic coefficient method and water balance method based on Budyko were similar, while the attribution of SWAT method was quite different. In the change period I, contribution of human activities to runoff changes show as SWAT method < elastic coefficient method < water balance method. And in

change period II, results of the two methods on Budyko both showed that human activity was the main reason for the decrease of runoff, while result of SWAT showed that the impact of climate change on runoff far exceeded the impact of human activities, and became the dominant factor affecting the runoff. Cross-validation of multi-method attributions showed that the water balance method based on Budyko theory was more suitable for the attribution of runoff changes due to the construction of hydraulic projects and frequent inter-basin water transfer in the Miyun Reservoir basin. Based on the selected model, it was found that the results of attribution tended to be stable as the length of the baseline period reached 16 years. Reduction effect of human activities on runoff would be overestimated while the baseline period was shorter than 16 years. And the calculated water reduction effect of human activities was larger when the baseline period was closer to the initial position of the whole period. Considering both the effects of model and baseline period, it was concluded that human activities were the dominant factor in the runoff changes in Miyun Reservoir basin; its reduction effect on runoff fluctuated from  $-128.32\%$  to  $-119.56\%$  during the change period I, and was about  $-75.58\%$  to  $-70.70\%$  during the change period II. These results are helpful to improve the scientific understanding of the complex changes of the runoff and its attribution in Miyun Reservoir basin.

**Key words:** runoff; attribution; baseline period; human activity; Miyun Reservoir



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部