

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[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 331-338. LI Z, YANG M Y, SANG Y F, et al. Detection and attribution of the non-stationary characteristics of precipitation-runoff processes in the Miyun Reservoir basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 331-338. (in Chinese)

密云水库流域降水径流非平稳特征识别及归因

李珠^{1,2,7}, 杨默远³, 桑燕芳^{1,2,4,7}, 赵雪花⁵, 吴林倩⁶

- (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. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 4. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 北京 100085;
5. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 6. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
7. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为更准确揭示和认识变化环境下密云水库流域水文过程的非平稳特征, 选取该流域 1960—2019 年降水和径流资料, 采用多种时间序列分析方法综合诊断其趋势、突变点和周期等非平稳特征并进行成因分析。结果显示: 该流域降水变化主要表现出较明显的随机特性, 径流相比降水的下降趋势更显著, 且在 1979 年发生了向下跳跃的强变异; 相比气候变异影响, 人类活动是密云水库流域径流减少的主导因素; 1980—1998 年流域水土保持措施与水利工程兴建对径流变化的贡献率为-111.40%, 抵消了气候变异 11.4% 的增水效应; 1999—2019 年, 塘坝建造和用地类型转变对径流变化的贡献率为-66.60%, 同时叠加气候变异-33.40% 的减水效应, 导致近 20 年来该流域径流呈现显著减少的态势。研究结果可为密云水库安全运行、洪水调度以及流域水资源管理决策提供科学支撑。

关键词: 降水径流; 非平稳特征; 诊断归因; 时间序列分析; 密云水库

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0004

受气候变异和人类活动的双重影响, 许多流域和地区水文过程的形成条件发生了明显改变, 观测水文时间序列呈现出越来越明显的非平稳特征^[1-2]。密云水库长期以来担负着北京城市生活和工农业生产用水的重要任务^[3]。在气候变异和人类活动共同影响下, 密云水库上游流域水文过程呈现出了明显的非平稳特征^[4-5], 2021 年、2023 年均出现了极端洪水过程。基于当前北京市水资源短缺的严峻形势及密云水库的重要供水地位, 准确揭示和合理认识密云水库流域水文过程的复杂演变特征, 可有效支撑该区域水资源合理利用与综合管理。

目前关于密云水库流域水文过程非平稳特征识别已有大量研究, 重点关注了降水、径流及二者关系的变化规律。针对该流域降水的变化规律, 主要有无明显趋势^[6-9]和存在下降趋势^[10]两种结论, 但关于降水突变、周期等特征的研究较少。此外, 针

对该流域径流趋势变化的研究结果较为一致, 即普遍认为径流呈下降趋势^[6-7,11-13]; 然而, 由于选取的识别方法和数据资料不同, 相关研究中分别检测出径流在 20 世纪 70 年代初和末、80 年代末、90 年代初和末均有突变特征^[6,8-9,11,13], 且给出了 4~5、6、7 a^[11,14] 等第一主周期和 16、17、18、24 a^[15-17] 等第二主周期的不同周期识别结果。综合分析可以看出, 已有研究中采用的分析思路和方法存在差别, 特别是许多研究采用的数据资料相对较短, 导致得到的该流域降水、径流非平稳特征识别结果存在很大差异, 甚至存在相互矛盾的结果, 使得对密云水库流域水文过程的非平稳特征无法形成统一的认识。

为了更准确地认识密云水库流域水文过程的复杂非平稳特征及其物理成因, 选取该流域 1960—2019 年长序列降水、径流资料, 采用水文变异综合诊断系统、标准化离散小波谱等方法, 深入

收稿日期: 2023-09-06 修回日期: 2023-12-01 网络出版时间: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240109.0940.006>

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@igsnr.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@igsnr.ac.cn

揭示流域降水、径流的趋势、突变点和周期特征,并结合物理过程对结果进行合理性分析,明确变化环境下密云水库流域水文过程的复杂演变规律;在此基础上,应用基于 Budyko 理论的水量平衡方法对流域径流变化进行归因分析,揭示气候变异和人类活动对径流变化的影响,旨在为变化环境下密云水库安全运行、洪水调度以及流域水资源管理决策等提供科学依据。

1 数据资料

密云水库流域位于 $40^{\circ}20'N\sim 41^{\circ}37'N$ 、 $115^{\circ}27'E\sim 117^{\circ}35'E$,上游分为白河和潮河两大支流,分别经张家坟水文站和下会水文站汇入密云水库。该流域气候类型属中温带向暖温带过渡、半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候^[18],雨热同期,降水多集中在汛期。流域多年平均降水量 449.30 mm(1960—2019 年),多年平均径流深 45.12 mm(1960—2019 年)。流域内地形以山地为主,主要植被类型为林地、耕地和草地。在多年水土保持工作的成效下,流域林地覆盖率已经达到 50% 左右(2018 年土地利

用数据)。为满足取用水需求,区域内先后建有云州水库(库容 10 200 万 m^3)、白河堡水库(库容 9 060 万 m^3)、遥桥峪水库(库容 1 094 万 m^3)等中型水库及小型水库共 30 余座,对径流演变规律产生了很大影响^[9]。

收集整理密云水库流域 1960—2019 年降水、径流数据进行分析计算。降水与径流数据均取自《海河流域水文年鉴》,利用泰森多边形法对流域内 35 个雨量站数据进行分析处理,得到该流域的面平均降水序列(图 1);将张家坟和下会水文站的径流之和作为该流域的径流序列(图 1)。此外,考虑到该流域 2021 年降水量是近 60 年来的最大值,因此分别对 1960—2019 年、1960—2021 年降水时间序列的非平稳特征进行诊断并对比分析,以评估结果的合理性与稳定性。由于无法获取 2020 年以来的径流数据,因此未对径流的变化特征做相同的对比分析。为进行流域径流变化成因分析,研究另收集赤城、丰宁、上甸子等站点气象数据,采用彭曼公式计算流域潜在蒸散发量。

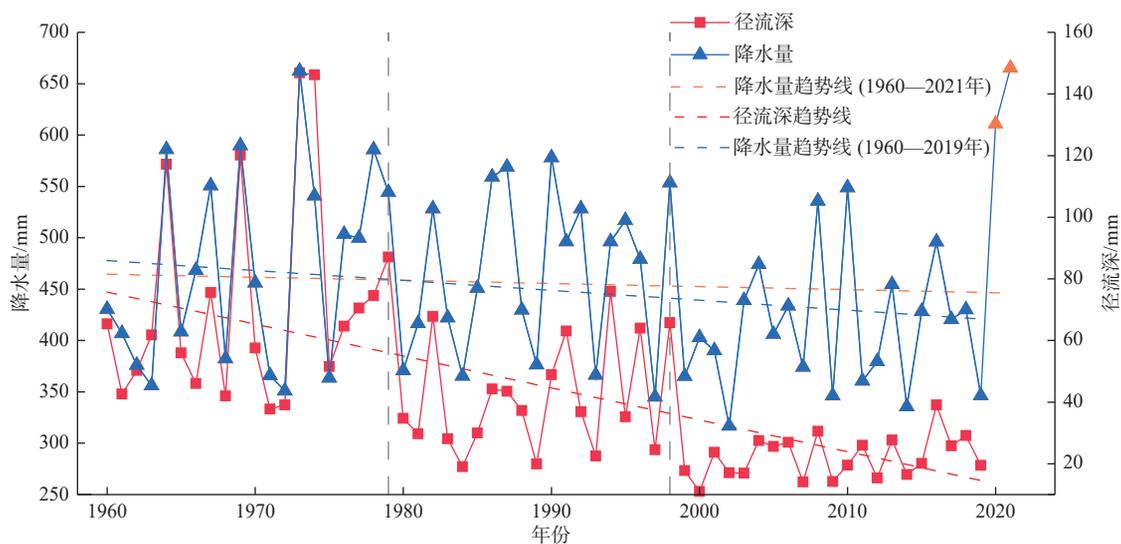


图 1 密云水库流域降水和径流时间序列

Fig. 1 Time series of precipitation and runoff in the Miyun Reservoir basin

2 研究方法

研究采用 Mann-Kendall (M-K) 检验方法^[19]分别对降水和径流时间序列进行趋势识别;采用水文变异综合诊断系统^[20]对降水、径流序列的突变点进行诊断;最后采用标准化离散小波谱方法^[21]识别降水和径流的周期特征。为揭示变化环境下密云水库流域径流呈现非平稳特征的物理成因,首先依据

降水、径流非平稳特征诊断结果进行年份段划分,然后利用基于 Budyko 理论的水量平衡方法^[22]对流域径流变化进行归因分析。

2.1 Mann-Kendall 检验方法

目前常用的水文时间序列趋势识别方法有定性分析的过程线法和定量分析的累计曲线斜率法、M-K 检验法、回归分析法、秩相关检验法等^[23]。其中, M-K 检验方法不要求数据服从同分布,且对存在局

部数据缺失问题具有良好的鲁棒性,更适合于非正态分布的气象水文序列的趋势识别^[20]。该方法原理简介如下:

对序列 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 进行 M-K 检验时,首先构造统计量 U , 表达式为

$$U = \frac{\tau}{\sqrt{D(\tau)}} \quad (1)$$

其中

$$\tau = \frac{4k}{n(n-1)} - 1, \quad D(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: n 为序列长度; k 为对偶值($x_i, x_j; j>i$)中 $x_i < x_j$ 的个数。当 $U>0$ 时表示序列呈增加趋势,当 $U<0$ 时认为序列呈减小趋势;趋势显著性由统计量 U 和给定显著水平 α 下的 $U_{\alpha/2}$ 的关系确定,当 $|U|>U_{\alpha/2}$ 时认为趋势显著,否则判定趋势不显著。

2.2 水文变异综合诊断系统

时间序列的突变点诊断较为困难,且不同诊断方法得到的突变点识别结果往往存在很大差异^[24]。鉴于水文变异综合诊断系统具有较单一检验方法检验指标多、能够多角度诊断和全面反映序列突变特征等优势,本文采用水文变异综合诊断系统对密云水库流域降水、径流序列进行突变点诊断。

应用该方法诊断序列突变特征的步骤包括初步诊断、详细诊断、综合诊断及成因分析:初步诊断采用 Hurst 方法和 Bartels 方法等从定性和定量角度对序列的随机性成分和确定性成分进行初步分析,判定序列是否存在突变;当序列存在突变时,采用详细诊断中的 12 种突变分析方法对序列进行多角度诊断^[25];综合诊断采用权重综合法、显著性综合法以及效率系数对序列的突变形式及其显著性进行量化;最后结合物理成因对突变结果进行合理性分析,最终得到该序列的突变诊断结果。方法原理详见文献 [20]。

2.3 标准化离散小波谱方法

应用常规周期识别方法直接对时间序列进行分析时,难以准确区分噪声成分产生的伪周期,且多成分相互干扰使得小时间尺度上周期波动的显著性被严重低估^[26]。为了克服常规方法的缺陷,采用标准化离散小波谱(uniform discrete wavelet spectrum, UDWS)方法识别密云水库流域降水、径流序列的周期特征,其基本原理解释如下:

对于长度为 n 的水文时间序列,选择合适的小波函数并确定其最大分解水平为 $\log_2 n$ 后,首先对

序列进行离散小波变换,表达式为

$$W_f(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{(j,k)}^*(t) dt \quad (3)$$

其中

$$\Psi_{(j,k)}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \Psi(2^{-j}t - k) \quad (4)$$

式(3)和(4)中: j 为分解水平; k 为时间转换因子; $\Psi^*(t)$ 为母小波 $\Psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(j, k)$ 为离散小波系数。在此基础上,重构各分解水平 j 下的子序列,表达式为

$$f_j(t) = \sum_k W_f(j, k) \Psi^*(2^{-j}t - k) \quad (5)$$

子序列的能量函数 $E(j)$ 的计算公式为

$$E(j) = \sum_{t=1}^n [f_j(t)]^2 \quad (6)$$

将待分析时间序列的能量函数与标准能量函数置信区间进行对比。在各分解水平下:当某子序列能量函数处于置信区间内时,认为该子序列由噪声构成且表现出随机性;反之,当子序列能量函数处于置信区间之上时,认为该子序列是确定性的周期成分,且通过显著性检验^[21]。

2.4 Budyko 水量平衡方法

Budyko 理论认为在较长时间尺度下,流域实际蒸散发量由流域降水量及潜在蒸散发量之间的平衡关系决定^[27]。采用考虑水分、能量及下垫面条件的 Mezentsev-Choudhury-Yang 公式计算研究区实际蒸散发量,表达式为

$$E = \frac{PE_T}{(P^w + E_T^w)^{1/w}} \quad (7)$$

式中: E 为多年平均实际蒸散发量, mm; E_T 为多年平均潜在蒸散发量, mm; P 为流域多年平均降水量, mm; w 为综合反映流域土地利用情况、地形条件及土壤条件等的参数^[22]。

将公式(7)与流域水量平衡公式 $P = E + R$ 相结合,流域内降水、径流、潜在蒸散发的关系可表示为

$$P - R = \frac{PE_T}{(P^w + E_T^w)^{1/w}} \quad (8)$$

根据上式,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计算推求。在变化期内,对径流变化进行归因分析时首先假定流域下垫面参数不变,利用变化期降水及潜在蒸散发量数据估算径流,并认为该估算值是不受人类活动影响的变化期径流量(R_m),其与基准期实测径流量($R_{基}$)的差值反映了气候变异引起的径流变化量(ΔR_c),与变化期实测径流量($R_{变}$)的差值反映了人类活动导致的径流变化量(ΔR_h)。

基准期和变化期实测径流的差值为总的径流变化量(ΔR)。因此,气候变异和人类活动对径流变化的贡献率可分别表示为

$$\eta_c = \frac{\Delta R_c}{|\Delta R|} = \frac{R_m - R_{基}}{R_{变} - R_{基}} \quad (9)$$

$$\eta_h = \frac{\Delta R_h}{|\Delta R|} = \frac{R_{变} - R_m}{R_{变} - R_{基}} \quad (10)$$

式(9)和(10)中: η_c 为气候变异对径流变化的贡献率; η_h 为人类活动对径流变化的贡献率。当贡献率为负数时表示该因素产生了径流减少效应,反之为径流增加效应。

3 结果分析

3.1 趋势识别分析

密云水库流域降水序列和径流序列的趋势识别结果见表 1。从表 1 可以看出:1960—2019 年降水序列呈下降趋势($U = -1.56$),但未通过 5% 置信水平的显著性检验;而 1960—2021 年降水序列由于包含了 2021 年降水量的极大值,因此降水下降趋势($U = -0.77$)相比 1960—2019 年降水序列明显变弱(图 1)。相比于降水,径流整体上呈分阶段减少的趋势,且趋势统计量($U = -5.24$)通过了 5% 置信水平的显著性检验。

表 1 密云水库流域降水、径流序列趋势检验结果

Tab. 1 Trend of precipitation and runoff series in the Miyun Reservoir basin

变量	序列长度	统计量 [*]	趋势	显著性
降水	降水序列 I (1960—2019年)	$ -1.56 < 1.96$	下降	不显著
	降水序列 II (1960—2021年)	$ -0.77 < 1.96$	下降	不显著
径流	径流序列 (1960—2019年)	$ -5.24 > 1.96$	下降	显著

注:^{*}表中以 5% 显著水平判别序列趋势的显著性,对应的 U 统计量阈值为 1.96。

已有研究^[6-9]中,由于选用的数据资料起止年份不同且序列长度也存在差异,尤其是未充分考虑降水在 2000 年前后呈现出的先下降后上升的分阶段变化现象(图 1),因此得到降水无明显趋势、存在下降趋势等不一致的结果。相比较而言,本研究在 60 年更长时间尺度内进行分析,可以看出降水存在不显著下降趋势,但径流呈现显著减少趋势。

3.2 突变点诊断分析

利用水文变异综合诊断系统得到的该流域降水、径流序列突变点诊断结果显示,1960—2019 年的降

水序列在 1998 年发生了向下跳跃的弱突变(图 1),且突变后多年平均降水量减少了 7.6%。然而,1960—2021 年降水序列并未诊断出突变点。由此认为,极端丰水年降水数据值对序列突变诊断结果具有显著影响。对于密云水库流域降水序列,1998 年的突变点主要反映了降水序列的局部变异现象,但对更长时间尺度内降水的整体演变规律影响较小,因此可能不会对径流变化产生较大影响。

采用该方法得到的流域径流序列诊断结果显示,径流在 1979 年发生了向下跳跃的强突变,且突变后多年平均径流深减少了 56.8%。基于流域人类活动情况进行分析发现,20 世纪 70 年代末以来,随着用水需求的增加和水土保持治理工作的推进,该流域内修建了大批塘坝和小水库,仅潮河流域就增加库容约 1 031 万 m^3 ^[28];此类工程汛期拦蓄上游径流供给生产、生活和生态用水,同时增加了流域蒸发量^[29]。上述因素共同作用解释了该流域径流在 1979 年发生显著突变的物理成因。

已有研究^[6,8-9,11,17]结果也指出了径流在 1979 年的突变特征,与研究结果一致。但这些研究还指出径流在 1967 年、1973 年、1987 年、1994 年、1998 年、1999 年等年份也存在突变特征。其中 1998 年的径流突变特征可能与降水在 1998 年发生的局部突变相关。对于诊断出的其他径流突变点,基于该流域内实际人类活动情况难以找到合理的成因解释,因此认为可能是由于选取的径流序列长度、诊断方法等不同而导致的不合理结果。

3.3 周期识别分析

利用 UDWS 方法得到的流域降水、径流序列周期识别结果见图 2。其中:1960—2019 年降水序列能量函数在各分解水平下均处于 95% 置信区间内,表明序列无显著周期特征;而 1960—2021 年降水序列能量函数在第 5 分解水平下超出了 95% 置信区间,表明序列存在约 30 多年的周期特征,即主要反映了降水在 2000 年前后先下降后上升的整体变化规律(图 1),但需要指出的是,采用 62 年降水序列得到的约 30 多年的周期特征可能存在较大的不确定性。为此,进一步采用 LB(Ljung-Box)白噪声检验方法对 1960—2021 年降水序列进行随机性检验,结果表明其表现出较强的随机特性,即反映出该降水序列周期特征较弱。采用 UDWS 方法得到的径流序列的周期识别结果显示径流序列存在约 20 a 的周期特征。

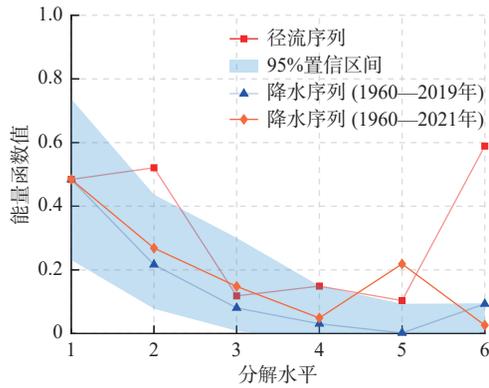


图2 基于标准化离散小波谱的密云水库流域降水、径流序列周期识别结果

Fig. 2 Periodicities of precipitation and runoff series based on uniform discrete wavelet spectrum in the Miyun Reservoir basin

已有研究^[11,13-16]结果中得到的径流周期普遍较短,即认为主要存在4~5、6、7 a等第一主周期和16、17、18、24 a等第二主周期,与本研究结果存在较大差异,究其原因认为与选取的序列长度较短、随机成分影响、方法存在缺陷^[24]等因素有关,导致周期识别结果存在较大偏差和不确定性。

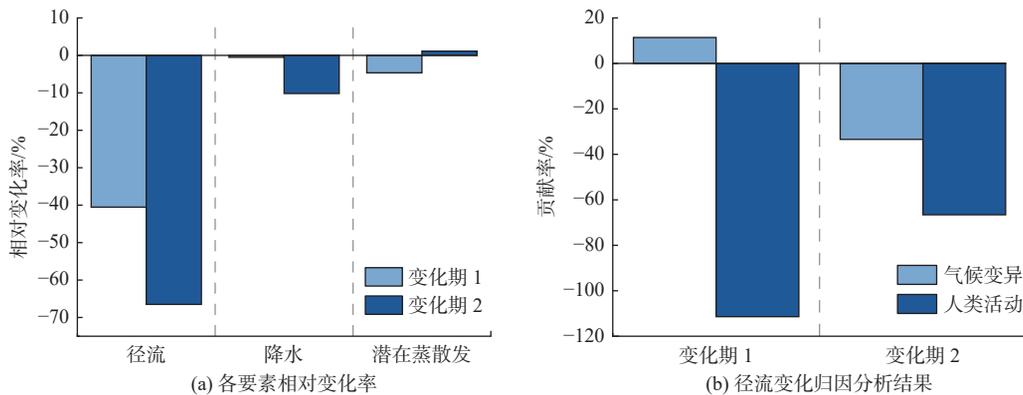


图3 变化期内密云水库流域各要素相对变化率与径流变化归因分析结果

Fig. 3 Relative change of precipitation, runoff and potential evapotranspiration in the Miyun Reservoir basin during the change period and the attribution of runoff change

径流变化归因分析结果 [图 3(b)] 显示: 在变化期 1 内气候变异对径流的总体贡献率为 11.4%, 即表现为增水效应, 其原因是该变化期内流域降水下降不明显(0.51%), 但潜在蒸散发明显减少(4.65%), 一定程度上缓解了降水减少对径流产生的负效应, 导致气候变异整体呈现为增水效应; 变化期 1 内, 人类活动对径流变化的贡献率达到了 -111.40%, 其产生的减水效应远大于气候变异的增水效应, 最终导致流域径流显著减少; 变化期 2 内, 气候变异对径流的贡献率为 -33.40%, 即表现为减水效应, 主要是由于降水明显减少(10.19%)且潜在

3.4 径流变化归因分析

上述诊断结果显示密云水库流域降水、径流的非平稳特征存在较大差别: 径流相比降水的下降趋势更显著, 且径流在 1979 年发生向下跳跃的强突变, 反映出气候变异和人类活动对径流变化的共同影响。为了准确揭示密云水库流域径流变化的物理成因, 基于突变点诊断结果, 选取 1960—1979 年为基准期, 同时考虑 1998 年降水的局部突变特征, 将 1980—1998 年和 1999—2019 年分别作为变化期 1 和变化期 2, 采用基于 Budyko 理论的水量平衡方法对流域径流变化进行归因分析。

基准期内流域年平均径流深为 71.88 mm, 降水量为 467.54 mm, 反映流域下垫面状况的参数 w 为 1.46。各变化期内降水、径流和潜在蒸散发量相比基准期的变化见图 3(a)。变化期 1 内, 径流较基准期减少了 40.53%, 但降水仅减少了 0.51%; 变化期 2 内, 径流减少了 66.49%, 降水减少了 10.19%。两个变化期内径流减少幅度均远大于降水的下降幅度, 反映了流域人类活动对径流的较大影响。

蒸散发量也同时增加(1.12%), 同期内, 人类活动对径流的影响仍然表现为负效应, 且贡献率为 -66.60%, 仍是流域径流减少的主导因素。

综上所述, 人类活动是密云水库流域径流减少的主要原因。基于流域实际情况分析可以发现, 人类活动对径流的影响方式主要包括区间取用水与跨流域调水等直接影响方式, 以及人类活动导致下垫面条件改变进而影响产汇流的间接影响方式。两个变化期内的人类活动影响过程讨论如下: 在变化期 1 内, 即从 20 世纪 70 年代末开始, 北京市山区水土保持工作快速推进, 截至 1995 年底, 流域治理

林木覆盖率达到 53.35%，一定程度上涵养水源并减少了流域产流^[30-31]。与此同时，随着用水需求不断增大，该时期流域内修建了大批水库塘坝，白河堡水库和遥桥峪水库相继建成蓄水，两库共计 11 000 万 m³ 库容，直接拦蓄上游天然来水，使流域径流大幅减少。因此，水土保持措施与水利工程兴建是变化期 1 内径流减少的主要原因。变化期 2 内，密云水库流域水土保持工作转入生态清洁小流域建设阶段，新建并修缮了部分塘坝。20 世纪 90 年代末以来，北京、河北等地开始推行退耕还林还草政策，京津风沙源治理工程也开始启动，流域用地类型发生较大转变。塘坝建造和用地类型转变使得流域拦蓄水量增大、产汇流关系发生改变，是导致变化期 2 内该流域径流大幅度减少的主要原因。

4 结论与讨论

本文采用多种分析方法，系统揭示了近 60 年来密云水库流域水文过程的复杂非平稳特征与物理成因。研究结果发现：该流域降水变化主要表现出较明显的随机特性，但降水、径流的非平稳特征存在较大差别，径流相比降水的下降趋势更显著，且径流在 1979 年发生了向下跳跃的强变异。归因分析结果显示：径流变化受气候变异和人类活动双重影响，且人类活动是密云水库流域径流减少的主导因素。1980—1998 年，流域水土保持措施与水利工程兴建对径流变化的贡献率达到了-111.40%，抵消了气候变异 11.4% 的增水效应；1999—2019 年，塘坝建造和用地类型转变对径流变化的贡献率为-66.60%，同时叠加气候变异-33.40% 的减水效应，导致近 20 年来该流域径流呈现显著减少态势。

近年来密云水库流域处于丰水年使得降水量较大，加之南水北调来水持续入库，以及人类活动对上游天然来水的削减作用，使得流域水文过程和密云水库来水情况呈现更加复杂多变的情势。伴随着经济社会持续发展，流域内人类活动对径流的影响方式不断增加、影响程度不断加深，因此有必要进一步收集流域取用水数据、土地利用变化数据、水利工程调水等数据，定量分析各项人类活动对径流变化的影响与贡献率。此外，在关注年际尺度下流域径流变化归因的基础上，未来还需探寻更精细的归因方法，在更小时间尺度下揭示降水强度及变化等精细过程对径流变化的影响，并厘清不同归因方法选取对径流变化归因结果的影响，以提升对该

流域径流复杂演变规律的科学认识。研究结果可以为统筹构建该流域天然来水、南水北调来水、库区蓄水及生产生活生态用水平衡体系，更好地为密云水库水资源调度管理和汛期防洪调度等实际工作提供支撑。

参考文献：

- [1] 吴卓, 戴尔阜, 林媚珍. 气候变化和人类活动对南方红壤丘陵区森林生态系统影响模拟研究: 以江西泰和县为例[J]. *地理研究*, 2018, 37(11): 2141-2152. DOI: 10.11821/dlyj201811002.
- [2] 韦晓伟, 张洪波, 辛琛, 等. 变化环境下流域气象水文要素的相关性演化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 17-26. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0112.
- [3] 赵刚, 徐宗学, 董晴晴, 等. 不同管理措施对密云水库流域水量水质变化的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 80-88. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.012.
- [4] ZHENG J K, SUN G, LI W H, et al. Impacts of land use change and climate variations on annual inflow into the Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(4): 1561-1572. DOI: 10.5194/hess-20-1561-2016.
- [5] YAN T Z, SHEN Z Y, BAI J W. Spatial and temporal changes in temperature, precipitation, and streamflow in the Miyun Reservoir basin of China[J]. *Water*, 2017, 9(2): 78. DOI: 10.3390/w9020078.
- [6] 姬世保, 杜军凯, 仇亚琴, 等. 基于二元水循环模拟的密云水库上游流域河川径流演变归因分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(4): 116-127. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.04.010.
- [7] 吴悦, 徐佳琪, 仇文顺, 等. 潮白河北京段生态补水调度方案研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9): 180-189. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.09.016.
- [8] 王静怡, 王晓燕. 密云水库流域径流变化特征及影响因素分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2): 89-92, 97. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2007.02.020.
- [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] 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.
- [11] 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.

- [12] MA H, YANG D W, TAN S K, et al. Impact of climate variability and human activities on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(3-4): 317-324. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.010.
- [13] 钟永华, 鲁帆, 易忠, 等. 密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析[J]. *水文*, 2013, 33(6): 81-84. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2013.06.017.
- [14] 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.
- [15] 王泽勇, 廖卫红, 丁星臣, 等. 气候变化和人类活动对密云水库上游流域径流变化的影响[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(6): 13-16.
- [16] 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.
- [17] 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, 22(6): 599-606. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2003.06.008.
- [18] 李子君, 李秀彬. 潮白河上游1961—2005年径流变化趋势及原因分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 82-87. DOI: 10.1332/j.1000-1522.2008.s2.001.
- [19] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*, 2020, 51(7): 845-857. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200066.
- [20] 王文圣, 金菊良, 丁晶. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988: 34.
- [21] 雷红富, 谢平, 陈广才, 等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(4): 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1547.2014.14.146.
- [22] XIE P, GU H T, SANG Y F, et al. Comparison of different methods for detecting change points in hydroclimatic time series[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123973. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123973.
- [23] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(1): 85-91.
- [24] 吴林倩, 谢平, 吴子怡, 等. 基于相关系数的水文序列滑动周期识别方法[J]. *科学通报*, 2019, 64(24): 2549-2560. DOI: 10.1360/N972018-01192.
- [25] SANG Y F, WANG Z G, LIU C M. Discrete wavelet-based trend identification in hydrologic time series[J]. *Hydrological Process*, 2013, 27(14): 2021-2031. DOI: 10.1002/hyp.9356.
- [26] 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. DOI: 10.1029/2010WR009826.
- [27] 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.
- [28] 程娅姗, 王中根, 刘丽芳, 等. 近50年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 45-50. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2018.0037.
- [29] 贾绍凤, 梁媛, 张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 33-38, 55. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.006.
- [30] 彭涛, 梅子祎, 董晓华, 等. 基于Budyko假设的汉江流域径流变化归因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1114-1124. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0114.
- [31] 冯胜航, 王党伟, 秦蕾蕾, 等. 金沙江流域径流变化特征及成因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 248-257. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0025.

Detection and attribution of the non-stationary characteristics of precipitation-runoff processes in the Miyun Reservoir basin

LI Zhu^{1,2,7}, YANG Moyuan³, SANG Yanfang^{1,2,4,7}, ZHAO Xuehua⁵, WU Linqian⁶

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Mountain Natural Hazards and Engineering Safety, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 4. Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China; 5. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 6. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 7. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Under the influences of climate change and human activities, the hydrological process formation conditions in many basins and regions have changed significantly, and observed hydrological time series show

growingly non-stationary characteristics. The uneven spatial and temporal distribution of water resources has been aggravated, resulting in new challenges for regional water resources management. It has been a hot topic to detect and attribute the changes in precipitation-runoff processes in changing environments. As the largest surface drinking water source in Beijing and the largest reservoir in north China, the Miyun Reservoir is responsible for water supply including urban, industries, and agriculture in the region. Precipitation-runoff processes upstream of the Miyun Reservoir also showed obvious non-stationary characteristics and extreme flooding events occurred in 2021 and 2023.

For accurately identifying the non-stationary characteristics of hydrological processes in the Miyun Reservoir basin, and further clarifying its physical causes by considering the influences of both climate change and human activities, the observed annual data of precipitation and runoff from 1960 to 2019 were used. Multiple methods for time series analysis, including the Mann-Kendall test, hydrological alteration diagnosis system, and discrete wavelet spectrum for period identification were applied to detect the non-stationary characteristics (including trend, breakpoint, and periodicities) of precipitation and runoff. Based on the detection results, the Budyko framework-based water balance method was used to attribute the changes in runoff.

Precipitation displayed random changes across the whole time, with no noteworthy trend, breakpoint, or period observed. However, runoff's non-stationary characteristics differed from those of precipitation. The decreasing trend of runoff was more significant compared with precipitation, and a significant breakpoint in 1979 was identified in the annual runoff time series. Based on that, from 1960 to 1979 was chosen as the baseline period, and the changes in runoff from 1980 to 1998 and from 1999 to 2019 were attributed to using the Budyko framework-based water balance method. The results indicated that human activities dominated the decrease in runoff in the Miyun Reservoir basin, compared to the influences of climate change. From 1980 to 1998, the soil and water conservation measures and constructions of hydraulic projects contributed -111.40% of runoff compared to the baseline period, offsetting the runoff increase of 11.4% caused by climate change. From 1999 to 2019 change caused by dam construction and land use change was -66.60% of the total runoff change, and climate change further aggravated -33.40% of the change

In recent years, the Miyun Reservoir basin has been in rainy periods, with higher precipitation compared to an average level. Coupled with the impacts of human activities on the runoff, the hydrological process and runoff present more complex variability in the Miyun Reservoir basin. Detection and attribution of the non-stationary characteristics of precipitation-runoff processes could be a useful basis for guiding the safe operation and water management of the Miyun Reservoir.

Key words: precipitation-runoff; non-stationary characteristics; detection and attribution; time series analysis; Miyun Reservoir