

永定河流域水文响应变化归因与驱动因素研究

牛凯杰^{1,2}, 吴 为³, 刘 庚^{1,2}, 苏 鑫⁴, 王银堂⁴, 李曦亭⁵, 王磊之⁴

(1. 太原师范学院地理科学学院; 2. 汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室;
3. 江苏汇智工程技术有限公司; 4. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 5. 河海大学水科学研究院)

摘要:为分析永定河流域主要干流水文响应变化趋势和变异特征,提出了天然径流变异归因分析方法并对永定河流域水文响应变化进行了定量归因分析,探讨了永定河流域水文响应变化的驱动因素。结果表明:永定河流域主要干流年天然径流均呈现显著衰减趋势,并于 20 世纪 80 年代初期发生了突变,突变前后流域水文响应发生较大结构性变化;气候变化对永定河干支流天然径流衰减的贡献率为 10.9%~24.5%,人类活动的贡献率为 75.5%~89.1%;永定河流域降水时程分布均匀化、气候变暖变干、植被覆盖增加、地下水开采是流域天然径流与水文响应变化的主要驱动因素。
关键词:天然径流;水文响应;气候变化;水量平衡模型;永定河流域

Research on attribution and driving factors of hydrological response changes in the Yongding River Basin//Niu Kaijie^{1,2}, Wu Wei³, Liu Geng^{1,2}, Su Xin⁴, Wang Yintang⁴, Li Xiting⁵, Wang Leizhi⁴(1. School of Geographical Sciences, Taiyuan Normal University; 2. Shanxi Key Laboratory of Surface Processes and Resource Ecological Security in Fenhe River Basin; 3. Jiangsu Huizhi Engineering Technology Co., Ltd.; 4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 5. Institute of Water Science and Technology, Hohai University)

Abstract: To analyze the changing trends and variation characteristics of the hydrological response of the main trunk and tributaries in the Yongding River Basin, a method for attributing variations in natural runoff was proposed, and a quantitatively attribution analysis of the changes in the hydrological response of the Yongding River Basin was conducted. Then the driving factors of the changes in the hydrological response were also explored. The results demonstrate that the annual natural runoff of the main trunk and tributaries in the Yongding River Basin shows a significant attenuation trend, and a sudden change occurred in the early 1980s. The hydrological response of the basin experiences significant structural changes before and after the sudden change. The contribution rate of climate change to the decline of natural runoff of the trunk and tributaries in the Yongding River is 10.9% to 24.5%, while the contribution rate of human activities is 75.5% to 89.1%. The uniformization distribution of precipitation time course, warming and drying climate, increased vegetation cover, and groundwater extraction are the main driving factors for changes in natural runoff and hydrological response in the Yongding River Basin.

Key words: natural runoff; hydrological response; climate change; water balance model; the Yongding River Basin

气候变化是造成全球水资源量及其空间分布变化的主要原因之一,人类活动也深刻改变了流域水文产汇流过程,对全球范围的水文循环产生了重大影响^[1-4]。径流作为水文循环系统中的核心要素,极易受气候变化和人类活动的干扰。长期以来,一些流域水文要素表现出异于正常波动的突变性或趋势性特征,对地区生态系统安全和经济社会发展带来不利影响^[3-9]。因此,科学诊断和解析河川径流等主要水文要素的变异特征及其驱动因素,对于深刻认

识变化环境下流域水循环机理与过程、合理调配水资源具有重要意义。

定量区分气候变化与人类活动对径流影响的方法主要有水文模型法、时间趋势法、流域对比法、弹性系数法等^[10-11]。其中,水文模型法可以有效区分气候变化和人类活动对径流的敏感性和贡献率,已广泛应用于不同流域径流变化评价与归因分析中^[12-17]。目前,水文要素的诊断与归因分析大多针对水资源开发利用后的实测径流,而对将耗水还原得到的天然径流

基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021212381);山西省科技战略研究专项项目(202404030401145);山西省文化、旅游、创意产业发展调研专项课题基金项目(SXSKWC2023073)

作者简介:牛凯杰(1989—),男,讲师,博士,主要从事水文生态研究。E-mail:nkj3596@163.com

通信作者:王磊之(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wanglz@nhri.cn

的相关研究较少。天然径流作为表征降水再分配和产水能力的关键因子,是降水、蒸散发、壤中流、地下水等多种水循环要素响应的客观载体,对于从源头分析水文情势变化至关重要^[18]。因此,鉴于天然径流在水循环中发挥的重要作用,一定程度上可采用天然径流来表征与量化流域水文响应变化特征。

永定河是海河流域七大水系之一,也是北京的母亲河。维护永定河生命健康,打造流动、清洁和绿色的永定河,是保障首都水安全和推动京津冀协同发展的重要基础。永定河水文情势发展变化在我国北方地区具有一定的代表性。自1980年以来,永定河水文情势发生持续变异,断流、干涸等问题日益突出,河流的生态廊道功能严重丧失,直至2019年后通过跨流域调水相关措施,永定河生态状况才得到了一定改善^[19]。近年来,相关学者围绕永定河水文情势变化与归因^[20-24]、生态修复^[25-27]、水文模拟^[28]、防洪减灾^[29]、水资源管理与调度^[30-31]等方面开展了大量的研究,但相关研究多针对永定河流域实测径流,尚缺乏从天然径流或水文响应变化角度解析永定河水文演变态势的研究,关于永定河水循环要素变异规律的深层次原因也揭示不足,制约了对永定河水文变化驱动机制的系统认识。

本文基于永定河相关数据,在水文变异诊断基础上分析永定河主要干支流水文响应结构变化特征,提出天然径流变异归因分析方法,筛选降水、气温、蒸散发、土地利用与覆被、地下水开采等驱动因素,综合分析永定河流域水文响应与天然径流变化成因。研究成果可为永定河流域协调生态恢复与水资源管理提供一定的参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

永定河发源于山西高原北部和内蒙古高原南缘,流经内蒙古、山西、河北、北京、天津5省(自治区、直辖市),主要支流为桑干河和洋河,全长747 km。永定河流域(39°N~41°20'N, 112°E~117°45'E)总面积约4.70万km²,地处温带季风气候区,四季分明,降雨时空分布不均,年降水量为360~650 mm,汛期(6—9月)降水量占全年的70%~80%。永定河为海河水系最大河流和北京市母亲河,永定河流域为京津冀地区重要的水源涵养区、生态屏障和生态廊道。

永定河三家店以上属于山区,集水面积为4.51万km²,是流域主要产流区。永定河流域水库和农业灌区众多,现有大、中型水库18座,其中官厅水库为全流域控制性水库,集水面积为4.34万km²;册田水库为桑干河流域的最大水库,集水面积为

1.71万km²;响水堡水库为洋河流域的控制性水库,集水面积为1.45万km²。官厅水库、册田水库、响水堡水库等站点水文情势在永定河流域、桑干河流域、洋河流域均具有代表性和典型性。永定河流域水系与气象水文站点分布如图1所示。

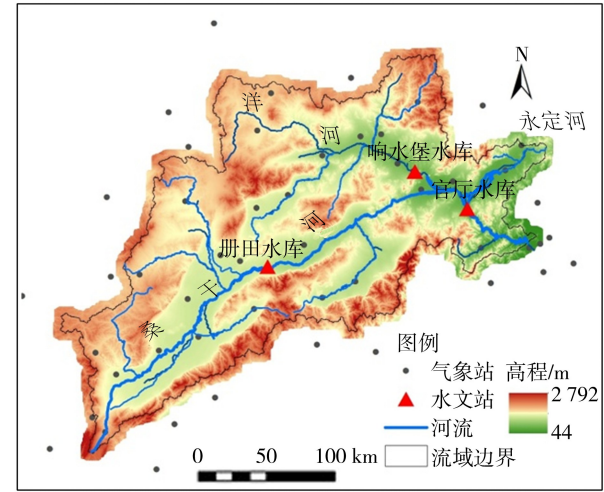


图1 永定河流域水系与气象水文站点分布

Fig. 1 Water system of the Yongding River Basin and distribution of meteorological and hydrological stations

1.2 数据来源

数据资料包括气象水文数据、土地利用与覆被数据、陆地水储量数据等。为保证数据和研究的一致性和可靠性,本文采用的数据均截至2016年。各类数据基本情况及来源为:1956—2016年研究区及附近50个气象站逐日气象数据包括降水、平均气温、最高气温、最低气温、湿度、风速、太阳辐射等,来源于<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>;结合气象数据,通过Penman-Monteith公式计算得到1956—2016年逐日潜在蒸散发系列数据;1956—2016年册田水库、响水堡水库和官厅水库站月尺度地表天然径流量系列来自全国第三次水资源调查评价;1980—2020年土地利用类型遥感监测数据(每5年一期),分辨率为1 km,来源于<https://www.resdc.cn/>;1982—2016年逐月GIMMS NDVI系列数据分辨率为8 km,来源于<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>;2002—2016年逐月陆地水储量数据分辨率为0.25°,来源于<http://www.csr.utexas.edu/datasets/>;地下水开采数据来源于永定河流域各省公布的水资源公报等。

2 研究方法

2.1 水文序列变化特征分析

2.1.1 水文要素变异点诊断

目前诊断水文要素变异性的统计方法很多,但多数方法无法同时检测序列的趋势性和突变性,且不

同方法所得结果不尽相同。为提高水文要素变异诊断的鲁棒性和可靠性,本文采用谢平等^[32]提出的水文变异诊断系统,包括初步诊断、详细诊断与综合诊断 3 个步骤,具体步骤详见文献[33-34]。

2.1.2 水文要素关系结构变化表征

采用 Copula 函数表征永定河流域干支流水文站控制流域降水-径流要素关系结构,并基于不同阶段的关系结构分析其变化规律。用 Copula 函数描述关系结构特征的优势在于可灵活、稳健独立于边缘分布对随机变量之间的依赖结构建模。关系结构变化表征思路为:①根据水文要素变异点检验结果将年降水量、年天然径流系列划分为 2 个阶段,在不同阶段分别采用皮尔逊Ⅲ(P-Ⅲ)型分布进行拟合计算,得到各自边缘分布函数;②选择 Archimedean Copula 族的 Frank、Clayton 和 Gumbel Copula 函数,通过普通最小二乘法(OLS)确定最优降水-径流联合分布函数,用以表征降水-径流要素关系结构;③通过对比 2 个阶段不同联合概率点处的降水量和径流量,分析降水-径流要素关系结构的变化特征。边缘分布函数、联合分布函数表达式及构建方法见文献[34]。

2.2 天然径流变异归因分析方法

本文提出的天然径流变异归因分析方法主要包括水文模型构建、天然径流重构和水文响应变化贡献率计算。

a. 水文模型构建。选择双参数水量平衡模型(water balance model with double parameters, WBM-DP)模拟永定河流域天然径流, WBM-DP 主要由水量平衡方程、水热耦合平衡方程和蓄泄方程组成。模型建立后,进行逐时段计算,得到连续的年径流、蒸散发和蓄水量过程,以年径流纳什效率系数(NSE)为目标,采用 SCE-UA 优化算法率定模型参数。模拟构建的详细步骤参见文献[35]。

b. 天然径流重构。基于水文变异点将研究时段分为基准期和变化期,基准期内流域气候变化和人类活动不显著,水文响应关系维持在天然状态;变化期内受气候变化和人类活动影响,天然径流及水文响应均发生显著变化。采用基准期率定的 WBM-DP 参数和全时段内观测的气象数据重构整个时期的天然径流,可反映全时段内天然状态下流域的水文特征。对比不同阶段流域实际天然径流和重构天然径流,可认为基准期内实际天然径流与变化期内重构的天然径流之差表征了气候变化引起的天然径流变化,而在变化期内重构的天然径流和实际天然径流之差即为人类活动引起的天然径流变化,即:

$$\Delta W_C = W_{vi} - W_{bn} \tag{1}$$

$$\Delta W_P = W_{bn} - W_{vn} \tag{2}$$

式中: ΔW_C 、 ΔW_P 分别为气候变化和人类活动引起的天然径流变化; W_{vi} 为基准期实际天然径流均值; W_{bn} 、 W_{vn} 分别为变化期重构的和实际天然径流均值。

c. 水文响应变化贡献率计算。对比变化期与基准期,河川天然径流的变化主要由气候变化和人类活动变化导致。贡献率计算公式为:

$$\eta_C = \Delta W_C / \Delta W_T \tag{3}$$

$$\eta_P = \Delta W_P / \Delta W_T \tag{4}$$

其中 $\Delta W_T = W_{vi} - W_{vn}$

式中: η_C 、 η_P 分别为气候变化和人类活动对天然径流或水文响应变化的贡献率; ΔW_T 为变化期较基准期天然径流的变化量。

3 结果与分析

3.1 水文响应变化特征

采用水文变异诊断系统在 95% 置信水平上检验了册田水库、响水堡水库、官厅水库 3 个水文站年天然径流量序列变异性。水文变异诊断包括初步诊断、详细诊断和综合诊断 3 个流程。初步诊断采用 Hurst 指数方法,册田水库、响水堡水库、官厅水库站 Hurst 指数分别为 0.982、1.000、0.975,表明永定河流域天然径流量序列整体上呈现强变异特性;详细诊断突变年份检验结果如表 1 所示,利用相关系数检验、Spearman 检验、Kendall 秩检验方法检验天然径流趋势特征,结果显示 3 个水文站天然径流均呈现显著下降趋势;综合诊断表明,册田水库、响水堡水库、官厅水库站年天然径流量下降趋势和突变性均显著,变异点分别为 1982 年、1983 年、1983 年,永定河流域干流及主要支流年天然径流量的变异规律具有较强的一致性和同步性。为便于分析,本文统一将 1983 年作为 3 个水文站天然年径流量变异点,并将 1956—1982 年作为基准期,1983—2016 年作为变化期。

表 1 年天然径流量突变年份检验结果

Table 1 Test results of years of abrupt change in annual natural runoff

检验方法	突变年份		
	册田水库站	响水堡水库站	官厅水库站
滑动 F 检验	2010 *	2014 *	2000 *
滑动 T 检验	1982 *	1983 *	1983 *
Lee-Heghinian 检验	1982 **	1983 **	1983 **
有序聚类法	1982 **	1983 **	1983 **
重标极差检验	1982 **	1986 **	1983 **
最优信息二分割	1982 *	1983 *	1998 *

注: * 表示突变结果显著, ** 表示无法判别显著性。

利用 P-Ⅲ 型分布函数建立永定河流域年降水

量和年天然径流量的边缘分布函数,采用 Frank、Clayton 和 Gumbel Copula 函数估计相依参数 α ,通过最小 OLS 值或最大决定系数 (R^2) 确定最优 Copula 函数,用以表征降水-径流要素关系结构, Copula 函数参数估计及拟合优度检验结果见表 2。由表 2 可以得出,册田水库、响水堡水库、官厅水库站拟合效果最优的 Copula 函数分别为 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数。

根据降水-径流联合分布函数的模拟计算结果,采用拟合效果最优的 Copula 函数,绘制 1983 年前后各水库站点控制流域降水-天然径流联合分布概率等值线图(图 2),以表征永定河干支流降水-径流要素关系结构的变化。对比基准期和变化期降

水-天然径流联合分布概率等值线分布,可以发现等值线的拐点为联合分布概率精确值,等值线的疏密程度反映了降水量和径流深年际波动的大小,等值线越密,表示年降水量和径流量变化范围大,反之亦然。为定量分析各水文站控制流域降水-径流要素关系结构突变前后水文参数及联合概率的变化,定义分布概率为 0.1 的等值线对应的值为小概率值,分布概率为 0.8 的等值线对应的值为大概率值,将分布概率为 0.1~0.8 的等值线范围称为分布区间宽度,反映了水文情势变化程度。基于此,分析各时段变化规律。

表 3 为主要干支流水文站控制流域降水-径流要素关系结构变化特征。永定河流域变化期与基准

表 2 Copula 函数参数估计及拟合优度检验结果

Table 2 Copula function parameter estimation and goodness-of-fit test results

水文站	时期	Kendall 系数	Frank Copula 函数			Clayton Copula 函数			Gumbel Copula 函数		
			α	OLS 值	R^2	α	OLS 值	R^2	α	OLS 值	R^2
册田水库	基准期	0.54	6.44	0.05	0.97	2.31	0.06	0.96	2.16	0.04	0.98
	变化期	0.14	1.32	0.03	0.98	0.34	0.03	0.98	1.17	0.03	0.98
响水堡水库	基准期	0.50	5.81	0.06	0.96	2.03	0.05	0.96	2.02	0.07	0.95
	变化期	0.18	1.70	0.03	0.99	0.45	0.03	0.99	1.22	0.03	0.99
官厅水库	基准期	0.44	4.76	0.04	0.98	1.58	0.04	0.97	1.79	0.04	0.97
	变化期	0.09	0.79	0.04	0.97	0.19	0.04	0.97	1.09	0.04	0.97

注:加粗数值为各函数评价指标中最小 OLS 值及最大 R^2 值,对应的函数为最优 Copula 函数。

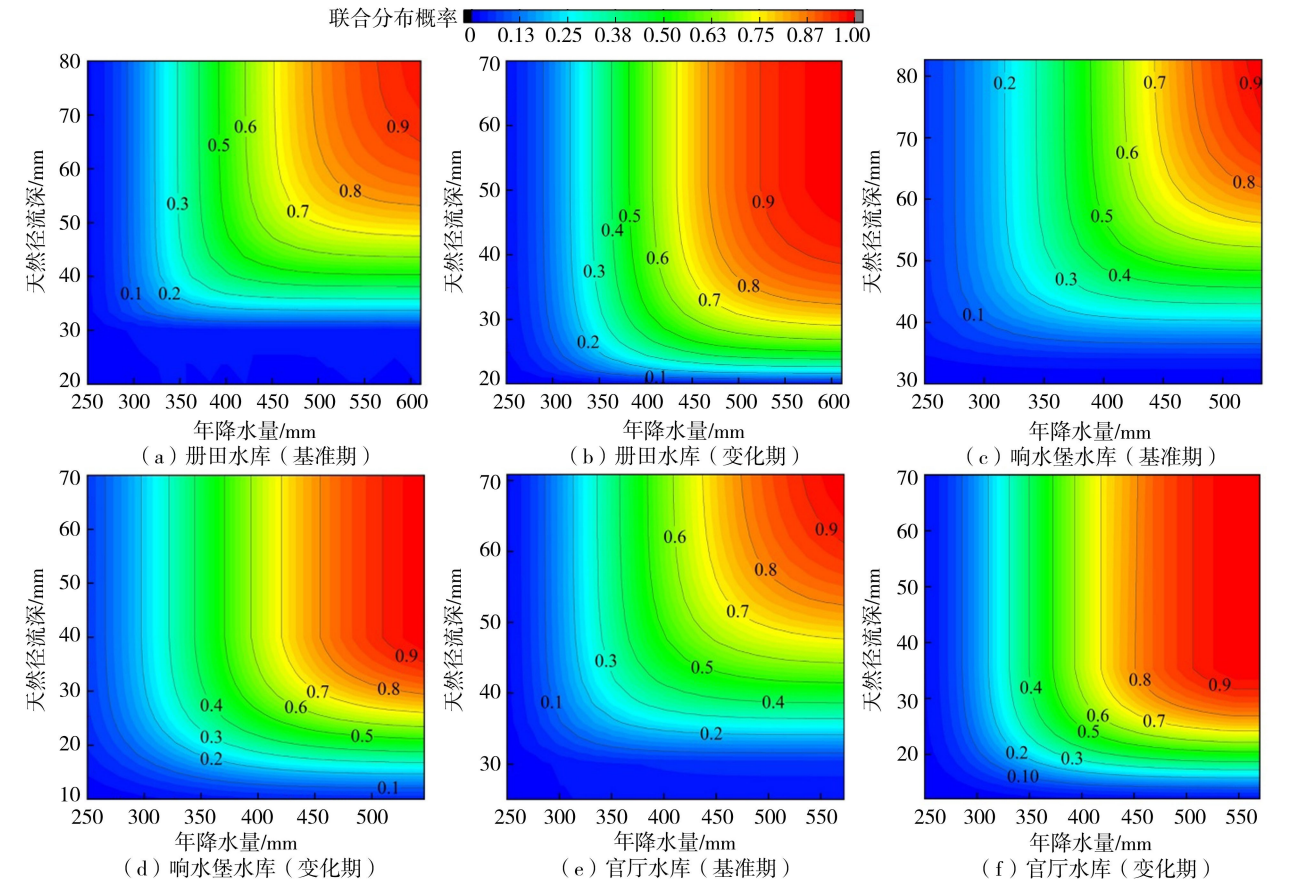


图 2 各水文站控制流域降水-天然径流联合分布概率等值线

Fig. 2 Probability contour lines of precipitation-natural runoff combined distribution for control basin of hydrological stations

表3 各水文站控制流域降水-径流要素关系结构变化特征

Table 3 Characteristics of precipitation-runoff structure changes for control basin of hydrological stations

水文站	联合分布概率	年降水量/mm			天然径流深/mm		
		基准期均值	变化期均值	相对变化率/%	基准期均值	变化期均值	相对变化率/%
册田水库	0.1	293	306	4.4	44	26	-40.9
	0.8	484	478	-1.2	69	38	-44.9
	0.1~0.8	191	172	-9.9	25	12	-52.0
响水堡水库	0.1	292	300	2.7	42	18	-57.1
	0.8	485	469	-3.3	70	35	-50.0
	0.1~0.8	193	169	-12.4	28	17	-39.3
官厅水库	0.1	298	308	3.4	36	19	-47.2
	0.8	493	468	-5.1	59	31	-47.5
	0.1~0.8	195	160	-17.9	23	12	-47.8

期对比分析表明,降水量的低概率值略有增加,大概率值略有减少,在一定程度上反映出降水的均化特性;径流深的低概率和高概率值均大幅下降。当联合分布概率为0.1~0.8时,永定河流域降水量减少为17.9%,而天然径流深下降为47.8%。可以看出流域天然径流深不仅有所降低,且产流区间范围也缩小一半。表明永定河流域天然径流下降幅度远超降水量,流域产水能力大幅度降低,永定河流域水文响应关系已发生结构性的根本变化。

图3给出了永定河流域主要水文站年天然径流量变异点前后年降水-天然径流散点图。由图3中可知,变化期对应的年降水-天然径流散点基本位于基准期散点下方,线性回归直线斜率较基准期显著下降,表明在同等年降水量条件下永定河流域变化期产流能力大幅度下降。统计了3个站点的年径流系数,发现基准期和变化期官厅水库站年径流系数均值分别为0.10和0.05,响水堡水库站分别为0.12和0.06,变化期相对降低程度均接近50%。说明20世纪80年代前永定河山区约有10%的年降水量可以转变为河川天然水资源量,而在80年代之后这一比例已降低到5%。同时,变化期年降水-天然径流散点较基准期分散,相应的官厅水库站、册田水库站、响水堡水库站年降水-天然径流线性回归方程的决定系数由基准期的0.57、0.63和0.57下降至

变化期的0.10、0.17和0.07,这说明年降水量对天然径流量的解释能力大幅度降低。

3.2 天然径流变异定量归因

天然径流变化可以反映水文响应关系结构的变化程度。采用WBM-DP模拟册田水库、响水堡水库和官厅水库3个典型水文站控制流域基准期天然径流量系列,利用基准期资料率定和检验模型参数,将1956—1972年和1973—1982年分别作为率定期和检验期,WBM-DP模拟参数和径流模拟效果如表4所示,模拟过程见图4。从图4可知,整个基准期WBM-DP对天然径流的模拟精度尚可,率定期和验证期各站点模拟天然径流的NSE均介于0.46~0.89之间,模拟参数位于正常取值范围内,除了峰值以外,模拟值和实际值基本吻合,模型具有较好的模拟效果。

表4 各水文站控制流域 WBM-DP 模拟参数和径流模拟效果

Table 4 WBM-DP simulation parameters and runoff simulation effects for control basin of hydrological stations

水文站	模拟参数			NSE	
	初始蓄水量	下垫面参数	蓄泄系数	率定期	验证期
册田水库	592	0.73	8534	0.78	0.46
响水堡水库	620	0.70	7554	0.82	0.58
官厅水库	749	0.71	11116	0.89	0.55

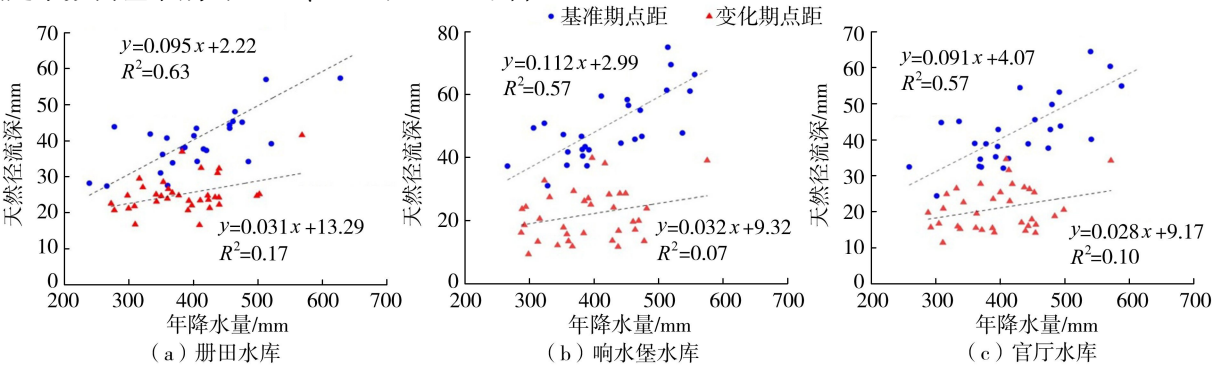


图3 各水文站控制流域年降水-天然径流关系

Fig. 3 Relationship between annual rainfall and natural runoff for control basin of hydrological stations

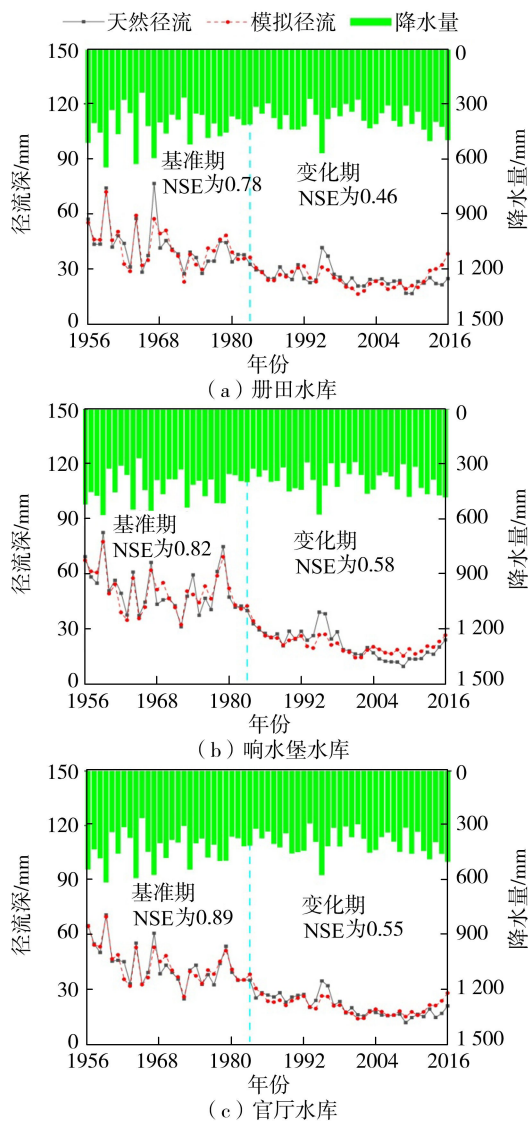


图4 各水文站控制流域径流模拟与变化归因

Fig. 4 Runoff simulation and change attribution for control basin of hydrological stations

根据 WBM-DP 基准期确定的参数,进一步模拟变化期重构天然径流系列,并对天然径流的变化进行定量归因分析。从图 4 可知,变化期各水文站控制流域实际天然径流多小于重构天然径流,表明气候变化和人类活动造成了流域地表水资源下降,且重构的天然径流过程与实际天然径流的突变点相一致,变化期这两条线之间的差距反映了气候变化和人类活动对天然径流的影响。以册田水库站控制流域为例,天然径流深年均值从基准期的 42.5 mm 下降到变化期的 25.3 mm,降幅为 17.2 mm,其中,重构天然径流在基准期和变化期的差值为 4.4 mm,而变化期内实际天然径流与重构天然径流的差值为 12.8 mm,这表明气候变化和人类活动对册田水库站控制流域天然径流减少的贡献率分别约为 24.5% 和 75.5%,同理,气候变化和人类活动对响水堡水库站控制流域天然径流减少的贡献率分别为

10.9% 和 89.1%,对官厅水库站控制流域天然径流减少的贡献率分别为 18.2% 和 81.8%。因此,气候变化与人类活动共同导致永定河流域天然径流和水文响应关系的改变,其中人类活动是主要因素。但要注意的是,为方便研究将永定河流域 3 个水文站的变异点统一为 1983 年,而册田水库站实际变异点为 1982 年,这会对册田水库站控制流域天然径流变化的归因结果产生一定的误差,但产生的误差较小,且 1983 年天然径流相较于 1982 年变化不大,对归因结果不会产生实质性的影响。

当前已有不少学者针对永定河流域长系列径流变化进行归因分析,归因成果有一定差异甚至相互矛盾。彭戩等^[21,23-24,36-37]均得出人类活动是造成永定河径流减少的主要因素。其中,彭戩等^[21-24,36]得出人类活动对径流减少的贡献率超过 90%,李秀等^[23]得出人类活动贡献率约为 80%。张利平等^[38]研究结果与大多数学者相反,推测可能原因是采用反映静态土地利用信息的 SWAT 模型模拟永定河径流,没有考虑以植被为主的下垫面动态变化,低估了人类活动的影响。Hou 等^[22]对比了相同气象条件下不同年代土地利用的水文效应,发现仅由静态土地利用导致的径流变化在 5% 以内。

较之前人研究主要针对实测径流,本文以天然径流为研究对象更具研究价值和实际意义。一方面,本文从源头识别了永定河流域水文响应、水文情势变化以及降水再分配能力,通过天然径流变异定量归因分析发现人类活动是导致永定河天然径流衰减和水文响应变化的主要原因,完善了对永定河流域水循环规律的系统认识。另一方面,本文采用集总式水文模型 WBM-DP 模拟天然径流,通过在基准期和变化期采用相同的模拟参数,分离气候变化和人类活动对天然径流的贡献率,可以有效避免采用分布式模型和传统 Budyko 假设方法时下垫面变化的不确定性干扰,预测方法和结果更加可靠。

3.3 水文响应变化驱动因素

流域水循环影响因素主要包括降水、气温、蒸散发等气候条件,土地利用与覆被等下垫面条件以及水资源开发利用等,这些因素的改变可能会导致水文响应关系以及天然径流的变化^[39-40]。

3.3.1 降水

汛期降水是干旱半干旱地区水资源的重要来源,永定河流域 7—8 月降水量约占全年降水量的 50%。流域 7—8 月降水量减少率为 1.21 mm/a,远大于年际下降率(0.23 mm/a),符合海河流域降水分布特征^[41]。研究期 7—8 月日降水量指标统计结果如表 5 所示,官厅水库站控制流域日降水量中位

数、偏度系数和峰度系数均随时段呈逐级减小的特征,册田水库站、响水堡水库站控制流域也有相同变化,这表明永定河流域 1956—2016 年 7—8 月日降水量表现为集中性降低、分布趋于均匀的特征。

表 5 1956—2016 年 7—8 月日降水量指标

Table 5 Daily precipitation indexes for July to August form 1956 to 2016

水文站	时段	降水量中位数/mm	偏度系数	峰度系数
册田水库	1956—1979 年	0.25	6.68	79.56
	1980—2000 年	0.11	5.31	42.88
	2001—2016 年	0	3.98	24.13
响水堡水库	1956—1979 年	0.54	8.19	119.94
	1980—2000 年	0.27	6.01	55.88
	2001—2016 年	0.17	3.60	20.49
官厅水库	1956—1979 年	0.86	7.95	115.70
	1980—2000 年	0.62	6.06	58.00
	2001—2016 年	0.31	3.38	11.86

图 5 为册田水库站、响水堡水库站和官厅水库站控制流域不同时段 7—8 月各量级日降水频率直方图。对不同时段日降水频率对比分析发现,各水文站控制流域日降水量小于 0.1 mm 的频率随时间不断增加,而随着日降水量级从 0.1~2 mm 增加至大于 50 mm,日降水频率随时间均有一定程度的减小,且减小幅度随日降水量的增加越来越显著。这表明永定河流域 7—8 月日降水频率与量级整体呈现均化的特点。

永定河流域 7—8 月降水量变化特征对产流具有重要影响。降水集中性降低有利于增加植被截流量,减少落地雨和地表超渗产流,进入土壤包气带中的雨水将更加缓慢运移,但通过植被蒸腾和土壤蒸散返回大气的比例也将增加,由此地下水和降水入渗补给可能并未增加甚至有所减少^[42]。鉴于永定河流域降水、径流均高度集中于汛期的特征,有理由认为降水持续均化过程是导致永定河流域天然径流量大幅度减少和水文响应关系变化的重要原因之一。

3.3.2 气温与蒸散发

根据气象数据资料,册田水库站、响水堡水库站

和官厅水库站控制流域面年平均气温均值由 1959—1979 年的 6.8~7.2℃ 上升至 1980—1999 年的 7.4~7.8℃,再上升至 2000—2016 年的 8.0~8.4℃。通过线性回归可以发现,研究期内永定河流域平均气温呈明显上升趋势,各站控制流域平均气温每 10 a 上升 0.22~0.26℃,多年平均气温 Mann-Kendall 检验 Z 值为 4.21~5.07,表明永定河流域平均气温呈显著增加趋势(显著性水平 $p<0.01$)。

永定河流域多年平均潜在蒸散发量(ET_0)呈现一定的下降趋势,册田水库站、响水堡水库站和官厅水库站控制流域 ET_0 的变化率分别为 -0.46、-0.60、-0.67 mm/a,相应序列 Mann-Kendall 检验 Z 值分别为 -2.69、-1.69、-1.72,其中册田水库站控制流域 ET_0 呈显著下降趋势($p<0.05$)。已有研究表明,海河流域存在日照时数减少的趋势,平均气温对海河流域蒸发皿蒸发量的增加作用小于日照时数的减少作用,这可能是永定河流域“蒸发悖论”现象产生的原因^[43]。与潜在蒸散发相反,基于构建的 WBM-DP 发现,1980 年以来永定河流域年实际蒸散发量为 346.9~489.7 mm,上升速率达 1.7 mm/a,表明流域呈现一定的暖干化趋势,符合海河流域相关研究结论^[44]。永定河流域平均气温和实际蒸散发的增加促进流域暖干化,增强了水域和植被的蒸发蒸腾作用,加大了流域水循环和水汽消耗,对流域天然径流产生不利影响。

3.3.3 土地利用与覆被

永定河流域土地利用类型在数量上以耕地为主,在流域中占比达到 45%~50%;林地、草地面积次之,占比为 20%~25%;其余水域面积、建设用地和未利用土地三者面积之和约为 10%。这表明永定河流域主要以耕地、林地、草地为主,植被是永定河流域土地利用最显著的特征,且 1980 年以来土地利用格局变化不大。

为进一步分析永定河流域不同土地利用类型面积变化,采用土地利用转移矩阵分析不同土地类型

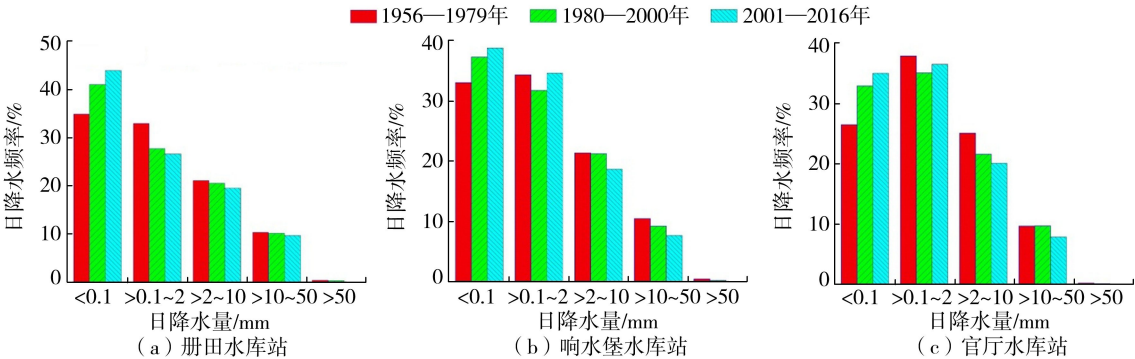


图 5 各水文站控制流域日降水频率直方图

Fig. 5 Histogram of daily precipitation frequency for control basin of hydrological stations

之间的转移情况(图6)。1980—2000年永定河流域内主要为耕地、林地、草地之间的转换,流域内不同类型的土地面积变化不大,且变化主要集中在流域中下游,人类活动对流域上游地区土地利用的干预较小。2000—2020年永定河流域各种土地利用类型转移强度较2000年前有进一步提升,期间流域林地面积迅速增加,从耕地转化为林地的面积较1980—2000年增加1.8倍,而从草地转换为林地的面积较1980—2000年增加3.1倍,耕地、草地向林地的转换以及耕地向草地的转换主要集中在大同、朔州以及张家口地区,可能是由于这些区域为退耕还林、植树造林等水土保持工程的重点治理区域,林地的大量增加促进流域总体生态环境质量好转,维持了生态环境动态稳定。

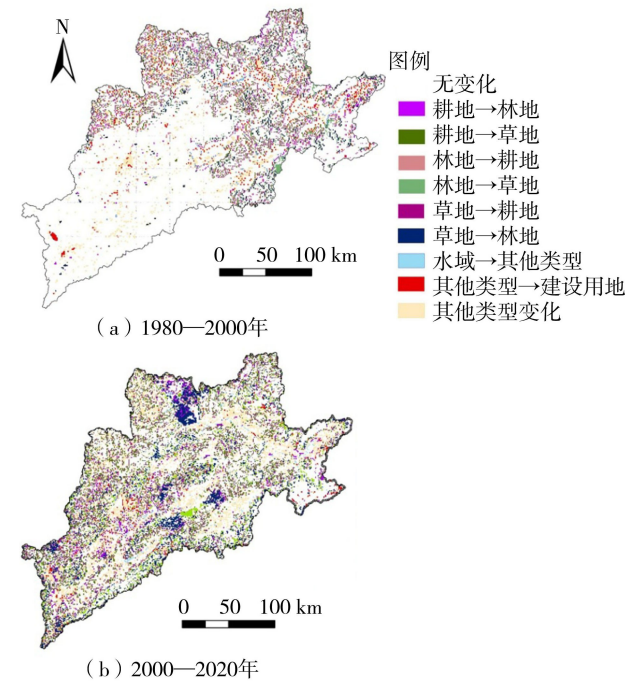


图6 土地利用类型空间变化
Fig. 6 Spatial variation of land use types

在植被方面,从20世纪80年代至今,受气候变化和生态植被工程的影响,流域归一化植被指数(NDVI)在时空范围内呈显著增加趋势,其线性趋势变化率为0.0013/a,尤其是2000年以后相关生态保护工程促进了流域NDVI的增加。在像元尺度上分析了年均NDVI序列空间分布变化趋势(图7),流域内年均NDVI变化率为-0.18%~0.64%,高达95.36%的像元NDVI呈增加趋势,仅4.64%的像元NDVI呈下降趋势,其中,年均NDVI变化率大于0.2%的面积约占12.32%。NDVI增加意味着植被覆盖度增加和植被生长状态的改善,故而永定河山区呈现明显变绿的特点,符合黄土高原地区植被变化规律^[45]。

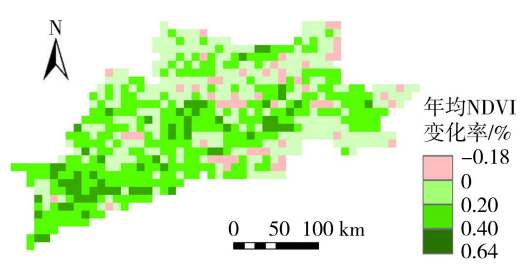


图7 1982—2016年年均NDVI序列空间变化趋势
Fig. 7 Spatial variation trend of annual average NDVI series from 1982 to 2016

通过拟合永定河流域1982—2016年年均NDVI序列与天然径流量序列(图8),可以发现两者表现出相反的年际变化态势,具有显著的负相关性($p < 0.01$),这也反映出植被绿化是永定河天然径流量减少的重要原因。有研究表明,永定河流域NDVI均值每增加1%,会导致下垫面参数值增加17.9%~22.1%^[24],说明永定河流域植被覆盖率增加导致流域产水量大幅度减少。其原因可能是植被覆盖率增加强化了植被冠层对降水的截留能力,提高了林草植被腾发量,强化了降水、土壤水、地下水的消耗,从而不利于地表径流和壤中流的产生,对天然径流和水文响应产生影响。

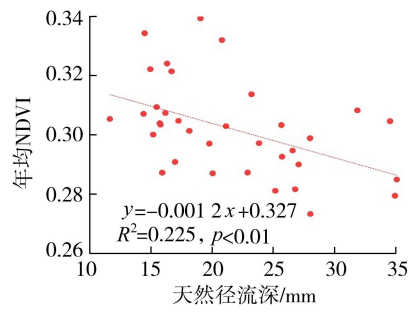


图8 1982—2016年天然径流与年均NDVI相关分析
Fig. 8 Correlation analysis between natural runoff and annual average NDVI from 1982 to 2016

3.3.4 地下水开采

根据2010—2020年《海河流域水资源公报》等资料,永定河流域水资源短缺,多年来地下水开采量维持在供水量的60%左右。20世纪70年代前,永定河流域内地下水年开采量不超过2.0亿 m^3 ,地下水埋深为1.5~3.0m,包气带厚度较小。在较大规模降水下,地表超渗雨水更易通过非饱和含水层补充地下水,使包气带达到饱和。但20世纪70年代以来,流域经济社会迅猛发展,导致用水需求不断增长,地下水开采量不断增加,1980年和2012年地下水开采量逐步增加至7.1亿 m^3 和13.6亿 m^3 ,之后略有减少,至2020年地下水开采量为9.7亿 m^3 ,地下水持续开采导致流域部分地区地下水存在不同程度的超采。在永定河山区,地下水长期超采对天然

径流具有多方面的影响。

图 9 为 2002—2016 年永定河流域 GRACE 陆地水储量总体情况,可以看出下降趋势非常明显,且表现出很强的持续性。经统计,2002—2016 年永定河流域陆地水储量月均减少约 0.67 mm、年均减少约 8.0 mm,期间累计下降最大值高达 197.5 mm。空间上,流域陆地水储量在全流域均呈下降趋势,且从东向西下降趋势逐渐加剧,桑干河上游月均下降接近 1.4 mm,洋河流域和官厅水库下游月均下降 0.4~0.8 mm。总之,由于日益增长的用水需求与水资源匮乏状况之间的矛盾日益突出,流域地下水和陆地水储量不断下降,导致流域天然径流和水文响应的改变。

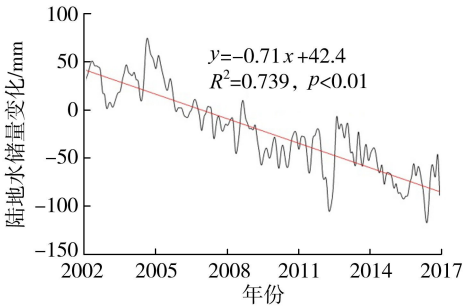


图 9 2002—2016 年陆地水储量总体变化趋势
Fig. 9 Overall change trend of terrestrial water storage from 2002 to 2016

4 结 论

a. 永定河流域主要干支流年天然径流均呈现显著衰减趋势和变异特征,突变发生在 20 世纪 80 年代初,变异点前后流域水文响应发生较大结构性变化。

b. 提出天然径流变异归因分析方法量化水文响应变化程度,WBM-DP 在基准期对天然径流具有较好的模拟效果;通过重构天然径流发现,气候变化对永定河干支流天然径流衰减的贡献率为 10.9%~24.5%,人类活动的贡献率为 75.5%~89.1%,人类活动是永定河水文响应和天然径流变化的主导因素。

c. 降水时程分布均匀化、气候变暖变干、植被覆盖增加、地下水开采等是造成永定河流域水文响应和天然径流变化的主要驱动因素。主汛期 7—8 月日降水频率和量级均化、气温和实际蒸散发升高、植被显著增加、地下水持续开采均导致永定河流域水文响应和天然径流的改变。

参考文献:

[1] 杨大文,徐宗学,李哲,等. 水文学研究进展与展望[J].

地理科学进展,2018,37(1):36-45. (Yang Dawen, Xu Zongxu, Li Zexue, et al. Progress and prospect of hydrological sciences[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1):36-45. (in Chinese))

[2] 刘春蓁,占车生,夏军,等. 关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J]. 水利学报,2014,45(4):379-385. (Liu Chunzhen, Zhan Chesheng, Xia Jun, et al. Review on the influences of climate change and human activities on runoff[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4):379-385. (in Chinese))

[3] Gradiyanto F, Parmantoro P N, Suharyanto. Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(1):69-77.

[4] Chen Xuegao, Yu Zhongbo, Lin Hui, et al. Hydrological responses to permafrost degradation on Tibetan Plateau under changing climate [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(3):209-216.

[5] 周国逸,李琳,方雪纯,等. 近 60a 来全球河川径流量变化趋势及影响因素分析[J]. 大气科学学报,2020,43(6):1076-1085. (Zhou Guoyi, Li Lin, Fang Xuechun, et al. Trend and influencing factors of global river discharge in recent 60 years [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6):1076-1085. (in Chinese))

[6] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467(7311):43-51.

[7] Omer A, Elagib N A, Ma Zhuguo, et al. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities [J]. Science of the Total Environment, 2020, 749:141446.

[8] Xu Yang, Zhang Xuan, Wang Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579:124147.

[9] 陆玲,聂志萍. 长江经济带水污染、环境规制与高质量发展关系研究[J]. 水利经济, 2024, 42(1):28-33. (Lu Ling, Nie Zhiping. Research on the relationship of water pollution, environmental regulation and high-quality economic development in the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(1):28-33. (in Chinese))

[10] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3):313-323. (Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Guan Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3):313-323. (in Chinese))

[11] Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions [J]. Journal of

- Hydrology, 2017, 548: 278-290.
- [12] 杨肖丽, 张佳乐, 黄星怡, 等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 1-9. (Yang Xiaoli, Zhang Jiale, Huang Xingyi, et al. Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese))
- [13] 郭珈源, 孙旭杨, 刘金涛, 等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 22-29. (Guo Jiayuan, Sun Xuyang, Liu Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 22-29. (in Chinese))
- [14] 林雍权, 陈启慧, 李琼芳, 等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 21-26. (LIN Yongquan, CHEN Qihui, LI Qiongfang, et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin' anjiang model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 21-26. (in Chinese))
- [15] Zhang Kai, Li Lijuan, Bai Peng, et al. Influence of climate variability and human activities on stream flow variation in the past 50 years in Taoer River, Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4): 481-496.
- [16] 刘雨, 赵君, 王国庆, 等. 基于 WA-BP 耦合模型的流域径流变化归因分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 27-31. (Liu Yu, Zhao Jun, Wang Guoqing, et al. Attribution analysis of runoff variation based on WA-BP coupling model [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10): 27-31. (in Chinese))
- [17] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))
- [18] 白华, 杨会峰, 张英平, 等. 京津冀山区水平衡演变及其影响因素识别[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 25-40. (Bai Hua, Yang Huifeng, Zhang Yingping, et al. Identifying the evolution of water balance and influencing factors in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 25-40. (in Chinese))
- [19] 张建云. 永定河绿色生态发展长效机制思考与建议[J]. 中国水利, 2021(1): 10-11. (Zhang Jianyun. Consideration and suggestions on long-term mechanism for green ecological development of the Yongding River [J]. China Water Resources, 2021(1): 10-11. (in Chinese))
- [20] 李晓琳, 潘兴瑶, 杨默远, 等. 基于生态补水的永定河流域径流变化分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 886-892. (Li Xiaolin, Pan Xingyao, Yang Moyuan, et al. Streamflow changes of Yongding River Basin after ecological water compensation [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(6): 886-892. (in Chinese))
- [21] 彭弢, 贾仰文, 牛存稳, 等. 永定河三家店以上流域径流减少归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 67-76. (Peng Tao, Jia Yangwen, Niu Cunwen, et al. Attribution of runoff attenuation in the Yongding River Basin upstream of the Sanjiadian [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1): 67-76. (in Chinese))
- [22] Hou Lei, Peng Wenqi, Qu Xiaodong, et al. Runoff changes based on dual factors in the upstream area of Yongding River Basin [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(1): 143-152.
- [23] 李秀, 郎琪, 雷坤, 等. 基于 Budyko 假设的永定河流域上游不同支流径流变化归因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 94-101. (Li Xiu, Lang Qi, Lei Kun, et al. Attribution analysis of tributary runoff variations in upper Yongding River Basin based on Budyko hypothesis [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(6): 94-101. (in Chinese))
- [24] Du Yong, Bao Aimei, Zhang Ting, et al. Quantifying the impacts of climate change and human activities on seasonal runoff in the Yongding River Basin [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110839.
- [25] 胡新宇, 申媛媛, 褚婷雯, 等. 生态补水下的永定河流域地下水水位变化规律[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 986-993. (Hu Xinyu, Shen Yuanyuan, Chu Tingwen, et al. Variation regularity of groundwater level in the Yongding River Basin under ecological replenishment [J]. Geoscience, 2023, 37(4): 986-993. (in Chinese))
- [26] 张镡文, 杨冉, 侯文星, 等. 生态补水前后永定河两岸植被覆盖度变化及驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 264-273. (Zhang Shanwen, Yang Ran, Hou Wenxing, et al. Analysis of fractional vegetation cover changes and driving forces on both banks of Yongding River before and after ecological water replenishment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(2): 264-273. (in Chinese))
- [27] 杜勇, 李建柱, 牛凯杰, 等. 1982—2015 年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1309-1323. (Du Yong, Li Jianzhu, Niu Kaijie, et al. Analysis of vegetation change and its impact on natural runoff in the mountain area of the Yongding River Basin from 1982 to 2015 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1309-1323. (in Chinese))
- [28] Wang Lei, Wang Zhongjing, Koike T, et al. The assessment of surface water resources for the semi-arid Yongding

- River Basin from 1956 to 2000 and the impact of land use change[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(9): 1123-1132.
- [29] 李致家, 李安琪, 姚成, 等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 10-17. (Li Zhijia, Li Anqi, Yao Cheng, et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(5): 10-17. (in Chinese))
- [30] 彭安帮, 牛凯杰, 胡庆芳, 等. 永定河流域多水源配置与水库群优化调度[J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 418-430. (Peng Anbang, Niu Kaijie, Hu Qingfang, et al. Allocation of multiple water sources and optimal operation of reservoir group in the Yongding River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 418-430. (in Chinese))
- [31] 邓延利, 吕政泽, 雷晶, 等. 永定河全流域水利风景区发展模式及对策研究[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 8-13. (Deng Yanli, Lyu Zhengze, Lei Jing, et al. Research on development model and countermeasures of whole basin water conservancy scenic area in the Yongding River [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 8-13. (in Chinese))
- [32] 谢平, 许斌, 章树安, 等. 变化环境下区域水资源变异问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [33] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [34] 刘章君, 郭生练, 何绍坤, 等. 基于 Copula 函数的多变量水文不确定性处理器[J]. *水利学报*, 2018, 49(3): 332-342. (Liu Zhangjun, Guo Shenglian, He Shaokun, et al. Multivariate hydrologic uncertainty processor based on Copula function [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(3): 332-342. (in Chinese))
- [35] 胡庆芳, 王银堂, 刘克琳, 等. 基于改进的两参数月水量平衡模型的月径流模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(6): 638-642. (Hu Qingfang, Wang Yintang, Liu Kelin, et al. Monthly runoff simulation based on improved two-parameter monthly water volume balance model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, 35(6): 638-642. (in Chinese))
- [36] Xu Xiangyu, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [37] 莫崇勋, 阮俞理, 莫桂燕, 等. 基于弹性系数法的径流对气候变化与人类活动响应研究[J]. *水文*, 2018, 38(2): 41-45. (Mo Chongxun, Ruan Yuli, Mo Guiyan, et al. Studying response of runoff to climate change and human activities based on elastic coefficient [J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(2): 41-45. (in Chinese))
- [38] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(6): 391-397. (Zhang Liping, Yu Songyan, Duan Yaobin, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River Basin [J]. *Climate Change Research*, 2013, 9(6): 391-397. (in Chinese))
- [39] 霍艾迪, 赵志欣, 王星, 等. 马莲河流域固沟保塬工程水文响应变化及优化[J]. *水科学进展*, 2023, 34(6): 867-876. (Huo Aidi, Zhao Zhixin, Wang Xing, et al. Hydrologic response change and optimization of gully consolidation and highland protection in the Malian River Basin based on CMADS and SWAT model [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 867-876. (in Chinese))
- [40] Niu Kaijie, Hu Qingfang, Wang Yintang, et al. Analysis on the variation of hydro-meteorological variables in the Yongding River mountain area driven by multiple factors [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3199.
- [41] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 53-60. (Zhou Lei, Xia Jun, Zhang Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))
- [42] Han Yuhang, Liu Bin, Xu Dan, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Haihe River Basin under the influence of climate change [J]. *Water*, 2021, 13(12): 1664.
- [43] Zeng Peng, Sun Fengyun, Liu Yaoyi, et al. Changes of potential evapotranspiration and its sensitivity across China under future climate scenarios [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 261: 105763.
- [44] Yan Nana, Tian Fuyou, Wu Bingfang, et al. Spatiotemporal analysis of actual evapotranspiration and its causes in the Hai Basin [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 332.
- [45] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974. (Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 施业)