

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.03.11

引用格式: 王江玉龙, 刘俊建, 史敬涛, 等. 基于 Budyko 假设的瀑河上游年均径流深变化归因分析[J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 83-91. (Wang J Y L, Liu J J, Shi J T, et al. Attribution analysis of annual average runoff depth variation in the upper reaches of the Bao River based on the Budyko hypothesis[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 83-91.)

基于 Budyko 假设的瀑河上游年均径流深变化归因分析

王江玉龙¹, 刘俊建^{1*}, 史敬涛¹, 王国强², 张军超³, 王雁亮¹,
姜禹戈¹, 李横飞¹, 安洪岩¹

(1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000; 2. 河北省平泉市水务局, 河北 承德 067500; 3. 河北省平泉市水土保持建设服务中心, 河北 承德 067500)

摘要: 近年来京津冀水资源短缺对生态环境有着重要的影响, 为量化区分气候变化和人类活动对水资源的影响, 针对京津冀水源涵养区北部山区典型小流域瀑河上游开展径流深变化归因分析。利用瀑河上游 1981—2020 年降水、蒸发和径流等资料, 采用曼-肯德尔法 (Mann-Kendall method, M-K 法) 检验确定 1981—2006 年为基准期, 2007—2020 年为变化期。分析发现, 与基准期相比, 变化期年均径流深减少了 46.47 mm, 约占基准期径流深总量的 77.10%。利用重标度极差分析法 (Rescaled Range Analysis, R/S 法), 推断瀑河上游未来年均径流深与 1981—2020 年间年均径流深的变化趋势相反, 即呈现相对平稳的增加趋势。基于 Budyko 假设原理, 定量地评价了气候变化 (降水量和潜在蒸散发) 和人类活动对该区年径流深的影响程度, 气候变化对径流影响贡献率为 40.30%, 人类活动影响的贡献率为 59.71%。人类活动对径流的影响主要通过土地利用类型的改变, 研究区共有 30.28% 的土地发生了相互转化, 其中乔木林地 2020 年较 1985 年增加了 67.61%, 极大程度增加了研究区的水源涵养能力, 同时植被覆盖度的增加也一定程度上降低了潜在蒸散发。研究可增进对京津冀北部山丘区水文水资源的认识, 为京津冀水源涵养功能驱动因素筛选提供一定的参考。

关键词: 年径流深; 归因分析; 土地利用类型; Budyko 假设; 瀑河上游

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2024)03-0083-09

0 引言

京津冀水源涵养功能区水资源与水生态环境健康的基础是深化对水文循环过程的认识。水文循环作为气候系统中能量传输的重要通道, 是受气候变化和人类活动影响的复杂过程。20 世纪中后期开始, 随着水生态环境问题的增加和水资源的严重短缺, 气候变化和人类活动对水文和水资源影响的研究已成为水源涵养功能研究的重要领域^[1]。

气候变化发生在全球范围内, 其影响往往因地而异^[2]。此外, 高强度的人类活动改变了水循环动力学使水资源的可利用性降低, 尤其是在中国北部的干旱和半干旱地区^[3]。目前, 针对径流变化归因的研究方法可分为 3 类, 即统计变量法、气候弹性系数法和水文模型模拟法。在这些研究方法中所涉及的基准期和变化期均是使用趋势分析方法获得的, 如 Pettitt-Mann-Whitney 变化点统计法^[4]、序列聚类分析^[5]、曼-肯德尔法 (Mann-Kendall 检验法, M-K 法)^[6]等。统计变量法将基准期平均观

收稿日期: 2023-06-28; 修订日期: 2024-05-10。

基金项目: 中国地质调查局“滦河流域中上游生态修复支撑调查 (编号: DD20220204)”与“滦河中游植被组成与土壤水分和养分相互作用机理 (编号: 2022KFKTC009)”项目联合资助。

第一作者简介: 王江玉龙 (1992—), 男, 工程师, 主要从事水平衡方面的工作。Email: langyuanxianpa@live.cn。

通信作者简介: 刘俊建 (1978—), 男, 高级工程师, 主要从事生态环境与资源评价及地下水污染防控方面的工作。Email: liujunjian@mail.cgs.gov.cn。

测数据和变化期平均观测数据之间的差异视为气候变化的结果,剩余影响归因于人类活动^[7];气候弹性系数法是基于 Budyko 假设的研究方法,对数据的要求相对较为宽松,更加简便准确;水文模型模拟法通过改变一个因素并固定其他因素来模拟不同情况,用以评估改变单一因素对不同水文特征的贡献^[8],但是这种方法需要的数据相对较为复杂,并且无法确保所有影响的总和等于 100%,实际操作起来过于困难。因此,本文选择基于 Budyko 假设的气候弹性系数法作为研究方法。

滦河流域作为京津冀水源涵养区的重要区域,承担着饮用水源和水资源战略储备等重要使命,是开展径流变化归因分析的热点地区。张玲玲^[9]使用 SWAT 模型对滦河流域 1965—1979 年的资料进行模拟,得到气候变化对年均径流深变化的贡献率为 57.37%,人类活动对年均径流深变化的贡献率为 39.72%,误差为 3.16%;付博超^[10]用滦河流域 1953—2011 年的数据,采用统计变量法,计算得到人类活动对年均径流深变化的贡献率为 56.6%,气候变化对年均径流量变化的贡献率为 43.4%;袁喆等^[11]采用经验统计法对滦河流域 1960—2006 年的数据进行分析,得到降水减少对年均径流深变化的贡献率为 15.58%,人类活动对年均径流深变化的贡献率为 84.42%;陈鑫^[12]使用 SWAT 模型对滦河流域进行分区计算,滦河流域整体人类活动对年均径流深变化的贡献率为 59%,气候变化对年均径流深变化的贡献率为 41%,滦河上游的坝上区域人类活动对年均径流深变化的贡献率为 11%,气候变化对年均径流深变化的贡献率为 89%。滦河流域由坝上高原、燕山山地与平原区 3 部分组成,3 种地貌类型的径流变化归因存在差异,目前针对滦河流域的研究大多数以滦河流域整体开展,仅有陈鑫^[12]进行了分区研究,研究区域为坝上高原区域。而山丘区小流域(瀑河流域)是滦河流域从坝上地区进入燕山山区的主要组成,属于典型的缺水浅山区,同时也是滦河流域重要的支流,目前研究程度较低。因此,本研究利用 Budyko 框架进一步量化降水量、潜在蒸散发以及土地利用类型的改变对瀑河上游年均径流深变化的贡献,旨在为京津冀水源涵养功能驱动因素筛选提供一定的参考。

1 研究区概况

瀑河是河北省境内滦河的主要支流之一,该河

起源于平泉市卧龙镇石拉哈沟村七老图山西麓,由北向南穿过平泉市,再进入宽城县,至宽城县瀑河口入滦河。瀑河流域总面积为 1 990 km²,河道总长度为 170 km,平均坡降为 7.87‰,海拔高度在 350~1 800 m 之间。研究区位于瀑河上游区域,总面积为 349.35 km²(图 1)。20 世纪 80 年代以来,由于气候条件的改变以及人类植树造林、矿区生态修复工程等活动导致下垫面改变,瀑河流域 1981—2020 年平均径流深较 1956—1979 年平均径流深减少了 1482 万 m³(45.64%)。

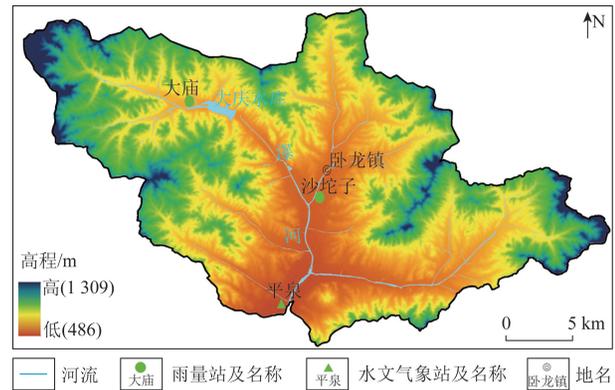


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

2 技术方法

2.1 数据来源

本文主要收集了瀑河流域水文气象站平泉站(图 1)1981—2020 年月均径流深的实测数据作为水文数据,实测数据较为完整,且研究时间序列较长,可以满足研究的需要。

此外,本文还收集了瀑河流域水文气象站平泉站以及雨量站大庙站及沙坨子站(图 1)1981—2020 年月均降水量数据以及平泉站 1984—2013 年月均蒸散发数据。研究区的面降水量用 3 个站点的算术平均值表示,3 个站点均满足研究的需要,且各站点雨量数据无明显的突变点和随机变化,数据变化较为一致,数据可靠,可以代表区域气候状况。遥感数据均为在地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)和空天院遥感数据服务系统(<http://eds.ceode.ac.cn/nuds/freedataquery>)网站下载的 Landsat 系列卫星影像数据。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析方法

M-K 法是一种非参数检验方法,因其不受样本值和样本分布类型的影响,通常用于水文、气象和序列的其他非正态分布。本文利用 M-K 法分析瀑河上游年均径流深序列的突变点及变化趋势^[6]。

重标度极差分析法 (Rescaled Range Analysis, R/S 法)^[13]是由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水坝工程时提出的方法,后来被用在各种时间序列分析中,主要用来预测时间序列的变化趋势。Hurst 指数的取值范围为 0~1,当 $H \in [0, 0.5)$ 时,表明时间序列的变化具有反持续性,即未来变化趋势与过去相反,且 H 值越接近于 0,反持续性就越强;当 $H = 0.5$ 时,序列表现为独立同分布的随机序列;当 $H \in (0.5, 1]$ 时,表明时间序列具有长程相关性,即序列在未来的变化趋势与过去相同,且 H 值越接近 1,持续性就越强。

2.2.2 基于 Budyko 假设的气候弹性系数法

根据全球水和能源平衡,Budyko 指出蒸散发受降水和蒸发能力的控制,中国气象学家傅抱璞^[14]提出了实际蒸散发的计算公式

$$E = E_0 \left\{ 1 + \frac{r}{E_0} - \left[1 + \left(\frac{r}{E_0} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \right\} \quad (1)$$

式中: E 为实际蒸散发, mm; E_0 为潜在蒸散发(最大可能蒸散发), mm; r 为降水量, mm; ω 为下垫面特性参数,主要反映下垫面条件,如地形、植被等条件。

根据傅抱璞^[14]的计算,山地和高原地区下垫面特性参数 ω 计算式为

$$\omega = 1 + 0.292 \ 8r^{1.210} \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^{0.393} \quad (2)$$

式中: Y 为径流系数; 其余符号含义同式(1)。

通过计算,本研究区 $\omega = 1.29$ 。

Li 等^[16-17]在式(1)的基础上进行了改进,计算公式为

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + \omega(E_0/P)}{1 + \omega(E_0/P) + (E_0/P)^{-1}} \quad (3)$$

式中: P 为多年平均降水量, mm; 其余符号含义同式(1)。

对于某个封闭区域,其多年平均降水量的表达式为

$$P = E + Q + \Delta S \quad (4)$$

式中: Q 为年均径流深, mm; ΔS 为流域蓄水变量,

mm³, 在平均规模的年份中,可以忽略^[15]; 其余符号含义同式(3)。

根据 Li 等^[16-17]提出的方法,气候变化和人类活动引起的径流变化的计算公式为

$$\Delta Q_p = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P \quad (5)$$

$$\Delta Q_{E_0} = \frac{\partial Q}{\partial E_0} \Delta E_0 \quad (6)$$

$$\Delta Q_h = \Delta Q - \Delta Q_c \quad (7)$$

式中: ΔQ_p 为年均降水量的变化引起年均径流深的变化量, mm; ΔQ_{E_0} 为年均潜在蒸散发的变化引起年均径流深的变化量, mm; ΔQ_h 为人类活动引起年均径流深的变化量, mm; ΔP 和 ΔE_0 分别为年均降水量和年均潜在蒸散发的变化, mm; ΔQ 为年均径流深的变化量, mm; ΔQ_c 为气候变化引起年均径流深的变化量, mm; $\frac{\partial Q}{\partial P}$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial E_0}$ 分别为降水弹性系数和潜在蒸散发弹性系数^[18]。

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \frac{1 + 2x + 3\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_0} = - \frac{1 + 2\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2} \quad (9)$$

式中: x 为干旱指数,为年均潜在蒸散发与年均降水量的比值; 其余符号含义同上。

气候变化和人类活动对年均径流深变化的贡献率计算公式为

$$\eta_c = \frac{|\Delta Q_c|}{|\Delta Q_c| + |\Delta Q_h|} \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_h = 1 - \eta_c \quad (11)$$

式中: η_c 为气候变化对年均径流深变化贡献率; η_h 为人类活动对年均径流深变化贡献率; 其余符号含义同上。

3 结果

3.1 水文序列的演变趋势

据 M-K 法,UF 指的是正序列趋势统计量, $UF > 1.96$ 表明时间序列有着显著的增加趋势, $UF < -1.96$ 表明时间序列有着显著的减少趋势, $UF > 0$ 对应年均径流深呈增加趋势, $UF < 0$ 对应年均径流深呈减少的趋势。由图 2 可知,年均径流深在 1984—1999 年间有着显著的上升趋势,2001 年后均处于下降趋势。UB 指的是逆序列趋势统计

量,UF 与 UB 的交点为突变点,发生在 2006 年(图 2)。依据 M - K 法检验结果,将 1981—2006 年定为基准期,2007—2020 年定位变化期。

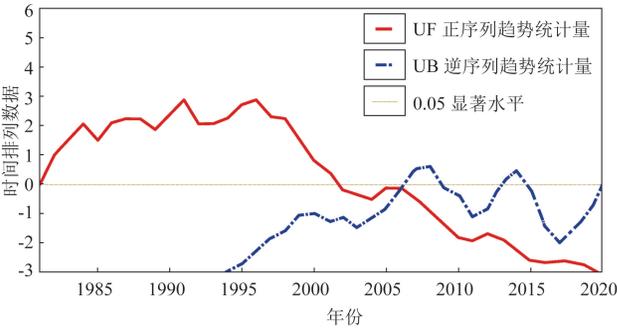


图 2 瀑河上游 1981—2020 年年均径流深 M - K 检验图
Fig.2 M - K trend test of annual average runoff depth in the upper reaches of the Bao River from 1981 to 2020

通过点绘 $\text{Log}(R/S)$ 散点图(图 3),得知瀑河上游的 H 值为 0.4026(接近 0.5),根据 2.2.1 中 Hurst 指数取值范围含义,表明未来年均径流深与 1981—2020 年间年均径流深的变化趋势相反但会出现随机分布情况。1981—2020 年年均径流深呈下降趋势(图 4),即未来年均径流深呈相对平稳的增加趋势。

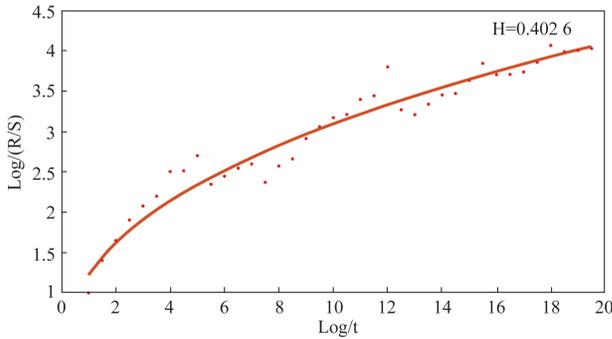
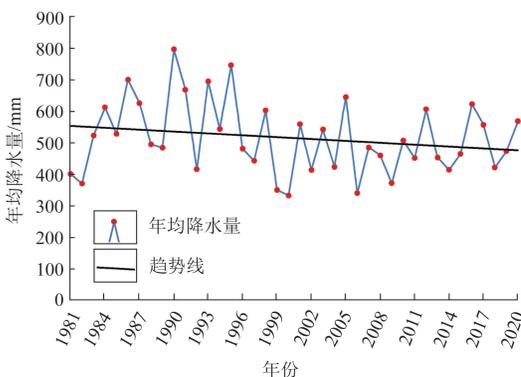
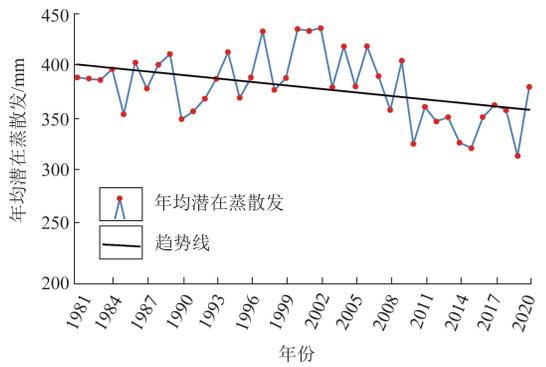


图 3 R/S 法散点图

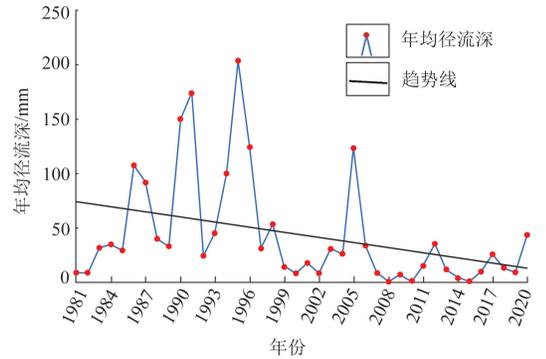
Fig.3 Scatter diagram of R/S analysis method



(a) 瀑河上游 1981—2020 年年均降水量



(b) 瀑河上游 1981—2020 年年均潜在蒸散发



(c) 瀑河上游 1981—2020 年年均径流深

图 4 瀑河上游 1981—2020 年年均降水量、年均潜在蒸散发、年均径流深的趋势性检验

Fig.4 Trend test of annual average precipitation, potential evapotran-spiration and runoff depth in the upper reaches of the Bao River from 1981 to 2020

3.2 气候变化的影响因素分析

气候变化对瀑河上游径流的影响不容小觑,主要包括降水量和潜在蒸散发两方面因素。气候变化中降水的弹性系数最大,是影响径流变化的主要因素。瀑河上游 1981—2020 年平均降水量为 515.6 mm,最大降水发生在 1990 年,为 797.8 mm,最小降水发生在 2000 年,为 333 mm,年际变化较大(图 4)。2007—2020 年年平均降水量较 1981—2006 年减少了 38.71 mm,降水改变导致径流深降低了 33.13 mm,贡献率为 71.31%,降水条件的变化直接影响径流的变化趋势。

另外,有关潜在蒸散发,现今也有较多相关研究:王庆明等^[19]在海河流域山区植被覆盖度与水热因子关系的研究中提出,植被覆盖度与潜在蒸散发呈正相关性,说明植被覆盖度的降低会减少潜在蒸散发;赵勇等^[20]通过 Choudhury - Yang 公式计算得出降水量的降低与潜在蒸散发减少呈正相关性。本研究区内同时存在着降水量减少与植被覆盖度增

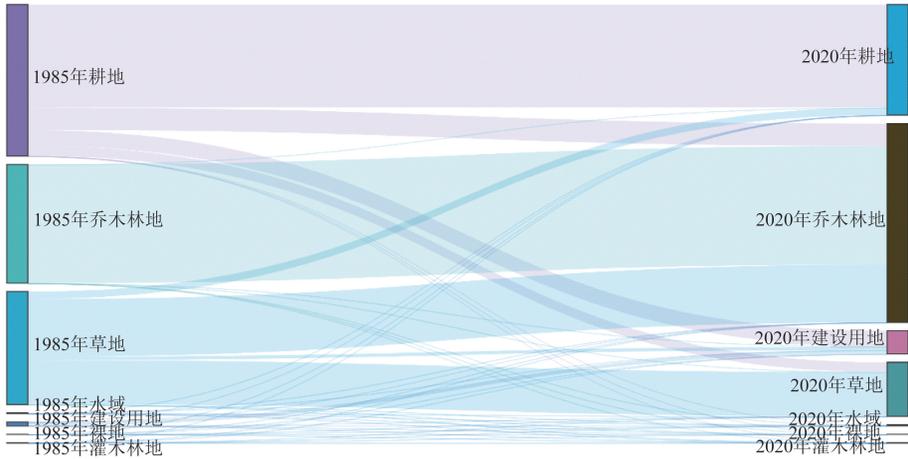


图6 漯河上游1985—2020年土地利用转化情况桑基图

Fig. 6 Sankey diagram of the land use transformation in the upper reaches of the Bao River from 1985 to 2020

3.4 量化区分气候变化和人类活动对径流的影响

通常降水径流双累积曲线应呈现一条直线的趋势,只有当存在其他因素影响时,径流深的累积量才会发生偏移。由图7中可知,与基准期相比,变化期累积径流量呈减少状态,说明除气象因素外,人类活动也在发生着较大的变化。

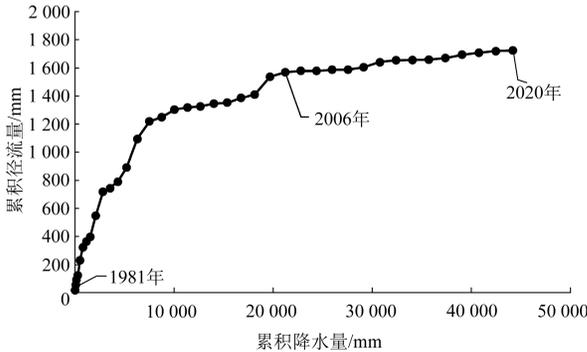


图7 漯河上游降水-径流双累积曲线图

Fig. 7 Double accumulation curve of precipitation and runoff for the upper reaches of the Bao River

通过第2节公式,计算得到干旱指数x等(表2)。由表2可知,与基准期相比,变化期年均潜在蒸散发减少了31.16 mm,年均降水量减少

了38.71 mm,年均径流深减少了46.47 mm,约占基准期径流深总量的77.10%,干旱指数减少了0.01。

表2 漯河上游1981-2020年间不同时间周期的参数信息
Tab. 2 Parameters for different time periods of the upper reaches of the Bao River from 1981 to 2020

时间	年均潜在蒸散发/mm	年均降水量/mm	年均径流深/mm	干旱指数
基准期	410.33	529.10	60.27	0.78
变化期	379.17	490.39	13.80	0.77

通过式(8)和式(9),分别得到了降水和潜在蒸散发的弹性系数,通过式(10)和式(11),得到气候变化和人类活动对年均径流深变化贡献率(表3)。如表3所示:年均降水量的减少使年均径流深减少了33.13 mm,贡献率为71.31%,但年均潜在蒸散发的减少使年均径流深增加了14.41 mm,贡献率为-31.01%,综合来看,气候变化对径流影响贡献率为40.30%;人类活动使年均径流深减少27.74 mm,贡献率为59.71%。在陈鑫^[12]对滦河流域近60 a径流变化归因分析中,人类活动贡献率为59%,人类活动为主导因素。本文计算结果与之相对应,人类活动是径流深减少的主要因素。

表3 基于Budyko假设的漯河上游1981—2020年间气候变化和人类活动对径流的贡献

Tab. 3 Contribution of climate change and human activities to runoff depth in the upper reaches of the Bao River from 1981 to 2020 based on the Budyko hypothesis

项目	$\partial Q/\partial P$	$\partial Q/\partial E_0$	$\Delta Q_P/\text{mm}$	$\eta_P/\%$	$\Delta Q_{E0}/\text{mm}$	$\eta_{E0}/\%$	$\Delta Q_h/\text{mm}$	$\eta_h/\%$
敏感系数及贡献率	0.86	-0.46	-33.13	71.31	14.41	-31.01	-27.74	59.71

注: η_P 表示年均降水量对年均径流深的贡献率; η_{E0} 表示年均蒸散发对年均径流深的贡献率; 其余符号含义同式(1)~(11)。

3.5 讨论

基于Budyko假设的气候弹性系数法分析了气

候变化和人类活动对径流深的影响,人类活动是径流深减少的主要原因。研究区人类活动主要体现

在土地利用方式的改变,即对下垫面的改变。由8期遥感解译结果得知,1985—2020年,瀑河上游区域土地利用类型的主要变化为耕地、草地转换为乔木林地,主要受退耕还林、矿山修复等水土保持措施影响。由于耕地、草地的植被顶冠较小,根系发育程度也不及乔木林地发达,持水能力较差,因此土地利用类型发生改变后,大大增强了研究区的水源涵养能力,更多的水资源得以留存下来导致地表径流深减少。近年来,很多研究也表明,受退耕还林等政策影响,乔木林地的增加是我国诸多流域径流深减小的主要原因^[22-24]。在后期的工作中,可通过水文模型的建立,细化造成的影响是积极的还是消极的,量化水源涵养功能的变化趋势,为京津冀水源涵养功能区的保护修复提供数据支撑,同时为地方政府在水资源配置等工作中提供数据支撑。

4 结论

(1)由 M-K 法得到瀑河上游径流序列的突变为2006年,因此设定1981—2006年为基准期,2007—2020年为变化期。由 R/S 法计算得出,平泉站 H 值为0.4026(接近0.5),表明瀑河上游未来年均径流深与1981—2020年时段有着相反的演变规律,即呈现相对平稳的增加趋势。

(2)通过对瀑河上游年均径流深、年均降水量、年均潜在蒸散发进行分析发现,与基准期相比,变化期年均降水量、年均径流深和年均潜在蒸散发均有所下降。与基准期相比,变化期年均径流深较减少了46.47 mm,约占基准期径流深总量的77.10%。

(3)通过 Budyko 水热平衡方程计算结果发现,瀑河上游径流深的减少主要是由气候变化和人类活动因素引起的,气候变化的贡献率为40.30%,人类活动的贡献率为59.71%,就贡献率而言人类活动整体带来的影响略大于气候变化影响。分析得知,人类活动对径流的影响主要表现在乔木林地大面积增加,更多的草地及耕地变为林地,持续增加研究区水源涵养能力。

参考文献(References):

[1] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1-4): 28-61.

[2] Trajkovic S, Kolakovic S. Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration at humid European locations [J]. *Hydrology Research*, 2009, 40(1): 45-52.

[3] Voöroösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.

[4] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 1-10.

[5] Wang G S, Xia J, Cheng J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A11.

[6] 胡琦, 马雪晴, 胡莉婷, 等. Matlab 在气象专业教学中的应用——气象要素的 M-K 检验突变分析 [J]. *实验室研究与探索*, 2019, 38(12): 48-51, 107.
Hu Q, Ma X Q, Hu L T, et al. Application of Matlab in meteorological teaching: M-K test for the abrupt change analysis of meteorological elements [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2019, 38(12): 48-51, 107.

[7] Chang J X, Wang Y M, Istanbuluoglu E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 169-179.

[8] Chawla I, Mujumdar P P. Isolating the impacts of land use and climate change on streamflow [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(8): 3633-3651.

[9] 张玲玲. 人类活动和气候变化对滦河流域径流影响的研究 [J]. *中国水运*, 2019, 19(12): 136-137.
Zhang L L. Modeling of nitrate flux between groundwater and surface water based on a coupled model in Shaying River Basin [J]. *China Water Transport*, 2019, 19(12): 136-137.

[10] 付博超. 滦河流域近59年径流变化分析研究 [J]. *水利科技与经济*, 2019, 25(12): 48-55.
Fu B C. Analysis of runoff changes in Luanhe River Basin in recent 59 years [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2019, 25(12): 48-55.

[11] 袁喆, 杨志勇, 董国强. 近47年来降水变化和人类活动对滦河流域年径流量的影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 66-69, 80.
Yuan Z, Yang Z Y, Dong G Q. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff in the Luanhe River Basin during recent 47 years [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(4): 66-69, 80.

[12] 陈鑫. 基于 SWAT 模型的海河典型流域径流变化归因分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Chen X. Attribution Analysis of Runoff Variation in Typical Basin Haihe River Basin Based on SWAT Model [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.

[13] 张殷钦, 胡伟, 刘俊民. 基于 R/S 分析法的地下水位动态变化趋势分析 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(12):

4912 - 4916.

Zhang Y Q, Hu W, Liu J M. Groundwater level regime variation trend on basis of rescaled range analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(12): 4912 - 4916.

[14] 傅抱璞. 山地蒸发的计算[J]. 气象科学, 1996, 16(4): 328 - 335.

Fu B P. On the calculation of evaporation from land surface in mountainous areas [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1996, 16(4): 328 - 335.

[15] 李斌, 李丽娟, 覃驭楚, 等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 70 - 76.

Li B, Li L J, Qin Y C, et al. Impacts of climate variability on streamflow in the upper and middle reaches of the Taoer River based on the Budyko hypothesis[J]. Resources Science, 2011, 33(1): 70 - 76.

[16] Li L J, Zhang L, Wang H, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(25): 3485 - 3491.

[17] Ma Z M, Kang S Z, Zhang L, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3 - 4): 239 - 249.

[18] 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.

Li Q J, Li Z L, Wang J. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin[J]. South - to - North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 31 - 39.

[19] 王庆明, 张越, 杨姗姗, 等. 海河流域山区植被覆盖度与水热因子关系研究[C]//2022 中国水利学术大会论文集(第四分册). 郑州: 黄河水利出版社, 2023: 366 - 374.

Wang Q M, Zhang Y, Yang S S, et al. A Study on the Relationship Between Vegetation Coverage and Hydrothermal Factors in Moun-

tainous Areas of the Haihe River Basin [C]//Proceedings of 2022 Proceedings of the China Water Conservancy Academic Conference. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2023: 366 - 374.

[20] 赵勇, 何国华, 李海红, 等. 基于 Choudhury - Yang 公式的泾河流域蒸散发归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 8 - 14.

Zhao Y, He G H, Li H H, et al. Attribution analysis on evapotranspiration changes in the Jinghe River Basin based on Choudhury - Yang equation[J]. South - to - North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 8 - 14.

[21] 王勇, 杨瑞, 瞿爽, 等. 楠杆自然保护区不同植被类型土壤物理特性及涵养水源功能分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 183 - 188.

Wang Y, Yang R, Qu S, et al. Analysis of soil physical characteristics and water conservation function of different vegetation types in NANGAn natural reserve[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 183 - 188.

[22] 杨洁. 基于植被恢复的云岩河流域水文响应模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.

Yang J. Hydrological Response Simulation of Yunyan River Basin Based on Vegetation Restoration[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[23] 邓睿, 张治意, 陈亚. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 141 - 147.

Deng R, Zhang Z Y, Chen Y. Responses of runoff to land use changes in Lower Jialing River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 141 - 147.

[24] 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 Y, Li J Z, Niu K J, 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.

Attribution analysis of annual average runoff depth variation in the upper reaches of the Bao River based on the Budyko hypothesis

WANG Jiangyulong¹, LIU Junjian¹, SHI Jingtao¹, WANG Guoqiang², ZHANG Junchao³,
WANG Yanliang¹, JIANG Yuge¹, LI Hengfei¹, AN Hongyan¹

(1. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hebei Langfang, 065000, China;
2. Pingquan Water Affairs Bureau, Hebei Chengde 067500, China; 3. Pingquan Soil and Water Conservation Construction Service Center, Hebei Chengde 067500, China)

Abstract: In recent years, the shortage of water resources in Beijing - Tianjin - Hebei region has an important impact on the ecological environment. In order to quantify the impact of human activities and climate change on water resources, the authors in this article conducted an attribution analysis of runoff changes in typical small wa-

tersheds in the northern mountainous areas of Beijing – Tianjin – Hebei water conservation area. Based on the data of precipitation, evaporation, and runoff in the upper reaches of the Bao River from 1981 to 2020 and the Mann Kendall method (M – K method), the baseline period was determined from 1981 to 2006 and the variation period was determined from 2007 to 2020. The results show that the annual average runoff depth during the variation period decreased 46.47 mm compared with the baseline period, accounting for 77.10% of runoff the total depth during the baseline period. Based on Rescaled Range Analysis (R/S), the future annual average runoff depth of the upper reaches in the Bao River was deduced to keep an opposite changing trend compared with the annual average runoff depth from 1981 to 2020, showing a stable increasing trend. Based on the Budyko hypothesis principle, the impact of climate change and human activities on the annual runoff depth in this region was quantitatively evaluated. The contribution rate of climate change to the runoff depth was 40.29%, and the contribution rate of human activities to the runoff depth was 59.71%. The impact of human activities on the runoff depth is mainly through changes in the land use type. A total of 30.28% of the land in the study area has undergone mutual transformation, with an increase of 67.61% in tree forests in 2020 compared to 1985, which greatly enhanced the water conservation capacity of the study area. The increase on vegetation coverage also reduces the potential evaporation. The research results could enhance the understanding of hydrological and water resources in the hilly areas of the northern Beijing – Tianjin – Hebei region, and provide some references for screening the driving factors of water source conservation function in Beijing – Tianjin – Hebei region.

Keywords: annual runoff; attribution analysis; land use type; Budyko hypothesis; the upper reaches of the Bao River

(责任编辑: 刘丹)