

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.004

基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析

郭珈源^{1,2}, 孙旭杨^{1,2}, 刘金涛^{1,2}, 边巴拉姆³, 王甲荣⁴, 王淑红⁵

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 西藏自治区水文水资源勘测局山南水文水资源分局, 西藏 山南 856100;
4. 聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252000; 5. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为提高对高寒山区流域气候变化下径流演变机理的认识,以羊八井流域为研究对象,系统辨析了该流域 1982—2013 年的水文气象要素演变特征,将冰川物质平衡和地下水蓄量变化项引入 Budyko 归因分析方程,评估了各要素变化对流域径流演变的贡献。结果表明:羊八井流域 1982—2013 年间降水量、平均气温、潜在蒸散发量、径流量和地下水蓄量均呈上升趋势,上升速率分别为 3.0 mm/a、0.02 ℃/a($p<0.05$)、0.53 mm/a、1.99 mm/a($p<0.05$)和 2.18 mm/a($p<0.05$);随着气候的暖湿化,流域径流演变对水文气象要素变化的敏感性增强,降水量、潜在蒸散发、非冰川区下垫面、冰川物质平衡及地下水蓄量变化对径流变化的贡献率分别为 189%、-2.99%、-78.3%、20.9%和-28.7%;植被生长状况改善与冻土退化是导致流域下垫面变化的重要因素,二者对径流变化的贡献率分别为-27.9%和-50.4%。

关键词: Budyko 理论; 气候变化; 径流演变; 归因分析; 高寒山区流域

中图分类号: P333.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)03-0022-08

Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory

GUO Jiayuan^{1,2}, SUN Xuyang^{1,2}, LIU Jintao^{1,2}, Bianbalamu³, WANG Jiarong⁴, WANG Shuhong⁵

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Shannan Branch, Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Xizang Autonomous Region, Shannan 856100, China;
4. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China;
5. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To further understand the mechanism of runoff evolution in cold alpine catchment under climate changes, the evolution characteristics of hydro-meteorological elements in the Yangbajain Catchment from 1982 to 2013 were systematically analyzed. By incorporating glacier mass balance and groundwater storage changes into the Budyko attribution analysis equation, the contributions made by changes in each factor to runoff evolution in the catchment were assessed. The results show that precipitation, average temperature, potential evapotranspiration, runoff amount, and groundwater storage in the Yangbajain Catchment show an upward trend from 1982 to 2013, with increasing rates of 3.0 mm/a, 0.02℃/a ($p<0.05$), 0.53 mm/a, 1.99 mm/a ($p<0.05$), and 2.18 mm/a ($p<0.05$), respectively. As the climate gets warm and humid, the sensitivity of runoff evolution in the catchment to changes in the hydro-meteorological elements has increased. The contribution rates of precipitation, potential evapotranspiration, underlying surface of non-glacial areas, glacier mass balance, and groundwater storage changes to runoff changes are 189%, -2.99%, -78.3%, 20.9%, and -28.7%, respectively. Improvement in vegetation growth and degradation of frozen soil are important factors causing changes in the underlying surface in the catchment, with contribution rates to runoff changes of -27.9% and -50.4%, respectively.

Key words: Budyko theory; climate change; runoff evolution; attribution analysis; cold alpine catchment

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZ-KK0207); 国家自然科学基金项目(92047301)
作者简介: 郭珈源(2000—),男,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:221301010010@hhu.edu.cn
通信作者: 刘金涛(1977—),男,教授,博士,主要从事土壤水文研究。E-mail:jliu@hhu.edu.cn
引用本文: 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.

青藏高原被誉为亚洲“水塔”,其高海拔山区也是响应全球变暖最显著的地区。近几十年来青藏高原暖湿化程度加剧,升温导致了广泛的积雪消融、冰川退缩和冻土退化现象^[1-2],这些地表水分-能量过程的变化深刻地改变了流域降水-径流响应关系,如何确定气候变化及其引起的地表扰动对径流演变的影响是该区域的研究热点之一^[3-5]。然而,由于径流来源复杂多样,且流域地表冰冻层和覆被等下垫面条件发生显著变化^[6-7],使得高寒山区流域径流的形成及演变机理仍不清晰^[8-9]。因此,亟待通过归因分析合理地解析各种因素对径流变化的影响机制和相对贡献,以厘清气候与下垫面要素对径流的复杂控制作用。

刘金平等^[10-11]利用分布式水文模型对雅鲁藏布江流域进行了气候变化下径流响应及水源组成的分析,但高海拔山区水文过程时空监测困难、观测数据缺乏均限制了水文模型的应用,不同研究结果间的差异性仍然较大,对于径流演变深层影响机理的认识有待增强。而基于水热耦合平衡原理的 Budyko 理论表征了流域在长期稳定状态下水分和能量间的理论关系,结合弹性系数法可为气候、下垫面变化与水文过程的相互作用提供定量解析方法^[12-13]。目前,Budyko 理论已被广泛应用于高寒山区流域的径流演变归因问题的研究:Wang 等^[3,14]使用不同的方法将冰川径流要素融入 Budyko 理论,并开展径流归因分析;Ji 等^[15]发现雅鲁藏布江流域植被与下垫面参数间存在良好的线性关系,进而量化了植被变化和人类活动对径流变化的影响。然而,Budyko 理论依赖对流域水量平衡各分项的准确量化,高寒山区流域水文循环复杂、对气候变化敏感,除增加冰川积雪融水外,暖湿化也改变了青藏高原的陆地水储量^[16-17],使之成为流域水平衡不可忽视的重要组成部分,因此在高寒山区流域利用基于简单水量平衡方程的 Budyko 理论计算径流时可能不满足其稳态假设的应用前提^[18]。此外,冻土作为冰冻圈的重要组成部分,其变化产生的影响仍很少纳入归因分析。Yang 等^[19]研究表明,考虑冰川物质平衡及冻土特征的 Budyko 理论在高寒山区的径流模拟中表现更好,特别是冰川覆盖率高的流域。因此,在 Budyko 理论中融入冰川物质平衡并充分考虑下垫面要素及其变化对水量平衡的影响是高寒山区径流演变归因的关键。

本文基于羊八井流域长期水文、气候和下垫面数据,通过线性趋势和突变点检验方法分析流域气候和水文的演变特征,引入冰川物质平衡及地下水蓄量变化开展流域水量平衡分析,利用基于 Budyko 理论的弹性系数法对径流变化展开归因分析,定量评估各因素对径流变化的贡献率,并对流域除冰川覆盖区外的下垫面变化的影响因素进行了讨论,以期揭示高寒山区径流对气候变化的响应机制及水资源规划和利用提供借鉴。

1 研究区概况

羊八井流域为西藏拉萨河西北部支流堆龙曲的源头流域,流域地形起伏大,下垫面特征复杂,包含植被、积雪、冻土、冰川和裸岩等。流域冰川面积为 316.3 km²,冰川储量约为 18.03 km³,冰川平均高程为 5 849 m,是拉萨河冰川化最大的子流域(冰川覆盖率达 12%)。流域内广泛分布多年冻土与季节性冻土,覆盖率分别为 36%和 64%;主要植被覆盖类型为高寒草甸。羊八井水文站位于流域出口,海拔 4 305 m,控制面积 2 645 km²。流域年平均气温-2.1℃,年降水量约 426.5 mm,年径流深 277.7 mm。研究区概况如图 1 所示。

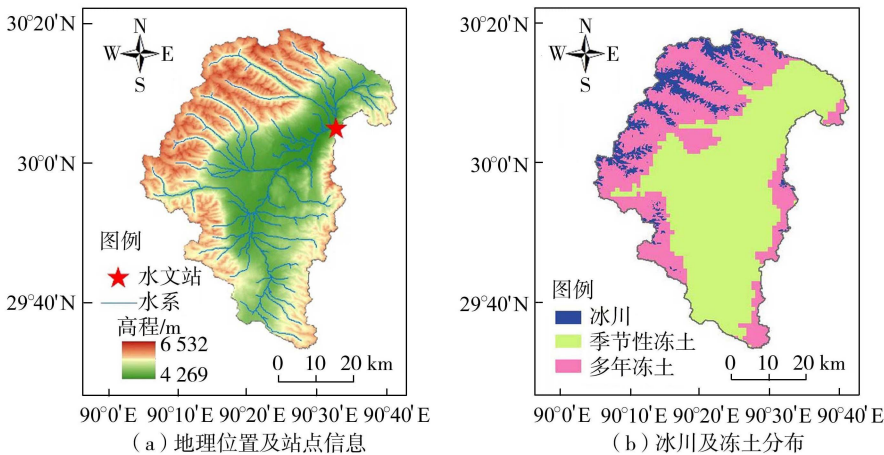


图 1 羊八井流域概况

Fig. 1 Overview of Yangbajain Catchment

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源

羊八井水文站提供了 1982—2013 年流域出口日尺度径流数据。地表气温、潜在蒸散发和降水数据分别来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)的中国近地表日气温数据集^[20]、中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集^[21]、雅鲁藏布江流域高时空分辨率降水数据^[22]。气温与降水数据的空间分辨率分别为 10 km 和 5 km,将其重采样至 1 km 并用于流域冰川物质平衡等的计算。冰川数据采用国家青藏高原科学数据中心提供的青藏高原冰川数据产品,包括 1976 年、2001 年、2013 年三期的冰川分布信息^[23]。植被叶面积指数数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)的 GLOBMAP 叶面积指数产品,空间分辨率为 8 km^[24]。Lin 等^[8]基于羊八井流域长序列径流资料,利用非线性水库的退水分析方法反演了流域 1982—2013 年地下水蓄量变化,其结果与 GRACE 数据估算的地下水蓄量变化趋势一致,可进一步用于流域径流变化的归因研究。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势与突变点检验

本文采用 Pettitt 非参数秩检验方法确定流域各水文气象要素突变发生的年份^[25]。以突变年为分界点,将研究时段划分为基准期(径流主要受气候变化影响)和影响期(气候和下垫面综合影响)。通过 Mann-Kendall 趋势检验法对研究序列进行趋势检验分析,该方法能够准确诊断各要素的变化趋势和显著性,在水文气象领域有着广泛的应用^[26]。Mann-Kendall 趋势检验中的标准统计变量 $|Z| > 1.96$ 和 $|Z| > 2.58$,表明该序列分别通过了置信度为 95% 和 99% 的显著性检验,具有显著上升或下降趋势。

2.2.2 水量平衡方程

由于流域在年尺度上的冰川物质平衡和地下水蓄量变化并不为零,因此定义 P_e 为可用于蒸发和产流的年有效水量,则流域水量平衡方程为

$$P_e = P - G - \Delta S = E + R \tag{1}$$

式中: P 为年降水量; G 为冰川物质平衡量; ΔS 为地下水蓄量变化量; E 为年实际蒸散发量; R 为径流深。

依据 Wang 等^[27]的研究,利用度日因子法进行流域冰川物质平衡的模拟,流域总降水的输入量为冰川区降雪、冰川区降雨及非冰川区降水三者之和,其中冰川区降雨与非冰川区降水可以直接补充径流并参与水文循环过程。冰川区的降雪(即固态降水)则暂时储存在冰川表面,视作冰川物质的补充。利用温度、降水数据及冰川分布信息,逐栅格地计算冰川物质平衡。

2.2.3 基于 Budyko 理论的归因分析

Budyko 理论中的 Choudhury-Yang 公式(式(2)),因引入了考虑下垫面等流域特征变化的影响因素,在径流变化归因分析中得到广泛应用^[28-29]。

$$E = P_e E_0 / (P_e^n + E_0^n)^{1/n} \tag{2}$$

式中: E_0 为潜在蒸散发量; n 为下垫面物理特性参数,由于本文流域冰川物质平衡单独核算,因此 n 仅与非冰川区的下垫面性质有关。将式(1)与式(2)联立可得基于 Budyko 理论的年径流深估算公式:

$$R = (P - G - \Delta S) - (P - G - \Delta S) E_0 / [(P - G - \Delta S)^n + E_0^n]^{1/n} \tag{3}$$

已知 P 、 G 、 ΔS 和 E_0 ,即可推求 n 。假定式(3)中各参数为相互独立的变量,则径流变化可用全微分的形式表示(式(4)),经改写后可用于量化某一变量的变化对径流变化的影响。

$$dR = \varepsilon_P \frac{dP}{P} R + \varepsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} R + \varepsilon_G \frac{dG}{G} R + \varepsilon_{\Delta S} \frac{d\Delta S}{\Delta S} R + \varepsilon_n \frac{dn}{n} R \tag{4}$$

其中

$$\begin{aligned} \varepsilon_P &= \frac{\partial R/R}{\partial P/P} = \left[1 - \left(\frac{E_0^n}{P_e^n + E_0^n} \right)^{1/n+1} \right] \frac{P}{R} & \varepsilon_{E_0} &= \frac{\partial R/R}{\partial E_0/E_0} = - \left(\frac{P_e^n}{P_e^n + E_0^n} \right)^{1/n+1} \frac{E_0}{R} \\ \varepsilon_G &= \frac{\partial R/R}{\partial G/G} = \left[\left(\frac{E_0^n}{P_e^n + E_0^n} \right)^{1/n+1} - 1 \right] \frac{G}{R} & \varepsilon_{\Delta S} &= \frac{\partial R/R}{\partial \Delta S/\Delta S} = \left[\left(\frac{E_0^n}{P_e^n + E_0^n} \right)^{1/n+1} - 1 \right] \frac{\Delta S}{R} \\ \varepsilon_n &= \frac{\partial R/R}{\partial n/n} = \left[\frac{P_e^n \ln P_e + E_0^n \ln E_0}{n(P_e^n + E_0^n)} - \frac{\ln(P_e^n + E_0^n)}{n^2} \right] \frac{P_e E_0}{(P_e^n + E_0^n)^{1/n}} \frac{n}{R} \end{aligned}$$

式中:dx 为各变量影响期多年平均值与基准期多年平均值之差(x 表示 P 、 G 、 ΔS 、 E_0 或 n); ε_p 、 ε_{E_0} 、 ε_G 、 $\varepsilon_{\Delta S}$ 、 ε_n 分别为 P 、 E_0 、 G 、 ΔS 、 n 的弹性系数。

式(4)中等式右侧各项为各变量对年径流变化的影响量 dR_x ,则 $dR = \sum dR_x$,各变量相对贡献率为

$$C_x = dR_x / dR \times 100\% \tag{5}$$

高寒山区流域径流变化的归因研究中,冻土和植被覆盖的变化通常被视作影响 n 的重要因素,因此通过建立 n 与流域冻土、植被覆盖变化间的线性关系进一步探讨羊八井流域非冰川区下垫面变化的影响因素。采用叶面积指数(L)表征植被覆盖信息,冻结指数(F)作为衡量冻土退化程度的变量^[30]。采用 10 a 滑动窗口计算 n 、 L 和 F 的均值,利用多元线性回归方法拟合 n 与 L 、 F 的关系(式(6)),通过式(7)(8)将非冰川区下垫面变化对径流的影响进一步分解为植被和冻土变化的影响。

$$n = aL + bF \tag{6}$$

$$dR_L = dR_n \frac{adL}{adL + bdF} \tag{7}$$

$$dR_F = dR_n - dR_L \tag{8}$$

式中 a 、 b 为回归系数。

3 结果分析与讨论

3.1 时间序列分析

由表 1 可知,1982—2013 年流域各水文气象要素均呈上升趋势,其中年径流量、年平均气温和年地下水蓄量变化上升趋势显著,通过了 $p < 0.05$ 的显著性检验。由图 2 可知:羊八井流域年降水量、年平均气温和年潜在蒸散发量的上升速率分别为 3.0 mm/a 、 0.02°C/a 和 0.53 mm/a ;年降水量最大值和最小值分别出现在 2001 年(634.6 mm)和 1983 年(273.4 mm);年平均气温和年潜在蒸散发量的最大值和最小值出现年份相同,分别为 2009 年(-1.14°C 、 665.6 mm)和 1997 年(-2.85°C 、 563.6 mm)。流域年径流深的上升速率为 1.99 mm/a ,表现出枯-

表 1 Mann-Kendall 和 Pettitt 检验结果
Table 1 Mann-Kendall and Pettitt test results

水文气候要素	Mann-Kendall 趋势检验			Pettitt 突变检验	
	Z	p	趋势	显著性水平	突变年份
年降水量	1.69	0.091	↑	0.076	1998
年平均气温	2.46	0.013 *	↑	0.119	1995
年潜在蒸散发量	0.73	0.467	↑	0.371	2005
年径流量	2.43	0.015 *	↑	0.035 *	1998
年地下水蓄量	2.43	0.015 *	↑	0.040 *	2002

注: * 代表变量的变化趋势或突变通过 $p < 0.05$ 的显著性检验, ↑ 代表序列呈上升趋势。

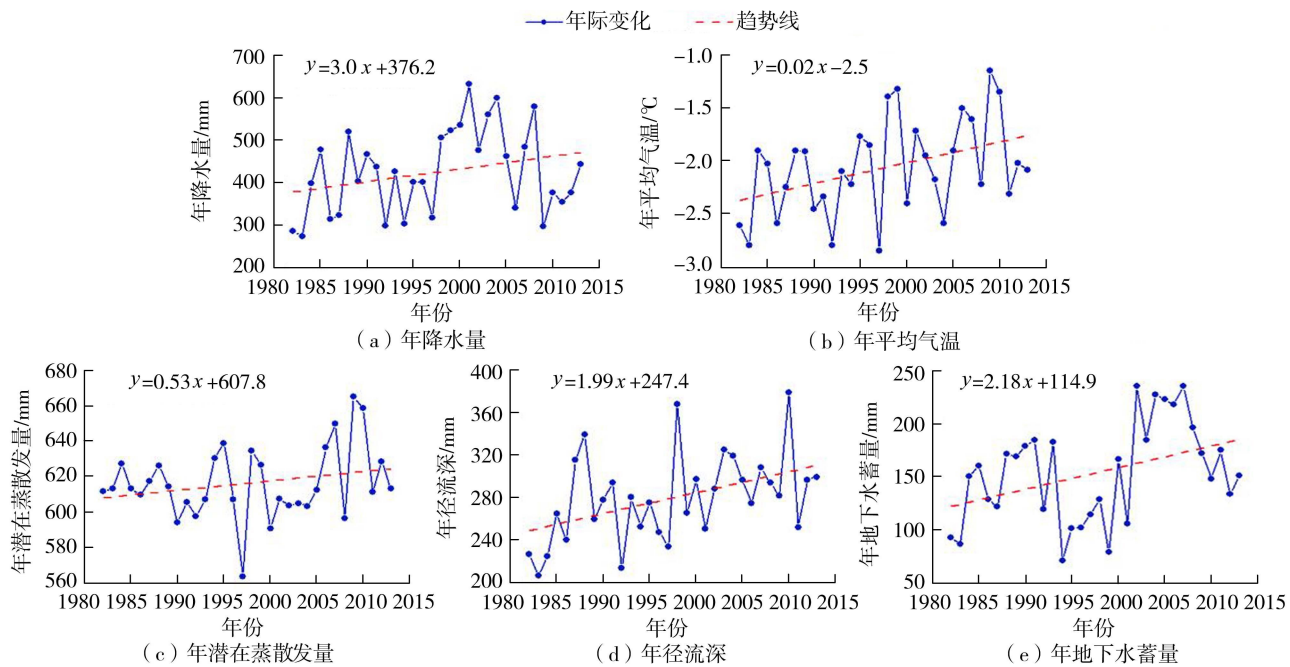


图 2 1982—2013 年羊八井流域水文气象要素变化
Fig. 2 Changes in hydro-meteorological elements in Yangbajain Catchment from 1982 to 2013

丰水年交替的演变特征。流域年地下水蓄量的上升速率为 2.18 mm/a, 结合其他要素变化情况可以推断出流域显著增加的地下水蓄量与气候暖湿化下降水和冰川冻土融水的增加密切相关。

Pettitt 突变检验结果表明(表 1), 羊八井流域年降水量与年径流量均在 1998 年发生突变, 其中径流量为显著突变, 潜在蒸散发量和年平均气温分别在 2005 年和 1995 年发生不显著突变, 而年地下水蓄量在 2002 年发生显著突变。以径流的突变年份作为判断基础并综合考虑其他水文气象要素的突变情况, 本文将 1998 年设置为突变点, 将径流序列分为 1982—1997 年的基准期与 1998—2013 年的影响期, 定量评估各要素对径流变化的相对贡献程度。

3.2 敏感性分析

逐栅格提取冰川区正积温和降雪计算冰川物质平衡时, 需要冰川边界来限定冰川分布范围。本文分别采用某一时段首尾两年的冰川边界进行计算并取均值作为该时段的冰川物质平衡结果, 根据所确定的突变年份, 使用 1976 年和 2001 年的冰川边界计算基准期的 G , 使用 2001 年和 2013 年的冰川边界计算影响期的 G 。两个时期的 G 计算结果及其他水文气象要素的统计信息见表 2。

表 2 各水文气象要素时段平均值

Table 2 Average values of hydro-meteorological elements during different time periods

时段	R/mm	P/mm	E_0/mm	n	G/mm	$\Delta S/\text{mm}$	E_0/P	R/P
1982—1997 年	260.0	378.6	611.4	0.523	-31.2	22.2	1.62	0.69
1998—2013 年	300.3	472.6	621.8	0.621	-41.7	36.5	1.32	0.64

由表 2 可知, 相较于基准期, 羊八井流域的年降水量、径流深以及潜在蒸散发量在影响期均增加, 其中年降水量的增加量最显著(94.0 mm), 远大于径流深的增加量(40.3 mm), 而潜在蒸散发量的增加则并不明显(10.4 mm)。两个时段间气温的升高为流域提供了更多的冰川融水, 流域的干旱系数(E_0/P)从 1.62 减小到 1.32, 径流系数(R/P)从 0.69 减小到 0.64, 这说明流域气候虽然变得更加湿润, 但降水向径流的分配比例并没有相应地提高。究其原因, 一方面 1982—2013 年流域地下水蓄量有所增加, 储存了一部分降水和冰雪融水, 土壤湿度增加后更多的水分耗散于蒸散发; 另一方面, Budyko 理论的下垫面参数 n 增加了 0.098, 表明羊八井流域的下垫面特征对气候变化的响应会相应减少径流量。

由表 3 可知, 径流与 P 、 G 呈正相关关系, 与 E_0 、 n 、 ΔS 呈负相关关系。冰川物质平衡的弹性系数为正, 表明冰川物质亏损量的增加将增加径流, 而 E_0 、 n 和 ΔS 的增加将减少径流。相较于基准期, 影响期流域的 ε_P 和 ε_G 增大, 而 ε_{E_0} 、 ε_n 和 $\varepsilon_{\Delta S}$ 减小。由影响期弹性系数可知, P 、 G 每增加 1% 分别引起径流增加 1.257% 和 0.111%, 而 E_0 、 n 和 ΔS 每增加 1% 分别引起径流减少 0.271%、0.657% 和 0.097%, 径流变化对降水最敏感。由于弹性系数的绝对值大小客观反映了径流对各水文气象要素的敏感程度, 对比基准期可以发现各弹性系数绝对值均有所增大, 表明随着气候暖湿化, 径流变化对气候及流域下垫面变化的敏感性增强, 体现了羊八井作为典型高寒山区的冰川流域易受气候变化影响, 以及生态水文系统脆弱的特点。

表 3 羊八井流域各水文气象要素的弹性系数

Table 3 Elastic coefficients of hydro-meteorological elements in Yangbajain Catchment

时段	ε_P	ε_{E_0}	ε_n	ε_G	$\varepsilon_{\Delta S}$
1982—1997 年	1.188	-0.216	-0.644	0.098	-0.070
1998—2013 年	1.257	-0.271	-0.657	0.111	-0.097

3.3 径流演变归因分析

利用 Budyko 理论计算得到的 P 、 E_0 、 n 、 G 、 ΔS 引起的径流变化分别为 75.8、-1.2、-31.4、8.4、-11.5 mm, 与之相应的贡献率分别为 189%、-2.99%、-78.3%、20.9% 和 -28.7%, 因此径流量变化为 40.1 mm, 与实际径流量的变化相差很小, 相对误差为 0.5%, 证明本文使用的径流变化归因分析方法有效。 P 的增加是导致径流量增加的主要因素, 而 n 变化在很大程度上抵消了这一影响, 这与刘金平等^[10]在该区域利用分布式模型得出的结论相符, 表明气候剧烈变化下流域下垫面的协同变化机制能够反馈水平衡, 缓和外部干扰对水文过程产生的影响。此外, 两个时段 E_0 的变化不大, 因而对径流变化的影响较小。 G 与 ΔS 变化带来的正负影响比较接近, 均超过 20%。 ΔS 对径流的负影响表明降水增加与冰雪融水带来的额外水量输入并没有全部进入河道, 其中一部分通过补充地下水而被流域调蓄。冰川物质平衡带来的影响与 Wang 等^[3]在雅鲁藏布江流域径流归因研究中所给出的冰川贡献率范围较为一致。徐宗学等^[14]的研究同样指出雅鲁藏布江中游冰川径流变化引起的径流增加贡献率约为 26.0%。Wang 等^[27]的研究也表明该区域 2000 年后冰川退缩呈加

速趋势。以上结果体现了高寒流域气候变化带来的冰冻圈变化在径流演变中所起到的重要作用。

3.4 流域非冰川区下垫面变化的影响因素

由图 3 可知,研究时段内流域叶面积指数 L 呈较稳定的上升趋势。由于气候变暖,流域冻结指数 F 呈波动下降趋势,表明流域冻土正在逐年退化。流域植被变绿和冻土退化现象与该区域相关观测结果相符^[6,8]。式(6)的拟合结果显示 L 与 F 的回归系数分别为 9.81 和 -0.00064,拟合相关系数为 0.47($p<0.01$)(图 4), L 与 n 表现为正相关关系, F 与 n 为负相关关系。归因计算结果表明 L 与 F 对径流变化的贡献量分别为 -11.2、-20.2 mm,与之相应的贡献率分别为 -27.9% 和 -50.4%。综上,羊八井流域植被变绿和变好倾向于减少径流量,流域暖湿化的水热环境变化促进了植被生长,植被覆盖度增加一方面通过降低地表反照率及植被变绿的生理响应增加流域的蒸散发,进而直接影响径流;另一方面通过增加截留、影响下渗等从而间接影响径流。冻土对流域径流的影响大于植被,冻土的退化与流域地下水蓄量的增加呈现较好的一致性。说明冻土退化可增加高寒山区流域冻土区活动层地下水库库容,增大地下水蓄量,结论与 Lin 等^[8,19]的研究相符。

4 结 论

- a. 羊八井流域 1982—2013 年年降水量、年平均气温、潜在蒸散发量、年径流深和年地下水蓄量均呈上升趋势,其中年平均气温、年径流深和年地下水蓄量的上升趋势显著,上升速率分别为 0.02 °C/a、1.99 mm/a 和 2.18 mm/a;年降水量和年潜在蒸散发量的上升趋势不显著,上升速率分别为 3.0 mm/a 和 0.53 mm/a。综合流域各水文气象要素的变化情况,确定突变年份为 1998 年。
- b. 相较于基准期,羊八井流域影响期内干旱系数增大,径流系数减小,径流量变化对气候和流域下垫面变化的敏感性增强,年降水量、潜在蒸散发量、非冰川区下垫面特征、冰川物质平衡量及年地下水蓄量变化对径流变化的贡献率分别为 189%、-2.99%、-78.3%、20.9%和-28.7%。
- c. 植被与冻土是影响羊八井流域非冰川区下垫面特征变化的重要因素,植被生长状况的改善以及冻土的退化改变了其水文性质,从而减少了径流,两者对径流变化的贡献率分别为-27.9%和-50.4%。

参考文献:

[1] YAO Tandong, BOLCH T, CHEN Deliang, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2022,3(10):618-632.

[2] KRAAIJENBRINK P D A, STIGTER E E, YAO Tandong, et al. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply[J]. Nature Climate Change,2021,11(7):591-597.

[3] WANG Jiarong, CHEN Xi, LIU Jintao, et al. Changes of precipitation-runoff relationship induced by climate variation in a large glaciated basin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,2021,126(21):e2020JD034367.

[4] XU Zongxue, ZHANG Rui. Compound extreme events in Yarlung Zangbo River Basin from 1977 to 2018[J]. Water Science and Engineering,2023,16(1):36-44.

[5] 徐冉,铁强,代超,等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):288-293. (XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, et al. Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(4):288-293. (in Chinese))

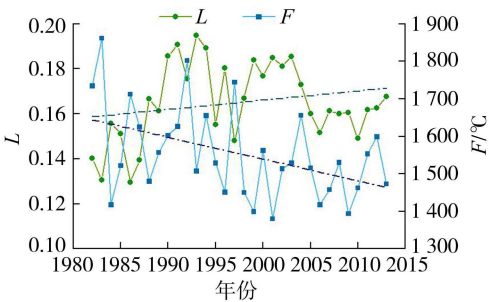


图 3 1982—2013 年流域 L 和 F 变化趋势
Fig.3 Changes in L and F in the Yangbajain Catchment from 1982 to 2013

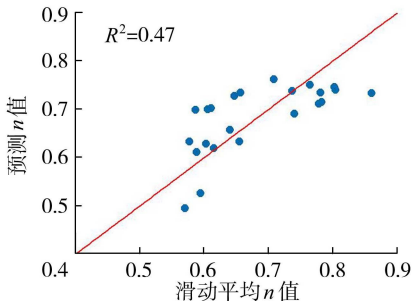


图 4 1982—2013 年滑动平均 n 与线性回归
预测 n 的相关关系

Fig.4 Correlation between moving average n and linear regression prediction n from 1982 to 2013

[6] 左德鹏,韩煜娜,徐宗学,等. 气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制[J]. 水资源保护,2022,38(6):1-8. (ZUO Depeng, HAN Yuna, XU Zongxue, et al. Impact mechanism of climate change on vegetation dynamics in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):1-8. (in Chinese))

[7] 韩先明,左德鹏,李佩君,等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(1):16-23. (in Chinese))

[8] LIN Lu, GAO Man, LIU Jintao, et al. Understanding the effects of climate warming on streamflow and active groundwater storage in an alpine catchment: the upper Lhasa River[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(3):1145-1157.

[9] 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))

[10] 刘金平,任艳群,张万昌,等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. 冰川冻土,2022,44(1):275-287. (LIU Jinping, REN Yanqun, ZHANG Wanchang, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(1):275-287. (in Chinese))

[11] 田富强,徐冉,南熠,等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. 水科学进展,2020,31(3):324-336. (TIAN Fuqiang, XU Ran, NAN Yi, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. Advances in Water Science,2020,31(3):324-336. (in Chinese))

[12] 赵昀皓,邢万秋,傅健宇. 基于概率性 Budyko 方程的我国可利用水资源量脆弱性评估[J]. 水资源保护,2020,36(2):47-52. (ZHAO Yunhao, XING Wanqiu, FU Jianyu. Evaluation of vulnerability of water availability in China based on probabilistic Budyko equation[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):47-52. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 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. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Advances in Water Science,2022,33(4):519-530. (in Chinese))

[15] JI Guangxing, YUE Shuaijun, ZHANG Jincai, et al. Assessing the impact of vegetation variation, climate and human factors on the streamflow variation of Yarlung Zangbo River with the corrected Budyko equation[J]. Forests,2023,14(7):1312.

[16] WANG Jiarong, CHEN Xi, HU Qi, et al. Responses of terrestrial water storage to climate variation in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology,2020,584:124652.

[17] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. 水资源保护,2023,39(2):199-207. (HAN Yu'na, ZUO Depeng, WANG Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):199-207. (in Chinese))

[18] MIANABADI A, DAVARY K, POURREZA-BILONDI M, et al. Budyko framework; towards non-steady state conditions[J]. Journal of Hydrology,2020,588:125089.

[19] YANG Linshan, FENG Qi, NING Tingting, et al. Attributing the streamflow variation by incorporating glacier mass balance and frozen ground into the Budyko framework in alpine rivers[J]. Journal of Hydrology,2024,628:130438.

[20] FANG Shu, MAO Kebiao, XIA Xueqi, et al. Dataset of daily near-surface air temperature in China from 1979 to 2018[J]. Earth System Science Data,2022,14(3):1413-1432.

[21] DING Yongxia, PENG Shouzhang. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100[J]. Theoretical and Applied Climatology,2021,145(1/2):79-94.

[22] WANG Yuanwei, WANG Lei, LI Xiuping, et al. An integration of gauge, satellite, and reanalysis precipitation datasets for the largest river basin of the Tibetan Plateau[J]. Earth System Science Data,2020,12(3):1789-1803.

[23] YE Qinghua, ZONG Jibiao, TIAN Lide, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: mid-1970s-2000-13[J]. Journal of Glaciology,2017,63(238):273-287.

[24] LIU Yang, LIU Ronggao, CHEN J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data[J]. Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2012,117(G4):G04003.

[25] 张梦娇,南熠,吴永祥,等. 1960—2020 年青藏高原东部主要河流的径流和泥沙变化特征[J]. 水科学进展,2024,35(2): 298-312. (ZHANG Mengjiao, NAN Yi, WU Yongxiang, et al. Streamflow and sediment change of major rivers in the Eastern Tibetan Plateau from 1960 to 2020[J]. Advances in Water Science,2024,35(2):298-312. (in Chinese))

[26] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3): 25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(3):25-33. (in Chinese))

[27] WANG Shuhong, LIU Jintao, PRITCHARD H D, et al. Characterizing 4 decades of accelerated glacial mass loss in the west Nyainqentanglha Range of the Tibetan Plateau[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2023,27(4):933-952.

[28] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. Water Resources Research,2008,44(3):W03410.

[29] 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))

[30] WANG Taihua, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework[J]. Journal of Hydrology,2018,558:301-313.

(收稿日期:2024-07-12 编辑:刘晓艳)

(上接第 21 页)

[13] 罗赞,董增川,刘玉环,等. 基于 Copula 函数的连河通江湖泊防洪安全设计:以洪泽湖为例[J]. 湖泊科学,2021,33(3): 879-892. (LUO Yun,DONG Zengchuan,LIU Yuhuan,et al. Safety design for rivers-connected lake flood control based on Copula function;a case study of Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(3):879-892. (in Chinese))

[14] 倪晋,虞邦义,张学军,等. 淮河流域冯铁营引河工程的防洪效果及影响评估[J]. 人民长江,2021,52(7):22-28. (NI Jin, YU Bangyi,ZHANG Xuejun,et al. Flood control effect and impact assessment of Fengtieying Diversion Project in Huaihe River Basin[J]. Yangtze River,2021,52(7):22-28. (in Chinese))

[15] 何夕龙,陈婷,许慧泽,等. 入海水道二期工程河道开挖规模与洪泽湖周边滞洪区运用关系研究[J]. 水利规划与设计, 2020(7):10-13. (HE Xilong,CHEN Ting,XU Huize,et al. Study on relationship between scale of channel excavation and flood storage area along Hongze lake on second stage of Sea-entering channel project[J]. Water Resources Planning and Design,2020 (7):10-13. (in Chinese))

[16] 刘源. 洪泽湖出流格局变化下的水动力特性分析[D]. 天津:天津大学,2020.

[17] 薛联青,成诚,汪露,等. 洪泽湖中低水位下泄流能力数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(5):32-38. (XUE Lianqing, CHENG Cheng,WANG Lu,et al. Numerical simulation of discharge capacity under middle and low water levels of Hongze Lake [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):32-38. (in Chinese))

[18] 陈春锦,徐国宾. 河道综合治理措施对洪泽湖及淮河干流水位影响数值模拟分析[D]. 天津:天津大学,2022.

[19] 丁玲,逢勇. 二维水流水质黎曼近似解模型性能分析及应用[D]. 南京:河海大学,2003.

[20] ZHAO Deshuang, SHEN Hanwei, TABIOS G Q, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins-Closure [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1996,122(1):52.

[21] SLEIGH P A, GASKELL P H, BERZINS M, et al. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries[J]. Computers & Fluids,1998,27(4):479-508.

[22] 陈咏诗,朱海,杨旭,等. 沙颍河下泄污水的降解与稀释特性对西淝河取水口水质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):29-36. (CHEN Yongshi, ZHU Hai, YANG Xu, et al. Impact of degradation and dilution characteristics of effluent discharged from Shaying River on the water quality of water-intake of Xifei River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):29-36. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-09 编辑:刘晓艳)