

基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析

王宣宣¹, 刘欢¹, 胡鹏¹, 贾仰文¹, 季叶飞², 党磊²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 松辽水利委员会水文局, 吉林 长春 130021)

摘要:针对 Budyko 假设在强人类活动干扰流域应用的不足, 将其与水量平衡原理相结合, 量化降水、潜在蒸散发、下垫面和人类用耗水变化对西辽河及其3大支流(老哈河、西拉木伦河和乌力吉木仁河)流域实测径流衰减的贡献。结果表明:1956—2020年西辽河流域径流以0.17亿m³/a的速度显著衰减($p=0.005$), 并在1966年、1984年和2005年左右发生了3次突变, 其间人类用耗水变化是西辽河流域径流衰减的主导因素, 贡献率为77.4%, 潜在蒸散发、下垫面和降水变化的贡献率分别为8.8%、7.9%、5.9%; 1984—2020年, 下垫面改变成为西辽河流域径流衰减的主导因素, 贡献率为58.3%, 其次是降水变化, 贡献率为28.8%; 1956—2020年各支流流域实测径流变化特征与主导因素差异较大, 但整体以人类活动影响为绝对主导因素, 贡献率在78.5%~91.7%之间。

关键词:强人类活动干扰; 水量平衡; Budyko 假设; 径流衰减; 归因分析; 西辽河流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)06-0165-08

Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis/WANG Xuanxuan¹, LIU Huan¹, HU Peng¹, JIA Yangwen¹, JI Yefei², DANG Lei²(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hydrological Bureau of Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China)

Abstract: To address the shortcomings of Budyko hypothesis in its application to river basins with significant human interference, Budyko hypothesis was combined with water balance principle to quantify the contributions of changes in precipitation, potential evapotranspiration, underlying surface, and human water consumption to the observed runoff attenuation in the Xiliao River Basin and its three major tributary basins (the Laoha River, Xilamulun River, and Wulijimuren River). The results showed that the observed runoff in the Xiliao River Basin significantly decreased at 17 million m³ per year ($p=0.005$) from 1956 to 2020, and underwent three abrupt changes around 1966, 1984, and 2005. Change in human water consumption was the dominant factor contributing to the observed runoff attenuation in the Xiliao River Basin during this period, with a contribution rate of 77.4%, and the contribution rates of changes in potential evapotranspiration, underlying surface, and precipitation were 8.8%, 7.9%, and 5.9%, respectively. Underlying surface change played a dominant role in runoff attenuation in the Xiliao River Basin from 1984 to 2020, with a contribution rate of 58.3%, followed by precipitation change, with a contribution rate of 28.8%. The change characteristics of observed runoff and the dominant factors in each tributary basin differed greatly, but human interference played a dominant role from 1956 to 2020, with the contribution rate ranging from 78.5% to 91.7%.

Key words: significant human interference; water balance; Budyko hypothesis; runoff attenuation; attribution analysis; Xiliao River Basin

在气候变化和高强度人类活动影响下, 全球不少地区河道径流发生了衰减甚至断流, 由此引发了

一系列生态环境问题^[1]。认识和理解流域径流衰减的原因是制定区域或流域水资源管理策略的重要

基金项目:国家自然科学基金项目(52122902, 52394233); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WR0145B022021); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK12022ZD01)

作者简介:王宣宣(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水资源保护研究。E-mail: 2016301010113@cau.edu.cn

通信作者:刘欢(1992—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liuhuan@iwhr.com

依据,近年来也成了水文水资源学研究的热点^[2]。目前,在径流变化的成因分析方面,常采用水文模型与情景分析相结合的方法,或采用 Budyko 假设、双累积曲线和多元线性回归等统计分析方法^[3]。其中,常见的水文模型包括 SWAT (soil and water assessment tool) 模型、VIC 模型 (variable infiltration capacity model) 和新安江模型等^[4-6]。随着流域产汇流理论与模拟技术的发展,基于物理机制的分布式水文模型因其过程明确、参数物理意义清晰等优点受到关注,但其结构复杂,对输入数据要求高,部分参数需要大量试验获得,难以应用于一些缺(少)资料的地区^[7]。此外,在城市化、农业灌溉、水利工程建设等强人类活动扰动的流域,水文模型因产汇流机制发生变化会出现失真问题^[8]。相较于水文模型,以 Budyko 假设为代表的统计分析方法因数据要求少,计算过程简便而备受青睐,但同样弱化了对径流变化机制的考虑^[9]。

Budyko 假设是水文学中研究流域水热耦合关系的重要方法,其认为流域径流是潜在蒸散发、降水量和下垫面参数的函数,将径流变化归因为气候变化(降水和潜在蒸散发)和下垫面改变^[10]。可以看出,Budyko 假设关注自然降水和下垫面等产水过程的变化,而忽视了人类经济社会用水对径流的消耗作用^[11]。对于我国北方干旱半干旱地区,人类活动耗水约占当地水资源量的 1/2,在强人类干扰流域,径流的变化已不能不考虑经济社会耗水的贡献,Budyko 假设的应用场景受到限制。西辽河流域是我国典型的农牧交错区和重要的粮食生产基地,2022 年人类活动耗水量约 36 亿 m³,占其多年平均水资源量的 47%。20 世纪 80 年代以来,西辽河流域径流发生了严重衰减,通辽以下干流河段常年出现断流问题,是目前全国七大江河中唯一处于断流状态的大江大河干流。而对于引起西辽河流域径流衰减的主要因素以及气候变化和人类活动在其中的贡献,目前还缺乏系统性的量化研究。

为此,本文针对西辽河流域径流衰减问题和强人类活动特点,将水量平衡原理与 Budyko 假设相结合,从水源、产水和用耗水 3 个径流影响因素出发,剖析径流衰减特征及各影响因素的贡献。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西辽河位于我国东北地区南部,处于 42°N~45°N、119° 4' E ~ 125° 1' E 之间,流域面积 13.83 万 km²^[12-13]。西辽河主要支流有老哈河、西拉木伦河、乌力吉木仁河、教来河、新开河等。流域

多年平均降水量约 375 mm,年潜在蒸散发量达到 1057 mm。根据第三次水资源调查评价,西辽河流域多年平均地表和地下水资源量分别为 13.95 亿 m³ 和 38.66 亿 m³,水资源总量为 50.88 亿 m³。20 世纪 80 年代以来,西辽河流域社会经济快速发展,导致用耗水量急剧增加。2022 年全流域用水量达到 50.46 亿 m³,水资源开发利用率高 85.6%。气候变化导致西辽河流域降水量普遍呈下降趋势,流域 2001—2021 年年均降水量仅 349.7 mm,相比 1981—2000 年下降了 12.8%。受气候变化和人类活动的共同影响,西辽河干支流流域径流衰减严重,20 世纪 80 年代以来,出现断流的范围、频率和持续时间大幅增加^[14-15]。为系统认识流域径流衰减特征及其成因,本文选择西辽河全流域和流域面积在 1 万 km² 以上的 3 条典型支流,即老哈河、西拉木伦河和乌力吉木仁河作为分析对象,郑家屯断面作为西辽河全流域控制断面,兴隆坡、海日苏和梅林庙断面分别作为老哈河、西拉木伦河和乌力吉木仁河流域的控制断面(图 1)。

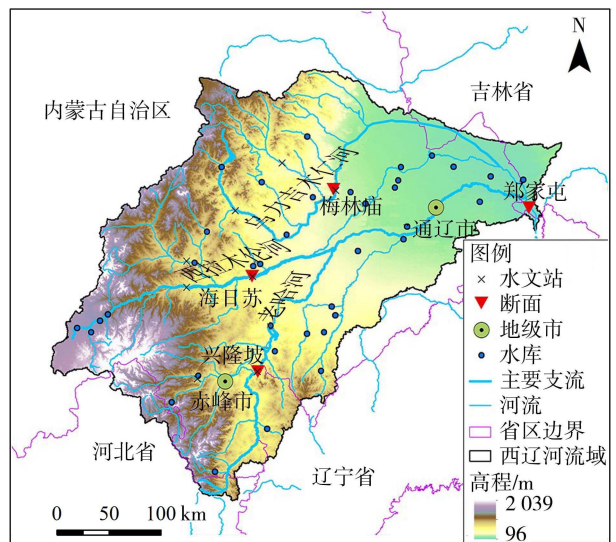


图 1 西辽河流域概况

Fig. 1 Sketch map of the Xiliao River Basin

1.2 数据来源

1956—2020 年的降水数据为 16 个国家基本气象站的实测资料,潜在蒸散发来源于国家青藏高原科学数据中心提供的 1 km 尺度逐月潜在蒸散发数据集^[16-19]。人类用耗水数据来自流域水资源公报统计数据,径流数据包括实测和还原径流,均来自水利部松辽水利委员会水文局。

2 研究方法

2.1 研究思路

从水源到产汇流全过程梳理径流变化的影响因

素,量化不同因素对西辽河流域实测径流衰减的贡献,研究技术路线如图2所示。降水、潜在蒸散发等气候因素的变化将直接导致西辽河流域径流产水量的改变;地形、土壤和植被等下垫面条件改变会对降水进行再分配,影响产流;人类活动通过取水产生直接消耗,导致径流衰减。为此,将流域径流影响因素划分为降水、潜在蒸散发、下垫面条件和人类用耗水4个方面,其中降水和潜在蒸散发均属气象因素,下垫面条件和人类用耗水属人类活动因素。

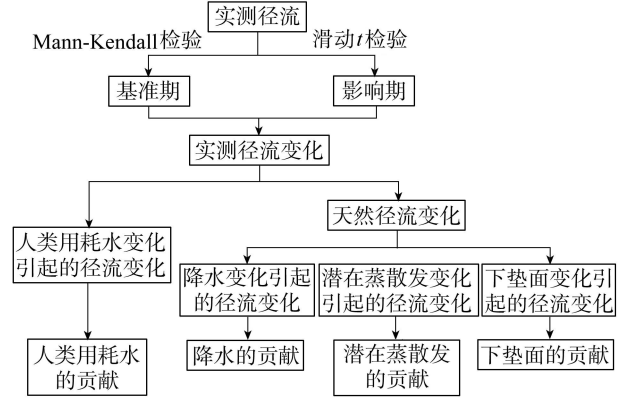


图2 研究技术路线
Fig. 2 Flowchart of research

采用 Mann-Kendall 检验^[20]和滑动 t 检验^[21]综合分析实测径流发生突变的年份,以此划分基准期和影响期。基于水量平衡原理,在多年尺度上将年均实测径流变化量分为人类用耗水变化引起的变化量和天然径流变化量两部分,计算人类用耗水和天然径流(即还原径流)的变化对实测径流变化的贡献。在此基础上,将 Budyko 假设应用于天然径流变化的归因分析,以量化降水、潜在蒸散发和下垫面变化对天然径流变化的贡献,进而确定3者对实测径流变化的贡献。

2.2 径流变化因素贡献计算方法

根据水量平衡原理,影响期年均实测径流相对于基准期的变化 ΔR_M 为

$$\Delta R_M = R_2 - R_1 = \Delta R_W + \Delta R_N \quad (1)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为基准期和影响期的年均实测径流; ΔR_W 、 ΔR_N 分别为人类用耗水变化直接引起的年均实测径流变化和天然径流变化。

人类用耗水和天然径流变化对实测径流衰减的贡献率 C_W 、 C_N 分别为

$$C_W = \frac{|\Delta R_W|}{|\Delta R_W| + |\Delta R_N|} \times 100\% \quad (2)$$

$$C_N = \frac{|\Delta R_N|}{|\Delta R_W| + |\Delta R_N|} \times 100\% \quad (3)$$

根据 Budyko 假设^[22],天然径流可认为是降水量

(P)、潜在蒸散发(ET_0)和下垫面参数(n)的函数,参数 n 反映了流域下垫面特征,与地形、土壤和植被等有关^[23]。傅抱璞等^[24-25]在 Budyko 假设的基础上,提出了具有普适性的年尺度流域水热耦合平衡方程:

$$R_N = P - \frac{P \cdot ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (4)$$

式中 R_N 为天然径流量。

对式(4)求全微分,得到:

$$\frac{dR_N}{R_N} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} \quad (5)$$

其中

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + \varphi^n)^{1/(n+1)} - \varphi^{n+1}}{(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1 + \varphi^n) - \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]}$$

$$\varphi = \frac{ET_0}{P}$$

式中: ε_P 、 ε_{ET_0} 、 ε_n 分别为天然径流对降水量、潜在蒸散发和下垫面的敏感性系数^[26]; φ 为潜在蒸散发与降水量的比值。

天然径流变化为

$$\Delta R_N = \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \Delta R_n \quad (6)$$

其中

$$\Delta R_P = \varepsilon_P R_N \frac{\Delta P}{P}$$

$$\Delta R_{ET_0} = \varepsilon_{ET_0} R_N \frac{\Delta ET_0}{ET_0} \quad \Delta R_n = \varepsilon_n R_N \frac{\Delta n}{n}$$

式中: ΔP 、 ΔET_0 、 Δn 分别为影响期年均降水量、潜在蒸散发、下垫面相较于基准期的变化量; ΔR_P 、 ΔR_{ET_0} 、 ΔR_n 分别为年均降水量、潜在蒸散发、下垫面变化引起的天然径流变化。

不同因素变化引起的天然径流变化对实测径流变化的贡献率 C_x 为

$$C_x = \frac{|\Delta R_x|}{|\Delta R_P| + |\Delta R_{ET_0}| + |\Delta R_n|} (1 - C_W) \times 100\% \quad (7)$$

式中 x 表示 P 、 ET_0 或 n 。

3 结果与分析

3.1 突变检验结果

图3为西辽河流域郑家屯断面1956—2020年径流变化趋势,从图3可以看出,西辽河流域实测径流以0.17亿 m^3/a 的速度显著减少($p=0.005$)。基于 Mann-Kendall 检验和滑动 t 检验识别1956—2020年径流突变发生年份,结果如图4所示。

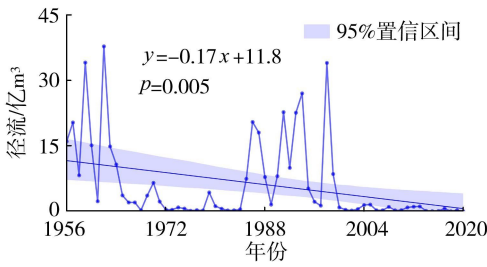


图3 郑家屯断面 1956—2020 年径流变化趋势

Fig. 3 Runoff change trend in Zhengjiatun section from 1956 to 2020

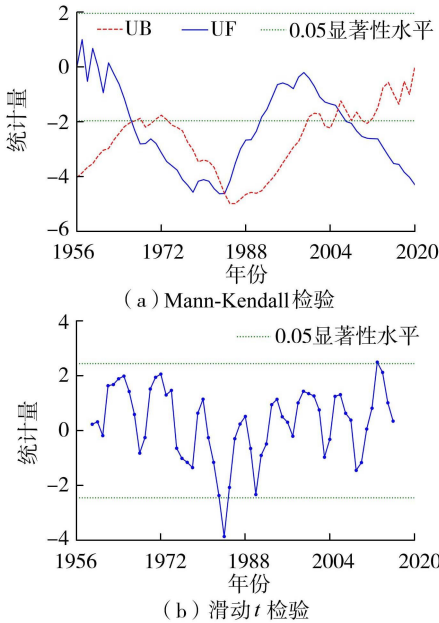


图4 径流突变年份 Mann-Kendall 检验和滑动 t 检验结果

Fig. 4 Results of Mann-Kendall test and sliding t test for runoff mutation years

Mann-Kendall 检验结果表明,流域年径流在 1966 年、1984 年和 2005 年左右经历了 3 次突变(图 4(a));滑动 t 检验结果表明,突变发生在 1984 年左右(图 4(b))。综合考虑认为,西辽河流域年径流在 1984 年左右发生了强突变,而在 1966 年和 2005 年左右发生了弱突变。为更深刻认识西辽河流域的径流变化,按时间跨度分两个层次开展研究:①聚焦长时间跨度,分析 1956—2020 年径流系列在 1984 年突变发生前后的变化特征和各因素对径流衰减的贡献;②聚焦短时间跨度,分析 1956—1983 年径流系列在 1966 年突变发生前后以及 1984—2020 年径流系列在 2005 年发生突变前后

表 1 实测径流与影响因素在影响期相较于基准期的变化

Table 1 Changes in observed runoff and influencing factors during influencing period compared to baseline period

时段	基准期	影响期	$\Delta R_M /$ 亿 m^3	$\Delta W /$ 亿 m^3	$\Delta R_w /$ 亿 m^3	$\Delta P /$ 亿 m^3	$\Delta R_p /$ 亿 m^3	$\Delta ET_0 /$ 亿 m^3	$\Delta R_{ET_0} /$ 亿 m^3	Δn	$\Delta R_n /$ 亿 m^3
1956—2020 年	1956—1983 年	1984—2020 年	-1.12	1.58	-1.58	4.59	0.55	22.91	-0.82	-0.04	0.72
1956—1983 年	1956—1965 年	1966—1983 年	-13.60	3.84	-3.84	-42.65	-5.90	1.34	-0.05	0.19	-3.81
1984—2020 年	1984—2004 年	2005—2020 年	-8.79	0.24	-0.24	-19.12	-2.53	22.90	-0.89	0.24	-5.13

注: ΔW 为年均人类用耗水变化量。下同。

的变化特征。

3.2 西辽河流域实测径流变化归因分析

西辽河流域实测径流与影响因素在影响期相较于基准期的变化如表 1 所示,不同因素对径流衰减的贡献率如表 2 所示。1956—2020 年,人类用耗水、潜在蒸散发分别以 0.063 亿 m^3/a 和 0.93 亿 m^3/a 的速度显著增加,降水量以 0.27 亿 m^3/a 的速度减少,下垫面参数 n 呈现增大的趋势。在该时期,西辽河流域影响期(1984—2020 年)的年均实测径流相较于基准期(1956—1983 年)减少了 1.12 亿 m^3 。从各因素影响期相对于基准期的变化来看,人类用耗水变化直接导致年均径流减少了 1.58 亿 m^3 ;年降水量增加了 4.59 亿 m^3 ,使年均径流增加了 0.55 亿 m^3 ;潜在蒸散发的增加提升了流域耗水能力^[27],使年均径流减少了 0.82 亿 m^3 ;下垫面变化造成年均径流增加了 0.72 亿 m^3 。由此可知,1956—2020 年,人类用耗水、降水、潜在蒸散发和下垫面变化对西辽河流域实测径流衰减的贡献率分别为 77.4%、5.9%、8.8% 和 7.9%,人类用耗水的影响起绝对主导作用。以降水和潜在蒸散发为主体的气候变化对西辽河流域实测径流衰减的贡献率(14.7%)远小于人类活动的贡献率(85.3%)。不同于西辽河流域,基于降水-径流关系的研究结果表明,土地利用变化对海河流域 1961—2018 年径流衰减的贡献超过 69.4%,是径流变化的主导因素^[28]。

进一步分析 1956—1983 年、1984—2020 年两个短时间跨度内西辽河流域径流的变化与成因。1956—1983 年,流域年均实测径流在 1966 年发生突变后(1966—1983 年)相对于突变前(1956—1965 年)减少了 13.60 亿 m^3 。其中,年降水量减少了 42.65 亿 m^3 ,导致年均径流减少 5.90 亿 m^3 ,贡献率达到 43.4%,是该时段径流衰减最主要的影响因素;人类用耗水变化导致年均径流减少 3.84 亿 m^3 ,贡献率为 28.2%;下垫面改变对径流衰减的贡献率为 28.0%;潜在蒸散发变化不大,对径流衰减的贡献率仅 0.4%。而 1984—2020 年,流域年均径流在突变后(2005—2020 年)相对于突变前(1984—2004 年)同样在减少,减少量达到 8.79 亿 m^3 ,其中人类用耗水、降水、潜在蒸散发和下垫面变化对径流衰

表 2 不同因素对径流衰减的贡献率

Table 2 Contribution rates of different influencing factors to runoff attenuation

时段	$C_w/\%$	$C_p/\%$	$C_{ET_0}/\%$	$C_n/\%$
1956—2020 年	77.4	5.9	8.8	7.9
1956—1983 年	28.2	43.3	0.4	28.0
1984—2020 年	2.8	28.8	10.1	58.3

减的贡献率分别为 2.8%、28.8%、10.1% 和 58.3%。可以看出,近 30 年中,下垫面改变对径流衰减起到了主要作用,其次是降水。究其原因,一方面可能由于上游水土保持建设提高了水源涵养能力,另一方面,平原区耕地向草地的扩张也极大改变了流域产水特性^[29-30]。1984—2020 年人类用耗水已经处于高水平,突变后多年平均值(13.96 亿 m^3) 相对突变前(13.72 亿 m^3) 仅增加 0.24 亿 m^3 , 因此对径流衰减的贡献率为 2.8%。而对于黑河流域上游,基于 Budyko 假设的研究结果表明,2005—2015 年的降水增加是径流变化的主要因素^[31]。

从长、短两个时间跨度上对西辽河流域径流变化成因分析来看,西辽河流域径流在突变前后均呈衰减趋势。虽然从长时期看,人类用耗水的增加在径流衰减过程中起主导作用,但在强突变前后的较短时间周期内,降水变化的贡献更大,分别达到 1956—1983 年的 43.4% 和 1984—2020 年的 28.8%。究其原因,人类用耗水是一个长期增长的过程,而降水的年际变幅很大,易在短期内体现,而在长期则会出现“坦化”。从 20 世纪 80 年代中期以来,以水土保持和草、耕地转换为主要特征的下垫面变化极大影响了流域径流。

3.3 西辽河三大支流流域实测径流变化归因分析

由于不同流域气象和人类活动差异,老哈河、西拉木伦河和乌力吉木仁河流域的实测径流变化与主导因素均有显著不同,具体见表 3 和表 4。相比 1956—1983 年,1984—2020 年老哈河和西拉木伦河流域年均实测径流分别减少 4.22 亿 m^3 和

表 3 各支流流域实测径流与影响因素在影响期相较基准期的变化

Table 3 Changes in observed runoff and influencing factors in each tributary basin during influencing period compared to baseline period

支流	时段	$\Delta R_m/\text{亿 } m^3$	$\Delta W/\text{亿 } m^3$	$\Delta R_w/\text{亿 } m^3$	$\Delta P/\text{亿 } m^3$	$\Delta R_p/\text{亿 } m^3$	$\Delta ET_0/\text{亿 } m^3$	$\Delta R_{ET_0}/\text{亿 } m^3$	Δn	$\Delta R_n/\text{亿 } m^3$
老哈河	1956—2020 年	-4.22	1.48	-1.48	-0.74	0.77	5.04	-0.28	0.50	-3.23
	1956—1983 年	-4.99	0.16	-0.16	-8.36	-0.70	-0.53	0.04	0.47	-4.17
	1984—2020 年	-3.54	2.68	-2.68	-4.76	-0.73	3.97	-0.20	-0.02	0.07
西拉木伦河	1956—2020 年	-2.34	1.17	-1.17	1.45	0.34	7.18	-0.46	0.09	-1.05
	1956—1983 年	-3.02	1.13	-1.13	-4.84	-1.21	0.42	-0.03	0.05	-0.65
	1984—2020 年	-5.71	1.44	-1.44	-5.08	-1.06	5.41	-0.31	0.28	-2.90
乌力吉木仁河	1956—2020 年	0.97	0.55	-0.55	4.01	-0.09	3.61	-0.13	0.49	1.74
	1956—1983 年	-1.51	0.38	-0.38	-2.59	-0.91	1.05	-0.03	0.06	-0.19
	1984—2020 年	-3.40	0.45	-0.45	-4.47	-0.61	3.02	-0.11	0.54	-2.23

2.34 亿 m^3 , 而乌力吉木仁河流域实测径流却有微弱增加, 年均径流提高了 0.97 亿 m^3 。从不同影响因素的贡献看, 下垫面改变对老哈河和乌力吉木仁河流域的径流变化均起到了主导作用, 贡献率分别为 49.0% 和 65.1%, 但对老哈河流域径流起到减少作用, 而对乌力吉木仁河流域径流起到增加作用; 人类用耗水变化对于西拉木伦河流域径流衰减的贡献率最大, 达到 50.1%。1980—2018 年, 西辽河上游草地转化为林地和耕地的面积分别为 7719.09 km^2 和 6014.9 km^2 ^[32], 使得流域截留蒸发量和冠层蒸腾能力增加^[33], 进而导致老哈河流域径流衰减。不同于老哈河, 20 世纪 80 年代中期以后, 乌力吉木仁河流域上游山区森林植被遭到严重破坏, 荒漠化面积增加, 流域调蓄能力显著降低, 导致径流系数增加^[34-35], 因此下垫面变化导致径流显著增加(1.74 亿 m^3)。总体上, 以人类用耗水和下垫面改变为主要特征的人类活动在 1956—2020 年各支流流域径流变化过程中起绝对主导作用, 贡献率在 78.5%~91.7% 之间, 这与全流域上的分析结果相一致。

从短时间跨度上看, 下垫面变化对老哈河流域径流衰减的贡献突出体现在 1956—1983 年, 贡献率高达 82.2%, 随后在 1984—2020 年大幅下降到 1.8%。相较之下, 下垫面变化对西拉木伦河和乌力吉木仁河流域径流变化的贡献率则分别从 1956—1983 年的 21.6% 和 12.6% 增加到 1984—2020 年的 50.9% 和 65.5%。近年来, 以水土保持为主的下垫面变化对西拉木伦河流域径流衰减贡献巨大, 西拉木伦河流域的赤峰市 2000 年流动沙丘面积为 28.9 万 hm^2 , 2015 年缩减为 18.1 万 hm^2 ^[36]。1984—2020 年, 人类活动主导了各支流流域径流变化, 贡献率在 76.1%~78.7% 之间。值得注意的是, 老哈河流域近年用耗水激增, 年均增加值为 2.68 亿 m^3 , 超过了西拉木伦河和乌力吉木仁河流域年均用耗水增加值之和

表 4 不同因素对各支流流域实测径流变化的贡献率

Table 4 Contribution rates of different influencing factors to observed runoff change in each tributary basin

支流流域	时段	$C_W/\%$	$C_P/\%$	$C_{ET_0}/\%$	$C_n/\%$
老哈河	1956—2020 年	35.1	11.7	4.2	49.0
	1956—1983 年	3.2	13.8	0.8	82.2
	1984—2020 年	76.0	17.5	4.7	1.8
西拉木伦河	1956—2020 年	50.1	9.1	12.4	28.4
	1956—1983 年	37.4	40.1	0.9	21.6
	1984—2020 年	25.2	18.5	5.4	50.9
乌力吉木仁河	1956—2020 年	26.6	3.5	4.8	65.1
	1956—1983 年	25.1	60.0	2.3	12.6
	1984—2020 年	13.2	18.1	3.2	65.5

(1.89 亿 m^3),对径流衰减的贡献率为 76.0%。此外,包含降水和潜在蒸散发的气候变化在短时间跨度上对各支流流域径流变化的贡献率相较长时段虽有所提高,但整体仍弱于人类活动,贡献率大多在 14.6%~41.0%之间。

4 结 语

本文针对 Budyko 假设在强人类干扰流域应用的不足,将水量平衡原理与 Budyko 假设相结合,量化了人类用耗水、降水、潜在蒸散发和下垫面变化对西辽河流域及其 3 大支流流域径流衰减的贡献。1956—2020 年,西辽河流域实测径流在 1984 年左右发生了强突变,突变后年均径流相对突变前减少了 1.12 亿 m^3 ,人类用耗水、降水、潜在蒸散发和下垫面变化对径流衰减的贡献率分别为 77.4%、5.9%、8.8% 和 7.9%。在短时间跨度上,年降水量的减少是造成 1956—1983 年径流衰减的主要原因,贡献率为 43.4%;而对于 1984—2020 年的径流变化,下垫面变化成为主导因素,贡献率达到 58.3%,其次是降水变化,贡献率为 28.8%。从各支流看,人类活动在 1956—2020 年径流变化过程中起绝对主导作用,贡献率在 78.5%~91.7%,这与全流域分析结果一致。气候变化在短时间跨度上对各支流流域径流变化的贡献相较长时段虽有所提高,但整体仍弱于人类活动,贡献率大多在 14.6%~41.0%之间。

参考文献:

[1] 陈忠升,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化[J].地理学报,2011,66(1):89-98. (CHEN Zhongsheng, CHEN Yanning, LI Weihong, et al. Changes of runoff consumption and its human influence intensity in the mainstream of Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 89-98. (in Chinese))

[2] 沈嘉聚,杨汉波,刘志武,等.长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析[J].水资源保护,2023,39(1):119-126. (SHEN Jiaju, YANG Hanbo, LIU Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 119-126. (in Chinese))

[3] 何玉芬,杨汉波,唐莉华,等.北大沙河流域径流变化归因分析[J].水资源保护,2022,38(4):95-101. (HE Yufen, YANG Hanbo, TANG Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 95-101. (in Chinese))

[4] JIANG Chong, WANG Fei. Temporal changes of streamflow and its causes in the Liao River Basin over the period of 1953-2011, northeastern China[J]. CATENA, 2016, 145: 227-238.

[5] 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))

[6] 汪昊燃,王容,黄鹏年,等.水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):25-30. (WANG Haoran, WANG Rong, HUANG Pengnian, et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 25-30. (in Chinese))

[7] 杨胜天,鱼京善,娄和震,等.遥感水文模型研究综述[J].地理学报,2023,78(7):1691-1702. (YANG Shengtian, YU Jingshan, LOU Hezhen, et al. Review of the remote sensing hydrological model[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1691-1702. (in Chinese))

[8] 汤秋鸿,徐锡蒙,贺莉,等.黄河中游生态水文模型及洪旱灾害风险评估[J].地理学报,2023,78(7):1666-1676. (TANG Qiuhong, XU Ximeng, HE Li, et al. Development of an eco-hydrological model for flood and drought risk assessment under a changing environment in the middle reaches of the Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1666-1676. (in Chinese))

[9] JIANG Chong, LI Daiqing, WANG Dewang, et al. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change[J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 199-211.

[10] FU Jianyu, LIU Bingjun, WANG Weiguang, et al. Evaluating main drivers of runoff changes across China

- from 1956 to 2000 by using different Budyko-based elasticity methods [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 329: 117070.
- [11] DU C, SUN F, YU J, et al. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 393-409.
- [12] 宫丽娟, 刘丹, 赵慧颖, 等. 西辽河地区植被气候生产潜力及其对气候变化的响应 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 866-875. (GONG Lijuan, LIU Dan, ZHAO Huiying, et al. Evolution of vegetation climatic potential productivity and its response to climate change in west Liao River Basin [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(5): 866-875. (in Chinese))
- [13] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭, 等. 西辽河流域近 60 年来气候变化趋势分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 62-66. (SUN Xiaozhou, FENG Zhiming, YANG Yanzhao, et al. The climate change trend in Xiliao River basin in recent 60 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 62-66. (in Chinese))
- [14] 王西琴, 李力. 西辽河断流问题及解决对策 [J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(6): 79-83. (WANG Xiqin, LI Li. The drying-up of the Western Liaohe River and the countermeasures to the problem [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(6): 79-83. (in Chinese))
- [15] 李成振, 孙万光. 西辽河平原区水资源供需平衡分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 56-61. (LI Chengzhen, SUN Wanguang. Analysis of water resources supply-demand balance in the plain of West Liaohe River [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(1): 56-61. (in Chinese))
- [16] DING Yongxia, PENG Shouzhong. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(1/2): 79-94.
- [17] DING Yongxia, PENG Shouzhong. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [18] PENG Shouzhong, DING Yongxia, LIU Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [19] PENG Shouzhong, DING Yongxia, WEN Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [20] 张姝琪, 张洪波, 辛琛, 等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 58-67. (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] BUDYKO M I. *Climate and life* [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [23] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮海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))
- [24] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算 [J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31. (FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 刘永佳, 黄生志, 李紫妍, 等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值及其动态变化: 以渭河流域为例 [J]. *灾害学*, 2022, 37(4): 107-114. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, LI Ziyen, et al. Propagation threshold and pgnamic changes of meteorological drought to hydrological drought of different levels: a case study of Weihe River Basin [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(4): 107-114. (in Chinese))
- [28] BAI Xuelian, ZHAO Wenzhi. Impacts of climate change and anthropogenic stressors on runoff variations in major river basins in China since 1950 [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165349.
- [29] MIAO Chiyuan, YANG Lin, LIU Baoyuan, et al. Streamflow changes and its influencing factors in the mainstream of the Songhua River basin, Northeast China over the past 50 years [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(3): 489-499.
- [30] 王国庆, 金君良, 王金星, 等. 辽河流域径流对气候变化的响应特征研究 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(4): 433-

440. (WANG Guoqing, JIN Junliang, WANG Jinxing, et al. Study on hydrological characteristics of Liaohe River Basin in response to climate change [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(4): 433-440. (in Chinese))
- [31] 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 Qiuju, LI Zhanling, WANG Jie. 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. (in Chinese))
- [32] 陈慧敏, 赵宇, 付晓, 等. 西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 948-961. (CHEN Huimin, ZHAO Yu, FU Xiao, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution and influence mechanism of habitat quality in the upper reaches of the West Liaohe River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 948-961. (in Chinese))
- [33] 王志春, 张治楠, 辛岩, 等. 近 35 年来老哈河流域湿地关键区景观格局演变及其驱动力[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(11): 143-148. (WANG Zhichun, ZHANG Zhinan, XIN Yan, et al. Landscape pattern evolution of wetland critical areas in Laoha River Basin and driving forces in recent 35 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(11): 143-148. (in Chinese))
- [34] 谢平, 刘媛, 杨桂莲, 等. 乌力吉木仁河三级区水资源变异及归因分析[J]. *水文*, 2012, 32(2): 39-43. (XIE Ping, LIU Yuan, YANG Guilian, et al. Attribution analysis of water resources alteration in the Third Grade Wulijimurenhe [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(2): 39-43. (in Chinese))
- [35] 王卫光, 邹佳成, 邓超. 赣江流域多种数据同化方案的径流模拟比较[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 1047-1056. (WANG Weiguang, ZOU Jiacheng, DENG Chao. Comparison of data assimilation based approach for daily streamflow simulation under multiple scenarios in Ganjiang River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1047-1056. (in Chinese))
- [36] 李秀军. 赤峰市水土保持在抗灾防灾中的效果[J]. *海峡科技与产业*, 2018(3): 47-48. (LI Xiujun. The effectiveness of soil and water conservation in disaster resistance and prevention in Chifeng City [J]. *Technology and Industry Across the Straits*, 2018(3): 47-48. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-22 编辑: 施业)

(上接第 103 页)

- [24] 魏红艳, 梁艳洁, 陈萌, 等. 基于 Roe 格式的不规则地形上浅水模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(1): 7-12. (WEI Hongyan, LIANG Yanjie, CHEN Meng, et al. Simulation of shallow water on irregular topographies based on approximate Riemann solver of Roe [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(1): 7-12. (in Chinese))
- [25] XIA Xilin, LIANG Qihua, MING Xiaodong, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3730-3759.
- [26] GUO J C Y, MACKENZIE K A, MOMMANDI A. Design of street sump inlet [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(11): 1000-1004.
- [27] VASCONCELOS J G, WRIGHT S J, ROE P L. Improved simulation of flow regime transition in sewers: two-component pressure approach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(6): 553-562.
- [28] 张大伟, 向立云, 姜晓明, 等. 基于 Godunov 格式的排水管网水流数值模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 911-921. (ZHANG Dawei, XIANG Liyun, JIANG Xiaoming, et al. Numerical simulation of drainage network flows based on Godunov scheme [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 911-921. (in Chinese))
- [29] SANDERS B F, BRADFORD S F. Network implementation of the two-component pressure approach for transient flow in storm sewers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(2): 158-172.
- [30] LEÓN A S, LIU X F, GHIDAoui M S, et al. Junction and drop-shaft boundary conditions for modeling free-surface, pressurized, and mixed free-surface pressurized transient flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(10): 705-715.
- [31] DONG Boliang, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: case study of the "7 · 20" flood event in Zhengzhou, China [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [32] SCHUBERT J E, SANDERS B F. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 41: 49-64.
- [33] LEE S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Urban inundation simulation considering road network and building configurations [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2016, 9(3): 224-233.
- [34] MIGNOT E, LI X F, DEWALS B J. Experimental modelling of urban flooding: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 334-342.

(收稿日期: 2024-03-02 编辑: 王芳)