

我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征

徐宗学^{1,2}, 班春广³, 张 瑞⁴

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120;
4. 华北科技学院应急技术与管理学院, 河北 廊坊 065201)

摘要:从径流演变规律主要分析方法和主要河川径流演变规律、径流主要归因方法和主要河川径流归因分析、案例分析、我国主要河川径流演变规律与径流归因分析区域分布特征4个方面系统总结和梳理了我国近年来在主要河川径流演变规律与归因及其区域特征研究方面取得的主要研究成果。结果表明: Mann-Kendall 非参数趋势检验方法是较为常用的径流演变规律分析方法, 水文模型法、统计分析方法和 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法是进行径流变化归因分析的常用方法, 其中 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法应用较为广泛; 我国主要河川径流量除西北诸河和西南河流源区部分河流呈增加趋势外, 其他区域河川径流大多呈减少趋势; 人类活动是引起我国主要河川径流变化的主要原因。

关键词: 河川径流; 气候变化; 人类活动; 演变规律; 归因分析

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)01-0001-08

Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China//XU Zongxue^{1,2}, BAN Chunguang³, ZHANG Rui⁴ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. North China Power Engineering Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China; 4. School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: Major research results achieved in China during the past recent years were systematically reviewed and summarized from four aspects, including main analysis methods and main evolution laws of river runoff, main attribution methods and main attribution analysis of river runoff, case study analysis, as well as the regional distribution characteristics of the main runoff evolution laws and runoff attribution analysis in China. The results show that the Mann-Kendall non-parametric trend test method is a commonly used method for analyzing runoff evolution law. Hydrological modeling method, statistical analysis method, and the coupled energy-water balance equation based on Budyko hypothesis are commonly applied methods for attribution analysis of runoff changes, among which the coupled energy-water balance equation based on Budyko hypothesis is widely employed. Except for the rivers in the northwest regions and southwestern rivers showing an increasing trend, the runoff of major rivers in other regions of China is decreasing. Human activities are the main cause of runoff variations for major rivers in China.

Key words: river runoff; climate change; human activities; evolution law; attribution analysis

气候变化和人类活动是变化环境的两个重要方面,也是导致水文循环变化的根本原因,二者共同作用改变了江河湖泊的水量、水质以及其他水循环要素的状态。气候变化改变了全球水文循环现状,引起地球上太阳辐射分布状况发生变化,影响天然蒸发、水汽输送和降水时空分布,对水文循环产生直接影响^[1-2]。人类活动主要通过3种方式对水循环要素产生影响^[3]:①通过改变土地利用和河道整治等

影响流域产汇流条件;②通过跨流域调水和地下水开采等工程措施直接改变流域水量;③通过建设水库等蓄水工程影响河道汇流过程。研究气候变化和人类活动对河川径流的影响,对于水资源开发利用、优化配置和生态保护等具有十分重要的现实意义。

在变化环境下,我国河川径流演变规律发生了显著变化,河川的径流量和径流季节分配发生了明显改变。许多学者针对我国长江、黄河、珠江、海河、

淮河、辽河、松花江、雅鲁藏布江等大江大河河川径流演变规律和径流归因分析等开展了广泛且深入的研究,并取得了一些卓有成效的成果。本文系统梳理了近年来我国主要河川径流演变规律,总结了河川径流演变的主要归因方法,并以雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析为案例开展研究,最后,总结得到变化环境下我国主要河川径流演变规律与径流归因区域分布特征,以期为我国水资源综合利用和优化配置提供科技支撑。

1 变化环境下径流演变规律

1.1 径流演变规律主要分析方法

目前,径流演变规律的主要分析方法有:①径流趋势分析方法,包括 Mann-Kendall 非参数趋势检验法^[4-5](以下简称“M-K 法”)、Spearman 秩次相关检验法^[6]、累积距平法^[6]、线性回归法^[6]、滑动平均法^[6];②径流突变分析方法,包括 M-K 法、滑动 t 检验、Pettitt 法;③径流年内变化规律分析方法,包括径流集中度和径流集中期^[7];④径流周期性研究方

法;集合经验模态分解法^[8]、功率谱分析法^[6]、小波分析法^[6]。表 1 为各种分析方法的优点。

1.2 我国主要河川径流演变规律

在气候变化和人类活动影响下,我国主要河川径流演变规律发生了显著变化,许多学者针对该变化开展了大量研究,如表 2 所示。王雁等^[11]利用 1951—2008 年长江和黄河流域径流资料研究了径流演变规律,发现长江流域上游径流减少趋势显著,中游和下游径流呈微弱减少趋势,黄河干流径流量呈显著递减趋势;鲍振鑫等^[12]分析了 1956—2016 年黄河流域年、月径流演变规律,结果表明除源头区年径流变化不显著外,黄河流域径流呈显著减少趋势,从上游到下游径流减少幅度不断增加,趋势显著性增加;潘扎荣等^[13]基于淮河干流 1956—2008 年资料研究了径流演变规律,发现淮河干流年径流量总体呈递减趋势,中游递减趋势较上游明显;张利茹等^[14]采用 M-K 法及线性回归方法研究了海河流域各典型区域年径流量变化趋势,结果表明海河流域年径流量呈显著减少趋势;牟夏等^[15]利用 M-K 法、

表 1 径流演变规律主要分析方法的优点

类别	主要分析方法	优点
径流趋势分析方法	M-K 法	不受异常值干扰,适用于时间序列非正态分布情况
	Spearman 秩次相关检验法	直观给出时间序列增减趋势的显著性
	累积距平法	常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法
	线性回归法	较为简单地判断时间序列增减情况
	滑动平均法	有效去除异常点波动影响,直观展示时间序列变化趋势 ^[8]
径流突变分析方法	M-K 法	可以明确突变开始时间,指出突变区域
	滑动 t 检验	能够检测到时间序列数据的变化,可以适应不同的窗口大小和重叠程度
	Pettitt 检验	直接利用秩序列检测突变点
径流年内变化规律分析方法	径流集中度 径流集中期	能够反映径流在年内集中程度及最大径流量出现时段
径流周期性研究方法	集合经验模态分解法	具有自适应优点,有效减小模态混叠程度 ^[9]
	功率谱分析法	能够确定序列隐含的显著周期 ^[6]
	小波分析法	具有时域和频域上局部化功能,识别不同时间尺度主要变化周期 ^[10]

表 2 20 世纪 50 年代以来我国主要河川径流演变规律

河流	集水面积/万 km ²	时段	分析方法	径流变化趋势	参考文献
长江	180	1951—2008 年	M-K 法	显著、微弱减少	王雁等 ^[11]
黄河	75.2	1951—2008 年	M-K 法	显著减少	王雁等 ^[11]
黄河	79.5	1956—2016 年	M-K 法	显著减少	鲍振鑫等 ^[12]
淮河	1.02、3.06、8.86、12.1	1956—2008 年	M-K 法、累积距平法	减少	潘扎荣等 ^[13]
海河	31.8	1950—2010 年	M-K 法、线性回归法	显著减少	张利茹等 ^[14]
无定河	3.03	1960—2007 年	M-K 法、有序聚类法、Yamamoto 法	显著减少	牟夏等 ^[15]
石羊河	4.16	1959—2019 年	M-K 法、累积距平法	减少	杨柳 ^[16]
黑河	12.8	1950—2000 年	线性回归法	缓慢增加	胡兴林 ^[17]
三江源	13.8、12.2、4.5、1.79	1956—2012 年	M-K 法、累积距平法、线性回归法	增加为主	蔡宜晴等 ^[8]
三江源	12.8、11.6、5.3	1958—2005 年	M-K 法	减少、变化不显著	张永勇等 ^[18]
塔里木河流域三源流	102	1956—2016 年	M-K 法	增加	刘静等 ^[19]
大凌河	2.33	1961—2010 年	M-K 法	减少-显著减少-增加-显著减少	刘鑫 ^[20]
嫩江	29.9	1956—2000 年	Spearman 法	无明显趋势	唐蕴等 ^[21]
嫩江	28.3	1956—2004 年	M-K 法、线性回归法、累积滤波器法	减少	王玉新 ^[22]
三江源	36.3	1950—2010 年	M-K 法、集合经验模态分解法、小波分析法	增加	徐宗学等 ^[23]
雅鲁藏布江	24.2	1950—2010 年	M-K 法、集合经验模态分解法、小波分析法	不显著减少	徐宗学等 ^[23]

有序聚类法、Yamamoto 法研究无定河流域径流量水文变异得到,1970—2007 年无定河流域径流量呈显著减少趋势;杨柳^[16] 基于石羊河流域 1959—2019 年径流数据研究了径流演变规律并发现,该流域径流总体呈减少趋势,减少速率为0.037 亿 m³/a;胡兴林^[17] 研究黑河流域径流演变规律,发现径流年际变化较小,径流年内分布主要受季风气候影响,1950—2000 年径流呈波动缓慢增加趋势,2000—2010 年径流仍可能缓慢增加;蔡宜晴等^[8] 基于三江源区内 4 个水文站 1956—2012 年实测月径流数据,研究得到三江源区直门达、吉迈和香达站年径流量呈增加趋势,唐乃亥站年径流量呈减少趋势;张永勇等^[18] 基于 1958—2005 年三江源3 个水文站径流数据,研究得出唐乃亥站年径流和非汛期径流过程呈显著减少趋势,直门达和昌都站径流过程变化趋势并不显著;刘静等^[19] 基于 1956—2016 年径流实测数据探讨了塔里木河流域三源流径流演变规律,结果表明阿克苏河和叶尔羌河径流量呈显著增加趋势,和田河径流量呈轻微增长趋势。刘鑫^[20] 分析了大凌河 1961—2010 年径流年际变化,发现大凌河径流整体呈减少-显著减少-增加-显著减少的趋势;唐蕴等^[21] 基于嫩江流域 1956—2000 年的年径流量数据得到,嫩江流域径流水文周期是 32a,径流整体不存在明显的趋势性;王玉新^[22] 基于 1956—2004 年嫩江干流水文站径流数据,发现年径流整体呈减少趋势,径流突变点为 20 世纪60 年代初、80 年代中和 90 年代末;徐宗学等^[23] 研究西南河流域区径流变化规律发现三江源地区径流在 1956—2012 年整体呈增加趋势,除尼洋河外,雅鲁藏布江流域的其他区域年径流量整体呈不显著减少趋势。

2 变化环境下径流归因

2.1 径流归因主要分析方法

在研究国内外主要流域径流演变规律的基础上,许多学者基于水文模型法、统计分析方法和 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法进一步开展了变化环境下径流归因分析研究,表 3 为径流归因主要分析方法。

水文模型主要包括概念性集总式水文模型、半

分布式水文模型和基于物理机制的分布式水文模型,其优势在于物理机制明确、能够反映径流变化过程,以及能应用于多个时间尺度,不足之处在于对数据精度和数据质量要求较高、计算较为复杂且不确定性较大。常用的水文模型主要包括 VIC^[24]、HBV^[25]、SIMHYD^[26]、XAJ^[27] 和 SWAT 模型^[28] 等。

统计分析方法的优势在于输入数据较少、计算过程相对简单,不足之处在于缺少物理机制、无法反映径流过程、仅能开展年尺度径流变化研究。统计分析方法包括双质量曲线法^[29] (double mass curve method)、累积量斜率变化率分析法^[29] (slope change ratio of cumulative quantity method)、双累积曲线法^[30] 等。

Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法的优势在于具有一定的物理机制、计算过程简单、参数容易计算,不足之处在于仅能应用于连续年和年尺度计算、无法反映径流变化过程^[29]。Choudhury^[31] 和 Yang 等^[32] 基于 Budyko 假设推导出流域水热耦合平衡方程,即 Choudhury-Yang 方程,其表达式为

$$E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \tag{1}$$

式中: E 为年实际蒸散发量,mm; P 为年降水量,mm; E_0 为年潜在蒸散发量,mm; n 为反映流域下垫面特征的参数。

基于流域水量平衡方程和 Choudhury-Yang 方程,计算得到:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} \tag{2}$$

式中: R 为径流深,mm; ε_P 、 ε_{E_0} 和 ε_n 分别为径流的降水(mm)、潜在蒸散发(mm)、下垫面弹性系数。

根据突变点检测结果将研究时段划分为两个子时段,两个子时段径流深变化记为 ΔR ,根据流域降水、潜在蒸散发和下垫面弹性系数,估算出降水量变化(ΔP)、潜在蒸散发量变化(ΔE_0)和下垫面变化(Δn)引起的径流变化分别为

$$\Delta R_P = \varepsilon_P (R/P) \Delta P \tag{3}$$

$$\Delta R_{E_0} = \varepsilon_{E_0} (R/E_0) \Delta E_0 \tag{4}$$

$$\Delta R_n = \varepsilon_n (R/n) \Delta n \tag{5}$$

表 3 径流归因主要分析方法

主要分析方法	优点	缺点	代表性方法
水文模型法	物理机制明确、能够反映径流变化过程,能够应用于多个时间尺度	对数据精度和数据质量要求较高,计算较为复杂,不确定性较大	VIC、HBV、SIMHYD、XAJ、SWAT
统计分析方法	输入数据较少,计算过程相对简单	缺少物理机制,无法反映径流过程,仅能开展年尺度径流变化研究	双质量曲线法、累积量斜率变化率分析法、双累积曲线法
Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法	具有一定的物理机制,计算过程简单,参数容易计算	仅能应用于连续年和年尺度计算,无法反映径流变化过程	弹性系数法、敏感系数法、互补法、分解法

2.2 我国主要河川径流归因

河川径流的归因问题是水文科学领域研究的热点和难点问题之一,科学揭示径流变化的主要驱动机制,建立径流变化和各驱动机制之间的联系成为现代水文学研究的重点。表4为我国主要河川径流变化的归因分析结果。王雁等^[11]采用1951—2008年长江和黄河流域径流资料分析了径流减少原因,结果表明,相较于1951—1969年,1970—2008年长江流域和黄河流域人类活动是引起径流量减少的主要因素,降水是引起径流量减少的次要因素。Luan等^[29]采用包括统计方法、敏感系数方法、水文模型法在内的8种方法研究了黄河流域20个主要子流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献,结果表明人类活动在径流变化中起主导作用。王国庆等^[33]基于SIMHYD概念性降水径流模型研究得到1970—1999年气候因素和人类活动分别占汾河流域年径流减少量的35.9%和64.1%,人类活动是汾河流域径流减少的主要因素。张丽梅等^[34]基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法定量评价了渭河流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献率,结果表明剧烈的人类活动引起的下垫面变化是径流量减少的主要因素。刘酌希等^[35]基于SWAT模型研究了洮河流域1955—2015年径流减少原因,结果表明气候变化和人类活动对径流变化的贡献分别为58.9%和41.1%,气候变化是径流减少的主要原因。牟夏等^[15]研究得到无定河流域1970—2007年径流呈减少趋势,基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法量化出气候变化和人类活动对径流量减少的贡献分别为36.57%和63.43%。Wu等^[36]研究了黄土高原17个流域1961—2013年径流变化及归因,结果表明15个流域呈减少趋势,在汛期人类活动占径流减少的贡献为73%,在枯水期气候变化对径流减少的影响大于人类活动。李天生等^[37]基于Budyko理论分析了珠江中上游流域气候和植被变化对径流的影响,结果表明1981—2013年降水量减少是径流量减少的主导因素,归一化植被指数(NDVI)对径流减少贡献影响并不显著。Bao等^[38]利用VIC模型研究得到人类活动是引起海河流域径流减少的主要因素。Xu等^[39]基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法研究了海河流域内33个山区子流域1956—2005年径流变化,发现气候变化和植被覆盖变化对径流减少的平均贡献分别为26.9%和73.1%。Wang等^[40]基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法研究了白洋淀流域径流变化得出,气候变化和下垫面变化对径流减少的贡献分别为7.55%和89.95%。莫崇勋等^[41]基于弹性系数法定量分析了永定河流域

1957—2010年的径流呈减少趋势的原因,结果表明永定河流域由气候变化引起的径流变化率为28%,人类活动引起的径流变化率为72%。Ma等^[42]基于分布式水文模型GBHM和气候弹性系数模型开展了潮白河流域1956—2005年径流减少归因分析,发现气候变化和人类活动对径流减少的贡献分别为55%和18%。彭涛等^[43]基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法研究汉江流域1964—2015年径流变化归因分析,结果表明下垫面变化是汉江流域径流量减少的主要因素。徐宗学等^[23]研究西南河河源区径流驱动机制得出,气候变化是导致三江源、雅鲁藏布江和怒江流域径流变化的主要原因,降水是径流变化最关键的影响因子。张树磊等^[44]采用基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方法,研究了中国1960—2010年以来径流量显著减少的主要流域,结果表明降水减少和下垫面变化是径流减少的主导因素。

表4 我国主要河川径流归因分析结果

河流	径流变化	径流归因	参考文献
长江、黄河	径流减少	人类活动 ^① 、降水 ^②	王雁等 ^[11]
黄河流域 20个子流域	径流减少	人类活动 ^①	Luan等 ^[29]
汾河	径流减少	人类活动 ^① 、气候变化 ^②	王国庆等 ^[33]
渭河	径流减少	人类活动 ^①	张丽梅等 ^[34]
洮河	径流减少	气候变化 ^① 、人类活动 ^②	刘酌希等 ^[35]
无定河	径流减少	人类活动 ^① 、气候变化 ^②	牟夏等 ^[15]
黄土高原 17个流域	径流减少	汛期:人类活动 ^① 、气候变化 ^② ; 枯水期:气候变化 ^① 、人类活动 ^②	Wu等 ^[36]
珠江中上游	径流减少	降水量减少 ^①	李天生等 ^[37]
海河	径流减少	人类活动 ^①	Bao等 ^[38]
海河33个 山区流域	径流减少	植被覆盖变化 ^① 、气候变化 ^②	Xu等 ^[39]
白洋淀	径流减少	下垫面变化 ^① 、气候变化 ^②	Wang等 ^[40]
永定河	径流减少	人类活动 ^① 、气候变化 ^②	莫崇勋等 ^[41]
潮白河	径流减少	气候变化 ^① 、人类活动 ^②	Ma等 ^[42]
汉江	径流减少	下垫面变化 ^①	彭涛等 ^[43]
三江源、雅鲁 藏布江、怒江	径流减少	气候变化 ^①	徐宗学等 ^[23]
中国主要河流	径流减少	降水减少 ^① 、下垫面变化 ^①	张树磊等 ^[44]

注:①、②分别代表主导因素和次要因素。

3 案例分析

以雅鲁藏布江流域为例进行径流演变规律与径流归因分析。雅鲁藏布江位于青藏高原东南部,发源于杰玛央宗冰川,于巴昔卡流出国境,是我国重要

的国际性河流。干流全长 2 057 km,流域面积约 24 万 km²,雅鲁藏布江水量丰富,蕴含丰富的淡水资源,在西藏地区和下游国家社会经济发展中发挥着十分重要的作用^[45]。因此,本文选取雅鲁藏布江流域为应用案例,研究其径流演变规律与径流归因。

3.1 雅鲁藏布江流域径流演变规律

黄俊雄等^[46]分析了雅鲁藏布江流域 1956—2000 年年径流演变规律,结果表明流域径流总体呈减少趋势,演变过程中表现出明显的阶段性和突变性。洛珠尼玛等^[47]利用雅鲁藏布江上中下游控制站 1960—2009 年年平均流量数据研究流域径流演变规律,发现流域径流 20 世纪 60 年代最丰,80 年代最枯,年平均流量总体上略有减少趋势,但不显著。张建云等^[48]采用 1956—2018 年雅鲁藏布江奴下水文站实测数据分析了流域径流演变特征,发现河川径流呈增加趋势,年径流呈先增加后减少、再增加又减少的阶段特征。李浩等^[49]利用雅鲁藏布江奴下水文站 1961—2015 年逐月流量数据分析了径流演变规律,发现年径流量呈先减少后增加的变化趋势,转折点为 1992 年,径流年内分配规律呈“坦化现象”。以上研究表明,采用不同时段和类型的径流数据以及不同的分析方法,研究得到的雅鲁藏布江径流演变规律存在差异,表明径流数据和分析方法对径流演变规律影响较大。此外,研究的时段不同,所得结果也会有差别。

3.2 雅鲁藏布江流域径流归因

采用 Pettitt 检验、滑动 *t* 检验和 M-K 法检验年径流量突变点,同时采用 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法对雅鲁藏布江流域径流变化进行归因分析^[45,50]。考虑到冰川在流域内占有不可忽略的比例,因此冰川径流变化在径流归因分析中应重点考虑。

基于雅鲁藏布江干流上 3 座水文站(奴各沙、羊村和奴下)的位置信息划分出 4 个子流域:奴各沙以上流域、奴各沙至羊村段流域、羊村至奴下段流域和奴下站以下流域。由于奴下站以下流域缺少相应的水文资料,无法进行径流归因分析,因此选取其他 3 个子流域进行径流归因分析,并定义奴各沙以上流域为上游、奴各沙至羊村段流域为中游、羊村至奴下段流域为下游。上中下游径流量分别为奴各沙站实测径流量、羊村站和奴各沙站径流量的差值、奴下站与羊村站径流量的差值。

经过 3 种统计方法检测,得出各子流域的突变点位于 1997 年左右,因此选取 1997 年作为各子流域的突变点,以此划分径流变化的基准期(1966—1997 年)和变化期(1998—2015 年)。基于 Budyko 框架进行雅鲁藏布江流域径流变化归因分析可知,在上游降水量变化、潜在蒸散量变化、下垫面变化、

冰川径流变化引起径流量增加的贡献分别为 -0.81、-1.54、14.34、14.30 mm,与其对应的贡献率分别为 -2.78%、-5.30%、59.61%、49.18%,对中游径流量增加的相应贡献分别为 33.77、-1.16、31.24、22.34 mm,对应的贡献率分别为 39.36%、-1.36%、36.4%、26.04%,对下游径流量增加的贡献分别为 26.71、-0.04、-12.14、6.16 mm,对应的贡献率分别为 129.21%、-0.17%、-55.74%、29.8%。

上述结果表明,下垫面变化和冰川径流变化对上游径流增加的贡献占主导地位,降水量的变化对中游径流的增加影响最大,冰川径流对上中下游的贡献率均超过 26%。通过对全流域径流量归因分析得出,径流各影响因素对径流增加的贡献率分别为 39.62%、-2.74%、32.32%、30.94%,表明除了降水因素,下垫面变化和冰川径流变化对径流变化具有重要作用。

4 我国主要河川径流演变规律与径流归因区域分布特征

由于地形地貌、地理位置、流域面积、水文气象、土壤植被等方面存在较大差异,加之受到人类活动的影响程度不同,全国范围内主要河川径流呈现不同的演变特征,同时径流归因方面也呈现出明显的变化特征。因此,总结归纳我国主要河川径流演变规律与径流归因区域分布特征具有重要意义。

4.1 我国主要河川径流演变特征区域性规律

自 20 世纪 50 年代以来我国河川径流在变化环境下出现显著性或非显著性变化,呈现区域性演变特征。长江流域上游径流减少趋势显著,中下游径流减少趋势较为微弱;黄河流域干流径流量呈显著减少趋势^[11];海河流域各典型区域年径流量呈显著减少趋势^[14];淮河流域干流年径流量呈递减趋势,中游递减趋势较上游显著^[13];在华北地区,永定河流域和潮白河流域径流均呈减少趋势^[41-42];嫩江流域径流呈减少趋势,突变点位于 20 世纪 60 年代初、80 年代中和 90 年代末^[51];珠江流域径流以 -2.69 mm/a 的速率减少^[52];西北诸河流域,黑河流域径流在 1950—2000 年呈波动缓慢增加趋势,2000—2010 年仍可能缓慢增加^[17],阿克苏河和叶尔羌河流域径流量增加明显,和田河流域径流量呈轻微增加趋势;西南河流域源区、三江源区径流表现出增加趋势,除尼洋河外雅鲁藏布江流域年径流量呈不显著减少趋势。

整体而言,长江流域、黄河流域、海河流域、华北地区、淮河流域、嫩江流域、珠江流域径流均呈减少趋势,西北诸河和西南河流域源区部分河流呈缓慢增加趋势。因此,过去几十年以来我国主要河川径流

量除西北诸河和西南河流域部分河流呈增加趋势外,其他区域的河川径流大多呈减少趋势。

4.2 我国主要河川径流归因区域分布特征

人类活动是造成长江流域和黄河流域径流减少的主要因素^[11],也是引起海河流域径流变化的主要原因。在珠江中上游流域,有研究表明以降水量减少为标志的气候变化是导致径流量减少的主要原因^[37]。在华北地区,人类活动是造成永定河流域径流减少的主要原因,气候变化是引起潮白河流域径流减少的主要原因。在西南河流域,气候变化是引起三江源、雅鲁藏布江和怒江流域径流变化的主要原因^[23]。

综上所述,长江流域、黄河流域、海河流域、华北地区部分河川径流减少均为人类活动引起,珠江中上游流域、华北地区部分河流、西南河流域区径流减少多为气候变化引起。因此,我国主要河川径流变化的主要原因是由人类活动引起的,这一研究结论与张树磊等^[44]研究得到的人类活动导致的下垫面变化对径流减少影响较为显著的结论一致。

5 结 论

a. M-K 非参数趋势检验方法是较为常用的径流演变规律分析方法。水文模型法、统计分析方法和 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法是进行径流变化归因分析的常用方法,其中 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法应用较为广泛。

b. 我国主要河川径流量除西北诸河和西南河流域部分河流呈增加趋势外,其他区域河川径流大多呈减少趋势。

c. 人类活动是引起我国主要河川径流变化的主要原因。

参考文献:

[1] 张建云,王国庆,刘九夫,等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江,2009,40(8):39-41. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, LIU Jiufu, et al. Review on worldwide studies for impact of climate change on water[J]. Yangtze River, 2009, 40(8):39-41. (in Chinese))

[2] 徐宗学,李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):450-459. (XU Zongxue, LI Jingyu. Progress in hydrological sciences: past, present and future[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4):450-459. (in Chinese))

[3] REN Liliang, YUAN Shanshui, YANG Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2):117-121.

[4] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J].

Econometrica, 1945, 13(3):245-259.

[5] 许钦,叶鸣,蔡晶,等. 1956—2018 年太湖流域降水统计特征及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(1):127-132. (XU Qin, YE Ming, CAI Jing, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):127-132. (in Chinese))

[6] 石朋,詹慧婕,瞿思敏,等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3):80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):80-86. (in Chinese))

[7] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学, 2007, 27(6):791-795. (LIU Xianzhao, LI Jiazhzhu, SU Qing, et al. Interannual runoff distribution based on degree and time of concentration for rivers[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(6):791-795. (in Chinese))

[8] 蔡宜晴,李其江,刘希胜,等. 三江源区径流演变规律分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10):1-5. (CAI Yiqing, LI Qijiang, LIU Xisheng, et al. Variation characteristics of runoff time series in the source region of Three Rivers [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(10):1-5. (in Chinese))

[9] 张晶,赵雪花. 基于 EEMD 的漳泽水库年径流周期分析[J]. 水力发电, 2015, 41(2):8-11. (ZHANG Jing, ZHAO Xuehua. A periodic analysis of annual runoff time series in Zhangze Reservoir based on EEMD [J]. Water Power, 2015, 41(2):8-11. (in Chinese))

[10] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3):41-45. (PAN Guoying, QIN Yongtai, MA Yafen, et al. Research on variation characteristics of runoff in Danhe River Basin based on R/S and Morlet wavelet analysis [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(3):41-45. (in Chinese))

[11] 王雁,丁永建,叶柏生,等. 黄河与长江流域水资源变化原因[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(7):1207-1219. (WANG Yan, DING Yongjian, YE Baisheng, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008 [J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(7):1207-1219. (in Chinese))

[12] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 1956—2016 年黄河流域河川径流演变规律[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5):52-57. (BAO Zhenxin, YAN Xiaolin, WANG Guoqing, et al. The trend in streamflow of the Yellow River Basin during 1956-2016 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5):52-57. (in Chinese))

[13] 潘扎荣,阮晓红,朱愿福,等. 近 50 年来淮河干流径流演变规律分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1):51-55.

- (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, ZHU Yuanfu, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of Huaihe River in the past 50 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 51-55. (in Chinese))
- [14] 张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 59-66. (ZHANG Liru, HE Yonghui, TANG Yueping, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 59-66. (in Chinese))
- [15] 牟夏, 刘强, 平凡, 等. 1960—2007 年无定河流域径流情势变化及其归因分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 465-471. (MOU Xia, LIU Qiang, PING Fan, et al. Analysis of changes in annual streamflow and its influence factors in Wuding River Basin in the last 50 years (1960-2007) [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(4): 465-471. (in Chinese))
- [16] 杨柳. 石羊河流域水资源演变规律分析及径流模拟的研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [17] 胡兴林. 黑河流域径流演变规律及区域性水资源优化配置分析[J]. 水文, 2003, 23(1): 32-36. (HU Xinglin. Analysis on runoff variation regularity and regional water resources optimum allocation in the Heihe River Basin [J]. Hydrology, 2003, 23(1): 32-36. (in Chinese))
- [18] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 71-82. (ZHANG Yongyong, ZHANG Shifeng, ZHAI Xiaoyan, et al. Runoff variation in the Three Rivers Source Region and its response to climate change [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 71-82. (in Chinese))
- [19] 刘静, 龙爱华, 李江, 等. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 10-17. (LIU Jing, LONG Aihua, LI Jiang, et al. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 10-17. (in Chinese))
- [20] 刘鑫. 大凌河流域径流演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 165-170. (LIU Xin. Analysis of variation characteristics of runoff in Dalinghe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 165-170. (in Chinese))
- [21] 唐蕴, 王浩, 严登华, 等. 嫩江流域近 45 年来径流演变规律研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 864-868. (TANG Yun, WANG Hao, YAN Denghua, et al. Evolutionary regularity of runoff of Nenjiang River Basin in period 1956-2000 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(6): 864-868. (in Chinese))
- [22] 王玉新. 嫩江流域径流演变规律及其归因分析[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [23] 徐宗学, 周祖昊, 姜瑶, 等. 西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 360-374. (XU Zongxue, ZHOU Zuhao, JIANG Yao, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of southwestern rivers [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 360-374. (in Chinese))
- [24] LIANG Xu, WOOD E F, LETTENMAIER D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification[J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1/2/3/4): 195-206.
- [25] SEIBERT J. Estimation of parameter uncertainty in the HBV model[J]. Nordic Hydrology, 1997, 28(4/5): 247-262.
- [26] CHIEW F H S, PEEL M C, WESTERN A W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD [M]//SINGH V P, FREVERT D. Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 2002.
- [27] ZHAO Renjun. The Xinanjiang model applied in China [J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1/2/3/4): 371-281.
- [28] ARNOLD J R, SRINIVASAN S, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [29] LUAN Jinkai, ZHANG Yongqiang, MA Ning, et al. Evaluating the uncertainty of eight approaches for separating the impacts of climate change and human activities on streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126605.
- [30] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1941-1951. (QIN Lihuan, ZHOU Jingxiang, LI Xuyong, et al. Attribution analysis of changes in runoff in the upstream of the Miyun Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1941-1951. (in Chinese))
- [31] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [32] 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): 893-897.
- [33] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River Basin of the middle Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 853-858. (in Chinese))
- [34] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7607-7617. (ZHANG Limei, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Attribution of runoff variation in the Wei River Basin based on the Budyko hypothesis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7607-7617. (in Chinese))
- [35] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变

- 化归因[J]. 水土保持研究,2020,27(5):87-92. (LIU Zhuoxi, CHEN Xin, GUAN Xiaoxiang, et al. Attribution of runoff change in the Taohe River Basin under a changing environment [J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(5):87-92. (in Chinese))
- [36] WU Jingwen, MIAO Chiyuang, WANG Yamei, et al. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods[J]. Journal of Hydrology,2017,545:263-275.
- [37] 李天生,夏军. 基于 Budyko 理论分析珠江流域中上游地区气候与植被变化对径流的影响[J]. 地球科学进展,2018,33(12):1248-1258. (LI Tiansheng, XIA Jun. Analysis of the influence of climate and vegetation change on runoff in the middle and upper reaches of the Pearl River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Advances in Earth Science,2018,33(12):1248-1258. (in Chinese))
- [38] BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River Basin, Northern China: climate variability or human activities? [J]. Journal of Hydrology,2012,460-461:117-129.
- [39] 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.
- [40] WANG Henian, LYU Xizhi, ZHANG Manyin. Sensitivity and attribution analysis based on the Budyko hypothesis for streamflow change in the Baiyangdian Catchment, China[J]. Ecological Indicators,2021,121:107221.
- [41] 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))
- [42] MA Huan, YANG Dawen, TAN S K, et al. Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment[J]. Journal of Hydrology,2010,389(3/4):317-324.
- [43] 彭涛,梅子玮,董晓华,等. 基于 Budyko 假设的汉江流域径流变化归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1114-1124. (PENG Tao, MEI Ziyi, DONG Xiaohua, et al. Attribution of runoff changes in the Hanjiang River Basin based on Budyko hypothesis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1114-1124. (in Chinese))
- [44] 张树磊,杨大文,杨汉波,等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展,2015,26(5):605-613. (ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960-2010[J]. Advances in Water Science,2015,26(5):605-613. (in Chinese))
- [45] 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))
- [46] 黄俊雄,徐宗学,巩同梁. 雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析[J]. 水文,2007,27(5):31-35. (HUANG Junxiong, XU Zongxue, GONG Tongliang. Characteristics and driving factors of the runoff variations in the Yarlung Zangbo River [J]. Journal of China Hydrology,2007,27(5):31-35. (in Chinese))
- [47] 洛珠尼玛,王建群,徐幸仪. 雅鲁藏布江流域径流变化特征及趋势分析[J]. 水文,2011,31(5):76-79. (LUOZHU Nima, WANG Jianqun, XU Xingyi. Characteristics and trend analysis of runoff variation in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Journal of China Hydrology,2011,31(5):76-79. (in Chinese))
- [48] 张建云,刘九夫,金君良,等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊,2019,34(11):1264-1273. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2019,34(11):1264-1273. (in Chinese))
- [49] 李浩,牛乾坤,王宣宣,等. 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J]. 水土保持学报,2021,35(1):110-115. (LI Hao, NIU Qiankun, WANG Xuanxuan, et al. Variation characteristics of runoff in the Yarlung Zangbo River Basin from 1961 to 2015[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(1):110-115. (in Chinese))
- [50] XIN Jiali, SUN Xiaoyu, LIU Liu, et al. Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting [J]. Hydrological Processes,2021,35(3):e14069.
- [51] 李镇洋,李国芳,高倩雨,等. 变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):35-40. (LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Runoff response of Fulaerji station in Nenjiang River under changing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):35-40. (in Chinese))
- [52] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2):153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):153-161. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-13 编辑:俞云利)