

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.001

中国主要江河径流变化成因定量分析

王国庆^{1,2,3}, 张建云^{1,2,3}, 管晓祥^{3,4}, 鲍振鑫^{1,3}, 刘艳丽^{1,3},
贺瑞敏^{1,3}, 金君良^{1,2,3}, 刘翠善^{1,3}, 陈鑫^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029;
4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 变化环境下中国主要江河实测径流量发生了较为明显的变化, 科学理清径流变化原因是流域水资源评价和管理的重要基础工作。基于中国七大江河代表性水文站 1956—2018 年的实测径流量资料, 诊断了变化环境下水文序列的变异性特征; 采用水文模拟途径, 定量评估了不同驱动要素对径流变化的影响。结果表明: ① 淮河、长江和珠江实测径流量变异性特征不明显, 相比而言, 北方主要江河实测年径流量系列存在较为明显的突变性, 但最显著的变异点发生时间存在差异, 变异前后降水径流关系发生较大变化。② RCCC-WBM 模型能够较好模拟中国南方湿润区和北方干旱区江河天然径流量过程, 该模型可以用来还原人类活动影响期间的天然径流量。③ 总体来看, 人类活动对中国北方江河径流量的影响大于气候变化的影响, 气候变化是中国淮河及其以南江河径流变化的主要原因。

关键词: 径流变化; 中国主要江河; 归因识别; RCCC-WBM 模型

中图分类号: TV121.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)03-0313-11

全球变暖背景下的强烈人类活动正在快速改变着区域的自然环境^[1-2], 水是受环境变化最为直接和敏感的要害^[3-4], 在气候变化和强人类活动共同作用下, 干旱地区的河川径流锐减^[5-6], 湿润地区的洪涝事件增多增强^[7-9], 河流水文情势的变化对区域生态平衡和流域水资源管理带来严峻挑战^[10-11]。自然和人类活动作用下河川径流演变及归因识别是国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)最新十年科学研究计划“Panta Rhei—Everything Flows”的核心研究主题之一^[12]。同时, 定量评估气候变化和人类活动对河川径流变化的影响, 也是流域科学治理开发、区域水资源评价及水安全保障的重要基础工作^[13-14]。

河川径流源于降水, 气温升高、降水变化对区域水资源具有直接的影响^[15]。研究表明, 气温升高对寒区径流及其特征影响显著, 温升导致融雪径流峰值提前, 冬春季径流量增大^[16]; 对半干旱地区来说, 温度升高、蒸发增大可能会进一步加剧区域水资源短缺情势^[17]。全球变暖背景下, 由于极端降水事件增多, 湿润地区洪涝情势可能会进一步加剧^[18], 城市洪涝问题愈加突出^[23]; 相比而言, 干旱地区河川径流对气候变化更为敏感^[4,19]。大型水利工程修建、水土保持工程、土地利用变化等人类活动通过影响区域的产汇流条件进而可对流域水文过程产生一定影响^[13,20]。水库的建设和运行, 不会明显减少年径流量, 但能够较大程度上改变径流的年内分配^[21]。以林地、草地、梯田等为主要特征的水土保持措施具有明显的拦蓄地表径流的能力, 试验结果表明, 中等降雨条件下, 与裸地相比, 林地可以减少 60%~80% 的地表径流量^[20]; 草地的径流模数约为裸地的 60%~75%^[22]; 相比而言, 城市地区径流模量要比裸地高得多^[23]。不同气候变化情景和多种人类活动使得流域的产汇流机制更为复杂。

收稿日期: 2019-10-01; **网络出版日期:** 2020-04-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200413.1930.007.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601501); 国家自然科学基金资助项目(41830863)

作者简介: 王国庆(1971—), 男, 山东成武人, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化对水文水资源影响方面研究。

E-mail: gqwang@nhri.cn

流域水文模型可以动态模拟不同环境变化情景下的水文过程^[13,24-25],是定量化分析不同驱动要素河川径流变化的重要工具^[26-28]。王国庆等^[29]基于流域水文模拟,提出了变化环境下径流变化归因定量识别方法,并应用于分析气候变化和人类活动对黄河中游汾河流域河川径流变化的影响,发现人类活动是汾河径流减少的主要原因。Wang 等^[30]诊断了海河流域潮白河径流变化原因,结果表明,人类活动的影响占该流域径流减少的 50% 以上。对渭河、老哈河、岚漪河等中国北方河流的研究表明,人类活动是中国北方河流径流多年均值的减少的主要原因,气候变化为次要驱动因素,但气候变化的影响呈逐步加强的趋势^[31-34]。Zhou 等^[35]研究表明,人类社会经济活动和气候变化对珠江流域东江径流变化的贡献分别为 42% 和 58%;杨倩等^[36]研究表明,气候变化对长江最大支流汉江石泉水文站年径流减少的贡献率为 65% ~ 68%,气候变化是近 56 年径流减少的主要原因;全球变暖影响下,天山山区冰川和积雪融化导致该区域近半个多世纪以来径流量呈现增加趋势^[37]。目前,关于径流变化归因的研究,大多集中在中小尺度流域,对中国主要江河和大尺度流域的研究相对欠缺^[38]。

中国幅员辽阔,不同地区水文气候要素变化复杂,系统理清中国不同区域河川径流变化及其归因,对变化环境下水资源开发利用与管理非常重要。基于中国七大江河的干流代表性水文站实测流量资料,系统诊断 1956—2018 年径流的变异性特征,定量分析气候变化和人类活动对径流变化的影响,以期为未来江河治理、水资源开发利用与管理提供参考依据。

1 数据资料

以中国七大江河为研究对象,在干流选取了 8 个代表性水文站,选取原则主要考虑具有较为完整的长序列实测资料和控制流域面积尽可能大两个方面。所选的水文站分别为松花江哈尔滨站、辽河铁岭站、黄河花园口站、长江大通站、淮河吴家渡站、珠江梧州站;由于海河流域由潮白河、永定河、大清河等 8 条河流组成,在海河流域选了 2 个控制面积相对较大的观台站(岳城水库入库站)和石匣里站(官厅水库入库站),基本上代表了海河南北区的水文情势。表 1 给出了所选 8 个代表性水文站的基本信息。

表 1 中国主要江河代表性水文站基本信息

Table 1 Basic information of the eight representative hydrological stations on major rivers in China

序号	河流	站名	纬度	经度	面积/km ²	年径流深/mm
1	松花江	哈尔滨	45°46′	126°35′	389 769	102.9
2	辽河	铁岭	42°20′	123°50′	120 764	22.8
3	海河	石匣里	40°13′	114°37′	23 627	15.0
4	海河	观台	36°20′	114°05′	17 800	42.8
5	黄河	花园口	34°25′	113°50′	730 036	49.0
6	淮河	吴家渡	32°56′	117°23′	121 330	215.2
7	长江	大通	30°46′	117°37′	1 705 383	518.2
8	珠江	梧州	23°28′	111°20′	327 006	615.5

本文全面收集了所选 8 个重点水文站 1956—2018 年的实测流量资料以及同时期全国基于 0.25°格点的气象资料,气象资料从中国气象局共享资料网获得。

2 径流变化归因定量识别方法

江河径流的变化是气候变化、流域下垫面变化和经济社会发展的用水变化等共同影响的综合结果。流域下垫面变化和用水增加等可以认为是人类活动影响的结果。因此,目前一般将成因分析的重点放在气候变化

和人类活动的贡献率方面。王国庆等^[29]提出了基于水文模拟的径流变化归因定量识别方法。该方法包括三部分内容:

(1) 采用有序聚类分析法诊断径流序列突变点选择天然基准期,即优化寻找最佳分割点,使同类之间的离差平方和较小,而异类之间的离差平方和较大。有序聚类分析法是目前较为有效的序列变异(突变)诊断方法,并已广泛应用于水文、气象等序列的变异(突变)性分析^[39-40]。

(2) 水量模拟模型。选用水利部应对气候变化研究中心研发的 RCCC-WBM 水量平衡模型(Water Balance Model developed by Research Center for Climate Change, RCCC-WBM)模拟还原流域天然径流量过程。该模型属于大尺度水文模型,具有结构简单、参数较少、易于理解、对资料要求不高等优点。模型以月为时间尺度,输入包括逐月降水、水面蒸发和气温,模拟的径流量包括地面径流、地下径流和融雪径流3种成分^[15]。对于较小尺度流域,该模型可以根据流域平均气象要素集总式模拟水文过程;对于中大尺度流域,该模型可将研究流域进行格点划分,进行水文过程的分分布式模拟^[25,41]。选用 Nash-Sutcliffe 模型效率系数(E_{NS})和模拟总量相对误差(E_R)为目标函数进行模型参数优化^[42]。

(3) 成因分析模型。利用人类活动扰动前(假定无人类活动,或人类活动不明显,称为“天然基准期”)的水文资料来率定水文模型参数,应用人类活动扰动后(突变点之后,称为“人类活动显著期”)的气象资料序列和“天然基准期”资料率定的模型参数,模拟计算“人类活动显著期”的径流过程。水文系列突变点前后的径流变化总量包括两部分:气候要素变化的影响和人类活动的影响。突变点前后天然径流量的差异是由气候变化引起的,人类活动显著期实测径流过程与模拟的天然径流量(由天然基准期率定参数计算得到)的差异则是人类活动的影响量。因此,径流变化归因定量识别方法的两个关键环节分别是径流突变点的诊断(即天然基准期和人类活动显著期的识别)和天然径流量的还原^[13,29]。径流变化归因定量识别模型如下:

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (1)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (2)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (3)$$

$$\eta_H = \Delta W_H / \Delta W_T \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_C = \Delta W_C / \Delta W_T \times 100\% \quad (5)$$

式中: ΔW_T 为径流总变化量; ΔW_H 、 ΔW_C 分别为人类活动和气候变化引起的径流变化量; W_B 为基准期径流量; W_{HR} 、 W_{HN} 分别为人类活动影响期实测与还原(模拟)的径流量; η_H 、 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流变化的贡献率。

3 结果与讨论

3.1 1956—2018 年实测径流量突变点诊断

河流水文过程是降水在自然条件和人类社会活动综合作用下的流域响应。当流域发生明显人类活动后,河流水文的自然过程受到破坏,相应发生趋势性变化或跳跃性突变。根据中国七大江河8个重点水文站1956—2018年实测年径流量系列,采用有序聚类分析方法诊断了年径流量系列的突变性特征(表2)。

表2诊断结果表明:①长江大通站、淮河吴家渡站和珠江梧州站年径流量系列不存在明显的变异点。②其余各站突变性特征明显,但突变发生的年份存在差异。辽河铁岭站年径流量系列突变发生年份相对较早(1965年,图1),海河流域的石匣里站和观台站年径流量系列突变分别发生在20世纪60年末和70年代中期(1969年和1977年),黄河花园口站年径流量系列突变发生在20世纪80年代中期(1985年),而松花江哈尔滨站径流量系列在21世纪初发生突变(2003年)。③上述突变点诊断结果与各流域实际的人类活动基本一致。

表 2 中国主要江河代表性水文站年径流量系列突变诊断结果

Table 2 Detection of abrupt change year of the representative hydrometric stations on the major rivers in China

序号	河流	水文站	突变年份	序号	河流	水文站	突变年份
1	松花江	哈尔滨	2003	5	黄河	花园口	1985
2	辽河	铁岭	1965	6	淮河	吴家渡	不明显
3	海河	石匣里	1969	7	长江	大通	不明显
4	海河	观台	1977	8	珠江	梧州	不明显

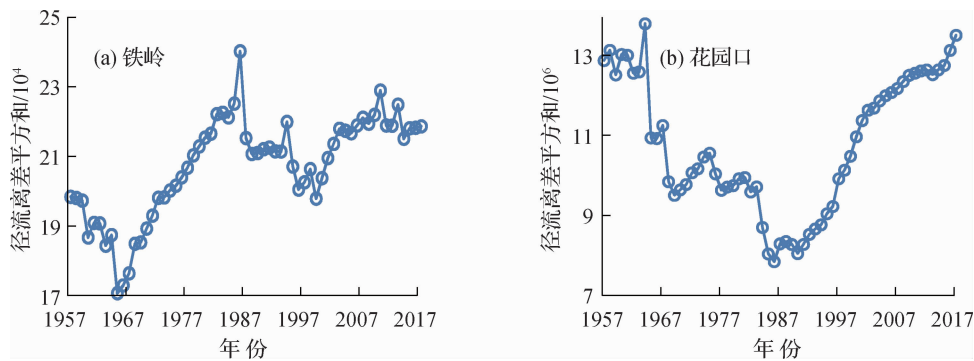


图 1 铁岭站和花园口站实测年径流量系列突变诊断结果

Fig. 1 Detection of abrupt change in annual runoff series of the Tieling station and the Huayankou station

强烈的人类活动是流域水文过程发生显著变化的重要原因，可以具体表现为降水径流关系的变化^[43-45]。图 2 给出了各个代表性流域在径流显著突变前后的降水径流关系，对于突变不明显的 3 个代表性流域点绘了 1956—1979 年、1980—2018 年两个阶段的降水径流关系。

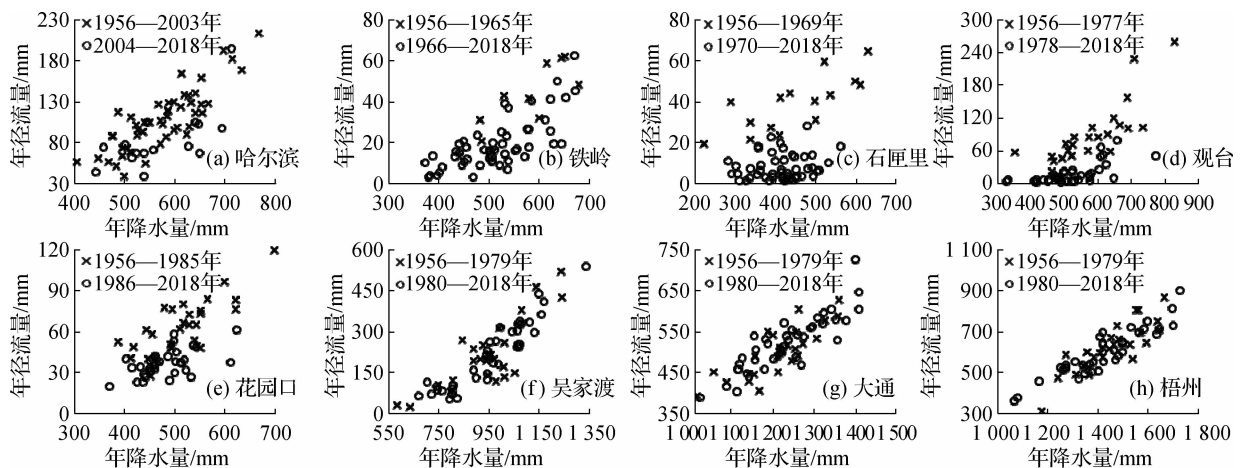


图 2 中国主要江河不同时期降水径流关系

Fig. 2 Relationships between runoff and precipitation during the different periods for major rivers in China

由图 2 可以看出：① 淮河及其以南湿润地区的 3 个流域降水径流关系较好，二者的相关系数多在 0.72 以上，黄河及其以北干旱半干旱地区的 5 个流域降水径流关系相对散乱，特别是海河石匣里站，降水径流的相关系数低于 0.24；② 淮河(吴家渡)、长江(大通)和珠江(梧州)在 2 个不同时期的点群较为集中，降水径流关系并没有发生明显变化，表明在相同降水条件下，流域产流量也基本相当，人类活动等要素对河川径流影响不是主要原因；③ 对于北方 5 个代表性流域而言，突变之前的降水径流相关性高于突变之后的降水径

流相关性。此外，突变之后的降水径流点群相对偏低，表明在同样降水条件下突变之后期间的产流量相对偏小。不同时期降水径流关系的变化突显了人类活动对河川径流的影响程度差异迥异。

3.2 模型参数率定及天然径流过程模拟

利用径流突变年份之前的资料系列进行模型参数率定和模型验证。对于没有检测出径流突变的流域，采用全系列进行参数率定和水文模拟。表 3 给出了 8 个研究流域月流量模拟效果。

表 3 中国主要江河月径流量模拟效果
Table 3 Simulation results of monthly runoff during 1956—1965 for major rivers in China

河流	水文站	率定期			验证期		
		资料系列	$E_{NS}/\%$	$E_R/\%$	资料系列	$E_{NS}/\%$	$E_R/\%$
松花江	哈尔滨	1956—1990 年	68.2	1.4	1991—2003 年	66.7	-2.6
辽河	铁岭	1956—1962 年	63.5	-2.7	1963—1965 年	65.5	3.3
海河	石匣里	1956—1965 年	67.5	-4.9	1965—1969 年	65.0	4.4
	观台	1956—1969 年	84.4	-3.1	1970—1977 年	73.6	3.7
黄河	花园口	1956—1974 年	68.9	-2.2	1975—1985 年	65.8	2.6
淮河	吴家渡	1956—1999 年	63.4	2.5	2000—2018 年	68.5	-4.6
长江	大通	1956—1999 年	76.2	-0.4	2000—2018 年	78.4	1.0
珠江	梧州	1956—1999 年	77.8	-1.7	2000—2018 年	86.8	2.2

由表 3 可以看出，每个流域率定期和验证期的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数均在 0.6 以上，模拟总量相对误差也较小，介于 $\pm 5\%$ 之间。统计结果表明，模型对 8 个典型流域突变年份之前径流总量模拟误差较小，介于 $\pm 1\%$ 以内。图 3 给出了海河流域观台站和长江大通站 1956—1965 年实测与模拟的月流量过程，由图可以看出，实测与模拟的月流量过程总体拟合良好。结合表 3 充分说明 RCCC-WBM 模型不仅可以较好模拟湿润区大尺度流域水文过程，而且也能够较好地模拟出干旱区典型流域的水文过程，模拟精度满足水资源评价的要求，可以用来模拟还原人类活动影响期间的天然径流量过程。

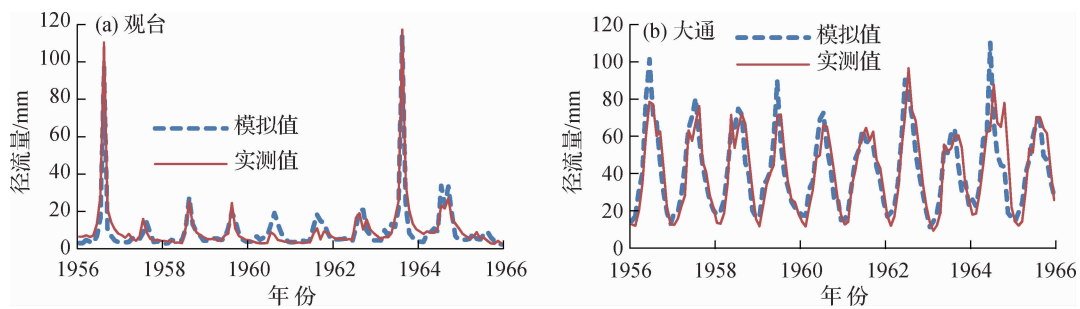


图 3 观台站和大通站 1956—1965 年实测与模拟月流量过程
Fig. 3 Recorded and simulated monthly runoff of the Guantai station and the Datong station during 1956—1965

各研究流域应用突变点前水文序列率定的模型参数，对 1956—2018 年的水文过程进行模拟分析，可以认为是该流域的“天然径流量过程”。图 4 给出了 1956—2018 年实测与模拟的年流量过程，可以看出：① 黄河及其以北河流实测径流量与模拟径流量在径流系列突变年份之前总体拟合较好，但突变年份之后的模拟径流量明显大于实测径流量，说明人类活动的影响使得实测河川径流量变小。② 淮河、长江和珠江流域 1956—2018 年实测年径流量与模拟径流量总体吻合，只是在个别年份存在模拟值偏高的情况，特别是一些来水相对较枯的年份，说明尽管人类活动影响下南方河流径流量并没有发生较为明显的突变，但在较枯年份人类活动对河川径流的影响相对明显。

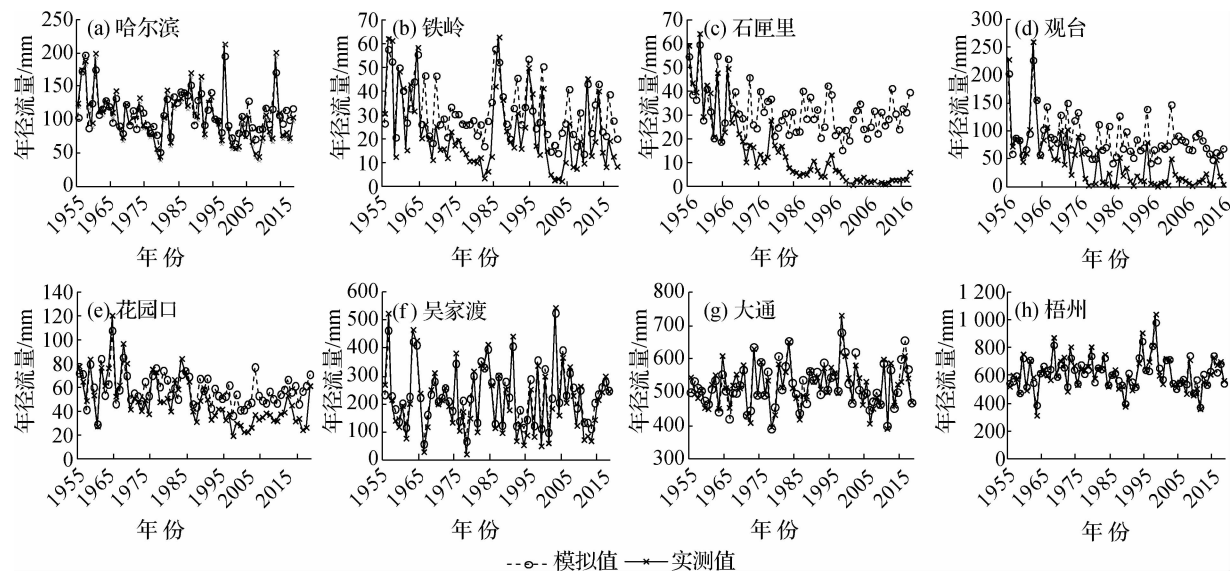


图 4 中国主要江河 1956—2018 年实测与模拟年径流量过程
Fig. 4 The recorded and naturalized annual runoff during 1956—2018 for major rivers in China

3.3 径流变化归因定量识别

前述径流突变诊断结果表明，实测径流量突变在黄河及其以北的河流明显存在，淮河及其以南江河由于水量充沛，河川径流量受人类活动的影响相对较小，降水径流关系基本稳定，并没有发生明显变化。因此，仅对径流显著变化的中国北方江河径流进行归因定量识别，表 4 给出了我国北方河流径流变化归因定量识别结果，可以看出：

(1) 松花江哈尔滨站实测年径流突变发生在 2003 年，2004—2018 年实测径流量较基准期 1956—2003 年减少 25.2 mm，其中，人类活动的影响量为 -17.6 mm，占径流减少总量的 69.8%，气候变化的影响量为 -7.6，占径流减少总量的 30.2%，人类活动的影响是松花江流域径流减少的主要原因。

表 4 气候变化和人类活动对中国北方河流径流量的影响

Table 4 Impacts of climate change and human activities on runoff of the northern major rivers in China

河流	站名	时段	实测径流量/ mm	天然径流量/ mm	总变化量/ mm	人类活动影响		气候变化影响	
						绝对影响/mm	相对影响/%	绝对影响/mm	相对影响/%
松花江	哈尔滨	1956—2003 年	108.7						
		2004—2018 年	83.4	101.0	-25.2	-17.6	69.8	-7.6	30.2
		1956—1965 年	39.9						
辽河	铁岭	1966—2000 年	21.5	31.7	-18.4	-10.2	55.4	-8.2	44.6
		2001—2018 年	15.5	27.1	-24.4	-11.6	47.6	-12.8	52.4
		1956—1969 年	38.7						
海河	石匣里	1970—2000 年	11.2	29.4	-27.5	-18.2	66.2	-9.3	33.8
		2001—2018 年	2.9	29.5	-35.8	-26.6	74.3	-9.2	25.7
		1956—1977 年	91.1						
海河	观台	1978—2000 年	18.0	73.6	-73.1	-55.6	76.1	-17.5	23.9
		2001—2018 年	15.4	78.4	-75.7	-63.0	83.2	-12.7	16.8
		1956—1985 年	61.8						
黄河	花园口	1986—2000 年	36.9	49.6	-24.9	-12.7	51.0	-12.2	49.0
		2001—2018 年	36.0	55.8	-26.0	-19.8	76.2	-6.2	23.8

(2) 辽河铁岭站实测年径流量系列突变发生在1965年,相比于基准期1956—1965年,1966—2000年和2001—2018年实测年径流分别减少18.4 mm和24.4 mm;人类活动和气候变化在1966—2000年期间的影响量分别为-10.2 mm和-8.2 mm,人类活动是该时期径流减少的主要原因;21世纪以来,人类活动和气候变化的影响量分别为-11.6 mm和-12.8 mm,气候变化对河川径流的影响约为52.6%,与人类活动影响贡献率基本相当。

(3) 海河石匣里站实测年径流量系列突变发生在1969年,以1956—1969年为基准期,1970—2010年和2001—2018年实测径流量较基准期分别减少27.5 mm和35.8 mm;人类活动在这两个时期的贡献分别占径流减少的66.2%和74.3%,是径流减少的主要原因。气候变化在这两个时期的影响基本相当,分别为-9.3 mm和-9.2 mm,占径流减少总量的33.8%和25.7%。

(4) 海河观台站实测年径流量系列最显著突变点发生在1977年,基准期1956—1977年的平均实测年径流量为91.1 mm,1978—2010年和2001—2018年实测径流量较基准期减少73.1 mm和75.7 mm;人类活动的影响分别占这两个时期径流减少量76.1%和83.2%,是径流减少的主要原因。

(5) 黄河花园口站实测年径流量系列最显著突变点发生在1985年,基准期1956—1985年平均实测径流量为61.8 mm;1986—2010年实测径流量较基准期减少24.9 mm,人类活动和气候变化的影响基本相当,分别为-12.7 mm和-12.2 mm;2001—2018年花园口站实测径流量较基准期减少26.0 mm,人类活动的影响为-19.8 mm,占径流减少总量的76.2%,是径流减少的主要原因,该时期气候变化的影响为-6.2 mm,为径流减少总量的23.8%。

在本项研究中,松花江哈尔滨站径流量系列划分为2个时期,天然期和人类活动影响期,明显可以看出人类活动影响期的实测径流量低于天然时期的实测径流量;对于其他研究流域,径流突变之后的人类活动影响期又以2000年为界分为两个时期(2000年之前和2000年之后)。可以发现,气候变化的影响均是径流减少,但在2000年前后的气候变化影响的贡献率有增有减。譬如,辽河流域在2000年之前气候变化的贡献率为44.6%,而在2000年之后,其影响贡献率增加为52.4%,这与辽河流域降水持续减少是分不开的,辽河流域在基准期平均年降水量为570 mm,而在2000年前后的两个影响期降水量减少为523 mm和490 mm,降水量的持续减少导致对径流的影响贡献率进一步增加。而对于海河流域和黄河流域,气候变化影响贡献率均有一定程度的减小,这与近些年中国雨带北移、黄淮海地区降水逐步增多有密切关系^[39,47]。对所有流域而言,人类活动影响的贡献率均具有不同程度的增加,相比而言,海河流域增加较多;如海河石匣里站,人类活动在2000年之前的影响贡献率为66.2%,而在2000年之后的近20年内其贡献率增加74.3%,说明随着经济社会的快速发展,流域内的人类活动不断增强,其对河川径流的影响幅度不断增加。

显然,就气候变化和人类活动对径流变化影响的贡献率而言,除辽河流域之外,人类活动对径流变化的影响率均超过50%,是径流变化的主要驱动因素。由于辽河流域2000年之后降水大幅度减少(与基准期相比减少14.2%),气候变化是该时期辽河径流减少的作用与人类活动基本相当。

3.4 讨论

径流变化归因是目前水文科学和气候变化领域研究的热点和重要科学问题。目前,水文学者针对不同河流开展了大量径流归因识别研究^[29-36]。例如,张利茹等^[46]分析了海河流域径流变化趋势及其归因,该研究以1970年之前的资料系列作为基准期,发现1970—2010年观台站实测径流量较前期减少79.6 mm,其中人类活动和人类活动的影响分别占径流总减少量的69.2%和30.8%。本文对观台站径流变化归因的分析结果表明,人类活动对径流减少的贡献超过75%,高于已有研究结果,分析认为采用的资料系列不同、选择的基准期不同是结果差异的重要原因。本文诊断结果表明观台站实测年径流量系列在1977年发生突变,那么张利茹等^[46]所采用的人类活动影响期包含了部分天然基准的时期,而根据归因识别方法原理,这部分天然时期的人类活动影响为零,均化作用降低了人类活动的贡献率。

随着经济社会的快速发展,中国用水总量不断增加,由21世纪初期的5 500亿 m^3 上升到目前的约

6 000 亿 m^3 。特别是北方地区,农业用水居高不下,生态用水、生活用水增加显著,各行业取用水增多和耗水不断增大,是河川径流减少特别是北方河川径流减少的重要原因^[47]。只是近年在实施最严格水资源制度后,用水增长的趋势得以遏制,2018 年全国用水总量为 6 015.5 亿 m^3 ,与上一年基本持平。此外,中国自 20 世纪六七十年代就开展了全国性的大规模水利工程建设,以黄河流域为例,截止目前黄河流域建有水库 3 178 座,淤地坝 52 444 座,强烈的人类活动,明显改变了水文的节律,也对河川径流产生重要影响^[48]。

还原天然径流量是开展径流变化归因识别的关键,本研究采用流域水文模拟的途径来还原天然径流量过程。尽管所采用的流域水文模拟能够较好地模拟研究流域的天然径流量过程,但由于气象水文资料的监测误差、水文模型本身的局限性以及率定模型参数的代表性等影响,模拟结果不可避免地存在一定的模拟误差。当江河径流变化量本身不大时,水文模型的模拟误差可能会对归因识别结果产生较大的影响。如何识别由于观测资料误差、模拟误差对结果带来的不确定性是未来径流变化归因定量研究的重要内容。

4 结 论

(1) 变化环境下中国淮河及其以南的长江、珠江实测径流量变化特征不明显,北方主要江河实测年径流量系列存在较为明显的变化特征,但各江河控制站水文系列突变点发生的时间存在一定的差异。

(2) 变化环境下黄河及其以北江河降水径流关系发生了不同程度的改变。江河径流的变化是气候变化和人类活动共同影响的结果。人类活动是我国北方江河径流减少的主要原因,特别是海河(永定河石匣里站和漳河观台站),2000 年之后人类活动对径流减少的贡献率超过 70%。

(3) 不同阶段淮河及其以南江河的降水径流关系基本保持不变,人类活动对河川径流的影响相对较小。

(4) RCCC-WBM 模型能够较好模拟中国南方湿润区和北方干旱区江河天然径流量过程;对中国主要江河 8 个重点水文站月径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数均在 0.6 以上,模拟总量相对误差较小,该模型可用来模拟还原人类活动影响期间的天然径流量过程。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] HAYAL D, BROOK L, EPHREM G. Identifying sustainability challenges on land and water uses: the case of Lake Ziway watershed, Ethiopia[J]. Applied Geography, 2017, 88: 130-143.
- [3] HU W J, LIU H L, BAO A M, et al. Influences of environmental changes on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(7): 985-1000.
- [4] WANG G Q, ZHANG J Y, HE R M, et al. Runoff sensitivity to climate change for hydro-climatically different catchments in China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31(4): 1011-1021.
- [5] WANG G Q, YAN X L, ZHANG J Y, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950—2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013, 4(3): 252-264.
- [6] GIUNTOLI I, RENARD B, VIDAL J P, et al. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices[J]. Journal of Hydrology, 2013, 482: 105-118.
- [7] WU C H, HUANG G R. Changes in heavy precipitation and floods in the upstream of the Beijiang River basin, South China[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(10): 2978-2992.
- [8] ZOPE P E, ELDHO T I, JOTHIPRAKASH V. Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India[J]. Natural Hazards, 2015, 75(1): 887-908.
- [9] SLATER L J, WILBY R L. Measuring the changing pulse of rivers: a 50-year data set shows changes in the seasonal timing of river floods in Europe[J]. Science, 2017, 357 (6351): 552.
- [10] ZHANG H L. Strategic study for water management in China [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2005.
- [11] WANG G Q, WANG Y Y. Managing water for sustainable utilization as China warms[J]. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 2019. [doi: 10.19080/IJESNR.2019.17.555952]

- [12] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. "Panta Rhei—Everything Flows": change in hydrology and society: the IAHS Scientific Decade 2013-2022[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58 (6): 1256-1275.
- [13] 张建云, 王国庆. 河川径流演变及归因定量识别[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (ZHANG J Y, WANG G Q. Variation of river runoff and quantitative attribution identification [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [14] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XIE P, CHEN G C, LEI H F, et al. Methodology of surface water resources assessment under a changing environment [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [15] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG J Y, WANG G Q. Impact of climate change on hydrology and water resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [16] CROSSMAN J, FUTTER M N, ONI S K, et al. Impacts of climate change on hydrology and water quality: future proofing management strategies in the Lake Simcoe watershed, Canada[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(1): 19-32.
- [17] WANG G Q, ZHANG J Y, XUAN Y Q, et al. Simulating the impact of climate change on runoff in a typical river catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(5): 1553-1561.
- [18] YE T, XU Y P, BOOIJ M J, et al. Uncertainty in future high flows in Qiantang River basin, China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 363-380.
- [19] BAO Z X, ZHANG J Y, LIU J F, et al. Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(15): 2294-2306.
- [20] 陈江南, 姚文艺, 李勉, 等. 清涧河流域不同水土保持措施配置下蓄水拦沙效益分析[J]. 水力发电, 2005, 31(6): 9-13. (CHEN J N, YAO W Y, LI M, et al. Analysis on the benefits of water and sediment interception under the conditions of different soil and water conservation measures in Qingjian River basin[J]. *Water Power*, 2005, 31(6): 9-13. (in Chinese))
- [21] 孙小方, 赵军凯. 三峡水库的径流调节作用分析[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 557-566. (SUN X F, ZHAO J K. Analysis on the runoff regulation of three gorges reservoir[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(6): 557-566. (in Chinese))
- [22] 肖胜生, 胡志坚, 张继松, 等. 鄱阳湖区典型堤防不同植草护坡产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 10-15. (XIAO S S, HU Z J, ZHANG J S, et al. Experimental study on surface runoff and sediment yield characteristics under different slope protection modes of a typical dike in Poyang Lake district[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 10-15. (in Chinese))
- [23] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II: 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25, 752-764. (SONG X M, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: urban stormwater modeling and management[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25, 752-764. (in Chinese))
- [24] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Z X. Hydrological models[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [25] 王国庆, 李健. 气候异常对黄河中游水资源影响评价网格化水文模型及其应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(6): 22-26. (WANG G Q, LI J. Grid based assessment model for climate change impact on water resources in the middle reaches of the Yellow River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(6): 22-26. (in Chinese))
- [26] NING T T, LI Z, LIU W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China[J]. *CATENA*, 2016, 147: 80-86.
- [27] LI F, ZHANG G, XU Y J. Separating the Impacts of climate variation and human activities on runoff in the Songhua River basin, Northeast China[J]. *Water*, 2014, 6(11): 3320-3338.
- [28] ZHANG J Y, WANG G Q, PAGANO T C, et al. Using hydrologic simulation to explore the impacts of climate change on runoff in the Huaihe River basin of China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(11): 1393-1399.
- [29] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流形势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858. (WANG G Q, ZHANG J Y, HE R M. 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))
- [30] WANG G S, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water bal-

- ance model; a case study of the Chaobai River basin in northern China[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45: W00A11.
- [31] 王国庆, 张建云, 鲍振鑫, 等. 人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 113-118. (WANG G Q, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Change in runoff within the lan river basin due to climate change and human activities[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 113-118. (in Chinese))
- [32] CHANG J X, WANG Y M, ISTANBULLUOGLU E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River basin, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380: 169-179.
- [33] JIANG S H, REN L L, YONG B, et al. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Lao-hahe basin in northern China using three different methods[J]. *Hydrological Process*, 2011, 25: 2492-2505.
- [34] LI B Q, LIANG Z M, ZHANG J Y, et al Attribution analysis of runoff decline in a semiarid region of the Loess Plateau, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131(1/2): 845-855.
- [35] ZHOU Y L, LAI C G, WANG Z L, et al. Quantitative evaluation of the impact of climate change and human activity on runoff change in the Dongjiang River basin, China[J]. *Water*, 2018, 10(5): 571.
- [36] 杨倩, 刘登峰, 孟宪萌, 等. 环境变化对汉江上游径流影响的定量分析[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(12): 73-84. (YANG Q, LIU D F, MENG X M, et al. Quantitative analysis of the impact of environment change on the runoff in the upper reach of the Han River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(12): 73-84. (in Chinese))
- [37] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323. (DENG H J, CHEN Y N. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions; a case study in Tianshan Mountains of Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323. (in Chinese))
- [38] LIU J, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 145-162.
- [39] 王国庆, 贾西安, 陈江南, 等. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析: 以黄河中游无定河流域为例[J]. *西北水资源与水工程*, 2001, 12(3): 13-15. (WANG G Q, JIA X A, CHEN J N, et al. Analysis on the transition point of hydrological series impacted by human activities; a case study of Wudinghe basin in the middle reach of the Yellow River[J]. *Northwest Water Resources & Water Engineering*, 2001, 12(3): 13-15. (in Chinese))
- [40] WANG G Q, ZHANG J Y, PAGANO T C, et al. Using hydrological simulation to detect human-disturbed epoch in runoff series [J]. *Water Science & Technology*, 2015, 71(5): 691-700.
- [41] WANG G Q, ZHANG J Y, JIN J L, et al. Regional calibration of a water balance model for estimating stream flow in ungauged areas of the Yellow River basin[J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 65-72.
- [42] NASH J E, SUTCLIFFE J. River flow forecasting through conceptual models: part 1; a discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10: 282-290.
- [43] 卢璐, 王琼, 王国庆, 等. 金沙江流域近 60 年气候变化趋势及径流响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 16-21. (LU L, WANG Q, WANG G Q, et al. Trend of climate change over the recent 60 years and its hydrological responses for the Jinsha River basin[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37(5): 16-21. (in Chinese))
- [44] 夏军, 乔云峰, 宋献方, 等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 70-76. (XIA J, QIAO Y F, SONG X F, et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou catchment[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 70-76. (in Chinese))
- [45] 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响[J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1253-1259. (LI X Y, LIU X Y, LI Z. Effects of rainfall and underlying surface on sediment yield in the main sediment-yielding area of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(10): 1253-1259. (in Chinese))
- [46] 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 L R, HE Y H, TANG Y P, 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))
- [47] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (China Renewable Energy Engineering Institute, Ministry of Water Resources. Water resources assessment and its development & utilization in China [M]. Beijing: China Water&Power Press, 2014. (in Chinese))

- [48] 王国庆, 管晓祥, 王乐扬, 等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. 人民黄河, 2019(10): 26-30. (WANG G Q, GUAN X X, WANG Y Y, et al. Impact of climate change and human activity on stream flow of the key runoff generation areas of the Yellow River basin[J]. Yellow River, 2019(10): 26-30. (in Chinese))

Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China*

WANG Guoqing^{1,2,3}, ZHANG Jianyun^{1,2,3}, GUAN Xiaoxiang^{3,4}, BAO Zhenxin^{1,3}, LIU Yanli^{1,3},
HE Ruimin^{1,3}, JIN Junliang^{1,2,3}, LIU Cuishan^{1,3}, CHEN Xin^{1,3}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China;
3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;
4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The recorded runoff of the major rivers in China has been changing due to environment change. It is of significance to quantitatively analyze attribution of runoff change for supporting water resources assessment and management in many practices. Based on abrupt change detection of annual runoff series from 1956—2018 measured at the 8 representative hydrometric stations on major rivers in China, impacts of climate change and human activities on runoff changes were investigated by using hydrological simulation approach. Results show that (1) The abrupt change of annual runoff series recorded at the Wujiadu station on the Huai River, Datong station on the Yangtze River and the Wuzhou station on the Pearl River are not detectable. However, the abrupt changes have been found for the recorded annual runoff series of the major rivers in North China with the earliest and the latest abrupt change years occurring in 1965 for the Tieling station on the Liao River and in 2003 for the Haerbin station on the Songhua River, respectively. The relationships between runoff and precipitation for periods before and after abrupt change year were markedly changed probably due to human activities. (2) RCCC-WBM model not only performs well on monthly runoff simulation for humid South China, but also achieves good simulation result for major rivers in arid North China. The model has been proved being qualified to naturalize runoff in the human-disturbed periods for major rivers in China. (3) In general, human-induced runoff changes are higher than the climatic impacts for major rivers in the North China, while climate change is a dominant driver of runoff variation for the Hai River and major rivers of China in its south.

Key words: runoff change; major rivers in China; attribution analysis; RCCC-WBM model

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0601501) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41830863).