

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2020.04.001

气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响

班璇¹, 师崇文², 郭辉³, 舒鹏⁴

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;

2. 中南民族大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430074; 3. 长江科学院水力学研究所, 湖北 武汉 430010;

4. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:采用变化范围法划分不同影响期,并对丹江口下游的黄家港站1965—2017年水文情势的变化趋势进行评估。结果表明:丹江口大坝蓄水使下游河道枯水期的流量增加,丰水期和平水期的流量减少;气候变化引起的降雨减少使各月份的月中值流量和年极大值流量减少,低流量脉冲次数增加;梯级大坝的修建使黄家港水文站受回水影响,月中值流量和年极小值流量增加,发生时间提前。受南水北调中线工程调水影响,月中值流量和年极小值流量大幅度减少,高/低流量脉冲次数增加。不同时期影响造成汉江中下游水文情势的波动,并影响了汉江中下游水生生态系统的稳定性。

关键词:水文情势;气候变化;丹江口大坝;变化范围法;汉江流域

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)04-0001-07

Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam//BAN Xuan¹, SHI Chongwen², GUO Hui³, SHU Peng⁴(1. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. College of Resources and Environmental Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China; 3. Department of Hydraulics, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this study, the hydrological trend of the Huangjiagang hydro-station downstream of Danjiangkou from 1965 to 2017 was evaluated by RVA method via dividing different influence periods. The results show that the impoundment of the Danjiangkou Dam can increase the discharge in dry seasons while decrease the discharge in flood and normal seasons in the downstream. The decrease of rainfall caused by climate change leads to the decrease of the monthly mean flow and the annual maximum discharge, but the occurrence of low flow pulse is increased. The backwater of the cascade dams increases the monthly mean flow and the annual minimum discharge with earlier occurrence. The Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project substantially reduces the monthly mean flow and the annual minimum discharge with an increase of both low and high flow pulse. The hydrological regime fluctuation in the middle and lower reaches of the Hanjiang River is induced by the different influencing periods, which affects the stability of aquatic ecosystems.

Key words: hydrological regime; climate change; Danjiangkou Dam; range variability approach; Hanjiang River Basin

随着社会经济的快速发展,人类对水资源的开发程度不断增大,修建了大量水利工程,如在河流上筑坝修建水库、调水工程、抽水工程等^[1]。水利工程建设在带来经济和社会效益的同时,也人为地改变了河流的水文循环格局及自然水文情势,对河流及其周围生态系统产生了深远影响^[2-7]。水文情势是塑造河流生态系统结构和功能特征的关键性因子,影响着河流生态系统的各个方面^[5,8-11],其变化对生态环境的影响是长期的、缓慢的、潜在的^[6]。南水北调中线工程的调水对汉江流域中下游水文情

势产生了重大影响^[2,10]。此外,全球气候变暖导致的降水量异常变化^[12-13]对汉江流域的水资源和生态环境也产生了深刻影响^[8,14-15]。汉江中下游同时受到梯级大坝、调水工程以及气候变化的叠加影响,其水文情势变化的驱动力非常复杂。各个影响因素如何影响丹江口下游汉江干流的水文情势,水文情势的改变又会引起哪些生态效应,这些是目前进行汉江下游水资源合理配置需要解决的首要科学问题。

本文以丹江口下游黄家港水文站的水文情势变

化为切入点,综合分析了丹江口大坝、王甫洲大坝、气候变化、南水北调中线工程叠加影响下的丹江口大坝下游水文情势的变化趋势与规律,以期能为汉江中下游流域生态环境保护和水资源合理配置提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区域概况

汉江流域面积约为 15.9 万 km²,属亚热带季风区,年降水量 873 mm,水量较丰沛,但年内分配不均,年际丰枯变化悬殊,5—10 月径流量约占全年 75%。汉江流域水能资源丰富,汉江中下游规划了 9 级水利枢纽,依次为孤山、丹江口(1973 年建成)、王甫洲(2001 年建成)、新集、崔家营(2010 年建成)、雅口、碾盘山、华家湾、兴隆(2013 年建成)(图 1)。9 级水利枢纽、南水北调中线工程、引汉济渭、引江济汉等多重调水工程对汉江流域的水文情势产生了极大影响。黄家港站作为丹江口水库的出库控制站,其流量和水位变化主要受丹江口水库调蓄、南水北调调水以及王甫洲水库回水等的影响,以及汉江中下游流域自 1991 年从多雨期转入少雨期的气候变化影响^[16]。因此,该水文站的水文情势变化主要受梯级大坝、气候变化、水库调水的叠加作用,其驱动机制非常复杂。

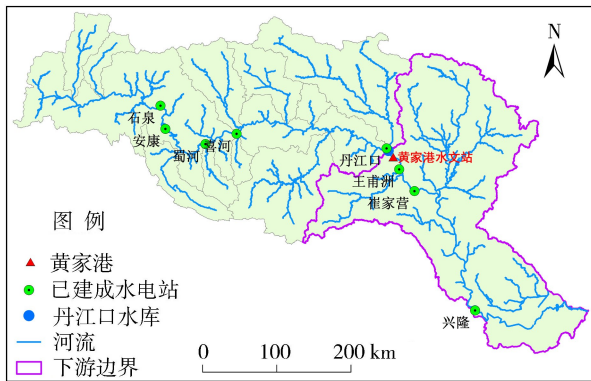


图 1 汉江流域示意图

为分析各因素对黄家港站水文情势的影响程度,笔者将该站的历史水文情势变化分为 5 个阶段(图 2):丹江口水库蓄水前的时期为未受人类活动影响的基准期(1965—1973 年);1974 年丹江口大坝蓄水后,气候突变前的时期为影响 I 期(1974—1990 年);1991 年气候突变后,修建王甫洲大坝前的时期为影响 II 期(1991—2000 年);2001 年修建王甫洲大坝后,南水北调之前的时期为影响 III 期(2001—2013 年);南水北调之后的时期为影响 IV 期(2014—2017 年)。将不同影响期的水文数据与基准期进行比较,分析不同影响期水文情势的变化

趋势。

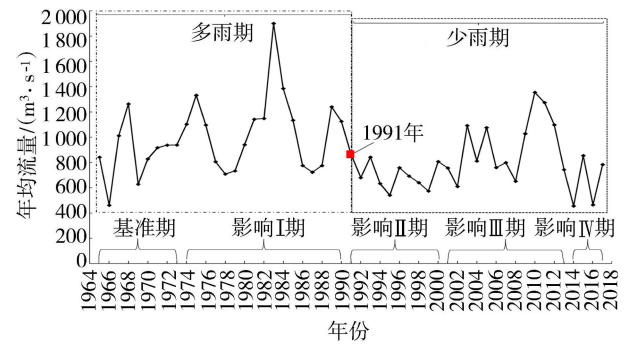


图 2 黄家港站 1965—2017 年均流量过程线

1.2 水文变化指标及变化范围法简介

1996 年 Richter 等^[17]提出了一系列能够代表河流水文情势与生态关系的指标,包括 5 组共 33 个描述流量过程的月均值、极值、极值出现时间、高/低流量脉冲的频率和持续时间、水文条件变化的速率及频率的水文变化指标(indicators of hydrology alteration, IHA),IHA 指标具有一定的生态学含义,具体求法与含义参见文献^[17]。变化范围法(range of variability approach, RVA)建立在 IHA 指标改变度的基础上,其核心是将处于自然状态下的长期水文资料作为定义水文变量变化范围的基础。郭文献等^[18-19]提出以各 IHA 指标计算结果的中值加减一个标准差作为 RVA 的目标范围类别,将 IHA 指标排序后进行频率计算,采用发生频率为 75% 和 25% 的值作为各 IHA 指标参数的上限、下限,小于 25% 为低 RVA 类别,大于 75% 为高 RVA 类别,25% ~ 75% 为中 RVA 类别。

人类干扰前后河流水文变量的变化程度,可通过水文改变度 D 量化计算^[20]。 D 的绝对值处于 0 ~ 33%、33% ~ 67%、67% ~ 100% 区间时分别表示低改变度(L)、中改变度(M)、高改变度(H),以此衡量水文变量相对基准值的偏离程度。

此外,用不同影响期 IHA 指标的中值与基准值相比较偏离的百分比和离散系数的偏移度检验 IHA 指标的变化相较于影响前是否有显著差异以及变化趋势。其显著性分析可以检验 IHA 指标的偏移度差异在统计分析中是否显著,其原理是随机打乱所有年份的输入数据,并重新计算影响前和影响后的中值和离散系数 1 000 次,显著性计数是中值和离散系数的偏差值大于实测值的百分比。因此,低显著性计数(最小值为 0)代表影响前和影响后时期的差异非常显著,而高显著性计数(最大值为 1)代表影响前和影响后时期的差异非常小^[18]。

偏移度的计算公式为

$$P = (P_{\text{影响后}} - P_{\text{影响前}}) / P_{\text{影响前}} \quad (1)$$

式中: P 为 IHA 指标的偏移度; $P_{\text{影响前}}$ 为各 IHA 指标在影响前时期内的平均值; $P_{\text{影响后}}$ 为各 IHA 指标在影响后时期内的平均值。

1.3 水文统计参数说明

文中用到的其他参数: ①年均流量^[20-22]反映一年内断面流量的中值状况。②年均变异系数^[23-24]: 日均流量的标准偏差与年均流量之比, 反映流量在一年内的波动程度。③流量的可预测性^[25]: 该值的范围在 0~1 之间, 可以反映流量的稳定性状况。由测量流量时间不变性的稳定性参数 C 和测量流量周期性的偶然性参数 M 组成, 具有非常稳定流量的河流可预测性主要由 C 确定, 而具有固定周期的高

度可变流量的河流可预测性主要由 M 决定。④60 d 内的洪水最大发生率^[26-27]: 在有记录的所有年份 60 d 内发生洪水的最大比例。洪水被定义为任何超过高脉冲阈值的水流。⑤无汛期长度^[28]: 所有水文年中流量达到或低于每年高脉冲阈值的最长周期天数。

2 结果分析

2.1 不同影响期水文指标变化及生态影响

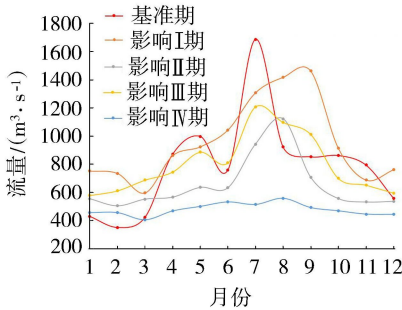
不同影响期水文指标的中值偏移度见表 1。

a. 月中值流量的变化(图 3(a))。与基准期相比, 整体上是 1—3 月的流量增加, 4—12 月的流量减少。影响 I 期受丹江口大坝影响, 月中值流量枯

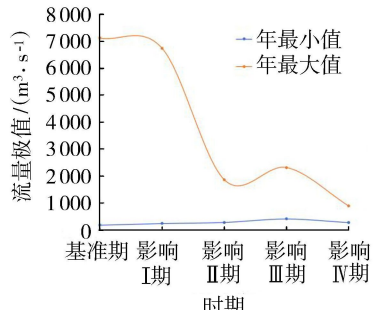
表 1 不同影响期水文指标中值偏移度

水文指标	中值偏移度				水文指标	中值偏移度			
	影响 I 期	影响 II 期	影响 III 期	影响 IV 期		影响 I 期	影响 II 期	影响 III 期	影响 IV 期
1 月中值流量	0.0481*	0.1622	0.0481	0.9089	年均 1 d 最小流量	0.0390*	0.5816	0.0190	0.4935
2 月中值流量	0.0090*	0.0591	0.0080	0.6977	年均 3 d 最小流量	0.8128	0.0430	0.2863	0.0440
3 月中值流量	0.1091	0.1031	0.0030	0.6266	年均 7 d 最小流量	0.8168	0.0581	0.2683	0.0270
4 月中值流量	0.9449	0.3223	0.4084	0.2352	年均 30 d 最小流量	0.2893	0.1141	0.2733	0.0020
5 月中值流量	0.3473	0.0531	0.4715	0.0891	年均 90 d 最小流量	0.4454	0.0741	0.3544	0.0571
6 月中值流量	0.0150*	0.4515	0.8068	0.3864	年均 1 d 最大流量	0.3804	0.1061	0.6537	0.0841
7 月中值流量	0.2873	0.1572	0.4915	0.1822	年均 3 d 最大流量	0*	0	0	0
8 月中值流量	0*	0.2272	0.5566	0.0030	年均 7 d 最大流量	0.3223	0.9810	0.5155	0.8478
9 月中值流量	0*	0.5375	0.6867	0.1011	年均 30 d 最大流量	0.8208	0.4775	0.6376	0.7417
10 月中值流量	0.7267	0.0491	0.2212	0.0631	年均 90 d 最大流量	0.0791**	0	0.4855	0
11 月中值流量	0.7938	0.1341	0.3263	0.2503	基流指数	0.1912	0.1912	0.1792	0.4424
12 月中值流量	0.2693	0.8729	0.6156	0.6266	年最小流量出现时间	0.0551**	0.7497	0.2412	0.1011
低脉冲次数	0.0170*	0.0060	0	0.2142	年最大流量出现时间	0.1592	0.2573	0.1502	0.0380
低脉冲历时	0*	0	0	0.1962	涨水率	0.0050*	0.0020	0	0.8158
高脉冲次数	0*	0	0	0.2763	退水率	0.0230*	0.1622	0	0.7568
高脉冲历时	0.0350*	0.1301	0	0.5526	逆转次数	0*	0.0100	0	0.0551

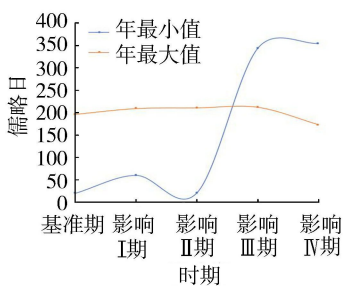
注: * 表示显著性检验的统计量的区间范围为 [0.95, 0.99], ** 表示显著性检验的统计量的值大于 0.99。



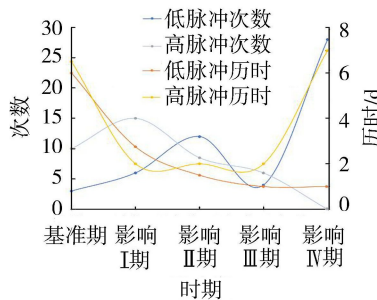
(a) 月中值流量



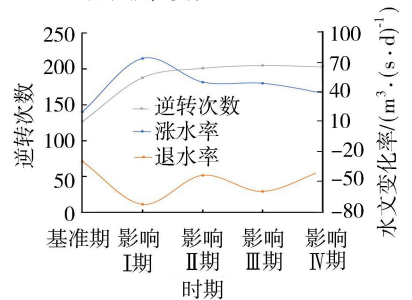
(b) 极值变化



(c) 极值出现时间



(d) 高、低流量脉冲变化



(e) 水文条件变化的速率及频率

图 3 各组水文指标在不同影响期的变化趋势

水期增加(1—3月),流量月均变化过程波动减少,流量峰值从7月推迟到9月。影响Ⅱ期叠加了气候变化的影响,流量波动趋势与影响Ⅰ期类似,但量值大小大幅度降低。影响Ⅲ期叠加了梯级大坝回水的影响,流量有所增加,峰值出现在7月。影响Ⅳ期南水北调工程实施后,下游各月份流量显著减少,流量波动趋势消失。该结果说明丹江口大坝的修建使下游河道枯水期的流量增加,丰水期和平水期的流量减少。气候变化降雨减少的影响使各月份流量整体减少。梯级大坝的回水使流量增加,峰值的出现时间提前。南水北调实施调水后,各月份流量大幅度减少,而且峰值和流量波动消失,没有了流量波动多样性的过程,下游水生态系统将会受到严重影响。

由于不同时期人类活动和气候变化的影响,丹江口大坝下游河道月中值流量的变化趋势处于一个波动调整的状态,这种变化不利于稳定水生态系统的建成。流量变化幅度和年极大值的减小对水生生物的种群稳定性造成了较大影响,它的波动将使水生生物的生存空间和优势种群都处于波动的过程中。据调查,汉江干流修建一系列梯级大坝后,汉江下游的底栖生物物种种群结构发生了变化,原有的优势种钩虾、多距石蛾和纹石蛾等物种消亡或沦为稀有种,取而代之的是喜静水的淡水壳菜、水丝蚓、苏氏尾鳃蚓等耐污种^[28]。

b. 年极端水文条件的大小变化(图3(b))。与基准期相比,整体上是年极小值无明显改变,年极大值流量从影响Ⅱ期起显著减少。年极值流量变化结果说明丹江口大坝叠加降雨减少的气候变化影响后使年极大值流量显著减少,使得水生生物的生存空间也相应减少。

c. 年极端水文条件的出现时间(图3(c))。与基准期相比,整体上是年极小值提前,年极大值发生的时间无明显变化。梯级大坝使年极小值从以前的1月提前到12月,南水北调工程实施后使年极大值从7月提前到6月。

年极值发生时间往往是水生生物进行繁殖的信号,它的改变会影响水生生物的繁殖过程。研究发现在汉江干流修建一系列的梯级枢纽后,汉江中下游产漂流性卵鱼类的产卵场萎缩退化、繁殖期缩短、产卵量明显下降^[29]。

d. 高、低流量脉冲的频率和持续时间(图3(d))。与基准期相比,整体上是低流量脉冲的次数增加,高流量脉冲次数减少,高/低流量脉冲持续时间减少。丹江口大坝的修建使下游河道高、低流量脉冲的次数增加,降雨减少增加了低流量脉冲次数,使高流量脉冲的次数从增加状态转为减少。

梯级大坝的回水削弱了低流量脉冲次数增加的幅度,而调水又极大地加剧了低流量脉冲次数增加的幅度,并使高流量脉冲的次数从减少状态转为增加。

该水文指标主要影响河道与洪泛区间的营养与有机物的交换,它的减少对洪泛区水生生物栖息地的稳定性造成不利影响。调查显示,梯级大坝修建后在汉江中游丹江口至襄樊江段,由于水流更缓,水生植物尤其是沉水植物如狐尾藻、穿叶眼子菜、竹叶眼子菜等和挺水植物分布面积扩大,生物量增加;调水后汉江下游水生植物分布面积萎缩,群落生物量将减少,生物多样性下降,水生植物分布更趋于单一化和斑块化^[30]。

e. 水文条件改变的速率及频率(图3(e))。与基准期相比较,整体上是涨水率和退水率均增加,流量逆转次数增加。丹江口大坝蓄水使下游流量的涨水率和退水率增加,随着降雨减少,梯级大坝回水,以及调水的影响涨水率增加幅度逐渐减小。退水率的增加幅度在不同影响期呈现波动的状态。该结果表明调水削弱了该组水文指标的变化幅度,这会影响到汉江流域四大家鱼的繁殖状况,造成其产卵比重显著下降^[29]。此外,还对河滨带植被造成干旱胁迫。

2.2 不同影响期水文指标离散系数的偏移度分析

离散系数反映了不同影响期水文指标的年际变化幅度。由图4可知,除了退水率外,其他水文指标的离散系数整体上较基准期呈增加趋势。年极大值,高、低流量脉冲的频率与持续时间的离散系数的偏移度较大。该结果说明气候变化使高流量持续时间的离散系数大幅度增加,年际变化幅度变大;梯级大坝的回水影响使年最大值流量的离散系数增加,年际变化幅度变大;调水使10月的月中值流量和年极大值的离散系数增加,年际变化幅度变大。

2.3 不同影响期水文指标的改变度分析

由图5可知,影响Ⅰ期受丹江口大坝的影响,月中值流量的改变度在8月和9月达到一个较大的峰值;连续30d、90d年最小流量以及高流量脉冲的持续时间、流量逆转次数的综合改变度较大。影响Ⅱ期受降雨减少的影响,月中值流量的改变度峰值延后到了10月,连续30d、90d年最小流量稍微增加,但年极大流量的改变度大幅增加。影响Ⅲ期,月中值流量改变度最大的月从10月推迟到12月,年极小值的流量改变度大幅增加。该结果说明大坝的修建改变了丰水期的流量,而降雨量的减少,使流量的改变延后到10月,梯级大坝的影响使受影响的流量月份再次延后到12月;年极小值的改变度较大,降雨量的减少和梯级大坝的修建都加剧了对年极小值的影响;高流量脉冲的持续时间和流量的逆转次数

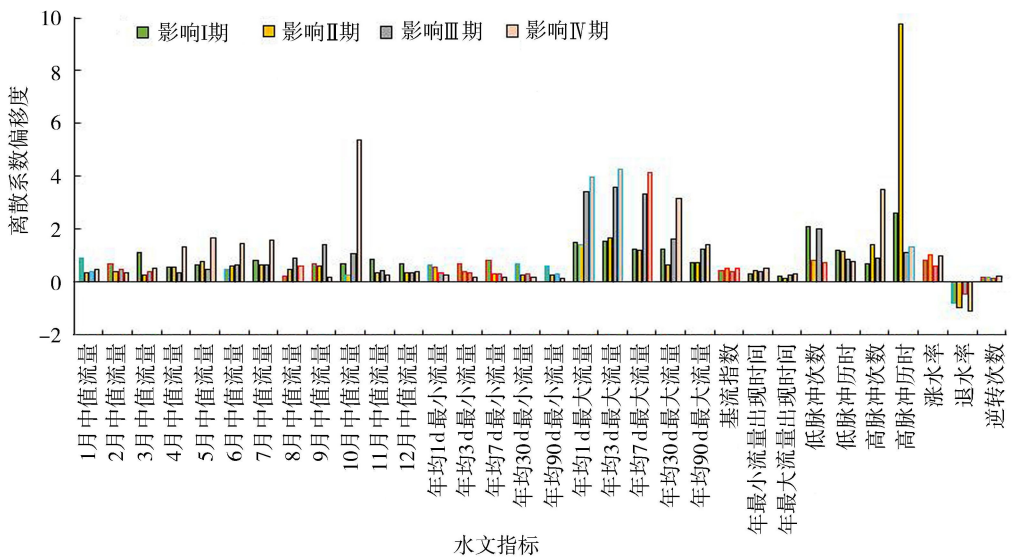


图4 不同影响期水文指标离散系数的偏移度

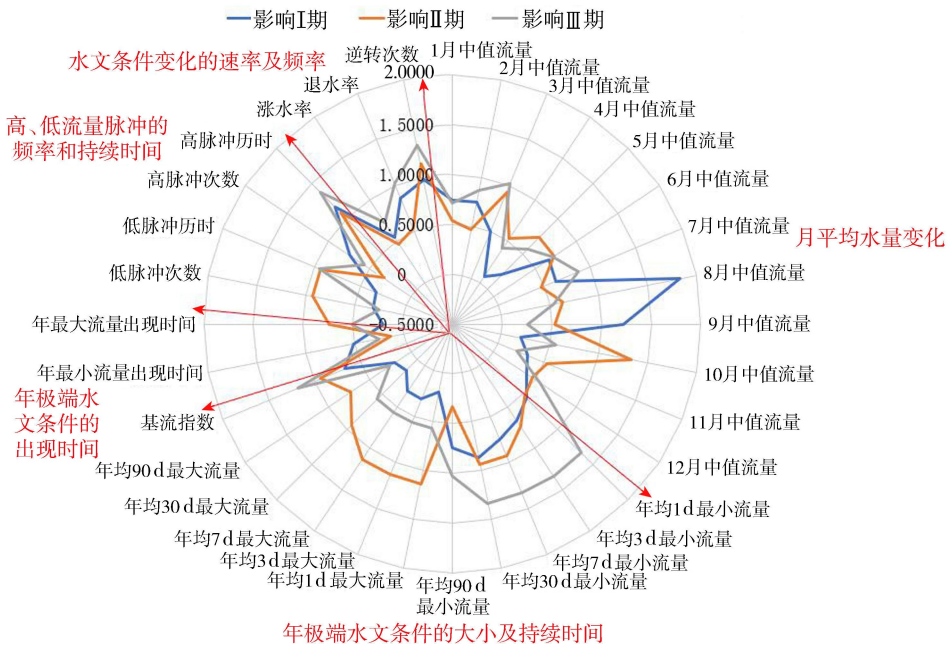


图5 不同影响期水文指标的改变化

改变度也较大,梯级大坝的修建加剧了这种影响。由于影响IV期的实测资料年数较少,在统计学上其代表性可能不佳,所以不对影响IV期进行分析。

2.4 不同影响期的其他水文指标的分析

表2的结果显示降雨减少的气候变化和大坝的修建使多年平均流量减少,流量的变异系数减少,流量的可预测性增加,非汛期的长度减少;梯级大坝的回水使多年平均流量增加,非汛期的长度减少;水库调水使多年平均流量减少,变异系数增加,非汛期的长度增加。

3 结语

通过分析气候变化、梯级大坝、南水北调等水利工程对丹江口大坝下游黄家港站水文与水生态的影

表2 其他水文指标

时期	多年平均流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	年均流量的变 异系数	流量的可预测 性/%	60 d 洪水发生 概率/%	无洪水季节/d
基准期	1048.0	1.13	0.55	0.38	79
影响 I 期	1208.0	1.18	0.58	0.29	1
影响 II 期	736.7	0.66	0.68	0.38	33
影响 III 期	992.3	1.03	0.65	0.35	27
影响 IV 期	678.0	1.13	0.80	0.43	151

响,确定了不同时期水文变化的趋势与可能引起的生态效应。1974 年丹江口大坝的修建使下游河道枯水期的流量增加,丰水期和平水期的流量减少;年极小值和基流指数增加,发生时间提前;高、低流量脉冲的频率增加,持续时间减小;流量逆转次数增加。1991 年汉江流域从多雨期转入少雨期后,各月份的月中值流量和年极大值流量减少,低流量脉冲

次数增加,高流量脉冲次数从增加状态转为减少。2001年丹江口下游梯级大坝的修建,黄家港水文站受到王甫洲大坝回水的影响,月中值流量和年极小值增加,发生时间提前。2013年开始实施南水北调后,月中值流量和年极小值大幅度减少,高/低流量脉冲次数增加,涨水率增加的幅度减小。不同时期不同的影响因素造成的水文情势的波动不利于形成稳定的水生态系统,并且对鱼类的产卵繁殖、底栖生物以及河滨带植被都造成了一定的影响。后期针对各种群的生长特征和保护目标,建议开展生态调度,从而削弱对汉江中下游水生生物的影响。

参考文献:

[1] RICHTER B D, POSTEL S, REVENGA C, et al. Lost in development's shadow: the downstream human consequences of dams [J]. *Water Alternatives*, 2010, 3 (2): 14-42.

[2] 柏慕琛,班璇,PANAYIOTIS D,等. 丹江口水库蓄水后汉江中下游水文时空变化的定量评估及其生态影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1476-1487. (BAI Mochen, BAN Xuan, PANAYIOTIS D, et al. Quantifying the spatio-temporal variation of flow and its ecological impacts in the middle-section of Hanjiang River following the Danjiangkou Reservoir impoundment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(9): 1476-1487. (in Chinese))

[3] 黄显峰,贾永乐,方国华,等. 基于PP-RVA法的水电站下游河流水文情势评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2018, 46(6): 479-485. (in Chinese))

[4] 于国荣,夏自强,叶辉,等. 大坝下游河段的河流生态径流调控研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4): 606-611. (YU Guorong, XIA Ziqiang, YE Hui, et al. Regulation of river ecological runoff in the lower reaches of the dam [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(4): 606-611. (in Chinese))

[5] 苏国欢,沙永翠,熊鹰,等. 大坝截流前后金沙江观音岩水电站鱼类群落功能多样性的变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 965-970. (SU Guohuan, SHA Yongcui, XIONG Ying, et al. Changes of functional diversity of fish community in Guanyinyan Hydropower Station of Jinsha River before and after dam closure [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 965-970. (in Chinese))

[6] 段唯鑫,郭生练,王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站

水文情势影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 120-130. (DUAN Weixin, GUO Shenglian, WANG Jun. Analysis of the influence of large reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River on the hydrological situation of Yichang Station [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120-130. (in Chinese))

[7] 周建军,张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))

[8] 邓鹏鑫,邴建平,贾建伟,等. 汉江流域1956—2016年汛期降水时空演变格局[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9): 2132-2141. (DENG Pengxin, BING Jianping, JIA Jianwei, et al. Temporal and spatial evolution pattern of precipitation in the Han River Basin during the flood season from 1956 to 2016 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(9): 2132-2141. (in Chinese))

[9] 王鸿翔,陈鼎新,李越,等. 三峡水库对坝下河流水文情势影响研究[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(5): 1-6. (WANG Hongxiang, CHEN Dingxin, LI Yue, et al. Impact of Three Gorges Reservoir on the downstream hydrology of Yangtze River [J]. *Journal of Water Ecology*, 2018, 39(5): 1-6. (in Chinese))

[10] 陆国宾,刘轶,邹响林,等. 丹江口水库对汉江中下游径流特性的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10): 959-963. (LU Guobin, LIU Yi, ZOU Xianglin, et al. Impact of Danjiangkou Reservoir on runoff characteristics of the middle and lower reaches of the Han River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10): 959-963. (in Chinese))

[11] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. *水资源保护*, 2018, 34(6): 24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6): 24-32. (in Chinese))

[12] 李丹,郭生练,洪兴骏,等. 汉江流域1960—2014年降雨极值时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1448-1456. (LI Dan, GUO Shenglian, HONG Xingjun, et al. Temporal and spatial variation characteristics of rainfall extremes in the Han River Basin from 1960 to 2014 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1448-1456. (in Chinese))

[13] HASAN M M, WYSEURE G. Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador [J]. *Water Science and Engineering*, 2018, 11(2),

- [14] 史超,夏军,余敦先,等. 气候变化下汉江上游林地植被生态需水量的时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 580-589. (SHI Chao, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Temporal and spatial evolution of ecological water demand of forest vegetation in the upper reaches of the Han River under climate change [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 580-589. (in Chinese))
- [15] 起永东,何明琼,郑永宏,等. 汉江流域降水结构时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2830-2838. (QI Yongdong, HE Mingqiong, ZHENG Yonghong, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation structure and influencing factors in the Han River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2830-2838. (in Chinese))
- [16] 班璇,朱碧莹,舒鹏,等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2817-2829. (BAN Xuan, ZHU Biying, SHU Peng, et al. Analysis of meteorological and hydrological trends and driving forces in the Hanjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2817-2829. (in Chinese))
- [17] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. River Research & Applications, 1998, 14(4):329-340.
- [18] 郭文献,李越,王鸿翔,等. 基于 IHA-RVA 法三峡水库下游河流生态水文情势评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 2014-2021. (GUO Wenxian, LI Yue, WANG Hongxiang, et al. Assessment of river ecohydrological situation in the lower reaches of the Three Gorges Reservoir Based on IHA-RVA method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 2014-2021. (in Chinese))
- [19] MATHEWS R, RICHTER B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(6):14.
- [20] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 147-170.
- [21] JOTHITYANGKOON C, HIRUNTEYAKUL C, BOONRAWD K, et al. Assessing the impact of climate and land use changes on extreme floods in a large tropical catchment [J]. Journal of Hydrology, 2013, 490:88-105.
- [22] LIN Xian, CHEN Xiaohong, HE Yanhu, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on annual and maximum daily runoff in the Wujiang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 55(5):828-839.
- [23] KRZYSZTOFOWICZ R. Transformation and normalization of variates with specified distributions [J]. Journal of Hydrology, 1997, 197(1/2/3/4):286-292.
- [24] SILVEIRA L. Multivariate analysis in hydrology: the factor correspondence analysis method applied to annual rainfall data. [J]. Hydrological Sciences Journal, 1997, 42(2):215-224.
- [25] BLÖSCHL G. Effects of scale and spatial process organisation in hydrology with implications for predictability [J]. EGU General Assembly, 2009, 11: 12748.
- [26] BROWN A E, WESTERN A W, MCMAHON T A, et al. Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves [J]. Journal of Hydrology, 2013, 483(3):39-50.
- [27] MANUELA N, TOBIAS P, KATRIN N, et al. On the relationship between hydro-meteorological patterns and flood types [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:3249-3262.
- [28] 池仕运,陈胜,汪红军,等. 汉江中下游底栖动物群落结构特征研究 [J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 82-90. (CHI Shiyun, CHEN Sheng, WANG Hongjun, et al. Community structure characteristics of benthos in the middle and lower reaches of the Han River [J]. Journal of Water Ecology, 2014, 35(5): 82-90. (in Chinese))
- [29] 秦烜,陈君,向芳. 汉江中下游梯级开发对产漂流性卵鱼类繁殖的影响 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊 2): 501-506. (QIN Xuan, CHEN Jun, XIANG Fang. The impact of cascade development in the middle and lower reaches of the Han River on the reproduction of drift spawning fishes [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(Sup2): 501-506. (in Chinese))
- [30] 徐新伟,吴中华,于丹,等. 汉江中下游水生植物多样性及南水北调工程对其影响 [J]. 生态学报, 2001, 22(11): 1933-1938. (XU Xinwei, WU Zhonghua, YU Dan, et al. Diversity of aquatic plants in the middle and lower reaches of the Han River and the impact of the south to North Water Diversion Project on it [J]. Journal of Ecology, 2001, 22(11): 1933-1938. (in Chinese))

(收稿日期:2019-07-17 编辑:刘晓艳)