

基于IHA-RVA法分析汉江中下游水文情势变化

王何予, 田 晶, 邓乐乐, 王 俊, 郭生练*

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

Email: heyuwang@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年7月7日; 录用日期: 2021年8月2日; 发布日期: 2021年8月12日

摘 要

收集黄家港和皇庄水文站1954~2020年日均流量数据, 分别以丹江口水库建成蓄水 and 南水北调中线工程通水为时间节点, 将长序列资料分为三个研究时段, 选用水文改变指标(IHA)和变化范围法(RVA), 分析计算建库以及调水对汉江中下游水文情势的影响。结果表明: 黄家港站整体水文改变度在丹江口水库建库后为53%, 在调水后为64%, 为中度改变, 其中流量增减变化最为显著。水文情势的中度改变直接影响汉江中下游的水环境和水生态, 有必要进行生态修复和生态调度措施。

关键词

水文情势, IHA-RVA法, 汉江中下游, 丹江口水库, 南水北调中线工程

Hydrological Regime Alteration Analysis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River Based on IHA-RVA Method

Heyu Wang, Jing Tian, Lele Deng, Jun Wang, Shenglian Guo*

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: heyuwang@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

Received: Jul. 7th, 2021; accepted: Aug. 2nd, 2021; published: Aug. 12th, 2021

Abstract

The daily average flow data of Huangjiagang and Huangzhuang hydrological stations from 1954 to 2020

作者简介: 王何予, 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。

*通讯作者。

文章引用: 王何予, 田晶, 邓乐乐, 王俊, 郭生练. 基于 IHA-RVA 法分析汉江中下游水文情势变化[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 350-361. DOI: 10.12677/jwrr.2021.104038

were collected, and the long-time data series were divided into three periods based on the Danjiangkou Reservoir and Mid-route of south-to-north water transfer project. Indicators of hydrologic alteration (IHA) and Range of variability approach (RVA) method were selected to analyze the impact of reservoir construction and water diversion on the hydrological regime in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. The results show that the overall hydrologic alterations of Huangjiagang station is 53% after the built of Danjiangkou Reservoir, and increases to 64% after the water diversion. The hydrological regimes of three periods of two hydrological stations are all moderate alteration, also the rate and frequency of hydrograph has changed greatly. Moderate alterations in hydrological regimes directly affect the water environment and ecology in the middle and lower reaches of the Hanjiang River, and it is necessary to carry out ecological regulation and restoration.

Keywords

Hydrological Regime, IHA-RVA, Middle and Lower Reaches of the Hanjiang, Danjiangkou Reservoir, Mid-Route of South-to-North Water Transfer Project

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水文情势是指自然水体如河流、湖泊以及水库等的降水、蒸发、径流、水质等诸多水文要素随时间、空间的变化情况。水文情势是河流和河漫滩生态系统的主要驱动力，它和水生生物多样性也同样存在重要联系[1]，其通过直接或间接的方式作用于生态系统进而影响生境、生物组成。水文情势的变化与河流健康、河流生态系统的生态完整性息息相关[2]，然而随着经济社会的发展，人类为满足防洪、供水、发电、农业及航运等而对河流进行的开发使得水文情势出现大幅度变化，这些变化必然改变生态系统。良好的河流生态环境是水资源开发利用能够可持续、高质量发展的重要前提和保障。

水文情势的分析都是基于对水文指标的研究，水文指标可以定量、定性表征水文过程的改变程度。Richter 等[3]于 1996 年提出水文改变指标(Indicators of hydrologic alteration, IHA)，包含 32 个指标，需要的数据指标较少且较易获得，可以定量描述水文情势的变化，所以在国内外被广泛应用。Poff 等[4]率先系统、详细地提出水文情势分为流量量级、频率、时刻、历时、变化率这五个方面，并强调其通过对水质、能量、物理栖息地、生物相互作用影响生态完整性。为了找到更确切描述水文情势改变程度的指标，Richter 等[5]进一步提出了变化范围法(Range of variability approach, RVA)用来评价水文改变度。RVA 方法是利用 IHA 不同生态相关流量指标的自然变化范围作为设定目标，用于指导恢复或维持河流自然流量的工作。RVA 定义了指标变化的部分或全部自然范围，若将每个水文指标的年值保持在目标值范围内就实现了对生境的保护和恢复。IHA-RVA 方法用于评价水文情势变化在国内外应用广泛，如 Olden 和 Poff [6]得出结论，IHA 是分析水文变化现象的最有力工具；Kim 等[7]利用水文变化指标 IHA 评估气候变化对韩国汉江流域水流状况的影响；段唯鑫等[8]使用 IHA-RVA 法评估长江上游大型水库群的运行对宜昌站水文情势的改变情况；郭文献等[9]选用 IHA-RVA 法评价长江上游鱼类保护区河段生态水文的变化情况及其对鱼类数量的影响。

重大工程的修建为汉江流域地区以及华北平原地区人民的生产生活带去了诸多便利，推动了经济和社会的发展，但同时导致其周边的水生态环境受到较大影响。丹江口水库建成蓄水后，邹振华等[10]分析得到丹江口水库的修建使 IHA 指标中除极值流量出现时间外的其他 4 组指标均大幅度改变；谢文星[11]等研究表明丹江口水

库的修建使得汉江中下游四大家鱼卵苗径流量明显下降,产卵场的位置也随之改变;彭涛[12]等对比分析了丹江口水库建成运行后黄家港和皇庄站的水文改变度,其中黄家港和皇庄水文站均为中度改变。南水北调中线工程通水后,朱焯等[13]分析得到南水北调中线工程开通后,汉江中下游的水资源量减少,径流年内分配均化;曹圣洁[14]、卢金友[15]等认为南水北调中线调水后 TP、TN 和藻密度上升,上游来水减少,水环境容纳能力降低,流域内污染物和污染源的不合理控制等都会让汉江中下游的“水华”风险变大。

现阶段研究对于丹江口水库建库以及南水北调中线工程对汉江中下游水文情势的共同作用研究较少,且流量资料长度有限均在 2000 年左右,时间跨度不够。本文关注丹江口水库建库前 1954 年直至 2020 年汉江中下游水文情势的变化,评价不同水文站各阶段的水文改变程度,为汉江中下游的水生态保护和水资源管理提供科学依据。

2. 研究方法

2.1. IHA

本文所选用的 IHA 指标是美国大自然保护协会(Nature Conservancy of the United States)在 32 个指标基础上完善后的指标,共 33 个[16],分为 5 组:各月均值流量大小、极值流量大小、极值流量出现时间、流量脉冲情况、流量增减变化率。

2.2. RVA

RVA 方法基于天然流量的数据[5],天然流量是指还未受到工程和人类活动等诸多因素破坏的流量过程。通过对天然流量下的指标进行处理分析找到 RVA 阈值来界定水文情势变化程度。本文选择天然流量下 33 个 IHA 指标的 75%、25%分位数,分别对应各指标的 RVA 上限和下限阈值范围。若非天然状态时段的流量超过这个范围则说明水文指标改变程度较大,反之改变程度较小。

定量分析水文改变度可用如下公式,对各 IHA 指标改变度 D_i 求取算术平均即可得到不同组别和总体水文改变度。

$$D_i = \left| \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, 33) \quad (1)$$

$$N_e = p \times N_T \quad (2)$$

式中: D_i 表示第 i 个指标的改变度; $N_{o,i}$ 表示第 i 个指标在非天然状态下落在 RVA 阈值内的年数; N_e 表示第 i 个指标在非天然状态下预期落入 RVA 阈值内的年数;由于本文所选为 75%和 25%分位数,所以 $p = 50\%$; N_T 表示非天然状态下的总年数。

设定水文指标改变程度,选用分级方法,按水文改变度 $0 \leq |D_i| < 33\%$ 、 $33\% \leq |D_i| < 67\%$ 、 $67\% \leq |D_i| < 100\%$ 由小到大分为轻度、中度和高度改变。

3. 研究区域及数据

汉江作为长江中游第一大支流,是国家水资源配置的重要战略水源地、长江流域绿色发展先行区、我国中部重要生态经济带[17]。汉江流域兴建了水库群和调水工程,其中丹江口水库和南水北调中线工程是该流域较为重要的两大工程。丹江口水库位于汉江干流的丹江口市,兼具防洪、供水、灌溉、发电、航运等综合作用。丹江口水库于 1967 年开始蓄水,2012 年大坝加高,正常蓄水位加高后为 170 m,库容达 290.5 亿 m^3 ,属于多年调节水库。为了解决华北平原的水资源短缺问题,南水北调中线工程从丹江口水库陶岔渠首引水,供水地区包括河南、河北、北京、天津四个省(市)。南水北调中线一期工程于 2014 年年底通水,供水范围覆盖 15.5 万 km^2 ,

截至 2020 年 7 月已达到 400 亿 m³ 的调水量。此前已有大量研究关注丹江口水库建库对其下游水文情势和生态环境的影响[10] [11] [12], 但 2014 年后南水北调中线工程的开通对汉江中下游的生态环境又会造成新的改变[13] [14] [15]。

收集汉江中下游干流黄家港和皇庄水文站的日均流量资料序列。为分析汉江中下游地区水文情势的变化情况, 分别以 1967 年丹江口水库蓄水和 2014 年底南水北调中线工程通水为两个时间节点, 将实测流量长序列划分为三个时段, 考虑到流量数据的缺失情况, 具体划分如表 1 展示。根据天然流量定义, 1954~1966 年即为天然流量情况。

Table 1. Data segmentation

表 1. 资料分段情况

时段序号	黄家港站	皇庄站
1	1954~1966	1954~1957, 1960~1963, 1965~1966
2	1967~2014	1967, 1969~1972, 1974~2014
3	2015~2020	2015~2020

注: 针对资料缺失时段, 采用分段计算方法。

4. 结果分析

采用 33 个水文改变指标(IHA)和变异性范围法(RVA), 计算黄家港和皇庄水文站各时段的水文改变度。表 2 仅展示不同时段黄家港水文站 IHA 指标及水文改变度。

Table 2. Hydrologic parameters of IHA in different periods at Huangjiagang hydrological station

表 2. 不同时段黄家港水文站 IHA 指标及水文改变度

组别	IHA 指标	黄家港						
		1954~1966			1967~2014		2015~2020	
		均值	下限(25%分位数)	上限(75%分位数)	均值	改变度(%)	均值	改变度(%)
第 1 组(m ³ /s)	1 月平均流量	305	265	358	737	88	572	100
	2 月平均流量	289	223	347	707	83	595	100
	3 月平均流量	511	333	691	729	38	607	33
	4 月平均流量	1084	656	1384	842	29	790	0
	5 月平均流量	1482	836	1496	1012	8	823	67
	6 月平均流量	1109	518	1323	1065	42	960	0
	7 月平均流量	2799	1386	3526	1632	21	1086	0
	8 月平均流量	2314	997	3329	1582	42	896	67
	9 月平均流量	2723	849	4579	1725	42	905	33
	10 月平均流量	1789	608	2318	1324	33	1129	100
	11 月平均流量	815	520	1056	812	17	541	33
	12 月平均流量	448	344	560	746	50	506	33

Continued

	最小 1 日流量	203	172	242	370	71	424	100
	最小 3 日流量	613	518	735	1211	75	1287	100
	最小 7 日流量	1460	1228	1788	2991	75	3052	100
	最小 30 日流量	7010	6026	8567	14,969	75	13,494	100
	最小 90 日流量	31,451	26,687	39,939	52,137	46	43,561	33
第 2 组(m ³ /s)	最大 1 日流量	14,866	9640	18,075	5839	75	3956	100
	最大 3 日流量	37,370	23,883	45,625	16,481	71	11,224	100
	最大 7 日流量	62,261	37,210	90,300	32,267	25	21,806	67
	最大 30 日流量	144,613	106,678	180,243	82,119	58	64,825	67
	最大 90 日流量	269,712	176,699	366,664	170,197	29	124,677	67
	基流指数	1	1	2	3	88	4	100
	断流天数(d)	0	0	0	0	0	0	0
第 3 组(d)	最小流量出现时间	131	58	204	150	38	143	33
	最大流量出现时间	215	180	253	212	8	225	0
第 4 组	高流量脉冲次数	9	8	10	7	50	5	67
	高流量脉冲历时(d)	10	8	10	15	58	9	67
	低流量脉冲次数	4	2	5	9	58	7	67
	低流量脉冲历时(d)	26	14	34	13	63	11	67
第 5 组	流量增加率	38	35	44	17	92	9	100
	流量减少率	-22	-24	-21	-13	88	-7	100
	流量逆转次数	67	64	70	164	100	163	100

4.1. 月平均径流量

黄家港为丹江口水库的出库控制站,根据表 2 和图 1 可知,建库后 4、5、7、11 月的月均流量为轻度改变,其他月份为中高度改变;南水北调中线工程实施后 4、6、7 月为轻度改变,其他月份为中高度改变。黄家港站 1967~2014 年和 2015~2020 年的月均流量及其分别与天然流量和建库后流量的距平如图 1。

黄家港 1967~2014 年主要受丹江口水库运行调度的直接影响,整体表现出汛期(5~9 月)的月均流量显著减少,枯期(12~3 月)的月均流量明显增加。这符合水库调度的丰水期蓄水,削减上游来水,枯水期补水,下泄流量加大的原则。最大增加下泄水量可以达到 1 月的 431 m³/s,最大削减水量可以达到 7 月的 1167 m³/s。图 1(a)可以看出水库在南水北调中线工程实施后年内流量明显坦化,分配均匀。

黄家港 2015~2020 年主要是受南水北调中线工程的影响,月流量仍然保持着水库蓄洪补枯的特性,年内分配进一步均化。南水北调中线工程通水后,月均流量均全部减少,其中汛期 7~9 月受调水影响最大。

黄家港站 1967~2014 年和 2015~2020 年中水文改变度较大的为 1 月和 8 月的月平均流量(图 2),图中 RVA 阈值范围仅使用 1954~1966 年天然流量的上下限,其他时段的上下限仅用于展示,方便对比改变前后数据的分布情况。除了 1 月份的月均流量在 1967~2014 年丹江口水库运行调度后流量增加,基本全部都在 1954~1966 年的天然流量 RVA 阈值以外;2015~2020 年虽然南水北调导致黄家港站水量有所下降,但仍然基本都在天然流量 RVA 阈值外。这与表 2 中 1 月在两时段都是高度改变的情况吻合。8 月月均流量在 1967~2014 年其上限和均值

呈明显下降趋势, 2015~2020 年后月均流量下降进一步减少, 两时段都为中度改变。

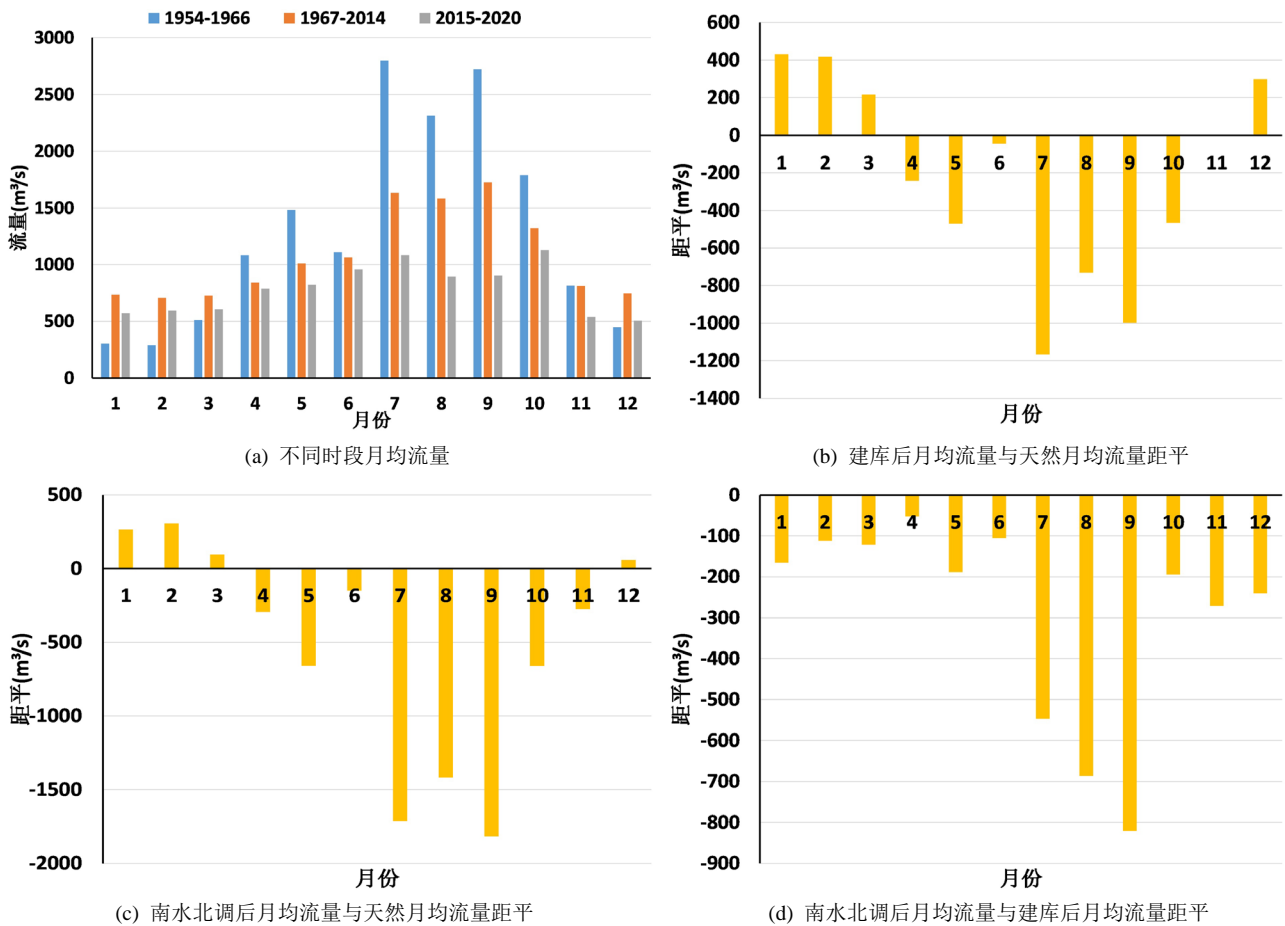


Figure 1. The monthly average discharge and anomalies in different periods at the Huangjiagang hydrological station

图 1. 黄家港水文站不同时段各月均流量与距平

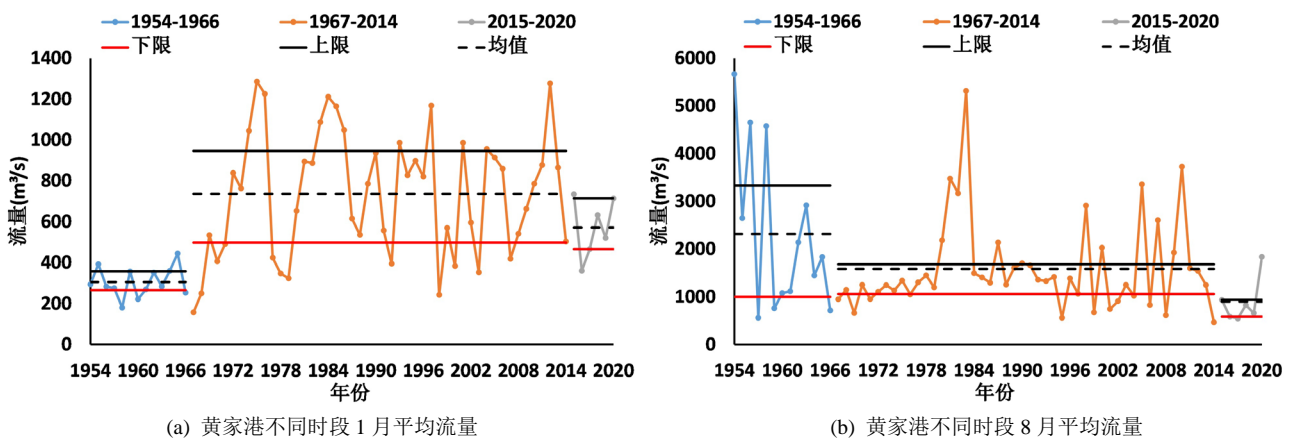


Figure 2. Average monthly flow in January and August during different periods at Huangjiagang hydrological station

图 2. 黄家港水文站不同时段 1 月和 8 月平均流量

皇庄是汉江下游重要控制站, 建库后 7、11、12 月的月均流量为轻度改变, 其他月份为中高度改变; 南水北调中线工程实施后 3、7~9 月为轻度改变, 其他月份为中高度改变。图 3 绘出皇庄站 1967~2014 年和 2015~2020

年的月均流量及其与前一时期距平。

丹江口水库运行调度后,皇庄站表现出汛期的月均流量显著减少,枯期的月均流量明显增加的特点。最大增加下泄水量可以达到1月的 $427\text{ m}^3/\text{s}$,最大削减水量可以达到7月的 $1206\text{ m}^3/\text{s}$,其中6月有 $26\text{ m}^3/\text{s}$ 的增加量是因为6月是丹江口水库的消落期,水库在6月会增加下泄流量,所以下游来水稍许增加。图3(a)可以看出水库建库后年内流量坦化。

受南水北调中线工程实施影响,皇庄站的月流量年内分配继续均化,除了4月和10月平水期少量增加,其余月均流量基本都减少,7~9月受调水影响最大。

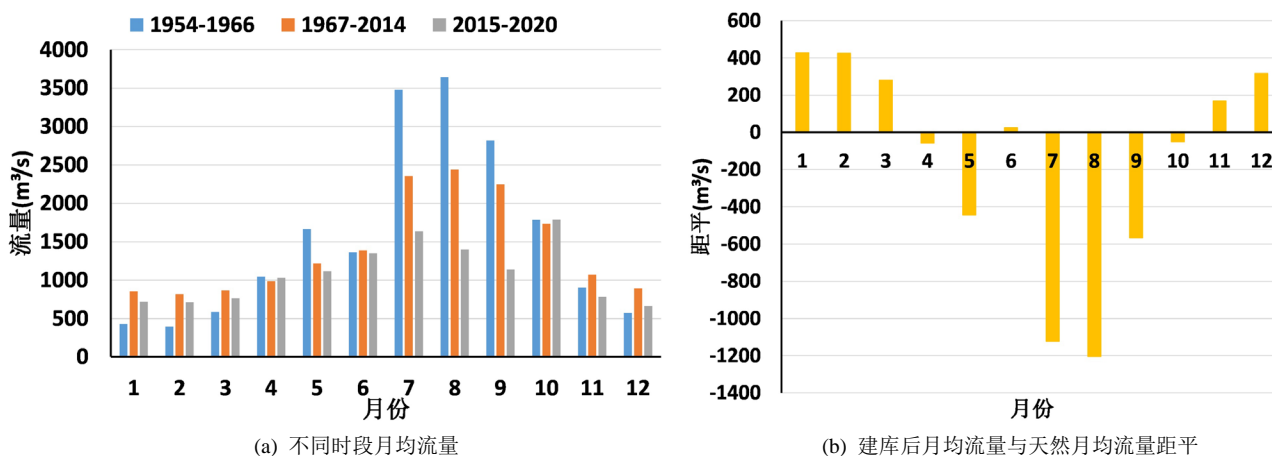


Figure 3. The monthly average discharge and anomalies in different periods at Huangzhuang hydrological station

图3. 皇庄水文站不同时段各月月均流量与距平

从生态响应的角度看,各月平均流量关系着水生生物的栖息地、满足植物生长的土壤含水量、陆地生物生存所需可利用水量等因素,同时水温、水中含氧量、水中光合作用也受其影响[16]。年内流量分配均匀使得各月水量均较充足,较好满足陆地生物和水生生物的需求。但是由于建库和南水北调的影响,月均流量均不在阈值范围内,剧烈的改变会使汉江中下游水生生物特别是鱼类的迁徙、产卵和洄游受到一定的影响。

4.2. 年极值流量

由表2展示1967~2014年黄家港水文站的年极值流量可见,除了最大7d和最大90d为轻度改变外,其他为中高度改变,大部分皆为高度改变。南水北调中线工程实施后年极值流量全部为中高度改变;皇庄水文站在1967~2014年,除了最大3、7、90d的流量为轻度改变外,其他为中高度改变。2015~2020年所有指标全部中高度改变。可见建库和南水北调对年极值流量的影响剧烈。两站均表现出丹江口水库建库后极小值流量显著增加,极大值流量显著减少;南水北调中线工程实施后,枯期和平水期较建库后水量基本不变,但是汛期水量有减少趋势。选择改变度较大的黄家港站最大1d流量展示如图4(a)。

从生态响应的角度分析,年极值流量关系到河道形态结构,水陆生态系统的构建,竞争性、耐受性和应激耐受性生物的平衡[16]。水库“削峰填谷”的特点以及南水北调中线工程对水资源短缺地区的供水能够对防洪、发电、航运、灌溉、生产生活等有一定的积极作用。但是年极值流量的显著变化,影响了调水地区河流和洪泛区之间的养分交换量以及水环境中氧气浓度、高化学浓度状态的历时,同时与极值流量密切相关的鱼类产卵繁殖也将受到较大影响。

4.3. 年极值流量发生时间

黄家港水文站在丹江口水库建库后的最小流量出现时间推迟了19d,为中度改变;最大流量提前了3d,为

轻度改变。南水北调中线工程实施后的最小流量出现时间较建库后的 1967~2014 年提前 7 d 左右但仍为中度改变，最大流量相较于天然流量推迟了 10 d 为轻度改变。皇庄水文站在丹江口水库建库后最小和最大流量出现时间分别推迟了 8 d 和 4 d，南水北调中线工程实施后最小和最大流量出现时间较建库后的 1967~2014 年分别提前了 2 d 和 16 d。皇庄水文站年极值流量发生时间都为中度改变。综合分析得到：丹江口水库建库后“蓄洪补枯”的特点会使得最小流量出现时间有明显推后，由原来的 4 月变为 5 月，南水北调中线工程实施后最小值出现时间又恢复到 4 月左右；最大值出现时间变化不大，3 个时段均基本出现在 7 月。最小流量和最大流量出现时间的分布范围均明显变大，如图 4(b)所示，说明建库和南水北调导致水文情势的不稳定性增大。年极值流量出现时间与生物的生命周期息息相关，影响洄游鱼类的产卵[16]，其中轻度的改变以及不稳定性对生境的影响是难以避免的。

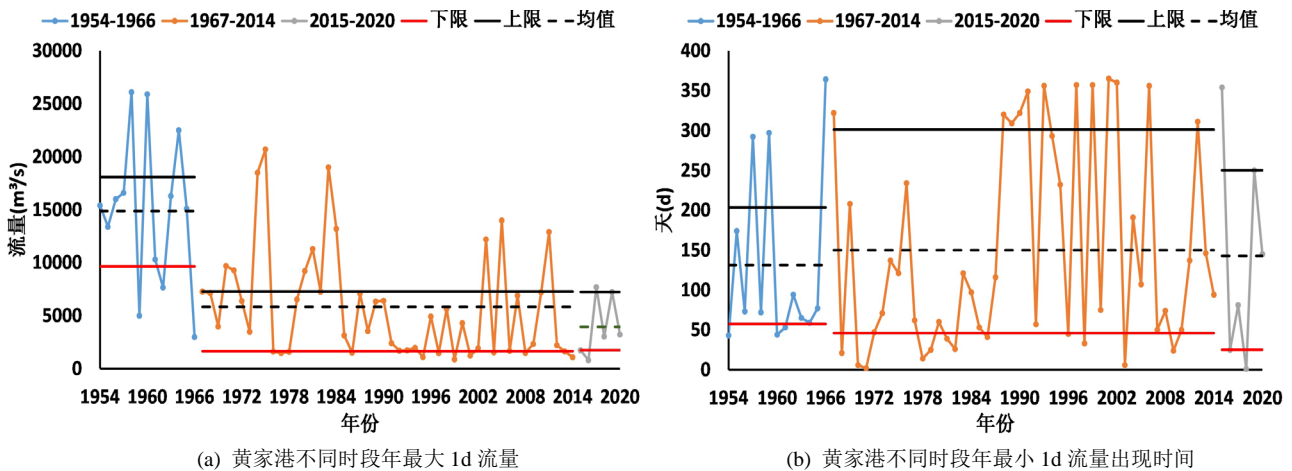


Figure 4. Magnitude and date of annual extreme water conditions in different periods at Huangjiagang hydrological station
图 4. 黄家港水文站不同时段极值流量大小及发生时间

4.4. 流量脉冲

黄家港水文站建库后高流量脉冲次数减少，每次历时增加 5 d。南水北调中线工程实施后高流量脉冲次数进一步减少，历时出现下降，如图 5(a)所示；建库后低流量脉冲次数增加，但历时减少了 13 d。南水北调中线工程实施后低流量脉冲次数相对于建库后的 1967~2014 年进一步减少。黄家港水文站流量脉冲均为中度改变。

皇庄水文站在 3 个时段过程中，高低流量脉冲次数分别显示逐步减少和逐步增加的趋势。高流量脉冲历时建库后增加 3 d，南水北调中线工程实施后又恢复到建库前的 13 d。

丹江口水库建库后由于“蓄洪补枯”以及发电的作用导致高流量脉冲次数出现减少，水库调度使得水量年内分配均匀进而低流量脉冲历时减少，低流量脉冲历时如图 5(b)展示。由于冬季的发电负荷相较于夏季基本持平甚至更大，所以为满足冬季的发电需求，建库后仍需在低流量的冬季发电，低流量脉冲次数出现增加现象。南水北调中线工程实施后高流量脉冲次数继续减少，低流量脉冲次数变化不明显；高流量脉冲历时相较于建库后减少，低流量脉冲历时变化不明显。

流量的脉冲使得河流与滩区形成一个动态连贯的系统，水生生物与陆地生物实现了物质能量交换。同时强烈脉冲导致的水交换也起到调节动植物种群的作用。洪水脉冲作为信息流同样是鱼类洄游、动物牲畜繁殖迁徙的信号[18]。虽然丹江口水库的建成在一定程度上缓解了枯水期水资源短缺的问题，但流量脉冲的改变会影响动植物生存，同时高流量次数和历时的减少也会造成河流与滩区的连通性和交互作用，使生态系统退化。

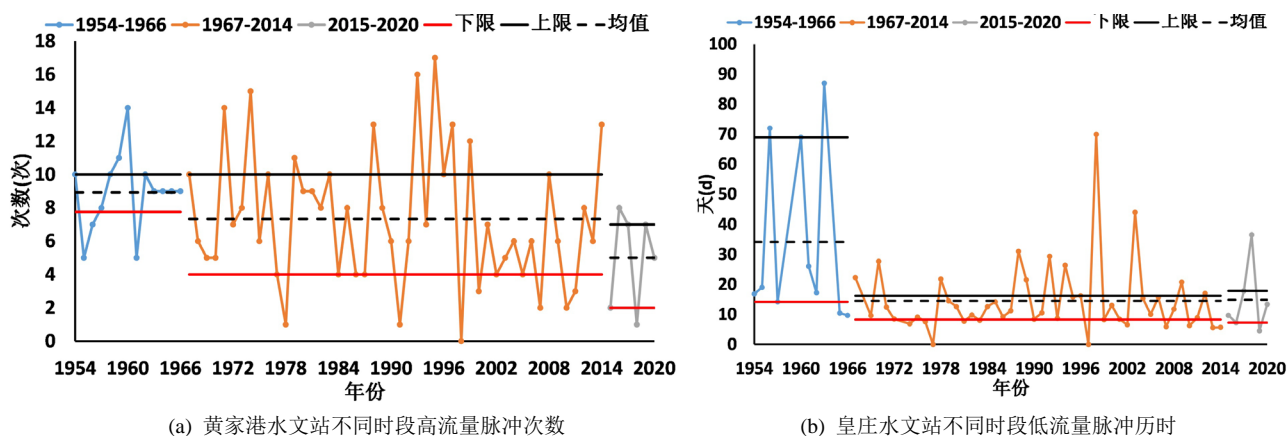


Figure 5. Frequency and duration of high and low pulses in different periods
图 5. 不同时段高低流量脉冲情况

4.5. 流量变化率

黄家港和皇庄水文站均表现出丹江口水库建库后流量增加率和减少率均减小,同时流量逆转次数显著增加,如图 6 展示了黄家港水文站流量增加率以及皇庄水文站流量逆转次数的变化情况。这一趋势在南水北调中线工程实施后进一步加剧。由于丹江口水库的建成,蓄洪补枯的作用导致流量年内分配均匀,增加率和减少率都降低;南水北调将水调走,水量整体减少,增加率和减少率继续降低。流量逆转次数的增加实现了水库中电网的调频和调峰,南水北调中线工程的影响使得流量逆转次数继续增加,严重偏离天然状态。

从生态响应的角度看,植物面临干旱压力、泛洪区有机物的截留情况、低流动河流边缘生物面临脱水问题等都与流量变化率密切相关[16]。流量变化率在两站均为高度变化,高度变化的流量变化率尤其是逆转次数势必会对水生动植物的繁衍生息产生剧烈影响。

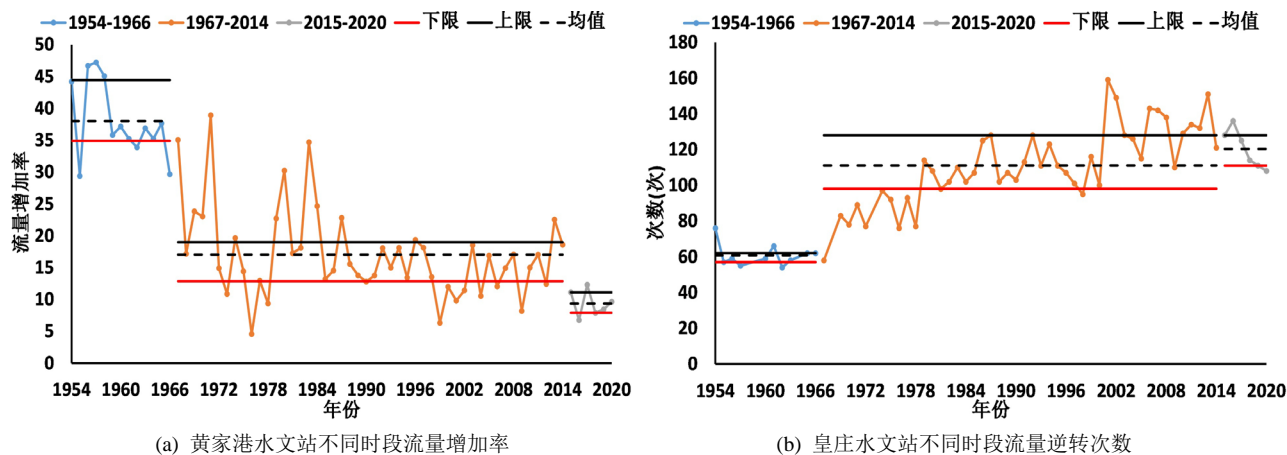


Figure 6. Rate and frequency of water condition changes in different periods
图 6. 不同时段流量增加率和逆转次数

4.6. 整体水文改变度

将水文改变度按照类别分类并求得每一类别的平均改变度和整体改变度,由图 7 可以看到皇庄水文站的整体改变度小于黄家港水文站,这是由于其地理位置距离丹江口水库较远受影响稍小。南水北调中线工程实施后的 2015~2020 年相较于丹江口水库建库后的 1967~2014 年整体水文改变度更大,2015~2020 年的整体改变度为

60%左右, 1967~2014 年的整体改变度均约为 50%, 皆为中度改变。IHA 指标分组, 第 5 组流量增减变化率最为明显, 均为 90%以上, 高度改变; 2015~2020 年的第 2 组数据(年极值流量)为高度改变; 其他组别大部分为中度改变, 极少组别为轻度改变。

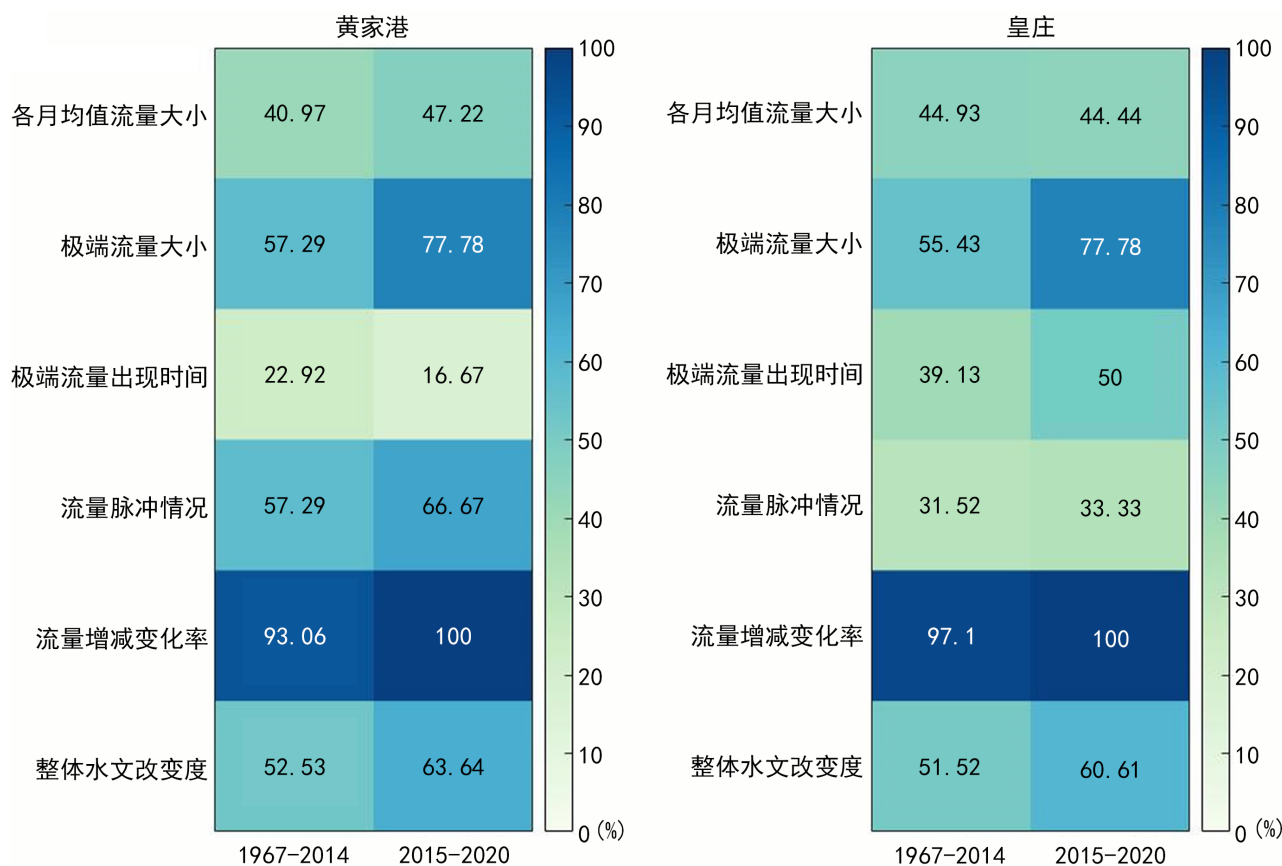


Figure 7. Hydrological alterations in different periods of each group

图 7. 各站不同时段分组水文改变度

5. 结论与展望

为探讨丹江口水库的建成蓄水以及南水北调中线工程实施对汉江中下游水文情势的影响, 本文选用 IHA-RVA 方法, 基于黄家港、皇庄两水文站 1954~2020 年日均流量资料, 定量分析各时段水文改变度, 得到研究结论如下:

1) 丹江口水库建库后的主要改变符合水库“蓄洪补枯”的运行规律, 枯水期流量明显增加, 汛期流量显著减少, 且流量逆转次数增加等。南水北调中线工程实施后, 各月的流量整体呈现下降趋势, 年极值流量出现高度改变, 表明汉江中下游可用水资源量减少。

2) 由于地理位置的不同, 黄家港水文站距离丹江口水库更近, 其整体水文改变度大于皇庄水文站, 但两站均为中度改变。由于水库调度和南水北调中线工程效应的叠加, 调水后 2015~2020 年时段水文改变度约为 60%, 大于丹江口水库建库后 1967~2014 年时段的 50%。

3) 丹江口水库建库后为保障经济社会发展产生防洪和供电效益的同时也改变了天然来水规律, 水文情势中度改变, 这给汉江中下游的生境造成一定压力, 尤其是水生生物的繁衍生息受到威胁。此时以缓解水库调度对生态环境影响的生态调度就有很大的实施的必要。南水北调中线工程实施后, 水量的整体减少可能会增加汉江中

下游水资源配置的难度, 已建引江济汉、兴隆水利枢纽等工程措施、即将实施的引江补汉工程和非工程措施, 将减缓南水北调中线工程对汉江中下游生境的不利影响。

基金项目

国家自然科学基金地区联合基金项目(U20A20317)。

参考文献

- [1] BUNN, S. E., ARTHINGTON, A. H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>
- [2] 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 and JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6): 24-32. (in Chinese)
- [3] RICHTER, B., BAUMGARTNER, J., POWELL, J., et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- [4] POFF, N. L., ALLAN, J. D., BAIN, M. B., et al. The natural flow regime. *Bioscience*, 1997, 47(11): 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- [5] RICHTER, B., BAUMGARTNER, J., WIGINGTON, R., et al. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
- [6] OLDEN, J. D., POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing stream flow regimes. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- [7] KIM, B.-S., KIM, B.-K. and KWON, H.-H. Assessment of the impact of climate change on the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration. *Hydrological Processes*, 2011, 25(5): 691-704. <https://doi.org/10.1002/hyp.7856>
- [8] 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 and WANG Jun. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang Station. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120-130. (in Chinese)
- [9] 郭文献, 陈鼎新, 李越, 等. 基于 IHA-RVA 法金沙江下游生态水文情势评价[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(8): 155-162. GUO Wenxian, CHEN Dingxin, LI Yue, et al. IHA-RVA-based assessment of eco-hydrological regime of lower Jinshajiang River. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(8): 155-162. (in Chinese)
- [10] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 丹江口水库对下游汉江径流情势的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2007(4): 33-35. ZOU Zhenhua, LI Qiongfang, XIA Ziqiang, et al. Human-induced Alterations in the flow regime of the Hanjiang River. *Water Resources and Power*, 2007(4): 33-35. (in Chinese)
- [11] 谢文星, 黄道明, 谢山, 等. 丹江口水利枢纽兴建后汉江中下游四大家鱼等早期资源及其演变[J]. *水生态学杂志*, 2009, 30(2): 44-49. XIE Wenxing, HUANG Daoming, XIE Shan, et al. The early evolution of the four major Chinese carp's resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River after the construction and operation of Danjiangkou Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(2): 44-49. (in Chinese)
- [12] 彭涛, 严浩, 郭家力, 王高旭, 等. 丹江口水库运用对下游水文情势影响研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(6): 22-26+47. PENG Tao, YAN Hao, GUO Jiali, et al. Impact of Danjiangkou Reservoir operation on downstream hydrological regime. *Yangtze River*, 2016, 47(6): 22-26+47. (in Chinese)
- [13] 朱烨, 李杰, 潘红忠. 南水北调中线调水对汉江中下游水文情势的影响[J]. *人民长江*, 2019, 50(1): 79-83. ZHU Ye, LI Jie and PAN Hongzhong. Influence of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 79-83. (in Chinese)
- [14] 曹圣洁, 夏瑞, 张远, 李正炎, 任逸轩, 塔拉. 南水北调中线工程调水前后汉江下游水生态环境特征与响应规律识别[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1431-1439. CAO Shengjie, XIA Rui, ZHANG Yuan, LI Zhengyan, REN Yixuan and TA La. Characteristics and response of ecological environment in downstream of Hanjiang River before and after running of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1431-1439. (in Chinese)
- [15] 卢金友, 林莉. 汉江生态经济带水生态环境问题及对策[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1179-1186. LU Jinyou, LIN Li. Problems and countermeasures on water eco-environment in Hanjiang ecological economic belt. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1179-1186. (in Chinese)
- [16] RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J. V., BRAUN, D. P., et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river

network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4): 329-340.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E)

- [17] 国务院关于汉江生态经济带发展规划的批复[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2018(30): 78-79.
The approval of development plan of Hanjiang ecological belt development. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2018(30): 78-79. (in Chinese)
- [18] 董哲仁, 张晶. 洪水脉冲的生态效应[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 281-288.
DONG Zheren, ZHANG Jing. Ecological effect of flood pulses. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3): 281-288. (in Chinese)