Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2024, 13(1)
Published Online February 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jwrr

堵河中游生态水文情势变化分析

李　杰，程小翠

湖北省水文水资源应急监测中心水资源科，湖北 武汉

收稿日期：2023年12月22日；录用日期：2024年2月7日；发布日期：2024年2月23日

摘　要

针对河道径流易受人类活动影响而导致生态水文情势发生变化的情况，本文利用竹山水文站1959~2020年的实测径流数据，采用IHA-RVA法评估潘口水库建库后对堵河中游生态水文情势的影响。结果表明：潘口水库运行后对河流的控制程度较大，整体水文改变度57.8%。对各月平均流量、年极值流量、流量变化改变率及频率三组参数的影响较为明显，需采取相关措施，减少水利工程对水文情势的影响，以维持河流生态系统健康可持续发展。

关键词

IHA-RVA，堵河，生态水文过程，水文综合改变度

Analysis of Changes in Ecological and Hydrological Conditions in the Middle Reaches of the Duhe River

Jie Li, Xiaocui Cheng

Department of Water Resources, Hubei Provincial Hydrological Water Resources Emergency Monitoring Center, Wuhan Hubei

Received: Dec. 22nd, 2023; accepted: Feb. 7th, 2024; published: Feb. 23rd, 2024

Abstract

In response to the susceptibility of river runoff to human activities leading to changes in the ecological and hydrological situation, the IHA-RVA method was used to evaluate the impact of the construction of the Pankou Reservoir on the ecological and hydrological situation in the middle reaches of the Duhe

作者简介：李杰，男，湖北安陆人，出生于 1989 年 6 月，硕士研究生，工程师，主要研究方向为水资源评价，Email: lijiehy@126.com

River, using the measured runoff data during 1959 to 2020 at the Zhushan Hydrological Station. The results indicate that after the operation of Pankou Reservoir, the degree of control over the river is significant, with an overall hydrological change of 57.8%. The monthly average flow, annual extreme flow, rate of change in flow, and frequency are more significant. Relevant measures need to be taken to reduce the impact of water conservancy projects on hydrological conditions to maintain the healthy and sustainable development of river ecosystems.

Keywords

IHA-RVA Method, Duhe River, Ecohydrological Processes, Hydrological Comprehensive Change Degree

Copyright © 2024 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

河流的天然水文情势是形成和维持水生生物和岸边生物赖以生存的河道内和泛洪平原栖息地条件的主要因素，影响着河流生态系统的结构和稳定。近几十年来，随着经济的快速发展，堵河流域水资源开发利用程度逐步增加，在河流上修建水利工程用于防洪、发电、灌溉、供水等使得河流的天然水文情势发生了改变，从而影响生物群落的组成和多样性[1] [2]。因此研究堵河中游生态水文情势变化，对维护堵河流域生态系统的健康和可持续发展具有重要意义。

2. 研究方法

2.1. 水文改变指标法

水文变化指标(Indicator of Hydrological Alteration, IHA)是大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC) 1996 年开发的一套评价水文变化的软件，1997 年 Richter 等把变化范围法(Range of Variability Approach, RVA) [3] [4] [5]引入 IHA，用流量大小、时间、历时、频率以及变化率等方面计算 32 个影响生态环境的关键水文特征[3]判定水文指标变化对生态环境的影响程度，具体水文参数见表 1，其中径流的年内变化影响着水生有机物栖息地有效性和陆生动物的水资源有效性及水供应的可靠性；年极值流量及发生时间影响着生物繁殖期的栖息地条件；高、低流量的频率及历时影响着洪泛区与河流的泥沙运输、渠道结构、底层扰动等；流量变化改变率及频率影响着低速生物体干燥胁迫和促成岛上、漫滩的有机物的诱捕等。

表 1. IHA 法的生态水文参数

组别	内容	特性	32 个水文改变指标(IHA)
1	各月流量	数量、时间	各月流量均值(12 个参数，1~12)
2	年极值流量	数量、历时	年最小、最大 1、3、7、30、90 日流量均值、断流天数和基流指数(12 个参数，13~24)
3	年极值流量发生时间	时间	年最大、最小 1 日流量发生时间(2 个参数，25~26)
4	高、低流量的频率及历时	数量、频率、历时	每年发生高脉冲、低脉冲的次数高脉冲、低脉冲平均历时(4 个参数，27~30)
5	流量变化改变率及频率	频率、变化率	流量平均增加率、流量平均减少率、每年流量逆转次数(3 个参数，31~33)

2.2. 水文变化范围法

RVA 法是建立在分析水文指标的基础之上的，通过分析变化前后的河道流量数据来评价水文指标的变化程度。Richter 等提出以各指标的平均值加减一个标准差作为 RVA 的目标，即以各指标的平均值 $\pm\delta$ (标准差)或者以频率为 75%和 25%作为各个指标的上下限，称为 RVA 目标[3]。RVA 法的评估步骤见文献[6] [7] [8] [9]。

2.3. 水文改变度的计算

IHA 水文指标受影响后的改变度，采用 Richter 提出的水文改变度来量化[5]：

$$D=\frac{N_0-N_e}{N_e}\times 100\% \quad N_e=r\times N_T \tag{1}$$

式中：D 为 IHA 指标的变化度；N_0 为影响后水文系列 IHA 指标值落入 RVA 目标范围内的年数；Ne 为影响后 IHA 指标值落入 RVA 目标范围内的期望年数；r 为影响前 IHA 指标落入目标范围内的年数的比例，对于 25%~75%频率区间的目标范围，$r=50\%$；N_T 为影响后水文系列的总年数。为了反映水文参数的变化在受水利工程建设和运行后的影响程度，将水文变化度$|D|$分为三个等级：0%~33%为无改变或低度改变(L)；34%~66%为中度改变(M)；67%~100%为高度改变(H)。

同时由于上述 33 个水文指标会产生 33 个不同的改变度，为进行简化且更便于理解，采用整体水文改变度 D_0 进行整体分析。

$$D_0=\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_i^2\right]^{1/2}\times 100\% \tag{2}$$

式中 n 为水文指标的个数。

其中，D_0 值介于 0%~33%属于未改变或者低度改变(L)；33%~67%属于中度改变(M)；67%~100%属于高度改变(H)。

3. 结果及分析

竹山水文站位于潘口水库下游，参考潘口水库建设时间(2011 年)，将竹山水文站 1959~2020 年逐日流量序列分为 1959~2010 年、2011~2020 年两个水文系列。采用 IHA 软件，依据上述研究方法，对竹山站水文系列进行分析统计，得出如表 2 所示的结果。

表 2. 竹山水文站断面 33 个生态水文指标统计表

参数	水文参数	建库前	建库后	RVA 阈值		变化率(%)	水文变化度(D)	变化等级
				下限	上限			
第 1 组(各月平均流量)	1 月	35.8	84.4	27.5	44.0	136.0	−100	H
	2 月	41.7	77.8	23.8	59.6	86.5	−54.8	M
	3 月	91.8	87.4	37.1	147	−4.9	1.46	L
	4 月	174	119	106	242	−31.6	−31.6	L
	5 月	231	202	97.4	365	−12.7	−22.0	L
	6 月	220	237	77.6	363	7.7	33.3	L
	7 月	285	220	126	444	−22.8	12.4	L

续表

第 1 组(各月平均流量)	8 月	235	174	69.7	400	−26.0	22.4	L
	9 月	263	182	87.4	439	−30.8	1.11	L
	10 月	201	165	45.2	357	−17.8	1.46	L
	11 月	106	77.7	49.0	162	−26.5	−1.62	L
	12 月	51.1	113	34.1	68.1	121.7	−70.3	H
第 2 组(年极值水文状况的大小和历时)	年最小 1 日流量	11.0	0.475	19.0	31.7	−95.7	−100	H
	年最小 3 日流量	11.2	0.692	20.1	32.3	−93.8	−100	H
	年最小 7 日流量	12.2	2.65	21.1	32.9	−78.3	−100	H
	年最小 30 日流量	16.3	9.0	24.2	36.1	−44.8	−40.6	M
	年最小 90 日流量	23.6	19.6	35.0	67.9	−16.9	−59.0	M
	年最大 1 日流量	8030	3020	1222	3704	−62.4	−57.8	M
	年最大 3 日流量	4030	2183	850	2419	−45.8	−57.8	M
	年最大 7 日流量	2467	1577	566	1512	−36.1	−70.3	H
	年最大 30 日流量	1146	889	294	716	−22.4	15.6	L
	年最大 90 日流量	632	440	206	450	−30.4	1.1	L
	断流天数	0	0	0	0	0	0	L
	基流指数	0.08	0.02	0.12	0.24	−78.3	−84.2	H
第 3 组(年极值水文出现时间)	年最小流量日	48.4	179.4	37	107.1	270.9	−37.6	M
	年最大流量日	212.3	192.7	161.5	263.2	−9.2	−18.8	L
第 4 组(高流量和低流量的频率和历时)	低脉冲次数	6.9	20.4	3	14.28	194.7	−84.7	H
	低脉冲历时	21.62	4.37	3.18	40.06	−79.8	−25.7	L
	高脉冲次数	9.06	4.10	5.24	12.87	−54.7	−52.7	M
	高脉冲历时	2.57	4.55	1.85	3.29	77.0	−70.3	H
第 5 组(水文条件改变的变化率和频率)	连续日流量上涨率	110.9	44.8	60.9	160.9	−59.6	−86.0	H
	连续日流量下降率	−49.7	−44.3	−68.5	−31.0	−11.0	12.4	L
	流量逆转的次数	101	184.3	86	132.7	82.5	−100	H

备注：1) 水文改变度中，正值表示变化段各参数落在目标区间比期望的高；负值表示变化段各参数落在目标区间比期望的低；2) 上升率(或下降率)指的是某日流量值相较于前一日的平均上升(或下降)百分比。3) 表中各参数的单位分别为：月平均流量：m^3/s；极端流量：m^3/s；极端流量出现时间：日；极端流量次数：次；流量变化率：%；反转数：次。

第 1 组参数：从表 2 及图 1 可以看出，建库后的 1 月、2 月、12 月月均流量落在 RVA 阈值范围内的年数比期望值要低。3 月至 11 月的流量中值除 6 月份相较建库前有所增加外，其余月份均相比有所下降，尤以 4、9 月减少明显。各月份水文改变度 1 月和 12 月为高度改变，2 月为中度改变，其他月份均为低度改变，其中以 1 月份水文改变度最大，表明水库的建设运行增加了枯水期流量，丰水期流量有所减小。径流年内分配的变化会造成河道形态的转变，改变原有的河流生态系统，进而影响自然生物产卵环境、迁徙等[7]。

第 2 组参数：该组参数中，大部分参数处于中高度变化中，由表 2 及图 2 可看出，最小 1 日、3 日、7 日平均流量水文改变度较大，达到了 100%，且落在 RVA 阈值范围内的年数比期望值低；最大 30 日、90 日平均流量变化较小，水文改变度低于 33%，为低度变化。说明水库运行后，由于水库的拦蓄作用及运行维护等原因，

可极大的改变最小日均流量的大小，故应更加关注建库后最小流量的减少对生物造成的影响。在变化前后均无断流天数，表明不会有大规模的生物死亡的现象。此外，极值流量的变化将导致河流生态系统的稳定性变差。

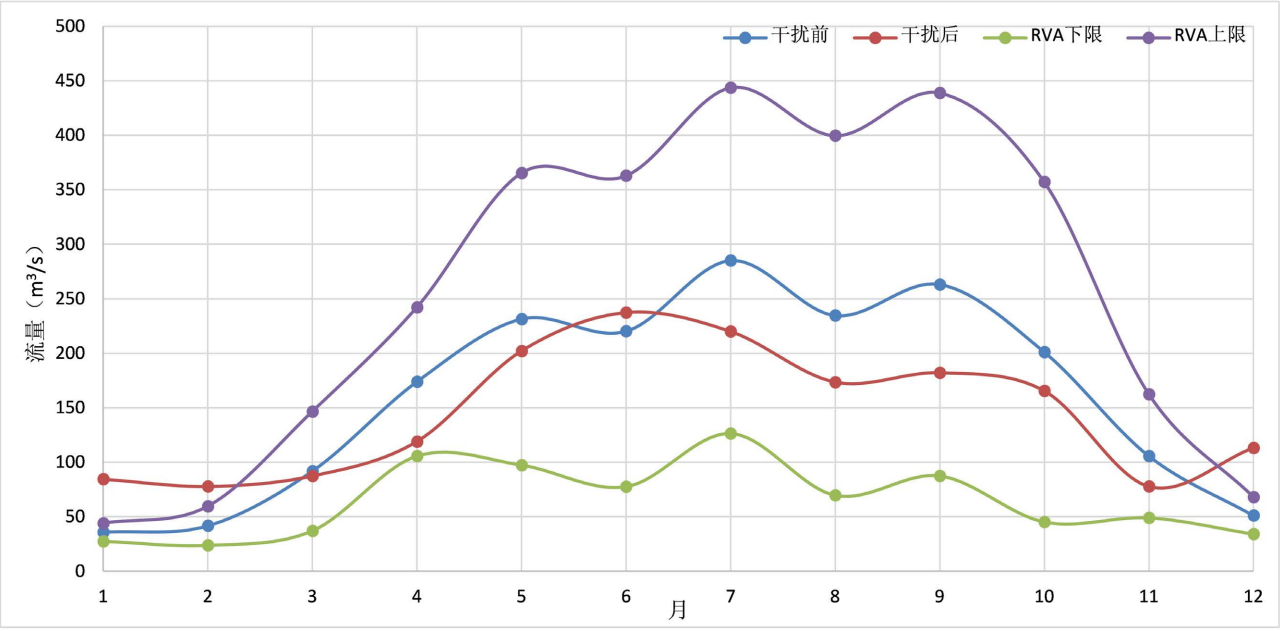

图 1. 竹山水文站干扰前后月均流量变化

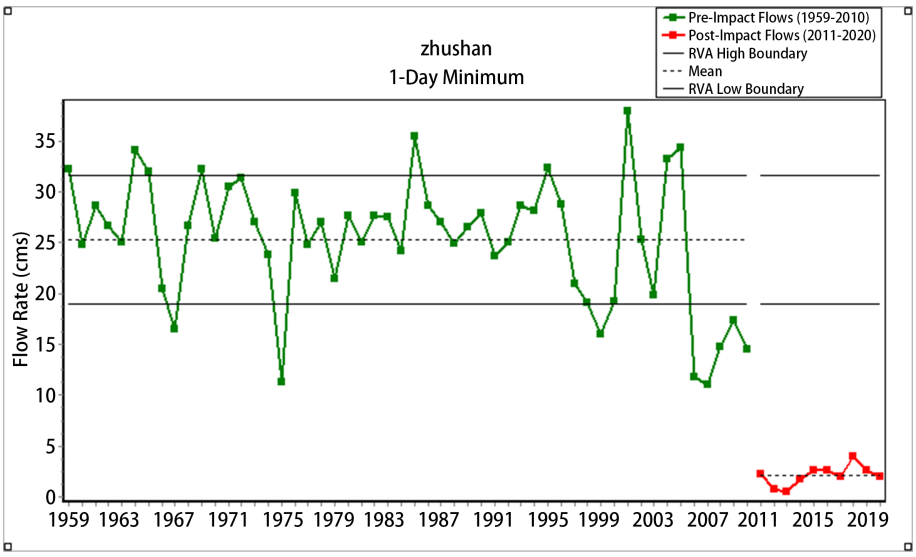

图 2. 竹山水文站最小 1 日流量变化图

第 3 组参数：年极值流量发生时间属于中低度改变。年最大流量出现时间有所提前，年最小流量出现时间有较大推迟。若每月按 30.4 天计算的话，年最小流量出现由 2 月中旬推迟至 6 月下旬；年最大流量出现由 7 月下旬提前至 7 月中旬。由于建库后极值年际波动较建库前显著，尤其是最小流量的出现在 6 月下旬，将会影响生物繁殖期内的行为过程和栖息环境。

第 4 组参数：除年低流量脉冲事件的平均历时为低度改变，其他参数为中度变化。干扰后，低流量次数增加，持续时间减少；高流量次数减少，持续时间增加。低流量次数和高流量持续时间较基准干扰前变化明显，

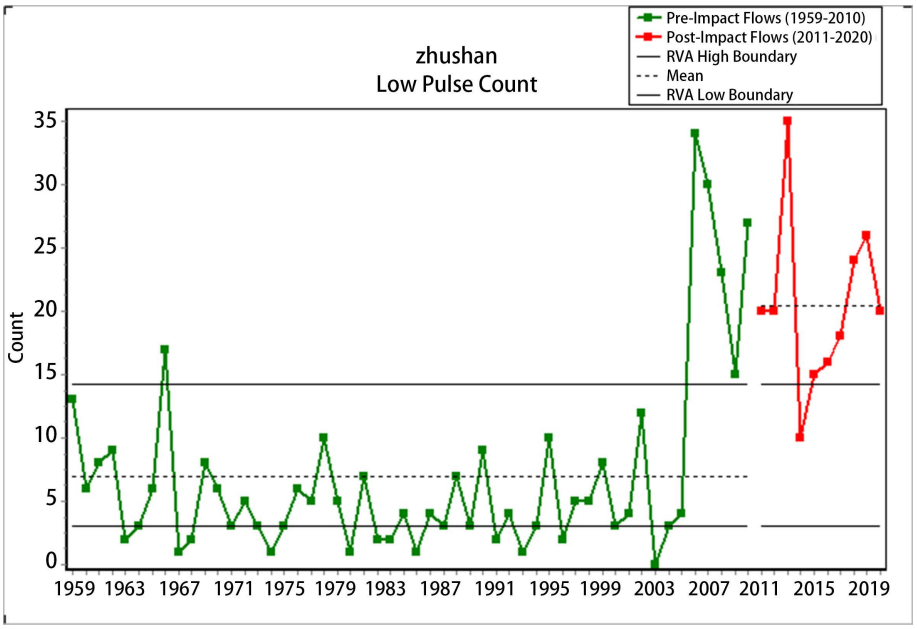

图 3. 竹山水文站低流量次数变化图

由图 3 可看出，低流量次数这一参数在 2006 年以后就很少落在 RVA 阈值范围内，且发生次数有明显增加，然而高、低流量是构造河流生态环境不可或缺的因素，高、低流量的过大变化会对水生生物，特别是漫滩栖息地的水生生物产生一定的影响[10]。

第 5 组参数。连续日流量上涨率和流量逆转的次数呈现高度改变，连续日流量下降率水文改变度为低度。由分析表格可知，连续日流量上涨率在干扰后的上涨幅度较干扰之前有所降低，说明干扰后流量变化更为平缓。流量的逆转次数与河流生态环境的变化周期有着十分紧密的相关性，较大的流量逆转可能会对某些水生生物的生长造成较大的影响[11]。

采用加权评价法分别计算竹山水文站各组 IHA 指标的水文改变度及断面的整体水文改变度，计算结果如表 3 所示。

表 3. 竹山水文站整体水文改变度计算表

断面名称	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	整体水文改变度
竹山	42.0 (M)	67.1 (H)	29.7 (L)	62.4 (M)	76.5 (H)	57.8 (M)

根据各组水文改变度的计算结果，可得出：竹山水文站断面第 2 组和第 5 组参数的水文改变度属高度改变，第 1 组和第 4 组参数的水文改变度属中度改变，第 3 组参数属低度改变，整体水文改变度分别为 57.8%，属于中度改变程度。由此看见，潘口水库运行后对下游竹山水文站断面的水文情势影响较大，主要原因是一方面为潘口水库为年调节水库，具有一定的拦蓄和调节水量的能力，在一定程度上能使得月平均流量、年极值流量、流量变化改变率及频率能发生较大程度的改变，另一方面，竹山断面位于竹山县城附近，其上游潘口水库及其入库支流作为中部灌区、陈家河灌区等中型灌区主要灌溉水源，导致堵河中游水文情势受人类活动影响相对较大。

4. 结论

本文采用 RVA-IHA 法对潘口水库的运行对堵河径流的影响进行了评价，结果表明潘口水库的运行，在一

定程度改变了下游河流的水文情势，打破了堵河原水域的生态系统，对其生态结构产生一定影响。潘口水库运行后，丰水期月流量变化减小、枯水期流量增加，高流量次数减少，低流量出现时间在汛期，说明潘口水库在汛期防洪调蓄作用明显。这种变化情况下，竹山断面的生态水文情势的整体改变程度达到中度变化，将对堵河水生生物的生存环境造成一定的改变，会对河流生物的生物量和多样性产生较大影响，继而危害水生生物的繁殖和生存，尤其是在汛期，鱼类繁殖、产卵、发育的关键时期，水文情势的变化导致原生态系统的改变，对原生态系统的影响将更为显著。因此，对于人类活动改变水文情势，造成影响的河流，须采取有力措施减少其影响，以维持河流生态系统健康可持续发展。

参考文献

[1] POFF, N. L., ALLAN, J. D., BAIN, M. B., et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. Bioscience, 1997, 47(11): 22-29. https://doi.org/10.2307/1313099

[2] RICHTER, B. D., MATHEWS, R., HARRISON, D. L., et al. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity. Ecological Applications, 2002, 13(1): 206-224. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2

[3] RICHARD, B. D., BAUMGARTNER, J. V. and POWELL, J. 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] RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J. V. and WIGINGTON, R. 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

[5] RICHARD, B. D., BAUMGARTNER, J. V. and BRAUN, D. P. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. Regulated Rivers: Research and 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

[6] 廖燕芬, 蔡旭东. 变化范围法评估北江流域水文情势变化[J]. 广西水利水电, 2012(3): 14-17.

[7] 张鑫, 丁志宏, 谢国权, 白淑娟. 水库运用对河流水文情势影响的 IHA 法评价——以伊河陆浑水库为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 79-83.

[8] 蔡文君, 殷峻暹, 王浩. 三峡水库运行对长江中下游水文情势的影响[J]. 人民长江, 2012, 43(5): 22-25.

[9] 郭文献, 夏自强, 王乾. 丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学报, 2008, 36(6): 733-737.

[10] 胡诗松. 长江上游保护区铜鱼产卵繁殖期的生态流量研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 长江科学院, 2016.

[11] 郭文献, 焦旭洋, 周昊彤, 金耀广, 王鸿翔. 嘉陵江水文情势变化及其鱼类影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 805-813.