

日调节电站库区生态水文情势评价

——以湘江干流衡阳站为例

曹艳敏 毛德华 邓美容 张京亚¹

(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

【摘要】: 河流生态水文情势对生态系统起着决定性作用, 定量评估日调节电站库区中部生态水文情势影响, 可为日调节电站的生态调度, 维持河流生态健康等提供科技支撑。采用变动范围法 (RVA) 对湘江干流大源渡枢纽库区衡阳水文站 1959~2015 年逐日流量、水位及流速指标进行分析, 采用生物多样性指标 SI 初步评估库区生物多样性的变化。结果表明: 日调节电站蓄水后, 库区中部生态水文变化特征及生态影响为: 流速 IHA 指标整体改变度达到 81%, 流量 IHA 指标整体改变度为 43%; 4~7 月月均流速降低 (高度改变) 不利于“四大家鱼”产卵活动; 库区年极小值流量的增加利于保障自然栖息地和植物群落; 年极值流速降低在改变库区河道地貌的同时加大生态环境风险; 流量、流速年最小值出现时间发生 100% 改变, 影响生物的生命活动; 流量低脉冲历时和流速高脉冲历时高度改变, 不利于刺激家鱼产卵繁殖活动; 枢纽蓄水后 SI 值降低, 生物多样性降低。

【关键词】: 生态水文 变动范围法 (RVA) 日调节电站 库区

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2019) 07-1602-10

河流水文情势是河流生态系统的驱动力^[1]。在长期的演变过程中, 河流物种适应了河流水流自然涨落变化过程, 并成为其生境条件, 河流生态系统的完整性很大程度上依赖于河流水流的天然动态变化的特征, 即河流水文情势^[2]。随着区域经济发展和社会的进步, 人类对水资源的开发利用程度不断提高, 改变了河流的天然水文情势, 其中水利枢纽工程对受控河流水文情势的改变最为显著, 且改变程度随着河流开发利用程度的增加而逐步积累, 并由此产生一系列生态水文效应^[3]。

国内关于水利工程对生态水文情势影响分析, 研究对象多为以三峡为代表的多年调蓄型水利枢纽^[4~9], 且各专家学者将研究重点多集中在水库下游^[10, 11]。少量有关日调节电站库区水文情势影响的研究以定性分析^[12, 13]及数值模拟^[14~17]研究为主, 缺乏对实测数据的生态水文情势改变度定量分析。因此, 科学定量分析日调节电站对河道尤其是库区回水范围内生态水文情势改变度, 可以全面深入了解日调节电站对生态环境的影响机理, 为改善河流生态健康提供支撑。

关于定量评估河流生态水文变化方法, 国外学者提出多个生态水文指标体系^[18]。但这些评价体系对数据要求较高, 涉及大量的生物栖息地、地貌甚至物种信息, 方法不易实现。1996 年, Richter 等^[19]提出水文变化指标法 (Indicators of Hydrologic Alteration, 简称 IHA 方法), 该方法以水文情势的量、时间、频率、延时和变化率 5 种基本特征为基础, 来评估河流生态水文变化。1997 年, Richter 等^[20, 21]在 IHA 方法的基础上, 提出变动范围法 (Ranges of Variability Approach, 简称 RVA 法), 用于分析河流变化前后的改变度, RVA 方法提出后, 在国内外得到广泛应用^[22, 23]。

¹**作者简介:** 曹艳敏 (1983-), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事水文水资源及水环境研究. E-mail: 179276781@qq.com; 毛德华 E-mail: 850276407@qq.com。

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2017SK2301); 湖南省重大水利科技项目 (湘水科计 [2016] 194-13); 湖南师范大学一流学科建设项目 (1117)。

本文以湘江干流大源渡枢纽库区中部衡阳站为研究对象,采用变化范围法(RVA)定量分析河流在枢纽蓄水后生态水文情势的改变程度,以期研究日调节水电站对库区河道生态影响,为进一步开展梯级枢纽生态调度提供决策依据。

1 研究区域与分析方法

1.1 研究区域

日调节是指一昼夜内进行的径流重新分配。日调节电站无防洪库容,工程建成后,虽然年月径流不发生改变,但日径流时程分配却发生了变化,电站用水属河道内用水,在其运行过程中本身并不消耗水量,基本为“来多少,泄多少”的状态,对水文情势影响相对多年调蓄型水库较小。因日调节水电站一般只在枯水季进行日调节,在汛期常采用径流发电方式,所以有人认为日调节水电站也属径流式水电站。

大源渡枢纽位于湘江干流衡阳市境内,是典型的低水头、径流式、日调节电站,1999 年建成蓄水,控制流域面积 53200km²,正常蓄水位 50.1m,死水位 47.9m(85 国家高程)。低水头径流式电站回水范围一般较短,单个枢纽库区范围内难以有多个水文监测站提供数据支撑,大源渡库区回水范围长约 100km,衡阳水文站位于大源渡枢纽上游 53km,位于库区中部,其水文情势改变度具有一定的代表性。

本文采用的数据资料主要包括:1959~2015 年衡阳水文站逐日流量、水位资料(由湖南省水文水资源勘测局提供),及衡阳水文站河道断面实测数据。衡阳站断面逐日平均流速 V_i 用公式(1)推求。

$$V_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为逐日流量; A_i 为 Q_i 流量下对应的过水断面面积。

1.2 RVA 分析方法

变动范围法(RVA)是 Richter 等于 1997 年提出,该法建立在水文变化指标(IHA)法的基础上,利用建立的生态水文指标(表 1)评价受水利工程影响的河流水文情势^[20~22]。为了量化指标受干扰后的变化程度,Richter 等建议以改变度来评估,其定义如下:

$$D_i = \left| \frac{N_{oi} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_i -第 i 个 IHA 指标的水文改变度; N_{oi} -第 i 个 IHA 受干扰后的观测年数中落在 RVA 目标阈值内的年数; N_e -受干扰后 IHA 指标预期落入 RVA 目标内的年数,可以用 $r \cdot N_r$ 来评估,其中, r 为受干扰前 IHA 落入 RVA 目标阈值内的比例,若以各个 IHA 的 75% 及 25% 作为 RVA 目标,则 $r=50\%$,而 N_r 为受干扰后流量时间序列记录的总年数。为对 IHA 指标的水文改变程度设定一个客观的判断标准,Richter 等建议 $0\% \leq |D_i| < 33\%$ 属于未改变或者低度改变; $33\% \leq |D_i| < 67\%$ 属于中度改变; $67\% \leq |D_i| \leq 100\%$ 属于高度改变。整体水文变化程度 D_o 可以用以下方法计算:取 32 个 IHA 指标改变度的平均值来评估河流生态环境的整体变化情形,然而这样将体现不出各指标权重大小。借鉴萧正宗提出的以权重平均的方式来量化评估整体水文特征改变度的方法^[24,25],以 D_o 表示,见下式:

表 1 IHA 参数指标及其生态影响

序号	IHA 参数组	参数指标	与生态系统的响应关系
1	月均值	每月流量、水位的平均值	(1)满足水生生物栖息地蓄水;(2)植被土壤湿度需求;(3)陆地生物的蓄水要求;(4)动物的迁徙需求;(5)水温、含氧量、光合作用的影响
2	年极值大小及历时	年均 1、3、7、30、90d 最小及最大流量(流速)、基流指数 ^①	(1)满足植被扩张;(2)生物体忍耐性平衡;(3)河渠地形塑造;(4)自然栖息地物理条件培养;(5)河流和漫滩的养分交换;(6)湖、池塘、漫滩的植物群落分布的需求
3	年极值状况发生时间	年最大、最小 1 天发生的日期(罗马日) ^②	(1)生物繁衍;(2)生物繁殖期的栖息地条件;(3)物种的进化需要;(4)满足鱼类的洄游产卵
4	高、低脉冲的频率及历时	每年高、低脉冲数 ^③ 以及脉冲持续时间的平均值	(1)植物所需土壤湿度的频率与尺度;(2)满足洪泛区与河流的泥沙运输、渠道结构、底层扰动等需要;(3)支持水鸟栖息地
5	流量及流速条件变化率及频率	涨幅(上升率)、降幅(下降率)的年均值以及逆转次数 ^④	(1)植物干旱压力;(2)低速生物体干旱胁迫;(3)岛、漫滩的有机物沉积

$$D_o = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{33} D_i^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中:n 为指标个数;同时也规定 D_o值介于 0%~33%属于未改变或者低度改变;33%~67%之间属于中度改变;67%~100%属于高度改变。

1.3 生物多样性评价方法

SI (Shannon Index, Shannon 指数) 是运用最广泛的评价生物多样性的指标^[26]:

$$SI = - \sum i p_i \times \log p_i \quad (4)$$

式中:p_i表示为群落属于第 i 个物种的比例;SI 越大表示生物多样性越丰富。Yang 等^[27]用 GP(Genetic Programming)算法,基于 IHA 的 33 个指标建立 SI 与水文指标的最佳拟合关系:

$$SI = \frac{D_{\min} / \text{Min}7 + D_{\min}}{Q_3 + Q_5 + \text{Min}3 + 2 \times \text{Max}3} + R_{\text{rate}} \quad (5)$$

式中:D_{min}表示为最小一天流量的儒略日期;Min3、Min7 分别表示为最小 3d 流量和最小 7d 流量;Max3 表示为最大 3d 流量;Q₃、Q₅分别表示为 3、5 月流量;R_{rate}表示为连续日流量之间正差异的均值^[28]。由于缺乏湘江干流该研究区域河道生物群落和种类数量数据,无法直接计算 SI 指标,因此本文用公式(5)SI 与水文指标构建的关系式,粗略评估枢纽建后对河道生物多样性的影响程度。

2 库区水文情势年际变化分析

对衡阳站年均流量、水位及流速进行年际分析(图 1)。1999 年大源渡枢纽蓄水对库区衡阳站年均流量影响不大,使年均水位抬高,年均流速下降。枢纽蓄水后,衡阳站水位由蓄水前年均 45.51m 抬高至蓄水后年均 49.96m,由于枢纽回水抬高作用,使得衡阳断面水位已普遍高于蓄水前上限值,没有再落入天然河流状况下水位 RVA 目标范围内的值,因此不宜再对水位进行 RVA 分析。在大源渡枢纽蓄水前衡阳水文站流量水位变化趋势一致,枢纽蓄水后流量水位变化趋势一致性减弱。枢纽蓄水后年均流速由 0.69m/s 降低到 0.34m/s,降低 51%。

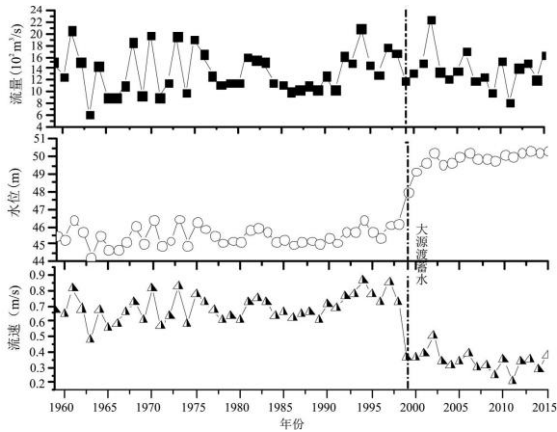


图 1 衡阳站生态水文指标年际变化

3 库区生态水文改变度分析

3.1 生态水文情势特性指标变化

为定量评价大源渡枢纽蓄水后库区河流生态水文情势的改变程度,将衡阳站流量、流速数据序列划分为两个时段:枢纽蓄水前(1959~1998 年),枢纽蓄水后(1999~2015 年)。在此基础上采用变动范围法(RVA)计算衡阳站流量、流速各指标的变化程度(表 2),根据各指标的变化情况对生态水文情势的改变程度进行分析。

表 2 大源渡枢纽蓄水前后衡阳站水文生态指标统计表

IHA 指标	流量			流速		
	蓄水前	蓄水后	改变度 (%)	蓄水前	蓄水后	改变度 (%)
1 月份均值	625	688	6.9	0.52	0.19	91.3
2 月份均值	996	889	9.8	0.64	0.24	92.4
3 月份均值	1520	1284	10.3	0.76	0.34	91.9
4 月份均值	2528	1869	21.6	0.96	0.46	100.0
5 月份均值	2847	2501	5.4	1.00	0.58	100.0
6 月份均值	2576	2815	26.0	0.93	0.64	74.8
7 月份均值	1402	1601	26.0	0.70	0.39	69.3
8 月份均值	1129	1440	4.4	0.66	0.35	83.2

9 月份均值	797	948	7.6	0.56	0.25	92.4
10 月份均值	647	744	13.6	0.52	0.20	81.9
11 月份均值	656	960	17.6	0.52	0.24	90.2
12 月份均值	557	794	10.3	0.48	0.21	83.2
年均 1d 最小值	182	328	91.6	0.29	0.09	100.0
年均 3d 最小值	194	340	91.9	0.30	0.10	100.0
年均 7d 最小值	214	369	83.2	0.32	0.10	100.0
年均 30d 最小值	278	438	75.7	0.36	0.12	100.0
年均 90d 最小值	496	619	0.8	0.46	0.17	100.0
年均 1d 最大值	10090	10330	9.2	1.67	1.64	30.3
年均 3d 最大值	8884	8969	8.6	1.57	1.51	4.1
年均 7d 最大值	6865	6427	35.8	1.40	1.22	2.3
年均 30d 最大值	4154	3597	17.6	1.16	0.79	91.9
年均 90d 最大值	2873	2644	8.6	1.00	0.61	100.0
基流指数	0.159	0.28	92.2	0.46	0.32	84.3
年最小值出现时间	342	334	100.0	337.80	324.20	100.0
年最大值出现时间	151	171	8.9	151.10	165.90	16.5
低脉冲次数	6.7	4.06	24.7	4.88	9.06	56.4
低脉冲历时	15.34	8.1	73.9	11.81	37.26	58.0
高脉冲次数	8.05	7.1	16.0	10.00	5.53	49.6
高脉冲历时	4.387	4.45	9.2	5.95	3.00	81.9
上升率	344.3	281	5.8	0.62	0.05	11.7
下降率	-237.2	-223	7.6	-0.04	-0.04	39.0
逆转次数	112	95	4.1	115.00	102.20	17.7

3.1.1 月均值变化

图 2 为大源渡枢纽蓄水前后衡阳站月均流量、流速变化图。由图 2 可以看出,大源渡枢纽蓄水后衡阳站月均流量在 2~6 月呈减少趋势;6 月~次年 1 月呈增加趋势,全年均为低度改变。相较于流量,流速均呈显著下降趋势,1~12 月月均流速均为高度改变,其中 4、5 月改变度达到 100%。枢纽蓄水后,库区月均流速减少了 0.27~0.49m/s,分别减少了 32%~63%。

3.1.2 年极值及其发生时间变化

衡阳站年均极小值流量都呈增加趋势,年均 1、3、7、30 日最小流量值改变度均属于高度改变。其中,年均 1 日最小值(图 3a)和年均 3 日最小值(图 3b)改变度最大分别为 91.9%和 91.6%,枢纽蓄水后除 1999 年和 2005 年低于 RVA 上限,其余年份均高于 RVA 上限值。年极小值流量发生时间改变度为 100%,发生时间整体为 10 月~次年 2 月期间,个别年份年极小值流量发生时间出现在 6、7 月份,出现时间均值蓄水后比蓄水前提前 8d。流量的基流指数蓄水后较蓄水前增加 76%,改变度为 92.2%属于高度改变(图 3e)。

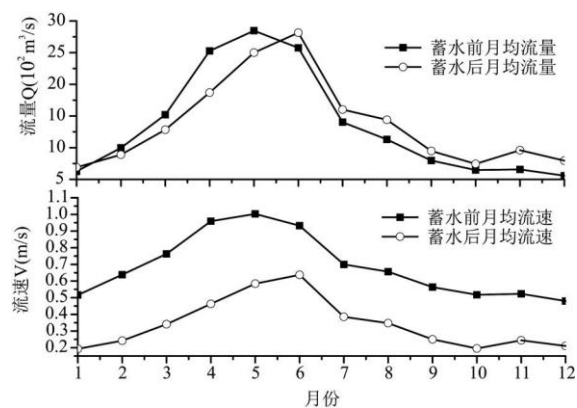


图2 流量和流速月均值变化

衡阳站年均极大流速值和年均极小流速值均呈减小趋势。其中,所有年均日极小流速和年均90d极大值流速(图4b)改变度都达到了100%,年均30d极大值流速改变度达到91.9%,属于高度改变。枢纽蓄水后年均1、3、7、30、90d极小值流速和年均90d极大值流速整体低于RVA下限值(图4)。年极小流速发生时间改变度为100%,发生时间整体为10月~次年2月期间,个别年份年极小流速发生时间出现在6、7月份,出现时间均值蓄水后比蓄水前提前13d。

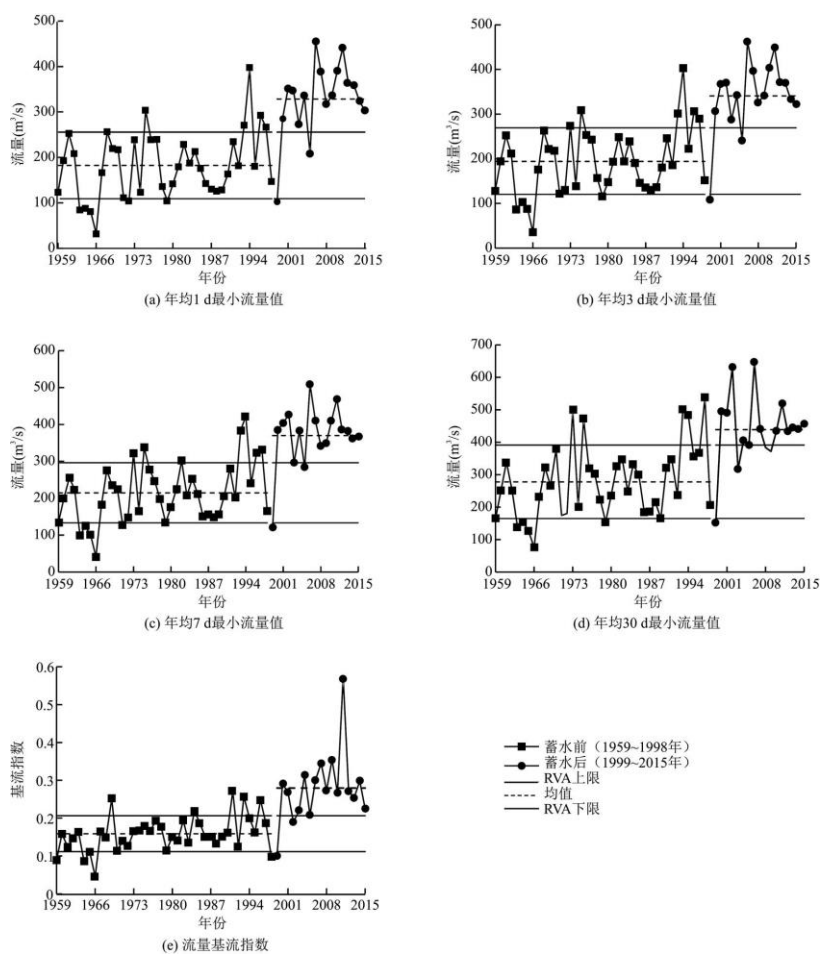


图3 年极值流量变化

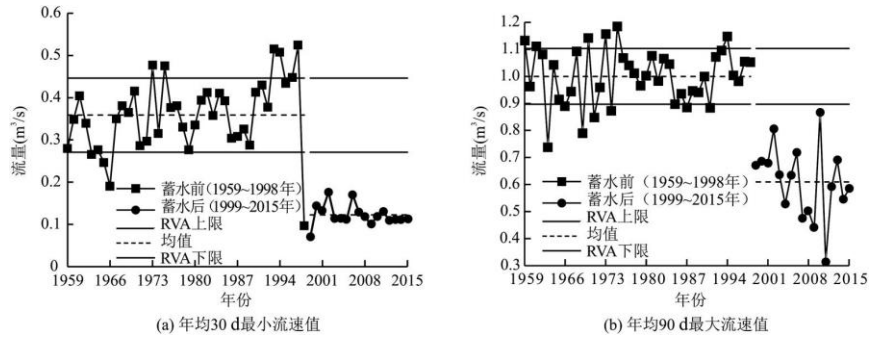


图4 年极值流速变化

3.1.3 高低脉冲变化

大源渡枢纽蓄水后,使库区回水范围内流量低脉冲历时(图5)和流速的高脉冲历时(图6)缩短,形成高度改变。流量的低脉冲历时由蓄水前 15.34d 缩短为 8.1d,改变度为 73.9%;流速的高脉冲历时由蓄水前 5.95d 缩短为 3d,改变度为 81.9%。

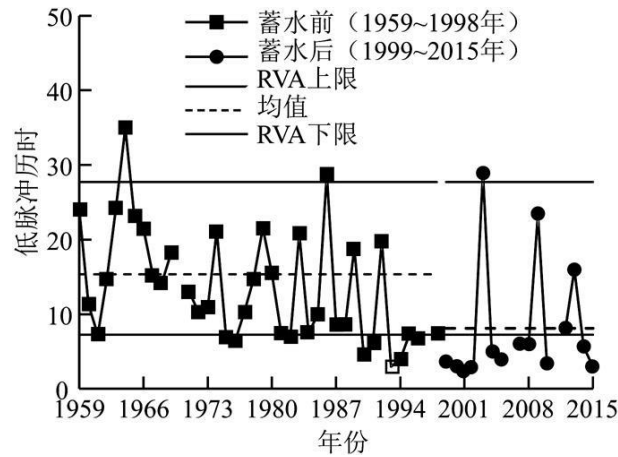


图5 流量低脉冲历时

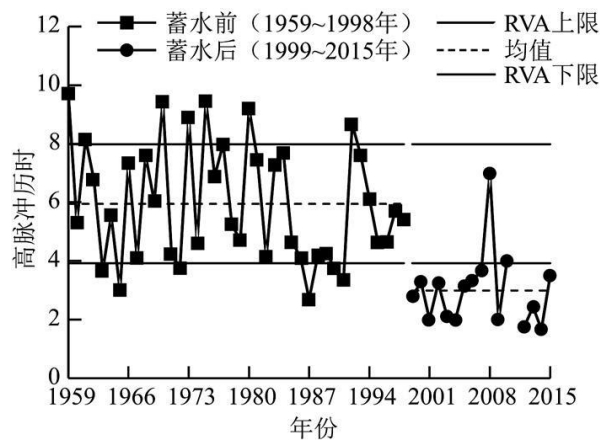


图6 流速高脉冲历时

3.2 生态水文情势改变度评价及影响分析

根据表 2 所列衡阳站流量、流速各指标改变度进行排序,如图 7、8 所示。得出大源渡枢纽蓄水后流量 IHA 指标多以低度改变居多,发生高度改变的有基流指数、年均 1、3、7、30d 最小值、低流量脉冲及年最小值出现时间等 7 个指标。流速 IHA 指标多以高度改变居多,发生高度改变的有 1~12 月份均值、年均 1、3、7、30、90d 最小值、年均 30、90d 最大值、基流指数、年最小值出现时间及高脉冲历时等 22 个指标。

进一步评价大源渡枢纽蓄水后库区流量、流速改变程度,计算流量、流速各指标的整体改变度以及各组指标的改变程度(表 3)。据此可知,流量整体改变度为中度改变,第 3 组为高度改变,第 2、4 组改变为中度改变,第 1、5 组为低度改变;流速整体改变度为高度改变,改变度达到 81%,第 1~3 组为高度改变,第 4 组改变为中度改变,第 5 组为低度改变。

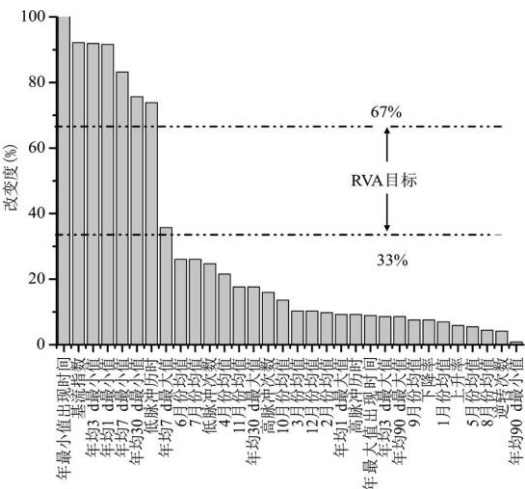


图 7 流量指标改变度排序

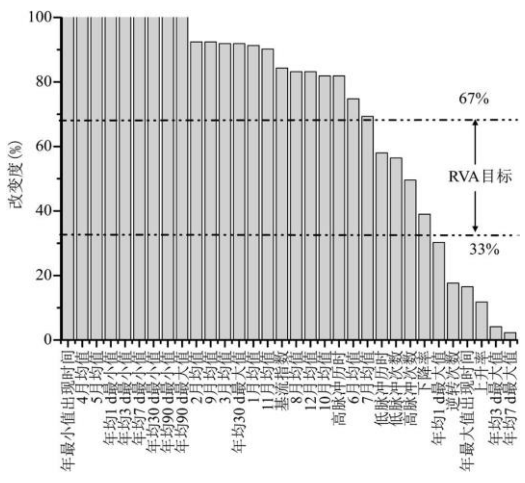


图 8 流速指标改变度排序

3.3 对生态系统的影响分析

湘江四大家鱼及其他一些经济鱼类多集中在湘江常宁松柏至柏坊河段产卵,该江段“四大家鱼”产卵场是全国三大“家鱼”产卵场之一^[29],其天然鱼苗产量约占全国 1/4^[30]。大源渡枢纽位于该产卵场的下游,是“四大家鱼”等半洄游鱼类上溯产卵的必经之地。随着湘江干流梯级开发相继建成蓄水,原有 88km 长江段的湘江“四大家鱼”产卵场已逐渐萎缩^[31],出现产卵场破碎化。

结合表 3 以及 IHA 各组参数对河流生态系统的影响(表 1)进行分析。

流速第 1 组(月均值)指标发生高度改变,对水生生物栖息地蓄水以及生物迁徙需求产生影响,同时影响到水温、含氧量、光合作用。四大家鱼产卵繁殖期在 4~7 月,繁殖期间需要有适宜的流水环境。针对四大家鱼产卵繁殖适宜流速的研究,易雨君^[32]认为四大家鱼产卵偏好流速为 0.2~0.9m/s,当流速小于 0.2m/s 时,漂流性卵开始下沉。本文分析得出大源渡枢纽蓄水后衡阳站 4~7 月流速为高度改变,其中 4、5 月改变度达到了 100%,流速的降低不利于受精卵漂浮吸水膨胀过程。

表 3 衡阳站流量流速整体改变度(%)

类型	各组水文改变度					整体水文改变度 D ₀
	第 1 组 (月均值)	第 2 组 (年均极值)	第 3 组 (年极值出现时间)	第 4 组 (高低脉冲的频率及历时)	第 5 组 (变化率及频率)	
流量	15	58	71	40	6	43
流速	88	83	71	63	26	81

第 2 组(年均极值)流量的中度改变和流速的高度改变对河道地形、地貌以及水生生物自然栖息地和植物群落分布产生影响。1、3、7、30d 最小流量值均发生高度改变,枢纽蓄水后流量值均高于天然状况,库区年极小值流量的增加利于保障水生生物自然栖息地和植物群落;流速指标中所有年均日极小值和年均 30、90d 极大值发生高度改变,流速整体低于 RVA 下限值,个别年份位于 RVA 目标范围,流速的降低不利于库区内泥沙及污染物的携带及冲刷,不利于处理河道沉积物,泥沙易于沉积改变了库区河道地形、地貌,污染物滞留,加大库区生态环境风险。

第 3 组(年极值出现时间)发生高度改变,其中年最小值出现时间发生 100%改变。年极值得发生时间与生物重要的生命阶段相联系,如繁殖、洄游等^[33],枢纽蓄水改变年极值发生的时间,会影响或改变生物的生命活动。同时,本文分析其他学者有关类似研究^[8,33],发现其他地区水利枢纽工程的建设都引起河流量等指标年最小值出现时间的高度改变。

流量、流速第 4 组(高低脉冲的频率及历时)发生中度改变,流量低脉冲历时和流速的高脉冲历时,形成高度改变,影响对库区河道与洪泛区间的营养与有机物的交换。家鱼产卵活动需要所处江河涨水的刺激,洪水脉冲的持续时间、流量大小和发生频率与渔业产量存在正相关^[34]。周雪研究发现涨水持续时间为 3d 及以上的涨水过程,或持续 2 次涨水过程可刺激家鱼发生大规模繁殖^[35],因此流量脉冲对家鱼繁殖产卵的影响为持续时间越长、次数越多越刺激家鱼产卵繁殖。由于枢纽拦截阻隔作用,库区流量的低脉冲历时缩短,流速的高脉冲历时缩短,均不利于刺激家鱼产卵繁殖活动。

同时,利用 SI(Shannon Index, Shannon 指数)初步评估大源渡枢纽蓄水后库区中部生物多样性改变程度。利用公示(5)计算得到天然河道情况下 SI 值为 344.31,枢纽蓄水后降低为 281.51,SI 值降低表明生物多样性降低,生态系统稳定性降低,生态脆弱性增强。

4 结论

本文定量分析了湘江大源渡枢纽库区中部衡阳站的水文改变度,研究得出日调节电站蓄水后,库区中部生态水文情势改变具有以下特征:

(1)库区中部流量 IHA 指标整体呈中度改变,改变度为 43%,流速 IHA 指标整体呈高度改变,改变度达到 81%;流量 IHA 指标多以低度改变居多,流速 IHA 指标多以高度改变居多,枢纽蓄水后水位变化不适用 RVA 法进行分析;

(2)流速第 1 组(月均值)指标发生高度改变,尤其 4~7 月份流速降低,发生高度改变,不利于四大家鱼繁殖活动,不利于产卵期受精卵漂浮吸水膨胀过程;

(3)第 2 组(年均极值)流量中度改变,流速高度改变,库区年极小值流量的增加利于保障水生生物自然栖息地和植物群落;但流速的降低不利于库区内泥沙及污染物的携带及冲刷,不利于处理河道沉积物,改变了库区河道地貌的同时加大库区生态环境风险;

(4)第 3 组(年极值出现时间)发生高度改变,影响或改变生物的生命活动;

(5)流量、流速第 4 组(高低脉冲的频率及历时)发生中度改变,流量低脉冲历时和流速的高脉冲历时,形成高度改变,不利于刺激家鱼产卵繁殖活动;

(6)SI(Shannon Index, Shannon 指数)在枢纽蓄水后降低,表明枢纽蓄水后库区中部生物多样性降低,生态脆弱性增强。

鉴于篇幅有限,本文仅初步分析了日调节电站蓄水对库区中部的生态水文改变度,在下一步工作中将开展日调节电站蓄水对库区尾端生态水文情势的影响分析,以完善日调节电站对库区生态水情势变化及其生态影响。另外,在后续研究工作中,针对本文研究得出的发生高度改变并且对生态系统产生了不利影响的 IHA 指标,可进一步开展日调节电站生态调度等生态保护措施,以维护河流生态健康。

参考文献:

[1] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341.

[2] 武会先, 王万战, 宋学东. 河流生命: 为人类和自然管理水[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 1-254.

[3] 陈栋为, 陈晓宏, 李翀, 等. 基于 RVA 法的水利工程对河流水文情势改变的累积效应研究: 以东江流域为例[J]. 水文, 2011, 31(2): 54-57.

[4] 杨宇. 中华鲟葛洲坝栖息地水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[5] 班璇, 李大明. 大型水利工程对中华鲟生态水文学特征的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(3): 10-13.

[6] 柏海霞. 长江宜都四大家鱼产卵场地形特征及生态水力因子分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.

[7] 陈永柏. 三峡水库运行影响中华鲟繁殖的生态水文学机制及其保护对策研究[D]. 北京: 中国科学院, 2007.

[8] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学

报, 2011, 30 (3) :22-38.

[9]李建,夏自强,戴会超,等.三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J].水利学报,2013,44(8):892-899.

[10]王珩.基于河流鱼类适宜生境控制的梯级水库优化调度方法研究[D].武汉:武汉大学,2016.

[11]杨娜,梅亚东,尹志伟.建坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进[J].长江流域资源与环境,2010,19(5):560-564.

[12]周召梅,李强.长沙综合枢纽工程对湘江水文情势水生态环境影响及对策[J].水利科技与经济,2010,16(9):986-988.

[13]李晓鹏.湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力研究[D].长沙:湖南师范大学,2014.

[14]YU ANNA L, CHANGSHAN W, CHANGBO J, et al. Simulating the impacts of an upstream dam on pollutant transport: A case study on the Xiangjiang River, China[J]. Water, 2016, 8, 516.

[15]武万国.基于EFDC模型的湘江下游河道水质数值模拟研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,长沙,2018.

[16]孙豪文.基于WASP模型的湘江中下游水质模拟研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.

[17]李昌玲.湘江下游河段河道及水动力水质演变研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.

[18]OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes[J]. River Research and Applications, 2003, 19 (2) :101-121.

[19]RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10 (4) :1163-1174.

[20]RICHTER B D. How much water does a river need [J]. Freshwater Biology, 1997, 37:231-249.

[21]RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated River: Research and Management, 1998, 14 (4) :329-340.

[22]MAINGI J K, MARSH S E. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50 (1) :53-79.

[23]BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: A method for classifying river flow regime alterations for the EC water framework directive[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2005, 15 (5) :427-446.

[24]SHIAO J T, WU F C. Feasible diversion and in stream flow release using range of variability approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130 (5) :395-404.

[25]SHIAO J T, WU F C. Compromise programming methodology for determining instream flow under multi objective

water allocation criteria [J]. Journal of American Water Resources Association, 2006, 42 (5) :1179-1191.

[26] KUO S R, LIN J H, SHAO K T. Seasonal changes in abundance and composition of the fish assemblage in Chiku Lagoon, south-western Taiwan [J]. Bulletin of Marine Science, 2001, 68:85-99.

[27] YANG Y C E, CAI X M, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis [J]. Water Resources Research, 2008, 44 (4) :472-479.

[28] 张宗娇, 张强, 顾西辉, 等. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应 [J]. 自然资源学报, 2016, 31 (12) : 2021-2033.

[29] 徐飞雄. 湖南天然鱼类资源的特点及保护增值战略 [J]. 热带地理, 1995, 3 (1) :52-63.

[30] 杨朝晖, 杨春平, 吕焕哲, 等. 湘江枢纽工程对水生生物的影响及防治研究 [J]. 上海环境科学, 1998, 11 (17) :30-32.

[31] 丁德明, 廖伏初, 李鸿, 等. 湖南湘江渔业资源现状及保护对策 [C]. 中国南方渔业学术论坛第二十六次水产学术交流大会论文集, 2010:122-130.

[32] 易雨君. 长江水沙环境变化对鱼类的影响及栖息地数值模拟 [D]. 北京:清华大学, 2008.

[33] 李杰. 梯级水库对屏山站水文过程的影响模式及关键水文指标研究 [D]. 武汉:长江科学院, 2015.

[34] 王俊娜, 冯顺新, 骆辉煌. 近 50 年长江中游洪水脉冲与渔业产量的关系演变 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44 (2) : 198-205.

[35] 周雪, 王珂, 陈大庆, 等. 四大家鱼自然繁殖对水文过程的响应关系研究 [J]. 淡水渔业, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1138.S.20181120.1130.002.html>.