
长江中游鱼类敏感水文期内水文情势对其资源量的影响评估¹

祁 涛^{1,2} 班 璇^{2*} 杜 浩³ 郭文献⁴ 杜 耘² 龙奥运⁵

南璐艺⁶ 石小涛⁷ 郑楚洋⁶

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;

3. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

4. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450011;

5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

6. 中南民族大学, 湖北 武汉 430074;

7. 三峡大学, 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 湖北 宜昌 443002)

【摘 要】: 三峡大坝的修建改变了河流的水文情势, 对河流生态系统及鱼类资源量影响显著。基于划分水文

¹ **【收稿日期】**: 2021- 12- 28; **【修回日期】**: 2022- 04- 21

【基金项目】: 国家自然科学基金优秀青年项目(51922065) ; 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地(HIBF2020009) ; 湖北省自然科学基金创新群体(2019CFA019)

【作者简介】: 祁 涛(1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文方面. E- mail: qitao20@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者 E- mail: banxuan@apm.ac.cn

期的变化范围法识别了长江中游典型江段的鱼类敏感水文期，并分析了鱼类敏感水文期内关键水文指标的变化对其资源量的影响。结果显示在宜昌江段，坝下经济鱼类的天然捕捞产量对涨水期的流量变动较敏感；在监利江段，四大家鱼鱼苗径流量对枯水期的流量变动较敏感；在洞庭湖江段，洞庭湖渔业天然捕捞产量对丰水期的流量变动较敏感；在鄱阳湖江段，鄱阳湖渔业天然捕捞产量对退水期的水位变动较敏感。在长江中游典型江段的鱼类敏感水文期内，极端水流条件及持续时间、水流的变化速率和频率的变化对鱼类资源量的影响较大。划分水文期相对于未划分水文期的变化范围法，不仅能够识别出鱼类敏感水文期，还可以进一步地确定鱼类敏感水文期内影响其资源量的关键水文指标及影响程度。其结果可为长江中游的鱼类资源保护和三峡大坝生态调度提供科学依据。

【关键词】：三峡大坝；变化范围法；水文情势；鱼类敏感水文期；鱼类资源量

【中图分类号】：P333；Q958.8 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2022)12-2621-12

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj202212006

在水生态系统中，适宜的水流条件对鱼类的性腺成熟、产卵诱发以及洄游行为有着至关重要的作用^[1]。大坝的修建改变了这种水流条件，对鱼类资源量造成了显著影响。目前，长江流域已修建了5万多座水利工程，其中葛洲坝、三峡大坝等大型水利工程对鱼类资源量影响巨大^[2]。据报道，葛洲坝修建之后，中华鲟的资源量从80年代初的几千尾下降到了几十尾^[3]，长江江豚数量也快速下降至原有1/3，仅几百头^[4]；三峡大坝修建之后，四大家鱼的平均鱼苗丰度从2003年前的25亿下降到了2005年的1.05亿^[5]。尽管国家已经实施长江10年禁渔和颁布长江保护法等重大举措来缓解长江水生态系统退化的现状，但水利工程对河流水文情势的影响难以消除，研究水利工程建设引起的水文情势变化对鱼类资源量的影响，能为大坝的生态调度决策提供科技支撑。

水文情势的定量分析，经历了只关注平均量，到开始关注极大、极小量，再到建立全面描述水文过程的指标体系这样一个发展历程^[6,7]。目前，以Richter等^[8]提出的基于5大类32个水文指标(Indicators of Hydrological Alteration, IHA)的变化范围法^[9,10,11](Ranges of Variability Approach, RVA)应用最为广泛，可以定量评估河流水文情势变化对水生态的影响。RVA法的传统用法是基于突变年前后的周年水文数据分析周年水文情势的整体变化对鱼类资源的影响，如Koel等^[12]依据传统的RVA法分析了美国伊利诺伊河的水位变化对鱼类资源的影响；Yang等^[13]基于鱼类资源的野外调查数据，应用传统的RVA法评估了汉江中下游的水文情势变化对鱼类种群结构的影响。然而，传统的RVA法未能考虑典型年份(丰、平、枯水年)的变化对水文情势的影响，也未能考虑人类活动对水文过程的周期性的影响。尽管，部分学者已经尝试对RVA法进行改进，如张如强等^[14]将典型年份的变化纳入整体改变度的计算中，更全面地评价水文情势的变化；如Yang等^[15]以IHA指标的周期性变化来反映水文过程的周期性在受人类活动影响后的变化；如班璇等^[16]将RVA法与皮尔逊相关分析法结合，提出了一种综合影响指数，以评估表征洪水属性的IHA指标对四大家鱼产卵的影响。然而，这些改进的RVA法很少关注周年内各水文期的水文情势变化。水文期与鱼类的生活史各阶段相对应，并且特定水文期的水文情势改变会影响鱼类在其生活史对应阶段的生境条件^[17,18,19,20]。比如，在涨水期的5~7月，流量增长率和涨水持续时间等水文特征的改变会影响长江中游四大家鱼在产卵期的产卵活动^[20]。此外，三峡水库在各水文期的运行方式不同，比如在汛期的6~9月，水库一般维持在防洪限制水位145 m，水库下泄流量与天然情况相同，仅在遇大洪水时会拦洪蓄水，控制下泄流量，而在汛期末10月份，水库蓄水，下泄量较天然情况有所减少^[21]。因此，三峡水库蓄水会改变各水文期的水文情势，也会影响鱼类在其生活史的不同阶段的水流生境条件。据研究，在鱼类的早期生活史阶段(即鱼卵、仔稚鱼)，小规模的水文情势变化会导致鱼类种群年际补充量的显著改变，进而引起鱼类种群数量的动态变化^[22]。因此，分析不同水文期的水文情势变化，并关注对鱼类资源量影响较大的水文期和水文指标，对分析引起鱼类资源量变化的生态水文影响因素更有针对性。

考虑到水文期与鱼类生活史各阶段相对应，本研究把RVA法中的周年水文数据按水文期进行划分，分别计算不同水文期内水文情势的整体改变度，识别长江中游典型江段对鱼类资源量影响较大的水文期，并应用综合影响指数评估该水文期内高度改变的水文指标对鱼类资源量的影响程度，提出减缓对鱼类资源量负面影响的三峡水库调度建议。

1 研究区域概况和数据来源

长江是中国水能资源最丰富的河流,全长约 6 388 km,流域面积 180 万 km²,分为上游,中游,下游三段^[23]。本文选取长江中游作为主要研究区域,即宜昌至湖口段(图 1(a))。长江中游总长约 950 km,流域面积约 68 万 km²,处于亚热带季风气候,年平均降雨量约为 1 100 mm^[23]。目前,长江干流中游段建有葛洲坝和三峡大坝两座大型水利工程(图 1(a))。其中,葛洲坝位于湖北省宜昌市,是世界上最大的低水头大流量、径流式水电站。三峡大坝位于葛洲坝上游约 40 km 处,控制流域面积约 100 万 km²,多年平均流量 14 300 m³/s,水库总库容 393 亿 m³。根据三峡水库调度方案,5 月 25 日~6 月 10 日为预泄调度,7 月 1 日~8 月 31 日为调洪削峰调度,9 月 15 日~10 月 31 日为正常蓄水调度,1~3 月或 12 月至次年 4 月为补水调度^[24]。宜昌和监利江段受葛洲坝和三峡大坝调度的直接影响,其流量呈现变化速度快,峰值大且持续时间短,季节性特征明显的特点(图 1(b));洞庭湖和鄱阳湖江段受湖泊调蓄作用影响,其流量呈现变化速度快,峰值小、分散且持续时间短,季节性特征较弱的特点(图 1(c))。

各典型江段相关水文站点的流量和水位数据(>20 年)来自湖北省水文水资源中心(<https://slt.hubei.gov.cn/sw/>)。鱼类资源量数据来自 1997~2016 年《长江三峡工程生态环境监测公报》,其中包括三峡水库坝下宜昌江段经济鱼类(主要包括铜鱼、鲤鱼、河鲀、黄颡鱼、四大家鱼、鲫鱼和鳊鱼等)的天然捕捞产量(单位万吨)、监利江段的四大家鱼鱼苗径流量(单位亿尾)、洞庭湖和鄱阳湖的渔业天然捕捞产量(单位万 t)。数据详细信息见表 1。

2 研究方法

2.1 典型江段的水文期划分

为了分析三峡水库蓄水对长江中游典型江段水文情势的影响,以距三峡大坝最近的宜昌站多年流量极值水文过程线呈现的水文特征差异为依据来划分典型江段的水文期(图 2)。三峡水库蓄水后,在 12~次年 2 月,多年流量极大值和极小值相对平缓且高于蓄水前;在 3~6 月,多年流量极大值和极小值呈上升趋势,其中前者的涨幅以及持续时间低于蓄水前,后者的量值高于蓄水前;在 7~9 月,蓄水后多年流量极大值低于蓄水前,呈明显的削峰现象,而蓄水后多年流量极小值相比蓄水前并无此现象;在 10~11 月,蓄水后多年流量极大值和极小值以及其下降率均明显低于蓄水前,并在 11 月底左右与蓄水前趋于重合。据此,依据不同时段的水文特征,将长江中游典型江段的水文年周年时段划分为枯水期(12~2 月),涨水期(3~6 月),丰水期(7~9 月),退水期(10~11 月)。这些划分的水文期与长江中游大多数鱼类的生活史相对应,如中华鲟的繁殖期在 10~11 月上旬,大银鱼的产卵高峰期在 12~次年 1 月,胭脂鱼的繁殖期在 3~4 月,草鱼的产卵期在 4 月下旬~7 月上旬,褐吻鰕虎鱼的产卵期在 7 月上旬~10 月上旬^[25]。

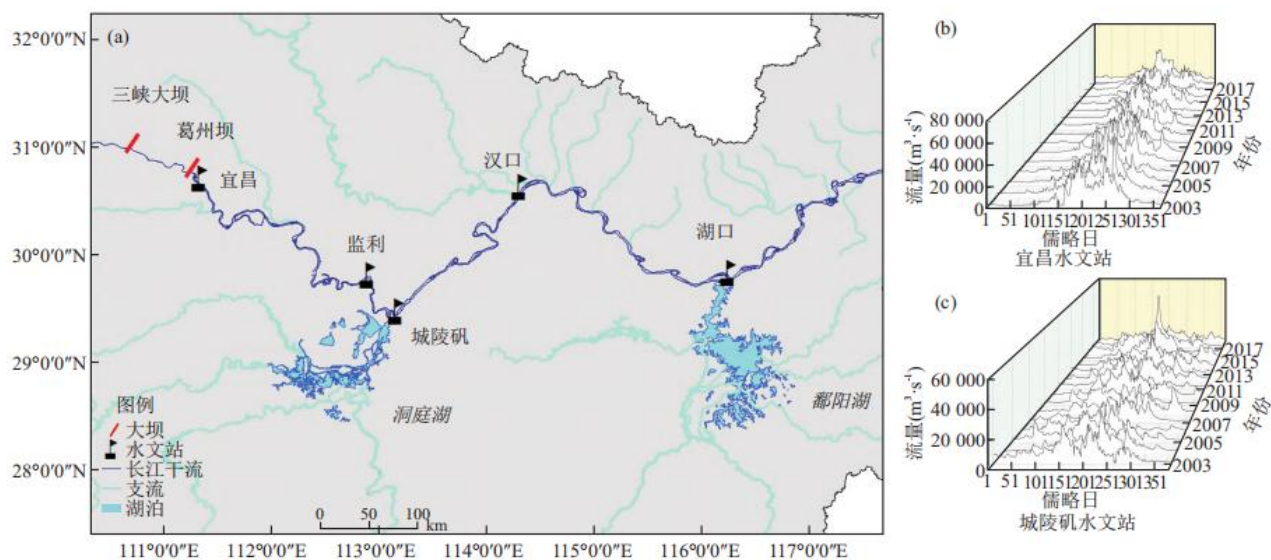


图 1 长江中游典型江段水文站点的位置及水文过程图

Fig. 1 Hydrograph and location of hydrological monitoring stations in middle typical reaches of Yangtze River

表 1 长江中游典型江段的水文数据及鱼类资源量数据信息

典型江段	代表水文站	日均流量时段/年	日均水位时段/年	鱼类资源量数据	水文站位置及特征描述[16]
宜昌江段	宜昌	1970~2018	1970~2018	坝下经济鱼类的天然捕捞产量/万 t (1997~2016)	位于三峡大坝下游 44 km 处，长江干流上游的出口控制站；受葛洲坝和三峡大坝调度直接影响
监利江段	监利	1975~2018	1975~2018	四大家鱼鱼苗径流量/亿尾 (1997~2016)	位于宜昌水文站下游 300 km 处，附近有四大家鱼的重要产卵场；受三峡水库调度直接影响
洞庭湖江段	城陵矶	1991~2018	1991~2018	渔业天然捕捞产量/万 t (1997~2016)	位于洞庭湖水沙汇入长江干流的出口处；受湖泊调蓄影响
鄱阳湖江段	湖口	1991~2018	1991~2018	渔业天然捕捞产量/万 t (1997~2016)	位于鄱阳湖水沙汇入长江干流的出口处；受湖泊调蓄影响

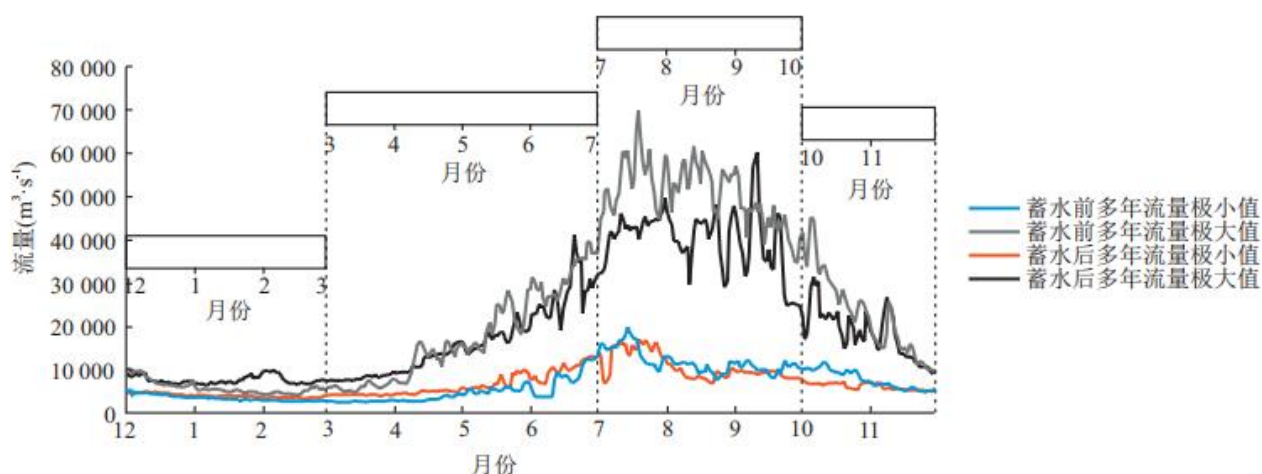


图 2 长江中游典型江段的水文期划分图

Fig. 2 Division of hydrological periods in middle typical reaches of Yangtze River

2.2 基于划分水文期的变化范围法

变化范围法^[9,10,11] (Ranges of Variability Approach, RVA) 建立在 IHA 指标的基础上, 其核心是以受干扰前各 IHA 指标发生频率的 75% 和 25% 作为 RVA 的目标边界, 并判断受干扰后的 IHA 指标是否落入目标边界内, 以此评估受干扰后河流水文情势的改变度。其中, IHA 指标[8]从月中值大小、极端值大小和历时、极端值发生时间、高低流量频率和历时、涨退水率等五方面将流量/水位的日时间序列数据转换为具有生态意义的 32 个 IHA 水文指标, 因长江中游未出现断流情况, 不考虑零流量天数的水文指标。

据此, 本研究首先确定各水文期内对应的 IHA 指标(表 2), 然后计算各典型江段的 IHA 指标, 最后利用 RVA 法评估长江中游典型江段在不同水文期的 IHA 指标受三峡水库蓄水影响的水文改变度和整体改变度。

表 2 不同水文期内 IHA 指标及相应的生态学意义

指标组别	不同水文期的 IHA 指标(序号[27])				生态学意义
	枯水期	涨水期	丰水期	退水期	
第一组: 月均水流变化情况	12、1、2 月流量/水位中值 (12, 1~2)	3、4、5、6 月流量/水位中值 (3~6)	7、8、9 月流量/水位中值 (7~9)	10、11 月流量/水位中值 (10~11)	为水生生物提供栖息地; 保持植物生长所需的土壤湿度; 为陆生动物提供饮用水; 影响水体水温、溶解氧大小和光合作用
第二组: 极端水流条件及持续时间	水文期内 1、3、7、30、90 d 最小流量/水位 (13~17)			1、3、7、30 d 最小流量/水位 (13~16)	生物体之间的竞争平衡; 构造河道地形、地貌以及物理生境条件; 保持河道与河漫滩之间的营养物质交换; 形成漫滩植被所需土壤湿度的压力和厌

	水文期内 1、3、7、30、90 d 最大流量/水位 (18~22)	1、3、7、30 d 最大流量/水位 (18~21)	氧压力；影响植物群落在河漫滩上的分布；造成动物脱水；处理河道沉积物、维持使产卵河床保持通风的高流量
	水文期内流量/水位基流指数：7 d 最小流量或水位除以平均流量或水位 (23)		
第三组：极端水流出现的时间	水文期内最小流量/水位出现时间 (24) 水文期内最大流量/水位出现时间 (25)		对生物不利影响的预见性/可避性；为繁殖或避免被捕食而进入特定的栖息地；为迁移的鱼类提供产卵机会
第四组：高、低流量/水位的频率和持续时间	水文期内低流量/水位频率 (26) 及持续时间 (27) 水文期内高流量/水位频率 (28) 及持续时间 (29)		植物所需土壤含水胁迫以及产生厌氧胁迫的频率及大小；洪泛区水生生物栖息的可能性；河道与洪泛区间的营养与有机物的交换；有利于水鸟捕食、栖息和筑巢繁殖等；影响泥沙运输，河床沉积物结构
第五组：水流变化的速率和频率	水文期内流量/水位上升率：日间流量/水位平均增加率 (30) 水文期内流量/水位下降率：日间流量/水位平均减少率 (31) 水文期内流量/水位逆转次数：流量/水位过程转换的次数 (32)		对植物产生的干旱胁迫；水生生物在洪泛区的截留；对低流动性的河床边缘有机物的干旱胁迫

(1) IHA 指标水文改变度的计算公式如下[10]：

$$D_i = \left| \frac{N_{oi} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$N_e = r \cdot N_T \quad (2)$$

式中： D_i 为第 i 个 IHA 的水文改变度； N_{oi} 为第 i 个 IHA 受干扰后落入 RVA 的目标边界内的实际观测年数； N_e 为受干扰后 IHA 指标预期落入 RVA 目标边界内的预测年数； r 为受干扰前 IHA 落入 RVA 目标边界内的比例，以 IHA 发生频率的 75% 和 25% 作为 RVA 目标边界，则 $r=50\%$ ； N_T 为受干扰后流量/水位时间序列记录的总年数。若 $0\% \leq D_i \leq 33\%$ 属于低度改变， $33\% < D_i < 67\%$ 属于中度改变； $67\% \leq D_i \leq 100\%$ 属于高度改变。

(2) 基于每个 IHA 指标的水文改变度 D_i ，受干扰后河流水文情势的整体改变度 D 的计算公式如下^[26]：

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (3)$$

式中：D 为受干扰后河流水文情势的整体改变度， $0\% \leq D \leq 33\%$ 属于低度改变； $33\% < D < 67\%$ 属于中度改变； $67\% \leq D \leq 100\%$ 属于高度改变。

2.3 鱼类敏感水文期的识别

本研究把周年水文过程划分为不同水文期，并把水文情势变化最大且鱼类资源量对该变化敏感程度最高的水文期定义为鱼类敏感水文期。其中，鱼类资源量对各水文期内水文情势变化的敏感程度通过判断各水文期内与鱼类资源量显著相关的 IHA 指标的个数多少来量化，个数越多，敏感程度越高。将各水文期内与鱼类资源量显著相关的 IHA 指标定义为鱼类敏感水文指标 (FSIHA-Fish Sensitive Indicators of Hydrologic Alteration)。识别鱼类敏感水文期的具体步骤为：首先，计算典型江段在不同水文期内水文情势的整体改变度；然后，利用斯皮尔曼相关分析法确定各水文期内目标鱼类的敏感水文指标，即 FSIHA 指标；最后，判断各水文期是否同时满足以下两个条件：其一是水文情势整体改变度最大，其二是 FSIHA 指标个数最多。如果是，则将满足条件的水文期确定为目标鱼类的敏感水文期；如果不是，则该目标鱼类无敏感水文期。

2.4 综合影响指数

综合影响指数 [16] (Composite index, Icom) 是根据各 IHA 指标较蓄水前的偏移度以及与鱼类资源量的相关性定量分析各 IHA 指标变化对鱼类资源量的影响程度。比如，某个 IHA 指标较蓄水前增大，并且与鱼类资源量呈显著正相关，则偏移度与相关系数的乘积 (即综合影响指数) 为正值。这说明当该 IHA 指标较蓄水前增大时，鱼类资源量也会增大。因此，该 IHA 指标较蓄水前增大表现为对鱼类资源量的有利影响。此外，以相关系数的大小确定对鱼类资源量的有利影响程度，相关系数越大，综合影响指数也越大，说明该 IHA 指标对鱼类资源量的有利影响程度也越大。据此，本文利用综合影响指数来评估鱼类敏感水文期内水文情势的变化对其资源量的影响程度。具体评估步骤如下：首先，计算鱼类敏感水文期内 FSIHA 指标的水文改变度，并将高度改变的 FSIHA 指标定义为关键水文指标 (KIHA, Key Indicators of Hydrologic Alteration)；然后，利用斯皮尔曼相关分析法计算 KIHA 指标与鱼类资源量的相关系数；最后，应用综合影响指数分析 KIHA 指标对鱼类资源量的影响程度。综合影响指数的计算公式如下：

$$I_{com} = [(M_{post} - M_{pre}) / M_{pre}] \times r_s \quad (4)$$

式中：Icom 为综合影响指数；Mpre 和 Mpost 分别为 KIHA 指标在三峡水库蓄水前后的中值，中括号里的公式表示受三峡水库蓄水影响后 KIHA 指标较蓄水前的偏移度；rs 为 KIHA 指标与鱼类资源量的相关系数，作为权重因子来表征 KIHA 指标对鱼类资源量的影响方向和程度。当 Icom 为正值时表示相应的 KIHA 指标改变对鱼类资源量为有利影响，负值则表示相应的 KIHA 指标改变对鱼类资源量为不利影响，且 Icom 值越大，不利或有利的的影响程度越大。

3 结果

3.1 典型江段水文情势的整体改变度

典型江段水文情势的整体改变度在划分与未划分水文期时呈现不同的变化规律(图 3):以流量过程为例,在未划分水文期时,各典型江段水文情势的整体改变度顺序从大到小依次是宜昌江段、监利江段、洞庭湖江段和鄱阳湖江段;而划分水文期后,在丰水期,洞庭湖江段水文情势的整体改变度最大,其次是鄱阳湖江段,再次是监利江段,最后是宜昌江段。可见,各典型江段在各水文期内水文情势的整体改变度的大小顺序与未划分水文期的结果不同。在宜昌江段,流量的涨水期和水位的退水期的水文情势整体改变度最大。在监利江段,流量和水位的枯水期的水文情势整体改变度最大。在洞庭湖江段,流量和水位的丰水期的水文情势整体改变度最大。在鄱阳湖江段,流量和水位的退水期的水文情势整体改变度最大。

3.2 典型江段的鱼类敏感水文期识别

鱼类敏感水文指标 FSIHA 在划分与未划分水文期时,其个数、所属组别和所属水文期的统计结果(图 4)显示:以宜昌江段为例,在流量的涨水期 FSIHA 指标个数最多,为 11 个,在水位的枯水期 FSIHA 指标个数最多,为 12 个。由图 3 可知,在宜昌江段,流量和水位分别在涨水期、退水期时水文情势的整体改变度最大。可见,在宜昌江段,仅流量的涨水期同时满足 FSIHA 指标个数最多和水文情势整体改变度最大两个条件。因此,宜昌江段的鱼类敏感水文期是流量的涨水期。同理,监利江段的鱼类敏感水文期是流量的枯水期;洞庭湖江段的鱼类敏感水文期是流量的丰水期;鄱阳湖江段的鱼类敏感水文期是水位退水期(图 3 和图 4)。

3.3 鱼类敏感水文期内关键水文指标对其资源量的影响

计算鱼类敏感水文期内 FSIHA 指标的水文改变度,将高度改变的 FSIHA 指标定义为关键水文指标(KIHA),应用公式(4)分析 KIHA 指标对鱼类资源量的影响程度(表 3)。结果显示各江段鱼类敏感水文期内的 KIHA 指标主要来自第二组和第五组,仅个别 KIHA 指标的综合影响指数为正值,表现为对鱼类资源量的有利影响,例如,洞庭湖江段的流量下降率(31)较蓄水前减小,且与鱼类资源量呈显著负相关,说明随着流量下降率的减小,鱼类资源量反而会增大,其余大部分 KIHA 指标的综合影响指数为负值,表现为对鱼类资源量的不利影响,例如,监利江段的流量上升率(30)较蓄水前减小,且与鱼类资源量呈显著正相关,说明随着流量上升率的减小,鱼类资源量也会下降。

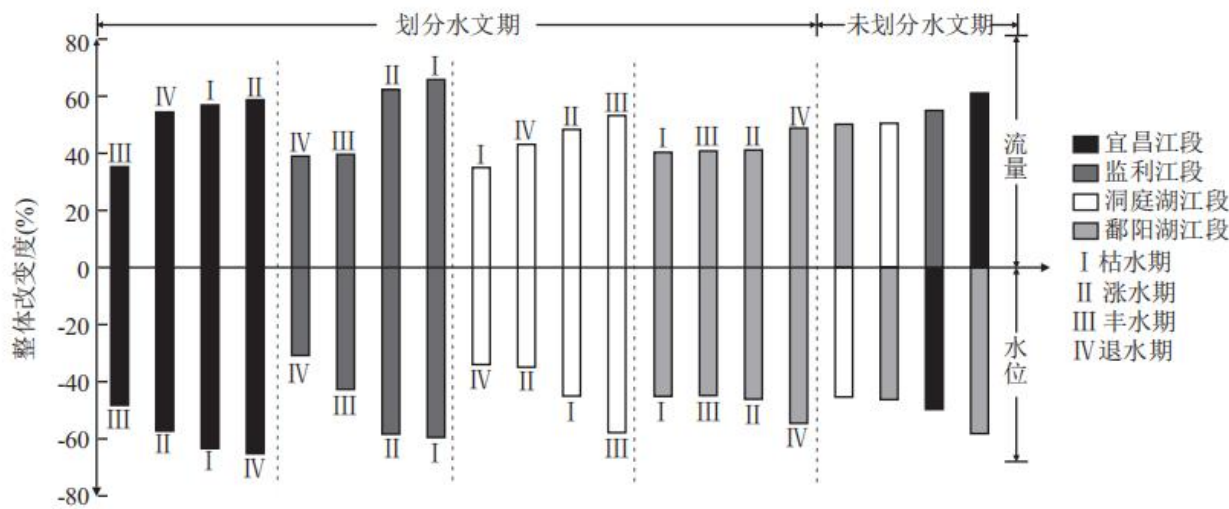
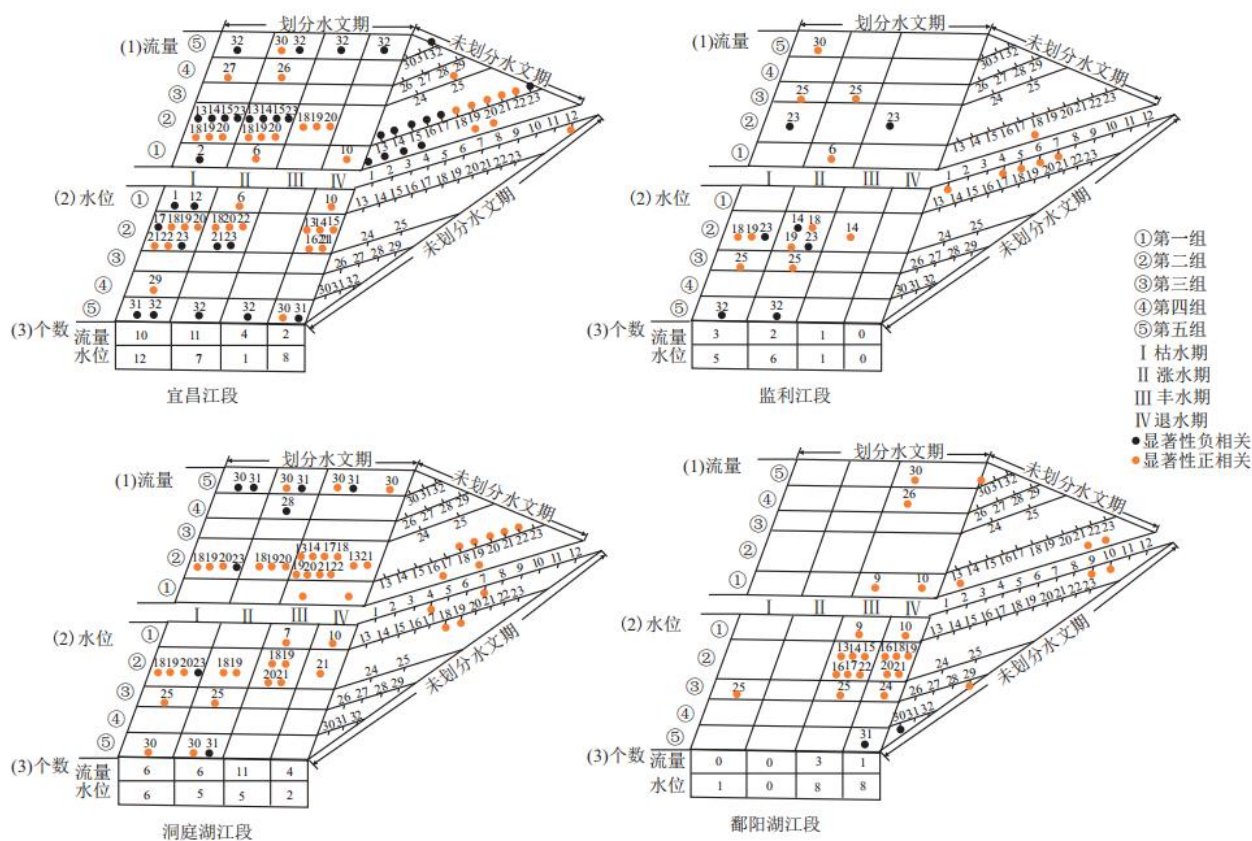


图 3 长江中游典型江段划分与未划分水文期时水文情势的整体改变度对比

Fig. 3 Contrast of degree of hydrological alteration based on dividing or no dividing hydrological periods in middle typical reaches of Yangtze River



注：图中数字 1、2……32 指 FSIHA 指标序号(表 2)；①……⑤指 FSIHA 指标组别。

图 4 长江中游典型江段的鱼类敏感水文指标统计图

Fig. 4 Statistical results of IHAs significantly correlated with fish resources in middle typical reaches of Yangtze River

表 3 典型江段鱼类敏感水文期内 KIHA 指标统计分析表

典型江段	鱼类敏感水文期	KIHA 指标(序号)	蓄水前	蓄水后	改变度(%)	偏移度	相关系数	综合影响指数
宜昌江段	流量的涨水期	1 d 最小流量(13)	3 570	5 340	-83	0.496	-0.625**	-0.310
		3 d 最小流量(14)	3 593	5 435	-81	0.513	-0.603**	-0.309
		7 d 最小流量(15)	3 763	5 476	-81	0.455	-0.586**	-0.267
		流量基流指数(23)	0.379 4	0.535 2	-81	0.411	-0.666**	-0.273

		流量逆转次数 (32)	42	57	-100	0.357	-0.709**	-0.253
监利江段	流量的枯水期	水位基流指数 (23)	0.479 2	0.626 6	-83	0.308	-0.481**	-0.148
		最大流量出现 时间(25)	30	25	-71	-0.169	0.538*	-0.091
		流量上升率 (30)	412.5	130	-100	-0.685	0.691**	-0.473
洞庭湖江 段	流量的丰水 期	流量下降率 (31)	-600	-400	-68	-0.333	-0.532*	0.177
鄱阳湖江 段	水位的退水 期	水位下降率 (31)	-0.11	-0.12	95	0.091	-0.445*	-0.040
		3 d 最大水位 (18)	14.9	14.82	69	-0.005	0.565**	-0.003
		7 d 最小水位 (19)	14.7	14.51	69	-0.013	0.590**	-0.008

注：流量单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最大流量出现时间为儒略日, 上升率和下降率单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 下降率指标前的负号表示流量处于下降过程, 逆转次数单位为次; *表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, **表示通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

从 KIHA 指标的影响程度(综合影响指数大小)来看, 在宜昌江段, 1 d 最小流量对鱼类资源量的不利影响程度最大; 在监利江段, 流量上升率对鱼类资源量的不利影响程度最大; 在洞庭湖江段, 流量下降率对鱼类资源量的有利影响程度最大; 在鄱阳湖江段, 水位下降率对鱼类资源量的不利影响程度最大。其中, 1 d 最小流量和水位下降率较蓄水前呈增大趋势, 流量上升率和流量下降率较蓄水前呈减小趋势(图 5)。

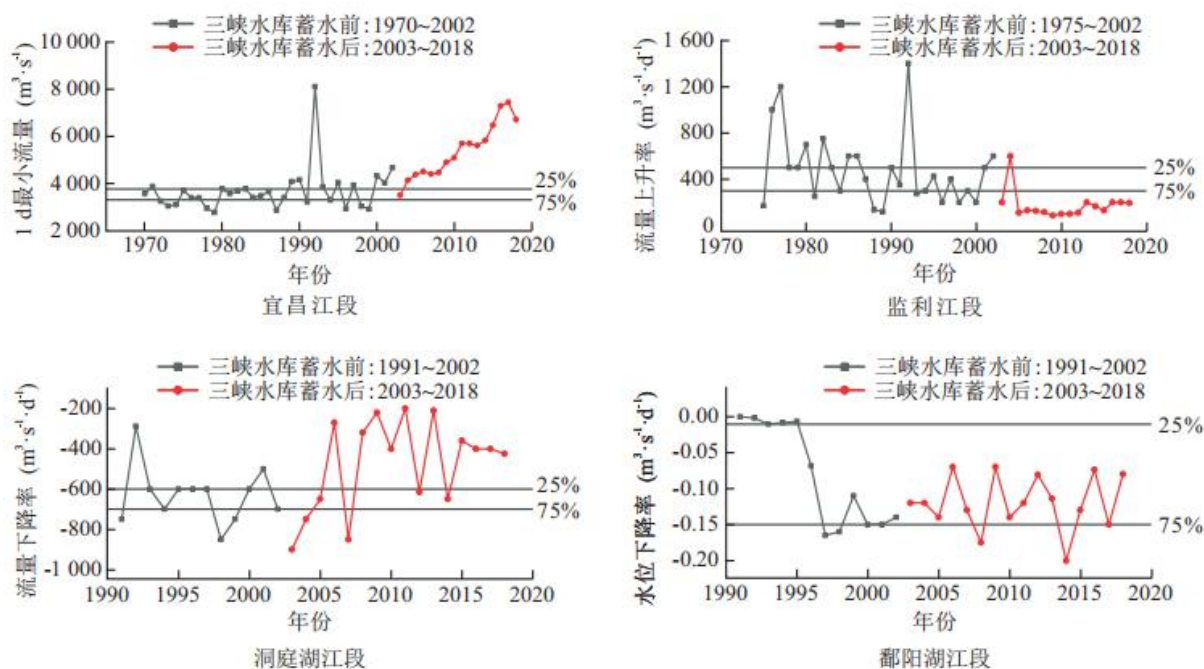


图 5 典型江段鱼类敏感水文期内 KIHA 指标变化趋势

Fig. 5 Variation trend of KIHA during fish sensitive hydrological periods for typical reaches

4 讨论

4.1 基于划分水文期的 RVA 法在识别鱼类敏感水文指标上的优势

河流在不同水文期的水文特征存在明显的差异性，例如在枯水期，多年流量极值水文过程线为波动平缓的水平线，在涨水期则为逆转次数较大且呈线性上升的曲线(图 2)。此外，每个水文期的水文特征变化也会影响鱼类在生活史对应阶段的生境需求，例如在涨水期，流量的涨幅过程会影响四大家鱼在早期生活史阶段的产卵活动[28, 29]；在丰水期，高流量及持续时间会影响四大家鱼在成鱼阶段的洄游行为[30]。因此，以年时间尺度评估河流水文情势变化对鱼类资源量的影响掩盖了周年水文过程在不同水文期的水文特征差异及其对鱼类资源量的影响。结果显示：在未划分水文期时，各典型江段水文情势的整体改变度顺序从大到小依次是宜昌江段、监利江段、洞庭湖江段和鄱阳湖江段；而划分水文期后，在流量的丰水期，洞庭湖江段水文情势的整体改变度最大，其次是鄱阳湖江段，再次是监利江段，最后是宜昌江段(图 3)。在宜昌江段，划分水文期相比未划分水文期，从 FSIHA 指标个数来看，前者的 FSIHA 指标个数明显多于后者；从 FSIHA 指标的组别分布来看，前者的 FSIHA 指标主要分布在第二组，后者并无明显规律；从 FSIHA 指标所属水文期分布来看，前者的 FSIHA 指标在鱼类敏感水文期内的个数最多，而后者并不能识别出这一点。监利、洞庭湖和鄱阳湖江段的规律与宜昌江段规律一致(图 4)。该结果说明传统 RVA 法评估的周年水文情势变化并不能代表特定水文期的水文情势变化。相应地，也不能反映特定水文期内水文情势变化对鱼类资源量的影响。因此，传统 RVA 法无法准确地识别鱼类敏感水文指标。结果显示相比传统 RVA 法，划分水文期的 RVA 法识别出的 FSIHA 指标的个数更多，并且能更细致地确定 FSIHA 指标所属组别和所属水文期。

4.2 鱼类敏感水文期的水文情势变化对其资源量的影响

本研究识别了长江中游典型江段的鱼类敏感水文期，并分析了该水文期内关键水文指标(即 KIHA 指标)的变化对鱼类资源量的影响方向和程度。研究结果显示，在宜昌江段，坝下经济鱼类(包括铜鱼、鲤鱼、河鲀、黄颡鱼、四大家鱼、鲫鱼和鳊鱼)的资源量变化对涨水期的流量较敏感(图 3 和图 4)。涨水期内 1、3、7 d 最小流量和流量逆转次数等 KIHA 指标较蓄水前的增大对

坝下经济鱼类的资源量呈不利影响。其中,以 1 d 最小流量的不利影响程度最大(表 3)。据研究,坝下经济鱼类的产卵期主要集中在涨水期[25],并且其产卵活动受该时期的涨水过程影响。比如,四大家鱼一般在河流上涨后大约 0.5~2 d 开始产卵,涨水停止时,产卵也停止[31, 32]。在涨水期 5~6 月,三峡水库为了腾出防洪库容会比较均衡地下泄水量[21],使得河流的涨水过程坦化,持续时间变短[33],1、3、7 d 最小流量和流量逆转次数较蓄水前增大,并且发生高度改变(表 3)。可见,三峡水库在涨水期的运行方式已经改变了大部分坝下经济鱼类的产卵活动的自然涨水过程,从而导致坝下经济鱼类早期资源量的显著改变,进而影响坝下经济鱼类种群全年资源动态[22, 34]。

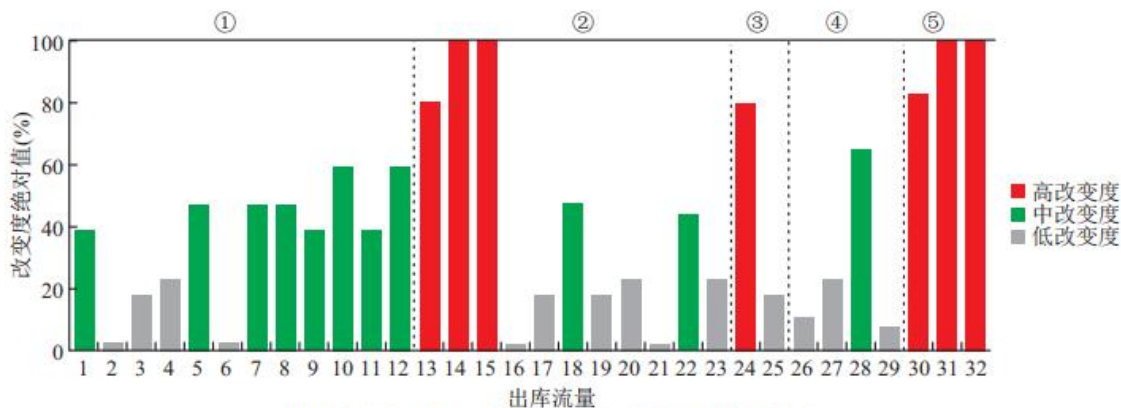
在监利江段,四大家鱼鱼苗径流量的变化对枯水期的流量较敏感(图 3 和图 4)。枯水期内最大流量出现时间和流量上升率等 KIHA 指标较蓄水前的高度改变对四大家鱼鱼苗径流量呈不利影响。其中,以流量上升率的不利影响程度最大(表 3)。监利江段属于分汊型江段,地势比较平坦,其江心洲和两岸的河漫滩是水生植物和底栖动物的重要栖息地[35],并为四大家鱼鱼苗提供庇护所及食物来源。据研究,监利江段的鱼卵和仔稚鱼主要分布在江心洲及两岸的河漫滩区域[36]。由表 2 的生态学意义可知,最大流量出现时间的提前会使在涨水期进行产卵的四大家鱼提前游入江心洲和河漫滩,而流量上升率较蓄水前减小将会影响水生植物在江心洲和河漫滩的早期萌发以及河道与河漫滩之间的营养物交换,从而间接影响四大家鱼鱼苗径流量的变化。

在洞庭湖江段,洞庭湖渔业资源量对丰水期的流量较敏感(图 3 和图 4)。丰水期内流量下降率较蓄水前减小,对洞庭湖的渔业资源量呈有利影响(表 3)。洞庭湖断面是长江干流与洞庭湖水文联通的重要断面,也是湖中洄游性鱼类的重要洄游通道。据研究,在 8 月~次年 2 月间,当洞庭湖断面水位下降时,洞庭湖中的洄游性鱼类呈现出从湖中游向长江干流的趋势[37]。根据三峡水库的运行方式,三峡水库在丰水期因拦洪蓄水、消减洪峰,使得洞庭湖断面的流量下降率较蓄水前减小(表 3)。相应地,洞庭湖断面的水位下降率也会减小,这会使得随水位下降一同进入长江干流的鱼类数量较蓄水前减小。虽然不利于洄游性鱼类从湖中游向长江干流,但是却减缓了湖中渔业资源量的下降。因此,流量下降率较蓄水前减少表现为对洞庭湖渔业资源量的有利影响。

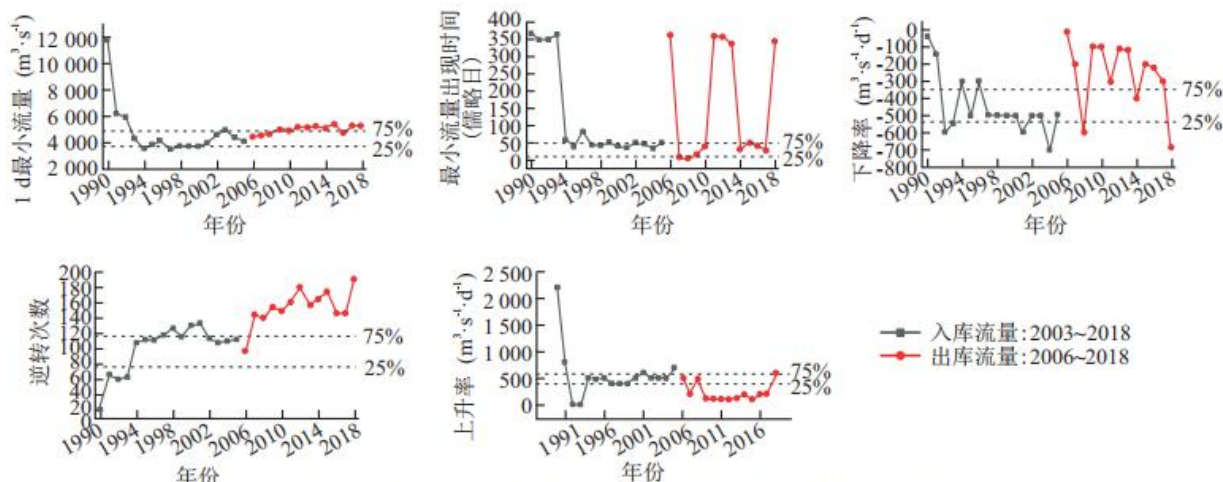
在鄱阳湖江段,鄱阳湖渔业资源量对退水期的水位较敏感(图 3 和图 4)。退水期内水位下降率,3、7 d 最大水位等 KIHA 指标较蓄水前高度改变,并对鄱阳湖的渔业资源量呈不利影响。其中,以水位下降率的不利影响程度最大(表 3)。在退水期,三峡水库蓄水,下泄流量有所减少[21],使得鄱阳湖断面的水位下降率较蓄水前增大。相应地,随水位下降一同进入长江干流的鱼类数量也会增多,有利于洄游性鱼类从湖中游向长江干流[37],从而使得湖中渔业资源量下降。此外,随着鄱阳湖断面水位的下降,鄱阳湖洲滩区域的水生植物由淹没态逐渐转变为半淹没态或者完全裸露。此时,湖中部分鱼类会进入河漫滩区域[38]。从表 2 的生态学意义可知,3、7 d 最大水位的减小可能会影响半淹没态或者完全裸露的水生植物所需土壤湿度的压力和厌氧压力,从而间接地影响进入鄱阳湖洲滩区域的鱼类的生长发育,导致湖中渔业资源量的下降。

4.3 基于关键水文指标的鱼类资源量保护建议

长江中游典型江段鱼类敏感水文期的 KIHA 指标统计结果显示对鱼类资源量呈不利影响的 KIHA 指标主要来自第二组和第五组(表 3)。进一步,为了确定三峡出库流量高度改变的 IHA 指标是否也是来自第二组和第五组。本研究将三峡水库入库流量(2003~2018 年)作为未受三峡水库蓄水影响的天然径流量,出库流量(2006~2018 年)作为受三峡水库蓄水影响的径流量,计算了三峡水库出库流量的 32 个 IHA 指标受三峡水库蓄水影响的改变度。结果显示出库流量的 1、3、7 d 最小流量、最小流量出现时间、上升率、下降率和逆转次数等 IHA 指标较入库流量呈高度改变,主要分布在第二组(描述极端水流条件及持续时间)、第三组(描述极端水流出现的时间)和第五组(描述水流变化的速率和频率)(图 6(a))。这与对鱼类资源量呈不利影响的 KIHA 指标的组别一致。说明在调节三峡水库出库流量时,应该优先关注极端水流条件及持续时间、水流变化的速率和频率等水文特征的改变对典型江段鱼类资源量的不利影响。目前,出库流量高度改变的 IHA 指标除了上升率和下降率呈现下降趋势,其他指标均呈现上升趋势(图 6(b))。因此,优化三峡水库调度时,应该上调出库流量的上升率和下降率,下调出库流量的 1、3、7 d 最小流量和逆转次数。



(a) 出库流量32个IHA指标受三峡水库蓄水影响的改变度



(b) 相对于入库流量, 出库流量高度改变的IHA指标的变化趋势

图6 三峡水库出库流量 IHA 指标的改变度及趋势分析图

Fig. 6 Alteration and variation trend of IHAs for outflow of Three Gorges Reservoir

5 结论

本研究基于划分水文期的 RVA 法识别了长江中游典型江段的鱼类敏感水文期, 评估了该水文期内关键水文指标 KIHA 变化对鱼类资源量的影响, 并提出了缓解 KIHA 指标变化对鱼类资源量不利影响的生态调度策略。主要结论如下:

(1) 划分水文期的 RVA 法能够克服传统研究未考虑水文情势在周年不同水文期内局部变化对鱼类资源量影响的缺点, 识别出长江中游典型江段的鱼类敏感水文期, 揭示出鱼类敏感水文期内影响其资源量的 KIHA 指标所表征的水文特征。

(2) 在宜昌江段, 涨水期内 1、3、7 d 最小流量和流量逆转次数的高度改变对坝下经济鱼类的资源量呈不利影响; 在监利江段, 枯水期内最大流量出现时间和流量下降率的高度改变对四大家鱼鱼苗径流量呈不利影响; 在洞庭湖江段, 丰水期内流量下降率的高度改变对洞庭湖渔业资源量呈有利影响; 在鄱阳湖江段, 退水期内 3、7 d 最大水位和水位下降率的高度改变对鄱阳湖的渔业资源量呈不利影响。

(3) 三峡水库出库流量高度改变的 IHA 指标组别与典型江段鱼类敏感水文期的 KIHA 指标组别一致, 主要为描述极端水流条件及持续时间(第二组)及描述水流变化的速率和频率(第五组)的 IHA 指标。因此, 在优化三峡水库调度以缓解典型江段鱼类资源量的下降时, 应尽可能的降低这两组 IHA 指标较入库流量的变化幅度。

参考文献:

- [1] STEIN E D, SENGUPTA A, MAZOR R D, et al. Application of regional flow-ecology relationships to inform watershed management decisions: Application of the ELOHA framework in the San Diego River watershed, California, USA [J]. *Ecohydrology*, 2017, 10 (7) :e1869.
- [2] LI J, DONG S, LIU S, et al. Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60:316-324.
- [3] ZHANG H, KANG M, SHEN L, et al. Rapid change in Yangtze fisheries and its implications for global freshwater ecosystem management [J]. *Fish and Fisheries*, 2020, 21 (3) :601-620.
- [4] CHEN D, XIONG F, WANG K, et al. Status of research on Yangtze fish biology and fisheries [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 85 (4) :337-357.
- [5] DUAN X B, LIU S P, HUANG M G, et al. Changes in abundance of larvae of the four domestic Chinese carps in the middle reach of the Yangtze River, China, before and after closing of the Three Gorges Dam [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 86 (1) :13.
- [6] 王俊娜, 李翀, 廖文根. 三峡-葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30 (2) :84-90, 95. WANG J N, LI C, LIAO W G. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream eco-hydrology [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30 (2) :84-90, 95.
- [7] 班璇, 姜刘志, 曾小辉, 等. 三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估 [J]. *水科学进展*, 2014, 25 (5) :650-657. BAN X, JIANG L Z, ZENG X H, et al. Quantifying the spatio-temporal variation of flow and sediment in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25 (5) :650-657.
- [8] 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.
- [9] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37 (1) :231-249.
- [10] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14 (4) :329-340.
- [11] RICHTER B D, MATHEWS R, HARRISON D L, et al. Ecologically sustainable water management: Managing River flows for ecological integrity [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13 (1) :206-224.
- [12] KOEL T M, SPARKS R E. Historical patterns of river stage and fish communities as criteria for operations of dams on the Illinois River [J]. *River Research and Applications*, 2002, 18 (1) :3-19.

-
- [13] YANG B, DOU M, XIA R, et al. Effects of hydrological alteration on fish population structure and habitat in river system: A case study in the mid-downstream of the Hanjiang River in China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01090.
- [14] 张如强, 刘俊国, 冒甘泉, 等. 基于改进 RVA 法的黑河上游水文情势变化分析 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(1): 29-38. ZHANG R Q, LIU J G, MAO G Q, et al. Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(1): 29-38.
- [15] YANG P, YIN X A, YANG Z F, et al. A revised range of variability approach considering the periodicity of hydrological indicators [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(26): 6222-6235.
- [16] BAN X, DIPLAS P, SHIH W, et al. Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 268-275.
- [17] NISLOW K H, ARMSTRONG J D. Towards a life-history-based management framework for the effects of flow on juvenile salmonids in streams and rivers [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2012, 19(6): 451-463.
- [18] 陈诚, 黎明政, 高欣, 等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状及水文影响条件 [J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 1055-1063. CHEN C, LI M Z, GAO X, et al. The status of the early-stage fish resources and hydrologic influencing conditions in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 1055-1063.
- [19] HAYES D, MOREIRA M, BOAVIDA I, et al. Life stage-specific hydropeaking flow rules [J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1547.
- [20] 周雪, 王珂, 陈大庆, 等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响 [J]. *水产学报*, 2019, 43(8): 1781-1789. ZHOU X, WANG K, CHEN D Q, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(8): 1781-1789.
- [21] 王超俊, 张鸣冬. 三峡水库调度运行对长江口咸潮入侵的影响分析 [J]. *人民长江*, 1994, 25(4): 44-48. WANG C J, ZHANG M D. Impacts of Three Gorges Reservoir operation on salt water encroachment at the Yangtze Estuary [J]. *Yangtze River*, 1994, 25(4): 44-48.
- [22] HOEDE E D, HOYT R D. Fish early dynamics and recruitment variability [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1987: 91-97.
- [23] YI Y, YANG Z, ZHANG S. Ecological influence of dam construction and river-lake connectivity on migration fish habitat in the Yangtze River Basin, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1942-1954.
- [24] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. Study on ecological environmental impact of Three Gorges project [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1997.

-
- [25] 乔晔. 长江鱼类早期形态发育与种类鉴别 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2005. QIAO Y. Early morphogenesis and species identification of fishes in Yangtze River [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [26] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(6): W06433.
- [27] 秦敬岚, 尹心安, 刘洪蕊, 等. 湖泊水位变化对挺水植物影响分析: 以洪泽湖为例 [J]. *环境工程*, 2020, 38(10): 53-60. QIN J L, YIN X A, LIU H R, et al. Analysis of effect of lake water level changes on emergent plants: A case study in the Hongze Lake [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(10): 53-60.
- [28] YANG Y C E, CAI X, 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): W04412.
- [29] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507.
- [30] 张辉, 莫康乐, 李婷, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对草鱼江湖洄游潜在影响研究 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 600-610. ZHANG H, MO K L, LI T, et al. The potential influence of the Poyang Lake Hydraulic Project construction on river-lake migration of grass carp [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 600-610.
- [31] POLLARD D A, HANNAN J C. The ecological effects of structural flood mitigation works on fish habitats and fish communities in the lower Clarence River system of South-Eastern Australia [J]. *Estuaries*, 1994, 17(2): 427-461.
- [32] DE GRAAF G. The flood pulse and growth of floodplain fish in Bangladesh [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2003, 10(4): 241-247.
- [33] 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 W X, LI Y, WANG H X, et al. Assessment of eco-hydrological regime of lower reaches of Three Gorges Reservoir based on IHA-RVA [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(9): 2014-2021.
- [34] HJORT J. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe: Viewed in the light of biological research [M]. *Rapports et Procès-Verbaux des Réunions*, 1914: 1-228.
- [35] 班璇, 郭舟, 熊兴基, 等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用 [J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 936-946. BAN X, GUO Z, XIONG X J, et al. Applying physical habitat model of Zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8): 936-946.
- [36] 李世健, 陈大庆, 刘绍平, 等. 长江中游监利江段鱼卵及仔稚鱼时空分布 [J]. *淡水渔业*, 2011, 41(2): 18-24. LI S J, CHEN D Q, LIU S P, et al. Spatial and temporal distribution patterns of eggs, fish larvae and juveniles at Jianli cross-section in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2011, 41(2): 18-24, 9.
- [37] QIN X, GONG Z, LIU H. Lateral migration of fish between China's second largest freshwater lake (Dongting

Lake) and the mainstem of the Yangtze River [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2019, 102(4):527-539.

[38] RU H J, LIU X Q. River-lake migration of fishes in the Dongting Lake area of the Yangtze floodplain [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, 29(3):594-601.