

# 基于 IHA-RVA 法的东江源区生态水文情势变化分析

曾金凤<sup>1,2</sup>, 刘祖文<sup>1</sup>, 刘友存<sup>3</sup>, 邹杰平<sup>4</sup>, 仝兴庆<sup>2</sup>, 刘星根<sup>1</sup>, 谢水石<sup>2</sup>

(1.江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2.江西省赣江上游水文水资源监测中心, 江西 赣州 341000; 3.嘉应学院地理科学与旅游学院, 广东 梅州 514015; 4.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** [目的] 研究东江源区流域生态水文情势的变化, 为明确流域生态修复目标和开展生态修复措施提供参考依据, 为水利部水环境生态监测试点工作顺利开展提供经验。[方法] 选取江西省寻乌县的寻乌水背水文站和定南县的定南胜前水文站两个国家站 1980—2020 年的逐日流量数据, 运用生态水文指标变化范围法(IHA-RVA)以及水文改变度法综合评价流域的水文情势改变程度。[结果] ①东江源区整体水文改变度为 50.1%, 属中度改变, 其中寻乌水影响大于定南水; ②32 个水文改变指标中, 高低流量的频率及延时受影响最小, 改变度为 26.3%, 属低改变; ③流量变化率及概率最大 61.5%, 属中度改变, 特别是最大 1 d 流量、变换次数、1 月均值流量、5 月均值流量等指标发生严重变异; ④以鱼类资源变化响应分析验证, 源区鱼类资源减少。[结论] 水库运行对东江源区周边生态系统影响较大, 亟需适时调控河流的流量, 使区域经济与生态环境保护协调发展。

**关键词:** IHA-RVA 法; 生态水文; 水文情势; 水文改变度; 东江源区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0157-08

中图分类号: X824

**文献参数:** 曾金凤, 刘祖文, 刘友存, 等. 基于 IHA-RVA 法的东江源区生态水文情势变化分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 157-164. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.022; Zeng Jinfeng, Liu Zuwen, Liu Youcun, et al. Eco-hydrological regime of source area of Dongjiang River based on IHA-RVA [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 157-164.

## Eco-hydrological Regime of Source Area of Dongjiang River Based on IHA-RVA

Zeng Jinfeng<sup>1,2</sup>, Liu Zuwen<sup>1</sup>, Liu Youcun<sup>3</sup>, Zou Jieping<sup>4</sup>, Tong Xingqing<sup>2</sup>, Liu Xinggen<sup>1</sup>, Xie Shuish<sup>2</sup>

(1.School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2.Hydrology and Water

Resources Monitoring Center for Ganjiang River Upstream, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

3.School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China; 4.School of

Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** [Objective] The changes of eco-hydrological regime in the source region of Dongjiang River basin were studied, in order to provide a basis for clarifying the objectives of eco-restoration and carrying out eco-restoration measures, and to provide experience for the smooth development of the pilot work of water environment and water ecology monitoring of the Ministry of Water Resources. [Methods] The daily flow data of Xunwu shuibei hydrological station in Xunwu County of Jiangxi Province and Dingnan Shengqian hydrological station in Dingnan County from 1980 to 2020 were selected, to comprehensively evaluate the degree of hydrological change of the basin by using IHA-RVA (indicators of hydrologic alteration, IHA; range of variability approach, RVA) method and hydrologic change degree method. [Results] ① The hydrological change degree of the source region of Dongjiang River was 50.1%, which belonged to moderate change, in which the effect of Xunwu Water was greater than Dingnan Water. ② Among the 32 IHA hydrological indexes, the frequency and delay of high and low flow were the least affected, and the degree of change was 26.3%. ③ The

收稿日期: 2021-08-07

修回日期: 2021-09-15

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“稀土矿区典型流域水沙过程与氮磷及重金属多界面迁移机制研究”(41861002); 国家自然科学基金项目(52160019); 江西省水利厅重大基础科研项目(KT201727); 广东省教育厅重点项目(2021ZDZX4046); 赣州市重大科技项目(赣市科发 2019[60]号); 嘉应学院高峰人才科研启动项目(311A1517)

**第一作者:** 曾金凤(1979—), 女(汉族), 江西省于都县人, 博士, 主要从事水资源与水环境研究。Email: 45415116@qq.com。

**通讯作者:** 刘友存(1977—), 男(汉族), 河北省迁安市人, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水资源水环境方面的教学研究工作。Email: liuyoucun@126.com。

maximum flow change rate was 61.5%, which belonged to moderate change, especially the maximum 1-day flow, transformation times, the mean flow in January, the mean flow in May and other indicators have serious variation. ④ According to the analysis of fish resources change, the fish resources in the source region decreased. [Conclusion] The operation of the reservoir has a great impact on the surrounding ecosystem of the source region of the Dongjiang River, and it is urgent to regulate the flow of the river to coordinate the development of regional economy and ecological environment protection.

**Keywords: IHA-RVA; eco-hydrological; hydrological situation; hydrological alternation degree; source area of Dongjiang River**

东江是粤港澳大湾区的重要饮用水源,直接关系到包括港深在内的流域内 7 000 多万人民生活用水和生态安全<sup>[1]</sup>。近年来,随着东江源区河流水利的频繁开发及程度的逐步加深,对东江源区水文情势带来较大改变。水利工程集中泄水影响了天然水文过程,直接或间接地改变了流域内重要物种的生境,影响物种的分布和群落结构<sup>[2]</sup>,进而对东江流域生态系统产生深远影响<sup>[3-4]</sup>。

当前,有关水利工程建设产生的生态水文效应的研究,国内外学者进行了一系列的研究工作。自从 Richter<sup>[5]</sup> 1997 年首次提出水文改变指标法(indicators of hydrologic alteration, IHA)的概念以来,并将它应用于人类活动对河流径流过程的影响的评价,构建了河流的生态流量管理模式。随后, Galat 等<sup>[6]</sup>和陈启慧等<sup>[7]</sup>分别应用 IHA 方法对密苏里河径流水文情势的变化和葛洲坝的建设对长江径流过程产生的影响进行分析。不久, Richter 等<sup>[8]</sup>又提出了河流生态恢复研究的变动范围法 RVA (range of variability approach),认为该方法能够有效地评估筑坝对河流生态水文情势的影响。Irwin 等<sup>[9]</sup>将 RVA 法运用于 1924—1980 年和 1984—1996 年 Tallapoos 河流量特征的变化评价中。此后,学者们将 IHA 和 RVA 进行有机地结合,形成生态水文指标变化范围(IHA-RVA)法,并进行广泛的应用,如李舒等<sup>[10]</sup>针对窟野河受水土保持、煤矿开采影响的水文情势指标变化情况, Mwedzi 等<sup>[11]</sup>针对津巴布韦境内 Manyame 流域建坝后不同断面的水文指标改变程度分别进行分析评价。近年来,针对东江流域水文特征及环境变化的研究,国内有学者也开展相关工作,例如胡娜等<sup>[12]</sup>人分析了枫树坝水库建设对东江干流中上游龙川站水文情势影响,胡晓张等<sup>[13]</sup>人从近 30 a 来东江大规模人工采砂而引起的河床下切视角分析东江中下游河道近期洪水水文情势变化。总之,无论是 IHA 法、RVA 法,还是目前逐步广泛运用的 IHA-RVA 法,在探讨人类活动尤其是水利工程对水文情势影响的研究方面都取得了可喜的成果,为水资源承载力和生态水文情形研究提供了科学依据。然而,针对亚热带典

型山地丘陵、水量丰沛流域的水文生态过程受水利工程影响的分析研究还不多见。为此,本文以江西省境内东江源为例,重点探讨流域水电工程修建前后对流域水生态水文指标变化的影响,并以鱼类资源变化加以佐证,不仅为明确流域生态修复目标和采取生态修复措施提供参考依据,也为水利部水环境水生态监测试点工作开展提供经验。

## 1 区域概况

东江源区位于武夷山南端余脉与南岭余脉的绵延地带,属亚热带南缘,地形以低山和丘陵为主,地势为东、北、西面高,南面低。流域面积约 3 524.0 km<sup>2</sup>,占东江流域面积的 13.0%。源区属于典型的亚热带丘陵区湿润季风气候,水量丰沛,年均降水量 1 615.00 mm,年际变化较大,极值比约为 2.5,丰—枯年交替出现,且降水年内差异显著,在汛期(4—9 月)部分地区洪涝灾害频发。降水是流域径流的主要补给来源,径流的年内分配与降水的年内分配基本一致。源区主要包括干流寻乌水和一级支流定南水两条水系,分别设有控制性水文站寻乌水背水文站和定南胜前水文站。干流水背水文站上游的南龙水库为引水式电站,2005 年建成投入使用,总库容 4.50×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,最大泄洪流量为 3 991 m<sup>3</sup>/s,兼顾防洪、发电、供水、灌溉。支流定南胜前水文站上游的黎屋电站为日调节水库,1997 年建成运行,总库容为 2.52×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,最大泄洪流量为 209.8 m<sup>3</sup>/s,兼顾防洪、发电。

## 2 数据与方法

研究选取寻乌水背水文站、定南胜前水文站 1980—2020 年实测逐日平均流量分析建库前后水文情势变化。日平均流量数据是以该站的水位过程线为基础,通过该站的水位—流量关系转化成流量过程线,再用面积包围法计算所得,其资料来源于赣江上游水文水资源监测中心水文年鉴。基于水文改变指标法(IHA)的变化范围法(RVA)进行寻乌水背水文站和定南胜前水文站突变前后的水文改变程度评价,

以 IHA 指标计算的结果分析东江源区水文突变前后整体水文情势变化。

## 2.1 水文改变指标

Richter 等<sup>[14]</sup>提出的 IHA,包含 33 个水文参数,

并依据水文情势的 5 种基本特征划分水文指标,综合流量、时间、频率、延时和改变率等方面评价河流水文状态的改变。因东江源区未出现断流情况,不考虑零流量天数,调整后的 IHA 参数详见表 1。

表 1 水文改变指标法(IHA)流量参数指标

组别	水文指标	IHA 指标
1	各月流量(12 个参数)	各月份流量的平均值
2	年极值水文状况大小及历时(11 个参数)	年最小(大)1 d,3 d,7 d,30 d,90 d 径流量,基流指数
3	年极值水文状况发生时间(2 个参数)	年最小(大)1 日流量发生时间
4	高低流量的频率及延时(4 个参数)	年发生低(高)脉冲的次数,低(高)脉冲平均延时
5	流量变化率及概率(3 个参数)	流量平均减少率,流量平均增加率,每年流量逆转次数

## 2.2 变化范围

Richter 等<sup>[15-16]</sup>提出水文变化范围(RVA),以各指标的平均值 $\pm\delta$ (标准差)或者以频率 75%和 25%作为 RVA 的目标边界。若水文变异后受影响的流量记录仍有部分落在 RVA 目标内,则说明水文变异对河流有轻微影响,仍属于自然流量的变化范围;若受影响的流量记录落在 RVA 目标范围外,则表明水文变异给河流的生态系统带来严重的负面影响<sup>[4,14-15]</sup>。

## 2.3 水文改变指标

(1) 单个指标改变度。运用 Richter 等以水文改变度来量化评估水文指标受干扰后的变化程度,计算公式为:

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

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

式中: $D_i$  为第  $i$  个 IHA 的水文改变度; $N_{oi}$  为第  $i$  个 IHA 的实际观测年数,指标变异后 IHA 仍落于 RVA 目标范围内的实际观测年数; $N_e$  预期年数,指标变异后 IHA 预期落于 RVA 目标范围内的预测年数; $r$  为变异前 IHA 落于 RVA 目标范围内的比例; $N_T$  为变异后受影响的径流量记录总年数<sup>[17]</sup>。

(2) 综合指标改变度。基于每个指标的变异程度 $D_i$ ,变异后序列总的水文变异程度  $D$  计算公式为:

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

式中: $D$  为流域整体的水文改变度, $0 \leq D < 33\%$  属于未改变或者低度改变; $33\% \leq D < 67\%$  属于中度改变; $67\% \leq D \leq 100\%$  属于高度改变<sup>[18-19]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 研究阶段的划分

为了定量评估东江源区水文改变程度,以两个水

电站建成时间 1997 和 2005 年为分界,将水背水文站和定南胜前水文站的历年逐日数据划分为两个时段,1980—1997 年、1980—2005 年为水文突变前自然状态下的基准流量研究时段。1998—2020 年、2006—2020 年作为水文突变后的流量改变序列研究时段。运用 IHA 和 RVA 法计算水文突变前后的水文改变程度。在此基础上,以指标参数频率 75%和 25%作为生态水文目标的上、下限阈值。

### 3.2 水文突变前后水文改变度分析

3.2.1 月均值流量变化 从图 1 可知,寻乌水背水文站和定南胜前水文站的月均值流量变化最大均发生汛期 4—9 月,月均流量值水文改变度分别为 45.0%和 43.9%,呈中度改变。寻乌水背水文站在 11 月至次年的 2 月流量有不同程度的增加,3—6 月有不同程度的减少,5 月减少最大。寻乌水流域水文突变年份为 1997 年,突变后 3—6 月流量比突变前减少 2~10 m<sup>3</sup>/s,其他月份不同程度增加。2—4 月降雨量比突变前减少 40~60 mm,可能是月均流量改变的重要因素,两者的时间差异表明寻乌水流域降雨径流的时滞特性;同时,与突变前相比,寻乌水流域春季降雨偏少,水电站增加蓄水,从而导致春末夏初(5 月)流量显著减少。定南胜前水文站 3 月、4 月、10 月有所减少,其他月份有不程度地增加。定南水水文突变年份为 2005 年,突变后 5—8 月流量比突变前增加 4~8 m<sup>3</sup>/s,其他月份呈现不同程度增加或减少,5—7 月降雨量比突变前增加 20~60 mm。寻乌水和定南水月均流量及降雨量的变化略有不同,主要表现在春季降雨(2—4 月)显著减少条件下,寻乌水春季流量显著减少,定南水 3—4 月流量呈现一定程度减少,而 5 月流量显著增加。两者变化差异可能与流域下垫面产流特性、水电站调节运行能力有关,间接表明寻乌水流域水库塘坝的水量调蓄能力可能比定南水流域的调蓄能力更强。

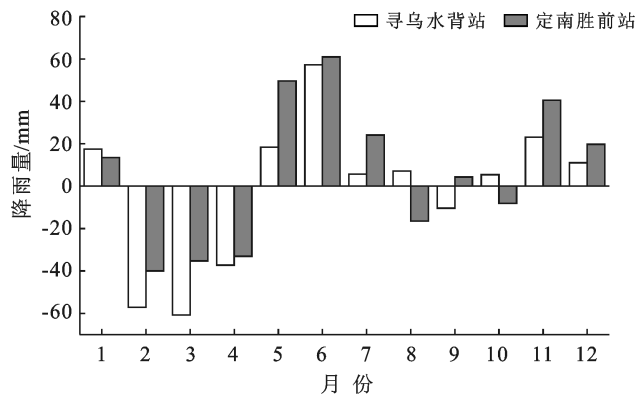
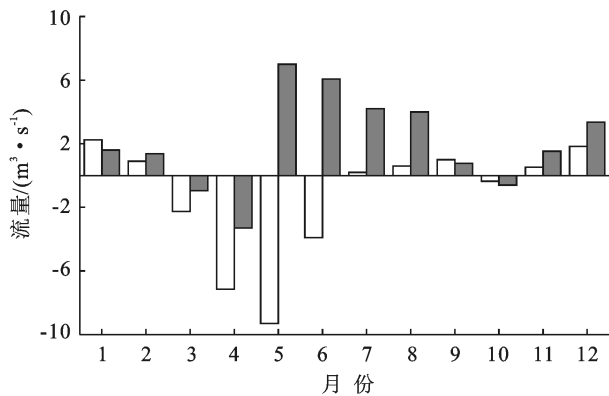


图 1 突变前后月均径流量及降雨量差值

3.2.2 年极值流量变化 图 2 分别为水文站最大 1 d, 最小 1 d 流量变化图。两个站的平均极大值有所减小, 阈值范围有所收缩, 体现了水库的防洪效益。寻乌水背水文站年均 1 d 最小流量在水文突变的影响下呈上升趋势, 而最大流量在突变影响下呈下降趋势, 部分超出 RVA 阈值, 且波动范围收紧, 这表明水

文突变使得年内低流量增加, 大流量减小, 水文突变后的极端流量事件处于一个稳定的范围, 提升了河岸生态系统的稳定性; 定南胜前水文站年均 1 d 最小流量变化不明显, 而 1 d 最大流量增大, 且波动范围略有缩减, 表明水文突变后的低流量事件范围相对稳定。

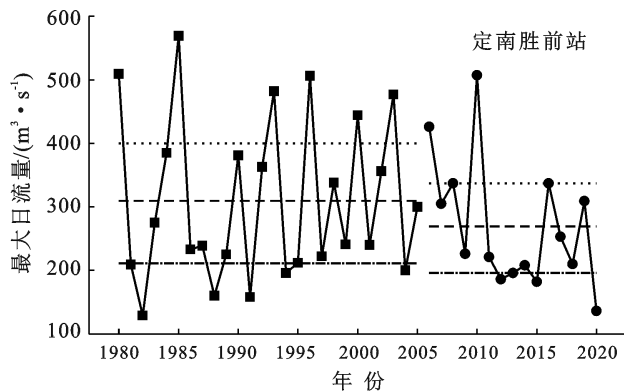
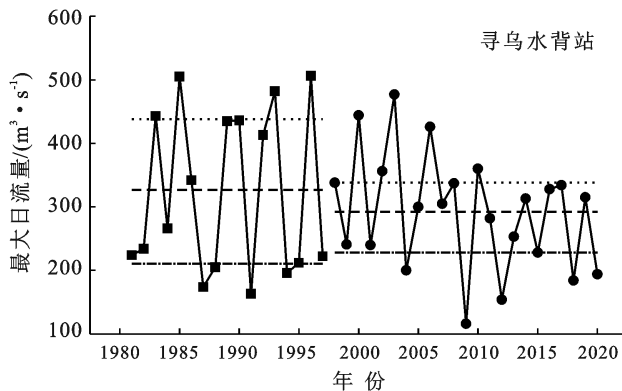
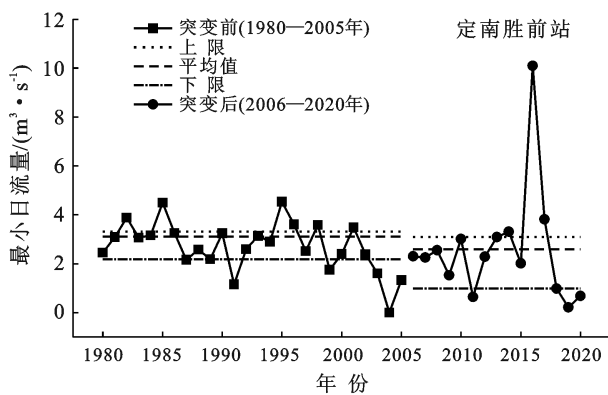
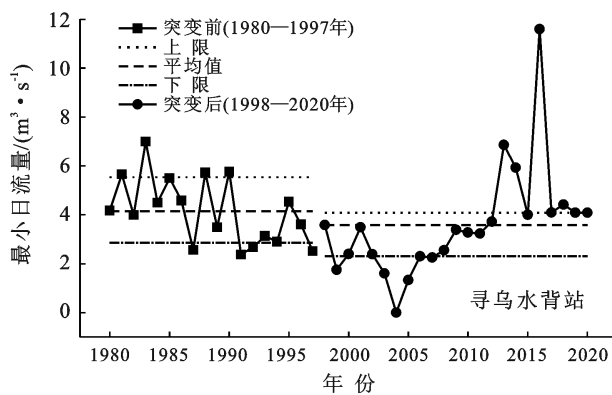


图 2 东江源区各水文站极值流量变化

3.2.3 年极端流量发生时间 表 2 为研究区各水文站极端流量发生时间。

由表 2 可知, 寻乌水背水文站最小、最大流量出现时间的均值在突变后发生了提前, 最小流量由 2 月的中上旬提前到 1 月中下旬, 最大流量由 5 月中上旬

提前到 4 月中下旬, 变化范围在半个月内, 改变度小, 证明受流域内水利工程调度的影响很小。径流式或不完全日调节水库对洪水调节能力小, 这由其水库性能决定; 自然流态下的河道最低流量出现时间因气候的变化具有不稳定性, 定南水最小流量时间提前, 出

现时间阈值范围收紧,表示水文变异维持了最小流量发生时间的稳定性。最大流量时间推后,改变度

90.67%属于严重改变,极大值的改变可能对生物栖息地以及鱼类洄卵生产较大的影响<sup>[20]</sup>。

表 2 东江源区各水文站极端流量发生时间

指标	寻乌水背水文站				改变度/ %	定南胜前水文站				改变度/ %
	中值		阈值			中值		阈值		
	变化前	变化后	上限	下限		变化前	变化后	上限	下限	
最小流量日出现时间/d	33	19	137.1	35.08	4.35	23	19	94.3	42.7	-65.33
最大流量日出现时间/d	159.5	147	171.7	139.90	4.35	154.5	162	178.7	135.1	90.67

3.2.4 高、低流量脉冲的频率及历时 除自然环境因素影响外,东江源区脉冲受上游水电站的影响比较小。寻乌水背水文站低脉冲改变度为中度,其他 3 个指标及定南胜前水文站的 4 个指标均为低改变度。突变后寻乌水背水文站和定南胜前水文站的高、低脉冲次数均增多,历时变短。低脉冲次数以及历时的变

短将使流域旱季水量减少。定南胜前水文站超出高脉冲 RVA 上限的部分增多,高脉冲的发生次数的增加,将不利于汛期过度(图 3)。低脉冲时间的缩短则使得河道、河滩的受水情况趋于稳定,有利于该区间生态平衡的健康发展,但是高流量平均时间的缩短又给河道及沿岸的生态环境的发展前景注入了不确定性<sup>[21]</sup>。

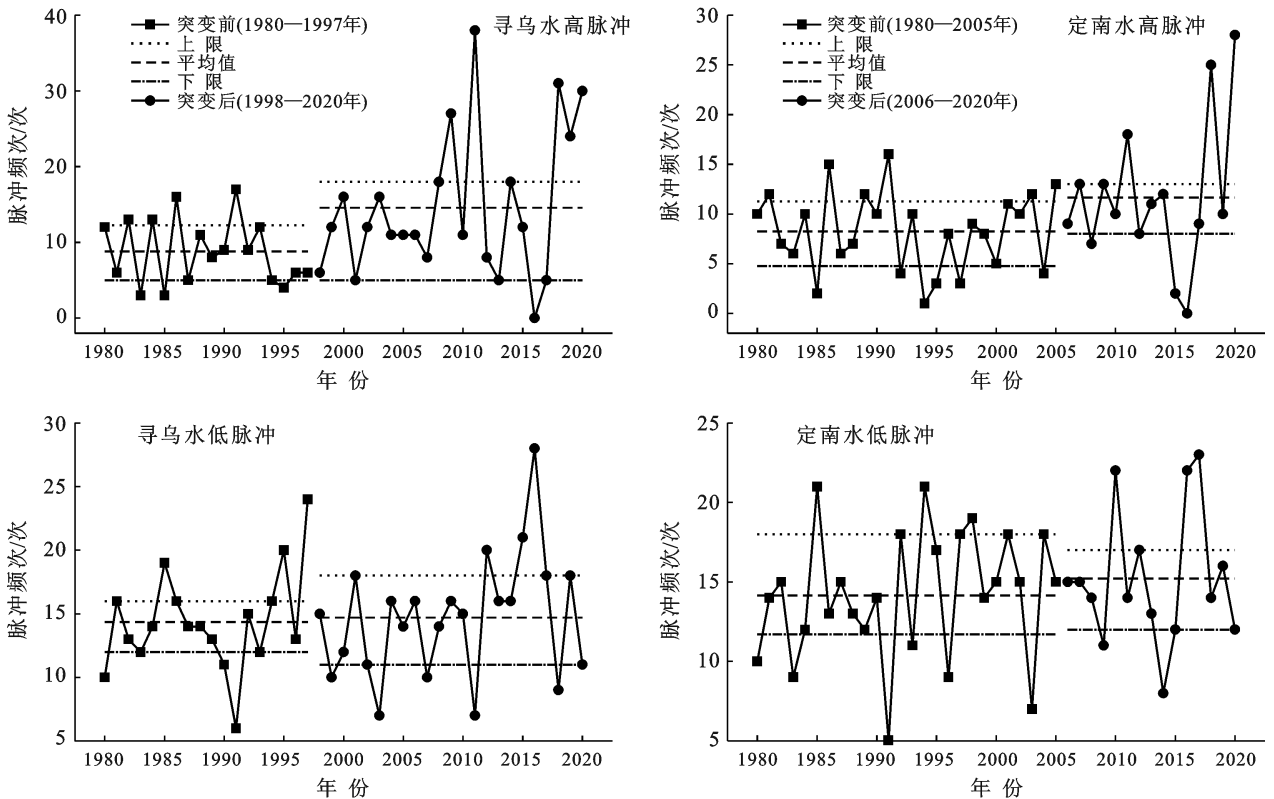


图 3 东江源区各水文站突变前后高低脉冲次数变化

3.2.5 流量改变率及频率 图 4 为突变前后流量逆转次数变化情况。由图 4 可知,寻乌水背水文站的流量平均涨水率下降,退水率上升,水文改变较显著为 56.5%,说明流量总体呈减少趋势,水文站下泄流量变化较大;定南胜前水文站的流量平均退水速率和涨水速率均有所上升,涨水速率呈低度改变,为 21.3%。流量逆转水文改变较显著,为 65.3%,为中度改变。

反映突变过程在调峰和调频过程对下泄流量造成较大影响。流量变化改变率及频率的增加或减少将给河流生物群落带来一定的影响。由于生态系统对外界环境变化的承载能力有限,河流生态系统稳定将受到流量变化及频率的影响。特别是流量逆转次数的改变,会直接影响水生动植物的生存环境,阻碍水生动植物的生长<sup>[22]</sup>。

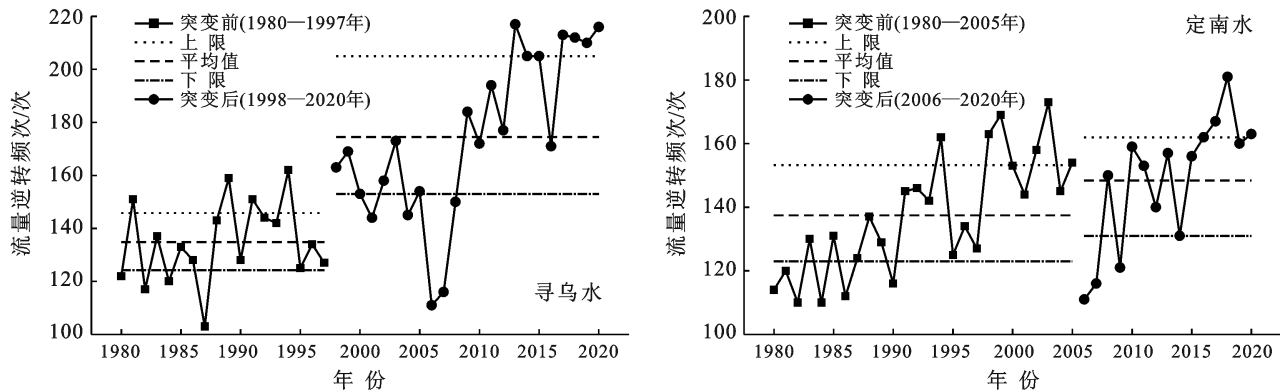


图 4 东江源区各水文站流量逆转频次变化

3.2.6 整体水文改变度 分析水文改变程度的不同,反映了河流水文突变对水文情势的影响程度。计算出寻乌水背水文站和定南胜前水文站在突变前后 32 个水文指标绝对值的改变度,并绘制 3 等级的水文改变度。

由图 5 可知,受突变的影响,寻乌水背水文站 32 个水文指标中。最大 1 d 流量、1 月均值流量出现时间、变换次数的水文改变度达到 100%,高度改变占比 26.3%外,其他 4 组均为中度改变。在空间上,水电工程对寻乌水水文情势的影响比定南水大。

明寻乌水流量在整个突变前后的改变较大。定南胜前水文站的多数指标为低改变度,占比 62.5%为最高,中度改变占比 28.1%次之,高度改变占比仅 9.38%,5 月平均流量改变度达到 100%。表明定南胜前水文站流量在整个突变前后的改变比较小,并有向好趋势。从表 3 分析,整个东江源区变化度为中度改变 50.1%,除高低流量的频率及延时低改变度 50.1%,除高低流量的频率及延时低改变度 50.1%,其他 4 组均为中度改变。在空间上,水电工程对寻乌水水文情势的影响比定南水大。

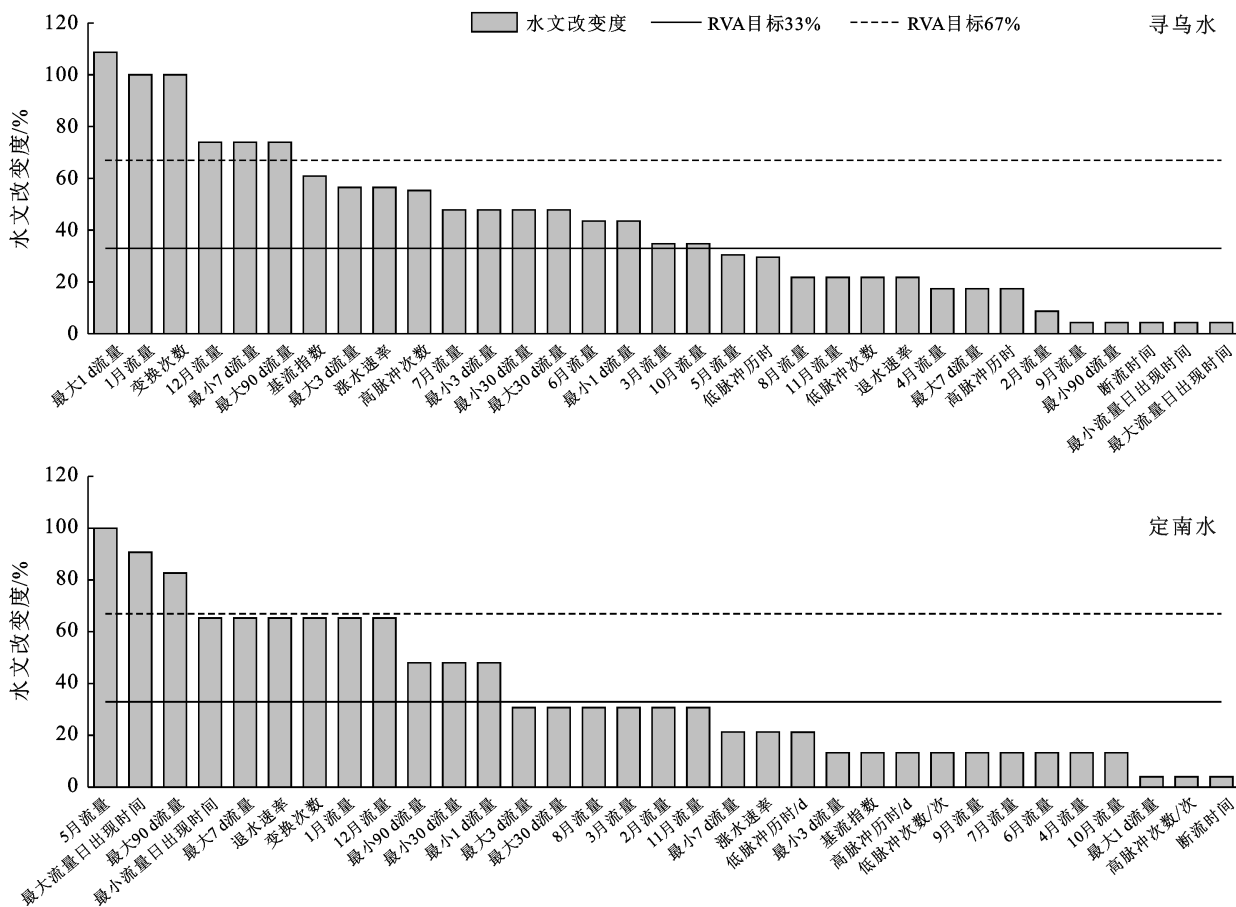


图 5 东江源区水文情势整体改变度

表 3 东江源区流量系列整体水文改变度

水文站名称	各组水文改变度					整体水文改变度( $D_0$ )
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	
水背水文站	45.0 (M)	62.2 (M)	4.35 (L)	34.3 (L)	67.5 (M)	48.3 (M)
胜前水文站	43.9 (M)	45.5 (M)	79.0 (H)	14.3 (L)	54.7 (M)	51.9 (M)
东江源区	44.5 (M)	54.4 (M)	56.0 (M)	26.3 (L)	61.5 (M)	50.1 (M)

注: H 表示高度改变, M 表示中度改变, L 表示低度改变。

3.2.7 水文改变度与鱼类资源的响应分析 东江源区域的河床多碎石,水流变化急缓结合,深潭与浅滩交错,为不同生态类型的鱼类提供良好的栖息场所。根据上文分析,水电站蓄水对东江源河流生态水文情势受产生一定程度的影响。水库蓄水后,相比天然河道状态下,库区及坝址以上回水区域内流速均减缓。库区流速由急流向缓流的转变,对库区鱼类种群结构及鱼类繁殖都有一定影响<sup>[23]</sup>。利用水电站调节年内分布的丰枯水量不均,使下泄流量过程趋向于均一化,改变了水库下游河流自然水文情势的年内丰枯周期变化规律,对枯水期的影响尤其明显,进而还会导致与水文相关的含沙量、河流形态、河流水生生物群落等发生相应的变化,从而影响到河流健康的生态过程,甚至会产生一系列广泛、深刻,而且长期的生态效应<sup>[24]</sup>。水电站不同调度运行方式对下游河流生态水文情势的影响时间及其程度存在一定差异。4—6 月为东江源区主汛期,水库防洪泄水,使坝下游的涨水过程发生变化,均衡地下泄水量,一定程度上使得下游河流的涨水过程坦化,水位变幅减小,使鱼类第一次产卵的信号减弱或消失。洪水过程单一的涨落过程,且持续时间变短,连续日流量上涨率减小,洪峰最高流量降低,鱼类繁殖活动受到抑制,产卵规模也会由繁殖季节涨水过程的改变逐年下降<sup>[24]</sup>。邹多录<sup>[25]</sup>于 1983—1984 年对寻乌水项山至留车河段进行了渔业资源调查,共调查到 57 种鱼类,隶属于 6 目 14 科 31 属。邓风云等<sup>[26]</sup>在 2010—2011 年对整个东江源区的鱼类进行了调查,共计采到鱼类 7 目 18 科 56 属 74 种。2019—2020 年,本研究调查东江源区鱼类种类,数量存在着明显下降。与历史数据相比,本次调查的数据与范围、频次、捕捞方式有关,但社会经济发展与人为活动对鱼类的影响不容忽视,该区域自然环境变化,流域内修建水电站导致鱼群孵化区受淹,“四大家鱼”产卵场逐渐消失,梯级水坝严重影响洄游性鱼类(如日本鳗鲡)正常的生活史,进一步验证水利工程对水文生态的影响。

## 4 结论

(1) 以 IHA 指标体系为基础,采用改进的 RVA

法分析水利工程对东江源区两条主要河流的生态水文情势的影响,上游水电站建设运行后对河流的控制程度较大,水文改变度 50.1%,对东江源河流径流产生较大影响:极值流量增加,历时提前,流量总体呈减少,低脉冲次数增加等,这些水文节律的变化对下游河道水生生物的栖息环境、洄游及产卵等产生影响,鱼类资源减少。

(2) 因本次研究仅有鱼类的前后对比资料,使得水文指标和生态系统其他指标如浮游动植物、底栖动物、水生植物等的响应关系定量实证分析不足,应进一步搜集水文情势变化前后的生态资料,更为深入地分析其间的响应机理。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王雨. 一国两制下的跨境水资源治理[J]. 热带地理, 2017, 37(2): 154-162.
- [2] Proff L R, Allan J D, Bain M B, et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J]. Bioscience, 1997, 47(11): 22-29.
- [3] 邓信翠, 陈洋波. 1990—2018 年东江流域土地利用变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 236-242, 258, 331.
- [4] 陈栋为, 陈晓宏, 李种, 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.
- [5] Richter B D. How much water does a river need [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(2): 231-249.
- [6] David L G, Robin L. Restoring ecological integrity of great rivers: Historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri River [J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423: 29-48.
- [7] 陈启慧, 郝振纯, 夏自强, 等. 葛洲坝对长江径流过程的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(4): 522-526.
- [8] Richter B D, Mathews R, Wigington H R. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity [J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 206-224.
- [9] Rwin E R, Freeman M C. Proposal for adaptive management to conserve biotic integrity in a regulated segment of the Tallapoosa River, Alabama, USA [J]. Conserva-

- tion Biology, 2010,16(5):1212-1222.
- [10] 李舒,齐青松.基于 IHA-RVA 法的人类活动对窟野河流域水文情势影响评估[J].水电能源科学,2021,39(4):24-26,63.
- [11] Mwedzi T, Katiyo L, Mugabe F T, et al. A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe [J]. Water SA, 2016, 42(2): 194-202.
- [12] 胡娜,林凯荣,何艳虎,等.东江上游龙川站水文情势变化分析[J].水电能源科学,2014,32(5):10-13.
- [13] 胡晓张,刘壮添,孙倩雯,等.东江中下游河道近期洪水水文情势变化分析[J].人民珠江,2016,37(11):1-7.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Richter B D, Braun D P, Mendelson M A, et al. Threats to imperiled freshwater Fauna [J]. Conservation Biology, 2010,11(5):1081-1093.
- [17] 李兴拼,黄国如,江涛.RVA 法评估枫树坝水库对径流的影响[J].水电能源科学,2009,27(3):18-21.
- [18] 罗志勇,杨炳良,管晓祥,等.不同水文模型在金溪流域的模拟与适应性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):6-12.
- [19] 李紫妍,刘登峰,黄强,等.基于多种水文学方法的汉江子午河生态流量研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(1):8-12.
- [20] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196.
- [21] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等.泼河水库对黄河径流过程及水文情势的影响[J].水资源保护,2021,37(3):61-65.
- [22] 王鸿翔,赵颖异,卓志宇,等.基于 IHA-RVA 法的资水流域水文情势评估[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(2):16-21,51.
- [23] 任影,周明迪,马朝霞.出山店水库建设后水文情势变化对鱼类资源的影响[J].河南水利与南水北调,2020,49(12):42-44.
- [24] 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.
- [25] 邹多录.江西省寻鄱水的鱼类资源[J].动物学杂志,1988,23(3):15-17.
- [26] 邓风云,张春光,赵亚辉,等.东江源头区鱼类物种多样性及群落组成的特征[J].动物学杂志,2013,48(2):161-173.

(上接第 156 页)

- [20] 赵宏波,马延吉.东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子:以吉林省为例[J].应用生态学报,2014,25(2):515-524.
- [21] 匡丽花,赵小敏,郭熙.基于乡镇尺度的耕地生态安全时空格局演变:以鹰潭市为例[J].江苏农业学报,2019,35(5):1144-1153.
- [22] 徐少葵,左逸帆,章牧.基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究[J].地理科学,2021,41(1):33-43.
- [23] Wang Yang, Feng Yining, Zuo Jian, et al. From “traditional” to “low carbon” urban land use: Evaluation and obstacle analysis [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51(11):1-9.
- [24] 吕添贵,孔安妮,汪立.基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断[J].水土保持研究,2021,28(2):343-350.
- [25] 郭利刚,冯珍珍,刘庚,等.基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价[J].生态学杂志,2020,39(6):2061-2069.
- [26] 陈伊多,杨庆媛,杨人豪,等.基于熵权物元模型的土地生态安全评价:重庆市江津区实证[J].干旱区地理,2018,41(1):185-194.
- [27] 陈文广,孔祥斌,温良友,等.基于需求—功能—维度的耕地健康评价指标体系构建与应用[J].中国农业大学学报,2021,26(5):106-117.
- [28] 宋聚,罗志军,赵越,等.基于耕地综合质量及聚类关系的耕地保护分区[J].西南农业学报,2019,32(10):2390-2397.