# 嘉陵江水文情势变化及其鱼类影响研究

郭文献 焦旭洋 周昊彤 金耀广 王鸿翔[1]

(华北水利水电大学 水利学院，河南 郑州 450045)

**【摘 要】**：河流水文情势是河流生态系统的主要驱动力。针对水利工程建设造成嘉陵江流域水文情势变化等问题，选取嘉陵江代表性水文站-北碚站(1956～2017)的逐日径流资料，采用Mann-Kendall法、累积距平法和滑动T检验法进行流量特征分析，并考虑到水利工程建设对突变前后水文指标进行割裂，选择应用生态水文指标变化范围法(IHA-RVA)和水文改变度法综合评价嘉陵江水文情势变化及对长江上游特有鱼类影响定性分析，结果如下：嘉陵江流域北碚水文站的年均流量呈轻微的下降趋势，突变年份发生在1993年；通过对水文情势突变前后生态水文指标分析得出：嘉陵江流域整体水文改变程度为50%,处于中度改变，其中逆转次数这一水文指标改变度达到100%;对比鱼类组成变化可知，一些漂流性、适应急流生境鱼类和大型经济鱼类数量明显减少，分析得出嘉陵江梯形水库运行以后对鱼类多样性产生较大影响。研究可为嘉陵江流域生态修复和可持续发展提供相应的参考。

**【关键词】**：嘉陵江流域 水文情势 IHA-RVA法 水文改变度 生态修复

**【中图分类号】**:TV213**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2022)04-0805-09

河流水文情势是其生态系统的动力学特征，决定着河流物质和能量的交换过程，而河流的水文情势的改变将对于流域内的生态系统的稳定和区域水资源利用和开发产生直接影响[1]。随着全世界都在通过河流来开发利用清洁、可持续的水能，河流的水文情势避免不了受到其影响发生变化[2]。在我国由于干流修建水利工程难度较大，对生态环境影响较为明显，破坏后难以修复，所以更偏向于支流修建。嘉陵江作为长江上游主要支流之一，其径流量和降水量较大，成为长江上水资源开发利用潜力较大的一条支流。过去70年来，嘉陵江流域各种水利工程的建设引起了流域内巨大的扰动和严重的整体压力，势必会对流域内生态系统造成干扰，特别是一些河流内生物的生存环境和产卵繁殖[3]。因此，开展嘉陵江流域河流的水文情势变化的研究，将对于其生态修复及可持续发展具有重要意义。

目前对于人类活动而产生水文情势变化的研究，RICHTER等提出的变动范围法(Range of Variability Approach,RVA)能够更好地反映其改变程度。Wei等[4]应用RVA方法研究了鄱阳湖和长江中下游的水文变化和江湖关系。郭文献等[5]通过RVA法，对三峡下游水文情势变化程度分析及水文情势变化对重要鱼类的产卵场生境条件的影响进行了评估。Zuo等[6]以沙颍河为例，通过RVA法量化大坝和水闸对其河势的影响。陈立华等[7]对于水库及支流汇入对黔江水文情势影响进行分析。蒋楠等[8]基于IHA的小型水电工程对黄尾河的水沙的影响进行分析，其结果可为黄尾河流域水文变化提供依据。同时，对于嘉陵江水文情势的变化，一些学者从不同角度展开了相关研究。刘扬扬等[9]基于嘉陵江主要梯级水库纵剖面图，采用GIS方法和数字高程模型数据对大坝蓄水后水域面积、径流、泥沙的改变定量分析，得出梯形水库建成后对河流水文情势影响较大，几乎决定了干流河段水文情势的变化趋势。李怡颖等[10]通过对嘉陵江径流、泥沙以及降雨等资料展开长时间序列的变化趋势研究，揭示了径流受气候影响在1999年逐渐弱化，最终主要受人类活动影响。夏菁等[11]采用Budyko假设的弹性系数法对嘉陵江流域径流变化进行归因分析，结果显示人类活动对径流变化影响较大，渠江流域的改变度高达91.51%。由此可见，人类活动是嘉陵江水文情势变化的主要影响因素。

[1]**作者简介**：郭文献(1979～),男，教授，主要研究方向为水文水资源及生态水利等研究.E-mail:guowenxian163@163.com
**基金项目**：国家自然科学基金项目(51679090,51609085,51779094);华北水利水电大学硕士创新提升能力工程(YK-2021-27);2016年河南省科技攻关项目(162102110015);贵州省水利厅2020年度水利科技项目(KT202008)

由于嘉陵江流域内水生生物资料较少，缺乏水文情势变化对流域内生物的影响定性分析，因此对于此类问题还需进一步研究。

本研究以嘉陵江的代表性水文站-北碚水文站的 1956～2017 年的逐日流量数据(数据来源长江流域水文年鉴)为基础，采用 Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法和滑动 T 检验法对嘉陵江流域水文情势变化特征进行分析，对径流时间序列进行划分。通过水文指标变化范围法(IHA-RVA)进行综合评价嘉陵江水文突变前后北碚水文站整体水文情势变化情况，并根据分析结果对流域内水生生物的影响进行评价，以此对长江上游流域水环境及水生态的修复及水资源开发与利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

嘉陵江位于 29° N～35° N 和 102° E～110° E 之间，属于长江上游主要支流之一，是连通长江和西北地区的重要通道。干流全长 1120km,途径陕、甘、川，最终在重庆市汇入长江，流域面积约 $16\times10^4km^2$,占长江流域面积的 15.9%,是长江北岸重要的一级支流，同时也是距离三峡库区最近的长江上游一级支流。北碚水文站位于重庆市北碚区，属于国家基本水文站，是嘉陵江流域出口控制性水文站，控制了嘉陵江 98%的流域[12]。嘉陵江流域水库建设是长江上游较为密集的地区之一，其大型水库库容占比高达 80%,包括 1996 年建成的、位于嘉陵江支流-白龙江的宝珠寺水库和 2013 年建成的、位于嘉陵江干流的亭子口水库，其库容分别为 25.5、41.2 亿 $m^3$[13]。频繁的修建水利设施，尤其是大型水库建设必然将引起河流的水文情势发生改变。

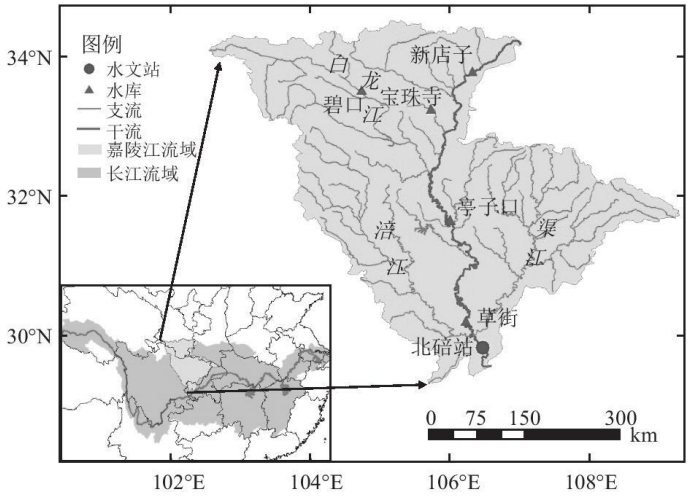


图 1 嘉陵江流域平面图

## 2 研究方法

本文主要采用 Mann-Kendall 非参数检验法[14]、滑动 T 检验法[15]、累积距平法[16]对北碚站观测的逐日流量数据进行趋势和突变分析。其中，Mann-Kendall 非参数检验法是一种应用较为广泛径流的突变性检验方法，但其检测结果具有较大的人为干扰因素，还需与其它几个突变检测方法以及实际情况相结合以保证其准确性。具体计算过程见相应的参考文献[14,15,16]。

为了研究河流复杂的水文变化过程，本文采用 RichterB.D 提出的水文改变指标法(Indicators of hydrologic alteration, IHA)及建立在 IHA 基础上的变化范围法(RVA)来分析其变化过程。以北碚水文站的逐日水位数据为基础，计算 32 个 IHA 水文指标(由于在研究期间内北碚水文站未出现过日流量为零的情况，因此本研究不在考虑零流量这一项水文指标),根据不同生态系统影响将 32 个指标划分成 5 组(表 1),综合流量、时间、频率、持续时间和改变率等水文指标来评价河流水文状态改变。为了定量分析其不同水文指标受干扰的程度，采用以下量化指标公式：

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

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

式中：$D_i$为第 i 个 IHA 指标的水文变化度；$N_{oi}$和$N_e$分别为水文指标改变后落在 RVA 目标阈值内的实际年数和期望年数；r 为受干扰前 IHA 落入 RVA 目标阈值内的比例；$N_T$为水文指标改变后总年数。

为了对其改变程度设定一个客观的判断标准，规定$D_i$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。整体水文变化程度$D_o$可以用以下方法计算：

表 1 IHA 参数表

| IHA 参数组 | 参数指标 |
|---|---|
| 月中值 | 每月流量的中值 |
| 年极值大小 | 年均 1、3、7、30、90d 最小及最大流量(含沙量)、基流指数① |
| 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 |
| 高、低流量频率及历时 | 每年高、低脉冲数③以及脉冲持续时间的平均值 |
| 流量变化改变率及频率 | 涨幅(上升率)、降幅(下降率)的年中值以及逆转次数④ |

注：①基流指数：年最小连续 7d 流量与年中值的比值；②罗马日：公历一年中第多少天；③低脉冲定义为低于干扰前 25%频率的日中值，高脉冲定义为高于干扰前 75%频率的日中值；④逆转次数：日流量由增加转为减少或减少转为增加的次数.

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

其中 n 为指标个数，同时也规定$D_o$处于 0～33%、33%～67%之、67%～100%之间分别属于低、中、高度改变[17]。

## 3 结果与讨论

3.1 年均流量趋势性及突变性检验

图 2 为嘉陵江水文站 1956～2017 年的年均流量结果，根据图可知嘉陵江年均流量交替频繁且明显，特别在 20 世纪 80 年起伏明显，具有较强的波动性。Mann-Kendall 趋势检验分析结果表明，嘉陵江水文站 1956～2017 年多年平均流量的统计量结果显示为负数，表示具有下降趋势；其检验值为 1.864,小于 1.96,没有通过 95%的显著水平检验，表明嘉陵江径流具有下降趋势，在 95%的置信水平下下降趋势不够显著。

采用 Mann-Kendall 突变检验原理进行计算并绘制其突变检验计量曲线图(图 3),同时参考累积距平法和滑动 T 法计算结果，

将 1993 年作为理论突变年份，这与嘉陵江自 90 年代开始以大、中型水库建设并运行为主相呼应。其计算结果如表 2 所示。

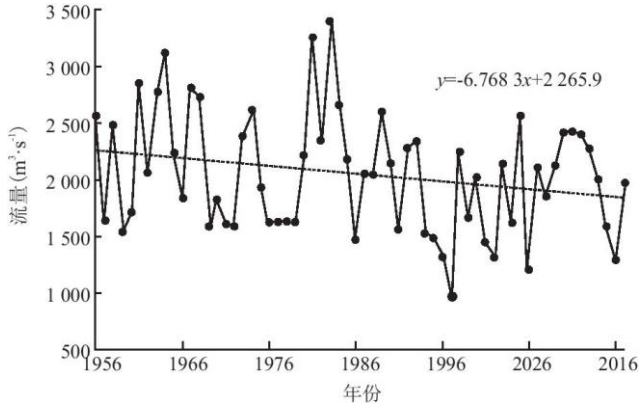


图 2 年均流量及趋势线

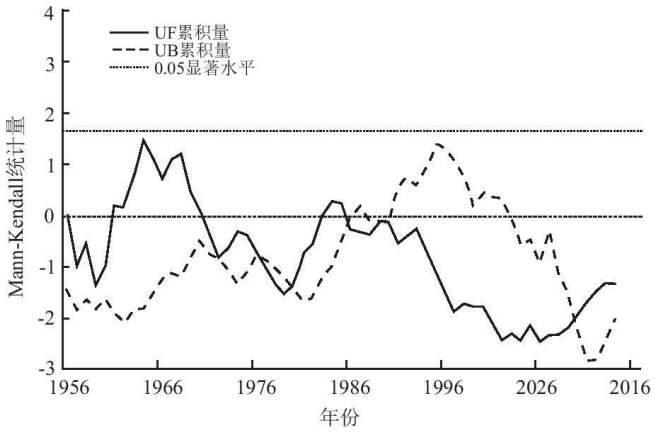


图 3 年均流量 M-K 突变检验

表 2 年均流量突变统计结果

| 水文站 | 突变年份 | | | 突变点 |
|---|---|---|---|---|
| | M-K 检验法 | 滑动 T 检验法 | 累积距平法 | |
| 北碚 | 1986、1990、2013 | 1993、1996 | 1989、1993、2012 | 1993 |

3.2 流域突变前后水文情势变化分析

综合 3.1 部分的突变性检验结果分析结果，分别将 1993 年以前(1956～1993)日流量时段作为基准流量序列，1993 年以后(1993～2017)作为流量改变序列，在此基础上运用 IHA 和 RVA 法计算突变前后北碚水文站的水文改变程度。

3.2.1 月中值流量大小

图 4 和图 5 分别为嘉陵江水文情势改变前后月中值比较图。根据比较图可以得出改变后的北碚站在每年的 11 月至来年的 3 月份及 5 月份，流量均有不同程度的增加，其中 1 月、3 月份增加较为明显，改变度达到高度改变；而 6～10 月及 4 月的月中值流量有不同程度的减少，其减少程度比增加程度明显，6、7、9 月均达到了高度改变。造成这一现象的原因可能与嘉陵江流域在 20 世纪 90 年代以大中型水库建设为主，其流域总库容急剧增加，嘉陵江水利设施蓄水后在枯水期增加下泄流量、丰水期减少下泄流量有直接关系。通过“蓄洪补枯”方式调节嘉陵江流量，对长江中下游流量及三峡水库调度具有一定调节作用。

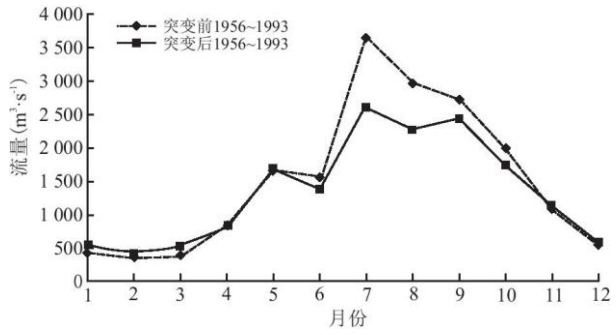


图 4 突变前后月中值流量比较

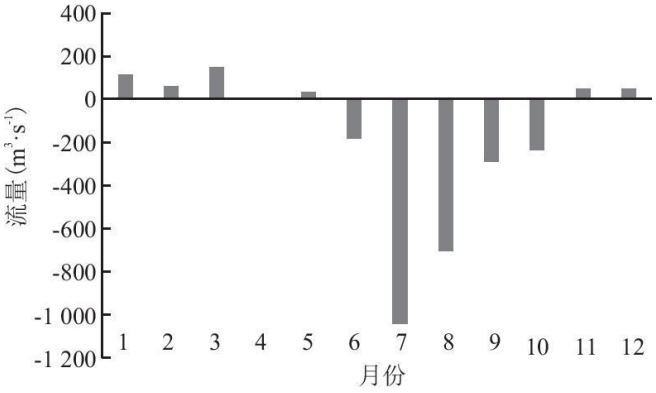


图 5 突变前后月均值流量差

3.2.2 年极值流量大小

图 6 和图 7 为改变最为显著的年极值流量变化图。由图可知，年均最小流量和最大流量均有不同程度的减少，年极值绝大部分流量值低于突变前 RVA 阈值的下限，其中年均最小 1d 流量下降趋势明显，改变度达到 66%,接近高度改变。改变后的极致流量大多数落在 RVA 阈值上下线之外，并均低于改变前。这与 M-K 趋势检验嘉陵江流量成下降趋势结果相一致。

3.2.3 年极端流量发生时间

北碚水文站年最小和年最大流量出现时间改变度均低于 33%,属于轻度改变。由于最大流量出现时间在突变前大部分落在 RVA 阈值上下线之外，而突变后最值绝大部分落在 RVA 阈值上下限之内，且出现的时间延迟了 11d,这表明嘉陵江水利设施的建设使得高流量时间处在一个稳定的范围内。

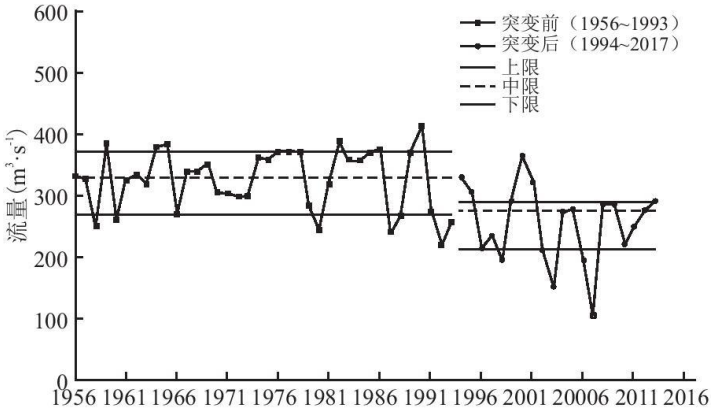


图 6 最小 1d 流量变化

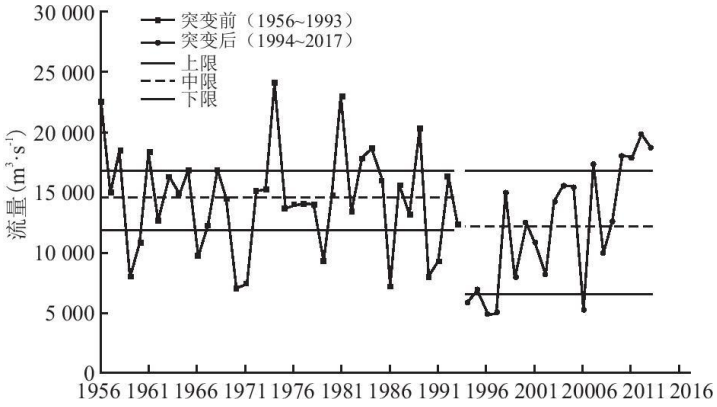


图 7 最大 7d 流量变化

3.2.4 高低流量的频率及历时

北碚站高脉冲次数和历时均有不同程度的下降，其中高脉冲次数从 9 次下降至 8 次，改变度为 24%、高脉冲历时从 6d 减少至 5d,改变度为 16%,二者均低于 33%,属于轻度改变；而低脉冲次数增加，从 2 次增加至 13 次，改变度为 82%,属于高度改变，低脉冲历时减少，从 37d 减少至 2d,改变度为 63%,接近高度改变。突变后低脉冲 RVA 阈值的上下线均较大幅度高于突变前，并且大多数点落在阈值范围之外。这表示通过修建水利工程设施使得嘉陵江在一定程度上减少了高脉冲次数和历时，有利于嘉陵江汛期的过渡；同时低脉冲次数增加和低脉冲历时的减少使得嘉陵江枯水期水量减少。

3.2.5 流量变化改变率及频率

北碚水文站流量上升率水文改变度和下降率水文改变度分别为 32%和 36%,均接近中度改变。逆转次数相较于突变前有明显的增加，改变度达到了 100%,这表明自 20 世纪年代以来大规模修建水利设施使得嘉陵江流量变化的改变率及频率大幅度增加，这对北碚水文站下泄流量产生较大的影响。由于生态系统受外界影响自我恢复能力有限，因此嘉陵江流量的改变将对其流域内的生态系统带来较大的影响。

3.2.6 整体水文改变度分析

基于 IHA-RVA 法对于嘉陵江水文情势突变前后结果分析，将北碚水文站突变前后的 32 个水文指标计算结果绝对值化，并将其由高到低进行排序，结果见图 9。根据图中可得出：北碚水文站绝大多数水文指标落在低度改变区域内；属于高度改变的水文指标达到 6 个，占总水文指标的 18%,其中逆转次数改变最为明显，水文改变度达到 100%;属于中度改变的水文指标达到 10 个，占总水文指标的 32%,其中 3 月中值流量和年均最小 1d 流量水文改变度达到 66%,接近高度改变；属于低度改变的水文指标达到 16 个，占总水文指标的 50%。

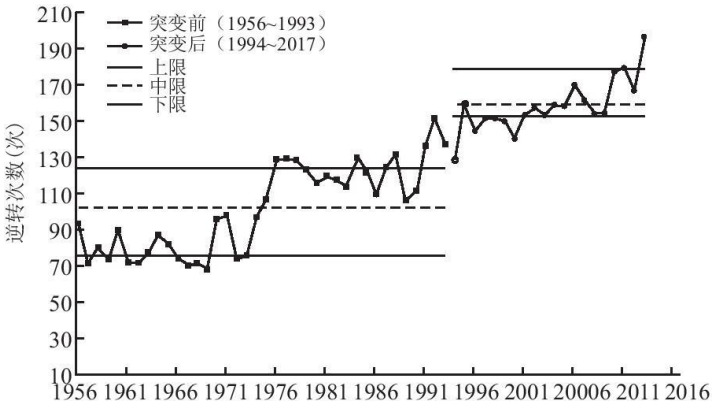


图 8 突变前后逆转次数变化

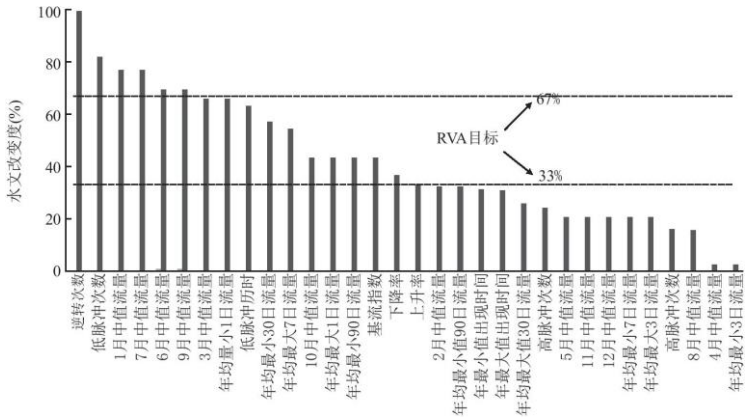


图 9 水文指标改变度排序

通过公式计算出整体的水文指标改变度和各个分组的水文指标改变度，具体结果见表 3。根据表中结果可以得出：北碚水文站除了第三组指标为低等改变度，其余的都属于中等改变度；第五组改变度为 64%,接近高度改变；整体水文指标改变度为 50%,属于中度改变，说明嘉陵江流域水库建设对于河流水文情势影响较大。同样位于长江上游的岷江及金沙江的 IHA-RVA 整体水文指标改变度分别为 74%、72%,均达到高度改变[18,19]。说明长江上游水利工程建设对河流流量影响显著，而嘉陵江水文情势变化较长江上游其它河流变化程度较小。

表 3 流量序列整体水文改变度(%)

| 水文站 | 各组水文改变度 | | | | | 整体水文改变度 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 第一组 | 第二组 | 第三组 | 第四组 | 第五组 | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 北碚 | 51(M) | 43(M) | 31(L) | 54(M) | 64(M) | 50(M) |

3.3 水文情势变化对鱼类影响分析

鱼类资源是水生生物资源的重要组成部分，其种群的稳定性受水利工程建设影响。自 20 世纪 80 年代开始，嘉陵江流域开始修建各种大型水利工程建筑物，尤其在 1990 年之后(表 5)。在 1990 年以前嘉陵江流域大型水库库容占比达 36%,而自 1991 年以来大型水库库容占比高达 80%以上[13]。梯级水电站虽然为该地区经济发展提供了极大地帮助，但相应的对于流域内生态系统稳定性特别是鱼类种群的稳定性产生较大的影响[20]。

目前嘉陵江流域鱼类多样性丰富，其中流域特有鱼类物种众多，位居长江流域各水系第 4 位，占整个长江流域的 1/3[21]。根据 2010 年对嘉陵江中下游渔业资源状况及变迁调查结果可知，相较于 1980 年的调查，嘉陵江流域减少的主要鱼类有 3 种：其一是产漂流性鱼卵的鱼类，这些鱼类产卵需要一定的涨水刺激，而嘉陵江流域水文情势改变后，河流高流量减小，上升率降低，使得这些鱼类繁殖受到抑制，此外由于大坝阻隔，使得其生存空间受到阻碍，如草鱼、中华沙鮈、宽体沙鮈和长薄鮈等；其二是一些适应急流生境的鱼类，由于河流的高脉冲历时缩短和最大流量出现时间推迟，径流变的缓慢并趋向库区化，使其无法满足特定的生境，例如四川白甲鱼、圆口铜鱼等；其三是嘉陵江渔业主要经济来源-鲤科鱼类，在种类和数量上都有了明显下降，其中种类由 58 种下降至 46 种，数量占比由 84.64%下降至 66.03%,造成原因是由于河流水库化，使得一些捕鱼作业容易开展，致使其被捕率大大增加[21]。

河流是一个水文连通的生态系统。随着长江上游各种类型的水利工程建设完成，长江上游干流和主要支流的联通被阻断，河流中的鱼类迁移的通道受到阻碍[22]。因此，对于与梯形水库建成下的鱼类保护应该重视其水电的开发程度，对于一些影响范围较大、效率较低的小型水利工程拆除，使其江河联系进行修复，恢复自然流态和水文节律，为一些洄游性和喜流水性等长江上游特有濒危鱼类提供合理的栖息环境[23]。

表 5 嘉陵江流域主要水库建设概况

| 水库 | 所在河流 | 控制流域($km^2$) | 建成年份 | 库容(亿 $m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 升钟 | 西河 | 1756 | 1984 | 13.4 |
| 宝珠寺 | 白龙江 | 28428 | 1996 | 25.5 |
| 草街 | 干流 | 156100 | 2011 | 22.2 |
| 亭子口 | 干流 | 62550 | 2013 | 41.2 |

## 4 结论

本研究主要基于生态水文指标变化范围法(IHA-RVA)及水文改变度法对嘉陵江流域水文情势变化进行分析评价，结果如下：

(1)根据 M-K 非参数检验法、滑动 T 检验法、累积距平法对北碚水文站的逐日流量数据分析得出：嘉陵江年均流量呈下降趋势，下降趋势不够显著；综合分析得出北碚水文站突变年份在 1993 年，这表明嘉陵江流域自 20 世纪 90 年代以来以大、中型水库修建对其径流产生影响显著。

(2)根据 IHA-RVA 法对其 32 个水文指标分析得出：相较于突变前，突变后的月中值流量在 6～11 月有所下降，在 12 月至来年 5 月有所增加；年最大流量在突变后均呈现下降趋势，而年最小 30、90d 流量呈上升趋势，年最小 1、3、7d 流量呈下降趋势；高、低脉冲历时均呈现下降趋势，高脉冲次数减少而低脉冲次数增加，最大流量出现时间延迟而最小流量出现时间提前，变动范围在 10d 左右；上升率、下降率及逆转次数均有所增加，其中逆转次数最为明显；总体来看嘉陵江流域北碚水文站的改变度为 50%,属于中度改变。

(3)自 20 世纪嘉陵江流域频繁修建大型水利设施，使得流域内水文情势明显的改变，从而造成河流生态功能受损、水生生物栖息地遭到影响。而嘉陵江一些漂流性、适应急流生境鱼类和大型经济鱼类数量明显减少，分析得出河流水文情势改变与之有着直接的影响。

随着中国经济的发展和现代化进程的推进，长江流域的人为活动引起了巨大的扰动和严重的整体压力。为保护和修复长江流域的生态系统，应针对水文情势变化做出相应的保护措施，而嘉陵江水文情势变化分析及其评估可为长江上游生态屏障区水资源修复提供科学依据，对流域生态建设亦具有重要的应用价值。

**参考文献：**

[1]GE J J,PENG W Q,WEI H,et al.Quantitative assessment of flow regime alteration using a revised range of Variability Methods[J].Water,2018,10(5):597.

[2]李旦，徐文，叶长青，等.气候变化和人类活动干扰下万泉河流域水文情势变化特征分析[J].水电能源科学，2019,37(12):14-17.

[3]ZHANG H,KANG M H,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]GUO W,XU H G,SHAO J,et al.Research on the middle and lower reaches of the Yangtze River and lake's hydrological alterations based on RVA[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2018,153(6),062047.

[5]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.

[6]ZUO Q,LIANG S.Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA[J].Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences,2015,368(368).

[7]陈立华，佘贞燕.基于 RVA 法分析水库及支流入汇对黔江中游水文情势影响[J].水电能源科学，2020,38(5):42-45,5.

[8]蒋楠，高成.基于 IHA 分析的小水电工程对黄尾河水沙的影响[J].水电能源科学，2020,38(4):14-17,59.

[9]刘扬扬，李斐，许秀贞.嘉陵江中下游干流水电开发对水文情势的影响[J].人民长江，2014,45(5):10-15.

[10]李怡颖，范继辉，廖莹.近 60 年来嘉陵江流域水沙变化特征[J].山地学报，2020,38(3):339-348.

[11]夏菁，刘国东.基于 Budyko 假设的嘉陵江流域径流变化归因分析[C].面向全球变化的水系统创新研究——第十五届中

国水论坛论文集，2017:235-239.

[12]王莺，王劲松，武明，等.土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J].水土保持研究，2019,26(1):135-142.

[13]袁晶，许全喜，熊明，等.嘉陵江流域水库拦沙及其减沙贡献权重研究[J].人民长江，2019,50(11):24-29,43.

[14]卓志宇，钱湛，姜恒，等.基于 IHA-RVA 法的湘江流域水文情势评价[J].中国农村水利水电，2020(8):188-192.

[15]王鸿翔,查胡飞,卓志宇,等.基于 IHA-RVA 法四水流域水文情势变化评估[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(3):169-177.

[16]CHEN L H,WANG Y,BILLEL T,et al.Temporal characteristics detection and attribution analysis of hydrological time-series variation in the seagoing river of southern China under environmental change[J].Acta Geophysica,2018,66(5).

[17]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.

[18]郭卫，徐高洪，沈杰，等.岷江流域径流变化趋势及水文情势变异研究[J].人民长江，2018,49(22):64-68.

[19]郭卫，徐长江，邵骏，等.基于 RVA 法的金沙江下游水文情势研究[J].人民长江，2018,49(18):58-63.

[20]周湖海，李翀，邓华堂，等.长江上游珍稀、特有鱼类种群动态现状及变化趋势分析[J].淡水渔业，2020,50(6):3-14.

[21]青弘.嘉陵江流域鱼类多样性格局及中下游渔业资源变迁分析[D].西南大学，2010.

[22]徐薇，乔晔，龚昱田.长江上游鱼类资源变迁及其保护评析[J].人民长江，2012,43(1):67-71.

[23]孙志禹，张敏，陈永柏.水电开发背景下长江上游保护区珍稀特有鱼类保护实践[J].淡水渔业，2014,44(6):3-8.