

1956 – 2019 年乌江水文情势变化及其对鱼类的影响研究

谷红梅, 朱志鹏, 王鸿翔, 郭文献
(华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

摘要: 水量变化导致河流生态水文情势发生改变,进而影响河流生态系统健康。为深入明晰乌江干流水文变异前后水文情势变化对鱼类生境的影响,选取武隆水文站 1956 – 2019 年逐日流量数据及 2009 – 2015 年 12 种漂流性鱼类产卵量资料,采用曼 – 肯德尔 (M – K) 检验法、累积距平法研究乌江干流变异节点,分析突变前、后逐日流量的变化趋势,通过生态水文指标变化范围法 (IHA – RVA) 综合评价乌江 32 组水文指标特征及改变度,基于水文情势变化下研究鱼类数量变化过程。结果表明:乌江流量突变年份为 2009 年,与彭水电站的运行时间相同,变异后,多年平均日流量峰值波动于 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$,而变异前流量峰值接近 $18\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。乌江 32 组水文指标整体改变度为 38.7%,处于中度变化范围;属于高度改变的低流量历时和次数改变度分别为 74.64%、75.29%,发生时间推迟 4 d;高流量历时和次数改变度分别为 29.79%、37.83%,发生时间提前 21 d。降雨与流量呈极强正相关,降雨量的逐年减少对流量有重要影响。此外,水文情势的变化易受彭水电站的影响。流量减少和变化下的水文情势对鱼类的影响是一个累积的过程,2009 年后 12 种漂流性卵鱼类的产卵总量大幅减少,尤以 2011 年最为突出,仅为 $1\,541.69 \times 10^4$ 粒。本研究可为研判乌江水文情势变化过程及制定水生态修复措施提供参考。

关键词: 水文改变度; 水文情势; IHA – RVA 法; 鱼类变化; 乌江

中图分类号: TV12; P339

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0024-08

Hydrological regime change and its influence on fish in Wujiang River from 1956 to 2019

GU Hongmei, ZHU Zhipeng, WANG Hongxiang, GUO Wenxian

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Water flow changes lead to changes in river eco-hydrological regime, and then affect the health of river ecosystems. In order to clarify the effects of hydrologic alterations on fish habitat in the Wujiang River mainstream, daily flow data from 1956 to 2019 and spawning data of 12 drifting fish species from 2009 to 2015 were selected from the record in the Wulong Hydrological Station. The Mann – Kendall (M – K) test and the cumulative anomaly method were used to study the abrupt changes in the Wujiang River mainstream, in order to analyze the change trend of daily flow before and after the abrupt changes. Then the characteristics and change degree of 32 sets of hydrological indexes were evaluated using indicators of hydrologic alteration – range of variability approach (IHA – RVA) method, so as to study the fish population change process under the change of hydrological regimes. The results show that the abrupt change in the Wujiang River flow occurred in 2009, which is the same as the operation time of Pengshui Hydropower Station. After the abrupt change, the average daily peak flow fluctuated around $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$, which was close to $18\,000\text{ m}^3/\text{s}$, the daily peak flow before the abrupt change. Furthermore, the overall change degree of 32 sets of hydrological indexes was 38.7%, which fell into the moderate range. The duration and frequency of low flow with high change range were 74.64% and 75.29% respectively, and the occurrence time was delayed by 4 days; whereas those of the high flow was 29.79% and

收稿日期:2021-11-01; 修回日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51679090、51609085、51779094); 2016 年度河南省高校科技创新人才支持计划(16HASTIT024); 贵州省水利厅 2020 年度水利科技项目(KT202008)

作者简介:谷红梅(1974 –),女,河南郑州人,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向为节水灌溉与农业水资源高效利用。

通讯作者:郭文献(1979 –),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文水资源及生态水利等研究。

37.83% respectively, and the occurrence time was 21 days ahead. It is found that rainfall was positively correlated with discharge with great significance, so the annual decrease of rainfall had seriously affected the discharge. In addition, the variation of hydrological regimes is easily affected by Pengshui Hydropower Station. However, the impact of the hydrological regime change and reduced flow on fish is a cumulative process, the spawning scale of the 12 drifting fish species started to decrease from 2009, then dropped dramatically in 2011, which was only accounted for 15, 416, 900 eggs. These findings can provide a reference for the study of hydrological regime change process of the Wujiang River and the formulation of water ecological restoration measures.

Key words: hydrologic change degree; hydrological regime; IHA – RVA method; fish change; the Wujiang River

1 研究背景

河流生态水文情势决定着流域内的物质循环以及生境和生物之间的相互作用,并对生态系统健康产生影响^[1–2]。随着经济社会的发展和技术的日益成熟,人类活动对流域水文循环过程的干扰程度不断加深,在不同程度上改变了河流的生态水文情势^[3–4]。以乌江为例,流域内孕育着多种长江上游特有鱼类,是长江鱼类资源的重要补充^[5]。然而,1982–2013年乌江干流上先后修建了11座大型水库,这些大型水利工程的修建在一定程度上引起乌江水文特征发生了改变^[6–7],从而改变了物种的分布和丰富度,对生物群落的组成和多样性造成了严重影响。

近年来,大量学者关注到水文情势改变量及其生态效应的问题,变动范围法(range of variability approach, RVA)能够更好地反映其改变程度,目前该方法在国内外已有较广泛的应用。Guo等^[8]、王鸿翔等^[9]、郭文献等^[10]、段唯鑫等^[11]采用RVA/IHA方法,分别评估了水利水电工程对三峡水库中、下游水文情势的影响,均指出三峡工程蓄水期间下游河道流入量减少,水文情势为中等改变,表明人为活动对长江中下游河流水文情势影响显著。随着对RVA法的深入研究,该方法也被应用于湖泊体系中。郭强等^[12]基于RVA法分析出鄱阳湖水位近年来下降明显,发生了中度改变;谷桂华等^[13]和王鸿翔等^[14]通过研究湖泊生态水位指出,RVA法计算的生态水位更接近于天然水位变化规律;Ashraf等^[15]运用IHA法评估了寒冷气候下气候变化和河流管制对径流的影响;张康等^[16]基于北碚、高场、宜昌水文站1950–2014年的逐日径流数据,采用CRITIC法改进RVA的方法对长江支流的整体水文变异度进行了综合的分析。

乌江流域属于喀斯特地区特殊的水文系统,以

地下排水网路为特征,土壤易吸收水量,其水文情势也极易受自然因素的影响,径流对降水减少较为敏感^[17],并呈现显著下降趋势^[18]。径流量的降低势必影响流域内水生物的栖息,此外,乌江干流梯级水库建设也阻隔了河流的连通性,隔断了水生物生境,彭水水电站蓄水前后,底栖动物群落结构发生了显著变化,蜉蝣目稚虫对生境的剧烈变动不适应^[19],对白甲鱼的遗传多样性也造成了一定程度的负面影响^[20]。综合来看,人类活动及流量减少对乌江的水文情势和生态环境造成了一定的改变。鉴于目前通过RVA法定量评价乌江水文情势及其水量变化下对鱼类响应的相关研究文献较少,因此本研究工作具有一定意义。

本研究基于乌江武隆水文站1956–2019年的逐日流量数据,采用Mann–Kendall趋势检验法、累积距平法对乌江水文情势变化特征进行定量分析,确定突变序列数据。通过生态水文指标变化范围法(IHA–RVA)对乌江水文突变前后水文情势的变化情况进行综合评价,并根据分析结果对所收集到的鱼类进行评价,以期对乌江干流水生态的修复提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

乌江又名黔江,水系呈羽状分布,流域地势西南高,东北低,地形以高原、丘陵为主,是长江上游南岸最大的支流,发源地至河口105 km,流经黔、渝、鄂、滇四省(市),于重庆市涪陵区汇入长江,总流域面积为87 920 km²,贵州省境内流域面积为66 849 km²,多年平均径流量为 5.32×10^{11} m³/s,主要用于发电,同时兼有防洪、航运等效益^[21]。干流全长1 037 km²,以临近毕节市为河流上游,彭水水电站以下为下游^[22]。乌江水系及梯级水电站分布如图1所示,武隆水文站位于乌江下游且为流域内最后一个站点。

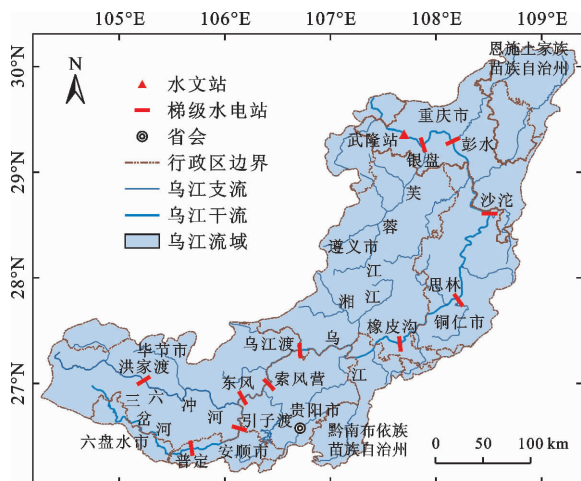


图1 乌江水系及梯级水电站分布

乌江梯级水电开发在大幅提高贵州省清洁能源比重、推动贵州省经济社会发展的同时,创造了诸多水电开发建设管理经典案例,为我国流域梯级水电开发提供了先进的经验。梯级水电工程的修建,为开发利用水资源提供了重要的基础设施,在抗御旱、涝、洪等自然灾害,工农业及城乡生活供水、发电和改善生态环境等方面发挥了重要作用,产生了巨大的社会和经济效益。然而,梯级水电工程建设通常会产生诸多的生态环境问题,大坝的修建往往会造成上下游河流水文过程发生剧烈变化,改变水流的自然循环,破坏河流以及地下水的连续性,从而干扰和改变河流生态系统的物种构成、栖息地分布以及相应的生态功能。当生境条件的改变超过生物自我调节恢复能力时,物种将面临衰退、濒危和绝迹的威胁,影响生态系统健康。

近年来,水电工程建设引起的河流生态环境问题已经逐渐引起了人们的重视。人们意识到要实现河流生态系统健康可持续发展,必须在开发利用的同时开展河流保护与修复工作。随着“河流健康”、“生态保护”等一些重要理念的提出,维护河流系统健康,实现生态和谐,已经成为今后河流治理的新思路。

2.2 数据来源

武隆站位于乌江下游,该站点记录的数据具有一定的代表性。1956–2019 年流量、降雨、泥沙数据来源主要为长江水文统计年鉴及中国气象网(<http://data.cma.cn/>),鱼类产卵数据来自长江中游水文水资源勘察局,包括蒙古鲃(*Culter mongolicus*)、圆筒吻鮰(*Rhinogobio cylindricus*)、蛇鮰(*Saurogobio dabryi*)、长鳍吻鮰(*Rhinogobio ventralis*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)、犁头

鲃(*Lepturichthys fimbriata*)、中华金沙鲃(*Jinshaia sinensis*)、中华沙鲃(*Botia superciliaris*)、翘嘴鲃(*Culter alburnus*)、吻鮰(*Rhinogobio typus*)、铜鱼(*Coreius heterodon*) 和花斑副沙鲃(*Parabotia fasciata*) 等。乌江水系图中河流、站点等 shp 文件来自中国科学院资源与环境科学数据中心平台。

2.3 研究方法

Mann–Kendall 非参数检验法^[23]是一种应用较为广泛的径流突变性检验方法,在置信水平 $\alpha = 0.05$ 上进行检验, $Z_c > 0$ 时,表示数据呈增加趋势; $Z_c < 0$ 时,表示数据为减小趋势。此外,基于原时间序列的逆序列计算相同的统计量,使 $UB = -UF$ 统计数据不应超出置信度 95% 的水平区间且两条曲线出现交点,表明在此时间点内发生变异^[23–24]。但其检测结果具有较大的人为干扰因素,还需与累积距平法以及实际情况相结合以保证其准确性。具体公式见参考文献[24]~[26]。

为明晰河川复杂的水文情势变化,引用 Richter 提出的水文变化指标法(indicators of hydrologic alteration, IHA)^[27–28],IHA 法是建立在变化范围法(RVA)基础上来分析水文指标变化过程的一种方法。以武隆水文站的逐日流量数据为基础,计算分为 5 组的 32 个 IHA 水文指标,以流量、时间、速率、持续时间和改变率等水文指标来综合评价水文情势的变化。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:

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

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

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 为水文指标改变后的总年数。

为了对其改变程度设定一个客观的判断标准,可采用以下公式计算:

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

式中: n 为水文指标个数,设定 D_o 处于 0~33%、33%~67%、67%~100% 之间时分别属于低、中、高度改变^[29]。

3 结果与分析

3.1 流量变化趋势及突变检验分析

1956–2019 年乌江武隆水文站年平均流量变

化及突变检验见图 2。由图 2 可见,除了特枯年(1966、1981、2006 年等)和特大洪水年(1964、1977、1996 年等)波动范围较大外,武隆水文站年均流量整体呈减小趋势,且通过了 95% 置信度区间检验。结合累积距平法和 M - K 突变分析检验出的突变年份为 2000、2005、2009 年,参考乌江梯级水电站构皮滩(2009 年投产)、思林(2009 年发电)、沙陀(2013 年首台机组发电)、彭水(2009 年投产使用)、银盘(2011 年竣工)的竣工投产时间,选取突变年份为 2009 年。

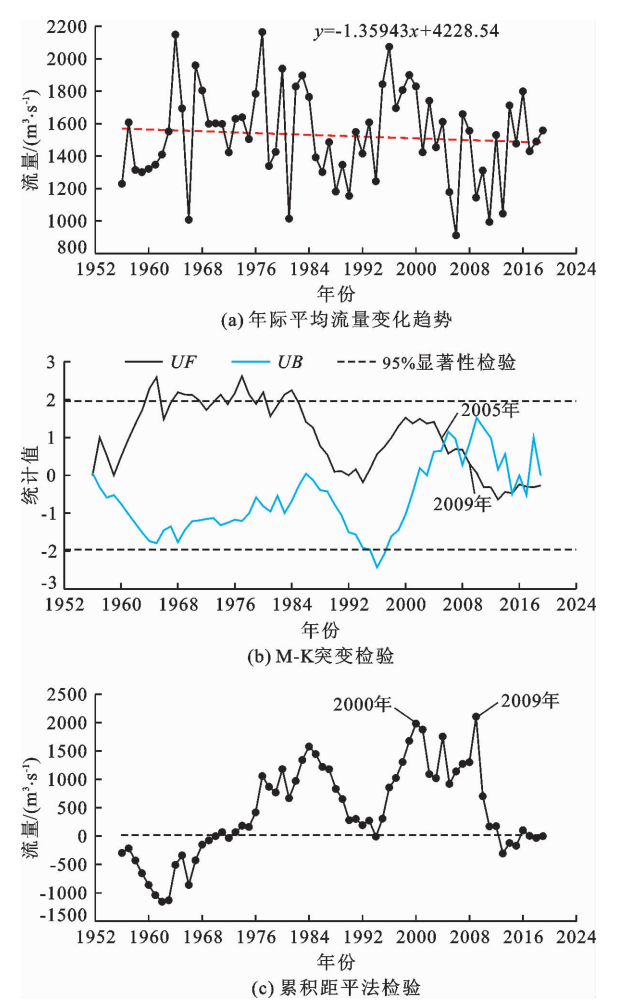


图 2 1956 – 2019 年乌江武隆水文站年平均流量变化及突变检验

3.2 突变前后日流量变化分析

图 3 为突变前后乌江武隆水文站多年日流量的变化。由图 3 可以看出,年内日流量变化趋势呈单峰分布,多年日均流量和日最大流量峰值显著,峰值出现在 6 – 7 月,7 月后逐渐减小。突变前、后年内日最小流量变化范围分别为 59 ~ 978、76 ~ 2 080 m³/s,日最大流量变化范围分别为 737 ~ 20 400、713 ~ 15 400 m³/s。可见多年日最大流量比多年日

最小流量变化趋势更为明显。

3.3 突变前后水文情势变化分析

根据图 2 的突变性分析结果,将 1956 – 2008 年逐日流量观测数据作为天然流量序列,2009 – 2019 年数据作为流量改变序列,运用 IHA - RVA 法计算突变前后乌江武隆水文站的水文变化情势与改变度,计算结果如表 1 所示。

表 1 流量突变前后乌江武隆水文站水文情势指标变化

IHA 指标		中值		水文改变度	
		突变前	突变后	数值/%	程度
第 1 组 指标/ (m ³ · s ⁻¹)	1 月份流量中值	462.7	685.5	47.91	中度
	2 月份流量中值	482.5	655.0	21.87	低度
	3 月份流量中值	628.1	835.7	25.39	低度
	4 月份流量中值	1260	1476	38.40	中度
	5 月份流量中值	2312	2333	5.42	低度
	6 月份流量中值	3374	2800	37.20	中度
	7 月份流量中值	3271	2602	40.45	中度
	8 月份流量中值	2052	1563	35.75	中度
	9 月份流量中值	1669	1296	31.90	低度
	10 月份流量中值	1458	1079	33.80	中度
	11 月份流量中值	1055	866.3	12.05	低度
	12 月份流量中值	590.9	708.0	13.52	低度
第 2 组 指标/ (m ³ · s ⁻¹)	年均最小 1 d 流量	306.7	320.9	11.19	低度
	年均最小 3 d 流量	314.8	382.2	31.17	低度
	年均最小 7 d 流量	329.5	417.0	27.73	低度
	年均最小 30 d 流量	384.3	505.5	46.46	中度
	年均最小 90 d 流量	521.0	640.8	19.70	低度
	年均最大 1 d 流量	11760	8116	47.91	中度
	年均最大 3 d 流量	10070	6533	60.93	中度
	年均最大 7 d 流量	8183	5243	49.28	中度
	年均最大 30 d 流量	4836	3501	13.52	低度
	年均最大 90 d 流量	3297	2679	7.07	低度
	基流指数	0.2176	0.3040	32.89	低度
	第 3 组 指标/d	年最小流量出现时间	42.43	53.42	20.48
第 4 组 指标	年最大流量出现时间	173.50	190.00	29.85	低度
	高流量发生次数	15.36	8.77	37.83	中度
	高流量历时/d	4.76	4.66	29.49	低度
	低流量发生次数	5.27	12.75	74.64	高度
第 5 组 指标	低流量历时/d	3.28	7.82	75.29	高度
	涨水速率/(m ³ · s ⁻¹ · d ⁻¹)	428.6	270.5	32.89	低度
	落水速率/(m ³ · s ⁻¹ · d ⁻¹)	-258.7	-257.1	25.87	低度
	逆转次数	116.7	188.5	100.0	高度

3.3.1 月均流量变化 图 4 为流量突变前后乌江武隆水文站各月月均流量及其变化量。由图 4 可以看出,流量突变后,武隆水文站 1、2、3、4、5 以及 12 月份的月均流量均有不同程度的增大,其中 1 月份增大幅度较为明显,改变度达到 47.91%,为中度改变。6 – 11 月份的月均流量有不同程度的减少,其变化最为

显著的是7月份,改变度达到40.45%。这一结果可能是乌江各水电站蓄丰补枯的运行方式所致,乌江梯级水电站在运行时,汛前需预留防洪库容而在汛末开始蓄水,蓄水期(乌江梯级水电站一般8-10月之间开始蓄水)不可避免地会减少下泄流量,至枯水期(12-次年3月)水库泄水运行向下游河道补水。该运行方式造成突变后月均流量的增减变化。

3.3.2 年极值流量变化 图5为1956-2019年乌江武隆水文站年最小30 d流量及年最大3 d流量变化趋势。结合图5和表1可知,年极值最小流量在2009年突变后均有所增加,以年最小30 d流量变化最为明显,突变后流量值的下限高于突变前流量值的上限,其改变度达46.46%,为中度改变。年极值最大流量在2009年突变后均有所减小,以年最大3 d流量变化最为显著,突变后流量值的上限低于突变前流量值的下限,其改变度达60.93%,属于

中度改变。

3.3.3 年均最大、小值流量出现时间 由表1可以看出,武隆水文站年均最大、最小流量出现时间改变度均低于33%,年均最小值出现时间改变度为20.48%,年均最大值出现时间改变度为29.85%,均属于轻度改变。表明乌江水利工程的建设使得年均最小、最大流量出现时间仍处在一个稳定的范围内。

3.3.4 高、低流量历时及发生时间 高流量可以促进水植物的快速生长,该流量出现时间多数处于夏季阶段,是生物需水量的旺季,低流量可以维持物种的生存环境,多处于冬季。从表1中看出,突变前后,高流量发生次数由15.36次减少为8.77次,改变度为37.83%,历时从4.76 d减少为4.66 d,改变度为29.49%,处于低度改变。低流量发生次数由5.27次增加为12.75次,改变度为74.64%,历时从3.28 d增加为7.28 d,改变度为75.29%,处于高度改变。

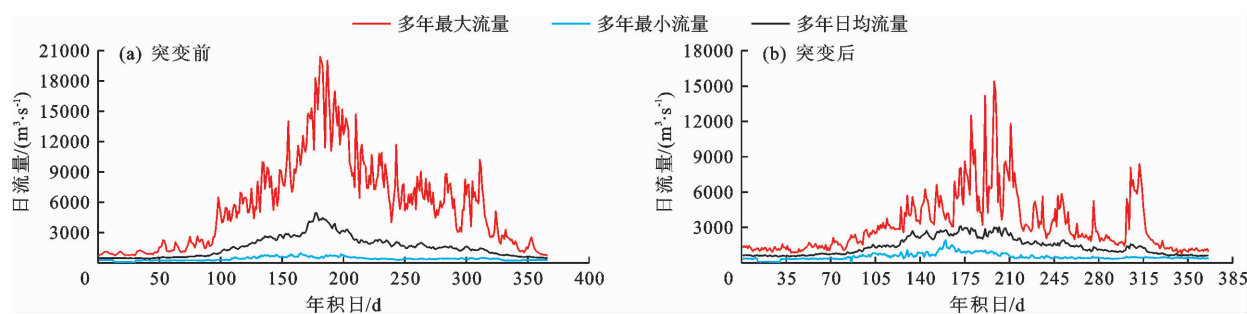


图3 突变前后乌江武隆水文站多年日流量的变化

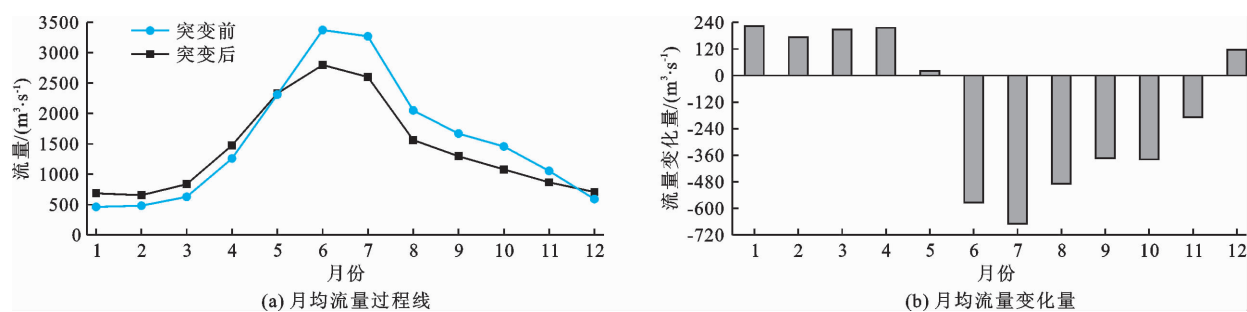


图4 突变前后乌江武隆水文站各月月均流量及其变化量

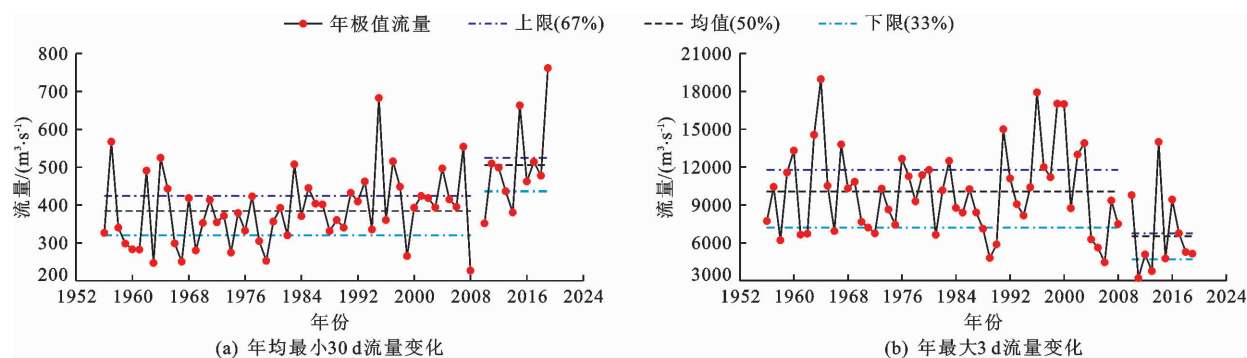


图5 1956-2019年乌江武隆水文站年最小30 d流量及年最大3 d流量的变化

图 6 为 1956 – 2019 年乌江武隆水文站年高流量及低流量发生时间的变化。分析图 6 可知,高流量发生时间多数在年积日 90 ~ 180 d(4 – 6 月)之间波动,突变前后,高流量平均发生时间分别为 125、129 d;低

流量发生时间多数在年积日 270 ~ 360 d(10 – 12 月)之间波动,突变前后,低流量平均发生时间分别为 332、311 d。表明突变后高流量平均发生时间推后了 4 d,低流量平均发生时间提前了 21 d。

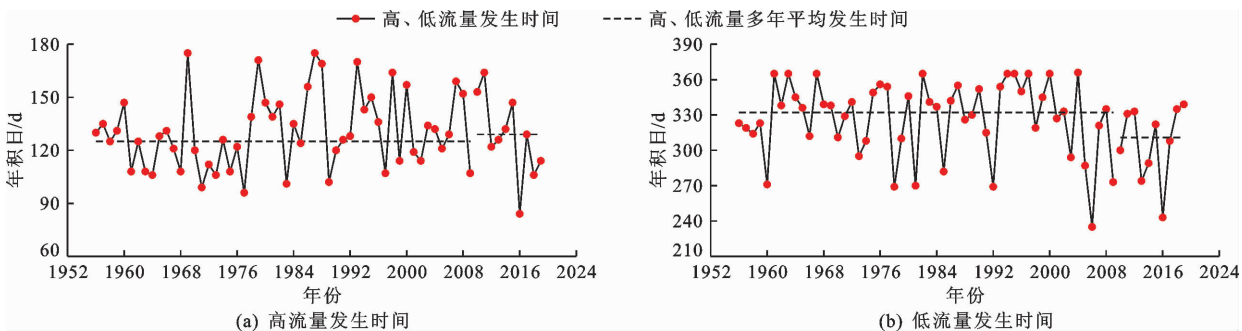


图 6 1956 – 2019 年乌江武隆水文站年高流量及低流量发生时间的变化

3.3.5 整体水文改变度 基于 IHA – RVA 法对乌江下游水文情势突变前后结果进行分析,将乌江武隆水文站突变前后的 32 个水文指标进行对比,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,约 1/3 水文指标的改变度在 33% ~ 67% 范围内,该范围内以 10 月份流量中值的改变度最小,仅为 33.8%,以年均最大 3 d 流量的改变度最大,为 60.93%。此外,改变度小于 33% 的水文指标中以 5 月份流量中值的改变度最小,仅为 5.42%,接近 33% 的水文指标为 9 月份流量中值,改变度为 31.9%。超出水文改变度阈值 67% 的水文指标仅有 3 个,其中,低流量发生次数和低流量历时的改变度分别为 74.64% 和 75.29%,逆转次数的改变度达到 100%。在 32 个水文指标中,中度改变指标为 11 个,占水文总指标的 34%,低度改变指标为 18 个,占水文总指标的 56%,高度改变指标为 3 个,占水文总指标的 10%。

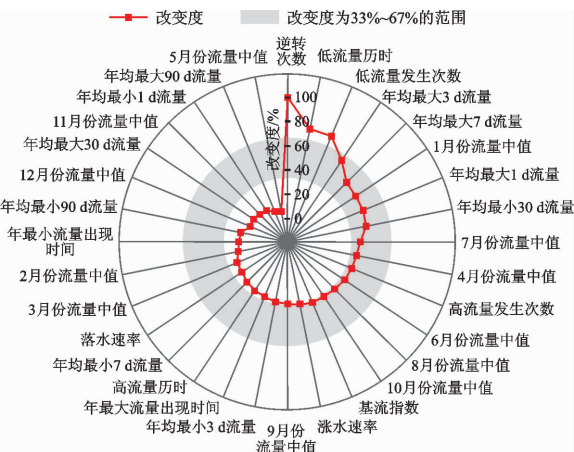


图 7 突变后乌江武隆水文站 32 个水文指标的改变度
由公式(3)计算出乌江武隆水文站各个分组的

水文指标改变度和整体水文指标改变度,计算结果见表 2。从表 2 可见,武隆水文站第 1 组、第 2 组和第 3 组指标为低度改变,第 4 组和第 5 组指标为中度改变,其中相对接近高度改变的第 4 组水文指标的改变度为 54.32%;32 个水文指标的整体改变度为 38.70%,属于中度改变,说明乌江干流和主要支流上高坝水电站的建造使其水文情势发生了一定程度的改变。

表 2 乌江武隆水文站各组水文指标及整体水文指标的改变度

各组水文指标改变度/%					整体水文指标 改变度/%
第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
28.64	31.62	25.16	54.32	53.59	38.70

3.4 水文情势变化对鱼类的影响

收集了突变前后的 2009、2011、2013、2014、2015 年乌江彭水至白马段 12 种漂流性卵鱼类的总产卵数量,如图 8 所示。图 8 显示,2009 年后漂流性卵鱼类的产卵规模显著下降,其中 2013 年的鱼类总产卵数量最少,仅占 2009 年总产卵数量的 5.42%,2014 年之后,鱼类产卵规模略有恢复,维持在 $3\,000 \times 10^4$ 粒左右。

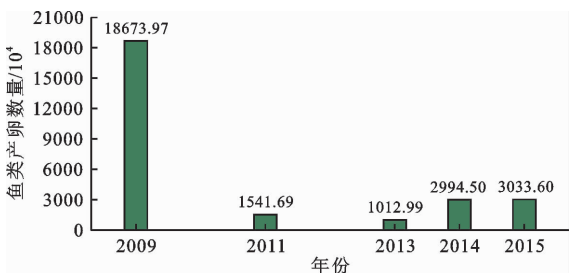


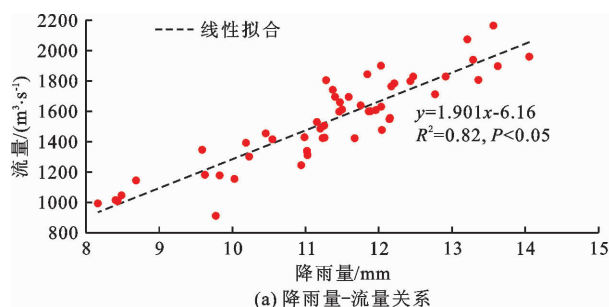
图 8 突变前后乌江彭水至白马段 12 种
鱼类部分年份的总产卵数量

4 讨 论

4.1 乌江流量减小及其水文情势变化的原因

本文的研究结果表明,乌江的年平均流量呈逐渐减小的变化趋势,水文情势也发生了改变,其原因主要从以下两个方面进行分析:

(1) 乌江流域气候的变化引起降雨量在时空上的异质性及数量上的改变,从而对河流流量产生了影响。图 9 为乌江武隆水文站降雨量-流量关系及多年降雨量变化趋势(1965-2017 年)。如图 9(a)



所示,武隆水文站流量与降雨量呈极强正相关,降雨量的变化直接影响着流量的变化。而图 9(b) 显示,1965-2017 年年降雨量整体呈减少趋势,多年平均降雨量从 2009 年水文情势突变之前的 11.46 mm 减少至突变后的 10.60 mm,同时研究区域工农业生产等取水量并未发生显著变化^[15]。因此,乌江流域降雨量的减少是导致其流量呈逐年减小趋势的直接原因。此外,乌江流域多为喀斯特地貌单元,具有地表-地下双层结构的特点,区域内土壤渗透性强^[17],易造成地表流量的减少。

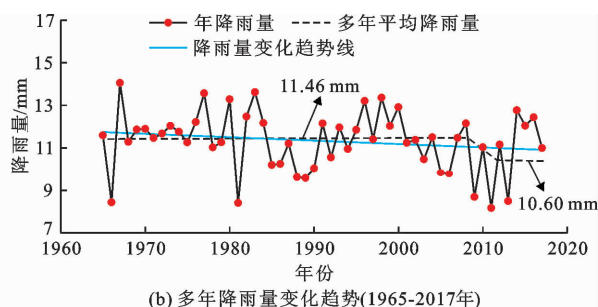


图 9 乌江武隆水文站降雨量-流量关系及多年降雨量变化趋势

(2) 乌江水利水电工程的梯级开发造成了原水文情势的改变。从 1982 年至 2013 年,在乌江干流及其主要支流上已建成 11 座水电站,位于武隆水文站附近的彭水水电站于 2009 年建成开始蓄水,彭水水电站为乌江干流最大的峰系统日调节水电工程,其运行势必改变其原有的水文情势,使该电站上下游流量产生差异。

4.2 乌江鱼类减少的原因

乌江流量的减少与水文情势的改变造成鱼类资源相应减少。2009 年彭水水电站开始运行,在一定程度上改变了水文情势,而鱼类生存环境受到剧烈扰动的影响是一个逐渐趋于累积的过程,至 2011 年,漂流性鱼类产卵量开始大幅减少,2014 年后鱼类自身对生境的剧烈变动已产生一定的适应,使鱼类产卵数量有所增加。

由于梯级水库之间的顶托作用,易导致原河流由河相转为湖相,库内水流与自然河道相比流速减缓,但诸如白甲鱼、圆口铜鱼等一些适应急流生境的鱼类以及长鳍吻鮡、圆筒吻鮡、中华金沙鳅等漂流性鱼类^[30],均需在一定的水流流速条件下进行产卵,河道水流流速的减缓会影响这些鱼类的正常产卵。另外,水利工程的建设也阻碍了河流中鱼类的迁移通道^[31]。总之,乌江水文情势的变化改变了鱼类的原有生态是造成鱼类减少的主要原因。

5 结 论

本研究基于乌江武隆水文站 1956-2019 年逐日流量数据实测资料,采用生态水文指标变化范围法(IHA-RVA)及水文改变度法对乌江流域水文情势的变化进行分析评价,并初步分析了流域水文情势改变对鱼类的影响。得出的主要结论如下:

(1) 乌江流域水文情势突变年份为 2009 年,与彭水水电站投产运行的时间相同,突变前的乌江年际流量已呈不显著的下降趋势。突变前、后年内日最小流量变化范围分别为 59~978、76~2 080 m^3/s ,日最大流量变化范围分别为 737~20 400、713~15 400 m^3/s ,突变前后乌江流量减少趋势显著。

(2) 突变后乌江武隆水文站 32 个水文指标的整体改变度为 38.70%,属于中度改变。其中高度改变的指标有低流量发生次数、低流量历时和逆转次数,改变度分别达到 74.64%、75.29% 和 100%。低流量平均发生时间提前了 21 d,高流量平均发生时间推后了 4 d。

(3) 乌江流量减小及水文情势改变的主要原因是流域年降雨量的减少及梯级水电站的开发修建。水文情势突变后的流域水文特征对鱼类的影响是一个累积的过程,2009 年之后 12 种漂流性卵鱼类的产卵总量大幅减少,尤以 2011 年最为突出,仅为 $1\,541.69 \times 10^4$ 粒。2014 年之后,鱼类产卵规模略有

恢复,维持在 $3\,000 \times 10^4$ 粒左右。

参考文献:

- [1] 江善虎,周乐,任立良,等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 356-365.
- [2] MCMILLAN H K. A review of hydrologic signatures and their applications [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2020, 8(1): 1499.
- [3] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利, 2008(2): 20-27.
- [4] LIANG Xu, WOOD E F, LETTENMAIER D. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification [J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1-4): 195-206.
- [5] 胡建国,郑海涛,胡菊香. 银盘水电站鱼类资源现状和缓解工程影响的保护措施探讨[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(1): 123-128.
- [6] 郭文献,赵瑞超,付体江,等. 乌江流域水沙变化趋势及驱动力分析[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 71-78.
- [7] 邵骏,范可旭,邴建平,等. 乌江干流年径流变化趋势及成因分析[J]. 水文, 2012, 32(6): 86-91+20.
- [8] GUO Wei, XU Gaohong, SHAO Jun, 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.
- [9] 王鸿翔,陈鼎新,李越,等. 三峡水库对坝下河流水文情势影响研究[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(5): 1-6.
- [10] 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.
- [11] 段唯鑫,郭生练,王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 120-130.
- [12] 郭强,孟元可,樊龙凤,等. 基于 IHA/RVA 法的近年来鄱阳湖生态水位变异研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1691-1701.
- [13] 谷桂华,杨侃,杨文春,等. 抚仙湖适宜生态水位研究及水位改变度分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 54-60.
- [14] 王鸿翔,朱永卫,查胡飞,等. 洞庭湖生态水位及其保障研究[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1529-1538.
- [15] ASHRAF F B, HAGHIGHI A T, MARTTILA H, et al. Assessing impacts of climate change and river regulation on flow regimes in cold climate: A study of a pristine and a regulated river in the sub-arctic setting of Northern Europe [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 410-422.
- [16] 张康,杨明祥,梁藉,等. 长江上游水库群联合调度下的河流水文情势研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 107-114.
- [17] 秦年秀,陈喜,薛显武,等. 气候变化对乌江流域水文水资源的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 623-628.
- [18] 吴晓玲,张欣,向小华,等. 乌江流域上游水沙特性变化及其水电站建设的影响[J]. 生态学报, 2018, 37(3): 642-650.
- [19] 池仕运,陈胜,李嗣新,等. 高坝对乌江下游底栖动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 469-481.
- [20] 熊美华,史方,徐念,等. 微卫星标记分析乌江流域白甲鱼群体的遗传多样性[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2): 122-125.
- [21] 朱俊,刘丛强,王雨春,等. 乌江渡水库中溶解性硅的时空分布特征[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 330-333.
- [22] 吕巍,王浩,殷峻暹,等. 贵州境内乌江水电梯级开发联合生态调度[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 918-927.
- [23] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152.
- [24] 章诞武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496.
- [25] CHEN Lihua, WANG Yang, TOUATI B, 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: 1151-1170.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] ZACHARIAS I, DIMITRIOU E, KOUSSOURIS T. Integrated water management scenarios for wetland protection: Application in Trichonis Lake [J]. Environmental Modelling and Software, 2003, 20(2): 177-185.
- [29] 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.
- [30] 徐薇,杨志,万力,等. 银盘电站蓄水前后乌江下游产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(6): 8-15.
- [31] 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.