

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.023

下岸水库对永安溪水文情势的影响分析

沈凯琦^{1,2}, 赵超^{1,2}, 张翔宇^{1,2}, 黄志强³

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门市水资源利用与保护重点实验室, 福建 厦门 361024;
3. 台州市黄岩区永宁江事务中心, 浙江 台州 318020)

摘要:为了定量评估永安溪下岸水库对下游水文情势的影响,利用永安溪柏枝岙水文站1980—2020年的径流序列,采用不均匀系数、完全调节系数和集中度分析水库运行前后永安溪径流年内分配变化,并利用RVA法评估水文整体改变度。结果表明:下岸水库的蓄丰补枯作用明显,径流年内分配趋于均匀化;在取得防洪效益的同时,水库的运行也对永安溪水文情势产生了中度改变,改变度达42.82%,对流域内水生生态系统的健康形成潜在影响。

关键词:RVA法;水文情势;永安溪;下岸水库

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0174-07

Influence analysis of Xia'an Reservoir on hydrological regime of the Yong'an River // SHEN Kaiqi^{1,2}, ZHAO Chao^{1,2}, ZHANG Xiangyu^{1,2}, HUANG Zhiqiang³ (1. School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. The Key Laboratory of Water Resources Utilization and Protection of Xiamen, Xiamen 361024, China; 3. Taizhou Huangyan District Yongning River Affairs Center, Taizhou 318020, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the influence of Xia'an Reservoir on the downstream hydrological regime, the runoff series of Baizhi'ao hydrological station in the Yong'an River from 1980 to 2020 were used to analyze the annual distribution change of runoff of the Yong'an River before and after the operation of the reservoir by using the nonuniformity coefficient, complete regulation coefficient and concentration degree, and the RVA method was used to evaluate the overall change degree of hydrology. The results show that the Xia'an Reservoir has an obvious effect of storing abundant water and replenishing dry water, and the annual distribution of runoff tends to be uniform. While presenting flood control benefits, the operation of the reservoir also has a moderate change in the hydrological regime of the Yong'an River, with a change degree of 42.82%, which has a potential impact on the health of the aquatic ecosystem in the basin.

Key words: RVA method; hydrological regime; Yong'an River; Xia'an Reservoir

河流水文情势是维系水域生态系统完整性及本地生物多样性的关键所在^[1-3]。河流在满足人类日常用水需求的同时,也为周遭依赖河流生态系统的动植物提供了最佳栖息地。然而,气候变化和人类活动的干预使河流径流量、水位和汛期等水文状况不断改变,这可能会扰乱水生生物的生长过程^[4-10]。建库筑坝是人类活动中改变河流水文情势最强烈的方式,一定程度上会导致河流水动力条件产生变动,从而影响河流的健康^[11-14]。因此,评估水库建设引起的水文特征的变化,对水资源综合管理和生态环境保护至关重要。目前国内对于水库建设引起的河

流水文情势变化展开了较多研究,张飒等^[15]针对丹江口水库的建设,应用变异范围法(range of variability approach,RVA)评估了汉江中游水文情势变化;王鸿翔等^[16]为评价三峡水库对坝下河流水文情势的影响,采用Mann-Kendall法分析流量变化趋势,并基于水文改变指标(indicator of hydrological alteration,IHA)和RVA法计算水文改变度;林梦然等^[17]结合龙羊峡水库运行特点和黄河上游生态特征,运用RVA法评估水库运行对其坝下河段水文情势的影响程度。

永安溪位于浙江省椒江水系中上游,是我国东

基金项目:福建省自然科学基金(2022J011232);厦门市科技计划(3502Z20203063);厦门理工学院科研攀登计划(XPDKT19028);厦门理工学院研究生科技创新计划(YKJCX2020092)

作者简介:沈凯琦(1997—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:shenkaiqi@stu.xmut.edu.cn

通信作者:赵超(1977—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhaochao@xmut.edu.cn

南沿海地区山溪性河流的典型代表,沿溪两岸湿地资源丰富,是不可多得的天然渔仓。当地的工农业生产总值都集中在永安溪两岸,生产生活资源也基本来源于此。受地形和降雨等因素的影响,永安溪历史上洪涝灾害频发,使人民生命财产安全遭到了严重威胁,因此当地人民和政府集资修建了下岸水库用以拦蓄洪水。虽然水库运行后防洪效果有所提高,但也对流域水文情势造成了潜在影响,加之近年来永安溪防护林和湿地资源加速减少,鱼类自然繁殖能力不断降低,渔业资源的品质和产量随之逐年下降,严重影响当地经济建设及生态发展。鉴于此,本文利用多种水文指标对比下岸水库运行前后永安溪流域水文特征变化情况,并采用 RVA 法评估流域水文情势的总体变化程度,以期下岸水库的生态调度和永安溪流域综合治理提供科学依据。

1 研究区概况

永安溪位于浙江省台州市境内,是浙江省第三大水系椒江的源头,自西向东横贯仙居盆地(图1)。永安溪全长约 141 km,流域面积为 2704 km²,地处亚热带湿润季风气候区,全年降雨主要集中在 3—9 月,枯水期为每年的 10 月至次年 2 月^[18]。下岸水库是永安溪上游唯一的控制性工程,坝址位于仙居县曹店村下游 680 m 处的峡口,于 2003 年建成并开闸蓄水,总库容 1.35 亿 m³,防洪库容 3 574 万 m³,正常蓄水位 208 m,为多年调节水库,是一座以防洪、供水为主,结合蓄能发电、养鱼为一体的综合性大型水利工程。柏枝岙水文站位于浙江省临海市白水洋镇柏枝岙村,属国家重要水文站,距永安溪河口 95 km,集水面积为 2 475 km²,占永安溪流域面积的 91.53%,是其出口控制断面,多年平均径流量为 23.00 亿 m³,建库后的年平均径流量由建库前的 23.57 亿 m³ 下降至 22.27 亿 m³。



图1 研究区域
Fig.1 Study area

本文基于柏枝岙站 1980—2020 年的逐日径流资料,将下岸水库蓄水年份(2003 年)作为水文改变年,则 1980—2002 年的径流数据代表水库运行前的天然水文情势,2003—2020 年的径流数据为水库运行后的水文情势,据此分析下岸水库对永安溪流域水文情势的影响。

2 研究方法

2.1 不均匀性

气温、降水等气象要素存在显著的季节性变化,很大程度上导致了径流年内分配的不均匀性。为衡量流域径流年内分配的不均匀性,本文采用径流年内分配不均匀系数 C_v 和径流年内分配完全调节系数 C_r ^[19],从不同角度进行分析。以月为时间尺度, C_v 和 C_r 的计算公式^[20-23]为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{r}} = \frac{1}{\bar{r}} \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (r_i - \bar{r})^2} \quad (1)$$

$$C_r = \sum_{i=1}^{12} \varphi_i (r_i - \bar{r}) / \sum_{i=1}^{12} r_i \quad (2)$$

其中

$$\bar{r} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} r_i$$

$$\varphi_i = \begin{cases} 0 & r_i < \bar{r} \\ 1 & r_i \geq \bar{r} \end{cases}$$

式中: r_i 为年内第 i 个月的径流量, m³; $\bar{r}$ 为年内月平均径流量, m³。 C_v 值越大,年内各月径流量与均值的离散度越高,径流年内分配的不均匀程度越高; C_r 的取值范围是 [0, 1], 其值越大,则径流年内分配越集中。

2.2 集中度

在月尺度下,将一年中各月径流量看作向量,月径流量的大小对应向量的长度,所处的月份为径流向量的方向,合成后的矢量模占年径流的比例即年径流集中度 C_d ^[24],计算公式为

$$C_d = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} / \sum_{i=1}^{12} r_i \quad (3)$$

式中 r_x 、 r_y 分别为一年中各月径流在 x 和 y 两个方向上的分量之和。

2.3 RVA 法

为定量评估河流水文情势受人类活动(如水库、大坝等水利工程的建设)干扰的程度,在具有长序列日径流观测数据的流域,Richer 等^[25-26]提出了 RVA 法。利用自然水文情势下的日径流序列,计算影响生态环境的 32 个关键水文特征值及分布范围(RVA 范围)^[27],用以评估水库运行后水文特征值偏离分布范围的概率,从而衡量水文整体改变度,具

体计算方法为

$$D = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (4)$$

其中

$$D_i = \frac{N_{p,i} - N_e}{N_e} \times 100\%$$
$$N_e = RN_t$$

式中: D_i 为第 i 个水文特征值改变度; D 为流域水文整体改变度; $N_{p,i}$ 为第 i 个水文特征值受干扰后落在 RVA 范围内的年数; N_e 为期望年数; R 为 IHA 指标受干扰前落在 RVA 目标范围内的比例, 本文取 50%; N_t 为受干扰后时间序列的总年数。

为客观评定水文指标的改变程度, Richter 等^[26]对 D_i 及 D 做出如下分级规定: 绝对值介于 0 ~ 33% 为未改变或低度改变 (L), 33% ~ 67% 为中度改变 (M), 67% ~ 100% 为高度改变 (H)。

3 结果与分析

3.1 径流年内分配

图 2 为水库运行前后年内月径流量分配情况。永安溪径流年内分布不均, 径流量主要集中在汛期 3—9 月, 其中 6 月经流量最丰沛, 枯水期 10 月至次年 2 月经流量较少。下岸水库运行前, 受梅雨及台风雨影响, 6、7、8、9 月经流量分别占全年径流量的 17.44%、11.94%、12.21%、11.93%; 水库运行后, 3—4 月的径流量占全年径流的比例由 20.85% 下降至 15.34%, 6 月和 7 月的径流量也下降明显, 月经流量降幅分别为 8.53% 和 4.85%, 10 月及 12 月至次年 2 月的径流量有所上升, 反映了水库调节的蓄丰补枯作用。值得一提的是, 水库运行后 8 月经流量不降反升, 月经流量占全年径流量的 17.19%。分析 8 月经流量上升的原因, 发现水库运行后 8 月的极值流量为 586.21 m³/s, 发生在 8 月 10 日, 主要由 2009 年台风“莫拉克”、2015 年台风“苏迪罗”和 2019 年超强台风“利马奇”均在 8 月初登陆浙江带来强降水所致。若无水库的调节作用, 台风期间的

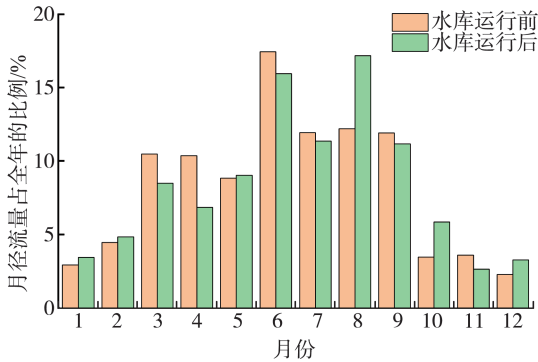


图2 径流量年内分配

Fig.2 Annual distribution of runoff

径流量会更加难以控制, 极可能造成洪涝灾害, 威胁流域内生物及周边居民的生命财产安全。

柏枝岙站 1980—2020 年 C_v 、 C_r 和 C_d 变化过程见图 3 和图 4。水库运行前, 1980—2002 年 C_v 和 C_r 的平均值分别为 0.88、0.35, C_v 值上升趋势明显, 表明径流年内分配不均匀增强, C_r 值相对稳定, 呈微弱上升趋势。水库运行后, 2003—2020 年 C_v 值则呈现出下降趋势, 均值降低至 0.87, C_r 值也缓慢减小, 均值下降至 0.34。水库运行前 C_d 呈现上升趋势, 运行后 C_d 趋势下降。综上, 水库运行后 C_v 、 C_r 和 C_d 变化一致, 均呈下降趋势。由此可见, 水库的调蓄运行使得永安溪径流年内分配趋于均匀, 流域对径流的调节能力有所提升。

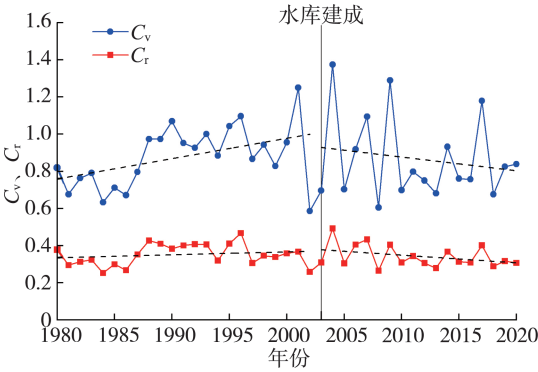


图3 1980—2020 年不均匀系数和完全调节系数变化趋势

Fig.3 Variation trend of nonuniformity coefficient and complete regulation coefficient from 1980 to 2020

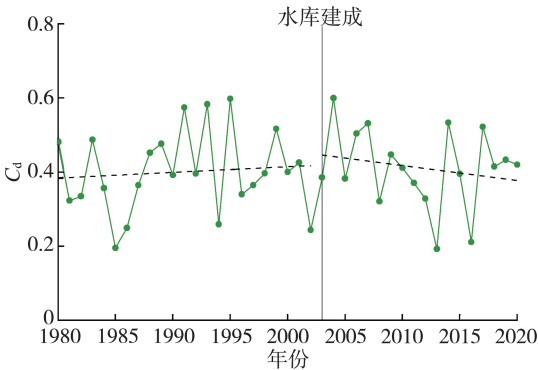


图4 1980—2020 年集中度变化趋势

Fig.4 Variation trend of concentration degree from 1980 to 2020

3.2 RVA 法分析

下岸水库运行前后的水文特征指标计算结果见表 1。第 1 组水文特征指标月中值流量的整体改变度为 30.03%, 呈低度改变, 其中改变度最高的是 4 月, 改变度高达 -74.44%。图 5 为 1980—2020 年 4 月流量, 可见水库运行后的 4 月流量大多低于 RVA 阈值的下限, 属于高度改变月。而每年的 4—5 月正值永安溪流域内溪鱼的产卵繁殖期, 因此该时段内流量的减少将直接影响水生生物的繁殖与生存。同

表1 下岸水库运行前后水文特征指标统计结果

Table 1 Statistical results of hydrological characteristic indexes before and after operation of Xia'an Reservoir

分组	序号	水文参数	中值		RVA 目标边界		改变度/%
			运行前	运行后	低	高	
月流量	1	1 月流量	10.70	18.45	7.63	19.20	-23.33(L)
	2	2 月流量	23.60	32.58	13.36	39.48	-0.62(L)
	3	3 月流量	48.40	40.05	40.48	63.59	-29.01(L)
	4	4 月流量	57.55	37.28	48.24	64.55	-74.44(H)
	5	5 月流量	43.00	42.10	29.31	54.15	-0.62(L)
	6	6 月流量	64.00	70.53	47.56	109.70	27.78(L)
	7	7 月流量	37.20	32.75	23.40	55.98	27.78(L)
	8	8 月流量	40.00	45.15	28.26	64.89	41.98(M)
	9	9 月流量	28.65	42.65	26.45	39.17	-14.81(L)
	10	10 月流量	15.80	16.30	13.18	18.93	13.58(L)
	11	11 月流量	11.55	11.05	8.20	22.84	13.58(L)
	12	12 月流量	9.42	15.30	6.28	15.88	-0.62(L)
年极端流量	13	年最小 1 d 流量	3.90	4.29	2.86	5.27	-0.62(L)
	14	年最小 3 d 流量	3.90	4.74	2.99	5.55	27.78(L)
	15	年最小 7 d 流量	4.30	4.95	3.21	5.78	-0.62(L)
	16	年最小 30 d 流量	7.20	7.49	5.45	8.67	-29.01(L)
	17	年最小 90 d 流量	19.05	19.00	14.55	26.65	27.78(L)
	18	年最大 1 d 流量	1 160.00	1 720.00	1 038.00	1 689.00	-29.01(L)
	19	年最大 3 d 流量	847.30	1 177.00	657.70	983.10	-57.41(M)
	20	年最大 7 d 流量	575.90	635.70	448.70	636.20	-29.01(L)
	21	年最大 30 d 流量	247.20	269.20	209.60	268.50	-57.41(M)
	22	年最大 90 d 流量	152.80	143.00	135.40	170.70	-43.21(M)
	23	基流指数	0.05	0.07	0.05	0.07	27.78(L)
年极端流量 出现时间	24	年最小流量出现时间	3.00	338.50	7.68	247.40	-0.62(L)
	25	年最大流量出现时间	232.00	222.50	177.90	239.40	70.37(H)
高低流量发生 频率和历时	26	低流量发生次数	5.00	9.00	4.92	6.08	-85.80(H)
	27	低流量发生历时	9.00	4.50	6.96	10.00	-87.22(H)
	28	高流量发生次数	16.00	15.00	14.00	17.08	16.16(L)
	29	高流量发生历时	4.00	4.00	3.46	4.54	-29.01(L)
流量改变率和频率	30	上升率	8.20	4.96	5.93	11.66	-14.81(L)
	31	下降率	-3.40	-4.72	-4.60	-2.80	-57.41(M)
	32	流量逆转次数	99.00	124.00	96.92	101.10	-100.00(H)

注:流量单位为“ m^3/s ”;极端流量出现时间单位为“儒略日”;历时单位为“d”;上升率、下降率为单位为“%”。

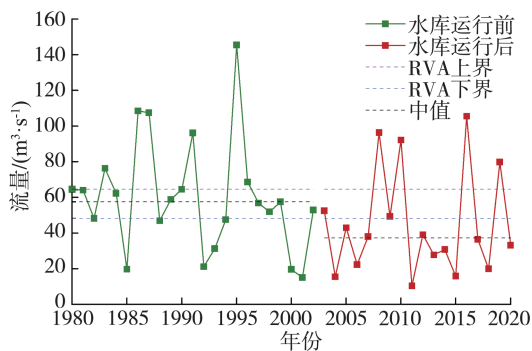


图5 4月流量

Fig. 5 Flow in April

时,流量的大幅降低也不利于沿溪两侧植被保持所需的土壤湿度,甚至难以保障陆生动物的供水需求。

由表1中第2组水文参数在水库运行前后的对比中可以看出,水库运行前后,除年最大、最小90 d流量减少外,其余指标均呈上升趋势,其中年最大1 d流量变化最显著,由运行前 $1\,160.00\,\text{m}^3/\text{s}$ 增长到

运行后 $1\,720.00\,\text{m}^3/\text{s}$,变化幅度高达48.28%,其他最小流量的增加表示水库的补枯作用有所成效。第2组指标年极端流量的整体改变度为35.39%,达到中度改变标准,其中年最大3 d流量、年最大30 d流量和年最大90 d流量这3个指标属于中度改变,其他指标均为低度改变,说明水库的运行对天然状态下流量的极值变化影响并不大。

年极端流量的出现时间可以很好地表征径流的季节性变化。通过表1第3组参数计算结果可以看出,年最小流量出现时间由每年1月初变为12月初,整体分布范围无明显变化(图6),年最小值出现时间的改变将会影响鱼类的迁移和产卵,不利于生物栖息环境的稳定;年最大流量出现时间较水库运行前提前10 d左右,发生时间的范围由原本的3月下旬至11月中旬集中到6月下旬至10月上旬(图7),属于高度改变(改变度为70.37%),同时出现时间的提前很可能向水生生物传递不符合其生长

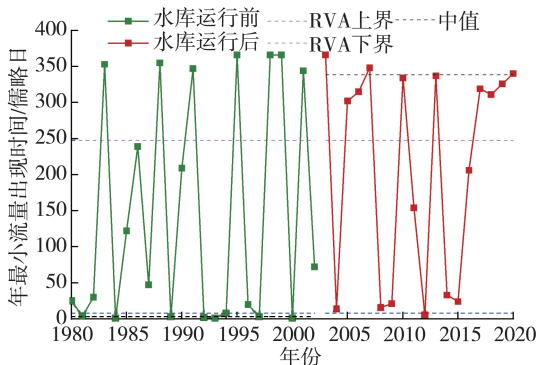


图6 年最小流量出现时间

Fig. 6 Occurrence time of annual minimum flow

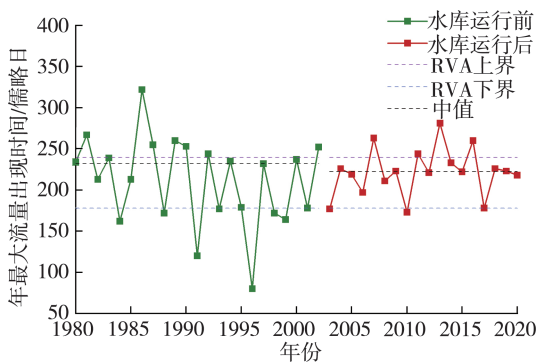


图7 年最大流量出现时间

Fig. 7 Occurrence time of annual maximum flow

规律的产卵和生长信号。

高流量发生次数和历时无明显变化,但低流量发生次数及历时均产生高度改变,水文改变度分别为 -85.80% 和 -87.22% ,其中低流量发生次数呈增加趋势,由水库运行前的5次增加至运行后的9次,发生次数的变化范围也增大,尤其是2017年出现了异常状况,低流量发生次数高达29次(图8),远多于其他年份,这可能是因为2017年降雨偏少,水库蓄水不足加剧了当地枯水期的旱情。若无法保证干旱时期的各项用水需求,干旱频发将会影响当地农作物及水生生物的生长。而低流量历时时间从9d减短到了4.5d,可见低流量次数虽然没有减少,

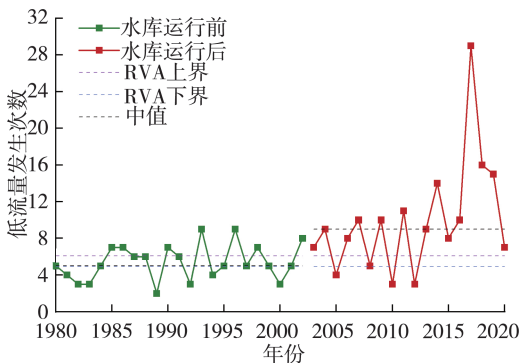


图8 低流量发生次数

Fig. 8 Occurrence times of low flow

但下岸水库的调节作用能减少低流量的持续时间。

由表1 计算结果可知,流量上升率减少了 39.51% ,下降率增大了 38.82% 。流量逆转次数由99次增加至124次,水库运行后增大趋势显著,多个年份逆转次数超过RVA阈值(图9),改变度达 -100.00% ,是所有指标中最高的,但是在体现水电站配合电网调峰、填谷和调频任务的同时,频繁流量波动会影响该流域内生物承受外界变化的能力,使其赖以生存的栖息地遭到破坏,不利于生物的稳定生长。

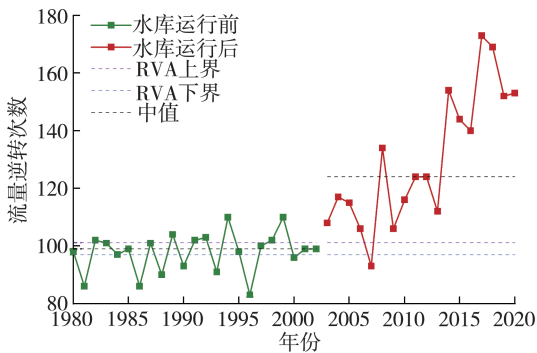


图9 流量逆转次数

Fig. 9 Occurrence times of flow reversals

3.3 水文整体改变度

由表1 可知,高度改变指标和中度改变指标各有5个,低度改变指标有22个,分别占比 15.63% 、 15.63% 和 68.74% 。为进一步清晰各指标改变度的分布情况,绘制水文改变度落区(图10),1~32的序号与32个水文特征指标一一对应,从内而外3个区域分别代表低、中、高度改变,从图10中可以明显看出,低改变度指标虽多,但大多都逼近中度改变的临界线,第4组和第5组水文特征指标的改变度

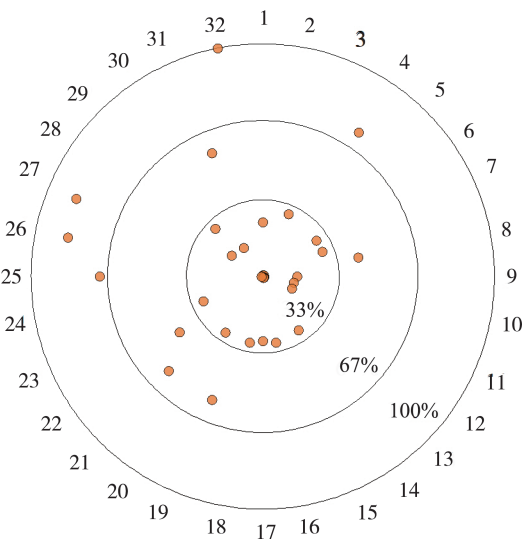


图10 水文改变度落区

Fig. 10 Hydrological change degree falling area

最高,其中低流量发生次数、低流量历时和流量逆转次数占主导。因此综合计算后的水文整体改变度仍能达到42.82%,属于中度改变,说明下岸水库的运行对永安溪流域的水文情势影响较大。

4 结 论

a. 下岸水库的建成和运行对径流产生了较大影响,具体表现在水库的蓄丰补枯作用。

b. 受水库调节作用的影响,径流年内分配趋于均匀化,不均匀系数 C_v 、完全调节系数 C_r 及集中度 C_d 变化规律一致,均在水库运行后由原本的上升趋势转变为下降趋势。

c. 经过RVA法分析,下岸水库运行后,4月流量显著减少,年最大流量出现时间提前10d,低流量发生次数增加、历时减少,流量逆转次数由99次增加至124次且改变度最高。这些指标的变动均会影响鱼类的洄游与繁殖。总体而言,下岸水库对永安溪水文情势产生了中度改变,水文整体改变度为42.82%。

d. 下岸水库虽然具有防洪减灾的效益,但是同时也改变了坝下径流的特性,造成的水文情势波动不利于水生生物的生长繁衍,影响生物群落的多样性,进而威胁河流生态环境的稳定。建议开展生态保护修复措施,如人工增殖、生态调度等,将水库运行对生态系统的不利影响降到最低。

参考文献:

[1] 高玉琴,周桐,马真臻,等.考虑天然水文情势的水库调度图优化[J].水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin,ZHOU Tong,MA Zhenzhen,et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resource Protection,2020,36(4):60-67. (in Chinese))

[2] LU W W,LEI H M,YANG D W, et al. Quantifying the impacts of small dam construction on hydrological alterations in the Jiulong River Basin of Southeast China [J]. Journal of Hydrology,2018(567):382-392.

[3] ZHANG Q,GU X H,VIJAY P S, et al. Evaluation of ecological in stream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations [J]. Journal of Hydrology,2015,529(3):711-722.

[4] SINGH R K, JAIN M K. Reappraisal of hydrologic alterations in the Roanoke River basin using extended data and improved RVA method[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 18: 417-440.

[5] OCOCK J F, BINO G, WASSENS S, et al. Identifying

critical habitat for Australian freshwater turtles in a large regulated flood plain: implications for environmental water management [J]. Environmental Management, 2018, 61 (3):375-389.

[6] GOMEZ J, DE LA M, ÓSCAR M. Restoring environmental flow: buy-back costs and pollution-dilution as a compliance with water quality standards[J]. Water Policy,2014,16(5):864-879.

[7] 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. (JIANG Shanhu,ZHOU Le,REN Liliang,et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):356-365. (in Chinese))

[8] 赵贵章,徐远志,王莉莉,等.黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):195-201. (ZHAO Guizhang,XU Yuanzhi,WANG Lili,et al. Effect of Qingtongxia Hydraulic Project in upstream of Yellow River on river baseflow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (3) : 195-201. (in Chinese))

[9] 王浩,王建华,胡鹏.水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J].水资源保护,2021,37(2):1-9. (WANG Hao,WANG Jianhua,HU Peng. New connotation of water resources protection:“quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resource Protection,2021,37(2):1-9. (in Chinese))

[10] CUI Tong, TIAN Fuqiang, YANG Tao, et al. Development of a comprehensive framework for assessing the impacts of climate change and dam construction on flow regimes [J]. Journal of Hydrology, 2020 (590):125358.

[11] 黄志鸿,董增川,周涛,等.面向生态友好的水库群调度模型[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (HUANG Zhihong,DONG Zengchuan,ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))

[12] 彭少明,尚文绣,王煜,等.黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J].水利学报,2018,49(10):1187-1198. (PENG Shaoming, SHANG Wenxiu, WANG Yu, et al. Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (10) : 1187-1198. (in Chinese))

[13] 魏卿,薛联青,张敏,等.淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J].水资源保护,2019,35

- (4):89-94. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake[J]. Water Resources Protection, 2019,35(4):89-94. (in Chinese))
- [14] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等.基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J].水资源保护,2020,36(2):8-12. (HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):8-12. (in Chinese))
- [15] 张飒,班璇,黄强,等.基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J].水力发电学报,2016,35(7):34-43. (ZHANG Sa, BAN Xuan, HUANG Qiang, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (7): 34-43. (in Chinese))
- [16] 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. (WANG Hongxiang, CHEN Dingxin, LI Yue, et al. Impact of Three Gorges Reservoir on the downstream hydrology of Yangtze River[J]. Journal of Hydroecology, 2018,39(5):1-6. (in Chinese))
- [17] 林梦然,董增川,贾一飞.龙羊峡水库对坝下河段生态水文情势影响研究[J].人民黄河,2019,41(3):69-74. (LIN Mengran, DONG Zengchuan, JIA Yifei. Research on impact of Longyangxia Reservoir on eco-hydrological regime of downstream reach of the dam[J]. Yellow River, 2019,41(3):69-74. (in Chinese))
- [18] 周芬,王丽婷,钟名军.基于径流频率和河道形态的生态流量分析方法[J].人民长江,2019,50(10):73-76. (ZHOU Fen, WANG Liting, ZHONG Mingjun. Ecological flow analysis method based on runoff frequency and channel morphology[J]. Yangtze River, 2019, 50 (10): 73-76. (in Chinese))
- [19] 汤奇成,李秀云.径流年内分配不均匀系数的计算和讨论[J].自然资源,1982,4(3):59-65. (TANG Qicheng, LI Xiuyun. Calculation and discussion of the non-uniform coefficient of annual runoff distribution[J]. Resources Science,1982,4(3):59-65. (in Chinese))
- [20] 王金星,张建云,李岩,等.近50年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-661. (WANG Jinxing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science,2018,19(5):656-661. (in Chinese))
- [21] 胡春明,董熙,尤立,等.红塔尔基水利枢纽对下游河道水文情势影响研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(6):89-95. (HU Chunming, DONG Xi, YOU Li, et al. Influence of Honghuaerji water control project on hydrological situation of downstream river[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6):89-95. (in Chinese))
- [22] 郑红星,刘昌明.黄河源区径流年内分配变化规律分析[J].地理科学进展,2003,22(6):585-590. (ZHENG Hongxing, LIU Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22 (6): 585-590. (in Chinese))
- [23] 班璇,师崇文,郭辉,等.气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J].水利水电科技进展,2020,40(4):1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (4): 1-7. (in Chinese))
- [24] 廖文婷,邓红兵,李若男,等.水利工程对坝下径流的影响:以葛洲坝、三峡水利枢纽为例[J].生态学报,2018,38(5):1750-1757. (LIAO Wenting, DENG Hongbing, LI Ruonan, et al. Effects of dams on runoff in the lower reaches: a case study of the Gezhouba Hydro-Project and the Three Gorges Project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5):1750-1757. (in Chinese))
- [25] RICHTER B D, JEFFREY V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10 (4): 1163-1174.
- [26] RICHTER B D, JEFFREY V, BAUMGARTNER D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 4(14):329-340.
- [27] 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 Xuan, JIANG Liuzhi, ZENG Xiaohui, 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. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-03 编辑:王芳)