

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.002

基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价

黄显峰¹,贾永乐¹,方国华¹,钟婧玮¹,戴灵辉²

(1.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2.湖南省农村水电及电气化发展局,湖南 长沙 410007)

摘要: 基于对5类33个水文变异指标与生态系统之间的响应关系分析,针对目前常用的变化范围法(RVA法)存在容易忽略低度、中度改变指标,且难以区分各项指标相对重要程度的不足,提出基于投影寻踪聚类模型的改进RVA法(PP-RVA法),对河流水文情势的整体变异度进行评价。以湖南省的刘家坪水电站为例,依据其厂房下游河道的实测径流资料,计算得到建库前后其水文情势的整体变异度为83.21%,属于高度改变,同时可知5月平均流量、高流量数、最小7d流量对水文情势改变的影响最大。评价结果更加贴合河道整体信息和指标变异度的分布特征,符合客观实际,表明刘家坪电站当前的运行方式对下游河道的生态系统影响较大,迫切需要开展生态调度实践,实现区域经济和生态环境保护的协调发展。

关键词: 水文变异指标;PP-RVA法;水文情势评价;投影寻踪;水电站;河流生态系统

中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)06-0479-07

Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method

HUANG Xianfeng¹, JIA Yongle¹, FANG Guohua¹, ZHONG Jingwei¹, DAI Linghui²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hunan Provincial Development Bureau of Rural Hydropower & Electrification, Changsha 410007, China)

Abstract: The current range of variability approach (RVA) usually ignores the low and moderate variation index, and is difficult to distinguish the relative importance between different indicators when evaluating the overall hydrological regime of a river. Therefore, according to the response analysis of indicators of hydrological variation (IHA) including 33 hydrological indexes from 5 sorts to ecological system, this study improved the RVA approach based on projection pursuit clustering model, which is called PP-RVA and can be used for the effective analysis of river hydrological variation degree. Then, on the basis of runoff data before and after the construction of the Liujiaping Hydropower Station in Hunan Province, the hydrological situation was evaluated by the proposed PP-RVA approach. From the comparison, the overall variability is 83.21%, which belongs to a high variability. The average flow, high flow rate and 7-day minimum flow in May have the greatest influence on the hydrological regime. The evaluating results fit the overall information of river and distribution characteristics of change degree of index corresponded with the objective reality. Moreover, this study indicates that the current operation mode of Liujiaping Hydropower Station has influenced the ecological system of lower reaches. Therefore, it is urgent to carry out the ecological operation practice to realize the coordinated development of regional economy and ecological environment.

Key words: indicators of hydrologic alteration; PP-RVA method; hydrological regime evaluation; project pursuit; hydropower station; river ecosystem

基金项目: 湖南省水利科技重点项目(湘水科技[2016]194-21);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0442);中央高校基本科研业务费(学生项目)(2017B627X14);湖南省水利科技项目([2015]245-13)

作者简介: 黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: hxhhuang2005@163.com

引用本文: 黄显峰,贾永乐,方国华,等. 基于PP-RVA法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):479-485.
HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(6):479-485.

河流作为人类社会发展的依托和保障,具有显著的资源功能、生态功能和经济功能。近年来,在人类活动的干扰下,河流的天然流态及生物多样性均受到了一定的影响,致使河流生态系统退化,特别是某些位于山区的中小河流,片面追求发电、灌溉等产生的经济效益,导致这一情况更加严重,引发社会各界的广泛关注。

正确评估水利工程对河流生态系统的影响,是实现人水和谐的基础^[1]。自20世纪70年代开始,一些国家便陆续开展相关研究,如南非的河口健康指数(estuarine health index, EHI)、英国的河流保护评价系统(system for evaluating rivers for conversation, SERCON)、美国的生境适宜性指数(habitat suitability index, HSI)等^[2-3]。这些评价体系从不同角度较完整地评价了河流的健康状况,但所需数据量大,且涉及河流地貌、生物物种及其栖息地等大量信息。我国对于河流健康的研究起步较晚,大多数河流对生态的观测资料欠缺,上述方法难以得到有效利用。美国学者 Richter 等基于河流水文要素与生态系统之间的响应关系,于1996年建立了水文变异指标体系(indicators of hydrologic alteration, IHA),并在此基础上提出了变化范围法(range of variability approach, RVA),定量计算河道水文情势的改变度^[3]。

IHA/RVA 方法一经提出,即得到了学术界的广泛采用。Richter 等^[4]应用此方法研究美国的河流,得到了流域尺度的水文变化分布图;Maingi 等^[5]结合统计方法分析了肯尼亚 Tana 河建库对来水的影响。张洪波等^[6]通过对水库出库站水文序列进行 IHA 评价,评估了龙羊峡水库运行对于流贵德站水文条件的影响。段唯鑫等^[7]用该方法分析了长江上游大型水库群对宜昌站水文情势的影响,推断出宜昌站的水文情势已经发生了中等程度的改变。舒畅等^[8]将 RVA 法的思路扩展到生态流量的计算,使用均值与 RVA 阈值差估算了泥曲河的生态流量。张颀等^[9]应用此法评估汉江中游水文变化的程度,研究表明,丹江口大坝蓄水引起襄阳和宜城站点的水位普遍降低,襄阳站的水位整体为高变化度,宜城站的水位整体为中变化度。薛联青等^[10]采用结合内梅罗指数法的改进 RVA 法评估水利工程对塔里木河干流生态水文情势的影响,发现多浪和胜利两大平原水库建设运行后对塔里木河干流径流产生较大影响。

传统的 RVA 法在分析河流生态水文特征的改变方面取得了很大成就,但因过度强调高度变化的水文指标导致评价结果与实际存在差异,且难以区分各项指标的相对重要程度。鉴于此,本文从 RVA 法的思路出发,通过构建投影寻踪聚类模型对其进行改进,并应用于刘家坪电站厂房下游河流整体水文情势改变的评价,分析刘家坪电站运行对下游河流水文条件及生态系统的影响,为开展生态调度、提出生态修复方案提供科学依据。

1 IHA 评价指标体系

河流是一个动态的流水系统,经过长期的生境演变,河流物种适应了天然水流流态形成的生态环境系统。水流的变化特征,即河流水文情势,决定并影响河流系统的物质循环、能量过程、栖息地状况和生物相互关系。譬如,高流量可刺激鱼类的产卵;洪水漫延为污染物质的输移提供有利条件^[11]。

Richter 等^[4]正是考虑到河流水文要素与生态系统之间的上述响应关系,将日流量资料转换为一系列与生态相关的、具有代表性的指标,囊括流量大小幅度、时间、频率、延时和变化率等5个方面,共33个因子(表1),来评价水文情势的变化程度。

2 评价方法

2.1 RVA 法基本原理

RVA 法是 Richter 等在 IHA 的基础上,通过对比不同时段河流水文指标的改变程度,以自由流量下各指标的平均值加减标准差或以75%和25%频率值作为上下限(即 RVA 阈值),定量计算河道水文整体变异度,进而评估河流健康状况,确定河流管理年度目标^[3]。本文以频率75%和25%作为上下限,计算单项指标的变异度。

Richter 等^[4]建议的水文变异度定义如下:

$$D_i = \frac{N_{io} - N_{ie}}{N_{ie}} \times 100\%$$

其中

$$N_{ie} = rN_T$$

(1)

式中: D_i ——第 i 个 IHA 的水文变异度; N_{io} ——观测年数,指受影响后第 i 个 IHA 落在 RVA 目标内的年数; N_{ie} ——预期年数,指受影响后第 i 个 IHA 预期落在 RVA 目标内的年数; r ——受影响后第 i 个 IHA 落在 RVA 阈值内的比例; N_T ——受影响后的总年数。

表 1 IHA 指标参数及其生态影响
Table 1 IHA index parameters and their impacts on ecology

IHA 指标	参数	指标编号	与生态系统的响应关系
月均流量	各月流量均值或中值	1 ~ 12	1. 满足水生生物栖息地需水;2. 植被土壤湿度需求; 3. 陆地生物的需水要求;4. 动物的迁徙需求; 5. 水温、含氧量、光合作用的影响
年均极值	年均 1 d、3 d、7 d、30 d、90 d 最小流量 年均 1 d、3 d、7 d、30 d、90 d 最大流量 零流量日数 基流指数;7 d 最小流量/年均流量	13 ~ 24	1. 满足植被扩张;2. 生物体忍耐性平衡; 3. 河渠地形塑造;4. 自然栖息地物理条件培养; 5. 河流和漫滩的养分交换; 6. 湖、池塘、漫滩的植物群落分布的需求
年极值出现时间	年最大流量出现时间 年最小流量出现时间	25 ~ 26	1. 生物繁衍;2. 生物繁殖期的栖息地条件; 3. 物种的进化需要;4. 满足鱼类的洄游产卵
高低流量频率与历时	低流量谷地数 低流量平均持续时间 高流量洪峰数 高流量平均持续时间	27 ~ 30	1. 植物所需土壤湿度的频率与尺度; 2. 满足洪泛区与河流的泥沙运输、渠道结构、底层扰动等需要; 3. 支持水鸟栖息地
流量变化率与频率	流量平均增加率 流量平均减少率 流量逆转次数	31 ~ 33	1. 植物干旱压力; 2. 低速生物体干旱胁迫; 3. 岛、漫滩的有机物沉积

为了量化水文指标的改变程度,Richter 等^[4]认为可以将 D_i 简单地分为 3 个级别: D_i 绝对值在 0 ~ 33% 之间属于无改变或低度改变; D_i 绝对值在 33% ~ 67% 之间属于中度改变; D_i 绝对值在 67% ~ 100% 之间属于高度改变,这也是目前用此法判断河流水文情势改变程度的通用标准。

Shiau 等^[12]进而提出了基于三等级法的整体变异度 D_0 计算方法:

a. 若所有指标均属于低度改变,则整体改变度为它们的算术平均值,即

$$D_0 = \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i$$

(2)

b. 若 33 个指标的改变度均小于 67%,且至少有 1 个大于或等于 33%,则整体改变度的计算公式为

$$D_0 = 33\% + \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{N_m} (D_i - 33\%)$$

(3)

式中: N_m ——中度改变的个数。

c. 若所有指标至少有 1 个属于高度改变,则整体改变度的计算公式为

$$D_0 = 67\% + \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{N_h} (D_i - 67\%)$$

(4)

式中: N_h ——高度改变的个数。

该方法考虑了各个指标之间的差异,但轻视了大多数中、低度指标的影响,因为变异度最大的指标不一定对生态系统的影响程度也最大。显然,用三等级法量化河流的整体变异度会与实际情形有所出入。

对此,Shiau 等^[13]提出了一种新的计算河流整体变异度的方法:

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2}$$

(5)

该方法虽在一定程度上统筹考虑了所有变异指标对整体变异度的影响,但不能区分各项指标的相对重要性,难以为后续的水库生态调度提供指导。

2.2 PP-RVA 法

为了更加客观地融合 33 个 IHA 指标,黎云云等^[14]提出从主观和客观两方面综合赋予各指标生态权重,以加权平均的方式计算整体变异度。但 IHA 涉及的指标众多,水文要素对生态环境的响应关系较为复杂,在缺乏生态资料的地区难以直接根据经验准确确定各指标的主次关系,且未考虑各个指标相关性^[15],因此不宜采用主观权重法。而投影寻踪法在分析非正态总体分布高维数据方面具有探索性,因此本研究构建投

影寻踪聚类模型对常规 RVA 法进行改进,来评价河流水文情势的综合变异度。

2.2.1 投影寻踪聚类模型

投影寻踪法(project pursuit, PP)的基本思想是以某种组合将高维数据投影到低维(1~3 维)子空间上,寻找出能反映数据特征的投影,实现在低维空间上对其内在联系的分析。同时,它很好地排除无关投影方向的干扰,容易根据投影向量中各个分量的相对大小知道单项指标对整体评价的影响程度,避免了人为确定指标权重的不确定性和主观性。

PP 模型的建模过程包括数据归一化处理、构造并优化投影指标函数和等级评价几部分,具体做法参见文献[16]。

2.2.2 PP-RVA 法计算步骤

基于 PP-RVA 法评价河流整体变异度的技术路线如图 1 所示,具体步骤如下:

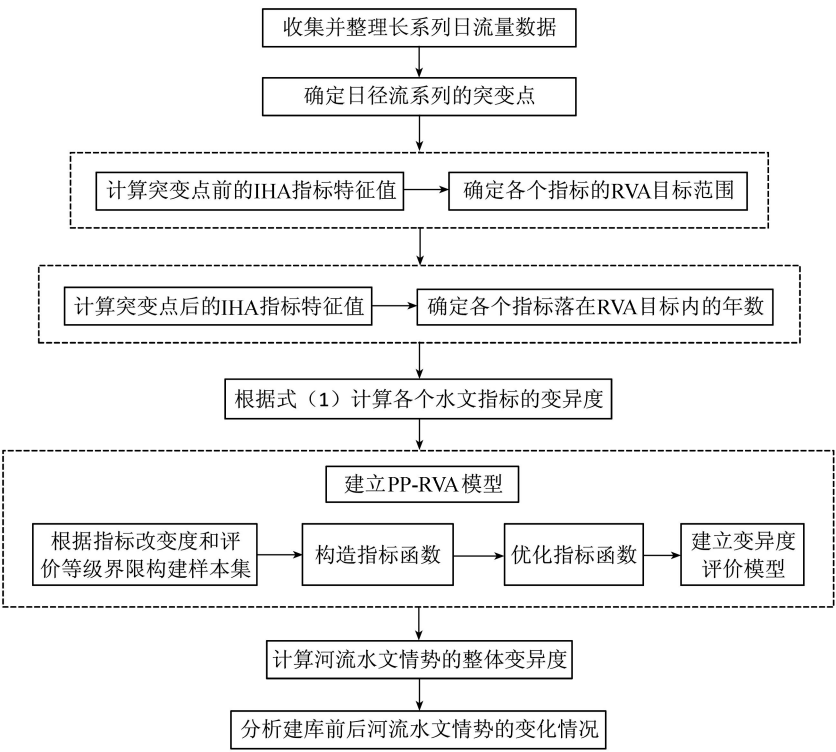


图1 PP-RVA 法计算流程
Fig.1 Flow chart of the PP-RVA method

- a. 确定日径流系列的突变点,一般为水利工程建成或其他受人类活动影响明显的年份。突变点之前的年份构成天然径流序列,之后的为受影响后的径流序列。
- b. 由天然径流序列计算建库前未受干扰的 IHA 指标值,确定各个水文参数的 RVA 目标范围;根据变化后的日流量资料计算建库后的 IHA 指标特征值,根据式(1)计算受影响后各个水文指标的变异度。
- c. 采用投影寻踪法聚类模型计算整体变异度,综合评价建库前后河流水文情势的变化情况。

3 实例研究

3.1 研究区概况

刘家坪水利枢纽位于湖南省溆浦县,地处东经 110°36′~110°42′、北纬 27°26′~27°38′,大坝位于刘家坪河上游,电站厂房位于大坝下游 3 km 处,是一座以发电为主,兼具灌溉、防洪等综合效益的中型水利工程。刘家坪河系溆水二都河的一级支流,发源于湖南省凉风界,由东南呈之字形流向西北,经溆浦县的龙庄湾、刘家坪在葛竹坪镇注入二都河,全流域面积 72 km²,河长 30 km,坡降较大。

刘家坪电站为高水头引水式开发,于 1984 年 10 月开工新建,1987 年蓄水发电,2014 年完成增效扩容改造,改造后保证出力 7500 kW,总装机容量为 18900 kW。电站水库正常蓄水位 1180.0 m,总库容 3365 万 m³,

控制集雨面积 53. 63 km²,具有多年调节性能。坝址多年平均流量 1. 51 m³/s,根据坝址处多年平均径流过程,可将全年划分为枯水期(11 月至次年 1 月)、平水期(2—5 月、8—10 月)和丰水期(6—7 月)。

3.2 IHA 指标计算

刘家坪电站存在明显的建库前后分界点。需要说明的是,Poff^[17]认为如果水文时间序列大于 20 a,就能基本消除年际气候变化等因素对水文指标计算结果的影响。然而,由于建库前后一段时期资料保存不完善,难以收集到完整的日径流数据,虽不能完全反映河流水文情势的改变程度,仍可以为河流水文情势的变化提供一定的参考。故以建库前(1960—1981 年)、建库后(1999—2013 年)作为天然径流和建库后水文序列,计算各项 IHA 指标的水文变异度,见表 2,指标的组成见表 3。

3.3 基于 PP 聚类模型的整体变异度计算

按照前述步骤,用 Matlab 编写 PP 模型程序,由于各项指标具有相同的物理意义,且变化范围都是 0~1,不必进行归一化处理。最终求得最佳投影向量见表 2,低、中、高改变度对应的投影值分别为 1. 8390、2. 7337、5. 5726,刘家坪电站建库后厂房下游河流整体变异度投影值为 4. 6380。

将低、中、高改变度所处的范围及其对应的投影值进行拟合,可建立变异度评价模型为

$$y^* = 0. 1794z^* \tag{6}$$

式中: y^* ——变异度; z^* ——变异度投影值。

将河流整体变异度投影值 $z^* = 4. 6380$ 代入式(6)中,求得对应的 $y^* = 83. 21\%$,为高度改变。再分别用三等级法和式(5)计算出来的河流整体变异度为 86. 23% 和 82. 26%,此模型计算结果介于两者之间,也符合实际情况,证明了此模型的有效性和实用性。

最佳投影方向各分量的大小实质上反映了各指标对河流整体变异度的贡献度,如图 2 所示。

刘家坪电站于 2014 年完成增效扩容改造,本应对 2014 年之后厂房下游河道径流进行水文变异度分析,鉴于仅有 2 个年份的资料,采用 RVA 法误差较大,笔者只对 IHA 中的各月平均流量指标做一对比分析,结果如图 3 所示。不难看出,增效扩容改造后的机组调节能力更强,导致其厂房下游河道径流过程与天然状况的偏差更大,再次说明迫切需要开展刘家坪电站的生态调度研究。

3.4 成果合理性分析

本文提出的 PP-RVA 法,全面考虑了每个水文指标对河流水文情势的影响程度,得到刘家坪电站厂房下游河流为高度改度。该评价结果的合理性分析如下:

a. 从表 3 可以看出,发生高度改变的指标最多,为 25 个,占比达到 75. 76%,发生低度和中度改变的指标均

表 2 刘家坪电站厂房下游河流 IHA 指标参数计算结果

Table 2 Calculating results of IHA parameters for the downstream of Liujiaping Hydropower Station

水文指标	水文变异度 $D_i/\%$	改变 程度	最佳投影 方向分量	贡献度 排序
1 月流量	-88. 89	高	0. 1735	21
2 月流量	-77. 78	高	0. 1540	23
3 月流量	-50. 00	高	0. 1187	28
4 月流量	-77. 78	高	0. 1494	24
5 月流量	-100	高	0. 2246	1
6 月流量	-100	高	0. 2062	9
7 月流量	-70. 00	高	0. 2067	8
8 月流量	-22. 22	低	0. 0897	31
9 月流量	-66. 67	高	0. 1734	22
10 月流量	-100	高	0. 2072	7
11 月流量	-100	高	0. 2078	4
12 月流量	-100	高	0. 1805	18
年均 1 d 最小流量	-100	高	0. 1965	12
年均 3 d 最小流量	-100	高	0. 1849	17
年均 7 d 最小流量	-100	高	0. 2079	3
年均 30 d 最小流量	-100	高	0. 1884	15
年均 90 d 最小流量	-88. 89	高	0. 1767	19
年均 1 d 最大流量	-100	高	0. 1972	11
年均 3 d 最大流量	-100	高	0. 1925	14
年均 7 d 最大流量	-100	高	0. 2076	5
年均 30 d 最大流量	33. 33	中	0. 1325	25
年均 90 d 最大流量	0	低	0. 0684	33
零流量天数	-6. 67	低	0. 0889	32
基流指数	-100	高	0. 2032	10
最小流量出现时间	55. 56	中	0. 1212	26
最大流量出现时间	-88. 89	高	0. 185	16
低流量谷地数	-100	高	0. 1956	13
低流量持续时间	-100	高	0. 2073	6
高流量洪峰数	-100	高	0. 2091	2
高流量持续时间	-83. 33	高	0. 1767	20
流量平均增加率	0	低	0. 1035	30
流量平均减少率	-44. 44	中	0. 1211	27
流量逆转次数	-44. 44	中	0. 1170	29

表 3 刘家坪电站厂房下游河流 IHA 指标
不同改变等级所占比例

Table 3 Proportion of different variability of IHA index for the downstream of Liujiaping Hydropower Station

改变等级	指标个数	所占比例/%
低度改变	4	12. 12
中度改变	4	12. 12
高度改变	25	75. 76

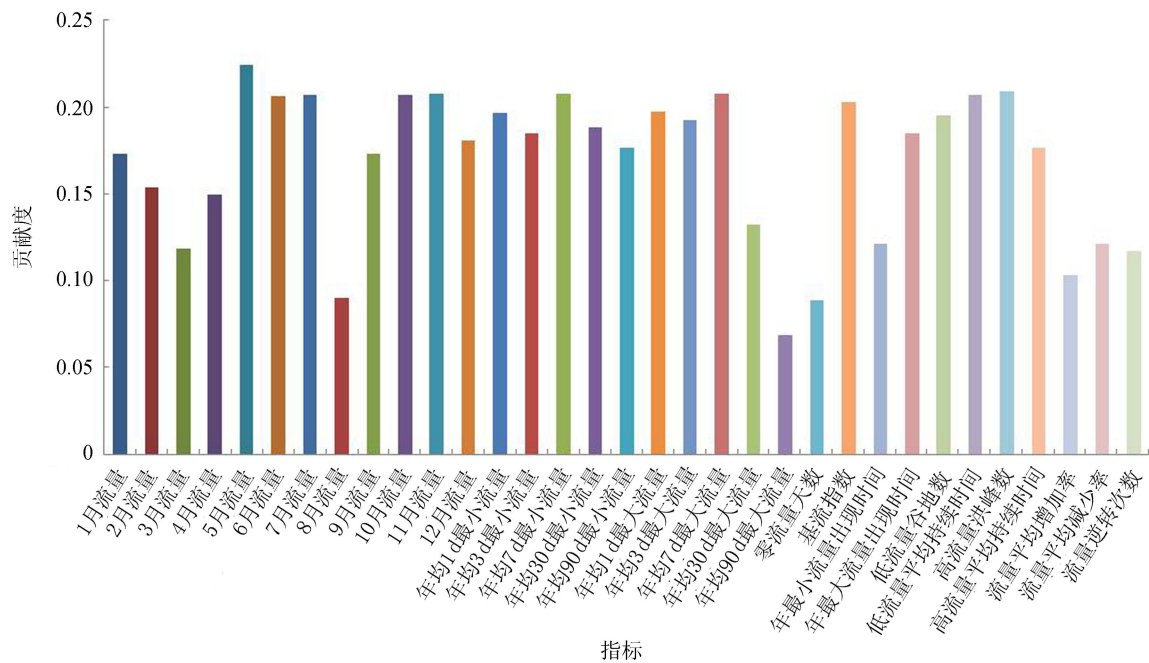


图2 各指标对整体变异度的贡献度柱状图

Fig.2 Contribution histogram of each index to overall variability

为4个,表明刘家坪电站的运行对其下游河流水文情势造成了很大的改变,已严重影响到河流的生态环境。

b. 从各月平均流量的变异度来看,除8月外其他月份平均流量都发生了高度改变,特别是5月、6月、10月、11月、12月的改变度达到了100%,属于极度改变,这主要与刘家坪电站当前采取“蓄丰补枯”的运行方式相关。同时刘家坪电站水库为龙头水库,库容系数为0.65,具有多年调节性能,能根据发电需求对天然径流进行彻底的再分配,即使是在汛期洪峰来临的时候,仍然有很大的库容可以用来拦蓄洪峰,导致最小1d、3d、7d、30和90d流量,最大1d、3d、7d、30d流量,以及基流指数、年最大流量出现时间、每年低流量谷地数及持续时间、每年高流量洪峰数及持续时间的改变度都较大。

c. 从图2可以看出,5月平均流量、高流量数、最小7d流量的贡献度最大,说明后续开展生态调度需特别注意:不宜为了形成对后续发电有利的高水头条件,而盲目在汛期初期拦蓄洪水;需通过合理调度适当造成人造洪峰脉冲,以满足河道鱼类的繁衍需求;重视河道基流对生态系统的作用。

4 结 语

针对RVA方法的缺陷,提出基于投影寻踪聚类模型的PP-RVA法,评价建库前后河流水文情势的改变程度,同时可以得到各指标对整体变异度的贡献率,从而有针对性地开展生态调度实践。将此方法应用于评价刘家坪电站运行对其下游河道水文情势的影响,得到整体变异度为83.21%,为高度改变,并结合刘家坪电站的特性和运行方式进行了合理性分析。

本文提出的PP-RVA法通用性较强,但所涉指标过多,后续研究应注重收集流域的生态资料,深入分析河流的生态水文特点,采用主成分分析法等对指标进行筛选,再进行评价,得到更具流域特色的成果。

参考文献:

[1] 刘贵花,朱婧瑄,熊梦雅,等. 基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究[J]. 水文, 2016, 36(1): 51-

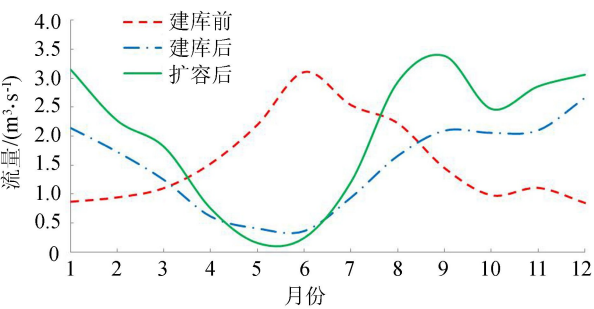


图3 建库前、建库后及增效扩容后各月平均流量过程
Fig.3 Average flow of each month before and after completing the reservoir construction and after expansion

57. (LIU Guihua, ZHU Jingxuan, XIONG Mengya, et al. Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at Meigang station of Xinjiang River[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(1): 51-57. (in Chinese))
- [2] 杨娜, 梅亚东, 尹志伟. 建坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进[J]. 长江流域与资源环境, 2010, 19(5): 560-565. (YANG Na, MEI Yadong, YIN Zhiwei. Impact assessment of damson the flow regime of lower by improved RVA[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(5): 560-565. (in Chinese))
- [3] 官云飞, 黄显峰, 方国华, 等. 基于 RVA 框架的河流适宜生态环境需水研究[J]. 中国农村水利水电, 2014 (1): 105-110. (GUAN Yunfei, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Research on river eco-environment water requirement based on RVA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014 (1): 105-110. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] MAINGI J K, MARSH S E. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(1): 53-79.
- [6] 张洪波, 王义民, 黄强, 等. 基于 RVA 的水库工程对河流水文条件的影响评价[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 262-267. (ZHANG Hongbo, WANG Yimin, HUANG Qiang, et al. Effects of reservoir engineering based on RVA upon river flow regime[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 262-267. (in Chinese))
- [7] 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. (DUAN Weixin, GUO Shenglian, WANG Jun. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang station[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(1): 120-130. (in Chinese))
- [8] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异性范围法 (RVA) 的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1151-1155. (SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1151-1155. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(3): 189-196. (in Chinese))
- [11] 陈翔, 赵建世, 赵钢铁, 等. 发电调度对径流情势及生态系统的影响分析:以小湾,糯扎渡水电站为例[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 36-43. (CHEN Xiang, ZHAO Jianshi, ZHAO Tongtiegang, et al. Effects of hydropower reservoir operation on natural flow regime and ecosystem: a case study of Xiaowan and Nuozhadu dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 36-43. (in Chinese))
- [12] SHIAU J T, WU F C. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(5): 395-404.
- [13] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and inter annual variability of the natural flow regime[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): 813-816.
- [14] 黎云云, 畅建霞, 雷江群. 改进 RVA 法在河流水文情势评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 211-218. (LI Yunyun, CHANG Jianxia, LEI Jiangqun. Application of improved RVA method in assessment of river hydrological regime[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2015, 43(10): 211-218. (in Chinese))
- [15] 周毅, 崔同, 高满, 等. 考虑不同水文年及 IHA 指标相关性的水文特征评估方法[J]. 水文, 2017, 37(2): 20-25. (ZHOU Yi, CUI Tong, GAO Man, et al. A new method to assess hydrological regime alterations considering hydrological year types and correlation among IHA[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(2): 20-25. (in Chinese))
- [16] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of the status quo of the city water ecological civilization based on projection pursuit method[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 117-122. (in Chinese))
- [17] POFF N. A hydro geography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependence in some hydrological descriptors[J]. Freshwater Biology, 1996, 36(1): 71-79.