

基于改进变权物元可拓模型的绿色水电评价研究

高亚琴¹, 刘国东²

(1. 四川大学工程设计研究院, 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 基于国内外绿色水电指标体系及评价方法的相关研究, 针对流域水电梯级开发环境保护特点和水电工程全生命周期管理, 本文构建了3个层次且涵盖河流健康状况、环境管理和社会经济效益3方面的绿色水电综合评价指标体系, 建立了绿色水电等级评定的改进的变权物元可拓模型. 我们选择大渡河上已建成且投产运行时间较长的深溪沟水电站作为典型代表电站进行绿色水电实证分析, 根据收集调查的基础数据计算得出各评价指标的得分, 再运用改进变权物元可拓模型对该电站的绿色水电等级进行评定, 并进一步对评价指标的敏感性进行分析, 验证了所建绿色水电指标体系和评价模型的适用性和有效性. 依据绿色水电评价分析成果, 我们需要对流域水电开发环境管理进行优化完善, 以进一步提高绿色水电评价等级, 推进流域水电项目的健康可持续开发.

关键词: 绿色水电; 指标体系; 评价模型

中图分类号: X321 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.063003

Research on green hydropower evaluation based on improved matter-element extension model with variable weight

GAO Ya-Qin¹, LIU Guo-Dong²

(1. Engineering Design and Research Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on related researches on the index system and evaluation approach of green hydropower at home and abroad, with respect to the characteristics of cascade hydropower development environmental protection in river basin and the life cycle management of hydropower projects, this study constructed a three-tiered comprehensive green hydropower evaluation index system comprising river health, environment protection and social economy, established an improved matter-element extension model with variable weight for green hydropower rating. This study selected Shenxigou hydropower station which has been built and operated for a long time as the typical hydropower station for empirical analysis. We obtained the score of each evaluation index by computing the data which have been collected and investigated, then utilized the improved matter-element extension model with variable weight to assess green hydropower grade of this power plant, and then analyzed the sensibility of the evaluation index, thus having verified the applicability and effectiveness of this index system and evaluation model. According to the analysis results of green hydropower evaluation, it is necessary to optimize and improve the environmental management of hydropower development in the basin, so as to further improve the evaluation

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 四川省环境工程评估中心科研项目(15H0658)

作者简介: 高亚琴(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向为水电开发环境保护. E-mail: 34327781@qq.com

通讯作者: 刘国东. E-mail: liugd988@163.com

level of green hydropower and promote the healthy and sustainable development of hydropower projects in the basin.

Keywords: Green hydropower; Index system; Evaluation model

1 引言

丰富的水电资源为中国近 50 年来水电的快速发展提供了前所未有的优势和机遇,但是,水电资源给社会经济带来效益的同时,也对社会及环境造成一些负面影响^[1-5]. 流域梯级水电开发改变了河流天然生境,生态环境影响逐步显现.“绿色水电”将可持续发展理念引入水电开发过程中,重点关注水电项目对河流生态系统功能及结构的影响,以实现经济与资源、环境的可持续发展^[6]. 瑞士于 2001 年建立了绿色水电认证,基于水文特点、河流连通、河道形态、生境和动植物群落等 5 个方面来评估河流生态系统. 2004 年,美国建立了低影响水电的认证制度,基于河道水流、水质、鱼道和鱼类保护、濒危物种保护、流域保护、文化资源保护、公共娱乐功能和未被建议拆除等 8 个方面构建了一整套的认证程序. 为确保水能资源能够实现理想的可持续开发运用,需要在环境友好、经济可行等多个角度积极开展探索,构建配套的规范的评估体系和制度. 基于上述需求, IHA (International Hydropower Association) 在 2006 年颁布了《水电可持续性指南》和《水电可持续性评价规范》,从规划、设计、建设、运行四个阶段,考虑环境、社会和经济三方面的因素,目的为判断水电建设项目的可持续状态,以指引后续水电企业管理,加快国际水电开发的可持续发展^[7]. 在此基础上, IHA 还于 2018 年 7 月推出了一种新的水电可持续发展环境、社会和治理差距分析工具 (HESGTool)^[8]. 此外,加拿大、挪威等国家也积极推进相关研究并开展了试点工作^[9].

我国对绿色水电研究的起步相对较晚,2012 年由生态环境部发布了《关于进一步加强水电建设环境保护工作的通知》,要求研究和建立‘绿色水电’指标体系和认证制度. 此外,刘恒等^[10]按照系统的层次等级特征,结合河流体系的组成、功能等,综合 PSR(压力-状态-响应)的分析模型,建立了含有压力、状态、响应因子的评估模型,构建的指标体系分为 4 层,但未给出具体的评价指标和评价标准. 禹雪中^[11]创建了含有水文特征、河道形态、河道连通度、生物群落、水环境、生境和河流自然景观等 7 个方面的绿色水电指标体系. 代成良等^[6]研究

绿色水电工程建设规划的概念和内容,提出了包括施工期和运行期的规划指标体系和规划的基本方法. 崔振华等^[12]在研究过程中,将生态、河流与绿色水电等三方面内容结合起来,创建了绿色水电项目总体评估框架. 我国于 2017 年颁布的《绿色小水电评价标准》,针对总装机 50 MW 及以下的已建小型水电站,其部分评价指标基于单个小水电运行期内 3 年而未流域层面全阶段统筹考虑. 综上所述,目前我国还没有建立综合系统的绿色水电评价指标体系和评价机制,对于新建和已运行的水电项目,还主要是从生态环境影响方面进行评估. 此外,对水电项目的规划、设计、建设及运行初期进行评估,尚未涵盖水电项目的全生命周期,且在水生生生态、河流形态等重要的河流生态环境影响方面,还没有建立相应的评价指标和标准.

本文在国内外绿色水电研究的基础上,针对流域水电梯级开发环境保护特点和水电工程全生命周期管理,构建绿色水电综合评价指标体系,涵盖河流健康状况、环境管理和社会经济效益等三方面,建立了客观性的改进变权物元可拓评价模型,选择西南山区典型河流大渡河流域上具有典型代表性的深溪沟水电站开展了案例分析,验证所建指标体系和评价模型的有效性. 大渡河为长江上游岷江水系最大支流,大渡河干流水能资源丰富,目前大渡河干流规划的 28 级电站中,已建成 11 级电站^[13]. 研究结果还将为今后流域水电开发环境管理与绿色认证提供科学依据.

2 方法与数据来源

2.1 绿色水电指标体系

流域生态环境系统是一个复杂、长期的过程,需要从流域层面统筹和水电开发全阶段考虑. 本文构建了 3 个层次的绿色水电评价指标体系,第一层次为目标层(A),即绿色水电. 第二层次为准则层(B),包括环境管理、河流生态环境健康状况和社会经济效益,其中,环境管理涵盖水电开发的规划、设计、施工和运行阶段,已有研究指出,为了实现绿色水电的目标,从生命周期角度开展环境、经济和社会管理是水电工程可持续发展的一个重要的方面^[14]. 有效成熟的全过程、动态环境管理可大大降

低水电开发可能产生的负影响, 确保水电工程的可持续健康发展; 河流生态环境健康状况主要包括河流水文特征、河道形态、河道连通程度、水环境、生物多样性、生境和河流自然景观等方面; 社会经济

效益包括电站对社会发展的影响及其产生的经济效益, 第三层次为指标层(C), 为可直接度量水电绿色程度的指标, 详见表 1.

表 1 绿色水电评价指标体系和计算方法表

Tab. 1 System and computing approach of green hydropower evaluation indexes

目标层	准则层	指标层	指标计算方法
[B1] 环境 管理	[C11]	环境管理机制	定性分析
	[C12]	环境保护措施制定及实施	定性分析
	[C13]	施工期“三废”及噪声平均达标率/%	施工监测期“三废”及噪声排放达标次数/监测次数×100%
	[C14]	环境纠纷及污染事故数	根据调查统计
	[C15]	过程管理的有效性	定性分析
	[C16]	科学研究	定性分析
[A] 绿色 水电	[C21]	生态需水量比率/%	生态需水量比率=月平均流量/年平均流量(Tennant 法)
	[C22]	库区水质综合污染指数	库区水质综合污染指数 $P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, P_i = \frac{C_i}{S_i}$, 其中: C_i 为污染物实测浓度; S_i 为污染物相应的标准值. 评价项目选取 pH、溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、氨氮、挥发酚、汞、铅、石油类共计 9 项
	[C23]	库区综合营养状态指数(TLI)	库区综合营养状态指数 $TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_{kj} \cdot TII(j) P_i = \frac{c_i}{s_i}$, 其中: $TLI(\sum)$ 为综合营养状态指数; $TII(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重
	[C24]	下泄水水温变化及气体过饱和影响范围及程度	定性分析
	[C25]	排沙比/%	排沙比=出库泥沙总量/入库泥沙总量×100%
	[C26]	为增加河道连通度而采取的措施	定性分析
	[C27]	鱼类重要生境面积变化率/%	鱼类重要生境面积变化率 = $\frac{S_{建库前} - S_{建库后}}{S_{建库前}} \times 100\%$
	[C28]	鱼类种类变化率/%	鱼类种类变化率=运行后鱼类种类减少的数目/运行前鱼类种类数目×100%
	[C29]	植被覆盖率变化率/%	植被覆盖率变化率 = $\frac{R_{V前} - R_{V后}}{R_{V前}} \times 100\%$, $R_V = \frac{S_{植}}{S_{总}}$, 其中: R_V 为植被覆盖率; $S_{植}$ 为流域植被覆盖面积; $S_{总}$ 为流域土地面积
[C210]	景观多样性指数变化率	景观多样性指数变化率 $\alpha = \frac{SHDI_{建库后} - SHDI_{建库前}}{SHDI_{建库前}}$, $SHDI = - \sum_{i=1}^n (P_i \cdot \ln P_i)$, 其中: $SHDI$ 为景观多样性指数; P_i 为生态系统类型 i 在景观中的面积比例, n 为景观类型数量	
[C31]	公众环境满意度/%	随机调查工程评价区内居民, 让被调查者在满意、较为满意、一般、不满意、很不满意中选择, 选择满意移民数/被调查总数即为公众环境满意度	
[B3] 社会 经济 效益	[C32]	公共服务改善度/%	公共服务改善度=电站新建道路长度/工程所在县原有道路长度×100%
[C33]	水资源利用与工程设计要求符合情况	定性分析	
[C34]	经济内部收益率/%	经济内部收益率, 经济内部收益率是反映电站对国民经济贡献的相对指标, 它是使电站计算期内的经济净现值累计等于零时的折现率	
[C35]	电站投资利润率/%	电站资金利润率=报告期累计实现利税总额/(固定资产净值平均余额+流动资产平均余额)×100%	

2.2 评价模型

本文引入改进变权物元可拓模型作为评价模型, 以实现水电站绿色等级的评定. 物元可拓模型的基础是物元理论, 在此基础上结合可拓集合论, 建立了理论框架. 该模型建立了经典域、节域以及评价等级, 基于客观数据对待评物元与相关评级等级的关联度进行计算, 从而得出对象的评价等级. 然而, 该模型有一定的不足, 该模型使用关联度来实现等级评定, 但关联度的基础是最大隶属原则, 无法体现待评对象的模糊性, 引起信息的损失, 进一步导致评价结果出现较大的不确定性. 因此, 需要对该模型的最大隶属度评判原则进行改进^[15].

本文使用贴近度准则计算等级贴近度来替代最大隶属度原则. 此外, 为避免确定指标权重过程中的主观因素的影响, 基于变权理论来确定各评价指标的权重. 因此称之为改进变权物元可拓模型, 其基本过程如下.

(1) 明确问题的经典域、节域以及待评物元. 令

$$R_j = (P_j, C_i, V_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & v_{1j} \\ & c_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & \langle a_{1j}, b_{1j} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{2j}, b_{2j} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{nj}, b_{nj} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, P_j 为第 j 个评价等级; c_1, c_2, \dots, c_n 为 P_j 的 n 个不同特征; $v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}$ 分别是 P_j 对应于 c_1, c_2, \dots, c_n 的取值范围, 即经典域; a_{1j} 和 b_{1j} 为 v_{1j} 的取值边界. 令

$$R_p = (P, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, P 为评价对象等级的全体; $v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn}$ 分别是 P 对应于 c_1, c_2, \dots, c_n 的取值范围, 即节域. 令

$$R_0 = (P_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, R_0 为待评物元; v_1, v_2, \dots, v_n 分别是 P_0 关于 c_1, c_2, \dots, c_n 的实测数据.

(2) 归一化处理.

由于绿色水电站不同指标的单位不同, 对绿色水电站指标 R_j 进行归一化处理, 可得

$$R_j^* = (P'_j, C_i, V'_{ij}) = \begin{bmatrix} P'_j & c_1 & \langle \frac{a_{j1}}{b_{p1}}, \frac{b_{j1}}{b_{p1}} \rangle \\ & c_2 & \langle \frac{a_{j2}}{b_{p2}}, \frac{b_{j2}}{b_{p2}} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle \frac{a_{jn}}{b_{pn}}, \frac{b_{jn}}{b_{pn}} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

对待评价水电站 R_0 进行归一化处理, 可得

$$R'_0 = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \frac{v_1}{b_{p1}} \\ & c_2 & \frac{v_2}{b_{p2}} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \frac{v_n}{b_{pn}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

各指标权重基于变权理论进行计算, 变权理论的基础是因素空间理论, 其指出: 设 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素状态变量, $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 为因素常权变量, $S(X) = (S_1(X), S_2(X), \dots, S_n(X))$ 为状态变权向量, 则变权向量 $W(X) = (\omega_1(X), \omega_2(X), \dots, \omega_n(X))$ 可用 W 和 $S(X)$ 的归一化的阿达玛乘积表示, 即

$$\omega_i(X) = \frac{\omega_i S_i(X)}{\sum_{k=1}^n \omega_k S_k(X)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中, $S_i(X) = e^{\alpha(x_i - \bar{x})}$, α 为变权因子, 当 $\alpha > 0$ 时, 产生的是 n 维激励型状态变权向量, 体现的是对因素之间均衡性的要求相对较低; 当 $\alpha < 0$ 时, 产生的是 n 维惩罚型状态变权向量, 体现的是对各因素有一些均衡性要求; 而当 $\alpha = 0$ 时, 这一模型成为了普通的常权模型.

为降低计算指标权重时主观因素的影响作用, 并体现所有指标在评价过程中的平等性, 研究将各指标的因素常权变量取为相等. 此外, 为体现被评价的对象在评价过程中主动参与的情况, 状态变权向量则由评价指标对应的客观实测数据以及其对应的节域来计算^[16], 从而确定指标权重的公式为

$$\omega_i(X) = \frac{\exp[\alpha(d_{i\max} - d_{i\min})]}{\sum_{i=1}^n \exp[\alpha(d_{i\max} - d_{i\min})]}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, $d_{\max} = \max \{ |v_i - a_{ip}|, |b_{ip} - v_i| \}$, $d_{\min} = \min \{ |v_i - a_{ip}|, |b_{ip} - v_i| \}$, 为了反映出各指标的相对平等性以及均衡性, 取 $\alpha = -1$.

(3) 构建贴近度函数, 并计算评价对象的贴近度值.

已有研究^[17]对使用贴近度准则而不是最大隶属度准则展开了相应的理论分析, 根据该分析中的非对称贴近度公式($p=1$)可得:

$$N = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D \omega_i \quad (8)$$

其中, N 指贴近度; D 是距离; ω_i 是权重.

进一步地, 待评价对象与某个等级相对应的贴近度则是

$$N_j(p_0) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D_j(v'_i) \omega_i(X) \quad (9)$$

其中, $D_j(v'_i) = \left| v'_i - \frac{a'_{ij} + b'_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2} (b'_{ij} - a'_{ij})$, 指归一化后的待评价对象 R'_0 与归一化的经典域之间的距离; $\omega_i(X)$ 是各指标所占的权重; n 是指指标的数量.

(4) 对象等级评定.

由 $N_j(p_0) = \max \{ N_j(p_0) \}$ 可以得出, 待评价对象属于 j' 等级. 令

$$\overline{N}_j(p_0) = \frac{N_j(p_0) - \min_j N_j(p_0)}{\max_j N_j(p_0) - \min_j N_j(p_0)} \quad (10)$$

可得

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \overline{N}_j(p_0)}{\sum_{j=1}^m \overline{N}_j(p_0)} \quad (11)$$

其中, j^* 是待评价对象 R_0 的等级变量特征值. 根据 j^* 的值可判断出待评价对象 R_0 在多大程度上倾向于相邻等级.

3 案例背景

绿色水电关注项目全生命周期对生态环境产生的影响, 而且更关注项目运行期, 在水电项目运行阶段, 必须认真落实流域的运行管理要求, 充分发挥水电站的经济效益和社会效益, 同时密切关注库区的生态问题, 做好生态恢复和治理工作保护, 这一阶段在水电绿色评价中具有重要意义^[18]. 因

此, 在进行绿色水电评价应用研究时, 应选择已建成且投产运行时间较长的典型代表电站进行实证分析. 深溪沟水电站为大渡河干流规划 28 个梯级的第 20 级电站, 依据深溪沟电站主要工程特性分析, 深溪沟水电站在大渡河干流梯级水电开发中具有代表性. 深溪沟水电站运行期间, 常年要承担 95 MW 发电基荷, 保证坝址处常年下泄流量不低于 327 m³/s, 既确保了坝址下游用水需求, 也满足了下游生态及景观用水要求. 依据深溪沟电站水文情势的分析, 深溪沟水电站的开发运行状况在大渡河流域梯级水电开发中具有典型性.

本文选择深溪沟水电站作为典型对其进行评价, 根据建立的评价指标体系, 收集了深溪沟水电站在各评价指标上的数据, 并依据收集调查的数据, 分析计算得出了各指标的得分. 其次, 本文运用改进变权物元可拓模型对深溪沟水电站的绿色水电等级进行了评定. 深溪沟水电站各指标得分见表 2.

4 结果与讨论

4.1 评价结果

各待评物元 R_0 与各等级的贴近度如下式.

$$N_1(p_0) = 1 - \frac{1}{21(21+1)} \sum_{i=1}^n D_1(v'_i) \omega_i(X) = 0.999\ 832 \quad (12)$$

$$N_2(p_0) = 1 - \frac{1}{21(21+1)} \sum_{i=1}^n D_2(v'_i) \omega_i(X) = 0.999\ 952 \quad (13)$$

$$N_3(p_0) = 1 - \frac{1}{21(21+1)} \sum_{i=1}^n D_3(v'_i) \omega_i(X) = 0.999\ 746 \quad (14)$$

$$N_4(p_0) = 1 - \frac{1}{21(21+1)} \sum_{i=1}^n D_4(v'_i) \omega_i(X) = 0.999\ 458 \quad (15)$$

$$N_5(p_0) = 1 - \frac{1}{21(21+1)} \sum_{i=1}^n D_5(v'_i) \omega_i(X) = 0.999\ 138 \quad (16)$$

通过待评物元 R_0 与各等级的贴近度值, 可以判断 $N_2(p_0) = \max \{ N_j(p_0) \} = 0.999\ 952$, $j = 1, 2, 3, 4, 5$. 进而, 可算得 $j^* = 2.2271 < 2.5$, $j^* = 2.2271 < 2.5$. 因此, 深溪沟水电站实测数据的绿色水电站等级为二级(良), 并且略微偏向于三级(中等).

表 2 深溪沟水电站绿色水电指标得分

Tab. 2 Evaluation index system and evaluation criteria of green hydropower

评价指标		评价等级及标准					深溪沟水电站指标得分	
目标层	准则层	指标层	优	良好	中等	较差		差
[B1] 环境管理	[C11]环境管理机制		规划、设计、施工、运行阶段均建立了流域性环境管理机构及管理制度	施工及运行阶段分别建立了单项工程环境管理机构及管理制度	施工阶段建立了单项工程环境管理机构,运行阶段无专职管理机构但制定了环境管理章程	施工阶段环境管理完全依托环境监理,运行阶段无专职管理机构但制定了环境管理章程	施工及运行阶段均无专职管理机构及管理制度	良
	[C12]环境保护措施制定及实施		从流域角度统筹制定了系统的环境保护措施体系,并严格执行“三同时”制度	针对单项工程,并适度考虑上下游相关因素制定了系统的环境保护措施体系,并严格执行“三同时”制度	仅针对单项工程制定环境保护措施体系,并严格执行“三同时”制度	仅针对单项工程制定环境保护措施体系,但未严格执行“三同时”制度	针对单项工程制定了环境保护措施体系,但措施体系不够完善,未严格执行“三同时”制度	良
	[C13]施工期“三废”及噪声平均达标率/%		≥99	[97, 99)	[95, 97)	[93, 95)	<93	≥99%
	[C14]环境纠纷及污染事故数		0	1	2~3	4~5	≥6	0
	[C15]过程管理的有效性		最佳	较好	一般	较差	无效	优
	[C16]科学研究		积极开展相关科研工作	积极开展要求的科研工作	开展了要求的科研工作	开展了部分要求的科研工作	未开展要求的科研工作	良
[A] 绿色水电	[C21]生态需水量满足率/%		≥60	[30, 60)	[20, 30)	[10, 20)	<10	24.20
	[C22]库区水质综合污染指数		<0.2	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.7)	[0.7, 1)	≥1	0.4
	[C23]库区综合营养状态指数(TLI)		[0, 20)	[20, 50)	[50, 60)	[60, 80)	[80, 100]	32.36
	[C24]下泄水水温变化及气体过饱和影响范围及程度		基本没有影响	影响程度轻微,范围有限	影响程度和范围一般	影响程度严重,范围广泛	影响程度和范围重大	良
	[C25]排沙比/%		[80, 100]	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)	93.70
	[C26]为增加河道连通度而采取的措施		最佳	较好	一般	较差	未采取措施或者措施无效	中
	[C27]鱼类重要生境面积变化率/%		[0, 20)	[20, 50)	[50, 60)	[60, 80)	[80, 100]	24
	[C28]鱼类种类变化率/%		[0, 5)	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	≥20	5.77
	[C29]植被覆盖率变化率/%		<5	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	≥20	-2.44
	[C210]景观多样性指数变化率		≥0	[-0.25, 0]	[-0.5, -0.25]	[-0.75, -0.5]	<-0.75	-0.016
[B3] 社会经济 效益	[C31]公众环境满意度/%		≥95	[85, 95)	[75, 85)	[65, 75)	<65	81
	[C32]公共服务改善度/%		≥8	[6, 8)	[4, 6)	[2, 4)	<2	0.92
	[C33]水资源利用与工程设计要求符合情况		一致	较为一致	基本一致	有所出入	不一致	优
	[C34]经济内部收益率/%		≥12	[10, 12)	[8, 10)	[6, 8)	<6	10.39
	[C35]电站投资利税率/%		≥15	[12, 15)	[9, 12)	[6, 9)	<6	0.435

4.2 敏感性分析

当评价中各指标的现实观测数据发生改变时, 指标的权重和评价对象的等级变量特征值 j^* 也会发生对应的改变. 本文计算了当指标的现实测量

值发生 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 40\%$ 、 $\pm 50\%$ 变化时, 如图 1 和图 2 中横坐标所示, 指标权重值和等级变量特征值的改变情况, 如图 1 和图 2 中纵坐标所示.

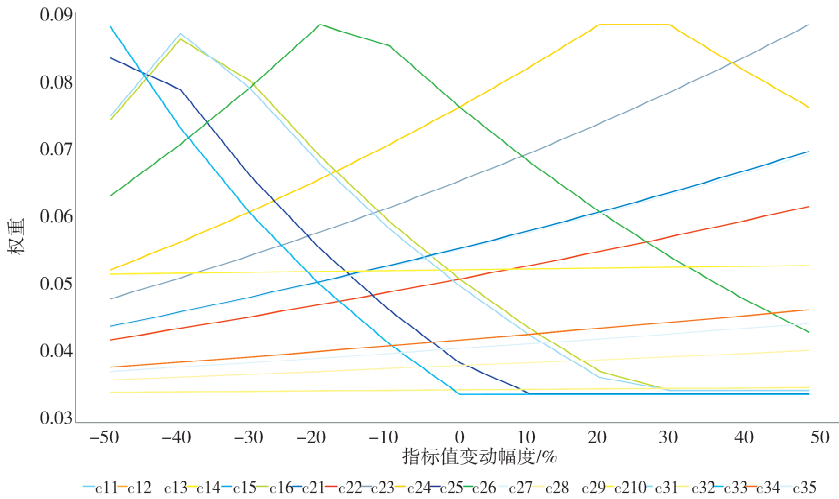


图 1 权重值根据指标值变化的结果

Fig. 1 Diagram of weight value changes with the variation of index

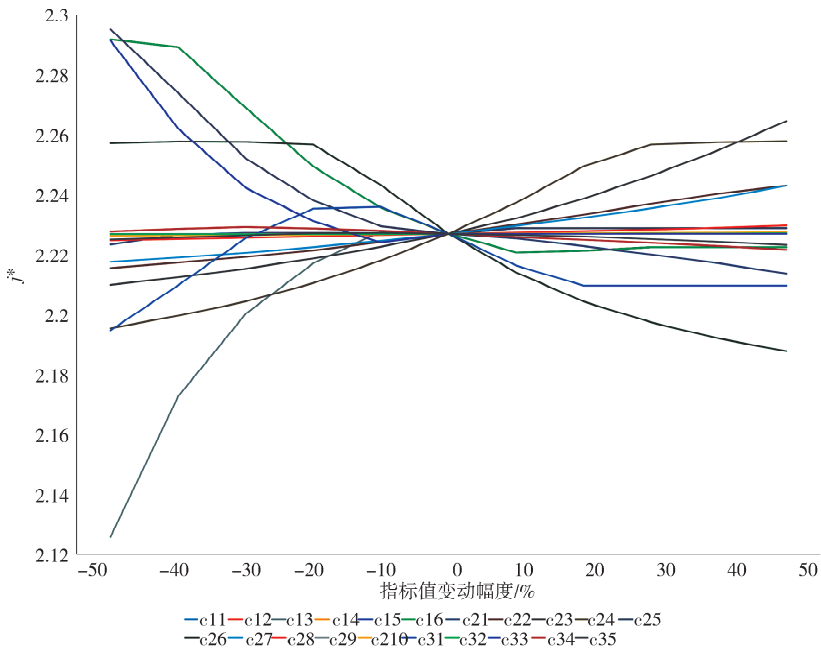


图 2 j^* 值根据指标值变化的结果

Fig. 2 Diagram of j^* value varies with index value

由图 1 可知, C33、C15、C13、C31、C11、C12、C16、C25、C26 这 9 个指标的权重随着指标实测值的变化而变化的幅度较大, 主要呈现先有较大幅度的下降, 然后维持平稳的趋势; C23、C24、C21、C27、C22 这 5 个指标的权重随着指标实测值的变化而变化的幅度较小, 主要呈现随指标值逐渐变大而变大的趋势; C34、C35、C28、C210、C32 这 5 个指

标的权重随着指标实测值的变化而变化的幅度非常微小, 有非常微小的上升趋势; C14、C29 这 2 个指标的变化对权重没有影响. 通过以上讨论可以发现, 指标权重大小会根据实测值的变化而产生相应的变化, 这反映出了评价对象在综合评价过程中的主动参与, 从而使得评价结果更能够反映出客观情况.

在图 2 中可以发现,跟随各指标实测值逐渐变大,对象的等级变量特征值 j^* 变化不大,幅度介于 2.12 和 2.3 间,这证明各指标实测值的变大没有对绿色水电站综合评价等级产生较为明显的影响,也表明未对其靠近两个与之相邻等级的程度产生较为明显的影响。

等级特征值 j^* 随着指标 C13、C11、C12、C16、C26 这 5 个指标的变化而变化幅度较大. 等级特征值 j^* 随着指标 C25、C15、C33、C24、C23、C31 这 6 个指标的变化而变化的幅度较小. 等级特征值 j^* 随着指标 C22、C27、C21、C34、C28、C35、C210、C32 这 8 个指标的变化而变化的幅度非常小. C14、C29 这 2 个指标的变化对 j^* 值没有影响。

特别地,当 C13、C11、C12、C16、C26 的实测值变化时,尽管绿色水电站评价的等级不变,但其引起的 j^* 值的大小变化较其余指标更大. 这说明有可能当 C13、C11、C12、C16、C26 的实测值变化时,绿色水电站评价的等级偏向会有所变化. 例如更偏向于第一等级或者更偏向于第三等级. 综上所述,相较于其他指标而言,指标 C13、C11、C12、C16、C26 是深溪沟水电站绿色水电站评价的较为敏感的指标。

4.3 绿色水电评价的分析讨论

从已有相关研究可以看出,虽然绿色水电评价得到了国内学界的关注和探讨,但是这些研究大多数仅对绿色水电评价的某些单一方面或单一阶段进行评价,没有综合考虑多方面以及水电站开发多阶段的影响因素,缺乏一个较为综合的绿色水电评价的指标体系. 本文针对流域水电梯级开发环境保护特点和水电工程全生命周期管理,构建了包含社会经济、河流健康状况和环境管理三个方面的综合绿色水电指标体系,重点关注河流生态系统健康的同时,也关注水电开发的社会经济效益,强调依靠建立长效机制,使得对生态环境的负面影响减到最小,实现水电开发与生态环境保护协调发展. 将此指标体系应用于大渡河流域典型代表深溪沟水电站绿色水电等级评定,验证了指标体系的合理性和适用性. 本文提出的综合性绿色水电评价指标体系,是对已有研究的补充和拓展,为绿色水电评价的相关研究提供了参考。

在绿色水电评价的方法方面,已有研究涉及到了主观、客观以及主客观相结合的评价方法. 如,禹雪中^[11]等提出了以定量分析为主、结合定性分析的评价标准,运用层次分析(AHP)-模糊综合评

价(FCE)方法来评价,并以澜沧江漫湾水电站为例进行了实证研究,得到了该电站的总体评价结果和主要限制因子,为工程采取针对性保护措施提供了依据. 王露等^[19]采用多级模糊评价模型和层次分析法对富江小水电站进行绿色小水电评价. 夏军等^[20]从生态环境角度出发,构建了一种基于层次分析-灰数(Grey)的动态生态环境评价模型,采用 3 标度层次分析法计算各指标权重,运用相似度思想修正专家权重进而修正指标权重,最后运用中心点三角白化权函数评价各指标所属灰类等级,并在此基础上进行延伸,求出各指标动态变化趋势。

在绿色水电评价方法中,已有研究多采用层次分析法、模糊综合评判或其改进方法,虽然这些常用方法可以实现综合评级,但其将定性评价指标转化为定量评价指标的过程不够理想,部分的方法还主要是依靠专家进行打分. 物元可拓法中,信息利用较为全面充分,计算过程较客观,已在其他领域有较多的应用,而目前鲜有研究将其应用于绿色水电评级中. 本文针对基本物元可拓方法的不足,提出了改进变权物元可拓模型. 以大渡河流域典型代表的深溪沟水电站为例,验证了改进变权物元可拓模型的可行性,创新了绿色水电的评价方法。

5 结 论

本文构建了 3 个层次 21 个指标的流域绿色水电综合评价指标体系. 第一层次为目标层,即绿色水电;第二层次为准则层,包括环境管理、河流生态环境健康状况和社会经济效益;第三层次为指标层,可直接度量水电绿色程度的指标. 本文构建出改进的变权物元可拓模型:以变权理论确定各指标的权重,并以改进物元可拓模型计算等级贴进度和等级特征值实现对水电站绿色等级的评定. 该模型的指标权重的计算采用客观的方法来确定,并通过计算贴进度来评定绿色水电站的等级。

选择大渡河流域的深溪沟水电站作为典型代表进行绿色水电实证分析,将本文建立的绿色水电指标体系应用于深溪沟水电站,改进性的对各项指标量化,再运用改进变权物元可拓模型计算了深溪沟水电站绿色水电等级. 结果显示其绿色水电站等级为良,并且略微偏向于中等,说明深溪沟水电站在环境管理、河流生态环境和社会经济上基本实现了平衡和可持续发展. 通过敏感性分析得出,“施工期“三废”及噪声平均达标率(C13)”,“环境管理机制(C11)”,“环境管理措施制定及实施(C12)”,

“科学研究(C16)”和“为增加河流连通程度而采取措施的有效性(C26)”这5个指标是影响深溪沟水电站绿色综合评价结果的较为敏感的指标。总体而言,“环境管理”这一类别的指标对于绿色水电的评级结果有较大的影响,是提升绿色水电等级评定所要重点关注的指标类别,为进一步优化环境管理机制、完善生态环境保护对策措施提供依据。

综合上述分析,本文所建立的评价指标体系和评价模型,应用于深溪沟水电站是有效的,适用于流域水梯级开发的绿色水电评价。深溪沟水电站能实现较好的绿色水电状态,主要经验是电站进行了全过程环境管理,较好地执行了环境保护“三同时”制度和落实了各项生态环保措施,同时促进了地方经济的发展。结合目前流域水电开发存在的环境问题和绿色水电评价分析成果,需要对流域水电开发环境管理进行优化完善,以进一步提高绿色水电评价等级,推进流域水电项目的健康可持续发展。本文的研究成果为今后流域水电开发开展绿色认证工作和建立环境管理体系提供了科技支撑。

参考文献:

- [1] Li X Z, Chen Z J, Fan X C, *et al.* Hydropower development situation and prospects in China [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2018, 82: 232.
- [2] 吕平毓,张铎,熊中福,等. 三峡库区成库前后干流万州段水体总磷特征[J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2020, 42: 162.
- [3] 齐跃明,杨雅琪,李鑫,等. 中美水资源研究现状与发展展望[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2019, 44: 95.
- [4] 王远明,韩宇,杨学春,等. 防浪林不同林木布置模式对河道水流结构的影响[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2021, 42: 235.
- [5] 周小力,李云,王国胤,等. CNLSTM模型预测城市积水[J]. *重庆邮电大学学报:自然科学版*, 2021, 33: 529.
- [6] 代成良,禹雪中,贾宝真. 绿色水电工程建设规划的概念和内容及方法[J]. *水力发电*, 2012, 38: 1.
- [7] 国际水电协会. 水电可持续发展指南[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [8] IHA. Hydropower sustainability assessment protocol, international hydropower association [EB/OL]. (2019-08-05) [2020-12-15]. <https://www.hydropower.org/topics/featured/hydropower-sustainability-assessment-protocol>.
- [9] 张润润,刘德有,欧传奇,等. 我国绿色水电认证的组织体系探讨[C]//中国水利学会2011学术年会第二届中国小水电论坛论文集. 杭州:国际小水电中心, 2011.
- [10] 刘恒,董国锋,张润润. 构建中国特色绿色水电评价和认证体系[J]. *中国水利*, 2010, 664: 46.
- [11] 禹雪中. 国际绿色水电认证经验与借鉴[J]. *中国水能及电气化*, 2015(7): 13.
- [12] 崔振华,陈星. 我国绿色水电认证实施策略探讨[J]. *中国水能及电气化*, 2011, 82: 21.
- [13] 环境保护部环境工程评估中心. 四川省大渡河深溪沟水电站环境影响后评价报告[R]. 北京:环境保护部环境工程评估中心, 2018.
- [14] Mahmud M A P, Huda N, Farjana S H, *et al.* A strategic impact assessment of hydropower plants in alpine and non-alpine areas of europe [J]. *Appl Energ*, 2019, 250: 198.
- [15] 李世辉,葛玉峰,王如玉. 基于改进变权物元可拓模型的碳信息披露质量评价[J]. *统计与决策*, 2019, 21: 57.
- [16] 卢凯璐,乔非,马玉敏. 基于变权物元可拓模型的烧结矿质量评价[J]. *控制工程*, 2018, 25: 878.
- [17] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. *山东大学学报:理学版*, 2004, 39: 25.
- [18] Chu P H, Liu P K, Pan H. Prospects of hydropower industry in the Yangtze River Basin; China's green energy choice [J]. *Renew Energ*, 2019, 131: 1168.
- [19] 王露, Van V T, 马志杰. 绿色小水电综合评价研究[J]. *中国水利水电科学报*, 2016, 14: 291.
- [20] 夏军,叶超,魏洁,等. 基于动态评估模型的绿色小水电生态环境影响研究[J]. *水利发电*, 2019, 45: 6.

引用本文格式:

中文:高亚琴,刘国东.基于改进变权物元可拓模型的绿色水电评价研究[J].*四川大学学报:自然科学版*, 2021, 58: 063003.

英文:Gao Y Q, Liu G D. Research on green hydropower evaluation based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. *J Sichuan Univ; Nat Sci Ed*, 2021, 58: 063003.