

水利水电工程的生态效应评价指标体系

常本春¹, 耿雷华², 刘翠善², 张 鹏¹, 徐澎波²

(1. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210005; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要 :从生态角度借鉴了国际上先进的压力-状态-响应(PSR)模式构建了水利水电工程生态效应状态-压力-效应(SPE)评价指标体系框架模型,综合选取了水利水电工程的生态效应评价指标集,并就具体评价指标的标准进行了率定。将所建立的评价指标体系应用于澜沧江大朝山水电站生态效应的评价中,实例研究表明,所建指标体系具有很好的适用性。

关键词 :生态效应评价 水利水电工程 评价指标 层次分析法 大朝山水电站

中图分类号 :X826

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2006)06-0011-05

Index system for ecological effect evaluation of hydropower projects//CHANG Ben-chun¹, GENG Lei-hua², LIU Cui-shan², ZHANG Peng¹, XU Peng-bo² (1. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210005, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract :Based on advanced pressure-state-response (P-S-R) mode from abroad, a framework of state-pressure-effect (S-P-E) evaluation index system for ecological effect of hydropower projects is constructed. Furthermore, the index set for ecological effect evaluation of hydropower projects is determined comprehensively, and the criteria for particular evaluation indexes are calibrated. The application of the index system developed in this study to ecological effect evaluation of Dachaoshan Hydropower Station on the Lancangjiang River shows that the present system is of high applicability.

Key words :ecological effect evaluation; hydropower project; evaluation index; hierarchy analysis; Dachaoshan Hydropower Station

兴建水利水电工程是一种在流域和地区水平上对生物多样性产生重大影响的事件。兴建水利水电工程的目的,是为满足人们供水、防洪、灌溉、发电、航运、渔业及旅游等的需求。我国水利事业先后经历了技术制约、投资制约、市场制约到目前的生态制约四个发展阶段^[1]。水利水电工程对生态环境的影响到底是好是坏,目前学术界争论非常激烈。总的来说,认为水利水电工程对经济发展、对生态状况做出了巨大贡献,但不能否认其负面影响。这种正面和负面影响的争论仅仅停留在定性方面,本文力图建立指标评价体系,为定量评价水利水电工程的生态效应提供评价依据。

1 水利水电工程的生态效应内涵

生态效应是指人为活动造成的环境污染和破坏引起生态系统结构和功能的变化。水利水电工程的生态效应是指水利水电工程建成之后对自然界的生态破坏和生态修复两种效应的综合结果^[3]。生

态破坏是指水利水电工程直接作用于水生态系统^[4],扰乱了长期形成的自然界的循环,破坏了其原有的平衡而引起生态系统生产能力的减小和结构改变,从而引起生态退化。生态修复是指利用水利水电工程改变现有的水流运行规律,恢复河道水质、河流浅滩,使之光热条件优越,又形成新的湿地,让鸟类、两栖动物和昆虫等栖息。从表面看,水利水电工程是为了解决水资源不足或充分利用水力资源,但若深入研究,却发现其对社会、环境的潜在影响是巨大和复杂的^[5]。水利水电工程的生态效应评价指标就是要确定系统分析边界条件,对系统进行层次分析,筛选关键指标,识别水利水电工程对生态环境的影响因子,建立数学模型,进行综合分析评价。

水利水电工程生态效应分析与环境影响评价不同,是发生在水利水电工程兴建之后,但是,它同水利水电工程后评估也是不同的,后评估是针对水利水电工程建成后是否达到预期经济效益以及对环境有无影响进行分析,而水利水电工程的生态效应分

析是建立在生态基础之上,对人类、自然、野生动植物等的影响进行综合分析,而对其经济效益和社会效益不作评价。因此,定性分析水利水电工程的生态负效应大于正效应。

2 水利水电工程生态效应影响因子

生态效应分析表明,水利水电工程同生态系统之间不断相互作用,发生关系。人类获取自身生存繁衍和发展所必需的水资源、电能等,通过勘测、施工、运行、生产、消费等环节,使生态环境状态发生变化。生态效应是在一定时间内发生的,是由若干相互联系、相互制约的子系统组成的一个复合系统。从生态效应的内涵来看,产生结果的影响因子由状态 S、压力 P、效应 E 构成。状态的因子有水量、水质、森林植被、土地状况和生物多样性等;压力因子有移民、土地淹没、开发利用情况、人为扰动(公路、矿山建设)等;效应的因子有鱼类、珍稀生物、人群健康、水土流失、地质灾害等。

3 水利水电工程的生态效应评价指标体系

3.1 指标体系的构建

“压力-状态-响应(PSR)”模式是国际上最流行的指标体系。PSR 模式的理论基础是研究人与自然的相互关系,回答‘发生了什么、为什么发生、我们将如何做’这 3 个问题。借用这一思路,将水利水电工程的生态效应评价指标体系构建为‘状态-压力-效应’(SPE),其中状态指标用于描述水利水电工程作用对象(地点)生态系统的状况;压力指标用于描述水利水电工程对生态的扰动;效应指标用于描述水利水电工程对生态产生的影响,即生态系统发展进程。图 1 是水利水电工程的生态效应‘状态-压力-效应’框架。

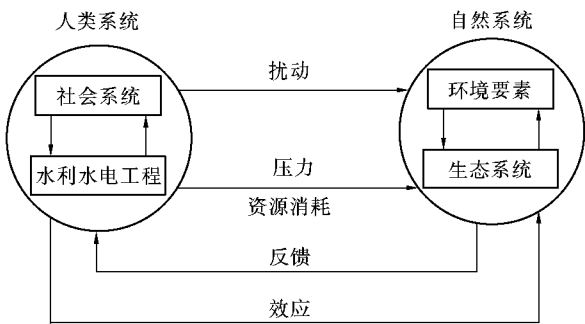


图 1 水利水电工程的生态效应‘状态-压力-效应’框架

对评价系统进行初步分析,基于上述‘状态-压力-效应’的评价概念框架,按照层次分析方法,根据评价对象各组成部分之间的相互关系构筑多层次评价指标体系,总体上将区域(流域)内的水利水电工程对生态的效应评价指标体系归纳为下列层次结构体系:

①目标层:以区域(流域)生态效应综合指数作为总目标层,以综合表征区域(流域)生态效应。②准则层:制约区域(流域)生态效应的主要因素,也可以理解为分目标层。本文以生态系统状态、水利水电工程压力、生态效应作为准则层的评判依据。③指标层:由可直接度量的指标构成,如人均水资源量、移民压力、鱼类生物完整性指数等,是区域生态效应综合指标体系最基本的层面,根据准则层各项目的特征和意义,区域(流域)生态效应综合指数就是由各个具体指标通过某一模型(或方法)计算而得。

3.2 本文研究采用的指标体系

从指标初始集到真正用于评价时的指标集,是高维指标空间到低维空间的降维过程,这一过程的实现涉及到指标遴选技术。本次研究将提出从定性到定量的指标筛选步骤,借助专家系统进行定性分析,借助主成分分析法做定量分析。

本次评价的目的是水利水电工程的生态效应分析。因此,指标选取的依据主要从体系的完整性、正确性、可行性方面入手,在不失全面性的情况下,尽量减少体系中的指标个数,注重指标体系的效应评价功能,最后选择和确定评价指标。选择中主要考虑以下三方面:一是评价的指标具有独立性;二是从定性方面选择最能反映生态效应的指标(专家咨询);三是能取到可靠资料。据此,选择水利水电工程的生态效应评价指标集,见表 1。

4 水利水电工程生态效应评价标准

采用不同的评价模型,评价标准的形式也是不一样的。评价标准的制定与评价模型是相互反馈、不断完善的过程。

评价就是人们参照一定标准对客体的价值或优劣进行评判比较的一种认知过程,同时也是一种决策过程。它是人们认识事物的重要手段之一。水利水电工程生态效应评价标准是将各指标量化分级,即把效应的正极大值 1 与负极小值 -1 之间划分为若干个质量值(隶属度),每个质量值即为 1 个刻度,将 -1 ~ 1 划分为 11 个刻度(±1, ±0.8, ±0.6, ±0.4, ±0.2, 0),与某一刻度相对应表明分层指标效应指数落在某刻度值处(刻度值也可内插),则此刻度值为该分层指标(影响因子)的效应指数。

水利水电工程评价指标的效应指数刻度见表 2。实际上标准的制定需要进行敏感性分析,以国际标准、国家标准、发展规划值、典型河流的现状特征值,通过专家咨询,研究具体指标的临界点来最后确定效应指数的评价标准。由于篇幅有限,在此不再一一介绍。

表 1 水利水电工程的生态效应评价指标体系

准则层	状态指标	人均水资源量(表征水资源状况,以区域水资源总量/区域总人口表示)
		人均耕地面积(表征耕地资源状况,用区域耕地面积/区域总人口表示)
		河流水质达标率(表征河流水质状况,用 1~3 级评价河长/评价河长总长 $\times 100\%$ 表示)
		森林覆盖率(表征区域植物状况,用区域森林面积/区域总面积表示)
		物种多样性指数(表征区域生物状况,采用 Shannon-Weaver 的多样性指数模式计算 ^[6])
	压力指标	移民压力指数(表征工程对人的扰动,以每 MW 迁移人数计)
		土地淹没压力(表征工程对地的扰动,以每 MW 淹没耕地计)
		水资源开发利用程度(表征人类对水的扰动,用实际用水量/水资源总量来表示)
		公路密度(表征水利工程前期对生态的扰动,用区域内等级公路里程数/区域面积来表示)
		工程施工压力(表征工程施工对生态的扰动,以定性判断为依据)
	效应指标	鱼类生物完整性指数(表征工程对河道生物的影响,用建库后河道内鱼类种类变化数/建库前鱼类种数 $\times 100\%$ 表示)
		珍稀水生物存活状况(表征工程对珍贵水生动物的影响,以珍稀水生物数量的增减作为定性判断的依据)
		人群健康状况(表征工程对人的影响,以工程前后人群平均寿命或者发病等作定性判断)
		水土流失强度(表征工程对植被、土壤的影响,以水土流失面积/土地面积 $\times 100\%$ 表示)
	水质灾害频度(表征工程产生的地质灾害,以工程后发生的地震次数/工程前发生的地震次数表示,由于资料限制,以建库前后 4 年为限。)	

表 2 水利水电工程生态效应指标评价标准

刻度	人均水资源量/ 10 ³ m ³	人均耕地面积/ hm ²	河流水质达标率/ %	森林覆盖率/ %	物种多样性指数	移民压力指数/ (人·MW ⁻¹)	土地淹没压力/ (hm ² ·MW ⁻¹)	水资源开发利用程度/ %	公路密度/ (km·km ⁻²)	工程施工压力	鱼类生物完整性指数/ %	珍稀水生物存活状况	人群健康状况	水土流失强度/ %	地质灾害频度/ 倍
1.0	≥35	≥0.33	100	≥50	≥6.0						≥18	优	优	0	0.0
0.8	30	0.30	90	45	5.0						12			2	0.2
0.6	25	0.27	80	40	4.0						8			4	0.4
0.4	20	0.23	70	35	3.5						5	良	良	6	0.6
0.2	16	0.20	60	30	3.0						2			8	0.8
0	12	0.17	50	25	2.5	0	0.0	0	0.0	无	0	中	中	10	1.0
-0.2	10	0.13	40	20	2.0	2	0.5	15	0.2	小	-2			15	2.0
-0.4	8	0.10	30	15	1.5	5	1.0	25	0.5	较小	-5	较差	较差	20	5.0
-0.6	6	0.07	20	10	1.0	10	1.5	35	0.8	中	-8			25	10.0
-0.8	3	0.03	10	5	0.5	20	2.0	45	1.2	较大	-12	差	差	30	15.0
-1.0	≤1	≤0.01	0	≤2	≤0.2	≥30	≥2.5	≥60	≥1.8	大	≤-18	恶劣	恶劣	≥45	≥20.0

5 水利水电工程生态效应评价

指标体系法是目前水利水电工程对生态影响评价常用的评价方法之一。对生态效应进行评价首先要选用能够表征生态系统主要特征的指标;其次要对这些特征进行归类区分,分析各个特征对生态效应的意义;再次是对这些特征因子进行度量,确定每个特征因子在生态系统中的权重系数;最后建立生态效应评价的指标体系。

5.1 水利水电工程生态效应评价模型

评价模型采用近年发展起来的、利用定性与定量分析相结合的层次分析法,它具有实用和简洁的特点,是解决复杂系统中多层次、多目标水利水电工程生态效应评价的较好方法。考虑计算方法的可操作性,为得出水利水电工程生态效应测评总得分,综合评价指数按式(1)计算:

E = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \sum_{j=1}^5 \lambda_j M_{ij} \tag{1}

式中:λ_i 为第 i 个准则层的权重;λ_j 为某准则层选取

的第 j 个指标在该准则层所占的权重;M_{ij} 为第 i 个准则层中选取的第 j 个指标的质量值(评分值)。

指标权重的合理选择关系到综合评价的正确性和科学性,根据层次分析法要求,通过专家咨询和打分结合试验判断按结构图的层次结构关系进行判别比较,分别构造判断矩阵,然后计算出水利水电工程生态效应各指标的权重。判断矩阵正确与否,关系到评价结果的准确度,一般采用分级定量法给判断矩阵指标赋值。

5.2 水利水电工程生态效应的评判

参照其他评价方式^[7],将水利水电工程生态效应指数划分成 5 级:①一级,水利水电工程生态影响大,综合指数为 ±0.8~±1.0;②二级,水利水电工程生态影响较大,综合指数为 ±0.6~±0.8;③三级,水利水电工程生态影响中,综合指数为 ±0.4~±0.6;④四级,水利水电工程生态影响较小,综合指数为 ±0.2~±0.4;⑤五级,水利水电工程生态影响小,即水利水电工程对生态几乎无影响,综合指数为 -0.2~0.2。

6 评价指标体系的应用实例

大朝山水电站位于云南省临沧地区的云县和思茅地区的景东彝族自治县交界处,是澜沧江中下游梯级开发继漫湾电站之后的第 2 个百万千瓦级的大型水电站。坝址距已建成的漫湾水电站水路程 90 km,距省会昆明公路里程 631 km^[8]。电站于 1997 年 8 月 4 日正式开工,同年 11 月顺利完成大江截流,2001 年 12 月首台机组建成发电。大朝山水电站总装机容量 1 350 MW (6 × 225 MW),保证出力 363.1 MW,年均发电量 59.31 亿 kW·h,装机利用小时数 4 393 h。上游小湾水电站建成后,电站保证出力达 723.5 MW,多年平均发电量 70.2 亿 kW·h,装机利用小时数 5 200 h。水库最大坝高 115 m,坝址控制流域面积 12.1 万 km²,正常蓄水位 899.0 m,相应水库面积为 26.25 km²,水库长度 91.25 km,回水末端与漫湾水电站发电尾水相接,总库容 9.4 亿 m³^[9]。水库淹没涉及云县、景东两县 10 个乡(镇)、38 个村(办事处)和 185 个社(组)。至 2001 年底共安置移民 6 363 人^[10]。水库淹没影响各类房屋面积 137 389 m²;淹没耕地 826.06 hm²,其中水田 180.33 hm²、林地 220.33 hm²、特种用地 187.33 hm²;专项设施淹没数量较少。

6.1 确定各分层指标的权重

根据层次分析法要求,通过专家咨询和打分结合经验判断,按结构图的层次结构关系进行判别比较,分别构造判断矩阵,然后计算出澜沧江大朝山水电站生态效应各指标的权重。一般采用五级定量法给判断矩阵指标赋值,五级分为相等(同等)重要、稍重要、重要、很重要、特别重要,相应赋值为 1,3,5,7,9,而 2,4,6,8 用于重要性标度之间的中间值。至于一个指标显得比另一个指标不重要,则相应赋值为上述数字的倒数,即 1/3 表示较不重要、1/5 表示不重要、1/7 表示很不重要、1/9 表示特别不重要。大朝山水电站生态效应评价总矩阵及权重见表 3。在准则层中,状态、压力、效应对上一层目标层的判断矩阵也见表 3。表中用判断矩阵计算权重向量,

其中,每一行的连乘积 $M_i = \prod_{j=1}^k a_{ij}$, a_{ij} 为矩阵元素;
 $\overline{W_i} = \sqrt[k]{M_i}$,将 $\overline{W} = (\overline{W_1}, \overline{W_2}, \overline{W_3})$ 归一化,即令 $W_i = \frac{\overline{W_i}}{\sum \overline{W_i}}$,则得权重向量 $W = (W_1, W_2, W_3)$ 。

求出权重后,需对判断矩阵进行一致性检查 首先计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$,然后计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}$ 及一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI}$,其中

表 3 大朝山水电站生态效应评价总矩阵及权重

准则层	判断矩阵			权重
	状态 1	压力 2	效应 3	
状态 1	1	1/2	1/2	0.195 8
压力 2	2	1	2	0.493 4
效应 3	2	1/2	1	0.310 8

RI 为平均随机一致性指标。当 $m = 3$ 时(m 为矩阵阶数), $RI = 0.58$,认为当 $CR < 0.1$ 时,符合一致性要求。由表 3 计算得 $\lambda_{\max} = 3.005$, $CR = 0.05 < 0.1$ 。

表 3 表明水利水电工程的压力对生态效应是最重要的,其次是效应准则,状态则表现为不太重要。压力是原因,效应是结果,即没有压力(扰动)生态效应(影响)也就无从谈起,而状态是表示抗干扰的能力,状态、压力、效应三者的权重分别为 0.195 8, 0.493 4, 0.310 8,符合实际情况。各指标的权重在准则层分权基础上采用平均分配法确定,具体见表 3。

6.2 大朝山水电站生态效应评价指标现状值

根据相关资料^[9-16],确定大朝山电站的生态效应评价指标值,具体见表 4,综合指数为 - 0.200 8。

表 4 大朝山水电站生态效应综合评价指数

分层指标	刻度值	权重	评价指数
人均水资源量 14 170 m ³	0.154	0.039 16	0.006 0
人均耕地面积 0.093 hm ²	- 0.44	0.039 16	- 0.017 2
河流水质达标率 100%	1	0.039 16	0.039 2
森林覆盖率 37.9%	0.3	0.039 16	0.020 2
物种多样性指数 3.4%	0.36	0.039 16	0.014 1
移民压力指数 4.7 人/MW	- 0.38	0.098 68	- 0.037 5
土地淹没压力 0.91 hm ² /MW	- 0.364	0.098 68	- 0.035 9
水资源开发利用程度 2.54%	- 0.034	0.098 68	- 0.003 3
公路密度 0.23 km/km ⁻²	- 0.227	0.098 68	- 0.022 4
工程施工压力中等	- 0.5	0.098 68	- 0.049 3
鱼类生物完整性指数 - 6.5%	- 0.5	0.062 16	- 0.031 1
珍稀水生动物存活状况较差	- 0.4	0.062 16	- 0.024 9
人群健康状况良	0.4	0.062 16	0.024 9
水土流失强度 28.6%	- 0.744	0.062 16	- 0.046 2
地质灾害频度 10 倍	- 0.6	0.062 16	- 0.037 3

6.3 大朝山水电站生态效应评价结果

将计算和引用的指标值与制定的评价分级标准相对照,如该值落在某一分级数值范围内,即表示生态效应指数处于某一状态。刻度采用内插确定。利用确定的指标权重,最终得出大朝山水电站的生态效应评价结果,具体见表 4。

综合生态效应指数的评分值越小,则生态效应的影响越小,否则相反。大朝山水电站的生态效应评价综合指数 - 0.200 8,对照生态效应划分的评判标准,其基本结论是 大朝山水电工程的生态效应综合影响较小。影响大朝山水电站生态负效应最大的是工程施工和水土流失,其次是移民和土地淹没 影响大朝山水电站的生态正效应的有原河流状态指标

河流的水质、森林覆盖率和生物多样性等。由于移民和土地淹没是由工程的性质决定的,目前已经不能改变,但水土流失通过流域治理是能改善的,因此,应该加强澜沧江流域的水土治理。

7 结 语

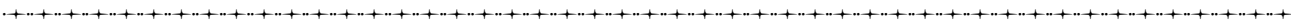
水利水电工程建设不可避免地一定程度上改变了自然面貌和生态环境,使已经形成的平衡状态受到干扰。在建设水利水电工程时,只要遵循‘因势利导,因地制宜’的原则,合理规划,周全设计,精心施工,加强科学管理,大多负面影响都可以得到缓解或减小。因此,必须充分发展和应用现代科学技术,深入研究自然与生态的平衡机制,研究人类改变自然时对生态的近期和长远的影响,将水利水电工程建设带来的负面影响降低到最低限度,发挥其正面效应,使水利水电工程为人类谋福祉。

参考文献：

[1] 汪恕诚.论大坝与生态[J].水力发电,2004,30(4):1-14.
[2] 《中国大百科全书·环境科学》编委会.中国大百科全书：环境科学[M].北京：中国大百科全书出版社,2002:91.
[3] 孙宗风,董增川.水利工程的生态效应分析[J].水利水电技术,2004,35(4):5-8.
[4] 祈继红,阮晓红.大坝对河流生态系统的环境影响分析[J].河海大学学报：自然科学版,2005,33(1):37-40.

[5] 陆佑楣.三峡工程的建设有利于改善长江生态环境[J].水利水电科技进展,1996,16(3):1-5.
[6] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 I:多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994,2(4):231-239.
[7] 刘恒,耿雷华,陈晓燕.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.
[8] 贺祖源.西部大开发中的大朝山水电站[J].云南水力发电,2001,17(4):1-2.
[9] 康建民.浅析云南大朝山水电站水库移民安置工作[J].水电站设计,2004,20(4):83-84.
[10] 付保红,陈丽晖,朱彤.云南高山峡谷区大型水电站建设开发性移民研究：以漫湾、大朝山电站为例[J].地域研究与开发,2004,23(6):111-114.
[11] 王忠泽,何晓瑞,周希琴,等.水生生物综合调查分析报告[R].昆明：云南大学,1996.
[12] 何晓瑞,王忠泽.澜沧江漫湾电站水库地区爬行动物多样性研究[J].四川动物,2000,19(3):123-126.
[13] 杨彪.澜沧江流域水土流失及其防治措施[J].四川林勘设计,1999(2):13-15.
[14] 张荣.澜沧江漫湾水电站生态环境影响回顾评价[J].水电站设计,2001,17(4):27-32.
[15] 何舜平,王伟.澜沧江中上游鱼类生物多样性现状初报[J].云南地理环境研究,1999,11(1):26-29.
[16] 刘昌明.调水工程的生态、环境问题与对策[J].人民长江,1996,27(12):16-17.

(收稿日期 2005-11-05 编辑 骆超)



· 简讯 ·

我国正在建设当今世界最高的混凝土双曲拱坝

目前世界上已建成的最高的混凝土双曲拱坝是前苏联于 1987 年在格鲁吉亚英古里河上建成的英古里坝,坝高 271.5 m,这个坝高记录已保持了近 20 年。但是,这项记录在不远的将来即将被我国超越,我国正在建设中的三座混凝土双曲拱坝的坝高都超过了英古里坝,它们是小湾水电站大坝、溪洛渡水电站大坝和锦屏一级水电站大坝。

小湾水电站大坝位于云南省西部南涧县和凤庆县交界的澜沧江上,坝高 292 m,装机容量 420 万 kW。该工程于 2002 年开工建设,计划 2010 年首台机组发电,2012 年竣工。

溪洛渡水电站大坝位于四川省雷波县和云南省永善县交界的金沙江上,坝高 278 m,装机容量 1 260 万 kW。该工程 2005 年开工建设,计划 2012 年首台机组发电,2015 年建成,是世界上第三大水电站。

锦屏一级水电站大坝位于四川省木里县和盐源县境内的雅砻江上,坝高 305 m,是我国唯一超过 300 m 的高坝,装机容量 360 万 kW。该工程 2005 年开工建设,计划 2012 年首台机组发电,2014 年建成,建成后将是世界上最高的混凝土双曲拱坝。

(吴 高供稿)