

曾容,赵彦伟,杨志峰,等.2010.基于能值分析的大坝生态效应评价——以尼尔基大坝为例[J].环境科学学报,30(4):890-896
Zeng R, Zhao Y W, Yang Z F, et al. 2010. Energy-based assessment of ecological effects of dams: a case study of the Nierji Dam [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(4): 890-896

基于能值分析的大坝生态效应评价 ——以尼尔基大坝为例

曾容,赵彦伟*,杨志峰,陈贺,徐菲,尹心安

水环境模拟国家重点实验室,北京师范大学环境学院,北京100875

收稿日期:2009-06-30 修回日期:2009-10-19 录用日期:2010-01-29

摘要:能值分析可提供客观真实的统一量化平台,在自然、经济系统整合分析方面具有显著优越性。将能值分析方法引入大坝生态效应评价,提出基于能值分析的大坝生态效应评价概念框架,绘制库区生态系统能值流图,构建包括生态系统运行效率、生态系统组织结构、生态系统功能维持和生态系统环境安全4方面共9个指标的能值综合评价指标体系。对尼尔基大坝建设前后库区生态系统变化进行对比性评价,结果表明,生态系统的运行效率、功能维持能力有较大提升,组织结构出现不平衡,环境负荷较高,可持续发展能力受损,需减少因流域水土流失与塌岸导致的库区泥沙淤积,以控制不可更新资源能值输入。

关键词:大坝工程;能值分析;生态效应评价;尼尔基大坝

文章编号:0253-2468(2010)04-890-07 中图分类号:X826 文献标识码:A

Energy-based assessment of ecological effects of dams: a case study of the Nierji Dam

ZENG Rong, ZHAO Yanwei*, YANG Zhifeng, CHEN He, XU Fei, YIN Xin'an

State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 30 June 2009; received in revised form 19 October 2009; accepted 29 January 2010

Abstract: Emergy analysis may provide an objective and unified metric with significant advantages in integrated analyses of natural and economic systems. Emergy analysis is introduced in this paper to assess the ecological effects of dams. First, we establish a conceptual framework for the assessment based on emergy, delineate an emergy flow diagram of a reservoir ecosystem, and propose an energy-based comprehensive assessment index system which includes 9 indices categorized into 4 groups, i.e., ecosystem efficiency, ecosystem organization structure, ecosystem service function and ecosystem environmental safety. Then, the changes of the Nierji reservoir ecosystem before and after the dam construction are evaluated. The results show that the ecosystem efficiency and service function maintenance ability have improved greatly, whereas the reservoir ecosystem suffers from the degradation of the balance of its structure, the increase of pollution load, and the reduction of its sustainable development capacity. Thus, it is necessary to control non-renewable resource inputs by reducing the reservoir's sedimentation caused by soil erosion and bank collapse.

Keywords: dam engineering; emergy analysis; ecological effect assessment; Nierji Dam

1 引言(Introduction)

大坝在发挥防洪、供水、灌溉、发电等作用同时,改变了局域气候、河流地貌、沉积机制、水文、水质、生物等因子(肖建红等,2007),直接或间接影响生态系统结构、组成和功能(毛战坡等,2005),

因此大坝生态效应研究受到人们关注。美国大坝委员会于1978年出版的《大坝的环境效应》一书,评价了大坝对水体、生物、河道的影响(姚维科等,2006),1984年大坝生态效应的三级响应概念框架体系被首次提出(Petts, 1984),国内外学者以此框架对大坝生态效应评价开展了广泛研究。综合来

基金项目:国家杰出青年科学基金(No.50625926);国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2006CB403303)

Supported by the National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (No. 50625926) and the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403303)

作者简介:曾容(1985—),女, E-mail: mimizr@126.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail: awei-a@163.com,电话:010-58801719

Biography: ZENG Rong(1985—), female, E-mail: mimizr@126.com; * Corresponding author, E-mail: awei-a@163.com, telephone: 010-58801719

看,评价方法可分为单要素物质量评价(Fu et al., 2007; 郭乔羽等, 2003; Frutiger, 2004; 曹勇等, 2006; 姚维科等, 2006; Zhou et al., 2008)、综合指标评价(Brismar, 2002; 侯锐, 2006; Nichols et al., 2006; 蔡旭东等, 2007; 崔保山等, 2008; Woodward et al., 2008)、价值量评价(马小凡等, 2005; 肖建红等, 2007; 魏国良等, 2008)3种。单要素物质量评价涵盖泥沙、水温、化学元素、植被生产力、浮游生物等要素,由于量纲不同,无法加和以全面表征系统结构功能变化;综合指标评价可全面表征系统变化,但指标标准、权重等确定中,受人为主观因素影响较重;价值量评价可将生态系统各项服务功能统一核算,但这种基于经济学的核算方法过分依赖支付意愿,具有较强不稳定性。

Odum等(1987)于20世纪80年代创立能值分析方法,用能量符号语言对生态系统、产业系统和经济系统的能量流、物质流、货币流进行统一量化描绘,以生物物理为基础连接自然属性与人类行为,被广泛应用于区域生态系统分析、可持续发展评估等领域(Cuadra et al., 2006; Rydberg et al., 2006; 陈春锋等, 2008; 杜博洋等, 2008; 任丽燕等, 2009)。从本质上,大坝是人类为满足自身需要而使自然生态系统能量流动、转化方式和方向出现暂时或持久改变的建筑,涉及能流、物流、人口流、货币流代谢,效应表现方式各异。能值分析方法可统一不同类型生态效应的度量尺度,比较大坝建设前后系统内部各种生态流运行趋势和交互作用变化,客观、真实计算、评估大坝建设的生态效应。目前有学者应用能值分析方法对大坝建成后生态效应进行预测性评估(Brown et al., 1996; Kang et al., 2002),选择指标有限,包括能值产出、环境负载率、可持续性指数三个指标,缺少对生态效应系统、全面分析。本文采用能值分析方法,从4个方面构建大坝生态效应评估指标体系,讨论大坝建设前后库区生态系统运行效率、组织结构配置、生态功能维持、环境安全变化,对比大坝建设前后库区生态系统物质能量流转方式、强度、路径,客观真实衡量大坝生态效应,明晰库区生态系统在大坝影响下演化,识别大坝建设给生态系统带来的不良影响,以期为大坝运行管理提供理论依据。

2 研究方法与研究区(Methods and study area)

2.1 研究方法

从能值分析的角度评估大坝生态效应,其热力

学基础在于系统内部物质能量的流转方式、速度和强度,制约和决定着系统组织结构的配置、运行的效率、环境负载的程度及资源耗竭的速率等(刘耕源等,2008),把握了系统能量流转路径,即可从效应发生根源入手,掌握生态效应由起源到作用的影响脉络,探求针对大坝生态负效应的改进措施。基于以上分析,提出了研究方法,具体如下。

(1)建立概念性能值分析系统

确定研究边界,收集、监测研究区能流、物流、货币流资料并进行分析,将各项资源加以分类,对能流量超过系统总能流量5%的各能值流进行区分归并,能流量低于此者可忽略其影响。建立库区概念性能值分析系统,绘制建坝前后库区生态系统能值流图(图1)。

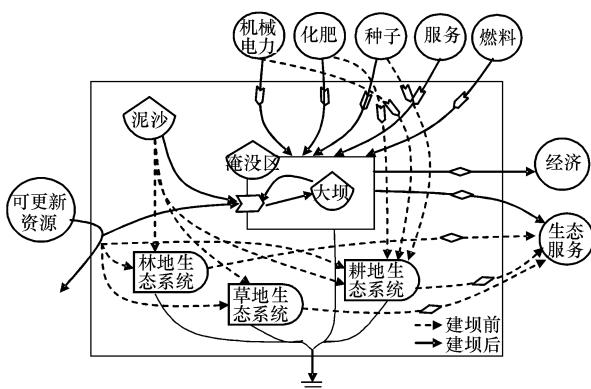


图1 建坝前后库区生态系统能值流图

Fig. 1 Energy flow diagram of the reservoir ecosystem before and after dam construction

库区生态系统在大坝建设前属于混合农业生态系统,淹没区内包括耕地、林地、草地3种土地利用类型,大坝建设后转变为复合生态系统。其能值输入按来源可分为两类:一类直接源于自然界,包括可更新环境资源(R , 河水势能)和不可更新环境资源(N , 表土层损失导致的泥沙淤积),另一类源于社会经济系统的反馈投入(F , 建坝前表现为化肥、农药、机械电力、种子等投入,建坝后包括建筑、维修、投资、淹没损失、移民等投入)。系统最终能值输出包括有效能输出(Y , 建坝前表现为农业、林业、畜牧业等生态服务输出 Y_s , 建坝后除水产品、防洪、灌溉等生态服务输出 Y_s 外,还有电力、航运等经济输出 Y_e),还包括系统各部分相互作用产生的不能再被系统利用的无效能输出(H_s)。

(2)编制能值分析表与量化能流图

运用Odum(1987)提出的能量符号及生态系统

图解方法,针对自然、社会经济系统能值输入与生态服务功能、经济能值输出,分类计算能值,绘制包括编号、项目、原始数据、太阳能值转换率、太阳能值等内容的能值分析表,然后对能值流图量化。各类能值的计算公式如下:

$$E_m = t \times E \quad (1)$$

式中, E_m 为A种物质或货币的能值(sej); t 为A种物质或货币的太阳能值转换率(sej·J⁻¹, sej·g⁻¹或sej·\$⁻¹); E 为A种物质或货币的量(J,g或\$)。

(3)建立能值综合评价指标体系

大坝对库区生态系统的影响体现在初级生产力、高营养级生物等生态变量和水文、泥沙、地貌等非生态变量两方面(祁继英等,2005),变量之间相互联系和作用,产生高一级变化,引起生态系统生产能力、能量利用效率、组织结构稳定性、各项服务功能发挥、环境负荷、为人类持续提供福祉能力等发生改变,在一定时空研究范围内可选择生态系统

运行效率、生态系统组织结构、生态系统功能维持、生态系统环境安全4方面表征生态系统对大坝生态效应的响应(表1)。运行效率指库区生态系统物质能量输入输出循环容量,反映生态系统的效率性、竞争力和存活力,用能值产出率、能值投入产出比和环境产出率来表示;组织结构主要考察库区生态系统内部结构稳定性和合理性,用不可更新资源能值比和可更新资源能值比来表示,反映资源利用结构情况;功能维持主要指系统维持自身服务功能,对人类提供福祉能力的判断,用能值自给率和能值产出密度来表示;环境安全指库区生态系统在当前胁迫状态下维持格局与结构的能力,用环境负载率和可持续发展指数来表示。

在上述各项能值计算基础上,对项目进行归类汇总,计算出各类能值指标数值,以进行定量分析评价。

表1 能值综合评价指标体系

Table 1 Emergy-based comprehensive assessment index system

指标类别	能值指标	表达式	单位	意义
运行效率	能值产出率 EYR	Y/F	/	反映库区生态系统各种产出对经济活动的贡献
	能值产投比	$Y/(R+N+F)$	/	反映库区生态系统整体生产效率
	环境产出率	$Y_s/(R+N+F)$		反映库区生态系统在生态服务方面的产出效率
组织结构	不可更新资源能值比	$N/(R+N+F)$	/	反映大坝建设对库区土壤资源的损耗程度
	可更新资源能值比	$R/(R+N+F)$	/	反映库区生态系统中自然资源的支持能力
功能维持	能值自给率	$(R+N)/(R+N+F)$		反映库区生态系统自给自足的能力
	能值密度	Y/S	sej·m ⁻²	反映库区生态系统生产力能力
环境安全	环境负载率 ELR	$(N+F)/R$	/	反映库区生态系统环境负荷的大小
	可持续发展指数 ESI	EYR/ELR	/	反映库区生态系统在当前负荷和产出状态下可持续发展的能力

(4)定量评价与分析

从系统内在物质循环、能量流动的格局出发,通过能值综合指标反映生态系统中各类要素的作用过程和各项服务功能,对大坝建设前后库区复合生态系统运行效率、组织结构、功能维持、环境安全4方面进行分析,考量大坝扰动下生态系统生产力效率、关键生态组分和结构完整性、格局与功能维持稳定性、自然资源安全性和永续利用潜力,对大坝生态效应进行客观、准确评价,明确大坝对生态系统带来的扰动强度和方式,并提出针对性大坝运行调控措施。

2.2 研究区概况

尼尔基大坝位于嫩江干流上段内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔族自治旗,控制流域面积占嫩江流

域总面积的22.4%,是松花江流域大型控制性综合水利枢纽工程。水库总库容 $86.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均发电量 $6.144 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。大坝地处大兴安岭支脉浅山区,南部系松嫩平原北缘,形成了包括低山、丘陵、平原在内的复杂地貌。工程建设规模较大,对植被、泥沙沉积、水循环、洪水规模、生物多样性等影响较大,自2005年建成后,大坝生态效应已在库区生态系统结构和功能上有所体现。河流生态系统变化通常由多种因素引起,很难将效应源直接界定为大坝建设,本研究区域位于嫩江平原,近几年人口规模、工农业开发活动基本无太大变化,大坝上游没有大型水利工程建设。本研究选择大坝动工前2001年和建成后2008年进行对比评价,以大坝淹没区为空间边界,在此时空范围内,可认为人

类活动、大坝上游累积效应等增量较小，库区生态效应主要源于尼尔基大坝建设。

3 结果 (Results)

采用内蒙古统计年鉴(2001, 2008)、尼尔基大坝环境影响评价报告书和松辽水利委员会嫩江统计数据、实地监测与调研数据, 统计分析大坝建设前后(2001年与2008年)年平均物质、能量、货币流, 转换计算得到库区生态系统能值分析表(表2、表3), 对大坝建设前后淹没区能流表综合分析, 绘出库区生态系统能值流变化图(图2). 将能流数据

表2 建坝前(2001年)尼尔基库区生态系统能值分析表

Table 2 Energy evaluation of the Nierji reservoir ecosystem before dam construction (2001)

序号	项目	原始数据	能值转换率	(J·a ⁻¹ , g·a ⁻¹ , \$·a ⁻¹)	(sej·J ⁻¹ , sej·g ⁻¹ , sej·\$ ⁻¹)
		(J·a ⁻¹ , g·a ⁻¹ , \$·a ⁻¹)	(sej·J ⁻¹ , sej·g ⁻¹ , sej·\$ ⁻¹)		
可更新资源					
1	河水重力势能	9.72×10^{14}	27764 ^①	2.69×10^{19}	
不可更新资源					
2	泥沙	3.79×10^{13}	63000 ^②	2.39×10^{18}	
有效能输出					
3	农产品(玉米)	2.08×10^{14}	8.52×10^4 ^①	1.78×10^{19}	
4	农产品(水稻)	4.1×10^{10}	9.7×10^8 ^②	3.9×10^{19}	
5	林业	4.0×10^{12}	3.49×10^4 ^①	1.39×10^{17}	
6	畜牧业	3.2×10^{12}	1.7×10^6 ^①	5.4×10^{18}	
	小计 Y(3+4+5+6)			6.22×10^{19}	
能值投入					
7	氮肥	5.7×10^9	3.8×10^9 ^①	2.16×10^{19}	
8	磷肥	1.9×10^9	3.9×10^9 ^①	7.41×10^{18}	
9	钾肥	7.4×10^8	1.1×10^9 ^①	8.14×10^{17}	
10	复合肥	2.6×10^9	2.8×10^9 ^①	7.28×10^{18}	
11	农药	1.1×10^8	1.6×10^9 ^①	1.76×10^{17}	
12	机械电力	1.02×10^{14}	1.59×10^5 ^①	1.6×10^{19}	
13	种子(有机)	7.8×10^{12}	6.6×10^4 ^①	5.15×10^{17}	
	小计 F(7+8+9+10+11+12+13)			5.23×10^{19}	

注:①源自 Odum(1996); ②源自 Brown&McClanahan(1996).

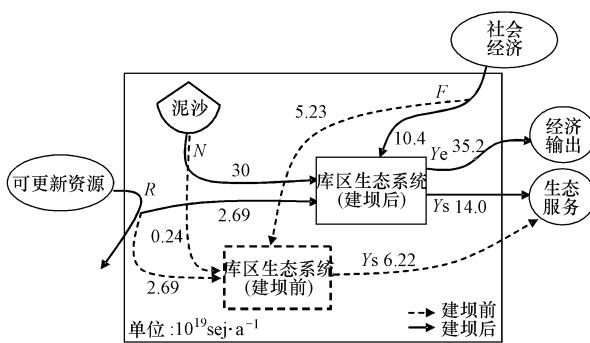


图2 尼尔基库区生态系统能值流图

Fig. 2 Energy flow diagram of the Nierji reservoir ecosystem

代入上述能值评价指标的计算公式, 得出运行效率、组织结构、功能维持、环境安全4方面能值综合评价指标(表4)。

表3 建坝后(2008年)尼尔基库区生态系统能值分析表

Table 3 Energy evaluation of the Nierji reservoir ecosystem after dam construction (2008)

序号	项目	原始数据	能值转换率	(J·a ⁻¹ , g·a ⁻¹ , \$·a ⁻¹)	(sej·J ⁻¹ , sej·g ⁻¹ , sej·\$ ⁻¹)
		(J·a ⁻¹ , g·a ⁻¹ , \$·a ⁻¹)	(sej·J ⁻¹ , sej·g ⁻¹ , sej·\$ ⁻¹)		
可更新资源					
1	河水重力势能	9.72×10^{14}	27764 ^①	2.69×10^{19}	
不可更新资源					
2	泥沙	4.9×10^{15}	63000 ^②	3.0×10^{20}	
有效能输出					
3	经济收益(发电)	2.21×10^{15}	159000 ^①	3.52×10^{20}	
4	经济收益(航运)	2.0×10^5	1.01×10^{12} ^③	2.02×10^{17}	
5	水产品	7.6×10^{14}	440 ^②	3.34×10^{17}	
6	调洪	1.34×10^6	1.01×10^{12} ^③	1.41×10^{18}	
7	灌溉	1.44×10^{11}	9.7×10^8 ^②	1.39×10^{20}	
	小计 Y(3+4+5+6+7)			4.92×10^{20}	
能值投入					
8	运转维修	1.28×10^6	1.01×10^{12} ^③	1.82×10^{19}	
9	建筑费用	2.19×10^7	1.01×10^{12} ^③	2.21×10^{19}	
10	淹没农产品(玉米)	2.08×10^{14}	8.52×10^4 ^①	1.78×10^{19}	
11	淹没农产品(水稻)	4.1×10^{10}	9.7×10^8 ^②	3.9×10^{19}	
12	林草损失	3.12×10^{14}	2750 ^④	8.58×10^{17}	
13	灌溉投资	1.0×10^6	1.01×10^{12} ^③	1.01×10^{18}	
14	移民安置	5.2×10^6	1.01×10^{12} ^③	5.25×10^{18}	
	小计 F(8+9+10+11+12+13+14)			1.04×10^{20}	

注:①源自 Odum(1996); ②源自 Brown&McClanahan(1996); ③源自本研究计算, 内蒙古地区能值货币比率; ④源自 Kang&Park(2002).

表4 尼尔基库区生态系统能值综合评价结果

Table 4 Comprehensive energy-based assessment results of the Nierji reservoir ecosystem

指标类别	能值指标	大坝建设后	大坝建设前
	EYR	4.73	1.19
运行效率	能值产投比	1.14	0.76
	环境产出率	0.32	0.76
组织结构	不可更新资源能值比	0.70	0.03
	可更新资源能值比	0.06	0.33
功能维持	能值自给率	76%	36%
	能值密度/(sej·m ⁻²)	1.02×10^{12}	1.28×10^{11}
环境安全	环境负载率 ELR	15.01	2.03
	可持续性指数 ESI	0.31	0.59

3.1 生态系统运行效率

大坝建成后, 库区生态系统能值产出率为

4.73, 是大坝建设前的 4 倍左右, 较高的能值产出率表示系统获得经济发展的机会和数额相对较高, 表明大坝建设带来的各种社会经济投入对生态系统运行效率带来积极影响。有效能值输出和社会经济系统反馈过程处于良性循环状态, 能值投入产出较大坝建设前增加近 1 倍, 表明生态系统整体投入的能值转换率显著提高, 能量实现更有效利用, 生态系统由低投入、低产出农业生态系统向有效投入、高效产出复合生态系统转变, 整体生产效率全面提高。环境产出率为 0.32, 较建坝前有明显减少, 主要由于建坝年限较短, 水文调节、生物多样性保护等服务功能具有响应上的滞后性, 各项服务功能总能值有所提高, 但不如电力、航运等经济产出增加明显。随着大坝蓄水年限增加, 结构趋于稳定, 系统的竞争力将进一步加强。

3.2 生态系统组织结构

大坝建设前, 生态系统受人为干扰较少, 自然环境支撑能力强, 可更新资源占生态系统可利用能值比例较大, 大坝建设后不可更新资源能值比上升, 占可利用能值的 70%, 可更新资源能值比仅占 6%, 表明大坝建设改变生态系统资源利用结构, 破坏河流纵向连续性, 导致库区土壤资源严重损耗。不可更新资源能值比与韩国某多功能大坝 (Kang *et al.*, 2002) 对比, 约高出 40%, 原因推测有两个, 其一是蓄水后不稳定库岸增多, 局部有塌岸发生, 大量泥沙淤积; 其二是嫩江上游近人为开荒、矿山开采使水土流失增强, 尼尔基大坝上游河段缺乏大型水坝拦截, 泥沙大部分于尼尔基库区沉积, 无法向下游传递, 成为大坝生态系统不可更新能值输入的主要来源。应加强库岸稳固和上游水土保持, 减轻库区土壤资源损耗。

3.3 生态系统功能维持

大坝建成前, 系统对内部自然资源的开发程度不高, 大部分能值来源于社会经济投入, 能值自给率为 36%, 自给自足能力一般; 大坝建成后, 随着购买能值投入增大, 能值自给率提高至 76%, 表明社会经济系统反馈提高了库区生态系统经济发展程度, 改变了系统内部组织结构, 促进资源利用方式的改变, 内部自然资源得到更有效利用。

大坝建设前, 生态系统产出主要以农牧产品为主, 单位面积能值产出很小, 大坝建成后, 该区域开发活动强度增加, 能量使用集约化程度提高, 单位面积能值产出是建坝前的 10 倍多, 科技、机械、

技术等投入提高了库区生态系统对自然资源和社会资源能量的利用效率。

3.4 生态系统环境安全

大坝建设前生态系统受人类活动干扰较小, 系统发展依赖自然环境支持, 环境负荷很小, 国外研究表明, 建坝后环境负载率会普遍提高, 尼尔基大坝建设后库区环境负载率为 15.01, 是建坝前环境负载率的 7 倍多, 是湄公河 Pa Mong 坝、Chiang Khan 坝、韩国某多功能大坝建坝后环境负载率的 5.1、4.7、4.8 倍, 其原因是由于一方面尼尔基大坝位于松嫩平原, 地理位置不同于其他大坝处于高山峡谷, 淹没面积、移民等社会经济系统反馈投入和不可更新能值输入较大, 给大坝生态系统带来较大压力, 另一方面大坝这一水工建筑能值利用强度较高, 若系统长期处于这样一种高环境负荷中, 生态系统可能会产生不可逆转的功能退化或丧失, 需减少对系统不可更新资源的开发利用和对外界输入能值的依赖, 减轻生态系统环境负荷。

建坝前生态系统可持续发展指标为 0.59, 小于 1, 说明系统本身可持续发展能力不强, 属于消费型系统, 建坝后指数下降至 0.31, 大坝建设虽提高了系统生产效率, 但系统环境负荷增长速度高于生产效率的提高, 这种高产出、高压力的生态系统须进行结构调整, 长期处于高负荷运转状态, 难以保证可持续发展。

4 结论(Conclusions)

1) 将能值分析的方法与思路, 引入大坝生态效应评价研究中, 有利于对生态系统变化实现客观、真实的统一衡量。以库区生态系统为研究边界, 将建坝前后物质流、能量流、货币流变化统一到热力学平台, 针对自然系统输入和社会经济系统输入, 生态服务功能输出和经济输出, 编制能值分析表, 绘制能值流图, 建立了包括运行效率、组织结构、功能维持和环境安全 4 个方面共 9 个指标的大坝生态效应综合评价指标体系, 可用于横向比较大坝建设导致的库区生态系统能量流动方式、运转速率等的变化。

2) 以尼尔基大坝库区为例进行研究, 结果表明, 大坝建成后, 随社会经济投入增加, 库区生态系统运行效率、功能维持能力有所提升, 上游泥沙与塌岸沉积物在库区过度累积, 组织结构方面出现不平衡, 对不可更新资源消耗增大, 对外界输入能

值依赖性强,由此导致环境负荷升高,可持续发展能力降低,需进行结构调整。

3)本文研究范围为尼尔基大坝库区。时间上,尼尔基大坝建成仅3年,库区生态系统未完全形成新平衡状态,组织结构会发生变化;空间上,大坝生态效应涉及范围包括上下游乃至河口地区。应基于长时间序列、大尺度数据监测与调查,开展大坝生态效应时空传递规律研究,为大坝管理提供系统参照。

责任编辑简介:赵彦伟(1974—),男,讲师,博士。E-mail: awei-a@163.com。

参考文献(References):

- Bednarek A T. 2001. Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal[J]. Environmental Management, 27(6): 803—814
- Brismar A. 2002. River systems as providers of goods and services: A basis for comparing desired and undesired effects of large dam projects[J]. Environmental Management, 29(5): 598—609
- Brown M T, McClanahan T R. 1996. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals [J]. Ecological Modelling, 91: 105—130
- 蔡旭东. 2007. 水利工程的生态效应区域响应研究[D]. 南京:河海大学. 26—32
- Cai X D. 2007. Study on regional response to ecological effects due to hydro-project [D]. Nanjing: Hohai University. 26—32 (in Chinese)
- 曹勇,陈吉余,张二凤,等. 2006. 三峡水库初期蓄水对长江口淡水资源的影响[J]. 水科学进展, 17(4): 554—558
- Cao Y, Chen J Y, Zhang E F, et al. 2006. Influence of Three Gorge reservoir filled with water on freshwater resource in the Yangtze River estuary[J]. Advances in Water Science, 17(4): 554—558 (in Chinese)
- 陈春锋,王宏燕,肖笃宁,等. 2008. 基于传统生态足迹方法和能值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较[J]. 应用生态学报, 19(11): 2544—2549
- Chen C F, Wang H Y, Xiao D N, et al. 2008. Comparison of sustainable development status in Heilongjiang Province based on traditional ecological footprint method and emergy ecological footprint method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 19(11): 2544—2549 (in Chinese)
- Cuadra M, Rydberg T. 2006. Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua [J]. Ecological Modelling, 196(3-4): 421—433
- 崔保山,翟红娟. 2008. 水电大坝扰动与栖息地质量变化——以漫湾电站为例[J]. 环境科学学报, 28(2): 227—234
- Cui B S, Zhai H J. 2008. Quality evaluation of habitats disturbed by the Manwan Hydropower Dam [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(2): 227—234 (in Chinese)
- 杜博洋,门明新,许皞,等. 2008. 基于能值分析的河北省农田生态系统资源环境效应综合评价[J]. 资源科学, 30(8): 1236—1242
- Du B Y, Men M X, Xu H, et al. 2008. Comprehensive evaluation of environmental resources and farmland ecosystems in Hebei Province based on emergy theory[J]. Resources Science, 30(8): 1236—1242 (in Chinese)
- Frutiger A. 2004. Ecological impacts of hydroelectric power production on the River Ticino. Part 1: Thermal effects [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 159(1): 43—56
- Fu K D, He D M. 2007. Analysis and prediction of sediment trapping efficiencies of the reservoirs in the mainstream of the Lancang River [J]. Chinese Science Bulletin, 52(2): 134—140
- 郭乔勇,李春晖,崔保山,等. 2003. 拉西瓦水电工程对区域生态影响分析[J]. 自然资源学报, 18(1): 50—57
- Guo Q Y, Li C H, Cui B S, et al. 2003. The impact of the Laxiwa Dam on regional eco-environment[J]. Journal of Natural Resources, 18(1): 50—57 (in Chinese)
- 侯锐. 2006. 水电工程生态效应评价研究[D]. 南京:南京水利科学研究院. 38—39
- Hou R. 2006. Study on the assessment of the hydropower ecological effect[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute. 38—39 (in Chinese)
- Kang D, Park S S. 2002. Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea[J]. Journal of Environmental Management, 66: 293—306
- 刘耕源,杨志峰,陈彬,等. 2008. 基于能值分析的城市生态系统健康评价[J]. 生态学报, 28(4): 1720—1728
- Liu G Y, Yang Z F, Chen B, et al. 2008. Emergy-based urban ecosystem health assessment: a case study of Baotou city[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(4): 1720—1728 (in Chinese)
- 马小凡,郭晓泽,王菊,等. 2005. 水坝工程建设与生态保护的利弊关系分析[J]. 地理科学, 25(5): 621—625
- Ma X F, Guo X Z, Wang J, et al. 2005. Advantages and disadvantages analysis of dam construction and eco-environment protection [J]. Scientia Geographica Sinica, 25(5): 621—625 (in Chinese)
- 毛战坡,王雨春,彭文启,等. 2005. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 16(1): 134—140
- Mao Z P, Wang Y C, Peng W Q, et al. 2005. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Advances in Water Science, 16(1): 134—140 (in Chinese)
- Nichols S, Norris R, Macher W, et al. 2006. Ecological effects of serial impoundment on the Cotter River, Australia [J]. Hydrobiologia, 572: 255—273
- Odum H T, Odum E C. 1987. Ecology and Economy: Emergy Analysis and Public Policy in Texas [M]. Texas: the Office of Natural Resources and Texas Department of Agriculture. 163—171
- Petts G E. 1984. Impounded Rivers: Perspectives of Management[M]. Chichester, UK: John Wiley. 12—25
- 祁继英,阮晓红. 2005. 大坝对河流生态系统的环境影响分析[J]. 河海大学学报, 33(1): 37—40

- Qi J Y, Ruan X H. 2005. Dam construction-induced environmental impact on riverine ecosystem[J]. *Journal of Hohai University*, 33(1): 37—40 (in Chinese)
- 任丽燕,吴次芳,岳文泽. 2009. 西溪国家湿地公园生态经济效益能值分析[J]. *生态学报*, 29(3): 1285—1291
- Ren L Y, Wu C F, Yue W Z. 2009. Emergy analysis of ecological economic system of Xixi National Wetland Park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(3): 1285—1291 (in Chinese)
- Rydberg T, Haden A C. 2006. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 117(2-3): 145—158
- 魏国良,崔保山,董世魁,等. 2008. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. *环境科学学报*, 28(2): 235—242
- Wei G L, Cui B S, Dong S K, et al. 2008. Impact of Hydropower development on river ecosystem service: a case study from the Manwan Hydropower Project[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 28(2): 235—242 (in Chinese)
- Woodward A, Schreiner E G, Crain P, et al. 2008. Conceptual models for research and monitoring of Elwha dam removal-Management perspective[J]. *Northwest Science*, 82: 59—71
- 肖建红,施国庆,毛春梅,等. 2007. 水坝对河流生态系统服务功能影响评价[J]. *生态学报*, 27(2): 526—537
- Xiao J H, Shi G Q, Mao C M, et al. 2007. Evaluation of effects of dams on river ecosystem service functions in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 27(2): 526—537 (in Chinese)
- 姚维科,崔保山,董世魁,等. 2006. 水电工程干扰下澜沧江典型段的水温时空特征[J]. *环境科学学报*, 26(6): 1031—1037
- Yao W K, Cui B S, Dong S K, et al. 2006. Spatio-temporal characteristics of Lancangjiang River water temperatures along the representative reaches disturbed by hydroelectric power projects[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(6): 1031—1037 (in Chinese)
- 姚维科,崔保山,刘杰,等. 2006. 大坝的生态效应:概念、研究热点及展望[J]. *生态学杂志*, 25(4): 428—434
- Yao W K, Cui B S, Liu J, et al. 2006. Ecological effects of dam: Concepts, research hotspots and prospects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(4): 428—434 (in Chinese)
- Zhou S C, Tang T, Wu N C, et al. 2008. Impact of small dam on riverine zooplankton[J]. *International Review of Hydrobiology*, 93(3): 297—311