

DOI: 10.5846/stxb201306091484

庞明月, 张力小, 王长波. 基于能值分析的我国小水电生态影响研究. 生态学报, 2015, 35(8): 2741-2749.

Pang M Y, Zhang L X, Wang C B. Emergy evaluation for ecological impacts of small hydropower in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2741-2749.

基于能值分析的我国小水电生态影响研究

庞明月, 张力小*, 王长波

北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 如何系统定量地评价小水电开发过程所引起的景观变化、河流局部断流等生态影响, 是平息争议、进行合理规划与开发小水电前提之一。运用能值分析方法, 以贵州省赤水市观音岩水电站为例, 将小水电建设、运行的资源投入, 以及河道中水流的时空改变所导致生态服务功能的损失纳入核算体系, 对其生态影响进行综合定量评估。从 2010 年的实际结果来看, 由于河流断流, 导致水坝下游生态系统服务功能的能值损失为 2.77×10^{18} sej, 占到了系统建设运行总投入的 44.84%, 其中重点保护鱼种在影响河段的生境破坏是最大的能值损失。若不考虑下游生态系统服务功能损失, 系统的环境负载率为 1.92, 可持续性指标为 1.22; 而考虑下游生态影响之后, 系统环境负载率增大至 4.26, 可持续性指标减小为 0.34。研究表明, 小水电的开发必须遵循适度开发、规划优先, 保障河流最基本的生态需水底线, 是协调小水电开发和河流健康矛盾、追求小水电可持续发展的刚性要求。

关键词: 小水电; 生态系统服务功能; 能值分析; 生态影响

Emergy evaluation for ecological impacts of small hydropower in China

PANG Mingyue, ZHANG Lixiao*, WANG Changbo

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

Abstract: In China, most of the small hydropower (short for SHP) plants are currently seeking for benefits in power generation and economic revenue with little consideration of environmental flows for ecosystems, causing great impacts on river ecosystem services in the downstream of the dams. Negative ecological impacts of small hydropower have drawn increasing attention from the public. This paper used emergy analysis, one of the ecological energetic accounting methods, to evaluate the overall ecological impacts of construction and operation of small hydropower and took Guanyinyan hydropower plant in Chishui City, northwest of Guizhou Province as an example. Having capabilities in accounting multiple forms of energy and materials both from environmental and economic points of view on a common energy basis, the method of emergy analysis was widely used for supporting the evaluation of agricultural, wetlands and urban systems and was proved to be a useful tool for evaluating the overall performance of a mixed ecological and economic systems. The related indices and ratios based on emergy flows such as emergy yield ratio (EYR), environmental loading ratio (ELR) and emergy sustainability index (ESI) can be used for characterizing resource consumptions, environmental impacts and overall system sustainability. Through incorporating losses of the downstream ecosystem services into the operation cost of the power production system, the results showed that the studied system was supported by a total emergy of 6.18×10^{18} sej in 2010 to produce 2.26×10^{13} J of electricity, of which the downstream ecosystem service losses was the largest among multiple marginal costs, accounting for 44.84% of total ecological economic cost. The losses of ecosystem service mainly included those due to biodiversity losses (especially rare species losses) and climate regulation losses, with 2.77×10^{18} and 4.63×10^{13} sej/a respectively. Without considering the ecosystem service losses, the ELR of the studied system was 1.92 and the ESI was 1.22. However, when considering ecosystem service losses, the ELR of the studied system increased to 4.26, which was much larger than those of

收稿日期: 2013-06-09; 网络出版日期: 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

large hydropower generation projects in Mekong River or those in Korea, showing an increased pressure on local environment. And the value of ESI decreased to 0.34, which was much lower than 1, indicating that the studied power production system was not sustainable. Furthermore, the results suggested that the degradation of river ecosystem in the downstream of the dam during operation period greatly reduced the sustainability of the system. Thus, for a small hydropower, occupying environmental flows of the downstream and the development pattern at the expense of the ecosystem approach would be unsustainable. Sufficient environmental flows would be essential to the river ecosystem in the downstream, especially for maintaining the aquatic biodiversity. Environmental-friendly and social harmonious development of water resources would be necessary to achieve sustainable development for small hydropower. Relevant authorities should strengthen the planning and management of water resources development to ensure the sustainability of small hydropower and the health of river ecosystem. In addition, this paper reflected that emergy analysis, as a measure of the environmental support and the work to keep ecosystem sustainability, is an effective tool that is capable of providing an integrative assessment, and then provide a basic for the sustainable development of small hydropower.

Key Words: small hydropower; ecosystem service; emergy analysis; ecological impacts

相比于备受争议的大型水电工程的生态影响^[1],小型水电站(简称小水电)的环境友好性似乎得到了公众的普遍认可,如 Paish 认为小水电工程简单,对当地生态环境的负面影响比大型水电工程要小得多^[2];实验方法证明在适度开发和采取合理保护措施的情况下,小水电不会对下游河流底栖藻类、水质和鱼类产生较大影响^[3-4];能值分析也显示小水电建设运行过程中的资源使用对生态环境的压力较小^[5]。基于这种对小水电环境友好性的认知以及解决偏远山区居民的用电问题,我国小水电自改革开放以来得到快速发展,截至 2011 年末,全国范围内已建成小型水电站 4.5 万多座,装机容量 6212 万 kW,年发电量 1757 亿 kWh^[6]。

但是,近些年我国快速甚至“过热”的小水电开发开始呈现盲目、无序等趋势,如在贵州省赤水市境内长 48.6km 的习水河干流上,所建小型水电站达 10 级之多,各级水电站水坝拦截与引流无序分配河水,导致在大多数年份下河流基本生态需水得不到满足,许多河段出现断流,河流生态系统退化严重,削弱了河流生态系统服务功能。因此,关于小水电开发生态影响的争议持续出现在学术界及媒体舆论中^[7-9]。但是,目前关于小水电生态环境影响的研究多为基于某一时间点与时间段的实验监测对单要素的定量分析,能够整合建设运行对区域资源环境压力、生态系统退化等影响的系统性评价较少见于报道。

能值分析方法是重要的生态能量方法之一,能够统一度量系统内储存和流动的各种形式物质和能量,以能量的集聚、结构与效率等特征指标来衡量系统的改变,能够对系统的生态环境影响和可持续发展水平进行综合定量分析^[10-14],目前已被用于国内外几座大型水电站的系统分析^[15-17],笔者也将其应用于小水电的可持续性分析^[5],为本研究提供了很好的基础。因此,本研究选取习水河干流上的观音岩水电站为例,将小水电建设、运行的资源投入,以及河道中水流的时空改变所导致生态服务功能的损失纳入核算体系,利用能值分析方法对其生态影响进行定量分析,以期对小水电开发和生态环境协调发展提供定量化依据。

1 研究对象与方法

1.1 观音岩水电站概述

观音岩水电站(N28°32′24.89″,E106°06′39.81″)位于贵州省赤水市官渡镇境内习水河干流上,为习水河干流赤水市境内河段水电梯级规划的第五级电站,项目总投资 2809.5 万元,始建于 2005 年,为坝后式水电站,其发电用水来自习水河上游,主要任务为水力发电。水电站拦河筑坝,集中落差,水库正常蓄水位容量为 121 万 m³,平均水头为 11.75m,水流由进水口经引水管道进入发电厂房发电,水轮机引用流量为 32.2m³/s,尾水经尾水渠排入习水河下游,水电通过变电设备向遵义市电网供电(图 1)。电站设计装机容量为 3200kW,年利用小时 3810h,年发电量为 1220 万 kWh。但因来水受季节性降雨和上游水电站的影响,电站实际运行情况

与设计规划存在一定差距,2010 年发电量仅为 633 万 kWh,上网 628 万 kWh,折算成年满发小时数为 1979h (表 1)。另外需要指出的是,在水坝下游约 2.28km 处有习水河一级支流长嵌河汇入。

1.2 小水电生态影响机理解析

一种事物对另外一种事物的影响,可以看作它们之间相互作用导致的特定改变。从某种意义上讲,改变就是一种影响,虽然这种影响或正或负。小水电的建设运行对生态环境的改变主要包括两方面:大量外部资源投入导致的能量集聚(表现为景观破坏)和拦截引流导致水量时空分布变化(表现为间歇性断流)导致的下游河段生态系统退化。



图 1 观音岩水电站景观图

Fig.1 Landscape photo of Guanyinyan SHP station

表 1 水电站设计运行清单

Table 1 The main characteristics of small hydropower plant

项目 Item	特征值 Characteristics	项目 Item	特征值 Characteristics
水头 Head of water/m	11.75	水轮机 Hydro-turbine	轴流定桨式 ZDJP401-LJ-161
装机容量 Installed capacity / MW	3.2	发电机 Electric generator	悬式 SF1.6-20/2150
流量 Discharge / (m ³ /s)	32.2	满负载运行小时数 Annual utilization hours /h	3810
年发电量 Annual generation / GWh	12.2	2010 年实际年发电量 Actual annual generation in 2010 / GWh	6.33

(1) 建设运行期间的外部资源投入

小水电在建设期间,需要大量来自社会的如水泥、机械设备、钢材等非可再生资源的投入;运行期间所需外部资源投入较少,但仍需要劳动力等的投入,如图 2 所示。从外部引入的这些资源在本地使用,虽然没有直接污染本地的生态环境,但使得本地系统因为能量的输入远离平衡态,破坏了系统原有的景观结构,对当地生态环境造成压力。

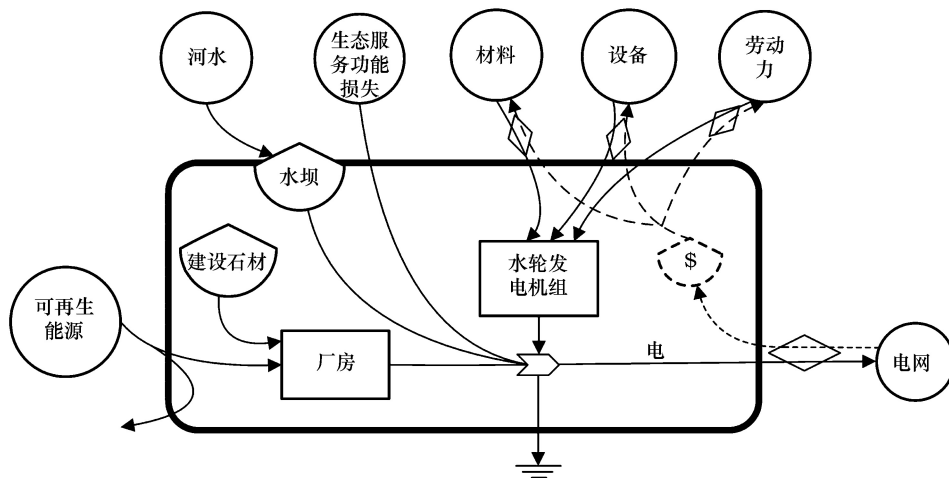


图 2 观音岩水电站的物质能量流动图

Fig.2 Diagram of the emergy flows in Guanyinyan SHP station

(2) 运行期间水坝下游河段生态系统退化

小水电拦河筑坝,不会改变河流的总水量,但会改变河水下泄的时间,从而改变了河流水体的自然时空分

布,中断河流生态系统原有的“时空连续性”^[7-8]。如图3所示,小水电在运行期间将连续的自然河流分成了三段水体:挡水坝以上河段(A)、水坝取水口与出水口之间的河段(B)以及出水口至支流汇入的河段(C)。对观音岩水电站2010年每日运行数据进行统计可知,水电站上游每日都有来水,即A河段不会出现无水情况,因此A、B、C三段水体的生境可分为图3中的I、II、III三种情景。其中,情景I即水坝出现溢流在2010年只有大约40d出现;大部分时刻处于情景II,即水轮发电机组在运转,但河坝无溢流,此时B段河流无水,C段获得发电下泄水量;除此之外,几乎每日都有不同时长的情景III间断出现,即水轮发电机组停止工作,无水溢流也无水发电下泄,B、C河段断流,2010年中有34个整天处于这种状态。

通过以上分析可知,B河段在一年中绝大部分时段都处于完全断流状态,河床裸露,不能为水生生物提供有效生境;而C河段因为几乎每日都有断流情况出现,对河流生境变化最为敏感的水生动物包括重点保护鱼种在此河段生境内不能生存,但此前研究表明在枯水期只要保证河流周期性的连通,不会对底栖藻类产生较大影响,因此在此河段水生植物可以正常生存。随着沿途大型支流汇入,河流生境逐渐恢复,为水生生物提供栖息地。此外在本研究中主要考虑小水电建设运行对水坝下游河道的生态环境影响,因此没有考虑小水电建设运行对水坝上游即A河段的影响。

1.3 能值分析

所谓能值是指产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的有效能总量^[10]。实际应用中,太阳能是包含在地球所有生物化学过程中最重要的能量,所以常以太阳能值为基准衡量某一能量的能值,单位为太阳能焦耳(sej)^[18-19]。不同类别的能量即能量(J)、质量(g)和货币(\$)通过单位能值价值(即UEV)转化成太阳能值,从而对系统进行定量比较和分析。当能量形式为焦耳时,UEV又可称为能值转换率^[20-21]。

根据输入资源是否免费以及是否具有可再生性,将其分为本地免费可更新资源(RL)、外界输入免费可更新资源(RO)、本地免费非可更新资源(NL)以及购入资源(P),其中购入资源又可分为可更新购入资源(PR)和非可更新购入资源(PN)。此外,运行成本中还包括小水电过度开发导致下游河道断流引起的生态系统服务功能损失(L_{ES}),表2列出了小水电系统不同资源输入及主要能值指标。

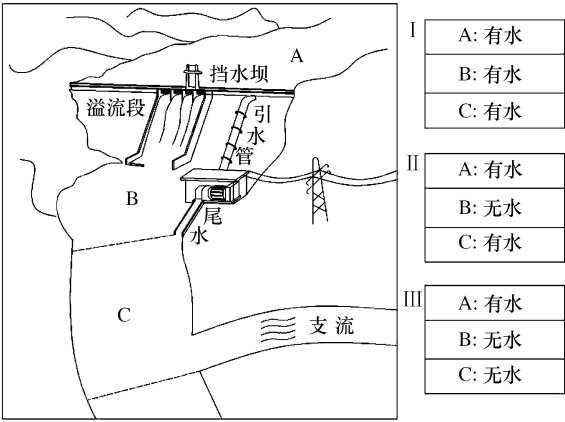


图3 案例小水电生态影响示意图
Fig.3 Diagram of ecological impacts of the studied system

表2 小水电系统的主要能值指标

Table 2 Energy indices for small hydropower system assessment

能值指标 Emergy indices	符号、计算公式 Symbol or formula	含义 Description
本地免费可更新资源 Local free renewable resources	RL	本地自然环境投入的可更新能值,如太阳能、雨能、风能、地热能等
外界输入免费可更新资源 Free renewable resources from outside	RO	从上游直接流入厂房的河水势能
本地免费非可更新资源 Local free nonrenewable resources	NL	本地直接投入的非可更新资源,主要为建设石材等
可更新购入资源 Renewable fraction of purchased resources	PR	从人类经济社会系统购入能值中的可更新部分
非可更新购入资源 Nonrenewable fraction of purchased resources	PN	从人类经济社会系统购入能值中的不可更新部分

续表2

能值指标 Emergy indices	符号、计算公式 Symbol or formula	含义 Description
生态系统服务功能损失 Ecosystem service losses	L_{ES}	系统运行导致的下游河段生态系统服务功能损失
能值总投入 Total emergy input	$U = RL + RO + NL + PR + PN + L_{ES}$	支撑系统运行的总能值需求
能值产出率 Emergy yield ratio	$EYR = U / (PR + PN + L_{ES})$	系统总产出能值与经济社会投入能值之比,表明系统从人类经济社会输入的能值对本地资源的开发能力
环境负载率 Environmental loading ratio	$ELR = (NL + PN + L_{ES}) / (RL + RO + PR)$	支撑系统运行的非可更新资源(本地和外界输入的)与可更新资源之比例,表明系统运行产生的环境负荷
可持续性指标 Emergy sustainability index	$ESI = EYR / ELR$	能值产出率与环境负载率的比值,衡量生产系统在单位环境负荷下的生产效率

2 结果与分析

2.1 观音岩水电站系统的能量流动

基于观音岩水电站工程设计和课题组的实地调研,建立了2010年观音岩水电站实际运行的系统能值核算表(表3)。需要指出的是该电站设计运行周期是30.5a,由于本研究是基于1a的静态核算,因此在能值核算清单中建设材料及发电设备等一次性投入能值均折算为年度的流动量。

表3 观音岩水电站系统能值核算表

Table 3 Emergy evaluation table of Guanyinyan SHP station system

项目 Item	原始数据 Raw data	可更新比例 Renewable factor	单位能值价值 Unit emergy value UEV/(sej/单位)	太阳能值 Solar emergy/sej
本地免费可更新资源 Local free renewable resources (RL)				
1 太阳能 Sunlight/J	2.10×10^{12}	1.00	$1^{[22]}$	2.10×10^{12}
2 雨水 Rain/J	3.82×10^9	1.00	$3.10 \times 10^4^{[22]}$	1.19×10^{14}
3 风能 Wind/J	1.84×10^9	1.00	$2.45 \times 10^3^{[22]}$	4.50×10^{12}
本地免费可更新资源总计 Total local free renewable resources (RL)				1.19×10^{14}
外界输入免费可更新资源 Free renewable resources from outside (RO)				
4 河水势能 River geopotential/J	2.62×10^{13}	1.00	$3.96 \times 10^4^{[15]}$	1.04×10^{18}
本地免费非可更新资源 Local free nonrenewable resources (NL)				
5 建设石材 Stone/g	5.41×10^8	0.00	$1.68 \times 10^9^{[23]}$	9.10×10^{17}
购入资源 Purchased input (P)				
6 建设水泥 Cement/g	1.64×10^8	0.00	$3.04 \times 10^9^{[24]}$	4.99×10^{17}
7 建设钢材 Steel/g	7.80×10^6	0.00	$4.24 \times 10^9^{[25]}$	3.31×10^{16}
8 建设木材 Wood/g	2.46×10^6	1.00	$6.77 \times 10^8^{[26]}$	1.67×10^{15}
9 炸药 Explosive/g	4.77×10^5	0.00	$4.19 \times 10^9^{[27]}$	2.00×10^{15}
10 建设用电 Electricity/J	2.21×10^{10}	0.00	$2.92 \times 10^5^{[10]}$	6.46×10^{15}
11 发电设备 Machinery/g	6.10×10^6	0.00	$1.13 \times 10^{10^{[15]}}$	6.87×10^{16}
12 柴油 Diesel fuel/J	8.70×10^{10}	0.00	$1.21 \times 10^5^{[28]}$	1.05×10^{16}
13 劳动力 Labor/J	8.14×10^{10}	0.90	$1.24 \times 10^6^{[27]}$	1.01×10^{17}
14 运行维护 Operation and maintenance/ \$	5.89×10^4	0.05	$6.28 \times 10^{12^{[29]}}$	3.70×10^{17}
15 建设服务 Construction services/ \$	4.70×10^4	0.05	$6.28 \times 10^{12^{[29]}}$	2.95×10^{16}
16 重新安置 Resettlement/ \$	1.18×10^4	0.05	$6.28 \times 10^{12^{[29]}}$	7.40×10^{16}

续表一

项目 Item	原始数据 Raw data	可更新比例 Renewable factor	单位能值价值 Unit energy value UEV/(sej/单位)	太阳能值 Solar energy/sej
可更新购入资源 Renewable fraction of purchased resources (PR)				1.30×10^{17}
非可更新购入资源 Nonrenewable fraction of purchased resources (PN)				1.33×10^{18}
购入资源总计 Total purchased input (P)				1.46×10^{18}
17 生态系统服务损失 Ecosystem service loss (L_{ES})				2.77×10^{18}
能值总投入 Total energy input (U)				6.18×10^{18}
产出 Yield (Y)				
18 水电 Electricity/J	2.26×10^{13}		2.73×10^5	6.18×10^{18}

①根据能值方法的最新发展,本研究采用 2000 年后 Odum 重新计算的驱动全球过程的能值量,即 15.83×10^{24} sej/a,为使得单位能值价值之间具有可比性,基于 9.44×10^{24} sej/a 计算得到的单位能值价值乘以 1.68 (15.83/9.44) 进行换算^[30];②劳动力投入主要分为建设和运行两个阶段,建设期工日为 9.28 万,除以 30.5 转化为年度流动量;运行期每年为 3442 工日;因此,2010 年劳动力总投入为 6485d,通过转换系数 3000×4.186 将其单位转换成焦耳

由核算结果可知,整个观音岩水电站生产系统 2010 年的能值总投入为 6.18×10^{18} sej,生产 2.26×10^{13} J 的水电,因此小水电的能值转换率为 2.73×10^5 sej/J。在能值结构,最大的投入是下游河流生态系统服务功能的损失 (2.77×10^{18} sej/a),占到总投入的 44.84%,说明观音岩水电站运行对下游河流生态系统产生的影响较大;其次河水重力势能和建设石材的投入分别是 1.04×10^{18} 和 9.10×10^{17} sej/a,分别为能值核算清单中第二、三大能值输入。而在本地免费可更新资源中,即太阳能、降雨和风能,雨水的能值 (1.19×10^{14} sej/a) 是最大的,为避免重复计算,只将雨水纳入到核算体系中。在购入资源中,水泥 (4.99×10^{17} sej/a)、运行维护 (3.70×10^{17} sej/a) 和建设服务 (主要包括水电站建设期间的机械使用费用等, 2.95×10^{16} sej/a) 是三个最大的能值投入,而其它建设材料所占比例很小。图 4 为观音岩水电站的主要能值输入即能值结构。

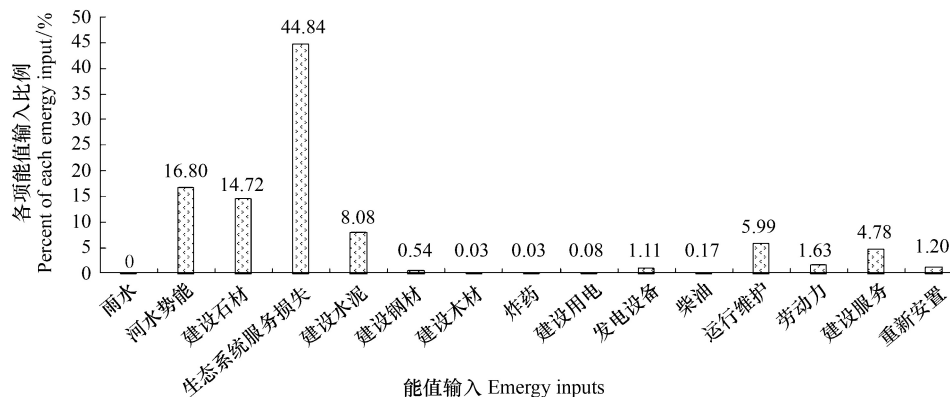


图 4 案例小水电的能值输入结构

Fig.4 Energy structure of Guanyinyan SHP station system

2.2 水坝下游生态服务功能损失的能值评估

小水电在运行期间挤占生态用水导致下游河道减脱水甚至断流的现象十分普遍,对河流水生生态系统造成了毁灭性破坏。实地调研得知,习水河干流官渡镇境内河段禁止捕捞鱼类、水生植物,因而不具有水产品生产功能,此外此河段有重点保护鱼类长吻鮠 (*Leiocassis longirostris*)。因此,河道减脱水甚至断流主要影响的是下游河段小气候调节与生物多样性维持功能等方面的能值损失。测量得到 B 河段水域面积为 7973.33 m^2 , C 河段水域面积为 74746.67 m^2 ,两河段总共水域面积为 82720 m^2 。根据上文的分析可知 7973.33 m^2 的水域面积因不能为水生植物提供生境而丧失气候调节功能;而 82720 m^2 的水域面积丧失了生物多样性维持功能。生物

多样性维持功能损失忽略其它非重点保护水生动物的能值损失,仅计算重点保护鱼种长吻鮠在此河段消失的能值损失,计算公式及结果见附表。

通过核算可知观音岩水电站 2010 年运行挤占下游河段生态用水导致其生态系统服务功能损失的能值为 2.77×10^{18} sej,主要是由重点保护鱼种长吻鮠在受影响河段消失导致生物多样性维持功能的丧失引起的,小气候调节功能的能值损失较小,仅为 4.63×10^{13} sej。可见,如果不能保障河道基本生态需水,仅以小水电发电为中心目标,就会破坏水生物种的生存生境,大大削弱其生态系统服务功能。

2.3 观音岩水电站生产系统综合分析

根据上述核算结果,进一步计算相关能值指标,为比较河流断流的影响,可分为考虑和不考虑下游河流生态系统退化两种情况,如表 4 所示。

表 4 观音岩水电站生产系统 2010 年主要能值指标
Table 4 Emergy indices for Guanyinyan SHP station system in 2010

能值指标 Emergy index	不考虑断流生态影响 Excluding ecological impacts from river cut-off	考虑断流生态影响 Including ecological impacts from river cut-off
能值转换率 Transformity/(sej/J)	1.51×10^5	2.73×10^5
能值产出率 Emergy yield ratio, EYR	2.33	1.46
环境负载率 Environmental loading ratio, ELR	1.92	4.26
可持续性指标 Emergy sustainability index, ESI	1.22	0.34

能值转换率是指系统生产单位物质所需投入的能值量。当不同系统生产相同的产品时,能值转换率可表征系统的生产效率。能值转换率低,生产相同的产品所需能量少,或者相同能量可生产出更多的产品,则说明系统生产效率高^[10,31]。本研究中,若考虑下游生态环境影响,小水电的能值转换率为 2.73×10^5 sej/J,大于湄公河上两座大坝的水电能值转换率(分别为 1.54×10^5 、 1.57×10^5 sej/J)^[15];而不考虑下游生态影响,其能值转换率为 1.51×10^5 sej/J,可见下游生态系统退化大大降低了小水电生态系统的生产效率。

环境负载率是评估系统对当地生态环境压力大小的一个重要指标,其值越大,系统对生态环境的压力越大,若持续处于较高的环境负载率,将会造成系统不可逆转的功能退化^[31-32]。若不考虑下游生态环境影响,观音岩水电站 2010 年的环境负载率为 1.92,低于湄公河上两座大坝(分别为 3.2、3.1)^[15],这与笔者之前关于小水电可持续研究中的结论相一致^[5],在没有下游生态系统退化的影响下,小水电的建设运行对生态环境的压力普遍较小;而考虑下游生态环境影响之后,环境负载率增大至 4.26,水电站由于过度开发挤占生态用水,下游河段生态系统退化严重,增大了水电站对生态环境的压力。

考虑下游河段的生态系统退化之后,系统能值产出率由 2.33 减小到 1.46,环境负载率增大,使得系统可持续性降低。可持续性指标表征系统的可持续发展能力,值越小,系统的可持续能力越差^[33-34]。本研究中,系统的 ESI 为 0.34,远小于 1,表明该水电站生产系统为消费型系统,长久来看是不可持续的;若不考虑下游生态环境影响,系统 ESI 为 1.22,两者对比说明下游河段生态系统的退化严重影响了小水电系统的可持续发展进程,进而表明小水电单纯追求发电效益,挤占下游河段生态用水、以生态环境破坏为代价的开发方式是不可持续的。

3 结论与启示

本研究以能值分析理论为基础,将小水电运行导致的水坝下游生态系统服务功能损失计入其运行成本,定量分析了小水电开发运行的生态环境影响,结果表明:

(1) 2010 年观音岩水电站运行需要 6.18×10^{18} sej 的能值投入,其中由下游河流断流导致的生态系统服务功能损失能值为 2.77×10^{18} sej,占到系统能值总投入的 44.84%,是系统运行的最大消耗项。而在生态系统服务功能损失中,重点保护鱼种长吻鮠在受影响河段消失损失的能值最大,破坏水生生物的栖息地是小水电过

度开发对下游最主要的影响之一。

(2)若忽略水坝下游生态系统退化,系统的 ELR 为 1.92,低于大型水电站的此项指标,而 ESI 为 1.22,系统可持续能力较强;而考虑此影响之后,研究系统的 ELR 增大至 4.26,ESI 减小为 0.34,系统对当地生态环境压力过大,是不可持续的,进而表明盲目无序的小水电开发方式不符合可持续发展的原则。

(3)从本研究的结果来看,如果给小水电设定一个开发底线,即在保障河流生态需水的前提下,小水电开发对生态环境的影响较小。但在目前工业、农业、生活等多家争水的格局下,河流生态需水很难得到保障,小水电的无序开发无疑加剧了河流生态系统退化的步伐。

(4)小水电开发虽不改变水资源总量,但通过拦截与引流分配,大大改变了河流水体的时空分布,间接影响了水资源的可用性。因此,流域小水电开发要生态优先、规划先行,既要避免“大马拉小车”,造成水能资源浪费,又要避免“小马拉大车”,发电负荷不能满足,进而大大挤占河流生态需水,造成河流生态系统持续退化,最终达到小水电开发和生态环境协调发展的目的。

附表 观音岩水电站运行造成的水坝下游生态系统服务损失的能值计算表

Appendix Emergy evaluation of the ecosystem service losses in the downstream of the dam caused by the operation of the station

项目 Item	公式 Formula	结果 Value/(sej/a)	相关参数含义及取值 Description and values of relevant parameters
气候调节功能损失能值损失 Emergy losses of climate regulation	$E_1 = DM_i \times 1.63 \times Tr_{CO_2} + DM_i \times 1.20 \times Tr_{O_2}$ [35]	4.63×10^{13}	DM_i 为水生植物干物质损失量, 45.83 g/a [36]; Tr_{CO_2} 为 CO_2 的能值转换率, $6.35 \times 10^7 \text{ sej/g}$ [35]; Tr_{O_2} 为 O_2 的能值转换率, $8.58 \times 10^7 \text{ sej/g}$ [35]
生物遗传信息的能值损失 Emergy losses of biodiversity	$E_2 = u_0 \times s_0 / s$ [37]	2.77×10^{18}	u_0 为物种的平均能值转换率, $2.11 \times 10^{25} \text{ sej/种}$ [37]; s_0 为受小水电运行影响的面积, 82720 m^2 ; s 为全球长吻鮠的分布面积, 约为 630087 km^2 [38]

参考文献 (References):

- [1] Scudder T. The Future of Large Dams: Dealing with Social, Environmental, Institutional and Political Costs. London: Earthscan, 2005.
- [2] Paish O. Small hydro power: technology and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(6): 537-556.
- [3] 吴乃成. 应用底栖藻类群落评价小水电对河流生态系统的影响——以香溪河为例. 武汉: 中国科学院, 2007.
- [4] Santos J M, Ferreira M T, Pinheiro A N, Bochechas J H. Effects of small hydropower plants on fish assemblages in medium-sized streams in central and northern Portugal. Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems, 2006, 16(4): 373-388.
- [5] 庞明月, 张力小, 王长波. 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析. 生态学报, 2014, 34(3): 537-545.
- [6] 中华人民共和国水利部. 新华社: 中国扩大农村水电规模助解能源环境危机, 2012. Available from: http://www.mwr.gov.cn/slzx/mtzs/xhsxhw/201205/t20120525_321968.html.
- [7] 张继业. 四川天全白沙河流域小水电梯级开发的景观影响研究与评价体系构建. 四川: 四川农业大学, 2007.
- [8] 王强. 山地河流生境对河流生物多样性的影响研究. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [9] 中华人民共和国水利部. 光明日报: 小水电开发过度了吗——访国际小水电组织协调委员会主席田中兴, 2011. Available from: http://www.mwr.gov.cn/slzx/mtzs/gmrb/201110/t20111013_306577.html.
- [10] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [11] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [12] 张力小. 生态系统的能值分析 // 蔡晓明, 蔡博峰. 生态系统的理论和实践. 北京: 化学工业出版社, 2012: 249-270.
- [13] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. Energy Policy, 2007, 35(7): 3843-3855.
- [14] 张力小, 杨志峰, 陈彬, 刘耕源, 梁竞. 基于生物物理视角的城市生态竞争力. 生态学报, 2008, 28(9): 4344-4352.
- [15] Brown M T, McClanahan T R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. Ecological Modelling, 1996, 91(1/3): 105-130.
- [16] Kang D, Park S S. Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3):

293-306.

- [17] Yang J, Tu Q, Liu B L. The estimate of sediment loss in the Emergy-based flows of hydropower production system // Brown M T, ed. *Emergy Synthesis 7*. FL: University of Florida Gainesville, 2012.
- [18] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 1996, 19(3): 219-235.
- [19] 胡秋红, 张力小, 王长波. 两种典型养鸡模式的能值分析. *生态学报*, 2011, 31(23): 7227-7234.
- [20] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H.T.Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 201-213.
- [21] Zhang L X, Hu Q H, Wang C B. Emergy evaluation of environmental sustainability of poultry farming that produces products with organic claims on the outskirts of mega-cities in China. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 128-135.
- [22] Odum H T, Brown M T, Brandt-Williams S. Folio #1: Introduction and Global Budget. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000.
- [23] Chen D, Webber M, Chen J, Luo Z H. Emergy evaluation perspectives of an irrigation improvement project proposal in China. *Ecological Economics*, 2011, 70(11): 2154-2162.
- [24] Pulselli R M, Simoncini E, Ridolfi R, Bastianoni S. Specific emergy of cement and concrete: an energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 647-656.
- [25] Zhang X H, Jiang W J, Deng S H, Peng K. Emergy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998-2004. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(11): 1030-1038.
- [26] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, Tiezzi E. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 2001, 9(4): 365-373.
- [27] Brown M T, Bardi E. Folio #3: Emergy of ecosystems. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2001.
- [28] Ingwersen W W. Uncertainty characterization for emergy values. *Ecological Modelling*, 2010, 221(3): 445-452.
- [29] Chen S Q, Chen B. Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: An emergy synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3948-3959.
- [30] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, Chen B. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 683-694.
- [31] Zhang L X, Song B, Chen B. Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 33-44.
- [32] 李双成, 傅小峰, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. *自然资源学报*, 2001, 16(4): 297-304.
- [33] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 1998, 108(1/3): 23-36.
- [34] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 1997, 9(1/2): 51-69.
- [35] 李睿倩, 孟范平. 填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例. *生态学报*, 2012, 32(18): 5825-5835.
- [36] 刘乃壮, 张永红. 淡水浮游植物气候生产力的生态模拟与地理分布. *水产学报*, 1992, 16(4): 297-306.
- [37] 孙洁斐. 基于能值分析的武夷山自然保护区生态系统服务功能价值评估. 福建: 福建农林大学, 2008.
- [38] 中国水文信息网: 长江流域流域概况(图), 2003. Available from: http://www.hydroinfo.gov.cn/swqbyb/lygk/200309/t20030922_49003.html.