

DOI: 10.20103/j.stxb.202403280663

井沛然, 盛金保, 胡铁松, 郭利丹, 董凯. 考虑社会-经济-生态损失的重大水电工程系统可持续性分析. 生态学报, 2025, 45(3): 1184-1198.

Jing P R, Sheng J B, Hu T S, Guo L D, Dong K. Sustainability analysis of hydropower megaproject system incorporating the social-economic-ecological losses. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1184-1198.

考虑社会-经济-生态损失的重大水电工程系统可持续性分析

井沛然^{1,2}, 盛金保^{2,*}, 胡铁松¹, 郭利丹³, 董 凯²

1 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072

2 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029

3 河海大学商学院, 南京 211100

摘要: 重大水电工程可持续开发运行是流域水资源可持续管理的重要组成。因此, 如何量化工程建设运行所造成的多重损失对重大水电工程系统可持续性的影响是关键科学问题。提出了一种考虑社会-经济-生态损失的可持续性能值评估模型 (ESM-SEEL), 将水电开发运行造成的社会损失、经济损失和生态系统服务损失作为能值分析的关键组分集成到能值核算账户中。以三峡工程为研究对象, 对 1993—2022 年 30 年间三峡工程系统可持续性的时间演变规律与特征进行综合评价与对比分析。结果表明: 1) 入库径流化学势能 (2.77×10^{24} sej) 和能值损失 (1.48×10^{24} sej) 是三峡工程系统的主要投入项, 分别占能值总投入的 52.1% 和 27.9%。防洪功能产生了显著的社会经济效益 (1.27×10^{24} sej), 占能值总产出的 35.2%。2) 移民安置补偿、运行期水污染、鱼类生物多样性损失和泥沙淤积是三峡工程的主要损失项, 分别占能值总损失的 77.7%、8.8%、5.5% 和 2.5%。3) 能值可持续性评估指标表明, 三峡工程系统可持续性波动上升, 可持续性指数 (IESI) 的变化趋势与三峡工程以及长江流域水旱实际情况一致, 即径流总量偏丰 (枯) 的年份 IESI 值相对较高 (低)。因此, 在实现水电工程效益最大化的同时, 降低系统社会-经济-生态损失是促进长江流域水电开发与生态环境协调发展的关键途径。研究结果为在水电工程尺度上理解人-水系统之间的复杂关系以及重大水电项目可持续性评估提供理论指导和科学依据。

关键词: 能值; 重大水电工程; 水资源; 可持续管理; 损失; 三峡工程

Sustainability analysis of hydropower megaproject system incorporating the social-economic-ecological losses

JING Peiran^{1,2}, SHENG Jinbao^{2,*}, HU Tiesong¹, GUO Lidan³, DONG Kai²

1 State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

3 Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: The sustainable development of hydropower megaproject (HM) is a crucial component of sustainable water resources management within the river basin. Hence, quantitatively appraising the multiple losses caused by construction and operation on HM sustainability is a critical and complex task. This study proposed an energy-based sustainability evaluation model incorporating the social-economic-ecological losses (ESM-SEEL), integrating the SEEL during the construction and operation of the HM system into the emergy calculation account. The Three Gorges Project (TGP) was selected as a case study, and the comprehensive evaluation and comparative analysis of the temporal evolution and

基金项目: 国家自然科学基金 (52179022); 国家重点研发计划 (2022YFC3005400); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y723001)

收稿日期: 2024-03-28; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jbshengnhri@163.com

sustainability characteristics of the TGP system from 1993 to 2022 was carried out. The results showed that: 1) The inflow runoff chemical potential energy (2.77×10^{24} sej) and the energy losses (1.48×10^{24} sej) are the primary input sections of the TGP system, accounting for 52.1% and 27.9% of the total energy inputs, respectively. The flood control function of the TGP has generated significant socio-economic benefits (1.27×10^{24} sej), accounting for 35.2% of the total energy output. 2) The resettlement compensation, water pollution during operation, fish biodiversity loss, and sediment deposition are the main losses of the TGP, accounting for 77.7%, 8.8%, 5.5%, and 2.5% of the energy losses, respectively. 3) The energy-based sustainability assessment indicators showed that the sustainability level of the TGP is increasing, and the improved energy sustainability index (IESI) is consistent with the actual situation of the TGP and the drought-flood years in the Yangtze River basin. IESI values are higher (lower) in years characterized by abundant (insufficient) river runoff. Therefore, along with maximizing the benefits of the HM system, reducing the HM system's losses is a critical approach to coordinate the hydropower development and ecological environment in the Yangtze River basin. This study helps to understand the complex relationship between people and water and provides theoretical guidelines and scientific foundations for the sustainability assessment of hydropower.

Key Words: energy; hydropower megaproject; water resources; sustainable management; loss; Three Gorges Project (TGP)

重大水电工程是耦合水资源-能源-粮食-生态环境系统中自然过程与人工过程的重要纽带,在流域水旱灾害防御、饮用水安全保障、能源与粮食供给、生态环境保护等方面具有不可替代的基础性作用^[1]。与此同时,水电工程建设与运行的生态效应及其引发的生态系统变化和响应也对流域社会经济发展和生态环境产生了持续深远的影响^[2-3]。例如大坝阻隔天然河流上下游之间的水力联系和物质能量交换,改变了河流连通性、河道形态、水文条件以及营养物、沉积物和污染物的流动等化学和生物物理过程^[4-5]。现有研究表明,全球长度超过 1000km 的河流中有 63% 建有水库大坝,占全球河流总数的 41%。这些变化导致河网受到破坏,改变了碳和营养物质从陆地向海洋的流动^[6]。筑坝后河流向下游运输的沉积物大幅减少,下泄水流在下游难以产生漫滩或挟带营养物质,也阻断了鱼类的洄游通道和野生动物的迁徙路线,改变下游生物的自然栖息地和物种群落,导致库区生态失衡和栖息地碎片化,对鱼类等水生生物的质量和数量产生诸多不利影响^[7]。因此,准确评估社会-经济-生态损失及其对重大水电工程系统可持续性的影响至关重要。而要系统评价损失的严重程度,必须对其进行量化,关键步骤就是用一个统一的术语来表达所有的生态效应及伴生的社会经济影响。相较于传统的物质-能量核算、经济价值货币化评估等方法,能值同时考虑了能量的数量大小和质量等级,能够更加客观、真实地反映生态资本流量和存量状况以及生态经济效益与价值贡献。本研究基于能值理论与分析方法,构建考虑社会-经济-生态损失的重大水电工程系统可持续性能值评估模型(ESM-SEEL),对三峡工程水能资源利用的可持续性进行评估,研究结果为重大水电工程系统可持续性评估与分析提供科学依据。

1 研究对象与数据来源

长江三峡水利枢纽工程(本研究简称三峡工程)位于湖北省宜昌市夷陵区三斗坪镇,地处鄂西南,长江中游。三峡工程是目前世界上规模最大、功能最多的综合利用水利枢纽工程,也是国家水网的重要结点和治理长江的关键性骨干工程。三峡工程建成后显著提升了长江流域水旱灾害防御能力,并且在优化水资源配置、清洁能源生产与节能减排、改善长江航运和渔业条件等方面产生了巨大的社会经济和生态环境效益^[8-9]。三峡工程蓄水后形成的三峡库区($105^{\circ}49' - 111^{\circ}50'E$, $29^{\circ}16' - 31^{\circ}25'N$)是目前世界上最大的水库淹没区。三峡水库蓄水至正常蓄水位 175m 时最大水域总面积为 1084km^2 。三峡工程下闸蓄水后水体增加了约 200 亿 m^3 ,总库容达 393 亿 m^3 。大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 185m,坝址处高程 4m,最大坝高 181m。三峡电站

由左、右岸厂房电站、地下电站及电源电站组成,总装机容量达 2250 万 kW,平均年发电量 882 亿 kWh。本研究采用的数据主要来源为:公开发表的与三峡工程建设运行和影响相关的国内外学术论文(集)、长江三峡工程运行实录(2003—2022 年)、长江三峡工程生态与环境监测公报(1997—2017 年)、长江泥沙公报(2003—2022 年)、三峡工程公报(2019—2022 年)、三峡工程环境保护年报(2005—2022 年)、长江三峡工程水文泥沙年报(2016—2022 年)等。

2 研究方法

2.1 能值理论与基本方法

能值理论基于系统论、能量学、生态经济学与生态热力学,探讨人类社会资源需求和生态系统生态供给之间的关系。由于不同存在形式的生态系统服务功能之间具有可通约性^[10],因此能值分析的原理就是将系统中不同类别、不可比较的能量转换成同一标准的能值来进行衡量和分析,并将系统中资源、产品或劳务形成所需要的直接和间接应用的太阳能之量定义为其所具有的太阳能值,以评价其在系统中的作用和功能^[11]。能值分析基本方法如下:

$$U = \sum_{i=1}^n f_i \times \tau_i \quad (1)$$

式中, U 为支撑系统运行所需要的总能值(sej); f_i 为系统输入的第 i 种物质或能量, $i=1,2,3,\dots,n$; τ_i 为第 i 种物质或能量的能值转化率,即单位能值。

2.2 重大水电工程系统可持续性能值评估模型

水电开发的生态效应及伴生的社会经济影响本质上是工程系统内物质流、能量流、信息流、资金流等生态流的投入和产出变化。因此,本研究基于投入产出分析思想和生态系统服务价值理论构建考虑社会-经济-生态损失的重大水电工程系统可持续性能值评估模型(ESM-SEEL)。该模型框架主要包括能值投入、能值产出和能值可持续性指标体系三部分(图 1):1)能值投入。主要包括河流生态系统为水电开发提供的资源、环境和生态支撑作用,人类社会经济系统为水电建设投入的物质、能量、资金等要素,工程建设运行期间所造成的各种经济损失、社会损失和生态系统服务损失。2)能值产出。即重大水电工程投产运行所能发挥的防洪、抗旱、供水、发电、航运、养殖、生态以及文化旅游等综合效益。(3)能值可持续性指标体系。根据计算得到的能值投入-产出结果,构建能值可持续性指标体系来评估重大水电工程系统可持续发展的水平和程度。

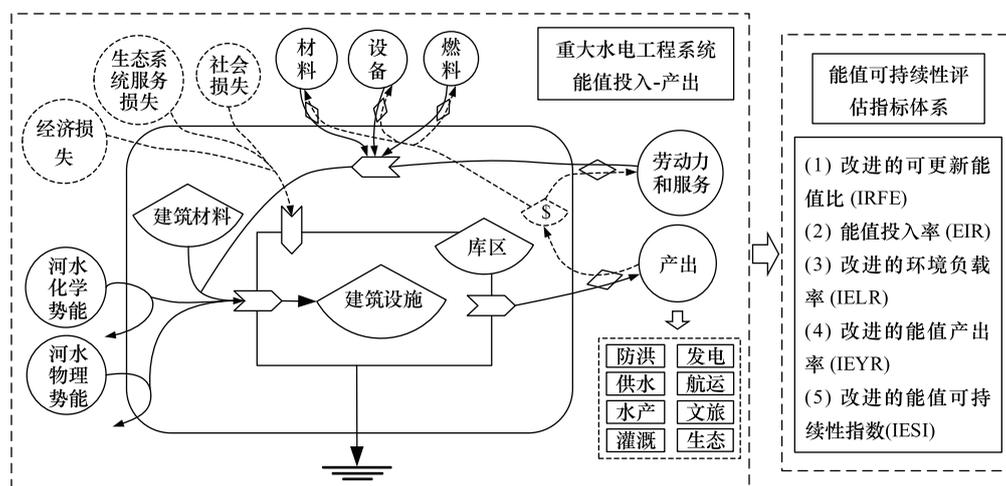


图 1 重大水电工程系统能值分析框架

Fig.1 Framework of the energy analysis of the hydropower megaproject system

2.2.1 能值投入模型

重大水电工程系统的能值总投入可分为 4 大类:可更新资源能值(R)、不可更新资源能值(N)、系统从外部购入资源能值(P)和系统社会-经济-生态损失能值(L)。具体来讲:1) R 主要包括河水物理势能和河水化学势能两方面。河水物理势能即河水的重力势能,主要用于水力发电,即为水体密度(kg/m^3)、水量(m^3)、重力加速度(m/s^2)和高程(m)的乘积^[12-13]。河水化学势能是水量(m^3)与河水吉布斯自由能的乘积(J/m^3)^[14]。2) N 主要包括系统内部和外界流入系统内部的不可更新能值。例如当地的石料、土壤等天然建筑材料。3) 水电工程建设运行需从外部社会经济系统购入相应的资源,即外部社会经济系统对工程系统开发运行的投入。例如投资(如枢纽工程建设、污染治理等)、能源(如电能、燃油等)、设备(如施工机械、生活设施等)、材料(如混凝土、钢筋等)。基于能值分析基本方法(公式 1), R 、 N 和 P 即为物质量或能量乘以相应的能值转换率(τ_i),具体计算模型详见文献^[14]。

在经济损失方面,水库建设运行导致耕地、园地、林地、牧草地等农业用地淹没,对原有区域内的农业种植结构产生负面影响,从而造成农业经济损失。此外,水库建设往往还伴随着农村移民补偿、城集镇迁建补偿、环保补助等移民安置补偿费用等。经济损失的能值(L_E)计算模型如下:

$$L_E = \sum_{i=1}^n Y_{\text{agr},i} \times A_{\text{agr},i} \times C_{\text{agr}} \times \tau_{\text{agr},i} + C_c \times \tau_c \quad (2)$$

式中, $Y_{\text{agr},i}$ 表示库区淹没范围内第 i 种土地的单位面积作物产量(kg/m^2); $A_{\text{agr},i}$ 表示第 i 种土地上作物种植总面积(m^2); C_{agr} 为农业用地淹没的单位换算系数($C_{\text{agr}} = 3.5\text{kcal}/\text{g} \times 4186\text{J}/\text{kcal}$)^[15]; C_c 表示移民补偿额度(元); $\tau_{\text{agr},i}$ 和 τ_c 分别表示相应的能值转换率(sej/J ; $\text{sej}/\text{元}$)。

在社会损失方面,水库蓄水后对当地社会结构、组织关系产生负面影响,还会产生大量非自愿移民^[16]。已有研究认为移民社会影响将持续一代人的时间(30 年)^[17]。此外,水库建设不仅淹没当地房屋和道路,还会淹没一批具有深厚文化价值的珍贵文物,造成严重的社会损失^[18-20]。社会损失的能值(L_S)计算模型如下:

$$L_S = \frac{30 \times \text{life}_o \times p \times \tau_{\text{imm}}}{\text{life}_d} + A_{\text{bui}} \times \tau_{\text{bui}} + P_{\text{cul}} \times \tau_{\text{cul}} \quad (3)$$

式中, p 表示受工程建设影响转移的人口数(人); life_d 和 life_o 分别表示工程设计使用年限和实际运行年限(a); τ_{imm} 为移民社会影响的能值转换率($\text{sej}/\text{人}$)。 A_{bui} 和 τ_{bui} 分别表示房屋道路淹没面积(m^2)和相应的能值转换率(sej/m^2)。 P_{cul} 和 τ_{cul} 分别表示重要文物古迹淹没的总经济损失(元)和相应的能值转换率($\text{sej}/\text{元}$)。

在生态损失方面,根据生态系统服务功能的内涵^[21-23]以及现有相关研究成果^[24-27],本研究将三峡工程建设和运行导致的生态系统服务功能损失分为气候调节、鱼类生物多样性、水土流失、泥沙淤积、水质污染、废气排放以及水面蒸发损失等 7 大类,具体如下:

(1) 气候调节损失

水库建成后在一定程度上改变了局部气候环境条件以及空气中的能量交换方式和强度,并且扩大了库区周边区域林地、草地的淹没范围,对当地植被造成永久性破坏,导致温室气体含量增加,氧气释放减少。本研究气候调节损失能值主要考虑淹没植被的固碳损失和光合作用产生氧气损失,计算模型如下:

$$L_{\text{O}_2\text{cli}} = L_{\text{O}_2\text{CO}_2} + L_{\text{O}_2\text{O}_2} = V_{\text{CO}_2} \times \tau_{\text{CO}_2} + V_{\text{O}_2} \times \tau_{\text{O}_2} \quad (4)$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1.63 \times (V_{\text{C}_\text{for}} + V_{\text{C}_\text{wet}} + V_{\text{C}_\text{far}} + V_{\text{C}_\text{gra}}) \quad (5)$$

$$V_{\text{O}_2} = \eta_{\text{O}_2/\text{CO}_2} \times V_{\text{CO}_2} \quad (6)$$

式中, $L_{\text{O}_2\text{cli}}$ 、 $L_{\text{O}_2\text{CO}_2}$ 和 $L_{\text{O}_2\text{O}_2}$ 分别表示水库建设造成气候调节损失、固碳损失和释氧损失的能值(sej)。 V_{CO_2} 和 V_{O_2} 分别为陆地生态系统固碳量和释氧量(t)。根据光合作用方程式,植物每积累 1g 干物质需要吸收 1.63g CO_2 并释放 1.2g O_2 。 V_{C_for} 、 V_{C_wet} 、 V_{C_far} 和 V_{C_gra} 分别为森林、湿地、耕地和草地等生态系统的固碳量(t)。 τ_{CO_2} 和 τ_{O_2} 分别代表固碳和释氧的能值转换率(sej/t)。此外, CO_2 、 O_2 和 C 的摩尔质量分别为 44g/mol、32g/mol 和 12g/mol,

因此, CO_2 中含 O_2 量的转化系数 $\eta_{\text{O}_2/\text{CO}_2} = 32/44$ 。

(2) 鱼类生物多样性损失

高坝大库建设扩大了水域面积,为水生动植物提供了生存空间,但蓄水后水库水温分层、水质退化和河流连通性受阻会对河湖生态系统原有水生生物的洄游时间、繁殖能力、胚胎健康和生长速度等关键指标产生负面影响^[5]。水库发挥调蓄作用时,河流水位急剧变化,交替暴露和淹没鱼群在浅水中有利的休息场所,妨碍了鱼类产卵。此外,泥沙淤积致使清水下切下游河道,影响了大坝下游鱼类、底栖生物的生存栖息环境,也阻隔了输送到下游和河口的大量盐分、有机物和浮游生物,对下游鱼类造成了影响^[16,25-27]。鱼类生物多样性损失的能值($L_{\text{O}_{\text{fis}}}$)计算模型如下:

$$L_{\text{O}_{\text{fis}}} = A_r \times BM \times q \times \Delta F \times \tau_{\text{fis}} \quad (7)$$

$$\Delta F = F_1 - F_2 = S_1 \times (H_1 + J_1 + M_1) - S_2 \times (H_2 + J_2 + M_2) \quad (8)$$

$$H = - \sum \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \quad (9)$$

$$J = \frac{H}{\ln S} \quad (10)$$

$$M = \frac{S-1}{\ln N} \quad (11)$$

式中, A_r 为研究区河段面积(m^2); BM 为单位面积平均鱼类生物量(g/m^2); q 表示鱼类平均热值,取 $16744 \text{ J}/\text{g}$ ^[16]; ΔF 代表鱼类多样性因子差; τ_{fis} 为鱼类能值转换率; F_1 和 F_2 分别表示水电站建设前后的多样性因子; S 为鱼类种类数目; H 为 Shannon-Wiener 多样性指数; J 、 M 和 N 分别表示均匀度指数、丰富度指数和鱼类个体数量。本文鱼类调查数据参考文献^[28-30]的相关研究结果。

(3) 水土流失

水库建设期间的土石方开采以及上游林木淹没导致的植被覆盖率降低是造成库区水土流失的主要原因。此外,水库建成蓄水后,库区人口密度增大、生产生活等人为扰动有可能会加剧库区的水土流失状况。水土流失损失的能值($L_{\text{O}_{\text{s\&w}}}$)计算模型如下:

$$L_{\text{O}_{\text{s\&w}}} = SA \times EM \times R_o \times C_{\text{soil}} \times \tau_{\text{s\&w}} \quad (12)$$

式中, SA 表示水土流失面积(km^2); EM 表示土壤侵蚀模数(t/km^2); $\tau_{\text{s\&w}}$ 表示水土流失的能值转换率(sej/J)。水土流失的危害主要体现在严重水库泥沙淤积、库区面源污染以及生态环境退化,为避免重复计算,本研究将分别核算这些生态损失。

(4) 泥沙淤积

大型水利水电工程建设将泥沙和营养物质拦蓄在上游库区,不断累积的泥沙等物质抬高河床,降低了水库容量,不利于水库防洪,还容易导致土地盐渍化。此外,泥沙在库区淤积则必然会减少下游河道的泥沙量,低含沙量的高速水流下泄将更剧烈地冲刷下游河床和河岸,导致河床底质中沙、石的组成比例发生改变,一些鱼类将无法产卵或产下的卵难以成活^[16-17,31]。因此,泥沙既是上游流入重大水电工程系统中的不可更新资源,也是系统内主要的生态损失。泥沙淤积损失的能值($L_{\text{O}_{\text{soil}}}$)计算模型如下:

$$L_{\text{O}_{\text{soil}}} = (V_{\text{bed}} + \Delta V_s) \times \gamma_s \times R_o \times C_{\text{soil}} \times \tau_{\text{soil}} \quad (13)$$

$$\Delta V_s = V_{\text{IS}} - V_{\text{OS}} + V_s' \quad (14)$$

式中, V_{bed} 为相较于建库前,蓄水后淤积在库内河床中的泥沙体积(m^3); ΔV_s 为淤积在水库中的悬移质泥沙体积(m^3); V_{IS} 、 V_{OS} 和 V_s' 分别为水库的入库悬移质输沙量、出库悬移质泥沙量和库区区间来沙(m^3); γ_s 为泥沙容重(g/m^3),取泥沙湿密度值 $1.6 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; R_o 为泥沙中的有机质百分比,一般取 0.01 ^[16]; C_{soil} 为入库泥沙单位换算系数, $C_{\text{soil}} = 5.4 \text{ kcal}/\text{g} \times 4186 \text{ J}/\text{kcal}$ ^[15]; τ_{soil} 表示泥沙的能值转换率(sej/J)。

(5) 建设期与运行期水质污染

水电工程建设期水质污染主要包括生产废水和生活污水排放。生产废水主要是施工期间筑坝材料生产、加工、运输过程中产生的废水。生活污水主要来源于施工作业人员和管理人员日常生活排放的排泄物、食物残渣、洗涤剂污染物。建设期废水排放的能值损失(L_{O_cwp})计算模型如下:

$$L_{O_cwp} = Q_{cwp} \times \tau_{cwp} \quad (15)$$

式中, Q_{cwp} 表示水库建设期废水排放量(t); τ_{cwp} 表示废水排放损失的能值转换率(sej/t)。

水库蓄水后改变了河流原来的流态和水动力特性,库内水体流速降低,使得水体自净能力比天然河流弱。库区水体包含多种污染物,当水体含有其中任意一种时即认为水体被污染,即水体的生态供给功能被污染物所占用,影响了水体支持生物生命和生态系统的能力^[32]。因此,为避免重复计算,取各种污染物的最大值作为库区总水体污染物的能值损失。运行期水污染物的能值损失(L_{O_owp})计算模型如下:

$$L_{O_owp} = \max(W_{owp_i} \times \tau_{owp_i}) \quad (16)$$

式中, W_{owp_i} 表示库区水体中第*i*种污染物的含量(t); τ_{owp_i} 表示第*i*种污染物的能值转换率(sej/t)。

(6) 建设期废气排放

建设期废气排放是指工程施工期间的生产和生活过程中消耗汽油、柴油、煤等能源,生产主要建筑材料(如水泥、钢材、土石方)排放的 SO_2 、 NO_x 、碳氢化合物等有毒有害气体,以及工业粉尘、建筑扬尘、交通扬尘等粉尘颗粒。废气排放所产生的能值损失(L_{O_ap})计算模型如下:

$$L_{O_ap} = \sum Q_{ap_i} \times \tau_{ap_i} \quad (17)$$

式中, Q_{ap_i} 为第*i*种废气的年均排放量(t); τ_{ap_i} 为第*i*种废气排放损失的能值转换率(sej/t)。

(7) 水面蒸发损失

水库蓄水后在上游形成人工湖泊,增大了库区水面面积,进而使得库区蒸发量加大。水面蒸发损失的能值(L_{O_eva})计算模型如下:

$$L_{O_eva} = \Delta A_{wf} \times \alpha_{eva} \times H_{wf} \times \rho_w \times \tau_{eva} \quad (18)$$

式中, ΔA_{wf} 为建库后净增加的水面面积(m^2); α_{eva} 为蒸发折算系数; H_{wf} 为水面年平均蒸发深度(m); ρ_w 为水体密度($1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); τ_{eva} 表示水面蒸发损失的能值转换率(sej/g)。本研究三峡库区水面蒸发量年均值参考李祖忠等^[33]基于 Landsat 影像的测算结果。

2.2.2 能值产出模型

根据文献分析结合现场调研,本研究分别从物质产品、调节服务、支持服务和文化服务等方面^[21]考虑重大水电工程建成蓄水后的综合效益,并运用能值分析方法对效益进行计算。主要效益有:1)调蓄洪水。水库在汛期调蓄洪水能有效降低洪水灾害风险,最大限度地减少洪灾造成的社会经济损失,保证下游地区人们的生命安全,减少洪灾死亡人数,有助于受影响区的整体福祉和安全^[1]。2)水力发电。水力发电是入库河水势能转化为机械能和电能的过程。水电是世界上最大的可再生清洁能源,具有清洁、高效、环保、可持续供应、价格低廉等优势^[34]。3)航运。高坝大库建设抬高了上游水位,增大了过坝货运量,降低了库区船舶运输成本和单位航程的燃油消耗,促进航运现代化。4)供水。库坝建设运行后可以向周边提供农业灌溉、工业、生活和生态用水^[2]。此外,工程在非汛期向下游补水,改善下游河道内的生态环境,保证下游河道生态基流和城乡饮用水安全^[35]。5)水产养殖。水库建成蓄水后水域面积扩大,可用于放养鱼类、虾蟹等水生动物以及种植水生植物,促进水产养殖业的发展^[36]。6)文化旅游。大型水电工程建成后不仅可以发挥工程效益还兼具美学功能,优化库区周边生态环境,增加旅游经济收入,进而带动库区社会经济发展^[19,24]。7)生态环境保护。水能是可再生的清洁能源,用水电代替火力发电,可以显著降低 CO_2 等温室气体和 SO_2 等有害气体的排放,进而减少空气污染,减弱温室效应,帮助缓解气候变化^[36]。基于能值理论的重大水电工程系统产出计算模型详见文献^[14]。

2.2.3 能值可持续性指标体系

根据本研究提出的ESM-SEEL模型框架(图1),遵循重大水电工程系统的结构、功能、特点以及科学性、

可用性、完整性和动态性原则,在参考现有相关研究^[16,24,26-27,34-36]的基础上建立了包含能值投入率(EIR)、改进的可更新能值比例(IRFE)、环境负载率(IELR)、能值产出率(IEYR)和能值可持续指数(IESI)的指标体系,以反映可获得自然资源的潜在贡献、购买资源的有效性、可再生自然资源的支撑能力和环境承载能力。最终目的是为了能够更好地表征重大水电工程系统的结构、功能和效率,量化系统可持续发展的水平和程度。主要能值可持续性指标如下:

$$\begin{cases} \text{IEYR} = Y / (P + L) \\ \text{EIR} = P / (LF + IF) \\ \text{IRFE} = (LF_R + IF_R + P_R) / U \\ \text{IELR} = (LF_N + IF_N + P_N + L) / (LF_R + IF_R + P_R) \\ \text{IESI} = \text{IEYR} / \text{IELR} \end{cases} \quad (19)$$

式中, U 和 Y 分别表示能值总投入和能值总产出(sej); P 为购入资源的能值(sej); L 为系统能值损失(sej); LF 和 IF 分别表示系统内部的免费资源和外界流入系统的免费资源能值(sej)。 LF_R (LF_N)、 IF_R (IF_N)和 P_R (P_N)分别表示系统内部的可更新(不可更新)资源、外界输入系统的可更新(不可更新)资源和从系统外部购入的可更新(不可更新)资源的能值(sej)。

3 结果与分析

3.1 三峡工程系统能值投入变化分析

从1993—2022年三峡工程系统能值输入结构和变化情况(图2)可以看出,30年间三峡工程能值总投入为 5.32×10^{24} sej。2003年之前能值投入变化较为稳定,2003年蓄水后,随着河水重力势能、河水化学势能等可更新资源的输入增加,曲线开始出现较大的波动,且整体呈现出先波动上升后波动下降的变化趋势。入库河水化学势能(2.77×10^{24} sej)是三峡工程系统最大的能值输入项,占能值总输入的52.06%,其大小主要取决于水库的年入库径流量。研究期内三峡水库年均入库径流量为4463.35亿 m^3 ,最大入库径流量6494.61亿 m^3 (2003年),最小入库径流量2788.33亿 m^3 (2006年)。根据M-K法来对研究期内三峡水库年入库径流进行时间序列趋势统计分析,结果显示M-K统计量为-1.65,通过了0.10的显著性水平检验,且 $P = 0.098$,表明2003—2022年三峡入库径流总量具有较为显著($0.05 < P \leq 0.1$)的下降趋势。三峡工程的第二大的能值输入项是经济损失(1.18×10^{24} sej),占能值总投入的22.17%。而生态系统服务损失(2.58×10^{23} sej)和社会损失(4.36×10^{22} sej)占能值总投入的比重相对较小,占比分别为4.85%和0.82%。此外,从经济损失的研究结果可以看出,农业生产用地淹没和移民补偿也均与移民社会影响密切相关。因此,必须在水电工程全生命周期中统筹考虑工程安全、社会经济利益、生态环境保护与人类需求和福祉,进而提高重大水电工程系统可持续发展的水平和程度。此外,系统内部不可更新资源能值为 5.23×10^{22} sej,占能值总输入的0.98%,其主要组分是三峡工程一期建设期内(1993—1997年)土石方开挖和回填。三峡工程系统的购入资源能值(4.80×10^{23} sej)占能值总投入的9.04%。其中,枢纽工程建设投资(2.43×10^{23} sej)占总购入能值的比重最大(50.56%),主要包括施工期混凝土浇筑以及材料、机械、劳动力等资源的投入。此外,其他主要的购入资源中,运行维护费用(1.21×10^{23} sej)、输变电工程建设(7.01×10^{22} sej)以及污染物治理投资(4.58×10^{22} sej)分别占总购入资源的25.28%、14.6%和9.55%。

3.2 三峡工程系统能值产出变化分析

三峡工程系统1993—2022年的能值总产出为 3.61×10^{24} sej,总体呈现出波动上升的变化趋势(图3),其中防洪功能产生最大的经济社会效益(1.27×10^{24} sej),占能值总产出的35.2%。三峡工程自实施175m试验性蓄水运行以来,通过汛期科学、精细调度,发挥了削峰、错峰作用,加上分蓄洪区的配合运用,有效避免了上游洪峰与中下游洪水叠加给沿岸造成威胁,显著提高了荆江河段、鄱阳湖和城陵矶附近地区的防洪标准,极大减轻了长江中下游地区的防洪压力,有效保障了长江中下游防洪安全。发电效益(1.26×10^{24} sej)是三峡工程第

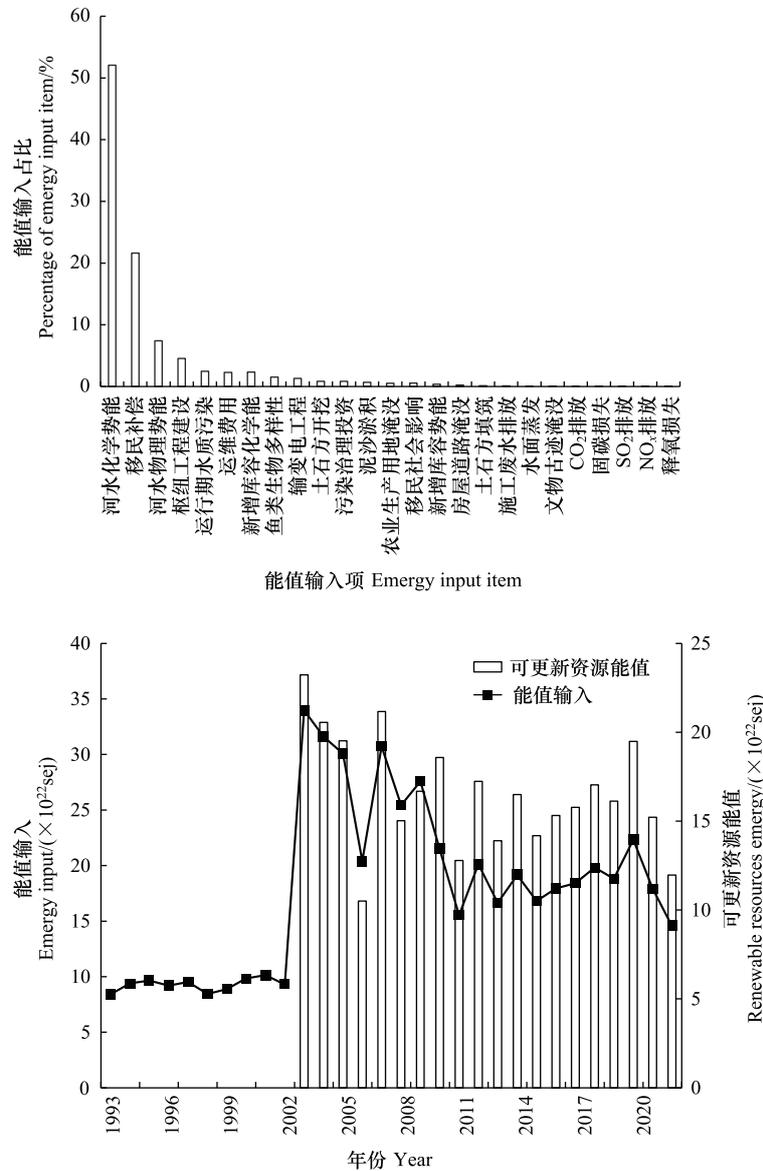


图 2 1993—2022 年三峡工程系统能值输入结构和变化

Fig.2 Energy input structure and changes of the Three Gorges Project system from 1993 to 2022

二大的能值产出,占能值总产出的 34.9%。作为世界上最大的水电站和最大的清洁能源生产基地,三峡电站 2012 年全部投产以来为中国的经济社会发展提供了源源不断的动力,到 2022 年累计发电量达 15028.42 亿 kwh,在保障国家能源安全、优化能源结构、提高非化石能源消费占比等方面发挥了巨大的作用。供水是三峡工程的第三大效益(4.04×10^{23} sej),占能值总产出的 11.2%。截至 2022 年,三峡水库补水总量达到 3332.82 亿 m^3 ,尤其是枯水季节向长江中下游地区补水极大改善了生产、生活和生态用水条件。三峡水库航运能值效益达到 3.58×10^{23} sej,库区通航条件得到改善,激流湍流变成了相对静水条件,也提升了长江中下游枯水期的通航标准和船舶航行和作业安全度,有效助力长江成为名副其实的“黄金水道”,推动了长江经济带高质量发展^[37]。根据三峡工程公报数据,截至 2022 年底,三峡电站发出的优质清洁电力能源相当于节约标准煤 4.85 亿 t,减少 CO_2 排放 12.65 亿 t,节能减排的效益十分显著。此外,由于水库可用于水产养殖,并且每年直接创造旅游收益和带动周边地区发展,三峡工程系统的水产养殖和文化旅游的能值效益分别为 1.39×10^{22} sej 和 1.19×10^{22} sej。

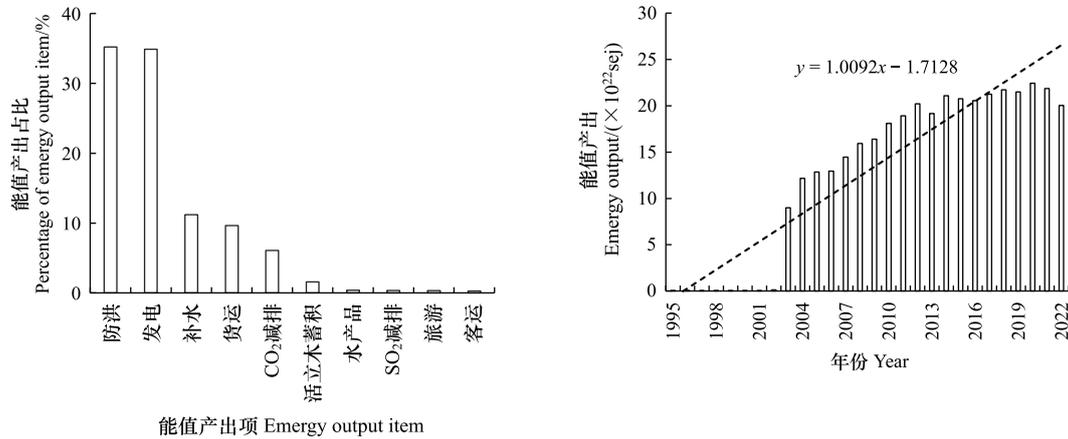


图3 1993—2022年三峡工程系统能值产出结构和变化

Fig.3 Energy output structure and changes of the Three Gorges Project system from 1993 to 2022

3.3 三峡工程系统社会经济和生态损失分析

三峡工程系统的损失为 1.48×10^{24} sej, 占能值总投入的 27.9%, 其中移民安置补偿 (1.15×10^{24} sej)、运行期水质污染 (1.31×10^{23} sej)、鱼类生物多样性损失 (8.12×10^{22} sej) 和泥沙淤积 (3.75×10^{22} sej) 是三峡工程系统最主要的损失, 分别占总损失能值的 77.7%、8.8%、5.5% 和 2.5% (图 4)。在社会经济能值损失中, 非自愿移民是三峡工程建设最直接的影响。三峡工程移民动态投资占工程总投资的 34.5%。此外, 三峡水库蓄水至正常蓄水位 175m 时, 耕地、林地、草地和鱼塘等农业生产用地总淹没面积为 337.8 km^2 , 各类房屋和道路总淹没面积为 34.79 km^2 , 不仅会影响粮食作物和经济作物的产量, 减少生态系统的碳汇和氧气释放, 还会对库区原住民的经济收入、社会情感以及当地动植物的栖息环境造成破坏。移民需要政府在经济补偿、教育、卫生、就业和社会网络重建等方面的支持, 同时不能忽略移民在社会财富、生态环境和文化习俗方面的需求, 特别是对少数民族的文化保护与恢复^[14]。因此, 平衡移民安置与三峡工程的社会、经济和环境的影响, 是促进三峡库区和移民安置区可持续、高质量发展的重要战略途径。

在生态系统服务功能损失中 (图 4), 对系统可持续性影响最大的是运行期水质污染 (占比 48.9%)。影响三峡库区水环境质量的主要是有机污染物、大量未经处理的城市生活污水、垃圾和农村面源污染^[13]。在水质

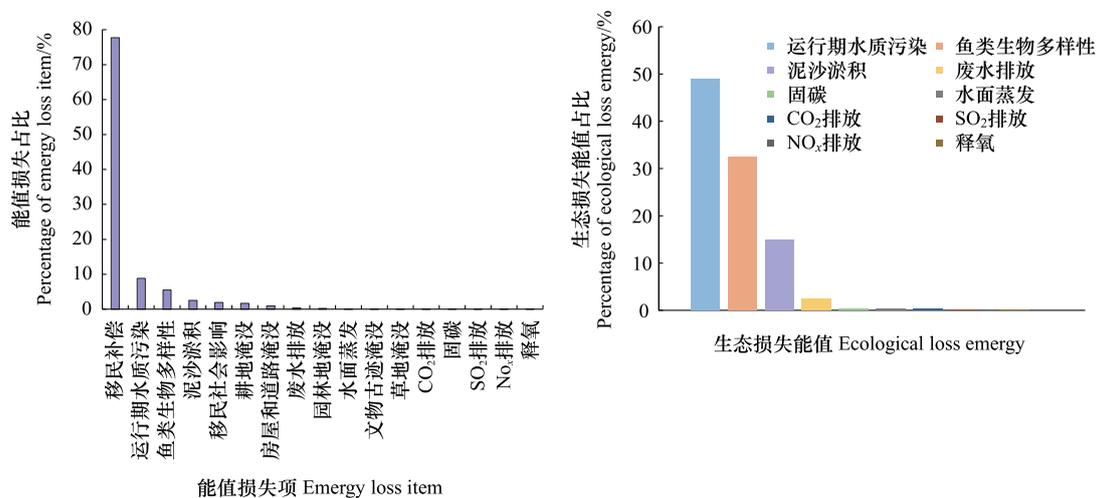


图4 1993—2022年三峡工程系统能值损失结构

Fig.4 Energy losses structure of the Three Gorges Project system from 1993 to 2022

污染因子中,化学需氧量(COD)和总氮(TN)是影响最大的水污染要素。因此,在加强三峡库区水质长期、大规模的现场观测和原位研究的基础上,需要建立环境保护与经济协同决策和数据共享机制。此外,增加三峡库区对养殖业和生活污水处理设施的投资,可以有效控制非点源污染,提高库区周边地区生活污水集中无害化处理率。第二个影响是水库蓄水后的鱼类生物多样性损失(32.6%)。因此,有必要继续实施三峡工程生态运行,为鱼类产卵繁殖创造有利的水文条件,从而有效促进长江水生生物的生长。泥沙作为河流生态系统的重要组成部分,参与塑造河流形态,为水生动植物生存提供保障,为水电站系统提供生态服务。泥沙淤积过程与建坝后河流水文情势的变化密切相关^[4]。由于三峡水库采取滞洪排沙、异重流排沙、浑水水库排沙等“蓄清排浊”模式来保持有效库容^[38],三峡工程泥沙淤积的影响比设计阶段要小,其能值损失只占总生态损失的14.9%。

4 讨论

4.1 三峡工程水资源可持续开发利用对比分析

基于三峡工程系统能值投入-产出及社会、经济和生态系统服务损失的量化成果,计算得到三峡工程系统能值投入率(EIR)、改进的可更新能值比例(IRFE)、改进的能值产出率(IEYR)、改进的环境负载率(IELR)和改进的能值可持续指数(IESI)等五个能值可持续性评价指标,并分别与国内外水库(水电站)大坝的研究成果进行对比。研究结果如下:

三峡工程系统 EIR 的年均值为 0.05,高于 Yang 的研究结果(0.02)^[15],但要低于其他国内外大部分水库(电站)的 EIR(0.07—1.25)。三峡工程作为世界上最大的水利枢纽工程,其建设投资和规模更大,技术设备复杂,需要更多的外部资源投入。从时间变化趋势来看(图 5),研究期内系统 EIR 的发展较为平稳,表明购入资源对三峡工程系统内部资源开发的有效性(产品竞争力)较强。Yang 计算的结果^[15]仅将河水势能作为系统的能值流入,并未考虑水库的河水化学势能。而三峡水库具有灌溉、供水、生态等多种效益,均需要河水化

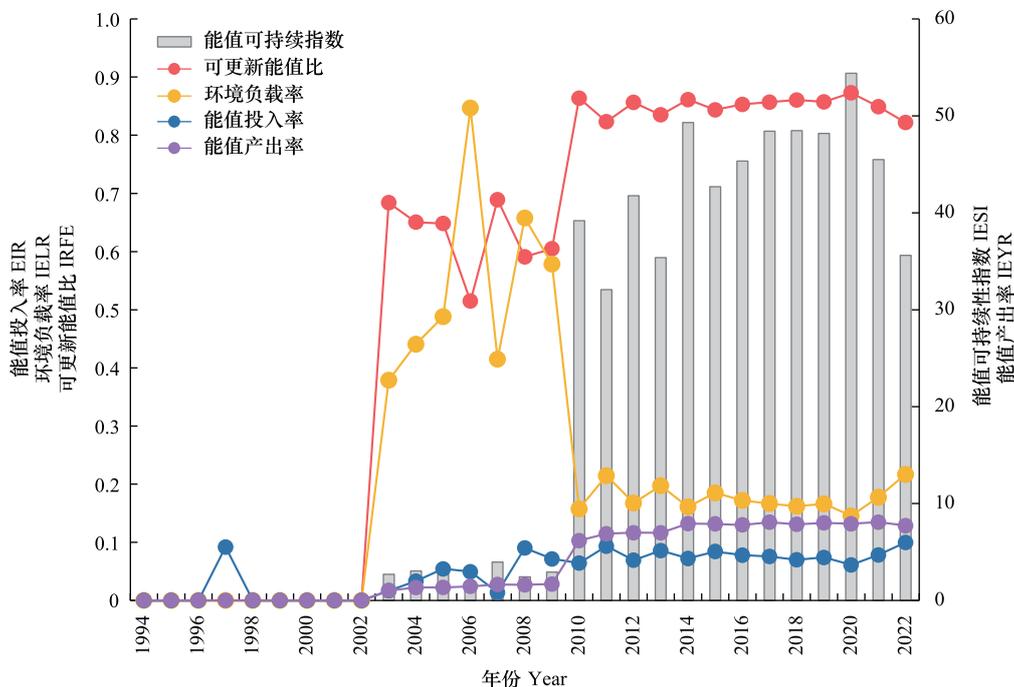


图 5 1993—2022 年三峡工程能值可持续性指标动态变化

Fig.5 Dynamic changes of energy sustainability indicators from 1993 to 2022

IESI:能值可持续性指数;IRFE:可更新能值比;IELR:环境负载率;EIR:能值投入率;IEYR:能值产出率

学势能间接做功。此外,购入资源(P)占比过大不利于系统的可持续发展,三峡水库的 EIR 比其他国内外大部分水库(电站)要小,表明虽然三峡主体工程在建设期投资较大,但蓄水形成三峡水库复合生态系统后,其运行过程中对从外部社会经济系统购入资源的依赖程度相对较低, P 仅占能值总输入的 9.02%,系统内部资源相对丰富,可更新资源在三峡工程系统建设运行中所占比例较高。

三峡工程系统 IRFE 的年均值为 0.51,与 Yang 计算的结果(0.58)^[15]相近,且高于除了漫湾(0.74)^[24]、Jupiá(0.83)和 Porto Primavera(0.63)^[26]之外的其他国内外水电站的 IRFE(0.06—0.50)。重大水电工程系统建设需要大量可更新和不可更新资源,其中 IRFE 值较高的系统通常具有更好的可持续性。从时间变化趋势来看(图 5),研究期内三峡工程系统的 IRFE 呈现波动增加的趋势,且在 2009 年三峡主体工程完工后趋于稳定,2011—2022 年均值达到 0.85。研究结果和工程实际情况表明,三峡工程所在的长江流域干流水量丰沛,对不可更新资源的依赖性相对较小,可更新系统内部资源较为丰富,具有较好的自然资源支持能力,可以用来支持其建设以及系统后续的可持续运行。需要提及的是,重大水电工程所涉及的移民安置、生态补偿等多种社会经济和生态损失,忽略其中一项都可能导致计算结果与实际情况不相符。巴西两座水电站的可更新能值比时并未考虑劳动力、移民安置转移以及设备运行维护成本^[26]。Cui 等^[24]仅考虑了泥沙淤积、农业生产、林地和移民安置损失,因此根据能值可持续性指标计算模型(公式 19),这三座水电站的 IRFE 计算结果均高于本研究。

三峡工程系统 IEYR 年均值为 3.62,其结果高于国内外大部分水电站的能值产出率,从时间变化趋势来看(图 5),研究期内三峡工程系统的 IEYR 呈现波动增加的趋势。本研究的时间周期是从建设期到运行期(1993—2022 年),与以往基于某一静态年研究得到的水库电站 EYR 结果(3.0—15.3)相比,虽然三峡水库每年能产生巨大效益,该段时间三峡工程并未发挥出全部的效益。在三峡工程 2009 年主体工程完工后,IEYR 的均值达到了 7.57。此外,本研究得到的系统损失占能值总投入的 27.9%,并将其纳入到 IEYR 的计算中,导致了本研究 IEYR 相对于其他水电站较小。现有的三峡工程 EYR 研究结果与本文计算结果存在差异是由计算方式所导致。例如 Yang^[15]考虑了部分社会、经济和生态服务损失(如泥沙淤积),但在产出效益计算中与本文采用了不同的计算方法,其能值产出的结果较小。

本研究在考虑系统损失的基础上得出的 IELR(0.20)小于大部分水库的 IELR,但高于 Jupiá(0.19)^[26]、向家坝(0.14)^[27]、Bursar(0.02)^[39]等工程。从时间变化趋势来看(图 5),研究期内三峡工程系统的 IELR 呈现先增加(1993—2006 年)后波动下降(2006—2022 年)的趋势。表明三峡水库在建设运行初期的能量传递和转移对当地生态环境造成的胁迫作用相对较高,而后随着 2009 年三峡主体工程完工,系统发展对不可更新资源的消耗以及造成的社会、经济和生态损失逐渐减少,因而工程系统运行对环境的压力逐步降低。漫湾、向家坝、溪洛渡、Bursar、Jupiá 等水库的能值计算中对移民安置与补偿、农田和房屋淹没等社会经济损失以及水体污染、固碳释氧、生物多样性损失等生态环境损失进行了考虑,因此计算得到的环境负载率(0.02—0.59)相对较小,也符合工程实际^[24,26—27,39]。

三峡工程系统 IESI 的年均值为 19.53(图 5),由于随着系统损失不断降低,工程运行后综合效益逐渐发挥,三峡水库复合生态系统的可持续性逐年增加,入库径流等可更新自然资源的可持续开发利用潜力巨大。狮子坪(1.04)^[36]、理县(2.09)^[36]、功果桥(9.61)^[34]、小湾(5.76)^[34]、糯扎渡(6.45)^[34]、Bursar(0.86)^[39]、观音岩(0.38)^[25]、加查(3.60)^[40]和旁多(0.37)^[16]等水库的 IESI 值小于 10,表明这些工程处在过度消费系统内部资源和购入资源状态,系统损失过多或者产出效益不高,可持续性相对较弱;大朝山(20.5)^[34]、景洪(11.9)^[34]、橄榄坝(22.2)^[34]、漫湾(11.35)^[24]、Jupiá(60.6)^[26]、溪洛渡(22.6)和向家坝(53.4)^[27]等水库 IESI 均大于 10,表示该系统可持续发展水平相对较低,可更新资源仍有较大开发潜力。由于水电工程的可持续开发利用是在以人为本的基础上考虑工程建设和生态环境的协调发展,因此 IESI 值过高或过低都非工程系统可持续性最优。总体上,三峡工程系统具有较好可持续发展水平,且可持续发展潜力不断增大。

4.2 能值可持续指数的影响因素

2003—2022 年三峡工程的能值可持续性指数 IESI 整体呈现波动上升的变动趋势(图 6),其中,在 2003—

2009 年期间 IESI 变幅相对平缓,而在 2009—2010 年期间出现陡增,之后在 2010—2020 年间波动增加,而在 2020—2022 年出现下降态势。研究期内 IESI 均值为 19.53,其中,在 2010—2022 年间 IESI 均值为 43.56。

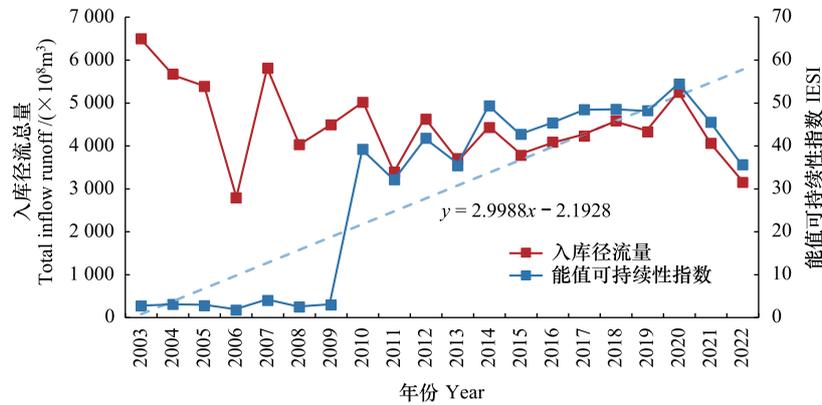


图 6 2003—2022 年三峡工程 IESI 指数与年入库径流量变化曲线

Fig.6 Variation curve of the IESI and annual inflow runoff of the Three Gorges Project from 1993 to 2022

从图 7 可以看出,2011 年后三峡工程入库径流量与 IESI 指数之间的相关性较强,二者之间的相关性系数在 2011—2022 年间为 0.74,在 2014—2022 年间达到了 0.95。而在 2011 年以前,二者间的相关关系并不显著。重大水电工程系统以结构为基础,通过系统生态流的传递和转化过程发挥既定功能。而三峡主体工程于 2009 年正式完工,在此之前系统整体结构未完全形成,功能尚没有充分发挥,且系统形成初期伴随着资源消耗、环境污染、生态破坏等一系列影响,系统处于能值投入大于产出的状态,导致 IESI 指数偏低。例如三峡主体工程施工期间(1993—2009 年)需要不断从外部社会经济系统中购入资源和能源,以满足土石方工程和混

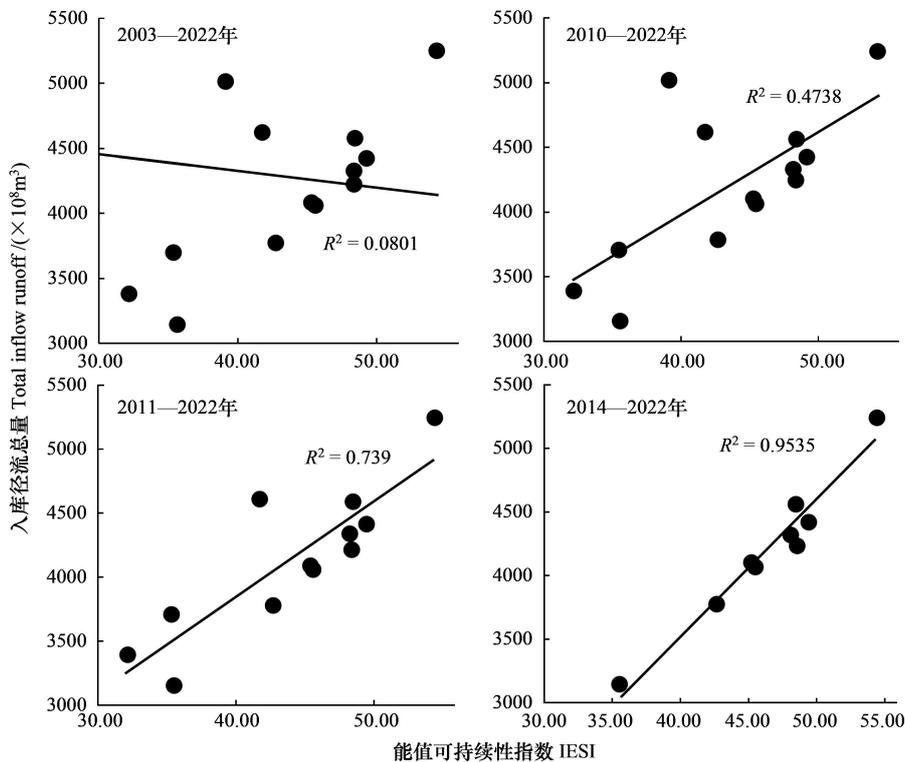


图 7 2003—2022 年三峡工程 IESI 指数与年入库径流量相关关系曲线

Fig.7 Correlation curve between the IESI and annual inflow of the Three Gorges Project from 2003 to 2022

凝土工程施工以及水电站机组安装的需求。而从 2011 年起,随着三峡工程的优化运行,以及系统中最大的能值输入项——入库径流量已开始进入系统中(图 2),加之三峡工程的主要效益(即防洪和发电)已开始产生(图 3),三峡工程建设运行给生态环境造成的压力和对外部社会经济系统资源服务供给的依赖性逐渐降低,因此在 2010—2020 年间系统可持续性逐步增强。同理,在 2020—2022 年期间,三峡水库入库流量降低,伴随着系统可持续性出现同步下降。

此外,研究发现 2009 年三峡主体工程完工后,在长江流域极端水旱灾害的年份,IESI 结果与三峡工程以及长江流域的实际情况相一致。例如 2020 年长江发生了 1998 年以来最严重的流域性大洪水,三峡水库出现建库以来最大入库洪峰($75000\text{m}^3/\text{s}$)^[41],该年三峡水库入库径流总量为 5247.03 亿 m^3 。而 2022 年是长江流域极端干旱事件典型年,该年夏季遭遇了自 1961 年有完整气象观测记录以来最严重的气象干旱,汛期发生流域性严重枯水,年入库流量只有 3147.00 亿 m^3 ,三峡入库径流量、输沙量以及中下游干流河道径流量均较往年显著减少^[42]。根据本研究构建的 ESM-SEEL 模型和三峡工程系统能值输入结构(图 2),径流总量偏丰(偏枯)的年份 IESI 值也相对较高(低),相应的 2020 年和 2022 年分别为 IESI 的高值年和低值年,研究结果与长江流域和三峡工程的实际情况相一致,验证了模型的合理性。

4.3 工程建设运行损益对重大水电工程系统可持续性的影响机制

本研究旨在探讨工程建设运行过程中产生的综合效益和造成的多重损失对重大水电工程系统可持续性的影响机制。研究表明,重大水电工程系统的入库径流是影响工程系统效益的关键因素,而构成工程实体的土石方、混凝土、水泥、机械等外部社会经济系统提供的资源亦对系统可持续产生较大的影响。先前研究较少或没有深入分析重大水电工程建设和运行过程中产生的综合效益和系统内的经济损失、社会损失和生态服务损失及其动态变化对工程系统可持续性的影响^[12,39,45—48]。然而忽略多重损失可能导致计算出的重大水电工程的能值输入项偏低,使得系统能值核算结果与工程实际情况之间出现偏差^[16]。现有研究表明,在不考虑下游生态系统服务损失的情况下,水电系统的环境负载率 ELR 为 1.92,能值可持续指数 ESI 为 1.22,在考虑下游生态影响后,系统 ELR 上升至 4.26,ESI 下降至 0.34^[25]。此外,现有基于能值的三峡工程可持续性研究发现考虑系统损失计算得到的三峡工程能值产出率 EYR、能值投入率 EIR、ESI 等指标相较于不考虑损失得到的结果要偏小,三项指标分别下降了 89.8%、33.3%和 98.9%,ELR 则偏大^[15]。而在本研究中三峡工程建设运行损失占比系统能值总投入的 27.83%,如果忽略损失项,则会高估系统 EYR,并且低估 ELR,进而导致高估重大水电工程可持续发展的水平和程度,使得研究成果难以有效指导实践政策设计与运行管理。贺成龙(2017)发现建设期水库移民和运行期库区水质污染分别是影响三峡工程可持续发展的主要影响因素^[13],这一发现和本研究 ESM-SEEL 模型计算出的三峡工程能值损失结果(图 4)基本一致,即重视三峡库区移民安置情况长期监测,加强库区水环境监测与保护,大力实施生态调控是协调经济社会效益与生态环境保护的关键举措。Li and Wen^[43]发现,1995—2008 年三峡工程的生态赤字指数逐渐下降,生态安全状态逐渐改善。Zhang 等^[44]认为 2010—2017 年三峡库区自然资本可持续利用空间充足。这些结果与本研究中改进的可更新能值比 IRFE、能值产出率 IEYR 和能值可持续性指数 IESI 等在同时期内波动上升的计算结果一致(图 5),即资源和能源供应能够满足三峡工程可持续发展的需要。

综上所述,重大水电工程为一个复合系统,工程建设运行造成多重损失会对重大水电工程系统的可持续造成一定的负面影响。本研究提出的 ESM-SEEL 模型将水电开发运行造成的社会损失、经济损失和生态系统服务损失作为能值分析的关键组分,得出的结论与现有相关成果相一致且更符合工程实际^[13,15,26—27,45—47]。

5 结论

(1) 针对具有综合服务功能的重大水电工程水能资源利用可持续性量化难题,将水电开发运行造成的经济损失、社会损失和生态系统服务损失作为能值分析的关键组分,建立了考虑社会-经济-生态损失的重大水电工程可持续性评估模型框架(ESM-SEEL)。ESM-SEEL 模型克服了传统水利水电工程可持续发展评估模型

难以准确量化工程效益和损失的缺陷,为在水电工程尺度上理解人-水系统之间的复杂关系以及重大水电项目可持续性评估提供理论指导和科学依据。

(2) 研究期间三峡工程能值总投入为 5.32×10^{24} sej, 其中, 入库河水化学势能是系统最大的能值输入 (2.77×10^{24} sej), 对水电站系统可持续发展产生了重要影响。能值总产出为 3.61×10^{24} sej, 其中防洪功能产生了最大的社会效益 (1.27×10^{24} sej), 表明三峡工程显著提高了长江中下游的防洪标准。三峡工程系统的能值总损失为 1.48×10^{24} sej, 其中移民补偿、运行期水质污染、鱼类生物多样性损失和泥沙淤积是三峡工程系统最主要的损失, 分别占总损失能值的 77.7%、8.8%、5.5% 和 2.5%。

(3) 研究期内三峡工程系统可持续性波动上升, 可持续性指数 (IESI) 的变化趋势与三峡工程以及长江流域水旱实际情况相一致, 即径流总量偏丰 (枯) 的年份 IESI 值相对较高 (低)。随着系统损失不断降低, 工程运行后综合效益逐渐发挥, 三峡工程的可持续性逐年增加, 入库径流等可更新自然资源的可持续开发利用潜力巨大。在气候变化和强人类活动持续加剧且损失项已纳入三峡工程系统的背景下, 提高工程系统的效益产出以及采取基于自然的措施缓解社会-经济-生态损失 (如水库泥沙淤积和淹没面积等), 对增强三峡工程系统水资源利用的可持续性, 促进长江流域水电开发、社会经济效益和生态环境保护协调发展至关重要。

总体而言, 研究成果创新了基于能值分析的重大水电工程系统可持续性评估方法, 拓展了能值视角下水资源可持续管理研究的理论基础和应用范围, 揭示了工程建设运行的效益和损失对重大水电工程系统可持续性的影响机制, 为长江流域水电可持续性评价提供了新的框架和见解。此外, 本研究对三峡工程系统的可持续性进行了建模分析, 新提出的 ESM-SEEL 模型框架可以扩展到中国和全球范围内更多的水库/水电站大坝可持续性评估研究和实践中。

参考文献 (References):

- [1] Palmer M A, Liu J G, Matthews J H, Mumba M, D'Odorico P. Manage water in a green way. *Science*, 2015, 349(6248): 584-585.
- [2] Ansar A, Flyvbjerg B, Budzier A, Lunn D. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. *Energy Policy*, 2014, 69: 43-56.
- [3] Flecker A S, Shi Q R, Almeida R M, Angarita H, Gomes-Selman J M, García-Villacorta R, Sethi S A, Thomas S A, Poff N L, Forsberg B R, Heilpern S A, Hamilton S K, Abad J D, Anderson E P, Barros N, Bernal I C, Bernstein R, Cañas C M, Dangles O, Encalada A C, Fleischmann A S, Goulding M, Higgins J, Jézéquel C, Larson E I, McIntyre P B, Melack J M, Montoya M, Oberdorff T, Paiva R, Perez G, Rappazzo B H, Steinschneider S, Torres S, Varese M, Walter M T, Wu X J, Xue Y X, Zapata-Ríos X E, Gomes C P. Reducing adverse impacts of Amazon hydropower expansion. *Science*, 2022, 375(6582): 753-760.
- [4] Forsberg B R, Melack J M, Dunne T, Barthem R B, Goulding M, Paiva R C D, Sorribas M V, Silva U L Jr, Weisser S. The potential impact of new Andean Dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0182254.
- [5] Chen Q W, Li Q Y, Lin Y Q, Zhang J Y, Xia J, Ni J R, Cooke S J, Best J, He S F, Feng T, Chen Y C, Tonina D, Benjankar R, Birk S, Santos Fleischmann A, Yan H L, Tang L. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(4): e2023RG000819.
- [6] Grill G, Lehner B, Thieme M, Geenen B, Tickner D, Antonelli F, Babu S, Borrelli P, Cheng L, Crochetiere H, Ehalt Macedo H, Filgueiras R, Goichot M, Higgins J, Hogan Z, Lip B, McClain M E, Meng J, Mulligan M, Nilsson C, Olden J D, Opperman J J, Petry P, Reidy Liermann C, Sáenz L, Salinas-Rodríguez S, Schelle P, Schmitt R J P, Snider J, Tan F, Tickner K, Valdujo P H, van Soesbergen A, Zarfl C. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, 569: 215-221.
- [7] Heilpern S A, DeFries R, Fiorella K, Flecker A, Sethi S A, Uriarte M, Naeem S. Declining diversity of wild-caught species puts dietary nutrient supplies at risk. *Science Advances*, 2021, 7(22): eabf9967.
- [8] 金中武, 郭超, 周银军, 刘亚, 李志晶, 周显. 三峡水库清淤及淤积泥沙综合利用可行性研究. *中国水利*, 2024(3): 29-33.
- [9] 阮利民. 发挥长江经济带关键骨干作用促进三峡工程安全运行和库区高质量发展. *水利发展研究*, 2024, 24(02): 22-26.
- [10] Yan N Y, Liu G Y, Xu L Y, Deng X Y, Casazza M. Emergy-based eco-credit accounting method for wetland mitigation banking. *Water Research*, 2022, 210: 118028.
- [11] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242: 1132-1139.
- [12] Wu J H, He C L, Xu W L. Emergy footprint evaluation of hydropower projects. *Science China: Technological Sciences*, 2013, 56(9): 2336-2342.
- [13] 贺成龙. 三峡工程的能值足迹与生态承载力. *自然资源学报*, 2017, 32(02): 329-341.
- [14] Jing P R, Sheng J B, Hu T S, Mahmoud A, Huang Y F, Li X, Liu Y, Wang Y, Shu Z K. Emergy-based sustainability evaluation model of hydropower megaproject incorporating the social-economic-ecological losses. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118402.
- [15] Yang J. EMergy accounting for the Three Gorges Dam Project: three scenarios for the estimation of non-renewable sediment cost. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 3000-3006.

- [16] Chen J H, Mei Y D, Ben Y, Hu T S. Emergy-based sustainability evaluation of two hydropower projects on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 150: 105838.
- [17] Brown M T, McClanahan T R. EMergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River Dam proposals. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1-3): 105-130.
- [18] Rugani B, Pulselli R M, Niccolucci V, Bastianoni S. Environmental performance of a XIV Century water management system: an emergy evaluation of cultural heritage. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 56(1): 117-125.
- [19] 贺成龙. 三峡工程的能值足迹与生态承载力[D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [20] 王敏, 肖建红, 于庆东, 刘娟. 水库大坝建设生态补偿标准研究——以三峡工程为例. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 37-49.
- [21] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [22] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [23] 陈默, 林育青, 张建云, 陈求稳, 李沁园. 水生态系统生产总值核算体系及应用. *水资源保护*, 2023, 39(1): 234-242.
- [24] Cui B S, Hu B, Zhai H J. Employing three ratio indices for ecological effect assessment of Manwan Dam construction in the Lancang River, China. *River Research and Applications*, 2011, 27(8): 1000-1022.
- [25] Pang M Y, Zhang L X, Ulgiati S, Wang C B. Ecological impacts of small hydropower in China: Insights from an emergy analysis of a case plant. *Energy Policy*, 2015, 76: 112-122.
- [26] Tassinari C A, Bonilla S H, Agostinho F, Almeida C M V B, Giannetti B F. Evaluation of two hydropower plants in Brazil: using emergy for exploring regional possibilities. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 122: 78-86.
- [27] Du H L, Yang L, Wang W Z, Lu L H, Li Z. Emergy theory to quantify the sustainability of large cascade hydropower projects in the Upper Yangtze. *Ecological Modelling*, 2022, 468: 109954.
- [28] 董纯, 杨志, 龚云, 唐会元. 三峡库区干流鱼类资源现状与物种多样性保护. *水生态学杂志*, 2019, 40(1): 15-21.
- [29] 魏念, 张燕, 吴凡, 沈子伟, 茹辉军, 倪朝辉. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8): 1858-1869.
- [30] 张伟, 翟东东, 熊飞, 刘红艳, 陈元元, 王莹, 廖传松, 段辛斌, 田辉伍, 邓华堂, 陈大庆. 三峡库区鱼类群落结构和功能多样性. *生物多样性*, 2023, 31(2): 83-95.
- [31] 李伟楠, 梅亚东, 李析男, 赵先进. 综合利用水库水体能值转换率研究. *武汉大学学报: 工学版*, 2020, 53(1): 1-8.
- [32] Jing P R, Sheng J B, Hu T S, Mahmoud A, Guo L D, Liu Y, Wu Y T. Spatiotemporal evolution of sustainable utilization of water resources in the Yangtze River Economic Belt based on an integrated water ecological footprint model. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358: 132035.
- [33] 李祖忠, 张旭东, 江聪, 杜涛, 曾凌. 基于 Landsat 影像的近 40 年来 (1982—2021 年) 三峡库区水面面积及其蒸发损失变化. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1822-1831.
- [34] Ren S Y, Feng X. Emergy evaluation of ladder hydropower generation systems in the middle and lower reaches of the Lancang River. *Renewable Energy*, 2021, 169: 1038-1050.
- [35] Guan X J, Jiang P K, Meng Y, Qin H D, Lv H. Study on production, domestic and ecological benefits of reservoir water supply based on emergy analysis. *Processes*, 2020, 8(11): 1435.
- [36] Liu X C, Pan H Y, Zheng X Y, Zhang X H, Lyu Y F, Deng S H, Guo X. Integrated emergy and economic evaluation of 8 hydropower plants in Zagunao Basin, Southwest of China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 353: 131665.
- [37] Zheng S R. Reflections on the Three Gorges Project since its operation. *Engineering*, 2016, 2(4): 389-397.
- [38] Niu X Q. The Three Gorges Project. *Engineering*, 2022, 15: 17-23.
- [39] Ali M, Liu L X, Geng Y, Khokhar S. Emergy based sustainability evaluation of a hydroelectric dam proposal in South Asia. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 121496.
- [40] 贤雯, 张士锋, 邱桃. 基于能值理论的青藏高原水电站生态影响研究. *水生态学杂志*, 2023, 44(6): 1-9.
- [41] 陈敏. 2020 年长江暴雨洪水特点与启示. *人民长江*, 2020, 51(12): 76-81.
- [42] 郭广芬, 吴瑶, 秦鹏程, 刘敏, 夏智宏, 张灵, 薛海涵, 冯扬. 长江流域 2022 年极端高温干旱特征和成因及其对水电资源的影响. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(10): 2098-2108.
- [43] Li T H, Wen X L. Local ecological footprint dynamics in the construction of the Three Gorges Dam. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 314-323.
- [44] Zhang Z X, Hu B Q, Shi K F, Su K C, Yang Q Y. Exploring the dynamic, forecast and decoupling effect of land natural capital utilization in the hinterland of the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 134832.
- [45] 尚科辉. 基于能值分析的大型水电站建设系统资源利用与可持续评价. *水利水电快报*, 2024, 45(08): 59-64.
- [46] Zhang L X, Pang M Y, Wang C B, Ulgiati S. Environmental sustainability of small hydropower schemes in Tibet: an emergy-based comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 97-104.
- [47] 曾容, 赵彦伟, 杨志峰, 陈贺, 徐菲, 尹心安. 基于能值分析的大坝生态效应评价——以尼尔基大坝为例. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 890-896.
- [48] Kang D, Park S S. Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(3): 293-306.