

DOI: 10.5846/stxb201311182760

肖建红, 王敏, 于庆东, 刘娟. 基于生态足迹的大型水电工程建设生态补偿标准评价模型——以三峡工程为例. 生态学报, 2015, 35(8): 2726-2740.

Xiao J H, Wang M, Yu Q D, Liu J. The evaluation models of ecological compensation standard on the large-scale hydropower engineering construction based on ecological footprint: a case of Three Gorges Project. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2726-2740.

# 基于生态足迹的大型水电工程建设生态补偿标准评价模型

——以三峡工程为例

肖建红\*, 王 敏, 于庆东, 刘 娟

青岛大学商学院, 青岛 266071

**摘要:**生态足迹作为重要的生态环境指标,已被广泛应用于可持续性分析中,但在生态补偿领域应用的较少。运用生态足迹思想,构建了 6 类大型水电工程建设的生态供给足迹与生态需求足迹模型,以此为基础,确立了大型水电工程建设的生态补偿标准评价模型;并进行了三峡工程案例研究。结果表明:(1)三峡工程建设 6 项正面影响的生态供给足迹为  $949.96 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ , 换算成总经济价值为  $619.18 \times 10^8 \text{ 元/a}$ ;三峡工程建设 9 项负面影响的生态需求足迹为  $188.98 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ , 换算成总经济损失为  $123.18 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。(2)发电产品、调蓄洪水和发电环境效益是三峡工程的主要正面影响,三者经济价值占总经济价值的 95.06%;水库泥沙淤积和水库淹没是三峡工程的主要负面影响,两者经济损失占总经济损失的 85.56%。(3)三峡工程建设的生态补偿标准为  $123.18 \times 10^8 \text{ 元/a}$ ,水电开发业主、中央政府和地方政府是主要的生态补偿主体,两者承担了 95.06%的生态补偿标准额度;河流生态系统和移民是主要的生态补偿对象,两者获得了 91.39%的生态补偿额度。通过对比分析发现,构建的模型在三峡工程案例中得到了很好的验证。

**关键词:**生态供给足迹;生态需求足迹;生态补偿标准;评价模型;大型水电工程;三峡工程

## The evaluation models of ecological compensation standard on the large-scale hydropower engineering construction based on ecological footprint: a case of Three Gorges Project

XIAO Jianhong\*, WANG Min, YU Qingdong, LIU Juan

Business College, Qingdao University, Qingdao 266071, China

**Abstract:** River ecosystem services imply the natural environmental conditions and their effectiveness formed and sustained by river ecosystem and its ecological processes, on which, human life relies of existence. The large-scale hydropower engineering construction (LHEC) enhanced or enriched the river ecosystem services which brought many benefits to human beings such as flood control, hydropower, improving waterway etc. While, the river ecosystem services were also declined by LHEC. There were many damages such as reservoir sedimentation, reservoir inundation etc. In the consideration of social justice, beneficiaries or the representatives of the beneficiaries (i.e. the ecological compensation subjects) from LHEC should undertake the economic losses of the impaired ones or the representatives of the impaired (i.e. the ecological compensation objects). The sum of the economic losses was the ecological compensation standard (ECS) of LHEC. The

**基金项目:**高等学校博士学科点专项科研基金项目(20113706110001);国家自然科学基金项目(41301622)

**收稿日期:**2013-11-18; **网络出版日期:**2014-07-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaojian\_hong@163.com

ecological footprint (EF) was defined as the biologically productive land and water a population requires to produce the resources it consumes and to absorb part of the waste generated by fossil and nuclear fuel consumption. The ecological supply footprint (ESF) was defined as the enhanced river ecological services' supply ability caused by the project construction. The enhanced ability was converted to the total biologically productive land/water area. And the ecological demand footprint (EDF) was defined as the weakened river ecological services' supply ability caused by the project construction. The weakened ability was converted to the total biologically productive land/water area. EF was a key ecological environment indicator that had been widely used in sustainability analyses. Thus, EF was applied rarely in the field of ecological compensation. Based on EF, six types of ESF and EDF models, which were about LHEC, were constructed. Then the evaluation models of ECS on LHEC were established. Finally the ECS of Three Gorges Project (TGP) construction was calculated. The results show that: (1) The ESF of the six positive effects (such as Three Gorges Reservoir breeding, improving waterway, hydropower production, environmental value of hydropower, tourism of Three Gorges Dam, and flooding control) on TGP construction were  $949.96 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ , which was converted to  $619.18 \times 10^8 \text{ RMB}/\text{a}$  in total. The EDF of the nine negative effects (such as reservoir sedimentation, occupation on river ecosystem, reservoir inundation, construction of resettlement area, impact on the rare and endangered species, impact on water quality in reservoir area and upper reaches of the Yangtze River, greenhouse gas emission of energy consumption, sewage discharge, and greenhouse gas emission of producing main building materials) on TGP construction were  $188.98 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ , which was converted to  $123.18 \times 10^8 \text{ RMB}/\text{a}$  in total. (2) Hydropower product, flood control and environmental benefits of hydropower were the main positive effects of TGP construction, which occupied 95.06% of the total values. The reservoir sedimentation and reservoir inundation were the main negative effects, which occupied 85.56% of the total losses. (3) The ECS of TGP construction was  $123.18 \times 10^8 \text{ RMB}/\text{a}$ . The hydropower development owner and central-local government were the main ecological compensation subjects and undertook 95.06% of ECS. The river ecosystem and resettlements were the main ecological compensation objects and obtained 91.39% of ECS. Through the comparative analysis, the models were proved successfully in TGP.

**Key Words:** ecological supply footprint; ecological demand footprint; ecological compensation standard; evaluation models; large-scale hydropower engineering; Three Gorges Project

生态补偿是一种受益者或破坏者付费的环境经济手段,其核心理论基础是生态系统服务价值。国外生态补偿与中国生态补偿涵义接近的主要以环境服务付费(Payments for Environmental Services, PES)为主<sup>[1]</sup>。生态补偿标准评价应遵循受益者付费原则或破坏者付费原则(国内有些生态补偿研究还会考虑发展机会成本、生态保护成本等)。受益者付费原则是通过核算生态系统提供的某一项(或多项)服务价值确定付费多少。国外(如哥斯达黎加、墨西哥、厄瓜多尔、欧盟与美国、玻利维亚等)的环境服务付费(PES)项目(生态补偿标准)主要核算的是某一类生态系统提供的某一项(或少数几项主要)服务的付费,如世界森林环境服务交易中的碳汇、生物多样性保护、水文服务、景观美化及综合服务。破坏者付费原则是通过核算生态系统受到影响而引起的服务损失确定付费多少。近期,国外 PES 相关研究主要涉及森林<sup>[2]</sup>、流域<sup>[3]</sup>、农田<sup>[4]</sup>、林草复合<sup>[5]</sup>、生物圈保护区<sup>[6]</sup>等领域,涉及生物多样性保护<sup>[7]</sup>、碳汇<sup>[8]</sup>、水文服务<sup>[9]</sup>等的项目较多;国内生态补偿标准评估主要涉及流域<sup>[10]</sup>、草原<sup>[11]</sup>、森林<sup>[12]</sup>、农业<sup>[13]</sup>、海洋<sup>[14]</sup>、区域<sup>[15]</sup>、能源开采<sup>[16]</sup>等领域。目前,从国内外大量的生态补偿相关研究成果来看,生态补偿主要以流域、森林、草原、农田等领域为主,运用的生态补偿标准评估方法主要有生态系统服务价值法、机会成本法、成本-费用分析法和条件价值评估法等。

我国是世界上水电资源最丰富的国家,水力资源理论蕴藏量、技术可开发量、经济可开发量及已建和在建开发量均居世界首位<sup>[17]</sup>。截止 2011 年底,我国共有水电站 46758 座,总装机容量  $3.33 \times 10^8 \text{ kW}$ ;其中,大型水电站(装机容量  $30 \times 10^4 \text{ kW}$  及以上)装机容量占全国水电站总装机容量的 62%<sup>[18]</sup>。同时,我国也是世界上

大型水坝建设最多的国家,2005 年,30 m 以上的大坝共有 4839 座,其中,100 m 以上大坝 130 座,分别占世界的 38%和 15%;2008 年,30 m 以上的已建在建大坝共有 5191 座,其中 100 m 以上大坝 142 座<sup>[19]</sup>。以大型水坝为基础的大型水电工程建设对生态环境的影响一直是学术界广泛关注的焦点,国内外学者在这一领域发表了多篇学术论文,如 *Science* 近年就发表了多篇关于三峡工程生态环境影响的文章<sup>[20-22]</sup>。千年生态系统评估(MA)指出<sup>[23]</sup>:淡水生态系统是全球范围内被人类活动最显著地改变的生态系统之一;自 1960 年以来,世界上水库的蓄水量已经增加到了原来的 4 倍,目前水库中的蓄水量大约是自然河流中水量的 3—6 倍;由于沿河修建大坝或者其他建筑,世界上 60%的大型河流水系的流量已经受到了中等或者强烈的影响;大型的水库建筑使河水在河道中的停留时间(指 1 滴水流入海洋的平均时间),增加到了原来的 2 到 3 倍。

修建大型水电工程,增强(或增添)了河流生态系统为人们提供防洪、发电、供水、航运、养殖、旅游、环境效益(减少温室气体)等多项服务;同时,大型水电工程建设引起的水库泥沙淤积、水库淹没、工程占据、移民安置区建设、对珍稀濒危生物影响、对重要文物古迹影响、对水质影响及施工期和主要建筑材料生产的温室气体排放等多项负面影响,也减弱了河流生态系统为人们提供的多项服务。大型水电工程建设带来的水库养殖、改善航道、水力发电产品、水力发电环境效益、水库大坝旅游和调蓄洪水等正面影响的受益者或受益者代表(大型水电工程建设的生态补偿主体),应承担大型水电工程建设引起的水库泥沙淤积、工程对河流生态系统占据、水库淹没、工程移民安置区建设、工程对珍稀濒危生物影响、工程对水质影响、工程施工期能源消耗温室气体排放影响、工程施工期污水排放影响、工程主要建筑材料生产温室气体排放影响等负面影响的受损者或受损者代表(大型水电工程建设的生态补偿对象)的经济损失,这些负面影响的经济损失之和就是大型水电工程建设的生态补偿标准。

2011 年,肖建红等将 Rees-Wackernagel 提出的生态足迹思想引入大型水电工程生态补偿标准评估中,首先定义了生态供给足迹与生态需求足迹的含义,即:大型水电工程生态供给足迹是指因修建工程而增强河流生态系统服务的供给能力,这种增强的供给能力能够折算的世界生物生产性土地(或水域)的总面积;大型水电工程生态需求足迹是指因修建工程而削弱河流生态系统服务的供给能力,这种削弱的供给能力能够折算的世界生物生产性土地(或水域)的总面积;并以湖南皂市大型水电工程为例,通过构建生态补偿主体受益评估模型和生态补偿对象受损评估模型,定量评估了大型水电工程的生态补偿标准<sup>[24]</sup>。这是一项针对个案的研究,带有特殊性,适用范围较窄。本文运用生态足迹思想,构建了 6 类具有一定适用性的大型水电工程建设生态供给足迹与生态需求足迹模型,以此为基础,构建了大型水电工程建设生态补偿标准评估模型,并进行了三峡工程案例验证;以期为生态足迹思想在(大型水电工程建设)生态补偿标准定量评估中的进一步应用和制定大型水电工程建设生态补偿政策等提供参考。

## 1 模型构建

已有的 6 类大型水电工程建设生态供给足迹与生态需求足迹模型和 15 个三峡工程建设生态供给足迹与生态需求足迹详细计算模型,是以大型水电工程建设对河流生态系统服务影响为基础,运用生态足迹思想,新构建的,模型均为原创。

### 1.1 大型水电工程建设生态供给足迹与生态需求足迹模型

#### 1.1.1 第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_i = r_i \times \Delta M_i \times \overline{y_i} \quad (1)$$

式中,  $EF_i$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $r_i$  为均衡因子;  $\Delta M_i$  为有无大型水电工程建设对比物质的变化;  $\overline{y_i}$  为特定产量因子(所谓特定产量因子就是需要依据实际情况调整的产量因子)(表 1)。

#### 1.1.2 第 II 类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_j = r_6 \times \Delta M_j \times [(1 - O_{CO_2}) \times L_j^{Carbon}] \quad (2)$$

式中,  $EF_j$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $r_e$  为化石燃料用地的均衡因子;  $\Delta M_j$  为有无大型水电工程建设对比物质量的变化;  $O_{CO_2}$  为海洋吸纳  $CO_2$  的比例;  $L_j^{Carbon}$  为能地比用碳吸纳法计算的化石燃料用地面积系数, 该系数用化石能源热量折算系数 ( $GJ/t$ ) 比上全球平均化石能源的足迹 ( $GJ\ hm^{-2}\ a^{-1}$ ) 计算 (火力发电热量折算系数应考虑发电效率, 取值为  $0.01184\ GJ\ kW^{-1}\ h^{-1}$ )。

表 1 第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型相关参数

Table 1 Type I : the correlative parameters of ESF (ecological supply footprint) and EDF (ecological demand footprint) models

| 评价内容<br>Evaluation contents     | $\Delta M_i$ 的含义<br>$\Delta M_i$ implications | $y_i$ 的计算方法<br>$y_i$ calculation methods | $r_i$ 的类型 $r_i$ types |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|
| 水库供水 Water supply of reservoir  | 水库供水量                                         | (内陆水域面积/地表水总供水量) × 产量因子                  | 水域                    |
| 水库养殖 Reservoir breeding         | 水库养殖水面面积                                      | 水库平均养殖单位产量/全球平均单位产量                      | 水域                    |
| 水库大坝旅游 Tourism of reservoir dam | 水库水面面积                                        | 产量因子                                     | 水域                    |
| 调蓄洪水<br>Flooding control        | 减少淹没耕地面积                                      | 产量因子                                     | 耕地                    |
| 调蓄洪水                            | 保护耕地面积                                        | (单位平均综合农业受灾损失值/地区农业平均产值) × 产量因子          | 耕地                    |
| 调蓄洪水                            | 减少城镇受灾的损失值折算的耕地面积                             | 产量因子                                     | 耕地                    |
| 水库泥沙淤积 Reservoir sedimentation  | 淤积泥沙折算的耕地面积                                   | 产量因子                                     | 耕地                    |

表 2 第 II 类生态供给足迹与生态需求足迹模型相关参数

Table 2 Type II : the correlative parameters of ESF and EDF models

| 评价内容 Evaluation contents                                                               | $\Delta M_j$ 的含义 $\Delta M_j$ implications  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 航运 Navigation                                                                          | 与公路运输相比节省的化石能源量                             |
| 水库航运 Reservoir navigation                                                              | 改善航运条件节省的化石能源量                              |
| 改善航道 Improving waterway                                                                | 建设受影响的珍稀濒危生物保护区年化石能源和(燃煤)火电消耗量              |
| 对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species                                    | 建设受影响的重要文物古迹博物馆等年(燃煤)火电消耗量                  |
| 对重要文物古迹影响<br>Impact on the important cultural relic and historic site                  | 增加建设的污水处理厂年(燃煤)火电消耗量                        |
| 对水质影响 Impact on water quality                                                          | 大型水电工程建设施工期各种化石能源和(燃煤)火电消耗量(平均折算到 20a, 一代人) |
| 施工期能源消耗温室气体排放 Greenhouse gas emission of energy consumption during construction period | 大型水电工程建设施工期治理排放污水(燃煤)火电消耗量(平均折算到 20a, 一代人)  |
| 施工期污水排放 Sewage discharge during construction period                                    |                                             |

### 1.1.3 第 III 类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_k = r_k \times \Delta M_k \times y_k \times v_k \quad (3)$$

式中,  $EF_k$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $\Delta M_k$  为有无大型水电工程建设对比物质量的变化;  $r_k$  为均衡因子;  $y_k$  为产量因子;  $v_k$  为基于生态系统服务的价值因子(表 3)。

本研究大型水电工程对各种不同类型土地(或水域)的占用(或淹没)考虑的是占用(或淹没)了整个生态系统, 所以, 乘上了基于生态系统服务的价值(或损失)因子。基于生态系统服务的价值因子具体计算方法为: 分别用各种不同类型(包括: 河流、森林、草原、农田等)生态系统服务的总单位价值比上其食品生产和原材料的单位价值之和, 计算基础数据选自 Constanza 等<sup>[25]</sup>的研究成果。

表 3 第Ⅲ类生态供给足迹与生态需求足迹模型相关参数

| 评价内容 Evaluation contents                                           | $\Delta M_k$ 的含义 $\Delta M_k$ implications |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 对河流生态系统占据 Occupation on river ecosystem                            | 大型水电工程建设占据的各种不同类型的土地(含水域)面积                |
| 水库淹没 Reservoir inundation                                          | 大型水电工程建设淹没的各种不同类型的土地(含水域)面积                |
| 移民安置区建设 Construction of resettlement area                          | 移民安置区建设占用的各种不同类型的土地面积                      |
| 对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species                | 建设受影响的珍稀濒危生物保护区占用的不同类型的土地(含水域)面积           |
| 对重要文物古迹影响 Impact on the important cultural relic and historic site | 建设受影响的重要文物古迹博物馆等的占地(建筑用地)面积                |
| 对水质影响 Impact on water quality                                      | 增加建设各类污水处理设施的占地(建筑用地)面积                    |

1.1.4 第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_m = r_1 \times \Delta M_m \times (t_{he}/f_{he}) \times v_1 \tag{4}$$

式中,  $EF_m$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $\Delta M_m$  为有无大型水电工程建设对比物质量的变化;  $t_{he}$  为水电的热量折算系数(0.0036 GJ kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);  $f_{he}$  为水电的全球平均足迹(GJ/hm<sup>2</sup>);  $r_1$  为耕地的均衡因子;  $v_1$  为耕地基于生态系统服务的价值因子(表 4)。

表 4 第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型相关参数

| 评价内容 Evaluation contents                                                               | $\Delta M_m$ 的含义 $\Delta M_m$ implications |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species                                    | 建设受影响的珍稀濒危生物保护区年水电消耗量                      |
| 对重要文物古迹影响 Impact on the important cultural relic and historic site                     | 建设受影响的重要文物古迹博物馆等年水电消耗量                     |
| 对水质影响 Impact on water quality                                                          | 增建污水处理厂年水电消耗量                              |
| 施工期能源消耗温室气体排放 Greenhouse gas emission of energy consumption during construction period | 大型水电工程建设施工期水电消耗量(平均折算到 20a, 一代人)           |
| 施工期污水排放 Sewage discharge during construction period                                    | 大型水电工程建设施工期治理排放污水水电消耗量(平均折算到 20a, 一代人)     |

1.1.5 第Ⅴ类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_n = r_3 \times \Delta M_n \times (1 - O_{CO_2})/p_{CO_2} \tag{5}$$

式中,  $EF_n$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $r_3$  为林地的均衡因子;  $\Delta M_n$  为有无大型水电工程建设对比物质量的变化;  $O_{CO_2}$  为海洋吸纳 CO<sub>2</sub> 的比例;  $p_{CO_2}$  为森林吸碳系数(t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)。

第Ⅴ类生态供给足迹与生态需求足迹模型用于评价生产大型水电工程主要建筑材料水泥、钢材等, 温室气体 CO<sub>2</sub> 排放(平均折算到 20a, 一代人)的生态需求足迹。

1.1.6 第Ⅵ类生态供给足迹与生态需求足迹模型

$$EF_{he} = r_3 \times \Delta M_{he} \times L_{he}^{Biomass} + r_6 \times \Delta M_{he} \times [(1 - O_{CO_2}) \times L_{he}^{Carbon}] \tag{6}$$

式中,  $EF_{he}$  为大型水电工程建设的生态供给足迹或生态需求足迹;  $r_3$  和  $r_6$  分别为林地和化石燃料用地的均衡因子;  $\Delta M_{he}$  为大型水电工程水力发电量;  $O_{CO_2}$  为海洋吸纳 CO<sub>2</sub> 的比例;  $L_{he}^{Biomass}$  为能地比用自然资本存量法计算的林地面积系数, 该系数用水电热量折算系数(0.0036 GJ kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) 比上 1 hm<sup>2</sup> 林地每年累积的可更新的生物质能源量(80 GJ/hm<sup>2</sup>) 计算;  $L_{he}^{Carbon}$  为能地比用碳吸纳法计算的化石燃料用地面积系数, 该系数用水电热量折算系数(0.0036 GJ kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) 比上煤、油和气的全球平均能源足迹的平均值(GJ hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) 计算。

第Ⅵ类模型用于大型水电工程水力发电生态供给足迹的计算, 模型包括水力发电产生新能源产品的生态供给足迹和水力发电环境效益的生态供给足迹两部分。

## 1.2 大型水电工程建设生态补偿标准模型

大型水电工程建设生态补偿标准模型为:

$$ECS = \sum_i ecs_{object}^i = \sum_j ecs_{subject}^j \quad (7)$$

$$ecs_{object}^i = EF_{demand}^i \times P_{EF} \quad (8)$$

$$ecs_{subject}^j = [ (EF_{supply}^j \times P_{EF}) / ( \sum_j EF_{supply}^j \times P_{EF} ) ] \times ECS \quad (9)$$

式中,  $ECS$  为大型水电工程建设生态补偿标准;  $ecs_{object}^i$  为大型水电工程建设第  $i$  个生态补偿对象获得的生态补偿额;  $ecs_{subject}^j$  为大型水电工程建设第  $j$  个生态补偿主体承担的生态补偿额;  $EF_{demand}^i$  为大型水电工程建设对第  $i$  个生态补偿对象产生负面影响的生态需求足迹;  $EF_{supply}^j$  为大型水电工程建设对第  $j$  个生态补偿主体产生正面影响的生态供给足迹;  $P_{EF}$  为生态足迹的单位价值。

运用肖建红等<sup>[24]</sup>的转换方法计算生态足迹的单位价值:分别用中国 2001 年、2003 年、2005 年、2007 年、2008 年的(2000 年不变价)人均 GDP 比上相应年份的中国人均生态足迹,计算出这 5a 中国生态足迹的价值。本研究将这 5a 中国生态足迹价值的平均值作为生态足迹转换的单位价值,计算结果为 6518 元/hm<sup>2</sup>。

## 2 模型应用

### 2.1 三峡工程建设生态供给足迹与生态需求足迹模型

#### 2.1.1 三峡工程建设生态供给足迹与生态需求足迹模型应用对照体系

依据第 I 类—第 VI 类生态供给足迹与生态需求足迹模型的含义及适合评价内容(表 1—表 4 评价内容一列及第 V、第 VI 类模型给出的适合评价内容),经过整理可得出,三峡工程建设生态补偿标准评估运用的生态供给足迹与生态需求足迹模型如表 5 所示(本研究评价范围主要以三峡库区为主;因数据获取的限制,评价范围涉及长江中下游的较少)。

表 5 生态供给足迹与生态需求足迹模型应用  
Table 5 The application of ESF and EDF models

| 评价内容 Evaluation contents                                                                                   | 生态供给足迹与生态需求足迹模型<br>ESF ( ecological supply footprint ) and EDF<br>( ecological demand footprint ) models |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 三峡水库养殖 Three Gorges Reservoir breeding                                                                     | 第 I 类模型                                                                                                  |
| 三峡工程改善川江航道 Improving waterway by TGP                                                                       | 第 II 类模型                                                                                                 |
| 三峡工程发电 Hydropower by TGP                                                                                   | 第 VI 类模型                                                                                                 |
| 三峡大坝旅游 Tourism of Three Gorges Dam                                                                         | 第 I 类模型                                                                                                  |
| 三峡工程调蓄洪水 Flooding control by TGP                                                                           | 第 I 类模型                                                                                                  |
| 三峡水库泥沙淤积 Sedimentation of Three Gorges Reservoir                                                           | 第 I 类模型                                                                                                  |
| 三峡工程对河流生态系统占据 Occupation on river ecosystem by TGP                                                         | 第 III 类模型                                                                                                |
| 三峡水库淹没 Inundation of Three Gorges Reservoir                                                                | 第 III 类模型                                                                                                |
| 三峡工程移民安置区建设 Construction of resettlement area of TGP                                                       | 第 III 类模型                                                                                                |
| 三峡工程对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species by TGP                                             | 第 II 类模型、第 III 类模型和第 IV 类模型                                                                              |
| 三峡工程对库区及其上游水质影响<br>Impact on water quality in reservoir area and upper reaches of the Yangtze River by TGP | 第 II 类模型、第 III 类模型和第 IV 类模型                                                                              |
| 三峡工程施工期能源消耗温室气体排放<br>Greenhouse gas emission of energy consumption during TGP construction period          | 第 II 类模型和第 IV 类模型                                                                                        |
| 三峡工程施工期污水排放 Sewage discharge during TGP construction period                                                | 第 II 类模型和第 IV 类模型                                                                                        |
| 三峡工程主要建筑材料生产温室气体排放<br>Greenhouse gas emission of producing TGP's main building materials                   | 第 V 类模型                                                                                                  |

## 2.1.2 三峡工程建设生态供给足迹模型

### (1) 三峡水库养殖生态供给足迹模型

以第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(1)为基础,构建的三峡水库养殖生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_c = r_5 \times S_c \times (q_c/y_{wc}) \quad (10)$$

式中,  $EF_c$  为三峡水库养殖的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_5$  为水域的均衡因子;  $S_c$  为三峡水库有可养殖的水面面积( $\text{hm}^2$ );  $q_c$  为长江中下游 6 省市大中型水库渔业的平均产量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $y_{wc}$  为世界水域的平均生产能力( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

### (2) 三峡工程改善川江航道生态供给足迹模型

以第 II 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(2)为基础,构建的三峡工程改善川江航道生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_n = r_6 \times (Q_n \Delta a_n) \times [(1 - O_a)(\eta_{do}/f_{do})] \quad (11)$$

式中,  $EF_n$  为三峡工程改善川江航道的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_6$  为化石燃料用地的均衡因子;  $Q_n$  为三峡工程正常运行时“重庆—宜昌”航道的货物周转量( $\text{t} \cdot \text{km}/\text{a}$ );  $\Delta a_n$  为因修建三峡工程改善川江航道单位货物周转量节省的航运燃油量( $\text{t t}^{-1} \text{km}^{-1}$ );  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例(%);  $\eta_{do}$  为柴油的热量折算系数( $\text{GJ}/\text{t}$ );  $f_{do}$  为柴油的全球平均能源足迹( $\text{GJ hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )。

### (3) 三峡工程发电产品生态供给足迹模型

以第 VI 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(6)为基础,构建的三峡工程发电产品生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_{ep} = r_3 \times Q_e \times (t_e/C_e) \quad (12)$$

式中,  $EF_{ep}$  为三峡工程发电产品的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_3$  为林地的均衡因子;  $Q_e$  为三峡工程多年平均发电量( $\text{kW h}^{-1} \text{a}^{-1}$ );  $t_e$  为水电的热量折算系数( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $C_e$  为  $1 \text{ hm}^2$  林地每年累积的可更新的生物质能源量( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ )。

### (4) 三峡工程发电减少温室气体排放生态供给足迹模型

以第 VI 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(6)为基础,构建的三峡工程发电减少温室气体排放生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_{ee} = r_6 \times Q_e \times [(1 - O_a)(t_e/\bar{f}_{cdog})] \quad (13)$$

式中,  $EF_{ee}$  为三峡工程发电减少温室气体排放的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_6$  为化石燃料用地的均衡因子;  $Q_e$  为三峡工程多年平均发电量( $\text{kW h}^{-1} \text{a}^{-1}$ );  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例(%);  $t_e$  为水电的热量折算系数( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $\bar{f}_{cdog}$  为煤、油和气全球平均能源足迹的平均值( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ )。

### (5) 三峡大坝旅游生态供给足迹模型

以第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(1)为基础,构建的三峡大坝旅游生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_l = r_5 \times S_r \times y_5 \quad (14)$$

式中,  $EF_l$  为三峡大坝旅游的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_5$  为水域的均衡因子;  $y_5$  为水域的产量因子;  $S_r$  为三峡水库库面面积( $\text{hm}^2$ )。

### (6) 三峡工程调蓄洪水生态供给足迹模型

以第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(1)为基础,构建的三峡工程调蓄洪水生态供给足迹具体计算模型为:

$$EF_f = r_1 \times S_{f_1} \times y_1 + r_1 \times S_{f_2} \times [(P_{cf}/P_{cf}^{2000})y_1] + r_1 \times [(Q_{f_2}P_{f_2})/P_{cf}^{1990}] \times y_1 \quad (15)$$

式中,  $EF_t$  为三峡工程调蓄洪水的生态供给足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_1$  为耕地的均衡因子;  $S_{t_1}$  为因修建三峡工程多年平均可减少农田淹没面积( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $P_{ct}$  为单位平均综合农业受灾损失值(元/ $\text{hm}^2$ );  $P_{ct}^{2000}$  为我国农业平均产值(2010 年第一产业国内生产总值与耕地总面积比值, 第一产业国内生产总值折算为 2000 年不变价值, 与  $P_{ct}$  值年份基本对应)(元/ $\text{hm}^2$ );  $S_{t_2}$  为三峡工程有效减免洪水灾害保护洞庭湖区和汉江平原的耕地面积( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $Q_{t_2}$  为三峡工程正常运行后年平均减少城镇受灾人口数(人/a);  $P_{t_2}$  为城镇人均综合损失指标(元/人);  $P_{ct}^{1990}$  为我国农业平均产值(2010 年第一产业国内生产总值与耕地总面积比值, 第一产业国内生产总值折算为 1990 年不变价值, 与  $P_{t_2}$  值年份基本对应)(元/ $\text{hm}^2$ );  $y_1$  为耕地的产量因子。

### 2.1.3 三峡工程建设生态需求足迹模型

#### (1) 三峡水库泥沙淤积生态需求足迹模型

以第 I 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(1)为基础, 构建的三峡水库泥沙淤积生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_s = r_1 \times (Q_s/d_s) \times y_1 \quad (16)$$

式中,  $EF_s$  为三峡水库泥沙淤积的生态需求足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $r_1$  为耕地的均衡因子;  $Q_s$  为三峡水库运行 20a 平均每年按照累积效应折算的泥沙淤积量( $\text{m}^3/\text{a}$ );  $d_s$  为土壤表土平均厚度(m);  $y_1$  为耕地的产量因子。

#### (2) 三峡工程对河流生态系统占据生态需求足迹模型

以第 III 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(3)为基础, 构建的三峡工程对河流生态系统占据生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_h = \sum_i (r_i \times S_i \times y_i \times v_i) \quad (17)$$

式中,  $EF_h$  为三峡工程对河流生态系统占据的生态需求足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $S_i$  为三峡工程占据耕地(建筑用地)或水域的面积( $\text{hm}^2$ );  $r_i$  为耕地或水域的均衡因子;  $y_i$  为耕地或水域的产量因子;  $v_i$  为耕地或水域的基于生态服务的价值因子。

#### (3) 三峡水库淹没生态需求足迹模型

以第 III 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(3)为基础, 构建的三峡水库淹没生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_i = \sum_j (r_j \times S_j \times y_j \times v_j) \quad (18)$$

式中,  $EF_i$  为三峡水库淹没的生态需求足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $S_j$  为三峡水库淹没耕地、草地、林地或湿地的面积( $\text{hm}^2$ );  $r_j$  为耕地、草地、林地或水域的均衡因子;  $y_j$  为耕地、草地、林地或水域的产量因子;  $v_j$  为耕地、草地、林地或水域的基于生态系统服务的价值因子。

#### (4) 三峡工程移民安置区建设生态需求足迹模型

以第 III 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(3)为基础, 构建的三峡工程移民安置区建设生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_r = \sum_k (r_k \times S_k \times y_k \times v_k) \quad (19)$$

式中,  $EF_r$  为三峡工程移民安置区建设的生态需求足迹( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $S_k$  为三峡工程移民安置区建设占用耕地、草地或林地的面积( $\text{hm}^2$ );  $r_k$  为耕地、草地或林地的均衡因子;  $y_k$  为耕地、草地或林地的产量因子;  $v_k$  为耕地、草地或林地的基于生态系统服务的价值因子。

#### (5) 三峡工程对珍稀濒危生物影响生态需求足迹模型

以第 II 类和第 III 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(2)和(3)为基础, 构建的三峡工程对珍稀濒危生物影响生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_b = \sum_t (r_t \times S_t \times y_t \times v_t) + r_6 \times (M_c/p_c) \times [(1 - O_a)(\eta_c/f_c)] \quad (20)$$

式中,  $EF_b$  为三峡工程对珍稀濒危生物影响的生态需求足迹 ( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $S_l$  为保护三峡工程影响的珍稀濒危生物所建自然保护区和人工繁殖放流站占用耕地、林地和水域的面积 ( $\text{hm}^2$ );  $M_c$  为自然保护区和人工繁殖放流站购买燃料的费用 (元/a),  $p_c$  为煤的单价 (元/t);  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例 (%);  $\eta_c$  为煤的热量折算系数 ( $\text{GJ/t}$ );  $f_c$  为煤的全球平均能源足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $r_l$  为耕地、林地或水域的均衡因子;  $r_6$  为化石燃料用地的均衡因子;  $y_l$  为耕地、林地或水域的产量因子;  $v_l$  为耕地、林地或水域的基于生态系统服务的价值因子。

#### (6) 三峡工程对库区及其上游水质影响生态需求足迹模型

以第Ⅱ类、第Ⅲ类和第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型(2)——(4)为基础,构建的三峡工程对库区及其上游水质影响生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_p = r_4 \times \left( \sum_i S_{pi} + \sum_j S_{pj} + x_p \sum_k V_{pk} \right) \times y_4 \times v_1 + r_6 \times (E_p x_c) \times [(1 - O_a)(t_c/f_c)] + r_1 \times [E_p(1 - x_c)] \times (t_{he}/f_{he}) \times v_1 \quad (21)$$

式中,  $EF_p$  为三峡工程对库区及其上游水质影响的生态需求足迹 ( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $S_{pi}$  为每座污水处理厂附属设施建筑面积指标 ( $\text{hm}^2$ );  $S_{pj}$  为每座污水处理厂泵站建设用地指标 ( $\text{hm}^2$ );  $x_p$  为污水处理厂的建设用地系数 ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ );  $V_{pk}$  为每座污水处理厂每天污水处理量 (体积) ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ),  $V_{pk} = m_{pk}/\rho_p$ ,  $m_{pk}$  为每座污水处理厂每天污水处理量 (质量) ( $\text{t} \cdot \text{d}$ ),  $\rho_p$  为污水密度 ( $\text{t}/\text{m}^3$ );  $E_p = (365 \times e_p \sum_k V_{pk})$  为新建污水处理厂处理污水年耗电量 ( $\text{kWh}$ ), 其中  $e_p$  为处理每立方米污水的耗电量 ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ );  $x_c$  为我国火力发电量占我国电力生产量的比例 (%);  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例 (%);  $t_c$  为火电的热量折算系数 ( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $f_c$  为煤的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $t_{he}$  为水电的热量折算系数 ( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $f_{he}$  为水电的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $r_1$ 、 $r_4$  和  $r_6$  分别为耕地、建筑用地和化石燃料用地的均衡因子;  $y_4$  为建筑用地 (耕地) 的产量因子;  $v_1$  为耕地基于生态系统服务的价值因子。

#### (7) 三峡工程施工期能源消耗温室气体排放生态需求足迹模型

以第Ⅱ类和第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型(2)和(4)为基础,构建的三峡工程施工期能源消耗温室气体排放生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_{ce} = \left\{ \sum_i r_6 \times Q_{ce}^i \times [(1 - O_a)(t_{ce}^i/f_{ce}^i)] + r_1 \times Q_{ce}^{he} \times (t_{he}/f_{he}) \times v_1 \right\} / T \quad (22)$$

式中,  $EF_{ce}$  为三峡工程施工期能源消耗温室气体排放的生态需求足迹 ( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $Q_{ce}^i$  分别为三峡工程施工期汽油、柴油、煤和火电的消耗量 ( $\text{t}$  或  $\text{kWh}$ );  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例 (%);  $t_{ce}^i$  分别为汽油、柴油、无烟煤和火电的热量折算系数 ( $\text{GJ/t}$ );  $f_{ce}^i$  分别为汽油、柴油、煤和火电 (煤) 的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $Q_{ce}^{he}$  为三峡工程施工期水电消耗量 ( $\text{kWh}$ );  $t_{he}$  为水电的热量折算系数 ( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $f_{he}$  为水电的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $r_1$  和  $r_6$  分别为耕地和化石燃料用地的均衡因子;  $v_1$  为耕地基于生态系统服务的价值因子;  $T$  为施工期环境影响分摊年数 (a)。

#### (8) 三峡工程施工期污水排放生态需求足迹模型

以第Ⅱ类和第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型(2)和(4)为基础,构建的三峡工程施工期污水排放生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_w = \{ r_6 \times [(Q_w e_w) x_c] \times [(1 - O_a)(t_c/f_c)] + r_1 \times [(Q_w e_w)(1 - x_c)] \times (t_{he}/f_{he}) \times v_1 \} / T \quad (23)$$

式中,  $EF_w$  为三峡工程施工期污水排放的生态需求足迹 ( $\text{hm}^2/\text{a}$ );  $Q_w$  为三峡工程施工期污水总排放量 ( $\text{m}^3$ );  $e_w$  为处理每立方米污水的耗电量 ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ );  $x_c$  为火力发电量占我国电力生产量的比例 (%);  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例 (%);  $t_c$  为火电的热量折算系数 ( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $f_c$  为火电 (煤) 的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $t_{he}$  为水电的热量折算系数 ( $\text{GJ kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $f_{he}$  为水电的全球平均足迹 ( $\text{GJ}/\text{hm}^2$ );  $r_1$  和  $r_6$  分别为耕地和化石燃料用地的均衡因子;  $v_1$  为耕地基于生态系统服务的价值因子;  $T$  为施工期环境影响分摊年数 (a)。

#### (9) 三峡工程主要建筑材料生产生态需求足迹评价

以第 V 类生态供给足迹与生态需求足迹模型(5)为基础,构建的三峡工程主要建筑材料生产生态需求足迹具体计算模型为:

$$EF_m = [r_3 \times (W_{mc} e_{CO_2}^c + W_{ms} e_{CO_2}^s) \times (1 - O_a) / p_{CO_2}] / T \quad (24)$$

式中,  $EF_m$  为三峡工程主要建筑材料生产的生态需求足迹 ( $hm^2/a$ );  $W_{mc}$  和  $W_{ms}$  分别为三峡工程建设所需的水泥、钢筋和钢材量 (t);  $e_{CO_2}^c$  和  $e_{CO_2}^s$  分别为生产 1 t 水泥和生产 1 t 钢材的  $CO_2$  排放系数 (t/t);  $O_a$  为海洋吸收二氧化碳的比例 (%);  $p_{CO_2}$  为全球平均 1  $hm^2$  林地每年吸收  $CO_2$  的量 (t/ $hm^2$ );  $r_3$  为林地的均衡因子;  $T$  为施工期环境影响分摊年数 (a)。

## 2.2 三峡工程建设生态补偿标准评价结果

### 2.2.1 数据来源

三峡工程相关基础数据通过文献<sup>[26-32]</sup>整理计算;产量因子、均衡因子、世界水域的平均生产能力、各种能源的全球平均足迹、生态足迹“能地比”计算的相关参数等来源于文献<sup>[33-36]</sup>;能源的热量折算系数来自文献<sup>[37]</sup>;海洋吸收二氧化碳的比例来自文献<sup>[38]</sup>;主要建筑材料水泥和钢生产过程的  $CO_2$  排放系数数据通过文献<sup>[39-40]</sup>整理计算;单位污水处理耗电量和污水处理厂建设相关参数选自文献<sup>[41]</sup>;农业平均产值、火电和水电比例等依据文献<sup>[42]</sup>中数据计算;基于生态系统服务的价值因子依据文献<sup>[25]</sup>中数据计算;单位平均综合农业受灾损失值来自文献<sup>[43]</sup>;土壤表土平均厚度来自文献<sup>[44]</sup>。

### 2.2.2 生态补偿标准

三峡工程建设生态补偿标准方案,将目前难以明确或难以具体明确的生态补偿主体和生态补偿对象通过政府承担或建立基金会的形式进行明确。在生态补偿对象中,三峡工程移民安置区影响范围广,目前难以具体明确移民安置区建设影响的生态系统微观对象,以成立三峡工程移民安置区建设环境保护基金会的形式代表生态补偿对象;三峡工程施工期能源消耗、三峡工程施工期污水排放和三峡工程主要建筑材料生产等的负面影响,目前难以具体明确三峡库区及其周边更大范围居民、主要建筑材料生产的水泥厂和钢厂附近居民及其周边更大范围居民等生态补偿微观对象,通过建立三峡工程环境与健康保护基金会的形式代表生态补偿对象。在生态补偿主体中,三峡工程调蓄洪水保护范围广,目前难以具体明确生态补偿微观主体,以中央政府和地方政府代表。

运用公式(7)一(9)计算可得出,三峡工程建设生态补偿主体受益值和生态补偿对象受损值(表 6)、三峡工程建设生态补偿对象获得生态补偿额(表 7)和三峡工程建设生态补偿主体承担生态补偿额(表 8)。

表 6 三峡工程建设生态补偿主体受益值和生态补偿对象受损值

Table 6 The values of ecological compensation subjects and the losses of ecological compensation objects on TGP

| 正面影响 Positive effects                                  |                                                     |                                                           | 负面影响 Negative effects                                   |                                                     |                                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 评价内容<br>Evaluation contents                            | 生态供给<br>足迹 ESF/<br>( $10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ ) | 经济价值/<br>( $10^8 \text{ 元}/\text{a}$ )<br>Economic values | 评价内容<br>Evaluation contents                             | 生态需求<br>足迹 BDF/<br>( $10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ ) | 经济损失/<br>( $10^8 \text{ 元}/\text{a}$ )<br>Economic losses |
| 三峡水库养殖 Three Gorges Reservoir breeding                 | 25.4                                                | 16.56                                                     | 三峡水库泥沙淤积<br>Sedimentation of Three Gorges Reservoir     | 127                                                 | 82.78                                                     |
| 三峡工程改善川江航道<br>Improving waterway by TGP                | 19.4                                                | 12.64                                                     | 三峡工程占据<br>Occupation on river ecosystem by TGP          | 4.55                                                | 2.97                                                      |
| 三峡工程发电产品<br>Hydropower production by TGP               | 419                                                 | 273.10                                                    | 三峡水库淹没 Inundation of Three Gorges Reservoir             | 34.7                                                | 22.62                                                     |
| 三峡工程发电环境效益<br>Environmental value of hydropower by TGP | 239                                                 | 155.78                                                    | 三峡工程移民安置区建设<br>Construction of resettlement area of TGP | 5.88                                                | 3.83                                                      |

续表6

| 正面影响 Positive effects              |                                                     |                                                    | 负面影响 Negative effects                                                                                   |                                                     |                                                    |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 评价内容<br>Evaluation contents        | 生态供给<br>足迹 ESF/<br>( $10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ ) | 经济价值/<br>( $10^8 \text{ 元/a}$ )<br>Economic values | 评价内容<br>Evaluation contents                                                                             | 生态需求<br>足迹 BDF/<br>( $10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ ) | 经济损失/<br>( $10^8 \text{ 元/a}$ )<br>Economic losses |
| 三峡大坝旅游 Tourism of Three Gorges Dam | 2.16                                                | 1.41                                               | 三峡工程对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species by TGP                                          | 3.21                                                | 2.09                                               |
| 三峡工程调蓄洪水 Flooding control by TGP   | 245                                                 | 159.69                                             | 三峡工程对库区及其上游水质影响 Impact on water quality in reservoir area and upper reaches of the Yangtze River by TGP | 6.46                                                | 4.21                                               |
| —                                  | —                                                   | —                                                  | 三峡工程施工期能源消耗 Greenhouse gas emission of energy consumption during TGP construction period                | 4.30                                                | 2.80                                               |
| —                                  | —                                                   | —                                                  | 三峡工程施工期污水排放 Sewage discharge during TGP construction period                                             | 0.03                                                | 0.02                                               |
| —                                  | —                                                   | —                                                  | 三峡工程主要建筑材料生产 Greenhouse gas emission of producing TGP's main building materials                         | 2.85                                                | 1.86                                               |
| 合计 Total                           | 949.96                                              | 619.18                                             | 合计 Total                                                                                                | 188.98                                              | 123.18                                             |

表 7 三峡工程建设生态补偿对象获得生态补偿额

Table 7 The ecological compensation objects obtained ecological compensation standard on TGP

| 负面影响<br>Negative effects                                                                                | 生态补偿对象<br>Ecological<br>compensation objects | 经济损失/( $10^8 \text{ 元/a}$ )<br>Economic losses | 获得生态补偿标准额/<br>( $10^8 \text{ 元/a}$ )<br>Obtained ecological<br>compensation standard |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 三峡水库泥沙淤积 Sedimentation of Three Gorges Reservoir                                                        | 河流生态系统                                       | 82.78                                          | 82.78                                                                                |
| 三峡工程占据 Occupation on river ecosystem by TGP                                                             | 河流生态系统                                       | 2.97                                           | 2.97                                                                                 |
| 三峡水库淹没 Inundation of Three Gorges Reservoir                                                             | 移民                                           | 22.62                                          | 22.62                                                                                |
| 三峡工程移民安置区建设 Construction of resettlement area of TGP                                                    | 三峡工程移民安置区建设环境保护基金会                           | 3.83                                           | 3.83                                                                                 |
| 三峡工程对珍稀濒危生物影响 Impact on the rare and endangered species by TGP                                          | 三峡工程珍稀濒危生物保护基金会                              | 2.09                                           | 2.09                                                                                 |
| 三峡工程对库区及其上游水质影响 Impact on water quality in reservoir area and upper reaches of the Yangtze River by TGP | 河流生态系统                                       | 4.21                                           | 4.21                                                                                 |
| 三峡工程施工期能源消耗 Greenhouse gas emission of energy consumption during TGP construction period                | 三峡工程环境与健康保护基金会                               | 2.80                                           | 2.80                                                                                 |
| 三峡工程施工期污水排放 Sewage discharge during TGP construction period                                             | 三峡工程环境与健康保护基金会                               | 0.02                                           | 0.02                                                                                 |
| 三峡工程主要建筑材料生产 Greenhouse gas emission of producing TGP's main building materials                         | 三峡工程环境与健康保护基金会                               | 1.86                                           | 1.86                                                                                 |
| 合计 Total                                                                                                | —                                            | 123.18                                         | 123.18                                                                               |

表 8 三峡工程建设生态补偿主体承担生态补偿额

Table 8 The ecological compensation subjects undertook ecological compensation standard on TGP

| 正面影响<br>Positive effects                               | 生态补偿主体<br>Ecological<br>compensation<br>subjects | 经济价值/( 10 <sup>8</sup> 元/a)<br>Economic values | 占总经济价值比例<br>Percent/% | 承担生态补偿<br>标准额/( 10 <sup>8</sup> 元/a)<br>Undertook ecological<br>compensation standard |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 三峡水库养殖<br>Three Gorges Reservoir breeding              | 水库养殖受益者                                          | 16.56                                          | 2.67                  | 3.30                                                                                  |
| 三峡工程改善川江航道<br>Improving waterway by TGP                | 改善航道航运<br>受益者                                    | 12.64                                          | 2.04                  | 2.51                                                                                  |
| 三峡工程发电产品<br>Hydropower production by TGP               | 水电开发业主                                           | 273.10                                         | 44.11                 | 54.33                                                                                 |
| 三峡工程发电环境效益<br>Environmental value of hydropower by TGP | 中央政府和地方<br>政府                                    | 155.78                                         | 25.16                 | 30.99                                                                                 |
| 三峡大坝旅游<br>Tourism of Three Gorges Dam                  | 旅游开发公司                                           | 1.41                                           | 0.23                  | 0.28                                                                                  |
| 三峡工程调蓄洪水<br>Flooding control by TGP                    | 中央政府和地方<br>政府                                    | 159.69                                         | 25.79                 | 31.77                                                                                 |
| 合计 Total                                               | —                                                | 619.18                                         | 100.00                | 123.18                                                                                |

3 模型验证

运用本研究构建的模型计算得出:

(1)在三峡工程建设的正面影响中(表 8 和图 1),发电产品、调蓄洪水和发电环境效益是三峡工程的主要正面影响,三者经济价值占总经济价值的 95.06%;航运、养殖和旅游也具有较明显的经济效益,三者经济价值占总经济价值的 4.94%。依据受益者的经济价值分摊生态补偿标准额度,水电开发业主(水电产品受益者)、中央政府和地方政府(调蓄洪水和发电环境效益受益者代表)是主要的生态补偿主体,两者承担了 95.06%的生态补偿标准额度;航运受益者、养殖受益者、旅游开发公司等生态补偿主体共承担了 4.94%的生态补偿标准额度;生态补偿标准额度占总经济价值的 19.89%。

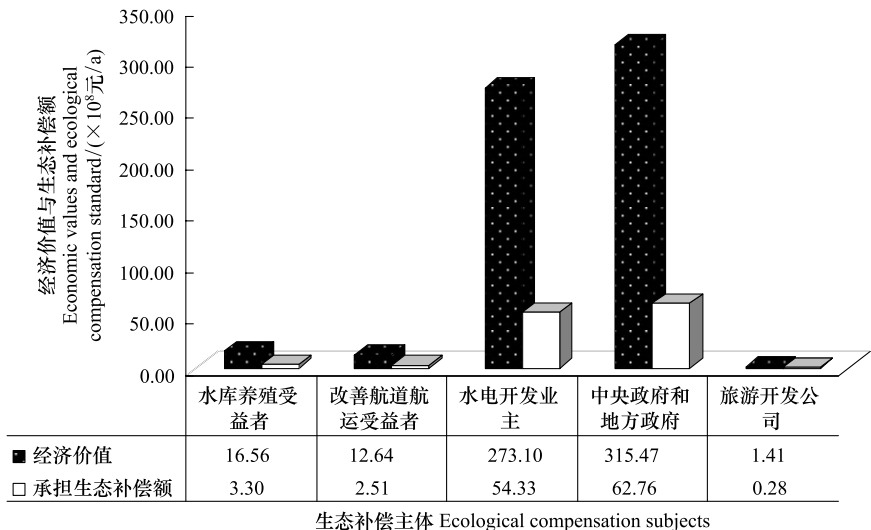


图 1 三峡工程建设经济价值与生态补偿额

Fig.1 The economic values and ecological compensation standard on TGP

(2)在三峡工程建设的负面影响中(表 7 和图 2),水库泥沙淤积和水库淹没是三峡工程的主要负面影响,

两者经济损失占总经济损失的 85.56%;对库区及其上游水质的影响、对珍稀濒危生物的影响和对河流生态系统占据的影响也是三峡工程的重要负面影响,三者经济损失占总经济损失的 7.53%;同时,本研究又增加核算了移民安置区建设对周边生态系统的影响,三峡工程主要建筑材料生产和施工期能源消耗、施工期污水排放等对周边居民的影响,这些三峡工程负面影响的经济损失占总经济损失的 6.91%。依据受损者的经济损失分配生态补偿标准额度,河流生态系统(水库泥沙淤积影响、工程占据影响、对水质影响)和移民(水库淹没)是主要的生态补偿对象,两者获得了 91.39%的生态补偿标准额度;移民安置区建设环境保护基金会(移民安置区建设负面影响)、珍稀濒危生物保护基金会(对珍稀濒危生物影响)和环境与健康保护基金会(施工期能源消耗、施工期污水排放和主要建筑材料生产等对周边居民影响)等生态补偿对象共获得了 8.61%的生态补偿标准额度。

在《长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程)》和《长江三峡水利枢纽环境影响报告书》中提出:三峡工程的主要效益是防洪、发电和航运,同时兼有旅游、环境效益、水产养殖等;三峡工程对生态环境的主要不利影响是水库淹没、水库泥沙淤积、对水质的影响、对生物的影响等<sup>[29]</sup>。肖建红等运用资源环境经济价值评价方法,通过研究也得出了类似的结论:防洪和发电是三峡工程的主要功能,旅游、环境效益、航运、养殖等也是三峡工程的重要功能;水污染、泥沙淤积和水库淹没是三峡工程的主要负面影响,对生物的影响和对河流生态系统的占据也是不容忽视的负面影响<sup>[45]</sup>。运用本研究构建模型得出的三峡工程正面影响和负面影响评估结果与上述文献得出的结果基本一致。

#### 4 讨论

(1) 生态足迹是评估人类活动对生态环境影响的重要指标,目前已被广泛应用于多个领域的资源和能源消耗及废弃物产生的生态环境影响定量评估中。物质质量估算是生态足迹核算的重要内容,本研究构建的 6 类生态供给足迹与生态需求足迹模型,均把大型水电工程建设引起的物质质量变化估算放在核心位置(这种物质质量变化的估算类似于统计人们日常生活生物资源等的消耗量)。生态足迹方法最新颖也是最受争议之处就是对化石能源消耗“能地比”的处理,其主要有碳吸纳法和自然资本存量法及替代法两类处理方式。本研究构建的第Ⅱ类和第Ⅴ类生态供给足迹与生态需求足迹模型及第Ⅵ类生态供给足迹与生态需求足迹模型的后半部分,核算施工期和运营期能源(含火电)消耗碳排放、准备期主要建筑材料生产碳排放和水力发电减少碳排放等的影响时,用的是碳吸纳法(这类似于核算人们日常生活能源消耗的生态足迹),并考虑了海洋的碳吸纳功能。本研究构建的第Ⅵ类生态供给足迹与生态需求足迹模型的前半部分,核算水力发电产品用的是自然资本存量法及替代法(水力发电不同于化石能源,它是新创造的能源,类似于自然资本存量法的森林生长或替代法的甲醇、乙醇生产)。

(2) 均衡因子和产量因子是生态足迹核算中使用的重要参数。Wackernagel 等、世界自然基金会(WWF)、重定义发展组织(Refine Progress)等均在研究成果中给出过均衡因子,本研究使用的均衡因子来自 Wackernagel 等人的研究成果<sup>[33-34]</sup>。本研究构建的第Ⅰ类、第Ⅲ类和第Ⅳ类生态供给足迹与生态需求足迹模型用到了产量因子,产量因子的初始值来自 Wackernagel 等人的研究成果<sup>[33-34]</sup>,在初始值的基础上对产量因子进行了调整;第Ⅰ类模型依据产量的实际变化(如受灾减产比例)对产量因子的初始值进行了调整,第Ⅲ

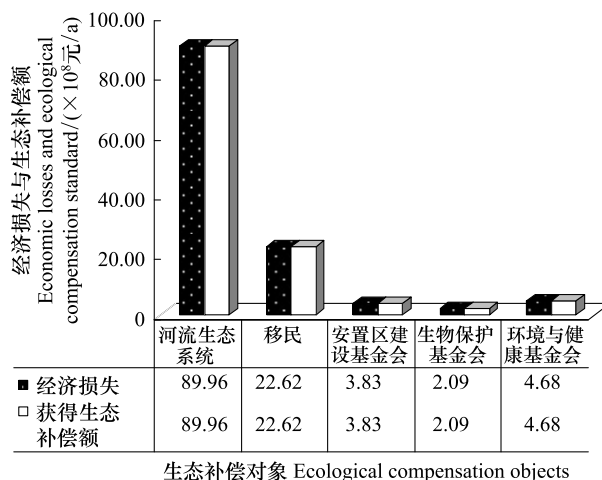


图2 三峡工程建设经济损失与生态补偿额

Fig.2 The economic losses and ecological compensation standard on TGP

类和第Ⅳ类模型通过引入价值因子(从生态系统服务视角)对产量因子进行了调整。

(3) 大型水电工程的整个生命周期(准备期、施工期、运营期和报废期)对生态环境均会产生影响,目前的相关研究主要关注的是运营期的影响。本研究构建的模型从大型水电工程生命周期角度考虑了准备期的主要建筑材料生产的影响、施工期能源消耗和污水排放的影响、运营期的各项主要影响等,报废期对生态环境的影响是世界性难题,目前很难进行定量核算。本研究构建的6类生态供给足迹与生态需求足迹模型涵盖了大型水电工程建设的主要生态环境影响,具有一定适用性。具体个案应用时,可以以此为基础,并结合基础数据的可收集性和个案的实际情况构建具体评价模型(如本研究的三峡工程案例)。

(4) 生态补偿标准评价基础是生态系统服务理论,其评价方法主要有生态系统服务价值法、机会成本法、条件价值评估法及各类成本-费用核算法等;但是,当用这些方法核算生态系统提供的某一项(生态系统)服务价值有多种方法可以选择时(如核算森林吸收二氧化碳服务的价值可选择造林成本法或碳税法等),不同方法的评价结果差异较大,以此确定的生态补偿标准存在很大的不确定性。为了弥补这方面的不足,本研究以大型水电工程为研究对象,将生态足迹思想引入生态补偿标准评价领域,通过构建生态供给足迹与生态需求足迹模型,确立生态补偿标准评价模型,并进行了三峡工程案例验证;以生态足迹思想方法确立的生态补偿标准评价结果较稳定。但是,这只是一项初步的研究,生态足迹思想在大型水电工程建设及其他各领域生态补偿标准评价中的应用有待进一步深入研究;同时,本研究是基于传统生态足迹思想方法构建的模型,关于生态足迹的各种改进方法在构建(大型水电工程)生态补偿标准评价模型中的适用性有待进一步研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Tacconi L. Redefining payments for environmental services. *Ecological Economics*, 2012, 73(15): 29-36.
- [2] Newton P, Nichols E S, Endo W, Peres C A. Consequences of actor level livelihood heterogeneity for additionality in a tropical forest payment for environmental services programme with an undifferentiated reward structure. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 127-136.
- [3] Kosoy N, Martinez-Tuna M, Muradian R, Martinez-Alier J. Payments for environmental services in watersheds: Insights from a comparative study of three cases in Central America. *Ecological Economics*, 2007, 61(2/3): 446-455.
- [4] Ulber L, Klimek S, Steinmann H H, Isselstein J, Groth M. Implementing and evaluating the effectiveness of a payment scheme for environmental services from agricultural land. *Environmental Conservation*, 2011, 38(4): 464-472.
- [5] Hayes T M. Payment for ecosystem services, sustained behavioural change, and adaptive management: Peasant perspectives in the Colombian Andes. *Environmental Conservation*, 2012, 39(2): 144-153.
- [6] García-Amado L R, Pérez M R, García S B. Motivation for conservation: Assessing integrated conservation and development projects and payments for environmental services in La Sepultura Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. *Ecological Economics*, 2013, 89: 92-100.
- [7] Sommerville M M, Milner-Gulland E J, Jones J P G. The challenge of monitoring biodiversity in payment for environmental service interventions. *Biological Conservation*, 2011, 144(12): 2832-2841.
- [8] Hegde R, Bull G Q. Performance of an agro-forestry based payments-for-environmental-services project in Mozambique: A household level analysis. *Ecological Economics*, 2011, 71(15): 122-130.
- [9] Blackman A, Woodward R T. User financing in a national payments for environmental services program: Costa Rican hydropower. *Ecological Economics*, 2010, 69(8): 1626-1638.
- [10] 徐大伟,常亮,侯铁珊,赵云峰. 基于 WTP 和 WTA 的流域生态补偿标准测算——以辽河为例. *资源科学*, 2012, 34(7): 1354-1361.
- [11] 巩芳,王芳,长青,刘鑫. 内蒙古草原生态补偿意愿的实证研究. *经济地理*, 2011, 31(1): 144-148.
- [12] 李伟,王玉芳,刘晓光. 森林生态系统生态补偿标准研究——以伊春林管局为例. *林业经济问题*, 2012, 32(5): 427-432.
- [13] 付意成,高婷,闫丽娟,张爱静,阮本清. 基于能值分析的永定河流域农业生态补偿标准. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 209-217.
- [14] 张继伟,杨志峰,汤军健,陈楚汉. 基于环境风险的海洋生态补偿标准研究. *海洋环境科学*, 2010, 29(5): 751-757.
- [15] 张伟,张宏业,张义丰. 基于“地理要素禀赋当量”的社会生态补偿标准测算. *地理学报*, 2010, 65(10): 1253-1265.
- [16] 吴文洁,常志风. 油气资源开发生态补偿标准模型研究. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5): 26-30.
- [17] 全国水力资源复查领导小组. 中华人民共和国水力资源复查成果. 北京:中国电力出版社,2005.
- [18] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [19] 中国大坝协会. 2008 年中国与世界大坝建设情况. <http://www.chincold.org.cn/chincold/index.htm>.

- [20] Mitsch W, Lu J J, Yuan X Z, He W S, Zhang L. Optimizing ecosystem services in China. *Science*, 2008, 322(5901): 528.
- [21] Shen G Z, Xie Z Q. Three Gorges Project: Chance and challenge. *Science*, 2004, 304(5671): 681.
- [22] Stone R. Three Gorges Dam: Into the unknown. *Science*, 2008, 321(5889): 628-632.
- [23] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005.
- [24] 肖建红, 陈绍金, 于庆东, 陈东景, 刘华平. 基于生态足迹思想的皂市水利枢纽工程生态补偿标准研究. *生态学报*, 2011, 31(22): 6696-6707.
- [25] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem 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(6630): 253-260.
- [26] 水利部长江委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程)(1—11), 1992.
- [27] 水利部长江委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计修改补充报告(枢纽工程), 1993.
- [28] 中国科学院环境评价部, 长江水资源保护科学研究所. 长江三峡水利枢纽环境影响报告书(简写本). 北京: 科学出版社, 1996.
- [29] 肖建红. 水坝对河流生态系统服务功能影响及其评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [30] 长江水利委员会. 三峡工程移民研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [31] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [32] 国家环境保护总局. 三峡库区及其上游水污染防治规划(2001—2010). <http://hzs.ndrc.gov.cn/zdzt/>.
- [33] Wackernagel M, Onisto L, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. Ecological footprint of nations: How much nature do they use? How much nature do they have?. Commissioned by the Earth Council for the Rio+5 Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, Toronto, 1997.
- [34] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [35] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹. 北京: 经济科学出版社, 2003.
- [36] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 69-78.
- [37] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南(第二卷: 能源), 2006.
- [38] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, Key R M, Lee K, Bullister J L, Wanninkhof R, Wong C S, Wallace D W R, Tilbrook B, Millero F J, Peng T H, Kozyr A, Ono T, Rios A F. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [39] 崔素萍, 刘伟. 水泥生产过程CO<sub>2</sub>减排潜力分析. *中国水泥*, 2008, (4): 57-59.
- [40] 张春霞, 胡长庆, 严定鏊, 齐渊洪, 陈丽云, 张旭孝. 温室气体和钢铁工业减排措施. *中国冶金*, 2007, 17(1): 7-12.
- [41] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理工程项目建设标准. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [42] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2003-2012.
- [43] 张淙蛟, 张世宝, 冯田华. 桃林口水库工程经济后评价防洪效益计算. *中国农村水利水电*, 2002, (8): 6-7.
- [44] 李金昌, 姜文来, 靳乐山, 任勇. 生态价值论. 重庆: 重庆大学出版社, 1999.
- [45] 肖建红, 施国庆, 毛春梅, 邢贞相. 三峡工程对河流生态系统服务功能影响预评价. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 424-431.