

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.030

水生生态系统生产总值核算体系及应用

陈默^{1,2}, 林育青^{2,3}, 张建云^{2,3}, 陈求稳^{2,3}, 李沁园^{2,4}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029;
3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:在系统梳理生态系统服务功能及生态系统生产总值核算方法的基础上, 聚焦水生生态系统, 选取2004—2021年相关文献进行统计分析, 筛选出水生生态系统生产总值核算的3大类14项指标, 建立了水生生态系统生产总值核算体系, 给出了各指标的核算方法及计算公式。以向家坝水电站为例, 基于水生生态系统生产总值核算体系, 评估了向家坝水电站建设对水生生态系统生产总值的影响。结果表明, 2011—2015年向家坝水电站水生生态系统生产总值变化量为261.1893亿元, 其中物质产品价值变化量为111.4940亿元, 调节服务价值变化量为84.8151亿元, 文化服务价值变化量为64.8802亿元。

关键词:水生生态系统; 服务功能; 生产总值; 核算体系; 水利水电工程; 向家坝水电站

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0234-09

Accounting system of gross water ecosystem product and its application // CHEN Mo^{1,2}, LIN Yuqing^{2,3}, ZHANG Jianyun^{2,3}, CHEN Qiwen^{2,3}, LI Qinyuan^{2,4} (1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of systematically sorting out ecosystem service functions and accounting methods of the gross ecosystem product, focusing on the water ecosystem, relevant literature from 2004 to 2021 were selected for statistical analysis. Through screening out 14 indicators of the gross water ecosystem product in three categories, a gross water ecosystem product accounting system was established, and accounting methods and calculation formulas of different indicators were provided. Taking Xiangjiaba Hydropower Station as an example, the impact of the construction of Xiangjiaba Hydropower Station on the gross water ecosystem product was evaluated using the gross water ecosystem product accounting system. The assessment results show that the change in the gross water ecosystem product from 2011 to 2015 was 26.118 93 billion yuan, including the change in material good value of 11.149 40 billion yuan, the change in regulation service value of 8.481 51 billion yuan, and the change in cultural service value of 6.488 02 billion yuan.

Key words: water ecosystem; service function; gross product; accounting system; water conservancy and hydropower engineering; Xiangjiaba Hydropower Station

生态系统提供了人类生存和发展所需要的物质产品和服务功能, 对其服务功能价值的研究愈来愈受到人们的关注。1970年以来, 生态系统服务相关研究取得了显著成效。Daily^[1]研究阐明, 生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成与维持的人类赖以生存的自然环境条件及其效应, 并运用多

种价值评估方法核算不同地区的生态系统服务功能价值。Costanza等^[2]对16个生物群落中的17个生态系统服务经济价值进行评估, 包括气候调节、水供给、营养物质循环、休闲娱乐、文化等服务功能, 研究表明生态系统服务功能对人类的生存和发展具有重要的意义。因此对生态系统服务功能价值的研究也

基金项目: 国家自然科学基金(92047303, 51879165)

作者简介: 陈默(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域生态学研究。E-mail: chenmo415650@163.com

通信作者: 林育青(1982—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: yqlin@nhri.cn

得到了更多关注。

我国学者也对生态系统服务功能价值进行深入探索和实践应用。欧阳志云等^[3]提出生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP)的概念,并将GEP定义为生态系统为人类生存和发展供给物质产品和服务价值总和。GEP概念提出以来,学者们分别在全国、省级、市级、县级行政区域开展了不同尺度多项GEP核算相关研究^[4-7]。2021年3月联合国统计委员会正式将GEP纳入最新的环境经济国际核算系统,并将GEP列为生态系统服务和生态资产价值核算指标以及联合国可持续发展2050目标的衡量指标。

水生态系统为人类提供了航运、水力发电、水质净化、洪水调蓄、休闲娱乐等服务,对人类的生产及生活具有重要意义。目前,许多学者已对水生态系统开展相关研究^[8],并对其价值进行评估,但研究采用的核算方法及选取的核算指标缺少统一的标准^[9-11]。我国社会经济发展迅速,以往粗放式经济发展方式突显出水环境污染、水生态系统退化等问题^[12]。为解决以上问题,需明确水生态系统生产总值核算体系的服务功能指标及核算方法,从而开展科学评价,使之具有科学应用价值。

本文基于生态系统生产总值核算体系和水生态系统服务功能,完善了水生态系统生产总值核算体系,并进行了实例分析,以期评价水利水电工程对水生态系统服务功能的影响提供有效方法,为水利水电工程建设、水电能源可持续开发利用提供参考。

1 水生态系统生产总值核算体系

1.1 指标筛选

研究水生态系统服务功能价值对生态系统自身及人类具有重要意义。水生态系统服务功能价值研究始于国外,但早期研究重点是水生态系统服务功能价值中的休闲娱乐指标^[13-14]。20世纪末我国开始研究水生态系统服务功能价值,并相继对河流、湖泊、水库、湿地等不同类型的水生态系统服务功能价值进行探讨。大部分研究采用不同的评价方法对不同类型的水生态系统服务功能价值进行评估,得出各服务功能价值评价指标的具体数值,但由于不同类型的水生态系统服务功能不同,相应的指标体系构建和评价方法选取也存在差异,因此最终的评价结果也不同。

本文将水生态系统服务类别确定为物质产品、调节服务和文化服务3类,基于此,研究水生态系统生产总值核算方法及步骤。通过统计分析2004—2021年中国知网和Web of Science数据库中与水生态

系统服务功能价值研究相关的文献,得出共计28项核算指标^[15-47],如图1所示(图中指标图案大小反映提及该指标的文献比例)。从全部指标中筛选出14项相对较为通用的评价指标,并按照物质产品、调节服务和文化服务分成3类,其中,物质产品包含航运、供水、水产品和水力发电4项评价指标,调节服务包含空气净化、气候调节等7项评价指标,文化服务包含休闲娱乐、景观价值和科研教育3项评价指标。

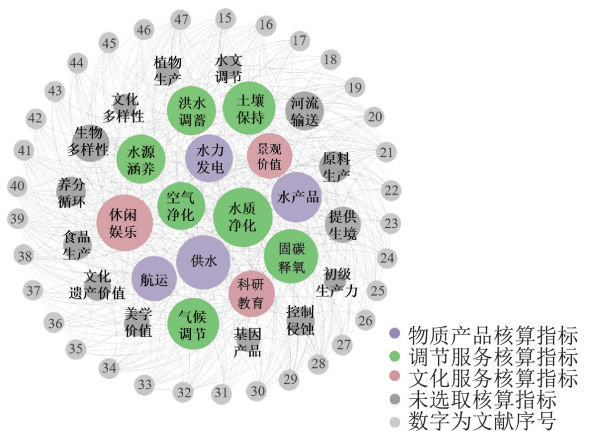


图1 文献指标统计分析网络关系

Fig. 1 Network relationship diagram for statistical analysis of literature indicators

根据水生态系统特征,将水生态系统分为河流、湖泊、水库、湿地-沼泽4个类型^[15],利用筛选出的14项评价指标,结合各类型水生态系统特征,分别构建服务价值功能评价指标体系,分析选取的各类水生态系统服务功能指标。其中,航运服务功能在河流、湖泊和水库水生态系统中均有体现,尤其在河流水生态系统中提供的物质产品价值最高,但湿地-沼泽由于其水体大多是孔隙介质中侧向渗透的表层流,无法实现水路运输,因此不具备航运功能;水力发电功能仅在水库水生态系统中有所体现,虽然天然河流蕴藏丰富的水能资源,但其资源需人为参与进行转化才能用以水力发电,因此河流水生态系统不具备该项功能;土壤保持是为了保持土壤的天然功能,防止人为或自然因素造成土壤侵蚀,河流在流动过程中会侵蚀河床及两岸并携带部分泥沙,湿地-沼泽本身是介于陆域和水域的中间过渡地带,因此不考虑河流和湿地-沼泽水生态系统的土壤保持功能;供水、水质净化、休闲娱乐等其余11项服务功能在河流、湖泊、水库和湿地-沼泽水生态系统中均有所体现。

1.2 核算方法

水生态系统生产总值核算主要包含物质量核算、价格确定、价值量核算3个部分。其中物质产

品、文化服务两大类指标物质量核算均采用统计调查法;调节服务指标物质量核算采用水量平衡法、污染物净化模型等方法。物质产品各指标价值量核算采用市场价值法;调节服务指标中土壤保持、水质净化、空气净化、固碳释氧和气候调节价值量采用替代成本法核算,水源涵养和洪水调蓄采用影子工程法核算;文化服务价值量核算方法分别采用旅行费用法、享乐价值法和科研投入法。具体价值量核算公式见表1。

1.3 核算步骤

参考水生态系统服务功能价值评估和生态系统生产总值核算体系,提出水生态系统生产总值核算步骤:①根据研究区域特征和核算目的划分类型,如河流、湖泊、水库等,划分水生态系统评估区域;②根据研究区域服务功能,选取核算指标,确定水生态系统生产总值核算类别,包含物质产品、调节服务和文化服务三大类;③收集水生态系统生产总值核算相关数据资料,并进行整理归纳;④通过经济核算体系、生态系统长期监测体系、模型估算等方式核算指标物质量;⑤采用现有的定价方法,确定各核算指标价格;⑥选取合适的核算方法,如市场价值法、替代

成本法等,运用相应公式核算各指标价值量;⑦计算各核算指标价值量总和得到水生态系统生产总值。即水生态系统生产总值为物质产品价值、调节服务价值、文化服务价值的总和:

$$V = V_M + V_R + V_C \quad (1)$$

其中

$$V_M = V_S + V_{WS} + V_{AP} + V_H$$

$$V_R = V_{SC} + V_{WC} + V_{WP} + V_A + V_{CR} + V_{CO} + V_{FS}$$

$$V_C = V_{LE} + V_{LV} + V_{RE}$$

式中: V 为水生态系统生产总值; V_M 为物质产品价值; V_R 为调节服务价值; V_C 为文化服务价值。

1.4 水利水电工程对水生态系统服务功能影响评价

水利水电工程建设对我国社会发展起到了重要的作用,关于水利水电工程建设对水生态系统服务功能的影响,我国学者进行了大量探索研究。以三峡工程为例,陆佑楣^[48]认为三峡工程是一项有利于全球环境保护的生态工程,也为三峡库区和湖北提供了发展机遇;潘立武等^[49]认为三峡工程蓄水后,使得长江水文状况等发生了改变,进而产生不利影响。从辩证的角度来看,兴建水利水电工程可以满足人民生活方面需求,预防洪水灾害等发生,但由于

表1 各核算指标核算方法及价值量核算公式

Table 1 Calculation methods and value quantity calculation formulas for different indicators

服务功能	核算指标	物质量核算方法	价值量核算方法	价值量核算公式
物质产品	航运	统计调查法	市场价值法	$V_S = T_f P_f + T_p P_p$
	供水		市场价值法	$V_{WS} = \sum_i Q_{WSi} P_{WSi}$
	水产品		市场价值法	$V_{AP} = \sum_i W_{APi} P_{APi}$
	水力发电		市场价值法	$V_H = E_H P_H$
调节服务	土壤保持	修正通用土壤流失方程	替代成本法	$V_{SC} = S_{SC} P_{SC} / (\rho h)$
	水源涵养	水量平衡法	影子工程法	$V_{WC} = H_{WC} P_{RC}$
	水质净化	污染物净化模型	替代成本法	$V_{WP} = \sum_i C_{WPI} P_{WPI}$
	空气净化	污染物净化模型	替代成本法	$V_A = \sum_i I_{Ai} P_{Ai}$
	气候调节	蒸散模型	替代成本法	$V_{CR} = K_{CR} P_{CR}$
	固碳释氧	固碳释氧模型	替代成本法	$V_{CO} = F_C P_C + X_O P_O$
	洪水调蓄	水量储存模型	影子工程法	$V_{FS} = D_{FS} P_{RC}$
文化服务	休闲娱乐	统计调查法	旅行费用法	$V_{LE} = R_{LE} P_{LE}$
	景观价值		享乐价值法	$V_{LV} = A_{LV} P_{LV}$
	科研教育		科研投入法	$V_{RE} = \sum_i O_{REi} P_{REi}$

注:表中 V_S 为航运价值,元; T_f 为货物周转量, $t \cdot km$; P_f 为货运价格,元/($t \cdot km$); T_p 为旅客周转量,人 $\cdot km$; P_p 为客运价格,元/($t \cdot km$); V_{WS} 为供水价值,元; Q_{WSi} 为 i 种用途的供水量, t ; P_{WSi} 为 i 种用途供水的市场价格,元/ t ; V_{AP} 为水产品价值,元; W_{APi} 为 i 类水产品产量, kg ; P_{APi} 为 i 类水产品市场价格,元/ kg ; V_H 为水力发电价值,元; E_H 为水力发电总量, $kW \cdot h$; P_H 为平均上网电价,元/($kW \cdot h$); V_{SC} 为土壤保持价值,元; S_{SC} 为泥沙淤积总量, t ; P_{SC} 为单位土壤年均效益,元/ m^2 ; ρ 为土壤密度, t/m^3 ; h 为土壤表土层土的平均厚度, m ; V_{WC} 为水源涵养价值,元; H_{WC} 为水源涵养量, m^3 ; P_{RC} 为单位库容建设费用,元/ m^3 ; V_{WP} 为水质净化价值,元; C_{WPI} 为 i 类水污染物净化量, m^3 ; P_{WPI} 为 i 类水污染物单位净化成本,元/ m^3 ; V_A 为空气净化价值,元; I_{Ai} 为 i 类大气污染物净化量, t ; P_{Ai} 为 i 类大气污染物单位净化成本,元/ t ; V_{CR} 为气候调节价值,元; K_{CR} 为调节温度或湿度消耗的总能量, $kW \cdot h$; P_{CR} 为单位电价,元/($kW \cdot h$); V_{CO} 为固碳释氧价值,元; F_C 为固碳量, t ; P_C 为国际碳税价格,元/ t ; X_O 为氧气释放量, t ; P_O 为工业制氧量价格,元/ t ; V_{FS} 为洪水调蓄价值,元; D_{FS} 为洪水调蓄能力, m^3 ; V_{LE} 为休闲娱乐价值,元; R_{LE} 为水生态系统中的景区旅游收入占总旅游收入 P_{LE} 的百分比,%; V_{LV} 为景观价值,元; A_{LV} 为受益土地总面积, km^2 ; P_{LV} 为单位面积溢价,元/ km^2 ; V_{RE} 为科研教育价值,元; O_{REi} 为第 i 年科研论文产出量,篇; P_{REi} 为第 i 年单篇论文产出需投入金额,元/篇。

改变了河流的天然水文情势,不可避免使当地生态系统服务功能受到影响^[50]。传统的水利水电工程以社会效益和经济效益为主,随着我国对生态效益的日渐重视,如何定量评估水利水电工程建设对水生态系统服务功能的影响,促进两者协调发展,是亟待解决的难题。

水生态系统服务功能价值对人类经济社会发展有着重要的意义,但是在人类活动影响下实现其部分价值的同时,会对其他服务功能价值产生影响。本文借助水生态系统生产总值核算体系,系统地评价水利水电工程对整体水生态系统服务功能的影响。鲁春霞等^[51]建立了评价体系用于评估水利水电工程对河流生态系统服务功能的影响;莫创荣等^[52]计算了水电能源开发导致的河流生态系统服务功能价值的变化;肖建红等^[53]建立了水坝对河流生态系统服务功能影响的评价体系,并评估了2002年全国水坝对其服务功能的影响;魏国良等^[54]基于河流生态系统服务功能内涵特征,建立了一套可用于评价水电能源开发对河流生态系统服务功能影响的核算体系;Chen等^[55]对小浪底水库2000—2012年的生态效益和损失进行了综合分析,提出了水电项目生态损益评价的3步框架,并定量评估该项目引起的河流生态系统服务功能价值变化量;贾建辉等^[56]采用功能价值法评价武江干流水电能源开发对河流生态系统服务功能的影响。虽然针对水利水电工程对不同类型水生态系统服务功能的影响已开展了部分研究,但目前尚缺乏统一的评价体系。

GEP概念的提出为评价水利水电工程对水生态系统生产总值的影响提供了思路。水利水电工程建设对水生态系统生产总值的影响存在正、负两方面效应,为核算水利水电工程兴建前后水生态系统生产总值变化量,定量评估水利水电工程对水生态系统生产总值的影响,基于水生态系统生产总值核算体系,建立如下公式:

$$\Delta V = \Delta V_M + \Delta V_R + \Delta V_C \quad (2)$$

式中: ΔV 为水利水电工程兴建后水生态系统生产总值的变化量; ΔV_M 为物质产品价值变化量; ΔV_R 为调节服务价值变化量; ΔV_C 为文化服务价值变化量。

2 应用实例

向家坝水电站主要用以发电,兼具防洪、航运、灌溉、改善环境等功能,2012年该水电站首批机组投产,2015年完成建设。因此,本文核算2011年和2015年水生态系统生产总值变化量,定量评估该工程对水生态系统服务功能的影响。

2.1 物质产品价值变化量

a. 航运。向家坝建成后淹没84处碍航险滩,航道增加了300 km,设计年货运量达到112万 t,客运量达到40万人,提高货运周转量3.36亿 t·km、旅客周转量1.2亿人·km,货运、客运单位均价分别为0.06元/(t·km)和0.24元/(人·km)^[57],航运服务功能价值变化量 ΔV_S 为0.4896亿元。

b. 供水。向家坝灌区一期工程多年平均引水量为7.67亿 m³,按照现行调水工程供水市场价格1.6元/t计算,则供水服务功能价值变化量 ΔV_{WS} 为12.27亿元。

c. 水产品。2011年向家坝渔业资源为30.48 t,2015年向家坝渔业资源为93.21 t^[58],根据内陆水产大省的淡水产品平均价格7元/kg^[57],则水产品服务功能价值变化量 ΔV_{AP} 为0.0044亿元。

d. 水力发电。根据《长江年鉴(2016卷)》,向家坝2015年发电量为307亿 kW·h,参照云南省2015年平均上网电价0.3216元/(kW·h)计算,则水力发电服务功能价值变化量 ΔV_H 为98.73亿元。

物质产品价值变化量为航运、供水、水产品及水力发电4项价值变化量的总和,共计111.494亿元。

2.2 调节服务价值变化量

a. 土壤保持。向家坝水电站2011年、2015年泥沙淤积量分别为4150万 t和1537.5万 t^[59],参考《水富县国民经济和社会发展统计》,2011年和2015年单位土壤年均效益分别为1.36元/m²和1.73元/m²,土壤密度为1.230 t/m³,土壤表土平均厚度为0.5 m,则土壤保持服务功能价值变化量 ΔV_{SC} 为-0.4852亿元。

b. 水源涵养。2011年该研究区产流降水量为745.29 mm,地表径流量为0.79 mm,蒸发量为872.09 mm;2015年该研究区产流降水量为1174.51 mm,地表径流量为5.34 mm,蒸发量为1012.01 mm,研究区水库面积为95.6 km²,通过水量平衡方程计算出2011年和2015年水源涵养物质质量。单位水库库容建设费用为6.1107元/m³^[60],则水源涵养服务功能价值变化量 ΔV_{WC} 为1.66亿元。

c. 水质净化。向家坝莲花池生活污水处理厂运行以来年平均处理污水量为87.6万 m³,单位污水处理成本约为0.7元/m³,则水质净化服务功能价值变化量 ΔV_{WP} 为0.0061亿元。

d. 空气净化。向家坝水电站建成后每年可减少SO₂排放量42万 t、NO₂排放量20万 t、粉尘排放量6万 t,3种污染物单位处理成本分别为1.2元/kg,0.63元/kg和0.15元/kg,则空气净化服务功能价值变化量 ΔV_A 为6.39亿元。

e. 气候调节。研究区水体面积为 95.6 km², 2011 年和 2015 年平均蒸发量分别为 872.09 mm 和 1012.01 mm, 单位体积水蒸发耗电量按 2.43 GJ 计算^[3], 2011 年单位电价取 0.483 元/(kW·h), 2015 年单位电价取 0.45 元/(kW·h), 则气候调节服务功能价值变化量 ΔV_{CR} 为 22.06 亿元。

f. 固碳释氧。2011 年和 2015 年研究区净初级生产力分别为 899.22 g/m² 和 907.74 g/m², 向家坝水库面积为 95.6 km², 则 2011 年固碳量为 14.012 万 t, 释放氧气量为 10.312 万 t; 2015 年固碳量为 14.145 万 t, 释放氧气量为 10.414 万 t。根据国际碳税标准 770 元/t 及工业制氧量价格 376.5 元/t, 估算固碳释氧服务功能价值变化量 ΔV_{CO} 为 0.0072 亿元。

g. 洪水调蓄。向家坝防洪库容为 9.03 亿 m³, 单位水库库容工程造价为 6.1107 元/m³^[60], 则洪水调蓄服务功能变化量 ΔV_{FS} 为 55.18 亿元。

调节服务价值变化量为土壤保持、水源涵养、水质净化、空气净化、气候调节、固碳释氧和洪水调蓄 7 项价值变化量的总和, 共计 84.8151 亿元。

2.3 文化服务价值变化量

a. 休闲娱乐。由于向家坝坝址位于水富县内, 因此休闲娱乐指标以水富县年旅游收入估算。参考《水富县国民经济和社会发展统计》, 2011 年水富县接待游客 70.5 万人, 旅游综合收入 2.38 亿元; 2015 年接待旅客 260 万人, 旅游综合收入 12.7 亿元。根据国家旅游局的统计, 水生态系统景点旅游收入占总景点旅游收入的比例为 12.3%^[60], 则休闲娱乐服务功能价值变化量 ΔV_{LE} 为 1.27 亿元。

b. 景观价值。根据水富县 2011 年和 2015 年房产升值进行估算, 受益面积为水富县建城区面积 12.7 km², 2011 年至 2015 年水富县房产平均溢价约为 500 元/m², 则景观价值服务功能价值变化量 ΔV_{LV} 为 63.5 亿元。

c. 科研教育。在中国知网和 Web of Science 数据库全文搜索“向家坝”“Xiangjiaba”, 得出 2011 年共发表与向家坝水电站相关论文 1283 篇, 2015 年共发表与向家坝水电站相关论文 1059 篇。根据国家统计局 2011 年和 2015 年的年度数据, 2011 年科研经费 411.81 亿元, 全年共发表科技论文 150 万篇, 则 2011 年单篇科技论文产出为 27454 元/篇; 2015 年科研经费 716.12 亿元, 全年共发表科技论文 164 万篇, 则 2015 年单篇科技论文产出为 43665.9 元/篇。由此估算科研教育服务功能价值变化量 ΔV_{RE} 为 0.1102 亿元。

文化服务价值变化量为休闲娱乐、景观价值及科研教育价值变化量的总和, 共计 64.8802 亿元。

水生态系统生产总值变化量为物质产品、调节服务和文化服务价值变化量三者之和, 则水生态系统生产总值变化量为 261.1893 亿元。由表 2 可看出向家坝水电站服务功能主要以水力发电、景观价值、洪水调蓄、气候调节和供水为主, 与水电站自身具有的效益相符。

表 2 向家坝水电站水生态系统服务功能价值变化量占比
Table 2 Proportions of value variation of water ecosystem service functions of Xiangjiaba Hydropower Station

评价指标	占比/%	评价指标	占比/%
航运	0.19	空气净化	2.44
供水	4.69	气候调节	8.44
水产品	0.01	固碳释氧	0.01
水力发电	37.80	洪水调蓄	21.12
土壤保持	-0.18	休闲娱乐	0.49
水源涵养	0.63	景观价值	24.31
水质净化	0.01	科研教育	0.04

3 结 语

本文梳理了近年来国内外水生态系统服务价值核算指标与方法, 构建了水生态系统生产总值核算体系, 将其应用于水利水电工程建设对水生态系统服务功能影响的定量评估。总体而言, 目前我国水生态系统生产总值核算尚处于研究初期, 核算方法及体系存在诸多不足, 其应用领域还需要进一步探索。水生态系统生产总值核算应针对河流、湖泊、水库和湿地-沼泽等不同特征水生态系统类型选择适宜的指标, 并将水生态系统生产总值核算纳入水利水电工程兴建前后的论证工作中, 科学评估水利水电工程建设对水生态系统生产总值的影响, 以推动水电能源开发与生态保护的协调发展。核算水生态系统生产总值、评估生态产品蕴含的经济价值, 有助于生态产品价值的实现, 可为相关部门制定评价指标体系及政策提供科学参考, 协同促进经济社会高质量发展与生态文明建设。

参考文献:

[1] DAILY G C. Nature's service: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington, D. C.: Island Press, 1997:392.

[2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630):253-260.

[3] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21):6747-6761. (OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study [J]. Acta Ecologica

- Sinica,2013,33(21):6747-6761. (in Chinese))
- [4] 马国霞,於方,王金南,等. 中国 2015 年陆地生态系统生产总值核算研究[J]. 中国环境科学,2017,37(4):1474-1482. (MA Guoxia, YU Fan, WANG Jinnan, et al. Measuring gross ecosystem product (GEP) of 2015 for terrestrial ecosystems in China [J]. China Environmental Science,2017,37(4):1474-1482. (in Chinese))
- [5] 白杨,李晖,王晓媛,等. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究[J]. 自然资源学报,2017,32(7):1100-1112. (BAI Yang, LI Hui, WANG Xiaoyuan, et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: a case study in Yunnan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(7):1100-1112. (in Chinese))
- [6] 董天,张路,肖焱,等. 鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估[J]. 生态学报,2019,39(9):3062-3074. (DONG Tian, ZHANG Lu, XIAO Yi, et al. Assessment of ecological assets and gross ecosystem product value in Ordos City [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(9):3062-3074. (in Chinese))
- [7] 白玛卓嘎,肖焱,欧阳志云,等. 基于生态系统生产总值核算的习水县生态保护成效评估[J]. 生态学报,2020,40(2):499-509. (PEMA Dolkar, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al. Assessment of ecological conservation effect in Xishui County based on gross ecosystem product [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (2): 499-509. (in Chinese))
- [8] 赵衡,闫旭,王富强,等. 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 21-25. (in Chinese))
- [9] 宋晓薇,赵侣璇,谢祎敏,等. 湖泊生态系统服务功能价值估算及保护对策研究[J]. 环境科学与管理,2019,44(1):162-166. (SONG Xiaowei, ZHAO Lyuxuan, XIE Yimin, et al. Lake ecosystem service function value estimation and protection countermeasures [J]. Environmental Science and Management, 2019, 44 (1): 162-166. (in Chinese))
- [10] 相晨,严力蛟,韩轶才,等. 千岛湖生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报,2019,30(11):3875-3884. (XIANG Chen, YAN Lijiao, HAN Yicai, et al. Evaluation of ecosystem services of the Thousand-Island Lake, Zhejiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(11):3875-3884. (in Chinese))
- [11] 张代青,沈春颖,于国荣. 基于河道内流量的河流生态系统服务价值评价模型研究[J]. 水利经济,2019,37(5):16-20. (ZHANG Daiqing, SHEN Chunying, YU Guorong. Evaluation model for ecological service value of rivers based on instream flow [J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(5):16-20. (in Chinese))
- [12] 孙子日哈,尚福强,吴得卿,等. 基于水生态系统平衡的鄂城南湖水体生态净化方案[J]. 水资源保护,2021,37(5):169-176. (SUN Zirihua, SHANG Fuqiang, WU Deqing, et al. Water ecological purification scheme of Yuncheng Nanhu Lake based on water ecosystem balance [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):169-176. (in Chinese))
- [13] YOUNG D. Recreational demands for maintaining instream flows: a contingent valuation approach [J]. American Journal of Agricultural Economics,1981,63(4):666-676.
- [14] BOWKER J M, ENGLISH D, DONOVAN J A. Toward a value for guided rafting on southern rivers [J]. Journal of Agricultural & Applied Economics, 1996, 28 (2): 423-432.
- [15] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(10):2091-2099. (OUYANG Zhiyun, ZHAO Tongqian, WANG Xiaoke, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system [J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(10):2091-2099. (in Chinese))
- [16] 莫创荣. 水电开发对河流生态系统服务功能影响的价值评估初探[J]. 生态环境,2006(1):89-93. (MO Chuangrong. Evaluation of hydropower development on river ecosystem services [J]. Ecology and Environment, 2006(1):89-93. (in Chinese))
- [17] 肖建红,施国庆,毛春梅,等. 三峡工程对河流生态系统服务功能影响预评价[J]. 自然资源学报,2006(3):424-431. (XIAO Jianhong, SHI Guoqing, MAO Chunmei, et al. Pre-evaluation of valuation effects of TGP on river ecosystem services [J]. Journal of Natural Resources,2006(3):424-431. (in Chinese))
- [18] 王欢,韩霜,邓红兵,等. 香溪河河流生态系统服务功能评价[J]. 生态学报,2006,26(9):2971-2978. (WANG Huan, HAN Shuan, DENG Hongbing, et al. A preliminary assessment on the Xiangxi River ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (9): 2971-2978. (in Chinese))
- [19] 张亮,吴泽宁,郭兵托,等. 北运河水生态系统服务功能价值评估[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):121-123. (ZHANG Liang, WU Zening, GUO Bingtuo, et al. Ecosystem services and value assessment of Beiyunhe River [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30 (3): 121-123. (in Chinese))
- [20] 张振明,刘俊国,申碧峰,等. 永定河(北京段)河流生态系统服务价值评估[J]. 环境科学学报,2011,31(9):1851-1857. (ZHANG Zhenming, LIU Junguo, SHEN Bifeng, et al. Evaluation of ecosystem services of the Yongding River in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(9):1851-1857. (in Chinese))

- [21] 周林飞,席芝橙,谭艳芳. 基于生态环境需水的大凌河生态系统服务功能价值评估[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1659-1664. (ZHOU Linfei, XI Zhicheng, TAN Yanfang, et al. Evaluation on the service function of River Dalinghe ecosystem based on ecological water requirement [J]. Ecology and Environment, 2011, 20(11): 1659-1664. (in Chinese))
- [22] 郝弟,张淑荣,丁爱中,等. 河流生态系统服务功能研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 106-111. (HAO Di, ZHANG Shurong, DING Aizhong, et al. Research progress on service functions of river ecosystem [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2012, 10(1): 106-111. (in Chinese))
- [23] 巩杰,降同昌,谢余初,等. 民勤红崖山水库生态系统服务功能的经济价值[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 82-86. (GONG Jie, JIANG Tongchang, XIE Yuchu, et al. Economic value of ecosystem services of Hongyashan Reservoir in Minqin County, an arid area of China [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 82-86. (in Chinese))
- [24] 杜婷婷,罗维,李中和,等. 湖泊生态系统服务功能价值评估:以太湖为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(增刊2): 208-211. (DU Tingting, LUO Wei, LI Zhonghe, et al. Evaluation of lake ecosystem services: a case study of Taihu Lake [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(Sup 2): 208-211. (in Chinese))
- [25] 叶延琼,章家恩,陈丽丽,等. 广州市水生态系统服务价值[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1303-1310. (YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, CHEN Lili, et al. Value evaluation of aquatic ecosystem services in Guangzhou, South China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1303-1310. (in Chinese))
- [26] 杨远祥,申文金,杨占彪,等. 白龙江上游水电梯级开发对河流生态系统服务功能的影响[J]. 水利水电技术, 2014, 45(7): 21-25. (YANG Yuanxiang, SHEN Wenjin, YANG Zhanbiao, et al. Impact of hydropower cascade development on river ecosystem service functions of upper Bailongjiang River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(7): 21-25. (in Chinese))
- [27] 王玲慧,张代青,李凯娟. 河流生态系统服务价值评价综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(增刊1): 10-14. (WANG Linghui, ZHANG Daiqing, LI Kaijuan. A survey of river ecosystem services value evaluation [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(Sup 1): 10-14. (in Chinese))
- [28] 崔树彬,李杰,严黎. 珠江水系东江流域上下游生态补偿机制[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 27-31. (CUI Shubin, LI Jie, YAN Li. Upstream and downstream ecological compensation mechanism in Dongjiang River Basin in Pearl River water system [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 27-31. (in Chinese))
- [29] 朱晓博,高甲荣,李诗阳,等. 北京市永定河生态系统服务价值评价与研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 90-97. (ZHU Xiaobo, GAO Jiarong, LI Shiyang, et al. Evaluation and study of ecosystem service value in Yongding River of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 90-97. (in Chinese))
- [30] 赵良斗,张烈,黄尤优,等. 青竹江河流生态系统服务价值初探[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(增刊1): 123-125. (ZHAO Liangdou, ZHANG Lie, HUANG Youyou, et al. Valuation of ecosystem services in the Qingzhu River [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(Sup 1): 123-125. (in Chinese))
- [31] ODGAARD M V, TURNER K G, BØCHR P K, et al. A multi-criteria, ecosystem-service value method used to assess catchment suitability for potential wetland reconstruction in Denmark [J]. Ecological Indicators, 2017, 77: 151-165.
- [32] 吴后建,但新球,刘世好,等. 湖南省湿地生态系统服务价值初步[J]. 湿地科学, 2016, 14(6): 781-787. (WU Houjian, DAN Xinqiu, LIU Shihao, et al. Preliminary evaluation of wetland ecosystem services in Hunan Province [J]. Wetland Science, 2016, 14(6): 781-787. (in Chinese))
- [33] CHAIKUMBUNG M, DOUCOULIAGOS H, SCARBOROUGH H. The economic value of wetlands in developing countries: a meta-regression analysis [J]. Ecological Economics, 2016, 124: 164-174.
- [34] 江波, CHRISTINA P W, 欧阳志云. 湖泊生态服务受益者分析及生态生产函数构建[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2422-2430. (JIANG Bo, CHRISTINA P W, OUYANG Zhiyun. Beneficiary analysis and ecological production function to measure lake ecosystem services for decision-making in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2422-2430. (in Chinese))
- [35] 梁鸿,潘晓峰,余欣繁,等. 深圳市水生态系统服务功能价值评估[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1474-1487. (LIANG Hong, PAN Xiaofeng, YU Xinfan, et al. Valuation of water ecosystem services in Shenzhen City [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1474-1487. (in Chinese))
- [36] GRIZZETTI B, LANZANOVA D, LIQUETE C, et al. Assessing water ecosystem services for water resource management [J]. Environmental Science and Policy, 2016, 61: 194-203.
- [37] WONG C P, JIANG B, BOHN T J, et al. Lake and wetland ecosystem services measuring water storage and local climate regulation [J]. Water Resources Research, 2017, 53(4): 3197-3223.
- [38] 范小杉,何萍. 河流生态系统服务研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(8): 852-864. (FAN Xiaoshan, HE

- Ping. Research progress, existing problems and future direction on river ecosystem service [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(8): 852-864. (in Chinese)
- [39] 杨青,刘耕源. 湿地生态系统服务价值能值评估:以珠江三角洲城市群为例[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(11):4527-4538. (YANG Qing, LIU Gengyuan. Wetland ecosystem services assessment based on emergy: a case of Pearl River Delta urban agglomeration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11):4527-4538. (in Chinese))
- [40] 邓灵稚,杨振华,苏维词. 城市化背景下重庆市水生态系统服务价值评估及其影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 208-216. (DENG Lingzhi, YANG Zhenhua, SU Weici. Valuing the water ecosystem service and analyzing its impact factors in Chongqing City under the background of urbanization [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 208-216. (in Chinese))
- [41] 高伟,杜展鹏,严长安,等. 污染湖泊生态系统服务净价值评估:以滇池为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1748-1757. (GAO Wei, DU Zhanpeng, YAN Changan, et al. Evaluating net ecosystem services value of a polluted lake: a case study of Lake Dianchi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1748-1757. (in Chinese))
- [42] 周文昌,史玉虎,潘磊,等. 2017年武汉东湖湿地生态系统最终服务价值评估[J]. *湿地科学*, 2019, 17(3): 318-323. (ZHOU Wenchang, SHI Yuhu, PAN Lei, et al. Evaluation of final service value of Donghu Lake wetland ecosystem in Wuhan City in 2017 [J]. *Wetland Science*, 2019, 17(3):318-323. (in Chinese))
- [43] 咎欣,张玉玲,贾晓宇,等. 永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6):1326-1337. (ZAN Xin, ZHANG Yuling, JIA Xiaoyu, et al. Evaluation on the ecosystem services value of the upper reaches of Yongding River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6):1326-1337. (in Chinese))
- [44] 张敏,迪丽努尔·阿吉. 博斯腾湖西岸人工湿地生态系统服务价值评估研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(5): 169-174. (ZHANG Min, DILINUER Aji. Evaluation of ecosystem service value of constructed wetland on the west bank of the Bosten Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(5): 169-174. (in Chinese))
- [45] GOU Mengmeng, LI Lie, OUYANG Shuai, et al. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307:127208.
- [46] 王德旺,何萍,徐杰,等. 宽滩型河流生态系统服务价值核算:以辽河干流为例[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 447-458. (WANG Dewang, HE Ping, XU Jie, et al. Accounting of ecosystem services value of broad beach river: taking the main stream of Liaohe River as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3):447-458. (in Chinese))
- [47] 刘念,李天宏,席浩郡. 长江中游荆江河段生态系统价值核算研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(6): 1335-1346. (LIU Nian, LI Tianhong, XI Haojun. River ecosystem value changes on Jingjiang Reach of the Yangtze River [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(6): 1335-1346. (in Chinese))
- [48] 陆佑楣. 三峡工程十论—在实践中不断加深对三峡工程的认识[J]. *科技进步与对策*, 2004(2): 4-7. (LU Youmei. Ten topics on the Three Gorges Project: deepening the understanding of the Three Gorges Project in practice [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2004(2):4-7. (in Chinese))
- [49] 潘立武,周建中,江兴稳,等. 三峡工程对长江中下游生态环境的影响[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(4):97-99. (PAN Liwu, ZHOU Jianzhong, JIANG Xingwen, et al. Influence of Three Gorges Project on eco-environment in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(4):97-99. (in Chinese))
- [50] 陶洁,曹阳,左其亭. 环境DNA技术在河流生态系统中的应用研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(6): 150-156. (TAO Jie, CAO Yang, ZUO Qiting. Research progress on the application of environmental DNA technology on river ecosystem [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6):150-156. (in Chinese))
- [51] 鲁春霞,谢高地,成升魁,等. 水利工程对河流生态系统服务功能的影响评价方法初探[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5):803-807. (LU Chunxia, XIE Gaodi, CHENG Shenkui, et al. Approaches to evaluate the effects of hydraulic on river ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 803-807. (in Chinese))
- [52] 莫创荣,李霞,陈新庚,等. 水电开发对河流生态系统服务功能影响的价值评估方法与案例研究[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2005, 44(增刊2):250-253. (MO Chuangrong, LI Xia, CHEN Xingeng, et al. Evaluation of hydropower development on river ecosystem services [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(Sup 2):250-253. (in Chinese))
- [53] 肖建红,施国庆,毛春梅,等. 水坝对河流生态系统服务功能影响评价[J]. *生态学报*, 2007, 27(2):526-537. (XIAO Jianhong, SHI Guoqing, MAO Chunmei, et al. Evaluation of effects of dams on river ecosystem service functions in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):526-537. (in Chinese))
- [54] 魏国良,崔保山,董世魁,等. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响:以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2):235-242. (WEI Guoliang, CUI Baoshan, DONG Shikui, et al. Impact of hydropower development on river ecosystem service: a case study From

- the Manwan Hydropower Project [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 235-242. (in Chinese))
- [55] CHEN Liang, SUI Xin, WANG Dongsheng, et al. The ecological benefit-loss evaluation in a riverine wetland for hydropower projects: a case study of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 34-44.
- [56] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: a case study in the mainstream of the Wujiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176. (in Chinese))
- [57] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 443-452. (ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 443-452. (in Chinese))
- [58] 王俊, 苏巍, 杨少荣, 等. 金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落多样性特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 394-401. (WANG Jun, SU Wei, YANG Shaorong, et al. Variation characteristics of fish biodiversity in Suijiang section before and after impoundment of first phase of Jinsha River hydropower project [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 394-401. (in Chinese))
- [59] 尹晔, 王党伟, 冯胜航, 等. 向家坝水电站库区泥沙淤积特性 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(7): 71-75. (YIN Ye, WANG Dangwei, FENG Shenghang, et al. Sedimentation characteristics in reservoir area of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(7): 71-75. (in Chinese))
- [60] 中华人民共和国文化和旅游部. 2012 年入境游客抽样调查综合分析报告 [R]. 北京: 中华人民共和国文化和旅游部, 2013. (收稿日期: 2022-01-04 编辑: 施业)

(上接第 207 页)

- [29] 区铭亮, 周文斌, 胡春华. 三峡水库调度下鄱阳湖水环境容量变化特征 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(16): 9786-9788. (OU Mingliang, ZHOU Wenbin, HU Chunhua. Variation characteristics of water environmental capacity in Poyang Lake under the scheduling of three gorges reservoir [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(16): 9786-9788. (in Chinese))
- [30] 刘晓东, 杨婷, 石佳佳, 等. 关于现行水域纳污能力计算规程中河流计算模型的探讨 [J]. *环境保护科学*, 2018, 44(2): 32-36. (LIU Xiaodong, YANG Ting, SHI Jiajia, et al. Discussion of the code of practice for computation on permissible pollution bearing capacity of water bodies in the current calculation procedures [J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(2): 32-36. (in Chinese))
- [31] 叶群, 计勇, 吴培军, 等. 鄱阳湖水利枢纽对湖区水动力及滞留时间的影响 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(2): 13-17. (YE Qun, JI Yong, WU Peijun, et al. Impacts of Poyang Lake Hydraulic Project on hydrodynamics and residence time in lake area [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(2): 13-17. (in Chinese))
- [32] 胡刚, 王里奥, 袁辉, 等. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(5): 780-784. (HU Gang, WANG Liao, YUAN Hui, et al. Release of N, P from submerged soil in the bottom part of shore-area in three gorges reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(5): 780-784. (in Chinese))
- [33] WEI Guoliang, YANG Zhifeng, CUI Baoshan, et al. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(9): 1763-1780.
- [34] CHEN Xi, WANG Yanhua, CAI Zucong, et al. Response of the nitrogen load and its driving forces in estuarine water to dam construction in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(25): 31458-31467.
- [35] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1539-1551. (WANG Yu, LU Shiguo, FENG Qi, et al. Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1539-1551. (in Chinese))
- [36] FENG Lan, LI Qiaoqiao, ZHANG Lei, et al. Exploring the effect of floodgates operation systems on water environmental capacity in a regulated river network of Wuxi, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 299: 126743
- [37] ZHANG Zezhong, ZHANG Fan, XU Chenguang, et al. Study on the water environment capacity for the typical watershed in Taizihe River [C] // International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Piscataway: IEEE, 2011: 486-488.
- [38] 戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. (收稿日期: 2021-10-11 编辑: 熊水斌)