DOI:10.15928/j.1674-3075.202203140073

河湖水生态系统服务价值核算研究及应用展望

黄 羽[1,2],幸 悦[1],孙晓玉[3],肖 骢[1,2],彭开达[1],梁宝文[1],熊 文[1,2]

(1.湖北工业大学 土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;
2.湖北工业大学 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室,湖北 武汉 430068;
3.珠江水资源保护科学研究所,广东 广州 510000)

摘要:科学有效地界定河湖水生态系统服务价值评估体系与评估指标,可以促进河湖水生态的可持续发展、合理制定水资源价格、为河湖水生态系统服务价值评估提供参考,同时也为河湖水资源纳入国民经济核算体系提供借鉴,为绿色经济核算提供有力的依据。从河湖水生态系统服务功能、评估体系和评估方法等方面总结了国内外研究进展,分析了现有河湖水生态系统服务体系和评估方法的优缺点。对河湖水生态系统服务评估体系进行了优化,优化后的评估体系包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务4大类以及水资源供给、水质净化、科研教育和固碳能力等19项指标,优化了水资源供给、提供水产品、水质净化、防洪减灾、休闲娱乐、生物多样性保护等6个指标的评估方法。对河湖水生态系统服务价值核算在生态文明建设考核、生态产品价值实现机制、自然资源资产审计以及新时期河湖长制考核实施方面的应用进行了展望。下一步要制订GEP核算技术标准,建设市场化、多元化的生态产品交易体系,将水资源开发、利用及保护情况、水资源管理生态环境效益等指标纳入审计范围,建立以水生态系统为整体、以维护河湖生态系统健康为总目标、以定量评判和可操作性为抓手的新的河湖长制考核体系。

关键词:河湖水生态系统;服务价值;方法优化;评估体系
中图分类号:X826 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2023)01-0001-08

水生态系统是水生生物群落与其生存环境共同构成的生态系统(Caputo et al, 2016),不仅可以维持生态系统的结构与环境,而且还可提供人类赖以生存和发展的物质基础和自然条件。河湖水生态是淡水水生态系统的重要组成部分,同时具有水生态系统的自然服务功能价值和人工服务功能价值(谢高地等,2015)。随着经济快速发展、城市化进程加快,河湖水生态环境污染问题日趋严重,因此,河湖水生态系统服务价值评估对水生态系统环境和水生态文明建设的影响逐渐受到关注。

总体来看,目前国内外对河湖水生态系统服务价值评估的研究相对于其他水体还较少(Zhang et al, 2016; Paudyal et al,2018; Aznar-Sánchez et al,2019)。当前有关河湖水生态系统服务价值评估尚未形成系统性的评估方法,涉及河湖水生态系统服务价值的核算往往是概括性用水生态系统服务评估方法进行,评估结果不能准确、合理地反映其服务价值(Czúcz et al,2018)。近年来,在我国大力发展生态文明建设的大背景下,国内的研究通常围绕着将河湖水生态系统服务价值核算应用在考核河湖生态文明建设、生态产品价值实现机制实施、自然资源资产审计和新时期河湖长制等实践方面。因此有必要对河湖水生态系统服务价值评估体系与评估指标进行科学有效地界定,这不仅可以促进河湖水生态的可持续发展、合理制定水资源价格、为河湖水生态系统服务价值评估提供参考,同时也为河湖水资源纳入国民经济核算体系提供借鉴,为绿色经济核算提供有力的依据。

本文从河湖水生态系统服务功能入手,归纳当前我国河湖水生态系统服务体系存在的问题,建立科学、全面的河湖水生态系统服务价值评估指标体系,优化河湖型生态系统服务价值评估方法,并展望河湖水生态系统服务价值核算在生态文明建设等方面的应用。

1 评估体系及评估方法简介

1.1 评估体系

尽管近年来对河湖水生态系统服务价值核算研究有所增多,但对其核算体系尚未形成规范的标准(Hackbart et al, 2017; Shaad et al, 2022)。目前,在

收稿日期:2022-03-14
基金项目:广东省水利科技创新项目 (2020-02)。
作者简介:黄羽,1983年生,男,讲师,博士,主要从事河湖生态系统保护与修复研究。E-mail:huangyu@hbut.edu.cn
通信作者:熊文,1967年生,男,教授,主要从事长江经济带生态环境保护与修复方面研究。E-mail:wenx2217@163.com
肖骢,女,博士,讲师,主要从事河湖生态系统保护与修复研究。E-mail:919030163@qq.com

生态系统服务价值的基础上，对河湖水生态系统服务价值的计算主要是以服务功能为基础（Gao et al，2017; Gao et al，2021），即河湖水生态系统服务评估体系基于MA体系按照供给、调节、文化及支持服务这4大服务组成（Sigrid，2015; Liu et al，2016），各服务的相关评估指标一般按照河湖水生态系统的特征、形态结构及功能来确定。由于研究对象的特性不同，研究选取的指标也不全面，难以进行普适性评估（Xia et al，2021）。

国外学者根据河湖水生态系统自身特点开展了基于服务功能类型和价值的相关研究(Gretchen，1997; Schallenberg et al，2011; Hossu et al，2019; Sterner et al，2019；Ashrafi et al，2022; Pastor et al，2022)，地球淡水湖泊的生态系统服务功能主要包括水产品提供、能源生产、通航、供水、灌溉、水力发电、热力发电以及娱乐和旅游等服务功能，其中水产品提供、水力发电、热力发电、通航、供水等属于供给服务，娱乐和旅游属于文化服务。另外淡水湖泊中城市湖泊的生态系统服务功能包括氮和磷的保持、生物多样性、维持物种种群和栖息地、调节城市气候、防洪以及教育和娱乐服务。

与国外相关评估研究相比，目前我国相关研究主要以借鉴国外研究河湖水生态系统服务评估体系的成果为主，通过筛选河湖水生态系统服务中相应的生态属性或效益指标对服务价值量进行核算，进而用核算结果来评估其生态环境或生态文明建设效果（陈旻坤和徐昔保，2021; Zhao & wang，2021; Li et al，2022）。国内关于河湖水生态系统服务价值评估体系中的评估指标主要包含：(1)供给服务——水资源供给服务、渔业产品提供服务、客运服务、货运服务、供沙服务、水力发电服务；(2)调节服务——水质净化服务、空气净化服务、蒸发服务、调蓄洪水服务、水资源蓄积服务、河流输沙服务、营养物质循环服务、水土保持服务；(3)支持服务——固碳服务、释氧服务、生物多样性保护服务、提供栖息地服务、侵蚀控制服务；(4)文化服务——休闲娱乐服务、科研教育服务和美学价值。研究通常是将某个单独的水域或某几种服务功能进行价值评估，关于河湖水生态系统服务价值评估还没有形成独立的、完善的系统性评估体系，进而导致对多种服务功能价值重复计算的问题，有可能会对各服务功能之间的联系与依赖造成割裂。因此需要对河湖水生态系统服务价值评估体系中的评估指标进行科学合理的筛选，形成一套系统性的河湖水生态系统服务评估指标体系。

1.2 评估方法

目前关于河湖水生态系统服务功能价值的评估方法还没有统一，对于其中的某一种服务功能的评估方法可以有多种，并且同一种评估方法可以适用于多种服务功能（Huang et al，2015; Zhang et al，2016; Vardon et al，2019）。

国内外河湖水生态系统服务价值评估方法主要有价值量评估法、物质量评估法和能值分析法3类（Xu et al，2013; Grizzetti et al，2016；Zhao & wang，2021; Jähnig et al，2022）。归纳的国内外现有文献中涉及河湖水生态系统各单项服务指标价评估的各种方法见表1。

表1 河湖水生态系统服务价值评估体系

Tab.1 Evaluation system for river and lake water ecosystem service values

评估方法	评估指标	应用
市场价格法	水资源供给服务价值	河流、湖泊
	渔业水产品提供服务价值	河流、湖泊
	客运服务价值	河流、湖泊
	货运服务价值	河流、湖泊
	营养物质循环服务价值	河流、湖泊
	水力发电服务价值	河流
	河流输沙服务价值	河流
	供沙服务价值	河流
C-D生产函数	水资源供给服务价值	湖泊
替代成本法	水质净化服务价值	河流
	空气净化服务价值	河流
	蒸发服务价值	河流、湖泊
	调蓄洪水服务价值	河流、湖泊
	水资源蓄积服务价值	河流、湖泊
	释氧能力	河流、湖泊
防护费用法	水质净化服务价值	河流、湖泊
	调蓄洪水服务价值	河流
等价因子法	水土保持服务价值	湖泊
造林成本法	固碳能力	河流、湖泊
成果参照法	生物多样性保护服务价值	河流、湖泊
	科研教育服务价值	河流、湖泊
支付意愿法	提供栖息地服务价值	湖泊
	休闲娱乐服务价值	河流
	美学价值	河流、湖泊
机会成本法	侵蚀控制服务价值	河流、湖泊
比例折算法	休闲娱乐服务价值	河流、湖泊
旅行费用法	休闲娱乐服务价值	河流、湖泊

评估方法、研究目的以及参数选取的可获得性、价格变化、社会经济发展水平等条件的不同,会导致评估结果具有差异性。因此有必要建立健全科学合理具有普适性的评估方法,以便于科学评估河湖水生态系统服务价值。

2　评估体系与评估方法优化

2.1　评估体系优化

目前关于河湖水生态系统服务体系中的指标构成缺乏全面性及完整性(Jing et al, 2012)。其中,关于单项指标的筛选应充分考虑科学性、合理性和独立性等原则;关于核心指标的筛选应充分考虑典型性与代表性等原则(Hao et al, 2013);关于指标的计算应充分考虑数据的可获得性。针对现有的河湖水生态系统服务体系中的指标构建不全面充分合理等问题,本文结合4大类服务功能筛选构建含有水资源供给、水质净化等19项指标的河湖水生态系统服务评估体系(图1),该指标体系面向所有河湖水生态系统,具体应用时应根据所研究河湖的水生态系统的特征进行指标取舍。

供给服务中渔业水产品提供服务这一指标在河湖水生态系统中选取提供水产品评估指标。供沙服务指标中的建筑沙石具有代表性和典型性,是河流所特有的,因此在河湖水生态系统中选取建筑沙石作为评估指标。

调节服务中的空气净化服务在河湖水生态系统评估指标中根据独立性、非重复性原则选取增加负离子和吸收粉尘这2个指标。气候调节服务主要有2种方式,其一是蒸发作用调节大气的温湿度,其二是水生植物的光合作用吸收CO_2。光合作用这个计算过程与支持服务中的固碳计算重复,因此在河湖水生态系统的调节服务中选取蒸发这一评估指标来代表调节气候服务。本研究选取蓄积水分和防洪减灾这2个评估指标分别对河湖水生态系统水资源蓄积服务功能和调蓄洪水服务功能进行描述。河湖水生态系统中的物质运输不仅输送沙石,还可以向下游输送水体中的氮磷碳等营养物质。然而,营养物质循环与支持服务中的固碳能力价值的计算重复,根据非重复性原则在调节服务中物质运输评估指标选取为河流输沙。由于水位高低、土质特征和植被覆盖情况等均会影响水土保持服务价值的评估,根据指标选取的典型性和代表性原则,因此不考虑水土保持服务。

文化服务中的文化多元性、美学价值、地方感、文化遗产价值等评估指标的构建受主观因素的影响较大,有较大的不确定性,根据数据可获得性原则及非重复性,旅游娱乐与休闲功能指标重复,统一概括为休闲娱乐,因此计算河湖水生态系统文化服务价值评估指标选取科研教育与休闲娱乐这2个指标。

支持服务中的提供栖息地与生物多样性保护的内涵相同,可以统一概括为生物多样性保护,因此,为了避免重复计算,本研究中的河湖水生态系统服务价值评估指标选取为生物多样性保护。根据指标选取的普适性原则,将侵蚀控制服务选取成陆造地这一评估指标进行描述。

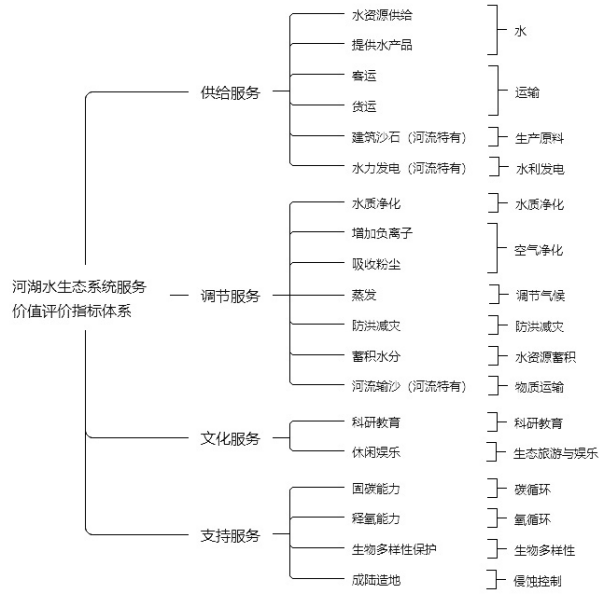

图1　优化后河湖水生态系统服务价值评估指标体系

Fig.1　Optimized evaluation index system of river and lake water ecosystem service values

2.2　评估方法优化

在对现有河湖水生态系统指标评估方法进行汇总统计后,发现部分指标的评估方法存在计算粗糙、内涵不全面、误差较大、数据获取难度大等系列问题。本研究对这些指标的评估方法部分进行优化。

2.2.1　水资源供给　水资源供给价值目前主要评估方法有市场价格法和C-D生产函数法(Martin-Ortega et al, 2013)。其中,市场价格法将水资源视为一般属性商品,C-D生产函数法仅计算水资源总量的经济收益。而合理的水资源供给价值,需充分反映不同水量、水质和水类型条件下的水资源价格。

2.2.2　提供水产品　目前有关水产品提供的价值都是通过当地水产品市场定价来获得的(Coates et al,2013)。

但实际水产品提供过程中会伴随着饲料、运输等中间消耗。因此在优化过程中应考虑中间消耗价值的影响，避免计算价格偏高。

2.2.3 防洪减灾 防洪减灾价值目前主要评估方法有替代成本法与防护费用法。前者通过对水利工程保护范围内农业总产值进行替代以及利用湖泊调蓄洪水的水价来体现水生态系统的防洪减灾价值；后者用特大暴雨年洪水造成的经济损失折算至计算年。2种方法计算较为粗糙，误差较大。为能更好体现河湖实际防洪效益，优化方法不仅应充分考虑防洪避免损失以及调蓄洪水水量价值，还应能体现出河流的行洪作用对防洪减灾的价值。

2.2.4 休闲娱乐 休闲娱乐价值主要采用比例折算法和支付意愿法2种方法评估（相晨等，2019）。前者仅考虑付费水域的旅游活动带来的收益，后者只计算了免费水域景观价值。在方法优化中应将收费及免费的水域景观所产生的休闲娱乐服务价值进行综合考虑。

2.2.5 生物多样性保护 目前生物多样性保护价值主要通过成果参照法与支付意愿法进行评估。但是，成果参照法未考虑物种数量和物种保护级别价值的差异性；支付意愿法虽然健全了成果参照法中的区域实用性，但是没有区别人类对动植物的支付意向。在方法优化中，通过增设生物保护等级的系数，来反映物种等级的差异性价值，并将人们对动植物的支付意愿进行分类计算，使结果更能科学准确地反映其服务价值。

2.2.6 水质净化 水质净化价值评估方法目前研究较多，主要有水环境容量替代法、未处理废污水处理成本替代法、污水处理费替代法、氮磷污染物去除成本替代法（熊文等，2020）。然而，以上方法存在数据难以获取、成本难以替代、计算数据偏差大等问题。方法优化以数据易获取为原则，选择以产生污水为对象，利用处理成本进行替代来评估水生态系统的水质净化价值。

河湖水生态系统优化后的指标评估方法见表2。

表2 河湖水生态系统指标评估方法

Tab.2 Summary of evaluation methods for river and lake water ecosystem indices

序号	服务指标	现有评估方法		计算方法优化	备注
1	水资源供给	市场价格法 C-D生产函数	用水量×市场价格 用水量×单位价格	$V_1=Q_1P_1+Q_2P_2+Q_3P_3$	V_1为水资源供给价值（元）；Q_1、Q_2、Q_3分别为工业用水量、农业用水量和生活用水量（t）；P_1、P_2、P_3分别为Q_1、Q_2、Q_3相对应的用水价格（元/t），P_1和P_2用C-D生产函数计算，P_3用模糊数学模型计算。
2	提供水产品	市场价格法	水产品产量×市场价格	$V_2=\sum T_iP_i-W_i$	V_2为提供水产品价值（元）；T_i为第i种水产品的产量（t）；P_i为第i种水产品的市价（元/t）；W_i为第i种水产品中间消耗（元）。
3	客运	市场价格法	旅客运输周转量×客运周转单价	$V_3=W_1P_1$	V_3为客运价值（元）；W_1为旅客周转量（人·km）；P_1为客运周转价格（元/<人·km>）。
4	货运	市场价格法	货物运输周转量×货运周转单价	$V_4=W_2P_2$	V_4为货运价值（元）；W_2为货运周转量（t·km）；P_2为货运周转价格（元/<t·km>）。
5	建筑沙石	市场价格法	供沙量×市场价格	$V_5=Q_wP_w$	V_5为沙石价值（元）；Q_w为供沙量（t）；P_w为沙石单价（元/t）。
6	水力发电	市场价格法	水力发电量×电价	$V_6=EP_b$	V_6为提供电能价值（元）；E为电站年发电量（kWh）；P_b为电价（元/kWh）。
7	水质净化	替代成本法	排污量×污水处理费 水体中N、P去除量×处理N、P污染成本 水体中N、P含量×处理N、P污染成本 水体可容纳污染负荷×单位污染物处理成本 处理的废污水量×单位废污水处理成本	$V_7=Q_fP_f$	V_7为水质净化价值（元）；Q_f为排污量（t）；P_f为污水处理费（元/m³）。
8	增加负离子	替代成本法	水体产生的负离子总数×市场上负离子的单价	$V_8=Q_LP_L$	V_8为增加负离子价值（元）；Q_L为增加负离子总个数（个）；P_L为市场负离子单价（元/10^{10}个）。
9	吸收粉尘	替代成本法	水体对空气中粉尘的吸收量×处理工业粉尘成本价格	$V_9=Q_gP_g$	V_9为吸收粉尘价值（元）；Q_g为吸收粉尘量（t）；P_g为工业粉尘处理成本（元/t）。

续表2

序号	服务指标		现有评估方法	计算方法优化	备注
10	蒸发	替代成本法	水体蒸发增加空气湿度和降低温度的总价 水体面积蒸发总量×农业灌溉用水单价	$V_{10}=X_1+X_2$ $X_1=Q_2P\beta$ $X_2=Q_2LP/3600\alpha$	V_{10}为蒸发价值（元）；X_1为增加空气湿度价值（元）；X_2为降低温度价值（元）；Q_2为水面蒸发的水量（m^3）；P为电价（元/kWh）；β为每1m^3液态水转化为水蒸汽需要消耗的电量；L为水在标况下的汽化热；α为空调能耗比。
11	防洪减灾	替代成本法	水库等水利工程对周边耕地防护范围×单位面积农业总产值＋防洪等效益 水库等水利工程对洪水的调蓄水量×单位库容蓄水单价	$V_{11}=F_1+F_2+F_3$ $F_1=Q_hP_C$ $F_2=A_pP_e+P_o$ $P_e=W_n/S_n$ $F_3=(Q_Ht-Q_c)P_C$	V_{11}为防洪减灾价值（元）；F_1为湖泊调蓄洪水价值（元）；F_2为水库调蓄洪水价值（元）；F_3为河道行洪能力价值（元）；Q_h为湖泊调蓄洪水量（m^3）；P_C为单位贮水价值（元/m^3）；A_p为保护的耕地面积（km^2）；P_o为以防汛费用代替的其他效益（元）；W_n为每年农业增加值（元）；S_n为耕地面积（km^2）；P_e为单位耕地的效益（元/km^2）；Q_H为河段设计洪水流量（m^3/s）；Q_c为研究河段多年的平均径流（m^3）；t为时间（年）。
		防护费用法	特大暴雨年造成洪涝灾害的经济损失折算到计算年		
12	蓄积水分	替代成本法	潜在的地表水体量×库容蓄水单价 （地表水和地下水总量）×相应水资源单价	$V_{12}=Q_CP_C$	V_{12}为蓄积水分价值（元）；Q_C为地表潜在水资源量（m^3）；P_C为单位贮水价值（元/m^3）。
13	河流输沙	市场价格法	输入河道的泥沙量×河道人工清淤成本	$V_{13}=UL$	V_{13}为河流输沙价值（元）；U为河流平均输沙量（t/a）；L为人工清理河道费用（元/t）。
14	科研教育	科研投入法	每年国家投入的科研管理费用 科研论文年投入金额	$V_{14}=AW_i$ $W_i=W_{i-1}(1+f_i)^n$	V_{14}为科研教育价值（元）；A为水域面积（km^2）；W_i为第i年单位水域面积所产生的科研及教育价值（元/ km^2）；f_i为社会折现率，取8%；n为时间差值（年）。
		成果参照法	河流湖泊生态系统获得的科研教育价值		
15	休闲娱乐	比例折算法	水生态系统在旅游资源中的占比×地区旅游总收入	$V_{15}=W_1+W_2$ $W_1=N_zV_z$ $W_2=\sum RN_mV_m$	V_{15}为休闲娱乐价值（元）；W_1为该地区付费水域景观所提供的休闲娱乐价值（元）；W_2为该地区免费水域景观所提供的休闲娱乐价值（元）；N_z为付费水域景观在该地区旅游总收入中所占的比例（%）；V_z为该地区旅游总收入（元）；R为常住人口（人）；N_m为该地区常住人口意愿为免费开放的水域景观进行支付的比例（%）；V_m为该地区常住人口平均每月愿意为免费开放的水域景观支付金额（元/月）。
		支付意愿法	免费水景观支付意愿		
16	固碳能力	碳税法	固定CO_2的量×固定CO_2的价格	$V_{16}=Q_CP_{CO_2}$ $Q_C=1.63B$	V_{16}为固碳能力价值（元）；Q_C为固定CO_2的量（t/a）；P_{CO_2}为固定CO_2的价格（元/t）；B为浮游植物净初级生产力（t/a）。
17	释氧能力	造林成本法	释放O_2的量×释放O_2的价格	$V_{17}=Q_OP_{CO_2}$ $Q_O=1.19B$	V_{17}为释氧能力价值（元）；Q_O为释放O_2的量（t/a）；P_{O_2}为释放O_2的价格（元/t）；B为浮游植物净初级生产力（t/a）。
18	生物多样性保护	成果参照法	水资源面积×需要被保护的水生态系统生物多样性价格	$V_{18}=\sum\gamma_iN_iP_iR$	V_{18}为需要被保护的生物多样性价格(元)；γ_i为需要被保护的水生动物（植物）对应的保护级别系数；N_i为第i级水生保护动物（植物）现存物种数量；R为常住人口（人）；P_i为该地区常住人口平均愿意为第i级水生保护动物（植物）的支付金额(元)。
		支付意愿法	生物种类的数量×人群对每级需要被保护物种的支付意愿		
19	成陆造地	机会成本法	成陆造地所获得的收益	$V_{19}=A_mP_d$ $A_m=M/(RH)$	V_{19}为成陆造地价值(元)；A_m为造陆面积（km^2）；P_d为单位土地面积收益（元/km^2）；M为造陆泥沙量（t）；R为土壤平均容重（t/m^3）；H为土壤表土平均厚度（m）。

3　应用展望

水资源具有流动性、循环性及时空变化特征，在水生态系统的各种因素与环境相互作用下，其服务价值将发生动态变化（Stosch et al，2017）。当前水生态系统的服务价值主要核算瞬时静态量，无法充分反映出其特性和时空异质性（Zhang et al，2016）。因此，需要进一步结合人工智能、生物信息技术、遥感技术等先进感知技术及大数据智能挖掘技术，掌握水生态系统各要素时空变化数据，提高水生态系统服务指标的可获得性和准确性，有利于全面完整涵盖水生态系统服务各要素价值，进而依法精准定量核算其服务价值及动态变化趋势，便于水生态系统管理考核。

3.1　科学全面考核生态文明建设成效

通过定量计算水生态系统的服务价值，可以为区域或流域经济发展和环境保护制订相应的政策提供全面、科学的参考（Lu et al，2021）。基于地区水生

态系统服务价值的GEP核算，是中国生态文明建设体系机制革新的具体实现，是推动政府绩效评估机制变革、促进经济绿色发展的重要指标，同时也是评估区域水生态产品和服务价值的一个重要指标（欧阳志云等，2020）。为了确保GEP核算科学性、延续性和可比性，下一步要制订相应GEP核算技术标准，明确核算指标和方法、建立GEP核算因子价格体系、制定相关成果应用指南。对GDP和GEP实施双轨驱动，并进行进一步的驱动，建立GDP与GEP双核算、双运行技术支撑、统计核算和考核评估机制，为生态文明建设管理和决策提供依据。

3.2 落实水生态产品价值实现机制

水生态产品价值实现路径是直接推进“绿水青山”到“金山银山”转化的平台，是检验“两山”建设水平的重要标准。对于调节服务类的产品，由于无法直接经过市场交易而变现其市场价值，因此必须由政府部门统筹管理，或者通过引导公司或私人资金投入并进行水生态补偿的方式来间接地变现产品价值，或者通过对供给类及文化类等能够直接成为市场产品的水生态产品实施生态标志认定、产品使用权买卖、生态旅游等方式来变现产品价值。建设市场化、多元化的生态产品交易体系对实现“两山”转化长效机制具有长远影响。

3.3 推进与完善自然资源资产审计

近年来，对领导干部进行自然资源资产离任审计逐步成为我国审计领域发展的一个新方向。虽然目前模式还不成熟，但是自然资源资产定量核算和动态变化是审计的核心。水资源价值核算和水资源资产离任审计分别是自然资源资产定量核算和自然资源资产离任审计中的主要内容。目前开展的审计主要针对水资源供给价值总量变化以及维护与恢复成本，存在水资源资产衡量困难、审计客体定位不准、评估指标单一、无针对性、无法形成科学完整的评估体系等问题。且审计过度关注政策法规实施、资金使用、工作合法合规等方面，并没有真正关注到水资源资产的社会效益和生态效益。随着自然资源资产离任审计工作的深入，与水资源开发、利用及保护情况、水资源管理生态环境效益等指标将逐步完善并纳入审计范围。这些与水资源开发等相关指标在水生态系统4大服务功能价值核算指标中均有体现。水生态系统服务价值核算对完善水资源资产审计指标体系和定量审计内容具有重要意义。

3.4 落实新时期河湖长制考核新要求

为落实新时期河湖长制度考核新要求，推动河湖长制度“有名”–“有实”–“有为”的阶段性转变，除了建立责任与督察机制、健全公众参与机制和河湖管护长效机制外，核心要建立健全河湖管理新考核体系，才能落实新的考核要求。新的考核体系应以水生态系统为整体，以维护河湖生态系统健康为总目标，以定量评判和可操作性为抓手建立。目前我国水生态系统服务价值在考核体系的基础上，对4种类型的服务价值变化进行统计，可以全面反映水资源、水环境和水生态变化情况，全面评估水资源开发利用与保护得失，同时还考虑“双碳”目标管控要求下河湖系统生态价值变化情况，为河湖长制实施提供了有效的定量考核手段。

参考文献

陈旻坤，徐昔保，2021. 近30年来鄱阳湖生态系统服务变化[J]. 湖泊科学，33(1): 309−318.

欧阳志云，林亦晴，宋昌素，2020. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例[J]. 环境与可持续发展，45(6): 80−85.

相晨，严力蛟，韩轶才，等，2019. 千岛湖生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报，30(11): 3875−3884.

谢高地，张彩霞，张昌顺，等，2015. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学，37(9): 1740−1746.

熊文，孙晓玉，彭开达，等，2020. 汉江下游平原典型区域水生态系统服务价值评价[J]. 人民长江，51(8): 71−77.

Ashrafi S，Kerachian R，Pourmoghim P，et al，2022. Evaluating and improving the sustainability of ecosystem services in river basins under climate change[J]. Science of The Total Environment，806: 150702.

Aznar−Sánchez J A，Velasco−Muñoz J F，Belmonte−Ureña L J，et al，2019. The worldwide research trends on water ecosystem services[J]. Ecological Indicators，99: 310−323.

Caputo J，Beier C，Luzadis V，et al，2016. Integrating beneficiaries into assessment of ecosystem services from managed forests at the Hubbard Brook Experimental Forest，USA[J]. Forest Ecosystems，3(4):243−257.

Coates D，Pert P L，Barron J，et al，2013. Water−related Ecosystem Services and Food Security[M]//In Managing Water and Agroecosystems for Food Security:29−41.

Czúcz B，Arany I，Potschin−Young M，et al，2018. Where concepts meet the real world: A systematic review of ecosystem service indicators and their classification using CICES[J]. Ecosystem Services，29: 145−157.

Gao J，Li F，Gao H，et al，2017. The impact of land−use change on water−related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin，Beijing，China[J]. Journal of Cleaner Production，163: S148−S155.

Gao X，Shen J，He W，et al，2021. Spatial-temporal analysis of ecosystem services value and research on ecological compensation in Taihu Lake Basin of Jiangsu Province in China from 2005 to 2018[J]. Journal of Cleaner Production，317: 128241.

Gretchen C D，1997. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. California:Island Press.

Grizzetti B，Lanzanova D，Liquete C，et al，2016. Assessing water ecosystem services for water resource management [J]. Environmental Science & Policy，61: 194-203.

Hao C，Yan D，Qin T，et al，2013. Water Ecosystem Services and Their Value-a Case Study in Luan River Basin，North China[C]. International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (REET 2013): 225-234.

Hackbart V C S，De Lima G T N P，Dos Santos R F，2017. Theory and practice of water ecosystem services valuation: Where are we going? [J]. Ecosystem Services，23: 218-227.

Hossu C A，Ioj I C，Onose D A，et al，2019. Ecosystem services appreciation of urban lakes in Romania. Synergies and trade-offs between multiple users[J]. Ecosystem Services，37: 100937.

Huang L Q，Wang C Y，Yang J，et al，2015. Study of Integrated Methods for Assessing Urban River Region Ecosystem Services[C]. Proceedings of the 5th International Yellow River Forum on Ensuring Water Right of the River´s Demand and Healthy River Basin Maintenance ，II: 220-229.

Jähnig S C，Carolli M，Dehnhardt A，et al，2022. Ecosystem Services of River Systems - Irreplaceable，Undervalued，and at Risk[M]//Encyclopedia of Inland Waters. Elsevier.

Jing Z，Li J，Ieee，2012. The Evaluation of River Ecosystem Services in Chongming Island，China[C]. World Automation Congress (WAC).

Li B，Yang G，Wan R，et al，2022. Impacts of hydrological alteration on ecosystem services changes of a large river-connected lake (Poyang Lake)，China[J]. Journal of Environmental Management，310: 114750.

Liu J，Li J，Gao Z，et al，2016. Ecosystem Services Insights into Water Resources Management in China: A Case of Xi´an City[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，13(12): 1169.

Lu Y，Liu M，Zeng S，et al，2021. Screening and mitigating major threats of regional development to water ecosystems using ecosystem services as endpoints[J]. Journal of Environmental Management，293: 112787.

Martin-Ortega J，Ojea E，Roux C，2013. Payments for Water Ecosystem Services in Latin America: A literature review and conceptual model[J]. Ecosystem Services，6: 122-132.

Pastor A V，Tzoraki O，Bruno D，et al，2022. Rethinking ecosystem service indicators for their application to intermittent rivers[J]. Ecological Indicators，137: 108693.

Paudyal K，Baral H，Keenan R，2018. Assessing social values of ecosystem services in the Phewa Lake Watershed，Nepal[J]. Forest Policy and Economics，90: 67-81.

Schallenberg M，Kelly D，Clapcott J，et al，2011. Approaches to assessing ecological integrity of New Zealand freshwaters[J]. Science for Conservation，307: 84

Shaad K，Souter N J，Vollmer D，et al，2022. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach[J]. Environmental Management，69(4): 752-767.

Stosch K C，Quilliam R S，Bunnefeld N，et al，2017. Managing Multiple Catchment Demands for Sustainable Water Use and Ecosystem Service Provision[J]. Water，9(9): 677.

Sigrid D，2015. Rating impacts in a multi-stressor world: a quantitative assessment of 50 stressors affecting the Great Lakes[J]. Ecological Applications，25(3): 717 - 728.

Sterner R W，Keeler B，Polasky S，et al，2019. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes[J]. Ecosystem Services，41: 11.

Vardon M，Keith H，Lindenmayer D，2019. Accounting and valuing the ecosystem services related to water supply in the Central Highlands of Victoria，Australia[J]. Ecosystem Services，39: 101004.

Xia H，Kong W，Zhou G，et al，2021. Impacts of landscape patterns on water-related ecosystem services under natural restoration in Liaohe River Reserve，China[J]. Science of the Total Environment，792: 148290.

Xu H，Pengda Z，Junmei W，et al，2013. Evaluation on ecosystem service value of West Lake in Hangzhou[J]. Advances in Water Science，24(3): 436.

Zhang Z，Fan X，Lan Y，et al，2016. Response of ecosystem services to socioeconomic development in the Yangtze River Basin，China[J]. Ecological Indicators，72: 481-493.

Zhao Q J，Wang Q Y，2021. Water Ecosystem Service Quality Evaluation and Value Assessment of Taihu Lake in China[J]. Water，13(5): 618.

（责任编辑　张俊友）

Research and Prospect of River and Lake Water Ecosystem Service Value Evaluation

HUANG Yu[1,2], XING Yue[1], SUN Xiao-yu[3], XIAO Cong[1,2], PENG Kai-da[1], LIANG Bao-wen[1], XIONG Wen[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P.R. China;
2. Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P.R. China;
3. Pearl River Water Resources Protection Science Research Institute, Guangzhou 510000, P.R. China)

Abstract: Effective definitions of ecosystem service values and water quality indices for rivers and lakes promote the sustainable development of aquatic ecosystems and allow rational pricing of water resources. It would also provide a reference for the value of river and lake water resources in the national economic accounting system and provide a basis for green economic accounting. In this paper, we summarized current research on river and lake ecosystem services, evaluation index systems and evaluation methods, and included the advantages and disadvantages of the current evaluation systems and methods. We then optimized the river and lake water ecosystem service valuation system, including 19 indices from four service categories: supply, regulation, culture and support. Methods for calculating the values of six indices were also optimized, including water resource supply, aquatic product supply, water quality purification, flood control and disaster reduction, recreation, and biodiversity protection. Next, we incorporated the accounting system for river and lake ecosystem service values into the assessment of ecological civilization construction, the implementation of ecological product value realization mechanism, and the audit of natural resource assets and the assessment of river and lake systems for the new era of green accounting. Future work should focus on formulating gross ecosystem product (GEP) technical accounting standards, building a marketized and diversified trading system for ecological products that includes the development, utilization and protection of water resources and the ecological benefits of water resource management. A new assessment system for rivers and lakes should be established for aquatic ecosystems as a whole, with the health of river and lake ecosystems as the overall goal, and quantitative evaluation and operability as the focus.

Key words: river and lake ecosystems; service value; method optimization; evaluation systems