

DOI: 10.5846/stxb201410192051

江波, Christina P. Wong, 欧阳志云.湖泊生态服务受益者分析及生态生产函数构建.生态学报, 2016, 36(8): - .

Jiang B, Christina P. W, Ouyang Z Y. Beneficiary analysis and ecological production function to measure lake ecosystem services for decision-making in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

湖泊生态服务受益者分析及生态生产函数构建

江 波¹, Christina P. Wong², 欧阳志云^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 亚利桑那州立大学 可持续发展学院, 美国亚利桑那州 85287

摘要:生态系统服务管理作为生态系统管理的优化方式,是生态学研究的前沿方向。湖泊生态系统服务管理是指综合利用生态学、经济学、社会学和管理学等学科知识,对影响湖泊生态系统结构、过程、功能的关键因子进行调控,提高湖泊生态系统服务供给水平和供给能力的过程。近年来国内外学者针对湖泊生态系统服务内涵、分类、经济价值评估等方面开展了大量研究,极大地促进了湖泊生态系统服务从认知走向管理实践。然而,现有研究在开展湖泊生态系统服务价值评估时多忽略生态系统服务受益者和生态系统特征对生态系统服务的边际影响分析,无法揭示生态系统服务空间流动和转移特征及生态系统服务时空权衡关系,制约了生态系统服务研究与管理决策和政策设计结合。本文在综述湖泊生态系统服务定量评估方法的基础上,认为通过生态系统服务受益者分析确定湖泊生态系统最终服务,并通过构建生态生产函数确定湖泊生态系统服务权衡关系及湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响,是生态系统服务走向管理实践和政策设计的科学依据,可以确保生态、社会、经济可持续发展。

关键词:湖泊生态系统;最终服务;受益者分析;生态生产函数

Beneficiary analysis and ecological production function to measure lake ecosystem services for decision-making in China

JIANG Bo¹, Christina P. WONG², OUYANG Zhiyun^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

Abstract: Lakes provide important resources to sustain human livelihoods and economic development. Lakes have significant ecological, cultural, and economic value in China as they supply drinking water, valuable fish species, regulate local climates, and provide scenic landscapes for leisure and tourism. However, they are one of the most extensively and rapidly altered ecosystems in China. Ecosystem services offer a holistic framework to link ecological and economic outcomes to manage the interconnectivity between ecosystems and human welfare. The ecosystem services concept seeks to clarify tradeoffs among ecosystem services and other social demands to improve lake ecosystem management. In recent decades, scientists have increasingly recognized the relevance of ecosystem services in policy analysis. In China, policy makers want to use ecosystem services in ecological compensation programs where consumers of ecosystem services pay suppliers for the benefits. However, technical challenges in separating intermediate ecosystem services from final ecosystem services to quantify tradeoffs are hindering the measurement and valuation of ecosystem services for lake management. Chinese scientists are confronted with the challenge of creating credible and legitimate ecosystem service values to inform policy makers on

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201204201)

收稿日期:2014-10-19; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

designing effective ecological compensation programs. A transdisciplinary approach is fundamental to measuring ecosystem services to understand how biological mechanisms of lake ecosystems support final ecosystem service flows. In the present study, we identify methods to measure lake ecosystem services and the gaps in current methods, and propose using ecosystem service flow mechanisms and beneficiary analysis to identify final ecosystem services, and ecological production functions to characterize the relationships between management choices, ecological characteristics, and economically valuable final ecosystem services. Ecological production function can help advance ecosystem services quantification to clarify tradeoffs for incorporating ecosystem services into lake management in China.

Key Words: Lake ecosystems; final services; beneficiary analyses; ecological production function

湖泊是维持人类生存和可持续发展的重要生态系统。我国有 2759 个面积大于 1km² 的湖泊(其中 1/3 是淡水湖泊)^[1-2], 为我国提供了多项生态系统服务。然而, 湖泊水体循环速率慢, 极易受到地方性或区域性污染物排放的影响^[1], 对于干扰会做出非线性响应并具有一定时滞效应。在外界干扰超过一定的阈值时, 湖泊能很快从一种状态(如: 贫营养化) 越变为另一种状态(如: 富营养化), 湖泊管理极为困难^[3]。近几十年, 我国经济的快速发展加剧了湖泊水体水质污染和水资源过度开发, 湖泊富营养化现象越来越严重。湖泊富营养化导致蓝藻大量繁殖, 严重削弱了湖泊水资源供应能力, 由此导致的直接经济损失高达几十亿元^[2], 对我国社会经济可持续发展造成了严重威胁。最近对我国 67 个大型湖泊的调查显示, 80% 的湖泊水质为 IV-劣 V 类^[4]。此外, 我国湖泊面积缩减现象也极为普遍, 仅过去半个世纪就有 243 个湖泊消失^[5]。湖泊水面面积下降和水环境问题已成为我国局部尺度、区域尺度和国家尺度的重要环境、经济和社会问题。

湖泊生态系统服务管理是综合运用生态学、经济学、社会学和管理学等学科知识, 通过湖泊生态补偿和生态系统保护规划, 对影响湖泊生态系统结构、过程、功能的关键因子进行调控, 提高湖泊生态系统服务供给水平和供给能力的过程^[6-11]。随着湖泊生态系统理论研究的不断深入和湖泊生态系统服务认知的不断提升, 湖泊生态系统研究已从生态系统健康评价^[2,5,12-14] 向生态系统服务优化管理方向发展。过去 20 年, 国内外学术机构在生态系统服务内涵、评估框架、模型应用等方面作了大量的探索和尝试, 为我国湖泊生态系统服务研究快速发展奠定了基础。然而, 国内研究仍集中于生态系统服务总经济价值评估^[15-16], 鲜有研究探讨生态系统服务的生态学形成机理^[17] 和受益者空间分布特征^[18-24]、生态系统服务空间流动和转移特征^[24-27]、生态系统和人类福祉关系^[7,28-30]、生态系统服务权衡关系^[31-39]。我国主要采用以下 3 种方法评估湖泊生态系统服务: (1) 列举湖泊生态系统提供的所有服务^[40] (包括中间服务和最终服务), 选取相应的生态属性指标^[18,21] 或效益指标, 评估生态系统服务物质量和价值量; (2) 以土地利用和土地覆盖为替代数据, 直接采用效益转化法^[41-42] 评估生态系统服务物质量和价值量^[43]; (3) 基于生态系统服务评估模型, 模拟不同土地利用和土地覆盖情景下生态系统服务物质量和价值量权衡关系^[44]。这 3 种方法从提高利益相关者生态系统服务认知走向管理决策和政策设计面临着多方面挑战, 包括: (1) 湖泊生态系统服务价值重复计算^[19, 21-22, 45], 评估结果可信度不高; (2) 评价指标和评估方法多样化, 评估结果不具可比性且不可尺度扩展; (3) 缺乏湖泊生态系统特征和生态系统最终服务的尺度关联研究^[45-46], 无法揭示湖泊生态系统服务权衡关系及湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响; (4) 忽视湖泊生态系统服务空间流动和转移特征^[40], 不利于揭示利益相关方与生态系统服务在不同尺度的相互作用机制^[40], 无法为生态补偿等政策设计提供科学依据。

本文在综述湖泊生态系统服务定量评估方法的基础上, 认为通过受益者分析确定湖泊生态系统最终服务及评价指标, 并通过构建生态生产函数研究湖泊生态系统服务权衡关系及湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响^[10-11,46-50], 是生态系统服务走向管理决策和政策设计的科学依据, 可以确保生态、社会、经济可持续发展^[9, 47, 51]。

1 湖泊生态系统服务评估方法(物质质量)及其局限性

1.1 湖泊生态系统服务评估方法(物质质量)

生态系统服务评估是环境管理^[52]和生态规划^[53]的重要研究内容。湖泊生态系统服务评估能揭示湖泊生态系统对人类福祉的直接或间接贡献^[10, 47],提高管理者和公众的湖泊生态系统服务认知和湖泊生态系统保护认识。同时,湖泊生态系统服务评估可以揭示湖泊生态系统服务时空权衡关系、湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响及湖泊生态系统服务空间流动和转移特征,帮助确定湖泊生态系统服务优先保护区域和优化管理方式,促进湖泊生态系统服务由认知走向管理实践^[24-27, 31, 54]。随着湖泊生态系统服务认知的不断提高,利益相关者逐渐认识到生态系统服务与管理决策和政策设计结合的重要性,并在生态系统服务评估框架^[9-11, 55-56]、生态系统服务物质质量^[32, 37, 39]和价值量评估^[16, 57-58]、生态系统服务权衡分析^[29, 59-60]、生态系统服务制图^[31-32]等方面进行了大量研究,但没有形成通用的湖泊生态系统服务评价指标体系和评估方法^[16, 30]。我国湖泊生态系统服务评估方法可以概括为以下3类:(1)列举湖泊生态系统提供的所有服务,选取相应的生态特征指标或效益指标,基于生态监测、野外调查、社会调查等方式搜集原始数据,评估湖泊生态系统服务;(2)以土地利用和土地覆盖为替代数据,采用效益转换法评估湖泊生态系统服务;(3)借助生物物理模型(biophysical model)、ArcGIS工具、统计软件等技术手段,模拟不同土地利用和土地覆盖情景下湖泊生态系统服务权衡关系,并进行生态系统服务空间制图。

1.1.1 生态属性或效益指标

国内学者在湖泊生态系统特征(包括生态系统结构、过程、功能)等方面开展了大量工作,为湖泊生态系统服务评估奠定了基础。在开展湖泊生态系统服务评估时,国内研究人员通常会参照生态系统服务^[9, 41, 61]和生态系统服务价值分类体系^[9, 11, 62],列举湖泊生态系统提供的所有服务,并基于文献综述、专家意见^[25]、研究区域特征及数据可获得性,选取特定指标,然后基于生态监测、野外调查和社会调查等方式搜集第一手资料,评估湖泊生态系统服务。我国学者针对湖泊生态系统服务评估开展了大量实践工作^[63-67],但没有形成通用的湖泊生态系统服务评价指标体系。

1.1.2 效益转化

效益转化法是评估湖泊生态系统服务比较流行和比较普遍的方法,效益转化法是通过查表的方式将已评估的湖泊生态系统数据转化到区域特征相似的湖泊生态系统^[68]。相比原始数据搜集,效益转化法不仅节省时间也节省成本,因此在数据缺乏和需要做出即时决策时被广泛应用。目前,我国学者在开展湖泊生态系统服务评估,特别是湖泊生态系统服务动态变化分析时,往往使用单位面积生态系统服务价值表^[41-42]进行效益转化,评估湖泊生态系统服务。

1.1.3 湖泊生态系统服务评估模型

生态系统服务评估模型能直观的反映生态系统服务空间流动和转移特征^[25-26],揭示生态系统服务时空权衡关系和生态系统服务重点保护区域^[25, 37, 52],为生态系统服务管理和政策设计提供科学依据。国内目前主要采用生态系统服务价值化的得失权衡综合评价模型(*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs-InVEST*)^[32]进行生态系统服务评估、权衡分析及空间制图。InVEST模型是基于GIS软件的功能扩展模块,它能较准确地模拟不同土地利用情景下生态系统服务的时空权衡和协同关系,在密云水库流域^[69]、白洋淀流域^[70]等区域得到了较好的利用,目前该模型未见单独应用于湖泊生态系统服务评估中。

1.2 湖泊生态系统服务评估方法局限性

湖泊生态系统服务评估是湖泊管理决策和政策设计的重要组成部分。近年来,国内学者开展了大量的湖泊生态系统服务评估案例研究,但在评估指标和评估方法等方面仍存在很大的局限性:(1)混淆湖泊生态过程、功能和最终服务,造成湖泊生态系统服务评估结果可信度下降;评估结果不具可比性且不可尺度扩展;湖泊生态系统服务空间流动和转移特征不明确,生态补偿等政策设计受到影响;湖泊生态系统服务时空权衡关

系不明确,湖泊生态系统服务优化管理受到制约。(2)忽视湖泊生态系统服务供给和需求的时空异质性,直接采用效益法评估生态系统服务。效益转换法虽然可以反映湖泊生态系统服务的空间分布特征和基本变化趋势,但无法准确确定湖泊生态系统优先保护区域^[43]和湖泊生态系统服务变化的关键驱动因子。其次,效益转换法容易造成生态系统服务重复计算^[41-42]和较大的转化偏差(忽视生态系统服务供给和需求的时空异质性),评估结果可信度不高^[68, 71-72]。

2 生态系统服务受益者分析及生态生产函数构建

生态系统服务供给和需求具有高度的时空异质性,受管理决策和人类活动等多方面因素影响^[17,73]。湖泊是一个复杂的系统,内部各组分和各服务之间相互作用、相互影响,形成生态系统服务束(*Ecosystem service bundles*)^[74]。在特定的时空尺度,当管理者选择性的提高某一项生态系统服务时,往往会削弱其他一项或多项生态系统服务的供给水平和供给能力^[29,32]。开展湖泊生态系统服务时空权衡关系及湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响研究,能协调利益相关者之间的矛盾^[40],实现湖泊生态系统优化管理。生态系统服务权衡关系研究是生态系统服务评估和优化管理的一种新模式^[75],受到学界和管理决策部门高度关注^[29,76-77]。国内外学者就管理措施(如:土地管理)对不同生态系统服务的影响进行了大量研究^[31-39],从理论和实践揭示了生态系统服务此长彼消的权衡关系,为开展生态系统服务权衡关系研究奠定了基础。然而我国学者对湖泊生态系统服务权衡关系的认识存在一定的局限性,阻碍了湖泊生态系统服务由认知走向管理实践。管理决策者需要综合利用生态学、经济学、社会学和管理学等学科知识,区分湖泊生态系统中间服务和最终服务,并通过构建生态生产函数揭示湖泊生态系统服务权衡关系及湖泊生态系统特征和生态系统最终服务的尺度关联特征^[10-11,46-50],提高湖泊生态系统管理效能^[44]。

2.1 湖泊生态系统服务受益者分析

千年生态系统评估将生态系统服务定义为:人类从生态系统中所获得的效益,并将生态系统服务划分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务^[9]。千年生态系统评估^[9]提出了研究生态系统与人类福祉关系的理论评估框架,被科学家和管理决策者广泛认可^[6]。然而千年生态系统评估停留在概念水平,在管理决策中缺乏实际应用^[30-31,78]。为了更好地将生态系统服务概念纳入到管理决策中,相关研究将生态系统服务定义为“生态系统对人类福祉和效益的直接或间接贡献”^[55,79],为区分生态系统中间服务和最终服务、避免生态系统服务重复计算,研究生态系统和人类福祉关系提供了可操作性更好的评估框架^[10,47,80]。生态系统最终服务是与人类福祉直接相关的物质质量产出^[51,80],生态系统中间服务是产生生态系统最终服务的生态特征,包括生态系统过程和生态系统功能等生态属性,是无直接受益者的生态功能量^[51,56,80]。提供产品服务和文化服务通常是最终服务,调节服务既可以是中间服务又可以是最终服务^[20],支持服务是中间服务^[46]。

生态系统最终服务将生态系统对人类福祉的直接贡献转化为具有社会价值的物质质量指标,为区分生态系统中间服务和最终服务,研究生态系统服务权衡关系及生态系统特征与人类福祉关系提供了理论基础。近年来,国内外学者针对生态系统中间服务和最终服务的区分原则与区分方法展开了大量讨论。Bockstael^[23]认为生态系统服务以人类利用为中心,其经济价值大小与每一个受益者对生态系统和自身福祉关系的评估有关。Wallace^[81]认为混淆生态系统过程、功能和服务是阻碍生态系统服务评估在管理决策中应用的主要障碍,并提出了相应的分类系统。Boyd^[80]将生态系统最终服务定义为具有社会价值的物质质量产出,为区分生态系统中间服务和最终服务奠定了重要的基础。Turner^[82]和 Fisher^[83]认为生态系统的物质质量产出取决于生态系统条件和过程(中间服务),但物质质量能否成为生态系统最终服务与受益者有关。例如:对排放污染物到湖泊生态系统的受益者而言,湖泊水体纳污量是最终服务。对饮用湖泊水资源和到湖泊游泳、观赏的受益者而言,水质净化过程是中间服务,清洁的水资源是最终服务。对到湖泊垂钓的受益者而言,清洁的水资源是中间服务,休闲娱乐是最终服务。Fu^[21]指出重复计算是生态系统服务价值评估面临的主要问题,并在分析以往研究的基础上指出了生态系统服务价值重复计算的原因,同时提出了相应的解决办法。Johnston^[22]提出了区分

生态系统中间服务和最终服务的理论框架和基本准则,并指出生态系统服务分类需要充分考虑受益者^[70],减少价值评估的不确定性。Nahlik^[18]认为采用 Boyd^[80]对生态系统最终服务的定义能:(1)形成通用的生态系统服务定义;(2)避免生态系统服务价值重复计算;(3)能有效促进生态学家、社会学家、经济学家及管理者之间的合作;(4)被公众认知和理解。Nahlik^[18]还指出受益者分析是确定生态系统最终服务的有效途径。Ringold^[19]指出生态系统最终服务评估是将生态系统服务纳入到管理决策的重要手段,并提供了确定生态系统最终服务指标,量化生态系统与人类福祉关系的六个关键步骤。不同利益相关者与生态系统的不同组分相互作用,受益者分析对确定生态系统最终服务类型和指标具有重要作用^[19]。Reyers^[45]提出了生态系统服务评估和管理的“社会-生态”系统,也需要基于受益者分析确定生态系统最终服务^[45]。

尽管诸位学者对生态系统服务评估有不同的理解和看法,但基于受益者分析确定生态系统最终服务的观点却基本一致。基于以上文献综述,本文总结了通过受益者分析确定湖泊生态系统最终服务的几个基本过程:(1)确定研究区域湖泊生态系统组分及其空间分布;(2)确定湖泊生态系统服务受益者空间分布;(3)列举与人类福祉相关的生态系统属性并归类;(4)根据受益者对生态系统服务的实际需求和利用,确定生态系统最终服务类型;(5)通过受益者偏好分析(例如:社会调查),确定生态系统最终服务指标。本文结合以上基本过程及湖泊生态系统服务评估经验,确定了与人类福祉有直接相关性的湖泊生态系统最终服务类型(表1),为区分湖泊生态系统中间服务和最终服务,开展湖泊生态系统服务精细化评估提供了重要基础,能提高不同案例研究的可比性和可尺度扩展性。

表 1 湖泊生态系统最终服务类型及其受益者

Table 1 Beneficiaries analysis to determine Lake final ecosystem services types

生态系统最终服务分类 Final ecosystem service classifications	生态系统最终服务类型 Final ecosystem service types	受益者 Beneficiaries
供给服务 Provisioning services	食物生产	局部尺度或区域尺度
	原材料生产	局部尺度或国家尺度
	医药资源	全国尺度
	水资源供给	局部尺度
	航运	局部尺度或全国尺度
调节服务 Regulating services	预防地面沉降	区域尺度
	洪水调蓄	区域尺度
	空气质量调节	区域尺度
	水质净化	局部尺度
	气候调节	局部尺度或区域尺度
	碳汇	全国尺度
	释氧	全国尺度
	休闲娱乐	全国尺度
文化服务 Cultural services	生物多样性和景观美学(非使用价值)	全国尺度
	湖泊文化遗产(非使用价值)	全国尺度

2.2 生态生产函数构建

生态生产函数是研究生态系统特征对生态系统最终服务边际影响的重要方法。跟经济评估函数确定产品输入和输出的数学函数关系类似,生态生产函数通过生物物理模型和统计学方法确定生态系统结构、过程、功能(解释变量)和生态系统最终服务(响应变量)的数学函数关系,进而量化生态系统最终服务的时空权衡关系及其对生态特征变化的边际响应特征^[10, 46, 50](图1)。生态生产函数通过整合生态学、经济学和社会学等学科知识,为管理决策和政策设计提供重要依据。其重要作用在于:(1)区分生态系统中间服务和最终服务,避免价值重复计算^[46]。(2)量化不同管理措施(如:土地利用变化、水资源和水环境管理等)下生态系统服务的时空权衡关系。(3)揭示生态系统服务的空间流动和转移特征。

国内学者需要整合生态学、经济学、社会学和管理学等学科知识,通过生态-经济综合模型提高湖泊生态系统服务评估的可信性,为制定湖泊生态补偿标准、确定湖泊生态系统优先保护区和开展湖泊生态功能区划等提供重要依据。生态生产函数是湖泊生态系统服务经济价值评估和湖泊生态系统优化管理的关键过程^[84],是湖泊生态系统服务与政策设计有力结合的重要保障。生态生产函数可以为价值评估提供合理的数据支撑(物质质量),在避免生态系统服务价值重复计算的同时,揭示生态系统服务时空权衡关系和生态特征对生态系统最终服务的边际影响。生态生产函数能提高效益转化法应用的合理性,为湖泊生态系统服务空间数据库的构建和即时决策提供重要支撑。

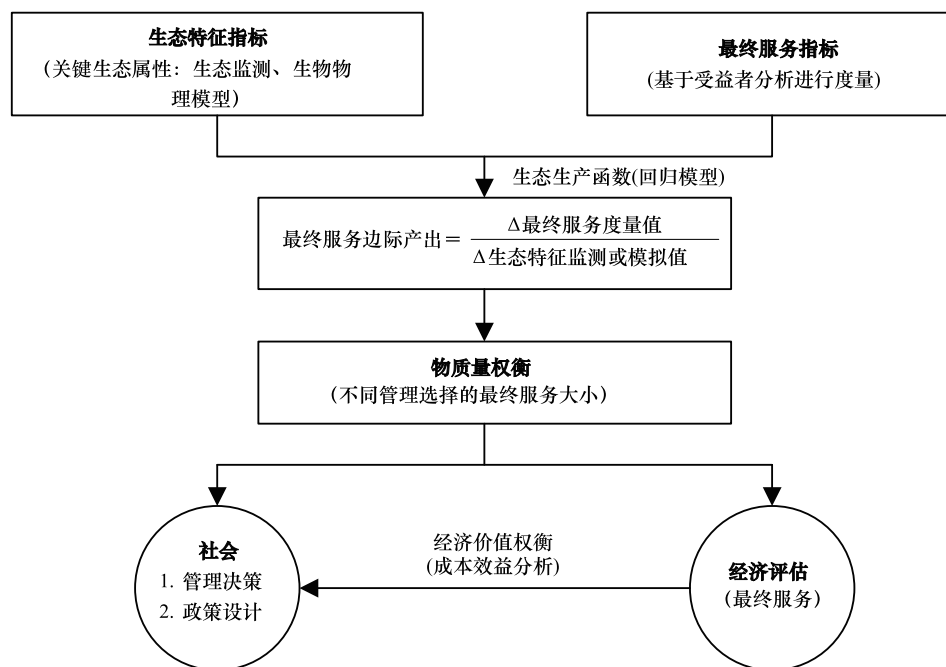


图1 生态生产函数在生态系统最终服务核算及权衡关系中的应用

Fig. 1 Ecological production function calculates the influence of ecological characteristics metrics on final ecosystem services as marginal changes to quantify tradeoffs to inform management decisions

3 结论与展望

我国拥有数量众多的湖泊生态系统,对我国居民生存和社会经济发展具有重要的支撑作用。然而,社会经济发展对资源的需求加剧了湖泊水体水质恶化和湖泊面积萎缩,严重影响了湖泊生态功能及其提供的生态系统服务。随着利益相关者对湖泊生态服务认知的不断提高,湖泊生态系统服务评估已成为环境管理、生态规划和政策设计的重要内容。然而,我国在湖泊生态系统服务评估指标和评估方法等方面存在很大的局限性,严重影响了生态系统服务由认知走向管理实践。我国急需确定湖泊生态系统最终服务、提高湖泊生态系统服务评估技术,揭示湖泊生态系统服务的时空权衡关系及湖泊生态系统服务空间流动和转移特征,为管理决策和政策设计提供科学依据。

本文在综述湖泊生态系统服务定量评估方法的基础上,提出通过受益者分析确定湖泊生态系统最终服务类型及评价指标,并通过构建生态生产函数揭示湖泊生态系统服务权衡关系及湖泊生态系统特征对生态系统最终服务的边际影响。生态生产函数是湖泊生态系统服务经济价值评估和湖泊生态系统优化管理的关键过程。然而,创建完整的生态生产函数需要大量的数据支撑,是一个相对漫长的过程。短期内,我们可以通过跨学科合作,确定生态系统最终服务指标及相应的生态特征指标,建立监测项目,为构建生态生产函数提供数据支撑,使湖泊生态系统服务从认知走向管理实践。

参考文献 (References):

- [1] Löffler H. The Origin of Lake Basins. // O'Sullivan P E, Reynolds C S, eds. *The Lakes Handbook. Volume 1: Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2004: 8-60.
- [2] Le C, Zha Y, Li Y, Sun D, Lu H, Yin B. Eutrophication of lake waters in China: costs, causes, and control. *Environmental Management*, 2010, 45(4): 662-668.
- [3] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [4] 李世杰. 应重视湖泊科学的建设和发展. *中国科学院院刊*, 2006, 21(5): 399-405.
- [5] Ma R H, Duan H T, Hu C M, Feng X Z, Li A N, Ju W M, Jiang J H, Yang G S. A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): 1-6.
- [6] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, DeFries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipapp A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [7] Seppelt R, Fath B, Burkhard B, Fisher J L, Grêt-Regamey A, Lautenbach S, Pert P, Hotes S, Spangenberg J, Verburg P H, Van Oudenhoven A P E. Form follows function? Proposing a blueprint for ecosystem service assessments based on reviews and case studies. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 145-154.
- [8] Lester S E, Costello C, Halpern B S, Gaines S D, White C, Barth J A. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Marine Policy*, 2013, 38: 80-89.
- [9] Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [10] The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010.
- [11] National Research Council (NRC). *Valuing Ecosystem Services: Toward Better Environmental Decision-Making*. Washington, DC: National Academies Press, 2005.
- [12] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li P G, Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [13] Liu C L, Xie G D, Huang H Q. Shrinking and drying up of Baiyangdian lake wetland: A natural or human cause? *Chinese Geographical Science*, 2006, 16(4): 314-319.
- [14] Zhang Y, Wang G X, Wang Y B. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan plateau from 1967—2004. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 180(1/4): 189-199.
- [15] Liu S, Costanza R, Farber S, Troy A. Valuing ecosystem services theory, practice, and the need for a transdisciplinary synthesis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1185: 54-78.
- [16] Zhang B, Li W H, Xie G D. Ecosystem services research in China: progress and perspective. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1389-1395.
- [17] Kremen C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 2005, 8(5): 468-479.
- [18] Nahlik A M, Kentula M E, Fennessy M S, Landers D H. Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics*, 2012, 77(C): 27-35.
- [19] Ringold P L, Boyd J, Landers D, Weber M. What data should we collect? A framework for identifying indicators of ecosystem contributions to human well-being. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(2): 98-105.
- [20] Keeler B L, Polasky S, Brauman K A, Johnson K A, Finlay J C, O'Neill A, Kovacs K, Dalzell B. Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(45): 18619-18624.
- [21] Fu B J, Su C H, Wei Y P, Willett I R, Lü Y H, Liu G H. Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures. *Ecological Research*, 2011, 26(1): 1-14.
- [22] Johnston R J, Russell M. An operational structure for clarity in ecosystem service values. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2243-2249.
- [23] Bockstael N E, Freeman A M, Kopp R J, Portney P R, Smith V K. On measuring economic values for nature. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(8): 1384-1389.
- [24] Schirpke U, Scolozzi R, De Marco C, Tappeiner U. Mapping beneficiaries of ecosystem services flows from Natura 2000 sites. *Ecosystem services*, 2014, 9: 170-179.
- [25] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [26] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [27] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 198-211.

- [28] ICSU-UNESCO-UNU. Ecosystem Change and Human Well-being: Research and Monitoring Priorities Based on the Millennium Ecosystem Assessment. Paris: International Council for Science, 2008.
- [29] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [30] Seppelt R, Dormann C F, Eppink F V, Lautenbach S, Schmidt S. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 630-636.
- [31] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [32] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson D M, Le Maitre, D C, van Jaarsveld A S. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 135-140.
- [33] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, Hacker S D, Wolanski E, Primavera J, Granek E F, Polasky S, Aswani S, Cramer L A, Stoms D M, Kennedy C J, Bael D, Kappel C V, Perillo G M E, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319(5861): 321-323.
- [34] Naidoo R, Ricketts T H. Mapping the economic costs and benefits of conservation, *PLoS Biology*, 2006, 4(11): e360-e360.
- [35] Naidoo R, Balmford A, Ferraro P J, Polasky S, Ricketts T H, Rouget M. Integrating economic costs into conservation planning. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(12): 681-687.
- [36] Chan K M A, Shaw M R, Cameron D R, Underwood E C, Daily G C. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*, 2006, 4(11): e379-e379.
- [37] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S., Tallis H., Cameron D R, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [38] Onaindia M, de Manuel B F, Madariaga I, Rodríguez-Loinaz G. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage, and water regulation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289:1-9.
- [39] Logsdon R A, Chaubey I. A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2013, 257: 57-65.
- [40] 李鹏,姜鲁光,封志明,于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [41] 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.
- [42] 谢高地,鲁春霞,冷允法,郑度,李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [43] Eigenbrod F, Armsworth P R, Anderson B J, Heinemeyer A, Gillings S, Roy D B, Thomas C D, Gaston K J. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(2): 377-385.
- [44] 郑华,李屹峰,欧阳志云,罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710.
- [45] Reyers B, Biggs R, Cumming G S, Elmqvist T, Hejnowicz A P, Polasky S. Getting the measure of ecosystem services: a social-ecological approach. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(5): 268-273.
- [46] Polasky S, Segerson K. Integrating ecology and economics in the study of ecosystem services: some lessons learned. *Annual Review of Resource Economics*, 2009, 1(1): 409-434.
- [47] United States Environmental Protection Agency. Valuing the Protection of Ecological Systems and Services: A Report of the EPA Science Advisory Board. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2009.
- [48] Boyd J W. Counting ecosystem services: ecological endpoints and their application. Unpublished report for the US Department of Agriculture, Forest Service. A copy of this report is on file with the authors, 2007.
- [49] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [50] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. *Natural Capital: Theory & Practice of Mapping Ecosystem Services*. New York: Oxford University Press, 2011.
- [51] Boyd J W. The endpoint problem. *Resources*, 2007, 165: 26-28.
- [52] Scarlett L, Boyd J. Ecosystem services and resource management: Institutional issues, challenges, and opportunities in the public sector. *Ecological Economics*, 2015, 115: 3-10.
- [53] Ehrlich P R, Kareiva P M, Daily G C. Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature*, 2012, 486(7401): 68-73.
- [54] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemen L, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [55] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [56] Fisher B, Turner K, Zylstra M, Brouwer R, de Groot R, Farber S, Ferraro P, Green R, Hadley D, Harlow J, Jefferiss P, Kirkby C, Morling P,

- Mowatt S, Naidoo R, Paavola J, Strassburg B, Yu D, Balmford A. Ecosystem services and economic theory: integration for policy-relevant research. *Ecological Applications*, 2008, 18(8): 2050-2067.
- [57] Tong C F, Feagin R A, Lu J J, Zhang X F, Zhu X J, Wang W, He W S. Ecosystem service values and restoration in the Urban Sanyang wetland of Wenzhou, China. *Ecological Engineering*, 2007, 29(3): 249-258.
- [58] Chen N W, Li H C, Wang L H. A GIS-based approach for mapping direct use values of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 2009, 68(11): 2768-2776.
- [59] Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5995-6000.
- [60] Gordon L J, Peterson G D, Bennett E M. Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(4): 211-219.
- [61] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [62] Turner R K, van den Bergh J C J M, Söderqvist T, Barendregt A, van der Straaten J, Maltby E, van Ierland E C. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. *Ecological Economics*, 2000, 35(1): 7-23.
- [63] 庄大昌. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. *经济地理*, 2004, 24(3): 391-394, 432.
- [64] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 47-51.
- [65] 杜婷婷, 罗维, 李中和, 吕永龙. 湖泊生态系统服务功能价值评估——以太湖为例. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(11): 208-211.
- [66] 邵宁平, 刘小鹏, 渠晓毅. 银川湖泊湿地生态系统服务价值评估. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1625-1630.
- [67] 潘文斌, 唐涛, 邓红兵, 蔡庆华. 湖泊生态系统服务功能评估初探——以湖北保安湖为例. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1315-1318.
- [68] Plummer M L. Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 38-45.
- [69] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [70] Bai Y, Zheng H, Ouyang Z Y, Zhuang C W, Jiang B. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: a case study in Baiyangdian watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2): 709-718.
- [71] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: a meta-analysis. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 257-270.
- [72] Brouwer R, Langford I H, Bateman I J, Turner R K. A meta-analysis of wetland contingent valuation studies. *Regional Environmental Change*, 1999, 1(1): 47-57.
- [73] Hein L, van Koppen K, de Groot R S, van Ierland E C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological economics*, 2006, 57(2): 209-228.
- [74] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [75] Perrings C, Naem S, Ahrestani F, Bunker D E, Burkill P, Canziani G, Elmqvist T, Ferrati R, Fuhrman J A, Jaksic F, Kawabata Z, Kinzig A, Mace G M, Milano F, Mooney H, Prieur-Richard A H, Tschirhart J, Weisser W. Ecosystem services for 2020. *Science*, 2010, 330(6002): 323-324.
- [76] Kremen C, Ostfeld R S. A call to ecologists: measuring, analyzing, and managing ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(10): 540-548.
- [77] Turner R K, Paavola J, Cooper P, Farber S, Jessamy V, Georgiou S. Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 493-510.
- [78] Burkhard B, Petrosillo I, Costanza R. Ecosystem services-Bridging ecology, economy and social sciences. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 257-259.
- [79] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162: 265-283.
- [80] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007, 63(2-3): 616-626.
- [81] Wallace K J. Classification of ecosystem services: problems and solution. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [82] Turner R K, Daily G C. The ecosystem service framework and natural capital conservation. *Environmental and Resources Economics*, 2008, 39(1): 25-35.
- [83] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [84] Wainger L, Mazzotta M. Realizing the potential of ecosystem services: a framework for relating ecological changes to economic benefits. *Environmental Management*, 2011, 48(4): 710-733.