

湖泊湿地生态服务监测指标与监测方法*

江波^{1,2} Christina P. WONG³ 陈媛媛¹ 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长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051; ³亚利桑那州立大学可持续发展学院, 亚利桑那州 85287, 美国)

摘要 湖泊湿地生态系统为人类提供了维持生存发展的多种生态系统服务, 是社会经济发展的重要基础。然而, 全国范围内的湖泊湿地资源被大量开发利用, 极大地削弱了湖泊湿地提供生态系统服务的能力, 人类自身福祉也受到严重威胁。开展湖泊湿地生态系统服务动态监测能减少生态系统服务重复计算、推动生态系统服务管理实践。本文在分析湖泊湿地生态系统服务监测必要性的基础上, 探讨了湖泊湿地生态系统服务监测指标选取的原则和思路, 并初步构建了适宜于我国湖泊湿地生态系统服务动态评估、权衡分析和生态生产函数构建的最终服务和生态特征监测指标体系。最终服务是与人类效益有直接关联的生态功能量, 生态特征指标是产生生态系统最终服务的关键指标, 主要包括生态结构、生态过程和生态功能指标。供给服务和文化服务一般是最终服务, 而调节服务既可以是中间服务(生态功能)又可以是最终服务, 支持服务是中间服务(生态过程)。针对调节服务和文化服务评估的困难性及调节服务的重复计算问题, 本研究提出通过宏观监测(3S技术监测)和典型湖泊湿地定位监测相结合的多尺度湖泊湿地生态系统服务监测方法, 构建湿地监测项目开展生态系统最终服务和生态特征指标数据监测。本研究对构建生态生产函数、开展湖泊湿地生态系统服务动态评估和权衡分析具有重要意义, 是生态系统服务从认知走向管理实践的重要基础。

关键词 湖泊湿地; 生态系统最终服务; 生态特征; 监测

中图分类号 X826.0148 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)10-2956-09

Monitoring indicators and methods for lake wetland ecosystem services. JIANG Bo^{1,2}, Christina P. WONG³, CHEN Yuan-yuan¹, OUYANG Zhi-yun^{1**} (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; ³School of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2956-2964.

Abstract: Lake wetlands provide humans with a great diversity of ecosystem services which are necessary for maintaining basic human needs and sustaining development in China. However, lake wetland resources nationwide are under great exploitation and utilization, which are significantly impairing the capacity of lake wetlands to provide the diversity of ecosystem services necessary to support human well-being. Implementing dynamic lake wetland ecosystem services monitoring can help minimize ecosystem services double-counting and promote ecosystem services management practices. In this paper, we identified the necessary requirements for lake wetland ecosystem services monitoring and then analyzed the principles and perspectives for selecting monitoring indicators to measure lake wetland ecosystem services. We present a set of ecosystem services monitoring indicators (including final ecosystem services and relevant ecosystem characteristics) to advance dynamic ecosystem services valuation, trade-offs analyses, and the creation of ecological production functions in China. Final ecosystem services are biophysical outcomes which are of obvious and clear relevance to human well-being. Ecosystem characteristics are attributes of eco-

* 国家林业公益性行业科研专项(201204201)和国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAJ07B05-3)资助。

** 通讯作者 E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

收稿日期: 2015-02-05 接受日期: 2015-06-08

systems measured as ecosystem structures, processes, and functions. Provisioning and cultural services are often final services while most regulating (i.e., ecosystem functions) and supporting services (i.e., ecosystem processes) are intermediate services. In order to overcome the significant challenge in credible evaluation of regulating and cultural services, and double-counting in valuing regulating services, we propose scientists focus on establishing a lake wetland monitoring program to measure final ecosystem service indicators and relevant ecosystem characteristics metrics as a first step. We also discuss how to combine macro-monitoring and local monitoring methods to monitor lake wetland ecosystem services across multiple scales. Our study is important to help acquire the necessary data to create ecological production functions to improve efforts on economic valuation by revealing the dynamic change of ecosystem services, and to effectively quantify the trade-offs among different stakeholders. Monitoring programs are critical to moving lake wetland ecosystem services from scientific theory into management practices.

Key words: lake wetlands; final ecosystem services; ecological characteristics; monitoring.

DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0284

湖泊湿地生态系统服务是指湖泊湿地生态系统对人类福祉的直接或间接贡献(US EPA, 2009; TEEB, 2010)。湖泊湿地生态系统服务评估能用直观的经济数据揭示湖泊湿地生态系统服务对人类效益的直接贡献,为湖泊湿地生态系统保护创建生态补偿等经济驱动机制。近年来,国内外学者逐渐认识到生态系统服务研究与管理决策和政策设计结合的重要性,并针对生态系统服务内涵、评估框架(MEA, 2005; NRC, 2005; Fisher *et al.*, 2008; US EPA, 2009; de Groot *et al.*, 2010)、价值评估(Costanza *et al.*, 1997; Tong *et al.*, 2007; de Groot *et al.*, 2012)等方面开展了大量研究,这些研究为湖泊湿地生态系统服务管理提供了重要的理论基础。生态系统服务研究具有跨学科、跨尺度等特征。开展多尺度的动态监测,不仅有助于提高管理决策者和公众生态系统服务认知,对确定生态系统服务市场和完善生态服务补偿机制、提高生态系统管理水平也有重要的作用(Carpenter *et al.*, 2006a)。由于湖泊湿地生态系统及影响其功能和服务的自然和社会因子的复杂性,国内湖泊湿地生态系统服务研究多集中于经济价值评估(崔丽娟, 2004; 庄大昌, 2004; 段晓男等, 2005; 邵宁平等, 2008; 叶小华等, 2009; 吕磊等, 2010; 王凤珍等, 2011; 杜婷婷等, 2012),鲜有研究探讨湖泊湿地生态系统服务的时空权衡关系,生态系统结构-过程-功能-服务-管理措施之间的相互关系,以及生态系统服务的空间流动和转移特征,生态系统服务管理面临着很大的挑战。

监测指标可以简化生态系统的复杂性,综合反映生态系统服务的变化趋势(Carpenter *et al.*, 2006b)。基于湖泊湿地生态特征和生态系统最终服务的概念模型,构建标准化的湖泊湿地生态系统

最终服务及生态特征指标体系并开展动态监测,是开展生态系统服务研究的关键过程(Layke *et al.*, 2012)。动态监测不仅能系统地表征和测度湖泊湿地生态属性和生态系统最终服务在时空上的变化趋势,也能(1)揭示湖泊湿地生态系统服务的时空权衡关系;(2)确定湖泊湿地生态系统结构、过程、功能、服务的关联机制,提高生态系统服务效益转化的可信度,为生态系统服务尺度扩展提供依据;(3)明确湖泊湿地生态系统服务的空间流动和转移特征,为生态补偿等政策设计提供依据;(4)明确管理结果与管理目标的缺口。本文在分析湖泊湿地生态系统服务数据监测必要性的基础上,探讨了湖泊湿地生态系统服务监测指标选取的原则和思路,并初步构建了适用于我国湖泊湿地生态系统服务动态评估、权衡分析和生态生产函数构建的监测指标,探讨了湖泊湿地生态系统服务监测方法。主要目的是为国内学者和管理决策者开展湖泊湿地生态系统服务动态评估和湖泊湿地生态系统管理提供理论基础。

1 湖泊湿地生态系统服务数据监测的必要性

综合运用生态学、社会学、经济学和管理学等学科手段开展湖泊湿地生态系统服务动态评估,是揭示湖泊湿地生态系统服务动态变化和时空权衡关系,实现湖泊湿地生态系统服务优化管理的重要基础;也是确定生态系统服务提供者和受益者的空间分布,实施生态补偿等政策的重要经济驱动机制。基于湖泊湿地生态系统服务评估的重要性,国内外学者近20年开展了大量评估案例研究。现有研究主要采用以下2种方法评估湖泊湿地生态系统服务:(1)基于专家咨询、文献综述等方法,列举湖泊湿地生态系统提供的所有生态服务(包括中间服务

和最终服务) ,用已有监测数据(生态结构或组分指标)、统计数据(效益指标)评估生态系统服务价值;(2) 忽视湖泊湿地生态特征和生态系统服务受益者的空间异质性及其边际效应特征,基于土地利用/土地覆盖数据,直接采用效益转化法评估湖泊湿地生态系统服务价值。由于数据缺乏,湖泊湿地生态系统服务从价值评估走向管理实践和政策设计面临着多方面的挑战(郑华等,2013),包括:湖泊湿地生态系统服务的精细化评估、湖泊湿地生态系统服务时空权衡关系研究、湖泊湿地生态系统特征和生态系统最终服务关联研究、湖泊湿地生态系统服务的空间流动和转移特征研究、及湖泊湿地生态系统服务的尺度扩展研究。

生态生产函数法是基于过程模型和统计学方法研究生态系统特征和生态系统最终服务数学函数关系的重要方法(Polasky *et al.*, 2009; US EPA, 2009; Kareiva *et al.*, 2011; Wong *et al.*, 2015)。生态生产函数与3S技术整合不仅可以揭示生态系统服务在时空上的权衡关系和生态系统服务的空间流动和转移特征,对生态系统服务评估及政策设计也有2个方面的重要意义:(1) 区分生态系统中间服务和最终服务,提高生态系统服务核算的可信度;(2) 为生态系统管理和政策设计提供可视化的空间数据(Wong *et al.*, 2015)。生态生产函数从理论上解决了湖泊湿地生态系统服务管理面临的多方面挑战,但由于数据缺乏,生态生产函数在生态系统服务评估中的应用(尤其是调节服务和文化服务)有很大的局限性。构建标准化的湖泊湿地生态系统服务监测指标并开展动态监测,一方面可以为创建湖泊湿地生态生产函数提供数据支撑,揭示湖泊湿地生态系统服务价值动态变化及其时空权衡关系,促进生态系统服务由认知走向管理实践;另一方面可以为确定生态系统功能(供给)和最终服务(需求)的空间位置关系和关联机制提供依据(Niemi *et al.*, 2004; Feld *et al.*, 2010; Burkhard *et al.*, 2012; Nedkov *et al.*, 2012; Stürck *et al.*, 2014),提高湖泊湿地生态系统服务效益转化的可信度,为生态系统服务尺度扩展和即时决策提供依据。

2 湖泊湿地生态系统服务监测指标选取原则

湖泊生态系统服务监测是通过宏观监测和定位监测,对表征湖泊湿地生态系统结构、过程、功能和服务的变量或指标进行数据重复搜集的过程。监测

指标应反映湖泊湿地生态系统特征和生态系统服务的时空变化趋势。

湖泊湿地生态系统结构、过程、功能、服务之间的关系极其复杂。湖泊湿地生态系统结构是指构成湖泊湿地生态系统的生产者、消费者、分解者和非生物组分在时间和空间上的分布与配置(吕宪国等, 2004; NRC, 2005; 陆健健等, 2006),例如:芦苇和香蒲是湖泊湿地生态系统的组分,也是湖泊湿地生态系统结构的一部分(NRC, 2005)。湖泊湿地生态系统过程是湖泊湿地生态系统生物组分和非生物组分相互作用(Lyons *et al.*, 2005)而发生的物质循环和能量转化的动态过程(Chapin *et al.*, 2002; Lovett *et al.*, 2005)。湖泊湿地生态系统功能是结构和过程相互作用的结果(Chapin *et al.*, 2002),是湖泊湿地提供生态系统服务的实际能力(不同于潜在能力)(de Groot *et al.*, 2010; Burkhard *et al.*, 2012)。湖泊湿地生态系统功能取决于湿地内部的生物组分和非生物组分之间的相互作用,是湿地内部各种过程的表现形式(例如:净初级生产力,营养物保持量,蒸散发量),同时又是湖泊湿地生态系统提供产品和服务能力的体现,但湖泊湿地生态系统功能不考虑受益者是否能够识别、利用(可持续或不可持续)或对其赋予价值(Tallis *et al.*, 2012)。湖泊湿地生态系统结构是支撑其过程和功能的重要要素,当生态系统过程和功能被受益者直接消耗或利用时,就成为生态系统最终服务(图1)。湖泊湿地生态系统最终服务是人类直接利用湖泊湿地生态系统的自然组分对效益的贡献,是与人类效益有直接关联的生态功能量。湖泊湿地生态系统最终服务是生态学家测度、经济学家评估、管理决策和政策设计参考的通用指标(Boyd *et al.*, 2007; Boyd, 2007; Fisher *et al.*, 2008; Nahlik *et al.*, 2012; Ringold *et al.*, 2013)。湖泊湿地生态系统最终服务的确定建立在受益者分析的基础上(Bockstael *et al.*, 2000; Fisher *et al.*, 2008, 2009; Turner *et al.*, 2008; Johnston *et al.*, 2011; Nahlik *et al.*, 2012; Reyers *et al.*, 2013),从理论上避免了生态系统服务价值的重复计算,提高了管理决策和政策设计的合理性和可靠性。湖泊湿地生态系统最终服务包括供给服务、调节服务和文化服务(de Groot *et al.*, 2010; TEEB, 2010)。供给服务多数可以通过监测部门汇报给统计部门和政府的社会经济数据直接获得(如:用水量、淡水产品捕捞量等),指标相对比较全面。文化服务评估目前主要集中在休闲旅游

服务和非使用价值两方面,其中休闲旅游服务主要用旅游人数等数据度量;非使用价值是经济学术语,包括选择价值、存在价值和遗产价值(de Groot *et al.* 2010; Burkhard *et al.* 2012)。基于旅行费用法和支付意愿法的问卷调查可以量化湖泊湿地生态系统提供的休闲旅游服务及其非使用价值。调节服务是一种无形产品,即不具竞争性也不具排他性,评估相对较为困难。

由于对生态系统服务理论认识的不足(Geijzen-dorffer *et al.* 2013) 研究人员在湖泊湿地监测项目建立初期,主要对湖泊湿地生态系统结构和组分(包括:种类组成、物种数量、水生生物现存量、物种高度、生境类型等)、水污染及富营养化指标(总氮、总磷、藻类等)、土壤指标(土壤养分)、环境指标(环境参数)、水文指标(水位、水量、泥沙含量、输沙量)、浮游植物初级生产力、湖泊周边社会经济情况等进行监测(黄祥飞等,1999; Xu *et al.* 2001; 陈伟民等 2004; Liu *et al.* 2006; Le *et al.* 2010; Ma *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2011)。这些指标从一定程度上反映了湖泊湿地生态系统状态及其时空变化特征(Xu *et al.* 2001; Liu *et al.* 2006; Le *et al.* 2010; Ma *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2011) 不仅为生态保护提供预警信息,也为现阶段生态系统服务评估提供了基础数据(Díaz *et al.* 2007; Layke 2009; Lavorel *et al.* 2010)。然而,这些指标多为表征湖泊湿地生态

系统特征的指标,无法反映湖泊湿地生态系统对人类效益的直接贡献。采用生态系统特征监测指标直接或间接度量湖泊湿地生态系统服务,不仅造成生态系统中服务服务和最终服务混淆(Boyd *et al.* 2007; Johnston *et al.* 2011; Nahlik *et al.* 2012),也无法反映生态系统服务受益者的空间分布和生态系统服务的尺度转移特征,严重影响了湖泊湿地生态系统服务评估的合理性及其与管理决策和政策设计结合的有效性(Loomis *et al.* 2014)。

为了更好地将湖泊湿地生态系统服务评估纳入到管理决策中,需要整合生态学、社会学、经济学和管理学等学科知识,构建标准化的湖泊湿地生态系统最终服务指标(Meyerson *et al.* 2005) 和生态特征指标(与最终服务有直接关联)并开展监测,使生态系统服务评估结果可信、可重复、可尺度扩展(Daily *et al.* 2009; 郑华等,2013)。生态系统服务监测指标的选取应遵循以下几个基本原则:(1) 基于生态重要性、社会经济重要性及管理目标确定需要开展监测的湖泊湿地生态系统(由于时间和成本的限制,对湖泊湿地进行重要性分级,优先对重要湖泊湿地生态系统开展监测);(2) 选取与人类活动和管理措施有直接关联,而且对人类活动和管理措施响应最明显的生态特征指标;(3) 监测指标能直接用于生态系统最终服务评估、生态系统服务供给和需求空间制图、及生态生产函数创建;(4) 监

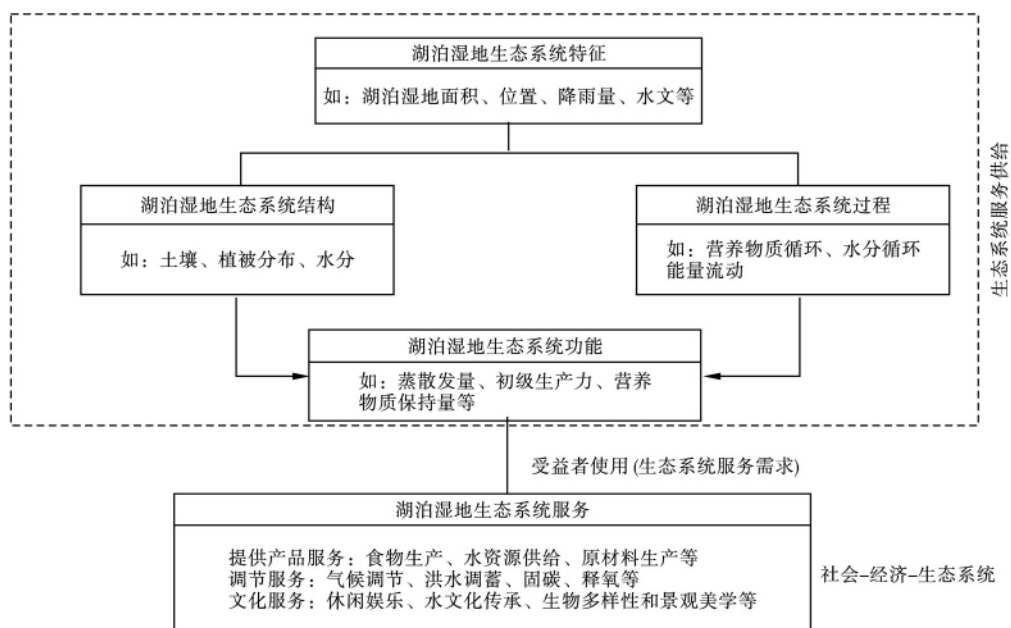


图1 湖泊湿地生态系统结构、过程、功能、服务关系评估框架

Fig.1 Framework to link lake wetland ecosystem structures , processes , functions , and services

测指标有可信的经济价值评估方法; (5) 充分结合现有常规观测指标, 确定需要补充监测的指标; (6) 操作简便易行, 可操作性强(数据容易获得, 而且监测人员容易理解); (7) 可重复、可尺度扩展(可以用于生态系统最终服务动态分析和效益转换); (8) 监测成本低(监测指标对于生态系统管理的价值要高于监测成本)。

3 湖泊湿地生态系统服务监测指标选取思路

本文在文献综述和专家咨询的基础上, 探讨了湖泊湿地生态系统服务监测指标选取的思路, 主要包括 2 个阶段(图 2)。第 1 阶段: 通过跨学科、跨部门合作, 基于湖泊湿地生态系统的生态属性和生态系统服务受益者分析, 确定湖泊湿地生态系统最终服务类型。首先, 生态学家对研究区域的湖泊湿地生态系统属性进行初步分析, 然后综合专家咨询、文献综述、社会经济数据分析及空间分析, 确定湖泊湿地生态系统最终服务类型及生态系统服务供给、需求的空间尺度。第 2 阶段: 基于受益者偏好、管理目标分析、经济评估方法可行性及数据的可获得性, 确定湖泊湿地生态系统最终服务指标, 并结合湖泊湿地生态系统服务和生态系统特征的内在关联, 确定湖泊湿地生态系统特征监测指标。在开展湖泊湿地生态系统最终服务和生态特征监测的基础上创建生态生产函数, 为研究生态系统服务时空权衡关系提

供支撑。

4 湖泊湿地生态系统服务监测指标与监测方法

为了更好地推动国内湖泊湿地生态系统服务研究, 本文基于湖泊湿地生态系统服务监测指标选取原则和选取思路, 确定了湖泊湿地生态系统服务类型, 并基于案例评估经验和文献综述, 归纳总结了湖泊湿地生态系统服务指标(表 1), 为区分湖泊湿地生态功能(中间服务)和最终服务、湖泊湿地服务库(生态资产)和服务流(从提供者到受益者)提供了重要基础。研究初步确定了适宜于我国湖泊湿地生态系统服务动态评估、权衡分析和生态生产函数构建的监测指标(生态系统最终服务和生态特征指标)、数据来源及监测方法(表 2 和表 3)。生态系统服务数据主要来源于国家或区域统计数据、定量模型、遥感监测和定位监测等不同空间尺度和分辨率的数据。

由于湖泊湿地涉及的范围广、面积大、类型多, 要对所有湖泊湿地进行定位动态监测从理论上讲是不可行的。根据目前湖泊湿地监测的发展趋势, 结合湖泊湿地已有监测基础, 我国湖泊湿地生态系统服务监测应采用宏观监测(运用 3S 技术手段进行大尺度监测)和典型湖泊湿地定位监测相结合的方法(张怀清等 2012)。遥感监测可以确定生态系统服务在时间序列和空间尺度(局部尺度到国家尺

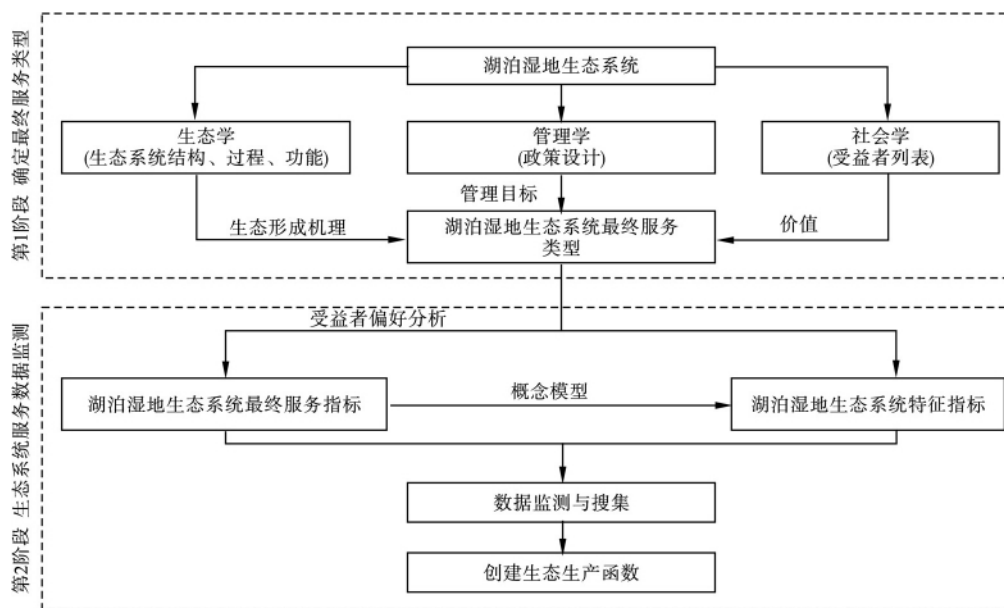


图 2 湖泊湿地生态系统服务监测思路

Fig.2 Framework to monitor lake wetland ecosystem services for creating ecological production function

度)上的变化趋势。相比于定位监测而言,遥感监测可以以相对较低的成本(Ayanu *et al.*, 2012)为决策者揭示不同尺度(局部尺度、区域尺度和国家尺度)的生态系统服务空间可视化评估结果(张立伟等, 2012)。遥感监测可以为生态系统服务监测提供连续的时间序列数据和即时数据(Ayanu *et al.*, 2012)。然而,目前大多数生态系统服务变化趋势的遥感监测研究都基于土地利用/土地覆盖信息,缺乏对湖泊湿地生态系统功能和服务的深入研究。而

选择具有典型意义的湖泊湿地,进行定位监测,可以在宏观监测的基础上对湖泊湿地生态系统服务动态变化进行深入研究,为构建典型案例的湖泊湿地生态系统生产函数,进行区域尺度或全国尺度的湖泊湿地生态系统服务研究提供重要基础。目前,受数据可利用性和生态系统服务认知局限性的影响,我们对生态系统最终服务的理解并不充分,监测方法也很局限,随着知识水平的不断提升和监测技术的不断发展,新监测指标和监测方法将不断被纳入。

表 1 湖泊湿地生态系统功能和生态系统服务指标

Table 1 Indicators for lake wetland ecosystem functions and services

生态系统服务类型		生态系统服务监测指标		
		生态系统功能(中间服务)	服务库	服务流(最终服务)
供给服务	食物供应	淡水产品生产量 ($t \cdot a^{-1}$)	单位面积鱼类资源量 ($kg \cdot hm^{-2}$)	淡水产品捕获量($t \cdot a^{-1}$)
	淡水供给			行业用水量($m^3 \cdot a^{-1}$)
	航运	产水量($m^3 \cdot a^{-1}$)	水源涵养量($m^3 \cdot hm^{-2}$)	航运(客运:人·km; 货运: $t \cdot km$)
	纤维、燃料、原材料	净初级生产量 ($t \cdot a^{-1}$)	总生物量($kg \cdot hm^{-2}$)	纤维、燃料、原材料使用量($t \cdot a^{-1}$)
	医药资源	净初级生产量 ($t \cdot a^{-1}$)	总生物量($kg \cdot hm^{-2}$)	医药资源使用量($t \cdot a^{-1}$)
调节服务	碳汇	净初级生产量 ($t \cdot a^{-1}$)	总生物量($kg \cdot hm^{-2}$)	生态系统净 CO_2 交换量($t \cdot a^{-1}$)
	预防地面沉降	地下水补给量 ($m^3 \cdot a^{-1}$)	湖泊资源、景观要素等	预防地面塌陷(m)
	洪水调蓄	调蓄洪峰量(m^3)	湖泊容积(m^3)	汛期削减洪峰量(m^3)
	水质净化	纳污量($t \cdot a^{-1}$)	湖泊资源、景观要素等	TN、TP、COD、有毒物去除量($t \cdot a^{-1}$)
文化服务	休闲娱乐	鱼类资源量、水体透明度等	湖泊资源、景观要素等	舒适、愉悦等(消费者剩余、旅行支出、时间成本)
	生物多样性和景观美学		湖泊资源、景观要素等	非使用价值
	湖泊文化传承		湖泊资源、景观要素等	非使用价值

表 2 湖泊湿地生态系统最终服务监测指标及数据来源

Table 2 Monitoring indicators, methods, and data sources for final ecosystem services

生态系统最终服务类型		生态系统最终服务监测指标	数据来源及监测方法
供给服务	食物供应	水产、植物、畜牧($t \cdot a^{-1}$)	社会经济统计数据
	淡水供给	行业用水量($m^3 \cdot a^{-1}$)	社会经济统计数据
	航运	客运量(人·km)和货运量($t \cdot km$)	社会经济统计数据
	纤维、燃料、原材料生产	经济植物收割量、砂石供给量($t \cdot a^{-1}$)	社会经济统计数据
	医药资源	医药资源生物量使用量($t \cdot a^{-1}$)	社会经济统计数据
调节服务	空气质量调节	粉尘、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 去除量($t \cdot a^{-1}$)	生态监测数据(大气环境监测)
	气候调节	空气温度差异($^{\circ}C/km$ 或 $^{\circ}C \cdot a^{-1}$)和相对湿度差异($\% \cdot km^{-1}$)	生态监测数据(气象监测)
	洪水调蓄	汛期削减洪峰量($m^3 \cdot a^{-1}$)	生态监测数据(水文监测)
	水质净化	TN、TP、COD、有毒物等污染物去除量($t \cdot a^{-1}$)	生态监测数据(水环境监测)
	栖息地	重要保护栖息地面积(km^2)	生态监测数据(生物监测)
	碳汇	生态系统净 CO_2 交换量($t \cdot a^{-1}$)	生态监测数据(生物监测)
	预防地面沉降	预防地面塌陷(m)	水文地质监测
文化服务	休闲娱乐	旅游人数、年旅行次数(个体)、费用支出(个体)、时间成本(个体)、常住地(出发地)、年收入(个体)、区域总人口数等	社会调查、社会经济统计数据
	生物多样性和景观美学	自己或他人将来利用,作为一份遗产留给子孙后代、确保永远存在	社会调查
	水文化传承	确保永远存在	社会调查

表 3 湖泊湿地生态系统结构和过程监测指标及监测方法

Table 3 Indicators and methods for monitoring lake wetland ecosystem structures and processes

结构指标	过程指标	监测方法
湖泊湿地组成: 水面、草洲、泥滩地、林滩地(丰、枯、平水位)	水文过程: 流量输入、输出过程、淹水规律、淹水历时	宏观监测: 利用 3S 技术, 获取研究区域的湿地类型及面积、生境状况、植被组成等基本信息
湖泊湿地参数: 水深、水位、容积、防洪限制水位和防洪高水位等 水体物理指标: 水温、透明度 水体化学指标: 总氮、总磷、COD、有毒污染物、泥沙有机质含量 气象指标: 温度、湿度、降水、蒸发量、风速、风向、辐射、日照等 水文指标: 径流、含沙量、水位 生物指标: 鱼、鸟类、浮游动物、底栖动物、两栖动物、爬行动物等动物; 浮游植物、挺水植物、沉水植物、浮叶植物等植物; 微生物; 外来入侵物种 土壤理化指标和土壤生物指标 植被格局: 分布、构成、形状 湖泊湿地与受益者位置关系监测	生态系统演替: 格局、群落结构; 初级生产力: 淡水产品、植物 物质流动和转化: 总氮、总磷、COD、有毒污染物等流入、流出; 植物吸收污染物 湿地利用状况监测 湿地周边社会经济状况监测	定期监测: 直接记数法、固定样带法、样点法和 GPS 技术定位监测, 记录鸟类的种类和数量, 计算研究区内鸟类的密度、物种多样性指数、均匀度指数 定期监测: 采用定期抽样调查的方式, 获取固定点不同时间的生物、水质等信息 定位连续监测: 利用气象站、水文监测站监测水文指标和气象指标 重点调查: 对湖泊容积、水深等参数进行重点调查(由于调查难度大、成本高, 间隔时间较长)

5 结论与展望

开展湖泊湿地生态系统服务动态监测及评估, 能揭示湖泊湿地生态系统服务权衡关系及生态系统服务变化驱动因子(如: 湖泊水面面积和水质), 为湖泊湿地生态系统服务优化管理提供基础(图 3)。本文在分析湖泊湿地生态系统服务监测必要性的基础上, 探讨了湖泊湿地生态系统服务监测指标选取原则与思路。本研究对构建湖泊湿地生态系统服务监测指标和开展湖泊湿地生态系统服务动态评估和权衡分析具有重要意义, 是实现生态系统服务与管理决策和政策设计结合的理论前提。然而, 湖泊湿地是一个复杂的生态系统, 一个过程可以产生多项服务, 一个服务也可以由多个过程产生, 当前关于湖泊湿地生态系统服务监测和生态生产函数的研究尚处于起步阶段, 本研究也没有明确确定指标之间的直接关联(湖泊湿地生态特征监测指标和生态系统最终服务监测指标之间的一对多或多对一关系), 存在一定的局限性。为了更好地将湖泊湿地生态系统服务监测数据纳入到管理决策中, 需要深入以下几个方面的研究: (1) 进一步加强湖泊湿地生态系统服务内涵和概念框架等理论研究, 区分湖泊湿地生态系统中间服务和最终服务。(2) 对生态系统服务评估指标的合理性、不确定性、可重复性等进行评价, 为构建标准化的湖泊湿地生态系统服务监测指标提供依据。(3) 进一步完善湖泊湿地生态系统服务评估方法和技术, 提高生态系统服务评估结果的尺度扩展性。(4) 深入探讨湖泊湿地生态系统服务动态评估平台构建思路, 使结果可视化, 为管理决

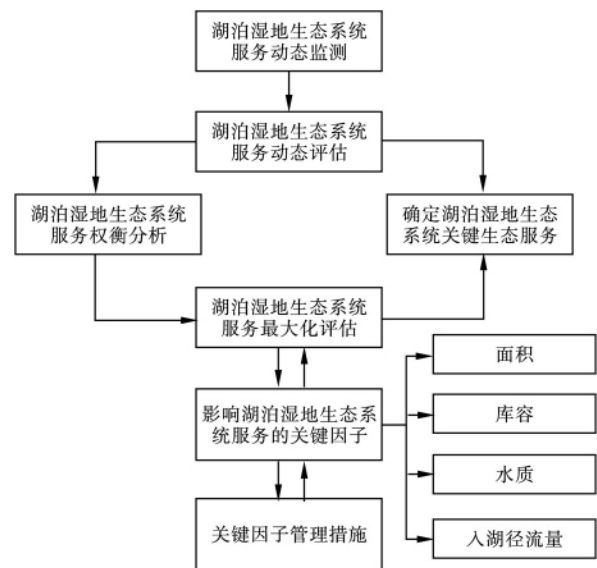


图 3 湖泊湿地生态系统服务评估与管理框架

Fig.3 Framework to regulate key management factors for optimizing ecosystem services for lake wetland management

策提供即时信息。

参考文献

陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 2004. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社.
 崔丽娟. 2004. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 生态学杂志, 23(4): 47-51.
 杜婷婷, 罗维, 李中和, 等. 2012. 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, 22(11): 208-211.
 段晓男, 王效科, 欧阳志云. 2005. 乌梁素海湿地生态系统服务功能及价值评估. 资源科学, 27(2): 110-115.
 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 1999. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社.

- 陆健健, 何文珊, 童春富, 等. 2006. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 吕 磊, 刘春学. 2010. 滇池湿地生态系统服务功能价值评估. 环境科学导刊, **29**(1): 76-80.
- 吕宪国, 李红玉. 2004. 湿地生态系统保护与管理. 北京: 化学工业出版社.
- 邵宁平, 刘小鹏, 渠晓毅. 2008. 银川湖泊湿地生态系统服务价值评估. 生态学杂志, **27**(9): 1625-1630.
- 王凤珍, 周志翔, 郑忠明. 2011. 城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估——以武汉市严东湖为例. 生态学报, **31**(7): 1946-1954.
- 叶小华, 李铁松, 夏训峰, 等. 2009. 升金湖湿地生态系统服务价值评估. 三峡环境与生态, **2**(4): 1-4.
- 郑 华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 2013. 生态系统服务功能管理研究进展. 生态学报, **33**(3): 702-710.
- 庄大昌. 2004. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. 经济地理, **24**(3): 391-394.
- 张怀清, 鞠洪波. 2012. 湿地资源监测技术. 北京: 中国林业出版社.
- 张立伟, 傅伯杰. 2012. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, **34**(2): 316-325.
- Ayanu YZ, Conrad C, Nauss T, et al. 2012. Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: A review of remote sensing applications. *Environmental Science & Technology*, **46**: 8529-8541.
- Bockstael NE, Freeman AM, Kopp RJ, et al. 2000. On measuring economic values for nature. *Environmental Science & Technology*, **34**: 1384-1389.
- Boyd JW. 2007. The endpoint problem. *Resources*, **165**: 26-28.
- Boyd J, Banzhaf S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, **63**: 616-626.
- Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, **21**: 17-19.
- Carpenter SR, DeFries R, Dietz T, et al. 2006a. Millennium ecosystem assessment: Research needs. *Science*, **313**: 257-258.
- Carpenter SR, Folke C. 2006b. Ecology for transformation. *Trends in Ecology and Evolution*, **21**: 309-315.
- Chapin FS III, Matson PA, Mooney HA. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot RS, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253-260.
- Daily GC, Polasky S, Goldstein J, et al. 2009. Ecosystem services in decision making: Time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**: 21-28.
- de Groot RS, Alkemade R, Braat L, et al. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, **7**: 260-272.
- de Groot RS, Brander L, van der Ploeg S, et al. 2012. Global estimates of the value of ecosystem and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, **1**: 51-60.
- Díaz S, Lavorel S, de Bello F, et al. 2007. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**: 20684-20689.
- Feld CK, Sousa JP, da Silva PM, et al. 2010. Indicators for biodiversity and ecosystem services: Towards an improved framework for ecosystems assessment. *Biodiversity and Conservation*, **19**: 2895-2919.
- Fisher B, Turner RK, Zylstra M, et al. 2008. Ecosystem services and economic theory: Integration for policy-relevant research. *Ecological Applications*, **18**: 2050-2067.
- Fisher B, Turner RK, Morling P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, **68**: 643-653.
- Geijzendorffer IR, Roche PK. 2013. Can biodiversity monitoring schemes provide indicators for ecosystem services? *Ecological Indicators*, **33**: 148-157.
- Johnston RJ, Russell M. 2011. An operational structure for clarity in ecosystem service values. *Ecological Economics*, **70**: 2243-2249.
- Kareiva P, Tallis H, Ricketts TH, et al. 2011. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services. New York: Oxford University Press.
- Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, et al. 2010. Using plant functional traits to understand landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, **99**: 135-147.
- Layke C, Mapendembe A, Brown C, et al. 2012. Indicators from the global and sub-global Millennium Ecosystem Assessments: An analysis and next steps. *Ecological Indicators*, **17**: 77-87.
- Layke C. 2009. Measuring Nature's Benefits: A Preliminary Roadmap for Improving Ecosystem Service Indicators. Washington DC: World Resources Institute.
- Le C, Zha Y, Li Y, et al. 2010. Eutrophication of lake waters in China: Costs, causes, and control. *Environmental Management*, **45**: 662-668.
- Liu CL, Xie GD, Huang HQ. 2006. Shrinking and drying up of Baiyangdian lake wetland: A natural or human cause? *Chinese Geographical Science*, **16**: 314-319.
- Loomis DK, Ortner PB, Kelble CR, et al. 2014. Developing integrated ecosystem services. *Ecological Indicators*, **44**: 57-62.
- Lovett GM, Jones CG, Turner MG, et al. 2005. Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes. New York: Springer.
- Lyons KG, Brigham CA, Traut H, et al. 2005. Rare species and ecosystem functioning. *Conservation Biology*, **19**: 1019-1024.
- Ma RH, Duan HT, Hu CM, et al. 2010. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, **37**: 1-6.
- Meyerson LA, Baron J, Melillo JM, et al. 2005. Aggregate measures of ecosystem services: Can we take the pulse of

- nature? *Frontiers in Ecology and the Environment* , **3**: 56–59.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) . 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington DC: Island Press.
- Nahlik AM , Kentula ME , Fennessy MS , et al. 2012. Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics* , **77**: 27–35.
- National Research Council (NRC) . 2005. Valuing Ecosystem Services: Toward Better Environmental Decision-Making. Washington DC: National Academies Press.
- Nedkov S , Burkhard B. 2012. Flood regulating ecosystem services: Mapping supply and demand , in the Etropole municipality , Bulgaria. *Ecological Indicators* , **21**: 67–79.
- Niemi GJ , McDonald ME. 2004. Application of ecological indicators. *Annual Review of Ecology , Evolution and Systematics* , **35**: 89–111.
- Polasky S , Segerson K. 2009. Integrating ecology and economics in the study of ecosystem services: Some lessons learned. *Annual Review of Resource Economics* , **1**: 409–434.
- Reyers B , Biggs R , Cumming GS , et al. 2013. Getting the measure of ecosystem services: A social-ecological approach. *Frontiers in Ecology and the Environment* , **11**: 268–273.
- Ringold PL , Boyd J , Landers D , et al. 2013. What data should we collect? A framework for identifying indicators of ecosystem contributions to human well-being. *Frontiers in Ecology and the Environment* , **11**: 98–105.
- Stürck J , Poortinga A , Verburg PH. 2014. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators* , **38**: 198–211.
- Tallis H , Mooney H , Anadelman S , et al. 2012. A global system for monitoring ecosystem service change. *Bioscience* , **62**: 977–986.
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) . 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. London: Earthscan.
- Tong CF , Feagin RA , Lu JJ , et al. 2007. Ecosystem service values and restoration in the urban Sanyang wetland of Wenzhou , China. *Ecological Engineering* , **29**: 249–258.
- Turner RK , Daily GC. 2008. The ecosystem service framework and natural capital conservation. *Environmental and Resources Economics* , **39**: 25–35.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) . 2009. Valuing the Protection of Ecological Systems and Services. Washington DC: United States Environmental Protection Agency.
- Wong CP , Jiang B , Kinzig AK , et al. 2015. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy. *Ecology Letters* , **18**: 108–118.
- Xu FL , Tao S , Dawson RW , et al. 2001. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods. *Water Research* , **35**: 3157–3167.
- Zhang Y , Wang GX , Wang YB. 2011. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan plateau from 1967–2004. *Environmental Monitoring and Assessment* , **180**: 189–199.
-
- 作者简介 江波男,1985年生,博士,主要研究方向为湿地生态系统服务评价,已发表论文20篇以上。E-mail: jbshuibao415a@126.com
- 责任编辑 魏中青
-