

基于管理目标的湖泊生态系统动力学

刘 永¹, 周 丰¹, 郭怀成^{1,*}, Liu Lei²

(1. 北京大学环境学院环境科学系, 北京 100871; 2. Department of Civil Engineering, Dalhousie University, Halifax, NS B3J 1Z1 Canada)

摘要: 基于生态系统管理的目标, 在对相关研究分析的基础上, 依据生态系统生态学、淡水生态学的理论, 提出了湖泊生态系统动力学研究的 2 个理论基础: 生态系统管理和生态系统特征。在此基础上, 分析得到湖泊生态系统动力学的研究方法体系, 主要包括研究内容与技术路线、关键问题识别和动力学模拟、湖泊生态系统的适应性管理决策等部分。其中, 湖泊生态系统结构和过程、湖泊中食物网营养动力学研究、生源要素循环、湖泊中关键过程的生态作用以及湖泊生态系统动力学模拟是研究的核心问题。此后, 以 P 为主要的生源要素, 将生态系统分为 3 个子过程: 入流、出流和内部反馈, 并以此建立了湖泊生态系统动力学的模型框架, 以辅助于湖泊的生态系统管理。

关键词: 生态系统动力学; 湖泊; 生态系统管理; 模拟; 食物网

文章编号: 1000-0933(2006) 10-3434-08 **中图分类号:** Q148, Q178 **文献标识码:** A

Management-oriented characterization of lake ecosystem dynamics

LIU Yong¹, ZHOU Feng¹, GUO Huai-Cheng^{1,*}, LIU Lei² (1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Department of Civil Engineering, Dalhousie University, Halifax, NS B3J 1Z1 Canada). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3434~3441.

Abstract: Over the past two decades, deterioration of lake ecosystems associated with rapid socio-economic development in China has acquired much attention by the public and the government. As a result, effective management for lake ecosystems is desired in response to this increasing concern and stress. Lake ecosystem management practices can be significantly improved through better understanding of lake ecosystem dynamics which is one of the fundamental disciplines in ecological dynamics. Previously, extensive efforts have been placed on the examination of ecological dynamics within ocean, forest and grassland systems as well as its application to the relevant ecosystem management. However, very few studies have been reported on the ecological dynamics of lake systems. As an extension of previous efforts on ecosystem dynamics studies, this paper focuses on the management-oriented characterization of dynamics in lake ecosystem in order to improve the overall quality of lake ecosystems and sustain a healthy lake ecosystem condition. Based on the fundamental theories from ecosystem ecology and aquatic ecology, the characterization of lake ecosystem dynamics in this study begins with identification of major characteristics of lake ecosystem, including holism, dissipative structure, ecosystem health and services, followed by the examination of practical measures for restoring structure and function of lake ecosystems. Modeling of lake ecosystem dynamics is then conducted to reflect crucial dynamics factors and simulate various processes in lake ecosystem, such as mass inflow and outflow, system structure, food chains and network, nutrimental dynamics, internal nutrient circulation, and their ecological effects. The modeling results could be used to assist lake authorities in making lake-related decisions. In order to reflect system complexities, adaptive management measures can be incorporated into the practical management activities. It is observed from this study that characterization of lake ecosystem dynamics could not only help scientists, engineers, and planner better understand complexity of lake ecosystem and interactions among system components from

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA601021)

收稿日期: 2005-07-01; **修订日期:** 2006-02-05

作者简介: 刘永 (1980~), 男, 河南南阳人, 博士生, 主要从事水生态学与流域生态系统管理研究. E-mail: yongliu@pku.edu.cn

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: hcguo@pku.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA601021)

Received date: 2005-07-01; **Accepted date:** 2006-02-05

Biography: LIU Yong, Ph. D. candidate, mainly engaged in aquatic ecology and ecosystem management. E-mail: yongliu@pku.edu.cn

a systematic standpoint, but also help local authorities enhance their management capabilities and thus improve their management practices.

Key words: ecosystem dynamics; lake; ecosystem management; modeling; foodweb

目前,湖泊富营养化和生态退化已成为全球所共同面临的重要环境问题。为恢复和维持湖泊生态服务功能的可持续性,需对其采取适宜的管理策略,而基于生态学理论的生态系统管理模式则无疑是一个最佳的选择。与传统管理模式不同的是,生态系统管理更关注湖泊生态系统的内部动力学过程及其在外来影响下的反馈机制,并以此来制定适应性的管理策略。

作为生态动力学^[1]的重要内容,生态系统动力学目前已经应用于海洋^[2~8]、海湾^[9]、森林^[10,11]、草原^[12,13]、河流^[14,15]、湿地^[1]等领域。此外,还有部分研究将熵等热力学和信息论概念引入生态系统中,探讨系统的演替模式及其时空分布特征^[16,17]。就湖泊生态系统动力学研究而言,在国际上形成了以 USEPA、LEC 和 ISEM 等为协调机构为中心的研究群体,如:美国 NOAA 下属的 CLERL、荷兰 University of Amsterdam 的 IBED、澳大利亚 University of Western Australia 的 CWR、瑞典 Uppsala University 的 Håkanson 研究组、荷兰 WL | Delft Hydraulics 等。而在国内,主要的关注焦点在于少数几个富营养化严重的湖泊^[18]。

与其他水域比较而言,湖泊生态系统动力学研究无论是在概念,还是在研究方法体系上均处于起步阶段,且尚未形成一个比较完整的体系^[19,20]。目前的研究也多集中在污染和藻类^[18]等特殊和局部问题上,缺乏从系统性和整体性角度的分析,因而为生态系统管理所提供的决策支持也相对有限。为服务于湖泊的生态系统管理,本文从系统性入手,提出了湖泊生态系统动力学研究的理论基础和研究方法,对其相关内容和过程进行分析,即生态系统自身的动态变化趋势及其对外源物质输入的适应性,并以此为基础建立了模型以服务于湖泊的生态系统管理。

1 管理目标与湖泊生态系统动力学的关系分析

湖泊的生态系统管理要达成一些基本目标,如:控制外来胁迫的影响,恢复和维持湖泊生态系统的结构和功能以及满足人类对湖泊服务功能的需求等。为此,需以生态系统的整体性为出发点对湖泊进行诊断、恢复和管理,分析影响湖泊生态系统变化的外部环境、作用机理以及在此情况下生态系统的响应,也即动力学机制。其中,外部环境是湖泊生态系统变化的驱动因素,主要表现在入湖污染物的增加、不合理的水资源开发、湖滨带退化以及人为调节水位和改变湖泊物种组成等^[19,20]。但这种驱动机制仍需通过系统内部的作用而表现出来,因此本文将重心放在湖泊生态系统的动力学分析上,外部环境作为影响因素而纳入其中。

2 理论基础

系统分析是湖泊生态系统研究的重要理论基础^[18],在研究基于管理目标的动力学机制时,需将淡水生态学^[19,20]以及生态系统生态学^[21]等相关理论纳入研究的体系中。依照生态系统生态学的理论^[21],湖泊具有整体性、层级性和耗散性的系统特征,通过系统内外的物质和能量传递来维系其结构的整体性和健康性,进而实现其作为一个完整系统所能提供的服务功能^[25];而从淡水生态学的角度分析,湖泊生态系统的演替和变化则会受制于外部环境的变化,并依托于其内部的结构和过程来完成^[19,20]。湖泊生态系统的管理应该基于对上述特征、结构和过程的理解,并从系统性的角度分析和制定管理策略。由此,本文的研究有两个理论基础:湖泊生态系统特征和湖泊生态系统管理^[22],二者虽处于不同的层次,但有内在的联系,生态系统特征是实施生态系统管理的重要基础和依据。

2.1 湖泊生态系统特征

生物和非生物是湖泊生态系统的基本组成要素,它们内部以及之间的相互影响决定了湖泊生态系统的结构和功能。湖泊生态系统具有多方面的基本特征^[21],就生态系统管理的目标而言,整体性、层级性、耗散性、生态系统服务功能和生态系统健康等是其中最为重要的方面。

整体性和层次性表现在湖泊是一个由生物群落与非生物环境组成,并通过食物网联系在一起生态系

统^[21]。系统各组分间通过相互反馈作用来共同应对外部环境变化所产生的影响,从而维系着湖泊生态系统的平衡^[23]。当然,整体性并非意味着对所有的系统要素均纳入研究的范畴中去,而是要根据湖泊生态系统的结构、功能以及研究的目的进行筛选。以生源要素(C、N和P)为例,就需根据对营养限制因子的判断来筛选研究重点。

系统的开放性和非线性决定了其耗散性,湖泊生态系统总是在外界的扰动下演替和发展,并通过与外界的物质和能量交换来维持自身的平衡,因此在研究其动力学时,需对湖泊物质的输入和输出加以考虑。

湖泊生态系统的服务功能^[21]反映了湖泊对于自身以及人类的价值,是湖泊生态系统及其生态过程所形成的,主要表现在产品提供、调节功能、文化功能和生命支持功能等方面^[24],是制订管理目标以及联系湖泊生态系统基本特征和管理策略的纽带。

作为实施生态系统管理的重要参考,尽管生态系统健康是一个人为化的概念,但它反映了人类对湖泊进行管理并维持其服务功能的需求,因此仍具有非常重要的价值。就本文研究的对象和目的而言,主要有6个方面的含义:自我平衡、没有病征、多样性、有恢复力、有活力和能保持系统组分间的平衡^[25],是湖泊生态系统保持健康并实现其服务功能的基础。

2.2 湖泊生态系统管理

生态系统管理是将整个环境考虑在内的过程,通过对系统内部组成、结构、过程和功能的研究,以及对输入和输出的调控来达到社会的需求和管理目标^[22]。湖泊生态系统管理在于加强对生态系统特征的充分理解,并在一定的时空尺度范围内将人类价值和社会经济条件整合到生态系统管理中,以恢复或维持生态系统的整体性和可持续性^[26]。对于湖泊而言,对结构和功能的理解,以及对其进行恢复与维持是实施生态系统管理的最核心要素。

3 研究方法

本文在分析上述研究的基础上,尝试性地提出湖泊生态系统动力学的研究内容与技术路线、关键问题识别以及动力学模拟,以期开展相关研究提供借鉴。当然,鉴于本文的管理目标导向,因此研究主要针对系统层次的动力学进行分析,而非个体营养动力学。

3.1 研究内容与技术路线

湖泊生态系统动力学主要是对湖泊生态系统的结构、物质能量流动过程及其在内外因素影响下所发生的变化进行研究。研究的着重点在于生态系统的结构、功能及其时空演变机理与规律,以及湖泊外部环境(物理、化学、生物过程)对水生生态系统的影响及其反馈机制,并在此基础上预测其动态变化,以反映湖泊在内外要素发生变化情况下的适应性,分为6个方面:①外部驱动因素分析;②生态系统结构、生产力、环境容量以及生态容纳量的计算和分析;③关键物理和化学过程研究;④食物网、微食物网营养动力学研究;⑤生态系统动力学模型研究;⑥生态系统健康评估,主要是健康的含义及其评价方法,并在动力学模拟的基础上对健康状态的变化进行定量研究。

根据对研究内容的分析,湖泊生态系统动力学研究主要应涵盖4方面的特征:①基于生态系统整体性所表现出的系统特征;②与湖泊水文相关的物理特征;③与营养物质转化相关的化学特征;④与浮游动植物、细菌、底栖生物等相关的生物特征。

依据研究的目的和内容,本文认为湖泊生态系统动力学研究的技术路线可分为3个主要的步骤:数据收集、湖泊生态系统动力学分析、湖泊生态系统动力学模拟及管理策略(图1)。

3.2 关键问题识别

根据研究的理论基础、主要内容和应用范畴,湖泊生态系统动力学主要关注4方面的关键问题:湖泊生态系统的结构与过程、食物网营养动力学研究、生源要素循环、关键过程的生态作用以及湖泊生态系统的动力学模拟。其中,在对湖泊生态系统基本特征和食物网分析的基础上,选择核心生源要素对生态系统的动力学过程进行模拟,是辅助于管理决策的核心步骤,也是目前研究的核心问题,并可为实施湖泊生态修复、生物操纵

等技术和措施提供直接依据。

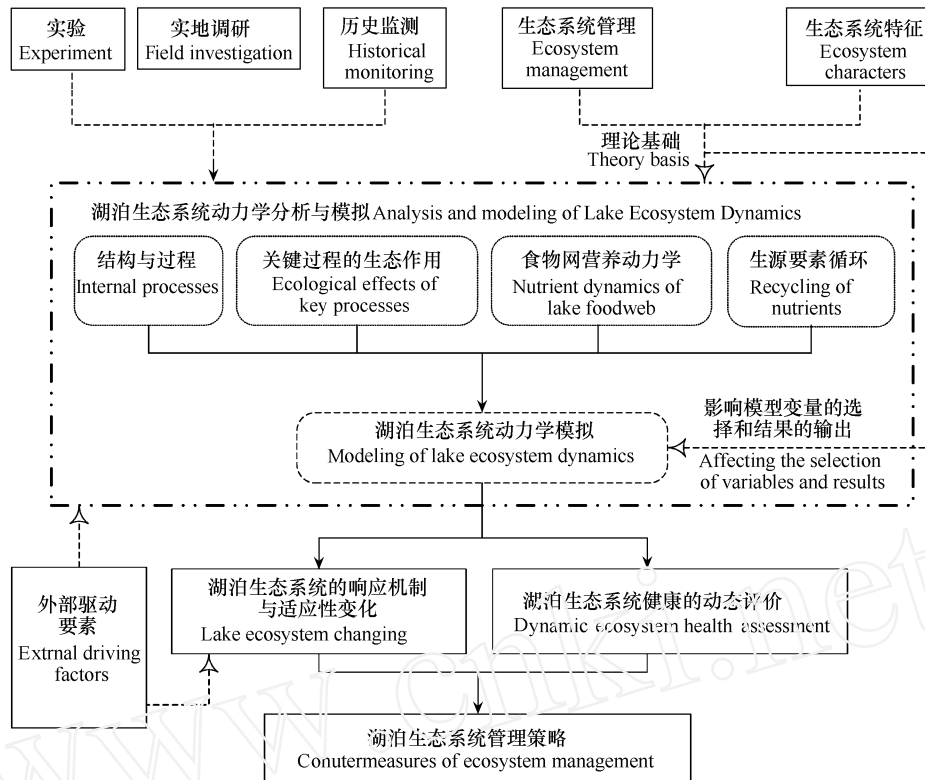


图1 基于生态系统管理的湖泊生态系统动力学研究技术路线

Fig. 1 The technical approach for lake ecosystem dynamics based on ecosystem management

(1) 湖泊生态系统的结构与过程 结构与过程是生态系统研究的核心^[23],在湖泊中,营养、空间、时间和层次是4个重要的结构,营养和层次结构反映了物质在湖泊生态系统中的循环过程,是建立湖泊生态系统动力学模型的基础。与上述结构相对应,湖泊中存在着很多重要的生态过程,如:光合作用、水生生物的呼吸与捕食、生源要素的沉降与矿化、硝化与反硝化以及底泥释放等,均会对湖泊生态系统的组成和发展产生影响,湖泊生态系统动力学模拟的过程选择则主要是建立在这些过程的分析基础之上的。因此,研究湖泊生态系统的结构与过程,就是要对食物网关系、营养物质和生物群落在水平和垂直方向上的变异特征^[27]以及空间生态位和时空尺度^[28]等进行监测,并以此对湖泊生态系统的动力学机制进行分析。

(2) 湖泊中食物网营养动力学研究 食物网营养动力学研究的基础是分析其基本结构,并实测物流和能流的转换关系,计算关键种的生态转换效率,确定湖泊中的主要营养关系。这些研究也可借助一些专门的软件,如 ECOPATH^[16,18],来辅助完成。在此基础上,分析人类活动对生物资源的影响,如:水质变化和渔业发展对生物物种及其数量的影响。由于目前对藻类等微型生物的关注程度日益增加,微食物网的研究也逐渐成为新的研究热点^[27]。

(3) 生源要素的循环 分析生源要素的循环对于建立生态系统动力学模型至关重要,主要的研究内容包括:①生源要素在水体和沉积层中的形态分布及循环过程;②湖泊水温分层、水动力对生源要素循环的影响;③估算不同营养水平下湖泊的内源负荷通量,尤其是沉积物—上覆水的物质传输和交换^[19,29]。在生源要素的选择上,大多以P为主要研究对象,如:滇池、太湖^[25]、北美五大湖^[18]等,研究的核心大多是分析在外源P输入量变化的情况下,湖泊生态系统的结构变化及其应对策略。

(4) 关键过程的生态作用 外部环境,如:流域发展而引起的污染物输入、湖滨带破坏以及由于流域内土地利用格局调整而引起的水文和土壤侵蚀变化等,都会给湖泊生态系统的变化带来重大影响。此外,湖泊中

的一些关键过程,如:水动力扰动、热分层、混合以及水位变动等,也会对湖泊生态系统的组成产生影响。主要表现在,一方面它们通过影响不同种群在水体中的空间分布来直接改变生态系统的结构和组成,而另一方面又依靠对生源要素时空分布的差异性来达到对生态系统的间接影响。因此对于面积较大的湖泊,需采取对湖泊分区^[27]来解决这类问题。

3.3 湖泊生态系统动力学模拟

湖泊生态系统动力学过程的研究为管理决策提供了必要的参考,但对于制订管理策略而言,仍需在动力学研究的基础上提供部分定量化的决策依据,模型是目前常用的决策辅助工具。根据湖泊生态系统管理的目标,需要在如下方面开展动力学模拟研究:①模拟和预测湖泊在现有条件下的生态系统变化,并通过动态的生态系统健康评价^[30]等方法来衡量湖泊的未来发展趋势;②通过对生态修复工程、生物操纵技术等预期效果的模拟^[31,32]来为相关决策的制订提供参考;③湖泊的变化主要受制于流域对其的输入和输出的影响,因此需将湖泊生态系统动力学模型同流域的经济模型和污染物传输模型,如:流域场和非点源模拟模型结合,分析在流域土地利用、产业结构调整^[33]等变化下湖泊的生态系统状态变化^[34]。由于目前在相关知识上的不足,以及对水生生物之间关系和微生物在生态系统中的作用等方面理解上的局限性,尚无法建立一个精确的湖泊生态系统动力学模型^[28],但以湖泊为整体建立服务于生态系统管理的模型仍然是可行的,并可为相关的管理活动提供参考。

由于服务于管理的目标导向,本文所阐释的模型并非对所有涉及到的过程和结构均进行描述,而主要是从系统的整体性出发,对关系生态系统管理的核心要素进行定量阐释^[28]。依据湖泊的生态系统特征分析,结合前述关键问题建立湖泊生态系统动力学模型,模型将遵循质量平衡方程,并主要考虑生源要素在湖泊中的物理输移扩散、生化反应以及源、汇等重要生态过程^[18,28],分为如下4个步骤:

(1) 依据管理目标和湖泊生态系统的特征分析,识别出状态变量和模拟的生源要素 浮游动植物、藻类、鱼类、沉积物等是湖泊中重要的组成要素,也是动力学模拟中可供选择的状态变量。依据管理目标的不同,选择不同的状态变量和需纳入模型中的生源要素。对于我国的大部分湖泊而言,富营养化是目前面临的最迫切的问题,且多数以P为限制性因子。据此,根据富营养化治理的管理目标,建立的湖泊生态系统动力学模型就需主要选用P为核心生源要素,本文下面的分析也主要是以P为基础展开的。但根据我国目前的水环境监测现状,除了几个湖泊(如太湖)外,其它都尚缺乏系统和细致的湖泊监测,限制了模型中对P形态的细化,因此在模拟中建议选用溶解态(DP)和颗粒态有机P(OP)以及颗粒态无机P(IP),通过对其循环过程的模拟为管理提供支持。

(2) 模拟过程的选择 依据对所研究湖泊的生态系统特征分析,结合湖泊中的食物网结构、重要的生态过程和生源要素循环过程等的分析,选择需纳入模型中的模拟过程。就目前的管理而言,主要是通过对输入和输出过程的控制来改变湖泊中的生源要素含量,并以此影响湖泊生态系统的结构,从而进一步改变其健康状况和服务功能。为此,确定模拟的3个核心过程:入流、出流和内部反馈^[35,36](表1),对其他过程可相应简化。与一般的生态系统动力学模型相比,基于管理目标的模型更为关注湖泊内部结构与外源输入和输出的关系,对状态变量和生源要素的选择更关注于解决实际存在的问题,并根据模型的结果来制定管理策略。

(3) 模拟过程的数学表达 就上述的大部分模拟

表1 湖泊生态系统动力学模型的模拟过程

Table 1 The simulation processes in modeling the lake ecosystem dynamics	
模拟过程 Simulating processes	主要过程描述 Detailed processes
入流 Inflow (I): 非点源输入 nonpoint sources (I ₁)、点源输入 point sources (I ₂)、其他 other (I ₃)	I ₁ : 径流输入 surface runoff, 湖面降雨、降水 atmospheric deposition; I ₂ : 城市排污河道入湖, 直接点源入湖(如: 企业直排) direct pollutant loading; I ₃ : 人为的营养物质投放(如: 投饵) artificial nutrients adding
出流 (II) Outflow	II ₁ : 河道输出 river outflow; II ₂ : 水资源输出 water resource development; II ₃ : 水生生物输出 outflow of aquatic botanies
内部反馈 (III) Internal recycling	III ₁ : 植物吸收 uptake, III ₂ : 浮游动物捕食 grazing by zooplankton, III ₃ : 鱼类捕食 grazing by fish, III ₄ : 沉积物的释放 sediment resuspension, III ₅ : PP 沉降 PP settling, III ₆ : PP 转化为 DP mineralization, III ₇ : 动植物捕食中的 P 损失 grazing and predation loss

过程而言,已有较多的研究和数学方程对其进行了分析^[8,18,27,28]。而对于过程 III₄ 而言,由于沉积物中 P 的含量非常小,尽管目前应用了较为成熟的化学连续提取法进行监测,但仍制约了数据的精度,又加之对过程 III₄ 的 P 交换机制了解相对有限,影响了对它的量化。

在目前的监测精度下,考虑到氧条件对过程 III 的重要性,可将底泥自上而下分为 3 层:好氧层(L_a)、厌氧层(L_{an})和稳定层(L_d)。 L_a 的厚度常取 0.5cm 左右, L_{an} 取好氧层下 10cm 左右,而 L_d 则只考虑其净沉积^[27]。在此条件下,将 III 细分为 5 个子过程(图 2)^[27,37~39]。

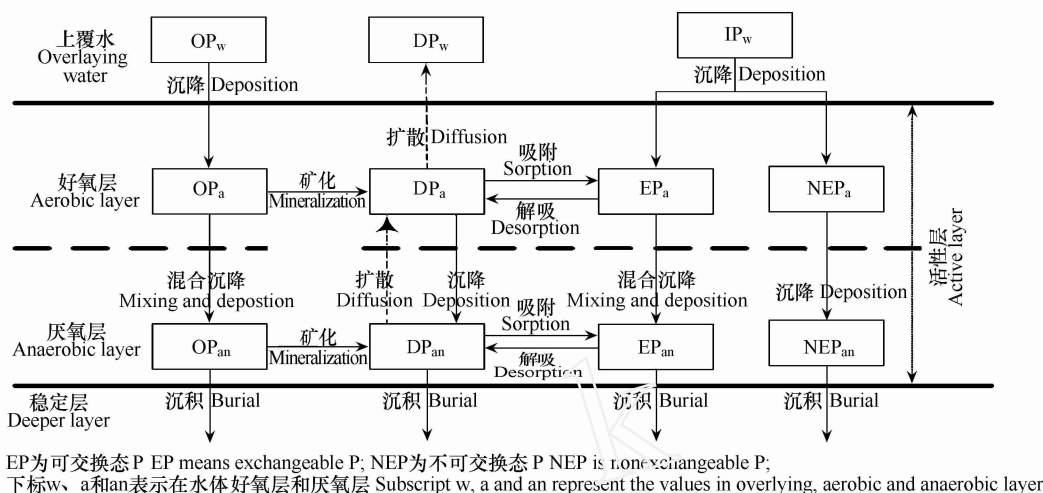


图 2 沉积物中 P 的形态与变化

Fig. 2 The circulation of phosphorus in the sediments

限于篇幅,仅以好氧层中 OP 的浓度变化为例说明:

$$\frac{d[OP_a]}{dt} = \frac{[OP_s]}{0.5z/v_{OP}} - \frac{J_{OP,a-an}}{z} - R_{OP_a} \cdot [OP_a] - \frac{v_{s,a}[OP_a]}{z} \quad (1)$$

式中, $[OP_a]$ 和 $[OP_s]$ 分别是 L_a 与上覆水中的 OP 浓度 (mg/L); t 为时间 (s); z 为 L_a 厚度; v_{OP} 是上覆水中 OP 的沉降速率 (m/s); $J_{OP,a-an}$ 表示 L_a 与 L_{an} 间扩散的 OP 通量 ($g/(m^2 \cdot s)$); R_{OP_a} 是 OP 的分解速率 (s^{-1}); $v_{s,a}$ 是 L_a 中颗粒物的沉积速率 (m/s)。

(4) 模型验证与求解 模型求解是服务于管理决策的重要环节,根据历史监测和相关研究对参数进行估值,并求解模型方程,完成有效性检验和灵敏度分析,最后经过证实后完成模型的建立^[28]。目前已有一些模型软件可辅助完成对湖泊生态系统的模拟,如:WASP、CE-QUAL-ICM、AQUATOX、Pamolare^[18]。由于它们针对的对象和模拟的过程不同,因此需要在应用时加以筛选和调整。

3.4 湖泊生态系统的适应性管理决策

通过对湖泊生态系统特征的分析,并依据模拟结果,可对湖泊未来的发展趋势进行预测,分析此情况下的生态系统健康状况变化。将上述结果与管理目标对比,可制定出管理策略。模拟湖泊生态系统在不同的外源输入下的变化趋势和响应机制,以此建立不同的管理方案。此外,为解决生态系统的复杂性和模型预测中的不确定性问题,需采用适应性的管理方式,以弥补目前在相关理解上的不足,并使得管理决策能够保持灵活性和适应性^[40]。

4 结论

(1) 生态系统动力学研究是湖泊生态系统管理的重要技术支撑,生态系统管理、生态系统特征是其研究的理论基础。

(2) 湖泊生态系统的结构、物质能量流动过程及其在内外因素影响下所发生的变化是湖泊生态系统动力

学研究的重要内容;湖泊生态系统的结构与过程、湖泊中食物网营养动力学研究、生源要素循环、关键过程的生态作用以及湖泊生态系统的动力学模拟是湖泊生态系统动力学研究的 5 个关键问题。

(3) 湖泊生态系统动力学的模拟要从系统的整体性出发,对关系生态系统管理的核心要素进行定量阐释,分 4 步实施:依据管理目标和湖泊生态系统的特征分析,识别出状态变量和模拟的生源要素;模拟过程选择;模拟过程的数学表达;模型验证与求解。模拟结果可用于分析和预测湖泊生态系统在外界不同变化下的反应,并借助于其他方面的研究结果,进而为辅助实施适应性的生态系统管理对策提供帮助。

(4) 为服务于管理目标的实现,未来尚需在如下方面开展深入研究:加强湖泊生态系统的监测、建立更为精确和小尺度的湖泊生态系统动力学模型、湖泊生态系统的响应机制研究、湖泊生态系统健康及其评价研究、湖泊生态系统的适应性管理研究等。

References:

- [1] Pei T F, Yu X M, Jin C J, *et al.* Ecological Dynamics. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] Wiebe P H, Beardsley R C, Mountain D G, *et al.* Global ocean ecosystem dynamics- Initial program in northwest Atlantic. Sea Technology, 1996, 37 (8): 67~76.
- [3] Wu Z M, Yu G Y. research advances and basic features of the marine ecosystem dynamical models. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(1): 13~18.
- [4] Tang Q S, Fan Y B, Lin H. Initial inquiring into the development strategy of Chinese ocean ecosystem dynamics research. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(2): 160~168.
- [5] Guan Y P, Gao H W, Feng S Z, *et al.* Basic views of ocean ecosystem dynamics. Advance in Earth Sciences, 1997, 11(5): 447~450.
- [6] Tang Q S, Su J L. Chinese Marine Ecosystem Dynamics I. Beijing: Science Press, 2000.
- [7] Su J L, Tang Q S. Chinese Marine Ecosystem Dynamics II. Beijing: Science Press, 2000.
- [8] Chen C S. Marine Ecosystem Dynamics and Modeling. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [9] Ulanowicz R E, Baird D. Nutrient controls on ecosystem dynamics: the Chesapeake mesohaline community. Journal of Marine Systems, 1999, 19 (1-3): 159~172.
- [10] Yarie J. Boreal forest ecosystem dynamics I. A new spatial model. Canadian Journal of Forest Research/Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 2000, 30 (6): 998~1009.
- [11] Charles J K, Stan B, Rudy B. Ecosystem dynamics of the boreal forest: the Klwane project. New York: Oxford University Press, 2001.
- [12] Gao Q, Yu M, Li C P, *et al.* Effects of ground water and harvest intensity on alkaline grassland ecosystem dynamics-a simulation study. Plant Ecology, 1998, 135 (2): 165~176.
- [13] Wang G L, Eltahir E A B. Ecosystem dynamics and the Sahel drought. Geophysical Research Letters, 2000, 27 (6): 795~798.
- [14] Yarie J, Viereck L, Van Cleve K, *et al.* Flooding and ecosystem dynamics along the Tanana River — Applying the state-factor approach to studies of ecosystem structure and function on the Tanana river floodplain. Bioscience, 1998, 48 (9): 690~695.
- [15] Graening G O, Brown A V. Ecosystem dynamics and pollution effects in an Ozark cave stream. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39 (6): 1497~1507.
- [16] Hauhs M, Lange H. Ecosystem dynamics viewed from an endoperspective. The Science of the Total Environment, 1996, 183(1-2): 125~136.
- [17] Ulanowicz R E. Some steps toward a central theory of ecosystem dynamics. Computational Biology and Chemistry, 2003, 27(6): 523~530.
- [18] Liu Y, Gao H C, Fan Y Y, *et al.* Research advance on lake ecosystem dynamic models. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1169~1175.
- [19] Secretariat on studies of lake and watershed. Research advances on lake and the watershed studies. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(4): 289~300.
- [20] Liu J K, Tang T. Aquatic ecology. In: Li W H, Zhao J Z eds. Research Advances in Ecology. Beijing: Meteorological Press, 2004. 336~346.
- [21] Cai X M. Ecology of Ecosystem. Beijing: Science Press, 2000.
- [22] Vogt K, Gordon J, Wargo J. Ecosystems: balancing science with management. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [23] Liu J K. Advanced Hydrobiology. Beijing: Science Press, 1999.
- [24] Ou Yang Z Y, Zhao T Q, Wang X K, Miao Hong. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (10): 2091~2099.
- [25] Constanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: Costanza R, Bryan G N, Benjamin D H eds. Ecosystem health: new goals for environmental management. Washington D. C., Island Press, 1992. 239~256.
- [26] Ren H, Wu J G, Peng S L, *et al.* Concept of ecosystem management and its essential elements. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 455~458.

- [27] Qin B Q. Process and mechanism of environmental changes of the Taihu Lake. Beijing: Science Press, 2004.
- [28] Jørgensen S E. Fundamentals of ecological modelling (3rd edition). New York: Elsevier Science, 2003.
- [29] Wang H, Adhityan A, John S G. Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments: Fmodel development. Water Research, 2003, 37 (16): 3928~3938.
- [30] Xu F L, Jørgensen S E, Tao S, *et al.* Modeling the effects of macrophyte restoration on water quality and ecosystem of Lake Chao. Ecological Modeling, 1999, 117(1-2): 239~260.
- [31] Håkanson L, Viktor V B. The lake foodweb: modelling predation and abiotic/biotic interactions. Leiden: Backhuys Pub, 2002.
- [32] Zhang J J, Jørgensen S E, Tan C O, *et al.* A structurally dynamic modelling - Lake Mogan, Turkey as a case study. Ecological Modeling, 2003, 164 (2-3): 103~120.
- [33] Güleralp B, Barlas Y. Dynamic modelling of a shallow freshwater lake for ecological and economic sustainability. Ecological Modelling, 2003, 167(1-2): 115~138.
- [34] Donald Scavia, Andrew Robertson. Perspectives on lake ecosystem modeling. Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science Publishers, 1979.
- [35] Håkanson L, Carlsson L. Fish farming in lakes and acceptable total phosphorus loads: calibrations, simulations and predictions using the LEEDS model in Lake Southern Bullaren, Sweden. Aquatic Ecosystem Health Management, 1998, 1: 9~22.
- [36] Håkanson L, Viktor V. Boulion. A general dynamic model to predict biomass and production of phytoplankton in lakes. Ecological Modelling, 2003, 165(2-3): 285~301.
- [37] Park R A, Clough J S. Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems volume 2: technical documentation. U. S. EPA, 2004.
- [38] Bailey M C, Hamilton D P. Wind induced sediment resuspension: A lake-wide model. Ecological Modelling, 1997, 99 (2-3): 217~228.
- [39] Chapra S C. Surface Water-Quality Modeling. New York: McGraw-Hill, 1997. 295~315.
- [40] Christensen N L, Bartuska A M, Brown J H, *et al.* The Report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. Ecological Applications, 1996, 6(3): 665~691.

参考文献:

- [1] 裴铁瑞, 于系民, 金昌杰, 等. 生态动力学. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 吴增茂, 俞光耀. 海洋生态系统动力学模型的基本特征及其研究进展. 地球科学进展, 1996, 11(1): 13~18.
- [4] 唐启升, 范元炳, 林海. 中国海洋生态系统动力学研究发展战略初探. 地球科学进展, 1996, 11(2): 160~168.
- [5] 管玉平, 高会旺, 冯士筌, 等. 海洋生态系统动力学浅说. 地球科学进展, 1997, 12(5): 447~450.
- [6] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究 I. 关键科学问题与研究发展战略. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 苏纪兰, 唐启升. 中国海洋生态系统动力学研究 II. 渤海生态系统动力学过程. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [18] 刘永, 郭怀成, 范英英, 等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1169~1175.
- [19] 湖泊及流域学科发展战略研究秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望. 湖泊科学, 2002, 14(4): 289~300.
- [20] 刘建康, 唐涛. 淡水生态学. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 336~346.
- [21] 蔡晓明. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2000. 20~37.
- [23] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 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. 生态学报, 2004, 24(10): 2091~2099.
- [26] 任海, 邬建国, 彭少麟, 等. 生态系统管理的概念及其要. 应用生态学报, 2000, 11(3): 455~458.
- [27] 秦伯强. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.