

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.005

浅水湖泊稳态转换模型 PCLake 研究进展

张笑欣,于瑞宏,张宇瑾,李凌宇

(内蒙古大学环境与资源学院,内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:总结了能够全面模拟浅水湖泊生物及非生物过程的 PCLake 模型的发展历程、技术框架、适用性及局限性,从营养盐转换阈值、气候变化、生物操纵等 3 方面详述了 PCLake 模型的研究进展,并针对 PCLake 模型优势及存在问题,结合当前研究热点,展望了该模型未来发展趋势:开发全球尺度规模以及更易于使用且更灵活的模型,涵盖更多湖泊特征,形成多种组合,用于稳态转换阈值及预警识别,将敏感性分析、不确定性分析等功能嵌套于模型,提高模型的模拟精度。

关键词:浅水湖泊;稳态转换;阈值判定;PCLake 模型;气候变化;生物操纵

中图分类号:P343.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)03-0019-06

Progress in research of regime shift model PCLake for shallow lakes

ZHANG Xiaoxin, YU Ruihong, ZHANG Yujin, LI Lingyu

(College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: The PCLake model can comprehensively simulate biotic and abiotic processes in shallow lakes. In this paper, we summarize the development history, technical framework, applicability, and limitations of the model from three aspects, which include the estimation of nutrients threshold, simulation of the effects of climate change, and biomanipulation. In addition, we present an outlook of the model's future development in terms of the development of a more applicable and flexible model on a global scale, which can describe the characteristics of a wider range of lakes, the regime shift threshold determination and early-warning identification, the applications of sensitivity analysis and uncertainty analysis to the model, and the improvement of the model's accuracy, based on discussion of the model's advantages and problems in combination with hotspot issues in current research.

Key words: shallow lakes; regime shift; threshold determination; PCLake model; climate change; biomanipulation

浅水湖泊是与人类联系最为密切的淡水生态系统之一,但是近 200 年来,在物理、化学和生物作用的不断干扰下,世界范围内 75% 以上的湖泊已经富营养化或正在富营养化中^[1],湖泊原有结构和功能遭到严重破坏,优势种群由沉水植物转变为浮游植物,湖泊生态系统发生稳态转换^[2]。所谓稳态转换,指随着干扰强度的增强而出现结构或功能的突然变化,这种变化具有突发性、难预知性,兼具非线性

性、多稳态、多阈值以及迟滞效应等特征^[3-4]。稳态转换的概念最早由 Isaacs^[5]引入海洋生态系统,用于描述海洋渔业产量变化及其驱动因素,其后逐渐被应用于浅水湖泊生态系统^[6-7]。综合而言,生态系统对外界条件的响应可概括为连续渐变型(图 1(a))、不连续突变型(图 1(b))及多稳态共存型(图 1(c))3 种形式^[3],其中,浅水湖泊生态系统属于多稳态共存型,通常包括草型清水稳态、藻型浊

基金项目:国家自然科学基金(51469018);内蒙古自然科学基金(2014MS0403);水利部公益性行业科研专项(20150104);内蒙古科技厅项目(20140707,20130428)

作者简介:张笑欣(1991—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:hzzxx@imu.edu.cn

通信作者:于瑞宏,副教授。E-mail:yrh0108@163.com

水稳态及过渡态 3 种状态。随着外界胁迫的持续增强,浅水湖泊生态系统会跨越阈值发生不同稳态间的转换,而稳态转换阈值的确定则成为有效识别稳态转换的关键环节^[8]。20 世纪初,Scheffer^[9] 基于大量的实验观测数据,提出“杯中弹子”概念模型,用于判定湖泊稳态。随着对生态系统复杂性、非线性及多阈值等特征研究的深入,稳态转换模型逐渐由单一的营养盐模型发展为复合动力学模型,由零维模型发展为三维模型,模型不仅包含水中生源要素的循环转换过程,而且包含水动力过程、气象因素、生物组分及表层沉积物中内源性营养盐等相互作用,能够全面反映生态系统稳态转换机理,揭示重要生态过程与参数变化^[4, 10-12]。

PCLake 模型是最早针对温带浅水湖泊开发的复合动力学模型,主要研究浅水湖泊生态系统的结构、功能及其时空演变规律,通过模拟水体及表层沉积物中的物理、化学、生物过程对浅水湖泊生态系统的影响及反馈机制,来预测系统的动态变化,更准确地估计稳态转换阈值^[13]。笔者总结 PCLake 模型的发展历程、技术框架、适用性和局限性及研究进展等,针对模型优势及存在问题,结合当前研究热点,展望该模型的发展趋势,旨在为 PCLake 模型的有效利用提供参考。

1 模型发展历程

PCLake 模型由 Janse 等^[14-15] 开发,最初以荷兰富营养化浅水湖泊 Loosdrecht 为原型建立,能够模拟浅水湖泊生态系统中 P、浮游植物、浮游动物和鱼类食物网的动态变化,以及湖泊对富营养化及其修复措施的反馈。随着浅水湖泊稳态转换研究及管理需求的深入,Janse 等^[16] 在原有模型基础上加以改进,增加了水生植物、食鱼性鱼类及 N 循环模块,改进后的模型能全面反映浅水湖泊的多种稳态特征,模拟稳态转换阈值,并分析生物操纵对湖泊生态系统的影响及出现的迟滞效应^[17-19]。后来,为了评价湿地招生植物对湖泊水质净化及修复的影响^[20-21],

Sollie 等^[22] 又在模型中增加了湿地模块。尽管 PCLake 模型无水动力模块,但将它与其他水动力模型配合嵌套,即可扩大模型的适用范围。如,Prokoppin 等^[23] 将 PCLake 模型与一维垂直分层模型联用,对西伯利亚的盐湖 Shira 进行动态变化分析,模拟结果与实验数据吻合较好。巴西南里奥格兰德联邦大学的液压研究所 (Hydraulic Research Institute, IPH) Fragoso 等^[24] 完善了 TRIM2D 模型 (Tidal, Resdual, Intertidal, Mudflat 2D Model),强化了湖泊实际水流流动过程,使用半隐式欧拉-拉格朗日有限差分法保证数据的准确性,开发出 TRIM3D 模型,随后将水动力模块与 PCLake 模型相结合,并增加杂食性鱼类组群,开发出能够应用于热带亚热带浅水湖泊生态系统的三维复合动力学模型 IPH-TRIM3D-PCLake^[24] (简称 IPH-ECO),突破了 PCLake 模型仅适用于温带的局限。2016 年, Hu 等^[25] 将 PCLake 与 FABM (Framework for Aquatic Biogeochemical Models) 相结合,用于模拟零维、一维、三维复杂环境下的水动力及生物地球化学过程。目前,PCLake 模型通过非生物过程,生物过程与非生物过程结合,生物、非生物与水动力过程相结合等 3 个阶段,已发展为水质-水动力-生态复合动力学模型。

2 模型结构

PCLake 模型由湖泊模块和湿地模块 2 部分组成,分为水体、表层沉积物 2 个层次结构。就 PCLake 模型中湖泊模块(图 2)而言,水体中主要功能组群为浮游植物(蓝藻、硅藻、绿藻)、沉水植物、浮游动物、食浮游生物鱼类、食底栖生物鱼类及食鱼性鱼类;表层沉积物包括沉降藻类及底栖动物。模型通过模拟各组群的干重及各种形态的 N、P,实现生态系统中生源要素的物质循环,同时考虑溶解氧的动态变化。物质循环的一般过程包括矿化作用、硝化作用、反硝化作用、再悬浮和沉降过程、食物链中营养盐吸收及交换作用等。除了物质流外,模型

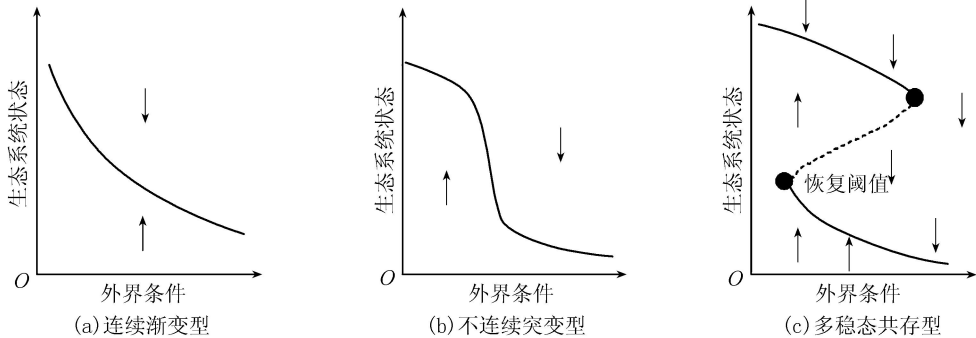
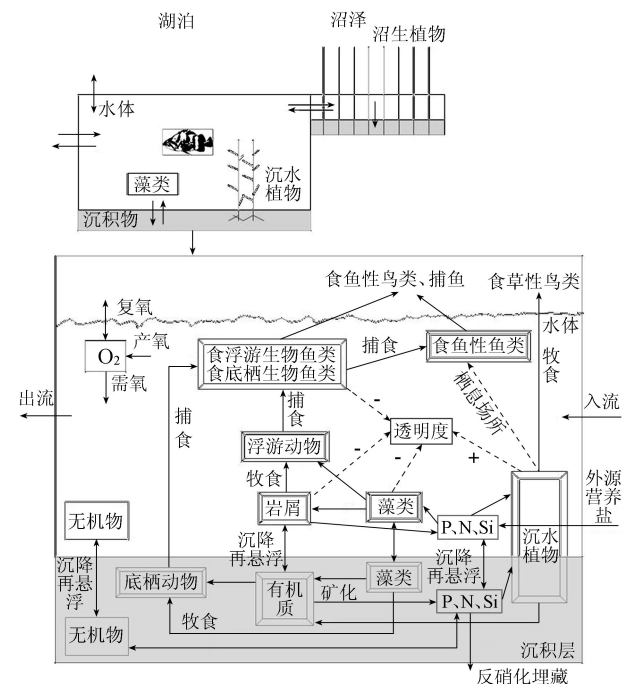


图 1 稳态转换的 3 种类型

中还包括一些间接的功能关系。模型结构灵活,子模块可以拆分,应用中可以根据需求选择部分组群^[13]。



注:实线箭头表示物质流,虚线箭头表示功能关系
负号表示水体透明度下降,正号表示水体透明度增加。

图2 PCLake 模型结构

PCLake 模型主要输入变量包括:进水量、外源营养盐浓度、悬浮颗粒物浓度、温度、光照、湖泊面积、水深、沉积物特性、湿地面积等,输出变量包括浮游植物、沉水植物、鱼类生物量和 Chl-a、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、PO₄³⁻-P 等的各状态变量浓度。

3 模型适用性及局限性

3.1 适用性

PCLake 模型可预测浅水湖泊生态系统稳态转换及转换阈值。相比深水湖泊,浅水湖泊更易受风浪、水位变动的影响,水体与沉积物相互作用强烈,再悬浮作用释放的内源性营养盐不容忽视^[26]。Janse 等^[18]通过 PCLake 模型对荷兰浅水湖泊进行研究时发现,在湖泊水深 1~2 m 内,湖泊出现迟滞效应,但水深增加到 5 m 或 10 m 时则未出现迟滞效应,说明水深在 1~2 m 范围内的浅水湖泊受到内源性营养盐的影响最为强烈。此外,Janse^[13]还发现沉积物类型也是影响湖泊稳态转换阈值的一个重要因素。PCLake 模型中,沉积物包括泥炭地、沙地和黏土,其中稳态转换阈值在沙地中最高,泥炭地中最低,原因在于泥炭地、黏土中黏土成分所占比例较大,能持有更多的 P,更易引起内源性营养盐进入水体,促进藻类生长。

PCLake 模型可估算营养盐在食物网中的循环转化。由于营养元素可沿食物链进行迁移、储存、转化,且营养链级与养分循环相互耦合,PCLake 模型将湖泊生态系统营养链级简化为不同功能组群,包括浮游植物(分为蓝藻、硅藻、绿藻)、浮游动物、食浮游生物鱼类、食底栖动物鱼类、食鱼性鱼类、底栖动物等^[13]。由于湖泊食物网涵盖不同生物间的上行控制、下行控制及间接影响,因此模型可体现生物对稳态及阈值的影响,同时也可定量估算湖泊修复过程中生物操纵技术对湖泊生态系统的作用。

PCLake 模型可单独考虑气候变化对稳态转换的影响。浅水湖泊稳态转换发生的外部条件包括外源性营养盐、气候变化、管理措施等,通常生态模型会将气候因子与外源营养盐统一作为稳态转换的外部影响因素,不单独考虑气候变化的影响,但由于二者时间尺度不同,有必要单独探究气候变化对浅水湖泊生态系统稳态转换的影响^[24]。PCLake 模型克服了已有生态模型的局限性,通过输入环境变量,如气温、太阳辐射强度、降水量、蒸发量等,模拟环境变量与生物量或营养盐浓度之间的关系,单独评估气候变化对稳态转换的影响。

PCLake 模型具有更高的预测精度,适用于对复杂水生生态系统的评估。浅水湖泊生态系统具有非线性和复杂的因果机制,简单模型不足以精确评估系统对外部条件变化的响应,而 PCLake 模型通过敏感性分析及不确定性分析,可有效处理这种复杂问题^[27]。Janse 等^[19]运用 PCLake 模型对荷兰浅水湖泊 P 阈值进行估算,当 P 质量浓度低于 0.15 mg/L 时,模拟结果准确率为 86%;高于 2.2 mg/L 时,准确率为 81%。Pereira 等^[28]使用随机模型 CCA 和确定性模型 IPH-ECO 预测丹麦湖泊 Engelsholm 在实施生物操纵后生物组分的变化趋势,交叉验证后的结果表明,随机模型预测叶绿素 a 浓度与浮游动物的相关系数($R^2 = 0.238, 0.184$),均小于确定性模型($R^2 = 0.643, 0.554$),确定性模型预测结果更为精确。

3.2 局限性

PCLake 模型针对浅水非分层湖泊而建立,假设水体完全混合,忽略了实际水深的影响。实际应用中,PCLake 模型可通过网格设置或结合多维的水动力模型克服以上局限,估算实际水流^[24],且 x-z 方向的二维模拟还可体现水生动物在水中的游动^[29]。

PCLake 模型应用于复杂水生生态系统的综合模拟,必然需要大量过程参数的支撑,而这些参数几乎不可能使用同一数据集估算得到,虽然可通过实验数据合理估算部分参数,但已有研究通常给出的均是不完整过程参数的估算结果^[27]。此外,有些模

型参数需要使用长时序及后处理数据用于参数估算,部分影响因子尚未包括在模型中(如与营养盐相关的硫酸盐、铁等因子),因此,模型应用受到基础数据与参数合理估算的限制^[30]。

PCLake 模型某些功能组群过度简化可能会导致错误的模拟结果,因此还需进一步划分详细的组群,如鱼类和大型水生植物。就鱼类而言,在热带、亚热带地区,杂食性鱼类多,缺乏大型浮游动物,过度简化的鱼类组群可能导致在评价生物操纵的影响时出现错误的结果^[18]。而大型水生植物伊乐藻(*Elodea*)和金鱼藻(*Ceratophyllum*)对于内源性营养盐的潜在作用被忽略。

就技术层面而言,PCLake 模型尚需进一步完善免费的易操作的用户界面,以实现对于不同湖泊的空间模拟、手控模拟与可视化,同时实现对于敏感性、校准研究的批量模拟^[11]。随着计算机技术的发展以及科学管理的需求,扩展新版本,开发出更加详尽的、灵活的、简化的操作界面是日后发展的趋势。

4 模型应用研究进展

4.1 营养盐转换阈值确定

Janse^[16]以荷兰具有典型湖泊特征的湖泊(水深 2 m)为对象,利用 PCLake 模型进行湖泊营养盐动力学研究,结果表明,湖泊存在多稳态现象,稳态转换存在明显的阈值效应,湖泊由清水稳态转换到浊水稳态的 P 阈值为 $3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,反之,由浊水稳态恢复到清水稳态的 P 阈值则为 $0.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,迟滞效应明显,且 P 阈值与湖泊面积、水深、水力停留时间成反比,与湿地面积和鱼类摄食强度成正比。Witteveen 等^[31]以荷兰浅水湖泊 Loenderveen 为研究对象,利用 PCLake 模型模拟 P 阈值,其灾变阈值为 $0.065 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,恢复阈值为 $0.028 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,表明该湖泊阈值远低于荷兰其他浅水湖泊的平均水平。Janse 等^[19]使用 PCLake 模型计算了荷兰、爱尔兰等国的 43 个湖泊的营养盐阈值,其中 11 个湖泊的观测营养负荷低于由浊水稳态恢复到清水稳态的恢复阈值 $0.6 \sim 1.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,湖泊处于清水稳态;26 个湖泊的观测营养负荷高于由清水稳态转变为浊水稳态的灾变阈值 $2 \sim 5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,湖泊处于浊水稳态;6 个湖泊的观测营养负荷介于恢复阈值与灾变阈值之间,湖泊处于过渡态。模型模拟的营养盐阈值与观测营养盐负荷相比,均符合各湖泊的稳态现状。通过预测湖泊稳态转换的营养盐阈值,可在一定程度上为湖泊治理修复提供依据,若实际营养盐输入超过灾变阈值则需要削减营养盐负荷,若介于灾变阈值及恢复阈值之间则需要采取生

物操纵措施^[18-19]。

4.2 气候变化对稳态转换的影响

有效预测气候变化对湖泊稳态转换的影响可为湖泊管理提供可靠依据。温度对湖泊生态系统的影响最为显著,多数学者认为温度升高会促进藻类生长,使得湖泊中的叶绿素 a 浓度增加、透明度下降,导致湖泊处于浊水状态或向浊水状态转变。Witteveen 等^[31]利用 PCLake 模型对荷兰浅水湖泊 Loenderveen 的研究发现,温度升高会使湖泊提前 5 年转变为浊水状态,并使 P 阈值降低。Mooij 等^[32]利用 PCLake 模型对温带浅水湖泊的研究表明,温度升高会导致浮游植物生物量尤其是蓝藻生物量大幅增加,并降低湖泊从清水到浊水稳态转换的阈值,当全年温度升高 3°C 时,阈值从原来的 $3.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降为 $2.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而在夏季,由于温度较高,湖泊更易转换为浊水状态,且难以恢复。

PCLake 模型模拟气候变化对稳态转换的影响时,不仅能考虑营养盐阈值,还能考虑气候变化对水生生物生长的影响。Fragoso 等^[33]以巴西浅水湖泊 Mangueira 为研究区,利用 IPH-ECO 模型研究气候变化对湖泊的影响,结果表明,春季温度升高导致浮游植物生物量增加 18%;到夏季,由于浮游动物生长迅速,牧食能力不断增强,浮游植物生物量则显著降低;而暖冬也会促进浮游动物生物量增加。Trolle 等^[34]联合使用 PCLake 模型与气候预测模型 ENSEMBLES,研究浮游植物对气候变化的响应关系,结果表明,当气温增加 5°C 、总磷增加 5% ~ 15% 时,叶绿素 a 增加 $24.5 \text{ mg}/\text{m}^3$,三者具有很高的相关性。Nielsen 等^[35]利用 PCLake 模型研究丹麦浅水湖泊,发现当温度升高时,蓝藻生物量、叶绿素 a 浓度大幅增加,温度升高 6°C 对湖泊稳态的影响与营养盐浓度增加 75% 时相当。Kuzuya^[36]利用 PCLake 模拟气候变化对土耳其湖泊 Eymir 水质影响,指出温度升高 $2 \sim 6^\circ\text{C}$,叶绿素 a 质量浓度明显升高($p < 0.01$)。

4.3 生物操纵

诱发稳态转换的众多因素中,外源性营养盐输入是最为关键的因素,但稳态转换同时会受到湖泊系统营养链级的影响,生物本身及系统养分通量均会影响湖泊生态系统结构。Janse 等^[18]利用 PCLake 模型研究了荷兰浅水湖泊 Zwemlus 实施生物操纵前后的食物链结构与营养盐分布,发现 1987 年开始实施生物操纵后,湖泊逐渐由藻型浊水状态转变为草型清水状态,初级生产力由浮游藻类变为以伊乐藻(*Elodea*)为优势种群的沉水植物,1989 年沉水植物覆盖度几乎达 100%,同时食鱼性鱼类增加,到 1990

年其生物量达到 395 kg/hm²。实施生物操纵前,N、P 主要分布在浮游植物和鱼类中,部分溶于水中;实施生物操纵后营养盐主要以可溶态分布于水中。荷兰湖泊 Veluwe 在 20 世纪 60 年代由于过量的营养盐输入,从清水状态转变为浊水状态,30 年后通过削减 P,结合生物操纵,湖泊恢复至清水状态^[13]。Janse 等^[19]通过 PCLake 模拟荷兰湖泊 Veluwe 生物操纵前后湖泊的稳态转换阈值,其值分别为 3.4 mg/(m²·d)、1.6 mg/(m²·d),与已有研究实验观测数据预测的 P 转换阈值 2.7 mg/(m²·d) 结果范围相一致。生物操纵是目前湖泊修复的主要措施,但要与营养盐负荷削减相结合才可能实现湖泊由浊水状态向清水状态转变^[16-17]。

5 研究展望

a. 目前 PCLake 模型主要应用于荷兰,部分应用于丹麦、波兰、爱尔兰、比利时、希腊等欧洲国家的温带湖泊。这些地区气候特征表现为气温整体偏高,温差较小,降水量丰富。对于温差大、降水量少且时空分布不均匀的地区,PCLake 模型暂无应用。笔者认为,为扩大 PCLake 的使用范围,开发全球尺度规模的模型,涵盖更多湖泊特征的模型是未来发展的重点。

b. PCLake 模型针对非分层浅水湖泊而开发,并未考虑水平方向、垂直方向的空间异质性,不能代表水生生态系统的实际情形。目前,PCLake 模型已与 TRIM3D 及 FABM 等水动力模型结合嵌套,弥补了原模型非分层的缺陷,未来还可将 PCLake 模型与流域模型、土地利用模型、生物多样性模型、气候变化模型等联合使用,使得 PCLake 模型不仅能用于浅水湖泊稳态转换阈值预测,还能用于描述其他水文、土地利用方式、全球变暖等不同要素对稳态转换的影响,开发出更易于使用且更灵活的模型版本,服务于全球及区域尺度。

c. PCLake 模型目前仅可用于稳态转换阈值确定,不能进行预警研究。未来可将 PCLake 模型与统计方法相结合用于稳态转换阈值预警综合研究,其中,PCLake 模型可从多尺度阐明稳态转化理论,统计方法可揭示长时间序列监测数据的统计规律,二者相结合,就可以形成多种组合用于稳态转换阈值确定及预警识别,很大程度上克服单独使用机理模型或统计方法的局限性,而将敏感性分析、不确定性分析等功能嵌套于模型,以提高模型的模拟精度。

参考文献:

[1] 秦伯强,高光,胡维平,等. 浅水湖泊生态系统恢复的理

论与实践思考[J]. 湖泊科学,2005,17(1):9-16. (QIN Boqiang,GAO Guang, HU Weiping, et al. Reflections on the theory and practice of shallow lake ecosystem restoration[J]. Journal of Lake Sciences,2005,17(1):9-16. (in Chinese))

[2] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术,2010,33(3):92-98. (ZHAO Yonghong,DENG Xiangzheng,ZHAN Jinyan, et al. Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33 (3) : 92-98. (in Chinese))

[3] SCHEFFER M,CARPENTER S,FOLEY J A. Catastrophic shifts in ecosystems[J]. Nature,2001,413:591-596.

[4] 赵磊,刘永,李玉照,等. 湖泊生态系统稳态转换理论与驱动因子研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(10):1697-1707. (ZHAO Lei, LIU Yong, LI Yuzhao, et al. Survey on theory and driving factors of regime shifts on lake ecosystems[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (10) : 1697-1707. (in Chinese))

[5] ISAACS J D. Some ideas and frustrations about fishery science [J]. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation,1976,18:34-43.

[6] DE YOUNG B, HARRIS R, ALHEIT J, et al. Detecting regime shifts in the ocean: data considerations [J]. Progress in Oceanography,2004,60:143-164.

[7] 常锋毅. 浅水湖泊生态系统的草-藻型稳态特征与稳态转换研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2009.

[8] SCHEFFER M,JEPPESEN E. Regime shifts in shallow lakes[J]. Ecosystems,2007,10:1-3.

[9] SCHEFFER M. Multiplicity of stable states in freshwater systems. [J]. Hydrobiologia,1990,200:475-486.

[10] 刘永,郭怀成,范英英,等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(6):1169-1175. (LIU Yong, GUO Huaicheng, FAN Yingying, et al. Research advance on lake ecosystem dynamic models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(6):1169-1175. (in Chinese))

[11] MOOIJ W M,TROLLE D,JEPPESEN E,et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approaches[J]. Aquatic Ecology,2010,44(3):633-667.

[12] 李玉照,刘永,赵磊,等. 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法[J]. 生态学报,2013,33(11):3280-3290. (LI Yuzhao,LIU Yong,ZHAO Lei,et al. Survey on threshold detection methods of regime shift in shallow lake ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (11) : 3280-3290. (in Chinese))

[13] JANSE J H. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches [D]. The Netherlands: Wageningen

- University,2005.
- [14] JANSE J H,ALDENBERG T. Modelling the eutrophication of the shallow Loosdrecht Lakes [J]. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie,1991,24:751-757.
- [15] JANSE J H, ALDENBERG T, KRAMER P. A mathematical model of the phosphorus cycle in Lake Loosdrecht and simulation of additional measures [J]. Hydrobiologia,1992,233:119-136.
- [16] JANSE J H. A model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation to multiple stable states [J]. Hydrobiologia, 1997,342:1-8.
- [17] 王寿兵,屈云芳,徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J]. 水资源保护,2016,32(5):1-4. (WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation[J]. Water Resources Protection,2016,32(5):1-4. (in Chinese))
- [18] JANSE J H, LIERE L V. PCLake: a modeling tool for the evaluation of lake restoration scenarios [J]. Water Science Technology,1995,31:371-374.
- [19] JANSE J H, DOMIS L N D S, SCHEFFER M, et al. Critical phosphorus loading of different types of shallow lakes and the consequences for management estimated with the ecosystem model PCLake [J]. Limnologica,2008,38: 203-219.
- [20] JOHNSTON C A. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality [J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1991, 21 (5/6):491-565.
- [21] VERHOEVEN J T A, MEULEMAN A F. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. Ecological Engineering,1999,12(1/2):5-12.
- [22] SOLLIE S, JANSE J H, MOOIJ W, et al. The contribution of the marsh zones to water quality in Dutch shallow lakes: a modeling study [J]. Environmental Management, 2008,42:1002-1016.
- [23] PROKOPKIN I G, MOOIJ W M, JANSE J H, et al. A general one-dimensional vertical ecosystem model of Lake Shira (Russia, Khakasia): description, parametrization and analysis [J]. Aquatic Ecology,2010,44:585-618.
- [24] FRAGOSO Jr C R, VAN NES E H, JANSE J H, et al. IPH-TRIM3D-PCLake: a three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems [J]. Environmental Modelling & Software,2009,24:1347-1348
- [25] HU F J, BOLDING K, BRUGGEMAN J, et al. FABM-PCLake-linking aquatic ecology with hydrodynamics [J]. Geoscientific Model Development,2016,9:2271-2278.
- [26] 年跃刚,宋英伟,李英杰,等. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨 [J]. 环境科学研究,2006,19(1):67-70. (NIAN Yuegang, SONG Yingwei, LI Yingjie, et al. Regime shift theory and ecological restoration discussion in eutrophic shallow lakes [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19 (1): 67-70 (in Chinese))
- [27] JANSE J H, SCHEFFER M, LIJKLEMA L, et al. Estimating the critical phosphorus loading of shallow lakes with the ecosystem model PCLake: sensitivity, calibration and uncertainty [J]. Ecological Modelling,2010,221:654-665.
- [28] PEREIRA F, FRAGOSO Jr. CR, MOTTA M D M, et al. Pairing multivariate data analysis and ecological modeling in the biomanipulated lake Engelsholm, Denmark [J]. Water Management and Research,2013,69:15-19.
- [29] WINDER M, SPAAK P, MOOIJ W M. Trade-offs in daphnia habitat selection [J]. Ecology, 2004, 85: 2027-2036.
- [30] OMLIN M, REICHERT P A. A comparison of techniques for the estimation of model prediction uncertainty [J]. Ecological Modelling,1999,115:45-59.
- [31] WITTEVEEN B, WATERNET, M N. Possible effects of climate change on ecological functioning of shallow lakes, Lake Loosdrecht as a case study [J]. Land Reclamation, 2007,38:95-104.
- [32] MOOIJ W M, JANSE J H, DOMIS L N D S, et al. Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake [J]. Hydrobiologia,2007,584:443-454.
- [33] FRAGOSO Jr C R, MOTTA MARQUES D M L, FINKLER FT, et al. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26: 1337-1348.
- [34] TROLLE D, ELLIOTTA, MOOIJ W M, et al. Advancing projections of phytoplankton responses to climate change through ensemble modeling [J]. Environmental Modelling & Software,2014,61:371-379
- [35] NIELSE A, TROLLE D, BJERRING R, et al. Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake [J]. Ecological Applications,2014,24(8):1926-1944.
- [36] KUZYAKA E. Modeling impacts of eutrophication and climate change in lake Eymir using PCLake model [D]. Ankara, Turkey: Middle East Technical University,2015.

(收稿日期:2016-08-25 编辑:彭桃英)