

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0520

胡文,王济,李春华,等.浅水湖泊模型PCLake及其应用进展[J].生态与农村环境学报,2019,35(6):681-688.

HU Wen, WANG Ji, LI Chun-hua, et al. The Application and Review of Shallow Lake Model: PCLake [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 681-688.

浅水湖泊模型PCLake及其应用进展

胡文^{1,2,3}, 王济^{1①}, 李春华^{2,3②}, 叶春^{2,3}, 魏伟^{2,3} (1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国环境科学研究院湖泊环境研究所, 北京 100012; 3. 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

摘要: 浅水湖泊是与人类关系最为密切的淡水生态系统之一。随着浅水湖泊富营养化的发生,人们对浅水湖泊也日益关注,并尝试采用不同生态模型对湖泊水质进行预测。PCLake模型是浅水湖泊专用模型,可以准确预测浅水湖泊污染物的变化。该研究介绍了PCLake模型原理概况,梳理了应用实例。从浅水湖泊的稳态转换研究、气候变化、湖泊管理等领域阐述了PCLake模型的应用研究现状,同时对PCLake模型与CAEDYM模型、LakeWeb模型、MIKE21模型、CE-QUAL-W2模型、WASP模型等常见的湖泊水生态模型进行了对比分析,探讨PCLake模型的适用性与局限性,展望其未来发展方向,旨在为浅水湖泊PCLake模型研究领域提供系统参考。

关键词: 浅水湖泊; PCLake模型; 稳态转换; 气候变化; 湖泊管理; 生态修复

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)06-0681-08

The Application and Review of Shallow Lake Model: PCLake. HU Wen^{1,2,3}, WANG Ji^{1①}, LI Chun-hua^{2,3②}, YE Chun^{2,3}, WEI Wei-wei^{2,3} (1. School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Beijing 100012, China)

Abstract: Shallow lake is one of the most important freshwater ecosystems for human being. With the increasing of lake eutrophication, people pay more attention to shallow lakes, and have tried different ecological models to predict lake water quality. PCLake model is specifically used for accurate prediction of pollution trend in shallow lakes. The principle of PCLake model and its application are briefly introduced. The application research of PCLake model is elaborated from different perspectives, including regime shift, climate change and lake management. In addition, different lake ecosystem models are compared, such as CAEDYM model, LakeWeb model, MIKE 21 model, CE-QUAL-W2 model, and WASP model. Based on the case studies and analysis of different models, the applicability and limitations of the PCLake model are explored and its future development is predicted, so as to provide a comprehensive and systematic reference for the research of PCLake model in shallow lakes.

Key words: shallow lake; PCLake model; regime shift; climate change; lake management; ecological restoration

生态环境部2017年重点监测的112个湖泊(水库)中,I类水质湖泊(水库)6个,占5.4%;II类27个,占24.1%;III类37个,占33.1%;IV类22个,占19.6%;V类8个,占7.1%;劣V类12个,占10.7%^[1]。淡水湖泊中多数为浅水湖泊,且浅水湖泊大多分布在东南沿海、长江中下游平原等人口密集的地区^[2]。此外,浅水湖泊更易从“清水态”的草型生态系统转换为“浑水态”的藻型生态系统,这有可能导致城市集中饮用水供水困难,造成巨大的经济损失以及严重的生态问题^[3-6]。当前我国严峻的

水体富营养化问题促使政策制定者与决策者寻求水质管理方法与水体恢复方案,其中就包括由荷兰湖沼生态模型学家Janse团队开发的浅水湖泊模型——PCLake。PCLake模型构建是基于封闭湖泊内的营养盐循环过程,并进行量化分析,是湖泊水生态系统研究领域中运用最广泛的模型之一^[7]。该

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-005)

①通信作者E-mail: wangji@gznu.edu.cn

②共同通信作者E-mail: lich@craes.org.cn

模型已经应用于气候变化^[8-9]、水位波动^[10]、湖泊异地碳输入^[11]以及生物多样性^[12]等研究领域。此外,该模型还应用于放大生态系统特定组成部分的过程研究,如食草动物的效应研究^[13]。

1 浅水湖泊模型 PCLake 建模原理

荷兰湖沼生态模型学家 Janse 团队开发的 PCLake 模型不仅综合考虑了浅水湖泊水生生态系统的基本元素,而且还具有湖滨湿地模块,更重要的是该模型是专门为浅水湖泊污染物控制与湖泊稳态转换预测而构建的。该模型没有考虑浅水湖泊水平与垂直方向的变化,认为浅水湖泊是均一、温度非分层水体^[7]。PCLake 模型克服了已有生态模型的局限性,通过输入环境变量,如出入湖营养盐负荷、食物网要素、水文条件、气温、太阳辐射强度、降水量、蒸发量等(详细输入、输出值见图1),模拟环境变量与生物量、营养盐浓度之间的关系。

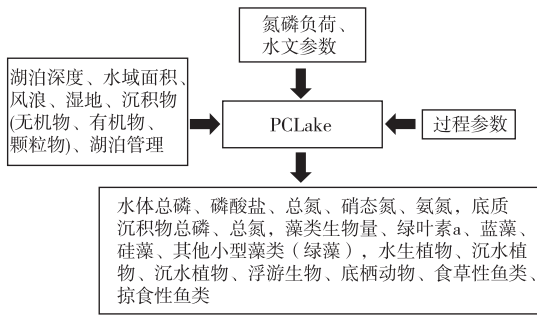
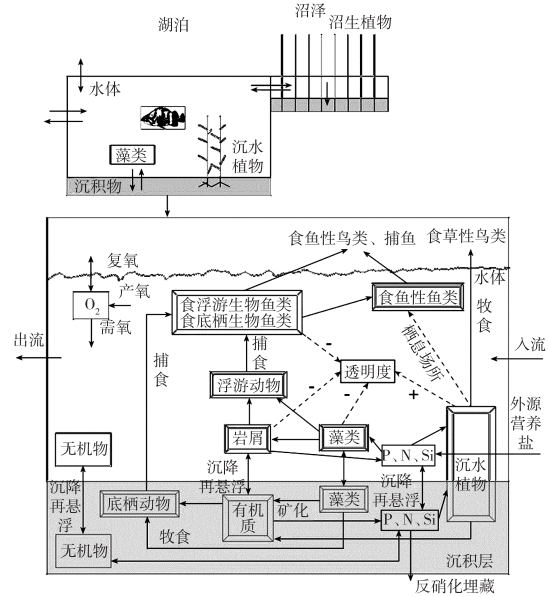


图1 PCLake 模型的主要输入和输出^[7]

Fig. 1 Main inputs and outputs of the PCLake model

由于浅水湖泊水生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模型具有更高的预测精度,适用于对复杂水生生态系统的模拟^[14-16],已发展为水质-水动力-生态综合模型^[15-17]。PCLake模型重点强调水生生态系统中的非生物和生物组成部分(图2)。在非生物部分中描述了沉积物与水体之间有机-无机物质的交换,包括沉淀、再悬浮、吸附、扩散和埋藏等过程^[7]。生物部分包括浮游植物、底栖动物、食草性鱼类和掠食性鱼类等,并将浮游植物和大型植物视为初级生产者^[7,18-20]。此外,该模型还可加入由另外42个状态变量和35个参数构成的湖滨湿地模块^[17]。PCLake模型结构灵活,各个子模块可以拆分,在实际应用中可以根据需求灵活选择组合使用。例如JANSE^[7]运用湖泊与湖滨湿地组合模块模拟沼泽对湖泊质量恢复的影响,表明湖滨湿

地的存在会增加湖泊恢复能力。



实线为物质流,虚线为功能关系;负号为透明度下降,正号为透明度增高。

图2 PCLake 模型结构示意图^[20]

Fig. 2 PCLake schematic model structure

2 湖泊水生生态系统模型对比分析

由于湖泊水生生态系统的多样性与复杂性,在采用生态模型时应选择多层、多室、多成分的复杂动态模型来模拟湖泊的物理、化学、生物、水动力过程^[21]。当前常见湖泊水生生态模型主要有CAEDYM模型、PCLake模型、LakeWeb模型、MIKE 21模型、CE-QUAL-W2模型和WASP模型等。常见的湖泊水生生态模型特征比较见表1^[22-33]。

2.1 CAEDYM 模型

CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model)模型是由西澳大利亚大学水研究中心开发的湖泊(水库)水生生态动力学模型^[22-23]。该模型是以传统“N-P-Z”(nutrition-phytoplankton-zooplankton)模式架构组成,全面系统地描述C、N、P、Si和DO的循环过程以及不同粒径悬浮颗粒物、藻类的动力学过程^[23]。模型包括了112个状态变量,并充分考虑了各营养物质的循环过程,包括大气的交换和沉积物的交换过程。该模型还可与ELCOM (Estuary and Computer Model)模型结合构建ELCOM-CAEDYM耦合模型,用于水动力条件下化学和生物过程的模拟,以拓宽该模型的应用范围^[34-36]。

表1 常见湖泊水生态模型特征比较

Table 1 Comparison of software of the lake ecosystem models

名称	研究主体	模拟问题	状态变量	主要参数	生物成分	数据来源
CAEDYM	湖泊、水库等水体	可以模拟悬浮固体、氧气、有机和无机营养物(C、N、P和Si)的循环,模拟湖泊和水库水体的动力学过程	112个状态变量:浮游植物和鱼类、底栖生物群落、病原体、地球化学过程(包括离子、pH值、金属、氧化还原过程)以及沉积物氧气、营养物质和金属通量等	与沉淀相关的参数、物化参数、生化参数等	浮游植物、鱼类、底栖生物、大型水生植物、病原体	[22-23]
PCLake	浅水湖泊	通过模拟水体与顶层沉积物中的物理、化学、生物过程对浅水湖泊生态系统的影响以及反馈机制,并以此来预测浅水湖泊的动态变化趋势	104个状态变量和454个参数变量:浮游植物、底栖生物群落、浮游生物、总氮、总磷、鲑鱼、掠食性鱼类、硝化过程	TN、TP、氮磷负荷、水体透明度、叶绿素a含量、大型水生植物、鱼类以及沉积物特性参数等	浮游植物、鱼类、底栖生物、大型水生植物	[7-14]
LakeWeb	湖泊、沿海地区等水体	通过生物的生产 and 生物量变化模拟控制率、代谢效率比率、分布系数、鱼类迁移和捕食压力	9大变量:浮游植物、浮游细菌、本氏藻、大型水生植物、食草性底栖动物、捕食性底栖生物、食草性鱼类、捕食性鱼类以及湖泊内部的非生物-生物相互作用	pH值、总磷浓度、平均湖深、最大湖深、湖区面积、表层温度、透明度等	浮游植物、底栖生物、鱼类	[24-26]
MIKE21	河流、湿地、湖泊、水库等水体	模拟水体中的各项水质指标,并对C、N、P等循环进行模拟分析	12个状态变量(浮游生物中碳、氮、磷含量,叶绿素a含量,浮游植物碳含量,底质碳、磷、无机氮、无机磷、溶解氧含量以及底栖动物碳含量)、35个辅助变量、71个常量、62个反应过程	地形参数、边界参数、糙率系数、时间步长、水深和初始水位等	浮游植物、底栖动物	[27-28]
CE-QUAL-W2	湖泊、水库、河流等水体	模拟温度、营养盐、藻类、溶解氧、有机物质和沉积物等与水体富营养化过程相关的基本因素	悬浮固体、营养盐和有机物质组、水力停留时间、衍生变量如TN、TOC、叶绿素a含量、pH值、总溶解气体和可选的生物群体(包括多种附生植物、浮游植物)	水文参数、DO、BOD、pH值、营养物、有机物、大肠杆菌、藻类、溶解和悬浮物等	浮游植物、底栖生物	[30-31]
WASP	湖泊、河流、水库、近海地区等水体	模拟水体点源、非点源污染物负荷以及边界交换等情况,适用于水体内有机物、溶解氧、营养物质、有毒化学成分以及浮游生物的迁移转化过程	8个水质变量的相互影响过程以及溶解氧平衡系统、氮循环系统、磷循环系统、藻类生长系统4个反应过程	DO、NH ₃ -N、NO ₃ ⁻ -N、有机氮、有机磷、COD、BOD、浮游植物碳含量等	浮游植物、大型水生植物	[32-33]

2.2 LakeWeb模型

LakeWeb是综合湖泊水生态系统模型,模型包含生物变量、强制驱动变量以及湖泊温度子模型^[24-25]。生物变量包含浮游植物、大型水生植物、浮游动物、底栖动物、食草性鱼类以及掠食性鱼类等9个生物变量。强制驱动变量包含面积、湖泊深度、颜色和pH值等,但由于LakeWeb模型只有7个强制性驱动变量,该模型仅应用于一般湖泊典型条件模拟,即湖泊食物网相互作用关系与非生物-生物作用关系模拟^[26,37]。

2.3 MIKE 21模型

MIKE 21是丹麦水力研究所(DHI)研发的系列水动力学软件之一,主要应用于河流、湖泊、河口、海湾等地区,软件包包含二维水动力模型、水质运移模型、富营养模型、泥沙运移模型和波浪模型等模型。其中水动力学模块(HD模块)是该模型的核心基础模块,可用于模拟各种作用力产生的水位和水流变化及任何忽略分层的平面二维仿真模

拟^[27-29]。同时,模型体系界面十分友好,可以与GIS、SWAT等链接以增加模型的适用性;但模型源程序不对外公布,使用时有相应的加密措施,需要付费且软件包售价十分昂贵^[38-39]。

2.4 CE-QUAL-W2模型

CE-QUAL-W2(A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model)模型是由美国陆军工程兵团(USACE)水道试验站利用FORTRAN语言编程的二维水质水动力学模型^[30-31]。经过40余年的发展,模型功能和准确性得到不断完善。该模型假设水体横向流动状态是平均的,适用于水库、河流、湖泊以及河口等复杂水域环境,尤其对相对狭长的湖泊和分层水库的水质模拟效果极佳^[31,40-41],可以预测水平与垂直速度、温度、营养物、有机物、大肠杆菌、藻类等21种水质变量^[42]。

2.5 WASP模型

WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)水质分析模拟软件是美国环保局(USEPA)开

发的专业水质模型软件,同时也是美国环保局推荐使用的最大日负荷总量(TMDL)研究工具之一,WASP软件包括2个计算模块:一维河流水动力模块(DYNHYD模拟模块)以及二维水质模块(WASP模拟模块)^[32-33]。在实际运用中根据污染物类型的不同,WASP模块又可分为富营养化模块(EUTRO)和有毒污染物模块(TOXI),而且DYNHYD模拟模块与WASP模拟模块既可以联合使用,也可以独立运行^[43-44]。该模型主要应用于水库、湖泊、河口、海岸、河流等复杂水质变化情况,适用于水体有机物、营养物质、有毒物质、有毒化学成分等物质的迁移转化过程,被称为“万能水质模型”^[44]。

2.6 PCLake模型的适用性与局限性

浅水湖泊模型PCLake的适用性主要包括3个方面:(1)PCLake模型是所有常见湖泊模型中包含最多变量因素的模型^[45],也是湖泊水生态系统模型中的最佳模型^[46-47],并且该模型具有比较性,可以对不同类型湖泊对富营养化的响应进行排序,适用于浅水湖泊多个领域的同时研究^[7]。(2)PCLake模型不仅涵盖了湖泊水体与沉积物之间的物理、化学、生物作用模拟,而且还包含浮游生物、鱼类和底栖生物的相互作用分析,同时还可以模拟水体中的3类浮游植物(绿藻、蓝藻、硅藻)与大型水生植物之间的竞争关系^[46]。基于此,该模型能准确地为湖泊管理者提供明确管理目标。(3)PCLake模型只适用于浅水湖泊领域,其他水体均不适用。对于浅水湖泊而言,该模型比其他湖泊水生态模型更具有针对性与专业性。

浅水湖泊模型PCLake的局限性主要体现在以下4个方面:(1)PCLake模型作为拥有大量参数的复杂生态模型,在模型模拟浅水湖泊水质变化过程中,很难从单一数据集开展评估,因此在模型的校准过程中需要做大量工作。KUIPER^[17]研究指出现场监测数据并非模型的重要参数,但仍然会在校准过程中对模型产生影响,同时可能在校准过程中失去原有模型的“平衡模式”。(2)PCLake模型涉及上行效应和下行效应在内的众多生态过程,由于当前各方面的限制,绝大部分湖泊缺乏实际研究与相关参数,无法直接获取目标湖泊的详细数据参数,在运行模型时不得不采用近似值或默认参数,降低了模型输出结果的精确度。(3)PCLake模型假设浅水湖泊是均质湖泊,即导致整个湖泊所有反应为“全有”或“全无”^[48],而实际水体在时刻发生反应,其中湖泊深度限制可以通过水平传输网格设置来减少

误差。(4)PCLake模型没有考虑其他无机盐因素,如硫酸盐、硝酸盐等盐类循环对湖泊水质的影响。

3 浅水湖泊模型PCLake应用研究进展

3.1 稳态转换研究应用

JANSE等^[49-51]首次利用PCLake模型自下而上控制的综合效应,证明以大型水生植物为主的“清水态”和以浮游植物为主的“浑水态”相互转换时存在营养盐负荷阈值效应。在高营养盐负载下,只有“浑水态”是稳定的,而低营养盐负载则相反^[52];在中间范围内,2种稳定态均可能存在,且可能相互切换。PCLake模型能够完美展现浅水湖泊对营养盐输入变化所表现出的非线性滞后响应,即显示稳态转换过程。由于稳定态均具有稳定缓冲机制,因此,发生稳态转换时临界营养盐水平取决于系统初始状态,呈现负载水平滞后性^[12]。SCHEP等^[53]以荷兰浅水湖Loenderveen为研究对象,模拟得出湖泊从“清水态”转换为“浑水态”时临界营养盐(P)负荷(CNL_{eu})为0.065 mg·m⁻²·d⁻¹;从“浑水态”转换为“清水态”时临界营养盐(P)负荷(CNL_{oligo})为0.028 mg·m⁻²·d⁻¹。JANSE等^[54]认为,可默认湖泊的临界营养盐负荷和水力负荷呈正相关,湖泊水质污染程度越高,临界营养盐负荷值也越高,同时在高营养盐负荷下湖泊以“浑水态”为稳定状态。JANSSEN等^[55]研究表明,由于湖泊稳定区域分布排除在潜在稳定区域以外,大型浅水湖泊表现出单一稳定状态。KUIPER等^[56]利用PCLake模型模拟生物操纵,对浅水湖泊中稳态转换反馈信息进行干预,并以稳态转换证明生物操纵可以提高湖泊的修复能力。JEPPESEN等^[57]对北欧浅水湖泊的研究表明,随着TP浓度降低,浅水湖泊稳态转换阈值的实际值将低于模型预测阈值,且稳态转换阈值内的稳定系数较弱。

研究人员对浅水湖泊稳态转换的应用主要从稳态转换的驱动因子与关键过程、稳态转换的机制与关键因子的生态响应、稳态转换的阈值判定和预警等领域进行研究^[58-59]。同时在PCLake模型的建模过程中,将浅水湖泊视为整体,忽略了湖泊深度、大型浅水湖泊的水平空间异质性、风场、湖泊内部低连通性对稳态转换区域的不确定性^[55]以及空间识别对营养盐负荷的影响^[46]。

3.2 气候变化应用

MOOIJ等^[60]以及SCHEP等^[53]研究表明CNL_{oligo}、CNL_{eu}随温度、降水量升高而降低。因此,研究人员

可使用PCLake模型来预测全球气候变化对湖泊浮游植物生物量的影响。MOOIJ等^[8]将研究重点放在气候变暖对湖泊的季节性影响上,分析显示在气候变暖的夏季,蓝藻优势度将会增加,并且与默认状态相比,夏季湖泊温度升高,湖泊将在低营养盐负荷下转换为“浑水态”。随后,MOOIJ等^[61]将PCLake模型与最小动力学模型相结合,证实浅水湖泊在“清水态”不受气候变化和营养盐循环的影响;反之,在“浑水态”气候变暖或营养盐循环增加的情况下,湖泊浑浊加剧。而FRAGOSO等^[62]关于气候变化对大型亚热带浅水湖泊的潜在影响研究表明,气候变暖使浅水湖泊的水体透明度增加,在中微营养状态下湖泊更易恢复到“清水态”。KUZUYAKA^[63]发现当湖泊水温升高6℃时,水体中浮游植物生物量、氨氮浓度、硝态氮浓度、TP浓度均呈现明显下降趋势。随后,NIELSEN等^[64]研究表明未来气候变暖和营养盐负荷增加将会降低湖水保持“清水态”的可能性,且富含沉水植物的草型湖泊中优势种的生态位可能降低。

PCLake模型的开发是为了研究浅水湖泊水体富营养化和相关恢复措施的效果^[49],但模型实际应用中发现水温会影响湖水和湖底沉积物中的生物过程速率,气候变暖将导致外部养分盐负荷增加^[7],由此模型开始应用于气候变化领域。但PCLake模型应用于气候变化领域也有相应缺点:(1)在实际运用PCLake模型时忽略了风速、光照等与气候相关的因素以及水温对湖中生物捕食活动造成的影响,没有进一步了解气候变化对湖泊水生态系统的影响。(2)当前PCLake模型研究气候变化主要应用于北欧温带气候地区,而针对亚热带以及热带地区湖泊的研究较少,近年来仅见FRAGOSO等^[62]将PCLake模型应用于亚热带大型浅水湖泊气候变化研究,由于模型实际运行中缺少湖泊时间与空间分布数据详细值,尚无法详细比较检验模拟值和观测值之间的误差,可能导致模拟结果误差较大。

3.3 湖泊管理应用

湖泊管理修复的目的是减少营养盐负荷^[65],使湖泊从“浑水态”转换为“清水态”^[57]。由图3可见,湖泊管理修复的主要措施包括湖泊外部恢复措施(降低外部营养盐负荷)、湖泊内部修复措施(生物操纵,湖泊疏浚)以及外部恢复措施+内部修复措施^[66]。PCLake模型能够准确确定浅水湖泊“清水态”与“浑水态”稳态转换时临界营养盐负荷具体数值。JANSE等^[54]运用PCLake模型模拟外部修复措

施对湖泊管理的影响,得出 CNL_{eu} 为 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, CNL_{oligo} 为 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。HILT等^[66]研究发现北温带浅水湖泊 CNL_{eu} 为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, CNL_{oligo} 为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, CNL_{eu} 降低可能导致浅水湖泊更易从“清水态”转换到“浑水态”,而 CNL_{oligo} 降低将阻碍浅水湖泊由“浑水态”回归到“清水态”。JANSE^[7]在浅水湖泊管理过程中对优势物种进行生物操纵,评估食物网管理在湖泊修复中的作用,结果显示食物网管理应该与减少营养盐负荷的措施相结合,以实现更佳的湖泊管理效果。

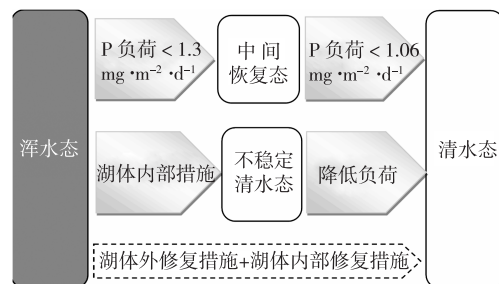


图3 湖泊管理修复措施

Fig. 3 Lake management restoration measures

浅水湖泊外部磷负荷的减少会导致春季和初夏时期出现浮游植物生物量减少的现象^[56]。而在夏季可能会发生蓝藻爆发,出现水华现象,阻止湖泊从“浑水态”稳态转换为“清水态”^[66-67]。LASPIDOU等^[68]研究表明,湖泊在富营养状态时夏季会高度浑浊,导致湖泊的浮游植物总生物量中75%为蓝藻,且N/P负荷比值与浮游植物动态密切相关。JANSEN等^[46]使用空间生态系统分岔分析(SEBA)评估了湖泊总体外部营养盐负荷对太湖动态的影响,分析了营养盐负荷的空间分布,并确定了湖泊管理目标——最大允许叶绿素浓度。JEPPESEN等^[57]将模型应用于收割大型水生植物对湖泊水生态系统稳定性的影响分析,评估何种条件下大型水生植物的收割会导致关键地区的“浑水态”稳态转换为“清水态”,为水生植物收割时间管理提供参考。HILT等^[66]研究表明湖泊管理者在浅水湖泊实施恢复措施会影响水生植物性状,进而导致浅水湖泊水体发生季节动态转换。

4 浅水湖泊模型PCLake未来展望

世界各国的研究者正在为完善浅水湖泊模型PCLake而努力,当前该模型正在向以下几个方面发展。

(1)多模型联用。PCLake模型可以根据实际需求与统计学相关模型联用^[58],以降低单个模型模拟的不确定性^[69-70]。TROLLE等^[45]将DYRESM-CAEDYM模型、PROTECH模型和PCLake模型联用,以减少单个模型在预测过程中的不确定性因素。在复杂气候变化预测中,多模型联用的预测值明显好于单个模型预测值^[70-71],JANSSEN等^[46]使用数据库建模法(DATM),将PCLake模型与Delft3D-DELWAQ模型耦合,并运用SEBA技术对大型浅水湖泊进行预测,结果表明该方法对大型浅水湖泊的营养盐负荷以及叶绿素a含量的确定存在差异性。

(2)应用于更多类型的湖泊并简化输入参数。目前PCLake模型主要应用于北欧地区,北欧地区属于温带海洋性气候区,而在全球范围内不同气候区还分布有诸多浅水湖泊。根据文献^[46,55],当前在我国应用PCLake模型开展研究的浅水湖泊仅有太湖和巢湖。在实际应用中发现湖泊面积大小、空间异质性以及湖泊内部连通性等因素决定了大型浅水湖泊中稳态转换的空间范围分布情况,而原始PCLake模型没有考虑这些因素,因此PCLake模型在国内推广应用时应充分考虑客观因素。通过灵敏度分析确定PCLake模型中的重要参数,并针对这些重要参数进行校准,确定各个湖泊重要取值范围,以减少模型数据校准工作时间,提高PCLake模型的适用性与准确性。

(3)增加PCLake模型的预警研究。当前PCLake模型应用主要集中在稳态转换、气候变化以及湖泊管理等方面。对PCLake模型的原理以及校准过程分析可知,该模型可以应用于预警领域,未来可以增加湖泊预警应用,最大程度发挥PCLake模型的功能识别能力。

参考文献:

- [1] 生态环境部.2017中国生态环境状况公报[R].北京:生态环境部,2018.
- [2] 李春华,叶春,孔祥臻,等.浅水湖泊水生植物适宜生物量评估方法的探讨[J].中国环境科学,2018,38(12):246-254. [LI Chun-hua, YE Chun, KONG Xiang-zhen, et al. Preliminary Idea on Assessment of Macrophyte Optimal Biomass in Shallow Lake [J]. China Environmental Science, 2018, 38 (12) : 246-254.]
- [3] KUIPER J J, VAN ALTENA C, DE RUITER P C, et al. Food-Web Stability Signals Critical Transitions in Temperate Shallow Lakes[J].Nature Communications, 2015, 6: 7727. DOI: 10.1038/ncomms8727.
- [4] GUO L. Doing Battle With the Green Monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, 317(5842): 1166-1166.
- [5] LIU X. The Identification of Nutrient Limitations on Eutrophication in Dianchi Lake, China[J]. Water and Environment Journal, 2017, 31(4): 592-597.
- [6] ZHANG L, WANG S R, LI Y P, et al. Spatial and Temporal Distributions of Microorganisms and Their Role in the Evolution of Erhai Lake Eutrophication[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3887-3896.
- [7] JANSE J H. Model Studies on the Eutrophication of Shallow Lakes and Ditches[D]. Wageningen, Netherlands: Wageningen University and Reserch Center, 2005.
- [8] MOOIJ W M, JANSE J H, DE SENERPONT D L N, et al. Predicting the Effect of Climate Change on Temperate Shallow Lakes With the Ecosystem Model PCLake[J]. Hydrobiologia, 2007, 584(1): 443-454.
- [9] NIELSEN A, TROLLE D, BJERRING R, et al. Effects of Changes in Climate and Nutrient Load on Water Quality of Shallow Lakes Assessed by Ensemble PCLake [J]. Ecological Applications, 2014, 24(8): 1926-1944.
- [10] KONG X Z, HE Q S, YANG B, et al. Hydrological Regulation Drives Regime Shifts: Evidence From Paleolimnology and Ecosystem Modeling of a Large Shallow Chinese Lake[J]. Global Change Biology, 2017, 23(2): 737-754.
- [11] LISCHKE B, HILT S, JANSE J H, et al. Enhanced Input of Terrestrial Particulate Organic Matter Reduces the Resilience of the Clear-Water State of Shallow Lakes: A Model Study[J]. Ecosystems, 2014, 17(4): 616-626.
- [12] DE MEESTER L, DECLERCK S, JANSE J H, et al. Biodiversity in European Shallow Lakes: A Multilevel - Multifactorial Field Study [M]//Wetlands: Functioning, Biodiversity Conservation, and Restoration. Berlin: Springer, 2006: 149-167.
- [13] VAN ALTENA C, BAKKER E S, KUIPER J J, et al. The Impact of Bird Herbivory on Macrophytes and the Resilience of the Clear-Water State in Shallow Lakes: A Model Study[J]. Hydrobiologia, 2016, 777(1): 197-207.
- [14] 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(4): 654-665.
- [15] FRAGOSO 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(11): 1347-1348.
- [16] HU F J, BOLDING K, BRUGGEMAN J, et al. FABM - PCLake Linking Aquatic Ecology With Hydrodynamics [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(6): 2271-2278.
- [17] KUIPER J J. Making Eco Logic and Models Work: An Integrative Approach to Lake Ecosystem Modelling[D]. Wageningen, Netherlands: Wageningen University and Research Center, 2016.
- [18] JØRGENSEN S E. A Eutrophication Model for a Lake[J]. Ecological Modelling, 1976, 2(2): 147-165.
- [19] JØRGENSEN S E. A Review of Recent Developments in Lake Modelling[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(4): 689-692.

- [20] 张笑欣,于瑞宏,张宇瑾,等.浅水湖泊稳态转换模型PCLake研究进展[J].水资源保护,2017,33(3):19-24.[ZHANG Xiaoxin, YU Rui-hong, ZHANG Yu-jin, *et al.* Progress in Research of Regime Shift Model PCLake for Shallow Lakes [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 19-24.]
- [21] 卢小燕,徐福留,詹巍,等.湖泊富营养化模型的研究现状与发展趋势[J].水科学进展,2003,14(6):792-798.[LU Xiao-yan, XU Fu-liu, ZHAN Wei, *et al.* Current Situation and Development Trends in Lake Eutrophication Models [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 792-798.]
- [22] LUO L C, HAMILTON D, LAN J, *et al.* Autocalibration of a One-Dimensional Hydrodynamic - Ecological Model (DYRESM 4.0 - CAEDYM 3.1) Using a Monte Carlo Approach: Simulations of Hypoxic Events in a Polymictic Lake [J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11: 903-913.
- [23] BRACHT - FLYR B, FRITZ S C. Combining Lake Core Records With the Limnologic Model DYRESM - CAEDYM to Evaluate Lake Response During the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly [J]. Journal of Paleolimnology, 2016, 56(1): 79-92.
- [24] HÅKANSON L, BOULION V V, OSTAPENIA A P. The Lake Foodweb: Modelling Predation and Abiotic/Biotic Interactions [M]. [s. l.]: Backhuys Publishers, 2002: 90-100.
- [25] HÅKANSON L, BOULION V V, OSTAPENIA A P. The Influence of Biomanipulations (Fish Removal) on the Structure of Lake Foodwebs, Case Studies Using the LakeWeb-Model [J]. Aquatic Ecology, 2003, 37(1): 87-99.
- [26] HÅKANSON L. Consequences and Correctives Related to Lake Acidification, Liming and Mercury in Fish: A Case Study for Lake Huljesjön, Sweden, Using the LakeWeb-Model [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2003, 8(4): 275-283.
- [27] MEHDIABADI F E, MEHDIZADEH M M, RAHBANI M. Simulating Wind Driven Waves in the Strait of Hormuz Using MIKE21 (Simulasi Gelombang Angin Di Selat Hormuz Menggunakan MIKE21) [J]. Indonesian Journal of Marine Sciences, 2015, 20(1): 1-8.
- [28] SONINBAYAR J, AUDRA P. Dam Break Simulation Using DHI-MIKE21 in the Eg Hydropower Plant, Mongolia [M]//Advances in Hydroinformatics. Singapore: Springer, 2018: 415-422.
- [29] DAGHIGH H, KHANIKI A K, BIDOKHTI A A, *et al.* Prediction of Bed Ripple Geometry Under Controlled Wave Conditions: Wave - Flume Experiments and MIKE21 Numerical Simulations [J]. Indian Journal of Geo - Marine Sciences, 2017, 46(3): 529-537.
- [30] NOORI R, YEH H D, ASHRAFI K, *et al.* A Reduced-Order Based CE-QUAL-W2 Model for Simulation of Nitrate Concentration in Dam Reservoirs [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 645-656.
- [31] TERRY J A, SADEGHIAN A, BAULCH H M, *et al.* Challenges of Modelling Water Quality in a Shallow Prairie Lake With Seasonal Ice Cover [J]. Ecological Modelling, 2018, 384: 43-52.
- [32] QUIJANO J C, ZHU Z D, MORALES V, *et al.* Three-Dimensional Model to Capture the Fate and Transport of Combined Sewer Overflow Discharges: A Case Study in the Chicago Area Waterway System [J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 362-373.
- [33] CANU D, ROSATI G. Long-Term Scenarios of Mercury Budgeting and Exports for a Mediterranean Hot Spot (Marano - Grado Lagoon, Adriatic Sea) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 198: 518-528.
- [34] VISSER P M, IBELINGS B W, BORMANS M, *et al.* Artificial Mixing to Control Cyanobacterial Blooms: A Review [J]. Aquatic Ecology, 2016, 50(3): 423-441.
- [35] HIPSEY M R, ANTENUCCI J P, HAMILTON D. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3.2 Science Manual [R]. Perth, Australia: University of Western Australia, 2008.
- [36] WEIGEL D E, VILHENA L C, WOODS P, *et al.* Aquatic Habitat Response to Climate-Driven Hydrologic Regimes and Water Operations in a Montane Reservoir in the Pacific Northwest, USA [J]. Aquatic Sciences, 2017, 79(4): 953-966.
- [37] HÅKANSON L. Lumbering Operations, Lake Humification and Consequences for the Structure of the Lake Foodweb: A Case Study Using the LakeWeb-Model for Lake Stora Kröntjärn, Sweden [J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(2): 185-197.
- [38] PAPAIOANNOU G, LOUKAS A, VASILIADES L, *et al.* Flood Inundation Mapping Sensitivity to Riverine Spatial Resolution and Modelling Approach [J]. Natural Hazards, 2016, 83(1): 117-132.
- [39] NUGROHO A R, AKHWADY R, METAKARYANTO D, *et al.* Studi Model Distribusi Pencemaran Di Pantai Utara Jawa Tengah Menggunakan Model MIKE 21 ECOLab [J]. Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan, 2016, 8(2): 89-100.
- [40] AFSHAR A, FEIZI F, MOGHADAM A Y, *et al.* Enhanced CE-QUAL-W2 Model to Predict the Fate and Transport of Volatile Organic Compounds in Water Body: Geshlagh Reservoir as Case Study [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(23): 803. DOI: 10.1007/s12665-017-7108-5.
- [41] RODOLFO J M, YANN R A, SALVADOR B R. Orographic Shading Effect on Water/Sediment Heat Exchange in Two Dams of Guanajuato River, Mexico [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2017, 17: 873-876.
- [42] BUCCOLA N L, RISLEY J C, ROUNDS S A. Simulating Future Water Temperatures in the North Santiam River, Oregon [J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 318-330.
- [43] 陈文君,段伟利,贺斌,等.基于WASP模型的太湖流域上游茅山地区典型乡村流域水质模拟[J].湖泊科学,2017,29(4): 836-847.[CHEN Wen-jun, DUAN Wei-li, HE Bin, *et al.* Water Quality Modeling for Typical Rural Watershed Based on the WASP Model in Mountain Mao Region, Upper Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 836-847.]
- [44] JOHNSTON J M, BARBER M C, WOLFE K, *et al.* An Integrated Ecological Modeling System for Assessing Impacts of Multiple Stressors on Stream and Riverine Ecosystem Services Within River Basins [J]. Ecological Modelling, 2017, 354: 104-114.
- [45] TROLLE D, ELLIOTT J A, MOOIJ W M, *et al.* Advancing Projections of Phytoplankton Responses to Climate Change Through Ensemble Modelling [J]. Environmental Modelling and Software, 2014, 61: 371-379.

- [46] JANSSEN A B G, DE JAGER V C L, JANSE J H, *et al.* Spatial Identification of Critical Nutrient Loads of Large Shallow Lakes: Implications for Lake Taihu (China) [J]. *Water Research*, 2017, 119: 276–287.
- [47] MOOIJ W M, TROLLE D, JEPPESEN E, *et al.* Challenges and Opportunities for Integrating Lake Ecosystem Modelling Approaches [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(3): 633–667.
- [48] LIJKLEMA L, JANSEN J H, ROIJACKERS R M M. Eutrophication in the Netherlands [J]. *Water Science and Technology*, 1989, 21(12): 1899–1902.
- [49] JANSE J H, ALDENBERG T, KRAMER P R G. A Mathematical Model of the Phosphorus Cycle in Lake Loosdrecht and Simulation of Additional Measures [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 233(1/2/3): 119–136.
- [50] VAN PUIJENBROEK J T M P, JANSE J H, KNOOP J M. Integrated Modelling for Nutrient Loading and Ecology of Lakes in the Netherlands [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 174(1/2): 127–141.
- [51] JANSE J H. A Model of Nutrient Dynamics in Shallow Lakes in Relation to Multiple Stable States [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 342/343(1): 1–8. DOI: 10.1007/978-94-011-5648-6_1.
- [52] SCHEFFER M, HOSPER S H, MEIJER M L, *et al.* Alternative Equilibria in Shallow Lakes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, 8(8): 275–279.
- [53] SCHEP S A, HEERDT G T N J T, JANSE J H, *et al.* Possible Effects of Climate Change on Ecological Functioning of Shallow Lakes, Lake Loosdrecht as a Case Study [J]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 2007, 38: 95–104.
- [54] JANSE J H, DE SENERPONT D L N, 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]. *Limnologia*, 2008, 38(3/4): 203–219.
- [55] JANSSEN A B G, TEURLINCX S, AN S, *et al.* Alternative Stable States in Large Shallow Lakes? [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(4): 813–826.
- [56] KUIPER J J, VERHOFSTAD M J J M, LOUWERS E L M, *et al.* Mowing Submerged Macrophytes in Shallow Lakes With Alternative Stable States: Battling the Good Guys? [J]. *Environmental Management*, 2017, 59(4): 619–634.
- [57] JEPPESEN E R I K, SØNDERGAARD M, JENSEN J P, *et al.* Lake Responses to Reduced Nutrient Loading: An Analysis of Contemporary Long-Term Data From 35 Case Studies [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(10): 1747–1771.
- [58] 于瑞宏, 张笑欣, 刘廷玺, 等. 浅水湖泊稳态转换预警识别方法局限与展望 [J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3619–3627. [YU Ruihong, ZHANG Xiao-xin, LIU Ting-xi, *et al.* Forewarned is Forearmed: Limitations and Prospects of Early Warning Indicators of Regime Shifts in Shallow Lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3619–3627.]
- [59] NIELSEN A, BOLDING K, HU F J, *et al.* An Open Source QGIS-Based Workflow for Model Application and Experimentation With Aquatic Ecosystems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 358–364.
- [60] MOOIJ W M, HÜLSMANN S, DOMIS L N D S, *et al.* The Impact of Climate Change on Lakes in the Netherlands: A Review [J]. *Aquatic Ecology*, 2005, 39(4): 381–400.
- [61] MOOIJ W M, DE SENERPONT D L N, JANSE J H. Linking Species- and Ecosystem-Level Impacts of Climate Change in Lakes With a Complex and a Minimal Model [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(21): 3011–3020.
- [62] FRAGOSO C R Jr, MOTTA M D M L, FERREIRA T F, *et al.* Potential Effects of Climate Change and Eutrophication on a Large Subtropical Shallow Lake [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(11): 1337–1348.
- [63] KUZYAKA E. Modeling Impacts of Eutrophication and Climate Change in Lake Eymir Using PCLake Model [D]. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 2015.
- [64] NIELSEN 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*, 2016, 24(8): 1926–1944.
- [65] VAN LIERE L, JANSE J H. Restoration and Resilience to Recovery of the Lake Loosdrecht Ecosystem in Relation to Its Phosphorus Flow [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 233(1/2/3): 95–104.
- [66] HILT S, ALIRANGUES N M M, BAKKER E S, *et al.* Response of Submerged Macrophyte Communities to External and Internal Restoration Measures in North Temperate Shallow Lakes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 194. DOI: 10.3389/fpls.2018.00194.
- [67] SØNDERGAARD M, BJERRING R, JEPPESEN E. Persistent Internal Phosphorus Loading During Summer in Shallow Eutrophic Lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2013, 710(1): 95–107.
- [68] LASPIDOU C, KOFINAS D, MELLIOS N, *et al.* Investigation of Factors Affecting the Trophic State of a Shallow Mediterranean Reconstructed Lake [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 154–163.
- [69] BRUGGEMAN J, BOLDING K. A General Framework for Aquatic Biogeochemical Models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 61: 249–265.
- [70] VAN GERVEN L P A, BREDEVELD R J, DE KLEIN J J M, *et al.* Advantages of Concurrent Use of Multiple Software Frameworks in Water Quality Modelling Using a Database Approach [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2014, 186(1/2): 5–20.
- [71] BRYHN A C. A Morphometrically Based Method for Predicting Water Layer Boundaries in Meromictic Lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 636(1): 413–419.

作者简介: 胡文(1993—),男,四川西昌人,硕士生,主要从事湖泊水生态研究。E-mail: qingnianxiegang@163.com

(责任编辑: 许素)