

# 湖泊富营养化机理模型研究进展

潘婷<sup>1,2</sup>, 秦伯强<sup>1\*</sup>, 丁侃<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210024; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 湖泊富营养化机理模型是模拟和预测水质参数变化趋势和水体富营养化状态的有效工具, 可为水环境污染预防和治理提供数据支撑与科学依据。在回顾湖泊富营养化机理模型分类及发展的基础上, 重点分析和总结了 CAEDYM 模型、PCLake 模型、AQUATOX 模型和 WASP 模型等生态动力学模型研究热点, 探讨了各个模型的适用性与局限性; 并进一步从湖泊富营养化影响机制探究和水质水环境管理保护决策服务两方面梳理了富营养化模型的应用现状, 指出了富营养化机理模型当前存在的问题与发展方向, 旨在为模型研究和应用提供参考。

**关键词:** 湖泊; 富营养化机理模型; 影响机制; 决策服务

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1674-6732(2022)03-0001-06

## Progress in Lake Eutrophication Process-based Models

PAN Ting<sup>1,2</sup>, QIN Bo-qiang<sup>1\*</sup>, DING Kan<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Lake eutrophication process-based model is an effective tool to simulate and predict the variation trend of water quality parameters and eutrophication state of water body, and provide data support and scientific basis for water pollution prevention and control. This paper reviewed the classification and development of lake eutrophication mechanism models, mainly introduced CAEDYM, PCLake, AQUATOX and WASP, and discussed the applicability and limitations of each model. The application of eutrophication model was summarized respectively from the mechanism of eutrophication and decision-making services of water quality and water environmental management. We also pointed out the current problems and development direction of eutrophication model, aiming to provide reference for model application.

**Key words:** Lake; Eutrophication process-based model; Mechanism of eutrophication; Decision-making services

湖泊富营养化是全球最为突出的水环境问题之一, 严重影响人民生活和社会经济发展<sup>[1]</sup>。2020 年中国生态环境状况公报显示, 在开展营养状态监测的 110 个重要湖库中, 中富营养状态高达 90.9%, 我国水体富营养化状况不容忽视<sup>[2]</sup>。基于理论分析与实验结果相结合构建的湖泊富营养化机理模型, 能够揭示湖泊富营养化的发生发展机理, 评估和预测水质水环境变化趋势, 是开展湖泊定量评价和科学治理与管理的重要工具。自 20 世

纪 60 年代以来, 随着生态过程机理认识的深入, 富营养化机理模型不断发展<sup>[3]</sup>。现对目前国内外主要应用的湖泊富营养化机理模型的发展现状以及应用研究进展进行综述, 指出存在的问题和难点, 并对未来的研究方向进行展望, 以期开展富营养化机理模型研究及应用提供参考。

### 1 富营养化模型分类

湖泊的模拟在很多方面与河流不同, 由于湖泊

收稿日期: 2022-04-06; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020004)

作者简介: 潘婷(1997—), 女, 博士研究生, 研究方向为湖泊富营养化模型研究。

\* 通讯作者: 秦伯强 E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

换水周期较长,对水体富营养化敏感程度较大,对湖泊的研究侧重浮游植物的生长和营养盐的循环。传统研究中一般将富营养化模型分为 3 类:单一营养盐负荷模型、浮游植物相关模型和生态动力学模型<sup>[3]</sup>,然而第 1 类和第 2 类模型都是针对藻类与营养盐的关系建模,生态动力学模型又包含着前面 2 类的关键状态变量,因此,这种分类方法很难突出反映湖泊富营养化的要素。现根据富营养化模型的建模核心分为 3 类:第 1 类是以营养盐为核心的模型,第 2 类是以水体初级生产力为核心的模型,第 3 类是以湖泊整体为核心的生态动力学模型。这种分类方法考虑了影响富营养化的主要因素及其相互作用,第 1 类是以引起富营养化的直接因素营养盐为建模核心,第 2 类是以富营养化的重要衡量指标初级生产力为建模核心,第 3 类则是以整个湖泊动力场变化和生态系统的关系为建模核心。

### 1.1 以营养盐为核心的模型

早期模型大都是依据平衡准则研究水体中营养盐浓度的变化过程,典型代表是 Vollenweider (VOL) 模型。1968 年,加拿大湖沼学家 Vollenweider<sup>[4]</sup>首次建立了能够反映夏季蓝绿藻和磷负荷关系的模型,并于 1975 年提出了第 1 个预测水体营养状况的 VOL 模型。该模型假定水体均匀混合,依据物质平衡准则,湖泊水体中磷的变化等于单位容积内输入的磷减去输出的磷以及从水柱中沉积到底泥中的磷<sup>[5]</sup>,该模型能够预测湖泊中的营养盐的长期变化状况,但不能反映湖泊生态系统的动态发展过程,如未考虑底泥向水柱中释放磷的过程。研究表明,湖泊底泥释放的磷是湖泊中水体磷的主要来源之一,如太湖底泥释放的磷总量贡献了蓝藻水华暴发期间对磷需求总量的 23%~90%<sup>[6]</sup>。

研究人员采用涵盖营养盐与浮游植物 2 种要素的动力学方程去模拟浮游植物的动态生长变化过程。Dugdale<sup>[7]</sup>使用源自酶动力学的 Michaelis-Menten (M-M) 方程,描述了稳态条件下藻类生长随营养盐浓度的变化情况。两者的关系可用下式表示:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{S + K_s} \quad (1)$$

式中: $\mu$ ——生长速率; $\mu_{\max}$ ——最大生长速

率; $S$ ——环境水体中的营养盐浓度; $K_s$ ——营养盐半饱和和常数。

由于浮游植物具有储存营养盐的功能,可能会大量吸收环境水体中的营养盐,上述公式并未全面揭示藻类生长率动态变化的驱动机制,根据此种现象,Droop<sup>[8]</sup>认为藻类生长速率取决于细胞内部营养盐浓度。表达式如下:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \left(1 - \frac{C_0}{C}\right) \quad (2)$$

式中: $\mu$ ——生长速率; $\mu_{\max}$ ——最大生长速率; $C_0$ ——细胞内的营养盐的最低浓度; $C$ ——细胞内的营养盐浓度。

公式(2)将生长速率与细胞内环境联系起来,但藻类的生长实际上是细胞内外环境的综合反映<sup>[9]</sup>,该公式无法评估环境水体中营养盐的影响,将其作为湖泊管理模型使用时,则需要了解细胞内环境的营养盐变化过程,降低了模型的可利用性。

### 1.2 以水体初级生产力为核心的模型

湖泊水体的初级生产力是评价水体营养状况的重要指标。水体初级生产力的高低取决于溶解氧、光照、温度、营养盐、植物细胞内环境等多种因素。早期 Smith 等<sup>[10]</sup>提出生物-光学模式计算水体初级生产力。Behrenfeld 等<sup>[11]</sup>建立了估算水体初级生产力的 VPGM 模型,模型参数有温度、叶绿素 a 浓度等,其中各项参数可通过遥感监测的手段获得,该模型在估算湖泊、海洋等水体的初级生产力方面得到了广泛应用。

### 1.3 以湖泊整体为核心的生态动力学模型

湖泊生态系统动力学是以湖泊生态系统的结构、功能、时空变化规律为研究对象,并分析湖泊生态系统的胁迫-响应机制。生态动力学模型涵盖生态过程和水动力过程,以质量平衡为理论依据,主要考虑物理迁移扩散项以及由生物、化学、物理过程引起的源汇变化等,建立相关微分方程组,运用数值方法求解,模拟预测湖泊中的生物与非生物成分变化及其之间的相互作用等<sup>[12]</sup>。目前,国内外广泛应用的生态动力学模型有 CAEDYM、PCLake、AQUATOX、WASP、EFDC、MIKE、Deflt-3D、CEQUAL 系列等<sup>[13-14]</sup>,现重点介绍 CAEDYM、PCLake、AQUATOX、WASP 模型,其研发者、适用范围、关键状态变量、主要特点及局限性对比见表 1。

表 1 4 种常用生态动力学模型对比

模型名称	研发者	适用范围	关键状态变量	主要特点	局限性	参考文献
CAEDYM 模型	西澳大学水研究中心	湖泊、水库、河口、沿海水域等	营养盐、溶解氧、无机颗粒物、浮游动植物、鱼类、底栖生物等参数	可同水动力学模型耦合	模型所需初始数据较细,监测数据往往不包含;适合底泥释放比重大的湖泊	[15-17]
PCLake 模型	Janse 团队	浅水湖泊等	营养盐、浮游生物、底栖生物等参数	子模块可拆分	无水动力学模块	[18-20]
AQUATOX 模型	Park 团队	湖泊、水库、河流等	营养物、植物、动物、有机碎屑、悬浮沉积物等参数	各个生态过程概化处理较详细	不考虑无机污染物;不能模拟金属影响等	[21-22]
WASP 模型	美国环保局	湖泊、水库、河流、沿海水域等	氨氮、硝态氮、有机氮、有机磷、无机磷、浮游植物碳、溶解氧、化学物质、颗粒物等参数	模型设置较灵活,有“万能水质模型”之称	提供的水动力学过程为一维模型	[23]

### 1.3.1 CAEDYM 模型

CAEDYM 模型是由澳大利亚西澳大学水研究中心研发,基于传统的“N-P-Z”(nutrients-phytoplankton-zooplankton)模型延伸扩展,模型模拟对象主要有碳、氮、磷、溶解氧循环以及浮游动植物动力学过程,尤其适用于底泥释放比重大的湖泊<sup>[15]</sup>。CAEDYM 模型能够同一些水动力学模型进行耦合,进一步扩大其应用范围。根据研究目标的不同,可以与一维水动力模型如 DYRESM 模型耦合研究湖泊分层变化对生态系统的影响<sup>[16]</sup>,也可以与三维水动力模型如 ELCOM 模型耦合全面系统地研究湖泊生态系统内部变化规律<sup>[17]</sup>。

### 1.3.2 PCLake 模型

PCLake 模型是由荷兰湖沼生态模型学家 Janse 等研发,最初研发是针对温带地区的浅水非分层湖泊,该模型综合考虑了水柱和顶层沉积物中的生物过程和非生物变化过程,生物过程如有对 3 类浮游植物(蓝藻、绿藻和硅藻)的模拟,非生物过程如有对沉积物与水柱之间有机-无机物质交换的描述<sup>[18]</sup>。针对原模型非分层的局限,通过水生生物地球化学模型框架(FABM),PCLake 可与多维水动力模型耦合克服这一局限<sup>[19]</sup>。应用 PCLake 模型,也可确定湖泊稳态转换时的营养盐阈值,研究气候变化、生物操纵等对稳态转换的影响<sup>[20]</sup>。

### 1.3.3 AQUATOX 模型

AQUATOX 模型是由水生态模型 CLEAN 模型逐渐发展而来,由湖沼学家 Park 等研发,是为数不多的可以描述有毒化学物质的综合影响的生态风险评估模型之一,该模型同样也可以模拟传统的污染物的迁移转换过程<sup>[21]</sup>。通过对研究对象的物理过程(光、风、温度等)、生物过程(植物与动物)、营

养盐转化模拟以及有机有毒化学物质迁移等过程模拟,实现对研究水体生态系统的全面模拟<sup>[22]</sup>。

### 1.3.4 WASP 模型

WASP 模型是由美国环保局(EPA)研发的水质分析模拟软件,WASP 包含 2 个独立的计算程序:DYNHYD 和 WASP,2 个程序既可以联合运行,也可以独立运行。根据模拟污染物类型的不同,WASP 水质程序分为有毒化学模块(TOXI)和富营养化模块(EUTRO),可以模拟水体中溶解氧、氮、磷、藻类的迁移及其相互作用等,该模型比较适用于生态系统简单、毒性物质影响显著的湖泊<sup>[23]</sup>。

## 2 模型应用研究进展

### 2.1 富营养化影响机制探究

湖泊富营养化主要受到气候变化、水动力条件、外源营养盐负荷输入等因素的影响。近年的研究表明,气候变化和水动力条件是湖泊富营养化持续发展,特别是藻类水华暴发的关键因素<sup>[24-27]</sup>。现重点介绍并探究气候变化、水动力条件对湖泊富营养化影响的模型应用。

#### 2.1.1 气候变化

气候变化会造成气温、风速、降水模式等变化,并会对湖泊的物理特性、生物化学过程产生影响,富营养化机理模型是揭示气候变化对湖泊水环境影响机制的有效途径。关于气候变化这一因素的引入主要有 2 种方式,其一是在实测气象数据基础上直接加上变化幅度,其二是采用区域气候模式(RCM)降尺度输出数据作为富营养化模型的驱动变量。目前运用模型探究湖泊生态系统对气候变化的响应主要集中在 2 个方面,包括浮游植物生物量以及溶解氧浓度对气候变化的响应。

浮游植物的生长与温度显著相关,气温对水温产生直接影响<sup>[28]</sup>。在全球变暖背景下,水温升高会影响水体的稳定性,特别是对于深水湖泊而言,水温升高、分层期提前均会造成浮游植物春季物候提前;同时水温升高会提高藻类的光合作用及呼吸作用速率,进而使得藻类生长速率变化,在营养盐充足的湖泊,气候变暖延长了生长季节,进一步促进了藻类生长<sup>[29]</sup>。Alex 等<sup>[30]</sup>研究了气候变暖对 Bassen 湖中浮游植物生长过程的影响,应用 RCM 降尺度输出数据驱动 PROTECH 模型,结果显示水温升高,导致春季浮游植物生长提前,营养盐提前消耗限制了夏季水华的暴发。Trolle 等<sup>[31]</sup>运用一维湖泊生态模型 DYRESM-CAEDYM 研究气候变化对 3 种不同营养化程度湖泊的影响,预测温度变化对湖泊中总磷、总氮和叶绿素 a 的影响。Tang 等<sup>[32]</sup>根据 GCM 模型输出的气象数据,驱动 EFDC 模型模拟太湖在未来气候情景下的水质变化,结果表明,蓝藻暴发时间每 10 a 大约提前 6 d。

影响溶解氧生物化学机制的过程主要有大气复氧、碳化需氧、硝化作用耗氧、浮游植物耗氧、底泥耗氧、浮游植物制氧及细菌呼吸耗氧等<sup>[33]</sup>。富营养化模型立足于描述上述各个过程,以此研究溶解氧浓度变化的内在机制及驱动因子。水温、风速、风向可通过影响湖泊中这些物理、生物、化学过程影响溶解氧的空间分布和时间变化。Bocaniov 等<sup>[34]</sup>运用三维水动力生态模型 ELCOM-CAEDYM 探究 Erie 湖中溶解氧对气温、风速的响应,温度升高和风速降低会延长湖泊的热力分层时间,增加了低氧和缺氧区域的大小和持续时间。

湖泊对气候变化能迅速做出反应,气候变化直接与间接交互影响着湖泊的生态系统功能,运用富营养化模型能够定量衡量气候变化的影响大小以及进行归因分析,揭示气候变化对湖泊生态系统的影响亟须研究。

#### 2.1.2 水动力条件

水华暴发形成的必要条件之一是藻类长期处于弱水动力环境中<sup>[35]</sup>。水体水动力环境包括水力停留时间、水体扰动、流速等多种因子,这些因子与藻类生长繁殖密切相关,是影响水体富营养化的重要因素<sup>[36]</sup>。

针对野外观测数据的限制,运用水动力模型模拟湖流流场等,对于认识湖泊环境变化意义深远<sup>[37]</sup>。林卫青等<sup>[38]</sup>以淀山湖为研究对象运用

Delft3D 模型探究了水力停留时间对富营养化的影响,研究发现水力停留时间对水体中浮游植物是否过度生长有着重要影响。秦伯强<sup>[37]</sup>、胡维平<sup>[39]</sup>、吴挺峰<sup>[40-41]</sup>、李未<sup>[42]</sup>等针对太湖开展了一系列有关水动力影响的研究,研究结果表明在不同的风向和风力作用下,引起的水动力状态变化、水流对藻类的夹带和释放对蓝藻水华的暴发和消失意义重大,同时辐合区的分布与水华聚集区相一致,辐散区的分布与未发生水华的区域相一致,正是由于辐合区和辐散区的时空分布随风场的变化不断发生变化,导致了蓝藻水华在短时间尺度内的高度时空分异性。

水动力条件与湖泊水体的富营养化关系并不是简单的线性关系,以水动力学为基础,耦合生态模型,可以深入研究水动力因子对湖泊水体富营养化发展历程的影响<sup>[36]</sup>。

### 2.2 决策服务

#### 2.2.1 短期预警

藻类的大量生长繁殖是水华发生的重要原因,运用富营养化模型研究浮游植物的生长规律,对藻类生长状况进行分析评价,预测短期内湖泊浮游植物生物量的时空分布,对于做好防控预警工作意义重大<sup>[43-44]</sup>。随着模型方法的逐渐发展完善,以及高频监测数据的可获得性,使得藻类水华精准预测预警成为可能。

短期预警的工作主要是在生态动力学模型的基础上开展的,国内对太湖、巢湖等开展了一系列藻类水华短期预警研究,研究成果也得到了实践应用。针对太湖生态系统,李未等<sup>[45]</sup>建立了一种藻类水华短期数值预报方法,为实现水华的早期防控提供了有效的技术支撑;Zhang 等<sup>[46]</sup>研发了基于 Windows 系统的太湖生态模型(WSE)软件,该软件封装了相关函数、边界条件和参数设置等,模型预测结果与观测结果基本一致;叶瑞等<sup>[47]</sup>基于 ELCOM-CAEDYM 模型构建了太湖蓝藻水华预警平台,在已有研究基础上发现对于处在下风向的湖湾,湖湾外来蓝藻输入量的大小可能取决于湖湾的主轴线与风向之间的夹角。针对巢湖生态系统,扶磊等<sup>[48]</sup>基于 FVCOM-FABM-PCLake 生态动力学模型,研究发现水体中营养盐集中在巢湖湖西区域,该区域易聚积大量水华;蒋晨韵等<sup>[49]</sup>以巢湖 2016 年 9 月的实测数据为建模基础,模拟结果显示在温度适宜、营养盐充足的条件下,风速和风向是影响

水华暴发的关键因子;邱银国等<sup>[50]</sup>构建的巢湖水动力-水质-藻类耦合的水华预测预警模型,对于实现蓝藻水华科学防控意义重大。水华预警结果的准确度取决于生态模型的模拟精度,驱动预警模型气象因子的预测,且后期现场测定结果存在一定的不确定性,预测会产生一定的差异。

### 2.2.2 湖泊管理

湖泊管理修复的主要措施之一是削减营养盐负荷,富营养化模型能够模拟营养物削减与湖内水质响应的关系,为湖泊管理提供科学依据和数据支撑。Zhang等<sup>[51]</sup>运用生态模型WASP,研究了Winnipeg湖多个氮磷负荷情景,评估氮磷负荷变化对湖泊生态系统的潜在影响,结果显示削减磷负荷后,与参考营养盐负荷情景相比,蓝藻占比随之下降,夏末浮游植物生物量峰值降低,促进了非固氮蓝藻的生长。陈小华等<sup>[52]</sup>采用Mike-Ecolab水动力-富营养化耦合模型模拟营养盐负荷衰减对洱海水环境的影响,在预设的4种入湖营养物负荷削减模式下,在2015年均可达到二级标准推荐值(0.44mg/L),在2030年可能达到一级标准推荐值(0.23 mg/L)。

以上研究都是基于假定的营养盐负荷削减情景,研究结论与实际应用存在一定的差距,无法直接应用到湖泊的具体管理实施过程,因此需要将水文模型、面源污染模型与富营养化模型耦合,模拟湖泊对流域实际营养盐负荷输入的响应过程,但水文模型、面源污染模型与富营养化模型累积的不确定性限制了建模成果的应用。

### 3 总结与展望

本文综述了一系列复杂程度不同的富营养化机理模型的研究重点与适用范围,需要根据特定研究目标选取合适的模型解决水环境问题。以营养盐、初级生产力为核心的富营养化模型结构简单、应用方便,在一定程度上可以预测水体水质状况;但浮游植物的生长不仅与细胞内环境、水体中营养盐有关,水体中的其他生物与非生物成分、水动力条件、外部环境中的气象条件等都会对浮游植物生长过程产生影响,生态动力学模型的建立为综合考虑这些因子提供了方法。生态动力学模型基于机理过程能动态展示富营养化发生发展过程,更符合实际,精度较高,但是这类模型的构建需要跨学科的认知基础,包含的参数众多,需要高质量的历史

数据进行率定,且有些参数较难测量或获取成本较高,参数识别有一定的难度且需花费大量的时间。

在富营养化机理模型的发展中也存在一些问题:(1)富营养化机理模型的不确定性主要源于模型结构、监测数据分辨率、参数等。模型中关于物理、生物化学过程的处理包含着一定的假设和概化,不同模型对各个过程的处理存在差异,多模型联合应用可以降低建模结果的不确定性及加强模型的稳健性;现阶段遥感技术的应用可提供时空分辨率更高的数据,提高对有害蓝藻水华风险的理解,进而改进模型,因此,监测技术的进步也可能会促进模型的改进。(2)模型的复杂程度与模拟精度的关系并不呈单调递增关系,模型并非越复杂精度越高,明确研究目标后,在建模时应抓住主要矛盾、关键过程,才能在有限的资源下,更好地研究湖泊富营养化过程。

### [参考文献]

- [1] PAERL H W, OTTEN T G, KUDELA R. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(10):5519-5529.
- [2] 生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. *环境保护*, 2021, 49(11):47-68.
- [3] 全为民, 严力蛟, 虞左明, 等. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. *生物多样性*, 2001, 9(2):168-175.
- [4] VOLLENWEIDER R A. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors[R]. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development, 1968.
- [5] VOLLENWEIDER R A. Input-output models [J]. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 1975, 37(1): 53-84.
- [6] XU H, MCCARTHY M J, PAERL H W, et al. Contributions of external nutrient loading and internal cycling to cyanobacterial bloom dynamics in Lake Taihu, China: Implications for nutrient management[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(4): 1492-1509.
- [7] DUGDALE R C J. Nutrient limitation in the sea: Dynamics, identification, and significance I[J]. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12(4): 685-695.
- [8] DROOP M R. The kinetics of uptake, growth and inhibition in *Monachyais lutheri*[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1968, 48: 680-733.
- [9] DI T, DOMINIC M. Applicability of cellular equilibrium and Monod theory to phytoplankton growth kinetics[J]. *Ecological Modelling*, 1980, 8: 201-218.

- [10] SMITH R C, TYLER J E. Transmission of solar radiation into natural waters[M]. Springer US, 1976.
- [11] BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 1–20.
- [12] 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(6): 1169–1175.
- [13] ANAGNOSTOU E, GIANNI A, ZACHARIAS I. Ecological modeling and eutrophication—a review[J]. *Natural Resource Modeling*, 2017, 30(3): e12130.
- [14] 邓大为. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. *湖南水利水电*, 2018(6): 71–74.
- [15] HIPSEY M R, ROMERO J R, ANTENUCCI J P, et al. Computational aquatic ecosystem dynamics model: CAEDYM v2[R]. Perth: Centre for Water Research, University of Western Australia, 2006: 1–8.
- [16] 陈黎明, 钱新, 张玉超, 等. 基于 DYRESM-CAEDYM 模型的太湖污染控制效果评估[J]. *中国科技论文在线*, 2009, 4(5): 373–378.
- [17] 卢嘉, 陈小华, 李小平. 基于 ELCOM-CAEDYM 模型的淀山湖营养物投入响应关系的模拟[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 366–374.
- [18] JANSE J H. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches[M]. Wageningen University and Research, 2005.
- [19] HU F, BOLDING K, BRUGGEMAN J, et al. FABM-PCLake—linking aquatic ecology with hydrodynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(6): 2271–2278.
- [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.
- [21] PARK R A, CLOUGH J S. Aquatox (release 3.1 plus), modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems, volume 2: Technical documentation[R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency (US EPA), 2014: 1–12.
- [22] 胡文, 李春华, 叶春, 等. 生态模型在水体富营养化研究领域的应用进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 349–362.
- [23] AMBROSE B, WOOL T A, MARTIN J L. The water quality analysis simulation program, WASP6, User Manual[R]. Athens, GA: US EPA, 2001: 80–88.
- [24] DENG J M, ZHANG W, QIN B Q, et al. Winter climate shapes spring phytoplankton development in non-ice-covered lakes: Subtropical Lake Taihu as an example[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(9): e2019WR026680.
- [25] QIN B Q, ZHOU J, ELSER J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in Lakes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3191–3198.
- [26] QIN B Q, DENG J M, SHI K, et al. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR029371.
- [27] ZHANG Y L, QIN B Q, ZHU G W, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: Implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4319–4331.
- [28] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229–1243.
- [29] 邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 1–10.
- [30] ALEX E J, THACKERAY S J, HUNTINGFORD C, et al. Combining a regional climate model with a phytoplankton community model to predict future changes in phytoplankton in lakes[J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(8): 1404–1411.
- [31] TROLLE D, HAMILTON D P, PILDITCH C A, et al. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 354–370.
- [32] TANG C, LI Y, JIANG P, et al. A coupled modeling approach to predict water quality in Lake Taihu, China: linkage to climate change projections[J]. *Journal of freshwater ecology*, 2015, 30(1): 59–73.
- [33] 欧阳潇然, 赵巧华, 魏赢珠. 基于 FVCOM 的太湖梅梁湾夏季水温、溶解氧模拟及其影响机制初探[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 478–488.
- [34] BOCANIOV S A, LAMB K G, LIU W, et al. High sensitivity of lake hypoxia to air temperatures, winds, and nutrient loading: Insights from a 3-D lake model[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): e2019WR027040.
- [35] 吴挺峰, 秦伯强, 马健荣, 等. 浅水富营养化湖泊中蓝藻群体运动研究述评[J]. *科学通报*, 2019, 64(36): 3833–3843.
- [36] 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 455–462.
- [37] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 327–334, 385.
- [38] 林卫青, 卢士强, 陈义中, 等. 应用生态动力学模型评价上海淀山湖富营养化控制方案[J]. *上海环境科学*, 2010, 29(1): 1–10.
- [39] 胡维平, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究——4. 保守物质输移扩散[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(4): 310–316.
- [40] WU T, QIN B, ZHU G, et al. Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8546–8556.
- [41] WU T, QIN B, BROOKES J D, et al. The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518: 24–30.
- [42] LI W, QIN B Q. Dynamics of spatiotemporal heterogeneity of cyanobacterial blooms in large eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 833: 81–93.

(下转第 26 页)

- [J]. 中国农业科学, 2014, 47(15): 2998 - 3008.
- [7] 李天祺, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 环境星 NDVI 时间序列重构方法研究[J]. 遥感信息, 2015, 30(1): 58 - 65.
- [8] 张玉君. Landsat 8 简介[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 176 - 177.
- [9] 王佳月, 辛良杰. 基于 GlobeLand 30 数据的中国耕地与粮食生产的时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 1 - 8.
- [10] 李军, 朱慧. 重庆地区 MODIS/NDVI 时间序列数据重建研究[J]. 地理科学, 2017, 36(1): 437 - 444.
- [11] 李儒, 张霞, 刘波, 等. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述[J]. 遥感学报, 2009, 13(2): 335 - 341.
- [12] BECK P S A, ATZBERGER C, HØGDA K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321 - 334.
- [13] 李晶, 邵文飞, 秦元萍, 等. 归一化植被指数时序数据拟合算法对比分析[J]. 中国矿业, 2016(S2): 317 - 323.
- [14] 辜智慧. 中国农作物复种指数的遥感估算方法研究——基于 SPOT/VGT 多时相 NDVI 遥感数据[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.
- [15] 王玮, 郭锐, 沙莎, 等. 我国西北地区东部时间序列 NDVI 数据集重建方法比较研究[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 1 - 13.
- [16] 韩晓勇. MODIS 陆表产品数据重建与时间序列分析[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [17] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1777 - 1786.
- [18] 于信芳, 庄大方. 基于 MODIS/NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111 - 117.
- [19] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 基于时序植被指数的东北地区耕地生长季特征识别与应用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 882 - 892.
- [20] 李晶, 焦利鹏, 申莹莹, 等. 基于 IFZ 与 NDVI 的矿区土地利用/覆盖变化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2822 - 2829.
- [21] MA M G, VEROUSTRATE F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China[J]. Advances in Space Research, 2006, 37(4): 835 - 840.

(上接第 6 页)

- [43] 陈声威. 水体富营养化预警模型研究现状和发展趋势[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(4): 5 - 8, 10.
- [44] 黄卫, 陈鸣, 徐亮. 太湖梅梁湾水环境监控预警体系研究[J]. 环境监控与预警, 2009, 1(1): 6 - 9.
- [45] LI W, QIN B Q, ZHU G W. Forecasting short-term cyanobacterial blooms in Lake Taihu, China, using a coupled hydrodynamic - algal biomass model[J]. Ecohydrology, 2014, 7(2): 794 - 802.
- [46] ZHANG HJ, HU WP, GU K, et al. An improved ecological model and software for short-term algal bloom forecasting[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48: 152 - 162.
- [47] 叶瑞. 太湖蓝藻水华季节性营养盐限制及其短期预警决策支持系统[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [48] 扶磊. 基于 FVCOM 模型模拟巢湖的水动力和水质过程[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [49] 蒋晨韵, 唐晓先, 王臻, 等. 气象因子对巢湖水源地蓝藻水华暴发的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10): 281 - 286.
- [50] 邱银国, 段洪涛, 万能胜, 等. 巢湖蓝藻水华监测预警与模拟分析平台设计与实践[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 38 - 48.
- [51] ZHANG W, RAO Y R. Application of a eutrophication model for assessing water quality in Lake Winnipeg[J]. Journal of Great Lakes Research, 2012, 38: 158 - 173.
- [52] 陈小华. 富营养化初期湖泊(洱海)的环境演变及营养物基准/标准研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.