

湖泊的水生态模型^{*}

牛志广 王秀俊^{**} 陈彦熹

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要 由于城市化进程的不断加快,大量的污染物排放到湖泊中,打破了湖泊的生态平衡。湖泊的水生态模型不仅能够研究湖泊的富营养化现象,而且还可以模拟工业毒物等污染物对湖泊生态系统的影响,是湖泊管理的有力工具。本文从分析湖泊的污染现状以及污染趋势出发,介绍了湖泊水生态模型的研究现状,并根据模型的模拟对象和空间模拟能力对湖泊水生态模型进行了分类。在此基础上介绍了 AQUATOX、PAMOLARE、CAEDYM、WASP、OOMAS 等比较成熟的模拟湖泊生态系统的模型软件,阐述了它们的产生、发展、主要特点以及应用,总结了当今湖泊水生态模型在模拟过程中遇到的问题,并对水生态模型的发展趋势进行了展望。本文为湖泊水生态模型的选择提供了建议。

关键词 湖泊生态系统;富营养化;水生态模型

中图分类号 X524 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)1-0217-09

Lake aquatic ecosystem models: A review. NIU Zhi-guang, WANG Xiu-jun^{**}, CHEN Yan-xi (*School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(1): 217-225.

Abstract: With the rapid development of urbanization, a large amount of contaminants are discharged into lakes, and break the ecological balance of the lakes. Lake aquatic ecosystem model can not only analyze the lake eutrophication, but also simulate the impacts of industrial poisons on lake aquatic ecosystem, being a useful tool of lake management. This paper analyzed the current status and tendency of lake pollution, introduced the research progress on the lake aquatic ecosystem models, and classified them based on the simulation objects and the spatial modeling capabilities. Some widely used simulation software of the aquatic ecosystem, such as AQUATOX, PAMOLARE, CAEDYM, WASP, and OOMAS were introduced, and their generation, development, characteristics, and applications were expatiated. The existing problems of the lake aquatic ecosystem models in modeling process were summarized, and the development trends of the models were predicted. Some suggestions for the selection of lake aquatic ecosystem models were proposed.

Key words: lake ecosystem; eutrophication; aquatic ecosystem model.

湖泊是重要的生态系统,在生物地球化学循环和营养盐流动方面发挥着重要作用,而且湖泊也是自然景观的重要组成部分,对生态环境有十分重要的服务功能。湖泊在维系区域水安全、生态安全和环境安全中具有供给、支撑、调节和美学四大功能(翁白莎等,2010)。湖泊生态系统的健康是指满足人类社会合理要求和湖泊生态系统自我维持与更新的能力(胡志新等,2005)。但是,近年来随着经济

的迅猛发展,大量富含营养物质的生活污水和工业废水未经任何处理直接排入湖泊中,使湖泊受到严重的污染,导致湖泊的富营养化趋势逐年加剧。湖泊的富营养化会对湖泊造成严重的危害,破坏湖泊生态系统的平衡,加速湖泊的老化,使湖泊生态系统的健康遭到破坏,在很大程度上制约了湖泊资源的可利用性和社会发展的可持续性(陈永灿等,1998)。因此,世界性的水污染治理难题和国际湖泊学界关注的重点问题就是水体的富营养化问题(王旭东,2008)。另外,随着工业化进程逐年加快,必然会产生大量的工业毒物。工业毒物排入到湖泊

^{*} 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-002-005)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: wangxiujun881028@163.com

收稿日期: 2012-06-21 接受日期: 2012-10-18

生态系统中会产生严重的负面影响,如人体接触到含有工业毒物的湖水时会引发局部刺激或过敏反应,甚至能够引起全身中毒,从而损害神经系统、消化系统和呼吸系统,而且它能够对人体产生远期影响,具有致突变作用、致畸作用和致癌作用。因此,利用湖泊的水生态模型来研究富营养化和工业毒物对生态系统的影响已成为当务之急。随着计算机科学的飞速发展,如何进一步研究和优化湖泊的水生态模型就显得尤为重要了。本文以分析湖泊生态系统的污染现状和污染趋势为基础,介绍了湖泊水生态模型的分类,并且具体阐述了 AQUATOX、PAMOLARE、CAEDYM、WASP、OOMAS 等较为成熟的湖泊水生态模型软件。通过对不同水生态模型的分析,总结了目前的湖泊水生态模型存在的一些问题,并预测和展望了湖泊水生态模型的最新发展趋势和研究方向,为湖泊水生态模型的选择提供了建议。

1 湖泊水生态模型的分类

1.1 按模拟对象进行分类

1.1.1 水动力模型 20 世纪 70 年代中期,湖泊的水动力模型进入快速发展的时期。水动力模型是以水动力学为理论依据的模型,主要用来研究湖泊在不同的外力条件作用下的湖流流动特征及污染物在湖泊中的分布特征,是湖泊日常管理和决策的有力工具(高庆先等,2001)。在国外,Simons(1973)是最早致力于完整的湖泊水动力模拟研究的专家,他建立了安大略湖二维冬季环流的数值模式,并提出了计算大面积湖泊环流的多层模式;H. G. Ramming 建立了北美艾利湖和安大略湖的水动力模式,为分析湖体内部各要素的相互关系提供了理论支持(高庆先,2001)。在国内,湖泊水动力模型的研究起步较晚,但也取得了较大的成就。罗淑葱(2004)利用湖泊的水动力模型系统地描述了太湖的湖流状况;李一平等(2012)以太湖为研究对象,采用拉丁超立方取样,研究了湖泊水动力模块中常用的 5 个参数对湖体水位和流速的影响,得出风场参数和床面粗糙高度对模拟结果的不确定性贡献最大。近年来,为了使湖泊的水动力模型更真实的描述湖流状况,国内外的模型研究者正致力于湖泊的三维水动力模型的研究,并逐渐将其应用到实践中。

1.1.2 水质模型 20 世纪 80 年代,湖泊水质模型的发展十分迅速。水质模型主要用来描述污染物在水环境中的变化规律与影响因素之间的关系。该模

型是水环境研究的重要内容也是重要工具(穆迪,2006)。水质模型的发展大致分为四个阶段(孙颖等,2001;徐祖信和廖振良,2003):第一阶段(1925—1965 年)主要采用一维计算方法研究比较简单的生化需氧量(BOD)和溶解氧(DO)的双线性模型,主要用来模拟受生活污水和工业废水严重污染的河流;第二阶段(1965—1970 年)在 BOD-DO 模型的基础上,水质模型发展为 6 个线性系统;第三阶段(1970—1975 年)开发了相互作用的非线性系统模型,而且生态水质的模型研究正处于初级阶段;第四阶段(1975 年以后)在第三阶段的基础上开发了多种相互作用的系统,并且空间尺度已经发展到三维。近年来,水质模型主要用来进行水质评价、水质预测和湖泊管理。水质模型在应用时所需要的数据较少且形式简单,因此具有较强的适用性和灵活性。但是,当今的水质模型并未完全认清介质中污染物的迁移转化过程,使模拟结果与实际情况偏差较大(张龙涛,2008);在模拟流速较快的湖泊时,不能精确地反映水体中各种营养物质的相互作用,使预测精度大大降低。Dahl 等(2006)在 2003 年用水质模型 LEEDS 对湖泊中悬浮颗粒和磷含量进行了模拟;2004 年,Arhonditsis 和 Brett(2005)模拟了美国的 Washington 湖的化学和生物特性。国内对于水质模型的应用主要集中在东湖、滇池和太湖等大型湖泊。刑可霞等(2005)以滇池为研究对象,用水质模型对其水文水质过程进行了模拟;上海市科委在对苏州河进行综合整治的过程中,对 WASP 模型进行了二次开发,首次研制成功了基于 GIS 技术和感潮河网水动力水质模型的水环境综合整治决策支持系统,并将其用于大规模的水系水环境改善措施工程分析(Wang *et al.*, 2005)。近年来,国内外水质模型发展迅速,并且开展了基于人工神经网络和地理信息系统的水质模拟研究,使模拟功能越来越强大,为湖泊、水库等水生态系统的管理提供了有效的工具。

1.1.3 生态模型 20 世纪 70 年代后期,湖泊的水生态模型取得了突破性的进展,并出现了更加复杂的描述湖泊生态系统要素的模型。此时的湖泊水生态模型开始用来揭示湖泊生态系统的动力学变化,并开始用多层、多室、多成分的复杂模型对湖泊中的化学、物理、生物生态和水动力过程进行模拟(Nyholm, 1978)。生态模型主要用来研究生态系统中各变量的动力学变化以及描述物种组成和物种性质的时间和空间变化(Jørgensen, 1986)。生态模型考

虑了湖泊生态系统中各营养物质的时空变化,并且更加细致地描述了湖泊中的各种变化过程,使模型的模拟更加精确。但是,该模型中包含大量的状态变量、驱动变量以及模型参数,导致在应用此模型时需要大量的监测数据,从而降低了模型的模拟精度;生态模型对于各途径的动力学描述、在软件中的实现方法以及模型的相关假设,因各位学者的观点不同存在很大的歧义(张军和周琪,2004)。生态模型在国内外均得到了广泛的应用。在国外,Sagehashi等(2001)以巴拉顿湖为研究对象建立了该湖的生态动力学模型,并用蒙特卡洛的方法对模型进行了校正;Angelini和Petrere(2000)建立了ELLOBO模型,此模型较准确地模拟了水体中浮游动物、浮游植物和鱼类之间的相互关系。在国内,朱永春和蔡启铭(1997)探讨了水动力作用下太湖蓝藻水华的迁移、聚集规律和垂直分布特性;胡维平等(1998)建立了风声流和风涌增减水的三维数值模型,模拟了湖泊的流动特性对湖泊生态系统的影响。由于模型参数会随着季节、地区甚至时段的变化而发生很大的变化,因此,近几年很多研究者忽略模型的普遍适用性,从每一个研究对象的特性出发,开始致力于开发适合某一类水体的生态动力学模型,并且取得了一系列的显著成果(刘涛,2005)。为了适应湖泊生态系统管理的目标,未来的生态模型应该致力于模拟和预测湖泊生态系统的变化,并结合生态系统健康评价等方法预测湖泊未来的发展趋势(刘永等,2006)。对于生态模型的研究趋势,可以总结为两种:一是要将研究的重点放到生物上,主要致力于研究湖泊中污染物的生物积累和对种群的影响,建立生物种群动态模型;二是要试图通过对化学污染物的研究,与生态效应建立某种联系,从而进一步预测水体中污染物的生态风险性(何孟常和杨居荣,1999)。

1.1.4 水质-生态-水动力耦合模型 20世纪70年代中期以后,陆续出现了水质-生态-水动力耦合模型,并在以后的发展中取得了显著的成效。该模型是以质量平衡方程和对流-扩散方程为基础,以水动力学为理论依据,主要考虑物理迁移扩散、生化反应以及源、汇等因素的模型。此模型的应用范围广泛,而且可以根据实际情况选择复杂程度不同的模型(Jørgensen, 1995)。但是它不能够描述湖泊的所有生态过程,且受各种因素的影响较大,需要考虑的因素比较复杂,在使用此模型时需要以大量的数据为

基础;模型的通用性较差,特定的参数只适用于特定的湖泊。水质-生态-水动力耦合模型在国内外均得到了广泛的应用。Silow等(1995)用该耦合模型对湖泊生态系统进行了数值模拟;Rukhovets等(2003)以湖泊的水动力学为基础,建立了浮游动物、碎屑、营养盐、溶解性有机物、磷和溶解氧浓度的水质-生态-水动力的耦合模型。国内的研究主要集中在巢湖、滇池和太湖等富营养化严重的湖泊。如李一平等(2004)将三维风生湖流模型和二维水质模型耦合,建立了太湖的模拟模型。近年来,水质-生态-水动力耦合模型的发展主要集中在描述湖泊生态系统在营养物质富集的过程中对季节变化的响应,但是由于各种因素的影响,使模型的研究变得十分困难。

1.2 按空间模拟能力进行分类

1.2.1 零维模型 零维模型通常用于理想状态下湖泊生态系统的模拟。但是,在某些特殊的情况下,如对湖泊生态系统进行粗略的模拟规划或将所研究的系统单元概化为一个完全混合的反应器,且不涉及水动力学方面的信息时,也可以应用零维模型进行模拟研究(王玲杰等,2005)。一般情况下,零维模型常用于内部各水团间混合均匀的小型浅水湖泊。零维模型的结构简单,所需基础资料较少,应用方便。但是,它的应用条件比较严格,且考虑的问题比较粗略,大大限制了它的广泛应用(王旭东,2008)。国内外应用零维模型模拟湖泊水生态系统的实例较少,应文晔等(2005)以浅水型城市湖泊惠州西湖为研究对象,以西湖水体完全混合的假设和实际监测资料为基础,建立了惠州西湖的零维总磷模型。

1.2.2 一维模型 一维模型常用于建立湖泊生态系统的垂向模型,该模型忽略了水平输运引起的湖泊生态系统的变化,多用于研究在水平方向变化不明显的较大湖泊的年际变化(樊娟等,2010)。一维模型仅能反映全湖的平均效果,并不能反映空间上的变化情况。水质模型发展的初期均为一维稳态模型,其中比较有代表性的模型是S-P模型和BOD-DO的耦合模型。Perroud等(2009)以Geneva湖为研究对象,对比分析了4种一维模型模拟湖泊水温剖面的能力;柏菊和王振龙(2011)利用一维水质模型,建立了淮北市区纳污能力模型,对水功能区的纳污能力进行了定量计算;马惠群(2007)针对济南市河流和湖泊的特点,采用一维水质模型和二维水质模型分别对小清河睦里庄—黄河站段和大明湖进行

了模拟,制定了济南市水环境的治理措施。

1.2.3 二维模型 二维模型主要用来研究湖泊的水流在某一坐标方向混合较均匀,而在另两个坐标方向的变化梯度较大的情况(王玲杰等,2005)。二维模型分为平面二维模型和竖向二维模型两种情况,前者是指水体的流速和污染物仅在水平面的纵向和横向变化,在竖向(水深方向)混合均匀,变化梯度较小;后者是指水体的流速和污染物仅在纵向和竖向变化,横向基本不变(陶涛等,2012)。其中,平面二维模型主要用来研究宽深比较大的宽浅型湖泊。二维模型是由 Hansen 第一个提出的,用于计算浅水海域的水位变化过程及潮流(刘炜,1999)。目前,二维模型已发展的较为成熟。但是,二维模型不能得到速度的垂向分布,常用半经验公式求解湖泊表面风应力及底部摩擦项,限制了模型求解的精度(马惠群,2007)。近年来,二维模型在国内外都得到了很大的发展,并广泛应用于实际工程。Boegman 等(2001)利用二维模型 CE-QUAL-W2 来模拟 Erie 湖的垂向温度结构的季节性波动,并对模型进行了校正;Ji 等(2007)建立了以湍流扩散和浅水方程为基础的二维水流水质模型,并以太湖的 COD_{Mn} 的模拟为例,证明了所建立模型的准确性,为浅水湖泊的水流和水质的模拟提供了新方法;刘玉生等(1991)把生态动力学模型、箱模型以及二维水动力学模型相结合,建立了滇池的富营养化模型;赖锡军等(2011)基于二维浅水方程和对流扩散方程构建了鄱阳湖二维水动力和水质的耦合模型。

1.2.4 三维模型 三维模型是湖泊生态系统模型发展的高级阶段,用来模拟研究湖泊生态系统在垂向、侧向和纵向的三维空间的分布特征(樊娟等,2010)。三维模型能反映湖泊的实际水流状况,特别适合于研究深水湖泊。但是,三维模型的应用缺乏灵活性和普适性,一套模型参数仅适用于一个湖泊生态系统;环境污染和人类活动会对湖泊生态系统产生冲击作用,使模型的模拟结果缺乏准确性;三维模型计算费时,需要的基础数据较多,且需要输入较多的参数;模型结构复杂,校正和验证较困难(Molen, 1994; Peterson *et al.*, 1999)。虽然真实的湖泊生态系统都是三维的,但是三维模型的应用仍存在许多局限,尚处于探索阶段,在实际的湖泊模拟研究中往往采用零维、一维或二维的模型来对湖泊进行模拟。三维模型在国内外应用相对较少,在国外, Menshutkin 等(1998)以水动力学方程为基础,

建立了三维生态动力模型,模拟了浮游植物、浮游动物、营养盐及溶解氧的相互关系和多年动态变化关系;Hu 等(2006)以太湖为研究对象,建立了以环境特征分析为基础的三维生态模型,并用实测数据对模型进行了校正和验证。在国内,王惠中(2001)以太湖为研究对象,对太湖风声水动力场进行模拟,并针对太湖的环境保护问题,建立了三维水质模型,提出了太湖水污染防治的策略;韩龙喜等(2011)以西北咸水湖泊艾比湖为研究对象,建立了三维水动力模型,分析了风力作用下高盐度湖泊风声流形成过程以及风声流水动力参数的三维空间分布特征。

2 湖泊的水生态模型软件

湖泊的水生态模型是目前应用最为广泛地模型,随着湖泊水生态模型的迅速发展,逐步开发出一些用于湖泊生态动力学模拟的软件。这些用于模拟湖泊生态系统的模型软件主要有: AQUATOX、PAM-OLARE、CAEDYM、WASP、OOMAS 等。各种成熟的水生态模型软件的特征比较如表 1 所示。

2.1 AQUATOX

AQUATOX 是美国环保局(EPA)于 2005 年 12 月发布的。它是始于水生态系统模型 CLEAN(李典谟和马祖飞,2002)的最新长系列模型。随后在与欧洲水生生物实验室研究员的磋商中形成了 CLEANER 系列和 LAKETRACE(孙勤芳等,1994)系列。AQUATOX 是用来评价过去、现在和未来的来自各种因素的直接或间接影响的常规机械风险评价模型(Park *et al.*, 2008)。AQUATOX 描述生态系统的概念模型如图 1 所示(曹小娟,2006)。Rashleigh 等(2009)用 AQUATOX 模型描述湖泊中 PCB 的食物网动力学特征,并用鱼的生物量的实测数据对模型进行校正,发现 PCB 的模拟值与实测值基本相同,得出用 AQUATOX 模型对参数进行敏感性分析是今后发展的趋势;Morkoç 等(2009)调查污染物荷载对湖泊水质的影响,并用 AQUATOX 模型模拟 3 种特定的场景,得出不同场景下营养物质及植物的变化情况;Bilaletdin 等(2011)用 AQUATOX 模型对湖泊的动力学进行模拟,并分析了湖泊的污染状况和富营养化问题;Taner 等(2011)用 HSPF 和 UFILS4 机械模型模拟气候变化对流域的水文学和热量平衡的影响,然后将其结果导入到 AQUATOX 生态模型中进行分析,建立了气候变化对湖泊潜在影响的大体框架;Park 等(2008)用 AQUATOX 模拟

表 1 各种成熟水生态模型软件的特征比较
Table 1 Comparison of mature software of the aquatic ecosystem models

软件名称	研究主体	模拟问题	状态变量	驱动变量	参数	生物成分	应用实例
AQUATOX 软件	湖泊、池塘、河流、水库、河口	预测不同的污染物的相互转化、在环境中的归宿及其对生态系统的影响	生物体、碎屑成分以及与之相关的有毒物质、营养物质、溶解氧等	入流水量、pH 值、温度、光、风	主要分为化学物质参数、动物参数、植物参数、场所参数、重矿化参数以及毒性参数	藻类、大型水生植物、无脊椎动物、鱼	洞庭湖、淀山湖、太湖、Hartwell 湖、Omerli 水库、Onega 湖等
PAMOLARE 软件	湖泊、湿地等	主要用来模拟湖泊的富营养化现象	12 个状态变量 (各种形态的氮和磷、浮游动物、浮游植物、残渣、鱼类、植物等)	无	共 31 个参数 (其中 Ext. Coefficient, Decomposition Rate, Sedimentation Rate, Diffusion Rate 较为敏感)	浮游动物、浮游植物、鱼、大型水生植物	Glums ø湖、Fure 湖、Sete Cidades 湖、Denmark 湖等
CAEDYM 软件	湖泊、水库等	用来模拟水生态系统的动态变化,模拟 C、N、P、Si 以及 DO 的循环过程,模拟多种无机悬浮颗粒和藻类的动力学过程	112 个状态变量 (生物地球化学、浮游植物、浮游动物、鱼类、水母、底栖生物、病原体、金属等)	无	很多,主要分为与沉淀相关的参数、化学参数、生物参数等	大型水生植物、浮游植物、病原菌、浮游动物、鱼	太湖、淀山湖、巢湖、Kinneret 湖、Daecheong 水库、Okareka 湖、Rotoehu 湖等
WASP 软件	池塘、水库、河流、河口和沿海水域	模拟地表水中污染物的运移和转化,可用于一维、二维、三维的模拟问题,被称为万能水质模型	氨态氮、硝酸盐氮、磷、浮游植物、COD、DO、有机氮和有机磷、金属、有机化学物质和泥沙	无	生物常数、化学常数、颗粒态物质的沉降速度等	浮游植物	白洋淀、三峡库区、汉江、东昌湖、辽河、太湖、Niagara 河、Carp 湖等
OOMAS 软件	湖泊等	用于生态动力学模拟,也可用来动态的演示湖泊的水位、流速、营养盐 (C、N、P)、水生生物量随时间的变化趋势	营养盐、溶解氧、碎屑、颗粒物、水生生物、光环境	无	40 多类参数 (如温度常数、藻中氮的最高浓度、藻中磷的最高浓度、氮碳比、磷碳比、扩散系数、摩擦系数、沉降速率、消光系数等)	水生生物	太湖等

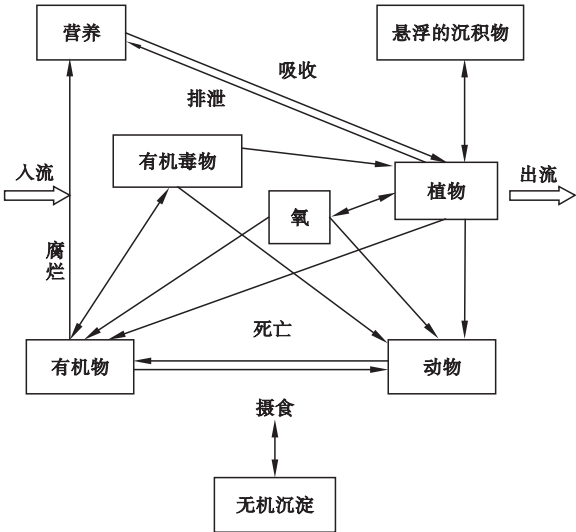


图 1 AQUATOX 描述生态系统的概念模型
Fig.1 Conceptual model of the ecosystem which is depicted by AQUATOX

湖泊等生态系统中的环境归宿和生态影响,得出各种因素对湖泊的直接或间接影响。

用 AQUATOX 模型模拟能达到指定的精度,使

用户可以根据需要任意增删变量,而且模型还可以进行扰动模拟、控制模拟和不确定性分析。但是,该模型不能明确模拟大型植物的根茎,不能独自模拟水平段,而且模型中的许多默认参数和经验公式对中国的大部分湖泊都不适用,需要进行修正和调整。近年来,AQUATOX 进行过多次更新,最新的 AQUATOX 模拟软件较之原来的版本增加了对河口的模拟,大大增强了软件的输出能力,并且在很多方面都有了进一步的提高。

2.2 PAMOLARE

PAMOLARE (Planning and Management of Lakes and Reservoirs Focusing on Eutrophication) 是由国际湖沼环境委员会和 UNEP 国际环境技术中心联合资助开发的。此软件根据模拟对象不同,可以分为 4 种不同类型的模型 (Nyholm, 1978)。Zhang 和 Jørgensen (2005) 用 PAMOLARE 模型预测湖泊中来自点源和非点源的营养物和有机物的浓度,并对模型进行校正和验证,最后模拟验证了预测场景;Gurkan 等 (2006) 用 PAMOLARE 模型对湖泊进行模拟,

并用不同时间段内的实测数据对模型进行校准和验证,最后得出连续的生态修复措施对湖泊生态系统的影响。PAMOLARE 模型可以根据不同的研究对象,选择适合于此研究对象的恰当模型,针对性比较强,而且使用者可以自己定义参数和状态变量,也可以用默认的值,模拟的过程比较容易理解。

2.3 CAEDYM

CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model) 是由澳大利亚西澳大学 (University of Western Australia) 的水研究中心 (Centre for Water Research) 开发的。它适用于多种不同类型的水体,可以分别设定 7 种微型藻、5 种浮游动物、4 种大型藻、3 种鱼类等多种生物的参数 (陈彧等, 2010), 并且能够模拟多种金属元素、非金属元素、无机悬浮颗粒和藻类的动力学过程。Trolle 等 (2011) 研究气候条件对 3 种不同营养化程度湖泊的影响,并用实测数据对 3 种模型分别进行了校准和验证,得出模型对水温、溶解氧、氮、磷等的模拟与实测值有很好的适应性;Missaghi 和 Hondzo (2010) 将 CAEDYM 模型与三维水动力学模型 ELCOM 结合起来研究形态复杂的湖泊; Mooij 等 (2010) 研究了湖泊的水生态模型今后所面临的两个挑战,并得出将 CAEDYM 模型与其他模型结合能够更好地对湖泊的生态系统进行模拟; McDonald 和 Urban (2010) 把 DYRESM 模型和 CAEDYM 模型结合起来模拟 4 种不同复杂程度下的藻类动力学,并对这 4 种模型进行分析,得出了适当增加模型的复杂程度会提高模型的精确性; Gal 等 (2009) 预测了氮磷的浓度对湖泊生态系统的影响,并说明了排入湖泊的氮磷荷载与湖泊内的总氮和总磷浓度的关系,对湖泊的管理具有指导意义; Wallace 和 Hamilton (2000) 通过用 CAEDYM 模型进行模拟,总结出营养物质的循环以及营养物质负荷的增加对水华的影响。

CAEDYM 模型可以和水动力学模型联合使用来进行生物和化学过程的研究,使模型得到更有效的应用,拓宽了它的应用范围。另外,此模型还可以模拟金属对底泥中营养元素释放的影响,对于底泥释放量比重较大的湖泊特别适用。而且,该模型模拟的复杂程度可以由用户依据自己的研究目的和基础数据的获取情况自行设定。近年来,CAEDYM 模型不断发展,它的最新版本 (v3.3) 比以前的版本在结构上变的更加复杂,并且模拟功能更加强大,增加

了模拟包括浮游植物、浮游动物和细菌群落中 C、N、P、O₂ 的循环在内的功能。

2.4 WASP

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 是由美国环保局 (EPA) 开发的。WASP 模型包括 DYNHYD 和 WASP 两个程序,它们可以联合运行也可以单独运行。WASP 的计算流程如图 2 所示 (杨家宽等, 2005)。Yen 等 (2012) 对湖泊的污染源和水质进行调查,并用校正后的 WASP 模型进行模拟,最后得出湖泊水质修复的长期和短期策略,并进一步分析了这些策略的有效性; Franceschini 和 Tsai (2010) 将 WASP 模型与 EFDC 模型耦合,来对河流进行不确定性评价,建立了 PCBs 浓度模型。

WASP 模型的 (杨家宽等, 2005) 用户界面十分友好,且具有富营养化和有机污染物的处理模块,处理效果比较高。而且此模型可以将计算结果与实测结果直接进行曲线比较。WASP 模型特别适用于生态结构简单、有毒物质影响显著的湖泊。但是 WASP 模型较少的考虑生态系统中的生物组分,限制了它在生物组分多样化的生态系统中的应用。WASP 模型经历了从一般的概念模型到演化运作的数学模型的发展历程。WASP7 是目前发展的最新版本,与以前的版本相比,此版本的模拟更加复杂更加精确。

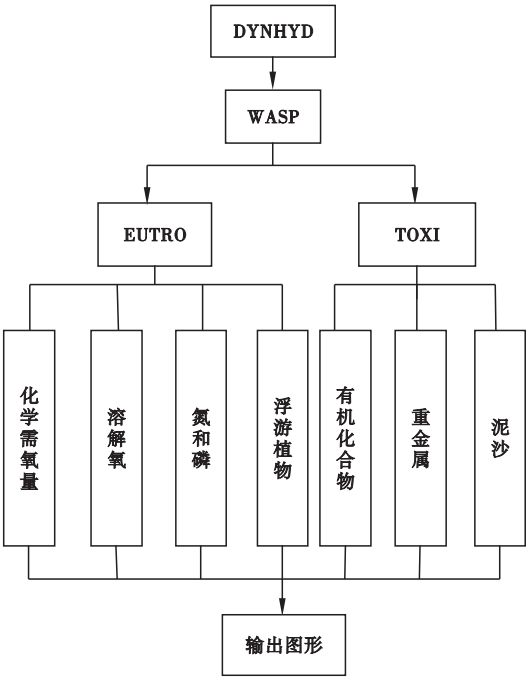


图 2 WASP 模型的计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart of WASP

2.5 OOMAS

OOMAS (Object Oriented Modeling of Aquatic Systems) 是荷兰 Aquasense 实验室开发的湖泊生态系统动力学模型。OOMAS 模型中湖泊的水位、流速、营养盐、水生生物量随时间的变化趋势能够动态的反映出来,且模型模拟的范围十分广泛(吴英海, 2005)。OOMAS 模型主要从湖泊的流动与混合、营养盐及溶解氧在水体和沉积物中的循环、碎屑的产生和分解、颗粒物的溶解和再悬浮、光环境的变化、各种生物(藻类、浮游动植物、底栖动物、鱼类、大型动植物)的生长及食物网间的相互关系和降雨、蒸腾、环湖入流及渗漏等水量平衡这七个方面来描述生态系统过程。OOMAS 模型是统一了水动力模型、水质模型和生态模型的较为综合的模型,具有考虑因素较多,较能反映实际生态情况,具有可视化界面和人机对话平台的优点。目前,OOMAS 模型在国内外的应用实例较少。

3 存在的问题及展望

当今的湖泊水生态模型是对生态机理和生态过程的数学概括,是湖泊管理的有效工具。近几十年来,湖泊水生态模型的研究已经取得了很大的进步,并用其解决了许多复杂的问题。但是在湖泊水生态模型的研究中仍然存在着许多问题,主要包括:模型的结构太固定,灵活性和适用性较差;湖泊的水生态模型涉及包括上行效应和下行效应在内的许多生命过程,因此在应用模型时需要输入大量的参数,而大部分湖泊由于各方面的限制,缺乏实际的研究和相关的实验测定结果,无法获得针对于本湖泊的详细参数和方程,而不得不采用一些近似值或模型默认值,使模拟结果的精确性较差;所研究的许多湖泊中缺乏生物参与的营养盐的循环与转化以及影响它的外部环境条件等关键过程的基础研究,使模拟的精确性较差;湖泊的水生态模型忽略了驱动生物分布和演变的环境物理场的作用,过于强调整个生物过程自身,不能模拟实际湖泊中三维生态场的时空分布,而且忽视了从定量和定性意义上对食物网层次间能量过程的研究,过分追求生态过程的模拟结果与观测资料的拟合程度,使湖泊的水生态模拟完全成了拼凑的游戏,使本学科的研究停滞不前(刘桂梅等, 2003);对模拟对象的水动力学条件和水质动态的描述较为简单(贾海峰等, 2009);模型中普遍采用一些经验公式而非机理公式(张军和周琪,

2004),使模型模拟的精度不高;模拟过程没有考虑生态系统中的微生物和细菌的影响;在检验模拟的过程中,由于初始值输入错误和评估错误导致的模拟结果不准确时,仅仅是通过与这个领域已经存在的数据进行对比,并没有将模拟结果与模拟对象的实测值进行比较(Pick *et al.*, 2011);在模拟过程中的许多参数是不确定的,怎样消除这些不确定性的研究以及对于不确定性的分析还十分缺乏(Nes & Scheffer, 2005);许多模型的模拟结果太复杂,不容易被人们理解;水下植物对鱼类活动影响的模拟研究目前还比较少(Li *et al.*, 2010)。

世界各国的研究者正在为完善湖泊的水生态模型而努力,当前的湖泊水生态模型正在向以下几个方面发展:将湖泊的水生态模型与 GIS 软件集成,把植物的动态变化与湖泊水环境的变化结合起来以研究某一时段内水生态系统的变化,从而提高模拟的精确性;将湖泊的水生态模型与社会学和心理学的系统模型相结合(谢湑等, 2009),使模拟结果更加精确;尽量增加采样密度和采样频率,得到充分的实验验证数据,将生态模拟结果与实测值进行比较,对模型进行校准,对模拟结果进行敏感性分析(Rigosi *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2012);细化食物链和食物网,将微生物和细菌的作用考虑其中;在水生态模型模拟结果的数据处理中引入神经网络预测模型,使数据处理结果更加精确(Scardi, 2001);研究更长的再生时间序列的适应性,来增进模型的内部控制(Taylor *et al.*, 2008);对水生态模型进行动力学分析(Yu *et al.*, 2009);将水生态模型与流域模型结合,用来调整湖泊的环境,并制定相应的策略;把水体污染物模型和生物生长模型进行动态的耦合;在深刻理解湖泊中物理、生物和化学等过程相互作用机理的基础上,不断加强对生态过程的基础性研究,不断提高模拟精度,达到真正实用的要求。

随着现代科学技术的发展,水生态模型一定会向着细致、精确和适用的方向发展。

参考文献

- 柏菊,王振龙. 2011. 基于一维水质模型的淮北市区纳污能力计算. 安徽水利水电职业技术学院学报, 11(1): 10-12.
- 曹小娟. 2006. 洞庭湖 AQUATOX 模拟与生态功能分区(硕士学位论文). 湖南: 湖南大学.
- 陈永灿, 张宝旭, 李玉梁. 1998. 密云水库富营养化分析与预测. 水利学报, (7): 12-15.
- 陈 彧, 钱 新, 张玉超. 2010. 生态动力学模型在太湖水

- 质模拟中的应用. 环境保护科学, **36**(4): 6-9.
- 樊娟, 刘春光, 冯剑丰, 等. 2010. 海洋生态动力学模型在海洋生态保护中的应用. 海洋通报, **29**(1): 78-83.
- 高庆先, 胡铭, 杨新兴, 等. 2001. 湖泊流体动力学模型及其应用. 环境科学研究, **14**(6): 29-32.
- 韩龙喜, 陆东燕, 李洪晶, 等. 2011. 高盐度湖泊艾比湖风场三维数值模拟. 水科学进展, **22**(1): 97-103.
- 何孟常, 杨居荣. 1999. 水质模型、生态模型及计算机模型软件. 环境科学进展, **7**(3): 62-69.
- 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 1998. 太湖水动力学三维数值试验研究. 1. 风场流和风涌增减水的三维数值模拟. 湖泊科学, **10**(4): 17-25.
- 胡志新, 胡维平, 张发兵, 等. 2005. 太湖梅梁湾生态系统健康状况周年变化的评价研究. 生态学杂志, **24**(7): 763-767.
- 贾海峰, 张岩松, 何苗. 2009. 北京水系多藻类生态动力学模型. 清华大学学报(自然科学版), **49**(12): 1992-1996.
- 赖锡军, 姜加虎, 黄群, 等. 2011. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟. 湖泊科学, **23**(6): 893-902.
- 李典谟, 马祖飞. 2002. 生态模型当前的热点与发展方向——兼记2002年国际数学家大会生物数学卫星会议暨第四届全国数学生态研讨会. 生态学报, **22**(10): 1788-1791.
- 李一平, 逢勇, 丁玲. 2004. 太湖富营养化控制机理模拟. 环境科学与技术, **27**(3): 1-3.
- 李一平, 唐春燕, 余钟波, 等. 2012. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析. 水科学进展, **23**(2): 271-277.
- 刘桂梅, 孙松, 王辉. 2003. 海洋生态系统动力学模型及其研究进展. 地球科学进展, **18**(3): 427-432.
- 刘涛. 2005. 水库水质参数预测和富营养化预警(硕士学位论文). 天津: 天津大学.
- 刘炜. 1999. 环境水力学进展. 武汉: 武汉水利电力大学出版社.
- 刘永, 周丰, 郭怀成, 等. 2006. 基于管理目标的湖泊生态系统动力学. 生态学报, **26**(10): 3434-3441.
- 刘玉生, 唐宗武, 韩梅, 等. 1991. 滇池富营养化生态动力学模型及其应用. 环境科学研究, **4**(6): 1-8.
- 罗淑葱. 2004. 太湖水动力学及其环境效应研究(博士学位论文). 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所.
- 马惠群. 2007. 济南市河流湖泊水质数值模拟研究(硕士学位论文). 山东: 山东大学.
- 穆迪. 2006. 渤海湾生态水质动力学模型研究(硕士学位论文). 天津: 天津大学.
- 孙勤芳, 贺昭和, 李锦秀, 等. 1994. 河网水质数学模型的参数估算. 农村生态环境, **10**(4): 46-50.
- 孙颖, 陈肇和, 范晓娜, 等. 2001. 河流及水库水质模型与通用软件综述. 水资源保护, (2): 7-11.
- 陶涛, 王韵珏, 信昆仑, 等. 2012. 基于二维水流模拟的湖泊型水源保护区划分方法. 同济大学学报(自然科学版), **40**(6): 882-889.
- 王惠中. 2001. 浅海与湖泊三维环流及水质数值模拟研究和应用(博士学位论文). 南京: 河海大学.
- 王玲杰, 孙世群, 田丰. 2005. 河流水质模拟问题的探讨. 合肥工业大学学报(自然科学版), **28**(3): 260-265.
- 王旭东. 2008. 白洋淀富营养化评价与数值模拟研究(硕士学位论文). 大连: 大连理工大学.
- 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 等. 2010. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用. 生态学杂志, **29**(12): 2514-2520.
- 吴英海. 2005. OOMAS模型在太湖水环境模拟中的应用研究(硕士学位论文). 南京: 河海大学.
- 谢湑, 王平, 田炜, 等. 2009. 湖泊富营养化评价模型的发展和应用. 环境科学与管理, **34**(5): 22-26.
- 刑可霞, 郭怀成, 孙延枫, 等. 2005. 流域非点源污染模拟研究——以滇池流域为例. 地理研究, **24**(4): 549-558.
- 徐祖信, 廖振良. 2003. 水质数学模型研究的发展阶段与空间层次. 上海环境科学, **22**(2): 79-85.
- 杨家宽, 肖波, 刘年丰, 等. 2005. WASP6水质模型应用于汉江襄樊段水质模拟研究. 水资源保护, **21**(4): 8-10.
- 应文晔, 钟萍, 刘正文. 2005. 惠州西湖磷模型的初级研究. 生态科学, **24**(4): 373-375.
- 张军, 周琪. 2004. 表面流人工湿地磷循环生态动力学模型及实现方法. 四川环境, **23**(1): 88-91.
- 张龙涛. 2008. 城市景观水体水质模拟和改善技术研究(硕士学位论文). 西安: 西安建筑科技大学.
- 朱永春, 蔡启铭. 1997. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究. 湖泊科学, **9**(2): 152-158.
- Angelini R, Petrere M. 2000. A model for the plankton system of the Broa reservoir, Sao Carlos, Brazil. *Ecological Modelling*, **126**: 131-137.
- Arhonditsis GB, Brett MT. 2005. Eutrophication model for Lake Washington (USA): Part II. Model calibration and system dynamics analysis. *Ecological Modelling*, **187**: 179-200.
- Bilaletdin A, Frisk T, Podsechin V, et al. 2011. A general water protection plan of Lake Onega in Russia. *Water Resources Management*, **25**: 2919-2930.
- Boegman L, Loewen MR, Hamblin PF, et al. 2001. Application of a two-dimensional hydrodynamic reservoir model to Lake Erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **58**: 858-869.
- Dahl M, Wilson DI, Håkanson L, et al. 2006. A combined suspended particle and phosphorus water quality model: Application to Lake Vänern. *Ecological Modelling*, **190**: 55-71.
- Franceschini S, Tsai CW. 2010. Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River. *Advances in Water Resources*, **33**: 493-503.
- Gal G, Hipsey MR, Parparov A, et al. 2009. Implementation of ecological modeling as an effective management and investigation tool: Lake Kinneret as a case study. *Ecological Modelling*, **220**: 1697-1718.
- Gurkan Z, Zhang JJ, Jørgensen SE. 2006. Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark. *Ecological Modelling*, **197**: 89-102.
- Hu WP, Jørgensen SE, Zhang FB. 2006. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China. *Ecological Modelling*, **190**: 367-398.
- Huang JC, Gao JF, Hörmann G. 2012. Hydrodynamic-phytoplankton model for short-term forecasts of phytoplankton in

- Lake Taihu, China. *Limnologica: Ecology and Management of Inland Waters*, **42**: 7–18.
- Ji Y, Zhang J, Yao Q, *et al.* 2007. Analysis of water quality in shallow lakes with a two-dimensional flow-sediment model. *Journal of Hydrodynamics*, **19**: 501–508.
- Jørgensen SE. 1986. Structural dynamic model. *Ecological Modelling*, **31**: 1–9.
- Jørgensen SE. 1995. State-of-the-art management models for lakes and reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, **1**: 79–87.
- Li JM, Huang P, Zhang RD. 2010. Modeling the refuge effect of submerged macrophytes in ecological dynamics of shallow lakes: A new model of fish functional response. *Ecological Modelling*, **221**: 2076–2085.
- McDonald CP, Urban NR. 2010. Using a model selection criterion to identify appropriate complexity in aquatic biogeochemical models. *Ecological Modelling*, **221**: 428–432.
- Menshutkin VV, Astrakhansev GP, Yegorova NB, *et al.* 1998. Mathematical modeling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem. *Ecological Modelling*, **107**: 1–24.
- Missaghi S, Hondzo M. 2010. Evaluation and application of a three-dimensional water quality model in a shallow lake with complex morphometry. *Ecological Modelling*, **221**: 1512–1525.
- Molen DT, Los FJ, Ballegooijen L, *et al.* 1994. Mathematical modelling as a tool for management in eutrophication control of shallow lakes. *Hydrobiologia*, **275/276**: 479–492.
- Mooij WM, Trolle D, Jeppesen E, *et al.* 2010. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approaches. *Aquatic Ecology*, **44**: 633–667.
- Morkoç E, Tüfekçi V, Tüfekçi H, *et al.* 2009. Effects of land-based sources on water quality in the Omerli reservoir (Istanbul, Turkey). *Environmental Geology*, **57**: 1035–1045.
- Nes EHV, Scheffer M. 2005. A strategy to improve the contribution of complex simulation models to ecological theory. *Ecological Modelling*, **185**: 153–164.
- Nyholm N. 1978. A simulation model for phytoplankton growth and nutrient cycling in eutrophic, shallow lakes. *Ecological Modelling*, **4**: 279–310.
- Park RA, Clough JS, Wellman MC. 2008. AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological Modelling*, **213**: 1–15.
- Perroud M, Goyette S, Martynov A, *et al.* 2009. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models. *Limnology and Oceanography*, **54**: 1574–1594.
- Peterson SA, Urquhart NS, Welch EB. 1999. Sample representativeness: A must for reliable regional lake condition estimates. *Environmental Science and Technology*, **33**: 1559–1565.
- Pick VM, Gal G, Gorfine M, *et al.* 2011. Sensitivity analysis for complex ecological model—A new approach. *Environmental Modelling & Software*, **26**: 124–134.
- Rashleigh B, Barber MC, Walters DM. 2009. Foodweb modeling for polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Twelvemile Creek Arm of Lake Hartwell, South Carolina, USA. *Ecological Modelling*, **220**: 254–264.
- Rigosi A, Marcé R, Escot C, *et al.* 2011. A calibration strategy for dynamic succession models including several phytoplankton groups. *Environmental Modelling & Software*, **26**: 697–710.
- Rukhovets LA, Astrakhansev GP, Menshutkin VV, *et al.* 2003. Development of Lake Ladoga ecosystem models: Modeling of the phytoplankton succession in the eutrophication process. *Ecological Modelling*, **165**: 49–77.
- Sagehashi M, Sakoda A, Suzuki M. 2001. A mathematical model of a shallow and eutrophic lake (the Keszthely Basin, Lake Balaton) and simulation of restorative manipulations. *Water Research*, **35**: 1675–1686.
- Scardi M. 2001. Advances in neural network modeling of phytoplankton primary production. *Ecological Modelling*, **146**: 33–45.
- Silow EA, Gurman VJ, Stom DJ, *et al.* 1995. Mathematical models of Lake Baikal ecosystem. *Ecological Modelling*, **82**: 27–39.
- Simons TJ. 1973. Development of three-dimensional numeral model of the Great Lakes. *Seizer*, **12**: 234–269.
- Taner MÜ, Carleton JN, Wellman M. 2011. Integrated model projections of climate change impacts on a North American lake. *Ecological Modelling*, **222**: 3380–3393.
- Taylor MH, Tam J, Blaskovic V, *et al.* 2008. Trophic modeling of the Northern Humboldt Current Ecosystem. Part II: Elucidating ecosystem dynamics from 1995 to 2004 with a focus on the impact of ENSO. *Progress in Oceanography*, **79**: 366–378.
- Trolle D, Hamilton DP, Pilditch CA, *et al.* 2011. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling & Software*, **26**: 354–370.
- Wallace BB, Hamilton DP. 2000. Simulation of water-bloom formation in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Plankton Research*, **22**: 1127–1138.
- Wang JP, Cheng ST, Jia HF. 2005. Water quality changing trends of the Miyun Reservoir. *Journal of Southeast University (English Edition)*, **21**: 215–219.
- Yen CH, Chen KF, Sheu YT, *et al.* 2012. Pollution source investigation and water quality management in the Carp Lake Watershed, Taiwan. *Clean: Soil, Air, Water*, **40**: 24–33.
- Yu HG, Zhong SM, Ye M. 2009. Dynamic analysis of an ecological model with impulsive control strategy and distributed time delay. *Mathematics and Computers in Simulation*, **80**: 619–632.
- Zhang JJ, Jørgensen SE. 2005. Modelling of point and non-point nutrient loadings from a watershed. *Environmental Modelling & Software*, **20**: 561–574.