

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.001

地表水环境数学模型研究进展

李一平¹, 施媛媛¹, 姜龙¹, 朱向宇², 龚然³

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 清水源(上海)环保科技有限公司, 上海 201107;
3. 南京工程学院环境工程学院, 江苏南京 211167)

摘要: 简述了地表水环境数学模型, 包括水动力学模型、水质模型和水生态模型的发展历史、应用现状及国内外最新研究成果, 深入探讨了模型敏感性和不确定性分析、模型模拟精度等应用中被广泛关注的疑难问题, 指出模型系统化、综合化和平台化, 大数据支撑下的与新兴技术结合创新, 以及模型法规化等将成为水环境模拟与预测领域未来的研究热点。

关键词: 地表水环境数学模型; 敏感性; 不确定性; 模拟精度

中图分类号: TV131.2; X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2019)04-0001-08

Advances in surface water environment numerical models// LI Yiping¹, SHI Yuanyuan¹, JIANG Long¹, ZHU Xiangyu², GONG Ran³ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Qingshuiyuan (Shanghai) Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 201107, China; 3. School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: This paper briefly described the surface water environment numerical models, including the development history, the application status, and the latest research results at home and abroad of hydrodynamic models, water quality models and water ecological models. Both methods of analyzing model sensitivity and uncertainty and problems of model precision were emphatically expounded. It is pointed out that the systematization, integration and platform construction of the model, the combination of innovation with emerging technologies supported by large data, and the related management issues such as model synthesis and regulation will become the future research hotspots in the field of water environment simulation and prediction.

Key words: surface water environment numerical model; sensitivity; uncertainty; simulation precision

水环境保护是国家水安全保障的重中之重, 掌握新形势下水环境演变过程是开展水环境保护工作的关键^[1]。研究水环境问题的手段主要包括野外观测、室内试验和数值模拟, 其中水环境数学模型扮演着越来越重要的角色。地表水环境数学模型(surface water environment numerical models, SWENM)主要分为水动力学模型、水质模型和水生态模型, 基本原理是将气象条件、水动力条件、边界条件等因素进行定量化约束, 通过求解方程组, 获得污染物的时空分布特征及迁移转化规律, 分析和判别各环境因子间的相互关系, 实现模拟与预测等功能。

目前, 已研发的地表水环境数学模型有数百种, 算法及应用的差异给水环境决策带来了一定的困难。现有综述论文对3类模型的介绍不够全面, 水

文领域更关注水动力模型, 环境领域又更注重水质模型, 水生态模型因其复杂性及涵盖面广难以进行整合归纳。此外, 关于模型模拟精度影响因素的综合探讨比较欠缺。因此, 归纳比较各种模型的适用范围、强化模型敏感性和不确定分析、辨析模型精度的影响因素等均有利于地表水环境数学模型的精准优化发展。鉴于传统模型应用的时空局限性, “3S”、云计算、人工智能等新技术的引入以及模型综合化和法规化, 将成为水环境模拟与预测领域未来的研究热点。

1 地表水环境数学模型的研究现状

1.1 水动力学模型

近代水动力学起步于 Navier-Stokes 方程(简称

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405203); 国家自然科学基金(51579061, 51579071)

作者简介: 李一平(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事水环境数学模型研究。E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

N-S 方程), 随后, Saint-Venant 于 1871 年首次提出了计算一维河道及河网水流的一维水流运动基本方程——Saint-Venant 方程。由此, 水动力学模型逐步应用于河流、河网; 20 世纪 60—70 年代, 随着 Saint-Venant 方程的广泛应用, 各种求解方法的数值稳定性和精度问题得到深入研究。平原地区河道交错, 流向流速易受潮汐、水利调度等影响而催生了涉及面更广的河网模型^[2]。在湖库方面, Heszen 于 1956 年最早提出浅水平面二维水动力学模型。之后的模型侧重于水流运动, 包括风生环流^[3-4]和吞吐流, 以及在深水湖库还因温度分层而存在垂向密度流^[5-6]。

随着计算机技术引入水动力学, 计算水动力学在计算方法、网络技术、紊流模型、大涡模拟等方面的新理论和新方法也为水动力学模型领域提供了有效借鉴^[7]。直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS)、Reynolds 平均模型 (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 和大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 等方法得以应用, 进一步修正了 N-S 方程, 典型的紊流模型有 $k-\varepsilon$ 模型和 v_2f 模型等^[8-9]。此外, 水动力学模型在洋流领域的应用研究推动了紊流机理的深入探索, 洋流模型由最初的普林斯顿海洋模型 (Princeton ocean model, POM) 发展至浅海三维水动力模型 (3D estuarine coastal ocean model, ECOM), 直至如今更为完善的有限体积海岸海洋模型 (finite volume coastal ocean model, FVCOM)。在河口海岸区域, 水动力学模型解决了潮汐作用下的紊流混合^[10]、因盐度差而形成的密度流以及因径流和盐度密度流产生的入海口滞留问题^[11]。

当前, 水动力学模型与其他模型 (流域水文模型、波浪模型和泥沙模型等) 的耦合应用实现了空间多维度的模拟。例如, 外夹河流域的耦合模型以水文模型计算的流量作为水动力学模型的边界条件, 成功实现了丘陵、平原混合地区的洪水预报^[12]; 太湖透明度模型^[13] 基于浅水波浪数值模型 (simulating waves nearshore, SWAN), 耦合了波浪模块和湖流三维模型, 动态模拟了太湖波浪和湖流的生消过程; 三维水动力模型也常常应用于探究泥沙输移规律^[14] 及鱼道模拟^[15]。

1.2 水质模型

自 1925 年 Streeter 和 Phelps 建立了 BOD-DO 耦合模型 (S-P 模型) 以来, 水质模型已经发展了 90 多年。水质模型基于水动力学模型, 根据物质守恒原理概化污染物在水中发生的物理、化学、生物化学变化过程。主要分为 4 个发展阶段^[16]:

第一阶段 (1925—1965 年): 简单的氧平衡模型阶段。集中研究氧平衡, 部分涉及非耗氧物质, 不断

修正 S-P 模型。

第二阶段 (1966—1985 年): 水质模型迅速发展阶段。考虑污染物不同形态的影响机制, 20 世纪 70 年代初, 美国的研发机构开始推出 QUAL-I、WASP (water quality analysis simulation program modeling system) 等综合水质模型软件, 后续列入其他污染源、底泥、边界的作用, 研发的 QUAL 系列模型应用于河流综合水质规划管理^[17]。

第三阶段 (1986—1998 年): 水质模型深入研究、广泛应用阶段。更多复杂的水质过程被纳入模型系统, 例如, 考虑沉积物“土-水”界面动态过程的沉积成岩模型^[18]; 模拟对象涵盖河流、湖泊 (水库)、河口、海岸带等。

第四阶段 (1999 年至今): 水质模型集成化、设计人性化阶段。MIKE、EFDC (environmental fluid dynamics code)、DELFT-3D 等模型集成水动力学、水质、泥沙、生态等模块, 并提供网格生成和前后处理工具。新兴技术也逐步被引入水质模型, 人工智能提高了水质模型的预测水平^[19], 遗传算法、模拟退火算法强化了参数识别^[20], 神经网络明晰了河网物理结构^[21]。

以 EFDC 模型为例, 其水质模块的发展基于切萨皮克湾水质模型 (CE-QUAL-IC), 可以模拟 DO、COD、BOD₅、NH₄⁺、NO₃⁻、TN、PO₄³⁻、TP 和叶绿素 a 等 22 个水质变量, 广泛用于河流、湖库、河口、海洋和湿地等地表水环境系统。唐天均等^[22] 应用 EFDC 模型构建了深圳水库三维模型, 模拟结果表明水库调度和削减东江引水污染负荷能够显著提升深圳水库水质, 有效降低水华发生风险。另外, 朱文博等^[23] 运用 WASP 水质模型评估不同时段曝气对河流水质的改善效益, 确定了河道曝气的最优条件; 朱茂森^[24] 基于 MIKE11 软件的水质模块建立了河流一维水质模型, 成功模拟了水体中污染物的迁移扩散和衰减过程。

1.3 水生态模型

水生态模型是描述水生生态系统中生物个体或种群间的内在变化机制, 及构建水文、水质、气象等因素连接的复杂模型, 主要用于研究水体富营养化、生物富集及水域系统食物网^[25]。

20 世纪 70 年代初期诞生的简单总磷模型成为水生态模型的基石; 20 世纪 80 年代, 美国和日本开发了第一批三维生态数学模型^[25]。现代水生态模型考虑了自然界中多因素相互作用及时空变化。例如, Delft3D BLOOM/GEM 模型能成功模拟 4 种不同海域的水生系统^[26]; 三维 ERSEM (european regional seas ecosystem model) 能够用于研究红海的水动力

和生化动力^[27]。

近年来,水生植物、鱼类迁移及生物栖息地等模块得到不断开发。江志超等^[28]建立了硅藻-中肋骨条藻与氮、磷关系的非线性动力学模型,发现光衰变率和营养盐是影响中肋骨条藻赤潮生消过程的关键因子。RIVER2D 模型已被用于识别在研究范围内最小水深和宽度处成年大鳞大马哈鱼^[29]。基于 HABITAT 模型建立的生物栖息地评价模型,能够反映泸沽湖水质变化对宁蒗裂腹鱼的影响^[30]。此外“水生态足迹”概念的提出衍生出了水生态足迹计算模型、水生态承载力计算模型和水生态赤字或盈余计算模型^[31]。

当前国内水环境模型研究主要关注水动力-水质-水生态耦合模型的应用。例如,太湖富营养化机理模型耦合了太湖三维风生湖流模型、垂向平均的二维水质模型和富营养化模型,考虑了水温、总氮、总磷和太阳辐射等因子对藻类生长的影响,模拟了藻类生消过程以及其随风生流迁移的规律^[32-33];王生愿等^[34]以湖泊水动力水质响应机制为研究背景,构建了水-生态-底泥耦合的湖泊水动力水生态模型。

2 常用地表水环境数学模型

近 30 年来,先后涌现出许多高品质的地表水环境数学模型,例如 WASP 模型素有“万能水质模型”之称;还有近年应用广泛的 EFDC (environmental fluid dynamics code) 模型^[35],集成了水动力、水质、风浪、泥沙、重金属及有毒物质、沉积成岩和水生植

物等模块。近些年国内也开发出了诸如 CJK3D、IWIND 等商用软件。表 1 列出了国内外常用的 18 个地表水环境数学模型。

3 地表水环境数学模型的不确定性和敏感性

模型不确定性和敏感性分析是数值建模研究的热点。不确定性分析是将模型输出中的不确定性进行量化评定^[36],而敏感性分析是研究模型输入因素和输出变化的响应关系。

水质模型不确定性的研究始于 20 世纪 70 年代,O' Neill 等^[37]指出单纯寻找模型最优优化参数没有意义,需要确定参数的分布;之后,水质模型的不确定性得到了系统性归纳^[38],采用不同的判定标准能够确定水质模型不确定性来源及分类^[39];生态模型和统计模型开启了水环境数学模型不确定性分析的时代^[40];各种不确定性分析方法基本原理的提出,为模型参数排序及决策评估提供了有效依据^[36]。

模拟结果的不确定性主要来自参数、输入数据和模型结构不确定性 3 个方面,其中参数不确定性指参数估计存在误差,输入数据不确定性指模型边界条件和初始条件的不确定性,而模型结构不确定性是由于人类对复杂环境系统认识的局限性,在系统建模过程中常常对一些现象和变化过程进行抽象和概化。

常用的不确定性分析的数学表达方法主要有区间数学法、模糊理论法以及概率分析法。区间数学法用于计算测量和参数估值误差引起的不确定性;模糊理论法解决具有模糊性的系统不确定问题,但

表 1 常用地表水环境数学模型

| 名称 | 研发机构 | 模型特征 | | | | | | 运行特征 | | 技术特征 | | |
|------------------|-------------------------------------|-------|------|-------|--------|------|------|---------------------|----|------|-----|--|
| | | 水动力模块 | 水质模块 | 水生态模块 | 沉积成岩模块 | 流域功能 | 代码开源 | 系统 | 免费 | 软件化 | 说明书 | |
| AQUATOX | EPA | 无 | 有 | 有 | 无 | 无 | 是 | Windows | 否 | 是 | 有 | |
| CE-QUAL-ICM/TOXI | USACE | 无 | 有 | 无 | 有 | 无 | 否 | Mac OS/Windows | 部分 | 部分 | 无 | |
| CE-QUAL-R1 | USACE | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Mac OS | 否 | 否 | 有 | |
| CE-QUAL-RIV1 | USACE | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 否 | Mac OS/Windows | 否 | 否 | 无 | |
| CE-QUAL-W2 | USACE | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 否 | Mac OS/Unix/Windows | 是 | 否 | 有 | |
| CJK3D | 南京水利科学研究院 | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 否 | Windows | 是 | 是 | 有 | |
| DELFT3D | W D Delft Hydraulics | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Unix/Windows | 是 | 是 | 有 | |
| ECOMSED | HydroQual, Inc. | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Mac OS/Unix/Windows | 是 | 部分 | 有 | |
| EFDC | EPA and Tetra Tech, Inc. | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 是 | Mac OS/Unix/Windows | 是 | 是 | 有 | |
| IWIND | EPA and Tetra Tech, Inc. | 有 | 有 | 有 | 无 | 有 | 是 | Mac OS/Unix/Windows | 是 | 是 | 有 | |
| MIKE11 | Danish Hydraulic Institute | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 否 | Windows | 部分 | 是 | 有 | |
| MIKE21 | Danish Hydraulic Institute | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 否 | Windows | 部分 | 是 | 有 | |
| MIKE SHE | Danish Hydraulic Institute | 有 | 无 | 无 | 无 | 有 | 否 | Windows | 是 | 是 | 有 | |
| QUAL2E | EPA | 无 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Mac OS/Windows | 是 | 否 | 有 | |
| QUAL2K | Dr. Steven Chapra, EPA TMDL Toolbox | 无 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Windows | 是 | 否 | 有 | |
| SWAT | USDA-ARS | 无 | 有 | 无 | 无 | 有 | 是 | Mac OS/Windows | 是 | 是 | 有 | |
| SWMM | EPA | 无 | 有 | 无 | 无 | 有 | 是 | Mac OS/Windows | 是 | 否 | 有 | |
| WASP | EPA | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 是 | Mac OS/Windows | 是 | 部分 | 有 | |

难以实现定量评估;概率分析法常用于描述物理系统的不确定性,根据模型输入的概率分布来确定模型输出的概率分布,最终以概率分布的形式来表达不确定性,如蒙特卡罗(Monte Carlo)法^[41]、拉丁超立方抽样法(Latin hypercube sampling, LHS)^[42]、普适似然不确定估计方法(generalized likelihood uncertainty estimation, GLUE)^[43]以及单纯多边形进化算法(shuffled complex evolution algorithm, SCE-UA)^[44]等。

敏感性分析方法主要分为局部分析方法和全局分析方法。常采用的局部分析方法是检验单个参数的变化对模型结果的影响程度(one factor at a time, OAT)。局部分析方法简单、易于实施,但响应结果较片面,无法解决“异参同效”问题。全局分析方法克服了局部分析方法的缺点,能够反映整体参数组合对结果输出不确定性的影响。全局敏感性分析方法有很多^[45]:①基于回归或相关分析技术的方法,如多元回归法、响应曲面方法(response surface methodology, RSM);②全局筛选法,如 LH-OAT 方法、Morris 方法;③基于方差理论的方法,如傅里叶振幅敏感性检验法(Fourier amplitude sensitivity test, FAST)、Sobol 方法和扩展傅里叶振幅敏感性检验法(extend FAST);④因子设计实验^[46];⑤摩尔斯分析法^[47];⑥取样分析法^[48]等。

敏感性分析常用的蒙特卡罗法属于取样分析法,能简单有效地评价多个参数对模型输出结果不确定性的贡献。LHS 克服了蒙特卡罗法计算成本高的缺点,抽取的样本能更精确地反映输入概率函数的分布,不仅高度控制抽样值,又为它们留有变化的余地。基于 LHS 的思想,运行模拟的次数由输入变量数决定,最少可为随机变量数的 1.5 倍,一般为几百次^[49]。

当前国内外已有对模型敏感性和不确定性研究的成功案例。李平等^[50-51]利用 EFDC 模型和 LHS 抽样方法分析了水动力模块中的 5 个重要参数以及 4 个重要的外部输入条件对太湖水位和流场分布的敏感性和不确定性,并借助原位观测简化了模型参数的率定验证;Gong 等^[52]基于 SWAT(soil and water assessment tool)模型采用 GLUE 不确定性分析方法分析模型参数对模型不确定性的影响,其中针对不同的研究目标需要选取不同的似然函数^[53];Reder 等^[54]采用 LHS 和全局敏感性分析法(global sensitivity analysis, GSA)在 42 个参数中筛选出 4 个最敏感的参数以提高模型性能。

除了传统分析方法以外,基于熵的不确定性敏感性分析方法也被提出^[55],并用以识别不确定变量

对随机变量和模糊变量组合系统的影响^[56]。全局灵敏度测算方法(sobol)是一种两阶段不确定性量化方法,简化了不确定度量化计算过程^[57]。风场、边界及底部地形的空间变化导致研究区域内的参数分布也有所差异,因此结合 GIS-Lab 衍生的参数空间不确定分析将成为新的研究方向。

参数不确定性和敏感性分析已成为模型构建的必要工作,通过分析可表征输出结果的不确定性对输入参数不确定性的依赖程度。对于特定的模拟目标,筛选出敏感参数、参数合理分布范围以及各个参数对模型结果不确定性的贡献率,可大幅度减少模型后续率定验证工作,同时可指导关键参数的监测工作。

4 地表水环境数学模型模拟精度关键影响因素

除由参数不确定性引起的模拟误差外,影响模型模拟精度的因素还包括模型类型及选择、网格种类、垂向坐标系统、方程离散方法、初始条件及边界条件等。

4.1 模型类型及选择

选择合适的模型是建模前应明确的重要环节,需要参考模拟对象的特性、精度要求和计算效率等。当模拟对象具有干湿交替或洪泛区特性时,应选用较为精细的水动力模型^[58];若模拟深水湖库水质,需要选用垂向二维或三维模型,考察垂向温度和水质变化^[59];若模拟重金属或有毒物质迁移转换过程,关键是构建并校验泥沙模块,其余影响因素和模块可进行一定程度的概化处理^[60]。由于复杂的物理、化学、生物过程无法在模型中详述,所以模型选择不恰当可能会浪费计算时间,且不一定能达到预期目标。因此,模型的选择并非越复杂越好,在明确模拟目标后,选择合适的模型即可,这个环节需要一定的实践经验。

4.2 网格种类及垂向坐标系统

网格种类及坐标系统选择也直接影响模拟精度。常见的平面网格有矩形网格、正交曲线网格、三角形网格及二叉树网格。矩形网格基于直角坐标系便于组织数据结构,计算效率高,但不适合处理复杂的边界且不易调控网格密度。正交曲线网格是一种基于曲线坐标系统的有结构网格,可以适应不规则边界,但处理过于复杂的边界时效果不佳。三角形网格利于研究复杂地形和边界问题,易于控制网格密度,但计算效率较低。具有树状结构的二叉树网格能高度拟合复杂的自然水体,易实现水动力及物质输运数值模拟^[61]。在边界和地形较复杂的位置

宜采用三角形网格,在计算域内部和地形变化不大的地方宜采用矩形网格或者正交曲线网格。

垂向坐标系统一般分为平面(z)坐标、等密度(ρ)坐标和地形拟合(σ)坐标,分别对应不同的网格。 z 坐标模式方程简单,易于数值离散,适用于具有准水平运动特点的水体,但不易处理底部边界,在浅水区域难以满足必要的垂直分辨率。 ρ 坐标模式常用于密度流模拟,但在混合层、非层化水体内部和底部边界层的分辨率较低。 σ 坐标模式实现了垂直相对分层,能够有效拟合底部地形,但斜压梯度力会有较大截断误差。对于地形复杂的水域可采用混合坐标模式,例如 σ - z 坐标系统适用于局部陡峭深水区,能够降低水平压力梯度误差的影响。在实际应用中,应根据岸线形状、水下地形数据和模拟精度的要求选择合适的网格及垂向坐标系统。

精细的分辨率能降低模拟误差,但会增加不必要的模拟成本。若部分区域的模拟精度要求较高,可进行局部网格加密处理,既保证拟合计算的合理性,又提高运行效率。

4.3 方程离散方法

为确保计算的稳定性和收敛性,时间步长应该足够小,通常须将时间步长减小到几分或几秒,与水动力过程模拟所需的时间步长差不多,可重现泥沙输送等水质动力学过程。目前基于有限差分法、有限体积法和有限单元法的高效数值离散计算方法、并行计算方法、集群计算方法等同时满足了精度和效率的要求^[62]。有限差分法根据时间和空间步长对定解区域进行网格划分,用差商代替导数,求解方法简单但不易处理复杂边界问题。有限体积法可以根据实际问题的物理特点对任意形状网格体进行积分,且不会影响计算精度和守恒性,但是对于质量差的网格,离散的过程会产生更大的误差。有限单元法根据实际问题的物理特点对求解区域进行单元剖分,能够满足一定的精度要求,但对于二维和三维问题需要建立许多人为的节点,且求解精度过于依赖网格划分,适合分析连续变形问题。

4.4 初始条件及边界条件

初始条件包括初始水位、流速、温度等,初始条件设置是否准确,对不同的水体影响不同。模拟湖库水质时,若只依赖边界条件驱动,运行至合理的初始状态需要一定的时间且对模拟的结果影响较大。因此,模拟湖库水质时,如没有准确的实测值作为初始条件,则通常将模型运行一段时间后的结果作为初始态,称为“预热”。对于河流、河口等水动力过程较剧烈的水体,边界条件的驱动将很快覆盖初始条件,初始条件的影响很小。

边界条件包括大气边界、出入流边界、开边界的作用力、水工建筑物、取水退水边界,其中水质模块的边界条件还需考虑各种出入水体边界的水质变量、大气干湿沉降、农田面源污染、地表径流、内源释放、地下水等。在确定污染源的过程中,大气干湿沉降对水域整体的贡献不可忽略,随降雨进入水体的污染物质往往是水质恶化的关键因素^[63]。边界条件还可分为垂向和水平边界条件,比如气温和风速作为模型垂向边界条件,虽然不参与直接计算模拟,但它们影响了潮流、混合和热传输等水动力过程。合适的边界条件可以有效避免模拟误差。

5 地表水环境数学模型发展趋势

目前,地表水环境数学模型正朝着系统化、综合化、法规化方向发展,模型涉及的要害越来越复杂,与许多新兴技术的结合,使得地表水环境数学模型的发展充满了机遇与挑战。

a. 模型系统的系统化、综合化和平台化。水环境模型逐步涉及水文、水动力、生物、地理等多领域,以单独模块的形式集成一体。模拟元素和模拟情景的增加拓展了模型的研究领域,比如药品及个人护理用品(PPCPs)、微塑料等新型污染物将成为新的模拟对象,藻类竞争、热量平衡等过程也逐步引入水生生态模型。适用于大型流域的三维水生生态模型开发,以及利用统一平台构建促使数值模拟成为流域控制与规划决策的支撑技术,将成为未来重要的发展趋势。这些将会是今后地表水环境数学模型研究的热点。

b. 与新兴技术的结合。大数据平台的参与能够有效解决边界条件、初始条件输入缺失难题;超算、云计算以及人工智能算法的应用将会大幅度提升地表水环境数学模型的计算效率和精度,比如遗传算法、模拟退火算法能够强化参数识别;VR技术丰富了模型结果的输出展现方式,实现了人性化的设计理念。在与物联网、“互联网+”、云技术的碰撞下,“3S”技术与水环境模拟集成模块的开发促进了环境因素之间的相互作用和动态变化的确定性分析,基于遥感技术的水质反演模型促进了“天地一体化”水环境监测系统的建立,能够实现数字预警、识别黑臭水体、考察海域污染,体现实时性、大尺度、高速度、动态性等优势。在GIS-Lab技术的引入结合下,风场、地形、床层等空间因素的考虑会更加全面,不确定性分析正从全局概化向区域性精细化发展,模拟过程更加真实,结果更加可靠。

c. 法规化趋势。基于GIS技术,模型库管理系统的建立促使水环境模型走上法规化管理道路。目前,美国国家环境保护局(EPA)已将97种地表水环

境数学模型列入模型信息库,澳大利亚政府也针对模型选择、参数率定、敏感性分析等给出了系统推荐,我国生态环境部也正式发布了 HJ2.3—2018《环境影响评价技术导则 地表水环境》,并推荐了适用于河流、湖泊、河口和海洋的数值模型。今后的发展将基于已有的模型信息库进行拓展丰富,有望实现模型运用流程的规范化操作、指导、监督。

参考文献:

[1] 曹慧群,赵鑫.流域水环境数值模拟技术应用及研究展望[J].长江科学院院报,2015,32(6):20-24. (CAO Huiqun, ZHAO Xin. Overview and applications of simulation models for basin water environment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(6):20-24. (in Chinese))

[2] 卢士强,徐祖信.平原河网水动力模型及求解方法探讨[J].水资源保护,2003,19(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution[J]. Water Resources Protection, 2003, 19(3):5-9. (in Chinese))

[3] LI Y, TANG C, WANG J, et al. Effect of wave-current interactions on sediment resuspension in large shallow Lake Taihu, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(4):4029-4039.

[4] JALIL A, LI Y, DU W, et al. Wind-induced flow velocity effects on nutrient concentrations at Eastern Bay of Lake Taihu, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(21):17900-17911.

[5] 李一平,罗凡,郭晋川,等.我国南方桉树(*Eucalyptus*)人工林区水库突发性泛黑形成机理初探[J].湖泊科学,2018,30(1):15-24. (LI Yiping, LUO Fan, GUO Jinchuan, et al. Mechanism of "black-water" occurrence in the reservoirs with *Eucalyptus* plantation, Southern China[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1):15-24. (in Chinese))

[6] 甘衍军,李兰,武见,等.基于EFDC的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(4):476-485. (GAN Yanjun, LI Lan, WU Jian, et al. Water temperature modeling and influences of water temperature stratification of Ertan Reservoir based on EFDC[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(4):476-485. (in Chinese))

[7] 阎超,于剑,徐晶磊,等.CFD模拟方法的发展成就与展望[J].力学进展,2011,41(5):562-589. (YAN Chao, YU Jian, XU Jinglei, et al. On the achievements and prospects for the methods of computational fluid dynamics [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5):562-589. (in Chinese))

[8] JUNG J. A numerical simulation of wave run-up around circular cylinders in waves [J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 2016, 22(6):750-757.

[9] YAO Z, ZHANG X, HE F. Anisotropic turbulent model

based on V2f model for natural and mixed convection in enclosed spaces[J]. Science and Technology for The Built Environment, 2015, 21(7):986-992.

[10] RIPPETH T P, VLASENKO V, STASHCHUK N, et al. Tidal conversion and mixing poleward of the critical latitude (an arctic case study) [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(24):12349-12357.

[11] 聂学富.径流及盐度对瓯江口滞留时间影响的数值模拟研究[J].浙江水利水电学院学报,2017,29(4):12-19. (NIE Xuefu. Numerical simulation on influence of river discharge and salinity in residence time in Oujiang Estuary[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2017, 29(4):12-19. (in Chinese))

[12] 杨甜甜,梁国华,何斌,等.基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):72-78. (YANG Tiantian, LIANG Guohua, HE Bin, et al. Study and application of a flood forecasting model based on coupled hydrological-hydrodynamic approach[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1):72-78. (in Chinese))

[13] 李一平,逢勇,刘兴平,等.太湖波浪数值模拟[J].湖泊科学,2008,20(1):117-122. (LI Yiping, PANG Yong, LIU Xingping, et al. Numerical modeling of waves in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1):117-122. (in Chinese))

[14] 王崇浩,韦永康.三维水动力泥沙输移模型及其在珠江口的应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(4):246-252. (WANG Chonghao, WEI Yongkang. Three-dimensional modelling of sediment transport in the Pearl River Estuary [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(4):246-252. (in Chinese))

[15] KHAN L A. A three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model analysis of free surface hydrodynamics and fish passage energetics in a vertical-slot fishway [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2006, 26(2):255-267.

[16] WANG Q, LI S, JIA P, et al. A review of surface water quality models [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(3):1-7.

[17] 周华,王浩.河流综合水质模型 QUAL2K 研究综述[J].水电能源科学,2010,28(6):22-24. (ZHOU Hua, WANG Hao. Review on the comprehensive stream water quality model QUAL2K [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(6):22-24. (in Chinese))

[18] VANDENBERG J A, PRAKASH S, BUCHAK E M. Sediment diagenesis module for CE-QUAL-W2 (Part 1): conceptual formulation [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2015, 20(3):239-247.

[19] 崔宝侠,高鸿雁,左传金,等.人工智能在水质模型改进中的应用[J].沈阳工业大学学报,2004,26(5):543-546. (CUI Baoxia, GAO Hongyan, ZUO Chuanjin, et al. Applications of artificial intelligence to water quality model improvement [J]. Journal of Shenyang University of

- Technology, 2004, 26(5):543-546. (in Chinese))
- [20] 王建平,程声通,贾海峰. 环境模型参数识别方法研究综述[J]. 水科学进展, 2006, 17(4):574-580. (WANG Jianping, CHENG Shengtong, JIA Haifeng. Advances in study on parameter identification methods for environmental models [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4):574-580. (in Chinese))
- [21] ZHENG W. Control model of watershed water environment system simulating human neural network structure [J]. Neuroquantology, 2018, 16(5):783-788.
- [22] 唐天均,杨晟,尹魁浩,等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3):393-400. (TANG Tianjun, YANG Sheng, YIN Kuihao, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen Reservoir based on EFDC model [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3):393-400. (in Chinese))
- [23] 朱文博,王洪秀,柳翠,等. 河道曝气提升河流水质的 WASP 模型研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(4):1326-1331. (ZHU Wenbo, WANG Hongxiu, LIU Cui, et al. Improvement of river water quality by aeration: WASP model study [J]. Environmental Science, 2015, 36(4):1326-1331. (in Chinese))
- [24] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护, 2013, 29(3):6-9. (ZHU Maosen. One-dimensional water quality model based on MIKE11 for Liaohe Basin [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(3):6-9. (in Chinese))
- [25] ANAGNOSTOU E, GIANNI A, ZACHARIAS I. Ecological modeling and eutrophication: a review [J]. Natural Resource Modeling, 2017, 30:e12130.
- [26] BLAUW A N, LOS H F J, BOKHORST M, et al. GEM: a generic ecological model for estuaries and coastal waters [J]. Hydrobiologia, 2009, 618(1):175-198.
- [27] TRIANTAFYLLOU G, YAO F, PETHAKIS G, et al. Exploring the Red Sea seasonal ecosystem functioning using a three-dimensional biophysical model [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2014, 119(3):1791-1811.
- [28] 江志超,郭艳芬,刘园园,等. 近岸海域赤潮藻非线性生态模型的建立和动力学分析[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(1):168-176. (JIANG Zhichao, GUO Yanfen, LIU Yuanyuan, et al. Nonlinear ecological model structuring and dynamic analysis on red tide algae in offshore area [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(1):168-176. (in Chinese))
- [29] COWAN W R, RANKIN D E, GARD M. Evaluation of central valley spring-run chinook salmon passage through lower butte creek using hydraulic modelling techniques [J]. River Research and Applications, 2017, 33(3):328-340.
- [30] 黄炜. 基于 HABITAT 模型的生物栖息地评价:以泸沽湖宁蒗裂腹鱼为例[J]. 环保科技, 2014, 20(5):37-42. (HUANG Wei. Ecological habitat assessment based on HABITAT model: a case study of *Schizothorax Yunnansis* [J]. Environmental Protection and Technology, 2014, 20(5):37-42. (in Chinese))
- [31] 张义,张合平,郭琳. 我国水生生态足迹研究进展[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2):57-60. (ZHANG Yi, ZHANG Heping, GUO Lin. Research advances of water ecological footprint in China [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2):57-60. (in Chinese))
- [32] WANG J, PANG Y, LI Y, et al. Experimental study of wind-induced sediment suspension and nutrient release in Meiliang Bay of Lake Taihu, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14):10471-10479.
- [33] JALIL A, LI Y, DU W, et al. The role of wind field induced flow velocities in destratification and hypoxia reduction at Meiling Bay of large shallow Lake Taihu, China [J]. Environmental Pollution, 2018, 232:591-602.
- [34] 王生愿,张万顺,吴扬,等. 湖泊湿地生态系统水动力、水生态数学模型研究[J]. 河南科学, 2015, 33(5):814-818. (WANG Shengyuan, ZHANG Wanshun, WU Yang, et al. The hydrodynamic and water ecological mathematical model of lake wetland ecosystem [J]. Henan Science, 2015, 33(5):814-818. (in Chinese))
- [35] 龚然,何跃,徐力刚,等. EFDC (environmental fluid dynamics code)模型在湖库水环境模拟中的应用进展[J]. 海洋湖沼通报, 2016(6):12-19. (GONG Ran, HE Yue, XU Ligang, et al. The application progress of environmental fluid dynamics code (EFDC) in lake and reservoir environment [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016(6):12-19. (in Chinese))
- [36] PIANOSI F, BEVEN K, FREER J, et al. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 79:214-232.
- [37] O' NEILL R V, RUST B. Aggregation error in ecological models [J]. Ecological Modelling, 1979, 7(2):91-105.
- [38] BECK M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty [J]. Water Resources Research, 1987, 23(8):1393-1442.
- [39] LINDENSCHMIDT K, FLEISCHBEIN K, BABOROWSKI M. Structural uncertainty in a river water quality modelling system [J]. Ecological Modelling, 2007, 204(3):289-300.
- [40] RECKHOW K H. Uncertainty analysis applied to Vollenweider's phosphorus loading criterion [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1979, 51(8):2123-2128.
- [41] KIM S H, SONG M S, SUN G M, et al. A proposal on accuracy estimation method for the sampling-based uncertainty analysis with Monte Carlo simulation technique [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, 53(2):295-301.
- [42] SHEIKHOLESLAMI R, RAZAVI S. Progressive Latin hypercube sampling: an efficient approach for robust sampling-based analysis of environmental models [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 93:109-126.
- [43] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models:

- model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 6(3) : 279-298.
- [44] GELLESZUN M, KREYE P, MEON G. Representative parameter estimation for hydrological models using a lexicographic calibration strategy [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 722-734.
- [45] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述 [J]. *环境科学*, 2017, 38(11) : 4889-4896. (CHEN Weiping, TU Hongzhi, PENG Chi, et al. Comment on sensitivity analysis methods for environmental models [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (11) : 4889-4896. (in Chinese))
- [46] CRYER S A, HAVENS P L. Regional sensitivity analysis using a fractional factorial method for the USDA model GLEAMS [J]. *Environmental Modelling & Software*, 1999, 14(6) : 613-624.
- [47] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. *Technometrics*, 1991, 33 (2) : 161-174.
- [48] HELTON J C, JOHNSON J D, SALLABERRY C J, et al. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(10/11) : 1175-1209.
- [49] MEINRATH G, EKBERG C, LANDGREN A, et al. Assessment of uncertainty in parameter evaluation and prediction [J]. *Talanta*, 2000, 51(2) : 231-246.
- [50] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (2) : 410-416. (LI Yiping, QIU Li, TANG Chunyan, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34 (2) : 410-416. (in Chinese))
- [51] LI Yiping, TANG Chunyan, ZHU Jianting, et al. Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(6) : 1078-1095.
- [52] GONG Y, SHEN Z, HONG Q, et al. Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling using the GLUE methodology [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4) : 246-255.
- [53] 姜倩妮, 李占玲, 张永勇. GLUE 框架下似然函数对水文模型不确定性的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29 (1) : 25-30. (JIANG Qianni, LI Zhanling, ZHANG Yongyong. Effect assessment of different likelihood functions on parameter uncertainty of hydrological model under the GLUE framework [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(1) : 25-30. (in Chinese))
- [54] REDER K, ALCAMO J, FLOERKE M. A sensitivity and uncertainty analysis of a continental-scale water quality model of pathogen pollution in African rivers [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 351: 129-139.
- [55] 倪祥龙, 康建设, 王广彦, 等. 基于熵的不确定性敏感性分析 [J]. *数学的实践与认识*, 2016, 46(5) : 194-203. (NI Xianglong, KANG Jianshe, WANG Guangyan, et al. Sensitivity analysis of uncertainty based on entropy theory [J]. *Journal of Mathematics in Practice and Theory*, 2016, 46(5) : 194-203. (in Chinese))
- [56] TANG Z, LU Z, PAN W, et al. An entropy-based global sensitivity analysis for the structures with both fuzzy variables and random variables [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227 (C2) : 195-212.
- [57] MINH L Q, PHAM L T D, GONCALVES J, et al. A two-stage approach of multiplicative dimensional reduction and polynomial chaos for global sensitivity analysis and uncertainty quantification with a large number of process uncertainties [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 78 : 254-264.
- [58] 赵明登, 曾威, 唐小春, 等. 基于 ArcGIS 与 Delft 3D 的渭河下游洪泛区洪水数值模拟 [J]. *中国农村水利水电*, 2012(10) : 145-147. (ZHAO Mingdeng, ZENG Wei, TANG Xiaochun, et al. Numerical simulation on flood in flood area of the Wei River downstream on the base of ArcGIS and Delft 3D [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(10) : 145-147. (in Chinese))
- [59] 丁正锋, 钱新, 张玉超, 等. ELCOM 模型在流溪河水库水温模拟中的应用 [J]. *环境保护科学*, 2009, 35(4) : 30-33. (DING Zhengfeng, QIAN Xin, ZHANG Yuchao, et al. Application of ELCOM model in simulating water temperature of Liuxihe Reservoir [J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(4) : 30-33. (in Chinese))
- [60] 谢森扬, 王金坑, 王翠, 等. 九龙江口-厦门湾悬沙浓度及多岔口潮汐汊道泥沙输运的数值模拟 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2016, 31 (2) : 188-201. (XIE Senyang, WANG Jinkeng, WANG Cui, et al. Numerical study on suspended sediment concentration in Jiulong Estuary-Xiamen Bay and sediment transport mechanism in tidal inlets with multi-fork [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(2) : 188-201. (in Chinese))
- [61] 刘晓东, 周媛媛, 华祖林, 等. 四叉树网格下水动力及物质输运数值模拟研究进展 [J]. *水电能源科学*, 2014, 32 (11) : 111-114. (LIU Xiaodong, ZHOU Yuanyuan, HUA Zulin, et al. Advance in numerical simulation of shallow water flow and mass transport on quad-tree grids [J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(11) : 111-114. (in Chinese))
- [62] 王永桂. 流域大尺度水环境模型的高效能集群计算方法研究及其在三峡库区的应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [63] 何宗健, 蔡静静, 倪兆奎, 等. 洱海不同途径氮来源季节性特征及对水体氮贡献 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (5) : 1939-1948. (HE Zongjian, CAI Jingjing, NI Zhaokui, et al. Seasonal characteristics of nitrogen sources from different ways and its contribution to water nitrogen in Lake Erhai [J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2018, 38 (5) : 1939-1948. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-09-10 编辑: 熊水斌)