

近岸海域水质模型研究现状及展望

陆耀烽, 丁志斌, 黎 炜, 陈 鹏, 陈 晓

(陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为更好地了解和使用近岸海域水质模型, 总结和比较了 EFDC(environmental fluid dynamics code)、WASP(water quality analysis simulation program)和 MIKE 三种模型的概念、性能、优势和局限性, 介绍了其在近岸海域的应用, 强调了选用合适的模型和降低不确定性是减小模拟结果误差的重要保证, 对近海水质模型进行了展望。分析表明, WASP 和 EFDC 的扩展性和开发性较强, MIKE 的选择性更大; 虽然水质模型在近岸海域已有较多应用, 但仍有较大的发展空间, 可通过模型内部完善、新技术耦合以及应用范围拓宽等途径使近岸海域水质模型得到进一步发展。

关键词: 近岸海域; 水质模型; EFDC(environmental fluid dynamics code); WASP(water quality analysis simulation program); MIKE

中图分类号: P76 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)02-0161-10

DOI: 10.11759/hyxx20190610001

海洋具有极强的自净能力, 依靠海水稀释作用处置废水是最原始的处理方式。直到现在, 其仍是一种有效的处置方式, 多数沿海城市都将处理后的废水从海洋排水口排出^[1-3]。随着沿海地区人口的密集和废水排放量的增大, 近海水质出现恶化。《2017 年中国环境公报》显示^[4], 我国近海海域水质一般, 渤海湾、珠江口和杭州湾等区域水质较差, 近岸海域急需科学有效的水质管理。

对于近岸海域这类大而复杂的水体, 使用实测数据支撑水质管理决策是不够的, 理论分析和数值模拟可以弥补实测数据的不足^[5]。经校准和验证的水质模型能模拟污染物迁移转化等物理生化过程和规律, 预测海域水质情况, 是水环境研究必不可少的工具^[6-7]。自 20 世纪 20 年代 Streeter 和 Phelps^[8]开发 Streeter-Phelps 模型(S-P 模型)用于描述一维稳态河流的 BOD(biochemical oxygen demand)和 DO(dissolved oxygen)变化规律以来, 水质模型开始快速发展, 计算机的进步使复杂的水体系统得以被模拟^[9-11]。截至目前, 研究学者已开发了 100 多种水质模型, 各有其优势和不足, Cao 和 Zhang^[12]依据水体类型、水质成分、模型属性和空间维度对水质模型进行了分类和总结。Wang 等^[13]将模型的发展历程分为了三个阶段, 第一阶段(1925—1965 年)的研究对象集中在 BOD 和 DO, 点源污染是该阶段模型的主要形式^[14-15]; 在第二阶段(1965—1995 年), 二维和三维模型出现, 氮磷、光照、温度和浮游动植物等参数被考虑, 开发了

QUAL、MIKE 11 和 WASP 等代表性模型; 第三阶段(1995 年至今)的水质模型考虑了大气沉降污染物且开始用于复杂环境条件下的水体^[16]。虽然各水质模型间有共通之处, 但仍需根据研究区域的特点和水质监测条件选用合适的模型, 这就要求使用者对各个模型的假定、缺陷和输入数据需求以及不确定性分析等有充分的理解^[17], 否则易造成水质模型难以匹配研究要求。

近岸海域水质模型可视作水质模型在河口、海岸和海湾等区域的应用。《海洋工程环境影响评价技术导则》指出^[18], 对于宽浅型水域且潮混合较强烈、各要素垂向分布较均匀的近岸海域或河口、海湾, 可采用二维数值模型近似描述海水的三维运动, 其余情况宜采用三维数值模型, 一维模型适用于复杂水体的长期模拟^[19], 因此近岸海域水质模型以二维和三维为主。EFDC(environmental fluid dynamics code)、WASP(water quality analysis simulation program)和 MIKE 是三种有代表性的水质模型, 在近岸海域有较多应用, 本文从概念、性能、优势和局限性等方面对其进行了总结和比较, 为近岸海域水质模型的选

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-07-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0506304)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC0506304]

作者简介: 陆耀烽(1995-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要从事近岸海域水动力和水质模拟研究, 电话: 15651835982, E-mail: yaofenglu0930@163.com

择提供了参考。此外，强调了水质模型存在着不确定性和误差，提出了相应的解决方法。最后，对近岸海域水质模型进行了展望。本文可望为近岸海域水质模型的研究应用提供参考和依据。

1 近岸海域水质模型

1.1 EFDC

1.1.1 概述

EFDC 模型由美国弗吉尼亚海洋科学研究所^[20-21]利用 Fortran 语言设计，后经资助进行再开发，稳定性和效率大幅提升，是美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, EPA)极力推荐的水动力和水质模型^[22]。EFDC 模型由水动力、水质、泥

沙、毒物和输运 5 个主要模块组成^[23]，水质模块的物理和化学过程如图 1 所示，分为营养物循环、水生植物和沉积物成岩及运输 3 个部分，水质参数间的转换原理主要来自 CE-QUAL-ICM 水质模型^[24]，其机理以碳为基础，并带入到其他循环中，状态变量有藻类、有机碳、N、P、Si、COD(chemical oxygen demand)、DO、活性金属、盐度和温度。其中，对有机碳、N 和 P 的相关水质参数有着细致的划分，在模拟前需对相应的数据进行全面收集，包括了难溶颗粒态有机碳(RPOC)、活性颗粒有机碳(LPOC)、溶解有机碳(DOC)、难溶颗粒态有机磷(RPOP)、活性颗粒态有机磷(LPOP)、溶解性有机磷(DOP)、总磷酸盐(PO_{4t})、难溶颗粒态有机氮(RPON)、活性颗粒有机氮

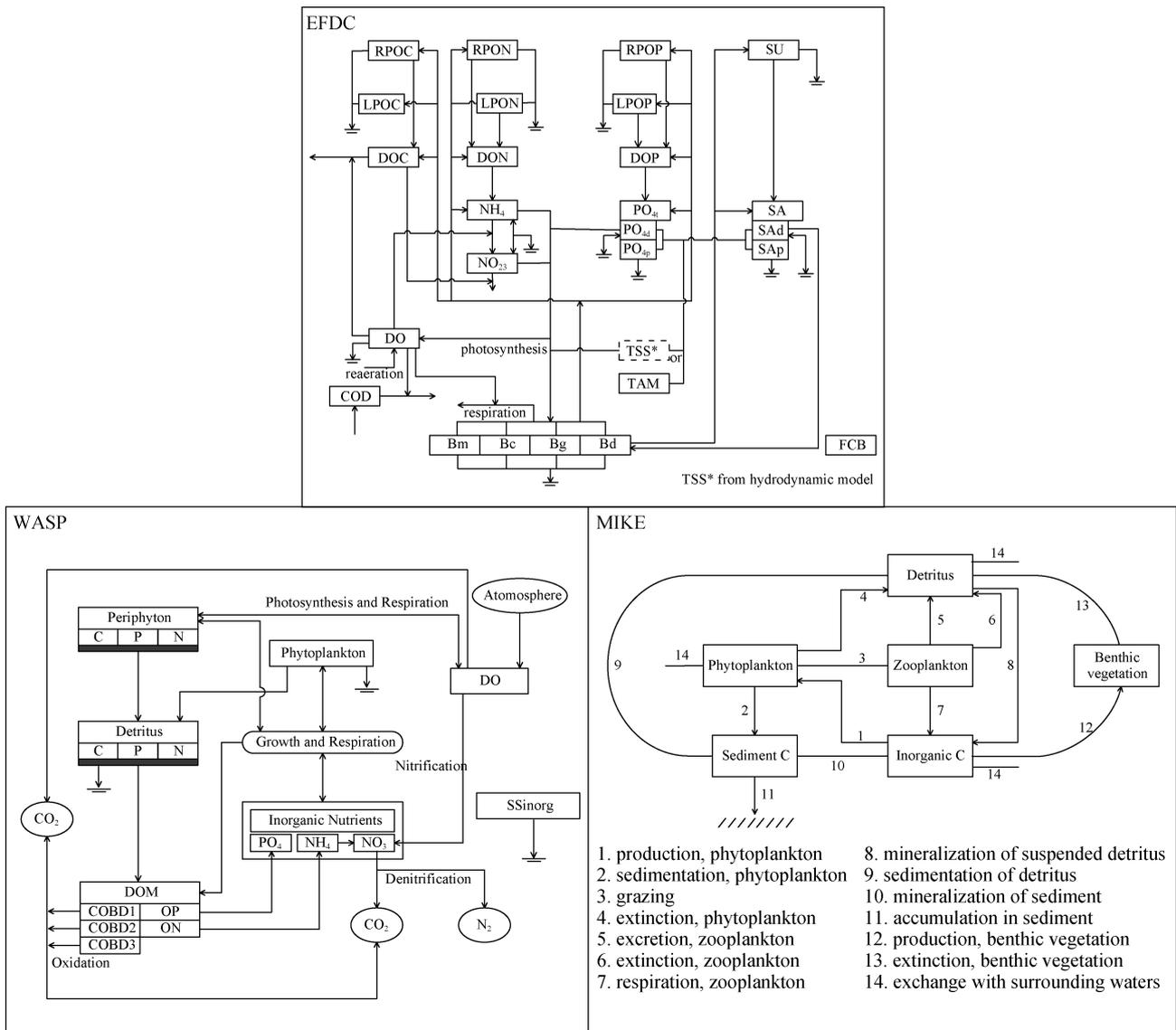


图 1 水质模型框架

Fig. 1 Water quality model framework

(LPON)、溶解有机氮(DON)、氨氮(NH₄)和硝氮(NO₃)。值得注意的是,不同于大部分水质模型采用BOD表示水体中耗氧有机物含量,EFDC使用COD来表示。

1.1.2 优势

EFDC 作为一款免费开源模型,降低了使用者的准入门槛。在水平上其使用了正交曲线坐标或笛卡尔直角坐标系和结构化网格,适用于长且直的岸线,计算时间更短,在垂直上使用了 Sigma 坐标系,避免了深水区和浅水区的精度差异。可模拟水体的一维、二维和三维的水动力和水质。计算过程采用了内外模分裂法,空间和时间的计算精度均为二阶。

1.1.3 局限性

由于大多地表水的水平尺度远大于垂直尺度,为简化计算,EFDC 模型将垂向压力梯度视作与浮力平衡,垂向加速度忽略不计,故多应用于浅水区。结构化网格也导致了 EFDC 对弯曲的海岸线适配度不高。EFDC 对水质指标划分较为细致,这对海水水质监测提出了较高要求,大部分官方监测数据均不适用于此模型,例如广东、福建和山东发布的近岸海域水质监测信息都未满足其需求(无 N、P 和 C 的难溶态、颗粒态和有机态),这在一定程度上限制了 EFDC 的应用。

1.1.4 应用

EFDC 在近岸海域的水动力模拟较多,成功应用于 100 多个水体区域的研究^[25]。在水动力方面,其可模拟水位、海流、温度、盐度、环流和波浪等,国外报道涵盖了塞文河口^[26]、库克湾^[27]和圣露西河口^[28]等海域,国内则有胶州湾^[29]、厦门湾^[30]和杭州湾^[31]等。在水质方面,模拟对象以 COD、氮和磷为主,樊乔铭和丁志斌^[32]利用 EFDC 模拟了某港口周围海域的水动力,预测了 COD、氨氮和活性磷酸盐扩散趋势,确定了排污口的最佳位置。类似地,何山^[33]模拟了长兴岛入海排污选址方案。Zhu^[34]探究了芝加哥入海地下排水系统对航道水质的影响,证明了地下排水的可行性。

1.2 WASP

1.2.1 概述

WASP 同样是 EPA 开发的水质模型软件,最新版本为 WASP8,可从 EPA 官方网站(<https://www.epa.gov/>)免费获取。WASP 采用了动力学箱式模型,通过对水体进行合理分段来模拟一维、二维和三维水质问题,基本程序有随时间变化的平流、弥散流、点源

和非点源的污染物负荷、边界交换等^[35]。WASP 包含了水动力与水质两个独立部分,两者能联和应用,也能独立运行。除了自带的运输算法 DYNHYD(一维)外,WASP 也可外接其他水动力模型,如 CE-QUAL-RIV1(一维)和 EFDC(一维、二维、三维)等^[36]。多数研究常使用 WASP 的 EUTRI 和 TOXI 模块,前者考虑了复氧-耗氧循环、氮循环、磷循环和藻类循环,多用于分析与富营养化相关的传统污染指标,后者用于模拟有毒物质。另有 Periphyton、MERCURY、HEAT 和 LIGHT 模块对模拟水质加以细化。模拟的参数包括了:DO、BOD、N(可溶有机氮、氨氮、硝氮)、P(可溶有机磷和无机磷)、Si(可溶有机硅和无机硅)、岩屑(N、P 和 Si)、浮游植物、底栖藻类、温度、盐度、沉积物(黏性和非黏性)、重金属、杀虫剂、有机化学品和 Hg 等^[37]。

1.2.2 优势

WASP 界面友好,结果输出选择性较多,易于用户使用。其以 FD 方程为基础,保证了时间和空间上的质量平衡。水质模拟功能强大,对稳态和非稳态水体均适用,模拟水质指标多样,除可模拟常规污染物外,也能用于汞、有毒物质、重金属和热污染等问题的研究。其在国内应用较多且源代码共享,可借鉴的研究报道丰富。

1.2.3 局限性

WASP 假设水体是完全混合的,由于自带的 DYNHYD 水动力算法简单,常要外接水动力模型用于平流模拟。WASP 也简化了沉积物通量计算,不能够模拟附生生物和大型藻类。此外,该模型在空间上使用了一阶迎风格式,易引起显著的数值扩散。

1.2.4 应用

由于近岸海域常用二维和三维模拟,故 WASP 在近岸海域的应用需耦合其他水动力模型^[38]。Zheng 等^[39]将 WASP 5 与 ECOM-si 耦合,探明了 Satilla 河口的物理过程、化学过程和生物过程对无机氮、磷酸盐和溶解氧的影响。Zafer 等^[40]建立的 ROMS-WASP 模型准确模拟了 Barnegat 海湾的溶解氧和总氮的变化。Xiong^[41]利用 EFDC-WASP 耦合模型完成了 Mobile 海湾的水动力构建,确定了悬浮沉积物和 DDT 的传输扩散情况。

1.3 MIKE

1.3.1 概述

MIKE 系列软件由丹麦水资源及水环境研究所(DHI)开发,是著名的水动力和水质模拟系统,用于

近岸海域的有 MIKE 21 和 MIKE 3^[42, 43], 其中 MIKE 21 是平面二维自由表面流模型, MIKE 3 为三维自由表面流动模型。MIKE 可使用结构化和非结构化网格, 且能联合使用。需要指出的是, 非结构化网格在模拟岸线弯曲的情况中有很大优势, 但会降低运算速度。模型包含了水动力(HD)、对流扩散(AD)、黏性泥沙(MT)、非黏性泥沙(ST)、粒子追踪(PT)、石油泄漏(OS)和水质生态(ECOLab)等模块。大部分水质模拟工作由 ECOLab 完成, 其进一步可细分为水质模式(Water Quality)、富营养化模式(eutrophication)和重金属模式(heavy metal)^[44], 相应的模拟参数有 BOD、DO、氨氮、硝氮、亚硝氮、磷酸盐、粪大肠菌和总大肠杆菌等; 浮游植物、叶绿素 a、浮游动物、岩屑、无机氮、无机磷、DO 和底栖植被等; 可溶重金属、吸附重金属、悬浮颗粒、沉积物、沉积物孔隙水中的可溶重金属、沉积物中吸附的重金属。

1.3.2 优势

MIKE 21/3 长期以来被定位用于模拟海岸和海洋工程, 是较为成熟的模拟工具。不同于 EFDC 和 WASP, 其水质模拟的模式多样, 有较为复杂的富营养化模块(Eutrophication Model 1 变量多达 60 个), 也有相对简单的水质模块(WQ Simple 仅有 BOD 和 DO), 用户可以根据研究目的选择合适模块以降低对数据的要求, 简化模拟难度, 提高工作效率。模型计算可使用一阶精度或二阶精度, 前者精度较差, 计算速度更快, 后者相反。

1.3.3 局限性

不同于 EFDC 和 WASP, MIKE 源程序不对外公布, 无法进行二次开发^[45]。此外, 其售价较高(MIKE 21 约为人民币 40 万元, MIKE 3 约为人民币 50 万元), 用户使用门槛较高。

1.3.4 应用

MIKE 21 用于近岸海域研究的报道较多, MIKE 3 的应用则相对较少。Babu 等^[46]使用 MIKE 21 模拟了 Kachchh 海湾水动力, 发现潮流除受潮汐驱动以外, 季节性波浪扮演着重要角色。除水动力外, Babu 等^[47]同样利用 MIKE 21 模拟了不同 BOD 排放负荷条件下的 Kochi 近岸海域水质, 并提出了最佳污水排放策略。在国内, MIKE 21 在泥沙冲淤^[48]、填海工程^[49]和溢油事故^[50]等领域均有应用。

1.4 讨论

本部分从功能、优势、局限性和应用等方面对

EFDC、WASP 和 MIKE 进行了讨论, 相应的物理、化学和生物转换过程如图 1 所示, 涵盖了 DO、BOD、重金属、藻类、沉积物以及与氮磷碳硅元素相关的物质, 水动力特征、模拟维度、转换过程和水质参数等要素对比如表 1 所示。

表 1 EFDC、WASP 和 MIKE 模型参数对比
Tab. 1 Comparison of the constituents modeled by EFDC, WASP, and MIKE

模型	EFDC	WASP	MIKE 21/3
水动力维度	一、二、三维	一维	二、三维
水质维度	一、二、三维	一、二、三维	二、三维
网格	结构化	结构化	结构化/ 非结构化
计算精度	二阶	二阶	一阶/二阶
温度	√	√	√
pH	√	√	—
盐度	√	√	√
BOD	—	√	√
COD	√	—	—
DO	√	√	√
有机碳	√	—	√
有机氮	√	√	√
氨氮、硝氮	√	√	√
亚硝氮	—	—	√
有机磷	√	—	√
磷酸盐	—	√	√
硅	√	√	√
叶绿素 a	—	—	√
蓝藻	√	√	√
绿藻	√	√	√
硅藻	√	√	√
悬浮颗粒物	√	√	√
水生植物	—	—	√
附着植物	—	√	√
岩屑	—	√	√
沉积物	—	—	√
大肠杆菌	√	√	√
水质模块可选	—	—	√

注: “√”表示模型包含该参数, “—”表示模型不包含改参数。

从模型的获取条件和开发环境来看, EFDC 和 WASP 的最新版本(EPA Version 1.01 和 WASP 8)均能从 EPA 官方网站上免费获取, 且源代码开放, 用户可根据需要进行模型功能拓展、模型间的耦合和不

确定分析等操作,有报道^[51]就建立了 EFDC、WASP 和 SWMM 的耦合模拟系统,并对其进行了不确定性分析的研究。MIKE 则不对外免费开放,二次开发能力有限,在扩展和开发的研究较少。3 种模型均适用于二维和三维的近岸海域水质模拟,其中 WASP 常要耦合其他水动力模型。在水质参数方面,MIKE 涵盖范围相对全面,水质模式更多,降低了匹配实际研究需求的难度;WASP 包含了绝大多数研究所要用到的水质指标,普适性强,得到了较为广泛的应用;EFDC 注重对水质指标可溶性和不可溶性的区分,对水质参数的划分较为细致,在保证模拟更加精确的同时,对监测数据的质量也提出了更高的要求。在网格划分和计算方面,MIKE 的选择性也更多,有结构化和非结构化网格、一阶精度和二阶精度,其余两者均使用结构化网格和二阶精度。

综上所述,MIKE 作为一款成熟的商业软件,其选择性强,可依据研究目标选用合适的水质模式,提高了工作效率,但二次开发受限,适用于近岸海域的案例;对于 WASP 和 EFDC 而言,可根据实际对其进行扩展和开发,但需按照模型要求进行水质监测,适用于近岸海域水质模型的理论研究和优化。

2 模型不确定性及其应对方法

2.1 不确定性

输入数据、模型结构和模型参数的不确定性是模型误差的来源^[17],控制不确定性以减小误差是水质模拟研究的重要任务。

James^[52]曾指出,海洋监测数据缺乏是未来限制水质模型应用重要因素,主要存在两方面问题,一是监测指标不统一、不全面,二是监测频率低、数据量小。以全球环境监测系统(global environment monitoring system, GEMS)为例,其涵盖的水质指标有 DO、BOD、大肠杆菌、硝氮和重金属等指标,但未包含总碳、氮及其化合物、磷及其化合物、淤泥、黏土和有毒物质等指标。在国内,《海洋监测规范》(GB 17378.1-2007)对水样的采集和测定方法进行了规范,但没有明确需监测的水质指标,这导致了各监测部门发布的水质信息存在差异,例如广东省近岸海域水质监测信息有水温、pH、悬浮物、大肠杆菌、DO、COD、氨氮、硝氮、亚硝氮、无机氮、活性磷酸盐、重金属(汞、镉、铅、砷、铜、锌)、石油类和盐度,这与山东省近岸海域水质监测信息存在

出入。此外,各省在各水文周期(枯水期、平水期和丰水期)或季度对近岸海域水质进行一次测定,导致近岸海域监测存在间隔时间长、频率低和数据量少的问题。以 2017 年近岸海域海水监测信息为例,广东省和福建省在枯水期、平水期和丰水期对近岸海域海水各进行一次监测,山东省则在四个季度各进行一次监测。上述情况使得输入数据难以匹配水质模型要求,常要处理输入数据以补充缺失数据,易引起误差。

伴随着学者对水质机理认识的不断加深,水质模型涉及的参数和状态变量逐渐增多,模型覆盖的过程愈加复杂,包括了非点源污染、大气沉降和流域水文等,但仍不能保证模型做到准确地反应实际过程。相反地,为了构建模型,提出了一系列的理想假设,简化了一些实际目标污染物转化机理,造成了模型结构的不确定性。

EFDC、WASP 和 MIKE 均为机理水质模型,需要调节参数以校准模型。由于校准过程多集中在实测值和模拟值的比较,忽视了对模型内部运算过程的验证。在大量参数的耦合作用下,易发生“异参同效”情况,出现了多组参数组合都能满足模型输出精度的现象^[53]。

2.2 应对方法

在减小模型不确定性方面的研究可分为两个方向,敏感性分析和不确定性分析。敏感性分析用于评价模型输入(变量和参数)对输出结果的影响程度,通过敏感性分析可定性或定量地描述模型结构、参数和输入变量对输出结果的影响程度。依据敏感性系数,舍弃非敏感部分,集中讨论敏感部分,提高工作效率,减小不确定性。敏感性分析分为全局敏感性分析和局部敏感性分析^[54, 55],计算机技术的发展使得全局敏感性分析基本取代了局部敏感分信息。常见的全局敏感分析方法有 Morris^[56]、RSA^[57]、Sobol^[58]和 GLUE^[59]等。不确定性分析通过评估输出的不确定程度来判定模型的可靠程度,值得注意的是,其不能消除模型当中客观存在的不确定性,常用的方法有区间法^[60]、模糊理论法^[61]和概率法^[62]等。张质明^[53]利用蒙特卡罗法(概率法)从参数和结构两方面对 WASP 水质模型进行了不确定性分析,发现 DO 的拟合结果不佳,后利用 Sobol 法和 EFAST 法进行了敏感性分析,确定沉积物耗氧(SOD)、硝化耗氧(E12)和呼吸作用温度系数(E1R)等为敏感参数。

除敏感性分析和不确定分析外,解决近岸海域水质监测数据存在的问题可更直接有效地降低水质模型的不确定性。一方面,国家生态环境部需进一步规范水质监测指标,保证指标全面性和统一性,适当提高监测频率,增加监测数据量;另一方面,研究者可依据研究目标和模型的需要,进行实地监测,但成本较高。此外,研究者可参照历史监测数据涵盖的指标,选用合适的水质模型,但这要求使用者能够深入理解各模型的不确定性、优势、假设和局限性。

3 小结与展望

随着沿海城市人口密度和污水排放量的增大,近岸海域水环境问题日益严峻。水质实测结合数值模拟可为近岸海域水质决策提供数据支撑。本文对 EFDC、WASP、MIKE 三种水质模型进行了总结和比较,认为 MIKE 适用于近岸海域的实际应用和案例分析,EFDC 和 WASP 在近岸海域水质模型的理论研究和优化。此外,近岸海域水质模型仍存在误差和不确定性,可通过敏感性分析、不确定分析和完善水质监测来提升模型准确性。

目前,近岸海域水质模型已有较多应用,但仍有较大的发展空间,除了上文提到的降低误差和不确定性外,还可从模型内部完善、新技术耦合以及应用范围拓宽来进一步发展近岸海域水质模型。

3.1 模型内部完善

水质模型的发展过程就是内部完善的过程,根据实际应用的需要,污染源从点源发展为面源,维度由一维发展为三维,其中伴随着底泥、水动力、浮游植物等模块的加入,复杂程度明显增大,以状态参数为例,由最初的 BOD 和 DO 两个变量增加至 36 个(CE-QUAL-ICM 模型)^[24]。当前的水质模型可较完整地描述水体污染物中的物理、化学和生态过程^[63],但在水气边界交换方面多采用经验系数,有待改善。此外,模型的可操作性、理论基础、通用性、界面和扩展灵活性等方面也需进一步提高。

3.2 新技术耦合

1) 遥感技术(remote sensing, RS)

近岸海域水质模型的建立需要对研究区域进行大范围、长时间和高频率的水质监测,难度大、成本高。RS 可远程探测目标物,覆盖面积广^[64],根据遥感波段信息和水质指标的光谱特征可建立反演模型,利用遥感数据间接得到水质指标浓度,获取连续全

覆盖的高质量水质数据^[65],有望克服近岸海域水质监测难题,RS 耦合水质模型技术已在大东湖^[66]、射阳河口^[67]、杭州湾^[68]等水体得到应用,模拟结果可准确反映实际情况。

2) 地理信息系统(geographical information system, GIS)

水质模型运行前,需处理地理空间数据和时间序列数据用作模型输入(前处理);运行完成后,要对计算结果进行统计分析并使其可视化(后处理)。水质模型在数据前后处理方面的能力有限。GIS 可高效存储、组织、分析和可视化数据^[66],使水质模型的输入输出更加便捷。Peng 等人^[69]将 GIS 与 WASP 结合用于查尔斯河流域的表面高程、DO 和温度的模拟,结果证明了 GIS 可以显著提升 WASP 在水质管理中的应用能力。

3.3 应用范围拓宽

1) 离岸岛屿周边海域

水质模型的研究范围已从河流和湖泊发展至河口、海湾等近岸地区,但研究对象常局限于沿岸,对离岸海域关注较少。全球已有兴起大量旅游型海岛,其人流量巨大,排放的废水量可观,周边水质环境恶化^[70]。与半开放型的近岸海域不同,海岛周边海域属于开放型区域,影响范围相对较小,将水质模型用于海岛周边海域的水质管理极具意义。

2) 珊瑚礁保护

我国南海珊瑚礁面积接近 37 200 km²,但在过去十几年间,珊瑚礁损害率高达 90%以上^[71],导致该问题的一大原因就是废水排放。《2017 年中国生态环境状况公报》显示,南海的近岸海域水质一般,珠江口水质极差。相较 2016 年,IV 类和劣 IV 类的海水比例分别上升 3.8%和 9.1%,主要污染指标为无机氮、PH 和活性磷酸盐。以珊瑚保护为目标的水动力水质模拟研究未见报道,加强该方面的研究可望为珊瑚保护提供科学范例。

参考文献:

- [1] Metcalf E. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse[M]. USA: McGraw-Hill, 1991: 56-60.
- [2] Panda U S, Mahanty M M, Ranga R V, et al. Hydrodynamics and water quality in Chilika Lagoon: A modeling approach[J]. Procedia Engineering, 2015, 116: 639-646.
- [3] Yang Lei. Review of marine outfall systems in Taiwan[J]. Water Science and Technology, 1995, 31: 257-264.

- [4] Ministry of Environmental Protection. China environmental status bulletin 2017 (Expert 3)[J]. Environmental Protection, 2018, 46(13): 70-74.
- [5] 季振刚. 水动力学和水质: 河流、湖泊及河口数值模拟[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 410-421.
Ji Zhengang. Hydrodynamics and Water Quality-Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 410-421.
- [6] 傅国伟, 程声通. 水污染控制系统规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 7-159.
Fu Guowei, Cheng Shengtong. Water Pollution Control System Planning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 7-159.
- [7] 于寒, 杨静, 刘桂梅. 海洋水质模型研究进展及发展趋势[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 88-96.
Yu Han, Yang Jing, Liu Guimei. Research progress and development trend of marine water quality model[J]. Ocean Forecast, 2017, 34(2): 88-96.
- [8] Streeter H W, Phelps E B. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River[M]. Washington: United States Public Health Service, 1925: 10-20.
- [9] Adrian D D, Yu F X, Barbe D. Water quality modeling for a sinusoidally varying waste discharge concentrations[J]. Water Research, 1998, 28(5): 1167-1174.
- [10] McBride G B, Rutherford J C. Accurate modelling of river pollutant transport[J]. Journal of Environmental Engineering. 1984, 110(4): 809-827.
- [11] Koussis A D, Kokitkar P, Mehta A. Modeling DO conditions in streams with dispersion[J]. Journal of Environmental Engineering, 1990, 116(3): 601-614.
- [12] 曹晓静, 张航. 地表水质模型研究综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(4): 18-21.
Cao Xiaojing, Zhang Hang. Commentary on study of surface water quality model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(4): 18-21.
- [13] Wang Qinggai, Li Shibe, Jia Peng, et al. A review of surface water quality models[J]. The Scientific World Journal, 2013(2013): 231768.
- [14] Howland W E, Thomas H A. The pollution load capacity of streams[J]. Water Sewage Works, 1948, 95: 409-413.
- [15] Dobbins W E. BOD and oxygen relationship in streams[J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1964, 90(3): 53-78.
- [16] Fan C, Ko C H, Wang W S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(5): 1824-1832.
- [17] Deepshikha S, Arun K. Assessment of river quality models: a review[J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2013, 12: 285-311.
- [18] GB/T19485-2014, 海洋工程环境影响评价技术导则[S]. GB/T 19485-2014, Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment of Marine Engineering[S].
- [19] Chibole O K. Modeling River Sosiani's water quality to assess human impact on water resources at the catchment scale[J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2013, 13(4): 241-245.
- [20] Hamrick J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects[R]. Virginia: The College of William and Mary, 1992.
- [21] Hamrick J M. Application of the EFDC, Environmental Fluid Dynamics Computer Code to SFWMD water conservation area 2A: A report to South Florida water management district[R]. Virginia: Williamsburg, 1994.
- [22] 张以飞, 王玉琳, 汪靓. EFDC 模型概述与应用分析[J]. 环境影响评价, 2015, 37(3): 70-73.
Zhang Yifei, Wang Yulin, Wang Liang. EFDC model overview and application analysis[J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(3): 70-73.
- [23] Trtra Technologies Inc. User's manual for EFDC explorer7[R]. New York: Dynamic Solutions-International, LLC, 2012.
- [24] Cerco C F, Cole T M. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay[J]. Journal of Environmental Engineering, 1993, 119(119): 1006-1025.
- [25] Hamrick J M. The environmental fluid dynamics code, user manual, US EPA Version 1.01[R]. Arlington, USA: Tetra Tech, Inc, 2007.
- [26] Zhou Juntao, Falconer R A, Lin Binliang. Refinements to the EFDC model for predicting the hydro-environmental impacts of a barrage across the Severn Estuary[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 490-505.
- [27] Singha G, Pangchang V G, Nelson J A. Sensitivity assessment of wave heights to surface forcing in Cook Inlet, Alaska[J]. Continental Shelf Research, 2013, 63: 50-62.
- [28] Ji Zhengang, Hu Guangdou, Shen Jian, et al. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in St. Lucie Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 73: 188-200.
- [29] 王翠, 孙英兰, 张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(5): 833-840.
Wang Cui, Sun Yinglan, Zhang Xueqing. Numerical simulation of 3D tidal currents based on the EFDC model in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(5): 833-840.
- [30] 谢森扬, 王翠, 王金坑, 等. 基于 EFDC 的九龙江口-厦门湾三维潮流及盐度数值模拟研究[J]. 水动力学

- 研究与进展, 2016, 31(1): 63-75.
- Xie Senyang, Wang Cui, Wang Jinkeng, et al. Numerical simulation study on 3D tidal flow and salinity in the Jiulong Estuary-Xiamen Bay based on the EFDC[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(1): 63-75.
- [31] 谢锐, 吴德安, 严以新, 等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(2): 165-174.
- Xie Rui, Wu Dean, Yan Yixin, et al. Application and improvement of the EFDC in numerical simulating of Yangtze River Estuary and adjacent sea[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 165-174.
- [32] 樊乔铭, 丁志斌. 基于 EFDC 的港口污水处理厂排放标准及排污口选划研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 147-152.
- Fan Qiaoming, Ding Zhibin. Study on emission standard and sewage discharge selection of port sewage treatment plant based on EFDC[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(12): 147-152.
- [33] 何山. 基于 EFDC 模型对入海排污选址方案的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- He Shan. The research on scheme of the location of sewage outfall based on EFDC model[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [34] Zhu Zhenduo, Oberg N, Morales V M, et al. Integrated urban hydrologic and hydraulic modelling in Chicago, Illinois[J]. Environmental Modelling and Software, 2016, 77: 63-77.
- [35] 于顺东. WASP 水质模型应用于 DO 模型评价[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- Yu Shundong. WASP water quality model applied to DO model evaluation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [36] Ambrose R B, Jr P E. WASP 8 stream transport model theory and user's guide, supplement to water quality analysis simulation program (WASP) user documentation[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2017.
- [37] Wool T A, Ambrose R B, Martin J L, et al. WASP8 multiple algae model theory and user's guide, supplement to water quality analysis simulation program (WASP) user documentation[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2017.
- [38] 倪晋仁, 秦华鹏, 赵智杰. 基于水质模型的海湾填海岸线选择[J]. 环境科学学报, 2001, 21(6): 684-688.
- Ni Jinren, Qin Huapeng, Zhao Zhijie. Bay shoreline selection based on water quality model[J]. Journal of Environmental Science, 2001, 21(6): 684-688.
- [39] Zheng Lianyuan, Chen Changsheng, Zhang F Y. Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia[J]. Ecological Modelling, 2004, 178: 457-482.
- [40] Zafer D, Frederick J S, Vincent D P, et al. Toward a comprehensive water-quality modeling of Banegat Bay: development of ROMS to WASP Coupler[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 78: 34-45.
- [41] Xiong Yi. Coupling sediment transport and water quality models[D]. Mississippi: Mississippi State university, 2010.
- [42] MIKE 21. Coastal hydraulics and oceanography, user guide[R]. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, 2005.
- [43] MIKE 3. Modeling of coast and sea[R]. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, 2019.
- [44] MIKE 21 & MIKE 3. Flow Model FM, MIKE ECO Lab module, short description [R]. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, 2019.
- [45] 蒋锦刚. 沿海典型流域水文-水动力-水质多模型耦合建模与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Jiang Jingang. Coupled modeling and application of hydrological, hydrodynamic and water quality models for typical coastal basins: a case study of the Yongjiang River Basin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [46] Babu M T, Vethamony P, Desa E. Modeling tide-driven currents and residual eddies in the Gulf of Kachchh and their seasonal variability: A marine environmental planning perspective[J]. Ecology Modeling, 2005, 184: 299-312.
- [47] Babu M T, Kesava D V, Vethamony P. BOD-DO modeling and water quality analysis of a waste water outfall off Kochi, west coast of India[J]. Environmental International, 2006, 32(2): 165-173.
- [48] 吴园园. 海阳中心渔港工程附近海域水动力及泥沙冲淤数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Wu Yuanyuan. The hydrodynamic and sediment scouring and silting numerical simulation of the surrounding waters of Haiyang Central Fishing Harbor[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [49] 冯静. MIKE 21FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Feng Jing. Application of MIKE 21FM numerical model in environmental impact assessment of ocean engineering[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [50] 郭健. 滨海近岸溢油风险模拟及对附近环境敏感区的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- Guo Jian. The risk simulation and environment sensitive area nearby effects of oil spill in Binhai offshore[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [51] 李志一. 流域水环境多模型耦合模拟系统的不确定性分析研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Li Zhiyi. Study on the uncertainty analysis of basin coupling model system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

- sity, 2015.
- [52] James I D. Modeling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: A review[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2002, 17: 363-385.
- [53] 张质明. 基于不确定性分析的 WASP 水质模型研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
Zhang Zhiming. Research on WASP based on uncertainty analysis[D]. Beijing: Capital Normal University, 2013.
- [54] He Jianxun, Chu A, Ryan M C, et al. Abiotic influences on dissolved oxygen in a riverine environment[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1804-1814.
- [55] Saltelli A, Tarantola S, Chan KPS. A quantitative model independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.
- [56] Morris M. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. *Technometrics*, 1991, 33: 161-174.
- [57] 朱新军, 王中银, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 105-112.
Zhu Xinjun, Wang Zhongyin, Li Jianxin, et al. Applications of SWAT model in Zhangwei River Basin[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(5): 105-112.
- [58] Sobol I M. Sensitivity estimates for non-linear mathematical models[J]. *Mathematical Modelling and Computational Experiment*, 1993, 4(1): 407-414.
- [59] Angela S, Stefan U. Sensitivity analyses of a distributed catchment to verify the model structure[J]. *Journal of Hydrology*, 2005: 216-235.
- [60] Vandenberghe V, Bauwens W, Vanrolleghem P A, et al. Evaluation of uncertainty propagation into river water quality predictions to guide monitoring campaigns[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(5): 725-732.
- [61] Li Jianbing, Huang G H, Zeng Guangming, et al. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(2): 173-188.
- [62] Mailhot A, Villeneuve J P. Mean-value second-order uncertainty analysis method: Application to water quality modelling[J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(5): 491-499.
- [63] 陆莎莎, 时连强. 水质模型研究发展综述[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 78-81.
- Lu Shasha, Shi Lianqiang. A review of research development about water quality model[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(S1): 78-81.
- [64] Mattikalli N M, Engman E T. Land surface remote sensing and geographical information systems for water quality modeling[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996, 4: 2237-2239.
- [65] 洗翠玲. 基于遥感的香溪河水质模拟方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
Xian Cuiling. Study on water quality simulation method of Xiangxi River based on remote sensing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [66] 田勇. 湖泊三维水动力水质模型研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Tian Yong. Development and application of a three dimensional hydrodynamic and water quality lake model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [67] 钱一婧. 基于遥感和数值模拟技术的河口水流及水质过程模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
Qian Yingjing. Simulation of flow and solute transport in estuary region based on remote sensing and numerical simulation[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.
- [68] 李宁. 近岸水质的遥感监测和数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Li Ning. Remote sensing and numerical simulation of coastal water quality[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [69] Peng Sen, Fu G Y Z, Zhao Xinhua. Integration of USEPA WASP model in a GIS platform[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2010, 11(12): 1015-1024.
- [70] 陈海滨, 杨龔, 杨禹, 等. 旅游型海岛生活垃圾污染及其控制[J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(1): 27-29.
Chen Haibin, Yang Yan, Yang Yu, et al. Pollution and control of domestic waste in tourism island[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2016, 24(1): 27-29.
- [71] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1160-1172.
Yu Kefu. Coral reefs in the south China sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. *Science in China*, 2012, 55(8): 1160-1172.

Review of coast quality models: Research process and outlook

LU Yao-feng, DING Zhi-bin, LI Wei, CHEN Peng, CHEN Xiao

(Defense Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Received: Jun. 10, 2019

Key words: coast; water quality model; environmental fluid dynamics code (EFDC); water quality analysis simulation program (WASP); MIKE

Abstract: To better understand the coastal water quality model, the environmental fluid dynamics code (EFDC), water quality analysis simulation program (WASP), and MIKE were reviewed on the basis of their conceptualization, capabilities, strengths, limitations, and applications. Moreover, it was important to select the appropriate model and reduce uncertainty. The development trend of the coastal water quality model was also examined. The analysis showed that WASP and EFDC had stronger scalability, whereas MIKE had better selectivity. Although the coastal water quality model has been widely used, there is still room for development, which can be achieved by improving the model, coupling new technologies, and broadening the application scope.

(本文编辑: 刘珊珊)