

海洋水质模型研究进展及发展趋势

于寒, 杨静, 刘桂梅

(国家海洋环境预报中心国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 介绍了水质模型的发展阶段, 从一维、二维、三维的角度分析了海洋水质模型应用情况, 展望了海洋水质模型未来的发展趋势, 可为控制污染物排放、海洋水质监测及水资源管理提供系统参考。

关键词: 海洋水质模型; 研究进展; 发展趋势

中图分类号: X834 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)02-0088-09

1 引言

沿岸多为人口密集区, 人为活动产生的污染物加剧了沿岸海域水污染程度, 生态环境也受到一定程度的影响, 加剧了人类可利用水资源的流失, 因此水污染的治理与水资源科学管理规划, 对人类水资源的可持续利用显得尤为关键。水质模型着重研究的是水环境中水质状态变量(溶解氧、营养盐等)的迁移、转化规律, 以及影响因素之间的相互关系, 可用于预测该海域水质的发展趋势, 所以水质模型不仅是水环境科学研究的主要内容, 同时也是水环境研究中必不可少的工具^[1]。水质模拟可分为定性模拟与定量模拟, 在实际水质问题的研究中, 定量模拟更能反应水质在空间和时间上的发展变化, 还可以利用定量模拟评价、预测、选择合适的污染控制方案, 为水质管理规定的制定以及污染物排放标准的确定提供依据^[2]。

建立可靠的水质模型, 对水质状态变量进行准确模拟及预测, 是科研工作者多年来致力研究的重点, 伴随着实际应用的多样化需求, 水质模型的应用从最初河水自净化研究到水质评价、污染物行为预测及过程模拟、水环境综合管理等方面的研究, 理论从最初的氧平衡模型到现在的模糊理论、灰色

理论、随机理论, 研究范围从河流扩展到湖泊、河口、水库、海岸, 这些都极大的推动了水质模型的发展^[3]。本文综述了水质模型研究进展, 分析了不同维数海洋水质模型及其应用, 并展望了海洋水质模型的发展趋势。对海洋水质模型的研究应用, 可以为海洋水质模拟、污染物排放计算、水质监测、水资源管理提供系统的参考, 使用户对模型有初步大概的认识, 能够根据需要选择适合的海洋水质模型研究区域海洋的具体问题。

2 水质模型研究进展

氧平衡模型是第一个水质模型, 早在1925年, Streeter等^[4]在对Ohio河污染及其自净化的综合研究中, 提出了最初的氧平衡模型形式, 该模型假定河流自净化过程中, 存在两个维持水中溶解态氧平衡的相反过程, 即消耗水中溶解氧的氧化反应, 以及补充水中溶解氧的复氧过程, 模式方程如下:

$$-\frac{dL}{dt} = K_1 L \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L - K_2 L \quad (2)$$

式中: L 为河水有机物需氧量, D 为河水中的氧亏值, K_1 河水脱氧速率系数, K_2 河水复氧速度系

收稿日期: 2016-08-19; 修回日期: 2016-11-28。

基金项目: 国家自然科学基金(41222038, 41206023); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020104); 国家海洋局海洋公益性行业专项(01205018)。

作者简介: 于寒(1991-), 女, 硕士在读, 从事海洋生态动力学模型研究。E-mail: yuhan3297@163.com

数, t 为反应时间。

基于最初单变量的 S-P (Streeter-Phelps) 水质模型, 水质模型在后续的发展中考虑了更多的相关过程, 引入了新的变量, 研究对象多样化, 数学工具的选择更为多样, 针对水质模型的发展阶段, 不同学者做出了不同的归纳^[5-13], 徐祖信等^[6]按时间将水质模型的发展大致分为3个阶段(见表1): 1925—1980年为发展的第一阶段, 水质本身为研究主体, 研究中注重水体内部水质各组分之间的发展规律, 污染负荷输入停留在点源层面上, 经历了水质模型空间维数(一维、二维至三维)、研究范围以及应用领域上的发展, 考虑影响生化需氧量-溶解氧(Biological Oxidation-Dissolved Oxygen, BOD-DO)的因素对 S-P 模型进行改进; 1980—1995年为发展的第二阶段, 状态变量增多的同时, 水动力模型、底泥等作用被纳入到多维模型系统内部, 并且连接流域模型, 使面污染源可以作为初始输入, 由于增加了水质组分的约束, 可以大大减少模拟的主观性, 如美国国家环保局开发的 WASP (The Water Quality Analysis Simulation Program) 系列模型, 多介质模型^[14-15]; 1995年至今为水质模型发展的第三阶段, 考虑到大气中沉降污染物(如有机化合物、金属以及氮化合物)的输入对河流水质的影响愈加显著, 所以建立了大气污染模型将大气沉降(动态或静态)连接到给定水域。

海洋水质模型是水质模型在河口、海岸、海湾等区域数值计算中的应用, 针对海湾、海岸等区域的重金属污染以及富营养化、水质监测、环境容量计算的需求, 以基本水质模型为基础, 用以解决海水有关水质的问题。海洋水质模型严格意义上讲, 是水质模型的一个应用领域, 在水质模型发展的第二阶段逐渐得到应用, 伴随实际需求的不断增加,

从最初对河流问题的研究发展到对海湾、近岸等水体的研究^[5]。

从海洋水质模型的研究来看, 美国、丹麦对海洋水质模型的研究走在世界前列, 美国环保局开发了 WASP 系列、丹麦水动力研究所研究开发了 MIKE 系列模型, 并且不断对模型修订、增强, 推动了海洋水质模型的发展。以 WASP 模型为例, 自最原始的版本在 1983 年发布以来, 经过不断的修订完善, 用户界面更加友好, 操作系统适用性逐步增强, 运算速度显著提高, 广泛应用于海湾、近岸的重金属污染、富营养化过程^[16]。国内对海洋水质模型的研究起步较晚, 也取得一些成果: 江毓武等^[17]基于三维变边界 σ 坐标下的污染扩散模型建立了厦门水质模型; 倪晋仁等^[18]建立基于沿深度平均的二维平流-扩散模型的水质模型; 王昆等^[19]建立非保守型水质预测预报模型, 考虑化学分解和生物的制约作用; 沈永明等^[20]将污染物扩散输移的湍流模型与多组分污染物生化转化模型结合, 建立了综合考虑物理、生物、化学过程的近岸海域多组分三维水质动力学模型。在实际需求的推动下, 国内学者不仅基于基本方程建立适用于海域的水质模型, 同时也引进国外广泛应用的海洋水质模型, 为区域海洋污染控制方案的制定提供了一定的参考。林卫青等^[21]利用丹麦水动力研究所开发的 MIKE21 水质模型在流场、温盐场、泥沙场的基础上, 以高锰酸盐、氨氮等变量为模拟指标, 建立该区域的二维水质模型, 为环境容量的计算与分配提供了理论依据。

水质状态变量的计算需要依托水动力模型提供基本的物理场, 近年来应用较多的海洋水质模型大致可以分为两类: 一类仅模拟水质的状态变量, 需要耦合其它的水动力模型进行实际的数值模拟, 这类模型比较典型的为 WASP、CE-QUAL-ICM

表1 水质模型发展的3个阶段

阶段	模型结构	外部强迫
一	水体水质模型	流域面污染源、大气污染源、点污染源、底泥污染源、水动力传输、开放的边界(如海岸)
二	水体水质模型、流域水质模型、底泥模型、水动力模型	流域污染源、流入流域与水体的大气污染源、点污染源、开放的边界(如海岸)
三	水体水质模型、流域水质模型、底泥模型、水动力模型、大气污染模型	流域污染源、大气污染源、点污染源、开放的边界(如海岸)

注: 本表参照文献[6]中的图1、图2、图3编制。

(Corps of Engineers Integrated Compartment Water Quality Model)等;另一类可同时模拟水动力和水质,应用于海洋区域比较典型的模型为地表水模型系统(Surface-Water Modeling System, SMS)。国内外学者利用海洋水质模型针对不同区域的海洋水质模拟做了大量研究,对该海域水质状态变量变化趋势的了解、预测,污染物的控制、环境容量的计算等方面都提供了一定的参考。例如针对胶州湾海域:Li等^[22]将三维水动力模型与从胶州湾围隔实验的氮磷动力学模型改编得到的水质模型耦合,利用三维水质模型对胶州湾的氮、磷容量进行评估;Zhang等^[23]利用三维物理和水质模型耦合,其中物理模型采用的 ECOM-si (Estuarine, Coastal and Ocean Model (semi-implicit)) 的修改版本,包括潮间带的干湿过程,水质模型采用 WASP5 水质模型,研究了营养盐、生化需氧量、溶解氧、浮游植物等状态变量的时空变化情况。Khangonkar 等^[24]为了解普及特海湾营养负荷对水质以及生态健康的影响,采用非结构有限体积海岸模型 (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model, FVCOM) 提供水动力条件,用 CE-QUAL-ICM 水质模型模拟生化过程,通过模拟 19 个状态变量来计算藻类生产、消亡及对溶解氧的影响。

3 水质模型分类及常用的海洋水质模型

3.1 水质模型的分类

根据不同的分类标准,可将水质模型分为不同的种类:水质模型在空间维数上可以分为零维、一维、二维、三维,在变量数量上可以分为单变量、多变量模型,按照水质组分时间变化特征可以分为动态模型、稳态模型,按照数学方法可以分为随机性模型、确定模型、线性模型、非线性模型,根据描述水体的不同可以分为河流、湖泊、河口、海湾、地下水模型,根据对象的不同可以分为溶解氧、温度、重金属、有毒有机物、放射性模型等不同的分类^[12]。

3.2 海洋水质模型

3.2.1 一维海洋水质模型

一维水质模型多适用于狭长的河流、渠道,考

虑状态变量在一个方向上的变化,忽略另外两个方向上的变化,一般常用的类型为水平一维和垂向一维水质模型,适用于沿河道变化显著和在垂直方向上变化显著的情况。

基于质量守恒原理推导得到的一维水质模型的数学表达式如下^[25]:

$$\frac{\partial(AC_1)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_1)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) - S_c - W_c = 0 \quad (3)$$

式中: C_1 为水质浓度, A 为过水面积, Q 为流量, E_x 为纵向分散系数, S_c 为动力学反应源汇项, W_c 是外源输入项。

一维水质模型在狭长河道得到较好应用^[26-27],在近岸、海湾等海域用一维水质模型可以模拟简化的物理和生化过程。杨红等^[28]在 WASP 模型基础上,运用系统动力学软件 Stella9.0.2 建立了适用于海洋围隔生态系统的一维箱式水质动力学模型,利用象山港围隔生态实验数据进行了模型验证和参数率定工作,成功模拟了不同水温条件下围隔水质情况。建立海洋围隔研究水质的变化情况,为一维海洋水质模型在近岸、海湾的应用提供了参考。

3.2.2 二维海洋水质模型

二维海洋水质模型多为水平方向的二维模型,在海岸、海湾等区域水深较浅,表层和底层的物理、生物化学性质差别较小,在外部强迫下,较易达到均一状态,在相对于变量的水平变化,垂直变化可以忽略的情况下,水平二维水质变量是较为合理的选择。

MIKE21 模型由丹麦水动力研究所 (Danish Hydraulic Institute, DHI) 研究开发,在海域、河口地区的污染物输运、扩散研究等方面得到广泛应用。林卫青等选用了 MIKE21 建立了长江口及毗邻海域的二维水质模型,其基本的对流扩散方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y h \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + s + KC \quad (4)$$

式中: C 为物质浓度, u 、 v 为 x 、 y 方向流速, D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向紊动扩散系数, s 为源汇项, K 为综合降解系数。针对该海域的氮磷超标问题,利用二维水质模型计算得到该海区排污口排放总量的控制方案,并利用三维生态模型进行校验,结果显示全海域实施控制方案之后,赤潮暴发的概率和面积都

大大减少^[21]。Babu等^[29]利用MIKE21计算了Kochi的离岸排水口在3种不同排放速率的情况下的吸收能力,基于距排水口8 km一椭圆区域对高BOD(生化需氧量)值的限制,来确定BOD的每天合适的排放量。以上国内外学者利用MIKE21水质模型计算污染物的浓度,考虑了点源负荷对研究区域的影响,根据具体的排放限制,确定了合理的排放方案,体现了MIKE21海洋水质模型在水质管理规划的应用,具有较好的效果。实际研究中,由于实时的水质数据难以获得,利用海洋水质模型来掌握水质变量的变化情况是必要的,可以根据预定基本功能所要求的水质及水域自净能力,确定总排放量、日排放量、排放分布情况,以较小的人为代价获得较好的水质效果^[5,30-31]。

RM4模型是美国陆军工程兵团开发的基于有限元法的二维污染物输移水质模型,主要应用于河口、河流、湖泊、海岸等地区的污染物输移扩散、排污口排放量等方面的计算^[32-34]。冯媛媛利用水动力学模型RM2与水质模型RM4,对瓯江河口工程前后的水动力及水质变化情况作了研究,RM4的基本方程如下:

$$h\left(\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y}\right) = h\left(\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial C}{\partial y} + \sigma - kC - \frac{R(C)}{h}\right) \quad (5)$$

式中: h 为水深, C 为污染物浓度, t 为时间, u 、 v 为 x 、 y 方向流速, D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向紊动扩散系数, k 为衰减系数, σ 为污染物源汇项, $R(C)$ 为降雨蒸发。以化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)作为污染物进行扩散研究,结果显示围垦工程对瓯江河口的水质不会产生影响^[34]。利用海洋水质模型考虑污染物在水体中的行为,应考虑该海域的主要生物化学过程以及点源、非点源污染物的输入,对瓯江河口水质的模拟未考虑到COD的降解,所以可能引起与实际情况的差异。海洋水质模型最主要的功能即是对污染物在水体中行为进行模拟和预测,由于污染物进入水体之后,随水体迁移过程中会受到水文、理化、水力等因素的影响,会发生降解、混合等复杂的行为,在借助模型来了解污染物的迁移运动规律时,应注意考虑影响该区域水质状态变量的主要过程^[5]。

3.2.3 三维海洋水质模型

三维海洋水质模型适用于流场环境复杂,水质状态变量在水平方向和垂直方向均有显著变化的情况。水质状态变量的模拟需要基本的水动力场信息(水位、流等),根据关注区域的基本水文情况选择海洋水质模型的水动力模块,对于只模拟水质状态变量的海洋水质模式而言,需要耦合其他水动力模块。

Cerco和Cole开发的CE-QUAL-ICM,最初是应用于美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay)的富营养化模型,能够模拟一维、二维、三维水体结构,可以模拟多种水质状态变量(多种藻类、浮游动物、溶解氧等),由于CE-QUAL-ICM模型只模拟水质,所以需要物理模型提供相应的流、水位、扩散系数等水动力信息^[35]。

该模型在国内外河口、海湾都得到应用,Taeyun等将FVCOM与CE-QUAL-ICM耦合,方程如下:

$$\frac{\partial V_j C_j}{\partial t} = \sum_{k=1}^n Q_k C_k + \sum_{k=1}^n A_k D_k \frac{\partial C}{\partial x_k} + \sum S_j \quad (6)$$

式中: V_j 是第 j 个控制体的体积, C_j 是第 j 个控制体的浓度, Q_k 是流过第 j 个控制体的 k 流面的体积流量, C_k 是流经 k 流面的流体浓度, A_k 是 k 流面的面积, D_k 是 k 流面的扩散系数, n 是与第 j 个控制体相连的流面的数量, S 是第 j 个控制体中的外部压力和动力源汇, t 是时间坐标, x 是空间坐标。对比4个试验的模式结果与解析解,结果显示二者耦合可进一步考虑用于评估人为引起的该海域营养富集,也推动了水动力模型与水质模型耦合的研究应用^[36]。Khangonkar等^[24]采用FVCOM与CE-QUAL-ICM耦合,由FVCOM提供水动力输出,包括:温度、盐度、自由表面高度、水位、速度分量及边界通量等,通过对19个状态变量的模拟,研究了普及特海湾营养负荷对水质以及生态健康的影响。Kim等^[37]将ROMS与CE-QUAL-ICM模型耦合,考虑河流以及水闸的营养盐点源负荷,研究了新万金(Saemangeum)潮汐湖及毗邻的韩国海域水质状态变量的季节变化。CE-QUAL-ICM模型可以耦合不同的水动力模型,可以输入点源、非点源负荷,灵活性较强,也可以与基于个体的鱼类生物能学模型耦合^[38],应用前景广泛。

WASP由美国环保局开发,可模拟一维、二维、

三维水质问题的水质模型,由水动力模型程序(Hydrodynamic Model,DYNHYD)与水质模型程序WASP组成,水动力模型程序DYNHYD适用于一维水动力情况,水质模型程序WASP可以与其连接计算,也可以耦合其他水动力模型^[18]。其中水质模型程序WASP由两个子程序组成:有毒化学物模型(The Toxic Chemical Model,TOXI)和富营养化模型(Eutrophication Model,EUTRO),EUTRO可以用于模拟传统污染物的迁移转化规律(如DO、BOD和富营养化),TOXI用于有毒物质迁移转化规律(有机化学物、金属、沉积物等)^[39-44]。

Zheng等利用修订的ECOM-si与WASP5耦合,研究了萨蒂拉(Satilla)河口的低溶解氧浓度的原因^[45],水质成分浓度的质量平衡式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(A_h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_h \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_h \frac{\partial C}{\partial z}) + S + W_0 \quad (7)$$

式中: C 为水质成分的浓度, u 、 v 、 w 笛卡尔坐标系下 x 、 y 、 z 方向的流速分量, A_h 、 K_h 分别为水平粘性扩散系数和垂直涡动扩散系数, S 为水质变量的内部源汇项, W_0 是点源和非点源的外部输入, t 表示时间。通过模式结果分析得到结论为:河口的溶解氧值低,原因是潮间带的沉积需氧量高,是主要的DO(溶解氧)消耗者,而与人类活动无关^[45]。

WASP模型灵活性较强,可以输入点源、非点源营养盐负荷,与其他模型的耦合能力较强,可以与环境流体动态模型地表水模拟系统(Environmental Fluid Dynamics Code,EFDC)耦合,兼具了EFDC极强的问题适应能力、主流的数值方法和系统开发方法、多种水动力过程、多种模拟计算方案等优点^[33]。李林子等^[46]耦合WASP和EFDC模型研究了突发水污染事故影响的预测预警,取得了较好的结果。Xiong^[47]选取EFDC和WASP作为水动力和水质模型,将水动力、水质、沉积模块耦合,在Mobile海湾的水动力、水质以及沉积过程的研究中验证了三者耦合的可行性。

MIKE3是由丹麦水动力研究所(DHI)研究开发的一款用于模拟水动力、水质、泥沙的专业工程软件,主要应用于水库、港口、河流、湖泊、河口、海岸,具有先进的前后处理功能和友好的用户界面,在大流域、长时间的数值模拟方面有着突出优点^[48]。

MIKE3模型应用广泛,王勇智等^[49]利用MIKE3水动力模型耦合粒子追踪模块,计算了渤海湾环流系统及其驱动下的水质点运移规律和变化特征,为污染物输运的研究提供了基础。黄少彬等^[50]利用MIKE3模型建立珠江口河口附近的三维水动力模型,计算出珠江口水体交换时间,并分析河流流量、外海潮汐与珠江口水体交换的相关性,对水体交换的定量计算,有利于水质环境治理和污染物扩散研究。陈瑶泓伶等^[51]利用MIKE3的三维水动力模型和对流扩散模块(Advection-Dispersion Model,AD)对天津南港污水排海进行污染物输移扩散数值模拟,排污口放置水下9 m左右,结果表明深海排放利于控制表层水体污染物含量的增量,为短期污染物排放控制提供了一定的参考。

地表水模型系统——SMS,由美国Brigham Young大学环境模型研究实验室开发,可用于一维、二维、三维水文建模、设计,可以模拟和分析地表水运动规律,包括预处理及后处理平台^[6,11]。SMS软件界面高度可视化,其中程序以及代码都是美国政府公开的,包含来自美国陆军工程兵水道实验站(U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station)与美国联邦公路管理局的计算模块^[52-53]。

SMS模型系统主要包含水动力和泥沙模型,水质变化过程有限,但可通过耦合其他水质模型模拟水质状态变量。SMS模型系统有较为广泛的应用,吴志易等^[54]利用SMS建立杭州湾海域模型,实现海域流场的可视化,并结合水动力学模型进行潮流场模拟,结合波浪动力学模型进行波浪场模拟,得到不同条件下的水质扩散模型,对于分析不同假设条件下的海域水流场变化有一定的参考价值。陈志娟等^[55]通过SMS模拟了黄河口周边大范围海域的流场分布情况,分析了该海域的泥沙扩散输运情况。鲁海燕^[56]利用SMS在杭州湾建立大范围平面二维水流模型,通过实测资料和水下地形的验证该模型满足预测要求。SMS模型具有较强的计算功能,对复杂流场、岸线的模拟都较好,且精度也较高。

4 海洋水质模型发展趋势

4.1 水质模型内部发展趋势

水质模型在建立之初注重的是流域水体本身

的发展,随着现实应用的需求,经历由点源向面源的过渡,逐渐加入了底泥模块、水动力模块、大气污染模块^[6]。最初的水质模型只包含DO、BOD在内的少数水质指标,随着不同机构对水质模型的不断开发、修正、增强,状态变量明显增加。例如MIKE模型系统的变量包括DO、BOD、水温、细菌、氮、磷、水生动物、底泥、岩屑、藻类、金属以及用户自定义物质^[9],CE-QUAL-ICM中的状态变量也增加到36个。水质模型中水质组分的增加,在模拟不同区域的不同水质状况时,用户可以通过选择合适的水质组分达到较好的模拟效果。

海洋水质模型在内部组分、数学方法、前后期处理等方面不断发展,并且更多的生化过程考虑进来,能够更客观的反映实际情况,也增加了模型的复杂性,其复杂性体现在以下几个方面:水质模型污染源负荷从点源、面源,到大气污染源的加入,体现了不同发展阶段污染源输入的主要特征,增加了模型结构的复杂性;基本的水动力模型与水质模型耦合的基础上,更多可能影响水质状态变量的过程被考虑进来,比如泥沙模块、沉积模块^[47]、底泥模块,增强了模型对生态系统的客观描述,使模型本身也更加复杂;河口地区一维与多维模型的耦合^[25],建立可以适用于不同特征的相邻区域的耦合模型,有利于计算效率和计算精度的提高。

海洋水质模型的应用日益广泛,最主要应用于水体中污染物行为的预测,随着实际需求的增加,模型功能更加细化。海洋水质模型应用于水质管理规划与预测,可以合理规划分配削减各污染源的排放量,力求在规定期限内使水质达标,林卫青等^[21]在长江口以及邻近海域建立了二维水质模型,计算得出总量分配方案,同时建立三维生态动力学模型校验水质模型计算出的总量控制方案;海洋水质模型也应用于计算水环境容量,是在确定的水质目标条件下,计算可以允许的最大排放量,喻良等^[57]采用SMS模拟水质,采用影响系数法计算环境容量,得出目标污染负荷,计算方便易于理解;海洋水质模型在水质预警方面也广泛应用,曹立杰等^[58]研发基于传感器网络的海洋环境监测与预报系统,通过建立传感器网络,获取实时监测的水质数据,利用水质模型预测、预报富营养化趋势,为国内近海富营养化的监测预报系统提供了参考。

4.2 水质模型与新技术(新方法)结合

4.2.1 不确定性分析

水环境充满很多不确定性因素,这种不确定性包括对水环境理化性质的未知,也包括数据的不确定性,Takyi等^[59]分析了优化水质模拟模型中不确定性的来源,可以概括为3个方面:(1)来自污染物排放量和河流背景值的随机性;(2)河流与水质资料的不充分对参数估计的影响;(3)对污染物输移认识不足,对简化水质管理系统仍然缺乏理论支持。

不确定性水质模型主要有3种^[60]:基于概率论与数理统计的随机方法(概率表述)、模糊数学(模糊度)、灰色系统理论(灰色度)。张荣祥等^[61]从数据输入输出、参数识别、构建模型等方面说明了整个水质模型构建中不确定性的来源,其中分析了水质模型构建过程中采用的黑箱水质模型和随机理论水质模型。扈华等^[62]采用T-S模糊神经网络模型对乌梁素海水质进行合理的量化评价,该模型兼并模糊系统与人工神经网络的优点,一定程度上解决了随机性、模糊性的问题,结果合理且与实际环境状况相符,可为监管乌梁素海水域的提供理论依据。田一梅等^[63]建立一维不确定性水质模型(内嵌神经网络),采用遗传算法(改进适应度函数)优化水质模型的参数解,结果验证不确定性水质模型具有很强的优势,体现在拟合精度更高、对污染物波动更敏感,预测河流水质的平均准确度普遍高于确定性水质模型。不确定性水质模型比确定性水质模型更能体现水质的实际变化的情况,减少模式的主观性,是将来发展一个大趋势。

4.2.2 基于GIS的水质模型

地理信息系统(Geographic Information System, GIS)应用于水质模型,可以在一定程度上弥补数学模型在管理维护数据、表现模拟结果以及空间分析上能力有限的缺点,不仅可以存储管理大量的数据,还能对水质模拟的结果进行空间分析,为水质模拟提供了预处理、后处理,使输出输出更加便捷^[8]。江毓武等将GIS的地图处理、数据分析功能应用于海洋水质模型的前期建立以及后期数据输出中,缩短了建模周期,同时也提高了模型精度,并且使在地图上查询模拟结果成为现实^[17]。Hartnett等^[64]将DIVAST (Depth Integrated Velocity and Solute

Transport)与GIS框架耦合,力求实现在特定领域中非专家人员对水质模型的建立、执行和水质数据分析。基于GIS的水质模型不仅在数据的管理上更加便利省时,还可以强化模型概念。

应用GIS对模式数据的规范化管理,对结果进行空间分析,是水质模型发展的一个大方向,现阶段将GIS与河流、水库集成较多,结果相对于单独的水质模型结果要更优,证实了水质模型与GIS集成具有很好的应用前景,为GIS在河口、海岸、海湾等海洋区域的应用奠定了良好基础。利用实时数据建立海洋监测预警体系也是海洋水质模型发展的一个重要方面,在沿海地区建立水质监测自动化平台,对海洋渔业、污染物治理、环境监测有重要的指导意义。

5 结语

海洋水质模型为水质模拟、污染物治理、水资源规划等方面提供了有力的工具,也为水质预警工作提供了有力的技术支撑,随着新技术的蓬勃发展,水质模型在原有的基础上推陈出新,适用性和模型的模拟能力也都有新的提高。海洋水质模型在应用中得到发展,使水质模型有了更广泛的应用领域,建立综合性更强、包含多种生物化学模块的模式,有利于更加精确的描述海洋区域的生化过程,使模拟结果有更高的参考价值。

在应用水质模型的同时,也应该注意水质模型的发展的中面临的问题:

(1)实时观测数据缺乏。海洋水质模型需要完整、连续、系统的水文、水质资料,这是建立模型的基础,观测数据可以为模式提供初始场、边界条件、强迫场,也可以用于验证模式的计算结果的准确性,而现在走航式观测和浮标观测,在时间上的连续性和数据的质量方面还有待提高。建议不针对某个项目建立观测点,在沿海选取代表性的位置布放浮标,观测变量包括基本物理变量和水质状态变量,数据自动化传输处理,同时实行数据共享;

(2)水质污染机理还不完全清楚,难以用数学公式详尽的表达,且模式中存在诸多假设,难免与实际有差异。建议注重基本理论的研究,必要时进行实验验证假设是否合理,与观测数据结合,确认

假设成立的条件;

(3)近岸水体的水质变化受众多因素的影响,涵盖了生物、物理、化学等不同学科,如何提高学科间的交叉、协作,以及基于水质模型建立一个考虑多学科多介质的海洋生态系统模型,更有利于海洋水质的客观模拟。

海洋水质模型自产生以来得到广泛应用,通用性不断增强,逐渐成为决策者的得力工具,基于海洋水质模型,建立完善、系统的沿海水质预警体系,预测、预报富营养化的趋势,同时提高海洋水质模型模拟能力,是海洋水质模型应用的热点。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 王玲杰,孙世群,田丰.河流水质模拟问题的探讨[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(3):260-265.
- [3] 郭劲松,李胜海,龙腾锐.水质模型及其应用研究进展[J].重庆建筑大学学报,2002,24(2):109-115.
- [4] Streeter H W, Phelps E B. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River, III. Factors Concerned in the Phenomena of Oxidation and Reaeration[M]. Washington D C: US Government Printing Office, 1925: 1-73.
- [5] 李继选,王军.水环境数学模型研究进展[J].水资源保护,2006,22(1):9-14.
- [6] 徐祖信,廖振良.水质数学模型研究的发展阶段与空间层次[J].上海环境科学,2003,22(2):79-85.
- [7] 陈英.基于河流总氮水质模型的研究进展及发展趋势[J].宜春学院学报,2010,32(4):108-110.
- [8] 姜云超,南忠仁.水质数学模型的研究进展及存在的问题[J].兰州大学学报(自然科学版),2008,44(5):7-11.
- [9] 王斌,万天杰.河流水质模型研究进展[J].河南化工,2010,27(3):2-3.
- [10] 樊石磊,吕松力,周志慧.水质模型研究进展[J].内蒙古石油化工,2014,(21):32-33.
- [11] 周雪丽,孙森林,张宽义,等.水质数学模型的研究进展及其应用[J].科学观察,2011,(2):87-88.
- [12] 李程.水质模型的研究进展及发展趋势[J].现代农业科技,2013,(6):208-209.
- [13] 李君,徐俊红,曹永梅.河流水质数学模型的研究进展及发展趋势[J].科技·经济·市场,2007,(9):35-36.
- [14] 叶常明,颜文红.多介质环境循环模型的研究进展[J].环境科学进展,1994,2(1):9-25.
- [15] Mackay D, MacLeod M. Multimedia Environmental Models: the Fugacity Approach[M]. The Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2002, 6(2): 63-69.
- [16] 陈美丹,姚琪,徐爱兰. WASP水质模型及其研究进展[J].水利科

- 技与经济, 2006, 12(7): 420-422, 426.
- [17] 江毓武, 洪华生, 张珞平. 地理信息系统(GIS)在厦门海域水质模型中的应用[J]. 厦门大学学报(自然版), 1999, (1): 90-95.
- [18] 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.
- [19] 王昆, 王年斌, 孙家文, 等. 基于辽东湾海域的非保守型水质预测预报模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(6): 691-700.
- [20] 沈永明, 郑永红, 吴修广. 近岸海域污染物迁移转化的三维水质动力学模型[J]. 自然科学进展, 2004, 14(6): 694-699.
- [21] 林卫青, 卢士强, 矫吉珍. 长江口及毗邻海域水质和生态动力学模型与应用研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(5): 522-531.
- [22] Li K Q, Zhang L, Li Y, et al. A Three-Dimensional Water Quality Model to Evaluate the Environmental Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1): 306-316.
- [23] Zhang Y, Sun Y L, Yu J, et al. A Three-Dimensional Water Quality Model and Its Application to Jiaozhou Bay, China[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(4): 669-684.
- [24] Khangaonkar T, Sackmann B S, Long W, et al. Puget Sound Dissolved Oxygen Modeling Study: Development of an Intermediate Scale Water Quality Model[R]. Technical Report AC05-76RL01830, 2012.
- [25] 胡嘉镗, 李适宇, 裴木凤, 等. 珠江三角洲一维河网与三维河口耦合水质模型模拟与验证[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 1-9.
- [26] 谌程骏, 张东辉, 张敏. 长江水质的评价预测模型[J]. 工程数学学报, 2005, 22(7): 41-46.
- [27] 周新明. 一维河流水质模型在应急监测中的应用分析[J]. 绿色科技, 2011, (6): 10-11.
- [28] 杨红, 丁骏, 王春峰, 等. 象山港围隔生态系水质模型研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(7): 14-22.
- [29] Babu M T, Das V K, Vethamony P. BOD-DO Modeling and Water Quality Analysis of a Waste Water Outfall off Kochi, West Coast of India[J]. Environment International, 2006, 32(2): 165-173.
- [30] 朱仲平. 水质规划的建立[J]. 环境科学, 1981, 2(3): 56-63.
- [31] Kazmi A A, Hansen I S. Numerical Models in Water Quality Management: A Case Study for the Yamuna River (India) [J]. Water Science and Technology, 1997, 36(5): 193-200.
- [32] 郭安. 长江口水动力及污水扩散影响的数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [33] 陈跃燕. SMS在镇江内江水质模拟与预测中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [34] 冯媛媛. 瓯江河口滩涂围垦对水动力及水质的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [35] Cerco C F, Cole T. Three-Dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay [J]. Journal of Environmental Engineering, 1993, 119(6): 1006-1025.
- [36] Kim T, Labiosa R G, Khangaonkar T, et al. Development and Evaluation of A Coupled Hydrodynamic (FVCOM) and Water Quality Model (CE-QUAL-ICM) [J]. American Society of Civil Engineers, 2009, 388: 373-388.
- [37] Kim C S, Lim H S, Cerco C F. Three-Dimensional Water Quality Modelling for Tidal Lake and Coastal Waters with ROMS-ICM [J]. Journal of Coastal Research, 2011, SI 64: 1068-1072. [38] Dalyander P S, Cerco C F. Integration of An Individual-Based Fish Bioenergetics Model into A Spatially Explicit Water Quality Model (CE-QUAL-ICM) [R]. Technical Note ADA518934, 2010.
- [39] Di Toro D M, Fitzpatrick J J, Thomann R V, et al. Documentation for Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP) [R]. Duluth, MN: US Environmental Protection Agency, 1983.
- [40] Ambrose R B, Wool T A, Connolly J P, et al. WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model-Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide[R]. Athens, GA: US Environmental Protection Agency, 1988.
- [41] Ambrose R B, Wool T A, Martin J L, et al. WASP5.X, A Hydrodynamic and Water Quality Model-Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide[M]. Draft, Athens, GA: US Environmental Protection Agency, 1991. [42] Wool T A, Ambrose R B, Martin J L, et al. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), Version 6.0-DRAFT: User's Manual[R]. Atlanta, GA: US Environmental Protection Agency, 2001.
- [43] 孙学成, 邓晓龙, 张彩香, 等. WASP6系统在三峡库区水质仿真中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2003, 25(2): 185-188.
- [44] Hao L F, Cheng L B, Bi X W. Apply With WASP Water Quality Model[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling. Paris, France: Atlantis Press, 2012.
- [45] Zheng L Y, Chen C S, Zhang F Y. Development of Water Quality Model in the Satilla River Estuary, Georgia[J]. Ecological Modelling, 2004, 178(3-4): 457-482.
- [46] 李林子, 钱瑜, 张玉超. 基于EFDC和WASP模型的突发水污染事故影响的预测预警[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 1010-1016.
- [47] Xiong Y. Coupling Sediment Transport and Water Quality Models [D]. Mississippi: Mississippi State University, 2010.
- [48] 马腾, 刘文洪, 宋策, 等. 基于MIKE3的水库水温结构模拟研究[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 68-71.
- [49] 王勇智, 吴頔, 石洪华, 等. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 471-480.
- [50] 黄少彬, 李开明, 姜国强, 等. 基于MIKE3模型的珠江口水体交换研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 134-140.
- [51] 陈瑶泓伶, 袁洪涛. 天津南港污水排海工程对海域环境影响的数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(5): 539-544.
- [52] 薛立梅. SMS系统软件在水利工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2010, 28(11): 63, 68.
- [53] 张明进, 张华庆. SMS水动力学软件[J]. 水道港口, 2006, 27(1):

- 57-59.
- [54] 吴志易, 徐项煜. 基于SMS的长江口—杭州湾海域建模[J]. 中国水运, 2013, 13(12): 125-126.
- [55] 陈志娟, 拾兵, 韩艳. SMS在黄河口水流数值模拟中的应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(8): 47-49.
- [56] 鲁海燕. SMS模型在杭州湾潮流模拟中的应用[J]. 浙江水利科技, 2003, (3): 4-6.
- [57] 喻良, 刘遂庆, 王牧阳. 基于水环境模型的水环境容量计算的研究[J]. 河南科学, 2006, 24(6): 874-876.
- [58] 曹立杰, 郭戈, 靳玉峰, 等. 基于传感器网络的海洋水质监测及赤潮预报系统的设计[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(6): 664-668.
- [59] Takyi A K, Lence B J. Surface Water Quality Management Using A Multiple-Realization Chance Constraint Method [J]. Water Resources Research, 1999, 35(5): 1657-1670.
- [60] 金明. 一维稳态河流水质的随机微分方程模型[J]. 水利学报, 1991, (2): 19-25.
- [61] 张荣祥, 刘键. 不确定性方法应用于水质模型中的研究[J]. 环境与生活, 2014, (10): 57, 59.
- [62] 扈华, 王冬青. T-S模糊神经网络在水质评价中的应用研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 128-132.
- [63] 田一梅, 刘扬, 王彬蔚. 不确定水质模型在城市河流水质模拟中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 119-123.
- [64] Hartnett M, Nash S, Mills P. The Development of a GIS-Based Water Quality Model[J]. River Basin Management II, 2003, 60: 401-409.

Review on the marine water quality model

YU Han, LIU Gui-mei, YANG Jing

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: In this paper, the development stages and modeling steps of the water quality model, are reviewed. The applications of the marine water quality model are introduced from one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional perspectives and the future development trend of marine water quality model is prospected. It is concluded that the marine water quality model can provide the systematic reference for the emission of pollutant, monitoring the water quality and managing the water resources.

Key words: marine water quality model; research progress; development