

海洋环境容量计算方法评价

孙佳佳¹ 李小虎² 宋桂云¹ 陆东燕¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要 准确计算海洋环境容量对改善海洋环境质量、实现海洋生态环境良性循环具有极其重要的意义。从海洋环境容量的概念入手, 着重介绍了海洋环境容量的计算方法以及几种常用的数值模拟软件, 并进行适当评价和比较, 为开展海洋污染物总量控制研究提供技术手段。

关键词 海洋环境容量; 数值模拟; 计算方法; 水动力水质模型

中图分类号 X145; P76 **文献标识码** A **文章编号** 1006-764X(2010)S1-0183-04

随着海上开发活动的加速进行, 全球海洋污染日益严重, 在一定程度上制约了区域的发展, 因此规范海洋开发利用秩序、加强海洋环境管理、开展海洋污染物总量控制研究是促进海洋环境质量改善, 实现海洋生态环境良性循环的根本保证。通过对海洋环境容量计算方法和数值模拟软件的评价, 准确计算海洋环境容量, 为促进海洋目标总量控制向容量总量控制转变提供技术手段。

1 海洋环境容量的概念

海洋环境容量的定义为: 为维持某一海域的特定生态环境功能所要求的海水质量标准, 在一定时间内所允许的环境污染物最大入海量^[1]。海洋环境污染物主要包括油类、重金属、农药、需氧有机化学污染物以及无机氮和无机磷等富营养物质。

海洋环境容量是海洋自净能力综合表现的定量描述。海洋环境容量的大小主要取决于以下 2 个因素: 一是海洋本身条件, 如海洋环境空间大小和位置、潮流、自净能力等自然条件以及生物的种群特征、污染物的理化特性等; 二是人们对特定海域环境功能的规定。环境目标、海域环境特性、污染物特征是影响海洋环境容量的三类主要因素。

2 海洋环境容量的计算方法

对于环境容量的计算, 目前普遍接受的观点有 2 种: 一种认为环境容量是在环境本底值和标准值之间的浓度范围内环境所允许容纳的污染物质量; 二是从总量控制和管理的角度出发, 认为环境容量

是在水质不超过环境标准值的前提下污染物的最大允许排放量。

目前, 海洋环境容量的计算方法主要有模型试算法、箱式模型法、分担率法、地统计学和 GIS 法、最优化法等。

2.1 模型试算法

该方法在综合考虑海洋计算范围、排污口位置、海域环境功能及海水保护目标等多方面因素的条件下, 将所模拟区域划分为若干个次区, 之后在水质模拟的基础上, 逐步加大其中一个集水区的污染量, 保持其他集水区污染量不变, 直至计算区域水质达到规定的海水水质标准, 此时的污染量即为该集水区的最大污染负荷, 重复上述做法, 估算各个集水区的最大污染负荷, 利用以上计算结果, 计算所有集水区在同时排放最大污染量时的水质情况, 并根据各次区的超标情况削减其污染量, 直至整个海域水质达到水质标准。

2.2 箱式模型法

该方法被广泛应用于海湾河口的环境评价研究^[2], 基本思想为: 将研究水体视为混合均匀的箱体, 箱内海水物质的浓度(质量浓度, 下同)的时间变化率等于流入与流出箱子的物质量之差, 即

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = \beta Q_F C_F - \gamma Q_E C_E + S \quad (1)$$

式中: V 为研究水体的体积; C 为箱内海水物质的浓度; C_E, C_F 分别为流出和流入海水的平均浓度; Q_E, Q_F 分别为流出和流入水量; β 为外部海水对内部海水的交换率; γ 为内部海水对外部海水的交换

率 ; S 为单位时间内排入内部的物质总量。

箱式模型在实际应用中又分为单箱模型和多箱模型 2 种。

2.2.1 单箱模型

吴俊等^[3]在研究大连湾的海水交换及自净能力时 ,提出 1 个潮周期内的物质输运量为

$$W = Q_E C_E - Q_F C_F \quad (2)$$

马绍赛^[4]用箱式模型和中村武弘水质预测模式 ,对乳山湾的 COD、无机氮和无机磷环境容量进行估算。海湾中 ,某种污染物质在单位潮周期的环境容量为

$$Q = \begin{cases} \gamma Q_E (C_S - C_P) & C_F = 0 \\ \gamma Q_F \left[C_S - C_P \exp \left(- \frac{\gamma Q_E T}{V} \right) \right] & C_F \neq 0 \\ \frac{\gamma Q_E T}{1 - \exp \left(- \frac{\gamma Q_E T}{V} \right)} - \beta Q_F C_0 & \end{cases} \quad (3)$$

式中 : C_P , C_S 分别为湾内某一物质的当前浓度和浓度标准 ; T 为潮周期 ; C_0 为该污染物质的背景浓度。

2.2.2 多箱模型

由于单箱模式与实际情况有较大的误差 ,多箱模式的出现在一定程度上弥补了这种缺陷。多箱模式的质量守恒公式^[5]表示为

$$\frac{dM_i}{dt} = \sum_j F_{ji} - \sum_j F_{ij} + \sum_k F_{ki} \quad (4)$$

式中 : M_i 为第 i 箱某种污染物的量 ; F_{ji} 为第 j 箱向第 i 箱的物质输出量 ; F_{ij} 为第 j 箱向第 i 箱的物质输入量 ; F_{ki} 为物质的第 k 种反应使第 i 箱物质增加或减少的量。

2.3 分担率法

分担率法在污染源调查和水质监测的基础上 ,采用数值模拟方法 ,通过建立潮流模型和入海污染物浓度模型 ,求得各个点源的响应系数场和分担率场 ,根据水质目标及现状浓度求得主要污染源和控制单元入海污染物的环境容量。

污染源单独排放时所形成的浓度场为

$$C_i(x, y, z) = a_i(x, y, z) Q_i \quad (5)$$

叠加后的平衡浓度场为

$$\alpha(x, y, z) = \sum_{i=1}^m C_i(x, y, z) \quad (6)$$

满足水质目标条件下第 i 个点源的环境容量为

$$Q_{si} = \frac{\gamma_i(x, y, z) C_s(x, y, z)}{a_{si}(x, y, z)} \quad (7)$$

式中 : Q_i 为第 i 个污染源的源强 ; $a_i(x, y, z)$ 为响应系数 ,即为 $Q_i = 1$ 时所形成的响应系数场 ,它表征了海域内水质对某个点源的响应系数 ; $C_s(x, y, z)$ 为该海域的水质标准浓度 ; $\gamma_i(x, y, z)$ 为第 i 个污染源的分担率 ; $a_{si}(x, y, z)$ 为满足水质标准下 ,第 i 个

污染源造成的该海域的响应系数。

第 i 个点源的削减量等于现状与环境容量之间的差额 ,差额为正 ,则应减少排放量 ;差额为负 ,则环境容量尚有富余。

2.4 地统计学和 GIS 法

地统计学和 GIS 法是一种基于环境现状监测、利用地统计学和 GIS 软件计算海洋环境容量的新方法。具体的计算方法为 :①应用地统计学对计算海域的环境现状监测数据进行分析 ,取得污染物在海域的空间分布情况 ;②利用普通克里格法对计算海域的污染物浓度进行空间差值 ;③根据质量守恒原理 ,通过地理信息系统软件的代运算功能求得计算海域的环境容量。

2.5 最优化法

最优化法是建立在水质模型基础上的环境容量计算方法。考虑到水文参数确定时的对流扩散方程可视为线性 ,可以将环境容量的求解转化为一个线性规划问题 ,即

$$\text{目标函数} \quad \max L = \sum_{j=1}^n x_j \quad (8)$$

约束条件

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + C_{0i} \leq C_{si} & (i = 1, \dots, m) \\ x_j \geq 0 & (j = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

式中 : i 为水质控制点编号 ; m 为水质控制点数目 ; j 为排污口编号 ; n 为排污口数目 ; x 为负荷量 ; L 为总负荷量 ; a_{ij} 为第 j 个排污口的单位负荷量对第 i 个水质控制点的污染贡献度系数 ; C_{0i} 为第 i 个水质控制点的污染背景浓度 ; C_{si} 为第 i 个水质控制点处的环境标准值。

上述各种方法的比较见表 1。

综上所述 ,海域环境容量的计算思路总体分为两类 :一种是建立在水动力模型基础上 ,充分考虑潮流等因素对污染物的稀释、扩散作用的方法 ,以最优化法、模型试算法和分担率法为代表 ;另一种是基于环境监测数据翔实的方法 ,如箱式模型法、地统计学和 GIS 法。在具体应用中 ,可根据海域实际情况 ,参照各种方法利弊以及适用范围选择合适的计算方法。目前数值模拟研究方法较为主流 ,已成为研究海洋环境容量的重要手段。笔者将着重介绍几种海洋水动力水质模型常用软件。

3 海洋数值模拟常用软件

随着计算机技术的迅速发展 ,已开发出多种水质数学模型软件。目前在国际上广泛应用的模型有 POM 及 ECOM 模式、MIKE 模型、DELFT3D 软件等。

表 1 海洋环境容量各计算方法比较

名称	优点	缺点	适用范围
模型试算法	能够简单方便且直观地预测水环境容量。	计算量较大,且在根据整个海域水质标准削减各个次区污染量的过程中,受主观影响较大。	适用于计算范围较小、海域功能区划单一的情况。
箱式模型法	概念清晰,将研究水体视为混合均匀的箱体,箱内物质浓度的时间变化率等于进入与流出箱子的物质量之差。	忽略内部水体对流扩散对计算的影响,误差较大。	广泛应用于海湾河口的环境评价研究。
分担率法	容易理解、操作方便。在污染源调查和水质监测的基础上,采用数值模拟方法求得环境容量。	没有考虑排污量在污染源之间的合理分配,从而不能实现在各控制点不超标的前提下使排污量达到最大。	适用于浓度场模拟时间不长即能达到平衡且所有排放源资料齐全的情况。
地统计学和 GIS 法	避开了复杂模型的计算,并且结果可视化程度高。	完全基于环境监测数据,其数据的多少和准确性将直接影响计算结果。	适用于监测数据充分、对海洋地理信息要求较高的情况
最优化法	统筹考虑了研究海域内控制点之间的动态联系,从而得到最优排污布局 and 最大排放量。	经常会出现某些排污口被“优化掉”的情况,即某些排污口的允许排放量为零,与客观实际不符。	广泛应用在大洋、海岸和河口等区域

3.1 POM 及 ECOM 模式

POM 模式是 20 世纪 80 年代由美国 Princeton 大学的 Blumberg 和 Mellor 合作开发,并不断完善的一款海洋数值模型。POM 模式垂向采用 σ 坐标,因而可以方便地引入大陆架地形;通过二阶紊流闭合模型计算垂向紊动黏性系数,垂向采用隐式差分格式,消除时间对垂向空间尺度的限制,可提高海洋上、下边界层的分辨率并保持计算稳定;为了节省计算时间和增加模式的计算稳定性,POM 模式将海流的正压模和斜压模分离,采用不同的时间步长。外模为二维,时间步长较短,内模为三维,时间步长较长。在水平方向,POM 模式采用 Arakawa C 型交错网格系统。ECOM 模式是在 POM 模式的基础上发展而来的,它沿用了 POM 模式中分裂算子和时间滤波的方法,采用了蛙跳差分格式,在水动力方程求解上与 POM 模式基本保持一致。

POM 及 ECOM 模式在大洋、海岸和河口等水动力模拟中得到了广泛的应用。Ezer 等^[6]首次将 POM 模式应用于大西洋的整体流场及温盐场的模拟;申霞^[7]将动边界引入 POM 模式中,并将其应用于南通海域潮流及水质的三维数值模拟;孙英兰等^[8]在 ECOM 模式中引入动边界,对胶州湾潮流进行了数值模拟。

3.2 MIKE 模型

MIKE 模型由丹麦水动力研究所(DHI)开发,在国际上得到了广泛应用。其中,广泛应用在海洋水环境方面的是其系列中的 MIKE 21 和 MIKE 3 模型。MIKE 21 模型采用垂向平均的二维浅水方程,MIKE 3 模型基于三维不可压缩雷诺时均方程,采用 Boussinesq 近似以及 Boussinesq 假设,水平方向和垂向采用不同的紊流模型,水平方向采用 Smagorinsky 模型,垂向采用 $k-\epsilon$ 模型。MIKE 21 以及 MIKE 3 模型都可以利用矩形网格或无结构网格离散计算区域,同时

分别采用有限差分法或有限体积法离散方程。

与其他计算软件相比,MIKE 模型前后处理方便,结果显示生动,计算中考虑的影响因素较全面,已成为国内外应用最广泛的软件之一。陈雪峰等^[9]应用 MIKE 21 模型预测长兴岛附近海域泥沙淤积的规律。王庆改等^[10]应用 MIKE 21 FM 模型计算了来宾电厂扩建工程温排水对来宾河造成的影响,采用三角形/四边形混合网格,减少了网格数量,节省了计算时间。

3.3 DELFT 3D 软件

DELFT 3D 软件由荷兰 DELFT 水力学研究所开发,是集水流、泥沙、环境于一体的程序软件包。该软件可以用来计算潮流、风暴潮、分层流、密度流、海湾中淡水排放、盐水入侵、湖泊以及海洋等水域的热分层、溶解性污染物质的输运等。DELFT 3D 软件在水平方向上采用交错的 C 网格,有矩形网格、正交曲线网格以及球面网格 3 种形式,垂向采用 σ 坐标系。DELFT 3D 软件在水平方向采用显式差分格式,受到严格的 CFL 稳定性限制,垂向采用全隐差分格式,采用追赶法求解。DELFT 3D 软件中同样整合了紊流闭合模型,有零方程模型、 $k-L$ 单方程模型以及 $k-\epsilon$ 双方程模型可供选择。

DELFT 3D 具有可视化的界面,操作相对简单,在国内外得到了较为广泛的应用。左书华^[11]应用 DELFT 3D 对鳌江口外平阳咀海域进行数值模拟;栗苏文等^[12]将 DELFT 3D 应用于大鹏湾水环境容量分析。

以上 3 种软件广泛应用在大洋、海岸和河口等水动力模拟中。此外,国际上还有 COHERENS, EFDC, TOM 等知名软件。国内三维水动力模型起步较晚,没有较为成熟的模型。但许多学者仍用各自的模型对许多问题进行了研究,对推动国内三维水动力模型的研究做出了巨大的贡献^[13-17]。

4 结 语

本文主要介绍了模型试算法、箱式模型法、分担率法、地统计学和 GIS 法、最优化法等海洋环境容量计算方法以及 POM 及 ECOM 模式、MIKE 模型、DELFT 3D 软件等计算软件。通过对各种计算方法的比较发现,以水质模型为基础的计算方法已日趋成熟,成为开展海洋环境容量研究不可缺少的手段之一。

环境容量的计算是一个复杂的系统工程,涉及面很广,影响海洋环境容量的因素有很多。除了计算方法以及模型因素,基础数据也会对环境容量产生直接的影响,因此,如何合理布置监测点位,选择监测时间,将试验与模型研究相结合,采用数据同化技术,将是今后研究环境容量的新方向。

参考文献:

[1] 张永良,刘培哲.水环境容量综合手册[M].北京:清华大学出版社,1991:24-28.
[2] 李克强,王修林,阎菊,等.胶州湾石油烃污染物环境容量计算[J].海洋环境科学,2003,23(4):13-17.
[3] 吴俊,王振机.大连湾海水交换及自净能力的研究[J].海洋科学,1983(6):32-35.
[4] 马绍赛.乳山湾东流区丰水期有机物及营养盐的环境容量[J].海洋水产研究,1998,19(2):33-36.
[5] 李家科.博斯腾湖水环境容量及污染物排放总量控制研究[D].西安:西安理工大学,2004.
[6] EZER T,MELLOR G L.Simulation of the atlantic ocean with a

free surface sigma coordinate ocean model[J].J of Geophysical Research,1997,102(7):15647-15657.
[7] 申霞.基于 POM 的近海三维水质模型研究及其应用[D].南京:河海大学,2006.
[8] 孙英兰,张越美.胶州湾三维动边界的潮流数值模拟[J].海洋与沼泽,2001,33(4):355-361.
[9] 陈雪峰,王桂萱.MIKE 21 计算软件及其在长兴岛海域改造工程上的应用[J].大连大学学报,2007,28(6):93-98.
[10] 王庆改,戴文楠,赵晓宏,等.基于 Mike 21 FM 的来宾电厂扩建工程温排水数值模拟研究[J].环境科学研究,2009,23(3):332-336.
[11] 左书华.Delft 3D 在鳌江口外平阳咀海域流场模拟中的应用[J].水文,2007,27(6):55-58.
[12] 栗苏文,李红艳.基于 Delft 3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J].环境科学研究,2005,18(5):92-95.
[13] 李孟国.海岸工程中实用三维流场数学模型研究[J].海洋通报,1995,14(6):1-12.
[14] 董文军,陈虹.迎风有限元法在三维潮流数值模拟中的应用[J].海洋与湖泊,1997,28(3):320-327.
[15] HUA Zu-lin,LIU Xiao-bo,CHU Ke-jian.3D simulation of flow and pollutant field transport in south branch of Changjiang Estuary[C]//Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary. Proceedings of the International Conference on Estuaries and Coasts. Hangzhou: Zhejiang University Press,2003:944-951.
[16] 陆永军,窦国仁,韩龙喜.三维紊流悬沙数学模型及应用[J].中国科学,2004,34(3):311-328.
[17] 韩龙喜.三峡大坝施工期水环境三维数值预测方法[J].水科学进展,2002,13(4):427-432.

(收稿日期 2010-03-11 编辑 骆超)

· 简讯 ·

“ 第 13 届水利量测技术综合学术研讨会 ” 将在大连召开

中国水利学会水利量测技术专业委员会将于 2010 年 10 月在大连理工大学召开第 13 届水利量测技术综合学术研讨会。会议议题如下:①原型测试技术及仪器,包括:水文要素(水位、流速、流量、断面、含沙量、颗分及冰凌等)观测及测流仪器,量水技术及仪器,水利遥感遥测技术与仪器,水质监测技术及仪器墒情和地下水监测技术及仪器。②模型测试技术及仪器,包括:室内试验观测新技术及仪器,粒子图像测试技术,激光多普勒测试技术。③安全监测技术及仪器,包括:堤坝隐患探测技术及仪器,洪水险情快速探测技术及仪器;水利水电工程安全监测仪器及系统,水利水电工程施工质量检测、控制技术及仪器,突发性灾害洪水监测(如堰塞湖、垮坝等)技术及仪器。④水信息及自动化技术,包括:新型传感器,水利水电量测技术新进展介绍与评述,水信息采集和处理有关技术,水利测试新软件及系统自动技术。⑤水利计量标准及检定规程,包括:水利计量标准体系及其关键技术,水利计量检定规程体系及其关键技术。⑥港口、海岸和近海水动力模拟及测试技术,包括:波浪、水流的现场和实验室测试技术及应用,浮体运动的现场和实验室测试技术及应用,波浪、潮流等实验室物理模拟技术及现场遥测技术。⑦固态水量测技术及应用,包括:冰雪现场测试技术和应用经验,冰雪物理模拟技术和实例分析,寒区地表和地下水监测技术和仪器,冰凌和冰灾害监测技术。

(本刊编辑部供稿)