

The Research and Application Progress of Environmental Fluid Dynamics Code

Hainan Ai, Wenshi Zhang, Xuebin Hu, Qiang He, Yuanyuan Liu

Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing
Email: aihainan@126.com

Received: Apr. 2nd, 2014; revised: Apr. 9th, 2014; accepted: Apr. 15th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With improvement of people's understanding of environmental problems and the rapid development of computer science, simulation of environmental processes has become a research focus in the field of environmental science and geochemistry. Environmental Fluid Dynamics Code is developed according to multiple mathematical models by Virginia Institution of Marine Science. Based on more than 200 papers from journal at home and abroad from 2003 to 2013, this paper presents the application and study of hydrodynamic model, water quality model and sediment model about estuaries, rivers, lakes and reservoirs, and meanwhile analyzes the development direction of EFDC.

Keywords

EFDC, Hydrodynamic Model, Water Quality Model, Sediment Model

环境流体动力学代码EFDC模型的研究及应用进展

艾海男, 张文时, 胡学斌, 何 强, 刘媛媛

重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆
Email: aihainan@126.com

作者简介: 艾海男(1982-), 男, 副教授, 主要从事活性污泥数学模型、排水管道污水处理研究。

收稿日期：2014年4月2日；修回日期：2014年4月9日；录用日期：2014年4月15日

摘要

随着人们对环境问题认识的不断提高以及计算机科学的迅速发展，环境过程的模拟及再现已成为当今环境科学与地球化学领域的热点。环境流体动力学代码(Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC)模型是由美国弗吉尼亚州海洋研究所(VIMS)根据多个数学模型集成开发的综合模型。基于2003~2013年发表在国内外期刊的200多篇论文，综述了EFDC模型中水动力模块、水质模块、泥沙模块在河口、河流、湖库等水环境领域研究中的应用，探讨了EFDC模型的发展方向。

关键词

EFDC, 水动力模型, 水质模型, 泥沙模块

1. 引言

水环境研究所涉及的空间尺度大、污染物成分众多及环境过程错综复杂，仅凭借实验分析和现场监测具有较大的难度，通过建立数学模型实现水环境的数值模拟成为了该领域的热点[1][2]。水质模型起源于上世纪二十年代，由美国学者 Streer 和 Phelps 对耗氧过程动力学分析后提出的 S-P 模型。二十世纪六十年代后基于计算机科学的快速发展，出现了大量的水环境模型。如今运用较为广泛的有 EFDC、WASP、QUAL、SWAT 及 MIKE 系列模型以[3]-[5]。这些模型都试图将水文过程、水动力过程与水质的生化反应动力学相结合。其中 SWAT 属于分布式水文模型，多用于流域尺度；QUAL 仅适用于一维、二维的河流模拟；WASP 虽然应用于各类水体的水质模拟，但在水动力模拟方面较 EFDC 稍显弱势；MIKE 系列模型涵盖了水环境模拟和流域水文过程模拟且操作界面良好，但其源程序不公开，价格昂贵。

EFDC 模型是由美国弗吉尼亚州海洋研究所 Hamrick 等开发，适用于河流、湖泊、水库、河口、海洋和湿地等地表水系统水动力、水质及泥沙的数值模拟，包括一维、二维(垂向和平面)和三维模拟。上世纪 90 年代该模型在北美 Chesapeake 海湾、York River 河口、佛罗里达 Indian 河都得到成功的运用，目前国内密云水库、洱海、太湖、长江及长江口等也有运用[6]-[9]。此外，EFDC 模型具有公开的源代码，可免费获取，经过前后处理工具封装后的商业模型的价格也相对便宜(如由美国 DSI 公司开发 EFDC-Explorer 系列软件)。本文以 2003~2013 年国内外公开发表的 200 多篇论文为基础，综述了 EFDC 模型中各个模块在各种水环境的应用及研究进展，旨在为其今后的应用研究提供基础累积。

2. EFDC 模型

2.1. EFDC 模型的模块及基本原理

EFDC 模型原理和计算方法与 Blumberg-Mellor 模型和美国陆军工程学院的 Chesapeake Bay 模型相似，并采用 FORTRAN77 编制，集水动力模块、水质模块和泥沙模块为一体，见图 1。EFDC 模型水动力模块主要采用 CH3D 水力学原理，主控方程的求解采用外模与内模分裂的方法先后进行数值求解。在求解过程中采用 Mellor 和 Yamada 提出的 2 阶紊流闭合模型求得垂向涡粘系数和涡动扩散系数。模型的水质模块源于 CE-QUAL-ICM 模型，在水动力模块提供的物理条件并考虑泥水界面行为的基础上模拟多项水体污染物的迁移转化。模型的泥沙模块把沉积物分为黏性和非黏性泥沙，泥沙在水体中以悬移质形态运动并采用三维对流扩散方程运算。

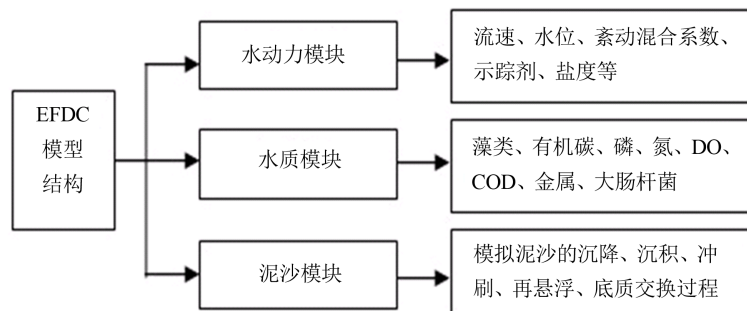


Figure 1. EFDC model structure diagram
图 1. EFDC 模型结构示意图

EFDC 模型的模拟过程是首先进行水动力运算，再进行水质、泥沙及有毒物质的模拟。模型初始条件以文本的形式输入，而且输入文件具有通用性。同时，EFDC 模型的输出结果形成的传输场可以用于其它水质模型，如 WASP 与 CE-QUAL-ICM 模型[10]。

2.2. EFDC 模型的主控方程

EFDC 模型基于三维水动力学方程，在水平方向和垂直方向分别采用曲线正交坐标变换和 σ 坐标变换，可得到如下主控方程：

1) 连续性方程

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_v)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = Q_H \quad (1)$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial(mH_u)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_{uu})}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_{vu})}{\partial y} + \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H_v \quad (2)$$

$$= -m_y H \frac{\partial(g\zeta + P)}{\partial x} - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u$$

$$\frac{\partial mH_v}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_{uv})}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_{vv})}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H_u \quad (3)$$

$$= -m_x H \frac{\partial(g\zeta + P)}{\partial y} - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v$$

3) 状态方程

$$\rho = 999.843 + (6.794 \times 10^{-2} \theta - 9.095 \times 10^{-3} \theta^2 + 1.002 \times 10^{-4} \times \theta^3 - 1.120 \times 10^{-6} \theta^4 + 6.536 \times 10^{-9} \times \theta^5) \quad (4)$$

4) 浓度运输方程

$$\frac{\partial(mH\varnothing)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_u \varnothing)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_v \varnothing)}{\partial y} + \frac{\partial(mw\varnothing)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial \varnothing}{\partial z} \right) + Q_\varnothing \quad (5)$$

为适应实际边界，通常水平方向采用 x, y 正交曲线坐标，垂向采用 σ 坐标系： $z = (z^* + h)/H = (z^* + h)/(\zeta + h)$ ， z 取值范围[0, 1]； z^* 代表 σ 转换前实际的垂向物理坐标，总深度 $H = h + \zeta$ ， h 为底床高程， ζ 为自由水面高程， m ； u 和 v 曲线正交坐标系下 x 和 y 方向的流速分量； w 为 σ 坐标下垂向流速；

m_x 、 m_y 和 m 为 Jacobian 曲线正交坐标转换系数, $m = m_x m_y$; Q_H 为降雨、蒸发、地下水相互作用、取水或点源和非点源入流; p 为相对静水压力; f 为柯氏力参量; A_v 为垂向紊流黏滞系数; Q_u 和 Q_v 为动量源汇项; A_b 为垂向紊动扩散系数; Q_ϕ 为源汇项; ϕ 为某种水质组分的浓度。

3. EFDC 模型应用

3.1. EFDC 水动力模块的应用

水动力模型是用以描述水体的水文特征、流场变化的数学模型。EFDC 模型水动力模块能够模拟河流、湖泊的动力学过程, 在模拟复杂水环境的动力学过程(如河口海湾的漫滩、潮汐、盐度入侵)及拉格朗日粒子示踪方面也有明显的优越性。

EFDC 模型对漫滩的模拟主要采用干湿网格控制的方法, 即在模拟过程中设定临界水深以判定干湿网格类型。通常实际网格和计算机内部网格都是采用的(I, J, K)网格索引进行定义, 而在不规则的区域中表示湿网格图时很可能对应到干网格。因此 Ji 等基于 EFDC 模型在对加利福尼亚 Morro 海湾浅滩进行数值模拟时将水平方向索引(I, J)转化为单个索引(L), 优化了计算内部存储和网格生成, 从而提高了运算的效率[11]。王翠等采用 EFDC 模型对胶州湾潮流进行模拟并设定干湿临界水深为 0.1 m, 在计算过程中对每个时间步长上网格中心水深进行判断, 低潮时胶州湾内只有 81.84% 的区域为湿网格[12]。Alarcon[13] 等对墨西哥海湾遭遇飓风袭击时 WSE 及水深进行模拟, 结果显示 EFDC 模型能够很好的模拟飓风前后及其过程中的洪水覆盖区域。龚文平等针对黄茅海建立 EFDC 模型, 根据水位与流速的相位差确定潮波类型, 研究了该海域潮波传播机制, 探讨了合山水闸的存在与黄茅海河口及珠三角河网的交互作用对黄茅海河口潮波传播的影响[14]。

Jeong 等针基于 EFDC 模型对 Geum 河中下游及河口建立海水盐度入侵进行数值模型, 考察了海水盐度入侵对河流下游的影响, 并对旱季流、枯水流、正常流及洪水情形下盐度入侵范围进行模拟[15]。郑晓琴对长江口及其临海建立三维温盐模型, 计算中加入径流、风、潮流和太阳辐射等参数共同求解热通量方程, 再现了夏季海区的温盐分布情况[16]。罗峰等模拟了长江口处在南水北调和三峡工程作用下的枯季流量下盐水入侵情况, 并结合全球海平面变化结果分析了海平面上升的影响[17]。陈景秋等采用 EFDC 模型建立了具有河流和河口特点的重庆长江 - 嘉陵江汇流水动力模型, 对水位、汇流比与坡降比进行了模拟, 其结果与实测数据高度的吻合度[18]。陈正兵等运用 EFDC 模型研究滩地植被对河道水流的影响, 发现滩地植被对滩地水流有较大影响, 对主槽水流影响相对较小, 植被的存在导致水流有向主槽集中的趋势, 研究结果对河道防洪和生态修复管理等有借鉴作用[19]。

李兰等运用 EFDC 模型对梯级水库进行了水流水温数值耦合预测计算, 深入研究了水库的水热循环规律, 并对分层型水库的水位、流速和水温分布规律进行剖析[20]。在梯级水电站联合运行环境下重点分析了高坝大库水温分层规律, 探讨了建库前后的水温变化规律和梯级水库的累积影响, 为调整梯级水电规划方案提供科学决策依据。同时, 甘衍军等将该水库模型垂向分为 40 层, 模拟和分析了太阳辐射和气温对水库水温分层的影响[21]。伍悦滨等建立了磨盘山水库水动力学模型进行流场、温度场、浓度场及生态过程的数值模拟, 解析了丰、平水期水库的水温分层情形[22]。郝文斌等采用 EFDC 研究引江济太调水工程对太湖水动力调控所产生的效果, 以湖体水龄(描述湖泊水体交换速率的参数)为研究对象, 系统地研究引江济太工程对太湖水动力的调控情况[23]。何国建等基于 EFDC 模型并采用斜对角笛卡尔差分方法进行数值离散, 模拟了核电厂附近海域的三维水流运动情况, 评价了不同排水口位置对扩散范围的影响, 所得取水口温升与物理试验值基本一致[24]。

EFDC 模型的水动力模块对各类水环境都有很强的适应性。在河口海岸区域主要用于盐度入侵和潮

汐模拟, 在湖库和河流等水体中主要用于流速场、温度及示踪剂模拟。目前 EFDC 的三维模型大都采用水位或者二维流速进行水动力校核, 往往缺乏水下流场的实测数据。再现三维水动力场的关键在于是否有足够的实测三维水文数据来进行模型的校核和验证, 从文献查阅来看三维的水动力模型的验证的实例较少, 其主要原因是三维数据难以获取。

3.2. EFDC 水质模块的应用

EFDC 模型将水质指标中的温度、盐度列入水动力模块部分, 水质模块源于 CE-QUAL-ICM 模型。与广泛使用的 WASP 模型的水质模块相比, EFDC 能够模拟 21 个水质指标。如将浮游植物细化为 4 个指标, 包括蓝藻、硅藻、绿藻和静态藻类。不过很多学者在进行水质模拟时也常将它与 WASP 等其他模型耦合[25]。

万由鹏等采用 EFDC 在深圳湾建立了水动力和营养盐模型, 模拟了总无机氮和正磷酸盐等主要营养盐在深圳湾不同水文条件下的输运规律, 分析了多种减排方案的效果, 为深圳湾污染物减排及总量控制的研究和实践提供数据支持[26]。陶亚等采用 EFDC 对深圳湾水质进行模拟, 研究了各子流域对深圳湾的污染贡献率以及海域水质分布、水力停留时间和突发污染负荷的响应特性, 并利用拉格朗日粒子追踪技术分析了内湾不同位置的污染物输移路径, 同时基于 TMDL 计划管理思想对深圳湾河流域的水质现状进行评价[27]-[29]。Liu 等为实现 St. Louis Bay 河口的 TMDL 管理, 建立了包括 HSPF、EFDC 和 WASP 耦合模型, 并以此考察了两种临界流量情况下的氮迁移动力学[30]。Seo 等采用 EFDC-WASP 耦合模型研究了 Nakdong 河 4 座河道水库对该河的水质影响, 模拟结果显示 BOD₅ 沿河降低, Chl-a 升高, 但是氮磷的并没有明显的变化[31]。

Jin 等基于 EFDC 模型对在北美最大的亚热带湖泊 Okeechobee 湖构建了 LOEM 模型, 其中包括三维水动力、泥沙、水质和 SAV(水下植被)模块。其中 SAV 模块能够较好的反映湖底沉水植物的时空变化。LOEM 的水质模拟值、SAV 输出结果和实际数据都显示夏季藻类生长受氮的限制, 而冬季则是受光照和氮的共同作用限制[32]。为保障和修复官厅水库的水体, He 等在 EFDC 模型框架下建立水库的水质水动力模型, 该模型基于在蓝藻、绿藻和硅藻的观察数据对这三种浮游植物进行预测模拟。并模拟了人工湿地降低外源营养物质负荷、生物操纵技术以及从册田水库调水三种措施对 Chl-a 的峰值浓度的减弱效果[33]。

近年来由于突发性水污染事件屡屡发生, 对突发水质事件的预警也逐渐的引起了重视[34]。任华堂等基于 EFDC 数学模型建立了内蒙古巴彦高勒至头道拐河段水污染应急预警模型, 分析了该河段的水流特性并预测了突发事故应急时间[35]。李林子等采用 EFDC 和 WASP 建立了南京化工园区突发水污染事故影响的预测模型, 并以龙翔甲苯罐区泄漏为例进行了事故情景模拟, 为突发水污染事故的预警应急提供决策依据[36]。邓建等基于 EFDC 模型构建了一个适用于三峡库区的“油粒子”漂移扩散的水上溢油预测模型[37]。

GIS 技术以其强大的空间数据建模和分析功能也运用到了水环境模拟领域。Peng 等基于 GIS 地理信息系统建立 WASP 水质模型并用于 Lower Charles 河的水质管理, 以提高了数据运算能力和管理能力, 其中 WASP 耦合了 EFDC 模型, 其结果显示该模型可以实现高效的数据流程和数据分析能力[38]。王建平等结合 EFDC、WASP 及非点源模型 SWAT 并集成到 GIS 构建了密云水库流域集成模型[39], 见图 2。

EFDC 模型水质模块适用范围不亚于 WASP 模型, 在营养盐、藻类、有毒物质模拟预测方面都得到了广泛应用。此外, 在氮磷模拟计算时对底部水体加入了沉积物扩散项, 对进行三维模拟和沉积物模拟时具有重要意义。

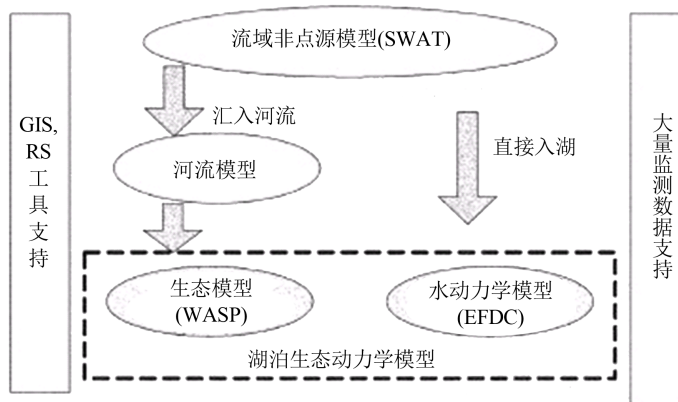


Figure 2. Frame of integrated environmental simulating model

图 2. 湖泊水环境模拟集成模型框架图

3.3. EFDC 泥沙模块的应用

EFDC 模型的泥沙模块将沉积物分为黏性和非黏性泥沙，可以模拟多组分泥沙运输，能够模拟黏性泥沙的悬移、絮凝、沉降、沉积和固结过程。对于非黏性泥沙，模型主要研究临界剪切流速从而分析泥沙运动状态。

Ji 等针对 Morro 海湾因常年沉积导致的水域面积锐减的问题，基于 EFDC 建立了一套水动力-泥沙沉积模型，以该模型模拟了海湾 160 天的潮流运动，计算出的沉积区域与实际沉积区域相符[40]。Kong 等基于移动床动态模型和干湿过程建立黄河口的 EFDC 模型，分析了沉积物沉降对河床海拔高度的影响。模拟结果与 1992 年到 2002 年测定的河床形态数据十分吻合，并且发现大量泥沙以每年 2.5 公里的速度沿河口向海洋移动[41]。Liu 等在 Apalachicola 海湾建立 EFDC 模型，模拟了沉积物的沉淀和再悬浮过程，发现强风致沉积物浓度增加主要是因为沉积物的再悬浮[42]。韩喜彬等运用 EFDC 模型再现了新仙女木事件时期的海平面在现代海平面下 60~72 m 振荡停顿近千年并形成黄海通道型古黄海海湾的过程，并研究了复杂潮流对悬浮泥沙的冲刷效应发现水下地形和科氏力是影响古黄海潮汐潮流的主要因素[43]。谢锐等模拟了长江口大范围水位变化和各个深度的流场，为进行长江口深水航道疏浚的模拟研究提供了可靠的手段[44]。

在水动力模型基础上进行泥沙模拟可用于研究河床物理变化以及为提供河道清淤工程的方案。水体中的污染物多附着于各类泥沙和悬浮物之上，因此研究水体的泥沙动力学对于考察水体中污染物分布以及迁移转换有着重大的意义。而目前涉及污染物在沉积物和水体之间的物理及生化过程的研究相对较少。

3.4. EFDC 不确定性分析

水环境数学模型的不确定性可分为四类：监测值的不确定性、参数不确定性、对目标系统认识局限造成的不确定性、自然过程固有的不确定性[45]。目前对于模型参数不确定性分析的方法众多，如 OAT、Monte Carlo 法和 LHS 法等。李一平等采用拉丁超立方取样(LHS)对太湖的 EFDC 模型水动力模块中常用的 5 个重要参数(风拖曳系数、床面粗糙高度、涡流性系数、紊流扩散系数以及风遮挡系数)进行了不确定性分析，并探讨了 5 个参数对湖体水位和流速的影响。结果表明：针对大型浅水湖泊，湖泊岸线和湖底地形、湖泊周围地形、湖泊水面风场对模拟结果产生决定性影响[46]。Franceschini 等采用修正 Rosenblueth 法对 EFDC-WASP 耦合模型中的变量和参数进行了不确定性评估，结果表明入河 PCBs 浓度对模型的结果影响最大[47]。

4. 结语

EFDC 模型作为水环境研究的数学工具有着良好的数值计算方法, 适用范围广。该模型在今后的发展上将更侧重于实际运用, 因此研究人员需要开发更为完善的前后处理工具及数据分析功能。

利用 EFDC 模型建模需要大量的基础数据, 重要水体的基础数据大多较为完备, 而对于缺乏水下地形资料和气象站数据的小型湖库河流可通过假设水深恒定及参照就近国家气象站数据的方式进行处理 [48]。

在构建三维水动力模型往往缺乏实测流场数据, 近年来快速发展的 ADCP 技术可以测量河流、湖泊及河口断面流速场, 相信将此技术运用到三维模型中必能大幅度的提高模型的精度。除了在水环境容量计算和 TMDL 管理方面的应用, 将 EFDC 水质模块与模型自带的沉积物模块用于研究污染物在水体和沉积物中的迁移转化也将会是研究热点。同时, 结合 GIS、流域水文模型构建大型的集成模型可用于城市健康水系统的构建, 实现城市河网水质水文状态的可视化及评价城市总体规划和水污染控制方案。而在与其他水环境模型耦合时, 如何提高模型的运算效率和模型耦合方法也有待研究。对 EFDC 模型中存在的各类不确定因素进行不确定性分析是提高模型精度和可信度的必要手段, 同时也是需要深入研究的方向。

基金项目

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07307-001)。

参考文献 (References)

- [1] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 923-931.
ZHAO Shi-xin, ZHANG Chen, GAO Xue-ping, et al. The impact of the operation of eastern route project of the south-to-north water diversion project on water quality in Lake Nansi. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 923-931. (in Chinese)
- [2] 郭羽, 贾海峰. 水污染预警 DSS 系统框架下的白河水质预警模型研究[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2866-2872.
GUO Yu, JIA Hai-feng. Water quality forewarning model in the framework of water pollution forewarning DSS. Environmental Sciences, 2010, 31(12): 2866-2872. (in Chinese)
- [3] AMBROSE, R. B. Development of water quality modeling in the United States. Environmental Engineering Research, 2009, 14(4): 200-210.
- [4] YANG, Y. S., WANG, L. A review of modelling tools for implementation of the EU water framework directive in handling diffuse water pollution. Water Resources Management, 2010, 24(9): 1819-1843.
- [5] CHEN, Y., NIU, Z., ZHANG, H., et al. Aquatic ecological modeling and remediation of landscape water based on AQUATOX. Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology, 2012, 45(1): 29-35.
- [6] 乔飞, 孟伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染物输出对河口水质的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1126-1132.
QIAO Fei, MENG Wei, ZHENG Bing-hui, et al. Influence of pollutants exported from the Yangtze River basin on water quality in the estuary. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(10): 1126-1132. (in Chinese)
- [7] 刘宝超, 李建平, 冯立成. 风影响夏季长江冲淡水扩展的数值模拟研究[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(1): 25-37.
LIU Bao-chao, LI Jian-ping and FENG Li-cheng. A modeling study of the effect of wind on Changjiang (Yangtze) River dilute water in summer. Acta Oceanologica, 2013, 35(1): 25-37. (in Chinese)
- [8] 卫志宏, 杨振祥, 唐雄飞, 等. 洱海湖泊及湖湾三维水动力模型构建及特征分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, 38(1): 85-95.
WEI Zhi-hong, YANG Zhen-xiang, TANG Xiong-fei, et al. Three dimensional modeling and characteristics of hydrodynamic processes in Erhai Lake. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 38(1): 85-95. (in Chinese)
- [9] LI, Y., TANG, C., WANG, C., et al. Assessing and modeling impacts of different inter-basin water transfer routes on Lake Taihu and the Yangtze River, China. Ecological Engineering, 2013, 60: 399-413.
- [10] Tetra Tech, Inc. Theoretical and computational theoretical and computational aspects of the generalized vertical coor-

- dinate option in aspects of the generalized vertical coordinate option in the EFDC model. Virginia: Tetra Tech, Inc., 2006.
- [11] JI, Z.-G., MORTON, M. R. and HAMRICK, J. M. Wetting and drying simulation of estuarine processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 53(5): 683-700.
- [12] 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(自然科学版)*, 2008, 38(5): 833-840.
WANG Cui, SUN Ying-lan and ZHANG Xue-qing. Numerical simulation of 3D tidal currents based on the EFDC model in Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(5): 833-840. (in Chinese)
- [13] ALARCON, V. J., MCANALLY, W. H. Using hydrodynamic modeling for estimating flooding and water depths in Grand Bay, Alabama. Salvador de Bahia, Brazil: Springer Verlag, 2012.
- [14] 龚文平, 刘欢, 任杰, 等. 黄茅海河口潮波的传播特征与机理研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(3): 41-54.
GONG Wen-ping, LIU Huan, REN Jie, et al. The study of tidal propagation the in Huangmaohai Estuary and its underlying mechanisms. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(3): 41-54. (in Chinese)
- [15] JEONG, S., YEON, K., HUR, Y., et al. Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6): 934-939.
- [16] 郑晓琴, 丁平兴, 胡克林. 长江口及邻近海域夏季温盐分布特征数值分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 6: 14-23.
ZHENG Xiao-qin, DING Ping-xing and HU Ke-lin. Numerical analysis of characteristics of temperature salinity distributions at the Changjiang Estuary and its adjacent areas in summer. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008, 6: 14-23. (in Chinese)
- [17] 罗锋, 李瑞杰, 廖光洪, 等. 水文气象条件变化对长江口盐水入侵影响研究[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3): 8-17.
LUO Feng, LI Rui-jie, LIAO Guang-hong, et al. Influence of hydrometeorological variation on saltwater intrusion in Changjiang River Estuary. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3): 8-17. (in Chinese)
- [18] 陈景秋, 赵万星, 季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2005, 20(A): 829-835.
CHEN Jing-qiu, ZHAO Wan-xing and JI Zhen-gang. The hydrodynamic numerical model of the confluence of Yangtze River and Jialing River in Chongqing. *Journal of Hydrodynamics (A)*, 2005, 20(A): 829-835. (in Chinese)
- [19] 陈正兵, 江春波. 滩地植被对河道水流影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52(6): 804-808.
CHEN Zheng-bing, JIANG Chun-bo. Effect of floodplain vegetation on river hydrodynamic. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(6): 804-808. (in Chinese)
- [20] 李兰, 武见. 梯级水库三维环境流体力学数值预测和水温分层与累积影响规律研究[J]. *水动力学研究与进展 A辑*, 2010, 25(2): 155-164.
LI Lan, WU Jian. The three-dimensional environmental fluid dynamics code model for research of reservoir water temperature law. *Chinese Journal of Hydrodynamics (A)*, 2010, 25(2): 155-164. (in Chinese)
- [21] 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 Yan-jun, LI Lan, WU Jian, et al. Water temperature modeling and influences of water temperature stratification of Ertan Reservoir based on EFDC. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(4): 476-485. (in Chinese)
- [22] 伍悦滨, 徐莹, 田禹, 等. 磨盘山水库温度场的数值模拟[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(6): 925-928.
WU Yue-bin, XU Ying, TIAN Yu, et al. Numerical simulation of temperature fields in Mopanshan reservoir. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(6): 925-928. (in Chinese)
- [23] 郝文彬, 唐春燕, 滑磊, 等. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 129-133.
HAO Wen-bin, TANG Chun-yan, HUA Lei, et al. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(2): 129-133. (in Chinese)
- [24] 何国建, 赵慧明, 方红卫. 潮汐影响下电厂温排水运动的三维数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(3): 125-131.
HE Guo-jian, ZHAO Hui-ming and FANG Hong-wei. 3D numerical simulation for flow and heat transport of power plant affected by tide. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(3): 125-131. (in Chinese)
- [25] ZOU, R., CARTER, S., SHOEMAKER, L., et al. Integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient total maximum daily load development for Wissahickon Creek, Pennsylvania. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(4): 555-566.
- [26] 江春波, 张明武, 杨晓蕾. 华北衡水湖湿地的水质评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(6): 848-851.
JIANG Chun-bo, ZHANG Ming-wu and YANG Xiao-lei. Water quality evaluation for the Hengshui Lake wetland in

- northern China. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(6): 848-851. (in Chinese)
- [27] 任华堂, 陶亚, 夏建新. 深圳湾水环境特性及其突发污染负荷响应研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(1): 52-63.
REN Hua-tang, TAO Ya and XIA Jian-xin. Characteristics of water environment and response to sudden loads of pollution due to accidents in Shenzhen Bay. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(1): 52-63. (in Chinese)
- [28] 陶亚, 赵喜亮, 栗苏文, 等. 基于 TMDL 的深圳湾流域污染负荷分配[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 46-51.
TAO Ya, ZHAO Xi-liang, LI Su-wen, et al. On-spot study of the waste load allocation in Shenzhen Bay basin based on TMDL. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(2): 46-51. (in Chinese)
- [29] 任华堂, 陶亚, 夏建新, 等. 旱季深圳湾水污染输移扩散特性研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(4): 132-139.
REN Hua-tang, TAO Ya, XIA Jian-xin, et al. Study on characteristics of mass transport and diffusion in Shenzhen bay during dry season. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4): 132-139. (in Chinese)
- [30] LIU, Z., KINGERY, W. L., HUDDLESTON, D. H., et al. Modeling nutrient dynamics under critical flow conditions in three tributaries of St. Louis Bay. *Journal of Environmental Science and Health Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2008, 43(6): 640-652.
- [31] SEO, D., KIM, M. and AHN, J. H. Prediction of chlorophyll-a changes due to weir constructions in the Nakdong River using EFDC-WASP modelling. *Environmental Engineering Research*, 2012, 17(2): 95-102.
- [32] JIN, K., JI, Z. and JAMES, R. T. Three-dimensional water quality and SAV modeling of a large shallow lake. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33(1): 28-45.
- [33] HE, G., FANG, H., BAI, S., et al. Application of a three-dimensional eutrophication model for the Beijing Guanting Reservoir, China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1491-1501.
- [34] 张晓健. 松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J]. *给水排水*, 2006, 32(6): 6-12
ZHANG Xiao-jian. Emergent drinking water treatment in water pollution accidents in Songhuajiang River and Beijing River. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(6): 6-12. (in Chinese)
- [35] 任华堂, 于良, 夏建新, 等. 黄河内蒙古段水污染事故应急预警模型研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012(S1): 67-76.
REN Hua-tang, YU Liang, XIA Jian-xin, et al. Water pollution accident emergency response and early-warning model of inner mongolian part of the Yellow River. *Journal of Basic and Science and Engineering*, 2012, 20(S1): 67-76. (in Chinese)
- [36] 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.
LI Lin-zi, QIAN Yu and ZHANG Yu-chao. Forecasting and warning the accident water pollution effect based on the EFDC and WASP. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8): 1010-1016. (in Chinese)
- [37] 邓健, 黄立文, 赵前, 等. 基于一、二维水动力耦合模拟的三峡库区溢油预测模型研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2011, 35(4): 793-797.
DENG Jian, HUANG Li-wen, ZHAO Qian, et al. Design of oil spill forecast model on the Three Gorges Reservoir area based on the couple one dimension and two dimension hydro simulation. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2011, 35(4): 793-797. (in Chinese)
- [38] PENG, S., FU, G. Y. and ZHAO, X. Integration of USEPA WASP model in a GIS platform. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2010, 11(12): 1015-1024.
- [39] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(7): 1286-1291.
WANG Jian-ping, SU Bao-lin, JIA Hai-feng, et al. Integrated model of nutrients for the Miyun Reservoir and its watershed. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1286-1291. (in Chinese)
- [40] JI, Z., MORTON, M. R. and HAMRICK, J. M. Modeling hydrodynamic and sediment processes in Morro Bay. *Proceedings of the International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, 2000, 1035-1054.
- [41] KONG, Q., JIANG, C., QIN, J., et al. Sediment transportation and bed morphology reshaping in Yellow River Delta. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3382-3390.
- [42] LIU, X. and HUANG, W. Modeling sediment resuspension and transport induced by storm wind in Apalachicola Bay, USA. *Environmental Modelling and Software*, 2009, 24(11): 1302-1313.
- [43] 韩喜彬, 史经昊, 李家彪, 等. 新仙女木期古黄海潮流场的数值模拟[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 13-23.
HAN Xi-bin, SHI Jing-hao, LI Jia-biao, et al. Dynamical simulation on tidal current Yellow Sea during Younger Dryas Episode. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 13-23. (in Chinese)
- [44] 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 A 辑, 2010, 25(2): 165-174.
XIE Rui, WU De-an, YAN Yi-xin, et al. Application and improvement of the EFDC in numerical simulating of Yangtze River Estuary and adjacent sea. *Chinese Journal of Hydrodynamics (A)*, 2010, 25(2): 165-174. (in Chinese)
- [45] DAREN HARMEL, R., SMITH, P. K. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3-4): 326-336.
- [46] 李一平, 唐春燕, 余钟波, 等. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 271-277.
LI Yi-ping, TANG Chun-yang, YU Zhong-bo, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic model. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 271-277. (in Chinese)
- [47] FRANCESCHINI, S., TSAI, C. W. Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(4): 493-503.
- [48] WU, G., XU, Z. Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang Lake. *Ecological Modelling*, 2011, 222(6): 1245-1252.