

# 基于 MDSF 的河流水质预警

陈鸣<sup>1,2</sup>, 陆卫鲜<sup>1,2</sup>, 黎刚<sup>3</sup>, 张晓雪<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 介绍了流域水资源模拟与决策支持框架(MDSF)的框架结构、InfoWorks RS 水质模拟方法及水质模型。利用 MDSF, 通过节点、断面、连接等建模工具构建长江南京段水质预警计算网络, 并采用 2005 年实测资料说明了水动力、水质计算的上下游边界条件和模型参数率定等方法。

**关键词:** MDSF; 框架结构; InfoWorks RS; 水质预警

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2010)-05-0005-05

## Advanced Warning of the River Water Quality Based on MDSF

CHEN Ming<sup>1,2</sup>, LU Wei-xian<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-xue<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jingsu 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**ABSTRACT:** In the present study, the structure of MDSF, the water quality simulation method and water quality model of InfoWorks RS were introduced. Taking advantage of MDSF, the water quality advanced warning computing network for Nanjing section of Yangtze river has been constructed by means of the model building tools such as nodes, sections and links. The bound of hydrodynamic and water quality calculation, the method of model parameters calibration and so on were explained according to the measured data in 2005.

**KEY WORDS:** MDSF; frame structure; InfoWorks RS; advanced warning of water quality

## 0 前言

近年来,随着中国经济的迅速增长,水资源的过度消耗和污染物的肆意排放打破了水资源循环过程中的人类利用、生态需水和天然补给之间的平衡,导致突发性水污染事件的发生越来越频繁。河流污染、水环境恶化直接影响了河流沿岸的生产发展和人民群众的用水安全。河流水质监测、预警、预报在防止水质进一步恶化、减轻水质突发事件造成的损失方面意义重大<sup>[1,2]</sup>。

流域水资源模拟与决策支持框架 MDSF( Modeling and Decision Support Framework) 是一个以地理信息系统(GIS)为平台的决策支持系统框架,包含了水动力学模型、水质扩散模型等多个水量、水质模型。用 MDSF 构建的河流水质预警系统具有方便、快捷、无需详细模型计算知识、无须编写详细软件程序代码和预报精度高等优点<sup>[3]</sup>。

## 1 实时预警平台

### 1.1 模拟与决策支持框架(MDSF)结构

MDSF 集成了 GIS 技术、模拟模型、知识库、数据库以及影响评估工具等,是一个综合的、开放的系统框架平台,允许用户对系统中的模拟模型不断进行修改和扩充<sup>[4]</sup>。MDSF 系统结构如图 1 所示,其中,内嵌的关系数据库和 GIS 是 MDSF 的基础,流域水资源和水质模拟专业模型是 MDSF 的核心,另外,MDSF 还制定了方案定义、人机交互、数据管理、数据共享、多模型同步计算等协议和接口。

收稿日期: 2009-07-02; 修订日期: 2009-09-29

基金项目: 江苏省科技计划项目(BS2007157),江苏省环境监测科研基金项目(0812),南京水利科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y109001)。

作者简介: 陈鸣(1957—),男,高级工程师,本科,主要从事水文、水环境研究。

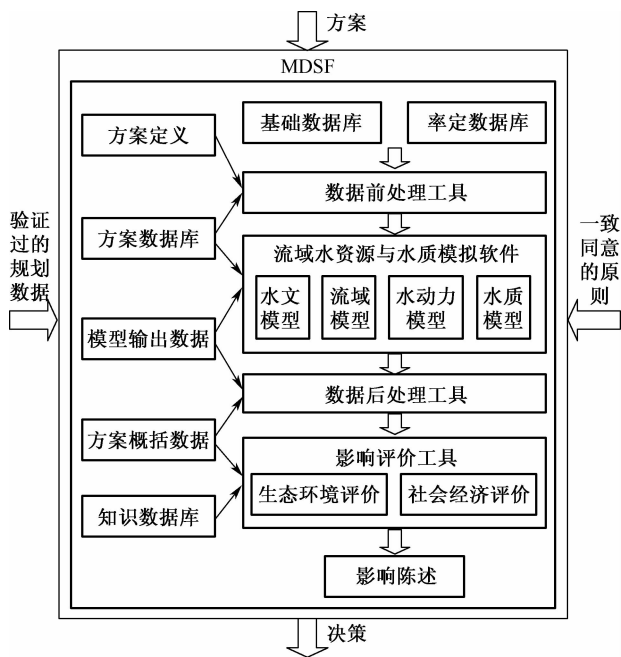


图 1 MDSF 系统结构

MDSF 系统制定的流域水资源、水质模拟管理框架较为完善,资料采集、数据库建设、方案制定、模拟分析、影响评价、多方案比较、方案确定等内容都遵循严格统一的程序。MDSF 的模拟引擎内嵌和支持众多水文模型、流域模型、水动力学模型、泥沙模型、水质模型、地下水模型等,能够完成大流域降雨、产汇流模拟和河网内水流-水质-泥沙联合模拟。MDSF 系统实现了模拟模型、地图数据和属性数据库与 GIS 的无缝连接,提供灵活易用的建模和模型管理工具,再加上功能强劲的数据前后处理模块,能够在 GIS 界面和图形操作界面下完成各种操作。它与 GIS 连接时,能够显示和分析流域河流特征、人口和经济信息、水资源分布、环境标示及城市区域等空间信息,实现了水资源管理与水质变化的相互对比,有助于针对特定流域制定水资源供需及水环境保护政策。另外,MDSF 系统遵循 OPEN-MI 标准,允许利用外部程序进行数值模拟计算、数据库操作和结果分析。有了外部模型的支持,系统的功能不断扩充,应用范围不断扩大,可应用于流域水资源规划、洪水风险分析和水质预警等方面。

1.2 实时水情预报预警

InfoWorks RS 是一种建构在 MDSF 框架内的基于客户/服务器、多模型体系的兼有实时预报预警模块的系统。InfoWorks RS 通过系统内的数据转换中心模块可将实时采集的水文、水质数据与系统进行无缝连接,实现数据采集、水文模拟、水动力

模拟和洪水预报、水质预报的一体化功能。其功能特点有:① 收集多种数据,包括遥测数据,水文、水质数据,气象雷达数据,卫星图像,气象预测数据;② 预测流域内特定预测点的流量、水位和水质;③ 集成多种类型(水文、水力和水质)模型;④ 对实时数据与预测结果进行比较,以更新模型的预报,并作为输入值提供给其下游的模型;⑤ 校核并交叉检查输入数据,利用专门的数据模型补充丢失或无效的数据;⑥ 产生 InfoWorks RS 模型网络中预报点的流量、水位、水质和其他数据的时间序列;⑦ 存储由 InfoWorks RS 预报模块生成的时间序列和分析模块产生报表,它保存着每一个独立预测系统的运行结果,包括运行中输入数据的副本。

2 水质预警模拟

MDSF 系统中 InfoWorks RS 的水质模拟由水动力学模拟和水质模拟两个步骤组成<sup>[5]</sup>。水动力学模拟的结果可以被一个或多个水质模拟使用。水动力学模拟与水质模拟的相关关系如图 2 所示。

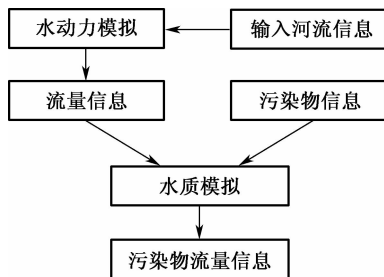


图 2 水动力模拟与水质模拟的关系

2.1 水动力模型

水流运动可以由圣维南方程组来表示质量和动力的守恒。质量守恒引出连续方程,该方程建立了水位上升率和楔状体以及棱状体储藏量之间的平衡。动力守恒引出动力方程,该方程建立了惯性、扩散、地心引力以及摩擦力之间的平衡。

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \tag{1}$$

式中:  $Q$ ——流量,  $m^3/s$ ;  $A$ ——过水面积  $m^2$ ;  $x$ ——距离,  $m$ ;  $t$ ——时间,  $s$ ;  $q$ ——旁侧入流,  $m^3/(s \cdot m)$ 。

动力方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} - gAS_f = 0 \tag{2}$$

式中:  $H$ ——水深,  $m$ ;  $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\beta$ ——水密度系数;  $S_f$ ——摩擦比降。

$$S_f = \frac{Q |Q|}{K^2} \quad (3)$$

其中:  $K$  由河道流量因数和相应曼宁糙率系数组成的方程得到,

$$K^2 = \frac{A^2 R^{\frac{4}{3}}}{n^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (5)$$

其中:  $R$ ——水力半径,  $m$ ;  $P$ ——润周长度,  $m$ ;  $n$ ——曼宁糙率系数。

利用 Preissmann 四点加权隐式差分格式求解圣维南方程组。

### 2.2 水质模型

使用水平对流扩散方程计算污染物扩散:

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} = -\frac{\partial(\mu CA)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( DA \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S \quad (6)$$

式中:  $C$ ——污染物质量浓度,  $kg/m^3$ ;  $A$ ——代表性流动区域,  $m^2$ ;  $\mu$ ——平均流速,  $m/s$ ;  $D$ ——扩散系数,  $m^2/s$ ;  $S$ ——源/汇项, 表现衰减、增长、侵蚀以及沉积作用等,  $kg/(m \cdot s)$ 。

方程(6)的有限差分近似为:

$$\frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} = -\frac{\mu \phi_{(i+1)/2}^n - \mu \phi_{(i-1)/2}^n}{\Delta x} + D \left[ \frac{(A_{i+1}^n + A_i^{n+1})(C_{i+1}^n - C_i^n)}{2(\Delta x)^2} - \frac{(A_i^n - A_{i-1}^n)(C_i^n + C_{i-1}^n)}{2(\Delta x)^2} \right] + S \quad (7)$$

式中:  $n$ ——时间指标;  $i$ ——位置指标;  $\Delta x$ ——节点  $i$  的单元长度,  $m$ ;  $\Delta t$ ——时间步长,  $s$ ;  $\phi$ ——标量变量,  $kg/m$ ,  $\phi = C \times A$ 。

平流扩散方程与多种水质变量进程模式(如污染物守恒模型、污染物衰减模型、大肠菌、盐度模型、温度模型等)结合,即可模拟河流中多种形式的污染物扩散演变过程。

### 3 应用实例

长江南京段中的污染物来源主要是上游输入和两岸工矿企业及生活污水排放。

### 3.1 计算网络

长江南京段水质计算网络构建,以 GIS 图层为背景,用 InfoWorks RS 中内嵌 GIS 工具完成,网络中包括上下游边界节点、排污口、江心洲上下游征控制断面、各断面间的连接等元素,见图 3。

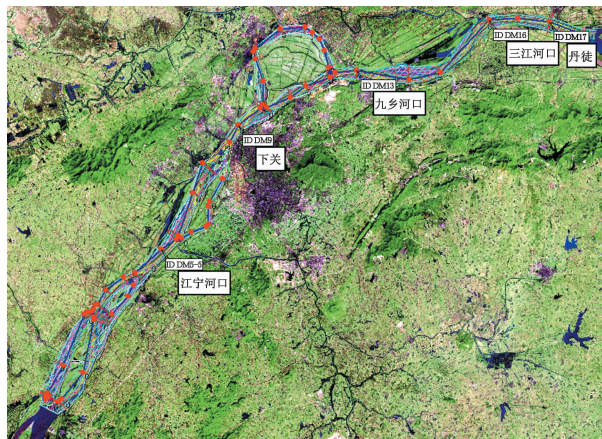


图 3 长江南京段水质计算网络

### 3.2 污染计算

取 2005 年的实测资料,进行长江南京段水质模拟计算。在水动力学计算中,上游边界为马鞍山站的水位过程,下游边界为镇江站的水位过程。经水动力学模拟后得到长江马鞍山至镇江段的流场。

将江宁河口断面实测污染浓度作为污染的上边界输入,九乡河口为中间污染源。污染物进程模式分别采用了衰减模型和溶解氧模型。

衰减模型为一阶衰减公式:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -KC \quad (8)$$

式中:  $K$ ——衰减率,  $s^{-1}$ ;  $C$ ——污染物质量浓度,  $kg/m^3$ 。

考虑到长江南京段地处大陆暖湿气候带,全年平均昼夜温差较大,衰减模型的衰减系数  $K$  白天为 0.01、夜间为 0.001。

水体中的溶解氧(DO)的主要来源有 3 类: ① 大气复氧, ② 光合作用, ③ 支流与上游污水中的溶解氧。水体内部消耗 DO 主要有以下 4 类: ① 碳化废弃物的氧化耗氧, ② 氧化废弃物的氧化耗氧, ③ 底泥耗氧, ④ 水生植物呼吸作用耗氧。某时刻水体 DO 的含量,可以总结为以下平衡式:

$$V \frac{dC}{dt} = \text{大气复氧} + (\text{光合作用耗氧} - \text{呼吸作用耗氧}) - \text{氧化、生物耗氧} - \text{泥沙耗氧} \pm \text{氧的迁移}$$

(进入或移出)。

其大气复氧以下列公式表示：

$$\frac{dDO}{dt} = K_{air} (DO_s - DO) \quad (9)$$

式中： $DO$ ——溶解氧质量浓度， $mg/L$ ； $K_{air}$ ——降解率， $h^{-1}$ ，表示成与水的深度和流速的函数：

$$\begin{cases} K_{air} = 5.33 V^{0.67} h^{-1.85}, h \leq 2.12 \\ K_{air} = 3.93 V^{0.5} h^{-1.5}, h > 2.12 \\ \text{且 } V < 1.68 h^{0.3689} - 1.433 \\ K_{air} = 5.02 V^{0.969} h^{-1.673}, \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中： $V$ ——流速， $m/s$ ； $h$ ——水深， $m$ 。  
 $DO_s$ ——饱和溶解氧质量浓度， $mg/L$ ，与水体的温度与盐度有关。

$$DO_s = 1.43 [(10.291 - 0.2809T + 0.006009T^2 - 0.0000632T^3) - 0.607S(0.1161 - 0.003922T + 0.0000631T^2)] \quad (11)$$

其中： $T$ ——水面温度， $^{\circ}C$ ； $S$ ——水体的盐度， $\%$ 。

生物耗氧量 BOD 表示为 5 日生化需氧量 ( $BOD_5$ )， $COD_{Cr}$  的计算公式如下：

$$COD_{Cr} = \frac{BOD_5}{1 - [(1 - \alpha) \exp(-5K_f) + \alpha \exp(-5K_s)]} \quad (12)$$

式中： $\alpha$ ——慢 BOD 量与快 BOD 量的比值； $K_f$ ——快 BOD 的反应速率； $K_s$ ——慢 BOD 的反应速率。

表 1 列出溶解氧模型的计算参数值。

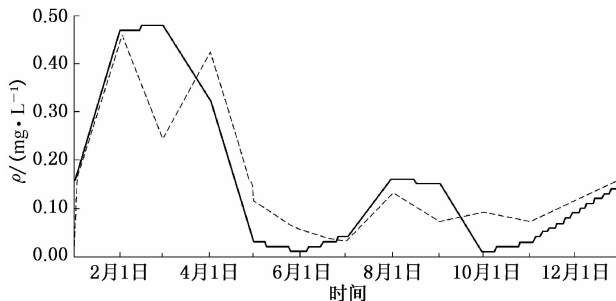
表 1 溶解氧模型计算参数

参数名称	参数值
BOD/COD 标准衰减率/ $d^{-1}$	0.23
BOD/COD 衰减温度系数	1
BOD 慢速衰减率	0.2
氮标准衰减率/ $d^{-1}$	0.23
氮衰减温度系数	1
氮慢速衰减率系数/ $d^{-1}$	0.2
氨标准氧化率	0.26
氨氧化温度系数	1
盐度系数	0
基准盐度/ $(g \cdot L^{-1})$	0
悬浮固体系数	0

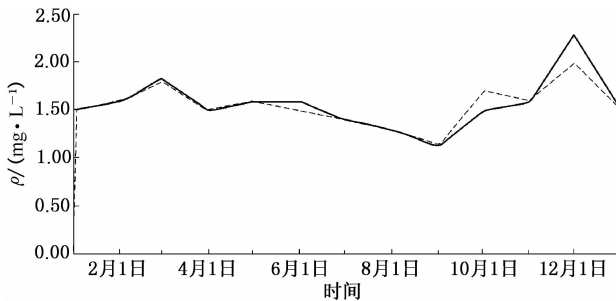
(续 表)

参数名称	参数值
基准悬移质/ $(g \cdot L^{-1})$	0
基准悬移质参数	0
亚硝酸盐标准氧化率/ $d^{-1}$	1
亚硝酸盐氧化温度系数	5

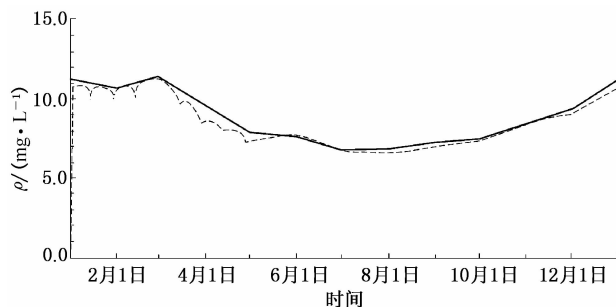
三江河口断面上的  $NH_4-N$ 、 $COD_{Cr}$  以及  $DO$  过程与实测过程比较，如图 4 所示，图中虚线为模拟值，实线为实测值。误差分析见表 2。



(a)  $NH_4-N$



(b)  $COD_{Cr}$



(c)  $DO$

图 4 2005 年三江河口断面实测与模拟过程比较

表 2 误差系列分析

项目	平均误差/ $(mg \cdot L^{-1})$	标准差	方差	决策系数
$NH_4-N$	0.000 7	0.069 3	0.004 8	0.805 8
$COD_{Cr}$	-0.019 7	0.085 7	0.007 3	0.891 5
$DO$	-0.265 1	0.240 1	0.057 6	0.975 8

(下转第 11 页)

若发生重大污染事故,必要时应调动异地监测站的设备和人员参加应急监测,同时加强与行业监测站的合作,发挥各自优势。可在现有工作基础上,采取应急监测技术和快速响应全方位能力大比武等形式,推进各区县监测站应急监测能力的快速发展,提升应急监测响应和能力的整体水平。

## 2.6 加强应急监测质量保证与监督

质量保证是应急监测管理的重要组成部分,对整个应急监测过程实行全面的质量管理,是获得准确可靠、快速有效监测数据的关键<sup>[7]</sup>。突发性水污染应急监测的质量保证主要包括:日常质量保证、现场采样质量保证、数据分析和处理质量保证及应急监测质量监督4个方面。

日常质量保证包括:仪器设备的检查维护,作业指导书的编写,试剂和用品的准备,人员培训和应急演练等。现场采样质量保证包括:合理调配采样资源,保证重点采集平行样,注意样品分类编码等。数据分析和处理质量保证包括:分析过程分重点测定平行样和加标样,注意消除基体干扰及数据严格校审等<sup>[8]</sup>。应急监测质量监督可分为内部和外部监督,又可分为全程序监督和部分薄弱环节监督<sup>[9]</sup>,无论何种监督,都应填写检查记录,对不符合要求的项目及时纠正。

## 3 结语

与常规监测相比,突发性水污染事故监测存在许多不确定因素,中心以“全面规划、突出重点”,“整合资源、职责明确”,“平战结合、软硬结合”为建设原则,以“科技创新、管理创新、设施与环境创新、技术与方法创新、专业理论知识与专业技术手段创新”为行动准则,不断提升应急事故处理处置的应变能力,把应急监测工作不断推向更高层次。

### [参考文献]

- [1] 卢华. 对突发性环境污染事故应急监测的思考[J]. 内蒙古环境科学, 2007, 19(4): 108-109.
- [2] 张涛, 钱江, 严刚. 江苏省突发性环境污染事故应急监测支持系统的建立[J]. 云南环境科学, 2005, 24(增刊): 231-232.
- [3] 王敬贤. 应急监测网络建设框架探讨[J]. 山西能源与节能, 2008(2): 23-24.
- [4] 曲明军. 大连市环境污染事故应急监测实施方案框架[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004, 24(4): 11-12.
- [5] 王晓青, 吕平毓, 王俊锋. 突发性水污染事故应急监测系统的建立与运行[R]. 2006.
- [6] 张园, 崔博文. 浅谈突发性环境污染事故应急监测支持系统的组成与功能[J]. 天津科技, 2008, 35(2): 59-61.
- [7] 李小平. 环境应急监测体系及体系的建构[J]. 内蒙古农业大学学报: 社会科学版, 2008, 10(6): 130-131.
- [8] 吴世良. 突发性水污染应急监测与质量控制[J]. 计量, 2007, 15(2): 18-19.
- [9] 刘卫红. 突发性环境污染事故应急监测质量保证体系的研究[J]. 中国环境监测, 2008, 24(1): 57-59.

(本栏目编辑 周立平)

(上接第8页)

由图4可见,模拟过程与实测过程总体较吻合。COD<sub>Cr</sub>、DO模拟精度高,决策系数都在80%以上,其中溶解氧模型计算的DO决策系数为97.58%。

## 4 结论

(1) MDSF系统提出了框架结构的软件设计理念,框架内可以装填GIS、多种水量和水质模型、数据前后处理工具等。MDSF系统的综合性和开放性允许用户对系统中的模拟模型及功能进行不断修改和扩充。

(2) 应用MDSF系统构筑水质预警预报系统,可在GIS图形界面下通过控制点、断面、连接等建模和模型管理工具完成,无须编写程序代码,方便易行。

(3) 水质模拟步骤分为水动力模拟和水质模拟两个部分,并包含守恒、衰减、溶解氧等多种水质变化模型。可通过一个水质模型模拟单一污染过程,也

可通过多个水质模型的组合应用模拟复合污染过程。

(4) 模型参数调试,须用长系列水位、流量和水质资料。参数调试也分两步进行,第一步为水动力模型参数调试,第二步为水质模型参数调试。

(5) 系统中采用的水质计算方法、模型及模型参数有较高的精度,可进行水质预警、水质规划、水质评估计算,可为长江水环境保护、治理决策提供技术支持。

### [参考文献]

- [1] 夏晶, 吴海锁, 尹大强, 等. 长江(江苏段)沿江开发水质监控预警系统建设[J]. 四川环境, 2006, 25(1): 96-99.
- [2] 于长江, 孟宪林. 突发事故水环境污染风险预警模型的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2007, 23(1): 75-79.
- [3] 南京水利科学研究所. MDSF在新疆克孜尔水库、山西汾河水水库试点应用研究报告[R]. 2007.
- [4] 陈鸣, 吴永祥, 陆卫鲜, 等. InfoWorks RS、FloodWorks软件及应用[J]. 水利水运工程学报, 2008(4): 19-24.
- [5] Wallingford Software. InfoWorks RS Help [EB/OL] (2007-09-06) [2009-03-06]. <http://www.Wallingfordsoftware.com>.