

# 三峡流域一体化水污染应急管理系统开发及应用

翟俊, 何强, 肖海文, 万杰, 宁可佳, 荣婧, 阮雨

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**以三峡库区流域为对象, 利用 ArcGIS Engine 组件库, 以 VB 为程序开发语言, 以 DLL 动态连接库的形式构建了水力/水质模型库, 以 Geodatabase 为数据库, 开发了一体化的水污染综合管理信息系统, 为三峡库区突发性水污染事故的应急管理提供了一种信息化的技术手段。该系统同时集成了多种数学模型, 并实现了不同模型之间的无缝衔接, 不仅具备了污染源动态管理、水体水质查询及评价、流速场和浓度场模拟等功能, 而且具备了流域内突发性污染事故的应急管理功能。通过针对翻船事故污染的应急管理应用, 表明该系统能快速模拟出事故污染带的迁移转化过程, 自动统计出各种污染事故所产生污染带在不同时间的影响范围和污染程度, 为突发性污染事故的应急措施提供决策支持。

**关键词:**水污染控制; 应急预警; 管理信息系统; 三峡库区

中图分类号: X321 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)02-0128-07

## Development and Application of an Integrated Emergency Lightening System for Water Pollutant Accident Management in the Three Gorges Basin

ZHAI Jun, HE Qiang, XIAO Hai-wen, WAN Jie, NING Ke-jia, RONG Jing, RUAN Yu

(Key Lab of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China) (Key Lab of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** An integrated water pollution management system for the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) titled as WPMIS\_ER\_TGRA was developed as an information-based technical tool for emergency response on water pollutant accident. ArcGIS Engine, a Geographic Information System (GIS) Module Warehouse, was used as programme developing platform, and Visual Basic (VB) as programming language. The mathematical models for hydraulic and water quality simulation were developed and integrated in the system and programmed as a DLL file via VB. WPMIS\_ER\_TGRA owns a new function of emergency lightening at watershed scale as well as the normal water environmental information management functions. The system was applied for emergency water pollution management by a dummy ship capsized in Yangtze River. It was found that WPMIS\_ER\_TGRA could model the transfer and diffusion of the accident pollutants in rivers, quickly forecast the pollution situation and identify the influencing area and their changing with time in a few minutes just after the accident happened.

**Key words:** Water Pollution Control; Emergency lightening; Management Information Systems; Three Gorges Reservoir Area

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07315-006); 科技部国际合作基金(2007DFA90660)

作者简介: 翟俊(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事水污染控制技术研究, (E-mail) zhaijun@cqu.edu.cn.

突发性水污染事故已经成为现代社会不可忽略的问题,正在引起全社会的高度重视。“松花江水污染”事件及其后发生在北江、湘江、黄河的水污染事件凸现出我国针对突发性污染事故的应急机制还欠科学,应急能力和技术手段还明显不足。目前国内外学者在突发性水污染事故应急管理信息系统研究领域已开展了一些研究工作。美国 WILLIAM“B.” SAMUELS 等人<sup>[1]</sup>开发了一种基于 GIS 的饮用水水质保障应急系统,可以模拟化学物质和放射性物质在供水管道系统中的迁移转化过程。哥伦比亚的 W. F. Dabbert 等人<sup>[2]</sup>认真分析了当前先进的空气质量监控和应急技术并讨论了大气污染物的扩散迁移模型。美国 Kathleen T. Ward<sup>[3]</sup>等人探讨了利用地理空间技术进行城市森林保护和应急管理。希腊的 Keramitsoglou<sup>[4]</sup>等人运用一系列相对独立的软件构建了地中海原油泄漏事故管理系统,并对其中一个岛屿进行了应用。美国 Martin<sup>[5]</sup>等人利用二维地表水模型(CE-QUAL-W2 Version3.1)和 GIS 构建了相对松散的污染物泄漏事故管理信息系统。我国王庆改<sup>[6]</sup>等人利用丹麦 MIKE11 一维模型定量模拟了突发性水污染事故发生后,汉江不同地点污染物达到的时间和浓度值。王鹏<sup>[7]</sup>等开发了耦合 GIS 的二维污染物迁移模型,针对松花江苏家屯段进行了应用。现有研究成果表明将 GIS 技术与数学模型和数据库技术相结合进而构建针对突发性水污染事故管理的决策支持系统是该领域的一个主要发展方向。但这些所开发的污染事故管理信息系统均只选用了一种水质数学模型,不成体系,难以适应不同尺度水环境管理的需求,而且模型与 GIS 的系统集成以松散集成为主。以流域尺度为对象的水污染事故应急管理信息系统的研究还较鲜见。

三峡库区污染源众多,有工业企业 1 700 余家,营运船只 8 500 余艘。近年来每年发生船舶污染事故 8~15 起。利用空间信息技术对复杂的水环境系统和可能发生的污染事故进行有效管理和辅助决策研究非常必要。本文以三峡库区流域为对象,利用 ArcGIS Engine 组件库,以 VB 为程序开发语言,以 DLL 动态连接库的形式构建了水力/水质模型库,开发了一体化的三峡库区突发性水污染事故应急管理信息系统(Water Pollution Management Information System for Emergency Response in the Three Gorges Reservoirs Area, WPMIS\_ER\_TGRA),并对库区翻船事故的应急管理进行了应用。

## 1 系统总体设计

WPMIS\_ER\_TGRA 系统是以 ESRI 公司的 GIS 开发平台 ArcGIS Engine 组件库为基础,集成自主开发的三峡库区水污染管理模型库组件,通过计算机通用程序语言 VB6.0 编译封装形成专业的一体化水污染综合管理信息系统。该系统可以独立安装于普通 PC 机上,无需其它软件的支持。系统的总体结构设计如图 1 所示。整个系统包括四个层次:数据库系统、模型库系统、GIS 系统、可视化界面。

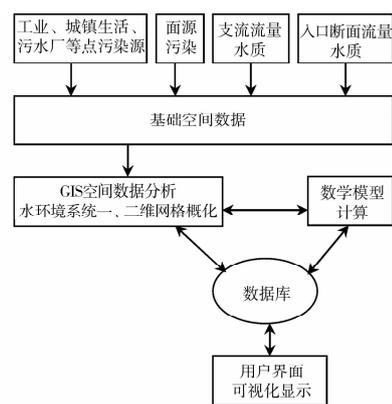


图1 水污染应急管理信息系统总体结构

数据库是整个系统的基础。WPMIS\_ER\_TGRA 采用 Geodatabase 数据库统一存储基础数据和计算结果数据,包括基础空间数据、(事故)污染源数据、水质/水文监测数据、流速场和浓度场数据,以及水质评价结果、模型参数、水环境质量标准和环境法规等。在系统中,采用特殊污染源来表示突发性污染事故,如油船倾泻、工业企业事故排放等。

模型库是开发人员针对系统功能需求,开发的具有特殊计算功能的计算机程序模块的集合。为了实现大尺度流域范围内不同层次水环境管理的功能需求,WPMIS\_ER\_TGRA 的模型库同时集成了恒定流一维动态水质模型、恒定流二维水力模型、二维动态水质模型、河流一维网格概化模型、大型自然河道复杂边界的二维适体网格离散模型,以及模糊综合水质评价(Fuzzy Comprehensive Water Quality Assessment, FCWQA)模型<sup>[8-10]</sup>等。该模型库能与 GIS 相耦合,在 GIS 控件拓扑分析功能的支持下,实现了污染源与数学模型计算网格点的自动匹配和一维水质模型与二维水质模型的无缝衔接等效果。模型库是系统具备决策支持功能的关键,也是本次开发的重点。本文将重点介绍系统模型库的构建和系统在突发性水污染事故中的管理应用。

## 2 模型库系统

### 2.1 河流的网格概化模型

网格概化是实现水环境系统中各个要素(如:长江、支流、点污染源、面源污染等)的属性数据能够被数学模型调用的关键步骤。WPMIS\_ER\_TGRA 系统的网格概化模型有一维概化模型和针对大型自然河道复杂边界的二维适体网格概化模型。

对于一维网格概化,系统充分利用 ArcGIS 软件提供的强大的空间拓扑分析功能,对长江画出了河道中弘线,并沿中弘线按 20 m 的流线间距,自动划分了 35 500 个计算网格,将河流离散成众多的点,并对每个节点进行编号。长江沿线的污染源和支流均可通过空间拓扑匹配模型自动确定在计算网格中的节点编号,极大地提高了数据采集的自动化程度。

天然河流边界都是不规则的曲线,对于这种不规则区域进行二维或三维的数值求解时都会遇到困难。将一个复杂的不规则求解区域变换成规则的矩形区域,对于数值求解可以有效提高数值计算收敛效率和模拟精度。WPMIS\_ER\_TGRA 系统有效地将 GIS 技术与数学方法相结合,利用 ArcGIS 的空间分析模块,将计算物理域的 4 边等分,然后利用边界拟合微分方程<sup>[11]</sup>计算曲线正交网格的节点。在实际计算过程中,发现传统方法对复杂河道的适用性较差,所生成的适体曲线网格并不能保证正交。本文对其进行了改进,提出边界滑移方法,在求解构造适体网格的 Laplace 方程和 Poisson 方程时,采用 3 边网格节点固定,另一边上的网格节点可以沿河岸线自由滑动,通过迭代,可以得出正交效果良好的适体网格。图 2 是采用改良方法和传统方法对万州段江面进行适体网格划分所得结果的对比。

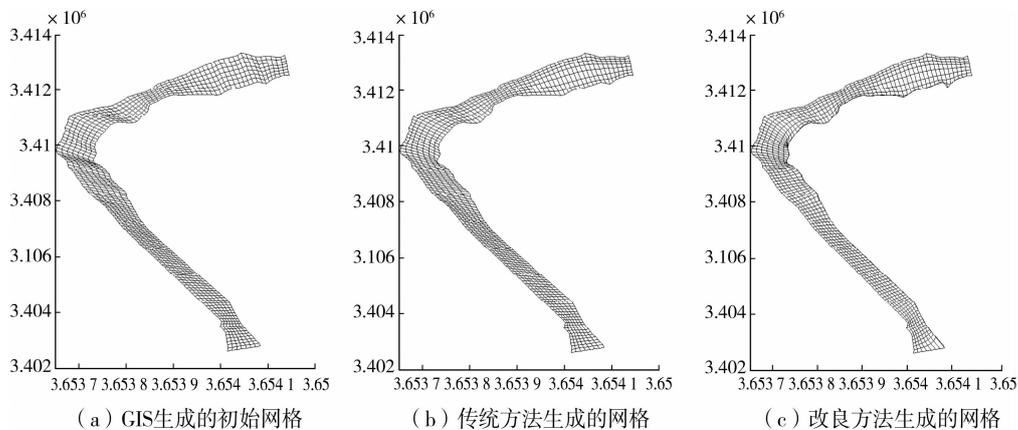


图 2 改良方法生成网格与传统方法生成网格的比较

### 2.2 水力/水质模型

2.2.1 模型方程的选择 考虑到三峡水库建成后在不同水期水文条件将发生较大变化,但在同一水

期内其水文条件变化并不显著的情况,选择成库前后 6 种典型水文条件作为水力/水质模拟的边界条件,如表 1 所示:

表 1 设计水文条件

序号	水期	入境流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			水位	备注
		长江朱沱	嘉陵江北碛	乌江武隆		
1	枯水期	2 640	388	373	65.8	7Q10*
2	成库前 平水期	8 536	2 120	1 627	68.5	多年平均
3	丰水期	17 500	5 312	3 688	70.4	丰水年丰水期
4	枯水期	2 640	388	373	175	7Q10
5	成库后 枯水期	2 640	388	373	155	7Q10
6	丰水期	17 500	5 312	3 688	145	丰水年丰水期

注:7Q10 流量为 90%保证率最枯连续 7 d 的平均水量,作为河流最小流量设计值。

模型的水力、水质方程均采用动态方程,如下式 所示。在流速场模拟时,在同一水期,设定边界条件

不变,当计算时间足够长时,动态非恒定流将趋于稳态恒定流。在水质模拟时,既可以模拟边界条件不变时的污染带稳态分布状况,也可以通过改变污染源状态和设定计算时间来模拟因污染源改变引起的污染带变化情况或污染带随时间的迁移扩散过程。

一维水力方程:

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

$$\frac{1}{g} \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial h}{\partial x} = i - J_f$$

一维水质方程:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial(AE_x \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} - u \frac{\partial(AC)}{\partial x} - AK_j C + S$$

二维水力方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = v_t \left[ \frac{\partial u^2}{\partial x^2} + \frac{\partial v^2}{\partial y^2} \right] - g \frac{\partial(z_0 + h)}{\partial x} - g \frac{n^2 uv}{h^{4/3}}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = v_t \left[ \frac{\partial v^2}{\partial x^2} + \frac{\partial u^2}{\partial y^2} \right] - g \frac{\partial(z_0 + h)}{\partial y} - g \frac{n^2 uv}{h^{4/3}}$$

二维水质方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = \frac{\partial(E_x \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(E_y \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} + K_1 C + S$$

式中:Q为断面流量;A为过水面积;q为单位河长侧向入流量,流入为正,流出为负;t为时间;h为断面平均水深;i为河床坡度;J<sub>f</sub>为沿程水头损失的坡降。u,v为平均流速在x、y方向的分量;Z<sub>0</sub>为河底高程;n为河床糙率;g为重力加速度;v<sub>t</sub>为紊动粘性系数。E<sub>x</sub>,E<sub>y</sub>为x、y方向的混合系数;S为源与汇;K<sub>1</sub>为生物化学反应率常数。

### 2.2.2 方程组的求解

WPMIS\_ER\_TGRA系统采用有限差分法(FDM)对一维、二维水力/水质数学模型方程求解。有限差分法具有格式简单,求解方便,计算内存占用比较少,计算速度快,能够充分反映流场和浓度场随时间的变化规律,在非恒定性比较强的问题中应用比较多<sup>[12]</sup>。

为了充分反映流速、水深、断面特征、河道形态等水文条件对模型参数的影响,也为了保证在成库

前水文率定和验证所得数学模型能够适用于成库后的水文条件,将模型的关键参数通过前人研究所得的经验公式<sup>[13-16]</sup>转化为与水文参数相关的经验表达式。如下:

$$E_x = K_E \left[ \frac{B}{h} \right]^{2.1} \left[ \frac{u}{u_*} \right]^{0.7} h u_* ;$$

$$E_y = K_i^{1.07} \frac{u^{0.48}}{u_*^{0.089}} \left[ \frac{B}{h} \right]^{0.089} ;$$

$$v_t = \frac{\pi}{8} C_n u_* h ;$$

$$k_{ij} = A_j + B_j \frac{u}{h}$$

式中:u<sub>\*</sub>为阻流速;B为水面宽度;u为断面平均流速;h为平均水深;i为水力坡降;k<sub>ij</sub>为第j中污染物的衰减系数;其余K<sub>E</sub>,K,C<sub>n</sub>,A<sub>j</sub>,B<sub>j</sub>均为需要率定和验证的参数。

于是可以通过率定和验证K<sub>E</sub>,K,C<sub>n</sub>,A<sub>j</sub>,B<sub>j</sub>等参数来验证水力/水质模型。

对于一维水力/水质数学模型参数的率定和验证,本文采用2003年(成库前)枯水期和平水期三峡库区重庆段16个控制断面的水文、水质数据,以及流域内的污染负荷进行率定;采用2003年丰水期的数据对所率定模型进行验证。计算过程中充分考虑了不同水期面源污染负荷对长江水质的影响。

对于二维水力/水质数学模型参数的率定和验证,本文采用2003年(成库前)长江万州段的丰、枯水期的水文、水质和污染负荷数据进行参数率定;采用2003年万州段平水期、重庆主城区段丰水期、涪陵城区段枯水期的数据进行了模型参数的验证。

### 2.3 模型库的程序实现

在WPMIS\_ER\_TGRA系统中,为了实现数学模型组件与GIS组件的结合,采用Visual Basic.net程序语言编制,形成动态连接库DLL文件,将系统所需的特殊功能数学模型转化为其它程序能够调用的功能函数。这为开发能够适用于任意河流的模块式水环境管理信息系统创造了条件。动态连接库提供的功能函数包括:二维网格划分、一维浓度场模拟、二维流场模拟、二维浓度场模拟等函数。以二维流场模拟功能函数为例:

函数原型为:Function EW\_Speed(ByVal n As Integer, ByVal m As Integer, ByVal gridxy As Object, ByVal upsect As Object, ByVal undersect As Object, ByVal Args As Object, Optional ByVal repeat As Integer = 10000) As Double(,)

输入参数:

表 2 二维流场模型软件参数输入

参数名	类型	描述	备注
n	Integer(32 位)	计算河段水流方向上的网格节点数	
m	Integer(32 位)	计算河段垂直水流方向上的网格节点数	
gridxy	Double 型三维数组	计算河段网格点坐标	
upsect	Double 型二维数组	进口断面条件	
undersect	Double 型二维数组	出口断面条件	
Args	Double 型一维数组	计算参数	
repeat	Integer(32 位)	循环迭代次数	

返回值: 三维 Double 型数组 ( $0 \cdots n-1, 0 \cdots m-1, 0 \cdots 3$ ), 表示各个网格节点的  $x$  方向速度、 $y$  方向速度、水面高程  $Z$ 、水深  $h$ , 其中前两维表示坐标点号, 第三维 0 表示、1 表示、2 表示  $Z$ 、3 表示  $h$ 。

### 3 WPMIS\_ER\_TGRA 在突发性水污染事故应急管理中的应用

WPMIS\_ER\_TGRA 系统中针对突发性水污染事故的应急管理功能主要是在通过动态水质模型对事故污染源产生污染带随时间的迁移扩散情况进行快速模拟的基础上, 利用 GIS 的查询分析功能模块, 显示并识别出不同时间超标污染带的位置和影响范围, 短时间内(在得到事故信息后的 10 min 以内即可预测出事故污染发生 48 h 内的污染带迁移扩散情况)为相关区域和部门提出警示和决策支持。

事故污染带的模拟分析过程主要分为 3 个步骤: 1) 事故污染源的编辑, 2) 事故污染带的动态模拟, 3) 模拟结果分析。下面以假定发生在重庆大渡口区江段的翻船事故为例(船上有约 10 t 的苯酚倾倒入长江, 船舶倾覆过程持续 2 h), 介绍 WPMIS\_

ER\_TGRA 系统对突发性污染事故的应急管理应用。

#### 3.1 事故污染源的编辑

当系统工作人员在得到事故的基本信息后, 立即在事故发生的位置添加一个事故污染源, 并设定其相应的属性数据。其属性数据的主要字段有: 事故名称(船舶污染), 事故污染物名称(苯酚), 特殊污染物浓度(100 000 mg/L), 持续排放时间(7 200 s)。对于其余的数据如: 事故位置在计算网格中的节点编号, 接纳水体名称等, 系统会调用拓扑分析模块自动匹配。这些的属性数据会存放在单独的数据列表中, 以供数学模型调用。

#### 3.2 事故污染带的动态模拟

根据需要, 系统通过从模型库中调用一维或二维动态水质数学模型, 在设定水期(如成库后 145 m 水位)下, 对事故污染物进行水质模拟, 计算出事故发生后不同时间的污染带分布情况。图 3 为事故发生后 4 h、12 h、24 h 时事故污染带的一维数字地图。图 4 为事故发生后 2 h、4 h、8 h 时事故污染带的二维数字地图。

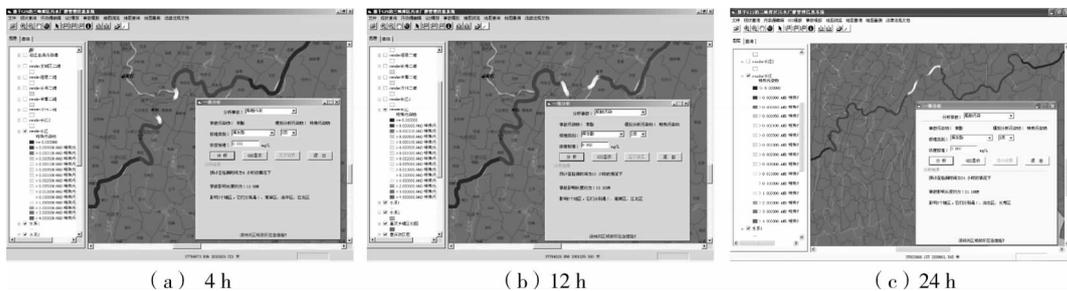


图 3 污染事故发生后各个时段污染带一维分布

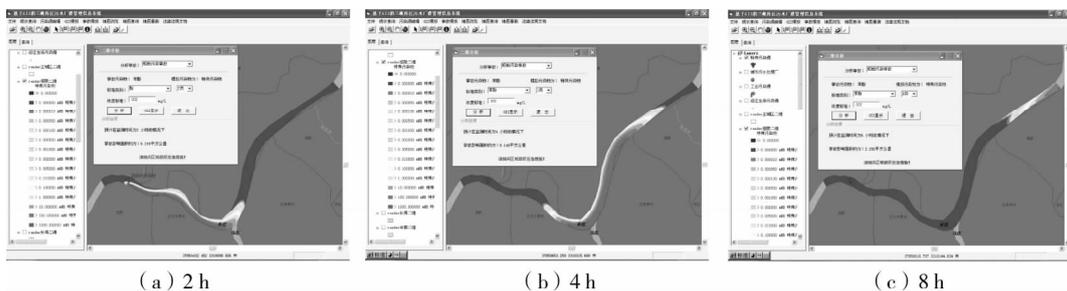


图 4 污染事故发生后各个时段污染带二维分布

### 3.3 模拟结果分析

系统利用 GIS 的查询分析组件,能够自动分析统计出因事故引起的超出水质标准值污染带的涉及

城市和影响范围,并弹出警示对话框,可以提示相关部门做出应急措施。表3为上述假定事故发生后各个时段的污染带影响范围。

表3 假定污染事故发生后污染带随时间的变化过程

事故发生后时间/h	0.5	1	2	4	8	12	24	48
污染带长度/km	4.12	7.64	13.48	13.6	11.7	13.32	21.18	20.88
涉及区域	大渡口	大渡口、南岸	大渡口、南岸	南岸、渝中、江北	南岸、江北	南岸、江北	渝北、长寿	涪陵、丰都

## 4 结论

1)采用 Visual Basic. net 程序开发语言,将系统所需的特殊功能数学模型编译成动态连接库 DLL 文件,转化为其它程序能够调用的功能函数,实现了 GIS、数学模型、数据库的全面集成,自主开发了一体化的三峡库区突发性水污染事故应急管理信息系统,可以独立应用于普通 PC 计算机,而不需其它软件的支持,大大降低该系统的建设成本。

2)该信息系统覆盖整个三峡库区,从流域管理角度出发,实现了整个库区范围内众多污染源信息管理和污染事故应急管理。所开发的模型库系统集成了一维动态水质模型、二维动态水力/水质模型等一系列模型,并实现了不同维数模型计算结果的无缝衔接。与现有类似管理信息系统相比,其功能更强大,运用更灵活,科学意义和实际应用价值更高。

3)通过对翻船事故污染带迁移扩散过程的快速模拟和分析应用,表明 WPMIS\_ER\_TGRA 系统具备了针对突发性水污染事故的应急管理功能,能够在事故发生后的短时间内快速计算并显示出不同时间超标污染带的位置、影响范围及影响程度,为相关区域和部门提出警示和决策支持。

4)将 GIS 的空间拓扑分析功能与边界拟合微分方程有机结合,并提出边界滑移方法,实现了自然复杂河道计算区域适体网格的快速自动划分。

### 参考文献:

- [1] WILLIAM B. SAMUELS, RAKESH BAHADUR. An integrated water quality security system for emergency response. Security of water supply systems: from source to tap[M]. Netherlands: Springer, 2006: 99-112.
- [2] DABBERDT W F, FREDERICK G L, HARDESTY R M, et al. Advances in meteorological instrumentation for air quality and emergency response[J]. Meteorol Atmos Phys. 2004, 87 (1/2/3): 57-88.
- [3] KATHLEEN T WARDA, GARY R JOHNSON. Geospatial methods provide timely and comprehensive urban forest information[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2007, 6 (1): 15-22.
- [4] KERAMITSOGLOU I, CARTALIS C, KASSOMENOS P. Decision support system for managing oil spill events [J]. Environmental Management, 2003, 32 (2): 290-298.
- [5] PAUL H MARTIN, EUGENE J LEOEUF, EDESEL B DANIEL, et al. Development of a GIS-based spill management information system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 112(3): 239-252
- [6] 王庆改,赵晓宏,吴文军. 汉江中下游突发性水污染事故污染物运移扩散模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 500-504.  
WANG QING-GAI, ZHAO XIAO-HONG, WU WEN-JUN. Advection-diffusion models establishment of water-pollution accident in middle and lower reaches of Hangjiang river[J]. Advances in Water Science, 2008, 19 (4): 500-504.
- [7] 高鹏飞,王鹏,郭亮,等. 流域水污染应急决策支持系统中模型系统研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41 (2): 92-96  
GAO PENG-FEI, WANG PENG, GUO LIANG et al. Model system in emergency decision support system for basin water pollution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 92-96.
- [8] 翟俊,何强,夏冰雪. 水污染控制规划地理信息系统模型库的应用[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29 (7): 134-137.  
ZHAI JUN, HE QIANG, XIA BING-XUE. Development and application of the modelbase in water pollution control planning geographic information system[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29 (7): 134-137.
- [9] 翟俊,何强,肖海文,等. 基于 GIS 的模糊综合水质评价模型[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30 (8): 49-53.  
ZHAI JUN, HE QIANG, XIAO HAI-WEN et al. GIS-based fuzzy comprehensive water quality assessment model[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30 (8): 49-53.
- [10] QIANG HE, JUN ZHAI, BINXUE XIA, et al. An

- integrated GIS-based fuzzy comprehensive water quality assessment model[C]//Proceedings of the International Conference on Sensing, Computing and Automation, Dynamics of Continuous, Discrete and impulsive System, Series B: Application and Algorithms, ISSN 1492-8760. Waterloo: Watam Press, 2006: 4005-4009.
- [11] 茅泽育, 许昕, 王爱民, 等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 214-223.  
MAO ZE-YU, XU XIN, WANG AI-MIN, et al. 2D numerical model for river-ice processes based upon body-fitted coordinate[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 214-223.
- [12] BRUNO COSTA, WAI SUN DON. High order hybrid central—WENO finite difference scheme for conservation laws[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, 204(2): 209-218.
- [13] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模拟研究[J]. 水利学报, 2002(12): 7-10.  
LI JIN-XIU, LIAO WEN-GENG, HUANG ZHEN-LI. Numerical simulation of water quality for the Three Gorges Project Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12): 7-10.
- [14] 李锦秀, 廖文根. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(3): 45-48.  
LI JIN-XIU, LIAO WEN-GEN. The effect of water flow on the biodegradation of organic pollution[J]. Research of Environmental Science, 2002, 15(3): 45-48.
- [15] 彭杨, 张红武, 张羽. 长江重庆河段平面二维非恒定水沙数值模拟[J]. 水力水电学报, 2005, 24(1): 47-52.  
PENG YANG, ZHANG HONGWU, ZHANG YU. 2-D numerical modelling for unsteady flow and sediment transport in Chongqing reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 47-52.
- [16] 谢作涛, 侯卫国, 任昊. 葛洲坝下游宜昌——杨家脑河段平面二维水沙数学模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 309-316.  
XIE ZUO-TAO, HOU WEI-GUO, REN HAO. 2D horizontal modeling for the movement of flow and sediment from Yichang to Yangjiaobao reach at the Gezhouba downstream[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 309-316.

(编辑 王秀玲)

(上接第 107 页)

- [15] 黄晓东, 李德生, 吴为中, 等. 生物活性滤池的强化过滤研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 10-13.  
HUANG XIAO-DONG, LI DE-SHENG, WU WEI-ZHONG, et al. Study on the enhanced filtration in bioactive rapid filter[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(8): 10-13.
- [16] 漆文光, 陆少鸣, 杜敬. 饮用水深度处理工艺的对比研究[J]. 净水技术, 2007, 26(5): 26-29.  
QI WEN-GUANG, LU SHAO-MING, DU JING. Study on advanced drinking water treatment process[J]. Water Purification Technology, 2007, 26(5): 26-29.
- [17] ROSARIO-ORTIZ FL, MEZYK SP, WERT EC, et al. Effect of ozone oxidation on the molecular and kinetic properties of effluent organic matter[J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2008, 11(3): 529-535.
- [18] ZARGHAMI M, SZIDAROVSKY F. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23(3): 329-339.
- [19] YURDUSEV MA, FIRAT M. Adaptive neuro fuzzy inference system approach for municipal water consumption modeling: An application to Izmir, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 225-234.
- [20] 李洪兴. 工程模糊数学方法及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.

(编辑 胡英奎)