

SOBEK 在突发性水污染事件中的应用

刘 震^{1 2} 孙 熙³ 周 毅⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450008; 4. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要 SOBEK 是荷兰 Delft 水力研究所开发的、用来模拟和管理各种水环境问题的综合软件包, 具有基于 GIS 的用户图形界面, 一维流、二维坡面漫流、降雨径流及一维地貌、一维水质和实时控制模拟等模型, 水动力一维、二维、三维模拟引擎是其计算内核, 是一个具备开放过程库和开放式模型公共接口(OpenMI)两种方法的、采用一体化方法软件环境的开放式系统。以黄河下游干流突发性水污染事件为例, 选择 0 号柴油作为特征污染物, 应用 SOBEK 软件, 模拟污染物在黄河下游干流断面的浓度变化和迁移转化过程, 推算支流污染团入黄时间、过程和总量, 通过分析污染事件监测数据, 对 SOBEK 软件在黄河的适应性及模拟精度进行了分析, 对软件在突发性水污染事件预警预报系统中的应用进行了探索。

关键词 SOBEK 软件; 水污染事件; 水质模拟; 预警预报系统

中图分类号 :TP311 ;X824 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)02-0061-04

Application of SOBEK to water pollution accidents

LIU Zhen^{1 , 2} , SUN Xi³ , ZHOU Yi⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. Henan Water and Power Consulting Engineering Co. , LTD , Zhengzhou 450008 , China ; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 4. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province , Nanjing 210098 , China)

Abstract :SOBEK is an integrated software package developed by WL|Delft Hydraulics in the Netherlands for the simulation and management of water environment problems. Besides having a GIS-oriented user interface , the software comprises modules of 1D flow , 2D overland runoff , rainfall runoff , 1D morphology , 1D water quality , real-time control simulation , and more. The 1D , 2D and 3D hydrodynamic simulation method is the kernel of the model. The model is an open system with an integrated software environment and the two methods of open process library and Open Modeling Interface and Environment(OpenMI). Using a water pollution accident in the main stream of the lower Yellow River as an example and choosing 0 # diesel oil as the characteristic pollutant , the cross section concentration and the transportation and transformation process of the pollutant in the main stream of the river were simulated with the SOBEK software. The time , movement , and total size of the plume in the branches entering the main stream of Yellow River were simulated. Compatibility and simulation precision of the SOBEK software in the Yellow River was discussed through an analysis of the monitoring data from the pollution accident. The application of SOBEK software to the pre-warning and predicting systems for avoiding water pollution accidents was also discussed.

Key words :SOBEK software ; water pollution accident ; water quality simulation ; pre-warning and predicting system

随着社会经济的高速发展,违反相关法律法规的人类活动与行为以及自然灾害或意外因素等导致的突发性水污染事件频繁发生,并具有发生突然、形式多样、危害严重、处理任务艰巨的特性。因此,有

必要对事件过程进行模拟,提供及时准确的预警预报,建立相应的应急机制。

水质模型是一些描述水质要素在其他诸要素作用下随时间和空间变化关系的数学表达式^[1],揭示

作者简介:刘震(1964—),男,山东荣成人,博士研究生,研究方向为水文水资源及水环境信息化、自动化方面的研究。E-mail: zliu@hhu.edu.cn

了水体中物质混合、输移、转化的内在规律。20 世纪五六十年代的欧美国家,工业化迅速发展,导致河流遭到严重污染,各国在治理中积累了很多水环境治理与管理的经验,也开发了很多完善成熟的水质模型软件系统^[2-3]。著名的有:丹麦水资源及水环境研究所(DHI)的 MIKE 系列软件^[4-5],美国国家环保局(EPA)环境研究室开发的 WASP 系列^[6-8]、QUAL 模型体系^[9-10],荷兰(Delft Hydraulics)的 SOBEK 软件系统^[11]等。这些软件系统可以直接使用或经过二次开发,应用于世界河流的环境管理中,为水资源水环境的规划、控制和管理提供了强有力的技术支持。国内水质模型软件系统研究开发起步较晚,在开发工具、平台、模型建立所需资料,以及开发的通用性、全面性等方面,与国外的发展还存在差距^[12-15]。

SOBEK^[11]是荷兰 Delft 水力研究所开发的用来管理河流、城市、乡村的综合软件包,具有基于 GIS 的用户图形界面,一维流、二维坡面漫流、降雨径流及一维地貌、一维水质和实时控制模拟等模型。水动力一维、二维、三维模拟引擎是其计算内核,是一个具备开放过程库和开放式模型公共接口(OpenMI)两种方法的开放式系统。采用一体化方法提供的软件环境,可以模拟河道河口地区、灌溉排水系统以及排污、排雨系统的各种管理问题。针对不同管理对象,软件分为 3 个相似体系的水资源管理产品:①SOBEK-河流(SOBEK-River)可以进行单一或复杂河流和河口的设计,模拟水流、水质、河流形态变化,河口和其他类型冲淤网(分叉的或环状)水道,由水流、水质、沉积物运移、形态学和盐的侵蚀 5 个单元所组成;②SOBEK-乡村(SOBEK-Rural):专门应用于地区水域管理的工具,在作物经济灌溉定额确定、沟渠自动控制、水库运转和水质控制中有广泛应用;③SOBEK-城市(SOBEK-Urban):可以提供解决排水堵塞、街道漫流和排水管道溢出污水等问题的有效措施,由水流、降雨径流和时间控制 3 个单元组成。3 个产品各有特定的用户界面,每个产品都是由模拟水系特定方面的模块所组成,可以独立或综合地对这些模块进行管理,模块间的数据自动(逐序)或同时传递以推动物质间的相互作用。本研究使用 SOBEK-Rural 对黄河下游干流突发性水污染事件进行水质模拟和预报。

1 SOBEK-Rural

SOBEK-Rural 包括水动力、水文、水质和实时监控 4 个模块,模拟简单或复杂的河流、河口以及岔状与环状的冲积河网的水量和水质。

1.1 原理

1.1.1 水动力模块

水动力模块包括一维流和二维地表漫流两个模

型,在此应用一维流模型进行研究。一维渐变非恒定水流用动量方程和连续性方程两个方程描述,即圣维南(Saint-Venant)方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (2)$$

式中: A_f 为湿面积, m^2 ; q_{lat} 为单位长度侧向流量, m^2/s ; Q 为流量, m^3/s ; t 为时间, s ; x 为距离, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水位, m ; C 为谢才系数, $m^{1/2}/s$; R 为水力半径, $R = A_f/O$ (O 为湿周), m ; W_f 为河宽, m ; τ_{wi} 为风切应力, N/m^2 ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 , 一般取 1000。

式(1)是动量方程,5 项分别描述了惯性项、对流项、水位梯度、河床阻力和风阻力。方程组采用 Delft 格式,通过栅格错列的方式求解,得到水位和流量等水力要素,结果满足鲁棒性、高效性、精确性的要求。

1.1.2 水质模块

水质模块包括一维水质模型,基本方程是一维移流离散方程:

$$\frac{\partial (A \rho)}{\partial t} = - \frac{\partial (Q \rho)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x A \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + S A \quad (3)$$

式中: A 为断面过流面积, m^2 ; ρ 为污染物质量浓度, mg/L ; M 为污染物质量, mg ; E_x 为纵向离散系数, m^2/s ; S 为污染物的源(+)或汇(-), $mg/(m^3 \cdot s)$ 。

采用有限差分数值解法,通过对时空的离散化处理,运用质量守恒原理求解。数值离散是改进的通量修正格式,结合了迎风格式正定性和中心格式精确性的特点,在不损失精确度的前提下避免产生数值振荡。

1.1.3 模型求解

模型求解过程分为两步:①根据水动力方程,求解水流速度、流量、水位参数;②以水动力学方程计算出的流速和流量值代入水质浓度扩散方程,求得各网格点的水质浓度。

1.2 构成及功能

软件系统包含导入河网、设置、气象数据、系统、模拟、结果输出等任务模块,一维流、二维坡面漫流、降雨径流及一维地貌、一维水质和实时控制模拟等模型,模拟结果能够以示意图、数据表和曲线图方式输出。在软件界面上的 8 个模块分别是 Import Network(输入概化图模块)、Settings(设置模块)、Meteorological Data(气象资料模块)、Schematization(系统化模块)、Simulation(模拟模块)、Results in Maps(地

图结果模块 \ Results in Charts(图表结果模块)、Results in Tables(表格结果模块)。这 8 个模块共同工作 ,全面观察水系的情况。软件系统应用步骤是根据具体的研究方案来确定研究目标和约束条件。输入相应控制文件和参数 ,逐步运行上述 8 大模块。从建立模型、剖分网格、数据输入、数值模拟至结果输出 ,整个过程都系统化、规范化。SOBEK 软件的完整框架把河流、水渠和排水管道系统联合起来 ,建立了一套总体管理方案 ,通过地图、曲线图直观地表现计算结果。

2 软件初始化

2.1 模块设置

选择水动力和水质 2 个模块进行模拟 ,2 个模块在 SOBEK 软件内部已经耦合。

2.1.1 水动力模块

计算步长 :模型计算网格包括 376 个计算点 ,节点之间纵向距离为 2 000 m ;模拟时段 :2005 年 11 月 1 日至 2006 年 3 月 31 日 ;模拟模式 :非稳定水流模拟计算 ;气象数据 :降水随时间而变化 ,蒸发量取多年平均值 1 000 mm ,风向和风速为常数 0 ;河网模型 :在黄河 GIS 矢量图上编辑模拟所需河网 ;上边界 :选用小浪底水文站实测流量 ;下边界 :选用利津水文站监测流量或水位资料 ;侧向流 :主要支流伊洛河的入汇流量选用黑石关水文站实测流量 ,沁河的入汇流量选用武陟水文站同步监测流量 ,沿途取水数据根据黄河干流取水公布数据 ;水文断面 :在模拟区段收集到了大约 90 个测淤断面的 2005 年的水下地形数据 ,基本上可以反映模拟河段特征 ;横断面插值方法 :线性内插法 ;输出时间步长 :根据模拟精度要求和决策需求定义输出步长为 2 h ;输出参数 :水位、流量。模型计算单元与 90 个测淤断面深泓纵向分布对比如图 1 所示。

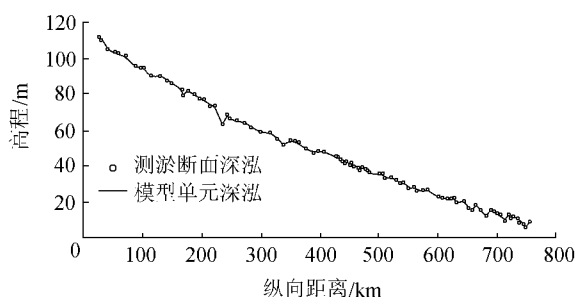


图 1 模型计算单元深泓纵向分布

2.1.2 水质模块

时间步长 :同水流模块 ;初始浓度 :输入有机微污染物(OMP)的初始数值 0 ;积分模式 :改进的通量修正输移数值格式 ;过程参数 :从过程库配置工具选

择 OMP ,非汛期泥沙含量 3g/L 的黄河水中 ,柴油溶于水的浓度 PARTWK_(OMP)取时间的函数 $\rho^{1/4} = -0.0118t + 1.8356$,水中综合衰减速率 LOS_WK_(OMP)是 0.0021h^{-1} ,离散系数值 :输入数值 5 00 ~ 5 000 m^2/s ,并且只有在过水流量非零时才考虑计算离散 ,敞开边界设为无离散发生 ,输移为输移的高阶近似值 ,输出选项 :监测站点和状态变量 ,输出设置 :时间步长设为 2 h ,输出当前值 ,时期等于模拟时间 ;河网模型 :同河流模块 ;模型数据 :入黄污水团来自支流伊洛河 ,OMP 总量未知 ;水质监测数据 :孙口和艾山断面的 0 号柴油实测浓度。

2.2 参数确定

纵向离散系数取值范围为 500 ~ 5 000 m^2/s ,其中花园口取 5 000 m^2/s ,孙口取 500 m^2/s ,中间河段采取线性内差法求得 ;0 号柴油的综合衰减系数取 0.0021h^{-1} ,河床糙率用曼宁系数表示 ,根据历史实测水文资料分析计算 ,取值范围 0.025 ~ 0.040。

3 软件应用

近几年突发水污染事件统计结果显示 ,黄河小浪底以下河段突发污染事件主要是石油类和氰化物污染事件。氰化物是可溶性物质 ,石油类、苯系物是难溶性物质 ,这些都是危害人群健康的重要物质 ,也是水质预测预报关注的重点因子。此外 ,位于伊洛河河畔的河南开普集团有限公司建有多套万吨级的苯系列有机中间体生产装置 ,年综合生产能力仅次于吉林化工厂和南京化工厂 ,居全国第 3 位。由于该集团主要中间体为单环芳烃(如硝基苯) ,鉴于单环芳烃中间体为化工基本原料 ,应用面较广 ,因而发生苯类突发性污染事件的可能性较大。2006 年 1 月初 ,黄河支流伊洛河发生水污染事件 ,河面漂浮大量的泄漏柴油 ,致使伊洛河受到严重的石油类污染物污染 ,水质严重恶化。由于监测数据有限 ,本研究利用孙口和艾山东大浮桥两个断面的监测数据对事件中石油类(柴油)污染物的入黄时间、过程和总量进行模拟推算。

3.1 污染物入黄时间

断面污染物浓度过程特征相似 ,计算数据基本能反映监测数据的峰值到达时刻以及污水团规模。计算结果如图 2 所示。此时 ,伊洛河入黄污染物浓度过程如图 3 所示。据此推算 ,突发水污染事件发生时石油类污染物入黄时间大致在 2006 年 1 月 2 日 12 时至 2006 年 1 月 4 日期间。

3.2 污染物入黄总量推算

综合衰减系数取 0.0021h^{-1} ,伊洛河入黄污染物通量见图 4。此时 ,推算伊洛河入黄河干流污染

物总量在 3.1t 左右。

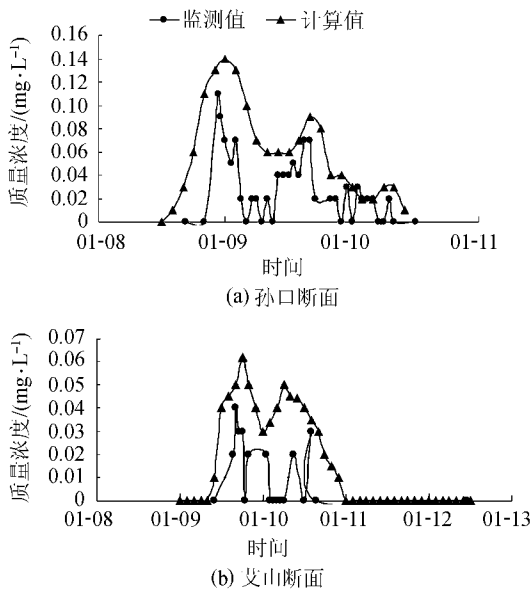


图 2 石油类污染物浓度监测值与计算值对比

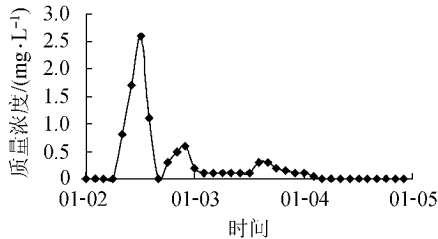


图 3 伊洛河入黄断面石油类污染物浓度过程线

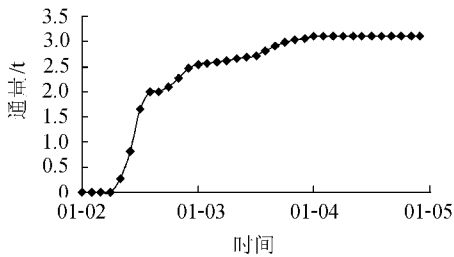


图 4 伊洛河入黄断面石油类污染物通量过程线

3.3 结果分析

实测数据显示 :在 2006 年 1 月 5 日 21 时 ,伊洛河入黄口检测石油类污染物质量浓度 0.4 mg/L ,柴油泄漏 4t 左右。因此 ,软件模拟结果与实际情况基本相符。

4 结 论

SOBEK 软件在洪水预报、航海、最优排水系统、控制灌溉系统、水库运作、排水管道溢流设计、地下水水位控制、河流形态调节和水质控制方面有着重要的应用。但软件是在荷兰本国河流特点的基础上开发的 ,包括水文特征、河道几何形态、含沙量等河流特性与黄河均不相同。对软件及部分模型参数针对黄河的特性进行修正是必须的。模型参数的选择

要根据河道的实测水文资料通过率定的方式来确定 ,还需要不同时间序列的实测水文资料来验证。因此 ,模型的率定和验证与研究河道的以往实测水文资料的丰富程度密切相关。

通过针对性的修正 ,在适用性与模拟精度得到提高以后 ,SOBEK 软件的使用可以得到令人满意的结果 ,适合在突发性水污染事件预警预报系统中使用。

参考文献 :

[1] 雒文生 ,宋星原 .水环境分析及预测 [M]. 武汉 :武汉水利电力大学出版社 ,2000 .

[2] 傅国伟 .河流水质数学模型及其模拟计算 [M]. 北京 :中国环境科学出版社 ,1987 .

[3] 徐祖信 .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 .

[4] DHI Water and Environment . MIKE 21 User 's Guide and Technical Reference[R]. DHI Water and Environment 2004 .

[5] DHI Water and Environment . MIKE 11 Users Manual[R]. DHI Water and Environment 2006 .

[6] ROBERT B . WASP 3 :a hydrodynamic and water quality model 'model theory ,user 's manual and programmer 's guide [M]. US EPA/600/3-034 ,1986 .

[7] US EPA . WASP 4 :a hydrodynamic and water quality model : model theory ,user 's manual and programmer 's guide[M]. US EPA/600/3-87 ,1039 ,1988 .

[8] AMBROSE R B ,WOOL T A ,MARTIN J L ,et al . WASP 5.x : a hydrodynamic and water quality model 'model theory ,user 's manual and programmer 's guide[C]//Draft : Environmental Research Laboratory ,US EPA ,1993 .

[9] BROWN L C ,BARNWELL T O J . The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : documentation and user manual(EPA600/3-87/007) [R]. 1987 .

[10] US EPA . QUAL2E windows interface users guide(EPA/823/B/95/003) [R]. 1995 .

[11] WL|Delft Hydraulics . SOBEK Online Help[EB/OL]. [2007-04-19]. http://www.sobek.nl/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=60&Itemid=82 .

[12] 张禹卿 .河流水质规划计算机模拟研究 [J]. 同济大学学报 ,1995 23(4) :458-463 .

[13] 李致家 ,谢悦波 .地下水流与河网水流的耦合模型 [J]. 水利学报 ,1998(4) :43-47 .

[14] 赵棣华 ,李提来 ,陆家驹 .长江江苏段二维水流 :水质模拟 [J]. 水利学报 ,2003(6) :72-78 .

[15] 马蔚纯 ,张超 .基于 GIS 的水质数值模拟 :以上海市苏州河为例 [J]. 地理学报 ,1998 53(12) :68-75 .

(收稿日期 2007-10-10 编辑 :傅伟群)