

文章编号:1671-6833(2007)02-0117-04

北江重金属镉污染事故数值模拟

窦明¹, 马军霞¹, 谢东瑜², 李晓华²

(1. 郑州大学 环境与水利学院 河南 郑州 450001; 2. 中山大学 水资源与环境系, 广东 广州 510275)

摘要: 针对2005年12月发生在北江流域的重金属镉污染事故,建立了一维河流重金属迁移转化模型,结合污染事故实测资料,对模型进行了参数率定和验证.从计算结果来看,当水体中镉浓度值较大时,重金属模型计算值与实测值拟合效果较好,而镉浓度值较低时,则拟合效果不理想,此外,水体中镉浓度随着水流运动由上游向下游递减,这说明重金属在吸附、沉降作用下逐步沉积到底泥中.

关键词: 北江; 重金属; 数值模拟

中图分类号: TU 414

文献标识码: A

0 引言

近年来,随着广东省经济的快速发展,尤其是金属冶炼、电镀、电子以及化工等行业的增多,向水体中排放的重金属废水量日益增加.由于重金属污染物毒性强、污染性质复杂、不能被微生物降解等特点使得其对水生生物和人类健康危害极大.目前,国内学者在重金属迁移转化机理方面作了一定的工作,其研究成果主要集中在泥沙对重金属迁移转化影响问题上,并从各自的研究重点建立了不完整的分相模型(即溶解相、悬浮相、底泥相中的一相或两相)和整体模型^[1-3].本文作者将以2005年12月发生在北江流域的镉污染事故为背景,建立重金属迁移转化模型,力图对重金属在水体中的运动规律进行模拟和分析.

1 北江镉污染事故概述

北江是珠江流域的第二大水系,位于广东省中部偏北.2005年12月13日,由于北江上游韶关冶炼厂在设备检修期间违规超标排放高浓度含镉的工业废水1000多吨,导致北江上中游水体严重污染.经广东省环保部门监测发现,事故发生后镉污染物峰值随水流沿江下移,从孟洲坝电站断面到高桥断面全部超过标准,12月15日高桥断面镉超标近10倍;18日上午,广东省环保部门责令韶关冶炼厂停产整顿,关闭超标的污水排放口.受北江镉污染事件的影响,北江中下游英德

市、清远市的饮用水源地受到威胁而一度停供,当地政府启动了备用水源,并调集消防车等运水工具向市区进行应急供水.

为了降低水体中的镉污染浓度,广东省有关部门采用在上游加大流量的方式稀释污染,调动南水水库集中排放7000多万m³水,稀释污染水体.至2005年12月28日,北江韶关段水体中镉浓度总体呈下降趋势,韶关市白沙断面以上河段已稳定达标;位于英德市白石窑断面镉浓度峰值为0.030 mg/L;飞来峡出口断面水质达标.经事后调查发现,镉污染超标的河段主要是在从韶关市到清远市石角镇河段,进入佛山市后水体已经基本达标.



图1 北江流域镉污染事故影响区

Fig.1 Influence area of cadmium pollution accident in North river

收稿日期:2007-02-20;修订日期:2007-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50679075);河南省科技攻关计划项目(0624440043)

作者简介:窦明(1975-),男,山东淄博人,郑州大学副教授,博士,主要从事水资源与水环境研究.

2 重金属迁移转化模型的建立

由于重金属是以一定比例存在于水体、悬浮物和底泥之中,因此,重金属在水体中的迁移将取决于它在这三相中的运动规律.根据文献[1],给出重金属随水、悬浮物、底泥迁移转化的基本方程组:

$$\begin{cases} \text{溶解相方程: } \frac{\partial C_d}{\partial t} + u \nabla C_d = E \cdot \nabla^2 C_d - K_1(C_w - C_d) + K_b(C_b - C_d) \\ \text{悬浮相方程: } \frac{\partial C_w}{\partial t} + u \nabla C_w = E \cdot \nabla^2 C_w + K_1(C_w - C_d) - w \frac{\partial C_w}{\partial z} \\ \text{底泥相方程: } \frac{\partial C_b}{\partial t} + q \nabla C_b = K_1(C_0 - C_d) - K_b(C_b - C_d) + w \frac{\partial C_w}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_d 、 C_w 、 C_b 分别为溶解相、悬浮相和底泥相重金属的浓度,需说明:一般 C_b 的单位 (mg/kg) 与 C_d 、 C_w 的单位 (mg/L) 不相同,为了统一,可将 C_b 乘上底泥容重 ρ_n (单位为 kg/L) 进行转换; $u = (u, v, w)$, 分别代表在 x, y, z 方向的流速分量; $E = (E_x, E_y, E_z)$, 分别代表 x, y, z 方向水体的扩散系数 (分子扩散与紊流扩散之和); $q = (q_x, q_y, q_z)$, 分别代表底泥在 x, y, z 方向迁移运动的流速矢量; $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})^T$, $\nabla^2 = (\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2})^T$; K_1 为吸附系数, 1/s; C_0 为吸附边界层溶解相浓度, mg/L; K_b 为解吸系数, 1/s; w 为综合沉降速率, $w = (1 - K)w_0$, 其中 w_0 为沉降速度, K 为再悬浮系数. 在平衡态时, 溶解相、悬浮相、底泥相重金属之间有以下关系: $C_w = f_0 C_d$, 其中 f_0 为平衡态时重金属在悬浮物和水中的分配系数, 无量纲; $C_b = f_b C_d$, 其中 f_b 为平衡态时重金属在底泥和水中的分配系数, 无量纲.

假定平衡态时溶解相重金属在水体中完全混合, 即 C_0 近似等于 C_d , 再将式(1)中溶解相方程和悬浮相方程相加, 并令 $C = C_d + C_w$, 可得到重金属随水、悬浮物迁移的总量模型, 即

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla C = E \cdot \nabla^2 C + K_b(f_b C_d - C_d) - (1 - k)w_0 \frac{\partial C_w}{\partial z} \quad (2)$$

由式(2)可见, 水体中的重金属源漏项由三部分组成: 一是底泥相重金属向水体中的解吸传质 $\bar{N}_s/h_i = K_b(f_b C_d - C_d)$; 二是悬浮相重金属的沉降 $N_g/h_i = -w_0 \frac{\partial C_w}{\partial z}$; 三是由于水流作用使底泥相重金属再悬浮进入水体 $N_s/h_i = Kw_0 \frac{\partial C_w}{\partial z}$, 这里 h_i 为 i 单元平均水深, m. 这 3 个分项的计算方法如

下:

(1) 底泥相重金属的解吸作用可表达为水体重金属浓度 C 的函数, 即

$$\frac{\bar{N}_s}{h_i} = K_b(f_b C_d - C_d) = \frac{K_b(f_b - 1)}{1 + f_0} C \quad (3)$$

(2) 悬浮相重金属的沉降 N_g 与再悬浮 N_s 是与水体中泥沙悬浮物的运动联系在一起的. 根据泥沙工程学原理, 给出水体中悬浮相重金属随水流沉降的表达式

$$\frac{N_g}{h_i} = \frac{K_w}{h_i} \cdot \frac{f_0}{1 + f_0} u^{-n} C = w_0 \frac{\partial C_w}{\partial z} \quad (4)$$

式中: K_w 为综合影响常数; u 为流速, m/s; n 为指数, 文献[1]的实验资料分析给出 $n = 2$.

(3) 对底泥再悬浮问题描述, 也可采用前述类似方法. 由此, 可获得因再悬浮作用进入水中重金属为

$$\frac{N_s}{h_i} = \frac{Ku^m C_b}{h_i} = \frac{K}{h_i} \cdot \frac{f_b}{1 + f_0} u^m C = Kw_0 \frac{\partial C_w}{\partial z} \quad (5)$$

式中: K 为再悬浮系数, 单位由 m 确定; m 为指数, 根据文献[1]给出 $m = 4$.

通过上述逐项分析, 最终确定出一维河流重金属迁移转化总量模型的具体表达式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{[K_b(f_b - 1)h_i + Kf_b u^m - Kw_0 f_0 u^{-n}]}{h_i(1 + f_0)} C \quad (6)$$

3 数值模拟

3.1 初始条件和边界条件的界定

根据佛山市环保局提供的北江镉污染事件影响范围及同步监测资料, 确定重金属模型的计算范围从北江干流飞来峡 (清远市境内) 至三水区芦苞断面 (佛山市境内), 全长 100 km, 共划分了 71 个计算断面. 时间范围取 2005 年 12 月 24 日 8:00 至 2006 年 1 月 19 日 8:00, 时间步长为 10 分钟.

模型计算时边界条件取值为:

(1) 水动力学边界条件: 上边界取为飞来峡的下泄流量值, 根据粤防总下达的八号、九号、十号调度令, 2005 年 12 月 23 日 20:00 至 2005 年 12 月 30 日 20:00 飞来峡的下泄流量调整为 $180 \text{ m}^3/\text{s}$, 此后恢复为 $160 \text{ m}^3/\text{s}$; 下边界采用佛山市环保局提供的三水站同步水位监测值.

(2) 水质边界条件: 上边界取飞来峡出水镉浓度监测值, 下边界取为镉最小监测限值 0.0005 mg/L .

初始条件取值为:

(1)水动力学初始条件:由于北江河底坡降较大,水动力模型的初始水位的赋值显得尤为重要.按照从上游至下游各计算断面的水位呈均匀递减的原则,可对飞来峡坝下和三水站的水位进行组合,使得第一计算时段的水位值与初始值相差不大.通过试算取飞来峡坝下的初始水位为 13.44 m,三水站的水位为 0.0 m,各断面均匀递减 0.192 m.初始流量设为 0.0 m³/s.

(2)水质初始条件:水质模型的初始镉浓度均设为 0.0 mg/L;水体中悬浮物浓度根据同期实测资料给出.

3.2 计算结果分析

选取监测断面飞霞旅游区、凤城大桥和石角作为模型验证断面,文献[1]赋给各参数初始值,再通过试算法最终率定出参数优选值(见表 1),水体中镉浓度计算值与实测值的拟合情况见图 2(a)~(c).

表 1 参数率定结果

Tab.1 Calibration result of parameters

符号	参数名称	率定值
K_b	解吸系数	2.6×10^{-12}
K	再悬浮系数	1.1×10^{-10}
K_w	沉降系数	9.0×10^{-10}
f_b	重金属在底泥和水中的分配系数	4×10^3
f_0	重金属在悬浮物和水中的分配系	2×10^4

根据模拟结果可见,当水体中镉浓度值较大时,重金属模型计算值与实测值拟合效果较好如图 2(a)、(b),飞霞旅游区、凤城大桥断面的计算值与实测值相对误差平均值分别为 9.7%、13.5%;而当水体中镉浓度值较低时,则拟合的效果不理想,如图 2(c),石角断面的计算值与实测值相对误差平均值为 25.4%.这是因为当水体中镉浓度值较大时,水流对重金属的输送迁移作用效果比较突出,各相态之间的转化作用相对较弱;而当水体中镉浓度值较低时,水流的输送迁移效果变弱,各相态之间的相互转化作用逐步显著,导致在交互作用下重金属的整体变化趋势比较紊乱,此外,浓度较低时水质监测的实际操作误差也增大,这也是导致计算精度变差的一个原因.

从各断面计算结果的镉浓度峰值来看,水体中的重金属镉随着水流运动由上游向下游递减.由于重金属不同常规污染物,自身不会发生衰减、降解等生化反应,只能被水流稀释或经吸附、沉降

作用将溶解相和悬浮相转变为底泥相,从而使得水体中重金属浓度降低.对比图 2 可见,各断面镉浓度峰值依次为 0.008 5 mg/L(飞霞旅游区,2006 年 1 月 13 日 2 时)、0.006 5 mg/L(凤城大桥,2006 年 1 月 13 日 8 时)、0.004 0 mg/L(石角,2006 年 1 月 14 日 8 时),这说明水体中的重金属镉随水流运动逐步沉积到底泥中.

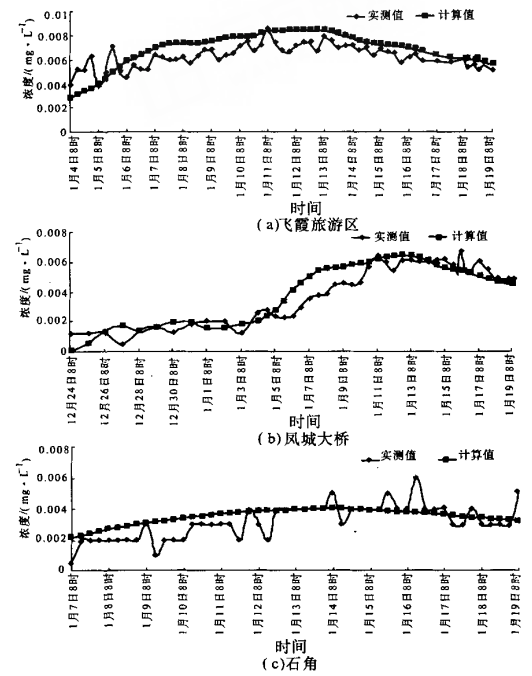


图 2 重金属型计算值与实测值比较

Fig.2 Compare on the calculated value and measured value

水体流速对重金属的迁移转化过程影响较大.当流速较小时,水体中主要以悬浮相重金属的沉降作用为主,底泥相的解吸作用和再悬浮作用累加效果小于沉降作用,因此水体中重金属浓度呈减少趋势;而当流速较大时,悬浮相重金属的沉降作用逐步减弱,底泥相的再悬浮作用逐步增强,并超越沉降作用而成为主导重金属浓度变化的首要因子,此时水体中的重金属浓度呈增长趋势.

4 结语

本文作者针对 2005 年 12 月发生在北江流域的镉污染事故,建立了一维河流重金属迁移转化模型,该模型物理概念清晰,有较好的理论基础,能从机理上表达溶解相、悬浮相、底泥相重金属之间的转化规律.结合 2005 年 12 月发生在北江的镉污染事故实测资料对模型进行了参数率定和验

证,结果发现模拟结果较准确,能反映出重金属随水流的运动和变化过程.

参考文献:

[1] 叶守泽,夏 军,郭生练,等. 水库水环境模拟预测

与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

[2] 谢东瑜. 感潮河网水污染控制研究——以佛山市水系为例[D]. 广州:中山大学,2006.

[3] 何 用,李义天. 重金属迁移转化模型研究[J]. 水科学进展,2004,15(5):576-583.

Numerical Simulation on Cadmium Pollution Emergency in North River

DOU Ming¹, MA Jun-xia¹, XIE Dong-yu², LI Xiao-hua²

(1. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In view of the cadmium pollution emergency in North River basin in Dec. 2005, one-dimension heavy metal transport and transformation model in rivers is established. Combined with the observed data of the pollution emergency, the parameters of heavy metal model are calibrated and validated. The conclusions are that the simulation effect between calculated value and observed value is rather good when the concentration value of cadmium in water is comparatively big, and the simulation effect is not ideal when the concentration value of cadmium is comparatively small. Furthermore, cadmium concentration of water body is decreased from upper reaches to lower reaches, and it shows that the heavy metal is subsided into the mud by the absorption and sedimentation actions.

Key words: North River; heavy metal; numerical simulation

(上接第 116 页)

Harmonic Analysis and Suppression of Intermediate Frequency Inductive Stove

ZHOU Yong¹, SUN Peng-tao¹, GUAN Peng²

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Changge Power Supply Company, Changge 461500, China)

Abstract: This paper discusses intermediate frequency inductive stove's principle and the damage that harmonic wave causes to the power system. Harmonic currents caused by rectifying devices are analyzed. Practical datum of Henan Jinhui Steel Plant is presented. Harmonic characteristics of stove is obvious and the content of harmonic currents is also steady, so passive power device equipped in low-voltage side of rectifier transformer should be adopted for suppression of harmonics, which consists of single tuned filter and high-pass filter. In order to reduce its influence on grid voltage, the point of common coupling which has bigger short-circuit capability should be chosen when the stove is connected to electric network.

Key words: intermediate frequency inductive stove; rectifying device; harmonic; power filter