

Health Hazard Assessment under the Cd Pollution Accident Scenarios in Longjiang River*

Ming Dou¹, Shuping Bao², Chongjie Ma¹, Guiqiu Li¹

¹College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou

²Bureau of Hydrology and Water Resources of Ningxia, Yinchuan

Email: dou_ming@163.com, douming@zzu.edu.cn

Received: Nov. 26th, 2012; revised: Dec. 12th, 2012; accepted: Dec. 21st, 2012

Abstract: Based on the Cd pollution accident in Longjiang River in 2012, one-dimensional heavy metal model is built, and its parameters are calibrated by the monitored data. According to the designed data of Cd pollution accident scenarios, the movement process of Cd in the river is simulated by the model. The assessment method of health hazard is built to assess the health hazards caused by the pollution accident. The results show that the health hazard under the real accident background on the people of Liuzhou city is little; the rise of Cd discharge intensity will increase the acute toxicity probability of the people in Liuzhou city; the rise of Cd discharge quantity and frequency will increase the chronic carcinogenesis risk of the people in Liuzhou city; and that water intake and water use actions from the 80 km long reach downward the accident place should be forbidden during the accident.

Keywords: Longjiang River; Cd Pollution; Heavy Metal Model; Health Hazard Assessment

龙江河镉污染事故情景下的健康危害评价*

窦明¹, 包淑萍², 马崇杰¹, 李桂秋¹

¹郑州大学水利与环境学院, 郑州

²宁夏水文水资源勘测局, 银川

Email: dou_ming@163.com, douming@zzu.edu.cn

收稿日期: 2012年11月26日; 修回日期: 2012年12月12日; 录用日期: 2012年12月21日

摘要: 以2012年广西龙江河镉污染事故为背景, 建立了一维重金属模型, 结合实测资料对模型进行验证; 设定多个突发镉污染事故情景, 运用重金属模型模拟镉在水体中的运移过程; 提出健康危害评价方法, 定量评价事故给柳州市带来的人群健康危害。结果表明: 在龙江河镉污染事故真实背景下对柳州市造成的健康危害较小; 镉排放强度的提高, 会增加下游柳州市居民急性中毒的几率; 镉排放总量和事故发生频次的增加, 则会加大当地居民的慢性致癌风险; 事故发生时应控制在事故地点以下80 km范围内禁止取用水。

关键词: 龙江河; 镉污染; 重金属模型; 健康危害评价

1. 引言

镉是一种常见的重金属元素, 可在生物体内富

集, 并通过食物链进入人体从而引起中毒和致癌致畸等后果。近年来我国镉污染事故频繁发生, 例如2005年12月的广东北江镉污染事故、2009年8月的湖南浏阳镉污染事故、2012年1月的广西龙江河镉污染事故等, 均对当地人群健康构成了一定的威胁。鉴于突

*基金项目: 郑州市科技攻关计划项目(0910SGYS33389-2)。

作者简介: 窦明(1975-), 男, 山东桓台人, 教授, 工学博士, 主要从事水资源与水环境研究。

发重金属污染事故呈现愈演愈烈的态势, 近年来地方政府纷纷把制定应急预案作为维护社会安全稳定的必选措施, 而掌握污染事故的发生规律、定量评价其对人体健康的危害则成为科研单位为政府提供决策支持的辅助手段。目前, 国内已将健康危害评价相关理论广泛应用于评价常规水环境污染对人体健康的影响, 如文献[1-3]就河流健康的概念、内涵、量化方法等进行了研究, 构建了河流健康评价方法体系; 文献[4-6]对饮用水源中存在的有毒有害物质所带来的健康风险进行了评价。但是, 如何评估重金属污染事故造成的危害, 是一个需要进一步探讨的问题。本文以龙江河镉污染事故为背景, 通过建立一维重金属模型和健康危害评价方法, 来定量评价镉污染事故给柳州市居民造成的健康危害。

2. 突发镉污染事故情景模拟

2012年1月15日, 广西龙江河拉浪水电站网箱养鱼出现死鱼现象, 经有关部门监测龙江河拉浪河段重金属镉超标80倍, 水体中的镉来自于上游河池市某企业排放的工业废水, 被污染的河段主要为龙江河东江镇断面至三岔镇断面约130 km的范围(如图1)。龙江河为柳江支流, 在柳州市柳城县与融江交汇, 其下游称为柳江, 而柳江又是柳州市的重要饮用水水源。龙江河镉污染对下游300余万人口的柳州市饮水安全造成了威胁。由于当地政府及时采取“弱碱性化学沉淀应急除镉技术”等应急措施, 絮凝沉降了水体中大部分镉离子, 故事件未造成恶劣影响。

为了能再现此次事故对柳州市供水水源的影响、

诠释事故可能引发的后果, 本文首先构建了重金属模型, 结合实测资料对模型进行了验证, 进而设计不同的镉污染事故情景, 通过重金属模型模拟和分析镉污染团对下游柳州市各水厂正常供水的影响。

2.1. 重金属模型的建立

作者曾在文献[7]中提出一种描述重金属在河流中迁移转化的数学模型, 其数学表达式由描述水动力运动过程的圣维南方程组和描述重金属迁移转化机理的水质基本方程组成^[7]:

连续方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (gA - Bu^2) \frac{\partial h}{\partial x} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} = u^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z - gu \frac{|Q|}{\zeta^2 R} \quad (2)$$

水质基本方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{[K_b(f_b - 1)h + Kf_b u^m - K_w f_\theta u^{-n}]}{h(1 + f_\theta)} C \quad (3)$$

式中: h ——断面水深, m; Q ——流量, m^3/s ; A ——断面面积, m^2 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; B ——过水宽度, m; q ——旁侧入流流量, m^3/s ; u ——流速, m/s ; R ——水力半径, m; ζ ——谢才系数, m/s ; C ——重金属的浓度, mg/l ; E_x —— x 方向上的扩散系数, m^2/s ; K_b ——解吸系数, $1/s$; K ——再悬浮系数; K_w ——



Figure 1. Scheme of the Cd pollution accident in Longjiang River in 2012
图1. 龙江河12.1镉污染事故示意图

沉降系数; f_{θ} ——平衡态时重金属在悬浮物和水体的分配系数; f_b ——平衡态时重金属在底泥和水体的分配系数; m 、 n ——指数, 此处给定 $n = 2.0$, $m = 4$ ^[2]。

重金属模型采用隐式差分法进行离散, 并用追赶法来进行求解。其计算范围从龙江河、融江汇合处至柳州市柳东水厂取水口, 全长 43.6 km, 划分为 19 个断面, 空间步长为 2~3 km。时间范围取 2012 年 1 月 25 日 14:00~2 月 21 日 16:00, 计算的时间步长为 2 h。计算时的水动力和水质条件取事故发生时的实测背景资料以及珠江水利网公布的柳江柳州站同期流量资料。

选取监测断面露塘、新圩和柳西水厂作为模型验证断面, 参考文献[7]赋予各参数初始值, 再通过试算法最终率定出参数优选值。参数率定结果如下: $K_b = 2.6 \times 10^{-12}$, $K = 1.7 \times 10^{-7}$, $K_w = 1.4 \times 10^{-6}$, $f_b = 4 \times 10^3$, $f_{\theta} = 2 \times 10^4$ 。

由图 2 可见, 上游露塘和新圩断面拟合较好, 下游柳西水厂断面拟合效果不太理想。露塘断面实测峰值为 0.0050 mg/l, 同时刻计算值为 0.0053 mg/l, 相差仅 0.0003 mg/l, 计算值与实测值的相对误差平均值为 16%, 而新圩断面和柳西水厂断面的相对误差分别为 21%和 25%。下游断面相对误差偏大主要是因为污染水体从污染源到验证断面时, 镉浓度值相对较低, 水流的输送迁移效果变弱, 重金属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较紊乱。此外, 在镉浓度较低时水质监测的实际操作误差增大和龙江河水动力资料的缺乏也是导致计算精度变差的原因之一^[7]。

2.2. 突发镉污染事故情景模拟

参照龙江河镉污染事故的背景资料来设计事故情景, 不过为了突出事故对柳州市的威胁程度, 将地点设定在龙江河与融江汇合处, 具体设计如下: 假设该地点有一污染源从 1 月 25 日 14:00 开始连续均匀地向河流排放含镉的工业废水, 排放强度在一定时间内保持稳定, 其后停止排污, 各情景下的镉排放总量和排放持续时间见表 1; 河道内的水动力学条件与模型验证时保持一致。

将水动力、水质条件代入建立的重金属模型, 模拟出下游柳西水厂断面的镉浓度变化过程(如图 3),

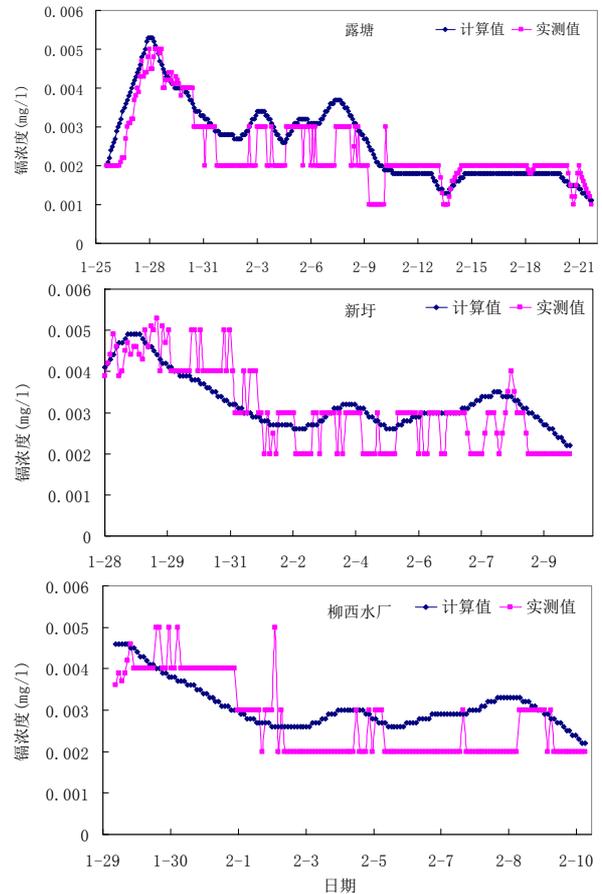


Figure 2. Comparison of observed values and computed values by heavy metal model
图 2. 重金属模型计算值与实测值比较

Table 1. The characteristic value of pollution accident under the designed scenarios
表 1. 设计情景下的污染事故特征值表

情景编号	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
镉排放总量(t)	60	60	60	150	300
排放持续时间(d)	7	2	0.25	2	2
镉浓度最大值(mg/l)	0.425	1.364	2.754	3.402	6.805
镉浓度超标历时(d)	9.7	5.0	4.2	5.4	5.7

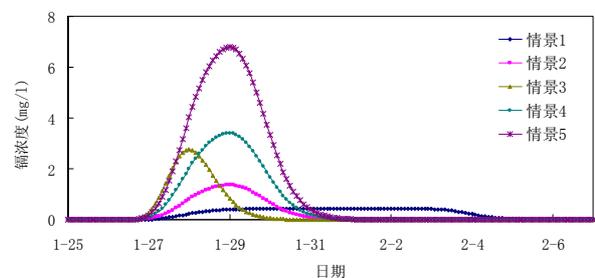


Figure 3. Cd concentration values in Liuxi waterworks under the designed scenarios
图 3. 设计情景下的柳西水厂镉浓度变化过程图

各情景下的镉浓度最大值和超标历时(超过III类水的累计时间长度)见表 1。对比各情景下的模拟结果发现: 在龙江河镉污染事故真实背景下, 由于原污染源距离柳州市较远, 途中经过及时的应急处理和融江来水的大量稀释, 故当污染团进入柳州市时水体中的镉浓度未超标。在设计情景中, 污染源位置下移到龙江河与融江交汇处, 对柳州市水源地的威胁程度明显加大。当镉排放总量一定时, 排放持续时间越短, 水体中镉浓度峰值越高, 镉浓度变化过程曲线越陡峭, 而且浓度峰值来得也较早。情景 1~3 下的镉浓度最大值从 0.425 mg/l 增加到 2.754 mg/l, 超标历时则从 9.7 d 减少到 4.2 d。而当排放持续时间一定时, 镉浓度变化过程曲线形状类似, 且曲线峰值到来的时间也比较接近, 但镉排放总量越大, 曲线的峰值就越高, 反之亦然。情景 2、4、5 下由于排放持续时间相同, 故超标历时变化不大, 但镉浓度最大值却依次为 1.364、3.402、6.805 mg/l, 随着镉排放总量的增加而增大。

3. 健康危害评价

在模拟了事故发生时镉的时空分布过程后, 再进一步地评价事故对柳州市人群带来的健康危害。

3.1. 健康危害评价方法介绍

镉是一种毒性很大的重金属, 其对人体的危害可分为急性中毒和慢性致癌两个方面, 震惊世界的日本“骨痛病事件”就是因为镉中毒所致。根据环境卫生学、毒理学原理, 突发污染事故由于有毒有害物质浓度高、历时短, 对人体健康造成的危害要大于暴露同等剂量下的低浓度、长历时的持续排污过程所造成危害。因此, 本文从以下两方面来探讨镉污染事故对人体的健康危害: 一是要判别事故是否会引起急性中毒, 这主要通过设定临界中毒剂量来实现。在参考文

献[8]的基础上, 给定镉通过口服途径导致人体急性中毒的临界剂量为 10 mg/d。二是要评价镉在体内累积所带来的致癌风险, 此时假定人群短期内暴露于高剂量有害物质与终生持续暴露于低剂量有害物质的后果相同, 并以终生累计平均每日暴露量来表示^[8]。

镉对人体产生的致癌风险, 可通过下面建立的健康风险评价模型计算得出^[8]:

$$R_{Cd} = [1 - \exp(-D\eta)] / A \quad (4)$$

式中: R_{Cd} ——镉通过口入途径所造成的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; D ——镉通过口入途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; η ——镉通过口入途径的致癌系数, $\eta = 6.1, (kg \cdot d)/mg$; A ——人类平均寿命, $A = 70 a$ 。

污染事故发生时, 镉单位体重日均暴露剂量 D 的计算公式如下:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (W \times \bar{C}_i) \times F}{G \times T} \quad (5)$$

式中: \bar{C}_i ——事故期间水体的镉日平均浓度, mg/l ; W ——人均日饮水量, $W = 2.2, L/d$; F ——一生中(以 70a 计)污染事故的可能发生次数, 按只发生一次来计; G ——柳州市人均体重, $G = 70, kg$; T ——平均暴露时间, d ; n ——突发污染事故对水体的影响时间, d 。

3.2. 评价结果分析

根据重金属模型模拟的不同情景下柳州市各水厂断面镉浓度过程, 计算出人体对镉的最大日口服剂量, 进一步通过临界中毒剂量来判别是否会引起中毒现象; 同时, 由式(5)计算出镉单位体重日均暴露剂量, 再通过式(4)评价全市 5 家水厂所对应供水区域内的个人致癌年风险 R_{Cd} , 由 R_{Cd} 乘以水厂供水区域人数得出年致癌人数 P_{Cd} (如表 2)。

Table 2. The result of health risk assessment under different scenarios
表 2. 不同情景下的健康危害评价结果

评价指标*	真实情景	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
个人致癌年风险/ a^{-1}	7.21×10^{-9}	3.26×10^{-7}	3.24×10^{-7}	3.23×10^{-7}	8.07×10^{-7}	1.61×10^{-6}
年致癌人数/人	0.01	0.47	0.46	0.46	0.92	2.31
最大口服剂量/ $mg \cdot d^{-1}$	0.010	0.957	2.869	4.031	7.155	14.310
是否引起急性中毒	否	否	否	否	否	是

*注: 评价指标取全市的平均值或合计值。

在综合比较国际辐射防护委员会、美国国家环保局、荷兰建设和环境部等国际机构现已制定的饮用水源个人年风险可接受程度范围基础上, 给定城市的个人年风险最大可接受水平 $R_{\max} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 再结合表2评价结果, 定量分析突发镉污染事故给柳州市造成的健康危害, 结论如下:

1) 在龙江河镉污染事故真实情景下, 由于上游来水已达标, 事故未造成柳州市居民急性中毒和慢性致癌后果。柳州市各水厂控制区域的个人最大日口服剂量为 0.010 mg/d , 远小于人体镉急性中毒的临界剂量 10 mg/d ; 个人致癌年风险 R_{Cd} 为 7.21×10^{-9} , 小于可接受水平 R_{\max} , 同时事故造成的全市年致癌总人数 P_{Cd} 仅为 0.01 人, 说明其慢性危害也非常小。导致此次事故危害程度较低的主要原因, 与事故地点距离柳州市区较远、途中又有融江来水稀释等有关。

2) 镉排放强度的提高, 是增加下游柳州市居民急性中毒几率的主要原因。对比情景 1~3 的评价结果, 尽管排污总量一样, 但排放强度较高的情景 3 的居民最大日口服剂量 (4.031 mg/d) 大于排放强度较小的情景 1 (0.957 mg/d); 再对比情景 2、4、5 也可得出类似结论。但需要说明的是, 其中只有情景 5 的最大日口服剂量超过了急性中毒的临界剂量, 会引起居民急性中毒的后果。

3) 镉排放总量是引发当地居民慢性致癌风险的主要因素, 而排放强度对其影响则不显著。在相同排放量的情景 1~3 下, 个人致癌年风险 R_{Cd} 相差不大; 而在情景 2、4、5 下的 R_{Cd} 值分别为 3.24×10^{-7} 、 8.07×10^{-7} 、 1.61×10^{-6} , 排放总量越大, 慢性致癌风险也就越大。尽管情景 1~5 下的个人致癌年风险均没有超过最大可接受水平 R_{\max} , 但值得注意的是, 污染事故发生频率的增加会显著提高人体的致癌风险。假设突发镉污染事故频率为 $1\text{a}/\text{次}$ (即 $F = 70$), 则个人致癌年风险 R_{Cd} 达到 $1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 此时 $R_{\text{Cd}} > R_{\max}$, 全市年致癌人数也增加到了 184.54 人。因此, 避免镉污染事故频繁发生也是降低慢性致癌风险的重要环节。

4) 污染源位置和是否有其他河流汇入也是影响下游城市居民健康风险的重要因素。龙江河镉污染事故的污染源在河池市金城江区, 河池市水厂在污染源上游, 基本没有受到影响; 其下游宜州市是距离污染源最近的城市, 但宜州市水厂不在龙江河上取水, 所

以事故对其影响也很小; 再往下的柳州市水厂直接从柳江取水, 但由于取水口距离污染源已较远, 此间又有融江来水的稀释以及对受污染水体的应急处理, 故事故对柳州市水源地造成的危害较小。然而, 一旦污染事故发生在柳州市区河段, 则引发的后果将十分严重。根据研究发现, 如果再发生同等级别的镉污染事故, 至少需要经过 70~80 km 的河段才能使水体中的镉浓度下降到一个较低的水平, 因此, 事故发生时应控制在事故地点以下 80 km 范围内禁止取用水。

4. 结语

随着今后经济社会的进一步发展, 诱发污染事故的因素将会增加, 这又会导致人群健康风险进一步加大, 因此必须切实做好城市饮用水源地的水污染防治工作, 其中建立水环境模拟与预警系统以及实施健康风险评价是一项重要的手段和措施。本文通过将一维重金属迁移转化模型、健康风险评价理论和情景分析法等多种手段的有效结合, 实现了对突发镉污染事故的健康危害评价, 对于今后指导柳州市开展饮用水源地保护工作具有重要指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 杨文慧, 杨宇. 河流健康概念及诊断指标体系的构建[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 28-30.
YANG Wenhui, YANG Yv. Concept and assessment indicator system of river health. Water Resources Protection, 2006, 22(6): 28-30. (in Chinese)
- [2] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 23-27.
CAI Shouhua, HU Xin. Concept of river health and index system for its evaluation. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2008, 28(1): 23-27. (in Chinese)
- [3] 杨文慧, 严忠民, 吴建华. 河流健康评价的研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 607-611.
YANG Wenhui, YAN Zhongmin and WU Jianhua. Advances in river health assessment. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(6): 607-611. (in Chinese)
- [4] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 47-50.
GAO Jijun, ZHANG Liping, HUANG Shengbiao, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing. Environmental Science, 2004, 25(2): 47-50. (in Chinese)
- [5] 耿福明, 薛联青, 陆桂华, 等. 饮用水源水质健康危害的风险度评价[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1242-1245.
GENG Fuming, XUE Lianqing, LU Guihua, et al. Water quality health-hazard risk assessment on drinking water supply sources. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1242-1245. (in Chinese)
- [6] 张映映, 冯流, 刘征涛. 长江口区域水体半挥发性有机污染物健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 18-23.

- ZHANG Yingying, FENG Liu and LIU Zhengtao. Health risk assessment on semivolatile organic compounds in water of Yangtze estuary area. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1): 18-23. (in Chinese)
- [7] 窦明, 马军霞, 谢平, 等. 河流重金属污染物迁移转化的数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(3): 22-25.
- DOU Ming, MA Junxia, XIE Ping, et al. Numerical simulation for the transformation process of heavy metal contamination transport in rivers. *Water Resources and Power*, 2007, 25(3): 22-25. (in Chinese)
- [8] 窦明, 马军霞, 毕宏伟, 李桂秋. 北江突发镉污染事故的健康危害评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(6): 655-659.
- DOU Ming, MA Junxia, BI Hongwei and LI Guiqiu. Health hazard assessment of emergent cadmium pollution accidents in Beijiang River. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(6): 655-659. (in Chinese)