

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.009

北江突发镉污染事故的健康危害评价

窦 明¹, 马军霞¹, 毕宏伟², 李桂秋¹

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001 ; 2. 水利部长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要 : 以西、北江河网区为研究对象, 建立一维重金属模型, 设定北江上游突发镉污染事故背景资料, 运用重金属模型模拟镉在河网区的运移过程, 提出健康危害评价方法, 定量评价事故给佛山市带来的健康危害。结果表明, 现状情况下突发镉污染事故给佛山市造成的致癌风险尚可接受, 但事故引起的急性中毒危害要远大于慢性致癌危害, 污染事故频率的增加会提高人体的致癌风险, 事故发生时应在事故地点以下 50 km 范围内禁止取水。

关键词 : 镉污染, 突发污染事故, 重金属模型, 健康危害, 北江, 佛山市

中图分类号 : X522 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2009)06-0655-05

与常规的点源、面源污染不同, 突发污染事故具有随机性和灾害性的特点, 能在短期内迅速影响周边水环境系统。据文献 [1] 统计, 在 1993 ~ 2004 年间全国共发生环境污染事故 21 152 起, 其中特重大事故 374 起, 重大事故 566 起, 污染事故发展态势不容乐观。近年来, 地方政府纷纷把制定突发污染事故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, 国内已将健康风险评价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 [2-4] 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 [5-7] 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, 如何评价突发性水环境污染事故所造成的健康危害, 却是一个需要进一步探讨的问题。本文以佛山市城市供水系统和河网水系为对象, 通过建立西、北江河网区一维重金属模型和健康危害评价方法, 来定量评价突发污染事故带来的健康危害。

1 突发镉污染事故情景模拟

本文以佛山市西、北江河网水系为研究对象。佛山市位于广东省中南部, 珠江三角洲腹地, 面积 3 848 km², 人口 541.2 万人, 由禅城、南海、顺德、三水、高明 5 个区构成。佛山市自然条件和地理位置优越, 是珠三角地区工业化、城市化快速发展的典型。至 2005 年, 全市具有资质的大小水厂有 52 家, 其中从西、北江河网取水的有 37 家, 总设计制水能力为 422.27 万 m³/d。西江和北江是珠江流域的两大主要水系, 在佛山市境内的思贤滘和甘竹溪交汇, 是佛山市重要的饮用水源地和航运通道。西江干流在佛山市境内长 69.1 km, 有支流河道 11 条; 北江干流在佛山市境内长 100.2 km, 主要支流河道有 13 条。为了能描述水污染事故发生时各水厂断面的污染物质浓度过程, 本文首先采用情景分析法设定事故情景, 再运用重金属迁移转化模型模拟污染物在西、北江河网区的迁移转化过程。

1.1 重金属模型的建立

河网区一维重金属迁移转化模型由描述水动力学运动过程的圣维南方程组和描述重金属在水体中迁移转化规律的水质基本方程组成 :

连续方程
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \tag{1}$$

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

收稿日期 : 2008-09-15
基金项目 : 国家自然科学基金(50679075)、郑州市科技攻关计划(083SGYC26122-6)
作者简介 : 窦明(1975—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士, 主要从事水资源与水环境研究。

水质基本方程
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{[K_b(f_b - 1)h + K_f u^m - K_w f_\theta u^{-n}]}{h(1 + f_\theta)} C \tag{3}$$

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 ——重金属的质量浓度， mg/L ； E_x —— x 方向上的扩散系数； K_b ——解吸系数， $1/s$ ； K ——再悬浮系数； K_w ——沉降系数； f_θ ——平衡态时重金属在悬浮物和水体中的分配系数； f_b ——平衡态时重金属在底泥和水体中的分配系数； m, n ——指数，此处给定 $n = 2, m = 4^{[8]}$ 。

重金属模型采用隐式差分法离散，并用追赶法求解。模型计算的上游边界取北江的飞来峡水库和西江的高要水文站；下游边界取黄埔、三沙口、南沙等水位站和潮位站。计算的时间范围为 2005 年 12 月 24 日~2006 年 1 月 19 日。根据佛山市环保局提供的 2005 年 12 月发生北江镉污染事件时的同步水动力学与水质监测资料，对重金属模型进行参数率定和验证。选取监测断面凤城大桥作为验证断面，镉质量浓度计算值与实测值的拟合情况见图 1，参数率定结果如下： $K_b = 2.6 \times 10^{-12}$ ， $K = 1.1 \times 10^{-10}$ ， $K_w = 9.0 \times 10^{-10}$ ， $f_b = 4000$ ， $f_\theta = 20000$ 。由图 1 可见，模型的计算值与实测值的拟合情况较好，能较好地反映镉随水流的运移过程。

1.2 情景模拟与分析

突发污染事故情景参照北江镉污染事故的背景资料设计，只是事故地点设定在北江中游清远市与佛山市交界处。具体设计如下：假设该地点有一家冶炼厂突然排放高浓度含镉工业废水，排污量为 10000 t，废水中镉质量浓度为 100 mg/L，排放过程持续 4 h。其他的水动力学条件、水质条件均与模型验证时保持一致。将设计的条件代入所建立的重金属模型，模拟出西、北江河网区各断面的镉质量浓度过程，选取部分断面的计算结果绘制质量浓度过程如图 2 所示。

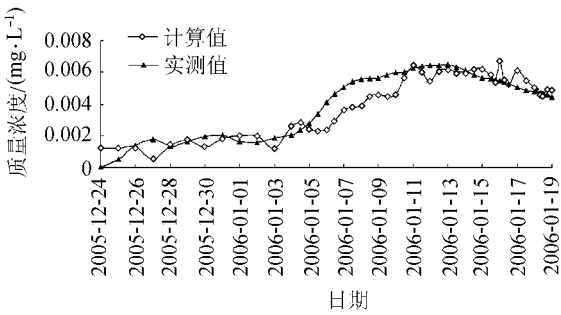


图 1 凤城大桥重金属模型计算值与实测值比较
Fig. 1 Comparison between observed and computed values of heavy metal model for Fengcheng Bridge

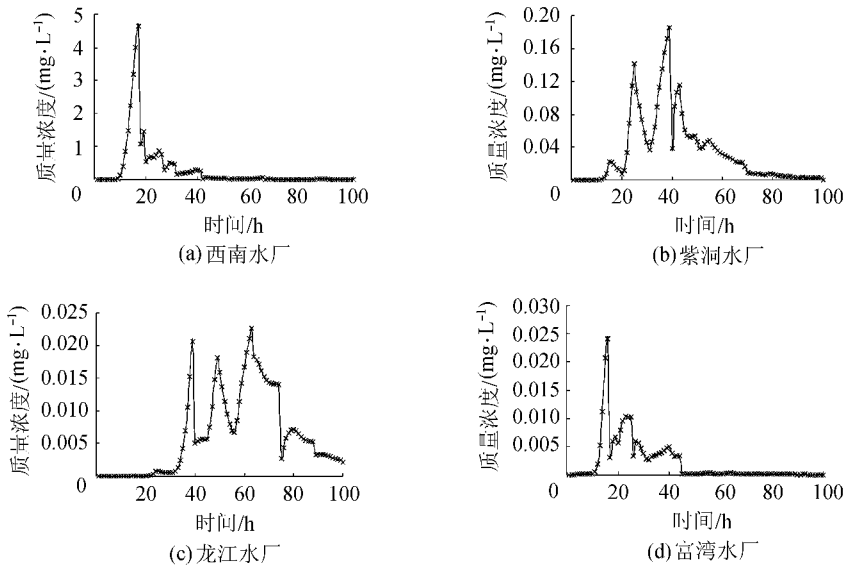


图 2 北江突发镉污染事故模拟结果

Fig. 2 Simulated results of emergent cadmium pollution accidents in Beijiang River

从模拟结果可见，水体中镉质量浓度随着水流运动自上游向下游迅速递减。由于水体中的悬浮物和底泥对镉表现出较强的亲合力，因此镉通过吸附作用吸附到悬浮物上，并进一步通过沉降作用下沉到底泥中，由此使得悬浮物和底泥中的镉质量浓度升高，而水体中溶解态的镉减少。位于北江干流上的大塘水厂、芦苞水厂、南边水厂断面，由于距事故地点较近，因此镉质量浓度值很高，以上断面的镉质量浓度峰值都超过 10 mg/L。当镉污染物下移到西江与北江交汇的思贤癘时，由北江上游下来的污水一部分通过思贤癘涌入西

江,致使西江水体被污染,镉质量浓度升高,而剩余污水则继续沿着北江干流向下游迁移.此后,河网区下游河道内的水流在潮汐作用下往复震荡,使得镉能较快沉降(流速越小,悬浮相重金属的沉降作用越明显),质量浓度值快速降低.至北江上的羊额水厂、陈村水厂断面以及西江上的富湾水厂断面,镉质量浓度峰值已满足Ⅴ类水质标准(即质量浓度小于或等于 0.01 mg/L);至北江上的桂州水厂断面以及西江上的星槎水厂断面,镉质量浓度峰值已满足Ⅰ类水质标准(即质量浓度小于或等于 0.001 mg/L).

2 健康危害评价

在模拟了事故发生时镉的时空分布过程后,再进一步评价事故对佛山市人群带来的健康危害.

2.1 健康危害评价方法

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方面.震惊世界的日本“骨痛病事件”就是因为镉中毒所致.镉进入人体后会慢慢在肾脏和骨骼中富集,并取代骨骼中的钙,使骨骼严重软化.此外,镉还会干扰人体和生物体内的酶系统,引起内脏功能失调,进而引发癌变畸变.

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同等剂量下低浓度、长历时的持续排污过程所造成危害.因此,本文从两方面来探讨镉污染事故对人体健康的危害:一是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.在文献[9-11]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.

镉对人体产生的致癌风险,可通过以下健康风险评价模型计算得出:

$$R_{Cd} = (1 - e^{-D\eta})/Y \tag{4}$$

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, $\eta = 6.1 (kg \cdot d)/mg$; Y ——人类平均寿命, $Y = 70 a$.

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:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (WC_i)F}{GT} \tag{5}$$

式中: $\bar{C}_i$ ——事故期间水体的镉日平均质量浓度, mg/L ; W ——人均日饮水量, $W = 2.2 L$; F ——一生中(以 70 a 计)污染事故的可能发生次数, $F = 70/f$, f 为污染事故发生频率, $a/次$; G ——佛山市人均体重, $G = 55 kg$; T ——平均暴露时间, d ; n ——突发污染事故对水体的影响时间, d .

根据笔者前期研究成果^[12],佛山市由于工业废水排放引起的突发污染事故频率为 20 a/次.此外,还选取事故频率 1 a/次、100 a/次与之进行比较.

2.2 评价结果分析

根据重金属模型模拟的各水厂断面镉质量浓度过程,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)计算出不同事故发生频率下的镉单位体重日均暴露剂量,再通过式(4)评价全市 37 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} .受篇幅限制,表 1 列出了受突发事故影响较大的代表性水厂的健康风险评价结果.

表 1 不同污染事故频率下的健康风险评价结果

Table 1 Results of health risk assessment with different frequencies of pollution accidents								
水 厂	R_{Cd}/a^{-1}			$P_{Cd}/人$			最大口服剂量/ ($mg \cdot d^{-1}$)	是否引起 急性中毒
	$f = 100 a/次$	$f = 20 a/次$	$f = 1 a/次$	$f = 100 a/次$	$f = 20 a/次$	$f = 1 a/次$		
大 塘	4.51×10^{-6}	1.58×10^{-5}	3.12×10^{-4}	0.14	0.49	9.76	52.25	是
芦 苞	2.21×10^{-6}	7.74×10^{-6}	1.54×10^{-4}	0.10	0.35	6.91	19.17	是
南 边	1.92×10^{-6}	6.73×10^{-6}	1.34×10^{-4}	0.05	0.17	3.36	25.88	是
石塘、西南、健力宝*	1.68×10^{-7}	5.87×10^{-7}	1.17×10^{-5}	0.06	0.20	3.92	2.06	否
小塘、南海第二*	3.49×10^{-8}	1.22×10^{-7}	2.44×10^{-6}	0.02	0.06	1.29	0.33	否
沙 口	1.58×10^{-8}	5.53×10^{-8}	1.11×10^{-6}	0.01	0.02	0.42	0.14	否

* 注:多个水厂共用一个取水口.

在综合比较国际辐射防护委员会(ICRP)、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后,给定佛山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1评价结果,定量分析突发镉污染事故给全市造成的健康危害,可得如下结论:

a. 现状情况下,突发镉污染事故给佛山市造成的致癌风险尚可接受.当事故发生频率为20 a/次时(近似于现状情况),仅大塘水厂的 $R_{\text{Cd}} > R_{\max}$,芦苞、南边水厂的 R_{Cd} 接近 $R_{\max}$,其他水厂的 R_{Cd} 均较小,对人体的长期健康不构成威胁.由于大塘、芦苞、南边3个水厂位于佛山市的上游河段,其供水人群较少(合计10.1万人),因此事故造成的年致癌总人数也较少,全市仅1.29人/a.

b. 事故引起的急性中毒危害要远大于其对人体造成的慢性致癌危害.根据模拟结果显示,事故造成南边水厂以上近40 km的江段镉质量浓度严重超标,大塘、芦苞、南边3个水厂的日平均质量浓度最大值分别达到23.8 mg/L、8.7 mg/L、11.8 mg/L,大大超过水厂正常供水的0.001 mg/L标准.如果事故期间继续供水,则沿岸居民的最大口服剂量分别达到52.25 mg/d、19.17 mg/d、25.88 mg/d,均超过人体急性中毒的临界剂量10 mg/d,因此会引起当地居民中毒事件发生.

c. 污染事故频率的增加会提高人体的致癌风险.当事故发生频率为100 a/次时,各水厂的个人致癌年风险 R_{Cd} 均小于 $R_{\max}$,全市年致癌总人数仅0.37人/a,由此可见在事故频率极低的情况下(近似于只发生一次),污染事故对人体健康所造成的慢性致癌危害并不显著.当事故发生频率为1 a/次时,大塘、芦苞、南边3个水厂的致癌风险将大大提高, R_{Cd} 超过了 $1.0 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 风险水平,而石塘、金沙、紫洞等7个水厂的 R_{Cd} 虽然小于 $R_{\max}$,但也超过 $1.0 \times 10^{-6} \text{a}^{-1}$ 风险水平,全市年致癌总人数则增加为25.67人/a,可见如果镉污染事故的发生频率过高,必将严重威胁佛山市的人群健康,个人年致癌风险大大增加.

d. 由于事故地点设定在佛山市境外,因此事故造成的危害要相对小一些,其危害范围主要是位于上游的大塘、芦苞、南边3个水厂.然而,一旦事故发生在佛山市区,则引发的后果将更加严重.研究发现,如果发生同等级别的镉污染事故,至少需要经过40~50 km的河段才能使水体中的镉质量浓度下降到较低的水平,因此,事故发生时应在事故地点以下50 km范围内禁止取水.

3 结 语

随着今后佛山市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,因此必须切实做好佛山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.本文通过将河网区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,实现了对北江突发镉污染事故的健康危害评价,对于今后指导佛山市开展饮用水源地保护工作具有重要指导意义.

参考文献:

- [1] 潘红波,王梅,高宇.开展环境风险评价防范突发污染事件[J].环境保护科学,2006,32(4):63-65.(PAN Hong-bo, WANG Mei, GAO Yu. Developing environmental risk assessment to prevent sporadic pollution accident[J]. Environmental Protection Science, 2006, 32(4): 63-65. (in Chinese))
- [2] 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 Wen-hui, YANG Yu. Concept and assessment indicator system of river health[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6): 28-30. (in Chinese))
- [3] 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 Shou-hua, HU Xin. Concept of river health and index system for its evaluation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2008, 28(1): 23-27. (in Chinese))
- [4] 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 Wen-hui, YAN Zhong-min, WU Jian-hu. Advances in river health assessment[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(6): 607-611. (in Chinese))
- [5] 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 Ji-jun, ZHANG Li-ping, HUANG Sheng-biao, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing[J]. Environmental Science, 2004, 25(2): 47-50. (in Chinese))
- [6] 耿福明,薛联青,陆桂华.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 Fu-ming,

XUE Lian-qing , LU Gui-hua. Water quality health-hazard risk assessment on drinking water supply sources[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2006 , 37(10) : 1242-1245.(in Chinese))

[7] 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 Ying-ying , FENG Liu , LIU Zheng-tao. Health risk assessment on semivolatile organic compounds in water of Yangtze estuary area[J]. Research of Environmental Sciences , 2007 , 20(1) : 18-23.(in Chinese))

[8] 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.

[9] 秦俊法 , 李增禧. 镉的人体健康效应[J]. 广东微量元素科学 2004 , 11(6) : 1-10.(QIN Jun-fa , LI Zeng-xi. The effect of cadmium on human health[J]. Guangdong Trace Elements Science 2004 , 11(6) : 1-10.(in Chinese))

[10] 吴红赤 , 杨谦 , 于海涛 , 等. 单次大剂量镉致急性肾损伤的实验研究[J]. 中国伤残医学 2007 , 15(6) : 1-3.(WU Hong-chi , YANG Qian , YU Hai-tao , et al. Empirical study of single large dose of cadmium-induced acute renal injury[J]. Chinese Journal of Trauma and Disability Medicine 2007 , 15(6) : 1-3.(in Chinese))

[11] 杜瑜 , 尚琪. 环境镉污染人群健康影响研究回顾[J]. 卫生研究 2006 , 35(2) : 241-243.(DU Yu , SHANG Qi. Review of effect on human health for environmental cadmium pollution[J]. Journal of Hygiene Research 2006 , 35(2) : 241-243.(in Chinese))

[12] 窦明 , 李晓华 , 谢平. 佛山市饮用水源地突发污染事故应急预案[R]. 佛山 : 佛山市环境保护局 2006.

Health hazard assessment of emergent cadmium pollution accidents in Beijiang River

DOU Ming¹ , MA Jun-xia¹ , BI Hong-wei² , LI Gui-qiu¹

(1. College of Water Conservancy and Environment , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China ;
2. Hydrology Bureau , Changjiang Water Resources Commission , Wuhan 430010 , China)

Abstract : The river network of the Xijiang River and Beijiang River was taken as the research object. A one-dimensional heavy metal model was established. The design data of emergent cadmium pollution accidents in the upper reaches of the Beijiang River were determined , and the motion processes of the cadmium in the river network were simulated using the heavy metal model. Methods for health hazard assessment were proposed to quantitatively assess the health hazards caused by the pollution accidents in Foshan City. The results show that the carcinogenic risk of the emergent cadmium pollution accidents to the residents of Foshan City under the current conditions is acceptable , but the hazard of acute poisoning is much greater than that of chronic carcinogenesis. The increase of the frequency of occurrence of emergent pollution accidents will raise the carcinogenic risk. When an emergent accident happens , water intake and use within a range of 50 km downstream of the accident site should be prohibited.

Key words : cadmium pollution ; emergent pollution accident ; heavy metal model ; health hazard ; Beijiang River ; Foshan City