

水质风险评价在跨界水污染预警体系中的应用

李二平^{1,2}, 侯 嵩¹, 孙胜杰¹, 敖红光¹, 尤 宏¹, 冯玉杰¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, youhong@hit.edu.cn;
2. 东北林业大学 生物质能工程技术中心, 哈尔滨 150040)

摘 要: 在构建跨界水环境污染事故预警指标体系中, 针对突发事件中污染物浓度的非稳态特征, 对 EPA 推荐的水质健康风险评价模型进行了修正, 并将其作为一项重要预警指标. 利用松花江硝基苯污染和北江镉污染这两个近年典型跨界水环境污染事件的历史数据, 进行了水质健康风险表征. 结果表明, 修正后的风险评价模型可操作性强, 可快速定量描述突发性环境污染事件对公众健康的潜在危害程度, 为跨界突发性水污染事件预警与应急处置的科学决策提供依据.

关键词: 水质健康风险; 跨界; 预警; 指标体系

中图分类号: X503.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)06-0963-04

Application of water quality health risk assessment in the trans-boundary water pollution accidents forecasting index system

LI Er-ping^{1,2}, HOU Song¹, SUN Sheng-jie¹, AO Hong-guang¹, YOU Hong¹, FENG Yu-jie¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, youhong@hit.edu.cn; 2. Biomass Energy Technology Engineering Centre, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The water quality health risk assessment model is usually applied to the evaluation of the drinking water quality and sudden water pollution accidents. In the course of establishing the index system of trans-boundary paroxysmal water pollution accidents, for the non-steady state features of characteristic pollutants concentration, the traditional water quality health risk assessment model of EPA was modified as to be a significant index of our forecasting system. On the basis of this, the water quality health risk of two typical trans-boundary water pollution accidents: the nitrobenzene pollution of Songhua River and the cadmium pollution of North River, was calculated by utilizing the historical data. The results show that the modified model can describe the potential harmful levels to human health quickly and quantitatively, which provides the scientific evidence for trans-boundary paroxysmal water pollution accidents forecasting and its emergency treatment.

Key words: water quality health risk; trans-boundary; forecasting; index system

水质健康风险评价模型在上世纪 80 年代兴起, 最初用于评价饮用水水源地的人体健康风险. 1986 年, 美国华盛顿环境保护饮用水中心的 C. R. Cothorn^[1]等以饮用水中的 TCE (Trichloroethylene) 为例, 进行了致癌风险评估, 并给出 TCE 浓度和影响寿命之间的关系. 1988 年, Donald G.

Barnes 等联合美国 EPA 研究组^[2], 共同针对 RfD 参考暴露剂量 (Reference Dose) 在健康风险评价中的应用做了相关研究, 用 RfD 对污染物的持久性和毒性进行了新的描述, 并给出 RfD 的计算方法. 美国的 Dennis J. Paustenbach^[3]运用水质健康风险模型对农药使用对农业的影响进行了评价, 并给出多种农药的使用上限. 1996 年, Michael L. Dourson^[4]针对非致癌性污染物进行风险评价, 对如何减小由参数 RfD、RfC 导致的不确定性的影响进行了相关研究. 1999 年, M. V. Ruby 等^[5], 运用该模型对重金属铅、镉等进行计算, 并给出了几

收稿日期: 2010-03-01.

基金项目: 国家高技术研究发展计划重大资助项目 (2008AA06A411).

作者简介: 李二平 (1980—), 男, 博士研究生;

尤 宏 (1961—), 男, 教授, 博士生导师;

冯玉杰 (1966—), 女, 教授, 博士生导师.

种重金属的口服剂量标准. 随着水质风险评价的日臻成熟, M. F. Dahab^[6], Ronald E. Giachetti^[7], E. Kentel^[8] 等针对评价中浓度、饮水量、体重等的不确定性, 采用高斯正态分布模型和三角模糊函数, 对传统水质健康风险评价模型进行修正, 使评价结果更具可靠性.

我国从上个世纪 90 年代起, 就有了应用水质健康风险评价模型的先例. 曾光明等应用该模型对河北保定饮用水源进行了评价^[9], 尝试性地将其应用在突发性水环境风险评价模型事故泄漏行为的模拟分析中^[10]. 近几年, 我国学者^[11] 对水质健康风险评价中的不确定因素进行研究, 以三角模糊函数完善传统水质健康风险评价模型, 对真实情况中浓度随时间和空间不断变化的水质进行风险评价, 使水质健康风险评价模型在我国的应用取得较大进展.

本文针对跨界突发性水污染事故的特点, 利用 PSR 模型初步构建跨界水污染事故预警指标体系. 重点考虑对跨界区域可能遭受污染的水源地的保护, 对 EPA 推荐的水质健康风险评价模型进行修正, 将水质健康风险作为跨界污染事故预警指标之一, 用于事故危害等级的判定. 此外, 利用松花江硝基苯和北江镉两组近年典型跨界水污染事件的历史数据, 分别对特征污染物进行水质健康风险表征, 以验证其作为跨界水污染事故的一个预警指标的必要性和科学性.

1 跨界突发性水污染事故预警指标体系的建立

1.1 跨界突发性水污染事故的定义及特点

跨界突发性水污染事故^[12] 是指一个地区 A 的水环境受到另一个地区 B 所实施的行为(如自然灾害、机械故障、人为因素及其他不确定因素所引发的突然排放污染物)的直接影响而造成的水环境污染事故. 这种跨界污染是一种物理外部性, 不包括通过价格或收入等间接效应对 A 产生的影响. 这里所说的“界”, 既包括国与国的分界, 也包括一个国家境内具有一定自治权的省或市或县之间.

与常规水污染事故不同, 跨界突发性水污染事故具有以下 3 个特点: 1) 事故发生、发展、危害不确定性, 应急主体不明确; 2) 污染往往发生在行政辖区的边界地带, 关系到不同行政辖区的利益, 影响范围常常涉及相邻国、省、市. 3) 事故环境风险波及范围广, 风险表征涉及的因素复杂.

1.2 跨界突发性水污染事故预警指标体系

对跨界突发性水污染事故进行评估与预警,

可以有效地界定事故可能对流域下游跨界行政区域带来的危害大小, 从而启动相应的预案, 将损失减少到最小.

PSR 模型最初由 Tony Friend 和 David Rapport 提出, 用于分析环境压力、状态与响应之间的关系, 是目前国内外在生态评价、环境质量评价和水资源承载力评价应用最广泛的指标体系之一^[13]. 对于突发性水污染事故, 人为因素导致污染物进入水体带来环境压力激增, 环境状态剧烈改变, 引起人类做出应急响应, 除了演进速度的差异, 它与生态评价中的 PSR 模型有着一致的内在逻辑. 本文基于 PSR 模型, 从事务压力, 事故状态和事故响应 3 方面选取了 9 个指标, 构建了跨界突发性水污染事故预警指标体系(见图 1).

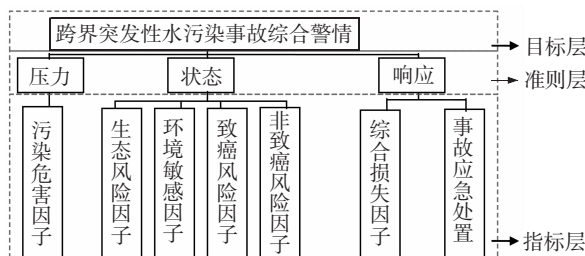


图 1 跨界突发性水污染事故预警指标体系 PSR 结构图

1) 压力指标. 选取污染危害因子, 即跨界区域特征污染物的超标倍数作为压力指标.

2) 状态指标. 描述污染对需要保护的环境目标所带来的不良影响. 选取生态风险因子和环境敏感因子, 以及人体健康风险(致癌风险和非致癌风险)因子作为状态指标.

3) 响应指标. 跨界突发水污染事故引起人类响应的方式包括停止城镇供水, 停止渔业, 跨界污染事故应急处置等, 因此, 选取综合损失因子和事故应急处置作为响应指标.

在跨界突发性水污染事故预警指标体系中, 各个指标对事故综合警情的影响程度不同. 通过专家咨询和层次分析, 发现准则层的状态指标权重远远大于响应与压力指标, 在状态层中的水质健康风险指标(即致癌风险因和非致癌风险因子)权重最大, 需要重点考虑.

2 跨界污染水质健康风险评价方法的建立

2.1 水质健康风险评价的基本模型

进行水质健康风险评价通常将污染物分为致癌和非致癌两类分别进行评价, 据 2001 年美国环保局^[14] 的推荐, 致癌风险的风险值(A_{risk})以及非

致癌风险的风险值(B_{hi})分别由下式计算:

$$A_{risk} = 1 - \exp(-W_{cdi} \times C_{sf}), \tag{1}$$

$$B_{hi} = W_{cdi}/W_{rdi}. \tag{2}$$

式中: C_{sf} 为污染物的致癌斜率因子($\text{mg}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{d}$), W_{rdi} 为污染物的参考剂量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$). 均可参考美国 IRIS 数据库^[15]获取.

W_{cdi} 为长期日摄入量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 经由饮水途径暴露的长期日摄入量 W_{cdi} 为

$$W_{cdi} = \frac{c \times W_{ir} \times f_{ef} \times t_{ed}}{\bar{W} \times \bar{t}}.$$

其中: c 为介质中致癌物质的质量浓度(mg/L), W_{ir} 为成人每日饮用水量(L/d), f_{ef} 为暴露频率(d/a), t_{ed} 为暴露延时(a), $\bar{W}$ 为人均体重(kg), $\bar{t}$ 为平均暴露时间(d).

2.2 水质健康风险评价模型修正

跨界突发性水污染事故发生后, 污染物的浓度不断地随着时间、空间的变化而变化. 针对这一特性, 许多学者曾采用高斯分布模型和三角模糊函数等方法对浓度进行数值模拟. 由于三角模糊函数法可操作性较强, 计算结果可靠性高, 故本文采用三角模糊函数法对特征污染物的浓度进行修正, 以得到特征污染物浓度的远程变化规律.

取污染事故发生后特征污染物浓度 c 的三角模糊函数, 令 $c = (c_1, c_2, c_3)$ (其中 c_1, c_2, c_3 均大于 0), 其对应的 α^- 截集为 $\tilde{c}^\alpha$. 这里借助 α^- 截集技术, 将三角模糊数转化为与同一可信度水平 α ($\alpha \in [0, 1]$) 相对应的区间数, 此时 W_{cdi} 计算公式转化为

$$W_{cdi} = \frac{\tilde{c}^\alpha \times W_{ir} \times f_{ef} \times t_{ed}}{\bar{W} \times \bar{t}},$$

则致癌风险(式(1))修正后为

$$A_{risk} = \frac{\tilde{c}^\alpha \times W_{ir} \times f_{ef} \times t_{ed}}{\bar{W} \times \bar{t}} \times c_{sf}, \tag{3}$$

非致癌风险(式(2))修正后为

$$B_{hi} = \frac{\tilde{c}^\alpha \times W_{ir} \times f_{ef} \times t_{ed}}{\bar{W} \times \bar{t} \times W_{rdi}}. \tag{4}$$

根据三角模糊函数法修正后得到的公式(3), (4)进行污染物健康风险计算, 可得到特征污染物在最大可信度时的健康风险值, 其结果更接近真实值, 更具有科学性.

3 跨界污染事故水质健康风险评价应用实例

应用水质健康风险模糊评价模型, 针对松花江硝基苯污染和北江镉污染这两个近年来典型跨界

突发性水污染事故的历史数据进行了实证分析.

3.1 松花江硝基苯污染事件

以肇源地区为黑龙江与吉林的省分界线, 利用表 1 的监测数据^[16]分别计算出硝基苯浓度平均值和标准差. 以平均值 c 作相对最可能值, $c - 2\alpha$ 和 $c + 2\alpha$ 做 $\tilde{c}$ 的下限和上限, 则 $c = (0, 0.14, 0.52)$, $\tilde{c}^\alpha = [0.14\alpha, -0.38\alpha + 0.52]$. 将 $\tilde{c}^\alpha$ 带入式(4)得

$$B_{hi} = \frac{[0.14\alpha, -0.38\alpha + 0.52] \times W_{ir} \times f_{ef} \times t_{ed}}{\bar{W} \times \bar{t} \times W_{rdi}}. \tag{5}$$

式中: W_{ir} 、 f_{ed} 、 $\bar{W}$ 、 $\bar{t}$ 分别取 EPA 推荐值. 因可信度 $\alpha \in [0, 1]$, 则当 $\alpha = 1$ 时对应的为最可能风险值, 将各个数值带入式(5), 得硝基苯的非致癌风险值 $B_{hi} = 2.7 \times 10^{-4}$.

表 1 肇源地区水质监测数据

监测时间/(月-日)	11-17	11-20	11-21
硝基苯质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.002 3	0.105 2	0.494 5
监测时间/(月-日)	11-23	11-24	12-11
硝基苯质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.086 6	0.001 5	0.000 4

3.2 北江镉污染事件

利用 2006 年 12 月 15 日起北江内镉污染带的监测数据^[17](表 2), 进行三角模糊处理后, 按照式(3)进行计算, 得到镉的致癌风险值 $A_{risk} = 1.8 \times 10^{-8}$.

表 2 2006 年 1 月 1 日起北江镉污染带水质监测数据

监测时间/(月-日)	12-15	01-01	01-02	01-03	01-04
镉质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.019	0.018	0.018	0.017	0.014
监测时间/(月-日)	01-05	01-06	01-07	01-09	01-14
镉质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.013	0.010	0.062	0.004	0.001

由计算结果可知, 在硝基苯污染事件中, 尽管硝基苯为非致癌污染物, 但由于其暴露浓度高, 暴露时间长, 其风险值仍然高达 $2.7 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 远超过国际辐射防护委员会推荐的最大可接受限值 10^{-6} a^{-1} , 因此, 硝基苯污染对肇源周边人口的人体健康构成很大风险. 而在北江镉污染事件中, 镉为致癌污染物, 但其暴露时间较短, 初始浓度较小, 故其风险值为 $1.8 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 小于 10^{-6} a^{-1} , 故对周围人口的健康影响较小.

4 结 论

1) 提出了跨界突发性水污染事故预警指标

体系的概念,并构建了指标体系框架,水质健康风险评价为预警指标体系计算中的一项重要指标,对评估污染事故级别十分关键.

2)针对跨界突发性污染事故中污染物随时间和空间的变化而变化的特点,对传统的水质健康风险评价利用三角模糊函数法进行修正.根据修正后的公式进行两个实例计算,结果表明,硝基苯的非致癌风险值远远超过国际接受的限值,从而提升了污染事故危害级别.重金属镉为致癌污染物,但污染事故中致癌风险值在可接受限制内,对本次污染事故危害级别的提升贡献不大.由此表明健康风险评价的结果对事故危害级别的判定有着不可忽视的影响.

3)对水质健康风险进行评价,可定量地描述环境污染对公众健康危害的程度.评价的结果为跨界突发性水污染事故应急处置与科学决策提供了依据.

参考文献:

- [1] COTHERN C R, CONIGLIO W A, MARCUS W L. Estimating risk to human health[J]. *Environ Sci Technol*, 1986, 20(2): 111 – 116.
- [2] BARNES D G, DOURSON M. Reference Dose(RfD): description and use in health risk assessment[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1988 (8): 471 – 486.
- [3] PAUSTENBACH D J. The risk assessment of environmental and human health hazard: a textbook of case studies[M]. New York: Wiley, 1989: 797 – 842.
- [4] DOURSON M L, ROBINSON D. Evolution of science-based uncertainty factors in noncancer risk assessment[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1996, 24: 108 – 120.
- [5] RUBY M V, SCHOOF R. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. 1999, 33,(21): 3697 – 3706.
- [6] DAHAB M F, LEE Y W, BOGARDI I. A rule-based fuzzy-set approach to risk analysis of nitrate-contaminated groundwater[J]. *Wat Sci Tech*, 1994, 30, (7): 45 – 52.
- [7] GIACHETTIA R E, YOUNG R E. A parametric representation of fuzzy numbers and their arithmetic operators[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997 (91): 185 – 202.
- [8] KENTEL E, ARAL M M. 2D Monte Carlo versus 2D fuzzy Monte Carlo health risk assessment[J]. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2005, 19: 86 – 96.
- [9] 曾光明,卓利. 水环境健康风险评价模型[J]. *水科学进展*, 1998, 9(3): 212 – 217.
- [10] 曾光明,卓利. 突发性水环境风险评价模型事故泄漏行为的模拟分析[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(5): 403 – 406.
- [11] 李如忠. 基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评价[J]. *水利报*, 2007, 38(8): 895 – 500.
- [12] 陈玉清. 跨界水污染治理模式的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [13] 吴克宁,关小克. 基于 PSR 模型的郑州市生态环境质量灰色预警[J]. *河南农业科学*, 2007 (6): 83 – 89.
- [14] EPA U S. Risk assessment guidance for superfund: volume 32 process for conducting probabilistic risk assessment chapter 1, part A[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response U. S. EPA, 2001.
- [15] TUXEN L. 美国 IRIS 数据库[DB/OL]. 2009 – 05 – 21 [2010 – 02 – 20]. <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>.
- [16] 中华人民共和国环境保护部. 松花江水污染通报[R]. [2010 – 02 – 20] <http://www.zhb.gov.cn/ztbdt/shj>.
- [17] 黄晓东,张金松. 广东北江镉污染应急处理技术与工程实践[J]. *供水技术*, 2007, 1(2): 25 – 27.

(编辑 杨 波)