

祝慧娜, 袁兴中, 曾光明, 等. 2009 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1527– 1533
Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, *et al*. 2009 An integrated fuzzy model based on interval numbers for assessment of environmental health risks of water sources[J]. A cta Scientiae Circum stantiae, 29(7): 1527– 1533

基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型

祝慧娜, 袁兴中*, 曾光明, 江洪炜, 梁婕, 赵宁宁, 张钊

湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082
收稿日期: 2008-10-24 修回日期: 2009-02-19 录用日期: 2009-05-13

摘要: 利用区间数表示水环境中污染物浓度的不确定性, 构建了基于区间数的河流水环境健康风险评价模型. 同时, 采用专家咨询法建立模糊化的风险评价标准体系, 将风险评价标准分为低、低-中、中、中-高、高和极高 6 个风险等级, 并运用一级综合评判法得出健康风险评价的等级. 最后, 选取 Cd、As、Hg、Pb、CN、NH₃ 和挥发酚为评价因子, 将基于区间数和模糊理论的河流水环境健康风险模糊综合评价模型应用于 2005~2007 年湘江长株潭段的水环境健康风险评价中. 评价结果表明, 2005~2007 年湘江长株潭段的水环境健康风险水平较高; 株洲和湘潭段的个人年风险值较大. 其中, 五星断面的个人年风险最高, 儿童的个人年风险明显高于成人的个人年风险; 2006 年朱亭镇、霞湾、三汊矶和樟树港 4 个断面上个人年风险略有增高, 2007 年各断面的健康风险水平有所降低.

关键词: 区间数; 模糊化; 隶属度; 健康风险评价

文章编号: 0253-2468(2009) 07-1527-07 中图分类号: X824 文献标识码: A

An integrated fuzzy model based on interval numbers for assessment of environmental health risks of water sources

ZHU Huina, YUAN Xingzhong*, ZENG Guangming, JIANG Hongwei, LIANG Jie, ZHAO Ningning, ZHANG Zhao

College of Environmental Science and Engineering Hunan University, Changsha 410082
Received 24 October 2008 **received in revised form** 19 February 2009; **accepted** 13 May 2009

Abstract A fuzzy assessment model was developed to describe environmental health risks from water sources. The model uses interval numbers to represent contaminant concentration uncertainties and expert consultation to establish the risk assessment system. In the system, the risks were classified into six levels of “low”, “low-medium”, “medium”, “medium-high”, “high” and “very-high”. Single-level comprehensive assessment was used to obtain the level of health risk assessment. On the basis of the interval numbers and fuzzy theory, an integrated fuzzy model for environmental health risk assessment of water sources was developed, and the model was used to assess the health risks associated with the Xiangjiang River in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area. The selected parameters were Cd, As, Hg, Pb, CN, NH₃ and volatile phenols. The results showed that the environmental health risk level of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan reaches was quite high from 2005 to 2007. The individual annual health risk of the Zhuzhou reaches and Xiangtan reaches were higher than that of the Changsha reaches, and the greatest individual annual health risk appeared in the Wuxing section. The annual health risk for an individual child was significantly higher than that for an individual adult. In 2006, the individual annual health risk in some sections was higher than that in 2005, while in 2007 the individual annual health risk in all of the sections was reduced.

Keywords interval numbers; fuzzy membership degree; health risk assessment

1 引言 (Introduction)

水环境健康风险评价是把水环境污染与人体健康联系起来的评估方法 (钱家忠等, 2004). 国内外已对它的计算方法和应用进行了大量的研究

(Furlong *et al*, 1995; Steinemann *et al*, 2000; Shakhavat *et al*, 2006; 何星海等, 2006). 当前, 国内外有关水环境健康风险问题的研究, 大多从确定性角度进行评价 (Dante *et al*, 2005; Schwab *et al*, 2005; Kentel *et al*, 2005; 陈鸿汉等, 2006; 李如忠

等, 2007). 事实上, 由于水环境健康风险评价系统中包含了大量不确定性因素 (Muddassir *et al.*, 2006; Kentele *et al.*, 2005; 陈鸿汉等, 2006), 而这些不确定性因素的来源、类型和性质等较为复杂 (张应华等, 2007). 对健康风险评价系统中不确定信息的忽视, 很有可能产生错误的结果 (Li *et al.*, 2007). 因此, 在健康风险评价过程中必须要充分考虑评价过程中存在的不确定性因素.

随着对不确定性因素的认识, 已有学者运用蒙特卡洛算法成功地解决了水环境中参数的不确定性问题, 并将建立的综合风险评价模型运用于暴露评价中 (Goodrich *et al.*, 1995; Batchebret *et al.*; Bennett *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 1994; 何理等, 2002; Guyonne *et al.*, 2003; 徐敏等, 2004; Li *et al.*, 2007). 而利用区间数来处理不确定性问题的研究报道还较少. 当一个问题的原始数据存在不确定性, 且知其包含在给定的界限范围内时, 就可用区间数来表示, 并可通过区间数运算求得该问题未知解的界限. 同时, 运用区间数分析求解不确定性问题, 能够减少人为因素的影响. 因此, 用区间数来表示水环境中污染物的浓度, 能够较好地反应污染物浓度的不确定性. 本文通过建立基于区间数的水环境健康风险模糊综合评价模型, 对评价标准进行模糊化分级并对各个等级赋值, 运用一级综合评判法得出健康风险评价的等级, 最后将该模型应用于 2005~2007 年湘江长株潭段的水环境健康风险评价中. 旨在解决评价过程中因污染物浓度变化而引起的不确定性, 建立新的风险评价标准体系, 为长株潭城市群“两型社会”建设在湘江水污染控制方面提供科学依据.

2 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型 (An integrated fuzzy model for assessment of environmental health risk of water sources based on interval numbers)

2.1 基于区间数的水环境健康风险评价模型

国际癌症研究机构 (IARC) 通过全面评价水体中化学有毒污染物的可靠性程度将污染物分为两类: 基因毒物质 (包括化学致癌物和放射性污染物) 和躯体毒物质 (非致癌化学有毒物质) (曾光明等, 1998; 钱家忠等, 2004). 区间数是指实数轴上的一个闭区间, 它是一个特殊的模糊数 (扬纶标等, 2001). 本文将区间数应用到水环境健康风险评价中, 建立了基于区间数的水环境健康风险评价模型

(为表示方便, 文中以“ $\leftarrow$ ”表示区间数).

基于区间数的化学致癌物健康危害风险 ($\leftarrow R^c$) 模型如下所示:

$$\leftarrow D_i = W \leftarrow C_i A \quad (1)$$

$$\leftarrow R_i^c = [1 - \exp(-\leftarrow D_i Q_i)] / 70 \quad (2)$$

$$\leftarrow R^c = \sum_{i=1}^k \leftarrow R_i^c \quad (3)$$

式中, $\leftarrow R_i^c$ 为化学致癌物 i (共 k 种化学致癌物) 经食入途径的个人平均致癌年风险值 (a^{-1}); Q_i 为化学致癌物 i 经食入途径的致癌强度系数 ($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$); $\leftarrow C_i$ 为水环境中化学致癌物 i 的浓度, 取值区间为当年污染物浓度的最低值和最高值 (mg L^{-1}); A 为人体体重, 成人 70 kg, 儿童 10 kg (USEPA, 1997); 70 为人类平均寿命 (a); W 为日平均饮水量, 成人 2.2 L, 儿童按 1.0 L 计 (USEPA, 1997); $\leftarrow D_i$ 为化学致癌物或躯体毒物质 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量 (mg kg^{-1}).

基于区间数的躯体毒物质的健康危害风险 ($\leftarrow R^n$) 模型表达如下:

$$\leftarrow R_j^n = (\leftarrow D_j \times 10^{-6} / RfD_j) / 70 \quad (4)$$

$$\leftarrow R^n = \sum_{j=1}^m \leftarrow R_j^n \quad (5)$$

式中, $\leftarrow R_j^n$ 为躯体毒物质 j (共 m 种躯体毒物质) 经食入途径所致健康危害的个人平均年风险 (a^{-1}); RfD_j 为躯体毒物质 j 经食入途径的参考剂量 ($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$); $\leftarrow D_j$ 为躯体毒物质经食入途径的单位体重日均暴露剂量 ($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$).

水环境中化学有毒污染物总的健康危害风险 ($\leftarrow R_{\text{总}}$) 模型为:

$$\leftarrow R_{\text{总}} = \leftarrow R^c + \leftarrow R^n \quad (6)$$

2.2 风险评价标准的模糊化分级及评判

模糊化一般应用于不确定性大而且信息量较少的情况, 此时, 可以用逻辑语言对参数进行描述 (Li *et al.*, 2007). 为了更好地确定风险水平的等级, 根据专家意见将风险评价标准进行模糊化分级, 在数学模型中用 $[a_1, b_1]$ $[a_2, b_2]$ $[a_3, b_3]$... $[a_n, b_n]$ 来表示不同的风险标准等级, 并对各个等级赋值.

设有区间为 $[a, b]$ 的风险值, 则 $[a, b]$ 对 $[a_i, b_i]$ 的隶属度可以定量表示:

$$A(l) = \frac{|[a, b] \cap [a_i, b_i]|}{|[a, b]|} \quad (7)$$

式中, $\cap$ 表示两个区间的交集; $|[a, b]|$ 表示区间的几

何长度; $[a_l, b_l]$ 表示评价标准的第 l 个等级, $l=1, 2, \dots, n$; $A(l)$ 表示 $[a, b]$ 对 $[a_l, b_l]$ 的隶属度.

由式 (7)得到 $[a, b]$ 对各个等级的隶属度后, 根据一级综合评判得出 $[a, b]$ 的总风险值 (R), 见式 (8).

$$R = \sum_{l=1}^l A(l) \cdot V(l)$$

(8)

式中, $V(l)$ 为各等级的赋值.

3 研究实例 (Case study)

3.1 研究区域概况

长株潭地区工业企业众多, 该地区工业企业废水大部分都直接或者经处理后排入湘江, 致使湘江长株潭段水质逐渐受到污染. 2005年两岸污水排放量 $9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均每天污水排放量约 $2.60 \times 10^6 \text{ m}^3$. 2007年 12月 14日长株潭城市群被批准为“两型社会”建设综合配套改革试验区. “两型社会”建设当中, 湘江水质的评价和改善是极其重要的部分.

本次健康风险评价主要选取了湘江长株潭段共 6个断面, 其中, 株洲、长沙和湘潭各取 2个, 分别为朱亭镇、霞湾、五星、昭山、三汊矶和樟树港, 断面分布如图 1所示.



图 1 长株潭及采样断面分布图

Fig. 1 Map of Chang-Zhu-Tan reaches of the Xiangjiang River and the section sites

3.2 参数的确定

本文的评价因子包括化学致癌物 Cd, As, 非化学致癌物 Hg, Pb, CN, NH₃和挥发酚, 各评价因子的监测值范围见表 1.

表 1 2005~ 2007 年湘江水质监测值范围

Table 1 Water quality data range of Xiangjiang River from 2005 to 2007

断面	Cd	As	Hg	Pb	CN	NH ₃	挥发酚
朱亭镇	[0.1, 6.2]	[3, 45]	[0.01, 0.05]	[0.19, 8]	[1, 9]	[105, 2549]	[1, 3]
霞湾	[0.1, 33]	[3, 42]	[0.02, 0.23]	[0.21, 1]	[1, 8]	[232, 3239]	[1, 34]
五星	[0.3, 21.4]	[1, 92]	[0.01, 0.13]	[0.10, 7]	[2, 14]	[37, 2340]	[1, 24]
昭山	[0.2, 6.5]	[3, 30]	[0.02, 0.09]	[1, 6]	[2, 32]	[120, 1570]	[1, 15]
三汊矶	[0.1, 4.9]	[4, 31]	[0.02, 0.09]	[1, 4]	[2, 4]	[130, 2990]	[1, 4]
樟树港	[0.1, 5]	[1, 22]	[0.01, 0.07]	[2, 3]	[2, 4]	[176, 2364]	[1, 2]

根据国际癌症研究机构 (IARC)和世界卫生组织 (WHO)编制的权衡化学物质致癌性可靠程度体系, Cd和 As分别属于 1组和 2A 组的化学物质, 为化学致癌物, 其致癌强度系数 Q_i (饮水途径)分别为 $6.1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $15 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Hg, Pb, CN, NH₃和挥发酚为非化学致癌物质, 其参考剂量 RD_j (饮水途径)分别是 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $14 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $3.7 \times 10^{-2} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $9.7 \times 10^{-1} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 以及 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

3.3 风险评价标准的模糊化分级

风险的概念本质上是模糊的, 它们之间找不到明确的边界, 从差异的一方到另一方, 中间经历了一个从量变到质变的连续过渡过程. 例如, 国际防

辐射委员会 (ICRP)推荐的最大可接受风险值为 5.0×10^{-5} (曾光明等, 1997), 而 EPA 认为在 10^{-4} 级别之内的风险值都是可以接受的 (高继军等, 2004), 若风险介于二者的标准之间, 将难以判定风险的等级. 模糊语言和模糊逻辑在一定程度上解决了这一问题. 采用模糊隶属度和模糊语言方法, 可以将数值形式的风险定级转化成语言的表达方式, 使风险评价的结果一目了然.

本文运用模糊化原理, 采用专家咨询法, 将风险评价标准区间分为 6个等级: $C_1 = \{ \text{I 低风险} \}$; $C_2 = \{ \text{II 低-中风险} \}$; $C_3 = \{ \text{III 中风险} \}$; $C_4 = \{ \text{IV 中-高风险} \}$; $C_5 = \{ \text{V 高风险} \}$; $C_6 = \{ \text{VI 极高风险} \}$, 并对各个等级进行赋值 (表 2).

表 2 评价标准的等级与分值

Table 2 Levels and values of the assessment standards		
风险级别	评价标准区间	评价分值
I 级风险	[1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-5}]	1
II 级风险	[1.0×10^{-5} , 5.0×10^{-5}]	2
III级风险	[5.0×10^{-5} , 1.0×10^{-4}]	3
IV级风险	[1.0×10^{-4} , 5.0×10^{-4}]	4
V 级风险	[5.0×10^{-4} , 1.0×10^{-3}]	5
VI级风险	[1.0×10^{-3} , 5.0×10^{-3}]	6

3 4 不确定性健康风险评价

运用基于区间数的水环境健康风险评价模型, 计算得出 2005~ 2007年湘江各断面化学有毒污染物通过饮水途径对成人和儿童造成的平均个人年风险总值, 计算结果如表 3所示.

由表 3可知, 6个断面中霞湾和五星断面的个人年风险值较其他断面略高, 五星断面个人年风险值最高, 说明霞湾和五星附近工业废水和生活污水排放严重, 该处水环境质量亟待改善. 同时, 2006年

表 3 有毒污染物所致健康危害的总风险 (个人年风险)

Table 3 Total health risk from all carcinogens and non-carcinogens for one person							a ⁻¹
断面	成人 2005	成人 2006	成人 2007	儿童 2005	儿童 2006	儿童 2007	
朱亭镇	[3.391×10^{-5} , 3.168×10^{-4}]	[5.405×10^{-5} , 1.800×10^{-4}]	[2.046×10^{-5} , 2.743×10^{-4}]	[1.076×10^{-4} , 9.864×10^{-4}]	[1.713×10^{-4} , 5.658×10^{-4}]	[6.501×10^{-5} , 8.555×10^{-4}]	
霞湾	[3.391×10^{-5} , 4.032×10^{-4}]	[4.734×10^{-5} , 2.935×10^{-4}]	[2.046×10^{-5} , 1.468×10^{-4}]	[1.076×10^{-4} , 1.257×10^{-3}]	[1.501×10^{-4} , 9.149×10^{-4}]	[6.501×10^{-5} , 4.622×10^{-4}]	
五星	[6.856×10^{-5} , 3.341×10^{-4}]	[7.555×10^{-6} , 6.648×10^{-4}]	[7.007×10^{-6} , 1.722×10^{-4}]	[2.170×10^{-4} , 1.040×10^{-3}]	[2.403×10^{-5} , 2.027×10^{-3}]	[2.228×10^{-5} , 5.417×10^{-4}]	
昭山	[4.789×10^{-5} , 2.118×10^{-4}]	[4.090×10^{-5} , 2.107×10^{-4}]	[2.074×10^{-5} , 1.595×10^{-4}]	[1.518×10^{-4} , 6.646×10^{-4}]	[1.297×10^{-4} , 6.608×10^{-4}]	[6.589×10^{-5} , 5.019×10^{-4}]	
三汊矶	[2.746×10^{-5} , 1.941×10^{-4}]	[3.391×10^{-5} , 2.157×10^{-4}]	[2.719×10^{-5} , 1.792×10^{-4}]	[8.720×10^{-5} , 6.097×10^{-4}]	[1.076×10^{-4} , 6.761×10^{-4}]	[8.633×10^{-5} , 5.630×10^{-4}]	
樟树港	[7.008×10^{-6} , 1.411×10^{-4}]	[3.391×10^{-5} , 1.515×10^{-4}]	[2.719×10^{-5} , 1.240×10^{-4}]	[2.229×10^{-5} , 4.449×10^{-4}]	[1.076×10^{-4} , 4.768×10^{-4}]	[8.633×10^{-5} , 3.910×10^{-4}]	

各断面风险水平与 2005 年相比, 下降趋势并不明显, 朱亭镇、霞湾、三汊矶和樟树港 4 个断面甚至呈现上升趋势, 而 2007年各断面风险水平下降趋势明显. 出现这种现象的原因可能是 2006 年的“1• 6湘江株洲段镉污染事件”导致该段及下游段水质在短

时间内急剧恶化以致使 2006年的风险水平增高. 运用区间数隶属度的计算公式 (7), 可以得到各监测断面不同风险水平对各个评价标准等级的隶属度值 (表 4表 5).

表 4 有毒污染物所致成人健康危害总风险的隶属度

Table 4 The membership degree of total health risk from all carcinogens and non-carcinogens for one adult			
断面	2005 年	2006 年	2007 年
朱亭镇	$\frac{0.057}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.177}{\text{中}} + \frac{0.766}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.365}{\text{中}} + \frac{0.635}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.116}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.197}{\text{中}} + \frac{0.687}{\text{中}-\text{高}}$
霞湾	$\frac{0.044}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.135}{\text{中}} + \frac{0.821}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.011}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.203}{\text{中}} + \frac{0.786}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.234}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.396}{\text{中}} + \frac{0.370}{\text{中}-\text{高}}$
五星	$\frac{0.118}{\text{中}} + \frac{0.882}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.141}{\text{中}} + \frac{0.609}{\text{中}-\text{高}} + \frac{0.250}{\text{高}}$	$\frac{0.018}{\text{低}} + \frac{0.242}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.303}{\text{中}} + \frac{0.437}{\text{中}-\text{高}}$
昭山	$\frac{0.013}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.305}{\text{中}} + \frac{0.682}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.054}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.294}{\text{中}} + \frac{0.652}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.211}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.360}{\text{中}} + \frac{0.429}{\text{中}-\text{高}}$
三汊矶	$\frac{0.135}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.300}{\text{中}} + \frac{0.565}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.089}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.275}{\text{中}} + \frac{0.636}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.150}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.329}{\text{中}} + \frac{0.521}{\text{中}-\text{高}}$
樟树港	$\frac{0.022}{\text{低}} + \frac{0.298}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.373}{\text{中}} + \frac{0.307}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.137}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.425}{\text{中}} + \frac{0.438}{\text{中}-\text{高}}$	$\frac{0.236}{\text{低}-\text{中}} + \frac{0.516}{\text{中}} + \frac{0.248}{\text{中}-\text{高}}$

表 5 有毒污染物所致儿童健康危害总风险的隶属度

Table 5 The membership degree of total health risk from all carcinogens and non-carcinogens for one child

断面	2005 年	2006 年	2007 年
朱亭镇	$\frac{0.447}{中-高} + \frac{0.553}{高}$	$\frac{0.833}{中-高} + \frac{0.167}{高}$	$\frac{0.044}{中} + \frac{0.506}{中-高} + \frac{0.450}{高}$
霞湾	$\frac{0.341}{中-高} + \frac{0.435}{高} + \frac{0.224}{极高}$	$\frac{0.458}{中-高} + \frac{0.542}{高}$	$\frac{0.088}{中} + \frac{0.912}{中-高}$
五星	$\frac{0.344}{中-高} + \frac{0.607}{高} + \frac{0.049}{极高}$	$\frac{0.012}{低-中} + \frac{0.025}{中} + \frac{0.200}{中-高} + \frac{0.250}{高} + \frac{0.513}{极高}$	$\frac{0.054}{低-中} + \frac{0.096}{中} + \frac{0.770}{中-高} + \frac{0.080}{高}$
昭山	$\frac{0.679}{中-高} + \frac{0.321}{高}$	$\frac{0.697}{中-高} + \frac{0.303}{高}$	$\frac{0.078}{中} + \frac{0.917}{中-高} + \frac{0.005}{高}$
三汊矶	$\frac{0.024}{中} + \frac{0.766}{中-高} + \frac{0.210}{高}$	$\frac{0.690}{中-高} + \frac{0.310}{高}$	$\frac{0.029}{中} + \frac{0.839}{中-高} + \frac{0.132}{高}$
樟树港	$\frac{0.066}{低-中} + \frac{0.118}{中} + \frac{0.816}{中-高}$	$\frac{1}{中-高}$	$\frac{0.045}{中} + \frac{0.955}{中-高}$

根据表 4 表 5 以及各个风险等级的分值, 由式 (8) 求得不确定性模型下有毒污染物所致健康危害总风险水平 (表 6).

表 6 有毒污染物健康危害总风险水平等级

Table 6 The level of total health risk from all carcinogens and non-carcinogens for one person

断面	成人			儿童		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007
朱亭镇	IV	IV	IV	V	IV	IV
霞湾	IV	IV	III	V	V	IV
五星	IV	IV	III	V	V	IV
昭山	IV	IV	III	IV	IV	IV
三汊矶	IV	IV	III	IV	IV	IV
樟树港	III	III	III	IV	IV	IV

由表 6 可知, 2005~ 2007 年各断面健康风险水平最低为 II 级, 最高出现了 V 级风险, 根据本文建立的模糊化综合评价标准, 2005~ 2007 年各断面健康风险水平处于 $C_3 = \{ III | 中风险 \}$ 、 $C_4 = \{ IV | 中-高风险 \}$ 和 $C_5 = \{ V | 高风险 \}$ 3 个等级. 由此可以看出, 2005~ 2007 年湘江长株潭段的水环境健康风险水平较高. 由表 6 还可见, 2005~ 2007 年儿童年的健康风险水平总体大于或等于成人的健康风险水平, 成人的最大风险水平为 IV 级, 儿童的最大风险水平为 V 级; 儿童的健康风险水平在 2005 和 2006 年的 6 个断面中均有 3 个断面大于成人的健康风险水平; 在 2007 年的 6 个断面中有 5 个断面大于成人的健康风险水平.

3.5 确定性健康风险评价

本文同时采用各断面各评价因子的年平均浓

度计算了确定性模型下的健康风险, 并对确定性模型下的风险进行了模糊化分级, 确定性模型下有毒污染物健康危害总风险水平等级如表 7 所示.

表 7 确定性模型下有毒污染物健康危害总风险水平等级

Table 7 The level of total health risk from all carcinogens and non-carcinogens for one person under the deterministic model

断面	成人			儿童		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007
朱亭镇	IV	IV	III	IV	IV	IV
霞湾	IV	IV	III	IV	IV	IV
五星	IV	IV	III	IV	IV	IV
昭山	IV	III	III	IV	IV	IV
三汊矶	IV	III	III	IV	IV	IV
樟树港	III	III	III	IV	IV	IV

由表 7 可见, 按本文建立的评价标准, 确定性评价模型下各年各断面健康风险水平处于 II 级或者 IV 级; 而在基于区间数的模糊综合评价模型下 (表 6), 各断面风险水平虽也有大部分处于 II 级或者 IV 级, 但儿童 2005 年的朱亭镇、霞湾、五星断面和 2006 年霞湾、五星断面出现了 V 级风险. 基于区间数的模糊综合评价模型下的评价结果和确定性模型下的评价结果存在一定的差别, 在成人的健康风险评价中, 2006 年的昭山、三汊矶断面及 2007 年的朱亭镇断面的风险水平在确定性评价中为 II 级, 而在基于区间数的模糊综合评价模型下为 IV 级. 在儿童健康风险评价中, 2005 年的朱亭镇断面以及 2005 和 2006 年的霞湾和五星断面的风险水平在确定性模型下为 IV 级, 而在基于区间数的模糊综合评价模

型下为 V 级。

将两个模型下的评价结果相比较可知, 成人 2006 年的昭山、三汊矶断面和 2007 年的朱亭镇断面的风险水平在基于区间数的模糊综合评价模型下的评价等级高于确定性模型下的评价等级, 儿童 2005 年的朱亭镇、霞湾、五星断面和 2006 年的霞湾、五星断面也出现同样的情况。这主要是由于基于区间数的模糊综合评价模型中采用的是污染物的浓度范围, 比采用年均浓度包含了更多信息, 在一定程度上反映了污染物浓度的不确定性。这也说明基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价可以在一定程度上反映风险评价中的不确定性, 为决策者提供更加科学的决策依据。

4 结论 (Conclusions)

1) 2005~2007 年湘江长株潭段的水环境健康风险水平较高, 处在中等、中-高等以及高等风险水平。

2) 霞湾和五星断面的个人年风险水平较高, 表明该处附近工业废水和生活污水排放严重, 水环境质量亟待改善。

3) 2006 年各断面下降趋势并不明显, 朱亭镇、霞湾、三汊矶和樟树港 4 个断面甚至呈现上升趋势; 而 2007 年各断面的健康风险水平有所降低, 说明湘江的水环境治理工作已初见成效。

4) 儿童个人年风险水平总体大于或等于成人个人年风险水平。

5) 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价在一定程度上解决了评价过程中存在的不确定性问题, 与确定性评价模型相比, 风险评价的结果更全面、合理地反映水环境健康风险水平的真实情况。

责任作者简介: 袁兴中 (1963—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事固体废物处理与处置, 废物资源化, 环境、生态与能源系统规划和评价等方面的研究。Tel 0731-8821413, E-mail yxz@hnu.cn

参考文献 (References):

Batchelor B, Valle's J, Agranath V. 1998 Stochastic risk assessment of sites contaminated by hazardous wastes [J]. *Journal of Environmental Engineering* 124: 380—388

Bennett D H, James A L, McKone T E, *et al*. 1998. On uncertainty in remediation analysis: variance propagation from subsurface transport to exposure modeling [J]. *Reliability Engineering and System Safety*,

62: 117—129

陈鸿汉, 谌宏伟, 何江涛, 等. 2006. 污染场地健康风险评价的理论和方法 [J]. *地学前缘*, 13(1): 216—223

Chen H H, Shen H W, He J T, *et al*. 2006. Health based risk assessment of contaminated sites: Principles and methods [J]. *Earth Science Frontiers* 13(1): 216—223 (in Chinese)

Dante D C, Paulina P, Nestor M, *et al*. 2005. Exposure to inorganic arsenic in drinking water and total arsenic concentration in a Chilean population [J]. *Environmental Research*, 98(2): 151—159

Furlong J. 1995. EC approach to environmental risk assessment of new substances [J]. *The Science of the Total Environment* 171: 275—279

高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 2004. 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*, 25(2): 47—50

Gao J J, Zhang L P, Huang S B, *et al*. 2004. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing [J]. *Environmental Science*, 25(2): 47—50 (in Chinese)

Goodrich M T, McCord J T. 1995. Quantification of uncertainty in exposure assessments at hazardous waste sites [J]. *Ground Water* 33(5): 727—732

Guyonnet D, Bougine B, Dubois D, *et al*. 2003. Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments [J]. *Journal of Environmental Engineering* 129: 68—78

何理, 曾光明. 2002. 水环境中的灰色水质风险研究 [J]. *重庆环境科学*, 21(1): 55—57

He L, Zeng G M. 2002. Study on grey water quality in water environment [J]. *Chongqing Environmental Science* 21(1): 55—57 (in Chinese)

何星海, 马世豪, 李安定, 等. 2006. 再生水利用健康风险暴露评价 [J]. *环境科学*, 27(9): 1912—1915

He X H, Ma S H, Li A D, *et al*. 2006. Exposure assessment of various reclaimed water uses [J]. *Environmental Science* 27(9): 1912—1915 (in Chinese)

Kentel E, Arel M M. 2005. 2D Monte Carlo versus 2D Fuzzy Monte Carlo health risk assessment [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19(1): 86—96

Lee L J H, Chan C C, Chung C W, *et al*. 2002. Health risk assessment on residents exposed to chlorinated hydrocarbons contaminated in groundwater of a hazardous waste site [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A*, 65: 19—235

Lee Y W, Dahab M F, Borgardi I. 1994. Fuzzy decision making in groundwater nitrate risk management [J]. *Water Resources Research* 30: 135—148

Li J B, Huang G H, Zeng G M, *et al*. 2007. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination [J]. *Journal of Environmental Management* 82: 173—188

李如忠. 2007. 基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评价 [J]. *水利学报*, 38(8): 895—900

Li R Z. 2007. Assessment for environmental health of urban water supply source based on uncertain information [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 38(8): 895—900 (in Chinese)

Muddassir N, Faisal I K. 2006. Human health risk modeling for various

- exposure routes of trihalomethanes (THMs) in potable water supply [J]. *Environmental Modeling & Software* 21(10): 1416—1429
- 钱家忠, 李如忠, 汪家权, 等. 2004 城市供水水源地水质健康风险评估 [J]. *水利学报*, 8: 90—93
- Qian J Z, Li R Z, Wang J Q, *et al*. 2004 Environmental health risk assessment for urban water supply source [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 8: 90—93(in Chinese)
- Schwab BW, Hayes E P, Fiori JM, *et al*. 2005 Human pharmaceuticals in US surface waters: a human health risk assessment [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 42(3): 296—312
- Shakhawat H, Tahir H, Neil B. 2006. Fuzzy rule-based modeling for human health risk from naturally occurring radioactive materials in produced water [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 89: 1—17
- Seinenmann A. 2000 Rethinking human health impact assessment [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 20: 627—645
- USEPA. Exposure Factors Handbook [R]. EPA /600/P- 95 / 002Fm 1997. Washington DC: EPA
- 徐敏, 曾光明, 黄国和, 等. 2005 非线性随机水环境风险模型 [J]. *水利学报*, 36(1): 56—61
- Xu M, Zeng G M, Huang G H, *et al*. 2005 Nonlinear stochastic water environmental risk model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 36(1): 56—61(in Chinese)
- 扬纶标, 高英仪. 2001. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 183—186
- Yang L B, Gao Y Y. 2001 The principle and application of fuzzy mathematics [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press 183—186(in Chinese)
- 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 1998. 水环境健康风险评估模式 [J]. *水科学进展*, 9(3): 212—217
- Zeng G M, Zhuo L, Zhong Z L, *et al*. 1998 Assessment models for water environmental health risk analysis [J]. *Advances in Water Science* 9(3): 212—217(in Chinese)
- 张应华, 刘志全, 李广贺, 等. 2007. 基于不确定分析的健康环境风险评估 [J]. *环境科学*, 28(7): 1409—1415
- Zhang Y H, Liu Z Q, Li G H, *et al*. 2007. Uncertainty analysis of health risk assessment caused by benzene contamination in a contaminated site [J]. *Environmental Science*, 28(7): 1409—1415(in Chinese)