

# 城市原水污染事故危害度应急评价模型

朱 明, 李 永, 李 嘉

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘 要:**对湖库水源地及明渠取水型城市原水系统污染事故的“危害度”评价进行探讨。归纳分析“危害度”的直接与间接影响因素;应用粗糙集理论与方法,对间接影响因素进行重要度分析与冗余约简;综合直接与间接影响因素,构建城市原水污染事故“危害度”的应急评价模型;引用 Vague 集相似度量方法对模型中的主要直接影响因素“浓度超标系数”的模糊渐变性进行度量。以成都市原水系统为应用背景,设计湖库硝基苯污染事故模拟工况,依据所构建模型计算各工况“危害度”值,并通过敏感性分析方法,对该模型的合理、有效性进行分析验证。结果表明,所构建模型能够综合反映湖库水源地及明渠取水型城市原水系统的污染事故对城市水厂及饮用水安全的危害影响程度。

**关键词:**城市原水;水污染;粗糙集;Vague 集;评价模型

**中图分类号:**TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0124-09

## A Model for Harm Impact Evaluation of Crude Water Pollution Accident

ZHU Ming, LI Yong, LI Jia

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

**Abstract:** The harm impact evaluation was studied for pollution accident happened in urban crude water system characterized of fetching crude water from reservoir through channel. The relevant direct and indirect factors to harm impact of crude water pollution accident were analyzed. Furthermore, the attribute reduction method in rough set theory was applied to eliminate the redundancy of indirect factors. Integrating the direct and indirect factors effects, an emergent evaluation model for the Harm-Impact was established with the similarity analysis by vague sets theory. Taking crude water system in Chengdu as a case study, a designed nitrobenzene pollution accident was simulated in different working-conditions. Moreover, the Harm Impact extent of the accident was calculated with the proposed model. The sensitivity analysis indicates that the proposed model is reasonable and valid in the emergent evaluation for the pollution accident happened in the urban crude water system.

**Key words:** urban crude water; water pollution; rough set theory; vague sets; evaluation models

城市原水系统是指在水厂取水口之前的、与原水相关的、相互作用与相互依存的诸要素的综合体,主要包括水源地、原水输运渠道等。城市水源有湖

库型、河流型、地下水型等,城市原水输运渠道又分为明渠、管道等。针对原水污染事故,已有的部分相关研究工作或成果有:王丹宁等<sup>[1]</sup>应用灰色聚类模

收稿日期:2009-07-14

基金项目:四川省科技厅科技支撑项目(2008SZ0158)

作者简介:朱明(1966-),男,博士生,主要从事环境水力学、城市水安全研究,(E-mail)zhuming610065@163.com。

李嘉(联系人),男,研究员,博士生导师,(E-mail)lijia@tfol.com。

型对给水管网水质进行了综合评价;Gullick等<sup>[2]</sup>对原水预警监控系统进行了设计分析;States等<sup>[3]</sup>对饮用水安全监测的快速分析技术进行了探讨;池丽敏<sup>[4]</sup>对江河水源地突发性水污染事故风险评价进行了探讨;熊凤等<sup>[5]</sup>以绵阳市涪江河段为例,探讨了城市河流水污染总量控制和综合治理的方法。在原水污染事故发生后,应急响应决策者最迫切需要知道的是事故对水厂及饮用水安全的影响程度,然后才能进行科学合理地决策。而在已有的相关研究中,特别针对原水污染事故的危害影响评价进行探讨的尚不多见。该文针对湖库水源地及明渠取水型城市原水系统污染事故“危害度”的应急评价问题进行探讨。分析“危害度”的直接与间接影响因素;引用粗糙集理论与方法,对间接影响因素进行重要度分析与冗余约简;综合直接与间接影响因素的作用,构建了一种适用于湖库水源地及明渠取水型城市原水系统污染事故“危害度”的应急评价模型;引用 Vague 集相似度量模型对模型的关键因子“浓度超标系数”的模糊渐变进行度量。以成都市原水系统为背景,设计发生在水源地湖库的硝基苯污染事故模拟工况,计算各工况“危害度”值,并采用敏感性分析方法,对所构建模型的合理、有效性进行验证分析。

## 1 基本理论与方法

### 1.1 粗糙集理论的属性约简方法

粗糙集(Rough Set, RS)理论由波兰学者 Pawlak. Z 于 1982 年提出<sup>[6-7]</sup>。RS 理论是一种刻画不完整性和不确定性的数学工具,能有效分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备信息,并从中发现隐含知识,揭示潜在规律。定义<sup>[7]</sup>,令  $K = (U, R)$  为一知识库,且  $P, Q \subseteq R$ , 知识  $Q$  仅有部分是由知识  $P$  导出,当

$$\gamma_P(Q) = \frac{|\text{pos}_P(Q)|}{|U|} \quad (1)$$

时,称知识  $Q$  对知识  $P$  的依赖度是  $\gamma_P(Q)$ 。 $|\text{pos}_P(Q)|$  表示根据知识  $P, U$  中所有一能归入  $Q$  的元素数量。

设  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  是论域,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  是属性集合。 $A$  中的元素称为属性,  $A = S \cup D$ ,  $S \cap D = \emptyset$ ,  $S$  称为条件属性集,  $D$  称为决策属性集。在 RS 理论中,应用决策表<sup>[8-9]</sup>来描述论域中的对象,同时具有条件属性集和决策属性集的知识表达系统称为决策表。决策表中的不同属性可能具有不同的重要性,利用属性的重要性可以求取约简<sup>[10]</sup>。在决策表中,令  $S$  和  $D$  分别表示条件属性集和决策

属性集,则条件属性子集( $S' \subseteq S$ )关于决策属性  $D$  的重要性定义<sup>[11]</sup>为:

$$\sigma_{SD}(S') = \gamma_S(D) - \gamma_{S-S'}(D) \quad (2)$$

对于分类来说,并非所有条件属性都必要,去除这些属性不会影响原来的分类效果。约简表示不含多余属性并保证分类正确的最小条件属性集<sup>[12-13]</sup>。定义<sup>[14]</sup>,令  $R$  为一等价关系族,  $r \in R$ , 如果:

$$\text{ind}(R) = \text{ind}(R - \{r\}) \quad (3)$$

称  $r$  为  $R$  中可省略的,否则  $r$  为  $R$  中不可省略的,其中  $\text{ind}(\cdot)$  表示不可分辨的。

### 1.2 Vague 集的相似度量

Vague 集理论<sup>[15]</sup>由 Gau 和 Buchrer 于 1993 年提出。在 Vague 集理论中,Vague 集由真假隶属函数定义,可表征元素对模糊概念的属于、不属于以及中立的程度<sup>[15]</sup>。设论域  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $X$  上一个 Vague 集  $A$  由真隶属函数  $t_A$  和假隶属函数  $f_A$  所描述,  $t_A: X \rightarrow [0, 1], f_A: X \rightarrow [0, 1]$ , 其中,  $t_A(x_i)$  是由支持  $x_i$  的证据所导出的肯定隶属度的下界,  $f_A(x_i)$  则是由反对证据所导出的否定隶属度的下界,且:  $t_A(x_i) + f_A(x_i) \leq 1$  (肯定隶属度与否定隶属度之和小于或等于 1), 元素  $x_i$  在 Vague 集  $A$  中的隶属度被区间  $[0, 1]$  中的一个子区间  $[t_A, 1 - f_A]$  所界定,称该区间为  $x_i$  在  $A$  中的 Vague 值,记为  $v_A(x_i)$ <sup>[16]</sup>。设论域  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $A, B$  为  $X$  上的两个 Vague 集。其中,

$$A = \sum_{i=1}^n [t_A(x_i), 1 - f_A(x_i)] / x_i, x_i \in X \quad (4)$$

$$B = \sum_{i=1}^n [t_B(x_i), 1 - f_B(x_i)] / x_i, x_i \in X \quad (5)$$

如果  $T(A, B)$  满足性质: 1)  $0 \leq T(A, B) \leq 1$ , 2)  $T(A, B) = T(B, A)$ , 3)  $T(A, B) = 1 \leftrightarrow A = B$ , 则称  $T(A, B)$  为  $A$  与  $B$  的相似度。引用李凡<sup>[17]</sup>提出的相似度量公式(6)对 Vague 集相似度进行度量。

$$T(A, B) = 1 - \frac{|t_A - t_B - (f_A - f_B)|}{4} - \frac{|t_A - t_B| + |f_A - f_B|}{4} \quad (6)$$

式(6)中,  $T(A, B)$  为 Vague 集相似度;  $T(A, B) \in [0, 1]$ ;  $T(A, B)$  值越大, Vague 集  $A$  和  $B$  越相似。

## 2 评价模型

水厂取水口既是城市原水系统的出口,又是城市饮用水系统的进口,水厂取水口水质直接影响着城市饮用水安全。定义原水污染事故对水厂取水口的影响程度为原水污染事故“危害度”。

2.1 危害度影响因素约简

针对湖库水源地及明渠取水型原水系统,将其污染事故危害度的影响因素分为直接与间接影响因素。直接影响因素中的关键因素为“取水口断面浓度超标系数”,其直接表征了污染事故对城市水厂及饮用水系统的压力及影响。间接影响因素包括以下 6 类:报警时间、事发时间、毒性、湖库下泄流量、污染物形态、天气状况。现引用粗集理论中的属性重要性分析与约简方法,对危害度的间接影响因素进行分析与约简。以 8 个具有湖库水源地及明渠取水型原水系统的大中型城市污染事故案例为样本,对危害度间接影响因素进行分析与约简。

1) 设论域  $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ , 表示 8 个案例;决策属性  $D$ , 表示间接因素对危害度增强的影响;条件属性  $S = \{a, b, c, d, e, f\}$ ,  $a$  为报警时

间、 $b$  为事发时间、 $c$  为毒性、 $d$  为湖库下泄流量、 $e$  为污染物形态、 $f$  为天气状况,各条件属性值的确定方法如下:(1)报警时间  $t$ :  $t < 0.5$  h, 定义为快,用 0 表示;  $0.5$  h  $< t < 1$  h, 定义为一般,用 1 表示;  $t > 1$  h, 定义为慢,用 2 表示。(2)事发时间:白天用 0 表示;夜晚用 1 表示。(3)毒性:高毒用 1 表示;低毒用 0 表示。(4)湖库下泄流量  $q$ :  $q > 600$  m<sup>3</sup>/s, 定义为大,用 2 表示;  $200$  m<sup>3</sup>/s  $< q < 600$  m<sup>3</sup>/s, 定义为中,用 1 表示;  $q < 200$  m<sup>3</sup>/s, 定义为小,用 0 表示。(5)污染物形态:可溶于水用 0 表示;不溶于水用 1 表示。(6)天气状况:天气好,用 0 表示;天气差,用 1 表示。(7)对危害度增强的影响:增强危害后果,用 1 表示;无明显影响,则用 0 表示。通过分析样本案例基本信息可得到危害度间接影响因素决策表,如表 1 所示。

表 1 危害度间接影响因素决策表

U	条件属性 S						决策属性 D
	报警时间 a	事发时间 b	毒性 c	湖库下泄流量 d	污染物形态 e	天气状况 f	对危害度影响
1	0	0	1	1	0	0	1
2	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	2	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	1
5	2	0	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	1	1	1
7	0	0	0	1	1	0	1
8	0	0	1	0	1	0	1

2) 根据表 1, 可计算各属性正区如表 2 所示。

表 2 各属性正区计算结果

属性正区	计算结果	属性正区	计算结果
$pos_{s-a}(D)$	$\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$	$pos_{s-b}(D)$	$\{1, 3, 5, 6, 7, 8\}$
$pos_{s-c}(D)$	$\{1, 3, 4, 5, 6, 7\}$	$pos_{s-d}(D)$	$\{1, 4, 5, 6, 8\}$
$pos_{s-e}(D)$	$\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$	$pos_{s-f}(D)$	$\{1, 3, 4, 5, 7, 8\}$

说明:①  $ind(S) = \{(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8)\}$ ; ②  $pos_s(D) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ,  $R_{s,D}(D) = \langle \{1, 4, 5, 6, 7, 8\}, \{2, 3\} \rangle$ ,  $\gamma_s(D) = 1$ ; ③  $D$  表示水污染事件的危害度状态, 是决策属性。

3) 根据表 2, 并由式(1)可计算各属性对  $D$  的 依赖度, 如表 3 所示。

表 3 各属性对 D 的依赖度计算结果

依赖度	计算结果	依赖度	计算结果
$\gamma_{s-a}(Q)$	$ pos_{s-a}(Q)  /  U  = 8/8 = 1$	$\gamma_{s-b}(Q)$	$ pos_{s-b}(Q)  /  U  = 6/8 = 3/4$
$\gamma_{s-c}(Q)$	$ pos_{s-c}(Q)  /  U  = 6/8 = 3/4$	$\gamma_{s-d}(Q)$	$ pos_{s-d}(Q)  /  U  = 5/8$
$\gamma_{s-e}(Q)$	$ pos_{s-e}(Q)  /  U  = 8/8 = 1$	$\gamma_{s-f}(Q)$	$ pos_{s-f}(Q)  /  U  = 6/8 = 3/4$

说明:①  $Q$  表示独立的最小条件属性子集。

4) 根据表 2、3,并由式(2)可计算出各属性的重要度如表 4 所示。

表 4 各属性重要度计算结果

重要度	计算结果	重要度	计算结果
$\sigma_{SD}(a)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{sa'}(D) = 1 - 1 = 0$	$\sigma_{SD}(b)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{sb'}(D) = 1 - 3/4 = 1/4$
$\sigma_{SD}(c)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{sc'}(D) = 1 - 3/4 = 1/4$	$\sigma_{SD}(d)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{sd'}(D) = 1 - 5/8 = 3/8$
$\sigma_{SD}(e)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{se'}(D) = 1 - 1 = 0$	$\sigma_{SD}(f)$	$\gamma_s(D) - \gamma_{sf'}(D) = 1 - 3/4 = 1/4$

由表 4 可知,湖库下泄流量  $d$  重要度最高;事发时间  $b$ 、毒性  $c$ 、天气状况  $f$  次之;报警时间  $a$  和污染物形态  $e$  重要度为零,可约去。经属性重要度分析与约简后,余留的危害度间接影响因素有:1) 事发时间  $b$ (重要度  $\sigma = 1/4$ );2) 毒性  $c$ ( $\sigma = 1/4$ );3) 湖库下泄流量  $d$ ( $\sigma = 3/8$ );4) 天气状况  $f$ ( $\sigma = 1/4$ )。

2.2 危害度评价模型

危害度应急评价模型构建的主要原则为:在精度满足应急响应要求前提下,各模型参数计算力求快速简便。因此,在评价模型中,主要直接影响因素作为关键因子对待,而间接影响因素则以调整系数的形式出现。如主要直接影响因素“取水口断面浓度超标系数”以“浓度超标系数” $\alpha$  来表达,间接影响因素“事发时间、毒性、湖库下泄流量、天气状况”分别以昼夜系数  $\beta_1$ 、毒性系数  $\beta_2$ 、紧迫系数  $\beta_3$ 、气象系数  $\beta_4$  来表示; $\sigma_i$  为各间接影响因素重要度(表 4),则原水污染事故“危害度”应急评价模型可构建如下:

$$H = \alpha \times \left(1 + \sum_{i=1}^n \beta_i \sigma_i\right) \quad (7)$$

式(7)中,  $H$  为原水污染事故“危害度”评价价值;  $n = 1, 2, 3, 4$ 。根据式(7)值域区间以及城市原水污染事故基本特征,可建立城市原水污染事故危害度应急评价标准如表 5 所示。

表 5 城市原水污染事故危害度应急评价标准

项目	评价标准			
危害度分级	[3,10)	[10,20)	[20,80)	80 以上
响应级别	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级
事故名称	轻微事故	一般事故	较大事故	重大事故

城市原水污染事故危害程度的描述如下:1) 重大事故:污染导致城市原水系统瘫痪,恢复难度很大,城市供水被迫较长时间停止;2) 较大事故:原水污染已使城市原水系统受到破坏,恢复难度较大;3) 一般事故:水厂自身已无法处理受到污染的原水,若需保证城市正常供水,必须在原水系统中(如在水源地或原水渠道)提前去除或部分去除污染物;4) 原水受到的污染较轻,通过在水厂内采取强化常规工艺、启动预处理或深度处理等工艺措施,即可有效去除

污染物,并能保证城市供水。

2.3 模型参数确定方法

2.3.1 浓度超标系数  $\alpha$  为合理表征污染物浓度没有超过水质临界标准前的模糊渐变过程,引用 Vague 集相似度量公式(6)对污染物浓度没有超过水质临界标准前的浓度超标系数  $\alpha$  进行确定。

$$\begin{cases} \alpha = k, (C_{\max} \geq C^*) \\ \alpha = T, (C_{\max} < C^*) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,  $k$  为取水口断面污染物浓度最大超标倍数,  $k = C_{\max}/C^*$ ;  $T$  为取水口断面污染物浓度一临界标准相似度,可由式(6)计算得到;  $C^*$  为水厂针对特定污染物的处理浓度极限值,单位为  $\text{mg/L}$ ;  $C_{\max}$  为污染物在取水口断面的最大浓度值,单位为  $\text{mg/L}$ 。

考虑应急响应需快速反映污染事故基本特征的要求,关于危害度应急评价的有关环境水力学计算,可采用一维模型。污染物的一维移流扩散基本控制方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

式(9)中,  $u_x$  为主流方向流速;  $C$  为污染物浓度;  $E_x$  为纵向综合扩散系数。求解式(9)的假设条件为:瞬时污染源;河流稳态,河段均匀;污染物不降解、吸附与沉淀;污染物很快在垂向与横向均匀混合;不考虑污染物在河道横向和垂向上的扩散影响;流速仅考虑主流方向。

纵向综合扩散系数  $E_x$  可由式(10)<sup>[18]</sup> 计算得到:

$$E_x = 0.2 \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{1.3} \cdot \left(\frac{u}{u^*}\right)^{1.2} \cdot h \cdot u^* \quad (10)$$

式(10)中,  $B$  河宽;  $h$  水深;  $u$  流速;  $u^*$  摩阻流速,  $u^* = \sqrt{gh_i}$ ,  $i$  为水力坡降,  $g$  为重力加速度。

设河流主流方向流速  $u$ , 污染物质量  $M$ , 河流断面面积  $A$ , 事故发生地距取水口的距离  $x$ , 取水口断面浓度在时间  $t$  为  $C$ , 则由控制方程(9)可得到  $C$  的解析解计算公式如下:

$$C = \frac{M}{A \sqrt{4\pi E_x t}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - ut)^2}{4E_x t}\right] \quad (11)$$

**2.3.2 昼夜系数  $\beta_1$**  为体现昼夜时间对污染事故危害程度增强影响的差异性,在危害度评价模型中引入昼夜系数  $\beta_1$ 。 $\beta_1$  取值推荐标准为:1) 白天: $\beta_1 = 0$ ;2) 夜晚: $\beta_1 = 0.2$ 。

**2.3.3 毒性系数  $\beta_2$**  为体现污染物毒性对危害度增强影响的差异性,在危害度评价模型中引入毒性系数  $\beta_2$ 。 $\beta_2$  取值推荐标准为:1) 剧毒, $\beta_2 = 4$ ;2) 高毒, $\beta_2 = 2$ ;3) 中毒, $\beta_2 = 1$ ;4) 低毒, $\beta_2 = 0.5$ ;5) 微毒, $\beta_2 = 0.1$ 。

**2.3.4 紧迫系数  $\beta_3$**  定义由从污染事故发生到处置措施开始实施所需响应时间而导致事故危害度增大的影响为紧迫系数  $\beta_3$ 。又定义:最小应急响应时间  $t^*$  为从污染事故接警开始到有效处置措施实施所需的最短时间;污染物到达取水口时间  $t_s$  为从污染事故发生开始至污染物到达取水口的时间;应急响应时间保守因子  $\tau$  为不同规模城市在应急响应时可能出现意外延迟情况的可能性。 $\tau$  取值推荐标准为:1) 小城市,0.1~0.2;2) 中等城市,0.2~0.3;3) 大城市,0.3~0.4;4) 特大城市,0.5。紧迫系数  $\beta_3$  的计算公式为:

$$\beta_3 = \left(\frac{t^*}{t_s}\right) + \tau \quad (12)$$

**2.3.5 气象系数  $\beta_4$**  为体现气象条件对污染事故危害程度增强的影响,在模型中引入气象系数  $\beta_4$ 。在湖库水源地及明渠取水型原水系统中,能见度为主要气象影响因子。能见度低,污染事故的处理难度大,则对危害度的增强程度就大。以能见度为影响因子的气象系数  $\beta_4$  取值推荐标准为:1) 能见度大于 100 m, $\beta_4 = 0$ ;2) 50~100 m, $\beta_4 = 0.2$ ;3) 小于 50 m, $\beta_4 = 0.3$ 。

### 3 模型应用验证

以成都市原水系统为应用背景,进行“危害度”评价模型的验证分析。成都市原水系统属于湖库水

源地与明渠取水方式型。水源地紫坪铺水库位于成都市西北 60 km 左右的岷江上游,多年平均流量 469 m<sup>3</sup>/s,年径流总量 148 亿 m<sup>3</sup>,提供城市生活及工业用水 50 m<sup>3</sup>/s,城市环保用水 20 m<sup>3</sup>/s<sup>[19]</sup>;紫坪铺水库库区上有高速公路跨越,周边有国道经过,人类活动强度大,极易发生由交通事故而引发的库区水污染事故,并进而导致库区下游的原水渠道污染。重要饮用水厂为水六厂,水六厂采用明渠取水方式,取水明渠为柏条河,柏条河全长 44.8 km,平均坡降 3.85‰。

#### 3.1 模拟工况设计及环境水力学计算

关于紫坪铺水库库区污染物的迁移扩散,李志勤<sup>[18]</sup>针对水库水动力学特性及污染物运动进行了研究,并应用于紫坪铺水库的三维水质数值模拟。引用文献[18]中关于发生在紫坪铺水库的突发性水污染事故的研究成果作为模拟工况设计的参考依据。在文献[18]算例中的初边值条件为:在库尾(距坝址 20 km)瞬时投放 5 000 kg 硝基苯,水库来流与出流均为 400 m<sup>3</sup>/s。经过 71 h 污染物前锋到达坝前出水口,出库浓度随时间变化的计算结果见图 1。

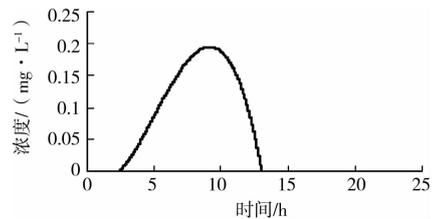


图 1 污染物出库浓度随时间变化过程

将图 1 中硝基苯污染物出库浓度过程作为下游原水河道中污染物浓度计算的输入条件,并将水库出水口监测到污染物的时刻设定为  $t = 0$ ,则可由取水明渠柏条河的可能流量设计模拟工况如表 6 所示。

表 6 模拟工况基本参数值

工况	流量 $Q /$ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	河宽 $B /$ m	水深 $h /$ m	断面面积 $A /$ m <sup>2</sup>	河道平均流速 $u /$ (m · s <sup>-1</sup> )	摩阻流速 $u^* /$ (m · s <sup>-1</sup> )	河道纵向综合扩散系数 $E_x /$ (m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
一	10	25.71	0.35	8.98	1.11	0.11	33.2
二	20	26.07	0.54	13.71	1.46	0.13	39.5
三	40	26.63	0.82	21.04	1.90	0.16	47.3
四	60	27.08	1.04	27.08	2.22	0.18	52.7

根据表 6 中的数据,由式(11)可计算各工况下水六厂在柏条河上的取水口断面污染物浓度  $C$  随时

间  $t$  的变化过程,具体如图 2 所示。

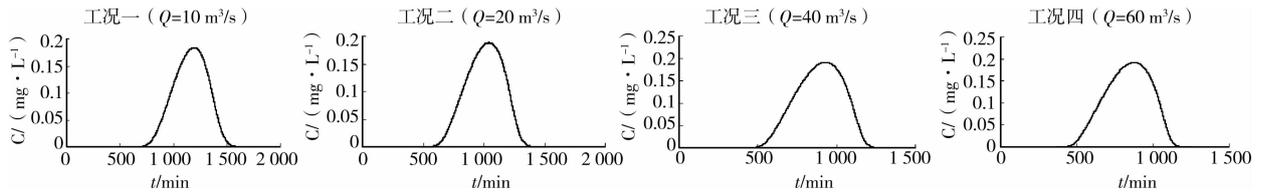


图 2 各工况下的水厂取水口断面污染物浓度变化过程

3.2 最大危害度计算

度”  $H_{max}$ , 具体如表 7 所示。

根据表 6、式 7 可计算各工况的最大“危害

表 7 最大危害度计算结果

工况	$Q/$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$C_{max}/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$C^*/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$k$	$\alpha$	$t_s/$ min	$t^*/$ min	$\tau$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$H_{max}$
一	10	0.184	0.017	10.8	10.8	581	100	0.5	0	2	0.67	0	33.02
二	20	0.188	0.017	11.1	11.1	481	100	0.5	0	2	0.71	0	33.93
三	40	0.191	0.017	11.2	11.2	405	100	0.5	0	2	0.75	0	34.67
四	60	0.192	0.017	11.3	11.3	369	100	0.5	0	2	0.77	0	34.97

说明:1)虽然成都市水厂应急处理能力较强,但基于保守考虑,仅将硝基苯的地表水Ⅱ类水质标准(0.017 mg/L)选取为应急状况下的极限处理能力,此时,  $C^* = 0.017$  mg/L;2)针对成都原水系统的污染事故的最小应急响应时间( $t^*$ )当前没有明确的取值,从最不利情况考虑,最小应急响应时间  $t^*$  试取为 100 min;3)成都为特大型城市,应急响应时间保守因子  $\tau$  取 0.5;4)模拟事故发生发生在白天,昼夜系数  $\beta_1$  取 0;5)硝基苯污染物属高毒类,  $\beta_2$  取 2;6)模拟事故发生时,天气的能见度较高,气象系数  $\beta_4$  取 0。

3.3 瞬时危害度计算

由地表水Ⅱ类水质标准中的硝基苯项目质量标准(0.017 mg/L),可建立硝基苯污染事故的评价标准临界区间[0,0.017]。根据该临界区间,可构建硝基苯的 Vague 集隶属函数如下:

$$\begin{cases} u = (t(C), 1 - f(C)) = (0, 0) & C = 0 \\ u = (t(C), 1 - f(C)) = \left(\frac{C}{0.017}, 1\right) & 0 < C < 0.017 \\ u = (t(C), 1 - f(C)) = (1, 1) & C = 0.017 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,  $C$  为硝基苯污染物在水厂取水口断面的浓度,单位 mg/L。

硝基苯浓度为 0.017 mg/L 时,原水水体针对硝基苯项目处于受到污染的临界极限状态,该极限状态 vague 值  $u^* = [1, 1]$ ,根据式(6),硝基苯在取水口断面

瞬时浓度 vague 值  $u$  与其临界极限状态 vague 值  $u^*$  的 vague 集相似度  $T(u, u^*)$  可表示如下:

$$T(u, u^*) = 1 - \frac{|t - t^* - (f - f^*)|}{4} - \frac{|t - t^*| + |f - f^*|}{4} \quad (14)$$

从图 2 可选取水厂取水口断面在工况一中的 7 个硝基苯瞬时浓度值  $C$  如表 8 所示。

表 8 硝基苯瞬时浓度值

参数	参数值						
$t/min$	0	760	787	806	813	828	841
$C/(mg \cdot L^{-1})$	0	0.005	0.01	0.015	0.017	0.022	0.027

根据表 7、8,由式(7)、(14),可计算得到硝基苯污染事故的瞬时危害度值  $H_s$  如表 9 示。

表 9 工况一瞬时危害度计算结果

$Q/$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$C^*/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$u^*$	$c/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$u$	$T$	$k$	$\alpha$	$t_s/$ min	$t^*/$ min	$\tau$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$H_s$
10	0.017	[1, 1]	0	[0, 0]	0	—	0	581	100	0.5	0	2	0.67	0	0.00
			0.005	[0.294, 1]	0.647	—	0.647	581	100	0.5	0	2	0.67	0	1.97
			0.01	[0.588, 1]	0.794	—	0.794	581	100	0.5	0	2	0.67	0	2.42
			0.015	[0.882, 1]	0.941	—	0.941	581	100	0.5	0	2	0.67	0	2.87
			0.017	[1, 1]	1.000	—	1.000	581	100	0.5	0	2	0.67	0	3.05
			0.022	—	—	1.294	1.294	581	100	0.5	0	2	0.67	0	3.95
			0.027	—	—	1.588	1.588	581	100	0.5	0	2	0.67	0	4.84

说明:1)  $T$  由式(14)求得;2)  $k = C_{max}/C^*$ 。

### 3.4 敏感性分析计算

最大“危害度” $H_{\max}$ 变化情况如表 10 所示。

选取工况一,计算模型中各调整系数变化时的

表 10 各调整系数敏感性分析

系数	$C_{\max}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$C^*/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$k$	$\alpha$	$t_s/$ min	$t^*/$ min	$\tau$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$H_{\max}$
$\beta_1$	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	2	0.67	0	33.02
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0.2	2	0.67	0	40.26
$\beta_2$	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	0	0.67	0	20.15
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	0.5	0.67	0	29.25
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	1	0.67	0	30.97
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	2	0.67	0	33.02
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	4	0.67	0	35.46
$\beta_3$	0.184	0.017	10.82	10.82	581	60	0.5	0	2	0.6	0	28.88
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	180	0.5	0	2	0.81	0	29.93
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	360	0.5	0	2	1.12	0	31.22
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	720	0.5	0	2	1.74	0	33.24
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	1440	0.5	0	2	2.98	0	36.22
$\beta_4$	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	2	0.67	0	29.25
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	2	0.67	0.2	36.49
	0.184	0.017	10.82	10.82	581	100	0.5	0	2	0.67	0.3	37.26

### 3.5 分析与讨论

根据表 7、9、10,对所构建模型的应用效果讨论如下。

1) 最大危害度评价结果分析。在工况 1~4 中,河道中的流量分别为 10、20、40、60  $\text{m}^3/\text{s}$ ,在评价模型中其它参数值不变的情况下,危害度指数分别为 33.02、33.93、34.67、34.97,表明流量越大,水厂取水口断面的污染物浓度超标倍数越大,污染事故的危害度也越大。说明所构建模型能体现影响水污染事故危害度的内因,在一定程度上能够区分并表达不同工况下的污染事故危害程度。

2) 瞬时危害度评价结果分析。在工况 1 中,水厂取水口断面在时间 0、760、787、806、813、828、841 min 的 7 个硝基苯瞬时浓度值  $c$  分别为 0、0.005、0.01、0.015、0.017、0.022、0.027  $\text{mg}/\text{L}$ ，“浓度超标系数” $\alpha$  分别为 0、0.647、0.794、0.941、1.000、1.294、1.588,瞬时危害度值分别为 0、1.97、2.42、2.87、3.05、3.95、4.84。其中, $\alpha \leq 1$  的值由 Vague 集相似度量模型得到, $\alpha > 1$  的值则由超标倍数得到;瞬时危害度的临界值是 3.05,与  $\alpha = 1$  对应,超过该值时,水质已被污染而超标。Vague 集相似度量模型的引入,既可将硝基苯污染物浓度变化值标准化以方便比较,如未引入前是小于 0.017 达标,而

引入后是小于 1 达标;也可清晰地表达硝基苯污染物浓度在临界标准区间  $[0, 0.017]$  中变化时  $\alpha$  的模糊渐变过程,如  $\alpha \leq 1$  的值都是达标的,但  $\alpha = 0.647$  时的达标程度要高于  $\alpha = 0.794$  时。

#### 3) 模型灵敏度分析

(1) 相同污染规模与程度的污染事故发生在白天或夜晚,其危害程度将不一样。针对工况 1,污染事故在白天发生时,昼夜系数  $\beta_1$  为 0,危害度为 33.02,而如发生在夜晚,则  $\beta_1$  为 0.2,危害度为 40.26。即同一污染事故发生在白天和夜晚,其危害程度有明显的差别;也说明模型能对污染事故发生在白天或夜晚的差别进行有效区分。

(2) 相同污染规模与程度的污染事故,如污染物的毒性不一样,则污染事故的危害度也差别较大。在工况 1 中,当污染物毒性由低向高变化时,污染事故危害度也相应以较大幅度增加,即当毒性系数  $\beta_2$  为 0、0.5、1、2、4 时,危害度相应为 20.15、29.25、30.97、33.02、35.46,增加幅度非常明显。

(3) 最小应急响应时间  $t^*$  由小向大变化时,污染事故危害度也以较大幅度增加。在工况 1 中,如设计的  $t^*$  变化过程为:60、180、360、720、1440 min,则紧迫系数  $\beta_3$  分别为 0.6、0.81、1.12、1.74、2.98,危害度分别为 28.88、29.93、31.22、33.24、36.22。

由最小应急响应时间增加而导致的危害度增加明显,表明如应急响应部门能很快投入应急抢险,则能有效减轻污染事故危害;反之,则会延误时间,导致污染事故的危害度增加。

(4)相同污染规模与程度的污染事故发生时的天气状况不一样,则污染事故的危害度将有差别。当能见度减小时,如从能见度大于100 m减小到小于50 m,则气象系数分别为0、0.2、0.3,污染事故危害度相应为29.25、36.49、37.26,由能见度降低而引起污染事故危害度的增加也很明显。

由以上分析讨论可知,所构建模型既可简洁地反映危害事故可能的最大危害程度,也可提供污染事故瞬时危害程度的模糊渐变过程;同时,模型也能有效地反映污染事故的增强影响因子变化时,污染事故危害程度的变化情况。这些信息都将有利于污染事故的应急响应决策。

## 4 结语

对湖库水源地及明渠取水型城市原水系统污染事故的“危害度”评价进行探讨。分析了“危害度”的直接与间接影响因素,引用粗糙集理论的属性约简方法对“危害度”间接影响因素进行冗余约简;组合“危害度”的直接与间接影响因素作用,构建了一种湖库水源地及明渠取水型的城市原水系统污染事故的应急评价模型,并在该模型中引用Vague集相似度量模型对主要直接影响因素“浓度超标系数”的模糊渐变性进行度量。以成都市原水系统为应用背景,采用敏感性分析方法,对所构建模型的合理性与有效性进行了分析。所构建模型能反映不同流量工况下,水厂取水口断面污染物浓度超标倍数的变化以及污染事故危害度的变化;能够表征污染事故危害程度的间接影响因素变化时,危害度的变化情况。关于城市原水污染事故危害影响程度的应急评价研究还需进一步深入,例如,基于应急评价模型的决策风险研究,以及其它类型水源地及取水方式的原水系统污染事故危害度的评价模型研究等。

### 参考文献:

- [1] 王丹宁,赵明,赵洪宾.应用灰色聚类模型对给水管网水质的综合评价[J].重庆建筑大学学报,2007,29(6):98-100.  
WANG DAN-NING, ZHAO MING, ZHAO HONG-BIN. Synthetic evaluation of water quality in water supply networks based on grey classified model[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007,29(6): 98-100.
- [2] GULLICK R W, GRAYMAN W M, DEININGER R A, et al. Design of early warning monitoring systems for source waters[J]. Journal AWWA, 2003,95(11): 58-72.
- [3] STATES S, NEWBERRY J, WICHTERMAN J, et al. Rapid analytical techniques for drinking water security investigations[J]. Journal AWWA, 2004,96(1):152-164.
- [4] 池丽敏.江河水源地突发性水污染事故风险评价[J].工业安全与环保,2009,35(3):32-34.  
CHI LI-MIN. Environmental risk assessment for abrupt accidents in water source areas of rivers[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2009, 35(3):32-34.
- [5] 熊风,罗洁,杨立中,等.城市河流污染总量控制和综合治理研究——以四川省绵阳市涪江河段为例[J].重庆建筑大学学报,2008,30(1):109-113.  
XIONG FENG, LUO JIE, YANG LI-ZHONG, et al. Study on gross control and comprehensive treatment of urban river according to Fu River in Mianyang district, Sichuan[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008,30(1):109-113.
- [6] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Parallel Programming,1982,11(5):341-356.
- [7] PAWLAK Z. Rough sets and their applications[J]. Microcomputer Applications,1994,13(2):71-75.
- [8] PAWLAK Z. Decisions rules and flow networks[J]. European Journal of Operational Research,2004,154(1):184-90.
- [9] 代建华,陈卫东,潘云鹤.基于粗糙集的综合推理模型[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(9):1526-1530.  
DAI JIAN-HUA, CHEN WEI-DONG, PAN YUN-HE. Synthesis reasoning model based on rough set theory[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2006,40(9):1526-1530.
- [10] LASHIN E F, MEDHAT T. Topological reduction of information systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25(2): 277-286.
- [11] 邓武,杨鑫华,赵慧敏.基于粗糙集和混合聚类法的决策表约简算法[J].大连交通大学学报,2008,29(3):86-90.  
DENG WU, YANG XIN-HUA, ZHAO HUI-MIN. An algorithm for decision table reduction based on rough set and hybrid clustering method[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008,29(3):86-90.
- [12] 高晓康,张今渡,施雨辰.粗糙集理论在注射成型中的应用[J].模具工业,2007,33(5):5-7.  
GAO XIAO-KANG, ZHANG JIN-DU, SHI YU-CHEN. Application of rough set theory in injection

- molding[J]. Die & Mould Industry, 2007,33(5):5-7.
- [13] QIU T R, YOU M, et al. A method of uncertainty measure based on rough set[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Granular Computing, Hangzhou, August 26th-28th, 2008 :544-547. .
- [14] 郭小荟,马小平. 基于粗糙集的故障诊断特征提取[J]. 计算机工程与应用,2007,43(1):221-224.  
GUO XIAO-HUI, MA XIAO-PING. Fault diagnosis feature subset selection using rough set[J]. Computer Engineering and Applications, 2007,43(1):221-224.
- [15] GAU W L, BUCHRER D J. Vague sets[J]. IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(2): 610-614.
- [16] 张东风,张金隆,窦亚玲. Vague 综合评判方法[J]. 计算机工程与应用, 2009,45(9):154-156.  
ZHANG DONG-FENG, ZHANG JIN-LONG, DOU YA-LING. Vague comprehensive evaluation approach [J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(9):154-156.
- [17] 李凡,徐章艳. Vague 集之间的相似度量[J]. 软件学报, 2001,1(26):922-927.  
LI FAN, XU ZHANG-YAN. Measures of similarity between vague sets[J]. Journal of Software, 2001,1(26):922-927.
- [18] 李志勤. 水库水动力学特性及污染物运动研究与应用[D]. 成都:四川大学水利水电学院,2005.
- [19] 成都市水务局. 2006 年成都市水资源公报[EB/OL]. (2007-12-25). <http://www.cdbwr.chengdu.gov.cn/uploadfiles/023503/20071225154900.doc>.
- (编辑 胡英奎)

.....

(上接第 112 页)

- [14] YANG JIAN-BO, MADAN G S. An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty [ J ]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetic, 1994, 24(1):1-18.
- [15] WANG Y M, Y J B, XU D L. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174: 1885-1913.
- [16] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 中国建筑工业出版社,1993
- [17] Office of the Deputy Prime Minister. The building regulations 2000: conservation of fuel and power L1A - Conservation of fuel and power in new dwellings[S]. 2006.
- [18] Energy Efficiency Best practice in Housing - Energy efficient domestic extensions. 2005[EB/OL]. <http://www.est.org.uk/bestpractice>
- [19] 中华人民共和国建设部. 物业管理企业资质管理办法 [M]. 北京:中华人民共和国建设部,2004
- (编辑 胡英奎)