

突发性水资源安全风险分析

畅明琦^{1,2}, 刘俊萍³, 黄 强²

(1. 山西省水资源研究所, 山西 太原 030001; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
3. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要 突发性水污染是水资源安全面临的最常见的威胁之一, 为做好突发性事故的预防、应急监测及应急处理, 最大限度地减少对生态环境的破坏, 应用扩散理论和风险理论, 研究泄漏点下游一定断面在不同泄漏时间有毒物质超标的风险、一定时间不同断面有毒物质超标的风险及有毒物质沿河宽的浓度分布, 并计算得出高风险河段和高风险时间段. 研究表明, 超标风险大体呈抛物线型变化, 表现出先增大, 后减少的规律, 高风险河段和高风险时间段的分析, 可提供有益的信息, 以避免在这些河段和时间段取水, 尽可能降低污染事故的危害程度.

关键词 突发性 水资源安全 风险

中图分类号 TV213 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)03-0281-05

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源, 是社会经济可持续发展和维护生态平衡的重要基础. 水资源安全是指水循环系统的健康运行不因水资源的问题而受到危险与威胁的状态, 它是国家安全与发展的战略基石. 随着社会经济的发展, 不论现在还是将来, 我国的水资源形势均不容乐观, 水资源安全问题已成为人们关注的核心^[1].

突发性的水资源安全问题很多, 比如战争、地震、破坏、袭击、失误以及突发性的水污染等, 均可以破坏或影响水资源安全系统的正常与良性运行. 本文就突发性水污染事故的水资源安全问题展开研究, 对于做好突发性事故的预防、应急监测、应急处理及善后工作, 最大限度地减少对生态环境的破坏具有十分重要的意义.

1 扩散理论和风险理论简介

许多学者已开展了有关水资源的风险管理^[2]、突发性水环境风险评价^[3]、污染物风险率的估算^[4]、区域生态风险评价^[5]、调水对水资源安全的影响分析^[6]等方面的研究, 取得了大量的研究成果. 本文应用扩散理论和风险理论从水质方面对突发性水资源安全风险进行分析.

扩散理论的研究在分子扩散方面比较成熟, 在流体中物质的扩散应按移流扩散方程(紊流则为紊流扩散方程)分析, 对复杂的流动情况求解是困难的, 但在单向均匀流动中, 即各处流速均为 $u_x, u_y = u_z = 0$ 的情况, 就有一些解析解. 在层流, 因边界引起黏性剪切力的存在, 这种均匀流动实际上是难以遇到的. 对于紊流, 严格说来也不可能出现, 因为没有剪切力就不能维持均匀紊流而不衰减. 因此, 紊流只是一种假想的流动, 但对这种流动的扩散便于进行理论分析, 对有些实际紊流可近似应用扩散理论^[7-8].

当不考虑边界影响时, 对三维情况:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \sum S \quad (1)$$

式中: c ——有毒物质的质量浓度; t ——有毒物质的泄漏时间; u_x, u_y, u_z ——水流在 x, y, z 方向的速度分量; E_x, E_y, E_z —— x, y, z 方向的湍流扩散系数; $\sum S$ ——内部所有源和汇的代数和, 如流动内部没有扩散质的发生与衰减时, $\sum S = 0$.

浓度解为

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{(4\pi t)^{3/2} \sqrt{E_x E_y E_z}} \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4E_x t} - \frac{y^2}{4E_y t} - \frac{z^2}{4E_z t} \right] \quad (2)$$

式中 M 为溶质质量.

瞬时源的二维对流扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3)$$

浓度解为

$$c(x, y, t) = \frac{m}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} \right] \quad (4)$$

式中: m ——单位长度包含的溶质质量, kg/m; D_x, D_y —— x, y 方向的弥散系数.

瞬时源的一维对流扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5)$$

浓度解为

$$c(x, t) = \frac{\mu}{\sqrt{4\pi D_x t}} \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} \right] \quad (6)$$

式中, μ 为单位面积包含的溶质质量.

扩散方程的求解与污染源的存在形式有关. 污染源在水体空间的存在形式有瞬时源和时间连续源. 本文就突发性水资源安全风险进行研究, 把突发性的水资源安全问题近似看作瞬时污染源.

某一有毒物质在水体中的扩散按二维流来考虑, 对大多数实际问题, 水流具有明显的主流方向, 其 u_y, u_z 可以忽略不计, 二维扩散方程为式(3), 解析式为式(4).

假如 c 表示一种在水里可以降解的污染物的浓度, 它的衰减反应系数为 k , 则式(4)变为

$$c(x, y, t) = \frac{M}{4\pi h \sqrt{D_x D_y t^2}} \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} \right] \exp(-kt) \quad (7)$$

河流某断面超标风险率定义为污染物质在泄漏时间 t_0 之后, 在河流中距泄漏点 x_0 的断面超过该物质的水质标准 c_0 的概率^[3,9]. 用下式表示:

$$R = P((c(y)/c_0) > 1) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_{c_0}^{c_1} f(x, y, t, c) dc dy \quad (8)$$

式中: B ——河流宽; c_1 ——有污染物质泄漏时的初始浓度.

如果 $f(x, y, t, c)$ 已知, 则通过式(8)积分即可求得风险 R . 如设

$$A = \frac{M \exp \left[-\frac{(x_0 - u_x t_0)^2}{4D_x t_0} \right] \exp(-kt_0)}{h \sqrt{2\pi\sigma_x}} \quad \sigma_x = \sqrt{2D_x t_0}, \sigma_y = \sqrt{2D_y t_0}$$

式(7)可转化为

$$c(x, y, t_0) / \left\{ \frac{M \exp \left[-\frac{(x - u_x t_0)^2}{4D_x t_0} \right] \exp(-kt_0)}{h \sqrt{2\pi} \sqrt{2D_x t_0}} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{2D_y t_0}} \exp \left(-\frac{y^2}{4D_y t_0} \right) \quad (9)$$

将 A, σ_x 和 σ_y 代入式(9), 得

$$c(x, y, t_0) / A = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \quad (10)$$

令 $\varphi(y) = c(x, y, t_0) / A$, 则得

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \quad (11)$$

当 x, t_0 已知时, 式(11)是关于 y 的标准正态分布函数.

利用式(11)可计算 $x = x_0, t = t_0$ 时的超标风险率：

$$R = P(y_1 \leqslant y \leqslant y_2) = F\left(\frac{y_2}{\sigma_y}\right) - F\left(\frac{y_1}{\sigma_y}\right) = 2F\left(\frac{y_2}{\sigma_y}\right) - 1$$

(12)

式中： F ——标准正态累积分布函数； y_1, y_2 ——水中物质达到水质标准时 $\varphi(y)$ 的 2 个解。

2 突发性有毒物质泄漏风险分析

某河发生突发性的氯苯泄漏事件,河水平均流速 0.56 m/s,平均河宽 300 m,平均河深 2.3 m.假设泄漏点在河中心,泄漏量为 210 kg,地面水中氯苯的最高允许浓度为 0.02 mg/L,弥散系数 D_x 的确定采用示踪法,为 150 m²/s, D_y 按经验取为 0.06 m²/s.

a. 一定断面、不同泄漏时间氯苯超标风险. 在下游某一断面,当泄漏时间不同时,氯苯质量浓度是不同的. 根据式(4)~(12),计算距泄漏点下游断面 3 km 处,泄漏 0.5 h(1 800 s)至 4 h(14 400 s)内的氯苯质量浓度沿河宽的分布,见图 1. 随着泄漏时间的延长,同一断面氯苯质量浓度表现出先增大,后减小的规律.

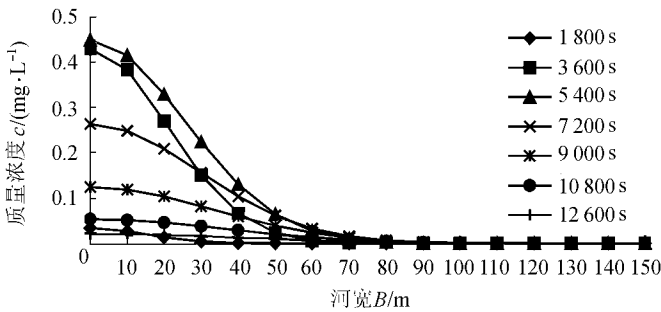


图 1 不同泄漏时间氯苯质量浓度沿河宽的分布

Fig.1 Chlorobenzene concentration distribution along river width at different moments after leakage

当泄漏时间 $t = 1\,800\text{ s}$, $t = 4\,540\text{ s}$, $t = 12\,770\text{ s}$ 时,氯苯质量浓度见表 1.

表 1 不同时间的氯苯质量浓度分布 ($x_0 = 3\text{ km}$)

Table 1 Chlorobenzene concentration distribution at different moments

河宽 B/m	氯苯质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			河宽 B/m	氯苯质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
	1 800 s	4 540 s	12 770 s		1 800 s	4 540 s	12 770 s
0	0.034 2	0.494 8	0.020 1	80	0.000 0	0.001 4	0.000 3
10	0.027 1	0.451 3	0.018 8	90	0.000 0	0.000 3	0.000 1
20	0.013 5	0.342 4	0.015 4	100	0.000 0	0.000 0	0.000 0
30	0.004 2	0.216 0	0.011 1	110	0.000 0	0.000 0	0.000 0
40	0.000 8	0.113 4	0.007 0	120	0.000 0	0.000 0	0.000 0
50	0.000 1	0.049 5	0.003 9	130	0.000 0	0.000 0	0.000 0
60	0.000 0	0.018 0	0.001 9	140	0.000 0	0.000 0	0.000 0
70	0.000 0	0.005 4	0.000 8	150	0.000 0	0.000 0	0.000 0

根据式(12)可计算一定断面的氯苯超标风险率,从氯苯泄漏 1 800 s 后开始监测此断面. 随着时间的延长,此断面的氯苯质量浓度超标风险大体呈抛物线型变化,见图 2. 当 $t = 1\,800\text{ s}$ 时,超标风险率为 70%,随着泄漏时间的延长,超标风险越来越大. 当 $t = 1\,800 \sim 1\,880\text{ s}$ 时,风险率 $r = 70\% \sim 79\%$; 当 $t = 4\,450\text{ s}$ 时,达到最大值 99%; 超过 4 450 s 以后,随着时间的延长,氯苯不断稀释,超标风险越来越小,河流水质逐渐恢复,到 12 770 s 后,超标风险率小于 5%.

b. 一定泄漏时间、不同下游断面氯苯超标风险. 在一定泄漏时间内,在不同断面监测的氯苯质量浓度是不相同的. 取泄漏时间 $t_0 = 3\,600\text{ s}$,根据式(4)~(12),计算下游断面 50~5 000 m 的氯苯质量浓度沿河宽的分布. 随着断面泄漏点

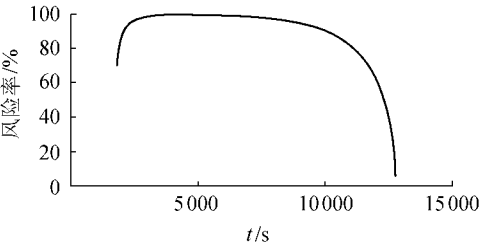


图 2 氯苯质量浓度超标风险 ($x_0 = 3\text{ km}$)

Fig.2 Over-standard risk of chlorobenzene concentration ($x_0 = 3\text{ km}$)

越来越远,同一泄漏时间氯苯质量浓度也具有先增大、后减小的变化规律,如图 3 所示.

当氯苯泄漏 3 600 s 后,随着距泄漏源距离的延长,超标浓度由大变小,下游 50 m 断面、2 490 m 断面、4 772 m 断面氯苯质量浓度分布见表 2.

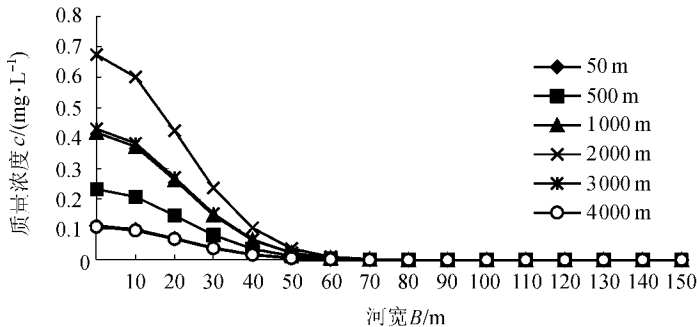


图 3 不同断面氯苯质量浓度沿河宽的分布

Fig.3 Chlorobenzene concentration distribution along river width in different cross-sections

表 2 不同下游断面的氯苯质量浓度分布($t_0 = 3\,600\text{ s}$)

Table 2 Chlorobenzene concentration distribution in different cross-sections of lower reaches($t_0 = 3\,600\text{ s}$)

河宽 B/m	氯苯质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			河宽 B/m	氯苯质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
	50 m 断面	2 490 m 断面	4 772 m 断面		50 m 断面	2 490 m 断面	4 772 m 断面
0	0.1126	0.6073	0.0200	80	0.0001	0.0004	0.0000
10	0.1002	0.5407	0.0178	90	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.0707	0.3817	0.0126	100	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0396	0.2136	0.0070	110	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.0176	0.0947	0.0031	120	0.0000	0.0000	0.0000
50	0.0062	0.0333	0.0011	130	0.0000	0.0000	0.0000
60	0.0017	0.0093	0.0003	140	0.0000	0.0000	0.0000
70	0.0004	0.0021	0.0001	150	0.0000	0.0000	0.0000

氯苯超标的风险随着断面距离的增加,即距泄漏源的距离的延长,超标风险表现出先增大,后减少的规律.在 50 m 断面,超标风险为 94%,50 m 后的断面超标风险逐渐增加,至 2 060 m 断面处达到最大,风险为 99.2%.50~2 060 m 这一河段氯苯超标风险一直保持在 94%~99% 之间,是一高风险河段.2 060 m 断面后风险逐渐减小,但仍然存在高风险.2 060~4 210 m,风险为 99%~90%;4 220~4 420 m,风险为 90%~80%;4 430~4 550 m,风险为 80%~70%;4 560 m~4 760 m,风险为 70%~20%,这段河段风险衰减得很快.在 4 772 m 断面,风险降至 3%,低于 5%,此时取水是比较安全的.风险随距离的变化如图 4 所示,距泄漏点越远,水质超标的时间越延迟.

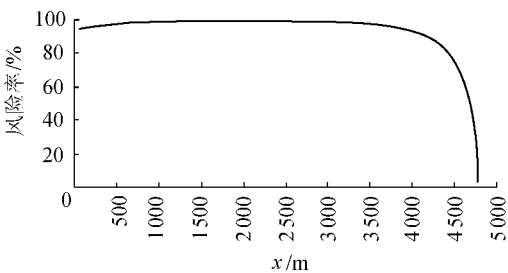


图 4 氯苯质量浓度超标风险($t_0 = 3\,600\text{ s}$)

Fig.4 Over-standard risk of chlorobenzene concentration ($t_0 = 3\,600\text{ s}$)

3 结 语

通过对突发性水污染水资源安全风险的研究,得出了污染物质浓度沿河宽的分布规律和超标风险变化规律,以及高风险河段和高风险时间段.在突发性水污染事故发生后,应采取紧急救援措施,做出及时有效的处理方案,避开在高风险河段和高风险时间段取水,加强水污染的应急监测,尽可能降低污染事故的危害程度.

参考文献:

[1] 畅明琦,刘俊萍.论中国水资源安全的形势[J].生产力研究,2006(8):5-7.

- [2] 冯平. 供水系统干旱期的水资源风险管理[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2): 139-144.
- [3] 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 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.
- [4] 胡国华, 夏军. 风险分析的灰色——随机风险率方法研究[J]. 水利学报, 2001(4): 1-6.
- [5] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271.
- [6] 刘年丰, 吴华军, 周羽. 南水北调对汉江中游襄樊市水资源安全影响分析[J]. 水电能源科学, 2004, 22(3): 53-56.
- [7] 金士博. 水环境数学模型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 13-32.
- [8] 赵文谦. 环境水力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1986: 6-34.
- [9] 麻荣永. 土石坝风险分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 2-9.

Risk analysis of water resources security under sudden water pollution accidents

CHANG Ming-qi^{1,2}, LIU Jun-ping³, HUANG Qiang²

(1. Shanxi Institute of Water Resources, Taiyuan 030001, China ;

2. Institute of Water Resources & Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China ;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract Sudden water pollution accidents seriously threaten the security of water resources. For effective prevention, emergency monitoring, and emergency treatment of water pollution accidents and decrease of their harms to ecological environment to the greatest extent, a study was performed on the over-standard risks of toxic substances both in a certain cross-section for different leakage time and in different cross-sections for a certain leakage time on the lower reaches of leakage points and the distribution of toxic substance concentration along the width of rivers. The high-risk river reaches and high-risk time periods were obtained by calculation. The result shows that the over-standard risk of toxic substances demonstrates a variation trend approximate to a parabolic curve, i. e. first increasing and then decreasing. The analysis of high-risk river reaches and high-risk time periods makes it possible to avoid such high-risk river reaches and time periods, so that the damage induced by water pollution accidents could be reduced.

Key words sudden occurrence ; water resources security ; risk