

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.011

地表水源突发污染应急处置技术筛选评估体系

曲建华¹,孟宪林^{1,2},尤 宏^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,150090 哈尔滨;
2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),150090 哈尔滨)

摘 要:为应对地表水源突发污染,筛选最优应急处置技术,采用层次分析法(AHP)构建了包含12个评价指标的地表水源突发污染威胁度评估指标体系,用以预判突发污染对水源地的威胁程度;构建了由19个评价指标组成的应急处置技术评估指标体系,依据不同等级的威胁度,确定出与其对应的评估指标权重值;基于多重指标体系的联合评估,确保了筛选评估体系的科学性.通过山西苯胺泄漏污染事故实例对评估体系进行了验证.结果表明,本文构建的筛选评估体系可对应应急处置技术方案进行快速、准确的评估,可为应急专家决策提供有效的技术支撑.

关键词:威胁度判定;地表水源地;应急处置技术;层次分析法

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)08-0054-05

Evaluation system for emergency disposal technology insurface drinking water source pollution

QU Jianhua¹, MENG Xianlin^{1,2}, YOU Hong^{1,2}

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

Abstract: In order to obtain the optimum emergency disposal technology scheme for the pollution of surface drinking water source, a threat-evaluation index system with 12 indicators was established based on analytic hierarchy process (AHP). Meanwhile, the technique evaluation system containing 19 indices was also developed, with different threat-levels corresponded to different weights of each evaluation indicator. The scientificity of the multiple evaluation systems has been evaluated using a sudden aniline pollution accident occurred in Shanxi. Experimental results showed that the evaluation system can assess the disposal technology schemes accurately once the accident occurred, and will provide technical support for emergency experts.

Keywords: threat-evaluation; surface drinking water source; emergency disposal technology; analytic hierarchy process

水源地是为城市提供清洁和充足水源的生态环境基础^[1].近年水源地突发污染事故频发,严重威胁城市供水安全,影响人民正常的生活与生产秩序,造成极为严重的社会影响^[2].突发污染事故一旦影响到水源地,就会放大其影响程度、规模和时间.因此,迅速、准确地筛选出适宜污染情景的应急处置技术极为重要.目前,国内外相关研究主要是通过经验总结或构建单一的指标体系和赋予指标权重对所选技

术进行筛选^[3-6].但水源地因其敏感性,一旦遭到突发污染,污染对水源地威胁度的不同势必导致技术筛选指标体系指标权重的不同.突发污染对水源地威胁较低时,指标体系中经济成本指标的权重应相对较大.而威胁较高时,应更注重所选技术的时效性而适当降低经济成本指标的权重.因此,固定一套指标体系进行应急技术的筛选缺乏科学性.

本文采用层次分析法构建了水源地突发污染威胁度评估指标体系,并给出了威胁等级的判定方法;构建了应急处置技术评估指标体系,并根据不同威胁度确定了2套应急处置技术筛选指标体系的权重值.通过2个指标体系和3套权重值对应急技术的共同筛选,确保了评估方法的准确性和科学性.

收稿日期: 2014-10-23.

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项项目(201209048).

作者简介: 曲建华(1987—),男,博士研究生;

尤 宏(1961—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 孟宪林, hgdmlx@163.com.

1 威胁度的判定方法

1.1 构建评价指标体系

根据 1985—2012 年共 300 余起国内外水源地突发污染事件的调研结果^[7], 突发污染对水源地的威胁度主要与污染情况、污染位置、水源地规模、应急管理、备用水源等因素有关; 本文选择广泛应用于多目标决策的层次分析法构建了包含 12 项评价指标的水源地突发污染威胁度评估指标体系, 见表 1。

表 1 地表水源地突发污染威胁度评估指标体系

目标层	准则层	指标层
A 地表水源地突发污染事故威胁度	B1 污染情况	C1 是否水中优先控制污染物
		C2 发展态势
		C3 取水口处污染物超标倍数
	B2 污染位置	C4 污染发生位置
		C5 污染团到达取水口时间
		C6 污染团影响取水口时间
	B3 水源地规模	C7 水源地级别
		C8 水源地服务人数
	B4 应急管理	C9 现场监测情况
		C10 预警情况
	B5 备用水源	C11 启用速度
		C12 应急供水满足程度

1.2 计算指标权重

邀请专家依据 Saaty 提出的 1~9 标度法^[8]对指标的相对重要性打分, 统计所有专家意见, 作为确定权重的依据。

1) 构造判断矩阵。建立层次结构后, 层次之间元素的隶属关系就被确定。假定上一层次的元素 B_i 作为准则, 对下一层次元素 $C_1, \dots, C_n$ 有支配关系, 将其下一层次中所有与之关联的元素之间两两比较其重要性, 比较结果按 1~9 的比较尺度定量表示标出, 采用专家打分法构建判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 直至底层。1~9 级比较尺度含义见表 2。

表 2 1~9 级比较尺度含义

尺度分级	含义
1	2 个指标相比, 具有同等重要性
3	2 个指标相比, 前者比后者稍微重要
5	2 个指标相比, 前者比后者明显重要
7	2 个指标相比, 前者比后者强烈重要
9	2 个指标相比, 前者比后者绝对重要
2, 4, 6, 8	重要程度分别介于 1, 3, 5, 7, 9 之间
上述各数的倒数	若指标 i 与指标 j 重要性之比为 b_{ij} , 则指标 j 与 i 的重要性之比为 $b_{ji} = 1/b_{ij}$

2) 层次单排序的一致性检验。Saaty 等^[8]定义 CI 为 B (判断矩阵) 的一致性指标, $CI=0$ 时, B 为一致阵, CI 越大, B 的不一致性程度越严重。一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}.$$

(1)

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; n 为判断矩阵的阶数。

为了确定 B 的不一致程度的容许范围, 需找出衡量 B 的一致性指标的标准, Saaty 等^[8]引入随机一致性指标 RI , 即

$$CR = \frac{CI}{RI}.$$

(2)

式中: CR 为层次单排序的一致性比率, CI 为一一致性指标, RI 为随机一致性指标, 其随机均值见表 3。

若 $CR \leq 0.10$, 判断矩阵具有可接受的一致性; 若 $CR > 0.10$, 判断矩阵的一致性不满足要求, 需调整。

表 3 RI 取值

n	RI	n	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

n 为矩阵阶数。

计算得 $A-B=0.012\ 3$, $B1-C=0.017\ 6$, $B2-C=0.051\ 5$, $B3-C=0.000\ 0$, $B4-C=0.000\ 0$, $B5-C=0.000\ 0$, 均 <0.10 , 通过一致性检验。同时计算得到准则层 B 对于目标层 A 的权重 (b_j) 及指标层 C 对于准则层 B 的权重 (w_i), 见表 4。

3) 层次总排序的一致性检验。综合 b_j 与 w_i 得指标层 C 对目标层 A 的层次总排序, 即指标权重

$$W_i = w_i \times b_j.$$

(3)

Saaty 等^[8]定义 CR 为层次总排序的一致性比率, 当 $CR \leq 0.10$ 时, 总排序的结果是满意的。

层次总排序一致性比率为

$$CR = \sum_{j=1}^n b_j CI_j / \sum_{j=1}^n b_j RI_j.$$

(4)

式中 b_j 为准则层元素的权重, CI_j 为与 b_j 对应的准则层判断矩阵的一致性指标, RI_j 为与 b_j 对应的准则层判断矩阵的平均随机一致性指标; 计算得 $CR = 0.032\ 6$, 满足一致性要求。

表 4 目标层至指标层的指标权重

项目	B1	B2	B3	B4	B5	W_i
	0.095 3	0.255 8	0.149 3	0.045 2	0.454 4	
C1	0.095 3	0	0	0	0	0.009 1
C2	0.249 9	0	0	0	0	0.023 8
C3	0.654 8	0	0	0	0	0.062 4
C4	0	0.527 8	0	0	0	0.135 0
C5	0	0.139 6	0	0	0	0.035 7
C6	0	0.332 5	0	0	0	0.085 1
C7	0	0	0.250 0	0	0	0.037 3
C8	0	0	0.750 0	0	0	0.112 0
C9	0	0	0	0.750 0	0	0.033 9
C10	0	0	0	0.250 0	0	0.0113
C11	0	0	0	0	0.250 0	0.113 6
C12	0	0	0	0	0.750 0	0.340 8

1.3 确定评价标准

在评价过程中,依据各指标对水源地的威胁程度将评价因子划分为5级,分别赋予2、4、6、8、10的相应分值.各评价因子依据现行环境标准和技术导则的相关要求,对应的分值如表5所示.

1)污染情况.通过水中优先控制污染物黑名单^[9]确定突发污染物的优先控制性(C1),判断污染物的毒性大小及对水源地的危害程度;发展态势(C2)指不对突发污染采取任何应对措施可能导致的后果,后果越严重对水源的威胁越大;依据突发污染物相关应急处置技术可应对的最大超标倍数确定取水口处污染物超标倍数(C3)的评分标准,描述其对水源的威胁程度.

若突发污染为多种污染物导致的复合污染,应分2种情况确定指标C3的分值.

①若各污染物为同属性质物质(如均为有机物),因对其采用的应急处置技术方案相似,在对此项指标的评判过程中,应先根据各自超标倍数进行打分,然后对各污染物超标倍数的打分结果进行累积相加,确定复合污染物的综合超标倍数分值.

②若污染物为不同属性物质,因应对不同污染物的应急处置技术方案有区别,应分别根据各自污染物超标倍数进行打分,计算出各自的威胁度;然后针对每一污染物的应急处置技术进行评估,确定适宜于各污染物的应急处置技术方案,最后进行方案

的综合优化.

2)污染位置.根据《饮用水水源保护区划分技术规范》确定污染发生位置(C4)的评分标准,突发污染的保护区级别越高,水源受到的威胁越大;依据《水污染防治法》中对造成水污染事故导致居民停水12 h以上的相关责任人实行刑事处罚的相关规定,确定污染团到达、影响取水口时间(C5、C6)的评分标准.

3)水源地规模.依据水源地供水对象,确定水源地级别(C7)的评分标准;根据《城市规划法》对城市规模的划分确定水源地服务人数(C8)的评分标准;水源地供水地区级别越高,供水服务人数越多,污染对水源的威胁程度越大.

4)应急管理.能否现场监测污染物(C9)及监测周期的长短对于能否尽快判明现场污染情况,迅速采取应急措施起着至关重要的作用;依据《国家突发公共事件总体应急预案》,发生突发污染事件后,信息报告最迟不得超过4 h,以此确定预警情况(C10)的评分标准;预警不及时会加大居民中毒、死亡的风险,进而加大污染对水源的威胁.

5)备用水源.备用水源启动速度(C11)快慢与否关乎居民的用水安全,若备用水源迅速启动而不致居民停水,将使突发污染的威胁度大大降低;根据文献^[10]调研,应急状态下供水量为正常的50%即可满足居民的生活用水量,以此为参考确定应急供水满足程度(C12)的评分标准.

表 5 评价因子的评分标准

评价因子	2 分	4 分	6 分	8 分	10 分
是否水中优先控制污染物		否			是
污染发展态势	不超标	超标不停水	超标不中毒	中毒/停水	致死
取水口处污染物超标倍数	≤2	2~10	10~50	50~100	≥100
污染发生位置	非保护区	准保护区		二级保护区	一级保护区
污染团到达取水口时间/h	≥12	8~12	4~8	1~4	≤1
污染团影响取水口时间/h	≤1	1~4	4~8	8~12	≥12
水源地级别	行政村、自然村、企业自备水厂水源地		街(镇)级水源地	区(县)级以上城镇水源地	城市主要水源地
水源地服务人数/万	≤2	2~10	10~20	20~50	≥50
现场监测情况	可实现现场实时动态监测		可现场监测,监测周期较短	可现场监测,但监测周期较长	无法现场监测
预警情况/h	≤1	1~2	2~3	3~4	≥4
备用水源启用速度	不停止供水,即刻启用	需进行简单改造,及时启用	需进行相对复杂的改造,方可启用	需进行比较复杂的改造方可启用	需进行极为复杂的改造方可启用
应急供水满足程度/%	75~100	50~75	25~50	10~25	≤10

2 结果与讨论

2.1 威胁度分级标准的确定

依据表4各指标的局权重(W_i)和表5的指标评分标准,采用线性加权确定威胁度的评价结果,即

式中: W_i 为指标层各指标的综合权重; β_i 为指标层各指标对应的指标评分值.将其最大值与最小值之间均分为4个区间,定义为4个威胁度分级标准,并给出了相应的威胁程度描述,见表6.

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \beta_i. \tag{5}$$

表 6 威胁度分级标准

评价分值 S	威胁度评级	分级意义
$S \geq 8.004\ 6$	I 级(极大威胁)	污染对水源的威胁极大;可导致供水城市大面积长时间停水,水源地生态服务功能将部分消失且服务价值将大量损失,城市居民正常的经济社会活动将受到极大影响。
$6.009\ 2 \leq S < 8.004\ 6$	II 级(重大威胁)	污染对水源的威胁重大;可导致供水城市部分地区长时间停水,水源地生态服务功能将削弱或部分消失,城市居民正常的经济社会活动将受到重大影响。
$4.013\ 7 \leq S < 6.009\ 2$	III 级(较大威胁)	污染对水源的威胁较大;可导致供水城市部分地区短时间停水,水源地生态服务功能将削弱,城市居民正常的经济社会活动将受到影响。
$2.018\ 2 \leq S < 4.013\ 7$	IV 级(一般威胁)	污染会对水源造成一定威胁,但不会导致供水城市停水;水源地生态系统将受到一定干扰,但水源地生态服务功能稳定,城市居民正常的经济社会活动不会受到较大影响。

2.2 突发污染应急技术筛选与评估

根据文献调研^[11-12],地表水源突发污染应急处置技术的可行性和适宜性主要与技术的时效性、可操作性、处置成本等因素有关;综合考虑上述因素,建立了包含 6 个准则指标和 19 个评价指标的地表水源污染应急处置技术评估指标体系,见图 1。

I、II 级威胁度表示突发污染可能对水源地造成很大破坏,严重影响供水安全,此时筛选应急技术的核心

指标应是技术性能,而适当削弱处置成本等指标的权重;III、IV 级威胁度表示突发污染对水源地破坏程度有限,不会对供水安全造成严重影响,在筛选技术时应提高处置成本等指标的权重,适当削减时效性等指标的权重。

基于上述原因,采用层次分析法得出应急处置技术评估指标体系的两套权重值,结果见表 7。通过判定不同威胁度,选择与威胁度对应的一套权重值进行应急技术的筛选与评估。

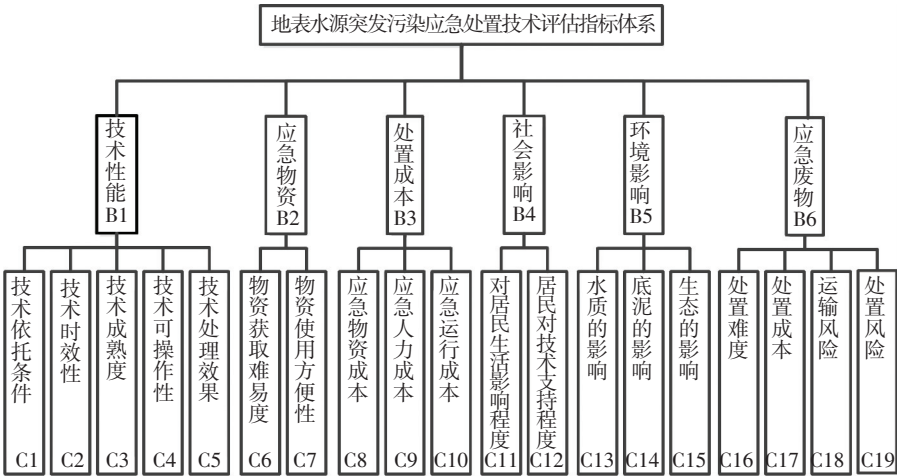


图 1 地表水源突发污染应急处置技术评估指标体系

2.3 案例分析

为进一步检验评估方法的准确性,采用 2012 年 12 月 31 日发生的山西长治浊漳河苯胺泄漏事故实例对评估体系进行了验证。

事故发生于山西省潞城市,由于苯胺罐区一条软管破损,造成约 8.7 t 苯胺泄漏进入浊漳河,对下游饮用水源地——越城水库造成严重威胁,严重影响邯郸、安阳等市的安全供水。实时监测数据显示越城水库苯胺最大质量浓度为 8.43 mg/L,高出《地表水环境质量标准》中苯胺质量浓度标准限值 83 倍。

来自水体污染防治领域的 20 位专家对污染事故进行了详细调研,并采用基于威胁度判定的应急

处置技术评估体系对可行的应急技术方案进行评估。首先,专家组依据实际污染情况对威胁度评估指标体系进行指标评分,判定事故为 II 级威胁(6.037 8),结果如表 8 所示。

同时,基于案例的详细调研,从近 300 起水源污染应急处置案例中筛选出了 5 个相似案例,并将其所应用的应急技术提取出来进行评估,结果见表 9。

最后,选用表 7 中与 II 级威胁度对应的应急技术评估指标体系的指标权重对 5 种可行的应急处置技术方案进行评估,综合各位专家的打分结果,得出的方案评价价值及优选顺序为:方案 1(9.115 8)>方案 4(8.851 5)>方案 3(8.764 2)>方案 2(8.755 5)>方案 5(8.642 5)。

表 7 指标(C1~C19)对目标层(A1)的权重

准则层				指标层		
指标		权重 I/II 级 威胁度	权重 III/IV 级 威胁度	指标	权重 I/II 级 威胁度	权重 III/IV 级 威胁度
A 地 表 水 源 突 发 污 染 应 急 处 置 技 术 评 估 指 标 体 系	B1 技术性能	0.398 1	0.371 7	C1 技术依托条件	0.012 6	0.032 1
				C2 技术时效性	0.133 2	0.148 5
				C3 技术成熟度	0.072 7	0.063 7
				C4 技术可操作性	0.046 4	0.063 7
				C5 技术处理效果	0.133 2	0.063 7
	B2 应急物资	0.246 7	0.140 1	C6 物资获取难易度	0.041 1	0.035 0
				C7 物资使用方便性	0.205 6	0.105 1
				C8 应急物资成本	0.032 6	0.166 6
	B3 处置成本	0.041 5	0.261 6	C9 应急人力成本	0.006 2	0.067 6
				C10 应急运行成本	0.002 7	0.027 4
				C11 对居民生活影响度	0.141 8	0.064 9
	B4 社会影响	0.162 1	0.086 6	C12 居民对技术支持度	0.020 3	0.021 7
				C13 水质的影响	0.085 5	0.052 0
				C14 底泥的影响	0.008 6	0.017 3
	B5 环境影响	0.118 4	0.086 6	C15 生态的影响	0.024 3	0.017 3
				C16 处置难度	0.020 6	0.027 5
				C17 处置成本	0.001 6	0.005 6
	B6 应急废物	0.033 2	0.053 3	C18 运输风险	0.005 5	0.010 1
				C19 处置风险	0.005 5	0.010 1

表 8 威胁度指标评分

评估指标	评价分值	分值意义
C1 是否水中优先控制污染物(0.009 1)	10	为水中优先控制污染物
C2 发展态势(0.023 8)	8	中毒/停水
C3 取水口处污染物超标倍数(0.062 4)	8	50~100
C4 污染发生位置(0.135 0)	2	非保护区
C5 污染团到达取水口时间(0.035 7)	6	4~8 h
C6 污染团影响取水口时间(0.085 1)	10	≥12 h
C7 水源地级别(0.037 3)	10	城市主要水源地
C8 水源地服务人数(0.112 0)	10	≥50 万
C9 现场监测情况(0.033 9)	8	可现场监测,但监测周期较长
C10 预警情况(0.011 3)	10	≥4 h
C11 启用速度(0.113 6)	6	需进行相对复杂的改造,方可启用
C12 应急供水满足程度(0.340 8)	4	50%~75%
总分值	6.037 8	II 级威胁度

表 9 可行的应急处置技术方案

方案	应急处置技术方案
1	{堵漏}+{筑坝,人工引流}+{袋装活性炭网吸附}
2	{堵漏}+{挖沟渠,人工引流}+{袋装活性炭网吸附}
3	{堵漏}+{筑坝,人工引流}+{高锰酸钾氧化}
4	{堵漏}+{筑坝,人工引流}+{大孔径吸附树脂网吸附}
5	{堵漏}+{挖沟渠,人工引流}+{大孔径吸附树脂网吸附}

实际应急处置过程为:关闭距越城水库上游 33 km的水电站闸门,通过小岳峰沟渠将受污染河水引到越城水库下游;同时,将 30 m 宽、1 m 高的袋装活性炭网置入下游水中,以吸附水中苯胺,见图 2.采用此应急处置方案后,河流中苯胺质量浓度降至 0.097 5 mg/L,满足供水要求.可见,案例应用的应急

处置方案与采用本文应急技术评估体系筛选出的最优应急方案一致.



图 2 山西苯胺泄漏事故应急处置技术方案

3 结 论

1)提出地表水源突发污染威胁度判定理论,构建了威胁度评估指标体系,采用层次分析法确定指 (下转第 70 页)