

基于层次分析法的敏感水源识别方法

傅金祥,刘梦阳,由 昆

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 对饮用水水源的敏感性进行分析,识别敏感水源,为提高饮用水安全保障提供有效方法. 方法 针对地下水水源地,选用层次分析法,以环境质量、水资源保障、环境风险、环境应急为准则层,筛选27个指标,构建敏感水源识别体系,使用文献分析与专家问卷调查相结合的方法确定各级影响因子的权重,并验证其可行性. 根据相关规范和法律法规确定评分标准,通过因子的分值和权重,确定水源地敏感度. 结果 根据一致性检验结果,构建的敏感水源识别体系具有可行性,能够根据水源地水质监测与管理情况进行评分敏感度分级,从而识别出敏感水源. 结论 应用层次分析方法建立识别敏感水源地的结构模型,并制定评分标准,保证了识别结果的客观性和准确性,可用此方法进行敏感水源的识别与分析,识别出水源地的敏感级别.

关键词 水源地;敏感水体;层次分析法;评价体系;权重

中图分类号 X832

文献标志码 A

Identification of Sensitive Water Sources Based on Analytic Hierarchy Process

FU Jinxiang, LIU Mengyang, YOU Kun

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to improve the safety of drinking water to provide an effective way, the sensitivity of drinking water were analyzed to identify sensitive sources. According to the groundwater source, using AHP, the quality of the environment, water resources, environmental risk, environmental emergency as the criterion layer, select 27 indicators, and build sensitive source identification system. The paper uses the method of literature analysis and expert questionnaire to determine the weight of factors at all levels, and to verify its feasibility. According to the relevant norms and laws and regulations, through the factor score and weight, determine the water source sensitivity. According to the results of the consistency test, the sensitive water source identification system is feasible, and can be classified according to the water quality monitoring and management of water resources, so as to identify the sensitive water source. Use analytic hierarchy process to construct a model for identifying sensitive water sources, and formulate the standard for evaluation, to ensure the objectivity and accuracy of the recognition results. This method can be used for identification and analysis of sensitive source, and identify the sensitive level of water sources.

收稿日期:2016-05-04

基金项目:国家十二五水体污染控制与治理科技重大专项课题资助项目(2012ZX07505-003-01)

作者简介:傅金祥(1955—),男,教授,博士,主要从事污水处理与资源化技术研究.

Key words: water source; sensitive water; analytic hierarchy process; evaluation system; weight

根据城市饮用水水源地安全评价,我国部分城市饮用水水源地存在水量不足、水质不达标、水源地安全管理措施不完善等问题^[1]. 根据我国对水源地的保护与管理状况,可以得出两个方面的问题:一是有关水源地保护方面的;二是有关水源地管理方面的^[2]. 在水源地保护方面,建立并健全饮用水安全保障体系的关键环节是对饮用水水源地环境安全进行全面监控与准确预警. 从而促进饮水安全动态监控、环境预警决策、事故应急处置能力等的提升^[3].

目前,国内外的研究多是关于水源地的风险管理、安全评价等^[4-7]. 李蕊等^[8]对湿地生态系统健康评价指标采用主成分分析法和相关性分析法进行筛选,构建了湿地生态系统健康综合评价指标体系,对辽河保护区七星湿地生态系统健康状况运用综合指数法进行评价. 刘年磊等^[9]利用区间规划和可信性模糊机会的结合约束规划模型,提出了不确定环境下的可信性模糊区间线性规划模型,在某城市水资源优化配置与科学管理中应用了该模型. 王建彬等^[10]应用模糊线性规划对干扰井群的开采量计算,并且建立干扰井群开采量数学模型. 杜大仲等^[11]对河流型饮用水水源地选址利用层次分析方法基本原理建立评价体系与模型,并对水源地选址进行科学评价. 王烁等^[12]应用层次分析法,根据可行性、可靠性、标准性三个角度对不同的水源进行评价. 贾惠艳等^[13]通过利用模糊层次分析法建立沈阳市地下水源热泵选址的评价指标体系和评价模型,对地下水源热泵的相宜性实行分区.

在敏感水源地的识别中可以应用模糊线性规划法、综合指数法和层次分析法等. 综合指数法和模糊线性规划法都是定量化的,简单、易掌握,但是在解决复杂、多变问题时,有些因素是无法进行量化的,常规方法繁琐、缺

乏定量化,而层次分析法能够把定性定量结合起来,把复杂的实际问题进行分解,以科学依据对最佳方案的选择提供基础,可以为正确的选择作出理论参考^[14-15]. 因此笔者针对地下水水源地,选用层次分析法,以环境质量、水资源保障、环境风险、环境应急为准则层,筛选 27 个指标,构建敏感水源识别体系,使用文献分析与专家问卷调查相结合的方法确定各级影响因子的权重,并验证其可行性.

1 层次分析法

运筹学教授 T. L. Saaty 于 70 年代初最先提出层次分析法,简称 AHP. 通过两两做比较判断,从而判定每个层次中各因素的相对重要性,接下来建立判断矩阵. 通过对判断矩阵的最大特征值及其相应特征向量进行计算,得到权重向量^[16-19].

1.1 构造判断矩阵

构造各层次的成对比较矩阵是根据评价指标体系的层次结构,对每一层次的元素进行两两比较. 然后判断出各元素的相对重要性,通常按 1~9 比例标度对两元素相比的重要性程度赋值. 1~9 标度的含义见表 1.

表 1 判断矩阵的 1~9 比例标度含义
Table 1 1~9 scale of the judgment matrix

比例标度	含义
1	同等重要
3	前者稍重要
5	前者明显重要
7	前者强烈重要
9	前者极度重要
2,4,6,8	上述相邻判断的中间值
倒数	$a_{ji} = 1/a_{ij}$

进行标度之后,可以将比较结果作为元素来构造判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$. 其中 a_{ij} 为 a_i 与 a_j 相对重要性的比例标度,该矩阵具有 $a_{ij} > 0, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$ 的性质.

1.2 确定权重

归一化计算判断矩阵的最大特征根、对应向量,计算结果为相同层次的因素对于上一层某因素的相对重要性的排序权值,即权重向量为根据计算公式 $AW = \lambda_{\max}W$, 得到的特征向量 W 经归一化后的结果.

1.3 一致性检验

在得到权重分配后要对判断矩阵进行一

致性检验,是为了验证层次分析法最终评价结果是否具有合理性和科学性.

① 一致性指标的计算如下:

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

(1)

式中: λ_{\max} 为最大特征值; n 为判断矩阵的阶数.

②依据表2,找出平均随机一致性指标.

表2 平均随机一致性指标 RI

Table 2 Average random consistency index RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.0	0.0	0.514 9	0.893 1	1.118 5	1.249 4	1.345	1.42	1.462 6

③计算一致性比例

$$CR = CI / RI.$$

(2)

可接受的判断矩阵的一致性 $CR < 0.1$,认为指标权重的分配是合理的;否则为不合理.适当调整判断矩阵,直到取得合适的一致性检验.

2 构建评价体系

2.1 评价体系的构建

由于水质和水量的保障是评价水源地安全性的重要表征,水源地管理中的环境风险和应急管理是水源地区域环境管理的重点工

作,笔者从环境质量、水资源保障、环境风险、环境应急方向构建敏感水源识别体系,如图1所示.

2.2 环境质量

根据水源地评估情况以《地下水质量标准》(GB/T14848—93)中的水质Ⅲ级标准选出营养盐及有机污染综合指标和其他污染指标作为环境质量 B_1 的指标层.把氨氮、高锰酸盐指数、硝酸盐和亚硝酸盐作为营养盐及有机污染综合指标的评价因子,选择铁、锰、硫酸盐和总硬度为其他污染指标的评价因子.

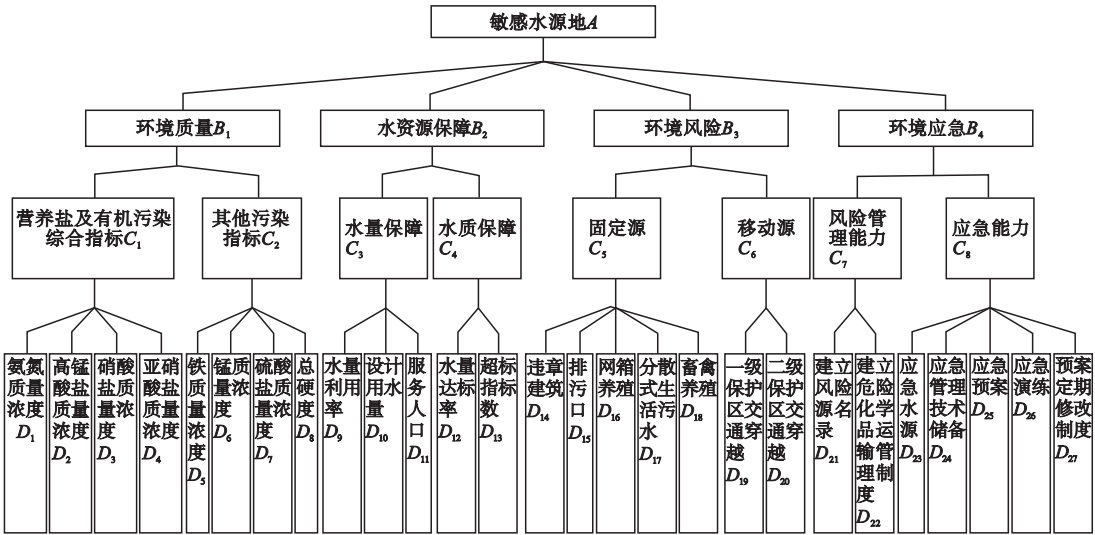


图1 层次分析结构图

Fig.1 Hierarchical analysis structure diagram

2.3 水资源保障

在水资源保障指标体系中水量保障表征的是供水量情况,水质保障表征的是达标的供水量情况.选择水量利用率、设计供水量、服务人口作为水量保障的评价因子.把水量达标率、超标指标数这两项作为水质保障的评价因子.

2.4 环境风险

环境风险的来源可以分为固定源、移动源.根据饮用水水源保护区划分技术规范的要求,一级、二级保护区不能有违章建筑、排污口、网箱养殖、交通穿越等,以及二级保护区内的分散式生活污水、畜禽养殖废物必须进行达标处理.因此固定源考虑为违章建筑、排污口、网箱养殖、畜禽养殖,移动源考虑为交通穿越.

2.5 环境应急

“环境应急”是指水源地发生环境事故时的应急能力.准则层 B_4 的评价指标选为风险管理能力、应急能力.风险管理能力的评价因子选为建立风险源名录、建立危险化学品运输管理制度,应急能力的评价因子选为应急水源、应急管理技术储备、应急预案、应急演练、预案定期修改制度.

3 判断矩阵与权重

参考《集中式饮用水水源地环境保护状况评估技术规范》和水源地水质和环境管理状况的调查数据对 27 个因子进行分级和分值量化,运用文献分析和专家问卷调查的方法,建立判断矩阵,确定影响因素的权重,借助 YAAHP 软件进行矩阵计算,进行一致性检验,判断是否合理.判断矩阵见公式(2)~(14),权重结果见表(3)~表(15).

准则层 B 对目标层 A 的判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表 3 准则层 B 对目标层 A 的权重

Table 3 The weight of target layer A based on criterion layer B

准则层 B	W_i	CR
B_1	0.375 0	0
B_2	0.375 0	
B_3	0.125 0	
B_4	0.125 0	

指标层对准则 B_1 的判断矩阵为

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 4 指标层对准则 B_1 的权重

Table 4 The weight of index layer based on criterion B_1

指标层	W_i	CR
C_1	0.500 0	0
C_2	0.500 0	0

指标层对准则 B_2 的判断矩阵为

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表 5 指标层对准则 B_2 的权重

Table 5 The weight of index layer based on criterion B_2

指标层	W_i	CR
C_3	0.666 7	0
C_4	0.333 3	

指标层对准则 B_3 的判断矩阵为

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

表 6 指标层对准则 B_3 的权重

Table 6 The weight of index layer based on criterion B_3

指标层	W_i	CR
C_5	0.750 0	0
C_6	0.250 0	

指标层对准则 B_4 的判断矩阵为

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

表7 指标层对准则 B_4 的权重

Table 7 The weight of index layer based on criterion

指标层	W_i	CR
C_7	0.250 0	0
C_8	0.750 0	

评价层对指标 C_1 的判断矩阵为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

(7)

表8 评价层对指标 C_1 的权重

Table 8 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_1	0.375 0	0
D_2	0.375 0	
D_3	0.125 0	
D_4	0.125 0	

评价层对指标 C_2 的判断矩阵为

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

(8)

表9 评价层对指标 C_2 的权重

Table 9 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_5	0.375 0	0
D_6	0.375 0	
D_7	0.125 0	
D_8	0.125 0	

评价层对指标 C_3 的判断矩阵为

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

(9)

表10 评价层对指标 C_3 的权重

Table 10 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_9	0.106 2	0.037 2
D_{10}	0.633 3	
D_{11}	0.206 5	

评价层对指标 C_4 的判断矩阵为

$$C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

(10)

表11 评价层对指标 C_4 的权重

Table 11 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_{12}	0.666 7	0
D_{13}	0.333 3	

评价层对指标 C_5 的判断矩阵为

$$C_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 2 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

(11)

表12 评价层对指标 C_5 的权重

Table 12 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_{14}	0.347 4	0.001 2
D_{15}	0.347 4	
D_{16}	0.120 2	
D_{17}	0.064 8	
D_{18}	0.120 2	

评价层对指标 C_6 的判断矩阵为

$$C_6 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

(12)

表13 评价层对指标 C_6 的权重

Table 13 The weight of evaluation layer base on index

评价层	W_i	CR
D_{19}	0.750 0	0
D_{20}	0.250 0	

评价层对指标 C_7 的判断矩阵为

$$C_7 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}.$$

(13)

表 14 评价层对指标 C_7 的权重

Table 14 The weight of evaluation layer base on index C_7

评价层	W_i	CR
D_{21}	0.250 0	0
D_{22}	0.750 0	

评价层对指标 C_8 的判断矩阵为

$$C_8 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}.$$

(14)

表 16 目标层至评价层的合成权重

Table 16 The synthetic weights of the target layer to the evaluation layer

目标层	准则层	指标层	评价层	权重值
地下水敏感 水源地 A	环境质量 B_1	营养盐及有机污染综合指标 C_1	氨氮 D_1	0.070 3
			高锰酸盐指数 D_2	0.070 3
			硝酸盐 D_3	0.023 4
			亚硝酸盐 D_4	0.023 4
		其他污染指标 C_2	铁 D_5	0.070 3
			锰 D_6	0.070 3
			硫酸盐 D_7	0.023 4
			总硬度 D_8	0.023 4
	水资源保障 B_2	水量保障 C_3	水量利用率 D_9	0.026 5
			设计用水量 D_{10}	0.185 3
			服务人口 D_{11}	0.065 1
		水质保障 C_4	水量达标率 D_{12}	0.083 3
			超标指标数 D_{13}	0.041 7
			违章建筑 D_{14}	0.032 6
	环境风险 B_3	固定源 C_5	排污口 D_{15}	0.032 6
			网箱养殖 D_{16}	0.011 3
			分散式生活污水 D_{17}	0.006 1
			畜禽养殖 D_{18}	0.011 3
		移动源 C_6	一级保护区交通穿越 D_{19}	0.023 4
			二级保护区交通穿越 D_{20}	0.007 8
		风险管理能力 C_7	建立风险源名录 D_{21}	0.023 4
			建立危险化学品运输管理制度 D_{22}	0.007 8
	环境应急 B_4	应急能力 C_8	应急水源 D_{23}	0.046 6
			应急管理技术储备 D_{24}	0.023 0
			应急预案 D_{25}	0.009 9
			应急演练 D_{26}	0.009 9
			预案定期修改制度 D_{27}	0.004 4

表 15 评价层对指标 C_8 的权重

Table 15 The weight of evaluation layer base on index C_8

评价层	W_i	CR
D_{23}	0.497 1	0.024 8
D_{24}	0.245 4	
D_{25}	0.105 3	
D_{26}	0.105 3	
D_{27}	0.046 9	

根据上面表中结果可知,各层的检验结果都满足 $CR < 0.1$,说明权重具有良好的一致性.运用 YAAHP 软件计算的合成权重结果如表 16 所示.

4 评价标准

在敏感水源地的识别体系中,根据地下水质量标准 and 集中式饮用水源评估技术规范中所对应的各等级,将评价因子的分值分别赋值为 0、40、60、80、100 分. 将敏感水源分为 5 个不同的等级,即极敏感(80 ~ 100)、比较敏感(60 ~ 80)、敏感(40 ~ 60)、不敏感(20 ~ 40)、极不敏感(0 ~ 20).

在评分过程中有几点需要注意:①无机污染指标和有机污染指标的评价因子 $D_1 \sim D_8$,以各水源监测最大值为准,无监测

数据的以 100 分计. ②根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T338—2007),地下水型水源分为中小型水源地(开采量 $<5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$)和大型水源地(开采量 $\geq 5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$),该评分标准按日设计供水量划分:中小型水源地(设计供水量 $<5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$)和大型水源地(日设计供水量 $\geq 5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$). ③服务人口评分标准根据《国务院关于调整城市规模划分标准的通知》中的要求制定. ④超标指标数以《地下水质量标准》Ⅲ级标准计. 具体评分结果见表 17.

表 17 评分标准
Table 17 Scoring standards

分值/分	评价因子								
	$D_1/$	$D_2/$	$D_3/$	$D_4/$	$D_5/$	$D_6/$	$D_7/$	$D_8/$	$D_9/\%$
	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
0	≤ 0.02	≤ 1	≤ 2	≤ 0.001	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 50	≤ 150	≤ 20
40	—	≤ 2	≤ 5	≤ 0.01	≤ 0.2	—	≤ 150	≤ 300	≤ 40
60	≤ 0.2	≤ 3	≤ 20	≤ 0.02	≤ 0.3	≤ 0.1	≤ 250	≤ 450	≤ 60
80	≤ 0.5	≤ 10	≤ 30	≤ 0.1	≤ 1.5	≤ 1	≤ 350	≤ 550	≤ 80
100	> 0.5	> 10	> 30	> 0.1	> 1.5	> 1.0	> 350	> 550	≤ 100

分值/分	评价因子								
	$D_{10}/$	$D_{11}/$	$D_{12}/\%$	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}
	($\text{万 t}\cdot\text{d}^{-1}$)	万人							
0	—	≤ 20	100	≤ 0	否	否	否	否	否
40	—	≤ 50	80 ~ 100	≤ 2	—	—	—	—	—
60	< 5	≤ 100	60 ~ 80	≤ 3	—	—	—	—	—
80	—	≤ 300	40 ~ 60	≤ 5	—	—	—	—	—
100	≥ 5	≤ 500	< 40	> 5	有	有	有	有	有

分值/分	评价因子								
	D_{19}	D_{20}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{24}	D_{25}	D_{26}	D_{27}
0	否	否	有	有	有	有	有	有	有
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	有	有	否	否	无	无	无	无	无

5 计算方法

首先调查掌握要做敏感度识别的水源地的水质、水量、环境管理等基本信息,根据所掌握的数据加结合评分标准得出各项评价因子的得分,再乘以各项评价因子对应的权重

然后求和,最终得出该水源地的综合评分,得出该水源的敏感等级.

6 案例分析

笔者运用层次分析模型对辽宁省辽河流域 39 个地下水型水源开展敏感水源识别. 根

据城市集中式饮用水水源环境状况的评估数据计算得到水源地的分数(见图2)。从图中可以看出,处在“敏感”等级的水源有5个,将5个属于“敏感”等级的水源归入敏感水源名单。

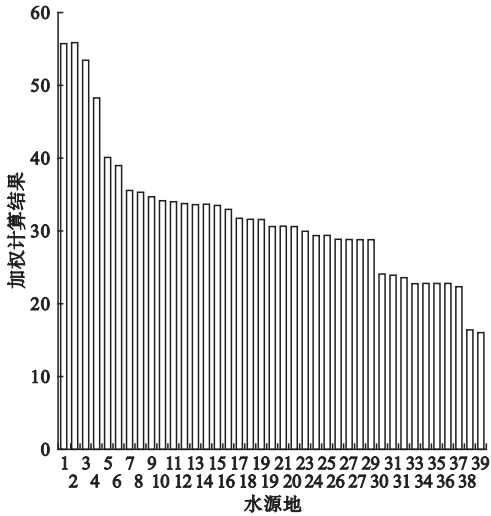


图2 敏感水源地筛选评分结果

Fig.2 Screening score of sensitive water sources

7 结 语

笔者运用层次分析法构建模型、建立评价体系,以此作为饮用水水源敏感水源的识别方法。从环境质量、水资源保障、环境风险、环境应急角度选择合理的评价因子,确定其合适的权重系数,制定评分标准,进行加权计算评分,根据评分结果确定水源地的敏感级别。该评价识别方法能更好地保证识别出的敏感水源地的客观性和准确性。确定合适的评价因子和评分标准是能够进行准确科学的敏感水源地识别的基础,但现在识别体系还没有统一的标准,仍需要在实践中逐渐完善。

参考文献

[1] 王晓红,高丽娜,孙翀.我国城市应急备用水源地建设安全评价指标体系研究[J].环境保护,2016(21):17-23.
(WANG Xiaohong, GAO Lina, SUN Chong. Indicator system of security assessment for emergency urban drinking water sources in Chi-

na[J]. Environmental protection, 2016 (21) : 17 - 23.)
[2] 鲍威,陈名,曹婷婷.我国大都市水源地保护的现状及对策研究[J].生态经济,2015,31(8):163-166.
(BAO Wei, CHEN Ming, CAO Tingting. Study on the problems and countermeasures of metropolis water source protection[J]. Ecological economy, 2015, 31(8):163-166.)
[3] 姜伟,黄卫.集中式饮用水水源地环境监控预警体系构建[J].环境监控与预警,2010,2(6):5-7.
(JIANG Wei, HUANG Wei. Environmental monitoring and early warning system construction of centralized drinking water sources[J]. Environmental monitoring and forewarning, 2010, 2(6):5-7.)
[4] ROSELLO M J P, MARTINEZ J M V, NAVARRO B A. Vulnerability of human environment to risk: case of groundwater contamination risk[J]. Environment international, 2009, 35(2):325-335.
[5] MINCIARDI R, SACILE R, EVA T. Resource allocation in integrated preoperational and operational management of natural hazards [J]. Risk analysis, 2009, 29(1):62-75.
[6] SAHOO S, DHAR A, KAR A. Environmental vulnerability assessment using grey analytic hierarchy process based model[J]. Environmental impact assessment review, 2016(56):145-154.
[7] SENER E, DAVRAZ A. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process(AHP) method; the case of Egridir lake basin(Isparta, Turkey) [J]. Hydrogeology journal, 2013, 21(3):701-714.
[8] 李蕊,段亮,王思宇,等.辽河保护区七星湿地生态系统健康评价[J].环境工程技术学报,2016,6(1):43-48.
(LI Rui, DUAN Liang, WANG Siyu, et al. Ecosystem health assessment of Qixing wetland in Liaohe river conservation area [J]. Journal of environmental engineering technology, 2016, 6(1):43-48.)
[9] 刘年磊,蒋洪强,吴文俊.基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J].中国环

- 境科学,2014,34(6):1607-1613.
- (LIU Nianlei, JIANG Hongqiang, WU Wenjun. Empirical research of optimal allocation model of water resources under uncertainties [J]. China environmental science, 2014, 34(6):1607-1613.)
- [10] 王建彬,王佳武. 模糊线性规划计算在水源地开采量计算中的应用-以渭南老香居油脂厂为例[J]. 地下水,2013,35(4):32-33,53.
- (WANG Jianbin, WANG Jiawu. Application of fuzzy linear programming in calculation of water resources exploitation-a case study of Weinan old fragrant oil factory [J]. Ground water, 2013, 35(4):32-33, 53.)
- [11] 杜大仲,孟宪林,马放,等. 基于层次分析法的河流型饮用水水源地选址评价[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):34-39.
- (DU Dazhong, MENG Xianlin, MA Fang, et al. Site selection assessment of river drinking water resources based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2011, 43(6):34-39.)
- [12] 王烁,王鹏彬. 层次分析法在建设项目水源选择中的应用[J]. 水利科技与经济,2016,22(7):79-80,91.
- (WANG Shuo, WANG Pengbin. Application of analytic hierarchy process in water source selection of construction project [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2016, 22(7):79-80, 91.)
- [13] 贾惠艳,孙雨,张军. 基于模糊层次分析法的沈阳市地下水热源泵适宜性分区[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(4):108-111.
- (JIA Huiyan, SUN Yu, ZHANG Jun. Research on zonation of adaptability for groundwater source heat pump in Shenyang based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. South - to - North water diversion and water science & technology, 2012, 10(4):108-111.)
- [14] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- (GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China safety science journal, 2008, 18(5):148-153.)
- [15] 李晶晶,华坚. 重大水利工程项目社会稳定风险评估综述[J]. 水利经济,2016,34(4):4-8.
- (LI Jingjing, HUA Jian. Review of risk assessment of social stability of key water conservancy projects [J]. Journal of economics of water resources, 2016, 34(4):4-8.)
- [16] 李亚峰,陶翠翠,林长宇,等. 改进层次分析法在给水管道的腐蚀速率预测中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(4):729-732.
- (LI Yafeng, TAO Cuicui, LIN Changyu, et al. Application of improved analytic hierarchy process in corrosion rate forecasting of water supplying pipe [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(4):729-732.)
- [17] VIDAL L A, MARLE F, BOCQUET J C. Using a delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects [J]. Expert systems with applications, 2011, 38(5):5388-5405.
- [18] 曲生. 层次分析法的改进及在安全决策中应用的研究[J]. 中国安全生产科学技术,2009,5(5):111-114.
- (QU Sheng. Research about improving AHP and applying to security decision field [J]. Journal of safety science and technology, 2009, 5(5):111-114.)
- [19] 高雪,傅金祥,由昆. 辽河流域水污染源在线监测问题[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(6):816-819.
- (GAO Xue, FU Jinxiang, YOU Kun. On-line monitoring of Liaohe River basin wastewater by applying AHP [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2014, 33(6):816-819.)