

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.01.003

基于层次分析和灰色分析的水质风险评价方法

张春荣¹,纪淑娟²,朱红梅³

(1. 山东科技大学地质学院,山东 青岛 266510;2. 山东科技大学信息学院,山东 青岛 266510 3. 山东农业大学信息学院,山东 泰安 271000)

摘要 给出一种基于层次分析和灰色分析的水质风险评价方法:用层次分析法计算水质评价因子权重,用带权重的灰色分析法评价多因素影响下的纯净水水质。结果表明,用层次分析法为评价因子赋权能够全面考虑各评价因子对水质影响的不同,用灰色分析法计算纯净水的风险度值和风险级别,考虑了水质评价中的模糊性和不确定性,比较符合纯净水水质评价的实际情况。

关键词 层次分析法;灰色分析法;水质风险;评价方法

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** :1004-6933(2011)01-0011-04

Water quality risk assessment based on analytic hierarchy process and gray analysis method

ZHANG Chun-rong¹,JI Shu-juan²,ZHU Hong-mei³

(1. College of Geological Science and Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266510,China;2. College of Information Science and Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266510,China;3. College of Information Science and Engineering,Shandong Agricultural University,Tai'an 271000,China)

Abstract:A water quality risk assessment method based on the analytic hierarchy process(AHP)and the gray analysis method was proposed. In the model,the AHP method was used to calculate the weights of the assessment factors,and the gray analysis method was used to assess the quality of pure water under the influence of various factors based on the weights. The results showed that the use of AHP method in computing the weights of assessment factors can offer a comprehensive consideration of different affects of various factors on water quality. Besides,the gray analysis method in calculating the risk value and risk category of pure water quality considered the vague and uncertain factors and met the real situation of pure water quality assessment.

Key words:analytic hierarchy process(AHP);gray analysis method;water quality risk;evaluation method

随着人民生活水平的提高,无色、无味、无菌、质地纯净的纯净水成了人们生活饮用水的首选。但纯净水安全问题不容乐观,生物性和化学性污染对纯净水安全的影响十分严重。据焦作市 1998—2000 年监测的 298 份纯净水数据,菌落总数不合格率为 53.4%^[1]。2008 年 3 月,竹源牌桶装水不洁致使贵阳 299 人感染甲肝^[2]等。我国各级政府和监管部门对纯净水安全问题十分重视,制定了 GB 17324—1998《中华

人民共和国瓶装饮用纯净水卫生标准》,采取了一系列措施强化纯净水安全的监管,并取得了初步成效。

1 基于层次分析和灰色分析的水质风险评价

目前已有很多水质评价方法。例如,单因子水质评价法、指数法、模糊综合评判法等,它们各有优缺点,文献[3-7]对它们进行了详细比较。灰色分析法已在水质评价中得到了广泛的研究与应用^[8-9]。

基金项目:山东省高等学校优秀骨干教师国际合作培养项目(2009),青岛市科技发展计划项目(09-1-3-50-jch),山东科技大学群星计划项目(qx0801125),山东科技大学春蕾计划项目(2008AZZ014)资助

作者简介:张春荣(1973—),女,山东郓城人,工程师,博士研究生,主要从事水文与水资源研究工作。E-mail:zcrcsdust@126.com

灰色分析法考虑了水质评价中的模糊性和不确定性,可以通过隶属函数来反映该属性并加以量化。但该方法需要考虑不同评价指标的赋权问题,不同的赋权方法直接影响评价结果。所以权重设计是一项重要内容,对评价结果有重要影响^[10]。笔者尝试利用层次分析法,把复杂问题分解为各个组成因素,将这些因素按支配关系构成递阶层次结构,通过成对比较方式确定同一层次中各因素的重要性,然后综合决策者的判断,确定备选方案的相对重要性总排序,从而得到评价因子的重要性,获得各评价因子的权重。最后用加权灰色分析法进行评价,得到纯净水水质风险,为纯净水的监控提供科学依据。

1.1 基于层次分析法的权重计算

基于层次分析法的权重计算包括以下几个步骤：

1.1.1 首先给出分层结构图^[11],构造成对比较判断矩阵

分层结构图(图1)包含3个层次,其中最高层为目标层,只有1个元素,一般是分析问题的预定目标或理想结果。中间层为标准层,包含了为实现目标所涉及的多个影响因素。最底层为方案层,包括了为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等。

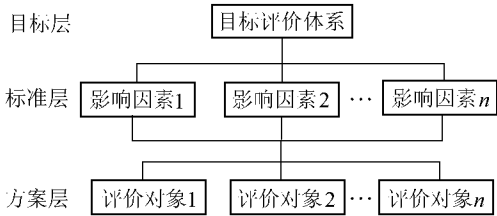


图1 分层结构图

根据 Saaty 等^[12]给出的成对比较判断矩阵构造方法构造矩阵使任意 a_{ij} 都满足下面式子：

$$a_{ij} > 0 \tag{1}$$

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

式中： a_{ij} 值是用数字表示两个影响因素对目标影响大小的比较,笔者采用 Saaty 等给出的 1~9 标度,即 1~9 的数字或者数字的倒数^[11]。

1.1.2 检验成对比较判断矩阵的一致性

上述构造成对比较判断矩阵的方法虽能减少其他因素的干扰,较客观地反映出某一对因子影响力的差别,但综合全部比较结果时,其中难免包含一定程度的非一致性,即不满足式(3)。需要对判断矩阵的一致性进行检验。

根据式(4)计算一致性指标 C_I ,其中 $\lambda_{\max}$ 为成对比较判断矩阵的最大特征值。

$$C_I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

在表1中查找相应的平均随机一致性指标 R_I 值。

表1 平均随机一致性指标 $R_I^{[11]}$

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

计算一致性比例 C_R

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \tag{5}$$

当 $C_R < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。

1.1.3 权向量的归一化处理

成对比较判断矩阵对应于最大特征值 $\lambda_{\max}$ 的特征向量 W ,经归一化后即为标准层相应因素对于目标层重要性的权值。

1.2 基于灰色分析的风险评价

灰色局势决策法是指选定一个合适的对策去对付某个发生的事件,以取得最佳的效果(风险值)。一般记事件为 a ,对策为 b ,事件与对策的二元组合称为局势,记为 S ,即 $S = (a, b)$ 。具体事件 $a_i \in a$ ($i = 1, 2, \dots, m$),对策 $b_j \in b$ ($j = 1, 2, \dots, n$)的二元组合 $S_{ij} = (a_i, b_j)$ 称为第 ij 个局势。用某一种对策 b_j 对付某一事件 a_i 的结果称为局势效果,记为 r_{ij} ,则单位局势效果称为决策元,记为

$$\delta_{ij} = \frac{r_{ij}}{(a_i, b_j)} = \frac{r_{ij}}{S_{ij}} \tag{6}$$

1.2.1 质量分级和风险测度计算标准

选取电导率、菌落总数、大肠菌群、霉菌和酵母4个主要水质指标作为评价因子进行分析。为了更好地对纯净水质量的优劣程度进行分析,为监管部门提供科学依据,在 GB 17324—1998《中华人民共和国瓶装饮用纯净水卫生标准》各评价因子的基础上增加了一个更优级别,即划分为三级(表2),其中一级(优良)水样被看做是对人体没有任何风险的纯净水,介于一级取值和二级(合格)取值之间的水样认为可以安全饮用,但可能存在一些安全隐患,介于二级取值和三级(严重)取值之间的水样被认为不能饮用,饮用后会对人体造成危害。

表2 纯净水水质分级

分级	电导率/ ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	菌落总数/ ($cfu \cdot mL^{-1}$)	大肠菌群/ ($MPN \cdot 100 mL^{-1}$)	霉菌和酵母/ ($cfu \cdot mL^{-1}$)
一级(优良)	8	16	2	0
二级(合格)	10	20	3	0
三级(严重)	20	50	10	1

将水质标准共分为3级(记为 $t, t = 1, 2, 3$)则水

质影响因子 p 的第 t 级标准为 $c_{0t}^{(p)}$ 并规定其对应的水质分级中该影响因子的第 t 级浓度上限值为 $c_{0t}^{(p)}$ 。在最优局势决策中,对超过第 t 级标准的影响因子 p 的风险程度值 r_{ij} (即风险测度)的计算公式为:

$$\begin{aligned} &\text{如果 } c_{0t}^{(p)} < c_i^{(p)} \leq c_{(t+1)}^{(p)} \quad t = 1 \ 2 \ 3 \\ &\left\{ \begin{aligned} r_{it}^{(p)} &= \frac{c_{0t}^{(p)}}{c_i^{(p)}} \\ r_{(t+k)}^{(p)} &= \frac{c_i^{(p)}}{c_{(t+k)}^{(p)}}, \forall k \in N \ (k = 1 \ 2 \dots 3 - t) \\ r_{(t-k)}^{(p)} &= \frac{c_{(t+k)}^{(p)}}{c_i^{(p)}}, \forall k \in N \ (k = t - 1 \ t - 2 \dots 1) \end{aligned} \right. \end{aligned} \tag{7}$$

式中: $c_{0t}^{(p)}$ 为污染因子 p 的第 t 级水质分级值; $c_i^{(p)}$ 为污染因子 p 在监测点 i 的监测值。根据该公式计算可得,介于第 t 级和第 $t + 1$ 级标准的水质样本对 t 级以上的风险度小于 1,而对第 t 级及以下各级的风险度大于 1。

1.2.2 一个影响因素决策矩阵的计算

当局势有几个影响因素时,第 p 个($1 \leq p \leq 4$)目标的决策风险测度记为 $r_{ij}^{(p)}$,其相应的决策元为 $\delta_{ij}^{(p)} = \frac{r_{ij}^{(p)}}{S_{ij}}$ 。则对应的第 p 个影响因素的决策矩阵 $D^{(p)}$ 为:

$$D^{(p)} = \begin{bmatrix} \frac{r_{11}^{(p)}}{S_{11}} & \dots & \frac{r_{1n}^{(p)}}{S_{1n}} \\ \frac{r_{m1}^{(p)}}{S_{m1}} & \dots & \frac{r_{mn}^{(p)}}{S_{mn}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

1.2.3 多个影响因素的综合风险度的计算

当局势有几个影响因素时,对各影响因素综合考虑的决策称为多目标决策。利用基于层次分析法求得的权重计算加权和,即得式(9):

$$r_{ij}^{(\Sigma)} = \sum_{p=1}^4 W_p r_{ij}^{(p)} \tag{9}$$

从而可得多目标局势决策的综合矩阵:

$$D^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} \frac{r_{11}^{(\Sigma)}}{S_{11}} & \dots & \frac{r_{1n}^{(\Sigma)}}{S_{1n}} \\ \frac{r_{m1}^{(\Sigma)}}{S_{m1}} & \dots & \frac{r_{mn}^{(\Sigma)}}{S_{mn}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

对行决策,按行选出风险度最大者,其对应的列号即为最优等级。风险度最大者可定义为式(11),相应的最佳决策元为 $r_{i^*j}^{(\Sigma)} / S_{i^*j}$,最优局势为 $S_{i^*j} = (a_{i^*}, b_j)$

$$r_{i^*j}^{(\Sigma)} = \max_i \{r_{ij}^{(\Sigma)}\} \tag{11}$$

2 纯净水水质风险评价

以某市质检局搜集的该市范围内几家纯净水公司生产和销售的纯净水水质监测数据(共计 38 个样本)作为原始数据,运用前面给出的层次分析法计算水质评价因子的权重,用带权重的灰色分析法评价多因素影响下的纯净水水质风险。

2.1 评价因子权重计算

根据图 1 得知,纯净水风险评价中标准层包含电导率、菌落总数、大肠菌群、霉菌和酵母等 4 个评价因子,方案层对应于各纯净水生产环节和销售环节的纯净水样本。这 4 个评价因子危害性级别为:电导率 < 菌落总数 < 大肠菌群 < 霉菌和酵母菌。为了确定它们的危害权重,利用 1.1 给出的层次分析法确定权重:

a. 构造成对比较判定矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 2 & 1 & 1/2 \\ 7 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

b. 利用 Matlab 求出成对比较矩阵的最大特征值,验证该矩阵的一致性,并求出最大特征值对应的特征向量 W_1 ,并证明该矩阵是一致的。

c. 对特征向量 W_1 进行归一化,得到权重向量 $W = (0.0601 \ 0.1615 \ 0.2878 \ 0.4906)$,并以此作为评价因子的权重。

2.2 样本风险评价

对采集的 38 个样本进行了水质风险评价,从评价结果可以看出,同一风险级别纯净水的风险度值也不尽相同,风险度值越大的样本,在该级内的风险越高。例如,表 3 中编号为 D200901201 和 H200712191 的样本霉菌和酵母、大肠菌群都是零,但是两者的电导率和菌落总数不同,分别为 84.4 μ 和 8.02 μ (详细数据见表 3)。根据表 3 知编号为 D200901201 的样本电导率远大于三级标准 20,所以该样本属于三级风险;同样的,编号为 H200712191 的样本菌落总数远大于三级标准 50,也应该属于三级风险。但是由 2.1(c)节得到的权重向量得知,电导率和菌落总数这两种影响因子的权重分别为 0.0601 0.1615,因此根据 1.2 节中多个影响因素的综合风险程度的计算公式得两个样本的风险度分别为 0.2404 和 0.323。从而可确定后一个样本中水的质量比前一个样本中水的质量风险大。

另外,风险级别相同的样本,虽然有些因素的值相差很大,但风险度可能相差不大。例如,表 3 中 A200707031, A200808272, C200810111 三个样本的大肠菌群和霉菌、酵母菌都相同,电导率、菌落总数各

不相同。由于表 3 中给出的三个样本的菌落总数都超出标准值 20 ,因此都属于严重危险的第三等级。但是由于它们的电导率不同 ,因此 ,它们的风险度也不同 ,严重程度按行从上到下依次递减。虽然样本 A200808272 和样本 C200810111 的电导率值相差很大 ,由于电导率所占权重比菌落总数所占权重小得多 ,从而导致这两个样本的风险度反而相差不大。

表 3 样本结果分析

样本编号	电导率/ ($\mu S\cdot cm^{-1}$)	菌落 总数/ ($cfu\cdot mL^{-1}$)	大肠菌群/ ($MPN\cdot$ $100 mL^{-1}$)	霉菌、 酵母/ ($cfu\cdot mL^{-1}$)	风险 度值	风险 级别
D200901201	84.4	0	0	0	0.2404	3
H200712191	8.02	140	0	0	0.323	3
A200707031	7.23	35	1	0	0.0923	2
A200808272	18.32	24	1	0	0.1674	2
C200810111	34	23	1	0	0.1581	2

3 结 语

笔者首先运用层次分析法给出纯净水水质评价因子权重的计算 ,赋权能够全面考虑各评价因子对水质影响的不同 ,比较符合纯净水水质的实际情况。然后运用灰色分析方法对纯净水的风险度值和风险级别进行了计算 ,其中对风险度值的求法进行了改进 ,由传统的直接求和法改为加权求和法。所给方法考虑了水质评价中的模糊性和不确定性 ,不仅可以实现纯净水生产企业的风险评价、为纯净水监管部门提供帮助 ,而且可以用于其他水质的风险分析 ,具有较强的实用性。

(上接第 10 页)

5 结 论

强降雨过程中 ,地下河系统水动态变化对降雨的响应速度快 ,降雨随岩溶裂隙进入地下河迅速 ,岩溶含水层对强降雨过程中水资源调蓄能力差。

地下河入口、出口处水动态变化差异性较大 ,上游地下河入口处水化学特征变化速度快 ,幅度大 ,受环境影响因素大。地下河出口处水化学变化较上游有规律 ,主要受稀释作用影响。

影响入口处水动态变化的环境因素对出口处水动态变化影响不明显。

参考文献：

[1] 袁道先 ,朱德浩 ,翁金桃 ,等 .中国岩溶学[M].北京 :地质出版社 ,1994 :1-13.

[2] 袁道先 ,蔡桂鸿 .岩溶环境学[M].重庆 :重庆出版社 ,1988 3-15.

[3] 杨平恒 ,罗鉴银 ,袁道先 ,等 .降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J].水利学报 ,2009 40(1) :67-74.

[4] 何师意 ,裴建国 ,谢运球 ,等 .湖南保靖县白岩洞地下河

参考文献：

[1] 牛江梅 ,张绍钧 ,陈 晓 .焦作市 1998—2000 年纯净水市场卫生学调查分析[J].华北煤炭医学院学报 ,2001 ,3(5) :557-557.

[2] 新浪网 .竹源牌桶装水不洁贵阳 299 人感染甲肝[EB/OL].[2008-04-19].http ://news.sina.com.cn/w/2008-04-19/012213759376s.shtml.

[3] 厉艳君 ,杨木壮 .地下水水质评价方法综述[J].地下水 ,2007 29(5) :19-24.

[4] 兰文辉 .环境水质评价方法的分析与探讨[J].干旱环境监测 ,2002 ,16(3) :167-169.

[5] 曾庆雨 ,田文英 ,王言鑫 .基于复合权重-GIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价[J].水利水电科技进展 ,2009 ,29(2) :23-26.

[6] 鄧海明 ,蒋良富 ,李粉茹 .2004 年淮河流域水质状况和聚类分析[J].水资源保护 ,2007 23(1) :60-62.

[7] 周维博 ,郭小砾 .塔里木河水水质模糊模式识别评价[J].水资源保护 ,2007 23(4) :33-36.

[8] 周振民 .基于模糊综合评判法水环境评价及其可靠性分析[J].中国农村水利水电 ,2009 (5) :15-17.

[9] 张春荣 .泰安市旧县水源地水质评价及保护措施[J].地下水 ,2007 29(1) :72-74.

[10] 苏耀明 ,苏小四 .地下水水质评价的现状与展望[J].水资源保护 ,2007 23(2) :4-9.

[11] 朱建军 .层次分析法的若干问题研究及应用[D].沈阳 :东北大学 ,2005.

[12] SAATY T L .The analytic hierarchy process[M].New York :Mc Craw-Hill ,1980.

(收稿日期 2009-12-08 编辑 :高渭文)

流域水文地球化学特征研究[J].中国岩溶 ,2006 ,25(3) :187-194.

[5] 邹成杰 .岩溶地区地下水位动态分析[J].中国岩溶 ,1995 ,14(3) :261-269.

[6] RAVBAR N ,GOLDSCHIEDER N .Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slowene Karst catchmen[J].Hydrogeology Journal ,2009 ,17 :725-733.

[7] 刘再华 ,GROVES C ,袁道先 ,等 .水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究 :以桂林岩溶试验场为例[J].水文地质工程地质 ,2003 30(4) :13-18.

[8] 刘再华 ,李强 ,汪进良 ,等 .桂林岩溶试验场钻孔水化学暴雨动态和垂向变化解释[J].中国岩溶 ,2004 ,23(3) :169-176.

[9] 杨平恒 ,罗鉴银 ,彭稳 ,等 .在线技术在岩溶地下水示踪试验中应用 :以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J].中国岩溶 ,2008 27(3) :215-220.

[10] 刘仙 ,蒋勇军 ,叶明阳 ,等 .典型岩溶槽谷区地下河水动态响应研究 :以重庆青木关地下河为例[J].中国岩溶 ,2009 28(2) :150-154.

[11] 贺秋芳 ,杨平恒 ,袁文昊 ,等 .微生物与化学示踪岩溶地下水补给源和途径[J].水文地质工程地质 ,2009 ,36(3) :33-38.

(收稿日期 2009-11-01 编辑 :高渭文)