

聊城市地下水水质特征及评价方法选择研究

李 扬^{1,2}, 吉龙江¹, 窦炳臣¹, 李法瑞¹, 孙建峰¹

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东大学 水利与土建学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 为准确反映聊城市地下水现状, 本文以聊城市典型监测点监测数据为依据, 运用综合评价法和模糊综合评价法对监测点水质进行评价, 并探讨2种水质评价方法的评价效果。结果表明: 聊城市浅层地下水和深层地下水水质以Ⅲ类和Ⅳ类水为主, 主要超标指标为总硬度和溶解性总固体; 各超标指标之间具有一定相关关系; 综合评价法评价结果数值偏大, 并且缺失Ⅲ类水; 模糊综合评价法更适合聊城市地下水水质评价。

关键词: 地下水; 水质特征; 水质评价; 综合评价法; 模糊评价法

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0029-06

Research on characteristics of groundwater quality and selection of assessment method in Liaocheng

LI Yang^{1,2}, JI Longjiang¹, DOU Bingchen¹, LI Farui¹, SUN Jianfeng¹

(1. Shandong Institute of Geophysical & Geophysical Exploration, Shandong 250013, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Shandong 250061, China)

Abstract: In order to accurately reflect the condition of groundwater quality, this paper took the data from the typical monitoring point of Liaocheng as the basis, applied the methods of comprehensive evaluation and fuzzy comprehensive evaluation to evaluated the water quality of monitoring point, and probed into the evaluation effect of two methods. The conclusion indicated that the shallow groundwater quality and deep groundwater quality of Liaocheng are mainly Class Ⅲ and class Ⅳ, the main indicators over standard are total hardness and total dissolved solids; between the indicators over standard has a certain correlation; the evaluation value of comprehensive evaluation is too large and lack of class Ⅲ water; the method of fuzzy comprehensive evaluation is more suitable for groundwater quality assessment in Liaocheng.

Key words: groundwater; water quality characteristics; water quality assessment; comprehensive evaluation method; fuzzy evaluation method

1 研究背景

地下水作为重要的水资源之一, 是多数城市 and 地区的主要供水水源, 与人类生活和社会生产紧密相关^[1]。随着社会经济的发展, 人为因素对地下水水环境的污染越来越严重, 地下水超采、生活污水、工业废水等导致地下水水质不断恶化, 而且地下水中超标重金属元素以及各种有毒化合物严重威胁供水安全^[2-4]。因此, 地下水安全成为我国经济发展长期面临和必须妥善处理的基本问题之一。山东省是我国北方严重缺水的省市之一, 而位于山东省西部的聊城市是一个严重缺水的地区, 作为“江北水

城”, 聊城市工业及生活用水主要靠开采地下水, 由于地理气候因素的影响, 水资源区域分布差别大, 降雨量年际变化大, 且年内分配不均, 地下水超采、污染现象严重, 地下水水质恶化, 严重威胁全市饮用水安全和国民经济的可持续发展, 急需对聊城市饮用水质量进行评价。

水质评价是指对水环境各个要素进行单项及综合评价, 通过对水环境质量的变化规律的研究以及对水环境要素或区域水环境性质的优劣进行定量描述, 探究改善和提高水环境质量的方法和途径^[5]。目前在地下水评价中应用的评价方法主要有单因子评价、综合评价法、层次分析法、灰色聚类法、模糊评

收稿日期: 2015-05-13; 修回日期: 2015-09-29

基金项目: 山东省地矿局地质勘查科研项目(KY201515); 山东省国土资源厅地质勘查项目(鲁勘字[2013]82号)

作者简介: 李 扬(1986-), 男, 山东莒南人, 博士后, 研究方向: 地下水水质评价与预测。

价法和神经网络法等^[6-12]。其中应用最为广泛的是综合评价法和模糊评价法。综合评价法将各指标进行数学综合运算,得出综合指数,以此来评价水质,主要有 F 值法和内梅罗指数法^[13]。模糊评价法是以模糊数学为基础,通过模糊聚类分析,把预测因子状态分类,建立起待预测水环境要素变量与因子状态之间的对应关系,进而实现对水环境变量的状态预测,能体现水环境中客观存在的模糊性及不确定性因素^[14]。两种评价方法各有优点和局限性,其评价效果需要进一步分析与探讨。

本研究旨在通过综合评价法和模糊评价法来科学评价聊城市地下水水质现状,分析两种评价方法在聊城市地下水水质评价中的评价效果,探讨不同评价方法对聊城市地下水水质评价的适用性,为聊城市水质评价方法的选择提供重要参考依据,寻找科学、合理、可持续开发利用和保护水资源的有效途径。

2 研究区概况

聊城市地处鲁西黄河冲积平原,辖三区一市六县,总面积 8 715 km²,属半干旱大陆性气候,多年平均降水量 961 mm,平均水面蒸发量 561 mm,平均水面蒸发量 1 280 mm。研究区内最大的河流为黄河,黄河河道为一带状高地,构成了天然的地表分水岭。

聊城市的地下水类型为第四系与第三系松散层的孔隙水,除沿黄地带为全淡区外,其它地区均有咸水分布,水化学分带在垂直方向呈淡-咸-淡或咸-淡分布。浅层含水层岩性以细砂、中砂为主,砂层厚 15~20 m,局部>20 m,顶底板埋深 8~43 m,底界面埋深 40~60 m,或>60 m,矿化度一般小于 2 g/L。中深层含水岩组是位于浅层含水岩组和深层含水岩组中间的含水水体,其顶、底板埋深在 60~260m 之间。由于受古地理环境的制约,该层地下水以咸水为主体(部分全淡区除外),属 Cl·SO₄ 型水,矿化度一般 2~5 g/L,无利用价值。深层水的埋藏与分布受古地理环境、咸水层底界面及河湖沉积物发育程度的控制,其顶界面埋深一般在 150~250 m,底界面埋深变幅较大,在 600~900 m,矿化度一般不超过 2 g/L,水化学类型一般为 HCO₃-Na 型。

3 研究方法

3.1 样品采集与分析

2014 年 5 月,根据聊城市水文地质条件和不同潜在污染类型区,有代表性和控制性地进行采样点布设,共采集样地下水品 150 组,其中浅层地下水样

品 110 组,深层地下水样品 40 组,采样点分布如图 2 所示。样品采集过程中严格进行质量控制,按 5% 的比例布设现场空白样、现场标准样和平行样,并对异常的测试数据点进行复核采样。样品由国土资源部济南矿产资源监督检测中心负责检测。

3.2 指标选取

本次评价主要选取无机指标进行评价分析,考虑到《地下水质量指标》(GB/T 14948-93)^[15]和《生活饮用卫生指标》(GB5749-2006)^[16]中指标,共选择评价指标 20 项进行分析,其中常规指标 8 项、“三氮”指标 3 项、重金属指标 9 项,如表 1 所示。

表 1 地下水水质评价指标

指标类别	指标名称
常规指标(8 项)	总硬度、溶解性总固体、pH 值、高锰酸盐指数、氯化物、氟化物、碘化物、硫酸盐
三氮指标(3 项)	硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、铵氮
重金属指标(9 项)	砷、铅、汞、镉、六价铬、锰、铜、锌、硒

3.3 评价方法

3.3.1 综合评价法 地下水质量综合评价,采用 F 值法,首先进行各单项评价,划分组分所属质量类别,对各类别按下列规定分别确定单项组分评价分值 F_i ,如表 2 所示。

表 2 单项组分评价分值 F_i 表

类别	I	II	III	IV	V
F_i	0	1	3	6	10

按式(1)和式(2)计算综合评价分值 F 。

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \tag{1}$$

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: F 为各单项组分评分值 F_i 的平均值; $F_{\max}$ 为单项组分评价分值 F_i 中的最大值; n 为项数。

根据 F 值,划分地下水质量级别,质量类别如表 3 所示。

表 3 地下水质量级别划分表

级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	<0.8	0.8~2.5	2.5~4.25	4.25~7.2	>7.2

3.3.2 模糊评价法 模糊评价是根据给出的评价

标准和实测值,经过模糊变换对事物做出评价的方法。计算步骤具体为:

(1)建立因子集和评价集。参考水质污染因子,建立因子集, $U = \{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_m\}$; 根据地下水水质评价登记,建立评价集 $V = \{ \text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V} \}$ 。

(2)建立隶属度函数。隶属函数是单项水质指标进行模糊评价的依据,因此确定各评价因子对各级标准的隶属函数是模糊综合评价法的关键。

对 I 级水($j = 1$) 时,隶属函数为:

$$y_{i1} = \begin{cases} 1 & x_{ki} \leq c_{i1} \\ \frac{C_{i2} - x_{ki}}{C_{i2} - C_{i1}} & C_{i1} < x_{ki} < C_{i2} \\ 0 & C_{i2} < x_{ki} \end{cases} \quad (3)$$

对 II 级至 IV 级水($j = 2, 3, 4$) 的隶属函数:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{C_{ij} - x_{ki}}{C_{ij} - C_{ij-1}} & C_{ij-1} \leq x_{ki} \leq C_{ij} \\ \frac{C_{ij+1} - x_{ki}}{C_{ij+1} - C_{ij}} & C_{ij} < x_{ki} < C_{ij+1} \\ 0 & x_{ki} < C_{ij-1} \text{ 或 } C_{ij+1} < x_{ki} \end{cases} \quad (4)$$

对于 V 级水($j = 5$) 的隶属函数:

$$y_{i5} = \begin{cases} 0 & x_{ki} \leq c_{i4} \\ 1 - \frac{C_{i5} - x_{ki}}{C_{i5} - C_{i4}} & C_{i4} < x_{ki} < C_{i5} \\ 1 & C_{i5} < x_{ki} \end{cases} \quad (5)$$

根据上述隶属函数公式,可以求出各单项污染因子对各级水质标准的隶属度。因此确定一个 $i \times 5$ 阶模糊关系矩阵 R :

(3) 确定污染物权重。模糊综合评价法中要考虑各指标的高低差别对水质污染与人体健康影响的不同,对各评价因子赋予权重,计算公式如下:

$$w_{ki} = \frac{x_{ki}}{S_i} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{1}{n} (C_{i1} + C_{i2} + \cdots + C_{in}) \quad (7)$$

$$a_{ki} = \frac{w_{ki}}{\sum_{n=1}^n w_{ki}} \quad (8)$$

w_{ki} 为因子权重; a_{ki} 为第 k 个样本中第 i 个评价因子的权重值,计算得到 $1 \times n$ 的模糊权重矩阵 A , 即 $A = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$

(4) 模糊综合运算。将权重矩阵 A 与模糊矩阵 R 带入公式,求出结果后进行分析与评价。

$$B = A \cdot R \quad (9)$$

4 结果与分析

4.1 综合评价法

根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749 - 2006) 中 20 个评价指标的范围,通过综合评价法,得出聊城各个区县浅层与深层地下水水质的分布特征。

(1)浅层地下水。根据综合评价法计算结果(见图 1),聊城市浅层地下水以IV类和V类水为主,分别占浅层地下水总类型的 54. 50% 和 49. 31%, 有小比例II类水,仅占总比例的 10. 47%, 总体水质较差。在聊城市区县中,浅层地下水V类水超过 60% 的有阳谷县、茌平县和高唐县,其中高唐县与茌平县V类水比例达到 70% 以上,浅层水质情况不容乐观。

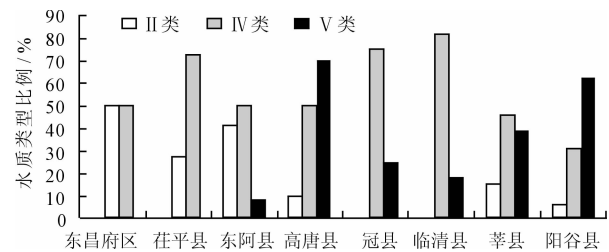


图 1 聊城市浅层地下水水质综合评价结果

(2)深层地下水。根据综合评价法计算结果,聊城市深层地下水以IV类水为主,其次为II类水,IV水超过 80%, 深层地下水质量较差, II类水主要分布在东阿县水源地,水质质量较好。

4.2 模糊评价法

(1)浅层地下水。根据模糊评价法计算结果(见图 2)。

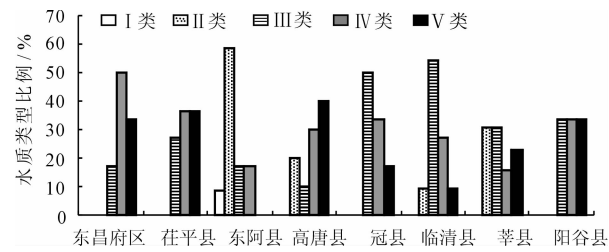


图 2 聊城市浅层地下水水质模糊评价结果

聊城市浅层地下水以III类和IV类水为主,分别占浅层地下水总类型的 29. 91% 和 30. 29%, 其次为II类水和V类水, 占总比例的 14. 77% 和 23. 98%, 另有少量 I 类水, 位于东阿县, 比例约为 1. 04%。IV类水和 V 类水比例占聊城市水质总比例的 54. 37%, 总体水质质量较差。在一区七县中,东阿县水质质量较好,以 II 类水为主。

(2)深层地下水。模糊评价法深层地下水评价结果如图 3 所示,40 个样品中以Ⅳ类水为主,Ⅳ水比例超过 40%,其次为Ⅲ类水和Ⅱ类水,分别为 28.57% 和 21.43%,Ⅰ类水比例最小,仅占 7.14%。

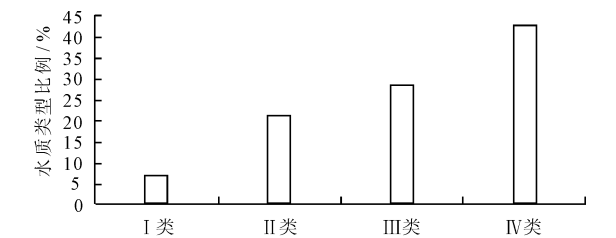


图3 聊城市深层地下水水质模糊评价结果

4.3 超标指标分布特征与相关性分析

4.3.1 超标指标分布特征

(1)浅层地下水。单因子指标为Ⅳ类和Ⅴ类水的样品,即超标样品,聊城市浅层地下水主要超标指标有氨氮、总硬度、溶解性总固体、氯化物、氟化物、亚硝酸盐、硝酸盐、锰和砷。从表 4 可以看出,在超标率方面,总硬度和溶解总固体的超标率很高,分别为 62.38%、59.41%,均超过 50%,说明聊城市浅层地下水硬度较高,硬度不能通过煮沸的方法去除,会对人体健康产生影响。而硝酸盐和砷超标率相对较小,为 4.95% 和 2.97%。

表 4 浅层地下水各超标指标的统计特征值 mg/L						
	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数	超标率 / %
氨氮	0.05	8.54	1.26	1.65	1.31	10.89
总硬度	76.50	2606.00	713.81	443.48	0.62	62.38
碘化物	0.01	0.77	0.20	0.15	0.75	30.69
溶解性总固体	344.00	5171.00	1527.16	1083.04	0.71	59.41
氯化物	7.01	1212.00	247.70	252.47	1.02	25.74
氟化物	0.01	8.54	1.26	1.65	1.32	28.71
亚硝酸盐	0.00	1.56	0.04	0.17	4.13	20.79
硝酸盐	0.06	98.70	4.74	13.53	2.86	4.95
锰	0.05	1.86	0.20	0.29	1.43	41.58
砷	0.00	0.06	0.01	0.01	1.87	2.97

从变异系数中可以看出,亚硝酸盐和硝酸盐的变异系数较大,分别为 4.13 与 2.86,聊城市浅层地下水中硝酸盐与亚硝酸盐的分布极不均匀,前人研究表明,地下水硝酸盐和亚硝酸盐含量与人类活动密切相关,农业施肥、生活污水和含氮工业废水的泄漏、固体废弃物的淋滤下渗、污水的回灌、大气沉降等都会引起地下水中硝酸盐与亚硝酸盐浓度的上升^[17-19],区域性的人类活动造成了其含量的不均匀

分布。

(2)深层地下水。从表 5 中可以看出,深层地下水超标指标主要有总硬度、溶解性总固体、氯化物、氟化物和碘化物,其中溶解性总固体超标率达到 70.59%,氯化物、氟化物和碘化物的超标率在 27%~30% 之间,总硬度超标率最小,仅为 5.88%,说明深层地下水水质最大影响因子为溶解性总固体,从变异系数看出,溶解性总固体的变异系数较小,从另一方面说明聊城市深层地下水中溶解性总固体普遍较高,目前,虽没有人类健康与饮用水中溶解性总固体有关的具体报道,但溶解性总固体浓度较高需引起人们的重视。

表 5 深层地下水各超标指标的统计特征值 mg/L						
水质指标	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数	超标率 / %
总硬度	76.50	664.00	291.40	150.63	0.52	5.88
溶解性总固体	612.00	1823.00	1231.92	326.39	0.27	70.59
氯化物	76.70	456.00	243.30	108.39	0.45	28.21
氟化物	0.02	2.04	0.78	0.61	0.77	29.68
碘化物	0.01	0.65	0.21	0.16	0.76	27.44

4.3.2 超标因子相关性分析 地下水离子之间存在一定的相关关系,当受到环境污染时,相关关系有可能发生改变。所以,对水质动态监测结果进行指标间的相关分析,有助于了解水质的早期变化。

聊城市地下水超标指标有氨氮、总硬度、碘化物、溶解性总固体(TDS)、氯化物、氟化物、亚硝酸盐、硝酸盐、锰和砷。从表 6 中可以看出,聊城市地下水超标指标之间具有一定的相关关系,除砷离子外,各超标指标之间基本呈正相关关系,砷离子与各超标指标之间呈不显著负相关关系。溶解性总固体(TDS)与除亚硝酸盐和砷离子之外的所有超标指标在 0.01 水平(双侧)上显著相关,总硬度与氯化物也呈现相同的规律。

聊城市地下水溶解性总固体 TDS 含量较高,从相关性分析中可知,它的含量与各个指标的含量密切相关,降低其他指标含量的浓度有助于降低 TDS 含量。

5 讨论

综合评价法之一的 F 值法公式简单,计算较为方便,能够突出最大污染因子对地下水水质的影响。但是 F 值法的缺点也较为明显,F 值法采用人为划定各评价因子的等级,进行不同的分值 F_i 赋予,尽管实测数值有微小的差距,但是赋值之后的差距会

被放大,如两个样品的氨氮含量分别为 0.5、0.51 mg /L 时,虽然实际浓度仅相差 0.01 mg /L,按标准进行 F_i 分值的赋予,其分值分别赋予为 6(Ⅳ类水)和 10(Ⅴ类水),赋予之后的分值却相差很大,这样致使评价结果在一定程度上不能准确表达地下水的真实水质情况。而且在评价中各评价因子如果有一项 F_i 值偏高,即使其他评价因子 F_i 值较低,也会出

现最终评价结果 F 值偏高的问题。另外,前人研究表明, F 值与 $F_{\max}$ 存在一定的线性关系,会导致 F 值法的计算结果缺失 Ⅲ类水^[20],本研究的 F 值法的计算结果也存在这一方面的问题。因此, F 值法虽然具有运算简单的优点,但是在实际过程需要仔细考量运用。

表 6 超标因子相关性分析

	氨氮	总硬度	碘化物	TDS	氯化物	氟化物	亚硝酸盐	硝酸盐	锰	砷
氨氮	1	0.352 **	0.194	0.413 **	0.466 **	1.000 **	0.141	0.326 **	0.278 **	-0.030
总硬度	0.352 **	1	0.262 *	0.893 **	0.839 **	0.352 **	-0.044	0.560 **	0.495 **	-0.104
碘化物	0.194	0.262 *	1	0.349 **	0.257 *	0.194	-0.054	-0.053	-0.119	0.201
TDS	0.413 **	0.893 **	0.349 **	1	0.897 **	0.413 **	0.006	0.501 **	0.443 **	-0.129
氯化物	0.466 **	0.839 **	0.257 *	0.897 **	1	0.466 **	-0.038	0.529 **	0.446 **	-0.130
氟化物	1.000 **	0.352 **	0.194	0.413 **	0.466 **	1	0.141	0.326 **	0.277 **	-0.031
亚硝酸盐	0.141	-0.044	-0.054	0.006	-0.038	0.141	1	0.203	0.005	-0.042
硝酸盐	0.326 **	0.560 **	-0.053	0.501 **	0.529 **	0.326 **	0.203	1	0.498 **	-0.117
锰	0.278 **	0.495 **	-0.119	0.443 **	0.446 **	0.277 **	0.005	0.498 **	1	-0.128
砷	-0.030	-0.104	0.201	-0.129	-0.130	-0.031	-0.042	-0.117	-0.128	1

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

模糊评价法注重权重的计算,从评价因子对总体污染的影响进行分析,并充分考虑了水质分界线的过渡,连续性的计算了每种评价因子对各级水质标准的隶属程度,本身具有定性与定量相结合的特点,体现了水环境中客观存在的模糊性和不确定性,符合客观规律,缺点是计算较为复杂繁琐,大样本时需要借助计算机专业软件如 Matlab 等进行编程完成,推广度相对较差。

6 结 语

- (1)聊城市浅层地下水与深层地下水水质均以Ⅲ类水和Ⅳ类水为主,地下水质量较差,深层地下水Ⅰ类水和Ⅱ类水主要分布在东阿县。
- (2)聊城市浅层地下水主要超标指标有氨氮、总硬度、溶解性总固体、氯化物、氟化物、亚硝酸盐、硝酸盐、锰和砷,总硬度和溶解总固体超标率最高,分别为 62.38%、59.41%。
- (3)聊城市地下水超标因子之间具有一定的相关关系,溶解性总固体与除亚硝酸盐和砷离子之外的所有超标因子在 0.01 水平(双侧)上显著相关。
- (4)综合评价法(F 值法)公式简单,由于重点突出最大污染因子,致使评价结果偏大;模糊综合评

价法充分考虑每种污染因子对各级水质标准的隶属程度,计算结果相对更加科学准确,相比之下,较适合聊城市地下水水质评价,建议在实际应用中可以结合综合评价法和模糊评价法等多种评价方法进行更为全面客观的评价。

参考文献:

[1] 郭春艳,张兆吉,费宇红. 保定市平原区地下水水质特征[J]. 环境科学与技术,2014,37(3):132-135+179.

[2] Navarro A, Carbonell M. Evaluation of groundwater contamination beneath an urban environment: the Beso’s river basin (Barcelona, Spain) [J]. Journal of Environmental Management,2007, 85(2): 259-269.

[3] 李永梅,张学俭,张立根. 基于 BP 神经网络的宁夏水资源需求量预测[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):98-101.

[4] 王 昭,石建省,张兆吉,等. 华北平原地下水中有有机淋溶迁移性及其污染风险评价[J]. 水利学报,2009, 40(7): 830-837.

[5] 郭劲松,龙腾锐,霍国友,等. 四种水质综合评价方法的比较[J]. 重庆建筑大学学报,2000,22(4):6-12.

[6] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):321-325.

- [7] Milovanovic M. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, South-eastern Europe [J]. *Desalination*, 2007, 213(1-3): 159-173.
- [8] Freni G, Mannina G, Viviani G. Assessment of the integrated urban water quality model complexity through identifiability analysis[J]. *Water Research*, 2011, 45(1): 37-50.
- [9] 殷淑华, 何江涛, 钟佐. 地下水有机污染评价的分级综合指数模型[J]. *水利水电技术*, 2006, 37(1): 56-58.
- [10] 宋印胜. 地下水水质污染的灰色综合评价方法[J]. *勘察科学技术*, 1990(6): 20-22.
- [11] 翟由涛, 赵玉军. 模糊综合指数在判断水质变化趋势和水体管理中的应用[J]. *环境工程*, 1995, 13(6): 44-50.
- [12] 秦传玉, 赵勇胜, 张伟红, 等. 基于 BP 神经网络的齐齐哈尔地区地下水水质评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2007, 19(2): 15-18.
- [13] 谷朝君, 潘颖, 潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J]. *环境保护科学*, 2002, 28(1): 45-47.
- [14] 寇文杰. 修正的模糊综合评判法在地下水水质评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 71-75.
- [15] 中华人民共和国国家技术监督局. 地下水质量标准 (GB/T 14848-93) [S]. 1993.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准 (GB 5749-2006) [S]. 2006.
- [17] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 等. 地下水硝酸盐污染研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 34-44.
- [18] 冷家峰, 崔丽英, 肖美丽. 济南市地下水硝酸盐污染研究[J]. *农村生态环境*, 1998, 14(1): 55-57.
- [19] 朴春香. 延边地区硝酸盐、亚硝酸盐污染现状分析 [D]. 延吉: 延边大学, 2006.
- [20] 张晓叶, 张永祥, 任仲宇, 等. 不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 98-101.

(上接第 28 页)

- [5] Jacobson S H, Mclay L A, Hall S N, et al. Optimal search strategies using simultaneous generalized hill climbing algorithms [J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2006, 43(9-10): 1061-1073.
- [6] Hoyle M, Cresswell J E. A search theory model of patch-to-patch forager movement with application to pollinator-mediated gene flow [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 248(1): 154-163.
- [7] Guitouni, K, Jabeur, M, Allouche, et al. Application of search theory for large volume surveillance planning [C]// The 11th International Conference on Information Fusion. Cologne: IEEE Press, 2008.
- [8] Wybo M, Robert J, Léger PM. Using search theory to determine an applications selection strategy [J]. *Information & Management*, 2009, 46(5): 285-293.
- [9] Dokou Z, Pinder G F. Optimal search strategy for the definition of a DNAPL source [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(3-4): 542-556.
- [10] Chen Liping, Jiang Juncheng, Yin Liang. Numerical simulation water pollution diffusions for sudden hazardous chemical [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(6): 761-765.
- [11] He Qiang, Peng Shujuan, Zhai Jun, et al. Development and application of a water pollution emergency response system for the Three Gorges Reservoir in the Yangtze River China. [J] *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(4): 595-600.
- [12] Grifoll M, Jordà G, Espino M, et al. A management system for accidental water pollution risk in a harbour: The Barcelona case study [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 88(1): 60-73.
- [13] 陶亚, 任华堂, 夏建新. 突发水污染事故不同应对措施处置效果模拟 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(2): 203-213.
- [14] 郑丙辉, 王丽婧, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 125-131.