

The Application of Fuzzy Synthetic Evaluation on the Assessment of Groundwater Quality in Maoming, Guangdong*

Jiayi Liu^{1,2}, Yanliang Kuang^{1,2}, Yueying Zhou^{1,2}, Zhen Zhang^{1,2}, Wenshan Zhuo^{1,2}, Zufa Liu^{1,2#}

¹Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou
Email: #eeslzf@mail.sysu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Groundwater plays an important role in drinking water supply, farmland irrigation and industrial consumption, as well as in the development of Maoming City. With rapid economic development as well as the dramatic growth of population, more and more groundwater in Maoming has been polluted, which leads to the increasingly conspicuous contradiction between supply and demand of water. Under the background above, this paper used Fuzzy Synthetic Evaluation method to assess the groundwater quality of 19 monitoring stations in Maoming during wet season of 2007. The results showed that the groundwater of Maoming has been polluted, which leads to the lack of high quality water. More than 80% of the groundwater could be categorized into class IV or V, the worst water quality in national standard. This study revealed the serious pollution of groundwater in Maoming. Establishing effective strategies on pollution control will be of great significance.

Keywords: Fuzzy Synthetic Evaluation; Groundwater; Water Quality Assessment; Maoming City

模糊综合评判法在广东茂名地下水水质评价中的应用*

刘嘉仪^{1,2}, 邝燕良^{1,2}, 周月英^{1,2}, 张 珍^{1,2}, 卓文珊^{1,2}, 刘祖发^{1,2#}

¹中山大学水资源与环境研究中心, 广州

²华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

Email: #eeslzf@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘 要: 地下水在饮用水供水中占有重要地位, 在农田灌溉和工业用水中也占有一定的比重, 广东省茂名市的发展更是离不开地下水开发利用。随着人口的持续增长和经济的快速发展, 越来越多的茂名市的地下水受到一定程度的污染, 水的供需矛盾日益突出。在上述背景下, 本文应用模糊综合评判法对茂名市 2007 年丰水期 19 个地下水监测点的水质情况进行了评价分析, 评价结果显示茂名市地下水缺乏优质的地下水源, 水质均收到一定的污染, 其中接近 80% 监测点的地下水属于 IV、V 类水, 为水质标准中最差的两类。该研究在一定程度上说明了茂名市地下水的污染问题较为严重, 采取有效的水质污染控制措施十分重要。

关键词: 模糊综合评判法; 地下水; 水质评价; 茂名市

*基金项目: 基于多重工作假说的流域水文模拟方法与应用研究—以华南湿润区为例(51379223)。

作者简介: 刘嘉仪(1990-), 女, 广东江门, 硕士研究生, 研究方向为水环境模拟与水资源保护。

#通讯作者。

1. 引言

茂名市位于广东省西南部, 陆地总面积 11459 平方公里, 到 2012 年, 茂名市全市户籍人口已达 748.90 万人。自 20 世纪 50 年代该市发现了油页岩矿后, 迅速崛起的石化业使茂名市成为了我国华南地区最大的石化基地^[1]。该市地下水分布面积广, 包括了市区全部和郊区的绝大部分地区, 且部分地区含水层厚度较大, 赋水性较好, 水量较丰富, 是农田灌溉、工业生产和生活用水的重要水源^[2]。随着茂名市人口的日益增长和经济的持续发展, 生活污水与工、农业废水的排放量不断加大, 加上地下水含水层埋藏浅, 茂名市区的地下水的已受到不同程度的污染, 水的供需矛盾也日益突出。至 2007 年, 茂名石化和已建成投产的 30 万吨乙烯工程, 排放的部分含油污水已渗漏至地下, 使该市地下水水质进一步恶化^[3]。

为了保证茂名市经济和社会的可持续发展, 保障当地居民的生产生活用水, 科学分析评价地下水污染现状, 合理开发和保护地下水, 已成为茂名市建设规划的重大课题之一。本研究利用模糊综合评判法^[4]对该市 2007 年丰水期收集的 19 个地下水监测点数据进行水质评价分析, 对各点的水质级别进行分类, 得出茂名市地下水污染的情况, 从而使人们了解该市地下水资源的污染现状, 为茂名市合理开发利用地下水资源提供依据。

2. 模糊综合评判法理论及步骤

地下水水质评价方法是地下水水质评价的工具与手段, 也是评价结果合理与否的关键。目前, 地下水水质评价方法包括单因子评价方法和综合评价方法, 其中, 常用的综合评价方法主要有: 综合指数法、人工神经网络模型、灰色聚类法、模糊综合评判法等^[5-14]。它们各具特色, 也有各自适用的范围和局限性。其中, 由于水质评价中的污染程度、水质类别都是一些客观存在的模糊概念和模糊现象, 而模糊综合评判法是利用模糊变换原理和最大隶属度原则^[15], 将评价的理论和方法与严谨的数学模型相结合, 通过模糊级别判断及综合评价值的计算, 客观地反映地下水水质的实际状况, 可以直观地判断出水质的优劣^[9]。

2.1. 模糊综合评判法原理

模糊综合评判法的原理可以用以下数学式来表示:

$$B = A \times R \quad (1)$$

式中: A 是由参加评价因子的权重经归一化处理得到的一个 $1 \times N$ 阶权重模糊行矩阵; R 是由各单因子评价行矩阵组成的一个 $N \times M$ 阶模糊关系矩阵; B 是一个 $1 \times M$ 阶矩阵, 是综合评判结果^[16]。

2.2. 模糊综合评判法步骤

2.2.1. 建立评价指标标准值

评价指标的选取以及评价指标的标准值的设定, 对评价结果有着至关重要的影响。因此, 需要通过分析影响因素, 选用一系列合理的指标建立可靠的评价指标体系, 并对各项指标拟定分级评价标准值。

2.2.2. 计算评价指标权重

由于综合评判法选取了多项指标进行评价, 然而每项指标对评价事情的影响都不尽相同。权重是通过数量形式对比的形式, 以权衡被评价事物在总体中诸因素相对程度的量值。它的决定因素主要有两个: 第一是在决策中, 选用指标的作用以及指标价值的可靠程度; 第二则是决策者对该项指标的重视程度以及主观评价。因此, 权重是主客观综合度量的结果。本研究采用的是下列公式计算权重(q_{ij}):

$$q_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{\rho_{jB}} \quad (2)$$

式中: 式中 q_{ij} 为第 i 个地区第 j 个指标的权重值; ρ_{ij} 为第 i 个地区的第 j 中指标的特征值; ρ_{jB} 为第 j 个指标的标准平均值, 最后再对各单项权重归一化处理:

$$\rho_{ij} = (\rho_{ij} / \rho_{jB}) / \left[\sum (\rho_{ij} / \rho_{jB}) \right] \quad (3)$$

2.2.3. 计算隶属度进行单因子评价

隶属度是指样本对于各级水质的隶属程度。一般模糊综合评判法的计算中, 用隶属函数 $r_{ij}(x)$ 表示实测浓度 x 与其相对应的第 i 个评价因子对第 j 类水质的隶属度。该函数只能在 $[0, 1]$ 区间连续取值, 即 $0 \leq r_{ij}(x) \leq 1$ 。以隶属度表达隶属资格时, 隶属度数值愈大, 隶属资格即愈高^[17]。

2.2.4. 计算模糊关系矩阵

对第 i 个地区, 第 i 个地区的模糊关系矩阵为 $R^i = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jk})^{[18]}$ (公式(4)如下)。

式中 r_{ij} 为指标 j 的特征值对第 k 级标准的隶属度; S_{j1} 、 S_{jk} 、 $S_{j(k+1)}$ 、 $S_{j(k-1)}$ 、 S_{jp} 分别为指标 j 的第 1 级、 k 级、 $k+1$ 级、 $k-1$ 级、 p 级标准值。

在水质评价中, 水质指标值有越大越优型, 也有越小越优型, 因而需要同时考虑指标特征值小于指标平均值和指标特征值大于指标平均值的情况。

2.2.5. 计算综合评价

根据上述建立综合评判模型进行模糊子集合成, 求得综合评判值 $B = A \times R$ 。根据分级标准以及最大隶属度原则, 判定评价等级。

3. 基于模糊综合评判法的 茂名市地下水水质评价

3.1. 数据来源及评价指标的选择

本研究根据茂名市市区的实际情况, 以该市的水质调查资料为依据, 采用了 2007 年丰水期茂名市区 19 个地下水水质监测点的监测数据, 各监测点的地理位置如图 1 所示。

为全面反映茂名地下水的污染基本情况, 对实测的 19 个监测点水质数据进行毒理学评价, 选取 pH、总硬度、总铁、氨氮、铅、汞、硫酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐 9 个检测项目, 作为评价茂名市市区地下水水质状况的指标^[19]。具体水质数据见表 1。

3.2. 茂名市地下水评价标准的选择

本研究采用国家技术监督局 1993 年发布的《地下水质量标准 GB_T 14848-93》^[20], 在考虑区域本底浓度值的基础上, 将该市地下水水质分为 5 个级别, 组成水质分级集合 $V = \{I, II, III, IV, V\}$ 。其中 I、II 类水主要反映地下水化学组成的天然背景含量, 适用于各种用途; III 类水以人体健康基值为依据, 主要适用

于集中式生活饮用水源及工业、农业用水; IV 类水以农业和工业用水要求为依据, 除适用于农业和部分工业用水外, 适当处理后可作生活饮用水; V 类水不宜饮用。分级标准见表 2。

3.3. 权重计算

在评价地下水时, 各单项指标高低有差别, 并且它们在总体污染中的贡献大小也不尽相同, 因此若对各单项指标一概而论必然会导致该分析评价效果欠佳。为综合评价分析茂名市地下水水质状况, 有必要对个单项指标赋予一定的权重。经过计算, 茂名市 19 个监测点 9 个检测指标权重计算结果列于表 3。

3.4. 综合评价

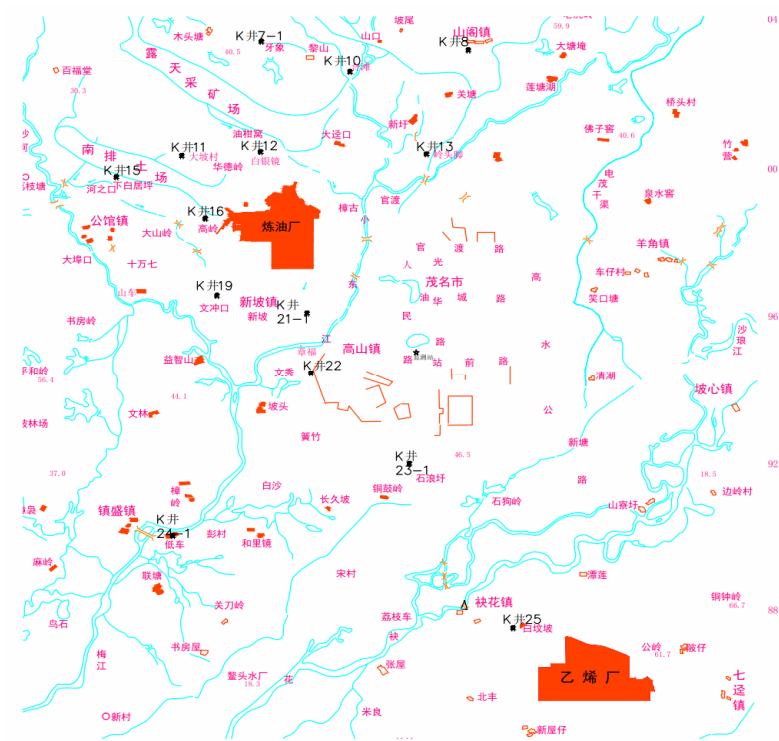
由前面确定的 A 和 R , 便可进行模糊矩阵的复合运算 $A \times R$, 以便获得最终评价结果。按模糊矩阵的复合运算法则(取小, 取大)计算, 隶属度数值愈大, 隶属资格愈高。利用该方法对茂名市区其余 19 个监测点进行模糊矩阵的复合运算, 利用其结果将各测试点的地下水水质进行级别分类。其结果列于表 4 中。

通过以上结果分析, 可以得出茂名市在 2007 年丰水期间所检测地下水状况如下: 1) 19 个地下水监测点中, 均没有检测出 I 类和 II 类地下水, 该市缺乏优质的地下水水源; 2) 监测出 III 类水质的只有 4 个监测点, 仅占了此次所监测地下水水质的 21.05%, 适合作为生活饮用水的地下水水源少; 3) 接近 80% 的地下水水质处于重污染或严重污染的级别, 其中, V 类水质高达 57.89%, 地下水污染问题比较严重。

4. 结语

地下水对于茂名市的生产和生活具有重要作用, 水质的好坏更关系到茂名市经济和社会可持续发展。本研究采用模糊综合评判法对茂名市地下水水质进行评价分析, 将模糊数学的方法引用到水质评价中来, 用隶属度来描绘模糊的水质分级界限, 对每一种

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq S_{jp} \text{ 或 } x_{ij} \geq S_{j1} \\ \frac{(x_{ij} - S_{j(k-1)})}{(S_{jk} - S_{j(k-1)})} & S_{j(k-1)} < x_{ij} < S_{jk} \text{ 或 } S_{j(k-1)} > x_{ij} > S_{jk} \\ \frac{(S_{j(k+1)} - x_{ij})}{(S_{j(k+1)} - S_{jk})} & S_{jk} < x_{ij} < S_{j(k+1)} \text{ 或 } S_{jk} > x_{ij} > S_{j(k-1)} \\ 1 & x_{ij} \geq S_{j1} \text{ 或 } x_{ij} \leq S_{jp} \end{cases} \quad (4)$$



注: 黑色“*”标记处为水样点位置

Figure 1. The location of the 19 groundwater monitoring stations in Maoming
图 1. 茂名市测区 19 个地下水监测点位置图

Table 1. Monitoring data of water quality indexes at the 19 groundwater monitoring stations in Maoming during wet season in 2007/mg·L⁻¹
表 1. 茂名市 19 个地下水监测点在 2007 年丰水期获得的水质监测数据/mg·L⁻¹

| 监测点 | 检测值 | | | | | | | | |
|-----|------|--------|------|------|-------|---------|--------|-------|-------|
| | PH 值 | 总硬度 | 总铁 | 氨氮 | 铅 | 汞 | 硫酸盐 | 硝酸盐 | 亚硝酸盐 |
| 1 | 5.49 | 13.46 | 0.09 | 0.00 | 0.024 | 0.00018 | 12.92 | 6.00 | 0.002 |
| 2 | 6.06 | 151.72 | 0.05 | 0.00 | 0.011 | 0.00020 | 93.95 | 70.00 | 0.014 |
| 3 | 5.26 | 59.95 | 0.08 | 0.00 | 0.042 | 0.00024 | 61.05 | 30.00 | 0.020 |
| 4 | 5.85 | 77.06 | 0.08 | 0.00 | 0.009 | 0.00011 | 38.76 | 35.00 | 0.003 |
| 5 | 6.75 | 69.76 | 0.27 | 1.40 | 0.027 | 0.00032 | 76.32 | 10.00 | 0.033 |
| 6 | 7.31 | 220.23 | 0.12 | 0.00 | 0.033 | 0.00016 | 152.64 | 20.00 | 0.007 |
| 7 | 7.33 | 132.16 | 0.33 | 0.00 | 0.022 | 0.00007 | 65.75 | 65.00 | 0.015 |
| 8 | 6.60 | 347.48 | 0.09 | 0.00 | 0.036 | 0.00021 | 304.17 | 30.00 | 0.012 |
| 9 | 6.18 | 223.88 | 0.15 | 1.80 | 0.042 | 0.00024 | 203.17 | 20.00 | 0.007 |
| 10 | 6.18 | 128.45 | 0.40 | 0.40 | 0.025 | 0.00004 | 72.81 | 2.00 | 0.063 |
| 11 | 7.12 | 211.67 | 0.11 | 0.40 | 0.031 | 0.00029 | 165.56 | 20.00 | 0.022 |
| 12 | 4.13 | 203.11 | 0.04 | 0.60 | 0.029 | 0.00039 | 225.45 | 9.00 | 0.009 |
| 13 | 7.05 | 116.24 | 0.04 | 0.00 | 0.009 | 0.00011 | 86.89 | 40.00 | 0.049 |
| 14 | 6.75 | 152.92 | 0.34 | 0.40 | 0.015 | 0.00024 | 57.54 | 4.00 | 0.036 |
| 15 | 6.48 | 193.30 | 0.31 | 3.00 | 0.027 | 0.00005 | 103.36 | 40.00 | 0.035 |
| 16 | 7.20 | 162.73 | 0.07 | 2.00 | 0.015 | 0.00024 | 81.03 | 45.00 | 0.024 |
| 17 | 6.40 | 140.71 | 0.19 | 0.00 | 0.014 | 0.00023 | 58.69 | 4.00 | 0.015 |
| 18 | 7.44 | 210.42 | 0.05 | 3.50 | 0.017 | 0.00033 | 79.87 | 15.00 | 0.275 |
| 19 | 6.70 | 245.90 | 0.02 | 0.00 | 0.018 | 0.00018 | 85.73 | 17.50 | 0.010 |

Table 2. Evaluation criteria/mg·L⁻¹
表 2. 评价因子分级评价标准/mg·L⁻¹

| 类别 标准值 项目 | I | II | III | IV | V |
|----------------------------|----------|-----------|--------|----------------------|----------|
| pH 值 | | 6.5 - 8.5 | | 5.5 - 6.5 8.5 - 9 | <5.5, >9 |
| 总硬度(以 CaCO ₃ 计) | ≤150 | ≤300 | ≤450 | ≤550 | >550 |
| 溶解性总固体 | ≤300 | ≤500 | ≤1000 | ≤2000 | >2000 |
| 硫酸盐 | ≤50 | ≤150 | ≤250 | ≤350 | >350 |
| 氯化物 | ≤50 | ≤150 | ≤250 | ≤350 | >350 |
| 铁 | ≤0.1 | ≤0.2 | ≤0.3 | ≤1.5 | >1.5 |
| 锰 | ≤0.05 | ≤0.05 | ≤0.1 | ≤1.0 | >1.0 |
| 挥发性酚类 | ≤0.001 | ≤0.001 | ≤0.002 | ≤0.001 | >0.01 |
| 硝酸盐(以 N 计) | ≤2.0 | ≤5.0 | ≤20 | ≤30 | >30 |
| 亚硝酸盐(以 N 计) | ≤0.001 | ≤0.01 | ≤0.02 | ≤0.1 | >0.1 |
| 氨氮(以 N 计) | ≤0.02 | ≤0.02 | ≤0.2 | ≤0.5 | >0.5 |
| 氟化物 | ≤1.0 | ≤1.0 | ≤1.0 | ≤2.0 | >2.0 |
| 氰化物 | ≤0.001 | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.1 | >0.1 |
| 汞 | ≤0.00005 | ≤0.0005 | ≤0.001 | ≤0.001 | >0.001 |
| 砷 | ≤0.005 | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.05 | >0.05 |
| 镉 | ≤0.0001 | ≤0.001 | ≤0.01 | ≤0.01 | >0.01 |
| 铬 | ≤0.005 | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.1 | >0.1 |
| 铅 | ≤0.005 | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.1 | >0.1 |

Table 3. Fuzzy Synthetic Evaluation results of groundwater during wet season in Maoming in 2007
表 3. 茂名市 2007 年丰水期的地下水水质 19 个监测点模糊矩阵的计算结果

| 监测点 | pH | 总硬度 | 总铁 | 氨氮 | 铅 | 汞 | 硫酸盐 | 硝酸盐 | 亚硝酸盐 |
|-----|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.364836467 | 0.016324 | 0.06064 | 0 | 0.219677 | 0.122988 | 0.027251 | 0.167283 | 0.021001 |
| 2 | 0.127662 | 0.05833 | 0.010679 | 0 | 0.031917 | 0.04332 | 0.062818 | 0.618672 | 0.046601 |
| 3 | 0.15890 | 0.033052 | 0.024504 | 0 | 0.174761 | 0.074546 | 0.058537 | 0.380228 | 0.095468 |
| 4 | 0.21807 | 0.052424 | 0.030236 | 0 | 0.046209 | 0.04216 | 0.045858 | 0.547372 | 0.01767 |
| 5 | 0.095324 | 0.017979 | 0.038659 | 0.581965 | 0.052518 | 0.046463 | 0.034208 | 0.059248 | 0.073636 |
| 6 | 0.220995 | 0.121508 | 0.036782 | 0 | 0.137412 | 0.049733 | 0.146463 | 0.253669 | 0.033438 |
| 7 | 0.150933 | 0.049664 | 0.068894 | 0 | 0.062395 | 0.01482 | 0.04297 | 0.561521 | 0.048803 |
| 8 | 0.146315 | 0.140585 | 0.020229 | 0 | 0.109925 | 0.047866 | 0.214021 | 0.279023 | 0.042035 |
| 9 | 0.069463 | 0.045924 | 0.017094 | 0.595536 | 0.065022 | 0.027736 | 0.07248 | 0.094312 | 0.012432 |
| 10 | 0.149589 | 0.056742 | 0.098166 | 0.284998 | 0.083349 | 0.009955 | 0.055937 | 0.02031 | 0.240953 |
| 11 | 0.147578 | 0.080069 | 0.023117 | 0.244047 | 0.088501 | 0.061802 | 0.108916 | 0.173918 | 0.072052 |
| 12 | 0.089275 | 0.080126 | 0.008767 | 0.381772 | 0.086343 | 0.086678 | 0.154678 | 0.08162 | 0.03074 |
| 13 | 0.179712 | 0.054076 | 0.010338 | 0 | 0.031599 | 0.02883 | 0.0703 | 0.427782 | 0.197363 |
| 14 | 0.175377 | 0.07251 | 0.089565 | 0.305914 | 0.053679 | 0.064113 | 0.04745 | 0.043602 | 0.147792 |
| 15 | 0.049359 | 0.026871 | 0.023941 | 0.672644 | 0.028327 | 0.003916 | 0.024988 | 0.127828 | 0.042125 |
| 16 | 0.072342 | 0.029839 | 0.007131 | 0.591505 | 0.020758 | 0.024793 | 0.02584 | 0.189689 | 0.038102 |
| 17 | 0.303339 | 0.121713 | 0.091305 | 0 | 0.091395 | 0.112083 | 0.088289 | 0.079539 | 0.112336 |
| 18 | 0.043049 | 0.02222 | 0.002933 | 0.596114 | 0.013548 | 0.019632 | 0.014668 | 0.036413 | 0.251422 |
| 19 | 0.244852 | 0.164003 | 0.007411 | 0 | 0.090604 | 0.067634 | 0.099439 | 0.268313 | 0.057744 |

Table 4. the category results of the groundwater based on Fuzzy Synthetic Evaluation in Maoming
表 4. 茂名市 19 个监测点的模糊矩阵计算结果

| 监测点 | $B = A \times R$ | | | | | 水质级别 |
|-----|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| | I | II | III | IV | V | |
| 1 | 0.122988049 | 0.219676767 | 0.219676767 | 0 | 0.364836467 | V |
| 2 | 0.06281753 | 0.127662007 | 0.046601293 | 0.127662007 | 0.618672335 | V |
| 3 | 0.074546047 | 0.174761251 | 0.174761251 | 0.38022768 | 0.158903919 | IV |
| 4 | 0.052424295 | 0.046209389 | 0.046209389 | 0.218070334 | 0.547371749 | V |
| 5 | 0.095323736 | 0.073636325 | 0.073636325 | 0.095323736 | 0.581964504 | V |
| 6 | 0.220994517 | 0.146462858 | 0.253669195 | 0.220994517 | 0 | III |
| 7 | 0.150932509 | 0.062394813 | 0.068894273 | 0.150932509 | 0.56152071 | V |
| 8 | 0.05 | 0.140584861 | 0.140584861 | 0.27902347 | 0.21402143 | IV |
| 9 | 0.045924319 | 0.072480164 | 0.094312264 | 0.06946292 | 0.59553631 | V |
| 10 | 0.056742489 | 0.083348618 | 0.284998499 | 0.28499849 | 0.14958907 | III |
| 11 | 0.147577993 | 0.108916091 | 0.244046608 | 0.244046608 | 0 | III |
| 12 | 0.086678425 | 0.154677505 | 0.154677505 | 0 | 0.38177222 | V |
| 13 | 0.179712198 | 0.070299666 | 0.197362848 | 0.197362848 | 0.427781542 | V |
| 14 | 0.175376645 | 0.064112651 | 0.30591386 | 0.30591386 | 0 | III |
| 15 | 0.02687122 | 0.028327184 | 0.042125162 | 0.049359149 | 0.672643715 | V |
| 16 | 0.072341818 | 0.029839217 | 0.038102112 | 0.072341818 | 0.591504562 | V |
| 17 | 0.121712815 | 0.11233643 | 0.11233643 | 0.303339138 | 0.303339138 | IV |
| 18 | 0.043049014 | 0.036412889 | 0.036412889 | 0.043049014 | 0.596114237 | V |
| 19 | 0.164002598 | 0.17 | 0.268312552 | 0.244852268 | 0 | IV |

污染因子的不同污染程度给予了一定的重视, 较为合理的计算方法使评价结果具有可靠性。利用内梅罗污染指数法对检测数据进行对比验证, 与模糊综合评判法水质评价结果大致一致, 证明应用模糊综合评判法对茂名市地下水污染的分析取得令人满意的效果。基于模糊综合评判法对茂名市区 2007 年丰水期的地下水水质进行评价, 得出以下结论:

1) I 类水和 II 类水均未检测出, 该市区地下水水源受到人类生产生活的一定影响, 缺乏优质的地下水水源。

2) 19 个监测数据中, 监测出 III 类水质的只有 3 个, 仅占了此次监测水质的 15.8%, 适合作为生活饮用水的地下水水源少。

3) V 类水比重高达 57.9%, 超过 80% 的地下水处于重污染和严重污染的级别, 地下水现状不容乐观。

4) 针对茂名市市区地下水受到严重污染的情况,

应该采取优先保护生活水源、控制污染物排放总量、建立监测体系、调整产业结构、加强地下水自净能力等多方面措施来改善和保护地下水资源。

5) 本研究采取的模糊综合评判法仍存在不足, 需要进一步改进方法。模糊综合评判法只是对监测点水质的整体评价, 没有指出具体的受污染因子, 也没有对地区整体情况进行一个总的评价, 因而不能为治理方案提出针对性对策。

5. 致谢

感谢国家自然科学基金项目的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

参考文献 (References)

- [1] 梁媛, 黄柏生. 茂名市浅层地下水 pH 值偏低的原因分析[J]. 工程勘测, 2003, 3: 32-34.

- Liang Yuan, Huang Baisheng. The causes for the low pH values of shallow groundwater in Maoming. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2003, 3: 32-34. (in Chinese)
- [2] 和卓峰. 茂名市区浅层地下水污染现状及防治措施[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(z1): 530-532.
He Zhuofeng. The pollution and control measures of shallow groundwater in Maoming. *WEST—China Exploration Engineering*, 2006, 18(z1): 530-532. (in Chinese)
- [3] 张冬梅, 沈蒙祥, 钟少华. 茂名石化炼油废水处理扩建一期工程 APO 系统改 OPO 工艺运行探索[J]. 环境工程, 2002, 18(1): 21-23.
Zhang Dongmei, Shen Haoxiang and Zhong Shaohua. The exploration of OPO process operation in the first phase expansion about APO system engineering of petrochemical refinery wastewater treatment in Maoming. *Environmental Engineering*, 2002, 18(1): 21-23. (in Chinese)
- [4] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 38-65.
Du Dong, Pang Qinghua and Wu Yan. The modern comprehensive evaluation method with selected cases. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 38-65. (in Chinese)
- [5] 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): 4-12.
Su Yaoming, Su Xiaosi. Present situation and prospecting of groundwater quality evaluation. *Water Resources Protection*, 2007, 23(2): 4-12. (in Chinese)
- [6] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733.
Yin Hailong, Xu Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese)
- [7] 刘万茹. 灰色理论在地下水环境质量评价中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学硕士毕业论文, 1999.
Liu Wangru. Application of grey theory for assessment of groundwater environmental quality. Hefei University of Technology, 1999. (in Chinese)
- [8] 孙涛, 潘世兵, 李永军. 人工神经网络模型在地下水水质评价分类中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 58-61.
Sun Tao, Pan Shibing and Li Yongjun. Application of artificial neural network model to groundwater quality assessment and classification. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004(3): 58-61. (in Chinese)
- [9] 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.
Li Yanjun, Yang Muzhuang. A Review of groundwater quality evaluation methods. *Groundwater*, 2007(29): 19-24. (in Chinese)
- [10] 李云辉. 集成BP网络在城市地下水水质评价中的应用[J]. 地下水, 2006, 28(5): 36-37.
Li Yunhui. The Application of Integrated BP Network to the Evaluation of Municipal Groundwater Quality. *Groundwater*, 2006, 28(5): 36-37. (in Chinese)
- [11] 曹剑锋, 平建华等. 改进BP神经网络在地下水环境质量评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 21-23.
Cao Jianfeng, Ping Jianhua, SUMARE Oumar et al. The application of artificial neural network model to groundwater quality assessment and classification. *Advance in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(3): 21-23. (in Chinese)
- [12] 付永锋, 张建等. 基于改进BP神经网络的地下水水质评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 129-132.
Fu Yongfeng, Zhang Jian, Luo Guangming, et al. Application of BP network to groundwater quality evaluation—Case study of Hotan sub-project area Xinjiang. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition)*, 2004, 32(11): 129-132. (in Chinese)
- [13] 何艳秋, 王永波, 刘莹. 灰色关联分析法在哈尔滨城区地下水水质评价中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(3): 104-107.
He Yanqiu, Wang Yongbo and Liu Ying. Application of gray connection analysis on the groundwater quality evaluation in Harbin urban. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2007, 34(3): 104-107. (in Chinese)
- [14] 张祖亮. 灰色聚类法在地下水质量评价中的应用[J]. 云南环境科学, 2004, 23(1): 60-62.
Zhang Zuliang. Application of the grey clustering method to underground water quality assessment. *Yunnan Environmental Science*, 2004, 23 (1): 60-62. (in Chinese)
- [15] 凌敏华, 左其亭. 水质评价的模糊数学方法及其应用研究[J]. 人民黄河, 2006, 28(1): 34-36.
Ling Minhua, Zuo Qiting. Application of fuzzy mathematics methods in water quality evaluation. *Yellow River*, 2006, 28(1): 34-36. (in Chinese)
- [16] 韩程辉, 刘文生. 模糊综合评判法在矿区地下水水质评价中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(5): 36-39.
Han Chenghui, Liu Wensheng. Application of fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality in mining area. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2004(31): 36-39. (in Chinese)
- [17] 王艳秋, 王辉等. 模糊综合评判法在阜新水质评价中的应用[J]. 辽宁工学院学报, 2006, 26(1): 4-6.
Wang Yanqiu, Wang Hui and Zhang Zhenbin. Application of fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Fuxin. *Journal of Liaoning Institute of Technology*, 2006, 26(1): 4-6. (in Chinese)
- [18] 钱挹清. 应用模糊综合评判法进行东莞市水资源规划宏观经济社会效益评价[J]. 珠江现代建设, 2006, 12(6): 1-8.
Qian Yiqing. The application of fuzzy comprehensive evaluation method to Dongguan city's water resources planning and its macroeconomic social benefits evaluation. *Modern Construction of the Pearl River*, 2006, 12(6): 1-8. (in Chinese)
- [19] 张震斌, 苑宏刚, 周立岱. 模糊综合评判理论在地下水污染评价中的应用[J]. 资源环境与发展, 2006, 1: 41-48.
Zhang Zhenbin, Yuan Honggang and Zhou Lishan. The application of fuzzy comprehensive evaluation in the assessment of groundwater pollution. *Resources Environment and Development*, 2006, 1: 41-48. (in Chinese)
- [20] GB_T 14848-93, 地下水质量标准[S]. 国家技术监督局, 1993.
GB_T 14848-93, Groundwater quality standards. State Bureau of Technical Supervision of the People's Republic of China, 1993.