

## 模糊数学在地下水资源污染评价中的应用

杨海燕, 夏正楷

(北京大学环境学院, 100871)

**摘 要:** 地下水的水质分析与污染评价是地下水保护与污染控制的重要内容。参照区域背景含量和国家地下水环境质量标准, 运用模糊数学的方法对该地区地下水中 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、总硬度、 $\text{NO}_2^-$ 、COD、Fe、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 九种组分的分析结果进行了数据处理, 并在此基础上, 将该区地下水按水质好坏划分为五个等级, 其中区内大部分地区属于水质较好的II级地下水分布区。受人类活动影响, 水质最差的五级地下水主要分布在工厂和居民区集中的地区。

**关键词:** 地下水; 污染评价; 模糊数学; 环境质量标准

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)04-0107-03

## The Appliange of Fuzzy Mathematics to the Polluted Evaluation of Groundwater Resources

YANG Hai-yan, XIA Zheng-kai

(College of Enviromental Sciences, Peking University 100871, China)

**Abstract:** The background analysis and pollution evaluation of groundwater is an important content of environmental protection and pollution control. Referring to the background content of the ground water and the National Environmental Quality Standards of Groundwater, fuzzy mathematics was used as a way to proceed the analyzed data of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , total hardness,  $\text{NO}_2^-$ , COD, Fe,  $\text{F}^-$  and  $\text{Cr}^{6+}$ . Based on this the water quality was divided into five levels. Most of this area belongs to II, where the water quality is better. Because of the influence of human's activity, the V water, which is the worst, mostly distributes in factories and residential area.

**Key words:** groundwater; pollution evaluation; fuzzy mathematics; environmental quality standards

地下水是人类重要的饮用水水源, 有效控制地下水污染, 消除有害元素, 对于保护人类身体健康具有重要的意义。

地下水污染评价是环境水文地质的基础性工作。通过对地下水污染状况的调查, 分析地下水污染的原因、程度, 可以为合理开发地下水资源、环境规划、工农业合理布局等提供科学依据。

在地下水污染的评价工作中, 人们经常采用的方法是将地下水中主要组分与地下水环境背景进行对比。我们对上顿渡—红旗桥区采集的样品数据进行了数据处理, 结合区域背景含量和国家地下水环境质量标准确定评价标准, 将模糊数学方法引入地下水污染评价工作中, 取得了良好的效果。

### 1 区域概况

本区位于江西省东部, 宜黄河中游, 为宜黄河冲积平原, 包括上顿渡至红旗桥镇以及两镇附近的部分村庄。处于赣抚平原向武夷山区过渡地带, 地势西高东低, 南高北低, 地形起伏不大, 标高在35~60 m之间。地貌主要为冲积平原岗地。

区内第四纪沉积物发育, 大部分地区为其覆盖, 基岩虽

有零星出露, 但在调查区内尚未发现。构造简单, 隐伏构造, 野外标志不明显, 主要为NE走向、NW倾向的单斜构造, 褶皱不发育。

本区地表水资源丰富, 在宜黄河沿岸平原地带有丰富的地下水资源, 可满足人们生活及工业生产的需要。

区内地下水主要为无压孔隙水, 局部微压, 主要分布于I、II级阶地与低丘、岗地中。近河地段、河漫滩、I、II级阶地与河水存在一定的补给关系。随着季节变化, 丰水期, 地表水补给地下水, 枯水期则反之, 且互补关系随离河距离的增加而减弱。低丘、岗地中的地下水主要靠降水补给, 排入河水中的补给I、II级阶地。本区地下水属 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$ -Ca-Na型水, 矿化度为0.1~0.9 g/L。由于补给充足, 水质良好, 是区内主要的地下水供水水源。

### 2 地下水环境调查与背景值的确定

布点: 本次调查在1:10 000的地图上, 每1 km<sup>2</sup>布置1~2个点, 总共布置了40个取样点。为了取得较准确可靠的资料, 本次调查采集了地下水水样和地表水水样。其中地下

\* 收稿日期: 2005-04-26

基金项目: 国家教育部博士点基金(编号: 20030001100)

作者简介: 杨海燕(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事第四纪环境及全球变化方面的研究。

水水样居多。

地下水环境调查: 本次调查的目的是查明地下水背景与地下水污染现状, 并进行地下水污染评价。现场测试项目有: 温度、pH 值、溶解氧, 并描述水的物理特征, 如色、味、嗅及透明度等。

数据处理: 受人为因素的影响或自然背景值确实偏高会导致数据异常值的出现。异常值的存在会降低数据的代表性, 故应对数据进行检验, 剔除异常值。本文对数据异常值的检验采用 Grubbs 法, 显著水平  $\alpha = 0.05$ 。本文采用最大累积频率绝对差检验法来进行分布型式的检验。结果表明  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、总硬度、 $\text{NO}_2^-$ 、COD、Fe、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 、N 均服从正态分布。

表1 本区地下水背景值

元素 (组分)	含量范围	背景值 ( $\bar{x}$ )	背景值上限 ( $\bar{x} - s$ )	背景值上限 ( $\bar{x} + s$ )	变异系数 (Cv)
$\text{NH}_4^+$	0.000~3.500	0.2533	0.0000*	0.5196	1.0515
$\text{NO}_3^-$	0.350~13.50	4.9999	1.4561	8.5437	0.7088
$\text{Cl}^-$	0.000~30.00	8.0513	3.2705	12.8421	0.5938
总硬度	6.00~199.0	80.0250	22.8138	137.2362	0.6975
$\text{NO}_2^-$	0.000~0.5184	0.0559	0.0000*	0.1237	1.2128
COD	2.680~17.10	4.2328	3.3417	5.1239	0.2105
Fe	0.000~3.900	0.0451	0.0000*	0.092	1.0387
$\text{F}^-$	0.136~9.600	0.2379	0.1702	0.3056	0.2847
$\text{Cr}^{6+}$	0.000~0.0710	0.0037	0.0000*	0.0074	0.9968
N	0.148~15.478	3.9479	0.0000*	8.344	1.1135

说明: \* 由于整体数据为零者居多, 故零也应划入背景值中, 其背景值下限略小于零, 取零。

### 3 地下水污染评价

#### 3.1 地下水污染评价方法

本文选用  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、总硬度、 $\text{NO}_2^-$ 、COD、Fe、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  九项作为评价因子。采用模糊数学综合评价。并以背景值上限作为 II 级标准, 参考国家标准, 其余分别做相应的扩大、缩小。标准如表 2。

表2 模糊评价标准

	I	II	III	IV	V
$\text{NH}_4^+$	0.2598	0.5196	1.0392	2.598	5.196
$\text{NO}_3^-$	4.27185	8.5437	17.0874	42.7185	85.437
$\text{Cl}^-$	6.41605	12.8321	25.6642	64.1605	128.321
总硬度	68.6181	137.2362	274.4724	686.181	1372.362
$\text{NO}_2^-$	0.06185	0.1237	0.2474	0.6185	1.237
	I	II	III	IV	V
COD	2.56195	5.1239	10.2478	25.6195	51.239
Fe	0.046	0.092	0.184	0.46	0.92
$\text{F}^-$	0.1528	0.3056	0.6112	1.528	3.056
$\text{Cr}^{6+}$	0.0037	0.0074	0.0148	0.037	0.074

#### 3.1.1 评价原理

模糊数学法采用模糊集理论来处理和评价这类问题, 其基本原理是把普通集合理论中的非“0”则“1”的绝对隶属函数用  $[0, 1]$  来刻画。

设某一个水样选作评价因子的污染物  $N$  项, 水质分为  $M$  级, 任一级的分级标准为  $S$  ( $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ ); 又设  $U = (X_i, X_{i+1}, \dots, X_n)$ ,  $S$  为地表水水质分级标准的集合, 即评判集  $S = (S_j, S_{j+1}, \dots, S_m)$ 。因此评判空间为  $X = (U, S, R)$ , 其中  $R$  具体确定了一个模糊映射, 它把集

合  $U$  上的一个模糊子集  $A$  映射到集合  $S$  上的一个模糊子集  $R$ , 用公式表示为  $B = A * R$  式中  $A$  为选作评价的单因子对水质影响的贡献占总体贡献的比重,  $B$  即为模糊综合评判的结果。

#### 3.1.2 评价过程

##### (1) 对评价因子计算隶属度

用线性隶属函数确定各评价因子对各级水的隶属度的计算公式为:

##### (1) $j = 1$ 级水

$$Y = \begin{cases} 1 & X_i \leq S_{i,j} \\ \frac{S_{i,j+1} - X_i}{S_{i,j+1} - S_{i,j}} & S_{i,j} < X_i < S_{i,j+1} \\ 0 & X_i \geq S_{i,j+1} \end{cases} \quad (1)$$

##### (2) $j = 2, 3, \dots, m-1$ 级水

$$Y = \begin{cases} \frac{S_{i,j+1} - X_i}{S_{i,j+1} - S_{i,j}} & S_{i,j} < X_i < S_{i,j+1} \\ X_i - S_{i,j-1} & S_{i,j-1} < X_i < S_{i,j} \\ \frac{S_{i,j} - S_{i,j-1}}{S_{i,j} - S_{i,j-1}} & X_i \leq S_{i,j-1} \text{ 或 } X_i \geq S_{i,j+1} \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

##### (3) $j = m$ 级水

$$Y = \begin{cases} 1 & X_i \leq S_{i,j} \\ \frac{X_i - S_{i,j-1}}{S_{i,j} - S_{i,j-1}} & S_{i,j-1} < X_i < S_{i,j} \\ 0 & X_i \geq S_{i,j+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $Y$ ——各因子分别属于各级水的隶属度;  $X$ ——各因子的实测浓度;  $S_{i,j}, S_{i,j+1}, S_{i,j-1}$ ——各因子的各级水质标准

##### (2) 模糊关系 $R$ 矩阵

通过隶属函数的计算, 求出单项指标对于各级别水的隶属度, 得出矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12} & \dots & \dots & \dots & r_{1m} \\ r_{21}, r_{22} & \dots & \dots & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1}, r_{n2} & \dots & \dots & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

##### (3) 各因子权重的计算

权重就是各评价因子对总体污染物影响强度的贡献及对人体影响效应的比重。

对于某种污染物浓度的分级标准  $S_i$ , 可以取其各级标准的平均值:

$$S_i = \sum S_j / m \quad (5)$$

对于某些在水中含量愈高表明水质愈好的单项因子(例如 DO), 其权重公式为:

$$W_i = S_i / X_i \quad (6)$$

对于某些在水中含量愈低表明水质愈好的单因子, 其权重公式为:

$$W_i = X_i / S_i \quad (7)$$

用式子  $W_i = S_j / X_i$  计算的权重可出现大于 1 的情况, 但模糊数学运算只允许在  $[0, 1]$  区间取值, 故各项权重必须进行归一化处理(即使各评价因子权重之和等于 1), 其公式为:

$$\bar{W}_i = W_i / \sum W_i \quad (8)$$

$\sum W_i = 1$ , 从而得到权重矩阵  $A$ , 它为一行  $n$  列矩阵( $n$  为参加评判的因子数)。

##### (4) 综合评价

模糊数学综合评价是通过模糊关系矩阵  $R$  和权重矩阵  $A$  的复合运算而进行的评价。实际是对各项评价因子进行加权合成。用数学式表示为:

$$B = A * R \tag{9}$$

其中  $B$  是以隶属度表示的水质级别模糊评价向量(行矩阵)。模糊矩阵  $A$  和  $R$  的复合运算, 本文采用取乘求和的矩阵相乘算法。

3.2 评价结果

运用模糊数学综合评价的结果列于下表 3。

表3 模糊综合评价结果表

水样	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
等级	I	V	II	II	II	I	II	I	I	I
水样	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	HR1	HR2	SR1
等级	IV	V	IV	II	I	III	V	V	IV	II
水样	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
等级	I	I	IV	I	V	III	I	IV	I	II
水样	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	SR2
等级	III	II	II	I	II	III	V	II	II	III

在表 3 的 I 级水点中, 由于点 HH1 (COD、Fe), HH9 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), SH1 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), SH4 (总硬度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>), SH7 (Fe), HH15 (Cr<sup>6+</sup>) 括号中的指标分别超过了背景值上限, 故认为其为 II 级水。进行调整后评价结果如表 4。

表4 评价结果表

水样	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
等级	II	V	II	II	II	I	II	I	II	I
水样	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	HR1	HR2	SR1
等级	IV	V	IV	II	II	III	V	V	IV	II
水样	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
等级	II	I	IV	II	V	III	II	IV	I	II
水样	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	SR2
等级	III	II	II	I	II	III	V	II	II	III

3.3 评价结果分析

从表 4 的评价结果中, 我们可以看出, 各级水的分布有一定规律, 污染较轻的水主要分布在农业区和一些低丘, 而工业分布区、生活区则一般污染较重。具体情况如下:

(1) I 级水分布区(未污染区): 主要分布在杨李桥、新开基南部的低丘, 包括十中在内的西北角的低丘, 西梁、王家在内的一片 II 级阶地。水质好, 各指标均未超标。

(2) II 级水分布区(轻污染区): 分布范围广, 主要分布在远离工业区、生活区的一些地带, 在生活区也有一定分布。水质较好, 个别指标超标。

(3) III 级水分布区(中等污染区): 主要分布在包括上周、河西街、上顿渡医院在内的一片区域, 受到生活污水入渗的影响较大。

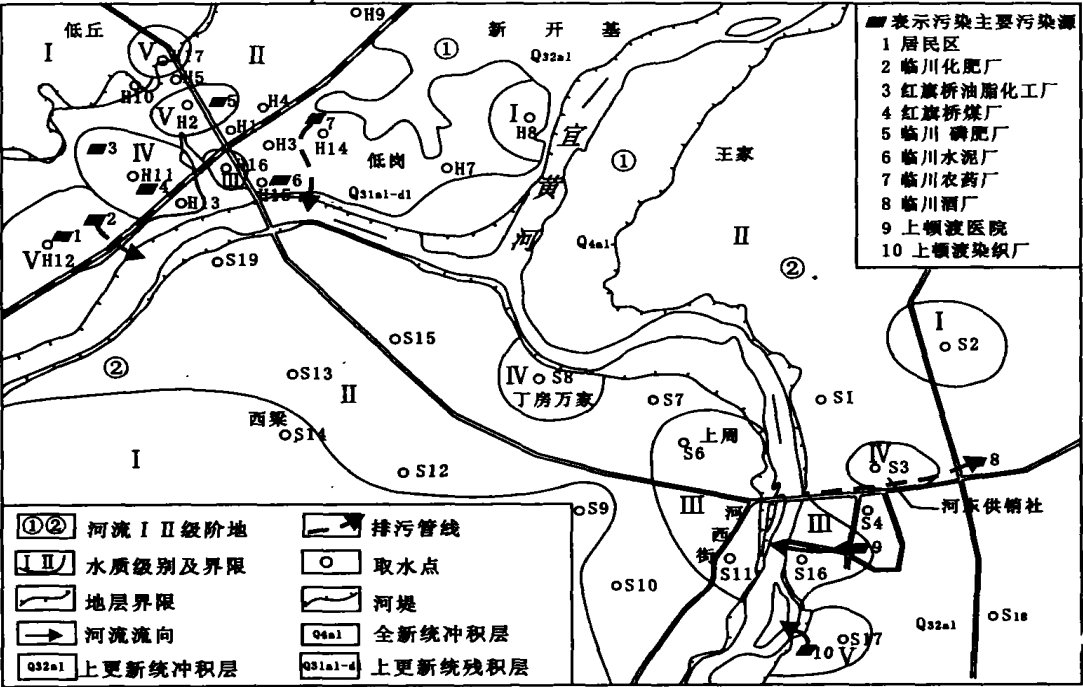


图1 上顿渡-红旗桥区地下水评价视图

(4) IV 级水分布区(重污染区): 主要分布在红旗桥油脂化工厂和煤矿较近范围内的一些地区、丁房万家及河东供销社。水质较差, 污染主要原因是居民生活污水、工厂废水的入渗。

(5) V 级水分布区(严重污染区): 主要分布在临川化肥厂及其附近居民区、上顿渡染织厂附近。由于工业生产的影响, 地下水中部分指标有严重超标现象, 水质差, 不能饮用。

将各个样点所属水质级别标于地形图上, 并结合地形和功能区, 划分出各级水的分布情况, 如图 1 所示。

4 结论及建议

本次环境调查野外采样布点 40 个, 分析项目 10 个, 论证了 10 种组分的分布型式均服从正态分布, 确定背景区间为  $[\bar{x} - s, \bar{x} + s]$ 。选用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、总硬度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、COD、Fe、F<sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 九项作为评价因子, 以本区地下水背景值上限为 II 级标准, 参考地下水质量标准(国家标准), 进行地下水水质评价, 得出该区地下水分为五级, 大面积为 II 级水

(下转第 112 页)

陷,靠近冲积扇这一侧也有零星的喷冒现象<sup>[6]</sup>。在整个地区里河道两侧都出现不同程度的滑移现象,这是两岸震陷、液化之后两岸的砂土受重力影响产生的滑移现象<sup>[5]</sup>。

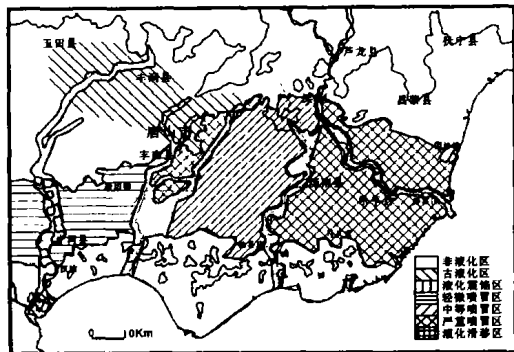


图3 唐山液化宏观形迹和分区示意图

#### 4 讨论

比较图2和图3可以归纳出以下几点规律。

(1) 液化现象的有无和冲积砂体的存在与否相对应。液化现象主要发生在大辛庄、丰南县、女织寨、洼里、滦县、指挥、团林镇一线以南,这片地区都是河流冲积扇或河口三角洲,有着较厚冲击砂体。而未发生液化现象的则是北部基岩山地、残丘。另外,存在冲积砂体的地区中只有少数因历史上发生过多次液化,地层增密处于超固结状态而此次未发生液化。

#### 参考文献

- [1] 地质部地质科学研究所 中国大地构造纲要[M] 北京: 科学出版社, 1964
- [2] 张文佑 华北断块区的形成和发展[M] 北京: 科学出版社, 1980
- [3] 毓顺民, 等 唐山地震区域构造北京和发展模式的讨论[J] 地质科学, 1977, (4): 305- 320
- [4] 李建华, 等 京津塘张地区断裂构造与地震活动性的分析[A] 北京: 北断块曲的形成和发展[M] 北京: 科学出版社, 1980 274- 280
- [5] 杨建, 陈庆寿 砂土液化影响因素及其判别方法[J] 部探矿工程, 2004, (3): 1- 2
- [6] 王钟琦 砂土液化宏观研究[J] 土工程学报, 1982, 4(3): 1- 10
- [7] 大港油田地质研究所, 等 滦河冲积扇—三角洲沉积体系[M] 北京: 地质出版社, 1985
- [8] 邓绥林, 等 河北地理概要[M] 石家庄: 河北人民出版社, 1984

(上接第109页)

(轻污染水)。区内 I、II 级阶地有丰富的地下水资源, 水质良好, 可满足生活与工业用水。

此外, 应该看到由于本区地下水资源管理不当, 工业三废、生活污水任意排放, 故地下水资源局部已受到一定程度的污染。为了防止污染的进一步加剧, 保证居民饮水健康, 本人提出以下几点建议:

居民饮用水的水井, 井上宜铺设水泥, 排水沟远离水井, 附近不应随处堆积垃圾。

#### 参考文献

- [1] 潘乃礼 水文地质常用数理统计方法[M] 北京: 原子能出版社, 1989
- [2] 杨忠耀 环境水文地质学[M] 北京: 原子能出版社, 1990
- [3] 全国环境水文地质学术论文选编组 环境水文地质理论及方法研究[M] 北京: 地质出版社, 1984
- [4] 刘天齐 环境技术与管理工程概论[M] 化学工业出版社, 1987
- [5] R E Bellman, L A Zadeh Decisionmaking in a Fuzzy Environment, Manage[J] Sci, 1970, 17: 141- 164
- [6] S A Orlovsky. On Programming With Fuzzy Constraint Sets[J] Kybernetes, 1977, 6(3): 197- 201

(2) 液化现象的不同类型也跟地貌类型有联系。首先, 发生喷水冒砂的地区大多都是河流冲积扇上的, 而且表现出冲积扇越新喷水冒砂现象越严重。以丰润为顶点的冲积扇上喷冒最轻, 以西峡口为顶点的冲积扇中等, 以滦县为顶点的冲积扇区域最严重。其次, 发生大面积震陷的是滨海平原区, 也就是海积平原和河口三角洲地区。最后, 液化引起的岸边滑移现象的地区主要是沿着现代河流沿岸以条带状分布的。

(3) 由野外观察到的宏观液化形迹上看, 有曲流存在的平坦地段, 河曲内侧(凸岸)有明显的喷水冒砂现象, 而在河曲外侧则没有明显的现象。喷冒集中出现在河道附近, 那里液化类型也比较复杂, 而远离河道的地段液化现象比较稀疏。喷冒最集中的地方是在冲积扇中古河道以及古泻湖残迹附近。从这一点可看出喷冒现象与河道关系密切。

#### 5 结论

从微观视角来讲, 地震液化的影响因素较多, 很难得出关于可能发生液化现象的地区的直观规律, 但是从唐山地震区的地貌与液化现象的比较分析可以看出液化与宏观地貌特征并非毫无联系。河流的冲积平原上容易发生地震液化, 冲积砂体越新越有可能发生砂土液化; 河道附近极容易发生喷冒现象, 河曲附近的喷冒现象尤为复杂。因此, 在生产建设过程中, 如果当地的构造活动比较活跃, 则需要注意回避那些有河流作用过的地区, 特别是古河道存在的地区, 以减少液化现象带来的损害。

尽量不去破坏 I、II 级阶地上的天然保护层, 对耕地、水稻田, 应合理施肥, 控制污灌。

完善排水设施, 清污分流, 达标排放。

建立地下水监测站和监测网, 进行地下水动态的长期观测, 展开地下水污染源及排污途径的调查研究。

致谢: 本文的完成过程中, 得到了罗定贵老师的关怀与指导。在此, 我衷心地感谢他!