

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.002

单一模型地下水水质评价结果的可靠性探讨

刘礼庆¹,袁乃华²,夏蔚芸¹

(1. 江苏水文水资源勘测局镇江分局,江苏 镇江 212000; 2. 镇江市节约用水办公室,江苏 镇江 212000)

摘要:分别采用单因子评价法、综合指数法、模糊综合评判法对镇江市浅层地下水水质进行评价,并给出悲观状况和乐观状况两种情景的评价结果,与采用传统单一评价方法所得结果进行比较。结果表明:①悲观状况下,I类、II类监测井占评价监测井总数的5.88%,III类监测井占39.22%,IV~V类监测井占54.9%;乐观状况下,I类、II类监测井占评价监测井总数的54.9%,III类监测井占5.88%,IV~V类监测井占39.22%。②不同评价方法的评价结果相差较大,依赖单一评价模型的评价结果进行决策,是具有风险的。

关键词:地下水;水质评价;单一模型;单项组分评价法;综合指数法;模糊综合评判法

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0010-04

Study of reliability of groundwater quality evaluation results using a single model

LIU Liqing¹, YUAN Naihua², XIA Weiyun¹

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Zhenjiang 212000, China;
2. Water Saving Office of Zhenjiang City, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: The water quality of shallow groundwater in Zhenjiang City was evaluated using the single factor evaluation method, the comprehensive index method, and the fuzzy comprehensive evaluation method. The evaluation results in regards to a pessimistic situation and an optimistic situation were obtained, and the results were compared with those obtained with the traditional single evaluation method. The study shows the following results: (1) In the pessimistic situation, the monitoring wells of the grade I and grade II levels accounted for 5.88% of the total monitoring wells evaluated, the monitoring wells of the grade III level accounted for 39.22%, and those of the grade IV and V levels accounted for 54.9%; in the optimistic situation, the monitoring wells of the grade I and grade II levels accounted for 54.9%, the monitoring wells of grade III accounted for 5.88%, and those of the grade IV and V levels accounted for 39.22%. (2) These evaluation methods generate remarkably different results, indicating that it is risky to make a decision based on a single evaluation method.

Key words: groundwater; water quality evaluation; single model; single component evaluation method; comprehensive index method; fuzzy comprehensive evaluation

地下水作为水资源的一个重要组成部分,具有分布广泛且稳定、相对于地表水不易受到污染、便于开采等优点,已经成为人们生活生产的重要供水水源。但是受人类活动和原生地球化学环境的共同影响,地下水水质表现出区域分布和演化的特点^[1]。地下水水质评价是地下水资源评价的一项重要

内容^[2],根据地下水的主要物质成分和给定的水质标准,分析地下水水质的时空分布状况,为地下水资源的管理和开发利用规划提供科学依据^[3]。但由于地下水水质评价指标与水质等级间非常复杂的关系,以及水体污染的随机性和模糊性,至今仍没有一个被广泛接受的评价模型^[1,4]。

1 地下水水质评价结果的可靠性

水质评价过程存在模糊不确定性^[5]。根据地下水资源评价中不确定性因素产生的原因,束龙仓等^[6-8]将其分为客观随机性因素和主观不确定性因素两大类,并对其进行了较为全面的分析。其中,客观随机性是由地下水资源系统内在的随机特性引起的,主要由水文地质、水文变量的空间和时间变化的不均一性决定;主观不确定性是由研究者对系统认识的不全面造成的,主要与数学模型的建立、求解及模型中参数的不确定性有关。在地下水水质评价过程中,数学方法的使用可以排除人为评价的主观性,但也难以避免所采用数学方法的假设和概化对评价结果的影响^[4]。目前地下水水质评价方法较多,主要有单项组分评价法、综合指数法、模糊数学评价法及灰色理论评价法等^[4]。然而,由于不同评价模型采用的原理以及考虑问题角度不同,其评价结果也不尽相同。如单项组分评价法对单个水质指标独立进行评价,评价结果难以全面反映地下水质量的整体状况;综合指数法忽略了水质分级分界线的模糊性,评价结果难以满足水质功能评价的要求和水质污染的真实状况;模糊数学评价法在评价因子确定方面具有一定的主观性等。文献[9]指出依靠单一模型的评价结果,会导致“弃真”和“取伪”的错误。Hoeting 等^[10]认为传统理论没有正确认识模型的不确定性,过分信赖单个模型做出的决策,这是极具风险的。同时,学者们也逐渐认识到,由于问题的复杂性,可以采用多种数学表达和解释来研究,因此越来越倾向于使用多模型分析方法,而非像以往一样仅依靠单个模型。由此可见,使用单一传统模型对地下水水质进行评价,其评价结果的可靠性是值得探讨的。

2 研究实例

2.1 研究区概况

镇江市地处江苏省西南部,长江下游南岸,位于长江与大运河十字交汇处,镇江东南接常州市,西邻南京市,北与扬州市、泰州市隔江相望。辖句容、扬中、丹阳3市和京口、润州、丹徒、新区4区。全市总面积3847 km²,属北亚热带南部气候区,具有以下气候特征:季风性较明显,过渡突出,变异性显著,温暖湿润,四季分明,热量充裕,雨水丰沛,光照充足,无霜期长等。全市多年(1950—2012年)平均降水量为1064.2 mm,降水量年内分配不均,年际变化较大。全市划分为3大水系:秦淮河、太湖湖西和沿江水系,共有流域面积在50 km²及以上的河流32条

(跨省2条),其中流域面积在100 km²及以上的河流20条,流域面积在1000 km²及以上河流2条,流域面积在50 km²以下至乡镇级主要河流328条。根据地下水在介质中的赋存条件,可以将区内的地下水分为孔隙水、岩溶水与裂隙水3大类。总体来看,镇江市浅层地下水分布广泛、总量丰富,但水质状况较为复杂,不同区域富水性相差较大。

2.2 资料来源及评价方法

此次评价共收集了51眼浅层地下水监测井水质监测资料(其中43眼井为2012年实测资料,8眼井为2014年9月补测资料)。镇江市浅层地下水水质监测井分布见图1。51眼井中句容市4眼,丹阳市3眼,扬中市4眼,市区(包括京口、润州、新区)及丹徒区40眼。监测因子主要包括I⁻、pH、Cl⁻、NH₄⁺、Fe、NO₂⁻、SO₄²⁻、F⁻、NO₃⁻、总硬度等。

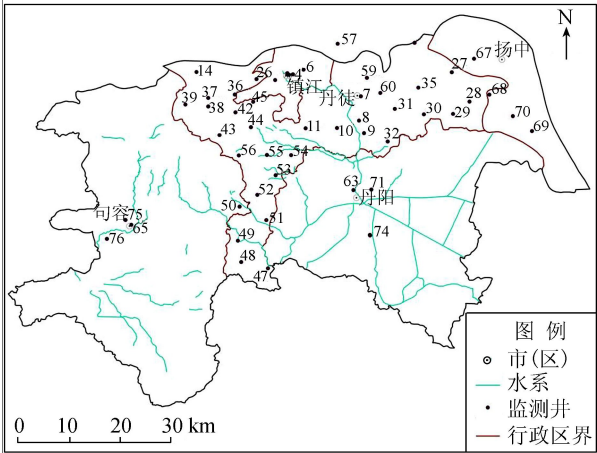


图1 镇江市浅层地下水水质监测井分布

依据GB/T14848—1993《地下水质量标准》^[11],选取其中较为常用的单项组分评价法、综合指数法和模糊综合评判法分别进行评价,分析采用单一模型进行地下水水质评价结果的可靠性。

2.2.1 单项组分评价法

单项组分评价采用标准指数法进行评价。标准指数大于1,表明该水质因子已超过了规定的水质标准,指数值越大,超标越严重。标准指数计算公式分为以下两种情况:

对于评价标准为定值的水质因子,其标准指数计算公式为

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^s} \tag{1}$$

式中: P_i 为第*i*个水质因子的标准指数; ρ_i 为第*i*个水质因子的检测质量浓度,mg/L; ρ_i^s 为第*i*个水质因子的标准质量浓度,mg/L。

对于评价标准为区间值的水质因子(如pH值),其标准指数计算公式为

$$P = \begin{cases} \frac{7.0 - Z}{7.0 - Z_{sd}} & \text{pH} \leq 7 \text{ 时} \\ \frac{Z - 7.0}{Z_{su} - 7.0} & \text{pH} > 7 \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为 pH 的标准指数; Z 为 pH 检测值; Z_{su} 为标准中 pH 的上限值; Z_{sd} 为标准中 pH 的下限值。

2.2.2 综合指数法

首先进行各单项组分评价, 划分所属质量类别。

I ~ V 水质类别对应的单项组评分值 F_i 分别为 0、1、3、6、10。

按式(3)确定综合评判分值 F 。

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (4)$$

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

根据 F 值划分地下水水质质量级别: $F < 0.80$, 为优良; $0.80 \leq F < 2.50$, 为良好; $2.50 \leq F < 4.25$, 为较好; $4.25 \leq F < 7.20$, 为较差; $F \geq 7.20$, 为极差。再将细菌学指标评价类别注在级别定名之后, 如“优良(Ⅱ类)”、“较好(Ⅲ类)”, 以此类推。

2.2.3 模糊综合评判法

模糊综合评判问题, 实质是模糊变换问题, 其原理可用下述模式表示:

$$\tilde{A} \cdot \tilde{R} = \tilde{B} \quad (5)$$

式中: $\tilde{A}$ 为因子模糊向量; $\tilde{R}$ 为模糊关系矩阵; $\tilde{B}$ 为等级模糊向量, 即评价结果。它是评价集上的一个模糊子集, 其各个元素是各因子对于评价等级的隶属度, 综合评判是在单因子评判基础上进行的。

其中, $\tilde{A}$ 的确定方法为

$$a_i = \frac{d_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n c_{i,j}} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: a_i 为矩阵 $\tilde{A}$ 的第 i 个元素; d_i 为第 i 个水样的实测值; $c_{i,j}$ 为第 i 个因子、第 j 级水质标准值。

式(6)实际是计算污染物的分指数, 具有“权重”的含义。因 $0 \leq a_i \leq 1$, 故采用式(7)更为合适:

$$a_i = \frac{d_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n c_{i,j}} / \sum \left(\frac{d_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n c_{i,j}} \right) \quad (7)$$

对水质评价问题, 当选定评价集 $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 后, 用梯形法求 $\tilde{R}$ 较为切合实际:

$$r_{i,j} = \mu_R(d_i, c_{i,j}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq d_i \leq c_{i,j} \\ \frac{c_{i,j+1} - d_i}{c_{i,j+1} - c_{i,j}} & c_{i,j} < d_i \leq c_{i,j+1} \\ 0 & d_i > c_{i,j+1} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

2.3 评价结果

本次水质评价以 51 眼监测井的水质监测资料为基础, 选取监测资料中的 I^- 、pH、 Cl^- 、 NH_4^+ 、Fe、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 NO_3^- 、总硬度等 10 个监测因子作为评价因子。实际评价过程中, 由于监测资料所限, 野外编号为 61、63 和 65 的 3 眼监测井, 选取 pH、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 F^- 、 NO_2^- 、总硬度 6 个监测因子作为其评价因子; 野外编号为 67 ~ 71、74 ~ 76 的 8 眼监测井选取 pH、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、Fe、 NO_2^- 、 NO_3^- 、总硬度等 8 个评价因子, 运用单项组分评价法、综合指数法和模糊综合评判法分别进行评价, 并设想悲观状况、乐观状况两种特殊情景, 以期给出更具说服力的评价结果(表 1)。

3 结论与分析

a. 悲观状况下, 51 眼水质监测井中, V 类水 23 眼, 占总数的 45.10%, IV 类水 5 眼, 占总数的 9.80%, III 类水 20 眼, 占总数的 39.22%, II 类水 3 眼, 占总数的 5.88%, 由此可见, 所取监测井浅层地下水 IV 类及 V 类水共占 54.90%, 超过 50% (图 2), 即水质适用于各种用途的 I 类、II 类监测井占评价监测井总数的 5.88%, 适合集中式生活饮用水水源及工农业用水的 III 类监测井占 39.22%, 适合除饮用外其他用途的 IV ~ V 类监测井占 54.9%; 乐观状况下, 51 眼水质监测井中, V 类水 8 眼, 占总数的 15.69%, IV 类水 12 眼, 占总数的 23.53%, III 类水 3 眼, 占总数的 5.88%, II 类水 6 眼, 占总数的 11.76%, I 类水 22 眼, 占总数的 43.14%。由此可见, 所取监测井浅层地下水 IV 类及 V 类水共占 39.22% (图 3), 即水质适用于各种用途的 I 类、II 类监测井占评价监测井总数的 54.9%, 适合集中式生活饮用水水源及工农业用水的 III 类监测井占 5.88%, 适合除饮用外其他用途的 IV ~ V 类监测井占 39.22%。两种情境下各水质监测点评价结果分布分别见图 4、图 5。

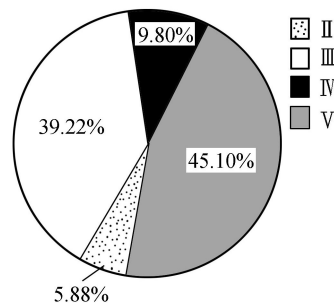


图2 悲观状况下浅层地下水水质类别比例

表 1 镇江市浅层地下水水质评价结果

野外编号	单因子评价法	综合指数法	模糊评级	悲观状况	乐观状况	野外编号	单因子评价法	综合指数法	模糊评级	悲观状况	乐观状况
01	V	V	V	V	V	47	IV	IV	I	IV	I
04	V	IV	V	V	IV	48	III	II	I	III	I
06	V	V	V	V	V	49	V	IV	V	V	IV
07	V	V	V	V	V	50	III	II	I	III	I
08	III	II	III	III	II	51	III	II	I	III	I
09	III	II	III	III	II	52	IV	IV	I	IV	I
10	III	II	I	III	I	53	III	II	I	III	I
11	IV	IV	I	IV	I	54	III	II	II	III	II
14	V	IV	IV	V	IV	55	III	II	II	III	II
16	IV	V	III	V	III	56	V	V	IV	V	IV
26	III	II	I	III	I	57	V	V	IV	V	IV
27	V	V	V	V	V	58	III	IV	I	IV	I
28	II	I	I	II	I	59	V	V	V	V	V
29	V	V	IV	V	IV	60	III	II	II	III	II
30	II	I	I	II	I	61	V	V	V	V	V
31	II	I	I	II	I	63	V	V	V	V	V
32	III	II	I	III	I	65	IV	IV	V	V	IV
35	III	V	III	V	III	67	V	IV	V	V	IV
36	III	V	I	V	I	68	V	IV	V	V	IV
37	III	II	I	III	I	69	V	IV	V	V	IV
38	III	II	II	III	II	70	V	IV	V	V	IV
39	III	II	I	III	I	71	III	II	I	III	I
42	III	II	I	III	I	74	III	II	I	III	I
43	III	II	I	III	I	75	V	IV	IV	V	IV
44	III	II	I	III	I	76	V	V	V	V	V
45	IV	IV	III	IV	III						

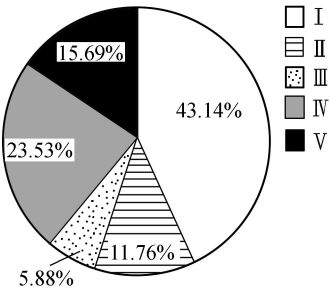


图 3 乐观状况下浅层地下水水质类别比例

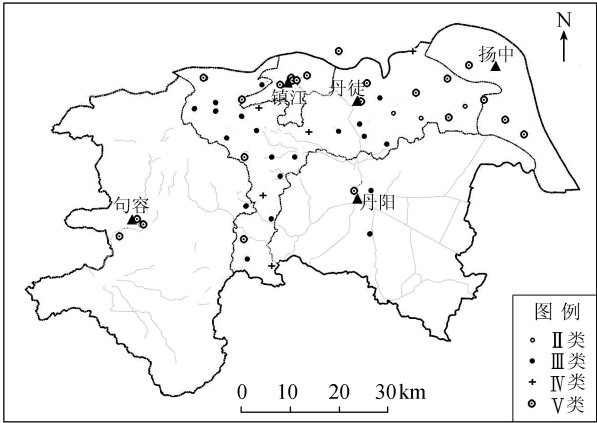


图 4 悲观状况下水质评价结果

b. 不同评价方法的评价结果相差较大,由表 1 可知,3 种评价方法评价结果完全一致的水样仅有 7 份,占总数的 13.7%;而评价结果完全不同的水样有 17 份,占总数的 33.3%。由此可知,依赖单一评

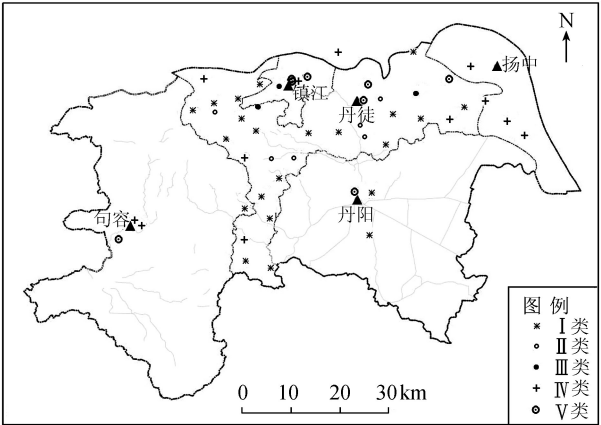


图 5 乐观状况下水质评价结果

价模型的评价结果进行决策是具有风险的。

c. 由评价过程可知,镇江市浅层地下水 IV、V 类水产生原因主要是 NH_3 、 NO_2^- 、总硬度和 NO_3^- 质量浓度较高,此外铁质量浓度偏高也是其浅层地下水水质为 IV 类的原因之一。同时,采样点分布对水质评价结果有一定影响,比如:扬中、句容均为 NH_3 超标导致水质超标,其中 67、68 号井水分别取自扬中乳胶制品厂和扬中化工厂, NH_3 超标严重。

d. 本研究选择不同评价方法对研究区进行评价,并考虑悲观状况和乐观状况两种情景,结果更具说服力。

(下转第 49 页)

feedstock for high quality biodiesel production [J]. Bioresource Technology,2014,156:42-47.

[9] HO S H,CHEN C Y,YEH K L,et al. Characterization of photosynthetic carbon dioxide fixation ability of indigenous *Scenedesmus obliquus* isolates [J]. Biochemical Engineering,2010,53(1):57-62.

[10] BLIGH G,DYER W J. A rapid method lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology,1959,37(8):911-923.

[11] 倪海尔. 生物试验设计与分析 [M]. 北京:科学出版社,2013:156-160.

[12] HANSSON L,DOSTALEK M. Influence of cultivation conditions on lipid production by *Cryptococcus albidus* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1986, 24 (1):12-18.

[13] ABDELAZIZ A E M,LEITE G B,BELHAJ M A,et al. Screening microalgae native to Quebec for wastewater treatment and biodiesel production [J]. Bioresource Technology,2014,157:140-148.

[14] LIN Q,LIN J D. Effects of nitrogen source and

(上接第 13 页)

参考文献:

[1] 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. (SU Yaoming, SU Xiaosi. Present situation and prospecting of groundwater quality evaluation [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (2):4-9. (in Chinese))

[2] 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 [J]. Groundwater,2007,29(5):19-24. (in Chinese))

[3] 倪深海,白玉慧. BP 神经网络模型在地下水水质评价中的应用 [J]. 系统工程理论与实践,2000(8):124-127. (NI Shenhai, BAI Yuhui. Application of BP neural network model in groundwater quality evaluation [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000 (8):124-127. (in Chinese))

[4] 白玉娟,殷国栋. 地下水水质评价方法与地下水研究进展 [J]. 水资源与水工程学报,2010,21(3):115-123. (BAI Yujuan, YIN Guodong. Evaluation method and research progress for groundwater quality [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2010,21(3):115-123. (in Chinese))

[5] 陈宇,束龙仓. 基于五元联系数的济宁市漏斗区承压水水质现状评价 [J]. 水电能源科学,2010,28(8):27-29. (CHEN Yu, SHU Longcang. Confined water quality evaluation for cone of depression in Jining City based on

concentration on biomass and oil production of a *Scenedesmus rubescens* like microalga [J]. Bioresource Technology,2011,102(2):1615-1621.

[15] 鲍亦璐. 微藻培养过程的营养优化与控制研究 [D]. 广州:华南理工大学,2012:4-9.

[16] HUBER S C,MAURY W. Effects of magnesium on intact chloroplasts [J]. Plant Physiology,1980,65(2):350-354.

[17] LIN Q, GU N, LIN J D. Effect of ferric ion on nitrogen consumption, biomass and oil accumulation of a *Scenedesmus rubescens*-like microalga [J]. Bioresource Technology,2012,112:242-247.

[18] LIU Z Y,WANG G C,ZHOU B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* [J]. Bioresource Technology,2008,99(11):4717-4722.

[19] CHEN F,JOHNS M R. Effect of C/N ratio and aeration on the fatty acid composition of heterotrophic *Chlorella sorokiniana* [J]. Journal of Applied Phycology, 1991, 3 (3):203-209.

(收稿日期:2015 -05 -26 编辑:王 芳)

five-element connection number [J]. Water Resources and Power,2010,28(8):27-29. (in Chinese))

[6] 束龙仓,朱元牲. 地下水资源评价中的不确定性因素分析 [J]. 水文地质工程地质,2000(6):6-8. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng. Analysis of the uncertainties in the groundwater resources evaluation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2000(6):6-8. (in Chinese))

[7] 束龙仓,朱元牲,孙庆义,等. 地下水资源评价结果的可靠性探讨 [J]. 水科学进展,2000,11(1):21-24. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng, SUN Qingyi, et al. Reliability analysis of groundwater resources evaluation results [J]. Advances in Water Science, 2000, 11 (1): 21-24. (in Chinese))

[8] 束龙仓,朱元牲,孙庆义,等. 地下水允许开采量确定的风险分析 [J]. 水利学报,2000(3):77-81. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng, SUN Qingyi, et al. Risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000(3):77-81. (in Chinese))

[9] POETER E P, ANDERSON D. Multi-model ranking and inference in ground water modeling [J]. Ground Water, 2005,43(3):597-605.

[10] JENNIFER A H, JOSEPH G I. Bayesian predictive simultaneous variable and transformation selection in the linear model [J]. Computational Statistics & Data Analysis,1998,28:87-103.

[11] GB/T14848 地下水质量标准 [S].

(收稿日期:2015 -05 -20 编辑:徐 娟)