

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.03.011

引用格式:李亮,龚建师,周锴锬,等.基于物元可拓的河南省柘城县浅层地下水质量综合评价[J].华东地质,2022,43(3):355-363.(LI L,GONG J S,ZHOU K E, et al. Application of Matter-Element and extension method in the comprehensive evaluation of groundwater environment quality of Zhecheng County, Henan Province[J].East China Geology, 2022, 43(3):355-363.)

基于物元可拓的河南省柘城县浅层地下水 质量综合评价

李 亮^{1,2},龚建师^{1,2},周锴锬^{1,2},王赫生^{1,2},许乃政^{1,2},陶小虎^{1,2},叶永红^{1,2}

(1.中国地质调查南京地质调查中心,江苏 南京 210016;

2.自然资源部流域生态地质过程重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:该文采用物元可拓法对 2008 年和 2019 年河南柘城县浅层地下水质量进行综合评价,并与综合评分法、单指标评价法的评价结果进行对比,分析物元可拓法的可靠性及水质变化趋势。研究表明:柘城县浅层地下水综合质量等级总体好于综合评分法和单指标评价法评价结果,绝大多数样品点综合质量等级优于Ⅲ类,Ⅳ类、Ⅴ类地下水质量影响因素主要为 F^- 和总硬度;对比 2008 年与 2019 年水质变化,柘城县浅层地下水具有Ⅰ类水向Ⅱ类水、Ⅳ—Ⅴ类水向Ⅲ—Ⅳ类水变化的趋势,与 2008 年样品的物元可拓指数预测结果一致。物元可拓法将综合关联度与可拓指数相结合,既客观地反映地下水水质总体状况,又定性地分析样本水质的变化趋势,使评价结果更接近于实际情况,评价方法在水质评价领域具有应用价值和研究意义。

关键词:浅层地下水;物元可拓;可拓指数;质量评价;河南省柘城县

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2022)03-355-09

地下水是水资源重要的组成部分,是保障生态环境良性发展的重要一环。地下水水质综合评价中,由于评价指标与水质等级间非常复杂的非线性关系,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]。目前,用于水质综合评价的方法主要有综合评分法^[2]、神经网络模型^[3]、单指标法、层次分析法^[4-5]、灰色聚类法^[6]等。其中模糊评判法应用最为广泛,但其不足是隶属度的人为性容易引起较大的误差^[7-9]。物元可拓法通过建立多指标性能参数的评判模型,利用物元分析中的关联函数进行评判,以定量的数值精确表示评判结果,在一定程度上解决了模糊评判法中人为影响因素过多、权值不确定性问题。物元可拓法是由蔡文教授于 20 世纪 80 年代创立,主要研究和处理不相容问题的理论和方法,目前

已广泛应用于新产品构思与设计、优惠决策、控制、识别与评价等各个领域^[10-12]。21 世纪初,部分学者开始尝试将物元可拓法应用于生态环境质量、空气质量、水环境质量综合评价^[13-15];近年来物元可拓模型被越来越多的学者应用于实际工作中^[16-17],并不断尝试对模型进行改进^[17]。

相对东部长三角地区而言,河南省柘城县浅层地下水研究程度较弱。20 世纪 80 年代全国水文地质普查时,柘城县开展了 20 万水文地质调查工作;2002—2005 年、2006—2010 年,中国地质调查局南京地质调查中心先后开展了淮河流域环境地质调查和淮河流域平原区地下水污染调查,系统评价了淮河流域平原区(含柘城县)地下水质量、污染等级;2019 年,南京地质调查中心开展涡河流域水文

* 收稿日期:2021-11-26 修订日期:2022-01-12 责任编辑:叶海敏

基金项目:中国地质调查局“沙颍河—涡河流域水文地质调查(编号:DD20190354)”、“长江下游及淮河流域水文地质与水资源调查监测(编号:20221756)”项目联合资助。

第一作者简介:李亮,1985 年生,男,高级工程师,硕士,主要从事水资源水环境调查研究。Email:280283941@qq.com。

地质调查,系统采集了柘城县浅层地下水样品。以往柘城县浅层地下水的研究集中在质量等级评价和污染等级评价,采用方法均为综合指标评价法,缺少对其他地下水质量评价方法适用性的研究和地下水质量变化的预测。利用物源可拓法开展柘城县浅层地下水质量评价,既为当地地下水评价提供一种准确适用的地下水质量评价方法,又可对地下水质量变化进行预测。

1 研究区概况

柘城县隶属于河南省商丘市,位于淮河一级流域区、涡河二级流域区,是全国重要的粮食、西瓜产区。柘城县具黄泛区平原地貌,松散岩类孔隙水在区内广泛分布,地表以下 30~55 m 分布有一层 14~20 m 厚的黏性土层,传统上以地表以下 50 m 为界线,将埋深小于和大于 50 m 的松散岩类孔隙水含水岩组分别划分为浅层含水系统和深层含水系统^[18]。浅层孔隙含水岩组主要岩性为第四系全新统、上更新统及部分中更新统上部的亚黏土、亚砂土、粉砂和细砂组成,地表多为亚砂土,结构松散;包气带岩性为亚黏土、亚砂土、粉砂。浅层含水层具有黏性土和砂性土互层特征,其分布与富水性变化受古河道带的控制,呈条带状展布。

研究区地表高程 43~48 m,呈西北向东南稍倾斜,地下水位埋深 4~7 m,浅层含水层主要受大气降水、地表水、蒸发、灌溉水、生活废水排放和人工开采等影响,水位变幅一般为 2~5 m。

2 技术方法

2.1 物元可拓法定义

物元可拓法是指运用可拓集合的关联度解决物元特征评价等级问题的方法。物元是描述事物的名称、特征及量值 3 个基本元素的简称^[19]。可拓集合是用关联度将模糊集合的 $[0,1]$ 闭合区间连续取值拓展到 $(-\infty, +\infty)$ 实数轴,将物元量值可拓集的关联度用代数式表达出来,使要解决的矛盾问题定量化,因此能更加客观的反映真实的情况^[20]。

2.2 物元矩阵

将研究的事物记作 M , M 的特征记作 c , M 关于 c 的量值记作 v , $R=(M, c, v)$ 称作物元。若事物 M 有

多个特征,并以 n 个特征 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 和相应的值 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ 来表示,则 n 维物元组建可表示为:

$$R(x) = \begin{bmatrix} c_1 v_1 \\ c_2 v_2 \\ \dots \\ c_n v_n \end{bmatrix} M.$$

2.3 经典域与节域

由事物的特征及其标准值范围组成的物元矩阵成为经典域,以 $R(0)$ 表示。

$$R(0) = \begin{bmatrix} c_1 [a_{01} & b_{01}] \\ c_2 [a_{02} & b_{02}] \\ \dots & \dots \\ c_n [a_{0n} & b_{0n}] \end{bmatrix} M,$$

式中: a_{0i} 为经典物元特征值 X_{0i} 的下限值; b_{0i} 为经典物元特征值 X_{0i} 的上限值; 其中, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

由经典物元、可转化为经典物元的事物及其特征、特征相应拓广了的量值范围组成的物元矩阵成为节域,以 R_c 表示。

$$R_c = \begin{bmatrix} c_1 [a_{01} & b_{01}] \\ c_2 [a_{02} & b_{02}] \\ \dots & \dots \\ c_n [a_{0n} & b_{0n}] \end{bmatrix} Mc,$$

式中: a_{ci} 为节域物元特征 X_{ci} 的下限值; b_{ci} 为节域物元特征 X_{ci} 的上限值; $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

2.4 矩

矩是指实数轴上点 x_j 与区间 X_{ij} 直接的距离。其中, $X_{ij}=(a_{ij}, b_{ij})$ 。计算公式为

$$\rho(x_j, X_{ij}) = \left| x_j - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}), \quad (1)$$

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

同理, x_j 与节域区间 $X=(a_{pj}, b_{pj})$ 之间的矩为节域物元的矩, 计算公式为

$$\rho(x_j, X_{pj}) = \left| x_j - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj}), \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ 。

2.5 关联函数

关联函数 $k(x)$ 指被评价单元与某标准的隶属程度, 以数值表示关联度。关联函数的选取采用

被评价事物的特征与开拓结合理论相结合的方法。

关联函数的计算公式为

$$k_i(x_j) = \begin{cases} \frac{\rho(x_j, X_{ij})}{|X_{ij}|} & x_j \in X_{ij} \\ \frac{\rho(x_j, X_{ij})}{\rho(x_j, X_{ij}) - \rho(x_j, X_{ij})} & x_j \notin X_{ij} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m; X_{ij}=a_{ij}-b_{ij}$ 。

2.6 权重系数

权重系数是指各因素对水质影响的程度。常用权重系数的计算方法有层次分析法^[21]、专家打分法、关联函数法和因子污染贡献率法等。本文采用因子污染贡献率法^[20],其计算公式为

$$a_j = \frac{\frac{x_j}{s_j}}{\sum_{j=1}^n \frac{x_j}{s_j}}, \quad (4)$$

式中: x_j 是指第 j 种评价因子的实测值; s_j 是指第 j 种评价因子各级标准的平均值; a_j 是指第 j 种评价因子的权重。

2.7 综合关联度

综合关联度是指充分考虑隶属关系和某因子对整个水体评价影响程度两方面,综合反映水体等级。通常,综合关联度以关联度与权重系数的乘积表示,即

$$k_j(p) = \sum_{j=1}^n a_j \times k_j(x_j), \quad (5)$$

式中: $k_j(p)$ 是指评价单元 p 关于 j 等级的综合关联度。综合关联度值越大,表明事物与此等级关系密切。

2.8 可拓指数

可拓指数是指事物向相邻等级偏向的程度,通常用 J 数值表示。可拓指数的数值越大表示待评价物元越偏向相邻等级,越具有向相邻等级发展趋势,因此可用以判断事物发展趋势。可拓指数计算公式为

$$\overline{k_j(p)} = \frac{k_j(p) - \min k_j(p)}{\max k_j(p) - \min k_j(p)}, \quad (6)$$

$$J = \sum_{j=1}^n j \overline{k_j(p)} / \sum_{j=1}^m \overline{k_j(p)}, \quad (7)$$

式中: $k_j(p)$ 为关联度指数; j 为评价等级。

3 评价因子的选取

本次研究选取 2008 年和 2019 年中国地质调查局南京地质调查中心在淮河流域开展环境地质调查^[22]工作时采集的地下水样品为测试对象,其中 2008 年 18 组样品,2019 年 8 组样品,两次样品采集时间均为 8—10 月,采样层位为浅层含水层,采样井为农田灌溉取水井。样品分布如图 1 所示,2008 年 18 组样品均匀分布在柘城县区域,其中在县城周边、县域西部等进行了局部样品加密,2019 年 8 组样品均匀分布在柘城县区域且与 2008 年样品采样位置接近。选择 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- 、总硬度和 TDS 7 项指标评价元素对地下水水质的影响^[23-24],样品测试由中国地质调查南京地质调查中心实验室完成。

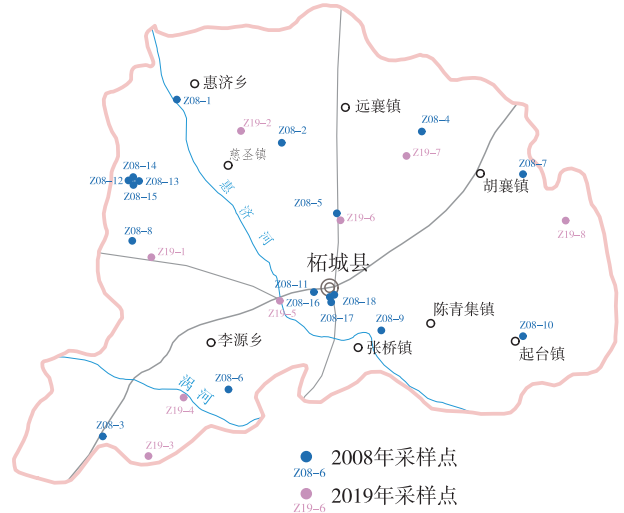


图 1 研究区采样位置示意图

Fig. 1 Sample locations of the study area

4 评价准则

评价准则依据国家《GBT14848—2017 地下水质量标准》^[25]制定,评价标准包括 5 级。由于地下水质量标准一般是指一个浓度区间,而国家标准以限制某评价因子浓度的上限的方式来划分等级,对第 V 级标准只有下限要求而没有上限要求。考虑到水样中存在超标因子,即存在 V 级水,因此以最高值作为 V 级标准的上限;对于柘城县内样品无 V 级水的指标,选取同期周边地区地下水相应指标的最高值作为 V 级标准的上限。综上所述,本文评价因子为细化的地下水质量分类标准(表 1)。

5 水质评价

根据物元与节域的定义,由表 1 可得出水质分

级标准物元矩阵 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 、 R_{05} 和节域矩阵 R_c ,如下所示:

表 1 地下水评价等级划分表

Table 1 The classification of groundwater evaluation

等级	$\text{Na}^+ /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Cl}^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{SO}_4^{2-} /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{F}^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
等级 I	100	50	50	2	1	150	300
等级 II	150	150	150	5	1	300	500
等级 III	200	250	250	20	1	450	1 000
等级 IV	400	350	350	30	2	650	2 000
等级 V	500	461	382	118	5.46	1 370	2 967

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{I} & \begin{matrix} \text{钠} & [0,100] \\ \text{氯化物} & [0,50] \\ \text{硫酸盐} & [0,50] \\ \text{硝酸盐} & [0,2] \\ \text{氟化物} & [0,1] \\ \text{总硬度} & [0,150] \\ \text{溶解性总固体} & [0,300] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$R_{02} = \begin{bmatrix} \text{II} & \begin{matrix} \text{钠} & [100,150] \\ \text{氯化物} & [50,150] \\ \text{硫酸盐} & [50,150] \\ \text{硝酸盐} & [2,5] \\ \text{氟化物} & [0,1] \\ \text{总硬度} & [150,300] \\ \text{溶解性总固体} & [300,500] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{III} & \begin{matrix} \text{钠} & [150,200] \\ \text{氯化物} & [150,250] \\ \text{硫酸盐} & [150,250] \\ \text{硝酸盐} & [5,20] \\ \text{氟化物} & [0,1] \\ \text{总硬度} & [300,450] \\ \text{溶解性总固体} & [500,1000] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$R_{04} = \begin{bmatrix} \text{IV} & \begin{matrix} \text{钠} & [200,400] \\ \text{氯化物} & [250,350] \\ \text{硫酸盐} & [250,350] \\ \text{硝酸盐} & [20,30] \\ \text{氟化物} & [1,2] \\ \text{总硬度} & [450,650] \\ \text{溶解性总固体} & [1\ 000,2\ 000] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$R_{05} = \begin{bmatrix} \text{V} & \begin{matrix} \text{钠} & [400,500] \\ \text{氯化物} & [350,461] \\ \text{硫酸盐} & [350,382] \\ \text{硝酸盐} & [30,118] \\ \text{氟化物} & [2,5.46] \\ \text{总硬度} & [650,1\ 370] \\ \text{溶解性总固体} & [2\ 000,2\ 967] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$R_c = \begin{bmatrix} \text{I-V} & \begin{matrix} \text{钠} & [0,500] \\ \text{氯化物} & [0,461] \\ \text{硫酸盐} & [0,382] \\ \text{硝酸盐} & [0,118] \\ \text{氟化物} & [0,5.46] \\ \text{总硬度} & [0,1\ 370] \\ \text{溶解性总固体} & [0,2\ 967] \end{matrix} \end{bmatrix}$$

由于样品数量较多,本文仅列出井 Z19-1 样品的物元矩阵 R_{Z19-1} ,如下所示:

$$R_{Z19-1} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{钠} & 101 \\ \text{氯化物} & 50.13 \\ \text{硫酸盐} & 33.15 \\ \text{硝酸盐} & 0.036 \\ \text{氟化物} & 2.23 \\ \text{总硬度} & 539.1 \\ \text{溶解性总固体} & 513.6 \end{matrix} \end{bmatrix}$$

将样品物元矩阵、标准物元矩阵以及节域矩阵,分别代入公式 3 计算出样本中各个评价因子与水质分级标准的关联度,计算结果见表 2。

将井 Z19-1 点各评价元素的实测值和各级平均值代入公式 4,计算可得权重系数,并进行归一化处理(表 3)。根据综合关联度与权重系数的关系,计算各等级的综合关联度(表 4)。

表 2 Z19-1 井关联度计算结果

Table 2 The correlation calculation results of well Z19-1

分类等级	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	总硬度(CaCO ₃)	TDS
I	-0.015 63	0.006 58	0.019 25	0.003 36	-0.074 79	-0.098 291 572	-0.060 52
II	0.038 14	-0.016 91	-0.019 25	-0.003 36	-0.074 79	-0.046 898 740	-0.027 00
III	-0.045 08	-0.021 30	-0.049 77	-0.010 60	-0.074 79	0.112 373 059	0.038 56
IV	-0.077 15	-0.022 18	-0.055 88	-0.014 23	0.124 59	-0.037 457 686	-0.070 82
V	-0.125 26	-0.022 55	-0.058 49	-0.014 63	-0.062 29	-0.105 723 766	-0.125 50

表 3 Z19-1 权重系数表

Table 3 The weight coefficients of well Z19-1

编号	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	总硬度(CaCO ₃)	TDS
Z19-1	0.173	0.024	0.065	0.015	0.284	0.259	0.180

表 4 Z19-1 综合关联度评价等级

Table 4 The evaluation rank of integrated relating rate of well Z19-1

编号	I	II	III	IV	V
Z19-1	-0.220	-0.150	-0.051	-0.153	-0.514

级即为样品最终评定等级。Z19-1 最大综合关联度为-0.051,所在等级为Ⅲ级,因此 Z19-1 样品综合质量等级评定为Ⅲ级。

同理,分别计算各井点样品的综合关联度,评定综合质量等级,如表 5 所示。

根据等级评定方法,综合关联度最大值所在等

表 5 综合关联度评定等级

Table 5 The evaluation grade of comprehensive correlation degree

取样时间	编号	水质级别					物元可拓法 评定结果
		I	II	III	IV	V	
2019 年	Z19-1	-0.220	-0.150	-0.051	-0.153	-0.514	III
	Z19-2	-0.703	-0.695	-0.659	-0.524	-0.644	IV
	Z19-3	-0.314	-0.156	-0.112	-0.233	-0.452	III
	Z19-4	-0.370	-0.302	-0.282	-0.326	-0.191	V
	Z19-5	-0.295	-0.063	-0.122	-0.095	-0.493	II
	Z19-6	-0.094	-0.188	-0.069	-0.432	-0.657	III
	Z19-7	-0.262	-0.282	-0.234	-0.263	-0.291	III
	Z19-8	-0.225	-0.157	-0.177	-0.162	-0.528	II
2008 年	Z08-1	-0.263	-0.226	-0.283	-0.122	-0.322	IV
	Z08-2	-0.150	-0.167	-0.297	-0.340	-0.595	I
	Z08-3	-0.440	-0.318	0.013	-0.022	-0.451	III
	Z08-4	-0.251	-0.163	-0.230	-0.303	-0.487	II
	Z08-5	-0.276	-0.138	-0.186	-0.047	-0.459	IV
	Z08-6	-0.516	-0.430	-0.285	-0.079	-0.136	IV
	Z0-7	-0.103	-0.176	-0.158	-0.305	-0.583	I
	Z08-8	-0.226	-0.092	-0.162	-0.413	-0.644	II
	Z08-9	-0.243	-0.183	-0.143	-0.272	-0.486	III
	Z08-10	-0.331	-0.139	-0.024	-0.222	-0.452	III
	Z08-11	-0.641	-0.582	-0.614	-0.613	-0.259	V
	Z08-12	-0.429	-0.323	-0.053	-0.076	-0.187	IV
	Z08-13	-0.226	-0.300	-0.224	0.022	-0.399	IV
	Z08-14	-0.240	-0.327	-0.021	-0.210	-0.518	III
	Z08-15	-0.334	-0.080	-0.050	-0.059	-0.467	III
	Z08-16	-0.689	-0.671	-0.570	-0.392	-0.203	V
	Z08-17	-0.688	-0.670	-0.569	-0.293	0.016	V
	Z08-18	-0.319	-0.134	-0.157	-0.120	-0.549	IV

6 结果分析

6.1 主要影响因素

根据物元可拓等级(表 5)可以看出,V 级样品共有 4 个,分别为 Z19-4、Z08-11、Z08-16 和 Z08-17。其中,Z19-4、Z08-11、Z08-16 各评价元素中, F^- 的权重系数最大,关联度为 V 级;Z08-17 各评价元素中,总硬度的权重系数最大,关联度为 V 级。因此,V 级样品主要影响因素是 F^- 和总硬度。

评价样品中,综合评定等级为Ⅳ级样品共 7 个,主要影响因素是总硬度和 TDS,其次是 F^- 、 SO_4^{2-} 。

6.2 水质转化趋势分析

根据公式(7)计算各样品点的物元可拓指数(表 6),等级为 V 级的样品有 Z19-4、Z08-11、Z08-16 和 Z08-17,物元可拓指数分别为:3.881、4.477、4.359 和 4.443。根据物元可拓指数的意义,V 级样品具有向Ⅳ级转化的趋势。等级为Ⅳ级的有 7 个样品 Z19-2、Z08-1、Z08-5、Z08-6、Z08-12、Z08-13、Z08-18,其物元可拓指数分别为 3.994、2.966、2.769、3.982、3.679、2.974、2.696,样品 Z08-1、Z08-5、Z08-18 具有向Ⅲ级转化的趋势。样品 Z08-2、Z08-7 为Ⅰ级,但具有向Ⅱ级转化趋势。综合分析可知,等级为Ⅰ级的样品具有向Ⅱ级转化趋势,评定等级为 V 级、Ⅳ级的样品具有向Ⅳ、Ⅲ转化的趋势。

2008 年样品中:Ⅰ级样品 2 个,占比 11%;Ⅱ级样品 2 个,占比 11%;Ⅲ级样品 5 个,占比 28%;Ⅳ级样品 6 个,占比 33%;V 级样品 3 个,占比 17%。而 2019 年样品中:无Ⅰ级样品;Ⅱ级 2 个,占比 25%;Ⅲ级样品 4 个,占比 50%;Ⅳ级和 V 级样品均为 1 个,占比分别为 12.5%。对比 2008 年与 2019 年各级别样品占比趋势变化可得,浅层地下水向Ⅱ级、Ⅲ级转化,地下水水质总体好转,与可拓指数所得结论相一致。

6.3 不同评价方法对比

为进一步区分各评价方法,本文采用《GB/T 14848—20017 地下水质量标准》^[25] 中推荐的单指标法和综合评分法^[26],对柘城县浅层地下水质量进行评定等级,评价结果对比见表 6。

由表 6 可以看出,2019 年度的样品中,Z19-4 样品在 3 种评价等级中均为 V 级,Z19-6 样品物元可拓评定等级与单指标评定等级同为Ⅲ级,高于综合评分法的Ⅱ级,其余样品的物元可拓评定等级均优

于其余两种方法的评定等级。对于 2008 年度的样品,物元可拓法评定等级均优于综合评分法和单指标法评定等级结果,而综合评分法与单指标法等级评定相同率达到了 89%。

表 6 各评价方法结果对比表

Table 6 Comparison results of each evaluation method

取样时间	编号	物元可拓法	可拓指数	综合评分法	单指标法
2019 年	Z19-1	Ⅲ	2.601	Ⅳ	Ⅳ
	Z19-2	Ⅳ	3.994	V	V
	Z19-3	Ⅲ	2.645	Ⅳ	Ⅳ
	Z19-4	V	3.881	V	V
	Z19-5	Ⅱ	2.694	Ⅳ	Ⅳ
	Z19-6	Ⅲ	2.257	Ⅱ	Ⅲ
	Z19-7	Ⅲ	2.689	V	V
	Z19-8	Ⅱ	2.561	Ⅳ	Ⅳ
2008 年	Z08-1	Ⅳ	2.966	V	V
	Z08-2	Ⅰ	2.254	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-3	Ⅲ	3.263	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-4	Ⅱ	2.387	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-5	Ⅳ	2.769	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-6	Ⅳ	3.982	V	V
	Z08-7	Ⅰ	2.315	Ⅱ	Ⅲ
	Z08-8	Ⅱ	2.313	Ⅱ	Ⅲ
	Z08-9	Ⅲ	2.479	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-10	Ⅲ	2.702	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-11	V	4.477	V	V
	Z08-12	Ⅳ	3.679	V	V
	Z08-13	Ⅳ	2.974	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-14	Ⅲ	2.656	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-15	Ⅲ	2.817	Ⅳ	Ⅳ
	Z08-16	V	4.359	V	V
	Z08-17	V	4.443	V	V
	Z08-18	Ⅳ	2.696	Ⅳ	Ⅳ

在 3 种评定方法中,综合评分法和单指标法均考虑了最大污染因素导致评定等级偏高,而物元可拓法综合考虑了各元素的权重,如 Z19-8 样品物元可拓评定等级为Ⅱ级,综合评分法和单指标法评定等级为Ⅳ级,根据样品测试数据,单指标中 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为Ⅰ级, NO_3^- 为Ⅱ级,TDS 为Ⅲ级, F^- 、总硬度为Ⅳ级且在数值上更接近Ⅳ级下限。因此,

对 Z19-8 进行综合评定时,物元可拓法的Ⅱ级更为合理。

7 结论

(1)物元可拓法评价研究显示,2008 年和 2019 年,柘城县浅层地下水综合质量优于Ⅲ类水的样品数占比分别为 50%和 75%;柘城县浅层Ⅳ级、Ⅴ级地下水质量影响因素主要为 F^- 和总硬度。从 2008 年到 2019 年,柘城县浅层地下水质量等级呈好转趋势。

(2)某种情况下,单指标评价与综合评分法在一定程度上高估了水质污染程度,而物元可拓法以最大关联度定性区分出了同一等级样本水体的水质优劣,并引入权重系数,更加客观、真实地反映出地下水水质情况。

(3)物元可拓法通过区间的延拓实现了评价从阶梯间断到区间连续的转变,以可拓指数的方式量化了等级,即可以定量展示样品的评定等级,又能够定性分析样品水质的变化趋势。

参考文献

- [1] 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): 115-119.
BAI Y J, YIN G D. Evaluation Method and Research Progress for Groundwater Quality [J]. Journal of Water Engineering, 2010, 21(3): 115-119.
- [2] 孙跃,刘中刚,侯香梦,等. 安徽合肥地区浅层地下水质量评价[J]. 华东地质, 2019, 40(1): 74-80.
SUN Y, Liu Z G, Hou X M, et al. Quality assessment for shallow groundwater in the Hefei area, Anhui Province[J]. East China Geology, 2019, 40(1): 74-80.
- [3] 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 (3): 58-61.
SUN T, PAN S B, LI Y J. Application of artificial neural network model to groundwater quality assessment and classification[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (3): 58-61.
- [4] 孙强,张泰丽,伍剑波,等. 基于 GIS 与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 227-233.
SUN Q, ZHANG T L, WU J B, et al. Landslide risk assessment of the Longxi river basin based on GIS and AHP[J]. East China Geology, 2018, 39(3): 227-233.
- [5] 陈哲锋,吴静,郭玉斌,等. 层次分析与模糊数学综合评价法在矿山环境评价中的应用[J]. 华东地质, 2018, 39(4): 305-310.
CHEN Z F, WU J, GUO Y B, et al. Application of AHP and fuzzy mathematics in comprehensive assessment of mine environment[J]. East China Geology, 2018, 39(4): 305-310.
- [6] 邹同庆. 地下水水质的物元评价方法及应用[J]. 常德师范学院学报(自然科学版), 2001(4): 31-34.
ZOU T Q. Matter-Element model of Multi-Factorial evaluation and its application to products desing quality [J]. Journal of Changde Teachers Umiversity (Natural Science Edition), 2001, (4): 31-34.
- [7] 兰双双,姜纪沂,王滨. 基于物元可拓法的地下水水质评价——以梨树县平原区浅层地下水为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 722-727.
LAN S S, JIANG J Y, WANG B. EFvaluation of Groundwater Quality Based on Matter-Element and Extension Means[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 722-727.
- [8] 刘红英,王联社. 关于模糊数学在环境质量综合评判中“最大隶属度”原则不适用性的讨论[J]. 干旱环境监测, 1995(3): 141-142.
LIU H Y, WANG L S. A discussion on the inapplicability of the principle of “maximum membership degree” in the comprehensive evaluation of environmental quality by fuzzy mathematics[J]. Arid Environmental Monitoring, 1995(3): 141-142.
- [9] 俞峰,杨成梧. 物元分析方法在地下水质量综合评判中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2005(2): 35-38.
YU F, YANG C W. Application of material-units analysis method to the comprehensive evaluation of groundwater quality[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005(2): 35-38.
- [10] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
CAI W. Matter-element model and application[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994.
- [11] 罗定贵,徐卫东. 环境质量评价的物元分析模型[J]. 地下水, 1997(2): 49-55.
LUO D G, XU W D. Matter-element analysis model for environmental quality assessment [J]. Groundwater, 1997(2): 49-55.
- [12] 禹华谦,姚令侃,陈春光. 物元分析在大气环境质量评价中的应用[J]. 兰州铁道学院学报, 2001(4): 95-97.

- YU H Q, YAO L K, CHEN C G. The Application of MEA in the Atmospheric Quality Judgement [J]. Journal of Lanzhou Railway University, 2001 (4): 95-97.
- [13] 刘春莉,李祚泳. 生态环境质量物元可拓评价及实例分析[J]. 城市环境与城市生态, 2003(4): 62-64.
LIU C L, LI Z Y. Evaluation of Eco-environment Quality and the Case Verification Based on Matter-Element and Extension [J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2003(4): 62-64.
- [14] 王锦国,张乾飞,袁永生. 城市空气质量综合评价的可拓方法[J]. 中国环境监测, 2001, 17(6): 47-49.
WANG J G, ZHANG Q F, YUAN Y S. Extension method for city air quality assessment [J]. Environmental Monitoring in China, 2001, 17(6): 47-49.
- [15] 叶勇,迟宝明,施枫芝,等. 物元可拓法在地下水环境质量评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 52-54.
YE Y, CHI B M, SHI F Z, et al. Application of Matter-element Extension for Groundwater Environment Quality Evaluation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 52-54.
- [16] 沈菊琴,王楠楠,孙付华,等. 基于 AHP-CRITIC 变权物元可拓模型的南水北调东线一期工程水源地生态补偿绩效评价[J]. 资源与产业, 2021, 24(1): 1-18.
SHEN J Q, WANG N N, SUN F H, et al. Performance evaluation of ecological compensation for water source of the first phase of the eastern route of the south to north water diversion project based on AHP-CRITIC variable weight matter-element extension model [J]. Resources and Industries, 2021, 24(1): 1-18.
- [17] 孟洋,姜先桥,张玉辉,等. 基于改进物元可拓模型的地下水水质评价[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(4): 90-98.
MENG Y, JIANG X Q, ZHANG Y H, et al. Groundwater Quality Evaluation Based on Improved Matter-element Extension Model [J]. Journal of Hebei Geology University, 2021, 44(4): 90-98.
- [18] 葛伟亚,叶念军,龚建师,等. 淮河流域平原区第四系含水层划分及特征分析[J]. 资源调查与环境, 2006(4): 268-276.
GE W Y, YE N J, GONG J S, et al. The Quaternary aquifer division and character analysis of plain in Huaihe River basin [J]. Resources Survey and Environment, 2006(4): 268-276.
- [19] 汤洁,李艳梅,卞建民,等. 物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005(5): 1-5.
TANG J, LI Y M, BIAN J M, et al. Application of Matter-Element and Extension to groundwater quality evaluation [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(5): 1-5.
- [20] 荀继萍,任仲宇,张永祥,等. 物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 87-92.
XUN J P, REN Z Y, ZHANG Y X, et al. Application of matter-element extension method in evaluation of groundwater quality [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(5): 87-92.
- [21] 李亮,王敏,邢怀学,等. 基于 AHP-DRASTIC 评价模型的无锡市潜水污染风险评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 310-314.
LI L, WANG M, XING H X, et al. Risk Assessment of Phreatic Water Pollution in Wuxi City Based on AHP-DRASTIC Evaluation Model [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(3): 310-314.
- [22] 周锴锬,王赫生,龚建师,等. 淮河流域平原区浅层地下水铁锰分布特征及成因浅析[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(2): 147-151.
ZHOU K E, WANG H S, GONG J S, et al. Elementary analysis of distribution features and formation of Fe and Mn in the shallow groundwater of the Huaihe River valley plain [J]. Resources Survey and Environment, 2014, 35(2): 147-151.
- [23] 龚建师,叶念军,葛伟亚,等. 淮河流域地氟病环境水文地质因素及防病方向的研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 633-639.
GONG J S, YE N J, GE W Y, et al. The relationship between fluorine in geological environment and endemic fluorosis in Huaihe River basin [J]. Geology in China, 2010, 37(3): 633-639.
- [24] 吴旭东. 蚌埠市区浅层、中层地下水硬度、氯化物、硫酸盐、溶解性总固体增高机理探讨[J]. 水文地质工程地质, 1998(5): 34-36.
WU X D. Mechanism of increasing hardness, chloride, sulfate and dissolved total solids in shallow and middle groundwater in Bengbu City [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998(5): 34-36.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Standardization Administration of The People's Republic of China. GB/T 14848—2017 Standard for groundwater quality [S]. Beijing: Standards Press of

- China, 2017.
- [26] 张新钰,辛宝东,刘文臣,等. 三种地下水水质评价方法的对比分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 113-118.

ZHANG X Y, XIN B D, LIU W C, et al. Comparative analysis on three evaluation methods for groundwater quality assessment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 113-118.

Application of Matter-Element and extension method in the comprehensive evaluation of groundwater environment quality of Zhecheng County, Henan Province

LI Liang^{1,2}, GONG Jianshi^{1,2}, ZHOU Kaie^{1,2}, WANG Hesheng^{1,2}, XU Naizheng^{1,2},
TAO Xiaohu^{1,2}, YE Yonghong^{1,2}

(1.Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2.Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Considering the diversity of evaluation indexes in the water quality evaluation was incompatible with the results of single index, the authors used the Matter-Element and Extension method to comprehensively evaluate the shallow groundwater quality in Zhecheng County of Henan Province, and then compared its outcome with those of both the comprehensive scoring method and single index, which can analyze further the reliability of Matter-Element and Extension method and the variation trend of water quality. The Matter-element extension evaluations of the samples in 2008 and 2019 show that the comprehensive quality grade of shallow groundwater in Zhecheng County was better than those of comprehensive score method and single index, and that the grade of most samples is better than Class III. The main influencing factors of groundwater quality in Class IV and V are F and total hardness. Compared with the shallow groundwater quality of Zhecheng County in 2008 and 2019, the trend of grade was from Class I to Class II, from Class IV—V to Class III—IV, which was consistent with the prediction results by Matter-Element using samples in 2008. The Matter-Element and Extension method combines the comprehensive correlation degree and extension index, and can not only objectively reflects the overall situation of groundwater quality but also qualitatively analyzes the change trend of sample water quality, so its evaluation results are closer to the actual situation. This evaluation method has applicative value and research significance in the field of water quality evaluation.

Key words: shallow groundwater; Matter-Element and Extension; extension index; quality assessment; Zhecheng County, Henan Province