

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.04.004

绥化市地下水水化学特征及水质现状评价

唐 然,温忠辉,束龙仓,刘 波,李 素

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为了查明绥化市的地下水环境状况,运用描述性统计、地统计学理论、相关分析、Piper 三线图法等对绥化市的地下水水化学特征进行全面分析。在此基础上采用了基于综合赋权的五元联系数法对研究区水质现状进行评价,并且利用秩相关系数法进行水质变化趋势分析。结果表明,研究区地下水略偏酸性,部分水样的水质指标存在超标现象。地下水中 Ca^{2+} 为优势阳离子, HCO_3^- 为优势阴离子。研究区的铁、锰、氟超标是受原生污染影响,地下水中的 Cl^- 与 SO_4^{2-} , Na^+ 与 Mg^{2+} 存在同一来源。将基于综合赋权的五元联系数法的评价结果与模糊综合评判法相比较,结果表明其评价结果是合理可靠的,符合客观实际。通过秩相关系数法表明研究区地下水水质状况在一定程度上有所改善。

关键词:地下水;水化学特征;水质评价;五元联系数;综合赋权;秩相关系数;绥化市

中图分类号:P641.74 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)03-0019-06

Hydro-chemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Suihua City

TANG Ran, WEN Zhonghui, SHU Longcang, LIU Bo, LI Su

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the environmental conditions of groundwater in Suihua City, the hydro-chemical characteristics of groundwater were analyzed using descriptive statistics, the geo-statistical method, the correlation analysis, and the piper diagram. Based on this, the groundwater quality was assessed with the five-element connection number method based on comprehensive weight, and its change trend was analyzed with the rank correlation coefficient method. The results show that the groundwater was slightly acidic and the water quality indices of some samples exceeded standard values. The major cation was Ca^{2+} , and the major anion was HCO_3^- . Due to primary pollution, the contents of Fe, Mn, and F in the study area exceeded standard values. Cl^- and SO_4^{2-} , and Na^+ and Mg^{2+} had the same source, respectively. Compared with the fuzzy comprehensive evaluation method, the five-element connection number method based on comprehensive weight has reliable and objective evaluation results. The results obtained by the rank correlation coefficient method show that the groundwater quality has improved to a certain extent.

Key words: groundwater; hydro-chemical characteristics; water quality assessment; five-element connection number; comprehensive weight; rank correlation coefficient; Suihua City

随着社会经济的快速发展,地下水与人类生活 的关系越来越密切。为了满足日益增长的供水需

作者简介:唐然(1987—),女,博士研究生,主要从事地下水系统理论与调控研究。E-mail: tr312@163.com
通信作者:温忠辉(1964—),副教授,E-mail: wenzh2812@sina.com

求,大规模开采地下水成为了解决水资源短缺的重要手段,但过量开采的同时也引发了一系列的环境、生态问题。地下水是水资源的重要组成部分,地下水的质是居民饮水安全及健康状况的关键因素,它在很大程度上与自然过程及人类活动有关^[1]。地下水中各种化学组分的浓度大小和分布规律影响着地下水水质,通过对地下水水化学资料的分析,可以科学评价区域地下水质量状况^[2]。因此,通过对地下水水化学特征的研究以及水质评价,不仅能反映区域的地下水水体质量状况,可以揭示地下水与环境的相互作用机制,并对区域地下水资源的保护、管理以及合理开发利用具有重要指导意义^[3]。地下水水质评价的方法很多,大致可分为两类,分别为单因子评价法和综合评价法,其中综合评价法包括物元法、灰色聚类法、模糊综合评判法、集对分析法和人工神经网络法等。

绥化市水资源贫乏,人均水资源占有量低于全国平均水平,并且区域内水资源分布不均衡,造成了绥化市的水资源供需矛盾。绥化市境内仅海伦、兰西、肇东建成了地表水水源工程,其余各县市区均依靠当地的地下水源供水。因此,地下水资源是绥化市重要的饮水来源。笔者通过对绥化市地下水水化学特征的研究以及水质现状评价、水质变化趋势分析,以期缓解该地区的水资源供需矛盾以及保护改善地下水水质提供帮助。

1 研究区概况

绥化市位于黑龙江省中南部,松嫩平原的中东部,是黑龙江省中北部地区重要的商品集散地。该区属于中温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年降水量一般在 400~780 mm 之间,年际变化较大,且东部、东北部的降水量高于西部、西南部。绥化市的地势东高西低、北高南低,由低丘陵、高平原过渡为河谷平原。绥化市位于呼兰河流域,赋存有第四系浅层微孔隙裂隙潜水及深层孔隙承压水,其地下水流向为从东部、东北部到西部、西南部。

2 数据来源及评价方法

2.1 数据来源

本次研究选取 2009 年 9 月研究区范围内的 36 个监测点的水样资料作为地下水水化学特征分析及水质现状评价的研究资料,并选取其中代表性监测点的 2004—2009 年的水质资料对主要水质指标进行变化趋势分析。监测点的地下水类型均为潜水,地下水埋深为 1.2~24.9 m,监测点分布见图 1。监测项目主要包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、

HCO_3^- 、pH、总硬度、TDS、总碱度、 COD_{Mn} 、Fe、Mn、 F^- 、 NO_3-N 、 NO_2-N 和 NH_4^+-N 等。

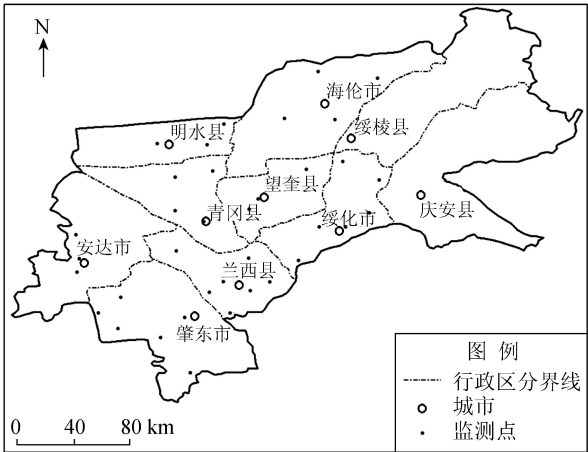


图 1 研究区监测点分布

2.2 基于综合赋权的五元联系数法

2.2.1 五元联系数法基本原理

集对分析是一种处理模糊不确定性问题的系统分析方法,通过引入联系度及其数学表达式,从同异反 3 个角度分析刻画事物之间的变化联系^[4-5]。五元联系数是由集对分析同异反联系度 $\mu=a+bi+cj$ 在 bi 上的拓展,一般表达式为:

$$\mu=a+bi+cj+dk+el \tag{1}$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 e 称为联系分量; i 、 j 、 k 、 l 为联系分量系数。

联系分量 a 、 b 、 c 、 d 、 e 的大小和态势各不相同,这是由于评价指标数值的差异而使得处于同一级别的水质样本也会因此有所不同。所以需要进一步对水质样本各项指标做五元联系数分析。

一般来讲,可以将水质评价指标大致分为 2 类。一类如 DO,随着评价指标值的递增,其水质样本的属性越优,属于越大越优型指标;另一类如硝酸盐,随着评价指标值的递减,其水质样本的属性越优,属于越小越优型指标。对于越大越优型指标,其五元联系数为:

$$\mu_{st}=\begin{cases} 1+0i+0j+0k+0l & x_{st}\in[s_I,+\infty) \\ \frac{x_{st}-s_{II}}{s_I-s_{II}}+\frac{s_I-x_{st}}{s_I-s_{II}}i+0j+0k+0l & x_{st}\in[s_{II},s_I) \\ 0+\frac{x_{st}-s_{III}}{s_{II}-s_{III}}i+\frac{s_{II}-x_{st}}{s_{II}-s_{III}}j+0k+0l & x_{st}\in[s_{III},s_{II}) \\ 0+0i+\frac{x_{st}-s_{IV}}{s_{III}-s_{IV}}j+\frac{s_{III}-x_{st}}{s_{III}-s_{IV}}k+0l & x_{st}\in[s_{IV},s_{III}) \\ 0+0i+0j+\frac{x_{st}-s_V}{s_{IV}-s_V}k+\frac{s_{IV}-x_{st}}{s_{IV}-s_V}l & x_{st}\in[s_V,s_{IV}) \\ 0+0i+0j+0k+1l & x_{st}\in[0,s_V) \end{cases} \tag{2}$$

对于越小越优型指标,其五元联系数为:

$$\mu_{st} = \begin{cases} 1 + 0i + 0j + 0k + 0l & x_{st} \in [0, s_I] \\ \frac{s_{II} - x_{st}}{s_{II} - s_I} + \frac{x_{st} - s_I}{s_{II} - s_I} i + 0j + 0k + 0l & x_{st} \in (s_I, s_{II}] \\ 0 + \frac{s_{III} - x_{st}}{s_{III} - s_{II}} i + \frac{x_{st} - s_{II}}{s_{III} - s_{II}} j + 0k + 0l & x_{st} \in (s_{II}, s_{III}] \\ 0 + 0i + \frac{s_{IV} - x_{st}}{s_{IV} - s_{III}} j + \frac{x_{st} - s_{III}}{s_{IV} - s_{III}} k + 0l & x_{st} \in (s_{III}, s_{IV}] \\ 0 + 0i + 0j + \frac{s_V - x_{st}}{s_V - s_{IV}} k + \frac{x_{st} - s_{IV}}{s_V - s_{IV}} l & x_{st} \in (s_{IV}, s_V] \\ 0 + 0i + 0j + 0k + 1l & x_{st} \in (s_V, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中: s_I 、 s_{II} 、 s_{III} 、 s_{IV} 、 s_V 分别为待评水样指标对应的各水质等级的门限值; x_{st} 为待评水样的地下水水质指标的实测值, s 表示第 s 个待评水样, t 表示待评水样的第 t 个水质指标。

2.2.2 综合赋权法

对于地下水水质评价, 评价指标的权重反映了各项评价指标对地下水水质评价结果的重要程度。水质评价结果的合理与否在很大程度上与评价指标权重的确定密切相关。一般来讲, 确定评价指标权重的方法分为两种。一种如德尔菲法、层次分析法等, 称之为主观赋权法; 另一种如熵值法、变异系数法等, 称之为客观赋权法。

主观赋权法主要是依靠决策者来判断各项评价指标的相对重要程度, 从而据此来赋予各项评价指标不同的权重。虽然主观赋权法是基于决策者的专业知识、实践经验等做出的判断, 但是同时会反映出决策者的主观随意性, 使得评价结果容易因为个人主观因素造成偏差。客观赋权法主要是依靠评价指标数据本身的信息确定指标权重, 避免了人为主观因素的干扰。但是客观赋权法在确定评价指标权重时并没有考虑到各项评价指标对水质评价结果的贡献程度, 仅仅基于自身的数据关系确定权重, 使得最终评价结果可能与当地实际情况不符。

基于主观赋权法与客观赋权法各自的优点与不足, 为了合理、科学地确定地下水水质评价中各项评价指标的权重, 研究采用层次分析法与熵值法相结合的主客观综合赋权法。层次分析法是一种定性与定量相结合的多准则决策方法, 以其灵活系统的特点得到了广泛应用。熵值法是根据评价指标信息熵值的效用价值来确定指标的权重。为了提高评价结果的可靠性, 采用线性加权的方法确定各项评价指标的综合权重。计算公式为

$$w_i = \alpha w_{i1} + \beta w_{i2} \quad (4)$$

式中: w_i 为各项评价指标的综合权重; w_{i1} 为层次分析法确定的指标权重; w_{i2} 为熵值法确定的指标权重; α 为主观偏好系数, β 为客观偏好系数, 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

2.2.3 基于综合赋权的五元联系数模型

根据以上叙述, 基于综合赋权的五元联系数法的评价步骤如下:

- 根据五元联系数的基本原理, 利用公式(1)初步计算出各水质样本的联系数 μ_s ;
- 根据选择的评价指标的特性选用公式(2)或(3)对各水质样本做进一步分析, 由此计算出水质样本中各项评价指标的联系数 μ_{st} ;
- 分别用层次分析法与熵值法计算各项评价指标的主客观权重 w_1 、 w_2 , 然后采用公式(4)计算评价指标的综合权重 w_i ;
- 根据计算出的 μ_s 、 μ_{st} 、 w_i 构造出基于综合赋权的五元联系数模型:

$$\bar{\mu}'_s = \mu_s \otimes \sum_{t=1}^n (w_i \times \mu_{st}) \quad (5)$$

式中, $\otimes$ 表示 μ_s 与 $\sum_{t=1}^n (w_i \times \mu_{st})$ 对应的联系数相乘。

- 对由(5)式计算出的 $\bar{\mu}'_s$ 进行归一化处理, 得到各水质样本的平均联系数 $\bar{\mu}_s$;
- 根据计算出的 $\bar{\mu}'_s$ 及评判准则判断各水质样本的地下水水质类别。

根据研究区的实际情况及客观的水质状况, 制定了相应的评判准则: ①当 $\max[a, b, c, d, e] = a$ 时, 若 $a \geq 0.75$, 则判为 I 类; 若 $a < 0.75$, 并且 $a + b \geq 0.5$, 则为 II 类; 若 $a < 0.75$, 并且 $a + b < 0.5$, 则为 III 类。②当 $\max[a, b, c, d, e] = b$ 时, 若 $a + b + c \geq 0.85$, 则判为 II 类, 否则为 III 类。③当 $\max[a, b, c, d, e] = c$ 时, 若 $b + c + d \geq 0.85$, 则判为 III 类, 否则, 比较 b 与 d 的大小, 若 $b \geq d$, 则为 III 类, 若 $b < d$, 则为 IV 类。④当 $\max[a, b, c, d, e] = d$ 时, 若 $c + d + e \geq 0.85$, 则判为 IV 类, 否则, 比较 c 与 e 的大小, 若 $c \geq e$, 则为 IV 类, 若 $c < e$, 则为 V 类。⑤当 $\max[a, b, c, d, e] = e$ 时, 则判为 V 类。

3 地下水水化学特征分析

3.1 地下水统计特征

地下水的化学成分是在一定的自然地理及地质背景下, 长期与环境相互作用的产物^[6]。进行地下水化学成分描述性统计分析对地下水化学元素迁移、聚集与分散规律的研究具有重要的意义。研究区地下水统计特征分析结果见表 1。

从表 1 中可以看出, 研究区的 pH 值变化范围在 6.2 ~ 8.3 之间, 均值为 6.936, 略偏酸性。总硬度质量浓度为 19.6 ~ 1020.0 mg/L, 均值为 438.572 mg/L, 结合水样的水质资料可知, 部分水样超标, 超标率为 41.67%。溶解性总固体 (TDS) 质量浓度变

表 1 研究区地下水水化学参数的统计特征值

指标	pH	ρ (总硬度)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (TDS)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (总碱度)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (COD_{Mn})/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (K^+)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Na^+)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Ca^{2+})/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Mg^{2+})/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
最大值	8.300	1020.000	1550.000	938.000	6.800	14.600	283.000	306.000	111.000
最小值	6.200	19.600	343.000	101.000	1.000	0.660	9.640	5.500	1.430
均值	6.936	438.572	721.083	376.944	2.186	2.971	63.973	107.856	41.098
标准差	0.423	222.864	305.523	223.592	1.120	2.638	70.044	70.578	24.683
变异系数(%)	6.100	50.820	42.370	59.320	51.240	88.790	109.490	65.440	60.060
偏度	0.752	0.609	1.157	1.179	2.329	2.902	1.711	1.245	1.152

指标	ρ (Cl^-)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (SO_4^{2-})/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (HCO_3^-)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Fe)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Mn)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (F^-)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ ($\text{NO}_3\text{-N}$)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ ($\text{NO}_2\text{-N}$)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
最大值	254.000	113.000	1140.000	2.610	1.060	2.910	9.490	0.107	2.250
最小值	3.940	10.400	123.000	0.030	0.020	0.100	0.130	0.003	0.100
均值	79.739	38.483	458.500	0.366	0.358	1.025	5.379	0.019	0.583
标准差	75.210	31.447	272.271	0.644	0.270	0.877	4.063	0.022	0.562
变异系数(%)	94.320	81.720	59.380	175.960	75.420	85.560	75.530	115.790	96.400
偏度	0.913	0.758	1.183	2.492	0.948	0.940	-0.321	2.598	1.658

化范围为 343 ~ 1 550 mg/L,均值为 721.083 mg/L,个别水样超标,超标率为 16.67%。研究区总铁、锰、氟的质量浓度变化范围分别在 0.03 ~ 2.61 mg/L、0.02 ~ 1.06 mg/L 和 0.10 ~ 2.91 mg/L 之间,均值分别为 0.366 mg/L、0.358 mg/L 和 1.025 mg/L,从均值上来看,研究区的铁、锰、氟均存在较为普遍的超标现象。研究区 pH 值的变异系数小于 30%,具有较小的空间变异性, Na^+ 、Fe 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的变异系数均大于 100%,具有较大的空间变异性,其余指标的变异系数介于 30% 到 100% 之间,具有中等变异性。 COD_{Mn} 、 K^+ 、Fe 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的偏度绝对值相对较高,说明这些指标浓度分布形态的偏斜程度较大。

3.2 铁、锰、氟的分布规律

利用 ArcGIS 绘制研究区铁、锰、氟的分布特征,如图 2 所示。图 2(a)为研究区的铁浓度分布图,将铁的质量浓度不高于 0.15 mg/L 的地下水称为高铁水;质量浓度为 0.15 ~ 0.30 mg/L 的地下水称为中铁水;质量浓度大于 0.30 mg/L 的地下水称为高铁水,即铁浓度超过 GB5749—2006《生活饮用水卫生标准》^[7] 规定的地下水。从图 2(a)中可以看出,高铁水仅分布在研究区的西部地区,中铁水分布于东北部及

中北部,高铁水主要集中在研究区的东南部及中部地区,可见研究区范围内广泛分布着中、高铁水。

图 2(b)为研究区的锰分布图,将锰的质量浓度小于等于 0.05 mg/L 的地下水称为低锰水,质量浓度为 0.05 ~ 0.10 mg/L 的地下水称为中锰水,质量浓度超过生活饮用水卫生标准规定的 0.10 mg/L 的地下水称为高锰水。从图 2(b)中可以看出,整个研究区范围内仅西南部肇东市境内及海伦市境内存在小范围的低、中锰水,其余地区均分布着高锰水。

图 2(c)为研究区的氟分布图,将氟质量浓度小于等于 0.5 mg/L 的地下水称为低氟水,质量浓度为 0.5 ~ 1.0 mg/L 的地下水称为中氟水,质量浓度大于 1.0 mg/L 的地下水称为高氟水。由图 2(c)可知,东部地区分布有大面积的低氟水,高氟水主要集中于研究区的西部,中氟水分布于中西部地区。由氟浓度等值线可以看出,研究区内氟浓度大体呈现由东向西逐渐增加,以安达、肇东为中心向四周逐渐减小的趋势。

可见,研究区有中、高铁水,高锰水广泛分布,相当一部分地区有高氟水存在。根据相关调查发现,研究区内没有相关产业造成的直接污染,这大多是由于该地区原生水文地质环境中尤其是铁、锰浓度

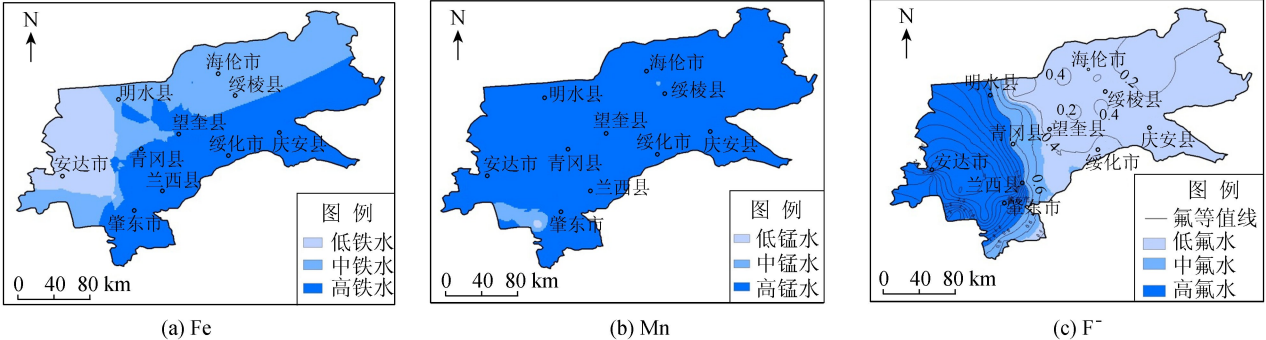
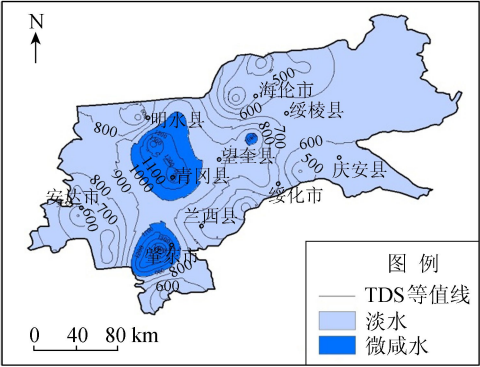


图 2 研究区铁、锰、氟浓度分布

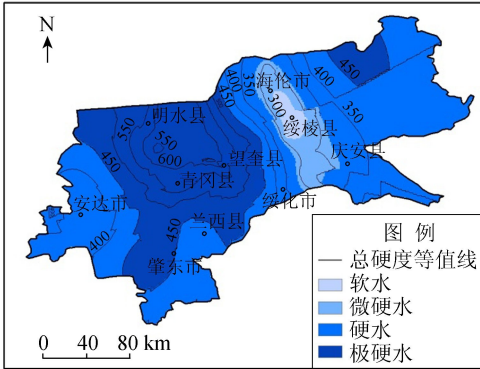
较高,并受地下水运移过程中水化学作用所致。

3.3 溶解性总固体、总硬度浓度分布规律

水质指标是衡量地下水质量优劣的重要参数, TDS 和总硬度是其中的重要两项。根据 TDS 质量浓度可以将地下水分为 3 类:当 $\rho(\text{TDS}) < 1 \text{ g/L}$ 时为淡水;当 $\rho(\text{TDS}) = 1 \sim 3 \text{ g/L}$ 时为微咸水;当 $\rho(\text{TDS}) > 3 \text{ g/L}$ 时为咸水。同样,根据总硬度浓度的高低也可以将地下水分类:当 $\rho(\text{总硬度}) < 150 \text{ mg/L}$ 时为软水;当 $\rho(\text{总硬度}) = 150 \sim 300 \text{ mg/L}$ 时为微硬水;当 $\rho(\text{总硬度}) = 300 \sim 400 \text{ mg/L}$ 时为硬水;当 $\rho(\text{总硬度}) > 450 \text{ mg/L}$ 时为极硬水。利用 ArcGIS 绘制研究区的 TDS 和总硬度浓度分布图,如图 3 所示。



(a) TDS等值线



(b) 总硬度

图3 研究区 TDS、总硬度浓度分布

图 3(a) 为研究区的 TDS 浓度等值线图。由图可知,在研究区范围内广泛分布着淡水,表明大部分地区的 $\rho(\text{TDS}) < 1 \text{ g/L}$,基本符合生活饮用水卫生标准。在明水县、青冈县、肇东市和望奎县境内分布有小面积的微咸水,研究区范围内没有咸水分布。从 TDS 浓度等值线可以看出,研究区内 TDS 浓度分布有由东向西逐渐增加的趋势,并且呈现以青冈县、肇东市和望奎县为中心向四周逐渐减小的趋势。

由图 3(b) 可知,研究区范围内分布有软水、微硬水、硬水和极硬水。在海伦市、绥棱县和绥化市城区境内有小面积的软水和微硬水分布,大部分区域分布有硬水和极硬水。极硬水主要分布在明水县、青冈县、望奎县和兰西县,集中于研究区的中西部地区。

3.4 水化学类型分布规律

绘制研究区的地下水水样 Piper 图,见图 4。从 Piper 图中可以看出,在研究区水样的阳离子中 Ca^{2+} 为优势阳离子,其次为 Mg^{2+} 和 Na^+ 。水样阴离子明显聚集于三角形的左下角, HCO_3^- 为优势阴离子,其次是 Cl^- , SO_4^{2-} 含量贫乏。

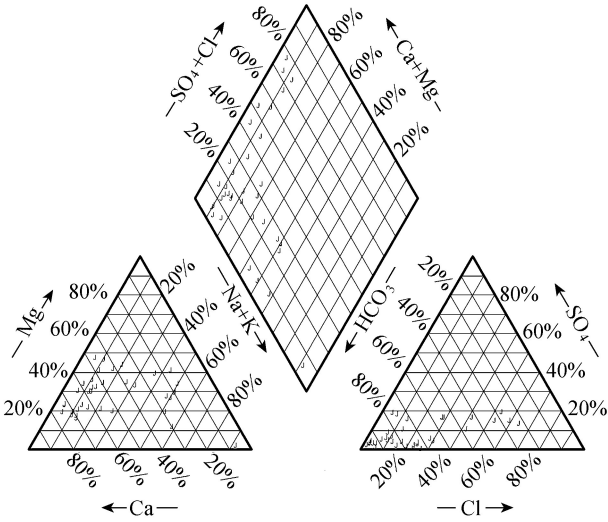


图4 研究区地下水水样 Piper 图

按照舒卡列夫分类法对研究区水样进行地下水水化学类型的分析,并且将 K^+ 与 Na^+ 合并,利用 ArcGIS 绘制出研究区的地下水水化学类型分布图,见图 5。

由图 5 可知,在绥化市城区和庆安县主要分布着 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,在研究区的西南部分布有大面积的 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型水以及小面积的 $\text{HCO}_3\text{-Mg} \cdot \text{Na}$ 型水,东北部主要分布有 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型水,中部主要分布有 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水。

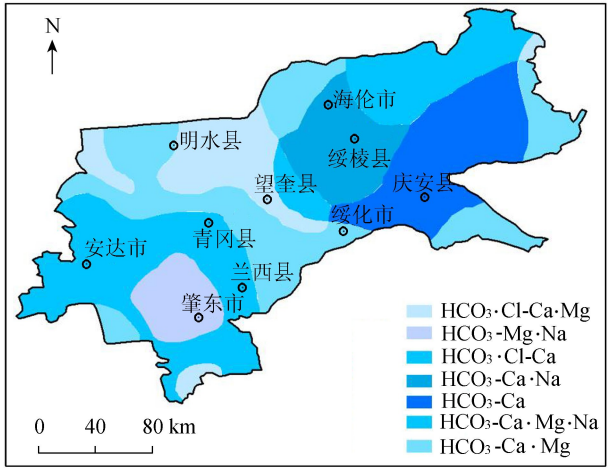


图5 研究区地下水水化学类型分布

3.5 离子相关性分析

相关性分析是揭示地下水水化学参数相似相异性的有效方法,并且可以分析其来源的一致性与差

异性^[8]。笔者利用 SPSS 计算各水化学参数的 Pearson 相关系数,结果见表 2。

由表 2 可知,Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、总硬度与 TDS 具有较好的正相关性,其中尤以 Cl⁻、Mg²⁺、总硬度与 TDS 的相关性显著,相关系数均在 0.60 以上。K⁺、SO₄²⁻、F⁻与 TDS 相关系数较小,其相关性不显著。Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻与总硬度具有较好的正相关性,相关系数均在 0.60 以上,F⁻与总硬度具有微弱的负相关性。各种阴阳离子中,Cl⁻与 SO₄²⁻的相关系数为 0.484($p<0.01$),具有较好的正相关性,说明研究区内地下水中的 Cl⁻与 SO₄²⁻存在同一来源。Na⁺与 Mg²⁺的相关系数为 0.635($p<0.01$),显著性相关,说明研究区内地下水中的 Na⁺与 Mg²⁺也存在同一来源。

4 水质现状评价

4.1 评价指标与评价标准

考虑到研究区范围内铁、锰、氟普遍超标是由原生环境污染所致,故而未选用铁、锰、氟作为本次评价的参评指标。选择 2009 年 9 月的水样资料作为本次水质现状综合评价的资料,考虑研究区的实际情况选取了其中的 36 个监测点,并且选取 Cl⁻、SO₄²⁻、总硬度、NO₃-N、TDS、COD_{Mn} 6 项指标作为评价指标。参考 GBT14848—93《地下水环境质量标准》^[9]确定各参评指标的评价标准,见表 3。

表 3 参评指标地下水水质评价标准 mg/L						
水质类别	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{总硬度})$	$\rho(\text{NO}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TDS})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$
I	50	50	150	2	300	1
II	150	150	300	5	500	2
III	250	250	450	20	1 000	3
IV	350	350	550	30	2 000	10
V	700	700	1 100	60	4 000	20

注:第 V 类的门限值取《地下水质量标准》中规定的第 IV 类门限值的 2 倍。

表 2 研究区地下水水化学参数 Pearson 相关系数

指标	pH	总硬度	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻
pH	1.000										
总硬度	-0.270	1.000									
TDS	0.130	0.769 **	1.000								
K ⁺	-0.076	0.107	0.042	1.000							
Na ⁺	0.592 **	0.113	0.539 **	0.106	1.000						
Ca ²⁺	-0.450 **	0.896 **	0.530 **	0.091	-0.223	1.000					
Mg ²⁺	0.191	0.638 **	0.769 **	0.076	0.635 **	0.230	1.000				
Cl ⁻	-0.138	0.707 **	0.600 **	-0.085	0.257	0.683 **	0.364 *	1.000			
SO ₄ ²⁻	-0.365 *	0.678 **	0.328	-0.055	-0.182	0.746 **	0.191	0.484 **	1.000		
HCO ₃ ⁻	0.609 **	0.119	0.447 **	0.082	0.868 **	-0.258	0.710 **	0.101	-0.166	1.000	
F ⁻	0.558 **	-0.034	0.163	0.021	0.620 **	-0.273	0.401 *	0.107	-0.136	0.728 **	1.000

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4.2 综合评价

根据综合赋权的五元联系数评价步骤可知,首先结合监测点的水质资料根据公式(1)计算出 36 个监测点的联系数 μ_s ,由于选取的参评指标均为越小越优型,故而采用式(3)计算各监测点水质样本各项指标的联系数 μ_{st} ,然后采用式(4)计算各参评指标的综合权重 w_t ,计算结果见表 4。其中, α 取 0.7, β 取 0.3。

表 4 参评指标权重系数

评价方式	综合权重 w_t					
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	总硬度	NO ₃ -N	TDS	COD _{Mn}
主观	0.084 9	0.095 4	0.190 8	0.219 4	0.204 7	0.204 7
客观	0.187 7	0.205 9	0.089 6	0.299 8	0.130 3	0.086 7
综合	0.115 7	0.128 6	0.160 5	0.243 5	0.182 4	0.169 3

根据构建的基于综合赋权的五元联系数模型及归一化后计算出 $\bar{\mu}_s$,并且根据制定的评判准则判断出各监测点的水质类别,最终结果见表 5。为了验证基于综合赋权的五元联系数法评价结果的合理

表 5 研究区地下水水质现状评价结果

水质级别			水质级别		
监测点名称	基于综合赋权的五元联系数	模糊综合评判	监测点名称	基于综合赋权的五元联系数	模糊综合评判
海伦 4 号	I	I	明水 17 号	II	III
海伦 7 号	I	I	明水 18 号	II	II
海伦 13 号	II	II	兰西 2 号	III	III
海伦 16 号	II	II	兰西 9 号	II	II
绥化 1 号	I	II	兰西 13 号	II	II
绥化 4 号	I	II	兰西 14 号	II	II
绥化 8 号	I	I	兰西 16 号	III	III
绥化 11 号	II	II	兰西 17 号	II	III
绥化 16 号	II	II	兰西 21 号	III	III
绥化 20 号	II	II	安达 7 号	II	II
望奎 8 号	II	II	安达 15 号	II	II
望奎 10 号	III	IV	安达 18 号	II	II
望奎 13 号	II	II	肇东 3 号	III	II
青冈 3 号	III	III	肇东 5 号	II	III
青冈 12 号	II	II	肇东 8 号	III	IV
青冈 19 号	II	II	肇东 10 号	I	II
青冈 22 号	III	IV	肇东 18 号	IV	IV
明水 13 号	II	II	肇东 20 号	II	II

性,同时列出了模糊综合评判法的评价结果进行比较。

从表 5 中可以看出两种方法得到的评价结果大致相同,各监测点的水质优劣程度基本一致。本次评价共选取 36 个监测点,两种评价方法中有 26 个监测点的评价结果完全一致,36 个监测点的评价结果基本一致,分别占总监测点的 72.2% 和 100%。可见,基于综合赋权的五元联系数法的评价结果是合理的和符合客观实际的。

从表 5 的评价结果中可以看出,该研究区的整体水质较好,仅个别监测点的水质超过Ⅲ类标准。由于本次综合评价时未选择研究区浓度普遍超标的铁、锰、氟作为参评指标,所以评价结果偏好。铁、锰、氟浓度超标的原因是原生环境污染,所以本次评价将原生污染指标去除,仅考虑人为污染指标,以期得到较为客观的水质评价结果,为改善区域的地下水水质状况提供帮助。

4.3 水质变化的趋势分析

本文采用 Daniel 趋势检验,以 Spearman 秩相关系数衡量研究区的地下水水质变化趋势。选取代表性的监测点利用 2004—2009 年的水质监测数据对主要水质指标进行趋势分析(其中 2005 年的 NO₃-N 资料缺失)。利用 SPSS 计算得到各监测点的秩相关系数 r_s ,结果见表 6。

监测点	秩相关系数					
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	总硬度	NO ₃ -N	TDS	COD _{Mn}
海伦 7 号	-0.200	-0.486	-0.698	0.600	-0.886	-0.943
绥化 11 号	-0.600	-0.257	-0.377	0.100	0.371	-0.736
望奎 13 号	-0.257	-0.314	-0.029	0.500	-0.714	-0.600
青冈 22 号	-0.086	-0.314	-0.600	0.300	-0.429	0.086
明水 13 号	0.086	-0.200	-0.086	0.500	-0.257	-0.464
兰西 13 号	0.086	-0.771	-0.314	0.400	-0.657	-0.029
安达 7 号	0.429	-0.600	0.257	0.900	-0.657	-0.086
肇东 20 号	-0.429	-0.771	-0.200	0.900	-0.943	0.058

查秩相关系数的临界值表知,当 $N=5$ 时,在 0.05 的显著性水平下 $W_p=0.900$,当 $N=6$ 时, $W_p=0.829$ 。比较 $|r_s|$ 与 W_p ,若 $|r_s| \geq W_p$,则表明水质指标具有显著的变化趋势。由表 6 可知,大部分监测点的 Cl⁻、SO₄²⁻、总硬度、TDS、COD_{Mn} 浓度均呈现出显著下降趋势,NO₃-N 呈现出不显著上升趋势。其中监测点海伦 7 号和肇东 20 号的 TDS 浓度呈显著下降趋势,安达 7 号和肇东 20 号的 NO₃-N 浓度呈显著上升趋势。由此可知,研究区主要水质指标浓度有逐年下降趋势,表明研究区的地下水水质状况在一定程度上有所改善。

5 结 论

a. 研究区地下水略偏酸性,部分水样的水质指

标存在超标现象。研究区的 pH 值变化较为稳定,Na⁺、Fe 和 NO₂-N 具有较大的空间变异性,其余指标均具有中等变异性。COD_{Mn}、K⁺、Fe 和 NO₂-N 指标浓度分布形态的偏斜程度较大。

b. 研究区广泛分布着高铁、高锰水,局部地区分布有高氟水,并且经调查发现铁、锰、氟超标均受水文地质环境及地下水运移过程中水化学作用的影响。研究区分布有淡水和微咸水,无咸水分布。在海伦市、绥棱县和绥化市城区境内有小面积的软水和微硬水分布,大部分区域分布有硬水和极硬水。

c. 在研究区水样中 Ca²⁺ 为优势阳离子,HCO₃⁻ 为优势阴离子。按照舒卡列夫分类法对研究区水样进行地下水水化学类型的分析,得到研究区主要分布有 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca·Mg·Na、HCO₃-Mg·Na、HCO₃·Cl-Ca、HCO₃-Ca·Na、HCO₃-Ca·Mg 和 HCO₃·Cl-Ca·Mg 型水。

e. 通过相关性分析可知 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、总硬度与 TDS 具有较好的正相关性,Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 与总硬度具有较好的正相关性,并且研究区地下水中的 Cl⁻ 与 SO₄²⁻,Na⁺ 与 Mg²⁺ 存在同一来源。

f. 采用基于综合赋权的五元联系数法对研究区的水质现状进行了综合评价,并且与模糊综合评判法的结果相比较,结果表明基于综合赋权的五元联系数法的评价结果是合理的,符合客观实际的。五元联系数是集对分析的拓展,是处理模糊不确定问题的有效方法,主客观相结合的综合赋权法既考虑了决策者的主观因素又考虑了数据本身的信息值,可以有效地解决地下水水质评价中的权重分配问题。

g. 采用 Spearman 秩相关系数法对研究区的水质变化进行了趋势分析,结果表明研究区地下水水质状况在一定程度上有所改善,但还需加大保护力度,制定相应的政策法规,进一步保护和改善地下水水质。

参考文献:

[1] KAZI T G,ARAIN M B,JAMALI M K,et al. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2009,72(2):301-309.

[2] 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))

(下转第 81 页)

发现主要原因是优化了废水治理投入产出配置。污水处理工艺和设备技术引自国外,已经较为成熟,我国水污染仍处于初级阶段,技术进步的影响远小于提高管理效率对废水治理绩效的贡献。

根据以上分析,DEA 作为一种相对效率分析方法,能够在复杂的废水治理效率评估中得以较好地运用,主要表现在以下方面:DEA 实现了废水治理效率的定量评估,能够得出更加客观准确的评估结果;DEA 能够对废水治理进行投入冗余和产出不足分析,并提出合理的废水治理投入预算和产出目标;DEA 结合 Malmquist TFP 指数能够挖掘出废水治理绩效变动的主导因素,为废水治理的绩效评估提供信息。

针对湖北省废水治理的效率分析结果,提出如下建议:①加大废水治理投入,力争使环境污染治理投资占 GDP 比率达到 2%(根据西方国家环保发展史,环境污染治理投资占 GDP 比率达到 2%可基本遏制环境进一步恶化);②大力发展污水处理行业,提高污水处理工程技术和污水处理设备制造技术水平,摆脱污水处理设备对沿海产地的依赖;③增强废水治理的危机感和使命感,为保护“千湖之省”——湖北的水环境作出贡献。

参考文献:

[1] 贺桂珍,吕永龙.太湖水污染防治计划实施效率评估[J].生态学报,2008,28(12): 6348-6354. (HE Guizhen, LÜ Yonglong. Efficiency evaluation on Taihu Lake water pollution control[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(12):

6348-6354. (in Chinese))
[2] 王宝顺,刘京焕.中国地方城市环境治理财政支出效率评估研究[J].城市经济,2011,18(4): 71-76. (WANG Baoshun, LIU Jinghuan. Empirical study on efficiency of provincial public spending on urban environment protection in China [J]. Urban Studies, 2011, 18(4): 71-76. (in Chinese))
[3] 黄和平,伍世安,智颖飙,等.基于生态效率的资源环境绩效动态评估:以江西省为例[J].资源科学,2010,32(5): 924-931. (HUANG Heping, WU Shian, ZHI Yingbiao, et al. Dynamic evaluations of resources and environmental performance based on eco-efficiency: a case study of Jiangxi Province [J]. Resources Science, 2010, 32(5): 924-931. (in Chinese))
[4] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
[5] COELLI T. A guide to DEAP version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program [R]. Armidale: Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA) of University of New England, 1997.
[6] FÄRE R, GROSSKOPF S, NORRIS M, et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries [J]. The American Economic Review, 1994, 84(1): 66-83.
[7] FÄRE R, GROSSKOPF S, LINDGREN B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980-1989: a non-parametric Malmquist approach [J]. Journal of Productivity Analysis, 1992, 3: 85-101.

(收稿日期:2012-12-24 编辑:徐 娟)

(上接第 25 页)

[3] ADAMS S, TITUS R, PIETERSEN K, et al. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa [J]. Journal of Hydrology, 2001, 241(1/2): 91-103.
[4] WU F F, WANG X. Eutrophication evaluation based on set pair analysis of Baiyangdian Lake, North China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1030-1036.
[5] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3): 257-262. (MENG Xianmeng, HU Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
[6] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995:50-51.
[7] GB5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].
[8] 章光新,邓伟,何岩,等.中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J].水科学进展,2006,17(1): 20-28. (ZHANG Guangxin, DENG Wei, HE Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 20-28. (in Chinese))
[9] GBT14848—93 地下水环境质量标准[S].

(收稿日期:2012-09-05 编辑:高渭文)