

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.161

引用格式: 何金宝, 刘洪博, 孔繁鹏, 等. 基于主成分分析的桦川—集贤—友谊地区地下水水质评价[J]. 中国地质调查, 2025, 12(2): 87–95. (He J B, Liu H B, Kong F P, et al. Groundwater quality evaluation in Huachuan – Jixian – Youyi area based on principal component analysis[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(2): 87–95.)

基于主成分分析的桦川—集贤—友谊地区 地下水水质评价

何金宝^{1,2}, 刘洪博^{1*}, 孔繁鹏¹, 毛永新¹, 赵建¹

(1. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 吉林 长春 130000; 2. 东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110019)

摘要: 三江平原桦川—集贤—友谊地区作为黑龙江省的关键粮食产区, 其水资源状况直接关系到农业生产和生态安全。随着工农业的快速发展, 水资源需求不断增加, 导致研究区地下水位下降、水质恶化等一系列问题, 厘清研究区地下水化学特征及影响因素, 评估水体质量, 对于保持农业稳定和可持续发展具有重要意义。通过野外采集地下水样, 结合统计分析、Piper 三线图、层次聚类分析、主成分分析、氯碱指数等方法对研究区地下水水化学特征及其成因进行分析, 并对地下水水质进行评价。结果表明, 钠吸附比 (sodium adsorption ratio, S_{AR})、钠百分比 (soluble sodium percentage, $Na\%$)、残留碳酸钠 (residual sodium carbonate, R_{sc}) 等均显示研究区的地下水灌溉适宜性较好。研究区地下水水化学类型主要为 $Ca^{2+} - HCO_3^-$ 型, 局部为 $Ca^{2+} - Cl^-$ 型。地下水化学组分主要受岩石风化作用控制, 主要离子来源于岩盐和方解石、白云石等可溶性碳酸盐的溶解, 同时氯碱指数表明阳离子交换作用也影响着地下水化学组分的形成。水质评价结果显示, 桦川县、集贤县部分地区地下水水质较差, NO_3^- 浓度超标, 除受自然因素影响外, 还与化肥农药的使用、矿山开采等人为活动有关。研究结果对于地下水资源的合理开发和治理具有一定的参考价值。

关键词: 三江平原; 主成分分析; 层次聚类分析; 地下水; 水质评价

中图分类号: P641.3; X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2025)02-0087-09

0 引言

地下水作为地球上重要的淡水资源^[1-2], 在人类生活、农业生产中起着非常重要的作用^[3-4], 三江平原作为我国最大的商品粮生产基地, 其地下水系统承担着农业灌溉和居民用水的双重功能。近年来, 该区域水稻种植面积占黑龙江省水田总面积的60%以上^[5], 地下水资源因此面临持续的环境危机^[6-7]。开展地下水水质评价有助于保护农业生态环境, 指导地下水的合理开发和科学管理。常用的水质评价方法主要有单因子指数法、模糊综合

评价法、内梅罗污染指数法、主成分分析法等^[8-11]。其中单因子指数法更多突出单个指标对水体评价结果, 不能完全客观反映地下水整体水质; 模糊综合评价法权重的确定容易受人为主观因素的影响; 内梅罗污染指数法评价结果易受指标极大值的影响且未考虑权重问题; 主成分分析法能够根据数据进行自身客观分析来确定权重, 极大地避免人为主观意愿或知识经验不足的影响, 具有较强的客观性和合理性^[12]。

桦川—集贤—友谊地区地处广袤的三江平原腹地, 因其独特的地理位置和自然条件, 拥有肥沃的土壤和丰富的水资源, 是典型的农业生产区域,

收稿日期: 2024-03-11; 修订日期: 2024-09-14。

基金项目: 中国地质调查局“三江平原黑土区水-土壤-植被耦合机制研究(编号: QCJ2022-30)”“高强度利用下黑土地表基质养分元素变化规律及机理研究(编号: KC20220002)”及“三江平原宝清地区黑土地表基基层调查(编号: DD20211588)”项目联合资助。

第一作者简介: 何金宝(1992—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查评价工作。Email: jinbao92@yeah.net。

通信作者简介: 刘洪博(1991—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查评价工作。Email: 2274496829@qq.com。

随着农业生产的不断发展和扩大,该地区对地下水的依赖日益增长,长期的不合理开发和利用,导致地下水位下降、地下水污染等问题。近年来该地区研究多集中于地下水资源潜力、承载力评价^[13-14]。对于地下水水质评价鲜有报道。本文采用统计分析、Piper 三线图、氯碱指数等方法分析研究区地下水的化学特征及影响机制,利用层次聚类分析、主成分分析等方法进行地下水质量评价,揭示地下水水质现状,潜在的污染风险,旨在为保障地下水资源的可持续发展和治理提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区包括佳木斯东部的桦川县和双鸭山北部的集贤县、友谊县,地处黑龙江省东北部,三江平原腹地,松花江下游南岸,是典型的以农业生产为

主的地区,地形由西南向北东方向逐渐倾斜,南部为完达山余脉,构成低山丘陵区,山区坡陡谷深,东北部为平原和沼泽地。研究区气候属寒温带大陆性季风气候,多年平均气温 3.8 ℃,多年平均降雨量 510.5 mm,降水多集中于 6—9 月的作物生长季节。区内存在 3 类含水层,松散岩类孔隙含水层在区内分布范围最广,含水岩组主要由中更新统浓江组、上更新统向阳川组、全新统冲积层组成,成层分布,各含水层之间水力联系密切,没有区域性隔水层,因而形成较大厚度的含水层,靠近山前地区,含水层由 3~4 个沉积旋回组成,旋回之间由亚黏土层相隔。碎屑岩类孔隙裂隙含水层主要分布于山前台地区,含水岩组以玄武岩、火山碎屑岩为主,部分陆源碎屑岩发育;岩浆岩类裂隙含水层主要分布在低山丘陵区,主要由花岗岩组成,经长期内外营力作用下岩石裂隙发育,形成了地下水流动和存储的通道(图 1)。

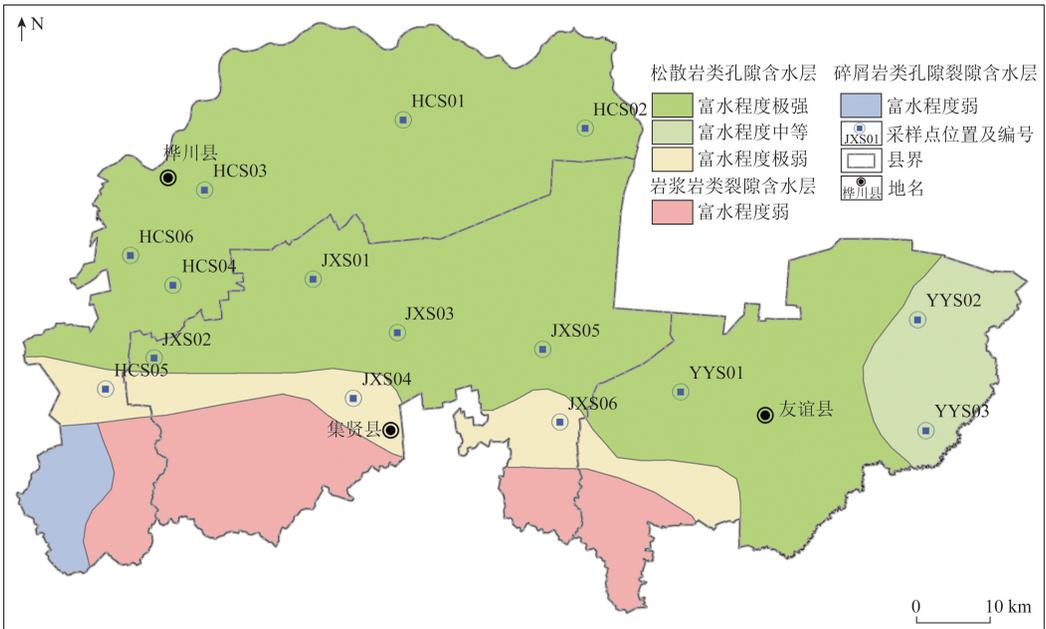


图 1 研究区水文地质及采样点分布

Fig. 1 Hydrogeology of the study area and distribution of sampling points

1.2 样品采集

本研究于 2023 年 7 月在桦川—集贤—友谊地区进行地下水采集工作,主要取自第四系含水层,共采集水质样品 15 件(图 1),均为孔深 30 m 以内浅井,每个水样采集 1 瓶(500 ml)和 1 桶(5 L),并盖紧密封,贴好标签,于当天送往黑龙江省地质矿

产实验测试研究中心进行水质指标的检测,检测项目包括 pH 值、阳离子(Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+})、阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 HCO_3^{-})、总硬度(total hardness, TH)、游离二氧化碳(free carbon dioxide, fCO_2)、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS),其中阳离子(Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+})采用电感耦合

等离子体发射光谱法测定; HCO_3^- 、 fCO_2 采用滴定法测定; 阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)采用离子色谱法测定; TH 采用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定; pH 值采用玻璃电极法测定; TDS 采用重量法测定; 各项质量控制参数均满足或优于水质测定相关规范要求^[15]。

1.3 分析方法

1.3.1 灌溉适宜性

采用钠吸附比(sodium adsorption ratio, S_{AR})、钠百分比(soluble sodium percentage, Na%)、残留碳酸钠(residual sodium carbonate, R_{SC})3个指标评估地下水灌溉适宜性,评价标准参考前人研究^[16]。氯碱指数(CAI-I、CAI-II)用于判定地下水阳离子的交换作用^[17],式(1)—(5)中各离子浓度单位为 meq/L。公式分别为

$$S_{AR} = \frac{\omega(\text{Na}^+)}{\sqrt{(\omega(\text{Ca}^{2+}) + \omega(\text{Mg}^{2+}))/2}}, \quad (1)$$

$$\text{Na}\% = \frac{(\omega(\text{Na}^+) + \omega(\text{K}^+)) \times 100}{(\omega(\text{Ca}^{2+}) + \omega(\text{Mg}^{2+}) + \omega(\text{Na}^+) + \omega(\text{K}^+))}, \quad (2)$$

$$R_{SC} = \omega(\text{HCO}_3^-) - (\omega(\text{Ca}^{2+}) + \omega(\text{Mg}^{2+})), \quad (3)$$

$$\text{CAI-I} = \frac{\omega(\text{Cl}^-) - (\omega(\text{Na}^+) + \omega(\text{K}^+))}{\omega(\text{Cl}^-)}, \quad (4)$$

$$\text{CAI-II} =$$

$$\frac{\omega(\text{Cl}^-) - \omega(\text{Na}^+) + \omega(\text{K}^+)}{\omega(\text{SO}_4^{2-}) + \omega(\text{HCO}_3^-) + \omega(\text{CO}_3^{2-}) + \omega(\text{NO}_3^-)}。 \quad (5)$$

1.3.2 主成分分析

主成分分析是一种降低由许多相互关联的变量组成的高维数据处理技术,提高数据的可解释性,同时能够最大限度的减少数据冗余与信息丢失^[18]。由于不同的水质指标具有不同的单位和量纲,通过对不同水质指标进行标准化,可以消除偏差,减少数据噪声的影响,提高主成分分析结果的准确性^[19]。

pH 值采用区间化方法(式(6)),最优上限值和最优下限值分别为 6.50 和 7.50,其他指标采用离差标准化方法(式(7))进行标准化处理^[20]。公式分别为

$$F(x_i) =$$

$$\begin{cases} 1 - \frac{\max(p - x_i, x_i - q)}{\max(p - \min(x_i), \max(x_i) - q)}, & x_i \notin [p, q] \\ 1, & x_i \in [p, q] \end{cases}, \quad (6)$$

$$F(x_i) = (\max(x_i) - x_i) / (\max(x_i) - \min(x_i))。 \quad (7)$$

式中: $F(x_i)$ 为各水质指标的标准化值,无量纲; x_i 为各水质指标值,mg/L; $\max(x_i)$, $\min(x_i)$ 为第 i 项指标中的最大值和最小值,mg/L; p , q 为最优范围的下限值和上限值,无量纲。

运用 SPSS 软件进行地下水化学参数的主成分分析和描述性统计,利用 Origin 软件绘制 Piper 三线图、Gibbs 图、地下水理化参数相关性图、聚类图分析地下水各离子的统计特征、地下水化学类型、主要的控制过程及影响因素。

2 结果与讨论

2.1 地下水化学特征

由研究区地下水的水化学参数统计结果可知(表1)。地下水 pH 值变化范围为 5.74 ~ 7.10,整体呈中性,部分地区呈弱酸性,空间变异性较弱。TH 变化范围为 60.59 ~ 579.63 mg/L,均值为 212.13 mg/L。根据分类标准^[21],研究区地下水整体以硬水为主,部分地区为软水。TDS 变化范围为

表1 地下水水化学参数统计分析

Tab.1 Statistical analysis of groundwater hydrochemical parameters

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
pH 值	5.74	7.10	6.55	0.36	0.05
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	16.51	168.40	58.94	40.16	0.68
$\text{K}^+(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.67	11.02	2.08	2.55	1.22
$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.87	127.00	28.59	37.32	1.31
$\text{Cl}^-(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.49	78.50	23.16	26.97	1.16
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	5.30	37.70	15.30	9.36	0.61
$\text{Na}^+(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	9.86	86.67	26.17	20.34	0.78
TDS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	128.00	910.00	323.40	207.39	0.64
$\text{NO}_3^-(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.35	225.00	31.96	71.15	2.23
$\text{fCO}_2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	22.30	129.73	55.41	27.99	0.51
TH/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	60.59	579.63	212.13	138.62	0.65
$\text{HCO}_3^-(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	38.07	501.85	225.43	148.38	0.66

128.00 ~ 910.00 mg/L。NO₃⁻ 变化范围为 0.35 ~ 225.00 mg/L, 均值为 31.96 mg/L。根据《GB/T 14848—2017 地下水质量标准》^[22] 中 NO₃⁻ 的分类标准, 部分水样 NO₃⁻ 离子浓度超过了 V 类标准 (>30 mg/L), 水体存在一定程度的污染。阳离子平均浓度大小依次为 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, Ca²⁺ 在所有阳离子中占据主要地位, 反映地下水中富含 Ca²⁺, K⁺ 在所有阳离子中空间变异程度最高。阴离子平均浓度大小依次为 HCO₃⁻ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻, HCO₃⁻ 是主要的阴离子, 空间变异

程度中等, 其余阴离子具有较强的空间变异性。不同灌溉指数表明: S_{AR} 可以有效衡量碱/钠对农作物的危害, 其变化范围为 0.39 ~ 1.57 (图 2 (a)), 所有样品都非常适合用于灌溉; Na% 是衡量钠危害水平的另一参数, 其变化范围为 10.55% ~ 37.31% (图 2 (b)), 所有样品较适用或非常适合用于灌溉; R_{SC} 指示了碳酸盐和碳酸氢盐对农业用水水质的有害影响, 其变化范围为 -4.97 ~ 1.85 meq/L, 所有样品都非常适合用于灌溉 (图 2 (c))。

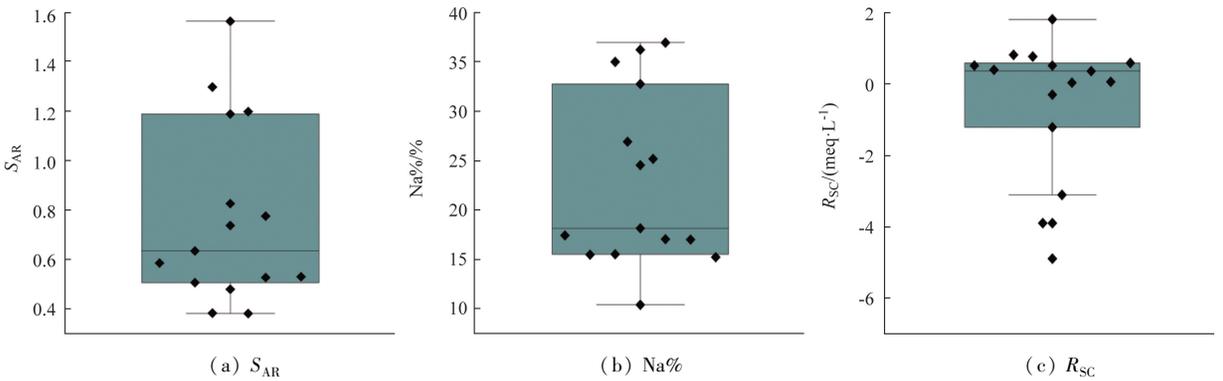


图 2 不同灌溉指数箱线图

Fig. 2 Box plots with different irrigation indices

2.2 地下水化学类型及影响因素

Piper 三线图和 Gibbs 图主要表达了水的各种离子的相对丰度以及化学类型及主要的控制机制^[23]。研究区地下水阳离子主要分布在 Ca²⁺ 附近, 阴离子主要分布在 HCO₃⁻ 附近, 地下水的水化学类型较为简单, 主要为 Ca²⁺ - HCO₃⁻ 型, 桦川县局部为 Ca²⁺ - Cl⁻ 型 (图 3)。Gibbs 图主要表示了地下水中主要阴离子和阳离子与 TDS 的比值, Cl⁻ / (Cl⁻ + HCO₃⁻) 变化范围为 0.01 ~ 0.65 (图 4 (a)), Na⁺ / (Na⁺ + Ca²⁺) 变化范围为 0.44 ~ 0.50 (图 4 (b)), 研究区地下水均处于岩石风化区域内, 说明地下水化学组分主要受岩石风化作用控制。地下水样品中 CAI - I 和 CAI - II 均为负值的有 12 个, 占 80.00%, CAI - I 和 CAI - II 均为正值的有 3 个, 占 20.00% (图 4 (c)), 表明地下水主要发生正阳离子交换作用, 地下水中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 不断与含水层中的

Na⁺ 和 K⁺ 进行交换。反阳离子交换作用主要发生在集贤县南部和桦川县中部地区。

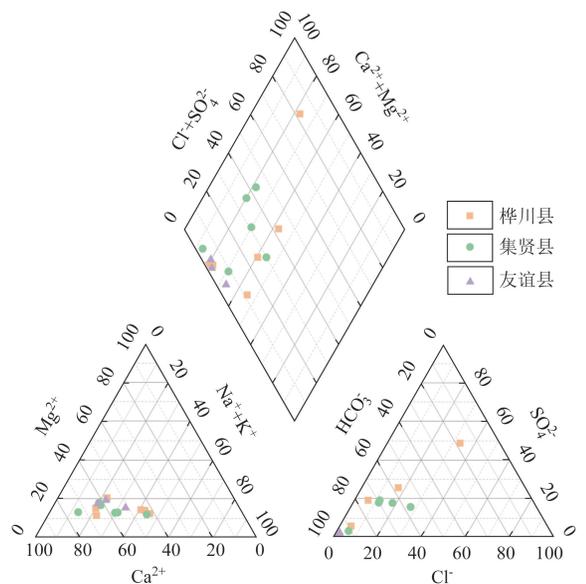


图 3 研究区地下水的 Piper 三线图

Fig. 3 Piper trilinear diagram of groundwater in the study area

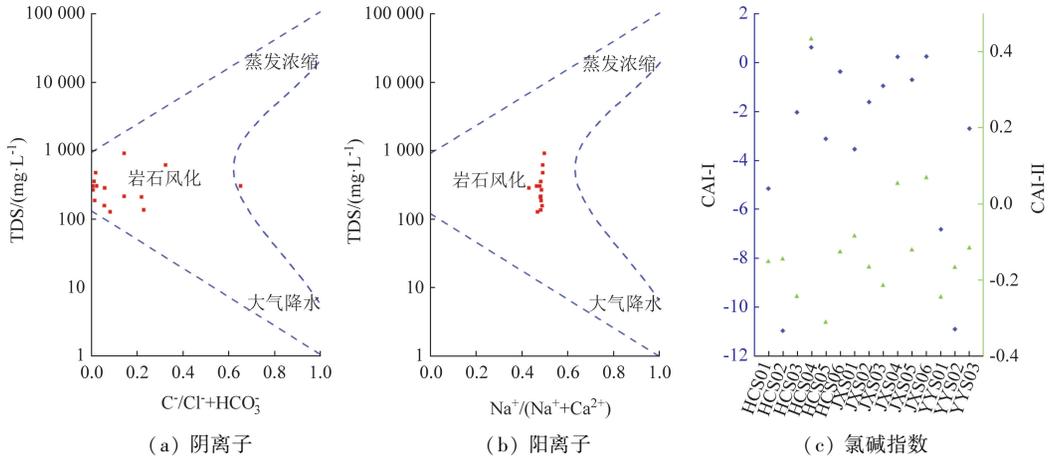


图 4 研究区地下水的 Gibbs 分布图和氯碱指数

Fig.4 Gibbs distribution map and chlor – alkali index of groundwater in the study area

2.3 地下水特征相关性分析

Person 相关分析是分析地下水理化特征之间关系的常用方法^[24]。研究区地下水中 K^+ 与其他离子相关性均不显著,其他离子均存在不同程度的正相关或负相关关系(图 5)。其中 TDS 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 fCO_2 均具有较强的相关性,并且 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 和 Na^+ 与 Cl^- 之间也具有较强相关性,表明这些离子可能来源相同或相似,主要来自于岩盐和方解石、白云石等可溶性碳酸盐的溶解。TH 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 之间存在显著相关,相关系数均大于 0.8,证明了 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度是决定地下水 TH 的主要影响因素^[25]。此外 HCO_3^- 与 pH 值呈较强的负相关,可能是由于 CO_2 与水反应形成大量的 HCO_3^- 从而使其偏酸性。

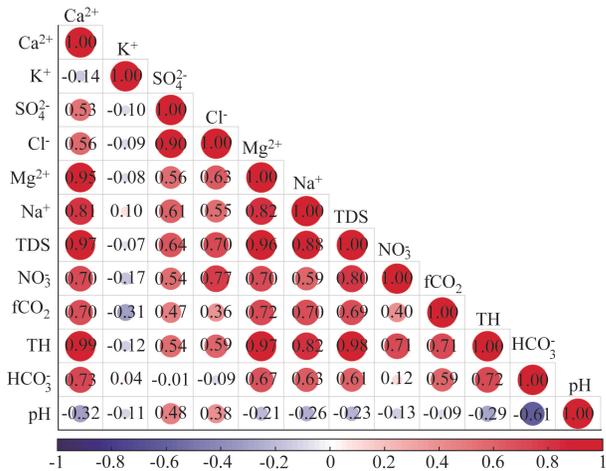


图 5 研究区地下水理化参数相关系数矩阵

Fig.5 Correlation coefficient matrix of groundwater physical and chemical parameters in the study area

2.4 地下水质量评价

2.4.1 主成分分析结果

通过对地下水数据进行主成分分析并提取特征值大于 1 的主成分,每个主成分的载荷、特征值、方差,共提取 3 个主成分,以及方差解释率达到 88.058%,能够很好地解释数据中的大部分信息(表 2)。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、TDS、TH、 NO_3^- 、 fCO_2 在第一个主成分 F_1 具有较高的主成分载荷,反映了大部分的地下水化学类型信息。pH 值和 HCO_3^- 与第二个主成分 F_2 关系密切,表明了对地下水酸碱度的一种综合度量。第三个主成分 F_3 只有 K^+ 与之关系密切,可能与化肥农药的使用和人类生活污水有关。

表 2 主成分结果及载荷矩阵

Tab.2 Principal component results and load matrix

指标	主成分 F_1	主成分 F_2	主成分 F_3
Ca^{2+}	0.964	-0.158	-0.040
K^+	-0.123	-0.175	0.950
SO_4^{2-}	0.665	0.665	0.091
Cl^-	0.696	0.679	0.145
Mg^{2+}	0.966	-0.074	0.016
Na^+	0.892	-0.097	0.202
TDS	0.994	-0.011	0.068
NO_3^-	0.764	0.265	0.047
fCO_2	0.761	-0.09	-0.355
TH	0.975	-0.137	-0.022
HCO_3^-	0.621	0.721	-0.039
pH 值	-0.195	0.861	-0.062
特征值	7.122	2.332	1.113
方差贡献率/%	59.353	19.433	9.272
累积贡献率/%	59.353	78.786	88.058

2.4.2 评价结果

通过对主成分 F_1 、主成分 F_2 、主成分 F_3 的得分系数与相应的特征值 λ 占比之积的和,计算得到各指标在主成分综合得分系数 $F^{[26]}$,对其进行归一化处理,得到各指标的权重系数(表3)。然后通过与各指标进行线性加权得到研究区水样点的综合得分。

水质分析结果得分越高,表明水体质量越好(表4)。层次聚类是一种根据变量之间的距离或相似性在层次结构中排列变量的方法,能够将复杂的水体数据更好地聚类^[27]。聚类计算结果以聚类变量之间的距离或相似度的形式呈现,将两者结合能够更好地显示聚类分析结果,选取欧氏距离进行

表3 主成分得分系数矩阵及指标权重

Tab.3 Principal component score coefficient matrix and index weight

Table with 6 columns: 指标, 主成分 F1, 主成分 F2, 主成分 F3, 综合得分系数 F, 权重. Rows include Ca2+, K+, SO4-, Cl-, Mg2+, Na+, TDS, NO3-, fCO2, TH, HCO3-, pH值.

表4 研究区水质分析结果

Tab.4 Results of water quality analysis in the study area

Table with 15 columns: 点位, Ca2+, K+, SO4-, Cl-, Mg2+, Na+, TDS, NO3-, fCO2, TH, HCO3-, pH值, 综合得分, 排名. Rows list various water samples like HCS01, JXS01, YYS01, etc.

聚类,通过树状图中较高合并距离处的水平切割线可将研究区地下水化学参数分为4类(图6),HCO3-、K+、pH值各自为一类,其余离子为一类,这与主成分分析的结果具有高度的一致性。水样点分为3类,JXS05、JXS06、HCS04各自为一类,其余水样点为一类。水样点 JXS05、JXS06 综合得分最低,可能是由于集贤县南部山区附近正在开采的煤矿导致水中的NO3-、TDS、TH、Cl-等指标浓度的升高,从而使水体质量较低。水样点 HCS04 位于桦川县地势低洼处,地下水径流条件差,循环作用较弱,导致水中的有害物质不易扩散和稀释,另外该区域土地利用多为水田,化肥农药的使用容易污染地下水,也是地下水较差的另一原因。

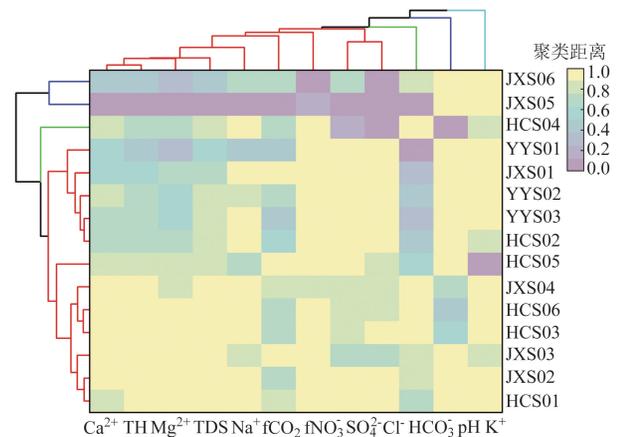


图6 研究区水样点及水化学参数的树状聚类热图 Fig.6 Tree cluster heat map of water sample points and hydrochemical parameters in the study area

3 结论

(1)研究区地下水 pH 值整体呈中性,部分地区呈弱酸性,阳离子 Ca^{2+} 在所有阳离子中占据主要地位, K^+ 的空间变异程度最高。 HCO_3^- 是主要的阴离子,其余阴离子具有较强的空间变异性。 S_{AR} 、 $\text{Na}\%$ 和 R_{sc} 3 个指标均指示地下水灌溉适宜性较好。地下水化学类型主要以 $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型为主,化学组分主要受岩石风化作用控制,阳离子交替吸附作用,主要表现为正阳离子交换作用,也是影响化学组分的重要机制。

(2)层次聚类分析将研究区地下水化学参数分为 4 类,水样点分为 3 类,桦川县、集贤县部分地区地下水水质较差, NO_3^- 浓度超标,地下水水质空间差异不仅受岩石风化、阳离子交换等自然过程控制,更与含水层结构和人类活动强度密切相关,建议加强矿区修复治理和优化农业管理措施,进一步保护和改善地下水资源。

参考文献 (References):

[1] Nguyen T G, Phan K A, Huynh T H N. Application of integrated-weight water quality index in groundwater quality evaluation[J]. Civil Engineering Journal, 2022, 8(11): 2661 - 2674.

[2] Kumar S, Sangeetha B. Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 10: 100297.

[3] 孟瑞芳, 杨会峰, 白华, 等. 海河流域大清河平原区地下水化学特征及演化规律分析[J]. 岩矿测试, 2023, 42(2): 383 - 395.

Meng R F, Yang H F, Bai H, et al. Chemical characteristics and evolutionary patterns of groundwater in the Daqing River Plain area of Haihe Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(2): 383 - 395.

[4] 王巧焕, 卢玉东. 内蒙古腰坝绿洲地下水化学特征及成因分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 81 - 88.

Wang Q H, Lu Y D. Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Yaoba Oasis of Inner Mongolia[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 81 - 88.

[5] 张浩, 张一丁, 黄彦, 等. 不同灌溉模式水稻耗水规律和生长特性研究[J]. 节水灌溉, 2023(4): 25 - 31.

Zhang H, Zhang Y D, Huang Y, et al. Study on water consumption and growth characteristics of rice under different irrigation modes[J]. Water Saving Irrigation, 2023(4): 25 - 31.

[6] 李晨洋. 三江平原井渠结合灌区水资源可持续利用对策[J]. 节水灌溉, 2013(1): 41 - 43.

Li C Y. Countermeasures for sustainable utilization of water re-

sources in well & canal combination irrigation district of Sanjiang Plain[J]. Water Saving Irrigation, 2013(1): 41 - 43.

[7] 吴泽新, 武瑶, 于叶翔, 等. 三江平原松花江流域地下水环境变化及其控制因素[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 38 - 42.

Wu Z X, Wu Y, Yu Y X, et al. Groundwater environment changes and control factors in Songhua River Basin of Sanjiang Plain[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(9): 38 - 42.

[8] 毛飞剑, 何义亮, 徐智敏, 等. 基于单因子水质标识指数法的东江河源段水质评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 327 - 331.

Mao F J, He Y L, Xu Z M, et al. Water quality evaluation of Heyuan reach of Dongjiang River based on the single factor water quality identification index[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5): 327 - 331.

[9] 傅金祥, 陈喆, 马兴冠, 等. 改良模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 环境工程, 2011, 29(6): 120 - 123, 127.

Fu J X, Chen Z, Ma X G, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in water quality assessment[J]. Environmental Engineering, 2011, 29(6): 120 - 123, 127.

[10] 高卫东. 基于主成分分析的矿区地下水水质评价[J]. 节水灌溉, 2009(4): 58 - 60.

Gao W D. Water quality evaluation of groundwater in mining area based on principal component analysis[J]. Water Saving Irrigation, 2009(4): 58 - 60.

[11] 杨磊磊, 卢文喜, 黄鹤, 等. 改进内梅罗污染指数法和模糊综合法在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 41 - 44.

Yang L L, Lu W X, Huang H, et al. Application of improved Nemerow pollution exponential method and fuzzy comprehensive evaluation method used in water quality assessment[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 41 - 44.

[12] 舒持恺, 杨侃, 王启明, 等. 河流健康评价中赋权方法的研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 61 - 65.

Shu C K, Yang K, Wang Q M, et al. Study on weighting method in river health evaluation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 61 - 65.

[13] 尹喜霖, 柏钰春, 王勇, 等. 三江平原地下水资源潜力评价[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 5 - 10.

Yin X L, Bai Y C, Wang Y, et al. Potential evaluation of groundwater resources of Sanjiang Plain in Heilongjiang Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(6): 5 - 10.

[14] 刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 等. 三江平原地下水流域演化趋势及影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 10 - 17.

Liu W P, Cui H Q, Liu W P, et al. An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 10 - 17.

[15] 张伟, 陈文彬, 李健, 等. 广安市平行岭谷区地下水化学特征及控制因素分析[J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 72 - 81.

Zhang W, Chen W B, Li J, et al. Groundwater chemical characteristics and analysis of the controlling factors in parallel ridge valley

- area of Guang'an City [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4):72–81.
- [16] 李泽岩, 曹文庚, 王卓然, 等. 内蒙古河套灌区浅层地下水水化学特征和灌溉适宜性分析[J]. 现代地质, 2022, 36(2):418–426. Li Z Y, Cao W G, Wang Z R, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability analysis of shallow groundwater in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2022, 36(2):418–426.
- [17] 邹嘉文, 刘飞, 张靖坤. 南水北调典型受水区浅层地下水水化学特征及成因[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5):2260–2268. Zou J W, Liu F, Zhang J K. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in typical water-receiving areas of the South-to-North Water Diversion Project [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5):2260–2268.
- [18] El-Rawy M, Fathi H, Abdalla F, et al. An integrated principal component and hierarchical cluster analysis approach for groundwater quality assessment in Jazan, Saudi Arabia [J]. Water, 2023, 15(8):1466.
- [19] 杨芳, 杨盼, 卢路, 等. 基于主成分分析法的洞庭湖水水质评价[J]. 人民长江, 2019, 50(S2):42–45, 58. Yang F, Yang P, Lu L, et al. Water quality assessment of Dongting Lake based on principal component analysis [J]. Yangtze River, 2019, 50(S2):42–45, 58.
- [20] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. Gao H X. Applied Multivariate Statistical Analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [21] Brindha K, Kavitha R. Hydrochemical assessment of surface water and groundwater quality along Uyyakondan channel, south India [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9):5383–5393.
- [22] 文冬光, 孙继朝, 何江涛, 等. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. Wen D G, Sun J C, He J T, et al. GB/T 14848—2017 Standard for Groundwater Quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 李晓波, 李杭, 杨宝萍, 等. 泰安市旧县水源地水化学特征及成因分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6):2002–2010. Li X B, Li H, Yang B P, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of water source area in Jiuxian County, Tai'an City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6):2002–2010.
- [24] 朱秀群, 蓝芙宁, 赵一, 等. 云南省南洞岩溶水系统水化学特征及其成因分析[J]. 人民长江, 2021, 52(5):37–43. Zhu X Q, Lan F N, Zhao Y, et al. Hydrochemical characteristics and causes of Nandong karst water system in Yunnan Province [J]. Yangtze River, 2021, 52(5):37–43.
- [25] 王建国, 周卫, 高顺宝, 等. 水-土相互作用对浅层地下水硬度升高的影响[J]. 中国矿业, 2012, 21(3):107–110. Wang J G, Zhou W, Gao S B, et al. Influence on increasing of shallow groundwater hardness with water-soil interaction [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(3):107–110.
- [26] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10):3187–3192. Liu X, Xue Y, Ji Y P, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. China Environmental Science, 2015, 35(10):3187–3192.
- [27] Taşan M, Demir Y, Taşan S. Groundwater quality assessment using principal component analysis and hierarchical cluster analysis in Alaçam, Turkey [J]. Water Supply, 2022, 22(3):3431–3447.

Groundwater quality evaluation in Huachuan – Jixian – Youyi area based on principal component analysis

HE Jinbao^{1,2}, LIU Hongbo¹, KONG Fanpeng¹, MAO Yongxin¹, ZHAO Jian¹

(1. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changchun Jilin 130000, China;

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China, Geological Survey, Shenyang Liaoning 110019, China)

Abstract: Huachuan – Jixian – Youyi area in Sanjiang Plain is a key grain-producing area in Heilongjiang Province, and its water resources are directly related to agricultural production and ecological security. The demand for water resources continues to increase with the rapid development of industry and agriculture, leading to a series of problems such as declining groundwater levels and deteriorating water quality. The clarification of chemical characteristics, and the influencing factors of water quality, is of great significance to maintaining agricultural stability and sustainable development. Through collecting 15 groundwater samples in the field, the authors analyzed the groundwater chemical characteristics and causes by combining statistical analysis, piper trilinear diagram, hierarchical cluster analysis, principal component analysis, chlor-alkali index, etc., and evaluate the groundwater quality. Sodium adsorption ratio (S_{AR}), soluble sodium percentage ($Na\%$), and residual sodium carbonate (R_{SC}) all showed good suitability for groundwater irrigation in the area. The main hydrochemical type was Ca^{2+} –

HCO₃⁻ type and locally Ca²⁺ - Cl⁻ type. The chemical composition of groundwater was mainly controlled by rock weathering, with the main ions derived from the dissolution of rock salt and soluble carbonates such as calcite and dolomite. And the chlor - alkali index indicated that cation exchange also affected the formation of groundwater chemical components. The results of the water quality evaluation showed that the groundwater quality in Huachuan County and Jixian County was poor, and the NO₃⁻ concentration exceeded the standard seriously. The overstandard was not only affected by natural factors, but also related to the use of chemical fertilizers and pesticides, mining and other human activities. The study results could provide references for the rational development and management of groundwater resources.

Keywords: Sanjiang Plain; principal component analysis; hierarchical cluster analysis; groundwater; water quality evaluation

(责任编辑: 王晗)