

水文地质

潮州飞天燕矿区地下水化学特征及成因分析

Chemical Characteristics and Genesis Analysis of Groundwater in the Feitianyan Mining Area, Chaozhou

谢永海, 刘建平 (广东省地质局惠州地质调查中心, 广东 惠州 516023)

摘要:为研究潮州飞天燕矿区地下水的化学特征及其成因,采集了15组地下水样品,并对其进行了常规离子的测试(包括pH值、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS等)。通过运用SPSS软件和Origin软件,进行了数理统计分析、Piper三线图绘制、Gibbs图模型分析、离子比值分析、相关性分析以及因子分析等多维度的方法研究,以揭示地下水的水化学成分类型及其演化过程的控制因素。研究表明:(1)研究区地下水pH值呈弱酸性,水体阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主,地下水以 $HCO_3 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型水为主,其次为Cl-Na型水,少量的 $Cl \cdot SO_4-Na$ 、 HCO_3-Na 型水。(2)研究区地下水主要的离子组成受到水-岩相互作用的影响,离子来源于硅酸盐矿物的风化以及蒸发盐矿物的溶解,还有阳离子的交替吸附作用;此外,人类活动影响下的大气降水也是影响水化学成分的主要贡献因子。

关键词:地下水;水化学特征;水质类型;成因分析

中图分类号:TD167 文献标志码:A 文章编号:1672-609X(2025)03-0103-07

Abstract:To study the chemical characteristics and genesis of groundwater in the Feitianyan mining area of Chaozhou, 15 sets of groundwater samples were collected and subjected to conventional ion testing (including pH value, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , TDS, etc.). Through the use of SPSS software and Origin software, multidimensional methods such as mathematical statistical analysis, Piper trilinear plot drawing, Gibbs plot model analysis, ion ratio analysis, correlation analysis, and factor analysis were conducted to reveal the hydrochemical composition types of groundwater and the controlling factors of their evolution process. The results show that:(1)The pH value of groundwater in the study area is weakly acidic. The cations in the water body are mainly Na^+ , and the anions are mainly HCO_3^- . The groundwater is mainly $HCO_3 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ type water, followed by Cl-Na type water, a small amount of $Cl \cdot SO_4-Na$, HCO_3-Na type water. (2)The main ion composition is influenced by the interaction between water and rock, with ions originating from the weathering of silicate minerals and the dissolution of evaporite minerals, as well as the alternating adsorption of cations; In addition, atmospheric precipitation under the influence of human activities is also a major contributing factor to the chemical composition of water.

Key words:groundwater; hydrochemical characteristics; water quality type; genesis analysis

1 前言

地下水是地球水资源的重要组成部分,它在人们的生产生活中扮演着不可替代的角色。然而,随着人类活动的加剧,特别是在矿产资源的开采过程中,地下水的化学特征会发生变化,进而影响到地下水的可持续利用和生态环境的健康。而地下水的化学成分是评价其环境的重要指标。

近几年,学者们主要采用数理统计法和离子分

析等方法,使用Piper三线图、Gibbs图、离子比例系数等对地下水的化学特征及其形成原因进行了深入研究。这些离子的存在形态和变化趋势可以反映出地下水的化学性质和可能的成因。地下水的化学成分特征是由多种因素共同影响的。例如,李政等^[1]在研究石家庄平原区的浅层地下水时,观察到主要的水化学类型为 HCO_3-Ca_4-Mg 型和 $HCO_3-SO_4-Ca \cdot Mg$ 型,这些类型的形成主要受到盐岩风化作用的影响。此外,阳离子交替吸附作用以及人类活动也对地下水的化学成分产生了一定影响,但在这一过程中,岩石风化作用作为一种自然因素,起到了决定性的作用。同样,夏玉婷^[2]等在芦岭矿区进行的研究中,对塌陷湖和浅层地下水的水化学特征及其成因进行了深

[作者简介] 谢永海(1987—),男,工程师,主要从事地质勘查、水工环地质、地质安全防治工作。

[引用格式] 潮州飞天燕矿区地下水化学特征及成因分析[J]. 中国矿山工程,2025,54(3):103-109.

入分析,发现水化学类型主要为 NaHCO_3 型,这主要是离子交换作用的结果,然而,人类活动在一定程度上改变了地下水的化学特性。杨露梅等^[3]在苏州吴江区进行的浅层地下水研究中,发现地下水的主要离子主要受自然过程的调控,但人类活动也对某些离子的富集产生了显著影响,例如,高浓度的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^{++} 有助于 I^- 在地下水中的富集。

综合以上研究,我们可以得出,地下水的化学特性是由多重因素共同作用的结果,其中包括自然地理条件和人类活动的直接影响。自然地理因素,如地质结构、气候条件和降水输入等,构成了地下水化学特性形成的基础条件。而人类活动,如工业排放、农业活动和城市化等,则在这些自然基础上起到了加速或改变的作用,从而导致地下水化学成分和浓度的变化。

飞天燕矿区位于潮州市湘桥区,周边为居民生活区,拥有百年的开采历史。在过去,该矿区的发展重点一直是开发矿产资源,但长期以来,由于开采活动的不规范,对地下水系统的关注和保护工作相对较弱。这不仅影响了地下水资源的可持续利用,也为周边环境和居民的安全带来了潜在风险。因此,对飞天燕矿区地下水系统的状况进行系统的评估和改善,已成为该矿区可持续发展的重要任务之一。本文通过对矿区地下水和地表水进行采样和分析,并运用数理统计方法进行因子分析,反演影响地下水化学指标的主要因素,运用离子分析法,分析其地下水成因来源。这一研究,可作为矿区水资源的合理开发利用和保护的科学依据。

2 研究区概况

飞天燕矿山位于潮州市郊,桥东街道管辖,交通便利。矿区地处丘陵地貌,临近海洋,属亚热带海洋性季风气候,气候温和,雨量充沛。周边地表水系不发育,最大地表水系为矿区西侧的洗马河,矿区内地表水系较发育,以积水坑为主,并有少量季节性冲沟。

矿山拥有百年开采历史,潮安断裂贯穿矿区,构造裂隙极其发育。矿区出露一套上侏罗统高基坪群酸性火山喷发沉积碎屑岩,其岩性为细屑凝灰岩、熔结凝灰岩、碳酸盐化凝灰岩等,矿物成份以石英、长石、黑云母等为主。研究区含水层主要为第四系冲洪积含水层、残坡积及风化层弱透水层和基岩裂隙弱含水层。第四系冲洪积层含水层,主要分布于研

究区外围洗马河两岸低洼处,土体一般为砂质黏土、粉质黏土,分选性差,结构松散,厚度一般在 1.0 ~ 11.0 m。残坡积及风化层弱透水层分布于研究区表层,岩性为粉质黏土、碎石土,整体厚度 0 ~ 3.5 m,平均厚度约为 0.85 m。基岩裂隙弱含水层主要赋存于凝灰岩的裂隙带中。地下水补给来源主要为大气降水垂直补给,地下水径流沿着孔隙、裂隙由高处往低处运动,再以渗流形式排泄到矿区外部的洗马河。

3 样品采集与分析方法

为分析研究矿区周边地下水化学类型,本次研究共计收集矿山地质勘探工作采集的 15 组地下水样品分析测试数据。测试分析主要为常规离子组成,即 pH 值、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ (K^+ 合并 Na^+)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、TDS、总硬度等指标。对水样结果进行碳酸平衡、电荷平衡、离子总量平衡等数据处理筛选后,用于本次数据分析的样品共计 13 组:其中地表水样品 4 组,采集于洗马河的第四系冲洪积含水层;浅层地下水样品 9 组,采集于矿坑和深约 3 m 的民井的残坡积及风化层弱透水层。研究区位置及采样点位如图 1 所示。

本次研究使用 SPSS 软件对样品数据主要离子浓度进行描述性统计分析和相关性分析,使用 Origin 软件绘制 Piper 三线图、Gibbs 图、离子比例系数散点图、相关性热图,以此来判别研究区的地下水化学类型和进行离子来源成因分析。

4 研究结果分析

4.1 地下水化学特征

1) 地下水组成特征

研究区地下水样品测试结果统计表见表 1,矿区地下水 pH 值平均为 5.91,呈弱酸性,TDS 含量平均值为 38.37 mg/L,属淡水。从变异系数来看,pH 值最小,表明研究区水环境稳定处于弱酸性,与当地弱酸性水土环境一致, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 变异系数较大,说明离子含量受到一定的人为活动影响。从水化学组分箱图(图 2)来看,水体阳离子以 Na^+ 为主,且 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$,阴离子以 HCO_3^- 为主,且 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。此外还在部分地表水和(民井)浅层地下水中检测到 NO_3^- 、 NO_2^- 离子,也说明了人类活动对水体的影响。浅层地下水与地表水主要阴阳离子浓度关系密切,说明其补给来源密切相关。

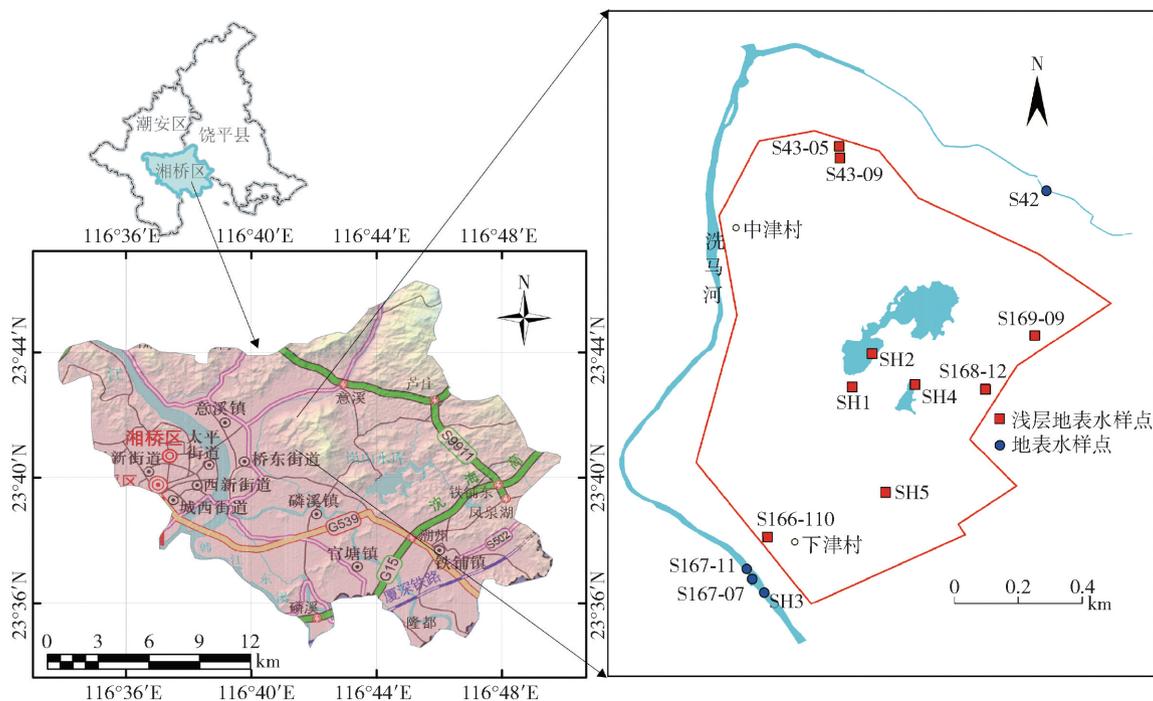


图1 研究区位置及采样点位图

表1 研究区地下水化学组分描述性统计表

组类	项目	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS
地表水	最小值	2.97	4.81	0.00	3.00	0.98	8.40	6.30	22.00
	最大值	12.20	7.40	0.88	9.71	5.20	30.75	6.90	53.63
	平均值	8.32	5.74	0.34	6.81	3.80	20.24	6.58	43.42
	标准差	3.91	1.19	0.38	2.80	1.95	9.16	0.26	14.46
	变异系数	0.47	0.21	1.10	0.41	0.51	0.45	0.04	0.33
浅层地下水	最小值	2.96	0.29	0.00	1.50	0.20	1.27	4.77	11.00
	最大值	14.40	8.82	0.25	18.93	10.40	33.32	6.50	69.43
	平均值	7.93	3.23	0.10	8.15	2.74	12.55	5.61	36.13
	标准差	3.54	3.33	0.11	5.88	3.13	10.41	0.56	20.58
	变异系数	0.45	1.03	1.07	0.72	1.15	0.83	0.10	0.57
总计	最小值	2.96	0.29	0.00	1.50	0.20	1.27	4.77	11.00
	最大值	14.40	8.82	0.88	18.93	10.40	33.32	6.90	69.43
	平均值	8.05	4.00	0.18	7.74	3.06	14.92	5.91	38.37
	标准差	3.49	3.03	0.24	5.04	2.79	10.34	0.66	18.62
	变异系数	0.43	0.76	1.35	0.65	0.91	0.69	0.11	0.49

注:表中数据 pH 值无量纲,其余数据单位为 mg·L⁻¹。

2) 地下水化学类型特征

为揭示研究区地下水化学阴阳离子的浓度关系,直观反映其水化学类型特征、相对含量及空间位置,绘制 piper 三线图进行统计分析,具体如图3所示。由图3可知,地表水以 HCO₃·Cl-Na·Ca 型水为

主,浅层地下水以 HCO₃·Cl-Na·Ca 型水为主,其次为 Cl-Na 型水,少量的 Cl·SO₄-Na, HCO₃-Na 型水。对于地下水而言,水化学组分受多种因素影响,主要因素是溶解程度。而水量影响较大的补给区域,其水化学类型主要为 HCO₃型,随着往排泄区转移,其

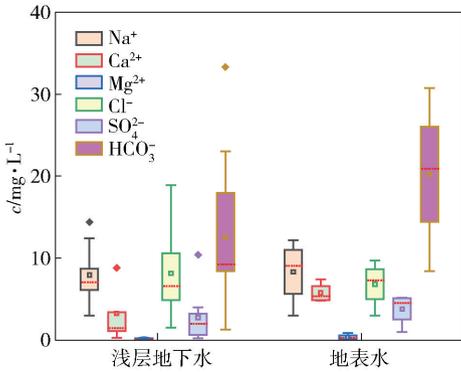


图2 研究区地下水化学组分箱图

水量逐渐减少,水化学类型转变为Cl型水。这种特征表明,研究区整体处于补给区域和排泄区域的过渡地带。

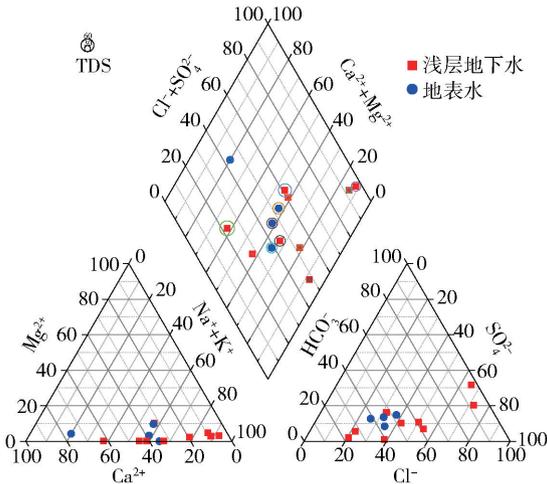
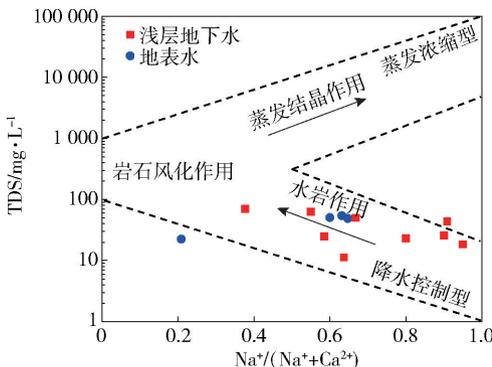


图3 研究区地下水 Piper 三线图

4.2 地下水成因分析

1) 地下水 Gibbs 图

通过 Gibbs 图,我们可以定性分析地下水的化学组成,并判断它们是否受蒸发浓缩、岩石风化或者



大气降水作用的影响^[4]。Gibbs 图为 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 与 TDS 关系图, $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 与 TDS 关系图。通过(图4)分析,研究区地下水 TDS 值较小,在 11 ~ 69 mg/L 之间, $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 比值大部分大于 0.5, $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值大部分小于 0.5,全部样品基本位于岩石风化作用和降水控制作用中间区域,这表明研究区的主要离子成分是水岩作用共同决定的,主要是有岩石的风化溶解和大气降水所导致的。在使用 Gibbs 图进行数据分析时,我们注意到有一部分数据点落在图中的区域外。这种现象可能与人类活动的影响有关,这需要我们进一步的研究和探讨。

2) 离子比值分析

由于地下水的离子来源主要为水岩相互作用,因此可以用离子之间的相互比值关系来探讨水岩作用的具体类型^[5]。从图5(a)和图(b)可以看出,研究区地下水水岩作用的主要类型为硅酸盐矿物风化以及蒸发盐矿物的溶解,但也有部分样品往碳酸盐矿物溶解方向偏移,表明研究区也有少量的碳酸盐矿物溶解作用,这与研究区具有碳酸盐化凝灰岩矿物是一致的。

Na^+ 和 Cl^- 主要是来源于岩盐的溶解, Na^+/Cl^- 能反映出两种离子的来源,是判定地下水成因的一个重要指标^[6]。 Cl^- 在地下水中非常稳定,在未受人类活动影响下, Na^+/Cl^- 一般在 1 左右,从图5(c)可以看出, Na^+/Cl^- 比值全部落在 1:1 线上部,表明地下水受蒸发盐矿物(NaCl)溶解作用较小,过多的 Na^+ 需要硅酸盐矿物风化溶解或者阳离子交换作用,这与研究区含有大量的硅酸盐矿物(长石)是一致的。根据以上分析,研究区地下水主要发生的风化反应为:

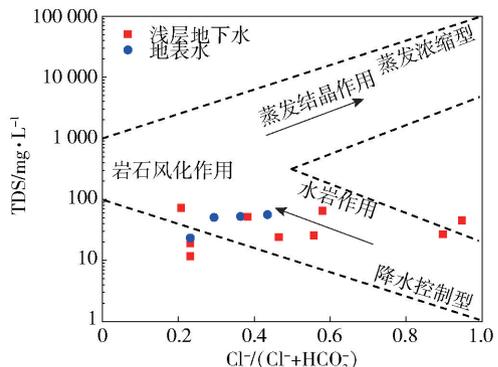
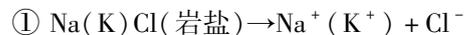
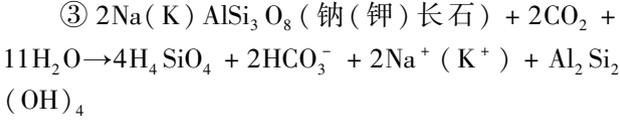
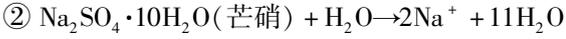


图4 研究区地下水化学 Gibbs 图



地下水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源,通常采用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 比值确定。当两者比值接近 1 时,表明其主要来自碳酸盐和硅酸盐矿物溶解^[7]。从图 5 (d) 可以看出, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 比值基本落在 1:1 线下部,表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源碳酸盐的溶解,而地表水有单个样品落在 1:1 线上部,可能受到人类活动污染

所致。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/\text{HCO}_3^-$ 比值关系可以判定方解石、白云石等碳酸盐类矿物对区内地下水 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的影响程度^[8]。从图 5 (e) 可以看出, $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/\text{HCO}_3^-$ 比值的 1:2 线为方解石溶解线,1:4 线为白云石溶解线。研究区地下水基本落在 1:2 线上部,表明碳酸盐矿物主要是方解石矿物。

3) 阳离子交替吸附作用

阳离子交替吸附作用是一种常见的地下水化学过程,其中主要涉及到的是阳离子的吸附和解吸。阳离子交替吸附作用在离子分析和地下水化学特征

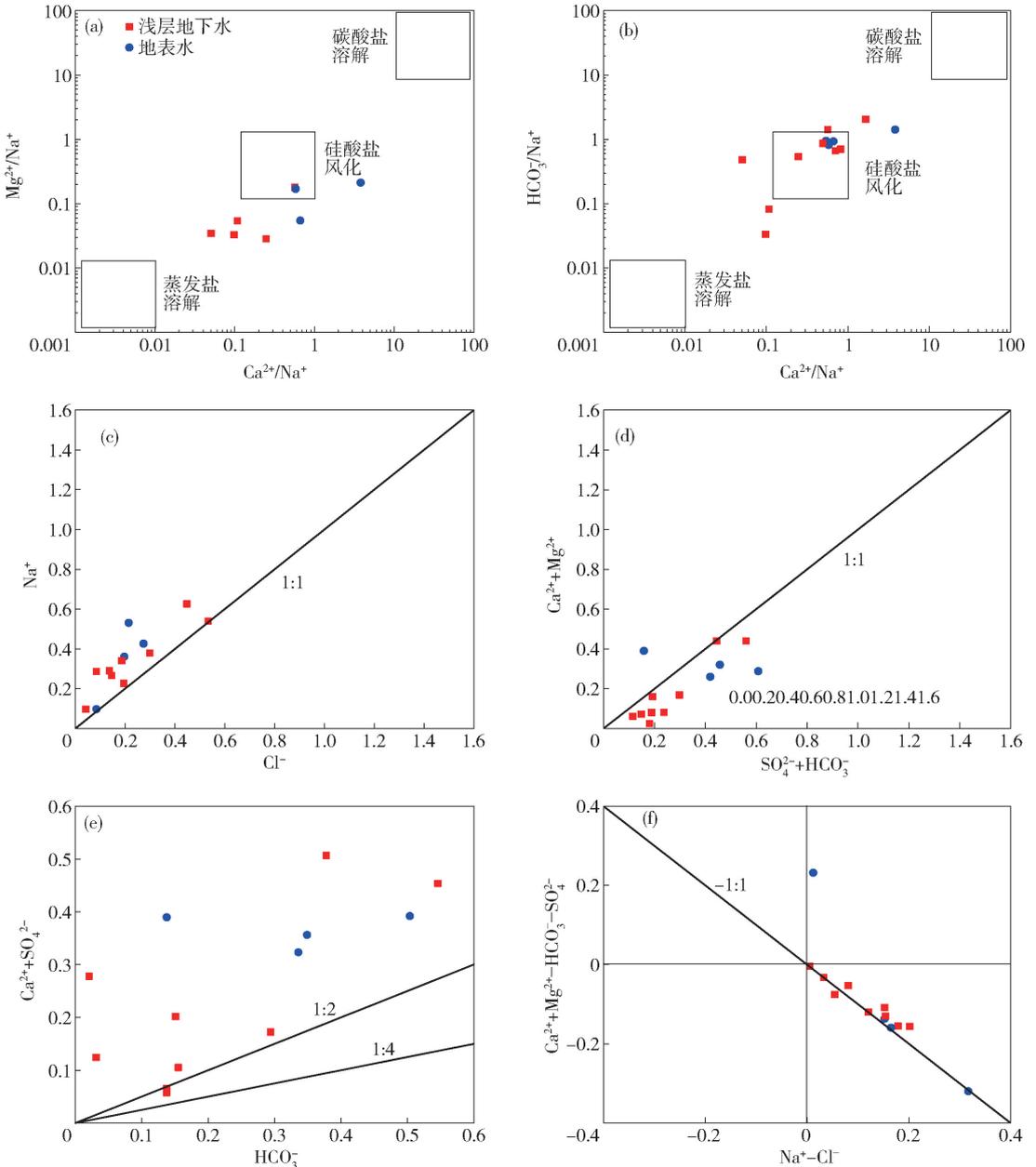


图5 研究区地下水离子毫当量浓度 (meq·L⁻¹) 关系图

研究中具有重要的作用,它可以揭示地下水离子的迁移性、地球化学背景,反映地下水的化学不平衡性。水体中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 的毫克当量浓度关系可以表征水样受离子交换作用影响的大小^[9]。从图 5(f)可以看出, $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ 比值相关性良好,接近于 -1:1,表明研究区地下水存在一定程度的阳离子交换作用,其反应公式为: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{NaX} \rightarrow 2\text{Na}^+ + \text{CaX}_2$ 。这也验证了前文过多的 Na^+ 也受离子交换作用的影响。

地下水化学演化过程中的离子交换强度可以根

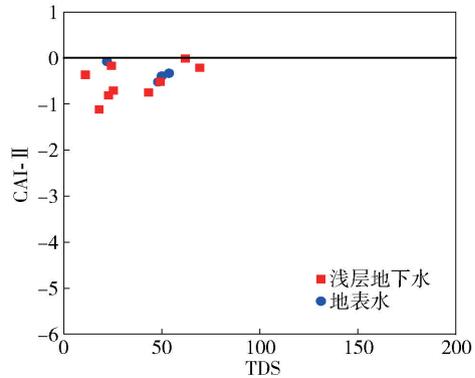
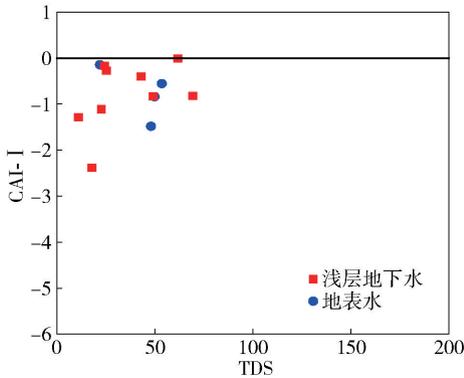


图 6 研究区地下水氯碱指数与 TDS 关系图

4.3 因子分析

相关性分析是表征变量间线性相关程度强弱的一种常用统计方法。通过线性相关分析研究两个变量间的线性关系,相关系数是描述这种线性关系程度和方向的统计量,利用 Origin 软件计算离子变量间的相关系数^[11],并绘制相关性热图,具体如图 7 所示。从图 7 可以看出, Na^+ 、 Cl^- 、TDS 表现出极显著正相关,说明两者有共同的来源,一般是来自蒸发岩矿物溶解, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、TDS 表现出正相关,反映碳酸盐岩溶解。统计数据显示, TDS 与多种阴阳离子的相关性分析表明, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 这四种离子与 TDS 的相关系数均大于 0.5 ($r > 0.5$),这表明这些离子是研究区地下水中最主要的化学组分,且与 TDS 之间存在显著的正相关关系。这一结果有力地指示了该区域地下水的化学特征:以 HCO_3^- 和 Cl^- 为阴离子,以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为阳离子的水化学类型 ($\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水),这一结论与先前研究结果高度一致。

在水文地球化学研究中, R 型因子分析可以去除水化学指标中重复的成分,提取出来的每一个主因子都指示一种水化学特征的成因^[11]。本次研究

据地下水氯碱指数 (CAI) 进行判别,若地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换 Na^+ ,即发生正阳离子交换作用,则 CAI-I、CAI-II 均小于 0;若地下水中 Na^+ 置换 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,即发生逆向阳离子交换作用,则 CAI-I、CAI-II 均大于 0^[10]。氯碱指数 CAI-I、CAI-II 计算公式为: $\text{CAI-I} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{Cl}^-$ 、 $\text{CAI-II} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / [\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-]$ 。从图 6 可以看出,研究区地下水 CAI-I、CAI-II 处于 -2.5 ~ 0 之间,其水化学阳离子发生正向的交换作用,但其指数的绝对值不大,说明阳离子交换作用的强度不大。

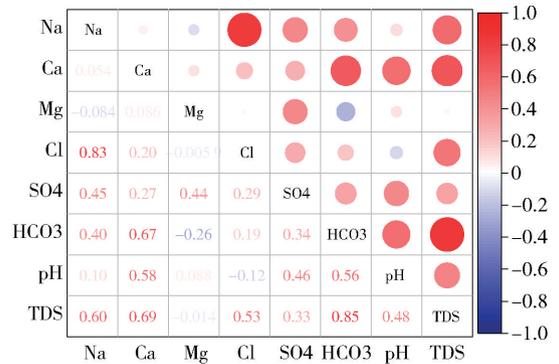


图 7 研究区地下水主要离子变量相关性热图

利用 SPSS 软件分别对研究区的水样品的七个水化学指标进行 R 型因子分析。从表 2 可以看出,第一主因子以 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS 为主,其方差贡献率为 44.475%, Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 除蒸发岩的溶解外,随着人类活动的影响,输入了一定的离子。因此因子 1 主要反映受人类活动影响下的大气降水对水化学成分的控制作用。第二主因子以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、TDS 为主,其方差贡献率 32.185%,主要反映碳酸盐矿物溶解对水化学成分的影响。

表2 地下水影响因子载荷矩阵

指标项	因子1	因子2
Na ⁺	0.853	0.421
Ca ²⁺	0.538	-0.724
Mg ²⁺	0.099	0.393
Cl ⁻	0.814	0.377
SO ₄ ²⁻	0.606	0.724
HCO ₃ ⁻	0.541	-0.759
TDS	0.874	-0.394
初始特征值	3.113	2.253
方差贡献率/%	44.475	32.185
累计方差贡献率/%	44.475	76.660

5 结论

(1)研究区地下水 pH 值呈弱酸性,水体阳离子以 Na⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主,地下水以 HCO₃·Cl-Na·Ca 型水为主,其次为 Cl-Na 型水,少量的 Cl·SO₄-Na、HCO₃-Na 型水。研究区整体处于补给区域和排泄区域的过渡地带。

(2)研究区的主要离子成分是水岩作用共同决定的,主要是有岩石的风化溶解和大气降水所导致的。水岩作用的主要类型为硅酸盐矿物风化以及蒸发盐矿物的溶解,也有少量的碳酸盐矿物溶解作用。溶解的碳酸盐矿物主要为方解石。同时 Na⁺ 离子还受到了正向的交替吸附作用影响。

(3)通过因子分析,研究区地下水化学组成贡献,第1因子主要反映受人类活动影响下的大气降

水对水化学成分的控制作用,第2因子主要反映碳酸盐矿物溶解对水化学成分的影响。

[参考文献]

- [1] 李政,范成博,尚琳群,等. 石家庄平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 河北地质大学学报, 2023(3):71-79.
- [2] 夏玉婷,张攀,王超. 芦岭矿区塌陷湖与浅层地下水水化学特征及形成机制[J]. 绿色科技, 2024(22):191-196.
- [3] 杨露梅,武鑫,许书刚,等. 苏州吴江区浅层地下水水化学特征及成因分析[J]. 地质论评, 2025(2):537-547.
- [4] 高帅,李常锁. 济南趵突泉泉域岩溶水化学特征时空差异性研究[J]. 地质学报, 2019, 93(S1): 61-70.
- [5] 刘谭杰,许光泉. 淮南矿区地下水化学组成及其水文地质意义[J]. 自然科学, 2020, 8(3):104-111.
- [6] 李田田,闵宁. 宿州芦岭矿区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 自然科学, 2024, 12(2):343-350.
- [7] 苏东,龚绪龙. 常州市地下水化学特征与成因分析[J]. 地质论评, 2023, 69(3):1039-1049.
- [8] 卢丽,陈余道. 岩溶区典型工业型城市地下水水化学特征及成因机制[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4):588-598.
- [9] 刘江涛,蔡五田. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5428-5439.
- [10] 倪泽华. 新会区地下水水化学特征及成因[J]. 陕西水利, 2022(7):124-128.
- [11] 贾超,王丛. 济南西部冲积平原地下水水文地球化学特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(3):49-60.