

DOI: 10.6053/j.issn.1001-1412.2025.04.004

阮传侠, 刘志龙, 邵炳松, 等. 渤海湾盆地沧县隆起北部蓟县系雾迷山组热储地热流体化学特征[J]. 地质找矿论丛, 2025, 40(4): 474-482.

RUAN Chuanxia, LIU Zhilong, SHAO Bingsong, et al. Chemical Characteristics of Geothermal Fluid in the JiXian System Wumishan Reservoir in the Northern Part of Cangxian Uplift, Bohai Bay Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2025, 40(4): 474-482.

## 渤海湾盆地沧县隆起北部蓟县系雾迷山组热储 地热流体化学特征

阮传侠<sup>1,2</sup>, 刘志龙<sup>1,2,3,\*</sup>, 邵炳松<sup>1,2</sup>, 董路飞<sup>1,2</sup>, 胡志明<sup>1,2</sup>

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 2. 自然资源部天津中低温野外科学观测研究站, 天津 300250;

3. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 本文以研究中国东部渤海湾盆地沧县隆起北部天津地区雾迷山组地热流体的化学特征和径流模式为目的, 系统分析了研究区63眼雾迷山组地热流体水化学数据, 运用统计分析和综合研究方法, 分析了研究区不同构造单元雾迷山组地热流体的水化学类型、主要离子组分含量、离子来源、离子变化规律等, 探讨了研究区雾迷山组地热流体的径流方向和特征分析, 认为地热流体主要来源于北部山区的大气降水, 入渗后向南、向东径流, 径流过程中 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量逐渐升高, 溶解性总固体(TDS)逐渐增大, 水-岩反应过程随径流过程持续发生, 但水-岩反应平衡度仍然偏低, 未达到平衡状态。汉沽断裂、海河断裂、白塘口西断裂与白塘口东断裂均为导水断裂, 而白塘口凹陷的存在也并未改变雾迷山组地热流体的径流方向。

**关键词:** 渤海湾盆地; 地球化学; 雾迷山组; 地热流体; 径流; 天津

中图分类号: P314.1; P641.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-1412(2025)04-474-9

## Chemical Characteristics of Geothermal Fluid in the JiXian System Wumishan Reservoir in the Northern Part of Cangxian Uplift, Bohai Bay Basin

RUAN Chuanxia<sup>1,2</sup>, LIU Zhilong<sup>1,2,3,\*</sup>, SHAO Bingsong<sup>1,2</sup>, DONG Lufei<sup>1,2</sup>, HU Zhiming<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China; 2. Observation and Research Station of Tianjin Low-Medium Temperature Geothermal Resources, MNR, Tianjin 300250, China; 3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming to study the chemical characteristics and runoff pattern of geothermal fluid in the Wumishan reservoir in the Cangxian Uplift area of the Bohai Bay Basin in eastern China, this paper systematically analyzed the hydrochemical data of geothermal fluids from 63 geothermal wells in the Wumishan reservoir within the study area. By adopting statistical analysis and comprehensive research methods, the paper obtained information on hydrochemical types, major ion concentrations, ion sources, and ion variation laws of the geothermal fluid in the Wumishan reservoir across different tectonic units in the study area. Additionally, it discussed the runoff direction and characteristics of the geothermal fluid in the Wumishan reservoir. The study concludes that the geothermal fluid originates from atmospheric precipitation in the northern mountainous areas; after infiltration, it runs off southward and eastward. During the runoff process, the contents of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  increase gradually, and the Total Dissolved Solids (TDS) also increase progressively. The water-rock reaction process occurs continuously along side the runoff process, yet the degree of water-rock reaction equilibrium remains low, far from a balanced state. All boundary

收稿日期: 2025-09-08; 修回日期: 2025-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目“雄安新区深部热储层多参数渗流-传热机理研究”(42272308)资助。

作者简介: 阮传侠(1978-), 女, 正高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为地热地质、地热资源勘查评价等。E-mail: chxruan@163.com。

\*通讯作者: 刘志龙(1989-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事地热资源勘查、评价与开发工作。E-mail: lzl\_tjdry@163.com。

faults of the tectonic units are water-conducting faults, and the existence of these water-conducting faults and depression areas does not alter the runoff direction of the geothermal fluid in the Wumishan reservoir.

**Keywords:** Bohai Bay Basin; geochemistry; Wumishan Reservoir; geothermal fluid; runoff; Tianjin

能源不仅支撑着现代社会的运转,更在悄然塑造着人类文明的走向。2014年,“四个革命、一个合作”的能源安全新战略,成为新时代中国能源事业谋篇布局的坐标系与导航仪。2020年我国提出“双碳”目标,在国内外引发广泛关注。为实现我国“双碳”目标,清洁可再生能源将发挥不可替代的作用。在“双碳”目标背景下,地热产业进入了新一轮快速发展期,在能源变革背景下具有独特的“先发优势”(王辉等,2025)。

研究区位于天津市南部平原区,面积约9 620 km<sup>2</sup>,大地构造单元属于华北板块东部渤海湾盆地的次级构造单元沧县隆起,其包括王草庄凸起、潘庄凸起、小韩庄凸起、双窑凸起和白塘口凹陷5个IV级构造单元(图1,表1)。天津位于华北平原北部,地热资源赋存条件良好,其中蓟县系雾迷山组(J<sub>xw</sub>)热储厚度大、温度高、水量大(江国胜等,2025)。研究蓟县系雾迷山组地热流体水化学特征、分布规律、形成及运移条件等,这对实现天津地区蓟县系雾迷山组地热资源的科学合理开发具有重要意义。

沧县隆起北部地热流体化学特征研究资料较为丰

富。岳冬冬等通过对天津山岭子地热田雾迷山组地热流体同位素特征分析研究,总结了天津山岭子地热田雾迷山组地热流体起源与形成机理(岳冬冬等,2023)。王冰等研究了天津主要热储层地热流体地球化学特征、同位素特征和补给条件(王冰等,2023)。王婷灏等研究了沧县隆起北部地热资源赋存特征,研究了区内馆陶组、奥陶系和蓟县系雾迷山组三套热储层的水化学类型,评价了该区地热资源潜力(王婷灏等,2022)。宋美钰等研究了天津地热流体在水平和垂直方向上的特征(宋美钰等,2018)。赵娜等重点研究了天津东丽湖地区地热流体的化学特征,从水化学角度出发阐述了东丽湖地区蓟县系雾迷山组地热流体的赋存环境等(赵娜等,2016)。李俊峰等研究了天津地区蓟县系雾迷山组热储层的水文地球化学特征及其动态变化规律,进而阐明了地热流体的形成和运移特征(李俊峰等,2008)。

本文在前人研究基础上,通过分析沧县隆起北部天津地区63组蓟县系雾迷山组地热流体测试结果,综合分析蓟县系雾迷山组地热流体的水化学组分和离子特征,讨论热储平衡状态与地热流体径流模式,这对研究该区

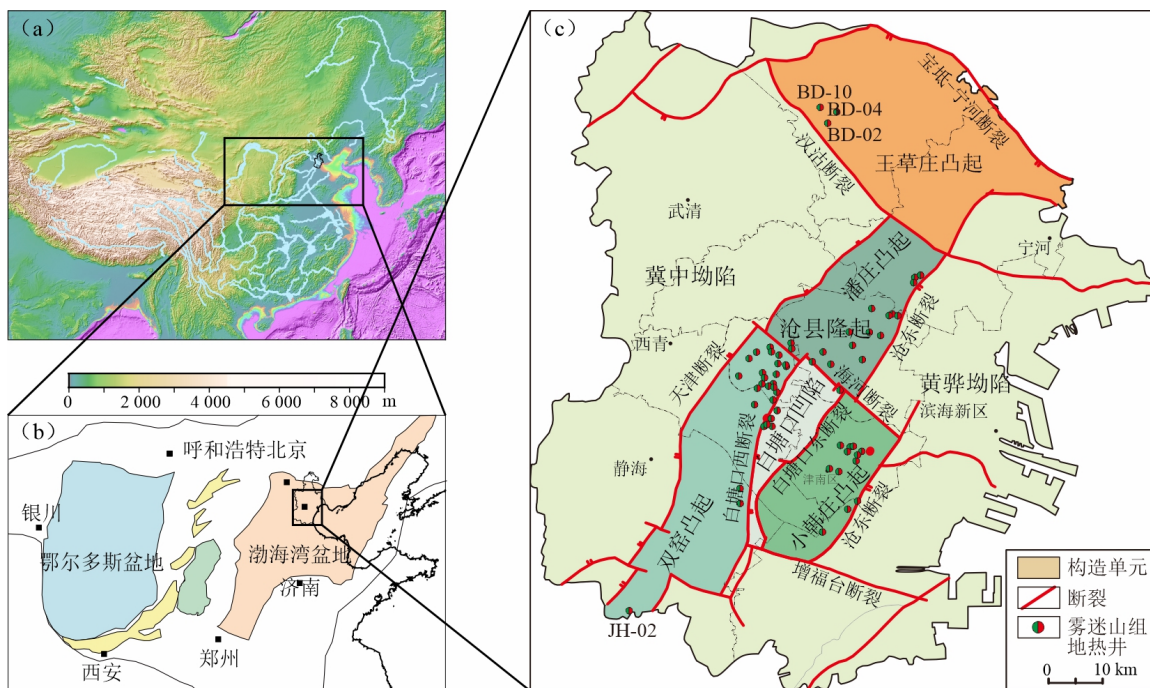


图1 研究区大地构造位置图

Fig.1 Tectonic location map of the study area

(a) 中国大陆高程图; (b) 华北板块主要构造单元; (c) 沧县隆起北部构造单元划分及采样点位图

注:图1b修改自文献(Liu et al., 2016)

域蓟县系雾迷山组地热流体来源提供了新思路。

表1 研究区构造单元一览表  
Tab.1 Tectonic units in the study area

Ⅲ级	Ⅳ级	边界断裂	基岩顶面岩性时代	埋深/m
沧县隆起	王草庄凸起	北:宝坻-宁河断裂 南:汉沽断裂 东:沧东断裂 西:古近系缺失线	元古界、寒武系、奥陶系、石炭系-二叠系	800~1 500
	潘庄凸起	北:汉沽断裂 南:海河断裂 东:沧东断裂 西:天津断裂	元古界、寒武系、奥陶系	1 000~1 600
	双窑凸起	北:海河断裂 东:白塘口西断裂 西:天津断裂	元古界、寒武系、奥陶系、石炭系-二叠系	800~1 800
	小韩庄凸起	北:海河断裂 南:增福台断裂 东:沧东断裂 西:白塘口东断裂	寒武系、奥陶系、石炭系-二叠系	880~1 200
	白塘口凹陷	北:海河断裂 南:增福台断裂 东:白塘口东断裂 西:白塘口西断裂	中生界	1 300~1 500

## 1 地质背景与开发利用现状

### 1.1 构造

渤海湾盆地是华北板块内部的一个中、新生代盆地,东界为郟城-庐江断裂带,西界为太行山东麓断裂带,北靠燕山造山带,南为鲁西地块。渤海湾盆地内部垂向结构复杂,经历了多期次的成盆作用,伴生出一系列北北东、北东向断裂,形成凹凸相间的构造格局(Liang et al., 2016; Yu et al., 2016; Zhao et al., 2016; Zhang et al., 2020; Luo et al., 2021; Li et al., 2024)。沧县隆起位于渤海湾盆地中北部,总体上位于渤海湾盆地基底隆起部位,走向为NE向,北部边界为宝坻-宁河断裂,东部边界为沧东断裂,西部边界为天津断裂(Lu et al., 2018; Duan et al., 2024; Wu et al., 2024)。

### 1.2 地层

沧县隆起地层似一部被岁月撕掉几页的“岩性史书”:太古界-元古界变质岩作“底”,其上的中新元古界-新生界依次叠置。由老到新,中新元古界以滨海-浅海相碳酸盐为主,古生界寒武系-奥陶系以滨海相白云岩、灰岩为主,石炭系-二叠系以海陆交互相煤碎屑岩为主,中生界以内陆杂色碎屑岩为主,新生界以陆相砂泥岩为主。

### 1.3 热储层

蓟县系雾迷山组在沧县隆起广泛分布,根据岩石类

型、沉积构造、叠层石形态及电性特征,可将沧县隆起雾迷山组划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个岩性段,分别代表三个沉积旋回,每一个旋回均呈现潮上、潮间、潮下的海进层序(高知云,1995)。蓟县系雾迷山组沉积环境为典型的浅水陆表海潮坪沉积环境,岩性以白云岩和硅质白云岩为主,顶部发育叠层石礁体,孔洞较为发育(李俊峰等,2008)。

### 1.4 开发利用现状

2024年,天津市共有地热开采井339眼,回灌井308眼,水热型地热资源开采量为 $4\ 598\times 10^4\ \text{m}^3$ ,回灌量为 $4\ 432\times 10^4\ \text{m}^3$ ,天津市地热供暖面积约为 $4\ 760\times 10^4\ \text{m}^2$ ,约占全市集中供暖面积7.9%。其中蓟县系雾迷山组地热井共有323眼,开采量为 $2\ 888\times 10^4\ \text{m}^3$ ,回灌量为 $2\ 621\times 10^4\ \text{m}^3$ ,回灌率可达90.96%。

## 2 样品采集与测试

本文共采集蓟县系雾迷山组地热水样品63组,采集点位置见图1。采集样品时,将样品装入预先酸泡并清洗干净的聚乙烯采样桶中(2 500 ml),并尽量保证水样装满采样桶,防止桶中产生气泡。样品送自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成测试。pH由酸度计检测; $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子检测仪器为电感耦合等离子体光谱仪,型号为Optima 8300; $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等阴离子由OPUS电子滴定器检测。

在数据分析之前,为了检验数据的可靠性,需要将得到的数据进行阴阳离子平衡检验,即电中性条件检验。水样化学测试数据采用阴阳离子的平衡误差(CBE, Charge Balance Error)进行检验,CBE值的计算公式如下:

$$CBE(\%) = \frac{\sum N_c - \sum N_a}{\sum N_c + \sum N_a} \quad (1)$$

式中, $\sum N_c$ 、 $\sum N_a$ 分别为阳离子和阴离子的毫克当量浓度(meq/L)。

经检验,所有水样水质数据CBE值均介于 $\pm 5\%$ 之间,满足阴阳离子平衡检验标准,数据检测可靠。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水化学类型

研究区蓟县系雾迷山组(Jxw)热储水化学检测结果见表2。由表2可知,潘庄凸起 $\text{K}^+$ 平均值最大,为76.46 mg/L;双窑凸起 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 平均值最大,分别为50.22 mg/L、16.14 mg/L、531.59 mg/L、373.24 mg/L;小韩庄凸起 $\text{Na}^+$ 平均值最大,为556.15 mg/L。

研究区水化学成分三线图见图2,从Piper三线图主

要离子指标箱型图(图3)可见,研究区蓟县系雾迷山组地热流体阳离子以Na<sup>+</sup>为主,阴离子以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主;水化学类型多样,主要为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na型、Cl·

HCO<sub>3</sub>-Na型、Cl·SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na型、Cl·SO<sub>4</sub>-Na型;pH为7.2~8.5,均为弱碱性;除双窑凸起上的JH02外,溶解性总固体(TDS)在933.87 mg/L~2 039.16 mg/L之间。

表2 研究区地热流体化学特征一览表

Tab.2 Characteristics of geothermal fluids in the study area

单位:mg/L

构造位置		K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	TDS
王草庄凸起	最小值	48.86	189.05	28.00	6.02	103.50	158.53	337.40		
	最大值	51.99	202.76	36.33	6.42	133.60	167.39	358.20		
	平均值	50.29	194.48	31.89	6.21	114.73	164.13	347.80	8.39	933.87
潘庄凸起	最小值	63.00	415.49	28.44	8.43	334.60	255.00	383.20		
	最大值	86.02	502.90	55.97	14.22	413.70	351.33	447.90		
	平均值	76.46	442.74	36.24	10.83	366.07	304.44	409.56	9.42	1709.85
双窑凸起	最小值	64.43	459.77	29.23	11.80	412.30	310.90	204.40		
	最大值	115.79	1 607.78	357.31	80.94	2 215.60	1 296.13	446.70		
	平均值	73.14	550.49	50.22	16.14	531.59	373.24	390.07	9.51	2039.16
小韩庄凸起	最小值	44.35	502.29	13.69	5.85	424.00	266.81	365.50		
	最大值	62.50	624.80	43.01	10.50	574.60	353.86	540.60		
	平均值	48.47	556.15	31.85	7.71	452.55	293.48	495.16	10.01	1944.61
白塘口凹陷	最小值	60.51	465.14	27.9	8.929	377.2	291.07	367.30		
	最大值	74.70	554.58	45.46	14.79	534.60	351.24	407.60		
	平均值	68.13	525.12	36.45	11.99	489.53	331.62	389.05	68.13	1910.77

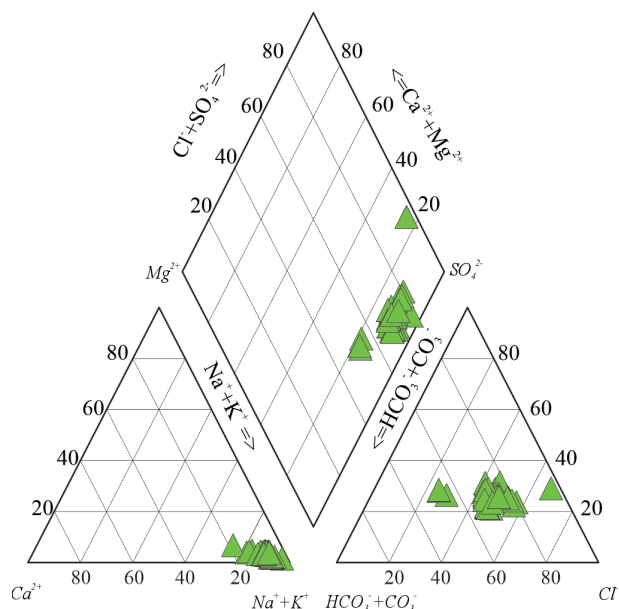


图2 研究区地热流体Piper图

Fig.2 Piper diagram of geothermal fluid in the study area

3.2 离子相关性分析

一般而言,溶解性总固体(TDS)越低,预示着地热流体的循环速率越快或者越接近于补给区,TDS的空间差异表明,随运移距离和埋藏深度增大,地热流体在长距离运移中不断与围岩接触,水-岩反应持续叠加,致使化学组分富集。从表2可以看出,沧县隆起最北边的王草

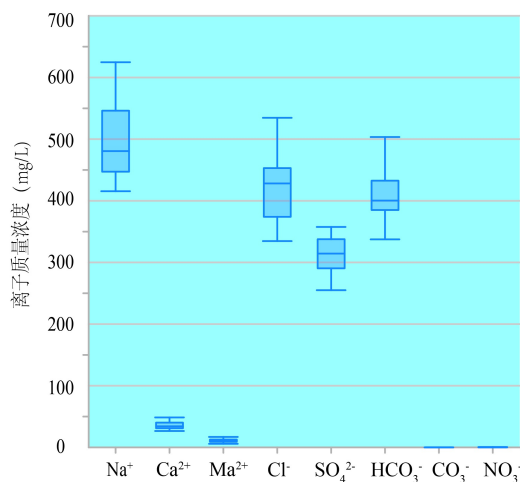


图3 研究区地热流体主要离子指标箱型图

Fig.3 Box plot of major ion indices of geothermal fluid in the study area

庄凸起,各离子组分含量均值几乎均为最低值,TDS均值小于1 000 mg/L,紧邻王草庄凸起的潘庄凸起,各离子组分含量均值均高于王草庄凸起,海河断裂以南的双窑凸起、白塘口凹陷和小韩庄凸起各离子组分含量均值变化不大。区域上由北向南、由西向东Na<sup>+</sup>和TDS均呈由小到大的变化趋势。说明研究区北部是区域雾迷山组地热流体的补给区,流体运移路径是由北向南、由西向东的。这在王草庄凸起的三口雾迷山组地热井也可以看

出, BD-10、BD-04 和 BD-02 的 TDS 分别为 808.00 mg/L、952.90 mg/L 和 1 040.70 mg/L, 远低于其他构造单元 TDS 数值。

研究区雾迷山组地热流体中 TDS 与 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 表现出强线性相关, 而与 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 则无明显相关(图 4, 表 3), 说明地热流体的 TDS 主要与 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子有关。结合表 2 可知, Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 离子含量均值由北向南、由西向东呈逐渐升高的趋势, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子含量均值则变化不大, 说明随着流体径流路径的增大, 地热流体中溶解的 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 逐渐增多, 并影响了地热流体的 TDS 值。

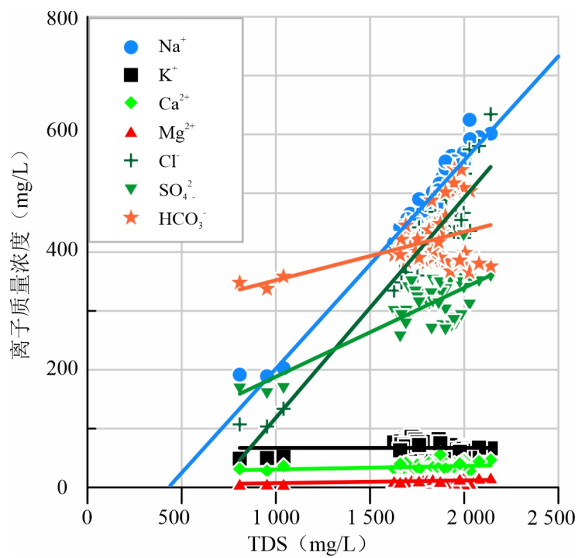


图 4 TDS 与不同化学组分含量的拟合曲线

Fig.4 Fitting curves between TDS and different chemical components

表 3 TDS 与不同化学组分含量的相关关系

Tab.3 Correlation between TDS and different chemical components

离子	相关系数	拟合方程
Ca <sup>2+</sup>	0.206	Y=0.006 X+24.670
Mg <sup>2+</sup>	0.398	Y=0.005 X+2.587
Na <sup>+</sup>	0.977	Y=0.354 X-152.288
K <sup>+</sup>	0.001	Y=-7.832×10 <sup>-6</sup> X+67.116
Cl <sup>-</sup>	0.937	Y=0.374 X-255.636
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.786	Y=0.151 X+36.882
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.394	Y=0.082 X+269.709

由于地热流体中 Cl<sup>-</sup> 比较稳定, 一般可用 Cl<sup>-</sup> 与其他离子的相关性来分析研究区地下流体径流情况。从图 5 和表 4 可以看出, Cl<sup>-</sup> 与 Na<sup>+</sup> 表现出强相关性, 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 显著相关, 与其他离子相关性较差。

以上分析可知, 研究区雾迷山组地热流体组分的

TDS 主要与 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 相关, 且 Cl<sup>-</sup> 与 Na<sup>+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 相关性较强, 而与其他离子相关性较小。虽然地热流体中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量也较大, 且影响到水化学命名, 但 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量不是该热储层地热流体化学类型的主要变化特征, Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 对地热流体化学类型影响较大。同时随着流体运移路径的增加, Na<sup>+</sup> 及 Cl<sup>-</sup> 组分也随之增加, 而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 则变化不大。

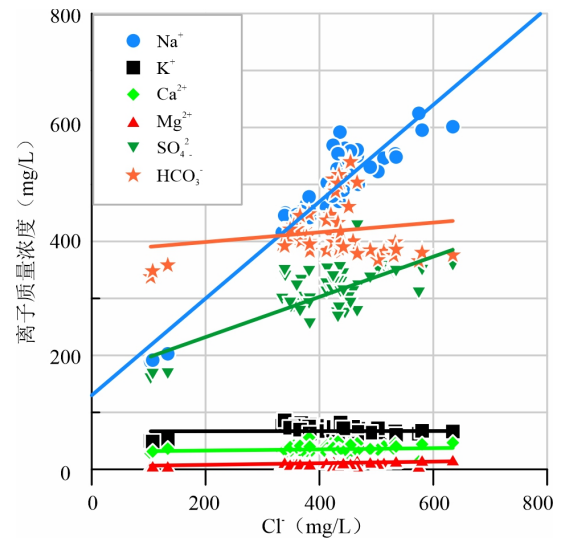


图 5 Cl<sup>-</sup> 与不同化学组分含量的拟合曲线

Fig.5 Fitting curves between Cl<sup>-</sup> and different chemical components

表 4 Cl<sup>-</sup> 与不同化学组分含量的相关关系

Tab.4 Correlation between Cl<sup>-</sup> and different chemical components

离子	相关系数	拟合方程
Ca <sup>2+</sup>	0.146	Y=0.010 X+30.863
Mg <sup>2+</sup>	0.484	Y=0.014 229 X+5.062
Na <sup>+</sup>	0.935	Y=0.850 X+129.874
K <sup>+</sup>	0.007	Y=0.001 X+66.724
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.733	Y=0.353 X+161.484
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.162	Y=0.085 X+381.995

### 3.3 离子来源分析

研究区热储类型以沉积盆地型层状热储为主, 在其补给、径流和排泄的演化过程中, 不断对接触介质进行溶滤并发生组分间的交换作用, 使地热流体中稳定组分富集, 不稳定组分则聚集于交换介质中。

天然水的离子谱系主要来自岩石风化及大气降水。Gibbs 图解是水化学研究中用于判别天然水体主要离子化学成分的图解方法: 其纵轴为 TDS, 横轴为  $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$  或  $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$  (Gibbs, 1970)。虽然 Gibbs 图通常应用于天然地表水体的研究, 但近年来已有学者将其应用于地热流体化学组分形成机制的研究中 (Gong et al., 2022; Shi et al., 2023)

将研究区雾迷山组地热流体的水化学数据投绘到Gibbs图中(图6)。可以看出,研究区雾迷山组地热流体的TDS基本都大于1 000 mg/L,  $\rho(\text{Cl}^-)/[\rho(\text{Cl}^-)+\rho$

$(\text{HCO}_3^-)]$ 除极少数外,主要介于0.5~0.8之间, $\rho(\text{Na}^+)/[\rho(\text{Na}^+)+\rho(\text{Ca}^{2+})]$ 主要介于0.8~1.0之间,离子来源主要为蒸发浓缩作用导致。

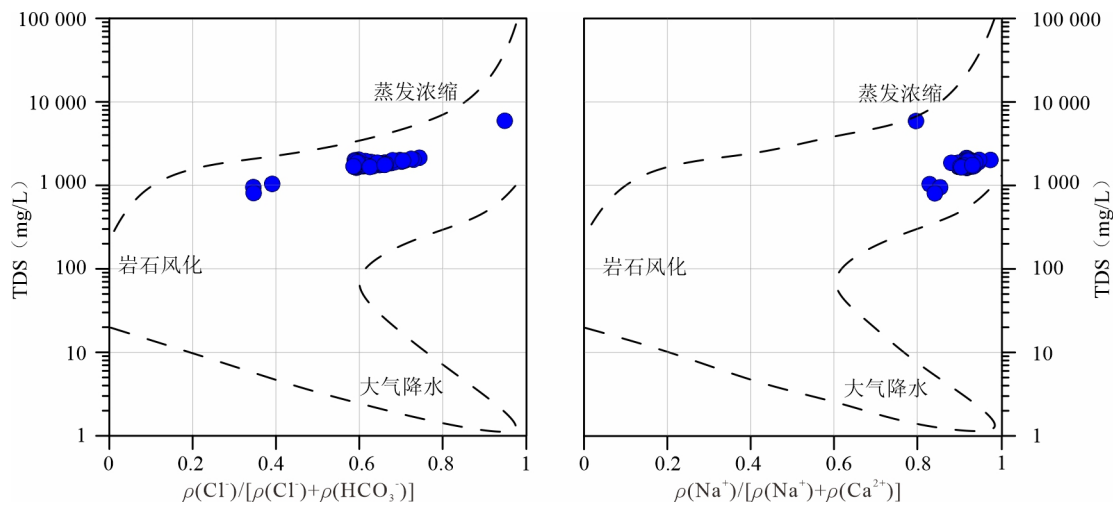


图6 研究区雾迷山组地热流体Gibbs图

Fig.6 Gibbs figure of geothermal fluid in the Wumishan Reservoir of the study area

### 3.4 基于离子比的分析

借助地下水中各组分中“摩尔比值”参数,可把抽象的水化学演化轨迹转译成一串简明系数,进而判断其迁移路径、混合比例或水-岩反应程度。本文研究借鉴地下水化学研究方法,利用部分离子当量比值来分析研究区雾迷山组地热流体水化学成分形成的来源和过程,并绘制了离子当量比值的变化特征(图7)。

#### 3.4.1 钠氯系数( $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ )

钠氯系数被称为地下水的成因系数,是表征地下水中 $\text{Na}^+$ 富集程度的水文地球化学参数(曹文庚等,2013),具有指示地层封闭性好坏、地层水变质程度、地层水活动性的作用。一般标准海水中的钠氯系数平均值为0.85,如果在地质历史过程中海相沉积水中的 $\text{Na}^+$ 与地层中交换性钙离子产生阳离子交换,则 $\text{Na}^+$ 含量下降, $\gamma$

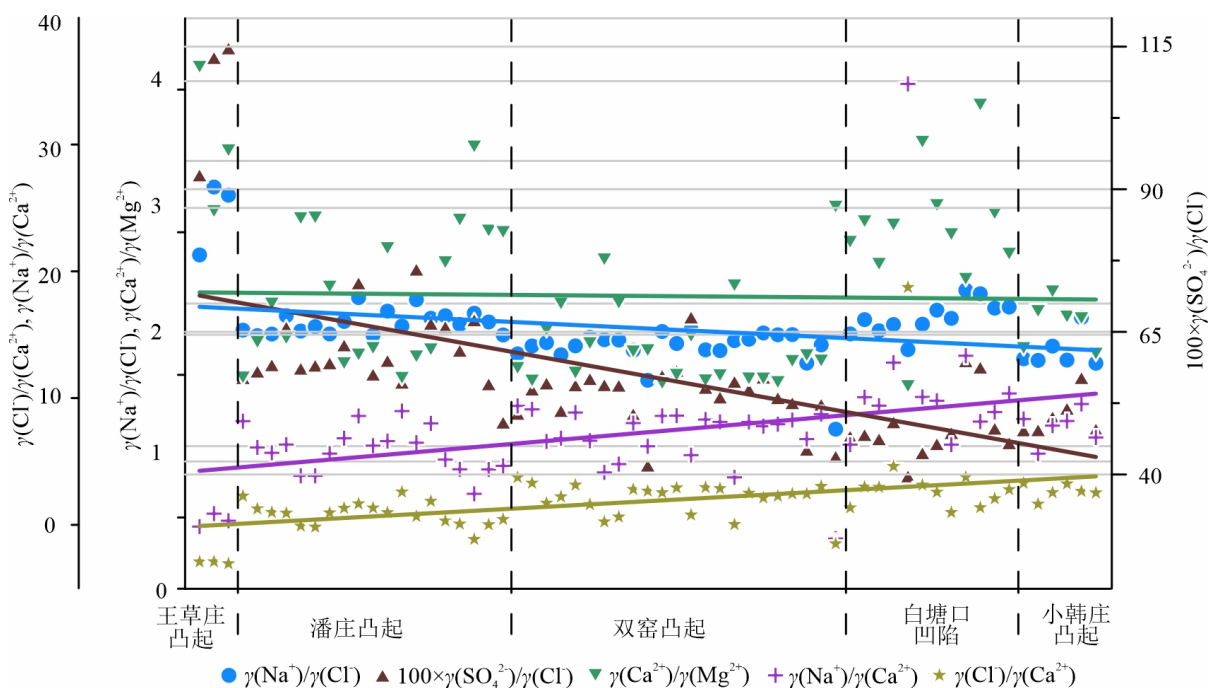


图7 研究区不同构造位置雾迷山组地热流体各离子平均毫克当量比值图

Fig.7 Figure of average milliequivalent ratios of various ions in the geothermal fluid of Wumishan Reservoir at different tectonic units in the study area

$(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) < 0.85$ 。如果地下水主要是含盐岩地层溶滤而形成,则 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 应接近于1。同时,低TDS水具有较高的 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 比值( $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) > 0.85$ ),高TDS水则具有较低的 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 比值( $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) < 0.85$ ) (安红梅等,2018;赵亚茜等,2022)。当钠氯系数大于0.75时,地层水封闭较差,反映了受外界环境水的影响较大,而钠氯系数小于0.75时,则地层水封闭条件较好,系数小于0.5则表现为停滞环境(张治波等,2017)。从图7中可以看出,研究区雾迷山组地热流体的 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 比值以王草庄凸起最大,比值大于2.3,其他地区 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 介于1.46~2.09之间,说明雾迷山组地热流体不是海相沉积水,且其封闭条件较差,受到了外界水的影响。

研究区雾迷山组地热流体中 $\text{Na}^+$ 毫克当量浓度大于 $\text{Cl}^-$ ,表明其在径流过程中发生了特定物理、化学作用,促使 $\text{Na}^+$ 释放并富集。促使 $\text{Na}^+$ 增加的物理、化学作用主要有两个方面:①流体中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和围岩中的 $\text{Na}^+$ 发生交换,使流体中 $\text{Na}^+$ 毫克当量浓度增加;②硅酸盐溶解,使流体中 $\text{Na}^+$ 浓度增加。结合 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 和 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 比值分析,可以推断雾迷山组热储层 $\text{Na}^+$ 浓度较高主要为硅酸盐的溶解及阳离子交换导致。

### 3.4.2 脱硫系数( $100 \times \gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Cl}^-)$ )

脱硫系数( $100 \times \gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Cl}^-)$ )指示地下水的氧化还原环境,通常认为脱硫系数越小,反映地下水的封闭性越好,反之封闭性越差。当脱硫系数大于3时,表明地热流体所处的地下水动力环境呈半开放至完全开放状态(钱诗友等,2009)。通过脱硫系数可以发现,研究区雾迷山组地热流体的脱硫系数介于39.73~114.74之间,平均值为57.83,脱硫系数远大于3,反映出该储层地热流体水动力环境较开放,水体活动能力较强。王草庄凸起雾迷山组地热流体脱硫系数为92.48,远高于其他地区,从北部王草庄凸起至南部小韩庄凸起,脱硫系数呈逐渐减小的趋势,进一步说明王草庄凸起接近地热流体的补给区,地热流体的运移路径为由北向南。

### 3.4.3 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$

$\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 值可以反映矿物的溶解情况,主要用来分析方解石、白云石和石膏等矿物溶解对地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 组分的影响(郭永海等,2002)。当 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 值为0~1时,表明白云石或碳酸盐岩发生了溶解,当 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 值为1~2时,表明方解石发生了溶解,当 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+}) > 2$ 时,表明硅酸盐发生了溶解,使得 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 进入流体(韦毅等,2021)。从图7可知,研究区雾迷山组地热流体 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 值在1.42~3.66之间,平均值为2.07,表明该热储地热流体参与水解的主

要矿物为方解石和硅酸盐。

### 3.4.4 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$

$\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 也可反映矿物的溶解情况,研究区雾迷山组地热流体的 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值介于3.92~39.78之间,平均值为12.60,表明地热流体中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 之间发生了阳离子交换,同时伴随着硅酸盐岩的溶解。从北部王草庄凸起至南部小韩庄凸起, $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值呈逐渐升高的趋势,说明随着地热流体的运移,阳离子的交换作用和硅酸盐岩的溶解作用持续发生。

### 3.4.5 $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$

$\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 是表征地下水动力特点的参数,系数大小代表着地下水动力条件的好坏,值越小,表明水动力条件越好;值越大,表明地下水流动越滞缓,水交替程度越弱,溶滤作用进行不充分。研究显示,雄安新区容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷和高阳低凸起雾迷山组地热流体的 $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 平均值分别为8.50、10.48、19.43和10.66,第四系地下水中的 $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 平均值为1.08,远小于深部地热水(邢一飞等,2022)。研究区雾迷山组地热流体的 $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值基本介于5~8之间,表明研究区雾迷山组地热流体的水动力条件较雄安新区雾迷山组水动力条件更好,地下水流动较雄安新区更快。同时,由图7可知,从北部王草庄凸起至南部小韩庄凸起, $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值呈逐渐升高的趋势,说明从北向南,远离补给区,雾迷山组地热流体的流动性逐渐减弱,水交替程度逐渐降低。

## 3.5 热储平衡状态

Na-K-Mg三角图解法由Giggenbach于1988年提出(Giggenbach, 1988),该方法可用于判断地热流体平衡状态和阳离子温标的可靠性。根据热水点在三角图中的散落情况,可以将地热水分为未平衡水、部分平衡水和完全平衡水三种类型。

将研究区雾迷山组地热流体中Na、K、Mg质量分数值投影到Na-K-Mg三角图中(图8),可知其全部样品均处于未平衡水区,且靠近Mg端,说明其水-岩作用尚处于初级阶段,热水中的钠、钾矿物均未达到饱和状态,反映了雾迷山组地热流体未达到平衡状态,溶解作用仍在进行,水-岩反应的平衡度偏低。

## 3.6 流体运移模式

从雾迷山组地热流体的化学成分分析可知,王草庄凸起最接近研究区雾迷山组地热流体的补给区,而随着地热流体由北向南、由西向东的逐渐运移,伴随着阳离子的交换作用和硅酸盐岩的溶解作用,雾迷山组地热流体中溶解的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量逐渐升高,地热流体的TDS值逐渐变大,地热流体的流动性逐渐减弱,水交替程度逐

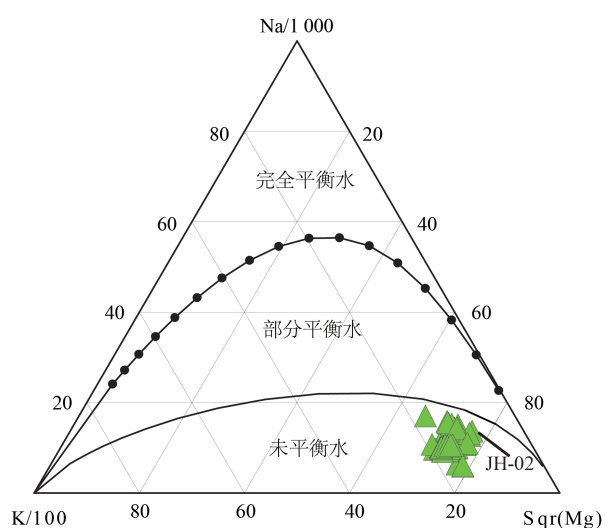


图8 研究区地热流体 Na-K-Mg 三线图

Fig.8 Ternary figure of Na-K-Mg for geothermal fluid in the study area

渐降低,但其水-岩反应远未达到平衡状态,即使矿化度高达 5 937 mg/L 的 JH-02 井也未达到平衡状态(图 8)。从雾迷山组地热流体的运移方向推测,分割王草庄凸起与潘庄凸起的汉沽断裂以及潘庄凸起南部边界断裂(海河断裂)均应为导水断裂。同时,虽然介于双窑凸起和小韩庄凸起之间的白塘口凹陷基岩为中生界,雾迷山组热储埋藏较两侧凸起区更深,但该凹陷区并未改变雾迷山组地热流体的运移方向,说明白塘口凹陷东西两侧的边界断裂(白塘口东断裂和白塘口西断裂)也应是导水断裂,其分别沟通了两侧雾迷山组热储,使得雾迷山组地热流体可以穿过断裂继续运移。

根据上述讨论结果,推测研究区雾迷山组地热流体在北部基岩裸露区接受大气降水补给,逐渐向南、向东径流,径流过程中虽然存在不同方向的断裂将雾迷山组热储错段,但断裂均为导水断裂,并未影响雾迷山组地热流体的径流方向。

## 4 结论

(1)研究区蓟县系雾迷山组地热流体化学类型以  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \text{Na}$  型、 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$  型、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$  型、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4^- \text{Na}$  型为主,阳离子主要为  $\text{Na}^+$ ,阴离子主要为  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

(2)研究区雾迷山组地热流体的补给区在天津北部,地热流体运移路径是由北向南、由西向东,随着流体的运移,地热流体中溶解的  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  逐渐增多,地热流体的 TDS 值逐渐变大。

(3)研究区雾迷山组地热流体离子来源主要为蒸发浓缩作用, $\text{Na}^+$  来源主要为硅酸盐的溶解及阳离子交换作用。

随着流体的运移,阳离子的交换作用和硅酸盐岩的溶解作用一直在发生,其水-岩作用远未达到平衡状态,溶解作用仍在继续。远离地热流体的补给区,雾迷山组地热流体的流动性逐渐减弱,水-岩相互作用也逐渐减弱。

(4)分割构造单元的汉沽断裂、海河断裂、白塘口西断裂与白塘口东断裂均为导水断裂,在一定程度上促进了地热流体运移,而白塘口凹陷的存在也未改变雾迷山组地热流体的运移方向。

## 参考文献(References)

- 安红梅,邓利君,赵矿,等.西藏地下水水化学特征及水质评价[J].水利规划与设计,2018,(8):45-47+56.
- 曹文庚,张翼龙,李政红,等.呼和浩特市大青山山前倾斜平原地质环境问题形成机理研究[J].现代地质,2013,27(2):468-474.
- 高知云.沧县隆起雾迷山组沉积相与储层初探[J].西北大学学报(自然科学版),1995,25(4):348-352.
- 郭永海,沈照理,钟佐桑.河北平原深层碱性淡水形成的水文地球化学模拟——以保定、沧州地区为例[J].地球科学(中国地质大学学报),2002,27(2):157-162.
- 江国胜,朱怀亮,杨忠彦,等.数字化录井技术在天津蓟县系雾迷山组地热井中的应用[J].地质找矿论丛,2025,40(2):141-149.
- 李俊峰,靳宝珍,程万庆,等.天津蓟县系雾迷山组地热流体水化学特征研究[J].地质调查与研究,2008,31(4):339-345.
- 钱诗友,曾灏辉.东营凹陷沙河街组地层水化学特征及其石油地质意义[J].天然气地球科学,2009,20(4):603-609.
- 宋美钰,刘杰,秦莉红,等.天津地热流体水化学特征及同位素分析[J].地质调查与研究,2018,41(2):138-144.
- 王冰,宗振海,夏雨波,等.天津地区地热流体主要离子组分特征及地热成因分析[J].华北地质,2023,46(2):9-16.
- 王辉,赵冠华,李活英,等.广西煤盆地隐伏地热成因模型及找矿靶区圈定[J].地质找矿论丛,2025,40(2):150-157.
- 王婷灏,汪新伟,毛翔,等.沧县隆起北部地区地热资源特征及开发潜力[J].中国地质,2022,49(6):1747-1764.
- 韦毅,骆湘勤,陈俊兵,等.浙江龙泉市青坑底矿泉水资源特征及成矿机理[J].矿产与地质,2021,35(3):460-466.
- 邢一飞,王慧群,李捷,等.雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析[J].中国地质,2022,49(6):1711-1722.
- 岳冬冬,贾小丰,张秋霞,等.天津山岭子地热田蓟县系雾迷山组热储流体同位素特征及其指示意义[J].华北地质,2023,46(2):45-50.
- 张治波,刘腾,李丽荣,等.鄂尔多斯盆地 CD 区块长 6 地层水化学性质及其地质意义[J].矿物岩石,2017,37(3):61-68.
- 赵娜,王光辉,江国胜,等.天津东丽湖地区地热流体地球化学特征及其赋存环境[J].地质找矿论丛,2016,31(1):142-146.
- 赵亚茜,李晓.平谷盆地地下水化学特征及成因分析[J].地下水,2022,44(1):60-63.
- DUAN Hexiao, BIAN Kai, LIU Bo, et al. Geochemical characteristics and genetic mechanism of geothermal fluid in the Xianxian geothermal field in the central Cangxian Uplift[J]. Doklady Earth Sciences, 2024, 515(1):546-562.
- Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170:1088-1090.

- GIGGENBACH W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749–2765.
- GONG Yixuan, YAO Jiasai, WANG Ping, et al. Perspective of hydrogen energy and recent progress in electrocatalytic water splitting[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 43(3): 282–296.
- LI Zunting, LIU Boran, LIU Yongjiang, et al. Mesozoic to Cenozoic tectonic evolution in the central Bohai Bay Basin, East China[J]. *GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN*, 2024, 136(11–12): 4965–4984.
- LIANG Jintong, WANG Hongliang, BAI Ying, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin and its coupling relationship with Pacific Plate subduction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 257–266.
- LIU Qiongying, ZHANG Linyou, ZHANG Chao, et al. Lithospheric thermal structure of the North China Craton and its geodynamic implications (Article)[J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 102: 139–150.
- LUO Jingshuang, SUN Yonghe, WANG Yougong, et al. Cenozoic tectonic evolution of the eastern Liaodong Bay sub-basin, Bohai Bay basin, eastern China — Constraints from seismic data[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2021, 134: 105346.
- LU Qingwei, WANG Qiang, ZHAN Jian, et al. Middle Pleistocene stratigraphic hiatus on the Cangxian Uplift, the west coast of Bohai Bay[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(4): 665–679.
- SHI Chao, WANG Yu. Stochastic analysis of load-transfer mechanism of energy piles by random finite difference model[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(4): 997–1010.
- WU Xiaoyang, LI Cuilin, FAN Jianke, et al. Cenozoic Evolution of the Bohai Bay Basin: Constraints From Seismic Radial Anisotropy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(12): 1–11.
- YU Fusheng, KOYI Hemin. Cenozoic tectonic model of the Bohai Bay Basin in China[J]. *Geological Magazine*, 2016, 153(5–6): 866–886.
- ZHANG Yao, DILEK Yildirim, ZHANG Fengqi, et al. Structural architecture and tectonic evolution of the Cenozoic Zhanhua Sag along the Tan-Lu Fault Zone in the eastern North China: Reconciliation of tectonic models on the origin of the Bohai Bay Basin[J]. *Tectonophysics*, 2020, 775: 228303.
- ZHAO Feiyu, JIANG Suhua, LI Sanzhong, et al. Cenozoic tectonic migration in the Bohai Bay Basin, East China[J]. *Geological Journal*, 2016, 51: 188–202.