

doi: 10.12029/gc20220601

邢一飞, 王慧群, 李捷, 滕彦国, 张保健, 李燕燕, 王贵玲. 2022. 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, 49(6): 1711–1722.  
Xing Yifei, Wang Huiqun, Li Jie, Teng Yanguo, Zhang Baojian, Li Yanyan, Wang Guiling. 2022. Chemical field of geothermal water in Xiong'an  
New Area and analysis of influencing factors[J]. Geology in China, 49(6): 1711–1722(in Chinese with English abstract).

## 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析

邢一飞<sup>1,2,3</sup>, 王慧群<sup>4</sup>, 李捷<sup>4</sup>, 滕彦国<sup>4</sup>, 张保健<sup>1,2,3</sup>, 李燕燕<sup>1,2,3</sup>, 王贵玲<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037; 3. 自然资源部地热与干热岩勘查  
开发技术创新中心, 北京 100037; 4. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:**【研究目的】雄安新区地热水化学场特征及其影响因素对了解区域地热资源聚敛机制具有重要意义。【研究方法】在区内 5 个主要构造单元(容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、保定凹陷和高阳低凸起)开展地热水水化学采样和测试分析工作。【研究结果】研究区内主要分布有砂岩热储和岩溶热储, 水化学类型以 Cl-Na 型和 Cl·HCO<sub>3</sub>-Na 为主。从浅入深, 地热水 TDS 值呈增大趋势。自西向东, 地热水 TDS 含量表现为增大的趋势, 指示着地下水流向。受断裂带导水作用影响, 部分深部雾迷山组与馆陶组地热水发生混合现象。雾迷山组岩溶热储地热水的变质系数和脱硫系数低, 热储封闭性较好, 处于相对还原状态, 而馆陶组和明化镇组砂岩热储地热水封闭性相对较差。【结论】区内地下水化学场主要受水岩相互作用程度、断裂、储层封闭性等因素影响。研究成果对于认识雄安新区地热资源、科学合理开发利用地热能, 推进北方地区冬季清洁取暖具有重要意义。

**关键词:** 地热; 水化学; 封闭性; 地热地质调查工程; 雄安新区

**创 新 点:** 采用雄安新区及其周边的近 100 组地下水化学样品, 构建了雄安新区地热水化学场, 探讨了其主要影响因素为水岩相互作用程度、储层封闭性等。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1711-12

## Chemical field of geothermal water in Xiong'an New Area and analysis of influencing factors

XING Yifei<sup>1,2,3</sup>, WANG Huiqun<sup>4</sup>, LI Jie<sup>4</sup>, TENG Yanguo<sup>4</sup>,  
ZHANG Baojian<sup>1,2,3</sup>, LI Yanyan<sup>1,2,3</sup>, WANG Guiling<sup>1,2,3</sup>

(1. Chinese Academic of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Deep Earth Science and Exploration Technology Laboratory, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100037, China; 3. Geothermal and Hot Dry Rock Exploration and Development Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100037, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

收稿日期: 2021-05-29; 改回日期: 2021-09-23

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC0604302)和中国地质调查局项目(DD20189114)联合资助。

作者简介: 邢一飞, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地热地质、水文地质等相关研究; E-mail: xingyifei@cags.ac.cn。

通讯作者: 李捷, 女, 1988 年生, 博士, 讲师, 主要从事水文地质相关研究工作; E-mail: lijie\_lm@163.com。

**[Objective]** The hydrochemical formation and evolution of the geothermal water in the Xiong'an New Area have great significant implications to understand the formation mechanism of geothermal resource. **[Methods]** Geothermal water and cold groundwater in the Rongcheng uplift, Niutuozen uplift, Baxian depression, Baoding depression, and Gaoyang low uplift were sampled for hydrochemical analyses. **[Results]** There are two thermal reservoirs: Sandstone and karst thermal reservoirs. The main hydrochemical types were  $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$  and  $\text{Cl-Na}$ . The TDS values of geothermal water increased with well depths. Mixing of the geothermal water of the Wumishan Formation and the Guantao Formation was observed in the fault zone. The metamorphic coefficients and desulfurization coefficients of geothermal water in the Wumishan Formation were low, indicating a relatively closed thermal reservoir and reduced state, while the sealing of the reservoirs in the Guantao Formation and Minghuazhen Formation was relatively poor. **[Conclusions]** The chemical field of geothermal water in the study area is controlled by the extent of water-rock interaction, faults, the sealing of the reservoirs, and so on. Our result is of great significance for understanding the geothermal resources in Xiong'an New Area and promoting clean heating in winter in northern China.

**Key words:** geothermal water; water chemistry; reservoir sealing property; geothermal geological survey engineering; Xiong'an New Area

**Highlights:** Chemical field in the geothermal field of Xiong'an New Area was described with samples from nearly a hundred wells. The extent of water-rock interaction and the sealing of the reservoirs were emphasized in affecting the chemical field of geothermal water.

**About the first author:** XING Yifei, male, born in 1984, Ph.D., senior engineer, mainly engages in geothermal geology and hydrogeology; E-mail: xingyifei@cags.ac.cn.

**About the corresponding author:** LI Jie, female, born in 1988, Ph.D., lecturer, majors in hydrogeology; E-mail: lijie\_lm@163.com.

**Fund support:** Supported by the projects of National Key Research and Development (No.2018YFC0604302) and China Geological Survey (No.DD20189114).

## 1 引 言

在全球变暖的气候变化背景下,能源耗竭和环境污染问题越来越严重,科学合理地开发利用可再生能源,对当今世界各国发展低碳循环经济、减少环境污染、保护生态环境具有非常重大的意义(Zhao et al., 2014; 周总瑛等, 2015; Li et al., 2015; 王贵玲等, 2020; 汪集暘, 2020)。地热能是一种清洁低碳、安全稳定的可再生能源,可替代化石燃料,用于室内供暖与发电等(汪集暘等, 2017; 汪集暘和庞忠和, 2021)。地热资源在全球范围内广泛分布,且地热能储存在地下,不容易受天气影响,占地和生态效应较小,随取随用,开发潜力巨大,是人类未来的重要替代新能源之一(汪集暘等, 2013)。

地层深部的地热流体在漫长的地质演化过程中,水化学成分受补给源、矿物岩石、温度和径流途径等因素的影响,地热水在地下运移过程中形成不同的水化学场特征(Zhou et al., 2013; Xia et al., 2019; Kong et al., 2020)。例如,Guo et al.(2007)通过对羊八井地热田不同含水层水化学特征的分析,认为控制地热水

化学组分的水文地球化学过程主要包括二氧化硅沉淀、 $\text{H}_2\text{S}$ 氧化、离子交换等;Guo et al.(2017)通过对康定地热流体水化学和同位素组分的分析,认为 $\text{CO}_2$ 脱气以及与本地降水起源的冷水发生混合是区内地热溶质浓度下降,温度降低的原因。另外, $\text{Na-K-Mg}$ 阳离子三角关系图(Giggenbach)常用于评价水岩平衡状态以及研究地热流体形成机理(Giggenbach, 1988; Pang et al., 2018; Liu et al., 2020)。地热流体化学场的演化规律可以指示区域地下水动力场特征,反映地下水补径排规律,进而服务于区域地下水开发与可持续利用。

近年来,华北地区雾霾频发,清洁取暖是从源头上治理雾霾的关键一环(陈墨香, 1988)。华北平原地热资源丰富,开发利用潜力巨大。其中牛驼镇地热田范围内的雄县、固安和霸县等地区自20世纪90年代开始就利用丰富的地热资源进行地热采暖,建设无烟城。与地热开发利用同步,牛驼镇地热田的研究工作也相对详细。例如,陈墨香等(1988)首次描述了牛驼镇凸起的地温分布;韩征等(2015)评价了牛驼镇地热田南部雄县地区的地热资源;庞忠

和等(2017)综合了大量的水文地质、地温测量、地球化学同位素及数值模拟工作,进一步指出牛驼镇地热田为“对流-传导型地热系统”,其传热方式在新生界盖层以传导为主,在基岩储层以对流为主;Kong et al. (2020)发现了雄县断层作为导水通道的地球化学和钻孔测温证据。区别于牛驼镇地热田,雄安新区的容城地热田和高阳地热田开发程度较低,研究相对较少。近年来,在清洁供暖大背景下,雄安新区建设大力推动了容城地热田和高阳地热田的地热资源勘查研究工作(Guo et al., 2019; 王朱亭等, 2019; 崔悦, 2020; 马峰等, 2020; 王贵玲等, 2020; Wang et al., 2020; 李燕燕等, 2021),这为了解整个雄安新区地热系统水化学特征及影响因素提供了很好的机遇。

为此,本次研究重点在雄安新区范围内的5个主要构造单元(容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、保定凹陷和高阳低凸起)采集了大量地热井水和浅层地下冷水样品,综合分析不同热储层和地下冷水的水化学场特征,进而探讨地热流体地球化学成因机制,以期为雄安新区地热资源的合理开发利用提供科学指导。

## 2 研究区概况

雄安新区位于冀中拗陷中部,主要构造单元有“三凸起、四凹陷和两斜坡”,三凸起代表的是容城凸起、牛驼镇凸起和高阳低凸起,四凹陷代表的是霸县凹陷、徐水凹陷、保定凹陷和饶阳凹陷,两斜坡代表的牛北斜坡和蠡县斜坡。本研究主要涉及5个构造单元,分别是容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、保定凹陷和高阳低凸起。雄安新区内发育较多的断裂,容城断裂、牛东断裂和高阳断裂为东北方向,容南断裂和牛南断裂为西北偏西方向。以牛南断裂为界线,笔者将研究区分为南北两部。按照热储介质类型,区内主要包括两种热储类型:一种为新近系明化镇组、馆陶组为代表的砂岩热储,另外一种是以雾迷山组和高于庄组为主的岩溶热储。其中新近系明化镇组热储主要岩性为粉砂岩、细砂岩、中砂岩,埋深较浅,为380~470 m,地层厚度130~650 m;新近系馆陶组热储主要分布于牛东断裂后缘,在牛驼镇凸起等地部分缺失,岩性由粉砂岩、含砾砂岩和砂砾岩组成,埋深800~1100 m,地层厚度

200~400 m。研究区雾迷山组厚度总体上表现从北东向至南西向厚度减薄,钻遇厚度310~1262.5 m,岩性主要为灰岩、白云岩、灰质白云岩、泥质白云岩和泥岩,岩溶裂隙发育,该热储层在容城凸起和牛驼镇凸起上埋藏较浅,是区内开发利用最主要的热储层。高阳地热田上覆巨厚的新生代及古生代沉积,雾迷山组热储埋深远大大于容城地热田和牛驼镇地热田,据区内钻井显示,雾迷山组顶部埋深为3660 m。

## 3 采样与测试

2018年11月和2019年12月,在雄安新区及周边地区采集地热水样品共计58组,第四系地下水5组。另外收集有牛驼镇凸起和霸县凹陷数据21组(Pang et al., 2018)和第四系冷水样品12组(Pang et al., 2018; Kong et al., 2020)。研究区地热水和浅部第四系地下水的采样点位置分布如图1所示。水样采集的地热井所在层情况为,容城凸起构造单元上有17组雾迷山组地热水和6组馆陶组地热水;牛驼镇凸起,有5组雾迷山组地热水、3组馆陶组地热水和2组明化镇组地热水;霸县凹陷,有2组雾迷山组地热水、4组馆陶组地热水和5组明化镇组地热水;保定凹陷,有13组馆陶组地热水;高阳低凸起,有4组雾迷山组地热水和18组馆陶组地热水。

采集地热井水时,记录其地理位置、坐标和地质构造等信息,利用红外线测温仪测定水温,待pH、水温等参数稳定后再开始取样。利用多参数水质分析仪(HQ40D, HACH)现场测定水样品的pH、ORP、EC、TDS等参数。采集样品前,加入需采集的水样清晰采样瓶3遍。阳离子样品经0.22 μm滤膜过滤后,装入聚乙烯采样瓶,经HNO<sub>3</sub>酸化至pH<2后密闭保存;阴离子样品经0.22 μm滤膜过滤后,装瓶密闭保存。样品分析测试是在北京核工业地质研究院完成,地阴离子的测试采用离子色谱(Dionex-500)测定,阳离子的测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定,阴阳离子平衡检验误差在5%以内。

## 4 结果与讨论

### 4.1 不同热储的水化学类型特征

根据水化学组分测试,绘制地热水及第四系冷

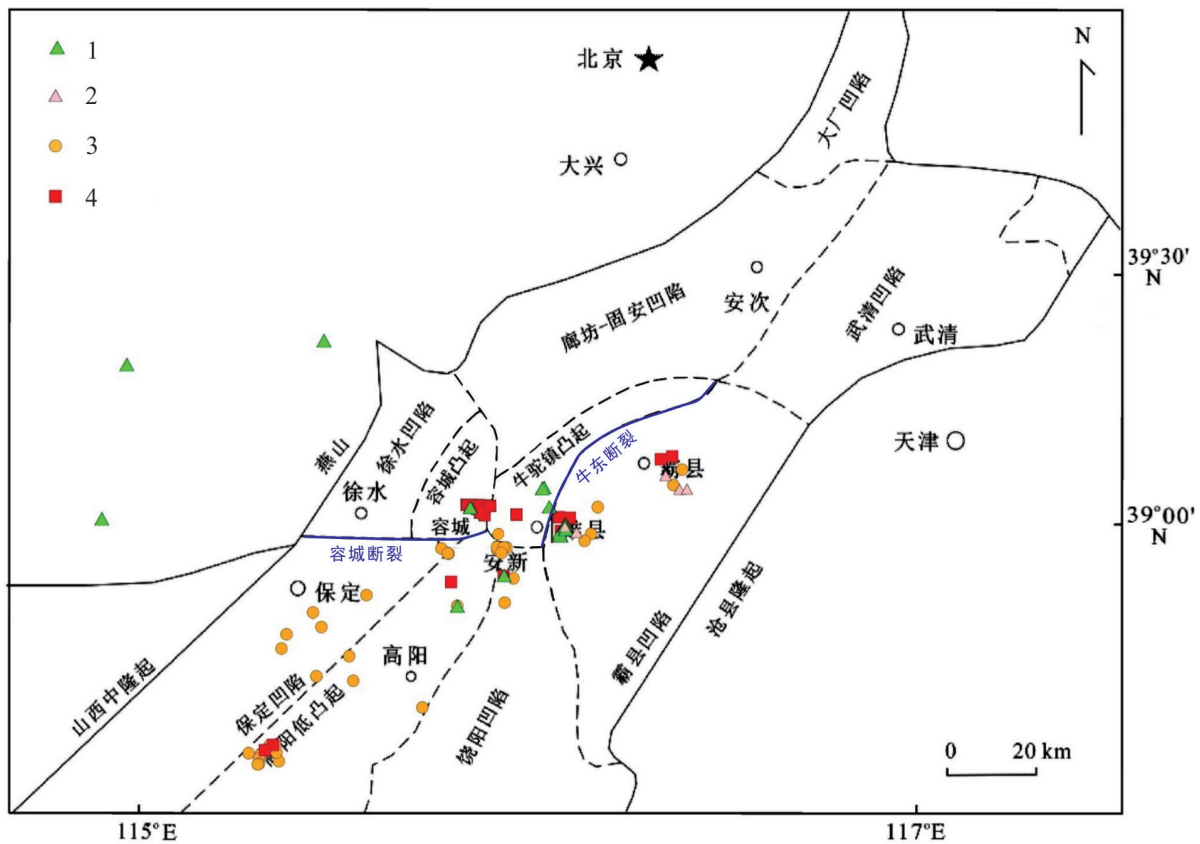


图1 采样点位置分布图

1—第四系冷水;2—明化镇组地热水;3—馆陶组地热水;4—雾迷山组地热水

Fig.1 Distribution map of sampling points

1—Quaternary cold water; 2— Geothermal water of Minghuazhen Formation (Nm); 3— Geothermal water of Guantao Formation (Ng); 4—Geothermal water of Wumishan Formation (Jxw)

水的Piper三线图见图2a~f。研究区第四系浅层地下水采样井深范围介于60~300 m, pH值为6.00~9.39, TDS介于188~1744 mg/L。浅层地下水水化学类型自西向东, 逐渐从 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型向 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水过渡, 因此第四系冷水主要来自于太行山补给, 地下水自西向东流动。

雾迷山组属于岩溶热储, 地热水在容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷和高阳低凸起构造单元内分布特征相似, 主要水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。由于岩溶裂隙发育, 连通性好, 水化学组分均一化程度较高, 水化学类型接近。在研究区北部, 自西向东, 从容城凸起、牛驼镇凸起到霸县凹陷, 雾迷山组地热水的TDS呈增大趋势, TDS平均值分别为2392 mg/L、2582 mg/L和2915 mg/L(图3, 表1), 指示着自西向东的地下水水流路径。而研究区南部的高阳低凸起TDS值相对较低, 为1457 mg/L, 南北

差异明显。

馆陶组和明化镇组均属于砂岩热储, 主要阳离子为 $\text{Na}^+$ , 主要阴离子为 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{HCO}_3^-$ , 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型。馆陶组和明化镇组TDS随经度的变化不存在明显规律, 这可能是因为馆陶组和明化镇组主要是砂岩储层, 与岩溶热储相比, 水化学组分均一化程度低。保定凹陷清苑地区馆陶组地热水的TDS明显偏高, 水化学类型为 $\text{Na-Cl}$ 型, 阳离子 $\text{Na}^+$ 平均质量浓度达3212 mg/L, 阴离子 $\text{Cl}^-$ 平均质量浓度达5602 mg/L, 均远超过其他地区的地热水。

#### 4.2 水化学组分的垂向变化规律

在垂向上, 在同一构造单元内, 热储层由浅至深, 地热水的水化学类型呈现一定的分布规律。研究区第四系地下水中pH平均为7.54, 接近中性, 而地热水pH值整体偏弱碱性。从明化镇组、馆陶组



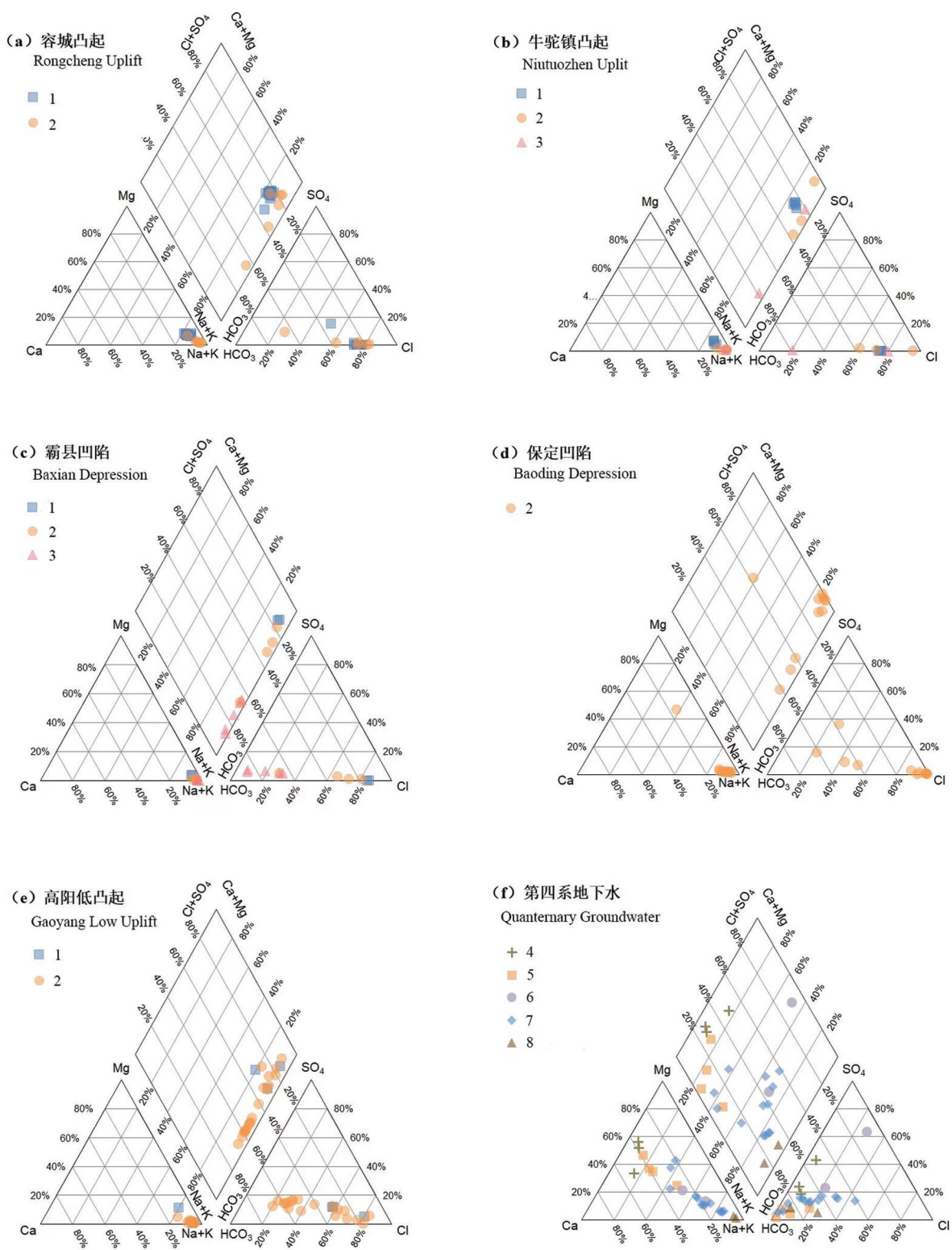


图2 地热水(a~e)和第四系地下水(f)Piper 三线图

1—雾迷山组;2—馆陶组;3—明化镇组;4—燕山;5—容城凸起;6—高阳低凸起;7—牛驼镇凸起;8—霸县凹陷

Fig. 2 Ternary diagrams of water samplings from geothermal water (a~e) and groundwater(f)

1—Wumishan Formation (Jxw); 2—Guantao Formation (Ng); 3—Minghuazhen Formation (Nm); 4—Yanshan Mountains; 5—Rongcheng uplift; 6—Gaoyang low uplift; 7—Niutuozen uplift; 8—Baxian depression

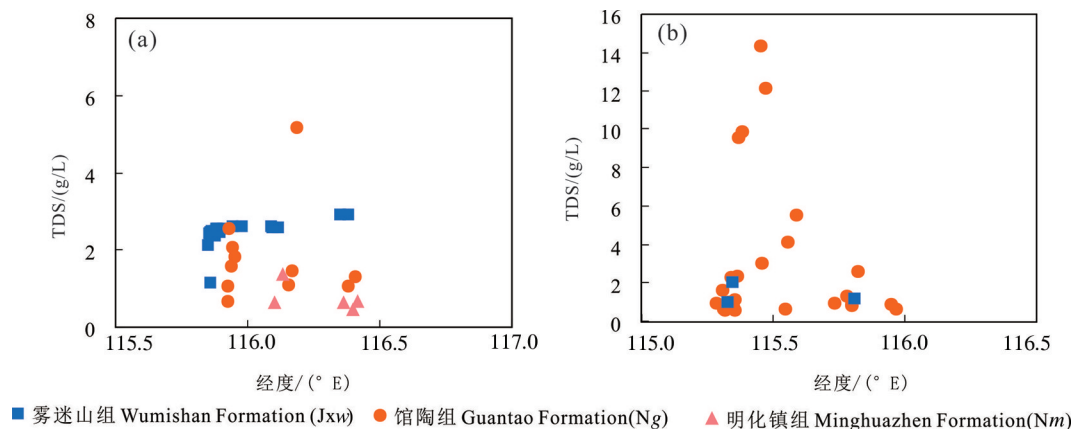


图3 研究区南部(a)和北部(b)不同地层地热水中TDS分布

Fig. 3 Distribution characteristics of TDS in geothermal water of different strata in the southern area (a) and northern area (b)

到深部雾迷山组,随热储的深度增加,地热水温度逐渐升高,地热水水化学类型由 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型,逐渐过渡为 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型和 $\text{Cl}^- \text{Na}$ 型。研究区北部的容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷,水化学规律较为明显,而研究区南部的保定凹陷和高阳低凸起内地热水分布差异较大,规律不明显。因此以容城断裂为界,南北区域地下水化学场的主要控制因素明显不同。

TDS值在同一构造单元内,在垂向上随热储深度增加具有明显增大趋势。容城凸起,馆陶组和雾迷山组地热水TDS平均值分别为1632 mg/L和2392 mg/L;牛驼镇凸起,明化镇组、馆陶组和雾迷山组地热水TDS平均值分别为1010 mg/L、2573 mg/L和2582 mg/L;霸县凹陷,明化镇组、馆陶组和雾迷山组地热水TDS平均值分别为564 mg/L、1115 mg/L和2915 mg/L;高阳低凸起,馆陶组和雾迷山组地

热水TDS平均值分别为1107 mg/L和1457 mg/L。而第四系浅层地下水中TDS最低,平均值仅为394 mg/L。因此,从明化镇组、馆陶组到雾迷山组热储,地热水中TDS随热储深度增加而增加,反映地热水与含水介质之间的水岩相互作用程度更高。

对比各构造单元内不同储层地热水的水化学组分可知,主量组分为 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ,而阳离子 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和阴离子 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 的含量相对较低。如图4所示,与TDS变化规律一致,对比浅层地下水冷水、明化镇组地热水、馆陶组地热水和雾迷山组地热水,常量离子质量浓度依次升高。围岩淋滤是地热水的重要物质来源,而自浅入深,热储温度不断增高,地热水与围岩的水岩相互作用时间更长,水化学组分含量更高。

如图5所示,研究区地热水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量相对较低,尤其北部容城凸起、牛驼镇凸起和霸县凹陷地

表1 各单元水化学特征(平均值)

Table 1 Hydrochemical characteristics of each unit (average value)

构造单元	储层	井深/m	井温/°C	pH	TDS/(mg/L)	水化学类型
容城凸起	雾迷山组	1924	53.1	8.30	2392	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
	馆陶组	1537	43.5	8.52	1632	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 和 $\text{Cl}^- \text{Na}$ 型
牛驼镇凸起	雾迷山组	1587	66.6	7.44	2582	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
	馆陶组	1695	47.1	8.53	2573	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 和 $\text{Cl}^- \text{Na}$ 型
	明化镇组	1350	52.0	8.63	1010	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 和 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
霸县凹陷	雾迷山组	3350	97.0	7.84	2915	$\text{Cl}^- \text{Na}$ 型
	馆陶组	2445	61.8	8.53	1115	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
保定凹陷	明化镇组	1970	55.8	8.94	564	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
	馆陶组	1838	60.6	8.16	5683	$\text{Cl}^- \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 型
高阳低凸起	雾迷山组	3480	78.0	8.26	1457	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型
	馆陶组	1934	66.9	8.45	1082	$\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 型

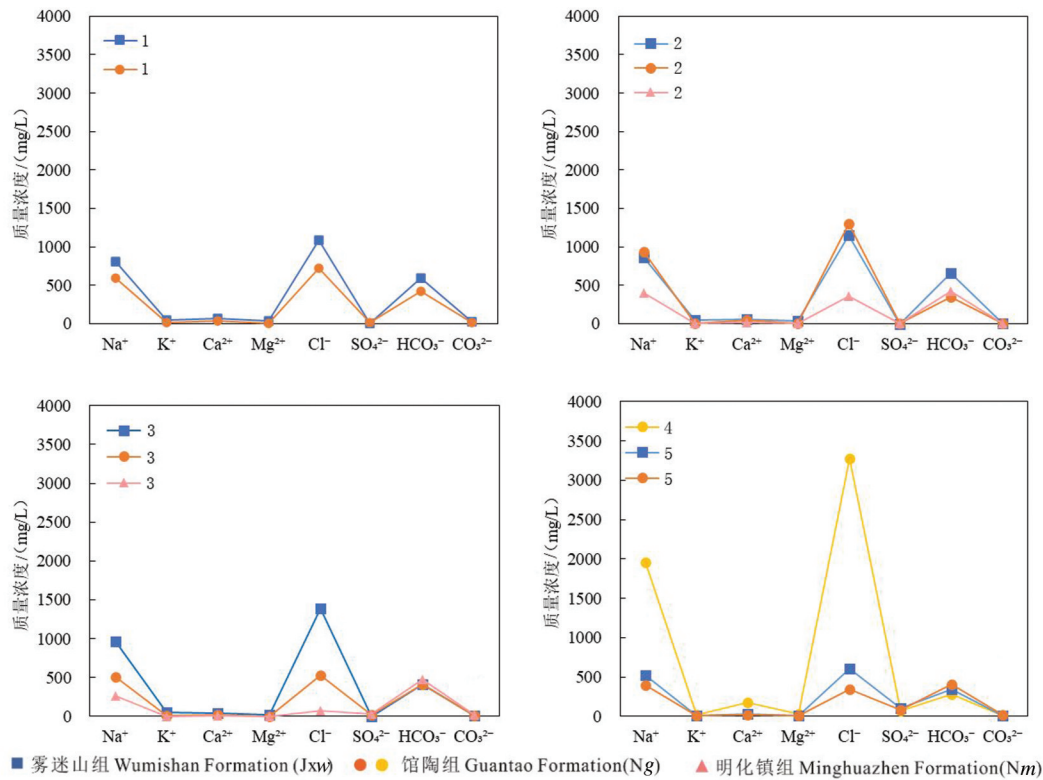


图4 地热水离子浓度  
 1—容城凸起;2—牛驼镇凸起;3—霸县凹陷;4—保定凹陷;5—高阳低凸起  
 Fig. 4 Ion concentration of geothermal water  
 1—Rongcheng uplift; 2—Niutuozen uplift; 3—Baxian depression; 4—Baoding depression; 5—Gaoyang low uplift

区(图5a),其馆陶组地热水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>平均浓度分别为14.9 mg/L、7.8 mg/L和18.3 mg/L,雾迷山组地热水出现较多水样SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量地热水低于检测限情况。深部雾迷山组地热水主要处于碳酸盐岩热储,因此地下热水硫酸根来源较少。同时,相对还原的环境,有利于硫酸盐发生还原,导致SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量很低。保定凹陷和高阳低凸起地热水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量相对较高(图5b)。保定凹陷馆陶组SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>平均质量浓度为70.1 mg/L;高阳低凸起馆陶组地热水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>平均质量浓度77 mg/L,相对其他地区较高。雾迷山组地热水基本位于2(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)=HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>线上方(Liu et al., 2020),进一步说明了脱硫酸作用的存在。在有有机质和微生物参与条件下,地热水中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>被还原生成H<sub>2</sub>S,从而造成雾迷山组地热水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量升高,并检测到一定含量的硫化物。

#### 4.3 地热水特征系数

地下水中特定离子浓度比反映了地下水的状态及水岩作用,通过分析离子浓度比以探究热储中

地热水的来源成因和形成过程(李燕燕等, 2021)。变质系数 $\gamma_{Na^+/\gamma_{Cl^-}}$ 可以探究地层封闭性。标准海水和海相沉积水系的平均值为0.85,含岩盐地层溶滤水值约为1(李虎等, 2015)。研究区地热水中,Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>含量普遍较高,变质系数均大于0.85,可排除研究区地热水海相沉积水的地质成因(闫晓雪等, 2019)。雾迷山组地热水中,变质系数范围介于1.06~1.79,平均值为1.19;馆陶组地热水中,变质系数范围介于0.84~7.34,平均值为2.24;明化镇组地热水中,变质系数范围介于1.22~14.77,平均值为7.06,第四系地下水平均值6.67。地热水变质系数均大于1,说明研究区地热水的补给来源与大气降水入渗有关(江海洋等, 2018)。在容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷和高阳低凸起,雾迷山组地热水变质系数平均值分别为1.17、1.16、1.07和1.43,馆陶组地热水变质系数平均值分别为1.72、1.34、1.97和2.97,同一构造单元内雾迷山组地热水的变质系数相对低于馆陶组,说明雾迷山组地热水所处地层环

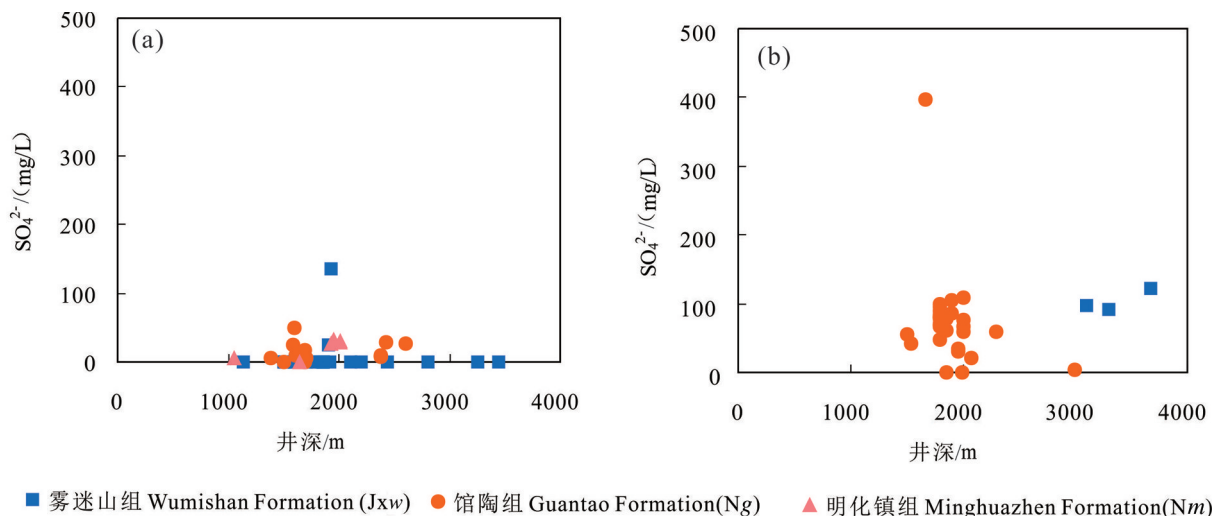


图5 研究区南部(a)和北部(b)  $\text{SO}_4^{2-}$ 与井深的关系  
Fig.5 Relationship between  $\text{SO}_4^{2-}$  and well depths in the southern area (a) and northern area (b)

境相对封闭。如图6a所示,雾迷山组地热水中  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  值总体小于馆陶组,且  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  随  $\text{Cl}^-$  的浓度增加而减小。

脱硫系数  $100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$  可以看出地下水氧化还原环境,脱硫系数越小,反映地下水环境越还原(张萌等, 2014)。如图6b所示,研究区雾迷山组和馆陶组地热水中  $100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$  比值随  $\text{Cl}^-$  浓度的增加而减小。研究区雾迷山组地热水的脱硫系数整体较低,容城凸起、牛驼镇凸起和霸县凹陷雾迷山组中,绝大部分地热水的脱硫系数小于0.01,说明地热水处于较还原环境,高阳低凸起雾迷山组脱硫系

数平均值为15.96,反映其封闭性相对较差,结合前文水化学特征分析,推测该组地热水与浅部地下水发生混合。

研究区馆陶组地热水,脱硫系数整体范围介于0.00~134.07,其中容城凸起、牛驼镇凸起和霸县凹陷平均值分别为6.65、1.22和5.82。保定凹陷馆陶组,TDS值很高的地热水对应的脱硫系数较低,大部分小于1,说明该处地热水处于相对封闭且还原的环境。高阳低凸起馆陶组平均值较高为37.53,封闭性较差。明化镇组地热水中,脱硫系数范围介于0.01~98.82,平均值为37.03;第四系地下水脱硫系数

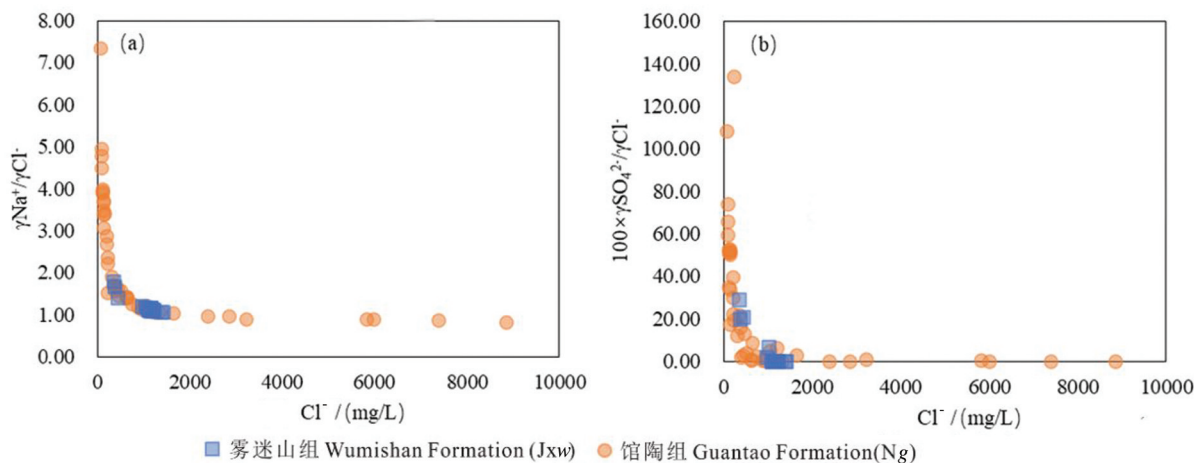


图6 地热水  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  (a)、 $100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$  (b)与  $\text{Cl}^-$  的关系  
Fig.6 Relationship between  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  (a),  $100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$  (b) and  $\text{Cl}^-$



介于21.15~673.23,平均值为162.20,远高于雾迷山组和馆陶组地热水,脱硫系数较大说明该区地热水的水体活动较强,处于相对氧化环境,封闭条件较差。因此,研究区雾迷山组地热水整体处于相对还原环境,而部分馆陶组和明化镇组地热水所处环境的封闭性较差,处于相对氧化条件。

$\gamma\text{Cl}/\gamma\text{Ca}$  比值反映了地下水动力条件,该比值越大,则代表地下水流速相对缓慢。容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷和高阳低凸起,雾迷山组地热水中  $\gamma\text{Cl}/\gamma\text{Ca}$  比值平均分别为 8.50、10.48、19.43 和 10.66,馆陶组地热水中分别为 13.61、25.05、16.96 和 7.67,明化镇组地热水中平均值为 8.38,而第四系地下水中  $\gamma\text{Cl}/\gamma\text{Ca}$  比值介于 0.04~6.34,平均值为 1.08,远小于深部地热水。因此,反映了深部雾迷山组地热水的流通性相对较差,地热水流速缓慢,水岩相互作用时间更长。

#### 4.4 对地热成因机制的指示

岩溶热储与砂岩热储存在明显的水化学差异,但在部分断裂带发现有不同热储层混合的现象。例如,容城凸起有 1 处馆陶组地热水位于容城断裂

附近,其水化学类型、TDS 值、离子含量以及地热水的一些特征系数与该区雾迷山组地热水十分相近,推测容城断裂导水,使得深部雾迷山组地热水带入到浅部含水层。另外,容城断裂断面的重力异常特征分析表明该断裂发育有大量的裂缝带和溶蚀带(郭飒飒等, 2020)。据此,推断容城断裂为区内基岩热水的上涌出口。另外,霸县凹陷靠近牛东断裂的一处馆陶组地热水,与雾迷山组水化学特征相近,推测该地热水在断裂带处发生了深部与浅部地热水的混合作用。在牛东断层下盘发育了底辟构造,可能是由深部地幔物质上涌引起浅层抬升所致,另外在断裂附近有古近—新近系的玄武岩呈串珠状展布(郭飒飒等, 2020),结合水化学证据,说明牛东断裂既是研究区的导热断裂,也是导水断裂。Kong et al. (2020)认为雄县断裂是导水断裂,深部的 Li 和 B 经由雄县断裂带入到浅部热储。因此,基岩中的断裂和次生断裂作为地热水的主要导水通道,使得深部侧向径流在断层坡面受阻后沿着这些通道上涌补给,使其具有较高的温度和较丰富的水量。

研究区第四系冷水主要接受来自太行山的大

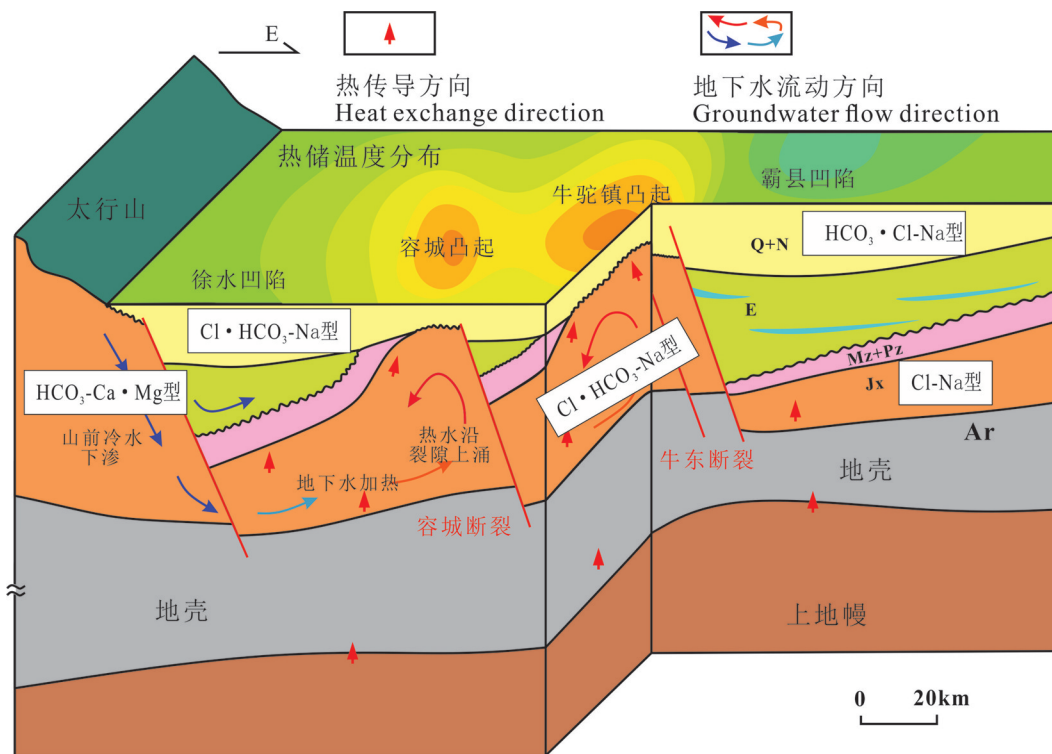


图7 雄安新区地热水水化学成因模式示意图 (修改自 Cui et al., 2019)

Fig.7 Conceptual model of hydrochemical mechanism of Xiong'an geothermal system (modified from Cui et al., 2019)

气降水的补给,自西向东流动。新近系砂岩储层和雾迷山组岩溶储层地下热水循环属于相对独立的系统,储层地下热水主要接受西部太行山地下水的侧向径流补给,经过深循环加热之后赋存于储层中。新近系明化镇组和馆陶组储层地热水封闭性相对较差,处于相对氧化环境;雾迷山组岩溶热储层地热水热储封闭性较好,处于相对还原状态,受岩溶储层较好连通性影响,地下热水之间水化学性质差异很小。另外,雾迷山组热水沿牛东、容城断裂张性正断层向浅部运移,与浅部砂岩热储发生混合(图7)。

## 5 结 论

本文通过对容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、保定凹陷和高阳低凸起5个构造单元内不同热储地热水的水化学特征进行对比,得到以下主要结论:

(1)雄安新区内分布有砂岩和岩溶两种热储类型,其中明化镇组和馆陶组砂岩热储,埋深相对较浅,水化学类型以 $Cl \cdot HCO_3 - Na$ 型和 $Cl - Na$ 型为主。雾迷山组岩溶热储,水化学类型主要为 $Cl \cdot HCO_3 - Na$ 型。由于岩溶储层均一化程度高,相对砂岩储层来说,岩溶热储的水化学特征空间差异小。从浅入深,地热水TDS值呈增大趋势,水岩相互作用更强。在研究区北部,自西向东,雾迷山组TDS值不断增加,指示着地下水流向。

(2)容城断裂和牛东断裂带导水作用,部分馆陶组与雾迷山组地热水发生混合,导致水化学类型、TDS、特征系数等特征较为相似。

(3)雾迷山组地热水中,变质系数和脱硫系数相对低于馆陶组,反映了深部雾迷山组热储封闭性较好,处于相对还原状态,水岩相互作用强烈,而大部分馆陶组和明化镇组地热水封闭性相对较差,处于相对氧化环境。

## References

Chen Moxiang. 1988. Geothermal Energy in North China[M]. Beijing: Science Press.  
Cui Yue, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Guo Sasa. 2019. Radioactive heat production and terrestrial heat flow in the Xiong'an Area, North China[J]. Energies, 12: 4608.  
Cui Yue. 2020. Genetic Mechanism of Geothermal Resource Heat Source in Wumishan Formation of Xiong'an New Area[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).

Feng Xin, Zhang Yazhe. 2014. Analysis and research on ion proportion coefficient of groundwater in Shenzhen area[J]. China Rural Water and Hydropower, (4): 18-20, 24 (in Chinese with English abstract).  
Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52(12): 2749-2765.  
Guo Qi, Pang Zhonghe, Wang Yingchun, Tian Jiao. 2017. Fluid geochemistry and geothermometry applications of the Kangding high-temperature geothermal system in eastern Himalayas[J]. Applied Geochemistry, 81: 63-75.  
Guo Qinghai, Wang Yanxin, Liu Wei. 2007. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 166(3/4): 255-268.  
Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Cui Yue, Zhang Jiatang, Zhao Yuhang. 2019. Present geothermal characteristics and influencing factors in the Xiong'an New Area, North China[J]. Energies, 12(20): 1-22.  
Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Cui Yue. 2020. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in the Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2026-2035 (in Chinese with English abstract).  
Han Zheng, Cui Yiqiao, Wang Shufang, Li Xiao, Sun Ying. 2015. Geothermal resource assessment based on Monte-Carlo method—A case study of geothermal field in Xiong County of Hebei Province[J]. Urban Geology, 4: 58-62 (in Chinese with English abstract).  
Jiang Haiyang, Wang Shuxing, Liu Lian, Cao Yanling, Shi Meng, Li Tingting, Sun Wenguang. 2018. Hydrochemical and environmental isotope characteristics of geothermal resources in Linyi section of Yishu fault zone [J]. Land and Resources of Shanghai, 39 (4): 90-94 (in Chinese with English abstract).  
Kong Yanlong, Pang Zhonghe, Pang Jumei, Li Jie, Pan Sheng. 2020. Fault-affected fluid circulation revealed by hydrochemistry and isotopes in a large-scale utilized geothermal reservoir[J]. Geofluids, 2020(24): 1-13.  
Li Hu, Xia Lingxiao, Jiang Guosheng. 2015. Analysis and research on ion proportion coefficient of Ordovician geothermal fluid in Tianjin [J]. Groundwater, 37(5): 35-37 (in Chinese with English abstract).  
Li Kewen, Bian Huiyuan, Liu Changwei, Zhang Danfeng, Yang Yanan. 2015. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42: 1464-1474.  
Li Yanyan, Zhang Baojian, Xing Yifei, Wang Guiling. 2021. Study on the fracture law of carbonate rocks of Gaoyuzhuang Formation under different confining pressures in Gaoyang geothermal field of Xiong'an New Area[J]. Geology in China: 1-15 [2021-04-19]

- <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210419.1328.006.html> (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingliang, He Tong, Wu Qifan, Guo Qinghai. 2020. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. *Earth Science*, 45(6): 2221–2231.
- Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Yue Gaofan. 2020. Thermal storage space structure and resource potential of Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1981–1990 (in Chinese with English abstract).
- Pang Jumei, Pang Zhonghe, Lü Min, Tian Jiao, Kong Yanlong. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77(1):12.
- Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Pang Jumei, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2017. Research on geothermal resources and development and utilization in Xiong'an new area[J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 32(11): 1224–1230 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Gao Jun, Zhang Baojian, Xing Yifei, Zhang Wei, Ma Feng. 2020. Research on thermal reservoir characteristics and high productivity geothermal well parameters of Wumishan Formation in Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1970–1980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, Zhang Wei. 2020. Current situation and development trend of geothermal resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Wang Wanli, Zhang Wei, Ma Feng, Liu Feng. 2020. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing–Tianjin–Hebei region in China[J]. *China Geology*, 3(1): 173–181.
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Study on the accumulation model and potential of geothermal resources in Beijing Tianjin Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074–1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Gong Yulie, Lu Zhenneng, Ma Weibin. 2013. Looking at China's geothermal development and utilization from the perspective of European geothermal development [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 1(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Pang Zhonghe. 2021. Geothermal energy welcomes unprecedented development opportunities [N]. *China Science Daily*, 2021–01–06 (1).
- Wang Jiyang, Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. 2017. Progress and development trend of geothermal research in China's oil fields[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 2015. *Geothermy and its Application*[M]. Beijing: Science Press: 257–376(in Chinese).
- Wang Jiyang. 2020. Clean geothermal heating is promising[N]. *China Science Daily*, 2020–09–02 (2).
- Wang Zhuting, Zhang Chao, Jiang Guangzheng, Hu Jie, Tang Xianchun, Hu Shengbiao. 2019. Characteristics and genetic mechanism of current geothermal field in Xiong'an New Area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62 (11): 4313–4322 (in Chinese with English abstract).
- Xia Liangyu, Zhang Yabo. 2019. An overview of world geothermal power generation and a case study on China—The resource and market perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112: 411–423.
- Yan Xiaoxue, Gan Hao, male, Yue Gaofan. 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of typical geothermal fields in Huizhou Conghua, Guangdong[J]. *Geological Review*, 65 (3): 743–754 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Meng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Liu Zhiming, Hu Xiancai, Wang Guiling. 2014. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high–temperature geothermal system in Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(3): 382–392 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingang, Wan Guan. 2014. Current situation and prospect of China's geothermal resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32: 651–661.
- Zhou Cheng, Elham Doroodchi, Behdad Moghtaderi. 2013. An in–depth assessment of hybrid solar–geothermal power generation[J]. *Energy Conversion and Management*, 74: 88–101.
- Zhou Zongying, Liu Shiliang, Liu Jinxia. 2015. Characteristics and development countermeasures of China's geothermal resources[J]. *Journal of Natural Resources*, 30(7): 1210–1221 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 崔悦. 2020. 雄安新区雾迷山组地热资源热源成因机制[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 冯欣, 张亚哲. 2014. 深州地区地下水离子比例系数分析研究[J]. *中国农村水利水电*, (4): 18–20, 24.
- 郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 唐博宁, 崔悦. 2020. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. *地质学报*, 94(7): 2026–2035.
- 韩征, 崔一娇, 王树芳, 李潇, 孙颖. 2015. 基于蒙特卡洛法的地热资源评价—以河北省雄县地热田为例[J]. *城市地质*, 4: 58–62
- 江海洋, 王树星, 刘连, 曹艳玲, 史猛, 李婷婷, 孙文广. 2018. 沂沭断裂带临沂段地热资源水化学及环境同位素特征[J]. *上海国土资源*, 39(4): 90–94.
- 李虎, 夏玲晓, 江国胜. 2015. 天津地区奥陶系地热流体离子比例系

- 数分析研究[J]. 地下水, 37(5): 35-37.
- 李燕燕, 张保建, 邢一飞, 王贵玲. 2021. 雄安新区高阳地热田热储高于庄组碳酸盐岩不同围压下破碎规律研究[J]. 中国地质: 1-15[2021-04-19] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210419.1328.006.html>.
- 马峰, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张汉雄, 岳高凡. 2020. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 94(7): 1981-1990.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 胡圣标, 汪集暘. 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 32(11): 1224-1230.
- 汪集暘, 龚宇烈, 陆振能, 马伟斌. 2013. 从欧洲地热发展看我国地热开发利用问题[J]. 新能源进展, 1(1): 1-6.
- 汪集暘, 庞忠和. 2021. 地热能迎空前发展机遇[N]. 中国科学报, 2021-01-06(1).
- 汪集暘, 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 2017. 中国油田地热研究的进展和发展趋势[J]. 地学前缘, 24(3): 1-12.
- 汪集暘. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社: 257-376.
- 汪集暘. 2020. 地热清洁取暖大有可为[N]. 中国科学报, 2020-09-02(2).
- 王贵玲, 高俊, 张保建, 邢一飞, 张薇, 马峰. 2020. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. 地质学报, 94(7): 1970-1980.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1-9.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 44(6): 1074-1085.
- 王朱亭, 张超, 姜光政, 胡杰, 唐显春, 胡圣标. 2019. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 62(11): 4313-4322.
- 闫晓雪, 甘浩男, 岳高凡. 2019. 广东惠州—从化典型地热田水文地球化学特征及成因分析[J]. 地质论评, 65(3): 743-754.
- 张萌, 蔺文静, 刘昭, 刘志明, 胡先才, 王贵玲. 2014. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(3): 382-392.
- 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 2015. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 30(7): 1210-1221.