

doi: 10.12029/gc20230226002

赵子锐, 张薇, 王贵玲, 邢林啸, 张汉雄, 赵佳怡. 2025. 冀中拗陷高阳地热田水文地球化学特征及其对地热成因的约束[J]. 中国地质, 52(1): 246–263.

Zhao Zirui, Zhang Wei, Wang Guiling, Xing Linxiao, Zhang Hanxiong, Zhao Jiayi. 2025. Hydrogeochemical characteristics of Gaoyang geothermal field in central Hebei Depression and its constraint on geothermal genesis[J]. Geology in China, 52(1): 246–263(in Chinese with English abstract).

冀中拗陷高阳地热田水文地球化学特征及其对地热成因的约束

赵子锐^{1,2}, 张薇^{1,2}, 王贵玲^{1,2}, 邢林啸^{1,2,3}, 张汉雄^{1,2}, 赵佳怡^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:【研究目的】高阳地热田赋存丰富的中低温地热资源, 地热流体水文地球化学研究是认识深部地热水循环过程、揭示地热系统成因机制的有效手段。【研究方法】通过对高阳地热田地热水样品的水化学及同位素数据的分析, 研究深部地热水的形成与演化过程。【研究结果】碳酸盐岩热储水化学类型为 Cl-Na 型, 砂岩热储水化学类型为 HCO₃-Cl-Na 和 Cl-HCO₃-Na 型, 地热水中的离子组分主要受盐岩、碳酸盐岩的溶解以及阳离子交替吸附作用控制。地热水接受太行山和燕山山区大气降水补给, 补给高程在 759.12~1092.33 m。雾迷山组热储温度为 102~154℃, 热循环深度为 2524~4020 m; 馆陶组热储温度为 61~84℃, 热循环深度为 1357~2024 m。【结论】高阳地热田雾迷山组热储水样 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$ 小于馆陶组热储, $\gamma_{SO_4^{2-}}/\gamma_{Cl^-}$ 和 $\gamma_{Cl^-}/(\gamma_{HCO_3^-} + \gamma_{CO_3^{2-}})$ 大于馆陶组热储, 说明雾迷山组热储相比于馆陶组热储变质程度更高, 封闭性更好, 地热水循环速度更缓慢, 盐化程度更高。深部热储的热量一部分通过热水沿断裂通道以热对流的方式向上传递, 另一部分通过岩石以热传导的方式向上传递, 形成对流-传导型地热系统。

关键词:冀中拗陷; 高阳地热田; 水文地球化学; 氢氧同位素; 热储温度; 地热勘查工程

创新点: (1) 通过分析水化学特征, 探究高阳地热田深部热水形成与演化过程; (2) 利用多种地热温标对高阳地热田馆陶组和雾迷山组热储温度进行计算; (3) 总结了高阳地热田水热成因模式。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0246-18

Hydrogeochemical characteristics of Gaoyang geothermal field in central Hebei Depression and its constraint on geothermal genesis

ZHAO Zirui^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Guiling^{1,2}, XING Linxiao^{1,2,3}, ZHANG Hanxiong^{1,2}, ZHAO Jiayi^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. Faculty of Environment, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei China)

收稿日期: 2023-02-26; 改回日期: 2023-07-05

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目(SK202306)与中国地质调查项目(DD20190555)联合资助。

作者简介: 赵子锐, 男, 1996 年生, 博士生, 主要从事地热地质方面的研究; E-mail: 184239608@qq.com。

通信作者: 王贵玲, 男, 1964 年生, 研究员, 主要从事地热资源评价方面研究; E-mail: guilingw@163.com。

Abstract: This paper is the result of geothermal exploration engineering.

[Objective] Gaoyang geothermal field rich in low–medium temperature geothermal resources. Hydrogeochemical research of geothermal fluids is an effective method to understand the processes of deep geothermal water circulation and to reveal the genesis mechanism of geothermal systems. **[Methods]** Through analyzing hydrochemical and isotopic data of geothermal water samples in Gaoyang field, we can explore the formation and development process of deep geothermal water. **[Results]** The hydrochemical type of carbonate reservoirs is Cl–Na type, and that of sandstones reservoirs is $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{--Na}$ and $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{--Na}$ type. The ionic components in geothermal water are mainly controlled by the dissolution of salt rock and carbonate rock and the alternating adsorption of cations. Geothermal water is recharged from precipitation in the Taihang and Yanshan mountains, The recharge elevation of geothermal water is 759.12–1092.33 m. The geothermal reservoirs temperature of Jxw is 102–154°C, and the depth of thermal cycle is 2524–4020 m; the geothermal reservoirs temperature of Ng is 61–84°C, and the depth of thermal cycle is 1357–2024 m. **[Conclusions]** In Gaoyang geothermal field, the $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ of samples from the Jxw reservoirs is smaller than that Ng reservoirs, and the $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$ and $\gamma\text{Cl}^-/(\gamma\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-})$ are larger than that of the Ng reservoirs. This indicates that Jxw reservoirs has a higher degree of metamorphism, better confinement, slower geothermal water circulation and higher degree of salinization than the Ng reservoirs. The heat from the deep thermal storage is partly transferred upward by thermal convection through hot water along the fault channels, and partly transferred upward by thermal conduction through rocks, forming a convection–conduction type geothermal system.

Key words: Jizhong Depression; Gaoyang geothermal field; hydrogeochemistry; hydrogen–oxygen isotopes; geothermal reservoir temperature; geothermal exploration engineering

Highlights: (1) Through analysis of water chemistry characteristics, the formation and evolution of deep hot water in the Gaoyang geothermal field were explored. (2) Reservoirs' temperatures for the Ng and Jxw reservoirs in the Gaoyang geothermal field were calculated by using multiple geothermometers. (3) The hydrothermal genetic model of Gaoyang geothermal field was summarized.

About the first author: ZHAO Zirui, male, born in 1996, Ph.D. candidate, mainly engaged in geothermal geology research; E-mail: 184239608@qq.com.

About the corresponding author: WANG Guiling, male, born in 1964, researcher, mainly engaged in geothermal resources evaluation research; E-mail: guilingw@163.com.

Fund support: Supported by the projects of Basic Research Fees of Chinese Academy of Geological Sciences (No.SK202306) and China Geological Survey (No.DD20190555).

1 引言

地热能是一种可再生清洁能源,具有资源储量大、分布广泛、清洁环保、不受天气和季节变化影响等特点,其开发利用不仅能缓解中国目前的能源资源压力,也是贯彻落实国家“碳达峰、碳中和”战略目标的决策部署(汪集旻等, 2012; 王贵玲等, 2017a; Wang et al., 2020)。分析地热系统的成因机制对于科学开发利用地热资源至关重要(王贵玲和蔺文静, 2020),一直以来水文地球化学方法是分析水热系统成因机制的有效手段,通过分析地热水化学组分及同位素特征,了解地热水的水岩作用程度、识别地热水的补给来源和补给高程、计算深部地热储层温度及循环深度,研究地热水循环与演化过程,以揭示地热系统成因机制(Mao et al., 2021)。

华北平原分布的沉积盆地型地热资源主要特点表现为储集层厚度大、热储类型多、资源储量大、可利用程度高、赋存中低温地热水(Wang et al., 2018; 张薇等, 2019)。目前,针对华北地区地热资源勘查评价、地热系统成因机制、地热资源开发利用潜力等研究已持续数十年。陈墨香等(1990)通过分析华北断陷盆地丰富的地温和大地热流测试数据,总结了地温和大地热流展布特点,探讨地温场的特点及形成机制,估算地热水资源潜力,评价其开发利用前景。王贵玲等(2017b)在分析京津冀地区构造、大地热流、地温梯度等地质背景的基础上,对研究区地热资源的赋存条件与成藏模式进行总结,并对其资源开发潜力进行评价。崔悦等(2020)通过构建地壳分层模型,探讨冀中拗陷地热异常的成因背景。前人在雄安新区开展了不少工作,尤其

针对牛驼镇地热田和容城地热田, Pang et al. (2018) 基于地热流体的化学和同位素组成对牛驼镇地热田的地热流体的来源和组成进行研究, 同时对该地区壳幔热流比进行评估, 为牛驼镇地热田壳幔热结构组成提供重要信息; 刘明亮等(2020)讨论了雄安新区地热系统成因机制, 认为雄安新区地热异常是深部放射性元素衰变在特定的大地构造背景下聚集而形成的; 马峰等(2020)研究容城地热田热储空间结构与分布特征, 并且构建了三维地质模型对该地区的资源潜力进行评估; 赵佳怡等(2020)计算了容城地热田的热储温度和热循环深度, 对雾迷山组碳酸盐岩热储地热水的深部循环机制进行研究; 邢一飞等(2022)对华北地区 5 个主要构造单元开展地热水水化学采样与测试工作, 研究认为区内地下水化学场主要受水岩相互作用、断裂和储层封闭性等因素的影响。

高阳地热田热储温度较高, 具有较高的开发利用潜力, 近年来一些学者在高阳地热田开展一系列工作, 王贵玲等(2020)通过对高阳低凸起雾迷山组热储特征与高产能的地热井参数进行研究, 为该区地热资源的勘探开发提供理论依据; 王思琪等(2021)综合地球物理场、区域水动力场、水化学场和地温场多场耦合指示的探测手段, 总结了高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制; Miao et al. (2022)运用 P-波速度成像和大地电测深两种方法来探究高阳低凸起地热异常的原因, 发现地热异常是区域地壳减薄、大断裂的热对流传热、凹凸分布的构造格局、较厚的新生代盖层 4 个因素共同影响的结果; Zhang et al. (2022)综合深部地质构造和岩石圈深部地球动力学过程, 总结了高阳地热田热汇聚机制和开发利用潜力。

通过整理分析前人研究成果, 发现前人主要利用地温场与大地热流特征、地球物理勘探手段、多场耦合分析结果, 研究高阳地热田聚热机制, 地热水化学主要研究层位以雾迷山组碳酸盐岩热储为主。本研究通过对高阳地热田的雾迷山组地热水和馆陶组地热水进行水化学组分、稳定同位素分析, 探讨地热水样品的水化学特征、将不同热储地热水深部地球化学演化过程进行对比, 计算地热水特征系数、补给高程、热储温度和热循环深度, 研究地热水的形成与演化, 揭示水热成因模式, 为高阳地

热田地热资源开发与利用提供科学依据。

2 研究区概况

冀中拗陷位于华北平原北部, 构造上隶属于华北板块(I级)渤海湾裂谷盆地(II级)的一个III级构造单元, 呈北北东向带状展布(图1)。西北部以太行山—燕山山前区域断裂及角度不整合为界与西侧太行山和北侧燕山山间盆地区相邻, 南东部以断层及角度不整合为界与东侧沧县隆起和南侧邢衡隆起相邻, 地跨北京、天津、河北三地, 南北长 300 km, 东西宽 80~130 km, 面积约为 28400 km²。区内地势西北高, 东南低, 海拔 10~100 m, 坡度为 0.05%~0.5%, 主要发育 NW、NE 和 EW 向的断裂, 其中 NE 走向断裂最为发育。冀中拗陷由 12 个凹陷区和 7 个凸起区构成, 呈现出东西分带、南北分区的沉积构造格局(张文朝等, 2008)。

高阳地热田位于冀中拗陷中南部, 由高阳低凸起和蠡县斜坡两个构造单元组成, 整体呈北东向条带状分布, 西部为保定凹陷, 东部为饶阳凹陷, 北部为霸县凹陷, 南部为晋县凹陷和无极—藁城低凸起。地热田内主要发育高阳断裂、安国断裂及其一些小断裂, 其中高阳断裂沿高阳低凸起构造单元呈北东向展布, 该断裂上至新近系, 下至长城系(隋少强, 2020)。自太古宙以来, 区内主要经历结晶基底形成、地台发育、褶皱—断陷发育以及新生代以来的断陷—拗陷 4 个阶段。研究区及周边地区地层总体特征是在太古宇—古元古界变质岩结晶基底之上沉积了元古宇(长城系、蓟县系)、古生界(寒武系、奥陶系)、中生界(侏罗系、白垩系)和新生代(古近系、新近系、第四系)(图2), 其中古近系和蓟县系呈角度不整合接触, 地层不整合面与深大断裂不仅是研究区地热水的运移通道, 也是地下水进入热储层的重要通道。

高阳地热田发育沉积盆地型地热资源, 按热储类型分为砂岩热储和碳酸盐岩热储, 砂岩热储主要包括新近系明化镇组热储和馆陶组热储, 碳酸盐岩热储以中新元古界热储为主, 局部发育寒武系—奥陶系热储。砂岩热储中明化镇组热储岩性以砂岩—泥岩互层为主, 馆陶组热储底部发育砾岩, 向上为砂岩和泥岩; 碳酸盐岩热储中寒武统—奥陶系热储岩性为灰岩、细晶白云岩、灰质白云岩, 蓟县系雾

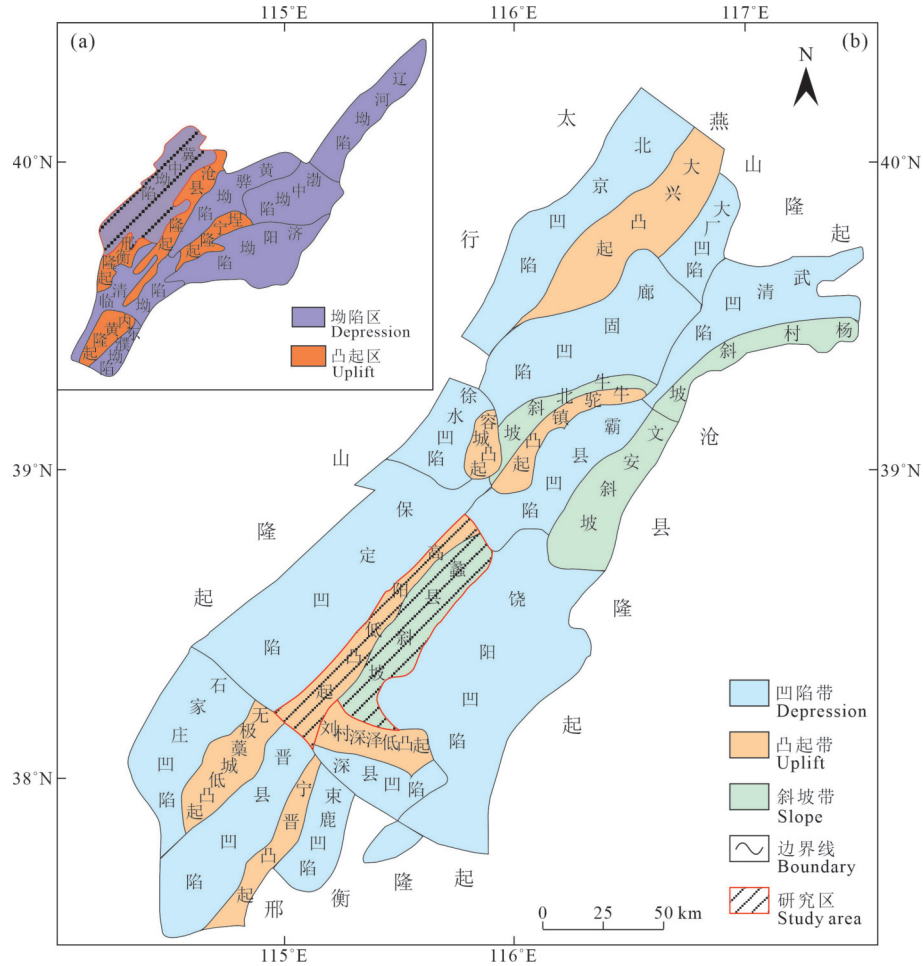


图 1 渤海湾盆地构造单元(a)和冀中拗陷构造单元划分(b)(据刘海剑, 2015 修改)

Fig.1 Tectonic unit of the Bohai Bay Basin (a), and the structure unit division of Jizhong Depression (b) (modified from Liu Haijian, 2015)

迷山组热储岩性为白云岩、泥质白云岩。雾迷山组碳酸盐岩热储具有分布范围广、热储埋深较深、厚度大、热储温度高、岩溶裂隙发育、渗透性好的特点,是高阳地热田最好的基岩热储层,具有较大的地热勘探潜力。

3 样品采集与测试

本研究水样共 20 组,其中野外采集水样 19 组,资料收集水样数据 1 组(GJ10,数据引自《河北省地热资源现状调查评价区划报告》(李郡等, 2015^①))。采样点分布在高阳低凸起和蠡县斜坡 2 个构造单元上(图 3),包括蓟县系雾迷山组(Jxw)碳酸盐岩热储地热水 10 组,水样编号 GJ01~GJ10;新近系馆陶组(Ng)砂岩热储地热水 7 组,水样编号 GS01~GS07;浅层地下水 2 组,水样编号 GQ01、

GQ02;大气降水 1 组,水样编号 DQJS01。在野外取样过程中使用数据型笔式测量仪对水温、pH、TDS 和电导率(EC)进行现场测量,对需要进行金属离子分析的样品中加入 2 mL 稀硝酸将水样进行酸化(pH<2)。取样结束后立即密封并保存于低温环境,之后将水样运输至中国地质科学院水文地质环境地质研究所自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心进行测试分析。

测试内容包括水质全分析和氢氧同位素分析,水质全分析依据《食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538—2016)、《生活饮用水标准检验方法总则》(GB/T 5750—2006)和《地下水水质分析方法》(DZ/T 0064—1993)检测,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP6300)对水样中的阴离子、阳离子和微量元素进行检测,阴、阳离子平衡误差

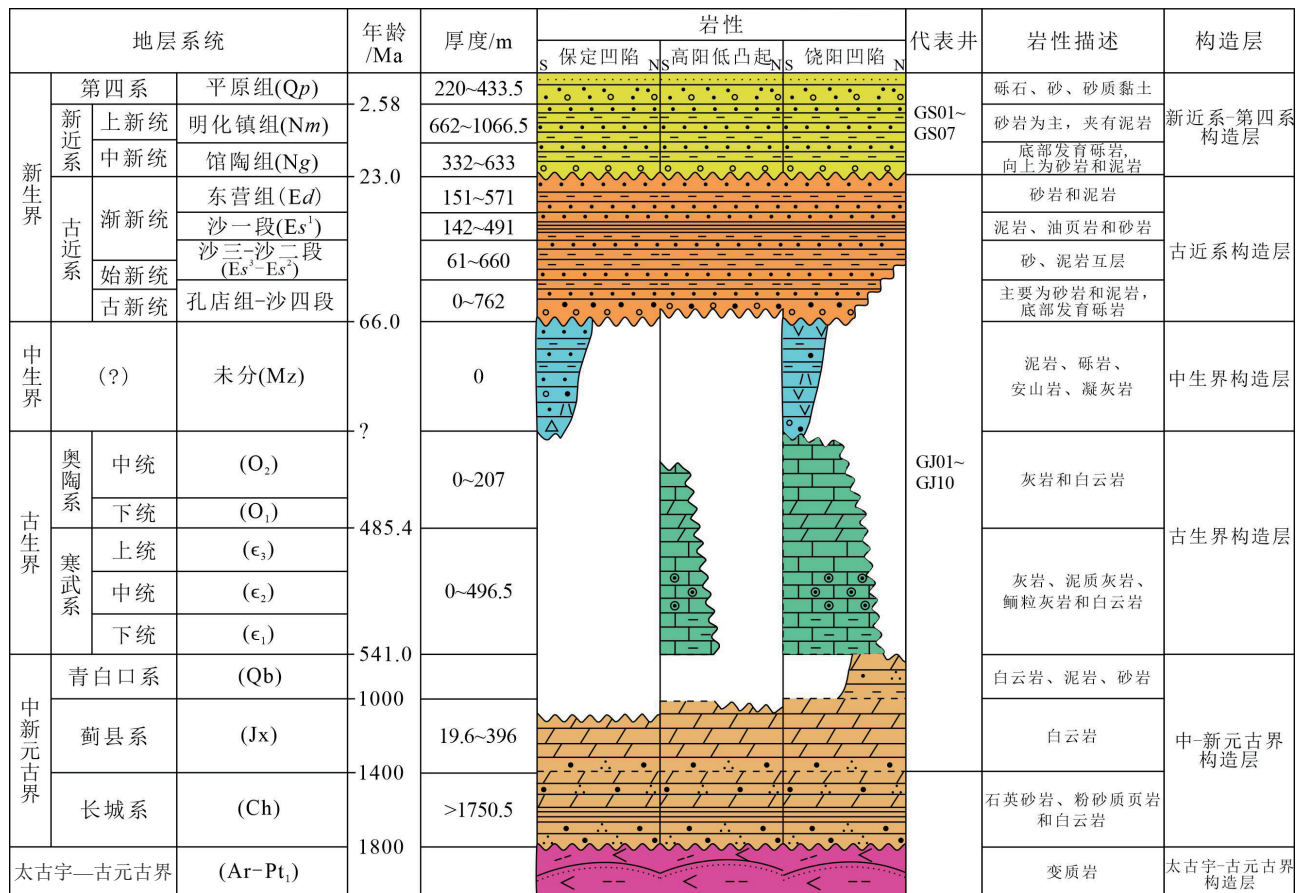


图2 高阳低凸起及邻区地层综合柱状图(据单帅强, 2022 修改)

Fig.2 Comprehensive histogram of strata in Gaoyang low uplift and adjacent areas (modified from Shan Shuaiqiang, 2022)

控制在3%以内。 δD 和 $\delta^{18}O$ 利用水同位素分析仪(L2130i)进行检测,测试方法为波长扫描-光腔衰荡光谱法, δD 和 $\delta^{18}O$ 的测试精度分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.1\%$ 。水样测试结果见表1。

4 地热水文地球化学特征

4.1 水化学特征

4.1.1 主要指标统计分析

地热水化学类型与热储岩性、埋藏条件关系密切。不同热储类型,其水化学组分也存在较大的差异。将研究区Jxw地热水和Ng地热水主要的化学指标进行数理统计分析,结果详见表2。

由表2可知,研究区Ng地热水pH范围为7.94~8.58,均值8.15,全部呈弱碱性;Jxw地热水pH范围为6.63~8.46,均值7.54,部分呈弱碱性。Ng地热水TDS含量在661.1~1209 mg/L,均值1009.06 mg/L;Jxw地热水TDS含量在2398~6461

mg/L,均值5056.91 mg/L。在Jxw地热水中 Cl^- 和 Na^+ 含量均值较其他离子更高,且变异系数较小,反映其在地热水阴、阳离子中占绝对优势;Ng地热水中 Na^+ 在阳离子中占绝对优势,阴离子中 HCO_3^- 与 Cl^- 含量相当, HCO_3^- 均值稍大于 Cl^- 。Jxw地热水中微量元素 F^- 、 Sr^{2+} 、 Li^+ 、偏硼酸和偏硅酸含量均值远高于Ng地热水,且变异系数较低,其主要原因是Jxw热储水岩作用程度更强烈,岩石中微量元素更多进入水中。

4.1.2 水化学类型

现场调查与取样测试结果表明,Jxw热储取样深度3200~4000 m,井口水温65.6~100℃;Ng热储取样深度1174.3~2640 m,井口水温44.8~82℃。根据水样指标测试结果绘制的Piper三线图(图4)显示,研究区Jxw热储水化学类型全部为 $Cl-Na$ 型;Ng热储水化学类型为 $HCO_3-Cl-Na$ 和 $Cl-HCO_3-Na$ 型,浅层地下水为 $SO_4-Na-Ca$ 和 $HCO_3-Na-Ca$ 型

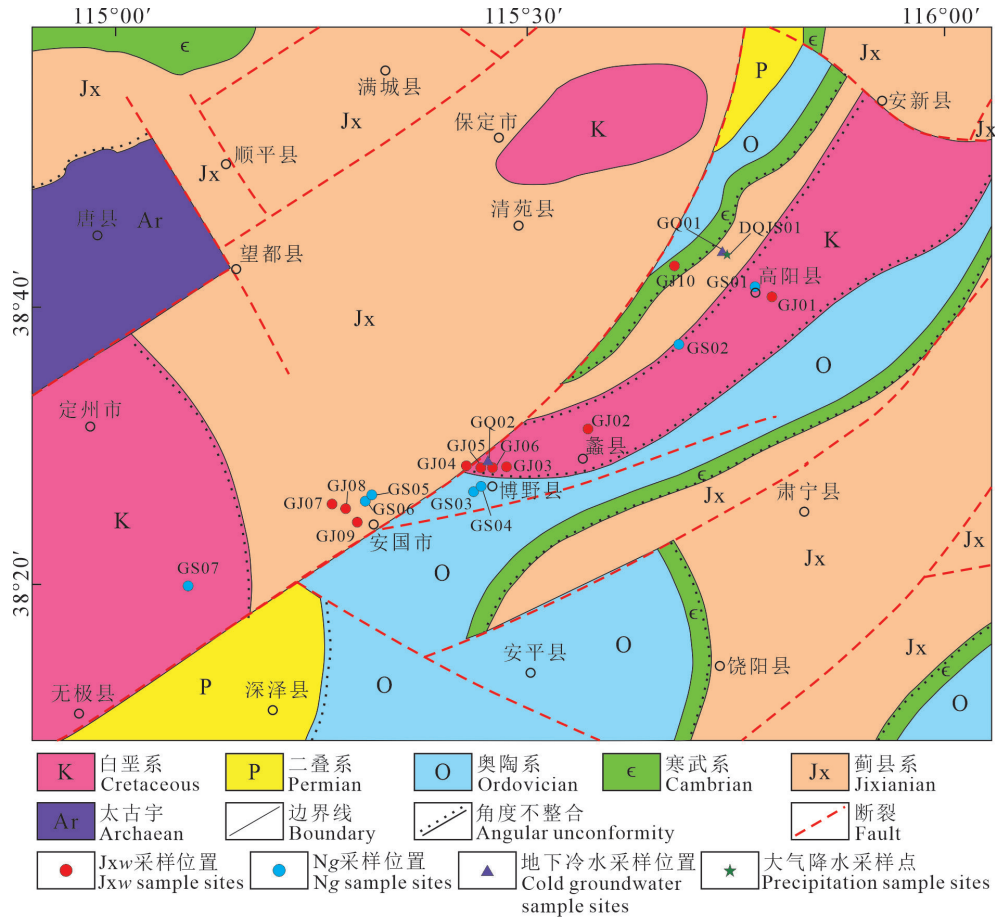


图 3 研究区前新生代地质图及采样位置(据滕飞, 2018^②修改)
Fig.3 Pre-Cenozoic geological map of the study area and sampling locations (modified from Teng Fei, 2018^②)

表 1 高阳地热田水样主要离子浓度 (mg/L)

Table 1 Main ion concentration (mg/L) of water samples in Gaoyang geothermal field

样品编号	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Sr ²⁺	Li ⁺	偏硼酸	偏硅酸	TDS	δD/‰	δ ¹⁸ O/‰
GJ01	8.46	1865	165.6	18.00	12.76	456.1	2818	94.16	8.78	2.811	5.704	107.2	204.4	5563	-70	-5.6
GJ02	8.4	2097	193.4	16.99	8.70	473.9	3096	111.7	9.68	7.327	6.563	120	182.9	6109	-70	-5.4
GJ03	8.38	2062	186.5	23.03	11.34	571.6	3097	116.1	8.63	6.689	5.339	118.1	204.1	6461	-71	-5.9
GJ04	7.08	1466	145.6	88.15	19.60	852.5	1978	118.3	9.45	7.970	3.744	78.48	185	4882	-72	-6.8
GJ05	7.46	1691	149.3	88.56	20.08	838.2	2387	104.9	8.43	8.611	5.040	90.26	179.1	5122	-72	-6.4
GJ06	7.53	1894	167.0	77.05	15.09	761.2	2746	112.3	8.42	9.714	5.781	104.2	186	5677	-71	-5.9
GJ07	7.03	1857	147.9	106.30	15.60	906.3	2675	120.6	6.58	10.74	5.008	91.72	133.8	5618	-73	-6.4
GJ08	7.34	823.9	37.19	53.59	8.86	574.6	996.2	92.81	2.11	3.091	0.953	25.18	78.78	2398	-75	-9.1
GJ09	7.05	1098	73.45	55.31	7.04	675.3	1391	104.5	4.09	5.309	2.201	48.17	100.6	3212	-74	-8.2
GJ10	6.63	1778.3	172.6	89.80	12.60	795.7	2566.8	93.7	8.57	9.712	5.150	21.99	175.3	5657.1	-71	-6.2
GS01	7.94	463.6	4.29	6.70	0.57	589.4	275	108.1	3.14	0.280	0.057	2.3	62.92	1209	-74	-9.4
GS02	8.19	359.6	2.90	4.97	0.62	527.2	164.1	81.49	2.99	0.148	0.039	1.26	56.11	925.7	-73	-9.4
GS03	7.95	445.1	4.60	9.37	0.83	396.9	369.8	102	1.72	0.536	0.072	1.62	60.89	1183	-74	-9.7
GS04	8.16	416.9	5.03	8.83	0.61	432.4	303.4	124.2	2.36	0.346	0.067	1.92	68.02	1135	-74	-9.3
GS05	8.04	412.0	4.00	11.81	1.11	325.8	368	110.4	1.69	0.636	0.055	1.12	52.62	1115	-75	-9.9
GS06	8.16	308.3	2.74	7.61	0.75	344.8	206.1	94.28	1.56	0.300	0.032	0.64	49.46	834.6	-76	-10.3
GS07	8.58	242.9	1.97	5.71	0.68	296.8	116	91.4	1.33	0.116	0.014	0.46	42.93	661.1	-76	-10.2
GQ01	7.83	99.8	1.20	82.89	49.34	179.5	105.4	327.7	0.43	0.897	0.006	<0.20	22.97	889.7	-80	-10.6
GQ02	8.09	49.1	3.18	21.81	6.91	209.4	5.25	6.4	0.37	0.297	<0.005	<0.20	21.47	326.7	-70	-9.7
DQJS01	5.86	2.8	0.45	4.54	0.81	4.74	1.79	7.8	0.15	0.016	<0.005	<0.20	<1.00	35.62	-55	-8.5

注: pH无量纲。

表 2 水化学指标统计

Table 2 Statistics of water chemistry index

热储类型	化学指标	最小值/ (mg/L)	最大值/ (mg/L)	均值/ (mg/L)	标准差	变异系数/ %	化学指标	最小值/ (mg/L)	最大值/ (mg/L)	均值/ (mg/L)	标准差	变异系数/ %
Ng热储 (n=7)	K ⁺	1.97	5.03	3.65	1.12	30.76	F ⁻	1.33	3.14	2.11	0.72	34.22
	Na ⁺	242.90	463.60	378.34	79.53	21.02	Sr ²⁺	0.12	0.64	0.34	0.19	56.52
	Ca ²⁺	4.97	11.81	7.86	2.35	29.94	Li ⁺	0.01	0.07	0.05	0.02	43.03
	Mg ²⁺	0.57	1.11	0.74	0.19	25.26	HBO ₂	0.46	2.30	1.33	0.67	49.96
	Cl ⁻	116.00	369.80	257.49	98.85	38.39	H ₂ SiO ₃	42.93	68.02	56.14	8.57	15.28
	SO ₄ ²⁻	81.49	124.20	101.70	14.10	13.86	TDS	661.10	1209.00	1009.06	206.47	20.46
	HCO ₃ ⁻	296.80	589.40	416.19	108.38	26.04	pH	7.94	8.58	8.15	0.22	2.67
Jxw热储 (n=10)	K ⁺	37.19	193.40	143.85	49.99	34.75	F ⁻	2.11	9.68	7.47	2.49	33.33
	Na ⁺	823.90	2097.00	1663.22	415.74	25.00	Sr ²⁺	2.81	10.74	7.20	2.74	38.12
	Ca ²⁺	16.99	106.30	61.68	33.24	53.90	Li ⁺	0.95	6.56	4.55	1.75	38.39
	Mg ²⁺	7.04	20.08	13.17	4.46	33.84	HBO ₂	21.99	120.00	80.53	36.52	45.35
	Cl ⁻	996.20	3097.00	2375.10	709.37	29.87	H ₂ SiO ₃	78.78	204.40	163.00	43.54	26.71
	SO ₄ ²⁻	92.81	120.60	106.91	10.54	9.86	TDS	2398.00	6461.00	5069.91	1286.71	25.38
	HCO ₃ ⁻	456.10	906.30	690.54	163.42	23.67	pH	6.63	8.46	7.54	0.66	8.71

注: pH无量纲。

表 3 地热水化学指标相关系数

Table 3 Correlation coefficients of geothermal water chemistry indexes

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	pH	温度
Ng 热储	K ⁺	1.000								
	Na ⁺	0.912**	1.000							
	Ca ²⁺	0.595	0.477	1.000						
	Mg ²⁺	0.086	0.097	0.813*	1.000					
	Cl ⁻	0.863*	0.827*	0.872*	0.553	1.000				
	SO ₄ ²⁻	0.819*	0.598	0.661	0.140	0.702	1.000			
	HCO ₃ ⁻	0.364	0.583	-0.404	-0.607	0.028	0.021	1.000		
	TDS	0.943**	0.995**	0.550	0.145	0.870*	0.667	0.510	1.000	
	pH	-0.760*	-0.910**	-0.498	-0.226	-0.799*	-0.406	-0.496	-0.899**	1.000
	温度	0.766*	0.707	0.298	-0.038	0.546	0.481	0.467	0.709	-0.493
Jxw 热储	K ⁺	1								
	Na ⁺	0.970**	1							
	Ca ²⁺	-0.131	-0.179	1						
	Mg ²⁺	0.334	0.246	0.630	1					
	Cl ⁻	0.962**	0.998**	-0.225	0.215	1				
	SO ₄ ²⁻	0.387	0.417	0.218	0.362	0.376	1			
	HCO ₃ ⁻	-0.012	-0.066	0.971**	0.692*	-0.117	0.389	1		
	TDS	0.985**	0.987**	-0.108	0.326	0.981**	0.446	0.017	1	
	pH	0.422	0.497	-0.861**	-0.233	0.535	0.065	-0.791**	0.424	1
	温度	0.703*	0.590	-0.268	0.098	0.605	-0.139	-0.208	0.656*	0.298

注: **在0.01级别(双尾), 相关性显著; *在0.05级别(双尾), 相关性显著。

水。Jxw热储中高浓度的Na⁺和Cl⁻也反映了其深部热水径流时间较长, 热水变质程度较深(陈墨香, 1988)。

水样 Schoeller 图(图 5)显示, 研究区中水样主要离子 Na⁺、K⁺、Cl⁻在 Jxw 热储中的含量均大于 Ng 热储, 其原因是因为 Jxw 热储水循环路径更长, 溶滤作用更充分, 围岩中的可溶物质大量进入热水

中; Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻在 Jxw 热储中高于 Ng 热储, 主要由不同热储岩性差异所导致, Jxw 热储岩性主要为白云岩, 主要矿物组分为白云石和方解石, Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻主要来源于这些碳酸盐矿物的溶解(张人权等, 2011), 地热水与地下冷水离子变化趋势存在差异, 表明其没有明显的水力联系(Zhang et al., 2019a)。

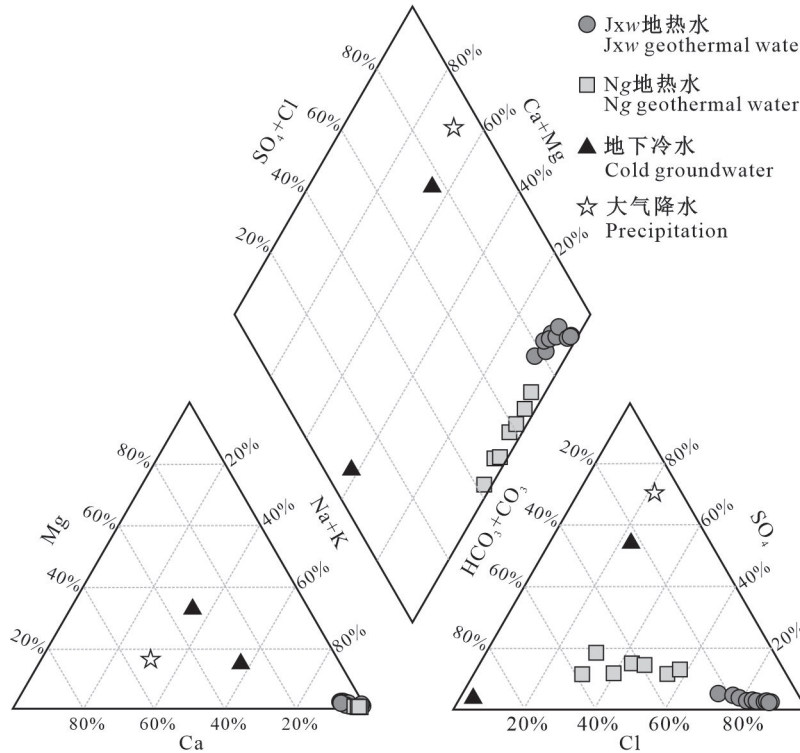


图 4 高阳地热田水样 Piper 三线图
Fig.4 Piper triangular diagram of water samples in Gaoyang geothermal field

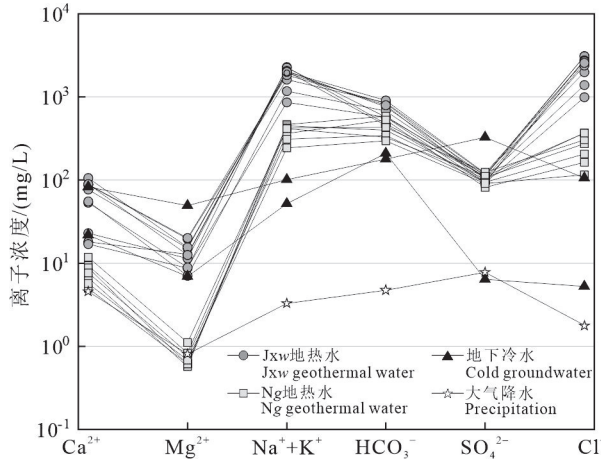


图 5 高阳地热田水样 Schoeller 图
Fig.5 Schoeller diagram of water samples in Gaoyang geothermal field

4.2 水化学演化过程分析

4.2.1 水化学组分相关性分析

对地热水主要水化学指标进行相关性分析,可以判别地热水离子之间的相关程度,推测水化学组分的可能来源。Cl⁻在热水系统中不会形成矿物盐也不易吸附到矿物表面,在高温条件下状态稳定,

具有良好的示踪作用,可以通过分析 Cl⁻与其他离子的相关性来判断其来源。由表 3 可知,研究区 Jxw 热储中 Cl⁻与 Na⁺、K⁺相关性显著,表明二者与 Cl⁻具有相同的物质来源,而主要离子 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻与 Cl⁻相关性较差,说明这些离子只来源于水岩作用中的矿物溶解。HCO₃⁻与 Ca²⁺、Mg²⁺相关性较高,表明这些离子主要来源于白云岩的溶解。TDS 与 Na⁺、K⁺、Cl⁻相关程度高,说明 TDS 含量变化主要受到这三种离子所控制。研究区 Ng 热储中 Cl⁻与 Na⁺、K⁺、Ca²⁺相关性显著,说明这三种离子与 Cl⁻来源相同。两类热储的 TDS 均与 Na⁺、K⁺、Cl⁻的正相关关系显著,表明这三种离子对地热水的 TDS 变化影响较大。

研究区地热水中微量元素主要包括 F⁻、Li⁺、Sr²⁺、偏硼酸和偏硅酸,尤其 Jxw 热储中更为富集,这些微量元素主要来源于水岩作用或者深部热液。通过绘制 Cl⁻与 F⁻、Li⁺、Sr²⁺、偏硼酸和偏硅酸含量关系图(图 6),来判断深部地热水中微量元素的主要来源。Ng 热储中 F⁻和偏硅酸与 Cl⁻的相关性较差,体现出与 Cl⁻有不同的物质来源,Li⁺、Sr²⁺和偏硼酸在该含水层中含量较低,以上表明在 Ng 地

热水中这些微量元素主要来源于水岩作用过程中矿物的溶解。Jxw 热储中 F^- 、 Li^+ 、偏硼酸和偏硅酸与 Cl^- 有较好的正相关, 推测这 4 种微量元素与 Cl^- 具有相似的物质来源; 偏硼酸是地热水中一种常见的物质, 其在地热水中的含量对地热水的径流强度具有一定的指示意义, 地热水中硼含量越高, 表明其径流强度越弱(袁建飞, 2010)。研究区 Jxw 热水中偏硼酸含量明显高于 Ng 热水, 说明 Jxw 热储中地热水径流路径更长, 水流流速更缓慢, 径流强度

更弱。

4.2.2 主要离子来源

地下水在深部循环的过程中会与围岩中的矿物发生反应从而导致不同水化学组分的含量存在一定差异, 其原因与形成于不同条件下岩石中元素的丰度关系密切(孙厚云等, 2020)。地热水中主要离子的含量关系图(图 7)可以识别主要离子来源, 反映水化学演化过程及成因。

$\gamma Na^+/\gamma Cl^-$ 主要用于识别 Na^+ 的来源, Ng 和 Jxw

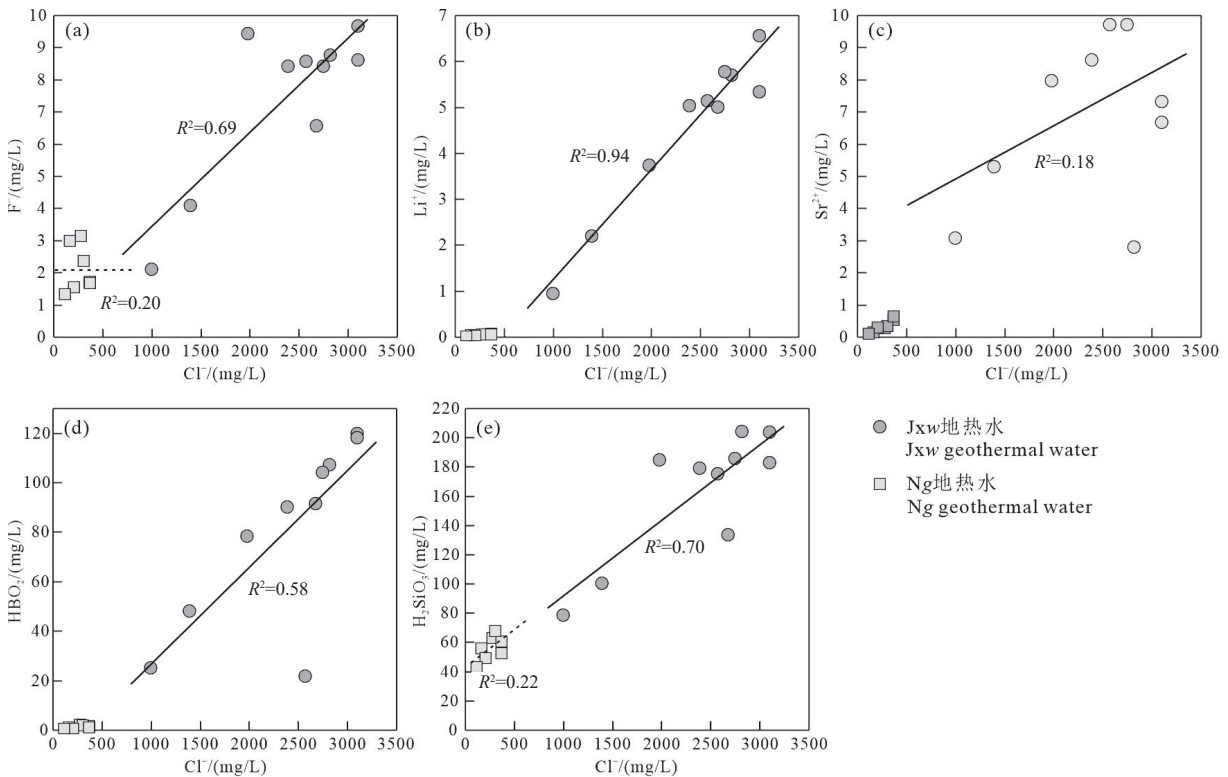


图 6 高阳地热田微量元素与 Cl^- 含量关系

Fig.6 Relationship between trace elements and Cl^- concentration in Gaoyang geothermal field

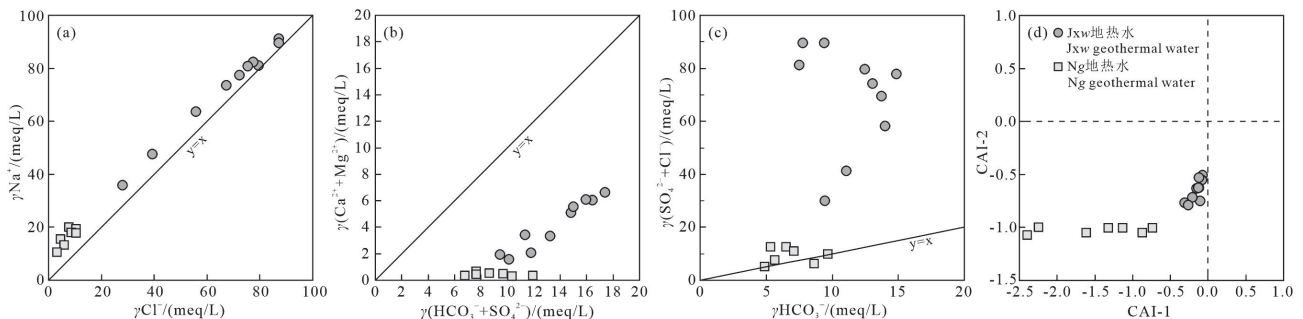


图 7 高阳地热田水样离子比值关系图

Fig.7 Ion ratio relationship of water samples in Gaoyang geothermal field

的全部水样点基本分布在 $y=x$ 线附近且 Na^+ 含量略高于 Cl^- (图 7a), 表明研究区地热水中 Na^+ 主要来源于盐岩溶解, 但也存在其他来源, 比如硅铝酸盐矿物的溶解(如钠长石), 或在阳离子交替吸附作用下岩石中的 Na^+ 被交换到水中。

地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 一般来源于碳酸盐岩、硅酸盐和蒸发岩的风化溶解。通过分析 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 和 $\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的比值关系可以来判断地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源。研究区 Jxw 热储和 Ng 热储水样总体落在 $y=x$ 线下方(图 7b), 但 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 在 Ng 热储均小于 Jxw 热储, 其与热储层的岩性条件对应。Ng 热储中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐矿物的溶解, Jxw 热储中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐矿物的溶解。 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 相比于 $\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 偏低也可能与地热水发生阳离子交替吸附作用有关, 使热水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换至岩石导致含量减少。

$\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-$ 可以用来识别岩石溶解过程中碳酸盐岩和盐岩的控制比例(李军等, 2021), 若水样点偏向 $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-$ 一侧说明 SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来源于盐岩、石膏等蒸发盐岩的溶解, 若偏向 HCO_3^- 一侧则说明 SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来源于碳酸盐岩的溶解。研究区水样 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-$ 关系图(图 7c) 显示, Jxw 和 Ng 热储水样点均落在 1:1 线上方(GS02 除外), 说明储层中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来源于蒸发盐岩的溶解, 部分来源于碳酸盐岩的溶解, 其中 Jxw 热储的 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-$ 值更大, 说明 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的来源受蒸发盐岩溶解的控制程度更深, 与 Jxw 热储地热水循环路径长, 水岩作用程度高有关。

阳离子交替吸附是影响地下水化学演化的重要过程(Appelo and Postma, 2004), 氯碱指数(CAI-1、CAI-2)可以识别地下水阳离子交替吸附过程的方向和强度。CAI-1、CAI-2 计算公式如下:

$$\text{CAI-1} = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Cl}^-} \quad (1)$$

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

若 CAI 全部为正值, 则表明地下水中的 Na^+ 和 K^+ 与围岩中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生离子交换; 若 CAI 全

部为负值, 则表明离子交换方向相反(Yin et al., 2021)。CAI 的绝对值越大, 表示地下水与围岩之间的阳离子交换程度越高。研究区地热水的氯碱指数 CAI-1 和 CAI-2 全部为负值(图 7d), 表示地热水阳离子交替吸附过程为地热水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与围岩中的 Na^+ 和 K^+ 进行交换, 这与前面得出 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量相对贫化的结果一致。Ng 地热水的 CAI-1 和 CAI-2 绝对值均大于 Jxw 地热水, 表明其阳离子交替吸附作用程度更高。

4.3 地热水特征系数

地下水中不同化学组分之间的比例系数可以用来研究一些水文地球化学过程, 通过分析地热水特征系数可以判断地热水所处地质环境, 研究区地热水及浅层地下水的水化学特征系数见表 4。

变质系数($\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$)用来描述地下水的变质程度、热储层水文地球化学环境及封闭性。变质系数越小, 含水层封闭性越好, 变质程度更高。研究区 Jxw 地热水变质系数为 1.02~1.28, Ng 地热水变质系数为 1.73~3.38, 表明 Jxw 热储封闭性更好, 变质程度更高, 所处环境还原性更强, 两个热储层变质系数均大于 1, 说明两个储层热水形成过程中均受大气降水入渗的影响, 其中 Ng 热储受入渗水的影响更大。

脱硫系数($100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$)用来表示地下水脱硫酸作用的程度, 其反应过程为 $\text{SO}_4^{2-} + 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$

表 4 地热水特征系数

Table 4 Characteristic coefficients of geothermal water				
样品编号	热储地层	$\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$	$100 \times \gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$	$\gamma\text{Cl}^-/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-})$
GJ01		1.02	2.47	8.10
GJ02		1.04	2.67	9.17
GJ03		1.03	2.77	8.30
GJ04		1.14	4.41	3.99
GJ05	Jxw	1.09	3.24	4.90
GJ06		1.06	3.02	6.21
GJ07		1.07	3.33	5.08
GJ08		1.28	6.87	2.98
GJ09		1.22	5.56	3.54
GJ10		1.07	2.70	5.54
GS01		2.60	28.99	0.80
GS02		3.38	36.72	0.54
GS03		1.86	20.33	1.60
GS04	Ng	2.12	30.26	1.21
GS05		1.73	22.16	1.94
GS06		2.31	33.73	1.03
GS07		3.23	58.10	0.60
GQ01	Q	1.46	229.63	1.01
GQ02		14.20	86.67	0.04

$\text{H}_2\text{S}+2\text{HCO}_3^-$,若脱硫系数越小,则表明地热水所处环境封闭性越好、还原性越高。若脱硫系数小于1,则表明含水层所处环境还原彻底。研究区 Jxw 热储脱硫系数为 2.47~6.87,Ng 热储脱硫系数为 20.33~58.1,其值均低于浅层地下水,表明两个储层热水均发生一定程度的脱硫酸作用。Jxw 热储比 Ng 热储封闭性更好,所处地质环境还原性更强。

盐化系数($\gamma_{\text{Cl}^-}/\gamma_{(\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-})}$)可以反映地下水的盐化程度,盐化系数越大,表明地下水盐化程度越高。研究区 Jxw 热水盐化系数为 2.98~9.17,平均值 5.78;Ng 热水盐化系数为 0.54~1.94,平均值 1.10。表明 Jxw 地热水比 Ng 地热水径流路径更长,水循环速度更缓慢,盐化程度更高。

4.4 氢氧稳定同位素特征

4.4.1 地热水补给来源

氢氧稳定同位素是一种良好的示踪剂,其分布特征可以用来判断地下水在循环过程中的补给来源和补给高程,并分析地下水在形成过程中所发生的水文地球化学过程。Craig(1961)在研究大气降水时发现大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布呈线性变化,确定了氢氧同位素标准(SMOW)并建立了全球大气降水线方程 $\delta\text{D}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$ 。将研究区 Ng 地热水、Jxw 地热水和浅层地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值绘制散点图(图 8),图中实线是全球大气降水线(GMWL),虚线是氘过量参数 d 分别等于 0、-10、-20、-30 时的大气降水线。

在高阳地热田 Ng 地热水 δD 在 -76‰~-73‰,

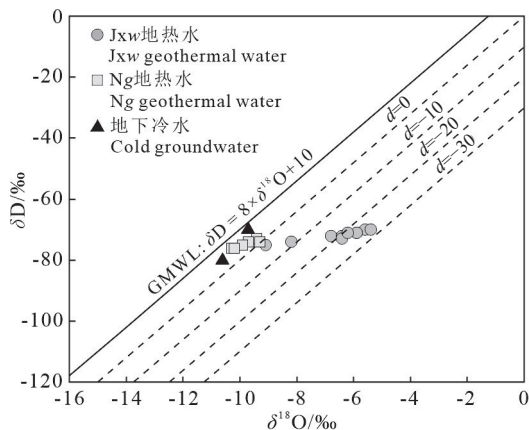


图 8 高阳地热田水样 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图
Fig.8 δD versus $\delta^{18}\text{O}$ relationship of water samples in Gaoyang geothermal field

$\delta^{18}\text{O}$ 在 -10.3‰~-9.3‰, Jxw 地热水 δD 在 -75‰~-70‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在 -5.4‰~-9.1‰, ^{18}O 在 Jxw 地热水中更富集。Ng 地热水和浅层地下水氢氧同位素整体分布在全球大气降水线 GMWL 附近(图 8),表明大气降水是其主要的补给来源,然而 Jxw 地热水的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显向右偏移了大气降水线,发生了显著的“氧漂移”,其原因是热储层矿物中富集 ^{18}O ,在长时间的水岩反应过程中围岩中的 ^{18}O 大量进入地热水,因此 Jxw 地热水中 ^{18}O 更为富集。Ng 和 Jxw 热储中 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异较大也表明这两个含水层没有明显的水力联系。

氘过量参数(d)表达式为 $d=\delta\text{D}-8\times\delta^{18}\text{O}$,其值大小表示当地大气降水线斜率为 8 时纵坐标的截距。 d 值不受季节、高度等因素影响,理论上其值恒定不变(刘凯等,2015)。当含水层接受大气降水补给后,地热水与围岩发生同位素交换作用,这个过程中 δD 值变化很小而 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大,随着地热水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐增大, d 值则逐渐减小。因此 d 可以用来衡量地热水与岩石中 ^{18}O 的交换程度, d 值越小,说明地热水径流速度越小、滞留含水层时间越长、水岩反应越强烈。研究区 Ng 地热水 d 值在 0.4‰~6.4‰,平均值 3.37‰;Jxw 地热水 d 值在 -26.8‰~-2.2‰,平均值 -19.18‰。Jxw 热水 d 值均低于 Ng 热水,表明 Jxw 地热水径流速度更缓慢,滞留含水层时间更长。

4.4.2 地热水补给高程

大气降水中氢氧稳定同位素具有高程效应,即 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的值随着高程增大而减小,其主要原因是由于水汽团的抬升与冷却,大气降水中的重同位素(D 和 ^{18}O)含量随着地形海拔的增高而逐渐贫化(柳鉴容等,2009)。因此,利用高程效应可以计算地热水的补给高程,从而推测出补给区域的具体位置。补给高程计算公式如下:

$$H = \frac{\delta_{\text{G}} - \delta_{\text{P}}}{K} + h \quad (3)$$

式(3)中, H 为地热水的补给区高程, m ; δ_{G} 为地热水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 或 δD 的值,‰; δ_{P} 为大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 或 δD 的值,‰; K 为大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 或 δD 的高程梯度,‰/100 m ; h 为取样点高程, m 。本文在研究区内取大气降水样 1 个,测试结果 δD 值为 -55‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.5‰,由于地热水中 ^{18}O 较为富集,使用 $\delta^{18}\text{O}$

计算补给高程误差较大,故选择 δD 来计算,大气降水 中 δD 的高程梯度 K 取 $-2\%/100\text{ m}$ (陈宗宇, 2001)。

根据公式计算得出高阳地热田地热水的补给 区高程在 759.12~1092.33 m,与冀中拗陷西部太行 山及北部燕山地区的海拔相符合,推测高阳地热田 地热水主要接受西部太行山和北部燕山的山区降 水补给。

5 深部地热循环过程

5.1 深部热储水-岩平衡状态

Na-K-Mg 三元图可以用来确定地热水与岩石 矿物反应的平衡程度以及估算热储温度,此图将地 热水划分为完全平衡水、部分平衡水或混合水和未 成熟水 3 种类型 (Giggenbach, 1988)。高阳地热田 地热水 Na-K-Mg 三元图 (图 9) 显示,两热储层水 样除了 GJ04 落在未成熟水区,其余全部处于部分 平衡或混合水,水岩作用未达到完全平衡状态,其 原因可能是有冷水进入热储层,与热水混合后水岩 相互作用没有再次达到平衡,因此使用阳离子地热 温标估算的热储温度具有不确定性,与实际热储温 度存在一定偏差。但 Ng 热水样点落在完全平衡线 附近,仍可选用阳离子温标估算热储温度。

5.2 深部热储温度

5.2.1 阳离子地热温标

阳离子地热温标是利用在特定的温度下地热

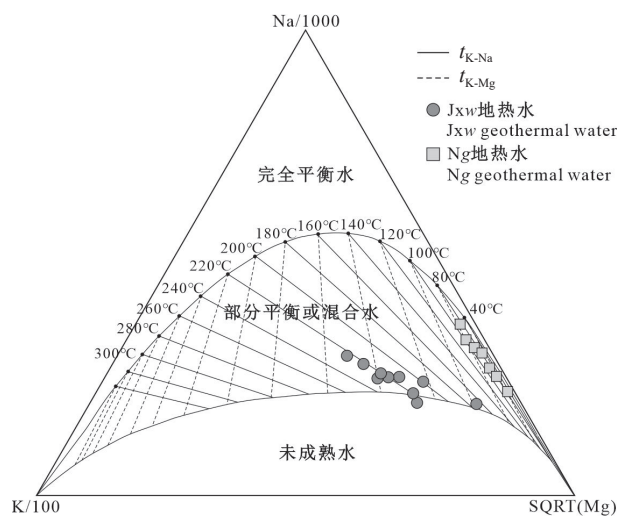


图 9 高阳地热田水样 Na-K-Mg 三元图
Fig.9 Na-K-Mg triangular diagram of water samples in Gaoyang geothermal field

水与热储层矿物的水岩作用达到平衡时阳离子比 值与温度之间的关系建立的热储温度计算方法,常 见的地热温标主要包括 Na-K 地热温标、Na-K-Ca 地热温标、K-Mg 地热温标、Na-Li 地热温标等。

Na-K 地热温标是基于地热水与碱性长石中 Na^+ 、 K^+ 交换平衡受温度控制所建立的,该地温计 主要适用于计算 150°C 以上的热水温度,其经验公 式为:

$$t = \frac{1217}{1.438 + \lg\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)} - 273.15 \quad (4)$$

K-Mg 地热温标是基于钾长石转变为白云母和 绿泥石的离子交换反应,该地温计主要适用于计算 中低温热水温度,其经验公式为:

$$t = \frac{4410}{13.95 - \lg\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right)} - 273.15 \quad (5)$$

Na-K-Ca 地热温标是在 Na-K 地热温标的基 础上进行修正的经验方法,其更适用于计算 Ca^{2+} 含 量较高的热水温度,弥补了 Na-K 地热温标在富 Ca^{2+} 热水中计算结果不合理的缺点,其经验公式为:

$$t = \frac{1647}{\lg\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \beta \left[\lg\left(\frac{\sqrt{\text{Ca}}}{\text{Na}}\right) + 2.26 \right] + 2.47} - 273.15 \quad (6)$$

式 (4)~(6) 中, t 是热储温度, $^\circ\text{C}$; 所有离子浓 度单位为 mg/L ; 如果 $\lg(\sqrt{\text{Ca}}/\text{Na}) > 0$, $\beta = 4/3$, 如果 $\lg(\sqrt{\text{Ca}}/\text{Na}) < 0$, $\beta = 1/3$ 。

根据地热温标计算结果 (表 5)。对于 Jxw 热 储,地热水没有达到完全平衡状态,利用 Na-K 和 Na-K-Ca 温标计算结果与实际热储温度相差较大, 均高于 K-Mg 温标计算结果;对于 Ng 热储,地热水 在完全平衡线附近,因此使用 Na-K、Na-K-Ca 和 K-Mg 三种温标计算结果比较接近。因为 K-Mg 温 标更适用于计算中低温地热系统热储温度,因此以 上三种阳离子地热温标中 K-Mg 温标计算结果较 接近实际热储温度,计算得出 Jxw 热储温度在 $102\sim 154^\circ\text{C}$, Ng 热储温度在 $61\sim 84^\circ\text{C}$ 。

5.2.2 SiO_2 地热温标

SiO_2 矿物广泛存在于岩石圈和水圈,自然界常 见 SiO_2 矿物包括石英、玉髓、无定型 SiO_2 和方英

石等,水中 SiO₂ 浓度具有对温度变化反应灵敏的特点,因此作为一种被广泛应用的经验地温计(李义曼等, 2021; 朱喜等, 2021)。二氧化硅地热温标原理是利用 SiO₂ 矿物的溶解度在溶液的蒸汽压下是温度的函数,且溶解度在 300℃ 下受压力和盐度变化影响较小。常见的 SiO₂ 地热温标有石英地热温标和玉髓地热温标,其经验公式为(Fournier, 1977):

无蒸汽损失的石英地热温标:

$$t = \frac{1309}{5.19 - \lg S} - 273.15 \quad (7)$$

玉髓地热温标:

$$t = \frac{1032}{4.69 - \lg S} - 273.15 \quad (8)$$

式(7)~(8)中, t 是热储温度,℃; S 是 SiO₂ 浓度,mg/L。

地热温标计算结果(表 5)表明, Jxw 热储石英温标计算温度在 111~164℃, 玉髓温标计算温度在 82~141℃; Ng 热储的石英温标计算温度在 83~104℃, 玉髓温标计算热储温度在 52~74℃。玉髓为颗粒极小的石英变种,与普通石英相比具有更大的表面能,与水的反应相比于石英更接近平衡,玉髓温标更适合估算中低温地热系统的热储温度(海阔, 2019),并且综合研究区已有地热井钻孔资料分析,

表 5 热储温度计算结果(℃)

Table 5 Calculation results of thermal storage temperature (℃)

样品编号	井口温度	Na-K	Na-K-Ca	K-Mg	石英	玉髓	多矿物平衡法
GJ01	88	216	222	142	164	141	150
GJ02	88	219	228	154	157	133	155
GJ03	100	217	223	148	164	141	146
GJ04	84	225	207	131	158	134	130
GJ05	82	215	203	131	156	131	122
GJ06	82	215	207	140	158	134	131
GJ07	67	207	197	135	139	112	121
GJ08	71	164	158	102	111	82	113
GJ09	66	193	183	125	123	95	117
GJ10	104	223	210	144	155	130	141
GS01	62	77	98	81	100	70	82
GS02	73	71	92	71	95	65	91
GS03	69	82	99	78	99	69	85
GS04	82	89	105	84	104	74	95
GS05	67	80	95	72	92	62	77
GS06	46	76	91	67	89	59	82
GS07	45	72	87	61	83	52	79

认为玉髓温标计算得出的热储温度更接近实际热储温度。

5.2.3 多矿物平衡法

多矿物平衡法是一种基于地热系统多组分化学平衡模拟的热储温度计算方法,其原理利用地热系统中多种矿物在热水中溶解状态与温度之间的函数关系,在特定温度下地热系统中多个矿物组分同时达到溶解平衡,这一温度即为深部热储温度(Reed and Spycher, 1984; Zhang et al., 2019b)。

饱和指数 $SI = \log Q/K$, 其中 Q 是离子活度积, K 是特定温度下的反应平衡常数,使用 SI 可以判断地热系统中矿物与地热水反应平衡程度。若 $SI > 0$, 表明矿物处于过饱和状态,矿物在热水中发生沉淀;若 $SI = 0$, 表明矿物处于溶解和沉淀平衡状态;若 $SI < 0$, 表明矿物处于不饱和状态,矿物会继续发生溶解。通过使用 Phreeqc 软件计算地热系统多种矿物在不同温度下的饱和指数,根据计算结果绘制饱和指数与温度的关系图(图 10),在 $SI-t$ 关系图中找到多条矿物饱和指数曲线同时收敛于 $SI=0$ 的交点,该点的温度即为预测的深部热储温度。

根据研究区的热储层岩性和含水层性质, Jxw 碳酸盐岩热储选择石英、玉髓、方解石、白云石、绿泥石、透长石和浊沸石进行计算, Ng 砂岩热储选择石英、玉髓、方解石、白云石、绿泥石和钾长石进行计算,温度范围设置在 0~300℃。地热水在上升的过程中由于压力和温度的降低会发生二氧化碳脱气作用,在脱气过程中使碳酸盐矿物在取样温度下过饱和($SI > 0$),从而影响矿物饱和指数曲线的收敛程度,导致热储温度计算结果不准确(Pang et al., 2018)。为了消除二氧化碳脱气的影响,本次计算过程中均加入一定量的二氧化碳来校正脱气作用。从 $SI-t$ 关系图(图 10)可以看出, Jxw 热储 GJ01、GJ02 和 GJ03 中 7 种矿物曲线在 $SI=0$ 附近收敛程度较好, GJ04、GJ05 和 GJ06 中除绿泥石以外的 6 种矿物曲线在 $SI=0$ 附近收敛程度较好, GJ07、GJ08、GJ09 和 GJ10 中石英、透长石和浊沸石在 $SI=0$ 附近收敛程度较好; Ng 热储 GS01、GS02、GS06 和 GS07 中钾长石、石英、绿泥石和方解石在 $SI=0$ 附近收敛程度较好; GS03、GS04、GS05 中钾长石、石英和白云石在 $SI=0$ 附近收敛程度较好。使用多矿物平衡法推测 Jxw 热储温度为

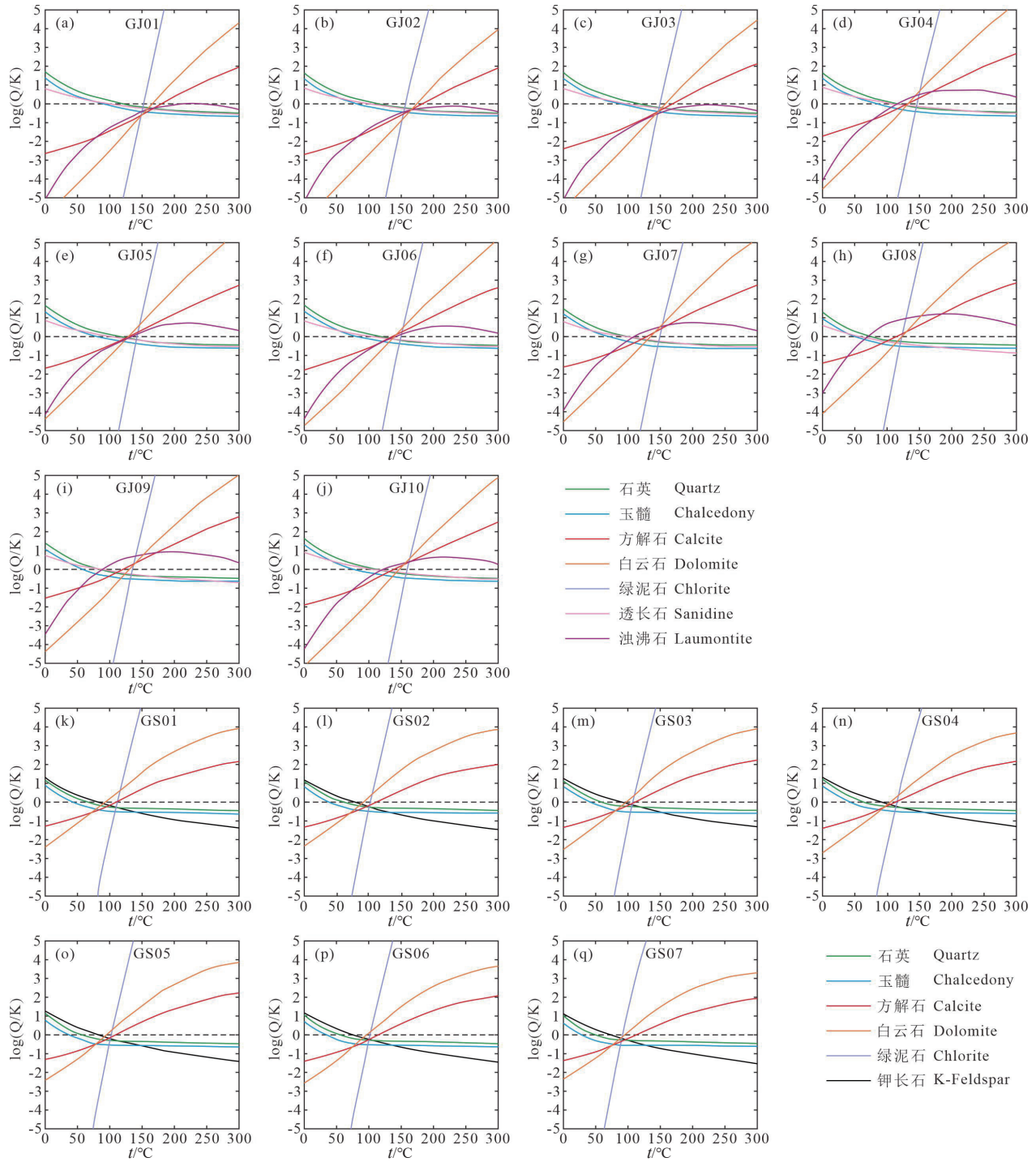


图 10 高阳地热田热水各矿物 SI-t 图
Fig.10 SI-t diagram of geothermal water in Gaoyang geothermal field

113~155℃, Ng 热储温度为 77~95℃。

$$H = \frac{t_1 - t_2}{I} + h \quad (9)$$

5.3 热循环深度

冀中拗陷地处华北平原,属于沉积盆地型地热资源,地热水的温度与热储热循环深度呈正相关关系,计算公式(张薇等, 2021):

式(9)中, H 为热循环深度, m ; t_1 为热储温度, $^{\circ}C$; t_2 为当地年平均气温, $^{\circ}C$; I 为地温梯度, $^{\circ}C/100 m$; h 为恒温带厚度, m 。

根据资料显示,研究区恒温度平均深度为 25 m,年平均气温为 14.5℃,地温梯度取 3.5℃/100 m (常健等, 2016),热储温度选择 K-Mg 温标的计算结果。经计算,高阳地热田 Jxw 热储热循环深度为 2524~4020 m,均值为 3476 m; Ng 热储热循环深度为 1357~2024 m,均值为 1714 m。

6 高阳地热田水热成因模式

通过对高阳地热田地热水地球化学特征以及氢氧稳定同位素的数据分析,结合研究区地质条件,提出地热系统成因模式(图 11)。

受太平洋板块向西俯冲的影响,华北克拉通东部受到明显破坏,岩石圈减薄,拗陷底部莫霍面抬升,地幔上涌形成深部热源(朱日祥等, 2012; Zhang et al., 2022)。热储接受山区大气降水补给,水流沿周边深大断裂流入热储层并向东运移,进入拗陷内部的地下水经过长距离的缓慢径流过程中,充分吸

收深部热源提供的热量,赋存于砂岩热储和碳酸盐岩热储中。碳酸盐岩热储相对于砂岩热储埋深更深,地热水径流路径更长,热储封闭性更好,受深部热源加热更充分,又因为白云岩的热导率高于砂岩,更有利于热量汇聚,因此雾迷山组热储温度更高。热储层上覆广泛发育的新生界,具有厚度大、结构相对松散、导热性差的特点,起到较好的隔热隔水效果,是深部热储的良好盖层。受多期构造活动作用的影响,冀中拗陷内形成的深大断裂和裂缝是良好的导水通道,热水沿断裂通道以热对流的方式将一部分热量向上传递,另一部分热量通过岩石以热传导的方式向上传递,并在高热流值的凸起区产生热聚集,从而形成对流-传导型地热系统。

7 结论

(1)根据高阳地热田地热水样品分析结果,高阳地热田 Jxw 碳酸盐岩热储水化学类型为 Cl-Na, Ng

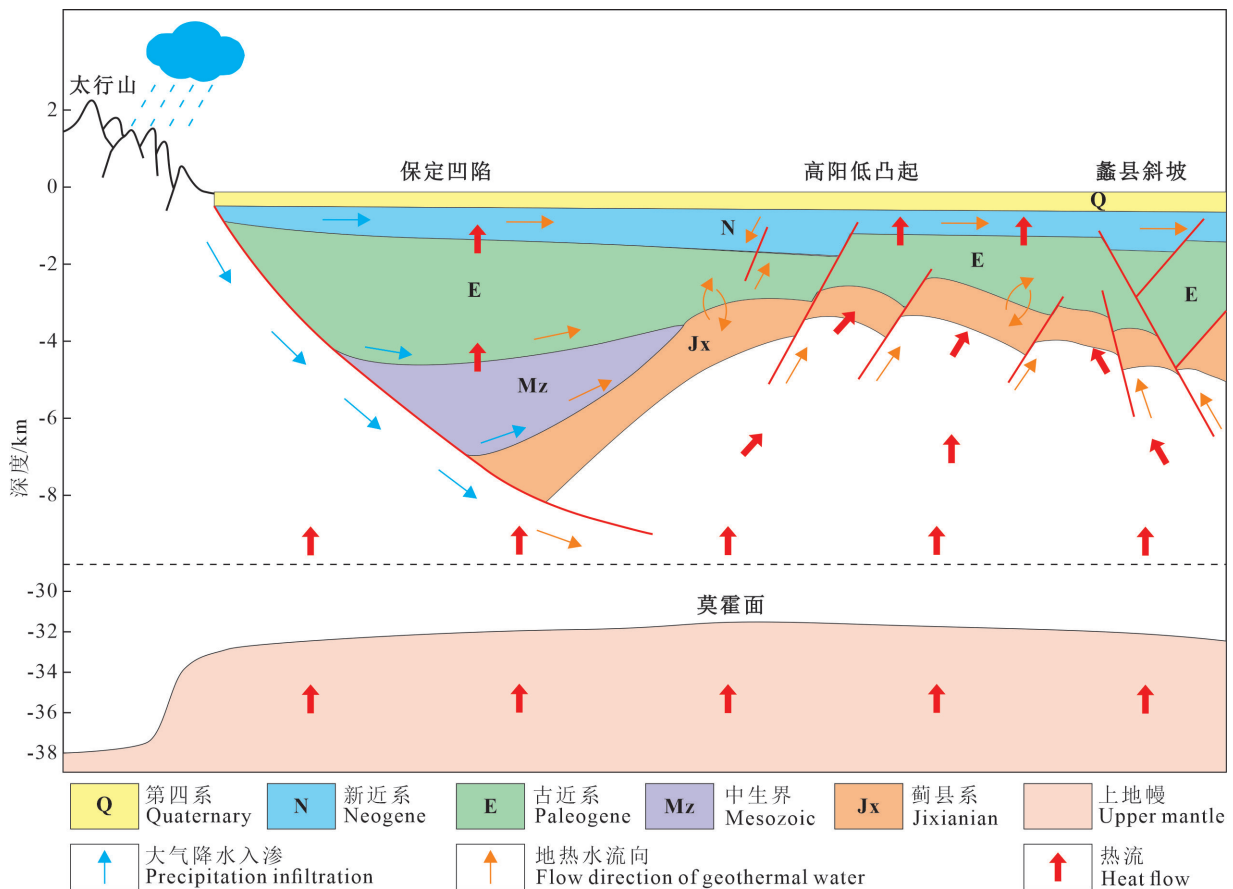


图 11 高阳地热田地热水成因模式(据庞玉茂, 2012 修改)
Fig.11 Geothermal water genetic model of Gaoyang geothermal field (modified from Pang Yumao, 2012)

砂岩热储水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ 和 $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ 。Ng 热水中微量元素主要来源于水岩作用过程中矿物的溶解; Jxw 热水中 F^- 、 Li^+ 、偏硼酸和偏硅酸与 Cl 具有相似的物质来源。高阳地热田 Jxw 热水中 HBO_2 含量明显高于 Ng 热水, 说明 Jxw 含水层地热水径流强度更弱, 水岩作用程度更高。

(2)通过分析地热水中主要离子比值关系, 地热水中的离子组分主要受盐岩、碳酸盐岩的溶解以及阳离子交替吸附作用共同控制。根据地热水特征系数计算结果, Jxw 热储相比于 Ng 热储变质程度更高, 封闭性更好, 所处地质环境还原性更强, 地热水径流路径更长, 水循环速度更缓慢, 盐化程度更高。

(3)高阳地热田 Ng 热储的主要补给来源为大气降水, Jxw 热储水岩作用程度较高导致 $\delta^{18}\text{O}$ 富集。地热水的补给高程在 759.12~1092.33 m, 与西部太行山及北部燕山的海拔相近, 表明地热水补给来源为太行山及燕山的山区降水补给。

(4)高阳地热田 Jxw 热储温度为 102~154℃, 热循环深度为 2524~4020 m; Ng 热储温度为 61~84℃, 热循环深度为 1357~2024 m。水样处于部分平衡或混合水, 水岩作用未达到完全平衡状态。

(5)热储接受山区大气降水补给, 通过深大断裂流入热储层, 在长距离的缓慢径流过程中充分吸收深部热源提供的热量形成地热水。深部热储的热量以两种方式向上传递, 一部分热量通过热水沿断裂通道以热对流的方式向上传递, 另一部分热量通过岩石以热传导的方式向上传递, 并在高热流值的凸起区产生热聚集, 从而形成对流-传导型地热系统。

注释

①李郡, 王全凯, 王琰, 刘忠凯, 康琳, 赵红亚, 张永树, 赵阳, 王来宾, 吕文斌, 刘洪涛, 常江, 吕冬冬, 杨超, 丁承裕, 张欢, 栾帅. 2015. 河北省地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 衡水: 河北省地矿局第三水文工程地质大队。

②滕飞. 2018.《华北平原基岩地质图》(1: 500000)[R]. 天津: 中国地质调查局天津地质调查中心。

References

Appelo C A J, Postma D. 2004. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*[M]. CRC Press.

Chang Jian, Qiu Nansheng, Zhao Xianzheng, Xu Qiuchen, Jin Fengming, Han Chunyuan, Ma Xuefeng, Dong Xiongying, Liang Xiaojuan. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 1003-1016 (in Chinese with English abstract).

Chen Moxiang. 1988. *Geothermal in North China*[M]. Beijing: Science Press, 1-214 (in Chinese).

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Ji'an, Deng Xiao, Yang Shuzhen, Xiong Liangping, Zhang Juming. 1990. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 80-91 (in Chinese with English abstract).

Chen Zongyu. 2001. *Groundwater Resources Evolution Based on Paleoenvironmental Information from Groundwater System in North China Plain*[D]. Changchun: Jilin University, 1-139 (in Chinese with English abstract).

Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 133(3465): 1702-1703.

Cui Yue, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Guo Sasa. 2020. Geothermal lithospheric thickness in the central Jizhong depression and its geothermal significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1960-1969 (in Chinese with English abstract).

Fournier R O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. *Geothermics*, 5(1/4): 41-50.

Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749-2765.

Hai Kuo. 2019. *Using Several Methods to Estimate the Temperatures of Deep Geothermal Reservoirs*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-102 (in Chinese with English abstract).

Li Jun, Zhou Shengzhang, Zhao Yi, Zhao Ruike, Dang Zhiwen, Pan Minqiang, Zhu Danni, Zhou Changsong. 2021. Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China[J]. *Environmental Science*, 42(4): 1750-1760 (in Chinese with English abstract).

Li Yiman, Pang Zhonghe, Luo Ji, Chen Kai. 2021. Applicability of SiO_2 geothermometers with adiabatic boiling correction in plateau areas[J]. *Geological Review*, 67(4): 1050-1056 (in Chinese with English abstract).

Liu Haijian. 2015. Relationships between Cenozoic Extension and Strike-slip of Raoyang Sag in Jizhong Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 1-69 (in Chinese with English abstract).

Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, Sun Xiaomin, Liu Xin, Wang Shiqin. 2009. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(22): 3521-3531 (in Chinese).

Liu Kai, Liu Yingchao, Sun Ying, Liu Jiurong, Wang Shufang, Liu Zongming. 2015. Characteristics of deuterium excess parameters of geothermal water in Beijing[J]. *Geology in China*, 42(6): 2029-2035 (in Chinese with English abstract).

Liu Mingliang, He Tong, Wu Qifan, Guo Qinghai. 2020. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Xiongan New Area

- and its indicating significance[J]. *Earth Science*, 45(6): 2221–2231 (in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Yue Gaofan. 2020. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1981–1990 (in Chinese with English abstract).
- Mao X M, Zhu D B, Ndikubwimana I, He Y Y, Shi Z D. 2021. The mechanism of high-salinity thermal groundwater in Xinzhou geothermal field, South China: Insight from water chemistry and stable isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 593: 125889.
- Miao Q Z, Wang G L, Qi S H, Xing L X, Xin H L, Zhou X N. 2022. Genetic mechanism of geothermal anomaly in the Gaoyang Uplift of the Jizhong Depression[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 885197.
- Pang J M, Pang Z H, Lü M, Tian J, Kong Y L. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77(1): 1–21.
- Pang Yumao. 2012. Geological Structure Characteristics and the Influence on Hydrocarbon Accumulation in Jizhong Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Reed M, Spycher N. 1984. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1479–1492.
- Shan Shuaiqiang, He Dengfa, Fang Chengming, Zhang Yuying, Hu Meiling. 2022. Structural characteristics and genetic mechanism of Gaoyang low uplift in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 44(6): 989–996, 1007 (in Chinese with English abstract).
- Sui Shaoqiang. 2020. Genetic analysis of karst thermal reservoir in Gaoyang geothermal field, Hebei Province, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 47(4): 492–497 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Gan Fengwei, Wang Heng, Jia Fengchao, He Zexin, Li Duojie, Li Jian, Zhang Jing. 2020. Genetic type and formation mechanism of strontium-rich groundwater in the upper and middle reaches of Luanhe river basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(1): 65–79 (in Chinese with English abstract).
- Wang G L, Zhang W, Ma F, Lin W J, Liang J Y, Zhu X. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. *China Geology*, 1(2): 273–285.
- Wang G L, Wang W L, Zhang W, Ma F, Liu F. 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, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017a. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017b. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074–1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Gao Jun, Zhang Baojian, Xing Yifei, Zhang Wei, Ma Feng. 2020. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1970–1980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020. Main hydrogeothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923–1937 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science and Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Siqi, Zhang Baojian, Li Yanyan, Xing Yifei, Yuan Wenzhen, Li Jun, Gao Jun, Zhao Tian. 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 12–21 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Yin Z Y, Luo Q K, Wu J F, Xu S H, Wu J C. 2021. Identification of the long-term variations of groundwater and their governing factors based on hydrochemical and isotopic data in a river Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 592: 125604.
- Yuan Jianfei. 2010. Transport of Boron in the Aquatic Environment of the Yangbajing Geothermal Field, Tibet[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B J, Zhao T, Li Y Y, Xing Y F, Wang G L, Gao J, Tang X C, Yuan W Z, Zhang D L. 2019a. The hydrochemical characteristics and its significance of geothermal water in both sides of large fault: Taking northern section of the Liaokao fault in north China as an example[J]. *China Geology*, 2(4): 512–521.
- Zhang B J, Wang S Q, Kang F X, Wu Y Q, Li Y Y, Gao J, Yuan W Z, Xing Y F. 2022. Heat accumulation mechanism of the Gaoyang carbonatite geothermal field, Hebei Province, North China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 858814.
- Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, Wan Li, Yu Qingchun. 2011. *Fundamentals of Hydrogeology (6th Edition)*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang W, Wang G L, Xing L X, Li T X, Zhao J Y. 2019b. Geochemical response of deep geothermal processes in the Litang region, Western Sichuan[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 37(2): 626–645.
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J].

- Geology in China, 46(2): 255–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Zhao Jiayi, Liufeng. 2021. Geochemical characteristics of medium–high temperature geothermal fluids in West Sichuan and their geological implications[J]. Geoscience, 35(1): 188–198 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenchao, Yang Dexiang, Chen Yanjun, Qian Zheng, Zhang Chaowen, Liu Huiyang. 2008. Sedimentary structural characteristics and hydrocarbon distributed rules of Jizhong depression[J]. Acta Geologica Sinica, 82(8): 1103–1112 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiayi, Zhang Wei, Ma Feng, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Wang Guiling. 2020. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field, Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1991–2001 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. Science China: Earth Science, 42(8): 1135–1159 (in Chinese).
- Zhu Xi, Wang Guiling, Ma Feng, Zhang Wei, Zhang Qinglian, Zhang Hanxiong. 2021. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Taihang Mountain–Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. Earth Science, 46(7): 2594–2608 (in Chinese with English abstract).
- 区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 54(22): 3521–3531.
- 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.
- 庞玉茂. 2012. 冀中坳陷地质结构特征及对油气成藏的影响[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 1–80.
- 单帅强, 何登发, 方成名, 张煜颖, 胡美玲. 2022. 渤海湾盆地冀中坳陷高阳低凸起构造特征及成因机制[J]. 石油实验地质, 44(6): 989–996, 1007.
- 隋少强. 2020. 河北高阳地热田岩溶热储的成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 47(4): 492–497.
- 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 贾凤超, 何泽新, 李多杰, 李健, 张竞. 2020. 滦河流域中上游富锗地下水成因类型与形成机制[J]. 地球学报, 41(1): 65–79.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017a. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449–459.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017b. 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, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7): 1923–1937.
- 王思琪, 张保建, 李燕燕, 邢一飞, 袁文真, 李郡, 高俊, 赵甜. 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. 地质科技通报, 40(3): 12–21.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 25–31.
- 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.
- 袁建飞. 2010. 西藏羊八井高温地热田水环境中硼的迁移和转化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 1–74.
- 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 万力, 于青春. 2011. 水文地质学基础(第6版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255–268.
- 张薇, 王贵玲, 赵佳怡, 刘峰. 2021. 四川西部中高温地热流体地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 35(1): 188–198.
- 张王朝, 杨德相, 陈彦均, 钱铮, 张超文, 刘会纺. 2008. 冀中坳陷古近系沉积构造特征与油气分布规律[J]. 地质学报, 82(8): 1103–1112.
- 赵佳怡, 张薇, 马峰, 朱喜, 张汉雄, 王贵玲. 2020. 雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J]. 地质学报, 94(7): 1991–2001.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135–1159.
- 朱喜, 王贵玲, 马峰, 张薇, 张庆莲, 张汉雄. 2021. 太行山–雄安新区藁县系含水层水文地球化学特征及意义[J]. 地球科学, 46(7): 2594–2608.

附中文参考文献

- 常健, 邱楠生, 赵贤正, 许威, 徐秋晨, 金凤鸣, 韩春元, 马学峰, 董雄英, 梁小娟. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征[J]. 地球物理学报, 59(3): 1003–1016.
- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1–214.
- 陈墨香, 汪集旻, 汪缙安, 邓孝, 杨淑贞, 熊亮萍, 张菊明. 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制[J]. 地质学报, 64(1): 80–91.
- 陈宗宇. 2001. 从华北平原地下水系统中古环境信息研究地下水资源演化[D]. 长春: 吉林大学, 1–139.
- 崔悦, 朱传庆, 邱楠生, 唐博宁, 郭飒飒. 2020. 冀中坳陷中部现今热岩石圈厚度及地热学意义探讨[J]. 地质学报, 94(7): 1960–1969.
- 海阔. 2019. 运用多种方法估算深部热储温度[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–102.
- 李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松. 2021. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 42(4): 1750–1760.
- 李义曼, 庞忠和, 罗霖, 陈凯. 2021. SiO_2 地温计沸腾校正方法在高原地区的适用性分析[J]. 地质论评, 67(4): 1050–1056.
- 刘海剑. 2015. 冀中坳陷饶阳凹陷新生代伸展与走滑关系研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 1–69.
- 刘凯, 刘颖超, 孙颖, 刘久荣, 王树芳, 刘宗明. 2015. 北京地区地热水气过量参数特征分析[J]. 中国地质, 42(6): 2029–2035.
- 刘明亮, 何瞳, 吴启帆, 郭清海. 2020. 雄安新区地热水化学特征及其指示意义[J]. 地球科学, 45(6): 2221–2231.
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 孙晓敏, 刘鑫, 王仕琴. 2009. 中国东部季风