

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.270>



雄安新区地热水化学特征及其指示意义

刘明亮^{1,2}, 何 瞳², 吴启帆², 郭清海^{2,3*}

1. 长江大学资源与环境学院, 湖北武汉 430100
2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 地热流体水文地球化学研究是认识地热资源形成机制、赋存环境以及循环机理的有效手段。以我国华北平原典型的中低温地热系统——河北雄安新区为研究对象, 基于不同热储层和浅层地下水的水化学及同位素特征, 探讨地热流体中主要组分的地球化学起源, 评估深部地热流体的热储温度, 指示地热系统的深部热源及其成因机制。大气降水入渗、热储高温条件下的流体-岩石相互作用是雄安新区地热流体中主要组分的物质来源, 其中深层雾迷山组地热水中部分组分可能源于古沉积水蒸发浓缩过程中形成的蒸发岩盐的溶滤。雾迷山组地热水适宜利用 Ca-Mg 温标和石英温标计算其热储温度, 温度范围为 76.4 ~ 90.6 °C, 馆陶组地热水运用石英温标更为合理, 热储温度为 66.2 ~ 71.3 °C。雄安新区地热异常是深部放射性元素衰变热在特定的大地构造背景下聚集而形成。

关键词: 水文地球化学; 地球化学起源; 地热温标; 地热异常; 雄安新区。

中图分类号: P641.3

文章编号: 1000-2383(2020)06-2221-11

收稿日期: 2019-07-12

Hydrogeochemistry of Geothermal Waters from Xiongan New Area and Its Indicating Significance

Liu Mingliang^{1,2}, He Tong², Wu Qifan², Guo Qinghai^{2,3*}

1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Hydrogeochemical research of geothermal fluids is an effective method to understand the formation mechanism, occurrence environment and circulation process of geothermal resources. Xiongan New Area, one of the typical low-temperature geothermal systems in the North China plain, is selected as the study area. In this study it is based on the analysis of water chemistry and isotopes, and aims: (1) to discuss the geochemical origin of main components in geothermal fluids, (2) to estimate the deep reservoir temperatures of geothermal waters, (3) to figure out the heat source beneath geothermal area and its genetic mechanism. The hydrochemical evidences imply that the main components in Xiongan geothermal waters are contributed by meteoric waters input and intense fluid-rock interactions at high reservoir temperatures, and several components of Wumishan Formation geothermal waters are from the dissolution of evaporation salt formed during the diagenetic process. The Ca-Mg and quartz geothermometer are suitable for estimating the reservoir temperature of Wumishan Formation geothermal waters, while

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2018YFC0604303); 国家自然科学基金项目(Nos.41902257, 41572335, 41772370, 41861134028, 41521001); 湖北省环境保护厅科研项目(No.2015HB17); 湖北省教育厅科学技术研究项目(No.B2017030); 湖北省自然科学基金项目(No.2018CFB258); “煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室开放基金项目(No.SHJT-17-42.9).

作者简介: 刘明亮(1989-), 男, 博士后, 主要从事地热领域的研究工作. ORCID: 0000-0003-3545-8129. E-mail: lml2008@cug.edu.cn

* 通讯作者: 郭清海, E-mail: qhguo2006@gmail.com

引用格式: 刘明亮, 何瞳², 吴启帆², 等, 2020. 雄安新区地热水化学特征及其指示意义. 地球科学, 45(6):2221-2231.

that for Guantao Formation geothermal waters, the quartz geothermometer is much more appropriate. The calculated temperatures range from 76.4 to 90.6 °C and 66.2 to 71.3 °C, respectively. The geothermal anomaly beneath Xiongan is likely to result from decay of radioactive elements in a specific tectonic setting.

Key words: hydrogeochemistry; geochemical origin; geothermometer; geothermal anomaly; Xiongan New Area.

0 引言

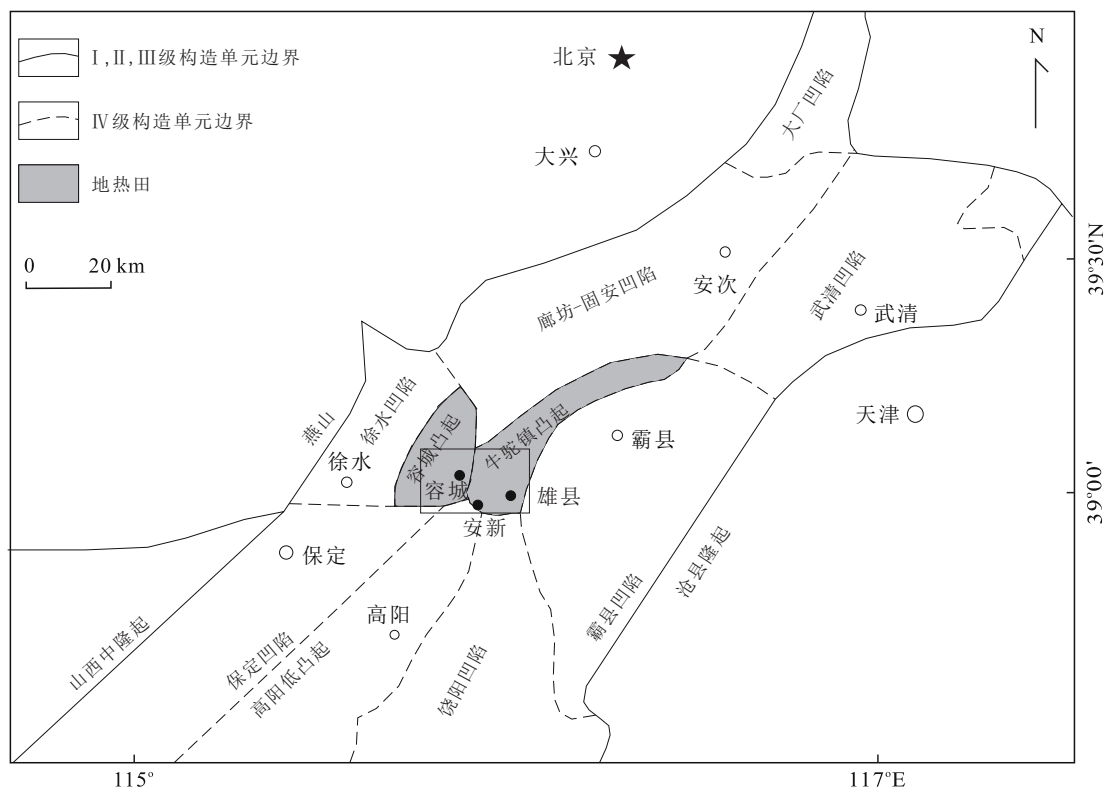
地热资源是一种集热、水、矿于一体的绿色新型能源,具有资源量丰富、对环境污染小、运营成本低等特点.对地热资源进行科学合理开发利用,将具有十分可观的经济效益和环境效益(如地热发电、住房供暖、水产养殖、医疗保健、温泉洗浴等),因此世界上许多国家目前都致力于研究与开发地热资源(Kaygusuz and Kaygusuz, 2004; Najafi and Ghobadian, 2011; Zhu *et al.*, 2015).我国是世界上地热资源储量较为丰富的国家之一(蔺文静等, 2013),高温地热资源主要分布于滇藏地热带藏南、川西、滇西地区,以及环太平洋地热带台湾地区(陈墨香等, 1996);而中低温地热资源遍布全国各地,其中以华北盆地蕴藏的中低温地热资源最为丰富,具有巨大的开发利用潜力(陈墨香等, 1990).20世纪90年代初期和“十二五”期间,我国分别对华北盆地地热资源开展了两次详尽的系统研究,总结了华北盆地地热场特征以及地热资源的成藏模式,并评估了华北盆地地热资源的潜力(陈墨香, 1988;陈墨香等, 1990;王贵玲等, 2017).而在华北盆地的雄安新区,河北省地质矿产局开展过河北地热研究以及牛驼镇地热田勘查(张德忠等, 2013),中国地质调查局、中国石化集团新星公司等单位相关人员近年来也开展了部分地热研究工作(郭世炎和李小军, 2013;李卫卫等, 2014;庞忠和等, 2017;吴爱民等, 2018;杨吉龙等, 2018).整体而言,这些工作取得了丰硕的成果,并成功指导了雄安新区地热资源的开发利用.然而迄今为止,对雄安新区地热资源的成因机制、赋存环境、运移规律以及各热储层之间的相互联系还远未充分认识,导致地热资源未能合理、有效、可持续开发利用.地热流体水化学组分及其同位素特征往往保留着地热系统形成演化过程中详尽的地球化学信息,常被用来分析地热流体的起源以及地热系统中相关的地球化学过程,是认识地热资源形成机制、赋存环境以及循环机理的有效手段之一(Guo, 2012; Ármannsson, 2016;李常锁等, 2018;汪新伟等, 2019).

为此,本次研究在雄安新区(包括雄县、容城和安新三县)采集了部分地热井水和浅层地下冷水样品,综合分析了不同热储层和地下冷水的水化学特征及氢氧同位素特征,探讨了地热流体地球化学起源,评估了深部地热流体的热储温度,并与笔者团队长期研究具有岩浆热源的西藏羊八井和搭格架地热系统水化学特征进行对比,指示雄安新区地热系统的深部热源及其成因机制,以期为雄安新区地热资源的合理开采提供借鉴思路和指导作用.

1 研究区概况

雄安新区是2017年中共中央、国务院设立的国家级新区,地处北京、天津、保定腹地,行政区划包括河北省雄县、容城、安新三县及周边部分区域.新区在大地构造上位于华北渤海湾盆地冀中凹陷北部的容城凸起与牛驼镇凸起的交接部位,北侧为廊坊—固安凹陷,西侧为徐水凹陷,东南为霸县凹陷,南部分别为饶阳凹陷、高阳低凸起和保定凹陷(图1).主要的断裂构造包括:牛南断裂、牛东断裂、大兴断裂、徐水断裂和容城断裂,其中容城断裂将牛驼镇凸起和容城凸起分隔,这些断裂作为导热、导水通道,对雄安新区地热系统的形成具有重要作用(吴爱民等, 2018).

研究区新生界地层包括第四系松散层和第三系砂砾岩,下伏地层为石炭系、二叠系、奥陶系、寒武系、青白口系、蓟县系、长城系碳酸盐岩和太古界变质岩(陈墨香, 1988;李卫卫等, 2014)(图2).第四系地层主要由粘土和砂岩交替组成,结构松散,热传导能力差,具有较好的保温隔热作用,作为地热系统的盖层.热储层主要分为四层,从上往下依次为:新近系明化镇组砂岩热储、新近系馆陶组砂岩热储、蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储和长城系高于庄组碳酸盐岩热储(图3).新近系明化镇组热储在研究区广泛分布,岩性主要为粉砂岩、细砂岩、中砂岩,埋深较浅,约为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,岩性由粉砂岩、含砾砂岩和砂砾岩组成,埋深约为800~1100 m,地层厚度200~400 m.蓟县系雾

图1 雄安地热区构造位置简图(改编自 Wang *et al.*, 2013)Fig.1 Simplified structural map of the Xiongan geothermal area (after Wang *et al.*, 2013)

迷山组热储分布广泛,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,埋深780~1310 m,地层厚度较大,最高可达700 m,是目前地热田开发利用最主要的热储层.长城系高于庄组热储层埋藏较深,可达1800 m,地层厚度300~500 m,岩性主要为灰色白云岩夹泥质白云岩、硅质白云岩,裂隙发育,是后期地热开发利用的主要目标层(陈墨香,1988;郭世炎和李小军,2013;王永波等,2016;吴爱民等,2018).

2 样品采集与分析

本次研究的采样区包括雄县、容城、安新三县,共采集样品36件,其中雾迷山组地热井水21件,馆陶组地热井水9件,第四系浅层地下冷水5件,采样位置见图2.另外,为判断地热水是否具有古海水补给来源,采集1件渤海海水样品进行对比分析.样品均在现场过滤0.22 μm滤膜,并收集于250 mL耐高温聚四氟乙烯瓶,采样前聚四氟乙烯瓶用待取水样润洗三次.各个采样点采集水样3瓶,其中一瓶加入优级纯HNO₃至pH低于1用于阳离子分析,一瓶未经处理用于阴离子及D、¹⁸O同位素分析,一瓶备用.

采集后的样品运回实验室保存于4℃冷藏箱,并于一周之内测试.不稳定的水化学参数,如水样温度(T)、pH、电导率(EC)、总溶解性固体(TDS)和氧化还原电位(Eh)用经过校正后的便携式多参数测定仪(Hach LDO TM HQ10)在现场测定,总硫化物用便携式比色计(Hach sension2)现场测定,碱度在取样当天用0.025 mol/L稀盐酸滴定.阴离子(F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Br⁻等)采用离子色谱仪(IC)(型号为DX-120)测定(检测限为0.01 mg/L),阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、As、B、Si等)采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)(型号为IRIS Intrepid II XPS)测定(检测限为0.01 mg/L).阴阳离子测试分析在中国地质大学(武汉)环境学院实验中心完成,HCO₃⁻和CO₃²⁻含量基于所测碱度以及阴阳离子浓度利用PHREEQC软件计算,大部分样品的电荷平衡值都小于5%,说明测试结果较为可靠.D、¹⁸O同位素采用同位素水分析仪(LGR IWA-35-EP)测定,测试工作在中国地质调查局武汉地质调查中心完成.样品现场测试指标及主要水化学组分见附表1和附表2.

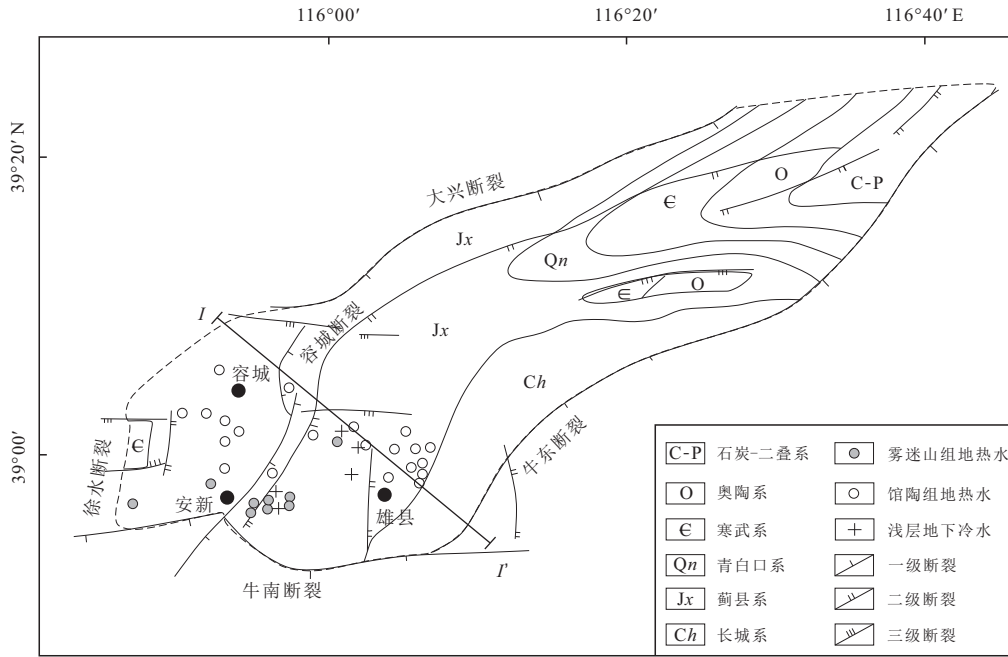


图2 雄安地热区前新生代地质简图及采样位置

Fig.2 Pre-Cenozoic geological map of the Xiongan geothermal area and sampling locations

改自 Pang *et al.*(2018)

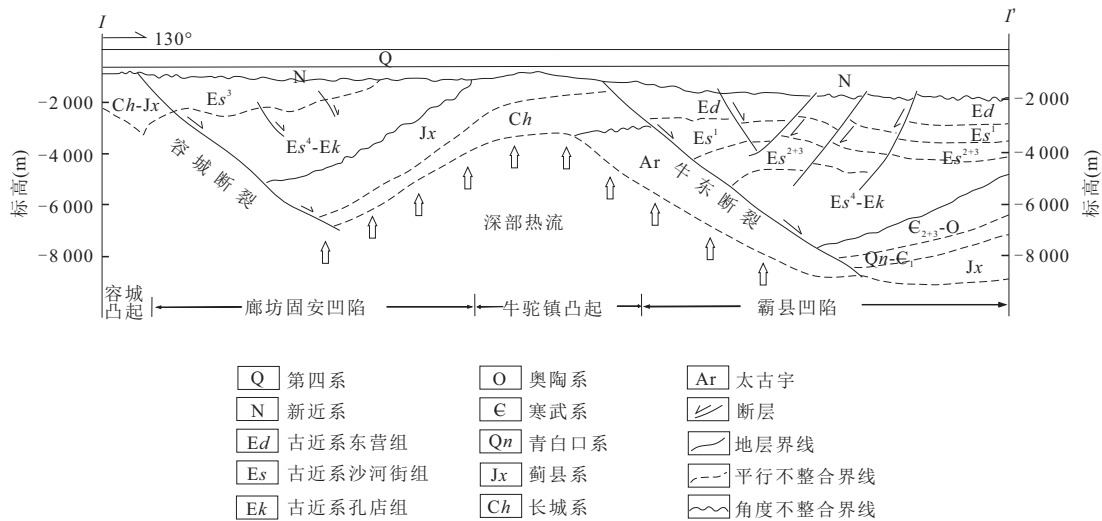


图3 雄安新区地热地质剖面图

Fig.3 Geothermal geologic profile map of the Xiongan geothermal area

剖面位置见图2,改自汤玉平(2017)

3 结果与讨论

3.1 地热水水文地球化学特征

本次研究采集的雄安新区地下水样品主要来自于:蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储、新近系馆陶组砂岩热储和第四系浅层地下冷水。雾迷山组地热水样品井口温度范围为 47 ~ 75 °C, 平均值为 62.2 °C, 主要阳离子为 Na⁺, 阴离子为 Cl⁻ 和

HCO₃⁻, 水化学类型主要为 Cl-Na 和 Cl·HCO₃⁻-Na 型(图 4)。馆陶组地热水样品井口温度范围为 34 ~ 47 °C, 平均值为 40.9 °C, 主要阳离子为 Na⁺, 阴离子为 HCO₃⁻ 和 Cl⁻, 水化学类型主要为 HCO₃·Cl-Na 和 Cl·HCO₃⁻-Na 型(图 4)。第四系浅层地下冷水温度范围为 13.8 ~ 19.8 °C, 平均值为 17.4 °C, 主要阳离子为 Na⁺, Ca²⁺ 和 Mg²⁺, 阴离子为 HCO₃⁻, SO₄²⁻ 和 Cl⁻, 水化学类型主要为 HCO₃·Cl-Na·Ca, HCO₃⁻

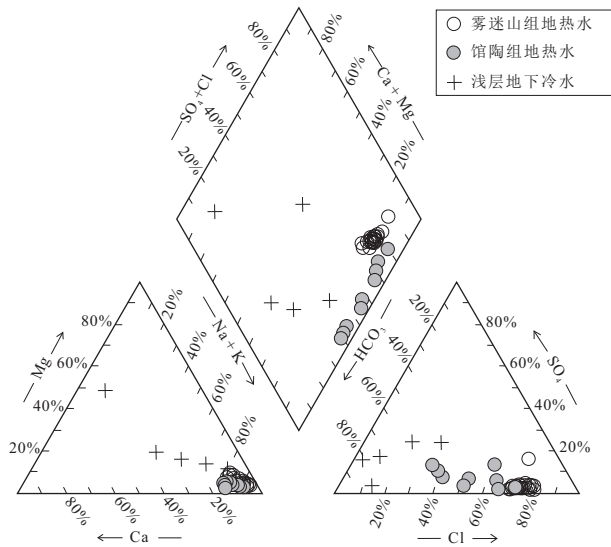
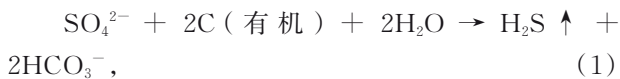


图4 雄安地热区样品Piper三线图

Fig.4 Piper diagram of water samples from Xiongan geothermal area

Ca·Na和HCO₃-Ca·Mg型(图4)。

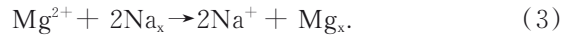
对比分析浅层地下冷水、馆陶组地热水和雾迷山组地热水, TDS依次升高(图5), 指示围岩的淋滤是地热水中主要组分的物质来源, 雾迷山组热储温度更高, 地热水与热储围岩的水-岩相互作用更为强烈, 因此水化学成分含量更高。而对于Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃⁻, 雾迷山组地热水同样远高于馆陶组, 主要是由不同的热储岩性所控制, 雾迷山组岩性主要由厚层白云岩和灰质白云岩组成, 方解石和白云石等碳酸盐类矿物的溶解是其Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃⁻的主要来源。然而, 值得注意的是, 从HCO₃⁻与Ca²⁺、Mg²⁺的关系图(图6)可以看出, 雾迷山组地热水基本都位于2(Ca²⁺ + Mg²⁺) = HCO₃⁻线的上方, 说明除了碳酸盐类矿物的溶解以外, 还必然存在其他地球化学过程控制雾迷山组地热水中HCO₃⁻、Ca²⁺和Mg²⁺浓度。其中最主要的过程应为脱硫酸作用, 具体反应为:



即在有机质和微生物参与条件下, 地热水中的SO₄²⁻被还原生成H₂S, 从而造成雾迷山组地热水中HCO₃⁻含量升高。地热水中SO₄²⁻和硫化物含量的相关关系(图5), 同样也证实了热储层中脱硫酸作用的发生。与馆陶组砂岩热储相比, 以海相碳酸盐岩为主的雾迷山组热储层, 尽管存在石膏的可能性更大, 但是雾迷山组地热水中SO₄²⁻含量明显低于馆陶组, 并且检测到一定含量的硫化物, 即为脱硫

酸作用造成SO₄²⁻含量降低并生成H₂S。由此可见, 雾迷山组地热水处于偏还原环境, 地热水赋存空间比较封闭, 水力联系较弱。

此外, 还可能存在阳离子交换过程造成雾迷山组地热水中Ca²⁺、Mg²⁺含量降低, 反应方程为:



即地热水中溶解的Ca²⁺、Mg²⁺与岩土矿物中的Na⁺交换, 从而被岩土矿物所吸附, 造成地热水中Ca²⁺、Mg²⁺含量降低。然而, 由于地热水中Na⁺含量较高, 抑制了交换反应的发生, 因此热储层中阳离子交换程度不高。

3.2 热储平衡状态及热储温度的估算

地球化学温标常被用来估算深部地热流体的热储温度(李洁祥等, 2017), 然而, 在中低温碳酸盐岩热储地热系统中(如本次研究的雄安新区), 应用地球化学温标计算热储温度往往存在以下问题:(1)由于热储温度较低, 地热水相对于热液蚀变矿物难以达到平衡状态;(2)控制地热流体水化学组分的矿物组合往往比较局限(主要为方解石和白云石)。本次研究首先运用不同地热温标(石英温标、玉髓温标、Na-K温标、K-Mg温标、Na-K-Ca温标和Ca-Mg温标)对雄安新区地热水热储温度进行估算(附表3), 结果显示各种地热温标计算值相差较大, 因此需对各种地热温标进行适用性分析。研究区雾迷山组地热水样品均位于Na-K-Mg三角图未成熟水区, 馆陶组地热水虽然均位于部分成熟区, 但仍远离全平衡线(图7), 因此研究区地热水(包括雾迷山组和馆陶组)相对于Na、K、Mg等长石类硅酸盐矿物均未达到水-岩平衡状态, 说明Na-K、K-Mg和Na-K-Ca等一般阳离子温标并不适用于研究区地热水热储温度的计算。

Ca-Mg温标是基于地热水相对于方解石和白云石等碳酸盐类矿物达到平衡状态的基础上建立的一种地热温标, 常被用来估算中-低温碳酸盐岩热储地热流体温度(Chiodini *et al.*, 1995; Blasco *et al.*, 2017)。研究区雾迷山组岩性主要为灰岩、白云岩、灰质白云岩, 并且夹有一定厚度的泥岩等碎屑岩, 地热水相对于碳酸盐类矿物(如方解石、文石和白云石等)和石英均达到平衡或过饱和状态(附表4), 因此Ca-Mg温标和石英温标均适用于雾迷山组地热水热储温度的计算。取以上两种温标计算结果的平均值, 雾迷山组地热水热储温度范围为76.4 ~ 90.6 °C, 略高

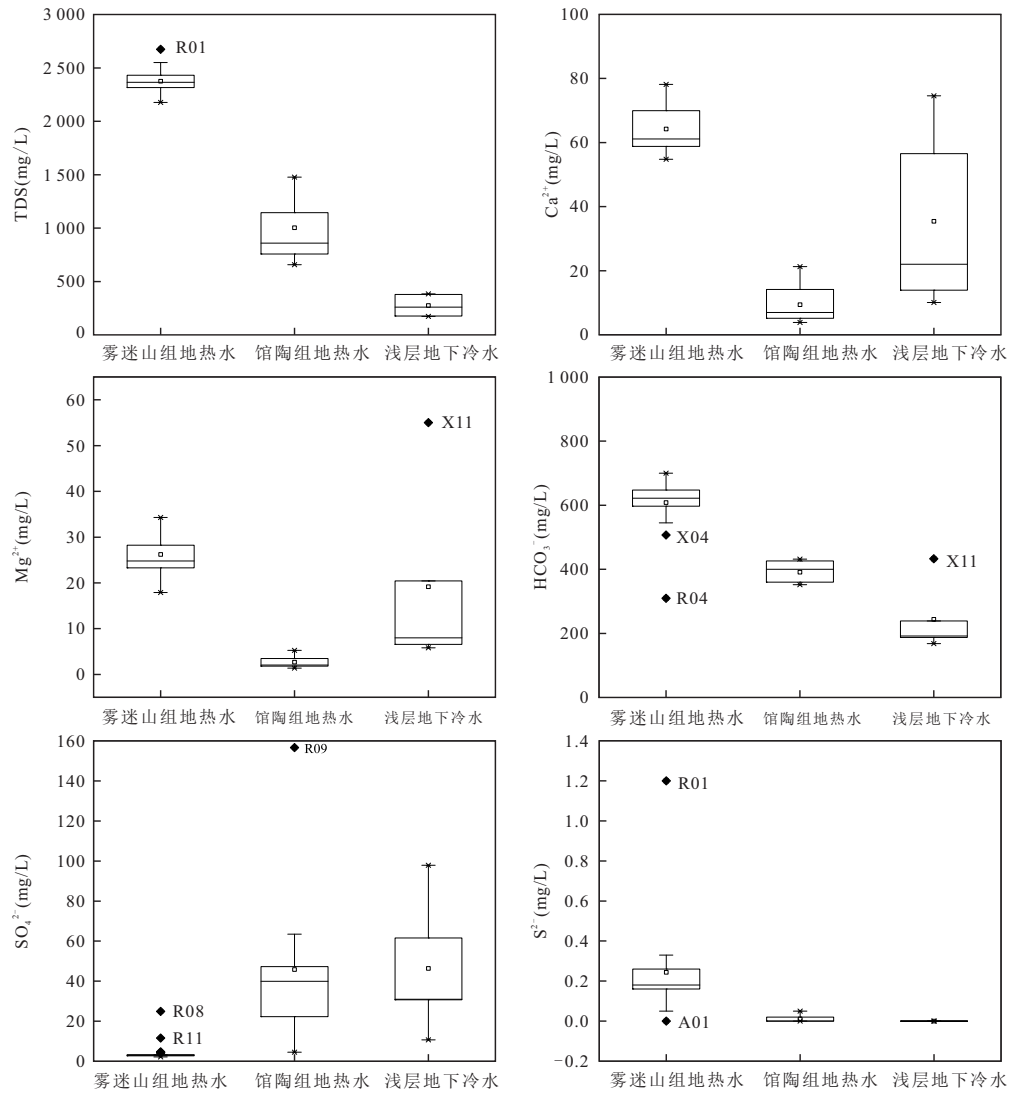


图 5 雄安地热区样品主要水化学组分箱型图

Fig.5 Box and whisker plots of major components of water samples from Xiongan geothermal area

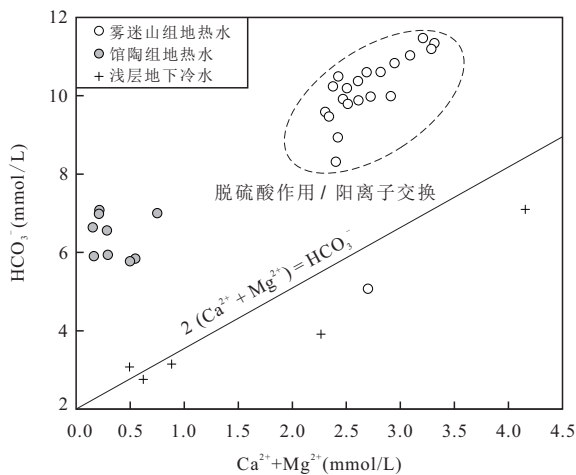


图 6 雄安地热区样品 HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系

Fig.6 HCO_3^- vs. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ concentrations of water samples from Xiongan geothermal area

于井口温度,与实际情况相吻合.馆陶组热储岩性由粉砂岩、含砾砂岩和砂砾岩组成,主要矿物类型为长石和石英,地热水相对于长石类矿物和玉髓均未达到平衡状态,而相对于石英达到平衡状态(图7,附表4),因此应用石英温标计算其热储温度更为合适,热储温度范围为 $66.2 \sim 71.3^\circ\text{C}$.

3.3 地热水地球化学起源

大部分地热水样品位于当地大气降水线附近(图8)(当地大气降水线方程及部分氘氧同位素数据来源于 Wang *et al.*(2013),指示其大气降水入渗补给,山区和山前平原地带入渗的大气降水形成侧向径流补给研究区地热水.馆陶组地热水样品发生了微弱的 ^{18}O 漂移,主要原因是由于馆陶组地热水埋深较浅,发生了一定程度的蒸发作用.而雾迷山组地热

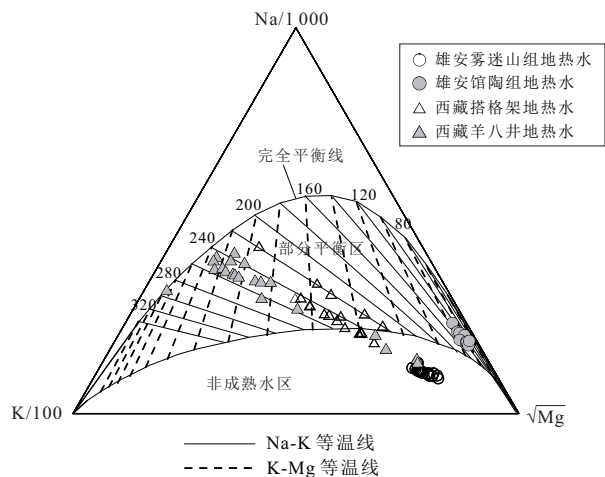


图 7 雄安和西藏地热水 Na-K-Mg 三角图

Fig.7 Na-K-Mg triangular diagram for Xiongan and Tibetan geothermal water samples

羊八井和搭格架数据分别来源于 Yuan *et al.*(2014)和 Liu *et al.*(2019)

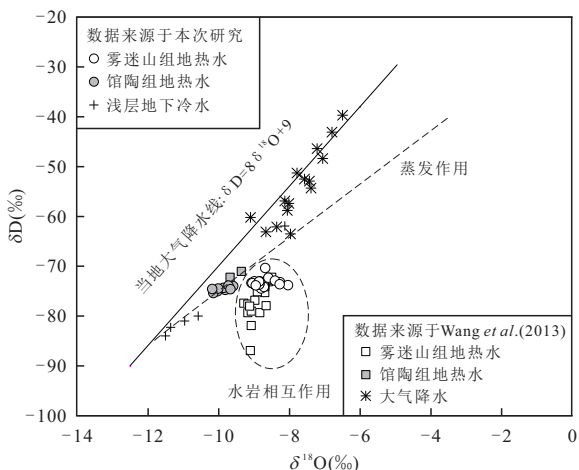


图 8 雄安地热水样品氧同位素关系图

Fig.8 $\delta D-\delta^{18}O$ plot of water samples from Xiongan geothermal area

水发生了较显著的 ^{18}O 漂移现象,主要是由于大气降水与深部碳酸盐岩热储在高温环境下发生了强烈的水-岩相互作用使氧同位素值增大.Cl和Br是天然水环境中两种典型的易溶保守组分,两者比值(Cl/Br摩尔比)常被用来判断地热流体的起源及相关的水文地球化学过程(Birkle *et al.*, 2016; Cartwright *et al.*, 2006).虽然蒸发作用或浅层冷水的混合等诸多过程都会造成一定程度地热水中Cl、Br含量的变化,但这些过程都不会影响Cl和Br的比值.由于缺乏研究区大气降水的Cl/Br摩尔比,可近似认为浅层地下冷水的Cl/Br摩尔比与大气降水相当.研究区地热水的Cl/Br摩尔比明显高于浅层冷水,其中雾迷山组地

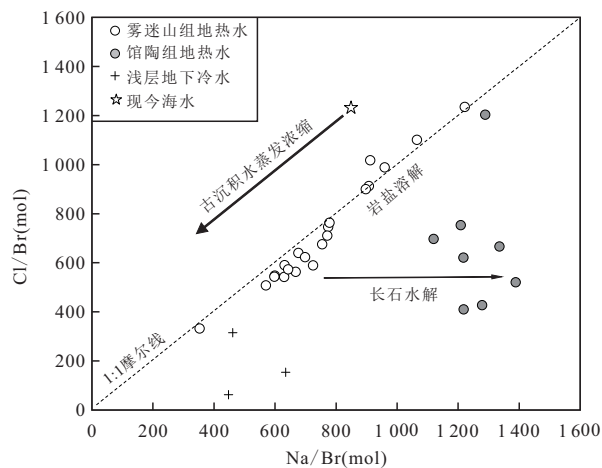


图 9 雄安地热水样品 Cl/Br 与 Na/Br 关系图

Fig.9 Cl/Br vs. Na/Br molar ratios of water samples from Xiongan geothermal area

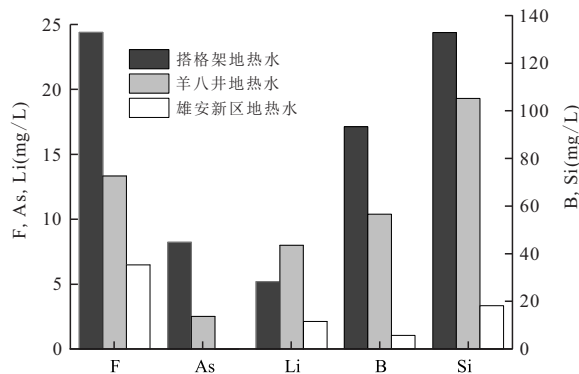


图 10 雄安新区、西藏羊八井和搭格架地热水化学组分柱状图

Fig.10 Histograms of the average concentrations of major constituents in Xiongan, Yangbajain and Daggyai geothermal waters

羊八井和搭格架数据分别来源于 Yuan *et al.*(2014)和 Liu *et al.*(2019)

热水样品基本都位于岩盐溶解 1:1 摩尔线附近(图 9),说明岩盐的溶解是造成雾迷山组地热水 Cl/Br 摩尔比升高的主要原因.值得注意的是,研究区地热水的补给区主要为北侧的燕山山脉和西侧的太行山脉(Wang *et al.*, 2013),地表主要以基岩为主,由蒸发作用形成岩盐的可能性较小,因此岩盐的来源可能与研究区的沉积环境相关.研究区漫长的地质历史时期,经历了多期的海侵、海退过程,大部分的海相同生沉积水被后期的大气降水驱替,形成岩溶裂隙型淡水,少量残留的古沉积水埋藏于海相碳酸盐岩地层中,经过蒸发浓缩过程,过饱和的矿物组分(如岩盐、石膏等)即可从古海水中析出.因此,深部碳酸盐岩热储雾迷山组地热水样品基本都分布在岩盐

1:1 摩尔线附近,而浅部砂岩热储馆陶组地热水都偏离 1:1 摩尔线,位于 Na 含量较高一侧(图 9),可能与围岩中钠长石的水解有关。

3.4 地热水地球化学特征对其热源的指示

地热系统的热源一般包括:地壳内熔融的岩浆房、构造活动热(如地质体碰撞、挤压、摩擦生热等)、放射性元素衰变热等类型。雄安新区地处华北盆地,远离板块边缘构造活动带,附近也不发育大陆裂谷,因此地壳内存在熔融岩浆房的可能性微乎其微。研究区地质历史时期经历了多期的地壳沉降与抬升,自中新世晚期以来,本区已趋于稳定,广泛沉积了第三系和第四系地层,构成了地热区良好的盖层,现今仍存在强烈构造活动产生摩擦热的可能性也不大。为了进一步分析研究区深部地热系统的热源,对比分析了雄安新区与西藏羊八井和搭格架地热水的水化学特征。与已证实存在岩浆热源的西藏羊八井和搭格架相比(Brown *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 1996; Kind *et al.*, 1996; Makovsky *et al.*, 1996;

其微。研究区地质历史时期经历了多期的地壳沉降与抬升,自中新世晚期以来,本区已趋于稳定,广泛沉积了第三系和第四系地层,构成了地热区良好的盖层,现今仍存在强烈构造活动产生摩擦热的可能性也不大。为了进一步分析研究区深部地热系统的热源,对比分析了雄安新区与西藏羊八井和搭格架地热水的水化学特征。与已证实存在岩浆热源的西藏羊八井和搭格架相比(Brown *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 1996; Kind *et al.*, 1996; Makovsky *et al.*, 1996;

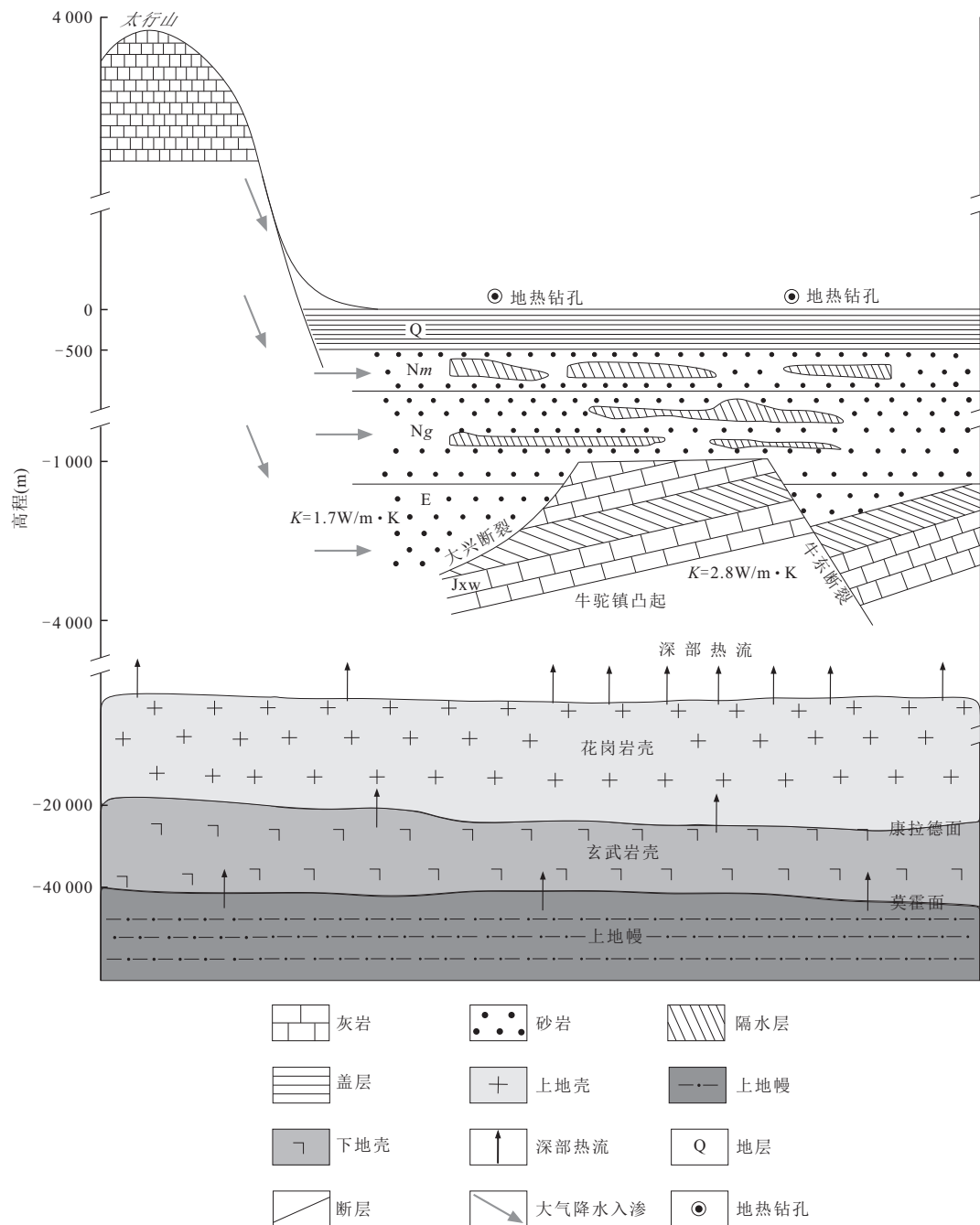


图 11 雄安新区地热系统成因机制

Fig.11 Conceptual model of formation mechanism of Xiongan geothermal system

Nelson *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2019; Hoke *et al.*, 2000), 雄安新区地热水与围岩水-岩相互作用程度更低(图7), 显示热储温度也更低, 并且一些与岩浆热液活动相关的元素(如F、B、As、Li等)含量也要低得多(图10), 同样并不指示雄安新区地下深部存在岩浆热源的可能。综上所述, 雄安新区乃至牛驼镇凸起地热异常与地壳内熔融的岩浆房无关, 而更可能是深部放射性元素(铀、钍、钾等)衰变生热的结果, 确凿的证据还需后期进一步测试深部岩体中放射性元素的含量。具体成热机制与研究区大地构造环境密切相关, 始新世末期喜山运动造就了牛驼镇凸起的形成, 形成的凸起为地热区提供了优质的热储层, 即新近系明化镇组、馆陶组砂岩地层和蓟县系雾迷山组、长城系高于庄组碳酸盐岩地层。来自地壳深部乃至于上地幔的均匀热流, 向热导率高、热阻小的基岩(热导率 $K=2.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)凸起区聚集, 而上覆的第三系、第四系盖层(热导率 $K=1.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)起到了良好的隔热效果, 从而形成了牛驼镇和容城凸起的热异常(陈墨香, 1988; 王贵玲等, 2017)。来自山区和山前平原的大气降水入渗形成侧向径流补给研究区地下水, 地下水在循环过程中被深部的岩温加热, 具体成因模式见图11。

4 结论

(1)本次研究采集的雄安新区地下水样品主要来自于蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储、新近系馆陶组砂岩热储和第四系浅层地下冷水。整体而言, 地热水水化学组分含量明显高于浅层地下冷水, 而其中雾迷山组地热水又明显高于馆陶组。雾迷山组地热水高含量的TDS、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等主要是由热储岩性和较高的热储温度所引起的; 而 SO_4^{2-} 含量偏低、硫化物含量偏高则主要是由于在深部封闭的还原环境下发生脱硫酸作用导致的, 指示雾迷山组地热水处于偏还原环境, 地热水赋存空间比较封闭, 水力联系较弱。

(2)研究区地热水样品均远离Na-K-Mg三角图全平衡线, 表明地热水相对于含Na、K、Mg等硅酸盐类矿物均未达到水-岩平衡状态, 一般的阳离子温标(Na-K温标、K-Mg温标和Na-K-Ca温标)并不适合其热储温度的计算; 雾迷山组地热水热储岩性以碳酸盐岩为主并夹有一定厚度的碎屑岩, 相对于碳酸盐类矿物和石英均达到平衡状态, 适宜利用Ca-Mg温标和石英温标计算其热储温度, 温度范围为 $76.4 \sim 90.6 \text{ }^\circ\text{C}$; 馆陶组地热水热储岩性主要为砂

岩, 相对于石英达到平衡状态, 运用石英温标更为合理, 热储温度为 $66.2 \sim 71.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3)大气降水入渗和热储高温条件下的流体-岩石相互作用是地热水中主要组分的物质来源, 其中深层雾迷山组地热水中部分组分(如 Cl^- 、 Br^- 等)可能源于古积水蒸发浓缩过程中形成的蒸发岩盐的溶滤。

(4)与羊八井和搭格架地热系统相比, 雄安新区地热水深部热储温度、与岩浆热液活动相关的组分含量均更低, 指示其地热异常与地壳深部熔融的岩浆房无关, 而更可能是深部放射性元素衰变生热的结果, 并在特定的大地构造背景下形成局部热异常。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Ármannsson, H., 2016. The Fluid Geochemistry of Icelandic High Temperature Geothermal Areas. *Applied Geochemistry*, 66: 14–64. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.008>
- Birkle, P., Marín, E. P., Pinti, D. L., et al., 2016. Origin and Evolution of Geothermal Fluids from Las Tres Virgenes and Cerro Prieto Fields, Mexico—Co-Genetic Volcanic Activity and Paleoclimatic Constraints. *Applied Geochemistry*, 65: 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.009>
- Blasco, M., Auqué, L. F., Gimeno, M. J., et al., 2017. Geochemistry, Geothermometry and Influence of the Concentration of Mobile Elements in the Chemical Characteristics of Carbonate-Evaporitic Thermal Systems, the Case of the Tiermas Geothermal System (Spain). *Chemical Geology*, 466: 696–709. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.013>
- Brown, L. D., Zhao, W., Nelson, K. D., et al., 1996. Bright Spots, Structure, and Magmatism in Southern Tibet from INDEPTH Seismic Reflection Profiling. *Science*, 274(5293): 1688–1690. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1688>
- Cartwright, I., Weaver, T. R., Fifield, L. K., 2006. Cl/Br Ratios and Environmental Isotopes as Indicators of Recharge Variability and Groundwater Flow: An Example from the Southeast Murray Basin, Australia. *Chemical Geology*, 231(1–2): 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.12.009>
- Chen, L., Booker, J. R., Jones, A. G., et al., 1996. Electrically Conductive Crust in Southern Tibet from INDEPTH Magnetotelluric Surveying. *Science*, 274(5293): 1694–1696. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1694>
- Cheng, M. X., 1988. Geothermics in North China. *Science*

- Press, Beijing (in Chinese).
- Cheng, M. X., Wang, J. Y., Deng, X., 1996. The Map of Geothermal System Types in China and Its Brief explanation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(2): 114–121 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, M. X., Wang, J. Y., Wang, J. A., et al., 1990. The Characteristics of the Geothermal Field and Its Formation Mechanism in the North China Down-Faulted Basin. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 80–91 (in Chinese with English abstract).
- Chiodini, G., Frondini, F., Marini, L., 1995. Theoretical Geothermometers and p_{CO_2} Indicators for Aqueous Solutions Coming from Hydrothermal Systems of Medium-Low Temperature Hosted in Carbonate-Evaporite Rocks. Application to the Thermal Springs of the Etruscan Swell, Italy. *Applied Geochemistry*, 10(3): 337–346. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00006-6](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00006-6)
- Guo, Q. H., 2012. Hydrogeochemistry of High-Temperature Geothermal Systems in China: A Review. *Applied Geochemistry*, 27(10): 1887–1898. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.07.006>
- Guo, S. Y., Li, X. J., 2013. Reservoir Stratum Characteristics and Geothermal Resources Potential of Rongcheng Uplift Geothermal Field in Baoding, Hebei. *Chinese Journal of Geology*, 48(3): 922–9321 (in Chinese with English abstract).
- Hoke, L., Lamb, S., Hilton, D. R., et al., 2000. Southern Limit of Mantle-Derived Geothermal Helium Emissions in Tibet: Implications for Lithospheric Structure. *Earth and Planetary Science Letters*, 180(3–4): 297–308. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00174-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00174-6)
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A., 2004. Geothermal Energy in Turkey: The Sustainable Future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(6): 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.01.001>
- Kind, R., Ni, J., Zhao, W., et al., 1996. Evidence from Earthquake Data for a Partially Molten Crustal Layer in Southern Tibet. *Science*, 274(5293): 1692–1694. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1692>
- Li, C. S., Wu, X. C., Sun, B., et al., 2018. Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Geothermal Water in Northern Ji'nan. *Earth Science*, 43(Suppl.1): 313–325 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. X., Guo, Q. H., Yu, Z. Y., 2017. Impact of Clay Mineral Formation in High-Temperature Geothermal System on Accuracy of Na-K and K-Mg Geothermometers. *Earth Science*, 42(1): 142–154 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. W., Rao, S., Tang, X. Y., et al., 2014. The Drilling Temperature Measurement and Geothermal Field Characteristics of Geothermal Field in Xiong County, Hebei Province. *Chinese Journal of Geology*, 49(3): 850–863 (in Chinese).
- Lin, W. J., Liu, Z. M., Wang, W. L., et al., 2013. The Assessment of Geothermal Resources Potential of China. *Geology in China*, 40(1): 312–321 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M. L., Guo, Q. H., Wu, G., et al., 2019. Boron Geochemistry of the Geothermal Waters from Two Typical Hydrothermal Systems in Southern Tibet (China): Daggyai and Quzhuomu. *Geothermics*, 82: 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.06.009>
- Makovsky, Y., Klemperer, S. L., Ratschbacher, L., et al., 1996. INDEPTH Wide-Angle Reflection Observation of P-Wave-to-S-Wave Conversion from Crustal Bright Spots in Tibet. *Science*, 274(5293): 1690–1691. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1690>
- Najafi, G., Ghobadian, B., 2011. Geothermal Resources in Iran: The Sustainable Future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 3946–3951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.032>
- Nelson, K. D., Zhao, W., Brown, L. D., et al., 1996. Partially Molten Middle Crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results. *Science*, 274(5293): 1684–1688. <https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1684>
- Pang, J. M., Pang, Z. H., Lü, M., et al., 2018. Geochemical and Isotopic Characteristics of Fluids in the Niutuozen Geothermal Field, North China. *Environmental Earth Sciences*, 77(1): 12. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7171-y>
- Pang, Z. H., Kong, Y. L., Pang, J. M., et al., 2017. Geothermal Resources and Development in Xiongan New Area. *Bulletin of the Chinese Academy of Science*, 32(11): 56–62 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. P., Wang, G. J., Tang, J. H., et al., 2017. The Application of Soil Gas Method to Delineation of the Most Favorable Enrichment Area of the Sedimentary Basin Type Geothermal System. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 41(1): 22–28 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Zhang, W., Lin, W. J., et al., 2017. Research on Formation Mode and Development Potential of Geothermal Resources in Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Geology in China*, 44(6): 1074–1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. F., Pang, Z. H., Liu, J. R., et al., 2013. Origin and

- Evolution Characteristics of Geothermal Water in the Niutuozen Geothermal Field, North China Plain. *Journal of Earth Science*, 24(6): 891–902. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0390-6>
- Wang, X. W., Wang, T. H., Zhang, X., et al., 2019. Genetic Mechanism of Xiwenzhuang Geothermal Field in Taiyuan Basin. *Earth Science*, 44(3): 1042–1056 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Ding, W. P., Tian, Y., et al., 2016. Genetic Analysis on High-Temperature Geothermal Water in Niutuo Geothermal Field, Hebei Province. *Urban Geology*, 11(3): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- Wu, A. M., Ma, F., Wang, G. L., et al., 2018. A Study of Deep-Seated Karst Geothermal Reservoir Exploration and Huge Capacity Geothermal Well Parameters in Xiongan New Area. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 523–532 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. L., Liu, F. T., Jia, Z., et al., 2018. The Hydrochemical and $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ Characteristics of Two Geothermal Fields in Niutuozen of Hebei Province and Tianjin and Their Environmental Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J. F., Guo, Q. H., Wang, Y. X., 2014. Geochemical Behaviors of Boron and Its Isotopes in Aqueous Environment of the Yangbajing and Yangyi Geothermal Fields, Tibet, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 140: 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.006>
- Zhang, D. Z., Liu, Z. G., Lu, H. L., 2013. *Geothermics in Hebei*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, J. L., Hu, K. Y., Lu, X. L., et al., 2015. A Review of Geothermal Energy Resources, Development, and Applications in China: Current Status and Prospects. *Energy*, 93: 466–483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.098>
- ### 附中文参考文献
- 陈墨香, 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社.
- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝, 1996. 中国地热系统类型图及其简要说明. *地质科学*, 31(2): 114–121.
- 陈墨香, 汪集旸, 汪缙安, 等, 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. *地质学报*, 64(1): 80–91.
- 郭世炎, 李小军, 2013. 河北保定容城凸起地热田储层属性与资源潜力. *地质科学*, 48(3): 922–931.
- 李常锁, 武显仓, 孙斌, 等, 2018. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理. *地球科学*, 43(增刊1): 313–325.
- 李洁祥, 郭清海, 余正艳, 2017. 高温地热系统中粘土矿物形成对 Na-K 和 K-Mg 地球化学温标准确性的影响. *地球科学*, 42(1): 142–154.
- 李卫卫, 饶松, 唐晓音, 等, 2014. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征. *地质科学*, 49(3): 850–863.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等, 2013. 中国地热资源及其潜力评估. *中国地质*, 40(1): 312–321.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等, 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究. *中国科学院院刊*, 32(11): 56–62.
- 汤玉平, 王国建, 唐俊红, 等, 2017. 应用壤中气方法圈定沉积盆地型地热田的地热最有利富集区. *物探与化探*, 41(1): 22–28.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等, 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究. *中国地质*, 44(6): 1074–1085.
- 汪新伟, 王婷灏, 张瑄, 等, 2019. 太原盆地西温庄地热田的成因机制. *地球科学*, 44(3): 1042–1056.
- 王永波, 丁文萍, 田月, 等, 2016. 河北牛驼镇地热田高温地热水成因分析. *城市地质*, 11(3): 59–64.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等, 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究. *地球学报*, 39(5): 523–532.
- 杨吉龙, 柳富田, 贾志, 等, 2018. 河北牛驼镇与天津地热田水化学和氢氧同位素特征及其环境指示意义. *地球学报*, 39(1): 71–78.
- 张德忠, 刘志刚, 卢红柳, 2013. 河北地热. 北京: 地质出版社.