

崔锐, 王学鹏, 冯波, 等. 基于水化学同位素技术的地热储层成因模式对比分析——以鲁西北埕宁隆起区为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 969-981, 994.

DOI: 10.11932/karst20230513

基于水化学同位素技术的地热储层成因模式对比分析 ——以鲁西北埕宁隆起区为例

崔锐^{1,2}, 王学鹏^{3,4,5}, 冯波^{1,2}, 刘曦遥^{1,2}, 冯守涛^{3,4,5}, 刘帅^{3,4,5}

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程中心, 吉林 长春 130021; 3. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072; 4. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东 德州 253072; 5. 德州市深层地质能节能减碳重点实验室, 山东 德州 253072)

摘要: 埕宁隆起区是我国重要的地热资源富集地区之一, 了解地热田的成因模式对于地热资源的可持续开发利用具有重要意义。采用水化学同位素手段, 对埕宁隆起区馆陶组砂岩热储和寒武-奥陶系岩溶热储成因进行对比分析, 结果表明: 砂岩热储地热水是地质历史时期的大气降水入渗补给的产物, 为侧向径流补给水, 而岩溶热储地热水不是直接来源于大气降水的就近入渗补给, 而是经过较长距离的径流过程, 具有明显的氢氧漂移现象。两套热储地热水补给高程、热储温度及热水循环深度分别为 459 m 和 557 m、66 °C 和 72 °C、1 420 m 和 1 795 m。此外, 研究成果还揭示埕宁隆起区地热水补给区位于泰山地区, 其地热系统热源为地壳深部及少部分上地幔传导热流。

关键词: 埕宁隆起; 水化学; 同位素技术; 热储成因模式; 地热储层

中图分类号: P314 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)05-0969-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

能源紧缺是制约人类社会生存和发展的重要因素, 巨大的能源消耗在给人类社会带来财富和生活便利的同时, 也造成了气候变化、雾霾等诸多环境问题^[1]。因此, 亟需寻找和开发稳定的可再生能源。地热能因其绿色清洁、无污染、分布广泛、高效稳定、可循环再生、开发灵活等优点, 可以有效解决上述问题^[2]。埕宁隆起区是我国主要的地热资源富集地区之一, 地热资源量极为丰富。该区共有地热开采井 131 口, 地热井热水水温大多低于 90 °C, 属中低温地

热资源温热水型。据已有地热地质资料及分析成果估算, 区内地热资源总量为 1.70×10^{20} J, 折合标准煤约 57.86×10^8 t^[3-4]。从地质构造上看, 埕宁隆起区属于在太古界和古生界基底上发育起来的中、新生代断陷盆地^[5]。受差异性升降运动的影响, 沉积了巨厚的中、新生代陆相碎屑岩沉积层。地热水主要富集在新近系层状砂岩的孔隙-裂隙和古生界石灰岩的岩溶-裂隙内^[6]。由于低温和中温地热资源埋深较浅, 区内储层渗透性较高, 开发较为便利。目前, 研究区地热资源多用于沐浴、医疗和供暖等领域。

近年来, 地热资源的水文地球化学特征及其成

资助项目: 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查和科技创新项目(202017); 吉林省科技厅重点研发项目(20200403147SF)

第一作者简介: 崔锐(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事地热资源开发与利用研究。E-mail: 2535225113@qq.com。

通信作者: 冯守涛(1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事地热水地质勘查研究。E-mail: 515631333@qq.com。

收稿日期: 2023-04-20

因模式受到国内外众多专家的关注^[7]。由于地下水具有流动缓慢且埋藏深度不同等特点,同位素技术已成为研究地下水、解决地下水资源与环境问题的重要手段,这有助于从微观和宏观两个方面来阐明地下水的运动机制。王卫星等^[8]通过分析地热水中的水化学特征,推测出地热资源的成因和地热流体的补给来源。自从 20 世纪 20 年代 Craig^[9] 发现世界各地热水的氢氧同位素特征曲线后,¹⁸O、D 几乎被用于所有地热水中。Maloszewski 等^[10] 依据径流中 ³H、¹⁸O 的浓度推测出研究区地热水的平均运移时间。Davisson^[11] 通过同位素和水文地质条件相结合的方法,查明了地下水的补给边界和渗流路径。冯明扬等^[12] 根据地下热水中溶解状 N₂、O₂ 和 CO₂ 等气体含量变化分析了深部构造断裂的开启闭合程度及地下热水水化学环境的特征。罗璐等^[13] 基于世界各地典型地热系统的惰性气体测试数据,讨论地热系统的气体来源判别,不同气源的混合比例计算等,进而确定地热流体的循环深度。然而研究者对不同热储类型地热水的补给来源、补给高程、热源成因等方面的对比分析较少。

本文基于已有成果,从水文地球化学角度对研

究区砂岩和岩溶两套热储岩性、热水水化学特征、补给来源、补给高程及热源成因进行对比研究,总结不同热储层的成因模式,为后续地热资源的可持续开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 地质条件

研究区位于山东省西北部,鲁北平原北部,地势平坦,海拔为 1~20 m。区内地表略有起伏,西南高,东北低,坡降为 1/8 000~1/10 000。在差异性沉降的影响下,在基底太古界、古生界和中生界上部沉积了巨厚的新生代地层。新生代地层由老到新分别为新近系馆陶组、明化镇组,第四纪平原组,缺失古近系^[14-15]。

受喜马拉雅山与地壳运动的影响,区内断裂构造发育,形成隆起、凹陷内的隆起区、坳陷区(图 1)。研究区地质构造上属于华北板块华北坳陷区(I) 济阳坳陷(I_a)的埕子口-宁津潜断隆(I_{a1})和无棣潜断隆(I_{a2})区,区内强烈的地壳运动导致长期稳定的地台裂解、断裂活动,其断裂的大致方向为 NE—

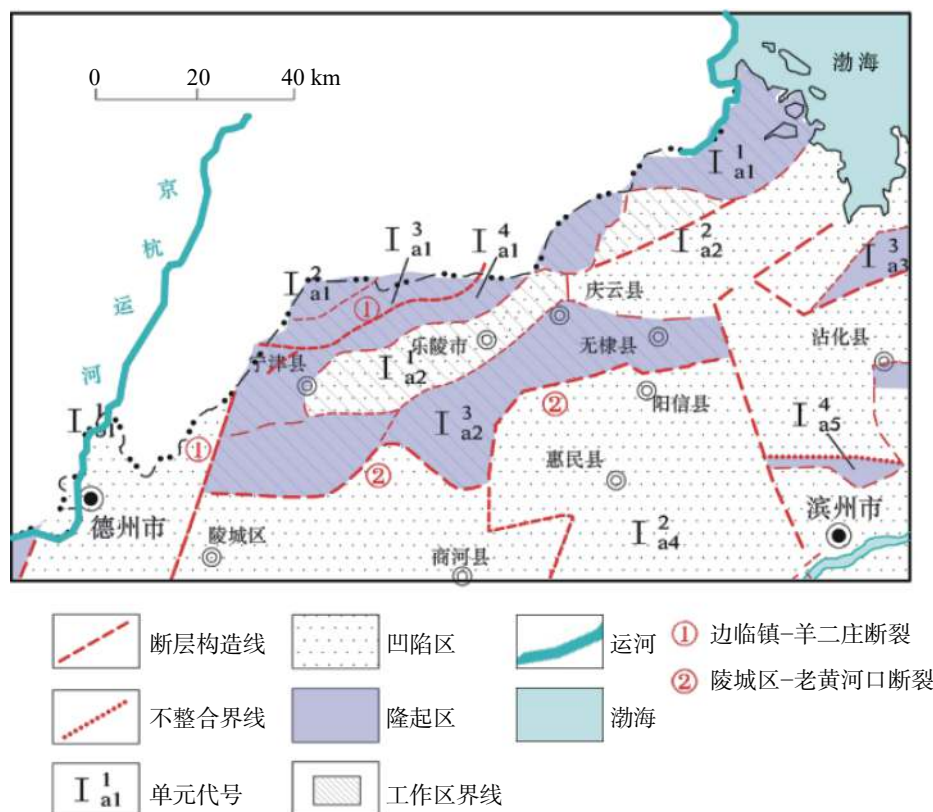


图 1 区域构造单元划分

Fig. 1 Regional tectonic units

NNE 向、NW 向和 EW 向，主要断裂为边临镇-羊二庄断裂与陵城区-老黄河断裂^[16]。

区内分布有浅层和深层地下水。其中，浅层地下水含水砂层颗粒细，水力坡度小，径流缓慢，地下水以垂直补排为主，主要接受大气降水、侧向径流和地表水补给，以垂直蒸发以及向马颊河、徒骇河等河道进行排泄。深层承压水补给条件很差，目前已形成了以城区为中心的地下水降落漏斗，地下水由四周向漏斗中心汇集。

1.2 地热地质条件

根据各热储的埋藏条件、富水性能、热储温度等地热地质条件，区内具备开发利用潜力的热储主要为新近系馆陶组砂岩热储、寒武-奥陶系岩溶热储。

新近系馆陶组热储广布全区，顶板埋深 800~1 100 m，底板埋深 900~1 500 m，地层厚度约为 100~450 m，热储累计厚度 70~150 m，平均单层厚度为 10~20 m^[17]，受区域构造和基底起伏的影响，其在凸起区表现为埋藏浅、厚度薄，而在凹陷区埋藏深、厚度大。水平方向上，西部宁津一带砂砾岩厚度较大，一般在 100~150 m 之间，往东北方向砂砾岩厚度逐渐变小，一般小于 100 m^[18]。热储岩性上部以灰白色、浅灰色细-中砂岩、细砂岩、粉砂岩为主，下部则主要为灰白色、灰色厚层状块砾岩、含砾砂岩，以底部普遍发育含石英和燧石的砂砾岩为特征。

寒武-奥陶系岩溶热储在埕子口潜凸起、无棣潜凸起东部缺失，其余地区均有分布。热储顶板埋深一般为 1 000~3 000 m，主要受基底构造的控制，波动较大。除在区内的乐陵一带隐伏在石炭-二叠系之下外，其余地区大多隐伏在新生界之下^[19]。地热流体主要赋存在碳酸盐岩系的石灰岩、白云岩类的岩溶-裂隙及岩石的古风化壳，除受岩性影响以外，岩溶裂隙、古风化壳发育程度还受构造和埋藏深度的影响。钻探结果显示，奥陶系灰岩潜山体的岩溶裂隙、古风化壳发育程度直接被新近系掩盖时要高于被石炭-二叠系掩盖时，并且前者的富水性大于后者^[20]。

2 地热水化学特征

2.1 地热水水化学组分与类型

为了对比砂岩热储与岩溶热储水质特征，2020 年 8 月依据《水质采样技术指导》(HJ494-2009)要求，

在研究区采集了 10 份水样进行地热流体化学组分测试，其中岩溶热储分析样 5 件，砂岩热储分析样 5 件，并现场测试了水样的水温、pH、矿化度等指标，水化学测试结果如表 1。

表 1 地热水水化学成分表
Table 1 Hydeochemical composition list of geothermal water

热储类型	砂岩热储	岩溶热储
K ⁺ /mg·L ⁻¹	10.80~19.95	31.10~41.50
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	1 540.00~2 036.25	1 541.00~1 896.25
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	6.01~131.90	230.46~720.00
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	12.15~39.80	35.84~144.00
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	1 896.58~2 746.69	3 008.82~3 163.91
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	566.75~999.02	315.80~1 198.00
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	79.33~299.00	146.45~275.00
矿化度/g·L ⁻¹	4.19~5.96	5.91~11.10
pH	7.35~9.43	6.50~7.29
水化学类型	Cl-Na	Cl-Na

砂岩热储地热水和岩溶热储地热水的阴阳离子均以 Cl⁻和 Na⁺为主，其中，Cl⁻含量分别为 1 896.58~2 746.69 mg·L⁻¹和 3 008.82~3 163.91 mg·L⁻¹，Na⁺含量分别为 1 540.00~2 036.25 mg·L⁻¹和 1 541.00~1 896.25 mg·L⁻¹。二者的不同点在于矿化度和 pH 值：砂岩热储地热水矿化度为 4.19~5.96 g·L⁻¹，pH 为 7.35~9.43，为中性-弱碱性水；岩溶热储地热水矿化度为 5.91~11.1 g·L⁻¹，pH 为 6.50~7.29，按酸碱度分类为中性水(6.5~8.0)。

为了确定地下水常规组分的相关性，基于 SPSS 分析不同离子间的相关系数(表 2)，当相关系数 r=1 时为完全正相关，r=-1 时为完全负相关，|r|越接近 1，代表其相关性越密切^[21]。通过 SPSS 的相关性分析，能够推断出该种离子的来源，从而更好地说明地热水的类型。

由表 2 知，在砂岩热储地热水中，相较于 SO₄²⁻和 HCO₃⁻，pH 与 Cl⁻的相关性最高为-0.667，表明地下水酸碱度主要受岩盐溶解影响。地热水中的矿化度与 Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻相关性最强，Ca²⁺、SO₄²⁻次之，表明研究区经历了强烈的溶滤作用，导致地热储层中的岩盐、碳酸盐矿物以及部分硫酸盐矿物溶解进入地热水中，引起地下水矿化度的增加。Na⁺和 Cl⁻与 HCO₃⁻相关性极高，说明砂岩热储地热水的补给来源主要接受大气降水间接补给和侧向补给，Ca²⁺与

表 2 基于 SPSS 离子相关性分析
Table 2 Correlation analysis of ions based on SPSS

热储类型	离子相关性	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	矿化度	pH
馆陶组砂岩热储	K ⁺	1.000	0.666	-0.232	0.571	0.501	-0.155	0.696	0.495	0.311
	Na ⁺		1.000	0.455	0.932	0.872	0.549	0.969	0.970	-0.376
	Ca ²⁺			1.000	0.660	0.725	0.506	0.436	0.657	-0.966
	Mg ²⁺				1.000	0.980	0.393	0.936	0.966	-0.593
	Cl ⁻					1.000	0.333	0.878	0.932	-0.667
	SO ₄ ²⁻						1.000	0.508	0.611	-0.481
	HCO ₃ ⁻							1.000	0.964	-0.356
	矿化度								1.000	-0.590
	pH									1.000
寒武系-奥陶系岩溶热储	K ⁺	1.000	0.738	-0.731	-0.737	-0.476	-0.521	-0.887	-0.560	0.663
	Na ⁺		1.000	-0.677	-0.891	-0.187	-0.958	-0.868	-0.306	0.947
	Ca ²⁺			1.000	0.929	0.849	0.608	0.932	0.907	-0.829
	Mg ²⁺				1.000	0.596	0.857	0.964	0.688	-0.976
	Cl ⁻					1.000	0.112	0.629	0.992	-0.419
	SO ₄ ²⁻						1.000	0.759	0.225	-0.948
	HCO ₃ ⁻							1.000	0.720	-0.910
	矿化度								1.000	-0.521
	pH									1.000

HCO₃⁻相关性较小也同样说明了这个问题,因为直接接受大气降水补给的地下水中 Ca²⁺与HCO₃⁻的相关性应较大。Ca²⁺与SO₄²⁻相关系数为 0.506,表明地层中含有石膏等硫酸盐矿物。Mg²⁺与HCO₃⁻相关性较大为 0.936,说明可溶性碳酸盐溶解对地下水组分影响显著。Na⁺、Mg²⁺与 Cl⁻的相关性较好,说明砂岩储层中富含岩盐矿物和海相沉积物。

在岩溶热储地热水中, Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻与矿化度和 pH 的相关性较强,表明岩溶地热水中的主要离子来源于白云石的溶解。Ca²⁺、Mg²⁺与SO₄²⁻的相关系数较大,说明储层中分布有大量的石膏等硫酸盐矿物。Na⁺与 Cl⁻相关性较差,且 Ca²⁺、Mg²⁺与HCO₃⁻的相关系数均高于 0.9,这说明岩溶储层中富含大量的碳酸盐矿物。

经过前期勘察,地热储层富含硫酸盐、碳酸盐等矿物,上文对于砂岩和岩溶热储地热水来源的推断与储层岩性相一致,由此确定,SPSS 的离子相关性分析可信度很高。

为了进一步确定地热水的补给来源,对地热水中主成分进行了分析(表 3)。

由表 3 可知砂岩热储地热水主要离子为 Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻,表明砂岩地热水主要受侧向补给。

这与当地水动力场特征相互映衬,均为大气降水补给后再侧向补给砂岩地热水^[14]。地下水与围岩发生水岩反应,水中的 Ca²⁺与 Na⁺发生置换反应导致其含量减小,同时鲁北地区地层中含有大量的岩盐矿物以及含氯海相沉积物,经历溶蚀作用地热水中 Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻的含量增加。

岩溶热储地热水主要离子为 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻,表明岩溶热储地热水不同于砂岩地热水,其直接受大气降水补给^[14],地下水在径流过程中温度升高,在高温条件下与围岩发生水岩反应,岩层中的石膏、岩盐、碳酸盐溶解进入地下水中,导致其矿化度升高。

根据 Piper 三线图样点分布区域的不同,可以直接反应不同含水层的水化学类型差异。图 2 为研究区砂岩热储和岩溶热储地热水水化学性质 Piper 图。

研究区馆陶组热储和奥陶系岩溶热储均为厚层的层状热储,其水化学类型表现为线性统一,均为 Cl-Na 型地热水,水中碱性碳酸盐的含量小于 50%,并且碳酸盐的硬度也小于 50%,该地区地下水为非碳酸盐碱性地下水。区内砂岩热储地热水由西至东 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻离子浓度均有增加,阴离子浓度的涨幅大于阳离子,导致热水的 pH 略有

表 3 基于 SPSS 地热水主成分分析
Table 3 Principal component analysis of geothermal water based on SPSS

离子类型	砂岩热储地热水			岩溶热储地热水		
	1	2	3	1	2	3
K ⁺	0.461	0.881	-0.107	-0.815	0.000	0.579
Na ⁺	0.945	0.281	0.165	-0.863	0.501	0.059
Ca ²⁺	0.716	-0.664	-0.216	0.955	0.285	0.082
Mg ²⁺	0.980	0.116	-0.164	0.989	-0.088	0.119
Cl ⁻	0.961	0.033	-0.276	0.657	0.747	0.103
SO ₄ ²⁻	0.569	-0.385	0.726	0.790	-0.574	0.213
HCO ₃ ⁻	0.940	0.314	0.130	0.991	-0.010	-0.137
矿化度	0.995	0.053	0.090	0.745	0.663	0.080
pH	-0.652	0.722	0.231	-0.940	0.291	-0.178

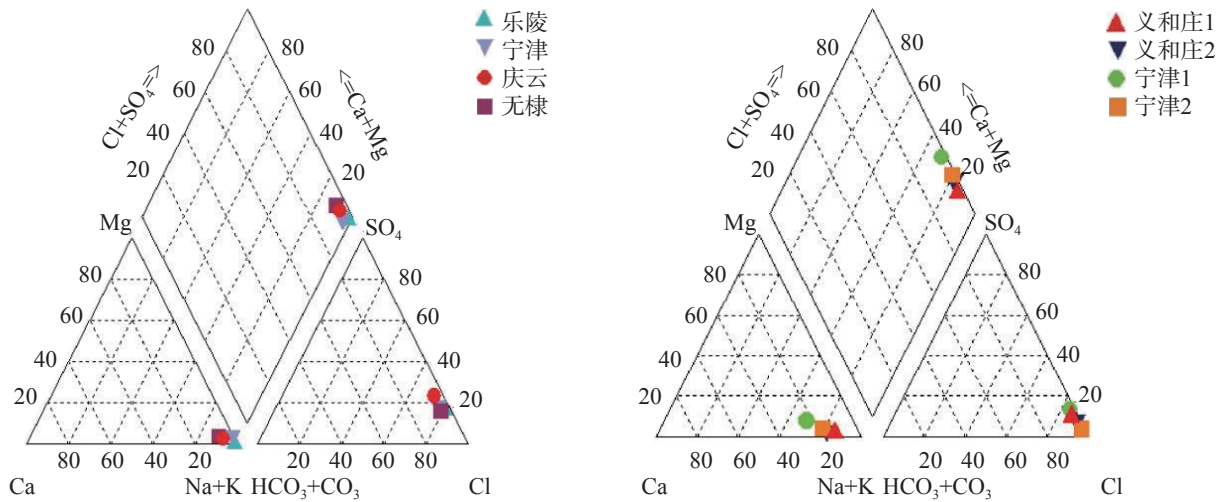


图 2 砂岩和岩溶热储地热水水化学 Piper 三线图
Fig. 2 Piper diagram of hydrochemistry of sandstone and karst geothermal water

下降。地热水中主要阳离子含量由大到小依次为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ，主要阴离子含量为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ 。相较于砂岩地热水，寒武系-奥陶系岩性主要以灰岩和白云岩为主，这导致岩溶热储地热水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量较高，地热水的硬度较大。岩溶热储地热水中的 K^+ 、 Cl^- 含量高于砂岩热储地热水，这是因为鲁西北坳陷以湖相沉积为主，在沉积过程中，形成了含有岩盐等易溶性盐类的地层，这些盐在形成地热水的过程中被溶解，最终导致 K^+ 和 Cl^- 离子含量较高。

2.2 水-岩相互作用

Na-K-Mg 三角图常被用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样，是水化学分析的一个重要方法^[22]。将研究区地热水中的 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 含量

投影到 Na-K-Mg 平衡图上(图 3)，可知砂岩热储地热水均位于局部平衡区，且水岩作用程度相似，尚未达到平衡状态。

岩溶热储地热水与砂岩热储地热水相似，处于局部平衡区，由于取样点靠近渤海湾，岩层中含有大量的海相沉积物，高温作用下加速矿物的溶解，这导致水样中 K^+ 的含量大幅增加，同时 K^+ 与岩层中的碳酸盐和硫酸盐发生置换反应继续加速水岩反应的进行，最终导致该地区处于水岩反应处于非平衡区^[6]。

为了确定地热储层中围岩主要成分，基于 PHREEQC 软件利用反向水文地球化学模拟，对地热水流动过程中，岩石发生的溶解、沉淀、蒸发、离子交换等水化学过程进行了定量分析。水化学分析结果可知砂岩型地热水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的含量较高，推测在径流过程中有碳酸盐矿物(方解石、白

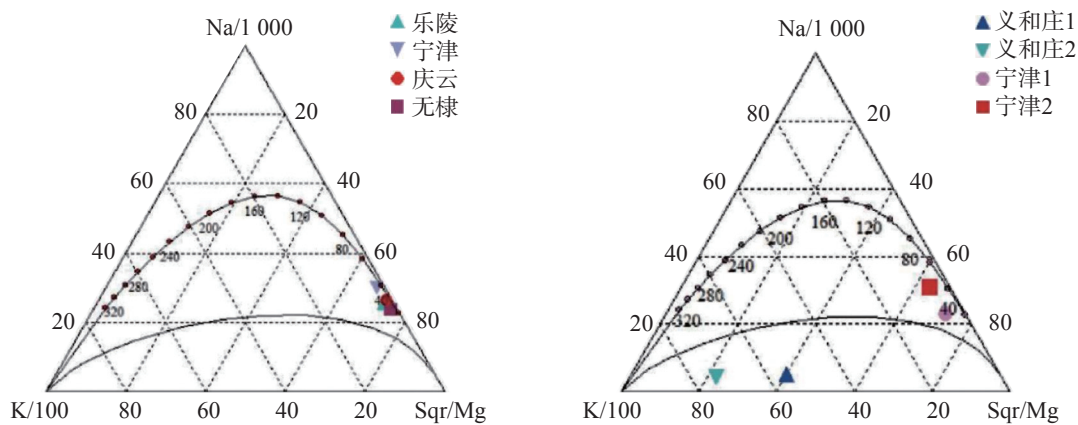


图 3 砂岩型和岩溶型地热水 Na-K-Mg 平衡图解^[21]
Fig. 3 Na-K-Mg equilibrium diagram of sandstone and karst geothermal water

云石、文石)、硫酸盐矿物(硬石膏、石膏)参与其中;在岩溶热储地热水中, K^+ 含量异常增加, 推测在排泄区附近含有大量的含钾矿物(伊利石、钾长石)。

模拟结果如表 4, 在地下水渗流过程中, 砂岩热储地热水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度升高的主要原因是方解石、白云石、岩盐、硬石膏的溶解; 岩溶热储地热水中 K^+ 主要来源于钾长石和伊利石, 岩盐的析出导致 Na^+ 含量降低。伊利石和方解石的溶解造成了地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度的升高。由此判定, 砂岩热储层中主要矿物为方解石、白云石、岩盐、硬石膏; 岩溶热储层中主要矿物为白云石、石膏、钾长石、伊利石。

表 4 基于 PHREEQC 反向水文地球化学模拟
Table 4 Reverse hydrogeochemical simulation based on PHREEQC

矿物组分	地下水渗流路径	
	砂岩热储	岩溶热储
方解石 $CaCO_3$	3.878×10^{-4}	-2.966×10^{-2}
白云石 $CaMg(CO_3)_2$	1.129×10^{-3}	6.739×10^{-2}
岩盐 $NaCl$	2.389×10^{-3}	-1.243
石膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2.297×10^{-3}	4.543×10^{-1}
钾长石 $KAlSi_3O_8$		8.452×10^{-3}
伊利石 $K_{0.65}\{Al_2[Al_{0.65}Si_{3.35}O_{10}](OH)_2\}$		3.796×10^{-2}

3 地热水同位素分析

3.1 补给来源

目前, 地热水补给来源和混合作用研究中, 应用最为广泛的同位素有稳定同位素 ^{18}O 、D、T 和放射性

同位素 ^{14}C 等^[23]。通过测定热水中氢、氧同位素指标, 并将其与全球大气降水馏线或地方馏线进行比较, 可以确定其补给来源。

根据区内地热水氢氧同位素资料分析(表 5), 砂岩热储和岩溶热储地热水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 关系点均位于中国大气降水线附近($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)^[24](图 4), 这说明该区地热水直接或间接来源于大气降水。

表 5 砂岩和岩溶热储地热水氢氧同位素数据表
Table 5 Hydrogen and oxygen isotope data of geothermal water in sandstone and karst reservoirs

热储层位	取样点	地面高程/m	$\delta D-^2H/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$
新近系馆陶组 砂岩热储	无棣	5.0	-73.0	-9.2
	乐陵	22.0	-70.0	-8.5
	乐陵	22.3	-67.0	-9.2
	宁津	17.0	-73.0	-8.7
	庆云	10.0	-71.0	-8.5
寒武-奥陶系 岩溶热储	德州	19.0	-77.3	-10.6
	宁津	20.0	-75.0	-9.5
	宁津	17.0	-75.0	-9.7
	乐陵	19.0	-80.3	-9.9
	宁津	22.0	-80.6	-9.6

砂岩热储地热水的氢氧同位素含量均低于全球大气降水线, 是由于其上覆巨厚的黏性土、泥岩及砂岩隔水盖层, 难以直接接受大气降水补给。这表明砂岩热储地热水是地质历史时期的大气降水入渗补给的产物, 为侧向径流补给水。

相较于砂岩热储地热水, 岩溶热储地热水中氢氧同位素的含量较低, 特别是 ^{18}O 值下降明显, 但岩溶型地热水更接近于全球大气降水线, 这说明岩溶

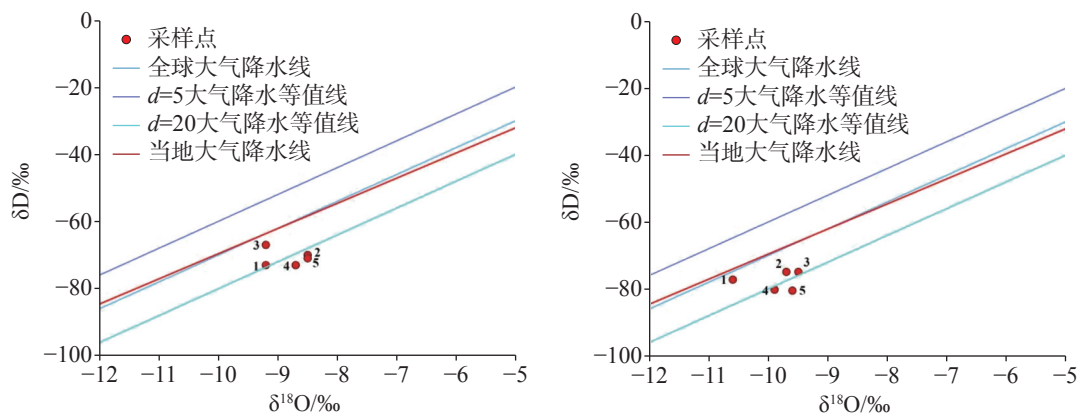


图 4 砂岩和岩溶热储地热水中 D、¹⁸O 同位素关系图

Fig. 4 D and ¹⁸O isotopic relationship of geothermal water in sandstone and karst reservoirs

热储地热水不是直接来源于大气降水的就近入渗补给,而是经过较长距离的径流过程,发生了明显的氢氧漂移现象。

d 值为氘的盈余参数($d=\delta D-8\delta^{18}O$),可以衡量水岩反应中 $\delta^{18}O$ 同位素的交换程度,d 值越小说明地下水补给路径越长,水岩反应越强烈^[25]。结合表 5 中数据通过计算可知研究区的 d 值均非常小,这说明研究区距离补给区较远,地下水补给路径较长,循环滞留时间长,与围岩反应更加充分,这进一步解释了岩溶水中同位素含量增多的原因。

3.2 补给高程

按照氢、氧稳定同位素的高程效应原理,δD、δ¹⁸O 随地下水补给高程的增大而减小。地热水补给区高程计算公式为:

$$H = H_0 + \frac{(D - D_r)}{gradD} \times 100 \tag{1}$$

式中:H 为地热水补给区高程,m;H₀ 为地热水水样点的地面高程,m;D 为补给水的 δD 值,‰;D_r 为地热水的 δD 值,‰;gradD 是随高程的递减梯度,‰/100 m。

依据张保健等的研究,泰山南天门冷泉水的 δD 值以-75.1‰计算,区内大气降水的 gradD 值为-1.24‰/100 m^[26]。鲁北地区砂岩热储地热水的 δD 均值为-70.8‰,平均地面高程为 15.3 m,依据区域大气降水的 gradD 值求得地下水补给高程为 459 m。鲁北地区岩溶热储地热水的 δD 均值为-77.64‰,平均地面高程为 19.4 m,依据区域大气降水的 gradD 值求得地下水补给高程为 557 m。补给高程大致相当于泰山山脉及其周边的鲁中山区,由此可以看出泰

山地区为研究区地下热水的补给区。

3.3 补给温度及循环深度

确切的热储温度是估算地下水循环深度的前提,井口水温通常小于实际温度;测井温度受到钻井液的影响,同样会小于地层的实际温度,本文选用 K-Mg 地热温标来计算热储温度(表 6)。对于中低温地热水温标的选取要考虑到其对温度变化的敏感性。K-Mg 地热温标是基于钾长石转变为白云母和斜绿石的离子交换反应,其对于温度的变化反应非常迅速,在溶液中达到平衡也最为快速,因此,它适用于中低温热水系统^[27]。计算公式为:

$$t \approx \frac{4410}{13.95 - \lg(C_1^2/C_2)} - 273.15 \tag{2}$$

式中:t 为热储温度,℃;C₁ 为地热水中溶解钾离子的浓度,mg·L⁻¹;C₂ 为地热水中溶解镁离子的浓度,mg·L⁻¹。

表 6 地热水水温及热储温度		
Table 6 Geothermal water temperature and thermal reservoir temperature		
热储层	井口水温/℃	热储温度/℃
新近系馆陶组砂岩热储	50~58	66
寒武系-奥陶系岩溶热储	65~70	72

利用 K-Mg 地热温标计算的热储温度估算地热水的循环深度(表 7),计算公式如下:

$$t = t_0 + \frac{H - h}{100} r \tag{3}$$

式中:t 为热储温度,℃;t₀ 为常温带温度,℃;r 为地热梯度,℃·hm⁻¹;h 为常温带深度,m;H 为地下热水

的最大循环深度, m。

查阅文献可知当地 t_0 为 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, h 为 20 m , 砂岩热储地温梯度为 $3.70\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$, 岩溶热储地温梯度为 $3.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ [6]。

表 7 地热储层地温梯度及地热水循环深度

Table 7 Geothermal gradient and depth of geothermal water circulation of geothermal reservoir

热储层	地温梯度/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$	循环深度/m
新近系馆陶组砂岩热储	3.70	1 420
寒武系-奥陶系岩溶热储	3.23	1 795

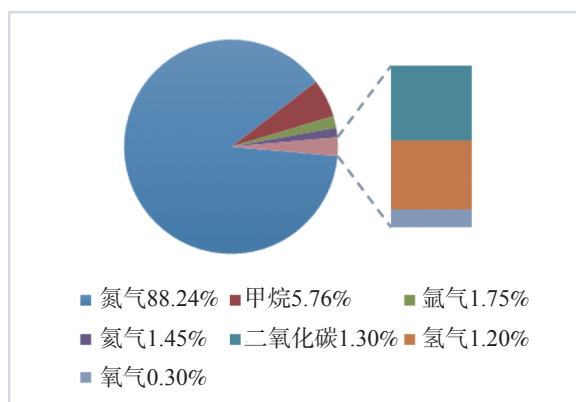
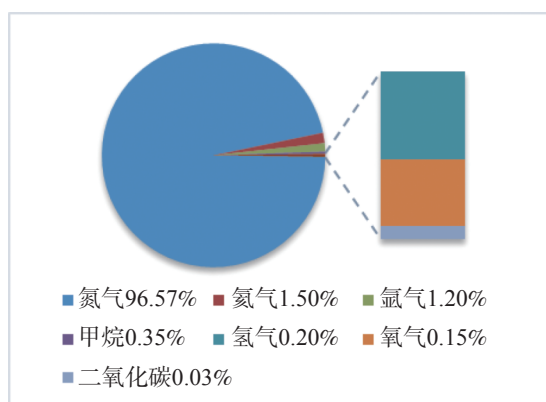


图 5 地热流体溶解气体组分含量图(左:砂岩热储,右:岩溶热储)

Fig. 5 Content of dissolved gas in geothermal fluid (left: sandstone heat storage, right: karst heat storage)

研究区内地热水氮气占比 $88.24\%\sim 96.57\%$, 大于大气中的 N_2 占比 (78%), 表明地热储层的封闭性较好, 与大气沟通循环过程缓慢。大气降水带入的氮气在储层中运移时, 极少参与各种化学反应及其它变化过程, 同时由于地幔的脱气作用, 一部分 N_2 沿断裂带进入地下水中, 证明砂岩热储与岩溶热储地热气体由大气降水经深循环补给。

水岩中极低的氧含量同样说明砂岩热储与岩溶热储地质构造条件较封闭, 处于还原条件 [28]。硫化氢与氧是不相容组分, 它们不能同时存在, 如果发现它们同时存在, 表示有含氧的浅层水混入到地热水中 [6]。在本次的样品中, 硫化氢含量极低, 也充分说明本次取样的地热流体处于封闭性良好的地质环境, 无浅层水混入。

相较于砂岩热储地热水, 岩溶型地热水中 CO_2 和 CH_4 的含量较高。这是由于岩溶型地热水的循环深度更大, 地幔脱气作用强于砂岩型地热水。同时岩溶储层中含有大量的碳酸盐, 在地热水深部循环

4 地热气体化学及同位素特征

4.1 气体组分占比特征

根据《气体参数测量和采样的固定装置》(HJ/T1-92)的要求, 对该地区的地热气体进行收集并检测。实测结果表明 N_2 占比在 88% 以上, 为砂岩热储与岩溶热储地热气体的主要成分 (图 5), 其次是 He 、 Ar 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2 、 O_2 、 C_3H_4 、 C_4H_{10} 占比较低, 均未超过 10% , 所有气体样品中 C_2H_6 、 SO_2 均未检出, He 、 Ar 等稀有气体比例相对稳定, 为高氮型地下热水。

过程中, 由于碳酸盐变质作用, 也会有部分 CO_2 进入水中。相较于砂岩储层, 岩溶储层的温度更高, 储层中有机物的热解作用和碳氢化合物的成岩、退化作用更加强烈, 导致 CH_4 含量增加。

4.2 地热气体同位素分析

地热气体主要有 3 个来源: ① He 含量较低的空气 (Air) 和空气饱和的地下水 (ASW), 其 N_2/Ar 比值分别为 83 和 40; ② 高 N_2 含量, N_2/Ar 比值 > 200 和 N_2/He 比值 $> 1\,000$ 的岛弧型 (俯冲型) 气体; ③ He 含量高且 N_2 较低, N_2/He 比值 < 200 的地幔源气体。由计算结果 (表 8) 可知, 地热水中的气体均不是岛弧型气体而是由大气和地幔两种来源混合而成 [29]。

4.2.1 He 同位素

由于 He 为惰性化学元素, 一般只考虑其物理过程, 不涉及复杂的化学过程, 故 He 同位素是判识幔源气体最灵敏的地球化学示踪指标 [30]。通常将气体样品中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值 R 与大气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值进

表 8 地热气体中 N₂-Ar-He 比值
Table 8 N₂-Ar-He ratio in geothermal gas

热储层	N ₂ /Ar	N ₂ /He
新近系馆陶组砂岩热储	70.49	61.12
寒武系-奥陶系岩溶热储	57.67	72.33

行 R/Ra 计算。大气、壳幔和上地幔的³He/⁴He 值分别为 1.4×10⁻⁶、2.0×10⁻⁸ 和 1.1×10⁻⁵[31]。一般认为纯地壳起源氦气³He/⁴He 的比值为 0.1~0.01 Ra, 若流体中 He 的³He/⁴He 比值>0.1 Ra 就意味着含有地幔起源 He 组分[32]。

砂岩热储地热水和岩溶热储地热水中 R/Ra 值范围为 0.27~0.37(表 9), 大于地壳氦(³He/⁴He=0.01~0.05 R/Ra), 表明砂岩热储与岩溶热储地热气体中的 He 主要为壳源成因并且均有地幔起源 He 的加入。

表 9 地热气体中 He 同位素组成及特征
Table 9 Composition and characteristics of He isotopes in geothermal gas

热储层	R/Ra	³ He/ ⁴ He(10 ⁻⁷)	⁴ He/ ²⁰ Ne	He(10 ⁻⁶)
新近系馆陶组砂岩热储	0.27	3.73	837	15 957
寒武系-奥陶系岩溶热储	0.37	5.17	886	12 997

根据³He/⁴He-⁴He/²⁰Ne 关系图(图 6), 可以判断气体为壳源或幔源, 从而判断出流体的循环深度[33]。由图 6 可以看出, 研究区砂岩热储与岩溶热储地热气体氦同位素所占比重基本相同, 均分布在 1% 上地幔线与 5% 上地幔线之间, 显示砂岩与岩溶热储热源大量来源于地壳, 少量来源于地幔。

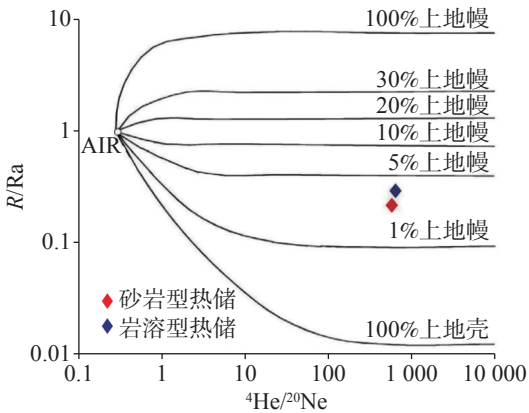


图 6 地热气体样品³He/⁴He-⁴He/²⁰Ne 关系图
Fig. 6 Relationship of ³He/⁴He-⁴He/²⁰Ne of geothermal gas samples

4.2.2 CO₂ 同位素

CO₂ 排放特征是指示活动断裂地球化学场特征的最佳方法之一, 碳稳定同位素(δ¹³C_{CO₂})可以判断 CO₂ 的来源并推断地热水的热源。由于不同成因的 CO₂ 的 δ¹³C 值会互相重叠, CO₂ 来源的判别通常基于 CO₂ 的 δ¹³C 值和 He 同位素特征共同分析[34]。图 7 为一个端元和基于各端元 CO₂/⁴He 比值作的混合线, 地幔起源, 壳源碳酸盐变质成因和壳源有机成因三个端元的 CO₂/³He 比值分别取 2×10⁹、2×10¹⁰、2×10¹¹。

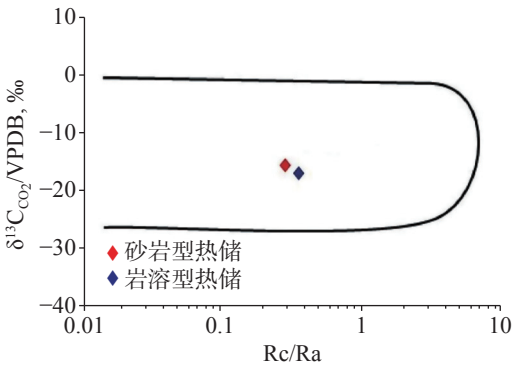


图 7 地热气体⁴He/²⁰Ne-Rc/Ra 关系图
Fig. 7 Relationship of ⁴He/²⁰Ne-Rc/Ra of geothermal gas

由图 7 可以看出, 区内砂岩热储与岩溶热储地热气体中, δ¹³C_{CO₂}值在-15.3‰~-17.8‰区间(表 10), 小于-10‰, 说明区内砂岩热储与岩溶热储地热气体 CO₂ 成因来源主要为地壳有机成因, 这与以上壳源、幔源 He 来源分析一致。

5 成因模式分析

研究区自中生代以来, 受燕山期地壳运动的影响, 发育了边临镇-羊二庄、陵城区-老黄河口等深大断裂, 岩浆沿深大断裂侵入或上地幔物质上涌到地壳浅部, 形成了地热异常区。差异性沉降形成的凹陷与凸起, 导致热流分布不均匀, 凹陷区的热流值普遍低于凸起区的热流值, 其热异常多数集中于凸起构造区及深大断裂带附近。由此可见, 该地区地热资源的形成受地幔结构、岩浆活动、地质构造、地层岩性及地壳深部地下水活动等影响, 并与盖层、热储层、热源和热水补给源等因素有关。

5.1 盖 层

研究区为热传导型地热系统, 热储上部新近系明化镇组及第四系沉积厚度达 800~1 100 m, 主要为

表 10 地热气体中 CO₂ 同位素组成及特征
Table 10 Composition and characteristics of CO₂ isotopes in geothermal gas

热储层	R/Ra	³ He/ ⁴ He(10 ⁻⁷)	⁴ He/ ²⁰ Ne	He(10 ⁻⁶)	δ ¹³ C _{CO₂} (‰)
新近系馆陶组砂岩热储	0.27	3.730	837	15 957	-15.3
寒武系-奥陶系岩溶热储	0.37	5.167	886	12 997	-17.8

黏性土和砂性土,其阻热能力强,导热性能差,起到了很好的保温作用。另外,各热储含水层所夹的泥岩,也起到了很好的保温作用,使热能得以在热储层中储集起来。

5.2 热 储

研究区主要热储为上部的新近系馆陶组层状孔隙-裂隙砂岩热储和下部的寒武系-奥陶系的岩溶热储。新近系馆陶组砂岩热储岩性以细-中砂岩、细砂岩、粉砂岩、砂砾岩为主,孔隙度大,富水性强,水温较高,其中泥岩、砂质泥岩共同组成下伏岩溶热储层的保温层;寒武系-奥陶系岩热储岩溶-裂隙空隙及古风化壳发育,富水性强,水温高,是本区可供开发利用的良好热储层。

5.3 热 源

地壳深部和少部分上地幔传导热流是研究区的主要热源。研究区的深大断裂在其活动时期产生了一定的摩擦热,同时作为地下热流的良好通道,沟通和向上传导了地壳深部和上地幔的岩浆产生的热量;另外,区内属深拗断陷沉积盆地,在巨厚中新世代沉积层压力下会产生重力压缩热。这些热源产生的热量在上覆阻热能力强,导热性能差的盖层的阻热保温作用下,储存在热储层的孔隙和裂隙中,是区内地热水形成的主要热源。

5.4 地下热水的补给来源

大气降水在研究区东南部的泰山山脉灰岩裸露区或泰山群变质岩构造有利地段入渗后,沿构造断裂经长时间径流和深部循环向研究区运移,运移过程中与围岩中的碳酸盐矿物、硫酸盐矿物、含钾矿物等发生溶解、沉淀、蒸发、离子交换等水岩反应,水化学类型由 HCO₃-Ca 演变为 Cl-Na 型。受断裂或者岩体的阻挡,大气降水在向地下深处循环过程中,一般处于封闭环境中,吸收上述热源产生的热量后形成地热水。岩溶地热水矿化度较高,水岩相互作用较大,δ¹⁸O 漂移现象明显。

研究区裂隙带的存在对岩溶裂隙的形成至关重要,在构造破碎和断层发育处,岩溶可向深部发展。岩溶和裂隙的发育程度和发育方向一般控制着区内寒武系-奥陶系岩溶地热水的补径排方向(图 8)。补给来源为鲁中山区基岩的大气降水,入渗后的大气降水及地表水沿岩溶裂隙和断裂构造带补给。

砂岩热储地热水所处水动力环境为华北盆地内部的径流滞缓带,馆陶组热储埋深较大,上覆 800~1 100 m 的松散沉积物,热水被封存于封闭的水文地球环境中,由于砂岩类热储中岩盐含量较大,地热水的化学成分以岩盐等可溶盐类的溶解为主,水化学类型为 Cl-Na 型。前人研究发现,馆陶组与上覆明化镇组水质、水温、水位等相差较大,由此可以推断两者之间的水力联系较弱,馆陶组砂岩热储地热水主要接受同层位近相邻地区的侧向径流补给,补给源为鲁中山区。

6 结 论

(1)鲁北地区砂岩和岩溶热储地热水阳离子均以 Na⁺为主,阴离子以 Cl⁻为主,砂岩热储地热水矿化度为 4.19~5.96 g·L⁻¹,pH 为 7.35~9.43,为中性-弱碱性水。岩溶热储地热水矿化度为 5.91~11.10 g·L⁻¹,pH 为 6.50~7.29,按酸碱度分类为中性水。

(2)砂岩热储地热水是地质历史时期的大气降水入渗补给的产物,为侧向径流补给水,储层中主要矿物为方解石、白云石、岩盐、硬石膏。岩溶热储地热水并非直接来自于大气降水的直接垂直入渗补给,而是经过长时间径流和深部循环,发生了明显的 δ¹⁸O 漂移,储层中主要矿物为白云石、石膏、钾长石、伊利石。

(3)砂岩热储地热水补给高程为 459 m,热储补给温度为 66 ℃,循环深度为 1 420 m。岩溶热储地热水补给高程为 557 m,热储补给温度为 72 ℃,循环深度为 1 795 m。补给区均为泰山山脉及其周边的鲁中山区。

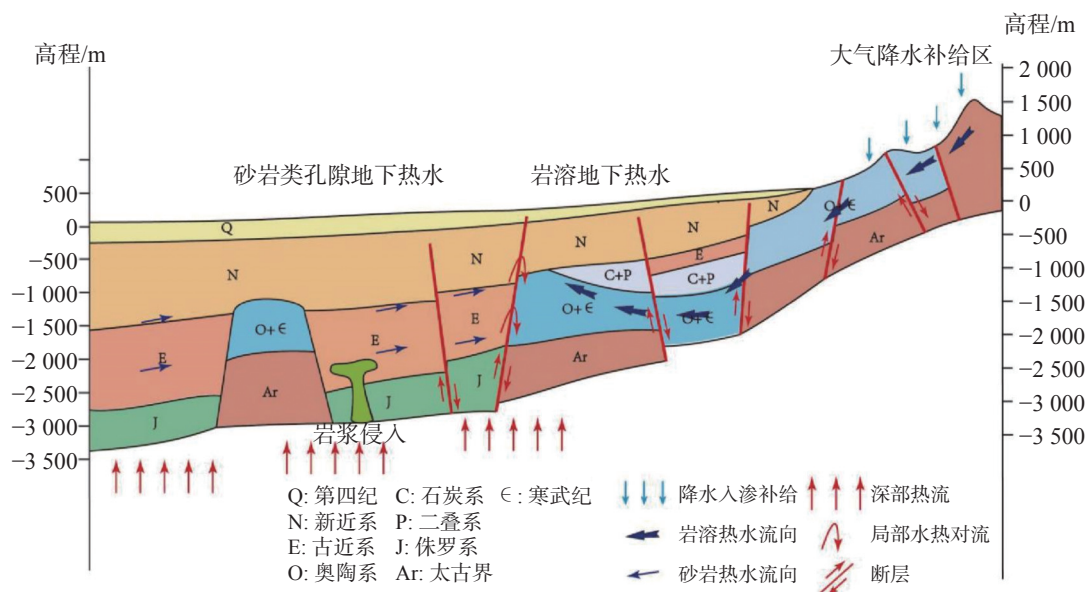


图 8 研究区地下热水形成模式图

Fig. 8 Formation pattern of hot groundwater in the study area

(4)研究区地热水处于封闭性良好的地质环境条件下,无浅层水混入,为深循环地热水。砂岩与岩溶热储热源大量来源于地壳,少量来源于地幔。

参考文献

- [1] Diego Moya, Clay Aldás, Prasad Kaparaju. Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 889-901.
- [2] E Pastor Martínez, C Rubio Maya, V M Ambríz Díaz, J M Belman Flores, J J Pacheco Ibarra. Energetic and exergetic performance comparison of different polygeneration arrangements utilizing geothermal energy in cascade[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 168(1): 252-269.
- [3] 王浩, 赵季初. 鲁西北平原区地热资源开发对地下水环境的影响[J]. *山东国土资源*, 2015, 31(7): 36-39.
WANG Hao, ZHAO Jichu. Effect of geothermal resources exploitation to groundwater environment in northwestern plain in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2015, 31(7): 36-39.
- [4] 王彦俊, 刘桂仪, 胡松涛. 鲁北地区地热资源区划研究[J]. *地质调查与研究*, 2008, 31(3): 270-277.
WANG Yanjun, LIU Guiyi, HU Songtao. Division of the geothermal resources in the northern Shandong Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2008, 31(3): 270-277.
- [5] 赵季初, 纪洪磊, 刘欢. 鲁北平原地下咸水浅层地热能开发利用条件研究[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(3): 13-20.
ZHAO Jichu, JI Honglei, LIU Huan. Study on the development and utilization prospect of shallow geothermal energy of saline underground water in northern Shandong Plain[J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(3): 13-20.
- [6] 张保建. 鲁西北地区地下水的水文地球化学特征及形成条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
ZHANG Baojian. Hydrogeochemical characteristics and formation conditions of the geothermal water in northwestern Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [7] 刘志涛, 刘帅, 宋伟华, 杨询昌, 周群道. 鲁北地区砂岩热储地热水回灌地温场变化特征分析[J]. *地质学报*, 2019, 93(Suppl.1): 149-157.
LIU Zhitao, LIU Shuai, SONG Weihua, YANG Xunchang, ZHOU Qundao. Change characteristics of geothermal field for geothermal return water reinjection of sandstone reservoir in the northern Shandong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Suppl.1): 149-157.
- [8] 王卫星, 孙玉东, 杨永江, 王光辉, 赵娜. 天津市东丽湖地热对井的地质与水文地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2010, 34(1): 44-48.
WANG Weixing, SUN Yudong, YANG Yongjiang, WANG Guanghui, ZHAO Na. Geological and hydrogeochemical characteristics geothermal paired wells in Dongli lake area Tianjin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(1): 44-48.
- [9] Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water[J]. *Science*, 1961, 133: 1833-1834.
- [10] Maloszewski Piotr, Rauert Werner, Trimbom Peter, Herrmann Andreas, Rau Rolf. Isotope hydrological study of mean transit times in an alpine basin (Wimbachtal, Germany)[J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 140(1): 343-360.
- [11] Davisson M L, Smith D K, Kenneally J, Rose T P. Isotope hydrology of Southern Nevada groundwater: Stable isotopes and radiocarbon[J]. *Water Resource Research*, 1999, 35(1): 279-294.
- [12] 冯明扬, 宋汉周, 杨谦, 刘加才. 江苏部分地热水的气体成分和

- 微量元素含量特征及其指示意义[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 164-170.
- FENG Mingyang, SONG Hanzhou, YANG Qian, LIU Jiakai. Characteristics of dissolved gases and trace element in geothermal waters in Jiangsu and their tracing significance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 164-170.
- [13] 罗璐, 庞忠和, 罗霁, 李义曼, 孔彦龙, 庞菊梅, 王迎春. 惰性气体同位素确定地热流体循环深度[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 888-898.
- LUO Lu, PANG Zhonghe, LUO Ji, LI Yiman, KONG Yanlong, PANG Jumei, WANG Yingchun. Noble gas isotopes to determine the depth of the geothermal fluid circulation[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 888-898.
- [14] 杨询昌, 康凤新, 王学鹏, 付庆杰, 刘志涛. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理: 鲁北馆陶组热储典型案例[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 738-750.
- YANG Xunchang, KANG Fengxin, WANG Xuepeng, FU Qingjie, LIU Zhitao. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water: A case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 738-750.
- [15] 刁海忠, 于桑, 李洪亮, 尹秀贞, 周建伟, 刘红, 王元新. 淄博洪山-寨里煤矿地下水串层污染治理区水化学和硫同位素特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 171-181.
- DIAO Haizhong, YU Sang, LI Hongliang, YIN Xiuzhen, ZHOU Jianwei, LIU Hong, WANG Yuanxin. Analysis on the hydrochemical and sulfur isotope characteristics of the groundwater in cross-strata pollution control area of Hongshan and Zhaili coal mines in Zibo[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(1): 171-181.
- [16] 孙爱群, 牛树银. 地幔热柱演化及其地热效应: 华北地热异常的深部构造背景[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, 2000, 21(2): 182-189.
- SUN Aiqun, NIU Shuyin. The mantle plume evolution and its geothermal effect: Deep tectonic setting of geothermal anomaly in North China[J]. Journal of Earth Sciences: Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, 2000, 21(2): 182-189.
- [17] 吴立进, 赵季初, 李艾银, 邢生霞. 鲁北拗陷区地热资源开发利用关键性问题研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2): 300-306.
- WU Lijin, ZHAO Jichu, LI Aiyin, XING Shengxia. Key issues of geothermal resource exploitation and utilization in the depression area of northern Shandong Province[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(2): 300-306.
- [18] 陈墨香, 黄歌山. 鲁北平原地温分布的特点及地热资源开发利用的前景[J]. 地质科学, 1987(1): 1-13.
- CHEN Moxiang, HUANG Geshan. The characteristics of the geotemperature distribution and the prospects of utilization of geothermal resources in the plain of northern Shandong Province[J]. Chinese Journal of Geology, 1987(1): 1-13.
- [19] 秦耀军, 张平平. 山东省砂岩热储地热资源开发利用模式探讨[J]. 山东国土资源, 2018, 34(10): 93-100.
- QIN Yaojun, ZHANG Pingping. Development and utilization of geothermal resources in the middle and deep layers of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(10): 93-100.
- [20] 赵书泉, 周绍智, 邹祖光, 赵季初, 刘桂仪. 山东省鲁北地热田及其可持续开发利用对策[C]//中国能源研究会地热专业委员会. 全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集. 化学工业出版社, 2005: 47-52.
- [21] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 陆成新, 白铭, 梁红涛. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380-389.
- LUAN Fengjiao, ZHOU Jinlong, JIA Ruiliang, LU Chengxin, BAI Ming, LIANG Hongtao. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380-389.
- [22] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [23] 许高胜, 马军, 马瑞, 孙自永. 同位素与水化学在地热水形成机理中的应用研究进展[J]. 中国水运(下半月刊), 2010, 10(11): 196-198.
- [24] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [25] 马致远. 环境同位素方法在平凉市岩溶地下水研究中的应用[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 7.
- MA Zhiyuan. Application of the environmental isotope technique to the study of karst groundwater in Pingliang City[J]. Geological Review, 2004, 50(4): 7.
- [26] 张保建, 徐军祥, 马振民, 沈照理, 亓麟. 运用H、O同位素资料分析地下热水的补给来源: 以鲁西北阳谷-齐河凸起为例[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 603-609.
- ZHANG Baojian, XU Junxiang, MA Zhenmin, SHEN Zhaoli, QI Lin. Analysis on groundwater supply sources using hydrogen and oxygen isotope data: A case study of Yanggu-Qihe salient, northwestern Shandong, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 603-609.
- [27] 吴红梅, 周立岱, 郭宇. 阳离子温标在中低温地热中的应用研究[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006(1): 27-30.
- WU Hongmei, ZHOU Lidai, GUO Yu. Application of cation temperature scale in medium-low temperature geothermal resource[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2006(1): 27-30.
- [28] 吴亚楠, 杨云涛, 焦玉国, 刘志涛, 王延岭, 翟代廷, 周绍智, 魏凯, 程凤. 山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 128-138, 148.
- WU Ya'nan, YANG Yuntao, JIAO Yuguo, LIU Zhitao, WANG Yanling, ZHAI Daiting, ZHOU Shaozhi, WEI Kai, CHENG Feng. Analysis on development characteristics and inducement of karst collapse in Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(1): 128-138, 148.

- [29] Fischer T P, Giggenbach W F, Sano Y, Williams S N. Fluxes and sources of volatiles discharged from Kudryavy, a subduction zone volcano, Kurile Islands[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160(1): 81-96.
- [30] 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 蒋忠惕, 沈平, 李晓斌, 孙明良. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005(5): 441-451.
- [31] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 孙明良. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布[J]. 科学通报, 1994, 39(16): 1505-1508.
- [32] Mamyrin B, Tolstikhin I. Helium Isotopes in the earth's atmosphere[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 3: 203-223.
- [33] 陈浩, 王家鼎, 王琳琳, 杨传伟, 姜福红. 山东省邹城市东部地下水水化学特征及形成机制[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 139-148.
- CHEN Hao, WANG Jiading, WANG Linlin, YANG Chuanwei, JIANG Fuhong. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in eastern Zoucheng City, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 139-148.
- [34] Bergfeld D, F Goff, Janik C J. Elevated carbon dioxide flux at the Dixie Valley geothermal field, Nevada, relations between surface phenomena and the geothermal reservoir[J]. *Chemical Geology*, 2001, 177(1): 43-66.

Comparative analysis of the genesis models of different geothermal reservoirs in Chengning uplift area in northwest Shandong based on hydrochemical isotope technology

CUI Rui^{1,2}, WANG Xuepeng^{3,4,5}, FENG Bo^{1,2}, LIU Xiyao^{1,2}, FENG Shoutao^{3,4,5}, LIU Shuai^{3,4,5}

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 2. Engineering Center of Geothermal Resources Development Technology and Equipment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 3. The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou, Shandong 253072, China; 4. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploration and Reinjection, Dezhou, Shandong 253072, China; 5. Dezhou Key Laboratory of Deep Geological Energy Saving and Carbon Reduction, Dezhou, Shandong 253072, China)

Abstract The Chengning Uplift Area is one of the important areas rich in extremely abundant geothermal resource in China. At present, geothermal resources in the study area are mostly used in the fields such as bathing, medical treatment, and heating. According to the existing geothermal geological data and analysis results, the total geothermal resources in this area are 1.70×10^{20} J, equivalent to 57.86×10^8 t of standard coal. Therefore, elucidating the genesis model of geothermal fields in this area is of great significance for the sustainable development and utilization of geothermal resources. This study uses hydrochemical isotope technology to compare and analyze the genesis of the sandstone thermal reservoir of Guantao Formation and the Cambrian-Ordovician karst thermal reservoir in the Chengning Uplift Area.

The research results indicate that the cations in the geothermal water from sandstone and karst thermal reservoirs in this area are mainly Na^+ , and the anions are mainly Cl^- . The mineralization degree of geothermal water in sandstone thermal reservoir is $4.19\text{--}5.96 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, with a pH value of $7.35\text{--}9.43$, indicating neutral to weakly alkaline water. The mineralization degree of geothermal water in karst thermal reservoir is $5.91\text{--}11.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, and the pH value is $6.50\text{--}7.29$; therefore, it is classified as neutral water according to its acidity and alkalinity. The geothermal water from sandstone thermal reservoir in this area is a product of atmospheric precipitation infiltration and replenishment during geological history, supplying water by lateral runoff. However, the geothermal water in karst thermal reservoir does not directly come from the nearest infiltration recharge of atmospheric precipitation, but through a longer distance runoff process, which has an obvious phenomenon of hydrogen and oxygen drift. The two sets of elevation of geothermal water supply, temperature of thermal reservoir and depth of hot water circulation are respectively 459 m and 557 m, 66°C and 72°C , and 1,420 m and 1,795 m. From this, it can be seen that geothermal water in the study area is in a well-sealed geological environment, without shallow water mixing, and is deep circulating geothermal

(下转第 994 页)

Taking the groundwater in Laoshan district, Qingdao City as the research object, we mainly focused on the issues of groundwater chemical characteristics, groundwater chemical processes, the degree of seawater intrusion and its impact on groundwater. In addition, under the theoretical guidance of hydrogeology, we analyzed the characteristics of seawater intrusion and evolution of groundwater hydrochemistry in the study area by means of data collection, theoretical analysis, field investigation and sample collection and testing. The research findings can provide a scientific basis for the rational development and utilization of groundwater in the area.

The results show that the groundwater in the study area has Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , and SO_4^{2-} as the main dominant ions, and most of the groundwater chemistry types are $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ and $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ types. The Cl^- concentration in the groundwater varied considerably and its mean value exceeded the cut-off value for the presence or absence of seawater intrusion ($250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), indicating that some degree of seawater intrusion may have occurred in groundwater. Groundwater in the Laoshan district of Qingdao City is neutral to weakly alkaline (mean $\text{pH}=7.0\text{--}8.0$), which is an effect of long-term hydrogeochemical processes in the coastal area. The results obtained by the PCA model show that changes in groundwater chemistry are mainly controlled by natural factors (rock-water interaction) or anthropogenic factors (agricultural and domestic activities). The five chemical characteristics of Cl^- , mineralization, SO_4^{2-} , $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ and SAR were selected as evaluation factors. Based on the inverse distance weighting (IDW) method and geographic information systems (GIS), we achieved the spatial mapping of seawater intrusion locations, showing that the seawater intrusion, in Laoshan district was mainly distributed in the intrusion sections such as the east of Jiangjia Tuzhai—the north of Puli community, the area of Wanggezhuang-Gangxi-Gangdong, Yangkou bay and the area of Danying village-Quanzhou island. The study results are of great significance for the use of groundwater resources and the prevention and control of seawater intrusion in Laoshan district. In addition, the research ideas and methods provide a reference for the study of groundwater genesis in other coastal areas in the world.

Key words groundwater quality, coastal aquifer, hydrochemistry, chemical evolution of groundwater, seawater intrusion, Laoshan district

(编辑 杨杨张玲)

(上接第 981 页)

water.

In addition, the research results also reveal that the supply area of geothermal water of Chengning Uplift is located in the Mount Tai area, and the heat source of its geothermal system is the heat flow conducted from the deep crust and a small part from the upper mantle. The deep fault in the study area generated a certain amount of frictional heat during its active period, and also served as a good channel for underground heat flow, connecting and conducting upwards the heat generated by magma in the deep crust and upper mantle. In addition, the area is a sedimentary basin with deep depression, which generates gravity compression heat under the pressure of the thick Meso-Cenozoic sedimentary layer. The heat generated by these sources is stored in the pores and cracks of the thermal reservoir under the thermal insulation effect of the cover layer with strong thermal resistance and poor thermal conductivity, and is the main heat source for the formation of hot water in the area.

Key words the Chengning Uplift Area, hydrochemistry, isotope technique, genesis model of thermal reservoir, geothermal reservoir

(编辑 杨杨张玲)