

卢兆群, 孟祥鑫, 开协全, 等. 章丘北部地区地热流体水文地球化学特征及成因[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 12-24.

DOI: 10.11932/karst2024y001

章丘北部地区地热流体水文地球化学特征及成因

卢兆群, 孟祥鑫, 开协全, 朱光骥, 刘凯丽, 尹秀贞

(中化地质矿山总局山东地质勘查院, 山东 济南 250013)

摘要: 济南市章丘北部地区发育有厚度巨大的晚古生代至新生代沉积地层, 断裂构造和岩浆岩也较为发育, 区内地热资源丰富, 目前有地热井3口, 均位于断裂带附近。文章利用水化学和同位素数据, 分析区内地热流体的水化学特征、水—岩作用过程、补给来源、形成年龄, 估算补给区高程、热储温度、热水循环深度。结果表明: 研究区地热流体水化学类型为 $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Ca}$ 型或 $\text{SO}_4\text{-Cl-Ca-Na}$ 型; 水化学组分主要来源于水—岩溶解作用, 且具有相似的水文地球化学过程; 大气降水补给, 补给区高程为+563~+616 m, ^{14}C 表观年龄在 5.55~29.71 ka 之间, 均是现代水与古水的混合水; 利用玉髓温标计算的热储温度为 41.9~52.4 °C, 相应循环深度为 622~1 565 m; 研究区为深循环—弱开放型岩溶热储, 其地热水经深循环加热而形成, 形成和富集受断裂构造控制明显, 其为层状兼带状热储, 属中低温地热资源。

关键词: 章丘; 地热水; 水文地球化学; 同位素; 成因模式

创新点: 利用章丘北部地区地热流体水化学和同位素分析数据, 探讨其水化学特征、水—岩作用及水化学演化过程、补给来源及形成年龄, 首次计算其补给区高程、热储温度、热水循环深度, 查明其地热流体的水文地球化学过程及成因。

中图分类号: P314.1; P641.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2024) 01-0012-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地热资源作为一种新型清洁能源, 其开发利用越来越受到人们的关注^[1-2]。地热水水化学特征和演化机制的研究不仅对于地热资源的合理开发与利用具有重要的指导意义, 还能为日后的地热资源勘查评价提供重要信息^[3]。目前, 水文地球化学方法和同位素方法已广泛应用于地热水水化学特征和形成演化等方面的研究^[4], 在分析地热水水—岩作用机制、补给来源、深部地热过程及形成年龄等方面取得了积极的进展^[5-11]。

济南市的地热资源丰富, 位于济南泉域边界以

北的济南东北部岩溶热储地热田(东到济南市行政边界, 南以石炭系出露界线为界, 西以卧牛山断裂、东坞断裂为界, 北到齐河—广饶断裂及济南市行政边界), 具有良好的中低温地热资源^[12-14]。位于该地热田东部的济南市章丘北部的枣园、宁家埠等地区近年来也先后发现了地热资源, 前人对于该地区地热资源的形成条件及地热水水化学特征等进行了研究, 对其水动力场及成因等有一定认识, 这为该地区后续的地热资源勘查工作奠定了基础^[15-18]。此后, 地矿部门又在章丘刁镇及绣惠地区发现地热资源, 进一步丰富章丘北部地热资源勘查工作的成果, 给济南市“中国温泉之都”建设提供了强有力支持。

资助项目: 济南市国土资源局地质勘查服务项目 [JNCZ(HZJS)-GK-2016-0004]; 济南市自然资源和规划局地质勘查服务项目 [JNCZ(XY)-JC-2020-0101]

第一作者简介: 卢兆群(1985—), 男, 高级工程师, 从事水文地质、地热地质及环境地质研究工作。E-mail: luzhaoqun@163.com。

收稿日期: 2022-05-05

本文在前人研究工作成果的基础上,基于水文地球化学方法和同位素方法,对章丘北部的枣园、宁家埠以及绣惠地区地热流体的水文地球化学特征以及成因等进一步分析,以期对章丘北部地区今后地热资源的进一步勘查和可持续利用提供依据。

1 研究区概况

1.1 地质概况

研究区位于济南市章丘区北部的枣园、宁家埠以及绣惠一带,在大地构造上属华北板块鲁西隆起区、鲁中隆起、泰山—济南断隆、齐河潜凸起与鲁山—邹平断隆、邹平—周村凹陷的交接带地区,总体为向北缓倾的单斜构造。

研究区及其周边地区大部为第四系覆盖,仅在女郎山及桃花山、河南山出露二叠系及三叠系地层(图1),下伏地层包括新近系、白垩系、侏罗系、三叠系、石炭系—二叠系以及奥陶系地层。

研究区内分布有文祖断裂、钓鱼台断裂及朱各务断裂。研究区位于文祖断裂的北段,根据物探解译,该段走向 NNW,倾向 SW,倾角约 76°;断裂西盘相对下降,东盘相对上升,总体看南段落差大,北段落差小,为一高角度张性断裂。钓鱼台断裂为一左旋张扭性断裂,是文祖断裂的支断裂,断裂总体走向 NW,倾向 SW,倾角约 80°,呈弧形展布,弧形向南西凸出。朱各务断裂为文祖断裂的派生断裂,根据区域地质资料,该断裂性质为先张后压;根据物探解译,该断裂总体沿南北方向延伸,东倾约 70°,南部与钓

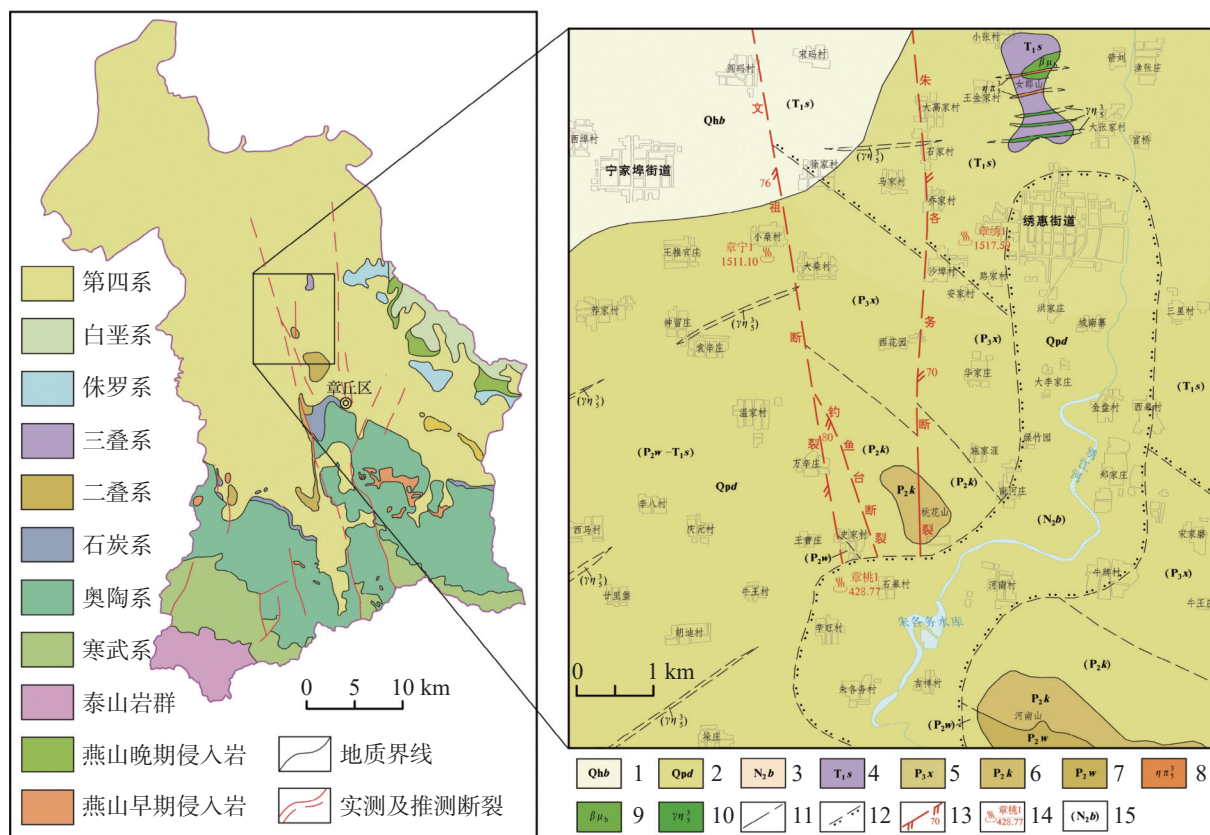


图 1 研究区地质及地热井位置分布图

1.第四系白云湖组 2.第四系大站组 3.新近系巴漏河组 4.三叠系孙家沟组 5.二叠系石盒子群孝妇河组 6.二叠系石盒子群奎山组 7.二叠系石盒子群万山组 8.中粗粒二长岩 9.辉绿玢岩 10.辉长玢岩 11.实测及推测地质界线 12.推测角度不整合界线 13.推测及实测张扭性断裂及产状(齿向示斜落盘方向) 14.地热井编号及深度/m 15.隐伏地层

Fig. 1 Geology and distribution of geothermal wells in the study area

1. Quaternary Baiyunhu Formation 2. Quaternary Dazhan Formation 3. Neogene Baluohu Formation 4. Triassic Sunjiagou Formation 5. Xiaofuhe Formation of Permian Shihezi Group 6. Kuishan Formation of Permian Shihezi Group 7. Wanshan Formation of Permian Shihezi Group 8. medium-coarse monzonite 9. sillite 10. gabbroporphryite 11. measured and extrapolated geological boundaries 12. extrapolated angular unconformity boundary 13. measured and extrapolated tension-torsion fracture and its occurrence (The tooth trace shows the direction of the inclined falling disc.) 14. number and depth of geothermal wells/m 15. buried stratum

鱼台断裂相交,该断裂大部分被第四系所覆盖,仅在南部的桃花山上见有出露,宽度约 7 m,断裂东西两侧地层存在明显的不一致性,西侧为灰白色砂岩、泥岩,东侧为紫红色泥岩。

研究区岩浆岩较为发育,在女郎山见有多条北东东向相互平行排列的脉岩群出露,岩性主要为辉长玢岩、辉长岩、闪长岩,其次为辉绿玢岩、二长斑岩等,形成时代为中生代燕山晚期。

1.2 地热概况

研究区内目前有地热井 3 口,均位于断裂带附近。其中,章桃 1 和章宁 1 井位于文祖断裂西侧,相距约 4.4 km;章绣 1 井位于朱各务断裂东侧,距最近的章宁 1 井约 2.6 km。其地热水赋存层位均为奥陶系马家沟群,岩性以灰岩、白云岩为主,热储类型为层状兼带状热储(表 1)。

表 1 研究区地热井信息表
Table 1 Information of geothermal wells in the study area

井编号	位置	井深/m	盖层时代	盖层厚度/m	热储层时代	揭露热储厚度/m	孔底温度/℃	地温梯度/℃·100 m ⁻¹	水温/℃
章桃1	枣园史家村南	428.77	Q,P,C	378.31	O ₂₋₃ M	50.46	41.00	6.46	41.0
章宁1	宁家埠小桑村南	1 511.10	Q,T,P,C	954.00	O ₂₋₃ M	557.10	46.24	2.09	45.5
章绣1	绣惠沙埠村北	1 517.59	Q,T,P,C	975.00	O ₂₋₃ M	542.59	50.20	2.35	40.0

研究区内浅部地温梯度一般 2 ℃·100 m⁻¹ 左右,总体位于正常地温梯度范围内。根据 3 口地热井的井温测量资料(图 2),推算区内地热井地温梯度为 2.09~6.46 ℃·100 m⁻¹。章桃 1 井在揭露热储层后,温度快速增高,热异常明显,根据钻探资料,钻孔在 224.02~225.12 m 以及 296.06~300.91 m 揭露到了两层岩浆岩,推测其为燕山晚期侵入活动的产物,正是

由于这些岩浆岩的侵入,带来了一部分附加热源,从而导致该井地温异常较明显。

根据章绣 1 井钻孔测温数据以及热储层部分代表性岩心热物性参数数据(表 2),计算得到其热储层段平均大地热流值为 45.5 mW·m⁻²,数值较低,较邻近的鸭旺口地热田 89.5 mW·m⁻² 的平均大地热流值明显偏低。

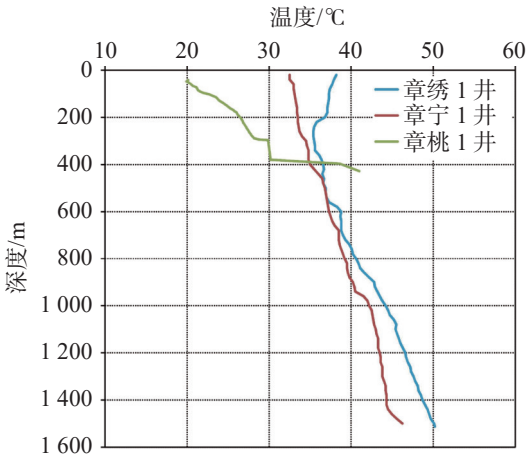


图 2 研究区地热井测温曲线图

Fig. 2 Temperature curve of geothermal wells in the study area

2 水文地球化学特征

本次研究于 2021 年 10 月对 3 口地热井各采取水化学分析样品 1 件,水化学分析测试结果见表 3。样品由自然资源部济南矿产资源监督检测中心测定,仪器为 Icap7400 Radial MFC 全谱直读等离子体发射光谱仪、日立 U-3310 分光光度计、XSeries2 电感耦合等离子体质谱仪等。

2.1 主要离子组分

研究区地热水温度在 40.0~45.5 ℃ 之间,属中低温地热水;pH 为 7.04~7.59,总体表现为弱碱性;总硬度(以 CaCO₃ 计)2 122.28~3 183.41 mg·L⁻¹,均为极硬

表 2 章绣 1 地热勘探井大地热流计算结果
Table 2 Results of terrestrial heat flow of Zhangxiu No.1 geothermal exploration well

岩性	深度范围/m	厚度/m	地温梯度/℃·km ⁻¹	热导率/W·(m ℃) ⁻¹	热流值/mW·m ⁻²	平均热流值/ mW·m ⁻²
灰岩	975~1 170	195	21.03	2.99	62.9	45.5
蚀变岩	1 170~1 200	30	16.67	3.29	54.8	
灰岩	1 200~1 517	317	11.36	2.99	34.0	

表 3 研究区地热水主要水化学组成

Table 3 Main hydrochemical composition of geothermal water in the study area

井编号	水温/℃	pH	水化学组分/mg·L ⁻¹						
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
章桃1	41.0	7.59	67.28	747.51	673.82	95.83	798.63	2 320.04	205.88
章宁1	45.5	7.05	55.84	1 054.00	852.83	141.65	1 809.72	2 324.72	191.71
章绣1	40.0	7.04	73.57	1 015.59	935.10	137.03	2 087.18	1 975.38	142.30

井编号	水化学组分/mg·L ⁻¹							
	F ⁻	Br ⁻	总硬度	TDS	H ₂ SiO ₃	HBO ₂	Li	Sr
章桃1	2.17	1.45	2 122.28	4 830.00	33.10	1.21	1.48	13.09
章宁1	2.41	3.10	2 766.27	6 602.05	28.74	1.90	1.53	15.93
章绣1	2.01	2.64	3 183.41	6 311.00	25.99	1.38	2.03	14.77

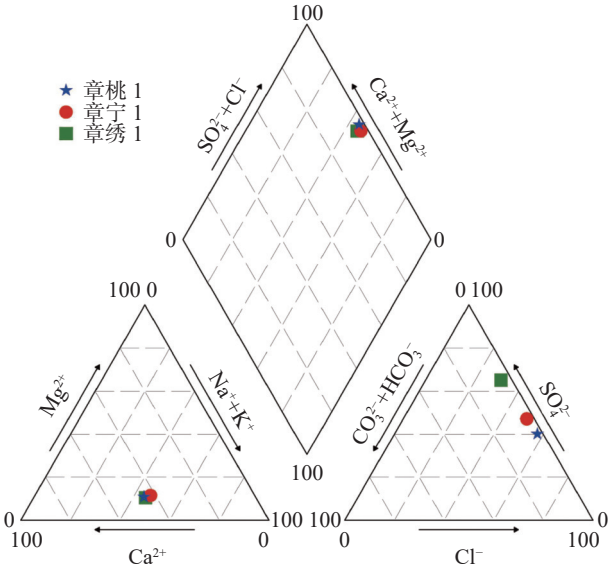


图 3 研究区地热水样 Piper 图解

Fig. 3 Piper diagram of geothermal water samples in the study area

水; 溶解性总固体 (TDS) 含量 4 830.00~6 602.05 mg·L⁻¹, 总体表现均为 3 g·L⁻¹ < TDS ≤ 10 g·L⁻¹ 的高矿化度咸水。

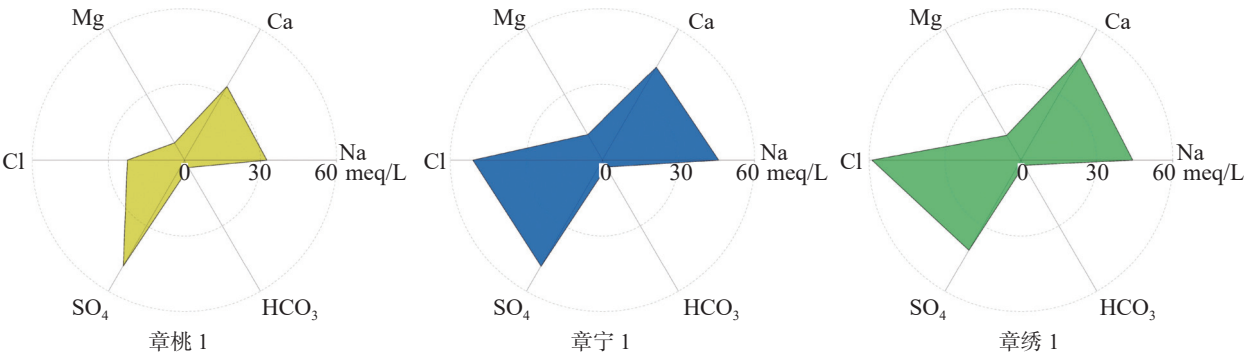


图 4 研究区地热水主要离子组分玫瑰花图

Fig. 4 Rose diagram of main ion components of geothermal water in the study area

由 Piper 三线图(图 3)及主要离子组分玫瑰花图(图 4)可知,研究区地热水的主要离子组分含量特征较相似,阳离子以 Na⁺和 Ca²⁺为主,阴离子以 Cl⁻和 SO₄²⁻为主,但水化学类型略有差异,章宁 1 井和章绣 1 井为 Cl·SO₄-Na·Ca 型,章桃 1 井为 SO₄·Cl-Ca·Na 型。

由地热水 Schoeller 图(图 5)可知,各水样主要离子组分含量变化趋势基本一致,仅个别离子稍有差异。位于地下水径流方向上游的章桃 1 井的 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺和 Cl⁻含量较下游的章宁 1 井和章绣 1 井明显偏低,而同位于文祖断裂西侧的章桃 1 井和章宁 1 井的 SO₄²⁻和 HCO₃⁻含量较位于朱各务断裂东侧的章绣 1 井明显偏高。

地下水中的 Mg²⁺主要来源于含钙镁的碳酸盐矿物(如白云石)以及岩浆岩和变质岩中含钙镁矿物(如辉石、角闪石和黑云母等)的溶解。高温时镁保留在固相中,随着温度降低及地下冷水的渗入,Mg²⁺含量逐渐增加^[19]。根据前文可知,研究区 3 口地热井热储层岩性较一致,但章桃 1 井揭露到热储层后热突变明显,推测可能受到了附加热源的影响,故此可能是造成其 Mg²⁺含量相对较低的原因;而 Ca²⁺主

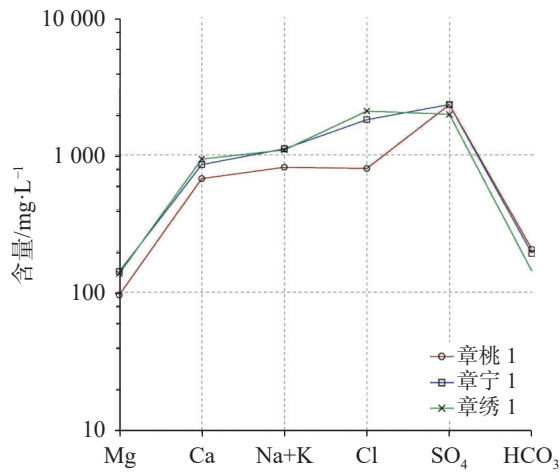


图5 研究区地热水 Schoeller 图

Fig. 5 Schoeller diagram of geothermal water in the study area

要来自地热水对碳酸盐岩的溶滤和溶蚀^[20],随着地热水在向深部和下游运移的过程中,增加了溶滤和溶解过程的时间,因此位于下游的地热水具有更高含量的 Ca^{2+} 含量,同时也具有更高含量的 Cl^- 和 TDS 含量。

2.2 微量元素组分

研究区 3 口地热井水中均含有较高含量的锶

(平均含量 $13.09\sim 15.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、氟(平均含量 $2.01\sim 2.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、锂(平均含量 $1.48\sim 2.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、偏硼酸(平均含量 $1.21\sim 1.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及偏硅酸(平均含量 $25.99\sim 33.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)等微量元素组分,达到了有医疗价值浓度—命名矿水浓度,具有较高的理疗价值。

总体看来,研究区 3 口地热井水中重要微量元素组分含量比较接近,仅偏硅酸含量差别相对明显(图 6)。研究区热储层岩性及主要矿物成分比较一致,因此,推测地热水化学组分主要来源于水-岩溶解作用,且具有相似的水文地球化学过程。

地热水中微量元素组分主要有两种来源:一种是岩石溶滤作用,另一种是深部来源^[21]。地热水中高浓度的 Na^+ 和 Cl^- 说明其在地下有较长的滞留时间,从而在高温高压条件下更充分的溶解了围岩中的微量元素,最终形成了富含多种微量元素组分的地热矿水;另一方面,该区域内深部多见有岩浆侵入活动,侵入体中的矿物如辉石、角闪石、黑云母、方柱石等普遍含有较高含量的 F、Sr、 SO_2 、Li 等微量元素^[4],地下水在深部径流过程中,由于径流速度慢,水-岩作用充分,矿物的微量元素受平衡流体的成分、温压条件以及自身的晶体化学结构等复杂因素影响大量

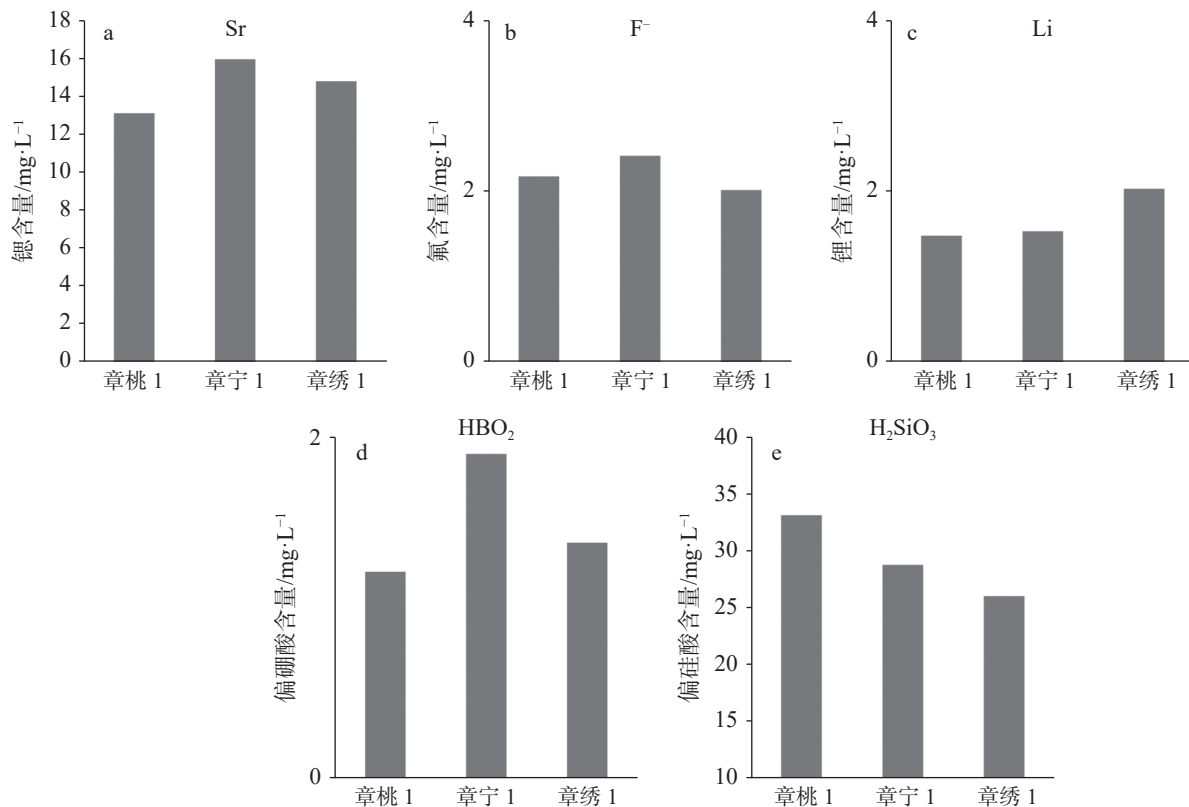


图6 研究区地热水微量元素组分含量对比图

Fig. 6 Comparison of trace element contents of geothermal water in the study area

溶于地下水中,从而成为地热水中各种微量元素的直接物源。

2.3 水—岩作用过程

利用 Gibbs 图解模型可判断地下水化学组分的成因类型,如岩石风化型、蒸发—结晶型以及大气降水型^[22]。由图 7 可知,研究区 3 个地热水样点均落在蒸发—结晶作用控制区域,表明水—岩作用是控制研究区地热水化学组分的主要因素。

矿物溶解作用在控制地下水主要离子成分的形成过程中起着至关重要的作用^[23-24]。 Na^+ 作为矿物分解的指示因子,用 Na^+/Cl^- (离子含量比)值可确定是否存在硅铝酸盐或岩盐溶解,由图 8a 可知,研究区地热水样点均位于 $[\text{Na}^+]=[\text{Cl}^-]$ 线附近,表明研究区地热水化学成分的形成存在硅酸盐矿物的溶解作用,同时还可能存在岩盐的溶解。 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$ (离子含量比)值可对硅酸盐矿物溶解作用的强弱程度进行估算^[23],由图 8b 可知,研究区地热水

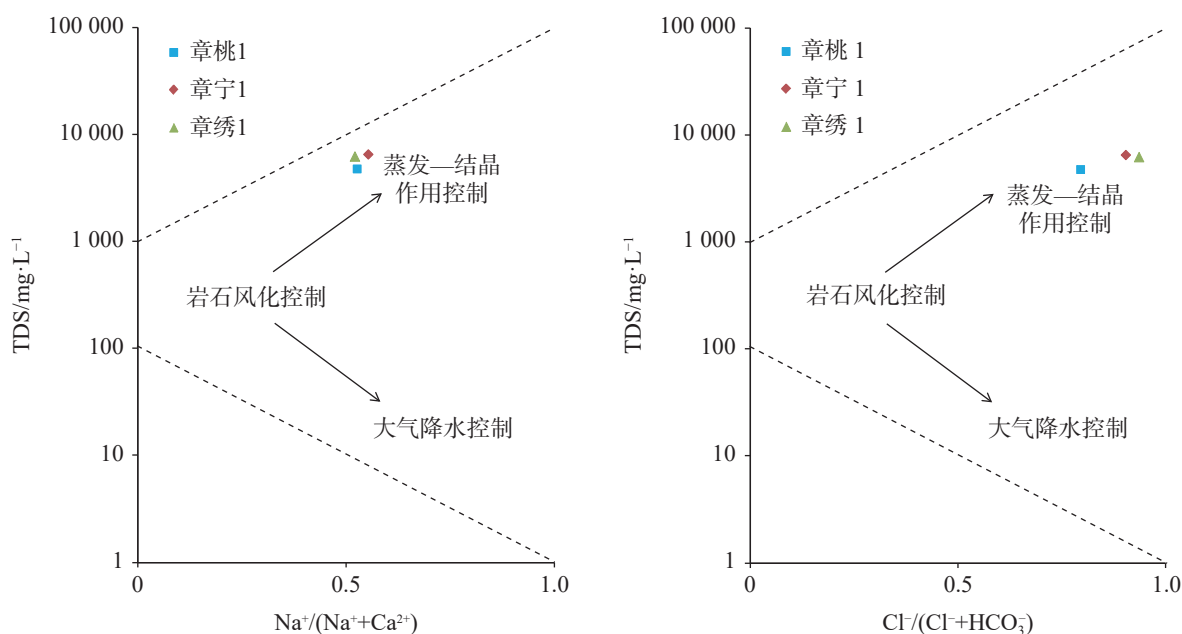


图 7 研究区地热水 Gibbs 图解

Fig. 7 Gibbs diagram of geothermal water in the study area

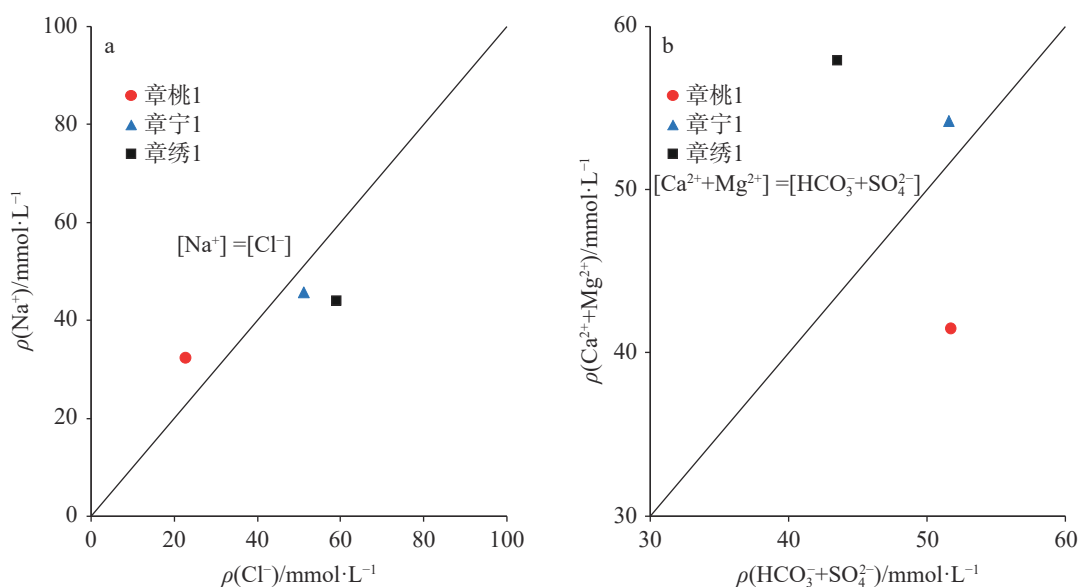


图 8 研究区地热水主要元素含量关系图

Fig. 8 Relationship between main element contents of geothermal water in the study area

样点分别位于 $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]=[HCO_3^-+SO_4^{2-}]$ 线两侧,其中章宁 1 井和章绣 1 井水样点位于线上方,而章桃 1 井水样点位于线下方,说明章宁 1 井和章绣 1 井水化学成分的形成受碳酸盐矿物的溶解作用占主导地位,而章桃 1 井水化学成分的形成则受硅酸盐矿物的溶解作用占主导地位。研究区热储层矿物成分主要为方解石、白云石等碳酸盐矿物,而发育其中的侵入岩则以石英、长石、云母、角闪石等硅铝酸盐矿物成分为主,表明章桃 1 井水的形成受到侵入岩影响,这与前文分析其热储层地温突变是受到附加热源的影响相吻合。

2.4 水化学演化过程

研究区奥陶系地层隐伏于煤系地层之下,受奥陶纪区域北倾单斜构造影响,埋藏深度由南向北逐渐加深。研究区地热水主要接受上游岩溶水的地下径流补给,随着埋藏深度的不断增加,由冷水逐渐转变为热水,在此过程中,水化学组分特征也逐渐变化。本次研究工作收集了地热水上游补给区和径流区的

岩溶冷水水质分析结果(表 4),通过分析离子组分变化特征,揭示岩溶冷水—热水的水化学演化规律。

由表 4 和图 9 可知,从补给区(黄露泉)到径流—排泄区(章桃 1、章宁 1),由岩溶冷水到热水的过程中,除了 HCO_3^- 含量略有下降外,其余离子组分含量均出现较大幅度的上升;TDS 含量由 $502.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $6\,602.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;水化学类型由 $HCO_3\cdot SO_4\text{-Ca}$ 型变化为 $HCO_3\cdot SO_4\text{-Ca}\cdot Mg$ 型,再变化到 $Cl\text{-}SO_4\text{-Na}\cdot Ca$ 或 $SO_4\text{-}Cl\text{-Ca}\cdot Na$ 型。

HCO_3^- 含量略有下降的原因与其溶解度有关。补给区,岩溶水经过入渗和径流, HCO_3^- 已达到或接近饱和,随着进一步径流及深部循环的进行,地下水中大量溶解了溶解度高的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等,地下水离子含量的升高使得溶解度相对较低的 HCO_3^- 不断饱和析出,故 HCO_3^- 含量相对稳定,且随矿化度升高, HCO_3^- 的溶解度会略有下降^[18]。

其余离子组分含量出现较大幅度上升的原因与流经地层的岩性有关。据前文分析,水—岩作用是控制区内地热水化学组分的主要因素,地下水经过

表 4 补给、径流、排泄区主要水化学组成

Table 4 Main hydrochemical compositions of groundwater in recharge, runoff and discharge areas

分区	采样地点	水化学组分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$								水化学类型
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	
补给区	黄露泉	2.17	9.58	136.33	12.49	24.31	117.84	256.19	502.17	$HCO_3\cdot SO_4\text{-Ca}$
径流区	百脉泉	0.78	10.00	115.73	25.58	21.27	129.63	273.66	479.24	$HCO_3\cdot SO_4\text{-Ca}\cdot Mg$
径流—排泄区	章桃1	70.92	756.09	661.64	106.09	788.00	2\,334.48	204.02	4\,844.50	$SO_4\text{-}Cl\text{-Ca}\cdot Na$
	章宁1	55.84	1\,054.00	852.83	141.65	1\,809.72	2\,324.72	191.71	6\,602.05	$Cl\text{-}SO_4\text{-Na}\cdot Ca$

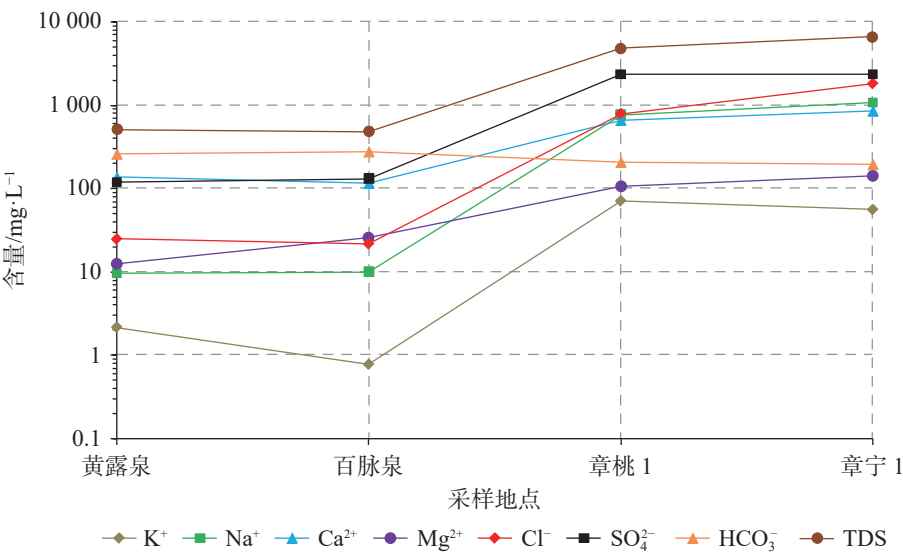


图 9 岩溶地下水主要离子组分含量变化趋势图

Fig. 9 Variation of main ion components in karst groundwater

长距离径流,尤其是流经岩浆岩侵入体时,进行深循环加温过程中,溶滤作用增强,同时由于地热水径流滞缓,围岩中大量的矿物溶解在地热水中,使含量要远远高于南部岩溶冷水。

3 同位素地球化学特征

3.1 地热水补给来源

地下水的同位素组成取决于降水的同位素组成及其在地下的循环过程^[25],因此可以利用地下水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素组成数据绘制散点图,通过与大气降水线进行对比,以判别地下水的补给来源及成因。本次研究通过采集测试以及收集以往资料获取了区

内 3 口地热井水、百脉泉水以及大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素组成数据(表 5),其中,章宁 1 井样品采集于 2017 年 10 月,测试单位为中国地质大学(武汉)环境学院实验教学中心实验室,章绣 1 井样品采集于 2021 年 10 月,测试单位为自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心实验室,主要测试仪器为 MAT-253 稳定同位素气体质谱仪、L2130i 水同位素分析仪、Quantulus1220 超低本底液体闪烁谱仪、PE1220QUANTULUS 超低本底液体闪烁谱仪等,其他样品数据收集于相关期刊文献。利用上述数据绘制出 δD - $\delta^{18}O$ 关系图(图 10),大气降水线选用我国东部季风区的局地大气降水线方程 $\delta D=7.46\delta^{18}O+0.90$ ^[26]。

表 5 研究区及周边代表性水样同位素组成

Table 5 Isotopic compositions of representative water samples in and around the study area

样品编号	样品类型	δD VSMOW/‰	$\delta^{18}O$ VSMOW/‰	现代碳百分数/%	^{14}C 表观年龄/ka
章桃1*	地热水	-75.00	-9.9	12.85±1.55	16.96±1.000
章宁1	地热水	-74.58	-9.8	51.10±0.80	5.55±0.08
章绣1	地热水	-74.00	-9.9	2.75±1.29	29.71±3.87
百脉泉*	常温水	-69.00	-9.1		
大气降水*	大气降水	-58.00	-8.1		

注:表中*数据来源于文献[16]、[27]。

Note: Data marked with "*" in above table is derived from literatures of [16] and [27].

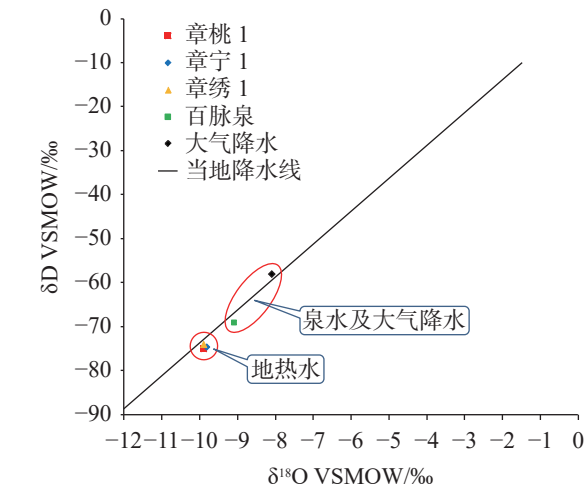


图 10 研究区及周边代表性水样 δD - $\delta^{18}O$ 关系图
Fig. 10 δD - $\delta^{18}O$ diagram of representative water samples in and around the study area

由图 10 可知,所有样品数据点均分布于当地降水线附近,说明其均具有当地大气降水同位素组成特征,因此,研究区地热水及百脉泉水的补给均直接或

间接的来源于大气降水;研究区 3 口地热井水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素组成差异很小,但较百脉泉水和大气降水的明显偏低,说明研究区地热水的补给来源区域相近,且不是来源于当地大气降水的就近补给,是经历了较长时间和途径的径流过程^[21];另外,除大气降水外,所有地下水样品均位于当地降水线下方,表明无论是地热水还是常温泉水的埋藏和循环深度均比较深,水循环环境相对封闭,不易产生氢富集。

3.2 地热水补给高程

根据大气降水的氢氧同位素高程效应可计算地热流体的同位素入渗高程(即补给区高程),进而判别地热流体的补给位置。通常利用大气降水同位素的 δD 值高程效应计算补给区高程更准确^[6],计算研究区地热水补给区高程的公式如下:

$$H = h + (D - D_r) / gradD \tag{1}$$

式中: H 为地热水补给区高程(m); h 为地热水采样点高程(m),章桃 1 井为 50 m,章宁 1 井和章绣 1 井

均为 30 m; D 为地热水的 δD 值(‰), 取表 5 中对应数值; D_r 为地热水取样点附近大气降水 δD 值(‰), 取表 5 中大气降水 δD 值; $gradD$ 为大气降水 δD 值高程梯度(‰·100 m⁻¹), 本文取-3‰/100 m。

根据公式(1)计算得到研究区地热水补给区高程为+563~+616 m, 3 口地热井水的补给区高程相差不大, 推断研究区地热水补给区域相近。研究区地热水径流方向总体为由南向北, 位于研究区东南方向约 30 km 的文祖—闫家峪一线以南区域, 奥陶纪灰岩大面积裸露, 标高在+500~+700 m, 推断该区域为研究区地热水补给区的可能性较大。

3.3 地热水形成年龄

地下水年龄是水循环研究的重要内容, 对于地下水资源开发利用具有重要意义, ¹⁴C 同位素测年方法一般用来测定“年老”的深层地下水年龄^[28]。由表 5 可知, 研究区地热水样品表观年龄在 5.55~29.71 ka 之间, 相当于晚更新世时期形成, 与热储层奥陶系围岩的年龄相差巨大, 推测应是由于晚更新世时形成后经大气降水循环而进入到古老地层中的渗入水。另外, 各样品都有现代入渗水混入, 均是现代水与古水的混合水, 但现代碳百分数差距较明显, 章宁 1 井水中现代入渗水的含量高于古水, 以现代入渗水为主; 而章桃 1 井和章绣 1 井水中现代入渗水的比例很低, 以古水为主。

前文分析表明研究区地热水的补给来源区域相近, 且 3 口地热井所处位置也相邻近, 说明 3 口地热井水的更新循环能力差别较明显。章宁 1 井和章绣 1 井的氯钙系数($\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$)和盐化系数($\gamma_{Cl^-}/(\gamma_{HCO_3^-} + \gamma_{CO_3^{2-}})$)明显大于章桃 1 井(表 6), 反映出章桃 1 井的地下水循环条件要明显好于另外两口井^[29]。可是章桃 1 井水中现代碳含量却明显低于章宁 1 井, 其原因是其碳同位素更多的来源于碳酸盐岩的溶蚀, 而其水中硫酸盐含量占比更高, 更加速了碳酸盐岩溶解的过程^[30]。

表 6 研究区地热水水化学特征系数

Table 6 Hydrochemical characteristic coefficient of geothermal water in the study area

井编号	$\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$	$\gamma_{Cl^-}/(\gamma_{HCO_3^-} + \gamma_{CO_3^{2-}})$
章桃1	0.67	6.67
章宁1	1.20	16.22
章绣1	1.26	25.20

4 地热水成因

4.1 热储温度估算

热储温度是划分地热系统的成因类型和评价地热资源潜力所不可缺少的重要参数, 地热温标方法是确定地下深部热储温度的一种经济有效的手段^[31]。目前常用的地热温标有二氧化硅温标和阳离子温标。

Na-K-Mg 平衡图解常被用于研究地热系统水—岩作用程度, 评价水—岩平衡状态, 以判断是否适用阳离子温标^[32]。研究区地热水样品均位于未成熟水区(图 11), 说明水—岩反应的平衡温度偏低, 未达到水—岩之间平衡状态, 因此不适合用阳离子地温标来计算热储温度。

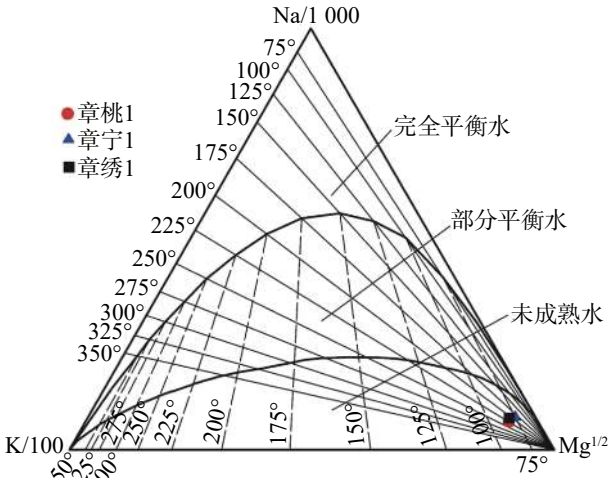


图 11 研究区地热水 Na-K-Mg 平衡图

Fig. 11 Na-K-Mg equilibrium diagram of geothermal water in the study area

二氧化硅地热温标是利用地下热水中的二氧化硅溶解度与温度的关系来计算地下热水的热储温度^[31]。石英温标及玉髓温标温度相关性公式如下:

石英地热温标(无蒸汽损失)计算公式:

$$T = \frac{1\,309}{5.19 - \lg SiO_2} - 273.15 \tag{2}$$

玉髓地热温标计算公式:

$$T = \frac{1\,032}{4.69 - \lg SiO_2} - 273.15 \tag{3}$$

式中: SiO_2 的单位为 mg·L⁻¹; 热储温度 T 的单位为 ℃。利用二氧化硅地热温标计算热储温度见表 7。

通过玉髓温标计算的研究区热储温度为 41.9~52.4 ℃, 通过石英温标计算的研究区热储温度为

表 7 二氧化硅地热温标计算结果
Table 7 Calculation results of silica geothermometer

井编号	SiO ₂ /mg·L ⁻¹	热储温度/℃	
		玉髓温标	石英温标
章桃1	33.10	52.4	83.5
章宁1	28.74	46.2	77.6
章绣1	25.99	41.9	73.6

73.6~83.5℃。利用玉髓温标计算的热储温度比较接近地热井的实际出水温度,这是因为玉髓温标比较适用于中低温热水,符合研究区中低温地热资源的特征,故研究区热储温度采用玉髓温标计算结果较为合理。另外,章宁1和章绣1井估算热储温度与其实际出水温度相差很小,表明其基本没有受到上部冷水的混入;而章桃1井估算热储温度要明显高出其实际出水温度,表明其还有进一步增温的潜力,亦有可能是其受到上部冷水的混入。

4.2 热水循环深度

研究区位于济南东北部岩溶热储地热田东部,属于深循环—弱开放地热水系统^[33],因此通过热储温度可估算地热水循环深度,计算公式如下:

$$H = \frac{T - T_0}{g} + h \tag{4}$$

式中: H 为循环深度(m); T 为热储温度(℃),取前文计算数值; T_0 为研究区的平均气温(℃),取 14.1℃; g 为地温梯度(℃·100 m⁻¹),根据各地热井井内测温

数据计算取得; h 为常温带深度(m),取 30 m。

由表 8 可知,研究区地热水达到计算热储温度的循环深度为 622~1 565 m,这与研究区地热井深度(428.77~1 517.59 m)比较接近,说明热储温度及热水循环深度估算结果较为合理。

4.3 热水成因模式

研究区为深循环—弱开放型岩溶热储,属中低温地热资源。热储层为奥陶系马家沟群灰岩、白云岩,盖层为巨厚的石炭系—二叠系、三叠系、新近系及第四系等,地热水的形成和富集受断裂构造控制明显,热储类型为层状兼带状热储,NW-NNW 向的文祖断裂和朱各务断裂为研究区主要控热构造。热水的成因模式可以概括为:地热水在南部山区接受大气降水入渗补给,推测补给区为研究区东南方向约 30 km 的文祖—闫家峪一线以南奥陶系灰岩大面积裸露区,补给高程为+563~+616 m;降水经入渗后沿裂隙岩溶及导水断裂逐渐向下游及深部运移,循环深度为 622~1 565 m;运移过程中以接受大地热流毯状传导增温为主,局部(深大断裂、侵入岩体—可溶岩接触带)还接受对流热源的加热而形成热水,热储层大地热流值相对较低,热储温度为 41.9~52.4℃;地热水形成年龄为 5.55~29.71 ka;岩溶裂隙和断裂构造形成导水通道和储水空间,上覆晚古生代—新生代地层为保温盖层,经人工钻探揭露而形成地热井(图 12)。

表 8 研究区地热水循环深度估算结果
Table 8 Estimation results of geothermal water circulation depth in the study area

井编号	热储温度/℃	平均气温/℃	地温梯度/℃·100 m ⁻¹	常温带深度/m	循环深度/m
章桃1	52.4	14.1	6.46	30	622
章宁1	46.2	14.1	2.09	30	1 565
章绣1	41.9	14.1	2.35	30	1 212

5 结 论

(1)研究区为深循环—弱开放型岩溶热储,属中低温地热资源。地热水的主要离子组分含量特征以及重要微量元素组分含量较相似。地热水水化学组分主要来源于水—岩溶解作用,且具有相似的水文地球化学过程,但水—岩反应的平衡温度偏低,未达到水—岩之间平衡状态。从补给区到径流—排泄区,在岩溶冷水到热水的水化学演化过程中,除了HCO₃⁻含量略有下降外,其余离子组分含量均出现较大幅

度的上升。

(2)研究区地热水补给来源均为大气降水,补给区域相近;¹⁴C 表观年龄在 5.55~29.71 ka 之间,其是于晚更新世形成后经大气降水循环而进入到古老地层中的渗入水,且都有现代入渗水混入,均是现代水与古水的混合水。研究区地下水在运移过程中以接受大地热流毯状传导增温为主,局部(深大断裂、侵入岩体—可溶岩接触带)还接受对流热源的加热而形成热水。地热水更新循环能力差别较明显,应加强对区内地热资源的保护,以实现可持续利用。

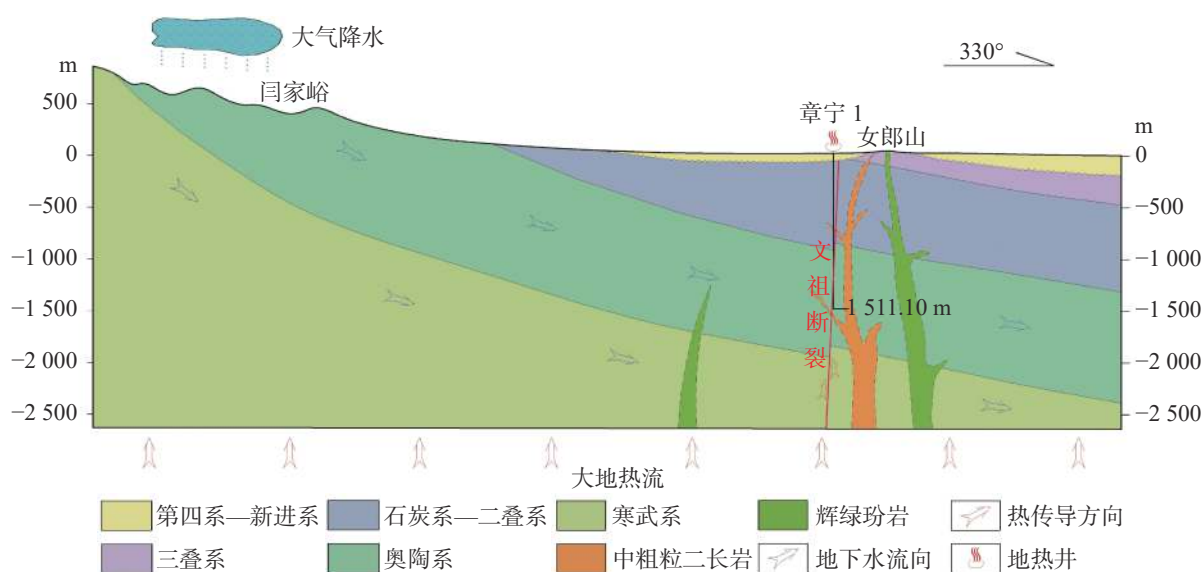


图 12 研究区地热水成因模式示意图

Fig. 12 Genesis model of geothermal water in the study area

参考文献

- [1] 徐雪球, 杜建国, 王素娟. 江苏省地热资源开发利用现状与建议[C]//中国地热能: 成就与展望——李四光倡导中国地热能开发利用 40 周年纪念大会暨中国地热发展研讨会论文集, 2010: 346-349.
XU Xueqiu, DU Jianguo, WANG Sujuan. Current situation and suggestions on the development and utilization of geothermal resources in Jiangsu Province[C]//Geothermal Energy in China: Achievements and Prospects—Proceedings of the 40th Anniversary Conference of Li Siguang's Advocacy for the Development and Utilization of Geothermal Energy in China and the Symposium on Geothermal Energy Development in China, 2010: 346-349.
- [2] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蒯文静, 刘志明, 王婉丽. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, LIU Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449-459.
- [3] 王奎峰, 李文平, 韩代成, 赵辉. 山东省临清地热田地热水化学特征及热水起源研究[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(3): 230-236.
WANG Kuifeng, LI Wenping, HAN Daicheng, ZHAO Hui. Hydrochemistry and origin of the Linqing geothermal field in Shandong Province[J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(3): 230-236.
- [4] 张保建. 鲁西北地区地下热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.
- [5] 张保建, 沈照理, 乔增宝, 元麟. 聊城市东部岩溶地热田地下水水化学特征及成因分析[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 263-268.
ZHANG Baojian, SHEN Zhaoli, QIAO Zengbao, QI Lin. Analysis on hydro-chemical features and origin of the hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng City[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(3): 263-268.
- [6] 卞跃跃, 赵丹. 四川康定地热田地下热水成因研究[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 491-497.
BIAN Yueyue, ZHAO Dan. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(4): 491-497.
- [7] 谭梦如, 周训, 张彧齐, 刘海生, 余鸣潇, 海阔. 云南勐海县勐阿街温泉水化学和同位素特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 70-80.
TAN Mengru, ZHOU Xun, ZHANG Yuqi, LIU Haisheng, YU Mingxiao, HAI Kuo. Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the Mengjia hot spring in Menghai county of Yunnan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 70-80.
- [8] 徐刚, 伍坤宇, 王鹏, 陈永东, 李兴彦, 胡林, 刘子畅, 李海. 藏北温泉盆地地热田水文地球化学特征研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 299-310.
XU Gang, WU Kunyu, WANG Peng, CHEN Yongdong, LI Xingyan, HU Lin, LIU Zichang, LI Hai. Hydrogeochemical characteristics of the geothermal field in Wenquan basin, northern Tibet[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 299-310.
- [9] 徐成华, 于丹丹, 骆祖江. 南京汤泉地下热水化学特征及其指示意义[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11472-11478.
XU Chenghua, YU Dandan, LUO Zujang. Hydrogeochemistry of geothermal water from the Tangquan in Nanjing and its indicating significance[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11472-11478.
- [10] 廖昕, 蒋翰, 徐正宣, 宋章, 欧阳吉, 张云辉, 巫锡勇. 西藏东部阿旺地下水化学特征及其成因初探[J]. 工程地质学报, 2020, 20(28): 11472-11478.

- 2020, 28(4): 916-924.
- LIAO Xin, JIANG Han, XU Zhengxuan, SONG Zhang, OUYANG Ji, ZHANG Yunhui, WU Xiyong. Hydrogeochemical characteristics and genesis mechanism of geothermal water in Awang, eastern Tibet[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 916-924.
- [11] 卢兆群, 彭明章, 董妍, 亓协全, 朱光骥, 孟祥鑫. 山东平阴地热水水文地球化学特征及成因分析[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(1): 104-114.
- LU Zhaoqun, PENG Mingzhang, DONG Yan, QI Xiequan, ZHU Guangji, MENG Xiangxin. Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of geothermal water in Pingyin of Shandong Province[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(1): 104-114.
- [12] 尚敏, 易武, 张兰新. 济南北部地区地热资源形成条件研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2008(4): 22-25.
- SHANG Min, YI Wu, ZHANG Lanxin. Research on forming condition of geothermal resources in north region of Jinan[J]. *Journal of Three Gorges University (Natural Science)*, 2008(4): 22-25.
- [13] 张中祥, 张海林. 济南北部地热田开发与保护建议[J]. *地质调查与研究*, 2008, 31(3): 264-269.
- ZHANG Zhongxiang, ZHANG Hailin. Development and protection suggestion for geothermal field in northern Jinan, Shandong Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2008, 31(3): 264-269.
- [14] 隋海波, 康凤新, 李常锁, 韩建江, 邢立亭. 水化学特征揭示的济北地热水与济南泉水关系[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 49-58.
- SUI Haibo, KANG Fengxin, LI Changsuo, HAN Jianjiang, XING Liting. Relationship between north Ji'nan geothermal water and Ji'nan spring water revealed by hydrogeochemical characteristics[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 49-58.
- [15] 蒙永辉, 王集宁, 于得芹. 章丘市枣园桃花山地地热地质特征分析[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(11): 24-27.
- MENG Yonghui, WANG Jining, YU Deqin. Analysis on geological characteristics of Taohuashan geothermal field in Zaoyuan of Zhangqiu City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2010, 26(11): 24-27.
- [16] 蒙永辉, 于得芹. 章丘枣园桃花山地热水与百脉泉水力联系浅析[C]//地质调查环境保障实现找矿新突破-2012年华东六省一市地学科技论坛文集, 2012: 285-289.
- MENG Yonghui, YU Deqin. Hydraulic connection analysis on geothermal water and Baimai springs located on Zaoyuan peach blossom mountain in Zhangqiu City[C]//Geological survey, environmental protection and new breakthroughs in ore prospecting-collected papers of the 2012 Geological Science and Technology Forum of Six Provinces and One City in East China, 2012: 285-289.
- [17] 程洪柱. 济南东部宁家埠地区地热资源特征与开发利用探讨[J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(Suppl.1): 72-75.
- CHENG Hongzhu. Probing into geothermal resource features, exploitation and utilization in Ningjiabu area to the east of Jinan[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(Suppl.1): 72-75.
- [18] 程洪柱, 成世才, 王振涛. 基于水化学特征的“奥灰”地热流体水文地球化学演化机制研究: 以济南东部章宁1地热井为例[J]. *山东国土资源*, 2019, 35(8): 20-25.
- CHENG Hongzhu, CHENG Shicai, WANG Zhentao. Study on hydrogeochemical evolution mechanism of "Ordovician limestone" geothermal fluid based on hydrochemical characteristics: Setting No. 1 Zhangning geothermal well in eastern Ji'nan as an example[J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, 35(8): 20-25.
- [19] 张元培, 牛俊强, 王伟. 湖北京山地区地热田地球化学特征及热源分析[J]. *物探与化探*, 2010, 34(6): 806-809, 813.
- ZHANG Yuanpei, NIU Junqiang, WANG Wei. Geochemical characteristics and heat source of the geothermal field in Jing-shan area, Hubei Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(6): 806-809, 813.
- [20] 潘明, 郝彦珍, 吕勇, 李波. 云南安宁橄榄河热泉水化学特征及复合成因机制研究[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 281-289.
- PAN Ming, HAO Yanzhen, LYU Yong, LI Bo. Hydrochemical characteristics and composite genesis of a geothermal spring in Ganlanhe, Changning, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 281-289.
- [21] 闫晓雪, 甘浩男, 岳高凡. 广东惠州—从化典型地热田水文地球化学特征及成因分析[J]. *地质论评*, 2019, 65(3): 743-754.
- YAN Xiaoxue, GAN Haonan, YUE Gaofan. Hydrogeochemical characteristics and genesis of typical geothermal fields from Huangshandong to Conghua in Guangdong[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 743-754.
- [22] Gibbs R J. Mechanisms controlling world chemistry[J]. *Science*, 1970, 170: 1088-1090.
- [23] 刘伟坡, 沙娜, 程旭学, 王文祥, 王雨山, 李海学, 张梦南. 海原县山前地下水化学特征分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(8): 82-87.
- LIU Weipo, SHA Na, CHENG Xuxue, WANG Wenxiang, WANG Yushan, LI Haixue, ZHANG Mengnan. Study on hydrogeochemical characteristics in piedmont of Haiyuan county[J]. *Yellow River*, 2019, 41(8): 82-87.
- [24] 王瑞, 李潇瀚. 百泉泉域岩溶地下水水化学演化特征及成因[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 398-408.
- WANG Rui, LI Xiaohan. Hydrochemical characteristics and genesis of karst groundwater in the Baiquan spring catchment[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 398-408.
- [25] 尚英男. 环境同位素示踪技术在地热地球化学研究中的应用[J]. *世界核地质科学*, 2006, 23(1): 21-26.
- SHANG Yingnan. Application of environmental isotope tracing technology to geothermal geochemistry[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2006, 23(1): 21-26.
- [26] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 孙晓敏, 刘鑫, 王仕琴. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3521-3531.
- LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, SUN Xiaomin, LIU Xin, WANG Shiqin. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J].

- [Chinese Science Bulletin](#), 2009, 54(22): 3521-3531.
- [27] 薛磊, 申中华, 张佰康. 济南市东部地区地热流体的化学特征研究[J]. 地下水, 2020, 42(4): 10-15.
XUE Lei, SHEN Zhonghua, ZHANG Baikang. The brief analysis of the chemical characteristics of geothermal fluid in east Jinan[J]. *Ground Water*, 2020, 42(4): 10-15.
- [28] 阮云峰, 赵良菊, 肖洪浪, 周茅先, 程国栋. 黑河流域地下水同位素年龄及可更新能力研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 767-782.
RUAN Yunfeng, ZHAO Liangju, XIAO Honglang, ZHOU Maoxian, CHENG Guodong. The groundwater in the Heihe river basin: Isotope age and renewability[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 767-782.
- [29] 卢兆群, 成世才, 陈刚, 陈纪平, 徐健. 山东平阴氡温泉水化学特征及成因分析[J]. [中国煤炭地质](#), 2020, 32(11): 65-72.
LU Zhaoqun, CHENG Shicai, CHEN Gang, CHEN Jiping, XU Jian. Radon hot spring hydrochemical features and genetic analysis in Pingyin, Shandong[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(11): 65-72.
- [30] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 程瑞瑞, 李腾芳. 山西柳林泉域岩溶地下水溶解无机碳特征及控制因素[J]. 地质论评, 2019, 65(4): 961-972.
HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, ZHANG Liankai, CHENG Ruirui, LI Tengfang. Characteristics and control factors of dissolved inorganic carbon in karst groundwater in Liuling spring catchment, Lvliang, Shanxi[J]. *Geological Review*, 2019, 65(4): 961-972.
- [31] 王莹, 周训, 于媛, 柳春晖, 周海燕. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. [现代地质](#), 2007, 21(4): 605-612.
WANG Ying, ZHOU Xun, YU Yuan, LIU Chunhui, ZHOU Haiyan. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs[J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 605-612.
- [32] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 2749-2765.
- [33] 康凤新, 隋海波, 郑婷婷. 山前岩溶热储聚热与富水机理: 以济南北岩溶热储为例[J]. [地质学报](#), 2020, 94(5): 1606-1624.
KANG Fengxin, SUI Haibo, ZHENG Tingting. Heat accumulation and water enrichment mechanism of piedmont karstic geothermal reservoirs: A case study of northern Jinan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1606-1624.

Hydrogeochemical characteristics and genesis of geothermal water in northern Zhangqiu

LU Zhaoqun, MENG Xiangxin, QI Xiequan, ZHU Guangji, LIU Kaili, YIN Xiuzhen

(Shandong Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract The northern part of Zhangqiu district in Jinnan City has developed a thick sedimentary formation from the late Paleozoic to the Cenozoic. In this district, relatively well-developed fault structures and magmatic rocks provide good geothermal conditions. Abundant geothermal resources have been discovered in the study area, with three geothermal wells located near the fault zone. Therefore, establishing the genesis model of geothermal resources is significant for their future sustainable development and utilization.

Based on hydrochemical and isotopic data of the study area, hydrochemical characteristics, water-rock interaction process, recharge source and formation age of geothermal water have been analyzed in this study. Besides, the elevation of the recharge area, thermal reservoir temperature, and depth of hot water circulation have also been calculated. Research findings show that geothermal water in the study area is composed of $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ or $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$, whose hydrochemical components mainly come from water-rock dissolution in the similar hydrogeochemical process. The source of water recharge is supplied by atmospheric precipitation, at an elevation from +563 m to +616 m. The ^{14}C apparent age ranges from 5.55 ka to 29.71 ka. The geothermal water is mixed with modern water and ancient water. The chalcedony temperature scale shows that the temperature of geothermal reservoir is at 41.9–52.4 °C, with the circulation depth of geothermal water at 622–1,565 m. The study area is a small-opened karst hot reservoir with deep circulation, during which geothermal water is heated up. Formation and enrichment of geothermal water are significantly controlled by fault structures. The geothermal reservoir is of stratified and banded type, belonging to geothermal resources at medium-low temperature.

Key words Zhangqiu district, geothermal water, hydrogeochemistry, isotope, genesis model

(编辑 黄晨晖)