

史启朋,宋帅良,孟甲,等.山东省菏泽凸起地热田岩溶地热水水化学水平演化特征[J].中国岩溶,2021,40(2):310-318.

DOI:10.11932/karst20210209

山东省菏泽凸起地热田岩溶地热水 水化学水平演化特征

史启朋^{1,2},宋帅良^{1,2},孟甲¹,郑慧铭¹

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地勘局第二地质大队), 山东 济宁 272100; 2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100)

摘要:在前人研究成果的基础上,选择A—A'和B—B'两条路径,采用Piper三线图解、Schoeller图解、Na—K—Mg平衡图解、饱和指数计算评价等方法,研究山东菏泽凸起地热田地热水沿路径上的循环演化特征。结果表明:沿A—A'、B—B'剖面岩溶冷水→岩溶热水,水化学类型由 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 或 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 向 $\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 或 SO_4-Ca 演化,矿化度逐渐增大, HCO_3^- 浓度逐渐减少, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 浓度逐渐增大,反映出岩溶冷水向岩溶热水演化的补给特征;水化学三线图上岩溶冷水、热水处在不同的区域,显示岩溶冷水向岩溶热水演化补给;距补给区由近到远,水岩作用程度逐步提高,饱和指数逐渐增大,岩溶地热水溶滤作用增强。

关键词:菏泽凸起地热田;岩溶地热水;水—岩作用;水化学特征

中图分类号:P314;P641.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)02-0310-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

菏泽凸起地热资源勘查最早始于20世纪90年代,以面状调查评价为主,到21世纪初,随着社会经济的发展,人们对地热认识逐步提高,以城区为中心开展了大量地热普查和钻探工作,推进了地热资源勘查和开发利用工作。目前区内共有岩溶地热井120余眼,开采量约 $6.0\text{万}\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,井口温度达 $45\sim 75\text{℃}$,主要用于供暖、洗浴等。

近年来,水文地球化学研究在揭示地热水循环机理、指导地热资源开发利用等方面卓有成效。Ellis等^[1]出版了《地热系统化学》一书,详细阐述了热水的起源,热水的物理化学作用、同位素特征,热水蚀变、热水中的矿物沉淀等。陈宗宇^[2]使用CHILLER软件模拟天津塘沽低温热储($35\sim 90\text{℃}$)回灌过程中的水—岩相互作用,探讨了回灌对储层性质的影响等。

马瑞^[3]研究了太原地区碳酸盐岩热储隐伏型中低温热水的成因与水—岩相互作用,结果显示:从补给区→径流区→排泄区,岩溶水水化学类型按 $\text{HCO}_3\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\rightarrow\text{SO}_4$ 的顺序转变,矿化度依次增大, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度不断增大, HCO_3^- 含量基本不变。张保健^[4]研究了鲁西北地区地下热水水文地球化学特征、水—岩作用程度及地下热水形成的水文地球化学过程,认为阳谷—齐河凸起岩溶地下热水的水—岩作用尚未达到平衡状态,还处于未饱和水阶段;水—岩作用主要表现为石膏和岩盐的溶解,地下热水矿化度逐步升高、水化学类型由 SO_4-Ca 水逐步演化为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 水。

菏泽凸起地热田已往地热地质勘查多集中在城区附近,区域勘查研究程度较低,地球化学研究多以整个地热田为研究对象,对水化学演化路径研究较少,地热水循环机理等方面缺乏规律性认识。本文综合研究菏泽凸起地热田岩溶地热水水化学演路

基金项目:山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20203700002937);国家自然科学基金项目(U1906209);山东省地矿局地勘项目[鲁地字(2018)13号]

第一作者简介:史启朋(1979—),男,高级工程师,主要从事地热地质、水工环地质勘查研究。E-mail:shiqipeng@163.com。

收稿日期:2020-03-04

径,初步揭示地热水循环机理,以期为地热资源的开发利用提供科学依据。

1 地热地质条件

1.1 地质背景

菏泽凸起地热田位于菏泽市中部,东以巨野和

田桥断裂为界,西以聊考断裂为界,南、北分别以省界为界^[5-6],总面积约 6 330 km²。主要分布奥陶系马家沟群灰岩,石炭—二叠系月门沟群、石盒子群泥岩、砂岩,新近、第四系松散岩层。近南北向断裂主要有聊考、巨野和田桥断裂,东西向断裂主要为汶泗、郛城、菏泽、鳧山和常乐集断裂(图 1,图 2)。

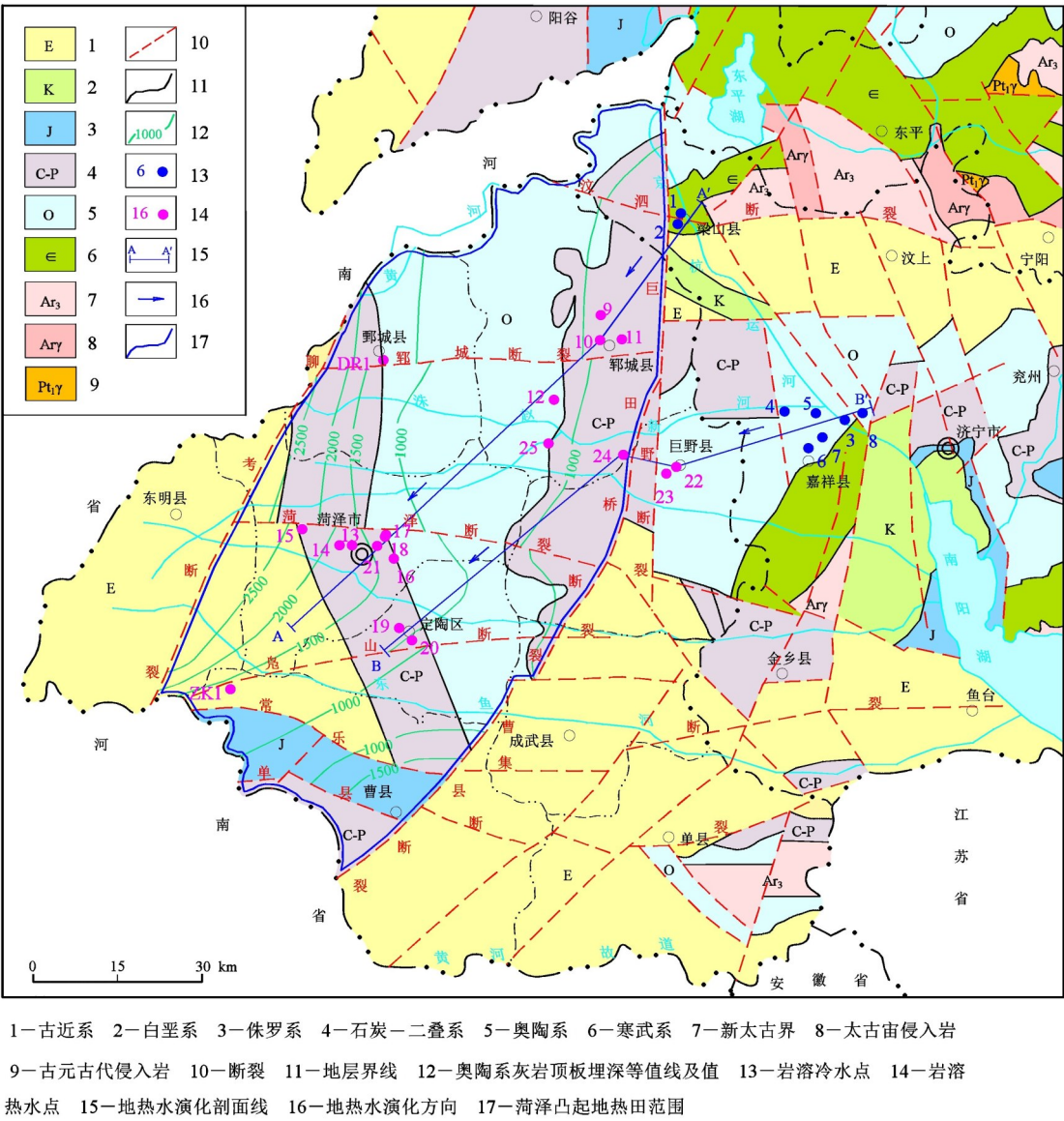


图 1 菏泽凸起地热田地质构造及取样点分布图

Fig. 1 Map showing geological structure and sampling site distribution in Heze uplift geothermal field

1.2 热储特征

区内主要分布奥陶系裂隙岩溶热储层,岩性以灰色、灰白色灰岩、白云岩为主,在断裂构造带附近,岩溶裂隙较发育,富水性较好,单井涌水量为 80 ~ 402 m³·h⁻¹,水位埋深 20 ~ 55 m,井口温度达 45 ~

75 ℃,矿化度为 3 ~ 4 g·L⁻¹,化学类型主要为 SO₄-Ca·Na;热储盖层为第四系、新近系松散层以及石炭—二叠系砂岩、泥岩,热储层顶板埋深 600 ~ 2 500 m,由东向西厚度逐渐增大^[7-9]。

研究区聊考、巨野、田桥、鳧山等深大断裂发育,

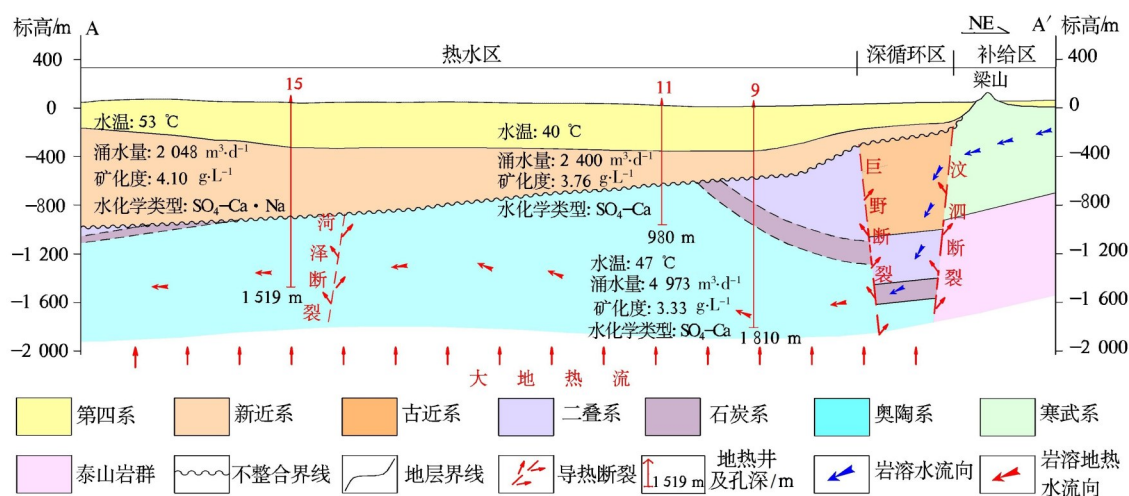


图2 A—A'热储剖面图

Fig. 2 Geothermal reservoir profile A-A'

沟通了深部热源,形成热源通道;深大断裂的次级断裂也发育,在断裂带附近灰岩历经多次强烈构造运动和溶蚀作用,裂隙岩溶发育,其是深部岩溶热水的循环、运移通道及储水空间,是主要的水源通道。

1.3 地热水动力场

研究区地热水主要受梁山、嘉祥一带基岩山区大气降水入渗,经深部循环、大地热流毯状加热、深大断裂导热加热,补给本区岩溶地热水,由东向西、由北向南径流,在郛城、菏泽和定陶城区附近受到人工开采排泄。22号地热井水位埋深最浅,为16.055 m,DR1地热井水位埋深最大,为53.114 m(图3)。

1.4 地温场特征

从菏泽凸起埋深1000 m地温等值线来看,靠近聊考断裂的地温高,在郛城—巨野一带地热水补给径流区地温小于41 °C,而在郛城、菏泽和定陶一带地热开采排泄区地温达47.5~54.5 °C;由东北向西南,由径流补给区至开采排泄区,地温逐渐增大(图4)。

1.5 地热水化学及同位素特征

地热水在补给、径流、排泄的长期演化过程中,不断对围岩进行淋滤,使阴、阳离子含量总合增加,矿化度含量增加。研究区矿化度在2037.77~4112.61 mg·L⁻¹之间,距补给区越远,矿化度含量越高(图5)。

¹⁴C是比较成熟的地热水测年方法,其测年范围一般大于5000年,是目前年老地下水测年最常用的方法。区内岩溶地热水¹⁴C年龄测试分析及校正

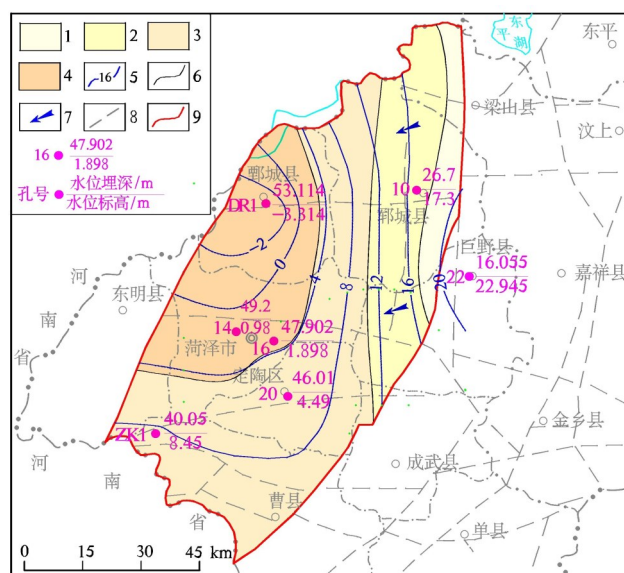


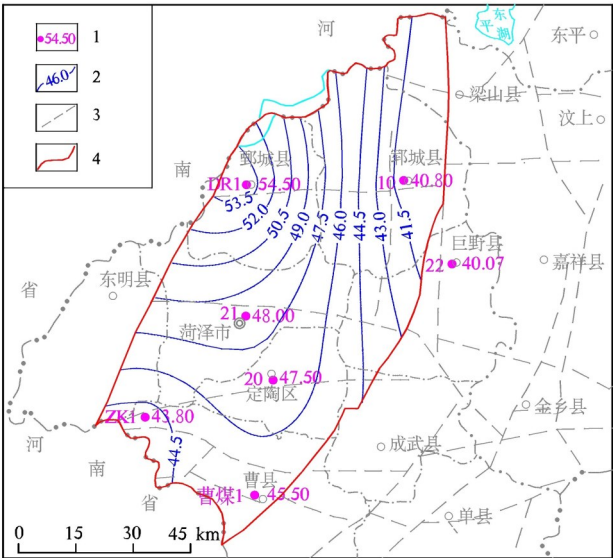
图3 菏泽凸起地热田水位埋深分区及标高等值线图

Fig. 3 Water level depth zoning and elevation contours in Heze uplift geothermal field

后¹⁴C年龄见表1。岩溶地热水¹⁴C年龄从补给区到排泄区逐渐增大,最小值位于22号地热井,年龄为12.82千年,最大值位于14号地热井,年龄为34.67千年。

2 数据采集与处理方法

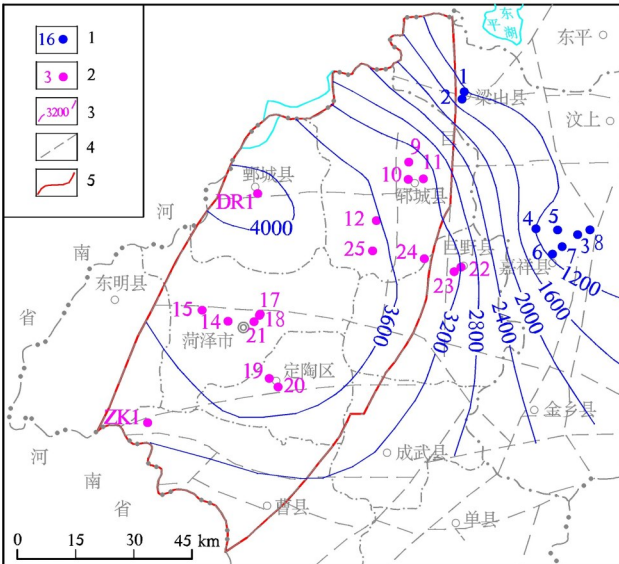
选择菏泽凸起地热田A-A'和B-B'剖面线附近25件水样(图1)全分析资料,采用沿路径离子含量变化曲线图、地热水Piper三线图、Schoeller图、Na-K-



1—测温井及温度/℃ 2—地温等值线及值/℃ 3—断裂 4—菏泽凸起地热田范围

图4 菏泽凸起地热田埋深1 000 m处地温等值线图

Fig. 4 Contours of ground temperature at depth 1,000 m in Heze uplift geothermal field



1—岩溶冷水点 2—岩溶热水点 3—矿化度含量等值线及值 4—断裂 5—菏泽凸起地热田范围

图5 菏泽凸起地热田及附近矿化度等值线图

Fig. 5 Contours of mineralization in Heze uplift geothermal field and its vicinity

Mg平衡图和饱和度指数计算评价等方法,研究沿地热水演化路径上的离子含量变化特征,对比分析岩溶冷水和热水水质特征,说明地热水的水—岩作用特征,地热水中矿物成份溶滤特征,以揭示地热水循环机理。25件水样中A-A'剖面1、2号水样为位于梁山一带补给山区的岩溶冷水,9、10、11、12和25号水样

表1 研究区岩溶地热水¹⁴C同位素测年结果

Table 1 ¹⁴C isotopic dating results of karst geothermal water in the study area

井号	¹⁴ C 表观年龄/千年	¹⁴ C 校正年龄/千年
ZK1	23.49	14.84
22	17.72±0.91	12.82
14	37.50	34.67
DR1	24.39	17.88

为郓城城区附近径流区的岩溶热水,13、14、15、16、17、18、21号水样为菏泽城区附排泄区的岩溶热水。B-B'剖面3、4、5、6、7、8号水样为嘉祥一带补给山区的岩溶冷水,22、23、24号水样为巨野城区附近径流区的岩溶热水,19、20号水样为定陶城区附近排泄区的岩溶热水。水样主要采用Agilent 5100 ICP-OES电感耦合等离子体发射光谱仪和ICS-Aquion离子色谱仪等进行全分析,阴阳离子平衡误差控制在3%以内。

3 结果与讨论

3.1 水文地球化学演化特征

3.1.1 A-A'、B-B'路径主要离子含量演化特征

岩溶地热水沿A-A'、B-B'剖面,主要阳离子K⁺、Na⁺、Ca²⁺含量呈增加趋势,平均含量分别由3.94 mg·L⁻¹增加到37.11 mg·L⁻¹,由126.73 mg·L⁻¹增加到462.04 mg·L⁻¹,由144.01 mg·L⁻¹增加到518.50 mg·L⁻¹;阴离子HCO₃⁻含量呈降低趋势,平均含量由395.60 mg·L⁻¹降低到188.20 mg·L⁻¹,SO₄²⁻和矿化度含量呈增加趋势,平均含量分别由383.26 mg·L⁻¹增加到2 036.67 mg·L⁻¹,由1 109.97 mg·L⁻¹增加到3 748.31 mg·L⁻¹(图6,图7),这反映出地热水由补给区→径流区→排泄区的演化特征。

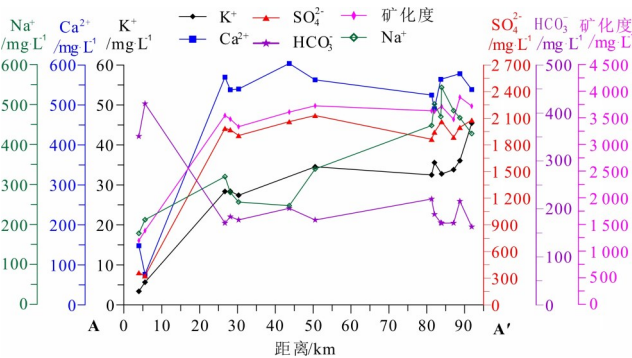


图6 沿A-A'剖面岩溶热(冷)水中离子含量演化曲线图

Fig. 6 Evolution curve of ion content in karst hot (cold) water along profile A-A'

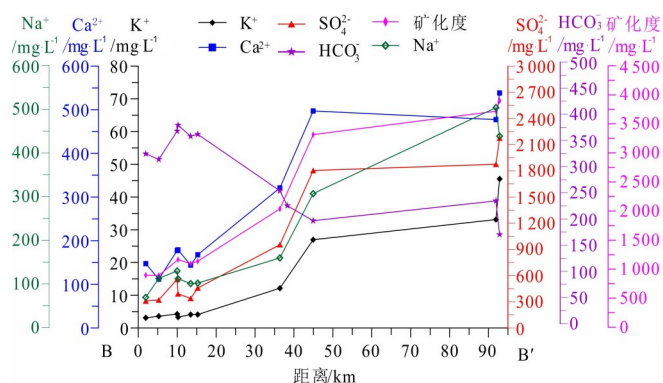


图7 沿B—B'剖面岩溶热(冷)水中离子含量演化曲线图

Fig. 7 Evolution curve of ion content in karst hot (cold) water along profile B-B'

3.1.2 Piper 三线图分析

将A—A'、B—B'剖面附近岩溶水水样按其主要组分浓度投影到Piper三线图上(图8),可知地下热水及其补给区的岩溶冷水分为三组:第Ⅰ组为北部梁山和东部嘉祥补给区的岩溶冷水,第Ⅱ组为菏泽凸起郓城和巨野城区附近径流区的岩溶地热水,第Ⅲ组为菏泽、定陶城区附近排泄区的岩溶热水^[10-13]。

第Ⅰ组:代表性水样为1~8号样品,岩溶水多为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型水或 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水,水化学组分相似。pH为7.4~8.0,矿化度为894.34~

1 382.29 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水中主要离子为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,阳离子含量顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$,阴离子含量顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ 。

第Ⅱ组:代表性水样为9~12和22~25号样品,岩溶热水水化学类型为 $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 和 $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ 。pH为6.78~7.65,矿化度为2 037.33~3 846.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水中主要离子为 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} ,阳离子含量顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$,阴离子含量顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ 。

第Ⅲ组:代表性水样为13~21号样品,岩溶热水水化学类型主要为 $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ 。pH为6.60~7.28,矿化度为3 471.01~4 104.75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水中主要离子为 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 、 Na^+ 。阳离子含量顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$,阴离子含量顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ 。

地热水沿A—A'、B—B'从补给区→径流区→排泄区,水化学类型由 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 向 $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ 演化。

从图8可知,地热水自梁山及嘉祥的补给山区(Ⅰ)→郓城及巨野一带岩溶地热水(Ⅱ),热储层和含水层以奥陶系灰岩为主,岩溶地热水径流距离较短,途中遇巨野断裂阻挡,地下热水所处水化学环境相对较开放,变质程度较低,代表了正常演化的地下水。菏泽凸起地热田腹地菏泽、定陶城区(Ⅲ),地热水受西部聊考断裂及南部常乐集断裂阻水影响,径流运移速度相比郓城及巨野一带已非常滞缓,且距

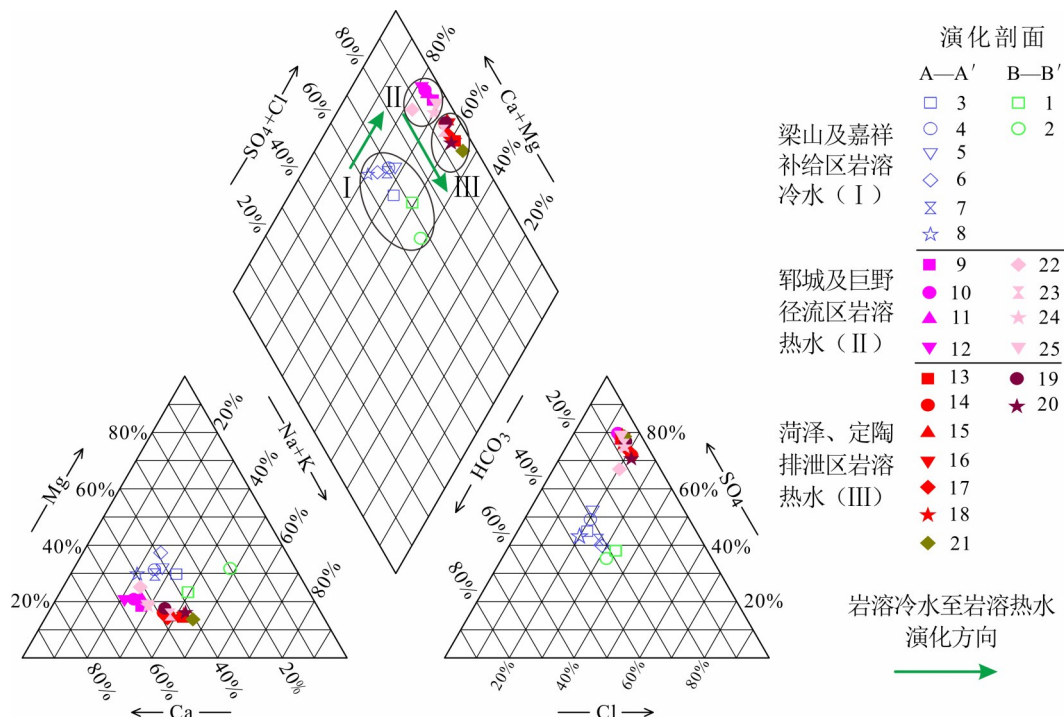


图8 菏泽凸起地热田A—A'、B—B'剖面上岩溶热(冷)水水化学Piper三线图

Fig. 8 Piper three-line diagram of karst hot (cold) water chemistry on profiles A—A' and B—B' in Heze uplift geothermal field

离补给源较远,地热水所处水化学环境相对较封闭,表现为地热水中的 SO_4^{2-} 浓度增加、 HCO_3^- 浓度减少、 K^+ 、 Na^+ 浓度增加。从Ⅱ至Ⅲ区代表了岩溶地热水向卤水化方向的演化特征^[14],也说明了地热水由所处水化学环境相对较开放向相对较封闭的演化特征。

3.1.3 Schoeller图分析

Schoeller图主要说明不同地点水样中离子含量的相对变化趋势。将菏泽凸起地热田A-A'、B-B'剖面上岩溶热(冷)水列于Schoeller图^[13-17]中,由图9可知:

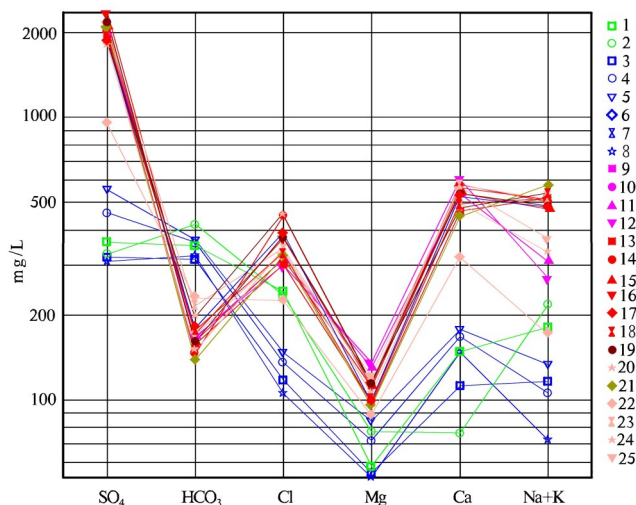


图9 A-A'、B-B'剖面岩溶热(冷)水Schoeller图

Fig. 9 Schoeller diagram of karst hot (cold) water in profiles A-A' and B-B'

(1)A-A'、B-B'剖面上所选25件样中1~8号岩溶冷水样与9~25号岩溶热水中各离子含量具有大致相同的变化趋势,说明岩溶热水与岩溶冷水具有同一补给源,且冷水向地热水补给混合;

(2)岩溶热水中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Na^+ + K^+ 含量大于岩溶冷水,说明岩溶冷水在向地热水运移补给过程中,溶滤作用增强,地热水中离子含量升高;

(3)地热水所处水文地球化学环境越封闭,水溶解的 Cl^- 和 Na^+ 就越多, HCO_3^- 含量越小。菏泽凸起地热田腹地菏泽市和定陶区城区13~21号样品中 Cl^- 和 Na^+ 含量明显高于梁山、嘉祥一带补给区岩溶冷水和郓城、巨野城区一带径流区岩溶热水中的 Cl^- 和 Na^+ 含量,而 HCO_3^- 含量则相对越小,说明菏泽凸起地热田腹地菏泽和定陶城区一带所处水文地球化学环境相对封闭。

3.2 水-岩相互作用程度

利用Na-K-Mg平衡图^[18-22]分析说明研究区水-岩相互作用程度。将A-A'、B-B'剖面上25件岩溶热(冷)水样品中的Na、K、Mg含量经线性转换后投至Na-K-Mg平衡图解上,形成Na-K-Mg平衡图(图10)。

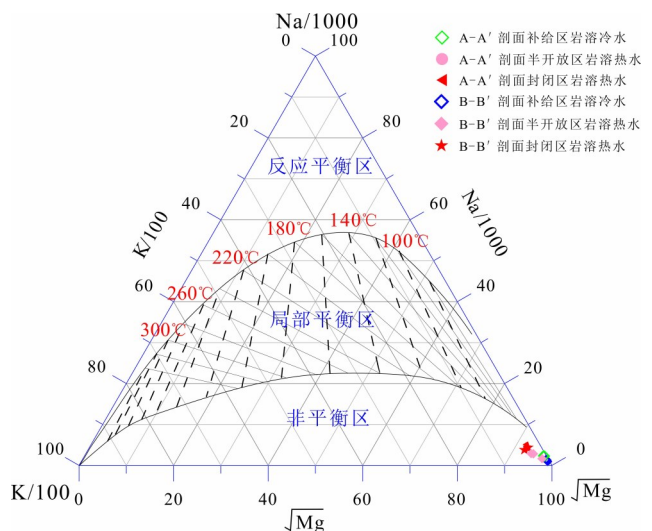


图10 A-A'、B-B'剖面岩溶热(冷)水Na-K-Mg平衡图解

Fig. 10 Diagram of Na-K-Mg equilibrium of karst hot (cold) water in profiles A-A' and B-B'

由图10可知,菏泽凸起地热田A-A'和B-B'剖面附近岩溶热(冷)水均位于非平衡区,说明水-岩作用尚未达到平衡状态,岩溶热(冷)水中的溶解作用仍在进行。A-A'和B-B'剖面补给区梁山、嘉祥一带岩溶冷水都位于Na-K-Mg平衡图右下角 Mg^{2+} 顶点处,说明补给区冷水尚处在水-岩作用的初级阶段;郓城、巨野城区一带径流区岩溶热水位于 Mg^{2+} 顶点较远处,菏泽、定陶城区一带排泄区岩溶热水位于 Mg^{2+} 顶点较远处,说明距补给区由近到远,水-岩作用程度逐步提高。

3.3 矿物饱和指数

为研究地热水中各种矿物的饱和状态,使用PHREEQC软件进行矿物相平衡计算,得出水样中各种矿物的饱和指数(SI)^[23-26]。该软件中SI定义如下:

$$\text{SI} = \lg \frac{IAP}{K_T}$$

式中: IAP 为水溶液中组成某矿物的阴、阳离子活度之积; K_T 为水样在测定温度条件下的热力学平衡常数。

当地下水中某种矿物的SI>0时,说明该矿物在地热水中处于过饱和状态;SI<0时,说明该矿物在地热水中处于非饱和状态;SI=0时,说明该矿物处于平衡状态。

A-A'和B-B'剖面附近岩溶热(冷)水中各矿物的

饱和指数计算结果见表2、表3,图11、图12。由表2、表3中可知,A-A'和B-B'剖面补给区岩溶冷水,径流、排泄区岩溶热水主要矿物成分中,易溶成分岩盐未达到饱和,而难溶成分硬石膏、文石、方解石、天青石、白云石、萤石、石膏等达到了饱和状态。

表2 A-A'剖面饱和指数计算结果
Table 2 Calculation results of saturation index in profile A-A'

矿物	补给山区岩溶冷水		径流区岩溶热水					排泄区岩溶热水						
	1	2	9	10	11	12	25	13	14	15	16	17	18	21
硬石膏	0.97	0.63	2.10	2.06	2.11	2.10	2.14	2.06	2.15	2.17	2.22	2.08	2.07	2.07
文石	2.31	2.79	3.07	2.98	2.98	2.65	3.33	3.10	2.43	3.29	3.28	2.70	3.14	2.56
方解石	2.45	2.93	3.19	3.11	3.10	2.78	3.46	3.23	2.56	3.41	3.41	2.83	3.26	2.69
天青石	1.45	1.31	2.58	2.70	2.70	2.54	2.55	2.68	2.49	2.53	1.31			2.46
白云石	4.65	6.03	5.85	5.74	5.73	5.09	6.41	5.91	4.56	6.25	6.25	5.08	5.99	4.84
萤石	1.61	1.34	3.05	2.83	2.11	2.89	3.55	2.81	3.03	3.37	3.37	2.79	3.01	3.02
石膏	1.17	0.83	2.15	2.11	2.98	2.18	2.17	2.04	2.14	2.14	2.21	2.08	2.07	2.06
岩盐	-3.41	-3.35	-3.06	-3.24	-0.44	-3.18	-3.01	-2.93	-2.75	-2.95	-2.79	-2.84	-2.86	-2.81

表3 B-B'剖面饱和指数计算结果
Table 3 Calculation results of saturation index in profile B-B'

矿物	补给山区岩溶冷水						径流区岩溶热水				排泄区岩溶热水	
	3	4	5	6	7	8	21	22	23	24	19	20
硬石膏	0.84	1.07	1.14	0.93	1.05	0.93	2.07	1.58	2.13	2.06	2.19	2.08
文石	2.74	2.82	2.72	2.80	3.07	3.23	2.56	2.80	3.4	2.52	3.17	2.84
方解石	2.89	2.96	2.87	2.94	3.21	3.38	2.69	2.93	3.53	2.64	3.29	2.96
天青石							2.46	2.26	2.47	2.52	2.79	
白云石	5.61	5.69	5.55	5.79	6.18	6.46	4.84	5.50	6.52	4.75	6.04	5.44
萤石	2.19	1.87	1.85	0.82	-0.49	1.86	3.02	2.37	3.19	2.81	3.06	2.95
石膏	1.05	1.28	1.34	1.14	1.25	1.14	2.06	1.69	2.15	2.05	2.16	2.04
岩盐	-3.92	-3.92	-3.78	-3.78	-3.73	-4.17	-2.81	-3.57	-2.87	-3.09	-2.84	-2.73

由图11、图12可知,沿A-A'、B-B'剖面岩溶热(冷)水中石膏、方解石、白云石、岩盐等饱和指数呈上升趋势,说明随着岩溶冷水向岩溶热水演化过程中溶滤作用增强。

4 结 论

(1)菏泽凸起地热水主要受梁山、嘉祥一带基岩

山区大气降水入渗、经深部循环、大地热流和深大断裂导热加热补给。沿A-A'、B-B'剖面水化学类型由SO₄·HCO₃-Ca·Mg·Na或SO₄·HCO₃-Ca·Mg向SO₄-Ca·Na或SO₄-Ca演化,矿化度依次增大,HCO₃⁻浓度逐渐减少,SO₄²⁻、Ca²⁺、K⁺浓度逐渐增大,反映出岩溶冷水向岩溶地热水演化补给特征;

(2)Schoeller图中,A-A'、B-B'剖面岩溶热(冷)水中各离子含量具有大致相同的变化趋势,说明岩

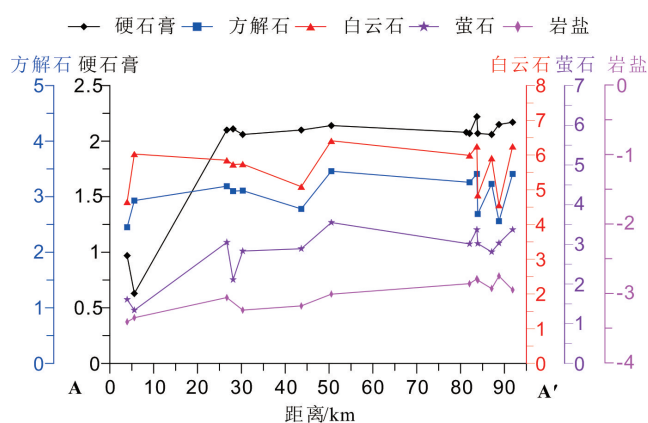


图 11 沿 A-A' 剖面岩溶热(冷)水饱和指数曲线图

Fig. 11 Curve of karst hot (cold) water saturation index along profile A-A'

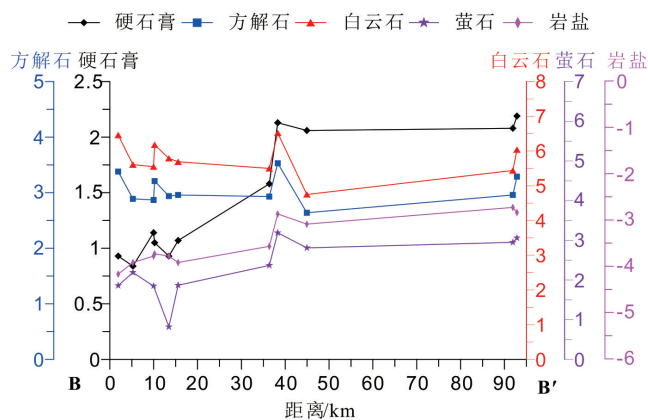


图 12 沿 B-B' 剖面岩溶热(冷)水饱和指数曲线图

Fig. 12 Curve of karst hot (cold) water saturation index along profile B-B'

溶热水与岩溶冷水具有同一补给源,岩溶冷水在向地热水补给过程中,溶滤作用增强,地热水中离子含量升高;水化学三线图中岩溶冷水、热水处在不同的区域,显示岩溶冷水向岩溶热水演化补给,地热水所处环境由开放、半封闭向封闭方向演化;

(3)距补给区由近到远,水—岩作用程度逐步提高,饱和指数逐渐增大,溶滤作用逐渐增强。

参考文献

- [1] Ellis A J, Mahon W A J. Geochemistry and geothermal systems [M]. New York: Academic Press, 1977: 1-52.
- [2] 陈宗宇. 天津市塘沽低温热储回灌的水—岩相互作用地球化学模拟[J]. 地球科学, 1998, 23(5): 513-518.
- [3] 马瑞. 碳酸盐岩热储隐伏型中低温热水的成因与水—岩相互作用研究: 以山西太原为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007.
- [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.
- [5] 吴晓华, 史启朋, 马哲民, 等. 山东省地热资源综合评价(鲁西南)报告[R]. 济宁: 山东省地质矿产勘查开发局第三水文地质工程地质大队, 2018.
- [6] 康凤新, 张忠祥, 徐军祥, 等. 山东省地热地质条件及开发利用[C]//科学开发中国地热资源高层研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 79-83.
- [7] 徐军祥, 康凤新. 山东省地热资源[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 404-410.
- [8] 康凤新, 赵季初, 秦耀军, 等. 山东省地热清洁能源综合评价[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 89-93.
- [9] 马哲民, 史启朋, 刘肖, 等. 菏泽(凸起)地热田综合评价报告[R]. 济宁: 山东省鲁南地质工程勘察院, 2019.
- [10] 马致远, 李嘉祺, 翟美静, 等. 沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 9-18.
- [11] 赵贤正, 李飞, 曾溅辉, 等. 霸县凹陷深部地下热水的地球化学特征及其成因[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 210-218.
- [12] 罗丹, 杨平恒, 王治祥, 等. 渝东南断裂型碳酸盐岩地热水的形成特征[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 670-681.
- [13] 杨吉龙, 柳富田, 贾志, 等. 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[J]. 地球学报, 2018, 39(1): 71-78.
- [14] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, 1983, 11(6): 6-11.
- [15] 隋海波, 康凤新, 李常锁, 等. 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.
- [16] 李志红, 胡伏生, 周文生, 等. 银川地区承压水水化学特征及控制因素[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 31-39.
- [17] 林韵, 高磊, 李绍恒, 等. 广东江门地热水水文地球化学特征及来源分析[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 512-523.
- [18] 袁建飞. 广东沿海地热系统水文地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- [19] 赵慧. 关中盆地地下热水地球化学及其开发利用的环境效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [20] 李修成, 马致远, 张雪莲, 等. 陕西省关中盆地东大地热田成因机制分析[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2082-2091.
- [21] 马月花, 唐保春, 苏生云, 等. 青海共和盆地地热流体地球化学特征及热储水—岩相互作用过程[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 123-133.
- [22] 毛晓敏, 刘翔, Barry D A. PHREEQC在地下水溶质反应运移模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(2): 20-24.
- [23] 焦春春, 肖江, 皮建高, 等. PHREEQC在汤市地热水化学形成作用模拟中的应用[J]. 矿业工程研究, 2018, 33(1):

- 49-53.
- [24] 唐辉,陈洁,钱会. 饱和指数在水—岩作用研究中的应用及其灵敏度分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 180-183.
- [25] 李常锁,武显仓,孙斌,等. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J]. 地球科学, 2018, 43(S1): 313-325.
- [26] 赵佳怡,张薇,张汉雄,等. 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 81-89.

Hydrochemical evolution of karst geothermal water in the Heze uplift geothermal field, Shandong Province

SHI Qipeng^{1,2}, SONG Shuailiang^{1,2}, MENG Jia¹, ZHENG Huiming¹

(1.Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute (the second Geological Brigade of Shandong Geological Exploration Bureau), Jining, Shandong 272100, China; 2.Shandong Provincial Engineering Research Center of Geothermal Energy Exploration and Development, Jining, Shandong 272100, China)

Abstract The Heze uplift geothermal field is located in the tectonic unit of the buried uplift, Heze-Yanzhou buried fault uplift, Heze buried uplift, with a total area 6,330 km². It hosts Ordovician crack karst thermal reservoirs of layering zone-like shape, with water yield of 80–402 m³·h⁻¹ in single wells, depths of water level 20–55 m and wellhead temperatures 45–75 °C. The thermal reservoir caprocks are Quaternary, Neogene and Permian–Carboniferous with a thickness of 600–2,500 m. Deep faults such as the Liaokao, Juye, Tianqiao and Fushan faults connect heat sources at depth, forming heat source channels. Secondary faults of these major deep faults developed well, nearby which limestone has undergone many tectonic movements and dissolution, resulting in the development of fissure karst which is the circulation, migration channel and water storage space of deep karst hot water as well as the main water source channel. The purpose of this work was to study the evolution characteristics of hydrochemistry of geothermal water. Two sections A–A' and B–B' were selected in the geothermal field. Piper, Schoeller and Na–K–Mg equilibrium diagrams and saturation index calculation were used to characterize the distribution and evolution of each chemical index in geothermal water. Results show that along the profiles A–A' and B–B', karst water turns from cold into hot, the hydrochemical type evolves from SO₄·HCO₃–Ca·Mg·Na or SO₄·HCO₃–Ca·Mg to SO₄–Ca·Na and SO₄–Ca. Mineralization increases gradually, HCO₃⁻ concentration decreases gradually, and SO₄²⁻, Ca²⁺ and K⁺ concentrations grow gradually. It reflects the evolution and supply characteristics of karst cold water to karst hot water. The karst cold water and hot water samples are located in different areas on the hydrogeochemical trilinear map, which shows that the cold water is supplied to the hot water. With distance supply area from near to far from the supply area, the degree of water rock interaction gradually intensifies, the saturation index gradually increases, and dissolution of karst hot water gradually becomes larger.

Key words Heze uplift geothermal field, karst geothermal water, water rock interaction, hydrochemical characteristics

(编辑 黄晨晖)