

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.110

引用格式: 李振雄, 胡博文, 王振华, 等. 地质构造控制下地热流体水化学、同位素及循环特征——以蔚县盆地为例[J]. 中国地质调查, 2024, 11(6): 64–75. (Li Z X, Hu B W, Wang Z H, et al. Hydrochemistry, isotope and circulation characteristics of geo-thermal fluids controlled by geological structure: A case study of Yuxian Basin[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6): 64–75.)

地质构造控制下地热流体水化学、同位素及循环特征 ——以蔚县盆地为例

李振雄, 胡博文*, 王振华, 郭鑫鑫, 庾乐彬, 张晓幸

(河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心(河北省矿山和地质灾害应急救援中心),
河北 石家庄 050085)

摘要: 蔚县盆地地热资源丰富, 地质构造繁杂, 研究地质构造控制下的地热流体水化学、同位素及循环特征可进一步促进地热开发与利用, 以及环首都县市区地热温泉康养产业发展。通过结合地下水和大气降水, 运用多元统计、相关性分析及特征系数分析, 借助 Piper 三线图、Na–K–Mg 三角图, 对蔚县盆地地热流体进行研究。研究结果显示: ①地热流体中阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要源于碳酸盐岩类矿物的溶解; ②地热流体中存在阳离子交替吸附作用, 作用方向为 K^+ 、 Na^+ 进入液相, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进入固相, Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 处于此消彼长、相互抑制的状态; ③热储地层封闭性较差, 地热流体浓缩程度和变质程度较低, 受渗入水及浅表层氧化作用影响显著; 地热流体补给来源主要为大气降水, 径流路径较短, 水循环较快; ④热储温度为 $37.32 \sim 57.36^\circ\text{C}$, 蔚县系雾迷山组热储最大循环深度为 $1\,715 \sim 2\,640\text{ m}$, 蔚县系高于庄组热储最大循环深度为 $3\,291 \sim 3\,337\text{ m}$, 均值为 $3\,314\text{ m}$ 。研究结果揭示了地质构造作用下水岩相互作用, 对研究该地区地热流体水化学演化及动态特征具有一定意义。

关键词: 蔚县盆地; 地热流体; 水文地球化学; 同位素地球化学; 循环特征

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2024)06–0064–12

0 引言

地热资源是一种集水、热、矿于一身的清洁能源^[1–2]。全球地热资源总量约 $14.5 \times 10^{25}\text{ J}$ 。21 世纪末, 地热能利用量占世界能源总量的 30%–80%^[3–5]。因地制宜开发利用地热资源可有效减少温室气体排放, 有助于实现碳中和目标, 为能源替代提供新途径^[6]。地热资源特有的环保、高效能和大存储量优势引得国内外政府及企业机构争相开展地热资源勘查开发利用与研究, 而地热流体水文地球化学、同位素地球化学及循环特征研究, 可有效辨析地热流体水化学类型、水岩相互作用、补给来源及其形成与循环过程, 为合理开发利用地热资源提供科学依据^[7]。

目前, 蔚县盆地地热资源研究主要集中于热储特征, 从地质构造、地层岩性、成热模式等方面进行分析, 未细化区分不同区域热储结构, 缺乏盆地整体水文地球化学、同位素地球化学及循环特征方面的研究。2004 年, 李业震^[8]主要对卜南堡地热井及其以北蔚县矿区地热系统进行了研究; 2016 年, 王国晨等^[9]重点对北洗冀地区热储特征进行了讨论; 2019 年, 周江^[10]对蔚县盆地地热成因进行了分析; 2019 年和 2020 年, 郝星波^[11]和李泓泉等^[12]分别对蔚县盆地热储特征及勘查开发利用方向进行了探讨。本文在总结分析前人研究的基础上, 论

收稿日期: 2024–01–08; 修订日期: 2024–07–03。

基金项目: 张家口市蔚县地热温泉资源详细调查项目资助。

第一作者简介: 李振雄(1992—), 男, 工程师, 主要从事水文地质、环境地质、地热地质等方面的工作。Email: 815615950@qq.com。

通信作者简介: 胡博文(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质、地热地质等方面的工作。Email: hubowen0808@126.com。

述蔚县盆地地质构造与地热流体水文地球化学、同位素地球化学及循环特征的关系,揭示地质构造作用下的水岩相互作用,在研究蔚县盆地地热流体水化学演化及动态特征方面具有一定意义。

1 研究区概况

蔚县盆地位于河北省张家口市西南部(图1),面积3 220 km²,其东邻涿鹿县,南接涞源县,西倚

山西省广灵县,北枕宣化区,处于“一县连二省”(河北省、山西省),三市(大同市、保定市、张家口市)的重要位置,是西联东出、承北接南的重要枢纽。

蔚县属温带大陆性季风气候,年平均气温6.5℃,年平均降水量407.4 mm。地形地貌主要以堆积类型为主,包括山前洪坡积裙亚类(Ⅲ₁)、山前坡洪积斜地亚类(Ⅲ₂)、山前冲洪积扇裙亚类(Ⅲ₃)、河流冲积带状平原亚类(Ⅲ₄)、侵蚀堆积黄土丘陵亚类(Ⅲ₅)、侵蚀堆积湖积台地亚类(Ⅲ₆)。

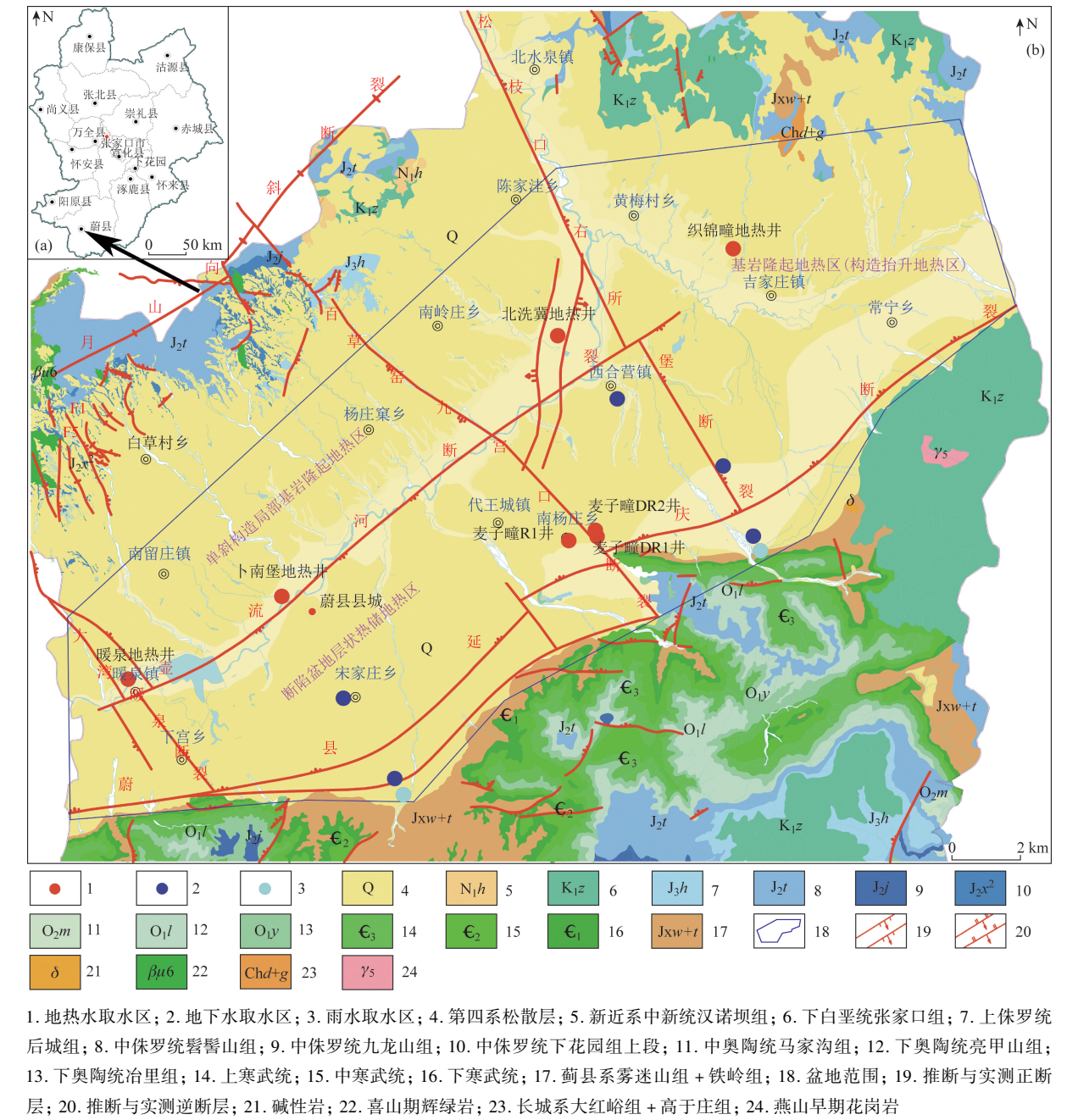


图1 蔚县盆地交通位置图(a)及地质略图(b)

Fig.1 Traffic location map and geological sketch of Yuxian Basin

蔚县盆地为中间低、南北高的典型盆地,基岩地层埋深整体东浅西深,北浅南深。地层岩性由老至新依次为新太古界桑干群、中元古界长城系和蓟县系、古生界寒武系和奥陶系、中生界侏罗系和白垩系、新生界古近系和第四系。断裂构造主要有蔚县延庆断裂、月山向斜断裂、壶流河断裂、松枝口—右所堡断裂、大湾—暖泉断裂、白草窑—九宫口断裂。其中,壶流河断裂为一新生界掩盖下的隐伏断裂,北侧奥陶系灰岩岩溶水含水层与南侧新生界湖相黏土类隔水层对接,构成了壶流河南北地下水隔水屏障,即为 EW 向延伸的 SN 向阻水断裂。

蔚县盆地地热异常区主要位于暖泉、卜南堡、北洗冀、织锦瞳、麦子瞳等地区,地热井出水温度为 $26 \sim 43\text{ }^{\circ}\text{C}$,出水流量为 $30 \sim 60\text{ m}^3/\text{h}$ 。蔚县盆地为新生代断陷盆地,地热资源分布受地质构造影响较大,埋藏深度和开采条件差异显著。盆地内兼有带状热储和层状热储。热源以幔源热为主,岩浆侵入体余热及放射性热为补充热,尤其是深部(上地壳上部)存在低速异常带,使得热传导活动更为强烈。

本文以壶流河断裂、松枝口—右所堡断裂为界,将蔚县盆地划分为三个地热区。壶流河断裂以北,松枝口—右所堡断裂以西,大湾—暖泉断裂以东,为单斜构造局部基岩隆起地热区;壶流河断裂以南,蔚县延庆断裂以北,大湾—暖泉断裂以东,松枝口—右所堡断裂以西,为断陷盆地层状热储地热区;松枝口—右所堡断裂以东为基岩隆起地热区(构造抬升地热区)。松枝口—右所堡断裂以东热储地层埋藏较浅,织锦瞳地热井,井深 $500 \sim 510\text{ m}$,热储地层为蓟县系雾迷山组白云岩。松枝口—右所堡断裂以西,壶流河断裂以北,热储地层埋深次之,且由西向东逐渐变浅,西部暖泉地热井,井深 $2\,693\text{ m}$, $1\,620\text{ m}$ 揭露蓟县系雾迷山组白云岩地层,中部卜南堡地热井,井深 $1\,167\text{ m}$,在 $1\,042\text{ m}$ 揭露蓟县系雾迷山组白云岩地层,东部北洗冀地热井,井深 $200 \sim 800\text{ m}$,热储地层为蓟县系雾迷山组白云岩。松枝口—右所堡断裂以西,壶流河断裂以南,热储地层埋藏较深,麦子瞳 DR1 井深 $2\,953\text{ m}$, $891 \sim 1\,676\text{ m}$ 为蓟县系雾迷山组白云岩地层,麦子瞳 DR2 井深 $2\,942\text{ m}$, $956 \sim 1\,578\text{ m}$ 为蓟县系雾迷山组白云岩地层,麦子瞳 R1 井深 $1\,228\text{ m}$, $694 \sim 1\,228\text{ m}$ (未揭穿) 为蓟县系雾迷山组白云岩地层。其中,北洗冀地区和织锦瞳地区与澡洗塘地热田相

似,均为基岩隆起区,即“古潜山”构造^[13]。

2 样品采集与测试

本次采集与收集的地热流体样品均取自蓟县系,采集地热水样全分析样品 3 件、放射性和稳定同位素样品 4 件,收集地热水样全分析样品 4 件、放射性和稳定同位素样品 3 件,收集地下水 and 雨水氢氧同位素样品 7 件。样品采集与测试时间为 2023 年 3—5 月,样品采集严格按照《NB/T 10716—2021 地热流体样品的采集与保存规范》^[14] 执行,样品测试在中国地质科学院水文地质环境地质研究所进行,样品采集点分布如图 1 所示。

地热水样全分析利用电感耦合等离子体发射光谱仪(Avio 550 Max)进行检测,D 和 ^{18}O 利用水同位素分析仪(L2130i)进行检测,T 和 ^{14}C 利用超低本底液体闪烁谱仪(Quantulus1220)进行检测, ^{34}S 利用气体同位素质谱仪(MAT253)进行检测。阴阳离子平衡误差小于 3%,测试环境 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 31%。

3 方法与讨论

3.1 地热流体水化学特征

3.1.1 地热流体离子组分

蔚县盆地地热流体出水温度为 $26 \sim 43\text{ }^{\circ}\text{C}$,属低温热水;pH 值为 $7.46 \sim 8.00$,呈弱碱性;溶解性固溶体(total dissolved solids, TDS) 为 $212.48 \sim 931.20\text{ mg/L}$,平均值为 533.65 mg/L ,属淡水、微咸水(表 1)。

壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区地热流体阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主;壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区的地热流体阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主;松枝口—右所堡断裂以东基岩隆起地热区的地热流体阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主。

根据图 2 可知,蔚县盆地地热流体按水化学类型主要分为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$,不同构造单元地热流体水化学类型不同。其中,暖泉地热井和卜南堡地热井均位于壶流河断裂以北单斜构造局部基

表 1 蔚县盆地地热流体主要指标测试结果

Tab.1 Test results of main indexes of geothermal fluids in Yuxian Basin

井号	含量/(mg·L ⁻¹)								pH 值	水化学类型
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS		
暖泉	2.37	32.70	58.90	29.00	19.90	66.50	301.40	212.48	7.81	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
卜南堡	2.60	33.80	54.55	27.87	14.00	67.40	277.40	506.70	7.60	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
北洗冀	4.65	39.31	69.30	24.55	29.97	93.64	264.40	554.20	7.46	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Ca·Mg ²⁺
织锦幢	6.33	67.87	51.10	18.78	51.12	97.24	221.90	546.00	7.54	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ ·Ca ²⁺
麦子幢 DR1	7.56	32.31	39.37	22.89	10.15	43.59	250.40	443.20	7.58	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺ ·Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
麦子幢 DR2	5.88	246.00	7.00	4.88	29.47	122.40	468.90	931.20	8.00	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺
麦子幢 R1	5.02	55.50	56.85	21.37	26.61	86.97	271.50	541.80	7.57	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ ·Ca ²⁺

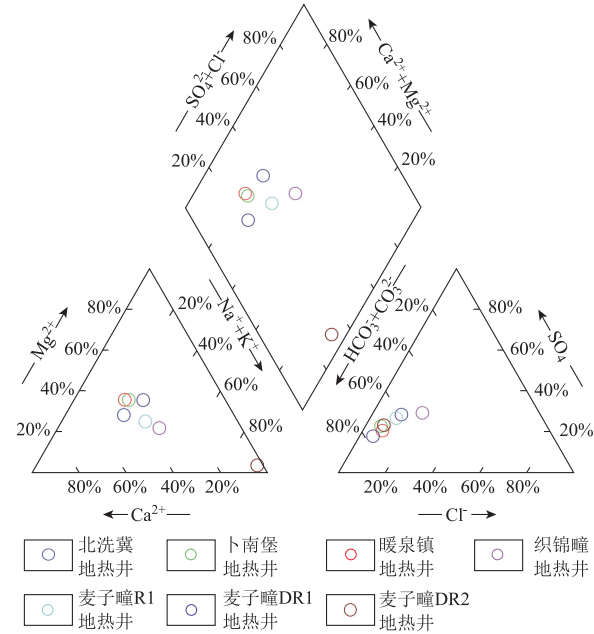


图 2 蔚县盆地地热流体 Piper 三线图

Fig.2 Piper triplex diagram of geothermal fluid in Yuxian Basin

岩隆起地热区,水化学类型相同,均为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 。北洗冀地区虽区位与暖泉和卜南堡相同,但其受基岩隆起和松枝口—右所堡断裂的影

响,地热流体溶滤作用不同,使得该地区地热流体水化学类型不同于暖泉和卜南堡地区,为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 。织锦幢地区与北洗冀地区均属于基岩隆起区,但二者由松枝口—右所堡断裂隔开,加之松枝口—右所堡断裂以东构造抬升,故水化学类型不同于北洗冀地区,为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 。麦子幢地区属于壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区,麦子幢 R1 地热井和麦子幢 DR1 地热井、麦子幢 DR2 地热井的开采层位不同,麦子幢 R1 地热井开采层位为蔚县系雾迷山组,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$,和织锦幢地热井水化学类型相同,麦子幢 DR1 地热井和麦子幢 DR2 地热井开采层位为蔚县系高于庄组,水化学类型分别为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 。

3.1.2 地热流体元素间相关性

本文利用 SPSS 软件对蔚县盆地地热流体中的 pH 值、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 F^- 、溶解性总固体进行元素间皮尔逊(Pearson)相关性分析(表 2),并绘制 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ 阳离子相关关系图(图 3)。

表 2 蔚县盆地地热流体元素间相关性分析

Tab.2 Correlation analysis among geothermal fluid elements in Yuxian Basin

项目	pH 值	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	TDS
pH 值	1									
K ⁺	-0.118	1								
Na ⁺	0.771 *	0.284	1							
Ca ²⁺	-0.767 *	-0.456	-0.882 **	1						
Mg ²⁺	-0.585	-0.550	-0.948 **	0.865 *	1					
Cl ⁻	-0.107	0.254	0.268	0.011	-0.395	1				
SO ₄ ²⁻	0.374	0.101	0.769 *	-0.401	-0.756 *	0.699	1			
HCO ₃ ⁻	0.897 **	-0.025	0.904 **	-0.800	-0.741	-0.075	0.586	1		
F ⁻	0.601	0.617	0.768 *	-0.934 **	-0.794 *	-0.094	0.266	0.683	1	
TDS	0.375	0.426	0.864 *	-0.723	-0.902 **	0.319	0.776 *	0.676	0.674	1

注：“*”为在 0.01 水平(双侧)上显著相关;“*”为在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

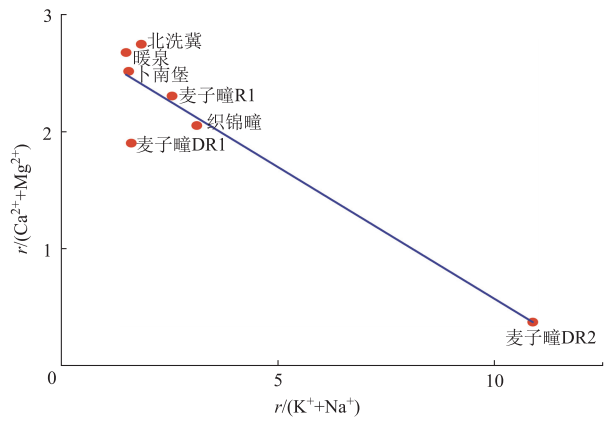


图3 蔚县盆地地热流体($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)与($\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$)阳离子交替吸附作用

Fig.3 Alternate adsorption of ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) and ($\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$) cations in geothermal fluid of Yuxian Basin

由表 2 可知,蔚县盆地地热流体中 pH 与 HCO_3^- 呈极显著正相关性, Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈极显著负相关性,与 HCO_3^- 呈极显著正相关性。一般地下水中, K^+ 比 Na^+ 活跃,阳离子交替吸附作用可使 K^+ 将部分 Na^+ 置换出来,导致地下水中 Na^+ 含量较高,通常 K^+ 含量为 Na^+ 含量的 10%。该地区热储层岩性和地热流体取水层位为蔚县系雾迷山组白云岩和蔚县系高于庄组白云岩,白云岩主要由白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)组成,其受高温和水岩溶滤

作用进入地热流体中,可导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较高。由图 3 可知,地热流体中阳离子交替吸附作用方向为 K^+ 、 Na^+ 进入液相, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进入固相^[15]。综上分析,蔚县盆地地热流体中存在阳离子交替吸附作用,其中 K^+ 含量低于 Na^+ 含量, Na^+ 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量相对较高,并处于一个此消彼长、相互抑制状态,且随地热流体 pH 值增高, Na^+ 含量增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量降低。

F^- 与 Ca^{2+} 呈极显著负相关性,分析认为,地热流体中 F^- 含量受 Ca^{2+} 含量影响较大。在 HCO_3^- 占优势的碱性环境中有利于含氟矿物中可交换的 F^- 被水中的羟基置换而进入水环境^[16],即 $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaF}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^-$,碱性条件有利于水体中的 Ca^{2+} 以 CaCO_3 的形式脱离溶液体系,从而使得平衡向含氟矿物(萤石)溶解的方向进行,导致 F^- 浓度增加。

TDS 与 Mg^{2+} 呈极显著负相关性,分析认为,地热流体中 TDS 受 Mg^{2+} 含量影响较大。

3.1.3 地热流体特征系数

地热流体特征系数可反映地层封闭程度、地热流体变质和浓缩程度,用以分析地热流体的运移和赋存环境^[17]。本次计算了蔚县盆地地热流体的特征系数,如表 3 所示。

表 3 蔚县盆地地热流体特征系数

Tab.3 Geothermal fluid characteristic coefficients in Yuxian Basin

井号	变质系数 ($r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$)	脱硫系数(100r ($\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$)	盐化系数($r(\text{Cl}^-)/$ $r(\text{HCO}_3^-) + r(\text{CO}_3^{2-})$)	$r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/$ $r(\text{HCO}_3^-)$	$r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/$ $r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$
暖泉	2.54	123.21	0.11	0.54	0.47
卜南堡	3.68	175.00	0.09	0.55	0.48
北洗冀	2.01	114.71	0.20	0.63	0.52
织锦疃	2.05	70.14	0.40	0.56	0.44
麦子疃 DR1	4.86	156.89	0.07	0.46	0.42
麦子疃 DR2	12.89	153.61	0.11	0.05	0.04
麦子疃 R1	3.21	120.67	0.17	0.52	0.43

(1) 变质系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 。变质系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 可用来反映地热水变质程度和水化学环境,系数越小,地层封闭性越好,地热水越浓缩,变质程度越高,越为还原水体环境;系数越大,反映为地热水受渗入水影响越大,渗入水影响越强烈^[18]。标准海水和海相沉积水系均值为 0.85,含岩盐地层溶滤水值为 1^[19]。蔚县盆地地热流体变质系数为 2.01 ~ 12.89,均值为 4.46。蔚县盆地主要断裂较多,次级断裂发育。蔚县延庆

断裂,正断裂,为多期活动区域性大断裂;月山向斜断裂,正断裂,与蔚县延庆断裂一起控制了蔚县“块断”的演化,为阳原盆地与蔚县盆地地下水径流通道天然屏障;壶流河断裂,正断裂,其周围次级断裂发育;松枝口—右所堡断裂,正断裂,断距较大,为区域性大断裂;大湾—暖泉断裂,曾具有平移和挤压双重性质,南段活动增强,一定程度上阻滞了断裂两侧地下水流通;白草窑—九宫口断裂,为左行平移正断裂。综上,盆地内断裂均为正断裂,开放性大断裂,

次级断裂发育,地热井均位于断裂交汇处或次级断裂延伸地带。分析认为,蔚县盆地地层封闭性较差,地热流体未浓缩,变质程度较低,受渗入水影响较大。

(2)脱硫系数($100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$)。脱硫系数($100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$)可用来指示地热流体氧化还原环境,数值越小,地层封闭性越好,为还原环境^[17]。脱硫系数($100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$) = 1 可作为还原条件好坏的界线指标,脱硫系数($100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$) < 1,表明地热流体处于封闭环境,还原作用较好,反之,则表明还原作用较差,可能受浅表层氧化作用影响^[18]。蔚县盆地地热流体脱硫系数($100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$)为70.14~175.00,数值远大于1,结合断裂分布特征,地层开放性较好,分析认为,蔚县盆地地热流体还原作用较差,受浅表层氧化作用影响较大。

(3)盐化系数($r(\text{Cl}^-)/r(\text{HCO}_3^-) + r(\text{CO}_3^{2-})$)。盐化系数($r(\text{Cl}^-)/r(\text{HCO}_3^-) + r(\text{CO}_3^{2-})$)可反映地热流体浓缩程度。盐化系数越大,矿化度相应增大,浓缩程度越高^[18]。蔚县盆地地热流体盐化系数($r(\text{Cl}^-)/r(\text{HCO}_3^-) + r(\text{CO}_3^{2-})$)为0.07~0.40,表明蔚县盆地地热流体浓缩程度相差不大,均较低。

(4) $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^-)$ 和 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 。 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^-)$ 和 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 可表明碳酸盐岩的溶解或沉淀^[20-21]。蔚县盆地地热水样主要位于 $2r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = r(\text{HCO}_3^-)$ 线附近(图4),由于蔚县盆地蔚县系岩性主要为白云岩,所以地热流体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩类矿物的溶解。 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 较 $r(\text{HCO}_3^- +$

$\text{SO}_4^{2-})$ 偏低,可能与地热流体中发生阳离子交替吸附作用有关,使其中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换至岩石导致含量相对减少^[21]。

3.2 地热流体同位素地球化学特征

3.2.1 氢氧同位素组成特征及意义

本次将地热水、地下水、雨水氢氧同位素数据绘制成 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图5)。由图5可知,地热水、地下水、雨水的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 数据点均分布于中国大气降水线附近,未发生明显氧飘移,表明蔚县盆地地下热水和地下冷水的补给来源均为大气降水。蔚县盆地地热水为开放型地热水,大气降水入渗后经深循环在大地热流加热作用下形成地热水,属于正常地热增温型地热资源^[24]。

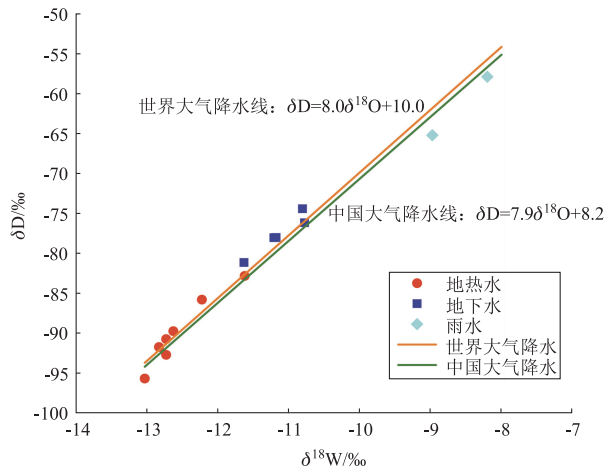


图5 地热水氢氧同位素与大气降水关系^[22-23]

Fig.5 Relationship between hydrogen and oxygen isotopes of geothermal water and atmospheric precipitation^[22-23]

3.2.2 氢氧同位素与热储埋深和温度关系

根据样品测试结果,分别绘制了 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与热储埋深和温度关系图(图6,图7)。由图6和图7可知,蔚县盆地不同地热区地热流体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大,蔚县系雾迷山组地热流体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量随着深度的增加而增大,而蔚县系高于庄组地热流体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量与热储温度关系不显著。

3.2.3 同位素³H、¹⁴C和³⁴S特征分析

由表4可知,蔚县盆地地热流体³H均<1,表明该地热,充体主要为1952年以前补给的地下水^[25]。蔚县盆地地热流体表观年龄为(16.81±0.48)~(39.27±3.24) ka,属于典型盆地型地下水,各地热区地热流体表观年龄相差较大。暖泉、麦子疃DR1、

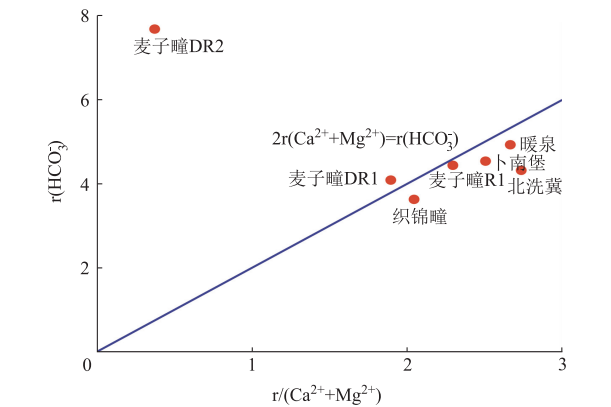


图4 蔚县盆地地热流体 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $r(\text{HCO}_3^-)$ 的关系

Fig.4 Relationship between geothermal fluid $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $r(\text{HCO}_3^-)$ in Yuxian Basin

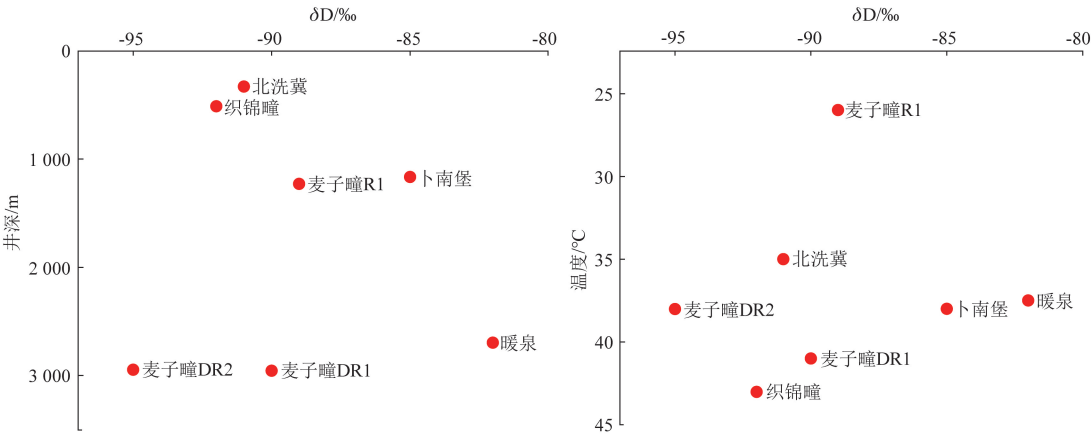


图 6 δD 与热储埋深 (左) 及温度 (右) 关系

Fig. 6 Relationship between δD and heat storage depth (left) and temperature (right)

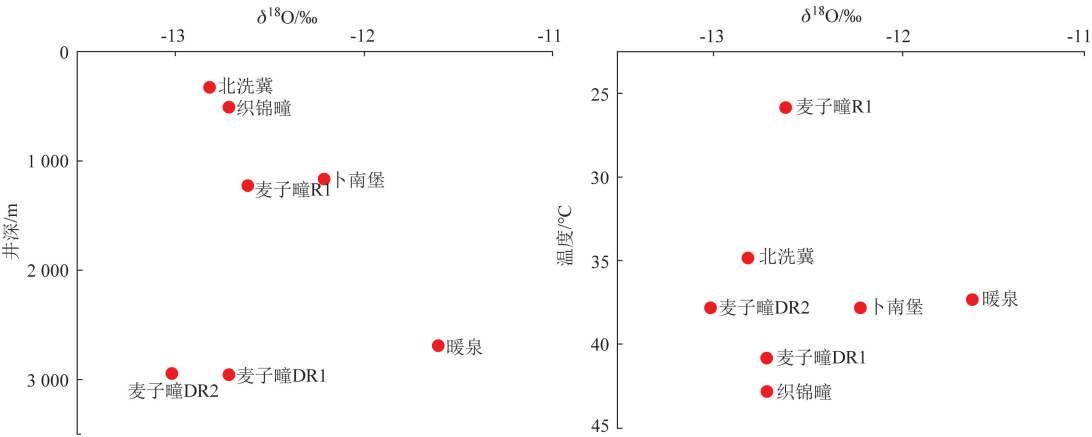


图 7 $\delta^{18}O$ 与热储埋深 (左) 及温度 (右) 关系

Fig. 7 Relationship between $\delta^{18}O$ and thermal reservoir depth (left) and temperature (right)

表 4 3H 、 ^{14}C 和 ^{34}S 同位素特征分析

Tab. 4 Isotopic characteristic analysis of 3H , ^{14}C and ^{34}S					
井号	井深/m	$^3H/TU$	现代 ^{14}C 含量/%	表观年龄/ka	$^{34}S/‰$
暖泉	2 693	<1	(4.46 ± 0.78)	(25.70 ± 1.44)	26.7
卜南堡	1 167	<1	(0.86 ± 0.34)	(39.27 ± 3.24)	8.7
北洗冀	230 ~ 330	<1	(0.94 ± 0.43)	(38.54 ± 3.70)	7.9
织锦幢	510	<1	(1.21 ± 0.34)	(36.47 ± 2.28)	9.2
麦子幢 DR1	2 953	<1	(11.53 ± 0.75)	(17.86 ± 0.75)	18.3
麦子幢 DR2	2 942	<1	—	—	16.2
麦子幢 R1	1228	<1	(13.09 ± 0.75)	(16.81 ± 0.48)	8.2

注：“—”为无数据。

麦子幢 DR2 地热流体 ^{34}S 远大于卜南堡、北洗冀、织锦幢、麦子幢 R1，而暖泉、麦子幢 DR1、麦子幢 DR2 的井深和取水层位也远大于卜南堡、北洗冀、织锦幢、麦子幢 R1。分析认为，外生条件下，厌氧细菌

还原硫酸盐产生的硫化氢富集 ^{32}S ，而残留的硫酸盐聚集 ^{34}S 。内生条件下，重同位素 ^{34}S 趋于聚集在高当量硫的化合物中^[26]。故 ^{34}S 在较封闭的热储环境中富集，与封闭环境中硫酸盐还原为硫化物的无机和有机过程中发生的硫同位素分馏作用，地质环境越封闭，水岩作用越强，硫酸盐还原作用还原势越大，越有利于地下热水中 ^{34}S 的富集^[25]。暖泉、麦子幢 DR1、麦子幢 DR2 的井深和取水层位大于卜南堡、北洗冀、织锦幢、麦子幢 R1，故井越深，深层地热环境较浅层地质环境越封闭，水岩作用越强，硫酸盐还原作用还原势越大，越有利于地下热水中 ^{34}S 的富集。

3.3 地热补给及循环特征

3.3.1 地热流体补给高程和补给区

高程效应即大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值随当地海拔高度增加而减少^[27]。地热流体补给区海拔高程计算公式如下^[28]

$$H = (S - P)/K + h \quad (1)$$

式中： H 为地热流体补给区高程，m； S 为水样的 δD 值或 $\delta^{18}O$ 值，‰； P 为地区大气降水 δD 值或 $\delta^{18}O$ 值，‰（蔚县大气降水取2021年9月雨水实测数据， δD 均值为 -61.49‰ ； $\delta^{18}O$ 均值为 -8.59‰ ）； K 为同位素高程梯度，‰/100 m（ $\delta^{18}O$ 取 $-0.30\text{‰}/100\text{ m}$ ， δD 取 $-2.5\text{‰}/100\text{ m}$ ）^[29]； h 为采样点高程，m。

由表5可知，蔚县盆地地热流体补给高程约1 844~2 422 m，与蔚县南山高程1 700~2 100 m和月山高程1 700~2 000 m相近^[30]。蔚县盆地地势平缓，海拔高差较小，地热流体总体由南北向中

部径流，结合壶流河断裂阻水情况，分析壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区补给区主要为蔚县西北方向阳原南山（月山）山区，松枝口—右所堡断裂以东基岩隆起地热区补给区主要为蔚县东北方向山区，壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区补给区主要为蔚县南部蔚县南山山区。此外，山西广灵县地势较蔚县盆地地势高，二者间为大湾—暖泉断裂，北侧断裂活动较南侧断裂弱，其阻水性南侧强于北侧，故分析受区域地形地貌影响，壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区地热流体还部分来源于山西广灵县境内。

表5 蔚县盆地地热流体补给高程

Tab.5 Geothermal fluid recharge elevation in Yuxian Basin

单元	井号	井口高程/m	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	δD 计算高程/m	$\delta^{18}O$ 计算高程/m	平均值/m
壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区	暖泉	912	-83	-11.6	1 772	1 915	1 844
	卜南堡	892	-86	-12.2	1 872	2 095	1 984
	北洗冀	872	-92	-12.8	2 092	2 275	2 184
松枝口—右所堡断裂以东基岩隆起地热区	织锦瞳	941	-93	-12.7	2 201	2 311	2 256
壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区	麦子瞳 DR1	998	-91	-12.7	2 178	2 368	2 273
	麦子瞳 DR2	997	-96	-13.0	2 377	2 467	2 422
	麦子瞳 R1	983	-90	-12.6	2 123	2 320	2 222

3.3.2 热储温度和循环深度估算

(1)水岩相互作用。地热温标常用来估算深部地热流体热储温度，但前提是地热流体中离子需达到平衡状态，因此计算热储温度前应对地热流体水岩平衡状态进行判断^[31]。本文利用Na-K-Mg三角图解判断水-岩平衡状态及是否有冷水混入，将地热流体分为完全平衡、部分平衡和未成熟水3种类型^[32]。由图8可知，研究区地热流体均位于未成熟水区域，表明热流体与围岩介质相互作用未达到平衡状况，阳离子地热温标不适宜估算区内热储温度^[33]。

(2)热储温度。因阳离子温标不适用于蔚县盆地热储温度的计算，故采用SiO₂地热温标计算热储温度。本次列举了以下6种SiO₂地热温标计算公式（表6），计算结果如表7所示。

由表7可知，蔚县盆地属低温地热系统，适用无蒸汽损失计算公式，但单独采用石英无蒸汽损失或玉髓无蒸汽损失均误差较大，故选用1/2（石英无蒸汽损失+玉髓无蒸汽损失）地热温标计算热储温度，其计算结果更接近实测井底温度，符合实际情况，但暖泉计算结果小于实测井口温度，故暖泉

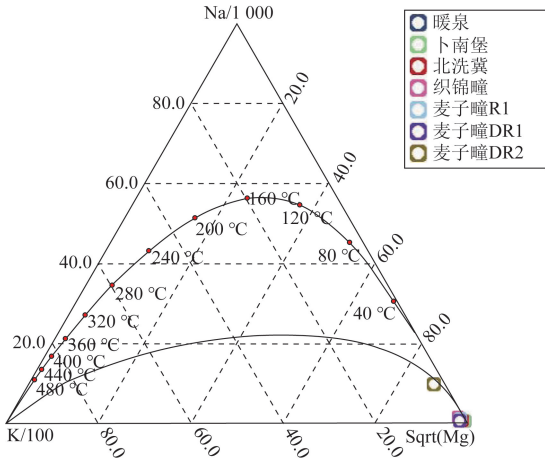


图8 蔚县盆地地热流体Na-K-Mg三角图解
Fig.8 Na-K-Mg triangle diagram of geothermal fluid in Yuxian Basin

以测井温度44.04℃^[36]作为热储温度，除测井实测温度作为热储温度外，其余以1/2（石英无蒸汽损失+玉髓无蒸汽损失）地热温标计算结果作为热储温度。

(3)循环深度。地热流体最大循环深度计算公式^[17]

$$H = (t - t_0)/t_e - h \quad (2)$$

表 6 SiO₂ 地热温标经验公式

Tab.6 Empirical formula of SiO₂ geothermometer

地热温标	公式	适用范围
石英无蒸汽损失 ^[34]	$T=1\ 309/(5.19-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	0~250℃
石英蒸汽损失 ^[34]	$T=1\ 522/(5.75-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	0~250℃
玉髓无蒸汽损失 ^[34]	$T=1\ 032/(4.69-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	0~250℃
玉髓蒸汽损失 ^[35]	$T=1\ 264/(5.31-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	—
α-方解石 ^[34]	$T=1\ 000/(4.78-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	—
无定形 SiO ₂ ^[34]	$T=731/(4.52-\lg\text{SiO}_2)-273.15$	—

注：“—”为无数据。

表 7 蔚县盆地热储 SiO₂ 地热温标计算结果

Tab.7 Calculation results of SiO₂ geothermometer for thermal reservoir in Yuxian Basin

井号	偏硅酸/ (ng·L ⁻¹)	二氧化硅/ (ng·L ⁻¹)	石英无蒸 汽损失/℃	石英蒸汽 损失/℃	玉髓无蒸汽 损失/℃	玉髓蒸汽 损失/℃	α-方解 石/℃	无定形二 氧化硅/℃	实测井口 温度/℃	实测井底 温度/℃	1/2(石英无蒸汽损失+ 玉髓无蒸汽损失)/℃
暖泉	19.90	15.31	53.68	60.25	21.28	33.27	5.01	-53.97	37.50	44.04 ^[36]	37.48
卜南堡	26.16	20.12	63.67	69.16	31.61	42.35	14.51	-45.87	38.00	—	47.64
北洗冀	23.81	18.32	60.17	66.04	27.97	39.17	11.17	-48.72	35.00	—	44.07
织锦瞳	31.68	24.37	71.04	75.68	39.28	49.04	21.56	-39.84	43.00	—	55.16
麦子瞳 DR1	29.70	22.85	68.52	73.45	36.65	46.75	19.15	-41.91	41.00	52.50 ^[37]	52.58
麦子瞳 DR2	33.45	25.73	73.19	77.58	41.53	50.99	23.63	-38.07	38.00	53.10 ^[37]	57.36
麦子瞳 R1	19.81	15.24	53.52	60.11	21.11	33.12	4.85	-54.09	26.00	30~40	37.32

注：“—”为无数据。

表 8 蔚县盆地蔚县系热储最大循环深度估算

Tab.8 Estimation of the maximum circulating depth of Jixian thermal reservoir in Yuxian Basin

分区	井号	热储地层	实测井口 温度/℃	实测井底 温度/℃	热储温度 <i>t</i> /℃	恒温带温 度 <i>t</i> ₀ /℃	恒温带深 度 <i>h</i> /m	地温梯度 <i>t</i> _e / (℃/100 m)	最大循环 深度 <i>H</i> /m
壶流河断裂以北单斜 构造局部基岩隆起地 热区	暖泉	Jxw	37.50	44.04	44.04	9.2	40	1.30 ^[12]	2 640
	卜南堡	Jxw	38.00	—	47.64	9.2	40	2.19 ^[38]	1 715
	北洗冀	Jxw	35.00	—	44.07	9.2	40	—	—
松枝口—右所堡断裂 以东基岩隆起地热区	织锦瞳	Jxw	43.00	—	55.16	9.2	40	—	—
壶流河断裂以南断陷 盆地层状热储地热区	麦子瞳 DR1	Jxg	41.00	52.50	52.50	9.2	40	1.30 ^[12]	3 291
	麦子瞳 DR2	Jxg	38.00	53.10	53.10	9.2	40	1.30 ^[12]	3 337
	麦子瞳 R1	Jxw	26.00	30~40	37.32	9.2	40	1.29 ^[37]	2 140

注：“—”表示无数据；Jxw 表示蔚县系雾迷山组白云岩地层；Jxg 表示蔚县系高于庄组白云岩地层。

3 291~3 337 m,均值 3 314 m,与李泓泉等^[12]计算的麦子瞳附近地热流体最大循环深度 3 500 m 相近。

4 结论与讨论

(1)蔚县盆地地热流体属低温热水,呈弱碱性,为淡水、微咸水。地热流体中阳离子以 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 为主。其中,Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 主要源于碳酸盐岩类矿物的溶解。受地质构造影响,各地热区地热流体水化学类型不同。

式中:*H* 为地热流体最大循环深度,m;*t* 为热储温度,℃;*t*₀ 为恒温带温度,℃,恒温带温度取 9.2℃^[37]; *t*_e 为地温梯度,℃/100 m;*h* 为恒温带深度,m,恒温带深度取 40 m^[37]。

由表 8 可知,蔚县盆地壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区西部蔚县系雾迷山组热储最大循环深度约 1 715~2 640 m;壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区蔚县系雾迷山组热储最大循环深度约 2 140 m,高于庄组热储最大循环深度约

(2)蔚县盆地地热流体中存在阳离子交替吸附作用,作用方向为 K⁺、Na⁺ 进入液相,Ca²⁺、Mg²⁺ 进入固相,Na⁺ 与 Ca²⁺、Mg²⁺ 处于此消彼长、相互抑制的状态。地热流体中 F⁻ 含量受 Ca²⁺ 含量影响较大,TDS 受 Mg²⁺ 含量影响较大。

(3)蔚县盆地地质构造复杂,断裂繁多,热储地层封闭性较差,地热流体浓缩程度和变质程度较低,受渗入水及浅表层氧化作用影响显著。地热流体为开放型热水,补给来源主要为大气降水入渗径流补给,径流路径较短,水循环较快。壶流河断裂以北单斜构造局部基岩隆起地热区补给区主要为蔚县西北方向阳原南山(月山)山区和山西广灵县,

松枝口—右所堡断裂以东基岩隆起地热区补给区主要为蔚县东北方向山区,壶流河断裂以南断陷盆地层状热储地热区补给区主要为蔚县南部蔚县南山山区。

(4)蔚县盆地热储温度选用 $1/2$ (石英无蒸汽损失 + 玉髓无蒸汽损失) 计算热储温度更为合适,蔚县系热储温度为 $37.32 \sim 57.36\text{ }^{\circ}\text{C}$,蔚县系雾迷山组热储最大循环深度为 $1\,715 \sim 2\,640\text{ m}$,蔚县系高于庄组热储最大循环深度为 $3\,291 \sim 3\,337\text{ m}$,均值为 $3\,314\text{ m}$ 。

(5)蔚县盆地地热井数量较少,地热流体水样数据量相对不足;北洗冀、织锦瞳地热井钻井资料缺失,深层地热井蔚县系雾迷山组和高于庄组划分不清,地层数据精度有待提高。建议在条件允许的情况下,于北洗冀、织锦瞳地区打凿地热井并进行地层编录与地热流体水样采集测试,弥补部分小区数据精度不足的情况。

致谢: 本文撰写期间,得到众多专家指导,感谢河北省地质矿产勘查开发局正高级工程师田文法、刘志刚的指导,感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所研究员张千千的指导。

参考文献 (References):

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘,2020,27(1):1-9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 汪洋,张旭虎,蒲丛林,等. 河北廊坊南部地区地热水化学特征及成因机制[J]. 地质通报,2022,41(9):1698-1706.
Wang Y, Zhang X H, Pu C L, et al. The hydrochemical characteristics of geothermal water and its formation in the south Langfang, Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1698-1706.
- [3] 徐世光,郭远生. 地热学基础[M]. 北京:科学出版社,2009.
Xu S G, Guo Y S. Fundamentals of Geothermal[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [4] 窦斌,田红,郑君. 地热工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2020.
Dou B, Tian H, Zheng J. Geothermal Engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.
- [5] 汪集旸,熊亮萍,庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993.
Wang J Y, Xiong L P, Pang Z H. Low-Medium Temperature Geothermal System of Convective Type[M]. Beijing: Science Press,

1993.

- [6] 牛兆轩,牛雪,张成龙,等. 唐山市滨海地区地下热水水化学特征及循环深度[J]. 中国地质调查,2022,9(6):84-92.
Niu Z X, Niu X, Zhang C L, et al. Hydrochemical characteristics and circulation depth of geothermal water in coastal area of Tangshan City[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(6): 84-92.
- [7] 袁利娟,张进平,何云成,等. 北京市通州区地热流体水化学和同位素特征及其地热学意义[J]. 地质论评,2021,67(5):1545-1556.
Yuan L J, Zhang J P, He Y C, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics of geothermal fluids in Tongzhou District, Beijing, and their geothermal significance[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1545-1556.
- [8] 李业震. 蔚县地热地质特征及地热资源开发利用[J]. 中国煤田地质,2004,16(S1):72-73.
Li Y Z. Geothermal geologic features and geothermal resource exploitation in Yuxian[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(S1): 72-73.
- [9] 王国晨,夏华宗,李贝德. 蔚县北洗冀地热异常区热储特征分析[J]. 科技视界,2016(9):261,291.
Wang G C, Xia H Z, Li B D. Analysis of heat storage characteristics in Beixiji Hebei geothermal anomaly area, Yuxian County[J]. Science & Technology Vision, 2016(9): 261, 291.
- [10] 周江. 蔚县盆地地热成因分析[J]. 煤炭科技,2019,40(5):6-10.
Zhou J. Analysis on geothermal genesis of Yuxian Basin[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2019, 40(5): 6-10.
- [11] 郝星波. 蔚县盆地地下水热赋存地质特征及开发利用前景探讨[J]. 地下水,2019,41(3):39-40,53.
Hao X B. Geological characteristics of underground hot water occurrence and prospect of development and utilization in Yuxian Basin[J]. Ground Water, 2019, 41(3): 39-40, 53.
- [12] 李泓泉,张树胜,谢明忠,等. 冀西北蔚县盆地地热资源赋存特征及勘查开发方向[J]. 地质论评,2020,66(4):919-932.
Li H Q, Zhang S S, Xie M Z, et al. The occurrence characteristics and exploration and development direction of geothermal resources in Yuxian Basin, northwest Hebei Province[J]. Geological Review, 2020, 66(4): 919-932.
- [13] 河北省地矿局国土资源勘查中心. 张家口市地热资源分布规律与开发利用研究[R]. 2014.
Hebei Province Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration Center. Research Report on the Distribution and Exploitation of Geothermal Resources in Zhangjiakou City[R]. 2014.
- [14] 国家能源局. NB/T 10716—2021 地热流体样品的采集与保存规范[S]. 北京:中国石化出版社,2021.
National Energy Administration. NB/T 10716—2021 Specification for Collection and Preservation of Geothermal Fluid Samples[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.
- [15] 张薇,王贵玲,赵佳怡,等. 四川西部中高温地热流体地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质,2021,35(1):188-198.
Zhang W, Wang G L, Zhao J Y, et al. Geochemical characteristics

- of medium – high temperature geothermal fluids in west Sichuan and their geological implications [J]. *Geoscience*, 2021, 35 (1): 188 – 198.
- [16] 孙红丽, 马峰, 刘昭, 等. 西藏高温地热显示区氟分布及富集特征[J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (1): 251 – 259.
- Sun H L, Ma F, Liu Z, et al. The distribution and enrichment characteristics of fluoride in geothermal active area in Tibet [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35 (1): 251 – 259.
- [17] 朱喜, 王贵玲, 马峰, 等. 太行山—雄安新区蓟县系含水层水文地球化学特征及意义[J]. *地球科学*, 2021, 46 (7): 2594 – 2608.
- Zhu X, Wang G L, Ma F, et al. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Taihang Mountain – Xiong'an new area and its indicating significance [J]. *Earth Science*, 2021, 46 (7): 2594 – 2608.
- [18] 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 B J. Hydrogeochemical Characteristics and Formation Conditions of the Geothermal Water in Northwestern Shandong Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [19] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- Shen Z L. Basis of Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [20] 江露露, 隋海波, 康凤新, 等. 鲁中隆起北缘地热区岩溶热储水化学特征及形成机理[J]. *中国岩溶*, 2023, 42 (5): 1005 – 1026, 1036.
- Jiang L L, Sui H B, Kang F X, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of the karst thermal reservoir at the northern edge of the Luzhong Uplift [J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42 (5): 1005 – 1026, 1036.
- [21] 赵子锐, 张薇, 王贵玲, 等. 冀中拗陷高阳地热田水文地球化学特征及其对地热成因的约束[J/OL]. *中国地质*, (2023 – 08 – 01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230731.1742.006.html>.
- Zhao Z R, Zhang W, Wang G L, et al. Hydrogeochemical characteristics of Gaoyang geothermal field in central Hebei Depression and its constraint on geothermal genesis [J/OL]. *Geology of China*, (2023 – 08 – 01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230731.1742.006.html>.
- [22] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133 (3465): 1702 – 1703.
- [23] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28 (13): 801 – 806.
- Zheng S H, Hou F G, Ni B L. Studies on stable isotopes of hydrogen and oxygen in atmospheric precipitation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28 (13): 801 – 806.
- [24] 陶兰初, 朱星强, 马一奇, 等. 滇东老厂地区地热水成因: 来自水化学和碳氢氧硫同位素的约束[J]. *沉积与特提斯地质*, 2023, 43 (2): 295 – 310.
- Tao L C, Zhu X Q, Ma Y Q, et al. Genesis of geothermal water in the Laochang area, eastern Yunnan Province: Constraints from hydrochemistry and C – H – O – S isotopes [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2023, 43 (2): 295 – 310.
- [25] 李泽威, 袁飞, 李明龙, 等. 水化学特征在恩施盆地地热资源调查中的指示意义[J]. *地质科技通报*, 2023, 42 (4): 83 – 94, 106.
- Li Z W, Yuan F, Li M L, et al. Indicative significance of hydrochemical characteristics in geothermal resource investigations in the Enshi Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42 (4): 83 – 94, 106.
- [26] 桂林冶金地质研究所同位素地质组. 硫同位素地质介绍[J]. *地质与勘探*, 1974 (1): 24 – 30.
- Sotope Geology Group, Guilin Institute of Metallurgical Geology. Introduction of sulfur isotope geology [J]. *Geology and Exploration*, 1974 (1): 24 – 30.
- [27] 宋小庆, 彭钦, 段启杉, 等. 黔东北地区地热水化学特征及起源[J]. *地球科学*, 2019, 44 (9): 2874 – 2886.
- Song X Q, Peng Q, Duan Q S, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of geothermal water in northeastern Guizhou [J]. *Earth Science*, 2019, 44 (9): 2874 – 2886.
- [28] 徐一鸣, 李微宇, 程立群, 等. 冀东平原馆陶组地热流体水化学成分和 H – O 同位素组成特征及其地质意义[J/OL]. *现代地质*, (2023 – 06 – 08). <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.056>.
- Xu Y M, Li A Y, Cheng L Q, et al. Characteristics of hydrochemical compositions and H – O isotopic compositions of geothermal fluids and their geological significance of the Guantao Formation in the Eastern Hebei Plain [J/OL]. *Geoscience*, (2023 – 06 – 08). <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.056>.
- [29] 周训, 金晓媚, 梁四海, 等. 地下水科学专论[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2017.
- Zhou X, Jin X M, Liang S H, et al. *Groundwater Science Monograph* [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [30] 河北省煤田地质局水文地质队. 河北省蔚县 1:5 万地质灾害风险调查评价报告[R]. 2022.
- Hydrogeology Team of Hebei Coal Field Geology Bureau. Investigation and Evaluation Report of 1:50,000 Geological Disaster Risk in Yuxian County, Hebei Province [R]. 2022.
- [31] 李洁祥, 郭清海, 余正艳. 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[J]. *地球科学*, 2017, 42 (1): 142 – 154.
- Li J X, Guo Q H, Yu Z Y. Impact of clay mineral formation in high – temperature geothermal system on accuracy of Na – K and K – Mg geothermometers [J]. *Earth Science*, 2017, 42 (1): 142 – 154.
- [32] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na – K – Mg – Ca geothermometers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52 (12): 2749 – 2765.
- [33] 王莹, 周训, 于媛, 等. 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 Y, Zhou X, Yu Y, et al. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs [J]. *Geoscience*, 2007, 21 (4): 605 – 612.
- [34] Fournier R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems [J]. *Geothermics*, 1977, 5 (1 – 4): 41 – 50.

[35]

Árnórsson S. Chemical equilibria in icelandic geothermal systems – Implications for chemical geothermometry investigations [J]. Geothermics,1983,12(2/3) :119 – 128.

[36]

河北文泉水利工程有限公司. 河北省蔚县暖泉古镇文化旅游开发有限公司地热勘查钻井竣工报告[R]. 2017.

Hebei Wenquan Water Conservancy Engineering Co. , LTD. Geothermal Exploration Drilling Completion Report of Yuxian Nuanquan Guzhen Cultural Tourism Development Co. , Ltd. [R]. 2017.

[37]

河北省煤田地质局第四地质队. 河北省蔚县麦子疃地热勘查区地热资源预可行性勘查报告[R]. 2020.

The Fourth Geological Team of Hebei Coal Field Geology Bureau. Pre – feasibility Exploration Report of Geothermal Resources in Yuxian Geothermal Exploration Area, Hebei Province[R]. 2020.

[38]

张德忠, 刘志刚, 卢红柳, 等. 河北地热[M]. 北京: 地质出版社, 2013.

Zhang D Z, Liu Z G, Lu H L, et al. Geothermal Energy in Hebei[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.

Hydrochemistry, isotope and circulation characteristics of geothermal fluids controlled by geological structure: A case study of Yuxian Basin

LI Zhenxiong, HU Bowen, WANG Zhenhua, GUO Xinxin, YU Lebin, ZHANG Xiaoxing

(Land Resources Exploration Center, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development (Hebei Mining and Geological Disaster Emergency Rescue Center), Heibei Shijiazhuang 050085, China)

Abstract: Yuxian Basin has rich geothermal resources and complex geological structures. The study on the hydrochemistry, isotope and circulation characteristics of geothermal fluids controlled by geological structures can further promote the development and utilization of geothermal resources and geothermal hot spring health care industry around the capital city. By combining groundwater and atmospheric precipitation, and using multivariate statistics, correlation and characteristic coefficient analysis, the authors studied the geothermal fluid in Yuxian Basin using Piper triplex diagram and Na-K-Mg triangle diagram. The results are as follows. ① The cations in geothermal fluid are mainly Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , and the anions are mainly HCO_3^- and SO_4^{2-} . Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- are mainly derived from the dissolution of carbonate minerals. ② A cation alternat adsorption occurred in geothermal fluid, with the action direction of K^+ , Na^+ into the liquid phase, and Ca^{2+} , Mg^{2+} into the solid phase. Na^+ and Ca^{2+} , Mg^{2+} are in a state of mutual inhibition. ③ The thermal reservoir formation is poorly sealed, the concentration degree and metamorphism degree of geothermal fluid are low, indicating a significant affection by infiltration water and shallow surface oxidation. The main source of geothermal fluid recharge is atmospheric precipitation, and the runoff path is short with fast water cycle. ④ The heat storage temperature was $37.32 \sim 57.36\text{ }^\circ\text{C}$, the maximum circulating depth of heat storage in Wumishan Formation of Jixian System was $1\,715 \sim 2\,640\text{ m}$, and the maximum circulating depth of the heat storage in Gaoyuzhuang Formation of Jixian System was $3\,291 \sim 3\,337\text{ m}$, with the average value of $3\,314\text{ m}$. The interaction between groundwater and rock under geological structure was revealed, which could provide certain guidance in studying the hydrochemical evolution and dynamic characteristics of geothermal fluid in this area.

Keywords: Yuxian Basin; geothermal fluid; hydrogeochemistry; isotope geochemistry; cycle feature
(责任编辑: 王晗)