



## 济源-开封凹陷东段馆陶组热储水化学特征及成因启示

张萌<sup>1</sup>, 秦祥熙<sup>2,3</sup>, 黄雯<sup>4</sup>, 石磊<sup>5</sup>, 郑钢<sup>1</sup>

1. 浙江陆特能源科技股份有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 东华大学, 上海 201620;
3. 百合花集团股份有限公司, 浙江 杭州 311228; 4. 浙江省国土整治中心, 浙江 杭州 310012;
5. 沧州陆特新能源科技有限公司, 河北 沧州 061000

**摘要:** 对济源-开封凹陷东段馆陶组地热水进行分析研究发现, 其水化学性质为中性水、盐水、极硬水, 以 Cl-Na 型水为主, 其化学特征、控制因素、特征系数等与上部明化镇组地热水、第四系地下水及地表水差异明显。馆陶组地热水为陆相含盐岩地层沉积型溶滤水, 赋存介质为砂岩孔隙, 区域发育的断裂、裂隙为其提供导热和运移的通道, 在大地热流的传导增温下, 不断发生溶滤作用、蒸发浓缩作用等, 同时热储层封闭性良好, 热水运移较停滞, 还原性彻底, 浓缩程度高。开封断隆内馆陶组地热水的以上特征与开封-兰考断陷相比程度更高。

**关键词:** 地热资源; 馆陶组; 水化学特征; 地下水; 热储; 济源-开封凹陷; 河北省

## HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GUANTAO GEOTHERMAL RESERVOIR IN EASTERN JIYUAN-KAIFENG SAG: Implication for Its Formation

ZHANG Meng<sup>1</sup>, QIN Xiang-xi<sup>2,3</sup>, HUANG Wen<sup>4</sup>, SHI Lei<sup>5</sup>, ZHENG Gang<sup>1</sup>

1. Zhejiang Loopmaster Energy Science & Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 2. Donghua University, Shanghai 201620, China;
3. Lily Group Co., Ltd., Hangzhou 311228, China; 4. Zhejiang Land Consolidation and Rehabilitation Center, Hangzhou 310012, China;
5. Cangzhou Loopmaster New Energy Science & Technology Co., Ltd., Cangzhou 061000, Hebei Province, China

**Abstract:** The analysis of geothermal water of Guantao Formation in eastern Jiyuan-Kaifeng sag shows that the geothermal water is hydrochemically neutral water, salt water and extra-hard water, mainly Cl-Na type, and its chemical characteristics, controlling factors and characteristic coefficients are significantly different from those in upper Minghuazhen Formation, Quaternary groundwater and surface water. The geothermal water in Guantao Formation is sedimentary type of lixiviation water in continental salt rock strata, occurred in sandstone pores, with regional faults and fissures as channels for heat conduction and migration, and terrestrial heat flow for heat conduction and warming, accompanied by constant lixiviation, evaporation and concentration. On the other hand, due to the well sealed geothermal reservoir, the migration of geothermal water is much stagnant, which contribute to the complete reducibility and higher concentration degree of geothermal water. Compared with Kaifeng-Lankao fault depression, the geothermal water in Guantao Formation of Kaifeng fault uplift shows higher degree of reducibility and concentration.

**Key words:** geothermal resources; Guantao Formation; hydrochemistry; groundwater; geothermal reservoir; Jiyuan-Kaifeng sag; Henan Province

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2023-01-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 河北省科学技术厅重点研发计划项目“地热资源分布式高效利用关键技术研究及梯级利用示范”(20374201D).

作者简介: 张萌(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地热资源综合开发利用工作, 通信地址 浙江省杭州市滨江区滨盛路 1688 号明豪大厦 29 楼, E-mail/zm110656@163.com

## 0 引言

河南省地热资源禀赋条件良好,开采潜力较大,主要分布在以济源-开封凹陷为代表的东部平原区<sup>[1-2]</sup>. 济源-开封凹陷地热资源的开发利用由来已久,众多学者<sup>[3-8]</sup>已分别对其内的武陟、原阳、郑州、中牟等地区,开展了地热资源的热储特征、赋存情况、开发利用等研究. 在其东段的开封-兰考地区内,相关研究多集中于开封市区及周边<sup>[9-11]</sup>,且受限以往的开采深度,又多针对明化镇组热储. 近年来,该区的地热资源开发向更深部的馆陶组热储延伸,开发利用规模进一步增加. 目前,在开封市、兰考县境内已建设多个馆陶组热水区域集中供热项目,围绕兰考境内馆陶组热储层的赋存规律、资源评价等研究也相继开展<sup>[12-14]</sup>,但是关于馆陶组地热水的形成条件与成因机制的研究尚存不足.

本文以济源-开封凹陷东段的开封断隆与开封-兰考断陷(涉及的行政区大致为开封市区及西部至兰考县城区)为研究区,利用2017—2020年在兰考、开封投资建设的水热型地热能区域集中供热项目所施工的馆陶组地热井信息,以馆陶组热储为研究对象,通过开展地下水的化学特征、形成作用等水文地球化学研究,探讨其赋存环境及成因特点,以期为该地区内地热资源的开发利用提供科学依据.

## 1 区域地热地质条件

济源-开封凹陷(I<sub>4</sub>)属于中朝准地台(I)之华北拗陷(I<sub>4</sub>),沿黄河呈东西向展布于济源-开封-民权一带. 区内断裂发育,近东西向的郑州-开封断裂(F2)为南部边界,古近纪时期为强活动正断层,造成区内巨厚的新生界沉积,至第四纪已停止活动<sup>[15]</sup>. 北西向的济源-商丘深大断裂(F1)为北部边界,具有多期次活动特征,且切割较深,为深部地下热能的传导及水源、热源的流通创造了有利条件<sup>[16]</sup>. 一系列的北北东向断裂自西向东将济源-开封凹陷分割为济源凹陷、武陟断凸、原阳-封丘断陷、开封断隆及开封-兰考断陷等多个断块(图1)<sup>[17]</sup>. 该区属华北地层区华北平原分区,基底主要为奥陶系、石炭系、二叠系、侏罗系及白垩系,新生代地层底板埋深2 000~5 000 m,自下而上为古近系、新近系、第四系.

区内地热资源丰富,源、通、盖、储结构完整. 热源供给为大地热流传导;区域性深大断裂为深部热源的

沟通传导与地热水的运移创造条件;浅部地层发育有多层黏土和砂质黏土层,具有保温隔热作用,形成良好的盖层;新生界地层厚度大、孔隙度高、富水性好,是良好的热储层,从上自下依次发育新近系明化镇组热储层、新近系馆陶组热储层和古近系热储层,各热储层相互独立,其间分布着弱透水层隔绝上下的连通<sup>[12]</sup>.

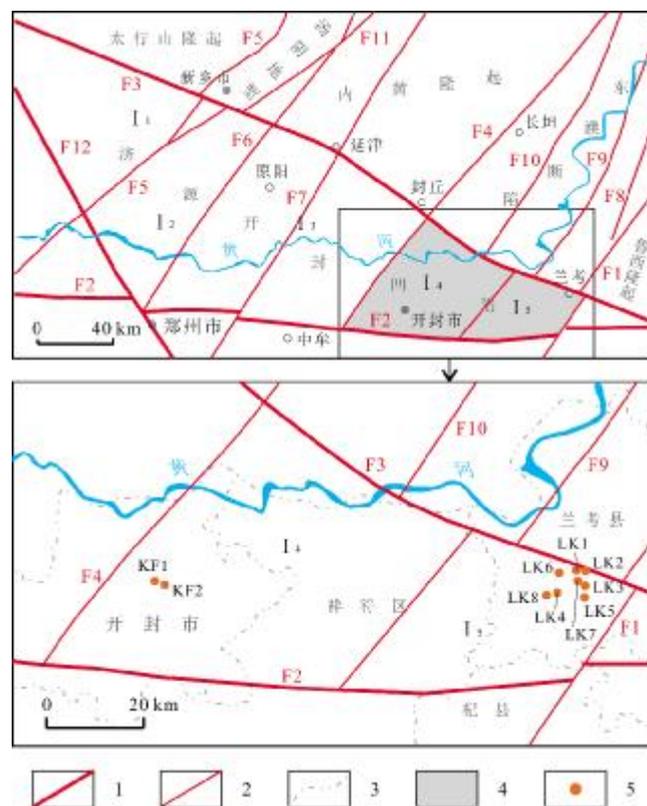


图1 研究区与地热井位置示意图  
(修改自文献[17-18])

Fig. 1 Location sketch map of the study area and geothermal wells

(Modified from References [17-18])

1—一级断裂(first-order fault); 2—次级断裂(second-order fault); 3—行政区界线(boundary of administrative region); 4—研究区(study area); 5—馆陶组热储地热井位置(location of reservoir geothermal well in Guantao fm.); I1—济源断陷(Jiyuan fault depression); I2—武陟断凸(Wuzhi fault convex); I3—原阳-封丘断陷(Yuanyang-Fengqiu fault depression); I4—开封断隆(Kaifeng fault uplift); I5—开封-兰考断陷(Kaifeng-Lankao fault depression); F1—聊城-兰考断裂(Liaocheng-Lankao fault); F2—郑州-开封断裂(Zhengzhou-Kaifeng fault); F3—新乡-商丘断裂(Xinxiang-Shangqiu fault); F4—长垣断裂(Changyuan fault); F5—太行山东麓断裂(Taihang Mountain east slope fault); F6—汤东断裂(Tangdong fault); F7—浚县-万滩断裂(Junxian-Wantan fault); F8—范西断裂(Fanxi fault); F9—黄河断裂(Huanghe fault)

## 2 馆陶组热储基本特征

研究区包括济源-开封凹陷东段的开封断隆、开封-兰考断陷(图1),区内新近系地层整体自西向东倾斜,除部分地区因人工开采造成局部降落漏斗外,区域上地热水自西向东径流<sup>[19]</sup>.馆陶组地层顶板埋深在开封断隆内自南向北逐渐变深,开封市南部约1 250 m,北部和西部可达1 700 m.馆陶组厚度从南到北约为200~800 m,兰考县境1 300~1 600 m不等,平均约1 500 m,厚度总体呈东薄西厚、北薄南厚的特点<sup>[12,19]</sup>.本研究共选用地热井10口(表1),其中开封断隆2口、开封-兰考断陷8口,地热井深均穿透馆陶组地层,取水层仅为馆陶组含水层.

开封断隆内馆陶组岩性上部为黏土夹细砂、粉细砂,下部为泥岩夹细粒砂岩、粉砂岩,顶板埋深1 450~1 520 m,地层厚度692.48~881.36 m.开封-兰考断陷内馆陶组地层岩性上部为细-中砂岩及泥岩与细砂岩互层夹粉砂岩,下部岩性为砾岩、含砾砂岩、砂砾岩、细砂岩夹粉砂岩、泥岩,顶板埋深1 260.71~1 600 m,地层厚度330.93~672.00 m.图2显示,两者馆陶组热储含水层单层厚度差异不大,但开封-兰考断陷内易出现异常大值.而两者的含水层孔隙度差别明显,开封断隆内数值相对集中且偏小,大部分集中在10.13%~12.41%区间,平均11.43%,变化幅度也不大;开封-兰考断陷内大部分数值集中在25.72%~41.27%,变化幅

度相对较大,但各地热井的平均值相差不多,为31.98%~35.91%,整体平均值为34.28%.

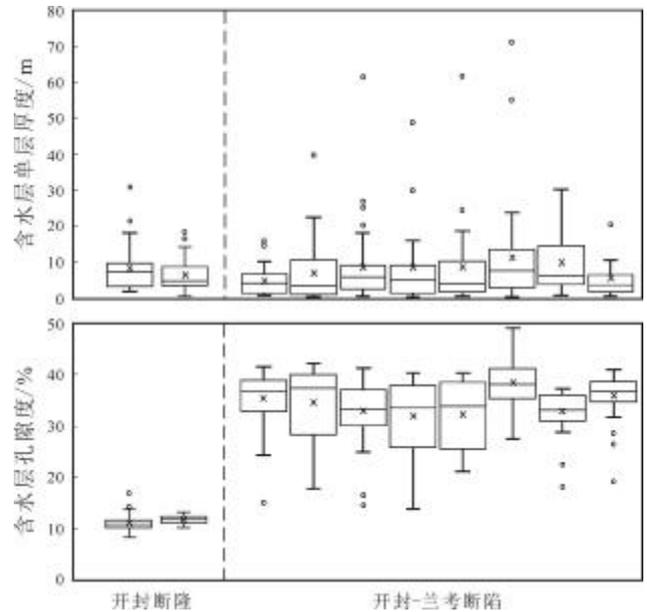


图2 不同区域馆陶组热储含水层单层厚度与孔隙度对比

Fig. 2 Comparison of thickness and porosity of geothermal reservoir single aquifer in Guantao Formation of different areas

地热井测温结果(图3)显示,垂向上研究区地温随深度加深而逐渐升高,呈现典型的传导型地温变化特点.平面上,开封断隆内馆陶组热储的盖层地温梯度为2.79~2.92 °C/hm;开封-兰考断陷内为3.25~4.06 °C/hm,

表1 馆陶组地热井基本情况

Table 1 Basic information of geothermal wells in Guantao Formation

地热井编号	开封断隆		开封-兰考断陷							
	KF1	KF2	LK1	LK2	LK3	LK4	LK5	LK6	LK7	LK8
顶板埋深/m	1520	1450	1288	1556	1300	1312	1578	1624	1261	1382
盖层地温梯度/(°C/hm)	2.79	2.92	4.06	3.55	3.25	3.50	3.53	3.31	3.31	3.76
地层厚度/m	881.36	692.48	615.80	330.83	684.00	672.00	371.97	668.10	646.22	643.75
含水层总厚度/m	351.81	252.35	156.10	270.31	197.58	233.00	320.96	306.90	353.30	358.40
静水位埋深/m	78.9	58.1	38.5	51.5	55.0	49.9	52.0	49.5	47.0	54.5
出水温度/°C	84	82	74	72	76	75	72	73	70	74
出水量/(m <sup>3</sup> /h)	96	80	103	97	130	107	120	126	131	115
单位涌水量/[m <sup>3</sup> /(h·m)]	2.08	2.21	11.49	4.20	11.82	4.13	6.35	6.67	6.78	5.35
抽水降深/m	46.1	36.1	9.0	23.1	11.0	26.0	18.9	18.9	19.3	21.5

平均 3.45 °C/hm, 高于前者(表 1). 开封断隆内馆陶组热储地热水静水位埋深 58.1~78.9 m, 井口水温 82~84 °C, 出水量 80~96 m<sup>3</sup>/h, 单位涌水量 2.08~2.21 m<sup>3</sup>/(h·m); 开封-兰考断陷内静水位埋深 38.5~55 m, 井口水温 70~76 °C, 出水量 97~131 m<sup>3</sup>/h, 单位涌水量 4.13~11.82 m<sup>3</sup>/(h·m).

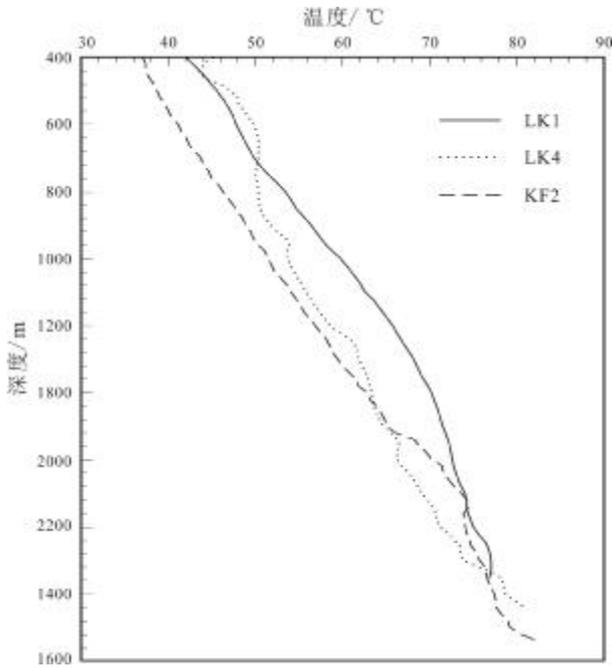


图 3 研究区地热井测温曲线

Fig. 3 Temperature logging curves of geothermal wells in the study area

综合以上分析可知, 开封断隆与开封-兰考断陷相较, 开封断隆内馆陶组热储层埋藏较深, 厚度较大, 含水层孔隙度较低, 抽水降深较大, 单井出水量和单位涌水量较低, 出水温度较高.

### 3 水化学特征及形成条件

#### 3.1 水质分析结果

研究区馆陶组地热水常量组分的测试结果见表 2, 同时选取明化镇组地热水、第四系地下水以及地表(黄河)水, 用于对比分析.

由表 2 可知, 研究区馆陶组地热水 pH 值均介于 6.5~8 之间, 属于中性水; 明化镇组地热水 pH 则略大于 8; 第四系地下水及地表水也属于中性水. 馆陶组地热水的总溶解固体(TDS)介于 10~50 g/L, 均为盐水, 总硬度(以 CaCO<sub>3</sub> 计)除 LK1 外均大于 450 mg/L, 为极

硬水, KF1 的总硬度甚至高达 10 969 mg/L. 开封断隆内明化镇组地热水和第四系地下水 TDS<1 g/L, 为淡水, 总硬度小于 150 mg/L, 为软水. 开封-兰考断陷内明化镇组地热水则为微咸水、软水, 第四系地下水为微咸水、硬水. 地表水则为淡水、硬水.

Schoeller 图(图 4)显示, 开封断隆与开封-兰考断陷内馆陶组地热水常量组分的变化趋势相同, 而与明化镇组热水、第四系地下水及地表水相异. Piper 三线图(图 5)表明馆陶组热水水化学类型明显区别于其他地下水和地表水. 除 KF1 外, 馆陶组热水水化学类型均为 Cl-Na 型, Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 占有绝对优势, 分别为首要阴离子和首要阳离子. KF1 总硬度(以 CaCO<sub>3</sub> 计)与其他馆陶组热水水样数值相差一个数量级, 水中含有大量的 Ca<sup>2+</sup>, 因此 Ca<sup>2+</sup> 成为次要阳离子, 水化学类型表现为 Cl-Na·Ca 型. 明化镇组热水中, Na<sup>+</sup> 仍为首要阳离子, 阴离子组分中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占比较大, 在开封断隆内为首要阴离子, 在开封-兰考断陷内为次要阴离子. 第四系地下水中 Cl<sup>-</sup> 占比均低于 25%, 不表现在水化学类型中, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 在阳离子中的占比较高, 超过 25%. 地表水的水化学类型则为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca 型.

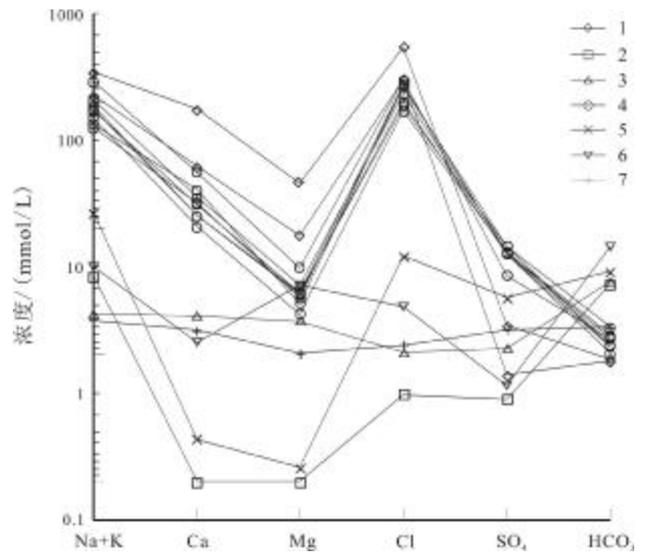


图 4 研究区水样 Schoeller 图

Fig. 4 Schoeller diagram of water samples from the study area 1~3—开封断隆区 (Kaifeng fault uplift area); 4~6—开封-兰考断陷区 (Kaifeng-Lankao fault depression area); 1,4—馆陶组地热水 (geothermal water in Guantao fm.); 2,5—明化镇组地热水 (geothermal water in Minghuazhen fm.); 3,6—第四系地下水 (Quaternary groundwater); 7—地表水 (surface water)

表 2 地热水主要离子测试结果

Table 2 Test results of main ions in geothermal water

分区	地热井	取水层	pH	TDS/(mg/L)	总硬度/(mg/L)	(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/(mmol/L)	Ca <sup>2+</sup> /(mmol/L)	Mg <sup>2+</sup> /(mmol/L)	Cl <sup>-</sup> /(mmol/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mmol/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mmol/L)	水化学类型
开封断隆	KF1	Ng	6.7	31393.00	10969.00	339.72	174.00	44.79	542.47	3.42	1.85	Cl-Na-Ca
	KF2	Ng	7.2	17421.7	3932.00	221.90	61.33	17.30	298.51	1.38	1.77	Cl-Na
	*CK1	Nm	8.3	722.16	20.00	8.30	0.20	0.20	0.98	0.90	7.30	HCO <sub>3</sub> -Na
	*CK2	Q	7.6	617.92	21.90	4.27	4.05	3.76	2.11	2.29	7.69	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca-Mg
开封-兰考断陷	LK1	Ng	7.1	14210.00	421.28	205.73	35.08	7.01	228.35	13.04	2.42	Cl-Na
	LK2	Ng	7.5	10507.93	1234.09	147.79	20.48	4.18	167.49	12.65	2.86	Cl-Na
	LK3	Ng	7.5	12478.9	1540.40	173.11	24.85	5.93	199.98	12.62	2.75	Cl-Na
	LK4	Ng	7.3	18718.50	3256.68	286.26	55.51	9.58	297.48	8.40	2.66	Cl-Na
	LK5	Ng	6.7	17720.00	1870.00	124.42	31.73	5.59	260.37	14.37	2.31	Cl-Na
	LK6	Ng	6.7	19710.00	1957.00	168.28	31.00	6.25	275.52	12.45	2.31	Cl-Na
	LK7	Ng	7.8	12232.92	1562.32	184.15	25.07	6.15	186.23	14.47	3.30	Cl-Na
	LK8	Ng	6.8	20158.00	1981.00	132.82	40.07	5.10	276.82	12.51	2.05	Cl-Na
	*CK3	Nm	8.1	1594.65	34.50	26.25	0.43	0.26	12.07	5.66	9.08	Cl-HCO <sub>3</sub> -Na
	*CK4	Q	7.7	1030.00	476.30	9.92	2.52	7.13	4.82	1.13	14.23	HCO <sub>3</sub> -Na-Mg
地表水	*CK5	黄河水	7.8	886.35	271.17	3.72	3.10	2.05	2.38	3.15	3.31	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl-Na-Ca

注: \*数据引自文献[20-22];总硬度为以CaCO<sub>3</sub>计;CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的含量为0,未列入表中。

由以上分析可知,研究区馆陶组地热水的水质特点与化学类型与上部的明化镇组热水、第四系地下水及地表水差异明显,表明它们之间的水力联系微弱,所处环境封闭<sup>[23-24]</sup>。而开封断隆与开封-兰考断陷相较,前者的馆陶组地热水具有更高的TDS值与硬度值,除KF1因Ca<sup>2+</sup>含量较高表现为Cl-Na-Ca型水外,其余均为Cl-Na型水。

### 3.2 水化学控制因素分析

Gibbs图<sup>[25-26]</sup>(图6)显示研究区馆陶组地热水均聚集于蒸发浓缩作用区域,远离大气降水控制区域,表明其控制机制以蒸发浓缩作用为主导,受大气降水作用影响小,可能还存在岩石风化作用的影响。Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>与Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>离子比值端元图<sup>[27-28]</sup>(图7)中同样展现出这样的特征,研究区馆陶组地热水主要集中于蒸发盐岩溶解区域,部分向硅酸盐风化区域偏移。因此,研究区馆陶组热水主要受盐岩的蒸发浓缩作用影响,开封断隆区内可能还受岩石风化作用影响,在开封-兰考

断陷内盐岩的蒸发浓缩作用对馆陶组热水的控制影响大于开封断隆区。蒸发浓缩作用会导致水中溶解度低的盐类离子(如Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)浓度降低,溶解度高的盐类离子(如Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)浓度升高<sup>[29]</sup>,因此研究区馆陶组热储地热水展示出前文所述的水化学类型。明化镇组热储、第四系地下水和地表水在图6、7中明显位于与馆陶组不同的区域,表明它们与馆陶组热储有着不同的控制因素。

地下水的封闭程度、变质程度、浓缩程度可用变质系数( $\gamma_{Na/\gamma_{Cl}}$ )、脱硫系数( $100 \times \gamma_{SO_4/\gamma_{Cl}}$ )、盐化系数 $[\gamma_{Cl}/(\gamma_{HCO_3} + \gamma_{CO_3})]$ 等特征系数来反映<sup>[30]</sup>。研究区地下水的特征系数值如表3所示。研究区馆陶组热水的变质系数均小于1,部分接近1,表现出含盐岩地层溶滤水的特征;且小于明化镇组地热水和第四系地下水,表明其处于更封闭、更停滞的赋存环境,水体变质程度更深,水体为还原环境。然而,部分馆陶组热水的变质系数则小于标准海水 $\gamma_{Na/\gamma_{Cl}}$ 的平均值(0.85),

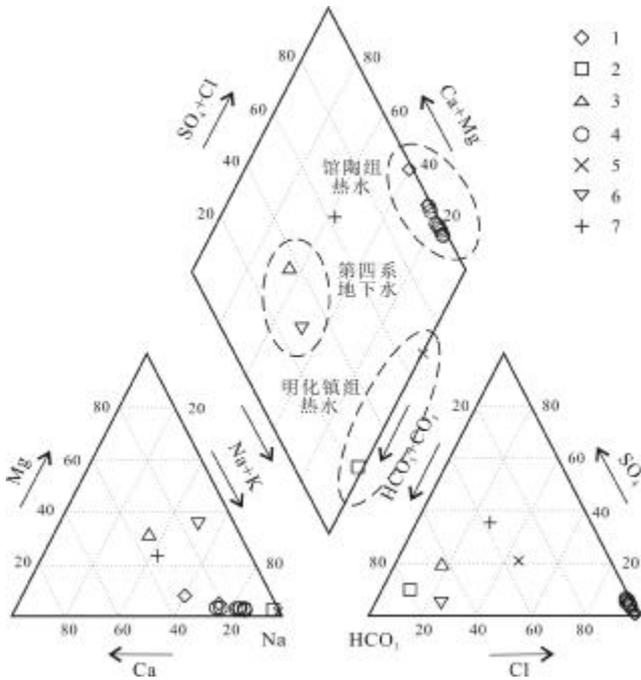


图 5 研究区水样 Piper 三线图

Fig. 5 Piper diagrams of water samples from the study area

1~3—开封断隆区 (Kaifeng fault uplift area); 4~6—开封-兰考断陷区 (Kaifeng-Lankao fault depression area); 1,4—馆陶组地热水 (geothermal water in Guantao fm.); 2,5—明化镇组地热水 (geothermal water in Minghuazhen fm.); 3,6—第四系地下水 (Quaternary groundwater); 7—地表水 (surface water)

展现出海相沉积水的特点<sup>[31]</sup>,但其 Cl/Br 系数均大于 293 (本研究仅部分馆陶组地热井水样分析了 Br 的含量,其中 KF1 Cl/Br 系数为 2958.77、KF1 为 1 511.84、LK1 为 566.12、LK3 为 709),可排除其海相沉积水的成因,应属于陆相含盐沉积型地下水<sup>[32-33]</sup>.

研究区馆陶组热水的脱硫系数远小于明化镇组地热水和第四系地下水,相差 1~2 个数量级,说明与其他地下水相比,馆陶组热水热储封闭性良好,热水还原较彻底. 而开封断隆内馆陶组热水的脱硫系数小于 1<sup>[34]</sup>,表明其环境更封闭、还原更彻底;开封-兰考断陷内的馆陶组热水大于 1,则表明其可能受到浅表氧化作用的影响.

研究区水样的盐化系数与其 TDS 含量呈现良好的正相关关系 (图 8),即盐化系数越高,水的 TDS 越大,水的浓缩程度越高<sup>[35]</sup>. 馆陶组地热水的盐化系数远高于明化镇组地热水、第四系地下水,表明其具有较强的浓缩程度,且开封断隆区内馆陶组地热水与开封-兰考断陷区相比更浓缩.

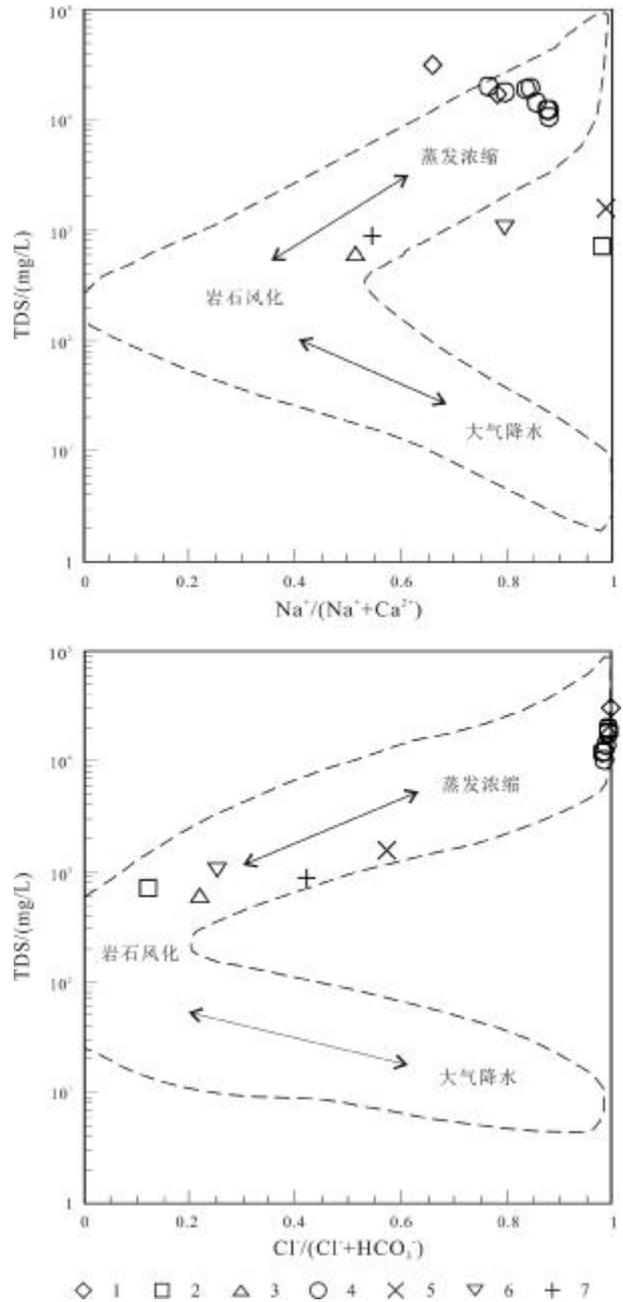


图 6 研究区水样 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagrams of water samples from the study area  
1~3—开封断隆区 (Kaifeng fault uplift area); 4~6—开封-兰考断陷区 (Kaifeng-Lankao fault depression area); 1,4—馆陶组地热水 (geothermal water in Guantao fm.); 2,5—明化镇组地热水 (geothermal water in Minghuazhen fm.); 3,6—第四系地下水 (Quaternary groundwater); 7—地表水 (surface water)

#### 4 水化学特征对成因的启示

已有的同位素研究成果表明,研究区内地热水起源于大气降水,且年代久远<sup>[36]</sup>. 区内地热资源类型为

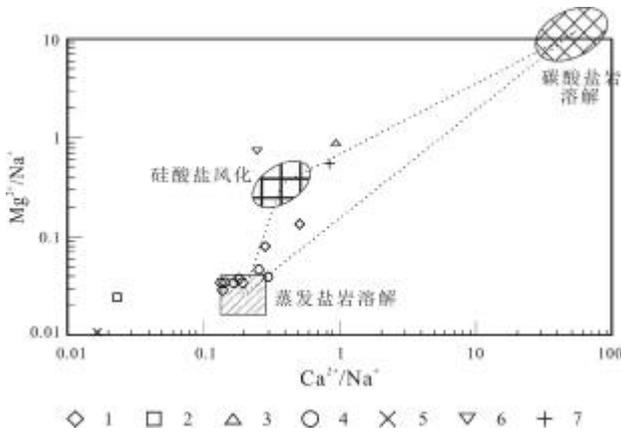


图7 Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>与 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>比值关系

Fig. 7 Relationship between Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>

1~3—开封断隆区 (Kaifeng fault uplift area); 4~6—开封-兰考断陷区 (Kaifeng-Lankao fault depression area); 1,4—馆陶组地热水 (geothermal water in Guantao fm.); 2,5—明化镇组地热水 ( geothermal water in Minghuazhen fm.); 3,6—第四系地下水 (Quaternary groundwater); 7—地表水 (surface water)

表3 研究区地下水特征系数

Table 3 Characteristic coefficients of groundwater in the study area

分区	编号	取水层	变质系数	脱硫系数	盐化系数
开封断隆	KF1	Ng	0.62	0.63	292.59
	KF2	Ng	0.73	0.46	168.65
	CK1	Nm	8.43	91.84	0.13
	CK2	Q	2.03	108.59	0.27
开封-兰考断陷	LK1	Ng	0.9	5.71	94.24
	LK2	Ng	0.88	7.55	58.66
	LK3	Ng	0.86	6.31	72.72
	LK4	Ng	0.96	2.83	111.71
	LK5	Ng	0.47	5.52	112.67
	LK6	Ng	0.6	4.52	119.22
	LK7	Ng	0.98	7.77	56.5
	LK8	Ng	0.47	4.52	135.1
	CK3	Nm	2.17	46.9	1.33
	CK4	Q	2.05	23.47	0.34

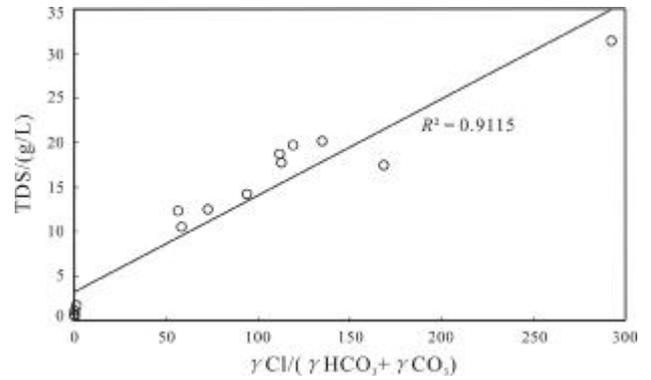


图8 盐化系数与 TDS 关系图

Fig. 8 Relationship between salinization coefficient and TDS

沉积盆地传导型, 地热水由大地热流传导增温. 发育的断裂、裂隙, 特别是区域性深大断裂, 为地热水的导热和运移提供了有利条件. 区内发育多层热储, 且垂向上联系甚微, 上部热储可作为下部热储层的良好盖层.

研究区馆陶组热水赋存于砂岩孔隙中, 在漫长的地质历史时期不断与周围地层发生溶滤作用, 属陆相含盐岩地层沉积型溶滤水. 馆陶组地层封闭性良好, 地热水的化学特征、控制因素、特征系数等与上部明化镇组地热水、第四系地下水和地表水完全不同, 进一步佐证了区内各层地下水间基本无水力联系. 馆陶组热水化学特征的控制机制以蒸发浓缩作用为主导, 馆陶组热水赋存环境封闭、停滞, 水体还原程度高, 浓缩程度大, 水中聚集大量的 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>, 水化学类型总体表现为 Cl-Na 型. 而开封断隆与开封-兰考断陷对比, 其馆陶组热储含水层孔隙度较低、单井出水量、单位涌水量较低, 其热水的赋存环境更封闭、更停滞, 热水还原更彻底、浓缩程度更高, 热水 TDS 和硬度相对更高.

### 5 结论

通过对济源-开封凹陷东段的开封断隆、开封-兰考断陷内馆陶组热储层的基本特点、热水水化学特征及形成条件进行分析研究, 得出主要结论如下:

(1) 研究区馆陶组热水为中性水、盐水、极硬水, 水化学类型以 Cl-Na 型为主. 其中开封断隆与开封-兰考断陷相较, 前者馆陶组热储层埋藏较深, 厚度较大, 含水层孔隙度较低, 抽水降深较大, 单井出水量和单位涌水量较低, 出水温度较高.

(2) 研究区馆陶组热水为陆相含盐岩地层沉积型

溶滤水,赋存介质为砂岩孔隙.区域发育的断裂、裂隙为其提供导热和运移的通道,在大地热流的传导增温下,不断发生溶滤作用、蒸发浓缩作用等.同时热储层封闭性良好,热水运移较停滞,使得热水还原性彻底,浓缩程度高.馆陶组热水与上部明化镇组热水、第四系地下水及地表水的水化学特征、控制因素、特征系数等完全不同,垂向间基本无水力联系.开封断隆与开封-兰考断陷对比,其馆陶组热水的赋存环境更封闭、更停滞,热水还原更彻底、浓缩程度更高,热水的TDS和硬度相对更高.

(3)本文的研究分析结果指示研究区内的馆陶组热水再生能力差,属消耗型资源,在开采过程中易出现结垢、堵塞、回灌能力衰减等问题,近年来的实际工程项目中确实已出现上述问题.为维持地热水的可持续开发,完成100%同层回灌,目前已采取的应对措施中最有效的是增设回灌井,但地热开发企业的投资建造成本、运行维护成本也同步增加.这些都对研究区馆陶组地热水的高效应用、可持续开发、吸引市场资金投入等方面造成了挑战.建议今后结合本文的研究成果,在地热水开发利用中做到合理规划、科学有序,同时加大对地热水堵塞机理、防垢阻垢、增加热储层回灌能力等方面的工程技术研究,促进地热资源经济可持续发展.

### 参考文献(References):

- [1]倪昆,卢磊,陈飞阳,等.河南省沉积盆地水热型地热资源特征及潜力评估研究[J].地下水,2021,43(1):13-16,113.  
Ni K, Lu L, Chen F Y, et al. Study on the characteristics and potential evaluation of hydrothermal geothermal resources in Sedimentary basins of Henan Province[J]. Ground Water, 2021, 43(1): 13-16, 113.
- [2]黄光寿,郭丽丽,黄凯.河南省沉积盆地五大构造单元地热地质特征[J].地质与资源,2020,29(2):172-179.  
Huang G S, Guo L L, Huang K. Geothermal geological characteristics of five tectonic units in the sedimentary basins of Henan Province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 172-179.
- [3]周振江.河南省武陟县地热资源的合理开发利用与保护[J].西部探矿工程,2013,25(6):151-153.  
Zhou Z J. Development, utilization and protection of geothermal resources in Wuzhi County, Henan Province [J]. West-China Exploration Engineering, 2013, 25(6): 151-153. (in Chinese)
- [4]魏庆龙,闫鸿庆,李东东.河南省原阳县地热地质条件及水化学特征研究[J].地下水,2018,40(3):44-46.  
Wei Q L, Yan H Q, Li D D. Geothermal geological conditions and hydrochemical characteristics of Yuanyang County, Henan Province [J]. Ground Water, 2018, 40(3): 44-46. (in Chinese)
- [5]朱卫民,韩国童,庞良.郑州市区地热储存条件与开发现状分析[J].地下水,2016,38(6):54-55.  
Zhu W M, Han G T, Pang L. Analysis of geothermal storage conditions and development status in Zhengzhou[J]. Ground Water, 2016, 38(6): 54-55. (in Chinese)
- [6]范浩敏.河南省郑汴新区(中牟段)地热资源特征及开发利用前景[J].地下水,2021,43(5):78-81.  
Fan H M. Characteristics of geothermal resources in Zhengbian New Area (Zhongmu Section) of Henan Province and its development and utilization prospect[J]. Ground Water, 2021, 43(5): 78-81.
- [7]高楠安,汪新伟,梁海军,等.冀鲁豫三省交界处临清坳陷大名次凹陷地热系统成因模式及开发潜力[J].中国地质,2023,50(4):1149-1162.  
Gao N A, Wang X W, Liang H J, et al. Genetic mechanism of geothermal system in Daming Sag, Linqing Depression in the junction of Hebei, Shandong and Henan provinces and its exploration potential [J]. Geology in China, 2023, 50(4): 1149-1162.
- [8]白博文,平建华,赵继昌,等.河南淮阳县地热流体化学特征及其成因分析[J].中国地质,2022,49(3):956-966.  
Bai B W, Ping J H, Zhao J C, et al. Chemical characteristics and causes analysis of the geothermal fluid in Huaiyang County, Henan Province[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 956-966.
- [9]齐玉峰.河南省开封凹陷区地热田地热资源分析[J].西南科技大学学报,2009,24(3):75-78.  
Qi Y F. Analysis on geothermal resources in Kaifeng Depression geothermal field of Henan Province[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2009, 24(3): 75-78.
- [10]张心勇,马传明.开封凹陷区地温场特征分析[J].工程勘察,2009,37(10):44-49.  
Zhang X Y, Ma C M. Geothermal field's characteristics analysis in Kaifeng depression [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(10): 44-49.
- [11]李莲花,王小青,孟萍.开封深部地热水地质条件及开发前景[J].南水北调与水利科技,2013,11(2):107-109.  
Li L H, Wang X Q, Meng P. Geological conditions and development prospect analysis of deep geothermal water in Kaifeng City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 107-109.
- [12]李尧,齐玉峰,黄烜,等.兰考县新近系热储赋存规律及开发适宜性研究[J].河南科学,2021,39(10):1615-1623.  
Li Y, Qi Y F, Huang X, et al. The occurrence regularities and development suitability of Neogene thermal reservoir in Lankao County[J]. Henan Science, 2021, 39(10): 1615-1623.
- [13]宋前进,王刚,许一川,等.深层地热能开发及其对地热水流场的

- 影响——以兰考县深层地热能开发为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 184-193.
- Song Q J, Wang G, Xu Y C, et al. Development of deep geothermal energy and its influence on geothermal water flow field: Taking the development of deep geothermal energy in Lankao County for an example[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 184-193.
- [14]肖雄, 李尧, 杨珍, 等. 河南省兰考县新生界地热资源特征及开发利用前景[J]. 地下水, 2022, 44(2): 72-74, 110.
- Xiao X, Li Y, Yang Z, et al. Characteristics and prospect of geothermal resources in Lankao County Henan Province [J]. Ground Water, 2022, 44(2): 72-74, 110.
- [15]王志铄, 马兴全. 郑州-开封断裂新生代活动特征[J]. 地震地质, 2018, 40(3): 511-522.
- Wang Z S, Ma X Q. The activity characteristics of Zhengzhou-Kaifeng fault during Kainozoic[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(3): 511-522.
- [16]张维, 闫晋龙, 马畅, 等. 河南新商断裂对地热资源形成的控制作用及资源潜力分析[J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2647-2652.
- Zhang W, Yan J L, Ma C, et al. Control of Xinshang fault on geothermal resources in Henan Province and its resource potential[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(12): 2647-2652.
- [17]邵炳松, 朱怀亮, 胡志明, 等. 济源-开封拗陷西南部电性结构研究及地热资源远景区预测[J]. 地质与勘探, 2021, 57(3): 572-583.
- Shao B S, Zhu H L, Hu Z M, et al. Electrical structure and forecast of geothermal prospective areas in the southwest of the Jiyuan-Kaifeng depression[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(3): 572-583.
- [18]齐玉峰, 王文娟, 李尧. 地质构造对黄河下游(河南段)地热分布的影响分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 67-72.
- Qi Y F, Wang W J, Li Y. Analysis of the influence of geological structure on geothermal distribution in lower reaches of the Yellow River in Henan Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 67-72.
- [19]罗梅. 中牟凹陷地热资源成因机理及其特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- Luo M. Genetic mechanism of geothermal resources in Zhongmu Depression and its characteristics [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [20]张良. 开封市城区地热水资源评价及可持续开发利用研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- Zhang L. Study on resource assessment and sustainable development and utilization of geothermal water in Kaifeng City [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [21]全长水, 靳孟贵, 王献坤, 等. 黄河故道兰考段地下水水化学特征[J]. 工程勘察, 2011, 39(12): 36-41.
- Tong C S, Jin M G, Wang X K, et al. Chemical characteristics of groundwater in Lankao section along abandoned area of Yellow River [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(12): 36-41.
- [22]杜青辉, 屈吉鸿, 宋全香. 开封市区近黄河地区地下水化学特征及成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 172-176, 181.
- Du Q H, Qu J H, Song Q X. An analysis of chemical characteristics and causes of groundwater near the Yellow River in Kaifeng City[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 172-176, 181.
- [23]Truesdell A H. Effects of physical processes on geothermal fluids[C]// Application of geochemistry in geothermal reservoir development. Rome: UNITAR/UNDP Publication, 1991: 71-92.
- [24]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.
- Shi Q P, Song S L, Meng J, et al. Hydrochemical evolution of Karst geothermal water in the Heze uplift geothermal field, Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 310-318.
- [25]Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [26]Rao N S, Subrahmanyam A, Kumar S R, et al. Geochemistry and quality of groundwater of Gummanampadu Sub-Basin, Guntur District, Andhra Pradesh, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(5): 1451-1471.
- [27]Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. Chemical Geology, 1999, 159(1/4): 3-30.
- [28]Li S L, Chetelat B, Yue F J, et al. Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 88: 74-84.
- [29]曾妍妍, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 64-70.
- Zeng Y Y, Zhou J L, Jia R L, et al. Hydrochemical characteristics and causes of surface water in Qimantage area, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 64-70.
- [30]张保健. 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, 2011.
- [31]李虎, 夏玲晓, 江国胜. 天津地区奥陶系地热流体离子比例系数分析研究[J]. 地下水, 2015, 37(5): 35-37.
- Li H, Xia L X, Jiang G S. Analysis on geothermal fluid ion ratios in Tianjin area[J]. Ground Water, 2015, 37(5): 35-37.

- Province[J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 1031-1032.
- [11] 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 等. 长春莲花山发现锶富集区[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 430-431.
- Sun Q F, Tian H, Guo X D, et al. Strontium-enriched areas discovered in Lianhuashan, Changchun[J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 430-431.
- [12] 李莉莉, 王莉. 安徽省和县香泉镇老山双泉 1 号泉饮用天然矿泉水成因分析[J]. *地下水*, 2016, 38(5): 16-18.
- Li L L, Wang L. Analysis of formation causes of natural mineral water no1 springs between Anhui Province and Laoshan double spring of Xianxiang County[J]. *Ground Water*, 2016, 38(5): 16-18.
- [13] 黄树春, 赵帅军, 夏友, 等. 湖南省饮用天然矿泉水资源潜力评价与开发利用区划[J]. *地质与资源*, 2017, 26(1): 67-72.
- Huang S C, Zhao S J, Xia Y, et al. Potential evaluation and exploitation division of the drinking mineral water resources in Hunan Province[J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(1): 67-72.

(上接第 81 页/Continued from Page 81)

- [16] 秦红富, 谈树成, 施旖奇, 等. 基于 CF-LR 组合模型的地质灾害易发性评价——以云南省宁洱哈尼族彝族自治县为例[J]. *人民长江*, 2022, 53(7): 119-127.
- Qin H F, Tan S C, Shi Y Q, et al. Geological hazard susceptibility assessment based on CF&LR combined model: Case of Ning'er Hani and Yi Autonomous County, Yunnan Province [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(7): 119-127.
- [17] 罗路广, 裴向军, 黄润秋, 等. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 526-535.
- Luo L G, Pei X J, Huang R Q, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and logistic regression model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 526-535.
- [18] 屠水云, 张钟远, 付弘流, 等. 基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 96-104.
- Tu S Y, Zhang Z Y, Fu H L, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 96-104.
- [19] 黄敬军, 甘义群, 缪世贤, 等. 江苏省地质环境区划评价指标体系初步研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1599-1606.
- Huang J J, Gan Y Q, Miao S X, et al. A preliminary study of the evaluation index system for geo-environment regionalization in Jiangsu [J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1599-1606.
- [20] 郭邦梅, 权开兄. 基于 ArcGIS 的青海隆务河流域灾害风险性评价[J]. *地质与资源*, 2019, 28(3): 289-292.
- Guo B M, Quan K X. ArcGIS-based disaster risk assessment of Longwu river basin in Qinghai Province[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(3): 289-292.

(上接第 114 页/Continued from Page 114)

- [32] 孙红丽, 王贵玲, 蔺文静. 西宁盆地地下热水的 TDS 分布特征及富集机理[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(1): 278-287, 299.
- Sun H L, Wang G L, Lin W J. Distribution characteristics and enrichment mechanism of TDS geothermal water in Xining Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(1): 278-287, 299.
- [33] 邢一飞, 王慧群, 李捷, 等. 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 1711-1722.
- Xing Y F, Wang H Q, Li J, et al. Chemical field of geothermal water in Xiong'an New Area and analysis of influencing factors[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1711-1722.
- [34] 张萌, 蔺文静, 刘昭, 等. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(3): 382-392.
- Zhang M, Lin W J, Liu Z, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(3): 382-392.
- [35] 郭宁, 刘昭, 男达瓦, 等. 西藏昌都觉拥温泉水化学特征及热储温度估算[J]. *地质论评*, 2020, 66(2): 499-509.
- Guo N, Liu Z, Nan D W, et al. The characteristics and reservoir temperatures of hot springs in Jueyong, Chamdo, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 2020, 66(2): 499-509.
- [36] 龚晓洁, 田良河, 袁锡泰. 河南平原区天然地热流体同位素特征对其生成环境的揭示[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(25): 33-37.
- Gong X J, Tian L H, Yuan X T. Isotopic characteristics and forming environment of natural geothermal fluids in the plain area of Henan Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(25): 33-37.