

白新飞, 胡彩萍, 宋津宇, 等. 肥城安驾庄岩溶型地热氦泉水化学特征及成因机理[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 283-299, 339.
DOI: 10.11932/karst20250207

肥城安驾庄岩溶型地热氦泉水化学特征及成因机理

白新飞¹, 胡彩萍², 宋津宇¹, 杨时骄¹, 郅亮³, 张军¹,
于超¹, 洪欢仁¹, 王涛¹, 宋亮¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第一地质大队(山东省第一地质矿产勘查院), 山东 济南 250014;
2. 山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队),
山东 济南 250014; 3. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东 泰安 271000)

摘要:以安驾庄地热田内地热井为研究对象, 综合运用 Durov 图等多种图解、离子组分比率特征、矿物饱和指数计算等方法深入分析地热水的水化学特征, 并采取土壤氦气测量、水氦测试及可控源音频大地电磁法测量等手段, 结合地热地质背景综合研究该地热氦泉的形成机理。结果表明: 该地热田地热水属于 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca}$ 型, 为氟—偏硅酸—氢复合型热矿水, 其水化学演化主要受蒸发盐类矿物与碳酸盐类矿物溶解共同控制, 硅酸盐矿物溶解参与其中, 并受阳离子交换作用制约; 地热氦泉形成受断裂构造控制, 具有四元聚热特征: 断裂带深循环水热对流传导聚热、大地热流毯状传导聚热、地震活动生热及放射性元素衰变生热; 断裂构造破碎带为地热水与氦的运移与富集的优势通道; 隐伏富铀 S 型花岗岩或铀矿化是氦的主要来源; 断裂构造活动与地震活动为氦析出提供动力来源。

关键词: 地热氦泉; 复合型热矿水; 四元聚热; 断裂构造; S 型花岗岩

创新点: 采用图解法、离子组分比率和矿物饱和指数分析安驾庄地热田地热水水化学演化规律, 并利用土壤氦气测量、水氦测试、CSAMT 测量等手段结合地热地质背景综合研究地热氦泉的形成机理, 分析出地热氦泉形成的氦源、热源、水源及空间与动力条件等重要因素, 其地热氦泉形成具备典型的断控型特征。

中图分类号: P314 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)02-0283-17

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

安驾庄地热田位于山东省肥城市安驾庄镇, 地貌类型为低山丘陵, 曾发育有一温一凉两眼泉水, 也被称为“温凉泉”。“温凉泉”在 21 世纪 80 年代初, 由于河流干涸, 泉水断流, 80 年代末期, 在进行灌溉井施工时意外发现地热水, 此后地热田内陆续又施工了多眼地热井。这些地热井深度为 123~340 m, 出水温度 31.0~60.2 °C, 单井涌水量 380~2400 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,

属于低温地热资源。安驾庄地热田是山东省地热资源中已发现的唯一达到命名矿水浓度的“岩溶型地热氦泉”^[1], 具有调节心血管系统、神经系统、内分泌系统、运动系统的功能, 同时在皮肤病治疗领域亦展现出显著疗效^[2-4], 其医疗康养价值十分显著。蔡有兄等^[5]简述了安驾庄地热田的地温场特征、热储特征、地热田成因、热储概念模型进行简述; 王成明等^[6]通过分析氢氧同位素认为安驾庄地热田地热水来源于大气降水, 通过 ^{14}C 测龄认为其地热水补给路径较

资助项目: 山东省地质矿产勘查开发局 2022 年度局地质勘查引领示范与科技攻关项目(鲁地字[2022]15 号)

第一作者简介: 白新飞(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质及地热地质研究。E-mail: 20388041@qq.com。

通信作者: 胡彩萍(1976—), 女, 研究员, 主要从事水工环地质及地热地质研究。E-mail: caipinghu126@126.com。

收稿日期: 2024-10-09

近,地热水运移速度较快,水交替相对频繁;刘元晴等^[7]分析了安驾庄地热田的水化学组分特征、热储温度估算及热水成因;李曼等^[8]通过研究分析鲁中南典型地热区地热水研究分析,确定安驾庄地热田地热水中氟离子的物质来源主要为萤石等含氟矿物的溶解沉淀,受控于阳离子交换等水岩相互作用影响。诸多学者对鲁中南隆起地热区碳酸盐岩地层的岩溶发育机制与特征、赋水规律开展研究,阐明了强岩溶发育带和地热水富集带特征^[9-12],为安驾庄地热田岩溶热储的研究提供了理论依据。上述研究对安驾庄地热田取得一定认识,但基本处于研究的初步阶段,缺乏对地热水水化学演化特征的系统分析,尤其是对地热水中氡的来源及成因机制的研究存在空白。

本文在对区域地质背景、地热地质条件系统研究的基础上,对地热水离子组分采用 Durov 图解、Schoeller 图解、Piper 图解、Gibbs 图解、离子组分比率特征、Na-K-Mg 平衡图解、矿物饱和指数法等对地热水的水化学特征与演化进行讨论,并通过土壤氡气测量、可控源音频大地电磁法(CSAMT)测量、水氡测试等方法取得的数据结合地质构造背景分析地热氡泉成因机制,以期为安驾庄地热田及同类型地热田资源的开发与利用提供理论支撑和科学依据。

1 研究区概况

1.1 地质条件

安驾庄地热田位于汶口凹陷与东平凸起接触带^[13](图 1a),区域上基底为太古代一元古代花岗岩侵入体,上覆地层呈现以奥陶系为核心的轴向近 EW、两翼不对称的向斜构造,其西缘翘起。断裂构造体系以近 NE 向、NNE 向及 EW 向为主,呈网格状发布,新构造运动较活跃,活动性断裂仍继承原构造格架继续活动。其中 NE 向的安驾庄断裂为一条高角度的活动性正断层,其发育规模较大,是汶口凹陷与东平凸起分界的控制性断裂。地热田内大多区域被第四系沉积物覆盖,仅在西部及西南部有零星基岩出露,地层由老至新依次为寒武系、奥陶系、古近系及第四系,岩浆岩主要为新太古代傲徕山序列松山单元的中粒二长花岗岩(图 1b)。区域上各类含水岩组均有分布,其中寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩类岩溶含

水岩组是区内主要含水层。

1.2 地热条件

安驾庄地热田位于鲁西隆起地热区的鲁中南隆起地热亚区^[14],该区具有莫霍面深度较大(33~36 km)^[7,15],大地热流值较低(48~70 mW·m⁻²)的特点^[7,16-18](图 2),不利于大地热流垂直热传导型地热资源的形成,但在区内的凸起与盆地接触带区域往往发育深大断裂,且多为活动断裂,有利于形成受断裂构造控制的对流型地热资源,安驾庄地热田即属于此类型地热资源。

安驾庄地热田盖层为古生界寒武系长清群馒头组碎屑岩,岩性以砂页岩、泥岩为主,保温隔热效果好,热储层为长清群朱砂洞组碳酸盐岩,岩性主要为白云岩、含燧石结合及燧石条带白云岩及白云质灰岩。地热水形成受断裂构造热对流控制,地热水沿断裂上涌至热储层后赋存在岩溶裂隙、热液溶蚀和受构造运动作用形成的层间虚脱、碎裂岩带及揉皱层间空隙形成的“似层状”富水区段^[10-12],因此,安驾庄地热田属于带状兼层状热储。

2 研究方法

2.1 样品采集与测试

本次在地热田内 G35、YZ2、ZK1 地热井采集地热水样品 3 组,机民井采集水氡测试样品 12 件。本次样品采集按照《地下水水质分析方法》(DZ/T0064.2-2021)的规定进行采集。使用无色聚乙烯塑料瓶采集全分析、微量元素分析、放射性样品,使用玻璃扩散器采集²²²Rn 样品,并填写采样记录信息卡。样品采集后密封保存并在 24 h 内送至具有检测资质的国土资源部济南矿产资源监督检测中心(山东省地质科学研究院)进行测试。全分析、微量元素分析采用全谱直读等离子体发射光谱仪(Icap7400 Radial MFC)、分光光度计(日立 U-3310)以及电感耦合等离子体质谱仪(XSERIES 2),放射性测定采用低本底 α 、 β 测量仪(BH1216),²²²Rn 测定采用氡钍分析仪(FD-125),检测仪器符合分析方法对仪器参数和检出限的要求,且在有效检定期内,测试数据精度满足要求、真实可靠。另外搜集以往地质工作中水质分析数据 3 组(ZK2、温泉、冷水)、水氡测试数据 20 组^[19-20]。

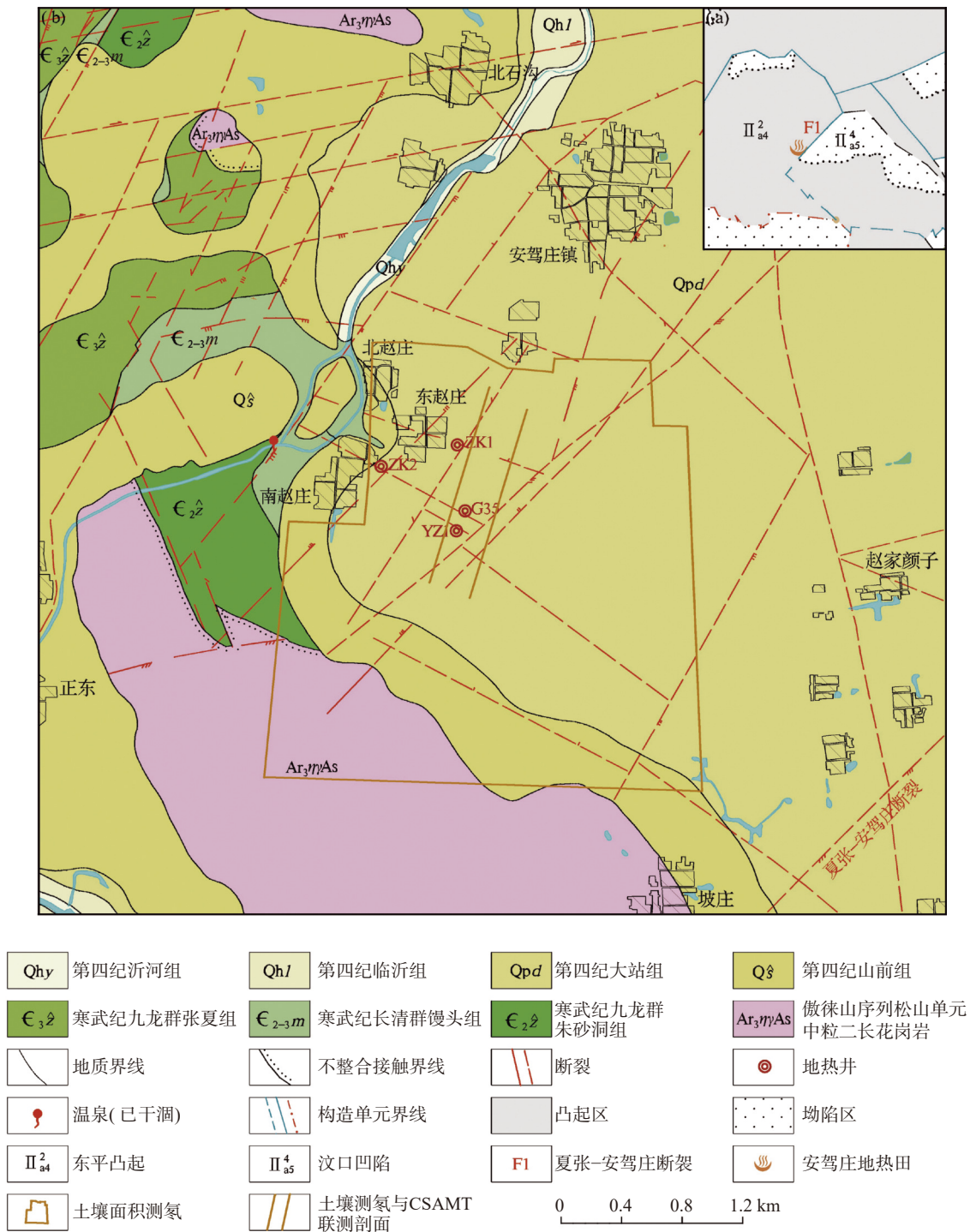


图 1 安驾庄地热田地质构造简图

(a) 构造单元划分图 (b) 地质简图

Fig. 1 Geologic structure of the Anjiazhuang geothermal field

2.2 土壤测氦与CSAMT 测量

本次研究采用土壤氦气测量、CSAMT 测量结合水氦测试的方法探究地热热水的形成机理^[21-22]。

本次研究完成常规面积测氦 8.5 km², 测网布设 250 m×50 m; 剖面测氦 2 km, 点距 20 m。土壤氦气

测量仪器采用 FD-216 环境氦测量仪, 采用瞬时法测量, 仪器土壤氦气测量范围为 300~300 000 Bq·m⁻³, 本底计数率≤0.3 cpm, 测量重复性误差≤5%。土壤测氦工作按照《民用建筑工程室内环境污染控制标准》(GB50325-2020)附录 C 规定进行, 测量连续无间断, 且在晴朗无降水、温度与湿度变化不大的气候下完成。

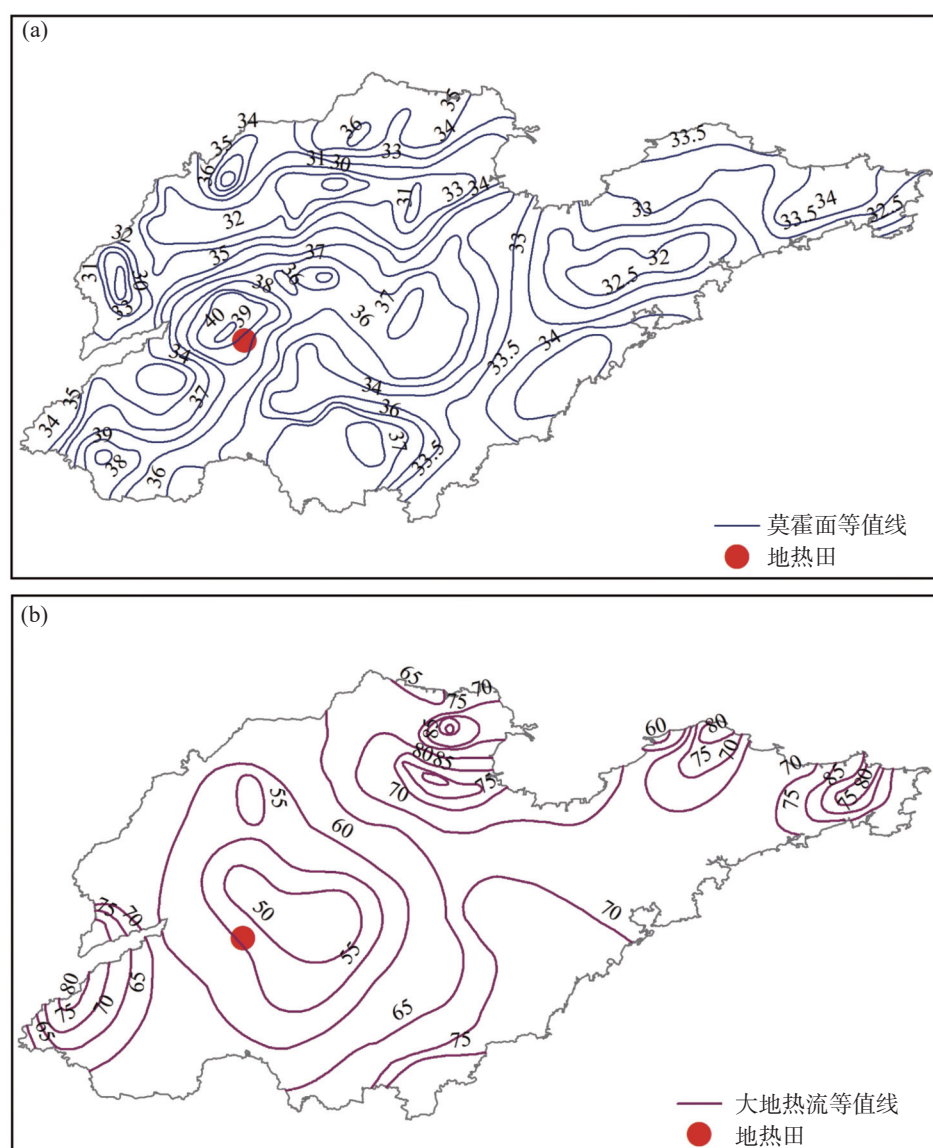


图2 山东省地热背景图

(a)山东省莫霍面等值线图 (b)山东省大地热流等值线图

Fig. 2 Geothermal background of Shandong Province

CSAMT 测线布置与土壤氩剖面测量一致, 点距 50 m, 测量深度 1000 m。采用 GDP-32 II 多功能电法工作站及其配套设备, 采用赤道(旁侧)装置, 发射源总体长度在 1.0~1.5 km, 发射电流 6.0~20.0 A, 采样频率为 0.125~8 192 Hz, 测量数据采用 SCS2D 可控源反演软件对数据进行剔除、降噪、校正和反演, 最终形成电阻率剖面图^[23]。

3 结果与分析

3.1 水化学特征

地热田内各水样测试分析结果如表 1 所示。地

热水温度为 29.0~60.2 °C, pH 为 7.10~7.80, TDS 为 1 783.00~2 322.53 mg·L⁻¹, 属于中低温弱碱性热矿水。地热水中阳离子中 Na⁺和 Ca²⁺含量占主导地位, 分别为 305.68~474.16 mg·L⁻¹和 208.32~270.11 mg·L⁻¹; 阴离子中 SO₄²⁻含量占主导地位, 为 705.23~1 131.44 mg·L⁻¹, 地热水总体特征表现为高钠钙、高硫酸根(图 3)。地热水之间离子组分变化不大, 与浅部冷水差距显著, 说明地热水与浅部冷水具有不同的循环途径与水岩作用程度(图 3, 图 4), 认为地热水在循环途中, 径流时间长, 温度升高, 水岩相互作用程度高, 通过溶滤围岩中的矿物, 各类离子组分在地热水中富集。

表 1 水样测试数据表
Table 1 Testing data of water samples

取样位置	主要阳离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				主要阴离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			TDS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	T/ $^{\circ}\text{C}$
	K^{+}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}			
G35	17.73	474.16	255.23	12.20	333.61	1072.16	105.97	2316.00	7.80	55.0
YZ1	13.10	305.68	238.08	18.51	272.95	705.23	214.96	1783.00	7.78	58.2
ZK1	14.18	397.97	208.32	21.72	302.49	947.33	160.23	2065.18	7.51	60.2
ZK2	9.50	415.00	218.44	66.88	336.82	1078.27	158.65	2240.32	7.10	31.0
温泉	18.26	447.55	270.11	13.01	329.27	1131.44	100.98	2322.53	7.10	29.0
冷水	1.08	46.60	151.53	21.93	115.32	141.02	264.63	690.99	7.66	21.3

取样位置	微量元素/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						放射性/ $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$			
	F^{-}	Br^{-}	Sr	Li	HBO_2	HiSiO_3	总 α	总 β	^{226}Ra	^{222}Rn
G35	3.59	1.09	8.26	0.67	1.05	61.67	0.54	0.70	0.19	82.60~260.00
YZ1	2.22	0.50	6.49	0.42	0.65	46.73	0.30	0.48	0.13	110.52
ZK1	1.87	0.93	9.16	0.54	1.58	68.45	0.51	0.67	0.21	182.00
ZK2	3.25	0.90	10.25	0.54	0.82	32.50				88.09
温泉	4.00	0.88	5.25	0.52	0.86	62.40				640.00
冷水	0.39	0.16	0.68	0.01	0.37	22.80	0.06	0.06	0.02	3.40

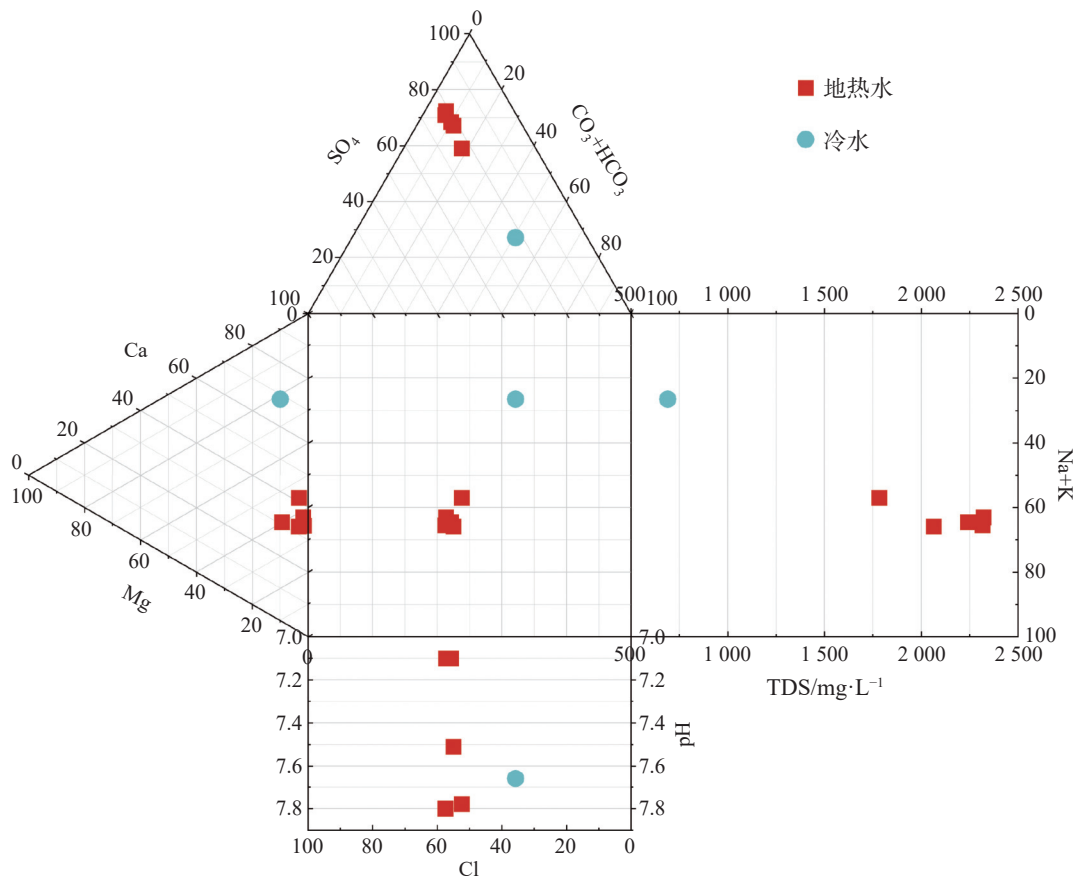


图 3 地热田地热水、冷水 Durov 图

Fig. 3 Durov map of hot and cold water in geothermal fields

地热水中富含多种具有医疗作用的微量元素，其中地热水中 F^{-} 含量为 $1.87\sim4.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均含量为 $2.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，达到命名矿水浓度； HiSiO_3 含量为 $32.50\sim68.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均含量为 $54.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，达到命

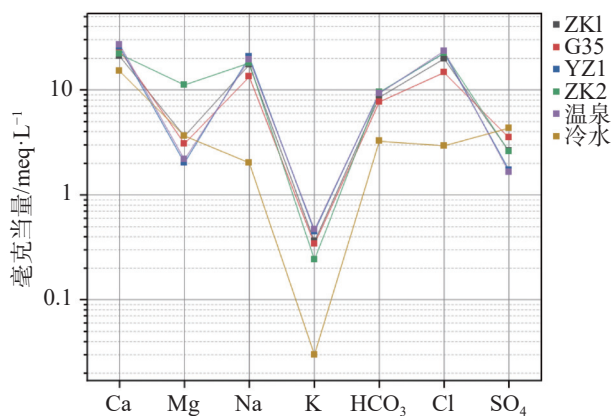


图4 地热田地热水、冷水 Schoeller 图

Fig. 4 Schoeller map of hot and cold water in geothermal fields

名矿水浓度; ^{222}Rn 含量为 $82.60\sim 640.00\text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均含量为 $208.78\text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到命名矿水浓度。因此, 安驾庄地热田地热水是一种稀缺的理疗资源, 可命名为氟—偏硅酸—氡复合型热矿水。

从 Piper 三线图^[24]可知, 地热水与冷水具有明显差异: 地热水样品分布相对集中, 水化学类型为

$\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型, 表现出碱金属 (Na、K) 大于碱土金属 (Ca、Mg), 弱酸大于强酸的特征, 非碳酸盐碱 $>50\%$ 的特征; 浅部冷水水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}$ 型, 表现为碱土金属 (Ca、Mg) 大于碱金属 (Na、K), 弱酸大于强酸的特征, 无一对阴阳离子 $>50\%$ 的特征 (图 5)。上述差异说明两者存在不同的循环途径和演化特征, 其水化学组分的变化与周边的菏泽潜凸起地热田^[25-26]、泰山北翼岩溶含水介质^[27] 中的岩溶冷水向地热水演化规律基本一致。

Gibbs 图可通过 TDS 与 $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ 和 $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ 之间的对应关系反映出各类水体中主要离子来源和演化过程^[28]。地热田内地热水样品主要落在蒸发/结晶主导与岩石风化主导交接带附近, 蒸发主导作用略占优势 (图 6)。由于地热水赋存深度大, 蒸发作用轻微, 蒸发/结晶作用指示的是蒸发盐类矿物溶解^[8], 因此地热水主要受蒸发盐类矿物和碳酸盐类矿物溶解, 其来源主要是热储层中的碳酸盐岩地层和石膏层。浅部冷水位于岩石风化作用主导区, 说

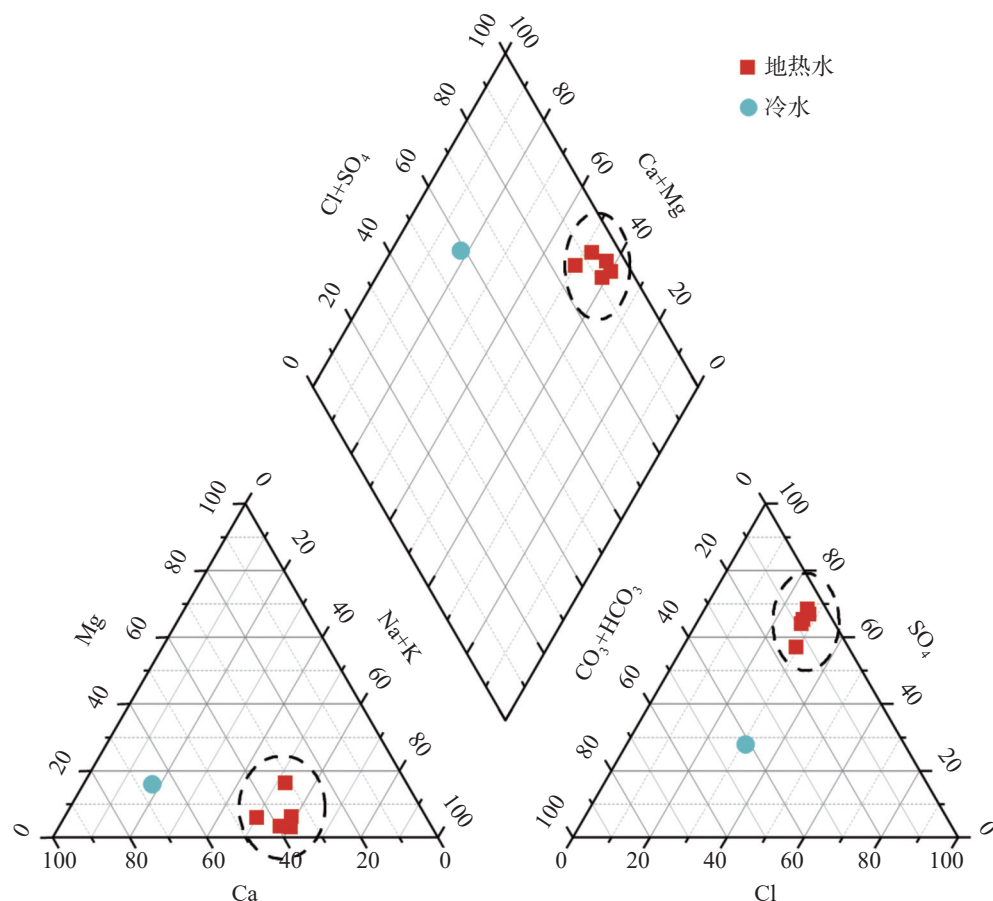


图5 地热田地热水、冷水 Piper 图

Fig. 5 Piper map of hot and cold water in geothermal fields

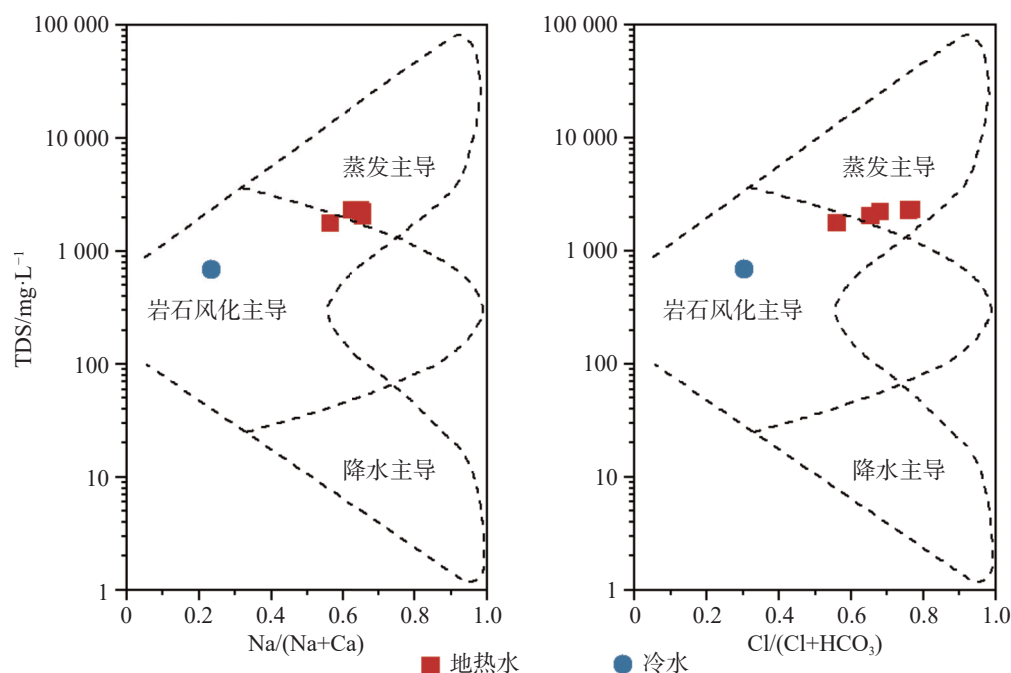


图6 地热田地热水、冷水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs map of hot and cold water in geothermal fields

明冷水主要受岩石风化作用控制,与肥城市内其他区域岩溶冷水的水化学特征一致^[29-30]。

Mg/Na、 HCO_3/Na 与 Ca/Na 等比值应用于揭示地下水水化学演化过程中水岩相互作用的类型^[31-33]。地热水分布在蒸发盐与碳酸盐矿物之间,更靠近蒸发盐矿物端源,表明受两者共同控制,以蒸发盐矿物水岩作用控制为主,冷水位于碳酸盐与蒸发盐矿物中间位置,表明受碳酸盐与蒸发盐矿物水岩作用共同控制(图7a,图7b)。由图7c可知,冷水与地热水均位于方解石矿物溶解线下方,地热水偏离程度更明显,同样证明了冷水与地热水均受到碳酸盐矿物与蒸发盐矿物溶解共同控制,地热水则受蒸发盐矿物溶解程度更显著。由图7d可知,地热水落在石膏溶解线上方,表明地热水中较高含量的 SO_4 来源不仅限于石膏等蒸发盐溶解,可能存在硫化物及从深部还原环境沿断裂上升的 H_2S 氧化等来源。由图7e可知,地热水落在溶解平衡线上方,显示地热水除受蒸发盐溶解、碳酸盐溶解控制外还存在部分硅酸盐矿物溶解。由图7f可知,冷水靠近岩盐矿物溶解线,地热水则位于溶解线下方,表明地热水中较高含量的Na可能来自热储层下伏的酸性侵入岩中硅酸盐矿物。由图7g可知,地热水与冷水的 $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ 与 $\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}$ 落在1:1线附近,地热水以正向阳离子交换作用为主导,水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换硅酸盐

矿物中的 Na^+ 、 K^+ ^[34-36],印证了地热水中 Na^+ 来源于硅酸盐矿物,也表明离子交换作用是制约地热水中阴阳离子含量的主要因素。由7h可知,地热水中 Sr/Ca 值变化趋势由温泉→G35、YZ1→ZK1、ZK2逐渐增大,这与三处地热水的热储层埋藏更深、循环途径更长、水岩作用时间更久的规律一致^[33,37-38]。

本次研究采用PHREEQC3.7.3软件对样品进行矿物相平衡计算,取得样品中各种矿物的饱和指数SI(表2)^[26]。地热水中方解石、白云石等碳酸盐类矿物的饱和指数均大于0,属于过饱和状态;硬石膏、石膏等蒸发盐类矿物的饱和指数虽然小于0,但接近0,属于近饱和状态;玉髓和石英等硅酸盐类矿物的饱和指数小于0,接近-1,属于未饱和状态;萤石、菱锆矿矿物饱和指数接近0,属于近饱和状态;岩盐、钾盐等易溶岩类饱和指数则远小于0,属于未饱和状态。通过矿物饱和指数认为地热水中阴阳离子含量受控于碳酸盐类、蒸发盐类矿物溶解,玉髓、石英、萤石与菱锆矿溶解为地热水中 H_2SiO_3 、F与Sr等微量元素提供来源。冷水中方解石、白云石的饱和指数大于地热水,其余矿物饱和指数均小于地热水,表明冷水中阴阳离子主要受控于碳酸盐类溶解。

Na-K-Mg平衡图^[39]是地热水水岩作用平衡状态初步判定的方法,可划分为完全平衡、部分平衡的地

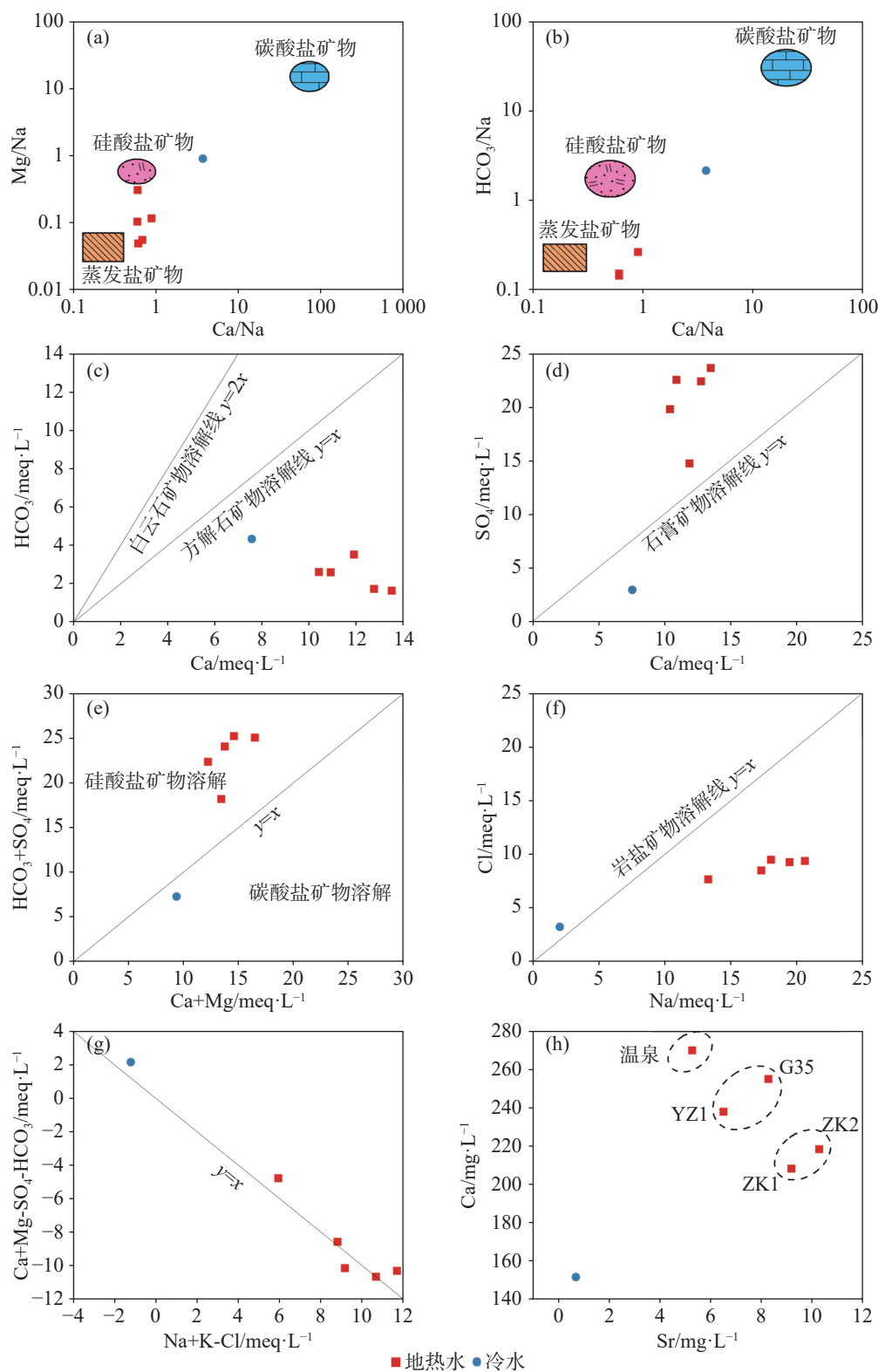


图7 离子组分比率图

Fig. 7 Diagram of ionic component ratio

下热水和未成熟的水。冷水位于 Na-K-Mg 平衡图的 Mg 顶点处,地热水则逐渐远离 Mg 顶点,且沿未成熟水与部分平衡水接触带分布(图 8),说明地热水

水岩作用程度高于冷水,处于由未成熟水向部分平衡水过渡阶段,也表明了地热水具备混合不同温度、不同组分或不同赋存条件流体的特征。

表 2 地热田地热水、冷水主要矿物饱和指数 (SI)
Table 2 Major mineral saturation indexes (SI) of hot and cold water in geothermal fields

样品	硬石膏	方解石	天青石	玉髓	白云石	萤石	石膏	岩盐	石英	菱锆矿	钾盐
G35	-0.44	1.56	-0.10	-1.23	1.99	0.01	-0.45	-5.49	-0.89	0.31	-6.60
YZ1	-0.55	1.91	-0.28	-1.48	2.86	-0.41	-0.59	-5.75	-1.14	0.58	-6.81
ZK1	-0.49	1.63	-0.05	-0.68	2.55	-0.67	-0.55	-5.60	-0.35	0.49	-6.75
ZK2	-0.77	1.65	-0.10	-1.43	3.05	0.04	-0.54	-5.51	-1.02	0.73	-6.75
温泉	-0.67	1.51	-0.37	-0.84	1.99	0.37	-0.41	-5.49	-0.43	0.22	-6.47
冷水	-1.63	1.97	-1.87	-1.99	3.27	-1.59	-1.28	-6.85	-1.55	0.14	-8.03

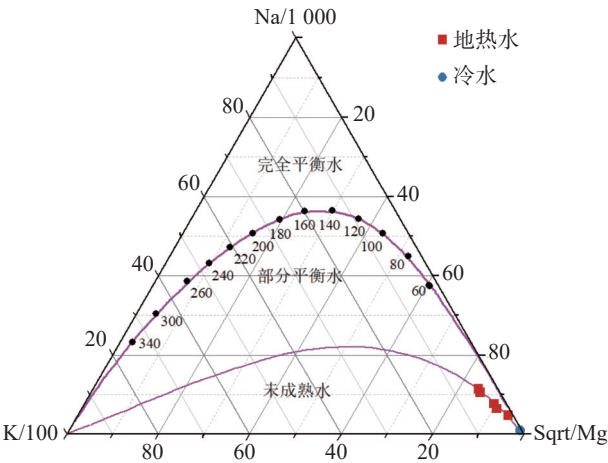


图 8 Na-K-Mg 平衡图

Fig. 8 Na-K-Mg equilibrium diagram

3.2 地热氦泉形成机理

3.2.1 氦气异常与断裂

(1) 土壤氦气异常

本次研究对土壤面积测氦数据采用普通克里金插值法,通过 Surfer 软件绘制土壤氦气测量等值线图(图 9)。由图 9 可知,土壤氦气异常区域呈带状分布,并且与以往研究工作推断的断裂高度吻合,表明土壤中氦气聚集受断裂构造控制。

采用土壤氦气测量与 CSAMT 测量联合解译对揭示断裂构造、氦气聚集机制及地热氦泉形成更为直观^[21-23]。土壤氦气测量 PM01 线采用分布形式检验法^[40]计算出背景值为 1 323.11Bq·m⁻³,阈值为 2 229.19 Bq·m⁻³,标准离差 604.05,共存在 3 处氦气异常带(图 10)。其中Ⅱ号异常带属于该剖面最大的异常带,为递减型多峰异常,极值为 9 964 Bq·m⁻³,对应的 CSAMT 反演断面在异常带两侧电阻率等值线呈现明显的“V”型低阻带,推断该异常带由两条断裂控制形成,异常带内对应分布的 G35、YZ1 两眼地热

氦泉井,氦浓度高达 82.6~260.0 Bq·L⁻¹。Ⅲ号异常带规模略小于Ⅱ号异常带,为不对称型双峰异常,极值为 6 492 Bq·m⁻³,对应的 CSAMT 反演断面在异常带电阻率等值线呈现近垂直的扭曲、错断,推断该异常带由 1 条断裂控制,异常带内对应分布的 ZK1 地热氦泉井氦浓度为 182.0 Bq·L⁻¹。

在 CSAMT 反演断面中,在埋深 150~350 m 存在一条明显的近横向低阻带,该低阻带与已有地热井热储层埋深高度吻合,表明地热田的热储层具有似层状特点。

(2) 水氦异常

地热田水氦测试数据同样采用普通克里金插值法,通过 Surfer 软件绘制水氦等值线图(图 11)。由图 11 可知,地热田内水氦呈现中间高、四周低的特点:中部高异常区是地热井聚集区,同时是断裂密集交汇区,表明地热水中氦含量显著高于冷水;冷水中氦浓度较高的地点同样呈现沿断裂分布的特点。

不论是土壤氦气异常还是水氦异常,均揭示氦气异常严格受断裂构造控制,断裂构造是氦气迁移和富集的重要因素。

3.2.2 氦源分析

以往研究认为,地下水中的氦并非主要来自水中铀、钍等元素的衰变,而是主要来自围岩^[41-42]。由表 1 可知,地热水中氦含量远远高于钍含量,呈现数个量级的差距,印证了上述观点。各类岩石中氦析出量与钍和铀含量呈现显著线性相关性^[43],铀作为衰变链源头对氦析出起到决定性作用。

地热田热储层为碳酸盐岩地层,铀元素丰度值低,不足以氦泉形成提供足够的物质来源。本次研究认为地热水中氦的来源存在以下两方面:

(1) 热储层下伏的新太古代傲徕山序列松山单

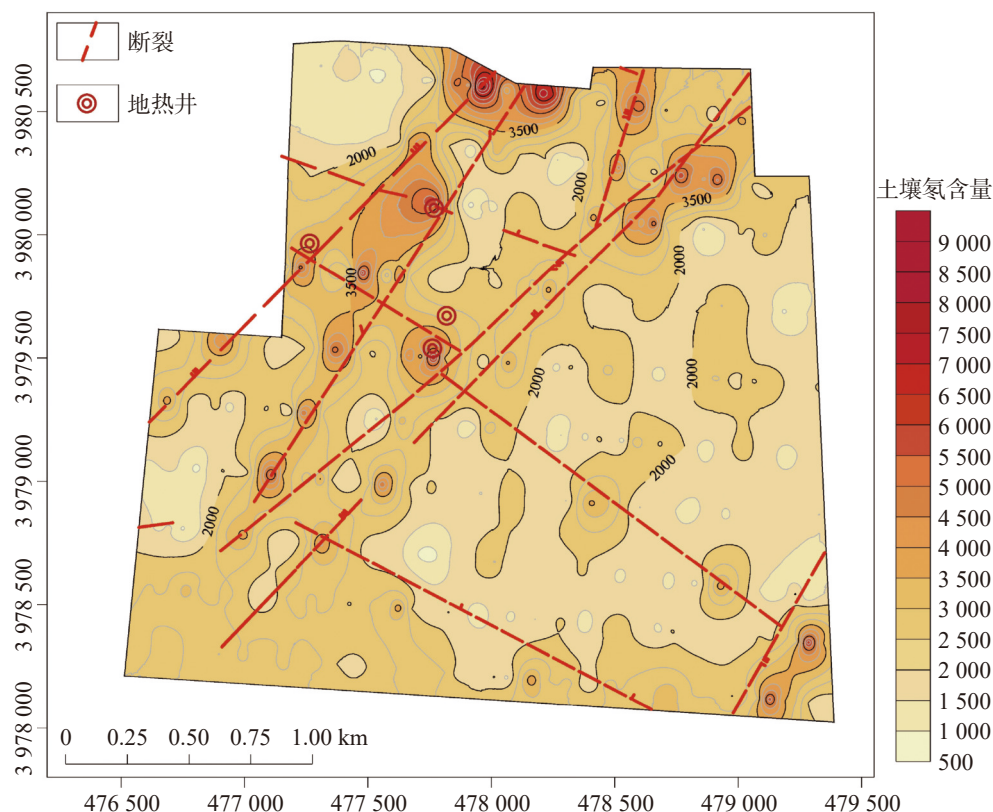


图9 土壤氡气浓度等值线图

Fig. 9 Contour map of soil radon concentrations

元中粒二长花岗岩为地热氡泉形成提供了物质来源。傲徕山序列二长花岗岩是新太古代晚期规模最大的—次酸性岩浆同源多次侵入形成的,属于上地壳物质熔融作用形成的S型花岗岩,分异程度高,具备富含铀的各种特征^[43-44]。根据以往地质研究,地热田周边区域的松山单元二长花岗岩铀元素含量为 $46.0 \times 10^{-6} \sim 867.0 \times 10^{-6}$ ^[45],铀元素含量较高,说明热储层下伏岩体可提供大量氡来源。由图10可知,断裂切割了下伏的二长花岗岩,岩体中析出的氡沿断裂构造破碎带迁移、富集并赋存在热储层的地热流体中。

(2)地热田与周边区域沂水县于家洞地区^[46]、沂源县张家坡地区^[47]铀矿地质特征基本一致,地热田热储层与铀矿矿体发育层均为寒武纪朱砂洞组,下伏新太古代傲徕山序列松山单元中粒二长花岗岩,发育多组断裂。上述两处铀矿均属于外带型花岗岩型铀矿^[48],朱砂洞组地层中铀含量分别为 $0.3 \times 10^{-6} \sim 149.0 \times 10^{-6}$ 和 $0.1 \times 10^{-6} \sim 154.1 \times 10^{-6}$,矿化处铀含量显著升高,矿化受断裂构造控制分布。地热田具备同样的铀矿化地质构造背景,在热储层中沿断裂构造带极有可能有铀矿化带发育,从而为地热氡泉形成提供氡来源。

3.2.3 空间与动力分析

岩石中氡以自由态、吸附态、封闭态的形式存在,自由氡可随地下流体(气流或热液)进行迁移。当岩石受到应力作用产生损伤时,会产生大量微裂隙,在核反冲作用下伴随晶格错动和超声振动,吸附和封闭的氡被释放并转为自由氡进行迁移。诸多学者对岩石的损伤演化和氡析出规律进行了深入研究,结果表明氡析出量与岩石损伤累计程度成正比^[49-52]。

断裂构造活动改变了破碎带周围的地应力分布,尤其是在断裂交汇处往往引起局部应力集中形成高应力区,使破碎带及围岩持续发生蠕变塑性变形和破损,形成一系列密集且贯通的微裂隙网络,比表面积增加,氡的持续析出能力增强。破损岩石中析出的氡则沿裂隙网络向断裂破碎带内迁移、汇集,部分氡沿破碎带向地表运移,在近地表沿断裂带形成土壤氡气异常,另一部分氡则溶于水赋存在地下。

地热田紧邻安驾庄断裂,位于其次级断裂交汇处。安驾庄断裂属于深大活动断裂^[53],NNE向次级断裂与安驾庄断裂呈小角度相交,继承了安驾庄断裂的活动性,是地热田的主要控热构造,而近EW向、

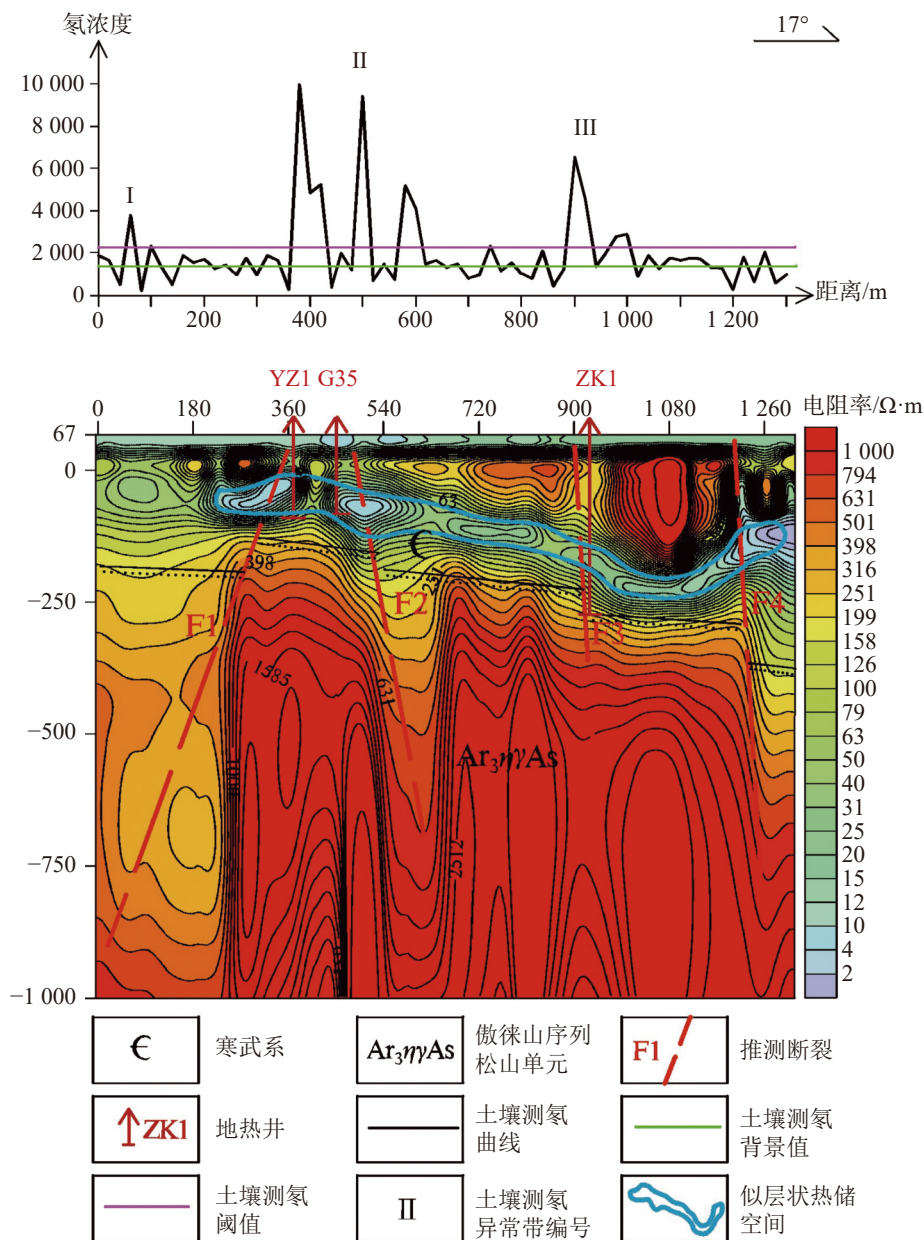


图 10 土壤测氦剖面与 CSAMT 测量断面解译图

Fig. 10 Interpretation of soil radon profile and CSAMT profile

NW 向张扭性次级断裂则是良好的导水断裂。在 NNE 向断裂与近 EW 向、NW 向断裂的交汇部位,破碎带不仅提供了与深部热源进行水热交换的通道,也为深部富铀的岩体或沿断裂分布的铀矿化带中自由氦的析出、迁移与富集提供了通道和空间,深部高应力区则为氦析出提供了源源不断的动力。

地震活动与构造活动密切相关,通过应力释放与地震波传播进一步促进岩石中氦的析出与迁移。地热田位于长清—临沂地震带^[54],区域上受夏张—安驾庄断裂、肥城断裂、峰山断裂等深大活动断裂影响,周边区域地震较为频发,为地热氦泉的形成提

供了有利的动力和热源条件。

3.2.4 热源分析

安驾庄地热田地热水形成具有四元聚热特点^[55-56],其中最主要的热源为夏张—安驾庄断裂及其次级断裂带中的深循环水热对流聚热,夏张—安驾庄断裂属于深大活动断裂,沟通了深部热源,在其次级断裂的交汇部位形成强富水和优势导水通道,通道内以水为载体进行带状深循环对流聚热传导,带状对流聚热沿通道传导至似层状热储层内则转为层间热对流传导。另外,大地热流毯状传导聚热为面源上的

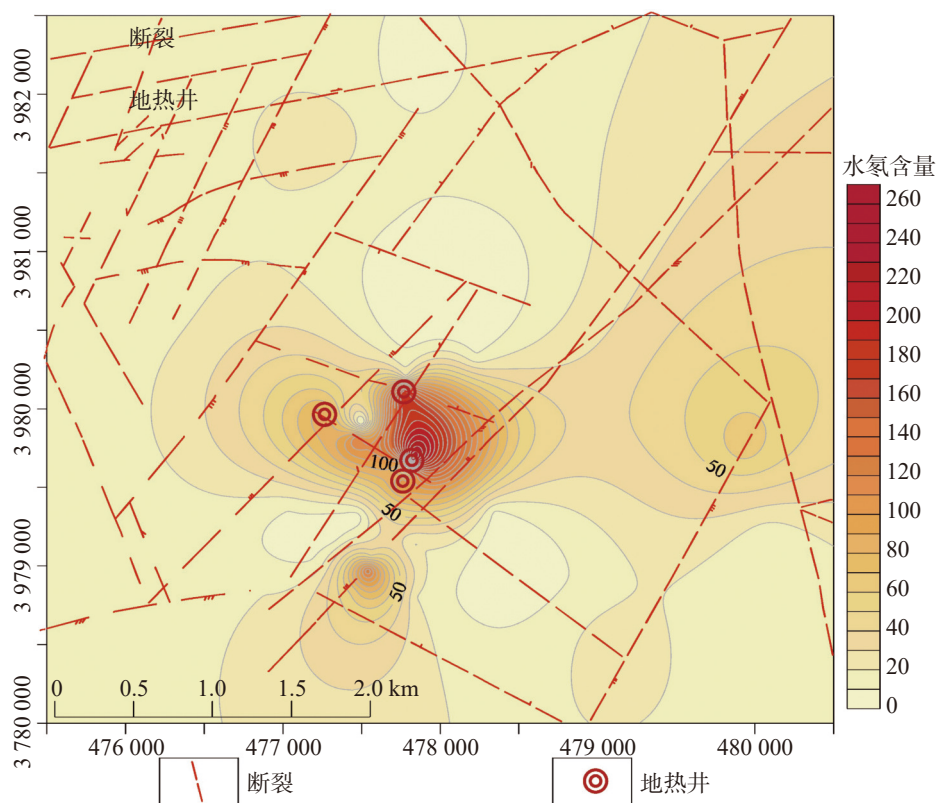


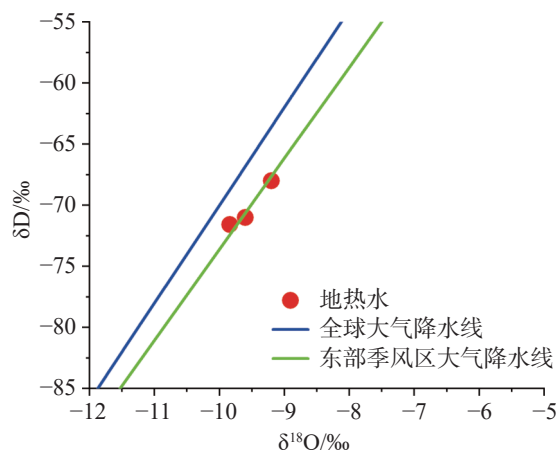
图 11 水氡浓度等值线图

Fig. 11 Contour map of radon concentration in water

正常大地热流传导,是地热田热源之一;地震活动与地热形成呈现出明显的耦合共生关系^[57],地热田位于长清—临沂地震带内,小震频发,地震活动的能量释放与摩擦生热是地热田的热源之一;地热田热储层下伏的傲徕山序列松山单元二长花岗岩铀元素含量高,且热储层具有形成花岗岩外带型铀矿的地质特征,地热水中氡含量高也表明热储围岩中放射性元素含量高,因此,放射性元素衰变生热也是地热田的热源之一。

3.2.5 水源分析

将文献 [6]、[19]、[20] 中地热水氢氧同位素测试结果投在 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系图(图 12)中,发现地热水均分布在我国东部季风区大气降水线附近,表明地热水主要源自大气降水入渗补给,属大气降水成因^[58-59]。大气降水入渗后沿岩溶裂隙、接触带裂隙、构造裂隙等径流通道补给地热田,地下水在安驾庄断裂与次级断裂交汇部位的优势通道进行以深循环水热对流聚热为主的热量传导转为地热水,并且地热水沿断裂带上涌至似层状热储层进行层间热对流传导,形成带状兼层状热储。由于似层状热储层内

图 12 地热水 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系图Fig. 12 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in geothermal water

对流传热能力较低,地热水延伸范围有限,地热田发育规模不大(图 13)。

4 结 论

(1)安驾庄地热田地热水水化学类型为 $SO_4Cl-Na-Ca$ 型,富含多种具有医疗作用的微量元素,可命名为氟—偏硅酸—氢复合型热矿水。

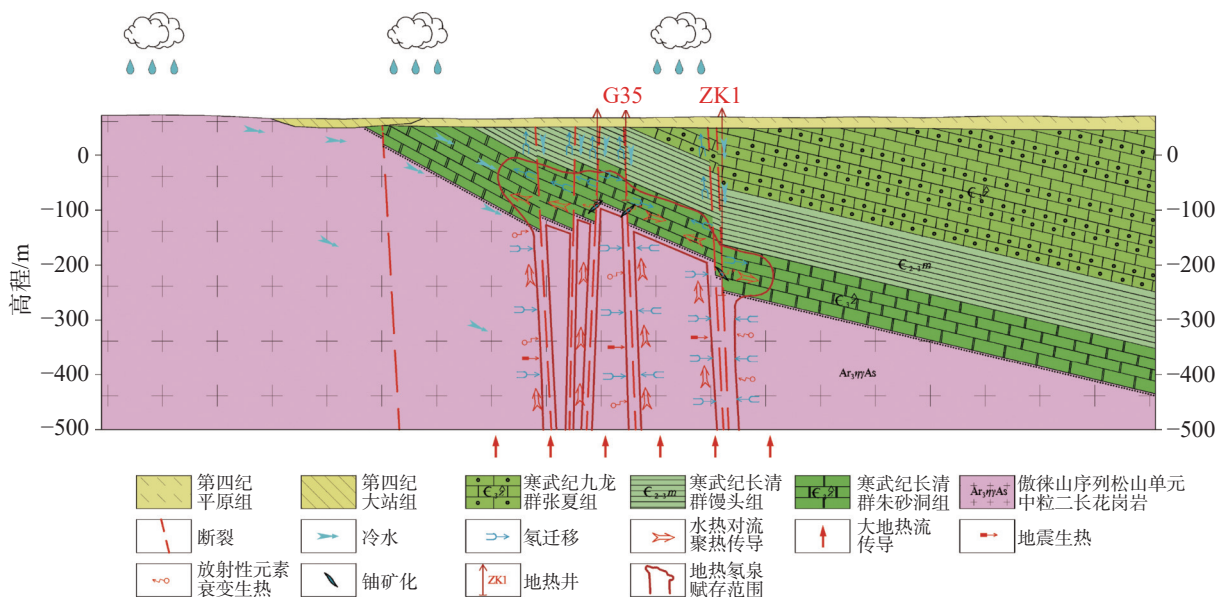


图13 安驾庄地热氡泉形成模式示意图

Fig. 13 Schematic diagram of formation model of the Anjiazhuang geothermal radon spring

(2) 地热水处于由未成熟水向部分平衡水过渡阶段, 主要阴阳离子来源以蒸发盐和碳酸盐溶解为主, 部分来自硅酸盐矿物溶解, 离子交换作用影响地热水中离子组分演化。

(3) 地热氡泉补给源以大气降水入渗补给为主, 其热源具有四元聚热的特点, 以构造破碎带内的深循环水热对流传导为主, 兼有大地热流毯状传导聚热、地震活动聚热、放射性元素衰变生热等热源。

(4) 地热田内的断裂构造活动是地热氡泉形成的重要因素, 断裂构造破碎带不仅是导水和富水的优势通道, 也是氡的迁移和富集通道; 热储层下伏的富铀S型花岗岩和热储层中沿断裂分布的铀矿化带为地热水中氡的富集提供物质来源; 断裂构造活动与地震则为地热氡泉形成提供了氡析出的动力来源。

参考文献

- [1] 刘志和, 卢霞, 刘拥军. 山东省医用矿泉氡浓度测定[J]. 中国辐射卫生, 1994, 3(2): 90-91.
LIU Zhihe, LU Xia, LIU Yongjun. Determination of radon concentration in medical mineral springs in Shandong Province[J]. Radiation Health in China, 1994, 3(2): 90-91.
- [2] Klaus Becker. One century of radon therapy[J]. International Journal of Low Radiation, 2004, 1(3): 334-357.
- [3] Kiyonori Yamaoka, Fumihito Mitsunobu, Katsumi Hanamoto, Koichi Shibuya, Shuji Mori, Yoshiro Tanizaki, Katsuhiko Sugita. Biochemical Comparison between Radon Effects and Thermal Effects on Humans in Radon Hot Spring Therapy[J]. Journal of Radiation Research, 2004, 45(1): 83-88.
- [4] 温传河. 泉水中的放射性元素氡及其应用价值初探[J]. 管理观察, 2009(28): 216-271.
WEN Chuanhe. Preliminary study on radioactive element radon in spring water and its application value[J]. Management Observation, 2009(28): 216-271.
- [5] [蔡有兄, 钟秀燕. 山东省鲁中南地区典型地热田概述[J]. 山东国土资源, 2015, 31(5): 24-30.
CAI Youxiong, ZHONG Xiuyan. Brief introduction to typical geothermal field in south region of Shandong province[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(5): 24-30.
- [6] 王成明, 杨询昌, 徐勇, 王悦琪. 山东省深部岩溶热储地热水同位素特征分析[J]. 山东国土资源, 2013, 29(1): 21-24.
WANG Chengming, YANG Xunchang, XU Yong, WANG Yueqi. Study on isotopic characteristics of deep karst geothermal water in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(1): 21-24.
- [7] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 宋绵, 郑一迪, 马雪梅. 山东鲁中山区地热地质特征及热水成因[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1908-1918.
LIU Yuanqing, ZHOU Le, LV Lin, LI Wei, WANG Xinfeng, DENG Qijun, SONG Mian, ZHENG Yidi, MA Xuemei. Geothermal geological characteristics and genesis of hot water in the central mountain area of Shandong Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1908-1918.
- [8] 李曼, 张微, 廖煜钟, 刘峰, 魏帅超, 何雨江. 鲁中南典型地热区地热水氟分布特征及其驱动机制[J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 36-47.
LI Man, ZHANG Wei, LIAO Yuzhong, LIU Feng, WEI Shuaichao, HE Yujiang. Characteristics and mechanisms of fluorine enrichment in the geothermal water of south central Shandong Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technol-

- ogy, 2024, 43(3): 36-47.
- [9] 康凤新, 隋海波, 李长锁, 魏善明, 江露露, 崔洋. 岩溶热储古岩溶发育机制与地热水富集模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 13-24.
- KANG Fengxin, SUI Heibo, LI Changsuo, WEI Shanming, JIANG Lulu, CUI Yang. Mechanism and model of paleokarst development in karst geothermal reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2024, 48(1): 13-24.
- [10] 刘元晴, 周乐, 李伟, 王新峰, 马雪梅, 吕琳, 邓启军, 陈晨. 山东莱芜盆地碳酸盐岩热液溶蚀特征及水文地质意义[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 199-206.
- LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, WANG Xinfeng, LÜ Lin, DENG Qijun, CHEN Chen. Characteristics and hydrogeological significance of hydrothermal dissolution in carbonate rocks from Laiwu basin, Shandong Province[J]. Geoscience, 2020, 34(1): 199-206.
- [11] 刘元晴, 周乐, 李伟, 王新峰, 马雪梅, 吕琳, 尹凯, 孟顺祥. 鲁中山区中生代构造活动对现今岩溶地下水赋存规律的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1811-1822.
- LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, WANG Xinfeng, LÜ Lin, YIN Kai, MENG Shunxiang. Controlling effect of Mesozoic tectonic activities on present karst groundwater occurrence in central mountain area of Shandong Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1811-1822.
- [12] 刘元晴, 周乐, 李伟, 吕琳, 邓启军, 朱庆俊, 徐蒙, 马雪梅, 何锦, 王新峰. 鲁中山区下寒武统朱砂洞组似层状含水层成因分析[J]. 地质论评, 2019, 65(3): 653-663.
- LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, LÜ Lin, DENG Qijun, ZHU Qingjun, XU Meng, MA Xuemei, HE Jin, WANG Xinfeng. Genetic analysis of lower Cambrian zhushadong formation layered aquifer in the central mountain area of Shandong Province[J]. Geological Review, 2019, 65(3): 653-663.
- [13] 张增奇, 张成基, 王世进, 刘书才, 王来明, 杜圣贤, 宋志勇, 张尚坤, 杨恩秀, 程光锁, 刘凤臣, 陈军, 陈诚. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源, 2014, 30(3): 1-23.
- ZHANG Zengqi, ZHANG Chengji, WANG Shijin, LIU Shucui, WANG Laiming, DU Shengxian, SONG Zhiyong, ZHANG Shangkun, YANG Enxiu, CHENG Guangsuo, LIU Fengchen, CHEN Jun, CHEN Cheng. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2014, 30(3): 1-23.
- [14] 徐军祥, 康凤新. 山东省地热资源[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- XU Junxiang, KANG Fengxin. Geothermal resources in Shandong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [15] 高宗军, 吴立进, 曹红. 山东省地热资源及其开发利用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 1-7.
- GAO Zongjun, WU Lijin, CAO Hong. The summarization of geothermal resources and its exploitation and utilization in Shandong Province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 28(2): 1-7.
- [16] 姜光政, 高棚, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892-2910.
- JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, ZHANG Linyou, TANG Xiaoyin, HUANG Fang, ZHAO Ping, PANG Zhonghe, HE Lijuan, HU Shengbiao, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [17] 刘春华, 王威, 卫润政. 山东省水热型地热资源及其开发利用前景[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 51-56.
- LIU Chunhua, WANG Wei, WEI Zhengrun. Analysis of hydrothermal geothermal resources and its prospect of development and utilization in Shandong[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 51-56.
- [18] 许传杰, 张军, 张玲, 李肖兰, 翟立民. 山东省干热岩地热资源潜力估算[J]. 山东国土资源, 2021, 37(10): 44-50.
- XU Chuanjie, ZHANG Jun, ZHANG Ling, LI Xiaolan, ZHAI Limin. Estimation of geothermal resource potential of dry hot rock in Shandong province[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(10): 44-50.
- [19] 山东省矿产勘查局第一地质队. 山东省肥城市安驾庄地热田详查地质报告[R]. 1995.
- [20] 中化地质矿山总局山东地质勘查院. 山东省泰安市地热资源调查报告[R]. 2020.
- [21] 白新飞, 宋津宇, 张军, 于超, 杨时骄, 李庆义, 孙晓涛. 山东省济南市莱芜区雪野湖地区地热矿泉水形成机理探析[J]. 山东国土资源, 2022, 38(5): 26-33.
- BAI Xinfei, SONG Jinyu, ZHANG Jun, YU Chao, YANG Shijiao, LI Qingyi, SUN Xiaotao. Study on the formation mechanism of geothermal radon spring in Xueyue Lake area, Laiwu District, Jinan City, Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2022, 38(5): 26-33.
- [22] 白新飞, 宋津宇, 张军, 杨时骄, 于超, 翟立民, 张松林. 济南市平阴县大孙庄地区地热矿泉水形成机理探析[J]. 山东国土资源, 2022, 38(10): 19-25.
- BAI Xinfei, SONG Jinyu, ZHANG Jun, YANG Shijiao, YU Chao, ZHAI Limin, ZHANG Songlin. Formation mechanism of geothermal radon spring in Dasunzhuang area in Pingyin county in Jinan City[J]. Shandong Land and Resources, 2022, 38(10): 19-25.
- [23] 白新飞, 张军, 王涛, 宋亮, 宋津宇, 于超, 赵明杨, 王振国. 土壤氡气测量与 CSAMT 测量在铜冶店—孙祖断裂勘查中应用[J]. 山东国土资源, 2021, 37(11): 60-66.
- BAI Xinfei, ZHANG Jun, WANG Tao, SONG Liang, SONG Jinyu, YU Chao, ZHAO Mingyang, WANG Zhenguo. Application of soil radon measurement and casmt measurement in the exploration of Tongyedian-Sunzu fault[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(11): 60-66.
- [24] Piper M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Transactions, American Geophysical

- Union, 1944, 25(6): 914-928.
- [25] 康凤新, 史启朋, 马哲民, 隋海波. 盆地潜凸起岩溶热储地热田成因机理: 以菏泽潜凸起为例[J]. *地质学报*, 2023, 97(1): 221-237.
- KANG Fengxin, SHI Qipeng, MA Zhemin, SUI Haibo. Genetic mechanism of the karst geothermal reservoir in buried uplifts of basins: A case study of Heze[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(1): 221-237.
- [26] 史启朋, 宋帅良, 孟甲, 郑慧铭. 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 Qipeng, SONG Shuailiang, MENG Jia, ZHENG Huiming. Hydrochemical evolution of karst geothermal water in the Heze uplift geothermal field, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 310-318.
- [27] 孙斌, 李长锁, 魏善明, 丁冠涛, 郭秀军, 高帅, 刘春伟, 杨振华. 泰山北翼岩溶含水介质分布及地下水循环规律研究[J]. *地质学报*, 2024, 98(2): 579-590.
- SUN Bin, LI Changsuo, WEI Shanming, DING Guantao, GUO Xiujun, GAO Shuai, LIU Chunwei, YANG Zhenhua. Study on the distribution of karst water-bearing medium and groundwater circulation pattern in the north flank of Mount Tai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(2): 579-590.
- [28] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3): 1088-1090.
- [29] 张超, 张保祥, 张吉圣, 邸燕. 肥城市岩溶水水化学特征及形成机制[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 698-707.
- ZHANG Chao, ZHANG Baoxiang, ZHANG Jisheng, DI Yan. Analysis of hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in Feicheng City[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 698-707.
- [30] 张文强, 滕跃, 唐飞, 王金秋, 许庆宇, 张海林. 山东省肥城断块岩溶水系统地下水水化学特征及演化分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(5): 1047-1060, 1084.
- ZHANG Wenqiang, TENG Yue, TANG Fei, WANG Jinxiao, XU Qingyu, ZHANG Hailin. Groundwater hydrochemical characteristics and evolution of the karst water system in the Feicheng fault block in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(5): 1047-1060, 1084.
- [31] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allegre C J. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1): 3-30.
- [32] 吕国森, 章旭, 张云辉, Safonova Inna, 黄豪擎, 余中友, 代倩. 川西仙水河、安宁河和龙门山断裂带地热水的水文地球化学特征及成因模式的讨论[J]. *中国地质*, 2024, 51(1): 341-359.
- LV Guosen, ZHANG Xu, ZHANG Yunhui, Safonova Inna, HUANG Haoqing, YU Zhongyou, DAI Qian. Discussion on hydrogeochemical characteristics and genetic model of geothermal waters in Xianshuihe, Anninghe and Longmenshan fault zones in western Sichuan, China[J]. *Geology in China*, 2024, 51(1): 341-359.
- [33] 唐春雷, 郑秀清, 梁永平. 龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2087-2095.
- TANG Chunlei, ZHENG Xiuqing, LIANG Yongping. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water system in the Longzici spring catchment[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2087-2095.
- [34] 黄珣, 张云辉, 李晓, 吕国森, 郭宏洋. 川西磨西断裂带东地热水水化学特征及成因机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(6): 91-101.
- HUANG Xun, ZHANG Yunhui, LI Xiao, LV Guoshen, GUO Hongyang. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism of geothermal water in the Wandong geothermal area along the Moxi fault in western Sichuan[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 91-101.
- [35] 周艺颖, 欧阳正平, 徐子东, 王文梅, 杨勇昌, 王江思, 黄泽佼, 马荣林, 梁海艳, 林毅. 琼西南九所地热水水文地球化学特征及成因[J/OL]. *地质科技通报*. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkg.tb20240242>.
- ZHOU Yiyang, OUYANG Zhengping, XU Zidong, WANG Wenmei, YANG Yongchang, WANG Jiangsi, HUANG Zejiao, MA Ronglin, LIANG Haiyan, LIN Yi. Study on hydrogeochemical characteristics and genesis of Jiushuo geothermal field in southwestern Hainan[J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkg.tb20240242>.
- [36] 周施阳, 董好刚, 李立湘, 袁东方, 卢丽, 姚飞延, 向翻, 陈林, 王震威, 吴鑫. 浙南仙居盆地水化学特征及成因分析[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(3): 527-537.
- ZHOU Shiyang, DONG Haogang, LI Lixiang, YUAN Dongfang, LU Li, YAO Feiyan, XIANG Fan, CHEN Lin, WANG Zhenwei, WU Xin. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of the Xianju basin in southern Zhejiang Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(3): 527-537.
- [37] Keul N, Langer G, Thoms S, Noolijer L J D, Bijma J. Exploring foraminiferal Sr/Ca as a new carbonate system proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 202: 374-386.
- [38] Yokota Y, Tanaka C, Kurosawa S, Yamaji A, Ohashi Y, Kamada K, Nikl M, Yoshikawa A. Effects of Ca/Sr ratio control on optical and scintillation properties of Eu-doped Li(Ca, Sr) AlF₆ single crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2018, 490: 71-76.
- [39] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [40] 马婷婷, 阙泽胜. 基于不同调查尺度的城市土壤氡浓度背景值和异常阈值测算方法稳健性分析与应用[J]. *辐射防护通讯*, 2023, 43(5): 29-34.
- MA Tingting, QUE Zesheng. Robustness analysis and application of methods for estimating the background value and anomaly threshold of radon concentration in urban soil based on different survey scales[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2023, 43(5): 29-34.

- [41] Frédéric girault, Frédéric Perrier, Tadeusz A Przylibski. Randon-222 and radium-226 occurrence in water: A review[J]. Geological Society of London, 2018, 451: 131-154.
- [42] 姚在永, 成忠礼, 王俊文. 息烽氡泉环境地球化学的初步研究[J]. 地球化学, 1982, 11(1): 76-81.
YAO Zaiyong, CHEN Zhongli, WANG Junwen. A preliminary environmental geochemical study on the radon springs in Xifeng, Guizhou Province[J]. *Geochimica*, 1982, 11(1): 76-81.
- [43] 龙淑琴, 谢焱石, 谭凯旋, 张明华, 单健, 王升. 花岗岩氡析出影响因素研究进展[J]. 辐射防护, 2022, 42(1): 11-18.
LONG Shuqin, XIE Yanshi, TAN Kaixuan, ZHANG Minghua, SHAN Jian, WANG Sheng. Research progress on influencing factors of radon exhalation in granite[J]. *Radiation Protection*, 2022, 42(1): 11-18.
- [44] 马绪宣, 刘飞, 黄河, 高利娥, 熊发挥, 何碧竹, 李海兵. 花岗岩、氡气与人类肺癌[J]. 地质学报, 2023, 97(12): 4198-4208.
MA Xuxuan, LIU Fei, HUANG He, GAO Li'e, XIONG Fahui, HE Bizhu, LI Haibing. Granite, Radon Gas and Human Lung Cancer[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(12): 4198-4208.
- [45] 山东省地质调查院. 中国区域地质志·山东志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 627-643.
Shandong Institute of Geological Survey. Editorial committee of the regional geology of China, Shandong[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 627-643.
- [46] 栾元滇, 刘垚, 姚修春, 张升磊. 山东省沂水县于家洞地区铀矿地质特征及成矿条件浅析[J]. 吉林地质, 2023, 42(2): 9-16, 29.
LUAN Yuandian, LIU Yao, YAO Xiuchun, ZHANG Shenglei. Geological features and mineralization condition of uranium deposits in the Yujiadong area of Yishui county, Shandong Province[J]. *Jilin Geology*, 2023, 42(2): 9-16, 29.
- [47] 姚修春, 马浩宁, 姜芳芳. 山东省沂源县张家坡地区铀矿地质特征及矿床成因浅析[J]. 能源与环境, 2023(6): 49-51, 57.
YAO Xiuchun, MA Haoning, JIANG Fangfang. Geological characteristics and genetic analysis of uranium deposit in Zhangjiapo area, Yiyuan county, Shandong Province[J]. *Energy and Environment*, 2023(6): 49-51, 57.
- [48] 范洪海, 庞雅庆, 何德宝, 陈东欢, 王勇剑, 孙远强, 耿瑞瑞. 华南花岗岩型铀矿成矿作用及成矿预测[J]. 地球学报, 2023, 44(5): 887-896.
FAN Honghai, PANG Yaqing, HE Debao, CHEN Donghuan, WANG Yongjian, SUN Yuanqiang, GENG Ruirui. Metallogenic process and prediction of granite-related uranium deposits in south Chian[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(5): 887-896.
- [49] 严俊, 葛良全, 邹功江, 赵剑锟, 谷懿, 徐立鹏, 罗耀耀, 贾雪辉. 单轴压力下花岗岩析出量的探究[J]. 核技术, 2013, 36(5): 050201-1-050201-4.
YAN Jun, GE Liangquan, ZOU Gongjiang, ZHAO Jiankun, GU Yi, XU Lipeng, LUO Yaoyao, JIA Xuehui. Explore the precipitation amount of radon in granite under uniaxial pressure[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36(5): 050201-1-050201-4.
- [50] 李玲玉, 张传庆, 崔国建, 周辉, 高阳, 胡大伟, 卢景景. 大理岩三轴压缩试验过程中氡释放规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1888-1897.
LI Lingyu, ZHANG Chuanqing, CUI Guojian, ZHOU Hui, GAO Yang, HU Dawei, LU Jingjing. Experimental study on the regularity of radon release from marble under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1888-1897.
- [51] 蒋复量, 杨文超, 张帅, 刘永, 李向阳, 黎明, 郭锦涛. 循环爆破荷载作用下类铀矿岩损伤与氡析出规律的实验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1): 15-20.
JIANG Fuliang, YANG Wenchao, ZHANG Shuai, LIU Yong, LI Xiangyang, LI Ming, GUO Jintao. Experimental study on damage and radon precipitation law for quasi-uranium ore under cyclic blasting load[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(1): 15-20.
- [52] Li Lingyu, Zhang Chuanqing, Tao Zhigang, Cui Guojian, Guo Yuhang, Zhou Hui. Study on radon release of intact rocks during direct shear[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(12): 4021-4034.
- [53] 孟建国, 于庆民, 李慧玲, 周均太, 王跃, 张明. 泰安地区历史及现代地震与断裂活动性关系研究[J]. 华北地震科学, 2015, 33(1): 61-65.
MENG Jianguo, YU Qingmin, LI Huiling, ZHOU Juntao, WANG Yue, ZHANG Ming. Study of relationship between modern and historical earthquakes and faults activity in Taian Area[J]. *North China earthquake sciences*, 2015, 33(1): 61-65.
- [54] 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 王志才, 杜宪宋. 山东中部一条明显的北西向中强地震带[J]. 华北地震科学, 1998, 16(2): 23-29.
CHAO Hongtai, LI Jialing, CUI Zhaowen, WANG Zhicai, DU Xiansong. An evident NW-trending seismic zone of medium-strong earthquake in central Shandong Province[J]. *North China earthquake sciences*, 1998, 16(2): 23-29.
- [55] 史猛, 康凤新, 张杰, 高松, 于晓静. 胶东半岛不同构造单元深部热流分聚模式[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1594-1605.
SHI Meng, KANG Fengxin, ZHANG Jie, GAO Song, YU Xiaojing. Discussion on the deep heat flow diversion-acculturation between uplift and depression in different tectonic units in the Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1594-1605.
- [56] 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.
- [57] 韩江涛, 牛璞, 刘家立, 吴懿豪, 辛中华, 李卓阳, 贾晓东. 地热资源与地震活动共生深部驱动机制研究现状与展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1950-1968.
HAN Jiangtao, NIU Pu, LIU Lijia, WU Yihao, XIN Zhonghua,

- LI Zhuoyang, JIA Xiaodong. Research status and prospect of deep driving mechanism of co-occurrence of geothermal resources and seismic activity[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1950-1968.
- [58] 卢兆群, 孟祥鑫, 亓协全, 朱光骥, 刘凯丽, 尹秀贞. 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.
- LU Zhaoqun, MENG Xiangxin, QI Xiequan, ZHU Guangji, LIU Kaili, YIN Xiuzhen. Hydrogeochemical characteristics and genesis of geothermal water in northern Zhangqiu[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(1): 12-24.
- [59] 罗伟, 杨仕江, 彭静, 袁余洋, 李生红, 曾祥建, 张信. 黔北遵义地区地热水化学特征及成因[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(1): 72-83.
- LUO Wei, YANG Shijiang, PENG Jing, YUAN Yuyang, LI Shenghong, ZENG Xiangjian, ZHANG Xin. Hydrochemical characteristics and genesis of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(1): 72-83.

Chemical characteristics and genetic mechanism of karst geothermal radon spring in Anjiazhuang, Feicheng

BAI Xinfei¹, HU Caiping², SONG Jinyu¹, YANG Shijiao¹, QIE Liang³, ZHANG Jun¹,
YU Chao¹, HONG Huanren¹, WANG Tao¹, SONG Liang¹

(1. No.1 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract The Anjiazhuang geothermal field, the only karst geothermal radon spring discovered in Shandong Province, is located at the contact zone between the Wenkou depression and the Dongping uplift in Feicheng City. The geological framework of this geothermal field is based on a Neoproterozoic granite basement, which is overlain by Cambrian–Ordovician carbonate rock strata and Quaternary loose sediments. Geothermal water originates within the tectonic fracture zone at the intersection of the Anjiazhuang fault and its secondary faults. It surges upward along the fracture zone and is stored in the layered karst fractures, forming a belt-like and layered thermal reservoir controlled by the fracture structure.

In this study, we systematically reveal the hydrochemical evolution characteristics of geothermal fluids and the genetic mechanisms of radon enrichment through the collection and analysis of groundwater and geothermal water samples. This includes measurements of soil radon gas, CSAMT measurement, and the application of hydrochemical diagram methods, ion component ratio characteristic methods, mineral saturation index methods and PHREEQC software simulations. The research findings show that the geothermal water is a weakly alkaline, medium-low temperature thermal mineral water, classified as a hydrochemical type of $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca}$. The concentrations of fluorine ($1.87\text{--}4.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), metasilicic acid ($32.50\text{--}68.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), and radon ($82.60\text{--}640.00\text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$) all meet the standards for designated mineral water, classified as a fluorine-metasilicic acid-radon composite therapeutic thermal mineral water, which possesses significant therapeutic value. The evolution of ion components in the geothermal water is mainly controlled by the dissolution of evaporite and carbonate minerals, followed by the dissolution of silicate minerals and cation exchange. The mineral saturation index shows that calcite and dolomite are supersaturated, anhydrite is nearly saturated, and halite is unsaturated. The enrichment of radon in geothermal water is closely related to the fracture structure: the radon in surface soil and the high anomalies of radon in groundwater are both distributed along the fracture zone. The low-resistance zone revealed by the inversion section of CSAMT measurement highly coincides with the fracture zone and the burial depths (from 150 m to 350 m) of the karst thermal reservoir. Radon mainly originates from the uranium-rich S-type granite of the Neoproterozoic Aolaishan Sequence underlying the thermal reservoir and the radioactive decay of the uranium series in the uranium mineralization zone distributed along the fracture. Deep active faults, such as the Anjiazhuang fault, induce the development of micro-fracture networks in rocks. This process facilitates the transformation of radon from a closed and adsorbed state in granite into a free state,

(下转第 339 页)

overburden layer thickness and water table height on the deformation characteristics of the overlying karst collapse has been investigated, as well as the migration law of soil particles under the influence of different factors.

The study demonstrates that during the evolution of overlying karst collapse, the contact force between particles undergoes a series of changes, which can be described approximately as follows, 'stress equilibrium–stress arch formation–stress arch destruction–stress equilibrium again–···–stress arch fracture'. The internal stress of the soil body demonstrates a pattern of 'compressive stress gradually decreasing, tensile stress gradually increasing, and tensile stress disappearing'. Additionally, the surface subsidence and porosity of the soil body tend to increase in conjunction with the collapse evolution process. It can be observed that the larger the opening of the cavern, the greater the depth and range of ground subsidence, which in turn increases the likelihood of collapse. A reduction in the thickness of the cover layer results in a more pronounced surface subsidence, thereby increasing the likelihood of collapse. Similarly, an elevated water table leads to a more rapid expansion of the soil hole, which in turn causes a more pronounced surface subsidence and an increased propensity for collapse. The relationship between surface settlement and cover layer thickness is not significant when the latter is of greater thickness. The study provides a comprehensive account of the karst collapse evolution process from a mesoscopic perspective, offering insights that can inform disaster prevention and the mitigation of surrounding karst collapse risks during the construction and operation of high-speed railway projects.

Key words karst collapse, geological hazard, train vibration, numerical simulation, dynamics response

(编辑 张玲)

(上接第 299 页)

allowing it to dissolve in geothermal water. Consequently, radon migrates and accumulates along the fracture zone. Regional seismic activities and the release of tectonic stress help to intensify the damage and fracturing of rocks, enhancing the radon exhalation ability. The relationship between hydrogen and oxygen isotopes shows that geothermal water is mainly recharged by atmospheric precipitation and is formed following the deep circulation and heating of groundwater through the karst-fault system. Its heat source exhibits the characteristics of a four-element heat accumulation: deep-circulating hydrothermal convection in the fracture zone serves as the main heat source, supplemented by the conduction of terrestrial heat flow, heat generated by seismic friction, and heat generated by the decay of radioactive elements.

In conclusion, the formation of the Anjiazhuang geothermal radon spring is the result of the synergistic effect of multiple factors including structure, hydrology and geochemistry, the structure system of the Anjiazhuang fault is not only the channel for radon migration and enrichment, but also provides the dynamic conditions for the exhalation of radon in rocks; the underlying uranium-rich granite and the uranium mineralization zone distributed along the fracture lay the material foundation, and deep-circulating hydrothermal convection and multi-source thermal effects jointly drive the evolution of geothermal water. This study systematically elucidates the multi-source synergistic genetic mechanism of radon enrichment in karst geothermal radon spring, providing a scientific basis for the exploration, development and utilization of similar geothermal resources.

Key words geothermal radon spring, compound hot ore water, four-element heat accumulation, fault structure, S-type granite

(编辑 黄晨晖)