

doi: 10.11720/wtyht.2022.0032

银涌兵,李海英,卢腾,等.相山铀矿田热结构特征与成矿关系——以邹家山矿床为例[J].物探与化探,2022,46(6):1388-1395. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0032>

Yin Y B, Li H Y, Lu T, et al. Relationships between thermal structure characteristics and mineralization of the Xiangshan uranium ore field: A case study of the Zoujiashan deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1388-1395. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0032>

相山铀矿田热结构特征与成矿关系 ——以邹家山矿床为例

银涌兵^{1,2}, 李海英³, 卢腾^{1,2}, 韩飘平^{1,2}, 孔德旭^{1,2}, 万环环^{1,2}, 庞文静^{1,2}, 吴志春⁴

(1. 江西省地质局 核地质大队, 江西 鹰潭 335001; 2. 江西省能源矿产地质调查研究院, 江西 南昌 330100; 3. 江西省地质调查勘查院 矿产勘查所, 江西 南昌 330038; 4. 东华理工大学, 江西 南昌 330000)

摘要:相山矿田是我国最大的火山岩型铀矿田,区内铀矿资源丰富,地热地质条件较好,但区内热结构及成矿特征研究程度较低。为有效解决这一问题,以矿田西部邹家山超大型铀矿床为典型区,综合地热地质、地温测井、地球物理勘探、探采对比、取样测试等成果,系统研究了矿田热结构特征,建立了热结构模型,分析了成热与成矿的关系。结果表明:研究区热结构属“热幔冷壳”型,符合中国东部地区热结构特征,较高的地壳热流与铀源体及铀矿体密切相关,放射性核素衰变产热是地壳热流主要来源;热异常受断裂构造控制明显,热源与铀源具有较强一致性,地温梯度异常是区内找矿标志之一,4℃/100m为矿床定位标志,地温梯度变化幅度可作富大矿体的定位标志。本次研究为该区地热地质及成矿地质研究提供了有效技术支撑。

关键词:相山铀矿田;邹家山;热结构;成矿关系

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)06-1388-08

0 引言

热结构最早由 Blackwell 提出^[1],主要是指一个地区地壳、地幔两部分热流的构成及分配。地壳浅部放射性元素 U、Th、⁴⁰K 衰变产生的地壳热流与地壳深部及地幔产生的地幔热流构成了地表热流^[2]。汪集旻等^[3]对热结构进行了细化补充,认为热结构还应包括不同岩层间的热流构成、热物性参数、温度场特征及热流配分比。热液型铀矿是热液活动的产物,其形成不仅需要丰富的铀源,良好的热结构环境更是促使铀元素活化迁移、富集成矿的必要条件,热液型铀矿与热异常在时空上具有密切联系^[4-8]。

相山矿田位于扬子陆块和华夏陆块两个一级大地构造单元间经历长期演化的复杂结合带上,区内

多期次构造运动和岩浆活动频繁,中生代陆相火山活动尤为强烈,大面积发育的火山岩及次火山岩具有较高的放射性生热率。矿田铀矿资源丰富,是我国最大的火山岩型铀矿田。以往勘探成果表明,矿田内也蕴含着丰富的地热资源,且铀与热在空间上具有密切的相关性。前人主要开展了地幔热流及温热水分布规律等研究,对矿田热结构特征研究较为欠缺,矿田热结构与铀成矿关系研究相对空白。

邹家山矿床是相山矿田内典型的超大型矿床的代表,勘探程度高,且部分地段已经开采,矿床基础资料丰富。本文以邹家山矿床作为研究对象,通过收集整理以往勘查成果资料,结合热物性参数测量及前人研究成果,对矿床热结构特征进行详细研究,同时,对比矿床矿体空间分布特征,分析研究热与铀

收稿日期: 2022-01-26; **修回日期:** 2022-04-15

基金项目: 江西省地质局科技创新基金项目(赣核地科 201993-6);江西省地质局发展引导资金项目(2020YDZ01);中国铀业有限公司—东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(NRE2021-08);江西省技术创新引导类计划(20212AEI91008)

第一作者: 银涌兵(1985-),男,四川绵阳人,高级工程师,主要从事地球物理相关工作。Email: ntyybice@163.com

的关系,以期为该区地热地质及成矿地质研究提供支撑。

1 研究区地质概况及大地热流特征

邹家山矿床位于相山矿田西部,EW 向河元背—凤岗基底断陷带和 NE 向邹家山—石洞断裂带的交汇部位,钻孔资料显示,矿床地热异常明显。区内地层简单,构造复杂,热液活动频繁(图 1)。基底为青白口系云母石英片岩(Qb),盖层为下白垩统打鼓顶组粉砂岩、砂砾岩(K_1d^1)、流纹英安岩(K_1d^2),鹅湖岭组晶屑玻屑凝灰岩(K_1e^1)和碎斑熔岩(K_1e^2)。区域深大断裂邹家山—石洞断裂带贯穿矿床,其展布呈尖灭再现和尖灭侧现,走向 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾向 NW、倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,区内隐伏型火山塌陷构造发育良好,埋深 200~500 m。碎斑熔岩和流纹英安

岩是矿床主要赋矿围岩,矿体主要赋存于邹家山—石洞断裂的旁侧裂隙及火山塌陷构造变陡部位不同岩性界面附近,地热异常与断裂构造关系密切。

矿田大地热流分布特征显示(表 1),大地热流最低 65.6 mW/m^2 ,最高 83.5 mW/m^2 ,平均大地热流 73.3 mW/m^2 ,略高于江西省实测大地热流均值 70.1 mW/m^2 ,属相对高热流区,大地热流高点落于邹家山矿床,显示研究区地热异常。NE 向主断裂构造形成早期呈张扭性,深切基底,沟通、传导深部热能,晚期受板块应力影响,构造呈压扭性,利于深部热能富集、储存。特别是在火山塌陷构造复合部位,深部热能与构造运动热能叠加,NW 向次级断裂构造为盖层构造,具导水、散热作用。受此影响,矿田大地热流值在平面上与 NE 向断裂构造呈正相关、与 NW 向断裂构造呈负相关,大地热流值最高处为 NE 向断裂构造与火山塌陷构造的复合部位。

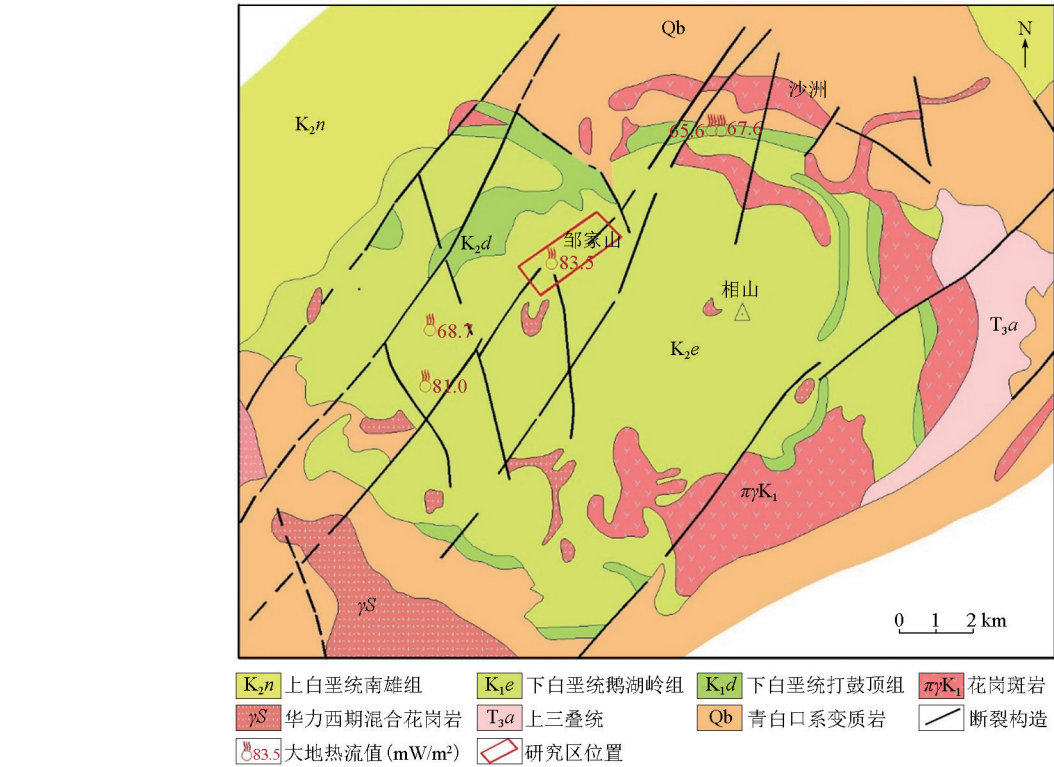


图 1 相山矿田地质背景及大地热流分布

Fig. 1 Geological background and terrestrial heat flow distribution map of Xiangshan ore field

表 1 相山矿田大地热流统计

Table 1 Statistical table of regional terrestrial heat flow

序号	地层代号	深度范围/m	地温梯度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	实测热流值/ ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)	校正热流值/ ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)	资料来源
1	K_1e^2	100~260	20.17 ± 0.8	3.25 ± 0.2	65.6	—	周文斌等,1992 ^[9]
2	K_1d^2	280~370	22.00 ± 1.7	3.23 ± 0.1	71.2	67.6	
3	K_1e^2	100~300	26.84 ± 1.1	3.02	101.0	83.5	
4	K_1e^2	320~430	25.90 ± 1.7	3.02	78.0	68.7	
5	K_1e^2	440~940	32.20 ± 1.4	3.14 ± 0.2	101.0	81.0	

2 热物性参数

2.1 地温梯度

地温梯度是研究地温场及热结构的主要参数之一,反映一定范围内温度随深度的变化关系。地温梯度利用钻孔井温实测而得。井温测量采用准稳态测量法,测量仪器为 JW238 型数字井温仪,测井时间与钻孔水位静止时间相隔 24 h 以上。经与静井 2 年多的钻孔稳态测温结果对比,准稳态测量与稳态测量结果相对误差较小($<1.5\%$),准稳态测量结果较为可靠,可做基础资料研究使用。

2.2 热导率

岩石热导率是表征岩石传热特性的物理量,是研究地壳、上地幔热结构和地球深部热状态的重要参数。影响岩石热导率的因素较多,主要有岩石成分、颗粒物粒度和结构、孔隙度、水饱和度、渗透率、湿度、压力等。岩石热导率测试由东华理工大学核资源与环境国家重点实验室负责实施,测试仪器为德国 TCS 热导率测试仪,测试精度 $\pm 3\%$,样品为钻孔原生带岩心。

前人研究结果表明,岩石热导率受温度影响较大,实测热导率采用如下公式^[10]进行校正:

$$K(0) = K(25) \{1.007 + 25[0.0037 - 0.0074/K(25)]\}, \quad (1)$$

$$K(T) = K(0) \{1.007 + T[0.0036 - 0.0072/K(0)]\}, \quad (2)$$

式中: T 为钻孔岩心原位温度, $^{\circ}\text{C}$; $K(0)$ 和 $K(25)$ 分别为岩心在 0°C 和 25°C 时的热导率值, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.3 生热率

岩石生热率是单位体积岩石中所含放射性元素在单位时间由衰变所释放的能量,标志着岩石自身生热能力的高低^[11-12]。依据岩石放射性核素 U、Th、K 实测含量,采用 Rybach 提出的生热率计算方法^[13]获得岩石生热率:

$$A = 0.01\rho(9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K), \quad (3)$$

式中: A 为岩石生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; C_U 为铀含量, 10^{-6} ; C_{Th} 为钍含量, 10^{-6} ; C_K 为钾含量, 10^{-2} 。

该方法在采集钻孔岩心进行分析测试的基础上,能最大限度地获取岩石生热率实际特征,但对于深部岩体,受制于钻孔深度影响,不能通过实测其放射性核素含量来计算深部岩体生热率。针对这一情况,Rybach^[13]从地球物理角度出发,研究了地震波纵波速度与岩石放射性生热率的关系,建立了波速与生热率间的相关关系:

$$\ln A = (16.5 - 2.74)V_p, \quad (4)$$

式中: V_p 为纵波波速, km/s 。

依据江西上地壳三维速度结构特征,合成获取研究区不同深度纵波波速值^[14],计算得到深部岩体生热率值。

2.4 热流配分比

热流配分比是岩石圈热结构研究中非常重要的内容^[15-16],可据此获得热分布状态,建立研究区热结构。地壳热流是地壳各结构层放射性生热量的叠加结果,可采用“剥层法”计算各结构层热流(式(5)),进而获得地壳热流(式(6));结合大地热流,可计算出地幔热流(式(7)),最终获得壳幔热流配分比:

$$q_i = A_i \cdot D_i, \quad (5)$$

$$q_c = \sum q_i, \quad (6)$$

$$q_m = q_0 - q_c. \quad (7)$$

式中: q_i 为结构层热流, mW/m^2 ; A_i 为结构层岩石生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$; D_i 为结构层厚度, km ; q_c 为地壳热流, mW/m^2 ; q_m 为地幔热流, mW/m^2 , q_0 为地表大地热流, mW/m^2 。

3 热结构特征

3.1 地温梯度特征

研究区平均地温梯度为 $4.01\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[17],高于区域平均地温梯度 $3.06\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[14]。地温梯度等值线在平面上呈带状展布(图 2),其分布特征与大地热流分布特征具有较强的一致性,二者皆受控于断裂构造。地温梯度自邹家山—石洞断裂带两侧向中心部位逐渐增高,高梯度等值线呈不规则团状展布于邹家山—石洞断裂带、火山塌陷构造附近,走向与邹家山—石洞断裂带走向一致,体现了邹家山—石洞断裂带对地温梯度的控制性;同时,在地温梯度带内,地温等值线的不均匀、非线性展布特征,体现了深部塌陷构造对地温梯度的叠加影响效应。垂向上,不同深度地温梯度差异明显,变化趋势同样受控于断裂构造,靠近邹家山—石洞断裂带及火山塌陷构造部位的实测地温梯度明显增大,增幅为 $(2\sim 3)\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,近 NW 向断裂构造部位的实测地温梯度相对降低,降幅为 $(1\sim 2)\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

将地温梯度大于研究区平均地温梯度定义为地温异常,异常空间展布特征主要受盖层断裂及塌陷构造联合控制。切穿基底的 NE 向邹家山—石洞断裂规模较大,具有多期次活动的特点,为深部热源传导和地下水的深循环运动创造了良好条件,控制着地温异常的走向,NW 向断裂构造为研究区补水构

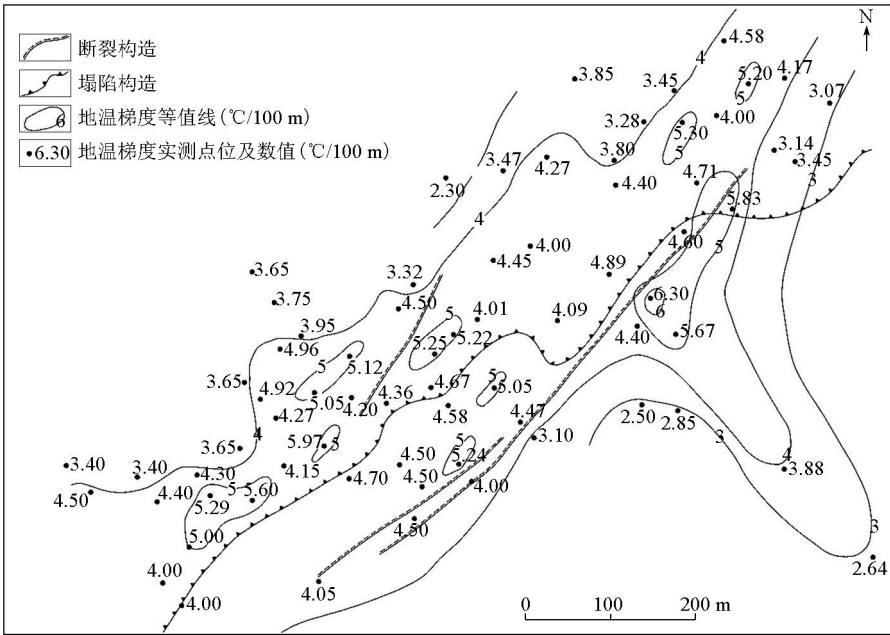


图 2 邹家山矿床地温梯度平面等值线

Fig. 2 Plane contour map of geotemperature gradient of Zoujiashan deposit

造,具有降温作用,控制着地温异常的宽度。火山塌陷构造呈隐伏态,埋藏较深,构造面岩石破碎,具有良好的储热、储水功能,火山塌陷构造与邹家山—石洞断裂带交汇部位控制着地温异常区,异常幅值达 6.8 °C/100 m。

3.2 热结构模型

研究区 0~1.46 km 深度地层分布及岩石生热率特征依据式(3)据实计算而得,1.46~6.12 km 深度地层结构及生热率依据式(3)参照基底岩石分析结果计算近似代表,6.12 km 至莫霍面地层结构及岩石生热率依据式(4)结合区域地壳三维速度结构计算得到。

0~0.89 km 深度结构层为下白垩统鹅湖岭组火山岩,岩性以碎斑熔岩为主,该结构层岩石生热率平均值为 4.39 $\mu\text{W}/\text{m}^3$;0.89~1.46 km 深度结构层为下白垩统打鼓顶组火山岩,岩性以流纹英安岩为主,该层岩石生热率平均值为 3.68 $\mu\text{W}/\text{m}^3$;1.46~

6.12 km 深度结构层为上地壳层,岩性以沉积变质岩和花岗岩为主,该层岩石生热率平均值为 1.51 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

中地壳岩石以花岗岩、高角闪岩相和麻粒岩相变质岩为主,下地壳岩石以玄武岩质岩石和壳幔混熔岩石为主。中、下地壳结构分层以地层波速界线细化,表 2 为依据波速与生热率关系计算出的各结构层热结构。

综合研究区地壳各结构层参数,统计计算地壳热流分层特征,建立了研究区地壳生热率及岩石圈热结构概念模型(图 3)。研究区地壳热流为 35.33 mW/m^2 ,地幔热流为 48.16 mW/m^2 ,壳、幔热流比为 0.73,属“热幔冷壳”型,与汪集旻等^[18]、邱楠生^[19]对中国东部地区热结构特征研究结果一致。上地壳热流值为 13.05 mW/m^2 ,中地壳热流值为 16.13 mW/m^2 ,下地壳热流值为 6.16 mW/m^2 ,地壳热流主要受上地壳、中地壳岩石放射性核素衰变生热的影响。

表 2 研究区岩石圈热结构计算结果

Table 2 Calculation table of lithospheric thermal structure in the study area

结构层	顶界面深度/km	底界面深度/km	D_i/km	$V_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_i/(\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	$q_i/(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$	热流值/ $(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$
地表	—	—	—	—	—	—	83.50(q_0)
上地壳	0	0.89	0.89	—	4.39	3.91	79.59
	0.89	1.46	0.57	—	3.68	2.10	77.49
	1.46	6.12	4.66	—	1.51	7.04	70.45
中地壳	6.12	10.83	4.71	5.92	1.32	6.22	64.23
	10.83	13.89	3.06	6.07	0.88	2.69	61.54
	13.89	16.69	2.80	6.09	0.83	2.32	59.22
	16.69	22.74	6.05	6.10	0.81	4.90	54.32
下地壳	22.74	33.00	10.26	6.21	0.60	6.16	48.16

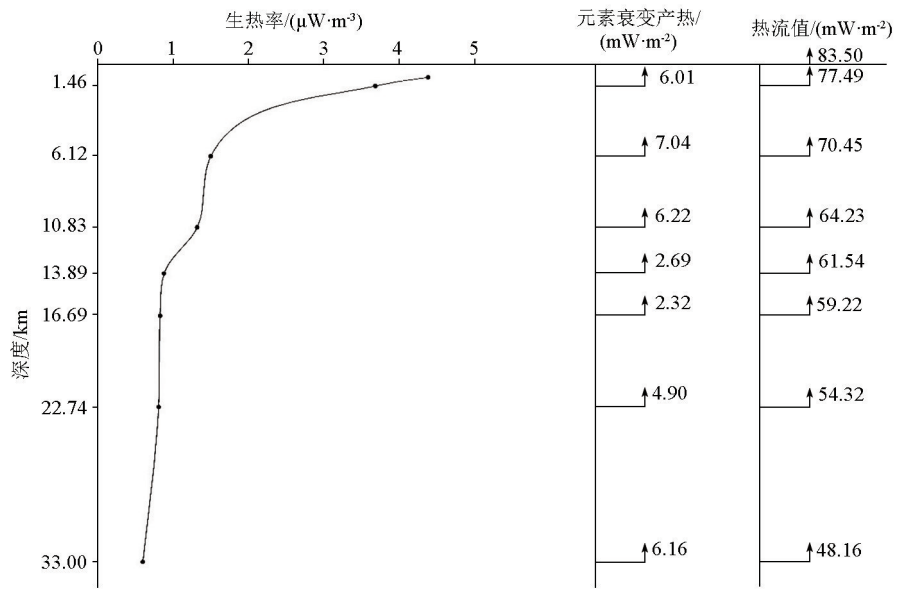


图 3 矿床生热率模型及热结构特征

Fig. 3 Heat generation rate model and thermal structure characteristics of the deposit

4 热结构与成矿关系

4.1 热源与铀源

研究区属铀钍混合、以铀为主型矿床,矿床铀平均品位为 0.3%,约为含矿围岩平均品位的 400 倍。岩石 U、Th 元素衰变生热量大于总生热量的 90%,大面积分布的高品位矿体源源不断地释放热能,为地表高热流的形成提供物质来源。

总体热结构显示,研究区 6 km 以浅上地壳岩石的生热率相对较高,约为深部岩石生热率的 3~8 倍,上地壳产生的热流大于地壳热流的三分之一,特别是早白垩世火山岩产生的热流约为地壳热流的六分之一,其厚度仅为地壳厚度的 4%,暗示上地壳铀源丰富,早白垩世火山岩是区内主要铀源体。

4.2 空间展布特征

研究区矿体及热结构平面分布特征主要受邹家山—石洞断裂带和火山塌陷构造联合控制,总体呈 NE 向展布,断裂带与塌陷构造交汇部位是成矿主体部位^[20-21],也是热异常中心部位。贯穿全区的 NE 向邹家山—石洞深大断裂带切穿结晶基底,张扭性断裂构造沟通深部热源(液),受深部热流上涌影响,断裂构造两侧一定范围内岩石发生水热蚀变,围岩性质发生变化,岩温相对升高,孔隙度变大,岩石地球化学环境及机械物理性质发生改变,深部成矿热液及矿化剂向上运移并发生热液作用,铀、钍离子有效迁移,在碱交代作用下初步富集于断裂构造附近,形成低级铀源建造即成矿地质体,该地质体控制

着矿带平面范围。受热传导及热液温度影响,岩石蚀变带地温梯度相对升高,呈热异常态,在平面上,地温异常(地温梯度大于 4 ℃/100 m)范围与矿带展布范围基本一致,走向上受 NE 向邹家山—石洞导热断裂带控制,主要分布于邹家山—石洞断裂带上盘,异常中心(地温梯度大于 5 ℃/100 m)为钻孔揭露的火山塌陷构造的反映(图 4)。据钻孔资料统计,地表岩石地温高值区为火山塌陷构造与邹家山—石洞断裂构造交汇平面投影位置,矿体分布于高值区两侧,且主要分布于火山塌陷构造的下盘,矿体的形成对岩性无选择性,但受塌陷构造形成因素影响(打鼓顶组流纹英安岩向火山盆地中心滑塌),矿体岩性以打鼓顶组流纹英安岩为主。

随着火山活动加剧,火山塌陷规模发育,在与断裂带的复合部位形成拉张空间,该空间由一系列滑塌裂隙带组成,在空间分布上具有成群、成带的特点,总体呈不规则脉状、透镜状,少数为囊状。深部热液、热流运移、汇聚至此,形成溶液容矿地质体及高温热储体。伴随大气降水的不断渗入,空间内成矿溶液物理化学性质发生变化,逐步呈中—酸性,铀、钍离子在还原条件下分别以 U^{4+} 与 Th^{4+} 铀酰碳酸盐络合物、卤化物或以硅酸盐络合物形式迁移、沉淀^[22],形成富大矿体。深部热液、热流是矿体形成的必要物质及热源条件,在垂向上,矿体形成时富集的热流造就了矿与热的一致性(图 5),同时,高品位矿体不断衰变产热,叠加形成矿化异常与地温异常高度重合的现今地热场特征。

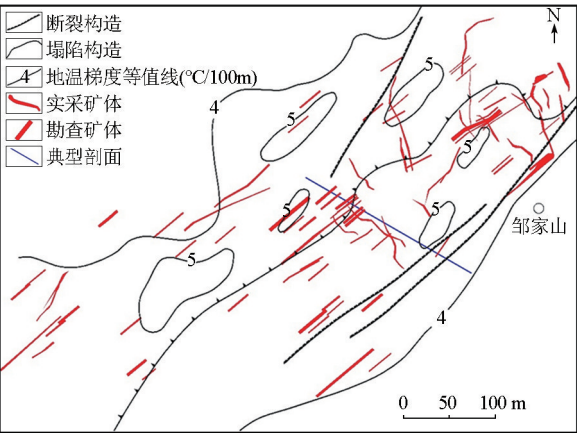


图4 研究区地温与矿体平面投影

Fig. 4 Plane projection of ground temperature and ore body in the study area

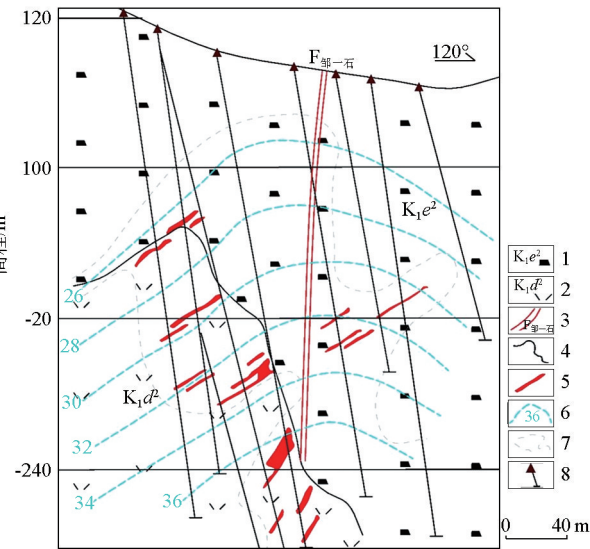


图5 研究区地温与矿体关系剖面

Fig. 5 Profile of relationship between ground temperature and ore body in the study area

4.3 找矿指示

前人研究结果表明,地热可作为找矿突破标志之一应用到热液型铀矿床找矿勘查中,尤其在利用铀矿与地热场分布的密切关系指导深部铀矿勘查上发挥着重大作用^[23]。地热异常与矿体(带)空间分布特征的一致性构建研究区地温找矿指示的重要依据。地温梯度大于4℃/100m为找矿第一标志,该标志指示成矿第一平面空间即矿床定位空间,其

范围受NE向断裂构造带及火山塌陷构造联合控制,宽约300m,建议找矿勘查中地温梯度测量平面点距小于50m。地温梯度异常轴线为导热控矿构造反应,轴线两侧地温梯度等值线密度则是找矿第二标志,等值线密集度越高,反映深部热变强烈,容矿控矿空间更大,为富大矿体赋存有利部位。

5 结论

本文以邹家山矿床为例,通过井温测井、取样测试等工作,分析了相山铀矿田热结构特征,并结合矿体(带)分布特征,研究了热与矿的关系,结论如下:

- 1) 邹家山矿床地温梯度平均值为4.01℃/100m,高于矿田地温梯度的平均值(3.06℃/100m)。地温异常主要受邹家山—石洞断裂构造带及火山塌陷构造联合控制,总体呈NE向。
- 2) 矿床地壳热流为35.33mW/m²,地幔热流为48.16mW/m²,壳、幔热流比为0.73,属“热幔冷壳”型;地壳热流主要来源于上地壳、中地壳岩石放射性核素衰变产热。
- 3) 总体热结构显示,研究区上地壳铀源丰富,早白垩世火山岩是区内主要铀源体。
- 4) 现今地热场显示,研究区热异常与矿体(带)空间分布特征镜像重合,二者皆受控于断裂构造分布特征。
- 5) 地温梯度大于4℃/100m为矿床平面定位标志,地温异常轴线旁侧等值线密集带是富大矿体赋存的有利部位。

参考文献 (References):

[1] Blackwell D D. The thermal structure of the continent crust[M]. Washington D C: AGU, 1971.

[2] Birch F, Roy R F, Decker E R. Heat flow and thermal history in New England and New York[J]. Studies of Appalachian Geology, 1968: 437-451.

[3] 汪集旸, 汪缉安. 辽河裂谷盆地地壳上地幔热结构[J]. 中国科学: B辑, 1986(8): 856-866.

Wang J Y, Wang J A. Thermal structure of crust and upper mantle in liaohu rift basin[J]. Science China : Part B, 1986(8): 856-866.

[4] 李学礼. 江西温泉成因与铀矿化关系研究[J]. 华东地质学院学报, 1992(3): 201-220.

Li X L. Study on the relationship between the genesis of hot springs and uranium mineralization in Jiangxi [J]. Journal of East China University of Geosciences, 1992(3): 201-220.

[5] Hillis R, Hand M, Mildren S, et al. Genetically related Mo-Bi-Ag and U-F mineralization in A-type granite, Gabal Gattar, Eastern

- Desert, Egypt [J]. *Ore Geology Reviews*, 2004, 62: 181–190.
- [6] 李庆阳, 蔡惠蓉, 陈彦. 地热场与深部铀矿的关系研究及应用 [J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 198–203.
- Li Q Y, Cai H R, Chen Y. Study on the relationship between geothermal field and deep uranium deposit and its application [J]. *Geology of China*, 2010, 37(1): 198–203.
- [7] 王俊虎, 张杰林, 王丽娟. ASTER 热红外影像温度反演及其应用 [J]. *金属矿山*, 2011, 40(6): 319–322.
- Wang J H, Zhang J L, Wang L J. Aster thermal infrared image temperature inversion and its application [J]. *Metal mines*, 2011, 40(6): 319–322.
- [8] 李燕燕. 贵州白马洞铀矿床黑色—红色蚀变形成机理及其与铀成矿关系 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Li Y Y. Formation mechanism of black red alteration of baimadong uranium deposit in Guizhou and its relationship with uranium mineralization [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [9] 周文斌, 李学礼, 史维浚. 相山地区地幔热流 [J]. *华东地质学院学报*, 1992, 15(3): 249–254.
- Zhou W B, Li X L, Shi W J. Mantle heat flow in Xiangshan area [J]. *Journal of East China University of Geosciences*, 1992, 15(3): 249–254.
- [10] 刘峰, 王贵玲, 张薇, 等. 燕山中部大地热流及岩石圈热结构特征——以承德市七家—矛荆坝地热田为例 [J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 1950–1959.
- Liu F, Wang G L, Zhang W, et al. Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the middle Yanshan region: A case study from the Qijia-Maojingba geothermal field in Chengde [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1950–1959.
- [11] 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 等. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制: 来自岩石放射性生热率的约束 [J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2697–2709.
- Zhang C, Hu S B, Song R C, et al. Genetic mechanism of dry hot rock geothermal resources in Gonghe Basin: Constraints from rock radioactive heat generation rate [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2697–2709.
- [12] 林乐夫, 孙占学, 王安东, 等. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地区化学特征及岩石圈热结构对比研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(4): 488–500.
- Lin L F, Sun Z X, Wang A D, et al. Comparative study on radiochemical characteristics and lithospheric thermal structure of Mesozoic granite in Nanling area and southeast coastal area [J]. *Journal of Rock Mineralogy*, 2017, 36(4): 488–500.
- [13] Rybach L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters [J]. *Pure Applied Geophysics*, 1976, 114: 309–318.
- [14] 毛勇. 江西上地壳三维速度结构地震层析成像 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2013.
- Mao Y. Seismic tomography of three-dimensional velocity structure of upper crust in Jiangxi [D]. Fuzhou: Donghua University of Technology, 2013.
- [15] 彭涛, 吴基文, 任自强, 等. 淮北煤田现今地温场特征及大地热流分布 [J]. *地球科学*, 2015, 40(6): 1083–1092.
- Peng T, Wu J W, Ren Z Q, et al. Characteristics of current geothermal field and terrestrial heat flow distribution in Huaibei coalfield [J]. *Earth Science*, 2015, 40(6): 1083–1092.
- [16] 雷晓东, 胡圣标, 李娟, 等. 北京平原区西北部大地热流与深部地温分布特征 [J]. *地球物理学报*, 2018, 61(9): 3735–3748.
- Lei X D, Hu S B, Li J, et al. Distribution characteristics of terrestrial heat flow and deep ground temperature in the northwest of Beijing Plain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3735–3748.
- [17] 汤国平, 庞文静, 张运涛, 等. 相山火山盆地邹家山铀矿床温热水分布特征及其找矿意义 [J]. *铀矿地质*, 2020, 36(2): 123–130.
- Tang G P, Pang W J, Zhang Y T, et al. Distribution characteristics of warm and hot water and its prospecting significance of Zoujiashan uranium deposit in Xiangshan volcanic basin [J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(2): 123–130.
- [18] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆大地热流数据汇编 [J]. *地质科学*, 1988, 23(2): 196–204.
- Wang J Y, Huang S P. Compilation of geothermal data in Chinese mainland [J]. *Geological Science*, 1988, 23(2): 196–204.
- [19] 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地地热状况剖面 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13(5): 447–448.
- Qiu N S. Geothermal profile of sedimentary basins in Chinese mainland [J]. *Progress in Earth Sciences*, 1998, 13(5): 447–448.
- [20] 林锦荣, 胡志华, 饶泽煌, 等. 相山火山盆地及邻区铀多金属成矿类型、成矿特征及控矿因素 [J]. *铀矿地质*, 2020, 36(6): 491–499.
- Lin J R, Hu Z H, Rao Z H, et al. Uranium polymetallic metallogenic types, metallogenic characteristics and ore controlling factors in Xiangshan volcanic basin and its adjacent areas [J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(6): 491–499.
- [21] 张万良, 杨松, 余水. 邹家山铀矿床矿体形态、规模及其变化特征 [J]. *铀矿地质*, 2015, 31(3): 363–369.
- Zhang W L, Yang S, Yu S. Ore body shape, scale and variation characteristics of Zoujiashan uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 2015, 31(3): 363–369.
- [22] 银涌兵, 李海英, 孔德旭, 等. 相山铀矿田居隆庵矿床矿石地球化学特征及其与矿石品位关系探讨 [J]. *世界核地质科学*, 2021, 38(4): 470–478.
- Yin Y B, Li H Y, Kong D X, et al. Discussion on ore geochemical characteristics of Julong'an deposit in Xiangshan uranium ore field and its relationship with ore grade [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2021, 38(4): 470–478.
- [23] 黄明光, 温圣奇, 张学珍, 等. 寻乌县横迳地区温泉铀水异常成因初探 [J]. *科技与生活*, 2010(16): 132–134.
- Huang M G, Wen S Q, Zhang X Z, et al. Preliminary study on the genesis of hot spring uranium water anomaly in Hengjing area of Xunwu County [J]. *Technology and Life*, 2010(16): 132–134.

Relationships between thermal structure characteristics and mineralization of the Xiangshan uranium ore field: A case study of the Zoujiashan deposit

YIN Yong-Bing^{1, 2}, LI Hai-Ying³, LU Teng^{1, 2}, HAN Piao-Ping^{1, 2}, KONG De-Xu^{1, 2},
WAN Huan-Huan^{1, 2}, PANG Wen-Jing^{1, 2}, WU Zhi-Chun⁴

(1. Nuclear Geology Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Yingtan 335001, China; 2. Jiangxi Energy and Mineral Geological Survey and Research Institute, Nanchang 330100, China; 3. Mineral Exploration Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330038, China; 4. East China University of Technology, Nanchang 330000, China)

Abstract: The Xiangshan ore field is the largest volcanogenic uranium ore field in China with abundant uranium resources and favorable geothermal geological conditions. However, few studies have been conducted on its thermal structure and mineralization characteristics. In order to solve this problem effectively. Taking the Zoujiashan super-large uranium deposit in the west of the ore field as a typical area, this study systematically investigated the thermal structure characteristics of the ore field, established the thermal structure model, and analyzed the relationships between heat generation and mineralization. The results are as follows. The thermal structure in the study area is of the hot-mantle and cold-crust type, which is in line with the characteristics of thermal structures in eastern China. The higher crustal heat flow in the area is closely related to the uranium source and uranium ore bodies, and the decay heat generation of radionuclides is the main source of the crustal heat flow. The thermal anomalies in the area are obviously controlled by faults, and the heat source is highly consistent with the uranium source. The geothermal gradient anomalies are one of the prospecting criteria of the area. Moreover, 4 °C/100 m is the positioning marker of deposits, and the variation amplitude of geothermal gradients can be used as the positioning marker of rich and large ore bodies. This study provides effective technical support for the study of geothermal geology and metallogenic geology in this area.

Key words: Xiangshan uranium ore field; Zoujiashan; thermal structure; mineralization relationship

(本文编辑:王萌)