

周堂波,李俊,郭新文,等.粤北书楼丘铀矿床黄铁矿标型特征及其找矿意义[J].世界核地质科学,2025,42(1):60-75. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.005

ZHOU Tangbo, LI Jun, GUO Xinwen, et al. Typological characteristics and prospecting significance of pyrite in the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 60-75 (in Chinese).

粤北书楼丘铀矿床黄铁矿标型特征及其找矿意义

周堂波,李俊,郭新文,陈军军,张海强,姜春晖,吴通航,马永胜

核工业二九〇研究所,广东 韶关 512026

摘要 黄铁矿在矿床中是最常见的金属硫化物,形成于铀成矿的各个阶段,其标型特征对深部找矿预测具有重要指示意义。利用电子显微镜、粉晶衍射、热电仪及电子探针系统分析书楼丘铀矿床中不同成矿阶段、不同标高黄铁矿的标型特征。研究表明:该矿床黄铁矿 $n(S)/n(Fe)$ 值指示具有亏S特征,特征元素 δFe 、 δS 、As、Se、Co和Ni等指示黄铁矿成因主要为岩浆热液型。黄铁矿晶胞参数特征表明:As以类质同象形式替换S是导致 a_0 变大的主因,亦是导致U元素沉淀的重要因素。黄铁矿热电系数值(a)介于 $-301.0\sim 332.2\mu V\cdot^{\circ}C^{-1}$ 之间,热电导型以P型为主。黄铁矿形成温度介于 $74\sim 386^{\circ}C$ 之间,属中低温矿床。黄铁矿热电系数离散度($\delta a'$)在成矿期 $\delta a'$ 为82.1,表明成矿环境较为稳定,叠加程度较弱;成矿前期及成矿后期 $\delta a'$ 分别为201.6、224.9,指示可能由多期次热液的叠加形成,叠加程度相对较强;各阶段 $\delta a'$ 值随标高的下降,亦在逐渐变小,且相对集中,表明越往深部矿化程度相对较好。黄铁矿的热电参数 X_{mp} 介于 $-40.0\sim 61.0$ 之间,矿体的剥蚀百分比(γ)介于34.8%~60.0%之间,平均为48.9,指示矿床已被剥蚀至中部,向深部仍有较大延伸。综合分析认为,矿床深部仍有较好的成矿和找矿前景。

关键词 黄铁矿;晶胞参数;热电系数;书楼丘铀矿床

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)01-0060-16

Typological characteristics and prospecting significance of pyrite in the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong

ZHOU Tangbo, LI Jun, GUO Xinwen, CHEN Junjun, ZHANG Haiqiang, JIANG Chunhui, WU Tonghang, MA Yongsheng

Research Institute No. 290, CNNC, Shaoguan 512026, China

Abstract: Pyrite is the most common metal sulfide mineral in mineral deposits, mostly formed at the stages of uranium mineralization. Its typological characteristics have important indicative significance for deep mineral exploration and prediction. This article uses electron microscopy, powder diffraction, thermoelectric analyzer, and electron probe system to analyze the typological characteristics of pyrite at different

基金项目:中国核工业地质局铀矿地质项目(编号:202238)资助

收稿日期:2024-12-30 改回日期:2025-01-23

第一作者:周堂波,1991年生,男,工程师,硕士,主要从事铀矿勘查与科研工作。E-mail: 550310423@qq.com

通信作者:李俊,1988年生,男,高级工程师,硕士,主要从事铀矿勘查与科研工作。E-mail: 956884427@qq.com

Supported by the Central Financial Fund Project (No. 202238) under the planning and jurisdiction of the China Nuclear Industry Geological Bureau

Received date: 2024-12-30 revised date: 2025-01-23

First author: ZHOU Tangbo, male, born in 1991, engineer, focusing on uranium exploration and research. E-mail: 550310423@qq.com

Corresponding author: LI Jun, male, born in 1988, senior engineer, focusing on uranium exploration and research. E-mail: 956884427@qq.com

mineralization stages and elevations in the Shulouqiu uranium deposit. The research results show that the $n(S)/n(Fe)$ values of pyrite in this area indicate a deficiency in S characteristics. Analysis of characteristic elements such as δFe , δS , As, Se, Co, Ni, etc. shows that the genesis of pyrite in this area is mainly magmatic hydrothermal. The characteristics of the crystal cell parameters of pyrite indicate that the substitution of S with As in an isomorphic form is the main cause of the increase in a_0 and also an important factor leading to the precipitation of U element. The thermoelectric coefficient value (a) of pyrite is $-301.0 \sim 332.2 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$, and the thermal conductivity type is mainly P-type. The formation temperature of pyrite is $74 \sim 386 ^\circ C$, belonging to a medium low temperature deposit. The thermal electric coefficient dispersion ($\delta a'$) of pyrite indicates a mineralization period with a $\delta a'$ of 82.1, indicating a relatively stable mineralization environment and a weak degree of superposition; The $\delta a'$ values in the early and late stages of mineralization are 201.6 and 224.9, respectively, indicating that they may have been formed by the superposition of multiple stages of hydrothermal fluids, with a relatively high degree of superposition; The $\delta a'$ values at each stage gradually decrease with the decrease of levels, and are relatively concentrated, indicating that the mineralization become relatively better as the depth increases. The thermoelectric parameter X_{np} of pyrite is $-40.0 \sim 61.0$, and the erosion percentage (γ) of the ore body is $34.8 \% \sim 60.0 \%$, with an average of 48.9, indicating that the deposit has been eroded to the middle and still has significant extension in the deeper part. Comprehensive analysis suggests that there is still good mineralization and prospecting potential in the deep part of the deposit.

Keywords: pyrite; unit cell parameters; thermoelectric coefficient; Shulouqiu uranium deposit

黄铁矿作为热液矿床中分布最广的硫化物矿物,在铀矿床中与成矿关系密切,而且蕴含了丰富的地质信息^[1-2],从20世纪50年代开始,国内外众多学者对黄铁矿等深色硫化物半导体的晶胞参数、热电系数和热电导型等标型特征开展研究,并取得了大量进展与成果。有效地指导了矿床的深部找矿实践,获得了显著的经济效益^[3-5]。

黄铁矿的晶胞参数变化及热电性能灵敏地反映矿物成分和晶形结构的细微变化,指示矿物形成的地质条件^[3,6-7]。利用黄铁矿的晶胞参数及热电性特征指导找矿是一种实用且有效的地质方法,而且对判断矿床的成矿温度、剥蚀程度、矿体规模、矿床成因以及寻找隐伏矿体等方面起着重要的作用^[8-14]。前人对黄铁矿的化学组成及成因联系等研究亦较为系统,其主量及微量元素蕴含了大量的成分标型特征及地质信息^[2-3,15]。

书楼丘铀矿床位于长江铀矿集区北部,前人对区内的矿石(矿物)^[2,16-25]、物性参数、构造形态、成岩(成矿)年龄、成矿流体和成矿物质来源等方面做了大量工作,基本查明该矿床地质特征、成矿物质来源和成因特征,但在成因矿物

学方面尚未进行系统研究。矿床内黄铁矿大量产出,且产出形态多样,显示具有多成因特征。本文系统分析了书楼丘铀矿床中黄铁矿的晶胞参数、热电系数和化学成分等标型特征,同时研究黄铁矿热电性在不同成矿阶段、不同标高的变化规律及其对矿床形成温度和剥蚀程度的指示意义,为该矿床的深部远景预测及深部探矿工程提供理论依据和实践指导。

1 地质概况

书楼丘铀矿床位于NE向桃山—诸广山铀成矿带南段,地处诸广山岩体中南部长江铀矿集区中部,南部与华南特大型铀矿床——棉花坑铀矿床相接。大地构造位置处于闽赣后加里东隆起与湘、桂粤北海西—印支凹陷的地块结合部、EW向(九峰—仙游)大断裂、NE向(吴川—韶关)深大断裂与NW向(汝城—惠来)切壳断裂的交汇部位,同时处于SN向(万洋—诸广)、NE向(万长山)与EW向(九峰—大余)构造岩浆活动带的交汇部位^[16],是集构造、岩浆、多金属成矿作用长期活动的地区^[17]。

区内岩浆活动具多期多阶段活动特征,从加里东期至喜山期均有岩浆出露,其中又以印支

期—燕山期侵入最为活跃,构成了岩体主体。书楼丘铀矿床内主要出露岩体包括油洞岩体,岩性为印支期第 3 阶段中粒斑状二云母花岗岩^[16], LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 244 Ma^[26], 主要分布在矿床南部;长江岩体,岩性为燕山早期中粒黑云母花岗岩^[16], LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 161 Ma^[26],在矿床内广泛出露。在矿床深部出露一套燕山晚期的细粒黑云母花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 123 Ma^[27],此外在研究区内由于晚中生代华南岩石圈伸展作用的响应,广泛出露有规模不等的基性岩脉和岩墙,脉形成时代主要有~140 Ma、~124 Ma、~105 Ma 和~90 Ma^[26]。其中油洞岩体铀含量介于 $6.3 \times 10^{-6} \sim 15.46 \times 10^{-6}$ 之间, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值介于 2.24~5.54 之间;长江岩体铀含量介于 $13.4 \times 10^{-6} \sim 73.5 \times 10^{-6}$ 之间, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值介于 0.55~5.01 之间。两类岩体铀含量均远高于华南产铀花岗岩的平均值 3×10^{-6} ^[19], 显示出良好的铀成矿潜力。

研究区构造位置位于长江断陷带中部,夹持

于 NE 向棉花坑断裂及里周断裂之间,处 NNW 向断裂和 NW 向油洞断裂相交汇部位。岩体内断裂构造具有规模大、产状多变、活动频繁、成群成组且等间距排布等特点^[17]。多方向断裂的交汇控制了铀矿床、铀矿点的产出。书楼丘铀矿床发育有 NE 向、NNE 向、NW 向、NNW 向和近 EW 向等多组断裂,其中铀矿体受 NNW 向张扭性断裂带控制。已发现的 NNW 向断裂带有 20 多条(图 1), 出露长度介于 0.6~5 km 之间,其中规模较大且含矿较好的有 1、9N、13 及 19 号带等,呈不规则的脉状、透镜状产出,基本与构造带的产状一致,铀矿化整体连续性较好,构造带延伸性与矿化深度成正比。含矿断裂带中心为硅化碎裂岩(碎裂岩)、构造角砾岩、石英及方解石等组成的硅质骨架,由内向外热液蚀变主要见硅化、水(绢)云母化、绿泥石化及高岭土化等。矿带多呈平行分布,具有水平、垂直分带的特征^[17-23];铀矿物主要为晶质铀矿、沥青铀矿及铀黑等,金属矿物主要有黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿及少量的方铅矿等;脉石矿物主要有石英、方解石及萤石等。

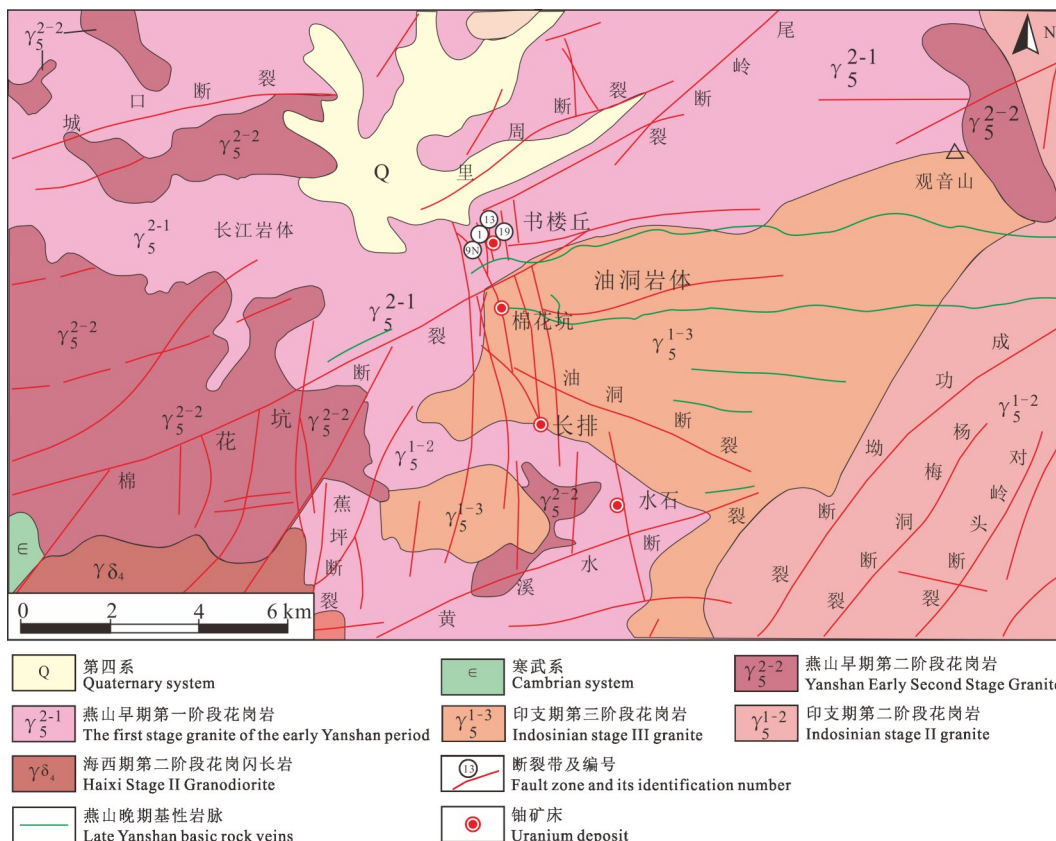


图 1 粤北书楼丘铀矿床地质简图

Fig. 1 Tectonic and geologic sketch of the Shulouqiu deposit

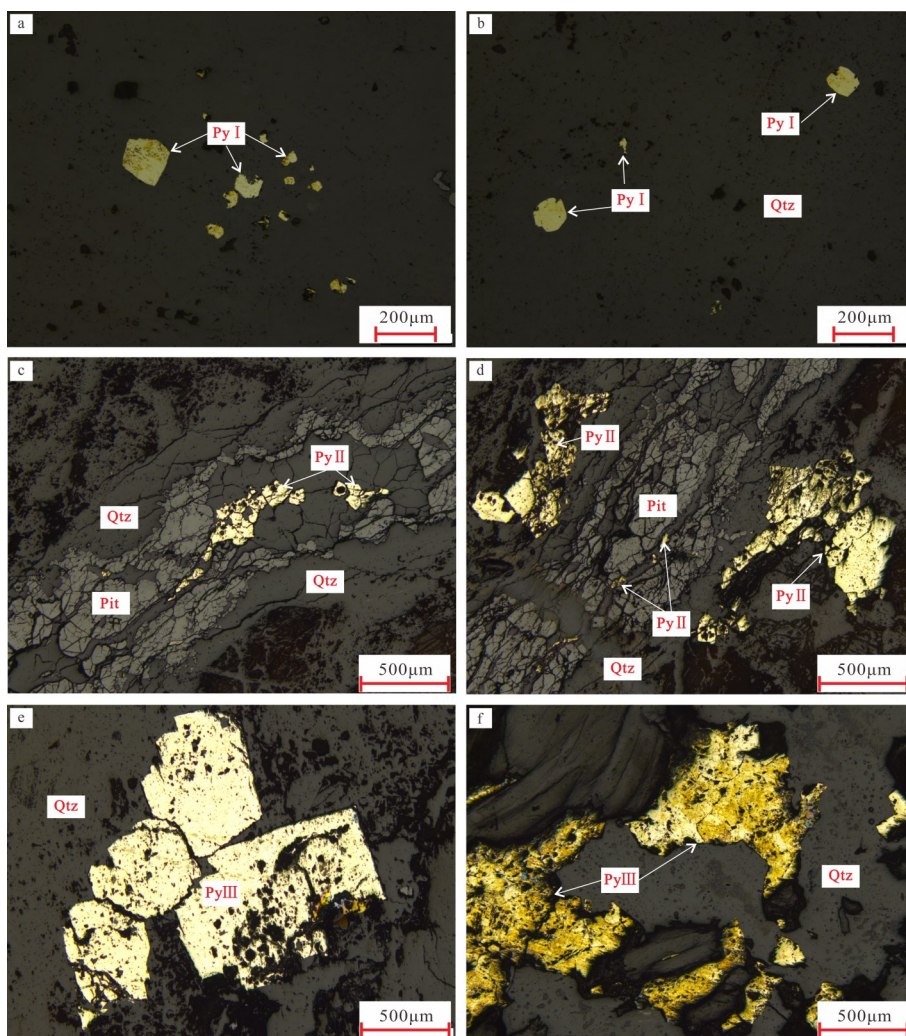
2 样品采集与测试方法

2.1 样品采集

黄铁矿的手标本样品取自研究区地表、坑道及钻孔岩心中,并在细致的岩相学、矿相学研究基础上对书楼丘铀矿床中黄铁矿成矿期次进行划分,而后选择代表性样品开展磨片和分析测试等工作。为了更好地探讨与铀成矿关系并进行深部铀成矿预测,在充分考虑样品

的空间分布特性基础上,对不同标高、不同成矿期次的含黄铁矿样品进行系统取样。本次分析共选取 12 件黄铁矿样品进行晶胞参数测量及电子探针分析,930 粒黄铁矿参与热电系数和热电导型测量。

成矿前期的黄铁矿(Py I)多为立方体晶形,粒径介于 30~330 μm 之间,产于粗粒石英脉或微晶石英脉内部(图 2a),或被成矿期沥青铀矿交代,形成交代残余结构,但整体保持原



a—成矿前期黄铁矿(Py I)产于粗粒石英脉内; b—微晶石英脉体中粒状黄铁矿(Py I)被沥青铀矿包裹; c—与沥青铀矿产于同一条石英脉内的黄铁矿(Py II); d—沥青铀矿内部包裹有角砾状、碎块状黄铁矿(Py II); e—呈自形立方体、八面体的黄铁矿(Py III),生长于成矿晚期石英脉内; f—呈不规则粒状、块状,矿物边缘和棱角变圆滑的黄铁矿(Py III); a~f—反射光照片; Qtz—石英; Pit—沥青铀矿; Py—黄铁矿。

a—Early mineralization of pyrite (Py I) occurred within coarse-grained quartz veins; b—Granular pyrite (Py I) in microcrystalline quartz veins is enveloped by pitchblende; c—Pyrite (Py II) located within the same quartz vein as bituminous uranium minerals; d—The interior of pitchblende is wrapped with angular and fragmented pyrite (Py II); e—A self shaped cubic and octahedral pyrite, grows within quartz veins during the late stage of mineralization (Py III); f—Pyrite in irregular granular and blocky form, with mineral edges and corners becoming smooth (Py III); A~f are all reflected light photos; Qtz—Quartz; Pit—pitchblende; Py—Pyrite.

图 2 书楼丘铀矿床黄铁矿镜下特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of pyrite in Shulouqiu uranium deposit

有的晶体形态。少数黄铁矿与沥青铀矿伴生, 沥青铀矿紧紧围绕在黄铁矿的外部边缘, 或呈团块状、不规则状形态产于黄铁矿的边缘或内部(图 2b)。此类黄铁矿颗粒粗大, 表明较粗糙, 孔隙和裂纹较发育, 往往呈自形结构分布于早期脉体或呈交代结构分布于成矿期脉体中。

成矿期的黄铁矿(PyII)多为不规则细脉状、脉状, 与沥青铀矿共生, 粒径变化较大(30~300 μm)。黄铁矿与沥青铀矿通常产于同一条石英脉内(图 2c), 在沥青铀矿内部包裹有角砾状、碎块状黄铁矿(图 2d)。此类黄铁矿与沥青铀矿密切共生, 粒径变化较大, 结晶程度中等, 其化学成分能反映成矿流体的信息。

成矿晚期的黄铁矿(PyIII)自形程度高于前两期黄铁矿, 多呈自形立方体、八面体或五角十二面体晶形, 生长于成矿晚期石英脉或石

英晶洞中(图 2e), 粒径变化较大, 介于 50~650 μm 之间。黄铁矿形成后可能遭受成矿期后流体的改造作用, 部分黄铁矿为不规则粒状、块状, 矿物边缘和棱角变圆滑(图 2e)。

2.2 测试方法

黄铁矿晶胞参数测试实验流程为挑选黄铁矿单矿物颗粒并粉碎至 80 μm , 选取 0.5 g 的样品进行分析测试, 测试仪器为 D2PHASER 粉晶衍射仪, 步长 0.020, 每步时间 0.3 s, 电压 30 kV, 电流 10 mA。黄铁矿热电性测试首先在纯酒精溶液中, 用超声波清洗掉矿物表面的氧化膜和杂质后, 运用 BHTE-08 型热电系数测量, 测试时, 冷、热两端温度分别为 24、90 $^{\circ}\text{C}$, 活化温度为 (60 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$, 每件样品随机选取 50 粒以上的单矿物进行测试。黄铁矿晶胞参数测试及热电性测试均在北京北达燕园微构分析测试中心有限公司完成。测试结果见表 1、2。

表 1 书楼丘铀矿床黄铁矿晶胞参数特征

Table 1 Characteristics of crystal cell parameters of pyrite in Shulouqi uranium deposit

| 样品编号 | 成矿阶段 | 标高/m | a_0/nm | $\Delta a_0/\text{nm}$ | V_0/nm^3 | $\Delta V_0/\text{nm}^3$ |
|--------|--------|------|-----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| SLQ-1 | Py I | 300 | 0.554 18 | 0.012 51 | 0.159 11 | 0.000 11 |
| SLQ-2 | | 0 | 0.542 20 | 0.000 53 | 0.159 24 | 0.000 24 |
| SLQ-3 | | -400 | 0.551 22 | 0.009 55 | 0.167 48 | 0.008 48 |
| SLQ-4 | Py II | 300 | 0.542 62 | 0.000 95 | 0.159 76 | 0.000 76 |
| SLQ-5 | | 300 | 0.542 10 | 0.000 43 | 0.159 28 | 0.000 28 |
| SLQ-6 | | 0 | 0.541 97 | 0.000 30 | 0.159 21 | 0.000 21 |
| SLQ-7 | | 0 | 0.542 02 | 0.000 35 | 0.159 24 | 0.000 24 |
| SLQ-8 | | -400 | 0.551 78 | 0.010 11 | 0.167 99 | 0.008 99 |
| SLQ-9 | | -400 | 0.543 97 | 0.002 30 | 0.160 96 | 0.001 96 |
| SLQ-10 | Py III | 300 | 0.543 41 | 0.001 74 | 0.160 46 | 0.001 46 |
| SLQ-11 | | 0 | 0.542 99 | 0.001 32 | 0.160 09 | 0.001 09 |
| SLQ-12 | | -400 | 0.543 22 | 0.001 55 | 0.160 30 | 0.001 30 |

电子探针测试在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室完成, 电子探针型号为 JEOL JXA-8100, 加速电压 15 kV, 电流 5.00×10^{-8} A, 电子束直径介于 1~5 μm 之间, 所测得数据经 ZAF 程序校正。测试结果见表 3。

3 黄铁矿标型特征

3.1 形态标型

研究区黄铁矿晶胞参数 a_0 介于 0.54 197~0.55 418 nm 之间, 平均为 0.54 514 nm, V_0 值介

于 0.15 911~0.16 799 nm^3 之间, 平均为 0.16 109 nm^3 , 与标准值 ($a_0=0.54 176$ nm 和 $V_0=0.15 900$ nm^3) 相比均偏高, 黄铁矿晶胞参数测试结果见表 1。其中成矿前期黄铁矿(Py I) a_0 值介于 0.54 220~0.55 418 nm 之间, 平均为 0.54 920 nm, V_0 值介于 0.15 911~0.16 748 nm^3 之间, 平均为 0.16 194 nm^3 ; 主成矿期黄铁矿(Py II) a_0 值介于 0.54 197~0.55 178 nm 之间, 平均为 0.54 408 nm, V_0 值介于 0.15 921~0.16 799 nm^3 之间, 平均为 0.16 107 nm^3 ; 成矿晚期黄铁矿(Py III)

表 2 书楼丘铀矿床黄铁矿热电性参数特征

Table 2 Characteristics of thermoelectric parameters of pyrite in Shulouqiu uranium deposit

| 样品编号 | 成矿期次 | 标高/m | α N 区间/ ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$) | | | 频率/% | α P 区间/ ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$) | | | 频率/% | 离散度 | X_{np} | 剥蚀度 |
|--------|--------|------|--|--------|--------|------|--|------|-------|------|-------|----------|------|
| | | | max | min | 平均值 | | max | min | 平均值 | | | | |
| SLQ-1 | Py I | 300 | -42.3 | -301.0 | -119.7 | 52 | 304.9 | 28.9 | 202.7 | 48 | 520.9 | -28.0 | 57.0 |
| SLQ-2 | | 0 | -31.1 | -31.1 | -31.1 | 1 | 328.7 | 17.3 | 141.6 | 99 | 44.8 | 11.0 | 47.3 |
| SLQ-3 | | -400 | -30.2 | -300.5 | -233.7 | 8 | 330.6 | 18.5 | 147.6 | 92 | 39.2 | -2.5 | 50.6 |
| SLQ-4 | Py II | 300 | -107.5 | -138.4 | -123.0 | 2 | 322.7 | 8.6 | 121.2 | 98 | 64.0 | 8.0 | 48.0 |
| SLQ-5 | | 300 | — | — | — | — | 307.6 | 84.7 | 205.9 | 100 | 21.9 | 61.0 | 34.8 |
| SLQ-6 | | 0 | -40.4 | -166.1 | -73.9 | 5 | 241.8 | 11.6 | 73.5 | 95 | 82.1 | -3.0 | 50.8 |
| SLQ-7 | | 0 | -5.1 | -123.3 | -77.1 | 6 | 332.2 | 28.6 | 218.0 | 94 | 152.7 | 54.0 | 36.5 |
| SLQ-8 | | -400 | -1.8 | -159.7 | -40.5 | 26 | 241.8 | 1.7 | 72.4 | 74 | 51.5 | -24.0 | 56.0 |
| SLQ-9 | | -400 | -6.8 | -243.9 | -99.3 | 15 | 295.7 | 3.5 | 115.9 | 85 | 120.6 | -9.0 | 52.3 |
| SLQ-10 | Py III | 300 | -3.3 | -200.3 | -76.8 | 50 | 259.5 | 8.2 | 130.3 | 50 | 465.8 | -40.0 | 60.0 |
| SLQ-11 | | 0 | — | — | — | — | 322.3 | 5.0 | 187.1 | 100 | 47.2 | 44.0 | 39.0 |
| SLQ-12 | | -400 | -10.2 | -163.6 | -61.0 | 28.0 | 294.9 | 8.3 | 111.1 | 72 | 161.7 | -18.0 | 54.5 |

注: “—” 表示低于检测限

a_0 值介于 0.54 299~0.54 341 nm 之间, 平均为 0.54 320 nm, V_0 值介于 0.16 009~0.16 046 nm³ 之间, 平均为 0.16 027 nm³。从成矿前期到成矿晚期 a_0 值变化为 0.54 514 nm→0.54 408 nm→0.54 320 nm, V_0 值变化为 0.16 109 nm³→0.16 107 nm³→0.16 027 nm³, 均呈现逐渐变小趋势。在垂向上从 300 m 至 -400 m 标高, a_0 及 V_0 值亦表现出逐渐下降趋势, 由此可知, 黄铁矿晶胞参数特征伴随成矿过程演化及标高减小表现为逐渐下降的特点。

3.2 热电标型

研究区黄铁矿热电系数 α 变化范围介于 -301.0~332.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 108.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围介于 -301.0~-1.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 -87.1 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$; P 型黄铁矿 α 变化范围介于 1.7~332.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 138.0 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, 总体以 P 型黄铁矿为主, 出现频率为 86.2%, 黄铁矿热电系数和热电导型测试结果见表 2。其中成矿前期黄铁矿 (Py I) α 变化范围介于 -301.0~330.6 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 109.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围介于 -301.0~-30.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 -137.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$; P 型黄铁矿 α 变化范围介于 17.3~330.6 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 151.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿出现频率为 86.0%; 主成

矿期黄铁矿 (Py II) α 变化范围介于 -243.9~332.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 111.9 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围介于 -243.9~-1.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 -66.4 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$; P 型黄铁矿 α 变化范围介于 1.7~332.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 130.1 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿出现频率为 90.7%; 成矿晚期黄铁矿 (Py III) α 变化范围介于 -200.3~322.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 92.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围介于 -200.3~-3.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 -71.1 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$; P 型黄铁矿 α 变化范围介于 5.0~322.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间, 平均为 149.7 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿出现频率为 74.0%; 从成矿前期到成矿晚期 α 变化范围为 109.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →111.9 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →92.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围为 -137.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →-66.4 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →-71.1 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿 α 变化范围为 151.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →130.1 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →149.7 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿出现频率为 86.0%→90.7%→74.0%, 除 P 型黄铁矿 α 变化表现出先降低后升高以外, 其余参数均表现出先升高后降低趋势。在垂向上从 300 m 至 -400 m 标高, 黄铁矿热电系数 α 值表现为 117.7 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →133.3 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →76.8 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, N 型黄铁矿 α 变化范围为 -99.6 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →-70.2 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ →-78.7 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿 α 变化范围为 164.4

表 3 书楼丘轴矿床黄铁矿主微量元素含量分析结果/%

Table 3 Analysis results of main and trace element content of pyrite in Shulouqiu uranium deposit/%

| 样品编号 | 成矿期次 | S | Fe | As | Se | Ag | Sb | Cu | Zn | Cd | Pb | Au | Te | Ni | Co | Cr | U | Total | n (S) / n (Fe) | w (Co) / w (Ni) | |
|-----------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|----------------|-----------------|-------|
| SLQ-1-01 | Py I | 52.77 | 47.20 | — | — | — | — | 0.11 | — | — | 0.27 | — | 0.03 | — | 0.12 | 0.03 | 0.013 | 100.54 | 1.96 | — | |
| SLQ-1-02 | | 53.07 | 47.19 | — | — | 0.01 | 0.02 | 0.13 | 0.02 | — | 0.82 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.02 | 0.016 | 101.40 | 1.97 | 36.00 | |
| SLQ-1-03 | | 51.35 | 44.37 | 0.15 | — | 0.01 | — | 1.42 | — | — | — | 0.20 | — | 0.20 | — | 0.06 | 0.03 | 0.001 | 97.79 | 2.03 | — |
| SLQ-2-01 | Py II | 53.16 | 47.63 | 0.08 | — | — | — | 0.02 | 0.04 | — | 0.10 | 0.02 | 0.02 | — | 0.09 | 0.03 | 0.017 | 101.21 | 1.95 | — | |
| SLQ-2-02 | | 51.36 | 46.04 | 0.28 | — | 0.02 | — | 0.17 | — | — | 0.01 | 0.34 | — | 0.04 | — | 0.08 | 0.04 | 0.021 | 98.40 | 1.95 | — |
| SLQ-2-03 | | 52.86 | 47.17 | 0.54 | 0.05 | — | — | 0.05 | 0.02 | — | — | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.10 | 0.05 | 0.054 | 101.17 | 1.96 | 12.13 |
| SLQ-3-01 | | 51.46 | 45.40 | 0.21 | 0.03 | — | — | — | — | — | 0.04 | 0.01 | 0.03 | — | — | 0.10 | 0.07 | 0.022 | 97.37 | 1.98 | — |
| SLQ-3-02 | | 52.31 | 47.72 | 0.39 | 0.03 | — | — | 0.12 | — | — | 0.01 | 0.19 | — | 0.01 | — | 0.12 | 0.14 | 0.036 | 101.08 | 1.92 | — |
| SLQ-4-01 | | 53.10 | 46.19 | 0.67 | — | 0.02 | — | 0.13 | — | — | 0.02 | 0.36 | 0.05 | — | — | 0.08 | — | 0.345 | 100.97 | 2.01 | — |
| SLQ-4-02 | | 53.68 | 47.00 | 0.89 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | — | — | 0.06 | — | 0.01 | 0.07 | — | 0.229 | 102.01 | 2.00 | 9.57 |
| SLQ-5-01 | | 53.83 | 46.50 | 0.63 | — | 0.01 | — | 0.02 | 0.04 | — | — | 0.10 | — | — | 0.01 | 0.18 | 0.03 | 0.118 | 101.47 | 2.03 | 22.63 |
| SLQ-5-02 | | 53.84 | 47.26 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | — | — | — | 0.04 | — | — | 0.09 | 0.09 | 0.771 | 102.15 | 2.01 | — |
| SLQ-6-01 | | 53.10 | 47.11 | 1.09 | 0.05 | — | — | 0.02 | — | — | — | 0.04 | — | — | — | 0.08 | 0.02 | 0.985 | 102.50 | 1.97 | — |
| SLQ-7-01 | 52.68 | 47.07 | — | — | — | — | 0.08 | — | — | 0.01 | 0.05 | 0.03 | — | 0.00 | 0.09 | 0.01 | 0.697 | 100.72 | 1.96 | 88.00 | |
| SLQ-8-01 | 50.56 | 45.77 | — | — | — | — | 0.01 | 0.03 | — | — | — | — | — | — | 0.07 | 0.06 | 0.546 | 97.05 | 1.93 | — | |
| SLQ-9-01 | 51.80 | 46.37 | 1.11 | 0.02 | — | — | 0.14 | 0.05 | — | — | 0.01 | 0.04 | 0.09 | — | 0.06 | 0.05 | 0.391 | 100.13 | 1.96 | — | |
| SLQ-10-01 | Py III | 52.26 | 47.50 | 0.74 | — | — | — | — | — | 0.00 | 0.43 | — | — | 0.01 | 0.11 | 0.28 | 0.031 | 101.36 | 1.93 | 22.00 | |
| SLQ-10-02 | | 52.63 | 46.77 | 0.32 | — | — | — | — | — | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | — | 0.09 | 0.09 | 0.021 | 99.96 | 1.97 | — | |
| SLQ-10-03 | | 52.29 | 46.67 | 0.48 | — | 0.02 | — | 0.06 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.31 | — | — | 0.00 | 0.12 | 0.06 | 0.016 | 100.09 | 1.96 | 58.00 |
| SLQ-11-01 | 53.45 | 46.86 | 0.73 | — | — | 0.00 | 0.19 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.09 | — | 0.03 | 0.10 | 0.28 | 0.002 | 101.86 | 2.00 | 3.33 | |
| SLQ-11-02 | 51.95 | 46.67 | 1.26 | — | — | 0.03 | 0.14 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.31 | — | — | — | 0.09 | 0.07 | 0.035 | 100.58 | 1.95 | — | |
| SLQ-12-01 | 52.93 | 45.85 | 0.84 | — | — | 0.00 | 0.06 | — | — | 0.01 | 0.48 | — | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.08 | 0.034 | 100.35 | 2.02 | 6.30 | |
| SLQ-12-02 | 53.37 | 46.91 | 0.01 | — | 0.00 | 0.00 | — | — | 0.05 | 0.02 | 0.07 | — | 0.00 | — | 0.09 | 0.09 | 0.008 | 100.62 | 1.99 | — | |
| SLQ-12-03 | 51.75 | 44.55 | 0.04 | — | 0.02 | 0.03 | 0.01 | — | — | — | 0.72 | — | — | 0.00 | 0.09 | 0.05 | 0.011 | 97.27 | 2.03 | 86.00 | |

注：“—”表示低于检测限

$\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}\rightarrow 139.5\ \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}\rightarrow 112.0\ \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$, P 型黄铁矿出现频率为 82.3 % \rightarrow 97.0 % \rightarrow 81.5 %, 除 P 型黄铁矿 α 变化表现出逐渐降低以外, 其余参数均表现出先升高后降低趋势。

3.3 成分标型

书楼丘铀矿床黄铁矿电子探针测试结果及特征参数见表 3。邹明亮等^[1]研究认为诸广岩体中含砷黄铁矿与铀成矿具有密切联系, 且 As 含量相对较高, 故而, 笔者等本次将 As 元素作为主量元素进行测定。本区黄铁矿 S 含量介于 50.56 %~54.84 % 之间, 平均为 52.61 %, Fe 含量介于 44.37 %~48.50 % 之间, 平均为 46.66 %, As 含量介于 0.01 %~1.26 % 之间, 平均为 0.53 %, 其中成矿前期黄铁矿 (Py I) S 含量介于 51.35 %~53.16 % 之间, 平均为 52.29 %, Fe 含量介于 44.37 %~47.72 % 之间, 平均为 46.59 %, As 含量为低于检测限~0.54 %, 平均为 0.27 %; 主成矿期黄铁矿 (Py II) S 含量介于 50.56 %~54.84 % 之间, 平均为 52.95 %, Fe 含量介于 45.77 %~47.50 % 之间, 平均为 46.78 %, As 含量为低于检测限~1.14 %, 平均为 0.77 %; 成矿晚期黄铁矿 (Py III) S 含量介于 51.75 %~53.45 % 之间, 平均为 52.58 %, Fe 含

量介于 45.55 %~48.50 % 之间, 平均为 46.60 %, As 含量介于 0.01 %~1.26 % 之间, 平均为 0.55 %。相较于黄铁矿主量元素 S、Fe 理论值 53.45 %、46.55 %^[28], 本矿床总体具有亏 S 特征, 从成矿前期到成矿晚期 S 含量变化范围为 52.29 % \rightarrow 52.95 % \rightarrow 52.58 %, Fe 含量变化范围为 46.59 % \rightarrow 46.78 % \rightarrow 46.60 %, As 含量变化范围为 0.27 % \rightarrow 0.77 % \rightarrow 0.55 %, 从数据可以看出 S、Fe 及 As 元素表现出先增加后减小趋势, S、Fe 元素含量变化相对稳定, As 含量变化较大, 其中以主成矿期含量最高, 表明主成矿期黄铁矿相对富 As 元素。

理论上黄铁矿原子个数比 $n(\text{S})/n(\text{Fe})\approx 2$ ^[1], 研究区成矿前期黄铁矿 (Py I) $n(\text{S})/n(\text{Fe})$ 比值介于 1.92~2.03 之间, 平均为 1.96; 主成矿期黄铁矿 (Py II) $n(\text{S})/n(\text{Fe})$ 比值介于 1.93~2.03 之间, 平均为 1.98; 成矿晚期黄铁矿 (Py III) $n(\text{S})/n(\text{Fe})$ 比值介于 1.89~2.03 之间, 平均为 1.98, 与理论值化学组分相近。黄铁矿中 S 和 Fe 含量呈正相关关系, Py II 相比于 Py I 和 Py III 具有更高的 S、Fe 和 As 元素含量, 指示 Py II 为相对亏 S 型黄铁矿。

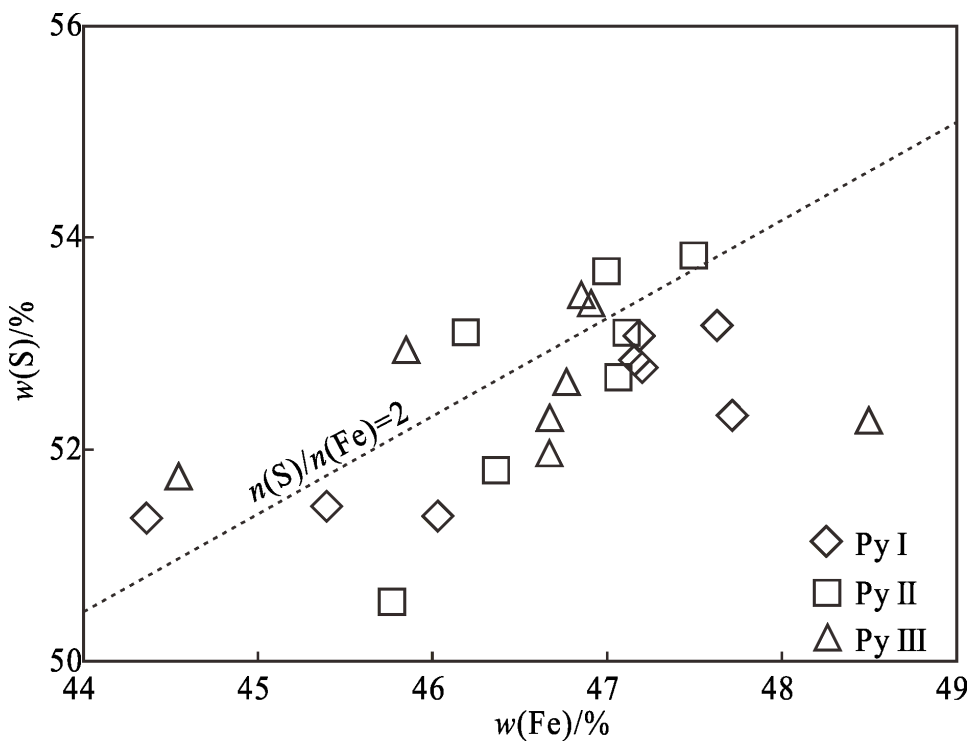


图 3 书楼丘铀矿床黄铁矿 S-Fe 图解

Fig. 3 S-Fe diagram of pyrite in Shulouqi uranium deposit

4 讨论

4.1 微量元素对黄铁矿成因及成矿流体性质的指示

前已述及,书楼丘铀矿床总体具有亏S特征, $n(S)/n(Fe)$ 指示Py II相比于Py I和Py III更具相对亏S型黄铁矿。利用前人提出的黄铁矿主量元素 δS 及 δFe 参数值进行标型特征分析,其中 δS 及 δFe 分别代表黄铁矿样品中的主量元素S、Fe质量及元素个数偏移理论值的程度^[28]。对本区黄铁矿数据进行 δFe 及 δS 体系投图(图4),在图中, δFe 及 δS 分别为 $-4.68 \sim 2.51$ 、 $-5.42 \sim 1.47$,相对集中(大部分在5%取

值范围内),主要分布在第三、四象限岩浆热液型黄铁矿区域,大部分表现出亏S特征。此外,前人研究表明,Se可以类质同象替换S元素而进入黄铁矿晶格中,在温度较高情况下,黄铁矿中Se含量较高,而S含量变化则不大,因而黄铁矿中S、Se元素的含量及比值可以较好地识别矿床的形成环境,通常岩浆热液性矿床的 $w(S)/w(Se)$ 比值介于10 000~26 700之间,沉积型黄铁矿 $w(S)/w(Se)$ 比值介于250 000~500 000之间^[13],书楼丘铀矿床 $w(S)/w(Se)$ 比值介于1 101~27 118之间,平均为9 016,表明本区黄铁矿具岩浆热液成因。

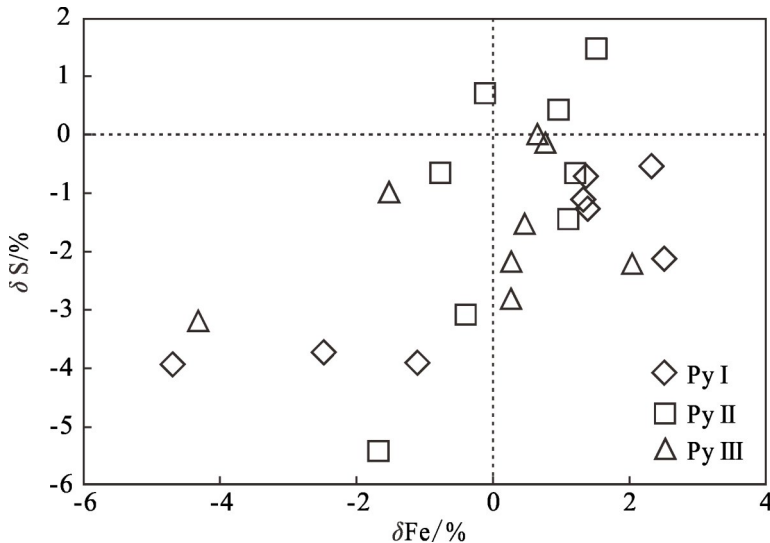


图4 书楼丘铀矿床黄铁矿 δFe - δS 图解(底图据^[28])

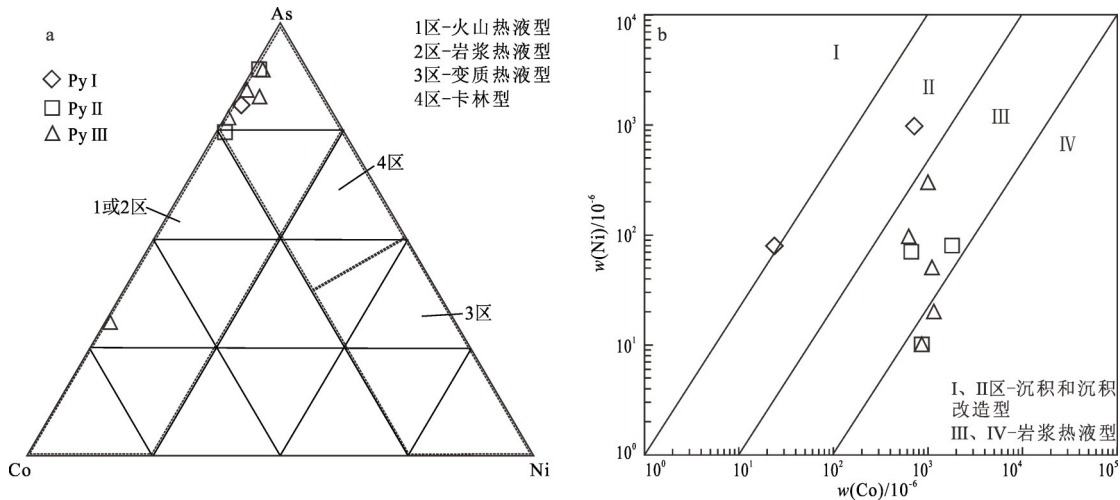
Fig. 4 Diagram of δFe - δS of pyrite in Shulouqiu uranium deposit (Base map after^[28])

黄铁矿中Co、Ni和As元素含量及其比值可以用于判别矿床成因类型^[1,15,29],书楼丘铀矿床黄铁矿样品均偏向As、Co端元,落于岩浆热液区域(图5a); $w(Co)/w(Ni)$ 介于3.33~88.00之间,平均为34.40,大部分样品位于岩浆热液区(图5b),进一步说明区内黄铁矿具有岩浆热液成因的性质。

4.2 黄铁矿晶胞参数及其地质意义

研究表明黄铁矿晶胞参数及其变化对于矿床勘查具有标型意义^[3,6]。黄铁矿中常含Ni、Co、As、Se、Te及Sb等微量元素,其中Ni、Co可以类质同象替换Fe;As、Se、Te和Sb常以类质同象的形式替换S^[6,14,29]。前已述及,随着成矿阶段的演化及标高的下降,晶胞参数 a_0 值均在逐

渐减小(仍大于黄铁矿理论值0.541 76 nm),经研究推测主要与As、Se、Te和Sb元素含量有关尤其是与As相关,原因主要是:1)当Ni、Co以类质同象形式替换Fe时,会形成多余电子,从而形成N型黄铁矿;当As、Se、Te和Sb以类质同象的形式替换S时,会形成多余的阴电荷去捕获空位,从而形成P型黄铁矿^[30]。从元素相关性图解来看(图6),Ni、Co与Fe没有明显的相关性(图6a、b);As、Se、Te、Sb与S呈现一定的负相关性(图6c、d、e和f),表明Ni、Co对黄铁矿晶胞参数影响较小,As、Se、Te和Sb可能以类质同象形式替换S进入黄铁矿中,从而导致黄铁矿晶胞参数比理论值大。2)书楼丘铀矿床中黄铁矿以P型黄铁矿为主,而P型黄铁矿出现概



a—黄铁矿 As-Co-Ni 图解; b—黄铁矿 Co-Ni 图解。

a-As-Co-Ni diagram of pyrite; b-Co-Ni diagram of pyrite.

图 5 书楼丘铀矿床黄铁矿 As-Co-Ni、Co-Ni 图解(底图据[15])

Fig. 5 Plot of As-Co-Ni, Co-Ni contents in pyrites from the Shulouqiu uranium deposit (Base map after [15])

率与黄铁矿中 As、Se、Te 和 Sb 微量元素含量相关,当 As、Se、Te 和 Sb 含量增大会导致 a_0 增大,亦会使 P 型黄铁矿出现概率增大^[14]; 3) 当 S 被 As 以类质同象形式替换进入黄铁矿矿物晶格中时,由于 S 的离子半径小于 As, As-S 共价键会变长,会导致黄铁矿晶格出现缺陷,从而使 U 元素更加有利进入黄铁矿晶格中^[31]。书楼丘铀矿床中黄铁矿内 As 与 U 呈现较强的正相关性(图 7),尤其是主成矿期的黄铁矿中含 As 量最高,表明黄铁矿中 As 的富集可能是导致 U 沉淀的重要因素之一^[1-2,29,32],也是黄铁矿晶胞参数 a_0 值变大的主要原因。另外研究区黄铁矿 $n(S)/n(Fe)$ 平均为 1.96,与理论值相比,相对亏 S,从成矿前期至成矿后期 $n(S)/n(Fe)$ 在逐渐变大,但是结合本区黄铁矿胞参数 a_0 值随着成矿阶段的演化及标高的下降在逐渐减小的事实,这类特征与前人研究向背^[3,6]。因此,笔者综合认为书楼丘铀矿床黄铁矿中 As、Se、Te 和 Sb 的含量,尤其是 As 含量对晶胞参数有一定影响。

4.3 黄铁矿热电性参数对成矿温度的标识

前人研究认为,矿物结晶和类质同象的某些规律对结晶温度具有指示意义^[3-4]。通常在高温条件下,高价离子杂质进入晶格的趋势较强,它们通常成为施主(形成 N 型晶体),高温下结晶的黄铁矿为 Fe 过饱和,这意味着存在 S 的

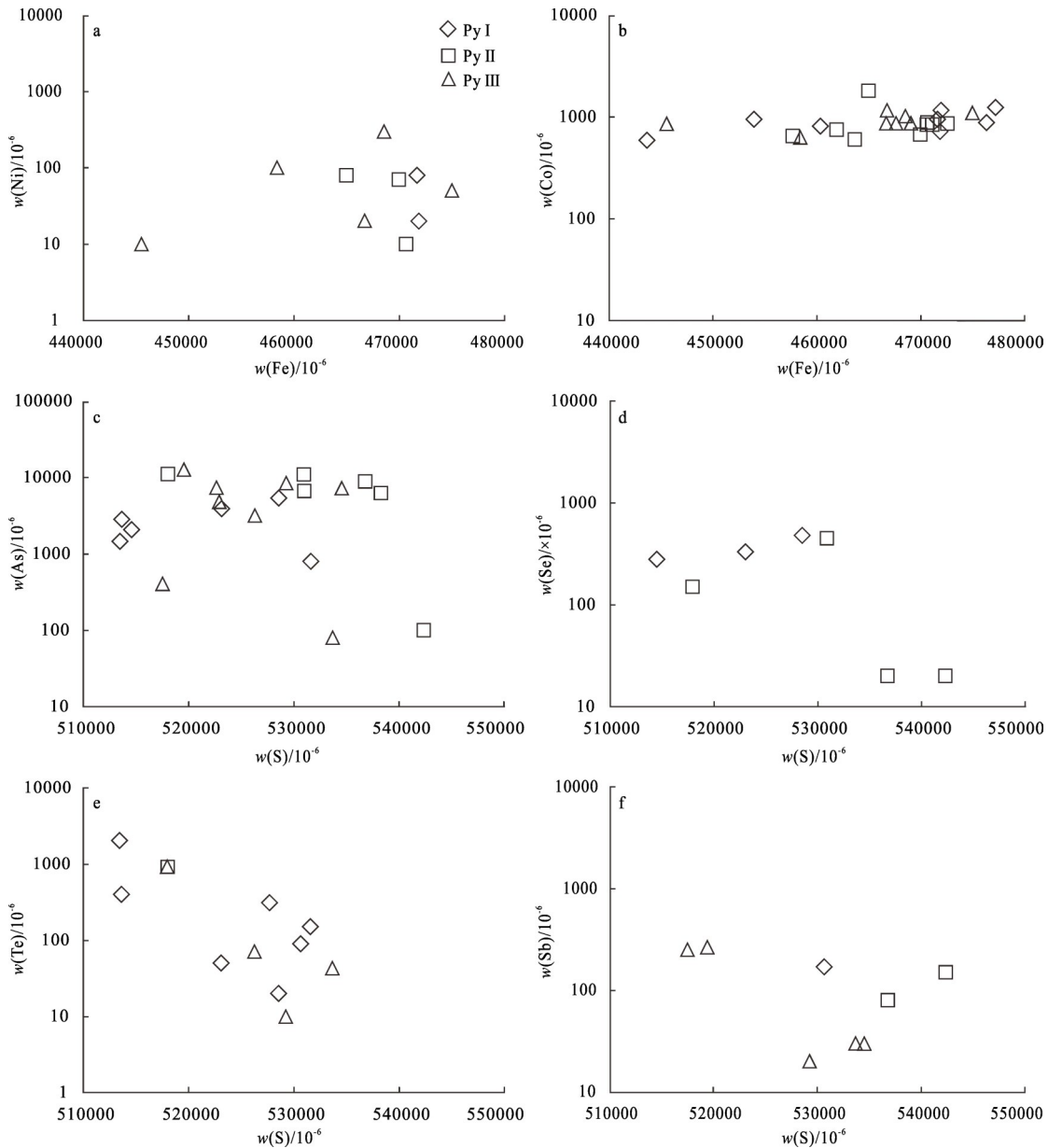
空位,而 S 空位通常起施主作用(形成 N 型黄铁矿);低温条件下结晶,低价离子杂质进入晶格,它们通常成为受主(形成 P 型晶体),低温下结晶的黄铁矿为 S 过饱和,这意味着存在 Fe 的空位,而 Fe 空位通常起受主作用(形成 P 型黄铁矿);在中温条件下则主要形成 N+P 型黄铁矿^[9,33]。因此,可以尝试通过研究书楼丘铀矿床内黄铁矿的导型变化特征,来反演黄铁矿结晶的温度变化情况。

前人发现黄铁矿的热电系数与形成温度之间存在一定的线性关系^[5,8],见式(1)、(2):

$$t = (704.51 - |a|) / 1.818 \quad \text{N 型} \quad (1)$$

$$t = 3 \times (122.22 + a) / 5.0 \quad \text{P 型} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: t —黄铁矿形成温度, $^{\circ}\text{C}$; a —黄铁矿热电系数。将测试得到的不同导型的黄铁矿热电系数代入上述公式分别计算出黄铁矿的形成温度。通过整理书楼丘铀矿床内采集到的 12 件黄铁矿样品测试的 930 个数据点,计算得出研究区黄铁矿形成温度范围介于 74~386 $^{\circ}\text{C}$ 之间,其中 N 型黄铁矿的形成温度介于 222~386 $^{\circ}\text{C}$ 之间, P 型黄铁矿的形成温度介于 74~273 $^{\circ}\text{C}$ 之间; N 型黄铁矿的成矿温度高于 P 型黄铁矿。从温度直方图(图 8a、b)可以看出黄铁矿形成温度峰值集中在两个区间: 100~280 $^{\circ}\text{C}$ 、340~380 $^{\circ}\text{C}$,表明书楼丘铀矿床为中低温矿床。这与前人分析长江铀矿集区内流体



a—黄铁矿 Fe-Ni 关系图；b—黄铁矿 Fe-Co 关系图；c—黄铁矿 S-As 关系图；d—黄铁矿 S-Se 关系图；e—黄铁矿 S-Te 关系图；f—黄铁矿 S-Sb 关系图。

a-Fe-Ni relationship diagram of pyrite; b-Fe-Co relationship diagram of pyrite; c-S-As relationship diagram of pyrite; d-S-Se relationship diagram of pyrite; e-S-Te relationship diagram of pyrite; f-S-Sb relationship diagram of pyrite.

图 6 书楼丘铀矿床黄铁矿微量元素与主要元素 Fe、S 关系图

Fig. 6 Relationship between trace elements and main elements Fe and S in pyrite of Shulouqiu uranium deposit

包裹体所测得的成矿温度介于 97~415 °C 之间^[34-35]相一致,因此矿床的成矿温度可以利用黄铁矿的热电系数来获得^[9-10]。

4.4 黄铁矿热电系数离散度特征

热电系数值差异较大的不同样品的相对分散与集中情况可以用热电系数离散度($\delta a'$)准确反映^[9,36]。其计算公式见式(3):

$$\Delta a' = \delta a / a' \times 100 \% \quad (3)$$

式(3)中: a' —热电系数平均值; δa —黄铁矿样品的热电系数标准差。 $\delta a'$ —不同阶段黄铁矿的叠加程度及成矿时的稳定程度。在早期主要叠加 N 型黄铁矿,晚期则以 P 型为主。当 $\delta a'$ 数值越大,指示黄铁矿热电系数的分散程度越大,表明波动范围较大,反之当黄铁矿热电系数分布相对集中,则表明 $\delta a'$ 较小,成矿时条件较稳定,当在两期叠加作用接近时,会造成成

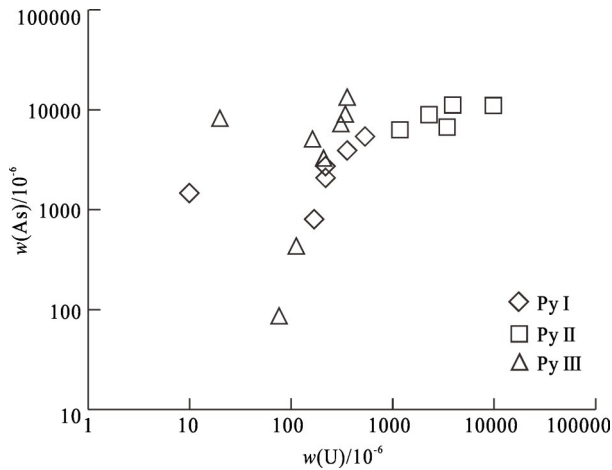
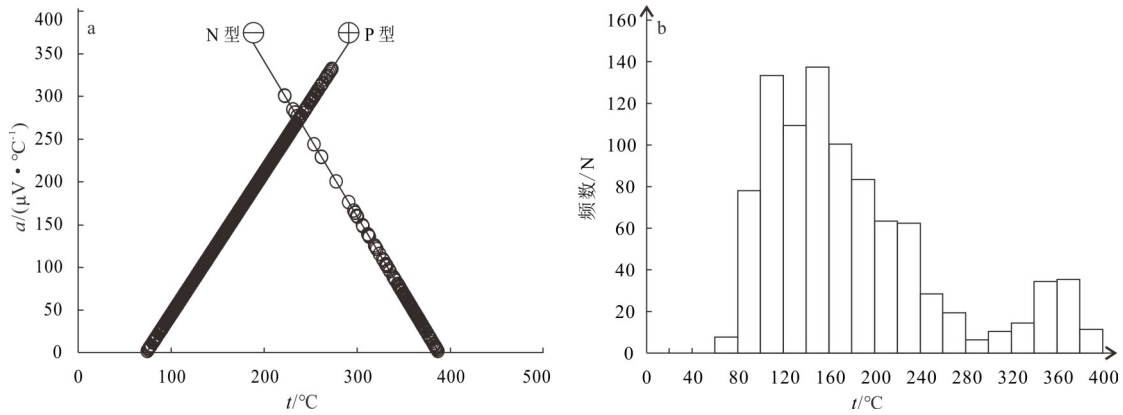


图 7 书楼丘铀矿床黄铁矿 As 与 U 关系图

Fig. 7 Relationship diagram between As and U in pyrite of Shulouqiu uranium deposit



a—黄铁矿热电系数-温度图解; b—黄铁矿温度直方图。

a—Thermoelectric coefficient temperature diagram of pyrite; b—Temperature histogram of pyrite.

图 8 书楼丘铀矿床黄铁矿热电系数-温度图解

Fig. 8 Thermoelectric coefficient temperature diagram of pyrite in Shulouqiu uranium deposit

矿条件波动强烈, $\delta a'$ 急剧增大。前人研究表明 P 型黄铁矿出现率及 $\delta a'$ 值相关性可以指示矿化信息^[9, 11-12], 当矿化信息较好时, 则表明 P 型黄铁矿出现率高, $\delta a'$ 值较小; 矿化不连续时, 表明 P 型黄铁矿出现率高, $\delta a'$ 值偏大; 矿化较差时, 则表明 $\delta a'$ 数值较大, P 型黄铁矿出现率低。

P 型黄铁矿频率与离散度的关系图反映出, P 型黄铁矿频率越接近 50%, $\delta a'$ 越大, 接近指数形态增长; P 型黄铁矿频率介于 90%~100% 之间时, $\delta a'$ 值越小; $\delta a'$ 与 P 型黄铁矿频率整体呈负相关性(图 9a)。研究区以 P 型黄铁矿出露为主, 不同成矿阶段的叠加程度不同, 从成矿前期至成矿后期的 $\delta a'$ 平均值分别为 201.6、82.1 和 224.9(表 2), 表明成矿前期及成矿后期可能由多期次热液的叠加形成, 叠加程

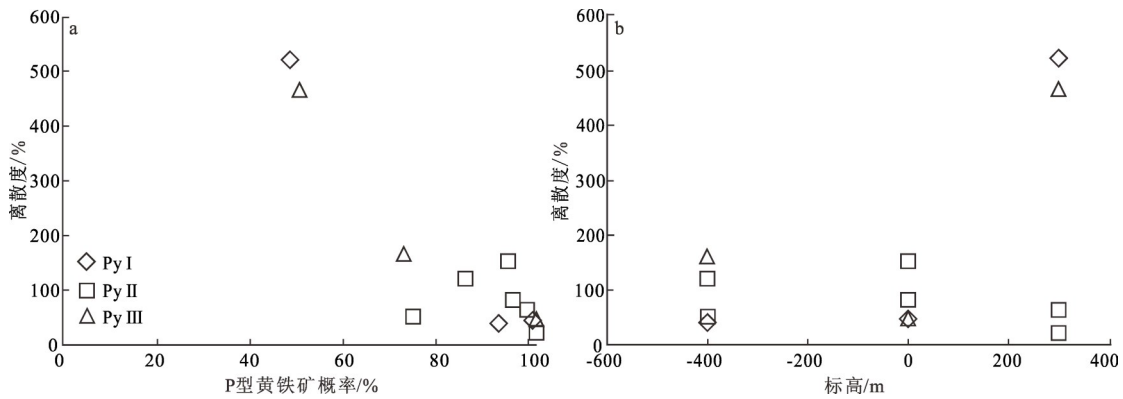
度相对较强; 成矿期的叠加程度最弱, 说明成矿环境较为稳定。另外随着标高的不断下降, 各阶段的 $\delta a'$ 值亦在逐渐减小, 且相对集中(图 9b), 表明越往深部矿化程度相对较好, 具有较好的成矿潜力。

4.5 热电性对矿体剥蚀程度和相对埋深的指示

根据黄铁矿的热电系数值, 热电性对矿体剥蚀程度可以运用下列方程求出热电性参数 X_{np} (表 2), 并以此来确定矿体的剥蚀切面^[8, 37]。计算公式见式(4):

$$X_{np} = (2f_I + f_{II}) - (f_{IV} + 2f_V) \quad (4)$$

式(4)中: f_I —黄铁矿热电系数区间为 $a > 400 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 的百分比; f_{II} — a 在 $200 \sim 400 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 之间的百分比; f_{IV} — a 在 $0 \sim -200 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 之间的百分比; f_V — $a < -200 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 的百分比。矿



a—黄铁矿热电系数-温度图解；b—黄铁矿热电系数-标高图解。

a-Thermoelectric coefficient temperature diagram of pyrite; b-Thermal electric coefficient of pyrite-elevation diagram.

图9 黄铁矿热电系数离散度、标高与P型黄铁矿频率关系图

Fig. 9 Relationship diagram between thermal electric coefficient dispersion ,elevation and frequency of P-type pyrite

体剥蚀率 $\gamma=50-X_{np}/4$ 。

一般而言,矿体最上部 X_{np} 值介于 200~100 之间,矿体上部 X_{np} 值介于 100~50 之间,矿体中部 X_{np} 值介于 50~-50 之间,矿体下部 X_{np} 值介于 -50~-100 之间。矿体的剥蚀百分比大于 50,则说明矿体已被剥蚀到中下部^[38]。

根据计算得出书楼丘铀矿床的热电参数 X_{np} 介于 -40.0~61.0 之间,矿体的剥蚀百分比介于 34.8~60.0 之间,平均为 48.9,可以说明矿床已被剥蚀到中部,意味着矿床深部仍有较好的找矿潜力。

5 结 论

1) 书楼丘铀矿床黄铁矿总体具有亏 S 特征,S、Fe、As、Se、Co 和 Ni 等元素指示本区黄铁矿具有岩浆热液成因特征。黄铁矿中 As 元素以类质同象形式替换 S 是导致晶胞参数变大的主要原因,亦是可能导致 U 沉淀的重要因素之一。

2) 黄铁矿热电系数 (a) 变化范围介于 -301.0~332.2 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 之间,总体以 P 型黄铁矿为主,出现频率为 86.2%。根据热电系数计算得出本区黄铁矿形成温度范围介于 74~386 $^\circ C$ 之间,指示书楼丘铀矿床为中低温矿床。

3) 黄铁矿热电系数离散度 ($\delta a'$) 从成矿前期、成矿期和成矿后期分别为 201.6、82.1 和 224.9,表明成矿前期及成矿后期可能由多期次热液的叠加形成,叠加程度相对较强;成矿期叠加程度最弱,说明成矿环境较为稳定。随着

标高的不断下降,各阶段的 $\delta a'$ 值亦在逐渐减小,且相对集中,表明越往深部矿化程度相对较好,具有较好的成矿潜力。

4) 黄铁矿的热电参数 X_{np} 介于 -40.0~61.0 之间,矿体的剥蚀百分比介于 34.8~60.0 之间,平均为 48.9,表明矿床已被剥蚀至中部,意味着矿床深部仍有较好的找矿潜力。

参考文献

- 1 邹明亮,黄宏业,刘鑫扬,等.华南诸广岩体中段含砷黄铁矿特征及其与铀成矿关系[J].地质论评,2017,63(4):1021-1039.
ZOU Mingliang, HUANG Hongye, LIU Xinyang, et al. Characterization of arsenic-bearing pyrite and the relationship with uranium metallogenic in the central Zhuguang pluton, southern China [J]. Geological Review, 2017, 63(4): 1021-1039 (in Chinese).
- 2 刘文泉,刘斌,罗强,等.粤北书楼丘铀矿床黄铁矿原位微量元素、硫同位素组成及矿床成因指示[J].地球科学,2022,47(1):178-191.
LIU Wenquan, LIU Bin, LUO Qiang, et al. In-situ trace element and sulfur isotope of pyrite constrain ore genesis in Shulouqiu uranium deposit, north Guangdong [J]. Earth Science, 2022, 47(1): 178-191 (in Chinese).
- 3 陈光远,邵伟,孙岱生.胶东金矿成因矿物学与找矿[J].重庆:重庆出版社,1989:94-134.
CHEN Guangyuan, SHAO Wei, SUN Daisheng. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting [J]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1989: 94-134 (in

- Chinese).
- 4 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 等. 胶东乳山金矿田成因矿物学[J]. 北京: 地质出版社, 1996: 89-93.
LI Shengrong, CHEN Guangyuan, SHAO Wei, et al. Genetic mineralogy in Rushan gold mines, Jiaodong region[J]. Beijing: Geological Publishing Group, 1996: 89-93(in Chinese).
 - 5 李青, 李胜荣, 张秀宝, 等. 河北省灵寿县西石门金矿黄铁矿热电性标型及其找矿意义[J]. 地质学报, 2013, 87(4): 542-553.
LI Qing, LI Shengrong, ZHANG Xiubao, et al. Thermoelectric coefficient of pyrite from the Xishimen gold deposit in Lingshou county, Hebei province and its prospecting significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 542-553(in Chinese).
 - 6 曹焯, 李胜荣, 张华锋, 等. 冀西石湖金矿黄铁矿和石英的晶胞参数特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(2): 185-191.
CAO Ye, LI Shengrong, ZHANG Huafeng, et al. Characteristics of cell parameters of pyrite and quartz and their geological significance at Shihu gold deposit in western Hebei, North China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(2): 185-191 (in Chinese).
 - 7 高建伟, 申俊峰, 李国武, 等. 胶东三山岛北部海域金矿黄铁矿晶胞参数与热电性特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(6): 205-1214.
GAO Jianwei, SHEN Junfeng, LI Guowu, et al. Characteristics of cell parameters and thermoelectricity of the pyrite in the Sanshandao north offshore gold deposit, Shandong province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(6): 1205-1214(in Chinese).
 - 8 要梅娟, 申俊峰, 李胜荣, 等. 河南嵩县前河金矿黄铁矿的热电性热爆特征及其与金矿化的关系[J]. 地质通报, 2008, 27(5): 649-656.
YAO Meijuan, SHEN Junfeng, LI Shengrong, et al. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the Qianhe gold deposit, Songxian county, Henan, China, and their relationships with gold mineralization[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(5): 649-656(in Chinese).
 - 9 刘冲昊, 刘家军, 王建平, 等. 陕西省铀厂沟金矿床主矿带黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 264-272.
LIU Chonghao, LIU Jiajun, WANG Jianping, et al. Thermoelectric characteristics of pyrite from the main ore zone of Huachanggou gold deposit, Shangxi province and its significance [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 264-272(in Chinese).
 - 10 翟德高, 刘家军, 韩思宇, 等. 黑龙江三道湾子碲金矿床黄铁矿标型特征及矿床变化保存过程分析[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 81-90.
ZHAI Degao, LIU Jiajun, HAN Siyu, et al. Typomorphic characteristics of pyrite and processes of changes and preservation of Sangdaowanzi telluride-gold deposit in Heilongjiang province [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(1): 81-90(in Chinese).
 - 11 刘坤, 刘家军, 吴杰, 等. 甘肃马坞金矿床 8 号矿体黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2014, 28(4): 711-720.
LIU Kun, LIU Jiajun, WU Jie, et al. Thermoelectric characteristic of pyrites from No.8 orebody of the Mawu gold deposit in Gansu province and its significance[J]. Geoscience, 2014, 28(4): 711-720 (in Chinese).
 - 12 刘华南, 刘家军, 李小伟, 刘冲昊, 等. 内蒙古新地沟金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 819-838.
LIU Huanan, LIU Jiajun, LI Xiaowei, et al. Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindigou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting[J]. Geology in China, 2018, 45(4): 819-838(in Chinese).
 - 13 张龙, 李胜荣, 宋英昕, 等. 胶东西北部望儿山金矿床黄铁矿标型特征及找矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2020, 39(2): 159-171.
ZHANG Long, LI Shengrong, SONG Yingxi, et al. Typomorphic characteristics of pyrite in the Wang'ershan gold deposit, northwest Jiaodong, and its prospecting significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2020, 39(2): 159-171(in Chinese).
 - 14 冯李强, 顾雪祥, 章永梅, 等. 山东蓬莱石家金矿床载金黄铁矿热电性、晶胞参数及其找矿意义[J]. 矿床地质, 2023, 42(5): 877-891.
FENG Liqiang, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Thermoelectricity and cell parameters of gold-bearing pyrite and their significance for prospecting of Shijia gold deposit in Penglai, Shandong province[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(5): 877-891(in Chinese).
 - 15 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质评论, 1980, 26(6): 541-546.
XU Guofeng, SHAO Jielian. The typomorphic characteristics of pyrite and its practical significance [J]. Geological Review, 1980, 26(6): 541-546 (in

- Chinese).
- 16 黄国龙,刘鑫扬,孙立强,等.粤北长江岩体的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因研究[J].地质学报,2014,88(5):836-849.
HUANG Guolong, LIU Xinyang, SUN Liqiang, et al. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristic and genesis of the Changjiang granite in northern Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 836-849(in Chinese).
- 17 徐文雄,伏顺成,许幼,等.诸广山岩体南部书楼丘铀矿床深部找矿潜力分析[J].矿产勘查,2017,8(5):782-788.
XU Wenxiong, FU Shuncheng, XU You, et al. Analysis of prospecting potential in the depth of Shulouqiu uranium deposit in southern Zhuguangshan pluton[J]. Mineral Exploration, 2017, 8(5): 782-788 (in Chinese).
- 18 叶永钦,刘文泉,吴建勇,等.粤北花岗岩型铀矿关键控制要素及勘查部署建议[J].世界核地质科学,2022,39(2):208-222.
YE Yongqin, LIU Wenquan, WU Jianyong, et al. Key controlling factors of granite-type uranium deposit and exploration deployment recommendation for northern Guangdong[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(2):208-222(in Chinese).
- 19 夏宗强,李伟林,蔡煜琦,等.粤北南雄断裂带花岗质糜棱岩锆石 SIMS U-Pb 年龄及其地质意义[J].世界核地质科学,2023,40(2):208-216.
XIA Zongqiang, LI Weilin, CAI Yuqi, et al. SIMS U-Pb age of zircon in granitic mylonite of Nanxiong fault zone, northern Guangdong and its geological significance[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(2):208-216(in Chinese).
- 20 庞雅庆,孟晓庆,范洪海,等.粤北长江地区花岗斑岩脉年代学、地球化学特征及其地质意义[J].世界核地质科学,2023,40(3):701-714.
PANG Yaqing, MENG Xiaoqing, FAN Honghai, et al. Geochronological and geochemical characteristics and geological significances of granite porphyry dykes from Changjiang area in northern Guangdong province[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 701-714(in Chinese).
- 21 江卫兵,周堂波,许丽丽,等.粤北棉花坑铀矿床萤石地球化学特征及其地质意义[J].世界核地质科学,2022,39(1):60-69.
JIANG Weibing, ZHOU Tangbo, XU Lili, et al. Geochemical characteristics and geological significance of fluorite in Mianhuakeng uranium deposits, north Guangdong[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1):60-69(in Chinese).
- 22 郭国林,刘晓东,潘家永,等.粤北 302 铀矿床流体包裹体研究[J].铀矿地质,2010,26(6):350-354+368.
GUO Guolin, LIU Xiaodong, PAN Jiayong, et al. Study of fluid inclusion from uranium deposit No.302 in north Guangdong[J]. Uranium Geology, 2010, 26(6): 350-354+368(in Chinese).
- 23 张善果.书楼丘铀矿床地质特征、矿床成因及找矿潜力分析[J].铀矿冶,2019,38(2):157-164.
ZHANG Shanguo. Geological characteristics, deposit genesis and prospecting potential of Shulouqiu uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(2):157-164(in Chinese).
- 24 胡鹏,闫秋实,叶松鑫,等.钍铀比值在判别铀成矿环境中的应用研究——以粤北书楼丘铀矿床为例[J].地质与勘探,2020,56(1):36-48.
HU Peng, YAN Qiushi, YE Songxin, et al. Application of the thorium-uranium ratio in identifying uranium metallogenic environment: An example of the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong province[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 36-48(in Chinese).
- 25 郑国栋,罗强,刘文泉,等.粤北书楼丘铀矿床沥青铀矿原位 U-Pb 年龄和元素特征及其地质意义[J].地球科学,2019,46(6):2172-2187.
ZHENG Guodong, LUO Qiang, LIU Wenquan, et al. In-situ U-Pb age and elemental characteristics of pitchblende in Shulouqiu uranium deposit and its geological significance[J]. Earth Science, 2019, 46(6): 2172-2187(in Chinese).
- 26 钟福军,严杰,夏菲,等.粤北长江花岗岩型铀矿田沥青铀矿原位 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J].岩石学报,2019,35(9):2727-2744.
ZHONG Fujun, YAN Jie, XIA Fei, et al. In-situ U-Pb isotope geochronology of uraninite for Changjiang granite type uranium ore field in northern Guangdong, China: Implications for uranium mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(9): 2727-2744(in Chinese).
- 27 周航兵,潘家永,钟福军,等.粤北长江铀矿田细粒黑云母花岗岩的成因及其与铀成矿关系[J].矿物岩石,2018,38(1):10-19.
ZHOU Hangbing, PAN Jiayong, ZHONG Fujun, et al. Genesis of fine grained biotite in the Changjiang uranium ore field, northern Guangdong of China, and

- its relation with uranium mineralization[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2018, 38(1):10-19(in Chinese).
- 28 严育通,李胜荣,贾宝剑,等.中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J].*地学前缘*, 2012, 19(4):214-226.
YAN Yutong, LI Shengrong, JIA Baojian, et al. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4):214-226(in Chinese).
- 29 李海东,田世洪,江卫兵,等.粤东北桃源铀矿床黄铁矿地球化学特征及其地质意义[J].*地质论评*, 2021, 67(4):1-11.
LI Haidong, TIAN Shihong, JIANG Weibing, et al. Boyang geochemical characteristics of pyrite in Taoyuan uranium deposit in northeast Guangdong and its geological significance [J]. *Geological Review*, 2021, 67(4):1-11(in Chinese).
- 30 薛建玲,李胜荣,孙文燕,等.胶东邓格庄金矿黄铁矿成因矿物学特征及其找矿意义[J].*中国科学:地球科学*, 2013, 43(11):1857-1873.
XUE Jianling, LI Shengrong, SUN Wenyan, et al. Characteristics of the Genetic mineralogy of pyrite and its significance for prospecting in the Denggezhuang gold deposit, Jiaodong peninsula, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(11):1857-1873(in Chinese).
- 31 刘一浩,薛春纪,赵云,等.2020.我国热液金矿中黄铁矿的载金性研究[J].*现代地质*, 2020, 34(1):1-12.
LIU Yihao, XUE Chunji, ZHAO Yun, et al. Research on auriferous pyrite in hydrothermal gold deposits, China[J]. *Geoscience*, 2020, 34(1):1-12(in Chinese).
- 32 赖静,郭新文,刘文泉,等.诸广中部塘湾铀矿床黄铁矿成因及其对铀成矿作用的指示[J].*地质论评*, 2024, 70(2):541-553.
LAI Jing, GUO Xinwen, LIU Wenquan, et al. Genesis of pyrite from the Tangwan uranium deposit in central Zhuguang pluton and its implication for mineralization [J]. *Geological Review*, 2024, 70(2):541-553(in Chinese).
- 33 董娟,李成禄.大兴安岭永新金矿床黄铁矿热电性特征及其指示意义[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1):95-106.
DONG Juan, LI Chenglu. Thermoelectric characteristics of pyrite from Yongxin gold deposit, Xing'an Great Range and its indicative significance [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(1):95-106(in Chinese).
- 34 徐浩,张闯,庞雅庆,等.广东长排铀矿床成矿流体特征[J].*现代地质*, 2018, 32(5):902-912.
XU Hao, ZHANG Chuang, PANG Yaqing, et al. Characteristics of ore-forming fluids of the Changpai uranium deposit in Guangdong province [J]. *Geoscience*, 2018, 32(5):902-912(in Chinese).
- 35 刘佳林,秦明宽,蔡煜琦,等.粤北诸广山岩体南部长排矿区流体包裹体研究[J].*地质通报*, 2019, 38(2/3):388-396.
LIU Jialin, QIN Mingkuan, CAI Yuqi, et al. Fluid inclusion studies of the Changpai area in Zhuguang mountain[J]. *Geologic Bulletin of china*, 2019, 38(2/3):388-396(in Chinese).
- 36 杨竹森,李红阳,高振敏,等.胶东北部超高品质金矿黄铁矿热电性研究[J].*矿床地质*, 2000, 19(4):307-313.
YANG Zhusen, LI Hongyang, GAO Zhenmin, et al. A study on thermoelectricity of pyrite from super high-grade gold deposits, northern Jiaodong [J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(4):307-313(in Chinese).
- 37 戢兴忠,杨立强,王中亮.胶东新城金矿床黄铁矿热电性特征[J].*现代地质*, 2013, 27(1):37-45.
JI Xingzhong, YANG Liqiang, WANG Zhongliang. Thermoelectricity characteristics of pyrite from Xincheng gold deposit, eastern Shandong [J]. *Geoscience*, 2013, 27(1):37-45(in Chinese).
- 38 张方方,王建平,刘冲昊,等.陕西双王金矿黄铁矿晶体形态和热电性特征对深部含矿性的预测[J].*中国地质*, 2013, 40(5):1634-1643.
ZHANG Fangfang, WANG Jianping, LIU Chonghao, et al. The crystal forms and thermoelectricity of pyrite from the Shuangwang gold deposit, Shaanxi province and their applications to metallogenic prognosis [J]. *China Geology*, 2013, 40(5):1633-1643(in Chinese).