

四川张家坪子金矿床黄铁矿热电性特征及其地质意义

刘蓓蓓¹, 赖川¹, 朱伟¹, 庞成斌¹, 庞振山^{2,3}, 吴金检⁴, 陈雨萌^{2,3}, 石光耀⁵, 俞炳^{2,3}, 陈辉^{2,3}

(1. 四川省自然资源投资集团攀西有限责任公司, 四川西昌 615000; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100037; 4. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 5. 河北地质大学, 河北石家庄 050031)

[摘要] 张家坪子金矿床是四川冕西金矿集区内一大型金矿床, 经过多年的勘查工作已揭露矿体至2600 m标高仍见矿。在野外地质调查的基础上, 本文系统采集了多个钻孔深部的黄铁矿样品开展原位黄铁矿热电性测试。通过对不同标高黄铁矿的热电性特征进行研究, 为深部找矿提供科学依据。结果显示: 张家坪子黄铁矿热电系数离散度保持相对稳定但整体偏大(标准差>20); 不同标高黄铁矿的热电导型以P型为主, 表明该矿床仍处于浅部位置, 局部(海拔2698 m和2863 m)存在N型可能为矿体叠加部位; 黄铁矿的形成温度均较低指示其整体仍位于浅部低温层面, 局部具有矿体首尾高低温相互叠加的现象; 深部黄铁矿的热电导型变化梯度Y值较小, 参考计算的剥蚀率(γ)得出矿床剥蚀程度仅为50%左右。综合各类热电性参数, 笔者认为张家坪子金矿床的成矿潜力较大, 断裂控制部位和矿体侧伏延伸方向的深部是有利的找矿空间。

[关键词] 黄铁矿 热电性 成矿潜力 深部找矿 张家坪子金矿床 四川

[中图分类号] P618.51 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)02-0346-13

Liu Beibei, Lai Chuan, Zhu Wei, Pang Chengbin, Pang Zhenshan, Wu Jinjian, Chen Yumeng, Shi Guangyao, Yu Bing, Chen Hui. Thermoelectric characteristics and geological significance of pyrite in the Zhangjiapingzi gold deposit, Sichuan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2025,61(2): 0346-0358.

0 引言

冕西金矿集区位于我国扬子准地台的西南边缘, 并与松潘-甘孜地槽接壤, 区内已发现各中小型金矿床和多处金矿化点(辛存林等, 2016)。张家坪子金矿床是四川省自然资源投资集团攀西有限责任公司在该金矿集区历经近20年探获的大型金矿床, 查明金金属量达55吨^①。该矿床工业类型属蚀变岩型, 成因类型为热液型金矿床, 经多年的槽钻探工程勘查, 现已揭露矿体埋深近800 m, 且尚未封底。矿体平均品位为 1.56×10^{-6} , 但矿体从浅至深具有品位变化不均一的特点。其矿床成因和成矿

潜力方面的研究仍较少, 尤其是近些年控制的南矿带矿体。张家坪子金矿床深部矿体以及矿体延伸方向的成矿潜力和找矿前景如何? 为了向深部找矿提供依据, 本文开展了张家坪子金矿床深部钻孔的黄铁矿原位热电性研究。

黄铁矿是最为常见和重要的载金矿物(Yang et al., 2016; Yu et al., 2021)。前人通过黄铁矿热电性研究揭示金矿床成矿温度、成矿潜力和找矿方向等, 大量学者已将该方法应用在国内不同金矿集区内多个重要矿山, 如胶东西岭、焦家和玲珑金矿床(申俊峰等, 2013; 俞炳等, 2024; 吴金检等, 2024), 辽东五龙和东昆仑五龙沟金矿床(吴晋超等, 2020;

[收稿日期] 2024-11-06; [改回日期] 2025-02-07; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 中地调研项目(编号:[2024]390)、四川省自然资源投资集团项目(编号:[2024]190、[2024]316)和中国地质调查局项目(编号:DD20230356)联合资助。

[第一作者] 刘蓓蓓(1980年-), 女, 2003年毕业于桂林工学院, 资源勘查工程专业, 获工学学士学位, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作。E-mail: ldb_beibeiliu@sina.com。

[通讯作者] 陈辉(1986年-), 男, 2015年毕业于南京大学, 矿床学专业, 获理学博士学位, 正高级工程师, 主要从事找矿预测研究工作。E-mail: egschenhui@163.com。

Wu et al., 2021)等,并取得了良好的找矿效果。

张家坪子金矿床经过多年的勘探工作,已达到深部找矿阶段,探矿成本逐渐增加,其深部和超深部进一步找矿验证需要更可靠的理论研究支持,因此亟需进行深入系统的科学研究工作。本文在对张家坪子金矿床基础地质调查的基础上,对钻孔中发现的多个黄铁矿进行原位热电性测试,剖析了黄铁矿热电系数的垂向分布规律和离散性特征,探讨了矿床中黄铁矿的形成温度、矿体延伸方向与受剥蚀程度、成矿潜力,以期对深部找矿提供借鉴。

1 区域地质概况

矿区大地构造位置处于盐源-丽江台缘坳陷带,位于金河-程海和小金河-丽江断裂带的构造夹持部位。该部位所在的扬子准地台西缘,受到松潘-甘孜地槽和扬子准地台的共同作用,其中的三叠系中统地层(盐源-丽江台缘坳陷带内)遭受了低绿片岩-绿片岩相的变质作用,造成该地区普遍发育褶皱、断层和节理等构造(罗光兴和谭显强, 2013),此外,还伴随强烈的岩浆活动。

区域地层主要由志留系至三叠系地层构成,包含碳酸盐岩与陆相至山麓碎屑岩的组合(辛存林等人, 2016)。该套地层均属于碳酸盐岩和滨浅海环境的碎屑岩沉积体系。在志留系的早期阶段,部分低洼区域可见硅质岩和笔石页岩的沉积记录。此外,早二叠世末期有玄武岩出露,而三叠纪末期则被海陆交互的含煤碎屑岩所覆盖,这反映了当时沉积环境水体较浅,但地形凹陷显著,沉积物的累积厚度最大可达 6000 m(包小强, 2016)。

该区域的构造格局大致沿北北东方向延伸,断裂构造占据主导地位,包括金河-程海断裂带、小金河-丽江断裂带,以及司依诺背斜构造和一系列褶皱。司依诺背斜主要呈现出北东 15° ~ 20° 的走向,其轴心部分主要由石炭系中上段地层构成,而局部区域常见泥盆系中下段地层,而两翼则分别由二叠至三叠系中段地层组成,西翼和东翼的倾角分别介于 50° ~ 80° 和 60° ~ 80° 之间,展现出轴面近乎直立的线性褶皱特征。值得注意的是,背斜的北段西翼受到了后期断层的切割破坏,南段的核心区域则被燕山期的花岗岩体所侵入(包小强, 2016)。金矿化现象主要集中分布在背斜西翼的三叠系中段地

层内。

区域岩浆岩主要形成于晋宁期、加里东期、海西期、印支期和燕山期5个阶段,包括辉绿岩、玄武岩、凝灰岩、辉绿玢岩以及大量中-酸性侵入岩(包小强, 2016)。其中,晋宁期为变质程度较高的火山熔岩系列,上覆少量火山碎屑岩,在该火山熔岩系列中发现了最早的含金石英脉矿化。加里东时期,岩浆活动形成了下志留统龙马溪组的一套基性至中酸性的火山岩系列,这些岩石从顶部到底部依次可划分为变质流纹质玻屑凝灰岩、基性火山岩和变质流纹质-安山质凝灰岩。至海西期,地质活动主要表现为沿主要断裂带的显著侵入作用及大规模的火山爆发事件,岩石类型主要为呈岩株或岩脉状产出的辉绿岩、辉绿玢岩和流纹斑岩,区域上金矿(如广金坪、银厂坪和金山矿床)的形成都受到显著的控制。印支期岩浆岩主要为沿断裂带侵入的碱性花岗岩和花岗岩,以岩株的形式产出,另有少量基性火山熔岩,后经变质作用形成阳起石片岩和钠长石片岩。燕山期形成了大量的中酸性侵入岩,表现为近南北走向延伸的花岗岩基,总面积 $>700\text{ km}^2$ 。岩体的上盘内、外接触带中,均发现了蚀变岩型金矿体以及少量石英脉型金矿化。此外,在木洛和牦牛坪等地,还存在霓辉石碱性花岗岩,这些岩石是稀土矿和萤石矿的产出地(辛存林等, 2016)。区域脉岩发育显著,主要包括辉绿岩脉、橄榄岩脉、花岗斑岩脉、正长岩脉、霏细岩脉、花岗岩脉、辉长岩脉及花岗伟晶岩脉等,其形成明显受到地质构造与岩浆活动的共同影响,主要侵入晚三叠世至白垩纪的岩体及其外部接触变质带。其中,石英脉与花岗斑岩脉在空间上与金多金属矿产的分布紧密相关,例如张家坪子金矿床,其中的含金石英脉与金矿体多集中在花岗斑岩脉的周边,且花岗斑岩脉自身也显示出明显的金矿化特征,其金的平均含量超过 0.1×10^{-6} (包小强, 2016;赵鹤森, 2019)。

冕西金矿集区拥有悠久的采金历史,具备优越的金成矿地质条件。区内已探明的金矿床有4处,金矿点及矿化点达33处,同时发现了20余处金化探异常与重砂异常,及大量与金矿化密切相关的蚀变与矿化迹象。这些矿化点或异常大多围绕一个或两个主要的大型矿床呈集群或带状分布。矿集区潜在黄金储量可能超过300吨。此外,除了金矿之外,该地区还发现了稀土、萤石、重晶石及多种金

属矿产,而铀矿在该区则表现为零星的异常分布(兰青,2013)。

2 矿床地质特征

张家坪子金矿床呈南北向展布,主要分为南北两个矿带,金矿体沿南北走向、北西-南东走向以及北东-南西走向的韧性剪切带以及断裂构造产出(图1)。矿区地层主要为三叠系绿片岩相,岩性主要为绿片岩夹蚀变交代白云岩和变质玄武岩。从西至东分别为三叠系上盘、赋矿围岩以及下盘,表现为走向近南北,倾向向西的单斜地层。沿着这些向西倾斜的岩层边界以发育逆断层为主,并受到了后期形成的走滑剪切断层的切割作用(赵鹤森,2019)。张家坪子矿区内控矿构造以南北走向的韧性剪切带为主,矿体的产出严格受该韧性剪切带的控制(包小强,2016)。围岩主要由钠长绿泥石片岩和绿泥白云石片岩等组成;矿体下方的下伏围岩,则主要由绿泥石阳起石片岩夹带着薄层状的白云质大理岩构成;矿体上方的上覆围岩,则主要为(含有绿帘石的)绿泥阳起石片岩(赵鹤森,2019)。区内褶皱为一个向西缓斜的单斜构造。其主要构造特征为北北东方向的压扭性断层,褶皱走向为北东 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,略呈向南抬升的趋势,两翼形态对称,形成轴面近于垂直的线状褶皱。倾角西翼介于 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,东翼则在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内。矿区南段被燕山期花岗岩体侵入,北段西翼受到断层的破坏(包小强,2016)。

金矿化以蚀变岩型为主,含少量石英脉型。经过多年的勘查研究,发现工业矿体55个,控制的矿体长度超过1500 m,深度超过700 m,平均厚度在4 m左右。矿体倾向西和北西方向,倾角在 $35^{\circ}\sim 65^{\circ}$,最高品位 36.68×10^{-6} ,平均品位 2.03×10^{-6} 。主矿体有5个,占总资源量的70%左右,分别为ZAu59、ZAu87、ZAu60、ZAu34和ZAu33。矿石矿物主要为黄铁矿(褐铁矿)及少量黄铜矿、黝铜矿和方铅矿等(图2);脉石矿物主要为铁白云石(约占80%)和白云石,次为石英和绢云母等。以不等粒自形-半自形、它形晶结构为主,次为交代残余结构、碎裂结构等。矿石构造为块状、网脉状、浸染状等。金的赋存形式有裂隙金、晶隙金和包体金,以裂隙金和晶隙金为主,约占70%(许龙等,2015)。

成矿阶段分成四期,第一阶段为白石英脉-黄铁

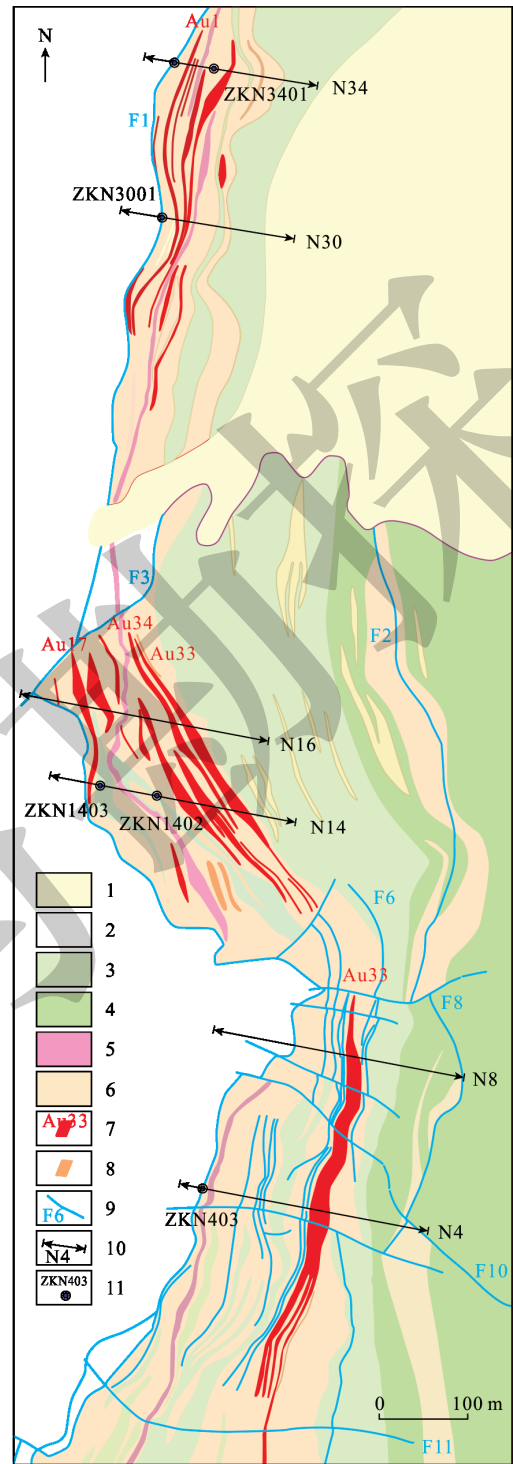


图1 四川张家坪子金矿床地质图(据赵鹤森,2019)

Fig. 1 Geological map of the Zhangjiapingzi gold deposit in Sichuan Province (modified from Zhao, 2019)

1-第四系;2-三叠系上覆岩层;3-三叠系赋矿岩层;4-三叠系下伏岩层;5-流纹岩;6-蚀变带;7-矿体;8-低品位矿体;9-剪切带;10-勘探线;11-钻孔

1-Quaternary; 2-Triassic overlying strata; 3-Triassic ore-bearing strata; 4-Triassic underlying strata; 5-rhyolite; 6-alteration zone; 7-orebody; 8-low-grade orebody; 9-shear zone; 10-exploration line; 11-drillhole

矿阶段,第二阶段为石英-粗粒黄铁矿阶段,第三阶段为石英-细粒黄铁矿-多金属硫化物(黄铜矿、黝铜矿、方铅矿等)阶段,第四阶段为石英-铁白云石阶段。围岩蚀变主要为硅化、黄铁绢英岩化、绢英岩化、绿泥石

化和碳酸盐化等,其中硅化和黄铁绢英岩化与金的成矿关系最为密切。上述蚀变具明显分带性,从内到外大致可分为:硅化→黄铁绢英岩化→碳酸盐化→绿泥石化蚀变带(罗光兴和谭显强,2013)。

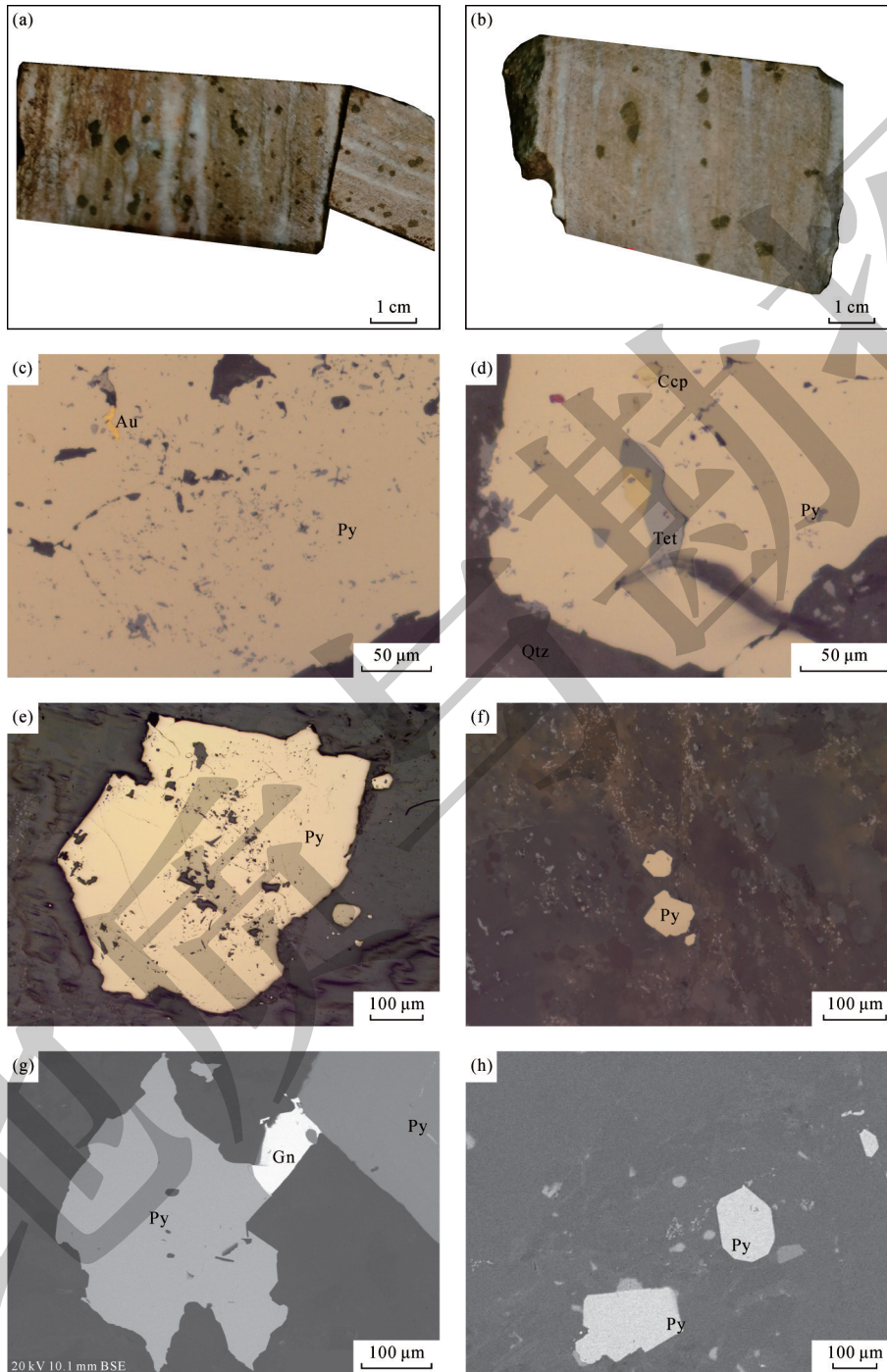


图 2 张家坪子金矿床矿石手标本和镜下照片

Fig. 2 Hand specimen and photomicrographs of the ores from the Zhangjiapingzi gold deposit

a-b-蚀变岩型矿石;c-黄铁矿中存在自然金;d-黄铁矿、黄铜矿和黝铜矿共生;e-f-黄铁矿;g-h-金属矿物扫描电镜照片;Au-自然金;Ccp-黄铜矿;Gn-方铅矿;Py-黄铁矿;Tet-黝铜矿

a-b-fractured altered rock type ore;c-native gold in pyrite;d-pyrite intergrown with chalcopyrite and tetrahedrite;e-f-pyrite;g-h-SEM photographs of metal minerals; Au-native gold;Ccp-chalcopyrite;Gn-galena;Py-pyrite;Tet-tetrahedrite

3 测试与结果

3.1 采样与测试

本研究对多个钻孔进行了岩心观察,选取张家坪子金矿床南北矿带矿化较好的钻孔进行了采样工作。各个已知矿体赋存深度较浅,钻孔揭露了从地表向深部-26 m~-778 m多个不同深度的矿体,矿体标高从2631 m~3600 m不等。所采集样品均为已知最大且较深部的矿体,涉及了Au59、Au34、Au33、Au46、Au87和Au60等6个矿体,对应了ZKS34A10、ZKS34A08、ZKS40A04、ZKS1203、ZKS1201、ZKS34A02、ZKS2407、

ZKS40A08、ZKS2403、ZKS2401、ZKN403、ZKN604、ZKN1002、ZKN1004以及ZKN405,共计15件钻孔的样品,采样信息见表1,采样剖面 and 位置见图3和4。样品首先被制作成加厚铜薄片(廊坊拓轩岩矿检测公司),随后,在南京航景信息科技有限公司完成实验样品的薄片原位测试。其中,选取黄铁矿半自形晶单颗粒(100~500 μm 粒径),测试时使用BHTE-06型热电系数测量仪。实验时选取25℃的检测环境温度 and 50%的相对湿度,测试过程中选择30℃的冷端、120℃的热端 and 90℃的活化温度的设置,实验过程依据吴晋超等(2020)提供的具体测试分析步骤进行。

表1 张家坪子金矿床不同钻孔黄铁矿采样信息

Table 1 Sampling information of the Zhangjiapingzi pyrites from different drill holes

序号	钻孔	采样深度 (m)	钻孔标高 (m)	矿体标高 (m)	矿体号	品位 ($\times 10^{-6}$)	厚度 (m)
1	ZKN1002	86	3135	3050	Au34	1.69	3.13
2	ZKN1004	222	3153	2935	Au33	1.90	7.02
3	ZKN403	217	3168	2987	Au46	1.76	2.31
4	ZKN405	544	3268	2800	Au34	1.57	15.39
5	ZKN604	350	3219	2890	Au33	1.38	9.05
6	ZKS1201	215	3180	2982	Au59	1.17	1.26
7	ZKS1203	372	3114	2698	Au59	2.63	1.76
8	ZKS2403	778	3395	2640	Au59	3.76	1.01
9	ZKS2407	161	3310	3170	Au59	1.73	6.67
10	ZKS34A08	219	3494	3282	Au59	3.36	3.48
11	ZKS34A10	351	3513	3174	Au59	1.77	8.69
12	ZKS40A08	404	3570	3172	Au59	0.93	6.4
13	ZKS34A02	26	3521	3500	Au60	1.03	20.79
14	ZKS40A04	164	3523	3375	Au60	2.9	9.1
15	ZKS2401	460	3298	2863	Au87	1.41	10.35

3.2 测试结果

15件来自张家坪子金矿床不同钻孔矿体的黄铁矿热电性测试结果见表2和图5,每个钻孔的黄铁矿样品测试点数不同,在65~225个之间,根据其数据表现差异而定。由表2可知,各钻孔揭露的不同金矿体表现出不同的热电性系数,除

了钻孔ZKS1203和ZKS2401有4%和26%的黄铁矿为N型,其余钻孔的黄铁矿均为P型。N型黄铁矿对应于Au59矿体的2845 m处和Au87矿体的2863 m处。P型黄铁矿的热电性系数范围为7.98~95.36 $\mu\text{V}/\text{C}$,各钻孔平均值范围为23.22~39.58 $\mu\text{V}/\text{C}$ 。

表2 张家坪子金矿床黄铁矿热电性特征

Table 2 Thermoelectricity features of the Zhangjiapingzi pyrites

钻孔	测试总数	N型 ($\mu\text{V}/\text{C}$)			频率/%	P型 ($\mu\text{V}/\text{C}$)			标准方差	
		最大值	最小值	均值		最大值	最小值	均值		
ZKN1002	185				0	74.8	8.41	29.56	100	24.27
ZKN1004	225				0	84.59	8.46	29.25	100	26.07
ZKN403	134				0	75.95	7.98	30.33	100	14.85
ZKN405	144				0	51.31	8.56	24.10	100	16.43
ZKN604	223				0	65.99	8.36	23.22	100	28.74
ZKS1201	72				0	50.09	8.24	24.53	100	24.80
ZKS1203	216	-8.69	-148.61	-60.69	26	55.95	8.26	25.06	74	14.75

续表 2

Continued Table 2

钻孔	测试总数	N 型 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)				P 型 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)				标准方差
		最大值	最小值	均值	频率/%	最大值	最小值	均值	频率/%	
ZKS2401	210	-15.67	-39.65	-29.94	4	80.47	8.19	24.83	96	31.83
ZKS2403	96				0	72.50	8.36	28.70	100	14.85
ZKS2407	80				0	61.12	8.21	32.04	100	23.16
ZKS34A02	96				0	53.14	8.24	24.21	100	22.29
ZKS34A08	72				0	56.89	8.24	24.92	100	22.90
ZKS34A10	89				0	74.39	8.19	24.96	100	23.57
ZKS40A04	65				0	50.39	9.05	25.38	100	22.58
ZKS40A08	97				0	95.36	8.24	39.58	100	23.36

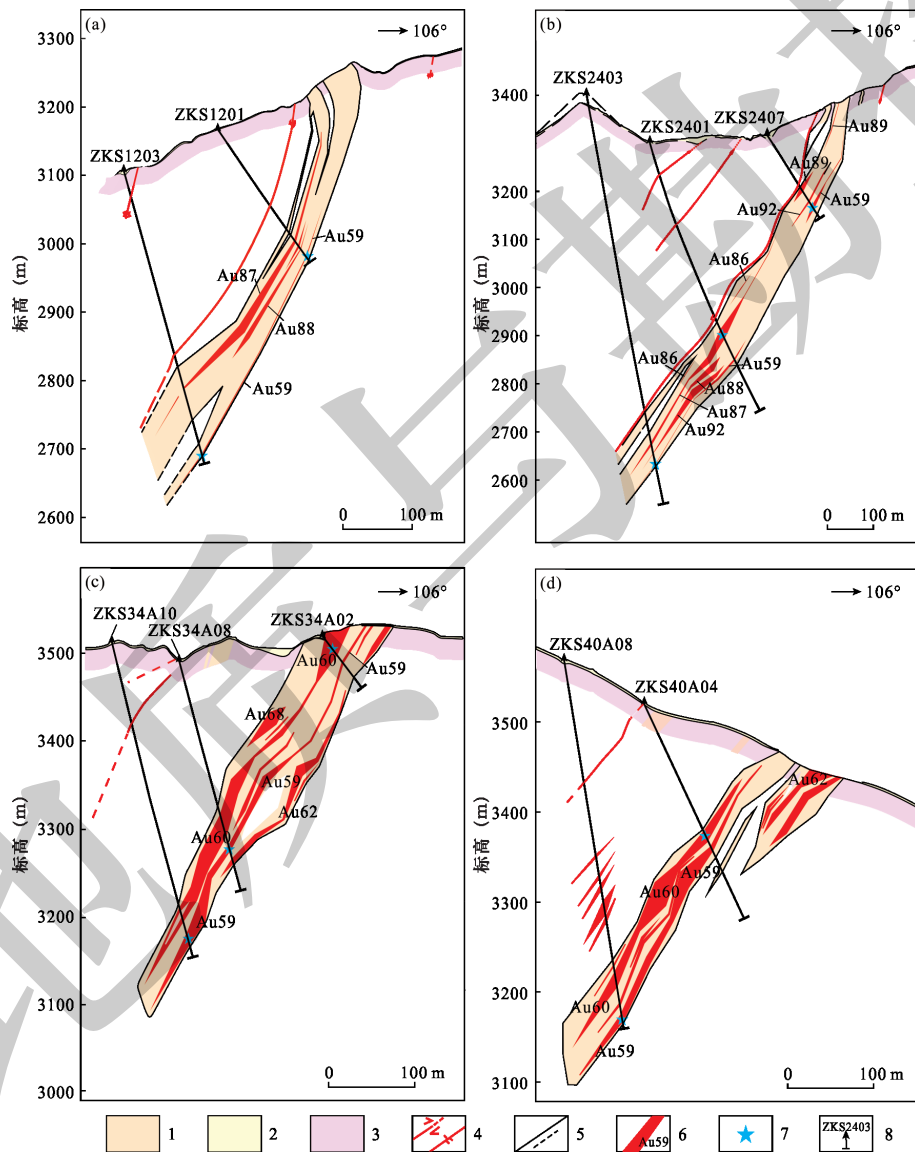


图 3 张家坪子金矿床南矿带勘探线剖面图^①

Fig. 3 Prospecting line profiles of south ore zone from the Zhangjiapingzi gold deposit^①

a-剖面 ZKS12; b-剖面 ZKS24; c-剖面 ZKS34A; d-剖面 ZKS40A; 1-矿化蚀变带; 2-第四系; 3-三叠系变质岩; 4-断层; 5-地质分界线; 6-金矿体及编号; 7-采样位置; 8-钻孔及编号

a-profile ZKS12; b-profile ZKS24; c-profile ZKS34A; d-profile ZKS40A; 1-mineralized alteration zone; 2-Quaternary; 3-Triassic metamorphic rocks; 4-fault; 5-geological boundary; 6-gold orebody number; 7-sampling location; 8-drillhole and number

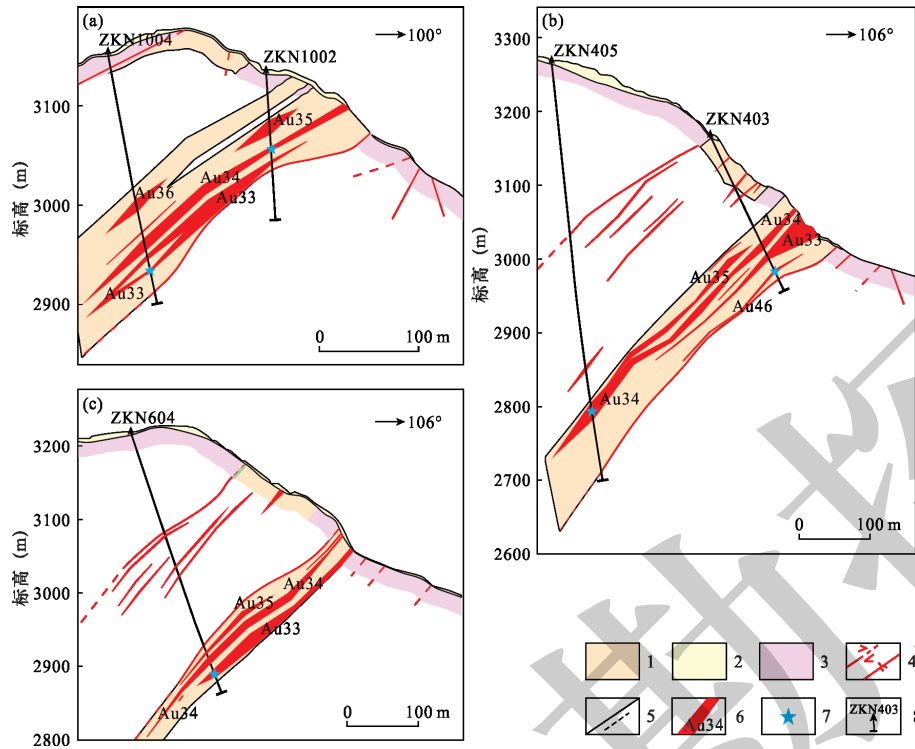


图4 张家坪子金矿床北矿带勘探线剖面图^①

Fig. 4 Prospecting line profiles of north ore zone from the Zhangjiapingzi gold deposit^①

a-剖面 ZKN10; b-剖面 ZKN4; c-剖面 ZKN6; 1-矿化蚀变带; 2-第四系; 3-三叠系变质岩; 4-断层; 5-地质分界线; 6-金矿体及编号; 7-采样位置; 8-钻孔及编号

a-profile ZKN10; b-profile ZKN4; c-profile ZKN6; 1-mineralized alteration zone; 2-Quaternary; 3-Triassic metamorphic rocks; 4-fault; 5-geological boundary; 6-gold orebody number; 7-sampling location; 8-drillhole and number

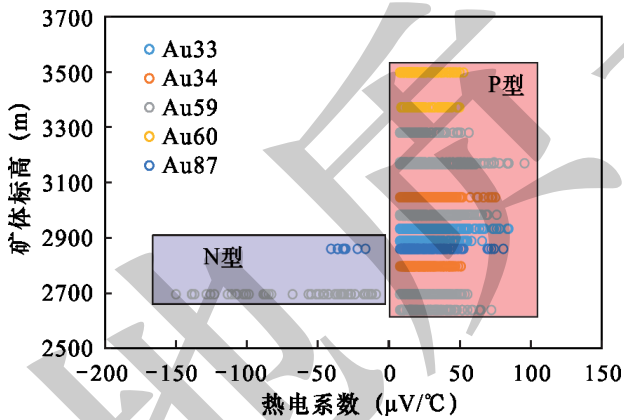


图5 张家坪子金矿床黄铁矿热电系数

Fig. 5 Dispersion of thermoelectric coefficient of the Zhangjiapingzi pyrites

4 讨论

4.1 黄铁矿热电性基本特征

黄铁矿的热电性通常包括黄铁矿的热电导型(N/P)、热电系数(α)及热电动势(E)3个参数。其中,黄铁矿的热电性导型包括N型(电子型)和P型(空穴型),N型黄铁矿表现为载流子含有额外的电

子,P型黄铁矿表现为失去了最外层电子(Pridmore and Shuey, 1976)。热电系数 $\alpha = \Delta E / \Delta t$,其中,热电系数 α 、热电动势差 ΔE 和温差 Δt 单位分别为 $\mu V / ^\circ C$ 、 μV 和 $^\circ C$ (陈光远等,1989;高来之,1990)。

通过对四川张家坪子金矿床各个钻孔不同标高矿体的黄铁矿进行原位黄铁矿热电性的测试,本文得到了各个热电性参数。张家坪子金矿床目前已被钻孔揭露的矿体,其北矿段矿体的黄铁矿全部表现为P型,而南矿体矿体除2个标高的矿体含有较少的N型黄铁矿外,其余均表现为P型。矿床中P型黄铁矿的占比是判别矿体所在位置和矿床深部预测的重要参数,通常P型黄铁矿越多,指示了该矿床的成矿作用越强,矿化潜力更大。随着向矿体深部的发展,P型黄铁矿的数量会减少,N型黄铁矿的数量会增多(邵伟等,1990)。因此,目前张家坪子金矿床所控制的矿体仍处在矿床顶部的位置,深部仍有较大的找矿潜力。

另外,张家坪子金矿床金主要以裂隙金、晶隙金和包体金的形式存在(许龙等,2015),而不同导型的黄铁矿对金的吸附能力是不同的,这主要受控

于黄铁矿的微量元素组成和受体阳离子,如As元素。As含量较高的黄铁矿为P型,且对Au元素的吸附能力较强。P型黄铁矿会优先吸附金的配合物,使得黄铁矿晶格发生畸变破坏,致使 Au^+ 还原为 Au^0 ,进而导致Au元素的沉淀(Morimoto, 1992; Fuchs et al., 2016)。张家坪子金矿床的黄铁矿以P型为主,且其中可见大量裂隙金,可作为判别大型金矿床的标志(高来之,1990)。

热电系数的离散性特征也可有效判别金矿化的强弱程度(陈光远等,1989;吴金检等,2024;俞炳等2024),并已在胶东乳山、西岭和焦家金矿床等得到了广泛验证(李胜荣等,1996;吴金检等,2024;俞炳等2024)。一般情况下,热电系数离散性较大时,则指示较强矿化而产生较大规模的矿体;反之,若热电系数的离散性较为集中,则往往表明成矿前景较为黯淡。张家坪子金矿床的P型黄铁矿热电系数最小值为 $7.89 \mu V/^{\circ}C$ (钻孔ZKN403),最大值为 $95.36 \mu V/^{\circ}C$ (钻孔ZKS40A08),各矿体不同标高的黄铁矿热电系数均表现出一定差别(表2),热电系数标准差几乎都 >20 ,反应了离散度大,且离散范围整体相对均匀稳定,指示了规模可观的矿体和较强的金矿化程度。北矿带的钻孔ZKN403(~2900 m)和ZKN405(~2800 m),南矿带的ZKS1203(~2700 m)和ZKS2403(~2600 m)的标准差 <20 ,反应了这四段矿化强度相比其他部位较弱。

张家坪子金矿床分为南北两个矿带,各标高的黄铁矿热电系数变化特征如图4所示。从整体来看,上至3600 m,下至2600 m,P型黄铁矿均有广泛分布,而在2700~2900 m的范围出现了N型黄铁矿,分别对应南矿带钻孔ZKS1203(Au59,2698 m)和ZKS2401(Au7,2863 m),表明张家坪子金矿床整体矿化强度较高,当前所采集测试的黄铁矿样仍处于整个矿床的浅部区域,而局部具有矿体首尾叠加的现象。

4.2 黄铁矿的形成温度

黄铁矿的形成温度与黄铁矿热电系数具有一定的相关性(邵伟等,1990;要梅娟等,2008),两种热电导型的黄铁矿形成温度满足戈尔巴乔夫线性方程式(Андреев,1992),可用如下线性函数来表示:

$$T=(704.51-|\alpha|)/1.818 \text{ (N型黄铁矿)} \quad (1)$$

$$T=(122.22+\alpha)\times 0.6 \text{ (P型黄铁矿)} \quad (2)$$

式中: T 为形成温度; α 为测得的热电系数。

将测得的张家坪子金矿床不同矿段标高黄铁矿热电系数代入上述方程式中,得到其形成温度

(图6),与前人通过石英中的流体包裹体显微测温范围较为一致(119.8~380.6 $^{\circ}C$,Yan et al., 2023)。P型黄铁矿具有高的热电系数和较低的形成温度,N型黄铁矿具有较低的热电系数和较高的形成温度,因此可以用来反映矿体的深浅位置。从矿床尺度整体来看,黄铁矿的形成温度以P型低温黄铁矿为主,而在2700~2900 m的范围出现了N型高温黄铁矿,对应南矿带钻孔ZKS1203(Au59,2698 m)和ZKS2401(Au7,2863 m),表明已发现的张家坪子金矿床整体处于低温的层面,为矿床的浅部区域,而局部具有矿体首尾高低温叠加的现象,单一矿体的尾端,也就是深部会有高温黄铁矿的分布。

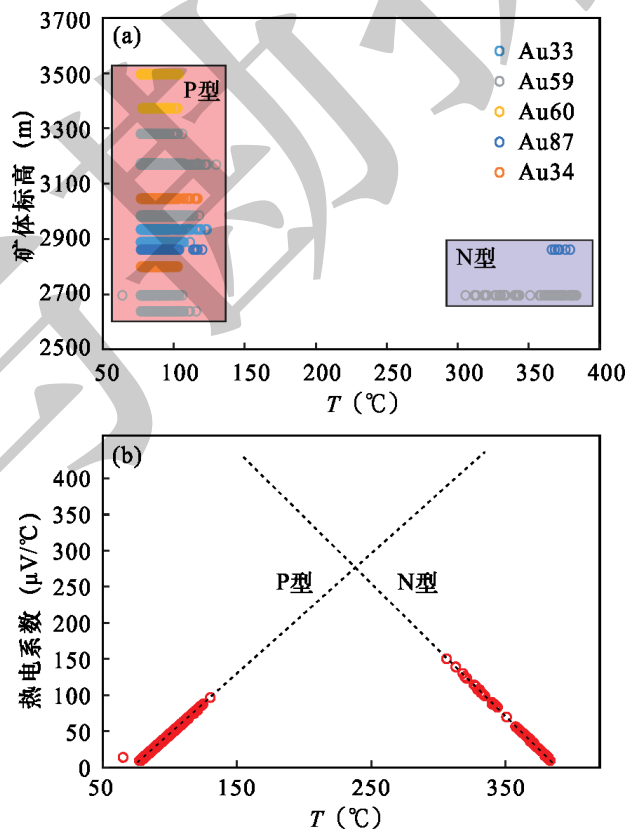


图6 张家坪子金矿床的黄铁矿形成温度与矿体标高(a)及热电系数(b)的关系

Fig. 6 Relationship between pyrite temperature, elevation of orebody (a) and thermoelectric coefficient (b) in the Zhangjiapingzi gold deposit

a-温度和矿体标高的关系;b-温度和热电系数的关系

a-relationship between temperature and elevation of orebody;b-relationship between temperature and thermoelectric coefficient

4.3 黄铁矿热电性对矿体延伸的标识

黄铁矿热电导型的变化梯度(Y)与矿体侧伏方向的延伸程度具有反比例关系。通常情况下, Y 值

越小,矿体的延伸程度越大;反之,矿体延伸规模有限(陈光远等,1989;董娟等,2021)。Y值与黄铁矿导型的比率满足以下公式:

$$Y=l(Xa-Xb)/(Ha-Hb) \quad (3)$$

$$Xa=NP/(NP+NN) \quad (4)$$

式中:Y为热电导型的变化梯度;(Xa-Xb)为黄铁矿分别在a和b两处同一热电导型占比;(Ha-Hb)为分别在a和b两处距离差;NP和(NP+NN)分别为某取样位置测得的P型数量和总量。

本文选择对同一矿体最深部2个标高的黄铁矿进行Y值的计算:矿体Au34的3050 m(ZKN1002)和2800 m(ZKN405)、Au33的2935 m(ZKN1004)和2890 m(ZKN604)、Au59的2698 m(ZKS1203)和2640 m(ZKS2403)以及Au60的3500 m(ZKS34A02)和3375 m(ZKS40A04)。将以上采样位置的黄铁矿热电系数参数带入式(3)和式(4)计算得到了张家坪子金矿床4个矿体的深部Y值。由于Au34、Au33和Au60所测黄铁矿均为P型,占比达100%,已经指示了良好的找矿前景,因此仅对Au59进行了计算。计算结果 $Y=l(74-100)/(2698-2640)l=0.45$ 。张家坪子金矿床Au59深部钻孔的黄铁矿Y值明显偏小(<1),指示了矿体深部仍有较大的延伸。

4.4 黄铁矿热电性对矿体剥蚀程度的指示

黄铁矿热电参数可对矿体的剥蚀率(γ)进行指示,首先需要借助以下公式(张方方等,2013;刘华南等,2018)计算黄铁矿的补偿热电系数(X_{np})。

$$\gamma=50-X_{np}/4 \quad (5)$$

$$X_{np}=(2fI+fII)-(fIII+2fIV) \quad (6)$$

式中: γ 和 X_{np} 分别为剥蚀率和补偿热电系数; fI 、 fII 、 $fIII$ 和 fIV 分别对应热电系数 $\alpha>400$ 、 $200\sim 400$ 、 $-200\sim 0$ 和 $<-200 \mu V/^\circ C$ 范围的热电系数百分占比。

借用(5)和(6)式对张家坪子金矿床的矿体Au59和Au87进行计算,因为只有这两个矿体存在N型黄铁矿,其热电系数范围在 $-200\sim 0 \mu V/^\circ C$ 之间,通过计算两个矿体的 $fIII$ 分别为6.54和3.81,最终算得了 γ 分别为51.64和50.95。通过以上数据,可参考认为张家坪子金矿床的剥蚀程度仅为50%左右,指示了深部巨大的成矿潜力。

4.5 黄铁矿热电性研究对深部找矿的意义

张家坪子金矿床是冕西金矿集区中的重要大型金矿床,主要赋存于蚀变白云岩中。前人通过对矿化石英进行K-Ar同位素定年,将张家坪子金矿床的形成时代限定为25 Ma。相比于区域上的其他

矿床(35.5~27.8 Ma),张家坪子金矿年龄较为年轻,为喜山期构造活动最新的成矿事件,矿化规模也是最大的(包小强,2016;辛存林等,2016)。另外,张家坪子金矿床的成因认识也较为一致,C-H-O-S-Pb同位素研究表明成矿流体和物质来源于地幔,可归类为造山型金矿床大类(包小强,2016;辛存林等,2016;赵鹤森,2019)。上述研究表明该矿床的形成受控于区域性的深大断裂,三叠纪康滇断裂的大幅度抬升和金河—程海断裂深切切割上地幔,促使幔源物质的部分熔融,形成了大量的岩浆和含金流体,而区内的次级构造则提供了有利的容矿空间,金矿床形成并赋存于张家坪子韧性剪切带内。因此,本文认为张家坪子金矿床主要受控于构造,有利的找矿方向为当前已知矿体沿着构造向深部侧伏延伸的方向。

通过对张家坪子金矿床南北两个矿带多个深部钻孔的黄铁矿原位热电性研究,认为深部的成矿潜力仍然很大。本文选择了7个钻孔用来揭露南部矿带的矿体Au59,其垂直纵投影图(图7)和剖面图(图3)显示出矿体Au59呈北东走向产出,倾向西偏北西方向。最浅部的钻孔ZKS34A08揭露了3279 m标高矿体具有较高的矿化品位是 3.36×10^{-6} ,矿体厚度为3.48 m,而向深部ZKS34A10延伸,矿体厚度增加为8.69 m,品位略有下降为 1.77×10^{-6} ,横向向西延长至ZKS2407矿体厚度仍然较厚,维持在6.67 m,品位变化不明显,为 1.73×10^{-6} ,反应了水平方向的矿化连续性,向深部延伸至ZKS2403的2640 m标高,矿体厚度虽减薄至1.01 m,但其品位提升至 3.76×10^{-6} ,反应了较强的金矿化现象。整个Au59矿体表现为以P型黄铁矿为主,热电系数离散度较大,黄铁矿形成温度低,Y值偏小,且剥蚀率低。以上结果均表明该矿体具有较大的成矿潜力。而深部矿体ZKS1203揭露了2698 m标高,存在26%的N型黄铁矿,可能为深部新矿体头部位置与Au59矿体尾部位置的叠加。因此,2600 m标高以上仍有较好的找矿前景。

黄铁矿热电性对成矿预测的指示分为矿床和矿体两个尺度(图8)。从矿床的尺度看,张家坪子金矿床已知南北两个矿带,两个矿带相连且包含了众多矿体。从北至南,矿带中矿体的走向从北东向北北东转变,这受控于韧性剪切带的变形方向。整个矿床从已知的3570 m~2640 m标高的黄铁矿绝大多数表现为P型,表明了目前已知的矿床只是位于头部位置,较宽的热电系数离散度、较低的黄铁矿形成温度

以及矿体延伸和剥蚀等判别指标,均表明张家坪子金矿床成矿潜力大。沿矿体侧伏延伸方向,断裂带控制方向,仍有较好的找矿前景。而就单个矿体尺度,黄铁矿热电性也反映出矿体头部的特征,存在N

型黄铁矿的位置很有可能为矿体首尾叠加的位置。通过黄铁矿热电性的研究,并结合钻孔揭露的数据联合讨论了矿床深部的成矿潜力,认为张家坪子金矿床是具有良好找矿前景的大型金矿床。

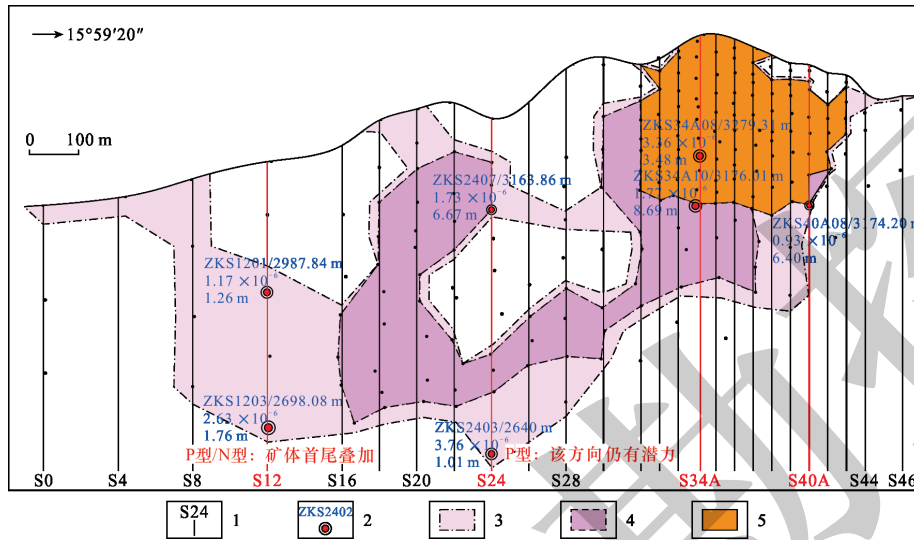


图 7 张家坪子金矿床矿体 Au59 垂直纵投影图^①

Fig. 7 Longitudinal projection of Au59 orebodies in the Zhangjiapingzi gold deposit^①

1-勘探线及编号;2-钻孔及编号;3-推断的资源量;4-控制的资源量;5-探明的资源量

1-exploration lines and number;2-drillholes and number;3-inferred resources;4-indicated resources;5-measured resources

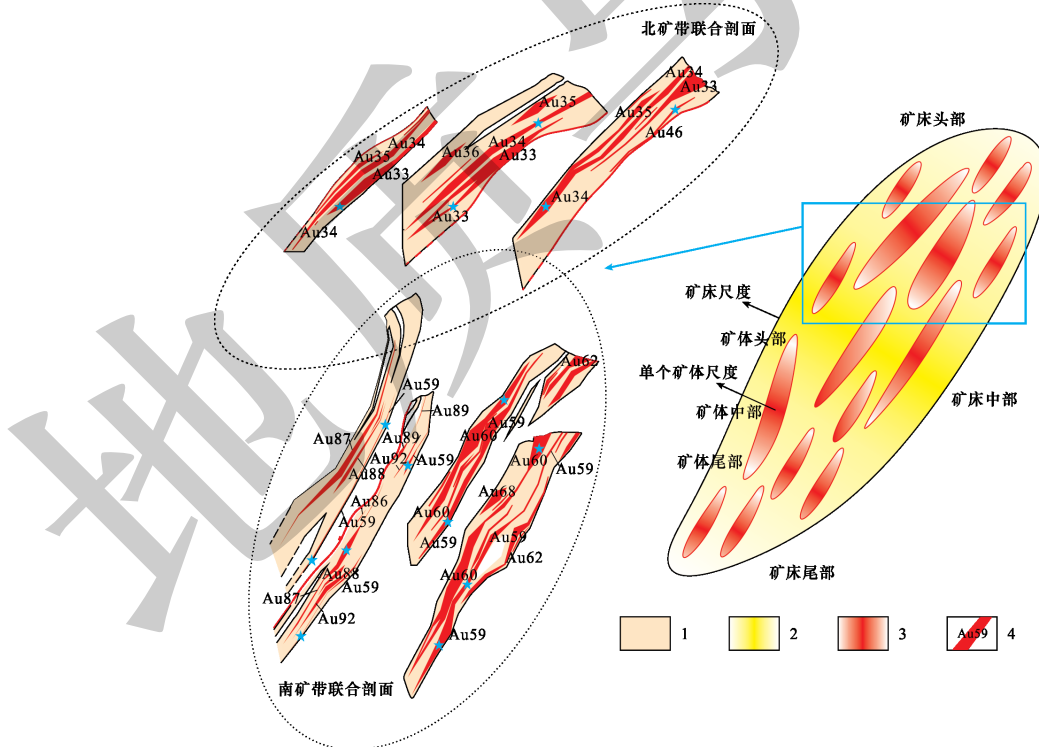


图 8 成矿预测简图

Fig. 8 Simplified model for ore deposit prospecting

1-矿化蚀变带;2-理想矿床模型;3-理想矿体模型;4-金矿体及编号

1- mineralized alteration zone; 2- ideal deposit model; 3- ideal orebody model; 4- Au orebodies and their number

5 结论

(1) 张家坪子金矿床不同标高的黄铁矿具有相对统一的热电性特征, 黄铁矿热电导型以P型为主, 表明研究矿段处于矿床浅部位置, 而南部矿带的ZKS1203(2698 m)和ZKS2401(2863 m)存在N型黄铁矿可能为矿体叠加的部位。

(2) 热电系数离散度整体较大(标准差>20)且相对均匀稳定, 指示了规模可观的矿体和较强的金矿化程度, 而局部具有矿化减弱的现象。

(3) 通过计算获得的黄铁矿形成温度表明张家坪子金矿床整体以P型低温黄铁矿为主, 为矿床的浅部区域, 而局部具有矿体首尾高低温叠加的现象。

(4) 张家坪子金矿床 Au59 深部钻孔的黄铁矿热电导型变化梯度Y值较小(0.45)指示了矿体深部仍有较大的延伸, 而参考计算的剥蚀率(γ)认为矿床剥蚀程度仅为50%左右。

(5) 通过原位黄铁矿热电性测试, 综合各类热电性参数认为张家坪子金矿床的成矿潜力较大, 断裂控制部位和矿体侧伏延伸方向的深部仍有较好的找矿前景。

致谢: 感谢清华大学蔡瑜老师在成文过程中就张家坪子金矿床黄铁矿热电性数据解译的有益交流和探讨, 感谢审稿人的宝贵意见。

[注 释]

- ① 四川省核工业地质局二八一大队. 2024. 四川省冕宁县张家坪子矿区金矿勘探报告[R].

[References]

Андреев Б С. 1992. Пирит Золоторудных Месторождений [M]. Москва: Изд. Наука: 51-63.

Bao Xiaoqiang. 2016. Study on enrichment regularities of mineralization and the ore-forming mechanism of the Zhangjiapingzi gold deposit [D]. Xi'an: Northwest Normal University: 1-54 (in Chinese with English abstract).

Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. 1989. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House: 1-452 (in Chinese).

Dong Juan, Li Chenglu. 2021. Thermoelectric characteristics of pyrite from Yongxin gold deposit, Xing'an Great Range and its indicative significance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(1): 95-106 (in Chinese with English abstract).

Fuchs S, William-Jones A E, Przybylowicz W J. 2016. The origin of the gold and uranium ores of the Black Reef Formation, Transvaal Supergroup, South Africa [J]. Ore Geology Reviews, 72(1): 149-164.

Gao Laizhi. 1990. Research status of thermoelectric properties of typical minerals in metal deposits [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 9(3): 200-201 (in Chinese with English abstract).

Lan Qing. 2013. Geology of the Zhangjiapingzi gold deposit [J]. Geology of Shaanxi, 31(2): 53-58 (in Chinese with English abstract).

Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei. 1996. Genetic mineralogy in Rushan gold mines, Jiaodong region [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-116 (in Chinese).

Liu Huanan, Liu Jiajun, Li Xiaowei, Liu Chonghao, Dai Hongzhang, Tao Yinlong, Wang Jianfeng, Du Yingdong, Fan Yunfei. 2018. Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindigou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting [J]. Geology in China, 45(4): 819-838 (in Chinese with English abstract).

Luo Guangxing, Tan Xianqiang. 2013. Source of ore-forming materials and prospecting direction of the Zhangjiapingzi gold deposit [J]. Acta Geologica Sichuan, 33(S): 7-12 (In Chinese).

Morimoto K. 1992. Relationship among the trace element composition, crystal morphology and physical property of natural pyrite [D]. Sendai: Tohoku University: 160.

Shao Wei, Chen Guangyuan, Sun Daisheng. 1990. Method of investigating thermoelectricity of pyrite and its application to pyrites from gold deposits in Jiaodong region [J]. Geoscience, 4(1): 46-57 (in Chinese).

Shen Junfeng, Li Shengrong, Ma Guanggang, Liu Yan, Yu Hongjun, Liu Haiming. 2013. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance [J]. Earth Science Frontiers, 20(3): 55-75 (in Chinese with English abstract).

Wu Jinchao, Shen Junfeng, Li Guowu, Li Shengrong, He Zeyu, Du Baisong, Xu Xixin, Qiu Haicheng, Li Jianping. 2020. The improved method for measuring thermoelectric property of pyrite and its implication for exploring gold resources—A case study of the Wulong gold deposit in Liaoning Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 39(2): 283-292 (in Chinese with English Abstract).

Wu J J, Zeng Q D, Wei Z H, Fan H R, Yang K F, Zhang Z M, Li X H, Liang G Z, Xia F. 2021. Prospecting potential of the Yanjingou gold deposit in the East Kunlun Orogen, NW China: Evidence from primary halo geochemistry and in situ pyrite thermoelectricity [J]. Minerals, 11(10): 1117.

Wu Jinjian, Zeng Qingdong, Zhang Wen, Dai Qinglong, Li Wen, Bai Rui, Fan Hongrui, Zhang Zheming, Li Xinghui, Yu Bing, Liu Jianming. 2024. In-situ pyrite thermoelectricity and metallogenetic potentiality of Zhaoxian gold deposit in Jiaojia gold belt, Jiaodong Peninsula [J]. Mineral Deposits, 43(4): 899-917 (in Chinese with English abstract).

Xin Cunlin, Bao Xiaoqiang, Anguobao. 2016. Geological characteristics and metallogenesis of Zhangjiapingzi gold deposit in Sichuan Province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science) 52(6): 713-721 (in Chinese with English abstract).

Xu Long, Fu Taiyu, Yang Huaichao, Dong Xiaoyan, Wu Dawei, Zheng Hui. 2015. Gold occurrence of Zhangjiaping gold deposit in Mianning, Sichuan Province [J]. Journal of Henan Science and Technology, 568(7): 140-142 (in Chinese with English abstract).

Yan B, Zhu L, Zhang J, Lai C, Yan H, Wei W F, Jiang H. 2023. Fluid evolution and metallogenesis of the Zhangjiapingzi gold deposit in Mianning, Sichuan Province: Constraints from fluid inclusion studies [J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1228019.

- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, Guo L N, Li R H, Groves D, Danyushevsky L V, Zhang C, Z heng X L, Zhao H. 2016. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment [J]. *Economic Geology*, 111:105–126.
- Yao Meijuan, Shen Junfeng, Li Shengrong, Cao Ye, Liu Xiuyan. 2008. 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*, 27(5):649–656 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bing, Ding Zhengjiang, Chen Weijun, Li Xiao, Liu Caijie, Xue Jianling, Zeng Qingdong, Fan Hongrui, Wu Jinjian, Zhang Qibin. 2024. Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xiling gold deposit in Jiaodong Peninsula and its implications for deep prospecting[J]. *Gold Science and Technology*, 32(2): 207–219 (in Chinese with English abstract).
- Yu B, Zeng Q D, Frimmel H E, Zhou L L, Mcclenaghan S H, Drakou F, Wang Y B, Chen P W, Yu Chuang. 2021. A magmatic–hydrothermal origin of the Xinfang gold deposit, Liaodong Peninsula, China, revealed by in – situ S–Pb isotopes and trace element analyses of pyrite[J]. *Resource Geology*, 71: 144–160.
- Zhang Fangfang, Wang Jianping, Liu Chonghao, Cao Ruirong, Cheng Jianjun, Yang Yongrong, Qi Feng, Wang Luo. 2013. The crystal forms and thermoelectricity of pyrite from the Shuangwang gold deposit, Shaanxi Province and their applications to metallogenic prognosis[J]. *Geology in China*, 40(5): 1634–1643 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hesen. 2019. Genetic mechanism of Danba–Mianning orogenic gold belt on western margin of Yangtze Craton [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1–151 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 包小强. 2016. 张家坪子金矿床成矿机制及矿化富集特征[D]. 西安: 西北师范大学:1–54.
- 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社: 1–452.
- 董娟, 李成禄. 2021. 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)*, 51(1):95–106.
- 高来之. 1990. 金属矿床标型矿物热电性研究状况[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 9(3): 200–201.
- 兰青. 2013. 张家坪子金矿地质特征初探[J]. *陕西地质*, 31(2): 53–58.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京: 地质出版社:1–116.
- 刘华南, 刘家军, 李小伟, 刘冲昊, 代鸿章, 陶银龙, 王建锋, 杜映东, 范云飞. 2018. 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*, 45(4):819–838.
- 罗光兴, 谭显强. 2013. 张家坪子金矿成矿物质来源及找矿方向探讨[J]. *四川地质学报*, 33(增刊):7–12.
- 邵伟, 陈光远, 孙岱生. 1990. 黄铁矿热电性研究方法及其在胶东金矿的应用[J]. *现代地质*, 4(1):46–57.
- 申俊峰, 李胜荣, 马广钢, 刘艳, 于洪军, 刘海明. 2013. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. *地学前缘*, 20(3): 55–75.
- 吴晋超, 申俊峰, 李国武, 李胜荣, 何泽宇, 杜佰松, 徐渴鑫, 邱海城, 李建平. 2020. 黄铁矿热电性测试方法改进及其在金矿找矿勘查中的应用—以辽宁五龙金矿为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(2): 283–292.
- 吴金检, 曾庆栋, 张文, 代清龙, 李文, 柏瑞, 范宏瑞, 张哲铭, 李兴辉, 俞炳, 刘建明. 2024. 胶东焦家金矿带招贤金矿床的原位黄铁矿热电性特征及找矿指示意义[J]. *矿床地质*, 43(4):899–917.
- 辛存林, 包小强, 安国堡. 2016. 四川张家坪子金矿床地质特征及成矿作用[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 52(6): 713–721.
- 许龙, 傅太宇, 杨怀超, 董晓燕, 吴大伟, 郑惠. 2015. 四川冕宁张家坪子金矿床金的赋存状态[J]. *河南科技学院学报*, 568(7):140–142.
- 要梅娟, 申俊峰, 李胜荣, 曹焱, 刘秀艳. 2008. 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*, 27(5):649–656.
- 俞炳, 丁正江, 陈伟军, 李肖, 刘彩杰, 薛建玲, 曾庆栋, 范宏瑞, 吴金检, 张琪彬. 2024. 胶东西岭金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义[J]. *黄金科学技术*, 32(2):207–219.
- 张方方, 王建平, 刘冲昊, 曹瑞荣, 程建军, 杨永荣, 齐峰, 王罗. 2013. 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*, 40(5):1634–1643.
- 赵鹤森. 2019. 扬子克拉通西缘丹巴–冕宁造山型金矿带成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京):1–151.

Thermoelectric Characteristics and Geological Significance of Pyrite in the Zhangjiapingzi Gold Deposit, Sichuan Province

LIU Beibe¹, LAI Chuan¹, ZHU Wei¹, PANG Chengbin¹, PANG Zhenshan^{2,3}, WU Jinjian⁴, CHEN Yumeng^{2,3}, SHI Guangyao⁵, YU Bing^{2,3}, CHEN Hui^{2,3}

(1. *Sichuan Natural Resources Investment Group Panxi Co. Ltd, Xichang, Sichuan 615000*; 2. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037*; 3. *Mineral Exploration Technical Guidance Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037*; 4. *China Aerial Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083*; 5. *Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031*)

Abstract: The Zhangjiapingzi gold deposit is a large-scale gold deposit within the Mianxi gold ore cluster in Sichuan Province. After years of exploration, the ore body has been exposed up to an elevation of 2600 meters above sea level, where mineralization is still present. Based on field

geological surveys, this article systematically collected pyrite samples from multiple deep boreholes for in-situ pyrite thermoelectric testing. By studying the thermoelectric characteristics of pyrite at different elevations, a scientific basis is provided for deep mineral exploration. The results show that the thermoelectric coefficient dispersion of Zhangjiapingzi pyrite remains relatively stable but overall tends to be large (standard deviation >20). The thermal conductivity type of pyrite at different elevations is mainly P-type, indicating that the deposit is still in a shallow position, and there may be N-type deposits in some areas (at elevations of 2698 m and 2863 m) that are possible overlapping parts of the ore body. The formation temperature of pyrite is relatively low, indicating that it is still located in the shallow low-temperature layer as a whole. There is a phenomenon of overlapping high and low temperatures at the beginning and end of the ore body locally. The thermal conductivity gradient Y value of deep pyrite is relatively small, and the erosion degree of the deposit is only about 50% based on the calculated erosion rate (γ). Based on various thermoelectric parameters, we believe that the Zhangjiapingzi gold deposit has great mineralization potential, and the deep areas controlled by faults and the lateral extension direction of the ore body are favorable exploration spaces.

Key words: pyrite, thermoelectricity, metallogenic potential, deep prospecting, Zhangjiapingzi gold deposit, Sichuan Province

