

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.04.008

云南金顶铅锌矿床硫化物电子探针分析及其对矿床成因的指示

李相材^{1,2,3}, 王京彬^{1,3*}, 祝新友³, 吕晓强³, 石珉⁴LI Xiangcai^{1,2,3}, WANG Jingbin^{1,3*}, ZHU Xinyou³, LYU Xiaoqiang³, SHI Min⁴

1.昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2.北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012;

3.中色紫金地质勘察有限责任公司, 北京 100012;

4.中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Beijing Institute of Geology For Mineral Resources, Beijing 100012, China;

3. Sinotech Minerals Zijin Exploration Co., Ltd., Beijing 100012, China;

4. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:金顶铅锌矿床位于滇西兰坪思茅盆地北部,为世界级超大型铅锌矿床。应用电子探针分析(EPMA)技术测定了金顶铅锌矿床中不同矿段(北厂、跑马坪、白草坪)黄铁矿、闪锌矿的微量元素组成,探讨金属硫化物的地球化学特征、矿床成矿环境,从而为研究区矿床成因提供依据。结果表明,各个矿段不同寄主岩石中黄铁矿相对富集 Pb、Zn、Co, 贫 Cu、Cd、Ni、Sb、Te 等微量元素,闪锌矿相对富集 Cd、Pb 等微量元素,贫 Fe、Mn、Ag、Cu、Sb 等。微量元素 Cd、Fe、Mn、Sb、Cu、Pb、Co、Zn 等可能以类质同象、矿物包体及多种形式赋存于金属硫化物中。硫化物微量元素特征显示其主要形成于中低温,成矿温度自白草坪—北厂—跑马坪呈现上升趋势,具盆地卤水特征。综合矿床地质特征及微量元素特征,表明金顶铅锌矿床应属于密西西比河谷型(MVT)矿床一类。

关键词:金顶铅锌矿;电子探针;矿床成因;硫化物;云南

中图分类号:P575.1;P618.42;P618.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)04-0626-16

Li X C, Wang J B, Zhu X Y, Lyu X Q, Shi M. Electron microprobe analysis of sulfide and its implication on genesis of Jinding lead zinc deposit in Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 626-641

Abstract: The Jinding lead-zinc deposit is located in the northern of the Lanping-Simao Basin in western Yunnan, which is a world-class super large lead-zinc deposit. The electron probe microanalysis (EPMA) technology was used to determine the trace element composition of pyrite and sphalerite in different ore sections of the Jinding lead-zinc deposit in this paper (Beichang, Paomaping and Baicaoping). This paper discusses the geochemical characteristics of metal sulfide and the metallogenic environment of the deposit, which provide a basis for the genesis of the deposit in the study area. The results show that the different host rocks in each ore section are relatively enriched in Pb, Zn and Co, but poor in trace elements, such as Cu, Cd, Ni, Sb and Te, while sphalerite is relatively enriched in Cd and Pb, but poor in trace elements, such as Fe, Mn, Ag, Cu and Sb. Trace elements, such as Cd, Fe, Mn, Ni, Sb, Cu, Pb, Co and Zn, could occur in sulfides as isomorphism, mineral inclusions or various forms. The characteristics of trace elements of sulfides show that there are mainly formed at medium and low temperature. The mineralization temperature shows rising characteristics from Baicaoping to Beichang to Paomaping, which has the characteristics of basin brine. According to the geological and trace element characteristics of the

收稿日期:2021-04-21;修订日期:2022-01-14

资助项目:中国铜业有限公司重点科技计划项目《云南兰坪金顶铅锌矿资源潜力评价》(编号:[2019]048)

作者简介:李相材(1992-),男,在读博士生,从事矿床地质研究。E-mail:384612064@qq.com

*通信作者:王京彬(1961-),男,研究员,从事矿床学研究。E-mail:13701350195@139.com

deposit, Jinding lead-zinc deposit should belong to MVT deposit.

Key words: Jinding lead-zinc deposit; electron probe; genesis of the deposit; sulfide; Yunnan Province

金顶铅锌矿是中国目前第二大铅锌矿,也是金属储量超过千万吨的世界级超大型矿床之一,是迄今为止发现的世界第三大密西西比河谷型矿床^[1-2]。尽管金顶铅锌矿床的研究已经积累了大量的资料,但关于其成因一直争论不休,包括同生沉积-后期改造成因^[3-6]、后生热液^[7-11]成因、喷流沉积成因^[12-13],以及具有自身的特点的特殊类型成因^[8, 11, 14-15]、热水喷溢沉积^[16]成因和同生沉积-卤水改造成因^[17]。近年来,学者们的主流观点主要有 2 种,一种认为金顶铅锌矿床以成矿时代新、陆相红色碎屑岩为赋矿围岩、有幔源物质加入及成矿与构造密切相关的特征,区别于密西西比河谷型(MVT)铅锌矿、喷流-沉积矿床型(SEDEX)铅锌矿和砂岩型(SST)矿床,应定义为独特的矿床类型^[7-8, 14, 18-19]。

另一种则以 Leach 等^[20]和 Song 等^[1]为首,认为金顶矿床不应该被定义为独特的矿床类型,而是与底辟作用有关的 MVT 矿床的亚类。

电子探针分析技术(EPMA)可以精准获取矿物中的微量元素组成^[21],为探讨成矿温度、厘定矿床成因类型奠定了基础。本文以金顶铅锌矿床硫化物(黄铁矿、闪锌矿)为主要研究对象,通过电子探针分析测试技术,测定硫化物微量元素组成,以揭示金顶铅锌矿床不同矿段黄铁矿、闪锌矿中微量元素的赋存状态,探讨成矿温度,为厘定矿床成因提供理论依据。

1 区域地质概况

兰坪-思茅盆地位于喜马拉雅造山带东部(图 1-a),

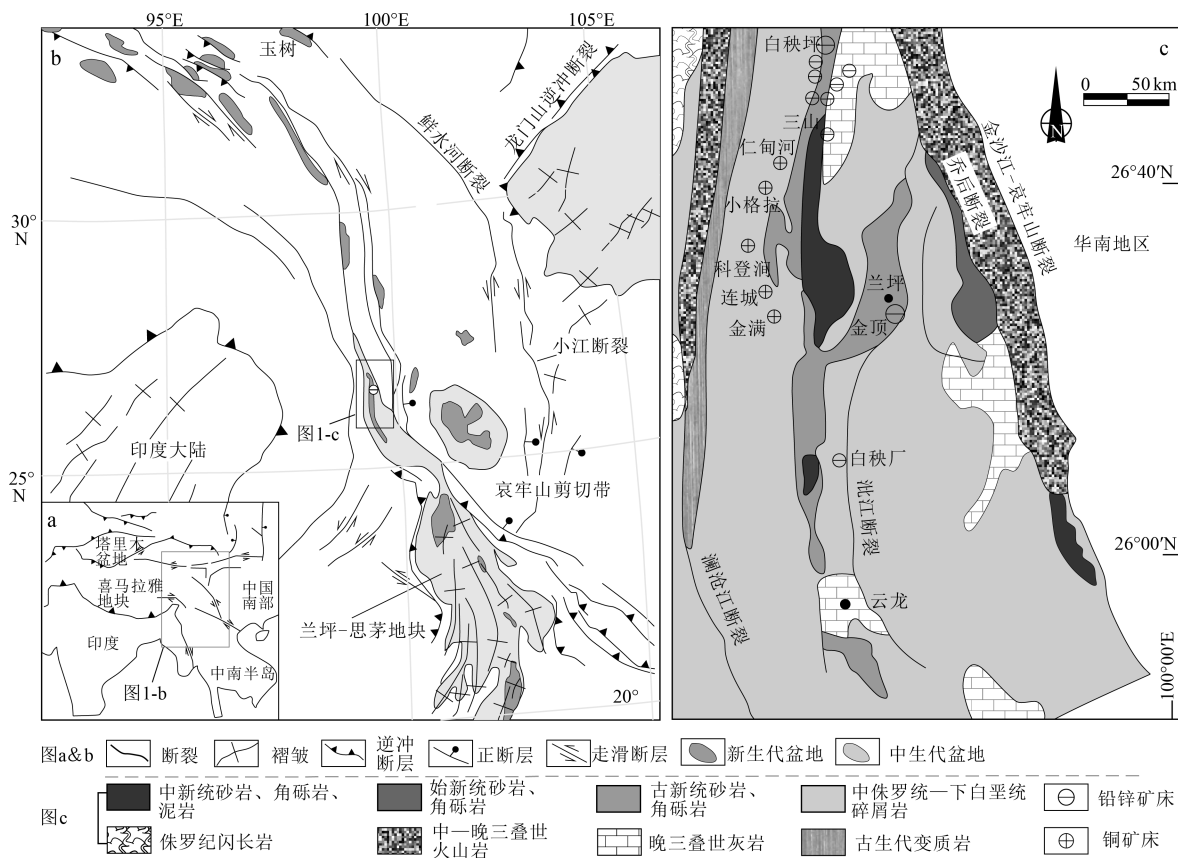


图 1 喜马拉雅造山带新生代盆地构造(a)、兰坪-思茅地块金顶铅锌矿床位置(b)

与兰坪盆地北部区域地质简图(c)(据参考文献[1, 22-23]修改)

Fig. 1 The generalized structure and distribution of Mesozoic-Cenozoic basins in Himalayan orogenic (a), the location of Jinding lead-zinc deposit in Lanping-Simao block (b), and the geological sketch map of the northern part of Lanping basin (c)

金顶铅锌矿床位于兰坪-思茅盆地北部(图 1-b),大地构造位置位于澜沧江断裂带以西的藏滇板块和金沙江-哀牢山断裂带以东的扬子板块之间(图 1-b),盆地中最古老的岩石为早二叠世—中三叠世弧型火成岩和含少量碳酸盐的硅质碎屑岩。这些单元暴露在盆地的西部和东部两侧边缘(图 1-c),被认为是兰坪-思茅地块西缘下古特提斯洋岩石圈向东俯冲的结果^[22, 24]。兰坪-思茅盆地记录了中生代大陆环境。区域上,三叠纪为裂谷盆地,侏罗纪—白垩纪为坳陷盆地,新生代为走滑拉分盆地。印度板块和欧亚板块之间的持续对冲和强烈

挤压导致了该地区发育广泛的大规模逆冲断层,中生代地层往往逆冲于古近纪地层之上。新近纪地层由粗面火山碎屑岩和红色砂岩组成^[9, 24-25]。

2 矿床地质概况

金顶的地层层序被划分为正常的原地系统,上面覆盖着较老的倒转外来系统(图 2)。原生演替系列包括上白垩统南新组、上白垩统虎头寺组、古新统云龙组和始新统果郎组,自上而下分为上三叠统三合洞组、麦初菁组、中侏罗统花开佐组、下白垩统景星组,各组之间均以次级断裂相接触(图 2)。矿

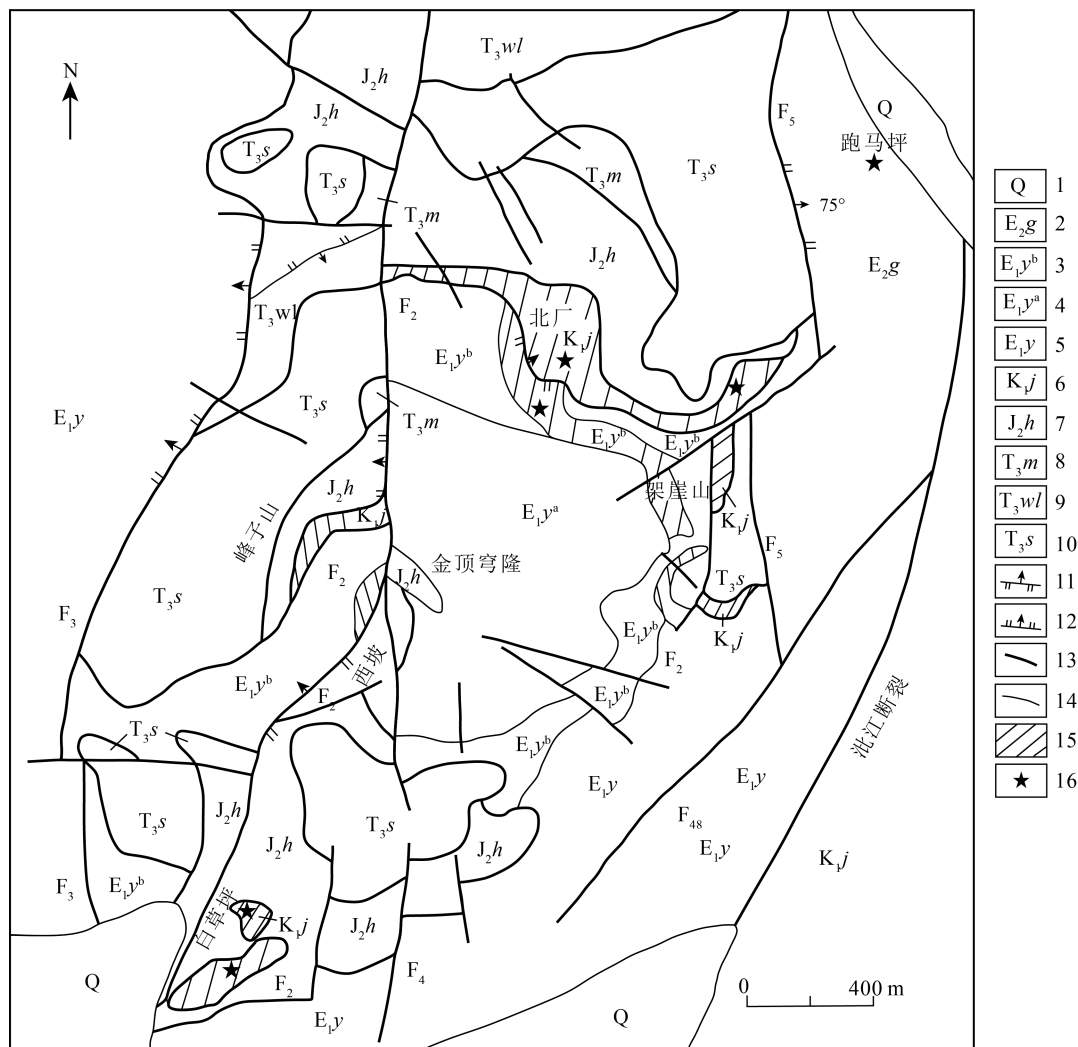


图 2 金顶铅锌矿床地质图(据参考文献①修改)

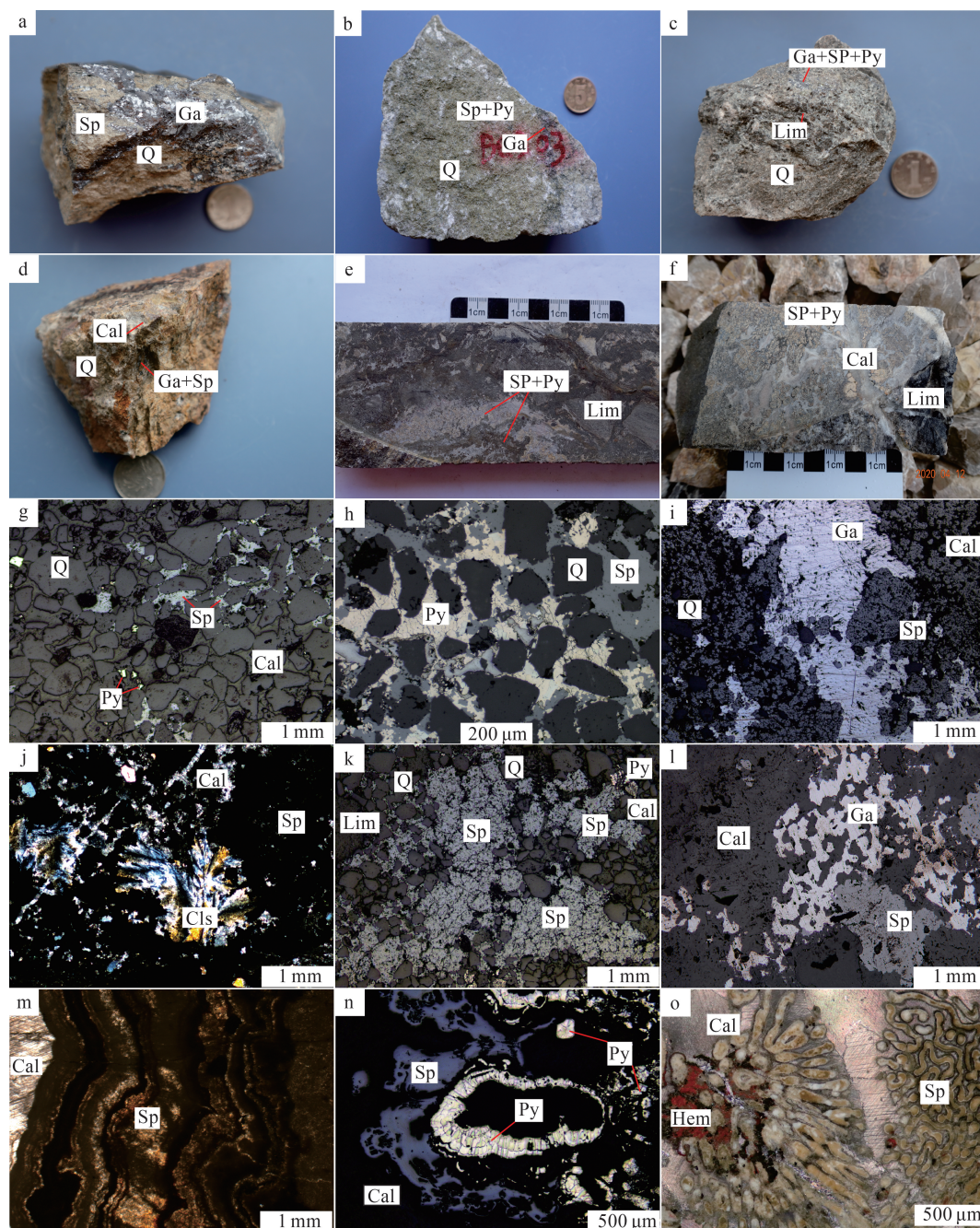
Fig. 2 The geological map of the Jinding lead-zinc deposit

1—第四系砾石及砂土;2—古新统果郎组泥质粉砂岩、细砂岩;3—古新统云龙组含石膏灰岩角砾岩、含砾砂岩、粉砂岩;4—古新统云龙组含砾的砂岩、粉砂岩;5—古新统云龙组泥砾岩,夹石膏和粉砂岩;6—下白垩统景星组石英砂岩;7—中侏罗统花开佐组粉砂岩及细砂岩;8—上三叠统麦初菁组粉砂质泥岩;9—上三叠统挖鲁八组泥岩及粉砂岩;10—上三叠统三合洞组灰岩、含燧石、沥青白云质灰岩;11—正断层;12—逆断层;13—断裂;14—地质界线;15—矿体;16—采样位置

区地质演化历史复杂,包括中生代—始新世沉积、古新世—始新世逆冲、始新世—渐新世穹隆构造的形成、渐新世—中新世铅锌矿化(磷灰石裂变径迹年龄为 32.5~21.4 Ma)^[26] 和晚期北向正断层(图 2)^[8,27]。金顶矿床由 7 个矿块组成,东部为架崖山,北部为北厂,东北部为跑马坪,西部为峰子山和西

坡,南部为白草坪和南厂(图 2)。在金顶的各个矿段中,北厂矿段是最重要的经济矿段,约占金顶铅锌矿床储量的 75%。在北厂矿段,砂岩型 I 号矿体呈层状、板状分布在砂岩层中(图 2)。I 号矿体占矿床储量的 40% 左右,平均 Zn 品位 4.5%,Pb 品位 1.1%,平均厚度为 29 m,已知长度为 1450 m。赋存

图版 I Plate I



a、b. 砂岩型铅锌矿石;c、d. 含砾砂岩型铅锌矿石;e、f. 灰岩角砾岩型铅锌矿石;g、h. 砂岩型矿石浸染状矿化反光镜下照片;i、j. 含脉状方铅矿化的砂岩型矿石正交偏光镜下照片;k、l. 含砾砂岩型矿石反光镜下照片;m. 灰岩角砾岩型矿石中胶状闪锌矿单偏光镜下照片;n. 灰岩角砾岩型矿石中胶状黄铁矿反光镜下照片;o. 灰岩角砾岩型矿石中蠕虫状闪锌矿透射光镜下照片。Lim—灰岩角砾;Cal—方解石;Ga—方铅矿;Py—黄铁矿;Hem—赤铁矿;Q—石英;Sp—闪锌矿;Cls—天青石

于云龙组上部的灰岩角砾岩、含砾砂岩及富石膏层位中形成的Ⅳ矿体呈透镜状、脉状、不规则状分布。Ⅳ号矿体长约 900 m, 厚约 40 m, Zn 平均品位为 8.4%, Pb 平均品位为 1.9%^①。

矿区主要发育 3 种类型的原生矿石, 即砂岩型矿石(图版 I-a、b)、含砾砂岩型矿石(图版 I-c、d)及灰岩角砾岩型矿石(图版 I-e、f)。砂岩型矿石的碎屑成分主要为石英, 胶结物主要为方解石, 矿化主要呈浸染状—稠密浸染状交代石英颗粒之间的方解石颗粒(图版 I-g、h)。Ⅰ号矿体东部见有脉状方铅矿化的砂岩型矿石(图版 I-a、i), 此类砂岩中发育重晶石(图版 I-j)。含砾砂岩与砂岩中的矿化类型相同(图版 I-k、l), 角砾中未见铅锌矿化, 角砾成分以灰岩为主, 含少量粉砂岩和泥岩, 呈棱角状, 磨圆度差, 粒径几厘米至几米, 也有呈大岩块产出。灰岩角砾岩型矿石中发育大量方解石、天青石及硬石膏脉。常见胶状及蠕虫状矿化(图版 I-m、n、o), 该类型矿化主要发育于跑马坪, 北厂则较少出现。矿石矿物中金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿, 以及极少的黄铜矿、磁黄铁矿等, 非金属矿物有方解石、天青石、重晶石、石膏、硬石膏等。

3 样品采集及分析方法

本文系统采集了不同勘探线上的钻孔及地表岩石新鲜面上的 166 件矿石标本。在野外和室内岩相学的观察基础上, 本文挑选 13 件代表性矿石磨制电子探针片, 进行电子探针分析, 探讨其地球化学特征。不同宿主岩石及产状的样品在表 1 及表 2 中详细列出, 具体采样位置见图 2。

闪锌矿采于跑马坪 XVIII 号、北厂 I 和 IV 号及白草坪 XXXI 号矿体。北厂闪锌矿呈浸染/稠密浸染状分布于砂岩(JDB402-1、JZB21-14、JDB413-2)及含砾砂岩内(JDB412-2)(图版 I-a、b、c)。砂岩(图版 I-a、b)中浸染状闪锌矿交代方解石产出(图版 I-g、h), 在Ⅰ号矿体东段砂岩(图版 I-a)中见方铅矿脉穿切稠密浸染状闪锌矿, 闪锌矿中共生天青石(图版 I-j); 跑马坪闪锌矿采自 XVIII 号矿体, 闪锌矿在灰岩角砾岩中呈浸染状(JZB26-2、JKB817-1)、蠕虫状及胶状分布(JDB18-17、JZB18-27、JZB18-31)(图版 I-n、o), 胶状闪锌矿具有明显的深浅环带, 大小通常在 0.5~2 mm 之间。蠕虫状发育在闪锌矿附近并伴生赤铁矿(图版 I-o)。白草坪闪锌

矿在砂岩型(JDB401-1)及含砾砂岩型矿石(JDB401-2、JDB404-3)(图版 I-d)中呈稀疏浸染状分布, 闪锌矿颗粒较小, 矿化较弱(图版 I-g、l)。

黄铁矿采于跑马坪 XVIII 号及北厂 I 号和 IV 号矿体。北厂黄铁矿主要呈浸染状分布于砂岩(JDB402-1、JZB21-14, 采自Ⅰ号矿体, 图版 I-h)及含砾砂岩内(JDB412-2, 采自Ⅳ号矿体, 图版 I-k), 黄铁矿颗粒通常呈碎裂状, 并被闪锌矿交代(图版 I-h)。在不同的寄主岩石中特征基本一致。跑马坪黄铁矿(JZB26-2、JKB817-1、JDB18-17)主要呈胶状及浸染状分布于岩角砾岩中(图版 I-n), 胶状黄铁矿通常围绕有机质/方解石核心生长, 又被胶状闪锌矿所围绕, 部分胶状黄铁矿破碎。最长直径通常在 0.2~0.5 mm 之间。各矿段浸染状黄铁矿特征基本一致。

闪锌矿及黄铁矿的电子探针分析测试在中国冶金地质总局山东局测试中心进行, 采用日本生产的 JEOL JXA-8230 电子探针分析仪(YQ055), 加速电压为 15 kV, 电子束流为 20 nA, 束斑直径为 1 μm , 环境室温 18℃, 湿度 10%, 检出限 0.001%, 运用 ZAF 方法进行校正。元素峰位处测 20 s, 上下背景各测 10 s。黄铁矿和闪锌矿样品单点分析选择 Ge、Ga、Zn、Fe、S、Pb、Sb、Cd、Ag、Cu、Ni、Co、Mn 等元素。

4 测试结果

4.1 黄铁矿

4.1.1 跑马坪黄铁矿特征

金顶铅锌矿床黄铁矿和闪锌矿的微量元素组成见表 1、表 2。跑马坪黄铁矿 Fe 含量在 43.01%~47.18% 之间, 均值为 45.46%, S 含量为 51.12%~53.31%, 均值为 52.80%; 与黄铁矿 Fe、S 的理论值(Fe 为 46.55%, S 为 53.45%)相比^[28], 跑马坪矿段 Fe、S 含量略低, S/Fe 原子比值为 1.955~2.106, 均值为 2.023, 整体具亏 S、亏 Fe 的特征; Zn 含量为 0.008%~0.15%, 均值为 0.047% ($n=17$); Pb 为 0.011%~1.01%, 均值 0.223%; Mn 为 0.06%~1.84%, 均值 0.675%; Co 为 0.055%~0.106%, 均值为 0.080%; Cu、Cd、Sb 含量较低, 其中 Cu 为 0.001%~0.027%, 均值 0.011% ($n=12$); Cd 为 0.002%~0.024%, 均值 0.009% ($n=17$); Sb 为 0.001%~0.023%, 均值 0.006% ($n=15$); Ni 为 0.001%~0.022%, 均值为 0.006%。

4.1.2 北厂黄铁矿特征

黄铁矿 Fe 含量在 45.42%~47.13% 之间,均值为 46.45%,S 含量为 52.49%~53.90%,平均值为 53.23%;与黄铁矿 Fe、S 的理论值(Fe 为 46.55%,S 为 53.45%)相比^[28],Fe、S 含量略低,S/Fe 原子数比值为 1.975~1.994,均值为 1.996,整体具亏 S、亏 Fe 的特征,但接近于理论值。Zn 含量为 0.010%~0.117%,均值为

0.034% ($n=7$); Pb 为 0.021%~0.622%,均值为 0.165% ($n=8$); Co 为 0.005%~0.096%,均值为 0.071%; Mn、Ni、Cu、Cd、Sb 含量较低,其中 Mn 含量为 0.008%~0.347%,均值 0.098%; Cu 为 0.003%~0.020%,均值 0.011% ($n=7$); Cd 为 0.01%~0.024%,均值 0.007% ($n=9$); Sb 为 0.002%~0.015%,均值 0.007% ($n=6$)。

表 1 金顶铅锌矿床黄铁矿电子探针分析结果

Table 1 The analytical results of price from the Jinding lead-zinc deposit using electron probe

%													
样品编号	矿石类型及矿物特征	Zn	Fe	S	Pb	Sb	Cd	Ag	Cu	Ni	Co	Mn	总计
跑马坪													
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.016	44.135	52.851	0.044	—	0.024	—	—	—	0.087	1.84	99.009
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.032	45.332	53.048	—	0.007	0.012	—	0.011	—	0.082	1.019	99.584
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	—	45.837	53.302	0.057	0.005	0.008	—	—	—	0.063	0.726	100.009
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.011	44.804	52.135	0.037	—	—	0.003	—	0.015	0.062	0.549	97.655
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	—	44.869	53.293	0.135	0.004	0.018	—	0.019	0.003	0.087	1.515	99.943
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	—	47.178	52.951	—	—	0.011	0.005	—	—	0.073	0.065	100.372
JZB26-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.091	45.494	52.795	0.076	0.023	0.007	0.007	0.006	—	0.064	0.848	99.411
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.15	46.423	52.996	0.456	0.003	0.008	—	—	—	0.105	0.06	100.211
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.098	46.907	53.248	0.393	—	0.007	—	—	0.016	0.072	0.159	100.9
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.035	46.848	53.227	0.227	—	0.002	0.027	0.003	—	0.074	0.149	100.62
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	—	44.864	51.12	0.785	0.001	0.004	0.007	0.001	0.004	0.106	0.547	97.439
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	0.012	46.333	52.843	0.177	0.008	0.003	0.004	0.017	0.007	0.057	0.266	99.758
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.051	43.014	52.009	1.01	0.002	0.006	0.016	0.006	0.022	0.091	1.558	97.797
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.044	45.195	52.261	0.011	—	—	—	—	—	0.083	0.6	98.197
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.032	45.276	53.045	—	0.012	0.012	—	0.019	—	0.087	0.552	99.054
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.069	45.183	52.756	0.071	0.014	0.011	—	—	—	0.062	0.327	98.507
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.046	45.257	52.957	0.066	—	0.016	0.004	—	0.002	0.091	0.592	99.031
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	—	44.542	52.729	—	—	0.006	—	0.02	—	0.105	0.677	98.08
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.023	46.284	53.281	0.11	0.002	0.002	—	—	0.008	0.055	0.53	100.338
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.05	45.753	53.012	—	0.001	0.021	0.008	0.027	—	0.086	0.487	99.451
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.024	45.384	52.674	—	0.003	0.004	0.004	—	0.005	0.076	0.637	98.894
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.058	46.217	52.585	0.096	0.002	0.006	0.006	—	0.001	0.084	0.433	99.488
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	0.008	44.673	52.896	—	0.008	0.009	—	0.004	0.007	0.085	1.321	99.031
JDB18-17	灰岩角砾岩型,胶状矿化	—	45.356	53.304	0.032	—	—	0.006	0.001	—	0.093	0.744	99.542
北厂													
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	—	46.728	52.995	—	0.012	0.011	—	0.013	—	0.096	0.012	99.879
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	0.021	47.135	52.595	0.096	—	0.011	0.01	—	—	0.077	0.028	99.976
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	0.015	46.893	53.742	0.132	0.006	0.013	—	0.017	0.006	0.093	—	100.917
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	—	46.615	53.122	0.021	—	—	—	0.011	0.004	0.087	—	99.895
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	0.01	46.262	53.011	0.21	0.015	0.017	0.002	—	—	0.086	—	99.624
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	0.01	45.462	53.909	0.03	0.005	0.017	0.004	0.02	—	0.086	0.008	99.587
JZB21-14	砂岩型,浸染状矿化	0.027	45.883	52.773	0.123	—	0.024	0.01	—	—	0.034	—	98.906
JZB21-14	砂岩型,浸染状矿化	—	45.853	52.486	0.622	0.004	0.022	—	0.012	—	0.005	0.014	99.018
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	0.035	47.106	53.395	—	0.002	0.01	0.005	0.003	—	0.072	0.18	100.808
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	0.117	46.611	54.261	0.082	—	0.016	0.01	0.003	—	0.078	0.347	101.525

注:“—”代表低于检测下限

表 2 金顶铅锌矿床中闪锌矿电子探针分析结果
Table 2 The analytical results of sphalerites from the Jinding Pb-Zn deposit using electron probe

													%
样品编号	矿石类型及矿物特征	Zn	Fe	S	Pb	Sb	Cd	Ag	Cu	Ni	Co	Mn	总计
跑马坪													
JZB18-31	灰岩角砾岩型,蠕虫状矿化	66.505	0.012	32.787	-	-	0.229	0.005	-	-	-	0.006	99.587
JZB18-31	灰岩角砾岩型,蠕虫状矿化	65.847	0.033	33.438	0.043	-	0.297	-	0.018	0.005	-	0.007	99.707
JZB18-31	灰岩角砾岩型,蠕虫状矿化	65.506	0.042	33.243	0.033	-	0.588	0.002	-	-	0.009	0.001	99.439
JZB18-31	灰岩角砾岩型,蠕虫状矿化	66.255	0.021	33.456	0.028	-	0.367	-	-	-	-	-	100.151
JZB18-31-1	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.868	0.016	32.566	0.076	0.014	0.545	-	0.006	-	-	0.007	100.154
JZB18-31-2	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.23	0.039	32.108	0.258	-	0.274	-	0.032	-	-	0.012	98.955
JZB18-31-3	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.904	0.025	32.57	0.177	-	0.416	-	0.042	0.001	0.001	0.013	100.167
JZB18-31-4	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.256	0.083	32.2	0.685	0.006	0.248	-	-	-	0.002	0.052	98.542
JZB18-31-5	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.791	0.109	32.543	0.303	-	0.234	-	-	-	-	0.044	99.057
JZB18-31-6	灰岩角砾岩型,胶状矿化	64.851	0.116	32.14	0.254	-	2.534	0.011	-	0.007	0.023	0.002	99.938
JZB18-31-7	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.133	0.164	32.646	0.071	-	0.218	-	-	0.004	0.011	0.087	99.334
JZB18-31-8	灰岩角砾岩型,胶状矿化	63.727	1.635	32.233	0.447	-	0.133	0.003	-	0.006	0.014	0.182	98.432
JZB18-31-9	灰岩角砾岩型,胶状矿化	64.835	0.388	32.105	0.632	0.005	0.251	-	-	0.009	0.004	0.043	98.586
JZB18-31-10	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.718	0.081	32.88	0.313	-	0.309	0.025	-	-	0.008	0.044	99.382
JZB18-31-11	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.917	0.303	32.792	0.662	-	0.102	0.003	0.051	-	0.011	0.134	99.998
JZB18-31-12	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.573	0.054	32.713	-	-	0.298	0.006	-	-	-	0.002	98.664
JZB18-27	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.381	0.059	32.339	0.271	-	0.158	-	0.11	0.012	0.002	0.019	99.351
JZB18-27	灰岩角砾岩型,胶状矿化	67.338	0.029	32.779	0.223	-	0.317	-	0.068	-	0.011	0.013	100.816
JDB18-17-1	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.24	0.043	32.534	0.401	0.001	0.362	0.017	-	-	0.008	0.031	99.637
JDB18-17-2	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.892	0.019	31.987	0.379	-	0.292	-	-	-	-	0.043	98.612
JDB18-17-3	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.546	0.036	32.361	0.373	-	0.38	-	-	-	0.007	0.026	98.731
JDB18-17-4	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.675	0.032	32.393	0.366	0.021	0.384	-	-	-	-	0.022	98.923
JDB18-17-5	灰岩角砾岩型,胶状矿化	65.749	0.028	32.201	0.356	0.001	0.323	-	-	0.012	0.013	0.063	98.746
JDB18-17-6	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.393	0.067	32.52	0.344	-	0.247	-	-	0.001	-	0.024	99.638
JDB18-17-7	灰岩角砾岩型,胶状矿化	66.456	0.263	33.263	0.115	-	0.184	-	-	-	0.007	0.027	100.323
JDB18-22	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	65.347	1.134	32.085	0.269	0.027	0.003	0.011	0.122	-	-	0.038	99.036
JZB26-2-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	66.431	0.083	32.661	0.497	-	0.334	-	-	0.014	0.03	0.051	100.121
JZB26-2-2	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	64.616	0.028	32.159	0.058	0.009	2.369	-	0.003	-	0.006	0.034	99.282
JDB44-8	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	66.622	0.256	32.586	0.058	-	0.852	-	-	-	-	0.028	
JDB44-8	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	65.565	0.159	32.407	0.003	0.004	0.318	-	-	0.001	0.013	0.015	98.517
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	63.374	0.779	32.604	0.092	0.01	2.08	0.001	-	-	0.005	0.044	98.989
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	63.185	0.857	32.307	0.117	-	3.245	0.021	0.043	0.003	0.043	0.034	99.865
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	62.465	2.279	32.041	0.507	-	0.29	0.008	0.064	-	-	0.086	97.756
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	61.43	0.02	31.681	0.042	0.039	6.696	-	0.022	0.002	0.009	0.01	99.957
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	65.639	0.092	31.157	0.043	0.011	1.978	-	-	0.007	0.017	0.036	98.98
JKB817-1	灰岩角砾岩型,浸染状矿化	65.657	0.662	32.14	0.003	-	0.205	-	0.003	-	0.004	0.166	98.901

续表 2

样品编号	矿石类型及矿物特征	Zn	Fe	S	Pb	Sb	Cd	Ag	Cu	Ni	Co	Mn	总计
北厂													
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	65.947	0.047	32.172	0.053	—	0.279	—	—	—	—	0.006	98.504
JDB402-1	砂岩型,浸染状矿化	65.088	0.206	32.172	0.063	—	0.222	0.001	—	—	—	0.005	97.757
JZB21-14	砂岩型,浸染状矿化	65.45	0.044	32.222	0.035	0.002	0.467	—	—	0.001	—	—	98.221
JZB21-14	砂岩型,浸染状矿化	64.391	0.05	32.799	0.242	—	0.376	—	—	—	0.007	0.004	97.876
JDB413-2	砂岩型,稠密浸染状矿化	64.823	—	32.009	0.07	—	2.443	—	—	0.018	—	0.002	99.365
JDB413-2	砂岩型,稠密浸染状矿化	63.752	0.015	32.175	0.032	—	2.762	0.002	—	0.002	—	—	98.751
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	65.46	—	32.345	—	0.024	2.656	0.007	—	—	—	—	100.498
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	65.904	0.051	32.489	—	—	0.473	0.008	—	0.017	0.006	—	98.97
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	65.423	—	32.75	—	0.015	2.43	—	—	—	—	0.006	100.648
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	66.61	0.067	32.629	0.003	—	0.898	—	—	0.013	0.006	0.011	100.246
JDB412-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	66.635	0.027	32.933	0.03	—	0.657	—	—	—	—	—	100.282
白草坪													
JDB401-1	砂岩型,浸染状矿化	63.583	0.03	32.377	0.173	0.005	1.258	—	—	0.008	0.032	0.001	97.502
JDB401-1	砂岩型,浸染状矿化	63.943	0.063	32.17	0.158	—	1.685	—	0.011	0.006	—	—	98.036
JDB401-1	砂岩型,浸染状矿化	63.522	0.023	32.068	0.208	—	1.26	—	—	0.011	—	—	97.099
JDB401-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	64.059	0.046	32.257	0.023	0.009	1.492	—	0.03	0.01	—	0.006	97.94
JDB401-2	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	62.261	1.423	32.398	0.1	0.008	0.641	—	0.255	—	0.004	0.012	97.102
JDB404-3	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	56.855	0.052	31.017	0.039	0.012	12.289	—	0.013	—	—	—	100.277
JDB404-3	含灰岩角砾砂岩型,浸染状	59.682	0.012	28.766	0.007	0.013	10.062	—	0.035	—	—	—	98.577

注:“—”代表低于检测下限

4.2 闪锌矿

4.2.1 跑马坪闪锌矿

跑马坪闪锌矿的微量元素 Zn 含量介于 61.43%~67.34% 之间,均值为 65.50%,S 介于 31.16%~33.46% 之间,均值为 32.46%,比闪锌矿理论标准值(Zn 67.10%,S 32.9%)^[28] 稍低。S/Zn 的原子比值介于 0.97~1.05 之间,均值为 1.01。Fe 含量为 0.012%~2.279%,均值为 0.279%,大部分小于 1%。分散元素 Cd 相对富集且变化范围大,Cd 为 0.003%~6.696%,均值为 0.779%;Pb 为 0.003%~0.685%,均值为 0.250%;Mn 为 0.001%~0.182%,均值为 0.041%。Co 为 0.001%~0.043%,均值为 0.011%;Ag、Cu、Ni、Sb 含量较低,Ag 为 0.01%~0.025%,均值为 0.009% (n=12);Cu 为 0.003%~0.11%,均值为 0.036%;Ni 为 0.001%~0.014%,均值为 0.006% (n=14);Sb 为 0.001%~0.039%,均值为 0.012% (n=12);Ge、Ga 值低于检测下限。

4.2.2 北厂闪锌矿

北厂闪锌矿的微量元素 Zn 含量介于 63.75%~66.64% 之间,均值为 65.41%,S 介于 32.01%~32.93% 之间,均值为 32.43%,比闪锌矿理论标准值(Zn 67.10%,S 32.9%)^[28] 稍低。S/Zn 的原子比值介于 0.99~1.04 之间,均值为 1.01。Fe 含量为 0.015%~0.242%,均值为 0.063%;分散元素 Cd 相对富集且变化范围大,Cd 为 0.222%~2.762%,均值为 1.242%;Pb 为 0.003%~0.242%,均值 0.066%;Mn、Ag、Cu、Ni、Sb、Co 含量较低,其中 Mn 为 0.002%~0.011%,均值为 0.006% (n=6);Co 为 0.006%~0.007% (n=3),微均值为 0.006%;Ge、Ga、Cu 值低于检测下限。

4.2.3 白草坪闪锌矿

白草坪闪锌矿的微量元素 Zn 含量介于 56.86%~64.06% 之间,均值为 61.99%,S 介于 28.77%~32.40% 之间,均值为 31.58%,均比闪锌矿理论标准值(Zn 67.10%,S 32.9%)^[28] 稍低。S/Zn 的原子比

值介于 0.98~1.11 之间,均值为 1.04。Fe 含量为 0.012%~1.423%,均值为 0.236%;分散元素 Cd 相对富集且变化范围大,Cd 为 0.641%~12.289%,均值为 4.098%;Pb 为 0.007%~0.208%,均值为 0.101%;Cu、Mn、Sb、Ni、Co 含量较低,其中 Cu 为 0.011%~0.255%,均值为 0.069% ($n=5$);Sb 含量为 0.005%~0.013%,均值为 0.009% ($n=5$)。Ge、Ga、Ag 值低于检测下限。

5 讨论

5.1 微量元素赋存状态及特征

研究表明,矿物中不同微量元素之间的相互关系可以指示其赋存状态。微量元素主要有 3 种赋存状态:类质同象、矿物包体或以多种形式赋存,分别对应负相关、正相关及无相关关系^[29-30]。为了解金顶铅锌矿床硫化物中微量元素的赋存状态,对部分微量元素进行相关性分析。

矿区内闪锌矿及黄铁矿的电子探针成分分析结果列于表 1 和表 2。本文主要关注北厂、跑马坪、白草坪矿段。

5.1.1 北厂闪锌矿微量元素赋存状态

北厂矿段的 Zn-Cd 双变量图解(图 3-a)中,

Cd 与 Zn 呈负相关性。在 Zn-Pb 图解(图 3-b)中,Pb 与 Zn 无相关趋势;在 Zn-Fe 图解(图 3-c)中,Fe 与 Zn 之间呈弱负相关趋势;Fe-Mn 图解(图 3-d)中,Mn 与 Fe 之间呈正相关趋势。在 Zn-Ag 图解(图 3-e)中,Ag 与 Zn 呈正相关趋势指示;在 Fe-Cd 图解(图 3-f)中,Fe 与 Cd 之间呈负相关趋势指示;Fe、Cd、Mn 等微量元素可能以类质同象形式赋存于闪锌矿中,Pb、Ag 以微粒包体的形式赋存于闪锌矿中。Pb 与 Zn 虽然没有相关性,但是测得的 Pb 浓度较高,归因于方铅矿和其他含铅矿物的微粒包体^[31]。Cu 元素含量均低于检测下限,区别于其他矿段。Cd 较富集,其他元素含量较低。在 Zn-Cd、Fe-Cd 双变量图解中,稠密浸染状闪锌矿的 Cd 含量明显高于浸染状闪锌矿,而 Fe 含量明显小于后者。

5.1.2 跑马坪闪锌矿微量元素赋存状态

跑马坪矿段的 Zn-Fe 图解(图 4-a)中显示,Fe 与 Zn 之间呈负相关趋势;Zn-Cd 双变量图解(图 4-b),Cd 与 Zn 呈负相关性,Cu 元素含量较北厂相对增多;Zn-Cu 图解(图 4-c)中,Cu 与 Zn 无相关趋势;在 Zn-Pb 图解(图 4-d),不同类型闪锌矿的 Pb 与 Zn 之间均呈无相关趋势;在 Fe-Mn

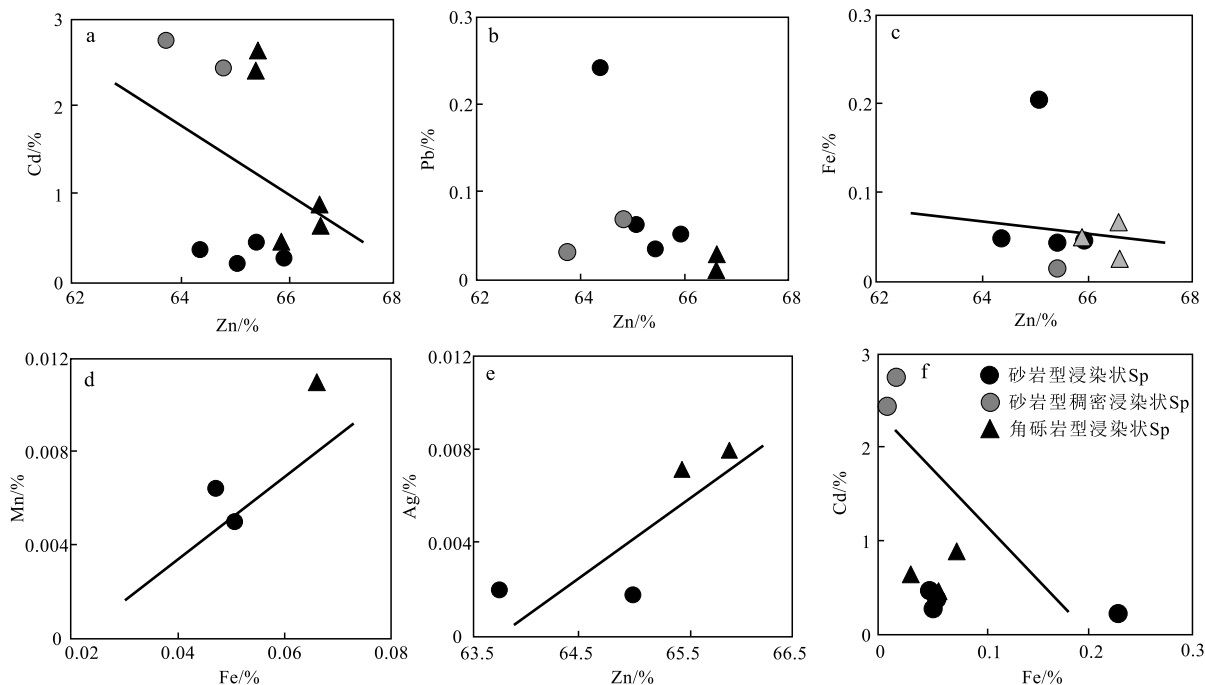


图 3 北厂闪锌矿 Zn-Cd(a)、Zn-Pb(b)、Zn-Fe(c)、Fe-Mn(d)、Zn-Ag(e)、Fe-Cd(f)关系图

Fig. 3 Diagrams showing relationships of the Zn-Cd(a), Zn-Pb(b), Zn-Fe(c), Fe-Mn(d), Zn-Ag(e) and Fe-Cd(f) of sphalerite from the ore section of Beichang

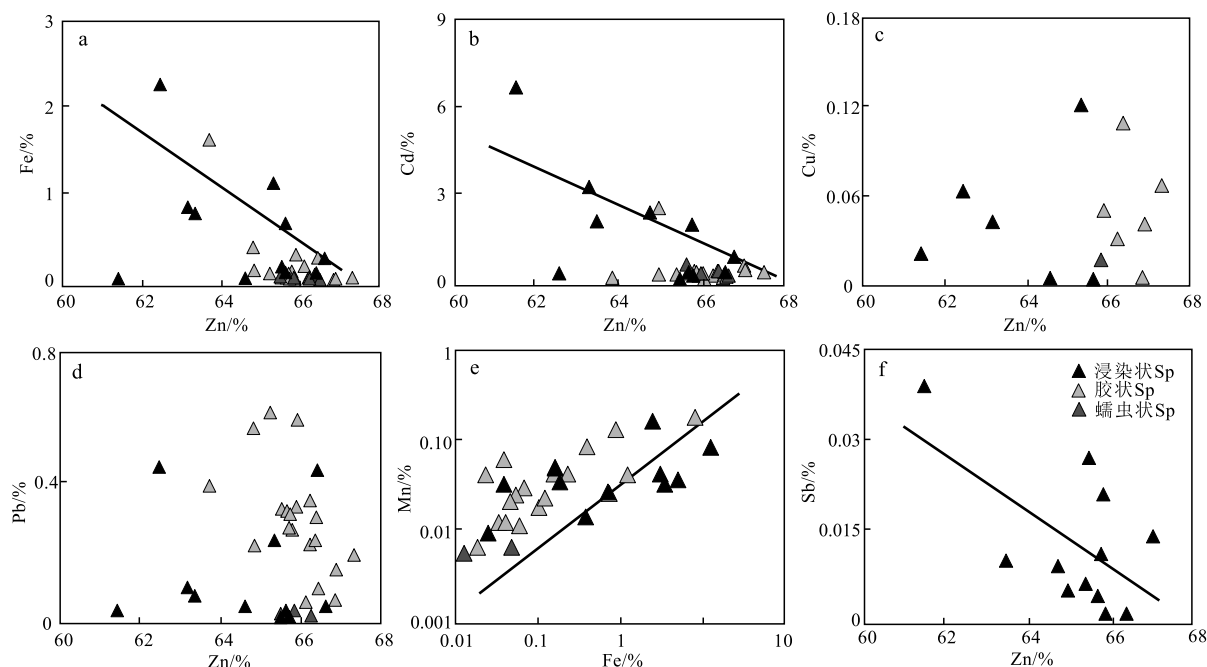


图 4 跑马坪闪锌矿 Zn-Fe(a)、Zn-Cd(b)、Zn-Cu(c)、Zn-Pb(d)、Fe-Mn(e)、Zn-Sb(f) 关系图

Fig. 4 Diagrams showing relationships of the Zn-Fe(a), Zn-Cd(b), Zn-Cu(c), Zn-Pb(d), Fe-Mn(e), Zn-Sb(f) of sphalerite from the ore section of Paomaping

图解(图 4-e)中, Mn 与 Fe 之间呈正相关趋势。在 Zn-Sb 图解(图 4-f)中, Sb 与 Zn 呈负相关趋势, 指示 Fe、Cd、Mn、Sb 等微量元素可能以类质同象赋存于闪锌矿中, Pb 以包体形式赋存, Cu 可能以多种形式赋存。跑马坪蠕虫状闪锌矿的元素分布情况类似于胶状闪锌矿, 而与浸染状闪锌矿有所区别。从 Zn-Fe、Zn-Cd 图解可以看出, 浸染状闪锌矿相比胶状或蠕虫状闪锌矿, 具有较高的 Cd、Fe 含量。Cd 含量低于北厂矿段。

5.1.3 白草坪闪锌矿微量元素赋存状态

在白草坪矿段 Zn-Fe 图解(图 5-a)中, Fe 与 Zn 之间无相关性; 在 Zn-Cd 双变量图解(图 5-b)中, Cd 与 Zn 呈明显的负相关性。Cd 非常富集, 含量远高于北厂与跑马坪矿段。在 Zn-Cu 图解(图 5-c)中, Cu 与 Zn 无相关趋势; 在 Zn-Pb 图解(图 5-d)中, Pb 与 Zn 无相关趋势; 在 Zn-Sb 图解(图 5-e)中, Sb 与 Zn 呈负相关趋势; 在 Fe-Mn 图解(图 5-f)中, Mn 与 Fe 之间呈正相关趋势。指示 Cd、Mn、Sb 等微量元素可能以类质同象形式赋存于闪锌矿中, Fe、Pb 以包体形式赋存, Fe、Cu 可能以多种形式赋存。不同寄主岩石的表现基本一致。白草坪中

Cd 元素含量较高, 其他元素含量较低。白草坪矿段 Fe 与 Zn 呈无相关性, 区别于跑马坪和北厂矿段, 可能与西部矿段成矿流体温度较低有关^[11, 18], 推测流体在低温情况下, Cd 元素更容易进入闪锌矿晶格中置换 Zn^{2+} , 导致 Fe 含量低。

另外, 由于电子探针精度有限, 笔者对 3 个矿段中的闪锌矿进行了 LA-ICP-MS 分析, 闪锌矿激光剥蚀信号强度图中微量元素的平坦程度也可以佐证这几种元素的赋存状态(未发表数据), 这也与前人数据结果吻合^[31]。

5.1.4 跑马坪黄铁矿微量元素赋存状态

在线性相关性图中, Zn 与 Fe 具有正相关性(图 6-a); 在 Fe-Cd 图解(图 6-b)中, Cd 与 Fe 呈负相关趋势; 在 Fe-Mn 图解(图 6-c)中, Fe 与 Mn 具有强负相关性; 在 Fe-Co 图解(图 6-d)中, Co 与 Fe 呈负相关趋势。在 Fe-Cu 图解(图 6-e)中, Cu 与 Fe 无相关趋势。在 Sb-Cu 图解(图 6-f)中, Cu 与 Sb 无相关性。指示跑马坪黄铁矿中的 Cd、Mn、Co 等微量元素可能主要以类质同象形式赋存, Zn 以矿物包体形式赋存, Cu、Sb 以多种形式赋存。值得注意的是, 跑马坪胶状黄铁矿与浸染状黄铁矿元素特征基

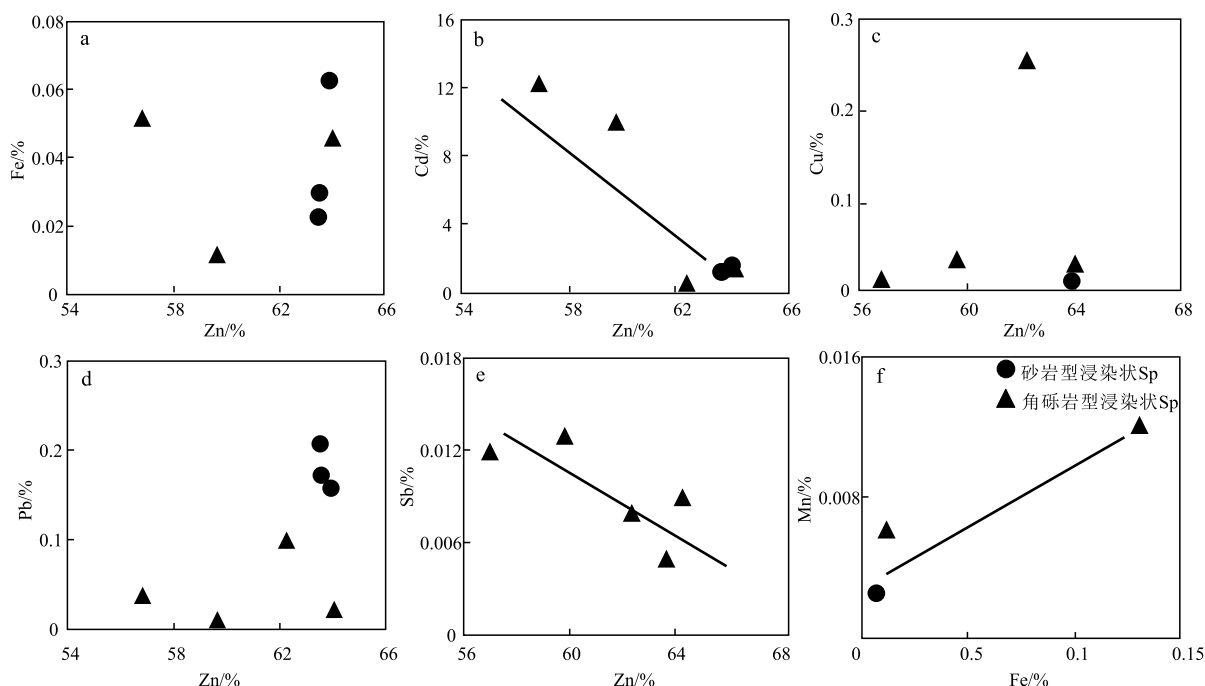


图5 白草坪闪锌矿 Zn-Fe(a)、Zn-Cd(b)、Zn-Cu(c)、Zn-Pb(d)、Zn-Sb(e)、Fe-Mn(f)关系图

Fig. 5 Diagrams showing relationships of the Zn-Fe(a), Zn-Cd(b), Zn-Cu(c), Zn-Pb(d), Zn-Sb(e) and Fe-Mn(f) of sphalerite from the ore section of Baicaoping

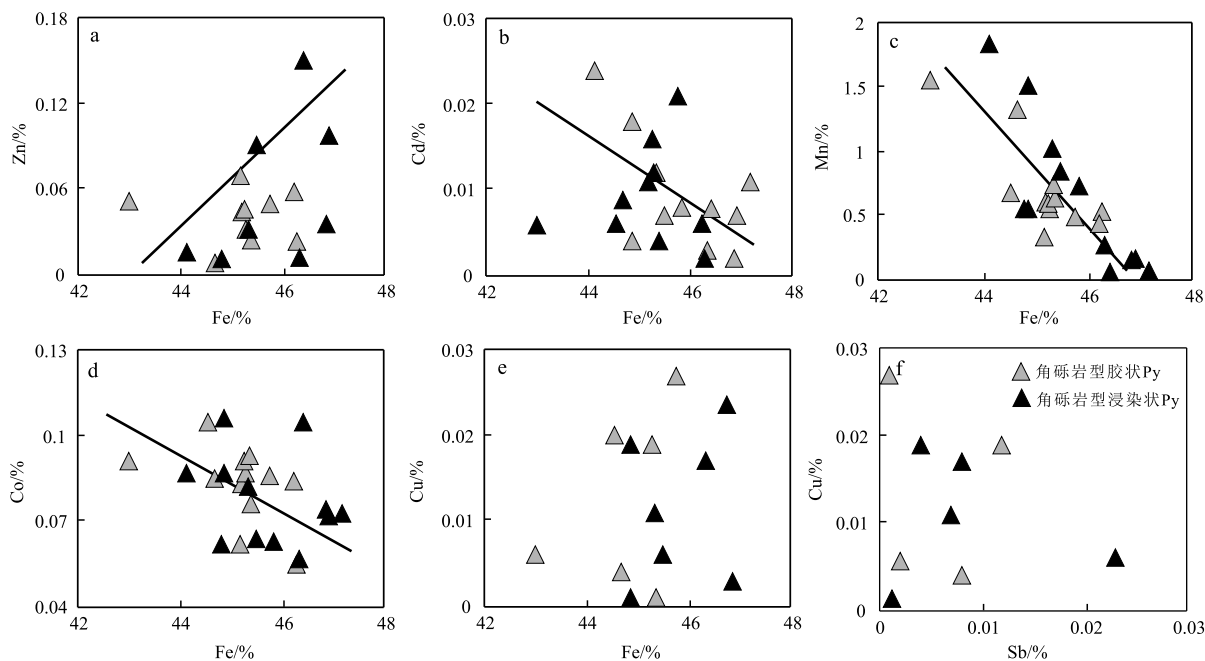


图6 跑马坪黄铁矿 Fe-Zn(a)、Fe-Cd(b)、Fe-Mn(c)、Fe-Co(d)、Fe-Cu(e)、Sb-Cu(f)关系图

Fig. 6 Diagrams showing relationships of the Fe-Zn(a), Fe-Cd(b), Fe-Mn(c), Fe-Co(d), Fe-Cu(e), Sb-Cu(f) of pyrite from the ore section of Paomaping

本一致, Mn 的含量相较北厂矿段高出一个数量级。

5.1.5 北厂黄铁矿微量元素赋存状态

在 Fe-Zn 图解(图 7-a)中, Zn 与 Fe 呈正相关

性;在 Fe-Cd 图解(图 7-b)中, Fe 与 Cd 呈强负相关性;在 Fe-Co 图解(图 7-c)中, Co 与 Fe 呈负相关趋势。在 Fe-Pb 图解(图 7-d)中, Pb 与 Fe 无相

关性。在 Fe-Cu 图解(图 7-e)中,Cu 与 Fe 无相关性。在 Cu-Sb 图解(图 7-f)中,Cu 与 Sb 无相关性。虽然 Pb-Zn 无相关性,但测得的铅浓度较高,归因于方铅矿和其他含铅矿物的微粒包体^[31]。指示跑马坪黄铁矿中的 Cd、Mn、Co 等微量元素可能主要以类质同象赋存,Zn、Pb 以矿物包体形式赋存,Cu、Sb 以多种形式赋存。北厂黄铁矿微量元素除 Cu、Mn 外,其他元素基本与跑马坪一致。

5.2 胶状闪锌矿微区剖面分析

Fe、Cd 元素含量是影响闪锌矿颜色的主要因素^[32-34]。因此,选取 2 个典型的跑马坪胶状闪锌矿纹层进行微区剖面分析,主要关注 Fe、Cd 两种元素。

从图 5 可以看出,胶状闪锌矿环带的颜色有交替变化的现象,存在浅黄色-棕色-黑色的区别。从闪锌矿核心至边缘进行分析,可以看出 Fe-Cd 之间存在明显互相消长的关系。由于 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 的离子半径相似,三者可以互相置换^[35]。温度高的环境下, Fe^{2+} 可以强烈置换矿物晶格中的 Zn^{2+} ,导致闪锌矿颜色变深^[36-37],随着温度下降, Cd^{2+} 进入先前

Fe^{2+} 的晶格位置,取而代之,导致闪锌矿颜色变浅,Cd 在低温条件下富集沉淀^[38],使 Cd、Fe 呈负相关性。从图 9 可以看出,中心的闪锌矿 Cd 含量要大于 Fe 含量,颜色呈浅黄色。随着向外出现黄褐色-深褐色条带,Fe 含量明显上升,而 Cd 含量明显降低,如图 9-a 第 8 点及图 9-b 第 6~7 点位。在图 9-a 第 9~12 点明显看出 Fe-Cd 的互相消长的韵律性变化。当闪锌矿中 Cd 含量高时,颜色较浅。当 Fe 含量高时,颜色相对较深。闪锌矿的颜色可能与 Cd 无关^[35]。因此,金顶胶状闪锌矿中浅色环带往往富 Cd、贫 Fe,深色环带则相反,相对富 Fe、贫 Cd,也反映出成矿流体温度的动荡变化。

5.3 对成矿温度的指示

高温岩浆热液条件下形成的闪锌矿呈深褐色或黑褐色,通常富集 Mn、Fe 和 In 元素;而中低温条件下形成的闪锌矿颜色较浅,通常富集 Cd、Ga、Ge 等元素^[31, 39-41]。金顶铅锌矿床闪锌矿中 Cd 含量较高:0.053%~0.145%,而 Fe 和 In 含量低,Fe 0.065%~2.02%,均值 0.497%;In 低于检测下限;其中 Fe 含量远低于高温热液作用形成的铁闪锌矿(一般 Fe 含量大于 10%),如广东大宝山多金属矿床

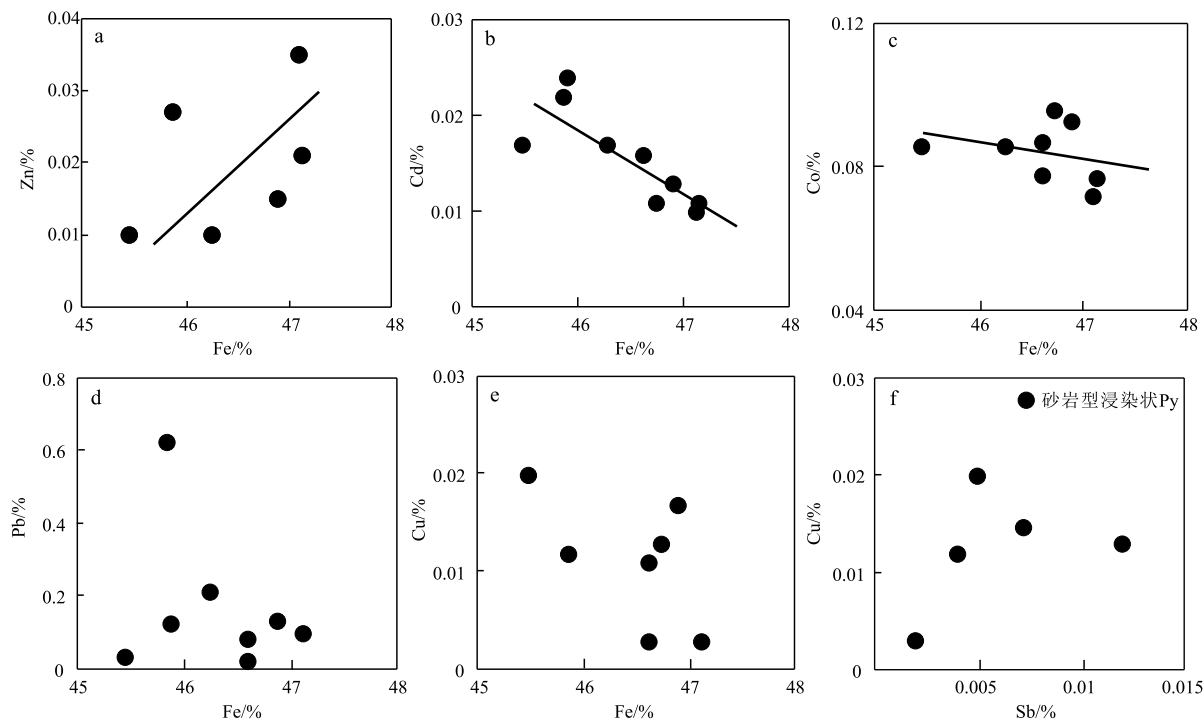
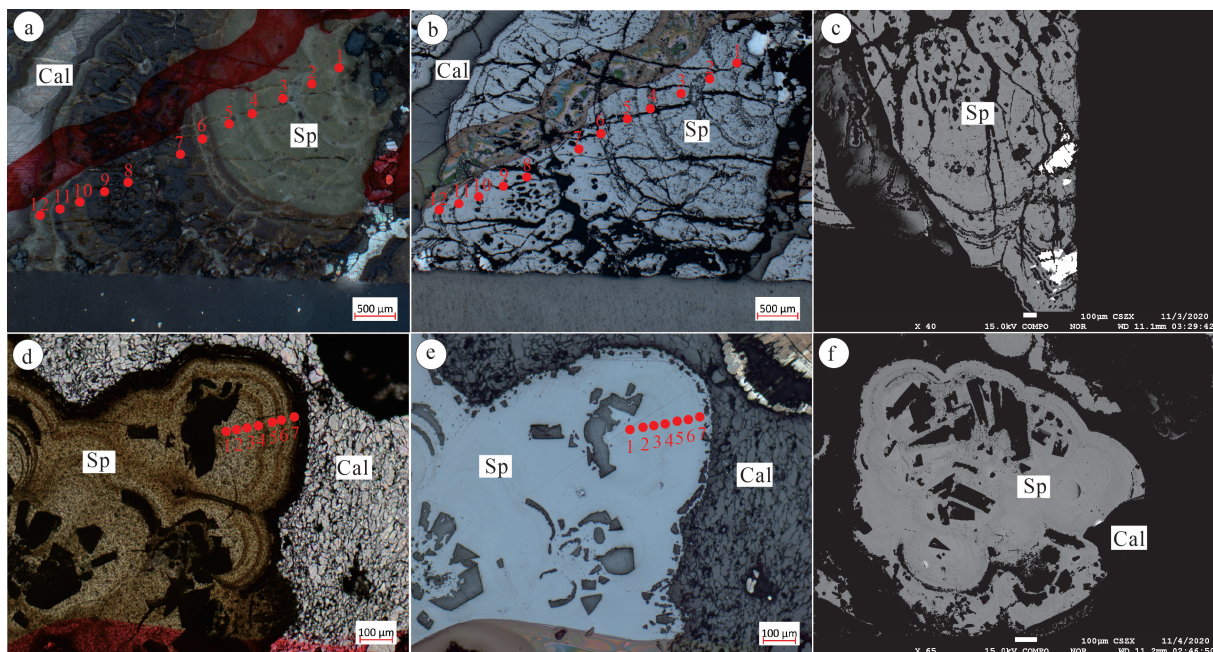


图 7 北厂黄铁矿 Fe-Zn(a)、Fe-Cd(b)、Fe-Co(c)、Fe-Pb(d)、Fe-Cu(e)、Sb-Cd(f)关系图

Fig. 7 Diagrams showing relationships of the Fe-Zn(a), Fe-Cd(b), Fe-Co(c), Fe-Pb(d), Fe-Cu(e) and Sb-Cd(f) pyrite from the ore section of Beichang

图版 II Plate II



a.JZK18-31 胶状闪锌矿透射光照片;b.JZK18-31 胶状闪锌矿反射光照片;c.JZK18-31 胶状闪锌矿部分的背散射图片;d.JZK18-17 胶状闪锌矿单偏光镜下照片;e.JZK18-17 胶状闪锌矿反光镜下照片;f.JZK18-17 闪锌矿背散射图片。Sp—闪锌矿;Cal—方解石

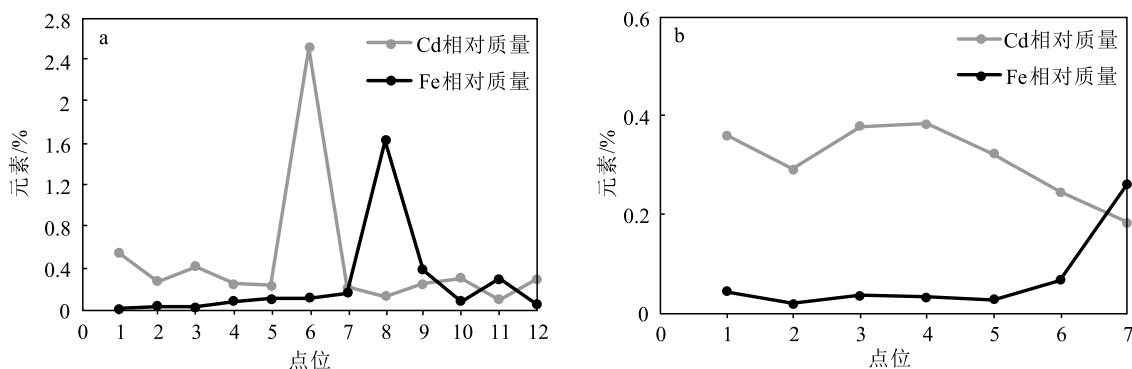


图 8 胶状闪锌矿 Fe-Cd 元素含量分布图

Fig. 8 Distribution diagrams of Fe-Cd element content in colloidal sphalerite

a—为样品 JZK18-31;b—样品 JZK18-17

Fe 含量为 10.29%~12.54%);而与云南勐兴铅锌矿床中闪锌矿的含量更接近,其中 Fe 为 0.079%~1.48%,均值为 0.486%^[31],其成矿温度指示中低温。此外,闪锌矿的 Zn/Fe 值也可以指示成矿温度,当闪锌矿 Zn/Fe>100 时,指示低温环境(<150℃);当 Zn/Fe 值介于 10~100 之间时,指示中温环境(150~250℃);当 Zn/Fe<10 时,指示中偏高温环境(250~300℃)^[42]。金顶跑马坪矿段中闪锌矿的 Zn/Fe 值为 23.41~3570.1,均值为 1071.2。北厂矿

段中闪锌矿的 Zn/Fe 值为 269.9~3793.4,均值为 1452.0。白草坪矿段中闪锌矿的 Zn/Fe 值为 867.0~4248.6,均值为 1901.5。Zn/Fe 值逐渐降低,表现出从白草坪到北厂再到跑马坪,成矿温度具有升高的趋势,整体上表现出中低温特征。此外,闪锌矿的 Zn/Cd 值可作为地质温度计。研究认为,Zn/Cd>500 时指示高温特征,100<Zn/Cd<500 时指示中低温特征,Zn/Cd<100 时指示低温特征^[43]。北厂矿段闪锌矿 Zn/Cd 值为 39.69~504.09,均值为

196.48;跑马坪矿段闪锌矿 Zn/Cd 值为 15.77 ~ 550.66, 均值 303.32;白草坪矿段闪锌矿 Zn/Cd 值为 73.82~167.00, 均值 95.93。白草坪—北厂—跑马坪比值增大, 温度具有从西向东增高的趋势, 总体表现出中低温特征。前人流体包裹体数据显示^[11, 18, 44], 跑马坪流体包裹体温度 133~234℃ (平均 185℃), 北厂流体包裹体温度 112~240℃ (平均 146℃), 西部矿段峰子山—白草坪一带流体包裹体温度 54~120℃ (平均 83℃), 与前人流体包裹体测试所获得的温度吻合。以上特征表明, 金顶铅锌矿床成矿温度属于中低温。

5.4 对矿床成因的指示

北厂矿段中黄铁矿 S/Fe (原子数比) 值在 1.975~1.994 之间;跑马坪矿段中黄铁矿 S/Fe (原子数比) 值在 1.955~2.106 之间;白草坪矿段中黄铁矿 S/Fe (原子数比) 值在 1.977~2.025 之间。一般来说, 热液型黄铁矿亏硫, 沉积型黄铁矿富硫或接近其理论值^[45]。相比黄铁矿理论值 ($S/Fe = 2$), 金顶铅锌矿床中的黄铁矿既表现了热液成因, 也表现出了沉积成因, 表明金顶铅锌矿部分黄铁矿受围岩混染的影响。

黄铁矿中的 Co 、 Ni 有一定的标型意义^[45]。 Co 、 Ni 和 Fe 的化学性质相似, 在不同成因的黄铁矿中 Co 、 Ni 含量和 Co/Ni 值不同, 对矿床的类型有一定指示意义。黄铁矿中的 Co/Ni 值可用于确定矿石成因的性质^[29, 46]。Price 等^[47] 证明热液黄铁矿的 Co/Ni 值变化很大, 一般大于 1, 而沉积黄铁矿的 Co/Ni 值小于 1^[29]。金顶铅锌矿的 Co/Ni 原子比值为 4.12~45.31, 平均值为 15.27。但兰坪沉积盆地具有较高的 Co 背景值, 在白杨坪矿集区已存在大量 Co 的独立矿物^[48-50], 同时在矿区及其附近区域没有发现岩体, 因此 Co/Ni 值比实际大。但是不难看出, 金顶 Co/Ni 值远大于 1, 结合 Fe/S 值可得, 金顶铅锌矿床为后期热液成因。这与 Wang 等^[51] 认为的黄铁矿中较高的 Co/Ni 值指示金顶成矿流体成分来自盆地卤水的结论一致。

研究数据表明, 闪锌矿微量元素在区分矿床成因类型方面具有很好的应用前景^[31, 39, 52-54]。MVT 型铅锌矿床富 Ge 、 Cd 、 Ga , 贫 Fe 、 Mn 、 Sn 、 Co ^[31]。金顶铅锌矿床中闪锌矿具有富 Cd 、贫 Fe 、 Mn 、 Co 的特征。金顶矿床具有较低的 Zn/Cd 值及较高的 Zn/Fe 含量, 属于典型的 MVT 矿床^[55], 综上特征,

金顶铅锌矿床符合 MVT 矿床特征。

金顶铅锌矿矿体产出位置受一定的地层岩性控制及构造控制。矿体与围岩界线清晰, 主要为浸染状、胶状、脉状、团块状, 属于后生矿床。金顶铅锌矿床的含矿岩系为石英砂岩建造、角砾岩和含砾砂岩建造, 具有较高的孔隙度和渗透率。通过闪锌矿的 Zn/Cd 值、 Zn/Fe 值及 Cd 的含量, 可以看出金顶铅锌矿床形成温度为中低温。结合矿物流体包裹体温度^[11, 18, 44] 及闪锌矿微量元素特征, 金顶铅锌矿床除寄主岩石为碎屑岩外, 其他特征类似于 MVT 矿床, 应属于 MVT 矿床。

6 结 论

(1) 金顶铅锌矿床各个矿段中黄铁矿相对富集 Pb 、 Zn 、 Co , 贫 Cu 、 Cd 、 Ni 、 Sb 、 Te 等微量元素, 闪锌矿则以相对富集 Cd 、 Pb 等微量元素为特征, 贫 Fe 、 Mn 、 Ag 、 Cu 、 Sb 、 Co 等微量元素。 Cd 、 Fe 、 Mn 、 Sb 可能以类质同象形式, Pb 可能以微观包体形式, Cu 可能以多种形式赋存于闪锌矿中。 Cd 、 Mn 、 Co 等微量元素可能主要以类质同象形式, Zn 、 Pb 以矿物包体形式, Cu 、 Sb 以多种形式赋存于黄铁矿中。

(2) 金顶铅锌矿床白草坪—北厂—跑马坪矿段的闪锌矿 Zn/Fe 值逐渐升高, Zn/Cd 值逐渐下降, 表现出成矿流体温度自东向西逐渐下降的过程, 总体上表现出中低温特征。胶状闪锌矿富 Cd 、低 Fe 特征亦表现出中低温流体特征, Fe 与 Cd 的负相关性表现出成矿流体温度的震荡变化。

(3) 各个矿段中硫化物均呈现出亏 Fe 、 Zn 、 S 的特征, 黄铁矿 Co/Ni 值大于 1, 均显示热液成因的特点。

(4) 金顶铅锌矿床中闪锌矿微量元素具有中低温特征。根据黄铁矿和闪锌矿微量元素组成特征, 结合成矿地质背景, 认为金顶铅锌矿床应归属于 MVT 矿床。

致谢: 诚挚感谢中色紫金地质勘察有限责任公司蒋斌斌工程师在野外工作中的大力支持和帮助。

参考文献

- [1] Song Y, Hou Z, Xue C, et al. New mapping of the world-class Jinding $Zn-Pb$ deposit, Lanping Basin, Southwest China: Genesis of ore host rocks and records of hydrocarbon-rock interaction [J]. Economic Geology, 2020, 115(5): 981-1002.

- [2] Song Y, Liu Y, Hou Z, et al. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonic setting, and ore controls[J]. *Gondwana Research*, 2019, 75: 249-281.
- [3] 施加辛, 易风煌, 文启谔. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因[J]. *云南地质*, 1983, (3): 179-194, 276-280.
- [4] 白嘉芬, 王长怀, 纳荣仙. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. *矿床地质*, 1985, (1): 1-10.
- [5] 张乾. 云南金顶铅锌矿床成因研究[J]. *地质找矿论丛*, 1991, (2): 47-58.
- [6] 张乾. 云南金顶超大型铅锌矿床的铅同位素组成及铅来源探讨[J]. *地质与勘探*, 1993, (5): 21-28.
- [7] 覃功炯, 朱上庆. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. *云南地质*, 1991, (2): 145-190, 205.
- [8] Kyle J K, Li N. Jinding: a giant tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *SEG Newsletter*, 2002, 50(1): 9-16.
- [9] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. *矿床地质*, 2002, (1): 36-44.
- [10] 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 等. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, (4): 315-322.
- [11] Xue C, Zeng R, Liu S, et al. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1/4): 337-359.
- [12] 王京彬, 李朝阳, 陈晓坤. 金顶超大型铅锌矿喷流沉积成因初探[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1990, (2): 122-123.
- [13] 赵兴元. 云南金顶铅锌矿床成因研究[J]. *地球科学*, 1989, (5): 523-530.
- [14] 曾荣, 薛春纪, 刘淑文, 等. 金顶超大型铅锌矿床成矿条件分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2005, (2): 21-25.
- [15] 王安建, 曹殿华, 管烨, 等. 西南三江成矿带中南段金属矿床成矿规律与若干问题探讨[J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1365-1375.
- [16] 罗君烈. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[J]. *云南地质*, 1991, (1): 1-10.
- [17] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [18] 曾荣, 薛春纪, 刘淑文, 等. 云南金顶铅锌矿床成矿流体与流体的稀土元素研究[J]. *地质与勘探*, 2007, (2): 55-61.
- [19] 王安建, 曹殿华, 高兰, 等. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. *地质学报*, 2009, 83(1): 43-54.
- [20] Leach D L, Song Y C, Hou Z Q. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(3): 281-296.
- [21] 龚玉爽, 胡斌, 付山岭, 等. 电子探针分析技术(EPMA)在地学中的应用综述[J]. *化学工程与装备*, 2011, (6): 166-168.
- [22] Tang YY, Bi X W, Fayek M, et al. Microscale sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 594-607.
- [23] Wang J H, Yin A, Harrison T M, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188(1/2): 123-133.
- [24] 范金伟, 杨天南, 梁明娟, 等. 滇西兰坪盆地西缘火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(3): 471-490.
- [25] Chunji X, Shuwen L, Yuchuan C, et al. Giant mineral deposits and their geodynamic setting in the Lanping basin, Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 368-374.
- [26] Yalikun Y, Xue C, Symons D T A. Paleomagnetic age and tectonic constraints on the genesis of the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(2): 245-259.
- [27] Xue C, Chi G, Fayek M. Micro-textures and in situ sulfur isotopic analysis of spheroidal and zonal sulfides in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China: Implications for biogenic processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 288-304.
- [28] 李胜荣, 许虹, 申俊峰. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [29] Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1987, 22(4): 292-300.
- [30] 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 等. 新疆霍什布拉克铅锌矿床微量元素地球化学[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(3): 540-550.
- [31] Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39(4): 188-217.
- [32] Burke E A J, Kieft C. Roquesite and Cu-In-bearing sphalerite from Långban, Bergslagen, Sweden[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1980, 18(3): 361-363.
- [33] Sverjensky D A. The origin of a Mississippi Valley-type deposit in the Viburnum Trend, southeast Missouri[J]. *Economic Geology*, 1981, 76(7): 1848-1872.
- [34] Bernardini G P, Borgheresi M, Cipriani C, et al. Mn distribution in sphalerite: an EPR study[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2004, 31(2): 80-84.
- [35] 刘铁庚, 叶霖, 沈能平, 等. 闪锌矿的 Cd 含量与颜色关系[J]. *矿物学报*, 2015, 35(1): 51-55.
- [36] 叶庆同. 闪锌矿的化学成分特征及其地质意义[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集(14), 1985.
- [37] Misra K C. Understanding mineral deposits[M]. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [38] Schwartz M O. Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element[J]. *International Geology Review*, 2000, 42(5): 445-469.
- [39] 印修章, 胡爱珍. 以闪锌矿标型特征浅论豫西若干铅锌矿成因[J]. *物探与化探*, 2004, (5): 413-414, 417.
- [40] Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(16): 4761-4791.
- [41] Yuan B, Zhang C, Yu H, et al. Element enrichment characteristics: Insights from element geochemistry of sphalerite in Daliangzi Pb-Zn deposit, Sichuan, Southwest China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 186: 187-201.
- [42] 代鸿章. 云南省太平铅锌矿床地质地球化学特征与成矿机制[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.

- [43] 李季霖, 章永梅, 顾雪祥, 等. 云南西邑 MVT 型铅锌矿床地质特征与硫化物电子探针分析[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 23-34.
- [44] 王建飞, 许东, 尹光候. 云南金顶铅锌矿成矿流体特征与成矿作用[J]. 现代地质, 2014, 28(4): 701-710.
- [45] 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质论评, 1980, (6): 541-546.
- [46] Cook N J, Ciobanu C L, Mao J. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China) [J]. Chemical Geology, 2009, 264(1/4): 101-121.
- [47] Price B J. Minor elements in pyrites from the Smithers map area, bc and exploration applications of minor element studies [D]. Doctoral dissertation, University of British Columbia, 1972.
- [48] 范世家, 王安建, 刘汉斌, 等. 论兰坪盆地白秧坪铜(钴)矿床成因的氩同位素证据[J]. 地质论评, 2006, (5): 628-635.
- [49] 刘家军, 翟德高, 李志明, 等. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1646-1660.
- [50] 王哲. 云南金顶铅锌矿床成矿流体与矿化机制研究 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2013.
- [51] Wang C, Yang L, Bagas L, et al. Mineralization processes at the giant Jinding Zn-Pb deposit, Lanping Basin, Sanjiang Tethys Orogen: Evidence from in situ trace element analysis of pyrite and marcasite[J]. Geological Journal, 2018, 53(4): 1279-1294.
- [52] Qian Z. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1987, 6(2): 177-190.
- [53] 郭飞, 王智琳, 许德如, 等. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义[J]. 地学前缘, 2020, 27(4): 66-81.
- [54] 胡宇思, 叶霖, 黄智龙, 等. 滇东北麻栗坪铅锌矿床微量元素分布与赋存状态: LA-ICPMS 研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(11): 3477-3495.
- [55] 王光辉, 刘兵, 匡爱兵. 铅锌矿床中闪锌矿 Cd 含量及 Zn/Cd 值的地质意义[J]. 西北地质, 2016, 49(3): 132-140.
- ① 云南地质三大队. 云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告. 昆明: 云南省地质与矿产局, 1984.

《地质通报》第 41 卷第 5 期要目预告

辽宁抚顺西露天矿南帮滑坡研究	刘传正等
山西中条山地区篦子沟、南河沟铜矿云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar 同位素年代学及其地质意义	王梦琦等
商丹洋早寒武世俯冲作用——关子镇蛇绿混杂岩中古坡高镁安山岩证据	毕志伟等
狼山地区叠布斯格岩群 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义	牛鹏飞等
西藏拉萨地块南部啊扎侵入体的年代学、地球化学特征及其地质意义	欧新锋等
江西中部古生代宜黄强过铝质 S 型花岗岩成因及其地质意义	何世伟等
北秦岭五朵山 I-S 型花岗岩成因及构造意义: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的约束	胡鹏等
豫南史庄一带金伯利岩中石榴子石矿物学特征及其地质意义	李积山等
中国铁矿资源经济安全评价与预警研究	郑明贵等
上扬子西南缘镇雄县羊场超大型优质磷矿地质特征及资源潜力	岳维好等
上扬子陆块北缘晶质石墨矿地质特征及成因	马志鑫等
河北四家地热异常特征及其成因	徐一鸣等
湘西南落家冲钨锡矿床加里东期成岩成矿年龄的测定: 对华南多旋回构造-岩浆活动与成矿作用的启示	杜云等