



青海玉树东莫扎抓铅锌矿床围岩蚀变和黄铁矿— 闪锌矿矿物学特征及意义

刘英超¹, 杨竹森², 侯增谦¹, 田世洪², 宋玉财¹, 张洪瑞¹, 于玉帅²,
薛万文³, 王富春³, 张玉宝³, 康继祖³

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012)

摘要: 青海玉树地区的东莫扎抓铅锌矿床是“三江”沉积岩容矿贱金属成矿带中的重要矿床之一。矿区过去研究鉴定出多种蚀变类型和矿物种类, 但不同蚀变在矿区的空间分布特征、不同矿物中元素含量特点、矿物相互之间的时间和空间关系均不清楚, 从而导致所指示的找矿意义也不明确。为此, 作者进行了系统岩石光薄片的显微镜下鉴定、矿区主要硫化物——黄铁矿和闪锌矿的电子探针成分分析、典型矿石中重要金属元素含量的 ICP-MS 测定等工作, 以期对上述问题的认识提供详实的基础资料。研究发现, 与矿化有关的蚀变主要有白云石化、黄铁矿化、硅化和重晶石化 4 种类型, 其中白云石化贯穿于成矿的前 4 个阶段, 分布基本遍及矿区, 黄铁矿化和硅化在 S3 和 S4 两个硫化物沉淀阶段发育, 前者和铅锌矿化紧密伴生, 后者主要发生在矿区主逆冲断裂以南, 重晶石化在 S2 和 S4 两个阶段出现, 但仅在矿区主逆冲断裂以南的多条断裂附近局限性发育。ICP-MS 分析发现典型矿石中存在含量较高的 Cd。电子探针成分分析发现, 在 S3 阶段, 黄铁矿中 S、Fe 含量和 S/Fe 原子比普遍高于理论值, 有一定的 As、Cu 存在, Co/Ni 比值一般大于 1, 闪锌矿中 S 含量和 S/Zn 原子比较理论值偏高, Zn 含量较理论值稍低, 有一定的 Cd、Fe 存在, 黄铁矿 S/Fe 和闪锌矿 S/Zn 原子比在流体活跃部位明显高于理论值, 球形黄铁矿、草莓状和皮壳状闪锌矿从边部到核心某些元素含量存在规律性变化。在 S4 阶段, 闪锌矿较 S3 阶段颜色浅, Zn 含量低, S/Fe 原子比高。综合岩相学特征和电子探针分析结果, 指出在 S3 阶段, S 源相对金属离子充足, 黄铁矿沉淀之初热液环境稳定, 随着闪锌矿的沉淀, 含矿流体的温度、S 离子活度和 pH 值降低, 但 Cd/Zn 比增高, 此阶段矿区存在两处流体活动中心, S4 阶段流体较 S3 阶段温度低, 疏逸度高。综合以上讨论, 提出了在矿区和区域上寻找同类铅锌矿化的具体建议, 并在矿区指出了 4 处具有找矿前景的位置。

关键词: 东莫扎抓 类 MVT Pb-Zn 矿床 蚀变 黄铁矿 闪锌矿 矿物学特征 铅锌找矿

中图分类号: P614; P578.2⁺92; P578.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2011)03-0490-17

Wall rock alteration and pyrite-sphalerite mineralogy of the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit in Yushu area, Qinghai Province

LIU Ying-chao¹, YANG Zhu-sen², HOU Zeng-qian¹, TIAN Shi-hong², SONG Yu-cai¹, ZHANG Hong-rui¹,
YU Yu-shuai², XUE Wan-wen³, WANG Fu-chun³, ZHANG Yu-bao³ and KANG Ji-zu³

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China)

Abstract: The Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit in Yushu area of Qinghai Province is one of the important ore

收稿日期: 2011-02-06; 修订日期: 2011-04-06

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAB01A08); 国家 973 资助项目(2011CB403106, 2009CB421007 和 2009CB421008) 国土资源大调查资助项目(1212010818096) 国家自然科学基金资助项目(U0933605)

作者简介: 刘英超(1982-), 女, 汉族, 博士研究生, 研究方向为矿床学和矿床地球化学, E-mail: lyhappy@126.com; 通讯作者: 侯增谦(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事海底与大陆成矿作用研究, E-mail: houzengqian@126.com

deposits located in the “Sanjiang” sediment-hosted base metal ore belt. In the ore deposit, several types of alteration and hydrothermal minerals were recognized in previous studies. However, the spatial distribution of the alterations, the characteristics of element content in the minerals, and the spatial and temporal relationships of different minerals in the orefield remain ambiguous, thus the data available couldn't provide clear ore-searching direction. In view of such a situation, the authors made systematic thin section observations of ore and host rocks, systematic electron-probe micro-analysis (EPMA) of the most important sulfides pyrite and sphalerite, and ICP-MS analysis of important metallic compositions of typical ore rocks, with the purpose of finding detailed scientific information on the above problems. Four hydrothermal alteration types were recognized in the ore deposit, namely dolomitization, pyritization, silicification and baritization. Dolomitization is almost distributed in the whole orefield and occurred from S1 to S4 ore-forming stages, whereas pyritization occurred from S3 to S4 ore-forming stages; in both alterations considerable lead and zinc minerals precipitated, and the pyritization was closely accompanied by Pb-Zn mineralization. Silicification occurred in the same time with pyritization and is mainly distributed to the south of the main thrust fault in the ore deposit. Barite precipitated before and after S3 polymetallic sulfide ore-forming stage, and baritization is mainly developed along the faults south of the main thrust fault. Relatively high content of Cd was observed from the typical ore rocks by ICP-MS. According to EPMA, during S3 ore-forming stage, S and Fe content and atomic ratios of S/Fe in pyrite were higher than their theoretical values, some As and Cu were observed, and the ratio of Co/Ni was usually higher than 1; in sphalerite the S content and the atomic ratios of S/Zn were higher than their theoretical values while the Zn content was lower than their theoretical values, and some Cd and Fe were observed. The atomic ratios of S/Fe and S/Zn in pyrite and sphalerite crystallized from most active hydrothermal fluids were obviously higher than their theoretical values; Micro-sections were studied for spherical pyrite and strawberry and crustal sphalerite in this ore-forming stage and some changes of As, Fe, S and atomic ratios of S/Fe in pyrite and Cd, S and Zn content and S/Zn atomic ratios in sphalerite were observed. During S4 ore-forming stage, the sphalerite had similar element content to that in S3 ore-forming stage, but it had lighter color, lower Zn content and higher atomic ratios of S/Zn. Combining the petrographic characteristics and the EPMA results of pyrite and sphalerite, the authors have reached three conclusions: ① in the S3 ore-forming stage, relative to metal ions, S was enough for sulfide crystallization, and the hydrothermal environment was stable in the early time of this stage; with the precipitation of sphalerite, however, the temperature and activity of S and Ph of the ore-forming fluid decreased while the Cd/Zn ratio rose; ② there were two active centers of hydrothermal fluids in the above ore-forming stage, which were located near Line 0 in the MI ore belt and in the north of MIV belt, respectively; ③ the properties of fluids at S3 and S4 ore-forming stages were different, and the latter stage was characterized by lower temperature and higher sulfur fugacity. Based on all these data, the authors give detailed suggestions on the prospecting for similar Pb-Zn mineralization: ① searching for dolomitization and silicification regionally; ② searching for pyritization in the dolomitization and silicification areas; ③ searching for sphalerite and galena at the positions with most pyrite; ④ searching for small-size but high-grade Pb-Zn ore bodies in the baritization areas along faults, and ⑤ searching for Zn-Pb mineralization in limestones with high content of Cd. Four Pb-Zn mineralization locations worthy of detailed work for further prospecting in the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit are delineated.

Key words: Dongmohazhua; MVT-like Pb-Zn ore deposit; alteration; pyrite; sphalerite; mineralogical characteristics; Pb-Zn prospecting

东莫扎抓类 MVT 铅锌矿床位于青海玉树藏族自治州杂多县境内,该矿床发现于 2001 年,勘查和科研工作始于 2003 年,迄今已探明铅锌资源储量 100 万吨以上。作为青藏高原“三江”地区碳酸盐岩容矿铅锌成矿带中的典型矿床之一(侯增谦等, 2008),东莫扎抓矿床已经成为研究“三江”地区铅锌区域成矿规律的重要基地。自 2007 年起,矿区物探方法的应用及勘查成果(张文权等, 2007)、矿床在区域上的经济意义和在成矿理论中的科学意义(侯增谦等, 2008)、矿区构造特征(王召林等, 2009; 张洪瑞, 2010)、矿床和成矿流体特征(刘英超等, 2009, 2010; 丛源等, 2010)以及成矿年代(田世洪等, 2009)等相继得到报道。在矿区,过去研究鉴定出多种蚀变类型和矿物种类,但不同蚀变在矿区的空间分布特征、不同矿物中元素含量特点、矿物相互之间的时间和空间关系均不清楚,从而导致所指示的找矿意义也不明确。因此,本文对矿区地表和部分钻孔岩心进行了系统的热液蚀变观察,对矿区典型硫化物(黄铁矿和闪锌矿)进行了详细的电子探针成分分析(EPMA),以期为矿床地质特征的进一步认识,为矿区和区域找矿工作提供详实的基础资料。

1 矿床地质简介

东莫扎抓铅锌矿床位于青藏高原“三江”成矿带东北段、羌塘地体东北缘玉树大型逆冲推覆和走滑构造体系中,铅锌矿化发生在古近纪始新世末期 35 Ma 左右(田世洪等, 2009)。矿区从老到新出露中—下二叠统九十道班组厚层或块状含微晶灰岩,上二叠统那益雄组安山岩、安山质碎屑岩、玄武质安山岩、流纹岩(Yang *et al.*, 2011),并夹杂砂岩和长石英砂岩,上三叠统甲丕拉组碎屑岩、陆缘弧安山岩(王召林, 2009)及上三叠统波里拉组纹层状生物碎屑灰岩。与区域压扭、张扭不断转换的构造背景相对应,矿区构造变形复杂,发育前新生代多期叠加褶皱和新生代大型逆冲推覆断层,并出露 244 Ma 的小型花岗岩侵入体(Yang *et al.*, 2011)。矿区逆冲断裂发育,矿体往往出现在逆冲断裂上盘,其中在 M I 矿带赋存于三叠系波里拉组灰岩中,在 M II、M III 和 M IV 矿带赋存于二叠系九十道班组灰岩中(图 1)。

之前的研究已对东莫扎抓铅锌矿床地质特征进行了详细描述(刘英超等, 2009, 2010),在此不再赘述,本节仅就最新观察结果,对修改厘定的成矿阶段

重新描述如下(图 2),其中除 S2 和 S4 阶段未出现在 M I 矿带外,其他阶段在 4 个矿带中均有体现。

(1) 白云石化阶段(S1):热液活动的最初阶段,矿区灰岩被大面积强白云石化,镜下可见灰岩中明显的碳酸盐重结晶现象和白云石化留下的孔洞(图 3a)。

(2) 重晶石化阶段(S2):发育在主逆冲断裂 F₁ 以南的 M II、M III 和 M IV 矿带中的九十道班组灰岩中,未见有伴生硫化物。

(3) 多金属硫化物阶段(S3):铅锌矿化的主要阶段,伴随白云石化和硅化,沉淀出少量黄铜矿、砷黝铜矿,随后黄褐色草莓状、皮壳状闪锌矿+球形黄铁矿+他形粒状黄铁矿/白铁矿+他形粒状方铅矿呈浸染状、稠密浸染状大量结晶。该阶段沉淀的铅锌矿物占矿区总铅锌矿物的 80% 以上。

(4) 重晶石硫化物阶段(S4):铅锌沉淀的第二阶段,伴随重晶石化、方解石化(图 3b)、白云石化和弱硅化,黄绿色他形粒状闪锌矿(图 3c)结晶,同时沉淀出他形粒状黄铁矿、方铅矿和少量黄铜矿。该阶段所有矿物均分布于主逆冲断裂 F₁ 以南的多条断裂附近,充填于张性裂隙中,是矿区构造局部活跃的结果。

(5) 方解石化阶段(S5):硫化物沉淀结束后,部分方解石呈不规则脉状,胶结角砾或充填晶洞(图 3d)沉淀。

(6) 粘土化阶段(S6):热液活动的最后阶段,埃洛石、迪开石等粘土矿物成团块状在围岩中局部发育(图 3e)。

2 围岩蚀变特征

2.1 蚀变矿物及特征

矿区围岩蚀变发育,其中白云石化、黄铁矿化、硅化和重晶石化与铅锌矿化关系密切。

白云石化:矿区内白云石化表现为低温面型交代蚀变和充填开放空间两种形式。前者包含 2 种类型(图 3a),其一为半自形—他形细—中晶白云石(D1),这种白云石具明显雾心亮边结构,常发育粒间孔隙;其二为泥晶白云石(D2),这种白云石晶体细小,需要借助茜素红染剂与方解石区分,粒间孔隙不发育。两种白云石空间上紧密伴生(图 3a),推测产状差异可能由灰岩原岩结构的不同所致,硫化物和第一种白云石在空间上紧密相关,镜下可见部分硫化物结晶在白云石粒间孔隙中。后者亦可区分 2 种类型,

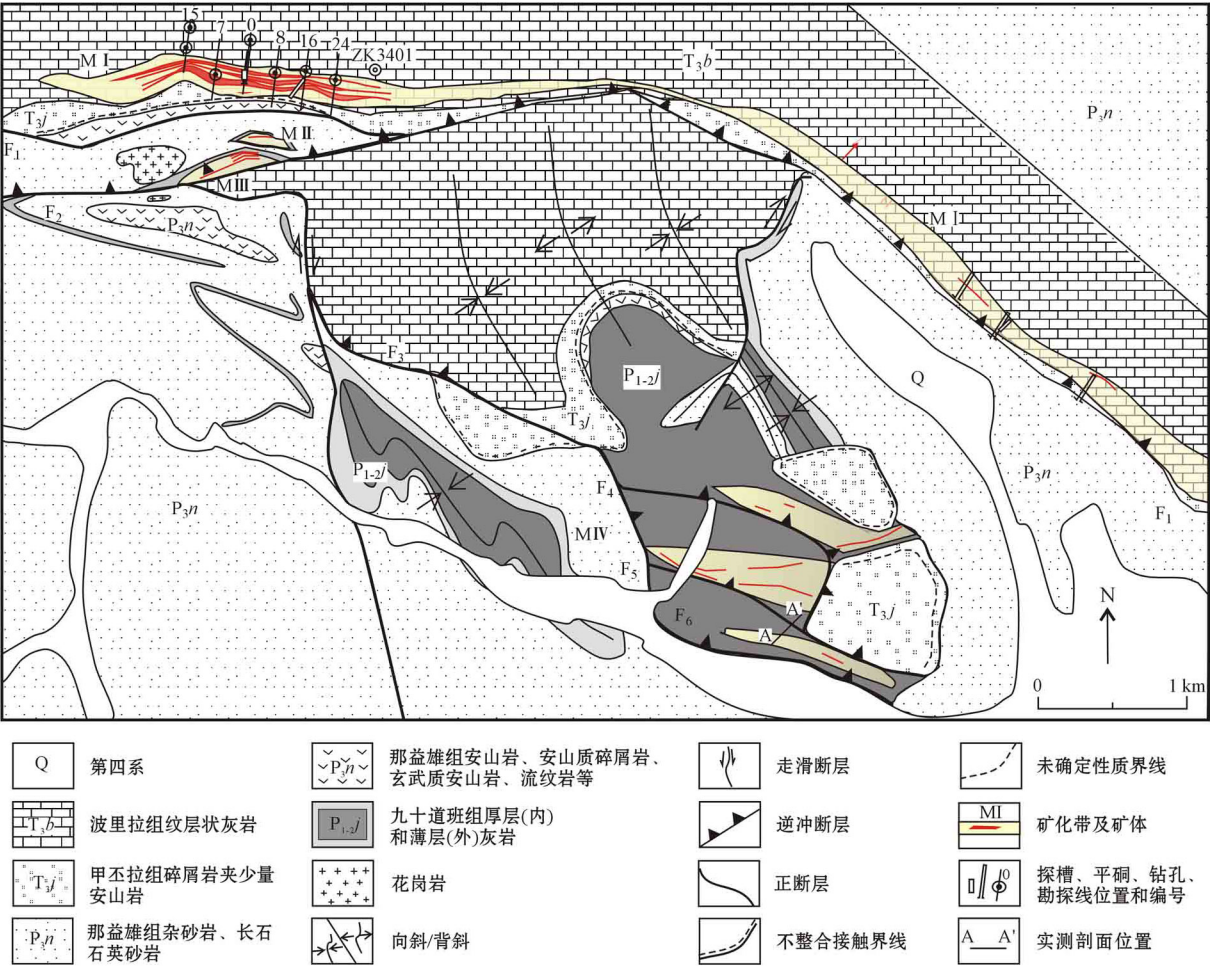


图 1 东莫扎抓铅锌矿区地质简图[据青海省地质调查院^①和 Yang 等 (2011)修编]

Fig. 1 Geological sketch map of the Dongmohazhazhua Pb-Zn ore deposit (modified after Qinghai Geological Survey Institute^① and Yang *et al.*, 2011)

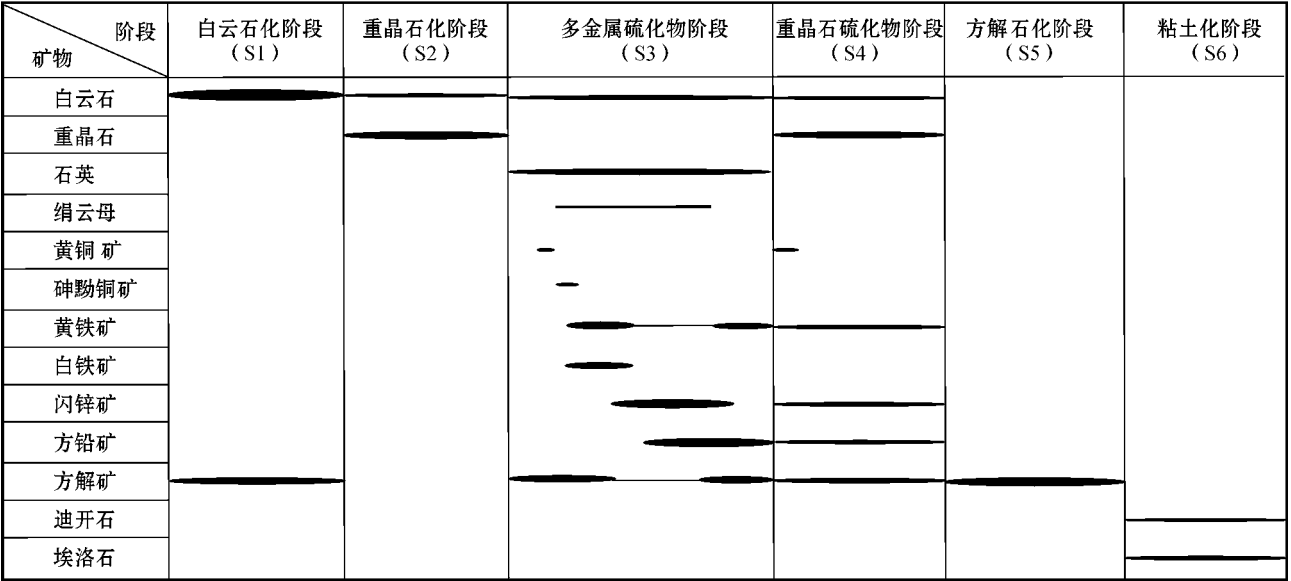
包括充填在硫化物之间的团块状白云石(D3)(图 3f)和与硫化物、重晶石等共生成脉状或单独成脉状的白云石(D4)(图 3g)。其中因 D1、D2 面状产于灰岩中,推测其隶属于 S1 阶段,D3 和 D4 则可明确区分其分别隶属于 S3 和 S4 阶段。对 D1、D2 和 D3 白云石分别进行了电子探针成分分析(表 1),发现中晶白云石(D1)的 MgO 含量(平均 21.57%)明显高于泥晶白云石(D2)(平均 19.97%)和充填在硫化物之间的白云石集合体(D3)(平均 20.30%)。D1 和 D2 两种白云石成分的差别在于其蚀变充分程度的差异,而二者与 D3 白云石的差别则由于不同阶段流体成分差异所致。

黄铁矿化:黄铁矿伴随铅锌矿化产生,在 S3 多金属硫化物阶段和 S4 重晶石硫化物阶段都为主要硫化物。在铅锌矿体外围,黄铁矿化弱,成细脉状分布,到矿体内部,则成稠密浸染状、脉状和团块状。

硅化:主要在 S3 多金属硫化物阶段和 S4 重晶石硫化物阶段发育,镜下见石英多为他形粒状,呈鱼子状集合体充填在矿物的解理、裂纹,粒间裂隙、孔洞或脉状充填在张性裂隙内(图 3h)。颗粒较大的石英有时也呈脉状,见与硫化物伴生(图 3i)。

重晶石化:在 S2 重晶石化阶段和 S4 重晶石硫化物阶段发育,其中前者在露头上成大脉状、团块状(图 3j),局部可见其晶洞中充填 S3 阶段球状黄铁

① 青海省地质调查院. 2007. 青海省杂多县东莫扎抓铅锌矿普查设计.



注：线条由粗到细代表矿物量由多到少。

图 2 东莫扎抓铅锌矿床热液矿物共生组合与生成顺序[据刘英超等(2010),有修改]

Fig. 2 Paragenetic assemblage and sequence of hydrothermal minerals in the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit (modified after Liu *et al.*, 2010)

矿,后者与黄绿色闪锌矿紧密伴生成脉状或不规则状集合体,以充填物或角砾胶结物的形式产出,常见充填在 S3 阶段黄铁矿和闪锌矿的晶内裂纹中(图 3k)。

2.2 空间分布

不同蚀变类型在矿区的分布有所差别,本次虽未进行系统的全矿区范围采样,但详细观察了区内 MⅠ、MⅡ、MⅢ和 MⅣ4 个矿带的地表、岩心和矿带外围地表部分样品,并将样品的蚀变情况在矿区地质图上进行了展示(图 4),借以达到抛砖引玉的效果。白云石化在全矿区范围内分布,仅在 MⅣ矿带局部地区出现白云石化空白带(图 4a)。黄铁矿化分布范围仅次于白云石化,多从铅锌矿化的外围向铅锌矿体内部展布(图 4b)。硅化在主逆冲断裂 F₁ 北侧的 MⅠ矿带有少量出露,但大面积分布则在 F₁ 以南的 MⅡ、MⅢ和 MⅣ矿带内部及外围(图 4c)。重晶石化分布更具局限性,仅在 F₁ 以南的部分断裂附近发育(图 4d),S2 和 S4 阶段重晶石分布有一定重叠性。

3 典型矿石矿物化学特征

3.1 黄铁矿、闪锌矿的矿相学特征

如上所述,东莫扎抓铅锌矿床的黄铁矿分别隶

属于 S3 多金属硫化物阶段和 S4 重晶石硫化物阶段(下文分别简称为 S3 和 S4 阶段黄铁矿),其中 S3 阶段黄铁矿占矿区黄铁矿总量的 80% 以上。两阶段黄铁矿表观颜色并无区别,均为典型的淡黄色,但在形态与产状上却截然不同。S3 阶段黄铁矿和白铁矿共生,成球形和半自形-他形粒状结构,浸染状、稠密浸染状、少量脉状和团块状构造,与闪锌矿、方铅矿紧密伴生(图 5a~5c)。S4 阶段黄铁矿成自形、半自形和他形粒状结构,脉状、团块状和浸染状构造,较该阶段闪锌矿、方铅矿数量较少。鉴于 S3 阶段黄铁矿在矿区的普遍分布、和铅锌矿化的密切关系以及典型的球形环带结构,本次研究对该阶段黄铁矿进行了系统的电子探针成分分析。

闪锌矿也分别隶属于上述两个阶段,以 S3 阶段为主要沉淀阶段。两阶段闪锌矿具较大差异, S3 阶段闪锌矿为黄褐色到浅黄褐色,草莓状、皮壳状和他形粒状结构(图 5d~5i),浸染状、稠密浸染状和少量团块状、脉状构造,其中皮壳状闪锌矿具明显的环带现象(图 5j~5k); S4 阶段闪锌矿为黄绿色到浅黄绿色,他形粒状结构,脉状构造,和重晶石紧密伴生,镜下可见 S4 阶段黄绿色闪锌矿充填在 S3 阶段黄褐色皮壳状闪锌矿错断的环带之间(图 3k)。因为两个世代闪锌矿都为各自阶段的典型硫化物,所以本次研

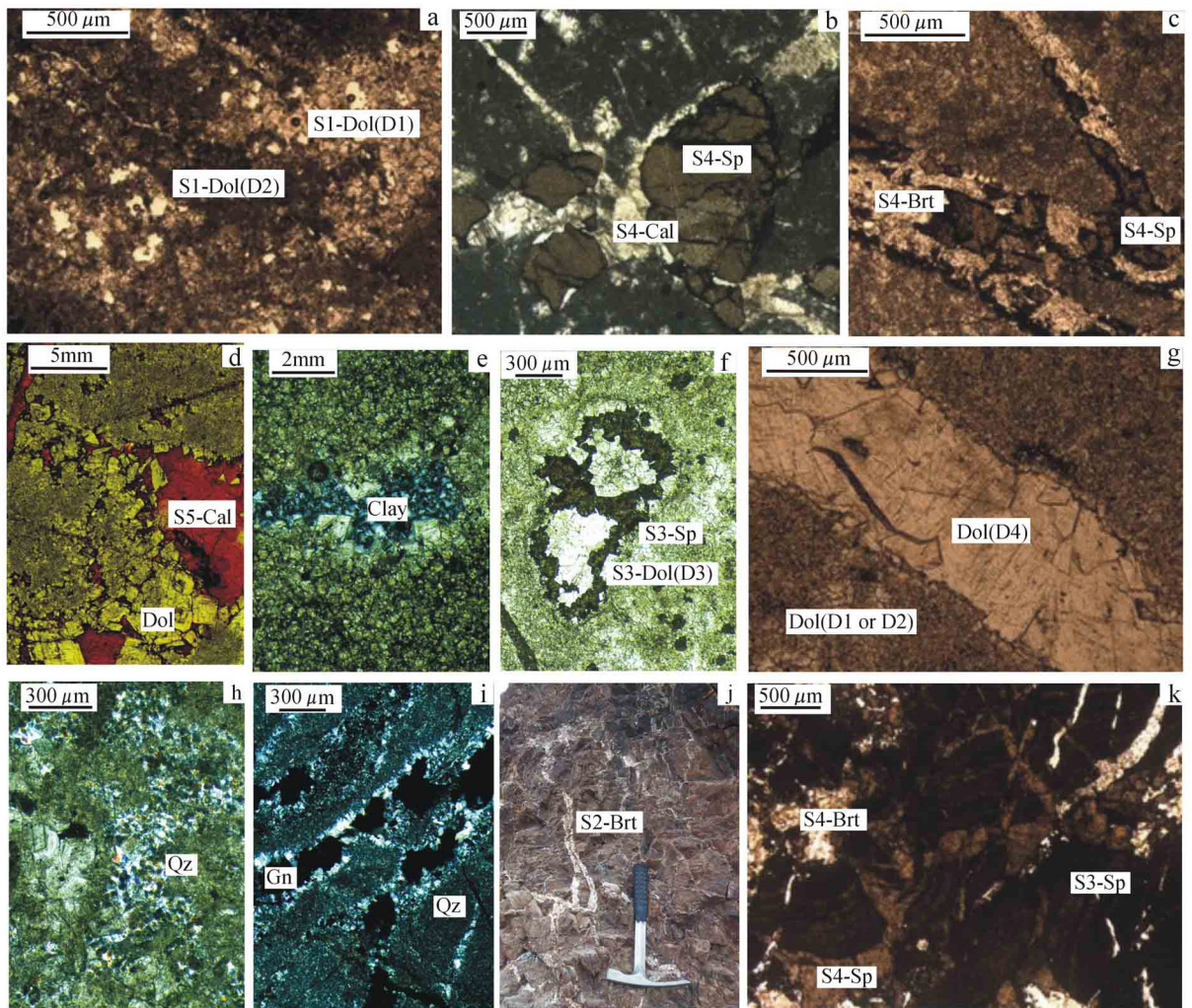


图3 东莫扎抓铅锌矿床典型蚀变矿物和硫化物照片

Fig. 3 Photos of typical altered minerals and sulfides in ores and rocks from the Dongmohazhazhua Pb-Zn ore deposit

a—含孔洞白云石化灰岩; b—方解石闪锌矿胶结灰岩角砾; c—重晶石闪锌矿胶结白云石化灰岩角砾; d—充填孔洞的方解石和不规则方解石脉(茜素红染色); e—充填孔洞的粘土矿物; f—被闪锌矿包围的白云石; g—白云石脉; h—硅化灰岩; i—充填裂隙的石英方铅矿脉; j—脉状纯重晶石; k—黄绿色闪锌矿和重晶石充填黄褐色闪锌矿粒间裂隙; Dol—白云石; Brt—重晶石; Cal—方解石; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; S1~S5—成矿阶段; D1~D4—不同类型白云石(见正文)

a—dolomitized limestone with pores; b—calcite and sphalerite cementing limestone breccias; c—Barite and sphalerite cementing dolomitized limestone breccias; d—calcites in pores and irregular calcite veins (ARS stain); e—clay minerals in pores; f—dolomite surrounded by sphalerite; g—dolomite veins; h—silicified limestone; i—quartz and galena veins filled in fractures; j—pure barite veins; k—yellowish green sphalerite and barite filled in intergranular fissures; Dol—dolomite; Brt—barite; Cal—calcite; Sp—sphalerite; Gn—galena; S1~S5—ore-forming stage; D1~D4—different dolomites (see the text)

究分别采集了两个阶段的闪锌矿进行了电子探针成分分析。

3.2 测试方法

本次研究共选取矿石和围岩样品 37 件,利用电子探针分析了白云石颗粒 9 个(9 点),黄铁矿颗粒 27 个(50 点),闪锌矿颗粒 34 个(54 点)。具体方法为:将岩矿石样品磨制成抛光探针片,在光学显微镜

下观察并圈定待测矿物,然后对探针片喷碳处理后利用电子探针显微分析仪对目标矿物进行测试。其中球形黄铁矿、草莓状闪锌矿和皮壳状闪锌矿的微区剖面成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,电子探针仪器型号为 JEOL JXA8800R,点分析时的测试条件电压为 20 kV,电流 20 nA,束斑直径为 1 μm ,分析精度为 0.001%。其余

表 1 东莫扎抓铅锌矿区蚀变灰岩中不同产状白云石电子探针成分分析结果

$w_B/\%$

样品号	白云石产状	CaO	MgO	FeO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	K ₂ O	NiO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	BaO	Total
ZK701-2	D1	29.98	20.76	0.38	0.04	0.07	-	0.01	0.00	0.02	-	-	-	-	51.27
ZK701-10	D1	29.58	21.45	0.30	0.03	0.08	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02	0.04	-	-	51.60
ZK701-12	D1	31.81	21.60	0.03	0.11	0.03	-	0.01	0.01	-	-	-	-	-	53.60
ZK701-19	D1	31.35	22.09	0.33	0.07	0.06	0.04	-	-	-	-	0.03	-	-	53.96
DM09-36	D1	30.24	21.93	0.63	0.13	0.29	0.01	-	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	53.39
DCMⅢ-1	D2	29.97	19.97	0.03	0.08	-	0.03	0.03	0.03	-	-	-	-	0.03	50.16
DTC1101-10	D3	30.04	20.59	0.01	0.02	0.05	0.03	0.09	0.00	-	-	-	-	0.07	50.89
DTC1101-8	D3	30.76	20.40	0.41	0.11	0.05	0.05	0.08	0.01	-	-	0.04	-	0.03	51.93
DM041-2	D3	30.12	19.59	0.32	0.08	0.07	-	-	0.14	-	-	0.02	0.05	0.00	50.39
平均值		30.43	20.93	0.27	0.07	0.09	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	51.91

D1: 半自形-他形细-中晶白云石; D2: 泥晶白云石; D3: 充填在硫化物之间的团块状白云石; 测试单位: 东华理工大学; 测试人: 郭国林。

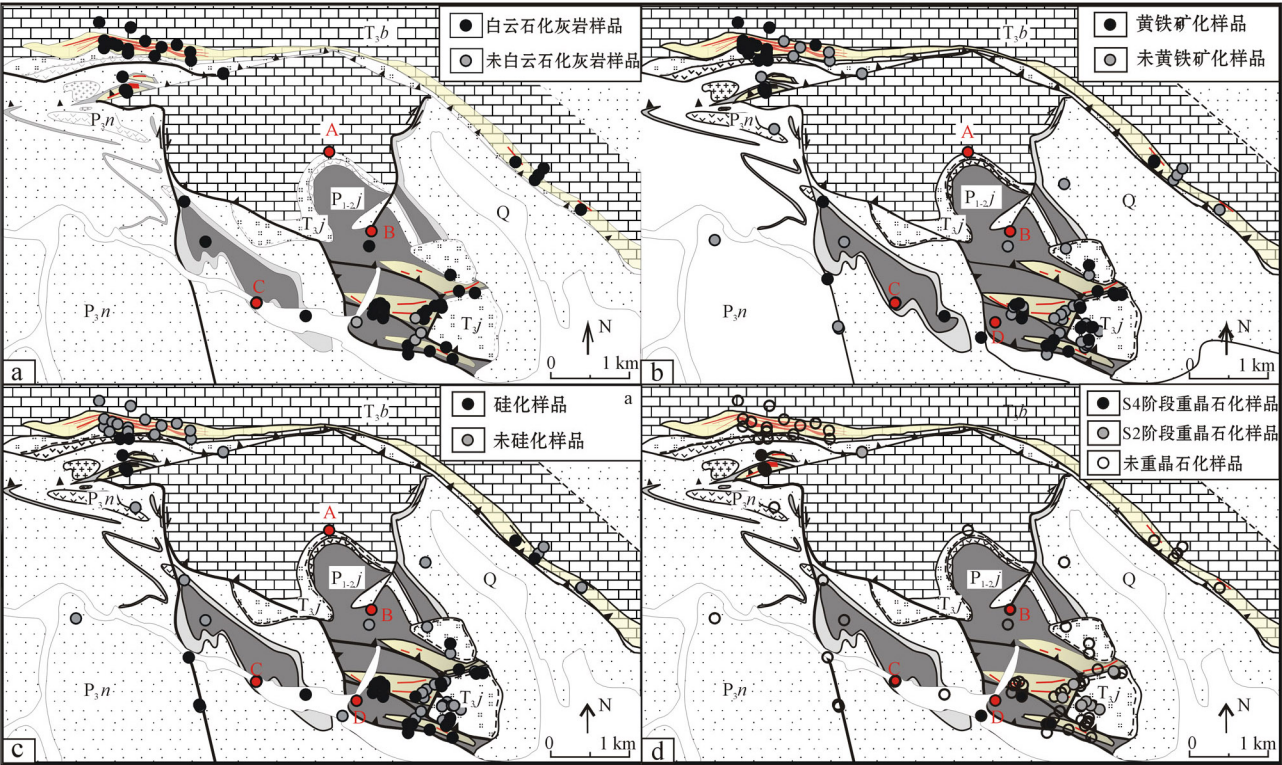


图 4 东莫扎抓铅锌矿区样品蚀变的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of altered samples from the Dongmozazhua Pb-Zn ore deposit

a—白云石化灰岩样品空间分布; b—黄铁矿化样品空间分布; c—硅化样品空间分布; d—重晶石化样品空间分布; A~D 为具找矿前景位置; 底图图例见图 1
a—distribution of dolomitized limestone; b—distribution of pyritized samples; c—distribution of silicified samples; d—distribution of baritized samples; A to D are favorable prospecting locations; legends of the base maps as for Fig. 1

矿物均在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室完成,电子探针仪器型号为 JXA-8100,点分析时加速电压为 15.0 kV,探针束流 20 nA,电子束斑 2 μm ,分析精度为 0.01 %。

此外,本次研究还选取 4 件典型矿石样品,利用 ICP-MS 测定了矿石中的 Cd、Cu、Pb、Sb、Zn、As、Ag、Hg 和 Au 含量,测试工作在国家地质实验测试中心完成。测试方法(何红蓼等,2002)为:称取样品 100 mg,

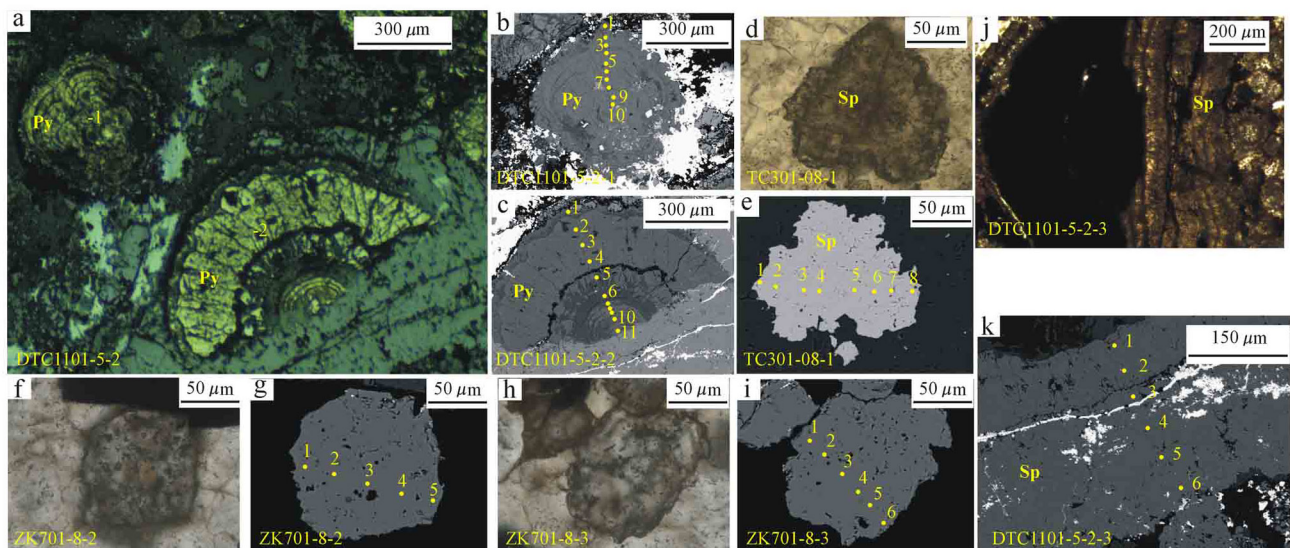


图 5 黄铁矿和闪锌矿微区剖面 EPMA 测点位置

Fig. 5 BSE and microscope photos of pyrite and sphalerite, showing analyzed spots of EPMA

黑白图片为背散射照片(b, c, e, g, i 和 k);彩色图片为反射光显微照片(a)和单偏光显微照片(d, f, h 和 j);其中 a 与 b 和 c, d 与 e, f 与 g, h 与 i, j 与 k 分别相互对应;红色圆点为测点位置;数字代表测点号;Sp—闪锌矿;Py—黄铁矿

black and white pictures are BSE photos (b, c, e, g, i and k); color pictures are reflected plane polarized light photo (a) and transmitted plane polarized photos (d, f, h, i and j); a, b and c, d and e, f and g, h and i and j and k correspond to each other respectively; red dots are locations of analyzed spots of EPMA; numeral represents serial number of analyzed spot; Sp—sphalerite; Py—pyrite

加 1 mL HF, 0.5 mL HNO₃, 封闭, 于 190℃ 烘箱中加热 12 h, 冷却后, 加入内标溶液, 在电热板上蒸发至干; 加入 1 mL HNO₃ 蒸发至干, 此步骤重复 2 次; 加入 HNO₃ 8 mL, 封闭后于 110℃ 烘箱中加热 3 h, 冷却后定容。用电感耦合等离子体质谱仪(Excel)测定 Au 元素含量, 利用 X-series 测定其他元素含量, 执行标准同为 DZ/T0223-2001。

3.3 微区成分分析结果

矿区内黄铁矿的电子探针成分分析结果列于表 2。结果显示 S3 阶段他形粒状黄铁矿和球形黄铁矿在化学组分含量上无明显区别, 均显示 Co/Ni 比值的较大波动, 分析结果中除 3 个 Co/Ni 比值小于 1 以外, 其他均介于 1.71~26.25 之间。黄铁矿 S 含量介于 50.99%~55.21% 之间, 平均 53.34%, Fe 含量介于 43.29%~48.15% 之间, 平均 45.14%, 均比黄铁矿理论 S、Fe 含量(S: 53.45%, Fe: 46.55%) (王濮等, 1984) 稍低。S/Fe 原子比介于 1.874~2.190 之间, 平均 2.07, 大部分都大于黄铁矿的理论 S/Fe 原子比。检出一定量的 As、Cu 和 Au, As 含量最高达 1.11%, Cu 最高达 0.92%。镜下发现 S3 阶段黄铁矿具明显的球形环带生长特征, 为了了解这种黄铁矿晶体从核心到边缘基本组分的变化, 选择了两

个样品从边缘到核心进行了微区剖面分析(图 5a~5c), 分析结果列于表 3, 结果显示其元素含量变化范围明显减小, 两个黄铁矿中 S 含量分别介于 52.26%~53.83% 和 52.82%~53.60% 之间, Fe 含量分别介于 45.47%~46.96% 和 44.86%~46.67% 之间, S/Fe 原子比则分别介于 2.003~2.046 和 2.009~2.089 之间, 各数值变化均位于上述 S3 阶段黄铁矿各组分变化的平均值附近。

矿区内闪锌矿的电子探针成分分析结果列于表 4。结果显示 S3 和 S4 阶段闪锌矿 S 含量分别介于 31.82%~36.25% 之间(平均 33.38%) 和 33.34%~34.21% 之间(平均 33.77%), Zn 含量分别介于 58.81%~67.59% 之间(平均 64.51%) 和 62.63%~64.02% 之间(平均 63.28%), 均高于闪锌矿理论 S 含量, 低于理论 Zn 含量(S: 32.90%, Zn: 67.10%) (王濮等, 1984)。S3 阶段闪锌矿 S/Zn 原子比平均值为 1.051, S4 阶段为 1.084。均检出一定量的 Fe, S3 阶段 Fe/Zn 相对含量比为 0.002 0, S4 阶段为 0.001 8, 和 S4 阶段黄铁矿结晶较少、闪锌矿颜色较浅的现象一致。测试过程中对 S3 阶段部分样品测定了 Cd, 发现闪锌矿中 Cd 含量明显高于 Fe, Cd/Zn 相对含量比介于 0.002 6~0.005 之间, 平均

表 2 东莫扎抓铅锌矿区 S3 多金属硫化物阶段黄铁矿电子探针成分点分析结果

Table 2 EPMA spots analytical results of pyrites at polymetallic ore-forming stage (S3) in the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit

样品特征	样品位置	样品深度/m	样品编号	Fe	S	Co	Zn	Pb	Ni	As	Cu	Au	Ag	Sb	Mn	Mo	Cr	Total	S/Fe* Co/Ni**	w _B /%
他形粒状黄铁矿		27.8	ZK701-2-09-1.1	48.15	51.55	0.09	0.30	1.20	-	-	-	-	-	-	0.02	0.56	0.02	101.89	1.874	-
他形粒状黄铁矿		38.6	ZK701-6-09-2.1	46.28	52.08	0.10	0.04	1.24	-	0.01	-	-	0.01	-	-	0.75	0.03	100.54	1.970	-
他形粒状黄铁矿		42.7	ZK701-8A1	44.10	53.86	0.11	0.03	-	0.01	0.01	0.02	0.84	0.08	-	0.01	-	-	99.07	2.137	9.08
他形粒状黄铁矿		44.6	ZK701-10-09-1.2	45.09	50.99	0.08	0.08	1.52	0.04	-	-	-	0.04	0.01	0.01	0.64	0.01	98.50	1.979	2.20
球形黄铁矿		49	ZK701-12A1	45.42	53.60	0.07	0.01	-	-	-	0.16	0.02	0.04	-	-	-	-	99.31	2.065	-
他形粒状黄铁矿		57	ZK701-15-09-1.1	44.13	52.85	0.07	0.06	0.96	0.01	-	-	0.31	-	-	0.02	0.63	-	99.03	2.096	8.00
他形粒状黄铁矿	I号矿带	80.1	ZK701-19-09-2.1	45.60	52.31	0.12	0.11	0.79	-	0.33	0.03	-	-	-	-	0.62	-	99.91	2.007	-
他形粒状黄铁矿		110.8	ZK701-25-09-1.1	46.25	52.94	0.08	0.07	0.21	-	0.00	-	0.19	-	0.01	-	0.69	0.01	100.44	2.003	-
他形粒状黄铁矿		144.9	ZK701-30-09-1.2	46.40	51.97	0.11	0.02	0.04	0.01	-	-	0.27	-	-	0.03	0.69	0.02	99.55	1.960	21.60
他形粒状黄铁矿		193.4	ZK701-32-09-1.4	46.10	52.50	0.07	0.01	0.42	-	-	-	-	-	-	0.05	0.64	-	99.77	1.993	-
他形粒状黄铁矿		195	ZK701-33-09-1.4	46.52	52.31	0.10	-	0.15	-	-	0.04	-	-	0.01	0.01	0.61	0.03	99.77	1.968	-
自形黄铁矿	地表		DM09-44-13-1.5	44.87	53.01	0.10	0.12	0.17	0.03	0.17	0.02	-	-	0.05	0.02	0.67	0.05	99.28	2.068	2.91
球形黄铁矿	地表		DTCl101-10B1	44.93	54.73	0.10	0.08	-	-	-	0.04	-	-	-	0.09	-	-	99.96	2.132	-
他形粒状黄铁矿	地表		DM003-2A1	45.26	54.31	0.12	0.02	-	-	-	0.08	0.15	0.03	0.06	-	-	-	100.03	2.100	-
他形粒状黄铁矿	地表		DM007-3B3	45.29	54.76	0.11	0.03	-	0.00	-	0.05	-	0.03	0.01	-	-	-	100.28	2.116	26.25
他形粒状黄铁矿	地表		DM016-1A2	44.41	54.07	0.09	0.03	-	0.06	-	0.16	-	-	-	-	-	-	98.82	2.131	1.71
他形粒状黄铁矿	地表		DM017-1A2	44.43	51.80	0.03	0.05	-	0.01	1.11	0.92	-	-	0.15	-	-	-	98.50	2.040	2.15
他形粒状黄铁矿	地表		DM007-2A1	43.73	54.55	0.05	0.02	-	0.02	-	-	-	-	0.02	0.01	-	-	98.39	2.183	1.96
他形粒状黄铁矿	地表		DM007-2B1	45.61	55.14	0.08	0.03	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	100.87	2.116	-
他形粒状黄铁矿	地表		DM041-2A1	44.62	55.21	0.10	0.06	-	-	0.01	0.24	-	0.04	-	-	-	-	100.28	2.165	-
他形粒状黄铁矿	地表		DM001-1A1	44.66	52.81	0.10	0.01	-	0.23	0.38	0.20	-	0.05	0.08	0.01	-	0.69	98.52	2.069	0.44
他形粒状黄铁矿	地表		TC301-08-1-2-1	43.29	54.17	0.12	-	-	-	0.01	-	-	0.04	0.02	-	-	-	98.33	2.190	-
球形黄铁矿	62.50		ZK1601-20-1-1	44.61	53.68	0.05	0.06	-	0.24	0.13	0.09	-	-	0.10	0.03	0.76	0.03	99.77	2.106	0.19
球形黄铁矿	62.50		ZK1601-20-1-2	44.24	53.47	0.07	0.08	-	0.28	0.16	0.12	-	-	0.12	-	0.81	0.06	99.40	2.115	0.25
球形黄铁矿	62.50		ZK1601-20-1-3	44.43	54.92	0.09	-	-	0.01	0.01	0.05	-	0.05	0.01	-	0.74	0.00	100.31	2.163	15.17
平均值				45.14	53.34	0.09	0.06	0.67	0.07	0.19	0.15	0.30	0.04	0.05	0.02	0.68	0.03	99.62	2.07	7.07

注: * 原子比,单位为1; * 相对含量比,单位为1; 空白表示未测;- 表示未测出; 测试单位:东华理工大学; 测试人:郭国林。

表 3 东莫扎抓铅锌矿区 S3 多金属硫化物阶段黄铁矿电子探针微区剖面分析结果

$w_{\text{B}}/\%$

Table 3 EPMA spots micro sections analytical results of pyrites at polymetallic ore-forming stage (S3) in the Dongmozhazhua Pb-Zn ore deposit

样号及描述	测点	Fe	S	Pb	Zn	Co	Ni	Cu	Au	Ag	Cd	Te	As	Se	Sb	Ge	Total	S/Fe*
DTC1101-5-2-1 球形黄铁矿 从边部到核心	1	46.96	53.83	0.046	0.137	0.074	-	-	-	0.012	0.016	-	0.020	-	-	-	101.089	2.006
	2	46.42	53.13	0.208	0.117	0.036	0.003	-	0.006	0.004	-	-	0.200	0.004	0.010	-	100.138	2.003
	3	46.15	53.21	0.192	0.029	0.085	0.015	0.001	-	-	-	-	0.009	-	0.044	-	99.735	2.018
	4	45.47	52.26	0.255	0.037	0.040	-	-	0.057	0.025	0.035	-	0.243	-	0.008	0.012	98.434	2.011
	5	46.24	53.51	0.180	-	0.079	0.009	-	-	0.001	0.018	-	0.017	-	0.012	0.003	100.067	2.025
	6	45.91	53.68	0.209	0.002	0.091	0.011	0.008	0.041	0.016	0.002	-	0.100	0.008	-	0.004	100.081	2.046
	7	46.24	53.59	0.076	0.050	0.035	-	0.004	0.020	0.002	0.009	0.009	0.029	-	-	0.010	100.073	2.028
	8	46.61	53.65	0.079	0.010	0.058	-	-	-	0.001	0.020	-	0.194	-	-	0.016	100.630	2.014
	9	45.57	52.92	0.224	0.052	0.032	-	-	0.043	0.009	0.006	0.026	-	-	-	-	98.878	2.032
	10	45.87	52.82	0.257	0.047	0.042	-	0.018	-	0.001	-	0.015	0.111	0.021	0.008	-	99.207	2.015
	11	45.85	53.06	0.356	0.010	0.045	-	0.002	-	0.005	0.003	0.010	0.077	-	-	-	99.422	2.025
DTC1101-5-2-2 球形黄铁矿 从边部到核心	1	44.89	53.60	0.288	0.525	0.068	0.018	-	0.045	-	0.013	0.006	-	-	-	-	99.448	2.089
	2	45.61	52.91	0.291	0.119	0.049	0.023	-	0.079	-	0.019	-	-	-	-	-	99.099	2.030
	3	45.66	52.90	0.196	-	0.038	0.019	-	-	0.007	-	-	-	-	0.030	0.003	98.853	2.028
	4	45.62	52.84	0.322	0.166	0.064	-	-	-	0.002	0.006	-	0.003	-	0.006	-	99.034	2.027
	5	45.87	52.82	0.499	0.107	0.038	-	-	-	0.010	0.030	0.008	0.006	-	-	-	99.387	2.015
	6	46.00	52.96	0.360	0.106	0.046	0.015	0.001	0.035	-	-	-	0.018	0.010	-	-	99.550	2.015
	7	44.86	53.39	0.440	0.078	0.059	-	0.035	-	0.044	-	0.038	0.245	-	0.047	-	99.227	2.083
	8	44.99	52.78	0.647	1.687	0.062	0.015	0.042	0.040	0.031	0.017	-	0.214	-	0.056	-	100.580	2.053
	9	46.17	53.35	0.367	0.046	0.043	-	0.025	0.022	-	0.017	0.009	0.101	-	0.002	-	100.157	2.022
	10	46.67	53.57	0.379	0.102	0.038	0.023	0.023	0.063	-	0.010	0.003	-	0.001	0.034	-	100.913	2.009
	11	45.43	53.46	0.608	0.071	0.052	-	-	0.039	0.019	0.017	-	-	0.006	0.004	-	99.700	2.059
	12	46.03	53.15	0.415	0.722	0.022	0.019	0.025	-	0.039	-	0.023	0.014	-	0.008	-	100.469	2.020

注：* 原子比,单位为 1；代表未测出 测试单位 中国地质科学院矿产资源研究所 测试人 陈振宇。

0.004 5。部分闪锌矿检出 Au。镜下观察发现,S3 阶段闪锌矿具典型环带、胶状结构和草莓状结构,为了解草莓状闪锌矿晶体从核心到边缘基本组分的变化以及皮壳状闪锌矿不同环带间基本组分的变化,分别选择 3 个草莓状闪锌矿和 1 个皮壳状闪锌矿,从核心到边缘进行了微区剖面分析(图 5d~5k),分析结果列于表 5,结果显示各闪锌矿 S 含量介于 32.62%~33.66% 之间,Zn 含量介于 65.71%~67.77% 之间,S/Zn 原子比则介于 0.988~1.028 之间,各组分数值范围显示较 S3 阶段整体闪锌矿特征,该种结构的闪锌矿具高 Zn、低 S 特征。

鉴于电子探针成分分析结果中闪锌矿和黄铁矿都检出了一定量的 Au,故利用 ICP-MS 对 4 件矿石样品进行了金属元素含量的测定,以进一步检测 Au 是否具有工业意义,测试结果列于表 6。根据分析结果发现,矿石样品中 Au 含量仅介于 $0.02 \times 10^{-3} \sim 0.79 \times 10^{-3}$ 之间,所以判断电子探针结果中 Au 的出现可能由于外部误差所致。此外,ICP-MS 测定结果发现矿石中具较高含量的 Cd,最高可达 $1\,573 \times$

10^{-6} ,结合电子探针成分分析,Cd 主要来自闪锌矿,从而指示 Cd 含量高的碳酸盐岩是寻找闪锌矿的一个有利标志。

4 讨论

4.1 围岩蚀变的指示意义

东莫扎抓铅锌矿区蚀变类型清晰,蚀变和矿化之间也具明显关系。

虽然白云石化遍及整个矿区,但笔者在 MIV 矿带白云石化灰岩与白云石化空白带的过渡剖面上发现,从矿体内部、边缘到逐渐远离矿体,灰岩的白云石化出现逐渐减弱至消失的变化(图 6),体现出了白云石化和铅锌矿化的密切关系。这种关系在 S3 多金属硫化物阶段尤为突出,镜下可见该阶段闪锌矿、黄铁矿和方铅矿多以浸染状产在白云石的粒间孔隙中,这也是半自形-他形细-中晶白云石化较泥晶白云石化和铅锌矿化关系密切的原因(在含 Mg 热液蚀变灰岩的过程中,方解石被蚀变成晶胞参数相对

表 4 东莫扎抓铅锌矿区 S3 多金属硫化物阶段和 S4 重晶石硫化物阶段闪锌矿电子探针成分点分析结果

$w_B/\%$

Table 4 EPMA spots analytical results of sphalerites at polymetallic ore-forming stage (S3) and barite stage (S4) in the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit

样品特征	样品位置	样品编号	Zn	S	Fe	Cd	Au	Ge	Cu	Sb	Ni	Co	Pb	As	Se	Mn	Mo	Bi	Hg	In	Total	S/Zn* Cd/Zn**	Fe/Zn**
I号矿带S3阶段		ZK701-6-09-3.1	63.53	33.79	0.05	1.67	0.04	0.02	0.03	-	-	0.13	-	0.01	0.09	0.53	-	-	-	99.88	1.080	0.000 83	
		ZK701-8-09-2.3	63.45	33.90	0.24	3.04	-	-	-	-	0.01	0.01	0.02	-	-	0.44	-	-	-	101.11	1.085	0.003 72	
		ZK701-10-09-2.1	63.32	32.48	0.08	1.98	0.01	0.01	-	-	-	0.03	0.01	0.00	0.04	0.40	-	1.47	-	99.83	1.042	0.001 28	
		ZK701-12-09-1.3	63.00	33.62	0.32	2.96	-	-	0.01	0.01	0.02	0.53	-	-	0.02	0.39	-	-	-	100.88	1.084	0.005 08	
		ZK701-15-09-1.3	58.81	31.82	0.12	2.89	-	0.01	-	0.01	0.01	0.04	-	0.01	-	0.49	-	4.29	-	98.50	1.099	0.001 96	
		ZK701-32-09-1.5	63.23	33.63	0.23	2.56	-	0.05	0.02	0.03	0.01	0.09	0.02	0.02	0.02	0.41	-	-	-	100.31	1.080	0.003 56	
		ZK701-33-09-1.2	61.84	32.77	0.45	3.41	0.04	-	-	0.02	0.01	0.09	-	-	0.01	0.43	-	-	-	99.07	1.076	0.007 23	
		DTCH101-10E2	64.77	33.25	0.08	0.01	-	-	-	-	0.04	0.02	-	-	-	-	-	0.01	-	98.18	1.043	0.001 3	
		DTCH101-5-2A5	65.10	33.71	0.17	0.94	-	-	-	-	-	0.00	-	-	0.02	0.02	-	0.02	-	99.99	1.052	0.002 66	
		DTCH101-8A1	66.39	34.36	0.16	-	-	-	-	0.03	-	0.01	-	-	-	-	-	0.04	-	100.99	1.051	0.002 43	
		TC36-5A1	67.59	32.08	0.04	0.36	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	0.04	-	-	-	100.15	0.964	0.000 65	
		CMH1-H63A1	65.43	34.00	0.09	0.22	-	-	-	0.06	0.02	-	-	0.04	-	0.01	-	-	-	99.87	1.056	0.001 3	
		ZK2401-14A1	65.10	33.72	0.07	-	-	-	-	0.06	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	98.96	1.052	0.001 06	
		CMH1-6A1	65.04	33.41	0.07	0.55	-	-	0.03	0.01	0.02	-	-	-	0.01	-	-	-	-	99.15	1.043	0.001 14	
ZK001-X2A1	64.15	33.98	0.04	0.19	-	-	-	-	-	0.02	0.00	-	-	-	-	-	-	98.39	1.076	0.000 65			
IV号矿带S3阶段		ZK001-5A1	65.17	33.60	0.03	0.84	-	0.04	-	-	0.02	-	-	0.29	0.06	0.03	-	-	-	100.07	1.047	0.000 52	
		ZK001-14A1	64.40	33.50	0.23	0.68	-	-	-	0.03	-	0.04	-	-	-	-	-	0.06	-	98.94	1.057	0.003 63	
		DM007-3E2	66.01	33.88	0.11	0.38	-	-	-	0.00	-	-	-	-	0.02	0.01	-	-	-	100.42	1.043	0.001 71	
		DM041-2A2	63.77	36.25	0.18	0.62	-	-	-	-	0.01	-	-	-	0.04	0.00	-	0.01	-	100.88	1.155	0.002 84	
		ZK1601-20-4.1	65.58	32.76	0.07	0.22	-	0.13	0.16	-	-	-	-	0.03	0.04	0.03	0.51	0.10	-	0.03	99.65	1.015	0.003 3
		ZK1601-20-4.2	65.37	32.36	0.09	0.34	0.19	0.06	0.01	0.03	-	-	-	-	-	0.04	0.54	-	0.83	-	99.84	1.006	0.005 2
		ZK1601-20-4.3	65.32	32.98	0.07	0.28	1.28	-	-	-	0.00	0.02	-	0.01	-	0.01	0.61	0.11	-	0.05	100.73	1.026	0.001 38
		ZK1601-20-2.2	66.12	32.89	0.09	0.29	0.92	-	-	0.04	0.02	-	-	0.04	-	0.01	0.54	-	-	100.97	1.010	0.004 4	
		TC301-08-1-3-4	65.33	32.97	0.06	0.31	0.64	0.02	0.01	-	0.02	-	-	0.02	-	0.01	0.55	-	-	99.98	1.025	0.004 8	
		TC301-08-1-3-5	65.05	32.46	0.07	0.53	1.02	-	-	-	-	0.02	-	-	0.02	-	0.56	0.10	-	-	99.82	1.014	0.008 2
		TC301-08-1-3-6	65.15	34.11	0.12	0.35	0.39	-	0.01	0.02	-	0.05	-	-	0.00	0.02	0.61	0.01	-	100.84	1.063	0.005 3	
		DM09-28-1-1.2	62.63	33.34	0.09	2.38	-	-	-	-	0.02	-	0.10	0.02	-	0.01	0.49	-	-	99.09	1.081	0.001 47	
		DM09-36-1-1.2	64.02	33.90	0.10	2.58	0.02	-	-	-	-	-	0.08	-	-	0.03	0.45	-	-	101.19	1.076	0.001 62	
		DM09-68-1-1.1	63.26	33.61	0.13	2.62	-	-	0.06	0.00	-	0.20	0.03	-	0.03	0.53	-	-	-	100.48	1.079	0.002 07	
DM09-80-2-1.2	63.21	34.21	0.13	3.29	-	-	-	-	0.01	-	0.08	-	-	0.00	0.43	-	-	101.34	1.099	0.001 99			

注: * 原子比,单位为1;空白表示未测;-表示未测出;测试单位:东华理工大学;测试人:郭国林。

表 5 东莫扎抓铅锌矿区 S3 多金属硫化物阶段闪锌矿电子探针微区剖面分析结果

$w_B/\%$

Table 5 EPMA spots micro sections analytical results of sphalerites at polymetallic ore-forming stage (S3) in the Dongmozhazhua Pb-Zn ore deposit

样号及描述	测点	Zn	S	Fe	Cd	Pb	Au	Te	Ag	Co	Ni	Cu	Sb	As	Se	Ge	Total	S/Zn*
TC301-08-1 草莓状闪锌矿 从边部到核心 再到边部	1	66.46	33.37	0.069	0.665	0.038	0.010	-	-	0.016	0.031	-	-	0.048	0.049	-	100.757	1.020
	2	67.45	33.35	0.132	0.334	0.018	-	0.012	-	-	0.029	-	-	-	-	-	101.318	1.004
	3	67.35	33.17	0.102	0.425	0.024	0.003	0.013	-	-	-	-	0.007	-	-	-	101.097	1.000
	4	68.06	33.44	0.047	0.322	0.027	-	-	0.007	-	-	-	-	0.027	-	-	101.931	0.998
	5	67.77	32.96	0.068	0.340	0.036	0.054	0.016	-	-	0.010	-	0.019	0.013	-	-	101.284	0.988
	6	67.31	32.85	0.040	0.503	0.026	0.021	-	-	-	-	-	-	0.032	-	-	100.783	0.991
	7	67.11	33.20	0.055	0.417	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	0.034	-	100.837	1.005
	8	66.37	33.15	0.195	0.499	0.026	0.039	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	100.305	1.015
ZK701-8-2 草莓状闪锌矿 从边部到核心 再到边部	1	66.74	33.40	0.152	0.210	0.032	-	-	-	-	0.036	-	0.007	0.037	0.018	0.043	100.633	1.017
	2	67.06	33.47	0.428	0.095	0.019	-	-	-	-	-	-	0.006	0.075	-	-	101.149	1.014
	3	67.45	33.61	0.088	0.101	0.001	-	0.032	-	-	-	-	0.013	-	-	-	101.298	1.012
	4	66.92	32.71	0.361	0.102	0.055	0.044	0.009	-	-	-	-	-	-	-	0.018	100.205	0.993
	5	66.30	33.28	0.162	0.678	0.003	0.051	0.020	-	0.027	0.007	-	-	-	-	-	100.534	1.020
ZK701-8-3 草莓状闪锌矿 从边部到核心 再到边部	1	66.40	33.60	0.141	0.617	0.016	-	-	-	-	0.021	-	-	-	0.016	-	100.816	1.028
	2	66.77	33.33	0.279	0.059	0.061	0.008	0.023	-	0.030	-	-	0.006	0.036	-	0.007	100.606	1.014
	3	67.32	33.66	0.153	0.034	0.031	-	-	-	0.035	-	-	-	-	0.030	0.015	101.258	1.016
	4	66.83	33.48	0.330	0.124	0.026	-	0.003	-	0.006	0.019	-	0.038	0.037	-	-	100.894	1.018
	5	66.12	33.30	0.597	0.103	0.018	0.003	-	-	0.025	-	-	0.006	0.005	-	-	100.177	1.023
	6	65.45	32.91	0.078	0.723	0.006	0.077	0.010	-	-	0.019	-	-	-	-	-	99.271	1.021
DTC1101-5-2-3 皮壳状闪锌矿 从核心到边部	1	66.13	32.80	0.540	0.433	0.065	-	0.039	-	-	-	-	0.001	-	-	-	100.004	1.008
	2	66.11	32.81	0.181	0.060	0.018	-	-	0.009	-	-	-	-	0.023	-	-	99.213	1.008
	3	66.60	33.07	0.171	0.166	0.038	-	-	-	-	-	-	0.026	0.002	0.017	-	100.094	1.009
	4	66.87	33.15	0.085	0.254	0.014	0.051	0.008	-	0.001	0.003	-	0.038	-	-	-	100.473	1.007
	5	66.72	33.37	0.067	0.257	0.040	0.038	-	-	0.031	-	-	-	-	0.028	0.013	100.547	1.016
	6	65.71	32.62	0.118	1.698	0.043	0.087	-	-	-	-	-	0.040	0.007	-	0.013	100.315	1.008

注：* 原子比,单位为 1；代表未测出 测试单位 中国地质科学院矿产资源研究所 测试人 陈振宇。

表 6 东莫扎抓铅锌矿区矿石中部分金属元素 ICP-MS 分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 6 Compositions of part of metal elements in ore rocks of the Dongmozhazhua Pb-Zn deposit based on ICP-MS analysis

样品号	样品描述	Pb	Zn	Cd	Au*	Ag	Cu	As	Hg	Sb
DTC1101-9-2	Ⅰ号矿带稠密浸染状矿石	12 060	43 890	341	0.23	15.1	13.8	128	1.50	6.98
ZK701-8		641	27 790	143	0.02	5.10	17.2	31.0	0.70	7.59
DM007-3	Ⅳ号矿带稠密浸染状+角砾状	3 402	229 300	1573	0.79	32.0	470	132	64.4	61.7
DM041-4	矿石	30 690	102 500	596	0.17	17.4	199	76.4	34.7	21.5

注：* 单位为 10⁻³ 测试单位 国家地质实验测试中心 测试人 王淑贤。

较小的白云石,灰岩中出现粒间孔隙,从而为硫化物沉淀提供了空间,热液蚀变形成的白云石自形程度越高,粒间孔隙越大,提供的空间越充分)。

黄铁矿是铅锌沉淀各阶段中的主要伴生硫化物,观察发现,黄铁矿化范围远大于铅锌矿化,锌矿化往往发生于黄铁矿化最强的部位,铅矿化则发生于锌矿化最强的部位,所以在矿区甚至在区域上都可以通过圈定黄铁矿化范围来寻找闪锌矿,进而寻找方铅矿这一规律来找矿。

硅化在 S3、S4 两阶段都有发生,但其往往在紧

邻碎屑岩的地层中发育,分布具有一定的局限性(图 4c),所以若根据硅化蚀变寻找到铅锌矿化后,可在其临近灰岩地层中扩大范围勘探。

对于 S4 重晶石硫化物阶段沉淀的闪锌矿和方铅矿而言,重晶石化对铅锌矿化的指示意义尤为明显。镜下可见这期硫化物和重晶石紧密伴生,闪锌矿常产在重晶石脉中。和重晶石同期的铅锌矿化往往紧邻断裂,且规模不大,但铅锌品位较高,为独立的富矿体。

根据白云石化对铅锌矿化的基础性作用,黄铁

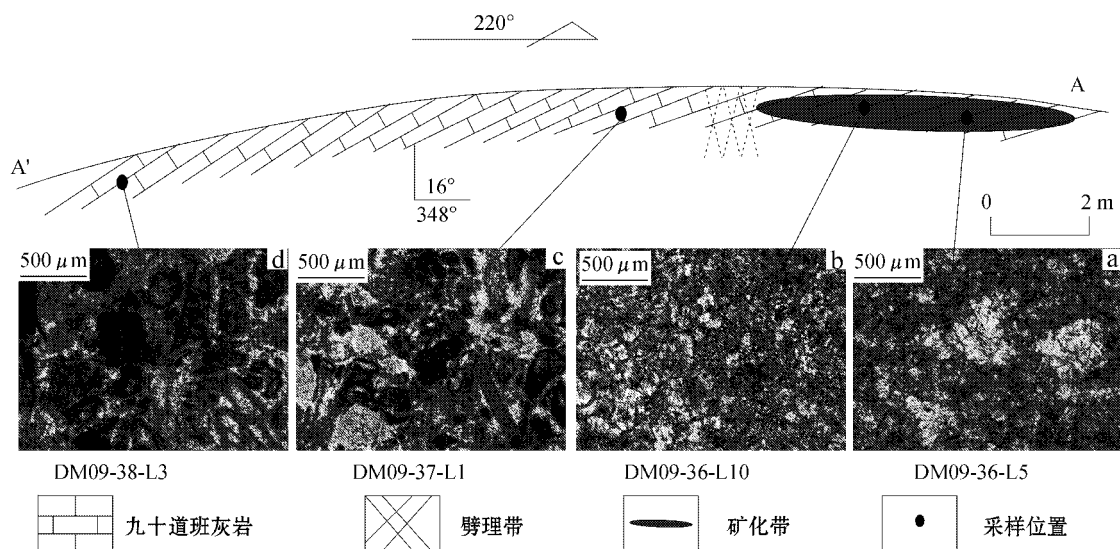


图 6 东莫扎抓Ⅳ号矿带白云石化和铅锌矿矿化关系实测剖面(AA位置见图 1)

Fig. 6 Measured section for the relationship between dolomitization and Pb-Zn mineralization in MIV mineralization ore belt of the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit (for location of section AA' see Fig. 1)

a—重结晶粒度大的白云石化灰岩；b—重结晶粒度小的白云石化灰岩；c—生物碎屑灰岩；d—生物碎屑灰岩(茜素红染色)

a—strongly recrystallized dolomitized limestone；b—weakly recrystallized dolomitized limestone；c—bioclastic limestone；d—bioclastic limestone (ARS stain)

矿化、硅化和重晶石化对铅锌矿化的指示性意义,以及矿区 4 种蚀变的空间分布特征,结合矿区灰岩赋矿和断裂构造控矿的特点,按照蚀变类型叠加越多,铅锌矿化机率越大的原则,在矿区提出 4 处具有找矿前景的具体位置(图 4, A~D),进一步勘探工作中可重点在以上位置向四周扩大范围进行。

4.2 黄铁矿与闪锌矿的成因矿物学意义

4.2.1 黄铁矿和闪锌矿对成矿流体性质的指示意义

S3 多金属硫化物阶段黄铁矿 :对 S3 阶段黄铁矿元素含量分析发现,其 Co/Ni 比值基本都大于 1,从而明确了黄铁矿的热液成因(一般认为沉积成因黄铁矿 Co/Ni 比值小于 1)(王秀璋等, 1992)。而其 S/Fe 含量相对黄铁矿的理论值都偏低特征说明了黄铁矿从热液淀出的过程中圈闭了较多微量元素。 S/Fe 原子比高于黄铁矿理论 S/Fe 原子比指示了硫逸度较高的热液环境。

分析球形黄铁矿从边部到核部的微区剖面发现(图 5a~5c),黄铁矿的 S/Fe 含量以及 S/Fe 原子比均出现锯齿状变化(图 7a~7b),说明在该阶段早期铅锌大量沉淀之前的黄铁矿亚阶段(图 2,图 5a),热液成分出现周期性震荡,推测由于充足的热液供给和黄铁矿连续沉淀所致,热液环境总体趋于稳定。

在 TC1101-5-2-1 中(图 7a)发现, As 含量和 S/Fe 原子比出现完全相反的锯齿状分布, As 和 S/Fe 原子比具有反相关关系(图 7c),暗示 As 主要取代 S 的位置沉淀。

S3 多金属硫化物阶段闪锌矿 :S3 阶段闪锌矿 S/Zn 原子比普遍高于闪锌矿理论值,同样指示了硫逸度较高的热液环境。分析草莓状闪锌矿微区剖面的元素含量变化发现,从核部到边部(图 5d~5i,图 8a~8c) Cd 出现明显增多趋势,说明伴随着闪锌矿的沉淀,成矿流体向硫离子活度、成矿温度、 pH 值降低和 Cd/Zn 增高的趋势演化(Schwartz, 2000),与刘英超等(2010)对矿区成矿阶段流体温度的研究结果一致(温度从 170°C 下降到 130°C) ; Zn 含量减少, S/Zn 原子比增大, S 含量无明显变化规律,说明随着闪锌矿的沉淀、流体中 Zn 含量逐渐减少,硫离子活度虽然也有所降低,但仍保持了一个相对活跃的程度,指示成矿过程中,相对 Zn , S 源充足。皮壳状闪锌矿(图 5j~5k,图 8d)对以上规律都无明显显示,可能是在测试中矿物的生长方向难以准确判断所致。闪锌矿中的环带通常由 Fe/Zn 比的变化形成,在本矿区,皮壳状闪锌矿具有明显环带,其 Fe/Zn 比例在微区剖面中也表现出一定程度的变化(图 8d)。S3 和 S4 阶段闪锌矿的对比 :S3 与 S4 阶段具有不同的矿物

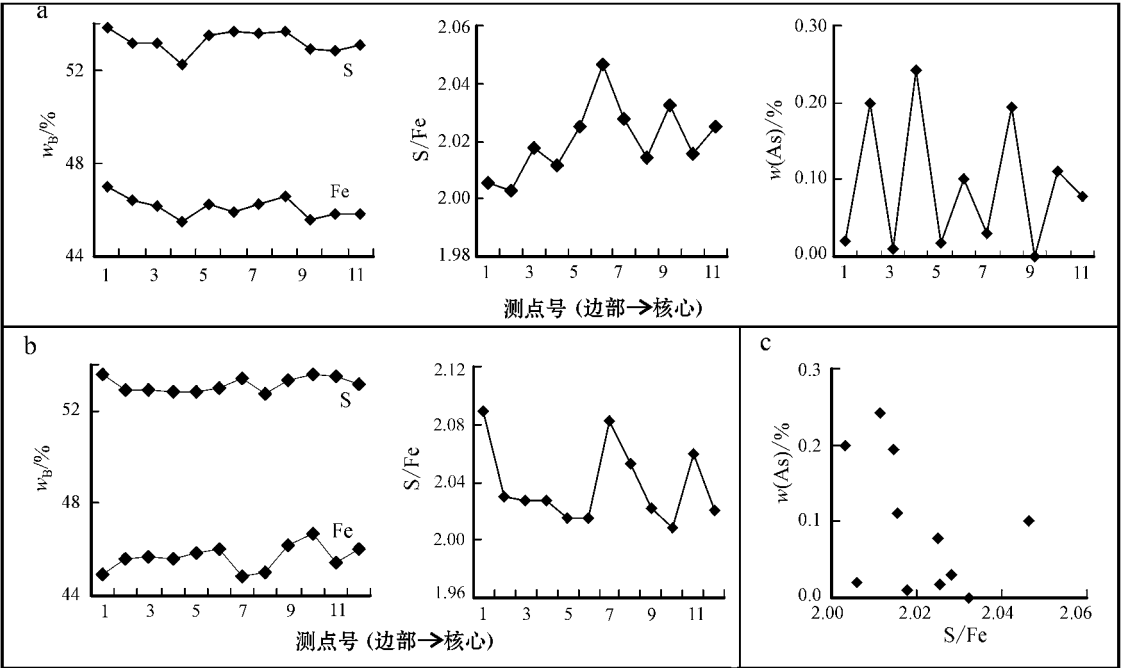


图 7 球形黄铁矿中部分元素含量和 S/Fe 原子比变化曲线及 As 与 S/Fe 原子比相互关系

Fig. 7 Graphs of content of several elements and S/Fe atomic ratios and the relationship between As and S/Fe atomic ratios in spherical pyrite

a—TC1101-5-2-1 b, c—TC1101-5-2-2 样品号和测点号与图 5 和表 3 一致

a—TC1101-5-2-1 ; b, c—TC1101-5-2-2 ; sample numbers and spot numbers as for Fig. 5 and Table 3

组合,两阶段闪锌矿颜色出现了明显的从深到浅的变化,指示了流体温度的降低。闪锌矿电子探针成分分析结果对比发现,S4 阶段闪锌矿 Zn 含量普遍较 S3 阶段低,而 S/Zn 比却高于 S3 阶段,指示出了两阶段流体性质的差异。说明两阶段流体不但在时间上存在先后顺序,在性质上也存在硫逸度增高,温度降低的变化。

4.2.2 对 S3 阶段成矿流体活动中心的指示意义

将 S3 阶段黄铁矿和闪锌矿与其采样位置结合起来,发现在东莫扎抓铅锌矿床 MI 矿带钻孔 701 中,其顶部矿化最好的矿体位置的闪锌矿 S/Zn 原子比和黄铁矿 S/Fe 原子比都具明显增大趋势(图 9),说明在该阶段中,铅锌矿化越好的部位,流体越为活跃,硫逸度也越高。鉴于该阶段闪锌矿和黄铁矿在矿区的广泛分布,闪锌矿 S/Zn 原子比和黄铁矿 S/Fe 离子个数比均可作为判断流体活动中心的重要标志,指导矿区找矿工作。对本次研究的样品进行系统分析发现,该阶段黄铁矿 S/Fe 原子数比在矿区指示两个高值点,分别位于 MI 矿带 0 线附近和 MIV 矿带北侧九十道班组灰岩和甲丕拉组碎屑岩接触的

位置(图 10a),闪锌矿 S/Zn 原子比指示的高值点在 MIV 矿带北侧和黄铁矿 S/Fe 原子比指示的高值点位置一致(图 10b)。结合二者分析,矿区 S3 阶段流体活动中心可能有两个,其中 MIV 矿带北侧流体活动更为活跃,MI 矿带 0 线附近次之,但这种差别也可能由于 IV 号矿带断裂发育,局部构造活动活跃所致。

5 结论

(1) 东莫扎抓铅锌矿区存在白云石化、黄铁矿化、硅化和重晶石化 4 种与铅锌矿化关系密切的蚀变类型,指示在矿区或区域灰岩中寻找同类铅锌矿可分 3 步进行 ① 寻找白云石化和硅化作为在大面积范围内寻找铅锌矿化的第一步 ;② 在白云石化和硅化范围内及邻近外围地区圈定黄铁矿化作为缩小找矿范围的第二步 ;③ 在圈定的黄铁矿化范围内寻找铁矿化最强的位置作为精确寻找铅锌矿化的第三步。此外,还可以在区域或矿区断裂带附近寻找重晶石化,定位品位高,规模小的铅锌富矿体。同时,高 Cd

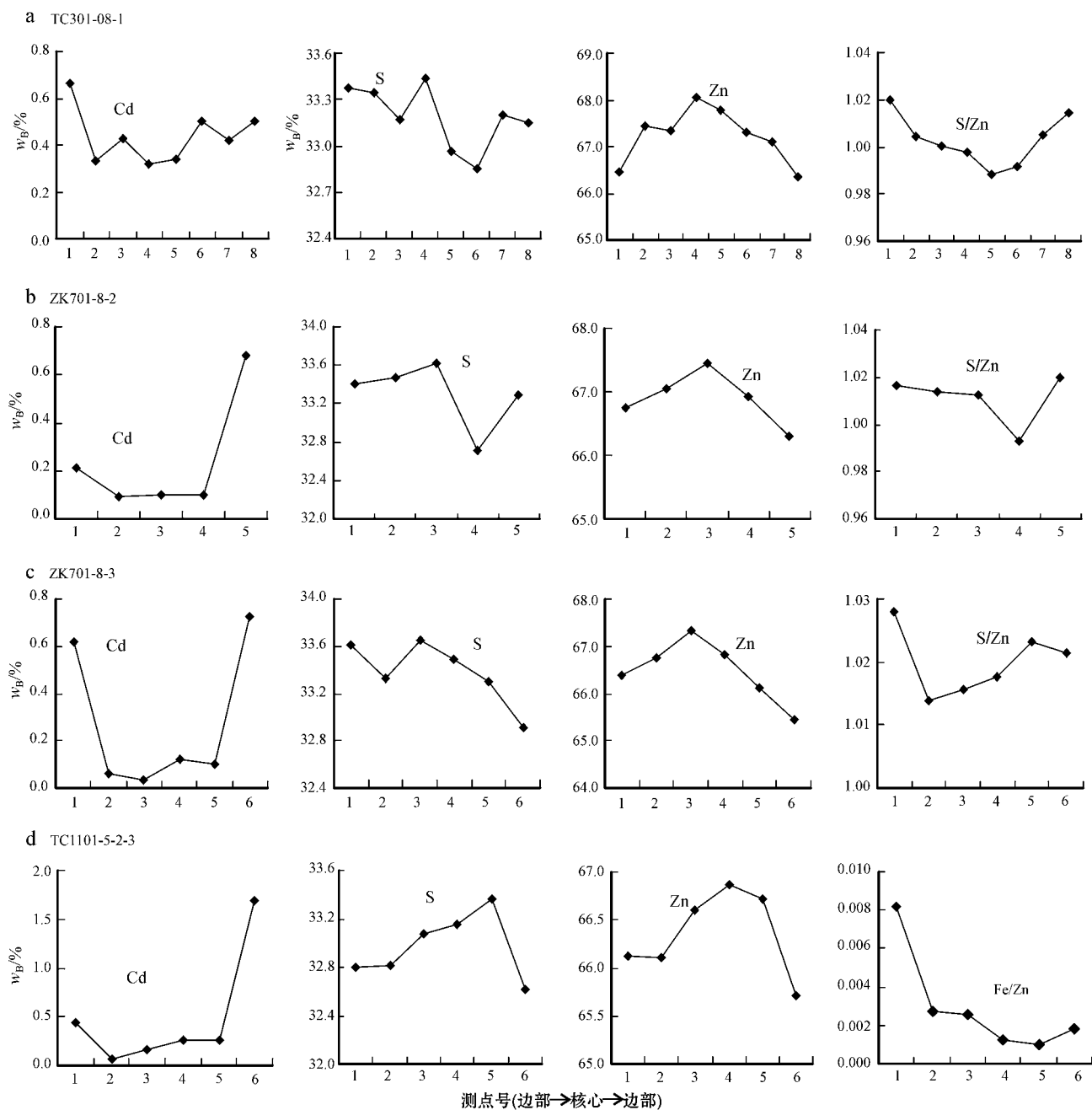


图 8 草莓状闪锌矿与皮壳状闪锌矿中部分元素含量和 S/Zn 原子比变化曲线(样品号和测点号与图 5 和表 5 一致)

Fig. 8 Graphs of content of several elements and S/Zn atomic ratios in strawberry and crust-like sphalerite (sample numbers and spot numbers as for Fig. 5 and Table 5)

含量的碳酸盐岩也是寻找闪锌矿的一个有利指示。

(2) 黄铁矿和闪锌矿单颗粒电子探针微区剖面分析指示,在 S3 多金属硫化物阶段 S 源相对金属离子比较充足,早期球状黄铁矿沉淀阶段热液环境稳定,随着闪锌矿沉淀,含矿流体向温度、S 离子活度和 pH 值降低, Cd/Zn 比增高的趋势演化。

(3) S3 多金属硫化物阶段沉淀的黄铁矿 S/Fe 原子比、闪锌矿 S/Zn 原子比在成矿流体活跃部位具明显高于理论值的现象,指示 MIV 矿带北侧九十道班组灰岩与甲丕拉组碎屑岩接触部位和 MI 矿带 0 线附近为该阶段成矿流体在矿区的活动中心。

(4) S4 重晶石硫化物阶段成矿流体与 S3 阶段流

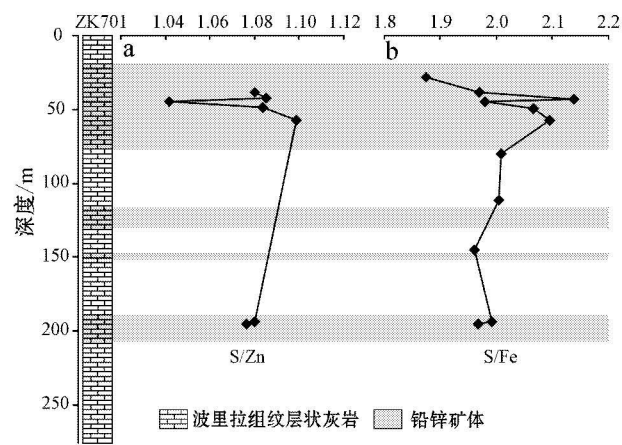


图 9 钻孔 701 闪锌矿中 S/Zn 原子比(a)和黄铁矿中 S/Fe 原子比(b)和深度变化关系
Fig. 9 Relationships between atomic ratios of S/Zn in sphalerite (a) and S/Fe in pyrite (b) and depths in Drill Hole 701

体性质具有一定差异,其温度相对较低、硫逸度相对较高。

(5) 综合矿区 4 种蚀变与铅锌矿化的密切程度和矿区灰岩赋矿和断裂构造控矿的特点,指出东莫扎抓铅锌矿区存在 4 处铅锌矿化前景位置,可考虑作为矿区进一步找矿方向。

致谢 野外工作期间得到了青海省地质调查院东莫扎抓铅锌矿区全体工作人员,中国地质科学院地质研究所杨天南研究员、刘燕学研究员和诸多师兄兄弟的大力帮助,探针片显微镜下鉴定和电子探针成分分析工作得到了东华理工大学郭国林老师、中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师、徐文艺研究员、陈伟十老师、地质研究所潘小菲老师的指导与帮助,在此对上述个人及单位一并表示感谢!

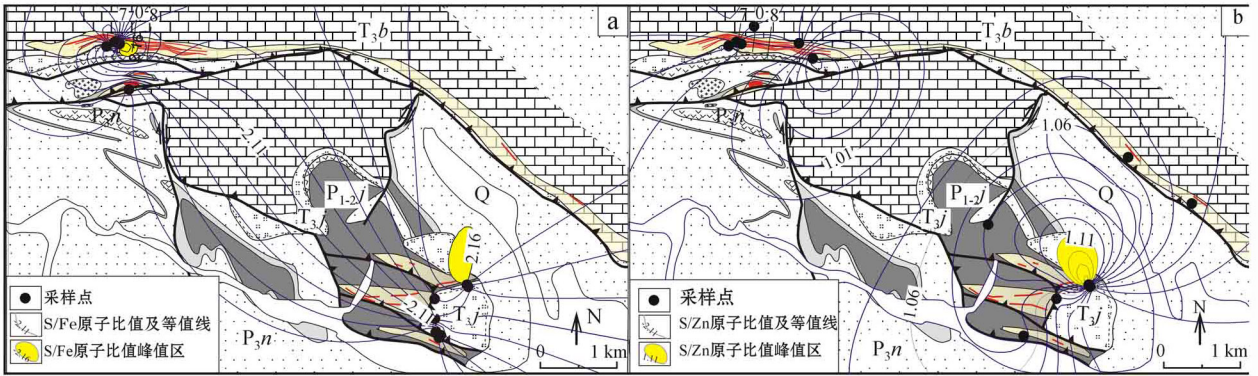


图 10 东莫扎抓铅锌矿区黄铁矿中 S/Fe 原子比(a)和闪锌矿中 S/Zn 原子比(b)高值分布范围(底图图例同图 1)
Fig. 10 Peak-value zones of atomic ratios of S/Fe in pyrite (a) and S/Zn in sphalerite (b) in the Dongmozhashhua Pb-Zn ore deposit (legends of the base map as for Fig. 1)

References

Cong Yuan, Chen Jianping, Dong Qingji, *et al.* 2010. Characteristics of sulfide minerals in Dongmozhashhua lead-zinc deposit, Qinghai Province, and their genetic significance[J]. *Geoscience*, 24(1): 42~51(in Chinese with English abstract).
He Hongliao, Li Bing, Han Lirong, *et al.* 2002. Evaluation of determining 47 elements in geological samples by pressurized acid digestion-ICPMS[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 21(5): 8~12(in Chinese with English abstract).
Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 420~441(in Chinese with English abstract).
Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2010. Fluid inclu-

sion constraints on the origin of Dongmozhashhua Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai Province[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 26(6): 1 805~1 819 (in Chinese with English abstract).
Liu Yingchao, Yang Zhusen, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Geology and hydrogen, oxygen and carbon isotope geochemistry of Dongmozhashhua Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 770~784 (in Chinese with English abstract).
Schwartz M O. 2000. Cadmium in zinc deposits: Economic geology of a polluting element[J]. *Int. Geol. Rev.*, 42(5): 445~469.
Tian Shihong, Yang Zhusen, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozhashhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 747~758(in Chinese with English abstract).
Wang Pu, Pan Zhaolu and Weng Lingbao. 1984. *Systematic Mineralogy*

- (Volume One) [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1~666 (in Chinese).
- Wang Xiuzhang, Cheng Jingping, Zhang Baogui, *et al.* 1992. Geochemistry of Reworked-Type Gold Deposits in China [M]. Beijing: Science Press, 1~177 (in Chinese).
- Wang Zhaolin. 2009. Study of Multiple Orogeny and Metallogenesis in Yushu Area, Northern Segment of Sanjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaolin, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2009. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in Zaduo area, southern Qinghai [J]. Mineral Deposits, 28(2): 157~169 (in Chinese with English abstract).
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry [J]. Chem. Geol., doi:10.1016/j.chemgeo. 2011. 03.006.
- Zhang Hongrui. 2010. Deformational structures and metallogenetic model of sediment-hosted Pb-Zn deposits in northern segment of the Sanjiang orogenic belt, southwest China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenquan, Wang Changyong, Wang Shenglin, *et al.* 2007. The research on application of comprehensive geophysical exploration in Dongmohazhua deposit [J]. Qinghai Guotu Jinglue, (4): 44~46 (in Chinese).
- 特征及成因意义 [J]. 现代地质, 24(1): 42~51.
- 何红蓼, 李 冰, 韩丽荣, 等. 2002. 封闭压力酸溶-ICP-MS 法分析地质样品中 47 个元素的评价 [J]. 分析实验室, 21(5): 8~12.
- 侯增谦, 宋玉财, 李 政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. 矿床地质, 27(2): 420~441.
- 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2010. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 26(6): 1 805~1 819.
- 刘英超, 杨竹森, 侯增谦, 等. 2009. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床地质特征及碳氢氧同位素地球化学研究 [J]. 矿床地质, 28(6): 770~784.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 2009. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 28(6): 747~758.
- 王 濮, 潘兆镛, 翁玲宝. 1984. 系统矿物学(上册) [M]. 北京: 地质出版社, 1~666.
- 王秀璋, 程景平, 张宝贵, 等. 1992. 中国改造型金矿床地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1~177.
- 王召林. 2009. “三江”北段玉树地区复合造山与成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王召林, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2009. 青海杂多地区新生代构造特征与两种类型矿床的关系 [J]. 矿床地质, 28(2): 157~169.
- 张洪瑞. 2010. “三江”北段沉积岩容矿铅锌矿床矿区构造变形与控矿模型 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 张文权, 王昌勇, 王生林, 等. 2007. 东莫扎抓矿区物探方法的综合应用效果 [J]. 青海国土经略, (4): 44~46.

附中文参考文献

丛 源, 陈建平, 董庆吉, 等. 2010. 青海东莫扎抓铅锌矿床硫化物