

西藏龙玛拉矽卡岩型铅锌多金属矿床金属矿物特征及地质意义^{*}

孙 杨¹, 周敖日格勒^{2**}, 谢富伟¹, 王立强², 何逸飞¹, 张 冠³, 林文海⁴

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 西藏大学工学院, 西藏拉萨 850000; 4 西藏中凯矿业股份有限公司, 西藏拉萨 850000)

摘要 龙玛拉铅锌多金属矿床是冈底斯成矿带东段北缘念青唐古拉矽卡岩型多金属成矿带一个典型的铅锌矿床, 矿床以铅锌银矿化为主, 伴生铁铜矿化, 具有矿化元素丰富, 品位高的特点。矿体在纵向上发育明显的矿化分带, 从矿体顶部向下依次发育铅锌银矿化、锌铜矿化、铁铜矿化和铁矿化, 表现出从矿体顶部到矿体, 从低温到高温的元素和矿物组合的分布规律。镜下鉴定及电子探针分析结果表明, 矿床主要金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿和磁铁矿, 同时存在少量的斜方辉铅铋矿、自然铋等铋矿物以及白铁矿、铜蓝、孔雀石等次生矿物, 金属矿物间具有复杂的穿插交代关系, 根据详细的野外观察和镜下鉴定厘清了矿物生成顺序。黄铁矿 Co/Ni 比值集中在 1~5 之间, 显示出岩浆热液成因的特点, 其 Fe/(S+As) 比值和胶状黄铁矿的出现暗示矿床形成于中浅成环境, 闪锌矿富 Fe、Mn, 多为铁闪锌矿, 表明其形成于中高温环境, 按照 Fe 元素温度计估算出闪锌矿成矿温度为 259~305°C, 磁黄铁矿以单斜磁黄铁矿为主, 为低温成因, 且在浅部围岩和矿体中均大量出现, 显示出成矿流体运移至近地表后快速降温, 在强还原条件下发生了硫化物沉淀, 龙玛拉矿床为远端岩浆热液矽卡岩型矿床。矿床中铋矿物与银具有密切的时空关系, 指示铋对银的富集可能具有重要作用, 对该带银成矿规律的研究具有一定的指示意义。

关键词 远端矽卡岩矿床; 矿化分带; 金属矿物矿物学; 锗矿物; 龙玛拉矿床; 冈底斯成矿带

中图分类号:P618.42; P618.43

文献标志码:A

Metallic minerals characteristic and geological significance of Longmala skarn type Pb-Zn polymetallic deposit in Xizang

SUN Yang¹, ZHOU Aorige², XIE FuWei¹, WANG LiQiang², HE YiFei¹, ZHANG Guan³ and LIN WenHai⁴

(1 Geoscience Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 MNR Key Laboratory of Metallogenesis and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Engineering College of Tibetan University, Lhasa 850000, Xizang, China; 4 Xizang Zhongkai Mineral Industry Co. Ltd Company, Lhasa 850000, Xizang, China)

Abstract

The Longmala lead-zinc polymetallic deposit is a typical Pb-Zn deposit in the Nyainqntanglha skarn type polymetallic metallogenic belt on the northern margin of the eastern Gangdise metallogenic belt. The deposit is dominated by lead-zinc-silver mineralization, accompanied by iron-copper mineralization, and characterized by rich mineralized elements and high grade. Obvious mineralization zonation is developed vertically in the deposit. Lead-zinc-silver mineralization, zinc-copper mineralization, iron-copper mineralization and iron mineralization

* 本文得到国家自然科学基金(编号:41902095)和国家重点研发项目(编号:2022YFC2905002)联合资助

第一作者简介 孙 杨,男,1998 年生,硕士研究生,矿物学、矿床学、岩石学专业。Email:1468294761@qq.com

** 通讯作者 周敖日格勒,男,1989 年生,博士,副研究员,矿产普查与勘探专业。Email:zhouaorige@163.com

收稿日期 2023-08-15; 改回日期 2024-01-26。张绮玲编辑。

are successively developed from the top to foot of the orebody, indicating the element combination and mineral association were developed from low temperature to high temperature from the top to foot of the orebody. The results of microscopic identification and electron probe analysis show that the main metal minerals of the deposit are galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite, pyrrhotite and magnetite, as well as minor bismuth minerals such as cosalite, natural bismuth and secondary minerals such as marcasite, covellite and malachite. The ore minerals have a complex intersperses metasomatism relationship, which is studied from detailed field observation and microscopic identification, and the mineral paragenesis was clarified. The Co/Ni ratio of multi-stage pyrite is concentrated in the range of 1~5, showing the characteristics of magmatic hydrothermal origin, and the Fe/(S+As) ratio and colloidal pyrite suggest that the deposit was formed in a mesogene to hypabyssal environment. Sphalerite in the Longmala deposit is rich in Fe and Mn, mostly marmatite, indicating that it was formed in a medium to high temperature environment. The Fe element thermometer estimates that the metallogenetic temperature of sphalerite is 259~305°C. The pyrrhotite is mainly monoclinic pyrrhotite and it occurs in abundance in both ore bodies and sand slate, indicating that ore forming fluids cooled rapidly after moving to the surface. Sulfide precipitation occurred under strong reduction condition. The Longmala deposit is a distal magmatic hydrothermal skarn deposit. The bismuth minerals in the deposit have a close relationship with silver, which indicates that bismuth may play an important role in silver enrichment, and has certain indicative significance for the study of silver mineralization in this belt.

Key words: distal skarn deposit, mineralization zonation, mineralogy of metal minerals, bismuth minerals, Longmala deposit, Gangdise metallogenic belt

矽卡岩矿床是世界上 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Sn、Ag、Au 等金属矿产和金云母、透辉石、硅灰石等非金属矿产的重要来源之一(Meinert, 1997; Meinert et al., 2005)。中国是矽卡岩矿床最为发育、分布最为广泛的国家之一,这类矿床具有重要的经济价值和工业意义(Zhao et al., 2003)。由于矽卡岩矿床多期、多阶段的复杂形成过程,关于其矿床成因分类、蚀变矿化分带以及成矿过程中物理化学条件的变化等问题一直是国内外研究的热点。

冈底斯成矿带是夹持于雅江缝合带和班-怒缝合带之间的世界级成矿带(唐菊兴等, 2012),主要的矿床类型为斑岩型和矽卡岩型(唐菊兴等, 2014)。近年来,在国家基础地质调查和商业性勘查的推动下,冈底斯成矿带内找矿成果突出,地质工作者发现并评价了一系列具有一定规模的矿集区(唐菊兴等, 2017)。冈底斯成矿带南缘主要为大型-超大型斑岩型铜多金属矿床,如甲玛铜多金属矿床、驱龙铜(钼)矿床、邦浦铜(钼)矿床以及厅宫-冲江铜矿床等(杨志明等, 2008; 唐菊兴等, 2010)。成矿带北缘则以矽卡岩型铅锌银矿床为主,如新嘎果、蒙亚啊、洞中拉、亚贵拉、龙玛拉等,这一系列矿床构成了与南带平行的念青唐古拉矽卡岩型铅锌银多金属成矿带(Wang et al., 2015),值得注意的是,该带东段发育了大量远

端矽卡岩型矿床,目前对该类型矿床的研究还相对薄弱。

龙玛拉铅锌多金属矿床是念青唐古拉成矿带东段一个典型的远端矽卡岩矿床(图 1a、b),矿体呈层状、似层状赋存于来姑组砂板岩与大理岩接触带的透辉石矽卡岩中,具有矽卡岩矿床的特征。前人对龙玛拉矿床的地质特征(付强等, 2014)、成矿物质来源(Wang et al., 2015)、流体包裹体(林鑫, 2015)以及地质年代学(Wang et al., 2017)等进行了初步的研究,但对其成因还存在一定争议,对其蚀变-矿化分带、矿物学及矿物地球化学特征等方面研究还不够深入。本文试图通过对龙玛拉矿床详细的野外地质调查、采场及岩芯编录,结合岩相学和矿相学研究、电子探针测试等手段,查明金属矿物特征和矿化分带,厘清矿物生成顺序,讨论金属矿物的矿物学和矿物地球化学特征对矿床形成的指示意义,为该成矿带同类型矿床成矿模式的建立奠定基础,并为矿床下一步勘查评价提供一定依据。

1 矿床地质特征

西藏龙玛拉铅锌多金属矿床位于西藏自治区嘉黎县与墨竹工卡县交界处,属那曲市嘉黎县绒多乡

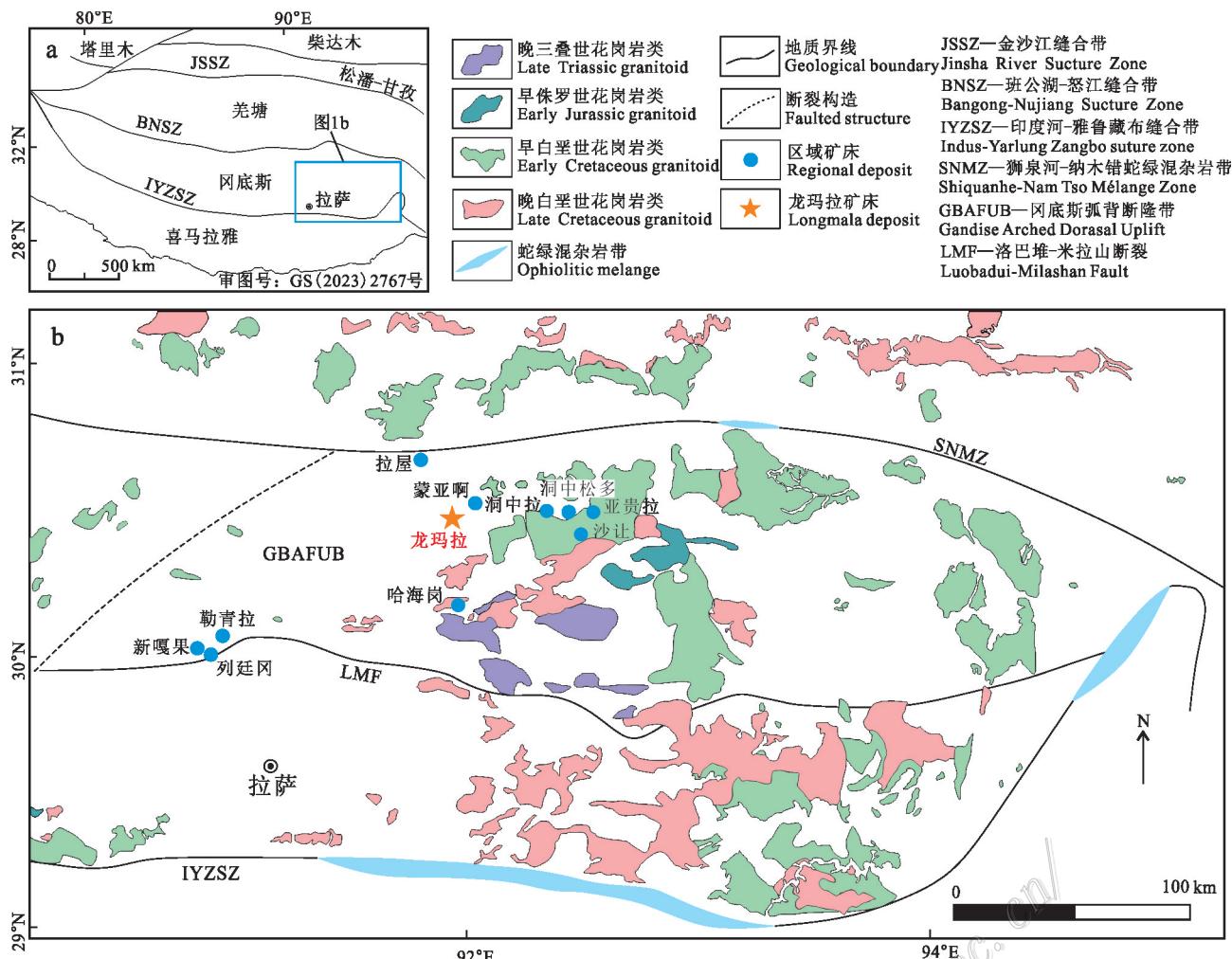


图1 青藏高原大地构造格架图(a)和念青唐古拉成矿带东段地质简图(b)(据Zhu et al., 2011修改)

Fig. 1 Tectonic framework map of the Qinghai-Tibet Plateau (a) and generalized geological map of eastern Nyainqntanglha metallogenetic belt (b) (modified after Zhu et al., 2011)

管辖,大地构造上隶属于西藏特提斯-喜马拉雅构造域一级构造单元冈底斯-念青唐古拉板片中部隆格尔-念青唐古拉中生代岛链带(冈底斯弧背断隆带)东段(潘桂棠等,2009)。

矿区出露地层较为简单,为上石炭统一下二叠统来姑组(C_2-P_1)和第四系(Q)。来姑组岩性以灰色-深灰色灰岩、粉砂岩夹砂岩为主,局部灰岩呈透镜状产出,分布在矿区大部分区域;第四系主要为冰碛物和冲积物,分布在矿区南部冰斗及南东河沟处(图2)。矿区内地质构造较为简单,褶皱较为发育,矿区构造格架主要受到区域从属的二级褶皱控制,集中在矿区中部,未见断裂构造。矿区未见岩浆岩出露,仅施工钻孔ZK474深部(750 m处)见黑云母二长花岗岩,其锆石U-Pb年龄为 (55.7 ± 0.3) Ma,矿床辉钼矿

模式年龄为 (53.3 ± 3.7) Ma(Wang et al., 2017),为印度-欧亚大陆主碰撞造山成矿作用的产物(Hou et al., 2009)。矿床成岩成矿时代一致,表明黑云母二长花岗岩为该矿床的成矿岩体(林鑫等,2014)。

矿床矿化类型为矽卡岩型铅锌银矿化,伴生铁铜矿化,累计查明的Pb+Zn金属量19.3万t,平均品位11.05%,银金属量413.8 t,平均品位237.03 g/t,铁铜也有较高的品位和金属量。矿床分为铅锌铜矿体和铁矿体,二者相互独立,但铅锌铜矿体深部常过渡为铁矿化。矿区主要有Pb-1、Pb-2、Pb-5三条铅锌铜矿体和Fe-9、Fe-10两条铁矿体,其中Pb-2为矿床主矿体,其呈似层状近于直立产出于上石炭统一下二叠统来姑组(C_2-P_1)砂岩与大理岩接触带形成的矽卡岩中,是本文的主要研究对象。

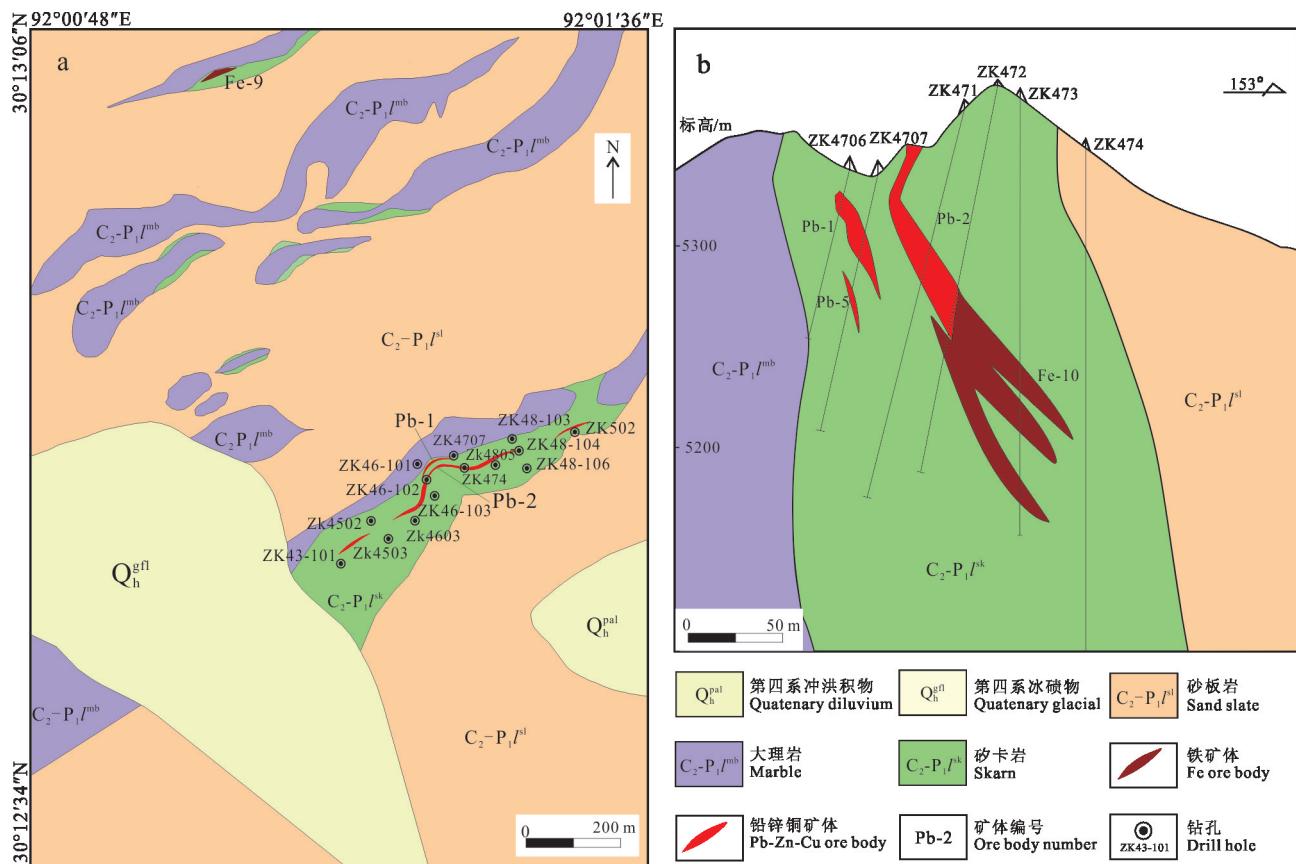


图2 龙玛拉矿床地质简图(a)和47号勘探线剖面图(b)

Fig. 2 Simplified geological map (a) and geological section at No. 47 prospecting line (b) of the Longmala deposit

铅锌铜矿石多为浸染状构造(图3b、c),少数为条带状(图3d)或块状构造(图3e),磁铁矿矿石多为致密块状构造(图3f、g),少数为浸染状(图3h)或条带状构造(图3i);镜下观察显示,矿石多具半自形-自形粒状结构,常见含矿流体交代形成的残余结构、骸晶结构以及固溶体分解形成的星状结构(图5)、叶片状结构(图5)、格状结构等。主要的金属矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿和磁黄铁矿,同时存在少量的斜方辉铅铋矿、自然铋等铋矿物及白铁矿、铜蓝、孔雀石等次生矿物;非金属矿物主要为石榴子石、单斜辉石、绿帘石、阳起石等矽卡岩矿物以及石英、方解石、绿泥石和云母等。矽卡岩以大量出现单斜辉石为特点,单斜辉石以透辉石为主,钙铁辉石次之,石榴子石以钙铝榴石和钙铁榴石为主。

矿区围岩蚀变主要为矽卡岩化、大理岩化、硅化及黄铁矿化,通过对矿区野外地质调查和采场编录发现,矿体附近发育的围岩蚀变具有明显的宏观分带现象(图3a),具体表现为从砂板岩一侧往大理岩一侧,依次发育角岩、石榴子石矽卡岩、透辉石石榴

子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、硅灰石矽卡岩、大理岩化蚀变,且石榴子石矽卡岩和硅灰石矽卡岩规模明显小于透辉石矽卡岩。

结合本次精细的野外地质调查研究以及室内细致的岩石学、岩相学及矿相学观察、鉴定、分析、总结和描述工作,笔者将龙玛拉矽卡岩矿床的成矿过程划分出热液成矿期和表生期,其中热液成矿期分为成矿前阶段、氧化物成矿阶段、硫化物成矿阶段以及成矿后阶段(图4)。成矿前阶段主要形成石榴子石、单斜辉石等无水硅酸盐矿物,代表了龙玛拉矿床矽卡岩形成的最早阶段;氧化物成矿阶段主要为绿帘石和阳起石等含水硅酸盐矿物交代进化蚀变矽卡岩形成的石榴子石和单斜辉石,同时在温度降低和氧化条件下,生成大量磁铁矿;硫化物阶段以广泛发育闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿以及斜方辉铅铋矿等金属硫化物为特征,伴生晚期退化蚀变产物如石英、方解石、绿泥石等;成矿后阶段仅生成少量的低温蚀变矿物,主要为无矿的方解石-石英细脉或网脉穿切早先形成的矽卡岩;在表生期,黄铁矿和磁

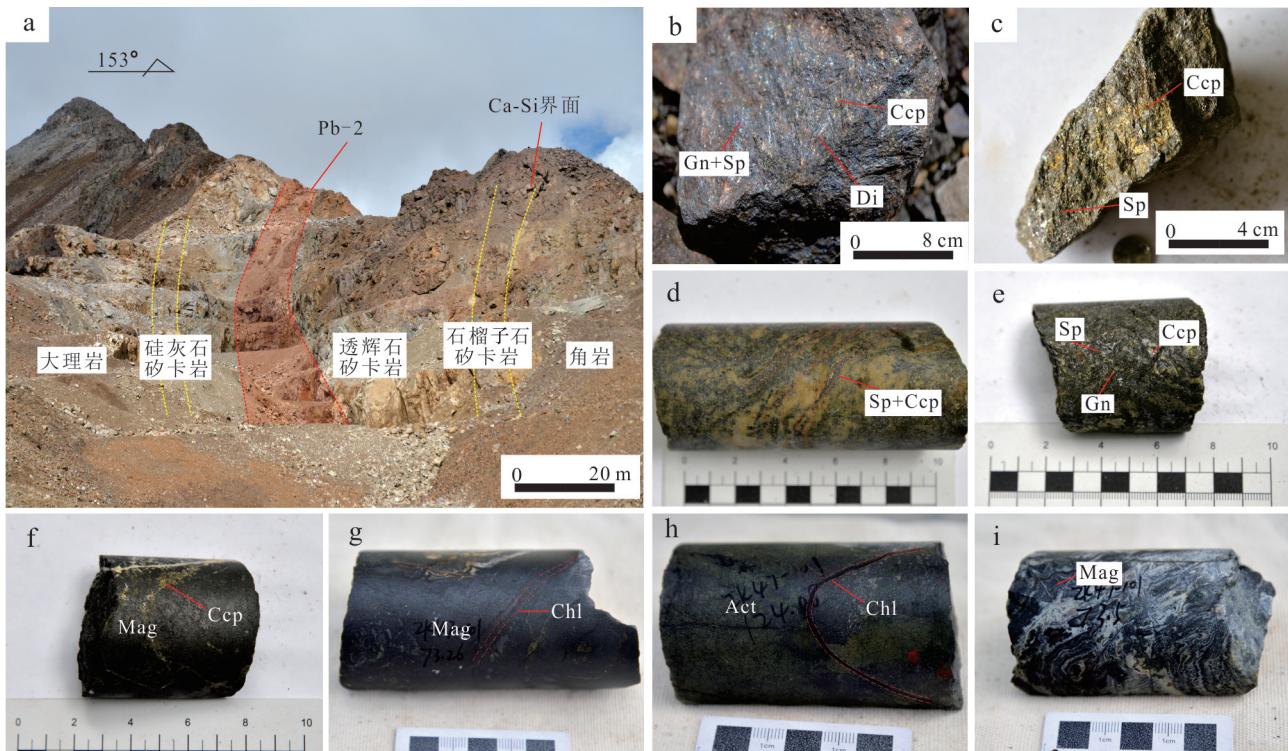


图3 龙玛拉矿床蚀变分带及矿石特征

a. 龙玛拉矿区露天采场剖面;b、c. 浸染状铅锌铜矿石;d. 条带状铜锌矿石;e. 块状铅锌铜矿石;f、g. 块状铁矿石;h. 浸染状铁矿石;

i. 条带状铁矿石

Di—透辉石; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Ccp—黄铜矿; Mag—磁铁矿; Act—阳起石; Chl—绿泥石

Fig. 3 Mineral/alteration zoning and ore features of the Longmala deposit

a. Distance view of the open pit; b, c. Disseminated Pb-Zn-Cu ore; d. Banded Zn-Cu ore; e. Massive Pb-Zn-Cu ore; f, g. Massive Fe ore;

h. Disseminated Fe ore; i. Banded Fe ore

Di—Diopside; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Mag—Magnetite; Act—Actinolite; Chl—Chlorite

黄铁矿形成次生白铁矿, 黄铜矿蚀变形成孔雀石。

2 样品采集和电子探针分析

本次研究对地表采坑出露的矿体附近以及不同深度钻孔的岩石、矿石进行了系统采样, 包括2件露天采场样品和20件钻孔岩芯样品。样品首先进行详细的野外观察和记录描述, 再挑选一些磨制光薄片, 进行显微鉴定。在此基础上, 对典型的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等金属矿物进行电子探针分析测试。

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室电子探针室完成, 分析仪器为JXA-8230型电子探针。该仪器的工作条件为: 加速电压为20 kV, 加速电流为20 nA, 束斑直径为5 μm, 测试数据利用ZAF校正处

理, 单个样品的元素峰测试时间Au、Ag为20 s, 其他元素为10 s, 上下背景测试时间Au、Ag为10 s, 其他为元素5 s。以天然矿物和合成材料为标准样品, 测试标准样品包括斜方砷铁矿(As)、硒化铜(Se)、硫化锗(Ge)、黄铁矿(Fe、S)、方铅矿(Pb)、闪锌矿(Zn)、辉铋矿(Bi)、黄铜矿(Cu)、金银矿(Au、Ag)、针镍矿(Ni)和辉锑矿(Sb)。

3 金属矿物特征

3.1 方铅矿

方铅矿是龙玛拉矿床最主要的金属矿物之一, 手标本上呈铅灰色, 立方体完全解理, 镜下呈纯白色, 半自形-他形粒状集合体, 黑三角孔比较发育, 具擦痕, 常与闪锌矿密切共生(图5a), 交代与其共生的大部分矿物, 常见交代黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿(图

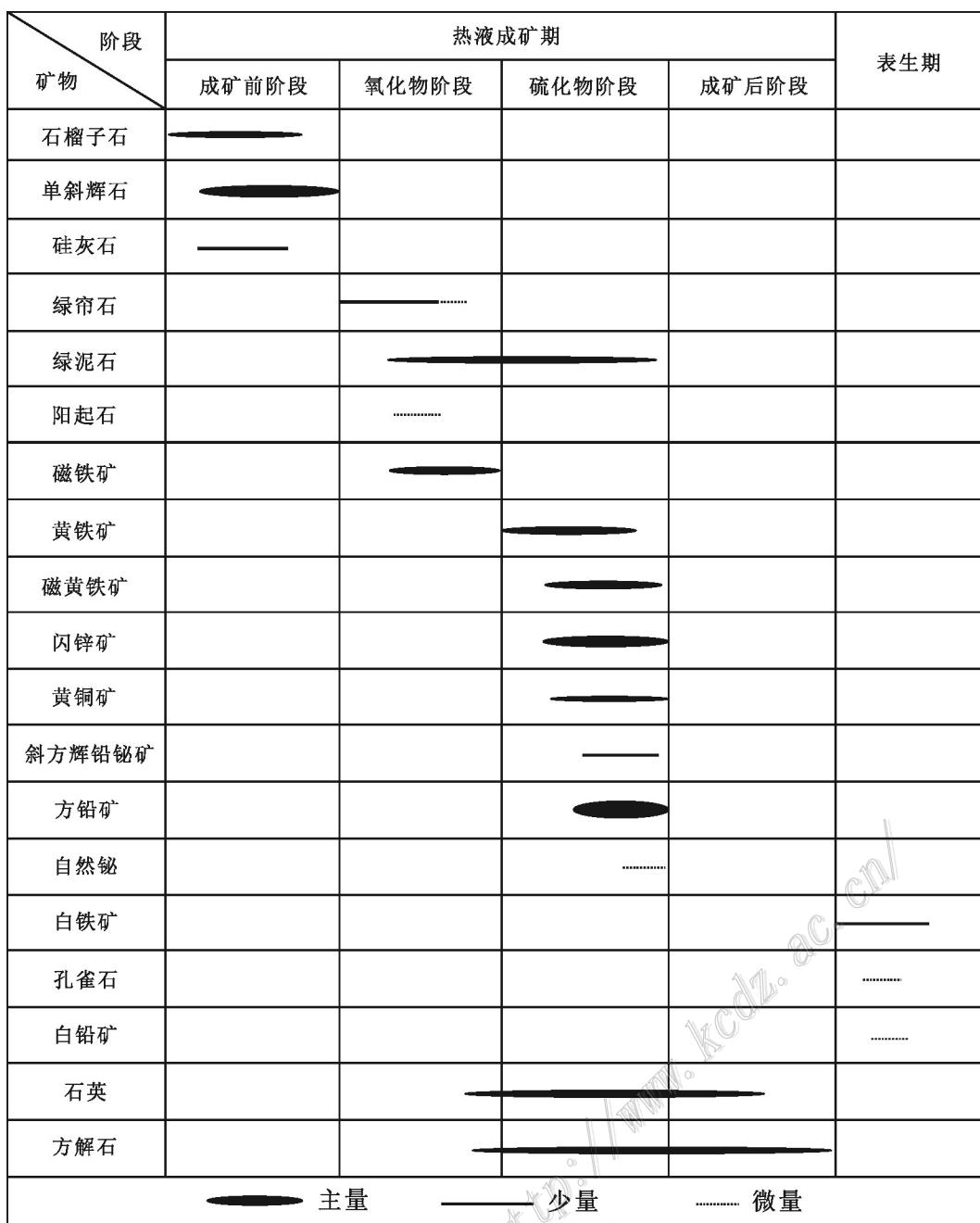


图4 龙玛拉矿床成矿期与成矿阶段

Fig. 4 Metallogenetic period and stage of the Longmala deposit

5c)、闪锌矿形成的交代文象结构、港湾状结构、孤岛状结构、骸晶结构等。

方铅矿电子探针分析结果见表1,大多数方铅矿富银, $w(\text{Ag})$ 从低于检测限至0.54%,平均值为0.21%,Pb和S含量较为均匀, $w(\text{Pb})$ 变化范围为84.79%~86.61%,平均值为85.75%; $w(\text{S})$ 变化范围为13.11%~13.87%,平均值为13.41%,其分子式为 $\text{Pb}_{0.95\sim1.01}\text{S}$ 。

3.2 闪锌矿

手标本上呈黑色,半金属光泽,镜下呈灰色,均质性,内反射明显,为红褐色-棕红色,他形粒状集合体,常见星点状黄铜矿(图5d)、磁黄铁矿在闪锌矿中呈固溶体分离结构,也可见被方铅矿沿边缘交代(图5b),部分随方解石脉与磁铁矿呈不规则接触(图5f)。

闪锌矿电子探针分析结果见表2,龙玛拉闪锌矿均富铁, $w(\text{Zn})$ 变化范围为45.65%~58.89%,平均值为53.58%; $w(\text{Fe})$ 变化范围为7.32%~13.53%,平均值

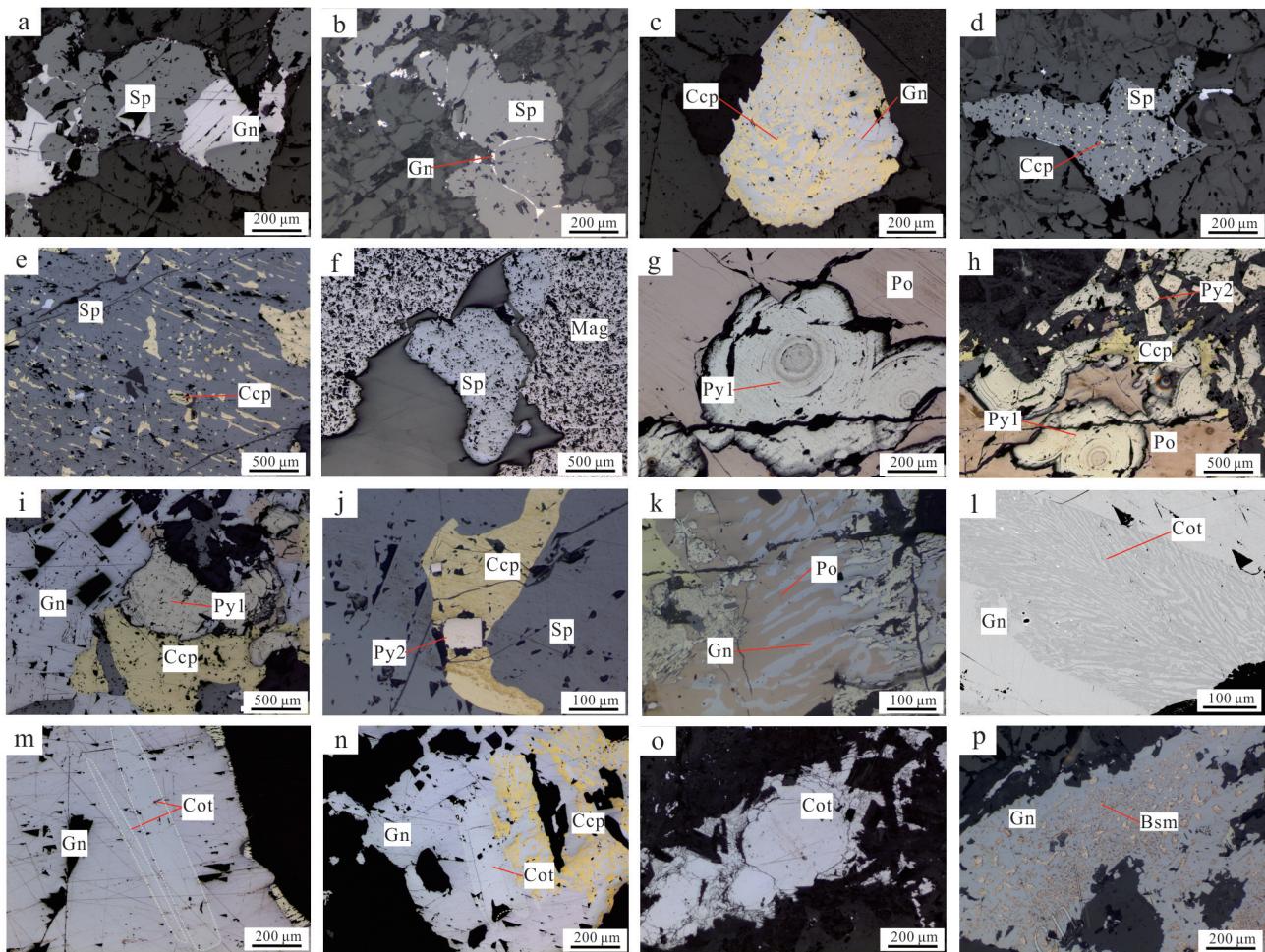


图5 龙玛拉矿床金属矿物镜下特征

a. 方铅矿与闪锌矿共生; b. 方铅矿沿边缘交代闪锌矿; c. 黄铜矿被方铅矿交代; d、e. 黄铜矿呈叶片状从闪锌矿中出溶; f. 方解石-硫化物脉与磁铁矿接触; g. 第1期胶状黄铁矿; h. 胶状黄铁矿(Py1)和粒状黄铁矿(Py2); i. 胶状黄铁矿被方铅矿和黄铜矿交代; j. 粒状黄铁矿被黄铜矿包裹; k. 方铅矿与磁黄铁矿共生; l. 方铅矿与斜方辉铅铋矿交生; m、n. 自形板状斜方辉铅铋矿; o. 针簇状斜方辉铅铋矿; p. 方铅矿中分布密集的自然铋

Gn—方铅矿; Sph—闪锌矿; Ccp—黄铜矿; Mag—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Cot—斜方辉铅铋矿; Bsm—自然铋

Fig. 5 Microscopic characteristics of metal minerals from the Longmala deposit

a. Galena is associated with sphalerite; b. Galena metasomatize sphalerite along the edge; c. Galena metasomatize chalcopyrite; d, e. Chalcopyrite exsolution from sphalerite; f. Calcite-sulfide veins in contact with magnetite; g. First stage colloform pyrite; h. Colloform pyrite (Py1) and granular pyrite (Py2); i. Chalcopyrite and galena metasomatize first stage pyrite; j. Chalcopyrite encloses second stage pyrite; k. Galena is associated with pyrrhotite; l. Galena and idiomorphic cosalite; m, n. Euhedral slaty cosalite; o. Needle shaped cosalite; p. Galena contains a dense distribution of bismuth

Gn—Ganela; Sph—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Mag—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Cot—Cosalite; Bsm—Bismuth

为10.64%; $w(\text{S})$ 变化范围为32.37%~34.16%, 平均值为33.15%, 其分子式为 $\text{Zn}_{0.66\text{--}0.89}\text{Fe}_{0.13\text{--}0.23}\text{S}$ 。

3.3 黄铜矿

手标本上黄铜矿呈深铜黄色, 可见暗黄或斑状锖色, 镜下呈铜黄色, 他形粒状集合体, 主要位于铅锌铜矿体中, 多与方铅矿、闪锌矿共生, 也可见黄铜矿-磁黄铁矿脉穿插于磁铁矿体或沿裂隙充填, 常沿矿物边缘交代闪锌矿、黄铁矿, 或呈乳滴状、竹叶

状(图5e)、格状固溶体分离物分布在闪锌矿中, 被方铅矿交代呈文象结构, 在近地表被交代形成孔雀石、蓝辉铜矿等。

电子探针分析结果见表3, $w(\text{Cu})$ 变化范围为33.87%~35.96%, 平均值为34.74%; $w(\text{Fe})$ 变化范围为29.48%~30.98%, 平均值为30.53%; $w(\text{S})$ 变化范围为33.15%~35.98%, 平均值为34.49%, 其分子式为 $\text{Cu}_{0.95\text{--}1.08}\text{Fe}_{0.94\text{--}1.07}\text{S}_2$ 。

表1 方铅矿电子探针分析结果
Table 1 Results of electron probe analysis of galena

样品编号	w(B)/%												
	Se	Ge	Ag	Cd	Fe	Mn	Cu	Zn	S	Pb	Te	Ni	总和
ZK47-101-12.1-1	0.03	0.04	0.26	0.25	0.07	0.03	-	0.08	13.11	85.75	0.06	0.02	99.69
ZK4603-14.3	-	0.10	0.15	0.26	0.01	-	0.03	-	13.45	85.59	0.05	0.01	99.64
ZK4905-8.4-1	0.04	0.03	0.08	0.28	0.04	-	0.02	0.04	13.68	86.09	0.01	-	100.30
ZK48-104-69.3-1	-	0.08	0.27	0.22	0.09	-	0.11	-	13.41	85.84	0.03	0.02	99.97
ZK47-101-10.9	0.01	0.09	0.12	0.32	-	0.04	-	0.03	13.87	84.79	-	-	99.18
ZK46-102-34.75	-	-	0.30	0.30	0.07	-	0.02	0.02	13.28	85.60	0.01	-	99.59
ZK46-102-12.95-1	-	0.07	0.23	0.24	0.01	0.01	-	-	13.50	85.31	0.05	0.02	99.52
ZK46-102-12.95-2	-	0.03	-	0.24	0.04	-	-	-	13.51	85.63	0.02	0.05	99.59
ZK4905-64.8	0.06	0.08	0.10	0.31	0.04	-	0.07	-	13.29	85.51	0.05	-	99.56
ZK48-106-14.0-1	-	0.01	0.54	0.26	0.02	-	0.01	0.06	13.30	86.03	0.06	-	100.28
ZK48-106-14.0-2	0.02	0.01	0.36	0.34	-	0.04	-	0.02	13.38	85.66	0.01	-	99.85
ZK48-104-73.4	-	0.04	0.04	0.24	-	-	-	0.03	13.37	85.36	0.04	-	99.14
ZK4905-13.8	0.02	0.09	-	0.28	-	-	-	-	13.30	85.95	0.02	-	99.66
ZK46-102-37.2	0.05	0.05	0.02	0.31	-	-	-	0.01	13.24	85.62	0.03	-	99.35
PM03-0401-1	-	0.07	0.23	0.29	0.02	-	-	-	13.74	85.10	0.05	0.02	99.94
PM03-0401-2	-	0.05	0.12	0.30	0.02	-	0.06	0.03	13.22	85.69	0.05	-	99.56
PM02-0602	0.04	0.05	0.26	0.27	-	0.04	-	-	13.32	86.02	0.05	-	99.86
ZK43-101-38.4	0.02	0.07	-	0.23	0.04	-	-	0.14	13.37	86.61	0.06	0.01	100.55
ZK46-103-2.08	0.02	0.02	0.38	0.32	-	-	0.01	-	13.50	85.23	0.02	0.04	99.45
ZK46-101-7.62-1	0.07	-	0.07	0.25	0.04	-	-	0.21	13.23	86.04	0.02	-	99.94
ZK46-101-7.62-2	0.03	0.06	0.15	0.32	-	-	-	-	13.56	85.88	0.06	0.02	100.11

注:“-”为低于检出限,余表同。

3.4 黄铁矿

黄铁矿镜下呈黄白色,均质性,自形-他形粒状、胶状均可见,具有3个期次,与各种金属硫化物伴生,第1期黄铁矿(Py1)为胶状黄铁矿,粒径0.2~1mm,反射率稍低,晶体生长面上吸附有细微杂质呈环带结构(图5g),被磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物交代呈残余结构,主要分布于矿体浅部近地表;第2期黄铁矿(Py2)为自形立方体黄铁矿(图5h),粒度大小不一,反射率高,切面干净,常被包裹于黄铜矿内部(图5j),呈包含结构,部分被第3期黄铁矿和其他硫化物交代;第3期黄铁矿(Py3)为他形黄铁矿,交代先形成的黄铁矿、磁黄铁矿等。

黄铁矿电子探针分析结果见表4,3个期次的黄铁矿在主量成分上没有明显差异,但Py1的Co、Ni含量相对于Py2较高,w(Fe)变化范围为45.62%~47.26%,平均值为46.40%;w(S)变化范围为52.80%~53.55%,平均值为53.22%,其分子式为 $\text{Fe}_{0.98\sim1.03}\text{S}_2$ 。

3.5 磁黄铁矿

磁黄铁矿在矿体浅部及来姑组砂板岩中均常见,手标本上呈暗古铜黄色,具弱磁性,镜下呈玫瑰

黄微带粉褐色,强非均质性,双反射显著,多色性明显,他形粒状集合体,少数见乳滴状固溶体分离物分布于闪锌矿中,铅锌铜矿石和磁铁矿矿石中均可见,常见被黄铜矿、方铅矿交代。

磁黄铁矿电子探针分析结果见表5,w(Fe)变化范围为58.83%~60.15%,平均值为59.59%,常有Co和Ni类质同象置换Fe,w(Co)变化范围0.08%~0.21%,平均值为0.14%,w(Ni)变化范围从低于检测限至0.27%,平均值为0.06%,w(S)变化范围为39.24%~41.13%,平均值为39.80%,其分子式为 $\text{Fe}_{0.83\sim0.88}\text{S}$ 。

3.6 锰矿物

斜方辉铅铋矿:纯白色-灰白色,显著非均质性,显弱多色性,常与方铅矿密切共生,呈柱状被包含在方铅矿中(图5m、n),或被方铅矿交代呈交代文象结构(图5l),独立存在时呈针状、束状集合体(图5o),部分分解形成自然铋。其电子探针分析结果见表6,斜方辉铅铋矿同样富银,w(Ag)变化范围为0.13%~0.31%,平均值为0.22%,w(Pb)变化范围为36.90%~47.46%,平均值为43.48%,w(Bi)变化范围为

表2 闪锌矿电子探针分析结果

Table 2 Results of electron probe analysis of sphalerite

样品编号	w(B)/%											
	As	Se	Ga	Au	Cd	Sb	Fe	Mn	Zn	Co	S	总和
ZK47-101-12.1-1	-	0.03	-	0.03	0.01	-	9.37	2.72	54.70	0.05	33.48	100.39
ZK4905-8.4-1	0.03	0.01	-	-	0.01	-	13.07	5.44	47.66	0.02	33.63	99.87
ZK48-104-69.3-1	0.03	-	0.06	0.04	0.01	-	12.28	1.52	52.34	0.01	33.81	100.10
ZK4603-16.4	-	0.05	0.03	-	0.06	0.01	13.53	5.76	45.65	0.03	34.16	99.26
ZK47-101-10.9	-	-	-	-	0.06	-	8.43	0.51	58.02	0.03	33.39	100.43
ZK46-102-12.95-1	-	-	-	-	-	0.01	9.12	0.50	57.47	0.03	33.49	100.64
ZK46-102-12.95-2	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	-	9.84	0.47	56.20	0.07	33.04	99.74
ZK4905-64.8	0.03	-	0.06	-	-	-	13.33	3.92	48.64	0.06	32.96	99.01
ZK48-106-14.0-1	-	0.08	0.01	0.08	0.03	-	12.00	1.52	52.77	0.04	33.72	100.28
ZK48-106-14.0-2	0.07	-	-	-	0.04	0.05	12.74	1.95	51.12	0.05	33.39	99.47
ZK4805-74.41-1	-	0.01	-	0.06	0.02	-	7.58	0.76	58.47	0.14	33.72	100.81
ZK4805-74.41-2	0.03	-	-	-	0.02	-	7.70	0.72	58.89	0.10	32.56	100.08
ZK48-104-73.4	-	0.08	-	0.05	0.04	-	12.53	1.25	52.44	0.05	33.44	99.95
PM03-0401-1	-	0.03	-	0.08	0.02	0.01	9.65	3.18	54.07	0.06	32.61	99.75
PM03-0401-2	0.02	-	-	0.02	0.06	0.02	10.42	2.88	53.13	0.03	32.65	99.28
ZK43-101-38.4	0.02	-	-	-	-	-	12.45	4.23	49.79	0.05	33.13	99.71
ZK46-101-7.62	-	-	-	0.03	0.03	-	7.32	1.13	58.40	0.05	32.39	99.36
ZK48-106-14.0	0.01	0.04	-	0.02	-	0.01	10.57	1.20	56.05	0.07	32.37	100.32
ZK48-106-38.4	-	-	-	0.04	0.08	-	10.36	1.03	55.44	0.06	32.71	99.82

表3 黄铜矿电子探针分析结果

Table 3 Results of electron probe analysis of chalcopyrite

样品编号	w(B)/%							总和
	Au	Sb	Fe	Cu	Zn	Co	S	
ZK47-101-12.1	-	0.04	30.61	35.96	0.07	0.03	34.16	100.91
ZK4603-14.3	0.13	0.03	30.90	34.16	0.03	-	34.87	100.22
ZK4905-8.4-1	-	-	30.72	35.09	0.09	0.07	34.59	100.59
ZK48-104-69.3	0.03	-	30.55	34.59	0.06	0.03	34.63	99.89
ZK4603-16.4	0.02	-	29.48	33.87	0.05	0.05	35.98	99.53
ZK46-102-34.75	-	-	30.66	34.38	0.04	0.03	34.34	99.49
ZK47-101-25	0.01	-	30.31	34.99	0.09	0.04	34.31	99.85
ZK4905-64.8	-	0.04	30.98	35.43	0.05	0.06	33.15	99.81
ZK48-106-14.0	0.07	-	30.54	34.31	0.07	0.07	34.51	99.61
ZK48-104-73.4	-	0.01	30.49	34.61	0.05	0.06	34.56	99.86
PM03-0401-1	0.02	-	30.76	34.51	0.17	0.06	34.65	100.35
PM03-0401-2	0.02	-	30.54	34.70	0.14	0.01	34.77	100.25
ZK43-101-38.4	-	-	30.79	34.90	0.07	0.06	33.94	99.81
ZK46-103-2.08	0.04	0.01	29.94	34.92	-	0.04	34.24	99.30
ZK4502-6.1	0.08	0.05	30.68	34.75	0.11	0.06	34.69	100.47

34.96%~45.50%，平均值为 38.75%，w(S)变化范围 14.88%~15.92%，平均值为 15.58%，其化学式为 $Pb_{1.79\sim2.33}Bi_{1.70\sim2.19}S_5$ 。

自然铋：亮白色带玫瑰黄色，弱非均质性，常呈树枝状与方铅矿交生(图5p)。其电子探针分析结果见表4，w(Bi)变化范围为 97.72%~98.71%，平均值为

表4 黄铁矿电子探针分析结果
Table 4 Results of electron probe analysis of pyrite

样品编号	w(B)/%							
	As	Au	Sb	Fe	Co	S	Ni	总和
ZK48-104-69.3 Py1-1	0.02	-	0.01	46.06	0.12	53.25	0.03	99.53
ZK48-104-69.3 Py1-2	-	0.04	-	46.74	0.10	53.18	0.02	100.22
ZK48-104-69.3 Py1-3	-	-	-	46.64	0.12	53.10	0.06	100.05
ZK47-101-25 Py1	0.04	-	0.02	46.64	0.20	53.36	0.13	100.46
ZK4502-6.1Py1-1	-	0.08	0.02	45.73	0.15	53.46	0.03	99.97
ZK4502-6.1Py1-2	0.03	-	-	46.27	0.12	53.55	-	100.04
ZK4502-6.1Py1-3	-	0.05	-	45.98	0.11	53.18	0.04	99.54
ZK43-101-38.4 Py1-1	-	-	-	46.36	0.20	53.02	0.17	99.86
ZK43-101-38.4 Py1-2	0.05	-	0.01	46.26	0.18	53.01	0.19	99.75
ZK46-103-2.08 Py2	0.05	0.02	-	46.92	0.05	53.32	-	100.36
ZK4603-16.4 Py2	-	-	-	45.83	0.06	53.40	-	99.32
ZK4502-6.1 Py2-1	0.02	0.09	-	47.01	0.08	53.27	-	100.47
ZK4502-6.1 Py2-2	0.03	0.03	-	47.26	0.07	52.80	-	100.20
ZK47-101-25 Py3	0.03	0.05	-	46.82	0.13	53.07	0.11	100.26
ZK4502-6.1 Py3	0.02	-	-	45.62	0.13	53.40	0.04	100.38
ZK4603-14.3 Py3	0.15	0.09	0.05	46.30	0.07	53.21	0.02	99.89

表5 磁黄铁矿电子探针分析结果
Table 5 Results of electron probe analysis of pyrrhotite

样品编号	w(B)/%								
	As	Au	Cd	Fe	Cu	Co	S	Ni	总和
ZK4905-8.4	0.07	-	-	59.69	0.07	0.09	40.08	-	99.93
ZK47-101-25	0.04	0.05	0.03	58.83	-	0.18	40.14	0.25	99.52
ZK48-104-73.4	0.02	0.15	0.06	59.70	-	0.17	39.51	-	99.60
PM03-0401	-	0.03	-	60.15	-	0.16	39.49	0.02	99.89
ZK4502-6.1	0.02	0.06	-	59.72	-	0.12	39.28	0.04	99.30
ZK4502-6.1	-	-	-	59.80	0.02	0.12	39.66	-	99.77
ZK4905-8.4	-	0.03	0.02	59.43	0.20	0.17	40.53	-	100.38
ZK48-104-69.3	0.03	0.03	-	59.40	-	0.12	41.13	0.02	100.72
ZK47-101-25	-	-	-	59.37	0.19	0.21	39.63	0.27	99.77
ZK46-102-34.75	-	-	-	59.68	0.06	0.15	39.65	0.10	99.65
ZK46-103-38.4	-	-	-	60.06	-	0.08	39.37	0.03	99.54
ZK4905-12.1	0.08	0.07	0.04	59.37	-	0.12	39.24	-	99.00

98.81%。

4 讨 论

4.1 矿化分带特征

通过详细的野外地质调查和对Pb-2矿体系统采样、镜下观察及矿床各钻孔矿化元素品位数据发现,矿体发育明显的纵向矿化分带。在主矿体上段(>5250 m),矿石矿物共生组合以方铅矿、闪锌矿为

主,方铅矿中多富银,可见少量黄铜矿,w(Pb+Zn)可达20%以上,w(Ag)多大于300 g/t;在主矿体中部(5200~5250 m),矿石矿物共生组合以闪锌矿、黄铜矿为主,可见少量方铅矿和极少量磁铁矿,矿化元素以锌铜为主;在主矿体中下部(5150~5200 m),矿石矿物共生组合以黄铜矿和磁铁矿为主,矿化元素以铁铜为主,再往下则过渡为磁铁矿矿体。方铅矿主要分布在矿体顶部,闪锌矿则分布于中上部,黄铜矿分布于中部及中下部,磁铁矿分布于矿体底部。所以,其矿化元素

表6 锑矿物电子探针分析结果
Table 6 Results of electron probe analysis of bismuth minerals

样品编号	$w(B)/\%$							总和
	Ag	Cd	Bi	Fe	Zn	S	Pb	
ZK47-101-12.1	0.05	-	98.71	0.03	-	0.02	-	98.81
ZK48-104-69.3	0.05	-	97.72	-	0.04	-	-	97.81
PM04-0102-1	0.13	0.04	36.57	0.14	0.02	15.89	46.29	99.08
PM04-0102-2	0.29	0.08	36.62	0.27	-	15.84	44.88	97.98
PM04-0102-3	0.31	0.17	36.72	0.13	-	15.18	45.61	98.13
PM04-0102-4	0.17	0.12	34.96	-	0.05	15.79	47.46	98.56
ZK46-102-37.2-1	0.26	0.10	45.50	0.11	-	15.92	36.90	98.79
ZK46-102-37.2-2	0.18	0.13	42.10	0.44	1.42	14.88	39.73	98.88

自矿体顶部往下依次发育铅锌(银)矿化、锌铜矿化、铁铜矿化和铁矿化的矿化分带特征,表现出从远离成矿中心(矿体上部)到矿化中心(矿体下部),从低温元素组合到高温元素组合和矿物组合的分布规律。

4.2 金属矿物成因及其对成矿环境的示踪

闪锌矿中常有 Fe、Mn、Cd、Ga、Ge、In、Se、Te 等多种类质同象代替元素,其元素组成特征及其特征比值与其形成温度密切相关,高温条件下(岩浆或火

山热液成因)形成的闪锌矿富集 Fe、Mn、In,亏损 Ga、Ge、Te 和 Tl 等元素(Cook et al., 2009)。龙玛拉矿床闪锌矿具有较高的 Mn、Fe 含量, $w(\text{Mn})$ 从 0.06%~5.76%, 平均达 2.04%, $w(\text{Fe})$ 从 7.32%~13.53%, 平均达 10.64%, 靠近富铁闪锌矿端员,且 Fe、Mn 与 Zn 含量呈明显负相关关系(图 6a、b),表明闪锌矿中有较多的 Fe、Mn 类质同象替代 Zn。Zn/Fe 比值同样对闪锌矿形成温度具有一定指示意义,前人研究表明

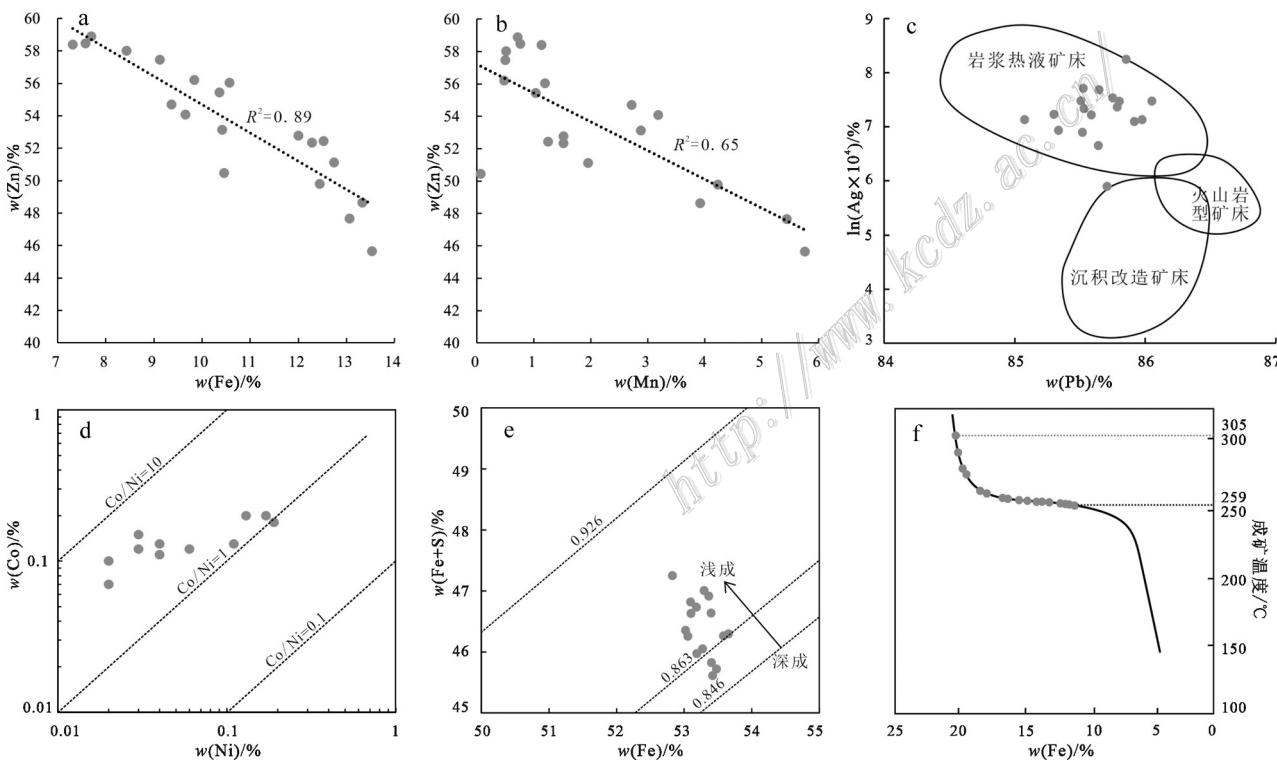


图6 龙玛拉矿床闪锌矿 Zn-Fe(a)、Zn-Mn(b)关系图解、方铅矿成因图解(c)、黄铁矿 Co-Ni 关系图解(d)、黄铁矿(As+S)-Fe 图解(e)和闪锌矿温度估算(f)

Fig. 6 Sphalerite Zn-Fe (a) and Zn-Mn (b) relationship diagram, genetic diagram of galena (c), pyrite Co-Ni (d) and (As+S)-Fe (e) relationship diagram and sphalerite temperature estimation diagram (f) of the Longmala deposit

低温闪锌矿 Zn/Fe 比值常大于 100, 中温闪锌矿 Zn/Fe 比值集中在 10~100 之间, 高温闪锌矿 Zn/Fe 比值则小于 10(余琼华等, 1987), 龙玛拉闪锌矿 Zn/Fe 比值为 3.37~7.98, 平均为 5.29, 表明为高温闪锌矿。根据闪锌矿的 Fe 含量计算出龙玛拉闪锌矿 $w(\text{FeS})$ 为 11.56%~22.14%, 对应估算的成矿温度大约为 259~305°C (图 6f) (卢焕章, 1975), 与林鑫 (2015) 对龙玛拉矿床晚期石英-硫化物阶段石英和方解石流体包裹体测温得出的成矿温度结果 (274~336°C) 基本一致。

相较闪锌矿, 前人对方铅矿成分对矿床成因和成矿环境的示踪研究要薄弱得多, 张乾 (1987) 汇总了当时世界各地报道的铅锌矿床中的方铅矿微量元素数据, 并构建了 Sb-Bi-Ag 三元图解试图加以对比区分, 研究发现岩浆热液成因方铅矿通常富含银 ($w(\text{Ag}) > 1000 \times 10^{-6}$) 和铋, 而沉积改造成因方铅矿则不富集银, 锡含量相对最高 ($w(\text{Sb}) > 350 \times 10^{-6}$), 火山成因则位于二者之间, 使用其 lnAg-Pb 图解 (图 6c) 发现龙玛拉矿床方铅矿均落在岩浆热液区域, 显示出岩浆热液成因方铅矿的特点。

黄铁矿中 As、Co、Ni 等可以反映矿床形成环境, 对探究矿床成因具有指示意义 (陈光远等, 1987)。不同成因类型矿床中黄铁矿的 Co、Ni 含量及 Co/Ni 比值不同在探讨矿床成因类型及成矿作用时指示作用明显, 其中 Co/Ni 比值应用最广, 岩浆成因黄铁矿的 Co/Ni 比值多 > 5 , 沉积成因 Co/Ni 比值多 < 1 , 而岩浆热液成因的黄铁矿 Co/Ni 多集中在 1~5 之间 (Bralia et al., 1979), 龙玛拉矿床黄铁矿 Co、Ni 含量均较高, $w(\text{Co})$ 为 0.05%~0.20%, 平均为 0.12%, $w(\text{Ni})$ 从低于检测限到 0.19%, 平均为 0.05, 黄铁矿 Co/Ni 比值 0.95~5.00, 大部分 Co/Ni 比值集中在 1~5 之间 (图 6d), 具有岩浆热液成因黄铁矿的特点。黄铁矿 $\text{Fe}/(\text{As}+\text{S})$ 比值与其形成深度显示出较好的相关性, 相关系数为 0.87, 通常浅部形成的黄铁矿比值约为 0.926, 深部约为 0.846, 中部则在 0.863 左右 (周学武等, 2005), 龙玛拉黄铁矿 $\text{Fe}/(\text{As}+\text{S})$ 比值为 0.854~0.895 (图 6e), 平均值为 0.879, 表明其形成深度为中浅成, 热液胶状黄铁矿的出现也暗示是浅部成矿热液骤然冷却, 强烈过饱和结晶成因的特点 (任云生等, 2006; Yang et al., 2016; 徐亮等, 2019)。

研究表明, 磁黄铁矿具有六方、单斜、斜方 3 种同质多象变体, 以六方和单斜最为常见, 其中六方磁黄铁矿晶格缺位较少, 结构较为稳定, 其形成温度

高, Fe 原子百分数 $x(\text{Fe})$ 为 47.0%~47.8%, 对应的化学分子式为 $\text{Fe}_{0.887}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.916}\text{S}$; 而单斜磁黄铁矿的晶格缺位相对较多, 其形成温度较低, 一般低于 304°C, $x(\text{Fe})$ 为 46.5%~47.0%, 对应的化学分子式为 $\text{Fe}_{0.867}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.869}\text{S}$ (杨阳等, 2020)。龙玛拉矿床 $w(\text{Fe})$ 变化范围为 58.83%~60.15%, 平均值为 59.59%, $w(\text{S})$ 变化范围为 39.24%~41.13%, 平均值为 39.80%, 其分子式为 $\text{Fe}_{0.84 \sim 0.88}\text{S}$, 均为单斜磁黄铁矿, 属中低温成因。林鑫 (2015) 对龙玛拉流体包裹体 H-O 同位素研究发现晚期成矿流体有大气降水的加入, 单斜磁黄铁矿在矿体和围岩中均有出现, 表明成矿热液可能在经过远距离运移至近地表后, 在大气降水的加入下而发生了快速降温, 由于围岩为强还原性的碳质砂板岩, 形成了单斜磁黄铁矿, 并为闪锌矿方铅矿等硫化物的沉淀提供了条件。

闪锌矿、黄铁矿等金属矿物显示出龙玛拉矿床岩浆热液来源的特点, 矿床形成于中高温、浅地表环境。矿床出现了典型的硅灰石、石榴子石、透辉石等矽卡岩矿物组合和蚀变分带, 矿化分带表明热液中心位于矿体底部, 成矿热液可能来源于深部。结合其矿床地质特征, 笔者认为龙玛拉矿床是深部隐伏的黑云母二长花岗岩析出的岩浆热液经远距离运移至近地表形成的远端矽卡岩型矿床。

4.3 锑矿物及其地质意义

铋是一种重要的低熔点亲铜元素 (LMCE), 在高于其熔点 (271.4°C) 时, 锑可以在成矿流体中以铋熔体形式稳定存在, 锑熔体具有明显富集 Au、Ag、PGE 金属的能力 (Ciobanu et al., 2006; Tooth et al., 2011)。铋熔体对贵金属元素的富集是由金、银等在铋熔体和热液流体中溶解度的不同而实现的, 热力学模拟和实验研究表明, 当热液流体与铋熔体共存时, Au、Ag 等贵金属元素会强分配进入铋熔体, 形成铋-金(银)熔体, 即使流体处于金(银)不饱和状态或其浓度极低, 锑熔体也能从中萃取出大量 Au(Ag), 从而达到金、银的高效富集, 形成具有一定规模的矿床 (Tooth et al., 2008; Biagioni et al., 2013)。

铋矿物普遍存在于热液矿床中, 特别是与侵入体有关的热液矿床。近年来, 已经报道了一些发现铋-银共生现象的矿床, 如粤北石英脉型钨多金属矿床 (王小飞等, 2011)、川西夏塞银铅锌矿床 (丁奎首等, 2019)、江西牛形坝-柳木坑金银多金属矿床 (岳秋雨等, 2023)。念青唐古拉成矿带是青藏高原重

要的铅锌银成矿带,多个铅锌银矿床均发现了独立铋矿物,且矿石中的 Ag 与 Bi 在空间上、成因上具有密切联系,如蒙亚啊、新嘎果、洞中拉等(吴纯能等,2020)。龙玛拉矿床主要的铋矿物为斜方辉铋铅矿及自然铋,均与方铅矿密切共生。斜方辉铋铅矿呈柱状、束状分布于方铅矿粒间,或与方铅矿交生,表明其与方铅矿近于同时或稍早形成,可能是同期富铋(银)铅流体在硫化物晚期共同沉淀的结果,这也与方铅矿、铋矿物和银矿化共同分布在矿体浅部的地质事实相符。方铅矿和斜方辉铋铅矿中分布的细小乳滴状自然铋(图 5p)是铋熔体在成矿期存在的典型特征(Ciobanu et al., 2005),暗示银矿化和铋具有密切联系,铋对银的富集可能起到了关键作用。

5 结 论

(1) 龙玛拉矿床宏观上发育明显的横向矽卡岩蚀变分带,具体表现为从砂板岩向大理岩一侧,发育角岩、石榴子石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、石榴子石透辉石矽卡岩、透辉石矽卡岩、硅灰石矽卡岩、大理岩,主矿体发育明显的纵向矿化分带现象,矿化元素从顶部到底部为铅锌银矿化、锌铜矿化、铁铜矿化和铁矿化,显示出远端矽卡岩矿床从远离成矿中心到矿化中心,从低温矿化元素到高温矿化元素的分布规律。

(2) 龙玛拉矿床主要的非金属矿物有透辉石和石榴子石,少量的硅灰石、阳起石、绿帘石、绿泥石等。金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿以及少量的斜方辉铋铅矿、自然铋。金属矿物显示出岩浆热液来源、浅成高温成因的特点,且可能与来姑组还原性围岩存在成因联系,矿床是深部隐伏岩体析出的岩浆热液长距离运移至浅部,在大理岩与砂板岩接触带发生接触交代作用形成的远端矽卡岩矿床。

(3) 矿床主要的铋矿物为斜方辉铋铅矿、自然铋,铋矿物与方铅矿、银均密切共生,且位于矿体顶部远离矿化中心,为同期次晚期热液事件的产物,铋对银的富集可能起着重要作用。

References

- Biagioni C, D'Orazio M, Vezzoni S, Dini A and Orlandi P. 2013. Mobilization of Ti-Hg-As-Sb-(Ag,Cu)-Pb sulfosalt melts during low-grade metamorphism in the Alpi Apuane (Tuscany, Italy)[J]. Geology, 41(4): 747-750.
- Bralia A, Sabatini G and Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium Deposita, 14(3): 353-374.
- Chen G Y, Sun D S, Zhang L, Zang W S, Wang J and Lu A H. 1987. Genetic morphology of pyrite[J]. Modern Geology, 1: 60-76(in Chinese).
- Ciobanu C L, Cook N J and Pring A. 2005. Bismuth tellurides as gold scavengers[A]. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge[C]. Berlin, Heidelberg: Springer. 1383-1386.
- Ciobanu C L, Cook N J and Spry P G. 2006. Preface: Special Issue: Telluride and selenide minerals in gold deposits: How and why[J]? Mineralogy and Petrology, 87(3): 163-169.
- Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, Skinner W, Shimizhu M, Danyush L, Saini-eidukat B and Melcher F. 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(16): 4761-4791.
- Ding K S, Guo J H, Liu B G, Han X L and Yang S H. 2019. The important significance of mineralization concerning sulfosalt minerals in Xiasai deposit[J]. Act Geologica Sinica, 93(1): 215-226(in Chinese with English abstract).
- Fu Q, Zheng Y C and Huang K X. 2012. Sulfur and lead isotopic compositions of Longmala polymetallic deposit, Tibet and its geological significance[J]. Nonferrous Metals, 64(4): 26-30(in Chinese with English abstract).
- Lin X. 2015. Characteristics of fluid inclusions of Longmala Pb-Zn deposit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Hang J R. 1984. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 218-266 (in Chinese).
- Lu H Z. 1975. Zinc blende geological thermometer and pressure gauge[J]. Geology and Geochemistry, (2): 6-9(in Chinese).
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration[J]. Exploration and Mining Geology, 6(2): 185-208.
- Meinert L D, Dipple G M and Niculescu S. 2005. World skarn deposits[J]. Economic Geology, 100th Anniversary Volume I : 299-336.
- Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 36: 2-24.
- Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, Den J F, Feng Y M, Zhang K X, Zhang Z Y, Wang F G, Xing G F, Hao G J and Feng Y F. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- Ren Y S and Liu L D. 2006. Hydrothermal colloidal pyrite in Tongling area, Anhui Province, and its metallogenic significance[J]. Mineral Deposits, 25(Supp): 95-98(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Duo J, Liu H F, Lang X H, Zhang J S, Zheng W B and Ying L J. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the East part of the Gangdise metallogenic belt[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4):

- 393-410(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang D H, Wang X W, Zhong K H, Ying L J, Zheng W B, Li F J, Guo N, Qin Z P, Yao X F, Li L, Wang Y and Tang X Q. 2010. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang L Q, Zheng W B and Zhong K H. 2014. Ore deposits metallogenetic regularity and prospecting in the eastern section of the Gangdise metallogenetic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 88 (12): 393-410(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang Q, Yang H H, Gao X, Zhang Z B and Zou B. 2017. Mineralization, exploration and resource potential of porphyry-skarn-epithermal copper polymetallic deposits in Tibet[J]. *Journal of Earth Sciences*, 38(5): 571-613(in Chinese with English abstract).
- Tooth B, Brugger J, Ciobanu C and Liu W H. 2008. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids[J]. *Geology*, 36(10): 815-818.
- Tooth B, Ciobanu C L, Green L, Neil B and Brugger J. 2011. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (19): 5423-5443.
- Wang L Q, Tang J X, Deng J, Kang H R, Lin B, Cheng W B, Li Z and Zhang Z. 2015. The Longmala and Mengya's skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet: Evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for formation during Early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1825-1842.
- Wang L Q, Tang J X, Leon Bagas, Wang Y, Lin X, Li Z and Li Y B. 2017. Early Eocene Longmala skarn Pb-Zn-Cu deposit in Tibet, China: Geochemistry, fluid inclusions, and H-O-S-Pb isotopic compositions[J]. *Ore Geology Review*, 16(5): 2326-2338.
- Wang X F, Qi H W, Hu R Z, Bi X W and Peng J T. 2011. Occurrence modes of tungsten, tin, bismuth, silver and molybdenum from the vein type tungsten polymetallic deposits in northern Guangdong, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 405-421(in Chinese with English abstract).
- Xu L, Xie Q Q, Zhou Y F, Chen P, Sun S and Chen T H. 2019. Mineralogical characteristics of Colloform pyrite from Tongguanshan ore field and its implications for mineralization of the stratabound sulfide deposit in Tongling mineralization cluster, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(12): 3721-3733(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Deng J and Guo R P. 2016. World class Xincheng gold deposit: An example from the giant Jiaodong Gold Province[J]. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 419-430.
- Yang Y. 2020. Typomorphic mineralogical characteristics of pyrrhotite in Jiama Cu polymetallic deposit, Tibet, and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 337-350(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, Song Y C, Li Z Q, Xia D X and Pan F C. 2008. Qulong super large porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, altera-
- tion and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 280-318(in Chinese with English abstract).
- Yu Q H, Li R Q and Feng Z T. 1987. Typomorphic characteristics of sphalerite in lead-zinc deposits in Nanling area[A]. Collection of papers on mineralogy[C]. Chengdu: The first National Symposium on Mineralogy(in Chinese).
- Yue Q Y, Zhai D G, Zhao G, Zhao Q Q, He G W and Liu J J. 2023. The compositions of silver-bearing minerals and the occurrence of silver in the Niuxingba-Liumukeng silver-gold polymetallic deposit, Jiangxi Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 43(3): 311-324(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q. 1987. The graphical method of trace elements of sphalerite and galena is used to distinguish the genetic types of lead-zinc deposits[J]. *Geology and Geochemistry*, 9: 64-66(in Chinese).
- Zhao Y M, Dong Y G, Li D X and Bi C S. 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 23(1): 153-182.
- Zhao Y M, Lin W W and Bi C S. 2012. Skarn ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-115(in Chinese with English abstract).
- Zhou X W, Li S R, Lu L and Lin W B. 2005. Research on the composition typomorphism of pyrite from Nongkeng Gold-Silver mineralization district in Wuyi, Zhejiang Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(4): 317-326 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈光远, 孙岱生, 张立, 臧维生, 王健, 鲁安怀. 1987. 黄铁矿成因形态学[J]. *现代地质*, 1: 60-76.
- 丁奎首, 郭敬辉, 刘秉辉, 韩秀怜, 杨赛红. 2019. 夏塞银矿床中硫盐矿物成矿作用的重要意义[J]. *地质学报*, 93(1): 215-226.
- 付强, 郑远川, 黄克贤. 2012. 西藏龙马拉多金属矿床硫铅同位素组成及其地质意义[J]. *有色金属(矿山部分)*, 64(4): 26-30.
- 林鑫. 2015. 西藏龙马拉铅锌矿流体包裹体特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 218-266.
- 卢焕章. 1975. 闪锌矿地质温度计和压力计[J]. *地质地球化学*, (2): 6-9.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1-28.
- 任云生, 刘连登. 2006. 铜陵地区热液成因胶状黄铁矿及其成矿意义[J]. *矿床地质*, 25(增刊): 95-98.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. *地球学报*, 31(4): 495-506.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底

- 斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 王立强, 郑文宝, 钟康惠. 2014. 冈底斯成矿带东段矿床成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报, 88(12): 2545-2555.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-613.
- 王小飞, 戚华文, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂. 2011. 粤北石英脉型钨多金属矿床中钨锡铋银钼的赋存状态研究[J]. 地质学报, 39(2): 405-421.
- 徐亮, 谢巧勤, 周跃. 2019. 安徽铜陵矿集区铜官山矿田胶状黄铁矿矿物学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 35(12): 3721-3733.
- 杨阳, 唐菊兴, 吴纯能, 林彬, 唐攀, 张泽斌, 何亮, 祁婧, 李怡萱. 2020. 西藏甲玛铜多金属矿床磁黄铁矿标型矿物学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 39(2): 337-350.
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代详, 潘凤雏. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 27(3): 280-318.
- 余琼华, 李若黔, 冯祖同. 1987. 南岭地区铅锌矿床中闪锌矿的标型特征[A]. 矿相学论文集[C]. 成都: 全国第一届矿相学学术讨论会.
- 岳秋雨, 翟德高, 赵刚, 赵青青, 贺根文, 刘家军. 2023. 江西牛形坝-柳木坑金银多金属矿床银矿物与银的赋存状态[J]. 矿物学报, 43(3): 311-324.
- 张乾. 1987. 利用方铅矿、闪锌矿的微量元素图解法区分铅锌矿床的成因类型[J]. 地质地球化学, 9: 64-66.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承恩. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-115.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 林卫兵. 2005. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(4): 317-326.