



编号: 0258-7106(2010)06-1054-25

西藏拉屋锌铜多金属矿床岩矿相学特征及意义*

刘妍¹, 赵元艺^{1**}, 王瑞江¹, 崔玉斌², 宋亮², 杨长青³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083;
3 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007)

摘要 拉屋矿床位于西藏当雄县境内, 为大型矽卡岩型锌铜多金属矿床。文章在大量的野外地质调查、室内岩矿鉴定、扫描电镜与电镜能谱以及 ICP-MS 分析测试的基础上, 对拉屋矿床的岩相学与矿相学特征进行了研究。矿区内的岩体为白云母二长花岗岩, 具明显的爆碎结构。矽卡岩主要包括石榴子石矽卡岩、含透辉石石榴子石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩。环带状石榴子石灰色部分的铝原子数为 0.36~0.86, 黑色部分的铝原子数为 1.23~1.53, 而钙原子数具有与铝原子数成反比的变化趋势。由石榴子石的环带推测, 有 13 次岩浆与地层灰岩的物质交换过程。矽卡岩及其后蚀变岩的形成过程, 控制着矿化的形成过程, 出现石榴子石(晶体中呈粒状的透辉石→板状透辉石→长柱状透辉石)→次闪石-绿帘石→绿泥石+石英→碳酸盐+石英的蚀变变化趋势, 与此相应, 矿化有铍+钴镍→铍+铜铅锌→铜铅锌银→钼的变化趋势。金属矿物由黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、自然铋、硫铜铁铋矿、硫铅铋银矿(?)、辉砷镍矿、黄黝锡矿、羟钼石等组成。作者指出, 有用金属元素为锌、铜、铅、锡、铋、钴、钼, 需对这些元素的资源特征进行评价, 开采时需注意综合利用。

关键词 地质学; 锌铜多金属矿床; 石榴子石环带; 矽卡岩; 岩矿相学; 拉屋

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Facieology and mineragraphy characteristics of Lawu zinc-copper polymetallic ore deposit in Tibet and their significance

LIU Yan¹, ZHAO YuanYi¹, WANG RuiJiang¹, CUI YuBin², SONG Liang² and YANG ChangQing³

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Henan Geological Survey, Zhengzhou 450007, Henan, China)

Abstract

Located in Dangxiong County of Tibet, the Lawu ore deposit is a large-size skarn zinc-copper polymetallic deposit. According to detailed field geological survey, indoor petrologic and mineralogical determination, SEM and EDS analysis, and ICP-MS spectral analysis, the authors studied facieology and mineragraphy characteristics of the Lawu zinc-copper polymetallic deposit. The main rock body of the ore deposit is muscovite monzonitic granite, with a clear decrepitation structure. The main skarn types are garnet skarn, diopside-bearing garnet skarn, garnet-diopside skarn and diopside skarn. The number of aluminum atoms is 0.36~0.86 in the gray part of zonal garnet and is 1.23~1.53 in the black part; nevertheless, the number of calcium atoms shows the opposite trend. The garnet ring implies that there have been 13 material exchange processes between magma and

* 由国家科技支撑课题《西藏班公湖岛弧带铜、金、富铁矿评价与综合找矿技术方法示范研究》(编号: 2006BAB01A05)之专题《区域成矿模型与典型矿床成因模型研究》与中国地质调查局青藏专项《西藏班公湖-怒江成矿带找矿远景区评价》(编号: 1212010818097)共同资助

第一作者简介: 刘妍, 女, 1957年生, 副研究员, 长期从事岩矿相学研究, Tel: 010-68999572。

** 通讯作者: 赵元艺, 男, 研究员, Tel: 010-68999084, Email: yuanyizhao2@sina.com

收稿日期: 2010-04-06; 改回日期: 2010-11-10。张绮玲编辑。

limestone strata. Skarn and the formation of the subsequent altered rock controlled mineralization. There appears granular changing trend of diopside-elongated diopside→sub-amphibole-epidote→chlorite + quartz→carbonate + quartz in the garnet crystal. Accordingly, the mineralization shows the order of bismuth + cobalt-nickel→bismuth + copper-lead-zinc→copper-lead-zinc-silver→indium mineralization. Metallic minerals include pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena, argentite, natural bismuth, sulfur-copper-iron-bismuth ore, sulfur-lead-bismuth-silver ore (?), gersdorffite, stannite, dzhalindite etc. Useful metals are zinc, copper, lead, tin, bismuth, cobalt and indium, whose resource characteristics need to be evaluated. When mining is carried out, the comprehensive utilization should be taken into account.

Key words: geology, zinc-copper polymetallic deposit, garnet zoning, skarn, facieology and mineragraphy; Lawu

拉屋矿床位于西藏当雄县乌玛塘乡境内,为大型矽卡岩型锌铜多金属矿床,锌的资源量达到 150 万吨。该矿床于 1996 年由河南省地质调查院发现,现由西藏华钰矿业有限公司负责对其进行开采,是西藏北部少数几个正在开采的有色金属矿床之一。本文在大量的野外地质调查、室内岩矿鉴定及扫描电镜与电镜能谱分析测试的基础上,对拉屋矿床的岩相学与矿相学特征进行了研究,这将对拉屋矿床以及相似矿床的成因研究与资源的开发有重要的参考价值。

1 矿床地质特征

西藏的大地构造位置属于欧亚板块与印度板块的结合部位,整体上可以分出两个一级铜多金属成矿远景区,即北部的班公湖-怒江成矿区与南部的冈底斯成矿区。冈底斯成矿区又可进一步划分为 3 个成矿带:① 班戈-那曲 Cu、Cr、Ag、Pb、Zn 成矿带,② 申扎-旁多 Cu、Ag、Pb、Zn、Au 成矿带,③ 日喀则-墨竹工卡 Cu、Fe、Pb、Zn、Au 成矿带(图 1)。其中拉屋

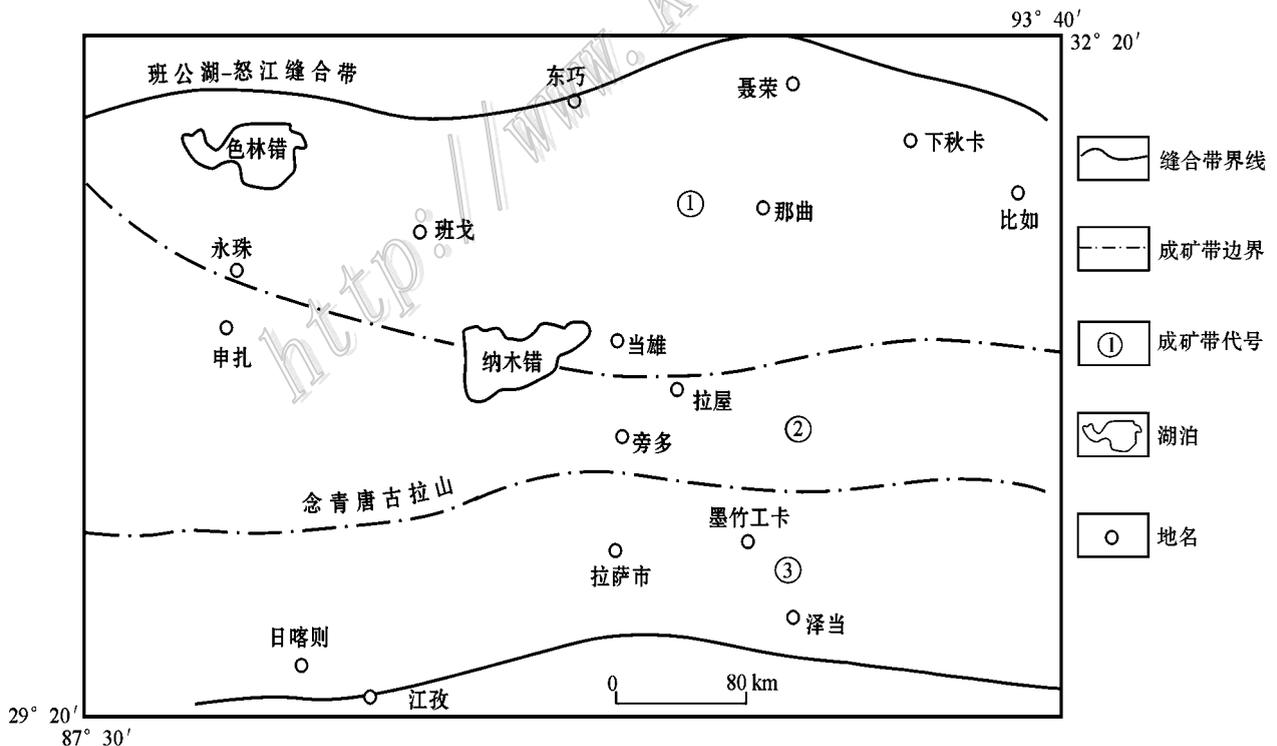


图 1 拉屋矿床在西藏自治区的位置示意图(据何国朝等, 2009 修改)

Fig. 1 The location of the Lawu ore deposit in Tibet (modified after He et al., 2009)

矿床位于申扎-旁多 Cu、Ag、Pb、Zn、Au 成矿带中(何国朝等,2009)。

矿区出露的地层为石炭系旁多群和二叠系洛巴堆组。石炭系旁多群的主要岩性为石英砂岩、绢云母石英板岩、大理岩,而二叠系洛巴堆组的岩性主要为石英砂岩、角岩化千枚岩和长石石英砂岩。矿区的地质总体走向为 NWW 向,白云母二长花岗岩岩体侵入到走向为 NWW 向不对称背斜的轴部。矿区的断裂有 NW 向和 NNE 向 2 组,其中北西向断裂以 F_3 断层为代表,该方向的断层为成矿前断裂,其内的部分区段被矿体所充填(刘延勇,2008)(图 2)。而

NNE 向断裂未见在地表出露,形成时间应在背斜形成之后和矿体形成之前(刘延勇,2008)。矿区内出露的岩体岩性为白云母二长花岗岩,属于矿区东部日音拿岩体的西延部分,岩体出露面积 6 km^2 ,为燕山期的产物(杜欣等,2004)。岩体周围的地层普遍有接触变质现象,碳酸盐类岩石形成矽卡岩和大理岩。矽卡岩主要分布于背斜的核部与两翼,矿体主要赋存于矽卡岩中。

拉屋矿区的矿体共为 6 条,主要分布于 F_3 断裂的北部,呈似层状或透镜状较为规整的东西向展布。矿体主要受断裂与矽卡岩控制,矿体长度一般为

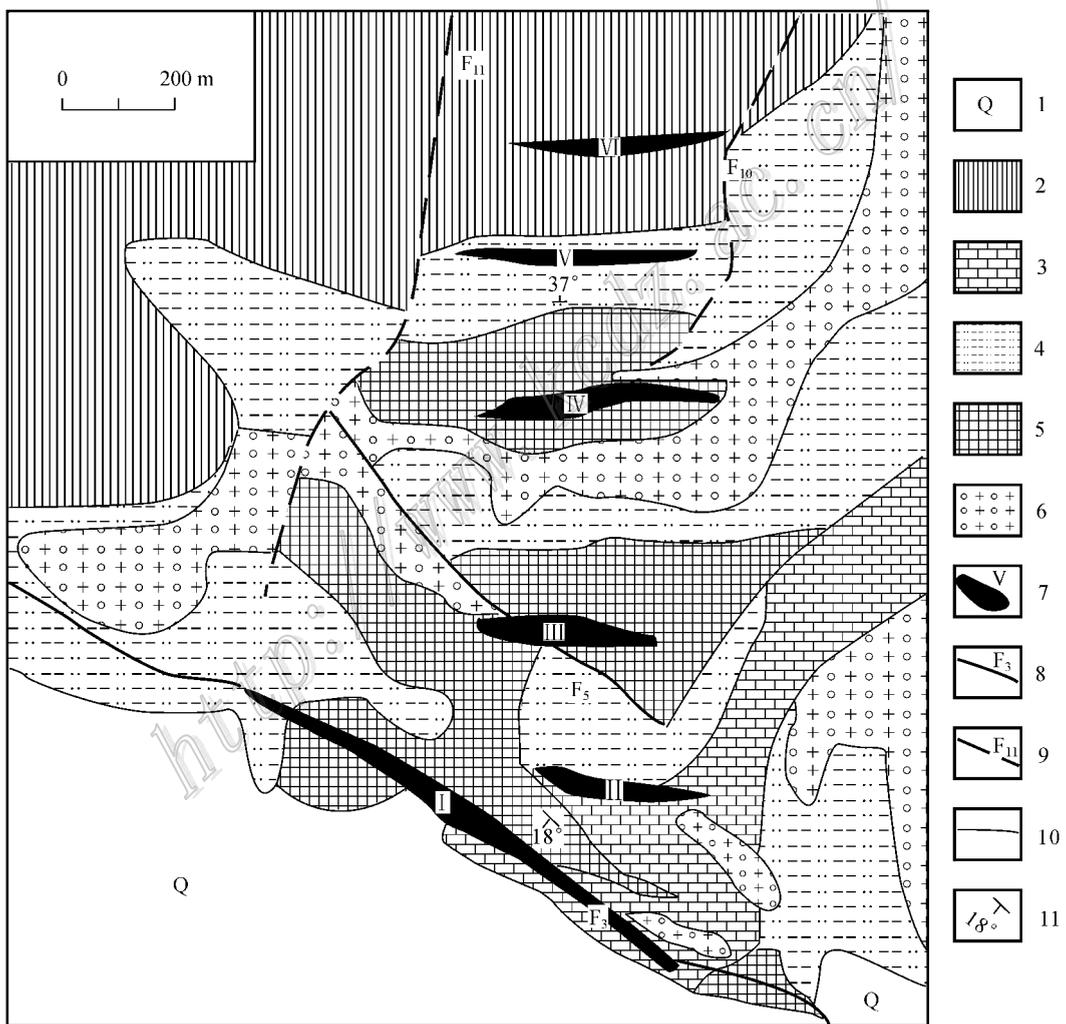


图 2 拉屋矿区地质图(据刘延勇,2008,修改)

1—第四系;2—二叠系洛巴堆组石英砂岩、长石石英砂岩;3—大理岩;4—石炭系旁多群角岩化千枚岩;5—矽卡岩;6—燕山晚期白云母二长花岗岩;7—矿(化)体及编号;8—实测断层及编号;9—推测断层及编号;10—地质界线;11—产状

Fig. 2 Geological map of the Lawu ore district (modified after Liu et al., 2008)

1—Quaternary; 2—Quartz sandstone and feldspathic quartz sandstone of Permian Luobadui Formation; 3—Marble; 4—Hornfelsized phyllite of Carboniferous Pangduo Formation; 5—Skarn; 6—Late Yanshanian muscovite monzogranite; 7—Ore body (mineralized body) and its serial number; 8—Measured fault and its serial number; 9—Inferred fault and its serial number; 10—Geological boundary; 11—Attitude

表 1 拉屋矿体特征统计表

Table 1 Statistics of characteristics of Lawu ore body

序号	矿体编号	矿体形态	矿体规模(长×厚) / m	矿体产状	α (平均品位) / %	控矿因素
1	I	似层状	4900×8.18	2~40°∠39~78°	Cu 1.03	F ₃ 断裂, 砂卡岩
2	II	似层状	1000×11.67	2°∠10~20°	Cu 1.02 ; Zn 10.45	F ₃ 与 F ₅ 断裂, 砂卡岩, 角 岩化千枚岩, 变质砂岩
3	III	似层状			Zn 5.64	F ₃ 断裂, 砂卡岩
4	IV	似层状	1800×8.76	2~6°∠34°	Zn 3.6 ; Pb 0.42	砂卡岩
5	V	似层状 透镜状	1100×14.59	0~6°∠29~42°	Zn 3.43 ; Pb 0.62	砂卡岩
6	VI	似层状	700×15.08	3~6°∠42°	Zn 4.61 ; Pb 5.12 ; Ag 超过工业品位	砂质板岩

据刘延勇, 2008; 杜欣等, 2004 整理, 表中矿体编号同图 2。

700~4 900 m, 厚度为 8.18~15.08 m, 分布于矿区东西向背斜的两翼。主成矿元素由南至北, 呈现 Cu→Cu、Zn→Zn→Zn、Pb→Pb、Zn、Ag 的元素分带现象(表 1, 图 2)。

2 样品采集、鉴定与分析测试

2.1 样品与采集方法

本文的样品采自拉屋矿床正在开采的 4410 与 4452 平硐(图 3a), 采样方法为单点捡块采样, 采自 III 号矿体的样品, 为本矿床典型样品, 用于对该矿床的成因类型和成矿作用的多样性与复杂性进行研究。样品标本见图 3。

2.2 鉴定与分析测试

本次工作共磨制探针片 60 件, 其中扫描电镜能谱分析 16 件。

光学显微镜工作 将岩矿石样品磨成探针片, 用于在偏光与反光显微镜下进行观察与鉴定, 显微照片见图 4、图 5、图 6、图 7。

扫描电子显微镜与电镜能谱分析 将探针片进行喷碳处理, 然后用 LEO-435VP 型扫描电子显微镜对样品进行观察并对有代表性的图像拍照; 对典型的图像用 LINK-ISIS 型 X-射线能谱仪进行成分分析。测试条件: 20 kV, 100 Pa。执行标准为: SY/T5162-1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法。测试单位为中国石油勘探开发研究院石油地质试验研究中心。扫描电镜图像与电镜能谱分析谱线图见图 8。

微量元素分析 采用 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则, 测试仪器为 Finnigan MAT 制造, HR-ICP-MS(Element I), 仪器编号为 6493, 测试温度为 20℃, 相对湿度为 30%。测试样品数为 78 件, 测试单位为核工业北京

地质研究院。部分分析与统计结果见表 4。

3 岩相学特征

3.1 主要岩石类型及岩相学特征

3.1.1 岩体

白云母二长花岗岩 以日音拿岩体为主, 分布于矿区东部, 呈不规则状, 面积约 1.5 km²。另有几个小岩体, 呈岩株状、不规则状分布于矿区中东部及拉屋断裂带中。这些岩体与围岩呈侵入接触关系, 在外接触带形成砂卡岩型矿化。白云母二长花岗岩呈灰白色, 花岗结构, 块状构造(图 3b)。主要矿物为斜长石 35%, 微斜长石 30%, 石英 30%, 白云母 5%。斜长石呈自形-半自形板状, 聚片双晶发育, 为更长石, 微斜长石呈半自形-他形板状; 石英呈不规则粒状分布。白云母呈片状。副矿物有磁铁矿等。矿物粒度大小不等, 以 0.5~2 mm 的细粒为主, 部分为 2~5 mm 的中粒。

在岩体的 4410 平硐中发现了爆碎岩(图 4a、4b、4c), 具明显的爆碎结构, 聚片双晶发育的斜长石晶体强烈破碎, 但各碎块之间破而不碎, 离而不远, 未见受构造应力挤压变形、双晶纹弯曲的现象, 并且破碎的裂隙完全没有方向性。另外, 在岩体的断裂带附近发现了硅化长英质糜棱岩。岩石具明显的糜棱构造(图 4d、4e), 其“残斑”本身也是细碎的糜棱物质, 表明该矿区曾经历多次构造活动, 既有脆性构造活动(表现为爆碎结构)又有韧性构造活动(表现为糜棱构造), 并伴随着强烈的硅化-热液活动。

流纹斑岩 样品采自 4452 平硐, 属于火山颈相岩石, 斑状结构, 斑晶含量较少, 约为 5%, 粒度约为 0.5~1 mm, 呈自形板状, 已完全被碳酸盐矿物交代, 推断为长石斑晶, 基质具霏细结构, 由长英质霏



图3 拉屋矿区与典型标本照片

a. 4452 平硐; b. 白云母二长花岗岩(样号:Lw8-1); c. 铜锌矿石(样号:LW4452-09-4); d. 锌铜矿石(样号:LW4410-09-8); e. 锌铜矿石中的斑铜矿(样号:Lw4410-09-7); f. 锌铜矿石中的磁黄铁矿(样号:Lw2-14); g. 石英脉型铜矿石(样号:Lw4410-09-12); h. 绢英岩型锡矿石(样号:Lw4410-09-32); 图中 Ms—白云母, Sp—闪锌矿, Chal—黄铜矿, Po—磁黄铁矿, Bn—斑铜矿

Fig. 3 The Lawu ore district and typical specimen photos

a. 4452 adit; b. Muscovite monzogranite (sample number: Lw8-1); c. Copper-zinc ore (sample number: LW4452-09-4); d. Zinc-copper ore (sample number: LW4410-09-8); e. Bornite in zinc-copper ore (sample number: Lw4410-09-7); f. Pyrrhotite in zinc-copper ore (sample number: Lw2-14); g. Quartz vein type copper ore (sample number: Lw4410-09-12); h. Sericite rock type tin ore (sample number: Lw4410-09-32); Ms—Muscovite, Sp—Sphalerite, Chal—Chalcopyrite, Po—Pyrrhotine, Bn—Bornite

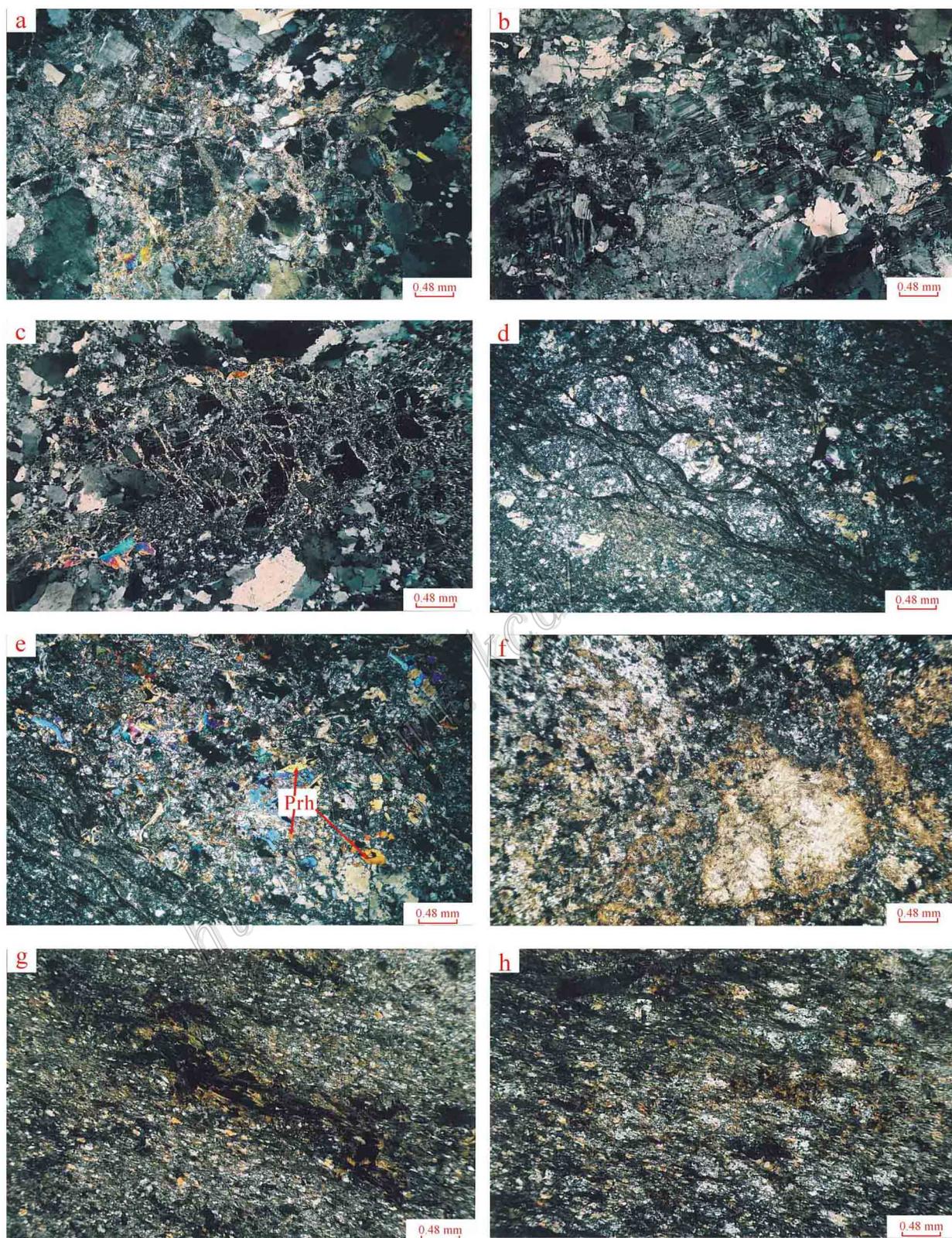


图4 典型围岩显微照片

a. 花岗爆碎岩(样号:LW7-3):爆碎结构,各碎块之间被粉碎的物质充填,粉碎物质又被后期热液蚀变形成的绢云母和碳酸盐矿物交代;b. 花岗爆碎岩(样号:LW2-21):爆碎结构,聚片双晶发育的斜长石晶体被爆碎,各碎块的双晶纹平直没有弯曲,各碎块之间破而不碎,离而不远,仍能

恢复原板状晶形特征;c. 花岗爆碎岩(样号:LW4410-1)爆碎结构,被爆碎的钾长石晶体仍具有一致的消光方位,但碎块不具方向性;d. 花岗质糜棱岩(样号:LW6-1)糜棱结构,糜棱残斑主要为经过千糜岩化的硅化石英,表明矿区经历过两次以上的构造运动和硅化热液活动;e. 花岗质糜棱岩(样号:LW6-1)糜棱结构,糜棱物质被后期葡萄石(Prh)交代的现象,葡萄石杂乱分布,不受定向构造的影响;f. 流纹斑岩(样号:LW4452-1)残留斑状结构,被碳酸盐矿物交代的长石斑晶,基质为长英霏细物质并已蚀变;g. 角岩化千枚岩(样号:LW5-2):千枚状构造,角岩化形成的微晶状黑云母和白云母-绢云母定向排列;h. 片理化堇青石角岩(样号:LW4-1)残留斑状变晶结构,微片状构造。堇青石变斑晶已完全被显微鳞片状白云母-绢云母所交代,并受到片理化作用的改造

Fig. 4 Microphotographs of typical wall rocks

a. Granite decrepitation rock (sample number : LW7-3) : Decrepitation texture ; the gaps among fragments are filled up with crushed material replaced by sericite and carbonate minerals formed by late hydrothermal alteration ; b. Granite decrepitation rock (sample number : LW2-21) : Decrepitation texture , plagioclase crystals with polysynthetic twin are disintegrated but twin-striations aren't winding. Fragments are broken but not cracked and the distance between fragments is short , which can still restore plate-like crystal ; c. Granite decrepitation rock (sample number : LW4410-1) : Decrepitation texture ; the broken k-feldspar crystals still have the same extinction position , but the fragments lack direction ; d. Granitic mylonite (sample number : LW6-1) : Mylonitic texture ; mylonitic residual plaque is mainly silicified quartz with phyllitization , which shows that the ore district has experienced more than two times of tectonic movement and silicified hydrothermal activity ; e. Granitic mylonite (sample number : LW6-1) : Mylonitic texture ; there is a phenomenon that mylonitic material is replaced by Late prehnite . Prehnite assumes chaotic distribution , not affected by directional structure ; f. Rhyolite porphyry (sample number : LW4452-1) : Residual porphyritic texture , porphyritic crystals in feldspar are replaced by carbonate minerals , and the groundmass is altered felsitic material ; g. Hornfelsized phyllite (sample number : LW5-2) : phyllitic structure ; microcrystalline biotite and muscovite - sericite generated along with hornfels are directionally arranged ; h. Cleaved cordierite hornfels (sample number : LW4-1) : Residual porphyritic blastic texture , micro-sheet structure. Cordierite porphyroblasts were replaced completely by micro-squamous muscovite-sericite , and were rebuilt by schistosity effect

细物质组成(图4f)

辉长岩脉 仅在拉屋北部、断裂带北侧出露,规模较小,呈薄透镜体状,延伸方向垂直断裂带,长仅120 m。岩石呈灰黑色,辉长结构,块状构造。主要矿物成分为基性斜长石(60%~65%),单斜辉石(25%~30%),次要矿物为角闪石(10%),少量石英。副矿物有磷灰石、磁铁矿等。局部见有黝帘石化和纤闪石化。

闪长岩脉 出露规模也较小,在日音拿沟及拉屋北侧,呈薄透镜体状产出。其延伸方向亦垂直于断裂带,长100 m左右。岩石呈黄褐色,具半自形-他形粒状结构,块状构造。主要矿物成分为中长石(60%~75%),角闪石(25%~40%),次要矿物为石英,副矿物为磷灰石、磁铁矿等。

石英脉 在区内零星分布,且规模小。部分沿断裂带贯入,延伸仅几十米,常具褐铁矿化等。根据石英脉的产出位置及矿化的关系,划分出矿化早期石英脉和矿化期石英脉。矿化早期石英脉一般分布在拉屋断裂带及其附近,与断裂带产状基本一致,石英脉长度一般十几米至几十米,厚2~4 m,白色透明,具碎裂状构造。矿化期石英脉,分布在拉屋断裂带之中,产状与断裂带一致,长一般几米至几十米,厚0.52~2 m,灰黄色、黄褐色,透明度差,具碎裂状构造,石英脉中常见黄铜矿化、孔雀石化、方铅矿化、

褐铁矿化等。

3.1.2 矿区主要围岩

区内出露的岩石类型有石英砂岩、千枚岩、片理化堇青石角岩、大理岩等。

石英砂岩 主要分布于矿区西北部,灰白、灰褐、暗紫红色等,具中-细粒砂状结构,砂屑粒度一般在0.1~0.5 mm之间,中厚层状构造。主要矿物为石英,次要矿物有黄铁矿、褐铁矿及少量的磁铁矿。

变质长石石英砂岩 主要分布于矿区西北部,灰褐、灰黄等色,具不等粒砂状结构,层状构造。主要矿物成分为石英(40%~75%),斜长石(15%~30%),砂屑多呈次棱角状、棱角状,粒度大小混杂,为0.1~1 mm不等,斜长石多为更长石。次要矿物有绿泥石、褐铁矿等,微量磁铁矿。

千枚岩 呈薄层状产出,在矿区中部有一定范围的分布。岩石呈灰黑、灰褐色,具变余粉砂泥质结构、显微粒状鳞片变晶结构,千枚状构造。受角岩化作用的影响,形成微晶黑云母。原粉砂碎屑成分主要为石英(50%±),少量的杂质及碎屑物,受千枚岩化作用,石英粉砂碎屑均被压扁拉长呈定向排列,原泥质变质重结晶为绢云母和角岩化作用形成的黑云母定向排列构成千枚状构造(图4g)。

片理化堇青石角岩 主要产于砂质板岩与岩体接触部位。岩石呈灰黑色,残斑状变晶结构,受片

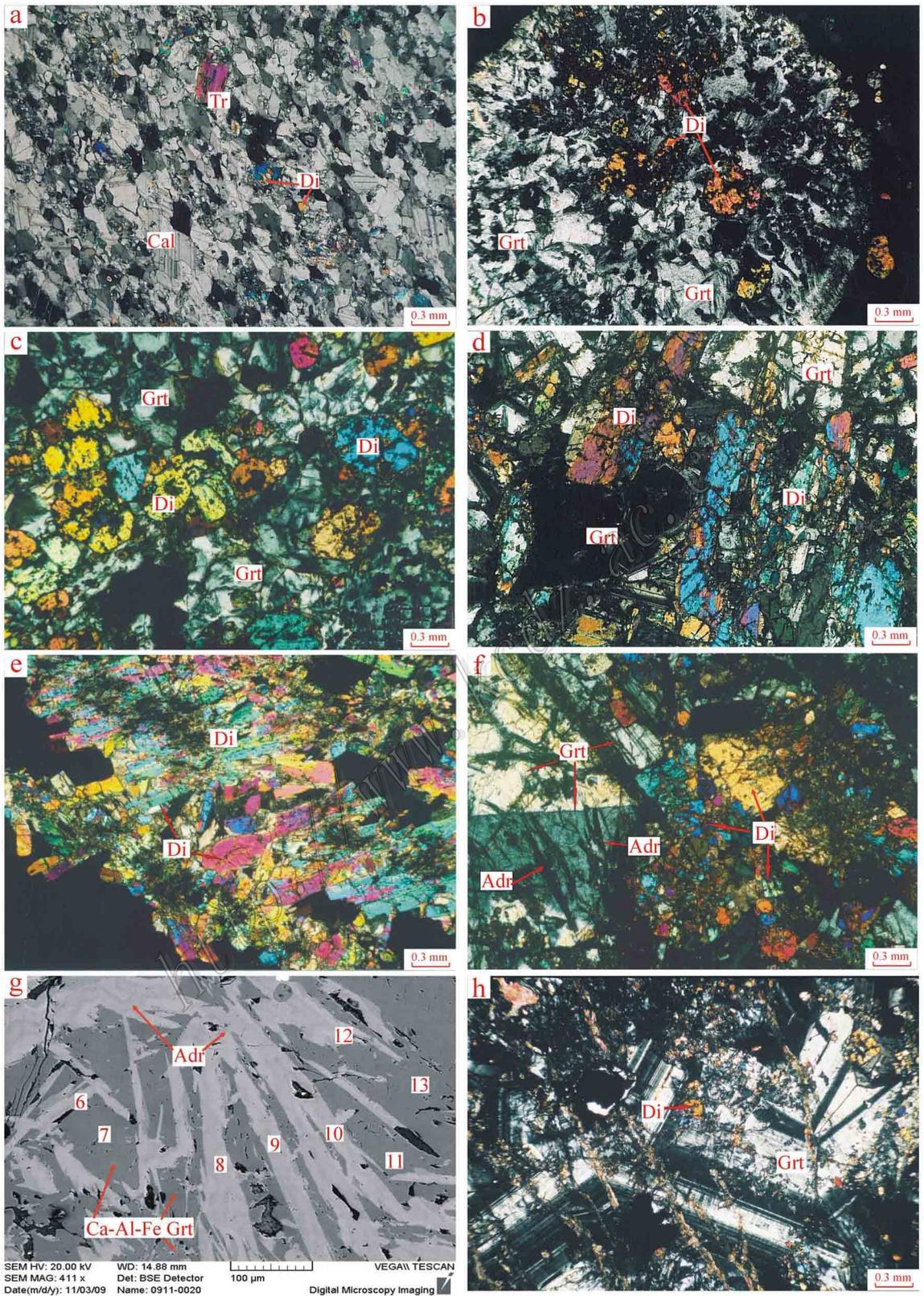


图 5 典型矽卡岩、石榴子石与透辉石显微照片

a. 透辉石大理岩(样号:LW1-4): 粒状变晶结构,透辉石(Di)与透闪石(Tr)呈细小的粒状变晶,方解石(Cal)也呈他形粒状变晶; b. 含透辉石石榴子石矽卡岩(样号:LW1-6):透辉石(Di)含量<10%,透辉石呈粒状被包裹在石榴子石(Grt)晶体中,石榴子石常呈自形、菱形十二面体晶形;

c. 透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW4452-4)透辉石(Di)含量30%~40%,透辉石呈粒状或半自形短柱状被包裹在石榴子石(Grt)晶体中;d. 石榴子石透辉石砂卡岩(样号:LW4452-7)透辉石(Di)含量60%~70%,透辉石呈自形短柱状,石榴子石(Grt)呈半自形等轴粒状;e. 透辉石砂卡岩(样号:LW1-7)透辉石(Di)含量约100%,透辉石呈自形长柱状晶体;f. 透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW4452-8):Ca-Al-Fe石榴子石(Grt)晶体中出现毛发状分布的Ca-Fe榴石(Adr);g. 透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW4452-8):毛发状分布的Ca-Fe榴石(Adr)与Ca-Al-Fe石榴子石(Grt)扫描电图像与电镜能谱分析点位及编号;h. 含透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW4410-09-1):石榴子石(Grt)的生长环带

Fig. 5 Microphotographs of typical skarn, garnet and diopside

a. Diopside marble (sample number: LW1-4): Granoblastic texture. Diopside and tremolite show small granoblastic texture, and calcite (Cal) also shows anhedral granoblastic texture; b. Garnet and diopside-bearing skarn (sample number: LW1-6): The content of diopside is less than 10%, and diopside is granular and wrapped in garnet. Garnet usually assumes euhedral, rhombic dodecahedron crystals; c. Diopside-garnet skarn (sample number: LW4452-4): The content of diopside is 30%~40%, and diopside assumes granular or subhedral short-columnar crystals wrapped in garnet; d. Garnet-diopside skarn (sample number: LW4452-7): The content of diopside is 60%~70%, and diopside assumes euhedral short-columnar crystals. Garnet is of subhedral isometric-granular structure; e. Diopside skarn (sample number: LW1-7): The content of diopside is about 100%, and diopside occurs as euhedral long columnar crystals; f. Diopside-garnet skarn (sample number: LW4452-8): There are hair-like Ca-Fe garnets distributed in Ca-Al-Fe garnet; g. Diopside-garnet skarn (sample number: LW4452-8): Hair-like Ca-Fe garnets and Ca-Al-Fe garnets and their SEM and EDS analytical positions and serial numbers; h. Garnet and diopside-bearing skarn (sample number: LW4410-09-1): Growth zoning of garnet

理化作用,原堇青石变斑晶被压扁拉长定向排列,同时退变为绢云母等,仅有少量新鲜堇青石残留(图4h)。岩石局部见绿泥石化、褐铁矿化等蚀变现象。

大理岩 主要分布于矿区中部与日音拿北部,岩石类型有石榴子石透辉石灰质大理岩,透辉石石英灰质大理岩和透闪石灰质大理岩。岩石呈灰褐色、灰黑色,具中-粗粒变晶结构,块状、条带状构造(图5a)。主要矿物成分为方解石(45%~95%)、透辉石(30%~40%)、透闪石(5%~10%)、石英(3%~16%)、石榴子石(0~5%),少量褐铁矿及硅灰石。方解石呈他形粒状,粒径0.2~3 mm,个别达5 mm。局部见有方铅矿化、闪锌矿化、黄铜矿化。

3.1.3 砂卡岩及其特征矿物

砂卡岩为容矿围岩,主要分布于矿区东部大理岩与岩体的接触部位。矿区砂卡岩矿物主要为石榴子石和透辉石。砂卡岩类型有石榴子石砂卡岩、含透辉石石榴子石砂卡岩、透辉石石榴子石砂卡岩和透辉石砂卡岩。砂卡岩根据透辉石的含量和晶形变化有一定的规律性。

石榴子石 本区所出现的石榴子石根据电镜能谱分析结果(表2)定为钙铝榴石与钙铁榴石连续类质同象而成的Ca-Al-Fe石榴子石系列。晶形发育较好,常呈菱形十二面体,矿物粒度在0.5~2 mm之间,透射光下无色或淡黄绿色,具明显的环带,电镜能谱分析结果显示,这种环带主要是由于Ca-Al成分的变化而引起,这种变化对石榴子石的突起(折光率)略有影响,当Ca含量增高时,折光率略有升高,当Al含量增高时,折光率略有降低。在正交偏光镜

下,石榴子石均有明显的光性异常,一般呈现一级灰黑色→一级黄白干涉色。尤其是环带发育的石榴子石晶体(图5h)光性异常干涉色黑、白相间。扫描电镜照片也显示出明暗相间的环带构造(图6a)。13个点的测定(表2)表明,在图6a中的暗色环带相当于光性异常干涉色较高的灰白色环带,其 Al_2O_3 含量较高,CaO含量较低(表2,序号4、6、8、10、12、13);而在图6a中的浅色环带,相当于光性异常干涉色较低的灰黑色环带,其 Al_2O_3 的含量较低,而CaO的含量相对较高(表2,序号1、2、3、5、7、9),这种 Al_2O_3 、CaO含量的变化反映成岩过程中温压条件的变化。

受后期构造应力的作用,砂卡岩中的透辉石和石榴子石晶体明显破碎(图5f),透辉石破碎成碎粒状,而石榴子石则产生微裂隙。在微裂隙中形成均质的石榴子石(图5f),这种石榴子石呈“毛发状”并非石榴子石的结晶习性,而是受微裂隙的制约。在图5g中浅色“毛发状”石榴子石含 Al_2O_3 较低,而含CaO较高(表2,序号2、14、16、17、18、20)。而主体石榴子石为灰黑色部分,其 Al_2O_3 含量较高,CaO含量较低(表2,序号15、19、21),表明 $w(Al_2O_3)$ 与 $w(CaO)$ 呈反消长关系,明显与应力作用有关,当应力作用大时, Al_2O_3 含量升高,而在张性裂隙中,受力接近于零,所形成的石榴子石含 Al_2O_3 很低,CaO含量高,为钙铁榴石。

另外,在石榴子石晶体中包裹着许多自形小柱状的氟磷灰石(图6c)表明在砂卡岩的形成过程中,有大量的挥发分参与,以致带入了众多的成矿金属

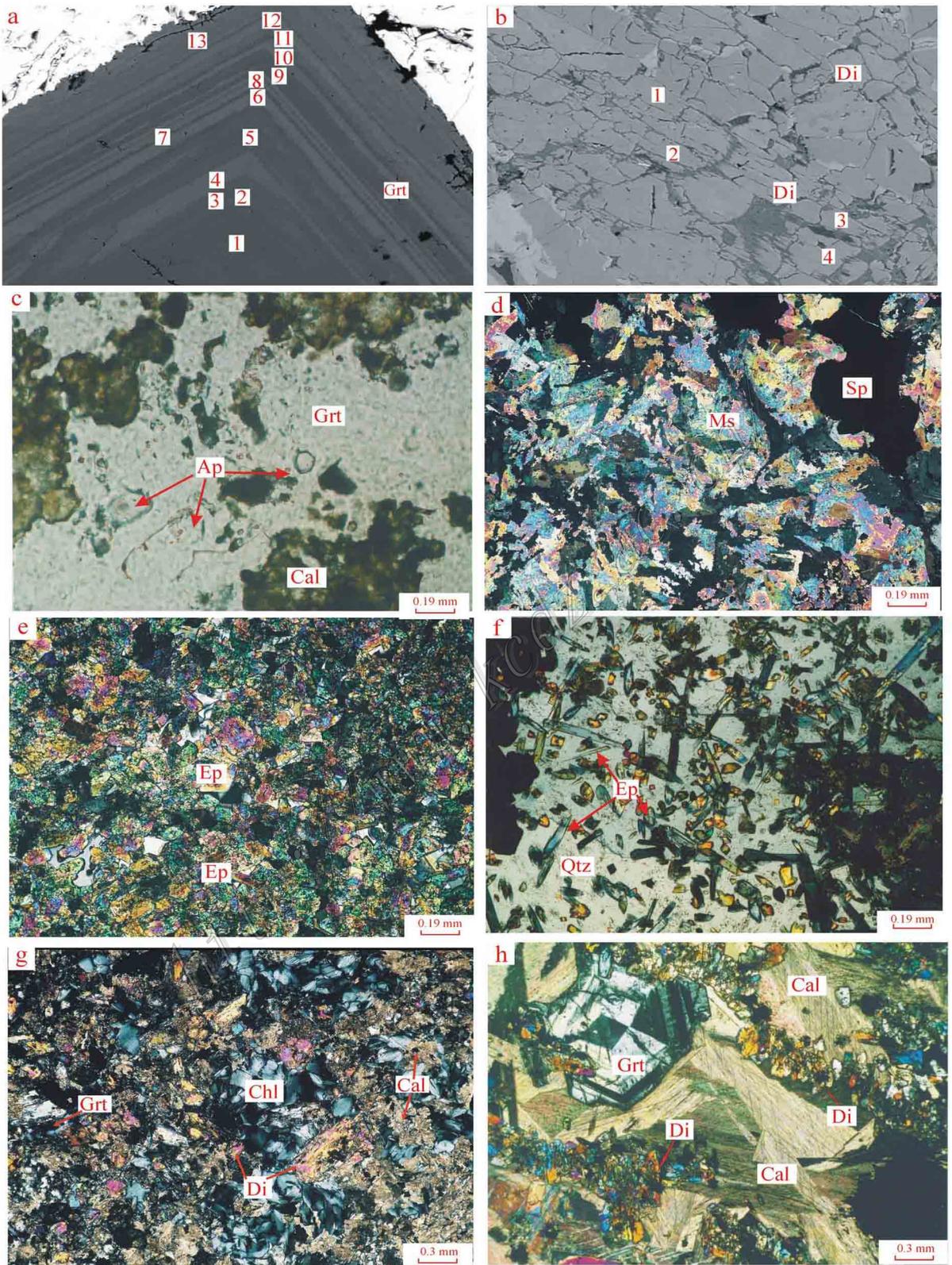


图 6 典型蚀变岩石显微照片

a. 含透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW4452-09-6):石榴子石(Grt)环带的背散射电子图像与电镜能谱分析点位及编号; b. 透辉石砂卡岩(样号:LW4452-09-1):透辉石(Di)的扫描电图像与电镜能谱分析点位及编号; c. 含透辉石石榴子石砂卡岩(样号:LW1-8):石榴子石(Grt)晶体中

含大量自形小柱状氟磷灰石(A_p); d. 白云母蚀变岩型锌矿石(样号:LW1-2):鳞片状白云母(M_s)与闪锌矿(ZnS); e. 绿帘石青磐岩(样号:LW3-7):自形-半自形粒状绿帘石(E_p); f. 绿帘石石英蚀变岩(样号:LW2-1):石英(Qtz)晶体中包裹着大量自形长柱状绿帘石(E_p); g. 绿泥石蚀变岩(样号:LW4452-1-10):绿泥石(Chl)、碳酸盐(Cal)矿物交代石榴子石(Grt)和透辉石(Di); h. 碳酸盐蚀变岩(样号:LW1-7):方解石交代透辉石(Di)和石榴子石(Grt)

Fig. 6 Microphotographs of typical altered rocks(III)

a. Garnet and diopside-bearing skarn (sample number: LW4452-09-6): Growth zoning's BSE and EDS analytical positions and serial numbers; b. Diopside skarn (sample number: LW4452-09-1): Diopside's BSE and EDS analytical positions and serial numbers; c. Garnet and diopside-bearing skarn (sample number: LW1-8): Lots of euhedral little columnar fluorapatites; d. Muscovitized zinc ore (sample number: LW1-2): Scaly muscovite and sphalerite; e. Epidotized propylite (sample number: LW3-7): Euhedral-subhedral granular epidote; f. Epidote-quartz altered rock (sample number: LW2-1): Lots of euhedral long-columnar epidotes are wrapped in quartz crystal; g. Chlorite altered rock (sample number: LW4452-1-10): Garnet and diopside are replaced by chlorite and carbonate minerals; h. Carbonate altered rock (sample number: LW1-7): Diopside and garnet are replaced by calcite.

元素。

透辉石 在透辉石晶体中,也发现了较为明显的环带构造,但由于透辉石为单斜晶系柱状矿物的结晶习性,环带构造发育不太完整(图6b)。本次工作没有测出明显的成分变化(表2,序号22、23、24、25),但可确定它为 $CaMg[Si_2O_6]CaFe[Si_2O_6]$ 完全类质同象系列矿物中的铁次透辉石(Di50-25 He50-75)。透辉石在矽卡岩中的含量变化与晶形的变化存在一定的相关性,当透辉石含量(质量分数,下同) $<10\%$ 时,矿物呈细粒状被包裹在石榴子石晶体中(图5b),而石榴子石呈自形菱形十二面体;当其透辉石含量在 $30\% \sim 40\%$ 时,矿物呈粒状或半自形短柱状(图5c),石榴子石呈自形-半自形粒状;当透辉石含量在 $50\% \sim 70\%$ 时,矿物呈自形短柱状(图5d),石榴子石呈半自形-他形粒状;当其含量 100% 时,透辉石呈自形长柱状(图5e)。

3.1.4 蚀变岩

矿区内蚀变岩分布广泛,种类繁多,根据其原岩类型不同,可分为2种:第一种,原岩为花岗岩类的岩石,主要发生云英岩-白云母化(图6d)、葡萄石化(图4e)和绢云母化(图4a)等;第二种,矽卡岩类的岩石,在矽卡岩成岩的后期阶段,随着温压条件的降低,出现一系列的蚀变岩石,如绿帘石青磐岩,主要由自形-半自形短柱状绿帘石组成;绿帘石石英蚀变岩,绿帘石呈自形长柱状分布在石英晶体中(图6f);碳酸盐-绿泥石蚀变岩,绿泥石和碳酸盐矿物强烈交代石榴子石和透辉石(图6g);碳酸盐蚀变岩,碳酸盐矿物强烈交代石榴子石和透辉石(图6h)。

4 矿石类型与矿相学特征

4.1 矿石类型与矿相学特征

矿石自然类型按主要容矿围岩的岩性分为石英

砂岩型、石英脉型、矽卡岩型、蚀变岩型4种矿床。其中石英砂岩型和石英脉型矿石分布于I号矿体中,主要为变余砂状结构和粒状变晶结构,星散浸染状、裂隙脉状构造,矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿,脉石矿物主要为石英;矽卡岩型、蚀变岩型矿石分布于其他矿体中,并为拉屋矿区的主要矿石类型,又可进一步分为透辉石矽卡岩型铜锌矿石、石榴子石矽卡岩型铜锌矿石、绿帘石青磐岩型铜锌矿石等,但以石榴子石矽卡岩型矿石矿化最好(杜欣等,2004)。根据铜和锌矿物的多少,又可分为铜锌矿石和锌铜矿石2种。

铜锌矿石,块状-斑杂状构造,中-粗粒、半自形-他形粒状变晶结构,矿石矿物主要为黄铜矿,呈斑杂状分布,粒径约 $3 \sim 5$ mm,占 15% ;闪锌矿粒径约 $2 \sim 12$ mm,含量 60% (图3c)。

锌铜矿石,呈块状、脉状构造,中-粗粒、半自形-他形粒状变晶结构,主要矿物有闪锌矿,粒度约 $1 \sim 5$ mm,含量 $5\% \sim 10\%$,黄铜矿粒度约 $0.5 \sim 12$ mm,占 60% ,磁黄铁矿粒度约 $1 \sim 10$ mm,含量 $5\% \sim 20\%$ (图3d)。部分锌铜矿石由斑铜矿、闪锌矿和磁黄铁矿组成,斑铜矿粒度约 $0.5 \sim 5$ mm,含量 15% (图3e),磁黄铁矿粒度约 $0.2 \sim 10$ mm,含量 20% (图3f)。呈脉状构造者主要为石英脉,脉宽约 $2 \sim 3$ cm,两侧为矽卡岩,脉中浸染状分布有黄铜矿,粒度约 $1 \sim 3$ mm,含量 10% (图3g)。另外还有锡石,细粒状结构,块状构造(图3h)。

脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、方解石、石英。围岩蚀变类型有大理岩化、矽卡岩化、角岩化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿帘石化、绿泥石化等。

4.2 金属矿物特征

本矿区金属矿物以金属硫化物为主,约占金属矿物总量的 98% 以上,其中主要金属硫化物为闪锌

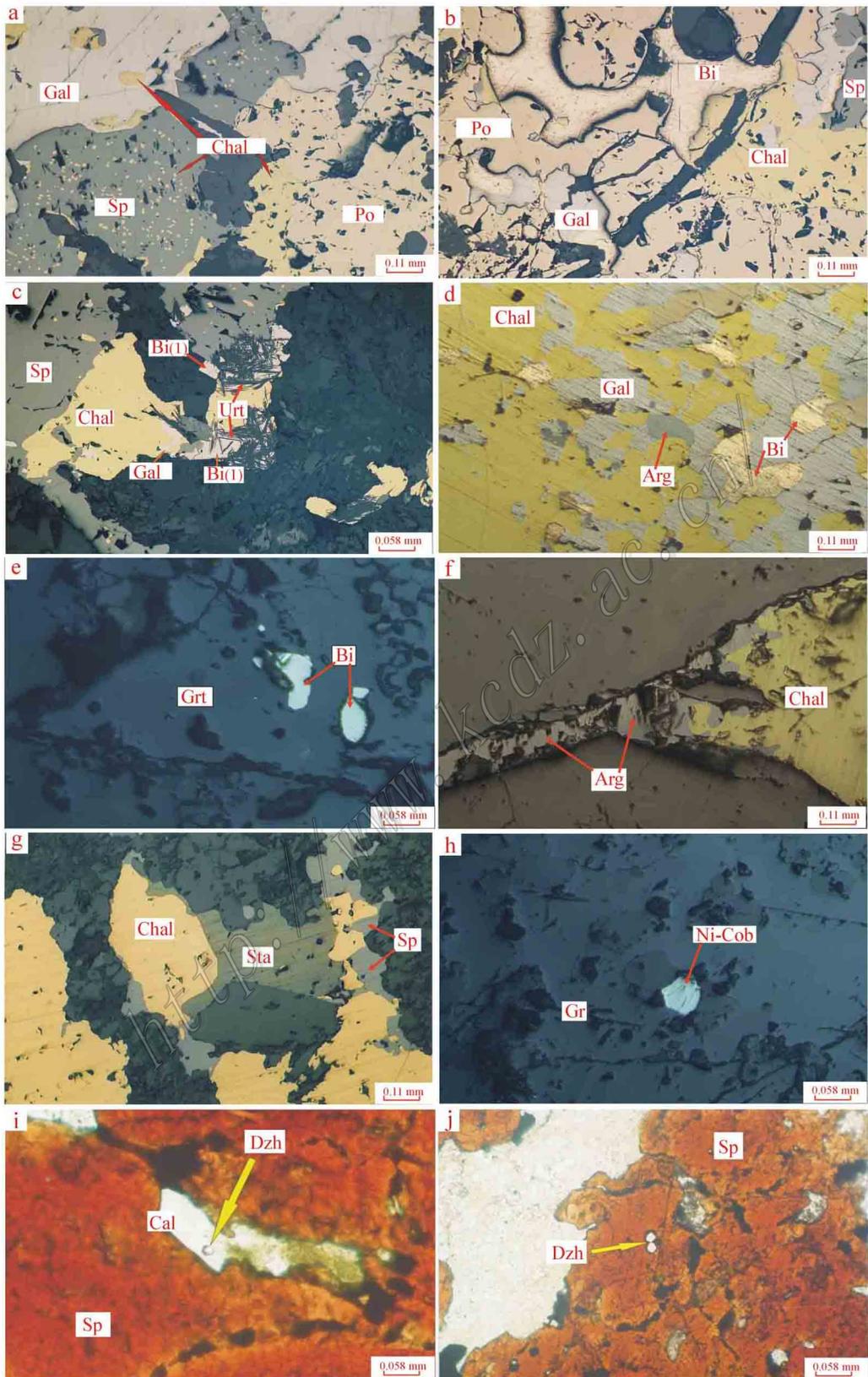


图7 拉屋矿区金属矿物显微照片

a. 铜-铅-锌矿石(样号:LWXC09-2):矿区内大量出现的金属硫化物为黄铜矿(Chal)、方铅矿(Gal)、闪锌矿(Sp)和磁黄铁矿(Po),四种矿物常同时出现,均呈他形粒状、不规则状紧密共生,或相互交代形成块状硫化物矿石。在闪锌矿晶体中包裹着大量乳滴状、叶片状黄铜矿与磁黄铁矿析

离体,表明闪锌矿结晶时间与黄铜矿和磁黄铁矿相近;b. 铋-铜-铅-锌矿石(样号:LW4452-9-5)金属矿物为磁黄铁矿(Po)、黄铜矿(Chal)、自然铋(Bi)和少量的方铅矿(Gal)、闪锌矿(Sp),产于金属硫化物矿石中的自然铋(Bi)常变成粉红色,一般呈他形不规则状,只分布在磁黄铁矿(Po)和与方铅矿(Gal)中,其粒度大小一般在0.1~1mm之间。反映矿物的生成顺序为:自然铋(Bi)→方铅矿(Gal)+磁黄铁矿(Po)→黄铜矿(Chal);c. 铋-铜-铅-锌矿石(样号:LW4452-9-5)未知铋矿物(Bi(1)),为铋的硫化物(由电镜能谱确定),为四方或斜方晶系,反射率略高于方铅矿(Gal),反射色略偏粉色,具微弱的反射多色性,硬度与闪锌矿相近,与黄铜矿(Chal)、方铅矿(Gal)等共生,被晚期针状纤闪石(Urt)所交代;d. 铋-铜-铅-锌矿石(样号:LW-2-2)黄铜矿(Chal)、方铅矿(Gal)、自然铋(Bi)和少量辉银矿(Arg),自然铋(Bi)已变成粉红色乳色,呈他形粒状,一般粒度在0.05~0.2mm之间,只分布在方铅矿中。辉银矿(Arg)呈灰色,反射率约30%,无反射多色性为等轴晶系矿物,其形成温度>177℃(中国地质科学院地质矿产所,1978)。也呈他形粒状,粒度约0.1mm,与黄铜矿(Chal)共生。反映矿物的生成顺序为:自然铋(Bi)→方铅矿(Gal)→黄铜矿(Chal)+辉银矿(Arg)(>177℃)(中国地质科学院地质矿产所,1978);e. 铋-铜矿石(样号:LW-1-5)石榴子石(Grt)中的自然铋(Bi)为亮白色,反射率60%±,呈自形-半自形粒状,粒度细小,一般小于0.1mm,含量较少;f. 铋-铜矿石(样号:LW4452-4)产于裂隙中的辉银矿(Arg)具反射多色性,属单斜晶系矿物,见局部交代黄铜矿(Chal),表明形成较晚,温度较低(<177℃)(中国地质科学院地质矿产所,1978)。矿物的生成顺序为:黄铜矿(Chal)→辉银矿(Arg);g. 铋-铜矿石(样号:LW-1-1)黄黝锡矿(Sta),为浅灰色略带橄榄绿色,呈他形晶与黄铜矿(Chal)共生,为高温热液产物(中国地质科学院地质矿产所,1978);h. 铋-铜矿石(样号:LW4452-6)产于石榴子石(Grt)晶体中的含镍辉钴矿(Ni-Cob),呈等轴粒状,为等轴晶系矿物,呈亮白色,反射色50%±,形成温度在800℃以上(中国地质科学院地质矿产所,1978);i. 铋-铜-锌矿石和铜矿石(样号:LW-2-5)透射光下红色闪锌矿(Sp)之间的碳酸盐矿物(Cal)中可见等轴粒状的羟锆石(Zh)晶体(箭头所指);j. 铋-铜-锌矿石(样号:LW-2-5)透射光下红色闪锌矿(Sp)中羟锆石(Zh)晶体(?)残留的等轴粒状空洞(箭头所指)

Fig. 7 Microphotographs of metallic minerals from the Lawu ore deposit

a. Copper-lead-zinc ore (sample number: LWXC09-2): Metal sulfides appear in large quantities are chalcopyrite, galena, sphalerite and pyrrhotite which are allotriomorphic-granular and irregular-shaped paragenetic minerals or massive sulphide ores of mutual replacement. Lots of milk drop-shaped, leaf-shaped schlierens of chalcopyrite and pyrrhotite are wrapped in sphalerite crystals, suggesting that the crystallization time of sphalerite is similar to that of chalcopyrite and pyrrhotite. B. Bismuth-copper-lead-zinc ore (sample number: LW4452-9-5): Metallic minerals are pyrrhotite, chalcopyrite, native bismuth and a small amount of galena and sphalerite. Native bismuth in metal sulfide ores has usually changed into pink milk color. When bismuth is allotriomorphic and irregular-shaped, it is only distributed in pyrrhotite and galena, and its grain size is 0.1-1mm. In conclusion, these phenomena suggest that the generation sequence is native bismuth→galena and pyrrhotite→chalcopyrite. c. Bismuth-copper-lead-zinc ore (sample number: LW4452-9-5): Unknown bismuth minerals (Bi(1)), which are bismuth sulfides (determined by EDS), are of the tetragonal or rhombic system, whose reflectivity is a little higher than galena's, whose reflective color is slightly biased in favor of pink and has a weak reflection pleochroism, whose hardness is close to that of sphalerite; such minerals are associated with chalcopyrite, galena (Gal), etc, and are replaced by late needle-like urallite. D. Bismuth-copper-lead-zinc ore (sample number: LW-2-2): Chalcopyrite, galena, native bismuth and a little argentite. Native bismuth has changed into pink milk color, it is allotriomorphic-granular, its grain size is 0.05-0.2 mm and it is only distributed in galena. Argentite is gray, its reflectivity is about 30%, and it occurs as equiaxial crystal minerals with no reflection pleochroism. The temperature that it generated may be high (>177℃) (Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1978). It is anhedral, and the particle size is about 0.1mm, and is also associated with chalcopyrite. In conclusion, these phenomena suggest that the formation sequence is native bismuth→galena→chalcopyrite and argentite (>177℃) (Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological sciences, 1978). E. Bismuth-copper ore (sample number: LW-1-5): Native bismuth in garnet is bright white, its reflectivity is about 60%, it assumes euhedral-subhedral granular structure, its grain size is usually less than 0.1mm, and its content is small. f. Bismuth-copper ore (sample number: LW4452-4): Argentite in fissures replaces chalcopyrite locally, with reflective multicolor, and belongs to monoclinic mineral, implying late formation and lower temperature (<177℃) (Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1978). These phenomena imply that the formation sequence is chalcopyrite→argentite. g. Bismuth-copper ore (sample number: LW-1-1): Stannite is light gray with slightly olive green, it is allotriomorphic, it is associated with chalcopyrite, and it is the product of high-temperature hydrothermal (Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1978). h. Bismuth-copper ore (sample number: LW4452-6): Nickel cobaltite in garnet crystal is isometric-granular and equiaxial crystal mineral, and is bright white, its reflectivity is about 50%, and the temperature that it generated is higher than 800℃ (Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1978). i. Indium-copper-zinc ore and copper ore (sample number: LW-2-5): Isometric-granular dzhalindite (arrows) in carbonatite minerals which is distributed among sphalerite crystals, and the sphalerite crystals are red under the transmitted light. j. Indium-copper-zinc ore (sample number: LW-2-5): Isometric-granular holes left by dzhalindite in the sphalerite crystals, and the sphalerite crystals are red under the transmitted light

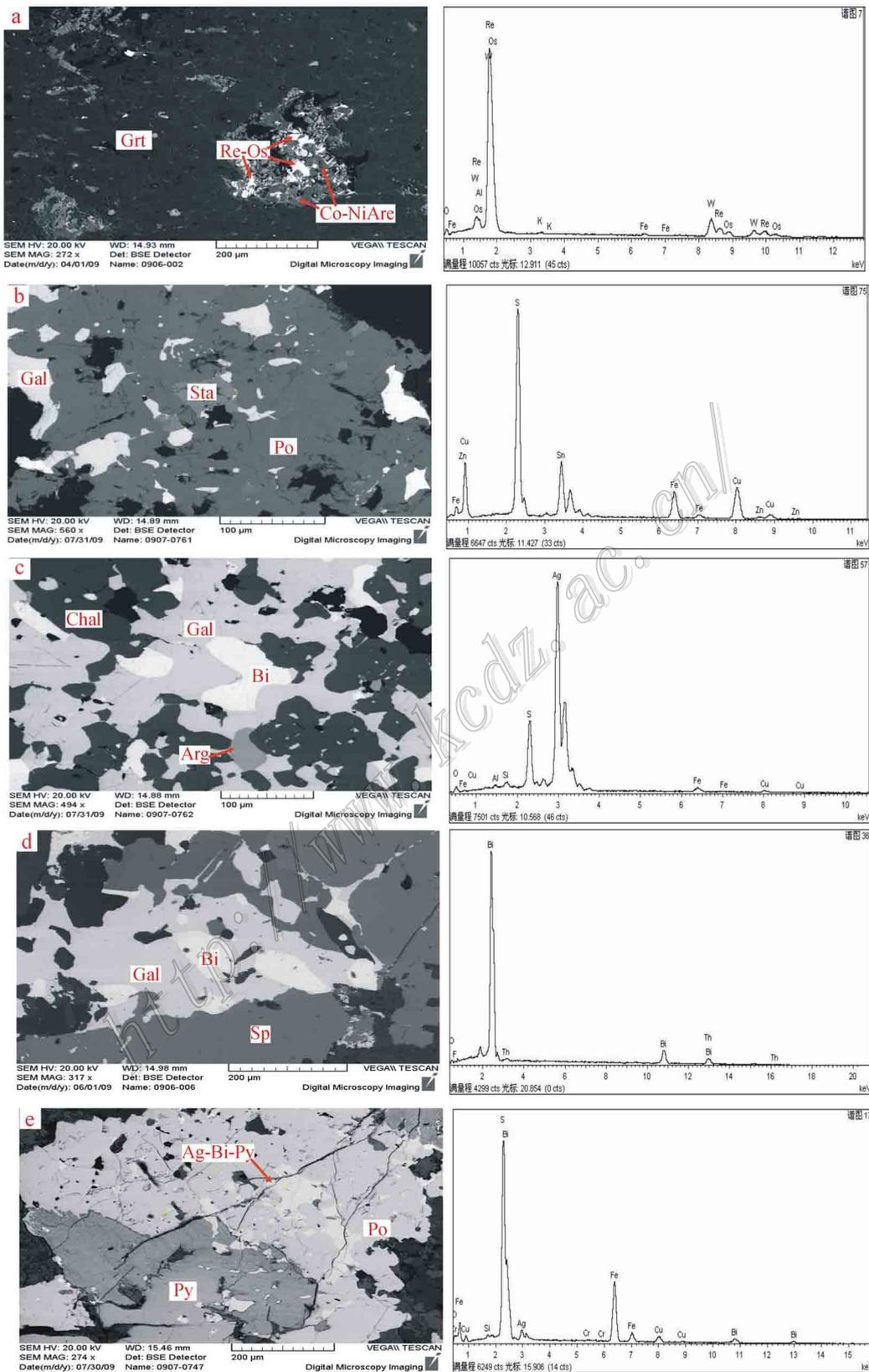


图 8 主要金属矿物扫描电镜图像与电镜能谱分析谱线图(1)

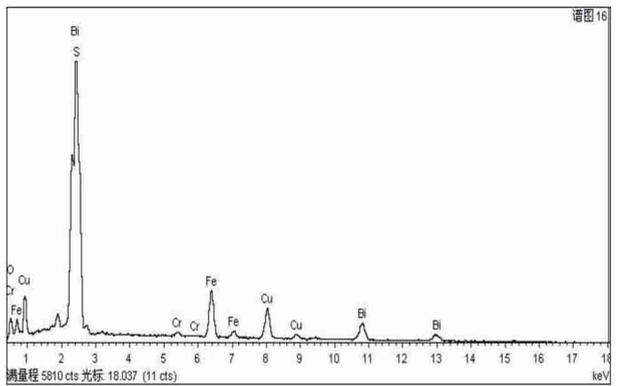
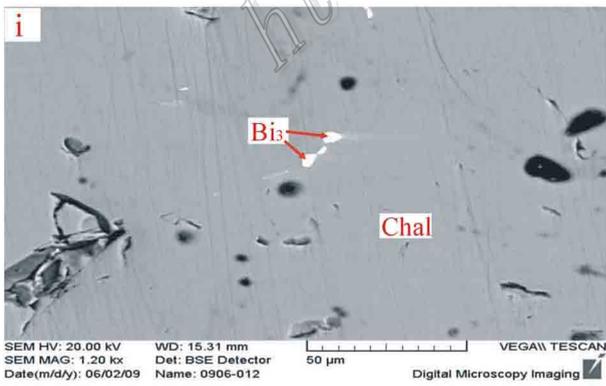
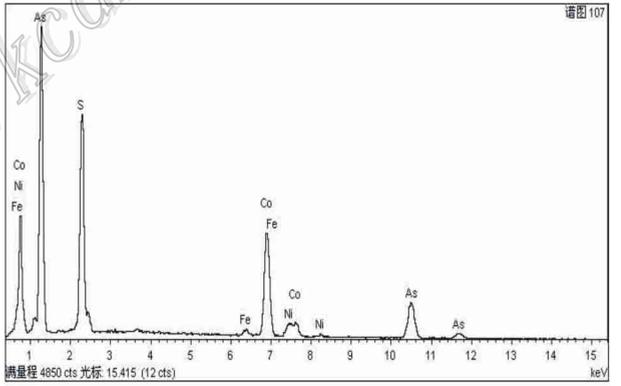
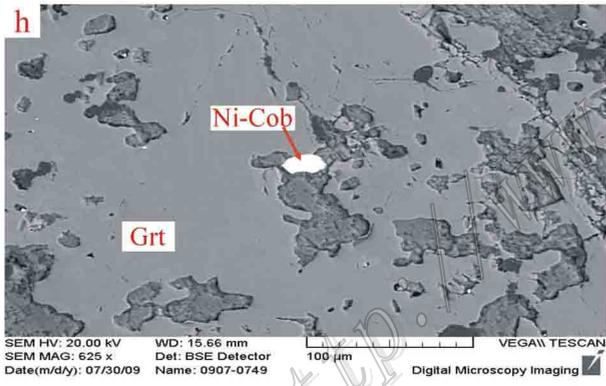
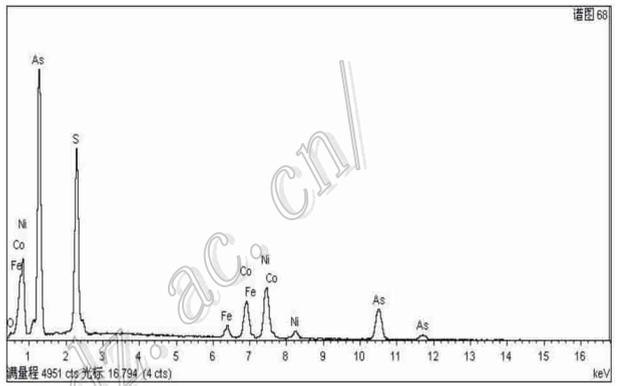
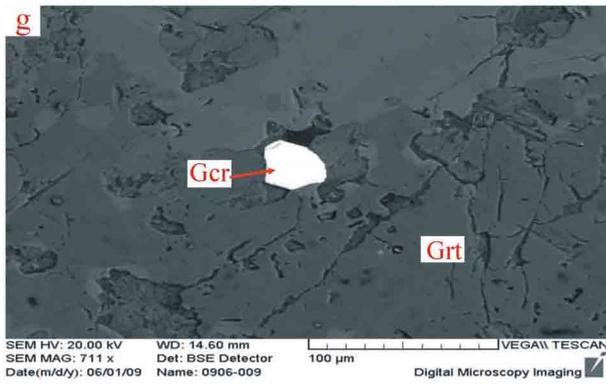
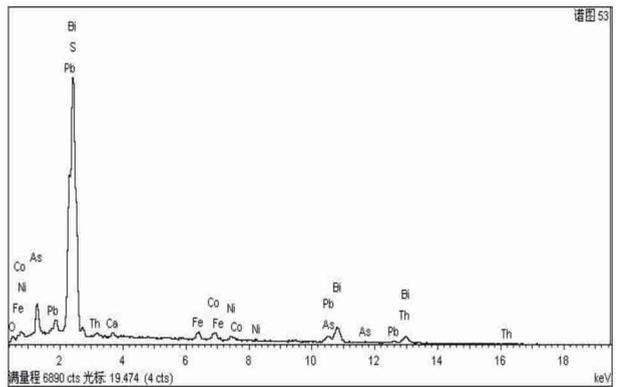
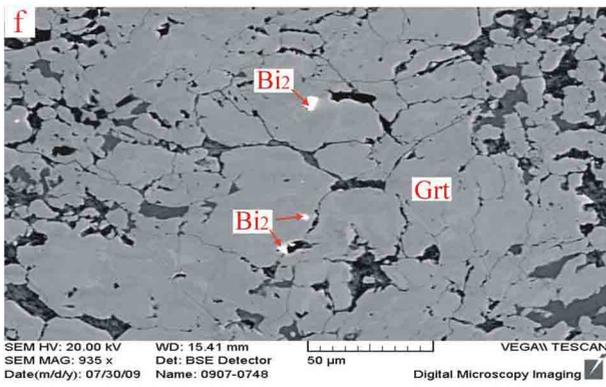


图 8 主要金属矿物扫描电镜图像与电镜能谱分析谱线图(2)

a. 铼钨矿(Re_2Os)被包裹在含钴镍毒砂($Co-Ni-ArS$)晶体中。而含钴镍毒砂又被石榴子石(Grt)晶体所包裹(样号:LW-2-11)。右图为铼钨矿(Re_2Os)的电镜能谱图。b. 磁黄铁矿(Po)中分布着黄黝锡矿(Sta)和方铅矿(Gal)。黄黝锡矿被包裹于其中为形成较早,而方铅矿散乱分布可能与磁黄铁矿同期形成(样号:LW-2-2)。右图为黄黝锡矿(Sta)的电镜能谱图。c. 自然铋(Bi)只分布在方铅矿(Gal)中,黄铜矿($Chal$)与辉银矿(Arg)共生(样号:LW2-2)。右图为辉银矿(Arg)的电镜能谱图。d. 自然铋(Bi)只分布在方铅矿(Gal)中,闪锌矿(Sp)包裹交代方铅矿,矿物的生成顺序为:自然铋(Bi)→方铅矿(Gal)→闪锌矿(Sp)。右图为自然铋(Bi)的电镜能谱图。e. 含银铋黄铁矿($Ag-Bi-Py$)分布在磁黄铁矿(Po)中,磁黄铁矿(Po)交代黄铁矿(Py),反映三种矿物的生成这顺序向着S减少、Bi-Ag富集的方向进行(样号:LW-1-1)。右图为含银铋黄铁矿($Ag-Bi-Py$)的电镜能谱图。f. 石榴子石(Grt)晶体中包裹的含钴镍砷(砷)铋矿物(Bi_2)分布在磁黄铁矿(Po)中,磁黄铁矿(Po)交代黄铁矿(Py),反映三种矿物的生成这顺序向着S减少、Bi-Ag富集的方向进行(样号:LW-1-1)。右图为含钴镍砷(砷)铋矿物(Bi_3)的电镜能谱图。g. 石榴子石(Grt)晶体中包裹的辉砷镍矿($NiAsS$)包裹在石榴子石(Grt)中,右图为辉砷镍矿($NiAsS$)的电镜能谱图。h. 石榴子石(Grt)晶体中包裹的含镍辉钴矿($Ni-Cob$)分布在磁黄铁矿(Po)中,磁黄铁矿(Po)交代黄铁矿(Py),反映三种矿物的生成这顺序向着S减少、Bi-Ag富集的方向进行(样号:LW-1-1)。右图为含镍辉钴矿($Ni-Cob$)的电镜能谱图。i. 黄铜矿($Chal$)晶体中包裹的硫铜铁铋矿物表明铋的硫化物与黄铜矿共生,或略早于黄铜矿($Chal$)。右图为铜铁铋矿物(Bi_3)的电镜能谱图。

Fig. 8 SEM images and energy spectral patterns for major metal minerals

a. Rhenium-osmium-tungsten ore is wrapped in cobalt and nickel-bearing arsenopyrite, whereas nickel-bearing arsenopyrite is wrapped in garnet (sample number: LW2-11). There exist the energy spectral patterns of rhenium-osmium-tungsten ore on the right. b. Stannite and galena are distributed in pyrrhotite. Stannite is wrapped in pyrrhotite, indicating that it was generated much earlier, but galena is distributed in scattered form, indicating that it might have been generated at the same time with pyrrhotite (sample number: LW2-2). There exist the energy spectral patterns of stannite in the right. c. Native bismuth is only distributed in galena. Chalcopyrite is associated with argentite (sample number: LW2-2). There are the energy spectral patterns of argentite on the right. d. Native bismuth is only distributed in galena. Galena is wrapped in sphalerite, and is replaced by sphalerite minerals, with the formation sequence being native bismuth→galena→sphalerite (sample number: LW2-2). There are the energy spectral patterns of native bismuth on the right. e. Silver and bismuth-bearing pyrite is distributed in pyrrhotite, and pyrrhotite replaces pyrite, implying that the generation sequence of the three minerals was along with the decrease of S and the increase of Bi-Ag (sample number: LW1-1). There exist the energy spectral patterns of silver and bismuth-bearing pyrite on the right. f. Cobalt-nickel-sulfide(arsenic)-bismuth minerals (Bi_2) is distributed in pyrrhotite, and pyrrhotite replaces pyrite, implying that the generation sequence of the three minerals was along with the decrease of S and the increase of Bi-Ag (sample number: LW1-1). There exist the energy spectral patterns of cobalt-nickel-sulfide(arsenic)-bismuth minerals (Bi_2) on the right. g. Gersdorffite is wrapped in garnet (sample number: LW4452-6). There exist the energy spectral patterns of gersdorffite on the right. h. Nickel-bearing cobaltite is wrapped in garnet (sample number: LW1-8). There exist the energy spectral patterns of nickel-bearing cobaltite mine on the right. i. Sulfur-copper-iron-bismuth mineral is wrapped in chalcopyrite, implying that sulfides of bismuth might have been generated at the same time or earlier than chalcopyrite (sample number: LW2-11). There exist the energy spectral patterns of copper-iron-bismuth mineral (Bi_3) on the right.

表 2 石榴子石与辉石电镜能谱分析计算结果

Table 2 The analysis result of energy spectrum patterns of garnet and pyroxene

序号	样品号	扫描电镜下颜色	化学式
石榴子石			
1	LW4452-09-6-1	黑色	$Al_{1.32}Ca_{3.12}Mg_{0.05}Fe_{0.74}Mn_{0.05}Si_{3.06}O_{12}$
2	LW4452-09-6-2	黑色	$Al_{1.28}Ca_{3.18}Fe_{0.75}Mn_{0.05}Si_{3.02}O_{12}$
3	LW4452-09-6-3	黑色	$Al_{1.31}Ca_{3.12}Fe_{0.78}Mn_{0.03}Si_{3.05}O_{12}$
4	LW4452-09-6-4	灰色	$Al_{0.86}Ca_{3.27}Fe_{1.19}Mn_{0.03}Si_{3.11}O_{12}$
5	LW4452-09-6-5	黑色	$Al_{1.31}Ca_{3.18}Fe_{0.75}Mn_{0.05}Si_{3.12.96}O_{12}$
6	LW4452-09-6-6	灰色	$Al_{0.68}Ca_{3.33}Fe_{1.38}Mn_{0.03}Si_{2.96}O_{12}$
7	LW4452-09-6-7	黑色	$Al_{1.53}Ca_{3.09}Fe_{0.47}Mn_{0.08}Ti_{0.05}Si_{3.00}O_{12}$
8	LW4452-09-6-8	灰色	$Al_{0.36}Ca_{3.38}Fe_{1.74}Si_{3.17}O_{12}$
9	LW4452-09-6-9	黑色	$Al_{1.44}Ca_{3.14}Fe_{0.69}Mn_{0.06}Ti_{0.06}Si_{3.03}O_{12}$
10	LW4452-09-6-10	灰色	$Al_{0.59}Ca_{3.27}Fe_{1.41}Mn_{0.05}Ti_{0.11}Si_{3.09}O_{12}$
11	LW4452-09-6-11	黑色	$Al_{1.34}Ca_{3.14}Fe_{0.69}Mn_{0.06}Ti_{0.06}Si_{3.012}$
12	LW4452-09-6-12	灰色	$Al_{0.72}Ca_{3.24}Fe_{1.37}Mn_{0.06}Si_{3.14}O_{12}$
13	LW4452-09-6-13	灰色	$Al_{0.83}Ca_{3.21}Fe_{1.28}Mn_{0.05}Si_{3.12}O_{12}$
14	LW4452-8-6	灰色	$Al_{0.39}Ca_{3.3}Fe_{1.79}Mn_{0.03}Si_{3.15}O_{12}$
15	LW4452-8-7	黑色	$Al_{1.41}Ca_{3.17}Fe_{0.65}Mn_{0.05}Si_{3.012}$
16	LW4452-8-8	灰色	$Al_{0.41}Ca_{3.3}Fe_{1.74}Mn_{0.05}Si_{3.17}O_{12}$
17	LW4452-8-9	灰色	$Al_{0.96}Ca_{3.17}Fe_{1.61}Mn_{0.05}Si_{3.17}O_{12}$
18	LW4452-8-10	灰色	$Al_{0.99}Ca_{3.32}Fe_{1.62}Mn_{0.03}Si_{3.14}O_{12}$
19	LW4452-8-11	黑色	$Al_{1.35}Ca_{3.18}Fe_{0.68}Mn_{0.06}Ti_{0.06}Si_{2.97}O_{12}$
20	LW4452-8-12	灰色	$Al_{0.78}Ca_{3.33}Fe_{1.73}Mn_{0.03}Si_{3.17}O_{12}$
21	LW4452-8-13	黑色	$Al_{1.37}Ca_{3.2}Fe_{0.65}Mn_{0.06}Ti_{0.06}Si_{2.97}O_{12}$
辉石			
22	LW4452-8-1		$Ca_{1.04}Fe_{0.61}Mg_{0.33}Mn_{0.08}Si_{1.97}O_6$
23	LW4452-8-2		$Al_{0.01}Ca_{1.04}Fe_{0.62}Mg_{0.32}Mn_{0.08}Si_{1.97}O_6$
24	LW4452-8-3		$Ca_{1.04}Fe_{0.62}Mg_{0.41}Mn_{0.09}Si_{1.97}O_6$
25	LW4452-8-4		$Ca_{1.04}Fe_{0.62}Mg_{0.32}Mn_{0.08}Si_{1.97}O_6$

注:石榴子石序号 1~13 图像与点位见图 6a,序号 14~21 图像与点位见图 5g,透辉石序号 22~25 图像与点位见图 6b。石榴子石成分中以 12 个 O 为基准,化学式中 Si 大于 3,是由于电镜能谱分析本身测试误差所致。

矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿,有少量辉银矿、含银铋黄铁矿(?)、黄(黝)锡矿以及Bi的硫化物矿物等。其次为金属硫-砷化物,例如钴镍毒砂,含镍辉钴矿、辉砷镍矿和硫砷Bi矿物等。金属氧化物含量极少,仅见有锡石、铋钨矿和羟钨石。自然元素有自然铋和自然银。它们的特征如下。

铁的硫化物 拉屋矿区的铁的硫化物主要有黄铁矿与磁黄铁矿2种。黄铁矿(FeS_2)含量较少,一般呈半自形-他形晶,被后期大量出现的磁黄铁矿、黄铜矿等交代,一般不含有其他成矿金属元素(表3,序号14)。磁黄铁矿(Fe_{1-x}S)在矿石中大量出现,手标本为靛色,硬度较大,一般呈他形-不规则状与闪锌矿、方铅矿和黄铜矿等共生或交代(如图7a、7b)。镜下观察其粒度一般在0.1~0.3 mm之间。此外,有少量的磁黄铁矿呈乳滴状被包裹在闪锌矿晶体中,为闪锌矿结晶过程中析出所致,电镜能谱分析结果显示,磁黄铁矿晶体中不含有其他成矿金属元素(表3,序号18、47、51、54、23、29、36)。

铜矿物 包括黄铜矿和斑铜矿2种。黄铜矿(CuFeS_2)为本矿区主要Cu矿物,手标本上呈铜黄色,硬度低,一般呈他形不规则状,粒度大小一般在0.1~3 mm,除与方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿共生外,还常与早期较高温的辉银矿、黄(黝)锡矿、自然铋和未知铋矿物等共生(图7a、7b、7c、7d、7g),并被晚期较低温辉银矿交代(图7f)。另外,黄铜矿常呈乳滴状分布于闪锌矿晶体中(图7f)。斑铜矿(Cu_5FeS_4)手标本上为暗紫色(图3e),反光镜下观察为紫罗兰色,硬度略小于黄铜矿,呈他形粒状,粒度大小不等,在0.5~3 mm之间,可见交代黄铜矿的现象,表明形成晚于黄铜矿。

锌矿物 主要为闪锌矿[(Fe,Zn)S],手标本上呈棕黑色,透射光下呈棕红色(如图7i、7j),反光镜下反射率较低,呈灰色,电镜能谱分析表明 $w(\text{FeO})$ 在8.36%~10.45%,在分子式中Fe/Zn比值 $<1/5$,不含其他成矿金属元素(表3,序号4、7、11、32、35、38、55)。一般呈他形不规则粒状,晶体一般较为粗大,在1~5 mm之间,常包裹方铅矿,黄铜矿在主要金属硫化物中结晶相对略晚,含有大量乳滴状黄铜矿析离体为本区闪锌矿的一大特征(图7a)。

铅矿物 主要为方铅矿(PbS),手标本上为铅灰色,立方体解理发育,镜下有明显的三角空洞(图7a),反光镜下呈他形不规则状,与自然铋、辉银矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等共生(如图7a、7b、7c、

7d)。电镜能谱测试结果显示其不含其他成矿金属元素(表3,序号2、6、9、17、22、28、34、46)。

铋矿物 所发现的Bi矿物有自然铋、硫铅铋银矿、硫铜铁铋矿物、(含钴镍)硫砷铋矿物(?)、含Ag-Bi黄铁矿。其中自然铋含量最多,分布最广泛,可分布于石榴子石晶体中,也大量出现在金属硫化物中。(含钴镍)硫砷铋矿物只出现在石榴子石晶体中,硫铜铁铋矿物(?)、硫铅铋银矿和含AgBi黄铁矿(?)本身就是Bi的金属硫化物,只分布于金属硫化物矿石中。

产于石榴子石晶体中的自然铋呈亮白色,反射率 $60\% \pm$,呈自形-半自形粒状,粒度细小,一般 <0.1 mm,含量较少(图7e)。产于金属硫化物矿石中的自然铋常变成粉红色,一般呈他形不规则状,常分布于磁黄铁矿和方铅矿中,略早于磁黄铁矿和方铅矿(图7b、7d)。电镜能谱分析结果见表3,序号1、3、5、8、16、19、21、27、33、37、43、50、57、58)和图8d。

未知Bi矿物,可能为四方或斜方晶系,反射率略高于方铅矿,反射色略偏粉色,具微弱的反射多色性,硬度与闪锌矿相近,与黄铜矿、方铅矿等共生,被晚期针状纤闪石所交代(图7c)。

硫铅铋银矿为亮乳白色,反射率 $60\% \pm$,呈他形粒状,常分布在黄铜矿晶体中,电镜能谱分析结果见表3(序号40)。含AgBi黄铁矿(?),产于磁黄铁矿中(图8e),磁黄铁矿常交代黄铁矿而成,三者的矿物分子式为黄铁矿(FeS_2) \rightarrow 磁黄铁矿(Fe_{1-x}S) \rightarrow 含Ag-Bi黄铁矿(?)[$(\text{Ag},\text{Bi},\text{Fe})_8\text{S}_8$](表3,序号15)。表明矿物的生成顺序向S降低,而Ag与Bi向升高的方向发展。

硫铜铁铋矿物,粒度细小,分布于黄铜矿中(图8i;表3,序号49、52)。

(含钴镍)硫砷铋矿物,分布于石榴子石晶体中(图8f;表3,序号30)。

银矿物 矿区所含Ag矿物有自然银、辉银矿、辉铜铁)银矿、硫铅铋银矿、含AgBi黄铁矿。其中硫铅铋银矿和含AgBi黄铁矿都含Bi和Ag,在Bi矿物中已有说明,故不再赘述。自然银产于金属硫化物矿石中,粒度极为细小(0.01 mm),反射率极高,银的纯度见表3(序号39)。辉银矿(Ag_2S)(图7d)的电镜能谱分析结果见表3(序号41),它呈灰色,反射率约30%,没有反射多色性,为等轴晶系矿物,也呈他形粒状,粒度约0.1 mm,与黄铜矿共生,其形成温度可能较高($>177^\circ\text{C}$)(样号:LW-2-2)。产于裂

表 3 拉屋矿床金属矿物电镜能谱分析结果
Table 3 The analysis result of energy spectrum patterns of metallic minerals from Lawu deposit

序号	样号	矿物名称	矿物晶系	wt(B)/%														化学式		
				Fe	Cu	Pb	Zn	Ag	Bi	Sn	Co	Ni	As	W	Os	Re	O		S	
1	LW4452-5-1	自然铋	六方							95.07										Bi
2	LW4452-5-2	方铅矿	等轴		84.17															Pb _{33.05} S _{7.688}
3	LW4452-5-3	自然铋	六方							95.62										Bi
4	LW4452-5-4	闪锌矿	等轴			54.68														(Fe _{8.14} Zn _{38.92}) _{47.06} S _{17.85}
5	LW4452-5-5	自然铋	六方							96.08										Bi
6	LW4452-5-6	方铅矿	等轴		85.20															Pb _{17.12} S _{2.88}
7	W4452-5-7	闪锌矿	等轴			54.18														(Fe _{8.92} Zn _{39.49})S _{30.98}
8	LW4452-5-8	自然铋	六方							96.14										Bi
9	LW4452-5-9	方铅矿	等轴		83.74															Pb _{12.11} S _{17.84}
10	LW4452-5-10	磁黄铁矿	六方	59.47																Fe _{5.73} S _{3.27}
11	LW4452-5-11	闪锌矿	等轴	8.61																(Fe _{7.36} Zn _{41.66})S _{30.69}
12	LW4452-6-2	辉砷镍矿	等轴	2.65			57.02													(Fe _{2.69} Co _{0.75} Ni _{23.23}) _{33.42} As _{33.26} S _{33.32}
13	LW-1-1-1	磁黄铁矿	六方	59.21								12.22	20.42	44.85						Fe _{5.46} S _{3.54}
14	LW-1-1-2	黄铁矿	等轴	43.62																Fe _{3.02} S _{3.33}
15	LW-1-1-4	含银磁黄铁矿(?)	六方	31.65	5.00		5.64	25.68												(Ag _{2.71} Bi _{6.37} Cu _{4.08} Fe _{39.36}) _{42.52} S _{41.56}
16	LW-1-3-1	自然铋	六方							94.89										Bi
17	LW-1-3-2	方铅矿	等轴		83.85															Pb _{12.30} S _{17.56}
18	LW-1-3-3	黄铜矿	等轴	30.52	33.54															Cu _{31.04} Fe _{3.90} S _{51.06}
19	LW-1-3-5	自然铋	六方	4.24						74.91										Bi
20	LW-1-3-6	含钴镍毒砂	斜方	26.28								2.94	4.94							(Ni _{2.23} Co _{5.07} Fe _{36.02}) _{33.32}
21	LW-1-3-7	自然铋	六方							93.56										As _{35.22} S _{31.46}
22	LW-1-3-8	方铅矿	等轴		81.86															Pb _{36.91} S _{2.66}
23	LW-1-3-9	黄铁矿	等轴	30.34	33.71															Cu _{31.17} Fe _{3.75} S _{51.08}
24	LW-1-3-10	磁黄铁矿	六方	59.30																Fe _{5.55} S _{3.45}
25	LW-1-5-1	(含钴镍)毒砂	斜方	29.16								2.63	1.23	46.16						(Ni _{1.07} Co _{2.38} Fe _{36.65}) _{30.00} As _{31.44} S _{27.78}
26	LW-1-5-3	(含钴镍)毒砂	斜方	30.37								2.65		48.04						(Ni _{0.59} Co _{2.48} Fe _{30.02}) _{33.00} As _{35.39} S _{31.52}
27	LW-1-5-4	自然铋	六方							95.55										Bi
28	LW-1-5-5	方铅矿	等轴		81.66															Pb _{37.88} S _{3.10}
29	LW-1-5-6	黄铜矿	等轴	29.18	34.09															Cu _{34.34} Fe _{3.70} S _{51.96}
30	LW-1-7-1	(含钴镍)硫 神秘矿物(?)		2.26						64.20		2.44	1.78	5.68						(Fe _{3.88} Co _{3.97} Ni _{2.91} Pb _{4.46} Bi _{29.52}) _{44.74} (As _{7.29} S _{31.70}) _{39.05}
31	LW-1-8-1	含镍辉钴矿		1.35								30.32	4.30	44.24						(Fe _{1.33} Ni _{4.05} Co _{28.27}) _{33.63} As _{32.45} S _{33.92}

续表 3
Continued Table 3

序号	样号	矿物名称	矿物晶系	wt(B)/%											化学式					
				Fe	Cu	Pb	Zn	Ag	Bi	Sn	Co	Ni	As	W		Os	Re	O	S	
32	LW-1-8-2	闪锌矿	等轴	9.72			54.98													(Fe _{8.29} Zn _{10.08})S _{31.07}
33	LW-1-9-1	自然铋	六方							95.72										Bi
34	LW-1-9-2	方铅矿	等轴		82.02															Pb _{10.29} S _{13.34}
35	LW-1-9-3	闪锌矿	等轴	9.98			55.85													(Fe _{8.57} Zn _{10.97}) _{49.54} S _{80.21}
36	LW-1-9-4	黄铜矿	等轴	30.17	34.08															Cu _{24.48} Fe _{24.65} S _{80.57}
37	LW-2-1-1	自然铋	六方				4.96			87.62										Bi
38	LW-2-1-4	闪锌矿	等轴	10.02			55.01													(Fe _{8.88} Zn _{10.23}) _{48.81} S _{80.55}
39	LW-2-1-5	自然银	等轴				1.88	85.70												Ag
40	LW-2-1-6	硫铅铋银矿	等轴六方	1.69			2.87	27.18	51.71											(Fe _{2.77} Zn _{4.02} Ag _{23.11} Bi _{2.70}) _{52.60} S _{47.39}
41	LW-2-2-1	辉银矿	等轴	1.85	1.13			80.02												Ag ₂ S
42	LW-2-2-2	锡石	正方								68.38									SnO ₂
43	LW-2-2-3	自然铋	六方					96.28												Bi
44	LW-2-2-4	黄(黝)锡矿	正方	12.29	28.36						27.50									Cu _{23.97} Sn _{12.44} Fe _{11.81} Zn _{1.48} S _{80.31}
45	LW-2-5-1	磁黄铁矿	六方	57.87																Fe _{84.17} S _{5.12}
46	LW-2-6-1	方铅矿	等轴			83.64														Pb _{11.83} S _{7.88}
47	LW-2-6-2	黄铜矿	等轴	30.13	34.00															Cu _{24.40} Fe _{24.60} S _{81.01}
48	LW-2-6-3	磁黄铁矿	六方	59.11																Fe _{85.36} S _{4.64}
49	LW-2-11-1	硫铜铁铋矿物(?)	斜方	11.18	12.47					58.31										Bi _{19.59} Cu _{13.71} Fe _{13.99} S _{23.68}
50	LW-2-11-2	自然铋	六方	2.17	2.95					84.09										Bi
51	LW-2-11-4	黄铜矿	等轴	29.77	34.21															Cu _{24.53} Fe _{24.29} S _{81.18}
52	LW-2-11-5	硫铜铁铋矿物(?)	斜方	6.62	6.86					72.73										Bi _{28.74} Cu _{8.84} Fe _{9.70} S _{6.09}
53	LW-2-11-6	自然铋	六方							92.13										Bi
54	LW-2-11-7	黄铁矿	等轴	29.37	33.85															Cu _{24.15} Fe _{23.84} S _{82.01}
55	LW-2-11-8	闪锌矿	等轴	8.36			57.42													(Fe _{8.57} Zn _{10.97}) _{49.54} S _{80.21}
56	LW-2-11-9	磁黄铁矿	六方	59.61																Fe _{85.87} S _{4.13}
57	LW-2-11-10	自然铋	六方							93.92										Bi
58	LW-2-11-12	自然铋	六方							93.77										Bi
59	LW-3-3-2	铋银铋矿																		
60	LW-2-1-3	辉(铜铁)银矿(?)		13.09	12.51		2.48	48.17												(Re _{17.21} Os _{12.48}) _{29.69} W _{30.89} O _{34.81}

注:序号15含银铋黄铁矿的分子式根据《金属矿物显微鉴定表》中镍黄铁矿(Fe,Ni)₉S₈的分子式推断而得。序号40等的硫铅铋银矿、AgBiS₂相在部分文献中一般称为硫铋银矿,硫铋银矿(Mendilite)在欧洲的文献中则成为“硫铅铋银矿”,在《金属矿物显微鉴定表》一书中与欧洲习惯用法一致的名称“硫铋银矿”。

隙中的辉银矿(图 7f)呈灰色,反射率 $\leq 30\%$,具弱反射多色性,为单斜晶系矿物,见局部交代黄铜矿,表明形成较晚,温度较低($< 177^\circ\text{C}$) (中国地质科学院地质矿产所,1978)。辉(铜铁)银矿(表 3,序号 60)的成分与辉银矿(表 3,序号 41)相比,有较大的差异,在辉(铜铁)银矿中, $w(\text{Ag})$ 只有 48.17%, $w(\text{Fe})$ 、 $w(\text{Cu})$ 分别为 13.09%和 12.51%,在辉银矿中, $w(\text{Ag})$ 为 80.02%, $w(\text{Fe})$ 、 $w(\text{Cu})$ 分别为 1.85%和 1.13%。表明 Fe、Cu、Ag 的硫化物在高温条件下混合程度高,可形成辉(铜铁)银矿。在温度降低的条件下析出大量的 Fe 和 Cu,形成等轴晶系的辉银矿,随着温度的降低,等轴晶系的辉银矿进一步相变成单斜晶系的辉银矿,该相变温度为 177°C 。这些现象反映了由高温 \rightarrow 低温的成矿过程。

钴镍矿物 矿区所见钴镍矿物有含镍辉钴矿、辉砷镍矿、Co-Ni 毒矿、(含 Co-Ni)硫砷镍矿物,均为硫砷金属矿物,分布于石榴子石晶体中,表明成岩蚀变及成矿作用可能同时进行。含(Co-Ni)硫砷镍矿物在 Bi 矿物中已说明,不再赘述。

含钴镍毒矿[(Co、Ni、Fe)AsS],产于石榴子石晶体中,经电镜能谱分析均含有 Co、Ni 元素(表 3,序号 20、25、26),在图 8a 中可见含 Co-Ni 毒砂中包裹有 Re-Os 钨矿,表明毒矿不仅仅是 Co-Ni 元素的载体,也可能是 Re、Os、W 元素的载体。

辉砷镍矿[(Co、Ni)AsS],分布在石榴子石晶体中(图 8g),呈自形等轴粒状。电镜能谱分析结果见表 3(序号 12)。在反光镜下,反射率比黄铁矿略低,与黄铁矿难以区分,但硬度比黄铁矿低的多,并具有多边形等轴粒状晶体。

含镍辉钴矿[(Ni、Co)AsS],也只见于石榴子石晶体中,反射率高(56%),反射色呈白色微带粉红色调,硬度略低于黄铁矿。电镜能谱分析结果见表 3(序号 31)。

锡、钨矿物 锡矿物包括锡石与黄(黝)锡矿。锡石(SnO_2)主要产于石榴子石矽卡岩型金属硫化物矿石中,呈自形-半自形粒状晶体,粒度细小,一般 $< 0.1\text{ mm}$ 透射镜下呈棕黄色,与闪锌矿难以区分,但反射率明显低于闪锌矿。电镜能谱分析结果见表 3(序号 42)。产于绢英岩型锡矿石中的锡石,手标本上呈褐色,粒度大小在 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 之间,分布不均匀,主要沿裂隙脉边缘分布见(图 3h)。黄(黝)锡矿($\text{Cu}_2\text{SnFeS}_4$)主要产于矽卡岩型金属硫化物矿石中,作为主要的金属硫化物,常见它与黄铜矿、磁黄铁

矿、方铅矿等共生(图 7g、图 8b),反光镜下为浅灰色略带橄榄绿色,呈他形晶,一般被认为是高温热液的产物。电镜能谱分析结果见表 3(序号 44)。铼钨钨矿[(Re₂Os)WO₄]分布于被石榴子石包裹的含 Co-Ni 毒砂晶体中(图 8a),粒度细小,偶然见到。电镜能谱分析结果见表 3(序号 59)。

铟矿物 在光学显微镜下见到交代闪锌矿的方解石中呈等轴晶粒状的羟铟石晶体(图 7i),与扫描电镜下所见羟铟石的晶形相同(赵元艺等,2010a),并见到闪锌矿晶体中呈等轴粒状的空洞,推测这些空洞很有可能是羟铟石所残留(图 7j)。在闪锌矿中未测出铟元素,故铟不是以类质同象分散在闪锌矿晶格中,而是以独立的铟矿物形式存在。

5 讨论

5.1 变质作用

由岩相学特征可以看出,矿区在漫长的地质演化历史中经历过区域变质作用和接触变质作用。区域变质作用,由于区域构造运动的影响,使岩石经受了强烈的改组和改造。在矿区的各类岩石中多表现为变质重结晶作用,形成的矿物主要为石英、绢云母等,如在千枚岩中。在矿区,侵入体与围岩之间发生接触变质及双交代作用,形成大理岩、角岩和矽卡岩等。接触变质作用与矽卡岩型矿化关系密切。此外,白云母二长花岗岩侵入体存在强烈的云英岩化、白云母化,表明该岩体在形成之后又发生大量的成矿流体活动。另外,白云母二长花岗岩体发生强烈的爆碎作用,从岩体中强烈的糜棱岩化以及片理化堇青石角岩中可以看到,堇青石变斑晶被压扁拉长,定向排列,表明岩浆侵位后,在矽卡岩型矿体形成前后,发生过强烈的张裂和挤压作用。

5.2 石榴子石与透辉石的形成

具有环带的石榴子石在变质岩中普遍存在(张建新等,2002;周喜文等,2003;张泽明等,2005;陈丹玲等,2005),根据其形成方式的不同分为扩散型环带与生长型环带(陈能松等,2003)。但在矽卡岩成因的石榴子石中环带发育较差。本文中的石榴子石主要成分为 Ca-Al-Fe 榴石,按照双交代成因矽卡岩的物质来源理论(赵一鸣等,1990),石榴子石中的钙质应由石灰岩提供,而铝质由岩浆提供,因此,石榴子石不同环带的钙质与铝质成分的变化可以反映围岩地层与岩浆分别对形成石榴子石的流体贡献的大

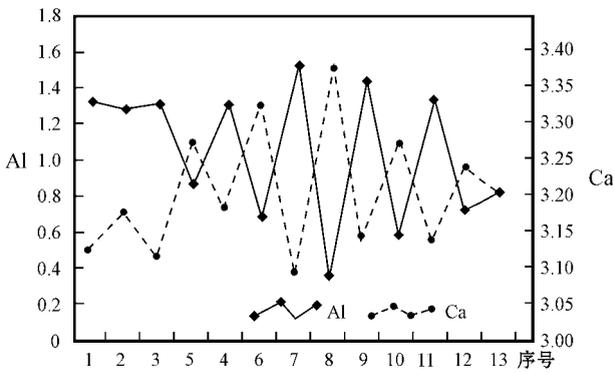


图9 石榴子石环带的Al与Ca原子数变化曲线
(图中序号同表2中石榴子石电镜能谱分析结果序号)
Fig. 9 Atoms curve of Al and Ca in garnet rings
(The numbers in the figure are the same with the numbers
of energy spectrum patterns analysis results in table 2)

小。样号为LW4452-09-6的环带状石榴子石至少可分出13个黑色与灰色相间的环带(图6a),灰色部分的铝原子数为0.36~0.86,黑色部分为1.23~1.53(表2),而钙的原子数与铝的原子数成镜像相反的变化趋势(图9),反映出石榴子石的形成过程是处于岩浆与地层灰岩物质交换的动态平衡状态。

对透辉石,本次工作没有测出明显的成分变化(表2),仅可定为铁次透辉石(Di50-25 He50-75)。透辉石在矽卡岩中的含量变化与晶形的变化存在一定的相关性,当透辉石含量<10%时,它们呈细粒状被包裹在石榴子石晶体中(图5b);当透辉石含量在30%~40%时,它们呈粒状或半自形短柱状(图5c);当其含量在50%~70%时,它们呈自形短柱状(图5d);当其含量100%时,它们呈自形长柱状(图5e)。透辉石含量升高与其晶形的这种变化反映了形成过程中温压条件逐渐降低的演化趋势。但在这个变化过程中石榴子石的成分有何变化,尚未获得测试数据,因此这个过程矽卡岩形成条件的变化细节目前无法知道,有待进一步研究。

5.3 蚀变与矿化

由矽卡岩与蚀变岩的矿物组合可以看出,随着分布在石榴子石晶体中的粒状透辉石→板状透辉石→长柱状透辉石→(次闪石→绿帘石)→(绿泥石+石英)→(碳酸盐+石英)的蚀变变化,与此相应,出现铋矿化+钴镍矿化→铋矿化+铜铅锌矿化→铜铅锌银矿化→铋矿化的变化。因此,蚀变的演化过程,控制着矿化的形成过程。

5.4 成矿期次与成矿阶段

由矿床的矿物组合可以看出,矿床的形成期次可分内生成矿期与表生成矿期。其中,内生成矿期可分为4个阶段:第一阶段,自然铋(石榴子石中)-钴镍矿化阶段,以形成辉钴矿等高温矿物为主,其形成温度据辉钴矿估计应在800℃以上(中国地质科学院地质矿产所,1978);第二阶段,锡石-黄黝锡矿-自然铋-方铅矿-磁黄铁矿阶段,形成温度为330~400℃;第三阶段为黄铜矿-闪锌矿等金属硫化物阶段,形成温度为260~320℃(杜欣等,2004);第四阶段为石英-碳酸盐-辉银矿阶段,由于177℃是由等轴晶系向单斜晶系的相变温度,结合包裹体测温资料,该阶段的形成温度为160~250℃(杜欣等,2004)。表生期仅有表生阶段,形成褐铁矿、孔雀石等表生矿物(杜欣等,2004)。

5.5 有用元素与资源综合利用

拉屋矿区主要的有用金属元素为铜、铅、锌、锡、铋、钴、钼等,这些元素的含量有些达到最低工业品位(表4)。

铜的主要赋存矿物为黄铜矿,其次还有斑铜矿,其中黄铜矿是矿山开采的主要对象。前人统计的 $w(\text{Cu})$ 为1.02%~1.03%(表1)。本次工作分析的达到边界品位25件样品中有18件的铜含量超过工业品位, $w(\text{Cu})$ 为0.936%~11.448%,平均为2.99%(表4)。锌的主要赋存矿物为闪锌矿,前人统计的 $w(\text{Zn})$ 为3.43%~10.45%(表1),本次测试的达到边界品位的15个样品中,有14件样品锌含量超过工业品位, $w(\text{Zn})$ 为1.283%~24.632%,平均为10.65%(表4)。样品中有6件样品铅含量超过工业品位,达到边界品位的7件样品的 $w(\text{Pb})$ 为1.616%~24.235%,平均为7.66%(表4)。锡的赋存矿物为黄锡矿,有少量的锡石,达到边界品位的8件样品中只有1件样品锡含量超过工业品位, $w(\text{Sn})$ 为0.103%~0.231%,平均为0.14%(表4)。铋的赋存矿物为自然铋、硫铅铋银矿、含银铋黄铁矿、硫铜铁铋矿、(含钴镍)硫铋矿(表3)。由于铋矿物种类异常复杂,而可供查阅的资料有限,故与铋有关的矿物定名可能存在一定误差,有待进一步确定。达到边界品位的11件样品的 $w(\text{Bi})$ 为0.05%~0.958%,平均为0.25%,其中9件样品铋含量超过工业品位(表4),而柿竹园矿床的铋平均品位为0.16%(孙传尧等,2004),与青海肯德可克矽卡岩型钴铋金矿石的铋含量(潘彤等,2003)接近,显示拉屋

表 4 拉屋矿区有用金属元素达到边界品位样品统计表

Table 4 Sample table of useful metal elements who meet the minimum industrial grade in Lawu orefield

序号及岩石类型	样号	$w_B/\%$					$w_B/10^{-6}$	
		Cu	Pb	Zn	Sn	Bi	Co	In
1 硅化碳酸岩-绿泥石化绿帘石石榴子石砂卡岩	LW4452-2				0.231			24.2
2 铅矿化透辉石石榴子石砂卡岩	LW4452-4	5.645					141	69.2
3 铅矿化石榴子石透辉石砂卡岩	LW4452-5		0.936	20.610		0.502	227	79.4
4 铅矿化透辉石石榴子石砂卡岩	LW4452-6			9.469	0.112		163	80
5 铅矿化石榴子石透辉石砂卡岩	LW4452-7	0.404		6.733		0.087		105
6 铅矿化透辉石石榴子石砂卡岩	LW4452-8	1.736			0.120			102
7 钨矿化绢英岩化花岗质岩石	LW4410-2					0.040		
8 铜矿化透辉石石榴子石砂卡岩	LW-1-1	9.753					284	106
9 锌矿石(白云母型)	LW-1-2			24.632		0.126	240	218
10 铜矿化石榴子石砂卡岩	LW-1-3	6.534		2.221		0.304	243	72.2
11 铜矿化透辉石石榴子石大理岩	LW-1-5			1.334				21.9
12 透辉石石榴子石砂卡岩型黄铜矿矿石	LW-1-6	7.271					218	94.1
13 矿化碳酸岩次闪石化石榴子石透辉石砂卡岩	LW-1-7			18.467		0.211	185	129
14 石榴子石砂卡岩型闪锌矿矿石	LW-1-8	1.109		7.126			181	105
15 透辉石石榴子石砂卡岩型闪锌矿矿石	LW-1-9	1.215		1.283		0.117	104	37.9
16 闪锌矿矿石	LW-2-1	3.006	1.616	16.100		0.137	225	113
17 绿泥石碳酸岩化铜矿石	LW-2-2	3.594	2.022	7.432		0.958	147	68.6
18 石英脉	LW-2-4	0.300						
19 黄铜矿闪锌矿矿石	LW-2-5	4.692	3.232	24.262		0.154	286	166
20 透辉石砂卡岩型斑铜矿方铅矿矿石	LW-2-6	3.438	10.589	4.874		0.049		22.1
21 透辉石石榴子石砂卡岩型方铅矿闪锌矿矿石	LW-2-7	3.299	11.022	13.113				34.2
22 石英脉型	LW-2-8	1.310						11.7
23 石英脉型	LW-2-9	0.783						6.83
24 铜矿化绢英岩化花岗质岩石	LW-2-10	0.649						
25 青磐岩型铜矿石	LW-2-11	2.745				0.140	132	14.2
16 透辉石砂卡岩型方铅矿矿石	LW-2-12	0.873	24.235		0.162			
27 透辉石石榴子石型铜矿石	LW-2-13	11.448		2.043				111
28 石英脉型铜、钨矿石(粉碎型花岗质岩石)	LW-2-27	3.302						15.8
29 矿化强烈绢英岩化花岗质岩石	LW-2-28	0.327						
30 强烈压碎花岗细晶岩	LW-2-29	0.313						
31 绿帘石青磐岩	LW-3-1				0.126			12.9
32 透辉石石榴子石砂卡岩	LW-3-2							6.43
33 条带状绿帘石青磐岩	LW-3-3							5.54
34 透辉石石榴子石砂卡岩	LW-3-4				0.106			7.42
35 石榴子石砂卡岩	LW-3-5	0.304			0.103			8.61
36 褐铁矿化石榴子石砂卡岩	LW-3-6							5.28
37 透辉石石榴子石砂卡岩	LW-3-7				0.136			20.1
38 矿化透辉石石榴子石砂卡岩	LW-5-1	0.839						8.7

边界品位要求为 Cu 0.3%、Pb 0.7%、Zn 1%、Sn 0.1%、Bi 0.05%、Co 100×10^{-6} 、In 5×10^{-6} ，工业品位要求为 Cu 0.5%、Pb 1%、Sn 0.2%、Zn 2%、Bi 0.1%、Co 300×10^{-6} 、In 10×10^{-6} (据吴良士等, 2008; 全国矿产储量委员会办公室, 1987; 何周虎等, 2004 综合)。

矿区铀的资源潜力较大。同时,拉屋矿区铀资源也是班公湖-怒江成矿带及邻区铀矿化带的重要组成部分(赵元艺等, 2010b)。钴的赋存矿物主要为含钴镍硫砷铋矿、含钴镍毒砂、含镍辉钴矿、辉砷镍矿(表 3),有 14 件样品钴含量超过边界品位(表 4),但所有样品 $w(\text{Co})$ 均未超过工业品位,范围为 $10^4 \times 10^{-6} \sim 286 \times 10^{-6}$,平均 198×10^{-6} (表 4)。

对铜元素,本次工作测试的 78 件样品中,有 32 件样品铜含量超过边界品位, $w(\text{In})$ 为 $5.54 \times 10^{-6} \sim 218 \times 10^{-6}$,平均为 58.52×10^{-6} (表 4)。铜在矿床中一般不以独立矿物为主要存在形式,大多赋存于富锡硫化物矿石的闪锌矿中,呈类质同象形式存在(张乾等, 2003; 朱笑青等, 2006; 郭春丽等, 2006; 李晓峰等, 2007)。在铜的独立矿物中,大庙矿和伊

逊矿发现于河北大庙铂族元素矿床中,为接触交代成因(於祖相,1997a;於祖相,1997b)。羟铋石($\text{In}(\text{OH})_3$)发现于锡石硫化物氧化带,其余矿物发现于富铋矿床中(张乾等,2003)。但是,在中国其他富铋矿床中并未见有具体的铋矿物种类的报告。主要是由于铋矿物在自然界罕见,数量非常稀少(张乾等,2003)所致。

本文在光学显微镜下见到交代闪锌矿的方解石中呈等轴晶粒状的羟铋石晶体(图7i),在更乃铜矿中,用扫描电镜手段发现了呈等轴粒状的羟铋石晶体(赵元艺等,2010a)。在闪锌矿中也未发现铋元素的存在(表3)。由于羟铋石脱水变为自然铋,而自然铋为自然界最软的金属矿物,其刻划硬度和布氏(Brinell)硬度低于自然铅(乌顿布格等,1975),在薄片磨制过程中容易造成缺失,因此还要继续做扫描电镜的工作,了解铋的赋存状态和铋矿物。

已知的铋矿床主要产于扬子板块南-西南缘与华北板块北缘(伍永田等,2005;郭春丽等,2006)。拉屋等地铋矿化的发现,为中国增加了一个新的铋矿化找矿方向(赵元艺等,2010a)。

另外,本文对拉屋矿区的7件样品的银含量进行了分析测试, $w(\text{Ag})$ 有1件样品达到509 g/t,1件为91.7 g/t,而其余均小于15 g/t,但是银矿物种类有硫铅铋银矿、自然银、辉(铜铁)银矿、含银铋黄铁矿和辉银矿5种(表3)。

总之,可以看出,拉屋矿床的有用金属元素为铜、铅、锌、锡、铋、钴、铟等,它们有较高的含量,并均呈独立矿物存在,有一定的利用价值,需要采取刻槽等工程手段,对这些元素的资源特征进行评价。另外,开采时要注意综合利用,以便提高经济价值。

6 结 论

(1)拉屋矿床主要的岩体为白云母二长花岗岩,并发育爆碎岩,具明显的爆碎结构。另外还有流纹斑岩、辉长岩脉、闪长岩脉、石英脉等。主要围岩有石英砂岩、长石石英砂岩、砂质板岩、片理化堇青石角岩、大理岩。大理岩类型有石榴子石、透辉石化大理岩、透辉石透闪石大理岩和透闪石灰质大理岩。矽卡岩主要分布于矿区东部大理岩带内,岩石类型有石榴子石矽卡岩、含透辉石石榴子石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩。透辉石根据其岩石中的含量变化,其晶形特征也发生明显的变

化。透辉石含量与晶形的变化反应了矽卡岩在形成过程中温度、压力是向着降低的方向发展。受后期构造作用,矽卡岩中的透辉石晶体明显破碎,石榴子石晶体也有破碎,有的则产生微裂隙,在微裂隙中充填钙铝榴石。

(2)矿区内蚀变岩可分为2种:对于花岗岩类的岩石,主要发生云英岩-白云母化、葡萄石化、绢云母化、爆碎岩的绢云母化等;对于矽卡岩类岩石,在矽卡岩成岩的后期阶段,随着温压条件的降低,出现绿帘石青磐岩、绿帘石石英蚀变岩、碳酸盐-绿泥石蚀变岩、碳酸盐化蚀变岩。石榴子石均为钙铝铁榴石,多具环带构造。环带状石榴子石灰色部分铝原子数为0.36~0.86,黑色部分铝原子数为1.23~1.53,而钙原子数与铝原子数成相反的变化趋势。环带状石榴子石共可分出13个黑色与灰色相间的环带,反映出在石榴子石形成过程中,岩浆与地层灰岩物质交换处于动态平衡状态。辉石均为次钙铁辉石。

(3)矽卡岩及其后蚀变岩的形成过程,控制着矿化的形成过程,出现分布在石榴子石晶体中呈粒状的透辉石→板状透辉石→长柱状透辉石→次闪石-绿帘石→绿泥石+石英→碳酸盐+石英的蚀变变化趋势,与此相应,出现的矿化有铋+钴镍→铋矿化+铜铅锌→铜铅锌银→铋。矿石自然类型按主要容矿围岩的岩性分为石英砂岩、石英脉型、矽卡岩型、蚀变岩型4种。金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、自然铋、硫铜铁铋矿、硫铅铋银矿(?)、辉砷镍矿、黄黝锡矿、羟铋石等。矿床的形成期次为内生成矿期与表生成矿期。内生成矿期分为4个阶段,即自然铋-钴镍矿化阶段、锡石-黄锡矿-自然铋-方铅矿-磁黄铁矿阶段、黄铜矿等金属硫化物阶段、石英-碳酸盐-辉银矿阶段,表生期仅有表生阶段。有用金属元素为铜、铅、锌、锡、铋、钴、铟,均呈独立矿物的形式存在,有较大的利用价值,需对这些元素的资源特征进行评价,并注意综合利用。

志 谢 本文野外工作期间,得到中国地质科学院矿产资源研究所曲晓明研究员、辛洪波副研究员及河南省地质调查院刘伟高级工程师的大力帮助,得到西藏华钰矿业有限公司拉屋锌多金属矿王志平矿长等的支持。薄片磨制工作由中国地质大学(北京)磨片室完成,标本与显微镜下的照相工作得

到中国地质科学院矿产资源研究所沙俊生及中国地质科学院地质研究所闫臻博士的积极协助,扫描电镜与电镜能谱的工作由魏宝和高工完成,扫描电镜与电镜能谱测试与相关数据的计算得到中国地质大学(北京)刘琰博士的大力帮助。测试样品碎样工作由中国地质科学院地质研究所王朋同志完成,微量元素测试工作由张彦辉同志完成。英文摘要等的翻译工作由中国地质大学(北京)李波涛硕士完成。论文蒙审稿专家的认真审核并提宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

References

- Chen D L, Sun Y, Liu L, Zhang A D, Luo J H and Wang Y. 2005. Metamorphic evolution of the Yuka eclogite in the North Qaidam, NW China: evidences from the compositional zonation of garnet and reaction texture in the rock [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(04): 1039-1048 (in Chinese with English abstract).
- Chen N S, Sun M, Yang Y, Liu R and Wang Q Y. 2003. Major and trace-element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 315-320 (in Chinese with English abstract).
- Du X, Liu J T and Wang Y P. 2004. Geological character and ore genesis of the Lawu copper-lead-zinc polymetallic ore deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, (5): 410-414 (in Chinese with English abstract).
- Guo C L, Wang D H, Fu X F, Zhao Z G, Fu D M and Chen Y C. 2006. Discovery of indium-rich ores in Chahe tin deposits, Huili, Sichuan, and its significance [J]. *Geological Review*, 52(4): 550-556 (in Chinese with English abstract).
- He G C, Zhao Y P, Yuan E H, Zhang X L and Wang X M. Discussion on the genesis of the Lawu copper-zinc deposit, Tibet [J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(2): 147-151 (in Chinese with English abstract).
- He Z H, Li S Q and Hu Z K. 2004. Discussion on industrial index of bismuth deposit [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 32-34 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geology. 1978. *Metallic minerals microscope identification* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-69 (in Chinese).
- Li X F, Watanabe Yasushi and Mao J W. 2007. Research situation and economic value of indium deposits [J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 475-480 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y Y. 2008. Metallogenic zonation in Lawu polymetallic deposit in Tibet [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 47(6): 66-69 (in Chinese with English abstract).
- Office of National Mineral Reserves Committee. 1987. *reference manual of mineral industries require* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 197-198 (in Chinese).
- Pan T and Sun F Y. 2003. The mineralization characteristic and prospecting of Kendekeke Co-Bi-Au deposit in Dunkunlun, Qinghai provied [J]. *Geology and Prospecting*, 39(1): 18-22 (in Chinese with English abstract).
- Sun C Y, Cheng X C and Li C G. 2004. Shizhuyuan method—A new technology for comprehensive processing of the complex multi-metal ore containing W, Bi, Mo and Fluorite [J]. *China Tungsten Industry*, 19(5): 8-14 (in Chinese with English abstract).
- Wu L S, Bai G and Yuan Z X. 2008. *Manual of mineral raw* [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 1-502 (in Chinese).
- Wu Y T, Wang M Y and Fan S K. 2005. Summarization of enrichment regularity for indium [J]. *Southern Land and Resources*, 10: 33-35 (in Chinese).
- Wudunbuge W and Boke E A J. 1975. *Microscopic identification table of metallic minerals* (Second revised edition) [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 102, 134 (in Chinese).
- Yu Z X. 1997a. Damiaoite—A new native indium and platinum alloy [J]. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 328-331 (in Chinese with English abstract).
- Yu Z X. 1997b. Yixunite—An ordered new native indium and platinum alloy [J]. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 332-335 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Meng F C and Qi X X. 2002. Comparison of garnet zoning between eclogites in Da Qaidam and Xitieshan on the northern margin of the Qaidam basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(3): 123-129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Liu Z H, Zhan X Z and Shao S X. 2003. Specialization of ore deposit types and minerals for enrichment of indium [J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 309-316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xiao Y L, Shen K and Gao Y J. 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic P-T path of the ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern Central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 809-818 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, Li D X and Jiang C J. 1990. *Skarn deposits in China* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-354 (in Chinese).
- Zhao Y Y, Liu Y, Cui Y B, Lv L N, Song L and Qu X M. 2010a. Discovery and significance of indium deposits in Bangonghu lake to Nujiang River mineralization belt and its adjacent area, Tibet [J]. *Geological Review*, 56(4): 568-578 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Liu Y, Cui Y B, Song L, Lü L N and Qu X M. 2010b. Discovery and significance of bismuth deposits in Bangonghu lake to Nujiang River mineralization belt and its adjacent area, Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(2): 183-193 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X W, Wei C J, Dong Y S and Lu L Z. 2003. Characteristics and genetic implications of diffusion zoning in garnet from Al-rich rock series of the Jingshan group in north Jiaodong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 752-760 (in Chinese with English abstract).

Zhu X Q, Zhang Q, He Y L and Zhu C H. 2006. Relationships between indium and tin, zinc and lead in ore-forming fluid from the indium-rich and -poor deposits in China [J]. *Geochimica*, 35(1):6-12 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈丹玲, 孙勇, 刘良, 张安达, 罗金海, 王焰. 2005. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的变质演化——石榴子石成分环带及矿物反应结构的证据 [J]. *岩石学报*, 21(04):1039-1048.

陈能松, 孙敏, 杨勇, 刘嵘, 王勤燕. 2003. 变质石榴子石的成分环带与变质过程 [J]. *地学前缘*, 10(3):315-320.

杜欣, 刘俊涛, 王亚平. 2004. 西藏拉屋铜铅锌多金属矿床地质特征及成因分析 [J]. *矿产与地质*, 18(5):410-414.

郭春丽, 王登红, 付小方, 赵支刚, 傅德明, 陈毓川. 2006. 四川盆河锡矿区富铟矿床的发现及其找矿意义 [J]. *地质评论*, 52(4):550-556.

何国朝, 赵延朋, 原恩慧, 张雪亮, 王晓曼. 2009. 西藏拉屋铜铅矿床成因探讨 [J]. *矿产与地质*, 23(2):147-151.

何周虎, 李时谦, 胡志科. 2004. 关于铋矿床工业指标的讨论 [J]. *华南地质与矿产*, 2(2):32-34.

李晓峰, Watanabe Yasushi, 毛景文. 2007. 铟矿床研究现状及其展望 [J]. *矿床地质*, 26(4):475-480.

刘延勇. 2008. 西藏拉屋多金属矿床的成矿元素分带规律 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 47(6):66-69.

潘彤, 孙丰月. 2003. 青海东昆仑肯德可克铋钴金矿床成矿特征及找矿方向 [J]. *地质与勘探*, 39(1):18-22.

全国矿产储量委员会办公室. 1987. 矿产工业要求参考手册 [M]. 北京:地质出版社. 197-198.

孙传尧, 程新朝, 李长根. 2004. 铋铋钼萤石复杂多金属矿综合选矿新技术——柿竹园法 [J]. *中国钨业*, 19(5):8-14.

乌顿布格 W, 伯克 E A J. 1975. 金属矿物显微镜鉴定表(第二修订

版) [M]. 北京:地质出版社. 102, 134.

吴良士, 白鸽, 袁忠信. 2008. 矿产原料手册 [M]. 北京:化学工业出版社. 1-502.

伍永田, 王明艳, 范森葵. 2005. 分散元素铟的富集规律研究综述 [J]. *南方国土资源*, 10:33-35.

於祖相. 1997a. 新矿物大庙矿——铟与铂的天然合金 [J]. *地质学报*, 71(4):328-331.

於祖相. 1997b. 新矿物伊逊矿——有序的铂与铟的天然合金 [J]. *地质学报*, 71(4):332-335.

张乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 2003. 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性 [J]. *矿床地质*, 22(1):309-316.

张建新, 孟繁聪, 戚学祥. 2002. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义 [J]. *地质通报*, 21(3):123-129.

张泽明, 肖益林, 沈昆, 高勇军. 2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴子石生长成分环带及变质作用 P-T 轨迹 [J]. *岩石学报*, 21(3):809-818.

赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床 [M]. 北京:地质出版社. 1-354.

赵元艺, 刘妍, 崔玉斌, 吕立娜, 宋亮, 曲晓明. 2010a. 西藏班公湖-怒江成矿带与邻区铟矿床的发现及意义 [J]. *地质论评*, 56(4):568-578.

赵元艺, 刘妍, 崔玉斌, 宋亮, 吕立娜, 曲晓明. 2010b. 西藏班公湖-怒江成矿带及邻区铋矿床的发现与意义 [J]. *地球学报*, 31(2):183-193.

中国地质科学院地质矿产所. 1978. 金属矿物显微镜鉴定 [M]. 北京:地质出版社. 1-699.

周喜文, 魏春景, 董永胜, 卢良兆. 2003. 胶北荆山群富铝岩系石榴子石扩散环带特征及其成因指示意义 [J]. *岩石学报*, 19(4):752-760.

朱笑青, 张乾, 何玉良, 祝朝辉. 2006. 富铟及贫铟矿床成矿流体中铟与锡铅锌的关系研究 [J]. *地球化学*, 35(1):6-12.