

文章编号: 0258-7106 (2011) 04-0599-17

## 西藏昌都地区拉诺玛铅锌锑多金属矿床 地质地球化学特征及成因分析\*

陶 琰<sup>1</sup>, 毕献武<sup>1</sup>, 辛忠雷<sup>2</sup>, 朱飞霖<sup>1,3</sup>, 廖名扬<sup>1,3</sup>, 李玉帮<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2 西藏地质矿产局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 拉诺玛铅锌锑多金属矿床位于西藏昌都盆地, 在吉塘镇北约 10 km 处。矿体赋存在三叠系上统波里拉组( $T_3b$ )灰岩的构造破碎带中, 是澜沧江沉积岩容矿型铅锌成矿带内的一个重要矿床。该矿床的成矿元素组成与该成矿带内其他铅锌矿床及国内外其他主要沉积岩容矿型铅锌矿床有所不同, 以锑铅锌共生组合为特征。矿石成分分析及矿石矿物成分的电子探针分析表明, 该矿床铅锑密切共生, 且呈纤硫锑铅矿产出。流体包裹体分析结果表明: 该矿床形成于中-低温到低温(140~350℃)、中-低盐度[ $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2%~13%], 以含 NaCl 为主, 包裹体的气相成分以  $\text{CO}_2$  为主, 含有  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$  等短链烃类, 成矿流体为 NaCl 型含烃富  $\text{CO}_2$  流体。热液方解石的碳同位素组成  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -3.5\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$ , 氧同位素组成  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = +11\text{‰} \sim +16\text{‰}$ , 介于海相碳酸盐岩和与花岗岩有关的热液之间, 反映出其来源为深部构造-岩浆活动与海相碳酸盐岩溶解作用的混合。矿石硫化物的硫同位素组成  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-PDB}} = -1.6\text{‰} \sim +2.6\text{‰}$ , 集中在 0 值附近, 反映出硫主要为深部来源。经综合分析认为, 该矿床的成矿作用可能与新生代深部构造-岩浆活动有密切关系, 其成矿背景与印度板块碰撞作用有关, 成矿物质主要来源于与剪切作用有关的构造-岩浆活动, 但昌都盆地内沉积地层中的建造水或地下水参与了成矿, 部分成矿物质可能来源于三叠系, 成矿流体的驱动机制包括上部重力驱动, 以及深部构造-岩浆活动热源驱动所形成的规模成矿流体运动。

**关键词** 地质学; 地球化学; 澜沧江 Pb-Zn 成矿带; 拉诺玛铅锌锑多金属矿床; 昌都盆地; 西藏

**中图分类号**: P618.42; P618.43; P618.66

**文献标志码**: A

### Geology, geochemistry and origin of Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit in Changdu area, Tibet

TAO Yan<sup>1</sup>, BI XianWu<sup>1</sup>, XIN ZhongLei<sup>2</sup>, ZHU FeiLin<sup>1,3</sup>, LIAO MingYang<sup>1,3</sup> and LI YuBang<sup>1,3</sup>

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2 Geothermal Geological Team of Tibet Bureau of Geology and Mineral Resources, Lhasa 850000, Tibet, China; 3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

#### Abstract

The Lanuoma Pb-Zn-Sb polymetallic deposit is located 10 km north of Jitang in Changdu basin, hosted by carbonate of Triassic Bolila Group ( $T_3b$ ). The ore deposit occurs in an ore district which is considered to be a part of the Sanjiang base-metal ore-forming belt along the Lancang River. It is unique in metallic composition of the ores. Different from the lead-zinc deposits in the Lanping basin and other major sedimentary rock hosted

\* 本文得到国家重点基础研究发展计划(编号:2009CB421005)、中国科学院重要方向项目(编号:KZCX2-YW-004-08)和国家自然科学基金项目(编号:40973039)的联合资助

第一作者简介 陶 琰, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 岩石学和矿床地球化学专业。Email: taoyan@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2010-09-28; 改回日期 2011-03-22。许德焕编辑。

lead-zinc deposits both in China and abroad, the Lanuoma ore deposit is characterized by mineralization of Sb associated with Pb, Zn. Ore composition analysis and electron microprobe analysis of ore minerals show that Sb is closely associated with Pb and occurs as robinsonite. The ore deposit was formed at intermediate-low to epithermal temperatures. Fluid inclusions in hydrothermal quartz and calcite veins are mainly in the two-phase (L + V) state at room temperature and are homogenized to the liquid phase between 140 and 350 °C. Their salinities [ $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ ] range from 2% to 10%. Results of bulk analysis of the fluid inclusions show that  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  are most abundant components in liquid phase.  $\text{CO}_2$  and trace  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  were detected by bulk analysis and laser Raman spectrometry in vapor phase of the fluid inclusions. These data indicate that the ore-forming fluid is Na-Cl-type,  $\text{CO}_2$ -rich and hydrocarbon-bearing fluid brine.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  values of hydrothermal calcite range from -3.5‰ to +1.8‰, and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  values of hydrothermal calcite range from +11‰ to +16‰, suggesting the characteristics between marine carbonate rocks and granite-related fluids and the mixing of magmatic components with hydrothermal dissolution of marine carbonate. The sulfide minerals have a restricted range of  $\delta^{34}\text{S}$  values from -1.6‰ to +2.6‰ around zero, indicating that the sulfur is of deep crustal derivation. The authors hold that the mineralization was related to Cenozoic magmatism associated with Indo-Asian collision. The sulfur and metals were derived mainly from igneous source or leached from crustal rocks related to tectono-magmatic activity, and partly from the Triassic strata. The fluid-driven mechanism included topography-driven fluid flow in cover sequences and deep magmatic heat source driving for large-scale ore-forming fluid flow.

**Key words:** geology, geochemistry, Lancangjiang Pb-Zn metallogenic belt, Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit, Changdu basin, Tibet

青藏高原东、北缘的兰坪、昌都、玉树及沱沱河地区,广泛发育着包括金顶超大型矿床在内的大量新生代 Pb、Zn、Cu 多金属矿床,构成长逾 1 000 km 的多金属矿化带(莫宣学等,1993;侯增谦等,2008)。昌都盆地铅锌成矿作用的动力学背景与兰坪盆地、囊谦盆地、沱沱河盆地一致(薛春纪等,2003;Hou et al.,2007;王安建等,2009;田世洪等,2009)。昌都盆地内的拉诺玛铅锌锡多金属矿床,其基本矿化特征与兰坪盆地、囊谦盆地、沱沱河盆地内产出的铅锌矿床相似,为沉积岩容矿型铅锌矿床。

拉诺玛铅锌锡多金属矿床位于澜沧江沉积岩容矿型铅锌成矿带内<sup>①</sup>,但其成矿元素组成与该带内其他铅锌矿及国内外其他主要沉积岩容矿型铅锌矿不同,以锡铅锌共生组合为特征,是沉积岩容矿型铅锌矿床中一个较为独特的矿化类型<sup>②</sup>,开展其成因研究对全面认识三江特提斯铅锌矿带的成矿作用具有重要意义,并有助于丰富对沉积岩容矿型铅锌矿的认识。本文旨在系统揭示拉诺玛铅锌锡多金属矿床的

地质地球化学特征,在此基础上,结合区域成矿背景及成矿条件,分析该矿床的成因并初步建立其成矿模式。

## 1 区域地质背景

拉诺玛矿床为沉积岩容矿型铅锌锡多金属矿床,产出在昌都盆地三叠纪碳酸盐岩地层中,矿体受断裂破碎带的控制。在区域构造体系上,昌都盆地位于三江特提斯构造域的北段,其基底构造背景与兰坪-思茅盆地相似(刘增乾等,1993;罗君烈等,1994),是“三江沉积岩容矿型贱金属成矿带”的组成部分。一般认为,昌都盆地的成矿作用动力学背景与兰坪盆地、囊谦盆地、沱沱河盆地一致,与印度板块同亚洲大陆的主碰撞作用有关<sup>①</sup>。

该区域的岩石及地层分布如图 1 所示。昌都盆地位于他念他翁隆起(类乌齐-左贡变质地块)与江达隆起(江达-维西火山-岩浆弧)之间。该盆地西侧

① 辛忠雷,唐菊兴,张金树,李志军,罗布次仁. 2003. 西藏自治区藏东类乌齐县-左贡县金银铜铅锌多金属成矿带远景评价报告. 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

② 冯德新,胡先才,肖福琦,宋兴龙,小巴桑. 2006. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌多金属矿评价报告(中国地质调查局地质调查项目). 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

的类乌齐-左贡变质地块主要发育有前泥盆系变质岩(吉塘群 AnDjt)和花岗岩,呈 NW 向展布。吉塘群变质岩的岩性为石英片岩、钠长石英片岩、二云石英片岩、二云片岩等。变质地块内有多期花岗岩产出<sup>①</sup>。拉诺玛矿床西侧 3 km 处出露的吉塘岩体呈 NW 向延伸,侵位于吉塘群变质岩系中,长 70 km,宽 2~10 km,出露面积约 340 km<sup>2</sup>,主要由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,其全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 220 Ma 左右,铷同位素初始值(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>0</sub> 为 0.725(陈福忠等,1994),该岩体是长达数千公里的澜沧花岗岩带的组成部分,在性质和成因上与东达山岩体、临沧岩体等相一致,它们共同组成了海西晚期-印支期巨大的同碰撞花岗岩带,表明拉诺玛矿床所处的昌都盆地与澜沧江铅锌成矿带内的兰坪盆地等具有相似的地质构造背景和历史。受印度板块碰撞作用的影响,变质岩地块内有新生代构造岩-浆活动的叠加(彭勇民等,1997;李才等,2009)(图 1)。昌都盆地的东侧是江达-维西火山-岩浆弧,在二叠纪一早-中三叠世期间发育有岛弧型火山岩(王立全等,2000),喜

马拉雅时期有花岗斑岩带产出(梁华英等,2009)。

昌都盆地内大面积分布着三叠系、侏罗系,总体上表现为大致以澜沧江为轴线的复向斜构造(图 1),轴部出露侏罗系,三叠系主要出露在两侧,盆地南部的中心地带带有白垩系出露。该盆地在三叠纪时期为弧后裂谷盆地性质。喜马拉雅时期,由于印度板块向欧亚大陆俯冲,昌都地区所在的青藏高原东缘晚碰撞构造转换带承接了来自印度板块巨大的 NE 向应力,发生了强烈的构造变形,形成了一系列叠瓦状岩片,整体朝 NE 向逆冲推覆(侯增谦等,2006a; 2006b)。

昌都盆地内的控矿构造主要形成于喜马拉雅期。在该盆地的三叠系至古新统内,顺层剪切活动广泛且强烈,主要发生在 36~38.4 Ma 之间,以构造透镜体化、劈理化及糜棱岩化为特征。这些构造破碎带正是该盆地中众多铅锌矿床、富锌矿床的控矿构造(唐菊兴等,2006;侯增谦等,2008;Hou et al., 2009),笔者推测,拉诺玛矿床的形成与喜马拉雅期剪切活动是同时期的。

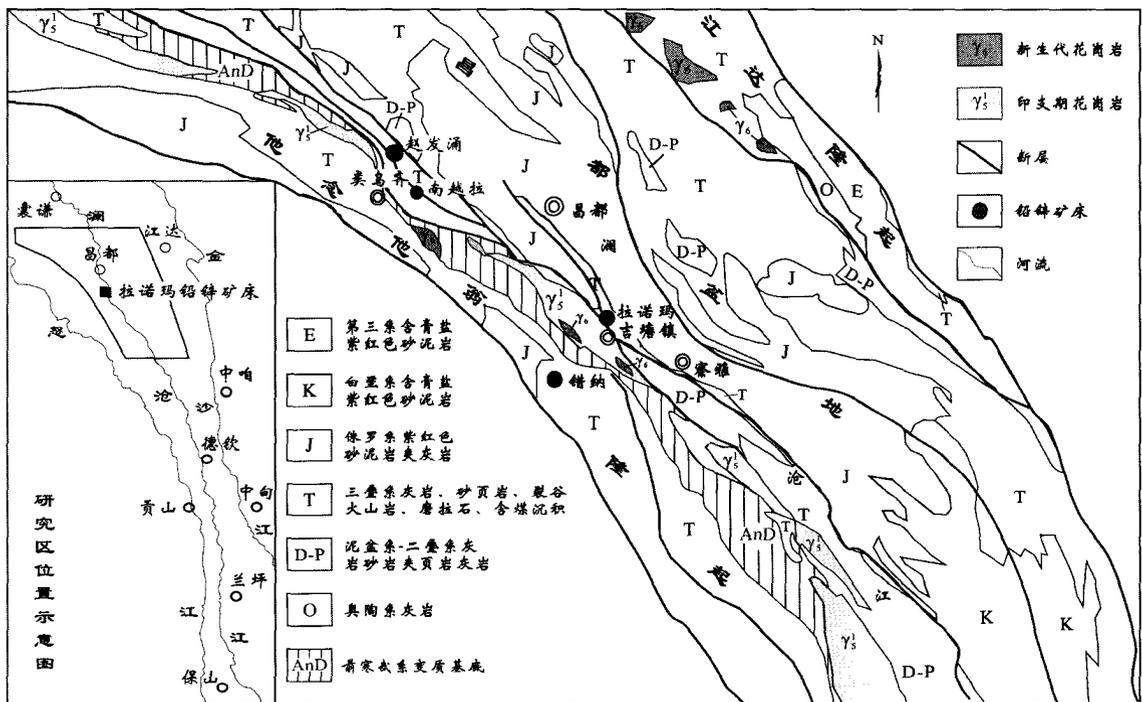


图 1 拉诺玛铅锌锡多金属矿床的产出位置及区域地质略图(据潘桂棠等,2004 修改)  
 Fig. 1 Location and regional geology of the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit (modified after Pan et al., 2004)

① 冯德新,胡先才,肖福琦,宋兴龙,小巴桑. 2006. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌多金属矿评价报告(中国地质调查局地质调查项目). 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

### 2 矿床地质概况

拉诺玛铅锌锑多金属矿床位于昌都地区吉塘镇北约 10 km 处(图 1)。矿体赋存在三叠系上统波里拉组(T<sub>3b</sub>)灰岩中(图 2)。矿体的产出受构造控制,主要产于断裂带内。据西藏自治区地质调查院的勘查资料<sup>①</sup>,该矿床的铅锌矿产资源量已达中型规模,锑矿资源量达大型规模。

矿区内出露的地层为三叠系上统甲丕拉组上段(T<sub>3j<sup>2</sup></sub>)、波里拉组(T<sub>3b</sub>)、阿堵拉组(T<sub>3a</sub>)、夺盖拉组(T<sub>3d</sub>)及第四系(Q)(图 2 和图 3)。

甲丕拉组上段(T<sub>3j<sup>2</sup></sub>)出露在矿区西侧及南西侧,呈 NW 向展布,是矿区内出露面积最大的地层,岩性较复杂,为一套以紫红色岩屑砂岩及长石石英砂岩为主的碎屑岩建造。波里拉组(T<sub>3b</sub>)出露在矿区的中部,是矿体的赋存层位,呈近 NS 向贯穿矿区,岩性为浅灰白色-浅青灰色含砾灰岩、砾状灰岩、细晶灰岩,地层总体西倾,局部倒转,倾角 36~74°,岩层厚度为 162.38 m。阿堵拉组(T<sub>3a</sub>)出露在矿区的北-中部,以浅色粉砂质泥页岩为主夹少量长石石英砂岩,含海相化石及陆生植物蕨类化石,为海陆交互的滨海环境的产物,岩层厚度大于 144.67 m。夺盖拉组(T<sub>3d</sub>)出露在矿区东部,呈 NS 向展布,岩性为

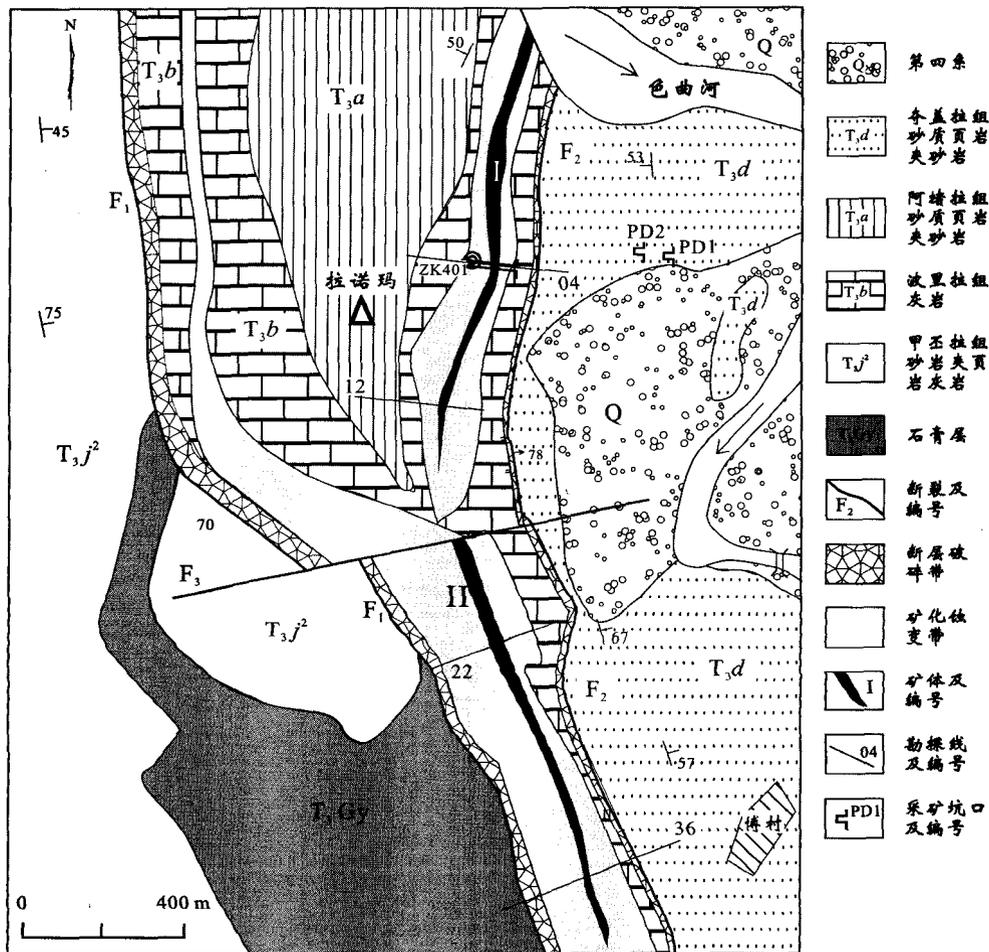


图 2 拉诺玛铅锌锑多金属矿区地质略图<sup>①</sup>

Fig. 2 Simplified geological map of the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

<sup>①</sup> 冯德新,胡先才,肖福琦,宋兴龙,小巴桑. 2006. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌多金属矿评价报告(中国地质调查局地质调查项目). 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

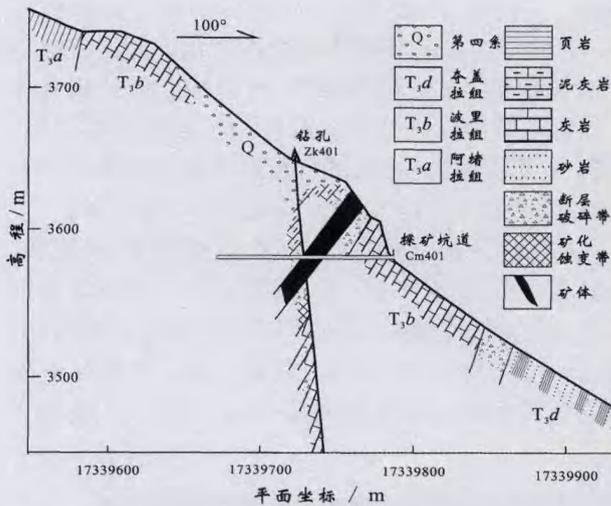


图3 拉诺玛铅锌锑多金属矿代表性地质剖面(04#)图  
Fig. 3 Representative cross-section (04#) of the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

灰黑色粉砂质泥页岩、碳质泥页岩、浅灰色中厚层块状岩屑杂砂岩、长石杂砂岩,岩层厚度为652.97 m,地层总体东倾,倾角50~80°。第四系(Q)分布于矿区的东部,主要发育在色曲河两岸及次级河谷中,为残坡积和冲洪积物,厚度局部可达数十米(图2)。

矿区内的断裂构造以NS向的为主,近EW向的为次。2条NS向断裂(F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>)纵贯全矿区;EW向断

裂有F<sub>3</sub>(图2)。

F<sub>1</sub>是区域性俄洛桥断裂的分支断裂,在矿区北部宽50~100 m,南部宽10~50 m,总体西倾,倾角为45~60°,在矿区北部充填了紫红色断层角砾岩、碎裂灰岩及菱铁矿矿化体,在矿区南部充填了紫红色断层泥及石膏,性质为逆断层。F<sub>2</sub>发育于矿区东部,宽度一般小于10 m,局部达15 m,主要充填了岩石碎屑、断层泥等,性质为逆断层,矿体产出在该断层之上的碎裂地层中,因而,F<sub>2</sub>被认为是该区内重要的控矿构造。F<sub>3</sub>发育于矿区中部,呈近EW向展布,地表出露宽度为5~50 m,为成矿期后构造,性质为平移断层,具压扭性质,对矿区氧化矿化带的空间分布有较大影响,在该断层的影响下,矿区内22号勘探线的矿体具有次生富集特征。

### 3 矿体和矿化特征

#### 3.1 矿体特征

拉诺玛矿床内的矿体产于上三叠统波里拉组(T<sub>3b</sub>)灰岩、碎裂灰岩中,呈条带状、似层状产出(图2和图3)。矿化以开放空间充填为主,交代为辅,矿石矿物主要呈脉状、角砾状和团块状产出(图4)。经勘查,划分出I号和II号2个矿体(图2)。以F<sub>3</sub>断裂为界,其北为I号矿体,其南为II号矿体。

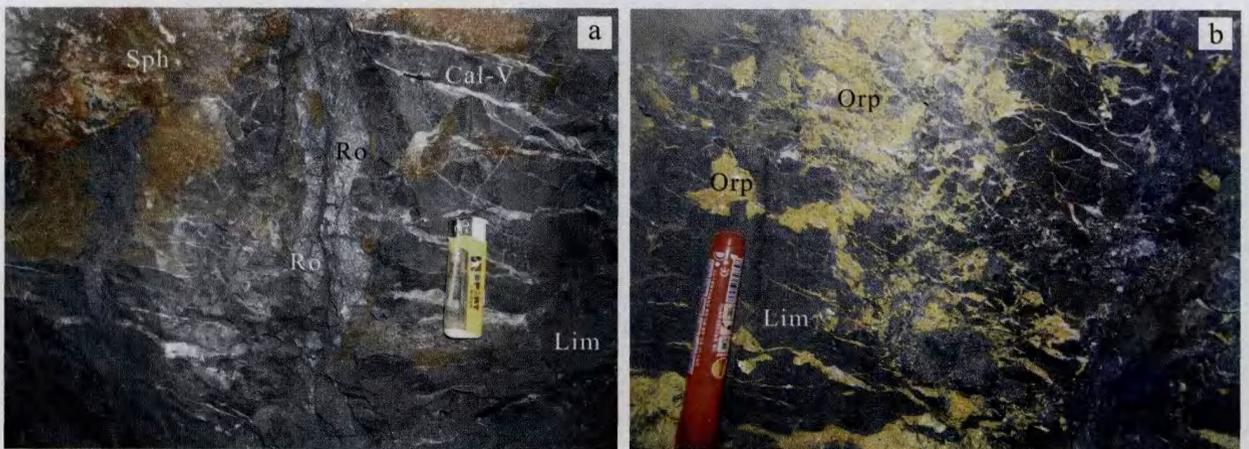


图4 拉诺玛矿床典型矿石矿物产出照片

a. 纤硫锑铅矿及方解石脉; b. 矿体中大量产出脉状、团块状低温雌黄

Ro—纤硫锑铅矿; Sph—闪锌矿; Cal-V—方解石脉; Lim—灰岩; Orp—雌黄

Fig. 4 Photos of representative ore minerals in the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

a. Robinsonite veins in host rock; b. Large amounts of orpiment veins in limestone

Ro—Robinsonite; Sph—Sphalerite; Cal-V—Calcite vein; Lim—Limestone; Orp—Orpiment

I号矿体呈似层状分布,有膨大分支现象,总体西倾,倾角为 $40\sim 50^\circ$ ,工程控制其长度为1 100 m,平均厚度12.67 m,斜深最大为175 m;矿石平均品位: $w(\text{Pb})$  1.90%、 $w(\text{Zn})$  3.04%。II号矿体总体东倾,倾角 $60\sim 70^\circ$ ,长1 025 m,地表平均厚度6.48 m;矿石平均品位: $w(\text{Pb})$  1.86%、 $w(\text{Zn})$  1.08%<sup>①</sup>。

### 3.2 矿化特征

该矿床的围岩蚀变主要为方解石化、黄铁矿化、硅化、雌黄矿化等。方解石化表现为灰岩、泥灰岩的微晶方解石化,以及较广泛发育的方解石脉,方解石

脉有穿插现象,反映出方解石化具多期性;灰岩、泥灰岩的微晶方解石化可伴有黄铁矿化。硅化石英呈他形粒状或不规则粒状散布,或以集合体形式分布于方解石脉中。雌黄矿化主要见于断裂破碎带中,雌黄(局部含雄黄)在含碳质较高的脆裂泥灰岩中呈脉状、团块状大量出现(图4b和图5c)。

矿石内的硫化物呈脉状、角砾充填状、团块状、浸染状产出(图4和图5)。矿石矿物主要为纤硫锑铅矿、闪锌矿、黄铁矿、雌黄、辰砂等,脉石矿物以方解石为主,次有石英、石膏、重晶石等。黄铁矿主要呈自形粒状星点散布在微晶方解石化灰岩、泥灰岩

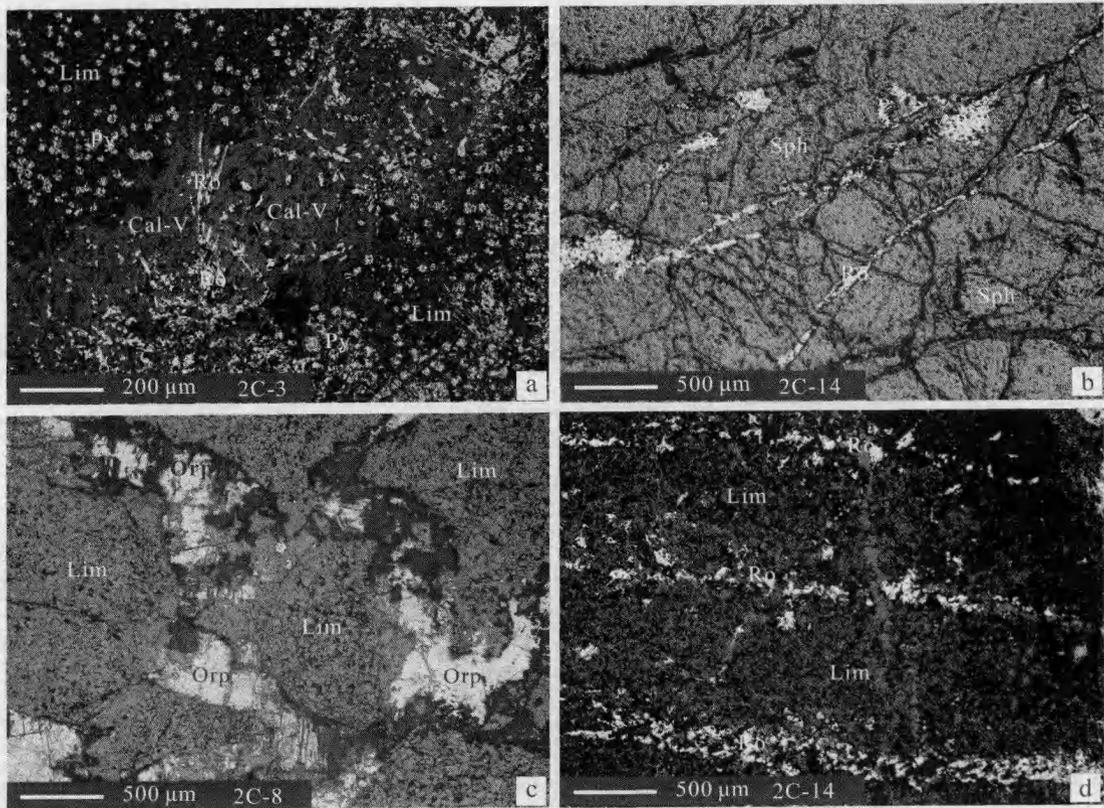


图5 拉诺玛矿床内矿石的显微镜下结构构造特征(反射光)

- a. 方解石化泥灰岩中的黄铁矿及脉状方解石中的纤硫锑铅矿; b. 纤硫锑铅矿呈细脉充填在闪锌矿裂隙中; c. 破碎灰岩角砾岩中产出的雌黄; d. 纤硫锑铅矿呈细脉状产出在蚀变灰岩中; Ro—纤硫锑铅矿; Sph—闪锌矿; Cal-V—方解石脉; Py—黄铁矿; Lim—灰岩; Orp—雌黄

Fig. 5 Reflected light microscope images of thin sections from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

- a. Pyrite spherules in limestone and robinsonite in calcite vein; b. Robinsonite veinlets in sphalerite; c. Orpiment in gravel limestone; d. Robinsonite veinlets in limestone; Ro—Robinsonite; Sph—Sphalerite; Cal-V—Calcite vein; Py—Pyrite; Lim—Limestone; Orp—Orpiment

① 冯德新,胡先才,肖福琦,宋兴龙,小巴桑. 2006. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌多金属矿评价报告(中国地质调查局地质调查项目). 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

中(图 5a 和图 6c),少量以脉状形式产出。纤硫锑铅矿可以独立或作为主体与方解石共生呈脉状、透镜状产出在方解石化灰岩中(图 4a),部分产出在方解石脉中(图 6a、d),也见在方解石化灰岩中以包裹黄铁矿的形式出现(图 6c),也可产出在热液石英间隙中(图 6b);纤硫锑铅矿是生成较晚的硫化物矿物,可以细脉状产在闪锌矿中(图 5b)。闪锌矿主要呈团块状或中-粗脉状等集合体,可见被晚期纤硫锑铅矿及方解石脉穿插(图 5b)。闪锌矿内局部偶见浸染状的辰砂。

根据诸矿石矿物相互间的穿插关系,结合流体包裹体均一温度的测定,可将拉诺玛矿床的成矿热液活动初步划分为:早期的微晶方解石化-黄铁矿化阶段,中期的多金属硫化物阶段(包括闪锌矿化、石

英-纤硫锑铅矿化、方解石脉-纤硫锑铅矿化),晚期的方解石脉-雌黄-雄黄矿化阶段。主要硫化物矿物的生成顺序为:黄铁矿→闪锌矿(辰砂)→纤硫锑铅矿→雌黄、雄黄。

### 3.3 矿石成分及矿石矿物组成

本次研究的样品采自采矿平硐 PD1 的 2 线穿脉 (PD1-2C)、采矿平硐 PD2 沿脉 (PD2) 及沿脉 (PD2-3A),采矿平硐 PD1 及 PD2 的开口位置参见图 2。在广州的澳实矿物实验室,对采自拉诺玛矿床的矿石样品及蚀变岩捡块样品的成矿元素组成进行了分析,分析结果如表 1 所示。矿石矿物成分的电子探针分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,部分分析结果如表 2 所示。

矿石成分分析结果表明,拉诺玛矿床为铅锑密

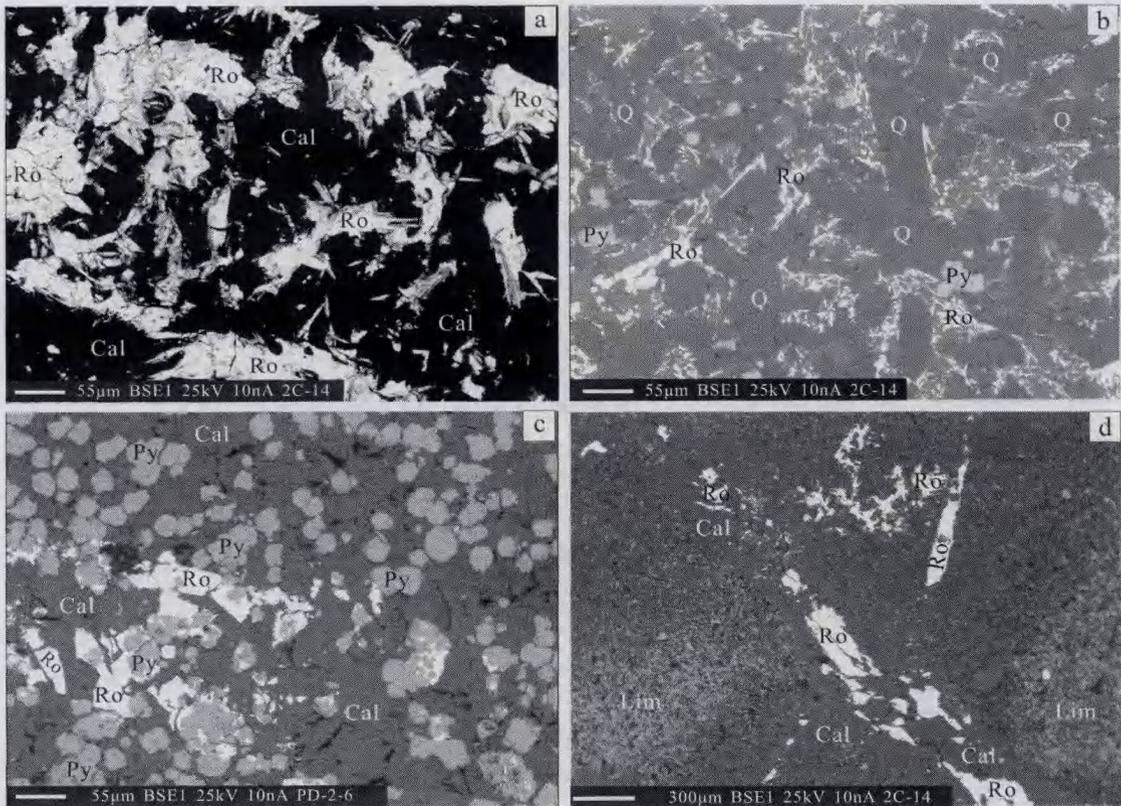


图 6 拉诺玛矿床内矿石的背散射电子图像

- a. 呈簇团状产出的纤硫锑铅矿与热液方解石共生; b. 纤硫锑铅矿产出在热液石英间隙中; c. 纤硫锑铅矿包裹黄铁矿;  
d. 纤硫锑铅矿呈脉状产出在方解石脉中; Py—黄铁矿; Cal—方解石; Lim—方解石化蚀变灰岩; Ro—纤硫锑铅矿; Q—石英

Fig. 6 Back scattered electron images showing typical ore textures from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

- a. Cluster robinsonite associated with hydrothermal calcite; b. Robinsonite filling the void of hydrothermal calcite veins;  
c. Pyrite spherules surrounded by robinsonite; d. Robinsonite in veins and associated with hydrothermal calcite veins

Py—Pyrite; Cal—Calcite; Lim—Limestone; Ro—Robinsonite; Q—Quartz

表1 拉诺玛矿床内矿石及蚀变岩块样的成矿元素组成分析结果

Table 1 Ore-forming element content of samples from the ore body in the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

样品号	$w(B)/10^{-6}$				$w(B)/\%$				Pb/Sb	Pb/Zn
	Ag	As	S	Fe	Pb	Zn	Sb			
PD2-3A-03	1.4	1 840	2.1	1.06	0.32	1.55	0.33	0.95	0.20	
PD2-3A-04	1.6	2 160	6.4	1.16	1.20	8.56	1.79	0.67	0.14	
PD2-3A-05	6.9	>10 000	7.5	1.44	5.73	6.46	3.36	1.71	0.89	
PD2-3A-06	1.3	1 960	5	1.29	0.81	4.11	0.76	1.05	0.20	
PD2-3A-07	1	1 360	4.6	1.04	0.38	5.05	0.29	1.33	0.08	
PD2-02	3.4	1 370	2.1	1.16	0.86	0.00	1.26	0.68	205	
PD2-03	50.1	1 940	>10.0	2.92	8.61	0.51	11.2	0.77	16.9	
PD2-04	33.3	671	>10.0	4.3	>20	0.81	>20	~1.00	>24.7	
PD2-05	8.2	1 390	1.8	0.9	0.64	0.10	1.06	0.60	6.42	
PD2-06	8.2	4 300	8.1	3.24	4.39	1.97	3.41	1.29	2.23	
PD2-07	11	8 010	6.3	3.93	4.63	0.16	5.44	0.85	29.1	
PD2-08	18.1	3 530	>10.0	6.13	13.7	0.96	11.9	1.15	14.3	
PD2-12	5.7	2 560	4.2	2.52	0.93	0.07	1.11	0.84	12.5	
PD1-2C-11	12.1	688	>10.0	2.94	>20	0.32	>20	~1.00	>62.9	
PD1-2C-12	5.7	1 380	7	1.91	7.08	0.08	9.38	0.75	90.2	
PD1-2C-13	11.6	1 020	>10.0	4.75	10.7	0.00	14.00	0.76	3804	
PD1-2C-14	9.9	2080	>10.0	3.58	5.35	0.01	7.44	0.72	500	

表2 拉诺玛矿床内矿石矿物成分的电子探针分析

Table 2 Representative analyses of ore minerals from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

矿物名称	样品测点号	$w(B)/\%$							$x(B)/\%$						
		S	Fe	Zn	Sb	Pb	As	总和	S	Fe	Zn	Sb	Pb	As	总和
纤硫锑铅矿	PD1-2c-14-2	20.88	00.00	00.00	42.31	31.72	2.26	97.17	53.59	00.00	00.00	28.53	12.57	2.48	97.17
	PD1-2c-14-4	19.10			37.79	41.03	1.14	99.06	52.78			27.43	17.51	1.35	99.07
	PD1-2c-14-8	19.48			35.79	41.36	1.40	98.03	53.24			25.69	17.46	1.63	98.02
	PD1-2c-14-6	32.75	0.71	65.88				99.34	49.75	0.62	48.97				99.34
闪锌矿	PD1-2c-14-9	34.17	0.63	66.18				100.98	51.56	0.54	48.86				100.96
	PD1-2c-14-11	32.82	0.42	65.21				98.45	49.74	0.36	48.35				98.45
	PD2-6-2	50.65	47.89				1.92	100.46	64.48	34.93				1.04	100.45
黄铁矿	PD1-2c-3-3	50.19	47.65				0.73	98.57	63.59	34.59				0.40	98.58
	PD1-2c-14-3	50.48	45.62				3.03	99.13	64.22	33.26				1.65	99.13

切共生,矿石中锑、铅含量有良好的线性相关关系(图7a),捡块样中的Sb、Pb含量均可超过20%。据矿物的电子探针分析结果(表2),铅锑硫化物矿物的化学式大致为( $Pb_{17}As_2Sb_{27}S_{54}$ ),与国内近年来报道的锑铅的硫代酸盐矿物不同(刘家军等,2010;邓宗立,1987;黄民智,1985),在矿物数据库(<http://www.mindat.org>)中尚未查到与该矿物化学组成相符的标准矿物,笔者初步认为其类似于纤硫锑铅矿(Robinsonite:  $Pb_4Sb_6S_{13}$ )(参见[http://webmineral.com/data/Robinsonite\\_shtml](http://webmineral.com/data/Robinsonite_shtml)),可能是纤硫锑铅矿的含As变种,本文暂称其为纤硫锑铅矿(Robinsonite),确切的矿物定名还有待进一步研究。

锌以闪锌矿产出,在矿石成分上,锌与锑、铅表现出一定程度的负相关关系,就捡块样而言,一般是

Pb高则Zn低,Zn高则Pb低(图7b)。这可能是由于闪锌矿与铅锑硫化物(纤硫锑铅矿)形成于不同的成矿阶段,造成了锌与铅、锑在产出空间上的分异。

As主要以独立矿物雌黄产出,热液黄铁矿和纤硫锑铅矿都含有少量As(表2)。

纤硫锑铅矿含少量Ag,其电子探针能谱见有弱的Ag特征谱峰。闪锌矿含铁约0.5%(表2)。

## 4 矿床地球化学特征

### 4.1 流体包裹体特征

拉诺玛矿床的热液方解石中流体包裹体颇少,所含包裹体也较细小,一般小于 $5\mu m$ ,个别可达 $10\mu m$ ,密集成群分布,或沿微裂隙呈线状排列,形态主要为

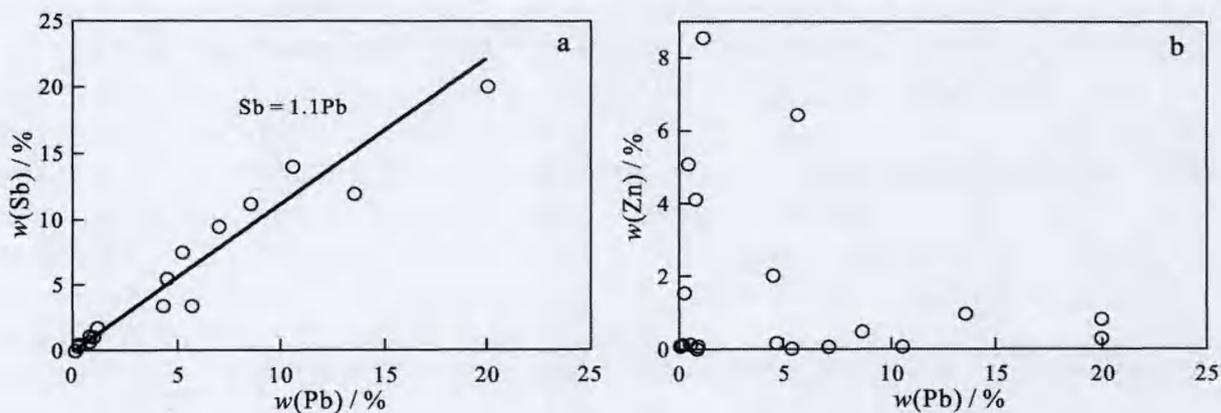


图 7 拉诺玛矿床内矿石主要成矿元素 Pb-Sb、Pb-Zn 相关关系图

Fig. 7 Diagram showing metallic relationship of ores from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

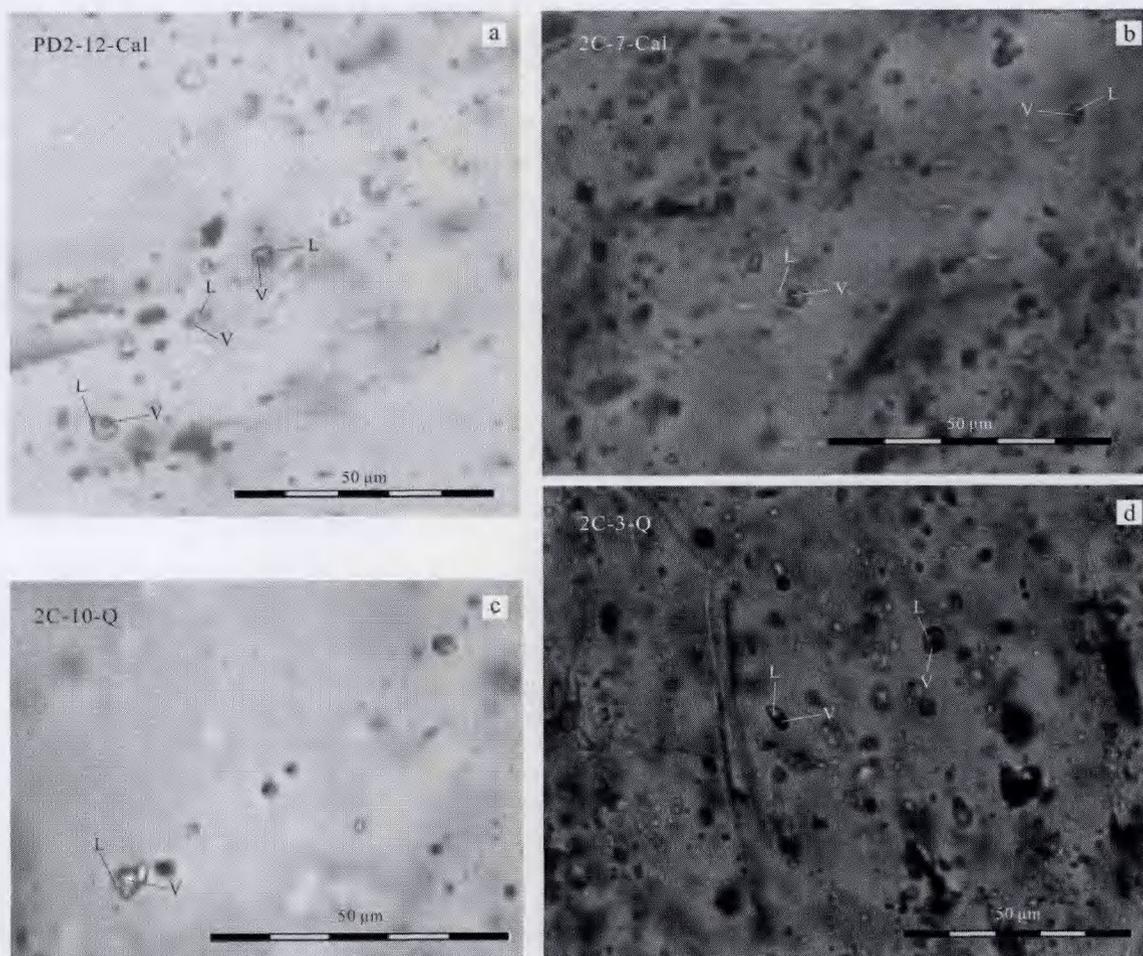


图 8 拉诺玛矿床内流体包裹体照片

a, b. 热液方解石中的流体包裹体; c, d. 热液石英中的流体包裹体

Fig. 8 Photographs of fluid inclusions in the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

a, b. Fluid inclusions in calcite; c, d. Fluid inclusions in quartz

不规则多边形、椭圆状、长条状。包裹体类型主要为液体包裹体,充填度较高,一般在80%以上(图8a、8b)。热液石英中流体包裹体较发育,呈星散状分布,或呈线状排列,大小为5~10 μm,为不规则状、椭圆状、浑圆状等,主要为液体包裹体,充填度一般在70%以上(图8c、d)。在方解石和石英颗粒的边缘或内部裂隙中,均可出现大量次生包裹体,以密集杂乱排列为特点,这些包裹体通常很小,一般在2 μm以下。

原生流体包裹体均一温度及冰点的测定在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。测试仪器为LINKAM-TMS94/1500型冷热台,仪器测定温度范围为-196~+600℃,冷冻数据和均一温度数据的精度均为±0.1℃,分析结果如图9所示。

流体包裹体均一温度测定显示,拉诺玛矿床存在中-低温至低温的成矿热液活动。热液石英中流体包裹体有较高的均一温度(200~350℃),热液方解石中流体包裹体的均一温度为140~220℃,唯一的一个闪锌矿中流体包裹体的均一温度为220℃。

成矿流体的盐度较低, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 一般为2%~13%,与澜沧江成矿带内产出的铅锌矿床(如兰坪金顶铅锌矿床等)成矿流体的盐度相似(Xue et al., 2007)。中温阶段的盐度相对较高, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为6%~13%,流体密度较小(0.7~0.9 g/cm<sup>3</sup>);低温阶段的盐度较低, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为1%~11%,流体密度较大(0.9~1.0 g/cm<sup>3</sup>)。

包裹体成分群体分析在中国地质科学院矿产资源研究所流体包裹体实验室完成。由于矿石中石英很少,未挑选出足量的单矿物,因而,本次用作包裹体成分群体分析的矿物都是方解石。将人工分选出的脉方解石单矿物粉碎筛分到40~80目,称量0.5 g,用澳大利亚SGE公司的热爆裂炉爆裂。气相成分分析采用日本岛津公司GC2010气相色谱仪测定,液相成分分析采用日本岛津公司Shimadzu HIC-SP Super离子色谱仪测定,具体分析方法请见文献(杨丹等,2007),分析结果如表3所示。此外,本次研究还对热液石英中个别较大的包裹体进行了单个流体包裹体气相组分的激光拉曼光谱分析,分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为英国Renishaw inVia Reflex型显微共聚焦激光拉曼光谱仪,分析结果如图10所示。

包裹体成分群体分析结果表明,热液中阳离子以Na<sup>+</sup>为主,Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>次之,Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值为1~2.6,热液中阴离子以Cl<sup>-</sup>为主,次为F<sup>-</sup>,F<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>比值为0.05~0.3,显示出成矿流体为NaCl型卤水。气相组分主要为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>,有少量CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>。石英中单个包裹体气相拉曼光谱分析结果显示,除水蒸气外,都含有CO<sub>2</sub>(图10),其中有一个样品还检测出C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>的谱线(据卢焕章等,2004)以及一个2 259 cm<sup>-1</sup>左右的拉曼谱峰(图10a),笔者推测该拉曼谱峰可能是无机CN基团的一个特征峰(据张甯等,2007)。

包裹体气相组分中富含CO<sub>2</sub>,并含有CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

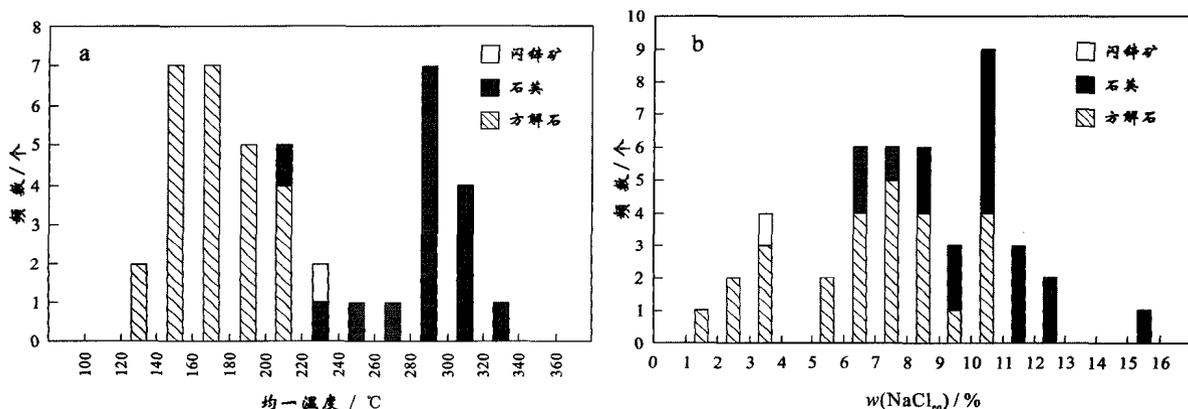


图9 拉诺玛矿床内流体包裹体的均一温度(a)和盐度(b)分布直方图

Fig. 9 Frequency distribution diagram of homogenization temperatures (a) and salinities (b) of fluid inclusions in hydrothermal minerals from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

表 3 拉诺玛矿床内流体包裹体成分群体分析结果

Table 3 Results of bulk analyses of gases and liquids in fluid inclusions from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

	PD1-2C-7 方解石	PD1-2C-10 方解石	PD1-2C-16 方解石	PD2-12 方解石		PD1-2C-7 方解石	PD1-2C-10 方解石	PD1-2C-16 方解石	PD2-12 方解石
$w(\text{液相成分})/(\mu\text{g/g})$					取样温度/℃	100~500	100~500	100~500	100~500
Li <sup>+</sup>	0	0	0	0	$w(\text{气相成分})/(\mu\text{g/g})$				
Na <sup>+</sup>	8.436	8.057	8.051	20.184	CH <sub>4</sub>	0.432	0.474	0.32	0.256
K <sup>+</sup>	3.232	7.72	4.222	9.88	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.18	0.134	0.122	0.091
Mg <sup>2+</sup>	3.794	19.555	6.775	11.389	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.009	微量	微量	微量
Ca <sup>2+</sup>	—	—	—	—	CO <sub>2</sub>	399.901	227.748	146.284	196.179
F <sup>-</sup>	4.046	4.38	5.299	2.39	H <sub>2</sub> O	533.321	592.592	506.134	972.834
Cl <sup>-</sup>	18.552	27.452	16.594	45.521	O <sub>2</sub>	48.281	23.968	22.897	12.157
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	N <sub>2</sub>	240.135	121.26	111.261	67.879
Br <sup>-</sup>	0.194	0.254	0.187	0.238	CO	0	0	0	0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.071	0.514	0.117	0.22					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	—	—	—	—					

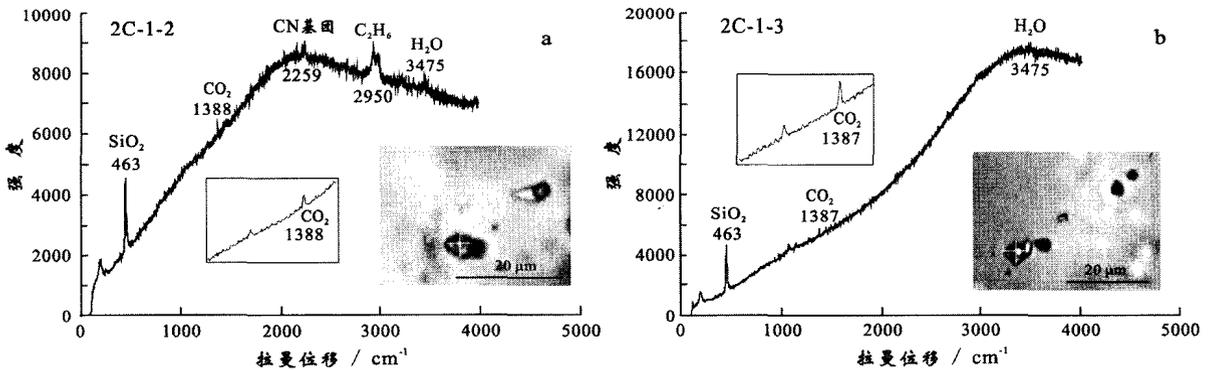


图 10 拉诺玛矿床内热液石英中流体包裹体的拉曼光谱图  
Fig. 10 Laser Raman spectra of fluid inclusion in quartz from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

等短链烃类,与兰坪铅锌矿床内流体包裹体的组分相似(薛春纪等,2002),成矿流体为 NaCl 型含烃富 CO<sub>2</sub> 流体。结合下述热液脉方解石 C、O 同位素分析,笔者认同具有相似特征的兰坪铅锌矿床成矿流体的分析结果(薛春纪等,2002),并认为拉诺玛矿床的成矿流体中也有一部分 CO<sub>2</sub> 可能来自深源,另有一部分 CO<sub>2</sub> 为沉积地层中碳酸盐岩和有机质分解成因,H<sub>2</sub>O 和烃主要起源于大气成因的盆地卤水和地层有机质。

4.2 热液方解石碳、氧同位素组成

热液方解石碳、氧同位素组成的分析在中国地质科学院国土资源部同位素地质重点实验室完成。样品分析采用离线法。每个样品的制备用 10~15 mg 方解石粉末,用无水磷酸溶解,在 25℃ 下恒温水浴 12 小时后提取 CO<sub>2</sub> 气体,最后,应用 MAT 253 型质谱仪完成测试。每一组样品中插入两个标准样

品,测试结果以相对 V-PDB 的 δ 值表示,仪器的 δ<sup>18</sup>O 和 δ<sup>13</sup>C 测试精度均高于 ±0.1‰。分析结果如表 4 所示。

分析结果表明,拉诺玛矿床内热液方解石的碳、氧同位素组成与沱沱河盆地、囊谦盆地内的铅锌矿床基本一致(图 11),热液方解石的碳同位素组成 δ<sup>13</sup>C<sub>V-PDB</sub> 为 -3.5‰ ~ +1.8‰,氧同位素组成 δ<sup>18</sup>O<sub>V-SMOW</sub> 为 +11‰ ~ +16‰,介于海相碳酸盐岩和深部构造-岩浆活动来源之间,反映出可能是深部构造-岩浆活动来源的热液与地层中海相碳酸盐岩溶解作用形成的流体的混合。

4.3 矿石硫化物硫同位素组成

矿石内硫化物硫同位素组成的分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成。将样品研磨至 200 目,称量 10 mg,采用 Cu<sub>2</sub>O 氧化方法,在真空系统和高温条件下,硫化物与 Cu<sub>2</sub>O 反应,硫全部转化为纯

表 4 拉诺玛矿床内方解石的碳、氧同位素组成分析结果

Table 4 C and O isotopes of hydrothermal calcite from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

样号	样品名称	$\delta^{13}C_{V-PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$
PD1-2C-7	方解石	-1	-16	13.92
PD1-2C-10	方解石	1.8	-18.4	11.43
PD1-2C-16	方解石	-2.7	-17.2	12.67
PD2-12	方解石	-3.5	-14	15.99
PD1-2C-15	泥灰岩	2.2	-13.4	16.61

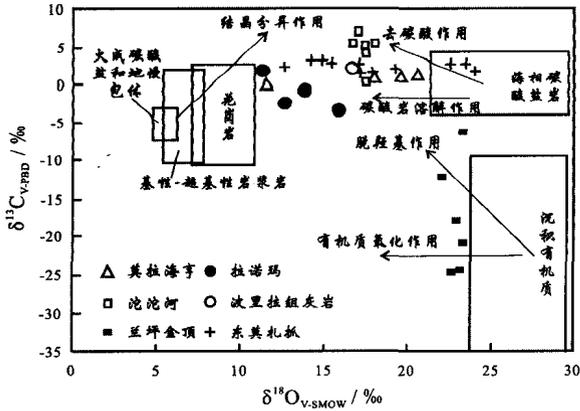


图 11 拉诺玛矿床内热液方解石的碳、氧同位素组成典型岩石类型的碳、氧同位素组成分布及三江铅锌矿带沱沱河盆地、囊谦盆地(东莫扎抓、莫拉海亨)铅锌矿床、兰坪金顶铅锌矿床的资料据刘家军等,2004 及 He et al.,2009

Fig. 11 Plot of  $\delta^{13}C$  versus  $\delta^{18}O$  of hydrothermal calcite from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

Fields of carbonatite, mafic and ultramafic rocks, granite, marine carbonate, marine and non-marine sedimentary organisms after Liu et al., 2004 and He et al., 2009

表 5 拉诺玛矿床内矿石硫化物的硫同位素组成分析结果

Table 5 S isotopes of sulfides from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

原样号	样品名称	$\delta^{34}S_{V-CDT}/\text{‰}$
PD1-2C-11Pb	纤硫锑铅矿	1.4
PD1-2C-12 Pb	纤硫锑铅矿	2.4
PD1-2C-13 Pb	纤硫锑铅矿	0.1
PD1-2C-14 Pb	纤硫锑铅矿	0.2
PD2-3 Pb	纤硫锑铅矿	-0.4
PD2-4 Pb	纤硫锑铅矿	2.3
PD2-8 Pb	纤硫锑铅矿	0.2
PD2-3A-4Zn	闪锌矿	-0.3
PD2-3A-6Zn	闪锌矿	2.6
PD2-3A-7Zn	闪锌矿	0.8
PD2-2C-14Zn	闪锌矿	-1.6

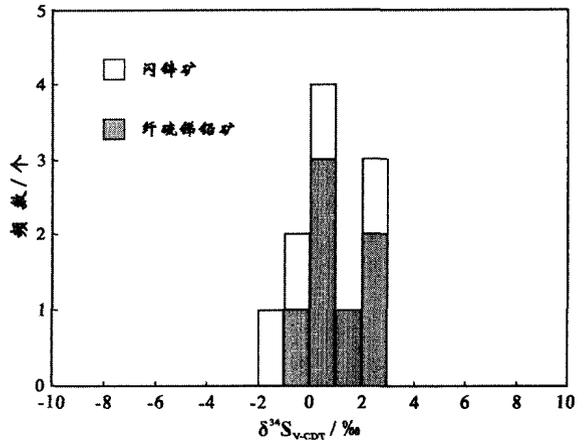


图 12 拉诺玛矿床内矿石硫化物的硫同位素组成

Fig. 12 Histogram of  $\delta^{34}S$  values of sulfides from the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

净的  $SO_2$  气体,使用德国 Finnigan 公司生产的 MAT 253 型稳定同位素质谱仪,测定其  $^{34}S$  与  $^{32}S$  的比值,分析结果如表 5 所示。分析结果表明,矿石硫化物硫同位素组成  $\delta^{34}S_{V-CDT}$  为  $-1.6\text{‰} \sim +2.6\text{‰}$ ,集中在 0 值附近(图 12),反映出成矿流体中的硫主要为深部来源,成矿物质来源主要与深部构造-岩浆活动有关。

### 5 矿床成因分析

昌都盆地铅锌成矿作用的动力学背景与兰坪盆地、囊谦盆地、沱沱河盆地一致,拉诺玛铅锌锑多金属矿床的地球化学特征也与上述 3 个盆地内产出的铅锌矿床基本相似,属于统一构造背景下形成的沉积岩容矿型铅锌矿床。但是,拉诺玛矿床以锑铅锌共生组合为特征,矿石成分分析及矿石矿物成分电子探针分析表明,该矿床为铅锑密切共生,大量产出纤硫锑铅矿,与兰坪盆地内的铅锌矿床及国内外其他主要沉积岩容矿型铅锌矿床在成矿元素组成上不同,它是沉积岩容矿型铅锌矿床的一种较为独特的矿化类型,矿化类型的不同可能反映出在成因上存在差异。

对拉诺玛铅锌锑多金属矿床成因的分析,主要依据有以下几个方面。

① 矿床地质地球化学特征 研究表明,成矿流体的液相组分以  $NaCl$  为主,气相组分中富含  $CO_2$ ,并含有  $CH_4$ 、 $C_2H_6$  等短链烃类,成矿流体为  $NaCl$  型

含烃富 CO<sub>2</sub> 流体。方解石的碳、氧同位素组成反映出成矿流体的来源为深部构造-岩浆热液与海相碳酸盐岩溶解作用形成的流体的混合; 矿石硫化物的硫同位素组成集中在 0 值附近, 指示出成矿流体中的硫主要为深部来源。笔者经分析认为, 成矿物质可能主要来源于与构造-岩浆热液活动有关的深源流体, 而盆地沉积地层中的建造水或地下水参与了成矿作用。

② 成矿期构造-岩浆活动背景 近年来, 在矿床学研究领域, 成矿作用与重大地质事件的内在关联受到高度重视(胡瑞忠等, 2008)。三江地区发育多期铅锌成矿作用, 部分矿床已被认为是构造-岩浆活动事件的产物(如: 龙汉生等, 2009; 陶琰等, 2010; 朱飞霖等, 2011)。大量研究表明, 三江地区新生代成矿作用与印度板块碰撞作用有关(顾雪祥等, 2001; 王登红等, 2002; 毛景文等, 2005; 毕献武等, 2005; 莫宣学等, 2006; 侯增谦等, 2006b; 邓军等, 2010)。受印度板块碰撞作用的影响, 沿澜沧江分布的变质岩带中有新生代构造-岩浆活动的产物, 他念他翁隆起的变质岩带中产出有新生代花岗岩株或岩脉, 在类乌齐县恩达村原吉塘岩群中所发现的岩浆成因的花岗质岩石, 其 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(27.4 \pm 0.6)$  Ma(李才等, 2009), 昌都高吉岩体(正长斑岩)侵入于中-下侏罗统察雅群之中, 其 K-Ar 年龄为 41 Ma(彭勇民等, 1997)。笔者认为, 正是沿澜沧江新生代剪切带的构造-岩浆活动为铅锌矿床的形成提供了热动力来源, 并部分提供了深部来源的成矿流体。国内外许多锡矿床或铅锌伴生锡矿化的矿床都被认为与岩浆活动有关(金景福等, 1999; 彭建堂等, 2001; 李金高等, 2002; Jonsson et al., 2002; 王峰等, 2003; Yang et al., 2009)。

③ 赋矿地层性质及可能存在的影响 昌都盆地两侧的中-下三叠统内产出大量火山岩, 东侧的三叠纪火山岩出露在江达、贡觉一带; 西侧, 在类乌齐北部、觉马-瓦浦一带产出, 是以钙质浊积岩为主的火山-沉积岩系。火山岩主要表现为双峰组合特征。觉马钙质浊积岩内所夹玄武岩厚约 10 m, 该玄武岩的地球化学特征表明其为张裂条件下喷溢出的拉斑玄武岩(吴根耀等, 2000)。笔者认为, 昌都盆地在三叠纪为伸展构造环境, 属于弧后裂谷盆地(王成善

等, 2001; 钟康惠等, 2006)。伴随强烈的双峰式火山活动, 作为弧后裂谷盆地内的三叠纪沉积岩系可以含有较高的成矿物质<sup>①</sup>, 裂谷期双峰式火山活动及其海底热液循环可以造成铅锌等成矿物质在地层中富集(杨永强等, 2006), 同时, 也可能在中-下地壳以岩浆底垫方式活化地壳中的成矿物质, 并使其局部预富集, 为新生代成矿提供了成矿物质基础。

④ 矿床分布及成矿流体运动系统 昌都盆地铅锌矿带中的矿床及矿点主要产出在澜沧江西侧基底变质岩出露的盆地边缘地带, 该地带处于刚性变质基底与相对柔性的盆地沉积地层的过渡位置, 在喜马拉雅期印度板块向欧亚大陆碰撞的影响下成为剪切活动强烈的部位, 是深部构造-岩浆活动及深源热液流体运移的有利通道, 在深部热动力的驱动下, 可以在盆地系统内形成区域性大规模的地下水侧向流动(图 13), 部分浸取了地层(三叠系)中的成矿物质进入成矿热液系统, 热液方解石 C、O 同位素组成及流体包裹体成分特征反映出盆地沉积地层中的建造水或地下水参与了成矿作用。

笔者经综合分析认为, 拉诺玛矿床的成矿作用与印度板块碰撞有关, 成矿物质主要来源于由构造-岩浆活动活化出来的中-下地壳物质(包括三叠纪裂谷期侵入中-下地壳的基性岩), 部分来源于三叠系, 成矿流体驱动机制包括, 上部重力驱动及深部构造-岩浆活动热源驱动所形成的大规模成矿流体的流动, 成矿物质在地壳浅部开放空间内沉淀成矿。拉诺玛铅锌锡多金属矿床的成矿模式如图 13 所示。

## 6 结 论

(1) 昌都盆地铅锌成矿作用的动力学背景与兰坪盆地、囊谦盆地、沱沱河盆地一致, 拉诺玛铅锌锡多金属矿床的基本特征也与这 3 个盆地内产出的铅锌矿床相似, 它们属于统一构造背景下形成的沉积岩容矿型铅锌矿床。

(2) 拉诺玛矿床为铅锡密切共生, 大量产出纤硫锡铅矿, 是澜沧江沉积岩容矿型铅锌矿带内一种独特的矿化类型。

(3) 拉诺玛矿床形成于中-低温至低温, 流体包裹体的均一温度为 140~350℃, 成矿流体为中-低

<sup>①</sup> 辛忠雷, 唐菊兴, 张金树, 李志军, 罗布次仁. 2003. 西藏自治区藏东类乌齐县-左贡县金银铜铅锌多金属成矿带远景评价报告. 西藏自治区地质调查院. 内部资料.

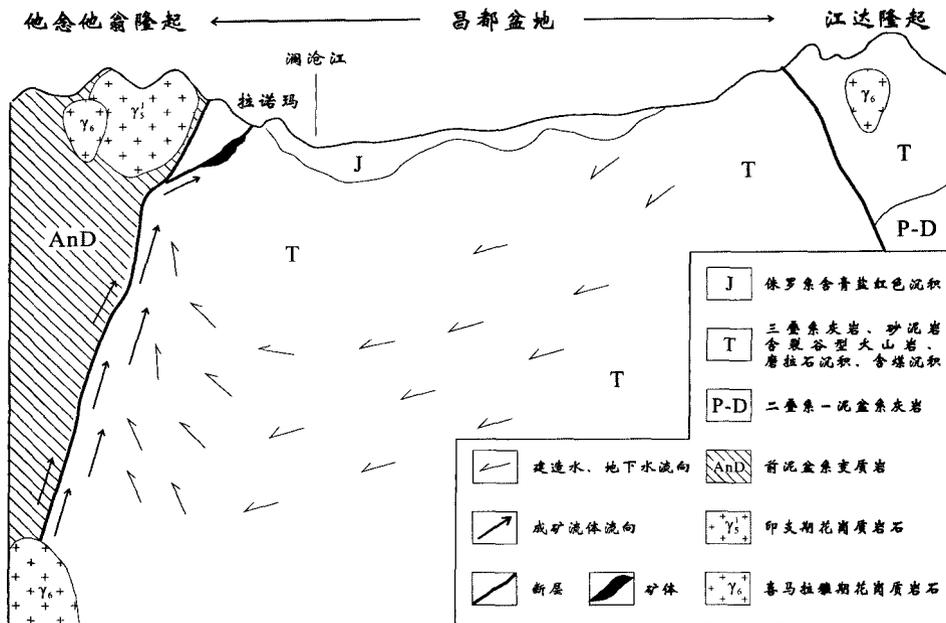


图 13 拉诺玛铅锌锑多金属矿床的成矿模式简图

Fig. 13 Schematic diagram illustrating the model for the formation of the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit

盐度,  $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  一般为 2% ~ 13%, 包裹体的液相以含 NaCl 为主, 气相成分以  $\text{CO}_2$  为主, 含有  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$  等短链烃类, 成矿流体为 NaCl 型含烃富  $\text{CO}_2$  流体。

(4) 拉诺玛矿床热液方解石中的碳为深部构造-岩浆活动来源与海相碳酸盐岩溶解作用来源的混合, 矿石硫化物的硫同位素组成集中在 0 值附近, 表明硫主要为深部来源。

(5) 拉诺玛矿床在成因上与印度板块碰撞作用有关, 成矿物质主要来源于与剪切作用有关的构造-岩浆活动, 部分来源于三叠系, 成矿流体驱动机制包括, 上部重力驱动及深部构造-岩浆活动热源驱动所形成的大规模成矿流体的流动。

**志 谢** 野外地质调查得到昌都地区国土局及西藏圣凯矿业公司的大力支持; 中国科学院地球化学研究所彭建堂研究员对本研究工作提出了宝贵建议; 薛伟、阳杰华、杨晨同志一同参加了野外地质调查; 中国地质科学院李延河研究员、杨丹副研究员帮助完成了样品的 C、O、S 同位素组成及流体包裹体群体成分分析; 中国科学院地球化学研究所罗丹、秦朝建副研究员帮助进行了流体包裹体冷热台分析及单个流体包裹体气相成分的拉曼光谱测定; 中国地

质大学刘家军教授及另一位匿名审稿人对本文稿进行了细致的审阅并提出大量建设性修改意见, 使本文得以改进, 并使作者在理论认识上得以提高。在此谨致谢忱!

## References

- Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Wu K X, Su W C and Zhan X Z. 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkali-rich intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 113-124 (in Chinese with English abstract).
- Chen F Z, Liu C J and Yong Y Y. 1994. Granotoid and Cu-Sn-Au mineralization in eastern Xizang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 197p (in Chinese).
- Deng J, Yang L Q, Ge L S, Yuan S S, Wang Q F, Zhang J, Gong Q J and Wang C M. 2010. Character and post-ore changes, modifications and preservation of Cenozoic alkali-rich porphyry gold metallogenic system in western Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1633-1645 (in Chinese with English abstract).
- Deng Z L. 1987. A study of jamesonite of the Zhenzhupo deposit, Guangxi[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 14(4): 42-49 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Tang J X, Wang C S, Lu Y and Wang Q. 2001. Himalayan collision orogenesis and formation of the large enriched mineral district: Scientific problems and thinking[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(4): 344-349 (in Chinese with English

- abstract).
- He L Q, Song Y C, Chen K X, Hou Z Q, Yu F M, Yang Z S, Wei J Q, Li Z and Li Y C. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 106-132.
- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M, Wang A J, Pan G T, Qu X M and Nie F J. 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 33 (2): 340-351 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wan E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521-543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z and Li X Z. 2007. The Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epoch and deposit type[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 48-87.
- Hou Z Q, Song Y C, Li Z, Wang Z L, Yang Z M, Yang Z S, Liu Y C, Tian S H, He L Q, Chen K X, Wang F C, Zhao C X, Xue W W and Lu H F. 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).
- 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.
- Hu R Z, Mao J W, Bi X W, Peng J T, Song X Y, Zhong H, Tao Y and Xie G Q. 2008. Several developing directions of relationship between continental geodynamics and mineralization[J]. *Geochimica*, 37(4): 344-352 (in Chinese with English abstract).
- Huang M Z. 1985. Marked advances gained in the study of sulfate mineral series from the Changpo cassiterite-sulfides deposit at Dachang, Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Mineral Deposits*, 4(1): 74 (in Chinese with English abstract).
- Jin J F, Tao Y, Lai W C, Zeng L J, Chu Z K and Wang G D. 1999. Metallogenic regularities and direction for prospecting of Xikuangshan-type antimony deposits in central Hunan Province, China[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. 176p (in Chinese).
- Jonsson E and Broman C. 2002. Fluid inclusions in late-stage Pb-Mn-As-Sb mineral assemblages in the Langban deposit, Bergslagen, Sweden[J]. *Canadian Mineralogist*, 40: 47-65.
- Li C, Xie Y W, Dong Y S, Qiangba Z X and Jiang G W. 2009. Discussion on the age of Jitang Group around Leiwuqi area, eastern Tibet, China and primary understanding[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1178-1180 (in Chinese with English abstract).
- Li J G, Wang Q H, Chen J K, Yao P and Peng Y M. 2002. Study of metallogenic and prospecting models for the Shalagang antimony deposit, Gyangze, Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5): 533-538 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Mo J H, Sun W D, Zhang Y Q, Zeng T, Hu G Q and Allen C. 2009. Study on geochemical composition and isotope ages of the Malasongduo porphyry associated with Cu-Mo mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 385-392 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, He M Q, Li Z M, Liu Y P, Li C Y, Zhang Q, Yang W G and Yang A P. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Xing Y L, Wang J P, Zhai D G, Yao M J, Wu S H and Fu C. 2010. Discovery of falkmanite from the Bairendaba superlarge Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia and its origin significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41 (3): 565-572 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z Q, Li X Z, Ye Q T, Luo J N, Shen G F and Yang Y Q. 1993. Division of tectono-magmatic belts and distribution of the ore deposits in Sanjiang region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 243p (in Chinese).
- Long H S, Luo T Y, Huang Z L, Zhou M Z, Yang Y and Qian Z K. 2009. Carbon and oxygen isotopic geochemistry of Laochang large scale Ag polymetallic deposit in Lancang country of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 687-695 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W Y. 2004. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press. 487p (in Chinese).
- Luo J L, Yang Y H, Zhao H, Chen J C and Yang J Z. 1994. Evolution of Tethys and metallogeny of major ore deposits in western Yunnan [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 235p (in Chinese).
- Mao J W, Li X F, Li H M, Qu X M, Zhang C Q, Xue C J, Wang Z L, Yu J J, Zhang Z H, Feng C Y and Wang R T. 2005. Types and characteristics of endogenetic metallic deposits in orogenic belts in China and their metallogenic processes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 342-372 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Lu F X, Shen S Y, Zhu Q W and Hou Z Q. 1993. Volcanism and metallogeny in the Sanjiang Tethys[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 267p (in Chinese).
- Mo X X and Pan G T. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43-51 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Ding J, Yao D S and Wang L Q. 2004. Geological map of Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and adjacent areas[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Press (in Chinese).
- Peng J T and Hu R Z. 2001. Metallogenic epoch and metallogenic tectonic environment of antimony deposits, South China[J]. *Geology-Geochemistry*, 29 (3): 104-108 (in Chinese with English abstract).
- Peng Y M, Chen F Z and Wang L Q. 1997. Gaoji alkaline rock body in the Qamdo basin in the Nujiang-Lancangjiang- Jinshajiang area[J].

- Tethyan Geology, 21: 100-109 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Zhong K H, Liu Z C, Li Z J, Dong S Y and Zhang L. 2006. Intracontinent orogen and metallogenesis in Himalayan epoch: Changdu large composite basin, Eastern Tibet[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 9: 1364-1376 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Hu R Z, Zhu F L, Ma Y S, Ye L and Cheng Z T. 2010. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetaoping lead-zinc deposit in Baoshan, Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1760-1772 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Yang Z S, Hou Z Q, Liu Y C, Gao Y G, Wang Z L, Song Y C, Xue W W, Lu H F, Wang F C, Su A N, Li Z Z, Wang Y X, Zhang Y B, Zhu T, Yu C J and Yu Y S. 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmohazhua 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 A J, Cao D H, Gao L, Wang G S, Guan Y, Xiu Q Y and Liu J L. 2009. A Probe into the genesis of Jinding super-large lead-zinc ore deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 83(1): 43-54 (in Chinese with English abstract).
- Wang C S, Tang J X, Gu X X and Lu Y. 2001. Preliminary analysis on Himalayan tectonic-metallogenetic domain and its mineralization effect[J]. J. Miner. Petrol., 21: 146-152 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, Xu J, Chen Y C, Xue C J, Luo Y N and Yin H L. 2002. Cenozoic ore concentration areas in the Sanjiang region, SW China: Tectonic setting and exploration[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(2): 135-140 (in Chinese with English abstract).
- Wang F and Jin J F. 2003. Isotopic geochemistry of the Nanjiaohu silver polymetallic ore deposit in Yunnan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2: 95-98 (in Chinese with English abstract).
- Wang L Q, Pan G T, Li D M and Xu T R. 2000. The evolution and mineralization of the Jiangda-Weixi continental marginal volcanic arc, South-west China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 20(2): 1-17 (in Chinese with English abstract).
- Wu G Y, Wang X P, Nie Z T and Liang D Y. 2000. Tectonic settings of the volcanic rocks in the Wapu Formation from Bitu zone, South-east Xizang[J]. Geoscience, (1): 21-28 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chen Y C, Yang J M, Wang D H and Xu J. 2002. The CO<sub>2</sub>-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenetic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu orefield, North-west Yunnan[J]. Acta Geologica Sinica, 76(2): 244-253 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chen Y C, Wang D H, Yang J M, Yang W G and Zeng R. 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenetic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, north-west Yunnan, China[J]. Science in China (Series D), 46: 789-800 (in Chinese).
- Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M and Wang D H. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, Western Yunnan, China: A review[J]. Ore Geology Reviews, 31: 337-359.
- Yang D, Xu W Y, Cui Y H, Chen W S and Lian Y. 2007. Determination of gaseous components in fluid inclusion samples by two-dimensional gas chromatography[J]. Rock and Mineral Analysis, 26(6): 451-454 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y Q, Zhai Y S, Hou Y S and Lü Z C. 2006. Study of metallogenic systems of sediment-hosted lead and zinc deposits[J]. Earth Science Frontiers, 13(3): 200-205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng X J, Liu Y C, Fei H C, Tian S H, Li Z Q and Gao W. 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen[J]. Ore Geology Reviews, 36: 194-212.
- Zhang N, Tian Z J, Leng Y Y, Wang H T, Song F Q and Meng J H. 2007. Raman characteristics of hydrocarbon and hydrocarbon inclusions[J]. Science in China (Series D), 50(8): 1171-1178 (in Chinese).
- Zhong K H, Tang J X, Liu Z C, Kou L L, Dong S Y, Li Z J and Zhou H W. 2006. Mesozoic-Cenozoic intracontinental rift in Changdu-Simao tectonic zone in east margin of Qinghai-Tibet, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, (9): 1296-1311 (in Chinese with English abstract).
- Zhu F L, Tao Y, Hu R Z, Liao M Y, Wang Y X and Li Y B. 2011. Ore-forming age of the Luziyuan lead-zinc deposit in Zhengkang, Yunnan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 30(1): 73-79 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. 岩石学报, 21(1): 113-124.
- 陈福忠, 刘朝基, 雍永源. 1994. 藏东花岗岩类及铜锡金成矿作用[M]. 北京:地质出版社. 197页p.
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 袁士松, 王庆飞, 张静, 龚庆杰, 王长明. 2010. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存[J]. 岩石学报, 26(6): 1633-1645.
- 邓宗立. 1987. 广西珍珠坡矿床的脆硫锑铅矿研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 14(4): 42-49.
- 顾雪祥, 唐菊兴, 王成善, 陆彦, 王乾. 2001. 喜马拉雅碰撞造山作用与(超)大型矿集区的形成: 科学问题与思考[J]. 成都理工大学学报, 28(4): 344-349.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 340-351.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521-533.

- 侯增谦,宋玉财,李 政,王召林,杨志明,杨竹森,刘英超,田世洪,何龙清,陈开旭,王富春,赵呈祥,薛万文,鲁海峰. 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.
- 胡瑞忠,毛景文,毕献武,彭建堂,宋谢炎,钟 宏,陶 琰,谢桂青. 2008. 浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势[J]. 地球化学, 37(4): 344-352.
- 黄民智. 1985. 大厂长坡锡石硫化物矿床硫酸盐矿物系列研究获重要进展[J]. 矿床地质, 4(1): 74.
- 金景福,陶 琰,赖万昌,曾令交,楚志宽,王高道. 1999. 湘中锡矿山式锡矿成矿规律及找矿方向[M]. 成都:四川科学技术出版社. 176 页.
- 李 才,谢尧武,董永胜,强巴扎西,蒋光武. 2009. 藏东类乌齐一带吉塘岩群时代讨论及初步认识[J]. 地质通报, 28(9): 1178-1180.
- 李金高,王全海,陈健坤,姚 鹏,彭勇民. 2002. 西藏江孜县沙拉岗锡矿床成矿与找矿模式的初步研究[J]. 成都理工大学学报, 29(5): 533-538.
- 梁华英,莫济海,孙卫东,张玉泉,曾 提,胡光黔,Allen Charlotte. 2009. 玉龙铜矿带马拉松多斑岩体岩石学及成岩成矿系统年代学分析[J]. 岩石学报, 25(2): 385-392.
- 刘家军,何明勤,李志明,刘玉平,李朝阳,张 乾,杨伟光,杨爱平. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1-10.
- 刘家军,邢永亮,王建平,翟德高,要梅娟,吴胜华,付 超. 2010. 内蒙拜仁达坝超大型 Ag-Pb-Zn 多金属矿床中针硫锡铅矿的发现与成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(3): 565-572.
- 刘增乾,李兴振,叶庆同,罗建宁,沈敢富,杨岳清. 1993. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M]. 北京:地质出版社. 243 页.
- 龙汉生,罗泰义,黄智龙,周明忠,杨 勇,钱志宽. 2009. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床碳、氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 28(5): 687-695.
- 卢焕章,范宏瑞,倪 陪,欧光习,沈 坤,张文雅. 2004. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社. 487 页.
- 罗君烈,杨友华,赵 准,陈吉琛,杨荆舟. 1994. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京:地质出版社. 235 页.
- 毛景文,李晓峰,李厚民,曲晓明,张长青,薛春纪,王志良,余金杰,张作衡,丰成友,王瑞廷. 2005. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨[J]. 地质学报, 79(3): 342-372.
- 莫宣学,路凤香,沈上越,朱勤文,侯增谦. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京:地质出版社. 267 页.
- 莫宣学,潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成:构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 13(6): 43-51.
- 潘桂棠,丁 俊,姚东生,王立全. 2004. 青藏高原及邻区地质图[M]. 成都:成都地图出版社.
- 彭建堂,胡瑞忠. 2001. 华南锡矿带的成矿时代和成矿构造环境[J]. 地质地球化学, 29(3): 104-108.
- 彭勇民,陈福忠,王立全. 1997. 三江地区昌都盆地高吉碱性岩体的基本特征[J]. 特提斯地质, 21: 100-109.
- 唐菊兴,钟康惠,刘肇昌,李志军,董树义,张 丽. 2006. 藏东缘昌都大型复合盆地喜马拉雅期陆内造山与成矿作用[J]. 沉积学报, 9: 1364-1376.
- 陶 琰,胡瑞忠,朱飞霖,马言胜,叶 霖,程增涛. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析[J]. 岩石学报, 26(6): 1760-1772.
- 田世洪,杨竹森,侯增谦,刘英超,高延光,王召林,宋玉财,薛万文,鲁海峰,王富春,苏媛娜,李真真,王银喜,张玉宝,朱 田,俞长捷,于玉帅. 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.
- 王安建,曹殿华,高 兰,王高尚,管 焯,修群业,刘俊来. 2009. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. 地质学报, 83(1): 43-54.
- 王成善,唐菊兴,顾雪祥,陆 彦. 2001. 喜马拉雅构造-成矿域及其成矿效应初步分析[J]. 矿物岩石, 21(3): 146-152.
- 王登红,杨建民,闫升好,徐 珏,陈毓川,薛春纪,骆耀南,应汉龙. 2002. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景[J]. 地球学报, 23(2): 135-140.
- 王 峰,金景福. 2003. 云南南角河银多金属矿床同位素地球化学研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2: 95-98.
- 王立全,潘桂棠,李定谋,须同瑞. 2000. 江达-维西陆缘火山弧的形成演化及成矿作用[J]. 沉积与特提斯地质, 20(2): 1-17.
- 吴根耀,王晓鹏,聂泽同,梁定益. 2000. 藏东南碧土带瓦浦组火山岩形成的大地构造环境[J]. 现代地质, (1): 21-28.
- 薛春纪,陈毓川,杨建民,王登红,徐 珏. 2002. 滇西北兰坪铅锌银铜矿田含炔富 CO<sub>2</sub>:成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报, 76(2): 244-253.
- 薛春纪,陈毓川,王登红,杨建民,杨伟光,曾 荣. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床:地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学, 33: 316-322.
- 杨 丹,徐文艺,崔艳合,陈伟十,连 玉. 2007. 二维气相色谱法测定流体包裹体中气相成分[J]. 岩矿测试, 26(6): 451-454.
- 杨永强,翟裕生,侯玉树,吕志成. 2006. 沉积岩型铅锌矿床的成矿系统研究[J]. 地学前缘, 13(3): 200-205.
- 张 鼎,田作基,冷莹莹,王汇彤,宋孚庆,孟建华. 2007. 烃和烃类包裹体的拉曼特征[J]. 中国科学(D辑), 37(7): 900-907.
- 钟康惠,唐菊兴,刘肇昌,寇林林,董树义,李志军,周慧文. 2006. 藏东缘昌都-思茅构造带中生代陆内裂谷作用[J]. 地质学报, 9: 1296-1311.
- 朱飞霖,陶 琰,胡瑞忠,廖名扬,王银喜,李玉帮. 2011. 云南镇康芦子园铅锌矿成矿年龄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(1): 73-79.