

藏南扎西康铅锌银锑多金属矿多期多阶段成矿特征及其指示意义

梁 维^{1,2}, 郑远川², 杨竹森³, 李振清³, 刘英超¹, 刘云飞¹,
李秋耘¹, 孙清钟¹, 付 强¹, 侯增谦¹

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要: 扎西康铅锌银锑多金属矿床是北喜马拉雅金-锑成矿带的典型代表, 更是该成矿带内为数不多的已达到大型规模的矿床。扎西康矿床具有丰富的金属矿物和脉石矿物组合以及极为复杂的成矿期次, 因而其成矿世代的系统划分不仅对该矿床成矿过程的认识和理解具有重要意义, 而且对区带成矿作用的认识也具有十分重要的指示意义。文章在总结前人的认识基础之上, 根据矿物共生组合和相互穿插关系, 提出了新的成矿期次划分方案, 将扎西康矿床的成矿世代分为3期、7阶段和13亚阶段, 这种多期多阶段成矿特点显示出扎西康矿床的形成可能是多期流体叠加的结果, 并提出晚期锑元素对先存铅锌矿体的叠加改造成因。研究表明这种叠加改造成矿作用在整个区带上具有普遍意义, 指示了在特提斯喜马拉雅锑金成矿带可能具有寻找铅锌矿体的潜力。

关键词: 扎西康; 铅锌银锑多金属矿; 多阶段成矿; 叠加改造

中图分类号: P618.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0064-15

Multiphase and polystage metallogenic process of the Zhaxikang large-size Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic deposit in southern Tibet and its implications

LIANG Wei^{1,2}, ZHENG Yuan-chuan², YANG Zhu-sen³, LI Zhen-qing³, LIU Ying-chao¹, LIU Yun-fei¹,
LI Qiu-yun¹, SUN Qing-zhong¹, FU Qiang¹ and HOU Zeng-qian¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Located in Tethys Himalayan sub-terrane, the Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic ore deposit is not only a representative ore deposit in the antimony-gold metallogenic belt but also among a few deposits that have reached large-scale reserves. The Zhaxikang deposit has abundant assemblages of ore minerals and gangue minerals with complex ore-forming process, which indicates that recognition of ore-forming stages and periods is very important for the study of the ore-forming process and also of indication significance for the understanding of the regional metallogenic belt. Based on summarizing the previous cognitions of the mineralization process as well as mineral paragenetic assemblages and crosscutting relationship of ore veins, the authors formulated a model for 3-

收稿日期: 2013-03-26; 修订日期: 2013-11-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB403106, 2011CB403104); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121253); 国际地质对比计划(IGCP/SIDA-600); 国家青年科学基金资助项目(41102033)

作者简介: 梁 维(1986-), 男, 汉族, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lwucgb@126.com; 通讯作者: 侯增谦(1961-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事大陆成矿作用研究, E-mail: houzengqian@126.com.

period, 6-stage and 13-sub-stage complex ore-forming process, which indicates that the metallogenic process of the Zhaxikang deposit resulted from superimposition and remobilization of several stages of ore fluids, and the later antimony-bearing fluid was superimposed upon and reconstructed the pre-existent lead-zinc ore body. The overprinting and remobilization process has universal meaning for the study of the regional metallogenic belt and suggests the potential of finding lead-zinc deposits in the Tethys Himalayan Sb-Au metallogenic belt.

Key words: Zhaxikang; Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic deposit; multiphase and polystage metallogenic process; superimposition and remobilization metallogenesis

已有研究表明,在印度-亚洲板块陆-陆碰撞的整个过程中,均伴有强烈而丰富的成矿作用发生(侯增谦等,2006a,2006b,2006c,2006d),在印度板块一侧的特提斯喜马拉雅构造板片上以一条极具成矿潜力的锑-金成矿带为代表。前人研究表明,这些锑-金矿床(矿点)主要分布于特提斯喜马拉雅带的东段,并与带内呈东西向展布的构造穹窿密切相关(聂凤军等,2005;杨竹森等,2006;戚学祥等,2008;Yang *et al.*,2009)。矿床的金属组合在空间上具有明显的分带现象,以构造穹窿为中心向外,由金矿化为主逐渐变为锑矿化为主,即穹窿中心位置以产出金矿为特征,向穹窿外侧锑的含量逐渐增多,逐渐变为金锑矿,并最终过渡为不含金的锑矿床或矿点(杨竹森等,2006;Yang *et al.*,2009)。

扎西康铅锌银锑多金属矿床位于西藏隆子县以西约 48 km,是藏南锑金成矿带中储量和开采规模最大(刘玉生,2009)工程揭露最完全的矿床。扎西康矿床具有复杂的矿石结构构造、繁多的矿物种类(朱文凤等,2010)杂乱的脉体穿切关系等特征,是研究矿物生出演化顺序的理想矿床。虽然前人对于该矿床的地质特征、矿石组构及矿物成分等开展了一些研究(杨竹森等,2006;孟祥金等,2008;Yang *et al.*,2009),但是受矿体揭露程度等因素制约,早期研究者对该矿床成矿期次和阶段的划分不完善,或存在明显的错误,成矿期次的划分及矿物生成顺序的拟清已经是该矿床理论研究争议的焦点之一(杨竹森等,2006;张建芳等,2010;朱黎宽等,2012;王艺云等,2012),同时也是制约该多金属矿床理论研究的瓶颈。鉴于此,本文在详细的野外和室内工作基础上对矿床成矿世代关系进行重新厘定,为下一步理论研究奠定基础。

1 成矿地质背景

青藏高原的形成伴随着强烈的碰撞造山运动与成矿过程(莫宣学等,2003,2006;侯增谦等,2006a)形成了现今的格局:两条缝合带(班公湖-怒江缝合带、印度-雅鲁藏布江缝合带)分隔出 3 个地块(由北向南依次为羌塘地块、拉萨地块、喜马拉雅地块),其中喜马拉雅带又可以分为北喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅 3 个微地体,而它们之间及它们与印度地块的分界线则是碰撞造山过程中形成的近东西向深大断裂,分别为藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)、主边界逆冲断层(MBT)(Yin and Harrison,2000)。造山过程中形成了一系列成矿带(侯增谦等,2006a,2006b,2006c),在藏南特提斯喜马拉雅带围绕穹窿分布的是低温热液型锑-金-铅-锌成矿带(聂凤军等,2005;杨竹森等,2006),以穹窿为中心,向外分别为金、锑-金、锑、铅-锌-锑矿床(杨竹森等,2006)。代表性的矿床(点)包括:浪卡子金矿、鹧鸪锦金矿、扎西康铅锌锑银多金属矿、马扎拉锑矿等。此外,一些铅锌矿床(点)如吉松银铅锌矿,也产出于特提斯喜马拉雅带。

北喜马拉雅沉积岩系主要为侏罗-白垩系海相碎屑岩沉积、三叠系碎屑岩沉积,零星分布古生代地层及元古宙古老变质基底。北喜马拉雅中东部是产出藏南锑金矿床的重要部位,主要出露侏罗-白垩系地层,沉积环境以浅海到深海的过渡相为主,少量出露深海沉积岩。区域地球化学数据显示,藏南地层中锑、金、铅、锌等元素均存在一条近东西向的正异常分布带,砷、汞、硼等元素含量也高于地壳平均值^①。除了广泛分布的沉积地层外,沿着北喜马拉雅

① 地调局区域 1:20 万地球化学数据。

微地块中部,从东至西近于等间距分布了大量的构造穹窿,形成一条独特的穹窿带(Burchfiel, 1992; Hauck *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2000, 2004)。这些穹窿主要有拉轨冈日穹窿、康马穹窿和也拉香波穹窿等,并以也拉香波、康马穹窿最具代表性(于涛等, 2007; 张进江等, 2007; 曾令森等, 2009; 胡古月等, 2011)。各穹窿间形成时代相近,其发育的时间集中在18~13.5 Ma之间(刘文灿等, 2004; 张进江等, 2007; 张进江等, 2012)。穹窿内出露的地层主要为中新元古代变质地层和古生代到中生代的沉积岩系(Burg *et al.*, 1984; Harrison *et al.*, 1997; 张进江等, 2007),并通常被中新世淡色花岗岩或具有埃达克岩性质的始新世二云母花岗岩穿切(Hou *et al.*, 2012)。穹窿中有广泛的岩浆侵入,在藏南还有大量的基性-中基性岩墙群,多呈北西向和近东西向展布,侵位时间为138 Ma左右(童劲松等, 2007)。

区域构造主要是穹窿构造及南北向正断层系。其中,构造穹窿与藏南拆离系形成密切相关。印度大陆与亚欧大陆强烈碰撞后的快速汇聚,导致喜马拉雅地块向南逆冲并迅速抬升(Molnar and Lyon-Caen, 1988),此时,地壳浅部(浅变质沉积地层)与

深部构造(角闪岩变质基底)发生伸展滑脱(陈智梁等, 1996),形成了近东西向的拆离断层系。在这个过程中,中地壳部分熔融岩浆沿着北喜马拉雅中部构造薄弱带向上侵位,形成了以拉轨冈日、康马、也拉香波为代表的藏南构造穹窿带。

在青藏高原中上地壳尺度强烈的伸展作用下(侯增谦等, 2003, 2006b),形成了遍布整个高原的近南北向裂谷带(Yin *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2012a),而控制裂谷的正断层(Pan and Kidd, 1992),形成了著名的南北向正断层系。对断层泥中云母和裂谷带内火山岩地层的同位素定年结果表明,裂谷带至少在18 Ma之前便已存在(Yin *et al.*, 1999; Blisniuk *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 2001)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层

扎西康铅锌银锑多金属矿床大地构造位置位于特提斯喜马拉雅带的东段(图1)。矿区出露侏罗系海相沉积地层,包括日当组砂页岩、陆热组泥晶灰岩、夹变质粉砂岩、遮拉组泥岩夹砂页岩及维美组

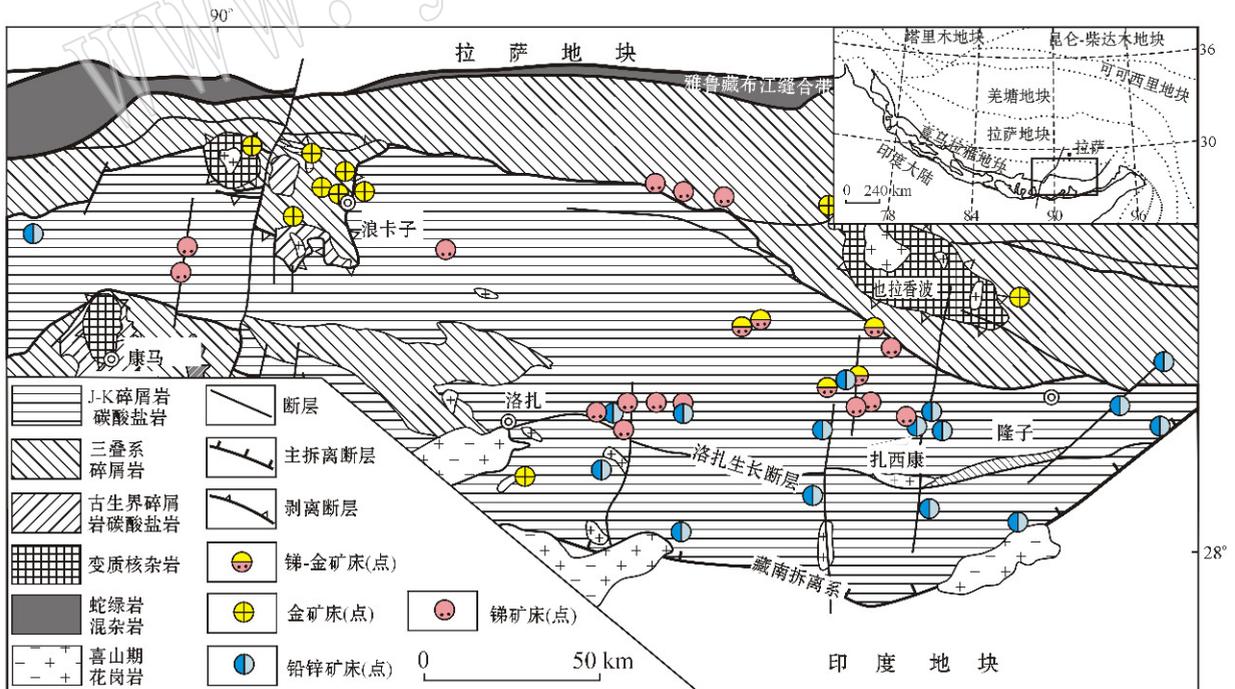


图1 北喜马拉雅东段矿床(点)分布(据杨竹森等, 2006 修改)

Fig. 1 Distribution of deposits in the eastern section of northern Himalayas, showing location of the Zhaxikang ore deposit (modified after Yang Zhusen *et al.*, 2006)

变质粉砂岩(西藏自治区地质矿产局,1993;尹学军 等,2004^①)(表 1)

表 1 扎西康铅锌银锑多金属矿床地层分组
Table 1 Strata in the Zhaxikang ore district, northern Himalayas

地层	岩性	沉积厚度	沉积相	备注
维美组(J _{3w})	2个岩性段:1. 灰色中厚层变质夹复成分砂砾岩、砾岩; 2. 细粒石英砂岩粉色粉砂质绢云板岩夹灰色薄层状变质粉砂岩	1 300 m	海滩相	
遮拉组(J _{2,3z})	灰黑色泥岩和泥质砂页岩互层夹少量硅质岩与玄武岩、英安岩、凝灰岩等	6 000 m	深海相	
陆热组(J _{1,2l})	深灰色、灰黑色中层状泥晶灰岩夹灰色中层变质粉砂岩、粉砂质绢云母板岩	3 200 m	浅海台地-台地浅滩相	
日当组(J _{1r})	5个岩性段:1. 灰绿色石英砂岩与灰黑色页岩互层;2. 灰黑色页岩夹褐黄色钙质砂岩;3. 灰绿色石英砂岩;4. 灰黑色页岩、碳质板岩;5. 白-黄褐色粗粒石英砂岩	>1 400 m	潮坪-陆棚相	第 4 岩性段主要为含矿地层

2.2 矿区构造

扎西康矿床为构造控矿。矿区控矿构造形式相对简单,为一系列近于平行排列的南北向-北北东向正断层。矿区分布有十余条南北向-北北东向断裂,都与地层高角度相交,且大部分具有一定的走滑位移量。这些断层构造都存在一定程度的矿化,具有代表性的断裂有 F2、F6 及 F7,它们分别控制了矿区的Ⅵ号、Ⅳ和Ⅴ号矿体(图 2)。

F2 全长大于 1 300 m,走向北东-南西,走向上呈舒缓波状,倾向~270°,倾角 75~88°。在 4872 硐口可以测得断层宽约 3 m,断层面倾向西,断层面的擦痕具有 10°的侧伏角,显示出具走滑性质特征,因此判断 F2 为具有走滑性质的正断层。

F6 断裂近南北向,长度大于 300 m,宽度 2~15 m,平面上具“S”形特征,倾向~270°,倾角>50°,从浅部到深部具有变陡的趋势,破碎带含有一定的铅锌锑矿化。

F7 断裂呈近南北向,产状 265~295°(62~75°,长度大于 1 400 m,断裂宽度 3~18 m 不等,向下有局部膨大的现象,从矿体产出上来看,该断裂向下还出现了分支现象。

3.3 矿体特征

扎西康铅锌银锑多金属矿床矿体的分布均受控于南北向-北北东向的断裂(图 2)。目前,Ⅴ号、Ⅵ号矿体规模最大,矿体形态基本相同,均为向西倾,向北侧伏。

Ⅴ号矿体是该矿床经济价值最高的矿体,受 F7 断裂控制。矿体呈现出向上收敛、向下膨大的特征,

并出现分支现象,目前开采了 10 个中段,向深部还具有一定的资源潜力。Ⅴ号矿体矿石构造主要为脉状、网脉状、皮壳状,少量为角砾状、块状。矿体的矿物组合有闪锌矿、方铅矿、铅锑硫酸盐、辉锑矿、黄铜矿、黄铁矿、方解石和铁锰碳酸岩等。Ⅴ号矿体具有复杂的矿物组合、多期多阶段成矿特征,成矿元素具有一定的垂直和水平分带性等特点,是扎西康矿床理论研究的重点。

Ⅵ号矿体相对较为简单,位于矿区东侧,是扎西康次重要的矿体,矿体产状 298°/79°。矿脉主要产出粗晶方铅矿和少量的闪锌矿、银黝铜矿、黄铁矿、铁锰碳酸盐等,矿石构造主要呈透镜状、角砾状、块状。靠近地表,矿体发生了强烈的氧化作用,在地表及平硐中出现大量的铅矾及褐铁矿化。

3 多期多阶段成矿

通过详细的矿区平硐编录及矿石、岩芯观察,按照主要金属矿物种类和组合为依据划分成矿期次;而成矿阶段则是以同一成矿期次内脉体的穿切和交代关系为依据,定名原则是按阶段最具特征和产出量最大的脉石矿物加矿石矿物命名;成矿亚阶段是对各阶段的矿物形成的先后顺序进一步细分,是对各阶段中具共生关系的矿物组合的划分,命名原则是列出该亚阶段主要的矿物并按矿物百分含量排列。按照上述划分原则,本文总结出 3 期 7 个阶段 13 个亚阶段成矿过程(表 2)。

① 尹学军等. 2004. 1:25 万隆子县地质图说明书.

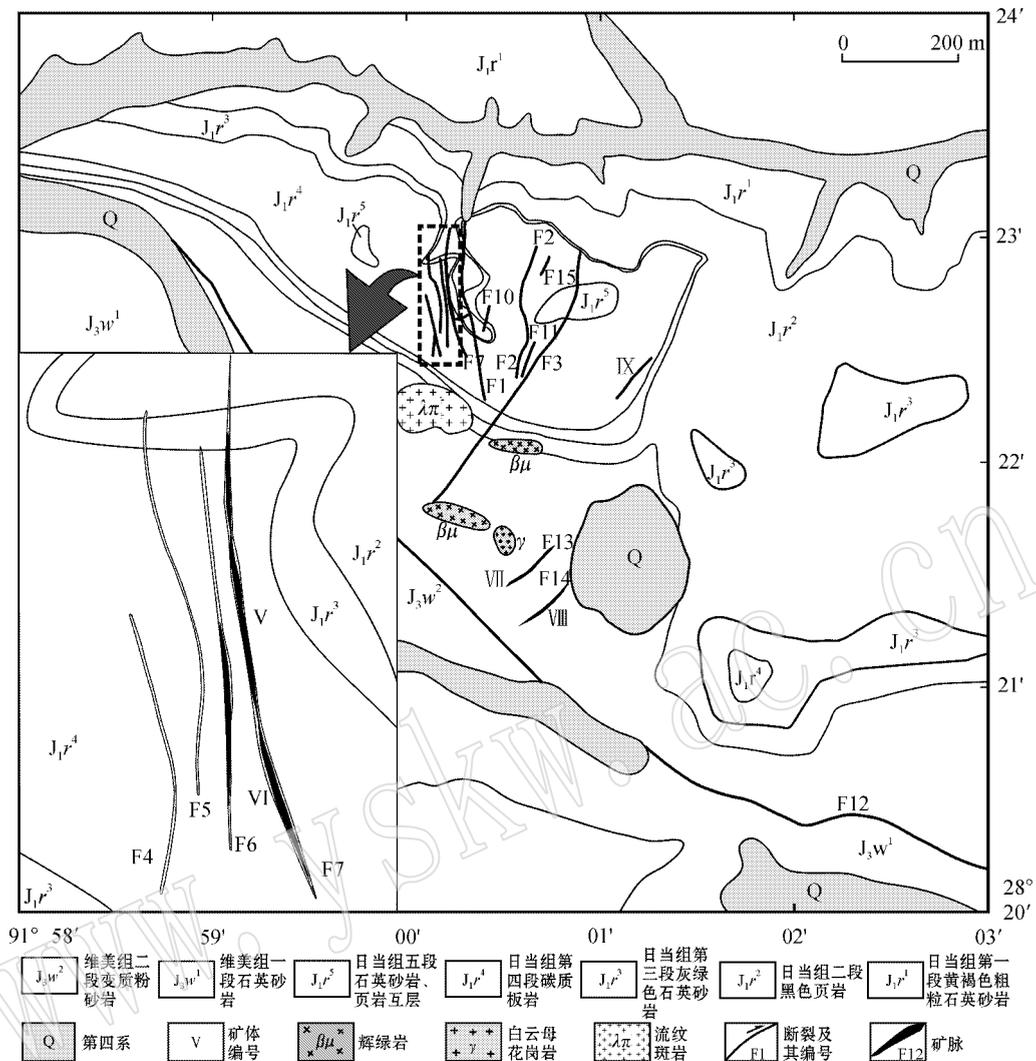


图 2 扎西康铅锌银锑多金属矿床地质图(据西藏华钰矿业开发有限公司, 2009^①)

Fig. 2 Geological map of the Zhaxikang polymetallic deposit (after Huayu Mining Co., Ltd., 2009^①)

3.1 铅(Pb)-锌(Zn)期(A期)

该期即扎西康的第 1 成矿期, 矿石矿物主要为闪锌矿和方铅矿, 脉石矿物主要为大量的菱锰矿和黄铁矿, 未见石英。该期划分的主要依据是产出大量粗晶方铅矿、闪锌矿角砾, 说明早期存在的矿体发生了构造破碎, 形成了角砾状矿石。角砾状矿石又被后期呈脉状-网脉状的硫化物脉穿切, 胶结, 依此定为铅(Pb)-锌(Zn)矿化期。虽然大多数情况下铅锌矿都是单独存在, 但也存在方铅矿和闪锌矿角砾共存的情况(图 3a1)。该期只包含一个方铅矿-闪锌矿阶段。

该阶段由一个角砾状、脉状粗晶闪锌矿-方铅矿

-菱锰矿亚阶段组成, 矿物组合为方铅矿(40%~45%)、闪锌矿(25%~30%)、黄铁矿(5%~10%)及菱锰矿(10%~15%)。方铅矿和闪锌矿具有相似的产出特征, 并以块状、透镜状、角砾状的较纯的硫化物团块为特征(图 3a1、3a2、3a3、3a4、3b1、3b2), 脉石矿物以菱锰矿为主, 含有少量的黄铁矿。不同的矿体铅锌矿物相对含量有所不同, 如 VI 号矿体, 多铅而少锌; V 号矿体则锌的含量大于铅。

该期方铅矿粒度粗, 纯度高, 一般沿着断裂或裂隙产出(图 3a3), 主要产出于矿体的深部位置, 仅在 VI 号矿体 4668 中段见到沿裂隙断续产出的长约

① 西藏华钰矿业开发有限公司. 2009. 西藏自治区隆子县扎西康矿区铅锌多金属矿详查报告.

2 m、宽 0.1~0.2 m 的两条脉体(图 3a2)。在 V 号矿体中该类型的矿石则绝大部分集中于矿体深部位置,浅部位置几乎未见粗晶方铅矿。方铅矿角砾具有一定圆度的(图 3a4),在镜下见到方铅矿三角孔结构具有一定定向性(图 4a1)。在 VI 号矿体 4872 平硐中,第 1 期角砾状粗晶方铅矿沿断裂产出,断裂产状为 278°∠51°,即倾向西,原位透镜状方铅矿线理方向与断裂面平行。

闪锌矿为黑色、粗晶,角砾状结构,且被铁菱锰矿和黄铁矿包裹(图 3b1、3b2)。

在 V 号矿体 4620 中段可以见到块状粗晶闪锌矿和块状粗晶方铅矿共生,胶结物为铁菱锰矿和黄铁矿。闪锌矿在透射光下为深红色(图 4a2),反射光

下未见黄铜矿“病毒”。

3.2 铅(Pb)-锌(Zn)-锑(Sb)-银(Ag)期(B期)

该期是矿床第 2 期硫化物成矿期,也是矿床最主要的成矿期。划分的依据是该期以脉状-网脉状产出大量富集铅、锌、锑、银、铜等金属硫化物矿物,并产出锑硫盐矿物为特征,且明显不同于第 1 成矿期呈角砾化的粗晶方铅矿、闪锌矿等硫化物。矿石矿物为大量的方铅矿、闪锌矿、锑铅硫盐、辉锑矿及少量的黄铜矿等,脉石矿物以富铁锰碳酸盐及石英为特征,并伴随黄铁矿和毒砂矿物出现。该期可划分为 5 个阶段(表 2),分别为铁菱锰矿-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿、石英-毒砂-硫盐、方解石-黄铁矿、石英-辉锑矿和石英阶段。

表 2 扎西康多金属矿成矿期次和阶段划分
Table 2 Metallogenic stages of the Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic deposit

成矿期	成矿阶段	亚阶段序号	成矿亚阶段	矿物组合	
A. 铅(Pb)- 锌(Zn)期	I. 方铅矿-闪 锌矿阶段	1	角砾状、脉状粗晶闪锌矿- 方铅矿-菱锰矿	方铅矿、闪锌矿、 菱锰矿、黄铁矿	
		2	皮壳状闪锌矿-铁菱锰矿-黄铁矿	闪锌矿、铁菱锰矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂	
		3	铁菱锰矿-黄铁矿-闪锌矿-毒砂	闪锌矿、铁菱锰矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、金红石	
		4	方铅矿-闪锌矿-黄铁矿	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、菱铁矿、黄铜矿	
		5	菱铁矿-毒砂-黄铁矿-闪锌矿	菱铁矿、毒砂、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿	
B. 铅(Pb)- 锌(Zn)- 锑(Sb)- 银(Ag)期	III. 石英-毒砂- 硫盐阶段	6	石英-硫盐-闪锌矿	石英、脆硫锑铅矿、闪锌矿、硫锑铅矿、 硫锑银矿、黝锑银矿、黄铁矿、黄铜矿	
		7	纯黄铁矿脉	黄铁矿	
		8	毒砂-石英-黄铁矿-闪锌矿	毒砂、石英、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿	
	IV. 方解石-黄铁矿阶段	9	方解石-黄铁矿	方解石、黄铁矿、白云石、石英、闪锌矿、绢云母	
		V. 石英-辉锑矿阶段	10	石英-辉锑矿-闪锌矿	石英、辉锑矿、闪锌矿、辉锑铅矿、银黝铜矿、 黝锑银矿
			11	石英-辰砂-石膏	石英、辰砂、石膏
VI. 石英阶段	12	石英-泉华	石英、钙华、玉髓		
	C. 表生期	VII. 氧化物阶段	13	表生风化矿物	褐铁矿、菱锌矿、铅矾、孔雀石、 蓝铜矿、锑华、蓝矾

3.2.1 铁菱锰矿-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿阶段

该阶段脉石矿物以富集铁菱锰矿为特征,矿石矿物主要以闪锌矿、方铅矿为主,脉石矿物为铁菱锰矿、黄铁矿和少量毒砂等矿物。该阶段可以分为 4 个亚阶段:皮壳状闪锌矿-铁菱锰矿-黄铁矿、铁菱锰矿-黄铁矿-闪锌矿-毒砂、细粒方铅矿-闪锌矿-黄铁矿及菱铁矿-毒砂-黄铁矿-闪锌矿亚阶段。闪锌矿在这 4 个亚阶段中一直出现,且结晶粒度从粗变细,呈皮壳状、脉状,并与铁菱锰矿共生,并出现毒砂矿物。

(1) 皮壳状闪锌矿-铁菱锰矿-黄铁矿亚阶段

该亚阶段最重要的特征为闪锌矿与黄铁矿、铁菱锰矿相间呈皮壳状相间交互性生长在第 1 期粗晶闪锌矿和菱锰矿角砾外围(图 3b2、3b3)。矿物组合为闪锌矿(35%~45%)、铁菱锰矿(30%~40%)、黄

铁矿(5%~10%)、黄铜矿(<5%)、毒砂(<1%)。闪锌矿颜色暗红色,中等粒度,以皮壳状出现,皮壳结构可以是简单皮壳也可以是复杂皮壳(图 3c),宽度 1~3 cm 不等。这种闪锌矿是这一亚阶段同时也是扎西康矿床最具特点的矿石。此外,在闪锌矿中可以依稀见到“病毒状”黄铜矿出现(图 4f2),在黄铁矿和闪锌矿交互出现的地方出现微量毒砂。

(2) 铁菱锰矿-黄铁矿-闪锌矿-毒砂亚阶段

观察后发现,铁菱锰矿-黄铁矿-闪锌矿-毒砂生长在皮壳状闪锌矿-铁菱锰矿-黄铁矿阶段外围(图 4f1)。该亚阶段为脉状,宽度有一定的变化,从几毫米到十几厘米不等,矿物颗粒较上一亚阶段,粒度变细。矿物组合为铁菱锰矿(30%~40%)、黄铁矿(20%~30%)、闪锌矿(10%~15%)、毒砂(5%~



图 3 扎西康成矿各阶段典型矿物、结构及构造宏观特征

Fig. 3 Typical macroscopic features of mineral, structure and texture of each ore-forming stage in the Zhaxikang deposit

a—A period of coarse galena vein: a1—第 1 期粗晶方铅矿和闪锌矿共生; a2—碳质板岩中块状粗晶方铅矿脉; a3—手标本尺度粗晶方铅矿矿石, 伴随一定的氧化; a4—角砾状粗晶方铅矿发育挤压拉伸线理; b—A、B 期闪锌矿接触关系: b1—角砾状闪锌矿—铁菱锰矿, 被铁菱锰矿胶结; b2—皮壳状闪锌矿+铁菱锰矿, b3—闪锌矿向外具倒梳状构造; c—B 期复杂皮壳状闪锌矿+铁菱锰矿, 被后期石英+硫盐+闪锌矿脉穿插; d—B 期硫化物成矿阶段细粒方铅矿+闪锌矿+铁菱锰矿—毒砂穿插铁菱锰矿+闪锌矿+黄铁矿, 两者均被石英+硫盐+闪锌矿脉穿插; e—多期硫化物脉相互穿切的块状硫化物矿石, 其穿插顺序: 铁菱锰矿+闪锌矿+黄铁矿+毒砂→菱铁矿+毒砂+黄铁矿+闪锌矿脉→石英+硫盐+闪锌矿脉→纯黄铁矿脉→毒砂+石英+黄铁矿+闪锌矿细脉; f—黄铁矿+方解石+白云石亚阶段: f1—矿体外围的板岩围岩中方解石+黄铁矿脉体; f2—方解石脉中的米黄色白云石; g—石英—泉华阶段: g1—扎西康西侧月 4 km 公路旁侧沟谷中的钙华; g2—石英+辉锑矿角砾之上生长着自形的石英晶簇; g3—无矿化的热泉石英; h—方解石—黄铁矿亚阶段中绢云母团斑及闪锌矿细颗粒; i1—后期无矿化石英脉; i2—表生氧化期孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等氧化、风化矿物; Qz—石英; Gn—方铅矿; Sph—闪锌矿; Py—黄铁矿; Rh—菱铁矿; Fe-Rh—铁菱锰矿; Sd—菱铁矿; Asp—毒砂; Mal—孔雀石; Azu—蓝铜矿; Cc—方解石; Seri—绢云母; Dol—白云石; Sul—硫盐

a—A period of coarse galena vein: a1—coarse-grained galena associated with sphalerite and pyrite; a2—vein-type coarse-grained galena in carbonaceous slate; a3—vein-type coarse-grained galena at specimen scale, showing intense oxidation; a4—compressional lineation in breccia coarse galena; b—contact relationship of sphalerite in period A and period B: b1—breccia sphalerite-rhodochrosite, cemented by Fe-rhodochrosite; b2—crustiform sphalerite-Fe-rhodochrosite; c—complex crustiform of sphalerite-Fe-rhodochrosite, crosscut by later stage quartz + sulfosalt + sphalerite vein; d—fine grain galena + sphalerite + Fe-rhodochrosite + arsenopyrite crosscutting Fe-rhodochrosite + sphalerite + pyrite vein and crosscut by quartz + sulfosalt + sphalerite vein; e—order of mineralization: Fe-rhodochrosite + sphalerite + pyrite + arsenopyrite vein → siderite + arsenopyrite + pyrite + sphalerite vein → quartz + sulfosalt + sphalerite → pure pyrite → arsenopyrite + quartz + pyrite + sphalerite tiny vein; f—pyrite + calcite + dolomite sub-stage: f1—calcite and pyrite in carbonaceous slate; f2—cream-colored dolomite in calcite vein; g—quartz-sinter stage: g1—travertine to the west valley of Zhaxikang, mainly calcitification; g2—idiomorphic finger-like quartz growing outside quartz-stibnite breccias; g3—hot spring quartz without mineralization; h—calcite + pyrite sub-stage with porphyritic sericite and tiny sphalerite grains i1—later period quartz vein without mineralization; i2—malachite and azurite in supergenic period; Qz—quartz; Gn—galena; Sph—sphalerite; Py—pyrite; Rh—rhodochrosite; Fe-Rh—Fe-rhodochrosite; Sd—siderite; Asp—arsenopyrite; Mal—malachite; Azu—azurite; Cc—calcite; Seri—sericite; Dol—dolomite; Sul—sulfosalt

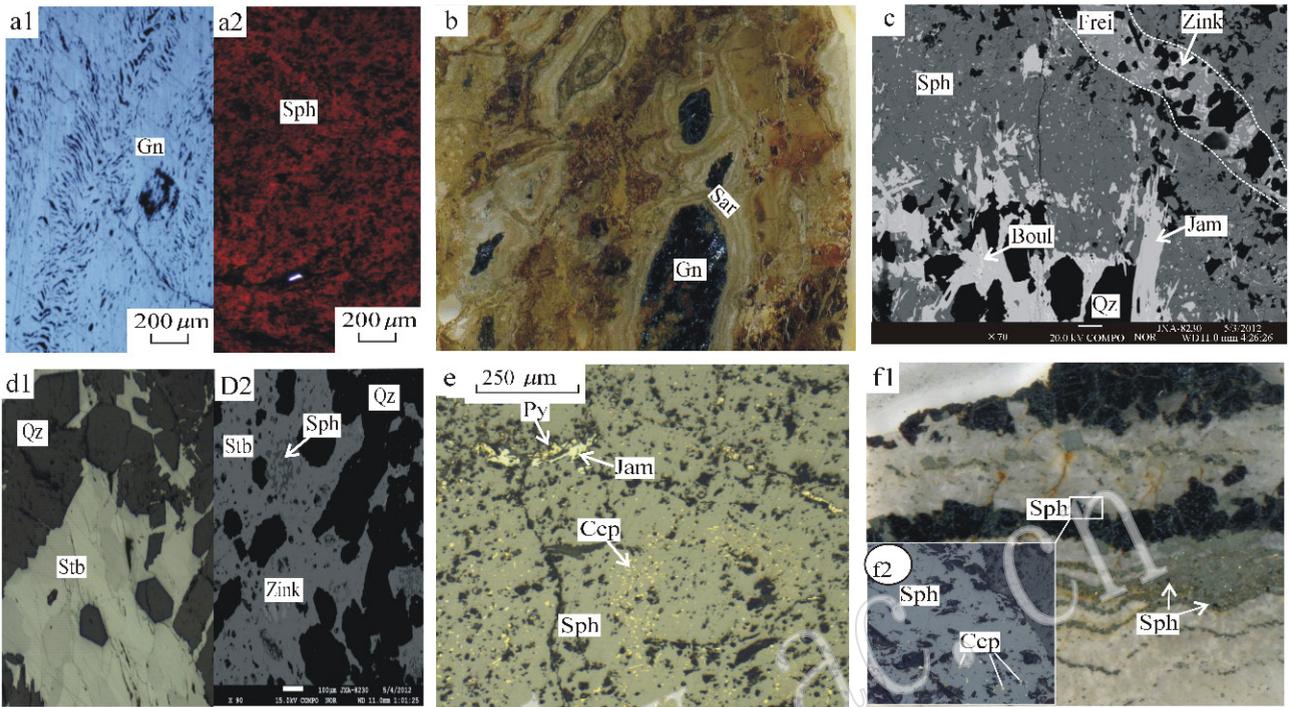


图 4 扎西康成矿各阶段典型矿物、结构及构造的显微特征

Fig. 4 Typical microscopic features in mineral, structure and texture of each ore-forming stage in the Zhaxikang deposit
 a—A 期粗晶方铅矿及闪锌矿：a1—方铅矿内受挤压而定向排列的变形“三角孔”结构(反射单偏光)；a2—暗红色闪锌矿(透射单偏光)；b—角砾状方铅矿，其边缘为氧化物铅矾(光薄片照片)；c—石英—硫盐—闪锌矿亚阶段中两种主要的硫盐矿物脆硫锑铅矿和硫锑铅矿，被后阶段银黝铜矿+辉锑铅矿细脉穿切(反射单偏光)；d—石英—辉锑矿阶段：d1—自形—半自形石英—辉锑矿脉(反射单偏光)；d2—石英+辉锑矿脉中少量闪锌矿及辉锑铅矿(背散射)；e—石英—硫盐—闪锌矿阶段闪锌矿中大量的“病毒”状黄铜矿及少量黄铁矿(反射单偏光)；f1—皮壳状闪锌矿—铁菱锰矿外围环带状铁菱锰矿+黄铁矿+闪锌矿；f2—皮壳状闪锌矿中出现少量黄铜矿(反射单偏光)；Qz—石英；Gn—方铅矿；Sph—闪锌矿；Py—黄铁矿；Zink—辉锑矿；Boul—硫锑铅矿；Jam—脆硫锑铅矿；Frei—银黝铜矿；Rh—菱锰矿；Fe-Rh 铁菱锰；Stb—辉锑矿；Sar—铅矾；Ccp—黄铜矿
 a—coarse galena and sphalerite of period A: a1—orientation of typical “triangle hole” in galena (reflection plainlight); a2—dark red color sphalerite (transmission plainlight); b—breccia galena with sardinianite oxides (thin section figure); c—two main sulfosalts in quartz-sulfosalt-sphalerite sub-stage: jamesonite and boulangerite, crosscut by later freibergite + stibnite (reflection polarized light); d—quartz-stibnite stage: d1—idiomorphic to subidiomorphic quartz + stibnite vein; d2—quartz + stibnite vein with a little sphalerite and zinckenite (BSE); e—“virus-like” chalcopyrite with a little pyrite in sphalerite of quartz + sulfosalt + sphalerite sub-stage (reflection plainlight); f1—crustiform sphalerite + Fe-rhodochrosite with Fe-rhodochrosite + pyrite + sphalerite outside (thin section figure); f2—little chalcopyrite in sphalerite (reflection plainlight); Qz—quartz; Gn—galena; Sph—sphalerite; Py—pyrite; Zink—zinckenite; Boul—boulangerite; Jam—jamesonite; Frei—freibergite; Rh—rhodochrosite; Fe-Rh—Fe-rhodochrosite; Stb—stibnite; Sar—sardinianite; Ccp—chalcopyrite

10%)、黄铜矿(<5%)及金红石(≪1%)等。该亚阶段最为重要的特点是出现了大量自形黄铁矿和毒砂(图 3d、3e)，且黄铁矿较上一亚阶段而言含量剧烈增加，而闪锌矿含量减少。闪锌矿中出现少量“病毒状”黄铜矿出熔体，多沿着闪锌矿解理呈线性排列出现。在铁菱锰矿内部偶见微量金红石自形颗粒。

(3) 方铅矿—闪锌矿—黄铁矿亚阶段

在 4620 中段 5 线穿脉见到方铅矿—闪锌矿—黄铁矿脉穿切了铁菱锰矿—黄铁矿—闪锌矿—毒砂脉体(图 3d)，该脉体产出的特点为闪锌矿和方铅矿呈细粒的脉状、网脉状，脉体宽度有 0.5~4 cm，脉体边部位置往往分布有黄铁矿及少量的菱铁矿。矿物组合为方铅矿(15%~20%)、闪锌矿(15%~20%)、黄铁

矿(20%~25%)、毒砂(5%~10%)及菱铁矿(10%~15%)、黄铜矿(10%)。在闪锌矿中有少量的黄铜矿“病毒”。黄铜矿和毒砂的含量较前一亚阶段有所增加，而菱铁矿在这一亚阶段首次见到，颜色微黄，菱形解理清晰。

(4) 菱铁矿—毒砂—黄铁矿—闪锌矿亚阶段

4620 中段 7 线穿脉见到该亚阶段穿切细粒方铅矿—闪锌矿—黄铁矿脉，又被后期的石英—硫盐—闪锌矿脉穿切(图 3e)。该亚阶段中可以见到大量的呈较宽的浅黄色菱铁矿，呈脉状、网脉状，脉宽 1~3 cm 不等。矿物组合为菱铁矿(30%~35%)、毒砂(20%~25%)、黄铁矿(10%~15%)、闪锌矿(15%~20%)和黄铜矿(5%)。该亚阶段主要特点为菱铁矿

矿物的大量出现,其间有少量的闪锌矿单颗粒,边缘部位往往会分布着毒砂和黄铁矿。少量黄铜矿主要产于闪锌矿之中,呈“病毒”体出现。

3.2.2 石英-毒砂-硫盐阶段

该阶段矿物组合呈脉状、网脉状产出,脉体宽度不等,小者仅几毫米,大者可达 50 cm。铅锑硫盐矿物的大量出现及石英矿物的首次出现是这阶段的重要特征。通过电子探针测试发现,锑硫盐矿物主要包括脆硫锑铅矿、硫锑铅矿、硫锑铅银矿、黝锑银矿等,其中脆硫锑铅矿及硫锑铅矿是产出最多的两种,其它两种则较少。石英在该阶段大量出现,多呈自形晶,并取代碳酸盐矿物成为重要的脉石矿物,但此时沉淀的脉石矿物还有少量的方解石。毒砂矿物在这个阶段也有一定的规模。该阶段可分为 3 个亚阶段:石英-硫盐-闪锌矿、纯黄铁矿脉和毒砂-石英-黄铁矿-闪锌矿亚阶段。

(1) 石英-硫盐-闪锌矿亚阶段

石英-硫盐-闪锌矿作为这一阶段开始,与前一阶段明显不同的是自形的毛发状、针状及细小颗粒状硫盐矿物及自形石英大量出现,并伴生浅色闪锌矿。野外石英-锑硫盐矿脉多呈脉状、网脉状穿切围岩及各早阶段(图 3d、3e)。该亚阶段矿物组合为石英(30%~35%)、脆硫锑铅矿(10%~15%)、闪锌矿(10%~15%)、硫锑铅矿(10%~15%)、硫锑铅银矿(<5%)、黝锑银矿(<5%)、黄铁矿(<5%)及黄铜矿(~5%)。锑硫盐为该亚阶段最主要的矿石矿物,同时部分硫盐矿物也是重要的富银矿物。细小颗粒硫盐矿物以各种宽度的脉状出现,而针柱状、毛发状脆硫锑铅矿多出现在空隙之中,形成硫盐晶洞。镜下观察到硫盐矿物充填在自形石英颗粒之间(图 4c),甚至在石英颗粒中包裹着硫盐矿物。除此之外,闪锌矿中包裹了少量硫盐矿物颗粒且常见“病毒”黄铜矿(图 4e)。4620 中段 7 线穿脉可以见到石英-硫盐-闪锌矿脉穿切了前亚阶段的菱铁矿-闪锌矿-黄铁矿-毒砂脉,而后石英-硫盐-闪锌矿脉又被纯黄铁矿脉穿切(图 3e)。

(2) 纯黄铁矿脉亚阶段

该亚阶段黄铁矿呈细脉状,脉宽约 1~3 cm,黄铁矿为亮黄色,颗粒细小。黄铁矿脉穿切了网脉状石英-硫盐-闪锌矿脉(图 3e)。矿物仅为黄铁矿。平硐中里的穿脉、手标本以及镜下都可以见到黄铁矿脉穿切石英-硫盐-闪锌矿脉(图 3e)。

(3) 毒砂-石英-黄铁矿-闪锌矿亚阶段

该亚阶段,呈现出来大量的毒砂矿物,多呈细脉状及网脉状穿切纯黄铁矿脉(图 3e),宽度一般不超过 1 cm。矿物颗粒多为自形菱形晶体与石英及黄铁矿共生。矿物组合为毒砂(30%~35%)、石英(15%~20%)、黄铁矿(20%~25%)、闪锌矿(10%~15%)及黄铜矿(<5%)。在细网脉边部出现细小颗粒状石英和黄铁矿,此外偶见浅色闪锌矿并含“病毒状”黄铜矿。

3.2.3 方解石-黄铁矿阶段

该阶段产出脉宽约 3~10 cm 方解石脉-黄铁矿粗脉体,多产于板岩围岩裂隙中,或者矿脉边部位置(图 3f1)。方解石和黄铁矿多为粗晶结构,其余矿物多为中-细晶自形颗粒出现。矿物组合为方解石(50%~55%)、黄铁矿(20%~30%)、白云石(<10%)、闪锌矿(<1%)、石英(<5%)和绢云母(<1%) (图 3f1、f2)。石英、绢云母和少量的自形闪锌矿等矿物在 4710 中段主巷道壁上与黄铁矿-方解石脉共生。此外在 zk009 钻孔之中,也可以见到这个亚阶段方解石脉中伴生绢云母团粒(图 3h)。

3.2.4 石英-辉锑矿阶段

石英-辉锑矿阶段以大量产出辉锑矿及石英为特征,矿石构造主要为脉状、簇状等。脉体宽度在 5~20 cm 之间,辉锑矿及石英均为中-粗晶自形晶体。这一阶段产出的位置比较特殊,主要位于五号矿体 4670 中段以上的浅表部位,深部很少见到辉锑矿。研究发现此阶段可分为石英-辉锑矿-闪锌矿亚阶段和石英-辰砂-石膏亚阶段。

(1) 石英-辉锑矿-闪锌矿亚阶段

该亚阶段辉锑矿呈自形晶产于石英脉体中,长轴方向与脉体方向基本一致。辉锑矿中偶见微量的辉锑铅矿及银黝铜矿穿切了早期的硫盐矿脉(图 4c),在 4670 中段 2 号穿脉掌子面见到石英-辉锑矿脉切穿了方解石-黄铁矿脉。该亚阶段矿物组合为石英(40%~45%)、辉锑矿(20%~30%)、闪锌矿(5%~10%)、辉锑铅矿(<5%)、银黝铜矿(<5%)和黝锑银矿(<5%)。镜下会见到有少量的闪锌矿与石英-辉锑矿共生(图 4d1、d2)。

(2) 石英-辰砂-石膏亚阶段

该亚阶段以产出细小脉状石英为特征,石英多呈对称梳状自形晶体生长,脉体宽度一般不超过 2 cm。矿物组合为石英(85%~90%)、辰砂(<5%)和石膏(<5%)。该阶段石英脉产于辉锑矿-石英脉外围及地表的碳质板岩细小裂隙,偶见共生辰砂及石膏。

3.2.5 石英阶段

石英阶段主要为后期大量的无矿化石英产出阶段,可以分为一个亚阶段:石英-泉华亚阶段。

该亚阶段,在矿洞中,见到一条粗大的不含石英英脉,脉宽 1~2 m 不等,颜色微微发黄,穿切了所有的成矿阶段(图 3i)。矿物组合为石英(30%~35%)、硅华(35%~40%)和玉髓(20%~25%)等。地表也可以见到该阶段石英呈现出指状、簇状生长于石英-辉锑矿角砾表面(图 3g₂、g₃),表明后期形成。同时见到指状石英往往和泉华(钙华、硅化)(图 3g₁)相伴生出现,在扎西康西 4 km 的沟谷之中也有现代热泉,存在着半固化的硅化及玉髓等泉华产物。

3.3 表生期(C期)

表生期包括了成矿之后的矿体所遭受到的表生风化及氧化作用所形成的一系列氧化矿物。表生风化及氧化作用在扎西康表现得比较突出,尤其是 VI 号矿体以东的几条矿脉及东边则当矿床都发生了大规模的氧化作用,广泛出现大量铁锰氧化,地表还出现少量孔雀石、白锑矿等氧化矿物。表生期分为一个表生氧化物阶段,矿物组合为褐铁矿(60%~65%)、菱锌矿(5%~10%)、铅矾(5%~10%)、孔雀石(<5%)、蓝铜矿(<5%)、锑华(<5%)、蓝矾(<1%)等。在 VI 号矿体 4872 可以看到厚约 4 m 的氧化带,浅黄色,含有褐铁矿化和铅矾化(图 4b),在方铅矿角砾边部除了铅矾外,还有少量褐铁矿化(图 3a₃)。在 V 号矿体顶部地表也可以见到辉锑矿表面氧化成锑华、黄铜矿氧化成了孔雀石等(图 3i₂)。

4 讨论

4.1 两大成矿期之间的成矿特点对比

成矿期次和阶段划分可以看出,扎西康矿床的

成矿过程虽然复杂,但也有一定的规律(表 3)。扎西康主要产出两种矿石类型,包括角砾状矿石及脉状-网脉状矿石。它们都处于一个矿体中,大致在下部以角砾状矿石为主,上部多为脉状-网脉状矿石,且角砾状矿石被脉状网脉状矿石包裹,表现出明显的两期成矿特征。矿石的这种空间分布具有一定的指示意义。首先,两期矿化之间存在一个破矿的地质事件,使得早期形成的矿石发生了角砾化。虽然两期成矿过程都受控于断裂系统,但是 A 期硫化物原生矿石几乎全部发生构造破碎,并在方铅矿中留下挤压线理,只有甚少部分保留原始状态,表明成矿之后受到了挤压构造作用。B 期硫化物成矿为开放空间充填,保留了原始的皮壳状、脉状、网脉状状态,说明该期成矿后并无挤压应力作用对矿体进行破坏。两期矿化之间的破矿事件可能是由于区域性构造应力场发生变化,经历了一个挤压应力场,而后变成了张性应力场。但是也不能排除大的区域性应力场不变而由于地震泵作用引起局部的挤压应力,使得早期硫化物发生角砾化,而后再叠加了后期成矿事件。但是,方铅矿中的挤压线理应该是一种持续性挤压作用造成的,很难在地震事件中的瞬时应力下形成。青藏高原后碰撞造山过程伸展过程中地壳尺度发生了巨大变化,扎西康 B 期推测成矿时间与区域性构造应力发生变化的时间相当,因此区域性应力发生变化引起矿石破碎的可能性比较大。

其次,矿物组合的变化比较明显,A 期矿石矿物为方铅矿、闪锌矿组合,B 期成矿除了闪锌矿、方铅矿外,出现了大量的硫酸盐矿物及辉锑矿、黄铜矿等矿物,脉石矿物为 A 期的黄铁矿、菱锰矿,B 期变化为黄铁矿、菱铁矿、毒砂、方解石及石英等。在 B 期成矿过程中,矿物沉淀也存在着一定的变化规律(表 3)。金属矿物沉淀过程为:方铅矿+闪锌矿→闪锌

表 3 扎西康多金属矿成矿规律变化特征表

Table 3 Variation in each metallogenic stage of the Zhaxikang polymetallic deposit

成矿期	A 期		B 期			
	I	II	III	IV	V	VI
主要矿石矿物	方铅矿+闪锌矿	闪锌矿+方铅矿+黄铜矿	硫酸盐+闪锌矿+黄铜矿	闪锌矿	辉锑矿+闪锌矿	
金属组合	Pb+Zn	Pb+Zn+Cu	Pb+Zn+Sb+Ag+Cu	Zn	Sb+Zn	
主要脉石矿物	菱锰矿	铁菱锰矿	菱铁矿+石英	方解石	石英+方解石	石英
主要结构构造	粗晶、块状、角砾状	细晶-粗晶、皮壳状、脉状	细晶-自形晶、网脉状、脉状	脉状	自形晶、粗脉状	自形、脉状

矿 + 硫盐矿物 → 辉锑矿,即先有一定量的铅锌矿物沉淀,紧接着是大量的硫盐矿物的出现,最后出现的辉锑矿。这种矿物上的变化规律暗示 A 期成矿过程只有铅锌元素,已经形成了铅锌矿体,且成矿后受构造应力发生角砾化,此时并无锑的存在。而 B 期成矿出现大量的锑,可能为富锑流体对早期矿石进行了不完全的交代作用,形成了大量的富锑-铅-锌-银流体,在矿物沉淀过程中锑与铅(银)结合形成了大量的硫盐矿物,而锌则以闪锌矿形式存在。后碰撞时期,北喜马拉雅广泛发育的铍(金)矿化,为这种富锑流体存在的重要证据。

上述总结的两期成矿特征表明,两大成矿期之间在矿石结构构造,脉石和矿石矿物组合上都存在着差异性和规律性特点,暗示了两期成矿之间有个破矿事件,这一事件可能是区域性应力场变化引起,也可能是由地震泵产生的局部挤压应力产生。矿物的变化规律可能是后期富锑流体对早期矿石进行不完全交代作用所形成新的成矿物质再沉淀的结果。

4.2 成矿期次对两期成矿的时间约束

前已述及,两大成矿期之间可能有一个挤压应力场变化的过程,使得 A 期矿石发生破碎。这暗示了两期成矿之间可能存在着一定的时间间隔。

矿石矿物组合特征表明,B 期矿物中含有铅锑硫盐为特征。扎西康成矿热液从富铅锌转变为富铅锑溶液,到最后为富锑溶液。锑矿化被认为是青藏高原碰撞造山过程后碰撞伸展造山阶段的特点(侯增谦等,2003,2006c),且扎西康也是作为藏南锑金成矿带的一个重要实例进行理论研究(聂风军等,2005;杨竹森等,2006;Yang *et al.*,2009)。早期研究指出,藏南锑金成矿带主要受南北向断裂控制,推测形成时限为中新生代(杜泽忠等,2011),暗示扎西康 B 期成矿形成于中新世的藏南地壳伸展时期。

后碰撞伸展阶段以来,青藏高原经历了 25~18 Ma 的下地壳流动与上地壳的强烈逆冲推覆形成藏南拆离系(STDS)及 18~0 Ma 的上地壳东西向伸展(侯增谦等,2006c)的两期发育历史。其中,18 Ma 后,高原上地壳处于应力持续松弛阶段,发育了大量的 NS 向正断层及地堑系统(Molnar and Tapponnier,1978;Yin *et al.*,1999;Blisniuk *et al.*,2001;张进江等,2003),NS 向断裂被认为是青藏高原地壳发生崩塌作用形成(Coleman and Hodges,1995;Kapp *et al.*,2008)。STDS 为成矿热液提供了运移通道(侯增谦等,2006c),NS 向断裂活动形成的开放

空间为后期富锑热液就位充填成矿提供了有利的场所,并控制了矿体的形态。我们推测扎西康 B 期成矿作用形成于 18 Ma 以来藏南上地壳持续伸展时期,即 B 期成矿作用的时间晚于 18 Ma。

4.3 成矿期次对矿床作用的指示

对矿床成矿期次和阶段划分方案的不同,实际是对矿床成因机制认识存在差异所致(杨竹森等,2006;张建芳等,2010;朱黎宽等,2012;王艺云等,2012)。目前对扎西康多金属矿床的成因类型划分仍有较大争议,并存在着热泉型、构造-岩浆热地热系统流体循环形成的中低温热液脉型,喷流沉积-热泉水改造热液充填脉型等多种认识(杨竹森等,2006;孟祥金等,2008;张建芳等,2010;朱黎宽等,2012;王艺云等,2012)。然而,扎西康矿床内的主要矿体受控于南北向的正断层系统,矿体与围岩地层均呈高角度穿切关系,未见顺层产出的层状矿体,这与喷流沉积矿床以层状矿体为特征的属性明显不同(Zheng *et al.*,2011)。此外,虽然矿床以铅锌为主,但矿石中锑的含量相当可观,尤其在晚期矿石中含量非常高,甚至早期作为锑矿进行开采和研究(杨竹森等,2006;郑有业等,2012),而在典型的喷流沉积矿床中很少报道有大量锑金属的存在(郑远川等,2010)。因此,扎西康矿床应该不属于海底喷流沉积矿床,而应属典型的热液脉型充填成因矿床。

根据两期成矿特征和时空关系,我们认为扎西康早期可能已经是一个成型的脉状铅锌矿床。后期矿石矿物中出现的大量锑铅硫盐矿物及辉锑矿等富锑矿物,则可能是在区域锑金成矿时,区域富锑流体对早期粗晶矿体进行交代、再活化,然后迁移、沉淀继而形成 B 期富含硫盐的矿脉,即后期富锑成矿热液对早期铅锌矿体叠加改造作用。但是,这种交代、再活化作用是不完全和不彻底的,在矿体的下部残留部分 A 期粗晶方铅矿、闪锌矿角砾状,它们往往都被后期脉体包裹、胶结。这种交代、再活化的现象与德国 Ramsbeck 铅锌银锑多金属矿区内华力西时期块状铅锌矿体遭受到晚华力西期富锑流体的叠加改造作用(Wagner and Cook,1998)十分相似,暗示这种受构造控制的多期多阶段叠加改造型脉状铅锌银锑多金属矿床成矿作用可能在造山带内广泛存在。之所以后期成矿流体会叠加到早期硫化物矿体之上,可用 Zheng 等(2012b)的硫化物再活化实验进行解释。该实验研究表明,当金属硫化物和脉石矿物

同时存在时,金属成矿流体会优先选择交代、再活化早期存在的硫化物,而非脉石矿物,即早期硫化物矿层是一有效的地球化学障(Gu *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2012b)。另一原因是,早期构造中的薄弱带,往往也是后期构造所出现的位置,也为再活化形成的流体迁移提供了通道和沉淀空间。A 期矿体作为后期流体叠加的化学障,有效的使后期形成的富锑流体对其进行交代、再活化,形成新的富铅锌锑流体往上迁移沉淀,形成新的矿脉。交代和再活化形成的流体向上运移过程中受控于温度发生沉淀,形成了元素的向上分带性。综上,扎西康矿床为受构造控制的多期多阶段叠加改造型矿床。

4.4 对区域成矿带的认识

虽然扎西康矿床最早是作为一个典型的低温热液脉状锑矿进行开采及研究(杨竹森等, 2006; 郑有业等, 2012),但是随着开采向深部扩展,矿体中铅锌含量显著提高,并且在深部矿体变为以铅锌矿化为主。特提斯喜马拉雅带很多矿床与扎西康相似,一些锑(锑-金)矿床都不是单一的产出锑(锑-金)矿物,还发现了方铅矿、闪锌矿等硫化物,如拉琼(戚学祥等, 2008)、乌拉堆(聂凤军等, 2005)等。按照扎西康的多期多阶段成矿特征,铅锌矿伴随着锑矿出现,暗示这些类似于扎西康的锑(锑-金)矿床在深部具有寻找铅锌矿的潜力。

1:20 万区域地球化学数据也表明藏南存在着一条铅锌元素的高异常带,部分研究者也认为藏南可能存在一条极具潜力的 Pb-Zn 成矿带(芮宗瑶等, 2004; 戚学祥等, 2008),在卡达、下坝、吉松等地都已相继发现一些颇具潜力的矿床(点)。这进一步表明,扎西康矿床内早期粗晶铅锌成矿作用可能并不是孤立存在的,而可能广泛存在于特提斯喜马拉雅带内,暗示了在特提斯喜马拉雅带内具有寻找铅锌矿床的潜力。

5 结论

(1) 扎西康矿床是一个具有复杂成矿过程的 Pb-Zn-Ag-Sb 多金属矿床,它的复杂性表现在具有丰富且规律性变化的矿石矿物组合、特殊的矿石结构构造以及多期多阶段成矿特点等。经过详细研究,本文提出了 3 期 7 个阶段 13 个亚阶段的划分方案。

(2) 复杂的成矿期次和阶段暗示了扎西康成矿作用具有以下特点:① 扎西康两期成矿作用之间存

在一个破矿事件,更可能由于区域构造应力的变化造成。扎西康晚期(B 期)成矿作用受控于 NS 向正断层系统,形成于高原地壳发生持续性伸展环境下;如果这个破矿事件是由区域构造应力变化引起,那么早期(A 期)粗晶方铅矿-闪锌矿的形成时间则要早于该地壳伸展时期;② 早期铅锌矿体可能是一个成型的矿体,它为后期(藏南锑金成矿期)区域富锑流体的沉淀提供了一个有效的地球化学障,并使晚期流体在早期矿体的基础上进行了叠加改造,即扎西康为受构造控制的多期多阶段叠加改造型矿床。

(3) 扎西康成矿特点的指示意义在于:① 区域上相似矿床的发现,暗示了扎西康这样的叠加改造作用在特提斯喜马拉雅带内可能广泛存在,且在区域内其它一些锑(锑-金)矿床(点)可能也具有向深部找铅锌矿体的潜力。② 早期粗晶铅锌矿体的存在及铅锌元素区域地球化学正异常,表明了特提斯喜马拉雅带内具有寻找铅锌矿床的潜力。

致谢 在野外工作中得到了扎西康矿山梁遇春、秦名、宿国平、雷鼎等工程师的大力协助,在此一并感谢。

References

- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, *et al.* 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. *Nature*, 412(6847): 628~632.
- Burchfiel B C. 1992. The South Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt[A]. *Geological Society of America Special Paper 269*(C), 51.
- Burg J, Guiraud M, Chen G, *et al.* 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2): 391~400.
- Chen Zhiliang and Liu Yuping. 1996. The southern Tibet detachment system[J]. *Tethyan Geology*, 20(20): 32~40 (in Chinese with English abstract).
- Coleman M and Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. *Nature*, 374(6517): 49~52.
- Du Zehong and Li Guanqing. 2011. Discussion on mineralogenesis of antimony-gold metallogenic belt, South Tibet[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1: 764~765 (in Chinese).
- Gu Lianxing, Zheng Yuanchuan, Tang Xiaoqian, *et al.* 2007. Copper,

- gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N. E. China[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(1): 1~29.
- Harrison T M, Lovera O M and Grove M. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. *Geology*, 25(10): 899~902.
- Hauck M, Nelson K, Brown L, Zhao W, *et al.* 1998. Crustal structure of the Himalayan orogen at 90 east longitude from Project INDEPTH deep reflection profiles[J]. *Tectonics*, 17(4): 481~500.
- Hou Zengqian, Lü Qingtian, Wang Anjian, *et al.* 2003. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization in Tibetan orogen[J]. *Mineral Deposits*, 22(4): 319~333(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, *et al.* 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the 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 Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 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 Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629~651(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006d. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 337~359(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Zeng Lingsen, *et al.* 2012. Eocene-Oligocene granitoids in southern Tibet: constraints on crustal anatexis and tectonic evolution of the Himalayan orogen[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 349: 38~52.
- Hu Guyue, Zeng Lingsen, Qi Xuexiang, *et al.* 2011. The Mid-Eocene subvolcanic field in the Lhunze-Qiaga area, Tethyan Himalaya, southern Tibet: A high-level magmatic suite related to the Yardio two-mica granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3308~3318(in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Taylor M, Stockli D, *et al.* 2008. Development of active low-angle normal fault systems during orogenic collapse: Insight from Tibet[J]. *Geology*, 36(1): 7~10.
- Lee J, Hacker B and Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2297~2316.
- Lee J, Hacker BR, Dinklage W S, *et al.* 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraint[J]. *Tectonics*, 19(5): 872~895.
- Liu Wencan, Wang Yu, Zhang Xiangxin, *et al.* 2004. The rock types and isotope dating of the Kangmar gneissic dome in southern Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 491~501(in Chinese with English abstract).
- Liu Yusheng. 2009. Application of estimation model of mineral resources based on MATLAB to Lead-Zinc deposit, Zhaxikang, Tibet[D]. Chengdu University of Technology for Master Degree(in Chinese).
- Meng Xiangjin, Yang Zhusen, Qi Xuexiang, *et al.* 2008. Silicon-oxygen-hydrogen isotopic compositions of Zhaxikang antimony Chengdu University of Technology polymetallic deposit in southern Tibetan responses to the ore-controlling structure[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1649~1655(in Chinese with English abstract).
- Molnar P and Lyon-Caen H. 1988. Some simple physical aspects of the support, structure, and evolution of mountain belts[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 218: 179~207.
- Molnar P and Tapponnier P 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5361~5375.
- Mo Xuanxue and Pan Guitang. 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).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~149(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Hu Peng, Jiang Sihong, *et al.* 2005. Types and temporal-spatial distribution of gold and antimony deposits (prospects) in Southern Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 373~385(in Chinese with English abstract).
- Pan Y and Kidd W S F. 1992. Nyainqentanglha shear zone: A late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 20(9): 775~778.
- Qi Xuexiang, Li Tianfu, Meng Xiangjin, *et al.* 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault-fold belt in southern Tibet, and its constraint on antimony-gold polymetallic mineralogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1638~1648(in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao, Li Guangming and Wang Longsheng. 2004. Metallic ore resources in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 23: 20~23(in Chinese).
- Tong Jinsong, Liu Jun, Zhong Huaming, *et al.* 2007. Zircon U-Pb dating and geochemistry of mafic dike swarms in the Lhozag area, southern Tibet, China, and their tectonic implications[J]. *Geological Bulletin*, 26(12): 1654~1664(in Chinese with English abstract).
- Wang Yiyun, Tang Juxing and Zheng Wenbao. 2012. A tentative discussion on ore fabric and genesis of the Zhaxikang Zn-polymetallic

- deposit, Lhunze county, Tibet [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 681~692 (in Chinese with English abstract).
- Wagner T and Cook N J. 1998. Sphalerite remobilization during multi-stage hydrothermal mineralization events—examples from siderite-Pb-Zn-Cu-Sb veins, Rheinisches Schiefergebirge, Germany [J]. *Mineralogy and Petrology*, 63: 223~241.
- Williams H, Turner S, Kelley S, *et al.* 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism [J]. *Geology*, 29(4): 339~342.
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Gao Wei, *et al.* 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in Southern Tibetan Detachments system [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377~1391 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Meng Xiangjin, *et al.* 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1~3): 194~212.
- Yin An and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211~280.
- Yin A, Kapp P A, Murphy M A, *et al.* 1999. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet [J]. *Geology*, 27(9): 787~790.
- Yu Tao, Zhou Zhiguang, Liu Changfeng, *et al.* 2007. Metamorphic structural sequence of Carboniferous and its underlying strata in Kangmar region of southern Tibet [J]. *Geoscience*, 21(3): 491~497 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Liu Jing, Gao Li'e, *et al.* 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104~112.
- Zhang Jianfang, Zheng Youye, Zhang Gangyang, *et al.* 2010. Genesis of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit in northern Himalaya: Constraints from multi-isotope geochemistry [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 1000~1011 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang and Ding Lin. 2003. East-west extension in Tibetan plateau and its significance to tectonic evolution [J]. *Chinese Journal of Geology*, 38(2): 179~189 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Guo Lei and Zhang Bo. 2007. Structure and kinematics of the Yalashangbo dome in the northern Himalayan dome belt, China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 16~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, Qi Guowei, *et al.* 2012. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and Northern Himalayan gneiss domes (NHGD) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535~3544 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Liu Minyuan, Sun Xiang, *et al.* 2012. Type, discovery process and significance of Zhaxikang antimony polymetallic ore deposit, Tibet [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 15 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yuanchuan, Gu Lianxing, Tang Xiaoqian, *et al.* 2012b. Sulfide Remobilisation from sulfide ore at high temperatures and differential stresses: an experimental approach [J]. *Resource Geology*, 62(2): 174~186.
- Zheng Yuanchuan, Gu Lianxing, Tang Xiaoqian, *et al.* 2011. Geology and geochemistry of highly metamorphosed footwall alteration zones in the Hongtoushan volcanogenic massive sulfide deposit, Liaoning Province, China [J]. *Resource Geology*, 61(2): 113~139.
- Zheng Yuanchuan, Gu Lianxing, Tang Xiaoqian, *et al.* 2010. Element mobilization and mass-change quantification of highly metamorphosed footwall alteration zones in Hongtoushan volcanogenic massive sulfide deposit, Liaoning Province [J]. *Mineral Deposits*, 29(5): 785~810 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yuanchuan, Hou Zengqian, Li Wei, *et al.* 2012a. Petrogenesis and geological implications of the oligocene Chongmuda-Mingze adakite-like intrusions and their mafic enclaves, Southern Tibet [J]. *the Journal of Geology*, 120(6): 647~669.
- Zhu Likuan, Gu Xuexiang, Li Guanqing, *et al.* 2012. Fluid inclusions in the Zhaxikang Pb-Zn-Sb polymetallic deposit, South the Tibet, and its geological significance [J]. *Geoscience*, 26(3): 453~463 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Wenfeng, Yang Guogao, Zhou Yuquan, *et al.* 2010. Technology and characteristics of components of Lead-Zinc polymetallic deposit in Zhaxikang [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(1): 21~27 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈智梁, 刘宇平. 1996. 藏南拆离系 [J]. *特提斯地质*, 20(20): 32~40.
- 杜泽钟, 李关清. 2011. 藏南锑-金带成矿作用初步探讨 [J]. *矿物学报*, 1: 764~765.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等. 2003. 初论陆-陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例 [J]. *矿床地质*, 22(4): 319~333.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 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, 等. 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): 521~543.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用 [J]. *矿床地质*, 25(6): 629~651.

- 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等. 2006d. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337~359.
- 胡古月,曾令森,戚学祥,等. 2011. 藏南特提斯喜马拉雅始新世隆子-恰嘎次火山岩区: 雅拉香波二云母花岗岩的高位岩浆体系[J]. 岩石学报, 27(11): 3308~3318.
- 刘文灿,王 瑜,张祥信,等. 2004. 西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年[J]. 地学前缘, 11(4): 491~501.
- 刘玉生. 2009. 基于 MATLAB 的资源/储量估算模型在西藏扎西康铅锌矿区的应用(硕士论文[D]). 成都理工大学.
- 孟祥金,杨竹森,戚学祥,等. 2008. 藏南扎西康锑多金属矿硅-氧-氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应[J]. 岩石学报, 24(7): 1649~1655.
- 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.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~149.
- 聂凤军,胡 朋,江思宏,等. 2005. 藏南地区金和锑矿床(点)类型及其时空分布特征[J]. 地质学报, 79(3): 373~385.
- 戚学祥,李天福,孟祥金,等. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶带新生代构造演化与锑金多金属成矿作用[J]. 岩石学报, 24(7): 1638~1648.
- 芮宗瑶,李光明,王龙生. 2004. 青藏高原的金属矿产资源[J]. 地质通报, 23(1): 20~23.
- 童劲松,刘 俊,钟华明,夏 军,鲁如魁,李运怀. 2007. 藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义[J]. 地质通报, 26(12): 1654~1664.
- 王艺云,唐菊兴,郑文宝. 2012. 西藏隆子县扎西康锑多金属矿床岩石结构研究及成因探讨[J]. 地球学报, 33(4): 681~692.
- 西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨竹森,侯增谦,高 伟,等. 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报, 80(9): 1377~1391.
- 于 涛,周志广,柳长峰,等. 2007. 藏南康马地区石炭系及其下伏变质构造地层序列[J]. 现代地质, 21(3): 491~497.
- 曾令森,刘 静,高利娥等. 2009. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义[J]. 科学通报, 54(3): 373~381.
- 张建芳,郑有业,张刚阳,等. 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因的多元同位素制约[J]. 地球科学, 35(6): 1000~1011.
- 张进江,丁 林. 2003. 青藏高原东西向伸展及其地质意义[J]. 地质科学, 38(2): 179~189.
- 张进江,郭 磊,张 波. 2007. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 42(1): 16~30.
- 张进江,杨雄英,戚国伟,等. 2012. 馬拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系-北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用[J]. 岩石学报, 27(12): 3535~3544.
- 郑有业,刘敏院,孙 祥,等. 2012. 西藏扎西康锑多金属矿床类型、发现过程及意义[J]. 地球科学, 37(5): 15.
- 郑远川,顾连兴,汤晓茜,等. 2010. 辽宁红透山块状硫化物矿床蚀变带元素迁移特征及定量计算[J]. 矿床地质, 29(5): 785~810.
- 朱黎宽,顾雪祥,李关清,等. 2012. 藏南扎西康铅锌锑多金属矿床流体包裹体研究及地质意义[J]. 现代地质, 26(3): 453~463.
- 朱文凤,杨国高,周玉泉,等. 2010. 扎西康铅锌多金属矿床物质组分特征及工艺性质[J]. 桂林工学院学报, 30(1): 21~27.