

doi:10.3799/dqkx.2012.108

西藏扎西康锑多金属矿床类型、发现过程及意义

郑有业^{1,2}, 刘敏院³, 孙祥^{1,4}, 原恩会³, 田立明², 郑海涛², 张刚阳², 张立华³

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 西藏华钰矿业开发有限公司, 西藏拉萨 850000
4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘要: 扎西康锑多金属矿床是北喜马拉雅成矿带中首次发现的超大型矿床, 是在全世界最年轻、最宏大的“藏南拆离系”中找矿取得的重大突破, 也是我国首次发现喷流沉积—热泉水改造型锰铁锑铅锌银矿床。通过大量详实的野外调查与综合研究, 新发现大量的锰铁碳酸盐建造、纹层状构造、“斑点狗”、同心环带、“古喷流口”、热水蛋、水热角砾岩、热泉洞以及硫化物中 $Pb+Zn>>Cu, Ga>>In, Mn, Fe, Ba, B$ 含量高等喷流沉积及热泉作用证据, 属喷流沉积—热泉水改造型锑多金属矿床, 是成矿找矿理论方法创新指导找矿突破的经典范例。在重点介绍该矿床地质特征、成因的基础上, 系统论述其发现过程及勘查新进展, 这对于启迪人们的找矿思路, 推动北喜马拉雅地区喷流沉积—改造型矿床进一步的勘查评价、科学研究及理论方法创新具有重要的指导与借鉴意义。

关键词: 西藏; 北喜马拉雅; 扎西康锑多金属矿床; 矿床类型; 发现过程; 意义。

中图分类号: P618.51 **文章编号:** 1000—2383(2012)05—1003—12 **收稿日期:** 2012—07—05

Type, Discovery Process and Significance of Zhaxikang Antimony Polymetallic Ore Deposit, Tibet

ZHENG You-ye^{1,2}, LIU Min-yuan³, SUN Xiang^{1,4}, YUAN En-hui³, TIAN Li-ming²,
ZHENG Hai-tao², ZHANG Gang-yang², ZHANG Li-hua³

1. College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Tibet Huayu Mining Development Ltd., Lhasa 850000, China
4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Zhaxikang antimony polymetallic ore deposit, the first super large deposit discovered in northern Himalayan metallogenic belt (NHMB) and first SEDEX discovered modified by hot spring type Mn-Fe-Sb-Pb-Zn-Ag deposit in China, is the marked prospecting breakthrough in the youngest and great southern Tibetan detachment system (STDS). Many detailed field surveys and comprehensive researches have been made to seek evidence of SEDEX and hot spring mineralization, including the ferromanganese carbonate formation, lamellar structure, dalmatianite structure, concentric rings, paleo-spout, hot water eggs, hydrothermal breccia, hot spring hole, (Pb+Zn) concentration much higher than Cu, Ga concentration much higher than In, as well as the higher concentrations of Mn, Fe, Ba and B. These indicate that Zhaxikang is the SEDEX modified by hot spring type deposit. The innovation of ore-forming prospecting theory method plays an important role in the prospecting breakthrough of Zhaxikang deposit. Based on the analysis of characteristics of ore deposit and its genetic type, the discovery process and exploration advance were introduced, which is of great significance both in the prospecting theories and practices, and in the exploration and evaluation, scientific research, and theory innovation in NHMB.

Key words: Tibet; northern Himalayan; Zhaxikang antimony polymetallic ore deposit; ore deposit type; discovery process; significance.

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划(No. IRT1083); 中国地质调查局综合研究项目(No. 1212011220927); 国家重点基础研究发展规划(No. 2011CB403106); 大陆碰撞与高原隆升重点实验室开放基金项目(No. LCPU2010003); 教育部博士点基金项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介: 郑有业(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事基础地质、成矿规律及矿产勘察评价工作。E-mail: zhyouye@163.com

北喜马拉雅成矿带是特提斯喜马拉雅成矿域的重要组成部分,是全球地质学家关注的热点.关于该带矿床成因存在不同的观点:李金高等(2002)认为沙拉岗锑矿是复合型 SEDEX 型矿床.聂凤军等(2005)主要依据容矿围岩和矿种类型将藏南地区矿床划分为以变质岩为容矿围岩的金和金—锑矿床,以沉积岩为容矿围岩的金、锑、金—锑和锑多金属矿床和以火山岩为容矿围岩的金—银矿床.杨竹森等(2006)根据控矿构造类型划分为受南北向正断层和东西向层间断层控制的沙拉岗式锑矿床、受层间断层控制的马扎拉式锑—金矿床、受剥离断层和正断层控制的浪卡子式金矿床.戚学祥等(2008)和张洪瑞等(2010)认为北喜马拉雅金锑多金属成矿带的金锑矿属于浅成低温热液型. Hou and Nigel(2009)认为北喜马拉雅金锑多金属矿床属于受控于断裂构造的热液脉型矿床.孙晓明等(2010)、韦慧晓等(2010)系统研究了藏南邦布金矿,认为其矿体受大型脆韧性剪切带的次级断裂控制,成矿流体富含 CO_2 —低盐度—低密度—中低温度,流体来源主要为变质水,属于造山型金矿.

由于北喜马拉雅成矿带自然环境和交通条件的制约、矿产工作程度极低及靠近边境等原因,典型矿床研究即使在国内也鲜见报道,对该带矿床成因、成矿规律、控矿因素等认识不清,找矿潜力不明,理论研究远落后于找矿评价的需求,严重影响了该带的找矿突破.随着相邻的冈底斯斑岩成矿带找矿取得了举世瞩目的巨大突破,关于北喜马拉雅的找矿方向、矿床类型、主要控矿因素及找矿潜力等关系成矿找矿的关键科学问题也日渐成为研究热点及亟待解决的难题.

2000—2009 年笔者通过大量详实的野外调查与综合研究^{①②}(郑有业等,2004,2007),总结、提出北喜马拉雅存在三大成矿作用期:被动大陆边缘裂谷喷流沉积、浊流沉积的同沉积期,动力变质、韧—脆性剪切的同碰撞期,伸展拆离、正断走滑系统及中酸性次火山岩浆热液(包括热泉水)叠加改造的后碰撞期;发育五大成因类型:喷流沉积—改造型(如扎西康、则日锑多金属矿),卡林型—类卡林型(如查拉普、熊曲金矿),热泉型(如车穷卓布、勇日锑矿),次火山岩浆热液型(如沙拉岗、德隆锑矿),造山型(如邦布、洗贡金矿);构成四大成矿系列;系统建立了北

喜马拉雅金锑多金属矿—盆三横三纵的“一三三”控矿构造格架及“四要素”找矿新模式,科学预测并证实北喜马拉雅成矿带存在巨大的找矿潜力带,指导找矿取得重大进展,特别是扎西康锑多金属矿床经过 2007—2010 年的勘查评价,现已成为该地区首个超大型矿床,这是继冈底斯找矿取得重大突破之后、西藏令人瞩目的区域找矿重大发现,也是我国首次发现喷流沉积—热泉水改造型锰铁锑铅锌银等多元素共生矿床,自此掀开了北喜马拉雅金锑多金属矿产勘查历史的新篇章.本文在系统介绍扎西康锑多金属矿床地质特征、典型矿石物质成分与组构特征、闪锌矿微量元素特征及矿床成因证据的基础上,系统论述了其找矿思路、发现过程及勘查新进展,对推动北喜马拉雅地区喷流沉积—改造型矿床的科学研究、进一步的找矿评价及理论方法创新具有重要的指导与借鉴意义.

1 区域地质背景

北喜马拉雅构造带位于印度河—雅鲁藏布江缝合带以南,高喜马拉雅结晶岩系以北,主体为一套古生代以来的海相沉积序列,被认为是大印度北缘晚三叠世以来被动大陆边缘的典型代表(余光明和王成善,1990).其中,以 NWW 向的拉孜—邛多江缝合带、近 EW 向的绒布生长断层和洛扎生长断层,以及近 SN 向的勒金康桑、下坝、洞嘎伸展走滑正断裂带围限所构成的羊卓雍错—哲古错—拿日雍错裂谷盆地周缘,分布着金、锑、铅锌银等矿床(点),扎西康锑铅锌银矿床即位于盆地复式向斜东南端北翼隆子县日当镇(图 1).

区域出露的地层主要有前寒武系拉轨岗日岩群、上三叠统、侏罗系、下白垩统和第四系.拉轨岗日岩岩群主要出露于也拉香波变质核杂岩的内核,往往被新生代含电气石二云花岗岩强烈破坏,岩性主要为石英片岩、云母石英片岩、铁铝榴石石英片岩、混合岩,局部可见蓝晶石片岩、十字石片岩、片麻岩等.上三叠统—下白垩统为一套浅海相—半深海相浊流沉积形成的复理石建造,岩性主要为浅变质灰黑色板岩夹变质细砂岩、泥质灰岩、微晶灰岩、硅质岩夹火山岩,是区域金、锑、铅锌银矿床的主要含矿岩系,与火山喷发相联系,发生了明显的热水沉积作用,形成了含碳页岩、硅质岩及泥灰岩等呈韵律分布的岩石组合,即“碳—硅—泥岩系”.

区域岩浆活动强烈,晚三叠世—早白垩世以来

①郑有业,陈静,赵永鑫,等,2001.西藏措美县马扎拉金锑矿控矿因素与成矿规律研究报告,1—121.

②郑有业,高顺宝,孙祥,等,2011.北喜马拉雅东段金锑多金属成矿机制与成矿预测研究报告,1—222.

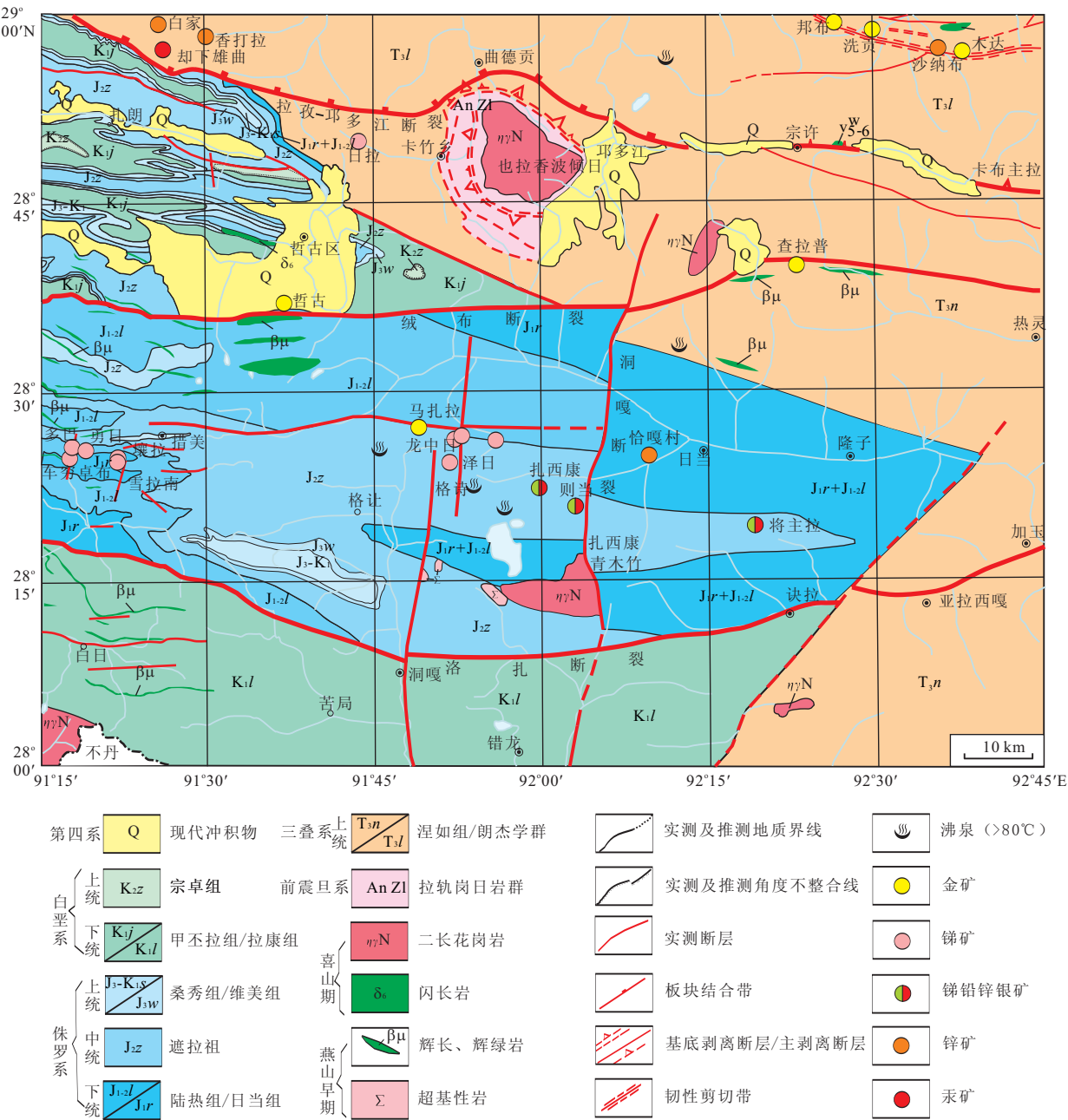


图1 措美—隆子区域地质图

Fig.1 Regional geologic map in the area between Comei and Longzi

的地层系统中发现了11个层位的以基性玄武岩为主的火山岩夹层,同时发育大量的中基性次火山岩脉.这些火山岩形成于大陆边缘裂谷背景,是地幔热柱或热点物质与岩石圈地幔物质相互作用的结果,并在132 Ma大规模爆发,构成了规模宏大的Comei-Bunbury大火成岩(Zhu *et al.*, 2009).此外,区域新生代岩浆活动也较强烈,主要有闪长岩、闪长玢岩、细晶岩、淡色花岗岩等(张宏飞等,2005;聂凤军等,2006;曾令森等,2009;张刚阳等,2011;Zeng *et al.*, 2012).

区域构造主要为近东西和近南北向断裂.规模较大的近东西向断裂构造主要有拉孜—耶多江断裂、绒布—古堆断裂和洛扎断裂.近东西向的断裂构造具有多期活动特点,早期为同生断裂,控制着中生代断陷盆地的发生、发展及中基性岩脉和火山岩的侵入和喷发;中期表现为南向的逆冲推覆,并伴有动力变质作用;晚期表现为伸展拆离,控制了区内中酸性岩体和矿床的分布.近南北向断裂形成时间上明显晚于近东西向断裂,具有多期活动的特征,多表现为高角度正断层和走滑(滑脱)性质,常常伴有现代

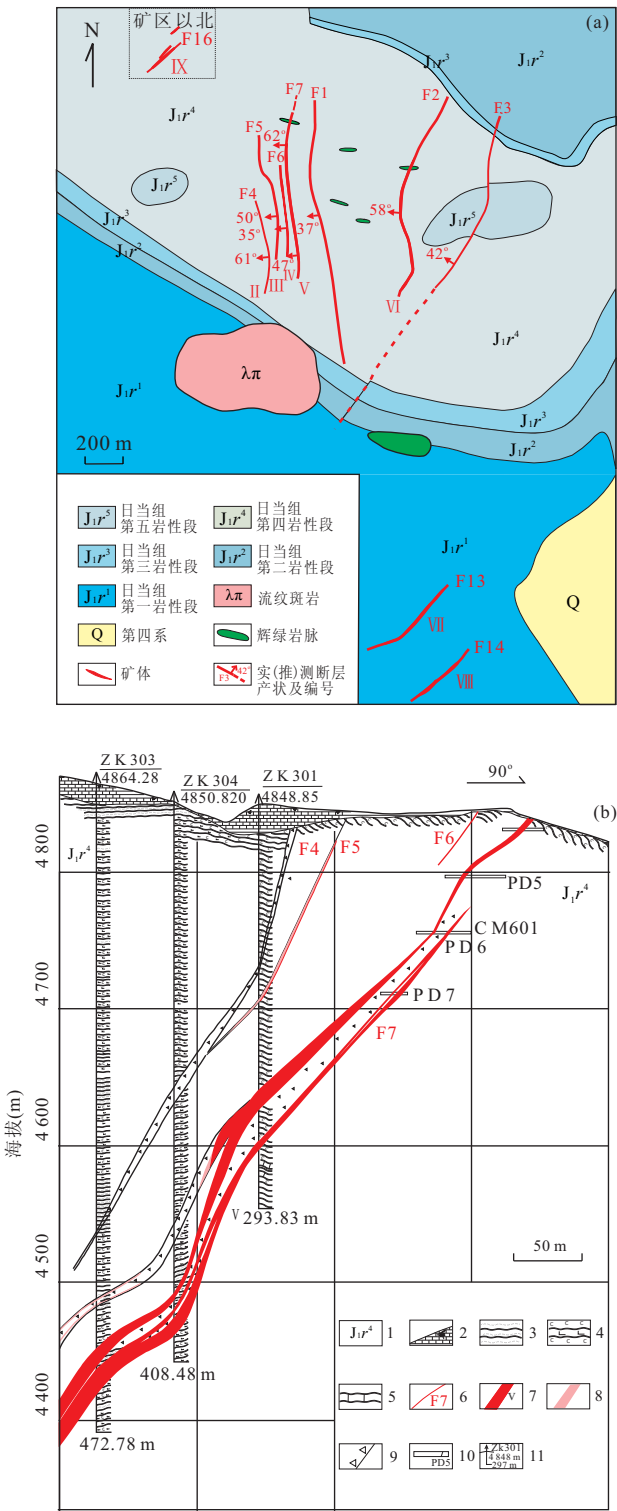


图 2 扎西康矿区地质图(a)和扎西康 3 号勘探线剖面图 (V 号矿体)(b)

Fig. 2 Geological map in Zhaxikang deposit (a) and its No. 3 exploration line section (orebody V) (b)

1. 下侏罗统日当组第四岩性段; 2. 腐殖质土残坡积物; 3. 砂质板岩; 4. 含碳钙质板岩; 5. 板岩夹灰岩; 6. 断层及编号; 7. 铅锌矿体及编号; 8. 铅锌矿化体; 9. 断裂破碎带; 10. 平硐位置及编号; 11. 已施工钻孔编号、开孔高程及钻孔深度

热泉活动,对金锑矿的形成定位起了非常重要的控制作用(郑有业等,2004).

2 矿床地质特征

矿区地层主体为下侏罗统日当组(J_1r),岩性主要为一套浅变质海相碎屑岩,总体走向近东西,低角度北倾,从顶部到底部可以划分为 5 个岩性段:第 5 岩性段主要为互层的变石英砂岩与黑板岩,分布于矿区北部和东侧中部;第 4 岩性段主要为灰黑板岩夹变钙质砂岩,是矿区分布面积最大的地层,矿体主要分布于该段地层中、近 SN 向的构造破碎带中;第 3 岩性段主要为变石英砂岩,主要出露于矿区东部及西南部;第 2 岩性段为灰黑板岩,仅小范围的出露于矿区北部;第 1 岩性段为变石英砂岩,主要出露于矿区西南部(图 1). 矿区内出露的岩浆岩主要为辉绿岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 133 Ma (郑有业等,另文发表),与藏南早白垩世大规模岩浆活动同期(Zhu *et al.*, 2009).

矿区断裂构造发育,主要为近南北向断裂,其次为北东向断裂. 目前共厘定出 16 条断层,其中 9 条为含矿断裂,并圈出 9 条铅锌多金属矿(化)体(张建芳等,2010),其中 I 号、II 号、III 号、IV 号、V 号、VI 号矿体赋存于近南北向断层破碎带中, VII、VIII、IX 号矿体赋存于北东向的断层破碎带中(图 2a). IV、V 号矿体是矿区的主要矿体,其中又以 V 号矿体最大且富,长度 $>1\,400\text{ m}$,宽 $1\sim30\text{ m}$,平面上具舒缓波状变化,产状为 $265^{\circ}\sim295^{\circ}\angle45^{\circ}\sim70^{\circ}$,倾角具有南缓北陡的特点,受 F7 断裂构造控制,占矿区总资源量的 80%以上. 矿体两侧围岩均为下侏罗统日当组灰黑色页岩和钙质板岩,围岩地层产状为 $25^{\circ}\angle20^{\circ}$,矿体斜切围岩地层产出(图 2b). 目前该矿体在向北走向延长及倾向延深方向工程均未控制到边界.

3 矿床类型

3.1 矿石物质成分与组构特征

根据显微镜、扫描电镜以及 XRD 衍射分析,扎西康矿床原生矿石中的矿物种类较多,金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、辉锑矿、锰铁碳酸盐(菱锰矿、菱铁矿)、黄铁矿、毒砂、硫锑铅矿,其次为黄铜矿、车轮矿、银黝铜矿、硫锑铅矿、辉锑铅矿、方锑矿、硫锑铅银矿、斜方砷铁矿,非金属矿物主要有石英、方解

石、绢云母、绿泥石、铬云母等。此外,表生氧化阶段还形成了褐铁矿、锑华、蓝铜矿、孔雀石、铅矾等矿物。

扎西康锑铅锌银锰铁矿床发育大量的喷流沉积作用及热泉作用证据。喷流沉积作用主要表现在矿石呈条带状构造、纹层状构造、脉状—网脉状构造、水热角砾岩、同心环带、“斑点狗”(Dal Matianite)构造、热泉蛋等特征(图3),以及在局部地段锰铁碳酸盐环带及中间硫化物组成的古喷流口(图3n);常可见层理、同生褶皱、同生角砾等同生沉积构造(图3b,3e),少数纹层状矿体具细粒镶嵌结构、胶状结构等(图3f,3g),显示同心环带等喷流沉积成矿特点。此外,含矿岩系为一套热水沉积岩(喷流岩)—锰铁碳酸盐建造,铅锌银硫化物及黄铁矿、黄铜矿等产于锰铁碳酸盐建造中,亦显示喷流沉积成矿特点。虽然扎西康铅锌银矿体不发育与地层整合产出的层状矿体,也不显示一般SEDEX型矿床所具有的“上层下脉”的双层矿体特征,但却类似于美国红狗矿床,后者被认为属于SEDEX型矿床(Moore *et al.*, 1986; Leach *et al.*, 2010)。

扎西康热泉作用主要表现在石英、辰砂、毒砂、辉锑矿、硫锑铅矿等共生(图4a,4g),辉锑矿等硫化物赋存于石英—方解石脉中。矿物的共生组合及相互切割关系显示锑矿化晚于铅锌矿化,局部辉锑矿叠加在早期形成的方铅矿和闪锌矿中(图4f)。矿石构造主要为脉状构造、热泉洞状构造、晶簇状构造、块状构造、放射状构造、指状构造(图4b,4e,4f,4h),结合地表出露的锑华,扎西康锑矿化形成较浅,显示热泉型成矿特征。由于北喜马拉雅中生代以来经历了多期构造作用,后期构造—变质作用及锑成矿作用常叠加改造早期形成的铅锌矿,一方面使矿物的颗粒结构遭受改造(重结晶、聚结晶、破碎、变形;图4a),另一方面使矿质在小范围内活化迁移,形成石英—方解石—闪锌矿脉体(图4c,4d),显示早期喷流沉积型矿石组构遭受后期构造及热液成矿的叠加改造。

3.2 闪锌矿微量元素特征

研究表明,岩浆热液型铅锌矿床中闪锌矿 Ga/In<1,沉积—改造型铅锌矿床中闪锌矿 Ga/In>1(张乾,1987;周卫宁和傅金宝,1989)。扎西康矿床闪锌矿中 Ga 元素含量为 $(2.47 \sim 4.74) \times 10^{-6}$,In 元素含量为 $(1.00 \sim 1.96) \times 10^{-6}$,Ga/In 介于1.49~4.47。扎西康矿床闪锌矿的高 Ga、低 In 含量显示沉积改造成矿特征,明显不同于江西冷水坑和河北蔡

家营铅锌矿床(图5)。

Schwartz(2000)系统对比分析了世界上480个矿床中闪锌矿的Cd元素含量特征,指出MVT型铅锌矿和白云岩、灰岩中脉状铅锌矿床中闪锌矿的Cd元素含量较高,而SEDEX型、VMS型、以及矽卡岩型铅锌矿床中闪锌矿的Cd元素含量明显偏低。扎西康矿床闪锌矿中Cd含量介于 $250 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$,小于冷水坑斑岩型铅锌矿床(Cd含量为 $754 \times 10^{-6} \sim 2.493 \times 10^{-6}$;承斯,2011),而与贵州天桥沉积—改造型铅锌矿床类似(Cd含量为 $623 \times 10^{-6} \sim 938 \times 10^{-6}$;周家喜等,2009)。扎西康矿床闪锌矿的Cd含量较高可能与后期热液叠加改造造成分散元素Cd富集有关。

3.3 同位素特征

扎西康矿区范围内硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素值总体显示两种分布特征。(1)早期与喷流沉积成矿有关的铅锌等硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 介于7.7‰~12‰,类似于以沉积岩为容矿主岩的海相硫化物矿床(SEDEX型),但远大于火山成因块状硫化物矿床(VMS型)的变化范围,后者同一矿床的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围通常不超过3‰(Ohmoto,1986)。扎西康铅锌等硫化物重硫富集的这一特征类似于广西大厂Sn-Sb-Pb-Zn矿田龙头山100号矿体($\delta^{34}\text{S}$ 介于7.3‰~12.5‰;韩发等,1997),但不同于湖南沃溪Au-Sb-W矿床($\delta^{34}\text{S}$ 介于-12.3‰~-1.2‰;顾雪祥等,2004)及美国的红狗Zn-Pb-Ag矿床($\delta^{34}\text{S}$ 介于-37.2‰~-16.4‰;Kelley *et al.*, 2004),这可能是由于扎西康硫来自大洋水和海水蒸发盐或围岩中的海相地层还原硫(Ohmoto,1986)。(2)晚期与热泉有关的锑矿化形成的辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 介于4.5‰~7.1‰,明显不同于早期硫化物的同位素组成,这也间接表明两者成矿作用的差异。

扎西康矿床硅华的 $\delta^{30}\text{Si}$ 范围为-0.4‰~-0.9‰,平均值-0.65‰,明显不同于热液成因石英脉 $\delta^{30}\text{Si}$ 为-1.5‰~-0.8‰(丁悌平等,1994;周涛发等,2001),而与云南腾冲热泉成因的温泉石英脉 $\delta^{30}\text{Si}$ 为-0.8‰~-0.4‰(李延河等,1994)相近,暗示其形成环境与地热水相近而不同于一般的热液矿床。

流体包裹体研究表明扎西康矿床与锑矿化和铅锌矿化有关的成矿流体具有明显差异。与锑成矿有关的流体的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}} = -142\text{‰} \sim -162\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -1.9\text{‰} \sim -12.9\text{‰}$,基本靠近西藏地热水,类似于车穷卓布锑矿而不同于沙拉岗锑矿;而与

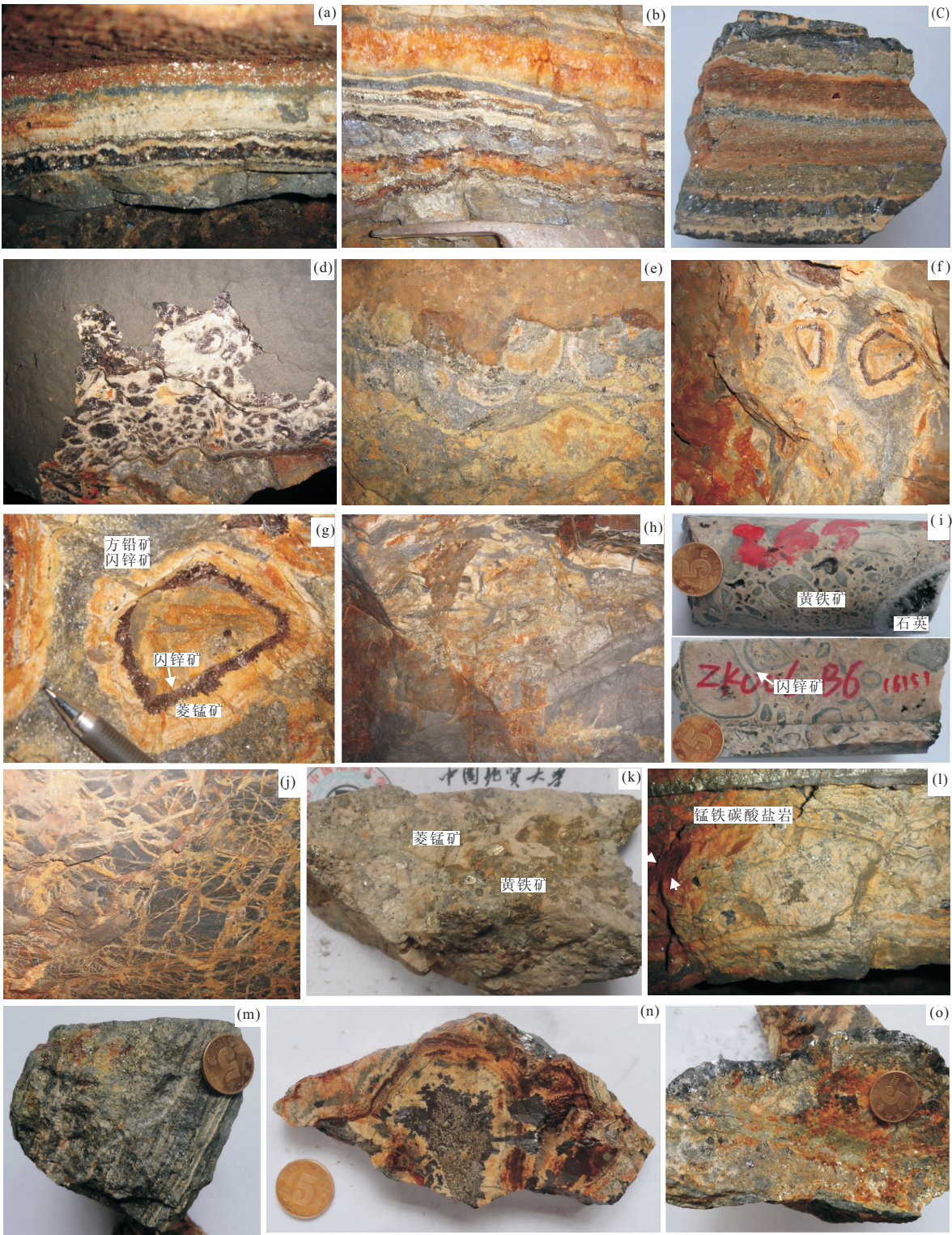


图 3 扎西康喷流沉积型矿石特征

Fig. 3 SEDEX type ore in Zhaxikang deposit

a. 纹层状铁闪锌矿、黄铁矿; b. 条带状闪锌矿、黄铁矿, 并显示同生褶皱特征, 后期被梳状石英脉充填; c. 黄铁矿、闪锌矿、锰铁碳酸盐构成条带状构造; d. 斑点状闪锌矿—菱锰矿, 类似“斑点狗”(Dalmatianite) 构造; e. 含闪锌矿的锰铁碳酸盐角砾被后期细粒的方铅矿、闪锌矿胶结, 可能为同生角砾; f, g. 含硫化物的菱锰矿角砾被后期呈同心环带构造的细粒方铅矿、闪锌矿及锰铁碳酸盐胶结; h. 角砾状构造, 角砾具有可拼贴性; i. 椭圆状角砾及胶结物全为锰铁碳酸盐的, “热水蛋”表面常包裹一层闪锌矿等硫化物; j. 网脉状构造; k. 锰碳酸盐及发育的黄铁矿化; l. 发育典型的热液沉积岩——锰铁碳酸盐岩; m. 闪锌矿和锰铁碳酸盐构成条带状构造, 后期发育浸染状黄铁矿化和黄铜矿化; n. 锰铁碳酸盐环带及中间充填的硫化物组成的“古喷流口”; o. 方铅矿、黄铜矿、黄铁矿充填交代喷流岩

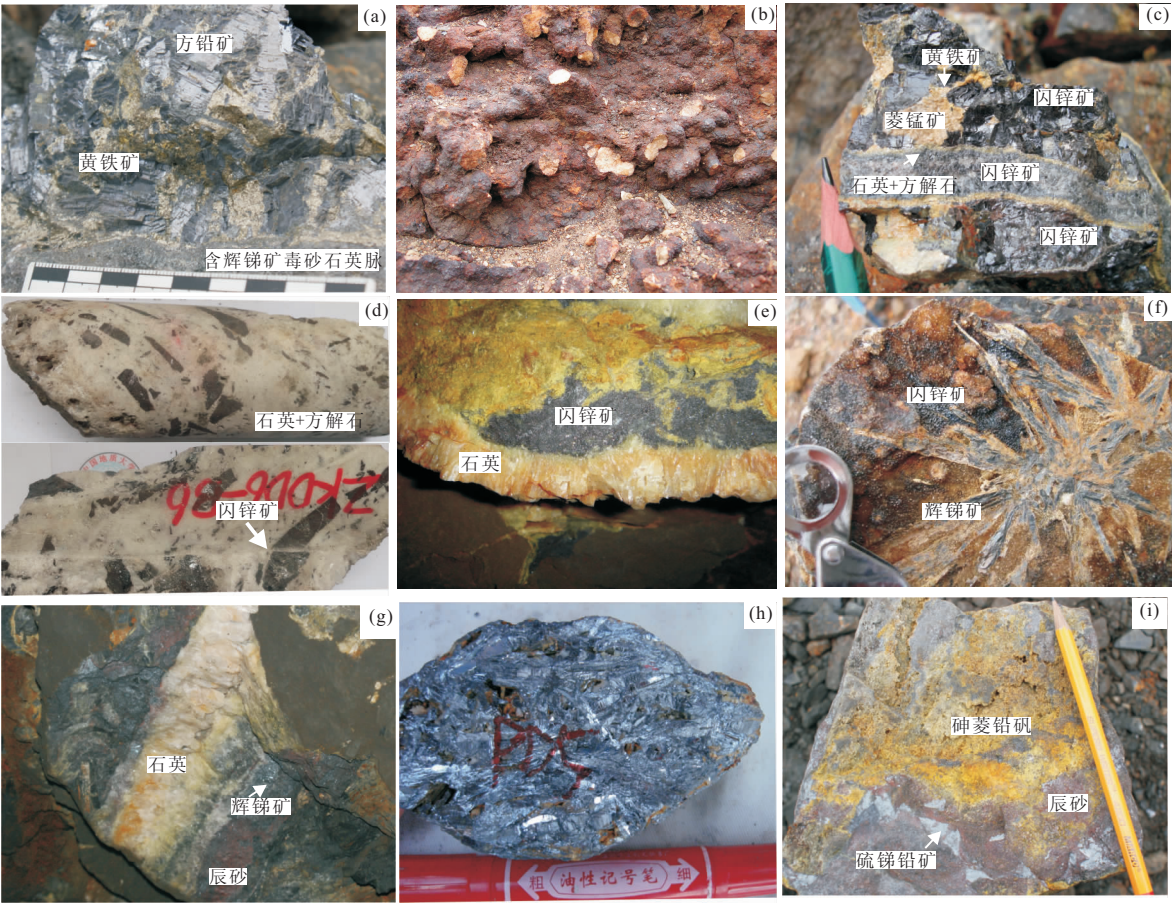


图 4 扎西康热液叠加改造型矿石特征

Fig. 4 Hydrothermal modified ore in Zhaxikang deposit

a. 早期团块状方铅矿、黄铁矿被后期含辉锑矿—毒砂—石英脉切割;b. 热泉活动形成的“热泉洞”;c. 石英—方解石—闪锌矿矿脉切割早期的团块状闪锌矿、黄铁矿与菱锰矿;d. 共生的闪锌矿—石英脉;e. 梳状石英脉充填早期的细粒闪锌矿;f. 放射状辉锑矿改造早期的细粒闪锌矿石;g. 辉锑矿—辰砂—石英脉;h. 晶簇状辉锑矿;i. 辰砂胶结早期的硫锑铅矿,后者在表生环境中形成砷菱铅矿

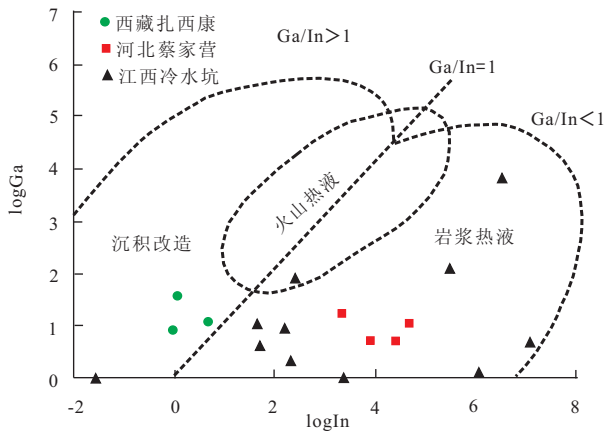


图 5 闪锌矿 Ga-In 元素对比(底图据张乾,1987)

Fig. 5 Ga vs. In concentration in sphalerite

扎西康矿床数据来自本文;蔡家营矿床数据来自潘家永等(1993);冷水坑矿床数据来自承斯(2011)

扎西康铅锌成矿有关的流体的 O 同位素组成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}} = 15\text{‰} \sim 21.4\text{‰}$, 相应的流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 6.14\text{‰} \sim 13.03\text{‰}$, 这种较高的 O 同位素表明成矿流体可能为地下热卤水(图 6)。

4 矿床发现过程

1995—1997 年,西藏区调队开展了 1 : 20 万洛扎幅、措美幅、隆子幅水系沉积物测量,圈定了扎西康地区以 Sb、Pb、Ag、Zn、Au、As、Cd 为主的异常,随后进行了异常三级查证,发现锑多金属矿体,随后对其进行了矿点检查工作。

1998—1999 年,西藏区调队对扎西康锑多金属矿开展了普查找矿工作,共圈定了 5 条矿化体(I、II、III、IV、V),因见矿效果不好、没有安排深部探矿

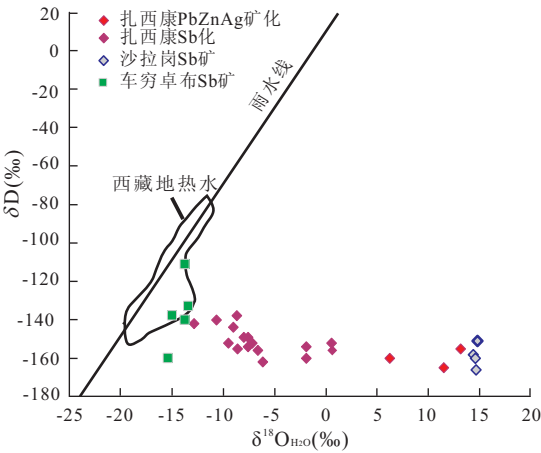


图 6 扎西康氢氧同位素关系

Fig. 6 δD - $\delta^{18}O$ relation in Zhaxikang deposit

扎西康矿床数据来自本文;沙拉岗矿床数据来自杨竹森等(2006);车穷卓布矿床据孟祥金等(2008)和本文;西藏地热水据郑淑蕙等(1982)

工程控制矿体等原因,只按矿点检查工作评审终结。提交的报告根据地表工程控制情况,共估算资源量:锑金属量 2 682.7 t、铅金属量 5 032 t、锌金属量 8 062 t、银金属量 76.12 t。

2004—2005 年度,西藏区调队在 V 号矿化体上重新布设施工了 4 条探槽,并在 V 号矿体东侧施工了平硐 PD3(标高 4 815 m),基本控制和查明了 IV、V 号矿体的深部地质情况,控制 V 号矿体长度 375 m、IV 号矿体长度 100 m。获得推断的(333)内蕴经济资源量 Pb 1.39 万 t、Zn 3.6 万 t、Sb 0.6 万 t、Ag 100 t,预测的(334)资源量 Pb 1.5 万 t、Zn 4.4 万 t、Sb 0.8 万 t、Ag 126 t。

2005—2006 年,西藏华钰矿业开发有限公司间接从西藏区调队受让了“西藏山南隆子县扎西康锑铅锌银矿预查”探矿权,并对该矿进行预查地质工作,主要开展了 1/1 万的地质草测工作和 100 m×100 m 的 TEM 物探测量;并施工了 TC601、TC602、TC603、TC604、PD4875、PD4920 探矿工程,大致查明了矿区内岩石类型、组合特征、分布范围、矿化与构造关系、围岩蚀变等,初步控制了 VI 号矿(化)带的地表出露情况。地表探槽揭露矿(化)体厚 1~2 m,控制长度 800 m,矿石品位:铅 1%~2.5%、锌 3%~5%、Sb 0.36%~1.97%、Ag 28~288 g/t;坑道工程控制矿体厚 1~3 m,产状 285°∠55°,平均品位 Pb 1.24%、Zn 4.78%、Sb 1.05%、Ag 157 g/t。初步估算 VI 号矿脉远景资源量:Pb 1 万 t、Zn 2.3 万 t、Sb 0.18 万 t、Ag 50.8 t。总体而言找矿进展不大、效果不太理想。

5 勘查新进展

2006 年底开始,针对扎西康矿区地质研究工作薄弱、找矿进展不大这一实际问题,同时也受冈底斯斑岩铜矿找矿取得重大突破的鼓舞,笔者在前人预、普查工作的基础上,开始运用新的理论与找矿思路进行资料二次开发,通过系统的示矿信息处理及综合研究,认为扎西康锑多金属矿床具备形成大型—超大型矿床的必要条件,进一步明确了勘查评价方向:

(1)受两组长期性、多期次活动的大型构造的交汇部位控制——找矿集区。北喜马拉雅金锑多金属矿床主要分布在羊卓雍错—哲古错—拿日雍错被动大陆边缘裂谷盆地周缘的盆山耦合地带,受裂谷(断陷)盆地周缘的近 EW 向拆离构造与近 SN 向正断层系统控制,特别是 EW 向生长断裂与 SN 向走滑正断系统的交汇部位更是寻找金、金锑、锑多金属矿的最有利部位。绒布—古堆断裂出露长度约 150 km,是主要的控盆、控岩和导矿构造,具有长期性、多期次活动的特点。早期为同生断裂,控制着中生代断陷盆地的发生、发展及中基性岩脉和火山岩的侵入和喷发;中期表现为南向的逆冲推覆,并伴有动力变质作用;晚期表现为伸展拆离,控制了区内中酸性岩体和矿床的分布。泽日—洞嘎走滑正断带中长大于 50 km 的断裂有 4 条,成矿元素由北向南:从以高 Au 为主,伴有 Sb、As、W 低温热液元素组合→中部以高 Sb、Au、Pb、Zn、Ag、Cd、As 等中低温元素组合→南部以高 W、Sn、Bi、Au、Pb、Ag 元素组合为特征的分带性,表现为构造显性地球化学边界,具多期次活动的大型构造特征。而扎西康锑多金属矿床正好位于绒布—古堆大型生长断裂与泽日—洞嘎大型走滑正断系统的交汇部位(图 1),也是中酸性岩浆热液活动、地下热卤水、地下热泉水和大气降水循环、萃取成矿物质最强烈的地区,即临界转换成矿系统最发育的部位,而该走滑正断系统又是热液运移及矿质沉淀的通道与沉淀场所,使锑铅锌银等成矿物质在构造的负压部位聚集成矿。因此认为扎西康锑多金属矿床具有巨大的找矿前景,大幅提升了对该矿的找矿评价信心。

(2)整个北喜马拉雅地区金锑多金属成矿作用与物质交换最强烈的地区——找靶区。在西藏特殊环境与特殊景观条件下,如何对原有的海量区域化探数据进行重新处理,从大量异常中筛选出最可能与大一超大型矿床有关的异常就成为制约找矿快速突破的关键。通过扎西康锑多金属矿的找矿实践与

区域探索,笔者提出对内生矿床而言,成大矿的地区必然是成矿物质交换作用最强烈的地区,而多种地质作用的叠加改造必然造成各种复杂的元素在空间上的聚集,致使“元素分带性差”。扎西康异常元素组合以 Sb、Pb、Zn、Ag 为主,伴生 Cd、As、Mo、Mn、W、Bi、Mn、F、Sr、Be、Fe₂O₃、B、Hg、Au、Ti、Ga 等高、中、低温元素组合,是整个北喜马拉雅地区元素种类最多的异常。据此将“元素种类的复杂程度而非异常值的高低”作为筛选和评价与矿床有关异常的重要准则,即以成矿作用的强度来优选异常,发现北喜马拉雅成矿作用最强烈的 5 个地区为扎西康、下坝、沙拉岗和沙纳布,其中扎西康是整个北喜马拉雅地区成矿物质交换最强烈的地区,也即成矿作用最强烈的地区,具有最大的找矿潜力。因此将其作为北喜马拉雅金锑多金属成矿带找矿突破的首选靶区。

(3)发现一系列喷流及热泉作用新证据,提出矿床成因新认识,明确了主攻目标——矿体定位。通过深入细致的野外调研与室内综合测试分析,在矿体浅部及 PD4815、PD4710 等平硐中发现大量的热水沉积、热水交代及热泉作用证据(图 3,图 4),结合闪锌矿元素特征、同位素特征以及锰铁碳酸盐—多金属硫化物中 $Pb+Zn \gg Cu, Ga \gg In, Ba, B$ 含量高等特点,认为 Pb、Zn、Ag、Mn、Fe、Au、Cu、Ga 等成矿元素主要来源于喷流沉积作用,而 Sb、Hg 等成矿元素则主要来源于地下热泉作用,应属喷流沉积—热泉水改造型锑多金属矿床。其中喷流沉积作用以形成锰铁碳酸盐—多金属硫化物为特色、热泉作用以形成石英方解石—锑锌硫化物为特色,V 号矿体应为喷流沉积及热泉作用中心部位,即喷口附近。因此确定把 V 号矿体作为主攻勘探目标,进行重点勘查部署,使找矿取得了重大进展。

(4)据矿化分带研究,认为主要矿体应在深部,明确了勘探方向。通过大量野外调研,对 2004—2005 年西藏区调队开展普查工作时在 V 号矿体施工的地表工程及平硐 PD4815 工程,以及对 2005—2006 年华钰矿业公司在 VI 号矿体施工的地表工程及 PD4875、PD4920 工程进行系统观察、采样分析、对比研究,发现由上向下:辰砂等矿物逐渐变少,辉锑矿逐渐增多,少量的脆硫锑铅矿、方铅矿也开始出现等。根据这些分带特征、矿床成因及元素地球化学分析结果,证明我们现在见到的矿体应是矿床顶部的特征,在垂向上应具有: $Hg \rightarrow HgSb \rightarrow SbAsHgPb \rightarrow SbAsPbZnAg \rightarrow PbZnAg \rightarrow PbZnCu \rightarrow CuZn$ 的理想矿化分带,而现在勘探的部位大概应相当于

SbAsHgPb 带,主矿体应在深部,向下应有较大延深,此为勘查指明了方向。经向深部控制,V 号矿体见矿良好,最大见矿深度近 1 000 m(0 勘探线),勘查深度已经控制到 3 850 m,找矿取得较大突破。

(5)总结控矿构造规律,提出控矿构造新模式,为找矿突破指明了方向。印度大陆斜向俯冲所产生的剪切牵引作用,形成一系列近 SN 正断层系统或裂谷系。大量的证据充分证明扎西康锑铅锌银矿受该系统控制,平面上表现为左行走滑,剖面上表现为正断性质,并提出控矿构造新模式:其早期力学性质以 NNE 向挤压为主、NE 向左行对扭为辅,表现为近 SN 向张性追踪与 NE 向破裂,形成近 SN 向与 NE 向矿体的雏形;随应力持续作用,中期力学性质以 NE 向左行对扭为主、NNE 向挤压为辅,表现为迁就 NNE 向张性追踪的持续拉分与一系列雁行状矿体的形成(如 I、II、III、IV 号矿体等);随着 NE 向左行对扭力场作用的持续,体现了分形原理—自相似性:即在 S 型结构面的中(腰)部追踪扭—扭张性结构面而继续拉开,使近 SN 向的一系列矿体规模变得更大,而在 S 型头及尾部追踪压—压扭性,限制与迁就了早期的近 NE 向矿体规模的扩大,同时也解释了近 SN 向主矿体的北部与南部的 NE 向矿体规模不是很大的原因(图 2)。这一新模式的重要意义在于:NE 向左行对扭力场下形成的近 SN 向矿体应为左形右阶式,靠 W 的矿体向 S 侧列,而靠 E 的矿体更向 N 侧列,即 I→VI 号矿体的找矿方向应依次从 S 向 N 侧列寻找。例如 V 号矿体在 S 部有露头约 47 m,早期的勘探工程都集中在露头附近,没有找到主矿体的位置,勘探效果不理想;在这一认识的指导下向北部隐伏区勘探,即沿勘探线向北对 15 线、23 线、31 线、35 线部署钻探工程,将主矿体的延伸长度向北扩大了 1 000 m 以上,使矿体总长度大于 1 400 m,并均见到了厚度超过 10 m 的矿体。其 $Pb+Zn$ 平均品位大于 8%,Ag、Mn、Fe 均高于工业品位,Au、Cu、Ga 达到伴生工业品位,资源量超过 100 万 t,找矿取得重大突破。

6 结论

(1)矿区发现大量的热水沉积、热水交代及热泉作用证据,如锰铁碳酸盐建造、纹层状构造、“斑点狗”构造、同心环带构造、“古喷流口”、热水蛋、水热角砾岩、热泉洞等。早期铅锌银硫化物产于锰铁碳酸盐建造中,成矿流体显示地下热卤水特征,结合闪锌

矿矿物元素特征、硫—硅—氢—氧同位素等特征以及硫化物中 $Pb+Zn >> Cu, Ga >> In, Mn, Fe, Ba, B$ 含量高等特点,早期 $PbZnAgMnFe$ 成矿具喷流—沉积典型特征,晚期 $SbHg$ 等成矿元素则主要来源于地下热泉作用,具有热泉型矿化特征。扎西康锑铅锌银矿床是海底热水+陆下热泉水联合改造的结果,属于喷流沉积—热泉水改造型矿床。(2)在大量详实的野外调查与综合研究的基础上,明确扎西康矿床突破的依据:①受拆离构造系与走滑正断系这两组长期、多期次活动的大型构造的交汇部位控制——找矿集区;②整个北喜马拉雅地区成矿作用与物质交换最强烈的地区——找靶区;③发现一系列喷流及热泉活动新证据及其作用中心位置,提出矿床成因新认识,明确了主攻目标——找矿体;④据矿化垂向分带及控矿构造规律,认为主矿体应在深部与北部,据此指导沿 V 号矿体向深部及北部隐伏区勘查——定工程,从而新评价了扎西康锑铁锑铅锌银超大型矿床(新增铅锌 126.8 万 t,锑 13.8 万 t,银 1800 t,伴生金 3.9 t,镓 361 t,锰铁富矿石 600 万 t,相当于 6 个大型锑矿或铅锌矿,潜在价值 460.4 亿元),找矿取得重大突破。(3)扎西康锑多金属矿床是北喜马拉雅成矿带中首个超大型矿床,也是我国首次发现喷流沉积—热泉水改造型锰铁锑铅锌银矿床,是继冈底斯找矿取得重大突破之后、西藏令人瞩目的区域找矿重大发现,也是在全世界最年轻、最宏大的“藏南拆离系”中找矿取得的重大突破,对推动该区喷流沉积—改造型矿床进一步的勘查评价、科学研究及理论方法创新具有重要的指导与借鉴意义;为青藏专项的实施提供了勘查新区,为国家建设新的矿产资源战略基地提供了决策依据,自此掀开了北喜马拉雅金锑多金属矿产勘查历史的新篇章。

致谢:华钰公司的李及秋、王柱念、张爱军、赵宸、郝陶泉、晏承群、黎华、张爱军、姜文成等科技人员,研究生张建芳、连永牢、张苏坤等同学作了部分的野外及室内地质工作,在此表示衷心的感谢。

References

Cheng, S., 2011. The mineralogical study of sphalerite of Xiabao deposit in Lengshuikeng silver-lead-zinc ore field, Jiangxi Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Ding, T. P., Jiang, S. Y., Wan, D. F., et al., 1994. Silicon isotope geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Gu, X. X., Liu, J. M., Oskar, S., et al., 2004. Syngenetic origin of the Woxi W-Sb-Au deposit in Hunan: evidence from trace elements and sulfur isotopes. *Chinese Journal of Geology*, (3): 424—439 (in Chinese with English abstract).

Han, F., Zhao, R. S., Shen, J. Z., et al., 1997. The geology and genesis of the Dachang tin-polymetallic deposit. Geological Publishing House, Beijing, 65—157 (in Chinese).

Hou, Z. Q., Nigel, J. C., 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: a review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 36: 2—24.

Kelley, K. D., Leach, D. L., Johnson, C. A., et al., 2004. Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: implications for ore formation. *Economic Geology*, 99: 1509—1532.

Leach, D. L., Bardley, D. C., Huston, D., et al., 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history. *Economic Geology*, 105: 593—625.

Li, J. G., Wang, Q. H., Chen, J. K., et al., 2002. Study of metallogenic and prospecting models for the Shalagang antimony deposit, Gyangze, Tibet. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5): 533—538 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. H., Ding, T. P., Wang, D. F., 1994. Experimental study of silicon isotope dynamic fraction and its geological application. *Mineral Deposits*, 13(3): 282—287 (in Chinese with English abstract).

Meng, X. J., Yang, Z. S., Qi, X. X., et al., 2008. Silicon-oxygen-hydrogen isotopic compositions of Zaxikang antimony polymetallic deposit in southern Tibet and its responses to the ore-controlling structure. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1649—1655 (in Chinese with English abstract).

Moore, D. W., Young, L. E., Modene, J. S., et al., 1986. Geologic setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, western Brooks Range, Alaska. *Economic Geology*, 81: 1696—1727.

Nie, F. J., Hu, P., Jiang, S. H., et al., 2005. Type and temporal-spatial distribution of gold and antimony deposits (prospects) in southern Tibet, China. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 373—385 (in Chinese with English abstract).

Nie, F. J., Hu, P., Jiang, S. H., et al., 2006. Genetic type and geochemical features of granitoid intrusions occurring in the Qionduojang area, southern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1342—1354 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Ohmoto, H., 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits. In: Valley, J. W., Taylor, Jr., H. P., O'Neil, J. R., eds., *Reviews in mineralogy: stable isotopes in high temperature geological processes*. *Mineral. Soc. Am.*, 16: 491—560.
- Pan, J. Y., Zhang, Q., Rui, Z. Y., 1993. Trace element characteristics of major minerals in the Caijiayang lead-zinc-silver deposit. *Journal of Guilin College of Geology*, 13(4): 386—393 (in Chinese with English abstract).
- Qi, X. X., Li, T. F., Meng, X. J., 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. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1638—1648 (in Chinese with English abstract).
- Schwartz, M. O., 2000. Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element. *International Geology Review*, 42(5): 445—469.
- Sun, X. M., Wei, H. X., Zhai, W., et al., 2010. Ore-forming fluid geochemistry and metallogenic mechanism of Bangbu large-scale orogenic gold deposit in southern Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1672—1684 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H. X., Sun, X. M., Zhai, W., et al., 2010. He-Ar-S isotopic compositions of ore-forming fluids in the Bangbu large-scale gold deposit in southern Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, (6): 1685—1691 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Gao, W., et al., 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in South Tibetan detachment system. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377—1391 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G. M., Wang, C. S., 1990. Tethy sedimentary geology in Tibet. Geological Publishing House, Beijing, 10—49 (in Chinese).
- Zeng, L. S., Gao, L., Dong, C. Y., et al., 2012. High-pressure melting of metapelite and the formation of Ca-rich granitic melts in the Namche Barwa massif, southern Tibet. *Gondwana Research*, 21: 138—151.
- Zeng, L. S., Liu, J., Gao, L. E., et al., 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104—112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Zheng, Y. Y., Zhang, J. F., et al., 2011. Ore-control structural and geochronologic constrain in Shalagang antimony deposit in southern Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2143—2149 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Nigel, H., Randall, P., Zhang, L., Zhao, Z. D., et al., 2005. Geochemistry of North Himalayan leucogranites: regional comparison, petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30: 275—288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. R., Hou, Z. Q., Yang, Z. M., 2010. Metallogenesis and geodynamics of Tethyan metallogenic domain: a review. *Mineral Deposits*, 29(1): 113—133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Zheng, Y. Y., Zhang, G. Y., et al., 2010. Genesis of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit in northern Himalaya: constraints from multi-isotope geochemistry. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 1000—1011 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., 1987. Application of diagram of trace elements in the sphalerite and galena to the genetic type of lead and zinc deposit. *Geology Geochemistry*, 64—66 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, S. H., Zhang, Z. F., Ni, B. L., et al., 1982. Hydrogen and oxygen isotopic studies of thermal waters in Xizang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (1): 99—106 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Duo, J., Ma, G. T., et al., 2007. Mineralization characteristics, discovery and age restriction of Chalapu hardrock gold deposit, southern Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 185—189 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Zhao, Y. X., Wang, P., et al., 2004. Metallogenic regularity and prospecting advance of gold and antimony ore belt, southern Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 44, 68 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. X., Huang, Z. L., Zhou, G. F., et al., 2009. The occurrence states and regularities of dispersed elements in Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(4): 471—480 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Yuan, F., Yue, S. C., et al., 2001. Silicon, helium and neon isotope geochemistry of Cu, Au ore deposit in the Yueshan orefield, Anhui Province. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(4): 385—390 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. N., Fu, J. B., 1989. Typomorphic characteristics of sphalerite in Tongkeng-Changpo mine of Dachang ore

- field, Guangxi, China. *Minerals and Rocks*, 9(2): 66—72 (in Chinese with English abstract).
 - Zhu, D. C., Chung, S. L., Mo, X. X., et al., 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: remnants identified in present-day SE Tibet and SW Australia. *Geology*, 37(7): 583—586.
- 附中文参考文献**
- 承斯, 2011. 江西冷水坑银铅锌矿下鲍矿区闪锌矿的矿物学特征研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 丁梯平, 蒋少涌, 万德芳, 等, 1994. 硅同位素地球化学. 北京: 地质出版社.
- 顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, 等, 2004. 湖南沃溪钨锡金建造矿床同生成因的微量元素和硫同位素证据. *地质科学*, (3): 424—439.
- 韩发, 赵汝松, 沈建忠, 等, 1997. 大厂锡多金属矿床地质及成因. 北京: 地质出版社, 65—157.
- 李金高, 王全海, 陈健坤, 等, 2002. 西藏江孜县沙拉岗锡矿床成矿与找矿模式的初步研究. *成都理工学院学报*, 29(5): 533—538.
- 李延河, 丁梯平, 万德芳, 1994. 硅同位素动力学分馏的试验研究及地质应用. *矿床地质*, 13(3): 282—287.
- 孟祥金, 杨竹森, 戚学祥, 等, 2008. 藏南扎西康锡多金属矿硅—氧—氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应. *岩石学报*, 24(7): 1649—1655.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 等, 2005. 藏南地区金和锡矿床(点)类型及其时空分布特征. *地质学报*, 79(3): 373—385.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 等, 2006. 藏南邛多江地区花岗岩地球化学特征及成因类型. *地质学报*, 80(9): 1342—1354.
- 潘家永, 张乾, 芮宗瑶, 1993. 河北蔡家营铅锌银矿床主要矿物的微量元素特征. *桂林工学院院报*, 13(4): 386—393.
- 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锡金多金属成矿作用. *岩石学报*, 24(7): 1638—1648.
- 孙晓明, 韦慧晓, 翟伟, 等, 2010. 藏南邦布大型造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制. *岩石学报*, 26(6): 1672—1684.
- 韦慧晓, 孙晓明, 翟伟, 等, 2010. 藏南邦布大型金矿成矿流体 He-Ar-S 同位素组成及其成矿意义. *岩石学报*, (6): 1685—1691.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 等, 2006. 藏南拆离系锡金成矿特征与成因模式. *地质学报*, 80(9): 1377—1391.
- 余光明, 王成善, 1990. 西藏特提斯沉积地质. 北京: 地质出版社, 10—49.
- 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. *科学通报*, (3): 373—381.
- 张刚阳, 郑有业, 张建芳, 等, 2011. 西藏沙拉岗锡矿控矿构造及成矿时代约束. *岩石学报*, 27(7): 2143—2149.
- 张宏飞, 张利, 赵志丹, 等, 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比, 岩石成因及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 30: 275—288.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 2010. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程. *矿床地质*, 29(1): 113—133.
- 张建芳, 郑有业, 张刚阳, 等, 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锡银矿床成因的多元同位素制约. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(6): 1000—1011.
- 张乾, 1987. 利用方铅矿、闪锌矿的微量元素图解法区分铅锌矿床的成因类型. *地质地球化学*, 64—66.
- 郑淑蕙, 张知非, 倪葆龄, 等, 1982. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究. *北京大学学报*, (1): 99—106.
- 郑有业, 多吉, 马国桃, 等, 2007. 藏南查拉普岩金矿床特征、发现及时代约束. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(2): 185—193.
- 郑有业, 赵永鑫, 王苹, 等, 2004. 藏南金锡成矿带成矿规律研究及找矿取得重大进展. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(1): 44, 68.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等, 2009. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律. *矿物学报*, 29(4): 471—480.
- 周涛发, 袁峰, 岳书仓, 等, 2001. 安徽月矿田硅、氢、氦同位素地球化学研究. *矿物岩石地球化学通讯*, 20(4): 385—390.
- 周卫宁, 傅金宝, 1989. 广西大厂矿田铜坑—长坡矿区闪锌矿的标型特征. *矿物岩石*, 9(2): 66—72.