

藏南扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床 Sm-Nd、Rb-Sr 成矿年龄*

李茂田^{1,2}, 丁 帅², 郑文宝^{3**}, 林 彬³, 杨 超⁴

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2 上海鹏岩地质科技有限公司, 上海 202150; 3 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室, 北京 100037; 4 拉瓦尔大学地质学与地质工程学院, 加拿大 魁北克 G1V0A6)

摘 要 由于成矿作用的多期性与复杂性, 如何精确获取铅锌矿床成矿年龄一直是成矿年代学研究的难点之一。近年来, 随着矿物提纯技术及分析测试手段不断完善, 基于 Sm-Nd 及 Rb-Sr 体系测定热液矿物年龄逐渐成为一种有效的定年方法。通过测定西藏南部扎西康超大型 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床中热液成因菱锰矿 Sm-Nd 与黄铁矿 Rb-Sr 同位素组成, 获得菱锰矿和黄铁矿对应等时线年龄分别为 (99.1 ± 0.9) Ma 和 (98.0 ± 1.8) Ma, 记录了一次重要的热液成矿事件。此外, 菱锰矿初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值在 0.512 301~0.512 849 之间, 经 99 Ma 球粒陨石 CHUR 计算出 ϵ_{Nd} 值在 -6.573 84~4.115 965 之间, 黄铁矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 0.714 021~0.719 708 之间。这 2 种矿物均具有盆地流体同位素组成特征。结合前人对成矿物质和成矿流体特征的研究, 笔者认为: 扎西康矿床主成矿期形成于印度板块向北偏移过程中产生的张性构造系中, 矿床属于盆地构造环境控制的铅锌矿床。

关键词 地球化学; 成矿年龄; 菱锰矿 Sm-Nd; 黄铁矿 Rb-Sr; 矿床成因; 扎西康
中图分类号: P618.66; P618.42; P618.43 **文献标志码**: A

Sm-Nd and Rb-Sr metallogenic ages of Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit, South Tibet

LI MaoTian^{1,2}, DING Shuai², ZHENG WenBao³, LIN Bin³ and YANG Chao⁴

(1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Shanghai Pengyan Geological Science and Technology, Shanghai 202150, China; 3 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 4 Department of Geology and Geological Engineering, University Laval, Quebec G1V0A6, Canada)

Abstract

How to accurately obtain the metallogenic age of lead-zinc deposit is a difficult point of geochronology due to the multistage and complexity of mineralization. In recent years, with the continuous improvement of mineral purification and testing methods, determination of the age of hydrothermal mineral based on Sm-Nd and Rb-Sr isotope system has gradually become an effective way of dating. The authors presented the Rb-Sr and Sm-Nd isotopic composition of hydrothermal genesis and pyrite from Zhaxikang superlarge Sb-Pb-Zn-Ag deposit in south Tibet, and obtained the corresponding isochron ages of rhodochrosite and pyrite, which are (99.1 ± 0.9) Ma and

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 41302060)资助

第一作者简介 李茂田, 男, 1992 年生, 工程师, 从事矿产资源勘查工作。Email: limaoitianllz@163.com

** 通讯作者 郑文宝, 男, 1982 年生, 副研究员, 主要从事矿产资源勘查与研究工作。Email: zhengwenbao2009@sina.com

收稿日期 2018-10-17; 改回日期 2019-07-06。张绮玲编辑。

(98.0 ± 1.8) Ma respectively. These data have recorded an important hydrothermal mineralization event. Furthermore, The $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of rhodochrosite are between 0.512 301 and 0.512 849, and calculation of the ϵ_{Nd} values with chondrites CHUR at 99 Ma yielded the ages between -6.57 384 to 4.115 965. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of pyrite are between 0.714 021 to 0.719 708. The two minerals have the characteristics of basin fluid isotopic composition. Combined with early research results, the authors point out that the main mineralization of the Zhaxikang deposit took place in the extensional structure system associated with basin environment during the northward migration of the Indian plate.

Key words: geochemistry, metallogenic age, rhodochrosite Sm-Nd, pyrite Rb-Sr, metallogeny, Zhaxikang

藏南地区作为全球新生代特提斯-喜马拉雅构造域的重要组成部分,受印度-亚洲大陆强烈碰撞及造山过程的影响,造就了一系列复杂的构造-岩浆活动和成矿作用(Yang et al., 2009; Hou et al., 2009; 许志琴等, 2012)。近年来在该地区相继发现了沙拉岗、马扎拉、车穷卓、查拉普、扎西康-柯月等众多 Sb、Sb-Au、Au、Sb-Pb-Zn-Ag 矿床(点),构成了青藏高原乃至中国独具特色的锑-金-铅锌成矿带(聂凤军等, 2005; 杨竹森等, 2006; 戚学祥等, 2008; Sun et al., 2015)。扎西康矿床是特提斯喜马拉雅成矿带东段勘查程度最高、成矿元素最复杂、规模最大的 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床。最近的地质勘查成果表明,该地区蕴藏有一百万吨以上的 Pb+Zn+Sb 资源储量,且共生 Ag 的储量也达到大型矿床的规模(唐菊兴等, 2012)。前人对该矿床的地质特征、成岩成矿时代、流体性质及同位素等多方面开展了详尽研究(聂凤军等, 2005; 杨竹森等, 2006; 李金高等, 2002; 孟祥金等, 2008; 张建芳等, 2010; 王艺云等, 2012; Xie et al., 2015; Duan et al., 2016; 郑有业等, 2012; 梁维等, 2013; 2015; Zhai et al., 2014),关于矿床的成因,提出喷流沉积成矿(李金高等, 2002)、热泉成因(孟祥金等, 2008)、与地下热水相关的脉型矿床(张建芳等, 2010)、与岩浆有关热液矿床(王艺云等, 2012; Xie et al., 2015; Duan et al., 2016)、喷流沉积-热泉水改造(郑有业等, 2012)及叠加改造型矿床(梁维等, 2013)等多种不同的认识。究其原因,扎西康矿床无论从矿石特征、成矿元素、同位素特征均暗示了其经历了多期多阶段复杂的成矿过程,并且缺乏常规定年矿物,因而难以从单方面限制其矿床类型与成因。为此,本文报道的扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床中热液成因菱锰矿 Sm-Nd 与黄铁矿 Rb-Sr 同位素组成及年龄,限定了这一关键时期成矿作用的时限,为重新认识矿床成因提供了新证据。

1 成矿地质背景

位于印度地块和雅鲁藏布江缝合带之间的特提斯喜马拉雅板片,是青藏高原造山带的重要组成部分,与相邻地块的边界分别为藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)以及主中央逆冲断层(MBT),从北至南可将其划分成4个构造带,分别为特提斯喜马拉雅(THB)、高喜马拉雅(HHB)、低喜马拉雅(LHB)和亚喜马拉雅(尹安, 2001)(图1a)。其中,大量 Au、Sb 矿床和 Pb、Zn(Sb、Ag)矿床(点)在特提斯喜马拉雅构造带中产出,如扎西康、柯月、沙拉岗、哲古等,构成藏南地区的“Au-Sb 多金属”成矿带(林彬等, 2013)(图1b)。

特提斯喜马拉雅构造带内主要分布有古生界、中生界和新生界的沉积地层, Au、Sb 矿床和 Pb、Zn 矿床的重要容矿围岩主要为发育于三叠系、侏罗系、白垩系的砂岩、砂页岩、板岩、泥灰岩(聂凤军等, 2005)。带内分布着一系列由深成侵入岩和变质岩构成的变质核杂岩体,并有大规模 EW 向逆冲-推覆断裂构造和近 SN 向的张性断裂构造发育。其中,近 SN 向张性断裂(如地堑、裂谷和正断层)分布广泛,与 Au、Sb 和 Pb、Zn(Sb、Ag)矿化的空间分布关系较为紧密(林彬等, 2013)。近 SN 向的张性断裂明显将先期形成的近 EW 向的断裂切割,是区域上重要的导矿、容矿构造(李振清等, 2005)。区域内岩浆岩出露面积广,主要为喜马拉雅期的中酸性侵入岩,印支期—燕山期的中基性侵入岩及火山岩次之。喜马拉雅期侵入岩为以二云二长花岗岩为主,白云母花岗岩次之的浅色花岗岩,还可见少量花岗闪长岩。岩浆岩侵入康马、也拉香波等穹窿的核部或沿诸如 STDS、洛扎断裂等近 EW 向大断裂分布。印支期—燕山期侵入岩顺层展布于三叠系、侏罗系和下白垩统地层中,岩体走向呈近 EW 向、NW 向,有辉绿岩、

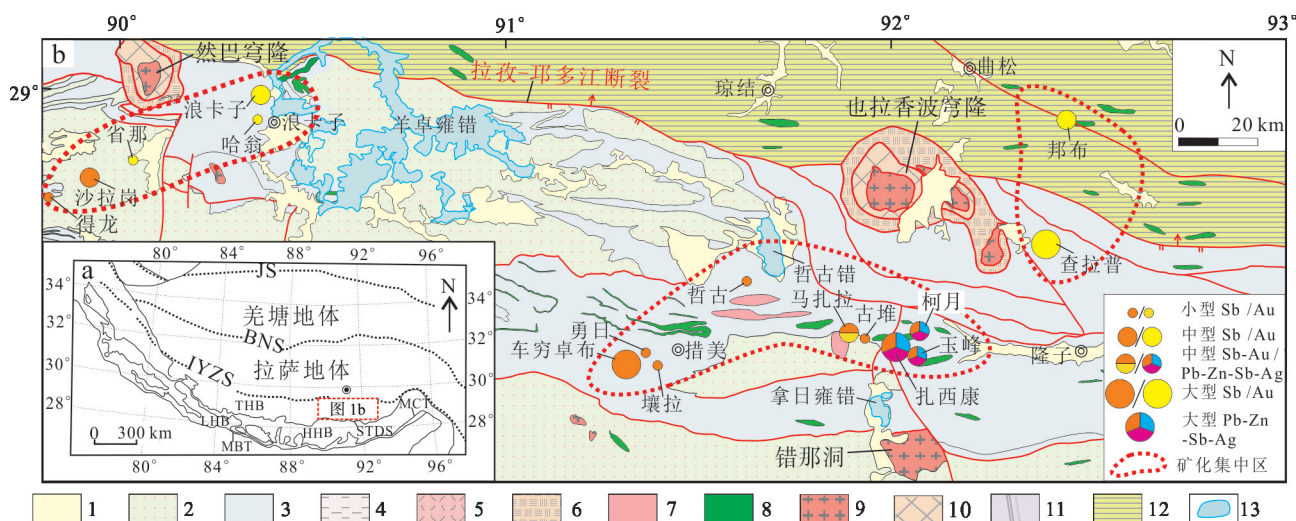


图1 北喜马拉雅成矿带区域地质背景图(据尹安, 2001)

1—第四系:残坡积物;2—白垩系:砂岩、页岩、板岩;3—侏罗系:砂岩、板岩夹粉砂岩;4—三叠系:板岩夹砂岩及灰岩透镜体;5—二叠系:灰岩、板岩;6—奥陶系:灰岩夹砂岩;7—闪长岩;8—辉绿岩;9—花岗岩;10—片麻岩、片岩;11—蛇绿岩;12—三叠系混杂岩;13—湖泊;
LHB—低喜马拉雅构造带;HHB—高喜马拉雅构造带;THB—特提斯喜马拉雅构造带;BNS—班公湖-怒江缝合带;
IYZS—印度-雅鲁藏布缝合带;MBT—主边界逆冲断裂;MCT—主中央逆冲断裂;STDS—藏南拆离系

Fig. 1 Regional geological background map of Northern Himalaya metallogenic belt (after Yin, 2001)

1—Quaternary: residual slopewash; 2—Cretaceous strata: sandstone, shale, slate; 3—Jurassic strata: sandstone, slate with siltstone; 4—Triassic strata: slate with sandstone and limestone lens; 5—Permian strata: limestone, slate; 6—Ordovician strata: limestone with sandstone;
7—Diorite; 8—Diabase; 9—Granitoid; 10—Gneiss and schist; 11—Ophiolite; 12—Triassic melange; 13—Lake;
LHB—Low Himalayan tectonic belt; HHB—High Himalayan tectonic belt; THB—Tethyan Himalayan tectonic belt; BNS—Bangong-Nujiang suture;
IYZS—Indus-Yarlung Zangbo suture; MBT—Main boundary thrust; MCT—Main central thrust; STDS—South Tibet detachment system

辉长岩等基性侵入岩,玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩、少量火山角砾岩等火山岩(林彬等,2013)。

2 矿床地质特征

扎西康地理位置位于西藏山南地区隆子县西约48 km,大地构造属北喜马拉雅岩片中部羊卓雍错-那日雍错复式向斜东南端北翼。区内出露上三叠统修康群(T_{3z})、下侏罗统日当组(J_{1r})、中-上侏罗统遮拉组(J_{2-3z})和下白垩统甲不拉组(K_{1j})等地层。矿区主要出露下侏罗统日当组(J_{1r}),整个藏南地区的日当组中富含Pb、Zn、Sb、Ag等成矿元素(李关清等,2014),为区内矿床的形成提供了大量丰富的成矿物质,是名副其实的矿源层,也是主要的容矿、赋矿岩层。地层岩性组合为黑板岩夹有少量的燧石团块及凝灰质、钙质砂岩(图2a),具体可划为5个岩性段,各岩性段之间接触关系为连续整合接触(林彬等,2013)。

区内岩浆活动频繁、岩浆岩类型较多,有以英安岩、流纹岩为主的喷出岩,以辉绿岩、浅色花岗岩为

主的侵入岩,局部范围内见少量基性-酸性脉岩。

自三叠纪以来,受特提斯洋盆的扩张、俯冲消减、闭合以及喜马拉雅陆块与冈底斯陆块的强烈碰撞造山和大规模的伸展拆离、旋扭走滑等作用的影响,使区内构造活动发育,形成复杂的构造样式及组合。矿区内主要的控矿构造是近SN向高角度断裂。当前矿区的张性正断层F7(倾向西,倾角约 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$)和F2(倾向西,倾角约 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$)为主要的控矿断层,分别控制V号、VI号矿体的产出(图2a)。

扎西康矿床的矿体产出严格受控于以SN向张扭性破碎带为主的构造破碎带中,在破碎带发育、交汇、扭张部位,矿体变得厚大、稳定且品位增高(王艺云等,2012)。目前在矿区共圈定出8个矿体,其中主矿体是位于矿区西部的赋存于断层F7的构造破碎带中的V号Pb-Zn矿体,呈似层状、脉状、长透镜状,局部有膨缩变化。矿体同构造破碎带的产状基本一致,倾向西,倾角约 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$ (图2b)。位于矿区东部呈似层状的VI号Pb-Zn矿体产出于断层F2的断裂破碎带中,矿体宽约1~12 m,厚度相对较为稳定,

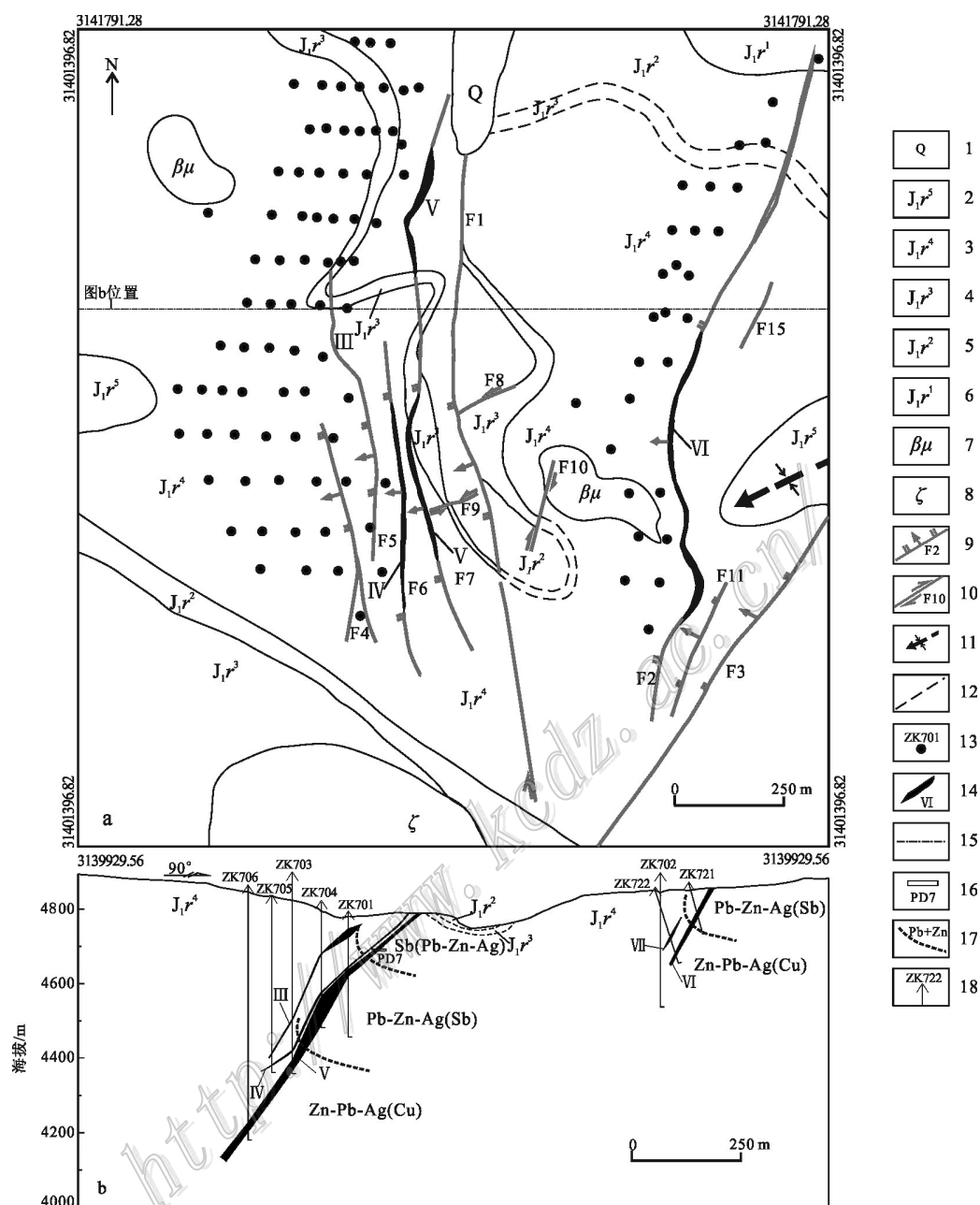


图 2 扎西康矿区地质图(a)及典型剖面(b)

1—第四系:残坡积物;2—下侏罗统日当组第五岩性段:灰绿色石英砂岩与灰黑色页岩互层;3—下侏罗统日当组第四岩性段:黑色板岩夹褐黄色钙质砂岩、凝灰岩;4—下侏罗统日当组第三岩性段:灰绿色石英砂岩;5—下侏罗统日当组第二岩性段:灰黑色页岩;6—下侏罗统日当组第一岩性段:白—黄褐色粗粒石英砂岩;7—辉绿岩;8—英安岩;9—实测正断层及编号;10—实测平移断层及编号;11—倾伏向斜;12—实(推)测地层界线;13—钻孔及编号;14—矿体及编号;15—勘探线位置;16—平硐及编号;17—元素分带及界线;18—钻孔

Fig. 2 Geological map of the Zhaxikang mining area (a) and typical section (b)

1—Quaternary: residual slopewash; 2—The fifth lithologic section of the Lower Jurassic: grayish interbedded green quartz sandstone and gray-black shale; 3—The fourth lithologic section of the Lower Jurassic: black slate intercalated with brownish yellow calcareous sandstone and tuff; 4—The third section of the Lower Jurassic: grayish green quartz sandstone; 5—The second section of the Lower Jurassic: grayish black shale; 6—The first section of the Lower Jurassic: white-brownish yellow quartz sandstone; 7—Diabase; 8—Dacite; 9—Measured normal fault and its serial number; 10—Measured translational fault and its serial number; 11—Plunging syncline; 12—Measured (inferred) stratigraphic boundary; 13—Drill hole and its serial number; 14—Orebody and its serial number; 15—Exploration line; 16—Drift and its serial number; 17—Elemental zoning and boundary; 18—Drill hole

倾向西,倾角约 $50^{\circ}\sim 65^{\circ}$ (图2b)。产于矿区西部的Ⅲ、Ⅳ号Pb-Zn矿体,分别受控于F5、F6断呈,近SN走向,倾向西,倾角约 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,呈似层状、长透镜状产出(图2b)。矿区东部呈长透镜状的Ⅶ号矿体,走向近SN,倾向W,倾角约 60° 。位于矿区中部呈似层状、长透镜状产出的Ⅷ号、Ⅸ号、Ⅹ号矿体是3个独立圈定的Sb矿体,近SN走向,倾向西,倾角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (图2b)。

矿区的矿石成分复杂。矿石中的热液矿物以黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、硫锑铅矿、辉锑铅矿、脆硫锑铅矿、辉锑矿、石英、方解石、菱锰矿为主,车轮矿、银黝铜矿、绢云母、绿泥石等次之。还有针铁矿、纤铁矿、钛铁矿、水锰矿等表生矿物,局部偶见蓝铜矿、孔雀石。

金属矿物组合在矿体三维空间存在典型的分带性,从浅部至深部,矿物组合变化为辉锑矿+黄铁矿+脆硫锑铅矿±方铅矿→方铅矿+黄铁矿+闪锌矿+辉银矿±银黝铜矿±辉锑矿→黄铁矿+闪锌矿+方铅矿±黄

铜矿±银黝铜矿;相应成矿元素组合变化为Sb(Pb-Zn-Ag)→Pb-Zn-Ag(Sb)→Zn-Pb-Ag(Cu)(图2b);围岩蚀变对矿化分带亦有很强的控制作用,上部锑矿化与硅化蚀变有关,中下部铅锌矿化则明显与铁锰碳酸盐化(菱锰矿为主)关系更为密切;从成矿时间来看,可划分为铅锌和锑两个成矿阶段,铅锌成矿要明显早于锑的成矿(王艺云等,2012;郑文宝等,2017)。

3 样品采集及分析测试

本次实验分别采用Rb/Sr和Sm/Nd同位素方法测定菱锰矿与黄铁矿年龄。实验样品采自V号、Ⅵ号矿体钻孔深部。为更符合Rb-Sr或Sm-Nd同位素体系要求,所有样品均为同源热液成因的矿物。从手标本和镜下特征观察,菱锰矿与黄铁矿产于同一条脉体中(图3a),与方铅矿和闪锌矿共生(图3b),为

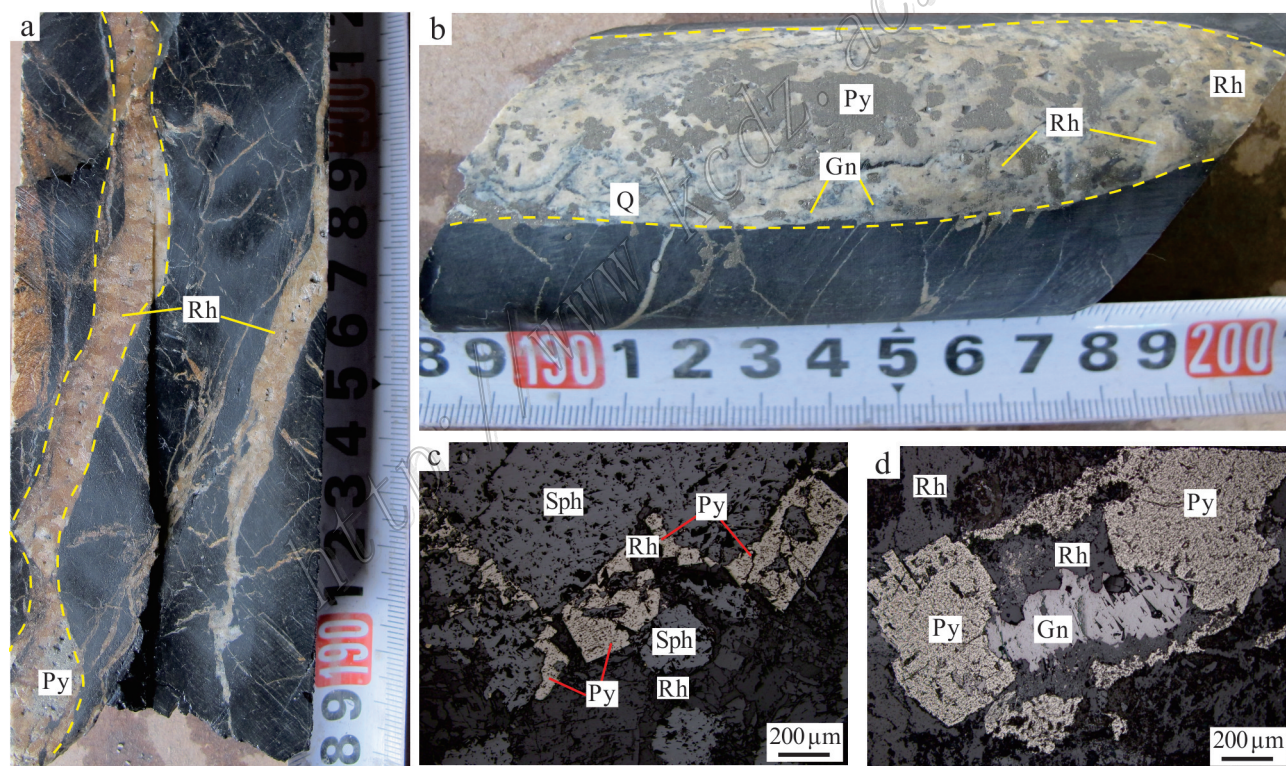


图3 扎西康矿区菱锰矿及黄铁矿特征

a. 菱锰矿与黄铁矿脉;b. 黄铁矿+菱锰矿+石英+方铅矿脉;c. 黄铁矿与菱锰矿共生,被闪锌矿交代呈共边结构;d. 半自形黄铁矿与菱锰矿共生,后期被方铅矿交代

Q—石英;Py—黄铁矿;Rh—菱锰矿;Sph—闪锌矿;Gn—方铅矿

Fig. 3 Characteristics of rhodochrosite and pyrite in the Zhaxikang mining area

a. Rhodochrosite and pyrite veins; b. Rhodochrosite+pyrite+quartz+galena veins; c. Pyrite associated with rhodochrosite and replaced by sphalerite; d. subhedral pyrite associated with rhodochrosite and replaced by galena

Q—Quartz; Py—Pyrite; Rh—Rhodochrosite; Sph—Sphalerite; Gn—Galena

铅锌成矿阶段样品。其中菱锰矿呈黄白色,镜下多为暗灰色,他形粒状,粒度 50~200 μm (图 3c、d)。黄铁矿呈半自形-他形,粒度在 10~500 μm 之间,并被方铅矿和闪锌矿不同程度的交代(图 3c、d)。

为了保证样品纯度,首先将样品粉碎到 60~80 目后过筛,在双目镜下挑选出纯度达 99% 以上的菱锰矿和黄铁矿单矿物。将选出的菱锰矿和黄铁矿在洁净环境中用蒸馏水清洗,并进行低温蒸干去杂质和去矿物、流体包裹体的处理。经低温蒸干后的样品首先经水浴恒温 60℃ 条件下 5 小时,然后对其样品用高纯 5% 冰醋酸(HAc)进行饱和处理提取酸溶物,而对酸不溶物经高速离心沉淀和高分子过滤材料过滤进行收集,经烘干后,在洁净环境下在玛瑙研钵中把样品磨到 200~400 目,使之均匀化。以上的全部化学处理在南京大学现代分析中心超净同位素化学实验室完成。所有样品的 Rb-Sr 或 Sm-Nd 含量使用等离子体质谱仪(ICP-MS)进行草测,以确定最佳 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值,然后挑选适合定年的样品在南京大学现代分析中心同位素分析室进行 Rb/Sr 和 Sm/Nd 同位素测定,分析方法和流程包括对粉末样品经过不同浓度的 HCl、HCl+HNO₃ 混合酸、稀 HF+HNO₃+HClO₄ 混合酸的多次消化溶解经蒸干后提取清液,后采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离对待测样品中上阳离子柱和反相层柱进行 Rb、Sr 和 Sm、Nd 元素分离纯。将所分离出来的样品放置于英国制造 VG354 多接收质谱计上测定 Rb/Sr 及 Sm/Nd 同位素比值。实验过程中采用相对低的发射电流和高效率的发射剂,每个样品保证 3~5 小时以上的测定时间,具体实验方法见文献(王银喜等, 2007)。

实验采用美国国家标准局 NBS-987 碳酸盐锶同位素标准样, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值为 $0.710\,241 \pm 0.000\,007$ ($2\sigma, n=8$), Sr 的全流程本底为 $(3\sim 5) \times 10^{-10}$ g, 同时采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行标准化。Nd 标样采用美国 La Jolla 同位素标准,标准样中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 $0.511\,860 \pm 0.000\,008$ ($2\sigma, n=8$), Nd 全流程本底为 $(2\sim 6) \times 10^{-11}$ g, 标准化值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行校正。年龄计算采用的是国际通用的 ISOPLOT 计算程序。在等时线年龄计算中,样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差为 1%~2%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 误差采用 0.01%~0.005%, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值误差为 1%, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 误差采用 0.03%~0.05%。

4 实验结果

扎西康矿床热液成因菱锰矿的 Sm-Nd 同位素及黄铁矿 Rb-Sr 同位素分析结果见表 1 和表 2。

获得 7 件菱锰矿样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 0.0602~0.9124 之间, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 0.512 301~0.512 849 之间,平均值为 0.512471(表 1),二者具有十分吻合的线性关系。采用 ISOPLOT 软件计算出菱锰矿 Sm-Nd 等时线年龄为 (99.1 ± 0.90) Ma, 初始铷同位素 I_{Nd} 为 0.512 258 2, MSWD=1.5(图 4a), 经 99 Ma 球粒陨石 CHUR 计算出的 ϵ_{Nd} 值在 -6.573 84~4.115 965 之间(表 1)。

获得 9 件共生黄铁矿 $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ 比值在 0.0653~4.0821 之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.714 021~0.719 708 之间(表 2), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ 同样具有吻合的线性关系。采用 ISOPLOT 软件计算出黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (98.0 ± 1.8) Ma, 初始锶同位素 I_{Sr} 为 0.713 968, MSWD=1.02(图 4b)。

表 1 扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床菱铁矿 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 Sm-Nd isotope data of rhodochrosite from the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit

样品编号	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵ_{Nd}
4405-476.2	0.1759	0.512372	-5.188847
4403-164.8	0.1321	0.512339	-5.832576
4402-109.5	0.0602	0.512301	-6.573840
4403-215	0.1025	0.512325	-6.105673
4404-293.3	0.2936	0.512448	-3.706319
4405-434	0.9124	0.512849	4.115965
4402-102	0.6239	0.512664	0.507181

表 2 扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 矿床黄铁矿 Rb-Sr 同位素分析结果

Table 2 Rb-Sr isotope data of pyrite from the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit

样品编号	$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
ZXK-B2	0.2547	0.714334
ZXK-B3	0.0653	0.714021
ZXK-B4	0.3469	0.714487
ZXK-B7	0.7921	0.715015
ZXK-B14	0.5108	0.714717
ZXK-B15	2.479	0.717384
ZXK-B18	4.082	0.719708
ZXK-B21	1.236	0.715739
ZXK-B24	2.986	0.718056

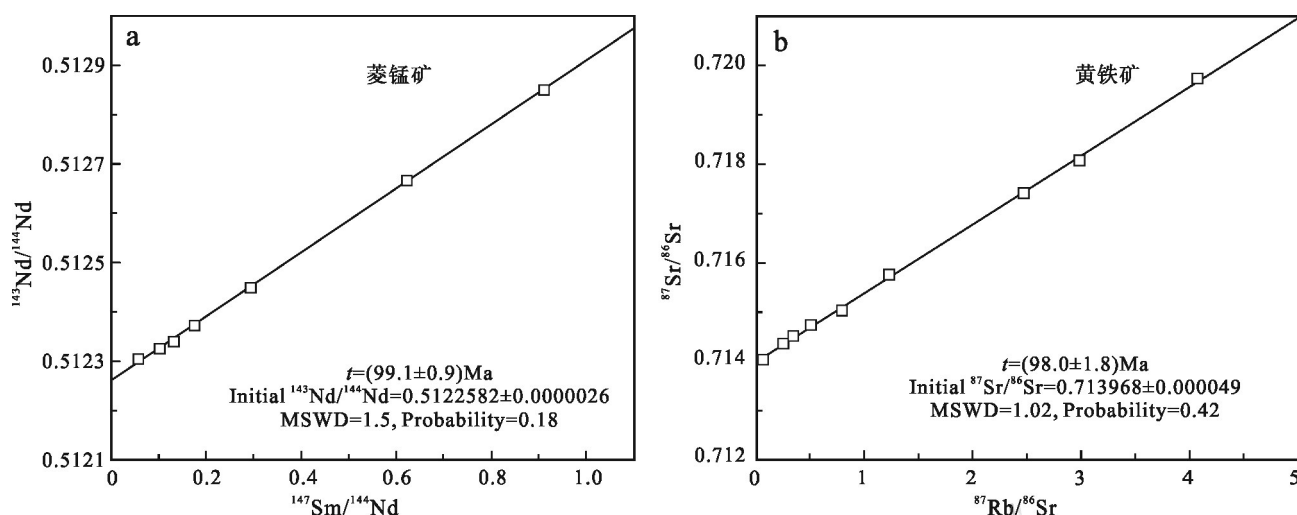


图4 扎西康Sb-Pb-Zn-Ag矿床菱锰矿Sm-Nd(a)及黄铁矿Rb-Sr(b)等时线年龄

Fig. 4 Rhodochrosite Sm-Nd (a) and pyrite Rb-Sr (b) isochron age of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit

热液成因菱锰矿与黄铁矿形成年龄非常一致,集中在99 Ma左右,说明其属于同源同期产物,代表了一次重要的热液活动时限。

5 讨论

5.1 Sm-Nd 与 Rb-Sr 测年评述及热液流体作用时限

Sm-Nd作为化学性质相似的稀土元素,在热液矿物形成过程中,常发生较为显著的化学分异并取代碳酸盐矿物中的 Ca^{2+} 进入矿物晶体(Cherniak, 1998; Elzinga et al., 2002),同时,由于Sm衰变产生的子体元素Nd能自然地留在矿物晶格的原位替代Sm,因而Sm-Nd体系容易保持封闭,在后期改造作用过程中较为稳定(Anglin et al., 1996; 彭建堂等, 2006)。而Rb-Sr等微量元素主要以类质同象形式、包裹体或机械混入形式赋存在黄铁矿的晶格间或吸附在矿物的表面(Lüders et al., 1999),同时在热液矿物形成过程中会使化学性质不同的Rb和Sr发生化学分异,结果促使矿物具有不同的Rb/Sr比值(Stein et al., 1998)。上述这些特征使得Sm-Nd及Rb-Sr同位素定年成为一种有效手段。但应用这2种体系测年的一个首要前提是样品为同期同源的共生硫化物,且热液矿物需具有相对一致的初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值及不同的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值,同时严格避免杂质及包裹体等外界干扰。近年来,随着矿物提纯技术及分析测试精度的不断完善,

采用Sm-Nd及Rb-Sr同位素体系获取热液矿物成矿年龄已得到越来越多的应用,也取得了大量可靠的年龄数据(Yang et al., 2001; 彭建堂等, 2002; 李文博, 2002; Barker et al., 2009; Hnatyshin et al., 2015)。

本次实验所采集的菱锰矿和黄铁矿样品均产于扎西康矿床的同期脉体中,属同期同源产物。同时,在实验前首先用不同浓度的HCl淋洗样品并分步提纯硫化物,最大限度地减少矿物颗粒表面和微细包裹体的干扰。并对样品进行了Sm-Nd和Rb-Sr含量草测,挑选出适合条件的样品进行测年实验,保证实验结果的准确性。实验获得7件菱锰矿Sm-Nd等时线年龄为 $(99.1 \pm 0.9) \text{ Ma}$, 9件共生黄铁矿Rb-Sr等时线年龄为 $(98.0 \pm 1.8) \text{ Ma}$, MSWD分别为1.5和1.02(图4),数据点加权平均方差(MSWD)较小,说明数据点离散程度较低,等时线年龄可信度较高。此外,无论是Sm-Nd法还是Rb-Sr法,获得的年龄如此相近,均集中在99 Ma左右,二者之间相互检验,也说明所获得数据的可靠性,能够代表这些矿物的形成年龄,说明扎西康矿区在晚白垩世时期(99 Ma左右)存在一次热液流体成矿事件。

5.2 成矿流体来源及性质

Sr-Nd同位素作为成岩成矿过程中重要指标,在矿床地质研究中常利用其来示踪流体与成矿物质来源(Depaolo et al., 1979; 朱炳泉, 2007)。本文获得7件菱锰矿钕同位素初始值在0.512 301~0.512 849之间,平均值为0.512 471,与Sm-Nd构建的等时线初始钕同位素值($I_{\text{Nd}} = 0.5122582$)相一致,经99 Ma球粒

陨石 CHUR 计算出 ϵ_{Nd} 值在 $-6.573\ 84 \sim 4.115\ 965$ 之间,平均值 $-3.254\ 87$,明显有别起源于地幔的大洋中脊玄武岩 ($\epsilon_{\text{Nd}}=10 \pm$) (Depaolo, 1980) 及陆壳沉积物 ($\epsilon_{\text{Nd}}=-15 \pm$) (Depaolo, 1980),而类似于海盆混合热液的 ϵ_{Nd} 组成 ($-3.6 \sim +7.9$) (Piepgras et al., 1985),同时测得 9 件黄铁矿 铀同位素初始值在 $0.714\ 021 \sim 0.719\ 708$ 之间,平均值为 $0.715\ 940$,具有明显高的铀初始值,介于大洋海水 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.709$) (Krabbenhöft et al., 2009) 与壳源 Sr 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.719$) (Faure, 1979) 之间,显示出盆地流体混合来源的特征。

对于盆地流体成矿,其来源显著不同于海底喷流沉积或者岩浆热液成矿。对铅锌和锑成矿阶段的菱锰矿和石英中流体包裹体的研究表明,早期铅锌成矿阶段均一温度变化为 $190 \sim 287.9^\circ\text{C}$,平均值为 251.25°C ,晚期锑成矿阶段均一温度变化为 $198 \sim 284^\circ\text{C}$,平均值为 231.90°C ;铅锌成矿阶段流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $4.03\% \sim 10.11\%$,平均为 5.30% ,到晚期的锑成矿阶段, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $1.40\% \sim 7.59\%$,平均为 4.22% ;早期铅锌热液成矿阶段,热液流体中阳离子主要为 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} ,几乎不含 Ca^{2+} ,阴离子主要为 Cl^- 、 SO_4^{2-} ;晚期锑(铅)热液成矿阶段,热液流体中阳

离子主要为 Na^+ 、 K^+ ,含少量的 Ca^{2+} ,几乎不含 Mg^{2+} ,阴离子主要为 SO_4^{2-} , Cl^- 含量相对减小(林彬, 2014; 张建芳等, 2010; 李应栩等, 2015)。据氢、氧同位素分析资料,绝大多数样品分布在西藏地热水附近以及 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移区(孟祥金等, 2008)。因此,扎西康矿床成矿流体特征与典型盆地流体成矿有关的卡林型金矿、MVT 型铅锌矿以及砂页岩型铜矿等具有相似性(翟裕生等, 2011)。

5.3 矿床成因及成矿过程

根据本文及前人研究成果,扎西康矿床成矿作用过程可以初步概括为:早白垩世 ($132\ \text{Ma} \pm$),在雅鲁藏布新特提斯南部被动大陆边缘的大印度北东缘、澳大利亚和南极洲三联点之下, Kerguelen 地幔柱发生首次大规模岩浆作用,形成隆子-措美大火成岩省,导致大印度从澳大利亚裂解出来,东印度洋开始扩张;大约在 $120\ \text{Ma}$, Kerguelen 地幔柱再次发生大规模岩浆作用,形成印度东部的 Rajmahal 玄武岩和南印度洋 Kerguelen 玄武岩,导致印度板块从南极洲裂解出来,南印度洋开始扩张(Coffin et al., 1994; Ingle, 2002; 朱弟成等, 2009);伴随着南印度洋的扩张,印度板块向北漂移,并导致新特提斯洋壳向拉萨

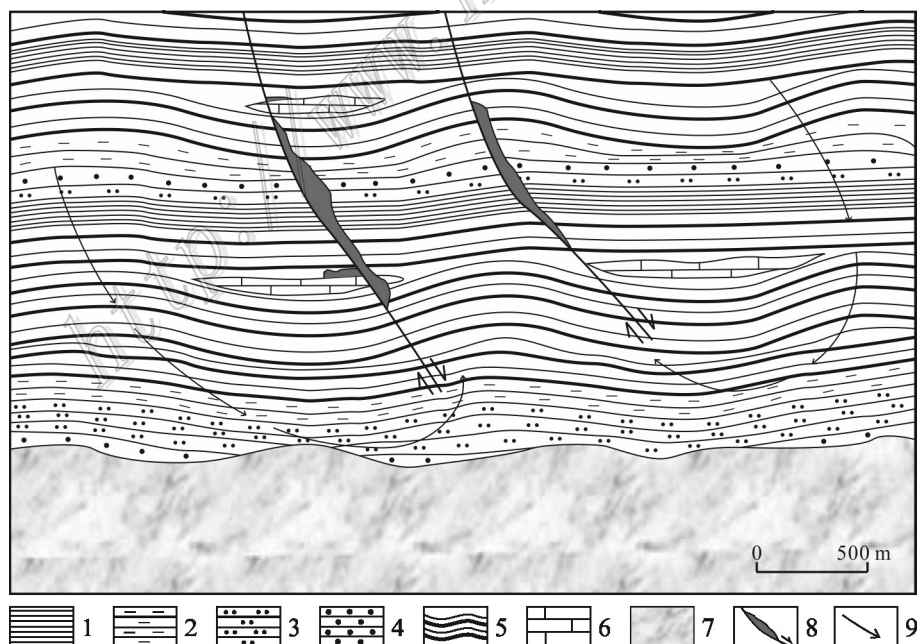


图5 扎西康矿床模型示意图

1—页岩;2—泥质岩;3—粉砂岩;4—砂岩;5—板岩;6—微晶灰岩;7—基底;8—断层及矿体;9—成矿流体运移方向

Fig. 5 Schematic diagram of Zhaxi Kang deposit model

1—Shale; 2—Mud rock; 3—Siltstone; 4—Sandstone; 5—Slate; 6—Limestone; 7—Basement; 8—Fault and orebody;

9—Ore-forming fluid migration direction

地体之下俯冲,在拉萨地体活动大陆边缘形成以桑日群火山岩和冈底斯岩基(103~80 Ma)为代表的岛弧岩浆作用(朱弟成等,2009)。印度板块从南极洲裂解向北漂移直至最后同拉萨地体发生碰撞过程中(120~65 Ma),扎西康区域一直处于印度板块被动大陆边缘,长期区域性的伸展背景导致区域张性构造密集发育,为热液流体的运移和就位提供了良好的空间;而此时该区为典型的湖盆沉积体系,以泥质岩、粉砂岩、页岩为主,局部夹有微晶灰岩透镜体和薄层砂岩。Sr、Nd、H、O同位素组成以及矿物流体包裹体特征指示,来源于盆地中的成矿流体可运移至张性断层中发生充填-交代作用,导致成矿(图5)。

梁维等(2015)采用Ar-Ar法获得的扎西康矿区绢云母坪年龄为(12.28±0.45)Ma,这与藏南地区印度-亚洲碰撞后伸展阶段时限相对应(Yin et al., 2000; Williams et al., 2001),笔者认为这个时间应该代表了后碰撞期藏南拆离系发育过程中的一次构造热液活动,是否与成矿有关尚不可知。

6 结 论

(1) 扎西康Sb-Pb-Zn-Ag矿床热液成因菱锰矿Sm-Nd等时线年龄为(99.1±0.9)Ma,共生黄铁矿Rb-Sr等时线年龄为(98.0±1.8)Ma,MSWD分别为1.5和1.02,代表这些矿物的形成年龄,记录了晚白垩世时期(99 Ma左右)的一次热液成矿作用事件。

(2) 菱锰矿Nd和黄铁矿Sr同位素组成表明成矿流体主要来源于盆地热液流体,热液流体产生于印度板块被动大陆边缘的盆地构造环境,就位于板块漂移过程产生的张性构造中。扎西康矿床属于盆地构造环境控制的铅锌矿床。

致 谢 感谢西藏华钰矿业股份有限公司为笔者的野外工作和室内工作提供资助。同时感谢审稿专家为本文提出的宝贵意见。

References

Anglin C D, Jonasson I R and Franklin J M. 1996. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline: Implications for the genesis of Archean gold deposits, Val d'Or, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 91(8): 1372-1382.
Barker S L L, Bennett V C, Cox S F, Norman M D and Gagan M K.

2009. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematics in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology[J]. *Chemical Geology*, 268(1-2): 58-66.
Cherniak D J. 1998. REE diffusion in calcite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3): 273-287.
Coffin M F and Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences[J]. *Reviews of Geophysics*, 32(1):1-36.
Depaolo D J and Wasserburg G J. 1979. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(4): 615-627.
Depaolo D J. 1980. Crustal growth and mantle evolution: Inferences from models of element transport and Nd and Sr isotopes: reply to a comment by R. L. Armstrong[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45: 1253-1254.
Duan J L, Tang J X and Lin B. 2016. Zinc and lead isotope signatures of the Zhaxikang Pb-Zn deposit, South Tibet: Implications for the source of the ore-forming metals[J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 58-68.
Elzinga E J, Reeder R J, Withers S H, Peale R E, Beck K M and Hess W P. 2002. EXAFS study of rare-earth element coordination in calcite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(16): 2875-2885.
Faure G. 1979. Principles of isotope geology[M]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons.
Hnatyshin D, Creaser R A, Wilkinson J J and Gleeson S A. 2015. Re-Os dating of pyrite confirms an early diagenetic onset and extended duration of mineralization in the Irish Zn-Pb ore field[J]. *Geology*, 43(2): 143-146.
Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogeny of the Tibetan collisional orogeny: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 2-24.
Ingle S. 2002. Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, Site 1137) [J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1241-1257.
Krabbenhöft A, Fietzke J, Eisenhauer A, Liebetrau V, Böhm F and Vollstaedt H. 2009. Determination of radiogenic and stable strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; $\delta^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) by thermal ionization mass spectrometry applying an $^{87}\text{Sr}/^{84}\text{Sr}$ double spike[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24(9): 1267-1271.
Li G Q, Cheng W B, Zhang Y M, Zhang Y, Lü P R, Dai H Z, Zhang X G and Xia B B. 2014. Geochemical characteristics and their geologic significance of the Lower Jurassic ridang formation host strata from the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag polymetallic ore-concentrated district, South Tibet[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 598-608(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).
Li W B, Huang Z L, Wang Y X, Chen J, Han R S, Xu C, Guan T and

- Yin M D. 2002. Age of the giant Huize Zn-Pb deposits determined by Sm-Nd dating of hydrothermal calcite[J]. *Geological Review*, 50(2): 189-195(in Chinese with English abstract).
- Li Y X, Li G M, Dong S L, Xia X B, Wu J Y and Zhou Q. 2015. Preliminary study on fluid evolution in the ore forming process of the Zhaxikang polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 571-582(in Chinese with English abstract).
- Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J and Meng X J. 2005. Characteristic and distribution of the partial melting layers in the upper crust: evidence from active Hydrothermal fluid in the South Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 68-77(in Chinese with English abstract).
- Liang W, Hou Z Q, Yang Z S, Li I Q, Huang K X, Zhang S, Li W and Zheng Y C. 2013. Remobilization and overprinting in the Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic ore deposit, Southern Tibet: Implications for its metallogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3828-3842(in Chinese with English abstract).
- Liang W, Yang Z S and Zheng Y C. 2015. The Zhaxikang Pb-Zn polymetal deposit: Ar-Ar age of sericite and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 560-568(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F, Wang Y Y, Liu M Y, Yang H H, Ding S, Zhang L H and Yang H Z. 2013. Geological characteristic and modes of occurrence of silver in Zhaxikang zinc polymetallic deposit[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 899-914(in Chinese with English abstract).
- Lin B. 2014. Geologic features and genesis discussion of Zhaxikang zinc polymetallic deposit in Tibet[D]. Tutor: Tang J X. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Lüders V and Ziemann M. 1999. Possibilities and limits of infrared light microthermometry applied to studies of pyrite-hosted fluid inclusions[J]. *Chemical Geology*, 154(1-4): 169-178.
- Meng X J, Yang Z S, Qi X X, Hou Z Q and Li Z Q. 2008. Silicon-oxygen-hydrogen isotopic compositions of Zhaxikang antimony polymetallic deposit in southern Tibet and its responses to the ore-controlling structure[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1649-1655 (in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Hu P, Jiang S H, Li Z Q, Liu Y and Zhou Y Z. 2005. Type 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).
- Peng J T, Hu R Z, Zhao J H and Lin Y X. 2002. Sm-Nd isotope dating of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan[J]. *Science Bulletin*, 47(10): 1134-1137(in Chinese with English abstract).
- Peng J T, Fu Y Z, Yuan S D, Shen N P and Zhang D L. 2006. Sm-Nd isotope dating of some Ca-bearing minerals in hydrothermal deposits[J]. *Geological Review*, 52(5): 662-667(in Chinese with English abstract).
- Piegras D J and Wasserburg G J. 1985. Strontium and neodymium isotopes in hot springs on the East Pacific Rise and Guaymas Basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 72(4): 341-356.
- Qi X X, Li T F, Meng X J and Yu C L. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fanit-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).
- Stein H J, Sundblad K, Markeyr J, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329-345.
- Sun X, Zheng Y Y, Wang C M and Geng X B. 2015. Identifying geochemical anomalies associated with Sb-Au-Pb-Zn-Ag mineralization in North Himalaya, southern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 1-12.
- Tang J X, Liu M Y, Zheng W B, Lin B, Tang X Q, Xu J, Yang H Z, Leng Q F, Ding S, Song J L, Hu Z H, Chen W, Wang Y Y, Xu Y F, Tang P, Lin X, Yang H H and Yang C. 2012. Verification report on resource reserves of lead-zinc polymetallic deposits in Zhaxiang mining area, Longzi County, Tibet Autonomous Region[R]. (in Chinese with English abstract).
- Wang Y Y, Tang J X, Zheng W B, Lin B, Leng Q F, Chen W, Ding S, Song J L and Xu Y F. 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).
- Wang Y X, Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Li H M and Yang J D. 2007. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1749-1755(in Chinese with English abstract).
- Williams H, Turner S, Kelley S and Harris N. 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*, 92: 188-193.
- Xie Y L, Wang B G, Li Y X, Li G M, Dong S L, Guo X and Wang L. 2015. Characteristics of pegmatite-related fluids and significance to ore-forming processes in the Zhaxikang Pb-Zn-Sb polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(3): 811-821.
- Xu Z Q, Yang J S, Li W C, Zeng L S and Xu C P. 2012. Tectonic background of important metallogenic belts in the southern and south-eastern Tibetan plateau and ore prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1857-1868(in Chinese with English abstract).
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of Lode gold deposits[J]. *Geology*, 29(29): 711-714.
- Yang Z S, Hou Z Q, Gao W, Wang H P, Li Z Q, Meng X J and Qu X M. 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in south tibetan detachment system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377-1391(in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng X J, Liu Y C, Fei H C and Tian S H. 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 194-212.
- Yin A and Harrison M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Ti-

- betan orogeny[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(28): 211-280.
- Yin A. 2001. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny in the context of Phanerozoic continental growth of Asia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(3): 193-230(in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, Yi J Z, Zhang X G, Mo R W, Zhou F, Wei H X and Zeng Q G. 2014. Geology, geochemistry, and genesis of orogenic gold-antimony mineralization in the Himalayan Orogen, South Tibet, China[J]. Ore Geology Reviews, 58(4): 68-90.
- Zhai Y S and Wang J P. 2011. A historical view of mineral deposit research[J]. Acta Geologica Sinica, 85(8): 603-611(in Chinese with English abstract).
- Zhang J F, Zheng Y Y, Zhang G Y, Gao S B, Ye X R, Zhang Z, Liu M Y and Li J Q. 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): 1000-1010(in Chinese with English abstract).
- Zheng W B, Ding S, Leng Q F, Wang Y Y and Lin B. 2017. Petrogeochemical characteristics of typical cross-section in the Zhaxikang ore district of Tibet and their geological significance[J]. Geological and Exploration, 53(1): 97-108(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y Y, Liu M Y, Sun X, Yuan E H, Tian L M, Zheng H T, Zhang G Y and Zhang L H. 2012. Type, discovery process and significance of Zhaxikang antimony polymetallic ore deposit, Tibet[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(5): 1003-1014(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 2007. Pb-Sr-Nd isotopic systematics in mantle derived rocks[J]. Earth Science Frontiers, 14(2): 24-36(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, Niu Y L, Pan G T, Wang L Q and Liao Z L. 2009. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective[J]. Earth Science Frontiers, 16(2): 1-20(in Chinese with English abstract).
- 南扎西康大型铅锌锑银多金属矿床叠加改造成矿作用初探[J]. 岩石学报, 29(11): 3828-3842.
- 梁维, 杨竹森, 郑远川. 2015. 藏南扎西康铅锌多金属矿床云母 Ar-Ar 年龄及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(3): 560-568.
- 林彬, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 王艺云, 刘敏院, 杨欢欢, 丁帅, 张立华, 杨红章. 2013. 西藏扎西康铅锌多金属矿床地质特征及银的赋存状态研究[J]. 矿床地质, 32(5): 899-914.
- 林彬. 2014. 西藏扎西康铅锌多金属矿床地质特征及成因探讨[D]. 导师: 唐菊兴. 成都: 成都理工大学.
- 孟祥金, 杨竹森, 戚学祥, 侯增谦, 李振清. 2008. 藏南扎西康锑多金属矿床硅-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.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 李振清, 刘妍, 周永章. 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.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 林源贤. 2002. 锡矿山锑矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 科学通报, 47(10): 789-792.
- 彭建堂, 符亚洲, 袁顺达, 沈能平, 张东亮. 2006. 热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 地质论评, 52(5): 662-667.
- 戚学祥, 李天福, 孟祥金, 于春林. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆褶皱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.
- 唐菊兴, 刘敏院, 郑文宝, 林彬, 唐晓倩, 许剑, 杨红章, 冷秋锋, 丁帅, 宋俊龙, 胡正华, 陈伟, 王艺云, 徐云峰, 唐攀, 林鑫, 杨欢欢, 杨超. 2012. 西藏自治区隆子县扎西康矿区铅锌多金属矿床资源储量核实报告[R].
- 王艺云, 唐菊兴, 郑文宝, 林彬, 冷秋锋, 陈伟, 丁帅, 宋俊龙, 徐云峰. 2012. 西藏隆子县扎西康锑多金属矿床矿石组构研究及成因探讨[J]. 地球学报, 33(4): 681-692.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 23(7): 1749-1755.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 曾令森, 许翠萍. 2012. 青藏高原南部与东南部重要成矿带的大地构造定格与找矿前景[J]. 地质学报, 86(12): 1857-1868.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 王海平, 李振清, 孟祥金, 曲晓明. 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.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅-青藏高原造山带地质演化[J]. 地球学报, 22(3): 193-230.
- 翟裕生, 王建平. 2011. 矿床学研究的历史观[J]. 地质学报, 85(8): 603-611.
- 张建芳, 郑有业, 张刚阳, 高顺宝, 叶先仁, 张众, 刘敏院, 李及秋. 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-中国地质大学学报, 35(6): 1000-1010.
- 郑文宝, 丁帅, 冷秋锋, 王艺云, 林彬. 2017. 西藏扎西康矿区典型剖面岩石地球化学特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 53(1): 97-108.
- 郑有业, 刘敏院, 孙祥, 原恩会, 田立明, 郑海涛, 张刚阳, 张立华. 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-中国地质大学学报, 37(5): 1003-1014.
- 朱炳泉. 2007. 全球幔源岩 Pb-Sr-Nd 同位素体系[J]. 地学前缘, 14(2): 24-36.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 牛耀龄, 潘桂棠, 王立全, 廖忠礼. 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地学前缘, 16(2): 1-20.

附中文参考文献

- 李关清, 程文斌, 章永梅, 张岩, 吕鹏瑞, 代鸿章, 张兴国, 夏抱本. 2014. 藏南扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区下侏罗统日当组赋矿地层元素地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(5): 598-608.
- 李金高, 王全海, 陈健坤, 姚鹏, 彭勇民. 2002. 西藏江孜县沙拉岗锑矿床成矿与找矿模式的初步研究[J]. 成都理工学院学报, 29(5): 533-538.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜, 陈进, 韩润生, 许成, 管涛, 尹牡丹. 2002. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 50(2): 189-195.
- 李应翔, 李光明, 董随亮, 夏祥标, 吴建阳, 周清. 2015. 西藏扎西康多金属矿床成矿过程中的流体性质演化初探[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 571-582.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 孟祥金. 2005. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据[J]. 地质学报, 79(1): 68-77.
- 梁维, 侯增谦, 杨竹森, 李振清, 黄克贤, 张松, 李为, 郑远川. 2013. 藏