

文章编号 10258-7106 (2009) 06-0747-12

玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义*

田世洪¹ 杨竹森¹ 侯增谦² 刘英超^{1,2} 高延光³ 王召林^{2,4} 宋玉财²,
薛万文⁵ 鲁海峰⁵ 王富春⁵ 苏媛娜^{1,6} 李真真^{1,7} 王银喜⁸ 张玉宝⁵,
朱 田⁵ 俞长捷⁵ 于玉帅¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3 中国地质调查局, 北京 100037; 4 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 5 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012; 6 东华理工大学, 江西 抚州 344000; 7 昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 8 南京大学现代分析中心, 江苏 南京 210093)

摘 要 青海玉树地区的东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床是“三江”北段铜铅锌多金属成矿带铅锌矿床的典型代表, 处于玉树逆冲推覆构造带的前锋带位置。本文利用单矿物闪锌矿和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线方法以及共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线方法测定东莫扎抓矿床的成矿时代为 34.7~35.7 Ma, 平均为 35 Ma, 利用单矿物闪锌矿和共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线方法以及单矿物萤石和共生矿物组合方解石与萤石 Sm-Nd 等时线方法测定莫海拉亨矿床的成矿时代为 31.8~33.9 Ma, 平均为 33 Ma, 表明 2 个矿床的成矿时代基本一致, 为同期同源成矿作用的产物。结合区域成矿地质背景, 建立了 2 个矿床的构造控矿模式。此外, 本文获得的玉树地区典型铅锌矿床的成矿时代与“三江”南段兰坪盆地和“三江”北段沱沱河盆地铅锌矿床的成矿时代相近, 证明青藏高原东部和北部受逆冲推覆控制的长达 1 000 km 的狭长地带有望成为一条巨型 Pb-Zn 成矿带。

关键词 地球化学; Rb-Sr 等时线; Sm-Nd 等时线; 共生矿物组合; 成矿时代; 逆冲推覆构造; 构造模式; 青海玉树东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床

中图分类号 P618.42 P618.43

文献标志码 A

Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozhaizhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications

TIAN ShiHong¹, YANG ZhuSen¹, HOU ZengQian², LIU YingChao^{1,2}, GAO YanGuang³, WANG ZhaoLin^{2,4}, SONG YuCai², XUE WanWen⁵, LU HaiFeng⁵, WANG FuChun⁵, SU AiNa^{1,6}, LI ZhenZhen^{1,7},
WANG YinXi⁸, ZHANG YuBao⁵, ZHU Tian⁵, YU ChangJie⁵ and YU YuShuai¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3 China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4 China Non-ferrous metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China; 5 Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China; 6 East China Institute of Technology, Huzhou 344000, Jiangxi, China; 7 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 8 Center of Modern Analysis, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

* 本文得到“十一·五”国家科技支撑计划重大项目 (2006BAB01A08) 国家 973 项目 (2009CB421007) 国土资源大调查项目 (1212010818096) 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (K0802) 中国博士后科学基金 (20070420418) 国家基础研究计划 973 项目 (2002GB41260) 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室资金 (13-7-5) 和东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室项目 (081206) 的联合资助

第一作者简介 田世洪, 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 主要从事矿床学和同位素地球化学研究工作。Email: s. h. tian@163.com
收稿日期 2009-08-26; 改回日期 2009-10-13。李德先编辑。

Abstract

Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits in Yushu area of Qinghai Province are representative Pb-Zn deposits in the Cu-Pb-Zn polymetallic mineralization belt of the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, which are in the front belt of Yushu thrust nappe system. The ages of the Dongmohazhua deposit have been determined by the Rb-Sr isochron method for sphalerite and one group of intergrowth mineral assemblage samples (pyrite and galena) and the Sm-Nd isochron method for one group of intergrowth mineral assemblage samples (sphalerite and pyrite); whereas, the ages of the Mohailaheng deposit have been determined by the Rb-Sr isochron method for sphalerite and one group of intergrowth mineral assemblage samples (sphalerite and galena) and the Sm-Nd isochron method for fluorite and one group of intergrowth mineral assemblage samples (calcite and fluorite). The ages of Dongmohazhua and Mohailaheng deposits are 34.7~35.7 Ma with an average of 35 Ma and 31.8~33.9 Ma with an average of 33 Ma, respectively, implying they have the same mineralization epoch. Combined with geological and geochemical data, it is concluded that the Dongmohazhua and Mohailaheng deposits formed during the same geological event and the metals have the same source. Together with regional mineralization geological setting, a possible tectonic model for metallogeny of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits has been established. These two ages are close to the ages of the Pb-Zn deposit in Lanping basin of the southern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area and in Tuotuohe basin of the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, indicating that it is possible that the narrow 1000 km - length belt controlled by thrust nappe system in the eastern and northern margins of Tibetan plateau would be a giant Pb-Zn mineralization belt.

Key words: geochemistry, Rb-Sr isochron, Sm-Nd isochron, mineral assemblage, ore-forming epoch, thrust nappe system, tectonic model, Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits in Yushu area, Qinghai Province

位于青藏高原东北缘的“三江”北段成矿带,是中国著名的“三江”铜多金属巨型成矿带的北延部分,构造上属特提斯巨型成矿域的重要组成部分。该构造成矿带不仅经历了古生代特提斯多岛弧盆演化,而且叠加发育了喜马拉雅期碰撞造山形成的第三纪前陆盆地和走滑拉分盆地以及走滑断裂系统和逆冲推覆构造(侯增谦等,2006a)。在这一狭长的构造转换带,第三纪盆地陆相碎屑岩建造和盆缘逆冲推覆构造带控制了一系列贱金属(Pb-Zn-Cu)和Ag矿床,如在兰坪盆地发现了金顶巨型Zn-Pb矿床和白秧坪超大型Ag-Cu-Pb-Zn矿床(成矿年龄介于40~34 Ma之间,He et al.,2009);在玉树盆地发现了东莫扎抓和莫海拉亨等大型Pb-Zn矿床(产于逆冲推覆构造的前锋地带,王召林等,2009);在沱沱河盆地发现了查曲帕茶等大型Pb-Zn矿床(受逆冲推覆构造派生的张性断裂控制)。侯增谦等(2008)通过对比研究大胆推断,青藏高原东至北缘可能发育一条上千公里长的、受新生代逆冲推覆构造控制的巨型Pb-Zn-Cu-Ag成矿带(图1)。该成矿带的形成机

制、矿床成因类型、成矿模型和勘查模型以及精确的成矿年龄已成为迫切需要解决的关键科学问题。

对于Pb-Zn矿床来说,精准定年一直是一个科学难题,即使是研究程度较高的MVT铅锌矿床,其成矿年龄也是利用地质依据间接推测的(Nakai et al.,1990;1993;Sangster,1996;Leach et al.,2005)。近年来,随着同位素定年技术的不断改进,矿床学家对Pb-Zn矿床定年,特别是MVT型Pb-Zn矿床定年做了大量开拓性的工作,并取得了重要进展,使得直接测定Pb-Zn矿床的年龄成为可能,先后在《Nature》、《Science》、《Geochimica et Cosmochimica Acta》、《Economic Geology》等刊物上发表了大量有关闪锌矿的Rb-Sr定年(Nakai et al.,1990;1993;Brannon et al.,1992a;1992b;Christensen et al.,1993;1995a;1995b)、伊利石K-Ar定年(张长青等,2005)、成矿期方解石Sm-Nd定年(李文博等,2004a)、成矿期方解石U-Pb和Th-Pb定年(Brannon et al.,1995;1996a;1996b)、成矿期萤石U-Pb和Th-Pb定年(Leach et al.,2001)、成矿期萤石Sm-

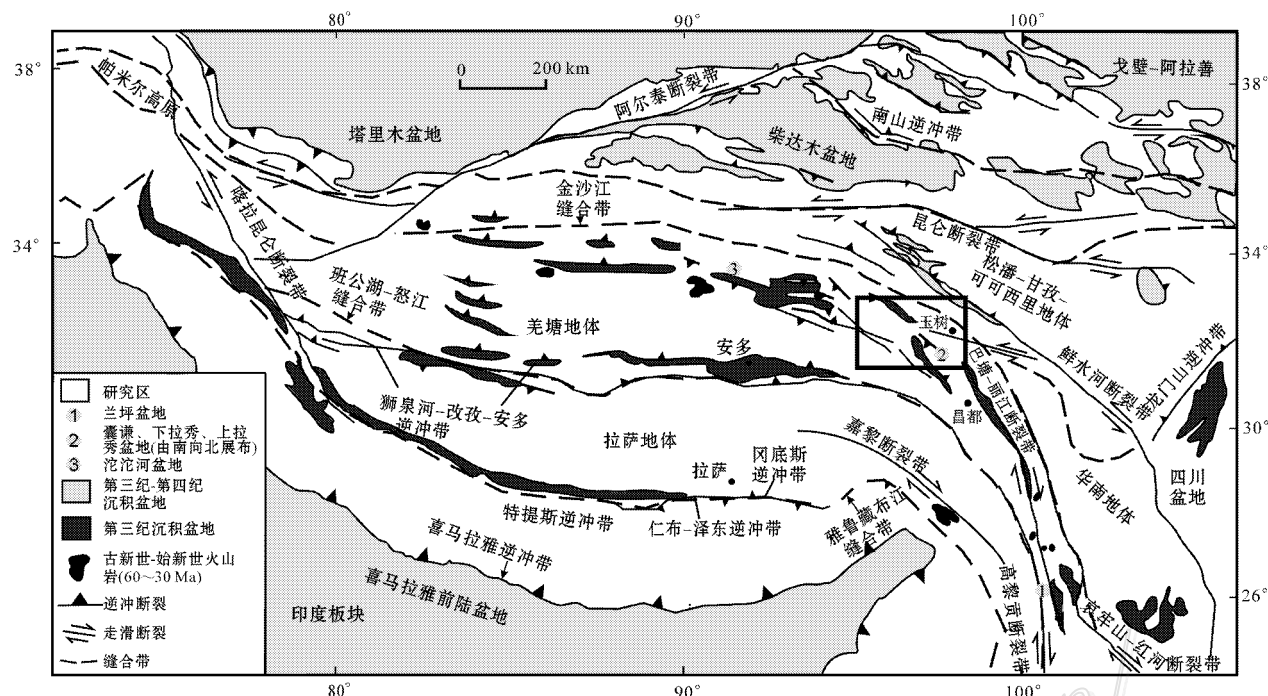


图 1 青藏高原大地构造简图及研究区位置(据 Spurlin 等, 2005; 侯增谦等, 2008 修改)

Fig. 1 Sketch tectonic map of the Tibetan collision belt and locations of the study zones

(modified after Spurlin et al., 2005; Hou et al., 2008)

Nd 定年(Chesley et al., 1994; Leach et al., 2001)以及辉钼矿 Re-Os 定年(毛德宝等 2000)等。

为了进一步限定青藏高原东缘巨型 Pb-Zn 成矿带的发育时限,查明矿床的成因类型,本文选择玉树地区的东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床,开展了成矿年代学研究,特别是利用单矿物闪锌矿、萤石和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿、闪锌矿与方铅矿以及方解石与萤石,进行了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄测定,获得了良好的效果。

1 地质背景

“三江北段”东莫扎抓铅锌矿床和莫海拉亨铅锌矿床所在的青海玉树地区,地处青藏高原碰撞造山带东北部,在大地构造上夹持于金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间(图 1),其主体位居羌塘地体(Yin et al., 2000; Spurlin et al., 2005)。区内出露的地层主要为古生界和中生界,其次为新生界。古生界包括下石炭统杂多群、上石炭统加麦弄群和下二叠统开心岭群,主要分布于研究区西南部,多呈逆冲断片出露。杂多群和加麦弄群均可分为下部的碎

屑岩组和上部的碳酸盐岩组。开心岭群包括尔笛卡组、扎日根组(本区未出露)、诺日巴尔日保组和九十道班组,其中诺日巴尔日保组为一套碎屑岩石组合,九十道班组是一套碳酸盐岩地层,尔笛卡组是后 3 组同时异相的一套火山-沉积岩系,为一套海陆交互的碎屑岩建造和碳酸盐建造。中生界在区内出露广泛,为中生代盆地内发育的碎屑岩-碳酸盐岩建造,包括中三叠统结隆组、上三叠统结扎群甲丕拉组、波里拉组和巴贡组、侏罗系雁石坪群雀莫错组、布曲组和夏里组以及白垩系风火山群错居日组和洛力卡组。新生界主要为陆相盆地沉积的古近系沱沱河组和雅西错组、新近系五道梁组和曲果组以及第四系碎屑岩。作为青藏高原碰撞造山带的组成部分,玉树地区以发育新生代逆冲推覆构造系统以及相伴产生的第三纪前陆盆地为典型特征(图 1;侯增谦等 2006a; 2008; 王召林等, 2009),经历了十分复杂的发育历史,大体可划分为 3 个阶段:古特提斯阶段、新特提斯阶段和新生代碰撞造山阶段。

与碰撞造山作用相伴的地壳缩短,在高原北部和东部主要形成以逆冲推覆构造为特征的薄皮构造(图 1),卷入地层主要为三叠系、侏罗系-白垩系,推

覆或并置于第三系之上。大型逆冲推覆具有幕式冲断特征,早幕集中于 55~50 Ma 晚幕集中于 40~37 Ma,分别与青藏高原主碰撞期(65~41 Ma)和晚碰撞期(40~26 Ma)相对应(侯增谦等,2006a;2006b,2008)。逆冲推覆构造作为青藏高原东部和北部的构造变形,在兰坪、玉树、沱沱河地区十分发育,其通过一系列逆冲断层将中生代地层切割成依次叠置的构造岩片,并推覆于前陆盆地沉积地层之上,控制了高原东、北部地区贱金属硫化物矿床的形成与分布。

玉树地区的逆冲推覆构造是羌塘地体东北缘最具特色的构造样式。该推覆带呈 NW 向,沿走向向西可延至风火山地区(Wang et al.,2002;Spurlin et al.,2005;李亚林等,2006)。大规模的逆冲推覆吸收了最少 61 km 的 NE 向挤压产生的缩短(Spurlin et al.,2005),如此大规模的新生代逆冲挤压和走滑运动控制了玉树地区第三纪沉积盆地的分布格局(周江羽等,2002;Spurlin et al.,2005)。初步的区域构造研究表明,玉树-杂多地区表现为囊谦断层带(NT)以南的以石炭系为主的构造岩片向北逆冲,在上盘形成隆起带,在囊谦断层以北的结扎-下拉秀地区受到强烈挤压,形成复合褶皱冲断盆地(见侯增谦等,2008,图 4)。

2 矿床地质特征

东莫扎抓和莫海拉亨 2 个 Pb-Zn 矿床,南北相隔 25 km 左右(见侯增谦等,2008,图 4),均受逆冲断裂上盘构造岩片内的次级断裂控制,断裂平行于区域逆冲推覆构造带方向,总体上顺岩层发育,但局部可切穿地层(见侯增谦等,2008,图 7d)。下面简要说明其地质特征(详见刘英超,2009)。

东莫扎抓 Pb-Zn 矿床 目前发现矿化带 4 个,铅锌资源量在 80 万吨以上。矿区出露的地层简单,包括下-中二叠统开心岭群诺日巴尔日保组杂色硅质岩、泥岩、长石石英砂岩、杂砂岩、凝灰岩、安山岩和九十道班组灰色薄层灰岩、厚层灰岩,上三叠统结扎群甲丕拉组流纹岩、晶屑凝灰岩、泥岩、钙质泥岩、硅质岩、砂岩和波里拉组砂屑灰岩、块状灰岩,以及第四纪腐殖土、坡积物和洪积物。矿区发育逆冲或走滑性质的北西西向、北东向、北东东向 3 组断裂,以北西西向逆冲断层最为发育,是区内主干断裂,主要是诺日巴尔日保组逆冲在九十道班组、诺日巴尔

日保组逆冲在波里拉组以及九十道班组逆冲在波里拉组之上。矿化主要见于九十道班组和波里拉组中。与成矿作用有关的蚀变主要为白云石化、方解石化、黄铁矿化、硅化。矿体形态主要为似层状和透镜体,具膨大收缩现象。矿物组合简单,矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿以及极少的黄铜矿、砷黝铜矿,脉石矿物为重晶石、白云石、方解石、石英、绢云母、埃洛石和迪开石,发现干沥青。矿石结构包括他形粒状结构、胶状结构、自形粒状结构、交代结构和重结晶结构,矿石构造包括角砾状、浸染状、脉状和团块状构造。钻孔编录和室内岩相学研究反映东莫扎抓矿床的热液活动期次有 5 个阶段:①白云石化阶段,②重晶石化阶段,③多金属硫化物(黄铁矿-方铅矿-闪锌矿)阶段,④方解石化阶段,⑤粘土化阶段。其中,第③阶段为主成矿阶段。

莫海拉亨 Pb-Zn 矿床 目前亦发现矿化带 4 个。矿区出露的地层仅有下石炭统杂多群下段灰色-深灰色、紫红色长石石英砂岩、板岩夹灰岩、火山碎屑岩和上段灰色-深灰色灰岩以及古近系沱沱河组紫红色复成分砾岩、含砾粗砂岩夹中厚层石英砂岩。矿区发育北西向、北东向 2 组断层,以北西向逆冲断层最为发育,是区内主干断裂,主要是杂多群逆冲在沱沱河组之上,矿化主要见于杂多群灰岩中。与成矿作用有关的蚀变主要为白云石化、硅化、绢云母化、重晶石化、萤石化、黄铁矿化、方解石化。矿体形态亦主要为似层状和透镜体,具膨大收缩现象。矿物组合简单,矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿,脉石矿物为重晶石、萤石、白云石、方解石、石英、绢云母、埃洛石和迪开石等,并发现干沥青。矿石结构包括胶状结构(皮壳状结构、草莓状结构)、球形结构、他形粒状结构、自形、半自形粒状结构和重结晶结构,矿石构造包括浸染状、脉状、团块状和角砾状构造。钻孔编录和室内岩相学研究反映莫海拉亨矿床的热液活动期次亦有 5 个阶段:①白云石化阶段,②重晶石化阶段,③多金属硫化物(黄铁矿-方铅矿-闪锌矿)阶段,④方解石化阶段,⑤粘土化阶段。其中,第③阶段为主成矿阶段。

3 样品处理及分析方法

用于 Rb-Sr 等时线年龄测定的样品为共生矿物组合闪锌矿与方铅矿、黄铁矿与方铅矿以及单矿物闪锌矿,用于 Sm-Nd 等时线年龄测定的样品为共生

矿物组合闪锌矿和黄铁矿、方解石与萤石以及单矿物萤石。其中,东莫扎抓铅锌矿床 Rb-Sr 等时线定年样品采自 M I 矿带的 701 钻孔、1101 探槽和 2 号平硐以及 MIV 矿带的地表,而 Sm-Nd 等时线定年样品则采自 M I 矿带的 001 钻孔、701 钻孔、1101 探槽和 2 号平硐以及 MIV 矿带的地表;莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 等时线定年样品采自 M I 矿带的 33 探槽、MIII 矿带的 25 探槽以及 M IV 矿带的 16 和 30 探槽,而 Sm-Nd 等时线定年样品则采自 M I 矿带的 33 探槽、MIII 矿带的 25 和 27 探槽以及 MIV 矿带的 30 探槽。所有样品均采自主要成矿期,被测试矿物均为未风化、未蚀变样品,能够代表各个矿床的成矿年龄。将手标本粉碎到 40~80 目,在双目镜下挑选出单矿物,纯度达 99% 以上,用蒸馏水清洗,低温蒸干,然后将纯净的单矿物样品在玛瑙研钵内研磨至 200 目左右待测。所有样品的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量草测(42 件)均在国家地质实验测试中心使用等离子质谱仪器(ICP-MS)测试,在此基础上,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、Sm、Nd 含量和同位素组成测定。具体分析方法如下:

Rb-Sr 同位素分析方法:采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯,然后用英国产的 VG354 质谱仪测定,测定方法见文献[方维萱等,2002]。测定的美国 NBS987 同位素标样为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710236 \pm 7$,Sr 的全流程空白为 $(5\sim7)\times 10^{-9}\text{g}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行标准化。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 的分析误差为 $\pm 1\%$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ 。等时线年龄用 ISOPLOT(Version 2.90, 1994) 程序计算。

Sm-Nd 同位素分析方法:具体处理和分析方法同 Rb、Sr 同位素分析。测定的美国 La Jolla Nd 同位素标准为 0.511864 ± 3 ,Sm、Nd 的全流程空白为 $(5\sim7)\times 10^{-11}\text{g}$,Sm、Nd 含量的分析误差优于 0.5%。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 的分析误差为 $\pm 0.2\%$ 。等时线年龄用 ISOPLOT(Version 2.90, 1994) 程序计算。

4 分析结果

4.1 东莫扎抓铅锌矿床

单矿物闪锌矿和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿的 Rb、Sr 含量和同位素组成测定结果分别见表 1 和

表 2,得到的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图均表现出很好的线性关系(图 2、图 3)。利用 ISOPLOT 软件包计算出闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (35.015 \pm 0.034)\text{Ma}$,初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.7088072$,MSWD = 3.8(图 2);共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (34.747 \pm 0.015)\text{Ma}$, $I_{\text{Sr}} = 0.70881000$,MSWD = 7.6(图 3)。共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿的 Sm、Nd 含量和同位素组成测定结果见表 3,得到的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图表现出很好的线性关系(图 4)。利用 ISOPLOT 软件包计算出共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线年龄 $t = (35.74 \pm 0.71)\text{Ma}$,初始钐同位素组成 $I_{\text{Nd}} = 0.51232640$,MSWD = 4.6(图 4)。

4.2 莫海拉亨铅锌矿床

闪锌矿与方铅矿的 Rb、Sr 含量和同位素组成测定结果见表 4,用单矿物闪锌矿和共生矿物组合闪锌矿与方铅矿得到的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图均表现出很好的线性关系(图 5、图 6)。利用 ISOPLOT 软件包计算出闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (32.22 \pm 0.36)\text{Ma}$, $I_{\text{Sr}} = 0.70851380$,MSWD = 2.9(图 5);共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (33.949 \pm 0.022)\text{Ma}$, $I_{\text{Sr}} = 0.70851030$,MSWD = 7.2(图 6)。萤石与方解石的 Sm、Nd 含量和同位素组成测定结果见表 5,用单矿物萤石和共生矿物组

表 1 东莫扎抓铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 1 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite from the Dongmohazhua Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
ZK701-15	闪锌矿	1.968	1.382	4.294	0.710943 $\pm$ 7
DTC1101-5-1	闪锌矿	1.117	2.413	1.257	0.709432 $\pm$ 10
CMII-H63	闪锌矿	0.5129	6.656	0.2365	0.708925 $\pm$ 7
DM041-1	闪锌矿	0.5992	3.781	0.5078	0.709060 $\pm$ 6

表 2 东莫扎抓铅锌矿床黄铁矿和方铅矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic analyses of pyrite and galena from the Dongmohazhua Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
DTC1101-5-1	黄铁矿	0.8498	1.354	1.839	0.709718 $\pm$ 8
DTC1101-9-2	黄铁矿	0.9316	20.09	0.1025	0.708861 $\pm$ 6
CMII-H63	黄铁矿	0.4504	4.817	0.3718	0.708993 $\pm$ 10
DTC1101-7	黄铁矿	0.4261	2.249	0.5621	0.709087 $\pm$ 9
ZK701-12	黄铁矿	0.6813	4.306	0.4861	0.709050 $\pm$ 9
ZK701-12	方铅矿	0.6752	0.2958	6.749	0.712141 $\pm$ 8
DM041-2	方铅矿	0.3898	0.0912	5.183	0.711367 $\pm$ 7

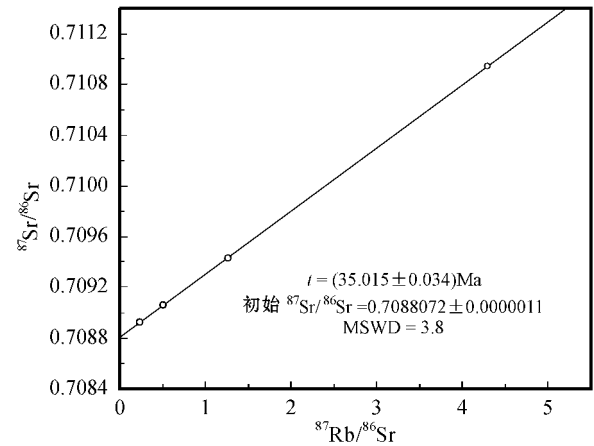


图 2 东莫扎抓铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线图
Fig. 2 Rb-Sr isochron of sphalerite from the Dongmohazhazhua Pb-Zn deposit

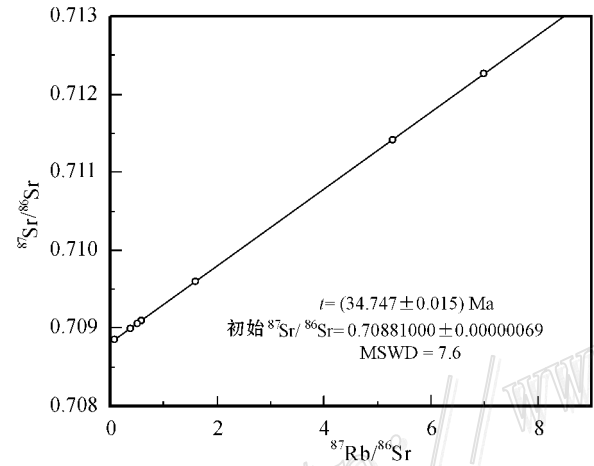


图 3 东莫扎抓铅锌矿床共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 3 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral associations pyrite and galena from the Dongmohazhazhua Pb-Zn deposit

表 3 东莫扎抓铅锌矿床闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 同位素组成
Table 3 Sm-Nd isotopic analyses of sphalerite and pyrite from the Dongmohazhazhua Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd
DTC1101-5-1	闪锌矿	0.0408	0.1749	0.1974	0.512373 ± 8
DTC1101-9-2	闪锌矿	0.0613	0.2356	0.1613	0.512363 ± 9
ZK701-15	闪锌矿	0.0368	0.1522	0.1489	0.512361 ± 5
CMII-H63	闪锌矿	0.0387	0.1581	0.1351	0.512358 ± 9
DM041-1	闪锌矿	0.0415	0.1341	0.1899	0.512371 ± 7
DM041-2	闪锌矿	0.0393	0.1216	0.2308	0.512379 ± 5
ZK001-14	闪锌矿	0.0525	0.1478	0.2172	0.512377 ± 7
DTC1101-7	黄铁矿	0.0256	0.1078	0.1409	0.512360 ± 8
ZK701-10	黄铁矿	0.0421	0.1003	0.2505	0.512386 ± 6
CMII-H63	黄铁矿	0.0235	0.1215	0.1174	0.512354 ± 8
ZK001-14	黄铁矿	0.0426	0.1409	0.1807	0.512369 ± 6

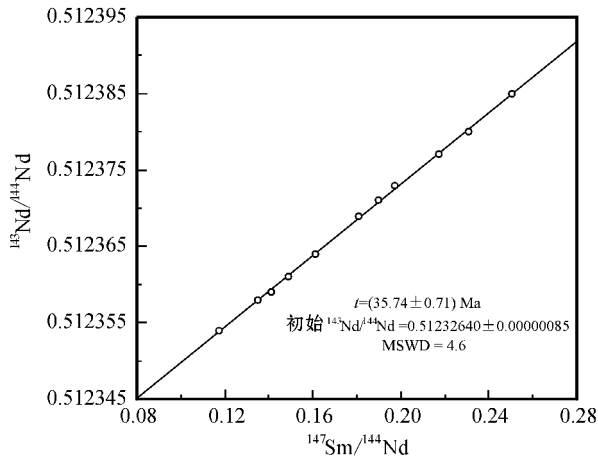


图 4 东莫扎抓铅锌矿床共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线图

Fig. 4 Sm-Nd isochron of the intergrowth mineral associations sphalerite and pyrite from the Dongmohazhazhua Pb-Zn deposit

表 4 莫海拉亨铅锌矿床闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 同位素组成
Table 4 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite and galena from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
MTC30-H29 _Z	闪锌矿	0.8512	94.95	0.0267	0.708526 ± 9
MTC25-H4	闪锌矿	0.4457	81.26	0.0163	0.708519 ± 7
MTC25-H5-4	闪锌矿	0.4326	12.82	0.1002	0.708562 ± 8
MTC30-H29 _Q	闪锌矿	3.8560	36.89	0.3306	0.708665 ± 10
MTC33-H23	方铅矿	0.9073	9.524	0.0587	0.708525 ± 8
MTC25-H9	方铅矿	0.6572	0.8543	2.258	0.709601 ± 8
MTC16-H8-2 _Z	方铅矿	1.7650	5.985	0.8684	0.708943 ± 9
MTC16-H8-4	方铅矿	0.7982	2.078	1.132	0.709062 ± 7
MTC16-H8-2 _Q	方铅矿	2.0340	1.598	3.753	0.710320 ± 8

注 Z 代表重的富集物 Q 代表轻的富集物。

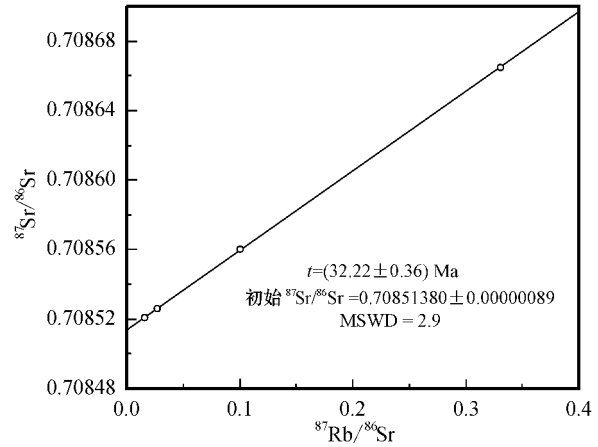


图 5 莫海拉亨铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 5 Rb-Sr isochron of sphalerite from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

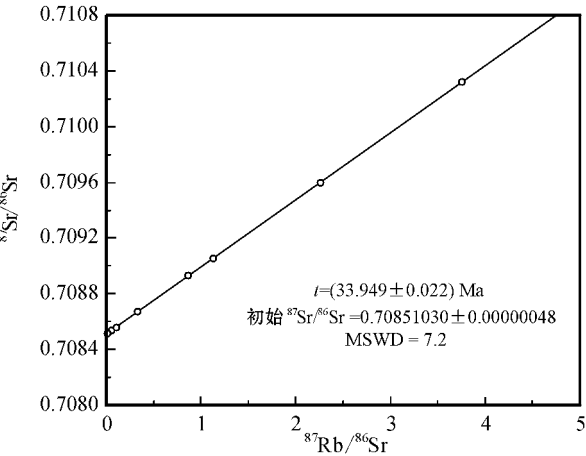


图 6 莫海拉亨铅锌矿床共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 6 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral associations sphalerite and galena from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

表 5 莫海拉亨铅锌矿床萤石和方解石 Sm-Nd 同位素组成
Table 5 Sm-Nd isotopic analyses of fluorite and calcite from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
MTC33-H13	萤石	0.0781	0.1634	0.2864	0.512421 ± 9
MTC27-H7	萤石	0.2034	0.4709	0.2569	0.512415 ± 7
MTC27-H5-2	萤石	0.0816	0.2515	0.1951	0.512401 ± 8
MTC25-H5-2	萤石	0.2206	0.3574	0.3727	0.512440 ± 6
MTC25-H5-4	萤石	0.1894	0.3402	0.3306	0.512431 ± 7
MTC33-H14-1	方解石	0.3523	1.015	0.2145	0.512405 ± 8
MTC27-H9-1	方解石	1.125	1.875	0.3923	0.512445 ± 9
MTC25-H5-2	方解石	0.2137	1.053	0.1213	0.512385 ± 8
MTC30-H5	方解石	0.5107	1.462	0.2153	0.512406 ± 8
MTC30-H37	方解石	0.7045	1.815	0.2326	0.512409 ± 6

合萤石与方解石得到的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图表现出很好的线性关系(图 7、图 8)。利用 ISO-
PLOT 软件包计算出萤石 Sm-Nd 等时线年龄 $t = (31.75 \pm 0.28) \text{ Ma}$, $I_{\text{Nd}} = 0.51236150$, $\text{MSWD} = 1.07$ (图 7);共生矿物组合萤石与方解石 Sm-Nd 等时线年龄 $t = (33.72 \pm 0.46) \text{ Ma}$, $I_{\text{Nd}} = 0.51235810$, $\text{MSWD} = 6.2$ (图 8)。从图 5 与图 6、图 7 与图 8 可看出,单矿物与共生矿物组合所得出的等时线年龄在误差范围内基本一致,起到了相互印证的效果,即可以用单矿物,也可以用矿物组合来限定成矿年龄。

5 讨论

“三江北段”青海玉树地区东莫扎抓铅锌矿床和

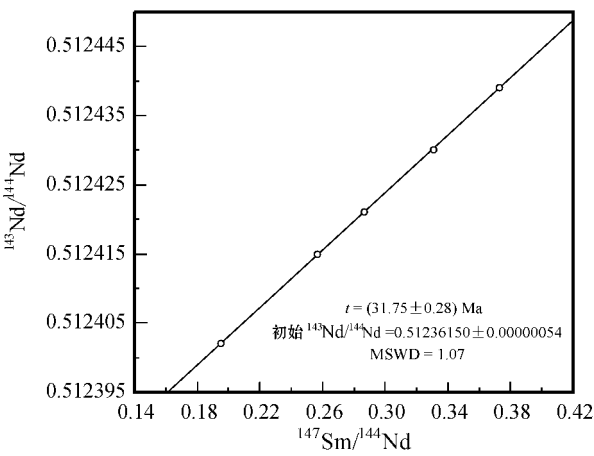


图 7 莫海拉亨铅锌矿床萤石 Sm-Nd 等时线图
Fig. 7 Sm-Nd isochron of fluorite from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

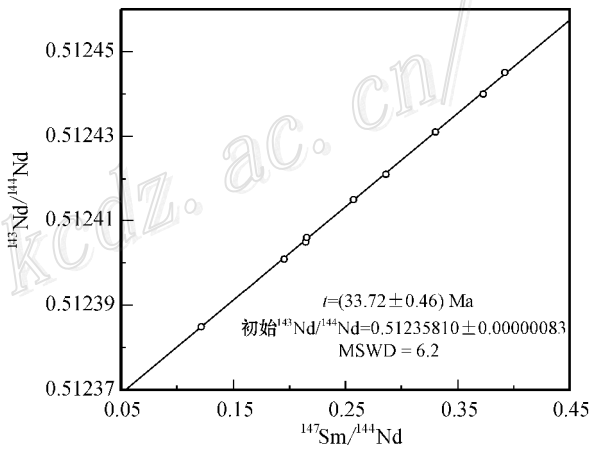


图 8 莫海拉亨铅锌矿床共生矿物组合萤石与方解石 Sm-Nd 等时线图
Fig. 8 Sm-Nd isochron of the intergrowth mineral associations fluorite and calcite from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

莫海拉亨铅锌矿床目前只处于勘探阶段,还有很多科学问题需要进一步研究,如铅锌矿化发育时限、铅锌矿化是否为同期热液流体矿化的产物、铅锌矿床产出的成矿环境和地球动力学背景以及同受逆冲推覆构造系统控制的“三江”北段与南段铅锌矿床在空间上的关系等等。本文获得的新的成矿年代学资料为解决这些问题提供了新的约束和限定。

5.1 成矿年龄

刘建明等(1998a;1998b)认为,用热液矿物组合 Rb-Sr 等时线测定热液矿床的成矿时代比较理想,由于不同矿物相具有不同的化学势,化学性质不同的

Rb 和 Sr 将发生化学分异,使同一成矿母液中沉淀出的一组共生矿物具有不同的 Rb/Sr 比值。用一组共生热液矿物开展 Rb-Sr 等时线定年,不仅符合 Rb-Sr 等时线定年的基本前提,而且还提高了 Rb-Sr 等时线的精确度。李文博等(2004b)利用 2 组共生矿物组合 Rb-Sr 等时线方法获得会泽超大型铅锌矿床的成矿时代为 $(225.1 \pm 2.9) \text{ Ma}$ 和 $(225.9 \pm 3.1) \text{ Ma}$,认为川-滇-黔成矿区内铅锌成矿作用与峨眉山玄武岩岩浆活动存在成因关系。

Sm、Nd 同为稀土元素,具有稳定性好、变化同步、不易受改造、母体衰变形成的子体容易在矿物的晶格中保存下来的特点,所以 Sm-Nd 等时线定年法也是一种较为理想的定年方法。REE 在流体体系中易与 OH^- 、 F^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 HPO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等形成络合物进行迁移,在含钙矿物沉淀时易置换 Ca^{2+} 而进入矿物晶体(赵振华,1997)。许多学者已成功利用萤石、白钨矿和电气石等含 Ca 矿物对相关矿床进行了 Sm-Nd 等时线定年(Halliday et al., 1990; Chesley et al., 1991; 1994; Eichhorn et al., 1997; Jiang et al., 2000)。方解石和萤石是矿床中常见的脉石矿物,研究表明,REE 进入方解石或萤石晶体中除了晶体溶解之外,其他过程破坏方解石或萤石稀土元素配分模式的几率很小(Zhong et al., 1995),因此,方解石和萤石都具有 Sm-Nd 等时线定年的潜力。Peng 等(2003)成功地利用 LREE 亏损型热液方解石对湘中锡矿山锑矿床进行了 Sm-Nd 等时线定年。李文博等(2004a)利用方解石 Sm-Nd 等时线获得会泽超大型铅锌矿床的成矿年龄为 $(226 \pm 15) \text{ Ma}$ 和 $(225 \pm 38) \text{ Ma}$,与其用共生矿物组合 Rb-Sr 等时线方法获得的成矿时代基本一致(李文博等, 2004b),证明利用方解石 Sm-Nd 法和共生矿物组合 Rb-Sr 法来厘定矿床成矿时代都是比较理想的。

综上所述,利用单矿物闪锌矿、萤石和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿、闪锌矿与方铅矿以及方解石与萤石,进行 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄测定,所获得的数据是可信的。 $1/\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 之间不存在线性关系,可以认为图 2、图 3、图 5 和图 6 所表现出的 4 条直线具有等时线意义,单矿物闪锌矿和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿或者闪锌矿与方铅矿的形成时代在误差范围内是基本一致的。与此相类似, $1/\text{Nd}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 之间也不存在线性关系,可以认为图 4、图 7 和图 8 所表现出的

3 条直线也具有等时线意义,单矿物萤石和共生矿物组合萤石与方解石的形成时代在误差范围内也是基本一致的。因此,不管是 Rb-Sr 法,还是 Sm-Nd 法,两者结果在误差范围内是非常一致的,起到了相互验证的效果,东莫扎抓铅锌矿床形成时代为 $(34.7 \sim 35.7) \text{ Ma}$,平均为 35 Ma ,莫海拉亨铅锌矿床形成时代为 $(31.8 \sim 33.9) \text{ Ma}$,平均为 33 Ma 。

前已述及,东莫扎抓矿区主要是诺日巴尔日保组逆冲在九十道班组、诺日巴尔日保组逆冲在波里拉组以及九十道班组逆冲在波里拉组之上。此外,在矿区南东 2 km 处还发现杂多群逆冲在沱沱河组、甲丕拉组逆冲在沱沱河组之上,说明东莫扎抓矿床的矿化时间至少晚于围岩沱沱河组的下限,即 52 Ma (李亚林等, 2006)。莫海拉亨矿区主要是杂多群逆冲在沱沱河组之上,亦说明该矿床的矿化时间至少晚于 52 Ma 。这从矿区的地层、构造的接触关系也进一步证实了笔者所做成矿年龄的可靠性。

5.2 构造控矿模式的年代学约束

“印度-亚洲主碰撞带成矿作用”973 项目组,历经 5 年系统研究,详细刻划了青藏高原新生代碰撞造山过程,认为 $65 \sim 41 \text{ Ma}$ 为以陆-陆碰撞和陡俯冲造山为特征的主碰撞期, $40 \sim 26 \text{ Ma}$ 为以陆内缓俯冲和边缘转换造山为特征的晚碰撞期, $25 \sim 0 \text{ Ma}$ 为以东西向伸展和藏南拆离为特征的后碰撞期(侯增谦等, 2006a; 2006b; 2006c)。东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床的成矿年代的测定,厘定出其成矿构造背景恰是青藏高原伴随陆内大规模走滑、逆冲推覆和大规模剪切等主要地质过程的晚碰撞期。东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床成矿时正是大型逆冲推覆晚幕($40 \sim 37 \text{ Ma}$)(侯增谦等, 2006a)刚刚结束的时候,是青藏高原东北部玉树地区走滑断裂(始于 37 Ma)(Spurlin et al., 2005)正在发生的时候,指示了成矿作用与区域逆冲推覆构造和走滑断层的密切关系。

逆冲推覆构造对青海南部铅锌、银多金属矿床的形成和分布具有重要意义(侯增谦等, 2008)。逆冲推覆构造分为根带、中带和前锋带,这些南倾的逆冲断层向深部逐渐变缓,形成统一的拆离滑脱带,成为卤水流体长距离迁移的主干通道和疏导系统(图 9a);大规模逆冲推覆不仅可以作为流体长距离迁移的动力来源,而且相应的推覆构造也是成矿流体迁移的疏导系统和金属汇聚、淀积的重要场所。流体长距离迁移是形成热液型矿床的首要条件(Oliver, 1986; Garven et al., 1997; Leach et al., 2005),而

逆冲推覆为流体长距离迁移提供了动力,大量的流体在逆冲挤压过程中得以释放和运移,流体在第三纪盆地运移的过程中,与碳酸盐岩相互作用,淋滤火山岩地层中的金属物质,形成富铅、锌的成矿流体。含矿流体通过矿区的逆冲断裂和平移断层垂向沟通网络进入东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿区,并和矿区先存的富含 H_2S 的流体储库混合,硫化物在逆断层附近碎裂带、裂隙以及溶蚀坍塌角砾形成的开放空间中沉淀形成铅锌矿床(图 9b)。

5.3 同期同源成矿作用的年代学约束

刘英超(2009)已从以下几个方面证实了东莫扎抓和莫海拉亨 2 个矿床为同期同源热液流体矿化的产物:① 2 个矿床具有相似的矿床地质特征,如:相似的围岩蚀变、矿物组合、矿石结构构造、成矿阶段和矿物生成顺序等;② 2 个矿床具有相似的成矿流体系统,如:相似的盐度范围、卤水体系(Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+ - Cl^- - SO_4^{2-} - F^-)等;③ 2 个矿床具有类似的方解石稀土元素配分模式,矿区成矿都处于弱还原环境;④ 2 个矿床具有相似的成矿流体来源,以盆

地卤水为主,大气降水为辅;⑤ 2 个矿床具有相似的 S 同位素组成 S 主要来自于细菌还原的硫酸盐或地层中一些含 S 的有机质。本次厘定东莫扎抓铅锌矿床形成于 35 Ma,莫海拉亨铅锌矿床形成于 33 Ma,两者成矿年龄相近,进一步证实 2 个矿床为同期同源热液流体矿化的产物。

5.4 “三江”南北段铅锌矿床成矿时代对比

据不完全统计,青藏高原东部和北部的狭长构造带内已发现贱金属硫化物矿床、矿点和矿化超过 100 处(侯增谦等,2006b),主要集中分布于兰坪盆地、囊谦-上拉秀盆地和沱沱河盆地(图 1),其中不乏大型-超大型矿床,如兰坪盆地的金顶巨型 Zn-Pb 矿床和白秧坪超大型 Ag-Cu-Pb-Zn 矿集区、本次研究的囊谦盆地内东莫扎抓和莫海拉亨大型远景的 Pb-Zn 矿床和沱沱河大型-超大型远景的茶曲帕查 Zn-Pb 矿床等,这些矿床均受到区域大规模逆冲推覆构造系统的控制(侯增谦等,2008)。

兰坪盆地贱金属矿床的成矿年代学研究已有一定进展,统计表明,到目前为止,所报道的兰坪盆地

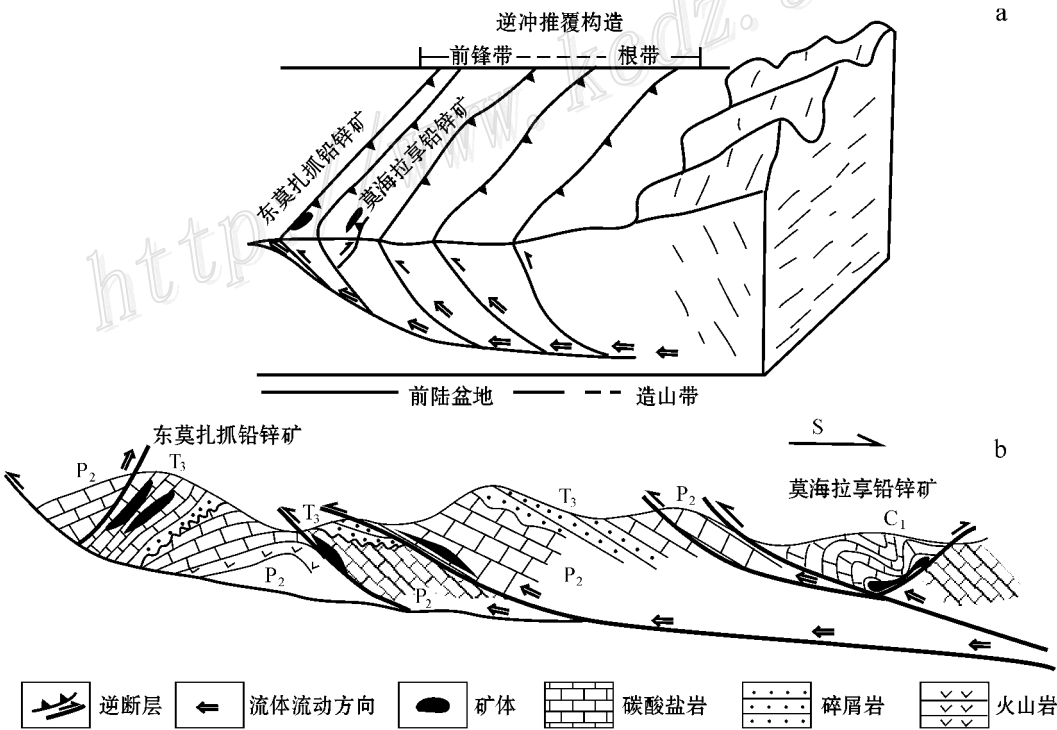


图 9 东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床成矿的构造模式

a. 东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床成矿模式图(据侯增谦等,2008 修改); b. 东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床成矿示意图

Fig. 9 A tectonic model for metallogeny of the Dongmohazhu and Mohailaheng Pb-Zn deposits

a. Mineralization model for the Dongmohazhu and Mohailaheng Pb-Zn deposits(modified from Hou et al., 2008);

b. Schematic diagram for metallogenic processes of the Dongmohazhu and Mohailaheng Pb-Zn deposits

内 Pb-Zn 矿化年龄介于 60~35 Ma 之间 (He et al., 2009)。但通过地质特征研究发现, 兰坪盆地 Pb-Zn 矿床的成矿年龄介于 40~34 Ma 之间 (He et al., 2009)。沱沱河盆地内的铅锌矿床年龄还未展开工作, 但初步研究发现, 查曲帕茶、多彩玛 Pb-Zn 矿床为后生热液铅锌矿床, 野外观察两者应该为同期成矿, 其成矿年龄必定新于其赋矿围岩 (分别为沱沱河组和五道梁组) 的下限 (分别为 52 Ma 和 23.8 Ma, 李亚林等, 2006), 即 < 23.8 Ma, 其成矿构造背景为青藏高原新生代碰撞造山的后碰撞期 (侯增谦等, 2006c)。本次研究的玉树地区囊谦盆地内的东莫扎抓铅锌矿床和莫海拉亨铅锌矿床成矿年龄分别为 35 Ma 和 33 Ma, 与上述 2 个盆地中的铅锌矿床年龄相近。对比发现, 青藏高原东部和北部狭长带内的受逆冲推覆构造控制的 Pb-Zn 矿床同为新生代构造转换期 (如兰坪盆地和囊谦盆地 Pb-Zn 矿床) 或构造伸展早期 (如沱沱河盆地 Pb-Zn 矿床) 的产物, 可见该区域上的铅锌矿床具有可比性。目前“三江”南段兰坪盆地铅锌矿床已具有一定研究程度, 其内金顶铅锌矿床是目前中国最大的铅锌矿床 (Xue et al., 2003; 2007; 曾荣等, 2005)。所以, 同兰坪盆地具有相同地质背景、区域控矿样式以及相近的成矿年代的囊谦盆地、沱沱河盆地必定具有巨大的找矿潜力, 青藏高原东部和北部受逆冲推覆控制的长达 1 000 km 的狭长地带有望成为一条巨型 Pb-Zn 成矿带 (图 1)。

东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床的成矿年龄和东部兰坪盆地内铅锌矿床的成矿年龄相近, 但是却早于西部沱沱河盆地内 Pb-Zn 矿化年龄 10 Ma 左右, 这种差异明显响应了印度陆块和青藏高原对接产生的挤压构造效应。相比“三江”北段沱沱河地区, 玉树地区和兰坪地区更处于构造转换强烈的部位, 构造形迹变形强烈且较早, 但沱沱河地区未处于印度陆块和青藏高原的正碰位置, 构造形迹变形较弱且较晚, 由此可见, 青藏高原东部和北部巨型 Pb-Zn 成矿带的确定受到青藏高原碰撞造山的强烈控制。

6 结 论

(1) 东莫扎抓矿床和莫海拉亨矿床的成矿时代分别为 35 Ma 和 33 Ma, 表明 2 个矿床的成矿时代一致, 且为同期同源成矿作用的产物。

(2) 结合区域成矿地质背景, 建立了 2 个矿床的

构造控矿模式。

(3) 玉树地区典型铅锌矿床的成矿时代与“三江”南段兰坪盆地和“三江”北段沱沱河盆地铅锌矿床的成矿时代相近, 证明青藏高原东部和北部发育一条受逆冲推覆构造控制的巨型 Pb-Zn 成矿带。

志 谢 野外工作得到了青海省地调院东莫扎抓矿区和莫海拉亨矿区所有工作人员的大力支持和帮助; 室内工作得到南京大学现代分析测试中心王琳等同志的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

References

- Brannon J C, Podosek F A and McLimans R K. 1992a. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin [J]. *Nature*, 356: 509-511.
- Brannon J C, Frank A, Podosek F A and McLimans R K. 1992b. A clue to the origin of dark and light bands of the 270 Ma Upper Mississippi Valley (UMV) zinc-lead district, southwest Wisconsin [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 24: 353.
- Brannon J C, Susan C C, Frank A, Podosek A and Kula C M. 1995. Radiometric dating of ancient calcite: Th-Pb and U-Pb isochrones for ore-stage and late-stage calcite from the central Tennessee zinc district, an Appalachian-Ouachita age MVT deposit [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 27: 118.
- Brannon J C, Susan C C, Cole Frank A P, Virginia M R, Raymond M C, Malcolm W W and Alison J B. 1996a. Th-Pb and U-Pb dating of ore-stage calcite and Paleozoic fluid flow [J]. *Science*, 271: 491-493.
- Brannon J C, Podosek F A and Cole S C. 1996b. Radiometric dating of Mississippi Valley-type ore deposits Lead-Zinc. In: Sangster D F, ed. *Carbonate-hosted lead-zinc deposit* [M]. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.* 4: 546-554.
- Chesley J T, Halliday A N and Scrivener R C. 1991. Samarium-neodymium direct dating of fluorite mineralization [J]. *Science*, 252: 949-951.
- Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K and Spry P G. 1994. Direct dating of Mississippi Valley-type mineralization: Use of Sm-Nd in fluorite [J]. *Econ. Geol.*, 89: 1192-1199.
- Christensen J N, Halliday A N, Stephen E K and Sangster D F. 1993. Further evaluation of the Rb-Sr dating of sphalerite: The Nanisivik Precambrian MVT deposit, Baffin Island, Canada [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 25: 471.
- Christensen J N, Halliday A N, Kenneth E L, Roderick N R and Stephen E K. 1995a. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 5191-5197.
- Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R and Stephen E K. 1995b. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct

- dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia[J]. *Econ. Geol.*, 90: 877-884.
- Eichhorn R H, Jagoutz E, et al. 1997. Dating scheelite stages: A strontium, Neodymium, lead approach from the Felbertal tungsten deposit, Central Alps, Austria[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 5005-5022.
- Fang W X, Hu R Z, Su W C, Xiao J F, Jiang G H and Qi L. 2002. The emplacement epoch of lamprophyre in Zhenyuan district, Guizhou Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(4): 307-3121 (in Chinese with English abstract).
- Garvern G and Raffensperger J P. 1997. Hydrogeology and geochemistry of ore genesis in sedimentary basins. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposit*[M]. New York: Wiley. 125-189.
- Halliday A N, Shepherd T J, Dicken A P, et al. 1990. Sm-Nd evidence for the age and origin of a MVT ore deposit[J]. *Nature*, 334: 54-56.
- He L Q, Song Y C, Chen K X, Hou Z Q, Yu F M, Yang Z S, Wei J Q, Li Z and Liu Y C. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.oregeorev. 2008.11.001.
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521-543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z S, Xu W Y, Mo X X, Ding L, Gao Y F, Dong F L, Li G M, Qu X M, Li G M, Zhao Z D, Jiang S H, Meng X J, Li Z Q, Qin K Z and Yang Z M. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 337-358 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Qu X M, Yang Z S, Meng X J, Li Z Q, Yang Z M, Zheng M P, Zheng Y Y, Nie F J, Gao Y F, Jiang S H and Li G M. 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 Z Q, Song Y C, Li Z, Wang Z L, Yang Z M, Yang Z S, Liu Y C, Tian S H, He L Q, Chen K X, Wang F C, Zhao C X, Xue W W and Lu H F. 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibet anorogenic belt: Geological features and tectonic mode[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 421-441 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Slack J F and Palmer M R. 2000. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia[J]. *Geology*, 28: 751-754.
- Leach D L, Premo W R, Lewchuk M T, Henry B, LeGoff M, Rouvier H, Macquar J C and Thibieroz J. 2001. Evidence for Mississippi valley-type lead-zinc mineralization in the Cevennes region, southern France, during Pyrenees Orogeny[J]. *Mineral deposits at the beginning of the 21st century*, 6 Balkema, Rotterdam: 157-160.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gatzmer J and Walters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposit: A global perspective[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 561-607.
- Li W B, Huang Z L, Wang Y L, Chen J, Han R S, Xu C, Guan T and Yin M D. 2004a. Age of the giant Huize Zn-Pb deposits determined by Sm-Nd dating of hydrothermal calcite[J]. *Geological Review*, 50(2): 189-196 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L, Chen J, Han R S, Zhang Z L and Xu C. 2004b. Rb-Sr dating of mineral assemblage from the Huize giant Zn-Pb deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24: 112-116 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Wang C S, Yi H S, Liu Z F and Li Y. 2006. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, northern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 1118-1130 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhao S R, Shen J, Jiang N and Huo W G. 1998a. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes[J]. *Advances in Geophysics*, 13(3): 46-45 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Shen J, Zhao S R, Huo W G and Jiang N. 1998b. Isotopic dating for metallic deposits and its significance[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 7(2): 107-113 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y C. 2009. Mineralization of Pb-Zn in Dongmohazhua and Mo-hailang Pb-Zn deposits, Zado area, Qinghai Province(dissertation for Master degree [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science. 1-114 (in Chinese with English abstract).
- Mao D B, Chen Z H, Zhong C T, Li Z Y and Zou X Q. 2000. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Beichagoumen Pb-Zn deposit in the North China Platform[J]. *Geochimica*, 29: 132-135 (in Chinese with English abstract).
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D, Kyle J R and Lane T E. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) ore deposits[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 417-427.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S F and Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposit[J]. *Nature*, 346: 354-357.
- Oliver J. 1986. Fluids expelled tectonically from the orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geological phenomena [J]. *Geology*, 14: 99-102.
- Peng J T, Hu R Z and Burnard P G. 2003. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer[J]. *Chem. Geol.*, 200: 129-136.
- Sangster D F. 1996. Mississippi valley-type lead-zinc deposit. In: Eckstrand O R, Sinclair W D and Thorpe R I, eds. *Geology of Canadi-*

- an mineral deposit type [M]. Geological Survey of Canada, 8: 253-261.
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, Zhou J Y and Wang J H. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syn collisional igneous activity, east-central Tibet [J]. GSA Bulletin, 117: 1293-1317.
- Wang C S, Liu Z F, Yi H S, Liu S and Zhao X X. 2002. Tertiary crustal shortening and peneplanation in the Hoh Xil region: Implications for the tectonic history of the northern Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 20(3): 211-223.
- Wang Z L, Hou Z Q, Yang Z S, Tian S H, Liu Y C, Yang Z M, Song Y C, Liu Y, Zhang H R, Wang M and Lu H F. 2009. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in Zaduo area, southern Qinghai [J]. Mineral Deposits, 28: 157-169 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Liu S W and Chen Y C. 2003. Geology and isotopic composition of Helium, Neon, Xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China [J]. Science in China (Series D), 46(8): 789-800.
- Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M and Wang D H. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, south China: A review [J]. Ore Geology Reviews, 31: 337-359.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.
- Zeng R, Xue C J, Liu S W and Li Y Q. 2005. Formation conditions of Jinding giant lead-zinc deposit [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 27(2): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Mao J W, Liu F and Li H M. 2005. K-Ar dating of altered clay minerals from Huize Pb-Zn deposit in Yunnan Province and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 24(3): 317-325 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H. 1997. The principles of microelement geochemistry [M]. Beijing: Science Press. 84-85 (in Chinese with English abstract).
- Zhong S J and Alfonso M. 1995. Partitioning of rare earth elements (REEs) between calcite and seawater solutions at 25 °C and 1 atm, and high dissolved REE concentration [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 443-453.
- Zhou J Y, Wang J H, Yin A, Spurlin M S and Horton B K. 2002. Depositional patterns and tectonic setting of Early Tertiary Basins in the NE margin of the Tibetan Plateau: A case study of the Nangqian and Xialaxiu basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1: 85-91 (in Chinese with English abstract).
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006a. 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, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 李光明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振清, 秦克章, 杨志明. 2006b. 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): 337-358.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 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, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. 矿床地质, 27(2): 421-441.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜, 陈进, 韩润生, 许成, 管涛, 伊牡丹. 2004a. 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): 189-196.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 韩润生, 张振亮, 许成, 管涛. 2004b. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究 [J]. 矿物学报, 24: 112-116.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 刘志飞, 李勇. 2006. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起 [J]. 地质学报, 80: 1118-1130.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998a. 成矿流体活动的同位素定年方法评述 [J]. 地球物理学进展, 13(3): 46-45.
- 刘建明, 沈洁, 赵善仁, 霍卫国, 姜能. 1998b. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义 [J]. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 107-113.
- 刘英超. 2009. 青海杂多东莫扎扒-莫海拉亨铅锌成矿作用(硕士学位论文) [D]. 北京: 中国地质科学院. 1-114.
- 毛德宝, 陈志宏, 钟长汀, 李子仪, 邵晓秋. 2000. 冀北北岔沟门铅锌矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄 [J]. 地球化学, 29: 132-135.
- 王召林, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 杨志明, 宋玉财, 刘焰, 张洪瑞, 王猛, 陆海峰. 2009. 青海杂多地区新生代构造特征与两种矿床的关系 [J]. 矿床地质, 28: 157-169.
- 曾荣, 薛春纪, 刘淑文, 李永强. 2005. 金顶超大型铅锌矿床成矿条件分析 [J]. 地球科学与环境学报, 27(2): 21-25.
- 张长青, 毛景文, 刘峰, 李厚民. 2005. 云南会泽铅锌矿床粘土矿物 K-Ar 测年及其地质意义 [J]. 矿床地质, 24(3): 317-325.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社. 84-85.
- 周江羽, 王江海, 尹安, Spurlin M S, Horton B K. 2002. 青藏高原早第三纪盆地充填的沉积型式及构造背景——以囊谦和下拉秀盆地为例 [J]. 沉积学报, 1: 85-91.

附中文参考文献

- 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 肖加飞, 蒋国豪, 漆亮. 2002. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代 [J]. 科学通报, 47(4): 307-