

# 青海玉树东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床与逆冲推覆构造关系的确定

## ——来自粗晶方解石 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄证据

田世洪<sup>1,2</sup>, 杨竹森<sup>1</sup>, 侯增谦<sup>3</sup>, 杨天南<sup>3</sup>, 张洪瑞<sup>3</sup>, 刘燕学<sup>3</sup>, 宋玉财<sup>3</sup>, 刘英超<sup>3</sup>,  
王银喜<sup>4</sup>, 于玉帅<sup>1</sup>, 王富春<sup>5</sup>, 薛万文<sup>5</sup>, 鲁海峰<sup>5</sup>, 张玉宝<sup>5</sup>, 朱田<sup>5</sup>, 俞长捷<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;  
3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 4. 南京大学 现代分析中心, 江苏 南京 210093; 5. 青海省地质  
调查院, 青海 西宁 810012)

**摘要:**青海玉树地区的东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床位于青藏高原金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带夹持的羌塘地体东北缘,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,但矿床与逆冲推覆构造之间的关系并不明确。野外研究表明,方解石为乳白色,结晶粗,呈不规则状、囊状,被后期矿化所穿切,形成于挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)的过渡阶段,是联系逆冲推覆构造与铅锌矿床之间的“纽带”。本文对该阶段方解石开展了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线方法定年,测定东莫扎抓铅锌矿床过渡阶段的年龄为 35.2~35.5 Ma,平均为 35.4 Ma,与其成矿时代 35 Ma 非常接近,测定莫海拉亨铅锌矿床过渡阶段的年龄为 34.0~34.6 Ma,平均为 34.3 Ma,与其成矿时代 33 Ma 也非常接近。结合区域成矿地质背景,建立了玉树地区铅锌矿床从逆冲推覆阶段到成矿阶段的构造控矿模式:伴随着印度-亚洲大陆持续碰撞,青藏高原北缘中生代构造岩片向盆地中央推覆叠置,形成逆冲推覆构造(37~40 Ma),之后处于由挤压到拉伸的松弛状态,早期造山带流体、盆地流体混合形成巨晶方解石脉(34~35 Ma),最后,流体从造山带沿拆离滑脱带长距离向前陆盆地方向运移,运移过程中淋滤围岩的金属物质,并与先期造山带流体混合,形成富铅、锌的成矿流体,通过主逆冲断裂垂向沟通,进入浅部的反冲断层形成铅锌矿床(33~35 Ma)。

**关键词:** Rb-Sr 等时线; Sm-Nd 等时线; 粗晶方解石; 逆冲推覆构造; 构造控矿模式; 青海玉树东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床

中图分类号: P597+.3; P578.6+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0475-15

## Confirmation of connection between Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits and thrust nappe system in Yushu area, southern Qinghai: evidence from Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of macrocrystalline calcite

TIAN Shi-hong<sup>1,2</sup>, YANG Zhu-sen<sup>1</sup>, HOU Zeng-qian<sup>3</sup>, YANG Tian-nan<sup>3</sup>, ZHANG Hong-rui<sup>3</sup>,  
LIU Yan-xue<sup>3</sup>, SONG Yu-cai<sup>3</sup>, LIU Ying-chao<sup>3</sup>, WANG Yin-xi<sup>4</sup>, YU Yu-shuai<sup>1</sup>, WANG Fu-chun<sup>5</sup>,  
XUE Wan-wen<sup>5</sup>, LU Hai-feng<sup>5</sup>, ZHANG Yu-bao<sup>5</sup>, ZHU Tian<sup>5</sup> and YU Chang-jie<sup>5</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Center of Modern Analysis, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 5. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, China)

收稿日期: 2011-03-02; 修订日期: 2011-04-14

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAB01A08); 国土资源大调查资助项目(1212010818096); 国家 973 资助项目(2011CB403104, 2009CB421007 和 2009CB421008); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U09336051)

作者简介: 田世洪(1973-), 男, 研究员, 主要从事矿床学和同位素地球化学研究工作, E-mail: s. h. tian@163.com.

**Abstract:** Located in the northeast margin of Qiangtang terrane between Jinshajiang suture zone and Bangonghu-Nujiang suture zone, the Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits in Yushu area of Qinghai Province are typical Pb-Zn deposits in the Cu-Pb-Zn polymetallic mineralization belt within the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area. Although these Pb-Zn deposits are in the front belt of Yushu thrust nappe system, the connection between Pb-Zn ore deposits and thrust nappe system remain unclear. Field investigations show that calcite is milk white in color, macrocrystalline, irregular and sack-like in form and is intersected by late mineralization. It was formed during the transitional stage from the compression stage (thrust nappe stage) to the extension stage (mineralization stage) and can be regarded as the link between Pb-Zn ore deposits and the thrust nappe system. Formation ages of the transitional stage in the Dongmohazhua and Mohailaheng ore districts, determined by both Rb-Sr and Sm-Nd isochron methods for calcite, are 35.2~35.5 Ma with an average of 35.4 Ma and 34.0~34.6 Ma with an average of 34.3 Ma, respectively. Formation ages of such a transitional stage are synchronous with Pb-Zn mineralization epoch (35 Ma and 33 Ma, respectively). In combination with regional mineralization geological setting, the authors established a tentative tectonic model for metallogeny of the Pb-Zn deposits from the thrust nappe stage to the mineralization stage in Yushu area, i. e., India-Asian collision led to the lifting of the orogenic belt relative to the Tertiary foreland basins in the northern margins of the Qinghai-Tibetan plateau, and strong compression resulted in the thrusting of these basins (37~40 Ma). During the transitional stage from the compression stage to the extension stage (34~35 Ma), the mixing of early orogenic fluid and basin fluid resulted in the formation of macrocrystalline calcite. At last, fluids generated from the orogen migrated laterally along gently-dipping detachment faults of the thrust systems toward the basins and evolved into Pb-Zn ore-forming fluids through the interaction with country rocks and the mixture of early orogenic fluid. The ore-forming fluids migrated vertically along major thrust faults and finally accumulated in the back thrust induced by thrust-nappe structures at shallow levels to form Pb-Zn ore deposits.

**Key words:** Rb-Sr isochron; Sm-Nd isochron; calcite; thrust nappe system; tectonic model; Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits in Yushu area, Qinghai Province

在世界范围内,业已发现的与岩浆活动无关并以沉积岩为容矿岩石的贱金属硫化物矿床包括 4 种主要类型: 喷流-沉积型(Sedex 型)Pb-Zn 矿床、密西西比河谷型(MVT 型)Pb-Zn 矿床、砂岩型(SST)Pb-Zn 矿床和砂岩型(SSC)Cu 矿床,这 4 类矿床均是盆地演化过程中盆地流体-热液活动的产物(Misra, 2000)。侯增谦等(2008)详细地总结了这 4 类矿床的总体特征,认为欧美学者虽然曾对这些矿床进行过深入系统的研究,相继建立了其描述模型和成因模型,并有效地指导了贱金属矿床的勘查实践,但是这 4 种矿床模式并不能涵盖青藏高原东部和北部许多重要的喜马拉雅期贱金属硫化物矿床的成矿模式,如滇西金顶巨型 Pb-Zn 矿床、白秧坪超大型 Ag-Cu-Pb-Zn 矿集区、金满中型 Cu 矿床、青海玉树东莫扎扎 Pb-Zn 和莫海拉亨 Pb-Zn 矿床等。这些矿床产于碰撞造山带环境,明显受大型逆冲推覆构造控制,侯增谦等(2008)认为青藏高原东-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)。

值得指出的是,尽管 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床空间上与逆冲推覆构造相伴,但要证明其成矿作用受新生代逆冲推覆构造控制,两者的形成时代必须相一致或者在时间上有连续性,因此需要从定年的角度来进一步厘定构造与成矿的关系。前人已厘定了相关矿床的成矿年龄,比如,兰坪盆地金顶巨型 Pb-Zn 矿床和白秧坪超大型 Ag-Cu-Pb-Zn 矿床的成矿年龄介于 40~34 Ma 之间(地层与构造限制,He *et al.*, 2009),兰坪盆地热液脉型铜矿床形成于 48~49 Ma (Re-Os 法,王光辉等,2009),玉树地区东莫扎扎和莫海拉亨大型 Pb-Zn 矿床的成矿年龄分别为 35 Ma 和 33 Ma (Rb-Sr 和 Sm-Nd 法,田世洪等,2009),沱沱河盆地茶曲帕查 Pb-Zn 矿床的成矿年龄为 23~20 Ma (地层与矿赋存关系限制,宋玉财,2009)。对于青藏高原东北缘的玉树-囊谦地区逆冲推覆的发育时限,Spurlin 等(2005)根据覆盖在逆冲断层上的火山岩的年龄,提出大型逆冲推覆具有幕式冲断特征,早幕集

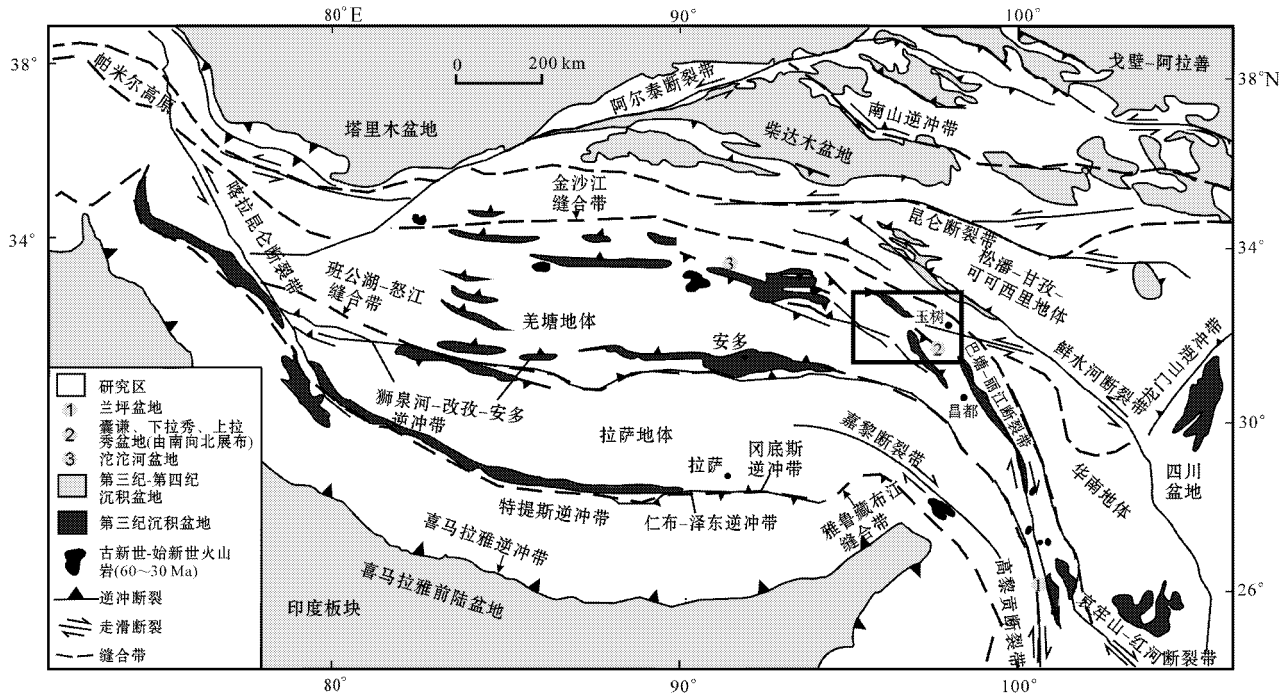


图 1 青藏高原大地构造简图及研究区位置 据 Spurlin 等(2005)、侯增谦等(2008)修改

Fig. 1 Sketch tectonic map of the Tibetan collision belt and locations of the study zones(modified after Spurlin et al., 2005; Hou Zengqian et al., 2008)

中于 55~50 Ma, 晚幕集中于 40~37 Ma。因此,要理解这条巨型成矿带的形成发育机制,查明这些矿床的成因类型,构建其相应的成矿模型和勘查模型,精确定逆冲推覆构造与成矿的关系则成为迫切需要解决的问题。

为了限定逆冲推覆与成矿之间的关系,本文选择了“三江”北段青海玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨 Pb-Zn 矿区由挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)过渡阶段形成的方解石,对其进行 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄测定,用以探讨和限定成矿与构造的关系。

### 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北缘,东南侧为拉萨地体,北东侧包括松潘-甘孜地体和扬子(华南)地体(Yin and Harrison, 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。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措组、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)。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,推覆或置于第三系之上(图 1)。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,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(图1)。

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

覆吸收了至少 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(图2)。

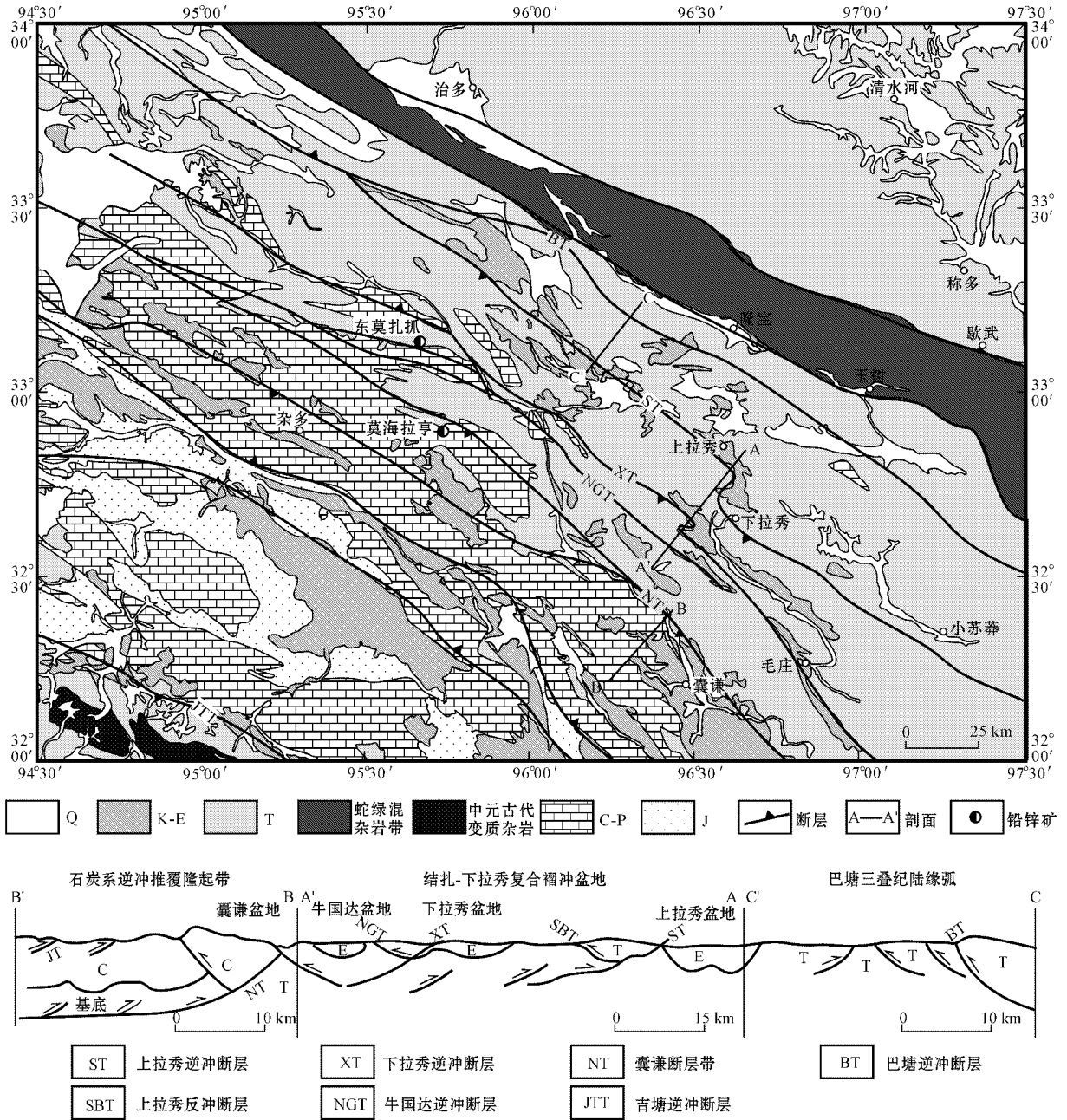


图2 玉树地区地质图及逆冲推覆构造平面图(侯增谦等 2008;王召林等 2009)

Fig. 2 Geological map of Yushu area with thrust nappe systems (after Hou Zengqian *et al.*, 2008; Wang Zhaolin *et al.*, 2009)

王召林等(2009)根据推覆构造带纵向上不同部位构造变形特点与构造组合样式特征,将玉树地区逆冲推覆构造带在逆冲方向上由南向北分为根带、中带和前锋带,各带之间以主逆冲断裂相隔,即根带与中带之间为吉塘逆冲断层,中带与前峰带之间为囊谦逆冲断层(图2)。

## 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,下面简要说明两个矿床的地质特征。

### 2.1 东莫扎抓 Pb-Zn 矿床

矿区出露的地层包括中下二叠统九十道班组灰岩、上二叠统那益雄组火山碎屑岩、上三叠统结扎群甲丕拉组紫红色砾岩夹火山碎屑岩、上三叠统结扎群波里拉组纹层状碎屑灰岩以及第四纪腐殖土、坡积物和洪积物(图3)。九十道班组主要分布在矿区中南部,下部为厚层块状灰岩(含硅质团块),上部见一层薄层灰岩夹硅质岩,向上过渡到那益雄组。

那益雄组为一套成熟度较低的碎屑岩,局部夹中基性火山岩,整合覆盖在九十道班组之上,被三叠纪甲丕拉组和波里拉组不整合覆盖。碎屑岩多呈灰绿色、紫红色,岩性主要有含砾杂砂岩、长石砂岩、凝灰质粉砂岩、泥岩、生物碎屑灰岩。在矿区西北部,靠近 MII 和 MIII 矿化带处,多为安山岩、凝灰岩、集块岩;矿区西南部的含砾杂砂岩中含有砾屑灰岩透镜体,厚层状,砾屑多泥质、钙质。甲丕拉组主要呈狭窄条带状,不整合于二叠系之上,被波里拉组整合覆盖。底部为紫红色砾岩,砾石成分有石英细砂岩、灰岩,局部见岩屑凝灰岩、流纹斑岩等中酸性火山岩。波里拉组砂屑灰岩分布在矿区中部,整合在甲丕拉组之上。

如图3所示,东莫扎抓矿区最显著的构造形迹为位于矿区北部、向北突出的弧形 F<sub>1</sub> 逆冲断层,主要为三叠系向南逆冲至二叠系之上。断层表现为多个断面叠瓦状排布(图4a),主断层面较平直,倾角为 40°~50°,为高角度逆冲断层,发育 3~5 m 的破碎角砾岩带,角砾定向明显,角砾成分混杂,有砂质、泥

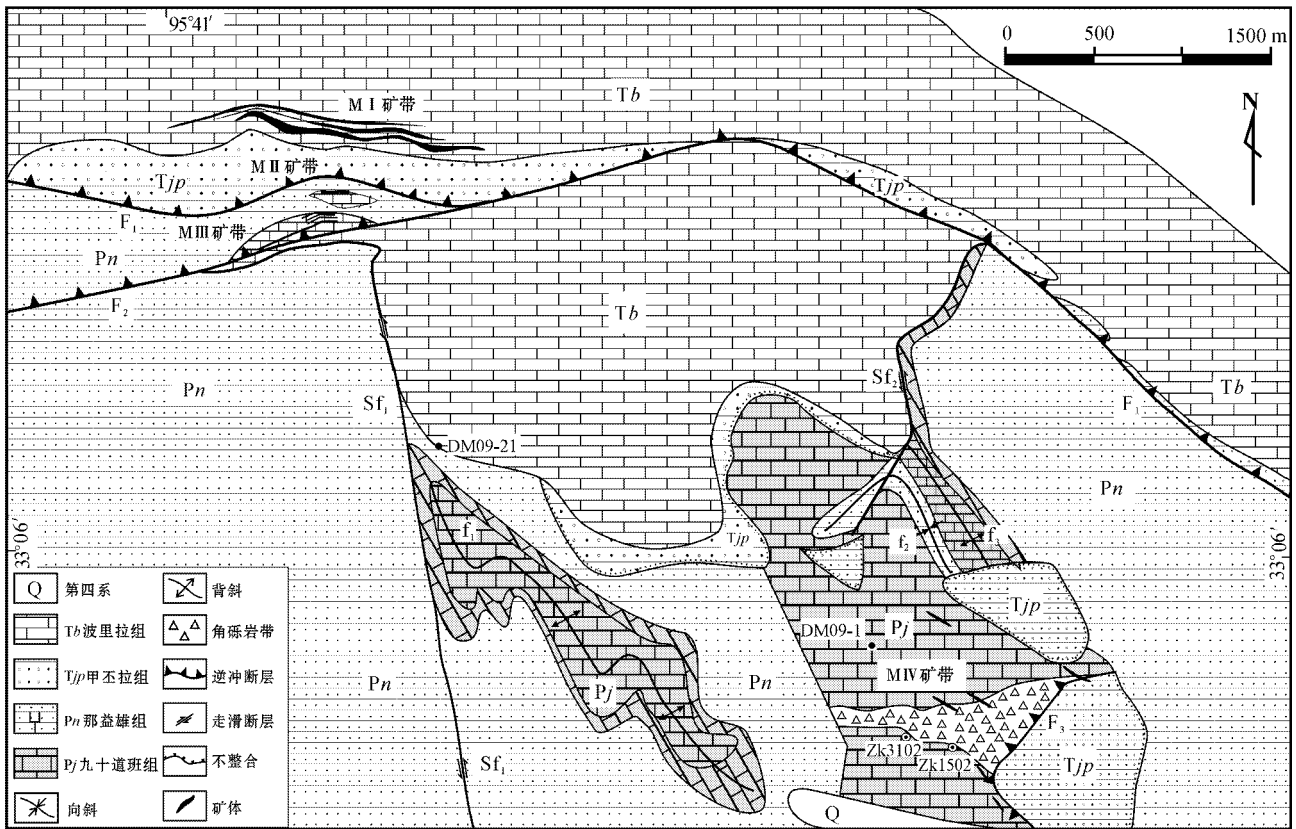


图 3 玉树地区东莫扎抓矿区地质图[据张洪瑞(2010)修改]

Fig. 3 Geological map of the Dongmozhazhua ore district in Yushu area (modified after Zhang Hongrui, 2010)

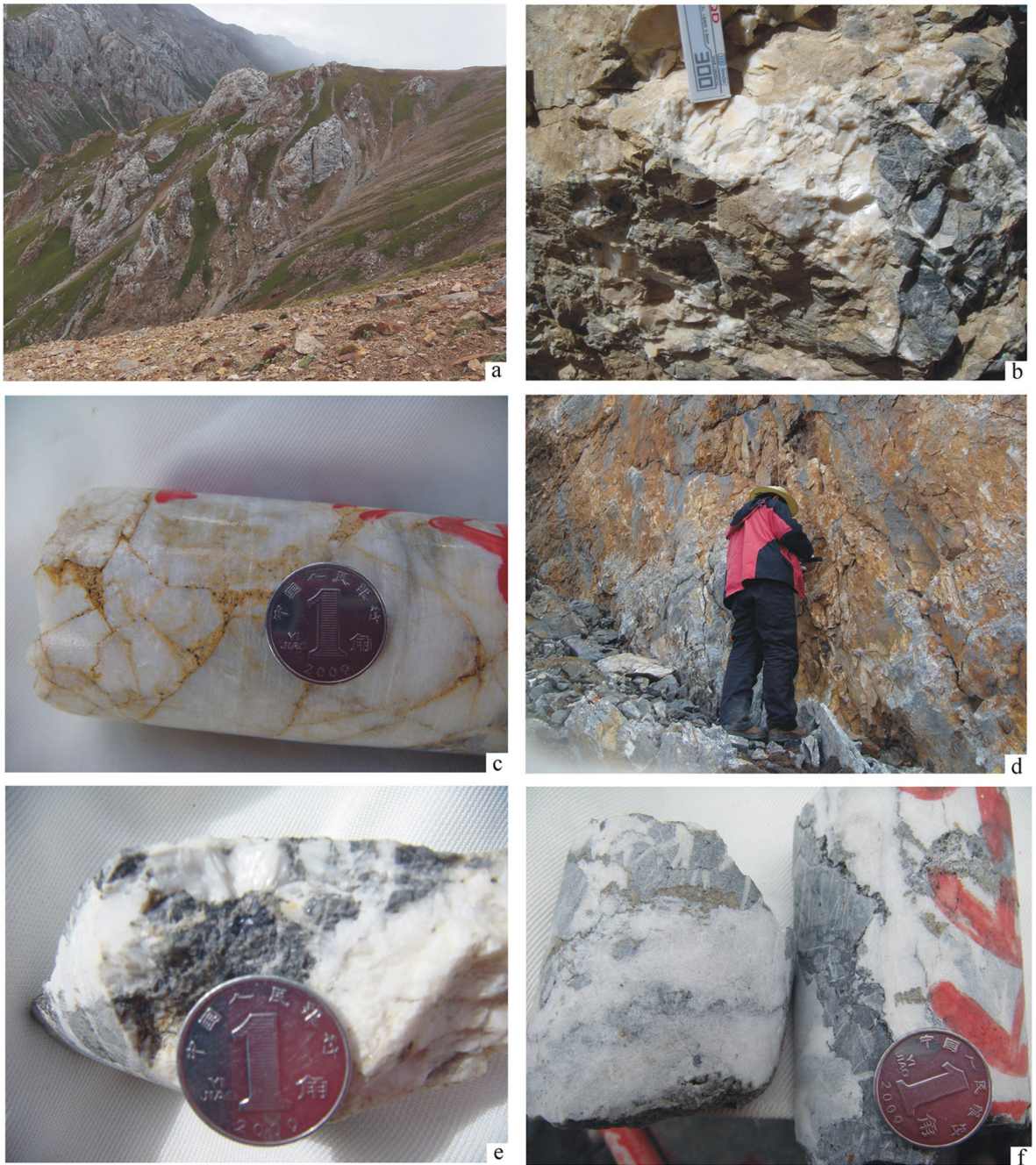


图4 玉树地区逆冲推覆构造和巨晶方解石

Fig. 4 Thrust nappe systems in Yushu area and macrocrystalline calcite

a—东莫扎抓矿区逆冲推覆构造,其内产有巨晶方解石团块;b—东莫扎抓矿区不规则状、囊状巨晶方解石胶结灰岩角砾;c—东莫扎抓矿区巨晶方解石被后期矿化穿切;d、e—莫海拉亨矿区不规则状方解石胶结灰岩角砾;f—莫海拉亨矿区巨晶方解石被后期矿化穿切  
a—thrust nappe system with macrocrystalline calcite in the Dongmohazhazhua ore district; b—irregular, sack-like calcite cementing limestone breccia in the Dongmohazhazhua ore district; c—macrocrystalline calcite penetrated by late mineralization in the Dongmohazhazhua ore district; d, e—irregular calcite cementing limestone breccia in the Mohailaheng ore district; f—macrocrystalline calcite penetrated by late mineralization in the Mohailaheng ore district

质、钙质等,胶结物为方解石(图4b~c)。方解石为乳白色,结晶粗,呈不规则状、囊状(图4b),被后期矿化穿切(图4c),明显区别于逆冲推覆阶段形成的雁

列状、脉状细粒方解石细脉,形成于从挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)过渡阶段,是联系逆冲推覆构造与铅锌矿床之间的“纽带”。

矿区地质勘查结果表明,铅锌矿主要发育在逆冲断层上盘的次级裂隙中。逆断层上盘为晚三叠世甲丕拉组和波里拉组,上盘岩层整体向北倾,倾角从 $20^{\circ}$ 到 $76^{\circ}$ 不等。断层下盘地层变形明显比上盘复杂,发育有 $F_1$ 褶皱、 $F_2$ 逆断层(那益雄组泥沙质碎屑岩和灰岩透镜体逆冲至火山质碎屑岩之上)、 $F_3$ 小型逆冲断层(二叠纪九十道班组灰岩逆冲到三叠纪甲丕拉组碎屑岩之上)、 $Sf_1$ 走滑断层、 $Sf_2$ 走滑断层、构造角砾岩带(图3)。

目前发现矿化带4个,铅锌资源量在80万吨以上。其中MⅠ矿化带条带状发育于 $F_1$ 主逆冲断层上盘的上三叠统结扎群波里拉组灰岩中(图3),长约8 km,宽约20~300 m,是矿区中最具规模的矿化带之一。矿化带倾向 $10^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$ ,倾角 $40^{\circ}$ ~ $55^{\circ}$ ,产状与地层产状基本一致,具层控特点,也与 $F_1$ 逆冲断层主断面基本平行。MⅡ和MⅢ矿化带位于 $F_2$ 逆断层上盘的那益雄组灰岩中。两个矿化带地表出露面积都较小。MⅡ和MⅢ矿化带东西条带状走向,长大于400 m,宽约50~120 m。MⅣ矿化带位于矿区东南部的九十道班组灰岩中,铅锌矿体在地表分布不稳定,断续呈串珠状。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、重晶石化、硅化。矿体形态主要为似层状和透镜状,具膨大缩小现象。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,并发现有干沥青。矿石结构包括他形粒状结构、胶状结构、自形粒状结构和交代结构;矿石构造包括角砾状、浸染状、脉状、团块状和重结晶构造。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(刘英超等,2011):①白云石化阶段,②多金属硫化物(黄铁矿-方铅矿-闪锌矿)阶段,③重晶石硫化物化阶段,④方解石化阶段,⑤粘土化阶段。其中第②阶段为主成矿阶段。

## 2.2 莫海拉亨 Pb-Zn 矿床

莫海拉亨矿区主要出露两套地层系统:早石炭世杂多群和始新世沱沱河组(图5)。杂多群主要为碳酸盐岩,夹少量碎屑岩(长石石英砂岩、粉砂质砂岩、炭质页岩)。始新世沱沱河组主要分布在矿区西南,为紫红色、灰绿色砾岩、含砾砂岩,夹细砂岩、含砾泥岩、粉砂质页岩。北西-南东向延伸的逆冲断层将莫海拉亨矿区划分为两个部分:南部(逆冲断层下盘)为沱沱河组砾岩、泥岩,北部(逆冲断层上盘)为

杂多群碳酸盐岩、碎屑岩。

如图5所示, $F_1$ 逆冲断层为矿区最显著的构造形迹,分隔了矿区两套地层系统,造成石炭纪地层由北向南逆冲至始新世沱沱河组之上,矿化主要见于杂多群灰岩中。断层带总体北西-南东向延伸,沿断层走向断层面有起伏变化。野外观察表明,逆冲造成的断层破碎带宽度 $>50$  m,由构造角砾岩组成,角砾大小不一,棱角明显,钙泥质胶结物中含大量黄铁矿、褐铁矿、方解石(图4d~f)。与东莫扎抓矿床一样,方解石也为乳白色,结晶粗,呈不规则状、囊状(图4d~f),形成于从挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)的过渡阶段。 $F_1$ 断层下盘沱沱河组砾岩呈厚层-块状,靠近逆冲断层产状明显变陡,发育压性劈理,硅质砾石也有被压扁的现象,说明受逆冲作用影响明显。 $F_1$ 断层上盘宏观构造格局表现为“背向相间”的褶皱样式,叠加条带状破碎。褶皱主要由 $f_1$ 向斜和 $f_2$ 背斜组成。

莫海拉亨矿区亦发现有4条矿化带,MⅠ矿带中圈定锌矿体1个,MⅢ矿带中圈定铅锌矿体1个,MⅣ矿带中圈定铅锌矿体3个。其中以MⅠ矿带1号体最具规模,长约1800 m,平均厚度7.18 m,矿体呈北西-南东向展布,具分枝复合、局部膨大等现象。矿体形态变化较大,与破碎灰岩共生。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状,具膨大缩小现象。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,并发现有干沥青。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;矿石构造包括浸染状、脉状、团块状、重结晶和角砾状构造。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多金属硫化物(黄铁矿-方铅矿-闪锌矿)阶段,③重晶石硫化物阶段,④方解石化阶段,⑤粘土化阶段。其中第②阶段为主成矿阶段。

## 3 样品处理与分析方法

用于Rb-Sr和Sm-Nd等时线年龄测定的样品均为从挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)的过渡阶段形成的粗晶方解石。其中,东莫扎抓铅锌矿床采

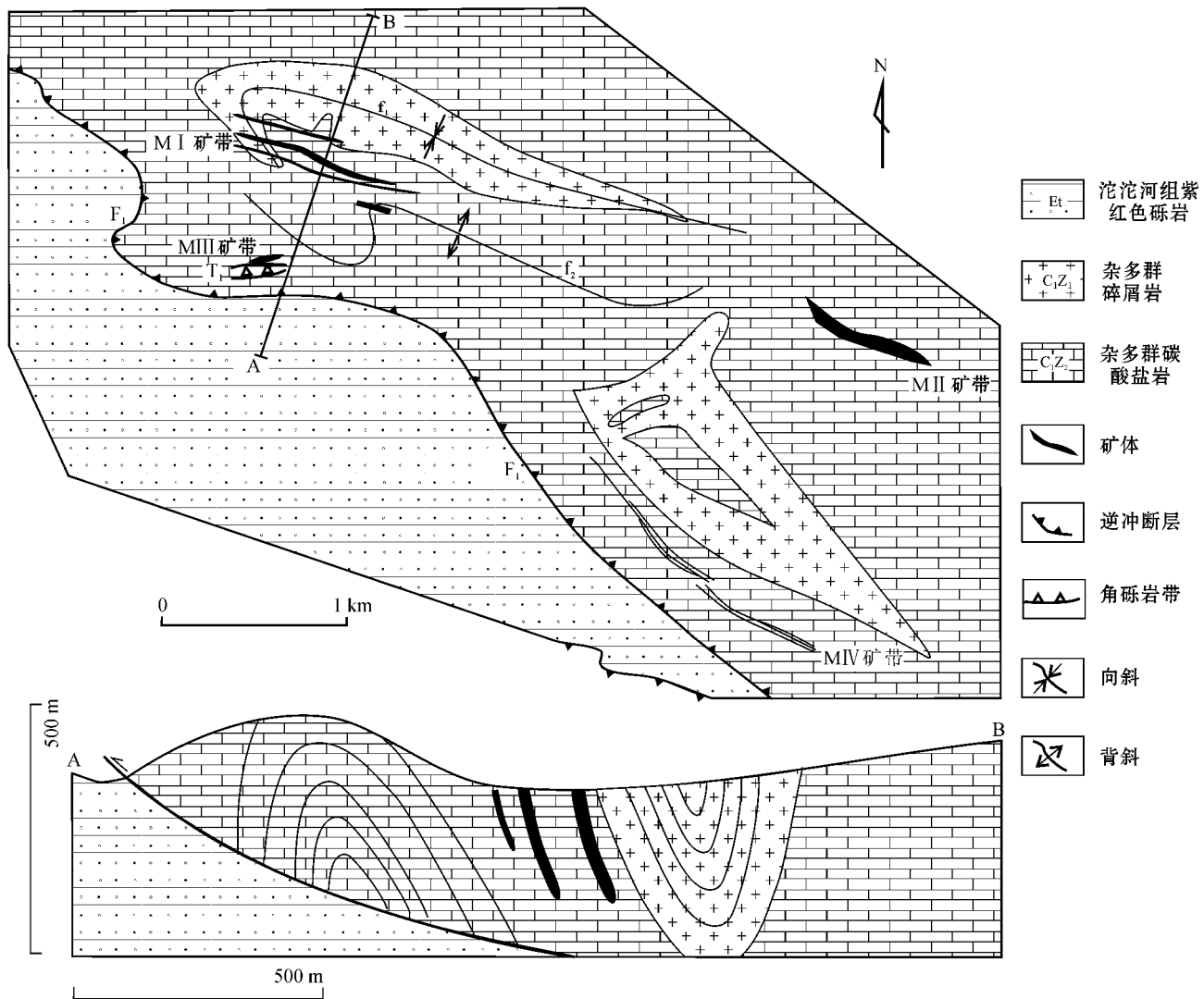


图5 玉树地区莫海拉亨矿区地质图[据张洪瑞(2010)修改]

Fig. 5 Geological map of the Mohailaheng ore deposit in Yushu area(modified after Zhang Hongrui, 2010)

自1502钻孔、3102钻孔和MIV矿化带地表,共6件样品,而莫海拉亨铅锌矿床采自ZK10302钻孔,共8件样品,具体采样位置见图3和图5。东莫扎抓铅锌矿床和莫海拉亨铅锌矿床成矿年龄已发表,详细资料见田世洪等(2009)。将手标本粉碎到40~80目,在双目镜下挑选出方解石,纯度达99%以上,用蒸馏水清洗,低温蒸干,然后将纯净的方解石样品在玛瑙研钵内研磨至200目左右待测。所有样品在南京大学现代分析中心使用ICP-MS仪器先草测Rb、Sr、Sm、Nd含量,以选定用于定年的样品,然后在其同位素分析室进行Rb、Sr、Sm、Nd含量和同位素组成精确测定。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 $(5\sim 7) \times 10^{-9}\text{g}$ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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(Ludwing, 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 $0.511864 \pm 3$ ,Sm、Nd的全流程空白为 $(5\sim 7) \times 10^{-11}\text{g}$ ,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 (Ludwing, 1994) 程序计算。

## 4 分析结果

### 4.1 东莫扎抓铅锌矿床

过渡阶段粗晶方解石、成矿期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见表 1, 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 6)。利用 ISOPLOT 软件包计算出方解石 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 35.2 \pm 2.6$  Ma, 初始锶同位素组成  $I_{\text{Sr}} = 0.70889$ , MSWD = 3.0 (图 6a); 闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 35.015 \pm 0.034$  Ma, 初始锶同位素组成  $I_{\text{Sr}} = 0.7088072$ , MSWD = 3.8 (图 6b); 共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 34.747 \pm 0.015$  Ma,  $I_{\text{Sr}} = 0.70881000$ , MSWD = 7.6 (图 6c)。过渡阶段粗晶方解石、成矿期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 2, 得到的

表 1 东莫扎抓铅锌矿床粗晶方解石、闪锌矿、黄铁矿和方铅矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 1 Rb-Sr isotopic analyses of macrocrystalline calcite, sphalerite, pyrite and galena from the Dongmozhazhua

Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	$w_{\text{B}}/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
		Rb	Sr		
过渡阶段 (图 6a)					
ZK1502-1	方解石	47.95	19.62	7.213	0.712533 ± 9
ZK1502-25	方解石	16.73	23.58	2.169	0.709932 ± 7
ZK3102-34	方解石	2.549	51.75	0.1485	0.709109 ± 6
DM09-1-1	方解石	17.37	58.95	0.9042	0.709292 ± 8
DM09-1-2	方解石	0.2408	73.89	0.0115	0.708841 ± 7
DM09-21-1	方解石	38.71	22.49	5.256	0.711493 ± 9
成矿期 (田世洪等 2009) 图 6b					
ZK701-15	闪锌矿	1.968	1.382	4.294	0.710943 ± 7
DTC1101-5-1	闪锌矿	1.117	2.413	1.257	0.709432 ± 10
CMII-H63	闪锌矿	0.5129	6.656	0.2365	0.708925 ± 7
DM041-1	闪锌矿	0.5992	3.781	0.5078	0.709060 ± 6
成矿期 (田世洪等 2009) 图 6c					
DTC1101-5-1	黄铁矿	0.8498	1.354	1.839	0.709718 ± 8
DTC1101-9-2	黄铁矿	0.9316	20.09	0.1025	0.708861 ± 6
CMII-H63	黄铁矿	0.4504	4.817	0.3718	0.708993 ± 10
DTC1101-7	黄铁矿	0.4261	2.249	0.5621	0.709087 ± 9
ZK701-12	黄铁矿	0.6813	4.306	0.4861	0.709050 ± 9
ZK701-12	方铅矿	0.6752	0.2958	6.749	0.712141 ± 8
DM041-2	方铅矿	0.3898	0.0912	5.183	0.711367 ± 7

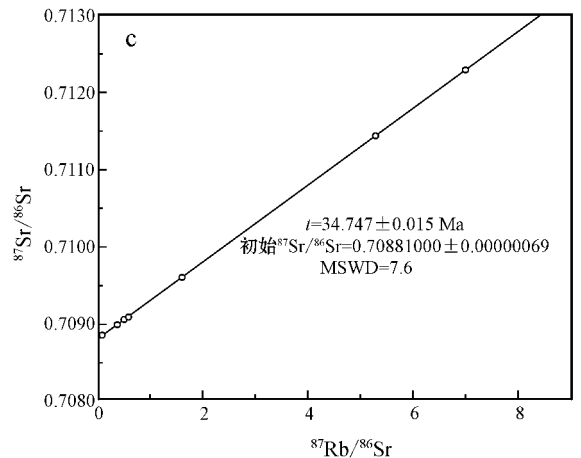
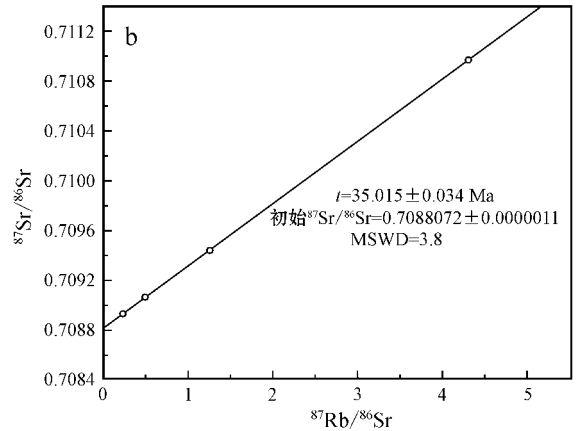
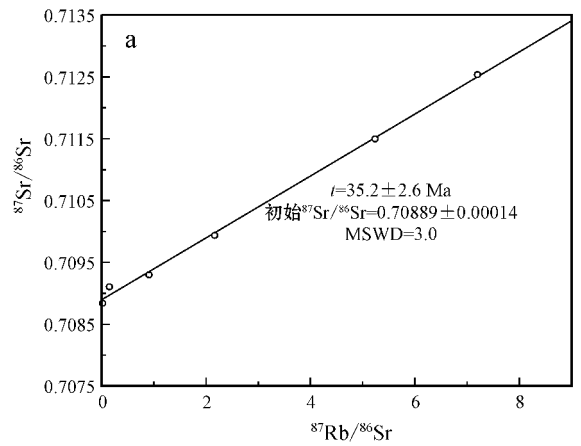


图 6 东莫扎抓铅锌矿床粗晶方解石 (a)、闪锌矿 (b) 和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 (c) Rb-Sr 等时线图解  
Fig. 6 Rb-Sr isochron of macrocrystalline calcite (a), sphalerite (b), and paragenetic mineral association pyrite and galena (c) from the Dongmozhazhua Pb-Zn deposit

$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  图表现出很好的线性关系 (图 7)。利用 ISOPLOT 软件包计算出方解石 Sm-Nd 等时线年龄  $t = 35.5 \pm 4.8$  Ma, 初始钆同位素组成  $I_{\text{Nd}} = 0.512331$ , MSWD = 1.4 (图 7a); 共生矿物组

表2 东莫扎抓铅锌矿床粗晶方解石、闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Sm-Nd isotopic analyses of macrocrystalline calcite, sphalerite and pyrite from the Dongmohazhua Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	$w_p/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
		Sm	Nd		
过渡阶段 图 7a					
ZK1502-1	方解石	0.094 8	0.125 7	0.453 1	0.512 434 ± 8
ZK1502-25	方解石	0.184 3	0.113 6	0.984 7	0.512 537 ± 6
ZK3102-34	方解石	0.069 4	0.214 5	0.209 4	0.512 399 ± 5
DM09-1-1	方解石	0.133 4	1.207	0.067 2	0.512 319 ± 8
DM09-1-2	方解石	0.292 5	1.182	0.156 1	0.512 389 ± 9
DM09-21-1	方解石	0.791 1	0.319 6	1.503	0.512 692 ± 7
成矿期 (田世洪等 2009) 图 7b					
DTC1101-5-1	闪锌矿	0.040 8	0.174 9	0.197 4	0.512 373 ± 8
DTC1101-9-2	闪锌矿	0.061 3	0.235 6	0.161 3	0.512 363 ± 9
ZK701-15	闪锌矿	0.036 8	0.152 2	0.148 9	0.512 361 ± 5
CMII-H63	闪锌矿	0.038 7	0.158 1	0.135 1	0.512 358 ± 9
DM041-1	闪锌矿	0.041 5	0.134 1	0.189 9	0.512 371 ± 7
DM041-2	闪锌矿	0.039 3	0.121 6	0.230 8	0.512 379 ± 5
ZK001-14	闪锌矿	0.052 5	0.147 8	0.217 2	0.512 377 ± 7
DTC1101-7	黄铁矿	0.025 6	0.107 8	0.140 9	0.512 360 ± 8
ZK701-10	黄铁矿	0.042 1	0.100 3	0.250 5	0.512 386 ± 6
CMII-H63	黄铁矿	0.023 5	0.121 5	0.117 4	0.512 354 ± 8
ZK001-14	黄铁矿	0.042 6	0.140 9	0.180 7	0.512 369 ± 6

合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线年龄  $t = 35.74 \pm 0.71$  Ma, 初始钕同位素组成  $I_{\text{Nd}} = 0.512 326 40$ , MSWD = 4.6 (图 7b)。

#### 4.2 莫海拉亨铅锌矿床

过渡阶段粗晶方解石、成矿期闪锌矿与方铅矿的 Rb、Sr 含量和同位素组成测定结果见表 3, 用单矿

物方解石、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 8)。利用 ISOPLOT 软件包计算出方解石 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 34.0 \pm 1.7$  Ma,  $I_{\text{Sr}} = 0.708 90$ , MSWD = 2.5 (图 8a); 闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 32.22 \pm 0.36$  Ma,  $I_{\text{Sr}} = 0.708 513 80$ , MSWD = 2.9 (图 8b); 共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄  $t = 33.949 \pm 0.022$  Ma,  $I_{\text{Sr}} = 0.708 510 30$ , MSWD = 7.2 (图 8c)。过渡阶段粗晶方解石、成矿期萤石与方解石的 Sm、Nd 含量和同位素组成测定结果见表 4, 用单矿物方解石、萤石和共生矿物组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 9)。利用 ISOPLOT 软件包计算出方解石 Sm-Nd 等时线年龄  $t = 34.6 \pm 4.8$  Ma,  $I_{\text{Nd}} = 0.512 297$ , MSWD = 0.23 (图 9a); 萤石 Sm-Nd 等时线年龄  $t = 31.75 \pm 0.28$  Ma,  $I_{\text{Nd}} = 0.512 361 50$ , MSWD = 1.07 (图 9b); 共生矿物组合萤石与方解石 Sm-Nd 等时线年龄  $t = 33.72 \pm 0.46$  Ma,  $I_{\text{Nd}} = 0.512 358 10$ , MSWD = 6.2 (图 9c)。

## 5 讨论

### 5.1 过渡阶段年龄

众所周知, Rb-Sr 等时线定年的基本前提是: 在同一热液阶段内从同一热液中基本同时沉淀的一组共生热液矿物具有一致的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 但有不同的 Rb/Sr 比值; 其次, 该组矿物对于其初始 Rb-

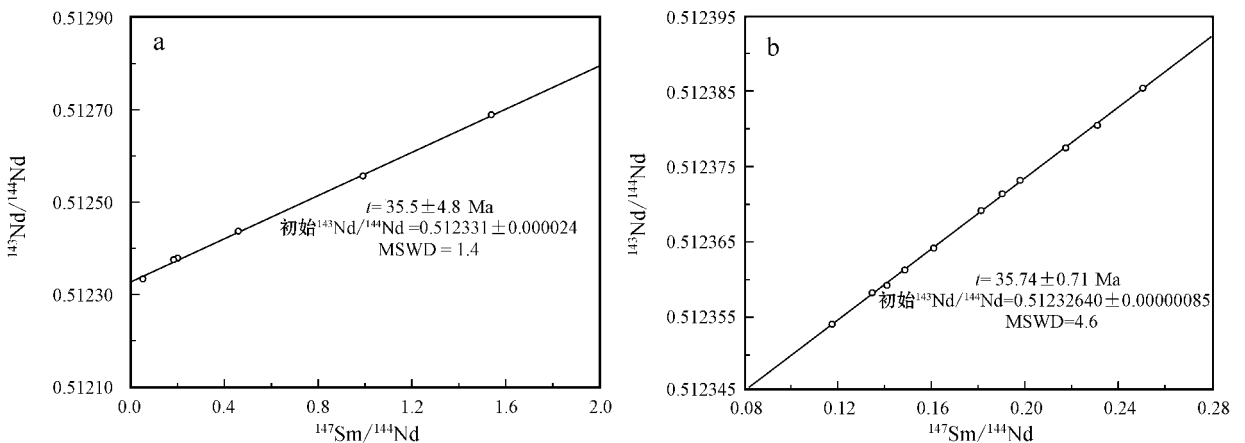


图 7 东莫扎抓铅锌矿床粗晶方解石 (a)、共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 (b) Sm-Nd 等时线图解

Fig. 7 Sm-Nd isochron of macrocrystalline calcite (a), and paragenetic mineral association sphalerite and pyrite (b) from the Dongmohazhua Pb-Zn deposit

表 3 莫海拉亨铅锌矿床粗晶方解石、闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 3 Rb-Sr isotopic analyses of macrocrystalline calcite, sphalerite and galena from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	$\omega_{\text{Pb}}/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
		Rb	Sr		
过渡阶段 图 8a					
ZK10302-2	方解石	49.87	18.05	8.172	0.712 887 ± 11
ZK10302-8	方解石	38.72	32.64	3.568	0.710 644 ± 9
ZK10302-32	方解石	14.97	40.37	1.124	0.709 463 ± 8
ZK10302-33	方解石	4.018	133.6	0.095 3	0.708 967 ± 8
ZK10302-34	方解石	48.33	23.78	6.011	0.711 844 ± 7
ZK10302-37	方解石	39.92	25.91	4.792	0.711 035 ± 6
ZK10302-39	方解石	43.66	17.66	7.309	0.712 452 ± 5
ZK10302-41	方解石	21.35	42.51	1.508	0.709 649 ± 5
成矿期(田世洪等 2009)图 8b 和 8c					
MTC30-H29 <sub>z</sub>	闪锌矿	0.851 2	94.95	0.026 7	0.708 526 ± 9
MTC25-H4	闪锌矿	0.445 7	81.26	0.016 3	0.708 519 ± 7
MTC25-H5-4	闪锌矿	0.432 6	12.82	0.100 2	0.708 562 ± 8
MTC30-H29 <sub>Q</sub>	闪锌矿	3.856	36.89	0.330 6	0.708 665 ± 10
MTC33-H23	方铅矿	0.907 3	9.524	0.058 7	0.708 525 ± 8
MTC25-H9	方铅矿	0.657 2	0.854 3	2.258	0.709 601 ± 8
MTC16-H8-2 <sub>z</sub>	方铅矿	1.765	5.985	0.868 4	0.708 943 ± 9
MTC16-H8-4	方铅矿	0.798 2	2.078	1.132	0.709 062 ± 7
MTC16-H8-2 <sub>Q</sub>	方铅矿	2.034	1.598	3.753	0.710 320 ± 8

注 z 代表重的富集物, Q 代表轻的富集物。

Sr 系统保持封闭到现在。前已述及,所有方解石样品均是从挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)过渡阶段形成的,而且是在南京大学现代分析中心使用 ICP-MS 仪器先草测了 Rb、Sr 含量,来挑选适合定年的样品。因此,方解石样品适合是 Rb-Sr 等时线定年的基本前提。

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<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等形成络合物进行迁移,在含钙矿物沉淀时易置换 Ca<sup>2+</sup> 而进入矿物晶体(赵振华,1997)。研究表明,REE 进入方解石晶体中,除了晶体溶解之外,其他过程破坏方解石稀土元素配分模式的几率很小(Zhong and Alfonso, 1995),因此方解石具有 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(2004)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 ± 15 Ma 和 225 ± 38 Ma。

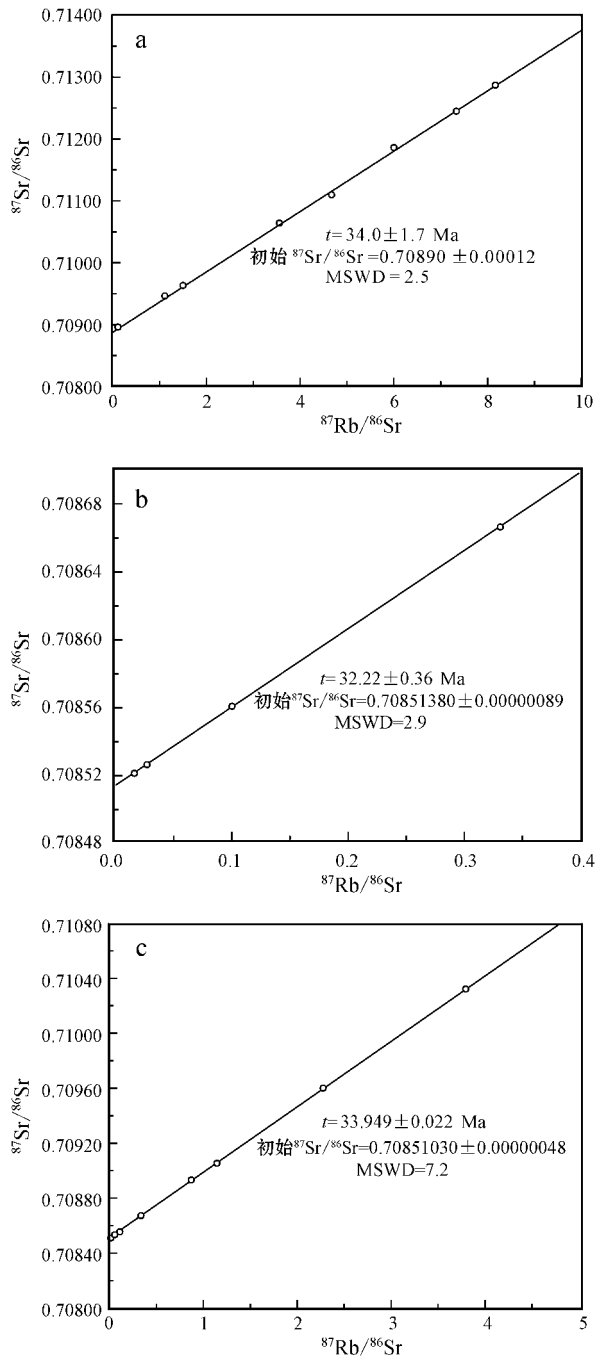


图 8 莫海拉亨铅锌矿床粗晶方解石(a)闪锌矿(b)和共生矿物组合闪锌矿与方铅矿(c)Rb-Sr 等时线图  
Fig. 8 Rb-Sr isochron of macrocrystalline calcite(a), sphalerite(b), and paragenetic mineral association sphalerite and galena(c) from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

综上所述,利用方解石进行 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 6a 和图 8a 所表现出的 2 条直线具有等时线意义。与此相类似,

表 4 莫海拉亨铅锌矿床粗晶方解石和萤石 Sm-Nd

同位素组成

Table 4 Sm-Nd isotopic analyses of macrocrystalline calcite and fluorite from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	$\epsilon_{\text{Sm}}/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
		Sm	Nd		
过渡阶段 图 9a					
ZK10302-2	方解石	0.213 9	0.258 7	0.502 3	0.512 422 ± 7
ZK10302-8	方解石	0.774 5	0.433 5	1.08 4	0.512 527 ± 6
ZK10302-32	方解石	0.443 2	0.455 6	0.599 5	0.512 433 ± 5
ZK10302-33	方解石	0.068 9	0.594 8	0.071 8	0.512 312 ± 7
ZK10302-34	方解石	0.574 3	1.282	0.272 3	0.512 359 ± 8
ZK10302-37	方解石	0.219 1	0.453	1.416	0.512 631 ± 6
ZK10302-39	方解石	1.963	0.953 7	1.259	0.512 579 ± 8
ZK10302-41	方解石	0.615 3	0.532 8	0.743 7	0.512 463 ± 5
成矿期 (田世洪等 2009) 图 9b 和 9c					
MTC33-H13	萤石	0.078 1	0.163 4	0.286 4	0.512 421 ± 9
MTC27-H7	萤石	0.203 4	0.470 9	0.256 9	0.512 415 ± 7
MTC27-H5-2	萤石	0.081 6	0.251 5	0.195 1	0.512 401 ± 8
MTC25-H5-2	萤石	0.220 6	0.357 4	0.372 7	0.512 440 ± 6
MTC25-H5-4	萤石	0.189 4	0.340 2	0.330 6	0.512 431 ± 7
MTC33-H14-1	方解石	0.352 3	1.015	0.214 5	0.512 405 ± 8
MTC27-H9-1	方解石	1.125	1.875	0.392 3	0.512 445 ± 9
MTC25-H5-2	方解石	0.213 7	1.053	0.121 3	0.512 385 ± 8
MTC30-H5	方解石	0.510 7	1.462	0.215 3	0.512 406 ± 8
MTC30-H37	方解石	0.704 5	1.815	0.232 6	0.512 409 ± 6

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  与  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  之间也不存在线性关系,可以认为图 7a 和图 9a 所表现出的 2 条直线也具有等时线意义。因此,不管是 Rb-Sr 法,还是 Sm-Nd 法,两者结果在误差范围是非常一致的,起到了相互验证的效果。东莫扎抓铅锌矿床过渡阶段的年龄为 35.2 ~ 35.5 Ma,平均为 35.4 Ma,与其成矿时代 35 Ma (图 6b、6c、7b,田世洪等 2009)在误差范围内非常接近,莫海拉亨铅锌矿床过渡阶段的年龄为 34.0 ~ 34.6 Ma,平均为 34.3 Ma,与其成矿时代 33 Ma (图 8b、8c、9b、9c,田世洪等,2009)在误差范围内也非常接近。

5.2 铅锌矿床形成与逆冲推覆关系

5.2.1 野外宏观证据

东莫扎抓矿区  $F_1$  逆冲断层在治多幅 1:25 万地质图上显示整体为  $300^\circ$  左右走向的大型断裂带,断层长度  $>50$  km,卷入地层除二叠系、三叠系以外,还包括始新世沱沱河组、色的日斑状二长花岗岩(张洪瑞 2010)。在矿区南东 2 km 处还发现杂多群、甲丕拉组逆冲在沱沱河组之上。此外,张洪瑞(2010)根据矿区变形分析表明,MI 矿化带的脉状闪锌矿主要赋存在  $F_1$  逆断层上盘的破碎带和次级断面上;

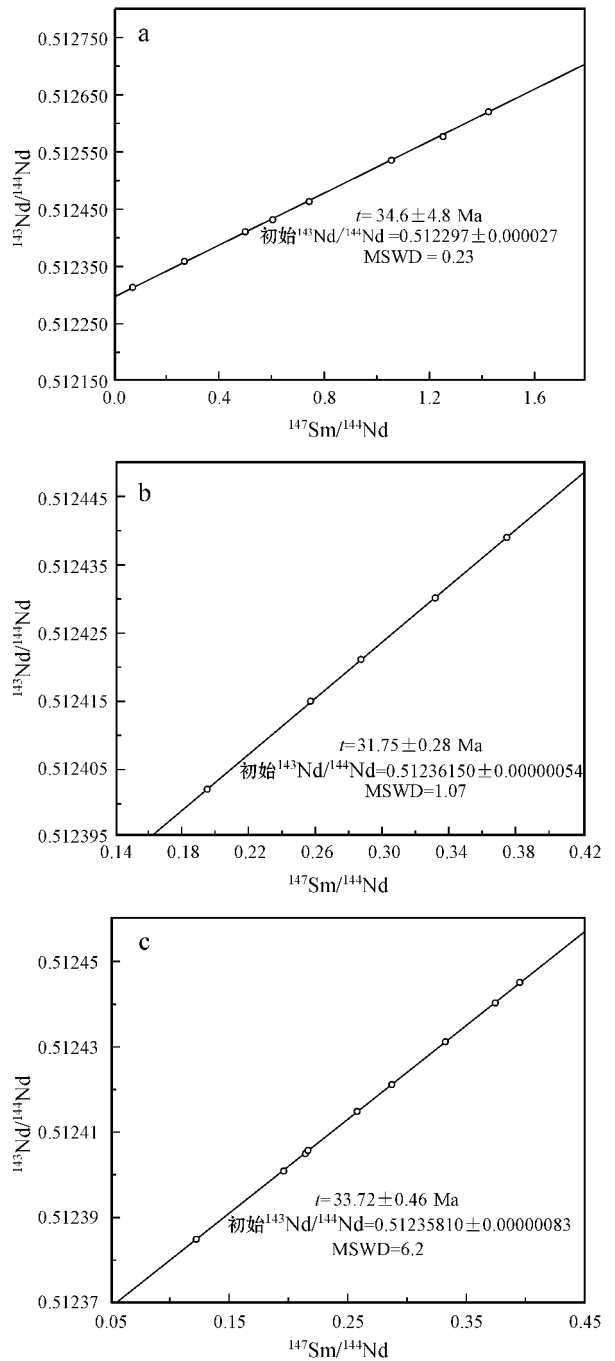


图 9 莫海拉亨铅锌矿床粗晶方解石 (a) 萤石 (b) 和共生矿物组合萤石与方解石 (c) Sm-Nd 等时线图

Fig. 9 Sm-Nd isochron of macrocrystalline calcite (a), fluorite (b), and paragenetic mineral association fluorite and calcite (c) from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

MII 和 MIII 矿化带为微细脉状闪锌矿、方铅矿,沿  $F_2$  逆断层上盘追踪张节理、早期劈理等裂隙面不连续分布;MIV 矿化带铅锌矿串珠状分布在角砾岩带和  $F_3$  小型逆冲断层上盘,显微尺度矿化主要为细脉状

和浸染状。总体显示矿体(带)与逆冲断层具有高度的空间耦合性。

莫海拉亨矿区石炭系向南逆冲到沱沱河组砂砾岩之上,形成 $F_1$ 逆冲断层。区域上该逆冲断裂属囊谦逆冲系的一部分,长度 $>50$  km。莫海拉亨矿区铅锌矿化总体分布在逆冲断层上盘,严格限定在杂多群碎屑岩夹层之下的碳酸盐岩内,呈透镜状、脉状近顺层展布,整体北西-南东向展布,与逆冲断层走向一致。

综上所述,这些地质现象从野外宏观的角度证明了“三江”北段青海玉树地区铅锌矿床与逆冲推覆构造相伴。

### 5.2.2 年代学证据

尽管Pb-Zn-Ag-Cu矿床空间上与逆冲推覆构造相伴,但要证明其成矿作用受新生代逆冲推覆构造控制,需要从年龄的角度来进一步厘定构造与成矿的关系。

已有研究成果表明,大型逆冲推覆具有幕式断特征,早幕集中于 $55\sim 50$  Ma,晚幕集中于 $40\sim 37$  Ma,分别与青藏高原主碰撞期 $65\sim 41$  Ma和晚碰撞期 $40\sim 26$  Ma相对应(侯增谦等,2006a,2006b,2008)。治多幅1:25万地质图表明,在东莫扎抓矿区逆断层向西北延伸至纳日贡玛地区,始新世的日斑状二长花岗岩(K-Ar年龄为 $41.8$  Ma<sup>①</sup>)向上逆冲至二叠纪碎屑岩上,说明逆冲晚于 $41$  Ma(张洪瑞,2010)。莫海拉亨矿区逆冲断层主要造成石炭纪地层逆冲至始新世沱沱河组之上,说明逆冲作用的发生是在始新世之后,即至少晚于围岩沱沱河组的下限( $52$  Ma,李亚林等,2006)。

野外研究表明,巨晶方解石为乳白色,呈不规则状、囊状,被后期矿化穿切,认为是从挤压(逆冲推覆阶段)到拉伸(成矿阶段)过渡阶段形成的。东莫扎抓矿区方解石Rb-Sr等时线年龄 $t = 35.2 \pm 2.6$  Ma,Sm-Nd等时线年龄 $t = 35.5 \pm 4.8$  Ma,平均为 $35.4$  Ma。莫海拉亨矿区方解石Rb-Sr等时线年龄 $t = 34.0 \pm 1.7$  Ma,方解石Sm-Nd等时线年龄 $t = 34.6 \pm 4.8$  Ma,平均为 $34.3$  Ma。

田世洪等(2009)研究表明东莫扎抓矿区闪锌矿Rb-Sr等时线年龄 $t = 35.015 \pm 0.034$  Ma,共生矿物组合黄铁矿与方铅矿Rb-Sr等时线年龄 $t = 34.747 \pm 0.015$  Ma,共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿Sm-Nd等时线年龄 $t = 35.74 \pm 0.71$  Ma,平均为 $35$

Ma。莫海拉亨矿区闪锌矿Rb-Sr等时线年龄 $t = 32.22 \pm 0.36$  Ma,共生矿物组合闪锌矿与方铅矿Rb-Sr等时线年龄 $t = 33.949 \pm 0.022$  Ma,萤石Sm-Nd等时线年龄 $t = 31.75 \pm 0.28$  Ma,共生矿物组合萤石与方解石Sm-Nd等时线年龄 $t = 33.72 \pm 0.46$  Ma,平均为 $33$  Ma。

综上所述,笔者认为玉树地区铅锌矿床的形成具有一个完整的连续过程(图10):挤压阶段(SW向NE的大型逆冲推覆, $37\sim 40$  Ma)→过渡阶段(巨晶方解石, $34\sim 35$  Ma)→拉伸阶段(铅锌矿床成矿作用, $33\sim 35$  Ma)。

### 5.3 玉树地区铅锌矿床构造控矿模式

基于以上分析,结合区域成矿地质背景,建立了玉树地区铅锌矿床从逆冲推覆阶段到成矿阶段的构造控矿模式:

(1)伴随着印度-亚洲大陆的强烈碰撞而形成沿造山带侧缘断续分布的、面积显著收缩的新生代前陆盆地,并接受河湖相碎屑岩沉积,顶部发育多层膏盐建造。

(2)在 $37\sim 40$  Ma,随着大陆碰撞造山持续推进,在高原北缘发生强烈的地壳缩短,形成以逆冲推覆构造系统为代表的“薄皮构造”(图10a)。逆冲推覆构造系统的指向是由SW向NE推覆,一系列中生代地层单元作为构造岩片推覆并叠置于前陆盆地之上。逆冲推覆构造内分为根带、中带和前锋带的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,成为造山带流体、成矿流体长距离迁移的主干通道(图10a)。在逆冲推覆构造系统的前锋带,发育与主逆冲断裂倾向相反的反冲断层(图10a)。

(3)在 $34\sim 35$  Ma,应力处于由挤压到拉伸的松弛状态,早期造山带流体、盆地流体混合形成巨晶方解石脉(图10b)。

(4)在 $33\sim 35$  Ma,逆冲推覆构造系统根带附近的侧向造山,导致早第三纪盆地含水层的大量脱水,并淋滤出大量的金属物质,产生正常的或超压的盆地卤水(含矿流体),沿拆离滑脱带长距离迁移汇聚,并强烈爆破和流体排泄。流体长距离迁移是形成热液型矿床的首要条件(Oliver,1986;Garven and Kaffensperger,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

① 青海地质调查院. 2006. 1:25万治多幅区域地质调查报告.

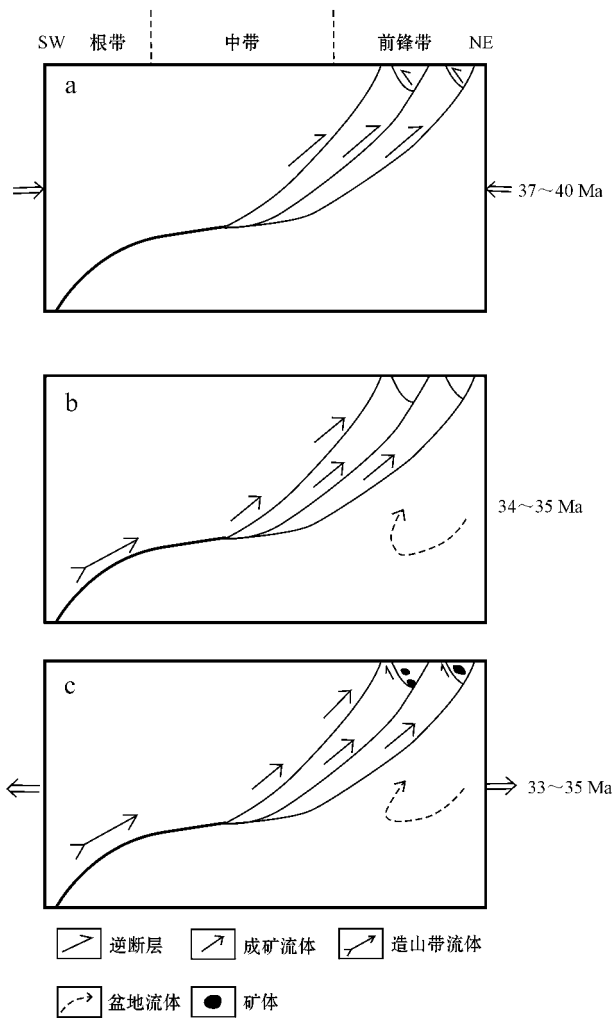


图 10 玉树地区受逆冲推覆构造控制的 Pb-Zn 矿床的成矿模型

Fig. 10 A tectonic model showing metallogenesis of Pb-Zn deposits controlled by thrust nappe systems in Yushu area

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,并与先期造山带流体混合,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,硫化物在逆冲推覆构造的反冲断层沉淀形成铅锌矿床(图 10c)。

## 6 结论

(1) 东莫扎抓铅锌矿床过渡阶段方解石的年龄为 35.2~35.5 Ma, 平均为 35.4 Ma, 与其成矿时代 35 Ma 非常接近; 莫海拉亨铅锌矿床过渡阶段方解

石的年龄为 34.0~34.6 Ma, 平均为 34.3 Ma, 与其成矿时代 33 Ma 也非常接近。

(2) 结合区域成矿地质背景, 建立了玉树地区铅锌矿床从逆冲推覆阶段到成矿阶段的构造控矿模式。

致谢 野外工作期间, 得到了青海省地调院东莫扎抓、莫海拉亨两矿区所有工作人员的大力支持和帮助; 室内工作期间, 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

- Fang Weixuan, Hu Ruizhong, Su Wenchao, *et al.* 2002. The emplacement epoch of lamprophyre in Zhenyuan District, Guizhou Province [J]. Chinese Science Bulletin, 47(4): 307~312 (in Chinese with English abstract).
- Garver G and Raffensperger J P. 1997. Hydrogeology and geochemistry of ore genesis in sedimentary basins [A]. Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits [C]. New York: Wiley, 125~189.
- He Longqing, Song Yucai, Chen Kaixu, *et al.* 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, 106~132.
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. Mineral Deposits, 25(5): 521~543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 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): 123~144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006a. 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).
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, *et al.* 2005. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposit: A Global Perspective [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 561~607.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Wang Yinxi, *et al.* 2004. 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 Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, *et al.* 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 Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2011. Wall rock alteration and pyrite-sphalerite mineralogy of Dongmohazhua MVT-like Pb-Zn Ore Deposit, Yushu area, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 490~506( in Chinese with English abstract ).
- Ludwig K R. 1994. Isoplot—A plotting and regression program for radiogenic-isotope data[J]. *U S Geol. Survey*, 1~45.
- Misra K C. 2000. Understanding Mineral Deposits[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1~845.
- 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.
- Song Yucai. 2009. Characteristics and genetic model of sediment-hosted base metal deposits in Sanjiang area, Southwest China[D]. Unpublished postdoctoral dissertation, Chinese Academy of Geological Sciences, 1~119( in Chinese with English abstract ).
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, *et al.* 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet[J]. *GSA Bulletin*, 117: 1293~1317.
- Tian Shihong, Yang Zhusen, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 747~758( in Chinese with English abstract ).
- Wang C S, Liu Z F, Yi H S, *et al.* 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 Guanghui, Song Yucai, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Re-Os dating of molybdenite from Liancheng vein copper deposit in Lanping basin and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 413~424( in Chinese with English abstract ).
- Wang Zhaolin, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2009. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in Zadoe area, southern Qinghai[J]. *Mineral Deposits*, 28: 157~169( in Chinese with English abstract ).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *J. Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211~280.
- Zhang Hongrui. 2010. Deformational structures and metallogenetic model of sediment-hosted Pb-Zn deposits in northern segment of the Sanjiang orogenic belt, Southwest China[D]. Unpublished doctoral dissertation, Chinese Academy of Geological Sciences, 1~112( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Zhenhua. 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 concentrations[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 59: 443~453.
- Zhou Jiangyu, Wang Jianghai, Yin An, *et al.* 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 Basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1: 85~91( in Chinese with English abstract ).

### 附中文参考文献

- 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 等. 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): 307~312.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 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): 123~144.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文芸, 等. 2006a. 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.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜, 等. 2004. 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.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 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.
- 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2011. 青海玉树东莫扎抓类 MVT 铅锌矿床围岩蚀变和黄铁矿-闪锌矿矿物学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 490~506.
- 宋玉财. 2009. “三江”沉积岩容矿贱金属矿床: 发育特点与成矿模型[D]. 中国地质科学院博士后研究报告, 1~119.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 2009. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 28(6): 747~758.
- 王光辉, 宋玉财, 侯增谦, 等. 2009. 兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 28(4): 413~424.
- 王召林, 侯增谦, 杨竹森, 等. 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.
- 张洪瑞. 2010. 三江北段沉积岩容矿铅锌矿床矿区构造变形与控矿模型[D]. 中国地质科学院博士论文, 1~112.
- 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, 等. 2002. 青藏东北缘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.