

# 青海玉树莫海拉亨铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成： 对成矿物质来源的指示——兼与东莫扎抓铅锌矿床的对比\*

田世洪<sup>1</sup> 侯增谦<sup>2</sup> 杨竹森<sup>1</sup> 刘英超<sup>2</sup> 宋玉财<sup>2</sup> 王富春<sup>3</sup> 鲁海峰<sup>3</sup>

TIAN ShiHong<sup>1</sup>, HOU ZengQian<sup>2</sup>, YANG ZhuSen<sup>1</sup>, LIU YingChao<sup>2</sup>, SONG YuCai<sup>2</sup>, WANG FuChun<sup>3</sup> and LU HaiFeng<sup>3</sup>

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. 青海省地质调查院, 西宁 810012

1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Qinghai Institute of geological Survey, Xining 810012, China

2011-04-05 收稿, 2011-07-08 改回.

**Tian SH, Hou ZQ, Yang ZS, Liu YC, Song YC, Wang FC and Lu HF. 2011. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Mohailaheng lead-zinc ore deposit in the Yushu area, southern Qinghai: Implications for the sources of ore-forming material in the deposit and comparison with those of Dongmohazhua lead-zinc ore deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9):2709–2720**

**Abstract** The Mohailaheng and Dongmohazhua Pb-Zn deposits in the Yushu area of Qinghai Province, located in the northeast margin of Qiangtang terrane which is between Jinshajiang suture zone and Bangonghu-Nujiang suture zone, are the two typical Pb-Zn deposits in the Cu-Pb-Zn polymetallic mineralization belt for the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area. The authors thought the sources of ore-forming material were derived from the sedimentary strata by the research of sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Dongmohazhua lead-zinc ore deposit. On the basis of geological field observations, the authors also made the research on the Mohailaheng lead-zinc ore deposit and selected sulfide minerals and barite for S isotope compositions analyses, sulfide minerals, gangue minerals and regional strata for Pb isotope compositions analyses, and gangue minerals for Sr-Nd isotope compositions.  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfide minerals are  $-30.0\text{‰} \sim +7.4\text{‰}$ , and show peaks at  $-18\text{‰} \sim -2\text{‰}$ , reflecting the characteristic of light sulfur.  $\delta^{34}\text{S}$  values of barite are  $20.2\text{‰} \sim +24.2\text{‰}$ , implying the derivation of Tertiary continental facies basin. The ore deposit displays wide variations in sulfide  $\delta^{34}\text{S}$  values, indicating multiple sulfur sources. On account of the lack of magmatic activity, it is realistic to view the rocks in the basin as the source of sulfur. Sulfur in the rocks was transferred into hydrothermal fluids via fluid-rock interaction. Therefore, the variation in rock types across the basin is likely to influence the variation of sulfur isotopic compositions. Reduced sulfurs were mainly derived from the biogenic sulfate reduction or the thermochemical reduction of sulfur-bearing organic matter, implying that sulfur came from the sedimentary basin. The  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios for sulfide minerals vary in ranges of 18.298 ~ 18.694, 15.298 ~ 15.721 and 38.169 ~ 38.894, respectively. The  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios for gangue minerals are between 18.418 ~ 18.672, 15.418 ~ 15.719 and 38.403 ~ 38.845, respectively. In the diagrams of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , the Pb isotope compositions of the sulfide minerals and gangue minerals fall into the regional upper crust lead zone, similar to MVT deposit, implying that Pb might have come from the upper crust rocks. The  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ,  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  and  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  ratios for gangue minerals vary in ranges of 0.70851 ~ 0.70906, 57.4 ~ 65.2, 0.512265 ~ 0.512361 and  $-6.5 \sim -4.6$ , respectively. The Sr-Nd isotope compositions of the

\* 本文受国家 973 项目(2009CB421007、2009CB421008、2011CB403104)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB01A08)、国土资源大调查项目(1212010818096)、国家自然科学基金联合基金(U09336051)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K0802)联合资助。

第一作者简介: 田世洪,男,1973 年生,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

gangue minerals indicate that their matter sources also came from the upper crust rocks. On the whole, the characters of sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Mohailaheng lead-zinc ore deposit in the Yushu area are the same as those of the Dongmozhazhua lead-zinc ore deposit, implying that they both derived from the sedimentary strata. Together with the geological and geochemical features of the Mohailaheng and Dongmozhazhua Pb-Zn deposits, the authors discussed their dynamical settings.

**Key words** Source of ore-forming material; S isotope; Pb isotope; Sr-Nd isotope; Mohailaheng Pb-Zn deposit; Yushu area, Qinghai Province

**摘要** 青海玉树地区莫海拉亨铅锌矿床和东莫扎抓铅锌矿床均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2个典型代表。笔者曾通过对东莫扎抓铅锌矿床的S-Pb-Sr-Nd同位素组成特征研究,认为其成矿物质来源于沉积地层。本文在野外地质观察基础上,亦对莫海拉亨铅锌矿床的矿石矿物和重晶石进行了S同位素组成分析,对矿石矿物、脉石矿物和区域地层进行了Pb同位素组成分析,对脉石矿物进行了Sr-Nd同位素组成分析。分析结果表明,硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-30.0\% \sim 7.4\%$ ,峰值为 $-18\% \sim -2\%$ ,反映了总体富轻硫的特征,而重晶石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $20.2\% \sim +24.2\%$ ,来自于第三纪陆相盆地。宽的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化可以解释为流体在盆地内活动期间与不同地层单元发生相互作用,从而继承了不同物质单元的S同位素特点,还原硫应主要来自于硫酸盐的细菌还原或者含硫有机质的热还原,反映硫来自沉积盆地。矿石矿物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 $18.298 \sim 18.694$ 、 $15.298 \sim 15.721$ 、 $38.169 \sim 38.894$ ,而脉石矿物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 $18.418 \sim 18.672$ 、 $15.418 \sim 15.719$ 、 $38.403 \sim 38.845$ 。矿石矿物和脉石矿物的Pb同位素组成介于区域上地壳Pb组成范围内,总体类似于MVT矿床,显示Pb等金属元素来源于上地壳岩石。脉石矿物的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 、 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 $0.70851 \sim 0.70906$ 、 $57.4 \sim 65.2$ 、 $0.512265 \sim 0.512361$ 、 $-6.5 \sim -4.6$ 。Sr-Nd同位素特征亦显示脉石矿物的物质来源于上地壳岩石。总体来说,莫海拉亨铅锌矿床的S-Pb-Sr-Nd同位素特征均与东莫扎抓铅锌矿床的一样,显示均来自沉积地层。并结合矿床地质特征和地球化学特征,讨论了莫海拉亨铅锌矿床和东莫扎抓铅锌矿床形成的动力学背景。

**关键词** 成矿物质来源;S同位素;Pb同位素;Sr-Nd同位素;莫海拉亨铅锌矿床;青海玉树

**中图法分类号** P618.42; P618.43

## 1 引言

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带的重要组成部分。该构造成矿带不仅经历了古生代-中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(图1),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(He *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010);在玉树盆地发现了东莫扎抓和莫海拉亨等大型Pb-Zn矿床(侯增谦等,2008;刘英超,2009;田世洪等,2009);在沱沱河盆地发现了查曲帕茶等大型Pb-Zn矿床(侯增谦等,2008;宋玉财,2009)。侯增谦等(2008)通过对比研究大胆推断,青藏高原东至北缘发育1条上千千米长的、受新生代逆冲推覆构造控制的巨型Pb-Zn-Cu-Ag成矿带(图1)。

莫海拉亨矿区距玉树西偏南约100km,距东莫扎抓矿床向南约30km。作为青藏高原“三江”北段玉树地区2个典型铅锌矿床之一,前人对东莫扎抓铅锌矿床研究得比较深入(张文权等,2007;侯增谦等,2008;王召林等,2009;刘英超,2009;刘英超等,2009,2010,2011;田世洪等,2009,2011a,b;张洪瑞,2010;宋玉财等,2011),而对于莫海拉亨矿床,仅在逆冲推覆构造与铅锌矿床之间关系(侯增谦等,2008;王召林

等,2009)、矿床地质特征与成矿流体特征(刘英超,2009)以及成矿年代学(33Ma;田世洪等,2009,2011b)等方面取得了初步成果,为认识莫海拉亨矿床的成因、类型以及与逆冲推覆构造之间的关系奠定了一定基础,但关于该矿床的成矿物质来源尚未开展研究工作。笔者通过对东莫扎抓铅锌矿床的硫、铅、锶、钕同位素组成研究,认为其成矿物质来源于沉积地层。为此,本文亦对玉树地区另一典型铅锌矿床——莫海拉亨矿床开展类似的研究工作,并与东莫扎抓铅锌矿床进行对比,以探讨受逆冲推覆构造控制的类MVT型铅锌矿床成矿物质来源,为研究该类矿床成矿机制提供新资料。

## 2 地质背景

“三江北段”莫海拉亨铅锌矿床和东莫扎抓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,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-可可西里地体和华南地体(图1; 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,在区内广泛分布,为中生代盆地内发育的碎屑岩-碳酸盐岩建造。新生界主要为陆相盆地沉积的古

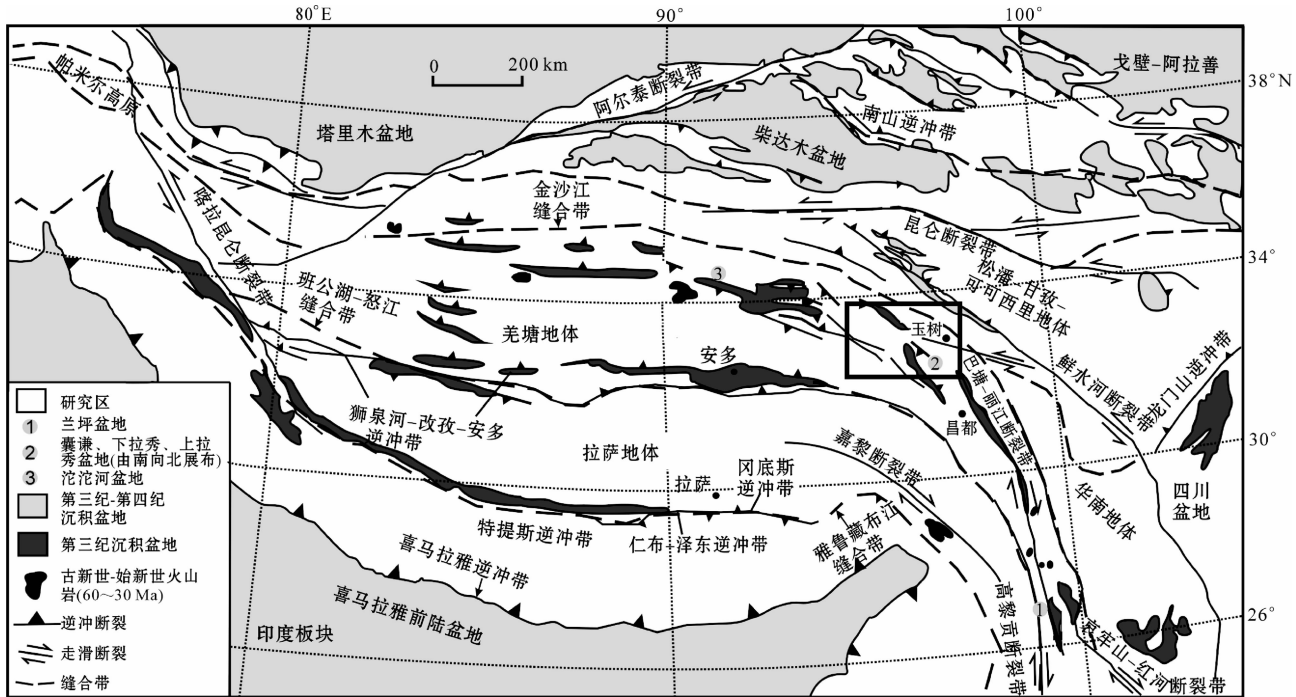


图1 青藏高原大地构造简图及研究区位置(据 Spurlin *et al.*, 2005; 侯增谦等, 2008 修改)

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)

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,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,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(图1)。大型逆冲推覆具有幕式冲断特征,早幕集中于55~50Ma,晚幕集中于40~37Ma,分别与青藏高原主碰撞期(65~41Ma)和晚碰撞期(40~26Ma)相对应(侯增谦等,2006a,b,2008)。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),区域上表现为囊谦断层带(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。

### 3 矿床地质特征

莫海拉亨矿区主要出露2套地层系统:下石炭统杂多群、始新世沱沱河组(图2)。杂多群主要为碳酸盐岩,夹少量碎屑岩。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2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。莫海拉亨矿区发现有4条矿化带(图2),MI矿带中圈定锌矿体1个,MIII矿带中圈定铅锌矿体1个,MIIV矿带中圈定铅锌矿体3个。其中以MI矿带1号体最具规模,其长约1800m,平均厚度7.18m,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体,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有5个阶段(刘英超,2009):

① 白云石化阶段(I):成矿前,含 $\text{Ca}^{2+}$ 和少量 $\text{Mg}^{2+}$ 热液进入围岩,结晶成晶体较大,解理较发育,晶体表面不平整的方解石,并充填裂隙成脉,围岩发生弱白云石化。

② 重晶石化阶段(II):生成大量团块状重晶石。

③ 多金属硫化物阶段(III):作为主成矿阶段,伴随硅化沉淀萤石、方解石、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等,几种硫化物的

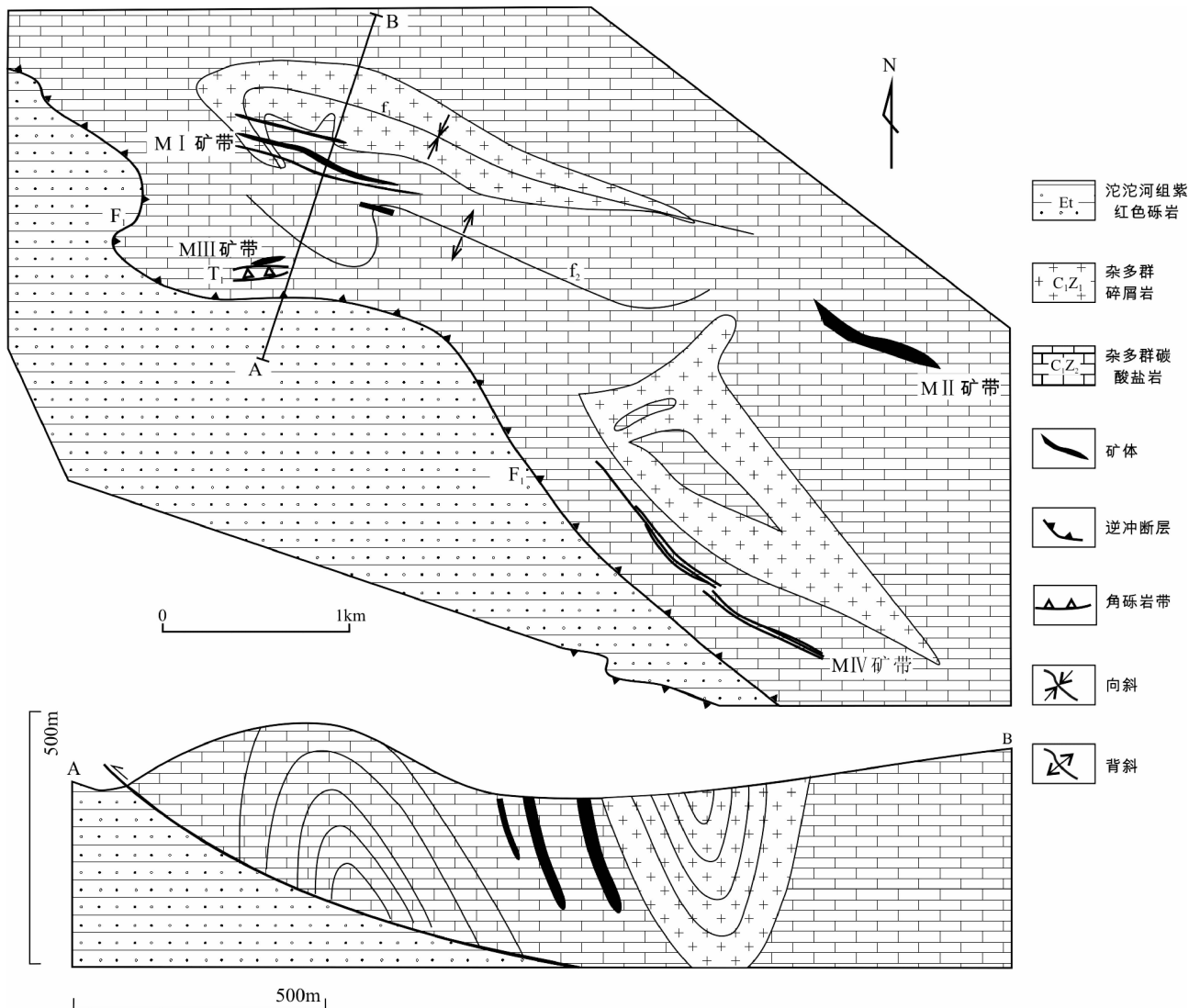


图2 玉树地区莫海拉亨矿区地质图(据张洪瑞,2010 修改)

Fig.2 Geological map of Mohailaheng deposit, Yushu area (modified after Zhang, 2010)

具体生成顺序为:纯黄铁矿脉、胶黄铁矿脉 > 方铅矿、闪锌矿胶结角砾 > 深色闪锌矿 > 浅色闪锌矿、黄铁矿。硅化伴随了整个阶段,萤石、方解石总体稍早于硫化物沉淀发生,不同过程生成的黄铁矿在镜下有一定区别,和纯黄铁矿脉、胶黄铁矿脉相比,伴随浅色闪锌矿沉淀的黄铁矿颜色更浅一些,呈现草黄色,且磨光较好,主要为自形晶。

④ 方解石化阶段(IV):沉淀结晶细小且晶面平整的方解石,形成方解石细脉。

⑤ 黏土化阶段(V):矿后酸性热液流经围岩,结晶埃洛石和迪开石,出现黏土化。

## 4 分析结果

硫同位素分析在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 MAT-251EM 型质谱计上完成。Rb、Sr、Sm、Nd 含量和

同位素比值以及 Pb 同位素比值测定均在南京大学现代分析中心新近改造的英制 VG354 多接收质谱计上完成。具体分析见田世洪等(2011b)。

### 4.1 S 同位素组成

选取矿床 6 件闪锌矿、11 件方铅矿、13 件黄铁矿以及 4 件重晶石进行了硫同位素分析,包括钻孔、探槽和地表 3 部分样品(表 1 和图 3),可以看出:

第二阶段的重晶石富含<sup>34</sup>S,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于 +20.2‰ ~ +24.2‰,平均值为 22.0‰。与第二阶段重晶石的硫同位素特征截然不同,第三阶段不同世代的所有硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要为负值,变化范围为 -30.0‰ ~ +7.4‰。其中,闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -13.5‰ ~ +0.4‰,平均值为 -8.8‰;方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -11.6‰ ~ +7.4‰,平均值为 -1.5‰;黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -30.0‰ ~ +6.2‰,平均值为 -12.5‰。3 对共生

表1 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床重晶石和矿石矿物以及区域地层中石膏硫同位素组成

Table 1 S isotope compositions of barite and sulfide minerals from the Mohailaheng Pb-Zn deposit and of gypsum from the regional strata in the Yushu area

样品号	成矿阶段	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)	数据来源
MTC33-H23	III	方铅矿	-1.3	本文
MTC33-H21-1	III	黄铁矿	-16.9	
MTC33-H20	III	黄铁矿	-17.5	
MTC33-H15A	III	闪锌矿	0.4	
MTC33-H15B	III	方铅矿	0.8	
MTC27-H5-2	III	方铅矿	5.5	
MTC25-H5-3	II	重晶石	24.2	
MTC25-H5-4A	III	闪锌矿	-8.3	
MTC25-H5-4B	III	方铅矿	-4.6	
MTC25-H9	III	方铅矿	-3.5	
MTC16-H8-2	III	方铅矿	7.0	
MTC16-H8-4	III	方铅矿	7.4	
MTC30-H29	III	闪锌矿	-13.5	
MH08-008-2	III	方铅矿	-9.2	
MH08-008-3	III	闪锌矿	-12.6	
MH08-008-3	II	重晶石	22.3	
ZK11901-7	III	方铅矿	-11.6	
ZK11901-9	III	方铅矿	-8.0	
ZK11901-9	II	重晶石	20.2	
ZK11901-13	II	重晶石	21.3	
ZK11901-18	III	闪锌矿	-10.6	
ZK11901-23	III	黄铁矿	6.2	
ZK11901-25	III	黄铁矿	-5.0	
ZK11901-27	III	黄铁矿	-11.0	
ZK10301-10	III	黄铁矿	-5.7	
ZK10301-16	III	黄铁矿	-16.4	
ZK10301-19	III	黄铁矿	-30.0	
ZK10301-22	III	黄铁矿	-6.2	
ZK10302-43A	III	闪锌矿	-8.3	
ZK10302-43B	III	黄铁矿	-15.0	
ZK14301-1	III	黄铁矿	-3.2	
ZK14301-2	III	黄铁矿	-27.2	
ZK14301-4	III	黄铁矿	-23.5	
MH09-13-1	III	方铅矿	0.8	
NangQ09-4-1			15.9	
NangQ09-1-1			13.1	
NangQ09-7-2	第三纪 雅西错组	石膏	17.1	
NangQ09-3-1			16.5	
NangQ09-7-3			18.3	

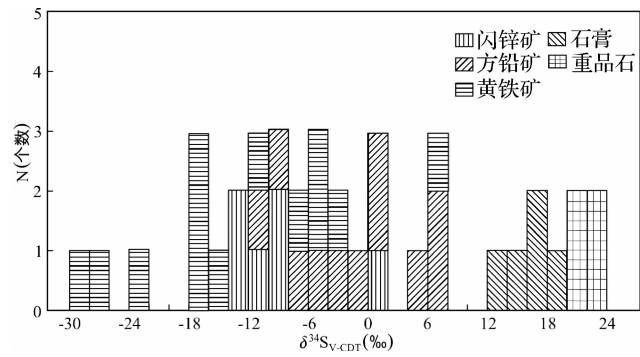


图3 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床重晶石和矿石矿物以及区域地层中石膏硫同位素组成直方图

Fig. 3 Histogram of S isotope compositions of barite and sulfide minerals from the Mohailaheng Pb-Zn deposit and of gypsum from the regional strata in the Yushu area

素组成总体来说不随深度的变化而发生变化。

## 4.2 Pb 同位素组成

选取矿床不同成矿阶段 3 件闪锌矿、10 件方铅矿、11 件黄铁矿、25 件方解石、5 件萤石以及 1 件重晶石进行了铅同位素分析(表 2),并以  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  数据进行投影(图 4)。从表 2 和图 4 可以看出:

第三阶段不同世代的所有硫化物的 Pb 同位素组成彼此间无明显区别,其中闪锌矿  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.299 \sim 18.638$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.354 \sim 15.627$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.199 \sim 38.647$ , 方铅矿  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.298 \sim 18.694$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.298 \sim 15.677$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.169 \sim 38.705$ , 黄铁矿  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.357 \sim 18.668$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.312 \sim 15.721$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.298 \sim 38.894$ 。1 对共生硫化物(闪锌矿与黄铁矿)之间的 Pb 同位素组成彼此间无明显区别。3 个钻孔(ZK11901、ZK10301、ZK14301)中同种硫化物的 Pb 同位素组成总体来说不随深度的变化而发生变化。不同阶段(第一阶段、第三阶段和第四阶段)的方解石 Pb 同位素组成彼此间无明显区别,其中第一阶段方解石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.543$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.526$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.617$ , 第三阶段方解石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.418 \sim 18.672$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.418 \sim 15.709$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.416 \sim 38.698$ , 第四阶段方解石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.421 \sim 18.613$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.426 \sim 15.719$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.403 \sim 38.693$ 。而第三阶段萤石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.459 \sim 18.607$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.524 \sim 15.683$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.512 \sim 38.845$ , 第二阶段重晶石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.513$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.583$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.549$ 。总体来说,不同阶段不同脉石矿物的 Pb 同位素组成无明显差别,都富集放射性铅。综上所述,不管是矿石矿物闪锌矿、方铅矿、黄铁矿,还是脉石矿物方解石、重晶石,铅同位素组成基本一致,数据点在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图上,大多数

硫化物(闪锌矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿)之间的硫同位素的相对富集情况与正常的平衡交换的顺序不一致,即不符合  $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$  的硫同位素平衡分馏趋势(表 1),说明流体中的硫同位素分馏不平衡。因此,莫海拉亨矿区的共生矿物不是在同位素平衡条件下沉淀的。此外,3 个钻孔(ZK11901、ZK10301、ZK14301)中同种硫化物的硫同位

表2 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床矿石矿物、脉石矿物和区域地层铅同位素组成

Table 2 Pb isotope compositions of sulfide minerals, gangue minerals and regional strata from the Mohailaheng Pb-Zn deposit in the

Yushu area

样品号	成矿阶段	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	数据来源
MTC33-H23	III	方铅矿	18.312	15.416	38.328	
MTC33-H21-1	III	黄铁矿	18.389	15.389	38.298	
MTC33-H20	III	黄铁矿	18.357	15.312	38.302	
MTC33-H15B	III	方铅矿	18.403	15.398	38.321	
MTC27-H5-2	III	方铅矿	18.309	15.298	38.361	
MTC25-H5-4B	III	方铅矿	18.327	15.329	38.257	
MTC25-H9	III	方铅矿	18.298	15.401	38.234	
MTC16-H8-2	III	方铅矿	18.356	15.387	38.169	
MTC16-H8-4	III	方铅矿	18.361	15.311	38.287	
MTC30-H29	III	闪锌矿	18.299	15.354	38.199	
ZK11901-7	III	方铅矿	18.443	15.539	38.483	
ZK11901-9	III	方铅矿	18.492	15.512	38.504	
ZK11901-18	III	闪锌矿	18.493	15.523	38.516	
ZK11901-23	III	黄铁矿	18.548	15.508	38.525	
ZK11901-25	III	黄铁矿	18.569	15.492	38.513	
ZK11901-27	III	黄铁矿	18.617	15.524	38.542	
ZK10301-16	III	黄铁矿	18.668	15.721	38.765	
ZK10301-19	III	黄铁矿	18.597	15.698	38.894	
ZK10301-22	III	黄铁矿	18.645	15.707	38.798	
ZK10302-43A	III	闪锌矿	18.638	15.627	38.647	
ZK10302-43B	III	黄铁矿	18.619	15.633	38.631	
ZK14301-1	III	黄铁矿	18.646	15.641	38.653	
ZK14301-2	III	黄铁矿	18.657	15.656	38.668	
MH09-13-1	III	方铅矿	18.694	15.677	38.705	
MTC33-H14-1	III	方解石	18.436	15.427	38.469	
MTC27-H10-1	III	方解石	18.427	15.418	38.491	
MTC27-H9-1	III	方解石	18.431	15.424	38.453	
MTC27-H9-2	III	方解石	18.426	15.419	38.426	
MTC25-H3	IV	方解石	18.421	15.426	38.403	本文
MTC25-H5-2	III	方解石	18.418	15.434	38.416	
MH08-008-1	III	方解石	18.672	15.709	38.698	
ZK11901-1	III	方解石	18.522	15.567	38.618	
ZK11901-9	III	方解石	18.512	15.556	38.596	
ZK11901-11	III	方解石	18.501	15.567	38.585	
ZK11901-12	III	方解石	18.523	15.536	38.589	
ZK11901-13	III	方解石	18.518	15.543	38.578	
ZK11901-17	III	方解石	18.535	15.566	38.586	
ZK11901-19	IV	方解石	18.517	15.561	38.563	
ZK11901-22	IV	方解石	18.521	15.564	38.681	
ZK11901-28	III	方解石	18.501	15.562	38.617	
ZK10301-18	IV	方解石	18.613	15.719	38.693	
ZK001-24	I	方解石	18.543	15.526	38.617	
ZK10302-2	III	方解石	18.513	15.562	38.558	
ZK10302-8	III	方解石	18.523	15.566	38.559	
ZK10302-32	III	方解石	18.538	15.573	38.564	
ZK10302-34	III	方解石	18.578	15.599	38.615	
ZK10302-37	III	方解石	18.582	15.578	38.618	
ZK10302-39	III	方解石	18.594	15.607	38.605	
ZK10302-41	III	方解石	18.606	15.611	38.622	
MTC33-H23	III	萤石	18.526	15.573	38.535	
MTC33-H13	III	萤石	18.459	15.559	38.534	
MTC27-H7	III	萤石	18.517	15.524	38.512	
MH08-008-1	III	萤石	18.607	15.683	38.845	
ZK10302-33	III	萤石	18.559	15.601	38.627	
MTC25-H5-3	II	重晶石	18.513	15.583	38.549	

续表 2

Continued Table 2

样品号	成矿阶段	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	数据来源	
玉树地区地层							
080805-13		C <sub>1</sub> 灰岩	18.631	15.527	38.626		
080805-14		C <sub>1</sub> 灰岩	18.609	15.531	38.692		
080805-25		C <sub>1</sub> 灰岩	18.645	15.543	38.647		
080807-1		P <sub>2j</sub> 灰岩	18.517	15.492	38.557	田世洪等,2011b	
080807-8		P <sub>2j</sub> 灰岩	18.524	15.486	38.549		
DM729-1		P <sub>2j</sub> 灰岩	18.497	15.579	38.584		
080807-28		T <sub>3b</sub> 灰岩	18.562	15.509	38.571		
080807-44		T <sub>3b</sub> 灰岩	18.537	15.483	38.507		
沱沱河地区地层							
080822-3		Pnr 灰岩	18.489	15.478	38.516		
080829-4		P <sub>2j</sub> 灰岩	18.476	15.501	38.489		
080829-25		P <sub>2j</sub> 灰岩	18.482	15.493	38.502		
080905-7		T 灰岩	18.697	15.701	38.789		
080905-8-2		T 灰岩	18.709	15.692	38.803	田世洪等,2011b	
080910-4		J 灰岩	18.719	15.686	38.814		
080910-20		J 灰岩	18.702	15.705	38.792		
080830-8		E 灰岩	18.659	15.628	38.617		
080831-2		E 灰岩	18.641	15.612	38.628		
囊谦盆地地层							
NangQ09-1-1		Eny 中石膏	18.598	15.621	38.642		田世洪等,2011b
NangQ09-3-1		Eny 中石膏	18.601	15.634	38.647		

表 3 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床脉石矿物 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of gangue minerals from the Mohailaheng Pb-Zn deposit in the Yushu area

样品号	成矿阶段	矿物名称	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$
MTC25-H3	IV	方解石	0.0069	0.708559	58.1	0.70856	0.1057	0.512369	-4.9	0.512346
MH08-008-1	III	方解石	0.0129	0.708708	60.2	0.70870	0.0956	0.512295	-6.3	0.512274
ZK11901-1	III	方解石	0.0091	0.708735	60.6	0.70873	0.1045	0.512306	-6.1	0.512283
ZK11901-9	III	方解石	0.0124	0.708873	62.5	0.70887	0.0842	0.512311	-5.9	0.512293
ZK11901-11	III	方解石	0.0096	0.708859	62.4	0.70885	0.1003	0.512318	-5.8	0.512296
ZK11901-12	III	方解石	0.0104	0.708812	61.7	0.70881	0.0892	0.512296	-6.2	0.512277
ZK11901-13	III	方解石	0.0016	0.708786	61.4	0.70879	0.1007	0.512302	-6.2	0.512280
ZK11901-17	III	方解石	0.0023	0.708738	60.7	0.70874	0.0887	0.512286	-6.4	0.512267
ZK11901-19	IV	方解石	0.0018	0.708834	62.1	0.70883	0.0843	0.512283	-6.5	0.512265
ZK11901-22	IV	方解石	0.0098	0.708767	61.1	0.70876	0.1013	0.512305	-6.1	0.512283
ZK11901-28	III	方解石	0.0023	0.708742	60.8	0.70874	0.0912	0.512318	-5.8	0.512298
ZK10301-18	IV	方解石	0.0061	0.708732	60.6	0.70873	0.0987	0.512321	-5.8	0.512300
ZK001-24	I	方解石	0.0054	0.708699	60.1	0.70870	0.0905	0.512313	-5.9	0.512293
ZK10302-2	III	方解石	8.172	0.712887	65.2	0.70906	0.5023	0.512422	-5.5	0.512314
ZK10302-8	III	方解石	3.568	0.710644	64.0	0.70897	1.084	0.512527	-5.9	0.512293
ZK10302-32	III	方解石	1.124	0.709463	63.5	0.70894	0.5995	0.512433	-5.7	0.512304
ZK10302-34	III	方解石	6.011	0.711844	64.8	0.70903	0.2723	0.512359	-5.8	0.512300
ZK10302-37	III	方解石	4.792	0.711035	61.4	0.70879	1.416	0.512631	-5.3	0.512325
ZK10302-39	III	方解石	7.309	0.712452	64.8	0.70903	1.259	0.512579	-5.6	0.512307
ZK10302-41	III	方解石	1.508	0.709649	63.6	0.70894	0.7437	0.512463	-5.7	0.512302
MTC27-H5-2	III	萤石	0.0337	0.708521	57.4	0.70851	0.1951	0.512401	-4.6	0.512359
MTC25-H5-4	III	萤石	0.6546	0.708836	57.7	0.70853	0.3306	0.512432	-4.6	0.512361
MH08-008-1	III	萤石	0.0152	0.708669	59.6	0.70866	0.0938	0.512286	-6.4	0.512266
ZK10302-33	III	萤石	0.0953	0.708967	63.3	0.70892	0.0718	0.512312	-5.8	0.512297
MTC25-H5-3	II	重晶石	0.0004	0.708563	58.2	0.70856	0.0937	0.512358	-5.0	0.512338

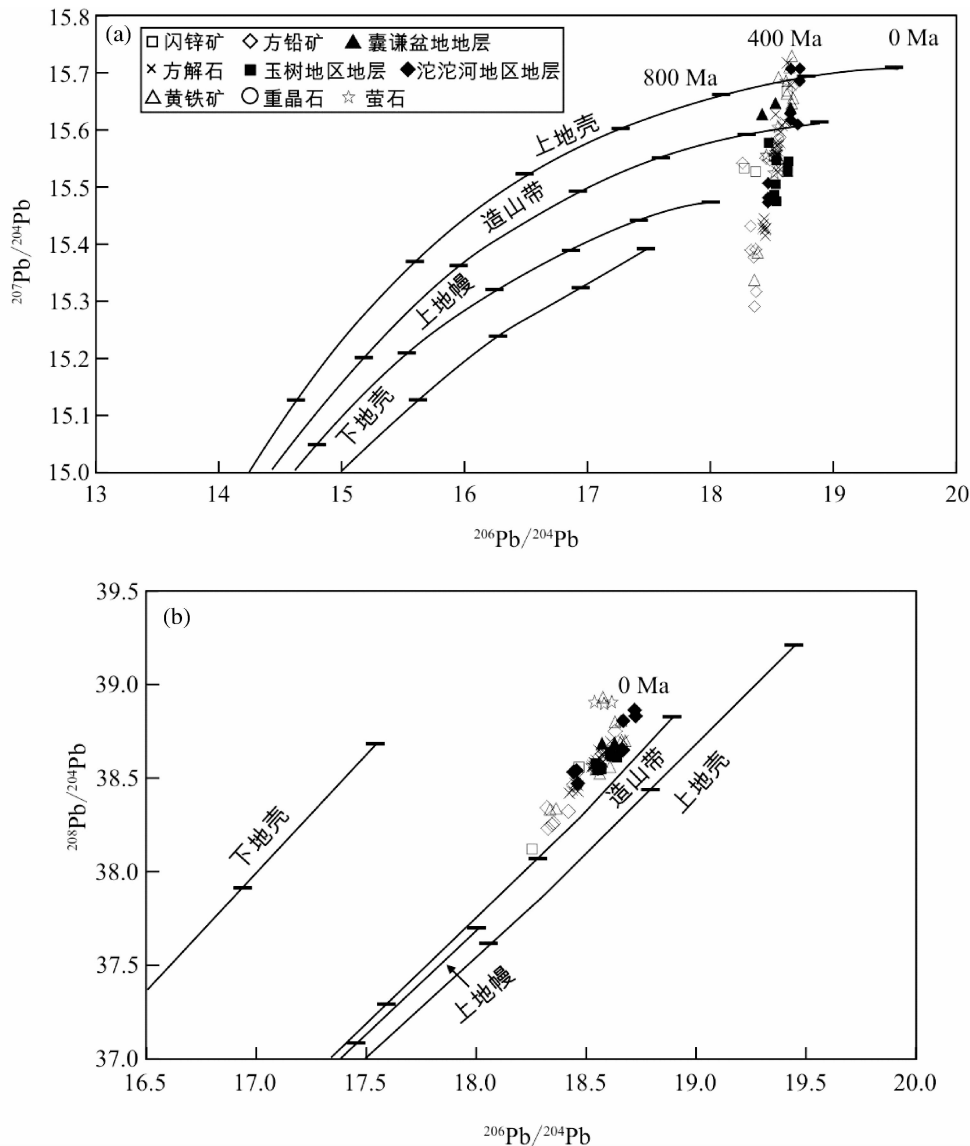


图4 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床矿石矿物、脉石矿物和区域地层 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投影图解(底图据 Leach *et al.*, 2005)

Fig. 4  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagrams of sulfide minerals, gangue minerals and regional strata from the Mohailaheng Pb-Zn deposit in the Yushu area (base map after Leach *et al.*, 2005)

位于造山带线和上地壳线附近,并呈线性排列,说明它们有相同的物质来源。

#### 4.3 Sr-Nd 同位素组成

袁忠信等(1995)和刘从强等(2004)根据四川牦牛坪稀土矿床脉石矿物方解石和重晶石的 Sr-Nd 同位素组成研究,证实该区稀土成矿物质来源与正长岩-碳酸岩密切相关,成矿物质具有幔源性。田世洪等(2011b)根据方解石和重晶石的 Sr-Nd 同位素组成分析,认为东莫扎抓铅锌矿床脉石矿物的物质来源来自上地壳岩石。为了进一步厘定莫海拉亨铅锌矿床的成矿物质来源,本文也选取 20 件方解石、4 件萤石

和 1 件重晶石进行了 Sr、Nd 同位素组成分析(表 3)。从表 3 和数据点的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 投影图解(图 5)可以看出:

由成矿年龄  $t = 33\text{Ma}$ (田世洪等,2009)计算的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>和( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub>与测定的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (现代值)不存在明显差别。从表 3 可见,不同阶段(第一阶段、第三阶段和第四阶段)的方解石 Sr-Nd 同位素组成彼此间无明显区别,其中第一阶段方解石( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.70870,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 60.1$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> = 0.512293,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.9$ , 第三阶段方解石( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.70870 ~ 0.70906,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 60.2 \sim 65.2$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> = 0.512267 ~ 0.512314,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.4 \sim -5.3$ , 第四阶段方解石( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.70856 ~



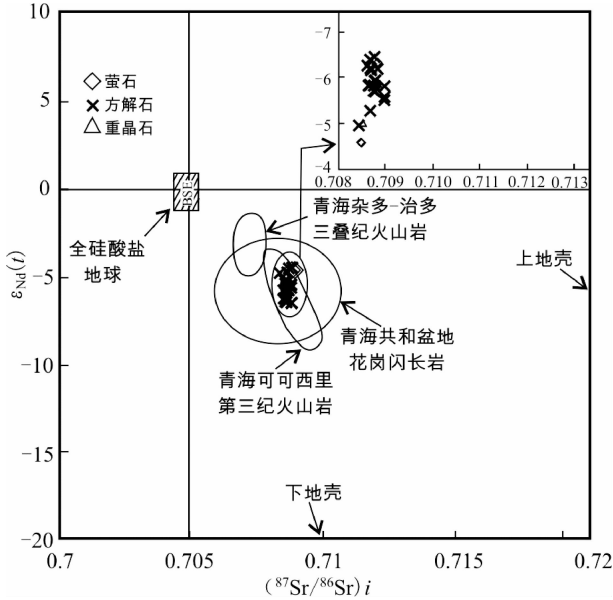


图5 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床脉石矿物 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> -  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图

青海可可西里新生代火山岩据郑祥身等(1996);青海共和盆地花岗岩类据张宏飞等(2006);青海杂多-治多三叠纪火山岩据马丽艳等(2007)

Fig. 5 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> -  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagrams of gangue minerals from the Mohailaheng Pb-Zn deposit in the Yushu area

Data of Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil district, Qinghai Province after Zheng *et al.* (1996); Data of granitoids around Gonghe basin in Qinghai Province after Zhang *et al.* (2006); Data of Triassic volcanic rocks in Zaduo-zhiduo district, Qinghai Province after Ma *et al.* (2007)

0.70883,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 58.1 \sim 62.1$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> = 0.512265 ~ 0.512346,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.5 \sim -4.9$ 。而第二阶段萤石 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.70851 ~ 0.70892,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 57.4 \sim 63.3$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> = 0.512266 ~ 0.512361,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.4 \sim -4.6$ , 第二阶段重晶石 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.70856,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 58.2$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> = 0.512338,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.0$ 。总体来说,不同阶段不同脉石矿物的 Sr-Nd 同位素组成彼此也无显著差别,说明它们具有相同的物质来源。

## 5 讨论

### 5.1 S 同位素

野外和室内显微观察表明,矿脉中各种硫化物的形成晚于重晶石,闪锌矿、方铅矿和黄铁矿常呈浸染状、斑杂状和脉状等分布于矿石中,交代了早期的重晶石和白云石等矿物。因此,硫化物和硫酸盐是不同成矿阶段的产物,两者之间达到同位素交换的平衡是很困难的。根据 Ohmoto (1972) 的理论计算,在高氧逸度下,当主要的硫物种为  $\text{SO}_4^{2-}$  时,可能的

矿物组合为重晶石+方解石,此时有  $\delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ ; 在中等氧逸度条件下,当硫化物与硫酸盐共存时,有  $\delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}} > \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ , 而  $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} < \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ ; 如果氧逸度再低些,硫酸盐不能存在,可能的矿物组合为黄铁矿+方铅矿+闪锌矿,则有  $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 。

在莫海拉亨矿区,第二成矿阶段主要矿物为重晶石,反应较高的氧逸度,没有硫化物生成。因此可以估计重晶石的  $\delta^{34}\text{S}$  与  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$  相接近,估计为 +20.2‰ ~ +24.2‰。第三成矿阶段的硫化物组合为闪锌矿+方铅矿+黄铁矿,不出现重晶石,反应氧逸度低,此时可以估计硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  与  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$  相接近 (Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979), 估计为 -30.0‰ ~ +7.4‰, 峰值为 -18‰ ~ -2‰, 反映了总体富轻硫的特征。

莫海拉亨铅锌矿床的硫同位素特征也十分类似于盆地热液流体成因的矿床,如 MVT、SST、SSC 型矿床,宽的  $\delta^{34}\text{S}$  变化范围可以解释为流体在盆地内活动期间与不同地层单元发生相互作用,从而继承了不同物质单元的 S 同位素特点,反映硫来自沉积盆地,与东莫扎抓铅锌矿床的一样 (田世洪等, 2011b)。

由于成矿系统中不同部位的封闭性不一致,使硫酸盐的细菌还原即可造成硫同位素组成变化范围很大 (Leach *et al.*, 2005); 而大量沥青的存在,是硫酸盐有机质热还原的有利条件,因此,硫的来源是硫酸盐生物还原和有机质热还原的结果。矿石中硫同位素为负值的硫化物,其硫应以生物还原硫为主,而硫同位素为正值硫化物,其硫应以热还原硫为主。该地区第三纪陆相盆地中有大量石膏,其  $\delta^{34}\text{S}$  值 13.1‰ ~ +18.3‰, 而盆地卤水可提供大量硫酸根,其在还原过程中可形成富轻硫的硫化物和富重硫的硫酸盐 (田世洪等, 2011b)。

### 5.2 Pb 同位素

绝大多数矿石矿物和脉石矿物的铅同位素组成介于区域上地壳 Pb 组成范围内 (图 4), 总体类似于 MVT 矿床, 显示 Pb 等金属元素来源于上地壳岩石 (Vaasjoki and Gulson, 1986; Sangster, 1990), 与东莫扎抓铅锌矿床的一样 (田世洪等, 2011b)。

朱炳泉 (1998) 认为钍铅的变化以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供更丰富的信息, 为突出这种变化关系, 将 Pb 同位素表示成与同时代地幔的相对偏差, 直观的表示是  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  成因分类图解。根据样品  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  相对于同时代地幔的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的偏差值  $\Delta\beta$  和  $\Delta\gamma$ , 做出莫海拉亨铅锌矿床  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  图解 (图 6), 数据点落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围和造山带铅范围内。

在 Zartman 的铅构造模式图 (图 4) 上, 莫海拉亨矿床铅同位素组成主要落入区域地层的铅同位素组成的范围, 还有一部分落入上地幔线附近, 表明这些矿床铅主要来自盆地内

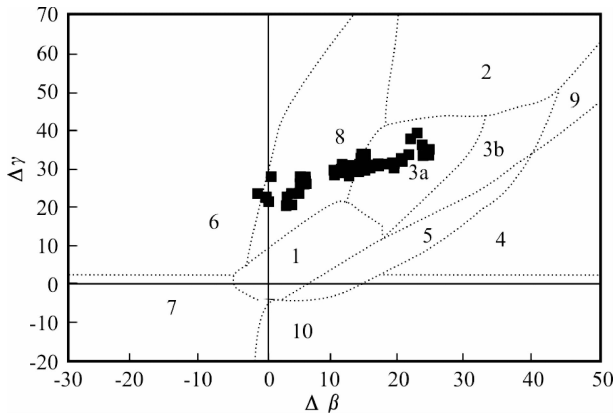


图6 玉树地区莫海拉亨铅锌矿床矿石矿物和脉石矿物铅同位素  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  成因分类图解(底图据朱炳泉,1998)

1-地幔源铅;2-上地壳铅;3-上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a 岩浆作用,3b 沉积作用);4-化学沉积型铅;5-海底热水作用铅;6-中深变质作用铅;7-深变质下地壳铅;8-造山带铅;9-古老页岩上地壳铅;10-退变质铅; $\Delta\beta = 1000 \times \beta / (\beta_M - 1)$ ,  $\Delta\gamma = 1000 \times \gamma / (\gamma_M - 1)$ ,  $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\beta_M$ 、 $\gamma_M$  分别为样品和地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

Fig. 6  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  genetic classification diagram of lead isotopes in sulfide minerals and gangue minerals from the Mohailaheng Pb-Zn deposit in the Yushu area (base map after Zhu, 1998)

1-mantle-derived lead; 2-upper crust lead; 3-mixed lead of the upper crust and mantle subduction zones (3a: magmatism, 3b: sedimentation); 4-chemical sedimentary lead; 5-submarine hydrothermal lead; 6-medium-high grade metamorphism lead; 7-lower crust lead of high grade metamorphism; 8-orogenic belt lead; 9-upper crust lead of ancient shale; 10-retrograde metamorphism lead;  $\Delta\beta = 1000 \times \beta / (\beta_M - 1)$ ,  $\Delta\gamma = 1000 \times \gamma / (\gamma_M - 1)$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  are values of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  respectively in samples,  $\beta_M$  and  $\gamma_M$  are values of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  respectively in the mantle

的地层,但也显示幔源物质的信息。从图6中看,数据点落在上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围和造山带铅范围内。Zartman的铅构造模式图上显示有幔源物质参与成矿的信息, $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因图上显示是岩浆作用的上地壳与地幔混合的俯冲带铅,是否说明成矿和幔源的岩浆有关呢?但矿床地质特征上并未见到成矿和岩浆活动相关的证据。因此认为莫海拉亨铅锌矿床中的成矿物质来自沉积地层,与东莫扎抓铅锌矿床的一样(田世洪等,2011b)。

### 5.3 Sr-Nd 同位素

在( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图(图5)上,所有样品的投影点均处在第四象限内,显示远离全硅酸盐地球估计值(BSE, Zindler and Hart, 1986)。第四象限为低Nd高Sr的壳源区,

投影点更靠近上地壳或年轻地壳的区域(图5, Depaolo and Wasserburg, 1979),与青海可可西里第三纪火山岩(郑祥身等,1996)、青海共和盆地花岗闪长岩(张宏飞等,2006)和青海杂多-治多三叠纪火山岩(马丽艳等,2007)的Sr-Nd同位素特征相似,说明它们具有相同的源区特征和成因联系,后者均被认为来自上地壳物质,因此莫海拉亨铅锌矿床脉石矿物的物质来源来自上地壳岩石,这与通过Pb同位素得出的结论相一致,也与东莫扎抓铅锌矿床的一样(田世洪等,2011b)。

### 5.4 与东莫扎抓铅锌矿床对比及其动力学背景

刘英超(2009)和田世洪等(2009)已从以下5个方面证实了东莫扎抓和莫海拉亨2个铅锌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( $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Na}^{+}$ - $\text{Cl}^{-}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{F}^{-}$ )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,大气降水为辅的特点;(5)2个矿床具有相似的成矿时代,其中东莫扎抓铅锌矿床形成于35Ma,而莫海拉亨铅锌矿床形成于33Ma。本文和田世洪等(2011b)通过东莫扎抓和莫海拉亨2个铅锌矿床的S、Pb、Sr-Nd同位素组成分析,认为2个矿床的成矿物质均来源于沉积地层。

前已述及,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,成为卤水流体长距离迁移的主干通道,形成流体运移的疏导系统;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 and Raffensperger, 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,流体在第三纪盆地迁移的过程中与碳酸盐岩相互作用和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 $\text{H}_2\text{S}$ 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。

## 6 结论

(1)热液硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为-30.0‰~+7.4‰,这一特征十分类似于盆地热液流体成因的矿床,宽的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范

围可以解释为流体在盆地内活动期间与不同地层单元发生相互作用,从而继承了不同物质单元的 S 同位素特点,还原硫应主要来自于硫酸盐的细菌还原或者含硫有机质的热还原,反映硫来自沉积盆地。

(2) 矿石矿物和脉石矿物的 Pb 同位素组成介于区域上地壳 Pb 组成范围内,总体类似于 MVT 矿床,显示 Pb 等金属元素来源于上地壳岩石。Sr-Nd 同位素特征亦显示脉石矿物的物质来源来自上地壳岩石。

(3) 莫海拉亨铅锌矿床的 S-Pb-Sr-Nd 同位素特征均与东莫扎抓铅锌矿床的一样,显示均来自沉积地层。

**致谢** 野外工作期间,得到了青海省地调院莫海拉亨矿区所有工作人员的大力支持和帮助;室内工作期间,得到国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室王成玉副研究员、南京大学现代分析测试中心王银喜教授等同志的大力支持;在此一并表示衷心感谢!

## References

Depaolo DJ and Wasserburg GJ. 1979. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 615 - 627

Garven G and Raffensperger JP. 1997. Hydrogeology and geochemistry of ore genesis in sedimentary basins. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposit*. New York: Wiley, 125 - 189

He LQ, Song YC, Chen KX *et al.* 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, (36): 106 - 132

Hou ZQ, Yang ZS, Xu WY *et al.* 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting. *Mineral Deposits*, 25(4): 337 - 358 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting. *Mineral Deposits*, 25 (5): 521 - 543 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Song YC, Li Z *et al.* 2008. Thrust-controlled, sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibet anorogenic belt: Geological features and tectonic model. *Mineral Deposits*, 27(2): 421 - 441 (in Chinese with English abstract)

Leach DL, Sangster DF, Kelley KD *et al.* 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposit: A global perspective. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 561 - 607

Li YL, Wang CS, Yi HS *et al.* 2006. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, northern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80: 1118 - 1130 (in Chinese with English abstract)

Liu CQ, Huang ZL, Xu C *et al.* 2004. Geofluids in the Earth's Mantle and Its Role in Mineralization: A Case Study of the Maoniuping REE Deposit, Sichuan Province, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 229 (in Chinese with English abstract)

Liu YC. 2009. Mineralization of Pb-Zn in Dongmohazhuzha and Mohailaheng Pb-Zn deposits, Zaduo area, Qinghai Province. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 - 114 (in Chinese with English summary)

Liu YC, Yang ZS, Hou ZQ *et al.* 2009. Geology and hydrogen, oxygen and carbon isotope geochemistry of Dongmohazhuzha Pb-Zn ore

deposit, Yushu area, Qinghai Province. *Mineral Deposits*, 28(6): 770 - 784 (in Chinese with English abstract)

Liu YC, Hou ZQ, Yang ZS *et al.* 2010. Fluid inclusion constraints on the origin of Dongmohazhuzha Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1805 - 1819 (in Chinese with English abstract)

Liu YC, Yang ZS, Hou ZQ *et al.* 2011. Wall rock alteration and pyrite-sphalerite mineralogy of the Dongmohazhuzha Pb-Zn ore deposit in Yushu area, Qinghai Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 490 - 506 (in Chinese with English abstract)

Ma LY, Bai YS, Niu ZJ *et al.* 2007. Geochemistry and tectonic settings of volcanic rocks in Late Triassic Gyeza Group of southern Qinghai. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(5): 428 - 437 (in Chinese with English abstract)

Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67: 551 - 578

Ohmoto H and Rye RO. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Deposits*. Second Edition. New York: John Wiley and Sons, 509 - 567

Oliver J. 1986. Fluids expelled tectonically from the orogenic belts; Their role in hydrocarbon migration and other geological phenomena. *Geology*, 14: 99 - 102

Sangster DF. 1990. Mississippi Valley-type and Sedex lead-zinc deposits: A comparative examination. *Institution of Mining and Metallurgy Transactions, Section B, Applied Earth Sciences*, 99: 21 - 42

Song YC. 2009. Characteristics and genetic model of sediment-hosted base metal deposits in Sanjiang Area, Southwest China. Post-Doctor Research Report. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 - 119 (in Chinese with English summary)

Song YC, Hou ZQ, Yang TN *et al.* 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: Characteristics and genetic types. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 355 - 380 (in Chinese with English abstract)

Spurlin MS, Yin A, Horton BK *et al.* 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to synclinal igneous activity, east-central Tibet. *GSA Bulletin*, 117: 1293 - 1317

Tian SH, Yang ZS, Hou ZQ *et al.* 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmohazhuzha and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications. *Mineral Deposits*, 28(6): 747 - 758 (in Chinese with English abstract)

Tian SH, Yang ZS, Hou ZQ *et al.* 2011a. Confirmation of connection between Dongmohazhuzha 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. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 475 - 489 (in Chinese with English abstract)

Tian SH, Yang ZS, Hou ZQ *et al.* 2011b. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Dongmohazhuzha lead-zinc ore deposit in the Yushu area, Southern Qinghai: Implications for the sources of ore-forming material in the deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2173 - 2183 (in Chinese with English abstract)

Vaasjoki M and Gulson BL. 1986. Carbonate-hosted base metal deposits: Lead isotope data bearing on their genesis and exploration. *Economic Geology*, 81: 156 - 172

Wang CM, Deng J, Zhang ST *et al.* 2010. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in southwest Sanjiang Tethys and Kangdian area on the western margin of Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1428 - 1438

Wang CS, Liu ZF, Yi HS *et al.* 2002. Tertiary crustal shortening and peneplanation in the Hoh Xil region: Implications for the tectonic history of the northern Tibetan plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(3): 211 - 223

Wang ZL. 2009. Study of multiple orogeny and metallogenesis in Yushu area, northern segment of Sanjiang. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 - 114 (in Chinese with English summary)

Wang ZL, Hou ZQ, Yang ZS *et al.* 2009. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in

- Zaduo area, southern Qinghai. *Mineral Deposits*, 28(2): 157–169 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211–280
- Yuan ZX, Shi ZM, Bai G *et al.* 1995. The Maoniuping Rare Earth Ore Deposit, Mianning County, Sichuan Province. Beijing: Seismological Press, 1–150 (in Chinese)
- Zhang HF, Chen YL, Xu WC *et al.* 2006. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai Province: Petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2910–2922 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HR. 2010. Deformational structures and metallogenetic model of sediment-hosted Pb-Zn deposits in northern segment of the Sanjiang Orogenic Belt, Southwest China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–112 (in Chinese with English summary)
- Zhang WQ, Wang CY, Wang SL *et al.* 2007. The research on application of comprehensive geophysical exploration in Dongmohazhua deposit. *Qinghai Guotu Jinglue*, (4): 44–46 (in Chinese)
- Zheng XS, Bian QT and Zheng JK. 1996. On the Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil district, Qinghai Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 530–545 (in Chinese with English abstract)
- Zhu BQ. 1998. The Isotopic System Theory and Application in Earth Science and on the Crust-Mantle Evolution in China. Beijing: Science Press, 1–330 (in Chinese)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493–571
- 附中文参考文献**
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用. *矿床地质*, 25(4): 337–358
- 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. *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. *矿床地质*, 27(2): 421–441
- 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. *地质学报*, 80: 1118–1130
- 刘丛强, 黄智龙, 许成等. 2004. 地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例. 北京: 地质出版社, 1–229
- 刘英超. 2009. 青海杂多东莫扎抓-莫海拉亨铅锌成矿作用. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1–114
- 刘英超, 杨竹森, 侯增谦等. 2009. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床地质特征及碳氢氧同位素地球化学研究. *矿床地质*, 28(6): 770–784
- 刘英超, 侯增谦, 杨竹森等. 2010. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 26(6): 1805–1819
- 刘英超, 杨竹森, 侯增谦等. 2011. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床围岩蚀变和黄铁矿-闪锌矿矿物学特征及意义. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 490–506
- 马丽艳, 白云山, 牛志军等. 2007. 青海南部三叠纪结扎群火山岩地球化学特征及其构造环境分析. *地球学报*, 28(5): 428–437
- 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. 博士后研究报告. 北京: 中国地质科学院, 1–119
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南等. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 355–380
- 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. *矿床地质*, 28(6): 747–758
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦等. 2011a. 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. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 475–489
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦等. 2011b. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示. *岩石学报*, 27(7): 2173–2183
- 王召林. 2009. 三江北段玉树地区复合造山与成矿作用研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1–114
- 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类型矿床的关系. *矿床地质*, 28(2): 157–169
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽等. 1995. 四川冕宁牦牛坪轻稀土矿床. 北京: 地震出版社, 1–150
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春等. 2006. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义. *岩石学报*, 22(12): 2910–2922
- 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. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1–112
- 张文权, 王昌勇, 王生林等. 2007. 东莫扎抓矿区物探方法的综合应用效果. *青海国土经略*, (4): 44–46
- 郑祥身, 边千韬, 郑健康. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩研究. *岩石学报*, 12(4): 530–545
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化. 北京: 科学出版社, 1–330