

虎头崖多金属矿床成矿物质来源及演化

雷源保^{1,2}, 赖健清¹, 王雄军¹, 苏生顺³, 王守良³, 陶诗龙¹

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 湖南省地质调查院, 长沙 410116;
3. 青海省第三地质矿产勘查院, 西宁 810029)

摘要: 虎头崖矿床是祁漫塔格成矿带中一个典型的铅锌多金属矿床。依据野外矿床地质调查和室内光薄片鉴定工作将该矿床划分为4个成矿期, 7个成矿阶段。16件具代表性硫化物矿石单矿物硫、铅同位素测试显示, 硫、铅同位素具有如下特征: $\delta(^{34}\text{S})$ 变化范围为 $+0.6\times 10^{-3}\sim +9.8\times 10^{-3}$, 平均值为 $+5.2\times 10^{-3}$, 从岩体边部至远离岩体处硫同位素含量呈逐渐增大趋势; 铅同位素变化范围小, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.717~38.261, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.718~15.560, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为19.502~18.476。结合矿床地质特征和前人研究成果, 分析硫、铅同位素特征, 估算地幔、地壳中各组分, 获得地幔、地壳中Pb组分分别为0.07~0.22、0.78~0.93, 并推断矿床成矿物质来源为以地壳成分为主、含地幔成分的岩浆岩。成矿物质演化为在靠近岩体处S主要来源于岩体, 远离岩体处地层物质含量逐渐增加, 但主要为岩浆成分。

关键词: 虎头崖多金属矿床; 硫; 铅; 同位素; 成矿物质; 地壳; 地幔

中图分类号: P597; P595

文献标志码: A

Origin and evolution of ore-forming material of Hutouya polymetallic deposit

LEI Yuan-bao^{1,2}, LAI Jian-qing¹, WANG Xiong-jun¹, SU Sheng-shun³, WANG Shou-liang³, TAO Shi-long¹

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and InfoPhysics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Institute of Geology Survey, Changsha 410116, China;
3. Third Institute of Qinghai Geological Mineral Prospecting, Xining 810029, China)

Abstract: Hutouya deposit is one of the typical Pb-Zn polymetallic deposits in Qimantage region. This deposit was divided into 4 metallogenic epoches and 7 mineralization stages based on geological characteristics of ore and identification of polished sections and thin slices. There were 16 representative minerals selected from sulfides and measured to determine the values of S and Pb isotopes. The results show that the values of $\delta(^{34}\text{S})$ range from $+0.6\times 10^{-3}$ to $+9.8\times 10^{-3}$, in which the average value is $+5.2\times 10^{-3}$, and increase gradually from the edges of intrusions to the distal end of them, while the range of Pb isotope is small, with 38.717~38.261 for $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 15.718~15.560 for $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 19.502~18.476 for $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Associated with characteristics of the ore deposit and the results of the former researchers, the characteristics of S and Pb isotopes were analyzed, and the proportions of Pb in the crust and mantle are estimated to be 0.07~0.22 and 0.78~0.93, respectively. The sources of metallogenic material are speculated from the magmatite that is composed of large ratio of crust matter and small proportion of mantle. The evolution of metallogenic material is that S element has higher proportion of igneous rocks' matter when mineralization is adjacent to magmatite, and with larger percentage of strata in distal area; however, the main materials still originate from intrusions.

Key words: Hutouya polymetallic deposit; S; Pb; stable isotope; metallogenic material; crust; mantle

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAA01B06); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121220, 1212010818091)

收稿日期: 2013-10-08; **修订日期:** 2014-03-25

通信作者: 赖健清, 教授, 博士; 电话: 13875983805; E-mail: lj@csu.edu.cn

虎头崖铅锌多金属矿床位于地跨青海、新疆两省的祁漫塔格成矿带中部,毗邻肯德可克铁多金属矿床、尕斯库勒磁铁矿床和野马泉铜铁多金属矿床。祁漫塔格成矿带内矿产资源丰富,矿种多、成因类型复杂,铅锌矿床发育,具有代表性的铅锌矿床有维宝贯入式矽卡岩型矿床^[1]和四角羊沟矽卡岩型矿床^[2-3]。近年来,随着国土资源、商业地勘项目的开展,虎头崖矿区基础地质、矿床地质研究均取得较大进展,在原有铅锌矿基础上,相继发现铜矿体、铁矿体,且在矿床成因、成矿时代和成矿物质来源方面也取得了较深入的认识。锆石 SHRIMP U-Pb 测年和辉钼矿 Re-Os 测年表明矿床形成于印支期^[4],这与祁漫塔格多数典型矽卡岩型和斑岩型矿床成矿年龄范围一致^[5]。但在矿床成因方面,前人存在较大分歧,丰成友等^[4]和张爱奎等^[6]认为是矽卡岩型,而李欢^[7]依据矿体产状和同生角砾岩推测为未冒出海底的喷流沉积矿床,胡杏花等^[8]综合矿体和矿石特征将矿床归为岩浆期后热液矿床。马圣钊等^[9]对本矿床多个矿带矿石硫、铅同位素进行研究,从大地构造背景上分析,认为矿床成矿物质来自地层与深部岩浆混合,且部分成矿物质主要来源于地幔。本文作者运用硫、铅同位素从不同矿体、矿带与岩体的空间分布关系探讨成矿物质来源和演化,估算地幔铅与地壳铅的比例,推断矿床成矿物质主要来源于地壳,以及探讨矿床形成的大地构造背景,以进一步加深对成矿物质来源、演化及矿床成因认识。

1 成矿地质背景

1.1 区域地质背景

祁漫塔格地区地处柴达木地块西南缘,为古亚洲与特提斯结合部位^[10],经历古陆壳裂解成洋、闭合、俯冲挤压和造山过程^[11],形成了多岛弧盆造山系。该区地层从早到晚依次为:古-中元古界金水口群白沙河组、长城系小庙组、蓟县系狼牙山组,古生界奥陶-志留系滩间山群、泥盆系牦牛山组、石炭系大干沟组、二叠系苏组,以及中生界三叠系鄂拉山组、第四系^[5]。除白沙河组中深变质岩和鄂拉山组陆相火山碎屑岩、熔岩外,各地层均含碳酸盐岩,其中以石炭系大干沟组和二叠系苏组最为发育。区域内构造活动发育,主要以北西向断裂和近东西向次级断裂,以及短轴和隔档式褶皱为主^[12],其中北西向断裂构造控制该区岩浆岩活动,各次级断裂控制本区成矿作用。岩浆岩活动强烈,从晋宁期到燕山期发育基性岩、中酸性岩、侵入岩和喷出岩,以海西-印支期岩浆活动为主,这

一岩浆活动与本区斑岩型-矽卡岩型矿床成矿关系密切,为成矿作用提供物质基础和能量^[5]。

1.2 矿区地质

矿区出露地层包括中元古界蓟县系狼牙山组、奥陶-志留系滩间山群、下石炭统大干沟组、上石炭统二叠系苏组、三叠系鄂拉山组和第四系(见图1)。矿区南部呈东西向出露蓟县系狼牙山组(Jx1)大理岩、灰岩夹石英砂岩、角岩、板岩;中东部和中西部展布奥陶-志留系滩间山群(OST)含碳酸盐岩的玄武岩、凝灰岩及硅质岩;在狼牙山组与滩间山群之间呈东西向出露下石炭统大干沟组(C₁dg)大理岩和灰黑色含生物碎屑灰岩;北部出露上石炭统二叠系苏组(C₂d)大理岩夹薄-中层灰黑色含生物碎屑结晶灰岩,结晶灰岩中可见贝壳类、海百合茎等化石残余;西北角喷出下中生界三叠系鄂拉山组(T₃e)含石英、长石晶屑的晶屑凝灰岩。各地层产状均较陡,倾角为45°~70°。第四系(Q)覆盖在各山系的沟谷处,呈不规则状分布。

矿区构造主要以近东西向层间滑脱构造主(见图1)。F₂、F₇两条层间滑脱构造带分别发育于矿区北部和南部,总长约10 km,控制IV、VI、VII矿带形态产状,局部可见穿层矿体。矿区岩浆岩较复杂,从基性岩到中性岩均有出露。侵入岩以钾长花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩为主,呈岩株状侵入于上石炭统二叠系苏组碳酸盐岩中(见图1),岩体周围形成矽卡岩化带和不规则条带状铁、铜矿体。此外,还发育闪长岩、闪长玢岩、辉绿岩岩枝和岩脉。

矿区出露7个矿带和1个矿体(见图1),各矿带相距较远。按矿体的形态可分为两组:一组以VII矿带为代表,为似层状、层状矿体,局部可见穿层矿体,矿种主要为铜、铅、锌多金属矿,走向近东西,长约0.5~2 km;另一组为除VII矿带以外的矿带和矿体,呈不规则条带状、透镜状矿体,产于钾长花岗岩、二长花岗岩与碳酸盐岩接触部位或断层破碎带内,与矽卡岩伴生,主要矿种为铁、铜、铅、锌矿,形成内接触带矽卡岩型矿体^[4]。主要矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、黄铜矿和斑铜矿,其次为毒砂、辉钼矿,少量辉铜矿、磁黄铁矿和黄铁矿等。脉石矿物主要为方解石、石榴子石和绿帘石,其次为透辉石、萤石和石英等。内矽卡岩型矿带和北部IV矿带中围岩蚀变为较强矽卡岩化、碳酸盐化,层状、似层状矿体(VII矿带)中为弱矽卡岩化、碳酸盐化。根据野外矿脉的穿插关系和镜下特征,将矿床成矿期次划为4个成矿期7个阶段,各期次特征如下。

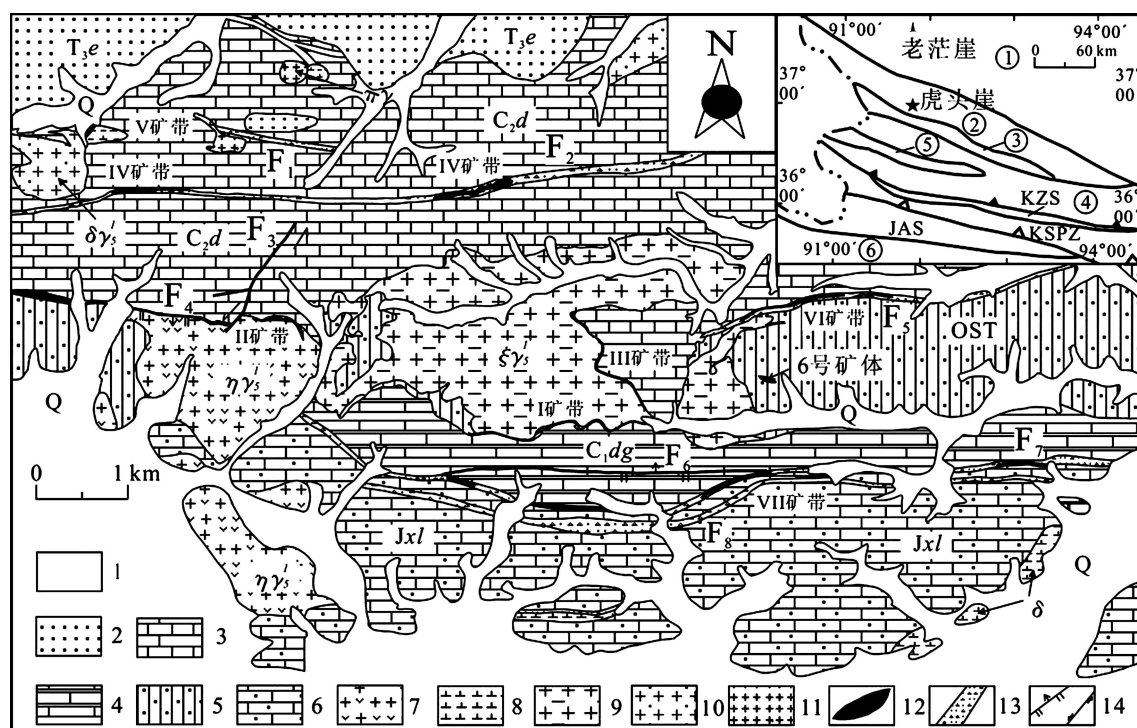


图1 虎头崖矿床地质图(据丰成友等^[4]修改,大地构造分区略图源自张雪亭^[13])

1—第四纪沉积物;2—上三叠统鄂拉山组晶屑凝灰岩;3—上石炭统锦敖苏组含生物碎屑结晶灰岩;4—下石炭统大干沟组大理岩、含生物碎屑灰岩;5—奥陶-志留系滩间山群玄武岩、凝灰岩和硅质岩;6—蓟县系狼牙山组大理岩、灰岩夹石英砂岩、板岩和角岩;7—印支晚期二长花岗岩;8—闪长(玢)岩;9—钾长花岗岩;10—花岗闪长(斑)岩;11—花岗斑岩;12—矿带或矿体;13—层间滑脱构造;14—断层。大地构造分区略图:①—柴达木中新代后造山磨拉石前陆盆地;②—祁漫塔格山北坡-夏日哈新元古代-早古生代岩弧带;③—祁漫塔格-都兰新元古代-早古生代缝合带;④—东昆仑岩浆弧带;⑤—东昆仑中陆块那陵格勒河后造山磨拉石前陆盆地;⑥—华板块巴颜喀拉边缘前陆盆地;KZS—东昆仑中新元古代-早古生代缝合带;KSPZ—东昆仑南坡俯冲碰撞杂岩带;JAS—鲸鱼湖-阿尼玛卿晚古生代-中生代缝合带

Fig. 1 Geological map of Hutouya deposit (Modified from FENG Cheng-you, et al^[4], skeleton map of tectonics' division originated from ZHANG Xue-ting^[13])

1—Quaternary sediment; 2—Elashan Formation of upper Triassic, crystal tuff; 3—Di'aosu Formation of upper Carboniferous, crystalline limestone contained biological debris; 4—Dagangou Formation of lower Carboniferous, marble and limestone with biological debris; 5—Tanjianshan Group of Ordovician-Silurian, basalt, tuff and siliceous rock; 6—Langyashan Formation of Jixianian System, marble and limestone interbedded quartzite, slate and hornstone; 7—Indo-Chinese epoch adamellite; 8—Diorite or diorite-porphyrity; 9—Moyite; 10—Granodiorite or porphyritic granodiorite; 11—Granite porphyry; 12—Ore belts or ore bodies; 13—Structures of decollement between strata; 14—Fault. Skeleton map of tectonic division: ①—Foreland basin with Molasse of post orogen in Qaidam in middle Cenozoic; ②—Magmatic arc belt of northern Qimantage Mountain-Xiariha in late Proterozoic to early Paleozoic; ③—Suture zone of Qimantage-Dulan in late Proterozoic to early Paleozoic; ④—Magmatic arc belt of East Kunlun; ⑤—Foreland basin contained Molasse of post orogen in Nalinggelehe, middle plate of East Kunlun; ⑥—Foreland basin of Bayankala margin, South China Plate; KZS—Suture zone of middle East Kunlun, in late Proterozoic to early Paleozoic; KSPZ—Subduction and collision complex of northern East Kunlun; JAS—Suture zone of Jingyuhu-Animaqing in late Paleozoic to Mesozoic

沉积成矿期(沉积成矿阶段)。主要出现层纹状的多晶黄铁矿、方解石,各层纹间夹有黑色有机质,且被后期方铅矿、黄铜矿和毒砂交代(见图2(a)),与后期黄铁矿形成3个世代黄铁矿(见图2(b))。

矽卡岩期(包括进化变质阶段和退化变质阶段)。进化变质阶段形成不含水硅酸盐矿物,主要为自形、半自形石榴子石、透辉石、硅灰石和少量符山石等,未见矿石矿物。这些矿物被退化变质阶段形成的矽卡岩矿

物交代(见图 2(c)~(d))。退化变质阶段形成含水硅酸盐矿物,主要为他形不规则状、柱状绿帘石,纤维状或放射状透闪石(见图 2(e))、直闪石、阳起石,放射状、片状金云母和绿泥石,以及少量他形石英、萤石。这一阶段形成的金属矿物前期主要为磁铁矿,后期为磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、辉钼矿、白钨矿和锡石。这些矿物被石英硫化物期的矿物交代(见图 2(f)和图 3(a))。

石英硫化物期。此期间为成矿作用的主要阶段,根据野外矿物组合和交代穿插关系(见图 3(b)~(c)),可划分为 3 个阶段,从早到晚分别为铜硫化物阶段、铅锌硫化物阶段、碳酸盐化阶段。铜硫化物阶段主要矿

石矿物为黄铜矿、斑铜矿,少量黄铁矿、辉铜矿、黝铜矿等,以成固溶体分离结构(见图 3(d))和块状构造为主,黄铁矿形成略晚于黄铜矿(见图 3(e));主要脉石矿物为绿帘石、石英、绿泥石。铅锌硫化物阶段主要矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿,少量黄铁矿,以他形粒状结构、填隙结构(见图 3(f))和块状构造、浸染状构造为主,方铅矿略晚于闪锌矿和黄铜矿(见图 3(g));脉石矿物主要为石英、方解石、透闪石。碳酸盐化阶段主要呈脉状碳酸盐岩矿物和黄铁矿穿插早期硫化物矿石组合(见图 3(c)和 3(h)),主要矿物组合为方解石、方铅矿和黄铁矿。

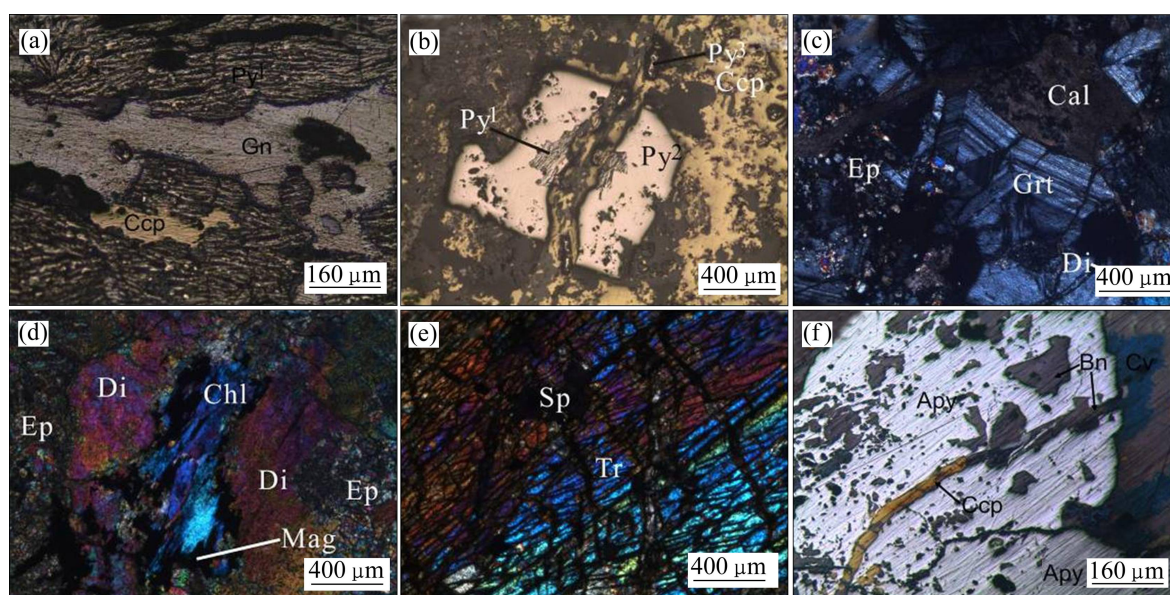


图 2 虎头崖矿床砂卡岩期次岩矿特征

(a), (b), (f) 为单偏下的光片照片; (c), (d), (e) 为正交下的薄片照片; (a)—沉积期多晶纤维状黄铁矿(Py¹)被黄铜矿方铅矿交代充填; (b)—3 个世代的黄铁矿, 早期黄铁矿(Py¹)被中期自形黄铁矿(Py²)交代包围, 晚期黄铁矿(Py³)和黄铜矿穿插中期自形黄铁矿; (c)—进化变质阶段半自形具环带的石榴子石被方解石石脉穿插和绿帘石交代; (d)—进化变质阶段透辉石被退化变质阶段的绿帘石和绿泥石交代, 并析出磁铁矿; (e)—退化变质阶段放射状透闪石中充填有不规则状闪锌矿; (f)—退化变质阶段的毒砂被黄铜矿和斑铜矿细脉穿插。矿物代号: Apy—毒砂; Bn—斑铜矿; Cal—方解石; Cc—辉铜矿; Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Cv—铜蓝; Di—透辉石; Ep—绿帘石; Gn—方铅矿; Grt—石榴子石; Lm—褐铁矿; Mag—磁铁矿; Mal—孔雀石; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Td—黝铜矿; Tr—透闪石

Fig. 2 Characteristics of rocks and minerals in different epochs and stages in Hutouya deposit

(a), (b), (f) Pictures of polished block under plan polarized light; (c), (d), (e) Pictures of thin section under cross polarized light; (a) Polycrystal nemaline pyrite(Py¹) replaced by chalcopyrite and galena in the sedimentation episode; (b) Three stages of pyrite, the earliest pyrite(Py¹) replaced and surrounded by middle stage euhedral pyrite(Py²), with the latest stage pyrite (Py³) cutting the middle and earliest stage pyrite; (c) Subhedral garnet with girdles cut by calcite vein and replaced by epidote in prograde metamorphic stage; (d) Diopside in prograde metamorphic stage replaced by chlorite and epidote in retrograde metamorphic stage and deposited magnetite; (e) Radial tremolite in retrograde metamorphic stage filled with irregular sphalerite; (f) Arsenopyrite in retrograde metamorphic stage cut by chalcopyrite and bornite veins. Apy—Arsenopyrite; Bn—Bornite; Cal—Calcite; Cc—Chalcocite; Ccp—Chalcopyrite; Chl—Chlorite; Cv—Covellite; Di—Diopside; Ep—Epidote; Gn—Galena; Grt—Garnet; Lm—Limonite; Mag—Magnetite; Mal—Malachite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Td—Tetrahedrite; Tr—Tremolite

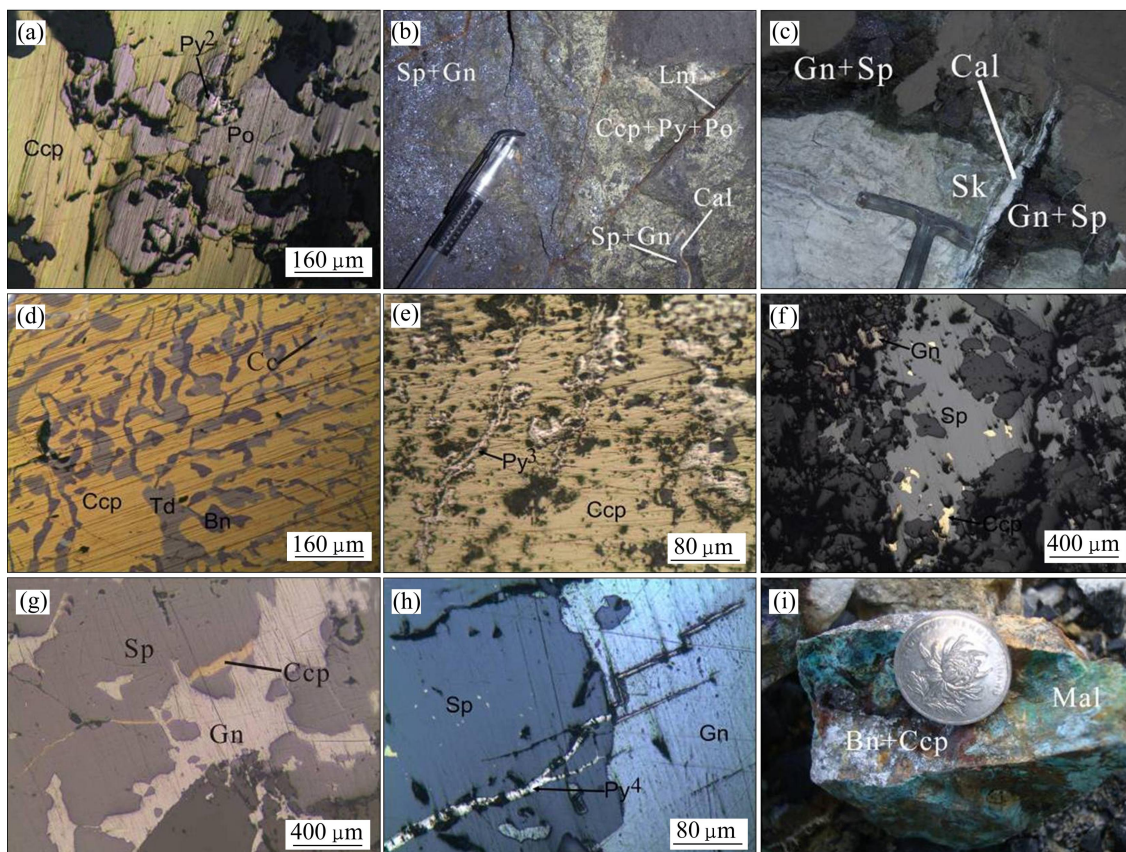


图3 虎头崖矿床石英硫化期次岩矿特征

(a), (d), (e), (f), (g), (h) 为单偏下的光片照片; (b), (c), (i) 为野外照片; (a)—铜硫化物阶段的黄铜矿交代包围黄铁矿和磁黄铁矿, 形成交代残余结构; (b)—铅锌硫化物阶段的闪锌矿和方铅矿组合及方解石脉交代穿插早期铜硫化物阶段的黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿组合, 沿节理发育的褐铁矿穿插上述两种组合; (c)—碳酸盐阶段的方解石脉错断铅锌硫化物组合和矽卡岩(SK); (d)—铜硫化物阶段的斑铜矿、辉铜矿和黝铜矿在黄铜矿中呈不规则乳滴; (e)—铜硫化物阶段中不规则黄铁矿细脉交代穿插黄铜矿; (f)—铅锌硫化物阶段的填隙结构和乳滴结构, 方铅矿、闪锌矿充填到脉石矿物间, 黄铜矿呈乳滴分布在闪锌矿中; (g)—穿插闪锌矿的黄铜矿细脉被方铅矿错断; (h)—碳酸盐化阶段的黄铁矿细脉(Py⁴)穿插方铅矿和闪锌矿; (i)—表生期铜矿石的氧化矿物孔雀石

Fig. 3 Characteristics of rocks and minerals in sulfide stage in Hutouya deposit

(a), (d), (e), (f), (g), (h) Pictures of polished block under plan polarized light; (b), (c), (i) Photos in field observation; (a) Pyrite and pyrrhotite replaced and surrounded by chalcopyrite of Cu-sulfide stage, formed texture of replacement and remnant; (b) Combination of sphalerite and galena in Pb-Zn sulfide stage, and combination of pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, cut and replaced by calcite veins, with later limonite vein cutting them; (c) Combination of lead-zinc sulfide and skarn are cut by calcite veins; (d) Chalcopyrite in Cu-sulfide stage contains irregular exsolution discs of bornite, chalcocite, tetrahedrite; (e) Chalcopyrite in Cu-sulfide stage is replaced and cut by irregular pyrite veins(Py⁴); (f) Intersertal texture and exsolution texture in lead-zinc sulfide stage, sphalerite, galena intergrowth with gangue minerals, and exsolution discs of chalcopyrite present in sphalerite; (g) Chalcopyrite veins cut sphalerite, cut by galena; (h) Sphalerite and galena cut by pyrite vein of carbonation stage; (i) Copper ore oxidized by malachite in supergene episode

表生氧化期(表生氧化阶段)。在原生矿物靠近地表处或裂隙连通地表处发育不规则次生氧化物细脉或皮壳状矿物集合体(见图 3(i)), 主要矿物为孔雀石、铜蓝、辉铜矿、褐铁矿、赤铜矿和白铁矿。依据上述成矿期次划分, 绘制矿物生成顺序图(见表 1)。

2 样品采集和分析测试

本研究中, 分别在IV矿带和VII矿带中采集硫化物

表 1 虎头崖矿床各成矿期次矿物生成顺序

Table 1 Episodes and sequence of crystallization in Hutouya deposit

矿 物	沉积成岩期	矽卡岩期		石英硫化物期			表生期
	沉积阶段	早期矽卡岩阶段	晚期矽卡岩阶段	铜硫化物阶段	铅锌硫化物阶段	碳酸盐化阶段	表生阶段
黄铁矿							
方解石							
石榴子石							
透辉石							
硅灰石							
符山石							
透闪石							
阳起石							
直闪石							
金云母							
绿帘石							
白钨矿							
锡 石							
磁铁矿							
磁黄铁矿							
辉钼矿							
毒 砂							
萤 石							
石 英							
绿泥石							
黄铜矿							
斑铜矿							
黝铜矿							
辉铜矿							
闪锌矿							
方铅矿							
铜 蓝							
赤铜矿							
孔雀石							
褐铁矿							
矿石构造	纤维状	条带状、块状		块状、浸染状			放射状
矿石结构		半自形、他形粒状		填隙、乳滴、交代残余等			
矿石类型		磁铁矿矿石		铜矿石和铅锌矿石			次生氧化矿
空间分布关系	碳酸盐岩地层中	岩体与围岩接触部位		靠近或远离岩体与围岩接触带部位			靠近地表

矿石样品 16 件，其中在西北角靠近花岗闪长岩(见图 1)IV矿带地表探矿坑道中采集 4 件，主要矿石类型为黄铜矿、斑铜矿矿石和铅锌矿石；在Ⅶ矿带矿井坑道中采集 12 件，这些样品来自不同地带不同中段，矿石主要类型为铅锌矿。样品先在光薄片下观察鉴定，将富含某种单矿物的样品磨成 0.25~0.42 mm，先在肉眼下挑选，然后在双目镜下精细挑选，挑选出 2~3 g 纯度达 98%以上单矿物，磨至 0.075 mm，送至核工业北京地质研究院分析研究测试中心进行硫、铅同位素测

试。硫同位素测试仪器为 MAT251，以 Cu₂O 作氧化剂制备测试样品，采用 CDT 国际标准，分析精度为 ±0.2%。铅同位素测试仪器为 ISOPROBE-T，测试方法参照 GB/T17672-1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》，分析精度对 1 μg 铅含量的 ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb 低于 0.05%，²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 不大于 0.005%。对国际标样 NBS981 测试结果如下：²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb=2.162189±0.000027，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb=0.913626±0.000059，²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb=0.059201±0.000015。以本次研究为基础，结合马圣钡等^[9](2012 年)测试数

据,将硫、铅同位素按不同矿带和矿体分为4组,绘制硫同位素直方图和铅同位素构造图解,利用 Geokit 软件^[14]计算铅同位素的模式年龄 t 、 μ (矿床中的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 分别为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与同时代地幔这一比值的相对偏差,绘制 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解。

3 硫、铅同位素特征

3.1 硫同位素组成

本研究中 16 个样品(闪锌矿、方铅矿、斑铜矿和毒砂)硫同位素测试结果见表 2。矿区硫化物矿石 $\delta(^{34}\text{S})$ 范围为 $+0.6\times 10^{-3}\sim +9.8\times 10^{-3}$, 这与马圣钊等^[9](2012 年)测试数据范围相近。综合马圣钊等^[9]测试数据,矿区矿石 $\delta(^{34}\text{S})$ 平均值为 $+5.2\times 10^{-3}$, 硫同位素值在各值段均有分布,大体上呈单峰式分布。由于矿区各矿带在空间上相差较大,依据其与成矿关系密切的钾长花岗岩、二长花岗岩的空间距离,将矿区中 5 个矿带和 1 个矿体从靠近岩体至远离岩体分为 4 组:第一组为 II 矿带和 III 矿带(见图 4(a)), 6 个样品;第二组为 IV 矿带(见图 4(b)), 7 个样品;第三组为 VI 矿带和 6 号矿体(见图 4(c)), 15 个样品;第四组为 VII 矿带(见图 4(d)), 16 个样品。各组硫同位素值如下:第一组 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+0.6\times 10^{-3}\sim +6.5\times 10^{-3}$, 除黄铜矿硫同位素值较大外,其余均集中于 $+1.0\times 10^{-3}$ 附近;第二组 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+1.7\times 10^{-3}\sim +3.6\times 10^{-3}$, 总体上分布于 $+2.2\times 10^{-3}$ 附近;第三组 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+2.7\times 10^{-3}\sim +6.8\times 10^{-3}$, 除 JY23 黄铜矿和 HTZK2301-14 方铅矿硫同位素值外,整体位于 $+5.0\times 10^{-3}$ 附近;第四组 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+1.6\times 10^{-3}\sim +9.8\times 10^{-3}$, 除样品 HT03 黄铜矿外,主要集中于 $+7.8\times 10^{-3}$ 附近。上述结果显示靠近成矿岩体至远离成矿岩体,硫同位素值逐渐增大。

整个矿区内主要硫化物硫同位素值变化范围较大:10 个方铅矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+0.6\times 10^{-3}\sim +8.4\times 10^{-3}$, 且在此范围内分布较均匀;15 个闪锌矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+1.0\times 10^{-3}\sim +9.8\times 10^{-3}$, 主要集中于 $+1.0\times 10^{-3}$ 和 $+8.0\times 10^{-3}$ 附近;11 个黄铜矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+1.6\times 10^{-3}\sim +6.5\times 10^{-3}$, 在此范围内分布较均匀;黄铁矿(3 个样品)和斑铜矿(2 个样品) $\delta(^{34}\text{S})$ 变化不大,分别为 $+5.9\times 10^{-3}\sim +6.8\times 10^{-3}$ 和 $+1.7\times 10^{-3}\sim +2.2\times 10^{-3}$ 。

3.2 铅同位素组成

闪锌矿、方铅矿、斑铜矿和毒砂单矿物共 16 件,其铅同位素测试结果见表 2。结合马圣钊等^[9]的测试结

果,将铅同位素分为 4 组:第一组为 II 矿带和 III 矿带,6 个样品;第二组为 IV 矿带,7 个样品;第三组为 VI 矿带和 6 号矿体,8 个样品;第四组为 VII 矿带,16 个样品。测试结果(表 2)表明矿区 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.717\sim 38.261$, 均值为 38.449 , 标准差为 0.102 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.718\sim 15.560$, 均值为 15.639 , 标准差为 0.033 ; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $19.502\sim 18.476$, 均值为 18.597 , 标准差为 0.176 , 其中 2 个样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 大于 19.000 , 其余均小于 18.700 。

根据单阶段铅演化模式,利用 Geokit 软件^[14]计算出铅同位素各特征参数(见表 2),计算中运用地参数值为 $\alpha_0=9.307$, $\beta_0=10.294$, $\gamma_0=29.476$, 成矿年龄值为 $t=235\text{ Ma}$ ^[4], 地球年龄 $T=4.43\text{ Ga}$ 。整个矿区铅模式年龄值多集中于 $110\text{ Ma}\sim 150\text{ Ma}$, 这与丰成友等^[4](2011 年)所测成矿年龄相差较大。 Th/U 值范围为 $3.20\sim 3.77$, 变化范围很小,表现出稳定铅同位素特征。 $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 值变化范围也很窄,为 $9.37\sim 9.67$ 。这一范围位于地壳 ($\mu_c=9.81$), 与原始地幔 ($\mu_0=7.80$) 的之间,反应出壳幔混合铅特征。

4 讨论

4.1 硫、铅同位素判别成矿物质来源的依据

硫同位素对成矿物质来源示踪的前提条件为硫同位素已达到分馏平衡和矿石硫同位素值应等于热液硫同位素值^[15]。矿石矿物硫同位素平衡条件为 ^{34}S 富集由易至难的顺序为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、辉铜矿^[15], 而矿区各主要矿石硫化物的 ^{34}S 同位素富集由易至难的顺序为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、磁黄铁矿,并没有遵循上述硫同位素平衡条件。但按硫化物共生顺序,不同成矿阶段中硫化物中硫同位素已经达到平衡,总体上,铜硫化物阶段 $\delta(^{34}\text{S})_{\text{py}} > \delta(^{34}\text{S})_{\text{csp}} > \delta(^{34}\text{S})_{\text{bu}}$, 铅锌硫化物阶段 $\delta(^{34}\text{S})_{\text{sp}} > \delta(^{34}\text{S})_{\text{gn}}$, 这说明矿区硫同位素大体上已达平衡,且早期硫化物阶段 $\delta(^{34}\text{S})$ 小于晚期硫化物 $\delta(^{34}\text{S})$ 。矿区内目前尚未发现硫酸盐矿物,且黄铁矿和磁黄铁矿均以稳定矿物出现,根据大本模式中磁黄铁矿-黄铁矿-方解石组合^[16],可以判断矿区矿石硫化物硫同位素相当于成矿热液硫同位素值。

铅同位素用于判断成矿物质来源的条件为地质体中含有极少量放射性铅^[17]。本矿床中稳定铅同位素的 3 个比值 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围很小,标准差均小于 0.18 , 表明矿区铅同位素中放

表 2 虎头崖多金属矿床硫、铅同位素值

Table 2 Values of S and Pb isotope in Hutouya polymetallic deposit

矿带	样品号	样品描述	测试对象	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t/Ma	μ	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	X	$1-X$	备注
II	JY11	钾长花岗岩	钾长石		38.407	15.604	18.630	143	9.59	3.72	88.22	23.18	39.35	0.11	0.89	[9]
II	HTY20	铅锌矿石	方铅矿	0.6	38.562	15.674	18.571	99	9.47	3.65	85.35	19.06	33.82	0.17	0.83	[9]
II	HTY20	闪锌矿石	闪锌矿	1.5												[9]
II	JY04	块状黄铜矿矿石	黄铜矿	3.6	38.317	15.657	19.502	103	9.48	3.65	85.18	19.13	33.98	0.16	0.84	[9]
II	JY13	黄铜矿磁铁矿矿石	黄铜矿	6.5	38.448	15.632	18.501	94	9.48	3.64	86.00	19.20	33.77	0.16	0.84	[9]
III	HTZK8201-7	磁铁矿矿石	闪锌矿	1.0	38.349	15.614	18.554	90	9.41	3.62	82.66	16.85	31.23	0.20	0.80	[9]
III	HTZK002-1	铜矿石	磁黄铁矿	0.9	38.384	15.640	19.035	146	9.62	3.72	89.39	24.09	40.34	0.09	0.91	[9]
IV	JY16	多金属矿石	方铅矿	2.4	38.357	15.611	18.522	112	9.53	3.67	87.40	21.02	36.09	0.14	0.86	[9]
IV	JY17	多金属矿石	黄铜矿	3.3	38.457	15.640	18.556	102	9.51	3.66	87.17	20.37	35.33	0.15	0.85	[9]
IV	HTY05	西段铜矿石	黄铜矿	2.2	38.428	15.643	18.682	96	9.49	3.65	86.58	19.72	34.47	0.16	0.84	[9]
IV	HB44-2	铜矿石	斑铜矿	2.2	38.503	15.639	18.561	94	9.48	3.64	86.41	19.46	34.04	0.16	0.84	本实验
IV	HB44-4	铜矿石	斑铜矿	1.7	38.620	15.690	18.585	79	9.48	3.63	87.23	19.26	33.61	0.16	0.84	本实验
IV	HB45-5	含闪锌矿毒砂矿石	毒砂	3.6	38.717	15.718	18.609	112	9.53	3.68	87.64	21.22	36.52	0.14	0.86	本实验
IV	HB45-7	铅锌矿石	方铅矿	1.8	38.363	15.612	18.519	122	9.56	3.69	88.16	22.07	37.7	0.12	0.88	本实验
6	JY25	矽卡岩矿石	方铅矿	4.4	38.355	15.613	18.533	129	9.58	3.7	88.93	22.92	38.86	0.11	0.89	[9]
6	JY25	矽卡岩矿石	黄铜矿	4.6												[9]
6	JY26	矽卡岩矿石	黄铁矿	6.8	38.369	15.617	18.532	120	9.55	3.68	87.87	21.74	37.24	0.13	0.87	[9]
6	JY28	黄铁矿矿石	黄铁矿	5.9												[9]
6	JY28	黄铁矿矿石	方铅矿	5.0	38.261	15.577	18.476	149	9.63	3.73	89.92	24.61	41.13	0.09	0.91	[9]
VI	JY19	黄铜矿矿石	黄铜矿	5.1	38.343	15.603	18.511	133	9.59	3.71	88.81	23.05	39.08	0.11	0.89	[9]
VI	JY20	黄铜矿矿石	黄铁矿	6.2	38.320	15.597	18.508	122	9.56	3.69	88.46	22.26	37.92	0.12	0.88	[9]
VI	JY23	多金属矿石	辉铜矿	2.7	38.465	15.560	18.547	109	9.55	3.68	88.81	21.81	37.65	0.13	0.87	[9]
VI	HTZK2301-3	铜矿石	黄铜矿	5.0	38.537	15.665	18.564	114	9.54	3.67	87.64	21.28	36.57	0.13	0.87	[9]
VI	HTZK2301-9	铜矿石	黄铜矿	4.5												[9]
VI	HTZK2301-13	铜矿石	黄铜矿	4.4												[9]
VI	HTZK2301-14	矽卡岩	方铅矿	3.1	38.599	15.688	18.591	94	9.48	3.64	86	19.2	33.69	0.16	0.84	[9]
VI	HTZK2301-14	矽卡岩	闪锌矿	6.4												[9]
VI	HTZK2301-15	矽卡岩	黄铜矿	6.0												[9]
VI	HTZK2301-15	矽卡岩	闪锌矿	5.6												[9]
VII	HT01	块状矽卡岩铅锌矿石	闪锌矿	7.2												[9]
VII	HT01	块状矽卡岩铅锌矿石	黄铁矿		38.522	15.666	18.578	-581	9.49	3.2	142.78	22.07	32.74	0.16	0.84	[9]
VII	HT02	块状矽卡岩铅锌矿石	闪锌矿	7.4	38.352	15.613	18.533	141	9.52	3.7	84.12	20.44	36.27	0.14	0.86	[9]
VII	HT02	块状矽卡岩铅锌矿石	方铅矿	8.3	38.441	15.641	18.557	111	9.53	3.67	87.34	20.96	36.52	0.14	0.86	[9]
VII	HT03	块状矽卡岩铅锌矿石	黄铜矿	1.6	38.344	15.606	18.537	23	9.52	3.6	94.73	21.15	35.74	0.14	0.86	[9]
VII	HK3-1	铅锌矿石	闪锌矿	9.8	38.457	15.644	18.561	137	9.58	3.71	87.81	22.59	38.67	0.11	0.89	本实验
VII	HK3-2	含围岩矿石	闪锌矿	9.2	38.501	15.657	18.570	97	9.46	3.65	84.71	18.54	33.44	0.17	0.83	本实验
VII	HK4-2	块状铅锌矿石	闪锌矿	8.9	38.544	15.670	18.583	82	9.46	3.63	86.23	18.74	33.47	0.17	0.83	本实验
VII	HK4-3	块状铅锌矿石	方铅矿	7.8	38.413	15.631	18.553	99	9.48	3.65	85.94	19.46	34.15	0.16	0.84	本实验
VII	HK6-2	块状铅锌矿石	方铅矿	8.4	38.381	15.621	18.543	128	9.58	3.69	88.63	22.66	38.27	0.11	0.89	本实验
VII	HK8-3	块状铅锌矿石	闪锌矿	7.3	38.484	15.652	18.565	92	9.45	3.63	84.53	18.15	32.82	0.18	0.82	本实验
VII	HK8-4	铅锌矿石	闪锌矿	7.5	38.628	15.696	18.600	106	9.52	3.69	87.64	20.89	37.76	0.14	0.86	本实验
VII	HK8-6	铅锌矿石	闪锌矿	6.5	38.552	15.672	18.581	152	9.62	3.74	89.04	24.22	40.91	0.09	0.91	本实验
VII	HK9-1	铅锌矿石	闪锌矿	8.7	38.509	15.660	18.575	170	9.67	3.77	90.45	26.05	43.52	0.07	0.93	本实验
VII	HK9-3	闪锌矿矿石	闪锌矿	7.9	38.499	15.653	18.581	15	9.37	3.67	86.82	15.74	36.73	0.22	0.78	本实验
VII	HK9-8	铅锌矿石	闪锌矿	7.7	38.459	15.645	18.561	10	9.45	3.61	91.68	18.61	35.17	0.18	0.82	本实验
VII	HK13-1	铅锌矿石	方铅矿	7.2	38.365	15.617	18.540	-245	9.49	3.42	115.41	20.96	34.55	0.16	0.84	本实验

本研究中数据来源于核工业北京地质研究院分析研究测试中心，其他数据来源于马圣钊等^[9]，空白处为未测试或未计算数据。 t 为模式年龄； μ 为矿床中的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ； $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 分别为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与同时代地幔这些比值的相对偏差，这些参数均由Geokit软件^[14]计算出来。

Data of this study were tested in Analytical Laboratory Beijing Research Institute of Uranium Geology. Other data are quoted from MA Sheng-chao, et al^[9](2012). Blanks are not tested or calculated. t —model age; μ — $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ of the deposit; $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ and $\Delta\gamma$ represent the deviation values of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compared with corresponding mantle values, respectively. All parameters are calculated by Geokit software^[14].

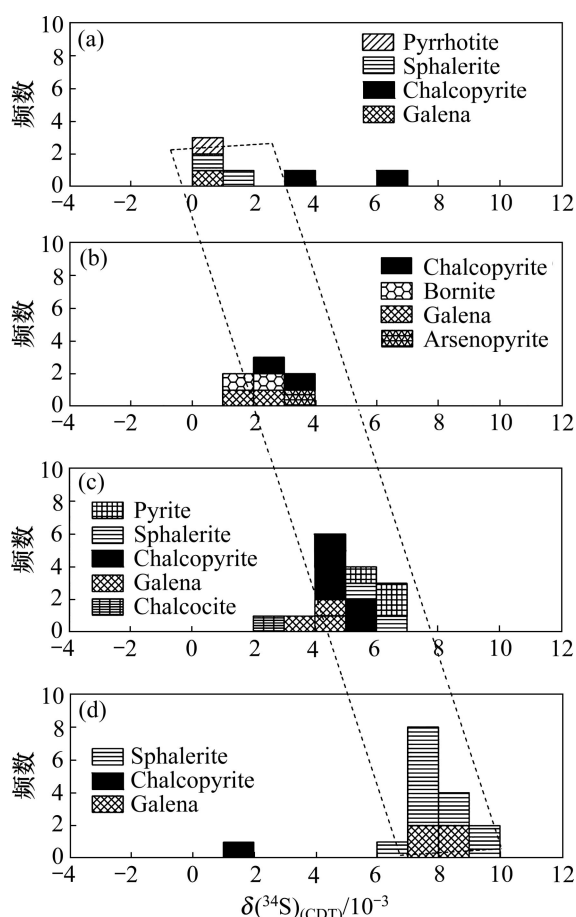


图4 虎头崖多金属矿床硫同位素直方图

Fig. 4 Histogram of S isotope values in Hutouya polymetallic deposit: (a) II and III ore belts; (b) IV ore belt; (c) 6th ore body and VI ore belt; (d) VII ore belt

射性成因铅含量很少,且 Th/U 值变化范围较小,仅为 3.20~3.77,说明 Th/U 值稳定,可以用于探讨成矿物质来源及演化。

4.2 成矿物质来源示踪

矿区 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+0.6 \times 10^{-3} \sim +9.8 \times 10^{-3}$, 平均值为 $+5.2 \times 10^{-3}$, 这一范围落在花岗岩类 $\delta(^{34}\text{S})$ ($-13.4 \times 10^{-3} \sim +26.7 \times 10^{-3}$)^[15] 中, 且与 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+0.6 \times 10^{-3} \sim +9.2 \times 10^{-3}$ 的磁铁矿系列花岗岩类成矿背景^[18] 非常接近, 但超出典型岩浆矿床的 $\delta(^{34}\text{S})$ 组成 $-2.0 \times 10^{-3} \sim +6.5 \times 10^{-3}$ ^[19], 而与古海相蒸发岩盐 $\delta(^{34}\text{S})$ 的最小值^[20] 有少量重叠。前人对祁漫塔格地区硫同位素研究^[5] 表明, 该区与岩浆成矿关系密切的海西-印支期典型斑岩型矿床的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $+0.5 \times 10^{-3} \sim +4.5 \times 10^{-3}$, 矽卡岩型矿床 $\delta(^{34}\text{S})$ $-2.1 \times 10^{-3} \sim +10.1 \times 10^{-3}$, 其成矿物质主要来自岩浆岩和被交代的围岩^[1, 5, 21]。虎头崖矿区硫同位素值正好位于这一范围之内, 说明虎头崖矿床成矿

物质来可能主要源于岩浆岩, 部分来源于围岩。

利用 3 个铅稳定同位素比值, 制作铅同位素构造环境判别图, 结果如图 5 所示, 分析成矿物质源于何种壳、幔层中或造山带^[22]。矿区铅同位素在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点图(见图 5(a))中, 主要位于造山带与上地壳之间, 少数样品位于造山带生长线下面, 以及上地壳线上面, 除 II 和 III 矿带 2 个样品外, 其余样品均在此投影图中呈一斜率较大的直线。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点图(见图 5(b))中, 矿区主要铅同位素值位于造山带附近的下地壳和上地壳之间, 呈现一直线, 仅有 II、III 矿带中 2 个样品处于上地壳

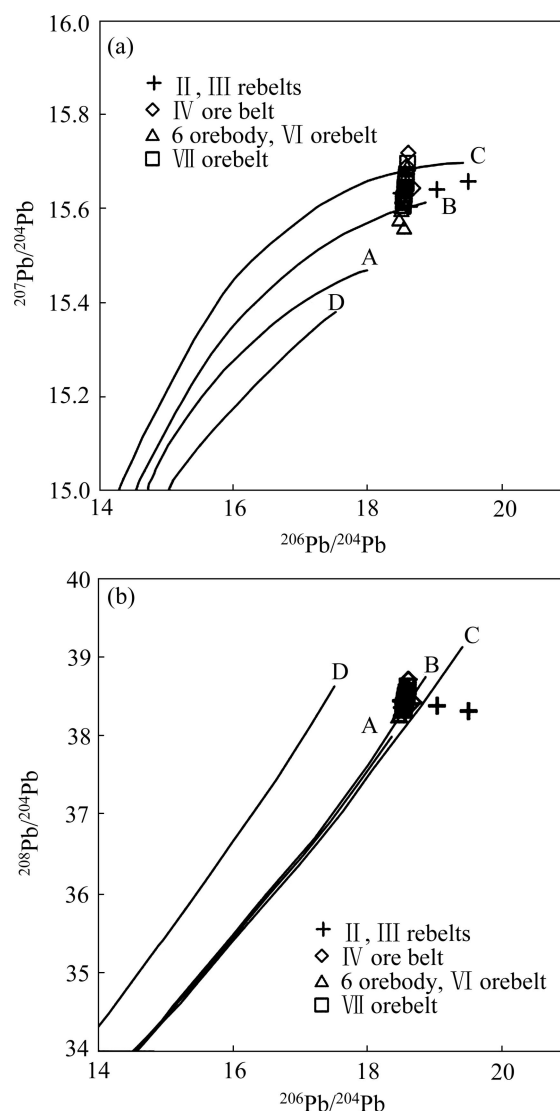


图5 虎头崖多金属矿床铅同位素构造图解(底图源自 Zartman 和 Doe^[22])

Fig. 5 Diagrams of lead isotope compositions in Hutouya polymetallic deposit (base maps derived from Zartman and Doe^[22]): A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

区域, 偏离直线较远。STACEY 和 HEDLUND 等^[23]认为: 投影点落在造山带增长线上方的矿石铅必然包含上地壳成分; 而投影点位于造山带增长线下方的矿石铅则必定源于地幔或下地壳; 投影点位于造山带增长线附近, 表明各储库混合源。依据上述判断标准可推测矿区铅主要源于各储库的混合, 且这种混合源主要以上地壳成分为主, 含有少量地幔成分。

铅同位素构造图解仅能粗略判断成矿物质来源于何种储库, 不能准确推断成矿物质来源何种地质体, 而朱炳泉等^[17]针对中国地质特征所创立的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解却能弥补这一不足。利用 Geokit 软件^[14]计算出矿区每个样品的 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$, 并将其投到 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解中(见图6)。矿区所有样品均落在俯冲作用下上地壳与地幔混合的岩浆作用范围内, 且样品总体上呈一斜线分布。说明矿区成矿物质主要来源于俯冲作用时上地壳与地幔混合的岩浆岩。

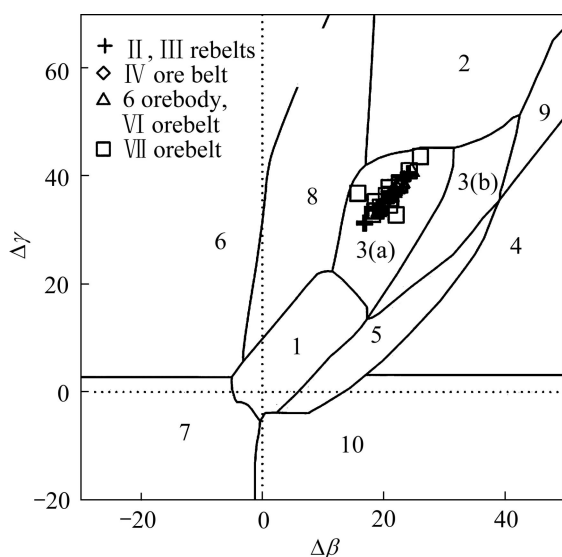


图6 虎头崖多金属矿床 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解(底图来源于朱炳泉等^[17])

1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲铅(3(a)—为岩浆作用; 3(b)—为沉积作用); 4—化学沉积铅; 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

Fig. 6 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram of Hutouya polymetallic deposit (Base map derived from ZHU Bing-quan, et al^[17])

1—Mantle lead; 2—Upper crust lead; 3—Mixed upper crust and mantle lead (3(a)—Magmatism; 3(b)—Sedimentation); 4—Chemical deposit lead; 5—Submarine hydrothermal lead; 6—Intermediate metamorphic lead; 7—High level metamorphic lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Upper crust lead of ancient shale; 10—Retrograde metamorphic lead.

地幔中 Pb 所占比例可根据下式计算^[17]:

$$\mu = \mu_C(1-X) + \mu_0 X \quad (1)$$

式中: $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 为利用 Geokit 软件^[14]计算所得值; μ_C 为地壳中 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值, 取 $\mu_C=9.81$; μ_0 为原始地幔中 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值, 取 $\mu_0=7.80$; X 为地幔 Pb 所占比例(即地幔中 Pb 组分), $1-X$ 为地壳中 Pb 所占比例(即地壳中 Pb 组分)。计算结果见表2中地幔组分和地壳组分, 地幔中 Pb 组分为 0.07~0.22, 地壳中 Pb 组分为 0.78~0.93。

铅同位素构造图解和 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解均表明, 虎头崖矿床铅元素源自上地壳与地幔混合, 这与利用式(1)所得地幔中 Pb 组分为 0.07~0.22 以及地壳中 Pb 组分为 0.78~0.93 一致, 说明矿区铅同位素为主要为来自含少量地幔成分的上地壳物质。这与该区较高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和负 $\varepsilon(\text{Nd}(t))$ 值^[24]特征相符, 说明地壳物质主要提供了成矿物质铅。形成这一混合铅储库的原因可能如下: 祁漫塔格地区所处板块经历晚古生代俯冲挤压时, 部分洋壳残留物质以地幔楔形式上侵到地壳中, 印支期残留洋壳和地壳发生重熔混合, 形成该区印支期大量构造岩浆活动。

4.3 成矿物质演化

依据矿带或矿体与成矿岩体(钾长花岗岩和二长花岗岩)的空间分布, 划分的 4 组硫同位素值(见图4)显示, 从靠近成矿岩体矿带至远离成矿岩体矿带(从 II 和 III 到 IV 矿带, 再到 6 号矿体和 VI 矿带, 最后到 VII 矿带)矿石中硫同位素 $\delta(^{34}\text{S})$ 有明显地增大趋势(见图4)。从 $+1.0 \times 10^{-3}$ 附近逐渐增大至 $+9.8 \times 10^{-3}$, 这说明成矿过程中成矿物质来源在不同的空间上有变化, 但这种变化并非硫同位素动力分馏中的氧化反应(如发生氧化反应则会在矿石中出现硫酸盐矿物, 但矿区中未见硫酸盐矿物)。硫同位素这一变化规律可解释如下: 岩体边部成矿物质中 $\delta(^{34}\text{S})$ 较小, 接近于陨石中 $\delta(^{34}\text{S})$, 其成矿物质可能主要来自矿区的钾长花岗岩和二长花岗岩, 以矿区中 II 矿带和 III 矿带为典型; 随着成矿作用在空间上远离岩体, 成矿流体不断萃取地层中成矿物质, 导致地层中成矿物质缓慢加入, 因而成矿流体中 $\delta(^{34}\text{S})$ 不断增大, 离成矿岩体最远的 VII 矿带中, $\delta(^{34}\text{S})$ 最大, 这一演化过程中依次形成具有代表性矿化的 IV 矿带、6 号矿体和 VI 矿带、VII 矿带。这种硫同位素变化规律也与靠近岩体处矽卡岩化强烈, 远离岩体处矽卡岩化变弱的矿床地质特征相应, 也与矿体在靠近岩体处呈透镜状、不规则条带状, 远离岩体处为层状、似层状对应, 还与成矿早期硫同位素值小于成矿

晚期硫同位素值相应。说明靠近岩体处成矿物质中岩浆成分占主体,温度较高,易于与碳酸盐岩发生交代作用形成强烈矽卡岩化;远离岩体处,来自于岩浆热液中的成矿物质在运移过程中经历较长时间与围岩发生交代反应,岩浆成分被萃取出来的地壳围岩成分稀释,温度也逐渐降低,因而形成较弱矽卡岩化。

5 结论

1) 通过野外和室内岩矿鉴定工作将该矿床划分4个成矿期7个成矿阶段。

2) 多种硫化物矿石硫同位素满足同位素平衡条件,可代表热液成矿流体的硫同位素,铅同位素中铅为稳定铅,可用于成矿物质来源示踪。

3) 硫同位素值特征及铅同位素构造图解和 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解,表明成矿物质主要来源于以地壳成分为主含少量地幔组分的岩浆岩;估算地幔、地壳中Pb组分分别为0.07~0.22和0.78~0.93。

4) 成矿物质演化上,成矿物质S可能在靠近岩体处主要来源于钾长花岗岩、二长花岗岩,远离岩体处围岩成分不断增加,但主要成矿物质来自岩体。

致谢:

本次研究中得到中国地质调查局资助,测试工作由核工业北京地质研究院分析研究测试中心承担,野外期间得到青海省第三地质矿产勘查院和金涌矿业有限公司领导和员工的帮助,在此一并感谢。此外,部分野外工作在中南大学祁漫塔格项目组谷湘平老师、黄敏、宋文彬、王业成、查道函、蒋明光、莫青云等人的帮助下完成,在此予以致谢。

REFERENCES

- [1] 黄磊. 新疆若羌县维宝铅锌矿地质特征及矿床成因[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
HUANG Lei. Geological characteristics and genesis of Weibao lead-zinc deposits in Xinjiang province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [2] 李洪普, 宋忠宝, 田向东, 芦文全. 东昆仑四角羊铅锌多金属矿床成矿地质特征及找矿意义[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 179-187.
LI Hong-pu, SONG Zhong-bao, TIAN Xiang-dong, LU Wen-quan. The mineralization characteristics and prospecting of Sijiaoyang Pb-Zn polymetallic deposit in Eastern Kunlun in Qinghai[J]. Northwest Geology, 2010, 43(4): 179-187.
- [3] 王进朝, 冯志兴, 李赛, 沈忠义, 于斌. 青海格尔木四角羊沟铅锌矿成因分析[J]. 云南地质, 2011, 30(2): 154-156.
WANG Jin-chao, FENG Zhi-xing, LI Sai, SHEN Zhong-yi, YU Bin. An analysis of the genesis of Sijiaoyanggou Pb-Zn deposit in Geermu, Qinghai[J]. Yunnan Geology, 2011, 30(2): 154-156.
- [4] 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 张爱奎, 肖晔, 刘建楠, 马圣钊, 李国臣, 李大新. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(6): 1806-1817.
FENG Cheng-you, WANG Xue-ping, SHU Xiao-feng, ZHANG Ai-kui, XIAO Ye, LIU Jian-nan, MA Sheng-chao, LI Guo-chen, LI Da-xin. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai province and its significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(6): 1806-1817.
- [5] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 李军红, 张占玉, 张爱奎, 舒晓峰, 苏生顺. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 10-17.
FENG Cheng-you, LI Dong-sheng, WU Zheng-shou, LI Jun-hong, ZHANG Zhan-yu, ZHANG Ai-kui, SHU Xiao-feng, SU Sheng-shun. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage Metallogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. Northwest Geology, 2010, 43(4): 10-17.
- [6] 张爱奎, 李云平, 刘光莲, 侯梦卫. 虎头崖铜铅锌矿床类型新认识及其意义[J]. 青海国土经略: 学术园地, 2008(4): 25-27.
ZHANG Ai-kui, LI Yun-ping, LIU Guang-lian, HOU Meng-wei. New cognition and its significance of Hutouya lead-zinc deposit[J]. Qinghai Land Management: Academic Field, 2008(4): 25-27.
- [7] 李欢. 青海虎头崖铅锌矿床地质特征及区域地质背景研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LI Huang. Metallogenic characteristics and geological background of Hutouya lead-zinc deposit, Qinghai[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [8] 胡杏花, 朱谷昌, 刘欢, 李智峰, 郑纬, 徐文海. 祁漫塔格矿带虎头崖多金属矿床特征和成矿作用分析[J]. 地质与勘探, 2010, 47(2): 216-221.
HU Xing-hua, ZHU Gu-chang, LIU Huan, LI Zhi-feng, ZHEN Wei, XU Wen-hai. Characteristics and mineralization of the Hutouya Polymetallic Deposit in the Qimantage Metallogenetic Belt[J]. Geology and Exploration, 2010, 47(2): 216-221.
- [9] 马圣钊, 丰成友, 李国臣, 苏晓峰. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、铅同位素组成及成因意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 321-331.
MA Sheng-chao, FENG Cheng-you, LI Guo-chen, SU Xiao-feng. Sulfur and lead isotope compositions of the Hutouya copper-lead-zinc polymetallic deposit in Qinghai province and their genetic significance[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 321-331.

- [10] 于文杰, 薛连明. 略论祁漫塔格地质构造特征[J]. 西北地质, 1986, 3: 15-21.
YU Wen-jie, XUE Lian-ming. Brief discussion of geological and tectonic characteristics of Qimantage area[J]. Northwest Geology, 1986, 3: 15-21.
- [11] 李月隆, 张芬英, 周晓中. 青海东昆仑造山带祁漫塔格地区铁钴金多金属矿找矿前景分析[J]. 甘肃冶金, 2007, 29(2): 34-36.
LI Yue-long, ZHANG Fen-ying, ZHOU Xiao-zhong. On prospecting foreground of multimetals mine in Qimantage of the Eastern Kunlun Mountains Orogenic Zone[J]. Gansu Metallurgy, 2007, 29(2): 34-36.
- [12] 张洪普. 东昆仑祁漫塔格铁多金属矿成矿地质特征与成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
ZHANG Hong-pu. Metallogenic geological characteristics and metallogenic prediction of Qimantage iron and polymetallic deposit of East Kunlun Mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [13] 张雪亭. 青海省板块构造研究—1:100 万青海省大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 128-156.
ZHANG Xue-ting. Plate tectonic research of Qinghai province: Instruction of Qinghai tectonic map for 1:1000000[M]. Beijing: Geology Press, 2007: 128-156.
- [14] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
LU Yuan-fa. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft excel[J]. Geochemica, 2004, 33(5): 459-464.
- [15] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218-234.
ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 218-234.
- [16] OHMOTO H. Systematics of sulfur and carbon in hydrothermal ore deposits[J]. Econ Geol, 1972, 67: 551-578.
- [17] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟. 地质科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 216-226.
ZHU Bing-quan, LI Xian-hua, DAI Tong-mo. Isotope system theory and application to the earth sciences—On crust-mantle evolution of continent of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 216-226.
- [18] SEAL R R II. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals[J]. Rev Mineral Geochem, 2006, 61: 633-677.
- [19] 徐文欣. 我国锡矿床的同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 1995, 45(1): 1-11.
XU Wen-xin. Isotope geochemistry of tin deposit in our country[J]. Mineral Resources and Geology, 1995, 45(1): 1-11.
- [20] SEAL R R II, RYE R O, ALPERS C N. Stable isotope systematics of sulfate minerals[J]. Rev Mineral Geochem, 2000, 40: 541-602.
- [21] 吴庭祥, 李宏录. 青海杂林格地区铁多金属矿床的地质特征与地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 157-161.
WU Ting-xiang, LI Hong-lu. Geological and Geochemical Characteristics of the Iron-polymetallic deposit in the Galinge area, Qinghai province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(2): 157-161.
- [22] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbo tectonics-the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.
- [23] STACEY J S, HEDLUND D C. Lead isotope compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. Geol Soc AM Bull, 1983, 94: 43-57.
- [24] 丰成友, 王松, 李国臣, 马圣钞, 李东生. 祁漫塔格中完三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665-678.
FENG Cheng-you, WANG Song, LI Guo-chen, MA Sheng-chao, LI Dong-sheng. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 665-678.

(编辑 龙怀中)