

文章编号:0258-7106(2013)01-0094-15

青海虎头崖多金属矿床地球化学特征及 成矿-控矿因素研究*

张爱奎¹, 刘光莲¹, 丰成友², 莫宣学³, 杨六成⁴, 刘永乐¹, 何书跃¹, 马永寿¹

(1 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810029; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810013)

摘要 虎头崖铜铅锌多金属矿床的成矿作用十分复杂, 成矿-控矿因素仍不明, 已成为制约找矿突破的瓶颈。鉴于此, 笔者对该矿床的地质、地球化学特征和侵入岩年龄及地球化学开展了研究。结果表明, VI矿带二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 (217.5 ± 1.1) Ma (MSWD=1.4)。VI矿带和II矿带二长花岗岩钾、钠含量均较高, $w(K_2O)$ 大于 $w(Na_2O)$, 分异程度较高。稀土元素球粒陨石标准化曲线向右缓倾斜, 强烈富集 LILE, 中等富集 HFSE, 贫 Ti、Ba, 具有后碰撞阶段岩石的特点。成矿受侵入岩岩浆源区、演化方式、地层、构造以及岩体与围岩接触方式的综合控制。源区具有地幔物质贡献的VI矿带二长花岗岩, 成矿作用较强, 主要形成近接触带矽卡岩型和远接触带矽卡岩型 Cu-Pb-Zn 多金属矿。而壳源特征为主的II矿带二长花岗岩成矿能力较弱, 主要形成矽卡岩型 Sn、Mo、Fe 等矿产。

关键词 地球化学; U-Pb 同位素年龄; 成矿-控矿因素; 矽卡岩矿床; 虎头崖; 青海祁漫塔格

中图分类号: P618.41; P618.42; P618.43

文献标志码: A

Geochemical characteristics and ore-controlling factors of Hutouya polymetallic deposit, Qinghai Province

ZHANG AiKui¹, LIU GuangLian¹, FENG ChengYou², MO XuanXue³, YANG LiuCheng⁴,
LIU YongLe¹, HE ShuYue¹ and MA YongShou¹

(1 Third Institute of Qinghai Geological Mineral Prospecting, Xining 810029, Qinghai, China; 2 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 College of Earth Sciences and Mineral Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, Xining 810013, Qinghai, China)

Abstract

Mineralization of the Hutouya deposit is very complicated, and the unclear mineralization and ore-controlling factors constitute the bottleneck which restricts the breakthrough of the ore-prospecting work. Detailed studies of characteristics of the ore deposit and geochemistry, geochronology and geochemistry of intrusive rocks were conducted by the authors with some achievements obtained. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic age of monzogranite in No. VI ore belt is (217.5 ± 1.1) Ma (MSWD=1.4). Monzogranite of VI mineral belt and II mineral belt have such features of post-collision rocks as high content of K_2O and Na_2O , higher K_2O than Na_2O , higher differentiation, gently right-oblique shape in chondrite-normalized REE patterns, enrichment of LILE, moderate enrichment of HFSE and depletion of Ti and Ba. Mineralization is controlled by such factors as magma

* 本文得到“青海省格尔木市野马泉地区铁多金属矿整装勘查区找矿部署研究”(青地调勘[2012]62号)和中国地质调查局地质调查项目(1212011085528)的联合资助

第一作者简介 张爱奎,男,1976年生,博士,高级工程师,从事矿床地质研究。Email: 474921988@qq.com

收稿日期 2012-05-19; 改回日期 2012-12-30。张绮玲编辑。

sources of intrusive rocks, evolution mode of intrusive rocks, strata, and structure. The monzogranite intrusions of VI mineral belt whose material was partly contributed by the mantle had features of strong fractional crystallization and relatively strong ore-forming capability. They mainly formed skarn-type Cu-Pb-Zn polymetallic deposits. II mineral belt Monzogranite which originated only from crustal sources had inferior mineralization capacity and they were mainly related to mineralization of such skarn-type ore bodies as tin, molybdenum and iron.

Key words: geochemistry, U-Pb isotopic age, mineralization and ore-controlling factors, skarn-type deposit, Hutouya, Qimantag, Qinghai Province

虎头崖矿床地处柴达木盆地西南缘的青海祁漫塔格地区,成矿与晚古生代—早中生代侵入岩的关系十分密切(丰成友等,2010,2012;刘云华等,2005;2006a)。矿区内岩浆侵入活动强烈,不同时代含碳酸盐岩的地层出露广泛,Fe-Cu-Sn-Mo-Pb-Zn等金属成矿元素组合复杂,具近接触带矽卡岩亚型和远接触带矽卡岩亚型多金属矿化(丰成友等,2011)。近年来,矿区找矿成果显著,矿床规模达到大型。但是随着找矿工作的不断深入,找矿难度越来越大。什么类型的岩浆岩与成矿更为密切,成矿主要受什么因素控制,这些问题还不能得到合理的解释,对矿床的成矿-控矿因素研究不够,已成为制约找矿突破的瓶颈。鉴于此,本次工作通过对侵入岩年代学及地球化学、矿床地球化学和成矿-控矿因素的研究,发现虎头崖矿床受岩浆岩源区、分异程度、演化方式以及地层和构造因素的综合控制,这对于区域成矿规律研究和促进勘探实践具有重要的参考价值。

1 矿区地质概况

虎头崖矿床位于格尔木市西约 345 km 处,地理坐标为:东经 $91^{\circ}30' \sim 91^{\circ}49'$,北纬 $37^{\circ}02' \sim 37^{\circ}06'$ 。所处大地构造分区属祁漫塔格结合带,北邻祁漫塔格北坡岩浆弧带和柴达木陆块,南与东昆中陆块相接(张雪亭等,2007)。

1.1 地层

矿区出露地层有蓟县系狼牙山组(Jxl)、奥陶系—志留系滩间山群(O-S)_t、下石炭统大干沟组(C₁dg)、上石炭统绵敖苏组(C₂d)、上三叠统鄂拉山组(T₃se)及第四系(Q)(图 1)。

蓟县系狼牙山组呈近 EW 向分布于矿区南侧,其北侧与下石炭统大干沟组呈断层接触。分为 3 个岩性段,第一岩性段是Ⅶ矿带最主要的赋矿地层,岩性主要为灰质白云岩、薄层含碳泥晶灰岩、大理岩,其次为硅质岩、同生角砾岩和少量石英粉砂岩;第

二岩性段岩性主要为石英砂岩、泥晶灰岩、大理岩;第三岩性段岩性主要为中厚层泥晶灰岩、灰质白云岩、含粉砂黏土岩、绢云母板岩。奥陶系—志留系滩间山群分布于矿区中部,近 EW 向,其南侧和北侧分别与下石炭统大干沟组和上石炭统绵敖苏组呈断层或角度不整合接触,岩性为玄武岩、凝灰岩夹硅质岩。下石炭统大干沟组是Ⅰ矿带最主要的围岩,位于蓟县系狼牙山组和滩间山群之间,并与它们呈断层接触,总体走向近 EW 向,倾向北,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,岩性主要为大理岩夹结晶灰岩。上石炭统绵敖苏组是Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅷ、Ⅸ矿带最主要的围岩,呈近 EW 向分布于矿区北部,岩性主要为微晶灰岩、微晶—粉晶白云岩、白云质灰岩、大理岩、生物碎屑灰岩、长石石英砂岩、角岩等。上三叠统鄂拉山组主要分布在矿区西北部,倾向北,倾角 $47^{\circ} \sim 62^{\circ}$,主要由晶屑凝灰岩、流纹质含角砾凝灰岩、流纹质玻屑晶屑角砾熔结凝灰岩等组成。

1.2 构造

矿区内褶皱、断裂构造发育,主构造线呈近 EW 向,是区域 NW 向昆北大断裂走向方向发生局部扭曲的表现。褶皱主要发育楚鲁套海高勒背斜,位于Ⅳ矿带,轴向近 EW 向,核部及两翼地层均为上石炭统绵敖苏组。靠近核部断裂破碎带发育,其南侧有二长花岗岩体侵入。主断裂呈 EW 向,分别见于Ⅳ矿带、Ⅱ矿带、Ⅶ矿带北侧等部位。Ⅳ矿带、Ⅱ矿带断裂属脆性断裂,Ⅶ矿带断裂兼具韧性变形和脆性断裂的特点,其南侧岩块中韧性变形十分强烈,发育糜棱岩和超糜棱岩,韧性变形主期变形时限为晚奥陶世,脆性断裂则形成于晚古生代—早中生代造山作用。矿区北部,NW 向和 NE 向共扼剪切断裂发育,走向分别为 40° 和 140° 。剪切断裂内岩石破碎,蚀变强烈,闪长玢岩脉发育,亦常见多金属矿体。

1.3 岩浆岩

矿区内岩浆岩十分发育,侵入岩主要为印支期中酸性岩,岩石类型主要有二长花岗岩、花岗闪长岩

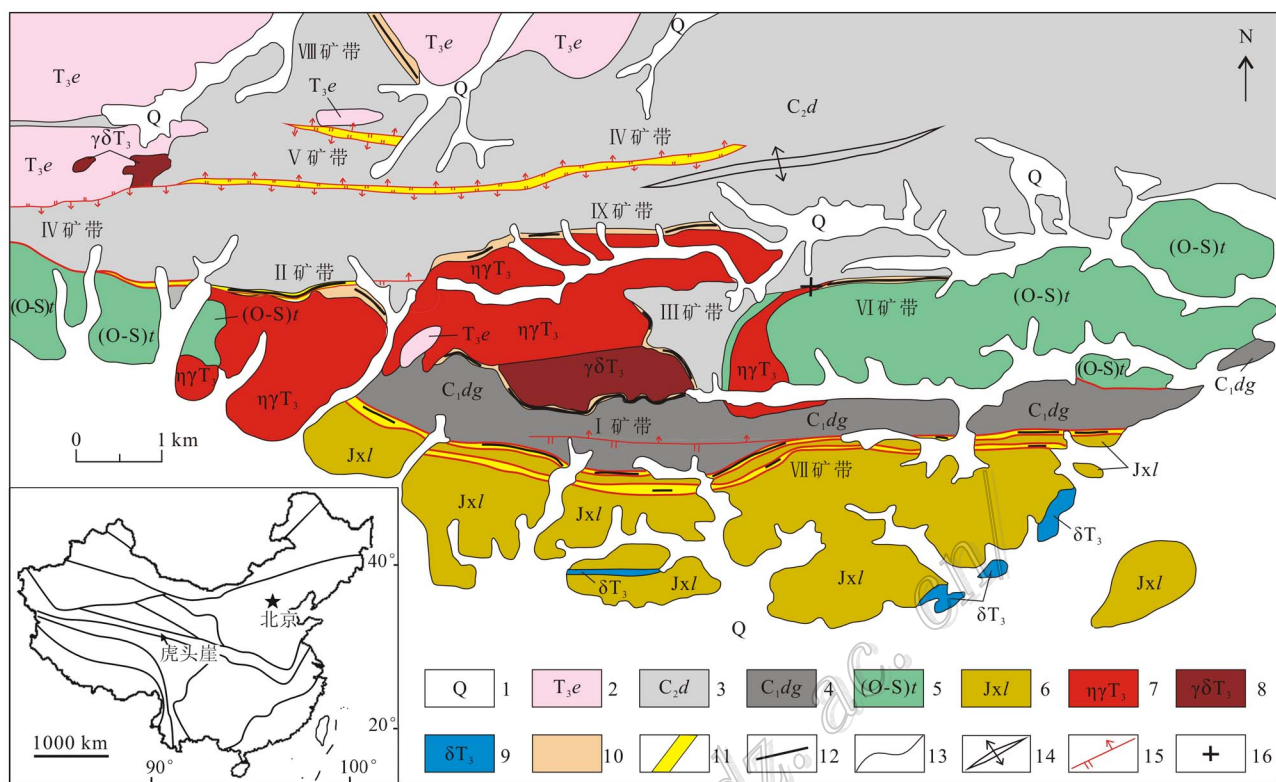


图 1 虎头崖矿区地质矿产图(据丰成友等, 2011 略做修改)

1—第四系; 2—上三叠统鄂拉山组晶屑凝灰岩、流纹质含角砾凝灰岩、流纹质玻屑晶屑角砾熔结凝灰岩等; 3—上石炭统绉敖苏组微晶灰岩、微晶—粉晶白云岩、白云质灰岩、大理岩、生物碎屑灰岩、长石石英砂岩、角岩等; 4—下石炭统大干沟组大理岩夹结晶灰岩; 5—奥陶系—志留系滩间山群玄武岩、凝灰岩夹砾质岩; 6—蓟县系狼牙山组灰质白云岩、含碳泥晶灰岩、大理岩、石英砂岩、绢云母板岩及硅质岩等; 7—晚三叠世二长花岗岩; 8—晚三叠世花岗闪长岩; 9—晚三叠世闪长岩; 10—矽卡岩; 11—破碎蚀变带; 12—矿体; 13—地质界线; 14—背斜; 15—逆断层; 16—同位素年龄样品采集位置

Fig. 1 Geological and mineral resources map of the Hutouya deposit (modified after Feng et al., 2011)

1—Quaternary; 2—Upper Triassic Elashan Formation crystal tuff, rhyolitic tuff breccia, rhyolitic glass the crumbs crystal crumbs brecciated ignimbrite; 3—Upper Carboniferous Diaosu Formation micrite and microcrystalline-crystal powder dolomite, dolomitic limestone, marble, bioclastic limestone, feldspar quartz sandstone, hornfels; 4—Lower Carboniferous Dagangou Formation marble, crystalline limestone; 5—Cambrian-Ordovician Tanjianshan Group basalt, tuff, cherts; 6—Langyashan Formation of Jixian System calcite dolomite, carbonaceous micritic limestone, marble, quartz sandstone, sericite slate and siliceous rocks; 7—Late Triassic monzogranite; 8—Late Triassic granodiorite; 9—Late Triassic diorite; 10—Skarn; 11—Fracture altered zone; 12—Ore body; 13—Stratigraphic boundary; 14—Anticline; 15—Reverse faults; 16—Sampling site

和闪长岩。喷出岩主要为晚三叠世晶屑凝灰岩、流纹质含角砾凝灰岩、流纹质玻屑晶屑角砾熔结凝灰岩等。

二长花岗岩体分布于矿区中部, 呈不规则状, 出露面积约 8.82 km²。西部 II 矿带二长花岗岩体内较少发现闪长质包体, 岩体与敖苏组地层呈断层接触或超覆接触(岩体位于地层上部)。接触带形态非常复杂, 地表倾向南, 倾角较陡, 通常为 50~70°, 深部局部倾向北, 倾角较缓, 通常为 20~30°。岩体与地层接触部位, 形成凹陷状, 其中发现有厚度较大的磁铁矿体。东部 VI 矿带二长花岗岩呈岩株状, 闪长质包

体十分发育, 东北部岩体超覆于上石炭统绉敖苏组之上, 接触带内岩石蚀变矿化强烈, 矿体规模较大。

花岗闪长岩体主要分布于矿区北西部和中南部, 出露面积约 1.37 km²。北西部沿背斜核部附近侵入于上三叠统鄂拉山组和上石炭统绉敖苏组中, 中南部侵入于下石炭统大干沟组和上石炭统绉敖苏组中。

闪长岩体呈岩脉状侵入于蓟县系狼牙山组地层中, 主要见于矿区南部, 走向近 EW 向, 长大于 1 km, 出露宽度一般为 10~30 m, 分布面积约 0.31 km²。岩体与围岩接触面形态不规则, 接触面产状较

陡,倾角一般为 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。

1.4 矿带、矿体和矿石

目前发现的 9 条矿带,从提交资源量情况来看,Ⅶ矿带最为重要,达到大型规模,已提交 Pb-Zn-Cu 金属资源量约 60×10^4 t,品位(质量分数,下同):Pb 为 $2.84\% \sim 3.47\%$,Zn 为 $2.71\% \sim 3.66\%$,Cu 为 $0.51\% \sim 1.08\%$;其次是Ⅵ矿带,估算 Cu-Pb-Zn 金属资源量约 20×10^4 t,品位:Cu $0.86\% \sim 1.22\%$,Pb $1.86\% \sim 3.16\%$,Zn $3.00\% \sim 3.09\%$;再次为Ⅱ矿带,提交 Sn 金属资源量约 0.3×10^4 t,Cu-Pb-Zn 金属资源量约 5×10^4 t,Fe 矿石资源量约 200×10^4 t,品位:Sn 0.22% ,Cu 1.06% ,Pb 平均为 3.46% ,Zn 平均为 3.50% ,TFe 为 29.22% 。

矿体主要产出于中酸性侵入岩与碳酸盐岩接触带形成的矽卡岩,以及远离接触带的构造破碎蚀变带(远接触带)中。Ⅶ、Ⅳ、Ⅴ矿带远离岩体接触带,其他矿带位于岩体近接触带,二者成矿特征具有明显差异。前者含矿岩层空间延伸较稳定,含矿岩石类型主要以细粒透辉石矽卡岩、硅化大理岩、矽卡岩化大理岩和绢英岩为主,Ⅶ矿带亦见少量硅质岩;成矿金属矿物以方铅矿、闪锌矿为主,黄铜矿相对较少,并发现有毒砂和砷硫锑铅矿,脉石矿物粒度相对较小,透辉石含量普遍大于石榴子石含量,绢云母、石英较多,但不出现萤石;围岩蚀变主要为硅化、矽卡岩化、绢英岩化、绿泥石化和碳酸盐化。后者含矿岩层空间延伸不规则,较严格受岩体接触带形态的控制,含矿岩石以透辉石石榴子石矽卡岩、石榴子石矽卡岩、透辉石绿帘石矽卡岩最为常见;Ⅵ、Ⅷ、Ⅸ矿带成矿金属矿物以黄铜矿、闪锌矿为主,其次为方铅矿,Ⅱ矿带以磁铁矿、黄铜矿和黄锡矿为主,并见辉钼矿、白钨矿,Ⅰ、Ⅲ矿带以磁铁矿为主;与Ⅶ、Ⅳ、Ⅴ矿带矽卡岩相比,近接触带矽卡岩的脉石矿物颗粒粗大,石榴子石含量一般较透辉石含量高,普遍含绿帘石,且萤石广泛出现;围岩蚀变主要为矽卡岩化及其退化蚀变和角岩化。代表性矿带及主矿体特征叙述如下。

Ⅶ矿带 产于蓟县系狼牙山组近东西向构造破碎蚀变带中,长 10 km,宽 30~150 m。目前,发现 4 条主矿体,呈似层状,倾向南,倾角较陡,通常为 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$,与围岩产状基本一致,具有顺层展布的特征(图 2)。主矿体长 350~1000 m,厚度 2.15~4.55 m,品位:Pb $2.84\% \sim 3.47\%$,Zn $2.71\% \sim 3.66\%$,Ag $51.33\% \sim 106.44\%$ 。矿石呈半自形-他形粒状结

构、压碎结构、交代结构、包含结构,浸染状、团块状、致密块状、似层状、脉状构造等。

Ⅳ矿带 产于上石炭统绵敖苏组近东西向构造破碎蚀变带中,断续长大于 10 km,但带内矿体规模较小。发现 1 条主矿体,呈似层状,倾向北,倾角较陡,通常为 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。主矿体长 490 m,厚度 1.60~3.49 m,品位:Pb 2.30% ,Zn 2.52% 。

Ⅵ矿带 产于二长花岗岩与上石炭统绵敖苏组接触带,长大于 3 km,宽 10~50 m。发现 2 条主矿体,呈透镜状,具有穿层现象(图 3)。矿体倾向 S,倾角为 $50^{\circ} \sim 78^{\circ}$ 。主矿体长 825 m,厚度 1.83~4.41 m,品位:Cu $0.86\% \sim 1.22\%$,Pb $1.86\% \sim 3.16\%$,Zn $3.00\% \sim 3.09\%$ 。矿石呈他形—半自形粒状结构,浸染状、块状、脉状、斑杂构造。

Ⅱ矿带 产于二长花岗岩与上石炭统绵敖苏组接触带,发现 2 条主矿体,矿体呈透镜状,倾向南,倾角为 $40^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。主矿体长 480~605 m,厚度 4.56~6.04 m,品位:Cu 1.06% ,Pb 平均为 3.46% ,Zn 平均为 3.50% ,TFe 为 29.22% ,Sn 为 0.22% 。

2 侵入岩年代学及地球化学

2.1 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年

曾在虎头崖矿区花岗闪长岩中测得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 (235.4 ± 1.8) Ma(丰成友等,2011),在中西部二长花岗岩中获得 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 (204.0 ± 2.6) Ma(刘云华等,2006b)和 (219.2 ± 1.4) Ma(丰成友等,2011)。近年在矿区东部发现Ⅵ号主矿带。本次工作选择Ⅵ矿带钻孔中二长花岗岩,采集了 HTY-JD1 样品,开展 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测定,样品平面坐标: X=4105100, Y=16383205。

本次采集的 HTY-JD1 样品较新鲜,蚀变很弱。从样品中挑选出的锆石形态完整,多呈柱状+双锥的聚形,生长环带发育,具有岩浆锆石的特征(图 4)。样品 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年数据列于表 1。

虎头崖Ⅵ矿带二长花岗岩 25 个点分析结果除 1 个点外,给出了较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 208~221 Ma,加权平均值为 (218 ± 2) Ma。在 U-Pb 谐和图中(图 5)投影点落入一致曲线附近,其平均年龄为 (217.5 ± 1.1) Ma(MSWD=1.4)(图 6)。与以往中西部二长花岗岩中测得的同位素年龄值相近,

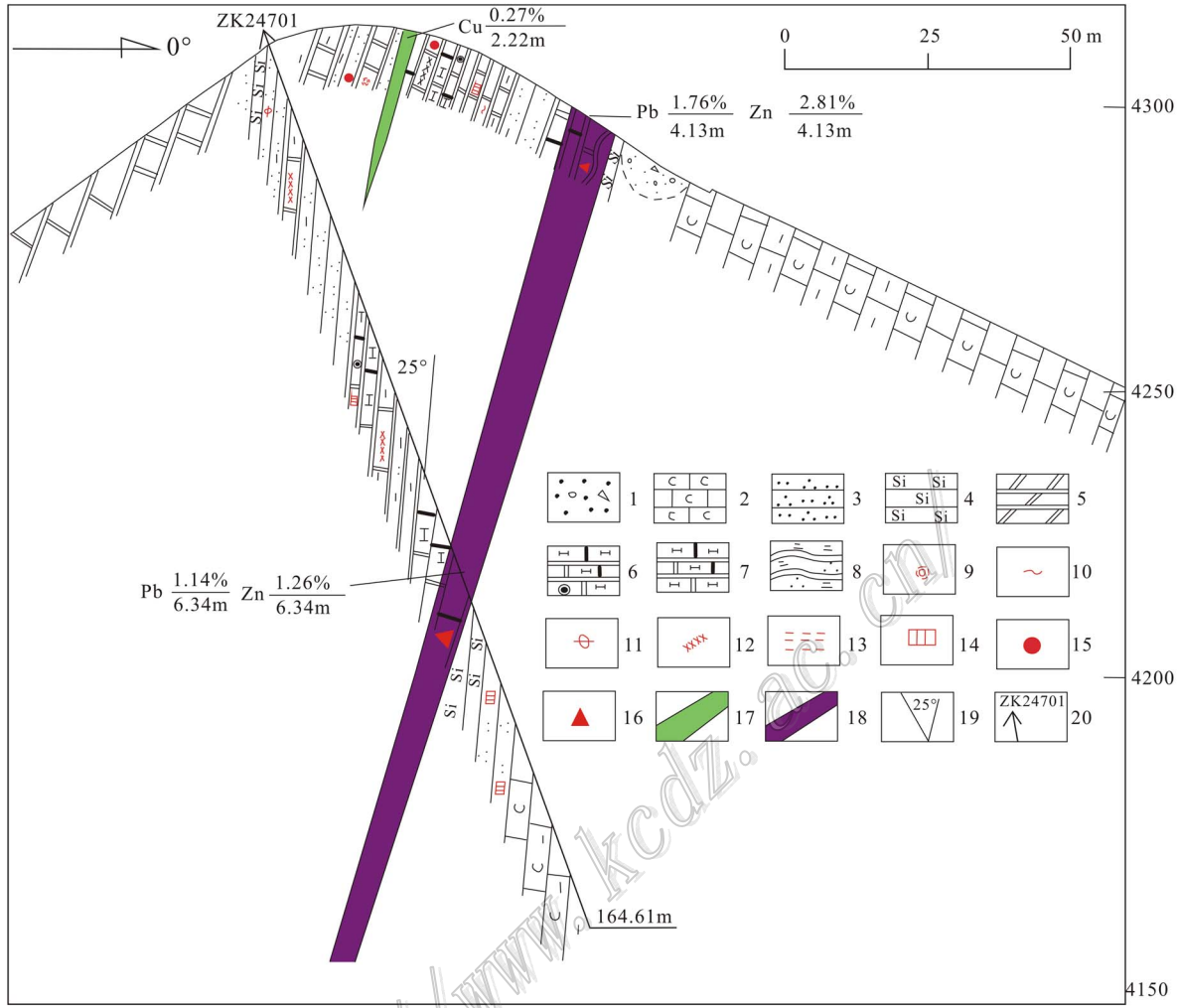


图 2 虎头崖矿区Ⅶ矿带 247 勘探线剖面图

1—第四系风成砂及残坡积物；2~7 为蓟县系狼牙山组：2—含碳泥晶灰岩；3—石英粉砂岩；4—硅质岩；5—大理岩、白云岩；6—含石榴子石透辉石砂卡岩；7—透辉石砂卡岩；8—绢英岩；9—硅化；10—绿泥石化；11—绿帘石化；12—砂卡岩化；13—糜棱岩化；14—黄铁矿化、磁黄铁矿化；15—孔雀石化、黄铜矿化；16—方铅矿化、闪锌矿化；17—Cu 矿体；18—Pb-Zn 矿体；19—轴心夹角；20—钻孔

Fig. 2 Geological section along No. 247 exploration line in VII ore belt, the Hutouya deposit

1—Quaternary Eolian sand and residual-slope wash material; 2~7 Langyashan Formation of Jixian system: 2—Carbonaceous micritic limestone; 3—Quartz-siltstone; 4—Cherts; 5—Marble, Dolomite; 6—Garnet-diopside skarn; 7—Diopside skarn; 8—Phyllic rock; 9—Silicification; 10—Chloritization; 11—Epidotization; 12—Skarnization; 13—Mylonitization; 14—Pyritization, Pyrrhotitization; 15—Malachitization, Chalcopryritization; 16—Galena alteration, Sphaleritization; 17—Copper ore body; 18—Lead-Zinc ore body; 19—Axis angle; 20—Drill hole

为晚三叠世。1 个点给出了 278 Ma 的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄,可能是记录了早二叠世俯冲的源区印记。

2.2 岩石地球化学特征

2.2.1 主量元素

表 2 列出了矿区侵入岩的主量元素和微量元素分析结果。从中可看出,二长花岗岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 71.63% ~ 77.08%, 属酸性岩。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 12.22% ~ 13.42%, A/CNK 值为 0.90~1.04, 属偏铝质—弱过铝质。 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.21% ~ 3.53%,

$w(\text{K}_2\text{O})$ 为 4.25% ~ 4.62%, 钾钠含量较高, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值为 1.28~1.44, $w(\text{K}_2\text{O})$ 大于 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 。里特曼指数 σ 值为 1.80~2.19, 属钙碱性岩。分异指数 DI 值为 84.64~93.18, 分异程度较高。

闪长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 53.20%, 属中性岩。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.00%, A/CNK 值为 1.14, 属强过铝质。 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.82%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 4.40%, $w(\text{K}_2\text{O})/$

卡岩；6—角岩；7—二长花岗岩；8—矽卡岩化；9—绿泥石化、褐铁矿化；10—黄铁矿化；11—磁铁矿化；12—辉钼矿化；13—黄铜矿化；14—闪锌矿、方铅矿化；15—Pb-Zn 矿体；16—Cu 矿体；17—轴心夹角；18—钻孔

Fig. 3 Geological section along No. 19 exploration line in VI ore belt , the Hutouya deposit

1—Upper Carboniferous Diaosu Formation limestone 2—Upper Carboniferous Diaosu Formation silicified limestone ; 3—Upper Carboniferous Diaosu Formation marble ; 4—Garnet-diopside skarn ; 5—Diopside skarn ; 6—Hornfels ; 7—Monzogranite ; 8—Skarnization ; 9—Chloritization , Limonitization ; 10—Pyritization ; 11—Magnetitization ; 12—Molybdenitization ; 13—Chacopyritization ; 14—Sphaleritization and galena alteration ; 15—Lead-zinc ore body ; 16—Copper ore body ; 17—Axis angle ; 18—Drill hole

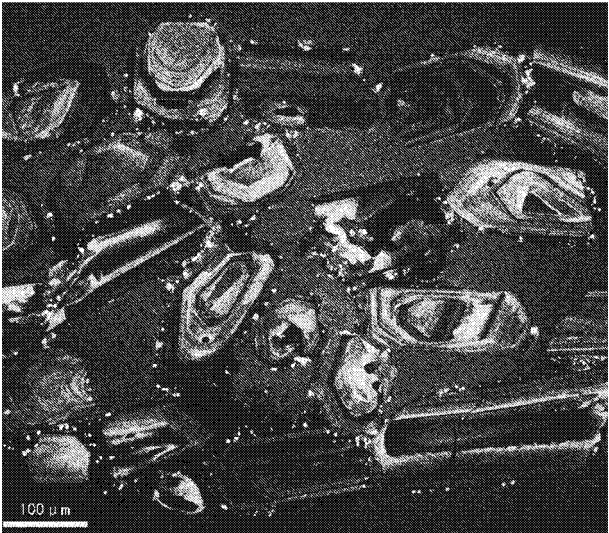


图 4 虎头崖Ⅵ矿带二长花岗岩锆石特征

Fig. 4 Zircon characteristics of monzogranite in VI ore belt , Hutouya

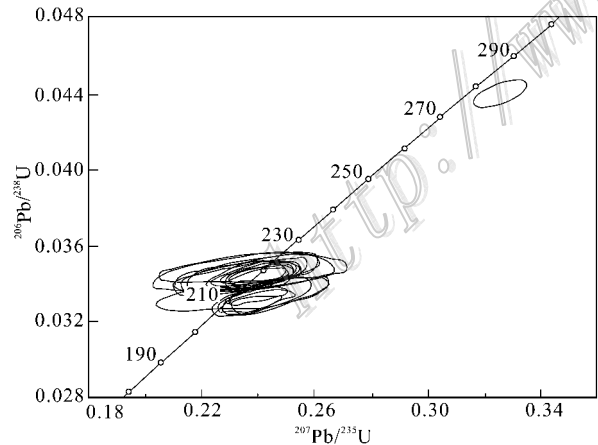


图 5 二长花岗岩²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄谐和图

Fig. 5 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U concordia diagram of monzogranite

$\alpha(\text{Na}_2\text{O})$ 比值为 5.37 , $\alpha(\text{K}_2\text{O})$ 大于 $\alpha(\text{Na}_2\text{O})$, 里特曼指数 σ 值为 2.24 , 属钙碱性岩。分异指数 DI 值为 51.85 , 分异程度较低。

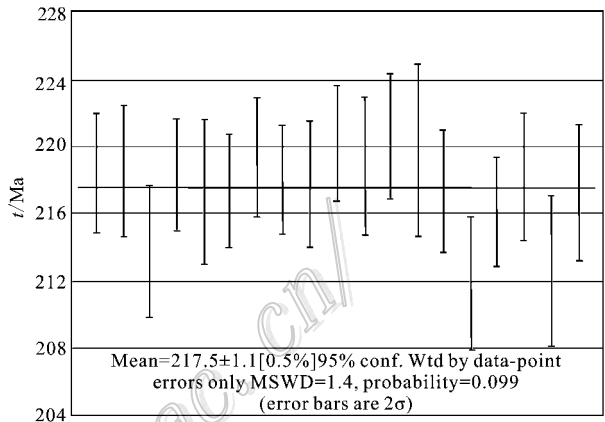


图 6 二长花岗岩²⁰⁶Pb-²³⁸U 表面年龄加权平均值

Fig. 6 Weighted average of ²⁰⁶Pb-²³⁸U dating of monzogranite

2.2.2 稀土元素和微量元素

二长花岗岩稀土元素总量为 $129.16 \times 10^{-6} \sim 182.74 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素富集 , 轻、重稀土元素比值 4.05 ~ 10.00 (La/Yb_N) 为 2.89 ~ 9.73 , δEu 为 0.08 ~ 0.45 , 钕亏损明显 , δCe 为 1.01 ~ 1.04 , 铈弱富集。球粒陨石标准化曲线呈向右缓倾斜 , Eu 谷较明显 (图 7) , 具有后碰撞阶段岩石稀土元素配分曲线的特征。闪长岩的稀土元素总量中等 , 为 165.43×10^{-6} , 轻稀土元素富集 , 轻、重稀土元素比值为 4.68 , (La/Yb_N) 为 4.38 , δEu 为 0.67 , 钕中等亏损 , δCe 为 0.97 , 基本无铈异常。球粒陨石标准化曲线呈向右缓倾斜 , 负钕异常不明显 (图 7) , 说明有加厚陆壳或大陆根的存在 (邓晋福等 , 1996) 。

微量元素标准化蛛网图 (图 8) 显示 , 岩石 K、Rb、Th 和 Pb 强烈富集 , 高场强元素 Ta、Nb、Zr、Hf 及轻稀土元素 La、Ce 中等富集 , Ba 呈现“ V ”型谷 , Sm、Eu、Dy、Ho、Yb、Lu 元素含量比原始地幔元素含量高一些 , Ti 元素呈现明显的“ V ”型谷 , 显示存在钛磁铁矿 (或金红石) 的分离结晶。微量元素特征总体反映岩浆具有壳源为主的特点。

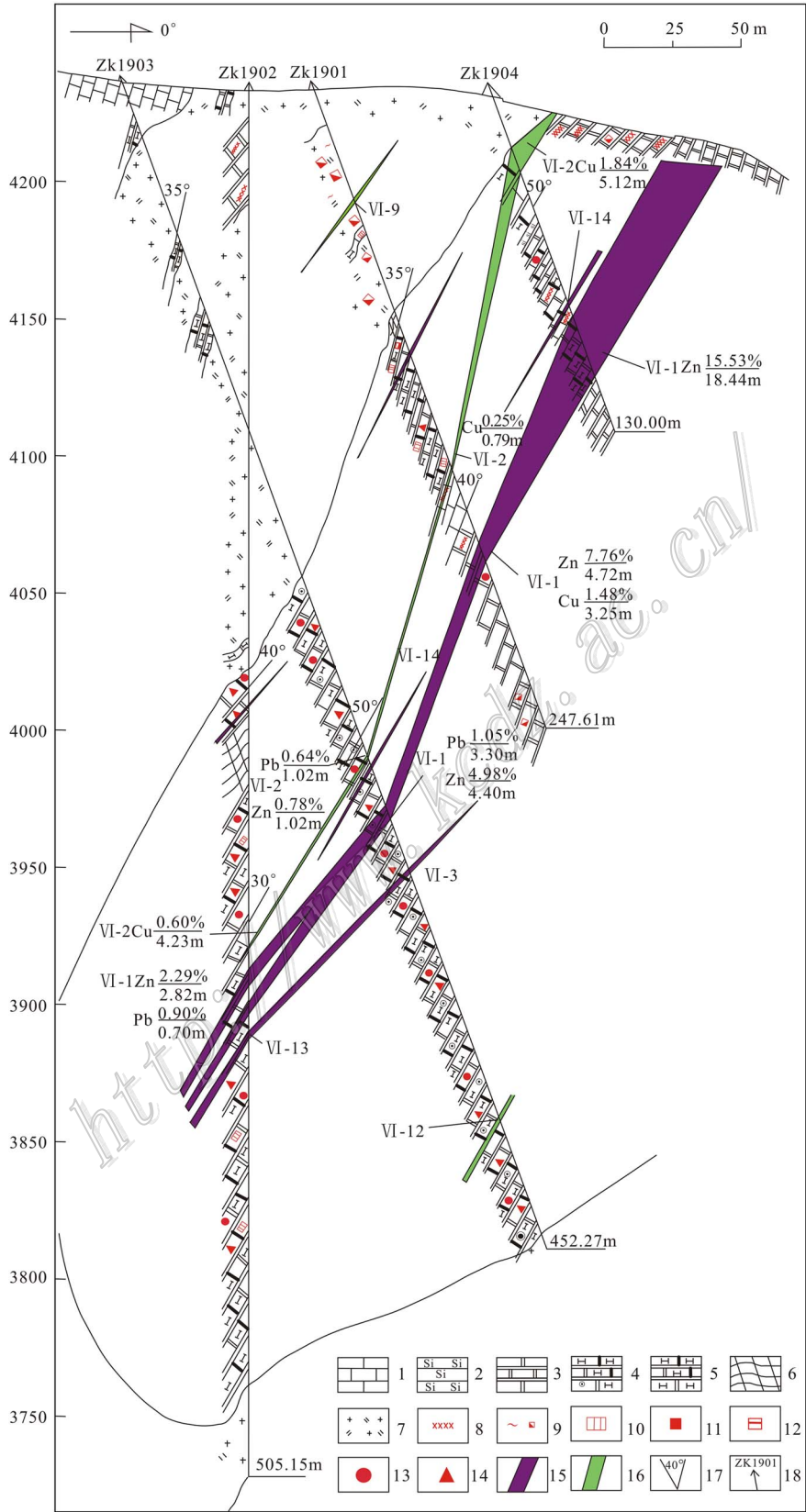


图 3 虎头崖矿区 VI 矿带 19 勘探线剖面图

1—上石炭统统放苏组灰岩；2—上石炭统统放苏组硅化灰岩；3—上石炭统统放苏组大理岩；4—含石榴子石透辉石砂卡岩；5—透辉石砂

表 1 虎头崖矿区二长花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素年龄测试结果
Table 1 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of adamellite from the Hutouya ore district

样品号	Pb	U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$		$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		年龄/Ma		
			1 σ	%	1 σ	%	1 σ	%	1 σ	%	1 σ	%	1 σ	%	1 σ	%	
HTY-JD1																	
1	12	357	0.0345	0.0003	0.81	0.2300	0.0058	2.53	0.0483	0.0012	2.48	0.0109	0.0002	2.12	0.3228	0.0038	1.18
2	9	250	0.0345	0.0003	0.88	0.2459	0.0086	3.51	0.0517	0.0018	3.53	0.0113	0.0003	2.47	0.4118	0.0052	1.26
3	9	249	0.0337	0.0003	0.90	0.2443	0.0084	3.45	0.0525	0.0018	3.37	0.0151	0.0003	1.94	0.3450	0.0036	1.04
4	16	485	0.0344	0.0003	0.75	0.2351	0.0047	2.01	0.0495	0.0010	1.94	0.0110	0.0002	1.63	0.2575	0.0029	1.12
5	14	399	0.0343	0.0003	0.98	0.2411	0.0057	2.35	0.0509	0.0012	2.31	0.0123	0.0002	1.39	0.3824	0.0073	1.90
6	29	820	0.0343	0.0003	0.78	0.2415	0.0035	1.45	0.0511	0.0007	1.42	0.0119	0.0001	0.79	0.3477	0.0036	1.04
7	10	268	0.0346	0.0003	0.82	0.2501	0.0092	3.68	0.0524	0.0019	3.66	0.0124	0.0003	2.10	0.3968	0.0046	1.15
8	19	540	0.0328	0.0002	0.67	0.2391	0.0049	2.05	0.0528	0.0010	1.89	0.0119	0.0001	0.90	0.5106	0.0068	1.33
9	16	451	0.0328	0.0002	0.65	0.2364	0.0052	2.21	0.0523	0.0011	2.12	0.0108	0.0001	0.81	0.5617	0.0074	1.31
10	14	409	0.0332	0.0003	0.76	0.2370	0.0054	2.27	0.0518	0.0011	2.21	0.0127	0.0002	1.27	0.3499	0.0042	1.19
11	11	318	0.0331	0.0002	0.75	0.2379	0.0061	2.57	0.0521	0.0013	2.52	0.0125	0.0002	1.70	0.3091	0.0038	1.22
12	10	296	0.0344	0.0003	0.75	0.2379	0.0067	2.81	0.0501	0.0014	2.78	0.0126	0.0002	1.74	0.2881	0.0040	1.37
13	16	456	0.0344	0.0003	0.87	0.2386	0.0044	1.82	0.0504	0.0009	1.80	0.0124	0.0001	1.02	0.3534	0.0050	1.40
14	10	284	0.0347	0.0003	0.77	0.2241	0.0078	3.48	0.0467	0.0016	3.45	0.0126	0.0002	1.45	0.3857	0.0040	1.04
15	8	224	0.0345	0.0003	0.93	0.2421	0.0121	5.00	0.0508	0.0025	4.92	0.0135	0.0004	3.02	0.3531	0.0038	1.06
16	21	530	0.0347	0.0003	0.78	0.4061	0.0057	1.42	0.0849	0.0011	1.32	0.0151	0.0001	0.89	0.5504	0.0060	1.10
17	13	348	0.0348	0.0003	0.85	0.2431	0.0062	2.54	0.0506	0.0013	2.48	0.0132	0.0002	1.20	0.4098	0.0046	1.13
18	28	640	0.0440	0.0003	0.64	0.3256	0.0038	1.16	0.0536	0.0006	1.12	0.0155	0.0001	0.80	0.3012	0.0032	1.06
19	6	154	0.0347	0.0004	1.17	0.2329	0.0122	5.24	0.0481	0.0025	5.24	0.0135	0.0004	2.71	0.3845	0.0055	1.42
20	7	212	0.0343	0.0003	0.83	0.2320	0.0092	3.96	0.0490	0.0019	3.89	0.0121	0.0003	2.51	0.3498	0.0041	1.16
21	7	199	0.0334	0.0003	0.94	0.2339	0.0124	5.31	0.0508	0.0027	5.24	0.0107	0.0004	4.08	0.3791	0.0084	2.21
22	12	334	0.0341	0.0003	0.74	0.2381	0.0067	2.80	0.0507	0.0014	2.69	0.0141	0.0002	1.31	0.3931	0.0043	1.10
23	10	256	0.0344	0.0003	0.87	0.2301	0.0084	3.64	0.0483	0.0017	3.60	0.0132	0.0002	1.47	0.5144	0.0054	1.05
24	16	446	0.0335	0.0004	1.05	0.2445	0.0060	2.44	0.0529	0.0012	2.24	0.0165	0.0002	1.29	0.3564	0.0042	1.18
25	13	371	0.0343	0.0003	0.92	0.2361	0.0054	2.30	0.0500	0.0011	2.17	0.0138	0.0002	1.52	0.3211	0.0037	1.15

注：① 样品由天津地质矿产研究所测试；② 测试方法为 LA-MC-ICP-MS；③ 温度 22℃，湿度 28%；④ 表中所列误差均为 1 σ 误差；⑤ 测试仪器名称为锆石激光多接收器电感耦合等离子体质谱仪，型号 Neptune 型，法拉第杯噪声：4 μV ，离子计数器噪声：10 cps。

表 2 虎头崖矿区侵入岩主量元素、微量元素分析结果及参数特征

Table 2 Major elements , trace elements compositions and parameters of intrusive rocks in the Hutouya ore district

组分	HTY-4	HTY-5	HTY-6	HTY-7	HTY-8
	Ⅱ 矿带二长花岗岩	Ⅵ 矿带二长花岗岩	Ⅵ 矿带二长花岗岩	Ⅱ 矿带二长花岗岩	Ⅶ 矿带南闪长岩
	$\omega(B)/\%$				
SiO ₂	72.15	77.08	71.63	75.42	53.20
TiO ₂	0.19	0.09	0.28	0.08	2.44
Al ₂ O ₃	13.32	12.22	13.42	13.02	13.00
Fe ₂ O ₃	0.71	0.16	1.03	0.69	3.14
FeO	1.15	1.00	1.68	0.50	9.36
MnO	0.06	0.05	0.08	0.03	0.15
MgO	0.48	0.09	0.51	0.06	3.77
CaO	2.29	0.82	2.21	0.94	2.89
Na ₂ O	3.51	3.21	3.31	3.53	0.82
K ₂ O	4.50	4.62	4.25	4.60	4.40
P ₂ O ₅	0.05	0.01	0.06	0.01	0.23
H ₂ O ⁺	0.66	0.44	0.85	0.79	3.91
H ₂ O ⁻	0.15	0.07	0.08	0.10	0.22
LOS	1.47				
总和	100.69	99.86	99.39	99.77	97.53
K ₂ O/Na ₂ O	1.28	1.44	1.28	1.30	5.37
A/CNK	0.90	1.04	0.95	1.04	1.14
σ	2.19	1.80	1.98	2.03	2.24
DI	86.91	93.18	84.64	93.03	51.85
	$\omega(B)/10^{-6}$				
La	31.60	29.10	41.40	28.20	29.20
Ce	60.00	55.30	78.30	60.80	59.40
Pr	6.33	6.07	8.66	7.30	7.73
Nd	20.10	18.90	29.40	25.9	31.80
Sm	3.60	3.50	5.01	6.10	6.64
Eu	0.49	0.23	0.59	0.16	1.55
Gd	3.07	3.44	4.69	6.51	7.55
Tb	0.49	0.60	0.80	1.20	1.18
Dy	3.01	3.85	4.96	8.12	8.04
Ho	0.67	0.85	1.03	1.73	1.66
Er	1.94	2.68	3.29	5.28	4.56
Tm	0.33	0.45	0.52	0.93	0.72
Yb	2.33	3.67	3.60	7.01	4.78
Lu	0.37	0.52	0.49	0.94	0.62
Y	20.0	27.5	32.70	59.90	44.80
ΣREE	134.33	129.16	182.74	160.18	165.43
LREE	122.12	113.10	163.36	128.46	136.32
HREE	12.21	16.06	19.38	31.72	29.11
LREE/HREE	10.00	7.04	8.43	4.05	4.68
(La/Yb) _N	9.73	5.69	8.25	2.89	4.38
δEu	0.45	0.20	0.37	0.08	0.67
δCe	1.04	1.02	1.01	1.04	0.97
Rb	260	339	208	431	136
Ba	411	119	436	111	644
Th	28.5	31.0	23.9	39.8	9.20
Ta	1.26	2.30	1.63	5.17	1.13
Nb	12.8	17.4	17.5	33.0	14.2
Hf	3.76	3.69	5.21	5.26	4.64
Zr	123	103	194	119	184
Sr	150	44.8	166	46.0	119

续表 2
Count. Table 2

组分	HTY-4	HTY-5	HTY-6	HTY-7	HTY-8
	Ⅱ矿带二长花岗岩	Ⅵ矿带二长花岗岩	Ⅵ矿带二长花岗岩	Ⅱ矿带二长花岗岩	Ⅶ矿带南闪长岩
Ni	1.37	3.78	5.63	1.77	3.36
Cu	5.98	5.82	14.6	6.02	23.3
Zn	101	38.4	53.6	35.8	174
Pb	H143	18.3	18.8	23.3	31.4
Mo	1.61	0.83	1.20	3.13	1.26
Co	2.27	1.32	4.19	0.95	24.8
Cs	6.08	12.5	5.37	14.0	5.34
Cr	3.06	9.87	14.5	5.11	29.2
Sc	3.00	1.32	3.77	2.15	36.9
V	16.7	2.48	15.9	0.90	124
Ga	16.0	16.4	18.6	20.2	21.8

注：样品由西安地质矿产研究所实验测试中心测试。

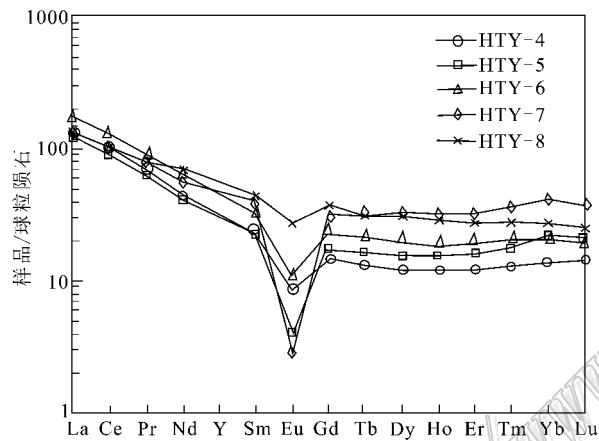


图 7 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图
(球粒陨石数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns
(Chondrite data after Sun et al., 1989)

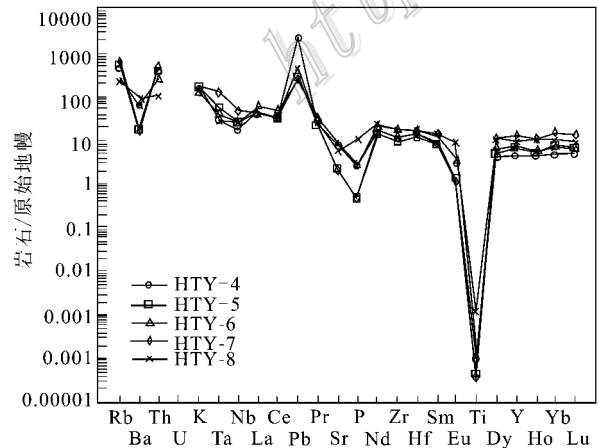


图 8 微量元素原始地幔标准化蛛网图
(原始地幔数据根据 Sun et al., 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element
pider diagrams(primitive mantle data after Sun et al., 1989)

2.2.3 Sr-Nd-Pb 同位素

本次研究对Ⅵ矿带、Ⅱ矿带的二长花岗岩和Ⅶ矿带南部的闪长岩开展了 Sr-Nd-Pb 同位素比值测试(表 3)。样品分别采集自地表探槽和地表露头部位。二长花岗岩呈浅肉红色,中细粒花岗结构,块状构造,主要由斜长石(35%~40%)、钾长石(30%~35%)、石英(25%~30%)、黑云母(±5%)组成。闪长岩呈灰黑色,细粒花岗结构,块状构造。岩石主要由斜长石(70%~75%)、角闪石(20%~25%)及少量钾长石、石英组成。

从表 3 可见,Ⅵ矿带二长花岗岩和闪长岩具有相似的 Sr-Nd 同位素比值特征 $\epsilon_{\text{Sr}}(0)$ 值为 408.97~509.35 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 -10.61~-9.99,与Ⅱ矿带二长花岗岩 $\epsilon_{\text{Sr}}(0)$ 值很高(达到 1450.31),但 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 负值不明显(为 -4.06),具有明显的差异。

在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 图解(图 9)中,样品均位于右下侧象限,闪长岩和Ⅵ矿带二长花岗岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值较日本岛弧区、内华达消减带花岗岩类大,但较喜马拉雅大陆碰撞带花岗岩类小。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值较日本岛弧区、内华达消减带花岗岩类小,但较喜马拉雅大陆碰撞带花岗岩类大,总体靠近喜马拉雅大陆碰撞带花岗岩类,具有壳源的特征,亦可能存在少量幔源物质的贡献。虎头崖Ⅱ矿带二长花岗岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与喜马拉雅大陆碰撞带花岗岩类相近,具有壳源的特征。在¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 图解(图 10)中,Ⅵ矿带二长花岗岩和闪长岩均位于 EMⅡ富集地幔区,其岩浆源区具有 EMⅡ富集地幔的印记。

东昆仑造山带晚古生代拉张出现的洋盆在海西晚期—印支早期向北俯冲、消减,直到中三叠世闭

表 3 虎头崖矿区侵入岩 Sr-Nd-Pb 同位素比值测定结果表

Table 3 Sr-Nd-Pb isotopic compositions for intrusive rocks in the Hutouya ore district

样品号	采集地点	岩石名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (2 σ)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2 σ)	$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 /%	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 /%	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 /%	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 /%	μ	ω	Th/U
HTY-TW1	虎头崖Ⅵ矿带	二长花岗岩	0.733312(4)	0.512094(3)	408.97	-10.61	0.8267	0.001	18.9672	0.003	15.6799	0.003	39.4679	0.003	9.57	38.34	3.88
HTY-TW2	虎头崖西Ⅱ矿带	二长花岗岩	0.806674(5)	0.512430(8)	1450.31	-4.06	0.822	0.001	18.9922	0.002	15.6119	0.002	38.7842	0.002	9.44	34.99	3.59
HTY-TW3	虎头崖Ⅶ矿带南	闪长岩	0.740384(4)	0.512126(1)	509.35	-9.99	0.8219	0.001	18.9885	0.001	15.6076	0.001	38.771	0.001	9.43	34.92	3.58

注： $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 由天津地质矿产研究所测试，测试方法质谱法，测试仪器为 TRITON 热电离子质谱仪，设备型号为 08-100016sb。

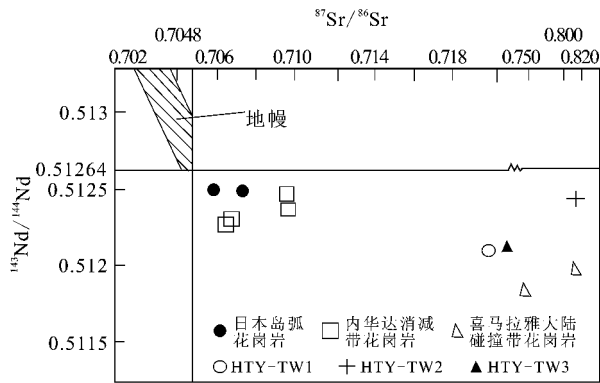


图 9 侵入岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解
(底图据邓晋福等 2003 转引自 Allegre et al., 1978)

Fig. 9 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diagrams of intrusive rocks (base map after Deng et al., 2003)

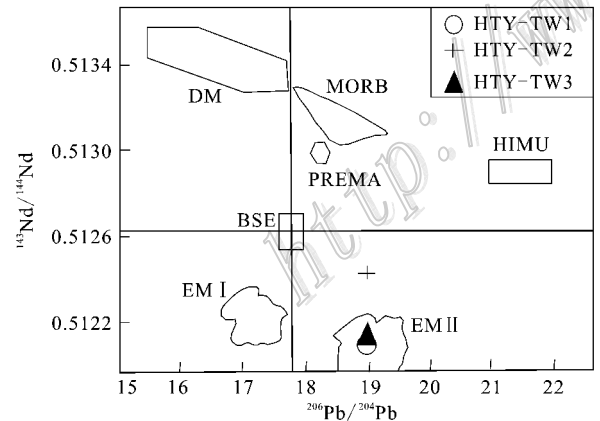


图 10 侵入岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解
(底图据莫宣学等 2009)

Fig. 10 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams of intrusive rocks (base map after Mo et al., 2009)

岩浆底侵作用和岩浆混合作用，铁镁质岩浆侵位于下地壳底部并局部熔融下地壳物质，形成了包括祁漫塔格岩浆弧在内的昆北岩浆弧(殷鸿福等，1997；莫宣学等，2007)。虎头崖矿区Ⅵ矿带二长花岗岩和闪长岩岩浆源区具有 EM II 富集地幔物质的贡献，可能保留了俯冲阶段板片断离地幔楔减压熔融或岩浆底侵和岩浆混合源区的印记。

在铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线(图略)上，Ⅵ矿带二长花岗岩和Ⅱ矿带二长花岗岩并未处于同一构造演化线。马圣钏等(2012)研究亦发现不同矿带的矿石和围岩铅同位素投点形成的拟合线段，并非同一构造演化线，亦表明矿区二长花岗岩可能存在不同的岩浆源区。

3 矿床地球化学

3.1 元素地球化学

一般认为，黄铁矿中的 Co、Ni 含量及其比值具有较好的成因指示意义(Loftus et al., 1967)。沉积型黄铁矿中 $\alpha(\text{Co})$ 低，一般小于 1000×10^{-6} ，Co/Ni 比值小于 1。热液型黄铁矿中 $\alpha(\text{Co})$ 高，为 $400 \times 10^{-6} \sim 2400 \times 10^{-6}$ ，Co/Ni 比值大于 1。矿区Ⅶ矿带 Pb-Zn-Cu 矿石中黄铁矿电子探针分析结果 Co/Ni 比值为 1.7~40，平均值为 14.4，显示黄铁矿物质主要来源于岩浆热液的特点(刘云华等，2006a)。

矿区Ⅶ矿带闪锌矿方铅矿矿石稀土元素分析结果(表 4)显示，矿石具有稀土元素总量低的特点， ΣREE 为 $2.92 \times 10^{-6} \sim 4.65 \times 10^{-6}$ ，轻、重稀土元素比值 6.53~9.2，轻、重稀土元素分馏明显。 δEu 为 0.39~0.63，平均 0.49，钕中等亏损。矿石 δCe 为 0.70~0.86，平均为 0.79，具热液蚀变。稀土元素标准化分布型式图(图 11)显示，矿石曲线具有向右倾斜的特征，负钕异常明显，曲线形态和矿区二长花岗岩曲线形态相似，但轻稀土元素富集更加明显，Gd、

合。洋岛边缘海型玄武岩为主的洋壳俯冲到以塔里木、柴达木等微陆块组成的昆北地块底部并发生断离，引起软流圈物质上升并造成地幔楔减压熔融，形成铁镁质岩浆。东昆仑造山带晚三叠世发生过幔源

表 4 虎头崖矿区Ⅶ矿带闪锌矿方铅矿矿石稀土元素分析结果及参数特征表
Table 4 REE elements compositions and parameters for ores in the Hutouya ore district

样品号	$\omega(B)10^{-6}$																LREE/	(La/	δEu	δCe	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE			$Yb)_N$
HTY-XT1	1.03	1.63	0.23	0.94	0.18	0.026	0.18	0.022	0.16	0.031	0.11	0.013	0.086	0.008	1.63	4.65	4.04	6.62	8.59	0.44	0.82
HTY-XT2	0.8	0.99	0.15	0.59	0.089	0.011	0.085	0.012	0.078	0.013	0.046	0.006	0.041	0.005	0.75	2.92	2.63	9.2	14	0.39	0.7
HTY-XT3	0.79	1.24	0.16	0.67	0.13	0.027	0.13	0.015	0.12	0.024	0.079	0.01	0.078	0.006	1.32	3.48	3.02	6.53	7.26	0.63	0.86

注：西安地质矿产研究所实验测试中心测试，分析方法：ICP-MS，单位为 10^{-6} 。

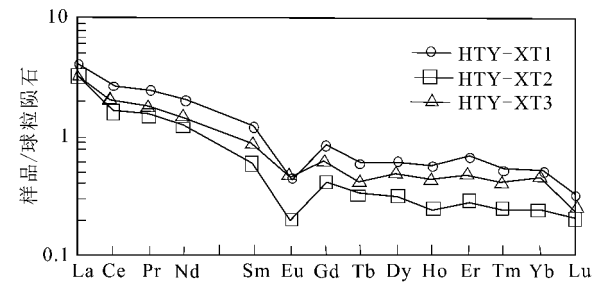


图 11 矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图
(球粒陨石数据据 Sun et al. , 1989)
Fig. 11 Chondrite-normalized REE patterns of ore
(chondrite data after Sun et al. , 1989)

Yb 显示富集,可能与热液蚀变有关。1 件矿石曲线形态和 δEu 值与闪长岩相近,闪长岩可能对成矿也具有一定的贡献。近年,在矿区南部闪长岩出露附近的次级断裂中已发现铅锌矿石,以往并未引起研究者的注意。

3.2 硫、铅同位素

Ⅶ矿带矿石硫同位素分析结果表明, $\delta^{34}S$ 值介于 $-0.97\text{‰} \sim 5.69\text{‰}$ 之间,测试的 7 个样品中有 6 个样品 $\delta^{34}S$ 值集中在 $3.09\text{‰} \sim 5.69\text{‰}$ 的范围,反映矿床硫主要来自深源(刘云华等, 2006a)。矿床中方铅矿 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值范围为 $18.520 \sim 18.591$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值范围为 $15.589 \sim 15.680$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值范围为 $38.268 \sim 38.570$,具有深源铅的特征,模式年龄差别较大,为异常铅, μ 值变化不大,铅具有多来源,但主要来自于岩浆(刘云华等, 2006a)。

3.3 成矿流体

本次研究在矿区Ⅶ矿带 0 勘探线采集了闪锌矿方铅矿矿石。矿石呈半自形—他形粒状结构、交代结构,浸染状构造、致密块状构造。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿,约占 35%,其次有黄铁矿、磁黄铁矿等。脉石矿物主要有透辉石、绿泥石、石英、方解石及少量石榴子石等。对样品的脉石矿物石英的流体包裹体进行测试(表 5),结果显示,流体包裹体为气

液两相包裹体,气相成分主要为 CH_4 ,其次有 H_2S 、 N_2 液相主要为 H_2O ,其次有 CH_4 。冰点温度 $-2.3 \sim -5.5^\circ C$,均一温度为 $211 \sim 407^\circ C$ 。利用公式: $W = 0.00 + 1.78 T_m - 0.0442 T_m^2 + 0.000557 T_m^3$ (Hall et al. ,1988) 计算求得,流体盐度 $\omega(NaCl_{eq})$ 为 $3.87\% \sim 8.55\%$,利用 $NaCl-H_2O$ 体系温度-盐度-密度相图(图 12)获得流体密度为 $0.6 g/cm^3 \sim 0.9 g/cm^3$ 。由图 12 可看出,矿石中较明显地存在 2 种成矿流体,为中温中等密度低盐度流体和高温低盐度低密度流体。

方解石中包裹体主要类型为 Ia 型无子矿物水溶液包裹体,形态一般不规则,少量为负晶型。包裹体大小不一,为 $4 \sim 30 \mu m$,成群或较孤立分布,气相分数($20^\circ C$)为 $10\% \sim 65\%$ 。观测计算出盐度 $\omega(NaCl_{eq})$ 为 $1.06\% \sim 3.87\%$,主要集中于 1.74% 左右。均一温度主要分布在 $220 \sim 303^\circ C$ 范围内,10 个数据平均为 $266^\circ C$,并出现一个较低的温度 $142^\circ C$ 和两个大于 $310^\circ C$ 的温度,其中大于 $310^\circ C$ 的两个

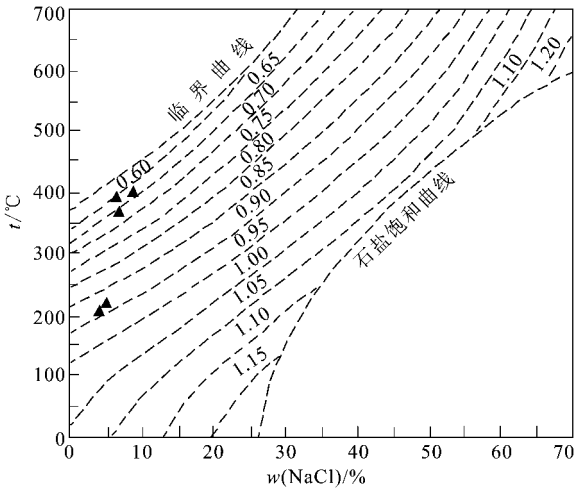


图 12 石英中流体包裹体 $NaCl-H_2O$ 体系 $t-w-\rho$ 相图(底图据 Bodnar , 1983)

Fig. 12 Phase diagram of $t-w-\rho$ of $NaCl-H_2O$ system in fluid inclusions of quartz (base map after Bodnar , 1983)

表 5 虎头崖Ⅶ矿带闪锌矿方铅矿矿石流体包裹体成分及温度测定结果表

Table 5 Analytical results of composition and temperature of fluid inclusions in sphalerite and galena ore

序号号	样品号	x(气相) %				x(液相) %			冰点温度/℃	均一温度/℃
		H ₂ S	CH ₄	N ₂	总和	H ₂ O	CH ₄	总和		
1	HTY-BT1								-5.5	407.0
2	HTY-BT1								-5.4	407.0
3	HTY-BT1		100.0		100.0	100.0		100.0	-5.0	401.0
4	HTY-BT1								-4.1	370.0
5	HTY-BT1								-4.2	395.0
1	HTY-BT2								-3.0	227.0
2	HTY-BT2								-3.1	226.0
3	HTY-BT2	8.8	82.9	8.3	100.0	99.3	0.7	100.0	-2.8	226.0
4	HTY-BT2								-2.3	211.0
5	HTY-BT2								-2.3	211.0

注：西安地质矿产研究所实验测试中心测试；分析方法：invia 激光拉曼探针；x(气相)、x(液相)均为摩尔数的相对百分含量；实验条件为 Ar⁺激光器，波长 514.5 nm，激光功率 40 mW，扫描速度 10s/6 次叠加，光谱仪狭缝 10 μm，温度 23℃，湿度 65%。

包裹体的气相分数(20℃)均大于 45%。流体密度值范围为 0.681~0.954 g/cm³(徐国端, 2010)。

虎头崖矿区Ⅶ矿带石英和方解石中明显地存在 2 种不同的成矿流体，具有低盐度、中低密度和较高均一温度的特征。

4 控矿因素讨论

4.1 地层因素

表 6 列出了矿区矿石和围岩微量元素含量统计结果，从中可看出，矿石和狼牙山组围岩除 Cr、Co、Ni 元素含量普遍低于地壳丰度外，其他元素含量通常高于地壳丰度。矿石 Cu、Pb、Zn、Mo、Cr 高于围岩，Co 与硅质岩和闪长岩相近。从不同岩石微量元素含量特征分析，围岩硅质岩和大理岩中 Cu、Pb、Zn 成矿元素含量均较高，二长花岗岩、闪长岩 Pb、Zn 成矿元素含量亦高于地壳丰度，矿石中 Cu、Pb、Zn、Mo 元素具有明显富集。表明成矿与中酸性侵入岩和围

岩存在密切关系，成矿物质很可能来源于地层和岩浆热液。闪长岩对成矿亦可能具有一定的贡献。

区域远接触带砂卡岩型多金属矿主要产于蓟县系狼牙山组，且矿床规模能达到大型。如虎头崖矿床Ⅶ矿带已提交 Pb + Zn + Cu 多金属资源量 60 万吨，新疆维宝矿床亦达到大型规模(杨自安等, 2008)。而其他层位远接触带砂卡岩型多金属矿规模较小(如矿区Ⅳ、Ⅴ矿带)均在中小型以下。推断虎头崖矿床与中元古代被动大陆边缘环境地层成矿元素的预富集作用可能有关。

中元古代蓟县系狼牙山组为一套热水沉积岩系，Cu-Pb-Zn 成矿元素在地层中含量较高，存在元素的预富集作用，局部已经形成矿体，如矿区发现的砷硫锑铅矿石等。虽然未能形成具有工业利用价值的矿床，但狼牙山组地层为印支期岩浆热液交代提供了重要物质基础。虎头崖矿床规模之所以能达到大型，与中元古代成矿物质的预富集作用可能存在很密切的关系。

表 6 虎头崖矿区矿石和围岩成矿元素含量(μ(B)/10⁻⁶)

Table 6 Ore-forming element compositions of ores and wall rocks in the Hutouya ore district(μ(B)/10⁻⁶)

元素	Ⅶ矿带铅锌矿石	狼牙山组硅质岩	狼牙山组大理岩	二长花岗岩	闪长岩	地壳丰度
Cu	1600	28	33	8.11	23.3	24
Pb	26000	64.2	73	50.85	31.4	12.6
Zn	38400	92.6	555	57.20	174	73
Co	20	30.5	3.6	2.18	24.8	25
Ni	未分析	27.8	10	3.14	3.36	51
Cr	210	51.7	10	8.14	29.2	119
Mo	80	未分析	2	1.69	1.26	0.65

注：①表中二长花岗岩数值为 HTY-4~HTY-7 平均值，闪长岩数值为 HTY8 的值，HTY-4~HTY8 样品数据引自本文表 2；②硅质岩数据引自张爱奎等(2010)；③矿石资料来源于湖南有色地质勘查局二一七队(2008)；④大理岩资料来源于徐国端(2010)；⑤地壳丰度引自韩吟文等(2003)转引自国际地球化学参考模型。

4.2 构造因素

虎头崖矿床成矿与矿区构造特征有很密切的关系。祁漫塔格地区区域研究表明,经历了晚古生代早期的洋盆形成和扩张,早二叠世昆南洋向北俯冲,晚三叠世发生陆-陆碰撞(张爱奎等,2012)。推断矿区南部较古老的蓟县系狼牙山组地层在陆-陆碰撞后被抬升出露。而矿区北部受挤压发生褶皱,在背斜核部形成虚脱和张性断裂。同时,侵入岩沿背斜核部附近应力薄弱地带侵入。随着岩浆的侵入,岩浆扩容和区域压应力的作用下,北西向、北东向剪切构造形成,同时岩浆热液在背斜核部、先存断裂及扩容过程中形成的北西向、北东向剪切构造等部位运移和沉淀。这些构造的发育,为成矿热液的运移提供了便利。而热液总是向着构造应力小的地区运移聚集,表现在矿区就向着断层的上盘,即Ⅶ矿带处运移聚集,这对Ⅶ矿带的形成十分有利,也是Ⅶ矿带规模较大的一个重要因素。

同时,虎头崖矿床所处位置,是区域大断裂(昆北断裂)方向由北西向改变为近东西向的地段,由于昆北断裂规模较大,构造方向的改变,引起地质条件的较大变化和物质迁移,这对于矿区成矿具有重要的影响。它控制了近东西向构造的发育,褶皱的形成,以及岩浆的侵入,进而控制了区内的成矿。

矿区主要储矿构造为近东西向断裂和岩体与地层的接触带,其次为褶皱核部以及北西向、北东向剪切构造部位。北西向、北东向剪切构造部位的成矿以往未予重视,近年已发现多金属矿体,值得进一步关注。

4.3 岩浆岩因素

虎头崖Ⅵ矿带二长花岗岩形成的矿体规模和资源量远超过Ⅱ矿带,形成的矿种以Cu、Pb、Zn矿为主,尤其是出现大量的方铅矿,铁矿很少出现。而Ⅱ矿带成矿矿种为Sr(达到小型规模)、Fe、Mo、W等,2个矿带具有明显的差异。

Ⅵ矿带二长花岗岩岩浆源区具有地幔物质的贡献,Ⅱ矿带二长花岗岩岩浆源区壳源特征明显,二者岩浆源区具有不同的地球化学背景,演化方式亦可能存在一定差异。岩浆源区和演化方式的差异,可能是造成二者成矿能力和成矿专属性差异的主要因素。

区域内冰沟南地区,出露地层亦以蓟县系狼牙山组为主,矿体也具有层状展布的特征,但矿体规模较小,品位也较低。这可能与冰沟南地区侵入岩的

规模、类型和虎头崖矿区存在差异有关。冰沟南地区侵入岩不发育,仅见少量闪长岩,其分异程度较低(闪长岩分异指数为51.85),岩浆热液不发育,成矿能力较弱。

铅同位素研究表明,虎头崖矿区成矿热液主要来源于岩浆(刘云华等,2006a)。Ⅶ矿带主矿体,主要位于虎头崖东部。从空间位置来看,主矿体均距离Ⅵ矿带二长花岗岩近一些。这可能暗示虎头崖成矿热液很可能是来源于Ⅵ矿带的二长花岗岩(闪长岩也可能提供了一部分)。从成矿矿种来看,Ⅵ矿带二长花岗岩以形成Cu-Pb-Zn矿为主,与虎头崖矿床Ⅶ矿带成矿矿种基本一致。推断Ⅵ矿带二长花岗岩形成的岩浆热液对Ⅶ矿带的形成,具有重要贡献。Ⅶ矿带出现较多方铅矿可能与距离岩体较远存在一定的关系。

4.4 接触带形态

侵入岩与围岩接触方式和形态对矿体规模,以及矿体形态具有明显的控制作用。岩体位于地层顶部的侵入接触方式,热量和矿液不容易散失,有利于接触交代。Ⅵ、Ⅱ矿带规模大于其他近接触带矽卡岩型矿带规模,可能与接触方式有关。接触带产状由陡变缓部位或岩体接触形成的凹陷带是形成厚大矿体最有利的部位,如Ⅱ矿带17勘探线发现的厚度相对较大的磁铁矿体。这主要由于这种接触形式,增大了接触面积,且凹陷带内应力较小,矿液容易聚集。

综上所述,地层成矿元素预富集、岩浆热液和构造的叠加,是形成虎头崖大型矿床的主要成矿-控矿要素组合。

5 结 论

(1) 虎头崖矿区Ⅵ矿带二长花岗岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄为 (217.5 ± 1.1) Ma (MSWD = 1.4),与Ⅱ矿带二长花岗岩形成年龄相近,均属印支期。岩石化学和地球化学特征显示,二长花岗岩钾钠含量较高, $w(K_2O)$ 大于 $w(Na_2O)$,分异程度较高,稀土元素球粒陨石标准化曲线向右缓倾斜,强烈富集LILE,中等富集HFSE,贫Ti、Ba,具有后碰撞阶段岩石的特点。

(2) 矿床地球化学特征显示,虎头崖矿区Ⅶ矿带石英和方解石中明显地存在2种不同的成矿流体,总体具有低盐度、中低密度和较高均一温度的特

征。

(3) 成矿受侵入岩岩浆源区、演化方式、地层、构造,以及岩体与围岩的接触方式的综合控制。那些源区具有地幔物质贡献的Ⅵ矿带二长花岗岩,成矿作用较强,主要形成近接触带矽卡岩型和远接触带矽卡岩型 Cu-Pb-Zn 多金属矿。而壳源特征为主的Ⅱ矿带二长花岗岩成矿能力较弱,主要形成矽卡岩型 Sn、Mo、Fe 等矿产。

(4) 矿床南部闪长岩发育部位的找矿,值得关注。

志 谢 论文编写得到了袁万明教授和江万研究员的许多宝贵意见,样品测试由天津地质矿产研究所、西安地质矿产研究所实验测试中心完成,周红英、刘力、韩伟、耿建真老师在样品测试过程中给予了许多帮助,范桂兰在光、薄片鉴定方面给予了许多无私帮助。在此,向他们表示最真挚的感谢!

参考文献/References

邓晋福,刘厚祥,赵海玲. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型 [J]. 现代地质, 10(2): 137-148.

邓晋福,罗照华,苏尚国. 2003. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京:地质出版社.

丰成友,李东生,吴正寿,李军红,张占玉,张爱奎,舒晓峰,苏生顺. 2010. 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, 43(4): 10-17.

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. 2011. 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), 41(6): 1806-1816.

丰成友,王 松,李国臣,马圣钊,李东生. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩 年代学、地球化学及成矿意义 [J]. 岩石学报, 28(2): 665-678.

韩吟文,马振东. 2003. 地球化学 [M]. 北京:地质出版社.

刘云华,莫宣学,张雪亭,许国武. 2005. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地质特征及控矿条件 [J]. 华南地质与矿产, 3: 19-23.

刘云华,莫宣学,张雪亭,许国武. 2006a. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地球化学特征及其成因意义 [J]. 华南地质与矿产, 3: 31-

36.

刘云华,莫宣学,喻学惠,张雪亭,许国武. 2006b. 东昆仑野马地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 22(10): 2457-2463.

马圣钊,丰成友,李国臣,舒晓峰. 2012. 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, 48(2): 321-331.

莫宣学,罗照华,邓晋福,喻学惠,刘成东,谌宏伟,袁万明,刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长 [J]. 高校地质学报, 13(3): 403-414.

莫宣学,赵志丹,喻学惠. 2009. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火山岩 [M]. 北京:地质出版社.

徐国端. 2010. 青海祁漫塔格多金属成矿带典型矿床地质地球化学研究 [D]. 昆明理工大学.

杨自安,彭省临,石菲菲. 2008. 新疆若羌县维宝铅锌矿床地质特征及成因分析 [J]. 矿产与地质, 22(6): 503-505.

殷鸿福,张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点 [J]. 地球科学, 22(4): 339-342.

张爱奎,莫宣学,李云平,吕 军,曹永亮,舒晓峰,李 华. 2010. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义 [J]. 地质通报, 29(7): 1062-1074.

张爱奎,刘光莲,莫宣学,刘军培,张文权,陈海福,李云平. 2012. 青海祁漫塔格晚古生代—早中生代侵入岩构造背景与成矿关系 [J]. 西北地质, 45(1): 9-19.

张雪亭,杨生德,杨站君. 2007. 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. 1-221.

Allegre C J and Minster J K. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 38: 1-25.

Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluid [J]. Econ. Geol., (78): 535-542.

Hall D L, Sterner S M and Bonder R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution [J]. Econ. Geol., (83): 197-202.

Loftus and Hills G. 1967. Cobalt nickel and selenium in sulfide as indicators of ore genesis [J]. Mineralium Deposita, 2: 228-242.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the ocean basin [M]. Geological Society, London, Special Publications. 42: 313-345.