

文章编号: 0258-7106(2014)01-0153-12

新疆西天山奈楞格勒矿田七兴铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义^{*}

张立成^{1,2}, 王义天^{2**}, 董连慧³, 张兵⁴, 万 闯⁴, 赵 强⁴, 王 攀¹

(1 中国冶金地质总局青岛地质勘查院, 山东 青岛 266000; 2 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; 3 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队, 新疆 乌苏 833300)

摘 要 奈楞格勒矿田位于西天山博罗霍洛成矿带中北部, 主要发育莱历斯高尔钼矿床、3571 铜矿床和七兴铅锌多金属矿床。其中, 七兴铅锌多金属矿床产于矿田的东北部, 赋存于上志留统博罗霍洛山组碎屑岩中, 矿体受 NE 向断裂控制, 呈脉状产出。对七兴铅锌多金属矿床石英-硫化物阶段的闪锌矿进行的 Rb-Sr 同位素测年研究, 获得等时线年龄为 (362.2 ± 4.9) Ma, 表明矿床形成于晚泥盆世—早石炭世。闪锌矿的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.7103 \sim 0.7107$, 平均值为 0.7105 , 指示成矿物质是以幔源为主的壳幔混合来源。结合前人的研究成果认为, 七兴铅锌多金属矿床是奈楞格勒矿田在海西期区域性构造-岩浆-热液成矿作用的产物。

关键词 地球化学; Rb-Sr 等时线年龄; 闪锌矿; 成矿时代; 奈楞格勒七兴; 西天山

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Rb-Sr isochron age of Qixing Pb-Zn polymetallic deposit in Nailenggele ore field of Western Tianshan, Xinjiang, and its geological significance

ZHANG LiCheng^{1,2}, WANG YiTian^{2**}, DONG LianHui³, ZHANG Bing⁴, WAN Yu⁴, ZHAO Qiang⁴ and WANG Pan¹

(1 Qingdao Geological Exploration Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266000, Shandong, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4 No. 7 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Uru 833300, Xinjiang, China)

Abstract

Located in the central north part of the Boluohuoluo metallogenic belt in Western Tianshan Mountains, the Nailenggele ore field is mainly composed of the Lailisigaoer Mo deposit, the No. 3571 Cu deposit and the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit. The Qixing Pb-Zn polymetallic deposit is hosted in clastic rocks of the upper Silurian Boluohuoluoshan Formation in the northeast of the Nailenggele ore field. The ore bodies occur as veins, controlled by NE-trending faults. In this paper, the Rb-Sr isotopic dating was carried out for the sphalerite of the quartz-sulfide stage in the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit, which yielded an isochron age of (362.2 ± 4.9) Ma, suggesting that the deposit was formed in Late Devonian-Early Carboniferous period. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ val-

^{*} 本文得到中国地质调查局地质大调查项目(1212011085527)资助

第一作者简介 张立成, 1984 年生, 硕士研究生, 矿床学专业。Email: zhanglicheng365@126.com

^{**} 通讯作者 王义天, 1969 年生, 博士, 研究员, 从事构造与成矿研究。Email: wyt69@263.net

收稿日期 2013-09-23; 改回日期 2013-12-22。张绮玲编辑。

ues of the sphalerite vary in the range of 0.7103~0.7107 with an average of 0.7105, indicating that ore-forming materials were mainly derived from the mantle. In combination with regional geology, the authors hold that the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit was formed by the regional intense tectono-magmatic-hydrothermal metallogenetic process in the Nailenggele ore field in Hercynian period.

Key words: geochemistry, Rb-Sr isochron age, sphalerite, metallogenetic epoch, Nailenggele Qixing, Western Tianshan

奈楞格勒矿田位于西天山博罗霍洛成矿带中北部,主要发育莱历斯高尔钼矿床、3571 铜矿床和七兴铅锌多金属矿床。其中,七兴铅锌多金属矿床产于矿田的东北部,距莱历斯高尔钼矿、3571 铜矿仅 3 km 左右(薛春纪等,2011b)。1999 年新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队开展预查工作,在莱历斯高尔钼矿外围发现了金银矿化异常;2004~2007 年,随着普查工作的进行,发现了以铅锌为主,伴生金银的主矿体。目前,对七兴矿床的详查工作正在进行,扩大了矿区铅、锌和金、银的储量,矿床已达小型规模(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队,2011)。前人对奈楞格勒矿田做了大量的研究工作,通过成矿地质环境和控矿特征的研究,指出了莱历斯高尔钼矿、3571 铜矿及七兴铅锌多金属矿可能为同一构造-岩浆-热液 Mo-Cu-Pb-Zn 成矿系列(冯京等,2008;程松林等,2009)。莱历斯高尔钼矿的岩石地球化学、同位素年代学、同位素地球化学等研究结果(李华芹等,2006;张东阳等,2009;朱明田等,2010;薛春纪等,2011a)揭示了其成岩成矿特征,表明成岩成矿时代为晚泥盆世—早石炭世。薛春纪等(2011b)对七兴铅锌多金属矿的同位素地球化学及包裹体测温等方面的研究工作,揭示了成矿地球化学特征,又通过对矿区内被矿脉切穿的基性岩脉同位素年代学研究指出了七兴铅锌多金属矿床与莱历斯高尔钼矿和 3571 铜矿并非同一成矿系列。由于缺乏七兴矿床的成矿测年数据,不同的研究者在奈楞格勒矿田是否为同一构造-岩浆-热液成矿系统的问题上还存在争议,因此获得精确的成矿年代是解决这些争议最有效的途径。金属矿床成矿时代的精确测定,对正确认识矿床成因和控矿因素、总结成矿规律并指导找矿勘探工作都具有极为重要的意义(程裕淇,1983;翟裕生等,1992;裴荣富等,1994;陈毓川等,1994;刘建明等,1998a;毛景文等,2000)。目前,辉钼矿 Re-Os(杜安道,1994;Mao et al.,1999;2003;2006;2008;Barra et al.,2002;毛景文等,2004;杨富全等,2011;2012;袁顺

达等,2012a)含钾矿物 Ar-Ar(York et al.,1970;Yuan et al.,2007;袁顺达等,2010a,2012b;杨富全等,2013)和锡石 U-Pb(Yuan et al.,2008,2011;袁顺达等,2010b)等矿物直接测年方法精度较高而被广泛应用于金属矿床。但是,铅锌矿床成矿年龄的精确测定目前仍是一个世界性的难题(李文博等,2002),近些年不少学者通过不断地探索,取得了一些成功的实例,例如,闪锌矿 Rb-Sr 法(Brannon et al.,1992a;1992b;Nakai et al.,1993;Christensen et al.,1993;1995a;1995b;Pettke et al.,1996;张长青等,2008;胡乔青等,2012;郑伟等,2013),闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 法(Nakai et al.,1990)。

本文在详细研究七兴铅锌多金属矿床地质特征的基础上,对石英-硫化物阶段的闪锌矿开展 Rb-Sr 同位素定年研究,为确定成矿时代,探讨成矿物质来源,进而为深入认识矿床成因和明确进一步找矿方向提供新的证据。

1 区域地质背景

奈楞格勒矿田位于哈萨克斯坦-伊犁古生代板块东北缘的博罗霍洛岛弧带中(图 1)。在西天山北部板块构造单元中,博罗霍洛古生代岛弧带北以博罗霍洛北坡断裂与赛里木基底隆起区为邻,东北侧与依连哈比尔尕晚古生代残余海盆相连,南侧是伊宁微板块及发育其上的阿吾拉勒晚古生代裂谷带(薛春纪等,2011a)。

区域出露地层主要包括奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系和二叠系。其中,奥陶系为奈楞格勒群和呼独克达坂组,奈楞格勒群以中基性火山碎屑岩为主,局部发育细碧角斑岩建造,呼独克达坂组由中厚层状碳酸盐建造夹硬砂岩组成。志留系包括尼勒克河组、基夫克组、库茹尔组和博罗霍洛山组,尼勒克河组为砂岩、碳质泥岩;基夫克组为碳酸盐岩-陆源碎屑岩,安山岩、英安质火山碎屑岩,局部有中酸性-基性火山岩;库茹尔组和博罗霍洛山组为类火山磨

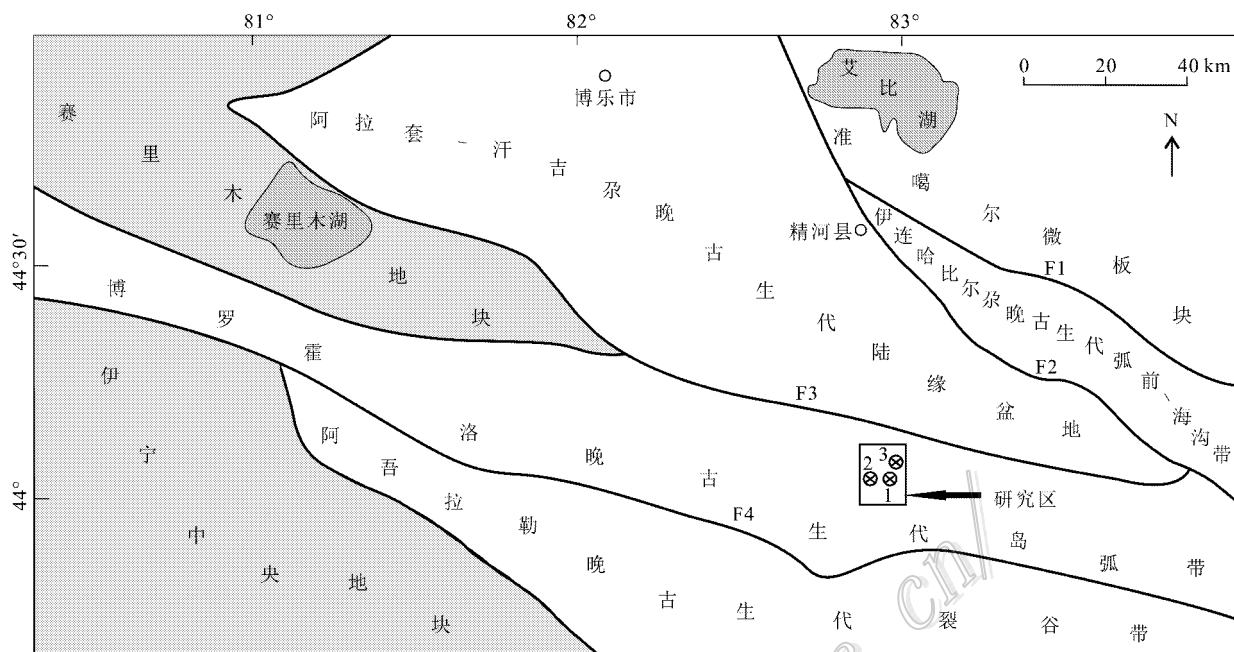


图 1 新疆西天山北部大地构造简图(据冯京等,2011)

缝合带或断裂: F1—巴音沟大断裂; F2—阿拉尔大断裂; F3—博罗霍洛北坡大断裂; F4—青布拉克-那拉提断裂;

矿床名称: 1—莱历斯高尔钼矿床; 2—3571 铜矿床; 3—七兴铅锌多金属矿床

Fig. 1 Geological sketch map of the north part of Western Tianshan Mountains, Xinjiang (after Feng et al., 2011)

Suture zone or faults: F1—Bayingou faults; F2—Alaer faults; F3—Boluohuoluo faults; F4—Qingbulake-Nalati faults;

Name of deposit: 1—Lailisigaoer molybdenite deposit; 2—3571 copper deposit; 3—Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

拉石建造,夹橄榄玄武岩及碳酸盐岩。泥盆系有汗吉尕组和托斯库爾他烏組,汗吉尕組由砾岩、石英砂岩夹生物碎屑灰岩组成;托斯库爾他烏組为火山岩熔岩、火山碎屑岩建造。石炭系有大哈拉军山组、阿恰勒河组、科古琴山组和东图津河组,大哈拉军山组为中性火山岩,阿恰勒河组为一套碎屑岩夹火山岩,科古琴山组和东图津河组由砾岩、长石砂岩和薄层砂质灰岩组成。二叠系乌朗组由中性-酸性熔岩夹中基性熔岩组成(冯京等,2008;程松林等,2009)。奈楞格勒钼铜铅锌多金属矿田就赋存于博罗霍洛山组中。

区域性大断裂主要为博罗霍洛山北坡大断裂(图1),呈波状北西西走向通过区域中部,延伸数十千米,规模宏大,为一南倾右行走滑性质的逆冲推覆断裂,产状 $200\sim 210^{\circ}/75\sim 80^{\circ}$,该断裂是博罗霍洛岛弧带与其北侧赛里木地块的分界,控制了斑岩体和铜钼矿化带的分布,其南侧次级北西西走向断裂发育,导致古生界呈断块状构造。

博罗霍洛地区侵入岩广泛发育,多呈岩基产出,延伸方向与区域性构造线方向一致,呈近 EW 向、

NWW 向分布,为泥盆纪—石炭纪岩浆活动的产物。泥盆纪侵入体多分布在中西部,包括花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、钾长花岗岩等;其中花岗闪长岩和石英闪长岩多呈岩枝、岩脉等小岩体侵入于上志留统博罗霍洛山组和上奥陶统呼独克达坂组,分布在区域中部的 8 个小水滴状花岗闪长斑岩小岩体构成莱历斯高尔-3571 小岩体群,单个岩体面积均小于 1 km^2 。石炭纪侵入体多分布在中东部,包括花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等,主要呈岩基状,全岩 Rb-Sr 年龄为 $(311 \pm 37)\text{ Ma}$ (李伍平等,1995),SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(305.0 \pm 5.4)\text{ Ma}$ (朱志新等,2006)。这些晚古生代侵入岩浆起源于上地幔或下地壳,具有 I 型花岗岩类的性质(李伍平等,1995;朱志新等,2006;张东阳等,2009)。

2 成矿地质特征

2.1 矿田地质特征

矿田出露地层为上志留统博罗霍洛山组海相细碎屑岩(图2)。地层走向 NW,倾向 SW,在矿田内构

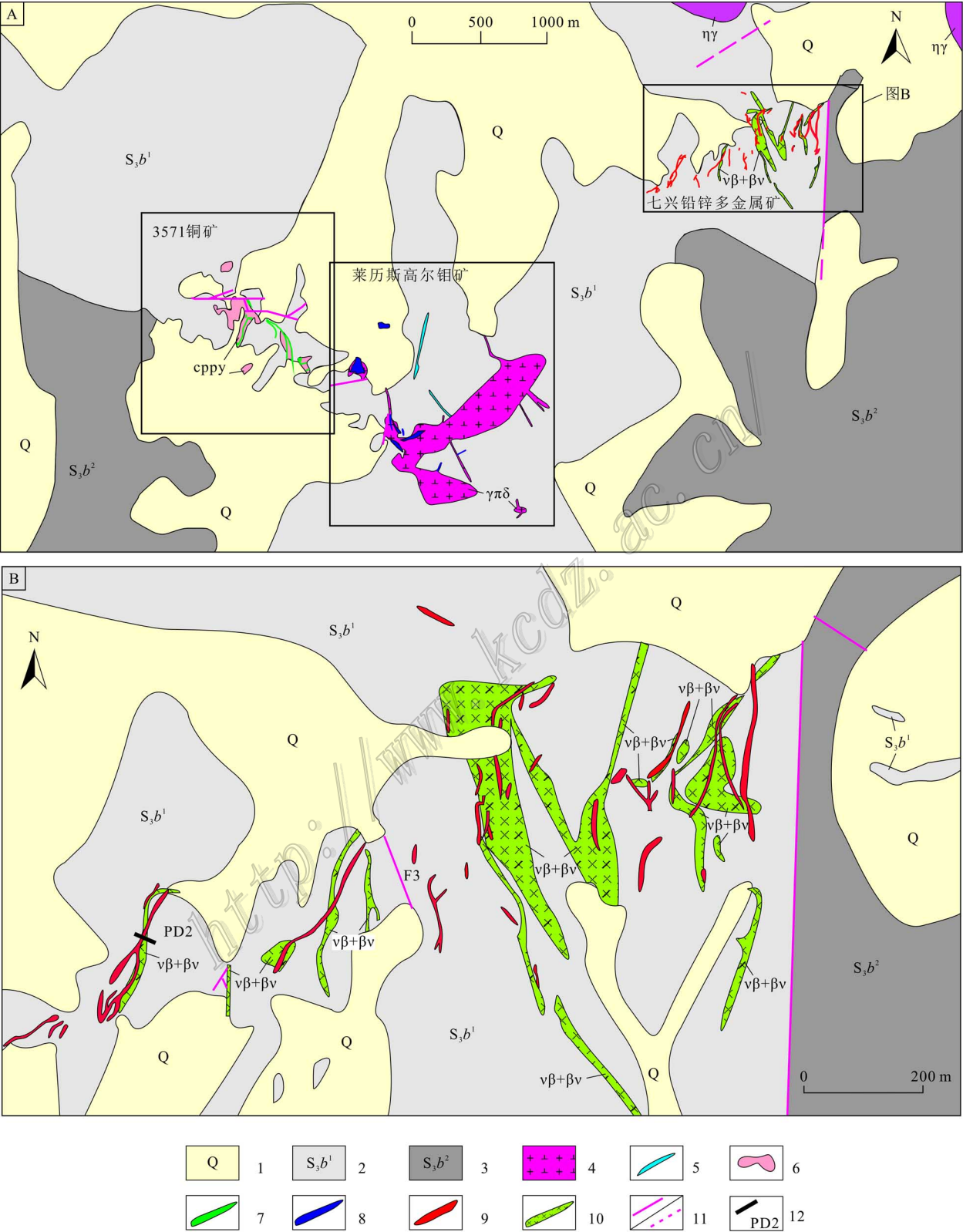


图 2 西天山奈楞格勒矿田地质简图(A)及七兴铅锌多金属矿床地质图(B)(据新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发第七地质大队, 2011)

1—第四系残坡积物; 2—博罗霍洛山组第一岩性段含粉砂泥岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩; 3—博罗霍洛山组第二岩性段粉砂质泥岩;

4—花岗闪长斑岩;5—二长花岗岩;6—黄铜矿磁黄铁矿化蚀变岩;7—铜矿体;8—钼矿体;9—铅锌多金属矿脉;10—辉绿辉长岩脉;
11—断层/推测断层;12—平硐及其编号

Fig. 2 Geological map of the Nailenggele ore field in Western Tianshan (A) and geological map of the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit (B) (modified after No. 7 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2011)
1—Quaternary; 2—First member of Boluohuoluoshan Formation; 3—Second member of Boluohuoluoshan Formation; 4—Granodiorite porphyry;
5—Adamellite; 6—Altered rock containing chalcopyrite and pyrrhotite; 7—Copper ore body; 8—Molybdenite ore body 9—Pb-Zn polymetallic ore body; 10—Diabasic gabbro veins; 12—Adit and its serial number

成单斜岩层,可划分为 2 个岩性段:第一岩性段(S_3b^1)为灰黑色含粉砂泥岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,分布在矿田中部,是矿田主要赋矿地层;第二岩性段(S_3b^2)为紫红色夹灰绿色、灰黑色粉砂质泥岩,分布在矿田西部和东部,与下部第一岩性段呈整合接触。受岩浆热液影响,矿田内博罗霍洛山组普遍发生角岩化和青磐岩化蚀变。

矿田内断裂构造发育,主体呈 NE 走向,与花岗闪长斑岩、角岩化带、矿化蚀变带等整体走向一致,反映构造对后者具有明显的控制作用。对矿田内节理的统计可知,主要受 NEE 向区域应力控制。

矿田内侵入岩分布较广,多呈岩株和岩脉状,岩性从中酸性到基性均有发育,延伸方向与构造线方向一致。矿田中部和东南部出露 4 个花岗闪长斑岩岩枝和小岩株,它们侵入于博罗霍洛山组第一段(S_3b^1)。平面上呈哑铃状、不规则圆形,剖面上呈筒状产出,长约 70~1340 m,宽约 30~720 m,延深一般大于 200 m,产状多向北陡倾,与围岩界线清晰,接触带不规则,锆石 SHRIMP U-Pb 法、LA-ICP-MS 法和全岩 Rb-Sr 法年龄分别为(362±12) Ma、(346±1.2) Ma 和(350±15) Ma (李华芹等,2006;张东阳等,2009;薛春纪等,2011b)。在花岗闪长斑岩中常可见到椭圆状或不规则状的暗色包体。在其顶部、边部、接触带及附近岩角化粉砂泥质围岩中发生了明显钼矿化。花岗闪长斑岩体北部还见二长花岗岩,呈 NW 向或 NNE 向脉状产出,长 230~460 m,宽 2~17 m。矿田东北部出露大量基性岩脉,岩性主要为辉绿辉长岩和少量辉长辉绿岩及辉绿岩,一般长 15~570 m,宽 2~140 m,走向近 NS,倾向东,倾角 43~77°,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(186.2±8.6) Ma (薛春纪等,2011b)。

2.2 七兴铅锌多金属矿床地质特征

2.2.1 矿体特征

七兴矿区共发现铅锌矿化脉 33 条(图 2B),产于近南北向和北北东向张性断裂带内(图 3A),脉宽 0.3

~2 m,局部宽达 8 m,脉长 5~280 m 不等,多向东南东倾,倾角为 52~81°,可见分枝复合现象。平均品位: $\alpha(\text{Pb})$ 为 3.14%, $\alpha(\text{Zn})$ 为 3.43%,伴生组分 $\alpha(\text{Au})$ 平均为 3.57×10^{-6} , $\alpha(\text{Ag})$ 的平均为 130.53×10^{-6} 。

2.2.2 矿石特征

矿石可分为 2 种:以石英-硫化物脉状矿石为主和极少量的碳酸盐-硫化物脉状矿石。矿石中金属矿物(图 3B、3C)主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和少量的白铁矿、黄铜矿及极少量毒砂、黝铜矿等;非金属矿物(图 3C)主要有石英和少量的方解石、绢云母、绿泥石等。黄铁矿:半自形-他形,发育大量麻点,粒度 0.2~2 mm,体积占金属矿物 5%~60%,常与闪锌矿、方铅矿等硫化物共生(图 3B、3C)或被后者交代(图 3G)。白铁矿:半自形-自形,粒度 0.1~1 mm 不等,占金属矿物的 30%,常被闪锌矿、方铅矿等硫化物交代(图 3H)。闪锌矿:半自形-他形(图 3E、3F),沿黄铁矿、白铁矿的边部及裂隙交代(图 3G、3H),可偶见被包裹在黄铁矿、白铁矿内部(穿孔结构)。方铅矿:常被闪锌矿交代,少量与闪锌矿共生(图 3E、3F)。毒砂:菱形自形晶,可被闪锌矿交代(图 3D)。黄铜矿:分布在闪锌矿中,以乳滴状产出(图 3I)。根据交代关系确定矿物生成顺序为:毒砂(或稍早一点)+黄铁矿+白铁矿+石英→方铅矿+闪锌矿+(黄铜矿+白铁矿)(乳滴状)+石英→闪锌矿+黄铜矿(乳滴状)+石英→碳酸盐+石英。

2.2.3 围岩蚀变与成矿期次

围岩蚀变较为发育,从矿体到两侧围岩,蚀变分带明显。蚀变带围绕矿体分布,形态与矿体形态相似。靠近矿体的蚀变带以硅化和黄铁矿化为主,少量绢云母化等,远离矿体,硅化和黄铁矿化变弱,出现方解石化和绿泥石化,且蚀变强度减弱。

根据野外详细观察,将七兴铅锌多金属矿划分为 2 个成矿期次(表 1):热液成矿期和表生期,热液成矿期又可为 3 个阶段:石英-硫化物阶段(Ⅰ)、方解石-硫化物阶段(Ⅱ)和无矿方解石脉阶段(Ⅲ)。

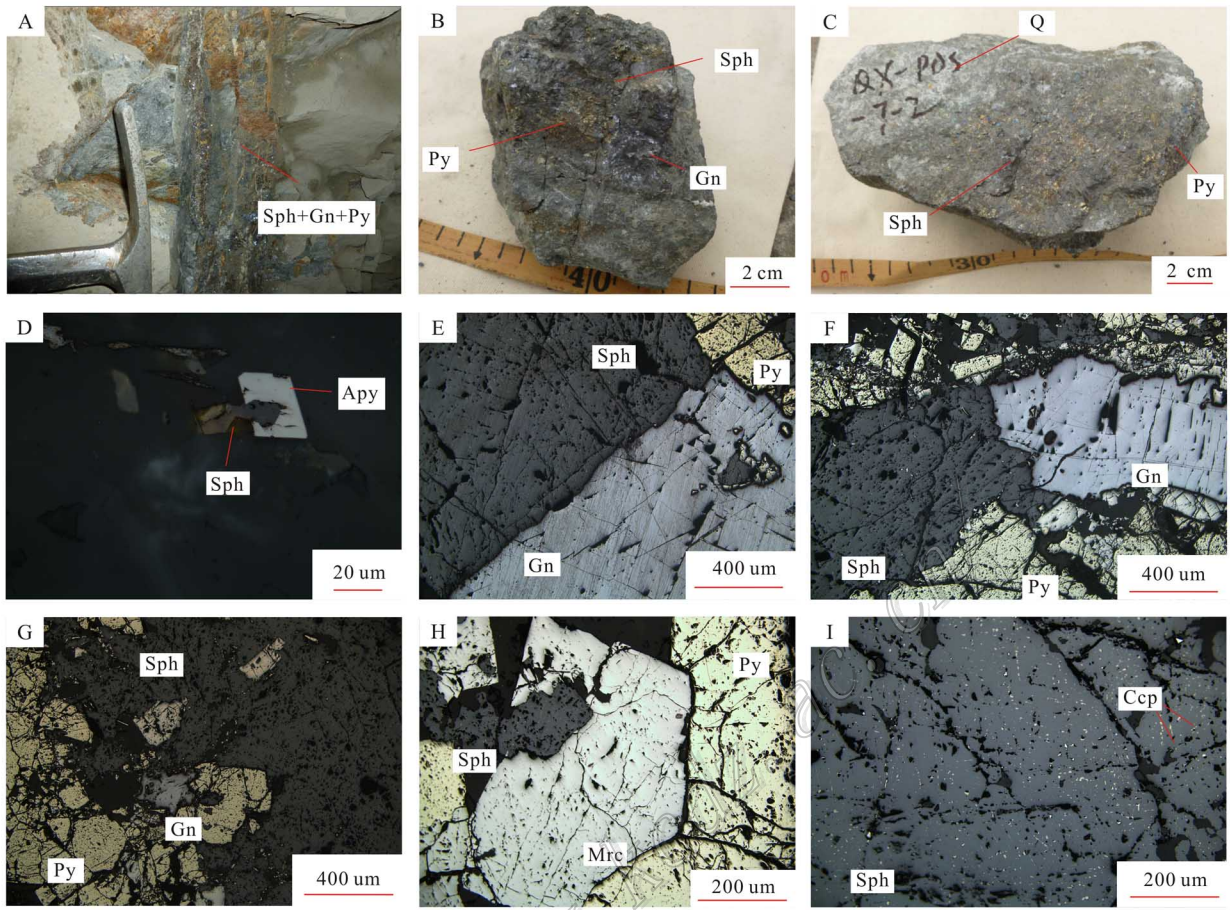


图 3 七兴铅锌多金属矿床主要矿石矿物样品特征

A. 闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿脉, 含少量的石英; B. 块状矿石, 闪锌矿、方铅矿、黄铁矿共生; C. 块状矿石, 闪锌矿、方铅矿、黄铁矿共生, 含团块状石英; D. 闪锌矿交代自形毒砂(反射光); E. 闪锌矿、方铅矿、黄铁矿共生边结构(反射光); F. 闪锌矿与方铅矿共生交代早期黄铁矿(反射光); G. 闪锌矿交代方铅矿和黄铁矿(反射光); H. 白铁矿与黄铁矿共生, 闪锌矿交代白铁矿(反射光); I. 闪锌矿与黄铜矿形成固溶体分离结构(反射光)

Q—石英, Sph—闪锌矿, Gn—方铅矿, Py—黄铁矿, Apy—毒砂, Mrc—白铁矿, Ccp—黄铜矿

Fig. 3 Characteristics of the ore mineral samples from the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

A. Ore vein containing galena, sphalerite, pyrite and a little quartz; B. Massive ore, galena and sphalerite associated with pyrite; C. Massive ore, galena and sphalerite associated with pyrite containing lumpy quartz; D. Automorphic arsenopyrite replaced by sphalerite (under reflective light); E. Association edge structure between galena, sphalerite and pyrite (under reflective light); F. Early pyrite replaced by galena and sphalerite (under reflective light); G. Galena and pyrite replaced by sphalerite (under reflective light); H. Sphalerite replacing marcasite associated with pyrite (under reflective light); I. Chalcopyrite and sphalerite assuming interstitial separation structure (under reflective light)

Q—Quartz, Sph—Sphalerite, Gn—Galena, Py—Pyrite, Apy—Arsenopyrite, Mrc—Marcasite, Ccp—Chalcopyrite

3 样品、分析及测试结果

本次工作对七兴铅锌多金属矿床 PD2 坑道(图 2B)进行了系统观察、测量和样品采集。用于 Rb-Sr 等时线年龄测定的样品均采自于石英-硫化物阶段的块状铅锌矿石。矿石矿物以方铅矿、闪锌矿为主(图 3B), 常见与黄铁矿、黄铜矿等共生, 含少量团块状石英(图 3C)。镜下观察闪锌矿主要呈灰色、半自形-他形、中粗粒粒状结构(图 3E、3F), 闪锌矿常与

方铅矿、黄铁矿、黄铜矿等硫化物共生(图 3H、3I)。

将样品粉碎到 40~80 目, 在双目镜下挑选出闪锌矿单矿物, 纯度达 99% 以上, 用蒸馏水清洗, 低温蒸干, 然后将纯净的单矿物样品在玛瑙研钵内研磨至 200 目左右待测。因为闪锌矿等金属矿物的 $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Sr})$ 较低, 甚至低于 0.01×10^{-6} , 为了确定进行 Rb-Sr 同位素定年的可行性, 首先在中国科学院土壤研究所对 7 个闪锌矿样品草测了 $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Sr})$, 在此基础上, 挑选适合定年的样品在南京大学现代分析中心同位素分析室进行 $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Sr})$

表 1 七兴铅锌多金属矿床矿物组合和生成阶段

Table 1 Mineral paragenesis and ore-forming stages of the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

矿物名称	热液成矿期			表生成矿期
	石英-硫化物阶段	碳酸盐-硫化物阶段	无矿碳酸盐阶段	
石英				
毒砂				
白铁矿				
黄铁矿				
闪锌矿				
方铅矿				
黄铜矿				
绿泥石				
绿帘石				
绢云母				
方解石				
褐铁矿				
铅矾				
孔雀石				

表 2 七兴铅锌多金属矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite from the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

样品号	测试矿物	$\alpha(B) \times 10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	$1/\text{Rb}/10^{-6}$	$1/\text{Sr}/10^{-6}$
		Rb	Sr					
QX-PDS-7-1	闪锌矿	0.019	0.175	0.3246	0.712403	0.71073	51.8134715	5.707762557
QX-PDS-7-2	闪锌矿	0.444	1.357	0.9637	0.715312	0.71034	2.254791432	0.736919676
QX-PDS-7-3	闪锌矿	4.065	3.964	3.023	0.726315	0.71073	0.24600246	0.252270434
QX-PDS-7-4	闪锌矿	2.294	0.850	7.954	0.751562	0.71055	0.435919791	1.17605551
QX-PDS-7-8	闪锌矿	1.697	2.304	2.468	0.721709	0.71053	0.589275192	0.434027778
QX-PDS-7-11	闪锌矿	0.382	1.981	0.5696	0.713482	0.71054	2.620545073	0.504795558

测试单位：南京大学现代分析中心同位素分析室。

和同位素组成测定。

Rb-Sr 同位素分析方法：原粉末样品用混合酸溶解，取清液上离子交换柱分离，采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯，然后用英国产的 VG354 质谱仪测定，测定流程见文献(王银喜等，2007)。用于测定的美国 NBS987 同位素标样为： $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,236\pm0.000\,007$ ，Sr 的全流程空白为 $(5\sim7)\times10^{-9}\text{g}$ ， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行标准化。

测试结果见表 2。等时线年龄用 ISOPLOT 程序计算， $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 的分析误差为 $\pm1\%$ ， $\lambda_{\text{Rb}}=1.42\times10^{-11}\text{a}^{-1}$ ， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差给定 0.05，置信度 95%。计算获得闪锌矿等时线年龄为 $(362.2\pm4.9)\text{Ma}$ (图 4)，离散度 2.1， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 $0.710\,57\pm0.000\,25$ 。

4 讨 论

4.1 成矿年龄的可靠性

热液矿物 Rb-Sr 等时线年龄测定的基本前提是

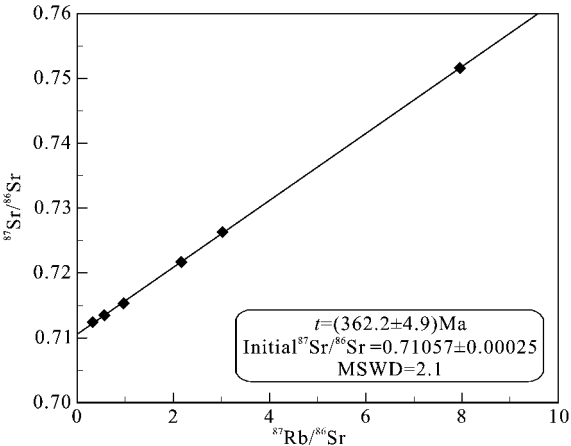


图 4 七兴铅锌多金属矿床单矿物闪锌矿 Rb-Sr 等时线图解

Fig. 4 Rb-Sr isochron of sphalerite from the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

样品的同源性、同时性、封闭性、锶同位素初始值的均一性以及 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$ 的差异性(李文博等,2002)。刘建明等(1998b)指出,影响热液矿床 Rb-Sr 同位素

测年等时线构筑不成功的原因主要有：① 成矿元素和成矿流体的多源性及成矿温度可能较低，使得成矿体系中同位素达不到平衡和均一；② 许多矿床易受后期构造-流体活动影响，改变了原来的矿物组合和同位素平衡；③ Rb、Sr 在热液矿物中存在形式不清楚，热液矿物中包裹体对测年影响较大；④ 成矿体系中热液矿物 Rb、Sr 的含量常常较低，Rb/Sr 比值变化相对较小，对质谱仪的灵敏度、精确度和实验室的全流程本底（空白误差）的要求很高。对七兴铅锌多金属矿脉中石英的流体包裹体测温（140 ~ 285℃）显示其为中低温热液脉型矿床（薛春纪等，2011b）。本次工作样品采自同一期次、同一矿脉局部较小的范围内，选择未见裂隙或后期热液脉，且结晶较好的致密块状矿石为研究对象，最大程度满足了 Rb-Sr 同位素测年的前提条件。实验过程中，为排除次生及原生包裹体的干扰，将闪锌矿粉碎至 200 目以下，然后采用热爆超声法清洗。

利用 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图解可判别闪锌矿生长期间锶同位素初始值是否保持不变（Pettke et al., 1996），进而来判别所测数据是否合理。本次测试数据在 $1/\text{Rb}-n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $1/\text{Sr}-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ （图 5）关系图解中显示，同时产出在石英-硫化物阶段的闪锌矿单矿物的 $\epsilon(^{87}\text{Rb})$ 、 $\epsilon(^{87}\text{Sr})$ 不同， $1/\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $1/\text{Rb}$ 与 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 之间不存在线性关系，而且相对稳定，说明闪锌矿生长期间锶同位素初始值基本保持不变，因此该等时线

年龄具有实际地质意义。

4.2 成矿物质来源

七兴铅锌多金属矿床闪锌矿锶同位素的测试结果（表 2）显示，硫化物的 $\epsilon(^{87}\text{Rb})$ 较低，变化范围为 $0.019 \times 10^{-6} \sim 4.065 \times 10^{-6}$ ， $\epsilon(^{87}\text{Sr})$ 变化相对不大，从 $0.175 \times 10^{-6} \sim 3.964 \times 10^{-6}$ 。同位素比值 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较大，从 $0.3246 \sim 7.954$ ，平均值为 2.7663 ； $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化相对较小，为 $0.7124 \sim 0.7516$ ，平均值为 0.7248 。

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 是判断成岩成矿物质来源的重要指标，在矿床地质研究中常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用等（侯明兰等，2006）。为避免放射性 ^{87}Rb 衰变对锶同位素造成显著影响，将成矿时代换算到 362 Ma，采用软件 Geokit 分别对硫化物进行了初始同位素计算（表 2），七兴矿床闪锌矿锶同位素初始值一致，且数值相对较高，介于 $0.7103 \sim 0.7107$ 之间，平均值为 0.7105 ，小于大陆地壳锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 0.719 （孙省利，2001），而高于并更接近于地幔的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值 0.707 （Faure，1986），显示硫化物的来源为以幔源为主的壳幔混合来源。这与该矿床 S、Pb 同位素（七兴铅锌矿： $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = 2.9\text{‰} \sim 4.8\text{‰}$ ， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.1893 \sim 18.1930$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6185 \sim 15.6226$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.1113 \sim 38.1281$ （薛春纪等，2011b））的地球化学特征得出的结论完全一致，均表明成矿物质与岩浆岩有关，而同一矿田内莱历

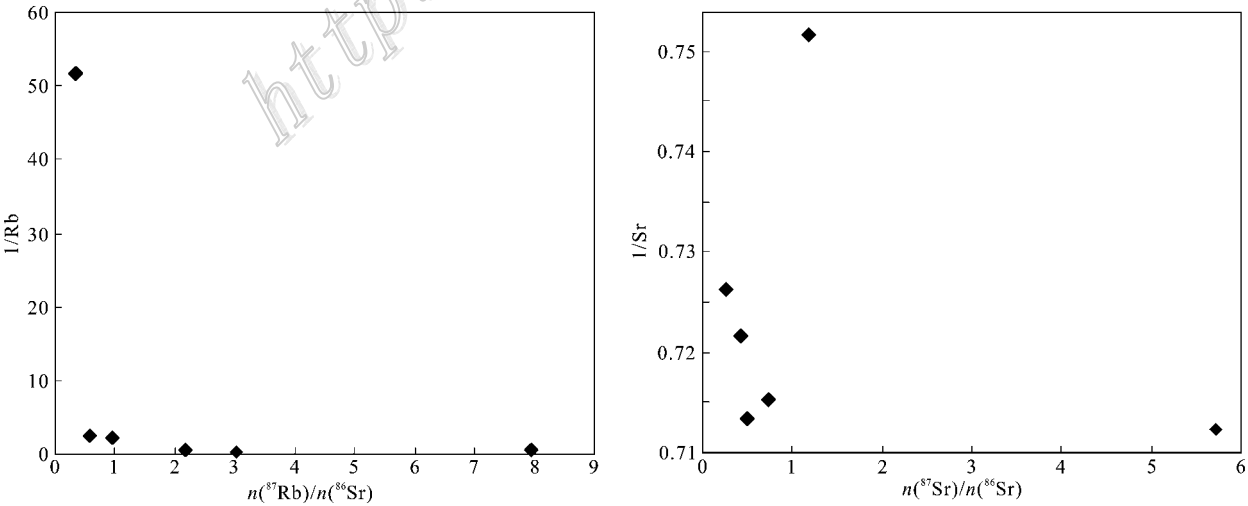


图 5 七兴铅锌多金属矿床闪锌矿 $1/\text{Rb}-n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $1/\text{Sr}-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 关系图

Fig. 5 Diagrams of $1/\text{Rb}$ versus $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ and $1/\text{Sr}$ versus $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ of sphalerites from the Qixing Pb-Zn polymetallic deposit

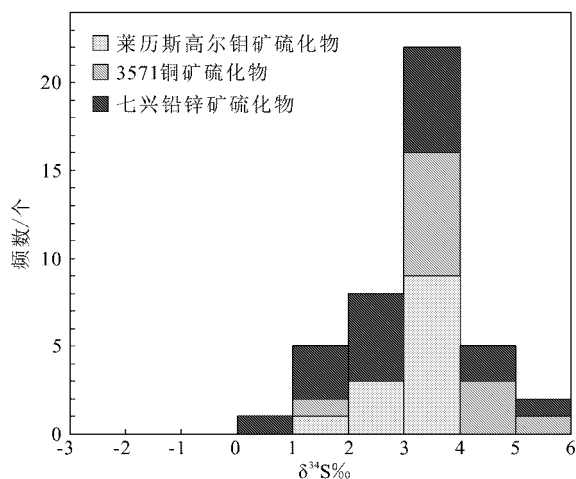


图 6 奈楞格勒矿田中硫化物的硫同位素组成直方图

Fig. 6 S isotopic composition histogram of sulfide ores in the Nailenggele ore field

斯高尔斑岩钼矿床的含矿斑岩体花岗闪长斑岩的锆同位素初始值为 $0.7079 \sim 0.7103$ (张东阳等, 2009), 含辉钼矿石英脉中石英的锆同位素初始值 (假定 $t = 360 \text{ Ma}$) 为 $0.7108 \sim 0.7117$ (李华芹等, 2006), 可见闪锌矿的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值与岩体和矿化石英脉中石英的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值基本一致, 表明七兴铅锌多金属矿床与莱历斯高尔花岗闪长斑岩体具有成因联系。

4.3 地质意义

西天山奈楞格勒矿田内莱历斯高尔钼矿花岗闪长斑岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(362 \pm 12) \text{ Ma}$, 全岩的 Rb-Sr 年龄为 $(350 \pm 15) \text{ Ma}$, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 $(359 \pm 8) \text{ Ma}$ (李华芹等, 2006) 及 $(379.9 \pm 8.3) \text{ Ma}$ (朱明田等, 2010)。博罗霍洛成矿带西段喇嘛苏钼矿区的花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(366.3 \pm 1.9) \text{ Ma}$ (Zhang et al., 2010), 阿希金矿区的安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(363.2 \pm 5.7) \text{ Ma}$ (翟伟等, 2006)。上述成岩成矿年龄数据与七兴铅锌多金属矿的闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄具有一致性, 主要发生在晚泥盆世—早石炭世, 暗示了岩浆活动可能为成矿作用提供了成矿物质和热源。奈楞格勒矿田内七兴铅锌多金属矿床、莱历斯高尔钼矿床 (薛春纪等, 2011a, 2011b) 和 3571 铜矿床 (张立成等, 未发表的资料) 硫化物硫、铅同位素研究表明, 三者 S 和 Pb 同位素组成 (莱历斯高尔钼矿: $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = 2.7\% \sim 4.3\%$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.0997 \sim 18.258$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6052 \sim 15.6242$, $^{208}\text{Pb}/$

$^{204}\text{Pb} = 38.1245 \sim 38.3078$; 3571 铜矿: $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = 3\% \sim 4.5\%$) 上是相同的 (图 6), 成矿物质来源一致, 结合本次工作闪锌矿的锆同位素初始值又与莱历斯高尔钼矿斑岩体及矿化石英脉中石英单矿物的锆同位素初始值基本一致, 均显示成矿物质与莱历斯高尔花岗闪长斑岩体具有密切的成因联系。地质年代学及同位素研究均表明七兴铅锌多金属矿与莱历斯高尔钼矿和 3571 铜矿在成因上具有密切联系, 应是同一岩浆-构造-热液成矿作用的产物。

在晚泥盆世—早石炭世, 准噶尔洋板块已经向南俯冲至伊犁板块之下, 形成了一个完整的晚古生代沟-弧-盆体系, 即依连哈比尔尕晚古生代弧前海沟带、别珍套-科古琴晚古生代岛弧带和吐拉苏晚古生代弧后盆地 (张良臣等, 1985; 肖序常等, 1992; 王志良等, 2004; 左国朝等, 2008), 博罗霍洛成矿带处于俯冲大陆边缘 (Gao et al., 1998; 朱永峰等, 2006; 王强等, 2006; 左国朝等, 2008; 张东阳等, 2009)。受到北北东-北东向区域应力作用, 形成了与造山带主体近垂直方向为主的构造-裂隙系统, 之后岩浆活动沿构造裂隙侵入形成了矿田内北东向的花岗闪长斑岩体, 岩浆期后含矿热液沿北东向断裂运移并形成了七兴铅锌多金属矿床。近些年, 与斑岩有关的脉状铅锌矿也有许多实例发现, 如西天山的库尕斯库勒生铅锌矿床 (段士刚等, 2012), 东秦岭的冷水北沟铅锌矿床 (王长明等, 2007), 百炉沟铅锌矿床、赤土店铅锌矿床 (段士刚等, 2010, 2011) 和辽宁青城子榛子沟铅锌矿床 (马玉波等, 2012) 等。总之, 区域构造演化、岩浆活动和成矿作用在时间和空间上的一致性表明, 奈楞格勒矿田在晚泥盆世—早石炭世经历了强烈的构造-岩浆-热液成矿作用过程, 七兴铅锌多金属矿床正是这次区域性地质事件产物之一。

5 结 论

(1) 七兴铅锌多金属矿床石英-硫化物阶段的闪锌矿单矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 $(362.2 \pm 4.9) \text{ Ma}$, 指示其成矿时代为晚泥盆世—早石炭世。

(2) 闪锌矿 Sr 同位素初始比值范围介于 $0.7103 \sim 0.7107$ 之间, 平均值为 0.7105 , 指示成矿物质是以幔源为主的壳幔混合来源, 与 S、Pb 同位素地球化学得出的结论相吻合。

(3) 地质年代学及同位素研究的一致性表明, 奈楞格勒矿田在晚泥盆世—早石炭世经历了强烈的

构造-岩浆-热液成矿作用过程,应为同一成矿系统的产物。

志 谢 野外地质工作期间,得到了新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一地质大队司李春,第九地质大队侯国栋、张波等同仁的大力支持和帮助,南京大学现代分析中心同位素分析室王银喜教授实验过程中给予了热情的指导和帮助,在此一并致谢!

参考文献/References

- 陈毓川,王平安,秦克令,赵东宏,毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 13(4): 289-298.
- 程松林,冯 京,涂其军,薛春纪,王晓刚,张 兵,万 闾. 2009. 新疆莱利斯高尔铜钼矿地质特征及找矿前景[J]. 新疆地质, 27(3): 236-241.
- 程裕淇. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 第6号: 1-64.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,皱晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少珍,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 段士刚,薛春纪,刘国印,燕长海,冯启伟,宋要武,高炳宇. 2010. 河南栾川百炉沟铅锌矿床地质、流体包裹体和稳定同位素地球化学[J]. 矿床地质, 29(5): 427-441.
- 段士刚,薛春纪,冯启伟,高炳宇,刘国印,燕长海,宋要武. 2011. 豫西南赤土店铅锌矿床地质、流体包裹体和 S、Pb 同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 38(2): 427-441.
- 段士刚,薛春纪,李 野,石海岗,贾志业. 2012. 新疆库尔尔生铅锌矿床地质、流体包裹体和同位素地球化学[J]. 矿床地质, 31(5): 1014-1024.
- 冯 京,兰 险,张维洲,李卫平,桑少杰. 2008. 新疆莱利斯高尔铜钼矿找矿方法及综合信息找矿模型[J]. 新疆地质, 26(3): 240-247.
- 冯 京,薛春纪,吴淦国. 2011. 西天山莱利斯高尔-达巴特一带与斑岩相关的铜钼金矿产预测[M]. 北京: 地质出版社. 1-50.
- 侯明兰,蒋少涌,姜耀辉,凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2524-2533.
- 胡乔青,王义天,王瑞廷,李建华,代军治,王双彦. 2012. 陕西凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据[J]. 岩石学报, 28(1): 258-266.
- 李华芹,王登红,万 闾,屈文俊,张 兵,路远发,梅玉萍,皱绍利. 2006. 新疆莱利斯高尔铜钼矿床的同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2437-2443.
- 李文博,黄智龙,许德如,陈 进,许 成,管 涛. 2002. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述[J]. 大地构造与成矿学, 26(4): 436-441.
- 李伍平,姜常义,吴文奎,谢广成. 1995. 西天山海西中期花岗岩的地质特征及其构造环境[J]. 西安地质学院学报, 17(1): 43-49.
- 刘建明,赵善仁,沈 洁,姜 能,霍卫国. 1998a. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. 地球物理学进展, 13(3): 46-55.
- 刘建明,沈 洁,赵善仁,霍卫国,姜 能. 1998b. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 107-113.
- 马玉波,邢树文,张增杰,孙景贵. 2012. 辽宁青城子榛子沟脉状铅锌矿成矿流体地球化学初探[J]. 矿床地质, 31(3): 569-578.
- 毛景文,王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质, 19(4): 289-296.
- 毛景文,Stein H,杜安道,周涛发,梅燕雄,李永峰,藏文栓,李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121-131.
- 裴荣富,吴良士. 1994. 金属成矿省演化与成矿[J]. 地学前缘, 1(3-4): 95-99.
- 孙省利. 2001. 西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿系列研究[博士学位论文]. 导师: 曾允孚, 何知礼. 成都: 成都理工学院. 43-44.
- 王长明,张寿庭,邓 军,孙艳霞,燕长海,叶会寿. 2007. 河南冷水北沟铅锌矿地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 26(4): 175-183.
- 王 强,赵振华,许继峰,Wyman D A,熊小林,资 峰,白正华. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 22(1): 11-30.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 23(7): 1749-1755.
- 王志良,毛景文,张作衡,左国朝,王龙生. 2004. 西天山古生代铜金多金属矿床类型、特征及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 78(6): 836-847.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,朱宝清,李锦铁,赵 民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社. 1-169.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队. 2011. 新疆尼勒克县-精河县奈楞格勒一带铜钼矿详查设计书[R]. 内部资料.
- 薛春纪,陈波,贾志业,张 兵,万 闾. 2011a. 新疆西天山莱利斯高尔-3571 斑岩铜钼矿田地质地球化学和成矿年代[J]. 地学前缘, 18(1): 149-165.
- 薛春纪,张 权,冯 京,王晓刚,张 兵,万 闾. 2011b. 新疆西天山七兴铅锌成矿特征、时代和地质意义[J]. 地学前缘, 27(5): 794-808.
- 杨富全,张志欣,屈文俊,耿新霞,吕书君,柴凤梅,姜丽萍,刘 锋.

2011. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及意义[J]. 地质学报, 85(3): 396-404.
- 杨富全, 张志欣, 刘国仁, 屈文俊, 张立武, 魏广智, 刘 锋, 柴凤梅. 2012. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏斑岩铜矿床年代学研究[J]. 岩石学报, 28(7): 2029-2042.
- 杨富全, 秦纪华, 刘 锋, 张志欣, 刘振江, 耿新霞, 柴凤梅, 高文娟. 2013. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏铜(钼)矿区韧性剪切变形时代: 来自白云母和黑云母 Ar-Ar 年龄的约束[J]. 大地构造与成矿, 37(1): 1-10.
- 袁顺达, 侯可军, 刘 敏. 2010a. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 23(3): 797-808.
- 袁顺达, 李惠民, 郝 爽, 耿建珍, 张东亮. 2010b. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义[J]. 矿床地质, 29(2): 543-544.
- 袁顺达, 张东亮, 双 燕, 杜安道, 屈文俊. 2012a. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 27-38.
- 袁顺达, 刘晓菲, 王旭东, 吴胜华, 原堃斌, 李学凯, 王铁柱. 2012b. 湘南红旗岭锡多金属矿床地质特征及 Ar-Ar 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 28(12): 3787-3797.
- 翟 伟, 孙晓明, 高 俊, 贺小平, 梁金龙, 苗来成, 吴有良. 2006. 新疆阿希金矿床赋围岩-大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1399-1404.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 11(1): 1-12.
- 张长青, 李向辉, 余金杰, 毛景文, 陈福坤, 李厚民. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷锶测年及地质意义[J]. 地质论评, 54(4): 145-151.
- 张东阳, 张招崇, 艾 羽, 苏慧敏. 2009. 西天山莱尔斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1319-1331.
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史[J]. 新疆地质, 3(3): 1-14.
- 郑 伟, 陈懋弘, 赵海杰, 徐林刚, 凌世彬, 吴 越, 胡耀国, 田 云, 吴晓东. 2013. 广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(2): 259-292.
- 朱明田, 武 广, 解洪晶, 万 阔, 钟 伟, 糜 梅, 刘 军. 2010. 新疆西天山莱尔斯高尔斑岩铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(12): 3667-3682.
- 朱永峰, 郭 璇, 周 晶. 2006. 西天山石炭系火山岩的岩石学及 Sr-Nb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1341-1350.
- 朱志新, 王克卓, 徐 达. 2006. 伊连哈比尔山石炭纪侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 25(8): 986-991.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 刘 敏, 王龙生. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 54(6): 748-767.
- Barra F, Ruiz J, Mathur R and Titley S. 2002. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA[J]. Mineralium Deposita, 38(5): 585-596.
- Brannon J C, Podosek F A and McLimans R K. 1992a. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Nature, 356: 509-511.
- Brannon J C, Frank A, Podosek F A and McLimans R K. 1992b. A clue to the origin of dark and light bands of the 270 Ma Upper Mississippi Valley (UMV) zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 24: 353.
- Christensen J N, Halliday A N, Stephen E K and Sangster D F. 1993. Further evaluation of the Rb-Sr dating of phalerite: The Nanisivik Precambrian MVT deposit, Baffin Island, Canada[C]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 25: 471.
- Christensen J N, Halliday A N, Kenneth E L, Roderick N R and Stephen E K. 1995a. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 5191-5197.
- Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R and Stephen E K. 1995b. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia[J]. Econ. Geol., 90: 877-884.
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology[M]. John Wiley & Sons (2nd edition), 183-199.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, Tang Y Q and He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 287: 213-231.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Rhenium-osmium isotopic dating of molybdenite in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in North Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 1815-1818.
- Mao J W, Du A D, Selmann R and Yu J J. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipoviy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia[J]. Mineralium Deposita, 38: 251-257.
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and Metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 29: 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Ye H S, Qu W J, Du A D, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 4607-4626.

- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E and Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley-type ore deposits[J]. *Nature*, 346: 354-357.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D, Kyle J R and Lane T E. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 417-427.
- Pettke T and Diamond L W. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrons; a clarification of why it works[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*,
- York D and Berggar G W. 1970. ^{40}Ar - ^{39}Ar age determinations on nepheline and basic whole rocks[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 7: 333-336.
- Yuan S D, Peng J T, Shen N P, Hu R Z and Dai T M. 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in Southern Hunnan and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 278-286.
- Yuan S D, Peng J T, Li H M, Shen N P and Zhang D L. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualingtin-polymetallic deposit (Hunan, South China)[J]. *Mineralium Deposita*, 43: 375-382.
- Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z and Zhang D L. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 235-242.
- Zhang D Y, Zhang Z C, Xue C J, Zhao Z D and Liu J L. 2010. Geochronology and geochemistry of the ore-forming porphyries in the Lailisigao'er-Lamasu region of the western Tianshan mountains, Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis, metallogenesis, and tectonic setting[J]. *The Journal of Geology*, 118(2): 543-563.