

延边天宝山矿集区新兴铅锌(银)矿床成矿岩体的年代学与地球化学特征

杨 群¹, 任云生¹, 鞠 楠², 张 博³, 陈 聪¹, 孙振明¹

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
3. 吉林省龙井市瀚丰矿业有限公司, 吉林 龙井 133400)

摘 要: 新兴铅锌(银)矿床位于兴蒙造山带东段的天宝山矿集区, 主矿体受花岗闪长岩体中的角砾岩筒控制。为确定该矿床的成岩成矿时代、物质源区和构造背景, 对与成矿作用关系密切的花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测定和岩石地球化学分析。结果表明: 花岗闪长岩中锆石 U-Pb 年龄的加权平均值为 264.6 ± 4.4 Ma ($n=15$), 表明该岩体侵位于中二叠世; 新兴花岗闪长岩的元素地球化学特征上表现为富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 $1.36 \sim 1.85$, 均 >1)、准铝质 (A/CNK 值为 $0.96 \sim 1.04$, 均值 0.99) 和中等偏高的 Al_2O_3 含量 ($16.04\% \sim 16.34\%$), 属 I 型花岗岩和高钾钙碱性-钙碱性岩石系列, 具有岛弧岩浆岩的地球化学属性; 微量元素组成上, 富集轻稀土 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.44 \sim 16.64$], 具弱的负 Ce 异常 ($\delta\text{Ce} = 0.72 \sim 0.91$, 均值为 0.83) 和弱的正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.15$, 均值为 1.06), 富集大离子亲石元素 (LILE) Ba、Rb、K 及不相容元素 Th、U, 相对亏损高场强元素 (HFSE) Ta、Nb 和 Ti 等, 微量元素比值介于地壳和地幔平均值之间, 均表明新兴成矿岩体形成过程中壳源物质的贡献。结合东北地区晚古生代区域构造演化, 认为该花岗闪长岩体及相关热液成矿事件是中二叠世古亚洲洋板块俯冲作用的结果。该期岩浆-成矿事件的识别对区内区域成矿作用及成矿规律研究具有重要意义。

关键词: 隐爆角砾岩; 花岗闪长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学; 新兴铅锌(银)矿床; 延边天宝山矿集区

中图分类号: P597⁺.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0295-14

Geochronology and geochemistry of the metallogenic intrusion in the Xinxing lead-zinc (silver) deposit in the Tianbaoshan ore concentration area, Yanbian Prefecture

YANG Qun¹, REN Yun-sheng¹, JU Nan², ZHANG Bo³, CHEN Cong¹ and SUN Zhen-ming¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Shenyang Center of Geological Survey, China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 3. Hanfeng Mining Co., Ltd., Longjing 133400, China)

Abstract: The Xinxing lead-zinc (silver) deposit is located in the Tianbaoshan ore concentration area of Yanbian Prefecture, east part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt. The major orebody is controlled by breccia pipe hosted by the granodiorite intrusion. In order to determine the petrogenetic and metallogenic ages, the material source and the tectonic setting of this deposit, the authors conducted LA-ICP-MS U-Th-Pb dating of zircon

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2015-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429802); 中国地质调查局项目(1212011085485); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金资助课题(17-1112-1); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开发基金项目(201209)

作者简介: 杨 群(1989-), 男, 汉族, 在读硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yangq2009jlu@163.com; 通讯作者: 任云生(1969-), 男, 汉族, 博士, 教授, 从事矿床学的教学与研究, E-mail: renys@jlu.edu.cn。

grains from the granodiorite related to the mineralization and made geochemical analysis of the intrusion. Zircon grains from granodiorite have the weighted average U-Pb age of 264.6 ± 4.4 Ma ($n = 15$), which means that the rock was emplaced in the middle Permian. The Xinxing granodiorite is characterized by high sodium ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.36 \sim 1.85$, avg. > 1), metaluminous nature ($\text{A}/\text{CNK} = 0.96 \sim 1.04$, avg. $= 0.99$), and mid-high Al_2O_3 ($16.04\% \sim 16.34\%$), similar to features of the arc volcanic rocks, indicating that the metallogenic granodiorite belongs to I-type granite and the high potassium-calc-alkaline series. Most of the samples are strongly enriched in light rare earth elements (LREE), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 8.44 \sim 16.64$, and have low negative Ce anomalies ($\delta\text{Ce} = 0.72 \sim 0.91$, avg. $= 0.83$) as well as low positive Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.15$, avg. $= 1.06$), with the enrichment of such large ion lithophilic elements (LILE) as Ba, Rb and K and incompatible trace elements of Th and U, and relative depletion of high field strength elements (HFSE) such as Ta, Nb and Ti. The ratios of trace elements are between the average value of the crust and that of the mantle, implying the contribution of crust-derived material. In combination with late Paleozoic tectonic evolution of Northeast China, the authors consider that the metallogenic event of granodiorite and related hydrothermal mineralization were caused by the subduction of the Paleo-Asian Ocean Plate in middle Permian. The identification of the magmatic-hydrothermal mineralization event in the area is of great significance for the study of regional mineralization and regional metallogenic regularity.

Key words: cryptoexplosive breccia; granodiorite; zircon U-Pb age; geochemistry; Xinxing lead-zinc (silver) deposit; Tianbaoshan ore concentration area in Yanbian Prefecture

隐爆角砾岩型矿床产有金、银、铅锌、铁、钼、钨等多种矿产资源,且是国内外许多大型-超大型矿床的重要矿化类型,如美国 Round Mountain 矿床和 Cripple Creek 矿床、澳大利亚的 Olympic Dam 矿床、我国祁雨沟金矿和铜绿山铜铁矿等。越来越多的研究表明,与隐爆角砾岩有关的斑岩多属壳-幔过渡型(纪现华,2013),隐爆角砾岩筒常作为寻找斑岩型矿床的直接标志(Sillitoe and Hedenquist, 2003)。随着越来越多的与岩浆隐蔽爆破作用有关的 Pb、Zn、Au、Ag、Cu、Mo 等矿床的发现,对控矿隐爆角砾岩筒控矿作用,特别是其与斑岩型以及浅成低温热液型矿床关系的研究备受关注(Sillitoe, 1973, 1983; Barton *et al.*, 1977; Henley and Ellis, 1983; Henley, 1985; Panteleyev, 1986; Heald *et al.*, 1987; Bartos, 1989; Sillitoe and Bonham, 1990; Cooke and Bloom, 1990; Eaton and Setterfield, 1993; Pirajno, 1995; 张会琼等, 2012)。

矽卡岩型多金属矿床一直被作为吉林天宝山矿集区内资源勘查与开发的重要类型。20 世纪 80 年代以来,随着地质勘查的不断深入,区内先后发现了新兴隐爆角砾岩型铅锌(银)矿床和东风南山火山沉积变质-热液改造型(接触交代型)铜铅锌矿床、东风北山斑岩型钼矿床,表明该矿集区矿种丰富、矿床类型复杂,且深部具有较好的找矿远景。查明不同类

型矿化的时空关系是成矿规律研究和确定找矿方向的关键。近年来,矿集区内典型的矽卡岩型和斑岩型矿床的控矿条件、矿化特征、成矿流体特征及成岩成矿时代取得了一些认识(宋贵,1984; 李宝树等,1991; 孙钧,1994; 朴清龙等,2000; 陈冬,2009; 张勇等,2012; 鞠楠,2013; 孙振明等,2014),但在受角砾岩筒控制的新兴多金属矿床的成矿时代、构造背景、成岩成矿的物质源区以及和立山接触交代型矿化和东风北山斑岩型矿化的时空关系尚缺乏系统研究。为此,本文对该矿床的成矿岩体开展了岩相学、同位素年代学以及地球化学特征研究,以期查明该岩体的成岩成矿时代与构造背景,为该矿床的理论研究及深部和外围找矿奠定基础。

1 矿集区地质与新兴矿床地质特征

吉林天宝山矿集区位于兴蒙造山带东端,敦化-密山断裂和西拉木伦-长春断裂交汇处的东侧。该区夹于兴凯地块、佳木斯地块与华北板块之间,先后经历了古生代古亚洲洋构造域和中生代环太平洋构造域两大构造域的演化以及复合叠加(张勇等,2012; 鞠楠,2013),频繁而强烈的构造岩浆活动为区内内生金属矿床的形成提供了优越的地质条件(图 1)。

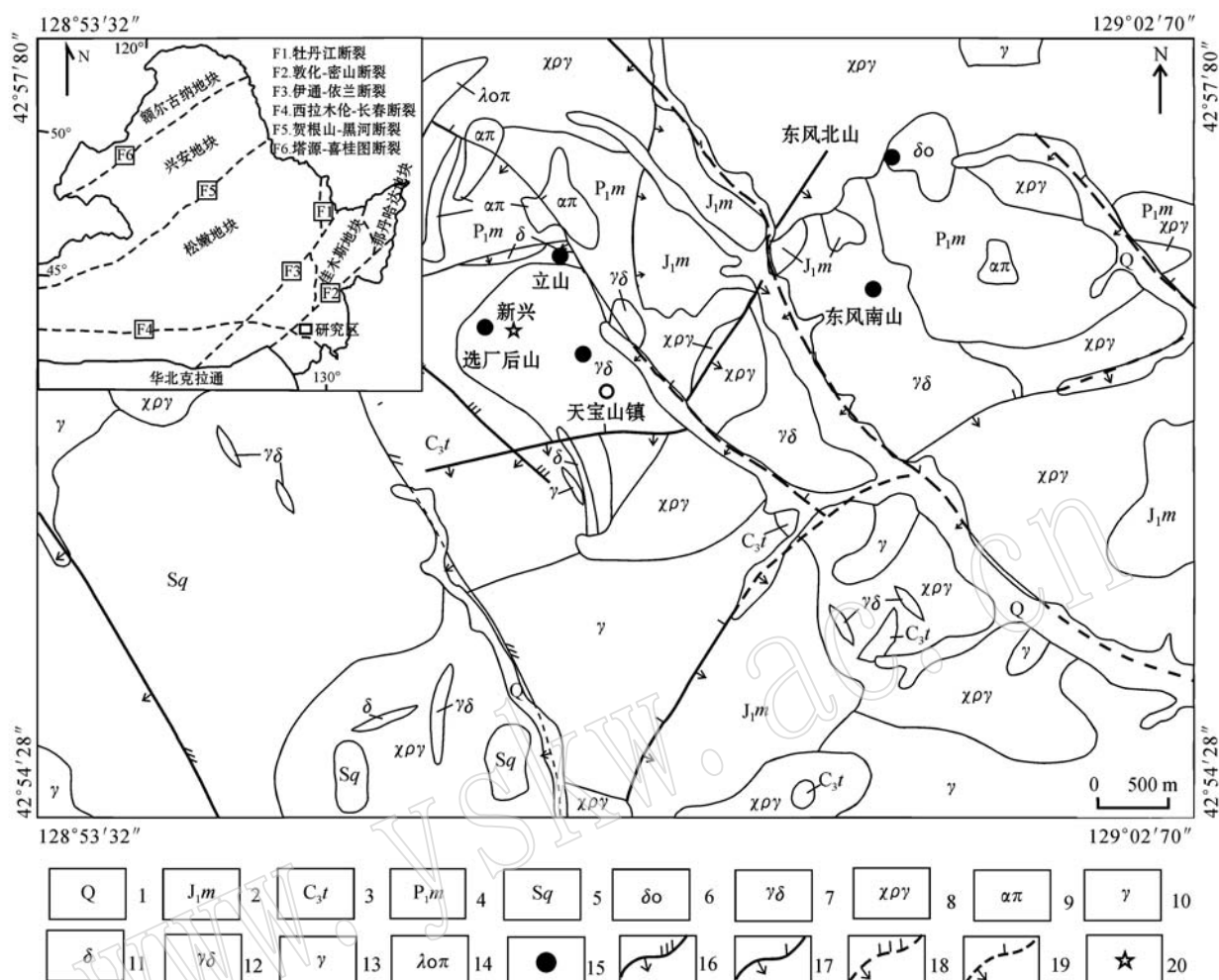


图1 天宝山矿集区大地构造位置图(据 Wu *et al.*, 2011)和矿集区地质图(据鞠楠, 2013)

Fig. 1 Tectonic location(modified after Wu *et al.*, 2011) and geological sketch map (modified after Ju Nan, 2013) of the Tianbaoshan ore concentration area

1—第四系; 2—下侏罗统明月沟组; 3—石炭系天宝山群; 4—二叠系庙岭组; 5—二叠系青龙村群; 6—海西期黑云母石英闪长岩; 7—海西期花岗岩闪长岩; 8—海西期碱长花岗岩; 9—印支期次安山岩; 10—印支期黑云母花岗岩; 11—燕山期闪长岩; 12—燕山期花岗岩闪长岩; 13—燕山期花岗岩; 14—燕山期石英斑岩; 15—矿床; 16—压扭性断裂; 17—张扭性断裂; 18—推测压扭性断裂; 19—推测张扭性断裂; 20—取样位置

1—Quaternary; 2—lower Jurassic Mingyuegou Formation; 3—Carboniferous Tianbaoshan Group; 4—Permian Miaoling Formation; 5—Permian Qinglongcun Group; 6—Hercynian biotite quartz diorite; 7—Hercynian granite diorite; 8—Hercynian alkali-feldspar granite; 9—Indosinian subandite; 10—Indosinian biotite granite; 11—Yanshanian diorite; 12—Yanshanian granite diorite; 13—Yanshanian granite; 14—Yanshanian quartz porphyry; 15—deposit; 16—compresso-shear fault; 17—transtensional fault; 18—inferred compresso-shear fault; 19—inferred transtensional fault; 20—sampling position

矿集区内出露的地层主要有石炭系山秀岭组, 二叠系庙岭组、柯岛组、青龙村群, 侏罗系明月沟组, 新近系船底山组。其中, 山秀岭组为一套浅海相类复理石建造, 岩石类型主要为亮晶灰岩、亮晶灰岩夹云母板岩、千枚岩等; 庙岭组主要为类复理石建造和碳酸岩建造夹海相火山岩建造, 岩石类型以安山岩、流纹岩、碳酸岩为主; 青龙村群岩石类型主要为含红

柱石片岩、黑云母斜长片麻岩、大理岩; 下侏罗统明月沟组岩性主要为安山岩、粉砂岩、页岩和薄煤层等; 船底山组的岩石类型主要为气孔状、杏仁状玄武岩。

区内主要发育 NNE、NE 和近 NW 向 3 组断裂及其次级构造, NE 向断裂以南部的太阳屯-福兴断裂带和北部的明月镇-福兴断裂带为主, NE 向断裂

穿切 NW 向断裂;最早形成的 NW 向断裂十分发育,以西部福兴-神仙洞断裂带和东部的银洞财沟、南柳-九户沟、榆树川等为代表,NE 和 NW 向断裂交汇,共同形成了天宝山矿集区的控矿构造格架。这些构造交汇处部位往往发生火山喷发和岩浆侵入,主要有海西期黑云母斜长花岗岩和黑云母石英闪长岩、花岗闪长岩;印支期花岗闪长岩、二长花岗岩、流纹岩、英安岩及其火山碎屑岩,燕山期花岗闪长岩、花岗斑岩等。其中海西期和燕山期岩浆岩对区域成矿起着重要的作用。

新兴铅锌(银)矿床受隐爆角砾岩筒控制明显,该角砾岩筒位于南北向卫星断裂、东西向头道沟断裂和新兴-陈财沟北西向断裂交汇部位,主矿体的规模、产状和形态与岩筒一致,角砾岩筒平面上呈南北

向的椭圆形,其中南北向长轴为 54~68 m,东西向短轴为 28~36 m,剖面表现为上大下小的漏斗形,上部为全筒式矿化,中部和下部为中心式矿化。矿体延伸约 320 m,该角砾岩筒倾向为 290°,倾伏角约 53°。隐爆角砾岩筒位于花岗闪长岩的内部,剖面上呈筒状或漏斗状(图 2)。

角砾岩中的角砾成分复杂多样,浅部及周围多为围岩或地层角砾,成分以角岩、凝灰岩、流纹岩、霏细岩、大理岩等为主;深部以花岗闪长质角砾为主,靠近花岗闪长质角砾岩带内角砾岩化程度最强,黄铁矿化、铅锌(银)矿化较发育,铅锌(银)含量往往较高,主要富集在角砾岩的胶结物中(图 3a),呈自形-半自形晶产出,胶结物的成分主要是花岗闪长岩岩屑、岩粉和后期的硅质、钙质等。角砾分选性差,大

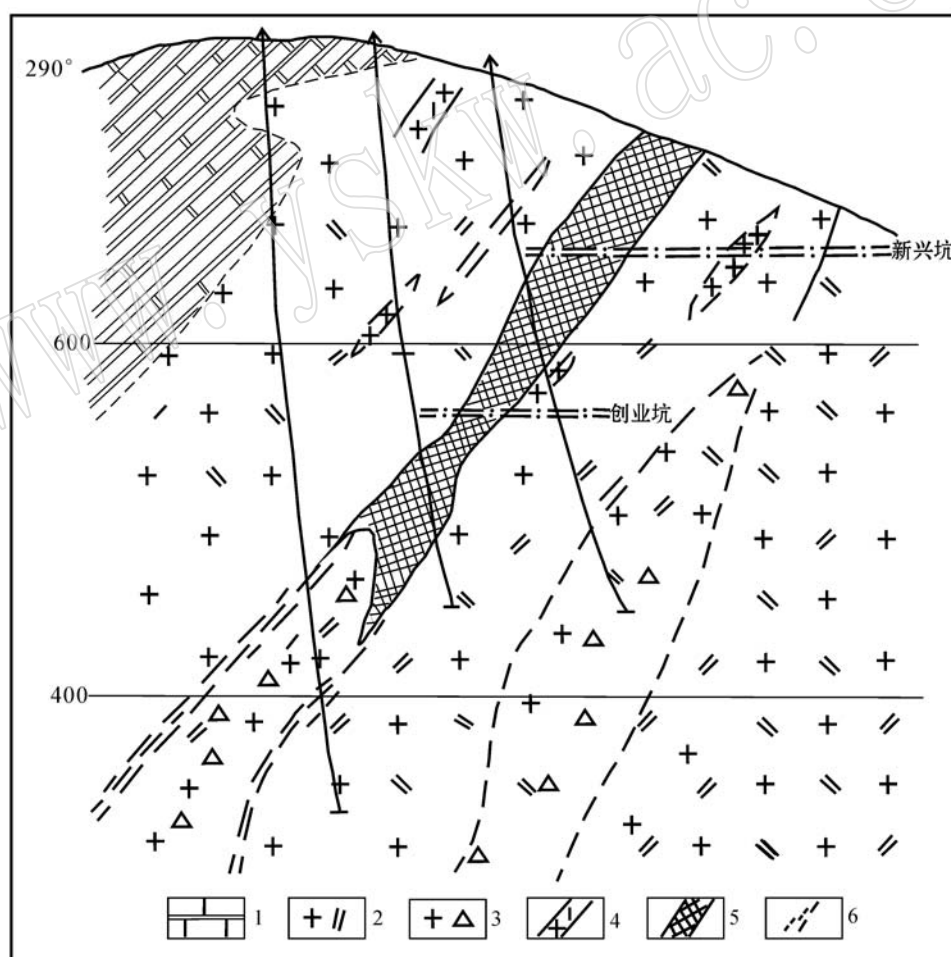


图 2 新兴角砾岩筒地质剖面图(据鞠楠, 2013)

Fig. 2 Geological section of the Xinxing breccia pipe (modified after Ju Nan, 2013)

1—大理岩; 2—花岗闪长岩; 3—花岗闪长质角砾岩; 4—霏细岩; 5—矿体; 6—裂隙带

1—marble; 2—granite diorite; 3—granodioritic breccia; 4—felsite; 5—orebody; 6—fractured zone

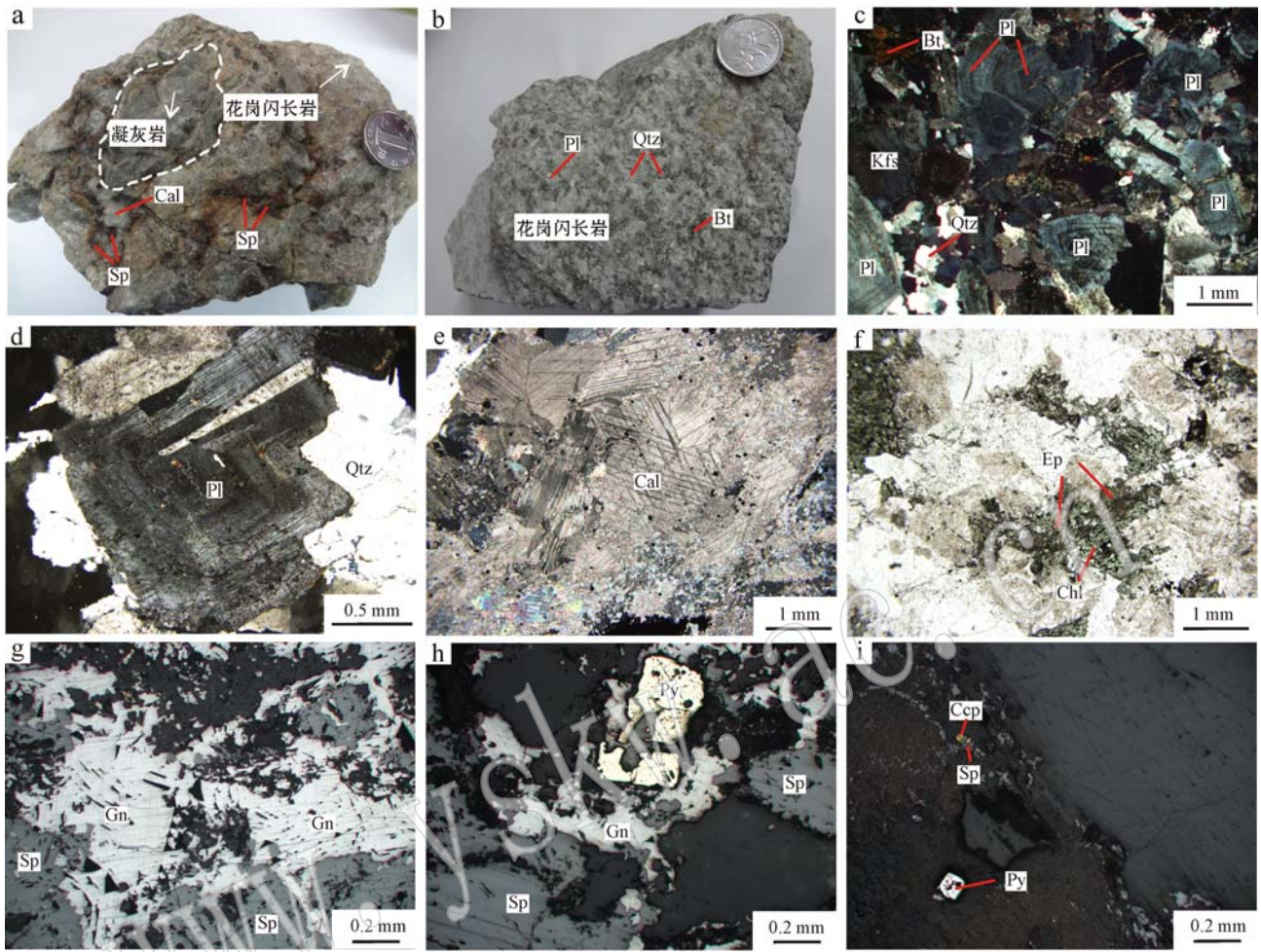


图3 新兴铅锌(银)矿床花岗闪长岩、围岩蚀变及矿化特征照片

Fig. 3 Photographs of the granodiorite, altered wall-rocks and mineralization in the ore of the Xinxing lead-zinc (silver) deposit
a—花岗闪长质角砾状矿石, 碳酸盐化; b—中细粒花岗闪长岩; c—发育环带结构的中细粒黑云母花岗闪长岩(正交偏光); d—斜长石的环带结构(正交偏光); e—碳酸盐化(正交偏光); f—黑云母发生绿泥石化和绿帘石化(单偏光); g—方铅矿沿裂隙交代闪锌矿(反射光); h—自形-半自形的黄铁矿, 方铅矿交代闪锌矿(反射光); i—闪锌矿交代黄铜矿(反射光); Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母;

Cal—方解石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿

a—carbonatized granodioritic brecciated ore; b—medium-fine grained granodiorite; c—medium-fine grained biotite granodiorite with zonal structure (crossed nicols); d—zonal structures of plagioclase (crossed nicols); e—carbonatization (crossed nicols); f—chloritization and epidotization in biotite (plainlight); g—sphalerite replaced by galena along fissure (reflection plainlight); h—euhedral-subhedral pyrite, sphalerite replaced by galena (reflection plainlight); i—chalcopyrite replaced by sphalerite (reflection plainlight); Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—feldspar; Bt—biotite;

Cal—calcite; Chl—chlorite; Ep—epidote; Sp—sphalerite; Gn—galena; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite

小不等, 互相混杂, 边部较大, 大多呈棱角状、次棱角状, 直径有数十厘米至数米不等。角砾岩块发生了强烈的碳酸盐化(图 3a)、绿帘石化、次生石英化和斜黦帘石化。从地表至 500 m 标高的岩筒内均为矿体, 在更深部则变化为矿化角砾岩以及钠长石化、绿帘石化、硅化和黄铁矿化的花岗闪长岩体, 花岗闪长岩体和含角砾矿石的胶结物中均有多金属硫化物, 矿化显著, 表明花岗闪长岩体与铅锌矿化关系密切。

矿石中主要的金属矿物为方铅矿、闪锌矿, 部分

矿石含有黄铁矿及少量的毒砂和黄铜矿; 银主要以类质同像的方式存在于方铅矿和闪锌矿之中, 其中单矿物方铅矿含银 $79 \times 10^{-6} \sim 910 \times 10^{-6}$ 、闪锌矿含银 $8 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$ (据宋贵, 1984), 金属矿物主要为自形-半自形粒状结晶结构(图 3i)、乳滴状结构、交代结构(图 3g)、交代残余结构(图 3h)等; 矿石构造主要包括角砾状构造(图 3a)、脉状构造、浸染状构造等; 围岩中发育硅化、碳酸盐化(图 3e)、绿泥石化(图 3f)、绿帘石化(图 3f)等蚀变现象。

根据矿石中矿物交生关系、矿石结构、矿石构造、围岩蚀变特征,可将新兴矿床的成矿阶段划分为 3 个阶段。早期阶段主要形成自形晶粗粒黄铁矿和石英,中期阶段是大量金属硫化物(方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等)的主要形成阶段,而晚期阶段主要形成碳酸盐化及少量的金属硫化物。

综合成矿地质条件、矿体特征、矿物组合、矿石组构以及围岩蚀变特征,本文认为新兴铅锌(银)矿床属于受隐爆角砾岩筒控制的中温岩浆热液型铅锌(银)矿床,花岗闪长岩体与铅锌(银)矿化在时空及成因上关系密切。

2 样品描述与分析方法

用于 U-Th-Pb 同位素测年的样品(T81)为花岗闪长岩,采自新兴角砾岩筒型铅锌(银)矿床平硐内(图 1),硐口坐标: N42°56.504', E128°57.021'。样品新鲜,无明显的矿化和蚀变现象。岩石新鲜面呈浅灰白色,块状构造(图 3b),不等粒中-细粒半自形粒状结构。主要造岩矿物(图 3c)为斜长石(60%)+钾长石(10%)+石英(25%)+黑云母(5%),斜长石大多具环带结构(图 3d),副矿物主要有磷灰石、榍石、锆石等。

在同位素测年样品采样位置及附近共采集 5 件无蚀变矿化的新鲜花岗闪长岩样品(编号 T81-1、T81-2、T81-3、T81-4 和 T81-5),用于主量、微量和稀土元素分析。

锆石单矿物的挑选由河北省廊坊诚信地质服务有限公司完成;锆石样品的制靶,反射光、透射光照相、锆石阴极发光(CL)图像以及锆石 U-Th-Pb 同位素测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成;所用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)的激光剥蚀系统是配有 193 nm ArF-excimer 激光器的 Geolas 200M,采用标准锆石 91500 进行校正;LA-ICP-MS 分析的详细流程及实验方法可见(袁洪林,2012);锆石同位素数据处理采用 Glitter 4.0 完成,运用 Isoplot 3.0 计算锆石加权平均值,并绘制锆石 U-Pb 谐和图像(Ludwig, 2003)。

在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行了 5 件花岗闪长岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素分析。主量元素采用 Axios PW 4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成;微量元素和稀土元素的测试分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ELAN DRC-e 型 ICP-MS)完成,相对误差 5%。详细流程及实验方法见 Qi 等(2008)。

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

花岗闪长岩体中的锆石无色透明,结晶较好,多呈长柱状或短柱状,长约 100~300 μm ,长宽比约 1.5~3.0,少数锆石晶体长宽比小于 1.5 或大于 3,表面洁净、光滑。阴极发光 CL 图像(图 4)显示,锆石晶体内部结构清晰,震荡生长环带显著。

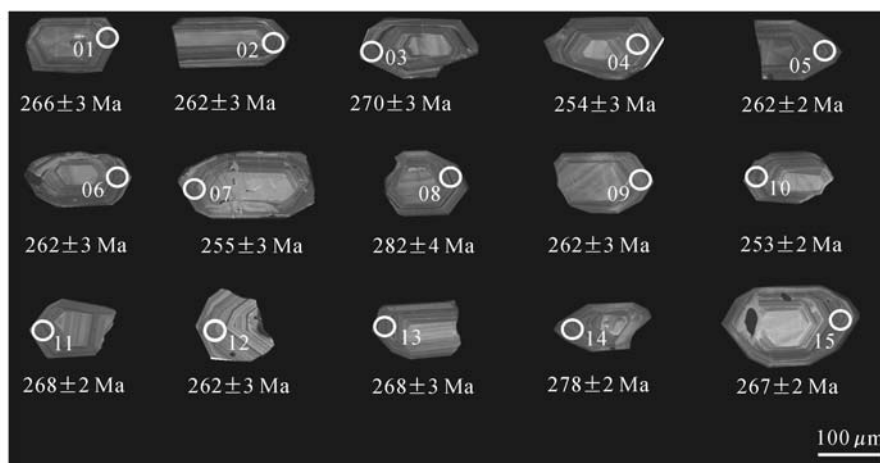


图 4 新兴矿区花岗闪长岩中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄、点号及 CL 图像

Fig. 4 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age, point number and CL images of zircon grains from the granodiorite in the Xinxing deposit

15 粒锆石中 Th、U 的质量分数分别为 $277.5 \times 10^{-6} \sim 949.5 \times 10^{-6}$ (平均值 407.7×10^{-6}) 和 $455.8 \times 10^{-6} \sim 1\,970.7 \times 10^{-6}$ (平均为 870.0×10^{-6})，Th/U 比值为 $0.48 \sim 0.67$ ，均大于 0.1，平均为 0.56。锆石的 CL 图像和上述 Th、U 含量特征表明，所测锆石均为典型的岩浆成因锆石(Koschek, 1993; 宋彪等, 2002; Fernando *et al.*, 2003; Samuel and

Mark, 2003; 张磊等, 2013)。

15 个测点的 U-Th-Pb 同位素测试结果(表 1)表明,数据在 U-Pb 谐和图中的投影点位于谐和线或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 264.6 ± 4.4 Ma(MSWD= 9.6, 可信度 95%)(图 5)。该结果代表了成矿岩体的结晶年龄,即中二叠世中期。

表 1 新兴花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Xinxing granodiorite

测点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值										年龄/Ma	
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	266	3
T81-1	65.751 2	413.523 1	843.667 9	0.490 1	0.052 6	0.001 7	0.308 0	0.010 3	0.042 1	0.000 4	0.013 3	0.000 5				
T81-2	67.133 9	467.016 0	844.564 0	0.553 0	0.048 7	0.001 6	0.280 1	0.009 3	0.041 4	0.000 5	0.012 2	0.000 4			262	3
T81-3	72.275 6	451.947 2	750.226 8	0.602 4	0.055 7	0.002 0	0.328 2	0.011 5	0.042 8	0.000 5	0.014 7	0.000 5			270	3
T81-4	72.909 2	525.030 5	802.139 5	0.654 5	0.048 1	0.001 7	0.266 2	0.009 1	0.040 3	0.000 5	0.012 9	0.000 4			254	3
T81-5	64.501 2	401.595 9	795.524 5	0.504 8	0.049 8	0.001 9	0.284 5	0.010 5	0.041 5	0.000 4	0.013 3	0.000 4			262	2
T81-6	58.858 4	398.002 2	674.661 8	0.589 9	0.049 9	0.001 8	0.286 3	0.011 0	0.041 5	0.000 5	0.013 0	0.000 5			262	3
T81-7	55.609 9	397.457 5	590.986 5	0.672 5	0.056 1	0.002 7	0.315 2	0.015 9	0.040 3	0.000 5	0.012 7	0.000 4			255	3
T81-8	161.306 6	949.483 9	1970.743 6	0.481 8	0.052 5	0.001 4	0.322 6	0.008 7	0.044 8	0.000 6	0.014 5	0.000 4			282	4
T81-9	52.867 8	342.328 8	677.479 8	0.505 3	0.047 6	0.001 7	0.269 6	0.009 4	0.041 5	0.000 4	0.012 7	0.000 4			262	3
T81-10	79.978 7	533.517 2	850.686 1	0.627 2	0.055 0	0.001 7	0.302 1	0.009 0	0.040 1	0.000 4	0.013 9	0.000 3			253	2
T81-11	58.839 0	368.612 9	694.270 2	0.530 9	0.054 5	0.001 9	0.315 5	0.010 8	0.042 4	0.000 4	0.014 1	0.000 4			268	2
T81-12	46.677 3	295.163 6	601.882 4	0.490 4	0.053 8	0.001 8	0.305 9	0.009 9	0.041 5	0.000 5	0.013 6	0.000 5			262	3
T81-13	39.783 0	277.500 5	455.751 7	0.608 9	0.057 1	0.002 5	0.328 6	0.013 3	0.042 5	0.000 5	0.013 6	0.000 5			268	3
T81-14	88.582 0	559.618 8	1016.690 5	0.550 4	0.051 9	0.001 6	0.314 2	0.009 3	0.044 1	0.000 4	0.014 2	0.000 3			278	2
T81-15	62.108 4	396.874 7	793.951 5	0.499 9	0.052 8	0.001 8	0.307 8	0.010 2	0.042 3	0.000 4	0.013 0	0.000 4			267	2

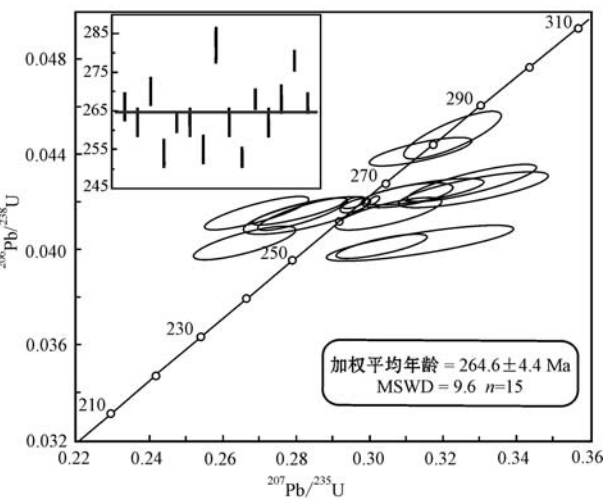


图 5 新兴花岗闪长岩加权平均年龄及谐和年龄图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and weighted age of zircon grains from the Xinxing granodiorite

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素

由表 2 可以看出,该岩体主量元素变化范围不大, SiO_2 的质量分数为 $63.73\% \sim 65.01\%$,均值为 64.56% 。结合显微镜下矿物粒径($0.5 \sim 3.0$ mm)以及斜长石、钾长石、石英及暗色矿物的相对含量将其定名为中-细粒黑云母花岗闪长岩。在 A/NK - A/CNK 图上(图 6a),岩石属于准铝质-弱过铝质岩石。 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 质量分数为 $6.32\% \sim 7.00\%$,均值为 6.66% ; Na_2O 质量分数为 $3.71\% \sim 4.47\%$,均值为 4.06% ,总体富硅富碱; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 $1.36 \sim 1.85$,均 >1 ,表明岩石属于钠质岩石系列;岩体具有中等偏高的 Al_2O_3 ($16.04\% \sim 16.34\%$)。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解上,岩石落在高钾-钙碱性岩石系列与钙碱性岩石系列的过渡处,并有偏向高钾-钙碱性岩石系列的趋势(图 6b)。

表 2 新兴矿区花岗闪长岩体主量($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Composition of major elements ($w_B/\%$), trace elements and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) in granodiorite from the Xinxing deposit

样品号	T81-1	T81-2	T81-3	T81-4	T81-5
SiO ₂	64.70	63.73	65.01	64.77	64.61
TiO ₂	0.47	0.47	0.44	0.49	0.48
Al ₂ O ₃	16.17	16.24	16.04	16.34	16.25
Fe ₂ O ₃	4.20	3.98	3.83	3.92	4.12
MnO	0.15	0.12	0.11	0.21	0.14
MgO	1.49	1.45	1.50	1.45	1.59
Na ₂ O	4.47	3.97	4.20	3.93	3.71
K ₂ O	2.42	2.68	2.80	2.39	2.72
CaO	3.73	3.95	3.09	4.21	3.64
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20
LOI	2.06	2.56	1.81	1.16	1.80
TOTAL	100.06	99.34	99.03	99.06	99.25
Na ₂ O + K ₂ O	6.89	6.65	7.00	6.32	6.43
Na ₂ O/K ₂ O	1.85	1.48	1.50	1.64	1.36
A/CNK	0.96	0.98	1.03	0.98	1.04
A/NK	2.20	2.49	2.32	2.53	2.66
Li	11.25	10.57	13.37	25.93	13.88
Be	1.38	1.34	1.37	1.31	1.40
Sc	5.81	2.13	5.36	5.58	3.46
Ti	2 836.00	2 776.00	2 628.00	2 911.00	2 740.00
V	56.89	53.56	51.96	56.21	53.79
Cr	11.54	6.88	7.08	12.61	7.57
Mn	1 746.00	1 204.00	1 445.00	2 784.00	1 549.00
Co	13.01	9.63	9.73	10.34	9.15
Ni	5.97	5.69	2.80	6.34	3.53
Cu	24.67	10.74	22.73	28.70	8.37
Zn	169.00	47.32	63.63	161.00	57.81
Ga	16.05	14.20	16.06	16.16	14.64
Rb	42.41	46.10	52.88	50.17	49.30
Sr	671.00	698.00	866.00	729.00	772.00
Y	13.83	7.31	13.00	14.25	12.90
Zr	128.00	123.00	112.00	115.00	131.00
Nb	6.36	6.87	5.94	6.56	6.91
Mo	0.53	0.75	0.40	0.53	0.58
Sn	0.99	0.94	0.96	0.95	0.96
Cs	2.59	1.02	1.89	5.80	1.18
Ba	826.00	815.00	873.00	789.00	814.00
La	27.06	12.98	29.89	27.95	19.60
Ce	47.68	20.52	53.16	44.59	27.53
Pr	5.55	2.80	5.80	5.31	3.83
Nd	20.56	10.95	20.75	20.26	15.18
Sm	3.36	1.99	3.20	3.48	2.75
Eu	1.08	0.73	1.07	1.10	0.97
Gd	3.13	1.86	3.02	3.13	2.51
Tb	0.41	0.27	0.39	0.43	0.36
Dy	2.13	1.56	2.00	2.27	1.97
Ho	0.41	0.31	0.38	0.43	0.38
Er	1.26	0.98	1.20	1.32	1.20
Tm	0.19	0.15	0.17	0.19	0.18

续表 2

Continued Table 2

样品号	T81-1	T81-2	T81-3	T81-4	T81-5
Yb	1.27	1.04	1.21	1.28	1.28
Lu	0.20	0.17	0.20	0.20	0.21
Hf	3.43	3.37	3.14	3.22	3.79
Ta	0.35	0.39	0.30	0.38	0.39
Bi	0.04	0.03	0.04	0.07	0.03
Th	6.56	2.34	7.73	5.17	4.46
U	1.49	0.93	2.04	1.47	1.19
ΣREE	114.29	56.32	122.45	111.94	77.95
LREE	105.28	49.97	113.88	102.69	69.86
HREE	9.01	6.34	8.57	9.25	8.09
LREE/HREE	11.68	7.88	13.29	11.10	8.64
(La/Yb) _N	14.34	8.44	16.64	14.78	10.31
δEu	1.00	1.15	1.04	1.00	1.11
δCe	0.89	0.78	0.91	0.83	0.72
Zr/Hf	37.36	36.61	35.53	35.56	34.59
Nb/Ta	18.24	17.63	19.52	17.20	17.79
Rb/Sr	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06

此外,表 2 中可以大致看出, TiO₂、MgO、CaO、Fe₂O₃、P₂O₅ 随 SiO₂ 的增加而降低,这可能与造岩矿物(斜长石)和副矿物(磁铁矿、磷灰石)等的结晶分异作用有关,P₂O₅ 与 SiO₂ 的负相关性同时也体现了该岩体具有 I 型花岗岩的成因特点(褚少雄等, 2012)。

3.2.2 稀土和微量元素

新兴花岗闪长岩稀土元素总含量较低且变化较大($\Sigma\text{REE} = 56.32 \times 10^{-6} \sim 122.45 \times 10^{-6}$, 平均值 96.59×10^{-6}), 相对富集轻稀土(LREE = $49.97 \times 10^{-6} \sim 113.88 \times 10^{-6}$, HREE = $6.34 \times 10^{-6} \sim 9.25 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 7.88 ~ 13.29), 并且轻重稀土分馏明显[(La/Yb)_N = 8.44 ~ 16.64]; 在球粒陨石标准化配分曲线图上(图 7a), 呈明显的右倾型, 表现为弱的负 Ce 异常($\delta\text{Ce} = 0.72 \sim 0.91$, 均值为 0.83)和弱的正 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.15$, 均值为 1.06)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b)显示其富集大离子亲石元素(LILE)Ba、Rb、K 及不相容元素 Th、U, 相对亏损高场强元素(HFSE)Ta、Nb 和 Ti 等。微量元素组成显示了该岩体具有岛弧岩浆岩的特征。

4 讨论

4.1 岩石成因及物质源区

新兴花岗闪长岩体主量元素组成具有富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.36 ~ 1.85, 均 > 1)、准铝质

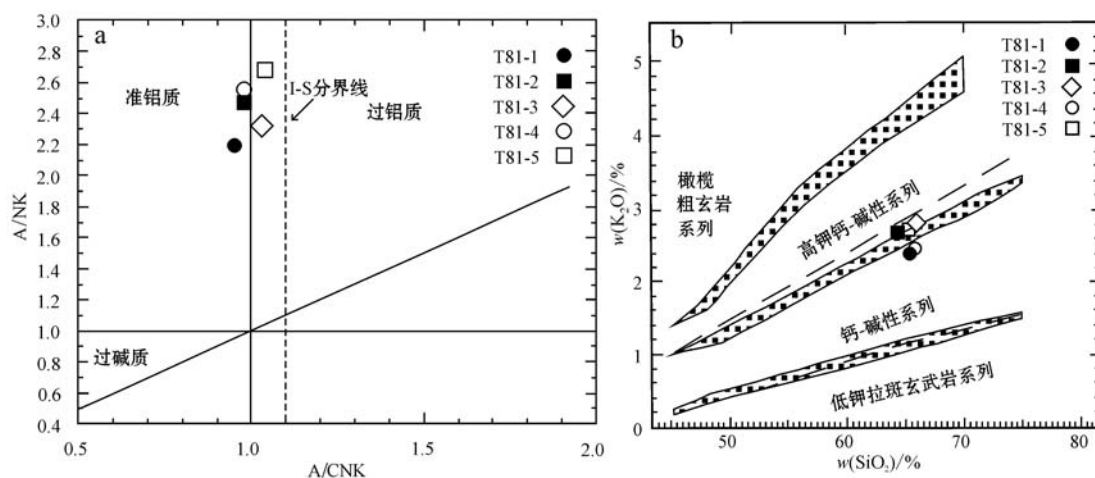


图6 新兴花岗闪长岩岩体主量元素特征判别图解

Fig. 6 Discrimination diagram of major elements in the Xinxing granodiorite intrusion

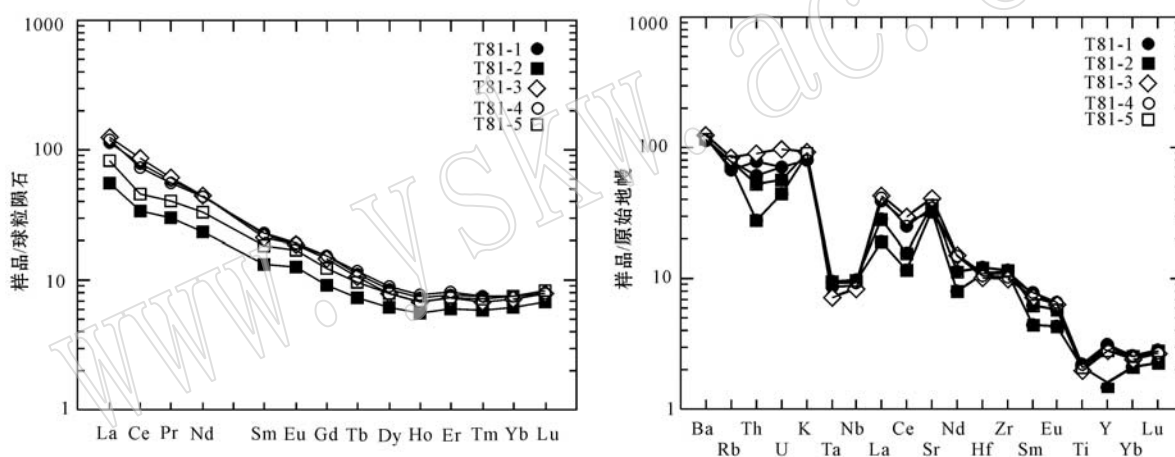


图7 新兴花岗闪长岩稀土(a)、微量元素(b)标准化图解(数据见表2;球粒陨石与原始地幔标准化数值分别据文献 Boynton, 1984; Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized element patterns (b) (for data, see Table 2; chondrite and primitive mantle-normalized values after Boynton, 1984 and Taylor and McLennan, 1985)

(0.96 ~ 1.04)、中等偏高的 Al_2O_3 (16.04% ~ 16.34%)、I型花岗岩和高钾钙碱性-钙碱性岩石系列的地球化学特征。微量元素上表现为富集大离子亲石元素(LILE)Ba、Rb、K及不相容元素Th、U,相对亏损高场强元素(HFSE)Ta、Nb和Ti等。岩石的主、微量显示其具有岛弧岩浆岩的地球化学特征。另外,样品的Nb/Ta比值(17.20 ~ 19.52,均值18.08)总体上与地幔平均值(17.5)(Sun and McDonough, 1989)接近;Zr/Hf比值(34.59 ~ 37.36,均值35.93)小于地壳平均值(44.68, Weaver and Tarney, 1984)而大于地幔平均值(30.74, Taylor and

McLennan, 1985);岩体的Rb/Sr比值(0.06 ~ 0.07,均值0.06)也介于上地幔值(0.034)与地壳值(0.35)之间(Taylor and McLennan, 1995),上述岩石地球化学特征均反映了壳源物质的贡献。稀土元素含量变化较大且含量较低、向右倾斜的稀土配分模式、弱的正铈异常也体现了新兴花岗闪长岩体的深源性,表明源区可能无斜长石的残留;Ta、Nb和Ti的亏损以及U、Th的富集也暗示了该期花岗质岩浆有陆壳物质的参与(Rollinson, 1993)。对于陆壳花岗质岩石来说,不能简单的将正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值解释为岩浆来自亏损地幔,原因有二:①实验岩石学已证明,地

幔橄榄岩的部分熔融不能直接形成花岗岩; ② 亏损地幔和原始地幔处于 Zr 不饱和状态, 这类地幔岩石部分熔融不可能直接形成锆石, 必须经过新生地壳熔融再造或在幔源岩浆侵位过程中地壳混染形成锆石(郑永飞等, 2007)。东北地区花岗岩从古生代到晚中生代都有分布, 但形成于古生代的花岗岩体较少, 且主要分布于大兴安岭地区和吉林东部的延吉地区。刘燊等(2012)测得吉林东部地区晚古生代黑云母花岗闪长岩(锆石 U-Pb 年龄 262.1 ± 1.2 Ma) $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $+1.35 \sim +5.62$ 之间, 认为该花岗岩的源区物质来自亏损地幔或者新生地壳物质的加入; 锆石 Hf 二阶段模式年龄介于 $1.1 \sim 1.4$ Ga, 暗示中-新元古代时期曾发生了一次重要的地壳增生事件; 付长亮(2009)也测得同地区珲春小西南岔晚二叠世花岗岩具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和较高的 $^{176}Hf/^{177}Hf$, 并认为源岩主要为玄武质下地壳; 另外, 洪大卫等(2000)指出, 兴蒙造山带显生宙花岗岩大多具有正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和年轻的 Nd 模式年龄, 兴蒙造山

带大量晚古生代-中生代正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的来源可能是古亚洲洋俯冲的洋壳转化而成的年轻下地壳, 它们正是 $800 \sim 600$ Ma 前由亏损地幔衍生出来不久的年轻地壳物质。综上, 结合新兴成矿花岗闪长岩成岩成矿时代及相应的大地构造背景, 本文认为该岩体的源区可能来自板块俯冲作用下增生地壳物质的重熔, 并可能有少量亏损地幔物质的加入。

4.2 成岩成矿时代与构造背景

与新兴矿床时空及成因上密切相关的花岗闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的加权平均值为 264.6 ± 4.4 Ma ($n = 15$), 所测的 15 个点谱和性较好, 表明新兴铅锌(银)矿床的成矿岩体为晚古生代(中二叠世中期)岩浆作用的产物。前已述及, 花岗闪长岩的主量、微量地球化学特征表明其具有岛弧岩浆岩的地球化学属性。同时在 $(Y + Nb) - Rb$ 和 $(Yb + Ta) - Rb$ 火成岩构造环境、物源区判别图解中(图 8a, 8b), 新兴花岗闪长岩样品均落在火山弧花岗岩; 在 $Ta/Yb - Th/Yb$ 火成岩判别图解中(图 8c),

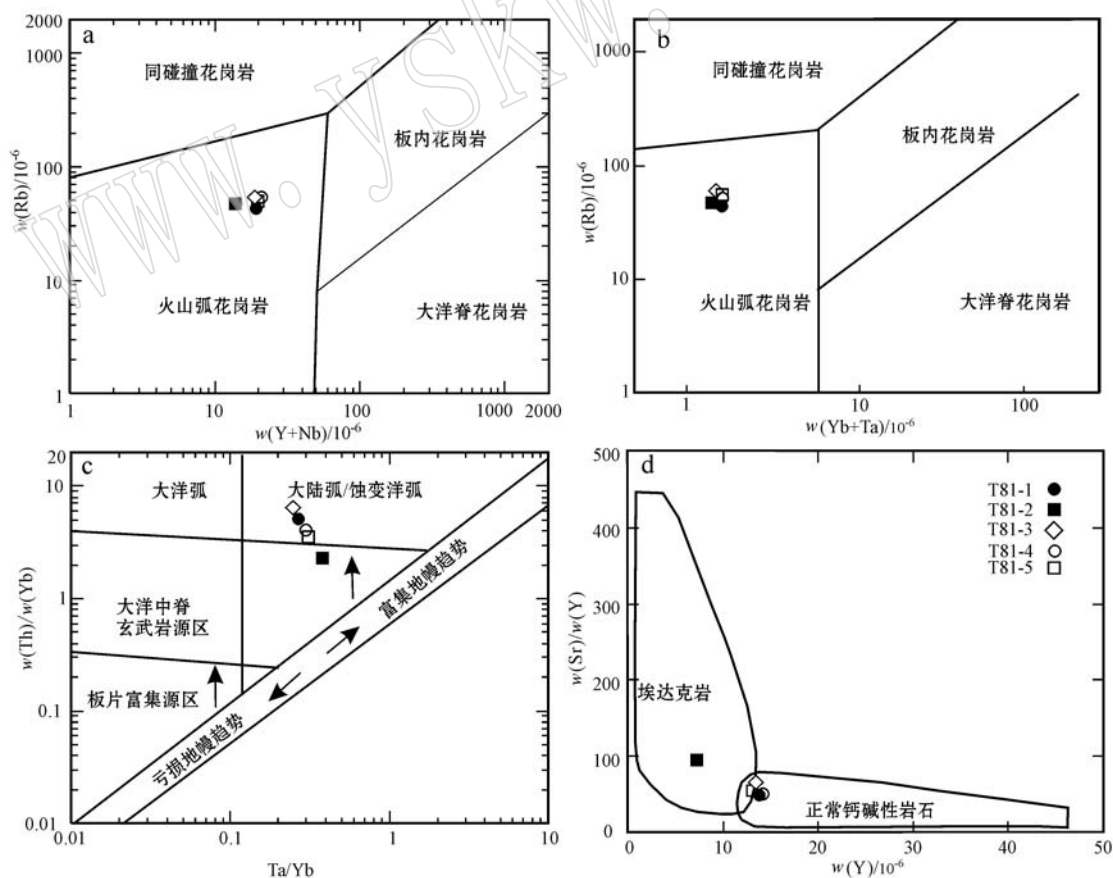


图 8 新兴矿床花岗闪长岩体的构造环境判别图解(图例同图 7d, a 和 b 底图据 Pearce *et al.*, 1984; c 据 Jahn *et al.*, 1999; d 据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 8 Discrimination diagrams of tectonic setting of the granodiorite in the Xinxing deposit (legends as for Fig. 7d, a and b after Pearce *et al.*, 1984; c modified after Jahn *et al.*, 1999; d after Defant and Drummond, 1990)

样品落入到大陆弧/蚀变洋弧区域,表明其成岩与板块俯冲作用有关;在 Y-Sr/Y 构造判别图解中,4 个样品落入了正常的岛弧钙碱性岩区域内,只有一个样品落入了埃达克岩区(图 8d),以上均表明新兴花岗闪长岩形成于岛弧或活动大陆边缘的构造环境。

从区域上看,延边地区广泛分布着沿 NE 向展布的海西晚期中酸性侵入岩分布,张勇(2013)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得天宝山含钼花岗闪长岩、刘生店含钼花岗闪长岩和后倒木钾长花岗岩的年龄分别为 273 ± 2.9 Ma、 265.7 ± 7.4 Ma、 254.9 ± 3.1 Ma;赵华雷(2014)测得珲春杨金沟钨矿区花岗斑岩的年龄为 255 ± 2.0 Ma 和五道沟钨矿区花岗闪长岩的年龄为 267.8 ± 1.0 Ma,以及本文测得天宝山多金属矿集区新兴花岗闪长岩的年龄为 264.6 ± 4.4 Ma,由此认为,晚古生代时期,区域上发育一系列与铅、锌、银、铜、钼矿化密切伴生的中酸性岩体。近年来,越来越多的资料表明华北板块与其北侧地体群(兴安地体、松嫩地体、佳木斯地体)的最终碰撞拼合位置为西拉木伦河-长春-延吉-珲春一线,时代为晚二叠世末~早三叠纪初期(孙德有等, 2004; 李锦轶等, 2007; 刘永江等, 2010; 韩杰等, 2011; 曹花花, 2013; Chen *et al.*, 2014),因此,早、中二叠世本区属古亚洲洋构造域,处于板块俯冲碰撞的构造背景。此外,新兴花岗闪长岩体所显示的强烈的负 Nb、Ta 异常是与俯冲有关岩浆的共同特点(Briqueu *et al.*, 1984),这些特征都可佐证研究区中二叠世中期岩浆成矿作用与古亚洲洋板块俯冲有密切的关系。因此认为,新兴花岗闪长岩体及相关铅锌(银)矿化发生于古亚洲洋板块俯冲的动力学背景。

4.3 天宝山矿集区晚古生代岩浆-成矿事件

最新的同位素年代学研究表明,海西期是天宝山矿集区的一个重要成矿期。鞠楠(2013)利用 LA-ICP-MS 测得矿集区内立山矽卡岩型铅锌铜矿床的成矿岩体闪长岩中锆石 U-Pb 年龄为 261.0 ± 7.0 Ma;孙振明等(2014)测得东风北山含辉钼矿黑云母石英闪长岩体的结晶年龄为 278.4 ± 1.8 Ma;本文作者还测得东风南山与接触交代型铜铅锌矿床成矿密切相关的花岗闪长岩体的结晶年龄为 255 ± 4.3 Ma($n=17$)(未发表数据),上述岩体均与本文所述新兴角砾岩筒型铅锌(银)矿床成矿花岗闪长岩年龄基本一致,表明这些侵入体同为海西晚期岩浆作用的产物。

综上所述,在天宝山矿集区内,海西期中酸性岩

浆作用强烈,形成了一系列不同岩相的火成岩,母岩浆在结晶晚期可能分异出的含矿热液含矿性不同,侵位于不同的围岩和地层中,萃取围岩和地层中部分成矿元素,富集形成不同的金属矿床。就目前研究资料表明,铅锌铜(银)形成于海西期,钼矿化则形成于燕山期,多期次的岩浆活动的叠加,也是形成天宝山矿集区多成因,多矿种的原因所在。

5 结论

(1) 天宝山矿集区新兴铅锌(银)矿床地处兴蒙造山带东段的延边地区,主矿体受角砾岩筒控制,赋存于花岗闪长岩体内部,成因类型为中温岩浆热液型。

(2) 新兴成矿花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的加权平均值为 264.6 ± 4.4 Ma,结合立山、东风北山等矿床成矿相关岩体的同位素测年结果认为,天宝山矿集区在中二叠世中期发生过一期重要的岩浆-成矿事件。

(3) 新兴成矿花岗闪长岩的元素地球化学特征具有岛弧岩浆岩的地球化学亲缘行,花岗闪长岩及相关的铅锌(银)矿化形成于大陆边缘或岛弧环境中,成岩成矿作用与古亚洲洋板块的俯冲作用有关。

致谢 野外调研中得到吉林省龙井市瀚丰矿业有限公司领导与技术人员的大力支持与帮助;西北大学大陆动力学国家重点实验室和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室在锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素测定和岩石地球化学测试分析中给予了大力支持和帮助,深表感谢!

References

- Barton P B J, Bethke P M and Roedder E. 1977. Environment of ore deposition in the Creed mining district, San Juan Mountains, Colorado: Part III, Progress OH vein[J]. *Econ. Geol.*, 72: 1~24.
- Bartos P J. 1989. Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationship to underlying porphyry deposits[J]. *Econ. Geol.*, 84: 1 671~1 683.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry: Development in Geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier, 3~107.
- Briqueu L, Bougault H and Joron J L. 1984. Quantification of Nb, Ta,

- Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: petrogenetic implications[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85: 384~400.
- Cao Huahua. 2013. Geochronology and Geochemistry of the Late Paleozoic-Early Mesozoic igneous rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block (Doctor Dissertation) [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Chen C, Ren Y S, Zhao H L, *et al.* 2014. Permian age of the Wudaogou Group in eastern Yanbian: detrital zircon U-Pb constraints on the closure of the Palaeo-Asian Ocean in Northeast China[J]. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2014.956348.
- Chen Dong. 2009. Mineralization and metallogenic model of Tianbaoshan Cu-Pb-Zn-Mo Polymetallic deposit, Yanbian (Master Dissertation) [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Chu Shaoxiong, Liu Jianming, Xu Jiuhua, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating, petrogenesis and tectonic significance Sankuanggou skarn Fe-Cu deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (2): 433~450 (in Chinese with English abstract).
- Cooke D R and Bloom M S. 1990. Epithermal and subjacent porphyry mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines: a fluid inclusion and paragenetic study[A]. Hedengui J W, White N C, Siddley G. Epithermal Gold Mineralization of the Circum-Pacific[C]. *Geology, Origin and Exploration I. J. Geochem. Explor.*, 35: 297~340.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347 (6294): 662~665.
- Eaton P C and Setterfield I N. 1993. The relationship between epithermal and porphyry hydrothermal systems within the Tavua Caldera, Fiji[J]. *Econ. Geol.*, 88: 1053~1083.
- Fernando C, John M H, Paul W O, *et al.* 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469~500.
- Fu Changliang. 2009. The Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of granitoid from Xiaoxinancha in Hunchun Area, Jilin Province (Master Dissertation) [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Han Jie, Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, *et al.* 2011. Detrital zircon U-Pb dating from sandstone of the Upper Permian Linxi Formation, Linxi area, Inner Mongolia, China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(2~3): 258~269 (in Chinese with English abstract).
- Heald P, Foley N K and Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid-sulfate and adularia-sericite types[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1~26.
- Henley R W. 1985. The geological framework of epithermal deposits [A]. Berger B R and Bethke P M. *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*[C]. *Rev. Econ. Geol., Soci. Econ. Geol.*, 2: 1~24.
- Henley R W and Ellis A J. 1983. Geothermal systems, ancient and modern[J]. *Earth Science Reviews*, 19: 1~50.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2000. Genesis of Positive (Nd, t) Granitoids in the Da Hinggan MTS-Mongolia Orogenic belt and growth continental crust[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F, Lo C H and Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Ji Xian Hua. 2015. Study on geology, geochemistry and genesis of Narusongduo lead-zinc deposit, Tibet[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Ju Nan. 2013. Ore Genesis and Tectonic Settings of Lishan Polymetallic Deposit in Tianbaoshan Metallogenic Region, Yanbian Area (Master Dissertation) [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Journal of Microscopy*, 171: 223~232.
- Li Baoshu and Li Henian. 1991. Polygenesis of Tianbaoshan polymetallic deposit, Jilin Province [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(2): 175~182 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shen, Feng Caixia, Hu Ruizhong, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age, Hf isotope character of the Hercynian granite in the eastern Jilin Province and the crustal growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3715~3720 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Zhang Xingzhou, Jin Wei, *et al.* 2010. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China[J]. *Geology in China*, 37(4): 943~951 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.1, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication.
- Panteleyev A A. 1986. Canadian cordilleran model for epithermal gold-

- silver deposits[J]. *Geosci. Cana.*, 13: 101~111.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal Petrology*, 25(4): 956~983.
- Piao Qinglong and Sun Shuyun. 2000. The geochemical model of the Tianbaoshan polymetallic ore deposit[J]. *Jilin Geology*, 19(1): 37~46(in Chinese with English abstract).
- Pirajno F. 1995. Volcanic-hosted epithermal systems in northwest Turkey[J]. *S. Afr. J. Geol.*, 98(1): 13~24.
- Qi L and Zhou M F. 2008. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 248: 83~103.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[J]. Harlow, Longman Scientific Technical, 80~142.
- Samuel A B and Mark D S. 2003. High-precision U-Pb zircon geochronology and the stratigraphic record[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 305~326.
- Sillitoe R H. 1973. The tops and bottoms of porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 68: 799~815.
- Sillitoe R H. 1983. Enargite-bearing massive sulfide deposits high in porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 78: 348~352.
- Sillitoe R H and Bonham J H F. 1990. Sediment-hosted gold deposits: Distal product of magmatic-hydrothermal systems[J]. *Geology*, 18: 157~161.
- Sillitoe R H and Hedenquist J W. 2003. Linkage between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[J]. *Society of Econ. Geol., SPEE. Publication*, 10: 315~343.
- Song Biao, Zhang Yuhai and Liu Dunyi. 2002. Introduction to the Naisance of SHRIMP and its contribution to isotope geology[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23(1): 58~62(in Chinese with English abstract).
- Song Gui. 1984. Geological characteristics and metallogenic age of Breccia Pipe Pb-Zn deposit in Tianbaoshan, Jinlin Province[J]. *Jilin Geology*, 1(4): 46~53(in Chinese).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, *et al.* 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone-Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 34(2): 174~180(in Chinese with English abstract).
- Sun Jun. 1994. The Characteristics of deposit series and the significance in prospecting in the Tianbaoshan polymetallic deposit, Jilin[J]. *Jilin Geology*, 13(2): 42~50(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313~345.
- Sun Zhenming, Ren Yunsheng, Ju Nan, *et al.* 2014. Superimposed mineralization of the Tianbaoshan metallogenic region in Yanbian area(eastern Jilin Province), northeastern China: Indicated by the isotopic dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2 081~2 091(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental Crust: its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Blackwell Science Publisher, Oxford, UK.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 241~265.
- Weaver B L and Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 310: 575.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1~30.
- Yuan Honglin. 2012. State key laboratory of continental dynamics, Northwest University[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(6): 1 090~1 092(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiqiong, Wang Jingbin and Wang Yuwang. 2012. A Study on Lithofacies Zonation of Crypto-explosive Breccia Pipe in Zhijiadi Pb-Zn-Ag Deposit, Lingqiu County, Northeastern Shanxi Province, and its Exploration Significance[J]. *Geological Review*, 58(6): 1 046~1 055(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Shi Xingjun, Zhang Jianjun, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Taohatuoxiquan gabbro in northern Alxa, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1 536~1 546(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong. 2013. Research on Characteristics of Geology, Geochemistry and Metallogenic Mechanism of the Jurassic Molybdenum Deposits in the Mid-East Area of Jilin(Doctor Dissertation)[D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Sun Jinggui, Chen Dong, *et al.* 2012. Characteristics of Fluid Inclusions and Metallogenic Model of Tianbaoshan Polymetallic Ore Field, Yanbian, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(6): 1 665~1 675(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hualei. 2014. Ore Genesis and Geodynamic Settings of Tungsten Deposits in Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces(Doctor Dissertation)[D]. Jilin University(in Chinese with English abstract).

Zheng Yongfei, Chen Renxun, Zhang Shaobin, *et al.* 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317~330(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹花花. 2013. 华北板块北缘东段晚古生代-早中生代火成岩的年代学与地球化学研究[D]. 吉林大学.
- 陈冬. 2009. 延边天宝山铜-铅-锌-钼多金属矿床的成矿作用与成矿模式研究[D]. 吉林大学.
- 褚少雄, 刘建明, 徐久华, 等. 2012. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 28(2): 433~450.
- 付长亮. 2009. 珲春小西南岔地区花岗岩类的时代、地球化学特征与成因[D]. 吉林大学.
- 韩杰, 周建波, 张兴洲, 等. 2011. 内蒙古林西地区上二叠统林西组砂岩碎屑锆石的年龄及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 30(2~3): 258~269.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. *地学前缘*, 7(2): 441~456.
- 鞠楠. 2013. 延边天宝山矿集区立山多金属矿床的矿床成因与构造背景[D]. 吉林大学.
- 纪现华. 2013. 西藏纳如松多铅锌矿床地质地球化学特征与成因机制研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 李宝树, 李鹤年. 1991. 多金属矿床的复式成因-吉林天宝山矿床成因讨论[J]. *长春地质学院学报*, 21(2): 175~182.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 23(3): 565~582.
- 刘荣, 冯彩霞, 胡瑞忠, 等. 2012. 吉林东部海西期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征与地壳增生[J]. *岩石学报*, 28(11): 3715~3720.
- 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 37(4): 943~951.
- 朴清龙, 孙淑云. 2000. 天宝山多金属矿床地球化学模式[J]. *吉林地质*, 19(1): 37~46.
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. *质谱学报*, 23(1): 58~62.
- 宋贵. 1984. 吉林省天宝山新兴角砾岩筒型铅锌矿床地质特征及成矿时代[J]. *吉林地质*, 1(4): 46~53.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(2): 174~180.
- 孙钧. 1994. 吉林省天宝山多金属矿床系列特征及其找矿意义[J]. *吉林地质*, 13(2): 42~50.
- 孙振明, 任云生, 鞠楠, 等. 2014. 吉林延边天宝山矿集区的叠加成矿——来自同位素年代学证据[J]. *岩石学报*, 30(7): 2081~2091.
- 袁洪林. 2012. 西北大学大陆动力学国家重点实验室[J]. *岩矿测试*, 31(6): 1090~1092.
- 张会琼, 王京彬, 王玉往, 等. 2012. 山西灵丘支家地铅锌银矿床隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义[J]. *地质论评*, 58(6): 1046~1055.
- 张磊, 史兴俊, 张建军, 等. 2013. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 32(10): 1536~1546.
- 张勇. 2013. 吉林中东部地区侏罗纪钼矿床的地质、地球化学特征与成矿机理研究[D]. 吉林大学.
- 张勇, 孙景贵, 陈冬, 等. 2012. 延边地区天宝山多金属矿田的流体特征与成矿模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(6): 1665~1675.
- 赵华雷. 2014. 吉黑东部钨矿成因及成矿地球动力学背景[D]. 吉林大学.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 23(2): 317~330.