

吉林百草沟金矿闪长玢岩锆石 U-Pb 年代学、 地球化学及其地质意义*

李睿华^{1,2,3} 孙丰月^{3*} 刘金龙³ 李 良³ 赵拓飞³ 闫佳铭³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 北京 100037; 2 北京大学地球
与空间科学学院, 北京 100871; 3 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要 文章对延边地区百草沟金矿床与成矿有关的闪长玢岩脉进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和地球化学研究。闪长玢岩中的锆石 U-Pb 定年结果显示, 闪长玢岩形成时代为早白垩世(128 ± 3) Ma, MSWD=0.29。岩石元素地球化学研究表明岩石属于高钾钙碱性系列, 明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb), LREE 和强不相容元素(如 Th、U), 相对亏损高场强元素(如 Ta、Nb、Ti、P), $Mg^\#$ 值为 42~54, 其地球化学特征与活动大陆边缘背景下形成的火成岩相似。岩石中 $\omega(\text{Cr})$ 为 $20.0 \times 10^{-6} \sim 33.4 \times 10^{-6}$, Nb/Ta 比值为 9.7~16.5, La/Nb 比值为 2.54~3.67, Th/La 比值为 0.19~0.43, Rb/Sr 值比为 0.10~0.33, 闪长玢岩岩浆是由地壳物质和地幔物质混合形成的。结合野外地质特征及年代学, 认为与矿床近同时形成的闪长玢岩, 其形成的构造背景应为古太平洋板块斜向亚洲大陆俯冲的活动大陆边缘。

关键词 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 百草沟金矿; 闪长玢岩; 活动大陆边缘

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Zircon U-Pb chronology and geochemistry of diorite-porphyrite from Baicaogou gold deposit in Yanbian region, Jilin Province, and its geological significance

LI RuiHua^{1,2,3}, SUN FengYue³, LIU JinLong³, LI Liang³, ZHAO TuoFei³
and YAN JiaMing³

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth and Space science, Peking University, Beijing 100871, China; 3 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical data of the diorite-porphyrite rocks, which are related to ore formation, from the Baicaogou gold deposit of Yanbian region were obtained to restrain their formation time and the regional tectonic background. The dating results indicate that these rocks were formed in the Early Cretaceous (128 ± 3) Ma, MSWD=0.29. The element compositions of these rocks are transitional from shoshonite series to potassium-high calc-alkaline series, characterized by enrichment of LILE (such as K, Ba and Rb), LREE and more mobile incompatible elements (such as Th, U), and relatively depleted in HFSE (such as Ta,

* 本文得到吉黑东部区域成矿规律综合研究项目(编号: 1212011085485)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 310827161011)联合资助

第一作者简介 李睿华, 男, 1990 年生, 博士研究生, 矿床学专业。Email: leerh5369@163.com

** 通讯作者 孙丰月, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地质学研究。Email: sfy@jlu.edu.cn

收稿日期 2015-01-10; 改回日期 2016-6-30。张绮玲编辑。

Nb, Ti and P). In combination with their $Mg^\#$ values (42~54), it is suggested that the features of the rocks are similar to the characteristics of active continental margin magma. Based on the data $Cr = (20.0 \sim 33.4) \times 10^{-6}$, $Nb/Ta = 9.7 \sim 16.5$, $La/Nb = 2.54 \sim 3.67$, $Th/La = 0.19 \sim 0.43$, and $Rb/Sr = 0.10 \sim 0.33$, it can be concluded that the magma was derived from mixture of the crust and the mantle. Together with the research on geological features and geochronology, the authors mainly studied diorite-porphyrite rocks similar to ore in formation time, and the formation background of diorite-porphyrite rocks was that of active continental margin closely related to the subduction of paleo-Pacific plate towards the Eurasia continent.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb chronology, Baicaogou gold deposit, diorite-porphyrite rocks, active continental margin

延边地区位于天山-兴蒙造山带的东端,处于古亚洲洋构造域和环太平洋构造域的交汇处(张艳斌, 2002)。前中生代时期,本区主要受西伯利亚板块与华北板块相互作用的影响,经历了古亚洲洋消减、两大板块向陆缘相增生而后最后拼接的演化历史;中生代受到太平洋板块活动的强烈改造与叠加增生,构成环太平洋构造带的重要组成部分,是一个大陆边缘复合构造区(彭玉鲸等, 2002; 张兴洲等, 2006; 赵宏光, 2007)。由于地质构造活动复杂,引起了众多学者的关注。近年来,有人在研究区内开展了花岗岩的研究,并由花岗岩对整个延边地区中生代构造机制的复杂性进行了论述(张艳斌, 2002),也有人对抗花岗岩类的形成时代、地化特征及其构造演化进行了研究(付长亮, 2009; 张超, 2011)。

百草沟金矿床处于著名的五凤-小西南岔金-多金属成矿带,原名闹枝金矿床。矿区出露面积最大的容矿围岩花岗闪长岩, U-Pb 定年结果显示其形成于早侏罗世(刘金龙等, 2015a)。9号矿体的围岩粗面安山岩, 定年结果也为早白垩世(林博磊, 2013; 刘金龙等, 2015b)。形成背景都与环太平洋构造域的俯冲有关。目前矿区缺乏与成矿相关的闪长玢岩的研究, 结合野外地质现象及井下编录观察, 发现闪长玢岩与主成矿体 $10^\#$ 矿体的时空关系密切, 是 $10^\#$ 矿体的成矿地质体, 可作为进一步找矿的标志。李睿华等(2015)对矿区的矿石进行过硫同位素研究, 认为百草沟矿床的硫来源具有深源的特征。同矿体呈平行分布的闪长玢岩具有深源、与成矿同时期、与矿体产出位置相近等特点, 闪长斑岩可能为成矿提供物质和能量来源, 因此, 本文将通过岩相学、U-Pb年代学、岩石地球化学, 对成矿期闪长玢岩的成因、成矿时代、岩浆演化及地质构造背景进行初步的分析与探讨。

1 地质背景和矿区地质

延边地区处于佳木斯、兴凯、华北3个地块间的活动带上(赵全国等, 2005), 受多个大地构造单元的制约与影响, 成矿地质背景复杂(图1a)。

区域内出露的地层主要有三叠系—新生界的沉积碎屑岩、火山碎屑岩、火山岩和第四纪沉积物等, 主要岩性有石英砂岩、粗砂岩、粉砂岩、玄武质安山岩等(吉林省地质矿产局, 1988)。区域内构造以断裂为主, 依走向分为NW-NNW向、NS向、EW向及NE-NEE向4组(孟庆丽等, 2001)。区域出露的岩浆岩主要有棉田岩体, 其主要岩性为花岗闪长岩, 局部为闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩和黑云斜长花岗岩; 仲坪岩体(紫苏辉石闪长岩)和其他花岗岩体(图1b)。

百草沟矿区主要出露中生界中侏罗统屯田营组上段(J_2t^2)与下侏罗统金沟岭组上段(J_3j^2)。区内多见NW向、NE向、近NS向断裂。岩浆岩分布广泛, 以燕山早期大规模呈岩基状产出的中酸性花岗闪长岩为主, 燕山晚期则以火山喷发和岩浆侵入交替作用为特征, 除形成一套火山岩外, 还有一套呈岩株、岩脉及岩枝状产出的中酸性侵入岩。

百草沟金矿区主要有10条矿脉, 它们均赋存于区内中生代火山盆地内的火山岩及花岗闪长岩中, 其中 $10^\#$ 矿脉规模最大, 含金性最好(图2a), 主要矿化类型为多金属硫化物石英脉, 石英脉呈不规则状。围岩蚀变主要为绢云母化、黄铁矿化及冰长石化, 其次为碳酸盐化和绿泥石化, 其中, 硅化、绢云母化、黄铁矿化与金矿化关系最为密切, 冰长石化、碳酸盐化反映了低温的特征。根据矿床地质特征及矿物组合, 认为百草沟矿床为低硫化型浅成低温热液矿床(李睿华等, 2015)。

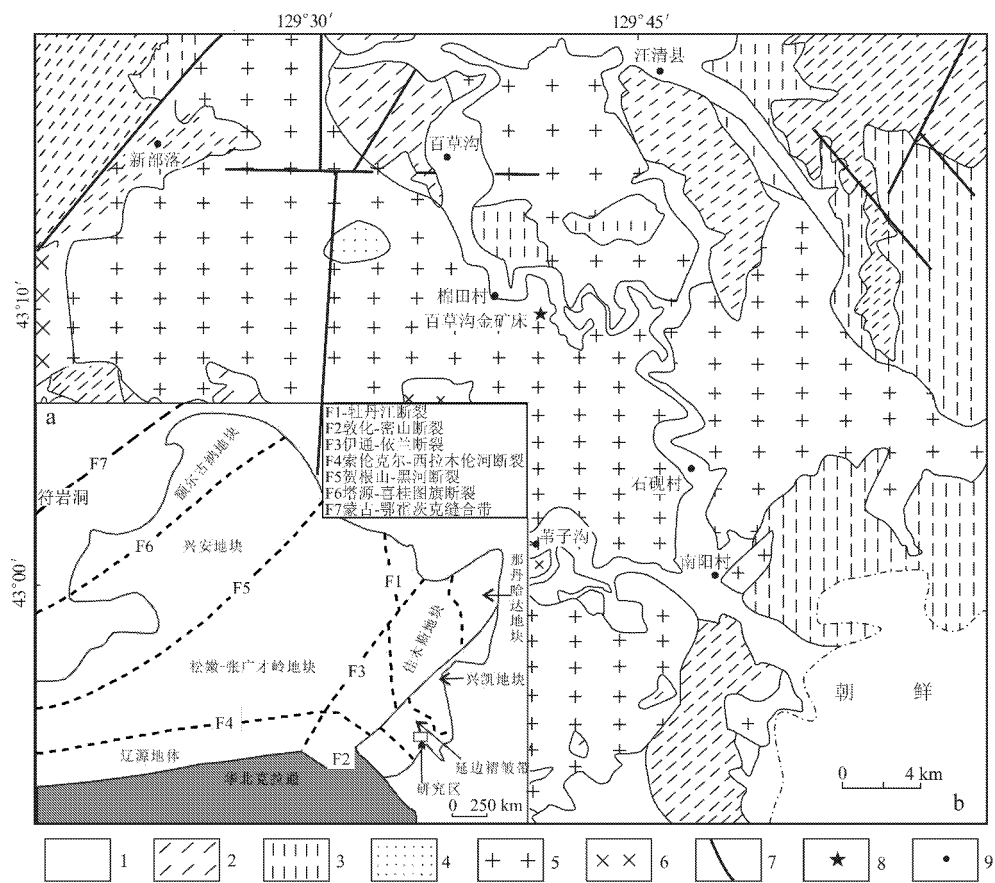


图 1 百草沟区域地质略图(据 Zhang et al. , 2004)

1—第四系沉积物；2—中生代火山岩、火山碎屑岩；3—二叠系沉积碎屑岩；4—仲平岩体；5—棉田岩体；6—其他花岗岩；7—断层；8—国界线；9—地名；10—采样位置

Fig. 1 Geological sketch map of the Baicaogou gold deposit (after Zhang et al. , 2004)

1—Quaternary sediments；2—Mesozoic volcanic and volcanioclastic rocks；3—Permian sedimentary clastic rocks；4—Zhongping rock body；5—Miantian rock body；6—Other granites；7—Faults；8—National boundaries；9—Location；10—Sampling Location

2 岩相学特征和样品描述

文中的 11 个样品取自百草沟金矿区 13-1 中段主穿脉内相对新鲜的闪长玢岩,其与成矿关系密切,由于严格受构造控制,常见矿脉同闪长玢岩脉平行产出(图 2b、图 3a),局部位置见脉岩中含细脉状黄铁矿、黄铜矿(图 3b),普遍发育浸染状矿化,且脉岩形成时代也接近于成矿时代,因此,本文把这类闪长岩脉归属于成矿期的脉岩。

岩石呈深灰色,具斑状结构,基质具细粒不等粒粒状结构。斑晶(45%±)主要由斜长石、角闪石、辉石组成。斜长石(30%±)自形半自形板状,粒径 1~3 mm,发育聚片双晶;角闪石(10%±)半自形-他形粒状,粒径 0.5 mm;辉石(5%±)半自形-他形粒状,粒径 0.5 mm;角闪石和辉石由于受后期热液的影响,

边部有少量绿泥石、绿帘石。基质(55%±)由斜长石、少量石英、角闪石和辉石构成,斜长石呈半自形板条状,可见环带构造,填隙状分布;石英呈他形粒状,星散状、填隙状分布;角闪石呈柱状,星散状分布;辉石呈粒状,星散状分布;副矿物可见针柱状磷灰石等。

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石同位素分析

锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成。锆石制靶、反射光、阴极发光以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定和痕量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 32 μm,激光剥蚀深度为 20~40 μm,实验中

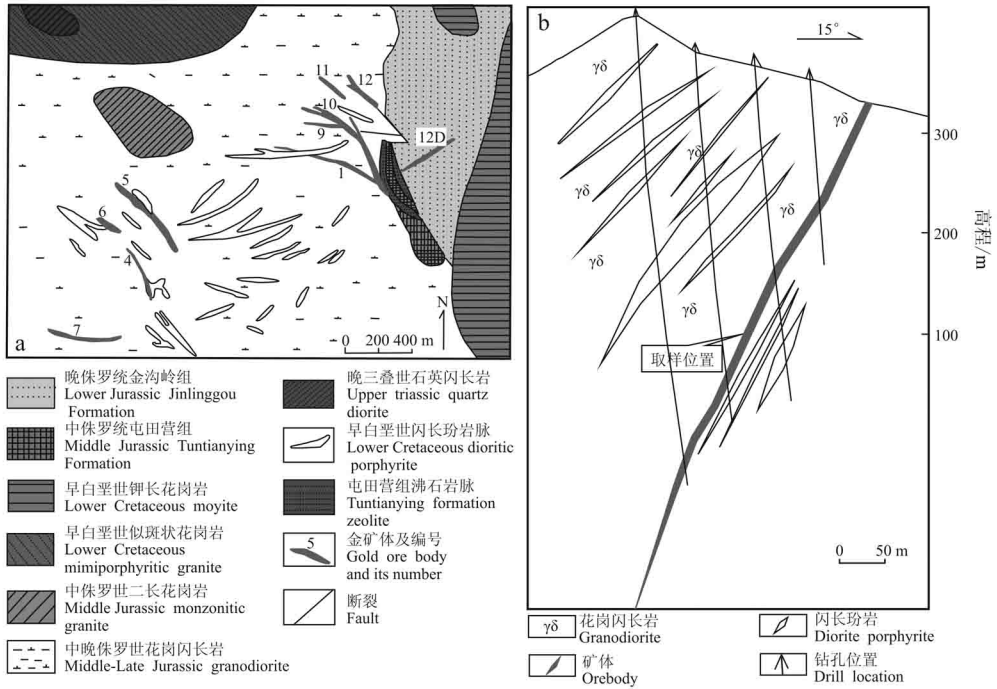


图 2 百草沟金矿床地质简图(a)(据张勇,2010;林博磊,2013)及 10# 矿体 80 号勘探线剖面图(b)(内部资料)
Fig. 2 Geological sketch map of the Baicaogou gold deposit(after Zhang,2010;Lin,2013)and geological section along No. 80 exploration line of No. 10 orebody(internal data)

采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素(锆石中 SiO₂ 的质量分数为 32.8%(袁洪林等,2003),分析方法见文献(Yuan et al.,2004);普通铅校正采用 Anderson 推荐的方法(Anderson,2002);样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATECAL 程序(Liu et al.,2008),年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 程序(Ludwig,2003)。

3.2 岩石地球化学测试

本次实验所用的主量元素和痕量元素分析样品先于吉林大学地球科学学院粉碎至 250 目后,缩分出适量样品,再由核工业北京地质研究院分析测试中心完成,主量元素的测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF),实验仪器为荷兰 FHLISP 公司 PW2404 顺序扫描型 X 射线荧光光谱仪,其中 Al₂O₃、SiO₂、MgO、Na₂O 检测限为 0.015%;CaO、K₂O、TiO₂ 检测限为 0.01%;Fe₂O₃、MnO、P₂O₅ 检测限为 0.005%;FeO 用容量法完成(检测限为 0.1%);微量和稀土元素测定采用德国 Finnigan-MAT 公司生产 ELEMENT I 电感耦合等离子体质谱仪测得。对于质量分数大于 20 μg/g 的元素,误差为 ±5%,而对于质量

分数小于 20 μg/g 的元素,误差为 ±10%。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

百草沟金矿含辉石闪长玢岩样品的阴极发光图像显示锆石颜色明亮,锆石具有清晰的振荡环带,为典型的岩浆锆石(图 4)。闪长玢岩锆石的 21 个分析点测试结果见表 1,Th/U 比值 0.33~1.75,符合岩浆锆石 Th/U 比值 >0.4 的特征(Weaver,1991)。21 个 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 分析数据的谐和年龄值为(128±1) Ma,MSWD=0.038;加权平均年龄为(128±3) Ma,MSWD=0.29(图 5),确定闪长玢岩形成时代为早白垩世,其中 1 个锆石年龄为 182 Ma,应该为中侏罗世矿体捕获围岩的锆石。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

百草沟矿区闪长玢岩 11 个样品的氧化物分析结果(表 2)表明,w(SiO₂)为 50.78%~61.85%,w(Al₂O₃)为 15.57%~17.86%,w(Na₂O)为 2.56%~4.78%,w(K₂O)为 1.89%~4.13%。其中 BCG-1~BCG-6 六个样品接近岩体,受成矿流体的影响,围岩蚀变发育,所以烧失量较高,其余 5 个

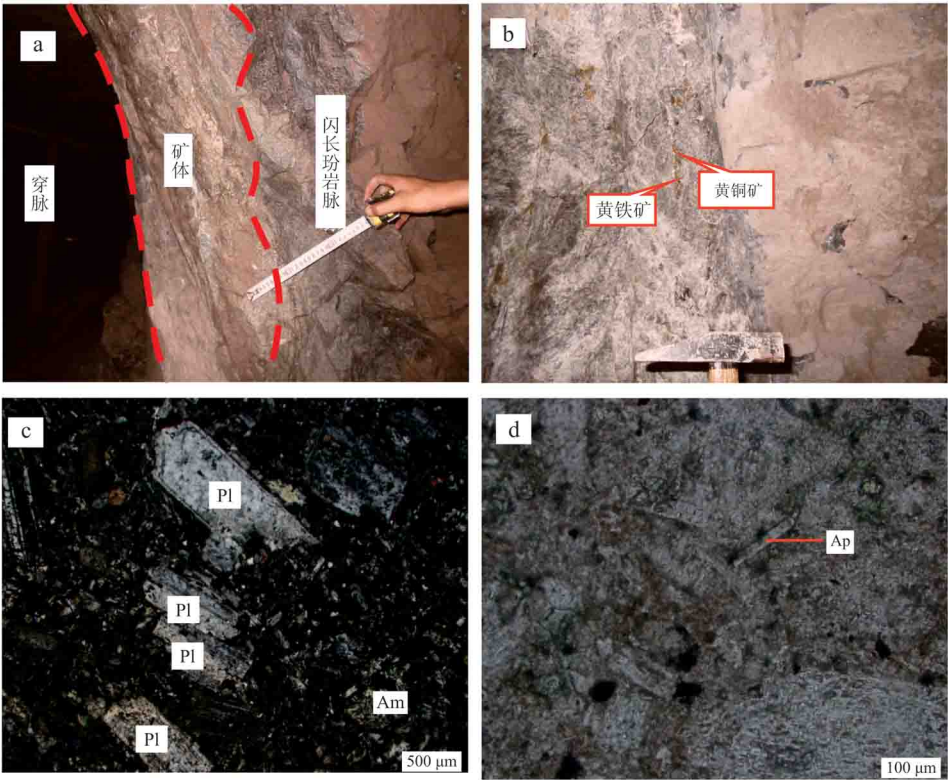


图 3 百草沟金矿 13-1 中段闪长玢岩及岩石组构和矿物特征

a. 矿体同闪长玢岩脉平行产出; b. 闪长玢岩脉中矿化; c. 斜长石斑晶(Pl)与角闪石(Am)斑晶(正交偏光); d. 针柱状磷灰石(Ap)(单偏光)

Fig. 3 Photos and microphotographs of the diorite-porphyrite in the Baicaogou gold deposit

a. Orebodies parallel to diorite-porphyrite vein; b. Mineralization in diorite-porphyrite vein; c. Phenocryst of plagioclase (Pl) and amphibole (Am) in diorite-porphyrite (crossed nicols); d. Slender columnar apatite (Ap) (plainlight)

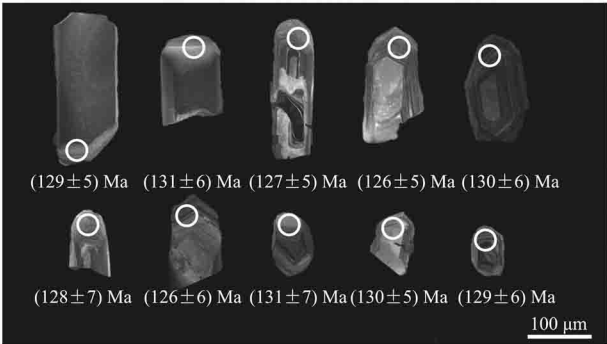


图 4 闪长玢岩锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from the diorite-porphyrite

样品(BCG-7~BCG-11)较为新鲜。所有主量元素数据在之后的投图前已做归一化处理。在 TAS 图解中所有样品基本落入二长岩范围内,且基本属于亚碱性系列(图 6);在 SiO₂-K₂O 图解上(图 7),样品多数落入高钾钙碱性系列。岩石中的 K₂O 和 Na₂O 的含量特征可能与岩石形成后普遍受到富钾、钠流体的影响,发生蚀变有关,同时也解释了硅钾图样品的分布不集中。

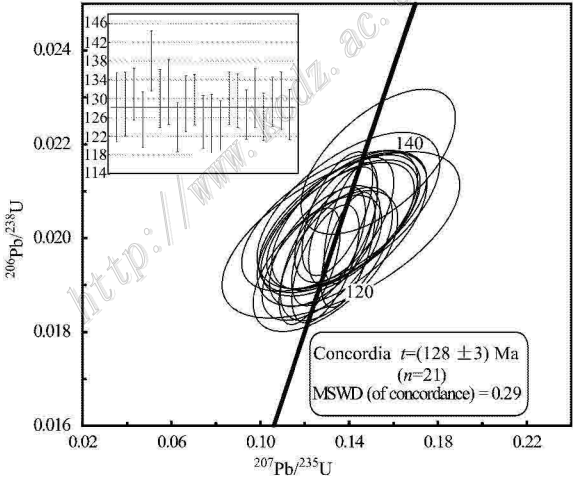


图 5 闪长玢岩的 U-Pb 年龄协和图

Fig. 5 Zircon U-Pb Concordia diagram for the diorite-porphyrite rocks

4.2.2 微量元素和稀土元素

全岩稀土元素总量 ΣREE 为 $100.72 \times 10^{-6} \sim 180.46 \times 10^{-6}$, 平均为 146.97×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为

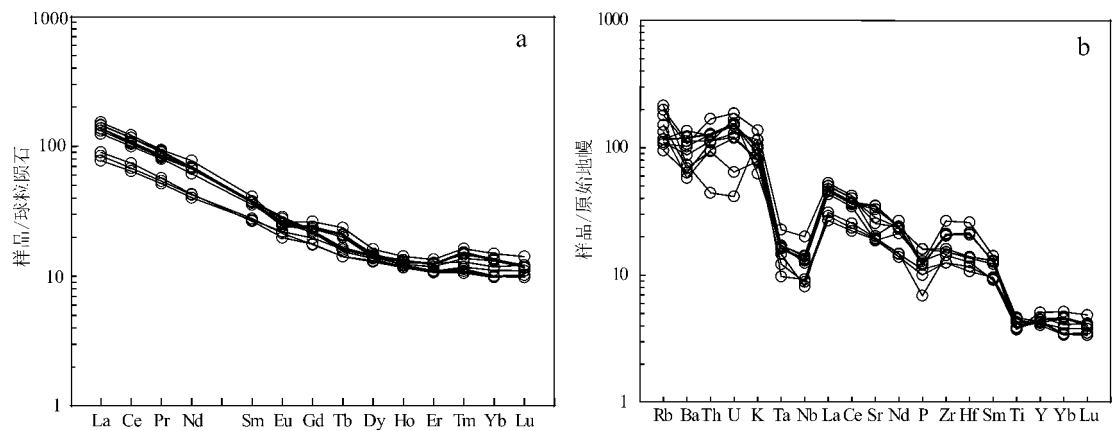


图 8 闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a 标准化值据 Boynton , 1984)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b 标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of diorite porphyry(a , after Boynton , 1984) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of diorite porphyry(b , after Sun et al. , 1989)

混染便可以使熔体的 $Mg^\#$ 值从 45 上升到 55(Rapp et al. , 1995)。百草沟金矿闪长玢岩 $Mg^\#$ 值为(42 ~ 54 , 平均为 49) ,显示其源区需要一种相对富镁的物质参与才能增高 $Mg^\#$ 值。此外 ,基性岩浆结晶分异以具有明显的 Eu 负异常为特征 ,而岩石 Eu/Eu^* 值为 0.79 ~ 0.98 ,负 Eu 异常微弱。岩石 $\epsilon(Cr)$ 为 (20 ~ 33.4) $\times 10^{-6}$,小于原始地幔的 $\epsilon(Cr)$ (2121 $\times 10^{-6}$)(Hirose et al. , 1993)和高镁安山岩 $\epsilon(Cr)$ 一般 $>100 \times 10^{-6}$,高者可达 770×10^{-6} (Kamei et al. , 2004)。综上所述 ,岩石不可能是下地壳镁铁质物质直接部分熔融形成。

此次测得闪长玢岩地球化学主量元素 Ti 和 P 的亏损可能受到磷灰石和钛铁矿、金红石和榍石等分离结晶的影响 ,或者岩浆有来源于古老的弧源地壳成分(翟明国等 , 2005)。Nb/Ta 比值为(9.7 ~ 16.5) ,介于地壳平均值 8.3(Rudnick et al. , 2003)和地幔平均值 17.5(Sun et al. , 1989)之间 ;Th/La 比值为(0.19 ~ 0.43) ,平均值为 0.33 ,亦高于大陆地壳平均值 0.20(Saunders et al. , 1988) ;Rb/Sr 比值(0.10 ~ 0.33)介于地幔值 0.034 和地壳值 0.35 (Taylor et al. , 1995)之间 ,Ba/La 比值(15.0 ~ 30.4) ,平均值为 22.84 ,介于地壳平均值 25 和原始地幔平均值 9.6 之间(Weaver , 1991)。华北克拉通东部的中生代高镁闪长岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值相对较高 (0.7050 ~ 0.7075) , $\epsilon_{Nd}(t)$ 相对较低 (-4.43 ~ -16.0)。结合区域上对延边地区研究表明研究区在早白垩世发生大规模的拆沉事件 ,断离的俯冲板片和拆沉的岩石圈(下部地壳 + 岩石圈地

幔)与软流圈的混溶产生了本区高镁闪长质岩浆 (Wu et al. , 2005 , 2011)。因此 ,认为闪长玢岩的岩浆是由地壳物质和地幔物质混合形成的。

5.2 构造背景

百草沟金矿闪长玢岩在 $MgO-FeO-T-Al_2O_3$ 图解中(图 9) ,岩石主体落入岛弧及活动大陆边缘附近。由于高场强元素的活动性较低 ,受各种地质作用的影响比较弱 ,因此能够真实反应源区的性质。在 Th-Hf-Ta 判别图解上(图 10) ,岩石大部分落在火山弧区域。闪长玢岩 Hf/Th 比值为 0.45 ~ 0.88 (<3) ,是钙碱性(Wood , 1980) ,以及 SiO_2-K_2O 图解(图 7)也落入高钾钙碱性的区域。微量元素中 ,Zr/Y 的比值为 6.57 ~ 9.28 ,所有比值都符合大陆边缘安山岩 Zr/Y 比值在 4 ~ 12 之间的化学特征(Condie , 1989)。岩石 La/Nb 比值 2.92 ~ 3.67 ,符合活动大陆边缘 La/Nb 比值高于 2 的特征(Salters et al. , 1991)。微量元素表现出了富集 K、Rb、Sr 等大离子亲石元素和 Th、U 等活泼不相容元素 ,相对亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、P、Ti) ,与岛弧或活动大陆边缘弧岩浆的特征相吻合。

目前的研究资料显示吉黑东部地区缺少 133 ~ 155 Ma 的岩浆活动 ,早白垩世岩浆活动主要集中在 88 ~ 133 Ma。研究区南边的和龙市柳洞岩体侵位年龄为(118.52 $\pm$ 0.67) Ma 和(118.58 $\pm$ 0.87) Ma ,属于早白垩世晚期 ,且具有高钾钙碱性高分异 I 型花岗岩的特点(张超 , 2014) ,泉水村组安山岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(116.8 $\pm$ 1.4) Ma ,全部落入了活动大陆边缘的范围内 ,暗示了此时古太平

表 2 岩石主量元素、稀土元素和微量元素含量及有关参数
Table 2 Major , REE and trace element content and parameter of the rocks

组分	BCG-1	BCG-2	BCG-3	BCG-4	BCG-5	BCG-6	BCG-7	BCG-8	BCG-9	BCG-10	BCG-11
SiO ₂	50.78	54.69	52.04	61.85	54.31	55.15	58.45	58.57	59.06	58.98	64.11
TiO ₂	0.96	0.9	0.99	0.91	0.98	0.81	0.81	0.82	0.83	0.81	0.79
Al ₂ O ₃	16.79	17.06	16.64	15.57	16.67	17.86	16.84	16.51	16.68	16.70	15.18
Fe ₂ O ₃	7.23	5.92	6.87	4.95	6.79	6.45	6.11	6.32	6.17	6.05	5.22
FeO ^T	6.51	5.33	6.18	4.45	6.11	5.80	6.68	7.11	6.76	6.62	5.55
MnO	0.15	0.13	0.12	0.09	0.11	0.09	0.13	0.20	0.14	0.17	0.10
MgO	3.85	2.99	3.28	1.63	3.65	2.94	3.58	2.86	3.33	2.83	2.22
CaO	6.09	5.92	5.61	3.16	5.16	3.82	4.36	5.1	4.08	5.08	2.35
Na ₂ O	2.54	4.45	3.71	4.78	4.38	4.66	3.86	3.39	4.01	3.46	2.71
K ₂ O	3.46	2.39	3.48	1.89	2.45	2.35	2.66	2.96	3.15	2.98	4.13
P ₂ O ₅	0.242	0.15	0.35	0.28	0.35	0.22	0.26	0.27	0.26	0.26	0.27
LOI	7.1	5.19	6.63	4.78	5.02	5.49	2.91	2.93	2.24	2.63	2.87
Total	99.27	99.86	99.85	99.96	99.99	99.92	99.97	99.92	99.95	99.96	99.95
Mg [#]	54	53	51	42	54	50	51	44	49	46	44
δEu	0.97	0.91	0.95	0.92	0.98	0.96	0.83	0.85	0.83	0.88	0.79
Ba	513	404	786	445	611	483	715	839	949	846	749
Ce	41.6	45.3	71.2	61.2	71.1	39.4	65	66.4	63.8	66.4	74.5
Cr	30	20	30	20	20	30	30.6	33.4	28.1	30.5	25.5
Dy	3.29	3.35	3.61	3.48	3.69	3.66	3.6	3.67	3.55	3.8	4.11
Er	1.78	1.81	1.81	1.77	1.83	2.08	2.06	2.03	1.96	2.1	2.23
Eu	1.24	1.15	1.61	1.48	1.66	1.28	1.45	1.47	1.41	1.51	1.5
Ga	20.5	20.4	21.3	17.1	21.2	22.3	20.6	21.8	20.5	21.3	18.4
Gd	3.6	3.64	4.59	4.48	4.61	4.05	4.91	4.95	4.75	4.88	5.42
Hf	3.3	3.9	4.3	4.2	4.3	3.6	6.42	6.6	6.6	6.7	8.01
Ho	0.66	0.68	0.69	0.66	0.69	0.75	0.73	0.756	0.7	0.72	0.81
La	20	21.3	34.3	29.6	34.6	18.4	32.5	32.5	31.2	32.6	36.3
Lu	0.26	0.28	0.25	0.26	0.25	0.31	0.31	0.3	0.30	0.29	0.36
Nb	6.6	5.8	10.2	8.9	10	6.3	9.24	9.59	9.48	9.56	14.3
Nd	19.8	20	32.2	28.8	31.8	18.8	32.5	32.6	31.3	32.5	36.2
Pr	5.13	5.41	8.71	7.6	8.52	4.91	7.92	8.04	7.81	8.15	8.91
Rb	136	84.5	126	60.4	70	95.9	67.8	73.6	74.1	74.1	114
Sm	4.25	4.06	5.79	5.43	5.76	4.14	5.76	5.69	5.62	5.68	6.28
Sr	407	413	538	393	598	400	696	741	742	737	428
Ta	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.5	0.66	0.67	0.67	0.68	0.93
Tb	0.53	0.53	0.6	0.58	0.62	0.6	0.77	0.79	0.75	0.77	0.88
Th	3.76	8.14	9.57	9.33	9.59	7.93	10.8	10.9	10.6	10.9	14.3
Tm	0.27	0.3	0.28	0.29	0.29	0.33	0.39	0.38	0.35	0.37	0.42
U	0.87	2.5	2.71	3.53	2.55	1.35	3.21	3.24	3.12	3.26	3.91
V	177	159	162	104	156	141	118	120	118	122	97.9
Y	18.4	19.1	19.4	19.2	19.7	21.3	20.5	20.3	19.4	20.3	23.2
Yb	1.67	1.89	1.7	1.71	1.71	2.01	2.29	2.26	2.24	2.33	2.54
Zr	140	160	180	170	170	140	234	228	234	237	298
ΣREE	104.08	109.70	167.34	147.34	167.13	100.72	160.19	161.84	155.74	162.10	180.46
LREE	92.02	97.22	153.81	134.11	153.44	86.93	145.13	146.70	141.14	146.84	163.69
HREE	12.06	12.48	13.53	13.23	13.69	13.79	15.06	15.14	14.60	15.26	16.77
LREE/HREE	7.63	7.79	11.40	10.10	11.20	6.30	9.64	9.69	9.67	9.62	9.76
(La/Yb) _N	8.59	8.08	14.50	12.40	14.50	6.57	10.20	10.30	9.99	10.00	10.30
Nb/Ta	16.5	9.7	14.6	12.7	14.3	12.6	14.0	14.3	14.2	14.1	15.3
La/Nb	3.03	3.67	3.36	3.33	3.46	2.92	3.52	3.39	3.29	3.41	2.54
Th/La	0.19	0.38	0.28	0.32	0.28	0.43	0.33	0.34	0.34	0.33	0.39
Rb/Sr	0.33	0.20	0.23	0.15	0.12	0.24	0.10	0.10	0.10	0.10	0.27
Hf/Th	0.88	0.48	0.45	0.45	0.45	0.45	0.59	0.61	0.62	0.61	0.56
Zr/Y	7.61	8.38	9.28	8.85	8.63	6.57	11.4	11.2	12.1	11.7	12.8
Ba/La	25.7	19.0	22.9	15.0	17.7	26.3	22.0	25.8	30.4	26.0	20.6

注：BCG-1 至 BCG-6 接近矿体蚀变较严重，绘图时已做归一化处理。

洋对吉黑东部开始了新的俯冲作用(张超,2014)。孙景贵等(2009)通过对延边小西南岔大型富铜矿床产出的与成矿密切的角闪花岗岩闪长岩、黑云花岗闪长岩、黑云二长花岗岩(花岗杂岩)侵入体和闪长玢岩岩脉的精细测年,初步确定它们的岩浆就位发生在早白垩世末期(112~102 Ma),处于伊泽奈崎板

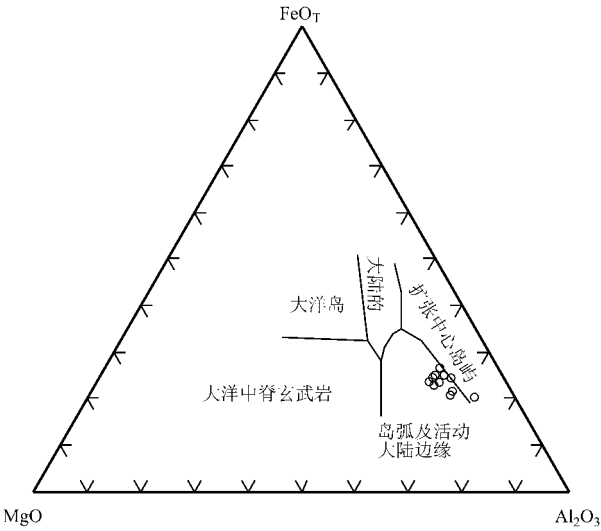


图 9 闪长玢岩 $\text{MgO-FeO-T-Al}_2\text{O}_3$ 判别图解
(据 Pearce et al. ,1977)

Fig. 9 $\text{MgO-FeO-T-Al}_2\text{O}_3$ diagram (after Pearce et al. ,1977) of diorite porphyrite

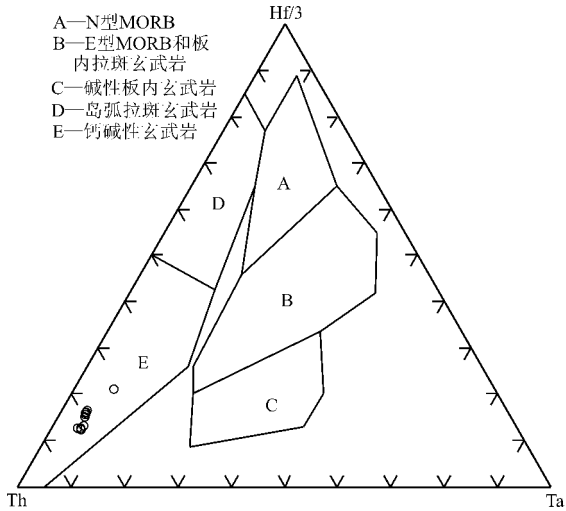


图 10 闪长玢岩 Th-Hf/3-Ta 判别图解
(据 Wood ,1980)

Fig. 10 Th-Hf/3-Ta diagram (after Wood ,1980) of diorite porphyrite

人用石英 Ar-Ar 法得出矿体的成矿时代为 127 Ma (金伯禄,1992),在误差范围内 2 个年龄基本一致。结合井下地质特征,闪长玢岩和矿体严格受构造控制,两者基本平行产出,可见两者产于同一构造破碎带内,局部闪长玢岩脉被矿体穿插,且脉中有含金的次级构造,黄铁矿化、黄铜矿化发育。

早白垩世晚期(106~133 Ma)环太平洋构造域的俯冲作用,在东部陆缘内侧表现为类似弧后的伸展环境,多发育富金斑岩型铜矿和浅成低温热液型金矿(Han et al. ,2013)。近年来吉黑东部浅成低温热液矿床的研究表明(孙景贵等,2008;门兰静,2011;任云生等,2011;李红霞等,2012),该区早白垩世矿床应与古太平洋板块对吉黑地区的俯冲作用有关。百草沟金矿正是该时期岩浆活动形成的(门兰静,2011;林博磊,2013)。

与成矿同时期的闪长玢岩脉和金矿床严格受构造控制,二者多呈平行分布,体现了二者间密切的时、空关系,它们应属于同一构造-岩浆活动期的产物。脉岩中硫化物发育,碳、氧和硫同位素显示物质来源于深源地幔(李睿华等,2015)。早白垩世,太平洋板块西向俯冲,由于洋壳俯冲脱水形成 C-H-O 流体,携带大量常量及微量元素,这种流体上升会因压力降低分异出相对富含铁镁质的硅酸盐“类岩浆”,分异后的 C-H-O 流体则变得相对富含硅、碱质。沿断裂带向上运移“类岩浆”与幔源含金 C-H-O 流体进入地壳后受壳源物质混染发生分异作用;“类岩浆”与 C-H-O 流体虽源于同一流体,但是经历了独立的演化。“类岩浆”与地壳物质相互交换,形成矿区内分布的中基性岩脉,如闪长玢岩、煌斑岩等。相对富硅、碱质的 C-H-O 流体同时也携带了一定数量的金及其他金属,在地壳的不同层次上,随着温度的不断降低和大气水的混入,使含矿流体溶解度不断降低,成矿物质在构造薄弱处发生沉淀,形成百草沟金矿床(孙丰月等,1995)。

6 结 论

(1) 延边百草沟金矿区闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为(128±3) Ma(MSWD=0.29),即形成于早白垩世,与成矿时代一致。

(2) 地球化学特征显示,延边百草沟金矿闪长玢岩明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb),LREE 和活泼的不相容元素(如 Th、U)相对亏损高场强元

块向古亚洲板块俯冲的大陆边缘环境。同时东北部地区分布了大面积的双峰式岩浆岩(Wu et al. ,2007;Sun et al. ,2013),也暗示了古太平洋板块俯冲作用的存在,以上岩浆岩与百草沟闪长玢岩应该属于同一阶段的太平洋俯冲活动造成的岩浆活动的产物。

5.3 脉岩与金矿床成因关系

延边百草沟金矿闪长玢岩锆石 U-Pb 定年结果显示其形成时代为(128±3) Ma(MSWD=0.29),前

素(如 Ta、Nb、Ti、P)、Nb/Ta、La/Nb、Rb/Sr、Th/La 比值等显示岩浆源区具有壳幔混合的特点。

(3)成矿期闪长玢岩与金矿化密切相关,应为同一构造-岩浆活动期的产物,同处于古太平洋板块斜向欧亚板块俯冲的活动陆缘环境。

志 谢 感谢审稿专家提出了重要的修改意见,编辑部老师的认真校稿修改,作者在此志以最诚挚的谢意!

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59-79.
- Boynnton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. In: Henderson P, ed. *Rare earth elements geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier. 63-114.
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 23(1): 1-18.
- Foley S and Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin [J]. *Lithos*, 28: 181-185.
- Fu C L. 2009. The geochronology, geochemistry and petrogenesis of granitoid from Xiaoxi 'nancha in Hunchun area, Jilin Province [D]. Supervisor: Sun D Y. Changchun: Jilin University. 1-93 (in Chinese with English abstract).
- Han S J, Sun J G, Bai L A, Xing S W, Chai P, Zhang Y, Yang F, Men J L and Li Y X. 2013. Geology and ages of porphyry and medium-to high-sulphidation epithermal gold deposits of the continental margin of Northeast China [J]. *International Geology Review*, 55(3): 287-310.
- Hirose K and Kushiro I. 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressure: Determination of composition of melts segregated from peridotite using aggregates of diamonds [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 114: 477-489.
- Irvine T H and Baragar W R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Jilin Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. *Regional geology of Jilin Province* [M]. Beijing: Geology Publishing House. 1-715 (in Chinese).
- Jin B L. 1992. Geologic feature and minerogenetic condition of Mesozoic volcanic type gold deposits in Yanbian, Jilin Province [J]. *Jilin Geology*, 2: 20-28 (in Chinese).
- Kamei A, Owada M, Nagao T and Shiraki K. 2004. High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, southwest Japan arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions [J]. *Lithos*, 75: 359-371.
- Li H X, Guo F, Li C W and Zhao L. 2012. Petrogenesis of Early Cretaceous tonalities from Xiaoxinancha Au-Cu deposit [J]. *Geochemistry*, 41(6): 497-514 (in Chinese with English abstract).
- Li R H, Sun F Y, Li L, Chen J, Chen C X and Yu L. 2015. Study on features of ore-forming fluid and ore genesis of Baicaogou gold deposit, Yanbian area, Jilin [J]. *Global Geology*, (1): 88-96 (in Chinese with English abstract).
- Lin B L. 2013. Study on the mineralization tectonic setting and genesis of Naozhi gold deposit, Eastern Jilin Province [D]. Supervisor: Li B L. Changchun: Jilin University. 1-86 (in Chinese with English abstract).
- Liu B, Ma Q B and Liu P X. 1999. The volcanic magmatic activities and mineralization in Eastern Yanbian [J]. *Geological Review*, S1: 339-342 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Sun F Y, Li B L, Wang Y D, Wang S and HU A X. 2015a. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of Miantian granodiorite intrusion in Yanbian region, Southern Jilin Province and its geological significance [J]. *Earth science- Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Sun F Y, Li B L, Wang G, Xu Q L and A C. 2015b. Geochronology and geochemistry of Trachyandesite of Naozhi gold deposit in Yanbian region, Southern Jilin province and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 45(5): 1394-1404 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34-43.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1-70.
- MacDonald G A and Katsura T. 1964. Chemical composition of Hawaiian lava [J]. *Journal of Petrology*, 5: 83-133.
- Meng L J. 2011. An ore-forming fluid study on Late Mesozoic epithermal Au-Cu deposits in Yanbian-Dongning area: Implication for the metallogenic mechanism [D]. Supervisor: Chi X G. Changchun: Jilin University. 1-139 (in Chinese with English abstract).
- Meng Q L, Zhou Y C and Chai S L. 2001. Porphyry hydrothermal vein type Cu-Au deposits, Eastern Yanbian, China [M]. Changchun: Jilin Science Technology Press. 1-163 (in Chinese).
- Middlemost E A K. 1985. *Magmas and magmatic rocks* [M]. London: Longman. 1-266.
- Pearce T H, Gorman B E and Birkett T C. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks [J]. *Science Letter*, 36: 121-132.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology Coord, 58 : 63-81.
- Peng Y J, Ji C H and Xin Y L. 2002. Petrology and geochronology of the paleo-Jilin-Heilongjiang orogenic belt in the adjacent areas of China, Russia and Korea[J]. *Geology and Resources*, 11(2): 65-75 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt an 8-32 kbar : Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- Ren Y S, Wang H, Qu W J, Zhao H L and Chu G Q. 2011. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Xiaoxi 'nancha copper- gold deposit in the Yanbian area and its geological significance[J]. *Earth Science*, 36(4): 721-728 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Cao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. In : Rudnick R L, ed. *The crust, treatise on geochemistry*[C]. Oxford : Elsevier Pergamon. 3 : 1-64.
- Salters V J and Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, island arcs : The Hf-isotope connection[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 104 : 364-380.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs : Trace element constraints[J]. *Journal of Petrology, Special Volume*(1): 415-445. doi : 10.1093/petrology/ Special-Volume. 1. 415.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B and Glazner A F. 2005. Volcanic granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(5): 635-661.
- Sun F Y, Shi Z L and Feng B Z. 1995. Gold ore geology, lithogenesis and metallogenesis related to the differentiation of mantle-derived C-H-O fluids in Jiaodong peninsula, eastern China[M]. Changchun : Jilin People 's Press. 1-150 (in Chinese).
- Sun J G, Chen L, Zhao J K, Meng L J, Pang W, Chen D and Liang S N. 2008. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in Xiaoxinancha gold-rich copper orefield of Yanbian and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 319-328 (in Chinese with English abstract).
- Sun J G, Meng L J, Chen D, Chen L, Pang W, Liang S N, Chang Y, Zhang P and Nie X T. 2009. Constraints of magmatism on the ore-forming process of magmatic hydrothermal gold- rich copper deposits as recorded from the element geochemistry and zircon CL image features : A case study of the Xiaoxinancha gold-rich copper deposit, Yanbian, Jilin Province[J]. *Mineral Petrol*, 1(29): 43-52 (in Chinese with English abstract).
- Sun J G, Han S J, Zhang Y, Xing S W and Bai L A. 2013a. Diagenesis and metallogenetic mechanisms of the Tuanjiegou gold deposit from the Lesser Xing' an Range, NE China : Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62 : 373-388.
- Sun S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implication for mantle composition and processes[A]. In : Saunderson A D, Norry M J, ed. *Magmatism in the ocean basins*[C]. Geological Society Special Publication, 2 : 313-345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions : trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 104 : 381-397.
- Wolf M B and Wyllie P J. 1992. The formation of tonalitic liquids during the vapor-absent partial melting of amphibolite at 10 kbar[J]. *Eos*, 70 : 506-518.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 50 : 11-30.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O and Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 : 103-119.
- Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A and Yang J H. 2007. The Hulan Group : Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic belt of NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30 : 542-556.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A and Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41 : 1-30.
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B and Zhang X Z. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China : Chronology, geochemistry, and tectonic implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392-402.
- Xu W L, Wang F, Pei F P, Meng E, Tang J, Xu M J and Wang W. 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China : Constraints from spatial and temporal variation of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339-353 (in Chinese with English abstract).
- Yang S S, Qing M, Hao T S, Wang K Y, Wan D, Piao X H and Bian Y H. 2010. Geological characteristics and genesis of Naozhi gold deposit in Yanbian area, Jilin Province[J]. *Global Geology*, 29(4): 606-613 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370.
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, Liu X M, Xu P and Sun D Y. 2003. Zircon from Cenozoic intrusive body laser probe U-Pb time dating and rare earth element composition analysis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511-1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Fan Q C, Zhang H F and Sui J L. 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China : Magma underplating, replacement and delamination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509-1526 (in Chinese with English abstract).

- ca, 2X 1): 1509-1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C. 2014. The Mesozoic tectonic evolution of Yanbian area in the Eastern segment of northern margin of the North China Block [J]. Supervisor: Liu Y J. Changchun: Jilin University. 1-150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X Z, Yang B J, Wu F Y and Liu G X. 2006. The basic characteristic of lithosphere structure in Xingmeng-Jihei, China [J]. Geology in China, 33(4): 816-823 (in Chinese).
- Zhang Y. 2010. Gold deposit geological characteristic and exploration potential of the Miantian-Naozhi region [J]. Western Technology in China, (3): 4-7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y B. 2002. The isotopic geochronologic frame of granitic magmatism in Yanbian area [D]. Doctor's degree thesis. Supervisor: Wu F Y. Changchun: Jilin University. 1-132 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H G. 2007. Study on the metallogenesis and models in Mesozoic epithermal gold deposits in Yanbian, Jilin Province [D]. Supervisor: Yao F L. Changchun: Jilin university. 209p (in Chinese with English abstract).
- Zhao J K. 2007. Studies of ore forming geochemistry, dynamic mechanism, Xiaoxinancha gold-copper deposit, Yanbian [D]. Supervisor: Sun J G. Changchun: Jilin University. 84p (in Chinese with English abstract).
- Zhao Q G, Xu W L, Jin K and Pei F P. 2005. The magma source of Mesozoic volcanic rocks in Yanbian area: Evidence from Sr-Nd Isotopes and deep seated xenoliths (xenocrysts) [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 4: 416-422 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 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]. 导师: 孙德友. 长春: 吉林大学. 93 页.
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 1-715.
- 金伯禄. 1992. 吉林省延边中生代火山岩型金矿地质特征及成矿条件 [J]. 吉林地质, (2): 20-28.
- 李红霞, 郭锋, 李超文, 赵亮. 2012. 延边小西南岔金铜矿区早白垩世英云闪长岩的岩石成因 [J]. 地球化学, 41(6): 497-514.
- 李睿华, 孙丰月, 李良, 陈俊, 陈昌昕, 禹禄. 2015. 吉林延边百草沟金矿成矿流体特征和矿床成因 [J]. 世界地质, (1): 88-96.
- 林博磊. 2013. 吉林东部闹枝金矿成矿构造背景及矿床成因研究 [硕士学位论文]. 导师: 李碧乐. 长春: 吉林大学. 86 页.
- 刘斌, 马启波, 刘培喜. 1999. 延边地区东部火山-岩浆活动特点及矿化特征 [J]. 地质评论, 51: 339-342.
- 刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 王英德, 王硕, 胡安新. 2015a. 吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素研究 [J]. 地球科学, 40(1): 1-12.
- 刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 王冠, 许庆林, 奥琮. 2015b. 吉林延边闹枝金矿区粗面安山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 长春: 吉林大学学报(地球科学版), 45(5): 1394-1404.
- 门兰静. 2011. 延边-东宁地区晚中生代浅成热液金铜矿床的成矿流体与成矿机理研究 [博士学位论文]. 导师: 迟效国. 吉林大学. 139 页.
- 孟庆丽, 周永昶, 柴社力. 2001. 中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社. 1-163.
- 彭玉鲸, 纪春华, 辛玉莲. 2002. 中俄朝毗邻地区古吉黑造山带岩石及年代记录 [J]. 地质与资源, 11(2): 65-75.
- 任云生, 王辉, 屈文俊, 赵华雷, 褚广勤. 2011. 延边小西南岔铜金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义 [J]. 地球科学, 36(4): 721-728.
- 孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿 [M]. 长春: 吉林人民出版社. 1-150.
- 孙景贵, 陈雷, 赵俊康, 门兰静, 逢伟, 陈东, 梁树能. 2008. 延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗岩杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 27(3): 319-328.
- 孙景贵, 门兰静, 陈冬, 陈雷, 逢伟, 梁树能, 常艳, 张鹏, 聂喜淘. 2009. 岩浆作用对岩浆热液金铜成矿制约的元素地球化学和锆石 CL 图像记录——以延边小西南岔富金铜矿床为例 [J]. 矿物岩石, 29(2): 43-52.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. 岩石学报, 29(2): 339-353.
- 杨帅师, 卿敏, 郝通顺, 王可勇, 万多, 朴星海, 边红业. 2010. 吉林延边闹枝金矿床地质特征及矿床成因 [J]. 世界地质, 29(4): 607-613.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. 科学通报, 48(14): 1511-1520.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 隋建立. 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵、置换与拆沉作用 [J]. 岩石学报, 21(1): 1509-1526.
- 张超. 2014. 华北板块北缘东段延边地区中生代构造演化 [博士学位论文]. 导师: 刘永江. 长春: 吉林大学. 150 页.
- 张兴洲, 杨宝骏, 吴福元, 刘国兴. 2006. 中国内蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征 [J]. 中国地质, 33(4): 816-823.
- 张勇. 2010. 吉林棉田-闹枝地区金矿成矿地质特征及找矿远景分析 [J]. 中国西部科技, (3): 4-7.
- 张艳斌. 2002. 延边地区花岗质岩浆活动的同位素地质年代学格架 [博士学位论文]. 导师: 吴福元. 长春: 吉林大学. 1-132.
- 赵宏光. 2007. 延边中生代浅成热液铜金矿床的成矿模式研究 [博士学位论文]. 导师: 姚凤良. 长春: 吉林大学. 209 页.
- 赵俊康. 2007. 延边小西南岔金铜矿成矿地球化学动力学研究 [硕士学位论文]. 导师: 孙景贵. 长春: 吉林大学. 84 页.
- 赵全国, 许文良, 靳克, 裴福萍. 2005. 延边地区中生代火山岩的岩浆源区: 来自 Sr-Nd 同位素和深源捕虏体(晶)的证据 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 35(4): 416-422.