

内蒙古北山老硐沟金多金属矿床闪长玢岩年代学、地球化学及其成矿意义*

张国震¹, 张永¹, 辛后田¹, 黄成², 牛文超¹, 段连峰¹, 赵泽霖¹, 任邦方¹

(1 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要 内蒙古北山老硐沟金多金属矿床原生矿化与闪长玢岩脉时空-成因关系密切, 部分闪长玢岩形成工业矿体, 但其地球化学特征、岩石成因及精确的成岩时代仍不清楚。笔者在详细野外地质调研基础上, 选取3个闪长玢岩体进行全岩主量元素、微量元素、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究。闪长玢岩具斑状结构, 斑晶主要为斜长石、角闪石, 少量黑云母, 基质主要为斜长石和角闪石, $w(\text{SiO}_2)$ 介于 62.87%~65.33%, 地球化学特征显示其属于高钾钙碱性或超钾质系列。矿化闪长玢岩、蚀变未矿化闪长玢岩、弱蚀变闪长玢岩中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $(243.0 \pm 1.0)\text{Ma}$ 、 $(237.8 \pm 1.2)\text{Ma}$ 和 $(233.8 \pm 0.9)\text{Ma}$, 表明闪长玢岩的岩浆活动持续了至少 9 Ma, 并可能发育多幕侵位, 成矿时代约为 243 Ma。其锆石 Hf 同位素组成均一, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本一致, 介于 0.05~5.67, 暗示矿化与未矿化的闪长玢岩具有相同的岩浆源区。二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 介于 905~1258 Ma, 表明岩浆可能起源于中新元古代地壳的部分熔融。三叠纪受造山后地壳伸展减薄影响, 基性岩浆底侵带来的热导致新生地壳的部分熔融。岩浆经历分离结晶作用并受到地壳物质的混染, 顺区域断裂上升侵位至构造薄弱地段形成闪长玢岩并沉淀矿质。而不同期次的闪长玢岩可能是岩浆持续脉动侵位的结果。

关键词 地质学; 闪长玢岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 老硐沟; 北山造山带

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Geochronology and geochemistry of diorite porphyrite from Laodonggou gold-polymetallic deposit, Beishan, Inner Mongolia, and its metallogenic significance

ZHANG GuoZhen¹, ZHANG Yong¹, XIN HouTian¹, HUANG Cheng², NIU WenChao¹, DUAN LianFeng¹, ZHAO ZeLin¹ and REN BangFang¹

(1 Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2 Institute of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract

The diorite porphyrite from the Laodonggou gold-polymetallic deposit has close temporal-spatial and genetic relationship with primary mineralization. However, its geochemical characteristics, petrogenesis and precise age remain unclear. Based on detailed field work, the authors selected three diorite porphyrite rocks for investigation of whole-rock geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. The diorite porphyrite has porphyritic texture. The phenocrysts are mainly plagioclase and hornblende as well as minor biotite, and the matrix includes plagioclase and hornblende. The content of SiO_2 ranges from 62.87% to 65.33%, and geochemical characteristics show high-K calc-alkaline and shoshonitic characteristics. Zircon U-Pb geochronological dating of the

* 本文得到地质调查标准化与标准制修订(2019-2021)(编号:DD20190472)及中国地质调查局项目(编号:DD20190038、DD20160039、DD20179382)资助

第一作者简介 张国震,男,1989年生,高级工程师,从事金属矿床地质与地球化学研究。Email: zhanggz1989@163.com

收稿日期 2020-09-21;改回日期 2021-03-26。张绮玲编辑。

mineralized diorite porphyrite, the altered diorite porphyrite and the weakly altered diorite porphyrite are $(243.0 \pm 1.0)\text{Ma}$, $(237.8 \pm 1.2)\text{Ma}$ and $(233.8 \pm 0.9)\text{Ma}$, respectively. The magmatic activity lasted for at least 9 Ma, with multiple emplacement, and the ore-forming age is approximately 243 Ma. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of different diorite porphyrite vary from 0.05 to 5.67, implying similar magma source. Two-stage Hf modal ages range from 905 Ma to 1258 Ma, indicating that the magma was derived from partial melting of Meso-Neoproterozoic crust. Affected by the lithospheric thinning and crustal extension in the Triassic, the basic magma underplated and caused the partial melting of juvenile crust. Accompanied by fractional crystallization and crustal materials, the diorite porphyrite of different stages might have been formed by magma impulsing emplacement.

Key words: geology, diorite porphyrite, zircon U-Pb ages, geochemistry, Laodonggou, Beishan orogenic belt

北山造山带位于中亚造山带南部,连接了西边南天山缝合带及东部索伦缝合带,同时是中亚造山带与南部塔里木及华北克拉通的构造结合部位(Jahn et al., 2000; 2004; Badarch et al., 2002; Xiao et al., 2003; Helo et al., 2007; Kroner et al., 2007; Johnson et al., 2008; Lamb et al., 2008; Li et al., 2013),经历了包括古陆形成-板块裂解-俯冲增生-碰撞造山等构造演化阶段,具有多期次、多旋回的复合造山特点(Zuo et al., 1991; 聂凤军等, 2002; 左国朝等, 2003; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2010; Song et al., 2013; Zong et al., 2017; 杨富林等, 2017; 潘志龙等, 2017),是中国重要的铜、金、铁、钨、多金属成矿区(聂凤军等, 2002; 苗来成等, 2014),发育包括岩浆热液型、火山岩型、沉积-热液改造型等多种成矿类型(聂凤军等, 2002; 杜玉良等, 2009)。

老硐沟金多金属矿床位于北山造山带东部,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带南部,发育热液脉型 Au-Pb-Ag-As-Sb 和矽卡岩型含金 Cu-Fe 两类原生矿体。野外地质特征显示,闪长玢岩与矿化密切相关,但其地球化学特征、岩石成因及侵位时代未见报导。本文通过研究闪长玢岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学及锆石 Lu-Hf 同位素,试图确定成岩成矿时代,揭示岩石成因,示踪岩浆源区。

1 区域地质概况

北山造山带自北向南出露有 3 条蛇绿混杂岩带,分别为红石山-百合山蛇绿混杂岩带、牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带及玉石山-账房山蛇绿混杂岩带(任秉琛等, 2001; 杨合群等, 2010; Xiao et al., 2010; Wang et al., 2018; 辛后田等, 2020)(图 1a),是古亚洲洋及其分支自前寒武纪形成宽阔大洋至晚二叠世最终闭合连续构造演化的地质记录(聂凤军等, 2002;

Xiao et al., 2010)。牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带是早古生代洗肠井洋向北俯冲、消减、闭合的产物,分隔了塔里木板块与哈萨克斯坦板块(杨合群等, 2009; 2010; 徐学义等, 2008; 孙立新等, 2017)。斜长花岗岩年龄($(536 \pm 7)\text{Ma}$)表明大洋在寒武纪早期已经形成(侯青叶等, 2012);其弧后拉张形成了石板井-小黄山超基性岩带(何世平等, 2005; 杨合群等, 2010; 任邦方等, 2019)。北部红石山-百合山蛇绿混杂岩带中辉长岩年龄($(344.6 \pm 1.8)\text{Ma}$) (牛文超等, 2020)及南部玉石山-账房山蛇绿岩带中辉长岩年龄($(350.6 \pm 2.0)\text{Ma}$) (余吉远等, 2012),表明古亚洲洋及其分支在晚古生代依然存在(聂凤军等, 2002; 何世平等, 2005; 杨合群等, 2010)。

老硐沟金多金属矿床位于牛圈子-洗肠井结合带东南缘的敦煌地块,古硐井-英雄山复式背斜轴部东段转折端北翼(图 1b)。区域出露地层包括中元古界长城系白湖群变石英砂岩、粉砂岩、绢云母粉砂质板岩;与蓟县系平头山群白云质大理岩及浅变质碎屑岩呈断层接触;青白口系大豁落山群白云石大理岩,白云质灰岩整合于平头山群之上;下二叠统双堡塘组玄武岩、安山岩、流纹岩夹碎屑岩与下二叠统菊石滩组火山岩夹碎屑岩出露于区域西南部,两者呈断层接触;上侏罗统赤金桥组细碎屑岩不整合于白湖群、大豁落山群、双堡塘组及菊石滩组之上;上新统苦泉组砂砾岩、砂岩、粉砂质泥岩小面积出露于西部;第四纪冲洪积物整体掩盖在区域地层之上。区域构造近东西向,次级构造 NE 向、NW 向,主体为古硐井-英雄山复背斜,转折端位于老硐沟-英雄山一带。侵入岩广泛分布,代表性岩体为早泥盆世鹰嘴红山岩体($\eta_1\beta D_1$),其次为闪长玢岩、辉绿(玢)岩、花岗闪长岩等小岩体或岩株/岩脉,多形成于海西期—印支期(聂凤军等, 2002; 钱建平, 2018)。

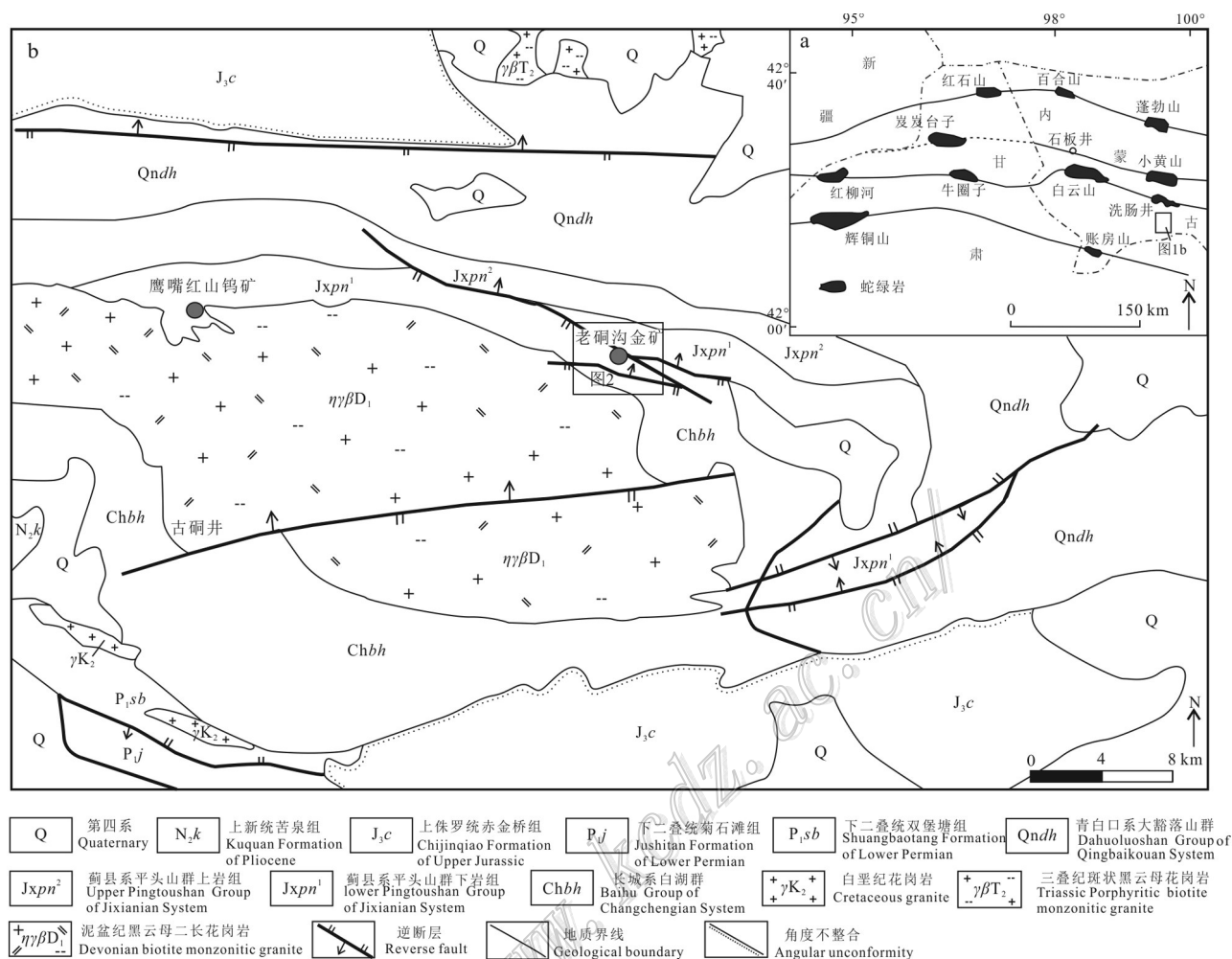


图1 北山造山带(a)和老硐沟地区(b)地质简图(据聂凤军等,2002;钱建平等,2018修改)

Fig. 1 Simplified geological maps of the Beishan orogenic belt (a) and Laodonggou area (b) (modified after Nie et al., 2002; Qian et al., 2018)

2 矿床地质

老硐沟矿区主要赋矿地层为中元古界长城系白湖群及蓟县系平头山群,以横跨矿区的近东西向F1断裂为界,白湖群出露于南部,平头山群出露于北部(图2)。白湖群主体为一套碎屑岩组合,上段为石英粉砂岩、变质石英砂岩,下段为变质长石石英砂岩、石英粉砂质泥质板岩,地层倾向北东,倾角55°~75°(黄典豪等,1997;聂凤军等,2007)。平头山群为一套碳酸盐岩组合,底部为钙质泥质板岩与结晶灰岩互层,向上部结晶灰岩常变为白云石大理岩,是矽卡岩型含金Cu-Fe矿化及部分热液脉型Au-Pb-Ag-As-Sb矿化的赋矿围岩;中部为白云石大理岩,局部夹灰岩透镜体,是Au-Pb-Ag-As-Sb矿化的主要围岩;上

部主要由粉砂质板岩、结晶灰岩及白云石大理岩组成,未见矿化,地层倾向北东-北北东,倾角40°~65°(黄典豪等,1997;聂凤军等,2007)。

矿区断裂构造主要沿近EW向、NNW向、NNW向展布,其中EW向断裂以F1~F3断裂为主,局部膨大,宽可达数十米,构成构造透镜体;NNW向断裂以北部F4断裂为主,充填有辉绿(玢)岩及闪长玢岩脉;NNW向断裂为一组等距平行断裂,同时切穿地层及东西向断裂(图2)。

矿区侵入岩主要为呈岩株状产出的黑云二长花岗岩,侵位于矿区西南部,未见金矿化,是西南部老硐沟钨矿的赋矿围岩,锆石U-Pb年龄为(423.1±1.5) Ma(赵鹏彬等,2016)。其次为呈岩株产出的斑状花岗岩闪长岩,该岩体与平头山组碳酸盐岩接触部位发育小规模矽卡岩型含金铜-铁矿化。辉绿(玢)岩沿

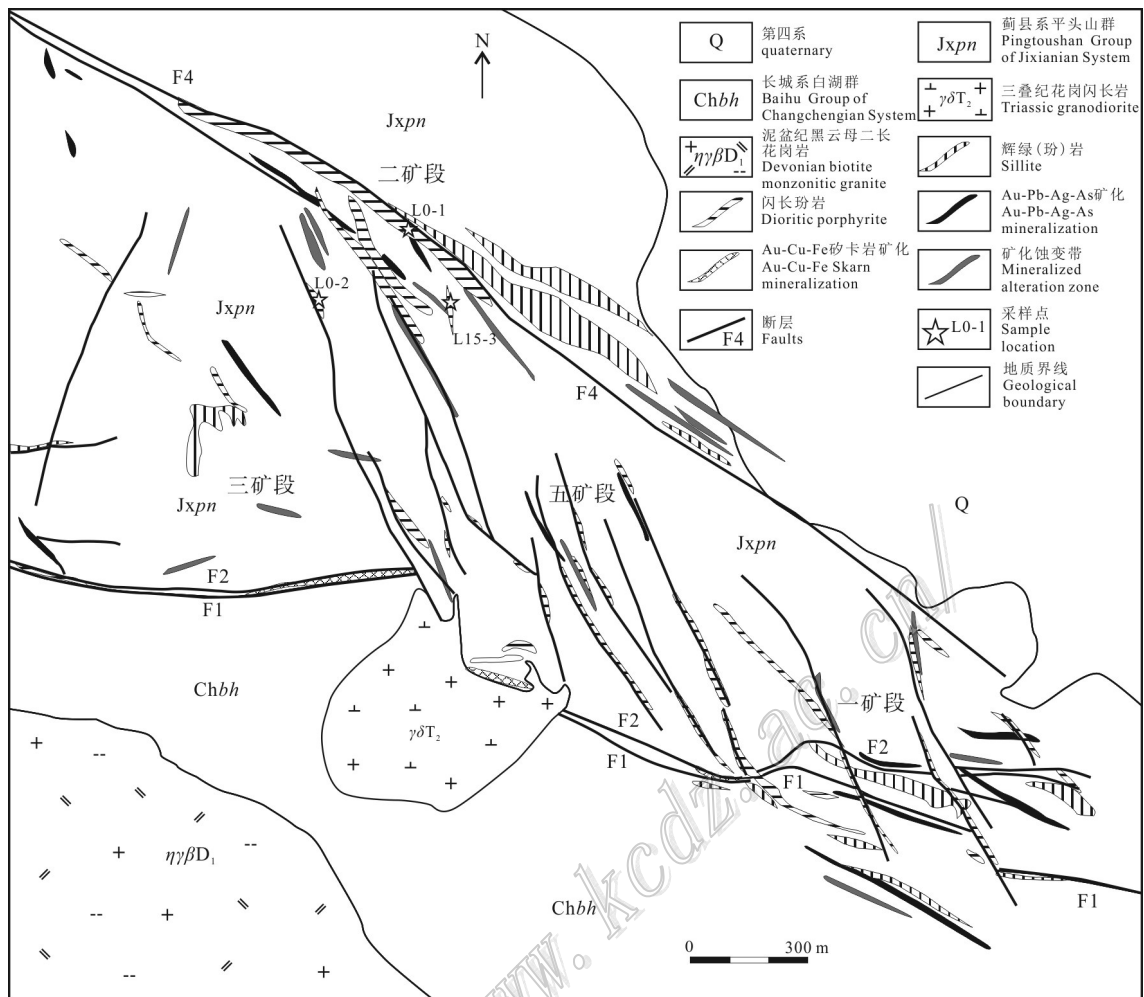


图2 老洞沟金多金属矿床地质图(据聂凤军等,2002;钱建平等,2018)

Fig. 2 Geological map of the Laodonggou gold-polymetallic deposit(modified after Nie et al., 2002; Qian et al., 2018)

NWW向或近EW向断裂产出,不发育矿化;闪长玢岩呈透镜状、脉状沿NW向或NWW向断裂产出,同时切穿辉绿(玢)岩脉。闪长玢岩在整个矿区广泛分布,有的伴生热液蚀变及金矿化,有的则不发育矿化,可能是不同期次岩浆活动的产物(图2)。其具斑状结构,斑晶主要为斜长石、角闪石、少量黑云母或石英,基质主要为细晶斜长石或角闪石,可见磷灰石、锆石、榍石等副矿物,岩石普遍发育蚀变,斜长石发育钠黝帘石化及碳酸岩化,黑云母、角闪石发育绿泥绿帘石化(图3)。

金矿石分为原生矿石及氧化型矿石,原生矿体中矽卡岩化含金Cu-Fe矿体由于规模较小,缺乏相应研究。热液脉型矿体呈不连续的巢状、透镜状或扁豆状产于平头山组碳酸盐岩地层中,与闪长玢岩具有密切时空联系,沿断裂破碎带侵位的闪长玢岩

往往受到强烈的热液蚀变,伴随金多金属矿化,而无闪长玢岩产出的破碎带,即使有硅化等热液蚀变发生,也通常只有微弱金矿化(黄典豪等,1997)。围绕矿体边部发育硅化、绢云母化、绿泥石化、褐铁矿化、碳酸盐化等构成的热液蚀变带,蚀变围绕矿体呈线性展布,蚀变宽度几厘米至30 cm不等,产于大理岩中的矿脉热液蚀变主要为硅化及黄铁矿化(黄典豪等,1997)。宏观上,西北部二矿段北部以块状含金方铅矿矿石为主,南部以块状黄铁矿-毒砂矿石及条带状黄铁矿矿石为主,西南部三矿段产出以黄铁矿-毒砂为主的块状及脉状矿石,中部五矿段及东南部一矿段以大量发育辉锑矿为特点(图3g~i)。原生矿石主要以块状或脉状为主,根据其矿物组合可以细分为金-黄铁矿-毒砂-方铅矿-石英矿石,金-黄铁矿-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿-毒砂-石英矿石,金-黄铁矿-

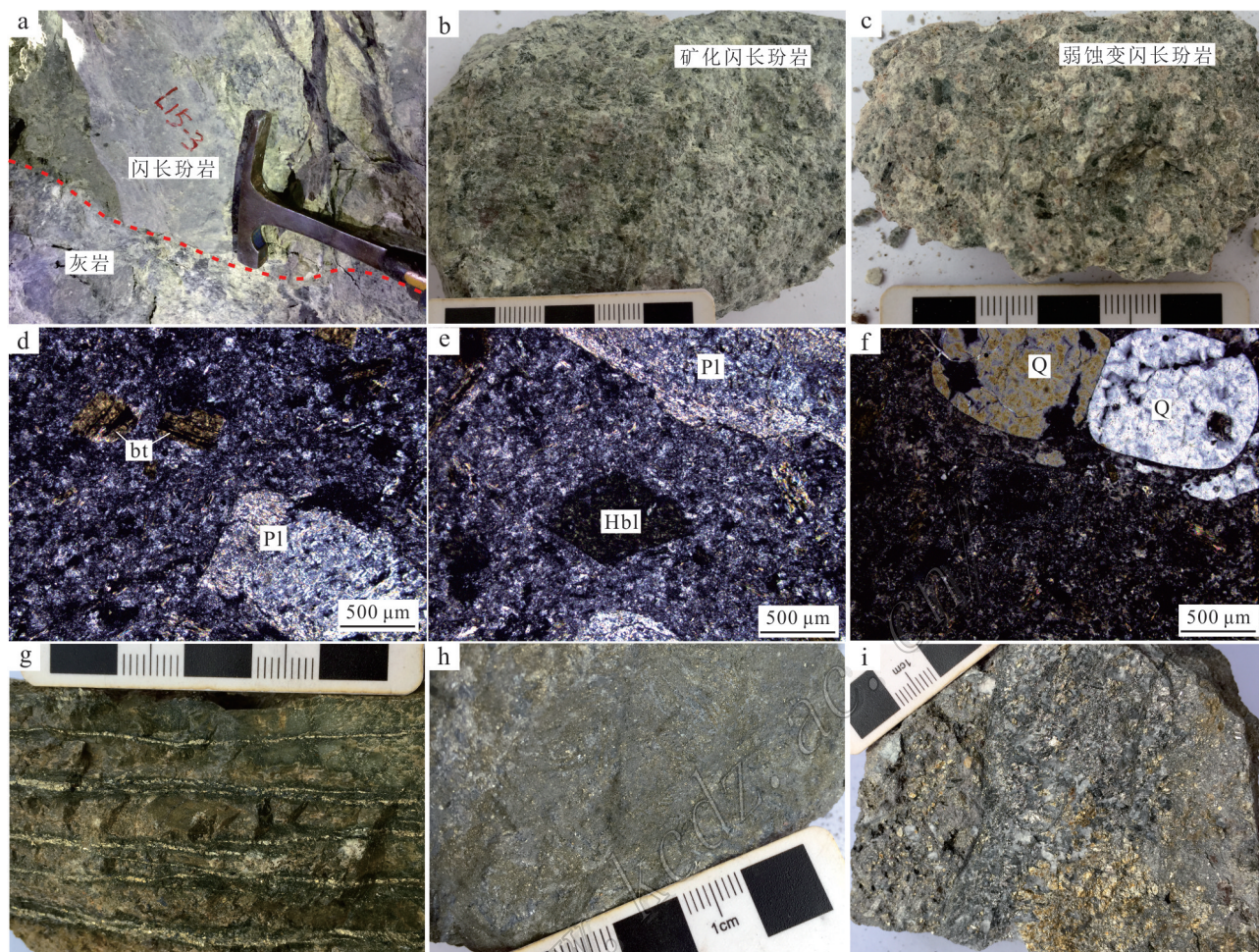


图3 闪长玢岩及主要矿石手标本及显微照片

a. 闪长玢岩野外露头; b. 矿化闪长玢岩手标本; c. 弱蚀变闪长玢岩手标本; d~f. 闪长玢岩镜下照片(正交偏光); g. 金-黄铁矿-毒砂脉状矿石; h. 黄铁矿-黄铜矿-方铅矿稠密浸染状矿石; i. 金-黄铁矿-毒砂-方铅矿块状矿石
Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Q—石英; Bt—黑云母

Fig. 3 Hand specimen and microphotographs of the diorite porphyrite and ores

a. Outcrop of diorite porphyrite; b. Hand specimen of mineralized diorite porphyrite; c. Hand specimen of weakly altered diorite porphyrite; d~f. Microscopic photos of diorite porphyrite (crossed nicols); g. Gold-pyrite-arsenopyrite vein type ore; h. pyrite-chalcopyrite-galena dense disseminated ore; i. Gold-pyrite-arsenopyrite-galena massive ore
Hbl—Hornblende; Pl—Plagioclase; Q—Quartz; Bt—Biotite

石英矿石,金-黄铁矿-辉钨矿-石英矿石,金-黄铁矿-黄铜矿-石英矿石。

3 采样及分析方法

用于锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素测定的 3 件原岩样品采自矿区西北角 2 矿区 3 号井五中段,其中矿化闪长玢岩(L0-1)采自五中段 0 号勘探线,走向 260°~275°,可见零星黄铁矿、闪锌矿矿化;蚀变未矿化闪长玢岩(L15-3)采自五中段 15 勘探线,岩石发育绿泥

绿帘石化,整体走向北西,倾向北东;弱蚀变闪长玢岩(L0-2)采自 0 号勘探线,在与碳酸盐岩接触部位发育轻微蚀变。用于主、微量分析的 8 件样品相应采自同位素样品附近,尽量避免受矿化蚀变影响。

锆石单矿物分选在河北区域地质矿产调查研究所实验室完成。原岩样品按常规方法粉碎成能够通过 200 目的筛网后,淘洗得到重砂,经磁选和重液分离得到锆石试样,在双目镜下挑选出锆石颗粒。锆石的制靶和透射光、反射光、阴极发光照相在北京铅年领航科技有限公司完成。样品测年和 Hf 同位素

工作于中国地质调查局天津地质调查中心完成。采用激光剥蚀多接收等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)进行微区原位锆石 U-Pb 同位素测定,激光器为美国 ESI 公司 NEW WAVE 193 nm FX,质谱仪为美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE。激光束斑直径为 35 μm ,频率 8~10 Hz,激光器能量密度 13~14 J/cm²,以氦气作为剥蚀物质的载气(Yuan et al., 2004),数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2010),U-Pb 谐和图及加权平均计算使用 Isoplot 程序的 4.15 版本完成(Ludwig, 2003)。采用 NEPTUNE(MCICPMS)系统进行 Hf 同位素测试工作, Lu-Hf 同位素测定时测点的选取位置与 U-Pb 同位素测定的位置重合或在其附近,选取锆石颗粒较大且环带清晰的样品进行测试,使用的激光器和质谱仪与前述锆石 U-Pb 测试一致。分析条件、仪器型号及流程见耿建珍等(2011)。在分析过程中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值根据同一测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算,采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Söderlund et al., 2004),球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 785, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.0336 (Bouvier et al., 2008)。亏损地幔模式年龄 (t_{DM}) 计算依据现今亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.0384, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.283 250 (Griffin et al., 2000)。计算锆石 Hf 同位素的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 时,采用 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.015 (Griffin et al., 2002)。

样品主微量元素测试在中国地质调查局天津地质调查中心完成,样品进行去皮去风化壳处理后,用破碎机粉碎,再用球磨机研磨至粉末状 (> 200 目),主量元素采用硼酸锂熔融消解、X 射线荧光光谱法 (XRF) 测试, FeO 应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析精度优于 1%。微量元素和稀土元素采用四酸消解、等离子质谱综合分析 (ICP-MS),分析精度优于 5%。

4 测定结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素

本次用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的样品包括矿化闪长玢岩 (L0-1)、蚀变未矿化闪长玢岩 (L15-3)、弱蚀变闪长玢岩 (L0-2),测试结果见表 1。

矿化及蚀变闪长玢岩锆石均呈自形长柱状、短柱状,表面光滑、干净,锆石具清晰的韵律环带。少数颗粒显示捕虏晶的核部和年轻的生长环带。测定

时,选取测点位置尽可能避开捕虏晶而选取岩浆环带部位,部分锆石 CL 图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄见图 4。

矿化闪长玢岩 (L0-1) 锆石长 80~200 μm ,长宽比为 1.5:1~3.5:1,锆石 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 170×10^{-6} ~ 416×10^{-6} 和 114×10^{-6} ~ 360×10^{-6} , Th/U 比值为 0.60~1.11,反映其为岩浆成因 (>0.1)。测得的 24 粒锆石的 24 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 241~245 Ma,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(243.0 \pm 1.0) \text{Ma}$ (95% 置信度), MSDW=0.18 (图 5)。

蚀变未矿化闪长玢岩 (L15-3) 锆石长 70~120 μm ,长宽比为 1:1~3:1,锆石 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 156×10^{-6} ~ 488×10^{-6} 和 99×10^{-6} ~ 419×10^{-6} , Th/U 比值介于 0.61~1.03,高于变质成因锆石 (一般小于 0.1),反映其为岩浆成因。测得的 24 粒锆石的 24 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 232~236 Ma,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(237.8 \pm 1.2) \text{Ma}$ (95% 置信度), MSDW=1.4 (图 5)。

弱蚀变闪长玢岩 (L0-2) 锆石 100~220 μm ,长宽比为 1.5:1~4:1,锆石 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 152×10^{-6} ~ 402×10^{-6} 和 121×10^{-6} ~ 389×10^{-6} , Th/U 比值介于 0.55~1.28,属岩浆成因。测得的 24 粒锆石的 24 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 233~242 Ma,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(233.8 \pm 0.9) \text{Ma}$ (95% 置信度), MSDW=0.26 (图 5)。

4.2 主、微量元素地球化学特征

本次对 8 件样品进行全岩主、微量元素测定,包括 5 件矿化闪长玢岩,3 件弱蚀变闪长玢岩。测定结果见表 2,3。全分析结果显示, $w(\text{SiO}_2)$ 介于 62.87%~65.33%, $w(\text{TiO}_2)$ 介于 0.42%~0.52%,显示低 Ti 特征。矿化闪长玢岩相对闪长玢岩具有高 $w(\text{CaO})$ (3.01%~3.28% 对比 0.87%~0.91%),高 $w(\text{K}_2\text{O})$ (4.32%~4.61% 对比 3.7%~4.35%),贫 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (15.50%~15.84% 对比 16.46%~16.76%) 的特征。这些样品均具有较高的烧失量 (LOI),矿化闪长玢岩烧失量介于 5.91%~6.25%,表明其经受了较为强烈的热液蚀变作用,弱蚀变闪长玢岩介于 3.7%~4.35%,同样受轻微蚀变作用影响。基于不活泼元素 Nb/Y 和 Zr/TiO₂ 的分类图解显示岩石属于闪长岩类,在 Co-Th 图解 (图 6) 中,显示岩石的高钾钙碱性和超钾质地球化学特征。

矿化闪长玢岩及弱蚀变闪长玢岩具有相似的原始地幔标准化微量元素图解和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线 (图 7),具有亏损高场强元素如 Nb、Ta、Ti、Ce,富集大离子亲石元素如 Rb、Ba 的特征。闪长玢岩稀土元素总量 ΣREE 为 164.7×10^{-6} ~ $271.8 \times$

表 1 老硐沟闪长玢岩锆石 U-Pb 同位素数据表

Table 1 U-Pb isotope composition of zircons in the diorite porphyrites of the Laodonggou gold deposit

测点 编号	$w(\text{B})/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						ρ	年龄/Ma					
	U	Th	Pb		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
L0-1 (矿化闪长玢岩)																	
1	222	159	9	0.71	0.0384	0.0004	0.2693	0.0052	0.0508	0.0009	0.52	243	2	242	5	232	42
2	248	164	10	0.66	0.0385	0.0004	0.2723	0.0053	0.0513	0.0009	0.53	244	3	245	5	253	42
3	232	221	10	0.95	0.0385	0.0004	0.2707	0.0053	0.0509	0.0009	0.51	244	2	243	5	238	43
4	219	244	10	1.11	0.0383	0.0004	0.2655	0.0050	0.0502	0.0009	0.54	243	2	239	4	205	41
5	246	236	11	0.96	0.0387	0.0004	0.2689	0.0046	0.0503	0.0008	0.59	245	2	242	4	211	36
6	329	282	14	0.86	0.0386	0.0004	0.2727	0.0042	0.0512	0.0007	0.65	244	2	245	4	252	32
7	320	252	13	0.79	0.0387	0.0004	0.2694	0.0047	0.0505	0.0008	0.59	245	2	242	4	217	37
8	170	114	7	0.68	0.0385	0.0004	0.2671	0.0079	0.0504	0.0014	0.36	243	3	240	7	212	66
9	216	178	9	0.82	0.0384	0.0004	0.2730	0.0058	0.0516	0.0010	0.47	243	2	245	5	267	46
10	198	166	8	0.84	0.0383	0.0004	0.2735	0.0056	0.0518	0.0010	0.49	242	2	246	5	278	44
11	326	258	13	0.79	0.0384	0.0004	0.2697	0.0042	0.0510	0.0007	0.64	243	2	242	4	241	33
12	343	255	14	0.74	0.0385	0.0004	0.2727	0.0041	0.0514	0.0007	0.65	243	2	245	4	257	32
13	416	312	17	0.75	0.0385	0.0004	0.2707	0.0041	0.0510	0.0007	0.66	244	2	243	4	241	31
14	309	255	13	0.82	0.0385	0.0004	0.2712	0.0044	0.0511	0.0008	0.62	243	2	244	4	246	34
15	306	247	13	0.81	0.0383	0.0004	0.2707	0.0045	0.0513	0.0008	0.59	242	2	243	4	253	35
16	310	223	13	0.72	0.0384	0.0004	0.2704	0.0045	0.0511	0.0008	0.59	243	2	243	4	247	35
17	239	210	10	0.88	0.0385	0.0004	0.2722	0.0050	0.0513	0.0009	0.55	243	2	244	4	256	39
18	339	360	15	1.06	0.0383	0.0004	0.2713	0.0043	0.0514	0.0008	0.61	242	2	244	4	260	34
19	320	244	14	0.76	0.0387	0.0004	0.2684	0.0043	0.0503	0.0007	0.60	245	2	241	4	207	34
20	328	242	14	0.74	0.0383	0.0004	0.2687	0.0041	0.0508	0.0007	0.64	243	2	242	4	233	32
21	363	246	15	0.68	0.0381	0.0004	0.2698	0.0042	0.0513	0.0007	0.64	241	2	243	4	254	32
22	343	259	14	0.76	0.0381	0.0004	0.2715	0.0047	0.0516	0.0008	0.56	241	2	244	4	270	36
23	378	229	16	0.61	0.0383	0.0004	0.2684	0.0040	0.0509	0.0007	0.64	242	2	241	4	235	32
24	408	246	17	0.60	0.0383	0.0004	0.2720	0.0041	0.0515	0.0007	0.64	242	2	244	4	263	32
L15-3 (蚀变未矿化闪长玢岩)																	
1	359	196	15	0.55	0.0379	0.0005	0.2692	0.0075	0.0515	0.0014	0.47	240	3	242	7	262	60
2	192	150	8	0.78	0.0379	0.0004	0.2662	0.0073	0.0510	0.0013	0.37	240	2	240	7	241	60
3	152	121	7	0.80	0.0381	0.0004	0.2692	0.0079	0.0512	0.0015	0.34	241	2	242	7	251	65
4	233	179	10	0.77	0.0381	0.0004	0.2678	0.0058	0.0509	0.0010	0.48	241	3	241	5	237	46
5	391	315	16	0.81	0.0378	0.0004	0.2671	0.0042	0.0512	0.0007	0.63	239	2	240	4	251	33
6	215	147	9	0.68	0.0376	0.0004	0.2686	0.0065	0.0518	0.0012	0.43	238	2	242	6	276	53
7	361	309	15	0.86	0.0379	0.0004	0.2683	0.0043	0.0513	0.0007	0.65	240	3	241	4	255	32
8	222	220	10	0.99	0.0378	0.0004	0.2674	0.0053	0.0513	0.0010	0.53	239	3	241	5	253	43
9	171	170	7	0.99	0.0383	0.0004	0.2710	0.0056	0.0514	0.0010	0.49	242	2	244	5	257	46
10	196	164	8	0.84	0.0380	0.0004	0.2658	0.0058	0.0507	0.0010	0.48	241	2	239	5	227	47
11	245	221	10	0.91	0.0377	0.0004	0.2672	0.0051	0.0513	0.0009	0.52	239	2	240	5	256	42
12	280	358	13	1.28	0.0375	0.0004	0.2652	0.0042	0.0513	0.0007	0.63	237	2	239	4	255	33

注:rho—误差相关系数。

续表 1

Continued Table 1

测点 编号	$w(\text{B})/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						ρ	年龄/Ma					
	U	Th	Pb		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
L15-3 (蚀变未矿化闪长玢岩)																	
13	264	262	11	0.99	0.0383	0.0004	0.2714	0.0045	0.0514	0.0008	0.61	242	2	244	4	261	35
14	402	342	17	0.85	0.0379	0.0004	0.2711	0.0042	0.0518	0.0007	0.65	240	2	244	4	277	31
15	272	348	12	1.28	0.0374	0.0004	0.2646	0.0044	0.0514	0.0008	0.59	236	2	238	4	258	35
16	228	223	10	0.98	0.0373	0.0004	0.2670	0.0050	0.0519	0.0009	0.52	236	2	240	5	280	40
17	318	357	14	1.12	0.0369	0.0004	0.2650	0.0042	0.0521	0.0008	0.62	233	2	239	4	292	33
18	303	217	12	0.72	0.0369	0.0004	0.2652	0.0044	0.0521	0.0008	0.61	234	2	239	4	291	34
19	269	190	11	0.71	0.0371	0.0004	0.2676	0.0046	0.0523	0.0008	0.59	235	2	241	4	300	35
20	358	302	15	0.84	0.0376	0.0004	0.2674	0.0040	0.0516	0.0007	0.66	238	2	241	4	270	31
21	265	197	11	0.74	0.0371	0.0004	0.2633	0.0045	0.0515	0.0008	0.59	235	2	237	4	262	36
22	393	389	17	0.99	0.0369	0.0004	0.2632	0.0039	0.0518	0.0007	0.65	233	2	237	4	276	31
23	273	209	12	0.77	0.0376	0.0004	0.2666	0.0054	0.0515	0.0009	0.50	238	2	240	5	261	41
24	321	325	14	1.01	0.0371	0.0004	0.2680	0.0043	0.0524	0.0008	0.60	235	2	241	4	303	34
L0-2(弱蚀变闪长玢岩)																	
1	345	353	15	1.02	0.0371	0.0004	0.2609	0.0042	0.0510	0.0008	0.63	235	2	235	4	241	34
2	225	162	9	0.72	0.0371	0.0004	0.2583	0.0048	0.0505	0.0009	0.56	235	2	233	4	220	40
3	290	228	12	0.79	0.0370	0.0004	0.2596	0.0047	0.0509	0.0009	0.55	234	2	234	4	236	40
4	488	404	21	0.83	0.0372	0.0004	0.2614	0.0041	0.0510	0.0007	0.63	235	2	236	4	239	32
5	236	187	10	0.79	0.0370	0.0004	0.2599	0.0057	0.0509	0.0010	0.48	234	2	235	5	238	46
6	343	276	14	0.80	0.0370	0.0004	0.2605	0.0044	0.0511	0.0008	0.61	234	2	235	4	244	35
7	406	419	18	1.03	0.0368	0.0004	0.2600	0.0039	0.0512	0.0007	0.65	233	2	235	4	250	32
8	486	317	20	0.65	0.0373	0.0004	0.2646	0.0038	0.0515	0.0007	0.68	236	2	238	3	264	30
9	347	275	14	0.79	0.0373	0.0004	0.2623	0.0044	0.0510	0.0008	0.61	236	2	237	4	243	35
10	156	99	6	0.64	0.0370	0.0004	0.2603	0.0073	0.0511	0.0014	0.37	234	2	235	7	244	63
11	281	224	12	0.80	0.0372	0.0004	0.2611	0.0050	0.0508	0.0009	0.54	236	2	236	4	234	40
12	343	239	14	0.70	0.0372	0.0004	0.2614	0.0048	0.0510	0.0009	0.55	235	2	236	4	241	39
13	458	303	18	0.66	0.0369	0.0004	0.2580	0.0040	0.0507	0.0007	0.65	234	2	233	4	226	32
14	347	249	14	0.72	0.0368	0.0004	0.2595	0.0049	0.0511	0.0009	0.55	233	2	234	4	246	40
15	437	264	17	0.61	0.0368	0.0004	0.2608	0.0046	0.0514	0.0008	0.58	233	2	235	4	258	36
16	295	205	12	0.70	0.0366	0.0004	0.2600	0.0049	0.0515	0.0009	0.54	232	2	235	4	263	41
17	264	238	11	0.90	0.0367	0.0004	0.2621	0.0050	0.0518	0.0009	0.51	232	2	236	5	275	41
18	432	351	18	0.81	0.0368	0.0004	0.2606	0.0040	0.0513	0.0007	0.65	233	2	235	4	256	32
19	338	215	14	0.64	0.0366	0.0004	0.2588	0.0042	0.0512	0.0008	0.62	232	2	234	4	251	34
20	286	223	12	0.78	0.0367	0.0004	0.2586	0.0047	0.0512	0.0009	0.54	232	2	234	4	248	40
21	351	267	14	0.76	0.0369	0.0004	0.2598	0.0044	0.0510	0.0008	0.59	234	2	234	4	241	36
22	404	370	18	0.92	0.0368	0.0004	0.2605	0.0041	0.0513	0.0007	0.62	233	2	235	4	253	33
23	405	293	17	0.72	0.0369	0.0004	0.2569	0.0043	0.0505	0.0008	0.58	233	2	232	4	219	36
24	384	284	16	0.74	0.0369	0.0004	0.2610	0.0051	0.0513	0.0009	0.51	234	2	236	5	254	42

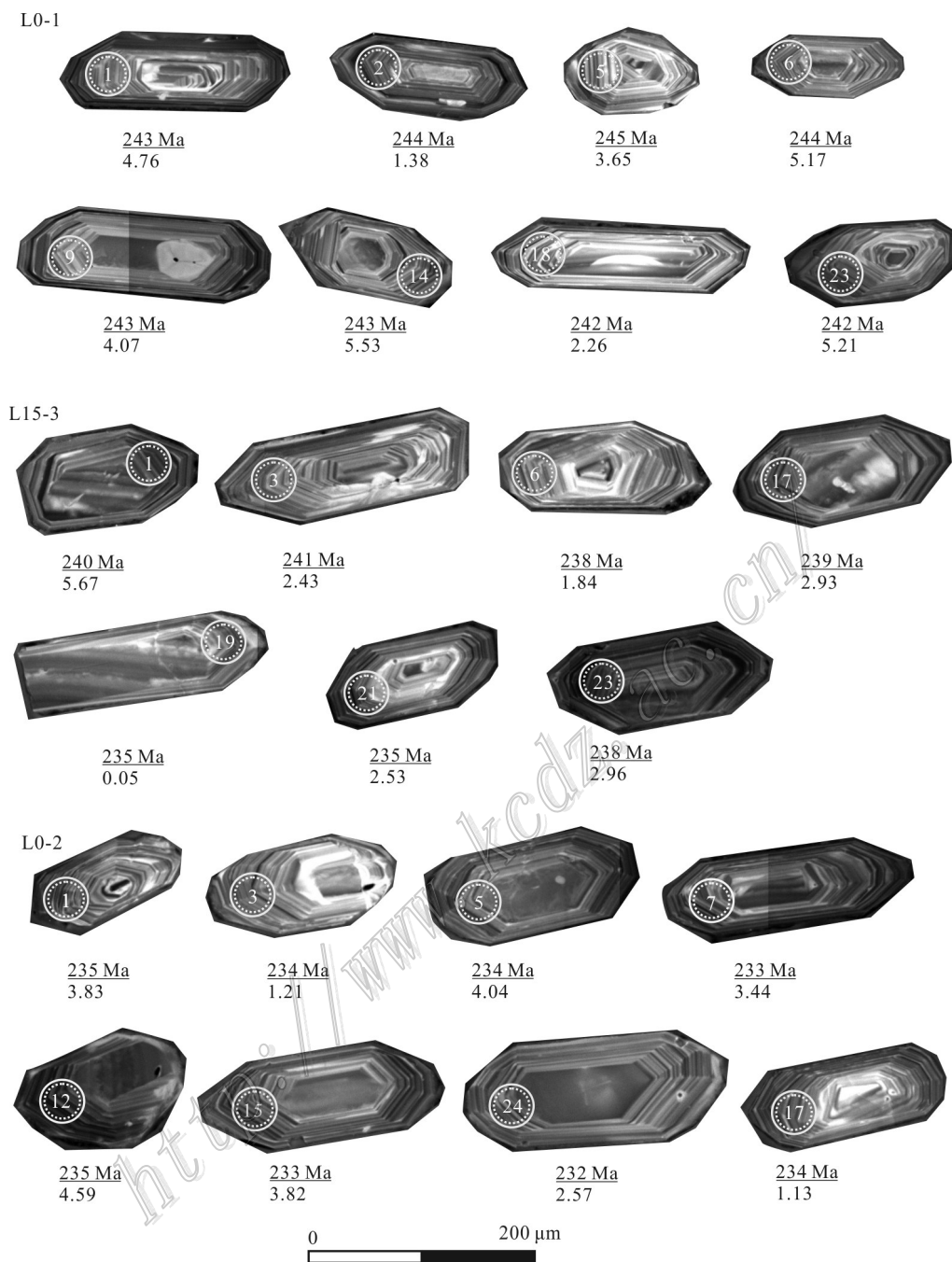


图 4 老硐沟闪长玢岩部分锆石的阴极发光图、测点位置及编号
实线为年龄点,虚线为 Hf 测点,锆石下方附年龄及 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值

Fig. 4 CL images of selected zircon grains from the diorite porphyrite of the Laodonggou gold-polymetallic deposit, showing the analyzed spot

Full line is age point, dotted line is Hf point, and age and $\epsilon_{Hf}(t)$ are listed under the zircon

10^{-6} , LREE/HREE 为 6.4~8.7, $(\text{La}/\text{Sm})_N=3.64\sim4.49$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=3.97\sim5.17$, 整体来说闪长玢岩表现出轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻稀土元素分馏程度与重稀土元素分馏程度均较高(图 7b)。闪长玢岩

具有轻微负 Eu 异常。而 Ce 基本无异常($\delta\text{Ce}=0.93\sim1.00$)。

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

Lu-Hf 同位素测定的样品与 U-Pb 同位素测定的

样品相同,测定数据见表4。

矿化闪长玢岩(L0-1)24个测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.282 630~0.282 781, 与之对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于

0.21~5.53, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 介于 917~1254 Ma。蚀变未矿化闪长玢岩(L15-3)具有与矿化闪长玢岩相似的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 644~0.282 770), 其

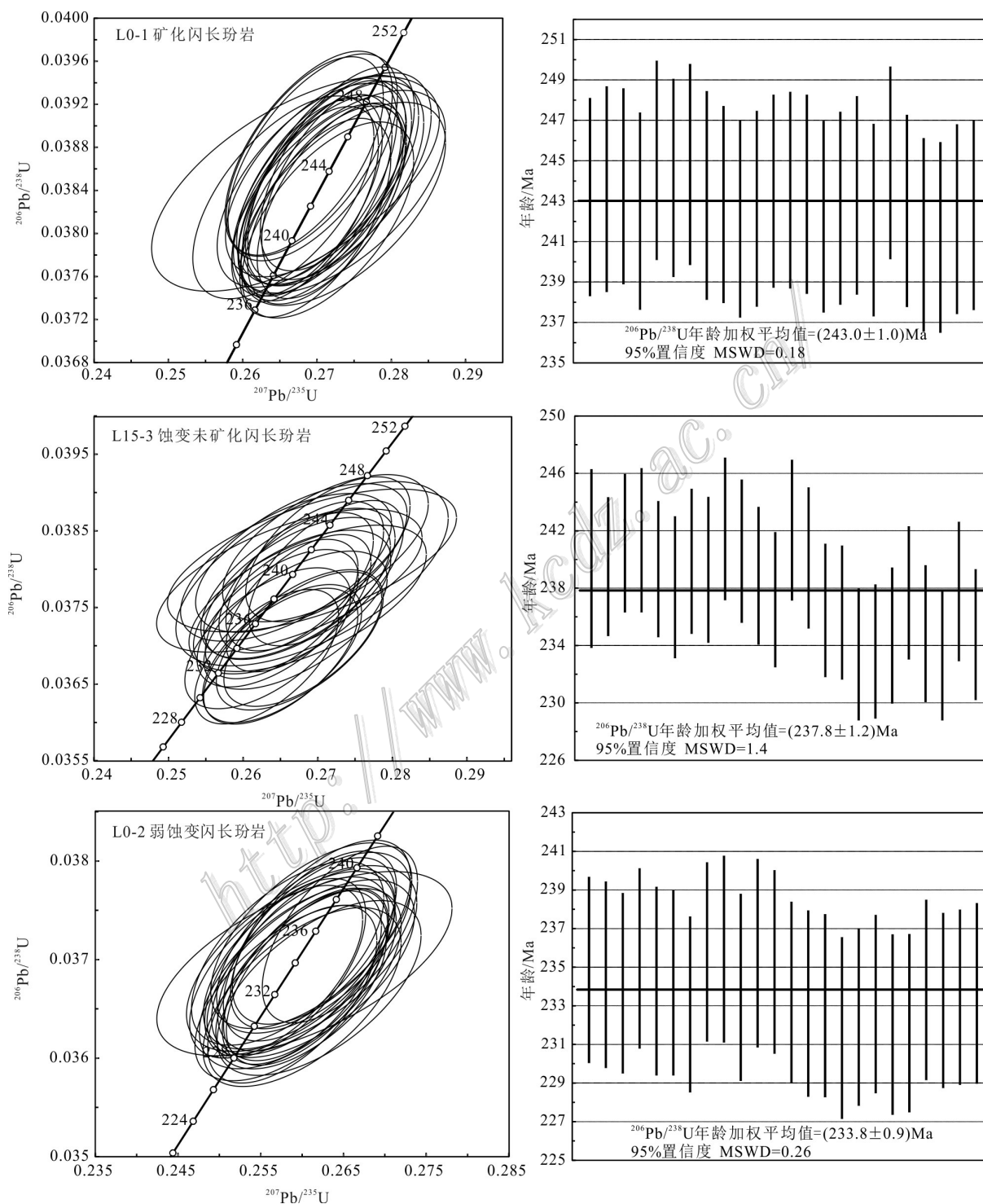


图5 老硐沟闪长玢岩锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams and the weighted mean ages of the diorite porphyrite from the Laodonggou gold-polymetallic deposit

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于0.49~5.03,二阶段模式年龄(T_{DM2})在943 Ma到1228 Ma之间。弱蚀变闪长玢岩16个测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 632~0.282 786), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(0.05~5.67)及二阶段模式年龄(t_{DM2})(905~1258 Ma)与上述闪长玢岩样品差别不大(图8)。

5 讨论

5.1 蚀变对于全岩地球化学特征的影响

由于老硐沟闪长玢岩与矿化时空联系密切,因此热液蚀变的影响大,发育绿帘绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化等蚀变,岩石烧失量高(>3%)(表2;图3d~f)。因此,使用全岩地球化学数据时有必要探讨蚀变作用的影响。一般来说,主量元素中P、Ti、Mn,高场强元素、过渡元素Cr、Co、Ni、V、Sc及稀土元素在热液蚀变作用中受影响程度较小(Winchester et al., 1976; Hastie et al., 2007)。而Ca、Na、K等主量元素、大离子亲石元素如Sr、Ba、Rb等受热液蚀变作用的影响较大(Rollinson, 1993)。

通过对比矿化闪长玢岩(L0-1-1~L0-1-5)及轻微蚀变未矿化闪长玢岩(L0-2-1~L0-2-3)样品的地球化学数据,矿化闪长玢岩相对弱蚀变闪长玢岩具有较低的 K_2O 、 Al_2O_3 含量和较高的CaO、MnO含量(表2),在微量元素蛛网图中,Rb、Ba点相对分散(图7a),可能由热液蚀变作用引起,尤其是斜长石、单斜辉石、绢云母、绿泥石等矿物的蚀变及分解(Rollinson, 1993)。对于 P_2O_5 、 TiO_2 、MgO,其含量相对均一,蚀变作用的影响较小(表2)。高场强元素如Nb、

Ta、Zr、Hf及稀土元素等在微量元素蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化图解中表现平滑一致,受后期蚀变作用影响较小(图7)。因此在讨论过程中要尽量回避受热液蚀变作用影响较大的元素。

5.2 岩石成因及岩浆源区

闪长玢岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为62.87%~65.33%,显示中性,与闪长岩成分相当(图6a),地球化学特征显示其属于高钾钙碱性或超钾质系列(图6b)。岩石具有斑状结构,斑晶主要为斜长石、角闪石、少量黑云母,表明岩浆演化过程中经历了分离结晶作用。La-La/Sm图解同样显示分离结晶的演化趋势(图9a),由于稀土元素配分曲线中Eu负异常不明显($\delta\text{Ce}=0.73\sim0.85$),说明斜长石的分离结晶作用不占主导作用,而角闪石在岩石形成过程中经历了较显著的分离结晶作用(图9b)。

岩浆在形成上升过程中会不同程度受到大陆地壳改造,从而影响微量元素含量。闪长玢岩显示较强的Nb、Ta、Ti亏损(图7a),这可能是:①岩浆源区部分熔融过程中残留富集高场强元素矿物(如金红石、钛铁矿);②岩浆上涌过程中受地壳混染;③俯冲流体交代(Wilson, 1989; 赵玉锁等, 2012; Cheng et al., 2014)。岩石中未见金红石、钛铁矿等矿物,同时金红石的残留会引起Zr、Hf的亏损,这与闪长玢岩实际地球化学特征不符(赵玉锁等, 2012)。而早二叠世晚期北山地区已进入陆内演化阶段,可以排除俯冲流体交代的影响,因此Nb、Ta、Ti异常为闪长玢岩岩浆在上升侵位过程中受到一定程度地壳混染影响的结果。

表2 老硐沟闪长玢岩的主量元素($w(\text{B})/\%$)

组分	L0-1-1	L0-1-2	L0-1-3	L0-1-4	L0-1-5	L0-2-1	L0-2-2	L0-2-3
SiO_2	63.16	62.91	62.87	63.03	63.38	64.65	65.24	65.33
Al_2O_3	15.84	15.76	15.75	15.73	15.5	16.76	16.46	16.47
Fe_2O_3	0.98	1.01	1.09	1.1	1.13	1.13	1.57	1.08
FeO	1.95	1.99	1.97	1.96	1.81	2.16	1.79	2.05
CaO	3.01	3.28	3.17	3.13	3.2	0.91	0.76	0.87
MgO	3.28	3.38	3.32	3.2	3.27	3.81	3.23	3.77
K_2O	4.55	4.32	4.38	4.48	4.61	5.1	5.93	4.76
Na_2O	0.33	0.27	0.27	0.29	0.29	0.29	0.26	0.3
TiO_2	0.42	0.43	0.43	0.42	0.42	0.49	0.52	0.48
P_2O_5	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.31	0.33	0.3
MnO	0.066	0.068	0.07	0.07	0.065	0.023	0.021	0.027
灼失(LOI)	5.98	6.15	6.25	6.15	5.91	4.13	3.7	4.35

表3 老硐沟闪长玢岩的微量元素($w(B)/10^{-6}$)Table 3 Trace element composition ($w(B)/10^{-6}$) of the diorite porphyrite from the Laodonggou gold deposit

组分	L0-1-1	L0-1-2	L0-1-3	L0-1-4	L0-1-5	L0-2-1	L0-2-2	L0-2-3
Pb	33.8	34.7	36.3	36.8	32.5	35.5	55.1	45.9
Cr	55.4	56.5	56.4	61.7	53.6	41.1	49	46.2
Ni	30.4	30.8	31.8	36.1	31.4	21.7	21.1	24.6
Co	8.04	8.37	9.24	8.58	8.22	7.48	5.25	8.22
Rb	130	126	129	132	128	147	267	131
Cs	5.63	5.95	5.53	5.50	6.54	6.03	6.84	5.75
Sr	318	279	292	319	308	295	367	286
Ba	1380	941	1060	1230	1260	1870	2090	1810
V	41.0	41.1	43.2	42.2	41.4	51.7	59.4	49.1
Sc	5.83	5.76	6.26	6.11	5.57	6.42	8.06	6.54
Nb	7.99	7.71	8.15	8.12	7.91	8.30	9.07	8.51
Ta	0.69	0.64	0.69	0.69	0.68	0.70	0.76	0.73
Zr	168	159	186	192	241	195	229	196
Hf	5.04	4.86	5.62	5.73	6.83	5.86	6.79	5.78
Ga	17.8	17.5	17.7	18.2	17.7	18.9	21.1	18.4
U	4.47	4.59	4.25	4.08	4.71	3.95	4.79	3.69
Th	16.8	15.9	17.4	17.8	16.5	21.1	24.1	21.4
La	39.5	38.1	38.9	37.7	42.5	57.1	56.4	31.6
Ce	79.7	77.0	79.1	77.1	82.0	113.0	110.0	67.3
Pr	9.82	9.56	9.85	9.70	10.20	13.80	13.6	8.13
Nd	36.6	35.9	37.4	34.1	37.5	47.6	46.8	28.3
Sm	6.69	6.69	6.82	6.68	6.11	8.65	8.69	5.61
Eu	1.68	1.55	1.61	1.66	1.67	2.16	2.25	1.51
Gd	5.96	5.81	5.96	5.98	5.97	7.50	7.75	5.09
Tb	0.57	0.58	0.60	0.60	0.59	0.71	0.82	0.52
Dy	2.53	2.55	2.69	2.70	2.59	2.94	3.65	2.33
Ho	0.48	0.48	0.50	0.50	0.48	0.55	0.70	0.45
Er	1.28	1.28	1.35	1.35	1.29	1.45	1.90	1.24
Tm	0.18	0.17	0.18	0.18	0.16	0.19	0.26	0.18
Yb	1.05	1.03	1.12	1.12	1.12	1.20	1.54	1.06
Lu	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.18	0.23	0.17
Y	11.7	11.7	12.3	12.4	11.6	13.1	17.2	11.2
ΣREE	197.9	192.6	198.6	191.9	204.0	270.1	271.8	164.7
LREE	174.0	168.8	173.7	166.9	180.0	242.3	237.7	142.5
HREE	23.9	23.8	24.9	25.0	24.0	27.8	34.1	22.2
LREE/HREE	7.3	7.1	7.0	6.7	7.5	8.7	7.0	6.4
La _N /Yb _N	27.0	26.5	24.9	24.1	27.2	34.1	26.3	21.4
δEu	0.80	0.74	0.75	0.79	0.83	0.80	0.82	0.85
δCe	0.96	0.96	0.97	0.96	0.93	0.96	0.94	1.00
La/Sm	3.81	3.68	3.68	3.64	4.49	4.26	4.19	3.64
Gd/Yb	4.70	4.67	4.40	4.42	4.41	5.17	4.16	3.97

注:比值单位为1。

锆石 Hf 同位素是示踪岩浆源区、地壳演化、壳幔相互作用的有效指标(吴福元等, 2007)。本文中闪长玢岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本一致, 总体介于 0.05~5.67,

全部落于亏损地幔演化曲线及球粒陨石均一储库线之间(图 8), 说明闪长玢岩主要起源于新生下地壳(Kinny et al., 2003), 而 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的不均一性不是由部

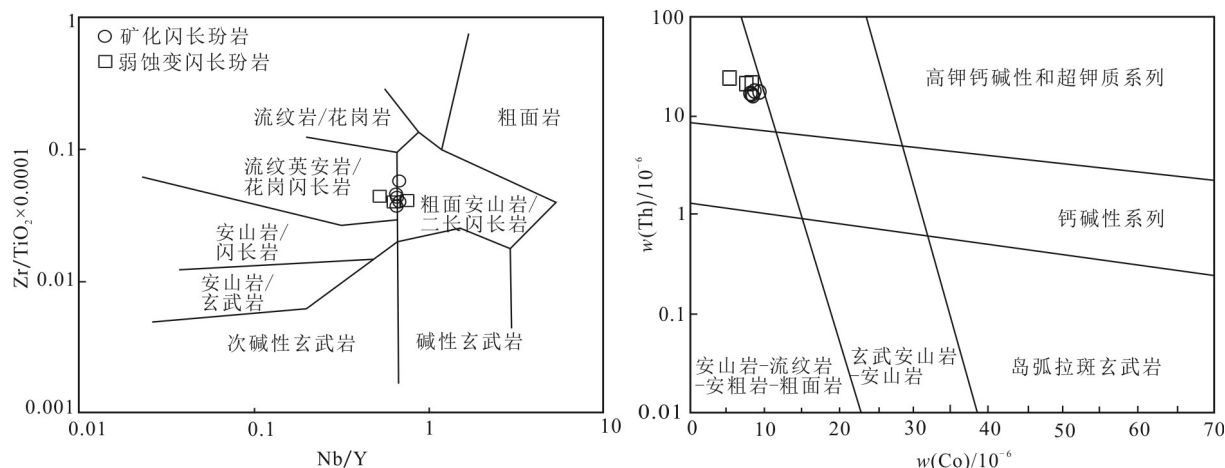
图6 老硐沟闪长玢岩 Nb/Y-Zr/TiO₂图解(a, 据 Winchester et al., 1976)和 Co-Th 图解(b, 据 Hastie et al., 2007)

Fig. 6 Nb/Y-Zr/TiO₂ (a, after Winchester et al., 1976) and Co-Th (b, after Hastie et al., 2007) diagrams of the diorite porphyrite from the Laodonggou gold-polymetallic deposit

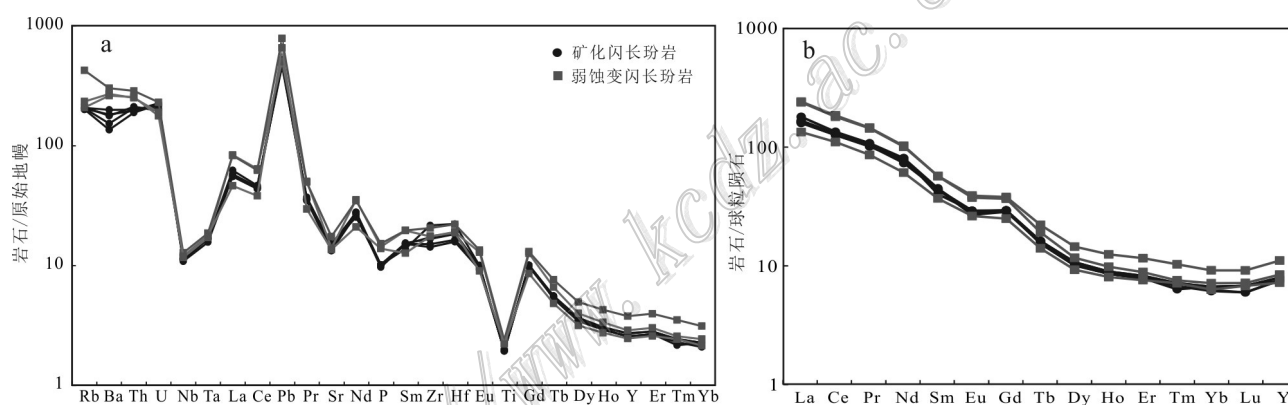


图7 老硐沟闪长玢岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分曲线(b)(据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the diorite porphyrite from the Laodonggou gold deposit (after Sun et al., 1989)

分熔融或分离结晶作用形成,而是由具放射性成因的幔源 Hf 和较少放射性成因壳缘 Hf 混合所致 (Bolhar et al., 2008),说明源区受到壳源物质的混染。闪长玢岩二阶段模式年龄(t_{DM2})介于 905~1258 Ma,表明岩浆可能起源于中新元古代地壳的部分熔融。本次研究的矿化闪长玢岩及不同蚀变程度的闪长玢岩具有相似的地球化学特征,除了个别活泼元素,球粒陨石标准化微量元素图解及原始地幔标准化稀土元素配分曲线均表现一致的趋势(图7),结合其相似的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(图8),暗示矿化闪长玢岩及蚀变闪长玢岩具有相同的岩浆源区。

5.3 成岩成矿时代及构造背景

根据闪长玢岩与矿化的关系及其蚀变程度选取

了3件样品用于同位素年龄测定,得到矿化闪长玢岩(L0-1)锆石 U-Pb 年龄(243.0 ± 1.0)Ma,蚀变未矿化闪长玢岩(L15-3)锆石 U-Pb 年龄(237.8 ± 1.2)Ma,弱蚀变闪长玢岩(L0-2)锆石 U-Pb 年龄(233.8 ± 0.9)Ma,说明闪长玢岩岩浆活动持续超过 9 Ma,并发育多幕侵位。矿区发育多种矿体类型,包括原生热液脉型 Au-Pb-Ag-As-Sb 矿化,矽卡岩型 Au-Cu-Fe 矿化及后期氧化-淋滤型富矿,不同矿化之间的成因联系,尤其是热液脉型与矽卡岩型矿化的关系仍需进一步确定。在闪长玢岩中也发现原生金矿化,因此成矿与闪长玢岩有一定的成因联系。

晚石炭世至早二叠世,北山地区各大洋盆陆续闭合。贺峰等(2004)在甜水井识别出一套铝质 A 型

表4 老硐沟闪长玢岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

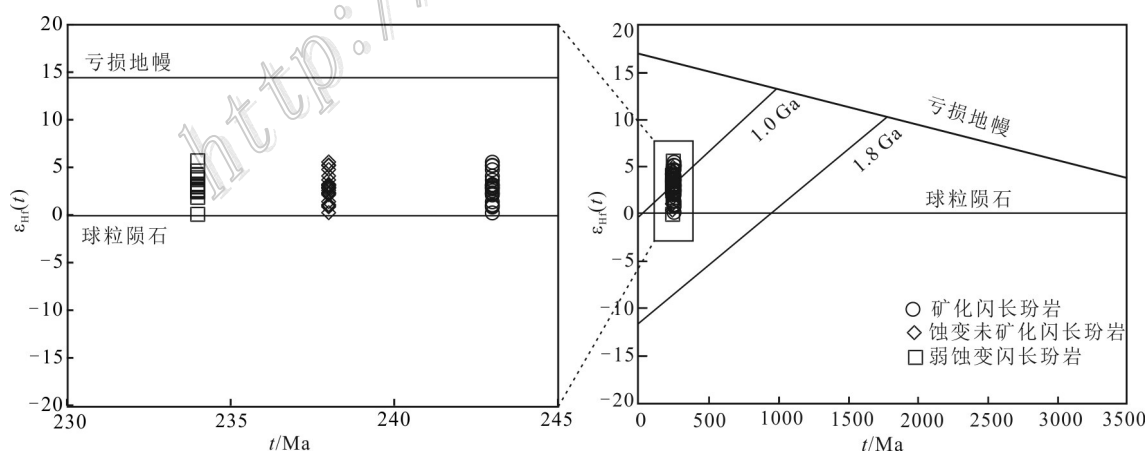
Table 4 In-situ zircon Lu-Hf isotope data of diorite porphyrite from the Laodonggou gold deposit

测点编号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄	2 σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}2}/\text{Ma}$
L0-1 (矿化闪长玢岩)												
1	243	2	0.0171	0.0002	0.0006	0	0.282758	0.000019	-0.49	4.76	693	966
2	244	3	0.0178	0.0002	0.0007	0	0.282663	0.000019	-3.87	1.38	827	1181
3	244	2	0.0203	0.0001	0.0007	0	0.282647	0.000020	-4.41	0.83	850	1216
4	243	2	0.0142	0.0001	0.0005	0	0.282683	0.000017	-3.16	2.08	797	1135
5	245	2	0.0195	0.0001	0.0007	0	0.282726	0.000020	-1.62	3.65	740	1038
6	244	2	0.0181	0.0001	0.0007	0	0.282769	0.000018	-0.09	5.17	678	940
7	245	2	0.0210	0.0001	0.0008	0	0.282710	0.000022	-2.19	3.07	763	1075
8	243	3	0.0270	0.0007	0.0009	0	0.282688	0.000023	-2.97	2.22	798	1127
9	243	2	0.0206	0.0001	0.0007	0	0.282740	0.000021	-1.14	4.07	721	1009
10	242	2	0.0244	0.0002	0.0009	0	0.282715	0.000020	-2.01	3.17	758	1066
11	243	2	0.0192	0.0001	0.0007	0	0.282715	0.000020	-2.03	3.19	756	1065
12	243	2	0.0217	0.0002	0.0008	0	0.282690	0.000018	-2.91	2.31	792	1122
13	244	2	0.0194	0.0002	0.0007	0	0.282701	0.000019	-2.51	2.73	774	1095
14	243	2	0.0222	0.0003	0.0008	0	0.282781	0.000018	-0.31	5.53	664	917
15	242	2	0.0237	0.0001	0.0008	0	0.282653	0.000021	-4.22	0.96	845	1206
16	243	2	0.0144	0.0001	0.0005	0	0.282704	0.000019	-2.41	2.84	767	1087
17	243	2	0.0291	0.0001	0.0010	0	0.282705	0.000022	-2.36	2.83	774	1088
18	242	2	0.0229	0.0001	0.0008	0	0.282689	0.000020	-2.93	2.26	794	1124
19	245	2	0.0193	0.0003	0.0007	0	0.282695	0.000018	-2.74	2.53	783	1109
20	243	2	0.0222	0.0001	0.0008	0	0.282655	0.000017	-4.15	1.05	841	1201
21	241	2	0.0189	0.0002	0.0006	0	0.282712	0.000018	-2.11	3.09	757	1070
22	241	2	0.0257	0.0002	0.0009	0	0.282708	0.000018	-2.26	2.90	768	1082
23	242	2	0.0294	0.0001	0.0010	0	0.282773	0.000017	0.05	5.21	679	936
24	242	2	0.0162	0.0002	0.0006	0	0.282630	0.000019	-5.02	0.21	870	1254
L15-3 (蚀变未矿化闪长玢岩)												
1	240	3	0.0202	0.0002	0.0007	0	0.282786	0.000019	0.51	5.67	655	905
2	240	2	0.0160	0.0001	0.0006	0	0.282712	0.000016	-2.14	3.04	757	1072
3	241	2	0.0251	0.0001	0.0008	0	0.282695	0.000017	-2.74	2.43	786	1112
4	241	3	0.0295	0.0005	0.0010	0	0.282731	0.000017	-1.44	3.71	738	1031
5	239	2	0.0176	0.0001	0.0007	0	0.282757	0.000015	-0.53	4.62	695	971
6	238	2	0.0270	0.0004	0.0009	0	0.282680	0.000017	-3.25	1.84	808	1147
7	240	3	0.0224	0.0003	0.0008	0	0.282699	0.000017	-2.59	2.55	779	1103
8	239	3	0.0199	0.0001	0.0007	0	0.282701	0.000019	-2.51	2.64	774	1097
17	233	2	0.0195	0.0003	0.0007	0	0.282713	0.000018	-2.09	2.93	758	1074
18	234	2	0.0220	0.0001	0.0008	0	0.282748	0.000019	-0.85	4.17	710	996
19	235	2	0.0259	0.0001	0.0009	0	0.282632	0.000017	-4.96	0.05	876	1258
20	238	2	0.0243	0.0001	0.0008	0	0.282719	0.000019	-1.87	3.22	752	1059
21	235	2	0.0217	0.0002	0.0008	0	0.282701	0.000019	-2.51	2.53	776	1101
22	233	2	0.0257	0.0002	0.0009	0	0.282721	0.000018	-1.79	3.20	749	1057
23	238	2	0.0281	0.0001	0.0009	0	0.282712	0.000016	-2.11	2.96	763	1076
24	235	2	0.0279	0.0004	0.0009	0	0.282741	0.000016	-1.11	3.91	723	1013

续表 4

Continued Table 4

测点编号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}2}/\text{Ma}$
L0-2 (弱蚀变闪长玢岩)												
1	235	2	0.0209	0.0001	0.0008	0	0.282738	0.000018	-1.20	3.83	724	1018
2	235	2	0.0174	0.0001	0.0006	0	0.282706	0.000020	-2.33	2.72	766	1088
3	234	2	0.0313	0.0002	0.0011	0	0.282665	0.000021	-3.77	1.21	833	1184
4	235	2	0.0185	0.0000	0.0007	0	0.282755	0.000018	-0.60	4.47	698	978
5	234	2	0.0189	0.0002	0.0007	0	0.282744	0.000019	-1.00	4.04	715	1005
6	234	2	0.0181	0.0001	0.0007	0	0.282689	0.000018	-2.94	2.10	790	1128
7	233	2	0.0302	0.0002	0.0011	0	0.282729	0.000018	-1.52	3.44	742	1042
8	236	2	0.0191	0.0001	0.0007	0	0.282770	0.000018	-0.05	5.03	676	943
9	236	2	0.0192	0.0002	0.0007	0	0.282761	0.000020	-0.40	4.68	690	965
10	234	2	0.0159	0.0000	0.0006	0	0.282689	0.000018	-2.92	2.13	788	1126
11	236	2	0.0189	0.0001	0.0007	0	0.282680	0.000016	-3.26	1.82	804	1147
12	235	2	0.0219	0.0001	0.0008	0	0.282759	0.000017	-0.45	4.59	695	970
13	234	2	0.0258	0.0001	0.0009	0	0.282710	0.000015	-2.18	2.82	765	1082
14	233	2	0.0241	0.0001	0.0009	0	0.282741	0.000018	-1.08	3.91	721	1012
15	233	2	0.0196	0.0003	0.0007	0	0.282738	0.000016	-1.19	3.82	722	1017
16	232	2	0.0209	0.0002	0.0008	0	0.282752	0.000015	-0.69	4.29	703	987
17	232	2	0.0164	0.0001	0.0006	0	0.282703	0.000015	-2.45	2.57	769	1097
18	233	2	0.0203	0.0003	0.0007	0	0.282733	0.000019	-1.37	3.65	729	1029
19	232	2	0.0171	0.0001	0.0006	0	0.282644	0.000015	-4.52	0.49	851	1228
20	232	2	0.0241	0.0003	0.0008	0	0.282732	0.000019	-1.43	3.55	734	1034
21	234	2	0.0194	0.0001	0.0006	0	0.282721	0.000016	-1.82	3.22	746	1056
22	233	2	0.0285	0.0003	0.0009	0	0.282702	0.000016	-2.49	2.49	778	1102
23	233	2	0.0253	0.0002	0.0009	0	0.282736	0.000018	-1.26	3.73	728	1023
24	234	2	0.0229	0.0004	0.0008	0	0.282662	0.000016	-3.88	1.13	830	1189

图8 老硐沟闪长玢岩 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解Fig.8 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of the diorite porphyrite from the Laodonggou gold deposit

花岗岩,获得锆石 U-Pb 年龄 271 Ma;Li 等(2013)通过研究柳园地区早二叠世高钾钙碱性花岗岩,认为

其就位于后碰撞伸展背景,表明在早二叠世末期,西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块及塔里木板块最终拼

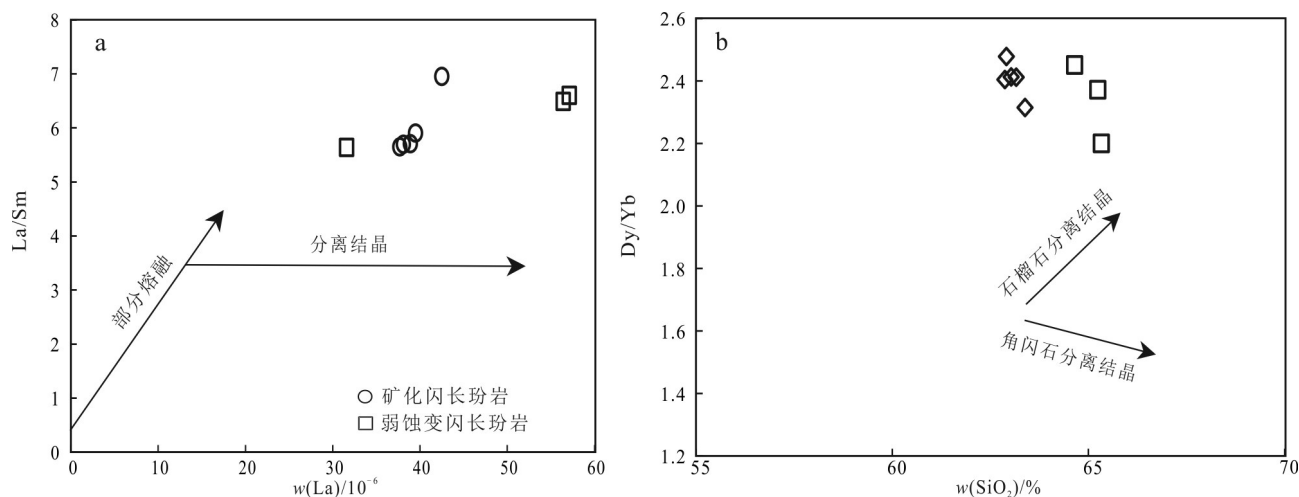


图9 老洞沟闪长玢岩 La-Lu/Sm 图解(a)及 SiO_2 -Dy/Yb 图解(b)(据 Davidson et al., 2007)

Fig. 9 La-Lu/Sm diagram (a) and SiO_2 -Dy/Yb diagram (b) of the diorite porphyry from the Laodonggou gold deposit (after Davidson et al., 2007)

合在一起,北山地区进入陆内演化阶段(Xiao et al., 2003; 童英等, 2010; Song et al., 2013)。三叠纪北山地区整体处于伸展构造体制,发育准铝质-弱过铝质的钙碱性-高钾钙碱性-弱碱性花岗岩至碱性花岗岩,年龄集中于 230~240 Ma(苗来成等, 2014)。

综上,在早-中三叠世,受造山后地壳伸展减薄影响,形成的基性岩浆底侵导致新生下地壳部分熔融形成母岩浆。岩浆在演化过程中发生角闪石、斜长石等矿物的分离结晶作用,随着区域性断裂的持续活动,提供了岩浆上涌的通道及容矿空间,岩浆沿区域性断裂上升并受围岩物质混染与改造,侵位于地壳浅部构造薄弱地段,形成闪长玢岩和岩浆热液型矿体。

6 结 论

(1) 闪长玢岩富 K, 贫 Ti, 显示高钾钙碱性和超钾质地球化学特征。矿化闪长玢岩、蚀变未矿化闪长玢岩、弱蚀变闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄分别为 $(243.0 \pm 1.0) \text{ Ma}$ 、 $(237.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ 和 $(233.8 \pm 0.9) \text{ Ma}$, 说明闪长玢岩岩浆活动持续至少 9 Ma, 并发育多幕侵入活动, Hf 同位素特征显示多幕侵位的闪长玢岩具有相同的岩浆源区。

(2) 中生代受造山后地壳伸展减薄影响, 基性岩浆底侵带来的热导致新生地壳的部分熔融形成母

岩浆, 经历分离结晶过程, 并受到地壳物质的混染与改造, 侵位于地壳浅部形成闪长玢岩和金多金属矿体。

References

- Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87-110.
- Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, Palin J M, Woodhead J D and Cole J W. 2002. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3-4): 312-324.
- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48-57.
- Cheng Y H, Teng X J, Li Y F, Li M and Zhang T F. 2014. Early Permian East-Ujimqin mafic-ultramafic and granitic rocks from the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt, North China: Origin, chronology, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96: 361-373.
- Davidson J, Turner S, Handley H, Macpherson C and Dosseto A. 2007. Amphibole "sponge" in arc crust[J]? *Geology*, 35: 787-790.
- Du Y L, Yin X M, Feng Z H and Yin Y. 2009. Mesozoic structural-magmatic activities and mineralization in Beishan Region[J]. *Northwest Geology*, 42(2): 48-54(in Chinese with English abstract).

- Geng J Z, Li H K, Zhang J, Zhou H Y and Li H M. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10):1508-1513(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Belousova E, Jackson S E, van Achterbergh E, Shee S R and Pearson N J. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3-4): 237-269.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A and Mitchell S F. 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram[J]. *Journal of Petrology*, 48: 2341-2357.
- He F, Xu L Q, Su H W and Li X R. 2004. Characteristics and tectonic setting of Middle-Permian A-type granites in Tianshuijing area, West of Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 37(3): 7-14(in Chinese with English abstract).
- He S P, Zhou H W, Ren, B S, Yao W G and Fu L P. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. *Northwest Geology*, 38(3): 6-15(in Chinese with English abstract).
- Helo C, Hegner E, Kröner A, Badarch G, Tomurtogoo O, Windley B F and Dulski P. 2007. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 227(3-4): 236-257.
- Hou Q Y, Wang Z, Liu J B, Wang J and Li D P. 2012. Geochemistry characteristics and SHRIMP dating of Yueyashan ophiolite in Beishan Orogen[J]. *Geoscience*, 26(5): 1008-1018(in Chinese with English abstract).
- Huang D H and Wang B L. 1997. Ore-forming characteristics of Laodonggou Oxidized-leached type gold deposit in Ejinaqi[J]. *Journey of Precious Metallic Geology*, 6(2): 93-100(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science*, 91: 181-193.
- Jahn B M., Windley B, Natal'in B and Dobretsov N L. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 599-603.
- Johnson C L, Amory J A, Zinniker D, Lamb M A, Graham S A, Affolter M and Badarch G. 2008. Sedimentary response to arc-continent collision, Permian, southern Mongolia[J]. *Special Papers-Geological Society of America*, 436: 363-390.
- Kinny P D and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327-341.
- Kroner A, Windley B F, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn B M, Gruschka S, Khain E V, Demoux A and Wingate M T D. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield[J]. *Memoirs-Geological Society of America*, 200: 181-209.
- Lamb M A, Badarch G, Navratil T and Poier R. 2008. Structural and geochronologic data from the Shin Jinst area, eastern Gobi Altai, Mongolia: Implications for Phanerozoic intracontinental deformation in Asia[J]. *Tectonophysics*, 451: 312-330.
- Li S, Wilde S A and Wang T. 2013. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 179: 99-119.
- Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- Ludwig K R. 2003. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Isoplot*, 3: 1-70.
- Miao L C, Zhu M S and Zhang F Q. 2014. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area[J]. *Geology in China*, 41(4): 1190-1204(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Jiang S H, Bai D M, Hu P, Zhao Y Y, Zhang W Y and Liu Y. 2007. Metallogenic studies and prospecting orientation in central and eastern segments along China-Mongolia border[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-574(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Jiang S H, Bai D M, Wang X L, Su X X, Li C J, Liu Y and Zhao X M. 2002. Metallogenic studies and ore prospecting in the conjunction area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region(Beishan Mt.), Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-408(in Chinese with English abstract).
- Niu W C, Yin H T, Duan L F, Zhao Z L, Zhang G Z, Ren B F and Zhang Y. 2020. Geochemical characteristics, Zircon U-Pb age of SSZ ophiolite in the Baiheshan area of the Beishan orogenic belt, Inner Mongolia and its indication for the evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(9): 1317-1329 (in Chinese with English abstract).
- Pan Z L, Wang S, Qiu Z, Zhang H, Zhang J L, Tian F Y, Li Q Z and Ji H. 2017. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Early Carboniferous Hongliuyuan volcanic rocks in Xianshuigou, Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 40(2):99-108(in Chinese with English abstract).
- Qian J P, Fu Y J, Zhou Y N, Li J Q, Chang Y D, Li F H, Wei Z Z and Su T. 2018. Analysis of the metallogenic structure system and the regularities of tectonic ore control of the Laodonggou gold polymetallic mining area, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(6): 1046-1063(in Chinese with English abstract).

- Ren B F, Ren Y W, Niu W C, Duan L F, Sun L X, Li M, Tian J, Duan X L and Zhang Y Q. 2019. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the volcanic rocks from Queershan Group in the Hazudongshan area of Beishan, Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Earth Science*, 44(1): 298-311(in Chinese with English abstract).
- Ren B S, He S P, Yao W G and Fu L P. 2001. Rb-Sr isotope age of Niuquanzi ophiolite and its tectonic significance in Beishan district, Gansu[J]. *Northwest Geology*, 34(2): 21-27(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. Harlow, UK, Longman. 1-352.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D and Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324.
- Song D, Xiao W, Han C, Tian Z H and Wang Z M. 2013. Provenance of metasedimentary rocks from the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data[J]. *Gondwana Research*, 24(3-4): 1127-1151.
- Sun L X, Zhang J H, Ren B F, Niu W C, Ren Y W and Zhang K. 2017. Geochemical characteristics and U-Pb age of Baiyunshan ophiolite mélangé in the Beishan orogenic belt and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 131-147(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- Tong Y, Wang T, Hong D W, Han B F, Zhang J J and Shi X J. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619-641(in Chinese with English abstract).
- Wang S, Zhang K, Song B, Li S, Li J, Yu J and Bu J. 2018. Detrital zircon U-Pb geochronology from Greywackes in the Niuquanzi Ophiolitic Mélange, Beishan area, NW China: Provenance and tectonic implications[J]. *Journal of Earth Science*, 29(1): 103-113.
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis[M]. London: Unwim Hyman. 1-366.
- Winchester J and Floyd P. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28: 459-469.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31-47.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, Han C M, Qu J F, Zhang J E, Ao S J, Guo Q Q, Cleven N R, Lin S F, Shan Y H and Li J L. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 310(10): 1553-1594.
- Xiao W, Windley B F, Hao J and Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6).
- Xin H T, Niu W C, Tian J, Teng X J and Duan X L. 2020. Spatio-temporal structure of Beishan orogenic belt and evolution of Paleo-Asian Ocean, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(9): 1297-1316(in Chinese with English Abstract).
- Xu X Y, He S P, Wang H L, Chen J L, Zhang E P and Feng Y M. 2008. An introduction to the geology of the northwest Territories[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1-347(in Chinese with English abstract).
- Yang F L, Zou Y X, Cao X, Yang L, Ma G and Gao J. 2017. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating for the quartz diorite in the south Pengboshan of Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 40(2): 109-118(in Chinese with English abstract).
- Yang H Q, Li Y, Zhao G B, Li W Y, Wang X H, Jiang H B, Tan W J and Sun N Y. 2010. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite[J]. *Northwest Geology*, 43(1): 26-36(in Chinese with English abstract).
- Yang H Q, Li Y, Zhao G B, Wang Y H, Yang J G, Li W M, Jiang H B, Tan W J and Zhang K C. 2009. Stratigraphic correlation and its significance of Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia Join area[J]. *Northwest Geology*, 42(4): 60-75(in Chinese with English abstract).
- Yu J Y, Li X M, Wang G Q, Wu P and Yan Q J. 2012. Zircon U-Pb ages of Huitongshan and Zhangfangshan ophiolite in Beishan of Gansu-Inner Mongolia border area and their significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2038-2045(in Chinese with English abstract).
- Yuan H, Gao S, Liu X, Li H, Gunther 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.
- Zhao P S, Fu L, Gao F, Li W J and He Z F. 2016. Geological characteristics and prospecting potential analysis of Laodonggu Wu deposit, Inner Mongolia[J]. *Western Resources*, 6: 83-85(in Chinese).
- Zhao Y S, Yang L Q, Chen Y F, Qing M, Yan J P, Ge L S, Guo X D and Wang J R. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite porphyry associated with the Jinchang Cu-Au deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 451-467(in Chinese with English abstract).
- Zong K, Klemd R, Yuan Y, He Z Y, Guo J L, Shi X L, Liu Y S, Hu Z C and Zhang Z M. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32-48.

- Zuo G C, Liu Y K and Liu C Y. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1: 1-15(in Chinese with English abstract).
- Zuo G, Zhang S, He G and Zhang Y. 1991. Plate tectonic characteristics during the Early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China[J]. *Tectonophysics*, 188(3-4): 385-392.
- ### 附中文参考文献
- 杜玉良, 殷先明, 冯治汉, 殷勇. 2009. 北山地区中生代构造-岩浆活动与成矿[J]. *西北地质*, 42(2): 48-54.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LAMC-ICP-MS 测定[J]. *地质通报*, 30(10): 1508-1513.
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 姚文光, 傅力浦. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. *西北地质*, 38(3): 6-15.
- 贺锋, 许立权, 苏宏伟, 李新仁. 2004. 内蒙古西部甜水井地区中二叠世 A 型花岗岩[J]. *西北地质*, 37(3): 7-14.
- 侯青叶, 王忠, 刘金宝, 王瑾, 李大鹏. 2012. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年[J]. *现代地质*, 26(5): 1008-1018.
- 黄典豪, 王宝林. 1997. 额济纳旗老硐沟氧化-淋滤型金矿床成矿特征[J]. *贵金属地质*, 6(2): 93-100.
- 苗来成, 朱明师, 张福勤. 2014. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. *中国地质*, 41(4): 1190-1204.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 王新亮, 苏新旭, 李景春, 刘妍, 赵省民. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社. 1-408.
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 白大明, 胡朋, 赵元艺, 张万益, 刘妍. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社. 1-574.
- 牛文超, 辛后田, 段连峰, 赵泽霖, 张国震, 任邦方, 张永. 2020. 内蒙古北山造山带百合山 SSZ 型蛇绿岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其对古亚洲洋演化的指示[J]. *地质通报*, 39(9): 1317-1329.
- 潘志龙, 王硕, 邱振, 张欢, 张金龙, 田粉英, 李庆喆, 季虹. 2017. 内蒙古北山地区咸水沟一带早石炭世红柳园组火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. *地质调查与研究*, 40(02): 99-108.
- 钱建平, 符有江, 周永宁, 李佳奇, 常德才, 李凤豪, 韦振兆, 苏特. 2018. 内蒙古额济纳旗老硐沟金多金属矿区成矿构造系统解析和构造控矿规律[J]. *大地构造与成矿学*, 42(6): 1046-1063.
- 任邦方, 任云伟, 牛文超, 段连峰, 孙立新, 李敏, 田健, 段霄龙, 张永清. 2019. 内蒙古北山哈珠东山泥盆系雀儿山群火山岩锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 44(1): 298-311.
- 任秉琛, 何世平, 姚文光, 傅力浦. 2001. 甘肃北山牛圈子蛇绿岩铷-锶同位素年龄及其大地构造意义[J]. *西北地质*, 34(2): 21-27.
- 孙立新, 张家辉, 任邦方, 牛文超, 任云伟, 张阔. 2017. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征, 时代及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 36(2): 131-147.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊. 2010. 王超北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 619-641.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185-220.
- 辛后田, 牛文超, 田健, 滕学建, 段霄龙. 2020. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J]. *地质通报*, 39(9): 1297-1316.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 张二鹏, 冯益民. 2008. 中国西北部地质概论[M]. 北京: 科学出版社. 1-347.
- 杨富林, 邹运鑫, 曹霞, 杨亮, 马刚, 高鉴. 2017. 内蒙古北山地区蓬勃山南石英闪长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J]. *地质调查与研究*, 40(2): 109-118.
- 杨合群, 李英, 赵国斌, 李文渊, 王小红, 姜寒冰, 谭文娟, 孙南一. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. *西北地质*, 43(1): 26-36.
- 杨合群, 李英, 赵国斌, 王永和, 杨建国, 李文明, 姜寒冰, 谭文娟, 张开春. 2009. 新疆—甘肃—内蒙古衔接区地层对比及其意义[J]. *西北地质*, 42(4): 60-75.
- 余吉远, 李向民, 王国强, 武鹏, 闫巧娟. 2012. 甘肃北山地区辉铜山和帐房山蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质通报*, 31(12): 2038-2045.
- 赵鹏彬, 付垒, 高峰, 李武杰, 贺争锋. 2016. 内蒙古老硐沟矿床地质特征与找矿潜力分析[J]. *西部资源*, 6: 83-85.
- 赵玉锁, 杨立强, 陈永福, 卿敏, 阎家盼, 葛良胜, 郭晓东, 王景瑞. 2012. 黑龙江金厂铜金矿床闪长玢岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学[J]. *岩石学报*, 28(2): 451-467.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘蒙北山地区构造格局及演化[J]. *甘肃地质学报*, 1: 1-15.