

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.4.2

东准噶尔北缘老山口铁-铜-金矿床古生代岩浆岩 锆石 U-Pb 年代学、氧逸度特征及地质意义

梁培^{1,2}, 陈华勇^{1,*}, 吴超^{1,2}, 刘振江³

1. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 新疆地质矿产开发局 第四地质大队, 新疆 阿勒泰 831140

LIANG Pei^{1,2}, CHEN Huayong^{1,*}, WU Chao^{1,2}, LIU Zhenjiang³

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. No.4 Geological Party of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Altay 836500, China

LIANG Pei, CHEN Huayong, WU Chao, et al. Geochemistry, geochronology and oxygen fugacity of volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou Fe-Cu-Au deposit in the northern margin of East Junggar, NW China. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(5): 096-118

Abstract: The Laoshankou deposit is an important Fe-Cu-Au deposit in the northern margin of the East Junggar, NW China. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon constrains the timing of crystallization of Ordovician basaltic andesite (~449 Ma), Ordovician andesite (~447 Ma), Devonian volcanic rocks (393-376 Ma), monzodiorite (~379 Ma), biotite diorites (~379 Ma), quartz syenites (~376 Ma), fine-grained diorite (~370 Ma), alkali granite (~330 Ma) and coarse-grained diorite porphyry (~310 Ma). Zircon dating indicates three periods of magmatism in Laoshankou: 450-440 Ma, ~390-370 Ma and 330-310 Ma. The magmatism for the first two periods occurred in a subduction-related island arc setting; the magmatism for the last one occurred in a post-collision or inplate extensive setting. Pre-, syn- and post-mineralization volcanic and intrusive rocks are divided based on the Fe-Cu-Au mineralization timing. Syn-mineralization intrusions in Laoshankou have relatively high $(Eu/Eu^*)_N$, $(Ce/Ce^*)_N$ and Ce^{IV}/Ce^{III} values of 0.13-0.86, 1.14-445.92 and 33.34-1165.04, respectively, indicating Fe-Cu-Au mineralization was associated with high oxygen fugacity magmatism.

Key words: northern margin of East Junggar; Laoshankou Fe-Cu-Au deposit; zircon U-Pb geochronology; zircon trace elements; oxygen fugacity

摘要:老山口矿床位于新疆东准噶尔北缘,是区域内重要的铁-铜-金矿床。矿区内岩浆岩发育广泛,对其中的奥陶纪玄武安山岩(约 449 Ma)、奥陶纪安山岩(约 447 Ma)、泥盆纪火山岩(393~376 Ma)、二长闪长岩(约 379 Ma)、黑云母闪长岩(约 379 Ma)、石英正长岩(约 376 Ma)、细粒闪长岩(约 370 Ma)、石炭纪碱性花岗岩(约 330 Ma)和粗粒闪长玢岩(约 310 Ma)进行了成岩年代学的统计和测试,结果表明老山口矿床存在 3 期岩浆活动:450~440 Ma、约 390~370 Ma 以及 330~310 Ma。结合区域构造演化可知,其中 450~440 Ma 和 390~370 Ma 的岩浆活动形成于不同时期俯冲相关的岛弧环境,而 330~310 Ma 的岩浆活动则形成于后碰撞-板内伸

收稿日期:2018-02-08;修回日期:2018-04-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB440802);中国科学院交叉学科项目(Y433131A07);中国科学院创新团队国际合作项目(20140491534)

作者简介:梁培(1990—),女,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:liangpei@gig.ac.cn;liangpei1990@gmail.com

*通讯作者简介:陈华勇(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事矿床学研究。E-mail:huayongchen@gig.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2018,25(5)

展环境。根据铜-金矿化的时代,可将矿区内的岩浆岩分为3期:成矿前、同成矿及成矿后。老山口同成矿期岩浆岩(泥盆纪火山岩、二长闪长岩、闪长玢岩和黑云母闪长岩)具有相对较高的 $(Eu/Eu^*)_N$ 、 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 值,分别为0.13~0.86、1.14~445.92和33.34~1165.04,说明铁-铜-金矿化与高氧逸度的岩浆活动有关。

关键词:东准噶尔北缘;老山口铁-铜-金矿床;锆石 U-Pb 年代学;锆石微量元素;氧逸度

中图分类号:P618.31;P618.41;P618.51;P597.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2018)05-0096-23

东准噶尔北缘在构造上位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位,以额尔齐斯深大断裂为界,北临阿尔泰山带南缘,是新疆北部一个重要的晚古生代铁、铜、金多金属成矿带^[1]。目前,这一区域已发现一系列铁、铜、金多金属矿床,包括喀拉通克岩浆铜镍硫化物矿床^[2]、乔夏哈拉铁-铜-金矿床^[3]、老山口铁-铜-金矿床^[4]、哈腊苏铜矿床^[5]、玉勒肯哈腊苏铜矿床^[6]、喀拉萨依铜矿床^[7]、希勒库都克铜-钼矿床^[8]、索尔库都克铜-钼矿床^[9]、科克库都克铜-金矿床^[10]、阿克塔斯金矿床^[11]等。而铁、铜、金矿化与区域内广泛发育的古生代岩浆活动具有密切的关系,因此对于区域内古生代大规模的岩浆演化事件的研究必将有助于该区成矿规律的理解和进一步的找矿勘探。前人大量的岩浆岩和地质构造研究认为,东准噶尔北缘古生代岩浆演化与多金属成矿及古亚洲洋形成和演化都有着密切关联,该区域先后经历了板块俯冲、板块碰撞和板内拉伸过程^[12-14]。但是对于区域内岩浆活动时限及岩浆-成矿相关性等的研究仍存在一定争议^[14-16]。

老山口矿床是东准噶尔北缘重要的铁-铜-金矿床^[4],其铁、铜、金多金属矿化与晚泥盆世闪长玢岩具有明显的时空关系^[14,17]。矿区内同时还发育一系列缺乏铁、铜、金矿化的岩浆岩。前人对老山口矿区内主要侵入岩体(石英闪长岩、正长岩、黑云母闪长岩)的年代学、形成环境和岩体成因开展了一系列研究工作,并获得初步认识^[14,18]。而对于同成矿期岩体的识别以及同成矿期岩体与非同成矿期岩体的差异性研究却非常薄弱。为此,笔者在老山口矿区进行了详细踏勘,并采集了10种不同岩性岩体的岩石样品进行锆石 U-Pb 定年以及锆石微量元素分析,较好地限定了老山口矿区乃至东准噶尔北缘岩浆活动的时限,分析了构造岩浆演化的规律,并探讨岩浆氧逸度特征与铁、铜、金矿化的关系。

1 地质背景

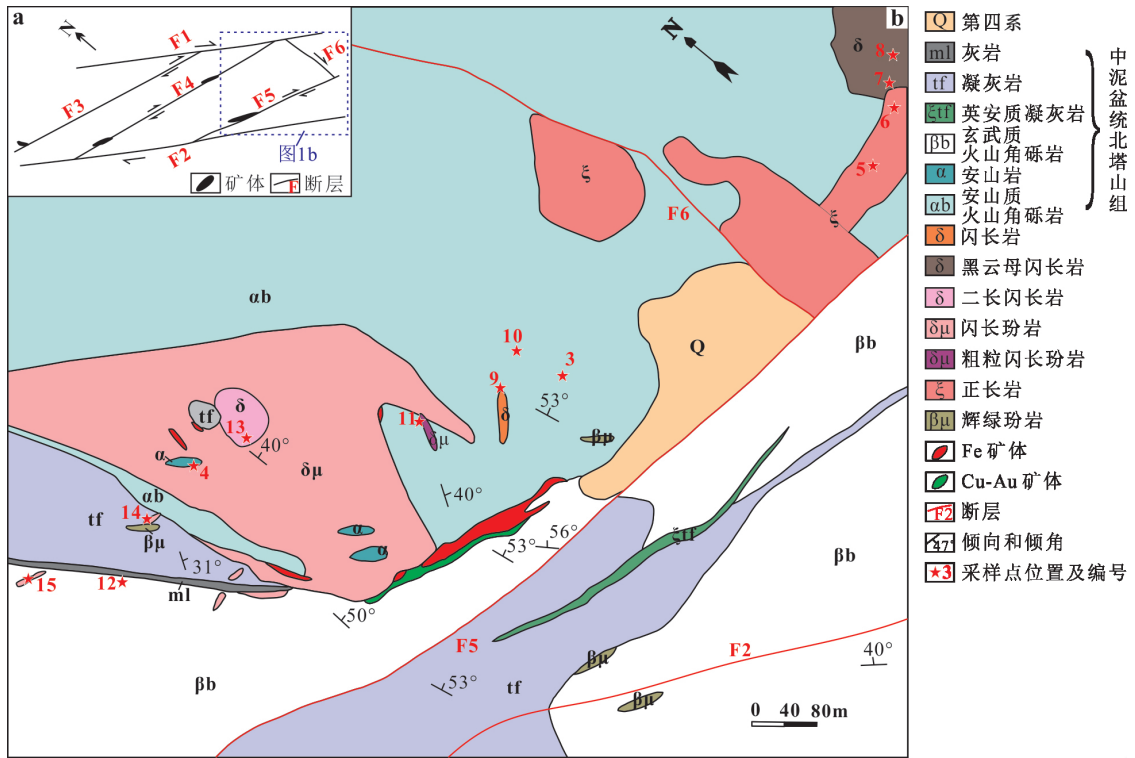
1.1 区域地质

东准噶尔北缘位于哈萨克斯坦-准噶尔板块北

部的杜拉特晚古生代岛弧带。区域出露地层主要有上奥陶统加波萨尔组浅海相灰岩夹砂岩,下泥盆统托让格库都克组海相火山岩夹灰岩,中泥盆统北塔山组基性-中基性火山碎屑岩夹灰岩,中泥盆统蕴都喀拉组浅海相-近海陆相火山碎屑岩夹砂岩,上泥盆统卡希翁组浅海相-陆相砂岩、粉砂岩夹火山岩,上泥盆统江孜尔库都克组火山碎屑岩-陆相碎屑岩,下石炭统南明水组陆相-浅海相火山岩-沉积岩,上石炭统巴塔玛依内山组陆相火山岩夹细砂岩,二叠纪扎河坝组陆相火山碎屑岩-细砂岩。地层总体呈NW向展布^[4,17]。其中中泥盆统北塔山组和下石炭统南明水组为本区主要的赋矿地层。区域构造呈NW-NNW向,与地层展布方向相同,以NW向的额尔齐斯大断裂和NNW向的富蕴大断裂为主。区域侵入岩分布广泛,主要分布于扎河坝西北和额尔齐斯-富蕴大断裂的交汇处。侵入岩主要包含晚古生代长英质岩浆岩和铁镁质-超铁镁质岩浆岩。前者包括390~370 Ma与古准噶尔洋向南俯冲有关的钙碱性岩浆岩以及330~280 Ma与后碰撞-后造山伸展有关的钙碱性-碱性岩浆岩^[5,14,19-21]。后者包括500~480 Ma与大洋中脊环境相关的扎河坝西北铁镁质-超铁镁质岩浆岩^[22-23]和298~287 Ma与板内伸展环境有关的喀拉通克铁镁质-超铁镁质岩浆岩^[2,24]。

1.2 矿床地质

老山口矿床位于准噶尔北缘,富蕴大断裂带西侧,是区域内重要的铁-铜-金矿床^[4]。矿区内出露地层主要有中泥盆统北塔山组及下泥盆统托让格库都克组(图1b)。其中北塔山组为赋矿地层,自上而下可分为3个岩性段:上段为主要的赋矿部位,岩石组合为玄武岩、安山岩、玄武安山岩、玄武质火山角砾岩、安山质火山角砾岩和灰岩、粉砂岩夹层;中段为凝灰岩、粉砂岩、砂岩夹硅质条带;下段出露较少,主要为硅质岩。下泥盆统托让格库都克组则主要为浅海相陆源沉积碎屑岩夹中基性火山碎屑岩和熔岩。柴凤梅等^[25]利用LA-ICP-MS锆石 U-Pb方法测得的老山口地区北塔山组辉石斑晶玄武岩的年龄为 (380.5 ± 2.0) Ma。



F1—富蕴大断裂;F2—山前大断裂;F3、F4、F5—未命名的次级断裂。五角星为采样位置,对应样品编号如下:1(未在图中)—TS-002,TS-003; 2(未在图中)—TS-007;3—LS-022;4—LS-025;5—LS-030,LS-031;6—LS-032;7—LS-036;8—LS-039;9—LS14-007;10—LS14-010;11—LS14-011;12—LS14-017;13—LS14-019,LS14-020;14—LS14-023;15—LS14-026;16(未在图中)—LS14-028;17(未在图中)—LS14-070。

图1 老山口矿区构造简图(a)^[26]及老山口矿区地质简图(b)

Fig.1 Simplified lineament map (adapted from [26]) (a) and geological map (b) of the Laoshankou Fe-Cu-Au deposit

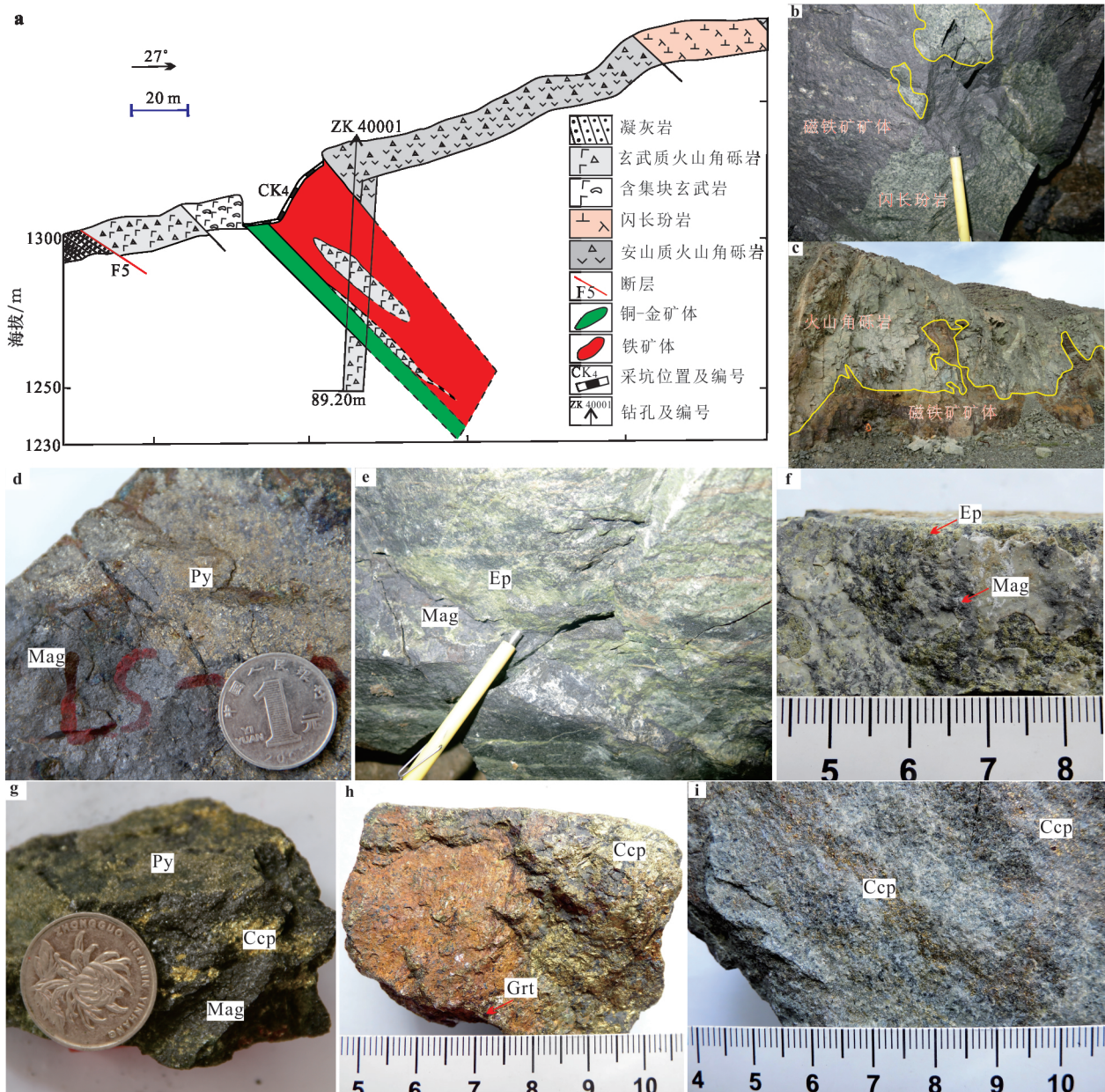
矿区内构造以NW向大断裂为主,包括北部的富蕴大断裂(F1)和南部的山前大断裂(F2)。它们与N向和W向展布的次级断裂一起在矿区内形成一系列菱形块状体(图1a)^[26]。N向展布的次级断裂F6和W向展布的次级断裂F5与老山口矿床中的岩浆岩及矿体具有明显的空间关系,次级断裂明显切断凝灰岩、正长岩等岩体及部分矿体。

矿区内出露面积较大的侵入岩主要为二长闪长岩、闪长玢岩、黑云母闪长岩及石英正长岩。此外还有少量后期侵入岩体,包括细粒闪长岩、碱性花岗岩及粗粒闪长玢岩脉(图1b)。其中闪长玢岩出露面积最大,呈岩株状产出,与矿体的空间联系显著,部分矿体赋存于该岩体中,野外可见磁铁矿及铜金矿体切割交代该岩体(图2a,b)。二长闪长岩则多见于深部矿井,地表出露面积相对较小,与闪长玢岩相邻且多呈岩株状产出,二者没有明显的切穿关系,部分矿体赋存于这类岩体中。黑云母闪长岩与石英正长岩多呈岩柱状、岩枝状或脉状产出,野外可见石英正长岩脉切穿黑云母闪长岩,吕书君等^[14]利用LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法测得的黑云母闪长岩和正

长岩的年龄分别为(379.3±2.3) Ma 和(366.3±1.9) Ma,其中黑云母闪长岩与 Li 等^[17]所得辉钼矿 Re-Os 年龄((383.2±4.5) Ma)在误差范围内基本一致,但是在空间上与已有矿体的关系并不显著。

老山口矿床自北向南依次存在4个矿段,本文主要研究IV号矿段。矿体赋存于北塔山组火山-火山角砾岩、闪长玢岩和二长闪长岩中,呈脉状、透镜状产出。矿体可分为上部含铜-金矿化的磁铁矿矿体以及下部的铜-金矿体(图2a-c)。矿体及周围发育大量的夕卡岩化蚀变,主要蚀变矿物有石榴子石、富铁斧石、绿帘石、绿泥石、角闪石、阳起石、钾长石、石英、方解石等。根据矿石中矿物组成以及结构特征,老山口矿床的矿石类型主要存在以下6种:块状黄铁矿-磁铁矿矿石(图2d)、块状绿帘石-磁铁矿矿石(图2e)、浸染状磁铁矿矿石(图2f)、块状黄铁矿-黄铜矿-磁铁矿矿石(图2g)、块状黄铜矿矿石(图2h)和浸染状黄铜矿矿石(图2i)。

根据野外观察和薄片鉴定,老山口矿床主要可划分为4个蚀变-矿化阶段:(1)钙硅酸盐蚀变阶段,包括早期石榴子石、辉石蚀变;(2)角闪石-绿帘石-



a—老山口矿床0号勘探线剖面图^[26]; b—磁铁矿矿体与闪长玢岩的穿插关系; c—磁铁矿矿体与火山围岩间的接触关系; d-i—老山口矿床典型矿石。Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿; Ep—绿帘石; Ccp—黄铜矿; Grt—石榴子石。

图2 老山口矿床矿体与典型矿石特征

Fig.2 Characteristics of orebody and typical ore types in the Laoshankou deposit

磁铁矿阶段,是主要的磁铁矿成矿阶段;(3)黄铁矿-黄铜矿阶段,是重要是铜-金矿化阶段,包含晚期石榴子石、绿帘石、阳起石和绿泥石等蚀变;(4)后期脉阶段,主要是成矿后的石英、方解石、绿帘石和钾长石热液脉。

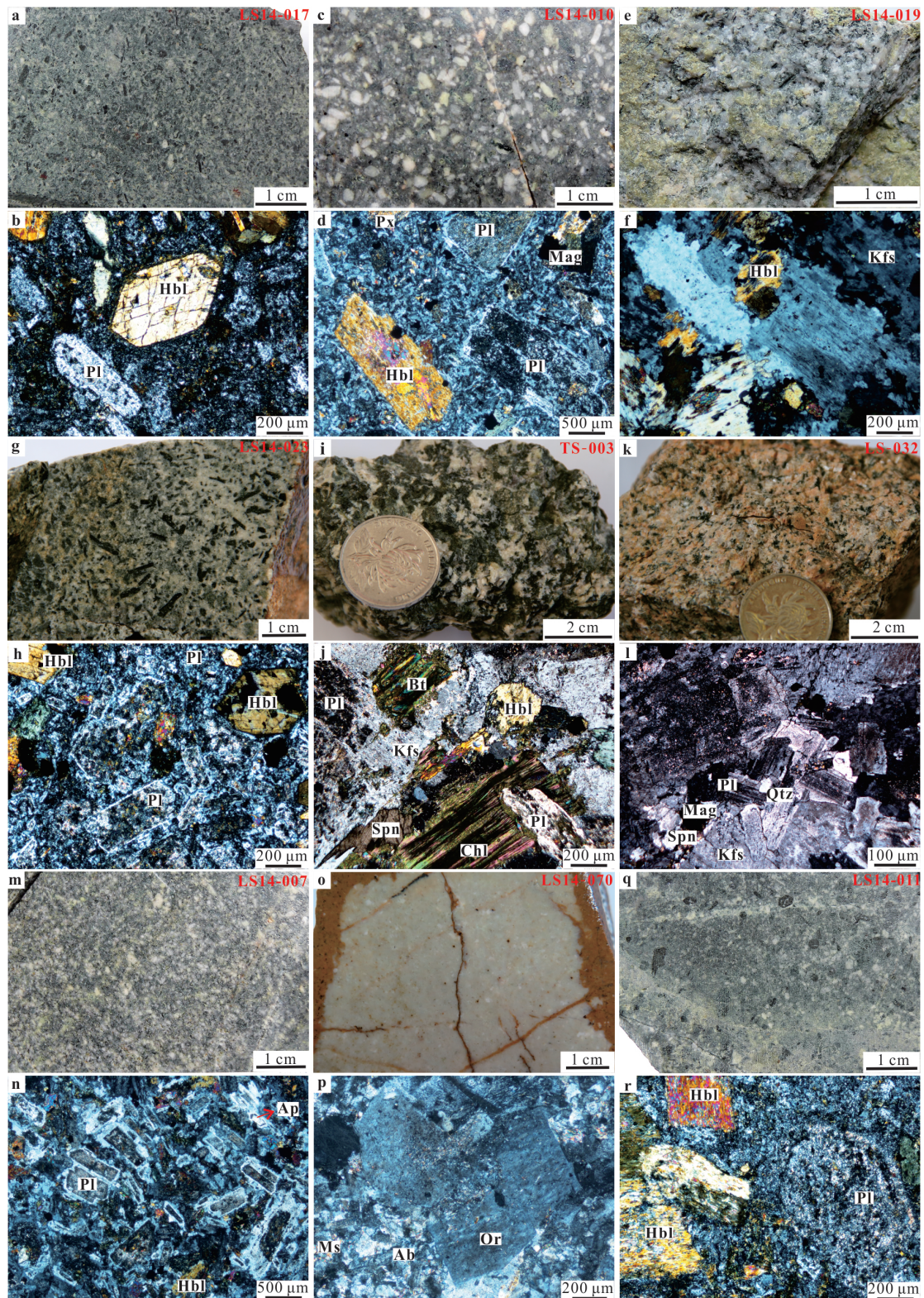
2 岩石学特征

2.1 火山岩

玄武安山岩,具块状构造、斑状结构,岩石多为

灰绿色(图 3a)。斑晶含量约为 30%,主要为自形一半自形的角闪石(0.2~1 mm,15%)、斜长石(0.2~0.6 mm,10~15%)、辉石(约 2%)以及少量的石英。角闪石斑晶多为自形粒状,部分角闪石呈片状,表面多具有明显的裂痕,部分角闪石绿泥石-碳酸盐化蚀变强烈,表面浑浊不清。斜长石斑晶多呈长条状,表面发育绢云母化和碳酸盐化,部分具有环带结构。基质多为细粒-隐晶质结构,含量约为 70%(图 3b)。

安山岩,具块状构造、似斑状结构,岩石多为浅灰色至灰绿色(图 3c)。斑晶含量约占 50%,主要包



Ab—钠长石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Fsp—长石; Hbl—角闪石; Kfs—钾长石; Mag—磁铁矿; Ms—白云母; Or—正长岩; Pl—斜长石; Px—辉石; Qtz—石英; Spn—榍石。a, b—玄武山岩 (LS14-017) 手标本及正交光显微照片; c, d—安山岩 (LS14-010) 手标本及正交光显微照片; e, f—二长闪长岩 (LS14-019) 手标本及正交光显微照片; g, h—闪长玢岩 (LS14-023) 手标本及正交光显微照片; i, j—黑云母闪长岩 (TS-003) 手标本及正交光显微照片; k, l—石英正长岩 (LS-032) 手标本及正交光显微照片; m, n—细粒闪长岩 (LS14-007) 手标本及正交光显微照片; o, p—碱性花岗岩 (LS14-070) 手标本及正交光显微照片; q, r—粗粒闪长玢岩 (LS14-011) 手标本及正交光显微照片。

图3 老山口火山岩、侵入岩岩石手标本和显微照片

Fig.3 Photograph and microphotograph of volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou deposit

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前沿, 2018, 25(5)

含自形一半自形粒状的角闪石(0.5~2 mm, 20%)、斜长石(0.5~3 mm, 25%)、辉石(0.5~1 mm, 5%)以及少量的磁铁矿(0.5 mm, 2%)。角闪石斑晶多为自形粒状或板状, 表面裂痕发育, 部分发生绿帘石化和碳酸盐化, 并有磁铁矿析出。斜长石斑晶主要呈长条状, 具有明显的环带且多具增生边。辉石斑晶主要呈自形粒状, 具明显的八边形结构, 表面裂痕发育。基质为细粒-隐晶质结构, 成分与斑晶相似。基质中斜长石约占90%以上, 并含有少量的暗色矿物(图3d)。

2.2 侵入岩

二长闪长岩具块状构造、半自形—它形粒状结构, 岩石多呈浅灰色(图3e)。主要组成矿物为斜长石(55%, 1~3 mm)、钾长石(20%, 0.5~1 mm)、角闪石(20%, 0.2~1 mm)以及少量的石英(约5%)及磁铁矿。斜长石多呈半自形—它形板状, 具有一定程度的碳酸盐化。钾长石多呈它形板状分布于斜长石颗粒之间, 表面碳酸盐化蚀变较强。角闪石多呈半自形—它形板状分布于斜长石颗粒之间, 部分角闪石表面发育绿帘石化(图3f)。

闪长玢岩具块状构造、似斑状结构(不等粒多斑结构), 岩石多呈浅灰色(图3g)。斑晶含量约为50%~60%, 主要为自形一半自形板状的斜长石(45%, 0.2~1 mm)和角闪石(15%, 0.2~1 mm)等。其中斜长石斑晶多为板状或碎裂状, 见环带状构造, 中部存在明显的碳酸盐化。角闪石斑晶多呈自形一半自形粒状或板状, 具六边形结构, 表面解理发育, 部分发生绿帘石化并有磁铁矿析出。基质含量约为40%, 细粒结构, 成分与斑晶基本相同(图3h)。

黑云母闪长岩具块状构造、半自形—它形粒状结构, 岩石多呈灰绿色(图3i)。主要组成矿物为斜长石(50%, 1~3 mm)、钾长石(20%, 0.5~1 mm)、角闪石(15%, 0.2~1 mm)和黑云母(15%, 0.5~2 mm)。斜长石常具环带构造, 中部多具有强烈的碳酸盐化。钾长石多存在于矿物间隙中, 具有条纹结构, 表面粗糙存在碳酸盐化。角闪石多呈半自形—它形板状结构。黑云母多呈它形片状, 沿黑云母的解理局部发生绿帘石化, 在正交镜下可见斜长石切穿黑云母。副矿物(<5%)包括锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等(图3j)。

石英正长岩具块状构造、半自形—它形粒状结构, 岩石多为浅褐色(图3k)。主要组成矿物为斜长石(30%, 0.1~1 mm)、钾长石(50%~60%, 1~

3 mm)、石英(约5%, 0.1~0.2 mm)和角闪石(5%, 0.2~0.5 mm)。斜长石多呈自形一半自形板状, 具明显的聚片双晶, 部分存在环带结构, 镶嵌于钾长石大颗粒中。钾长石多呈它形巨型颗粒, 部分颗粒因存在明显的碳酸盐化而表面比较浑浊。石英多呈它形粒状充填于斜长石矿物颗粒间隙。角闪石多呈半自形板状或长条状, 部分发生绿帘石化, 嵌生于钾长石巨型颗粒中。副矿物(<5%)为锆石、榍石、磁铁矿等, 镶嵌于其他矿物颗粒之间(图3l)。

细粒闪长岩具块状构造、自形—它形粒状结构, 岩石多呈浅灰色(图3m)。主要组成矿物为斜长石(70%, 0.2~0.5 mm)和角闪石(30%, 0.2~0.5 mm)。副矿物为磷灰石、榍石和磁铁矿。斜长石呈自形—半自形柱状, 具环带构造, 中部存在明显的碳酸盐化, 边部具有明显的增生边。角闪石多呈半自形—它形粒状或板状, 部分存在强烈的绿帘石化, 并有磁铁矿矿物析出(图3n)。

碱性花岗岩具块状构造、似斑状结构, 岩石呈浅白色, 外部存在明显的蚀变边(探针数据显示为热液云母和碳酸盐化;图3o)。斑晶含量约10%, 主要为它形一半自形粒状的碱性长石(0.4~1 mm, 约5%)和石英(约0.5 mm, 约5%)。碱性长石表面存在局部碳酸盐化, 双晶不明显。石英表面较为干净, 但裂纹发育。基质含量约90%, 主要为细粒的斜长石(15%)、碱性长石(35%)、石英(40%)等, 不含暗色矿物, 副矿物主要为锆石。斜长石发育聚片双晶, 表面存在明显的绢云母化和碳酸盐化, 具有环带结构。在显微镜下还观测到局部存在后期长石、石英细脉(图3p)。

粗粒闪长玢岩具块状构造、似斑状结构或不等粒多斑结构, 岩石多呈浅灰色(图3q)。斑晶含量约为50%, 主要为自形一半自形柱状的斜长石(30%, 1~2 mm), 角闪石(20%, 0.5~2 mm)等。斜长石斑晶, 多为柱状结构, 存在明显的碳酸盐化, 表面浑浊不清。角闪石多呈它形一半自形粒状或板状, 表面解理发育, 部分发生绿帘石化(图3r)。基质含量约为50%, 细粒结构, 成分与斑晶基本相同。

3 锆石年代学和地球化学

3.1 样品及测试方法

为探究老山口岩浆岩的形成时代及地球化学特征, 在该矿床中采集并挑选出了10个较为新鲜的岩

石样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和锆石微量元素测试。样品分别为玄武安山岩 (LS14-017)、安山岩 (LS14-010)、二长闪长岩 (LS14-019)、黑云母闪长岩 (TS-003 和 LS-036)、石英正长岩 (TS-002 和 LS-032)、细粒闪长岩 (LS14-007)、碱性花岗岩 (LS14-070) 和粗粒闪长岩 (LS14-011)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和锆石微量元素测定在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 锆石 U-Pb 定年和微量元素分析采用的是 RESolution M-50 激光剥蚀系统和 7500a 型电感耦合等离子质谱仪, 测试结果见表 1 和表 2。详细的分析流程和数据处理方法详见文献[27-29]。

3.2 锆石 U-Pb 年代学

玄武安山岩 (LS14-017) 的锆石主要呈短柱状 (长/宽为 1 : 1~2 : 1), CL 图像显示出较好的震荡环带以及明暗相间的条带状结构 (图 4), Th/U 比值为 0.4~1.3, 反映出岩浆成因锆石的特征 (岩浆岩型锆石 Th/U > 0.4, 变质成因锆石 Th/U < 0.1)^[30]。

选取测试点中 6 个谐和度较好的测试点, 其中 2 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 1 618 和 1 873 Ma, 锆石 CL 图像显示出明显的核边结构 (锆石点 6, 图 4), 表明其为岩浆上升时继承锆石的年龄。另外 4 个测试点的测试年龄相对集中, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (449.2±5.9) Ma (MSWD=0.43), 代表了奥陶纪玄武安山岩的年龄 (图 5a)。

安山岩 (LS14-010) 的锆石以长柱状 (长/宽为 2 : 1~3 : 1) 和短柱状 (长/宽为 1 : 1~2 : 1) 为主, CL 图像显示其具有明显的震荡环带以及明暗相间的条带状结构 (图 4), Th/U 比值为 0.2~1.0, 反映出岩浆成因锆石的特征。选取测试点中 11 个谐和度较好的测试点, 其中 5 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄落于 2 044~838 Ma, 锆石 CL 图像显示这些锆石具有核边结构 (锆石点 14, 图 4), 表明其为继承锆石的年龄。其余 6 个测试结果相对集中, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (446.8±6.1) Ma (MSWD=0.26), 代表了奥陶纪安山岩的年龄 (图 5b)。

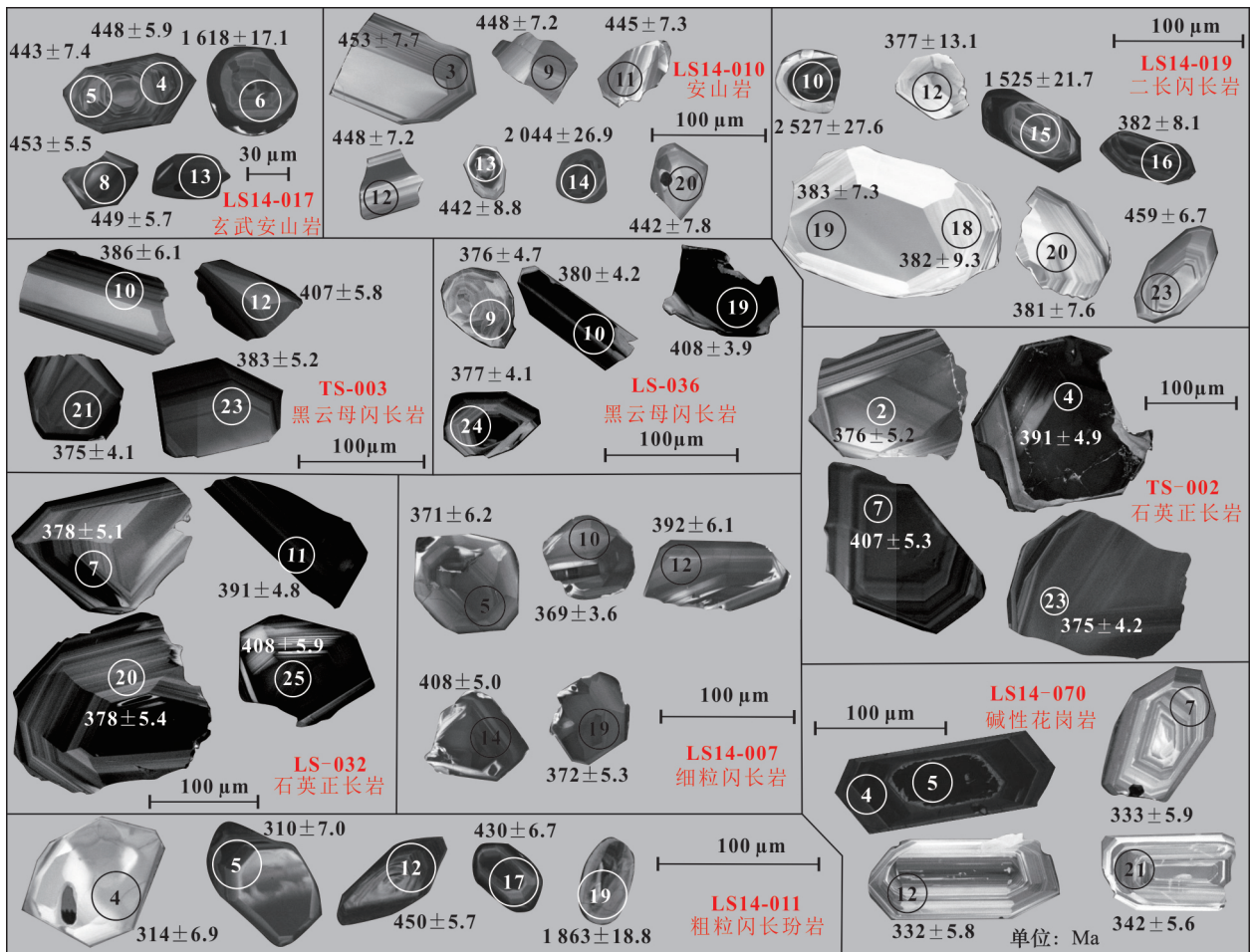


图 4 老山口岩浆岩锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig.4 CL images for zircon grains of volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou deposit

表 1 老山口岩浆岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 1 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of volcanic and intrusive rocks from the Lasohankou deposit

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
奥陶纪玄武安山岩												
LS14-017-4	191	328	0.58	0.577 7	0.021 1	0.072 0	0.001 0	463	14	448	5.9	96%
LS14-017-5	122	225	0.54	0.612 2	0.027 3	0.071 1	0.001 2	485	17	443	7.4	90%
LS14-017-6	29	585	0.05	4.265 1	0.127 7	0.285 3	0.003 4	1 687	25	1 618	17.1	95%
LS14-017-8	593	488	1.22	0.571 2	0.017 8	0.072 9	0.000 9	459	11	453	5.5	98%
LS14-017-13	441	447	0.99	0.597 2	0.019 8	0.072 2	0.000 9	475	13	449	5.7	94%
LS14-017-15	217	495	0.44	5.338 0	0.140 7	0.337 2	0.004 1	1 875	23	1 873	20.0	99%
奥陶纪安山岩												
LS14-010-1	48	138	0.34	1.272 4	0.052 3	0.139 5	0.002 5	833	23	842	14.3	99%
LS14-010-2	41	145	0.28	1.251 5	0.045 6	0.138 9	0.001 8	824	21	838	10.3	98%
LS14-010-3	159	199	0.80	0.541 9	0.019 3	0.072 8	0.001 3	440	13	453	7.7	97%
LS14-010-9	89	112	0.80	0.570 8	0.025 2	0.072 0	0.001 2	459	16	448	7.2	97%
LS14-010-11	141	167	0.84	0.593 1	0.022 4	0.071 5	0.001 2	473	14	445	7.3	94%
LS14-010-12	138	156	0.88	0.575 5	0.022 2	0.072 0	0.001 2	462	14	448	7.2	97%
LS14-010-13	374	373	1.00	0.557 1	0.019 9	0.071 0	0.001 5	450	13	442	8.8	98%
LS14-010-14	83	123	0.68	6.379 3	0.184 2	0.373 1	0.005 7	2 029	25	2 044	26.9	99%
LS14-010-17	57	118	0.48	5.123 2	0.165 0	0.325 0	0.005 2	1 840	27	1 814	25.4	98%
LS14-010-18	33	170	0.19	1.436 7	0.044 9	0.153 1	0.002 2	904	19	918	12.4	98%
LS14-010-20	59	178	0.33	0.582 9	0.024 0	0.071 0	0.001 3	466	15	442	7.8	94%
泥盆纪二长闪长岩												
LS14-019-2	32.0	68.8	0.47	0.490 1	0.031 6	0.060 8	0.001 3	405	22	380	7.7	93%
LS14-019-3	57.3	121	0.47	0.501 6	0.023 6	0.061 0	0.001 1	413	16	382	6.4	92%
LS14-019-4	65.4	121	0.54	0.497 8	0.031 9	0.059 6	0.001 1	410	22	373	6.5	90%
LS14-019-10	64.1	191	0.34	11.822 6	0.185 1	0.479 9	0.006 3	2 590	15	2 527	27.6	97%
LS14-019-12	28.2	76.7	0.37	0.503 7	0.045 2	0.060 3	0.002 1	414	31	377	13.1	90%
LS14-019-14	135	280	0.48	0.466 0	0.019 9	0.060 7	0.000 9	388	14	380	5.4	97%
LS14-019-15	115	220	0.52	3.542 3	0.102 2	0.267 0	0.004 3	1 537	23	1 525	21.7	99%
LS14-019-16	642	640	1.00	0.510 0	0.018 7	0.061 1	0.001 3	418	13	382	8.1	90%
LS14-019-17	230	254	0.91	9.783 2	0.287 9	0.427 0	0.006 4	2 415	27	2 292	29.0	94%
LS14-019-18	25.4	68.0	0.37	0.484 3	0.029 7	0.061 1	0.001 5	401	20	382	9.3	95%
LS14-019-19	62.1	89.8	0.69	0.438 7	0.025 3	0.061 3	0.001 2	369	18	383	7.3	96%
LS14-019-20	29.4	87.9	0.33	0.430 1	0.026 1	0.060 9	0.001 3	363	19	381	7.6	95%
LS14-019-21	205	287	0.72	0.530 3	0.021 7	0.071 0	0.001 3	432	14	442	7.7	97%
LS14-019-23	120	199	0.60	0.611 0	0.024 3	0.073 7	0.001 1	484	15	459	6.7	94%
LS14-019-24	175	183	0.96	0.446 5	0.022 9	0.059 8	0.001 0	375	16	375	6.0	99%
泥盆纪黑云母闪长岩												
TS-003-1	192	298	0.65	0.438 1	0.018 1	0.059 9	0.000 7	369	12.8	375	4.4	98%
TS-003-2	329	423	0.78	0.471 3	0.017 9	0.061 0	0.000 8	392	12.4	382	4.8	97%
TS-003-3	103	250	0.41	0.442 5	0.020 4	0.061 0	0.000 9	372	14.4	382	5.2	97%
TS-003-4	86.3	200	0.43	0.438 6	0.018 7	0.060 9	0.000 9	369	13.2	381	5.2	96%
TS-003-5	222	436	0.51	0.448 6	0.019 2	0.060 8	0.000 6	376	13.4	380	3.9	98%
TS-003-6	46.3	118	0.39	0.500 4	0.028 4	0.059 9	0.000 9	412	19.2	375	5.4	90%
TS-003-7	391	420	0.93	0.429 4	0.017 7	0.058 4	0.000 7	363	12.6	366	4.4	99%
TS-003-8	118	250	0.47	0.473 7	0.021 2	0.060 7	0.000 8	394	14.6	380	4.6	96%
TS-003-9	241	309	0.78	0.459 3	0.019 4	0.060 9	0.000 8	384	13.5	381	4.7	99%
TS-003-10	189	289	0.65	0.464 4	0.023 3	0.061 1	0.001 0	387	16.2	383	6.1	98%

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2018, 25(5)

(续表 1)

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
TS-003-11	169	315	0.54	0.451 3	0.019 4	0.065 2	0.000 9	378	13.6	407	5.3	92%
TS-003-12	84.8	189	0.45	0.495 6	0.025 7	0.065 1	0.001 0	409	17.4	407	5.9	99%
TS-003-13	195	324	0.60	0.454 1	0.017 9	0.060 7	0.000 7	380	12.5	380	4.3	99%
TS-003-14	263	336	0.78	0.441 0	0.017 6	0.061 3	0.000 7	371	12.4	383	4.3	96%
TS-003-15	206	445	0.46	0.452 4	0.017 5	0.061 0	0.000 7	379	12.2	382	4.0	99%
TS-003-16	169	387	0.44	0.459 4	0.018 7	0.060 9	0.000 7	384	13.0	381	4.5	99%
TS-003-18	718	699	1.03	0.452 5	0.014 2	0.062 6	0.000 7	379	9.9	391	4.0	96%
TS-003-19	216	302	0.72	0.437 6	0.016 1	0.060 8	0.000 7	369	11.4	381	4.5	96%
TS-003-21	166	410	0.40	0.445 2	0.016 5	0.060 7	0.000 7	374	11.6	380	4.0	98%
TS-003-23	144	344	0.42	0.446 9	0.018 5	0.060 9	0.000 9	375	13.0	381	5.2	98%
TS-003-24	172	365	0.47	0.461 7	0.017 8	0.060 9	0.000 8	385	12.4	381	5.1	98%
TS-003-25	195	378	0.51	0.477 2	0.020 1	0.060 0	0.000 7	396	13.8	376	4.4	94%
LS-36-1	1 192	815	1.46	0.488 9	0.017 4	0.060 3	0.000 6	404	11.9	378	3.8	93%
LS-36-2	148	245	0.60	0.508 7	0.020 6	0.061 3	0.000 8	418	13.9	384	4.7	91%
LS-36-3	1 194	1 143	1.04	0.457 6	0.011 8	0.060 8	0.000 6	383	8.2	381	3.8	99%
LS-36-4	763	615	1.24	0.444 9	0.013 4	0.061 5	0.000 8	374	9.4	385	4.6	97%
LS-36-5	242	216	1.12	0.444 0	0.019 2	0.060 4	0.000 8	373	13.5	378	5.0	98%
LS-36-6	127	163	0.78	0.418 4	0.018 0	0.060 7	0.000 8	355	12.9	380	5.1	93%
LS-36-7	833	420	1.99	0.474 0	0.021 6	0.059 3	0.000 8	394	14.9	371	5.1	94%
LS-36-8	815	732	1.11	0.440 7	0.013 5	0.058 8	0.000 5	371	9.6	368	3.2	99%
LS-36-9	39.5	151	0.26	0.456 9	0.021 7	0.060 1	0.000 8	382	15.1	376	4.7	98%
LS-36-10	844	438	1.93	0.429 4	0.015 4	0.060 8	0.000 7	363	10.9	380	4.2	95%
LS-36-11	123	194	0.64	0.483 9	0.021 3	0.060 7	0.000 7	401	14.6	380	4.5	94%
LS-36-12	204	282	0.72	0.439 2	0.015 4	0.060 5	0.000 7	370	10.9	379	4.1	97%
LS-36-14	163	190	0.86	0.457 7	0.018 8	0.060 6	0.000 7	383	13.1	379	4.4	99%
LS-36-15	381	402	0.95	0.458 8	0.017 2	0.060 7	0.000 7	383	12.0	380	4.2	99%
LS-36-16	1 787	999	1.79	0.497 7	0.015 4	0.065 3	0.000 8	410	10.5	408	4.6	99%
LS-36-17	385	405	0.95	0.462 1	0.021 8	0.060 0	0.000 7	386	15.1	376	4.0	97%
LS-36-18	798	661	1.21	0.458 6	0.013 5	0.060 9	0.000 6	383	9.4	381	3.3	99%
LS-36-19	982	732	1.34	0.486 6	0.014 6	0.065 3	0.000 6	403	10.0	408	3.9	98%
LS-36-20	749	588	1.27	0.469 7	0.016 6	0.061 2	0.000 7	391	11.5	383	4.2	97%
LS-36-21	125	193	0.65	0.455 5	0.019 8	0.061 1	0.000 8	381	13.8	382	4.8	99%
LS-36-22	220	240	0.92	0.497 3	0.021 3	0.066 9	0.000 9	410	14.4	417	5.7	98%
LS-36-23	59.4	145	0.41	0.466 2	0.025 0	0.060 9	0.000 9	389	17.3	381	5.5	97%
LS-36-24	351	377	0.93	0.453 4	0.018 2	0.060 3	0.000 7	380	12.7	377	4.1	99%
LS-36-25	554	522	1.06	0.451 0	0.018 1	0.061 0	0.000 8	378	12.7	382	4.6	98%
泥盆纪石英正长岩												
TS-002-1	559	876	0.64	0.433 6	0.020 1	0.060 1	0.000 8	366	14.3	376	5.0	97%
TS-002-2	268	446	0.60	0.444 4	0.020 8	0.060 1	0.000 9	373	14.6	376	5.2	99%
TS-002-3	521	887	0.59	0.445 6	0.016 9	0.060 1	0.000 7	374	11.9	376	4.4	99%
TS-002-4	642	1 441	0.45	0.473 8	0.016 5	0.062 5	0.000 8	394	11.4	391	4.9	99%
TS-002-5	711	996	0.71	0.467 5	0.016 9	0.060 2	0.000 7	389	11.7	377	4.2	96%
TS-002-6	336	636	0.53	0.438 2	0.018 6	0.060 3	0.000 8	369	13.1	377	4.7	97%
TS-002-7	409	718	0.57	0.483 4	0.018 1	0.065 1	0.000 9	400	12.4	407	5.3	98%
TS-002-8	389	652	0.60	0.539 3	0.020 4	0.065 2	0.000 7	438	13.5	407	4.5	92%
TS-002-9	573	1 077	0.53	0.463 5	0.014 5	0.062 6	0.000 8	387	10.1	391	4.6	98%
TS-002-10	911	1 348	0.68	0.478 5	0.014 7	0.059 6	0.000 7	397	10.1	373	4.0	93%

(续表 1)

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
TS-002-11	474	811	0.58	0.485 0	0.015 1	0.060 1	0.000 6	402	10.3	376	3.9	93%
TS-002-14	393	755	0.52	0.475 2	0.014 9	0.060 6	0.000 7	395	10.3	379	4.3	95%
TS-002-15	427	764	0.56	0.479 5	0.016 2	0.060 5	0.000 7	398	11.1	379	4.4	95%
TS-002-16	373	673	0.55	0.487 4	0.017 6	0.065 2	0.000 8	403	12.0	407	4.7	98%
TS-002-17	361	679	0.53	0.445 8	0.015 5	0.060 2	0.000 6	374	10.9	377	3.9	99%
TS-002-19	705	1 034	0.68	0.456 2	0.015 7	0.060 1	0.000 7	382	11.0	376	4.4	98%
TS-002-20	1 670	1 570	1.06	0.478 4	0.016 7	0.062 5	0.000 8	397	11.4	391	4.8	98%
TS-002-21	215	641	0.33	0.444 6	0.017 0	0.060 0	0.000 8	374	11.9	376	4.7	99%
TS-002-22	255	670	0.38	0.461 6	0.017 2	0.059 8	0.000 7	385	12.0	375	4.4	97%
TS-002-23	276	627	0.44	0.457 2	0.016 2	0.059 9	0.000 7	382	11.3	375	4.2	98%
TS-002-25	477	816	0.58	0.536 5	0.019 6	0.065 2	0.000 9	436	13.0	407	5.4	93%
LS-32-1	193	264	0.73	0.478 1	0.021 7	0.060 7	0.000 7	397	14.9	380	4.5	95%
LS-32-2	224	258	0.87	0.487 5	0.018 2	0.060 5	0.000 7	403	12.4	379	4.4	93%
LS-32-3	157	199	0.79	0.485 4	0.020 3	0.060 5	0.000 8	402	13.9	379	4.7	94%
LS-32-4	157	150	1.04	0.496 2	0.022 8	0.060 6	0.000 8	409	15.5	379	5.1	92%
LS-32-5	289	273	1.06	0.444 7	0.017 6	0.060 1	0.000 7	374	12.4	376	4.4	99%
LS-32-6	130	261	0.50	0.449 7	0.019 3	0.060 3	0.000 7	377	13.5	377	4.5	99%
LS-32-7	127	195	0.65	0.468 1	0.021 3	0.060 4	0.000 8	390	14.8	378	5.1	96%
LS-32-8	1 199	648	1.85	0.449 6	0.013 0	0.059 0	0.000 6	377	9.1	370	3.4	98%
LS-32-9	196	232	0.85	0.489 8	0.019 9	0.059 5	0.000 7	405	13.5	373	4.1	91%
LS-32-10	281	325	0.87	0.464 4	0.018 0	0.060 6	0.000 6	387	12.5	379	3.8	97%
LS-32-11	270	275	0.98	0.476 5	0.019 3	0.062 5	0.000 8	396	13.3	391	4.8	98%
LS-32-12	167	181	0.93	0.459 1	0.021 6	0.062 5	0.000 7	384	15.0	391	4.2	98%
LS-32-13	358	369	0.97	0.489 1	0.017 2	0.060 2	0.000 6	404	11.8	377	3.9	92%
LS-32-14	491	379	1.30	0.470 4	0.018 6	0.059 9	0.000 7	391	12.8	375	4.1	95%
LS-32-15	339	374	0.91	0.494 4	0.018 6	0.060 6	0.000 6	408	12.6	380	3.8	92%
LS-32-16	283	292	0.97	0.455 8	0.018 6	0.060 0	0.000 8	381	13.0	375	4.7	98%
LS-32-17	301	276	1.09	0.484 5	0.019 7	0.059 9	0.000 7	401	13.5	375	4.5	93%
LS-32-18	255	236	1.08	0.463 1	0.018 6	0.060 3	0.000 8	386	12.9	378	4.7	97%
LS-32-19	160	195	0.82	0.449 4	0.021 8	0.059 2	0.000 8	377	15.3	371	5.1	98%
LS-32-20	116	212	0.55	0.448 0	0.021 6	0.060 4	0.000 9	376	15.1	378	5.4	99%
LS-32-21	252	264	0.95	0.416 3	0.018 8	0.059 6	0.000 8	353	13.5	373	4.7	94%
LS-32-22	187	208	0.90	0.437 6	0.021 8	0.059 5	0.000 8	369	15.4	372	4.8	98%
LS-32-23	526	373	1.41	0.446 0	0.020 1	0.060 9	0.000 8	374	14.1	381	4.7	98%
LS-32-24	215	233	0.92	0.477 0	0.022 4	0.065 1	0.000 8	396	15.4	407	5.0	97%
LS-32-25	120	163	0.74	0.484 5	0.025 2	0.065 3	0.001 0	401	17.3	408	5.9	98%
泥盆纪细粒闪长岩												
LS14-007-3	794	832	0.95	0.437 3	0.013 5	0.059 5	0.000 9	368	10	373	6	98%
LS14-007-4	807	695	1.16	0.448 0	0.011 4	0.058 8	0.000 9	376	8	368	5	97%
LS14-007-5	2 198	693	3.17	0.488 5	0.017 2	0.059 2	0.001 0	404	12	371	6	91%
LS14-007-6	1 664	1 061	1.57	0.463 9	0.013 8	0.059 5	0.001 0	387	10	372	6	96%
LS14-007-10	708	553	1.28	0.471 3	0.013 1	0.058 9	0.000 6	392	9	369	4	93%
LS14-007-11	480	513	0.94	0.454 6	0.010 0	0.062 8	0.000 9	380	7	393	5	96%
LS14-007-12	722	717	1.01	0.445 5	0.009 7	0.062 6	0.001 0	374	7	392	6	95%
LS14-007-13	348	436	0.80	0.453 6	0.014 0	0.062 6	0.000 9	380	10	391	5	97%
LS14-007-14	1 267	910	1.39	0.471 7	0.010 8	0.065 3	0.000 8	392	7	408	5	96%
LS14-007-15	468	468	1.00	0.415 6	0.012 5	0.058 9	0.000 8	353	9	369	5	95%
LS14-007-18	573	550	1.04	0.432 6	0.011 6	0.059 2	0.000 8	365	8	371	5	98%

(续表 1)

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
LS14-007-19	1 289	944	1.37	0.432 4	0.010 1	0.059 4	0.000 9	365	7	372	5	98%
LS14-007-21	855	804	1.06	0.431 5	0.012 2	0.058 7	0.001 0	364	9	368	6	99%
LS14-007-22	588	594	0.99	0.428 9	0.011 3	0.059 7	0.000 9	362	8	374	5	96%
LS14-007-23	958	799	1.20	0.466 4	0.011 8	0.059 3	0.000 6	389	8	372	4	95%
LS14-007-24	822	680	1.21	0.444 8	0.011 4	0.062 4	0.001 0	374	8	390	6	95%
LS14-007-25	1 069	870	1.23	0.425 5	0.011 5	0.059 1	0.000 7	360	8	370	4	97%
石炭纪碱性花岗岩												
LS14-070-1	2 477	2 742	0.90	2.997 1	0.125 0	0.049 3	0.000 8	1 407	31.8	310	4.8	-28%
LS14-070-3	68.0	140	0.49	0.383 1	0.019 0	0.052 7	0.001 1	329	14.0	331	6.6	99%
LS14-070-4	3 086	4 746	0.65	4.547 3	0.131 8	0.060 5	0.001 2	1 740	24.1	379	7.4	-29%
LS14-070-5	2 406	3 806	0.63	2.762 9	0.110 4	0.052 6	0.001 4	1 346	29.8	330	8.8	-22%
LS14-070-6	269	826	0.33	0.406 6	0.010 0	0.053 3	0.000 7	346	7.3	335	4.2	96%
LS14-070-7	149	530	0.28	0.372 5	0.011 8	0.053 0	0.001 0	322	8.7	333	5.9	96%
LS14-070-8	5 510	5 896	0.93	2.362 7	0.058 7	0.035 7	0.000 5	1 231	17.7	226	2.9	-39%
LS14-070-10	363	900	0.40	0.370 5	0.013 8	0.052 8	0.000 9	320	10.3	331	5.6	96%
LS14-070-11	3 476	4157	0.84	1.508 3	0.088 2	0.028 6	0.000 7	934	35.7	182	4.3	-35%
LS14-070-12	124	489	0.25	0.384 3	0.013 9	0.052 8	0.000 9	330	10.2	332	5.8	99%
LS14-070-13	1 681	2 329	0.72	2.463 1	0.158 0	0.040 0	0.001 2	1 261	46.4	253	7.3	-34%
LS14-070-15	389	1 093	0.36	0.419 8	0.016 5	0.051 3	0.000 7	356	11.8	322	4.2	90%
LS14-070-16	6 500	5 928	1.10	2.025 0	0.045 5	0.029 4	0.000 4	1 124	15.3	187	2.5	-43%
LS14-070-17	1 876	3 676	0.51	1.017 4	0.023 5	0.024 4	0.000 3	713	11.8	155	2.0	-29%
LS14-070-18	6 386	6 722	0.95	1.056 3	0.022 1	0.017 8	0.000 2	732	10.9	113	1.6	-47%
LS14-070-19	1 300	2 703	0.48	1.579 1	0.036 9	0.041 2	0.000 5	962	14.5	260	3.0	-15%
LS14-070-20	124	383	0.32	0.397 5	0.013 7	0.052 6	0.000 8	340	9.9	331	5.2	97%
LS14-070-21	398	994	0.40	0.397 5	0.011 4	0.054 5	0.000 9	340	8.3	342	5.6	99%
LS14-070-22	263	848	0.31	0.382 8	0.011 6	0.052 7	0.001 0	329	8.5	331	6.0	99%
LS14-070-23	2 255	3 956	0.57	2.039 7	0.055 4	0.037 7	0.000 6	1 129	18.5	238	3.8	-31%
LS14-070-24	1 909	2 542	0.75	1.154 1	0.039 6	0.035 7	0.000 8	779	18.7	226	5.2	-10%
LS14-070-25	5 121	5 523	0.93	2.807 9	0.092 9	0.037 5	0.000 6	1 358	24.8	237	3.5	-41%
LS14-070-26	2 302	4 456	0.52	0.700 4	0.029 7	0.021 4	0.000 4	539	17.7	137	2.7	-20%
LS14-070-27	287	709	0.41	0.401 2	0.015 4	0.052 7	0.000 9	343	11.2	331	5.5	96%
LS14-070-29	229	641	0.36	0.386 3	0.012 7	0.052 8	0.000 6	332	9.3	332	3.9	99%
LS14-070-30	352	1 055	0.33	0.357 8	0.011 1	0.051 1	0.000 8	311	8.3	321	4.9	96%
石炭纪粗粒闪长玢岩												
LS14-011-1	62.0	60.7	1.02	0.364 0	0.024 4	0.049 0	0.001 4	315	18	308	8.5	97%
LS14-011-2	60.1	58.8	1.02	0.388 0	0.025 3	0.049 0	0.001 1	333	19	308	6.7	92%
LS14-011-3	95.0	133	0.71	0.366 4	0.016 9	0.048 6	0.000 9	317	13	306	5.6	96%
LS14-011-4	41.3	48.4	0.85	0.401 9	0.023 3	0.050 0	0.001 1	343	17	314	6.9	91%
LS14-011-5	132	169	0.78	0.365 0	0.017 8	0.049 3	0.001 1	316	13	310	7.0	98%
LS14-011-6	158	316	0.50	0.634 7	0.021 1	0.077 2	0.001 3	499	13	479	7.6	95%
LS14-011-7	27.3	163	0.17	5.296 3	0.148 7	0.322 7	0.004 9	1 868	24	1 803	24.1	96%
LS14-011-9	106	90.7	1.17	0.564 3	0.030 3	0.076 0	0.001 3	454	20	472	8.0	96%
LS14-011-10	125	99.3	1.26	0.558 1	0.021 2	0.071 0	0.001 4	450	14	442	8.2	98%
LS14-011-12	204	303	0.67	0.566 4	0.016 8	0.072 3	0.000 9	456	11	450	5.7	98%
LS14-011-15	66.3	64.3	1.03	0.387 3	0.020 4	0.049 5	0.001 0	332	15	311	6.4	93%
LS14-011-16	103	163	0.63	0.360 6	0.018 0	0.049 5	0.000 9	313	13	311	5.7	99%
LS14-011-17	246	509	0.48	0.595 5	0.020 2	0.069 0	0.001 1	474	13	430	6.7	90%
LS14-011-19	36.2	410	0.09	5.695 5	0.133 4	0.335 1	0.003 9	1 931	20	1 863	18.8	96%

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2018, 25(5)

表 2 老山口岩浆岩锆石稀土元素含量及氧逸度分析结果
Table 2 Zircon trace element composition and oxygen fugacity for volcanic and intrusive rocks from the Lasohankou deposit

点号	Age/Ma	$w_B/10^{-6}$														LREE/ HREE		LREE/ HREE		LREE/ HREE		Zircon Ce ^{IV} /Ce ^{III}
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE	(Ce/ Eu*) _N	(Ce/ Eu*) _N			
奥陶纪玄武安山岩																						
LS14-017-4	448	2.68	30.89	0.75	4.40	2.79	0.77	11.87	3.72	40.77	14.82	65.84	14.28	134.96	29.21	42.27	315.48	0.13	0.41	5.34	181	
LS14-017-5	443	16.61	49.10	4.15	18.14	5.06	0.90	11.15	3.33	34.55	12.12	52.83	11.36	107.28	23.18	93.96	255.79	0.37	0.36	1.45	73	
LS14-017-8	453	0.19	46.48	0.45	7.47	14.19	4.20	78.92	27.16	332.39	130.47	601.40	126.21	1 185.59	253.82	72.98	2 735.97	0.03	0.38	38.34	87	
LS14-017-13	449	3.81	39.94	1.18	8.86	10.02	3.20	55.80	19.26	235.46	97.07	471.38	107.93	1 079.73	242.00	67.01	2 308.63	0.03	0.41	4.62	147	
奥陶纪安山岩																						
LS14-010-3	453	0.01	11.53	0.12	2.52	4.46	1.07	23.91	8.39	106.19	45.51	217.35	49.40	496.45	112.77	19.71	1 059.97	0.02	0.32	88.13	73	
LS14-010-9	448	0.00	9.04	0.08	1.97	3.95	1.04	23.79	8.02	101.38	41.77	197.89	43.73	409.96	89.16	16.08	915.70	0.02	0.33	150.26	56	
LS14-010-11	445	0.16	11.05	0.14	2.48	4.41	1.05	24.57	8.64	109.34	46.04	219.22	49.21	478.15	106.46	19.28	1 041.64	0.02	0.31	18.06	67	
LS14-010-12	448	0.00	11.22	0.15	2.25	4.59	1.45	32.35	11.68	147.40	61.44	290.48	61.92	570.62	122.09	19.66	1 297.98	0.02	0.36	144.99	69	
LS14-010-13	442	0.03	35.55	0.10	2.24	4.45	1.45	25.97	8.59	104.67	42.72	201.67	45.25	449.39	101.51	43.82	979.76	0.04	0.41	150.73	204	
LS14-010-20	442	0.01	1.74	0.06	2.40	5.23	0.40	28.86	9.92	114.61	45.05	207.62	44.03	398.00	86.81	9.85	934.91	0.01	0.10	16.65	5	
泥盆纪二长闪长岩																						
LS14-019-2	380	0.00	1.73	0.05	0.90	2.26	0.41	15.20	5.39	68.41	28.51	139.21	32.32	322.29	71.28	5.35	682.60	0.01	0.21	20.29	42	
LS14-019-3	382	0.01	2.54	0.09	1.69	3.41	0.58	17.94	6.92	92.82	41.72	213.58	49.40	485.11	107.12	8.32	1 014.61	0.01	0.23	20.29	42	
LS14-019-4	373	0.17	8.52	0.38	3.68	3.80	0.80	21.02	7.00	87.07	34.59	173.77	39.23	385.80	86.32	17.35	834.79	0.02	0.27	8.16	92	
LS14-019-12	377	0.03	4.34	0.05	0.78	1.44	0.42	8.62	3.45	44.37	18.97	102.95	24.81	256.62	62.13	7.06	521.91	0.01	0.37	28.24	236	
LS14-019-14	380	0.02	7.41	0.06	1.79	4.13	0.81	27.24	10.92	146.45	63.20	313.03	72.09	705.13	156.40	14.23	1 494.47	0.01	0.23	47.87	119	
LS14-019-16	382	0.16	47.32	0.40	4.93	8.88	2.55	51.07	17.89	229.54	97.53	490.16	114.59	1 146.02	260.38	64.23	2 407.17	0.03	0.37	46.66	285	
LS14-019-18	382	0.00	7.93	0.02	0.50	1.29	0.61	9.50	3.82	55.37	25.40	137.98	34.05	352.80	86.05	10.34	704.97	0.01	0.53	731		
LS14-019-19	383	0.02	8.85	0.14	2.19	4.74	1.91	27.94	9.57	121.49	48.84	233.19	53.28	518.27	115.46	17.85	1 128.03	0.02	0.51	46.54	81	
LS14-019-20	381	0.00	3.72	0.02	0.66	1.15	0.37	9.86	4.14	56.67	26.75	140.33	34.56	366.00	85.50	5.91	723.81	0.01	0.34	426		
LS14-019-24	375	0.05	12.34	0.06	0.94	2.22	0.97	14.41	5.72	79.88	35.81	181.49	42.99	434.52	101.40	16.58	896.22	0.02	0.53	58.33	456	
泥盆纪黑云母闪长岩																						
TS-003-1	375	0.06	3.71	0.12	1.24	2.55	0.88	14.01	5.45	68.66	27.83	141.16	33.74	362.67	75.86	8.57	729.36	0.01	0.45	10.64	60	
TS-003-2	382	0.02	4.23	0.15	1.67	3.94	1.22	23.73	8.57	104.49	42.88	210.86	50.50	519.84	108.66	11.22	1 069.54	0.01	0.38	21.28	41	
TS-003-3	382	0.00	2.51	0.01	0.27	0.42	0.29	5.34	2.16	31.00	14.54	82.67	21.39	248.59	55.86	3.50	461.55	0.01	0.58	1 053		
TS-003-4	381	0.00	2.25	0.00	0.22	0.75	0.28	4.89	2.10	31.55	14.57	81.80	21.24	239.34	53.41	3.50	448.90	0.01	0.44	297		
TS-003-5	380	0.00	2.91	0.00	0.16	0.44	0.22	4.39	1.85	27.44	12.45	68.52	18.37	201.80	45.82	3.73	380.64	0.01	0.48	445.92	923	
TS-003-6	375	0.01	1.78	0.01	0.13	0.39	0.16	3.43	1.53	20.85	9.46	54.28	14.24	162.99	36.33	2.49	303.11	0.01	0.43	30.32	592	
TS-003-7	366	0.22	10.93	0.42	4.29	6.36	1.88	30.36	10.30	125.46	49.78	236.60	55.69	563.08	113.15	24.11	1 184.43	0.02	0.41	8.86	43	
TS-003-8	380	0.00	2.85	0.01	0.06	0.78	0.20	4.61	2.01	28.25	13.11	70.76	18.79	205.65	45.94	3.91	389.12	0.01	0.33	306		

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn 地学前缘, 2018, 25(5)

(续表 2)

点号	Age/Ma	$w_B/10^{-6}$														LREE/		(Ce/		Zircon				
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE	HREE	Eu*		(Ce/	Ce*	N	Ce ^{IV} /Ce ^{III}
TS-003-9	381	0.06	4.34	0.10	1.86	3.34	1.09	18.88	6.69	83.22	33.86	164.91	39.81	411.70	85.32	10.78	844.39	0.01	0.42	13.14	13.14	46		
TS-003-10	383	0.01	2.97	0.06	1.20	2.58	0.70	13.67	4.96	62.63	26.82	135.31	33.07	354.10	73.78	7.51	704.34	0.01	0.36	31.41	31.41	46		
TS-003-13	380	0.01	3.28	0.05	0.77	1.56	0.63	11.18	4.34	58.19	25.43	132.58	32.84	359.71	76.39	6.30	700.64	0.01	0.46	34.37	34.37	141		
TS-003-14	383	0.02	5.14	0.10	2.09	4.48	1.31	23.56	8.53	102.63	41.07	194.05	46.76	471.52	94.64	13.14	982.76	0.01	0.39	28.94	28.94	33		
TS-003-15	382	0.00	3.65	0.00	0.37	0.58	0.36	6.35	2.88	46.71	22.20	122.45	31.83	363.63	81.49	4.97	677.54	0.01	0.58			1 165		
TS-003-16	381	0.00	2.75	0.02	0.27	0.76	0.28	4.66	2.19	31.26	14.60	82.46	22.33	260.27	58.74	4.08	476.51	0.01	0.45			392		
TS-003-19	381	0.01	3.43	0.10	1.05	2.94	0.89	17.00	6.48	81.92	33.24	166.18	40.15	411.78	83.17	8.42	839.92	0.01	0.38	34.97	34.97	45		
TS-003-21	380	0.01	3.14	0.02	0.22	0.90	0.27	6.13	2.36	38.08	17.77	103.60	27.20	320.48	73.54	4.55	589.18	0.01	0.35	52.55	52.55	404		
TS-003-23	381	0.02	2.85	0.01	0.26	0.73	0.30	5.83	2.28	33.81	16.37	90.37	24.31	274.00	62.91	4.17	509.87	0.01	0.44	54.02	54.02	471		
TS-003-24	381	0.00	3.77	0.02	0.27	0.92	0.30	7.33	3.16	50.36	22.68	127.44	33.15	375.27	81.59	5.29	700.97	0.01	0.35			490		
TS-003-25	376	0.00	3.12	0.02	0.35	0.87	0.28	5.52	2.49	35.82	16.81	92.82	24.39	278.65	62.49	4.63	518.98	0.01	0.39			361		
LS-036-1	378	0.34	82.50	0.85	8.92	15.12	2.69	71.15	25.19	304.57	118.59	561.64	127.12	1 235.77	244.28	110.41	2 688.31	0.04	0.25	37.71	37.71	252		
LS-36-2	384	12.75	27.29	2.70	12.64	4.55	1.54	14.75	4.24	49.98	20.28	101.05	23.99	256.41	57.13	61.47	527.84	0.12	0.58	1.14	1.14	232		
LS-36-3	381	0.03	9.19	0.02	0.49	1.64	1.33	13.59	4.58	60.54	25.70	131.18	31.15	342.71	82.89	12.71	692.32	0.02	0.86	88.60	88.60	794		
LS-36-4	385	0.01	44.56	0.42	7.31	15.19	2.03	82.21	28.63	352.03	135.37	631.61	141.68	1 378.67	271.55	69.51	3 021.74	0.02	0.18	149.84	149.84	147		
LS-36-5	378	0.03	9.41	0.17	2.61	7.30	2.79	41.30	14.39	179.78	69.82	329.74	74.47	739.46	152.84	22.31	1 601.79	0.01	0.49	34.73	34.73	75		
LS-36-6	380	0.04	5.05	0.08	1.11	2.20	0.76	15.12	5.40	71.07	28.60	144.35	33.71	333.15	70.13	9.25	701.54	0.01	0.40	21.42	21.42	203		
LS-36-7	371	0.04	20.87	0.31	6.31	10.85	3.12	58.20	17.31	195.50	73.17	326.88	68.68	648.44	127.12	41.50	1 515.31	0.03	0.38	45.28	45.28	63		
LS-36-8	368	0.02	47.50	0.32	6.17	16.46	1.62	86.80	31.60	386.78	147.66	683.68	151.47	1 453.22	279.55	72.09	3 220.76	0.02	0.13	138.39	138.39	137		
LS-36-9	376	0.00	1.69	0.00	0.21	0.50	0.31	3.08	1.15	16.38	7.90	45.38	11.42	136.56	36.54	2.72	258.41	0.01	0.75	114.49	114.49	717		
LS-36-10	380	0.03	12.02	0.23	5.09	11.58	3.20	53.66	17.79	205.26	76.68	345.42	75.49	717.37	139.36	32.15	1 631.03	0.02	0.39	33.99	33.99	35		
LS-36-11	380	0.03	6.16	0.07	0.83	2.34	0.73	13.73	5.15	67.74	29.25	149.16	36.42	382.08	82.95	10.16	766.47	0.01	0.39	31.90	31.90	265		
LS-36-12	379	0.01	2.25	0.07	1.02	2.00	1.07	12.14	3.93	50.84	20.96	104.38	23.90	247.46	55.92	6.41	519.54	0.01	0.67	26.32	26.32	89		
LS-36-14	379	0.00	5.22	0.06	1.01	2.15	0.75	14.19	5.03	62.29	26.01	129.20	30.30	312.77	66.19	9.19	645.98	0.01	0.41			209		
LS-36-15	380	0.02	18.47	0.12	1.78	5.65	1.02	37.87	14.32	185.90	73.80	359.65	82.39	823.90	165.24	27.06	1 743.06	0.02	0.21	84.02	84.02	263		
LS-36-17	376	0.00	22.58	0.11	1.67	4.63	0.88	30.04	12.52	163.93	66.90	334.14	77.91	778.88	155.79	29.87	1 620.11	0.02	0.23			450		
LS-36-18	381	0.05	41.26	0.29	7.09	16.34	3.60	88.66	31.25	375.06	143.92	676.47	152.85	1 506.39	295.16	68.62	3 269.77	0.02	0.29	85.56	85.56	128		
LS-36-20	383	0.05	37.50	0.27	5.89	12.61	2.80	67.51	23.33	282.47	109.12	514.72	115.55	1 140.28	224.26	59.12	2 477.24	0.02	0.29	79.51	79.51	149		
LS-36-21	382	0.00	6.06	0.03	0.70	2.02	0.66	13.46	5.17	68.09	29.21	148.31	36.35	383.40	82.03	9.48	766.03	0.01	0.39	119.79	119.79	342		
LS-36-23	381	0.03	3.86	0.09	0.99	1.44	0.67	6.87	1.96	25.57	11.01	56.97	13.92	159.99	37.86	7.09	314.15	0.02	0.65	17.63	17.63	211		
LS-36-24	377	0.03	20.63	0.04	0.96	3.53	0.66	21.67	8.78	116.95	49.26	247.34	58.32	602.22	124.68	25.84	1 229.21	0.02	0.23	148.03	148.03	577		
LS-36-25	382	0.01	28.98	0.19	3.18	8.17	1.67	51.68	19.44	248.83	99.00	477.15	109.78	1 091.21	215.23	42.21	2 312.30	0.02	0.25	144.45	144.45	258		
泥盆纪石英正长岩																								
TS-002-1	376	0.05	16.95	0.26	6.07	14.58	0.65	80.55	28.75	349.74	137.20	634.91	139.43	1 318.87	248.09	38.56	2 937.55	0.01	0.06	36.84	36.84	16		

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn 地学前缘,2018,25(5)

(续表 2)

点号	Age/Ma	$w_B/10^{-6}$														LREE/		(Ce/ Ce*) _N	Zircon Ce ^{IV} /Ce ^{III}		
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE				
TS-002-2	376	0.05	12.57	0.27	5.05	11.15	0.67	57.95	19.42	239.90	93.73	438.13	95.79	909.43	176.38	29.77	2 030.74	0.01	0.08	26.24	14
TS-002-3	376	0.00	11.32	0.25	3.88	9.65	0.36	57.33	21.21	262.00	105.57	501.44	112.30	1 076.74	205.69	25.46	2 342.28	0.01	0.05	156.45	20
TS-002-5	377	0.09	29.31	0.51	9.36	19.89	0.67	99.61	34.58	422.86	163.85	751.01	164.43	1543.50	289.51	59.83	3 469.36	0.02	0.05	34.10	17
TS-002-6	377	0.02	8.22	0.21	3.26	6.23	0.26	39.14	14.75	192.85	78.84	378.54	87.60	839.49	160.53	18.19	1 791.74	0.01	0.05	28.66	27
TS-002-10	373	0.11	32.13	0.24	3.44	7.50	0.46	42.06	16.24	207.82	87.36	433.64	101.88	982.49	192.93	43.89	2 064.42	0.02	0.08	47.81	93
TS-002-11	376	0.00	11.04	0.19	4.01	9.24	0.47	58.40	21.09	261.84	103.21	488.01	109.44	1 026.59	196.84	24.96	2 265.41	0.01	0.06		20
TS-002-14	379	0.05	11.38	0.21	3.94	8.15	0.35	49.34	18.32	230.17	93.57	443.61	101.20	964.02	187.81	24.08	2 088.05	0.01	0.05	27.74	26
TS-002-15	379	0.01	10.10	0.23	3.93	7.63	0.34	50.32	18.53	236.88	95.74	453.55	102.02	955.20	183.34	22.25	2 095.58	0.01	0.05	45.51	25
TS-002-17	377	0.03	8.45	0.18	3.51	6.93	0.34	44.05	15.85	203.26	82.56	393.79	89.86	847.36	164.40	19.43	1 841.14	0.01	0.06	30.40	23
TS-002-19	376	0.02	25.51	0.15	2.26	5.62	0.15	33.52	13.56	184.72	78.25	392.44	91.29	876.04	173.80	33.71	1 843.63	0.02	0.03	129.67	117
TS-002-21	376	0.02	12.08	0.07	1.09	2.88	0.12	18.16	7.67	109.56	50.51	268.23	66.40	677.14	138.52	16.26	1 336.19	0.01	0.05	85.41	169
TS-002-22	375	0.00	9.67	0.06	0.48	1.25	0.10	9.78	4.03	57.93	25.55	134.58	33.89	354.95	72.02	11.55	692.72	0.02	0.09		368
TS-002-23	375	0.00	18.10	0.10	1.60	3.91	0.19	24.96	10.98	156.66	69.16	355.46	83.00	817.92	166.36	23.90	1 684.51	0.01	0.06		162
LS-032-1	380	0.01	19.01	0.05	1.14	2.38	0.60	19.02	7.99	119.51	55.61	302.30	76.59	808.62	172.43	23.17	1 562.06	0.01	0.27	215.71	628
LS-32-2	379	0.00	11.21	0.10	2.08	4.83	0.92	29.62	11.46	151.90	64.38	328.46	80.16	839.54	172.82	19.15	1 678.35	0.01	0.23	134.35	91
LS-32-3	379	0.00	11.92	0.12	1.79	4.17	0.93	23.53	9.00	119.61	50.72	265.78	66.66	709.65	149.54	18.93	1 394.49	0.01	0.29	399.70	115
LS-32-4	379	0.00	9.79	0.05	0.68	1.42	0.46	10.85	4.15	58.60	25.32	134.24	33.54	363.13	78.80	12.39	708.62	0.02	0.36		421
LS-32-5	376	0.22	16.32	0.20	3.68	7.22	1.48	42.46	15.62	199.62	80.69	405.13	96.61	1 001.95	205.50	29.12	2 047.58	0.01	0.26	19.12	71
LS-32-6	377	0.00	14.49	0.03	0.44	1.51	0.32	11.49	5.10	75.28	35.78	204.07	56.04	631.75	139.13	16.79	1 158.66	0.01	0.24		967
LS-32-7	378	0.01	12.71	0.03	0.70	1.84	0.34	10.79	4.62	66.24	30.94	171.33	44.77	498.72	107.44	15.63	934.84	0.02	0.24	169.42	454
LS-32-8	370	0.13	44.86	0.35	5.57	14.84	3.50	105.60	38.09	478.77	190.77	920.63	211.61	2 125.52	422.89	69.25	4 493.88	0.02	0.27	51.00	93
LS-32-9	373	0.01	13.89	0.12	2.06	4.32	0.88	26.71	10.17	135.70	57.39	300.45	73.96	767.39	160.10	21.29	1 531.87	0.01	0.25	85.78	132
LS-32-10	379	0.01	16.56	0.15	2.84	4.59	0.96	30.80	12.21	161.29	67.99	352.76	85.74	890.39	182.49	25.11	1 783.68	0.01	0.25	108.96	157
LS-32-13	377	0.07	12.22	0.15	2.46	4.80	1.33	40.46	16.19	221.76	94.04	479.34	116.76	1 223.08	253.44	21.03	2 445.08	0.01	0.29	28.42	143
LS-32-14	375	0.07	23.92	0.23	4.44	10.14	2.34	62.65	23.47	298.40	120.11	585.96	138.19	1 411.81	284.51	41.13	2 925.09	0.01	0.28	47.37	72
LS-32-15	380	0.00	22.71	0.05	0.99	2.25	0.44	17.32	6.79	94.42	41.09	217.88	54.78	584.98	120.47	26.44	1 137.74	0.02	0.21		587
LS-32-16	375	0.00	12.43	0.15	1.87	4.91	1.07	34.86	13.34	183.31	76.84	394.74	96.74	1 022.76	210.75	20.43	2 033.35	0.01	0.25		118
LS-32-17	375	0.02	17.12	0.19	3.18	8.15	1.83	48.83	17.28	221.46	89.13	438.85	104.82	1 069.96	219.54	30.48	2 209.87	0.01	0.28	67.62	62
LS-32-18	378	0.01	16.96	0.16	3.24	7.02	1.56	39.38	14.28	179.20	73.59	366.27	88.74	902.51	184.02	28.94	1 847.99	0.02	0.29	129.08	70
LS-32-19	371	0.01	12.14	0.09	1.71	3.30	0.79	21.75	8.74	117.08	51.02	263.18	65.64	701.69	150.56	18.03	1 379.67	0.01	0.28	91.79	185
LS-32-20	378	0.01	14.23	0.04	0.64	1.55	0.38	11.66	5.17	77.28	35.43	200.35	53.15	582.27	126.42	16.86	1 091.74	0.02	0.27	165.36	817
LS-32-21	373	0.02	16.16	0.08	1.89	3.81	0.89	24.89	9.68	137.05	60.00	316.07	79.26	839.72	179.44	22.86	1 646.12	0.01	0.28	105.75	220
LS-32-22	372	0.02	9.46	0.16	1.96	4.20	1.06	29.55	11.17	144.93	61.05	306.57	75.24	775.45	160.14	16.85	1 564.11	0.01	0.29	45.34	94
LS-32-23	381	0.03	27.47	0.29	5.59	12.58	2.71	66.57	23.08	292.84	116.56	566.22	132.78	1 348.68	273.55	48.67	2 820.27	0.02	0.29	70.16	53

(续表 2)

点号	Age/Ma	$w_B/10^{-6}$														LREE/		(Ce/		Zircon Ce ^{IV} /Ce ^{III}	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE	HREE	Ce*		
泥盆纪细粒闪长岩																					
LS14-007-3	373	0.01	33.13	0.17	2.74	7.31	2.50	44.95	16.30	204.20	80.78	391.58	91.33	898.00	186.92	45.86	1 914.06	0.02	0.42	185.13	159
LS14-007-4	368	0.02	33.21	0.17	3.66	9.72	3.49	56.51	21.18	254.88	100.61	481.46	110.80	1 082.87	220.58	50.27	2 328.88	0.02	0.45	138.30	107
LS14-007-5	371	2.02	76.38	2.01	18.42	16.29	4.45	53.15	16.71	188.77	70.01	353.56	80.23	812.48	173.65	119.57	1 748.56	0.07	0.46	9.30	74
LS14-007-6	372	0.29	78.65	0.40	6.78	14.97	5.13	83.48	29.68	357.31	134.48	625.73	140.11	1 333.55	268.88	106.22	2 973.22	0.04	0.44	57.18	130
LS14-007-10	369	0.89	61.80	0.73	9.88	13.75	4.76	56.87	19.45	236.72	90.70	428.28	98.31	959.33	199.52	91.81	2 089.18	0.04	0.52	18.78	93
LS14-007-15	369	0.03	22.82	0.23	4.13	9.20	2.87	47.12	16.64	199.71	79.35	386.44	88.11	884.80	185.98	39.28	1 888.15	0.02	0.42	67.50	70
LS14-007-18	371	0.03	26.74	0.22	4.48	10.76	3.36	54.86	18.76	228.01	89.85	431.10	98.67	973.35	202.43	45.60	2 097.03	0.02	0.42	76.89	65
LS14-007-19	372	0.01	52.93	0.12	2.46	7.87	2.65	57.44	21.19	270.24	107.82	509.78	116.87	1 137.11	231.01	66.04	2 451.46	0.03	0.38	404.12	266
LS14-007-21	368	0.07	44.49	0.33	7.43	14.59	4.65	72.61	24.70	294.68	113.42	537.79	121.01	1 189.97	242.91	71.56	2 597.09	0.03	0.44	74.28	71
LS14-007-22	374	0.04	25.53	0.27	4.32	9.66	2.86	51.83	18.47	222.43	88.04	420.09	99.05	1 000.58	207.96	42.66	2 108.45	0.02	0.39	62.01	79
LS14-007-23	372	0.48	153.56	1.29	14.68	20.00	5.66	82.99	27.35	315.30	120.67	573.12	134.73	1 355.49	283.08	195.65	2 892.74	0.07	0.42	47.92	158
LS14-007-25	370	0.01	41.45	0.18	4.53	10.43	3.29	61.51	21.38	265.78	102.55	489.60	111.04	1 087.51	222.87	59.89	2 362.24	0.03	0.40	203.37	117
石炭纪碱性花岗岩																					
LS14-070-3	331	0.02	13.81	0.16	2.41	4.73	2.11	29.25	10.05	124.72	48.53	221.78	48.26	451.93	96.33	23.24	1 030.85	0.02	0.55	62.08	43
LS14-070-6	335	0.24	23.74	0.28	2.78	5.49	0.63	33.08	11.94	148.99	58.54	272.40	58.77	552.50	115.34	33.16	1 251.56	0.03	0.14	22.67	66
LS14-070-7	333	10.25	37.49	3.47	17.31	6.07	0.58	26.28	9.14	111.52	44.20	211.89	46.16	432.84	92.87	75.17	974.90	0.08	0.14	1.54	72
LS14-070-10	331	3.22	29.97	1.13	6.46	6.05	0.74	33.53	11.93	145.69	57.56	259.14	55.22	510.04	106.77	47.56	1 179.89	0.04	0.16	3.85	64
LS14-070-12	332	0.11	10.89	0.17	3.08	6.29	0.78	35.13	12.75	159.20	63.22	290.89	63.21	598.88	124.80	21.33	1 348.09	0.02	0.16	19.38	24
LS14-070-15	322	0.83	28.95	0.40	3.25	5.68	0.65	36.31	13.08	164.25	64.23	292.74	62.37	588.52	121.93	39.75	1 343.43	0.03	0.14	12.36	79
LS14-070-20	331	0.03	8.88	0.26	5.00	9.93	1.82	51.91	17.55	202.04	73.84	326.51	68.20	623.25	128.37	25.93	1 491.66	0.02	0.25	25.43	8
LS14-070-21	342	0.25	23.92	0.34	2.67	5.19	0.63	35.50	12.06	151.83	58.83	268.17	57.68	538.81	110.58	33.01	1 233.45	0.03	0.14	19.86	71
LS14-070-22	331	1.83	26.00	0.62	4.75	5.28	0.53	29.43	10.91	139.09	54.77	255.91	56.19	528.04	111.53	39.00	1 185.87	0.03	0.13	5.98	76
LS14-070-27	331	0.13	19.28	0.18	2.11	4.34	0.62	26.76	9.74	120.42	48.08	219.30	47.18	441.57	91.06	26.66	1 004.12	0.03	0.18	31.11	67
LS14-070-29	332	0.19	15.81	0.20	1.96	3.98	0.41	22.62	8.99	111.94	44.50	206.74	45.07	420.27	88.20	22.56	948.33	0.02	0.13	19.81	64
LS14-070-30	321	8.69	49.89	2.81	14.91	9.42	0.78	41.78	15.23	181.84	72.13	333.30	71.92	668.99	138.92	86.52	1 524.12	0.06	0.12	2.47	58
石炭纪粗粒闪长玢岩																					
LS14-011-1	308	0.01	8.54	0.07	1.66	3.71	0.85	23.53	8.14	97.05	37.29	166.33	33.85	304.94	62.01	14.83	733.14	0.02	0.28	107.73	73
LS14-011-2	308	0.01	8.44	0.05	1.35	3.96	0.94	23.21	7.94	94.57	36.16	162.51	34.98	300.29	62.06	14.75	721.72	0.02	0.30	86.70	63
LS14-011-3	306	0.00	8.65	0.03	0.73	1.90	0.35	14.24	5.12	64.68	26.76	129.67	27.74	265.34	58.88	11.66	592.43	0.02	0.21		270
LS14-011-4	314	0.06	5.97	0.06	0.72	2.25	0.52	13.41	4.85	59.95	23.76	110.26	23.53	212.19	46.25	9.58	494.20	0.02	0.29	26.22	104
LS14-011-5	310	0.00	10.37	0.05	1.07	2.31	0.44	14.32	5.32	67.47	26.57	126.61	26.91	246.71	51.94	14.23	565.84	0.03	0.23		193
LS14-011-15	311	0.01	8.63	0.10	1.68	4.13	0.90	24.01	8.59	101.06	39.27	171.83	35.88	316.30	65.93	15.44	762.86	0.02	0.28	91.40	63
LS14-011-16	311	0.09	12.46	0.09	0.98	1.83	0.47	15.00	5.64	79.23	33.94	167.86	37.10	364.27	81.30	15.93	784.34	0.02	0.28	33.06	571

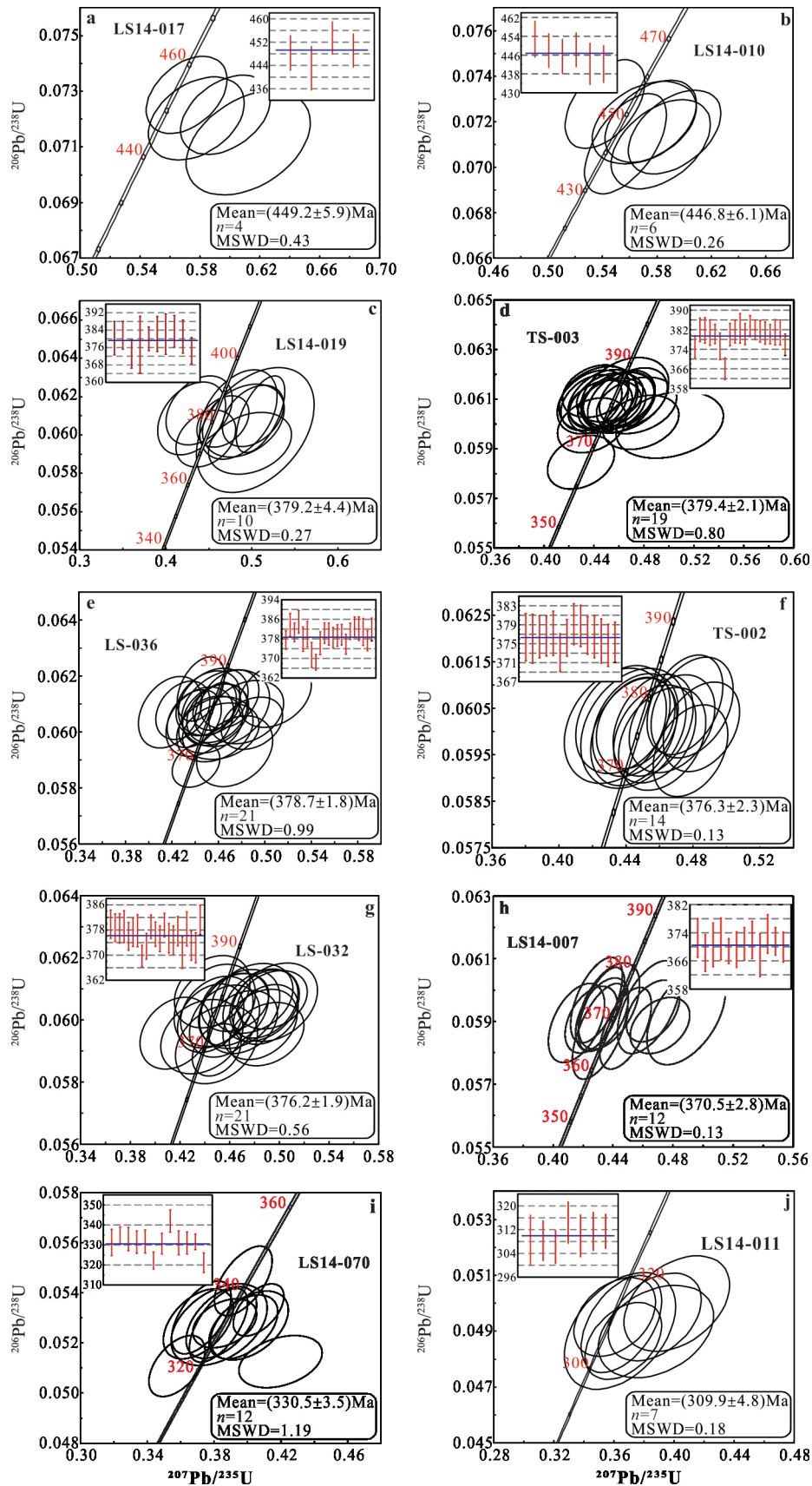


图5 老山口岩浆岩锆石 U-Pb 年龄谐和曲线

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams for volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou deposit

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2018, 25(5)

二长闪长岩(LS14-019)的锆石以短柱状为主(长/宽为1:1~2:1), CL图像显示其具有明显的韵律环带(图4), Th/U比值为0.3~1.0, 反映出岩浆成因锆石的特征。选取测试点中15个谐和度较好的测试点, 其中3个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄非常高, 落于2527~1525 Ma间, 结合锆石CL图像所显示的明显的核边结构(锆石点10、15, 图4), 认为其为继承锆石的年龄。另有两个测试点落于459~442 Ma, 与前述奥陶纪火山岩的年龄相一致, 推测可能为继承锆石。剩余10个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(379.2±4.4) Ma (MSWD=0.27), 代表了二长闪长岩的形成年龄(图5c)。

黑云母闪长岩(TS-003和LS-036)两个样品的锆石均以柱状为主(长/宽为1:1~2.5:1), CL图像显示其具有明显的韵律环带, 部分具有核幔结构(图4), Th/U比值分别为0.4~1.0和0.3~2.0, 反映出岩浆成因锆石的特征。分别选取22个和24个谐和度较好的测试点, 两个样品均存在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄落于417~391 Ma间的测试点, 这与区域泥盆纪火山岩地层的年龄相符, 推测可能为继承锆石。两个样品中大部分测试点集中于约380 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为(379.4±2.1) Ma (MSWD=0.80)和(378.7±1.8) Ma (MSWD=0.80), 代表了黑云母闪长岩的形成年龄为379 Ma左右(图5d、e)。

石英正长岩(TS-002和LS-032)两个样品的锆石主要以柱状为主(长/宽为1:1~4:1), 部分锆石碎裂呈不规则状, CL图像显示明显的振荡环带以及宽窄不一、明暗相间的条带状结构(图4), Th/U比值分别为0.3~1.1和0.5~1.8, 反映出岩浆成因锆石的特征。分别选取21个和25个谐和度较好的测试点, 两个样品均存在两组较老的锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于约407 Ma和约391 Ma, 其中391 Ma与老山口火山岩地层的年龄相符, 结合锆石CL图像所显示的核边结构(TS-002, 锆石点4), 推测可能为继承锆石, 407 Ma则可能是继承或俘获的年龄更老的锆石。两个样品中大部分测试点集中于约380 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为(376.3±2.3) Ma (MSWD=0.13)和(376.2±1.9) Ma (MSWD=0.56), 代表了石英正长岩的形成年龄为376 Ma左右(图5f、g)。

细粒闪长岩(LS14-007)的锆石以短柱状为主(长/宽为1:1~2:1), CL图像显示其具有明显的岩浆韵律环带(图4), Th/U比值为0.8~3.2, 反映

出岩浆成因锆石的特征。选取测试点中17个谐和度较好的测试点, 其中5个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄非常高, 分别集中于约408 Ma和约391 Ma, 其中391 Ma与老山口火山岩地层的年龄相符, 推测可能为继承锆石, 407 Ma则可能是继承或俘获的年龄更老的锆石。剩余12个点相对集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(370.5±2.8) Ma (MSWD=0.13), 代表了细粒闪长岩的形成年龄(图5h)。

碱性花岗岩(LS14-070)的CL图像显示锆石形态较为规则以负晶形为主, 长/宽比值为1:1~3.5:1。由锆石明暗条件和环带构造可以分为两类: 一类锆石存在浅色明显的岩浆韵律环带, Th/U比值为0.25~0.49, 反映出岩浆成因锆石的特征; 另一类锆石存在明显的核、幔、边结构, 核部为均质暗色, 幔部为狭窄的浅色边, 边部呈暗色但存在明显的岩浆韵律环带(图4)。所得U-Pb年龄测试结果分为两组: 其中暗色锆石所得结果具有较高的 ^{207}Pb 值, 使得谐和度为负而无法得出真实的年龄; 选取浅色岩浆锆石中12个谐和度较高的数据点进行年代学分析, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(330.5±3.5) Ma (MSWD=1.19), 代表碱性花岗岩的年龄(图5i)。

粗粒闪长玢岩(LS14-011)的CL图像显示锆石形态各异, 锆石以柱状(长/宽为1:1~3:1)为主, 具有明显的振荡环带以及明暗相间的条带状结构(图4), Th/U比值为0.2~1.3, 反映出岩浆成因锆石的特征。选取测试点中14个谐和度较好的测试点, 其中7个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别集中于1863~1803 Ma和479~430 Ma, 最古老锆石的CL图像显示这些锆石具有核边结构(锆石点19, 图4), 表明其为继承锆石的年龄, 479~430 Ma则可能也是继承或俘获的老锆石。其余7个测试结果相对集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(309.9±4.8) Ma (MSWD=0.18), 代表了粗粒闪长玢岩的年龄(图5j)。

3.3 锆石微量及氧逸度特征

奥陶纪玄武安山岩(LS14-017)的锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与典型的岩浆锆石稀土元素配分曲线非常相似, 明显富集重稀土元素, 亏损轻稀土(图6a), LREE/HREE比值为0.03~0.37, 明显富集Ce而亏损Eu元素。其中两个年龄较大的继承锆石(sp.6和sp.15)的稀土元素配分曲线略有不同, 另外一个代表成岩年龄的锆石其轻稀土含

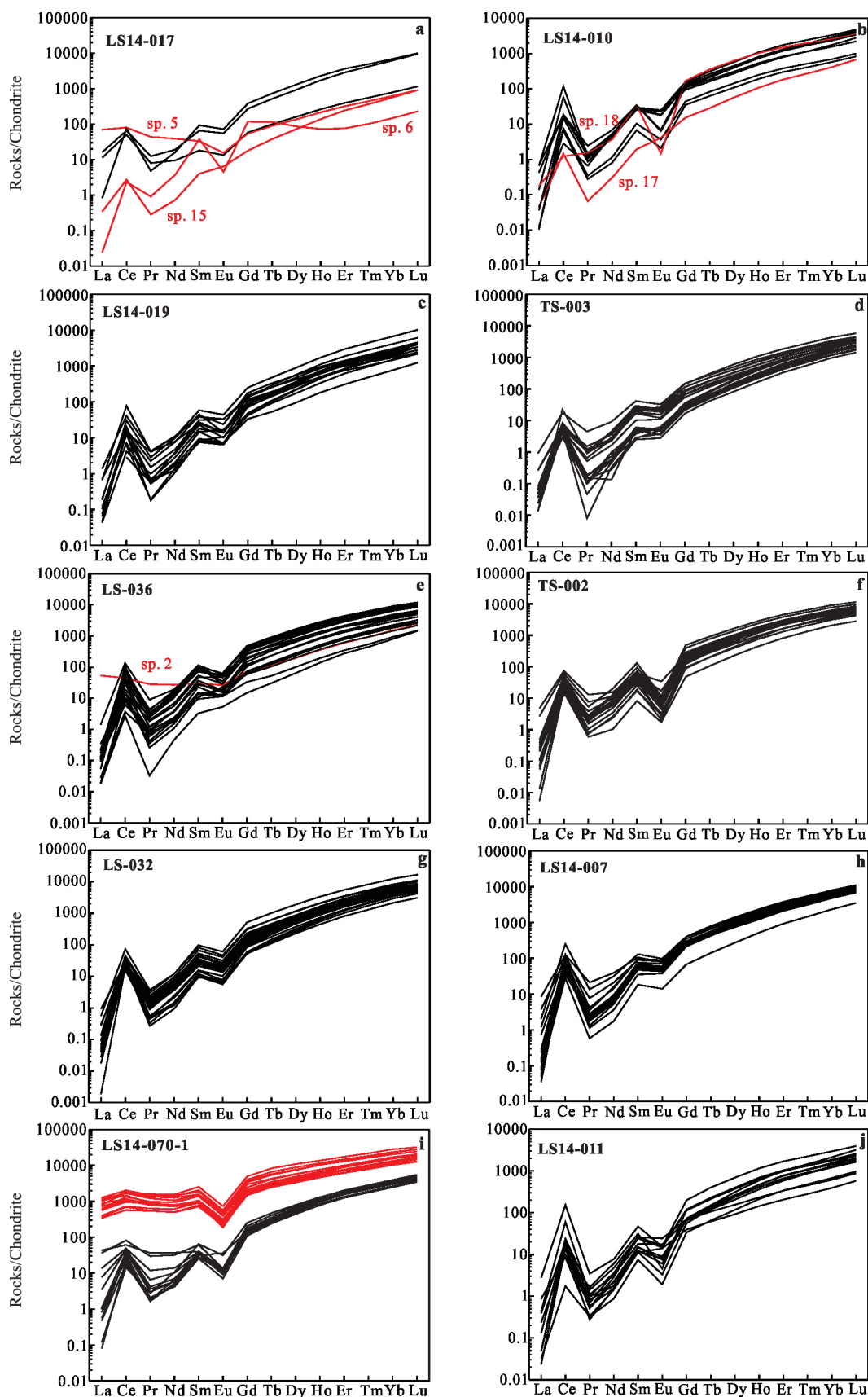


图 6 老山口岩浆岩锆石球粒陨石标准化稀土元素分配模式图

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of zircon grains for volcanic and intrusive rocks from Laoshankou

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2018, 25(5)

量明显较高(sp.5),可能与锆石中富含稀土的矿物包体有关(主要是磷灰石)。4个成岩年龄锆石点的 $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.36~0.41和1.45~38.34。根据辛洪波等^[31]提出的公式,计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为73.22~181.16。

奥陶纪安山岩(LS14-010)的锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与岩浆锆石配分曲线也非常相似,重稀土元素明显富集,轻稀土相对亏损(图6b),LREE/HREE比值为0.01~0.04,明显富集Ce而亏损Eu元素。其中两个年龄较大的继承锆石(sp.17和18)的稀土元素配分曲线略有不同,但仍具有岩浆锆石特征。6个成岩年龄锆石点的 $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.10~0.41和16.65~150.73。计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为5.15~204.31。

二长闪长岩(LS14-019)的锆石在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上,重稀土元素明显富集,轻稀土相对亏损,明显富集Ce而亏损Eu元素,与岩浆锆石的稀土元素配分曲线相近(图6c)。10个成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值为0.01~0.03, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.21~0.53和8.16~58.33。计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为41.53~731.35。

两个黑云母闪长岩(TS-003和LS-036)的稀土元素配分曲线非常相似,均与岩浆锆石的配分曲线相近,具有重稀土元素明显富集,轻稀土相对亏损,明显富集Ce而亏损Eu元素的特征。其中LS-036中一个成岩年龄的锆石点轻稀土含量明显较高(sp.2),可能与锆石中富含稀土的矿物包体有关(主要是磷灰石;图6d,e)。两个样品成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值分别为0.01~0.02和0.01~0.12, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.33~0.58和0.13~0.86, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为8.86~445.92和1.14~149.84,计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 分别为33.34~1165.04和34.82~717.31。

两个石英正长岩(TS-002和LS-032)的稀土元素配分曲线均与岩浆锆石的配分曲线相近,具有重稀土元素明显富集,轻稀土相对亏损,明显富集Ce而亏损Eu元素的特征(图6f,g)。两个样品成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值分别为0.01~0.02和0.01~0.02, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.03~0.09和0.21~0.36, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为27.74~156.45和19.12~399.70,计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 分别为

14.26~367.68和19.12~399.70。

细粒闪长岩(LS14-007)的锆石在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上,具有重稀土元素明显富集、轻稀土相对亏损、明显富集Ce而亏损Eu元素的特征,与岩浆锆石的稀土元素配分曲线相近(图6h)。12个成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值为0.02~0.07, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.38~0.52和9.30~404.12。计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为65.19~266.36。

碱性花岗岩(LS14-070-1)的锆石在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上,明显具有两组特征:结合锆石CL图像(图4),第一类具有核、幔、边结构的锆石配分曲线特征,与典型岩浆锆石明显不同,轻稀土相对较高;第二类浅色具明显震荡环带的锆石,显示岩浆锆石配分曲线特征,富集重稀土、亏损轻稀土,明显富集Ce而亏损Eu元素的特征(图6i)。12个成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值为0.02~0.08, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.12~0.55和1.54~62.08。计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为7.64~79.20。

粗粒闪长玢岩(LS14-011)的锆石在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上,具有重稀土元素明显富集,轻稀土相对亏损,明显富集Ce而亏损Eu元素的特征,与岩浆锆石的稀土元素配分曲线相近(图6j)。7个成岩年龄锆石点的LREE/HREE比值为0.02~0.03, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值分别为0.21~0.30和26.22~107.73。计算得出的锆石 $\text{Ce}^{\text{IV}}/\text{Ce}^{\text{III}}$ 为63.28~570.66。

4 讨论

4.1 岩浆活动及构造演化时间

利用LA-ICP-MS锆石U-Pb分析,我们获得老山口矿床中的奥陶纪玄武安山岩((449.2±5.9)Ma),奥陶纪安山岩((446.8±6.1)Ma),泥盆纪二长闪长岩((379.2±4.4)Ma)、黑云母闪长岩((379.4±2.1)Ma和(378.7±1.8)Ma)、石英正长岩((376.3±2.3)Ma和(376.2±1.9)Ma)、细粒闪长岩((370.5±2.8)Ma),石炭纪碱性花岗岩((330.5±3.5)Ma)和粗粒闪长玢岩((309.9±4.8)Ma)的成岩年龄。结合区域岩浆年代学数据,认为泥盆纪北塔山组火山岩的年龄范围应为393~376Ma^[14,25,32-34]。据此,我们认为老山口矿床存在3期岩浆活动,分别为450~

440 Ma, 390~370 Ma 及 330~310 Ma, 后两个时期是区域内主要的岩浆侵入阶段。通过对准噶尔北缘大量岩浆岩年代学数据的总结^[33], 可以确定中泥盆世(约 390~370 Ma)和石炭纪(约 330~300 Ma)两期晚古生代岩浆侵入活动, 与老山口矿床的岩浆侵入阶段相符, 也与吕书君等^[14]所总结的东准噶尔古生代两期岩浆侵入活动高峰(390~370 Ma 和 320~270 Ma)以及王涛等^[15]和 Wang 等^[16]所总结的东准噶尔北缘和阿尔泰山南缘 4 期岩浆活动(470~440 Ma, 425~390 Ma, 380~360 Ma 和 290~270 Ma)具有较好的匹配性。

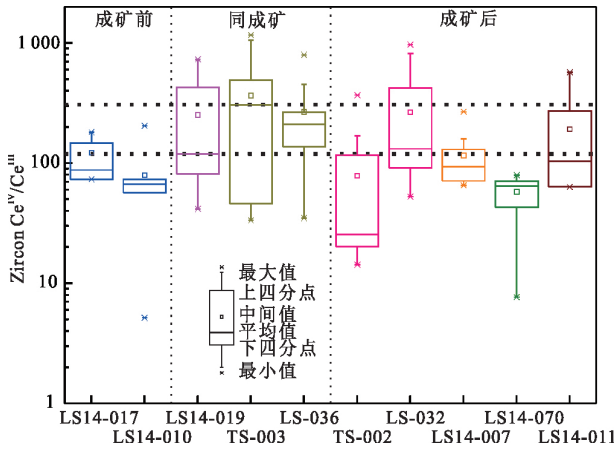
前人大量的研究表明, 东准噶尔北缘—阿尔泰山南缘地区经历了板块俯冲、板块碰撞和板内拉张过程^[1, 12-14]。其中东准噶尔北缘与板块俯冲相关的岩浆活动, 产生包括乔夏哈拉闪长玢岩(约 380 Ma)^[33], 卡拉先格尔花岗闪长斑岩(390~380 Ma)^[32], 玉勒肯哈腊苏闪长斑岩(约 379 Ma)^[35], 哈腊苏石英闪长岩、花岗闪长斑岩(391~372 Ma)^[21], 喀拉萨依二长闪长岩(约 376 Ma)等^[36]在内的 390~370 Ma 岛弧岩浆岩。老山口矿区广泛分布的泥盆纪北塔山组火山岩(393~376 Ma)也具有富集大离子亲石元素及轻稀土元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的岛弧火山岩的特征, 表明其形成于岛弧环境^[25]。这与同期老山口黑云母闪长岩和石英正长岩地球化学特征具有极高的相似性, 即富集大离子亲石元素(LILEs) K、Sr、P 及稀土元素, 亏损高场强元素(HFSEs) Th、Nb、Ta、Nd 和 Ti^[34], 进一步表明老山口矿区乃至整个东准噶尔北缘在中—晚泥盆世(390~370 Ma)处于板块俯冲相关的岛弧环境中。结合该区地质特征, 认为 370~360 Ma 东准噶尔北缘同碰撞作用结束并已开始隆升, 晚泥盆世西伯利亚板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块已对接为统一大陆, 古亚洲洋已经闭合^[33]。对于东准噶尔北缘—阿尔泰山南缘地区后碰撞—板内伸展环境相关的岩浆活动, 韩春明等^[37]和韩宝福等^[38]发现 330~310 Ma 和 305~280 Ma 的岩浆活动, 王涛等^[15]则确定 355~318 Ma 岩浆活动均与此相关。我们结合东准噶尔北缘近期一系列后碰撞—板内伸展环境的岩浆岩年代学, 得出 360~330 Ma 和 330~290 Ma 两期岩浆活动^[33], 包括 360~334 Ma 乌图布拉克碱性花岗岩^[39]、358~353 Ma 布尔根碱性花岗岩^[19]、331 Ma 乔夏哈拉碱性花岗岩^[33]、327 Ma 哈腊苏碱性花岗岩^[21]、319~299 Ma 二台花岗闪长岩^[38, 40]、300 Ma

哈旦逊花岗闪长岩体^[41]等, 与该阶段伸展环境相关, 并得出在早石炭世(360~327 Ma)东准噶尔北缘整体处于由后碰撞向板内转化的过渡期。老山口碱性花岗岩典型 A1 花岗岩的特征则表明老山口地区在约 331 Ma 进入板内后造山伸展环境^[33]。

4.2 氧逸度与成矿

锆石作为岩浆岩中重要的副矿物, 锆石中的 Ce 和 Eu 均存在两种价态, 且分异能力很强, 对氧化状态反应敏感, Ce 的正异常与氧化环境下 Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} 有关, 而 Eu 的负异常与氧化环境下 Eu^{3+} 相较 Eu^{2+} 优先进入锆石中有关, 由于锆石结晶早不宜受后期作用的影响, 锆石的 $(Eu/Eu^*)_N$ 、 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 比值便成为岩体相对氧逸度研究的有效指示, 较高的 $(Eu/Eu^*)_N$ 、 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 比值形成于相对较高的 $f(O_2)$ 环境下^[42-45]。大量研究表明岩浆氧逸度是制约斑岩型铜、金成矿的重要因素之一^[46-47]。Cu、Au 是亲硫元素, 高氧逸度条件下, 岩浆中的 S 绝大多数以 SO_4^{2-} 和 SO_2 形式溶解在硅酸盐熔体中, 能形成硫化物的 S^{2-} 含量较低, 硫化物难以达到饱和, 从而有利于铜、金在残余岩浆中逐渐富集并最终分配到岩浆流体相^[46]。Ballard 等^[48]对北智利的超大型斑岩铜矿的研究发现, 含矿岩体的氧逸度明显高于不含矿岩体的氧逸度; 李鹏举等^[46]对浙赣皖相邻区燕山期花岗质岩类氧逸度的研究亦发现, 岩体的氧逸度较高, 铜、金、钼等成矿元素的含量也较高, 充分说明高氧逸度对于铜、金、钼成矿更有利。然而对于东准噶尔北缘广泛发育的 Fe、Cu、Au 矿化与岩体氧逸度相关性的研究却比较薄弱, Fe、Cu、Au 矿化是否也与高氧逸度的岩浆活动有关, 一直未得到论证。

我们根据老山口矿床铁、铜、金矿化阶段的成矿年代(383.2 ± 4.5 Ma)^[17]以及岩体与铁、铜、金矿体的空间关系, 将老山口矿床中产出的一系列岩浆岩划分为: 成矿前的岩浆岩, 包括奥陶纪玄武安山岩和奥陶纪安山岩; 同成矿的岩浆岩, 包括泥盆纪火山岩、二长闪长岩、闪长玢岩和黑云母闪长岩; 成矿后的岩浆岩, 包括石英正长岩、细粒闪长岩、碱性花岗岩和粗粒闪长玢岩。在 Ce^{IV}/Ce^{III} 图解(图 7)中发现同成矿期的二长闪长岩和黑云母闪长岩明显具有相对较高的 Ce^{IV}/Ce^{III} 值(33.34~1 165.04, 平均 300.33), 而成矿前火山岩与成矿后的岩浆岩等均具有较低的 Ce^{IV}/Ce^{III} 值(5.15~204.31, 平均 96.41; 7.64~967.22, 平均 152.50)。此外, 在 $(Eu/Eu^*)_N$ — $(Ce/Ce^*)_N$



粗虚线为同成矿期岩体 Ce^{IV}/Ce^{III} 平均值区间。

图7 老山口岩浆岩锆石 Ce^{IV}/Ce^{III} 图解

Fig.7 Zircon Ce^{IV}/Ce^{III} box plot for volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou deposit

(图 8a)和 $(Eu/Eu^*)_N - Ce^{IV}/Ce^{III}$ 图解(图 8b)中亦发现同成矿期的二长闪长岩和黑云母闪长岩具有相对较高的 $(Eu/Eu^*)_N$ 、 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 比值,且 $(Eu/Eu^*)_N$ 值与 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 比值均呈现正相关关系,说明老山口 Fe-Cu-Au 矿床中同成矿期岩体相较非成矿期岩体具有较高的氧逸度。对比临近地区同一时期东准噶尔北缘乔夏哈拉 Fe-Cu-Au 矿床(375 Ma)^[49],我们发现乔夏哈拉成矿期岩体的 Ce^{IV}/Ce^{III} 值(32.92~807.89,平均 313.36;数据未发表)与老山口成矿期岩体的 Ce^{IV}/Ce^{III} 值(33.34~1165.04,平均 300.33)具有明显的相似性,且两者均大于非成矿期乔夏哈拉(Ce^{IV}/Ce^{III} :39.91~156.21,平均 78.20;数据未发表)和老山口(Ce^{IV}/Ce^{III} :

5.15~967.22,平均 145.12)岩体的相应值。在 $(Eu/Eu^*)_N - (Ce/Ce^*)_N$ (图 8a)和 $(Eu/Eu^*)_N - Ce^{IV}/Ce^{III}$ 图解(图 8b)中亦发现老山口与乔夏哈拉 Fe-Cu-Au 矿床的同成矿期岩体具有明显的重叠,且范围较非成矿期岩体有明显偏移,说明铁、铜、金矿化与氧逸度较高的岩浆活动也有着密切的关系,其氧逸度特征值范围为 Ce^{IV}/Ce^{III} 平均值 >300 , $(Eu/Eu^*)_N$ 平均值 >0.4 。这与智利北部典型斑岩铜矿床同成矿岩体所需要的较高的氧逸度特征($Ce^{IV}/Ce^{III} >300$, $(Eu/Eu^*)_N >0.4$)^[48]相近。此外与邻近区域同一时期的哈腊苏斑岩铜矿床^[21]相比较,老山口和乔夏哈拉 Fe-Cu-Au 矿床同成矿岩体的氧逸度特征值在 $(Eu/Eu^*)_N - (Ce/Ce^*)_N$ (图 8a)和 $(Eu/Eu^*)_N - Ce^{IV}/Ce^{III}$ 图解(图 8b)中具有明显的重叠,且相较哈腊苏成矿前(Ce^{IV}/Ce^{III} :2.58~772.36,平均 196.15)及成矿后(Ce^{IV}/Ce^{III} :3.41~61.58,平均 20.34)岩体明显向较高氧逸度方向偏移。但显然老山口和乔夏哈拉 Fe-Cu-Au 矿床同成矿岩体的氧逸度特征值相较哈腊苏同成矿岩体的 $(Eu/Eu^*)_N$ 、 $(Ce/Ce^*)_N$ 和 Ce^{IV}/Ce^{III} 氧逸度特征值明显偏低,这可能也正是老山口与乔夏哈拉是以 Fe 为主的 Fe-Cu-Au 矿化,而非哈腊苏斑岩铜矿床如此广泛的 Cu-Au 矿化的主要原因之一。

因此,我们得出岩体相对较高的氧逸度有利于 Fe-Cu-Au 矿化的产生,且其氧逸度值具有 Ce^{IV}/Ce^{III} 平均值 >300 、 $(Eu/Eu^*)_N$ 平均值 >0.4 的特征,氧逸度值与形成斑岩型 Cu-Au 矿化的高氧逸度岩体具有一定相似性,但相对较低。

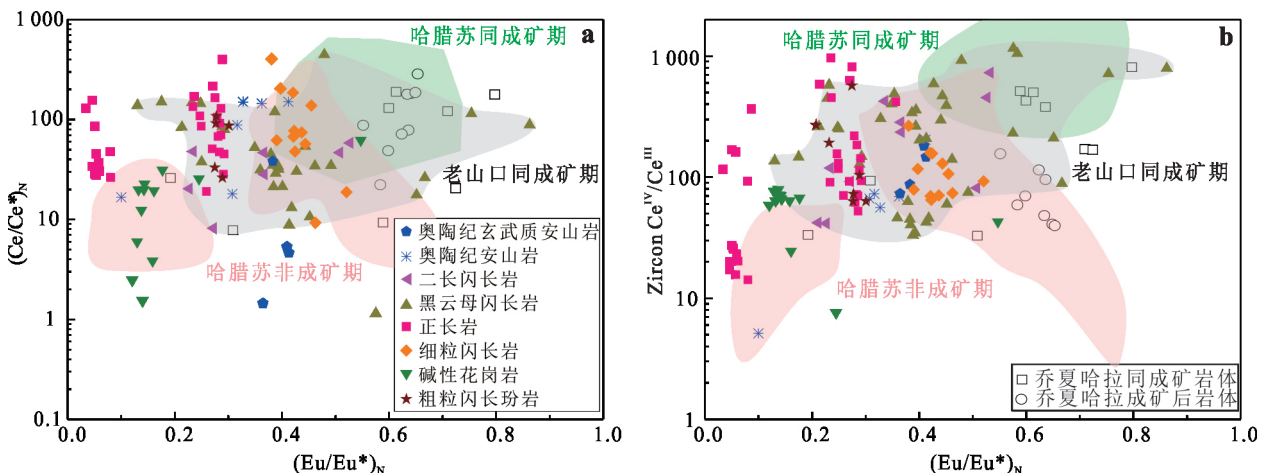


图8 老山口岩浆岩锆石 $(Eu/Eu^*)_N - (Ce/Ce^*)_N$ (a)和 $(Eu/Eu^*)_N - Ce^{IV}/Ce^{III}$ (b)图解

Fig.8 Zircon $(Eu/Eu^*)_N$ vs. $(Ce/Ce^*)_N$ (a) and $(Eu/Eu^*)_N$ vs. Ce^{IV}/Ce^{III} (b) diagrams for volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou deposit

5 结论

(1)老山口矿床中的奥陶纪玄武安山岩((449.2±5.9) Ma),奥陶纪安山岩((446.8±6.1) Ma),泥盆纪火山岩(393~376 Ma)、二长闪长岩((379.2±4.4) Ma)、黑云母闪长岩((379.4±2.1) Ma 和(378.7±1.8) Ma)、石英正长岩((376.3±2.3) Ma 和(376.2±1.9) Ma)、细粒闪长岩((370.5±2.8) Ma),石炭纪碱性花岗岩((330.5±3.5) Ma)和粗粒闪长玢岩((309.9±4.8) Ma)的年代学数据表明老山口矿床存在3期岩浆活动:450~440 Ma、约390~370 Ma以及330~310 Ma,前两个时期和最后一期的岩浆活动分别对应俯冲相关的岛弧环境和后碰撞-板内伸展环境。

(2)老山口矿床中与铁、铜、金矿化同期的岩体相较成矿前与成矿后的岩体,具有较高的氧逸度值(高(Eu/Eu*)_N、(Ce/Ce*)_N和Ce^{IV}/Ce^{III}),说明铁-铜-金矿化与高氧逸度的岩浆活动有关。

锆石 U-Pb 定年分析得到了中国科学院广州地球化学研究所李聪颖博士的帮助,野外工作得到惠源矿业有限责任公司陈龙工程师的大力支持,成文过程中新疆生态与地理研究所李诺研究员和吴燕爽博士对文章提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 梁培,陈华勇,韩金生,等.东准噶尔北缘早石炭世构造体制转变:来自碱性花岗岩年代学与地球化学制约[J].大地构造与成矿学,2017,41(1):201-221.
- [2] 焦建刚,王勇,钱壮志,等.新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Y9 岩体年代学与成岩成矿机制探讨[J].矿床地质,2014,33(4):675-688.
- [3] 应立娟,王登红,梁婷,等.新疆乔夏哈拉铁铜金矿的矿床成因及其成矿模式[J].矿床地质,2009,28(2):211-217.
- [4] 吕书君,张志欣,杨富全,等.准噶尔北缘老山口铁铜金矿床成矿流体及成矿机制[J].矿床地质,2012,31(3):517-534.
- [5] 薛春纪,赵战锋,吴淦国,等.中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化:以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J].地学前缘,2010,17(2):53-82.
- [6] 赵战锋,薛春纪,张立武,等.新疆青河玉勒肯哈腊苏铜矿区酸性岩锆石 U-Pb 法定年及其地质意义[J].矿床地质,2009,28(4):425-433.
- [7] 姚红,赵华,薛红梅.新疆青河县喀腊萨依斑岩铜矿含矿岩体的地球化学特征[J].新疆有色金属,2007,30(3):7-8.
- [8] 王莉娟,王京彬,王玉往,等.准噶尔北部希勒库都克斑岩铜矿床地质与成矿流体[J].岩石学报,2009,25(4):944-954.
- [9] 周肃,蔡红,谢才富.新疆北部索尔库都克铜(钼)矿床年代学研究[J].华南地质与矿产,1996(4):52-56.
- [10] 侯江胜.新疆富蕴县科克库都克金铜矿地质特征及控矿因素[J].新疆有色金属,2010,33(增刊1):14-15.
- [11] 潘东.新疆富蕴县阿克塔斯金矿床地质特征与矿床成因研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
- [12] 张海祥,沈晓明,马林,等.新疆北部富蕴县埃达克岩的同位素年代学及其对古亚洲洋板块俯冲时限的制约[J].岩石学报,2008,24(5):1054-1058.
- [13] 许继峰,梅厚钧,于学元,等.准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩:消减板片部分熔融的产物[J].科学通报,2001,46(8):684-688.
- [14] 吕书君,杨富全,柴凤梅,等.东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].地质评论,2012,58(1):149-164.
- [15] 王涛,童英,李舫,等.阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义:以中国阿尔泰为例[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6):595-618.
- [16] WANG T, HONG D W, JAHN B M, et al. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. The Journal of Geology, 2006, 114(6): 735-751.
- [17] LI Q, LÜ S J, YANG F Q, et al. Geological characteristics and genesis of the Laoshankou Fe-Cu-Au deposit in Junggar, Xinjiang, Central Asian Orogenic Belt[J]. Ore Geology Review, 2015, 68: 59-78.
- [18] 吕书君,杨富全,柴凤梅,等.东准噶尔北缘老山口矿区花岗岩体地球化学特征[J].地质论评,2013,59(5):971-982.
- [19] 童英.阿尔泰造山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义[D].北京:中国地质科学院,2006.
- [20] 代雅建.阿尔泰布尔根碱性花岗岩的年代学及其地质意义研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
- [21] WU C, CHEN H Y, HOLLINGS P, et al. Magmatic sequences in the Halasu Cu Belt, NW China: trigger for the Paleozoic porphyry Cu mineralization in the Chinese Altay-East Junggar[J]. Ore Geology Review, 2015, 71: 373-404.
- [22] 张元元,郭召杰.准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究[J].岩石学报,2010,26(2):421-430.
- [23] 简平,刘敦一,张旗,等.蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J].地学前缘,2003,10(4):439-456.
- [24] 韩宝福,季建清,宋彪,等.新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].科学通报,2004,49(22):2324-2328.
- [25] 柴凤梅,杨富全,刘锋,等.新疆准噶尔北缘北塔山组火山岩

- 年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2183-2198.
- [26] 程剑. 新疆青河县老山口金铜铁矿区IV矿段地质特征及成因探讨[J]. 新疆有色金属, 2004(增刊1): 22-23.
- [27] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. 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*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [28] LUDWIG K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center, 2003: 1-72.
- [29] TANG G J, WANG Q, WYMAN D A, et al. Late Carboniferous high $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Hf}}(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: ridge-subduction-related magmatism and crustal growth[J]. *Lithos*, 2012, 140: 86-102.
- [30] RUBATTO D, GEBAUER D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: some examples from the Western Alps[M] // PAGEL M, BARBIN V, BLANC P, et al. Cathodoluminescence in geosciences. Heidelberg, Berlin: Springer, 2000: 373-400.
- [31] 辛洪波, 曲晓明. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III)比值的约束[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 152-160.
- [32] 相鹏, 张连昌, 吴华英, 等. 新疆青河卡拉先格铜矿带II-III矿区含矿斑岩锆石年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1474-1483.
- [33] LIANG P, CHEN H, HOLLINGS P, et al. The Paleozoic tectonic evolution and metallogenesis of the northern margin of East Junggar, Central Asia Orogenic Belt: geochronological and geochemical constraints from igneous rocks of the Qiaoxiahala Fe-Cu deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 130: 23-45.
- [34] LIANG P, CHEN H, HOLLINGS P, et al. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Laoshankou District, North Xinjiang: implications for the Late Paleozoic tectonic evolution and metallogenesis of East Junggar[J]. *Lithos*, 2016, 266/267: 115-132.
- [35] 杨富全, 张志欣, 刘国仁, 等. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏斑岩铜矿床年代学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2029-2042.
- [36] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 科学通报, 2006, 51(13): 1565-1574.
- [37] 韩春明, 肖文交, 赵国春, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 163-170.
- [38] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I): 后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1077-1086.
- [39] 周刚, 吴淦国, 董连慧, 等. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1390-1402.
- [40] 李宗怀, 韩宝福, 宋彪. 新疆东准噶尔二台北花岗岩体和包体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1263-1270.
- [41] 周刚, 张招崇, 吴淦国, 等. 新疆准噶尔北东缘造山后伸展及陆壳生长: 来自哈旦逊杂岩体的岩石学及地球化学的证据[J]. 地质学报, 2009, 83(3): 331-346.
- [42] 赵振华. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 267-286.
- [43] 孙占亮. 华南山岭地区中生代花岗岩体年代学及氧逸度特征[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 141-151.
- [44] 李平, 徐学义, 王洪亮, 等. 中天山南缘那拉提碱性花岗岩岩石成因: 来自锆石微量元素和 Hf 同位素的证据[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1949-1964.
- [45] BELOUSOVA E, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602-622.
- [46] 李鹏举, 余心起, 邱骏挺, 等. 浙赣皖相邻区燕山期花岗岩类含矿性及其氧逸度特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(5): 161-168.
- [47] 胥磊落, 毕献武, 陈佑纬, 等. 云南金平铜厂斑岩铜钼矿区岩体锆石 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 比值及其对成矿的指示意义[J]. 矿物学报, 2012, 32(1): 74-82.
- [48] BALLARD J R, PALIN M J, CAMPBELL I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(3): 347-364.
- [49] LI Q, ZHANG Z X, GENG X X, et al. Geology and geochemistry of the Qiaoxiahala Fe-Cu-Au deposit, Junggar region, Northwest China[J]. *Ore Geology Review*, 2014, 57(3): 462-481.