

西秦岭闾井花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及其意义

王顺安¹, 王晓霞¹, 柯昌辉¹, 杨 阳¹, 聂政融^{1,2}, 吕星球^{1,2}, 李金宝³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 闾井岩体是西秦岭“五朵金花”岩体群的成员之一。岩石类型主要为似斑状黑云母二长花岗岩、含斑黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩及粗粒黑云母二长花岗岩。对似斑状黑云母二长花岗岩、粗粒黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分别获得 221 ± 1 Ma ($N=20$, MSWD=0.11)、 221 ± 1 Ma ($N=24$, MSWD=0.04) 和 218 ± 1 Ma ($N=15$, MSWD=0.13) 的年龄, 表明该岩体形成于晚三叠世, 其中似斑状黑云母二长花岗岩比中细粒黑云母二长花岗岩形成略早。该花岗岩的 $A/CNK=1.02 \sim 1.16$, $Na_2O+K_2O=7.65\% \sim 8.84\%$, $K_2O/Na_2O=1.37 \sim 1.82$, 属于过铝质-强过铝质、高钾钙碱性-钾玄岩系列, 为 I 型花岗岩。稀土元素配分曲线为右倾型, 轻、重稀土元素分馏明显, 具有显著的负 Eu 异常。地球化学上总体富集 Rb、Th、K 元素, 不同程度亏损 Sr、Nb、P、Ti 元素。锆石饱和温度计算显示, 闾井岩体成岩温度为 $736 \sim 818^\circ\text{C}$ 。该岩体与“五朵金花”岩体群中的中川岩体具有相似的形成时代及地球化学特征, 表明闾井岩体与中川岩体可能具有相似的成岩机制, 其外围可能也具有和中川岩体一样的成矿潜力。

关键词: 花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 西秦岭

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0033-19

Zircon U-Pb age and geochemistry of Lüjing granitoid pluton in Western Qinling and their significance

WANG Shun-an¹, WANG Xiao-xia¹, KE Chang-hui¹, YANG Yang¹, NIE Zheng-rong^{1,2}, LÜ Xing-qiu^{1,2} and LI Jin-bao³

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Faculty of Earth Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Lüjing pluton is one of the “Five Golden Flower” granite plutons in the Western Qinling. Its main lithologies includes porphyroid biotite admellite, phenocryst-bearing biotite adamellite, medium-fine-grained biotite monzonitic granite and coarse-grained biotite monzonitic granite. The zircon LA-ICP-MS dating for the porphyroid biotite admellite, coarse-grained biotite monzonitic granite and medium-fine-grained biotite monzonitic granite from this pluton yielded ages of 221 ± 1 Ma ($N=20$, MSWD=0.11), 221 ± 1 Ma ($N=24$, MSWD=0.04) and 218 ± 1 Ma ($N=15$, MSWD=0.13), respectively. These ages suggest that they were formed during Late Triassic and the porphyroid biotite admellite was formed earlier than the medium-fine-grained biotite monzonitic granite. The rocks are of high-K calc-alkaline to shoshonite series and belong to peraluminous to strong

收稿日期: 2015-05-05; 接受日期: 2015-10-14

基金项目: 地质调查项目(12120113090200, 1212010611817); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K1406); 公益性行业专项课题(200911007-09)

作者简介: 王顺安(1991-), 男, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1037350400@qq.com; 通讯作者: 王晓霞(1960-), 女, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: xiaoxiaawang@hotmail.com。

peraluminous I-type granites with A/CNK varying from 1.02 to 1.16, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ from 7.65% to 8.84% and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ from 1.37 to 1.82. Their REE and trace elements are enriched in LREE, Rb, Th and K and differently depleted in Sr, Nb, P and Ti, with strong negative anomalies of Eu ($\delta\text{Eu}=0.30\sim0.70$). Crystallization temperature of the Lüjing granites is from 736°C to 818°C by zircon thermometer. The geochemical features and formation ages of the Lüjing pluton are similar to those of the Zhongchuan pluton, which is also one of the “Five Golden Flower” granites, suggesting that the Lüjing pluton may have similar petrogenic mechanism and metallogenic potential to the Zhongchuan pluton.

Key words: granites; zircon U-Pb dating; geochemistry; Western Qinling

Fund support: China Geological Survey Project (12120113090200, 1212010611817); Fundamental Scientific Research Separate Funds for Central Public Welfare Research Institutes (K1406); Welfare Scientific Research Project of Ministry of Land and Resources (200911007-09)

西秦岭造山带发育大量的花岗质侵入体,侵位时代主要为印支期(张成立等,2008;李婷等,2012;骆必继等,2012;韦萍等,2013;Wang *et al.*, 2013)。其中处于造山带东部甘肃礼县-岷县境内的中川岩体、柏家庄岩体、碌础坝岩体、闫井岩体和教场坝岩体被合称为“五朵金花”岩体群(许亚玲等,2006;殷先明等,2006;彭璇,2012,2013)。近年来,在该岩体群东段的中川岩体外围接触带发现了李坝、金山、马泉等多个大中型金矿,形成了礼岷金矿带(奚小双等,2002;冯建忠等,2003;刘家军等,2010;郭红乐等,2013;姜启明等,2014)。目前围绕“五朵金花”岩体群及礼岷金矿带前人已经做了大量工作,主要集中在中酸性岩体的形成时代和元素地球化学等方面(叶海,2005;温志亮,2008;欧春生等,2010),另外对于矿床地质特征和成矿作用方面也有大量研究(高珍权,1999;程彧等,2001;张作衡等,2004;张玉龙等,2008;杨根生等,2008;崔义发,2012),但岩体与成矿的关系仍不清楚,为什么有的岩体外接触带形成金矿,而有的目前还没有发现金矿,它们在形成时代、岩石类型、地球化学特征、岩浆演化及物质来源上是否有差异,这是人们比较关心的问题。

闫井岩体的主体岩性为似斑状黑云母二长花岗岩,与岩体群中其它岩体相比,目前的研究报道仅限于岩体地质及成岩年龄方面。前人在闫井岩体大石头梁单元二长花岗岩曾获得 Rb-Sr 等时线年龄为 $181 \pm 8 \text{ Ma}$ (地矿部甘肃地勘局兰州地勘院,1998)^①;对似斑状黑云母二长花岗岩曾获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $214.5 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (Zeng *et*

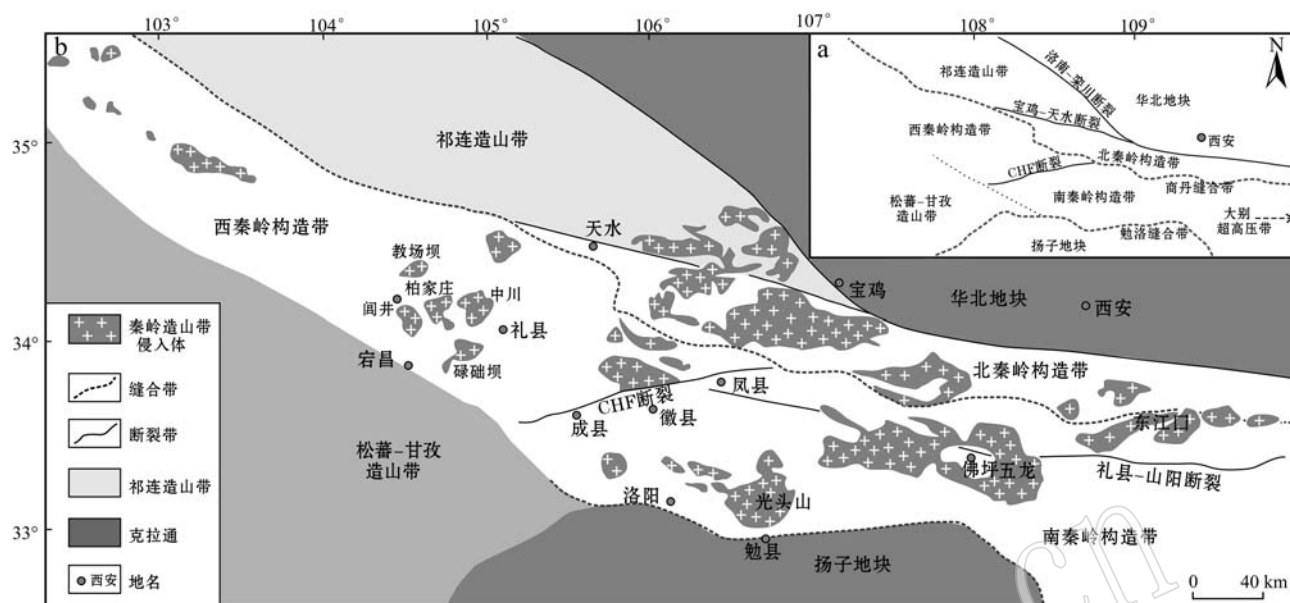
al., 2014)。可见仅有的岩体年代学资料差别较大,更缺乏不同岩性的系统定年、岩石地球化学和岩石成因研究。为此,本文在前人工作基础上,结合野外工作,对岩体群西段的闫井岩体开展了详细的岩相学、年代学和元素地球化学研究,确定其岩浆演化、地球化学特征,探讨其岩石成因类型,并与“五朵金花”岩体群东段的中川岩体进行对比研究,探讨其可能的成矿潜力,补充区域上与金矿相关的中酸性岩体的形成时代和岩体成因信息,为进一步总结礼岷金矿带成岩成矿规律提供新的岩石学依据。

1 区域地质概况

秦岭造山带位于中国中部,呈东西向展布,南北分别为扬子地块和华北地块,东与大别-苏鲁造山带相连,西接昆仑和祁连造山带,西南与松潘-甘孜造山带相邻(张国伟等,2001)(图 1a)。在三叠纪晚期,华北地块和扬子地块碰撞形成现今秦岭“三块两带”的构造格局,即以商丹缝合带和勉略缝合带为界,将秦岭造山带分为华北地块南缘及北秦岭、秦岭微地块、扬子地块北缘(Meng and Zhang, 2000;张国伟等,2001,2003)。其中南秦岭构造带夹持于商丹和勉略缝合带之间,而西秦岭属于南秦岭构造带的西延部分,大致以成县-徽县-凤县断裂(即 CHF 断裂,图 1)为界(黄雄飞等,2013;Zeng *et al.*, 2014)。

秦岭造山带至少经历了新元古代、古生代和中生代构造岩浆热事件和造山作用(Wang *et al.*, 2013)。新元古代花岗岩在北秦岭和南秦岭均有分布,古生代的花岗岩主要分布在北秦岭;中生代的花岗岩可

① 地矿部甘肃地勘局兰州地勘院. 1998. 闫井幅 1:5 万区域地质调查报告.

图 1 西秦岭区域地质简图(底图据 Zeng *et al.*, 2014)Fig. 1 Geological sketch map of the West Qinling Mountains (modified after Zeng *et al.*, 2014)

以分为早中生代和晚中生代两期,早中生代花岗岩主要分布在西秦岭地区,岩体主要形成于 220~200 Ma 之间(张成立等,2008; Wang *et al.*, 2013);晚中生代花岗岩主要分布在东秦岭。早中生代花岗岩在西秦岭往往成群出现,代表性的岩体群有东江口岩体群、五龙岩体群、光头山岩体群和“五朵金花”岩体群等(张成立等,2005),这些岩体群中的岩体多以岩基形式侵入到古生代地层中(图 1b)。同时这些早中生代花岗岩的分布具有平行于近东西向的断裂带呈线性展布的特征(向鼎璞等,2004; 骆必继等,2012);从东往西可分为 3 个岩浆岩带,分别位于西秦岭东部西和-武山-礼县一带、中部合作-夏河-同仁一带及西部共和盆地边缘(骆必继等,2012)。“五朵金花”岩体群处于西秦岭东段岩浆岩带,区内主要出露显生宙地层,由泥盆纪到白垩纪的沉积岩系组成(周振环等,1989; 冯益民等,2003)。

2 岩相学特征

间井岩体是“五朵金花”岩体群成员之一,位于甘肃省岷县间井镇的南部,东西宽 12 km,南北长 14 km,面积约 160.98 km²(图 2)。间井岩体西南部侵入地层为泥盆纪中统黄家沟组(Dh)和上统红岭山

组(Dhl),其中黄家沟组地层主要以砂岩粉砂岩与粉砂质板岩互层为主,而红岭山组地层主要以厚层状-巨厚层状灰岩为主;南段局部与上白垩统车拉组呈角度不整合接触,岩性为含砾粗砂岩、砂砾岩组成;而岩体东部则主要侵入到中元古界吴家山岩群中,主要由大理岩及黑云石英片岩等浅变质岩组成基底。另外区内出露还有下二叠统十里墩组(Psl)、下石炭统巴都组(Cb)及第四系覆盖。最近的 1:25 万岷县幅区调报告(甘肃省地质调查院,2007)^①中将间井复式岩体分为背后梁(TBηγβ)、大石头梁(TDηγβ)、上葱滩(TCηγβ)3 个侵入体,且各侵入体之间均为脉动式侵入,在平面上具有从外到内由老至新由背后梁侵入体、大石头梁侵入体、上葱滩侵入体组成的“同心环状”分布特征。

岩体主要由似斑状黑云母二长花岗岩(TCηγβ)、含斑黑云母二长花岗岩(TBηγβ)、粗粒黑云母二长花岗岩(TDηγβ)、中细粒黑云母二长花岗岩组成。似斑状黑云母二长花岗岩为主体岩性,在岩体中大面积分布(主要分布在岩体的中间部位),粗粒黑云母二长花岗岩呈南北向窄条带状主要分布在岩体的东部边缘;含斑黑云母二长花岗岩平面上呈哑铃状分布(主要分布在岩体的西部,另外在东部边缘也有局部出露),据野外实际剖面路线考察,其间夹有少量

① 甘肃省地质调查院. 2007. 1:25 万岷县幅区域地质调查报告.

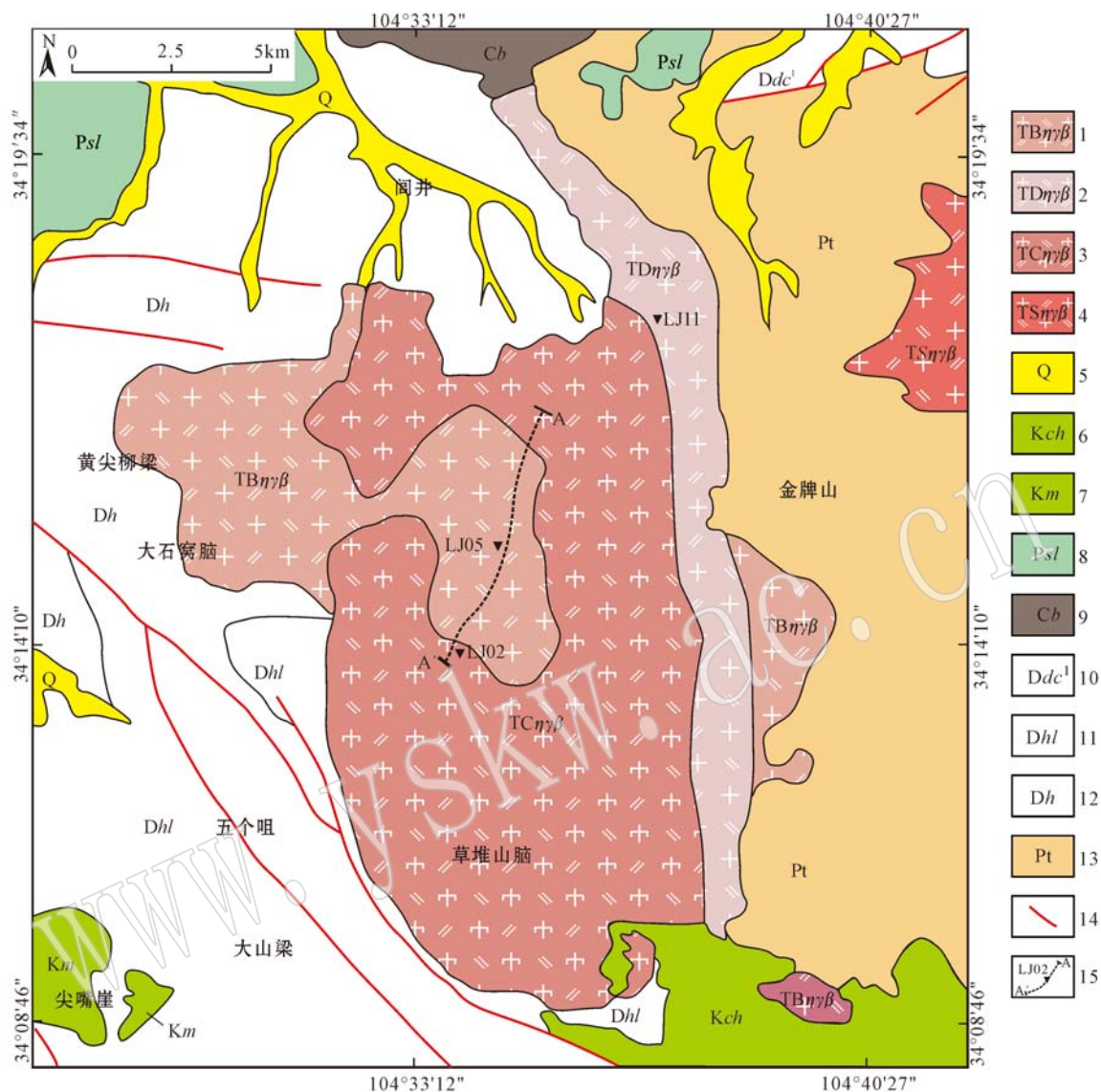


图 2 闾井岩体地质图(据甘肃省地质调查院, 2007)^①

Fig. 2 Geological sketch map of the Lüjing pluton (modified after Gansu Institute of Geological Survey, 2007)^①

1—含斑黑云母二长花岗岩; 2—粗粒黑云母二长花岗岩; 3—似斑状黑云母二长花岗岩; 4—二云母二长花岗岩; 5—第四系; 6—上白垩统车拉组; 7—下白垩统磨沟组; 8—下二叠统十里墩组; 9—下石炭统巴都组; 10—上泥盆统大草滩组; 11—上泥盆统红岭山组; 12—中泥盆统黄家沟组; 13—中元古界吴家山岩群; 14—断裂; 15—野外路线、测年采样点及编号

1—phenocryst-bearing biotite adamellite; 2—coarse-grained biotite monzonitic granite; 3—porphyroid biotite admellite; 4—two-mica monzonitic granites; 5—Quaternary; 6—Upper Cretaceous Chela Formation; 7—Lower Cretaceous Mogou Formation; 8—Lower Permian Shilidun Formation; 9—Lower Carboniferous Badou Formation; 10—Upper Devonian Dacaoan Formation; 11—Upper Devonian Honglingshan Formation; 12—Middle Devonian Huangjiagou Formation; 13—Mesoproterozoic Wujiashan Group; 14—fault; 15—field route, sampling location and its serial number

中细粒黑云母二长花岗岩(图 3)。岩体中可见岩浆暗色包体, 主要分布于岩体的边缘部分。野外观察可见暗色包体大小不一, 多呈椭圆状、不规则状等,

局部可见冷凝边, 与寄主岩界线截然, 包体中可见含有早期结晶的钾长石斑晶(图 4a)。

含斑黑云母二长花岗岩: 多呈灰白色, 浅肉红

① 甘肃省地质调查院. 2007. 1:25 万岷县幅区域地质调查报告.

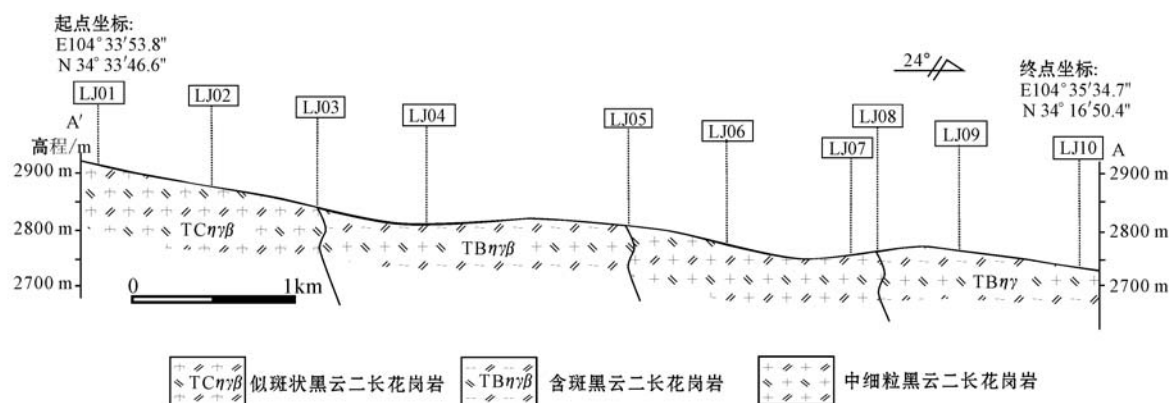


图 3 野外路线信手剖面图(剖面位置见图 2)

Fig. 3 The hand section of the pluton (for profile position see Fig. 2)

色,中细粒似斑状花岗结构、块状构造。斑晶含量 5%±,主要以钾长石为主,另含少量石英,钾长石多呈半自形板状,最大粒度可达 1.2 cm,可见卡氏双晶;基质粒度较细,主要为钾长石(30%~35%、粒度 0.2~2.5 mm),斜长石(25%~30%、粒度 0.2~2 mm),石英(20%~25%、粒度 0.1~2.5 mm)、黑云母(5%~8%)及极少量角闪石(图 4d)。副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

粗粒黑云母二长花岗岩:灰白色或肉红色,块状构造,等粒花岗结构(图 4c)。主要矿物为钾长石,呈半自形-他形板状,粒径约 4~7 mm;多数大于 5 mm,含量为 35%~40%,发育卡氏双晶和格子双晶;斜长石呈半自形-他形板状,粒径 0.2~2 mm 不等,含量 30%~35%,发育聚片双晶,表面发生绢云母化;石英呈他形粒状,粒径多在 0.3~3 mm,含量 20%~25%;黑云母呈半自形片状,含量 5%~10%,表面发生弱绿泥石化。副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

似斑状黑云母二长花岗岩:岩石呈浅肉红色,似斑状中细粒花岗结构、块状构造(图 4a)。斑晶主要为 1.1 cm×0.6 cm 的板状钾长石,含量约为 15%左右,可见卡氏双晶,局部可见其包含斜长石及黑云母(图 4e),可见少量石英斑晶。基质含量为 70%~90%,主要由斜长石(含量 30%~40%,粒度 0.2~2.5 mm)、钾长石(含量 30%~35%、粒度 0.5~3 mm)、石英(含量 20%~25%、粒度 0.2~2.5 mm)和黑云母(3%~5%)组成,斜长石部分发生绢云母化。可见锆石、榍石、磷灰石、磁铁矿等副矿物。

中细粒黑云母二长花岗岩:在含斑黑云母二长花岗岩内局部分布,呈灰白色,等粒花岗结构,块状

构造。矿物组成为钾长石、斜长石、石英、黑云母及少量白云母。钾长石呈半自形-他形板状,粒度 0.2~2.5 mm,含量 35%~40%,格子双晶发育(图 4e);斜长石呈半自形-他形板状,粒度 0.2~2 mm,含量 30%~35%,发育聚片双晶,表面发生弱绢云母化;石英呈他形粒状,粒径多在 0.2~1.5 mm,含量 20%~25%;黑云母多呈半自形片状,含量 5%左右,发育弱绿泥石化。副矿物有榍石、磷灰石、锆石等。

从早到晚,该岩体的岩石类型基本无变化,均为黑云母二长花岗岩,但岩石的结构具有明显的变化,从呈粗粒→中细粒结构,从含斑→似斑状→无斑结构;另外由早到晚岩石中主要矿物组成基本相同,但次要矿物有变化,如角闪石仅出现在早期含斑黑云母二长花岗岩中,白云母只出现在最晚期中细粒黑云母二长花岗岩中,这也反映了岩浆由早期相对偏基性到晚期偏酸性的演化趋势。

3 样品采集和测试分析方法

本文主要对岩体中 3 种主要岩性进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年:似斑状黑云母二长花岗岩,样品采自闫井岩体家门子-张木拉路线南端(样号 LJ-02/1B,采样位置:N34°14'7.1",E104°33'57.1");中细粒黑云母二长花岗岩采自闫井岩体家门子-张木拉路线中途(样号 LJ-05/1B,采样位置:N34°15'14.3",E104°35'2.2");粗粒黑云母二长花岗岩,采自闫井镇林口村旁(样号 LJ-11/1B,采样位置:N34°18'16.6",E104°37'18.4")(图 2);另外 11 件新鲜岩石样品,分别采自闫井岩体的不同位置,用于元素地球化学分析。

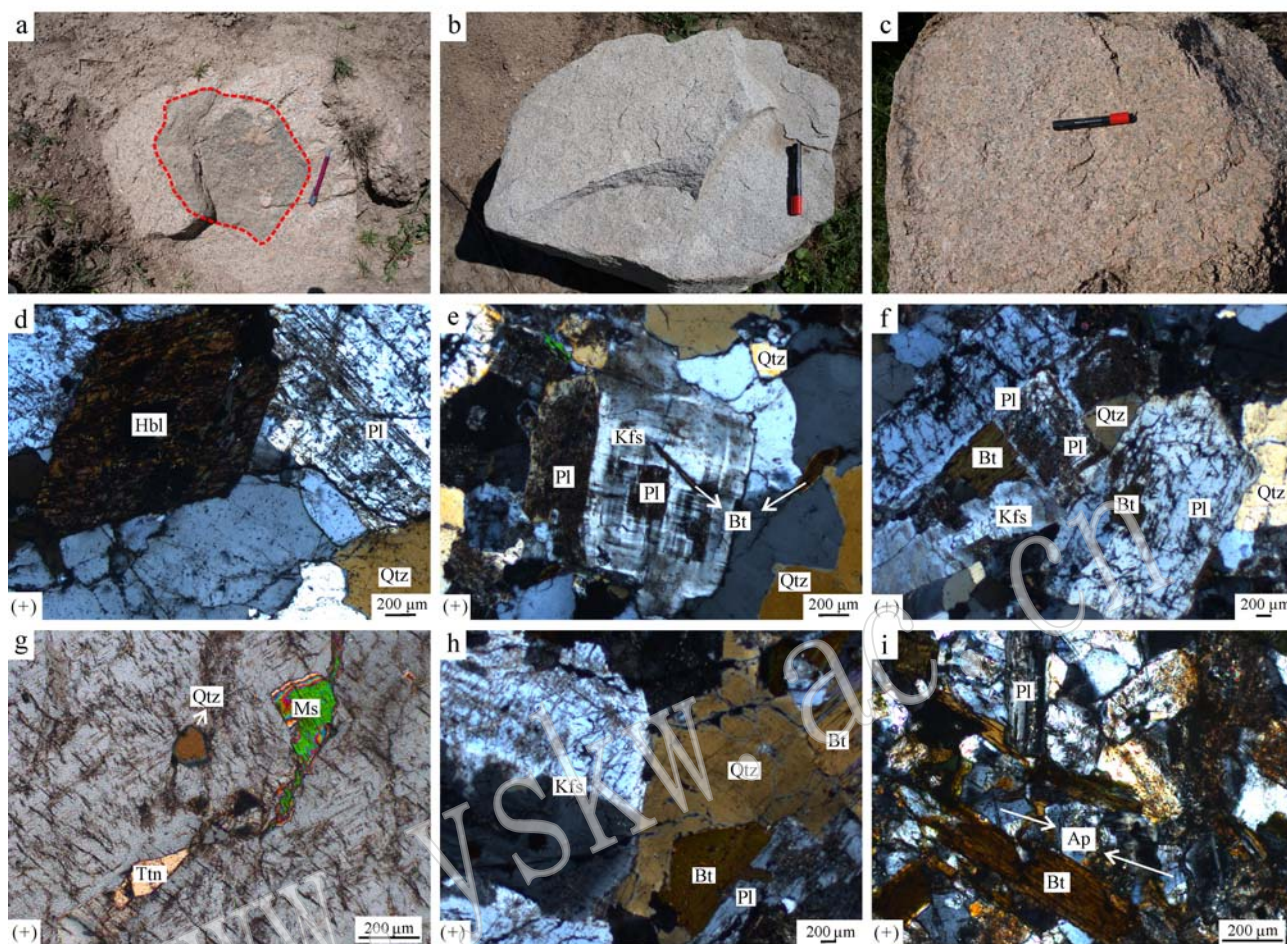


图 4 间井岩体的岩相学特征

Fig. 4 Petrography of the Lüjing pluton

a—似斑状黑云母二长花岗岩中的岩浆暗色包体；b—含斑黑云母二长花岗岩，可见少量钾长石斑晶；c—粗粒黑云母二长花岗岩；d—含斑黑云母二长花岗岩中角闪石及斜长石聚片双晶；e—中细粒黑云母二长花岗岩中钾长石格子双晶包含黑云母及斜长石；f—含斑黑云母二长花岗岩的花岗结构；g—中细粒黑云母二长花岗岩中可见白云母；h—钾长石卡式双晶；i—岩浆暗色包体可见针状磷灰石；Kfs—钾长石；

Pl—斜长石；Qtz—石英；Bt—黑云母；Ms—白云母；Hbl—角闪石；Ttn—榍石；Ap—磷灰石

a—magmatic enclaves in porphyroid biotite adamellite; b—kfs phenocryst-bearing biotite adamellite; c—coarse-grained biotite monzonitic granite; d—hornblende and plagioclase with multiple twin from phenocryst-bearing biotite adamellite (crossed nicols); e—biotite and plagioclase enveloped by K-feldspar with grid twin from medium-fine-grained biotite monzonitic granite (crossed nicols); f—typical granitic texture in phenocryst-bearing biotite adamellite (crossed nicols); g—muscovite in medium-fine-grained biotite monzonitic granite (crossed nicols); h—Carlsbad twin of K-feldspar (crossed nicols); i—acicular apatite from magmatic enclaves (crossed nicols); Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Bt—biotite; Ms—muscovite; Hbl—amphibole; Ttn—titanite; Ap—apatite

锆石分选在中国地质科学院廊坊物化探研究所完成，用于测试的样品是无蚀变和受矿化影响甚弱的，运用常规方法将样品粉碎，经过重选、磁选，除去轻比重矿物以及磁铁矿、磁黄铁矿等磁性矿物，分选得到的重砂矿物再经过淘洗得到锆石精矿，最后在双目镜下挑选晶形完好、透明度好的锆石单矿物，将其粘在双面胶上，用无色透明的环氧树脂固定，待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出一个平面。锆石

的 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室四级杆 ICP-MSElan6100DRC 进行测定。激光剥蚀系统为德国 LambdaPHvsik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外(DVU)193 nmArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统，该系统相对常规的 266 nm 或 213 nmND:YAG 剥蚀系统具有较小的元素分馏效应。分析所采用的激光束直径为 30 μm ，剥蚀深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载

气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化调试,采样方式为单点剥蚀,每完成 4~5 个待测样品测定,插入测标样 1 次。在所测锆石样品 15~20 个点前后各测 2 次 NIST610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质,元素含量采用 NIST610 作为外标。测试结果通过 Glitter 软件计算得出,获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,并采用 Isoplot4.0 进行最终的年龄计算和图表的绘制,分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄按 95% 的置信度给出,详细分析参见文献(Yuan *et al.*, 2004)。

主量元素、微量元素分析测试是在加拿大温哥华 Acme 分析实验室进行的,除了 Fe_2O_3 之外,主量元素是用电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)的,微量元素是由电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成的。主量元素测试先把粉末样品在石墨坩埚中与助熔剂 $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合,放在马弗炉中熔化后用硝酸稀释溶解,然后选取 0.2 g 进行 ICP-AES 分

析,烧失量在 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时测定。微量元素分析包括两部分,稀土元素和难溶元素的测定选取粉末样品在石墨坩埚中与助熔剂 $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合,放在马弗炉中熔化用硝酸稀释溶解后,再进行 ICP-MS 分析;另外单独选取 0.5 g 经王水溶解的进行 ICP-MS 分析贵金属的含量。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

4.1.1 锆石特征

间井岩体 3 件花岗岩类样品 LJ-02/1B、LJ-05/1B 及 LJ-11/1B 的锆石阴极发光(CL)图像及 U-Pb 定年的测定点位(白圈表示)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值见图 5。

3 件样品的锆石自形程度较高,都呈无色到浅黄色,透明至半透明,短柱-长柱状,锆石长宽比多集中于 1.5:1~2:1 之间,少数呈长柱状,长宽比可达 3:1。阴极发光(CL)图像显示,多数锆石晶形完整,显示核、幔结构,韵律震荡环带清晰(图 5),为典型的岩浆结晶锆石(吴元保等,2004)。

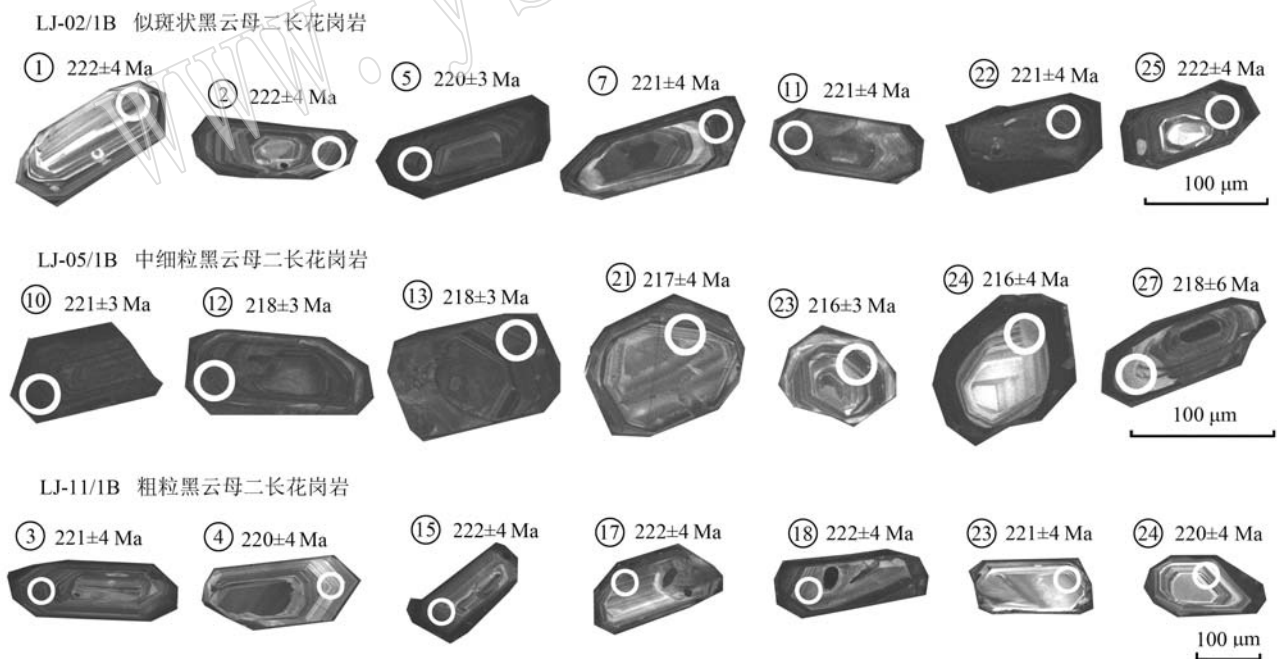


图 5 间井岩体代表性锆石的阴极发光图像、LA-ICP-MS 分析点位及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值

Fig. 5 CL images, localities of the spots for LA-ICP-MS analysis and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of representative dating zircons from the Lüjüng pluton

表 1 阎井花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of Lüjing granitoid pluton

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			年龄/Ma		
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
似斑状黑云母二长花岗岩 LJ-02/1B										
01	2.59	271.67	394.59	0.69	0.0526 ± 0.0027	0.2544 ± 0.0111	0.0351 ± 0.0006	311 ± 113	230 ± 9	222 ± 4
02	<1.09	204.78	542.47	0.38	0.0514 ± 0.0021	0.2479 ± 0.0077	0.0350 ± 0.0006	260 ± 91	225 ± 6	222 ± 4
03	<1.06	269.49	739.97	0.36	0.0513 ± 0.0018	0.2489 ± 0.0059	0.0201 ± 0.0006	255 ± 79	226 ± 5	223 ± 4
05	<1.03	418.28	1525.69	0.27	0.0504 ± 0.0110	0.2409 ± 0.0052	0.0347 ± 0.0006	215 ± 77	219 ± 4	220 ± 3
06	<1.15	243.76	552.25	0.44	0.0505 ± 0.0019	0.2434 ± 0.0065	0.0349 ± 0.0006	220 ± 85	221 ± 5	221 ± 4
07	1.09	186.43	526.82	0.35	0.0487 ± 0.0025	0.2337 ± 0.0101	0.0348 ± 0.0006	132 ± 116	213 ± 8	221 ± 4
10	<1.01	455.67	1424.04	0.32	0.0507 ± 0.0020	0.2426 ± 0.0070	0.0347 ± 0.0006	229 ± 88	221 ± 6	220 ± 4
11	1.52	480.04	1146.86	0.42	0.0596 ± 0.0025	0.2873 ± 0.0091	0.0350 ± 0.0006	590 ± 87	256 ± 7	221 ± 4
12	2.44	456.98	1189.91	0.38	0.0584 ± 0.0021	0.2806 ± 0.0070	0.0348 ± 0.0006	546 ± 77	251 ± 6	221 ± 4
13	2.67	843.85	1541.89	0.55	0.0568 ± 0.0020	0.2720 ± 0.0062	0.0348 ± 0.0006	482 ± 75	244 ± 5	220 ± 4
14	12.25	514.44	1687.16	0.30	0.0534 ± 0.0019	0.2557 ± 0.0065	0.0348 ± 0.0006	344 ± 80	231 ± 5	220 ± 4
15	4.05	312.12	1144.41	0.27	0.0539 ± 0.0022	0.2582 ± 0.0078	0.0347 ± 0.0006	368 ± 88	233 ± 6	220 ± 4
16	<0.91	349.35	1241.99	0.28	0.0520 ± 0.0017	0.2506 ± 0.0053	0.0349 ± 0.0006	287 ± 75	227 ± 4	221 ± 3
17	1.76	377.48	1246.81	0.30	0.0517 ± 0.0028	0.2455 ± 0.0117	0.0344 ± 0.0007	273 ± 121	223 ± 9	218 ± 4
18	1.33	455.65	1468.14	0.31	0.0579 ± 0.0021	0.2793 ± 0.0068	0.0350 ± 0.0006	526 ± 77	250 ± 5	222 ± 4
19	<1.00	442.32	1395.52	0.32	0.0519 ± 0.0017	0.2462 ± 0.0050	0.0344 ± 0.0006	281 ± 74	224 ± 4	218 ± 3
21	<1.10	487.09	1393.74	0.35	0.0504 ± 0.0017	0.2431 ± 0.0055	0.0350 ± 0.0006	214 ± 78	221 ± 5	222 ± 4
22	1.13	311.08	924.8	0.34	0.0541 ± 0.0019	0.2596 ± 0.0062	0.0348 ± 0.0006	375 ± 77	234 ± 5	221 ± 4
24	10.31	455.78	1047.69	0.44	0.0561 ± 0.0024	0.2682 ± 0.0090	0.0347 ± 0.0006	455 ± 92	241 ± 7	220 ± 4
24	0.96	291.32	887.38	0.33	0.0510 ± 0.0020	0.2461 ± 0.0074	0.0350 ± 0.0006	240 ± 90	223 ± 6	222 ± 4
粗粒黑云母二长花岗岩 LJ-11/1B										
01	<1.10	173.92	454.81	0.38	0.0530 ± 0.0022	0.2548 ± 0.0082	0.0349 ± 0.0006	329 ± 92	231 ± 7	221 ± 4
03	<1.10	268.25	777.91	0.34	0.0503 ± 0.0018	0.2414 ± 0.0061	0.0348 ± 0.0006	209 ± 83	220 ± 5	221 ± 4
04	<1.32	107.6	217.13	0.50	0.0549 ± 0.0032	0.2629 ± 0.0132	0.0347 ± 0.0007	409 ± 123	237 ± 11	220 ± 4
05	<1.15	72.87	171.51	0.42	0.0597 ± 0.0032	0.2873 ± 0.0133	0.0349 ± 0.0007	591 ± 113	257 ± 10	221 ± 4
06	3.36	211.4	420.36	0.50	0.0503 ± 0.0023	0.2433 ± 0.0087	0.0351 ± 0.0006	208 ± 101	221 ± 7	222 ± 4
07	1.14	142.98	325.03	0.44	0.0487 ± 0.0043	0.2341 ± 0.0195	0.0349 ± 0.0009	133 ± 197	214 ± 16	221 ± 5
08	<1.27	340.66	734.54	0.46	0.0511 ± 0.0019	0.2449 ± 0.0061	0.0348 ± 0.0006	243 ± 81	222 ± 5	221 ± 4
09	<1.35	155.3	333.15	0.47	0.0518 ± 0.0024	0.2501 ± 0.0093	0.0350 ± 0.0006	276 ± 102	227 ± 8	222 ± 4
10	<1.03	180.03	485.41	0.37	0.0508 ± 0.0020	0.2453 ± 0.0072	0.0350 ± 0.0006	233 ± 88	223 ± 6	222 ± 4
11	<0.93	439.32	738.29	0.60	0.0511 ± 0.0019	0.2449 ± 0.0062	0.0348 ± 0.0006	245 ± 82	222 ± 5	220 ± 4
12	<1.03	295.18	608.78	0.48	0.0501 ± 0.0019	0.2419 ± 0.0064	0.0351 ± 0.0006	197 ± 84	220 ± 5	222 ± 4
13	<1.26	147.75	348.86	0.42	0.0512 ± 0.0023	0.2471 ± 0.0089	0.0350 ± 0.0006	251 ± 100	224 ± 7	222 ± 4
14	<1.11	135.57	390.55	0.35	0.0522 ± 0.0029	0.2512 ± 0.0119	0.0349 ± 0.0007	295 ± 120	228 ± 10	221 ± 4
15	<1.06	221.48	424.05	0.52	0.0487 ± 0.0024	0.2350 ± 0.0095	0.0350 ± 0.0006	132 ± 110	214 ± 8	222 ± 4
16	<1.10	77.71	192.88	0.40	0.0510 ± 0.0025	0.2462 ± 0.0101	0.0350 ± 0.0006	242 ± 109	224 ± 8	222 ± 4
17	<1.02	204.82	295.21	0.69	0.0508 ± 0.0021	0.2453 ± 0.0080	0.0351 ± 0.0006	230 ± 94	223 ± 7	222 ± 4
18	<1.03	188.64	447.86	0.42	0.0506 ± 0.0020	0.2448 ± 0.0070	0.0351 ± 0.0006	224 ± 88	222 ± 6	222 ± 4
19	<0.99	215.54	458.93	0.47	0.0504 ± 0.0021	0.2431 ± 0.0079	0.0350 ± 0.0006	215 ± 94	221 ± 6	222 ± 4
20	<0.97	242.04	489.09	0.49	0.0508 ± 0.0019	0.2457 ± 0.0065	0.0351 ± 0.0006	233 ± 84	223 ± 5	222 ± 4
21	<0.97	150.1	391.05	0.38	0.0512 ± 0.0024	0.2467 ± 0.0092	0.0349 ± 0.0006	252 ± 103	224 ± 8	221 ± 4
22	<1.26	136.24	275.97	0.49	0.0524 ± 0.0024	0.2532 ± 0.0093	0.0350 ± 0.0006	304 ± 101	229 ± 8	222 ± 4
23	2.47	106.08	195.27	0.54	0.0500 ± 0.0031	0.2404 ± 0.0135	0.0349 ± 0.0007	194 ± 140	219 ± 11	221 ± 4
24	<1.04	87.66	217.64	0.40	0.0533 ± 0.0024	0.2569 ± 0.0095	0.0350 ± 0.0006	341 ± 100	232 ± 8	222 ± 4
25	<1.05	221.95	421.15	0.53	0.0502 ± 0.0031	0.2398 ± 0.0132	0.0347 ± 0.0007	204 ± 137	218 ± 11	220 ± 4

续表 1

Continued Table 1

点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
中细粒黑云母二长花岗岩 LJ-05/1B											
08	7.68	416.9	1 161.33	0.36	$0.052\,4\pm0.001\,8$	$0.247\,5\pm0.005\,7$	$0.034\,2\pm0.000\,5$	304 ± 77	225 ± 5	217 ± 3	
10	2.67	678.59	2 078.4	0.33	$0.054\,4\pm0.001\,7$	$0.261\,3\pm0.004\,7$	$0.034\,9\pm0.000\,5$	386 ± 69	236 ± 4	221 ± 3	
11	8.41	347.79	8 420.12	0.04	$0.059\,5\pm0.002\,0$	$0.282\,4\pm0.006\,1$	$0.034\,4\pm0.000\,5$	85 ± 72	253 ± 5	218 ± 3	
12	<1.15	398.98	1 338.32	0.30	$0.053\,0\pm0.001\,7$	$0.251\,2\pm0.005\,0$	$0.034\,3\pm0.000\,5$	330 ± 72	228 ± 4	218 ± 3	
13	3.15	300.98	807.89	0.37	$0.061\,4\pm0.002\,0$	$0.291\,7\pm0.006\,1$	$0.034\,4\pm0.000\,5$	655 ± 70	260 ± 5	218 ± 3	
14	<1.22	83.81	204.77	0.41	$0.054\,8\pm0.002\,4$	$0.258\,3\pm0.009\,1$	$0.034\,2\pm0.000\,6$	402 ± 95	233 ± 7	217 ± 4	
21	<1.09	177.64	392.36	0.45	$0.051\,2\pm0.002\,1$	$0.241\,2\pm0.007\,9$	$0.034\,2\pm0.000\,6$	250 ± 94	219 ± 6	217 ± 4	
23	1.8	214.48	477.68	0.45	$0.061\,4\pm0.002\,4$	$0.288\,8\pm0.008\,1$	$0.034\,1\pm0.000\,6$	652 ± 80	258 ± 6	216 ± 3	
24	<1.26	75.35	251.87	0.30	$0.051\,5\pm0.002\,4$	$0.241\,7\pm0.009\,2$	$0.034\,1\pm0.000\,6$	261 ± 103	220 ± 8	216 ± 4	
26	1.02	287.8	519.18	0.55	$0.052\,4\pm0.002\,8$	$0.247\,8\pm0.011\,3$	$0.034\,3\pm0.000\,6$	302 ± 117	225 ± 9	218 ± 4	
27	<0.89	113.69	459.59	0.25	$0.059\,4\pm0.005\,6$	$0.281\,6\pm0.025\,1$	$0.034\,4\pm0.000\,9$	581 ± 194	252 ± 20	218 ± 6	
28	<0.99	74.86	272.17	0.28	$0.050\,3\pm0.004\,1$	$0.237\,1\pm0.018\,1$	$0.034\,2\pm0.000\,8$	207 ± 180	216 ± 15	217 ± 5	
29	<1.26	45.97	379.75	0.12	$0.049\,0\pm0.003\,1$	$0.233\,9\pm0.013\,4$	$0.034\,6\pm0.000\,7$	146 ± 143	213 ± 11	220 ± 4	
30	<1.01	134.02	304.82	0.44	$0.048\,1\pm0.002\,9$	$0.228\,7\pm0.012\,4$	$0.034\,5\pm0.000\,7$	104 ± 138	209 ± 10	219 ± 4	
31	<0.94	95.49	310.61	0.31	$0.049\,7\pm0.002\,5$	$0.235\,2\pm0.010\,1$	$0.034\,3\pm0.000\,6$	179 ± 114	214 ± 8	218 ± 4	

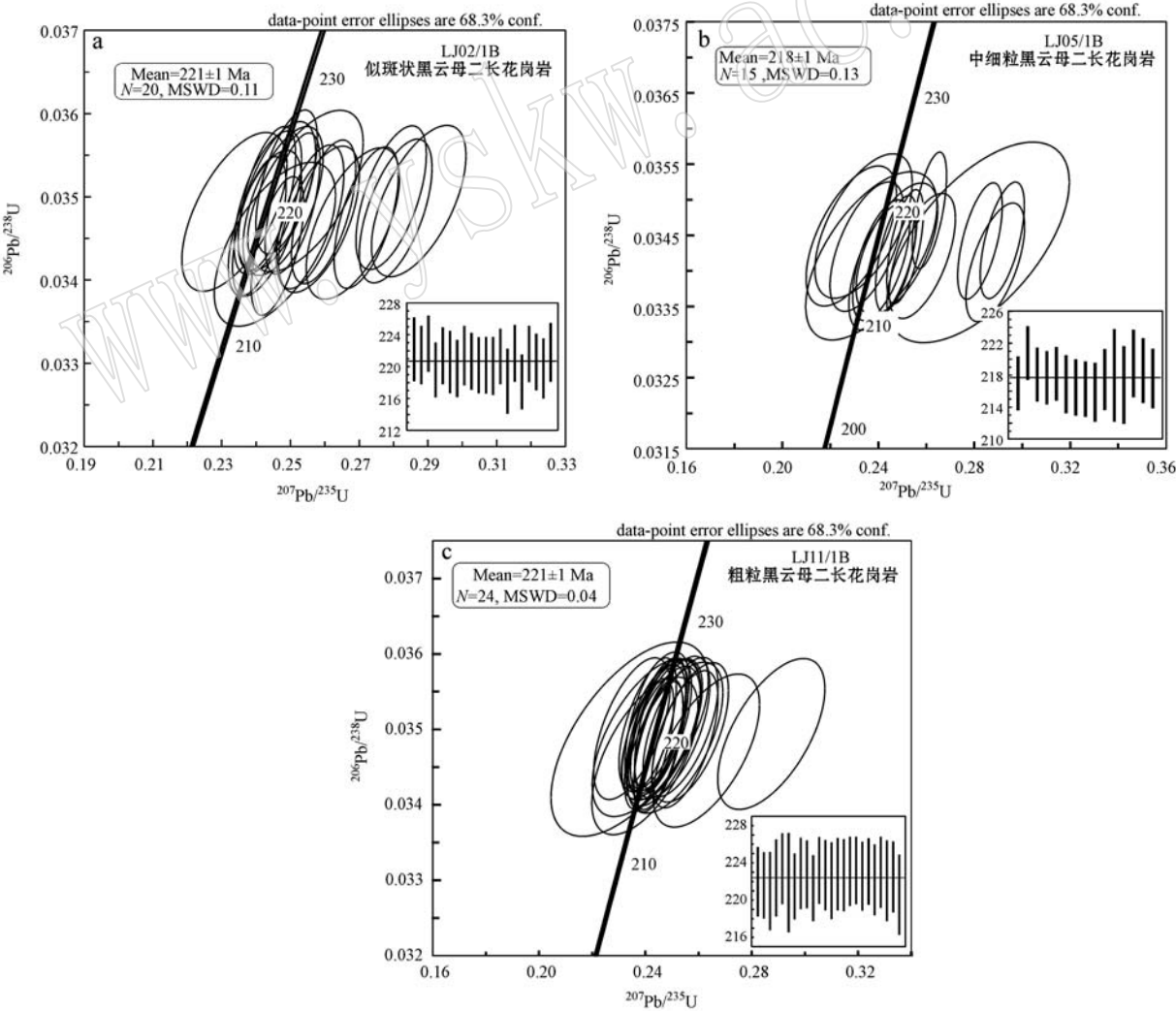


图 6 闾井岩体花岗岩类锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram of granites from the Lüjing pluton

4.1.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

对似斑状黑云母二长花岗岩样品(LJ-02/1B)及粗粒黑云母二长花岗岩样品(LJ-11/1B)分别进行了 25 个点的分析测试,对中细粒黑云母二长花岗岩(LJ-05/1B)样品进行了 31 个点的分析测试;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 有效分析结果列于表 1,谐和图见图 6。部分锆石分析点(例如 LJ-02/1B 中 04、08、09、20、23 锆石颗粒)的 ^{204}Pb 计数较高,这种较高的普通铅组成导致谐和图中 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的谐和度降低,在谐和图和讨论中将不涉及这些点。由于 ^{235}U 和 ^{238}U 的半衰期及其丰度存在差异,导致在放射性成因组分积累较少的年轻锆石中,放射性成因 ^{207}Pb 的丰度比放射性成因 ^{206}Pb 的丰度约低一个数量级,因此,对于年龄较小($<1\text{ Ga}$)的锆石,采

用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄更加准确(Compston *et al.*, 1992; Griffin *et al.*, 2004)。

分析结果得到似斑状黑云母二长花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $221 \pm 1\text{ Ma}$ ($N = 20$, $\text{MSWD} = 0.11$);粗粒黑云母二长花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $221 \pm 1\text{ Ma}$ ($N = 24$, $\text{MSWD} = 0.04$);中细粒黑云母二长花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $218 \pm 1\text{ Ma}$ ($N = 15$, $\text{MSWD} = 0.13$)。由于锆石的封闭温度较高($>850^\circ\text{C}$),其结晶年龄代表了岩体的侵入年龄,表明各侵入体均属于晚三叠世产物。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

闪岩体地球化学分析结果见表 2。

表 2 闪岩体的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)及相关参数Table 2 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) as well as related parameters of Lüjing granitoid pluton

样品号 岩性	含斑黑云母二长花岗岩				粗粒黑云母二长花岗岩				中细粒黑云母二长花岗岩			似斑状黑云母二长花岗岩		
	LJ08/1B	LJ10/1B	LJ03/1B	LJ04/1B	LJ11/1B	LJ12/1B	LJ13/1B	LJ13/5B	LJ06/1B	LJ07/1B	LJ05/1B	LJ02/1B	LJ02/2B	LJ01/1B
SiO ₂	74.14	69.71	72.63	77.58	73.02	75.26	70.66	66.92	73.34	73.14	73.07	70.98	71.70	71.53
Al ₂ O ₃	14.02	14.95	14.53	13.02	14.22	13.08	14.15	15.55	14.55	14.54	14.45	14.83	13.81	14.69
Fe ₂ O ₃	0.94	2.60	1.55	0.74	1.68	1.41	2.98	3.61	1.10	1.16	1.23	2.09	2.61	1.98
MgO	0.21	0.85	0.44	0.07	0.30	0.22	0.86	1.32	0.39	0.38	0.38	0.65	0.83	0.64
CaO	0.82	1.81	1.01	0.08	0.97	0.74	1.73	2.12	0.88	0.71	0.93	1.34	1.69	1.38
Na ₂ O	3.14	3.48	3.42	0.20	3.35	3.10	3.30	3.43	3.40	3.47	3.45	3.34	3.23	3.44
K ₂ O	5.70	5.08	5.24	4.60	5.49	5.37	4.86	4.97	5.08	5.13	5.11	5.39	4.42	5.07
TiO ₂	0.12	0.35	0.21	0.13	0.19	0.15	0.35	0.49	0.20	0.20	0.20	0.28	0.36	0.28
P ₂ O ₅	0.03	0.14	0.08	0.03	0.05	0.04	0.14	0.19	0.05	0.06	0.06	0.11	0.14	0.11
MnO	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.07	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.04
LOI	0.8	0.8	0.7	3.4	0.6	0.5	0.7	1.1	0.9	1.1	1.0	0.8	1.0	0.7
Sum	99.94	99.82	99.84	99.88	99.90	99.90	99.79	99.77	99.91	99.91	99.91	99.86	99.84	99.86
Mg [#]	0.34	0.43	0.40	0.18	0.29	0.27	0.40	0.46	0.45	0.43	0.42	0.42	0.43	0.43
Na ₂ O+K ₂ O	8.84	8.56	8.66	4.80	8.84	8.47	8.16	8.40	8.48	8.60	8.56	8.73	7.65	8.51
K ₂ O/Na ₂ O	1.82	1.46	1.53	23.00	1.64	1.73	1.47	1.45	1.49	1.48	1.48	1.61	1.37	1.47
σ	2.51	2.74	2.53	0.67	2.60	2.22	2.41	2.95	2.37	2.45	2.44	2.72	2.04	2.54
A/CNK	1.09	1.03	1.10	2.38	1.07	1.07	1.02	1.04	1.14	1.16	1.12	1.08	1.05	1.07
A/NK	1.24	1.33	1.28	2.45	1.24	1.20	1.32	1.41	1.31	1.29	1.29	1.31	1.37	1.32
Rb	263.3	217.1	245.5	223.1	164.4	162.2	185.4	188.9	247.4	229.2	235.9	194.6	170.8	188.9
Sr	129.2	269.6	176.1	53.1	129.2	76.2	255.8	341.4	147.8	141.0	135.5	215.6	226.0	205.0
K	47317.4	42170.6	43498.8	38186.0	45574.1	44578.0	40344.3	41257.5	42170.6	42585.7	42419.6	44744.0	36691.7	42087.6
Ti	719.4	2098.3	1259.0	779.4	1139.1	899.3	2098.3	2937.6	1199.0	1199.0	1199.0	1678.6	2158.2	1678.6
P	130.9	611.0	349.2	130.9	218.2	174.6	611.0	829.3	218.2	261.9	261.9	480.1	611.0	480.1
Cs	15.3	13.1	20.9	13.9	4.3	5.7	7.5	7.2	21.4	14.9	13.2	12.3	12.5	10.4
Sc	2	4	3	2	3	2	6	7	2	2	3	3	4	3
Co	0.7	3.8	1.9	1.1	1.7	1.0	4.4	6.0	1.2	1.3	2.4	3.3	4.1	2.9

续表 2

Continued Table 2

样品号 岩性	含斑黑云母二长花岗岩				粗粒黑云母二长花岗岩				中细粒黑云母二长花岗岩			似斑状黑云母二长花岗岩		
	LJ08/1B	LJ10/1B	LJ03/1B	LJ04/1B	LJ11/1B	LJ12/1B	LJ13/1B	LJ13/5B	LJ06/1B	LJ07/1B	LJ05/1B	LJ02/1B	LJ02/2B	LJ01/1B
Ga	16.0	15.9	19.0	16.4	16.2	13.8	16.7	18.2	20.2	20.3	21.8	15.9	14.7	15.6
Ni	1.5	3.4	1.5	0.7	0.9	1.3	3.0	5.6	0.7	0.9	1.0	3.0	3.7	3.1
Zn	28	46	42	36	38	29	52	54	40	43	43	44	49	39
Cu	5.1	8.3	10.2	12.2	4.7	2.7	11.4	8.8	6.5	7.8	8.0	6.5	4.7	2.7
V	10	35	20	15	13	8	33	51	22	16	19	28	36	27
Zr	81.2	182.9	133.7	92.9	166.5	135.1	242.9	224.6	120.9	103.8	112.3	129.8	172.5	136.2
Sr/Y	13.9	18.1	13.3	6.0	9.2	7.3	11.8	15.3	17.0	21.4	15.2	19.6	16.1	20.3
La	28.6	49.6	43.0	29.9	64.3	41.3	52.5	64.0	39.4	33.6	37.4	25.9	50.1	15.1
Ce	54.6	98.2	78.5	54.6	116.0	81.0	96.9	117.6	67.4	64.5	67.3	58.0	93.5	45.3
Pr	5.94	9.94	8.45	5.90	12.01	7.68	10.33	13.12	7.47	6.97	7.58	5.91	10.75	3.87
Nd	19.9	32.7	28.8	20.3	40.4	25.5	38.7	47.5	25.9	24.3	25.9	22.7	37.6	13.9
Sm	3.86	5.47	4.87	4.03	6.11	4.11	7.23	8.33	4.22	4.07	4.54	4.20	6.25	3.21
Eu	0.48	0.92	0.69	0.39	0.72	0.49	1.04	1.29	0.64	0.53	0.57	0.83	0.96	0.72
Gd	2.82	4.01	3.95	3.22	4.56	3.26	5.75	6.57	3.08	2.38	2.76	2.96	3.94	2.53
Tb	0.40	0.58	0.53	0.42	0.52	0.40	0.78	0.82	0.36	0.32	0.40	0.44	0.59	0.40
Dy	1.91	2.90	2.60	2.06	2.65	1.98	4.04	4.56	1.59	1.56	1.92	2.24	3.03	2.09
Ho	0.27	0.49	0.36	0.26	0.42	0.34	0.62	0.72	0.25	0.23	0.32	0.37	0.49	0.32
Er	0.76	1.31	1.03	0.62	1.33	0.89	1.78	1.98	0.64	0.60	0.78	1.08	1.38	0.91
Tm	0.12	0.21	0.17	0.10	0.20	0.16	0.29	0.30	0.09	0.10	0.11	0.16	0.22	0.16
Yb	0.79	1.42	1.16	0.59	1.28	1.12	1.86	2.19	0.64	0.59	0.74	1.11	1.44	1.09
Lu	0.13	0.22	0.17	0.09	0.21	0.17	0.31	0.29	0.10	0.09	0.10	0.16	0.22	0.18
Y	9.3	14.9	13.2	8.9	14.0	10.5	21.7	22.3	8.7	6.6	8.9	11.0	14.0	10.1
ΣREE	120.6	208.0	174.3	122.5	250.7	168.4	222.1	269.3	151.8	139.8	150.4	126.1	210.5	89.8
LREE	113.4	196.8	164.3	115.1	239.5	160.1	206.7	251.8	145.0	134.0	143.3	117.5	199.2	82.1
HREE	7.20	11.14	9.97	7.36	11.17	8.32	15.43	17.43	6.75	5.87	7.13	8.52	11.31	7.68
LREE/HREE	15.75	17.67	16.48	15.64	21.44	19.24	13.40	14.45	21.49	22.82	20.10	13.80	17.61	10.69
(La/Yb) _N	25.97	25.05	26.59	36.35	36.03	26.45	20.25	20.96	44.16	40.85	36.25	16.74	24.96	9.94
(La/Sm) _N	4.78	5.85	5.70	4.79	6.79	6.49	4.69	4.96	6.03	5.33	5.32	3.98	5.17	3.04
(Gd/Yb) _N	2.95	2.34	2.82	4.51	2.95	2.41	2.56	2.48	3.98	3.34	3.09	2.21	2.26	1.92
δEu	0.42	0.57	0.47	0.32	0.40	0.40	0.48	0.51	0.52	0.48	0.46	0.68	0.55	0.75
δCe	0.97	1.02	0.95	0.95	0.95	1.04	0.96	0.94	0.90	0.98	0.93	1.11	0.94	1.42
t/℃	736	792	776	800	793	777	818	807	772	760	763	769	792	774

注：A/CNK = (Al₂O₃)/(CaO + K₂O + Na₂O)摩尔数分数比，A/NK = (Al₂O₃)/(K₂O + Na₂O)摩尔数分数比，Mg[#] = (MgO/40.31)/(MgO/40.31 + Fe₂O₃^T × 0.899 8/71.85 × 0.85)；球粒陨石、原始地幔数据来自 Sun and McDonough, 1989，σ = (K₂O + Na₂O)₂/(SiO₂ - 43)，δEu = 0.5 Eu_N/(Sm_N + Gd_N)，δCe = 0.5 Ce_N/(La_N + Pr_N)，ΣREE、HREE 均不含 Y；t 为锆石饱和温度，具体计算公式参考文献(Watson and Harrison, 1983)；LJ04/1B 样品烧失量过大，在部分数据统计分析中舍去。

闫井花岗岩类总体上具有高硅 SiO₂ = 69.71% ~ 77.58% (仅 1 件样品 SiO₂ 含量较低，为 66.92%)，富钾(K₂O/Na₂O = 1.37 ~ 1.82，K₂O/Na₂O > 1)，高铝(Al₂O₃ = 13.02% ~ 15.55%)和富碱(K₂O = 4.42% ~ 5.70%，Na₂O = 3.10% ~ 3.48%，Na₂O + K₂O = 7.65% ~ 8.84%，里特曼指数 σ = 2.04 ~ 2.95)的特点(其中 LJ04/1B 样品烧失量过大，导致 K₂O/Na₂O 数值异常，在数据统计分析中

舍去)。Fe₂O₃ 和 CaO 含量偏低，分别为 0.94% ~ 3.61% 和 0.71% ~ 2.12%，低镁 MgO = 0.21% ~ 1.32%，岩石的铝饱和指数 A/CNK = 1.02 ~ 1.16。哈克图解中间井岩体中不同岩石的 CaO、Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃、MgO、P₂O₅ 与 SiO₂ 总体上呈现良好的线性关系(图 7)，但是 K₂O、Na₂O 与 SiO₂ 线性相关不明显。另外闫井岩体各岩性单元均显示出高钾钙碱性-钾玄岩系列和过铝质-强过铝质系列(图 8)。

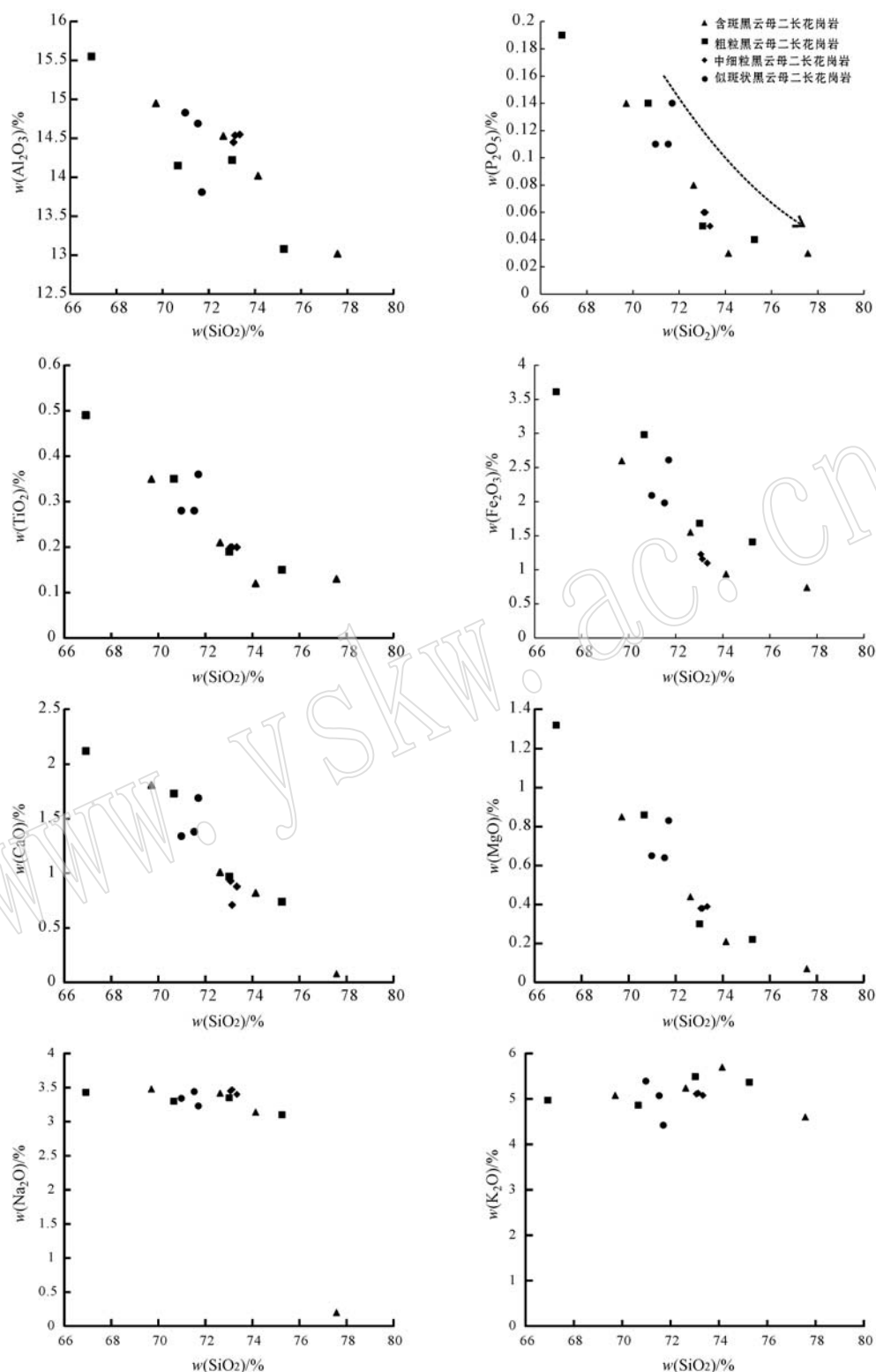


图 7 闾井岩体主量元素哈克图解

Fig. 7 Harker diagrams of the major elements of the granites from the Lüjing pluton

4.2.2 微量元素

闾井岩体各岩性单元稀土元素的总含量为中

等,变化较大($\sum \text{REE} = 89.8 \times 10^{-6} \sim 269.3 \times 10^{-6}$),轻重稀土元素之间分馏明显[LREE/HREE

$= 10.7 \sim 22.8$, 平均为 17.18, $(La/Yb)_N = 9.9 \sim 44.2$, 平均为 27.90], 其中轻稀土元素内部分异较重稀土分异明显 $(La/Sm)_N = 3.0 \sim 6.8$, 平均为 5.21, $(Gd/Yb)_N = 1.9 \sim 4.5$, 平均为 2.84。在稀土元素球粒陨石标准化配分图上, 闾井岩体各岩性单元分配曲线基本一致, 均表现出富集 LREE, 相对亏损 HREE, 轻稀土分馏明显、重稀土分馏不明显的右倾特征, 无四分组效应(图 9a); 并具有显著负 Eu 异常

($\delta Eu = 0.30 \sim 0.70$, 平均 0.50), 显示了斜长石的分离结晶作用, 无 Ce 异常($\delta Ce = 0.90 \sim 1.42$)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 9b), 闾井岩体各岩性单元分配曲线基本一致, U 含量变化较大, 均显示出富集 LREE、Rb、Th、U、K 等元素, 而相对亏损 P、Nb、Ta、Ti 等元素。其中 Sr 含量小于 400×10^{-6} , Sr/Y 比值也较低, 说明其不具有埃达克岩的地球化学特征。

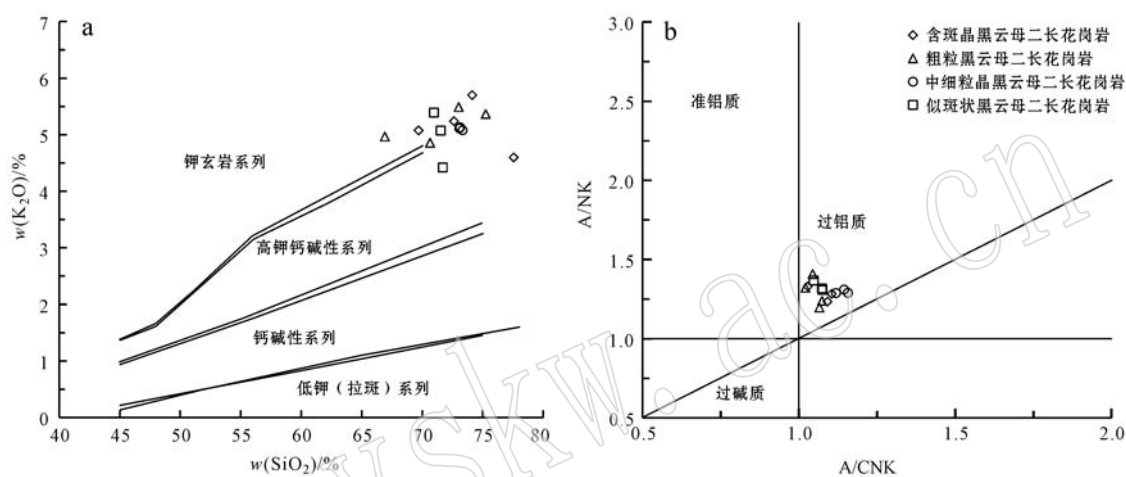


图 8 闾井花岗岩体 $SiO_2 - K_2O$ 图解(a)和 $A/CNK - A/NK$ 图解(b)(底图据 Peccerillo and Taylor, 1976; Rickwood, 1989)

Fig. 8 $SiO_2 - K_2O$ (a) and $A/CNK - A/NK$ (b) diagrams for Lüjing granitoid pluton (after Peccerillo and Taylor, 1976; Rickwood, 1989)

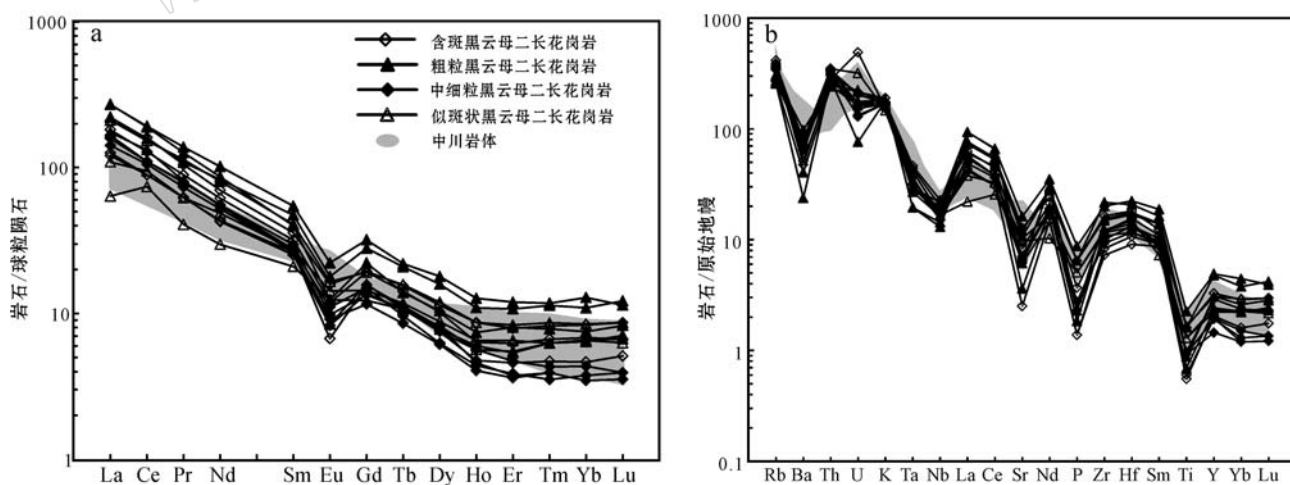


图 9 闾井花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石与原始地幔标准化数值据 Sun and McDonough, 1989; 中川岩体数值据 Zeng *et al.*, 2014)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of Lüjing granitoid pluton (normalization values after Sun and McDonough, 1989; samples of Zhongchun pluton from Zeng *et al.*, 2014)

与中川岩体相比(图 9):在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上,总的来说两者均表现为富集 LREE 元素、亏损 HREE 元素的右倾分配特征,并都具有负 Eu 异常;闰井岩体稀土元素总量要比中川岩体含量高,另外,闰井岩体轻重稀土元素分馏总体较中川岩体明显,轻稀土元素内部分馏显著,而重稀土元素内部分馏不明显;闰井岩体负 Eu 异常显著,而中川岩体负 Eu 异常较弱,个别数据有正的 Eu 异常;总体上,闰井岩体岩浆分异程度更高一些;在微量元素原始地幔标准网图化蛛上,两岩体总的分配曲线基本一致,均显示出富集 LREE、Rb、Th、U、K 等元素,而相对亏损 P、Nb、Ta、Ti 等元素的特征;具体来说闰井岩体在微量元素的总量上较高,同时更具明显的 Sr、Nb、P、Ti 负异常。

5 讨论

5.1 岩体形成时代、区域岩浆活动与成矿作用

本文对闰井岩体中 3 个岩性单元代表性岩石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,似斑状黑云母二长花岗岩形成年龄为 221 ± 1 Ma ($N=20$, MSWD=0.11);粗粒黑云母二长花岗岩为 221 ± 1 Ma ($N=24$, MSWD=0.04);中细粒黑云母二长花岗岩为 218 ± 1 Ma ($N=15$, MSWD=0.13);在误差范围内与前人的定年结果 214.5 ± 2.1 Ma (Zeng *et al.*, 2014) 基本一致,表明闰井岩体各单元均为晚三叠世侵入体,成岩时间在误差范围之内,说明它们是在很短的时间内先后侵入而成。

三叠纪时期华北地块与扬子地块在秦岭造山带沿着勉略缝合带发生碰撞,出现巨量的三叠纪花岗岩浆侵入作用,形成钙碱性花岗岩带,伴随强烈的成矿作用及丰富的成矿类型(陈衍景, 2010)。就西秦岭东部西和-武山-礼县一带侵入岩及成矿年龄资料显示:糜署岭岩体形成时代为 214.5 ± 1.6 Ma (李佐臣等, 2013);太白牙岩体的形成时代为 221.8 ± 1.5 Ma (任厚州等, 2014);黄渚关与厂坝花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 216.3 ± 4.3 Ma 和 217.9 ± 3.4 Ma (国阿千等, 2011);温泉斑岩型钼矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 214.7 ± 7.1 Ma (Zhu *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2011);李子园金矿成矿时代 206.8 ± 1.63 Ma (刘云华等, 2011);与中川岩体空间关系密切的李坝金矿床的云母 Ar-Ar 坪年龄为 $227 \sim 216$ Ma (Zeng *et al.*, 2012);另外该

花岗岩带内金、钼、铅锌等多金属矿床或矿化发育,与相应的中酸性岩体近同时形成或稍晚于岩体形成 (Zeng *et al.*, 2012; 胡乔青等, 2013; 姜启明等, 2014)。毛景文等(2012)总结这些三叠纪矿产认为其形成于碰撞造山或后碰撞环境;而秦岭造山带早中生代花岗岩体主要分布在西秦岭地区,形成于后碰撞伸展环境(张成立等, 2008; Wang *et al.*, 2013)。就闰井岩体而言,成岩年龄为 $221 \sim 218$ Ma,这与西秦岭中酸性岩体的主期成岩时代($220 \sim 200$ Ma)一致,均属印支晚期岩浆作用产物。

5.2 岩石成因类型

前人对“五朵金花”岩体群的岩石成因类型多归属为以地壳重熔及同碰撞 S 型花岗岩为主(李永军等, 1996; 卢哲等, 2004; 叶海, 2005; 殷勇等, 2006),且部分岩体被认为是具埃达克质岩地球化学特征的花岗岩体(彭璇, 2012)。而地球化学特征表明闰井岩体的 Sr/Y 比值并不高($Sr/Y=6.0 \sim 21.4$, 平均值 14.6),而且富钾, $K_2O/Na_2O > 1$,并不具有埃达克质岩的基本特征。同时以下证据表明其具有 I 型花岗岩的特征。

闰井岩体主要岩石类型为似斑状黑云二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩、含斑黑云母二长花岗岩和粗粒黑云母二长花岗岩,岩石中暗色矿物以黑云母为主,含有少量角闪石(图 3d),副矿物出现榍石、磷灰石、磁铁矿等,含少量白云母,未见石榴子石、堇青石等富铝矿物。在矿物组合特征上,一般认为角闪石、堇青石和碱性暗色矿物是判断 I、S 和 A 型花岗岩的重要矿物学标志(吴福元等, 2007),尽管闰井花岗岩类岩石含有极少量白云母,然而白云母和石榴石并不是确定 S 型花岗岩的有效标志(Miller, 1985)。另外闰井岩体各岩性单元均含有数量不等的岩浆暗色包体,因此在矿物组成上,闰井岩体岩石显示出 I 型花岗岩的矿物组成。

闰井岩体各岩性单元花岗岩铝饱和指数 A/CNK 为 $1.02 \sim 1.16$ (LJ04/1B 烧失量过大,部分数据未参与统计分析),一般认为 Al 饱和指数 > 1 并不是 S 型花岗岩的唯一特性,绝多数 I 型花岗岩也是如此(Chappell and White, 1992); Bea 等(1992)研究认为,花岗岩的 P_2O_5 含量比铝饱和指数(ASI 或 ACNK)能更好地判别初始岩浆事来自于火成岩还是沉积岩,在 $SiO_2 - P_2O_5$ 图解中(图 7), P_2O_5 与 SiO_2 显示出反相关关系,显示出 I 型花岗岩的特征(Chappell, 1999)。

结晶温度的确定对于研究岩石成因也具有重要意义。目前,花岗岩类岩石成岩温度估算最常用的方法之一为 Watson 等(1983)提出的锆石饱和温度计。其基本原理是锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物,锆石中 Zr 的分配系数对温度十分敏感,其在岩浆中的含量与温度存在相关性,而其他因素对其没有明显影响(Miller *et al.*, 2003),因而可以认为锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度(King *et al.*, 1997)。本次运用该方法计算得到闾井岩体的成岩温度为 736~818℃,平均 780℃(表 2);与 I 型花岗岩锆石饱和温度的平均值 781℃相近(King *et al.*, 1997)。

闾井岩体不同岩石类型在形成年龄上相近,岩石在成因类型上基本没有变化,均为 I 型花岗岩,但总体有向高分异 I 型花岗岩演化的趋势。

5.3 与区域上中川岩体对比

本文专门将闾井岩体与同区域研究程度较高的中川岩体进行了对比研究(表 3)。

在岩相学和岩浆演化方面,闾井岩体为一复式岩体,野外观察可知闾井岩体最早一期侵入体应为含斑黑云母二长花岗岩,其中夹有中细粒黑云母二

长花岗岩为后期侵入,另外主体岩性似斑状黑云母二长花岗岩与边部呈南北向条带状展布的粗粒黑云母二长花岗岩相比则侵入较晚。虽然测得的年龄数据表明这两个侵入体年龄一致,均为 221 Ma,并无先后关系,与这一事实看似不符,考虑到数据仍然在误差范围内,且最晚一期侵入体中细粒黑云母二长花岗岩年龄数据 218 Ma,可见闾井岩体整体年龄范围 221~218 Ma 跨度小(仅 3 Ma),由此认为闾井岩体各侵入单元为同时代不同期次侵入,在平面上具有同心环状的分布特征。野外实际路线观察发现各侵入体由外向内斑晶含量变少,粒度变细,而暗色包体在边部发育,向内逐渐变少,中心不发育。同样中川岩体也为一复式岩体,位于该岩体东侧约 20 km,主体部分发育 3 期侵入作用,不同期次呈同心环状产出,由外向内(由老到新)依次为中粗粒似斑状黑云二长花岗岩、中粒含斑黑云二长花岗岩以及中细粒黑云二长花岗岩,岩浆暗色包体在边部发育,向内逐渐减少,中心不发育。在年龄方面各岩性单元年代从 221±1 Ma~207±1 Ma 变化(聂政融等,待发表)。由此可见,这两个岩体具有相似的岩相学和岩浆演化特征。

表 3 闾井岩体与中川岩体相关参数对比
Table 3 The comparison of parameters between Lüjing pluton and Zhongchuan pluton

	中川岩体	闾井岩体	备注
岩石类型	黑云母二长花岗岩	黑云母二长花岗岩	相同
岩石结构变化	由外向内(由老到新):中粗粒似斑状→中粒含斑黑云二长花岗岩→中细粒	由外向内:粗粒→中细粒结构;从含斑→似斑状→无斑结构	均为同心环状复式岩体
成岩年龄	221±1 Ma~207±1 Ma	221±1 Ma~218±1 Ma	均为同时代
岩石地球化学	SiO ₂ =66.28%~72.98% Al ₂ O ₃ =13.51%~17.1% K ₂ O/Na ₂ O=1.33~1.80	SiO ₂ =69.71%~77.58% Al ₂ O ₃ =13.02%~15.55% K ₂ O/Na ₂ O=1.37~1.82	均表现出高硅、富钾、富铝地球化学特点
稀土元素	弱负 Eu 异常(δEu=0.55~1.20); (La/Sm) _N =2.9~5.0,平均为 4.48; (Gd/Yb) _N =1.8~4.2,平均为 2.90	显著负 Eu 异常(δEu=0.30~0.70); (La/Sm) _N =3.0~6.8,平均为 5.21; (Gd/Yb) _N =1.9~4.5,平均为 2.84	均显示富集 LREE,亏损 HREE 的右倾分配特征;稀土元素分配特征及变化趋势相似;仅微量元素总量上及分异程度上有所差别(图 9)
岩性系列	钙碱性系列、准铝质-弱过铝质(A/CNK=0.99~1.15)	高钾钙碱性-钾玄岩、过铝质-强过铝质(A/CNK=1.02~1.16)	
岩石成因类型	I 型→高分异 I 型	I 型	岩石成因类型相同,均为 I 型花岗岩
围岩地层	岩体外围主要侵入中石炭统地层、泥盆系地层;金矿的赋矿层为泥盆系地层	主要侵入泥盆系地层及中元古界地层	前人认为该区地层无控矿专属性
岩体外围矿床	与李坝、马泉、金山等大中型矿关系密切	零星矿化,尚未发现大型矿床(潜力巨大)	普遍认为岩体为金成矿提供热源

注:中川岩体地球化学数据部分引自 Zeng *et al.* (2014);年龄数据引自聂政融(待发表),测试方法为 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法。

在地球化学方面, 闽井岩体为过铝质(A/CNK 为 $1.02 \sim 1.16$), 而中川岩体为准铝质-弱过铝质, 但两者都具有富集 LREE、Rb、K 等元素, 亏损 HREE、Nb、P、Ti 等元素的特征。岩石成因类型上, 中川岩体为 I 型花岗岩, 也与闽井岩体一致。另外稀土元素球粒陨石标准化图解及原始地幔标准标准化图解中, 闽井岩体各岩性单元有着近平行的分布曲线, 总体与中川岩体有着相似的分配特征及变化趋势, 尽管在微量元素总量上及分异程度上有所差别(图 9)。

另外, 从区域构造上来看, “五朵金花”岩体群总体处在以构造线方向为北西向的断裂带中, 同时区域上发育众多轴向近北西的复式褶皱; 地层方面, “五朵金花”岩体群外围主要接触的有泥盆系、石炭系及中元古界地层; 研究表明中川岩体外围金矿的赋矿层主要为泥盆系地层, 但从已发现的金矿床赋矿地层看, 该区地层无控矿专属性(孙省利等, 1995)。

综合对比表明, “五朵金花”岩体群中西段的闽井岩体与东段的中川岩体不同岩石类型在形成时代及岩浆演化方面基本一致。值得注意的是目前发现的金矿主要局限于中川岩体外围, 已有研究表明中川侵入岩体、热液活动及金矿化事件为近同时代形成, 时代限制在 216 Ma (Zeng *et al.*, 2012, 2014)。因此有理由认为, 闽井岩体与中川岩体可能具有相似的成岩成矿机制, 至少在岩石学及地球化学上对成矿有着相同的制约因素。闽井岩体的外接触带可能和中川岩体的外接触带一样也具有金的成矿潜力。

6 结论

(1) 闽井岩体主要由似斑状黑云母二长花岗岩、含斑黑云母二长花岗岩、粗粒黑云母花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩组成, 主体岩性为似斑状黑云母二长花岗岩。闽井岩体成岩年龄为 $218 \pm 1 \text{ Ma}$ $\sim$ $221 \pm 1 \text{ Ma}$, 与中川岩体时代相同, 均为晚三叠世岩浆活动产物。

(2) 闽井岩体中的黑云母二长花岗岩主要为高钾($K_2O/Na_2O = 1.37 \sim 1.82$)、富碱($Na_2O + K_2O = 7.65\% \sim 8.84\%$)、铝弱饱和($A/CNK = 1.02 \sim 1.16$), 富集大离子亲石元素和亏损高场强元素, 属于过铝质-强过铝质高钾钙碱性-钾玄岩系列 I 型花岗岩。

(3) 该岩体在主要岩石类型和各岩石形成时间

演化上与外接触带金矿化发育的中川岩体基本一致, 同时其主要地球化学特征也相似, 表明该岩体与中川岩体可对比, 其外接触带也可能有良好的金矿成矿潜力。

致谢 西北大学大陆动力学国家重点实验室在锆石年龄测试、数据分析方面给予了很大帮助, 审稿老师对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59~79.
- Bea F, Fershtater G and Corretgé L G. 1992. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminium[J]. *Lithos*, 29(1): 43~56.
- Cao Xiaofeng, Lü Xinbiao, Yao Shuzhen, *et al.* 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology, geochemistry and kinetics of the Wenquan ore-bearing granites from West Qinling, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 120~131.
- Chappell B W and White A. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 272: 1~26.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chen Yanjing. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Qrogen, central China[J]. *Chinese Geology*, 37(4): 854~865(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yu and Zhang Wangding. 2001. Structural and magmatic activity and the relation to Gold mineralization in Zhongchuan area, West Qinling[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(2): 94~98(in Chinese with English abstract).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171~184.
- Cui Yifa. 2012. The research of geological characteristics and ore-controlling factors for Liba gold deposits, Gansu Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 24(3): 186~188(in Chinese).
- Feng Jianzhong, Wang Dongbo, Wang Xueming, *et al.* 2003. Geology and metallogenesis of Liba large-size Gold deposit in Lixian, Gansu province[J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 257~263(in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, *et al.* 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling orogenic belt[J]. *Northwest-*

- ern Geology, 36(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Gao Zhenquan. 1999. Geochemical characteristics and genesis discussion of Liba gold deposit[J]. Acta Geologica Gansu, 8(C00): 49~53 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. Precambrian Research, 131(3): 231~282.
- Guo Aqian, Ding Zhenju and Wen Chengxiong. 2011. Zircon U-Pb dating and its geological significance of granites in Xicheng Ore Field, Gansu [J]. Acta Mineralogica Sinica, S1: 581~582(in Chinese).
- Guo Hongle, Dong Junchao, Liu Jiangling, *et al.* 2013. Gold Mineralization Conditions and Metallogenic Prediction of the Western Part of Li-Min Metallogenic Belt in Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 21(6):22~29(in Chinese with English abstract).
- Hu Qiaoping, Wang Yitian, Wei Ran, *et al.* 2013. Discussion of the skarnization and mineralization about Changba-Lijiagou Pb-Zn deposit, Western Qinling[J]. Acta Mineralogica Sinica, S2: 12~13(in Chinese).
- Huang Xiongfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the Late Triassic acid volcanic rocks in Tanchang area, West Qinling and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3 968~3 980(in Chinese with English abstract).
- Jiang Qiming and Lu Tiaojian. 2014. The diagenetic and metallogenic ages of Zhongchuan gold deposit in Li Country, Gansu Province: Constraints from SHRIMP U-Th-Pb zircon dating [J]. Chinese Journal of Geology, 49(4): 1 184~1 200(in Chinese with English abstract).
- King P L, White A, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Li Ting, Xu Xueyi, Chen Juanlu, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic setting of Zhongchun intrusion, Lixian area, Western Qinling orogeny[J]. Geological Bulletin of China, 31(6): 875~883(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun and Huo Fuchen. 1996. Tectonic-genetic types of the intrusive rocks in the eastern part of West Qinling[J]. Acta Geologica Gansu, 5(1): 30~44(in Chinese with English abstract).
- Li Zuochen, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry of the Mishuling intrusion in western Qinling and their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(8): 2 617~2 634(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Mao Guangjian, Wu Shenghua, *et al.* 2010. Discovery and significance of native gold in the Zhaishang gold deposit, Southern Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(1): 115~123.
- Liu Yunhua, Liu Huaili, Huang Shaofeng, *et al.* 2011. Metallogenic epoch and geological features of Suishizi porphyry gold deposit in Liziyuan area, west Qinling mountain[J]. Gold, 32(7): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhe, Quan Junjuan, Cheng Yu, *et al.* 2004. Characteristics and geological effects of magmatic activity of the Zhongchuan granite of Western Qinling area[J]. Acta Geologica Gansu, 12(2): 25~30 (in Chinese with English abstract).
- Luo Biji, Zhang Hongfei and Xiao Zunqi. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Indosinian Meiwu Pluton in West Qinling, central China[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 199~213 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jinwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, *et al.* 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. Geology in China, 39(6): 1 437~1 471.
- Meng Qingren and Zhang Guowei. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 323(3): 183~196.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. Geology, 31(6): 529~532.
- Miller C F. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources? [J]. The Journal of Geology, 93(6): 673~689.
- Ou Chunsheng, Yang Yongchun, Wang Hu, *et al.* 2010. Characteristics and mineralization of Luchaba pluton in Lixian [J]. Gansu Science and Technology, 26(17): 37~41(in Chinese).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63~81.
- Peng Xuan. 2012. Magmatic consanguinity and tectonic significance of Zhongchuan rock group in western Qinling [D]. Master Degree Thesis, Chang'an University, 1~79(in Chinese with English abstract).
- Peng Xuan. 2013. Reserch on Homology for the Rock Group of Monzonite Granite in the Western Qinling[J]. Northwestern Geology, 46(1): 63~80(in Chinese with English abstract).
- Ren Houzhou, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, *et al.* 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taibai intrusion in Tianshui areas of Western Qinling Mountains and their geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 33(7): 1 041~1 054(in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22(4): 247~263.
- Sun S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J].

- Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sun Shengli, Song Chunhui, Wu Anbin, *et al.* 1995. Geochemical Characteristics of Liba Group Gold-Bearing Turbidite Formation in Lixian-Minxian Gold Mineralized Zone, West Qinling, Gansu Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(4): 145~152(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Zhang Chengli. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129~151.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Wei Ping, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2013. Geochemistry, chronology and geological significance of the granitoids in Xiahe, West Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 981~3 992 (in Chinese with English abstract).
- Wen Zhiliang. 2008. A new recognition of magma mixing process about Jiaochangba rock body, Western Qinling[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(3): 29~36(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Xi Xiaoshuang and Zhang Zengrong. 2002. Ore control model of structural press shadow domains at Limin gold area in Western Qinling [J]. *Journal of Central South University of Technology(Natural Science)*, 33(3): 221~224(in Chinese with English abstract).
- Xiang Dingpu, Tang Lingxiu, Tao Bingkun, *et al.* 2004. The origin of intermediate-acid intrusive rocks in West Qinling in special reference to their petrochemical characteristics[J]. *Geochimica*, (1): 66~75 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yaling, Mao Yongzhong and Wang Ganggang. 2006. Discuss on diagenetic and metallogenic features and metallogenic mechanism of Baijiazhuang Rock Mass in Minxian-Lixian area of Gansu Province [J]. *Gansu Geology*, 15(2): 36~41(in Chinese with English abstract).
- Yang Gensheng, Yang Guisheng, Wang Ganggang, *et al.* 2008. Geological characteristic and ore-controlling factors of Jinshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 30(1): 32~37.
- Ye Hai. 2005. Geochemical Prospecting and ore-prospecting Prognosis of Five Granitic Bodies in Li-Min Area[J]. *Gansu Metallurgy*, 27 (3): 43~46(in Chinese with English abstract).
- Yin Xianming, Du Yuliang and Yin Yong. 2006. Mineralization of granitoid and its prospecting in Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 38(4): 25~31(in Chinese with English abstract).
- Yin Yong and Zhao Yanqing. 2006. Relationship between granite and gold mineralization in the gold enrichment area of Western Qinling, Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 15(1): 36~41(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 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.
- Zeng Qingtao, McCuaig T C, Hart C J R, *et al.* 2012. Structural and geochronological studies on the Liba goldfield of the West Qinling Orogen, Central China[J]. *Mineralium Deposita*, 47(7): 799~819.
- Zeng Qingtao, McCuaig T C, Tohver E, *et al.* 2014. Episodic Triassic magmatism in the western South Qinling Orogen, central China, and its implications[J]. *Geological Journal*, 49(4): 402~423.
- Zhang Chengli, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, *et al.* 2005. Origin and dynamic significance of Guangtoushan granitic plutons to the north of Mianlue zone in southern Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 711~720(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304~316.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. *Science Press*, 1~806(in Chinese).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, *et al.* 2003. Mian-Luo Tectonic belt and Mian-Luo Suture zone in the Southern margin of the Qinling and Dabie orogenic belt[J]. *Science in China(Series D)*, 33(12): 1 121~1 135(in Chinese).
- Zhang Yulong, Xin Cunlin and Xi Jiaping. 2008. U-Au metallogenic pattern and prospecting criteria inside and outside-zone of Zhongchuan rock mass in East Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 43(6): 7~12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen and Wang Yong. 2004. Characteristics of fluid inclusions in the gold deposits within Zhongchuan area, western Qinling and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23 (2): 147~157(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhuan, Zhao Rushi and Mao Jinhai. 1989. Regional Geology of Gansu Province[M]. *Beijing: Geology Publishing House*, 1~692 (in Chinese).
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Chen Yanjing, *et al.* 2011. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-bearing granitoids in West Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 39(1): 46~62.

附中文参考文献

- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景, 岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 37(4): 854~865.
- 程 或, 张旺定. 2001. 西秦岭中川地区构造-岩浆活动及微细浸染型金矿成矿作用分析[J]. 地质找矿论丛, 16(2): 94~98.
- 崔义发. 2012. 甘肃李坝金矿床地质特征及控矿因素研究[J]. 西部探矿工程, 24(3): 186~188.
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 2003. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因[J]. 矿床地质, 22(3): 257~263.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二册, 等. 2003. 西秦岭造山带的演化, 构造格局和性质[J]. 西北地质, 36(1): 1~10.
- 高珍权. 1999. 李坝金矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 甘肃地质学报, 8(C00): 49~53.
- 郭红乐, 董俊超, 刘江领, 等. 2013. 甘肃礼县成矿带西段金成矿条件及成矿预测[J]. 黄金科学技术, 21(6): 22~29.
- 国阿千, 丁振举, 文成雄. 2011. 甘肃西成矿田花岗岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿物学报, 31: 581~582.
- 胡乔青, 王义天, 魏 然, 等. 2013. 西秦岭厂坝-李家沟铅锌矿床矽卡岩化与成矿关系探讨[J]. 矿物学报, 32: 12~13.
- 黄雄飞, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2013. 西秦岭宕昌地区晚三叠世酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(11): 3 968~3 980.
- 姜启明, 鲁挑建. 2014. 甘肃礼县中川地区金矿成岩和成矿年龄的 SHRIMP 厘定[J]. 地质科学, 49(4): 1 184~1 200.
- 李 婷, 徐学义, 陈隽璐, 等. 2012. 西秦岭造山带礼县地区中川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境[J]. 地质通报, 31(60): 875~883.
- 李永军, 霍福臣. 1996. 西秦岭东段侵入岩的构造成因类型[J]. 甘肃地质学报, 5(1): 30~44.
- 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等. 2013. 西秦岭糜署岭花岗岩体年代学, 地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 29(8): 2 617~2 634.
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 等. 2010. 甘肃礼县-岷县成矿带西段寨上金矿床中自然金的发现及成因意义[J]. 地质通报, 29(1): 115~123.
- 刘云华, 刘怀礼, 黄绍峰, 等. 2011. 西秦岭李子园碎石子斑岩型金矿床地质特征及成矿时代[J]. 黄金, 32(7): 12~18.
- 卢 哲, 权君娟, 程 或, 等. 2004. 西秦岭中川花岗岩岩浆活动特征及地质效应[J]. 甘肃地质学报, 12(2): 25~30.
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘, 19(3): 199~213.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. 中国地质, 39(6): 1 437~1 471.
- 欧春生, 杨永春, 王 虎, 等. 2010. 礼县碌碁坝花岗岩体特征及其成矿作用[J]. 甘肃科技, (17): 37~41.
- 彭 璇. 2012. 西秦岭中川岩体群同源性及其构造意义[D]. 长安大学, 1~79.
- 彭 璇. 2013. 西秦岭二长花岗岩岩体群同源性研究[J]. 西北地质, 46(1): 63~80.
- 任厚州, 裴先治, 刘成军, 等. 2014. 西秦岭天水地区太白花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 33(7): 1 041~1 054.
- 孙省利, 宋春晖, 武安斌, 等. 1995. 西秦岭礼县金矿带李坝群含金浊积岩建造地球化学特征[J]. 沉积学报, 13(4): 145~152.
- 韦 萍, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2013. 西秦岭夏河花岗岩的地球化学、年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 29(11): 3 981~3 992.
- 温志亮. 2008. 西秦岭教场坝岩体岩浆混合成因的新认识[J]. 矿物岩石, 28(3): 29~36.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 奚小双, 张曾荣. 2002. 西秦岭礼县金矿田构造压影域控矿模式[J]. 中南工业大学学报, 33(3): 221~224.
- 向鼎璞, 唐灵秀, 陶炳昆, 等. 2004. 西秦岭中酸性侵入岩岩石化学特征及成因探讨[J]. 地球化学, (1): 66~75.
- 许亚玲, 毛永忠, 王刚刚. 2006. 甘肃省岷县-礼县一带柏家庄岩体群成岩成矿特点及成矿机制探讨[J]. 甘肃地质, 15(2): 36~41.
- 杨根生, 杨贵生, 王刚刚, 等. 2008. 甘肃省金山金矿地质特征及控矿因素[J]. 地球科学与环境学报, 30(1): 32~37.
- 叶 海. 2005. 礼县地区五大岩体地球化学勘查及找矿预测[J]. 甘肃冶金, 27(3): 43~46.
- 殷先明, 杜玉良, 殷 勇. 2006. 甘肃花岗岩类成矿作用研究与找矿方向[J]. 西北地质, 38(4): 25~31.
- 殷 勇, 赵彦庆. 2006. 甘肃西秦岭金矿富集区花岗岩与金成矿作用的关系[J]. 甘肃地质, 15(1): 36~41.
- 张成立, 王 涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3): 304~316.
- 张成立, 张国伟, 晏云翔, 等. 2005. 南秦岭勉略带北光头山花岗岩体群的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 711~720.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学 D 辑, 33(12): 1 121~1 135.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 科学出版社, 1~806.
- 张玉龙, 辛存林, 席甲平. 2008. 甘肃省东部中川岩体内外带铀金成矿规律及其找矿判据[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 43(6): 7~12.
- 张作衡, 毛景文, 王 勇. 2004. 西秦岭中川地区金矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 23(2): 147~157.
- 周振环, 赵茹石, 毛金海. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~692.