

赣南营前岩体的年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其地质意义^{*}

郭春丽¹ 毛景文¹ 陈毓川²

GUO ChunLi¹, MAO JinWen¹ and CHEN YuChuang²

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. 中国地质科学院, 北京 100037

1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2009-12-19 收稿, 2010-02-17 改回.

Guo CL, Mao JW and Chen YC. 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd-Hf isotopic analysis of the Yingqian intrusion in Jiangxi Province, South China and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 919–937

Abstract The Yingqian intrusion is located in southern Jiangxi Province of the East Nanling region, and consists of granitoids of two periods of granitoids, mega-porphyratic granodiorites and fine-grained granites. There are a lot of melanic monzonitic enclaves in mega-porphyratic granodiorites. SHRIMP zircon U-Pb dating gives the ages of 172.2 ± 3.1 Ma for the earlier granodiorites, 167.6 ± 3.3 Ma for enclaves, 168 ± 3 Ma for later granites, indicating that the Yingqian intrusion is a Mid-Jurassic magmatic pluton. All of the rocks fall into the calc-alkaline category. Their whole rock trace elements demonstrate total LREE enrichment without significant Eu anomalies and obvious fractionation between LREE and HREE. LILE enrichment and HFSE depletion, and significantly negative Nb-Ta anomalies characterized the primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the rocks. The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ratios of the fine-grained granites, mega-porphyratic granodiorites and enclaves are 0.70885 ~ 0.70965, 0.71058 ~ 1.46393, 0.70788 ~ 0.70923 with $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values from -6.38 ~ -5.31, -6.51 ~ -5.17 to -5.47 ~ -4.31 respectively. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are -12.4 ~ -5.7, -9.2 ~ -4.2, -9.4 ~ +0.1 respectively. These data indicate that the Yingqian intrusion were result of partial melting of ancient crustal materials, interacted with mantle-derived magmas. The Mid-Jurassic magmatism along the “Shi-Hang” belt formed in a continental crustal thinning setting, which is a favorable event of interaction between crustal and mantle.

Key words SHRIMP zircon U-Pb age; Sr-Nd isotopic analysis; Zircon Hf isotopic analysis; Melanic monzonitic enclaves; Yingqian intrusion; Shi-Hang belt; Nanling region

摘要 赣南营前岩体由早期似斑状花岗闪长岩和晚期细粒黑云母花岗岩组成, 在前者中普遍发育暗色基性包体。SHRIMP 锆石 U-Pb 测年显示似斑状花岗闪长岩为 172.2 ± 3.1 Ma, 细粒黑云母花岗岩为 168 ± 3 Ma, 包体为 167.6 ± 3.3 Ma。所有的岩石均为钙碱性系列, 稀土元素显示 LREE 富集, HREE 亏损, Eu 负异常并不明显的特征, Nb-Ta 负异常显示壳源物质的特征。晚期细粒黑云母花岗岩、早期似斑状花岗闪长岩、暗色包体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.70885 ~ 0.70965、0.71058 ~ 1.46393、0.70788 ~ 0.70923 和 -6.38 ~ -5.31、-6.51 ~ -5.17、-5.47 ~ -4.31; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -12.4 ~ -5.7、-9.2 ~ -4.2、-9.4 ~ +0.1。结合岩相学、地球化学研究, 初步认为营前岩体的两期花岗质岩石源于地壳重熔, 地幔底侵导致地壳熔融形成营前岩体, 基性岩浆加入到未冷却的酸性岩浆中形成了目前所见到的暗色包体。结合区域上的研究资料, 认为中侏罗世期间, 沿“十杭”断裂带及与其相平行的一些深断裂发生了板块的撕裂, 这些缝合带是岩石圈相对薄弱的地带, 有利于幔源物质底侵上升以及壳幔相互作用。

* 本文受国家自然科学基金青年基金项目(40803008)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K2007-1-3)、国土资源大调查项目(1212010781078)和国家重点基础研究发展计划(2007CB411405)联合资助。

第一作者简介: 郭春丽, 女, 1978 年生, 博士研究生, 矿床学专业, E-mail: gchunli@126.com

关键词 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; Sr-Nd 同位素; 锆石 Hf 同位素; 暗色包体; 营前岩体; 十杭带; 南岭地区
中图法分类号 P588.12; P597.3

Gilder *et al.* (1996) 通过 Sr-Nd 同位素研究发现从广西的十万大山, 经过桂东北、湘东南、赣西南, 到杭州, 为一个低 t_{DM} 高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 带(十杭带), 并推断为一个中生代裂谷带; Hong *et al.* (1998) 也指出在华南大陆内部的杭州-诸广山-花山这一狭长地带的花岗岩幔源组份偏高; Chen and Jahn (1998) 进一步工作指出, 在十杭带的东侧也存在几条同样特征的带, 认为是岩石圈伸展和壳幔相互作用的证据; 陈江峰等 (1999) 考虑到万洋山-诸广山地区花岗岩体的 t_{DM} 值均大于 1700Ma, 将 Gilder *et al.* (1996) 提出的十杭带肢解成为两个带; 王德滋等 (2002) 通过总结前人的 77 个数据和测定 76 个中生代花岗岩体 Sm-Nd 同位素, 认为中国东南部中生代花岗岩的 Nd 模式年龄存在 3 个低值带和一个低值区。

近几年来总结发现沿“十杭带”及其东侧与之相平行的断裂带分布的中侏罗世花岗闪长岩有: 赣东北花岗闪长斑岩(与德兴铜矿、银山银铅锌矿有关), 湘东花岗闪长岩(与七宝山铜矿有关), 湘东南花岗闪长质岩体和火山岩(与水口山铅锌矿、宝山铜矿、铜山岭铜矿有关), 和粤北花岗闪长斑岩

(与大宝山铜金矿有关)(毛景文等, 2007, 2008)(图 1)。本文的研究发现赣南营前岩体也是一个幔源组份偏高的中侏罗世岩体, 而且主体花岗闪长岩中普遍发育暗色包体, 与该岩体有关的矿产为金、银、铜、铅、锌, 而不是南岭中生代区域上广泛发育的钨、锡、铌、钽、铍。本文对该岩体和暗色包体进行了系统的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素、锆石 Hf 同位素研究, 以揭示岩浆源区性质和岩浆演化过程。另外, 结合前人资料, 对上述中侏罗世花岗闪长质岩体进行了全面总结, 试图深入了解“十杭带”及其平行的 NE 向断裂带对于成岩成矿作用的控制作用, 和南岭地区中侏罗世的地球动力学背景。

1 赣南地区区域地质特征

赣南地区大地构造位置隶属于华南加里东褶皱系的一部分。区内地层发育较全, 除缺失志留系外, 自震旦系-第四系均有出露。震旦系-奥陶系主要为一套富含钙质、泥质、碳

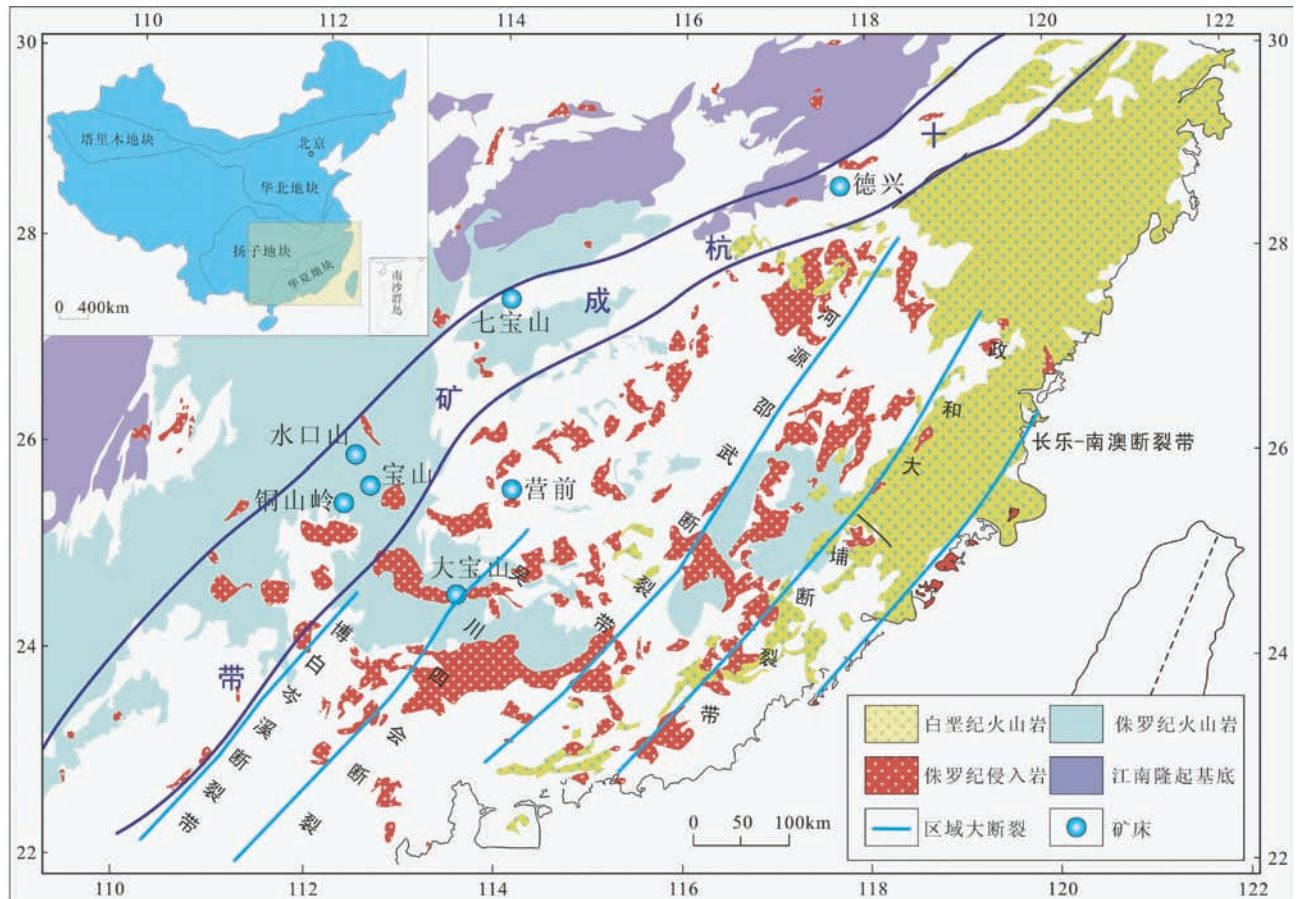


图 1 中侏罗世花岗闪长岩沿十杭带的分布位置图(改编自徐先兵等, 2009)

Fig. 1 Distribution map of the Mid-Jurassic granodiorites along the Shi-Hang belt (modified from Xu *et al.*, 2009)

质及砂泥质的类复理石建造,夹有大量的海底火山喷发物,岩石普遍发生了区域浅变质作用,构成了区内的褶皱基底。震旦系主要分布于区内北东部,寒武系、奥陶系等主要分布于西南部。泥盆系—下三叠系主要为一套海陆交互相,浅海相含钙质碎屑岩、砂页岩、碳酸盐岩,其中泥盆系主要分布于区内中、西及西南部,石炭系—二叠系主要分布于区内晚古生代拗陷盆地内,三叠系分布较为局限,呈零星分布。侏罗系—白垩系主要为陆相红层沉积及岩浆喷发物,侏罗系主要分布于南部地区,白垩系分布于区内主要断陷盆地内。

区内岩浆岩分布广泛,加里东期—燕山期均有分布,并以酸性岩类为主,中、基性岩类次之。其中以燕山期岩浆活动最为强烈,岩体遍布全区,岩性主要为黑云母花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩等,且多为复式岩体。

本区构造格架大体是在加里东褶皱基底之上经历了海西—印支(垂直运动为主)旋回、燕山(北西相对于南东的水平挤压)旋回。长期多阶段构造演化形成了一系列的 NNE 向、EW 向的深大断裂,由此构成了区内三对相间出现的隆起带和拗陷带。区内主要的构造形迹有加里东期的褶皱构造,其轴向主要为 NW 向、NE 向,次为近 SN 向等;而燕山期则主要表现为断裂构造,以 NE 向、NNE 向为主,次为 NW 向及 EW 向。燕山期 NE 向的三条深大断裂有万安—遂川、兴国—池江、宁都—定南,EW 向三条深大断裂为兴国—石城、大余—会昌、龙南—寻乌。营前岩体处于营前复式背斜轴部,受 NE 向断裂控制。

围绕营前岩体分布着一系列与该花岗岩有成因关系的矿床:茶亭坳、里坑、寨下、举望等钨多金属夕卡岩矿,焦龙金矿,焦里银铅锌多金属矿(谢春华,2001;李大新和赵一鸣,2004),井子坳钨银铅锌多金属矿。

2 营前岩体地质特征

营前岩体位于江西省南部上犹县营前乡境内,为一出露面积约 50km² 的岩体,呈近等轴状似圆形,侵入寒武系和奥陶系浅变质长石石英杂砂岩夹板岩(图 2)。

岩体与围岩的接触变质带发育,内接触带具有宽约 15cm 的细粒淬火边、黑云母等暗色矿物集合体构成斑杂状构造;外接触带在平面上形成较规则的围绕侵入体环状分布的面型接触变质晕,根据蚀变矿物组合自外向内划分为钠长石—绿帘角岩相黑云母带和角闪石角岩相堇青石带。

营前岩体分成两期,早期侵入面积约 49km²。岩性为粗粒似斑状花岗闪长岩(图 3a)和中粒似斑状花岗闪长岩(图 3c),前者巨大斜长石斑晶的环带结构清晰(图 3a, b);晚期细粒黑云母花岗岩小岩株侵入早期似斑状花岗闪长岩体中,面积约 1km²(图 3d)。早期似斑状花岗闪长岩中随处可见大小不等的暗色包体,形态大多呈浑圆状,其次为梭形、椭圆、透镜状等,长轴一般为 5~20cm,包体与寄主花岗闪长岩的接触界线清晰(图 4a, b)。

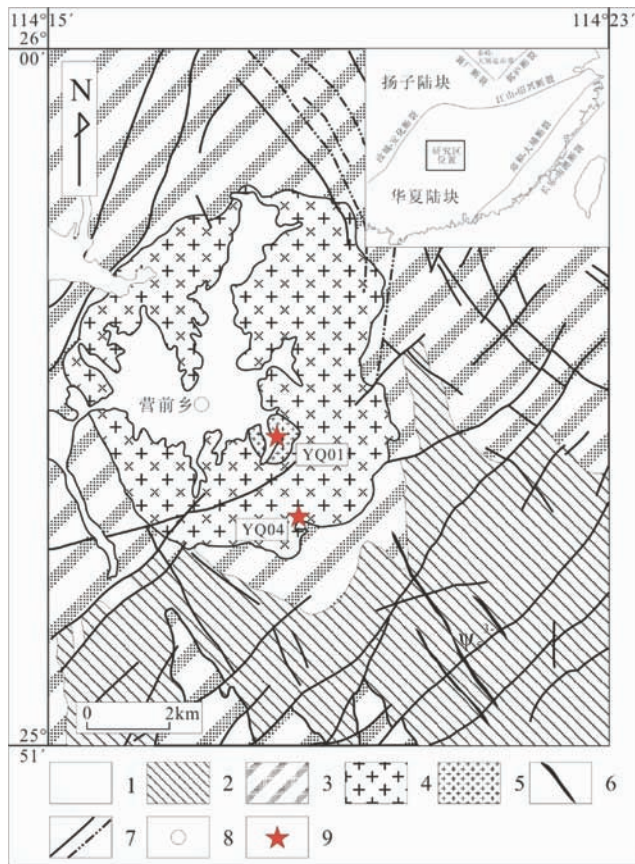


图 2 营前岩体地质图(改编自营前幅 1:50000 地质图①)

1-第四系沉积物;2-奥陶系下统硅质板岩;3-寒武系上统浅变质砂板岩;4-早期似斑状花岗闪长岩;5-晚期细粒黑云母花岗岩;6-泲水辉长岩墙;7-断层及推测断层;8-营前乡;9-SHRIMP 定年样品采样点

Fig. 2 Geological map of the Yingqian intrusion

1-Quaternary sediments; 2-Lower Ordovician siliceous slates; 3-Upper Cambrian epizonal sandstones and slates; 4-earlier porphyritic-like granodiorites; 5-later fine-grained biotite granites; 6-Zhuoshui gabbro dikes; 7-faults and presumed faults; 8- Yingqian Town; 9-sampling locations of SHRIMP zircon U-Pb dating

早期似斑状花岗闪长岩肉红色,似斑状结构,块状构造,斑晶与基质的比例为 1:2。斑晶为斜长石(35%~45%),基质为石英(15%~25%)、钾长石(15%~20%)、黑云母(5%~6%)和角闪石(2%),副矿物为锆石、榍石、钛铁矿、磷灰石等;斜长石呈半自形板状,卡-钠复合双晶常见(图 5a),环带构造发育(图 5b)。黑云母呈片状,黄色-褐色多色性明显,含较多磷灰石和锆石包体。石英呈他形粒状填充在其它矿物之间,并包裹早期斜长石和黑云母。

晚期细粒黑云母花岗岩为等粒结构,块状构造,主要矿

① 江西省地质矿产局调研大队 406 队. 1988. 营前幅 1:50000 地质图



图3 营前岩体主要岩相类型

a-似斑状花岗岩闪长岩(早期边缘相); b-环带结构的长石斑晶;
c-中粒似斑状花岗岩闪长岩(早期中心相); d-晚期细粒黑云母花岗岩

Fig. 3 Main lithofacies of the Yingqian intrusion

a-porphyrity-like granodiorite (early marginal facies); b-feldspar phenocryst with zonal texture; c-mid-grained porphyritic-like granodiorite (early central facies); d-late fine-grained biotite granite

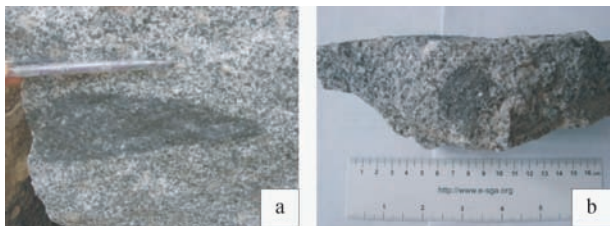


图4 营前岩体中的暗色包体

a-体积较大的暗色包体; b-体积较小的暗色包体

Fig. 4 Mafic enclaves in the Yingqian intrusion

a-large melanic monzonitic enclaves; b-small melanic monzonitic enclaves

物成分为斜长石(约30%~40%)、钾长石(约5%~10%)、石英(约45%~55%)、黑云母(约4%~6%)和少量角闪石(约1%~2%),副矿物为锆石、榍石、铁钛氧化物和磷灰石等。斜长石呈自形-半自形板状,见有不规则卡-钠复合双晶、聚片双晶,环带构造发育(图5c)。钾长石呈半自形板状-他形粒状,种属以正长石为主,少量微斜长石及隐条纹长石,卡氏双晶发育,显微格子双晶少见。石英呈半自形-他形粒状,常呈聚晶产出,少量斑晶包含早期结晶的斜长石和暗色矿物。黑云母呈自形-半自形片状,具深棕-淡黄褐色多色性,含榍石等副矿物包体。角闪石呈板状,具深绿-绿色多色性,属普通角闪石(图5d)。

暗色包体粒度明显变细,灰黑色-黑色,块状构造,矿物种类与寄主岩石相似,但比寄主岩石更富角闪石、黑云母等

铁镁矿物,石英含量极少(约2%~4%)。角闪石呈长柱状,多色性明显,绿色-黄绿色,属普通角闪石。斜长石具环带构造,中心蚀变较强,表面浑浊,而边部较干净透明(图5e),含大量的榍石、锆石、磷灰石等副矿物(图5f)。

早期似斑状花岗岩闪长岩和晚期细粒花岗岩虽然矿物组成相似,但是矿物含量、粒度、组构并不相同。暗色包体多呈椭圆状或透镜状的塑性形态特征,显示与花岗岩质石同时或近同时形成;包体中含有大量的暗色矿物角闪石和黑云母,使之呈暗黑色,且具有典型的岩浆结构、缺乏富铝矿物,不发育变晶结构和片理构造,且没有见到固态条件下的热变质或接触变质成分分带,说明是镁铁质岩浆包体。

3 样品分析方法

3.1 锆石 SHRIMP 分析方法

用于 U-Pb 测年的锆石选自营前岩体的新鲜岩石样品,采样点位置见图2。锆石 U-Pb 测年在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行。应用 SHRIMP 进行 U-Th-Pb 分析的详细流程和原理参考 Compston *et al.* (1984, 1992); Williams and Claesson (1987)、Williams (1998) 完成。应用澳大利亚国家地调局标准锆石 TEM(417Ma) 进行元素间的分馏校正;应用澳大利亚国立大学地学院标准锆石 SL13(572Ma, U 含量 238×10^{-6}) 标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Squid 1.01, 谐和图绘制采用 ISOPLOT 2.49h 程序(Ludwing, 2001)。用 SHRIMP II 进行锆石原位微区测定的流程及常用实验参数详见宋彪等(2002)。

3.2 主、微量元素分析方法

主量、微量元素在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。岩石样品碎成 200 目以下的粉末,主量元素采用 XRF 法在 X 荧光光谱仪(3080E)上测定,用波长色散 X 射线荧光光谱仪进行测量,用国家级标准物质制作校准曲线。稀土元素和除 Sr、Ba 之外的微量元素采用等离子质谱(Excell) ICP-MS 测定。微量除 Sr、Ba 采用等离子光谱(IRIS) ICP-AES 法测定。具体分析步骤见郭春雨等(2007)。

3.3 Sr-Nd 同位素分析方法

Sr-Nd 同位素在中国地质科学院地质所同位素实验室完成。Sm 和 Nd 的分离使用常规的两次离子交换技术(1)轻稀土元素分离通过阳离子交换柱(1×8cm, 充填树脂 Bio-Rad AG50X8, 200~400 目)和(2)Sm 和 Nd 的提纯通过另一个交换柱(0.6×7cm, 填充 Kel-F telfon 粉, HDEHP 作为交换介质)。质谱分析使用 7 个接收器的 Finnigan MAT-261 质量分光计, Sr 用静态模式而 Nd 用动态模式。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 标准化, $\text{NBS-607 } ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.20035 \pm 1 (2\sigma_n, n=6)$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标

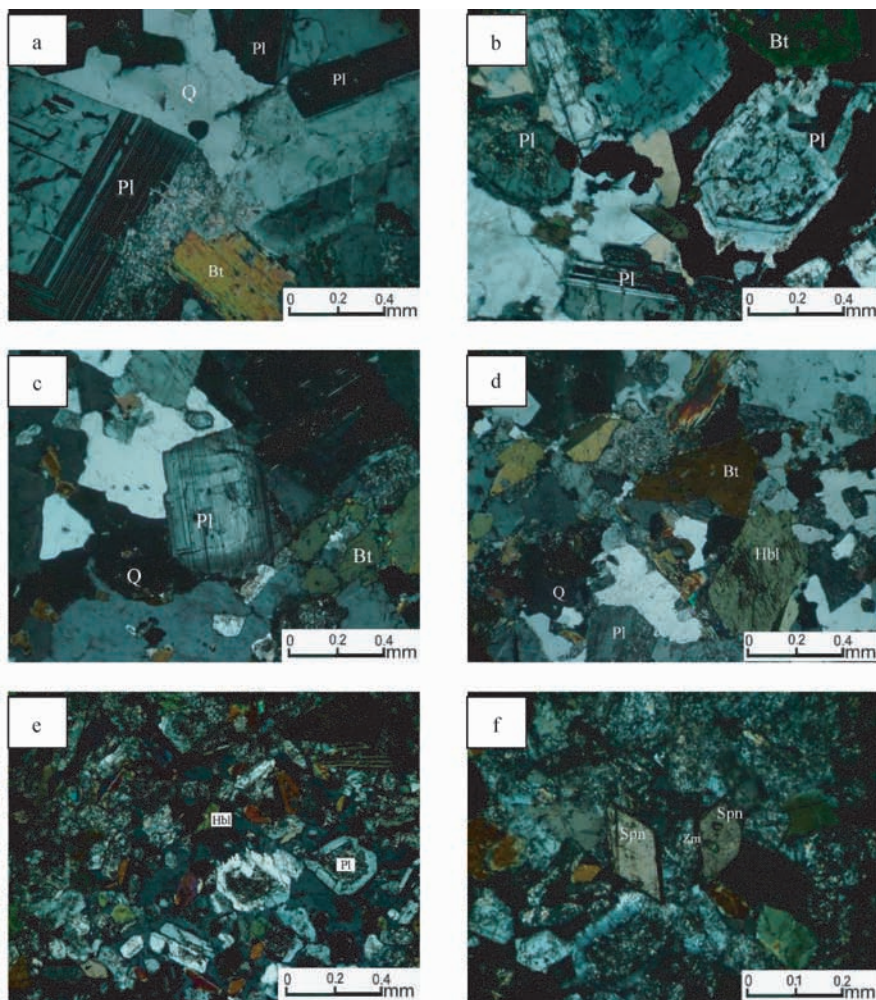


图5 营前岩体早期花岗闪长岩、晚期黑云母花岗岩、暗色包体的显微镜下照片

a-早期似斑状花岗闪长岩中斜长石(Pl)的聚片双晶和黑云母碳酸盐化蚀变; b-早期似斑状花岗闪长岩中斜长石的卡-钠复合双晶和环带构造; c. 粒度较小的晚期细粒花岗岩中具环带构造的斜长石; d-粒度较小的晚期细粒花岗岩中斜长石稍有蚀变, 含少量角闪石(Hbl); e-暗色包体的粒度细小, 含大量的角闪石, 具环带构造的斜长石中心蚀变较强而边部较干净透明; f-暗色包体中含较多的榍石(Spn), 锆石(Zrn)

Fig. 5 Microphotographs of granodiorites, enclaves and granites of the Yingqian intrusion

a-polysynthetic twinned crystal of plagioclase and carbonatization alteration of biotite in porphyritic-like granodiorite; b-compound twinned crystal and zonal structure of plagioclase in porphyritic-like granodiorite; c-zonal structure of plagioclase in later fine-grained granite; d-slightly alteration of plagioclase in later fine-grained granite with a few of hornblendes; e-fine-grained mafic enclaves with lots of hornblendes, plagioclase has zonal structure with altered center and clear margin; f-a plenty of sphenes, zircons in enclaves

准化, La Jolla $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511854 \pm 7 (2\sigma_n, n=8)$ 。用于计算年龄的衰变常数(λ_{Rb} 和 λ_{Sm})是 ^{87}Rb 为 0.0142Ga^{-1} , ^{147}Sm 为 0.00654Ga^{-1} 。

3.4 锆石 Hf 同位素分析方法

锆石进行 SHRIMP U-Pb 年龄测定后, 再在原位置用 MC-ICPMS 进行 Lu-Hf 同位素分析。实验在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 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小,

剥蚀直径采用 $55\mu\text{m}$ 或 $40\mu\text{m}$, 测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282015 \pm 31 (2\sigma_D, n=10)$, 与文献报道值(Ehrlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内一致。

4 分析结果

4.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

选取的样品为 YQ04 (早期似斑状花岗闪长岩)($N25^{\circ}53'$

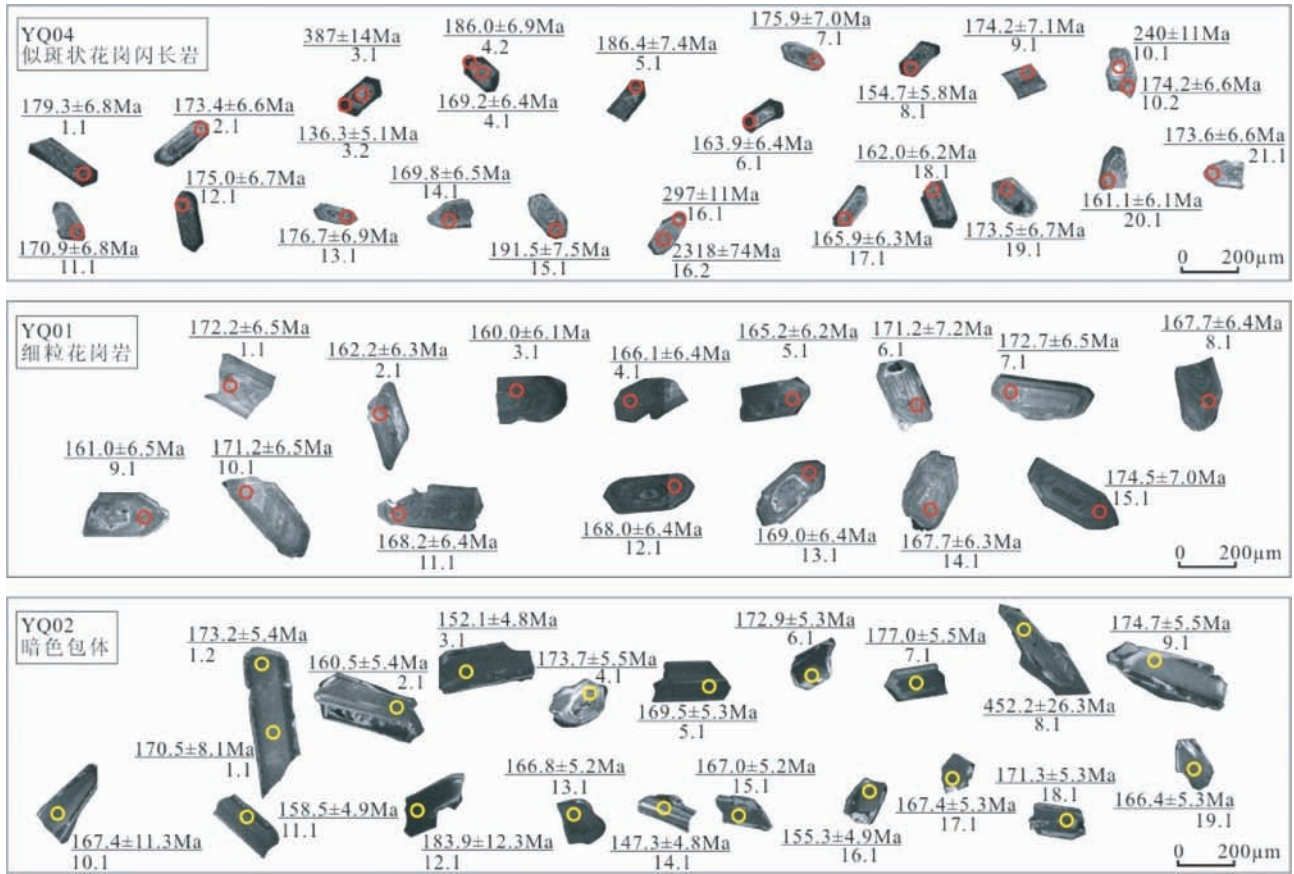


图6 营前岩体花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体锆石阴极发光图像

Fig. 6 Zircon CL images of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

53°, E114°18'40")、YQ01(晚期细粒黑云母花岗岩)(N25°54'50", E114°18'20")和YQ02(暗色包体)(包含在寄主岩中,经纬度与YQ04一致)。锆石阴极发光图像见图6。

三个样品的阴极发光图像中(图6),早期似斑状花岗闪长岩(YQ04)的锆石大部分呈长柱状,晶形比较完整,裂纹不发育,且部分岩浆结晶环带发育,有的环带比较密集,有的环带较稀少。韵律环带结构显示所测锆石为典型的岩浆成因锆石;相比之下,晚期细粒黑云母花岗岩(YQ01)锆石颗粒更大,环带结构清晰,也是岩浆成因锆石;而暗色包体(YQ02)的锆石颗粒与YQ01大小相差不多,但是晶形较差,且成分环带不清晰,略具熔蚀现象,可能与岩浆混合作用有关。TEM和未知年龄样品分析量按照比例1:3进行,测点位置见图6,年龄结果见表1和图7。

早期似斑状花岗闪长岩(YQ04)共测定了23个单颗粒锆石,共25个点。年龄数据中的18个点集中分布于186.4Ma~161.1Ma,且均落在谐和线上,说明186.4~161.1Ma代表岩浆结晶时间,18个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $172.2 \pm 3.1\text{Ma}$ (MSWD=1.14)。该样品中对三个核、边界线分明的锆石分别测定了核部和边部的年龄。点3.1的年龄为 $387 \pm 14\text{Ma}$,点3.2为 $136.3 \pm 5.1\text{Ma}$,点3.2的U

含量相对较高,可能是因为U裂变破坏锆石晶格引起Pb丢失。点10.1为 $240 \pm 11\text{Ma}$,图6显示该点为锆石核部,表明老锆石为早期结晶的产物,后期的岩浆事件导致新生锆石重新生长结晶。点16.1为 $297 \pm 11\text{Ma}$,点16.2为 $2318 \pm 74\text{Ma}$,该较老年龄可能指示出岩体源区有老基底的存在。点15.1为 $191.5 \pm 7.5\text{Ma}$,点8.1为 $154.7 \pm 5.8\text{Ma}$,与其它点的年龄值谐和度较差。上述7个年龄数据没有参与最终的加权平均年龄计算。

晚期细粒黑云母花岗岩(YQ01)共测定了19个单颗粒锆石,共20个点。年龄数据中的16个点集中分布于177.0~155.8Ma,且均落在谐和线上,代表岩浆结晶时间,16个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $168 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD=1.3)。该样品中点8.1为 $452 \pm 26\text{Ma}$,12.1为 $184 \pm 12\text{Ma}$,可能为捕获的锆石。点3.1的年龄为 $152.1 \pm 4.8\text{Ma}$,点14.1为 $147.3 \pm 4.8\text{Ma}$,与其它点的年龄值谐和度较差。上述4个年龄数据没有参与最终的加权平均年龄计算。

暗色包体(YQ02)共测定了15个单颗粒锆石,共15个点。年龄数据中的15个点较一致,集中分布于174.5~160.0Ma,且均落在谐和线上,代表岩浆结晶时间,15个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $167.6 \pm 3.3\text{Ma}$ (MSWD=0.44)。

表1 营前岩体花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 Results of SHRIMP zircon U-Pb dating of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

序号	点号	U	Th	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}_c$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ (Ma) $\pm 1\sigma$
		($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)		(%)	测值	相对误差(%)	测值	相对误差(%)	测值	相对误差(%)		
YQ04(早期似斑状花岗闪长岩)													
1	YQ04-1.1	1149	492	0.44	28.0	1.04	0.0471	8.3	0.183	9.2	0.0281	3.8	179.3 ± 6.8
2	YQ04-2.1	605	255	0.43	14.5	0.92	0.0583	7.4	0.222	8.4	0.0276	3.9	173.4 ± 6.6
5	YQ04-3.1	1000	368	0.38	53.6	0.90	0.0584	5.0	0.498	6.3	0.0618	3.8	387 ± 14
3	YQ04-3.2	24290	6084	0.26	457	2.70	0.0630	2.8	0.1858	4.7	0.0214	3.8	136.3 ± 5.1
6	YQ04-4.1	621	267	0.44	14.4	1.74	0.0638	7.6	0.234	8.5	0.0266	3.9	169.2 ± 6.4
4	YQ04-4.2	12253	3114	0.26	310	0.51	0.0535	1.1	0.216	3.9	0.0293	3.8	186.0 ± 6.9
7	YQ04-5.1	14040	2994	0.22	357	0.85	0.0536	2.0	0.217	4.5	0.0293	4.0	186.4 ± 7.4
8	YQ04-6.1	25100	6031	0.25	565	1.94	0.0699	3.9	0.238	5.6	0.0258	4.0	163.9 ± 6.4
9	YQ04-7.1	663	422	0.66	16.0	1.50	0.0505	9.6	0.193	10	0.0277	4.0	175.9 ± 7.0
10	YQ04-8.1	1090	413	0.39	23.1	1.64	0.0544	7.6	0.182	8.5	0.0243	3.8	154.7 ± 5.8
11	YQ04-9.1	518	251	0.50	12.4	2.17	0.0528	15	0.200	15	0.0274	4.1	174.2 ± 7.1
12	YQ04-10.1	585	178	0.31	22.7	17.33	0.342	5.5	1.77	7.3	0.0380	4.5	240 ± 11
13	YQ04-10.2	612	164	0.28	14.4	0.35	0.0546	4.5	0.206	5.9	0.0274	3.9	174.2 ± 6.6
14	YQ04-11.1	553	195	0.36	12.8	0.14	0.0534	2.7	0.1978	4.9	0.0269	4.1	170.9 ± 6.8
15	YQ04-12.1	1082	650	0.62	25.7	0.50	0.0498	4.7	0.189	6.1	0.0275	3.9	175.0 ± 6.7
16	YQ04-13.1	775	544	0.72	18.6	0.58	0.0529	6.1	0.203	7.3	0.0278	4.0	176.7 ± 6.9
17	YQ04-14.1	746	448	0.62	17.2	0.83	0.0520	5.4	0.191	6.7	0.0267	3.9	169.8 ± 6.5
18	YQ04-15.1	633	259	0.42	18.1	10.10	0.145	10	0.599	11	0.0302	4.0	191.5 ± 7.5
19	YQ04-16.1	1450	799	0.57	58.8	0.22	0.0533	1.6	0.346	4.2	0.0471	3.9	297 ± 11
21	YQ04-16.2	468	146	0.32	174	0.21	0.1589	1.0	9.48	3.9	0.433	3.8	2318 ± 74
20	YQ04-17.1	1273	615	0.50	28.7	0.88	0.0521	6.8	0.188	7.8	0.0261	3.9	165.9 ± 6.3
22	YQ04-18.1	624	346	0.57	14.0	2.73	0.0709	11	0.249	11	0.0255	3.9	162.0 ± 6.2
23	YQ04-19.1	897	256	0.30	21.1	0.16	0.0556	1.9	0.2091	4.4	0.0273	3.9	173.5 ± 6.7
24	YQ04-20.1	900	284	0.33	19.9	1.92	0.0561	9.8	0.196	10	0.0253	3.8	161.1 ± 6.1
25	YQ04-21.1	548	278	0.52	12.9	0.58	0.0557	7.3	0.210	8.2	0.0273	3.9	173.6 ± 6.6
YQ01(晚期细粒花岗岩)													
1	YQ01-1.1	441	340	0.80	10.3	1.21	0.0466	6.9	0.172	8.4	0.0268	4.8	170.5 ± 8.1
2	YQ01-1.2	694	710	1.06	16.3	0.60	0.0490	3.8	0.1839	4.9	0.0272	3.1	173.1 ± 5.4
3	YQ01-2.1	698	1064	1.58	15.3	1.42	0.0490	5.7	0.170	6.7	0.0252	3.4	160.5 ± 5.4
4	YQ01-3.1	820	1291	1.63	17.0	1.10	0.0467	5.5	0.1537	6.4	0.0239	3.2	152.1 ± 4.8
5	YQ01-4.1	564	354	0.65	13.7	3.19	0.0444	12	0.167	13	0.0273	3.2	173.7 ± 5.5
6	YQ01-5.1	882	1761	2.06	20.6	2.00	0.0441	8.2	0.162	8.8	0.0267	3.1	169.5 ± 5.3
7	YQ01-6.1	872	1688	2.00	20.6	1.12	0.0478	4.3	0.1791	5.3	0.0272	3.1	172.9 ± 5.3
8	YQ01-7.1	769	1228	1.65	18.6	1.07	0.0510	9.2	0.196	9.8	0.0278	3.1	177.0 ± 5.5
9	YQ01-8.1	748	117	0.16	47.0	0.65	0.0550	3.3	0.551	6.8	0.0272	6.0	452 ± 26
10	YQ01-9.1	510	445	0.90	12.3	1.89	0.0451	11	0.171	11	0.0275	3.2	174.7 ± 5.5
11	YQ01-10.1	684	791	1.19	15.8	1.83	0.0444	8.5	0.161	11	0.0263	6.8	167 ± 11
12	YQ01-11.1	1109	811	0.76	24.9	4.75	0.0457	9.6	0.157	10	0.0245	3.1	158.5 ± 4.9
13	YQ01-12.1	4872	7862	1.67	122	0.35	0.0495	1.8	0.198	7.0	0.0289	6.8	184 ± 12
14	YQ01-13.1	705	948	1.39	16.1	1.21	0.0491	8.4	0.177	8.9	0.0262	3.2	166.8 ± 5.2
15	YQ01-14.1	524	631	1.24	11.1	6.18	0.0484	17	0.154	18	0.0231	3.3	147.3 ± 4.8
16	YQ01-15.1	953	1147	1.24	21.7	0.88	0.0498	4.1	0.1802	5.2	0.0263	3.1	167.0 ± 5.2
17	YQ01-16.1	677	782	1.19	14.5	2.05	0.0465	9.4	0.156	10.0	0.0244	3.2	155.8 ± 4.9
18	YQ01-17.1	841	1118	1.37	19.2	1.04	0.0516	11	0.187	12	0.0263	3.2	167.4 ± 5.3
19	YQ01-18.1	847	1297	1.58	20.0	2.08	0.0455	10	0.169	11	0.0269	3.1	171.3 ± 5.3
20	YQ01-19.1	788	1553	2.04	18.0	1.68	0.0473	15	0.171	15	0.0262	3.2	166.4 ± 5.3
YQ02(暗色包体)													
1	YQ02-1.1	1033	222	0.22	24.1	0.37	0.0547	3.2	0.204	5.0	0.0271	3.8	172.2 ± 6.5
2	YQ02-2.1	674	194	0.30	14.8	0.20	0.0609	4.6	0.214	6.0	0.0255	3.9	162.2 ± 6.3
3	YQ02-3.1	644	154	0.25	13.9	—	0.0603	6.1	0.209	7.2	0.0251	3.9	160.0 ± 6.1
4	YQ02-4.1	872	265	0.31	19.7	0.97	0.0509	5.9	0.183	7.1	0.0261	3.9	166.1 ± 6.4
5	YQ02-5.1	788	247	0.32	17.6	0.42	0.0592	6.1	0.212	7.2	0.0260	3.8	165.2 ± 6.2
6	YQ02-6.1	736	218	0.31	17.2	1.22	0.0527	13	0.196	14	0.0269	4.3	171.2 ± 7.3
7	YQ02-7.1	666	155	0.24	15.6	0.80	0.0545	6.0	0.204	7.1	0.0272	3.8	172.7 ± 6.5
8	YQ02-8.1	634	139	0.23	14.3	—	0.0624	6.5	0.227	7.5	0.0264	3.9	167.7 ± 6.4
9	YQ02-9.1	880	228	0.27	19.3	0.77	0.0543	5.5	0.189	6.8	0.0253	4.1	161.0 ± 6.5
10	YQ02-10.1	945	242	0.27	21.9	0.15	0.0575	3.4	0.213	5.1	0.0269	3.8	171.2 ± 6.5
11	YQ02-11.1	941	231	0.25	21.5	0.56	0.0554	7.3	0.202	8.3	0.0264	3.8	168.2 ± 6.4
12	YQ02-12.1	665	131	0.20	15.0	—	0.0654	5.9	0.238	7.1	0.0264	3.8	168.0 ± 6.4
13	YQ02-13.1	951	216	0.24	21.8	—	0.0590	3.4	0.217	5.1	0.0267	3.8	169.7 ± 6.4
14	YQ02-14.1	943	196	0.21	21.5	0.70	0.0530	5.6	0.193	6.8	0.0263	3.8	167.7 ± 6.3
15	YQ02-15.1	695	182	0.27	16.6	1.57	0.0474	9.5	0.179	10	0.0274	4.0	174.5 ± 7.0

注: Pb_c 和 Pb* 分别表示普通铅和放射性铅, 应用实测²⁰⁴Pb校正锆石中的普通铅, 采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄

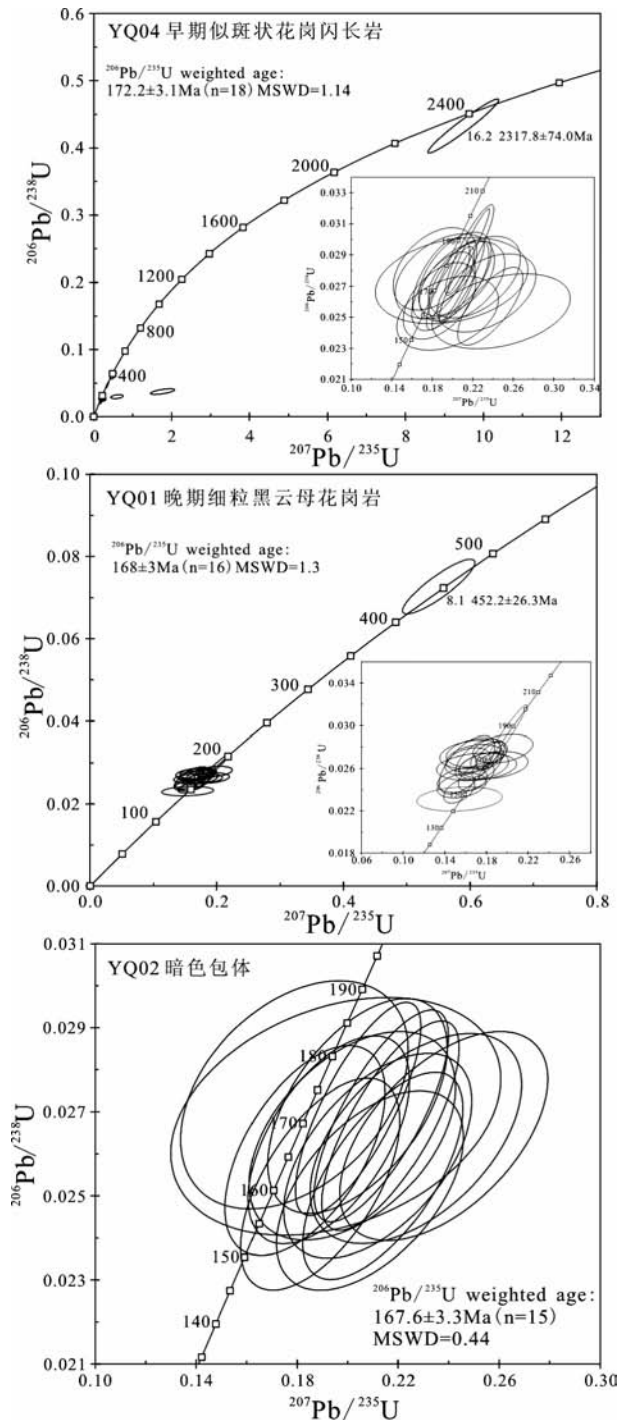


图7 营前早期花岗闪长岩、晚期花岗岩、暗色包体锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图

Fig. 7 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

4.2 主量、微量、稀土元素分析结果

主量元素分析结果见表2, 稀土元素微量元素分析结果见表3, 微量元素分析结果见表4。

营前岩体不同类型岩石的主量元素成分见表2。在火成岩的 SiO_2 -AlK分类命名图解(Cox, 1979)上, 晚期细粒花岗岩投在花岗岩区域, 早期似斑状花岗闪长岩投在花岗闪长岩区域, 暗色包体投在二长岩区域(图8)。晚期细粒花岗岩—早期似斑状花岗闪长岩—暗色包体的 SiO_2 含量依次降低, 分别为74.93%~71.11%, 67.86%~65.32%, 54.58%~53.36%; Al_2O_3 含量依次升高, 分别为13.30%~14.42%, 14.48%~15.74%, 17.15%~17.58%。 A/CNK 值分别是1.05~0.99, 1.01~0.92, 0.83~0.79, 可见包体和早期花岗闪长岩为偏铝质, 晚期花岗岩为过铝质(图9)。两期花岗岩和暗色包体均落入Morrison(1980)所示高钾钙碱性岩石范围(图10); 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量依次降低, 分别为8.27%~7.56%, 7.11%~6.36%, 6.46%~5.77%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值依次升高, 分别是0.70~0.54, 1.03~0.65(YQ03为1.03), 1.85~1.57, 一般认为 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ 的岩浆起源通常与角闪石在8~12kb的脱水熔融有关(Rapp and Watson, 1995), 因此推断暗色包体的形成与角闪石在8~12kb的脱水熔融有关, 这与暗色包体中含有大量的黑云母、角闪石等暗色矿物相对应。

营前岩体不同类型岩石的稀土元素成分见表3, 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图如图11。晚期细粒花岗岩、早期似斑状花岗闪长岩、暗色包体的 ΣREE 分别是 $103.9 \times 10^{-6} \sim 132.24 \times 10^{-6}$, $162.72 \times 10^{-6} \sim 230.72 \times 10^{-6}$, $241.12 \times 10^{-6} \sim 279.41 \times 10^{-6}$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别是4.70~7.83, 10.08~13.71(除了YQ02为4.43), 4.39~5.36; 其中暗色包体的稀土总含量最高, 且轻重稀土分馏不明显; 晚期细粒花岗岩的稀土总含量最低; 早期似斑状花岗闪长岩稀土分馏程度最大。但是三者的 δEu 差别不大, 分别是0.81~0.69, 0.79~0.67, 0.81~0.66。

与早期似斑状花岗闪长岩和晚期细粒花岗岩相比, 暗色包体的过渡元素Sc、V、Cr、Co、Cu、Zn等元素含量明显偏高, 这与其基性程度较高相匹配。反映岩石分异演化的元素比值(Rb/Sr 、 Rb/Ba 、 Nb/Ta)由晚期细粒花岗岩、早期似斑状花岗闪长岩、暗色包体依次为: $\text{Rb}/\text{Sr} = 1.98 \sim 0.45, 0.39 \sim 0.26, 0.34 \sim 0.26$; $\text{Rb}/\text{Ba} = 1.70 \sim 0.46, 0.80 \sim 0.26, 0.98 \sim 0.66$; $\text{Nb}/\text{Ta} = 10.88 \sim 9.66, 13.68 \sim 10.87, 13.41 \sim 11.71$ 。

4.3 全岩Sr-Nd同位素分析结果

营前岩体的Sr-Nd同位素分析结果见表5。

晚期细粒花岗岩、早期似斑状花岗闪长岩、暗色包体的 Rb/Sr 比值分别是0.68~0.26, 0.90~0.16, 0.28~0.16; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值分别是0.70965~0.70885, 0.71058~1.46393, 0.70923~0.70788, 暗色包体的 Rb/Sr 比值和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值低于花岗岩质岩石, 更接近地幔成分。上述岩石的按平均年龄170Ma计算, 晚期细粒花岗岩、早期似斑状花岗闪长岩、暗色包体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为-6.38~-5.31, -6.51~-5.17, -5.47~-4.31。

表2 营前早期花岗闪长岩、晚期花岗岩、暗色包体主量元素分析结果 (wt%)

Table 2 Major compositions of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves (wt%)

岩性	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃ ^T	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	LOI	K ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ O + K ₂ O
晚期 细粒 花岗岩	YQ(H)01	74.93	0.19	13.41	1.22	2.90	5.37	1.50	0.11	1.38	0.51	0.05	0.07	0.46	1.85	8.27
	YQ(H)02	72.29	0.26	13.51	2.11	2.70	4.98	2.21	0.57	1.59	0.88	0.08	0.11	0.51	1.84	7.68
	YQ(H)03	74.45	0.17	13.30	1.58	2.85	4.92	1.31	0.74	0.50	0.31	0.03	0.06	0.58	1.73	7.77
	YQ(H)04	71.11	0.23	14.42	2.24	3.11	4.45	2.59	1.76	0.65	0.57	0.09	0.10	0.75	1.43	7.56
早期 似斑 状花 岗闪 长岩	YQ01	66.24	0.54	14.86	4.15	2.72	3.78	4.70	3.14	1.25	1.57	0.09	0.25	0.87	1.39	6.50
	YQ02	65.32	0.51	15.27	3.88	2.91	4.04	4.74	2.35	2.16	1.52	0.10	0.28	1.03	1.39	6.95
	YQ03	65.55	0.50	15.74	3.79	3.22	3.14	4.85	2.68	1.90	1.54	0.10	0.25	1.02	0.98	6.36
	YQ04	65.56	0.54	14.83	4.05	2.71	4.02	5.15	3.14	1.70	1.78	0.09	0.25	0.62	1.48	6.73
	YQ05	67.86	0.43	14.48	3.38	2.80	4.31	3.89	1.99	1.70	1.33	0.10	0.21	0.55	1.54	7.11
	YQ06	65.94	0.54	14.97	3.87	2.84	4.26	4.97	2.77	1.92	2.03	0.11	0.27	0.55	1.50	7.10
暗色 包体	YQ(B)01	53.48	0.88	17.57	7.10	4.11	2.26	8.54	3.12	5.11	2.57	0.24	0.67	2.00	0.55	6.37
	YQ(B)02	53.51	0.86	17.58	6.98	3.85	2.46	8.66	4.24	3.99	2.58	0.23	0.66	1.98	0.64	6.31
	YQ(B)03	54.58	0.87	17.15	7.12	3.58	2.19	10.05	4.10	5.54	3.75	0.34	0.51	2.26	0.61	5.77
	YQ(B)04	53.36	0.90	17.50	6.93	3.98	2.48	8.66	4.12	4.13	2.67	0.24	0.68	2.08	0.62	6.46
	YQ(B)05	54.37	0.84	17.39	6.71	3.95	2.13	8.67	3.90	4.38	2.61	0.23	0.65	1.84	0.54	6.08

表3 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的稀土元素分析数据 (×10⁻⁶)Table 3 REE compositions of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves (×10⁻⁶)

岩性	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	δEu	(La/Yb) _N
晚期 细粒 花 岗 岩	YQ(H)02	20.2	37.9	4.78	18.4	4.46	0.98	4.21	0.80	4.85	0.93	2.49	0.42	3.02	0.46	3.56	103.9	0.69	4.80
	YQ(H)03	16.90	36.8	4.95	21.8	5.62	1.47	5.43	0.81	4.95	0.91	2.46	0.36	2.58	0.41	4.44	105.45	0.81	4.70
	YQ(H)04	25.42	50.17	6.69	26.26	5.92	1.38	5.09	0.76	4.32	0.84	2.35	0.36	2.33	0.35	22.93	132.24	0.77	7.83
早期 似斑 状花 岗闪 长岩	YQ01	39.5	67.8	8.35	32.4	7.02	1.62	6.65	0.99	5.42	1.10	2.79	0.42	2.81	0.44	4.64	177.31	0.72	10.08
	YQ02	35.0	85.5	10.8	48.6	11.6	2.58	10.7	1.69	10.0	1.96	4.99	0.78	5.67	0.85	6.76	230.72	0.71	4.43
	YQ03	38.5	66.8	7.32	27.2	5.64	1.33	5.06	0.74	4.17	0.80	2.19	0.34	2.24	0.39	4.32	162.72	0.76	12.33
	YQ04	43.4	76.0	8.53	32.9	6.64	1.62	6.21	0.86	4.83	0.89	2.41	0.36	2.27	0.37	5.01	187.29	0.77	13.71
	YQ05	37.41	68.63	9.14	35.74	6.88	1.66	6.04	0.89	4.97	0.96	2.60	0.40	2.57	0.40	26.17	178.29	0.79	10.44
	YQ06	46.97	84.64	10.36	37.51	7.15	1.47	6.34	0.92	5.20	1.02	2.81	0.43	2.94	0.46	28.01	208.22	0.67	11.46
暗色 包体	YQ(B)01	43.75	99.08	13.17	54.19	12.01	2.56	11.65	1.60	9.53	1.89	5.55	0.79	5.86	0.87	50.50	262.5	0.66	5.36
	YQ(B)02	37.80	91.13	12.83	56.38	12.87	2.87	12.49	1.77	10.52	2.06	5.98	0.86	6.17	0.94	54.29	254.67	0.69	4.39
	YQ(B)03	39.88	114	15.1	60.2	12.24	3.07	10.86	1.48	8.69	1.67	5.13	0.75	5.49	0.85	45.87	279.41	0.81	5.21
	YQ(B)04	43.06	98.13	13.34	56.34	12.41	2.67	11.90	1.69	9.97	1.98	5.94	0.82	6.18	0.94	52.98	265.37	0.67	5.00
	YQ(B)05	40.80	88.02	12.1	50.49	11.28	2.42	10.98	1.56	9.24	1.77	5.33	0.76	5.55	0.82	49.76	241.12	0.66	5.27

注:其中 δEu = Eu_N / (Sm_N × Gd_N)^{1/2}

表4 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的微量元素分析数据 ($\times 10^{-6}$)Table 4 Trace element compositions of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves ($\times 10^{-6}$)

岩性	样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	Rb/Sr	Rb/Ba	Nb/Ta
晚期 细粒 花岗 岩	YQ(H)01	20.2	3.53	2.07	14.3	2.43	1.49	2.25	3.33	19.1	15.0	269	136	16.0	14.3	11.3	158	113	1.48	1.44	27.8	27.5	7.60	1.98	1.70	9.66
	YQ(H)02	28.0	3.04	3.38	23.1	3.03	2.33	2.39	8.59	35.2	14.0	249	229	24.0	11.4	7.86	418	117	1.15	1.24	21.3	17.7	6.80	1.09	0.60	9.91
	YQ(H)03	39.1	3.20	8.60	70.3	14.2	6.99	7.39	7.39	6.32	45.3	16.0	185	412	18.0	12.3	5.98	398	144	1.13	1.01	17.6	21.5	7.73	0.45	0.46
早期 似斑 状花 岗 岩	YQ05	34.8	3.07	11.56	86.8	6.31	8.04	21.83	12.50	60.7	19.6	158	545	158.5	13.8	5.41	605	4.84	1.10	0.86	16.6	14.4	4.57	0.29	0.26	12.55
	YQ06	47.2	3.87	13.75	85.4	6.95	7.85	2.73	2.71	53.1	21.4	129	495	169.3	15.6	6.09	267	5.61	1.14	0.68	15.9	20.4	6.24	0.26	0.48	13.68
	YQ07	27.1	3.70	13.13	105.4	9.88	10.35	3.88	25.81	47.1	19.3	187	484	151.7	12.5	7.02	233	4.90	1.15	0.96	13.5	15.3	8.91	0.39	0.80	10.87
暗色 包体	YQ(B)01	35.57	5.79	17.04	113	7.17	14.37	6.87	11.2	95.44	25	171	531	229	24.58	6.20	174	6.39	1.88	0.98	11.31	13.39	10.08	0.32	0.98	13.07
	YQ(B)02	37.68	5.63	20.59	139.2	2.42	14.68	5.09	41.35	90.53	26.58	142	483	238.2	26.53	6.54	158	7.06	2.16	0.94	11.64	13.75	11.9	0.29	0.89	12.28
	YQ(B)03	24.2	4.57	28.85	223.7	25.54	20.48	10.36	18.58	98.65	23.44	128	436	133.9	23.88	6.41	195	4.38	2.04	0.62	13.86	9.74	5.83	0.29	0.66	11.71
	YQ(B)05	38.95	5.53	18.53	110	7.19	15.14	7.30	18.15	101.8	26	178	530	216	26.58	6.96	191	6.62	2.08	1.12	12.74	14.39	7.98	0.34	0.93	12.78
	YQ(B)06	42.69	5.95	18.23	137.7	0.93	13.52	4.34	64.72	95.4	26.75	117	449	223.3	23.74	6.68	147	6.26	1.77	0.82	11.27	12.35	14.09	0.26	0.79	13.41

4.4 锆石 Hf 同位素分析结果

营前岩体的锆石 Hf 同位素分析结果见表 6。

YQ04(早期似斑状花岗闪长岩)和 YQ01(晚期细粒花岗岩)的锆石颗粒不均匀,因此用测点的年龄计算每个点相应的 Hf 同位素值。YQ02(暗色包体)的锆石颗粒非常均匀,对其 Hf 同位素计算所用年龄数据为 SHRIMP U-Pb 测试结果的加权平均年龄 167Ma。

早期似斑状花岗闪长岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-9.2 \sim -4.2$ (除 03-1 为 -1.4 和 16-2 为 41.6 外),晚期细粒花岗岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-12.4 \sim -5.7$ (除 08-1 为 -0.4 外),暗色包体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-9.4 \sim +0.1$;晚期花岗岩和早期花岗闪长岩的模式年龄 t_{DM} 为 $1414 \sim 1048\text{Ma}$,暗色包体的模式年龄 t_{DM} 为 $1420 \sim 916\text{Ma}$ 。

5 讨论

5.1 早期似斑状花岗闪长岩与晚期细粒黑云母花岗岩之间的关系

营前岩体为一个复式岩体,由早期花岗闪长岩和晚期细粒花岗岩组成,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $172.2 \pm 3.1\text{Ma}$ 和 $168 \pm 3\text{Ma}$,两者的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。

岩石化学成分和微量元素显示出,从主体花岗闪长岩到晚期细粒花岗岩, SiO_2 , K_2O , Rb 在增加, Al_2O_3 , CaO, TFe、 TiO_2 , P_2O_5 , Sr, V, Zr 和 Co 减少,可能与斜长石和暗色矿物析出有关,硅质、碱质和碱金属元素相对增高,镁铁质元素降低,反映出两者之间的分异演化关系。选择 SiO_2 作为分异指数做出哈克图解(未给出),可以看出随着 SiO_2 增高,主要元素 Al_2O_3 , CaO, TFe, TiO_2 , P_2O_5 及 Sr, V, Zr 和 Co 降低,而 K_2O 和 Rb 增高,具有明显的线性相关关系,说明两个岩体的同源分异关系。尽管稀土元素的 δEu 值为没有出明显的差别,但是 REE 总量和 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 比值表明从主体花岗闪长岩到晚期细粒花岗岩显著降低(表 3, 图 11),这指示了岩浆的结晶分异作用。两类花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本一致(表 6),表明两者来源于同一源区。上述分析表明早期似斑状花岗闪长岩与晚期细粒黑云母花岗岩同源岩浆一次侵入,结晶分异作用造成的。

5.2 成岩过程的壳幔混合作用

暗色包体是窥探壳幔相互作用的窗口,有助于了解寄主岩浆起源与成因演化等基础地质问题(Didier and Barbarin, 1991; Castro *et al.*, 1991; Wilcox, 1999; Silva *et al.*, 2000)。Hutton 早在 1795 年就注意到苏格兰花岗岩中的暗色包体(enclaves),而 Didier (1973) 和 Didier and Barbarin (1991) 的两部专著是关于花岗岩中包体研究最系统的文献,将花岗岩

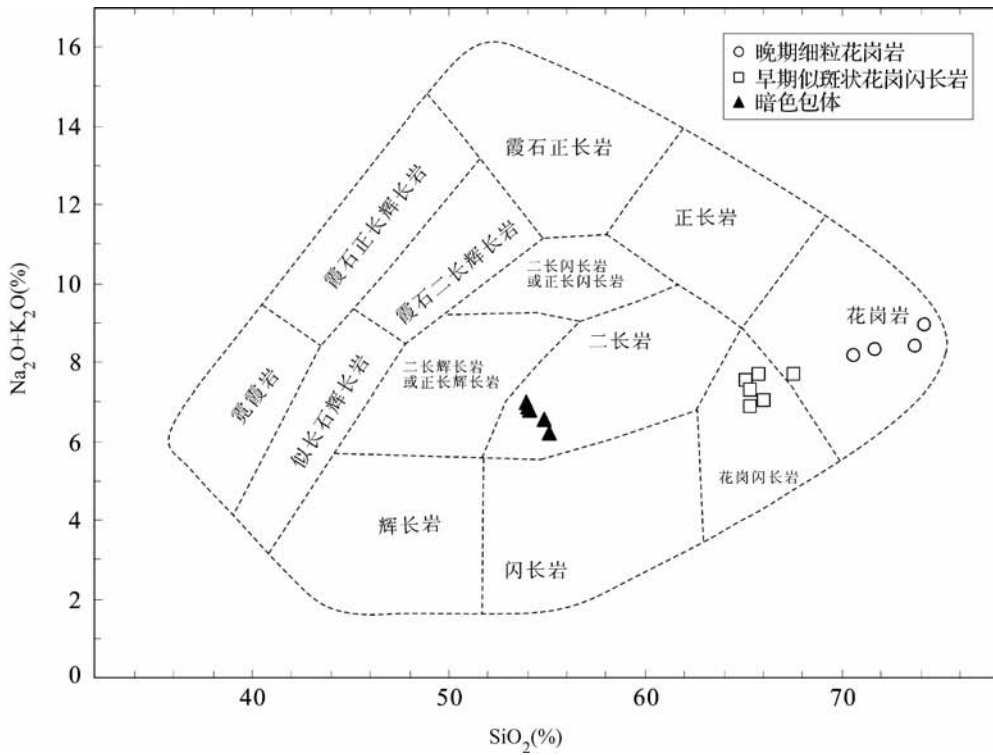
图8 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 SiO_2 -Alk 分类命名图解(据 Cox, 1979)Fig. 8 SiO_2 vs. Alk diagram of Yingqian granodiorites, granites, enclaves (after Cox, 1979)

表5 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 5 Sr-Nd isotopic compositions of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

岩性	样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	I_{Sr}		
晚期细粒 花岗岩	YQ(H)01	100.6	147.4	0.68	1.975	0.714424	10	0.70965		
	YQ(H)03	86.74	322.6	0.27	0.7782	0.710893	12	0.70901		
	YQ(H)04	105.5	407.9	0.26	0.7485	0.710661	20	0.70885		
早期似斑 状花岗闪 长岩	YQ01	106.5	391.1	0.27	0.8459	1.465978	25	1.46393		
	YQ02	90.10	435.6	0.21	0.5985	0.709826	10	0.70838		
	YQ03	64.59	392.8	0.16	0.4759	0.710708	10	0.70956		
	YQ04	164.9	182.4	0.90	2.618	0.716912	17	0.71058		
	YQ05	86.32	283.9	0.30	0.8802	0.712493	15	0.71037		
暗色包体	YQ(B)01	113.5	401.0	0.28	0.8193	0.709860	18	0.70788		
	YQ(B)02	61.00	387.1	0.16	0.4560	0.710336	10	0.70923		
	YQ(B)03	58.52	336.0	0.17	0.5041	0.710206	10	0.70899		
岩性	样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{(\text{Sm}/\text{Nd})}$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$
晚期细粒 花岗岩	YQ(H)01	1.862	7.074	0.1592	0.512269	10	-7.20	-6.38	-0.19	2.45
	YQ(H)03	4.356	21.537	0.1224	0.512283	5	-6.92	-5.31	-0.38	1.45
	YQ(H)04	5.561	28.005	0.1201	0.512266	5	-7.26	-5.59	-0.39	1.44
早期似斑 状花岗闪 长岩	YQ01	5.756	27.629	0.1260	0.512292	6	-6.75	-5.22	-0.36	1.49
	YQ02	6.053	28.669	0.1277	0.512296	12	-6.67	-5.17	-0.35	1.51
	YQ03	6.382	32.401	0.1191	0.512252	10	-7.53	-5.85	-0.39	1.44
	YQ04	3.732	17.253	0.1308	0.512244	9	-7.69	-6.26	-0.34	1.66
	YQ05	5.551	25.996	0.1292	0.512229	5	-7.98	-6.51	-0.34	1.66
暗色包体	YQ(B)01	5.168	23.292	0.1342	0.512288	6	-6.83	-5.47	-0.32	1.65
	YQ(B)02	10.617	46.833	0.1371	0.512351	5	-5.60	-4.31	-0.30	1.59
	YQ(B)03	4.370	17.090	0.1547	0.512308	5	-6.44	-5.53	-0.21	2.17

表6 营前岩体早期似斑状花岗闪长岩、晚期细粒花岗岩、暗色包体的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 6 Zircon Hf isotopic compositions of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
YQ04(早期似斑状花岗闪长岩)										
01-1	179.3	0.046758	0.001354	0.282472	0.000025	0.282467	-10.6	-6.8	1115	-0.96
02-1	173.4	0.022076	0.000693	0.282476	0.000024	0.282474	-10.5	-6.7	1089	-0.98
03-1	387	0.054863	0.001422	0.282502	0.000024	0.282491	-9.6	-1.4	1074	-0.96
03-2	136.3	0.124846	0.004117	0.282447	0.000025	0.282437	-11.5	-8.9	1241	-0.88
04-1	169.2	0.043966	0.001433	0.282455	0.000024	0.282451	-11.2	-7.7	1141	-0.96
04-2	186	0.120431	0.004259	0.282488	0.000021	0.282473	-10.1	-6.5	1184	-0.87
05-1	186.4	0.049538	0.001619	0.282479	0.000021	0.282473	-10.4	-6.5	1113	-0.95
05-1	186.4	0.071753	0.002393	0.282420	0.000021	0.282412	-12.4	-8.6	1221	-0.93
06-1	163.9	0.096452	0.003105	0.282453	0.000028	0.282443	-11.3	-8.0	1197	-0.91
07-1	175.9	0.038829	0.001403	0.282490	0.000024	0.282485	-10.0	-6.3	1090	-0.96
08-1	154.7	0.052774	0.001709	0.282458	0.000022	0.282453	-11.1	-7.9	1145	-0.95
09-1	174.2	0.037811	0.001201	0.282453	0.000023	0.282449	-11.3	-7.6	1137	-0.96
10-1	240	0.029118	0.000923	0.282446	0.000023	0.282442	-11.5	-6.4	1138	-0.97
10-2	174.2	0.033268	0.001133	0.282450	0.000024	0.282446	-11.4	-7.7	1139	-0.97
11-1	170.9	0.035008	0.001150	0.282473	0.000023	0.282469	-10.6	-7.0	1108	-0.97
12-1	175	0.043528	0.001394	0.282474	0.000027	0.282469	-10.5	-6.9	1113	-0.96
13-1	176.7	0.044063	0.001620	0.282430	0.000027	0.282425	-12.1	-8.4	1182	-0.95
14-1	169.8	0.030054	0.000982	0.282480	0.000019	0.282477	-10.3	-6.7	1092	-0.97
15-1	191.5	0.035544	0.001139	0.282510	0.000030	0.282506	-9.3	-5.2	1054	-0.97
16-1	297	0.042908	0.001133	0.282475	0.000028	0.282468	-10.5	-4.2	1104	-0.97
16-2	2318	0.052157	0.001439	0.282539	0.000024	0.282475	-8.3	41.6	1022	-0.96
18-1	162	0.045966	0.001552	0.282429	0.000019	0.282425	-12.1	-8.7	1181	-0.95
19-1	173.5	0.028218	0.000882	0.282453	0.000017	0.282450	-11.3	-7.6	1127	-0.97
20-1	161.1	0.049774	0.001934	0.282417	0.000021	0.282412	-12.5	-9.2	1211	-0.94
21-1	173.6	0.034051	0.001142	0.282460	0.000018	0.282456	-11.0	-7.4	1125	-0.97
YQ01(晚期细粒花岗岩)										
01-1	170.5	0.041572	0.001294	0.282484	0.000017	0.282480	-10.2	-6.6	1095	-0.96
01-2	173.1	0.043628	0.001188	0.282494	0.000021	0.282490	-9.8	-6.2	1079	-0.96
02-1	160.5	0.048016	0.001247	0.282393	0.000019	0.282389	-13.4	-10.0	1223	-0.96
03-1	152.1	0.030734	0.000831	0.282470	0.000020	0.282467	-10.7	-7.4	1102	-0.97
04-1	173.7	0.025390	0.000720	0.282506	0.000019	0.282504	-9.4	-5.7	1048	-0.98
05-1	169.5	0.041212	0.001166	0.282480	0.000020	0.282477	-10.3	-6.7	1097	-0.96
06-1	172.9	0.040401	0.001173	0.282480	0.000019	0.282476	-10.3	-6.7	1098	-0.96
07-1	177	0.030740	0.000881	0.282410	0.000022	0.282407	-12.8	-9.0	1188	-0.97
08-1	452	0.026605	0.000752	0.282486	0.000021	0.282484	-10.1	-0.4	1077	-0.98
09-1	174.7	0.035808	0.001057	0.282439	0.000020	0.282436	-11.8	-8.1	1152	-0.97
10-1	167	0.036460	0.001019	0.282463	0.000023	0.282460	-10.9	-7.4	1116	-0.97
11-1	158.5	0.035763	0.000970	0.282408	0.000021	0.282405	-12.9	-9.5	1193	-0.97

续表 6

Continued Table 6

点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
YQ01(晚期细粒花岗岩)										
12-1	184	0.025222	0.000685	0.282413	0.000020	0.282411	-12.7	-8.7	1177	-0.98
13-1	166.8	0.028092	0.000843	0.282507	0.000021	0.282504	-9.4	-5.8	1050	-0.97
14-1	147.3	0.039392	0.001086	0.282415	0.000021	0.282412	-12.6	-9.5	1186	-0.97
15-1	167.0	0.038935	0.001142	0.282433	0.000026	0.282430	-12.0	-8.5	1163	-0.97
16-1	155.8	0.123249	0.004258	0.282337	0.000035	0.282324	-15.4	-12.4	1414	-0.87
17-1	167.4	0.030383	0.000930	0.282461	0.000021	0.282458	-11.0	-7.4	1117	-0.97
18-1	171.3	0.024934	0.000750	0.282435	0.000026	0.282432	-11.9	-8.3	1149	-0.98
19-1	166.4	0.036672	0.001121	0.282449	0.000023	0.282446	-11.4	-7.9	1140	-0.97
YQ02(暗色包体)										
1-1	167	0.154646	0.004461	0.282624	0.000038	0.282610	-5.2	-2.0	978	-0.87
1-1re	167	0.160120	0.004818	0.282493	0.000022	0.282478	-9.9	-6.7	1194	-0.85
1-2	167	0.156219	0.004633	0.282594	0.000036	0.282580	-6.3	-3.1	1030	-0.86
1-2re	167	0.181651	0.005854	0.282593	0.000035	0.282574	-6.3	-3.3	1071	-0.82
2-1	167	0.261832	0.006734	0.282691	0.000035	0.282670	-2.9	0.1	938	-0.80
3-1	167	0.236805	0.006572	0.282606	0.000034	0.282585	-5.9	-2.9	1073	-0.80
4-1	167	0.044253	0.001382	0.282476	0.000025	0.282472	-10.5	-6.9	1108	-0.96
5-1	167	0.129925	0.003739	0.282516	0.000027	0.282504	-9.1	-5.8	1122	-0.89
6-1	167	0.283291	0.007585	0.282636	0.000038	0.282612	-4.8	-2.0	1057	-0.77
7-1	167	0.154420	0.004480	0.282511	0.000028	0.282497	-9.2	-6.0	1155	-0.87
8-1	167	0.048778	0.001430	0.282510	0.000023	0.282506	-9.3	-5.7	1062	-0.96
9-1	167	0.180358	0.005608	0.282613	0.000031	0.282595	-5.6	-2.6	1031	-0.83
10-1	167	0.171558	0.005351	0.282574	0.000031	0.282557	-7.0	-3.9	1084	-0.84
11-1	167	0.230427	0.006536	0.282534	0.000029	0.282514	-8.4	-5.5	1190	-0.80
12-1	167	0.449121	0.013474	0.282609	0.000040	0.282567	-5.8	-3.6	1359	-0.59
13-1	167	0.136453	0.003804	0.282495	0.000025	0.282483	-9.8	-6.5	1156	-0.89
14-1	167	0.137233	0.004007	0.282499	0.000021	0.282487	-9.7	-6.4	1157	-0.88
15-1	167	0.216935	0.006284	0.282447	0.000032	0.282427	-11.5	-8.5	1323	-0.81
16-1	167	0.225803	0.006404	0.282492	0.000031	0.282472	-9.9	-6.9	1255	-0.81
17-1	167	0.244768	0.007418	0.282617	0.000037	0.282594	-5.5	-2.6	1083	-0.78
18-1	167	0.159508	0.004654	0.282536	0.000031	0.282521	-8.3	-5.2	112	-0.86
19-1	167	0.263358	0.007446	0.282507	0.000035	0.282484	-9.4	-6.5	1270	-0.78

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10,000$; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10,000$; $t_{\text{Hf}} = 1/\lambda \times \ln | 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] |$; $t_{\text{Hf}} = t_{\text{Hf}} - (t_{\text{Hf}} - t) [(f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}})]$ (f_{CC} , f_{S} , f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$); $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1]$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)$, 其中: $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},1} = 0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$; $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$

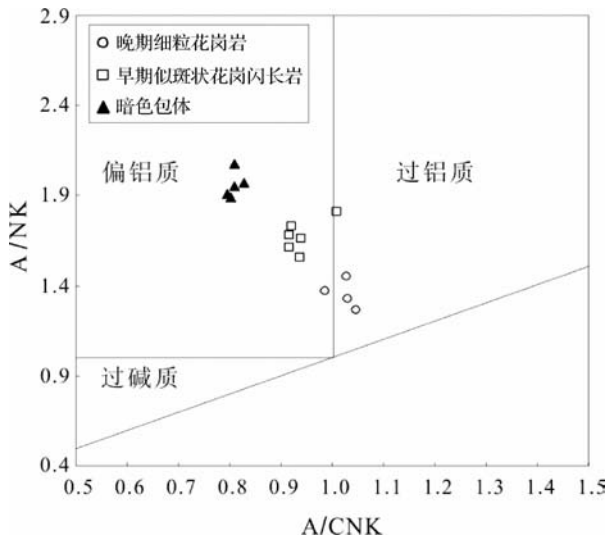


图9 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 A/CNK-A/NK 图解

Fig.9 A/CNK vs. A/NK diagram of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

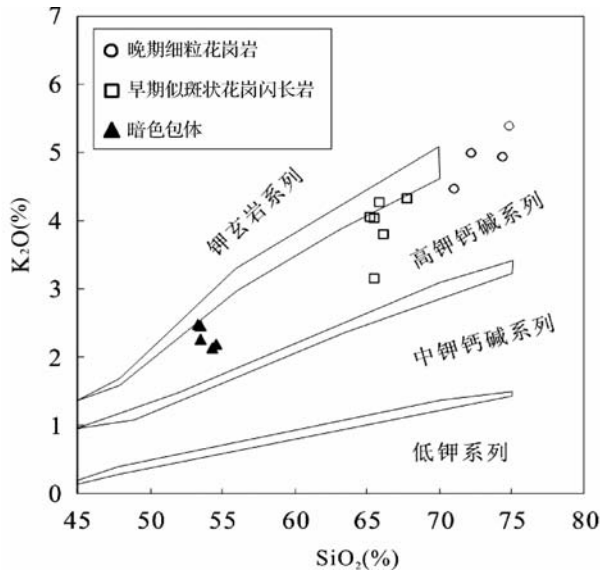


图10 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 SiO₂-K₂O 图解(据 Morrison, 1980)

Fig.10 SiO₂ vs. K₂O diagram of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves (after Morrison, 1980)

中的包体分成三种类型:捕掳体、残留体、镁铁质岩浆包体。当来自地幔的基性岩浆注入到已部分结晶的长英质岩浆时,如果长英质岩浆的粘度还比较小,但两种共存岩浆的粘度差已相当大,彼此之间已到了不能发生完全的化学混合形成均一岩浆,只能发生机械混合的程度(Fernandez and Barbarin, 1991),这时未完全均匀混合的镁铁质基性岩浆就在长英质

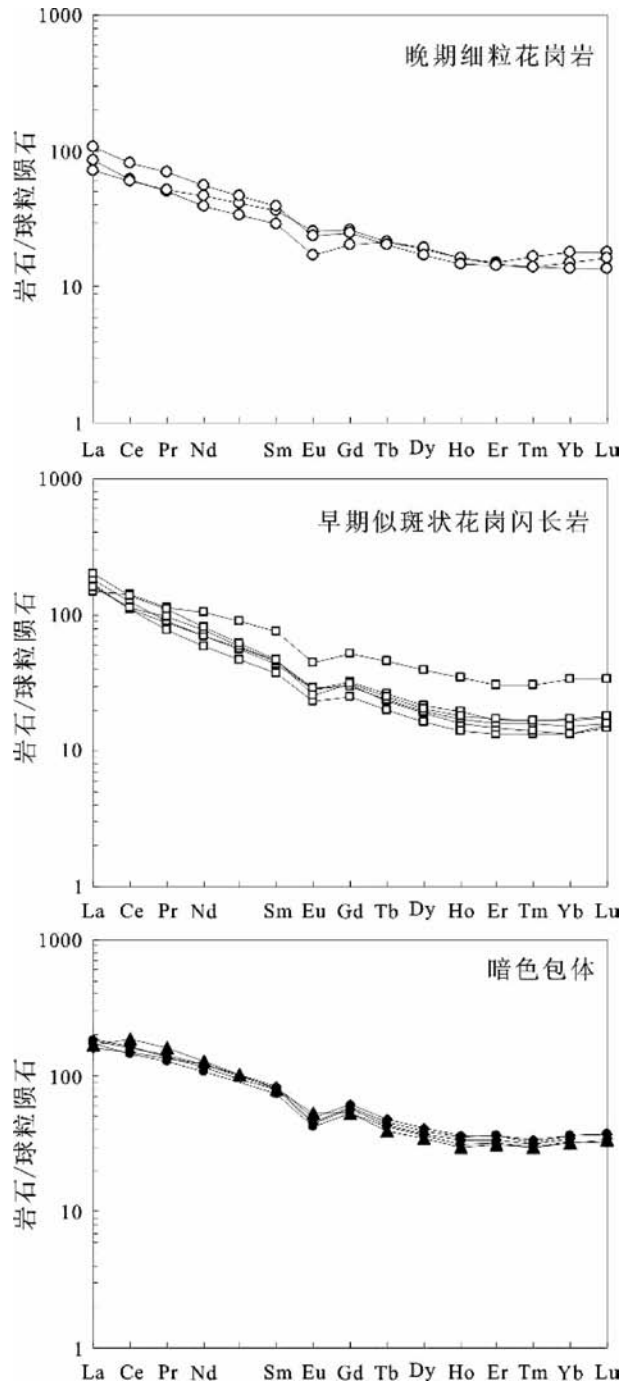


图11 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(球粒陨石标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves (after Sun and McDonough, 1989)

岩浆中淬冷、结晶形成囊状暗色包体,对流作用或其它驱动力使包体分散到整个寄主岩体中。由暗色包体的形态可知营前花岗闪长岩中的暗色包体是幔源基性岩浆与壳源长英

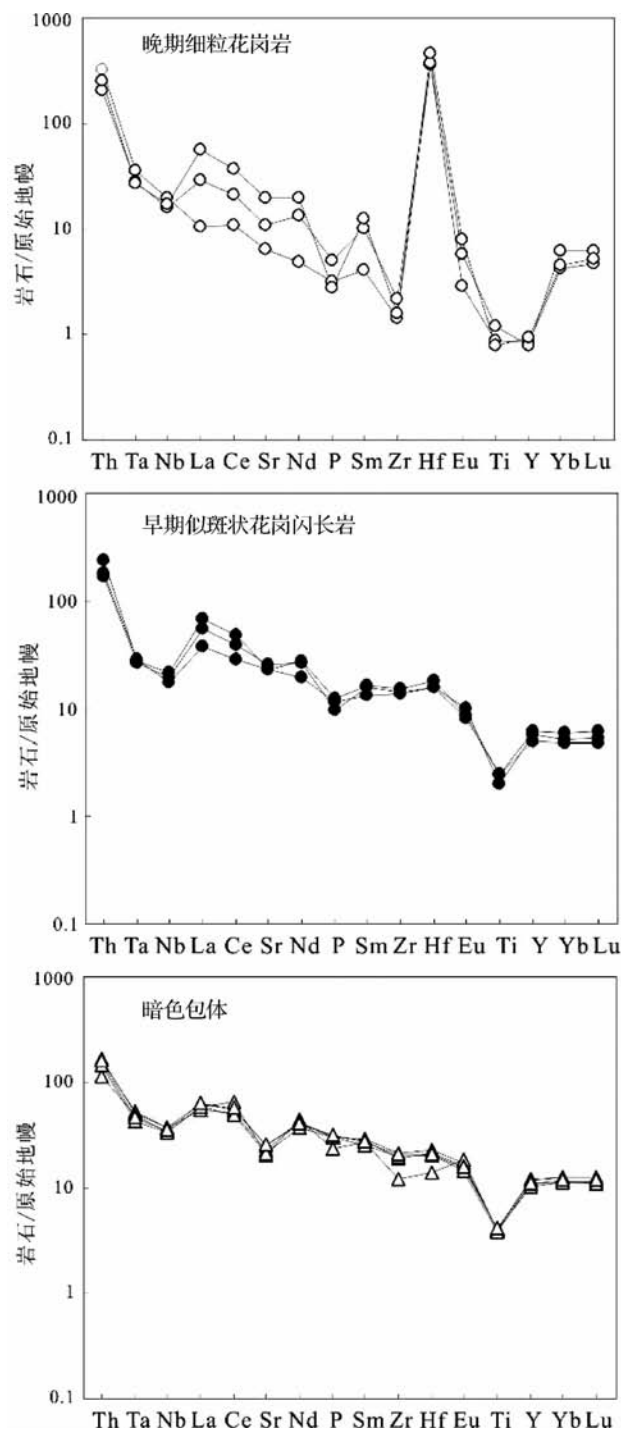


图 12 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的原始地幔标准化分布型式图 (原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 12 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves (after Sun and McDonough, 1989)

质岩浆机械混合的产物。年代学结果进一步表明营前岩体是岩浆混合成因,因为基性、酸性岩浆发生混合作用才可能

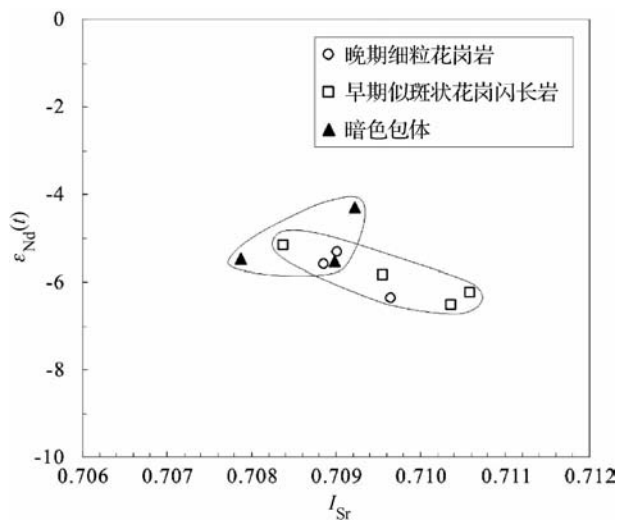


图 13 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 ϵ_{Nd} - I_{Sr} 同位素图解

Fig. 13 ϵ_{Nd} vs. I_{Sr} diagram of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

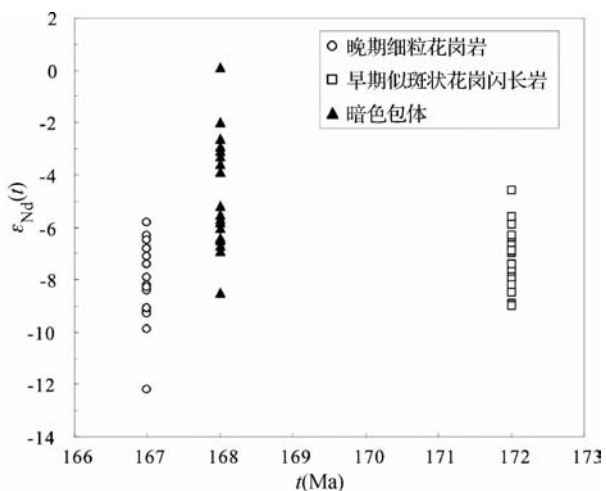


图 14 营前花岗闪长岩、花岗岩、暗色包体的 Hf 同位素图解

Fig. 14 Hf isotopic diagram of the Yingqian granodiorites, granites and mafic enclaves

导致包体与岩浆同期生成 (Neves *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 1999)。

从岩石组成来看,暗色包体与花岗闪长岩和晚期细粒花岗岩截然不同,前者富有镁铁质矿物角闪石和黑云母,斜长石的长与宽比值较大,而且相对遭受蚀变比较强烈,石英含量为 2% ~ 4%,这与后两类以长英质矿物为主的岩石,构成了鲜明的对比。

暗色包体与花岗闪长岩和晚期细粒花岗岩的 Eu 均具有弱的负异常,推断在岩浆分离结晶过程存在斜长石的分离结

晶作用,但是分离出的斜长石很少,斜长石更多地保留在熔体相中;Eu 异常变化不明显,表明暗色包体和花岗质岩并非同源岩浆分异结晶的产物,因为随着斜长石、钾长石等矿物的分离结晶,残余岩浆的铕异常将渐趋明显。

反映岩石分异演化的元素 Rb/Sr、Rb/Ba、Nb/Ta 比值显示暗色包体壳源成分偏低的特点,晚期细粒花岗岩和早期似斑状花岗闪长岩的壳源成分偏高。暗色包体和早期似斑状花岗闪长岩的原始地幔标准化分布型式图相似(图 12),说明暗色包体岩浆与花岗闪长岩两者不是毫不相关的,它们之间可能存在成分的交流,是基性岩浆受到酸性岩浆混染的产物。

在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对 I_{Sr} 图解中(图 13),暗色包体比花岗岩更靠近富集地幔端元,主体花岗闪长岩与晚期细粒花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 I_{Sr} 呈现线性负相关性,显示出多来源的特征。由图 14 可知,相对晚期花岗岩和早期花岗闪长岩来说,暗色包体的 Hf 同位素组成变化较大,显示多来源的特征;模式年龄更小,说明锆石不是结晶于单一岩浆,且是富集地幔和地壳混合的产物。

扬子地块西南部 Nd 模式年龄约为 2.0 左右,华夏地块的大部分地区基地岩石的 t_{DM} 在 2.2 ~ 1.8Ga 之间(陈江峰等,1999)。营前岩体和暗色包体的 t_{DM} 分别为 2.45 ~ 1.44Ga, 1.66 ~ 1.44Ga, 2.17 ~ 1.59Ga, 低于本区基地岩石的 t_{DM} 值,因此认为这些具有低 Nd 模式年龄的花岗质岩石是地幔物质参与成岩过程的重要表现。营前两类花岗岩类和暗色包体中虽然锆石 U-Pb 年龄相同,但铪同位素组成却不同,而这种同时代的锆石具有较大范围的、相异的铪同位素,表明是同时异源的岩浆之间发生混合作用的产物。暗色包体与早期似斑状花岗闪长岩、晚期细粒黑云母花岗岩具有不同的岩浆来源,而早期似斑状花岗闪长岩与晚期细粒黑云母花岗岩是同源区的产物,而后者经历了更彻底更充分的分异演化作用。

5.3 华南地区德兴-大宝山花岗闪长岩带的成岩动力学背景

华南地区以大花岗岩省和大规模钨锡多金属成矿为特点,其中也有一些花岗闪长岩类及其 Cu-Au-Mo、Pb-Zn-Ag 和 Cu-Pb-Zn 矿床(陈毓川等,1989)。最近几年,锆石 U-Pb 同位素测年表明这些岩体,包括赣南的营前岩体、赣东北德兴花岗闪长岩、湘东七宝山、赤马、石蛤蟆花岗闪长岩、湘东南水口山、宝山、铜山岭花岗闪长岩、粤北大宝山花岗闪长岩,其成岩年龄集中在 175Ma ~ 165Ma(王岳军等,2001; Wang *et al.*, 2002; 汪洋,2003; 彭头平等,2004; 王强等,2004; 伍光英等,2005; 丁昕等,2005; 马丽艳等,2006; 魏道芳等,2007; Li *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010)。

我们通过对这一期岩体的总结研究,发现具有如下特征:(1)在空间分布上,该期花岗闪长岩类位于大陆板块内部的深断裂带及断陷带内,呈线性带状分布。(2)其镁铁矿

物以角闪石为主,钛铁矿含量大于磁铁矿。(3) $\text{SiO}_2 = 56.24\% \sim 68.8\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.02\% \sim 10.55\%$, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{A}/\text{CNK} = 0.79 \sim 1.57$, 为准铝-弱过铝质高钾钙碱性系列岩石。(4)稀土元素分布型式总体上呈向右倾斜的平滑曲线, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.43 \sim 29.07$, 具有弱的负铕异常, $\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 1.36$, 以富集 LILE 和亏损 Nb-Ta、Ba、Sr、Ti、P(德兴除外)为特征。(5)初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.705028 \sim 0.722376$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.3 \sim 1.80$, 属高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、低 t_{DM} 的高钾钙碱性系列岩石,其形成与地幔物质的加入或者参与有关。(6)在成矿元素组成上,以 Cu、Mo、Fe 及亲铜、亲铁和亲硫元素含量较高, W、Sn、Nb、Ta、Li、Be、Rb、Cs 等元素含量较低为特征,并伴生有 Pb、Zn 矿化。

对于这套岩体及其矿产形成的地球动力学背景的研究尚比较少,直到上世纪末到本世纪初,在湘南宁远-新田、湘东南宜章、赣南龙南、寻乌和闽西南永定发现一条约长 500km,走向 EW 的双峰式侵入岩带,形成时间为 178 ~ 173Ma(许美辉等,1992;赵振华等,1998;陶奎元等,1998;陈培荣等,1999,2002;李献华等,1999;Chen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003;王岳军等,2004; Zhou *et al.*, 2006),岩性包括碱性玄武岩和拉斑玄武岩,在赣南和闽西南伴生有流纹岩和少量安山岩,总体上显示为双峰式火山岩,推测代表了一个中侏罗世早期的裂谷带。据此类推,毛景文等(2004)认为,沿江山-绍兴断裂、湘南和粤西还出现了几个相互平行走向近东西的伸展带,由于壳幔强烈作用形成了一系列 I 型花岗岩和富碱花岗斑岩类。其中部分经过强烈分异演化的花岗岩体伴随有斑岩铜矿化和铜铅锌多金属矿化,并认为是后碰撞伸展带。Wang *et al.* (2006) 研究认为与德兴斑岩铜矿有关的花岗斑岩为埃达克岩,其形成环境并非大陆弧而是在陆内沿十杭裂谷带或伸展带由拆沉下地壳重熔的产物。德兴斑岩铜矿位于十杭伸展带北 50km(Wang *et al.*, 2006),在裂谷带之南 30km 还发育有永平中晚侏罗世夕卡岩型铜矿。毛景文等(2007,2008)认为从德兴到大宝山这条长达 100km 的这条与铜铅锌矿有关的花岗质岩石具有高氧化度,显然岩石来自深部,可能由俯冲板片重熔或撕裂而形成。在区域上同时代的推覆构造构造发育,在德兴和冷水坑等矿区可以见到 NE 向的挤压构造,表明 180 ~ 160Ma 华南整体为一个挤压环境(毛景文等,2010)。因此,可以认为这条岩浆带可能为古太平洋俯冲板块局部重熔或撕裂重熔的产物,并与地壳岩浆混合后上侵定位。该岩浆直接上升到浅表,则形成斑岩铜矿,与地壳大量混染或混熔后形成的岩浆则伴生铅锌银矿。

作为德兴-大宝山花岗闪长岩带中的组成部分,营前岩体的成岩时代为 $172.2 \pm 3.1\text{Ma}$ 至 $167.6 \pm 3.3\text{Ma}$,而且伴生有焦龙金矿、焦里银铅锌矿等,其成岩物质表现为壳幔混源,并以地壳物质为主。可能为上侵地幔或俯冲板片重熔上升的物质引发下地壳重熔而形成花岗岩浆,并且有地幔岩浆的注入。

6 结论

(1) 营前岩体早期似斑状花岗闪长岩的形成时间为 172.2 ± 3.1 Ma, 后期细粒黑云母花岗岩为 168 ± 3 Ma, 且与暗色包体的年龄 167.6 ± 3.3 Ma 一致。

(2) 岩石地球化学特征显示, 暗色包体较营前两期岩体基性组份偏高; 全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素表明暗色包体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均高于两期花岗质岩石, 更接近富集地幔端元; 较低的 Nd 和 Hf 模式年龄表明花岗质岩石形成时有地幔物质参与了成岩过程。暗色包体与晚期花岗岩、早期花岗闪长岩具有不同的岩浆来源, 可能是基性岩浆注入到酸性岩浆中且被酸性岩浆改造的产物。

(3) 总结了“十杭”断裂带花岗闪长质岩体的地质、地球化学特征, 指出在中侏罗世发生了裂解作用, 表明该结合带是中生代地质构造相对薄弱而伸展构造最强烈的地方, 有利于幔源物质上升以及玄武质岩浆底侵作用的发生。

致谢 感谢赣南地质大队曾载淋总工、赣南大队华威矿业公司范世祥总经理在样品采集过程中给予的帮助; 中国地质科学院离子探针实验室杨之青研究员在锆石 SHRIMP U-Pb 分析过程中给予的指导; 中国地质科学院国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室侯可军在锆石 Hf 同位素分析过程中给予的帮助。

References

Castro A, Moreno-Ventas I and de la Rosa JD. 1991. H-type (hybrid) granitoids: A proposed revision of the granite-type classification and nomenclature. *Earth Science Reviews*, 31: 237–253

Chen JF and Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Evidence from Nd and Sr isotopic compositions of rocks. *Tectonophysics*, 284: 101–133

Chen JF and Jahn BM. 1999. Nd, Sr, Pb isotopic tracer and crustal evolution of Southeast China. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 262–287 (in Chinese)

Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35 (6): 649–658 (in Chinese with English abstract)

Chen PR, Kong XG, Wang YX *et al.* 1999. Rb-Sr isotopic dating and significance of early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from South Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 378–383 (in Chinese with English abstract)

Chen PR, Hua RM, Zhang BT *et al.* 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Series D)*, 8: 85–98

Chen YC, Pei RF, Zhang HL *et al.* 1989. *The Geology of Non-Ferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in Nanling Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1–474 (in Chinese)

Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *J. Geophysical Research*, 89 (Supp.): 325–534

Compston W, Williams IS, Kirschvink JL *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. London: J. Geophysical Society, 149: 171–184

Cox KG. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. Allen & Unwin

Didier J. 1973. *Granites and Their Enclaves*. Amsterdam: Elsevier, 1–393

Didier J and Barbarin B. 1991. *Enclaves and Granite Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1–625

Ding X, Jiang SY, Ni P *et al.* 2005. Zircon SMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11 (3): 383–389 (in Chinese with English abstract)

Elhlou S, Belousova E, Griffin WL *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (Supp.): A158

Fernandez AN and Barbarin B. 1991. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: Nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In: Didier J and Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 263–276

Gilder SA, Keller GR, Luo M *et al.* 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197: 225–243

Gilder S A, Gill J, Coe R S *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysics Research*, 101 (B7): 13137–16154

Guo CL, Wang DH, Chen YC *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon ages and major element, trace element and Nd-Sr isotope geochemical studies of a Neoproterozoic granitic complex in western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2457–2470 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH, Zou TR *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract)

Li DX and Zhao YM. 2004. Skarn mineralization zonation and fluid evolution in the Jiaoli deposit, Jiangxi Province. *Geological Review*, 50 (1): 16–24 (in Chinese with English abstract)

Li XF, Watanabe Y, Mao JW *et al.* 2007. Sensitive high-resolution ion microprobe U-Pb zircon and ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar uiscovite ages of the Yinshan deposit in the Northeast Jiangxi Province, South China. *Resource Geology*, 57: 325–337

Li XH, Zhou HW and Liu Y. 1999. Petrological and geochemical characteristics of shoshonitic intrusion belt in Southeast Guangxi Province. *Chinese Science Bulletin*, 44 (18): 1992–1998 (in Chinese)

Ludwig K R. 2001. *Users Manual for Isoplot/Ex rev. 2*. 49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. La. 1–55

Ma YL, Lu YF, Mei YP *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite from Shuikoushan ore-field, Hunan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (10): 2475–2482 (in Chinese with English abstract)

- Mao JW, Xie GQ, Li XF *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45–55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL *et al.* 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China; Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang JD, Guo CL *et al.* 2010. The model of porphyry Cu-epithermal Ag-Pb-Zn-remote hydrothermal Au deposits; A new deposit model-example from the Dexing in South Jiangxi Province. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, (in press)
- Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13: 97–108
- Neves SP and Vauchez A. 1995. Successive mixing and mingling magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil. *Lithos*, 34: 275–299
- Peng TP, Xi XW, Wang YJ *et al.* 2004. Geochemical characteristics of the Early Mesozoic granodiorites and their tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 287–296 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar; Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891–931
- Silva MMVG, Neiva AMR and Whitehouse MJ. 2000. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal. *Lithos*, 50: 153–170
- Song B, Zhang YH, Wan YS *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Supp.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publications, 42: 313–345
- Tao KY, Mao JR, Yang ZL *et al.* 1998. Mesozoic petro-tectonic associations and records of the geodynamic processes in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 5: 183–191 (in Chinese with English abstract)
- Wang L, Hu MG, Yang Z *et al.* 2010. U-Pb and Re-Os geochronology and geodynamic setting of the Dabaoshan Mo-polymetallic deposit, northern Guangdong Province, South China. *Ore Geology Review*, (in press)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P *et al.* 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315–324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Jian P *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China; Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119–144
- Wang Y. 2003. The Early Mid-Jurassic granodiorite in South Hunan; Its petrochemical characteristics, tectonic setting and geological implication. *Beijing Geology*, 15(3): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F *et al.* 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in Southeast Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 169–175 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F *et al.* 2002. U-Pb dating of Early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications. *Science in China (Series D)*, 45(3): 280–288
- Wang YJ, Liao CL, Fan WM *et al.* 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications. *Geochimica*, 33(2): 109–117 (in Chinese with English abstract)
- Wei DF, Bao ZY and Fu JM. 2007. Geochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Tongshanling granite in Hunan Province, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(4): 482–489 (in Chinese with English abstract)
- Wilcox RE. 1999. The idea of magna mixing: History of a struggle for acceptance. *Geology*, 107: 421–432
- Williams IS and Claesson S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides; II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 205–217
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35
- Wu GY, Ma TQ, Bai DY *et al.* 2005. Petrological and geochemical characteristics of granodioritic cryptoexplosion breccia and zircon SHRIMP dating in the Baoshan area, Hunan Province. *Geoscience*, 19(2): 198–204 (in Chinese with English abstract)
- Xie CH. 2001. Geological characters of skarn-type silver-bearing scheelite deposit in southern Jiangxi and its prospecting direction. *Mineral Resources and Geology*, 15(Supp.): 440–444 (in Chinese with English abstract)
- Xu MH. 1992. Early Jurassic bimodal volcanic rocks and their structure environment in Yongding County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, (2): 115–125 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, Dong C W, Li W X *et al.* 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbros-diorite-granite association. *Lithos*, 46: 299–315
- Xu XB, Zhang YQ, Jia D *et al.* 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573–593 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bao ZW and Zhang BY. 1998. The geochemistry characteristics of Mesozoic basalts in the south of Hunan Province. *Science in China (Series D)*, 28(Supp.): 7–14 (in Chinese)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China. *Episodes*, 26–33

附中文参考文献

- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 262–287
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富等. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. 南京大学学报(自然科学), 35(6): 649–658

- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜等. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义. 高校地质学报, 5(4): 378-383
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1-474
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培等. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. 高校地质学报, 11: 383-389
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川等. 2007. 川西新元古代花岗岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究: 岩石成因与构造意义. 岩石学报, 23(10): 2457-2470
- 侯可军. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595-2604
- 李大新, 赵一鸣. 2004. 江西焦里夕卡岩银铅锌钨矿床的矿化夕卡岩分带和流体演化. 地质论评, 50(1): 16-24
- 李献华, 周汉文, 刘颖. 1999. 桂东南钾质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报, 44(18): 1992-1998
- 马艳丽, 路远发, 梅玉萍等. 2006. 湖南水口山矿区花岗岩长岩中的锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2475-2482
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45-55
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 毛景文, 张建东, 郭春丽. 2010. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远程热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例. 长安大学学报, (待刊)
- 彭头平, 席先武, 王岳军等. 2004. 湘东北早中生代花岗岩长岩地球化学特征及其构造意义. 大地构造与成矿学, 28(3): 287-296
- 宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30
- 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良等. 1998. 中国东南部岩石构造组合和复合动力学过程. 地学前缘, 5: 183-191
- 王德滋, 周新民等. 2002. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社, 250-256
- 王强, 赵振华, 简平等. 2004. 德兴花岗岩长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩石学报, 20(2): 315-324
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋等. 2001. 湘东南中生代花岗岩长质小岩体的岩石地球化学特征. 岩石学报, 17(1): 169-175
- 王岳军, 廖超林, 范蔚茗等. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义. 地球化学, 33(2): 109-117
- 汪洋. 2003. 湘南早中生代花岗岩长岩的岩石化学特征、构造背景及地质意义. 北京地质, 15(3): 1-7
- 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 2007. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年. 31(4): 482-489
- 伍光英, 马铁球, 柏道远等. 2005. 湖南宝山花岗岩长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年. 现代地质, 19(2): 198-204
- 谢春华. 2001. 赣南夕卡岩型白钨银矿地质特征及其找矿方向. 矿产与地质, 15(增刊): 440-444
- 许美辉. 1992. 福建永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境. 福建地质, (2): 115-125
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东等. 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3): 573-593
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学(D辑), 28(增刊): 7-14