

DOI: 10.13745/j.esf.2017.02.011

湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征:对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示

许德如^{1,2}, 邓 腾^{1,2,3,*}, 董国军⁴, 宁钧陶⁴, 王智琳⁵, 张俊岭¹, 邹凤辉^{1,3},
周岳强^{1,3,4}, 陈根文¹, 于得水^{1,3}, 叶挺威^{1,3}

1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与矿床学重点实验室, 广东 广州 510640

2. 加拿大里贾纳大学 地质系, 萨斯喀彻 里贾纳 S4S 0A2

3. 中国科学院大学, 北京 100039

4. 湖南省地质矿产勘查开发局 402 地质队, 湖南 长沙 410014

5. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083

XU Deru^{1,2}, DENG Teng^{1,2,3,*}, DONG Guojun⁴, NING Juntao⁴, WANG Zhilin⁵,
ZHANG Junling¹, ZOU Fenghui^{1,3}, ZHOU Yueqiang^{1,3,4}, CHEN Genwen¹,
YU Deshui^{1,3}, YE Tingwei^{1,3}

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

2. Department of Geology, University of Regina, Regina, S4S 0A2, Saskatchewan, Canada

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

4. 402 Geological Brigade of Hunan Geology and Mineral Exploration Bureau, Changsha 410014, China

5. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

XU Deru, DENG Teng, DONG Guojun, et al. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyungshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: implications for petrogenesis and tectonic setting associated with poly-metallic mineralization. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 104-122

Abstract: Northeastern Hunan Province, located to the northwest of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay Juncture orogenic belt, is an important producer of Au, Cu, Co, Pb, Zn and other metals in China. This area is characterized by intensive Yanshanian granitic magmatism which led to a swarm of plutons. Among these, the Lianyungshan two-mica monzogranites were emplaced at the southeast part of the NNE-trending Changsha-Pingjiang fault and is typically S-type granite with strongly peraluminous signatures. Based on elemental geochemical compositions, the Lianyungshan two-mica monzogranites can be subdivided into two groups. In comparison with the second group, the first group has lower concentrations in Eu, Sr and Ba, and transitional metal elements Cr and Co, and higher ratios of CaO/Na₂O and FeO^T/(FeO^T+MgO). This suggests a more reduced, water-poor, and plagioclase-rich psammite source for the first group, whereas a more oxidized, water-rich and plagioclase-poor pelitic source for the second group. The Lianyungshan two-mica monzogranites also show relatively homogeneous Nd-Sr isotopic components with $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -13.36 \sim -13.65$ and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.72286-0.73097$. In addition, most of the Lianyungshan granite samples show geochemical affinities to adakitic rocks. This indicates that the Lianyungshan two-mica monzogranites resulted from partial melting of thickened lower crust under eclogite facies conditions. High Sm/Yb and Gd/Yb ratios and low zircon

收稿日期:2017-02-20;修回日期:2017-03-01

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0600401);中国地调局项目“湖南省金井-九岭地区矿产远景调查”(资[2014]01-019-026)

作者简介:许德如(1966—),男,博士,研究员,主要从事成矿构造与矿产预测研究。E-mail:xuderu@gig.ac.cn

* 通讯作者简介:邓 腾(1990—),男,博士研究生,从事构造地质学、矿床学、岩石学研究。E-mail:dengteng2015@126.com

saturation temperature indicate that the magma source was low in temperature and high in pressure. LA-ICPMS U-Pb dating on zircon further reveals an emplacement age of 145 ± 1 Ma for the Lianyunshan two-mica monzogranites. Combined with the Late Mesozoic tectonic development of South China, the emplacement of the Lianyunshan two-mica monzogranites were most likely related to the NW-trending flat subduction of paleo-pacific plate under South China Block. At ca. 145 Ma, the subducted paleo-pacific plate collapsed, and then the subsided slab and continental lithosphere were dehydrated, resulting in the decompression melting of the thickened lower crust which formed the Lianyunshan two-mica monzogranites. These processes also caused Au-bearing fluids to move upward when the magma ascended. As a result, the post-magmatic hydrothermal fluids resulted in the zoned poly-metallic mineralization surrounding the Lianyunshan two-mica monzogranites.

Key words: Lianyunshan two-mica monzogranites; northeastern Hunan Province; Qinzhou Bay-Hangzhou Bay Juncture orogenic belt; magmatic process; ore-forming tectonic setting

摘 要: 湘东北位于华南钦杭结合带的北西侧, 是中国重要的金、铜、钴、铅和锌等多金属矿产地。该区燕山期岩浆活动异常强烈, 其中所侵位的连云山二云母二长花岗岩位于区域性北东向长沙—平江断裂的南东侧, 为强过铝质 S 型花岗岩。根据元素地球化学特征, 可以将连云山二云母二长花岗岩分为两组, 第一组具有较低的 Eu-Sr-Ba 和过渡金属元素 Cr-Co 含量, 较高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$ 比值, 指示了相对还原、干燥、贫泥质、富斜长石粗粒碎屑岩源区; 相反, 第二组则为相对氧化、富水和贫斜长石的富泥质源区。此外, 二云母二长花岗岩大部分具有埃达克质岩地球化学特征。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -13.36 \sim -13.65$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.72286 \sim 0.73097$, 说明连云山二云母二长花岗岩为榴辉岩相的加厚下地壳部分熔融的产物。连云山二云母二长花岗岩还具有较高的 Sm/Yb 和 Gd/Yb 比值以及较低的锆石饱和温度, 指示岩浆源区具有较高的压力和较低的温度。连云山二云母二长花岗岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 (145 ± 1) Ma (MSWD=1.9)。结合华南地区晚中生代以来大地构造演化特征, 湘东北连云山二云母二长花岗岩与古太平洋板块俯冲至华南板块之下有关。约 145 Ma, 俯冲的古太平洋板块崩塌, 下沉的俯冲板片和岩石圈地幔脱水, 使得早已加厚的下地壳发生减压熔融, 形成连云山二云母二长花岗岩。而当连云山二云母二长花岗岩的源区岩浆运移时, 驱动了含金成矿流体的运移, 其期后的岩浆热液形成了该区围绕连云山二云母二长花岗岩呈带状分布的多金属矿体。

关键词: 连云山二云母二长花岗岩; 湘东北地区; 钦杭结合带; 岩浆作用过程; 成矿构造背景

中图分类号: P612; P588.1; P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2017)02-0104-19

0 引言

华南地区中生代强烈的岩浆活动一直是国内外学者的研究热点, 是因为它不仅是了解华南中生代以来大地构造演化性质及其地球动力学背景的“窗口”, 而且也是深入揭示华南地区中生代大规模 W、Sn、Bi、Mo、U、Nb-Ta、REE、Cu、Au、Pb、Zn 和 Sb 等多金属成矿事件的关键^[1-4]。华南地区中生代岩浆活动大致可划分为印支期和燕山期两个期次。其中, 燕山期的岩浆活动最为强烈^[5-6]。关于华南地区晚中生代岩浆岩的起源, 主要有 3 种不同的地球动力学观点: 第一种观点认为, 由于古太平洋板块北西向俯冲于华南大陆边缘之下, 造成了华南内陆大范围的岩浆活动和北东向的构造格局^[7-11]; 第二种观点认为, 大陆岩石圈减薄和北东向大陆裂谷发育, 形成了晚中生代大规模的岩

浆活动和伸展盆地^[12]; 第三种观点认为, 华南扬子板块和华夏板块在古生代—三叠纪发生的聚合, 形成了强烈的岩浆活动^[13-14]。近年来, 古太平洋板块俯冲模型得到了越来越多的学者的认同, 但是关于俯冲的方式和开始时间, 目前仍还存在争论^[8-9, 15-21]。一部分学者认为古太平洋板块在早侏罗世低角度平俯冲于华南板块之下, 形成了华南大规模燕山期花岗岩^[5, 16]。Z. X. Li 和 X. H. Li^[9]则提出, 古太平洋板块在 250~190 Ma 北西向平俯冲至华南板块之下, 并在 190~150 Ma 崩塌形成 1300 km 宽的造山带、宽泛的内陆盆地以及其后发生非造山岩浆活动和大陆伸展。

钦杭(钦州—杭州)结合带位于扬子板块和华夏板块的结合处, 由元古宙低变质的火山-碎屑沉积岩和新元古代来的多期次的岩浆岩组成, 是我国重要的多金属成矿带^[11, 22-31]。该区发育有广泛的晚中生代 S 型、I 型和 A 型花岗岩, 其形成与地幔物质上

涌, 古老地壳物质的部分熔融有关^[16-17, 32-36]。钦杭结合带上有大、中型矿床达数百处, 包括浙江平水铜矿、江西德兴铜矿、湖南水口山铅锌矿、黄金洞和大万金矿、广西—广东庞西垌银金矿等一系列大型、超大型矿床^[3, 25, 37-40]。

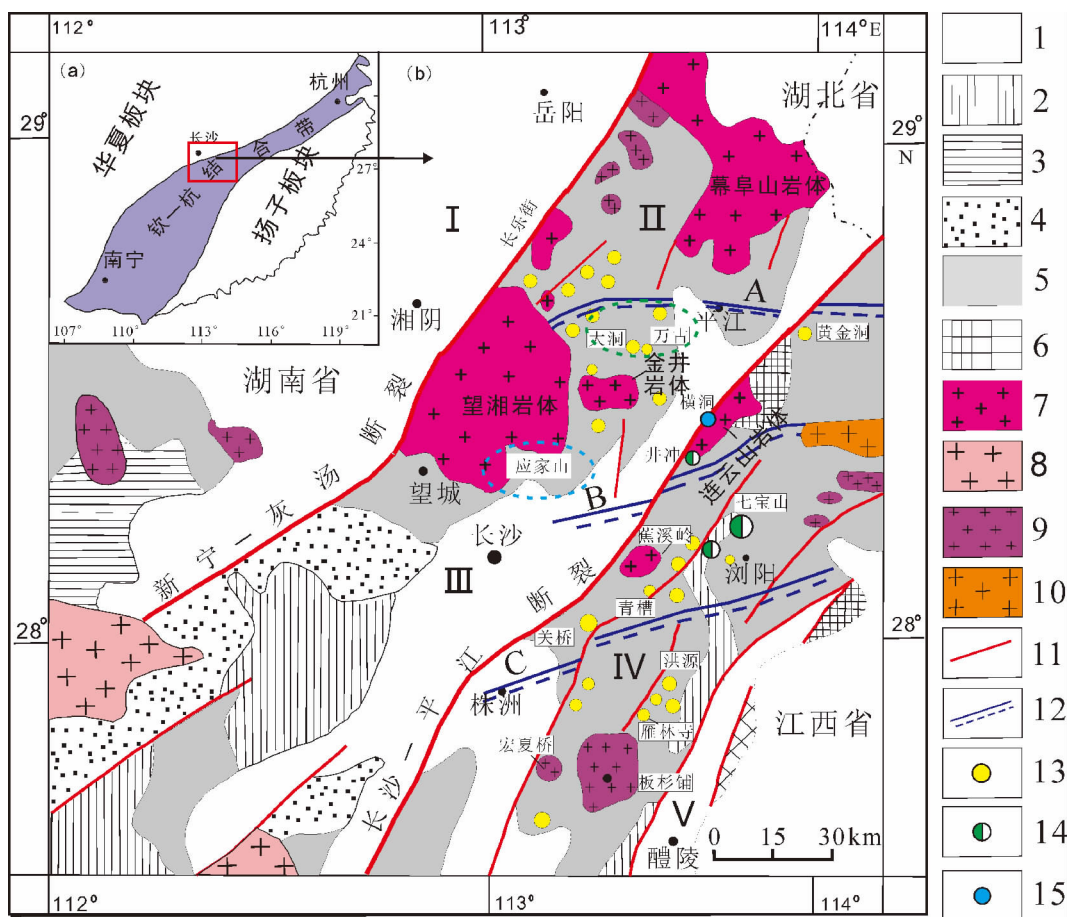
湘东北地区位于钦杭结合带中部的北西侧, 该区发生多期次的岩浆活动, 其中燕山期的岩浆活动最为强烈, 产生了多个花岗岩岩基, 如金井岩体 (166 Ma、158 Ma; 锆石 U-Pb 定年; 144 Ma、145 Ma、147 Ma; 黑云母 K-Ar 定年; 133 Ma、134 Ma、138 Ma; 全岩 Rb-Sr 定年)、望湘岩体 (138 Ma; 全岩 Rb-Sr 定年; 129 Ma; 黑云母 K-Ar 定年; 160 Ma、183 Ma; 锆石 U-Pb 定年)、幕阜山岩体 (170 Ma; 全岩 Rb-Sr 定年; 139 Ma; 黑云母 K-Ar 定年) 和连云山岩体 (160~164 Ma; 黑云母 K-Ar 定年和独居石 U-Th-Pb 定年) 等^[32, 41-42]。部分学者认为, 燕山期大规模岩浆作用与该区的 Au、Cu、Co、Pb 和 Zn 以及 Mo 等多金属成矿有密切关系^[22, 38-39]。燕山期的岩浆活动为含 Au 的成矿流体的运移提供了驱动力, 并直接为 Cu、Co、Pb 和 Zn 等多金属矿产提供了成矿物质和成矿流体来源^[38, 40, 43]。连云山岩体的地球化学特征显示连云山岩体为强过铝质花岗岩, 具埃达克岩的特征, 是玄武质岩浆底侵作用下由加厚的下地壳部分熔融产生的岩浆经同化混染和分异结晶而形成, 其源岩可能主要为变质杂砂岩、长英质片麻岩和变英云闪长岩^[33, 44]。连云山岩体的成矿作用显著, 其东北侧具有明显呈带状分布的多金属矿体。但由于一直未获得精确的年代学数据, 前人对于连云山岩体形成的地球动力学背景的研究仍相对薄弱, 对连云山岩体与湘东北地区的 Au、Cu 和 Co 的成矿关系也未有令人信服的证据。本文结合地球化学和 Nd-Sr 同位素分析, 在对连云山二云母二长花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年基础上, 通过与整个华南地区同时代花岗岩的对比, 进一步阐明了连云山二云母二长花岗岩的源区特征和形成的构造背景, 以期深入探讨其岩浆作用过程与金多金属成矿事件的关系提供依据。

1 区域地质背景

钦杭结合带是扬子与华夏两大古陆块碰撞拼贴形成的巨型板块结合带, 为一条蜿蜒长约 2 000 km 的北东向大型成矿带, 其构造演化受扬子板块和

夏板块自新元古代以来的多次分离和聚合影响^[27]。新元古代以来, 扬子和华夏板块发生了多次的分离和聚合, 使得华南地区出现多期次构造-岩浆活动。新元古代, 华夏板块俯冲于扬子板块之下, 形成了晋宁期的蛇绿岩、岛弧火山岩、后碰撞岩浆岩和高压绿片岩^[45-48]。华夏和扬子板块的碰撞是 Rodinia 超大陆在新元古代聚合的重要事件^[49-51]。Rodinia 超大陆聚合后于 820 Ma 左右又开始裂解, 扬子和华夏板块之间则形成标志未完全分裂开的大陆裂谷^[49]。早古生代扬子和华夏板块再次发生板内汇聚碰撞作用, 开启了强烈的加里东期造山作用幕。该构造运动使得泥盆纪的地层发生绿片岩-角闪岩的区域变质。华南板块加里东期的构造岩浆活动, 在部分文献中也被叫作广西运动^[52]。印支运动造成华南内陆地区早三叠世以前的地层普遍褶皱变形并伴随一系列逆冲推覆构造^[53], 同时发生广泛的印支期变质作用和岩浆作用, 并使得华南地区完成了向大陆的转变, 成为 Pangea 超大陆的组成部分^[24, 54-60]。燕山期以来, 华南板块总体处于 SE-NW 向应力场的作用下, 形成了 NE 向的构造格局和华南大规模的燕山期花岗岩^[21, 61-64]。

湘东北地区位于钦杭结合带湖南段北西侧, 处于扬子板块的东南部 (图 1a)。该区出露的地层主要为新元古界冷家溪群和板溪群, 还有少量的泥盆系和白垩系, 以及第四系盖层。冷家溪群在本区出露最广, 为一套灰、灰绿色绢云母泥板岩、条带状板岩、粉砂质板岩、岩屑杂砂岩、凝灰质细碎屑岩, 局部夹火山岩, 总厚 6 700~10 127 m, 与上覆的板溪群呈角度不整合接触^[34, 66]。该区构造特征主要反映了加里东期—印支期和燕山期构造作用的结果。加里东期—印支期的构造主要为贯穿基底的 3 条近东西向韧性剪切带 (图 1b): 九岭—清水韧性剪切带、连云山—长沙韧性剪切带和青草—株洲韧性剪切带^[67]。燕山期构造表现为区内醒目的 3 条北东向大的断裂带和断陷盆地, 这 3 条深大断裂为新宁—灰汤、长沙—平江和醴陵—衡东断裂 (图 1b)。此外, 湘东北地区还发育一系列的北西 (西) 向的断裂, 这些断裂被北东向的断裂切割, 可能是燕山期构造活动形成的次级构造。湘东北地区的矿产以金为主, 还有铜、钴、铅和锌等^[22, 68]。湘东北地区发育有晋宁期、加里东期、印支期和燕山期岩浆岩, 其中燕山期的岩浆分布最为广泛。燕山期的代表性岩体有连云山岩体、金井岩体、幕阜山岩体、望湘岩体、蕉溪岭



1—第四系—白垩系; 2—三叠系—泥盆系; 3—志留系—震旦系; 4—新元古界板溪群; 5—新元古界冷家溪群; 6—古元古界—太古宇?; 7—燕山期花岗岩; 8—印支期花岗岩; 9—加里东期花岗岩; 10—元古宙花岗岩; 11—断裂; 12—韧性剪切带; 13—金矿床(点); 14—铜多金属矿床(点); 15—钴矿点; I—汨罗断陷盆地; II—幕阜山—望湘断隆; III—长沙—平江断陷盆地; IV—浏阳—衡东断隆; V—醴陵—攸县断陷盆地; A—九岭—清水韧性剪切带; B—连云山—长沙韧性剪切带; C—青草—株洲韧性剪切带。

图 1 湘东北区域地质图

(据文献[27,65]修改)

Fig. 1 Geological map of Northeastern Hunan Province

岩体和七宝山岩体^[34-35,44]。本文研究的连云山岩体位于长沙—平江断裂的东南侧,其北东向约 10 km 即为著名的黄金洞金矿(图 1b)。

2 岩石学和岩相学特征

连云山岩体位于长沙—平江断裂的东南侧、井冲—横洞钴铜矿的东侧、黄金洞金矿的西南侧(图 1b,图 2)。该岩体整体的形态受北东向的长沙—平江深大断裂控制,中部膨大,向北东向缩小、南西侧分叉,出露面积约 135 km²。岩体主要侵位于冷家溪群板岩和连云山岩群之中(图 3a),并与围岩呈突变侵入和交代侵入接触,变质带宽可达数百米至 20 km 以上。连云山岩体与冷家溪群板岩接触的部位局部可见混合岩化,并有强烈的剪切

变形和定向构造(图 3b,3c),还可见少量的冷家溪群围岩捕虏体。

连云山岩体主要岩性为中细粒黑云母二长花岗岩和中细粒(斑状)二云母二长花岗岩,其次为中细粒黑云母花岗闪长岩(图 2)。本次采集的花岗岩样品为(中)细粒二云母二长花岗岩,灰白色,块状构造,(中)细粒花岗结构(图 3d)。主要矿物组成为 20%~25%的石英、25%~30%的碱性长石(可见格子双晶)、30%~35%的斜长石(可见聚片双晶)、约 7%的黑云母和约 5%的白云母(图 3e—h)。其中,白云母受应力作用,显示出明显的变形(图 3e),大部分斜长石蚀变较强(图 3g)。副矿物主要为磷灰石,独居石和锆石(图 3i)。连云山混合花岗岩中的矿物种类和连云山二云母二长花岗岩相似,但是矿物颗粒更细,且定向排列明显,指示了应力作用(图

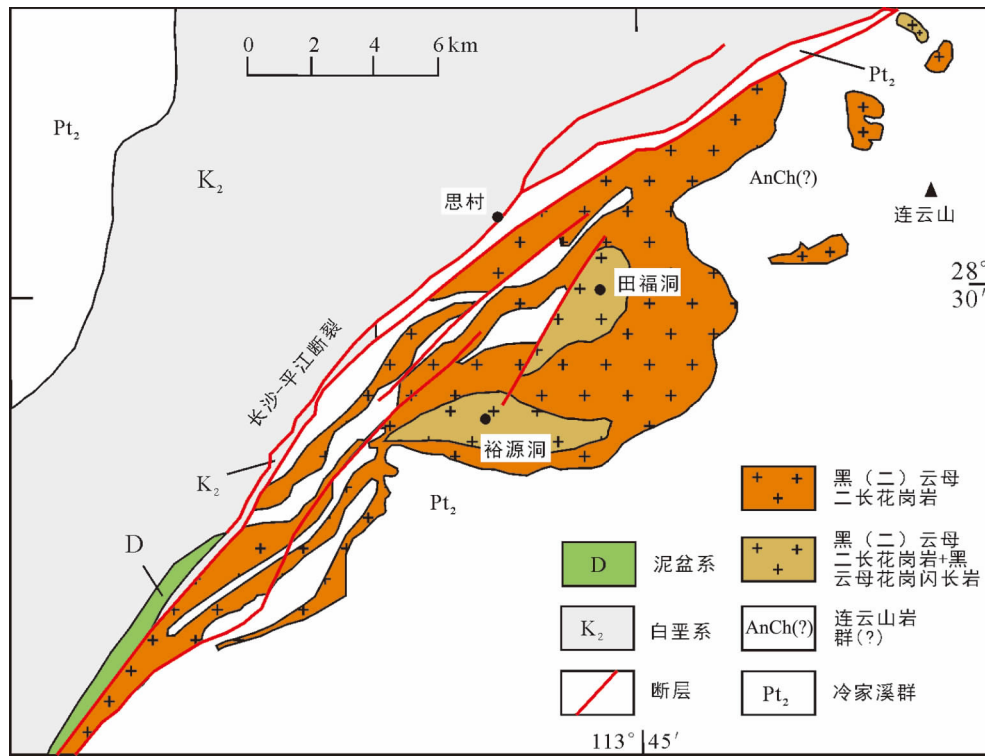


图2 连云山岩体地质简图

(据文献[41-44]修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Lianyunshan granites

3j)。连云山二云母二长花岗岩中的捕虏体的矿物颗粒细小, 大部分为 0.2 mm 左右, 主要有石英、长石和黑云母, 还有少量的石榴子石(图 3k, 3l)。

3 样品采集和分析方法

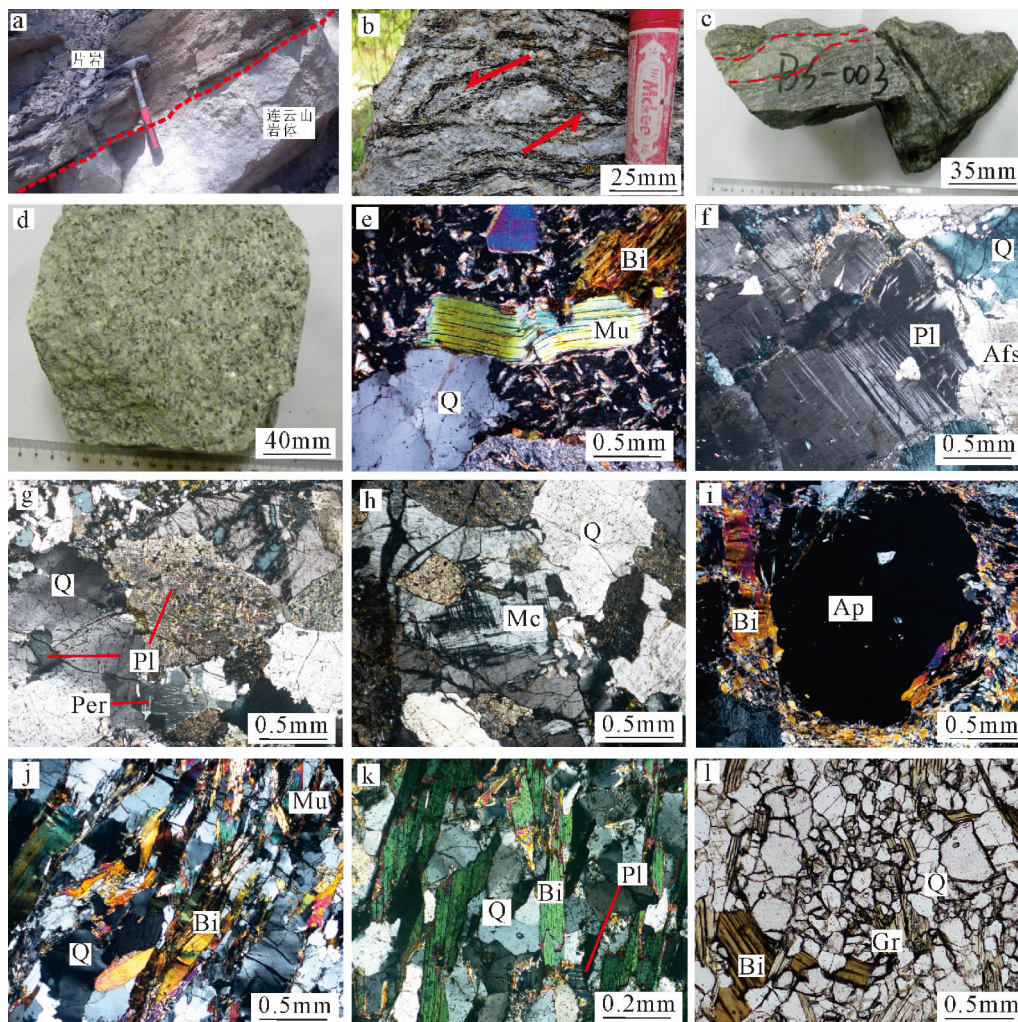
我们采集了 7 个连云山二云母二长花岗岩和 2 个连云山混合花岗岩进行全岩主量和微量元素(含 REE)分析, 对其中的 8 个样品进行 Sr-Nd 同位素分析, 并对其中一个样品(LLYS01 和 BS01 为同一个样品)挑选锆石, 进行 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年。新鲜的岩石样品被破碎成拇指大小的碎块之后用 5% 的稀硝酸溶液在超声波条件下清洗并用清水冲洗干净, 烘干后剔除肉眼看得到的被污染的样品碎块。将岩石碎块在玛瑙研钵中压碎磨成小于 200 目的粉末, 这些粉末用于主、微量元素分析和 Sr-Nd 同位素测定。

主量和微量元素分析在核工业北京地质研究院完成。主量元素的测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF), 其过程大致如下, 首先称取 0.7 g 样品, 然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片, 最后在 XRF

(仪器型号为 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪)上测定氧化物含量。测定时经 GSR-1(花岗岩)标样监控, 使主量元素分析精度优于 5%。微量元素测定采用等离子质谱(ICPMS)法: 首先称取 50 mg 样品, 用氢氟酸、硝酸敞开容器分解法与氢氟酸、硝酸密闭容器消解法相结合的方式对样品进行分解, 并制成溶液, 然后在 ICP-MS 上用内标法进行测定, 分析精度优于 10%。

Sr-Nd 同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 MC-ICP-MS 仪器上完成, 利用阳离子树脂交换柱对 Sr 和 Nd 元素进行提取, 盐酸作为淋洗液。实验过程具体描述见文献[69-70]。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试的比值分别通过 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119 4 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 校正质量分流, 而 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的报道比值则是分别通过 NBS SRM 987 标准 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 25 和 Shin Etsu JNdI-1 标准 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 115 进行校正^[71]。

将采集的样品(5 kg±)清洗干净、破碎, 采用常规浮选和磁选方法分选后, 在双目镜下将锆石分选出来; 将其置于 DEVCON 环氧树脂中, 待固结后抛



a—连云港二云母二长花岗岩侵入岩于片岩化的冷家溪群之中；b—连云港混合花岗岩野外照片，混合岩中可见左旋构造；c—连云港混合花岗岩手标本照片；d—连云港中细粒二云母二长花岗岩手标本照片；e—连云港二云母二长花岗岩镜下照片，可见白云母、黑云母和斜长石。其中斜长石蚀变较强，白云母受应力作用变形较强（正交偏光）；f—连云港二云母二长花岗岩显微照片，石英、钾长石和具有典型聚片双晶的斜长石（正交偏光）；g—连云港二云母二长花岗岩显微照片，颗粒较大的斜长石、石英和条纹长石周围可见碎裂结构（正交偏光）；h—连云港二云母二长花岗岩显微照片，具有典型格子双晶的微斜长石（正交偏光）；i—连云港二云母二长花岗岩显微照片，具有较大颗粒的副矿物磷灰石（正交偏光）；j—连云港混合花岗岩显微照片，矿物呈明显的定向排列（正交偏光）；k—捕虏体显微照片，可见大小为 0.2 mm 左右石英、斜长石和黑云母（正交偏光）；l—捕虏体显微照片，捕虏体局部可见少量的石榴子石（单偏光）。Q—石英；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Mc—微斜长石；Per—条纹长石；Bi—黑云母；Mu—白云母；Ap—磷灰石；Gr—石榴子石。

图 3 连云港岩体野外、手标本和镜下照片

Fig. 3 Field work, hand sample and thin section photographs of the Lianyunshan intrusion

磨至锆石粒径的大约二分之一，使锆石内部充分暴露。在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室进行 CL 显微图像分析及 LA-ICPMS U-Pb 年龄测试。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析所用的仪器为 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型 ICP-MS 联机。激光剥蚀频率为 10 Hz，剥蚀斑点直径为 31 μm ，采用 He 气作为剥蚀物质的载体。以国际标样锆石 Temora 1 作为外标对锆石样品的年龄进行校正，以 ^{29}Si 作为内标校正实验中的信号漂移。实验流程可参考文献 [72]，实验获得数据采用 ICPMSDataCal (version 7.4)

进行处理，最后利用 Isoplot 3.0 完成加权平均年龄和协和图的绘制。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

连云港二云母二长花岗岩的锆石颗粒长 100~250 μm ，长宽比为 2 : 1~4 : 1。从阴极发光的图像上看，很多锆石具有典型的继承核和增生边结构，其中部分继承核具有岩浆环带，其颜色一般较白，指示了较低的 U 和 Th 含量，而边部的颜色较黑，且大部

分具有明显的岩浆环带(图 4)。大部分锆石增生边 Th 含量为 $(40.7 \sim 301) \times 10^{-6}$, U 含量为 $(132 \sim 4\ 038) \times 10^{-6}$, 少量的锆石增生边的具有更高的 Th 和 U 含量, 分别为 $(506 \sim 4\ 878) \times 10^{-6}$ 和 $(4\ 466 \sim 8\ 356) \times 10^{-6}$ 。锆石增生边的 Th/U 值变化较大, 总体上位于 0.01~0.56。锆石继承核的 Th 含量为 $(53.4 \sim 582) \times 10^{-6}$, U 含量为 $(155 \sim 1\ 468) \times 10^{-6}$, Th/U 比值位于 0.065~0.849。表 1 为锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果, 部分数据因协和

度低于 90%, 予以剔除。在谐和图上, 所有的样品点都位于谐和线上, 协和度为 90%~99%。LLYS01-05、06、16、32 的年龄值因太小, 而被舍弃。反映岩体结晶年龄的锆石年龄在 141~150 Ma 之间, 加权平均年龄为 (145 ± 1) Ma(图 5)。少量锆石继承核的年龄也在 141~150 Ma, 可能也反映了岩体的形成年龄(图 4)。但大部分锆石的继承核的年龄较老, 主要大约有 200~300 Ma、600~700 Ma 和 850 Ma 3 个不同的年龄群。

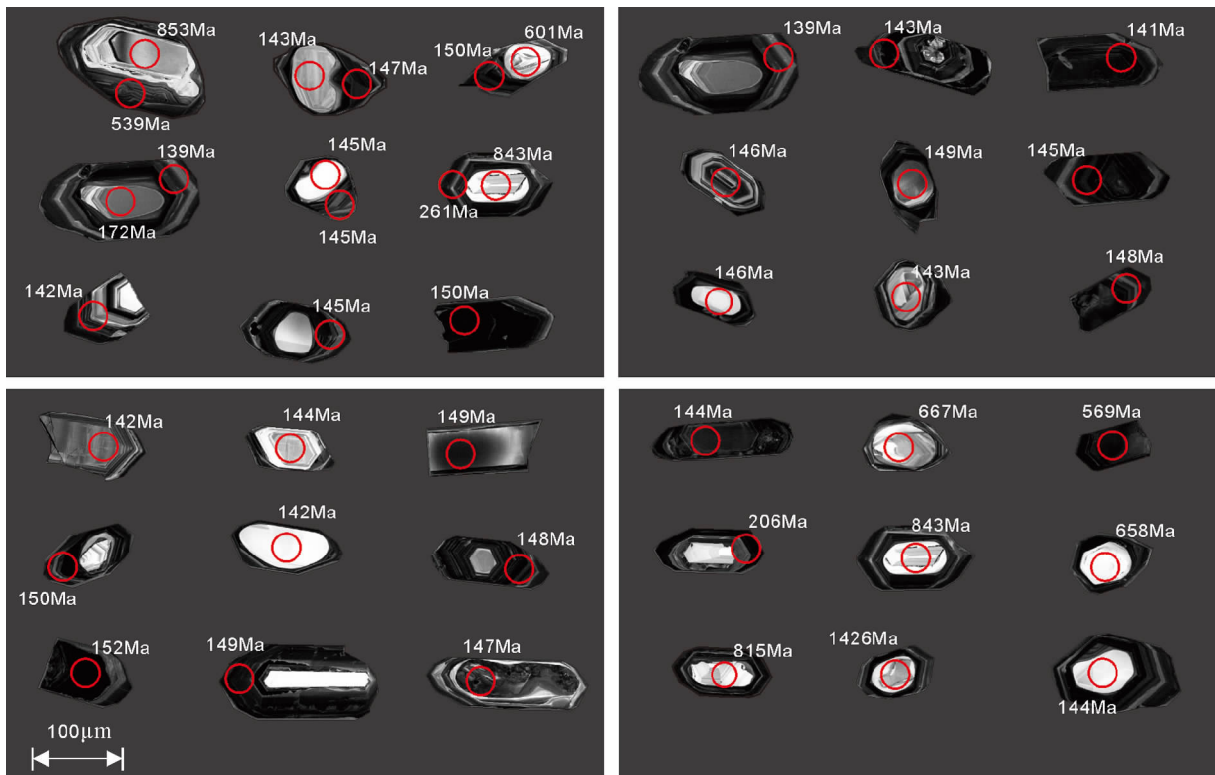


图 4 连云港二云母二长花岗岩锆石样品阴极发光(CL)图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons of the Lianyungshan two-mica monzogranites

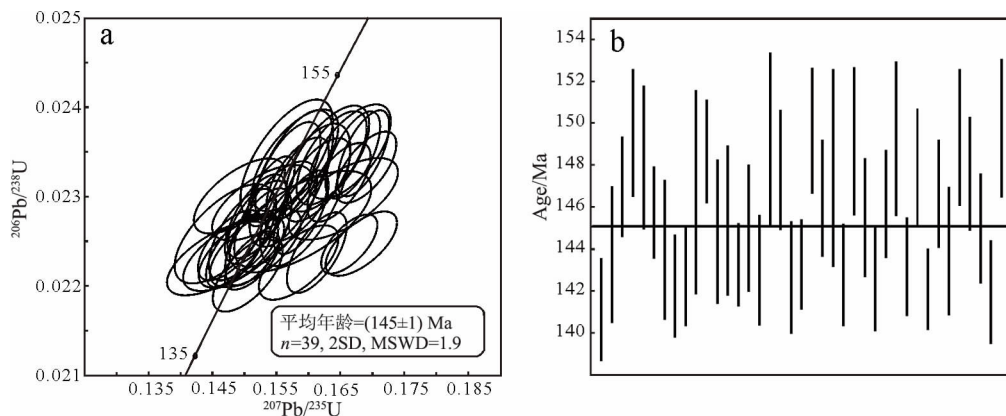


图 5 湘东北连云港二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia (a) and average age (b) diagrams of the Lianyungshan two-mica monzogranites in Northeast Hunan Province

表 1 连云山二云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic compositions of the Lianyunshan two-mica monzogranites

测试点	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma						协和度 /%
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
LLYS01-05	88.1	778	0.11							132	52	139	3	140	2	99
LLYS01-06	116	940	0.12	0.050 4	0.000 9	0.149 2	0.002 8	0.021 5	0.000 2	213	41	141	3	137	2	97
LLYS01-16	219	3 519	0.06	0.048 3	0.001 2	0.146 3	0.004 0	0.021 8	0.000 3	122	57	139	4	139	2	99
LLYS01-32	147	3 296	0.04	0.049 5	0.000 9	0.139 1	0.002 7	0.020 2	0.000 2	172	44	132	2	129	1	97
LLYS01-01	558	1 791	0.31	0.048 9	0.000 8	0.152 2	0.003 4	0.022 5	0.000 4	143	44	144	3	144	2	99
LLYS01-03	506	2 460	0.21	0.048 5	0.000 7	0.154 2	0.002 4	0.023 1	0.000 3	124	33	146	2	147	2	97
LLYS01-04	57.6	8 356	0.01	0.051 5	0.000 5	0.166 9	0.002 8	0.023 5	0.000 3	265	22	157	2	150	2	99
LLYS01-09	266	4 534	0.06	0.048 7	0.000 8	0.156 8	0.003 4	0.023 3	0.000 4	132	36	148	3	148	2	99
LLYS01-12	179	336	0.53	0.046 9	0.001 5	0.146 9	0.005 1	0.022 6	0.000 4	55.7	68.5	139	5	144	2	98
LLYS01-19	169	479	0.35	0.047 3	0.001 7	0.146 0	0.005 4	0.022 3	0.000 3	65	81	138	5	142	2	95
LLYS01-20	97.3	668	0.15	0.048 0	0.001 3	0.149 1	0.004 1	0.022 4	0.000 3	102	61	141	4	143	2	96
LLYS01-21	40.7	3 439	0.01	0.050 0	0.000 9	0.159 5	0.004 6	0.023 0	0.000 5	195	43	150	4	147	3	99
LLYS01-22	78.9	3 856	0.02	0.052 3	0.000 9	0.169 0	0.003 1	0.023 3	0.000 3	298	42	159	3	149	2	99
LLYS01-24	73.1	132	0.56	0.051 1	0.002 4	0.158 7	0.007 3	0.022 7	0.000 4	243	107	150	6	145	2	99
LLYS01-25	65.6	1 166	0.06	0.049 3	0.001 2	0.154 9	0.004 3	0.022 8	0.000 4	167	57	146	4	145	2	93
LLYS01-26	136	4 038	0.03	0.053 5	0.000 9	0.166 4	0.002 9	0.022 5	0.000 2	350	41	156	3	143	1	93
LLYS01-34	236	3 468	0.07	0.048 0	0.000 9	0.151 7	0.003 2	0.022 7	0.000 3	102	44	143	3	145	2	97
LLYS01-37	148	302	0.49	0.049 1	0.001 6	0.151 7	0.004 7	0.022 4	0.000 3	154	76	143	4	143	2	98
LLYS01-38	228	1 801	0.13	0.048 2	0.001 1	0.156 6	0.004 8	0.023 4	0.000 4	109.4	53.7	148	4	149	3	98
LLYS01-41	201	1 740	0.12	0.050 2	0.000 9	0.161 4	0.003 4	0.023 2	0.000 3	206	45	152	3	148	2	98
LLYS01-46	224	3 409	0.07	0.052 6	0.001 2	0.161 3	0.003 1	0.022 4	0.000 3	309	53	152	3	143	2	97
LLYS01-48	47.2	1 721	0.03	0.049 2	0.001 1	0.150 5	0.003 6	0.022 1	0.000 3	154	50	142	3	141	2	99
LLYS01-49	183	3 601	0.05	0.053 9	0.001 0	0.168 3	0.003 7	0.022 5	0.000 2	365	43	158	3	143	1	96
LLYS01-55	224	3 492	0.06	0.052 4	0.000 9	0.168 6	0.002 7	0.023 5	0.000 3	302	41	158	2	150	2	94
LLYS01-58	143	1 624	0.09	0.052 0	0.001 5	0.165 5	0.005 6	0.023 0	0.000 3	283	67	155	5	146	2	99
LLYS01-65	135	2 792	0.05	0.049 1	0.001 0	0.157 3	0.004 3	0.023 2	0.000 5	154	53	148	4	148	3	97
LLYS01-67	167	3 472	0.05	0.048 0	0.000 9	0.148 7	0.003 1	0.022 4	0.000 3	98	44	141	3	143	2	97
LLYS01-68	177	778	0.23	0.048 7	0.001 1	0.157 9	0.004 4	0.023 4	0.000 4	200	54	149	4	149	2	96
LLYS01-71	964	4 509	0.21	0.050 4	0.000 8	0.158 8	0.002 8	0.022 8	0.000 3	213	33	150	2	145	2	90
LLYS01-73	108	346	0.31	0.047 9	0.001 6	0.148 3	0.005 2	0.022 4	0.000 3	100.1	77.8	140	5	143	2	99
LLYS01-74	199	439	0.45	0.048 3	0.001 6	0.152 7	0.005 1	0.022 9	0.000 3	122	80	144	5	146	2	94
LLYS01-76	73.3	2 526	0.03	0.050 0	0.001 0	0.163 0	0.004 3	0.023 4	0.000 4	195	50	153	4	149	2	96
LLYS01-77	252	1 152	0.22	0.047 4	0.001 0	0.147 7	0.003 3	0.022 5	0.000 3	77.9	50.0	140	3	143	2	97
LLYS01-78	82.8	3 159	0.03	0.049 2	0.000 9	0.158 3	0.003 2	0.023 2	0.000 3	167	38	149	3	148	2	97
LLYS01-83	241	1 214	0.20	0.049 2	0.001 0	0.151 2	0.002 8	0.022 3	0.000 2	167	44	143	2	142	1	99
LLYS01-85	82.8	666	0.12	0.047 1	0.001 5	0.149 2	0.004 7	0.023 0	0.000 3	57.5	70.4	141	4	147	2	98
LLYS01-87	192	1 370	0.14	0.047 9	0.001 0	0.149 7	0.003 5	0.022 6	0.000 3	94.5	43.5	142	3	144	2	91
LLYS01-88	301	4 466	0.07	0.050 2	0.000 8	0.163 6	0.003 6	0.023 4	0.000 3	206	37	154	3	149	2	95
LLYS01-92	153	6 204	0.02	0.051 2	0.001 0	0.164 8	0.003 3	0.023 2	0.000 3	256	44	155	3	148	2	98
LLYS01-94	823	2 428	0.34	0.048 0	0.001 0	0.152 1	0.003 1	0.022 7	0.000 3	102	46	144	3	145	2	99
LLYS01-96	4874	1 894	2.57	0.050 9	0.001 2	0.158 5	0.004 1	0.022 3	0.000 3	239	56	149	4	142	2	99
LLYS01-98	1 162	3 738	0.31	0.050 6	0.000 9	0.166 5	0.004 2	0.023 5	0.000 3	233	38	156	4	150	2	95
LLYS01-100	95.6	2 917	0.03	0.049 9	0.000 9	0.158 1	0.003 2	0.022 9	0.000 2	187	44	149	3	146	2	94
LLYS01-15	235	1 996	0.118	0.048 4	0.001 2	0.187 1	0.012 0	0.027 0	0.001 2	120	64	174	10	172	8	98
LLYS01-31	201	1 27	1.588	0.051 3	0.002 6	0.171 9	0.008 6	0.024 5	0.000 6	254	82	161	7	156	4	96
LLYS01-56	98.6	2 128	0.046	0.053 3	0.000 8	0.234 6	0.008 2	0.031 7	0.000 9	339	37	214	7	201	6	93
LLYS01-70	62.2	14 847	0.004	0.048 6	0.000 7	0.160 4	0.002 9	0.023 9	0.000 3	132	31	151	3	152	2	99
LLYS01-97	275	2 590	0.106	0.051 8	0.001 1	0.205 7	0.005 4	0.028 6	0.000 6	276	48	190	5	182	4	95
LLYS01-99	81.7	1 381	0.059	0.051 9	0.001 0	0.234 3	0.005 6	0.032 5	0.000 5	283	44	214	5	206	3	96
LLYS01-35	70.4	1 089	0.065	0.055 3	0.001 4	0.323 9	0.014 9	0.041 3	0.001 5	433	57	285	11	261	9	91
LLYS01-63	265	1 468	0.181	0.057 3	0.001 1	0.399 4	0.018 5	0.049 4	0.001 9	506	43	341	13	311	12	90
LLYS01-07	582	1 276	0.456	0.073 0	0.001 7	1.387 1	0.030 5	0.138 3	0.001 6	1 014	48	883	13	835	9	94
LLYS01-08	286	1 193	0.24	0.062 9	0.001 0	0.783 7	0.043 4	0.087 2	0.004 4	706	36	588	25	539	26	91
LLYS01-11	235	277	0.849	0.065 9	0.001 5	1.233 8	0.032 1	0.134 7	0.002 1	1 200	42	816	15	815	12	99
LLYS01-27	130	155	0.84	0.067 8	0.001 5	1.005 5	0.030 7	0.107 4	0.002 6	861	46	707	16	658	15	92
LLYS01-36	288	476	0.604	0.065 5	0.001 4	1.272 1	0.029 4	0.139 8	0.001 9	791	44	833	13	843	11	98
LLYS01-42	109	183	0.595	0.066 5	0.001 3	1.203 1	0.024 2	0.131 0	0.001 4	822	40	802	11	793	8	98
LLYS01-43	153	274	0.558	0.100 7	0.001 4	3.448 7	0.056 0	0.247 5	0.002 9	1 639	25	1 516	13	1 426	15	93
LLYS01-44	435	1 062	0.409	0.065 8	0.000 9	0.921 9	0.018 3	0.101 1	0.001 6	1 200	27	663	10	621	9	93
LLYS01-54	494	1 383	0.357	0.066 3	0.000 9	0.895 9	0.018 8	0.097 7	0.001 7	817	28	650	10	601	10	92
LLYS01-60	97.1	380	0.256	0.063 4	0.001 2	0.965 5	0.041 3	0.109 0	0.004 1	724	39	686	21	667	24	97
LLYS01-80	53.4	169	0.316	0.069 6	0.001 7	1.084 2	0.031 3	0.112 4	0.002 1	917	44	746	15	687	12	91
LLYS01-89	149	902	0.165	0.060 8	0.001 4	0.814 8	0.057 6	0.092 3	0.006 0	632	48	605	32	569	36	93

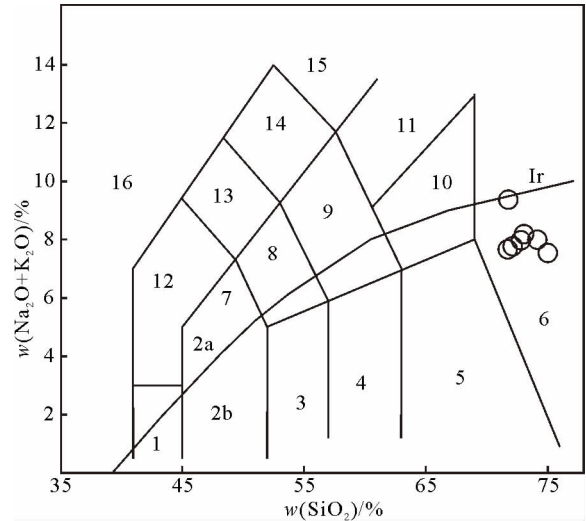
4.2 主量元素特征

表 2 为连云港二云母二长花岗岩和混合岩的主微量元素分析结果, 结果显示连云港中细粒花岗岩和细粒花岗岩在主量元素组成上没有显著的差别, 两者与混合花岗岩的成分相差较大。

连云港二云母二长花岗岩的 SiO_2 含量为 71.77%~75.00%, 平均值为 72.95%, 硅含量较高, 属于花岗岩类(图 6)。 Al_2O_3 的含量为 14.38%~15.32%, 均值为 14.34%, 为过铝质花岗岩(图 7)。 Na_2O 含量为 3.34%~4.68%, 均值为 3.77%, K_2O 的含量为 3.94%~4.79%, 均值为 4.30%, 总碱 K_2O+Na_2O 为 7.54%~9.37%, K_2O/Na_2O 为 0.95~1.50, 为高钾钙碱性系列。混合花岗岩的具有相对较低的 SiO_2 和 K_2O 含量, 而 FeO 和 MgO 的含量相对较高(表 2)。

4.3 稀土和微量元素特征

连云港二云母二长花岗岩的微量元素和稀土元素测试结果如表 2 所示。花岗岩样品的 ΣREE 值变化范围为 $(61.60 \sim 115.26) \times 10^{-6}$, 平均 91.48×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE=10.50 \sim 27.99$, 平均值为 19.08, $(La/Yb)_N$ 比值的变化范围为 29.79~67.51, 平均值为 44.47, 显示出轻稀土富集的特征。 Sm/Yb 比值的变化范围为 4.82~9.72, 平均值为 7.39。 $\delta Ce=1.01 \sim 1.06$, 无明显 Ce 异常(图 8b)。按照全岩 Eu 异常, 可以分为两类, 第一类的样品为 BS005、BS008 和 BS008-1, $\delta Eu=0.41 \sim 0.63$; 第二类样品为 BS001、BS002、BS005-1、BS006, $\delta Eu=0.81 \sim 0.95$ 。连云港二云母二长花岗岩总体上具有 Eu 负异常, 但不



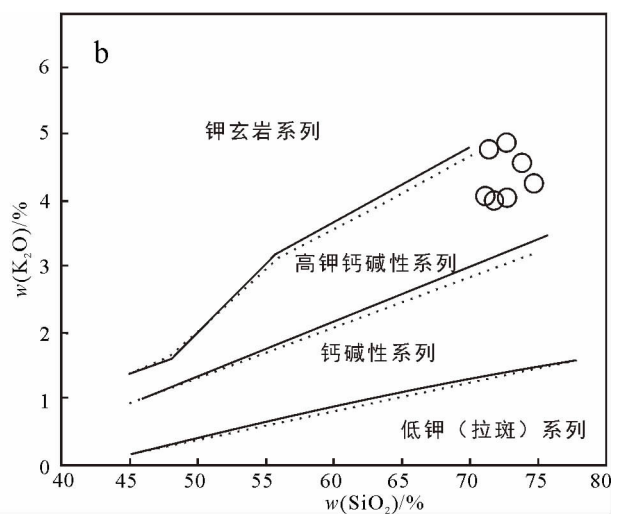
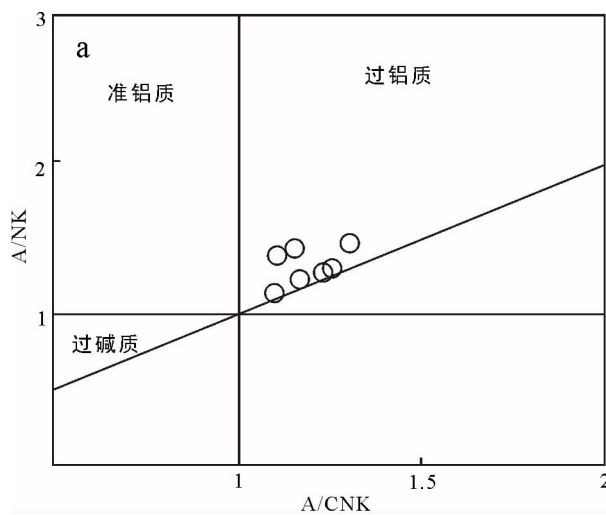
1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗岩; 6—花岗岩; 7—二长辉长岩; 8—二长闪长岩; 9—二长岩; 10—石英二长岩; 11—正长岩; 12—副长石辉长岩; 13—副长石二长闪长岩; 14—副长石二长正长岩; 15—副长正长岩; 16—副长深成岩; Ir—Irvine, 上方为碱性, 下方为亚碱性。

图 6 连云港二云母二长花岗岩 TAS 图解

(据文献[74]修改)

Fig. 6 TAS diagram of the Lianyungshan two-mica monzogranites

同的 δEu 值指示花岗岩形成过程中可能有不同程度的斜长石分离结晶。此外, 第一类样品比第二类样品具有更高的重稀土元素含量。锆石饱和温度为 $658.46 \sim 737.37 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $686.95 \text{ }^\circ\text{C}$ 。连云港二云母二长花岗岩富集大离子亲石元素如 K、Rb、Th 和 U 以及 Pb, 亏损 Sr 和高场强元素如 Nb、Ta 和 Ti 以及不相容元素 Zr、Hf、Ba(图 8a)。连云港混合花岗岩则具有较高的 ΣREE 值 $((148.22 \sim 178.39) \times 10^{-6})$, 相对较低的 $\Sigma LREE/\Sigma HREE (7.64 \sim 11.36)$ 、 $Sm/$



a—A/NK-A/CNK(摩尔分数比)图解(底图据文献[75]); b— K_2O-SiO_2 图解(底图据文献[76])。

图 7 连云港二云母二长花岗岩岩石类型判别图解

Fig. 7 Rock type discriminative diagrams of the Lianyungshan two-mica monzogranites

Yb 比值 (2.18~5.47)、(La/Yb)_N 比值 (8.23~21.19)、 δEu (0.28~0.30) 和锆饱和温度 (596.79~598.99 °C), 但是其 Ce 异常值与连云港二云母二长花岗岩相似 ($\delta\text{Ce}=1.01\sim 1.06$)。连云港混合花岗岩和花岗岩的大离子亲石元素如 K、Rb、Th 和 U 以及 Pb 含量相近, 但更加亏损 Sr 和不相容元素 Zr、Hf、Ba, 而高场强元素如 Nb、Ta 和 Ti 亏损较少 (图 8a)。

4.4 全岩 Sr-Nd 同位素特征

全岩 Sr-Nd 同位素组成如表 3 所示, 基于文中 145 Ma 为连云港二云母二长花岗岩侵入的年龄, 计算相

关的参数。连云港二云母二长花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.729\ 07\sim 0.743\ 76$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.722\ 86\sim 0.730\ 97$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\ 96\sim 0.512\ 02$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511\ 75\sim 0.511\ 77$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -13.36\sim -13.65$ 。连云港混合花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.765\ 53\sim 0.788\ 71$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.730\ 08\sim 0.710\ 03$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 05$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511\ 82\sim 0.511\ 84$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.29\sim -10.02$ 。连云港二云母二长花岗岩和混合花岗岩的二阶段 Nd 模式年龄值相似, 都为 1.7~2.1 Ga。

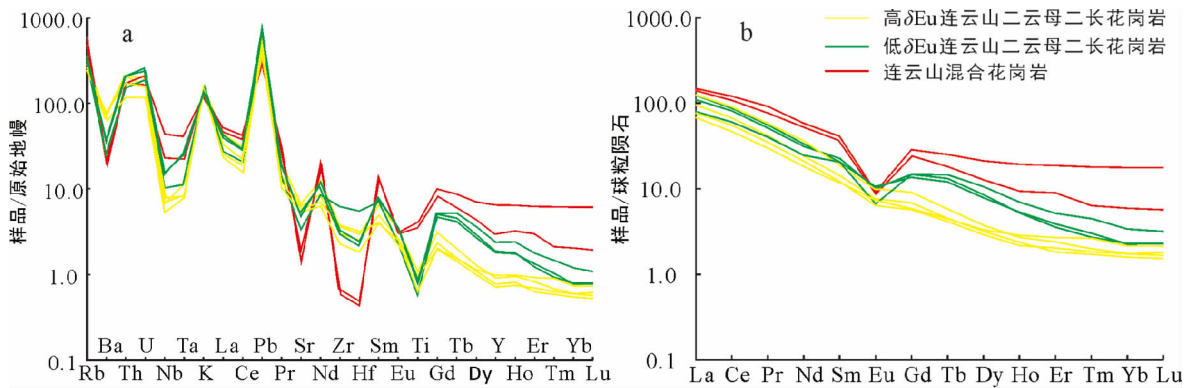


图 8 连云港二云母二长花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土元素配分图(b) (原始地幔和球粒陨石来源于文献[77])

Fig. 8 Primitive-mantle-normalized trace element spidergrams (a) and Chondrite-normalized REE patterns (b) of the Lianyungshan two-mica monzogranites

表 2 连云港二云母二长花岗岩和混合岩主微量元素分析结果

Table 2 The major and trace elements compositions of the Lianyungshan two-mica monzogranites and migmatites

岩性	样品号	$w_B/\%$												
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
中细粒花岗岩	BS001	71.77	0.23	14.62	0.91	1.22	0.57	0.06	0.28	4.68	4.69	0.09	1.37	100.49
	BS002	73.07	0.21	14.38	0.71	1.02	0.46	0.06	0.24	4.19	3.99	0.07	1.14	99.54
混合花岗岩	BS003	67.00	0.93	14.71	1.95	5.96	2.04	0.09	0.46	1.39	3.96	0.11	1.32	99.92
	BS004	68.66	0.74	14.33	1.35	4.98	1.52	0.07	0.68	2.09	3.65	0.12	1.20	99.39
中细粒花岗岩	BS005	72.82	0.12	15.42	0.59	0.83	0.27	0.04	0.76	3.19	4.79	0.20	1.36	100.39
	BS005-1	74.15	0.14	13.11	0.51	1.16	0.34	0.06	0.33	3.47	4.52	0.14	1.14	99.07
	BS006	75.00	0.205	13.16	0.489	1.04	0.385	0.042	0.231	3.34	4.21	0.071	0.96	99.13
细粒花岗岩	BS008	72.14	0.17	14.72	0.49	1.23	0.33	0.04	1.51	3.82	3.94	0.25	0.85	99.51
	BS008-1	71.72	0.19	14.95	0.52	1.33	0.37	0.04	1.42	3.68	3.98	0.19	0.81	99.20
岩性	样品号	$w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\%$	K ₂ O/Na ₂ O	A/CNK	$w_B/10^{-6}$									
					Ba	Co	Cr	Cu	Ga	Ge	Mo	Ni	Pb	Sc
中细粒花岗岩	BS001	9.37	1.00	1.10	513.6	3.71	31.21	3.07	20.45	1.45	0.35	3.83	33.15	3.19
	BS002	8.18	0.95	1.23	464.22	3.15	25.67	3.37	19.29	1.48	1.08	3.65	29.67	2.77
混合花岗岩	BS003	5.36	2.85	1.98	150.25	15.19	89.36	30.93	26.20	1.62	0.29	36.03	20.55	16.36
	BS004	5.73	1.75	1.66	130.45	9.50	49.29	18.85	25.30	1.68	0.20	23.84	24.97	10.69
中细粒花岗岩	BS005	7.98	1.50	1.31	174.09	1.47	13.56	2.92	21.20	0.86	0.57	2.76	48.14	2.41
	BS005-1	7.99	1.30	1.17	451.36	2.13	13.62	3.20	13.78	1.29	0.18	2.31	36.36	2.01
	BS006	7.54	1.26	1.26	547.00	2.66	17.50	2.78	16.50	1.22	0.22	4.75	26.80	2.44
细粒花岗岩	BS008	7.76	1.03	1.11	260.92	2.34	19.67	3.22	19.63	1.47	0.91	4.79	54.06	3.27
	BS008-1	7.66	1.08	1.16	248.58	2.55	15.16	2.55	19.16	1.58	0.51	3.38	49.22	3.51

(续表 2)

岩性	样品号	$w_B/10^{-6}$											
		Sr	Th	U	W	Zn	Hf	Zr	Rb	Nb	Ta	Sb	Y
中细粒花岗岩	BS001	142.05	17.63	3.30	0.75	38.60	0.92	40.65	183.80	4.96	0.35	0.45	4.18
	BS002	133.11	17.87	4.13	0.75	31.10	0.78	33.80	154.22	4.79	0.47	0.35	3.54
混合花岗岩	BS003	30.97	15.00	3.51	0.99	170.50	0.14	6.90	302.13	16.45	0.95	0.21	29.63
	BS004	40.98	14.55	4.27	0.76	162.90	0.15	7.42	377.24	30.11	1.66	0.33	13.90
中细粒花岗岩	BS005	70.27	12.92	3.95	0.67	39.49	1.71	69.81	197.05	7.35	0.46	0.28	8.52
	BS005-1	113.02	9.92	2.48	0.78	25.74	0.59	25.58	166.01	3.79	0.32	3.41	4.49
	BS006	127.00	14.50	3.30	0.66	31.10	1.02	44.10	152.00	5.59	0.34	0.28	3.27
细粒花岗岩	BS008	111.78	17.23	5.41	1.29	60.01	0.70	33.21	212.91	10.19	1.05	0.29	10.91
	BS008-1	105.11	17.80	5.01	1.53	71.79	0.75	36.75	227.67	11.08	1.03	0.27	8.24

岩性	样品号	$w_B/10^{-6}$											
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
中细粒花岗岩	BS001	29.72	55.61	5.53	16.96	2.88	0.57	1.86	0.22	0.95	0.15	0.40	0.05
	BS002	22.71	41.18	3.99	11.31	2.20	0.44	1.40	0.17	0.81	0.13	0.30	0.04
混合花岗岩	BS003	36.92	77.64	8.74	27.35	6.58	0.54	6.16	0.94	5.39	1.09	3.11	0.46
	BS004	31.77	66.35	7.33	24.49	5.80	0.49	4.74	0.68	3.24	0.53	1.49	0.16
中细粒花岗岩	BS005	18.87	36.79	3.82	11.52	3.15	0.39	3.03	0.49	2.17	0.30	0.59	0.07
	BS005-1	16.15	28.52	2.85	8.57	1.77	0.42	1.21	0.17	0.84	0.16	0.45	0.07
	BS006	18.30	34.00	3.33	9.86	1.87	0.37	1.17	0.16	0.74	0.12	0.34	0.05
细粒花岗岩	BS008	27.21	52.30	5.15	14.66	3.46	0.58	3.06	0.55	2.69	0.40	0.86	0.11
	BS008-1	29.37	53.58	5.31	15.70	3.34	0.59	2.80	0.45	2.00	0.29	0.64	0.08

岩性	样品号	$w_B/10^{-6}$					$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	锆石饱和温度/ $^{\circ}C$	Sm/Yb	δEu	δCe
		Yb	Lu	ΣREE	$\Sigma LREE$	$\Sigma HREE$					
中细粒花岗岩	BS001	0.30	0.05	115.26	111.28	3.98	27.99	681.5	9.72	0.81	1.04
	BS002	0.27	0.04	85.01	81.84	3.18	25.76	679.5	8.11	0.82	1.04
混合花岗岩	BS003	3.02	0.46	178.39	157.75	20.63	7.64	599.0	2.18	0.28	1.04
	BS004	1.01	0.14	148.22	136.22	11.99	11.36	596.8	5.74	0.30	1.05
中细粒花岗岩	BS005	0.39	0.06	81.64	74.54	7.10	10.50	737.4	8.03	0.41	1.04
	BS005-1	0.37	0.05	61.60	58.28	3.32	17.58	658.5	4.82	0.95	1.01
	BS006	0.30	0.04	70.57	67.66	2.91	23.22	703.0	6.31	0.82	1.05
细粒花岗岩	BS008	0.58	0.08	111.67	103.36	8.31	12.43	669.4	6.01	0.59	1.06
	BS008-1	0.38	0.06	114.59	107.89	6.70	16.10	679.5	8.69	0.63	1.03

注: $A/CNK = Al_2O_3 / (Na_2O + CaO + K_2O)$ (摩尔分数); $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{0.5}$; $\delta Ce = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{0.5}$; 锆石饱和温度 = $12\ 900 / [2.95 + 0.85M + \ln(49\ 600 / Zr_{melt})] - 273$, Zr_{melt} 为熔体中 Zr 的含量, $M = (Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ (摩尔分数); 计算中, 令 $Si + Al + Fe + Ca + Na + K + P = 1$; 据文献[73]。

表 3 连云港岩体和混合岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Lianyungshan intrusion and migmatites

样品	年龄/Ma	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}$	$\epsilon_{Nd}(t)$	T_{DM2}/Ma
BS001	145	3.752	0.730 60	0.722 86						
BS003	145	28.447	0.788 71	0.730 08	0.241 61	0.512 05	0.511 82	0.512 45	-12.29	1 931.09
BS004	145	26.784	0.765 53	0.710 33	0.116 39	0.512 05	0.511 94	0.512 45	-10.02	1 747.63
BS005	145	8.142	0.743 76	0.726 98						
BS005-1	145	4.259	0.729 07	0.720 29	0.281 57	0.512 02	0.511 75	0.512 45	-13.65	2 041.07
BS006	145	3.455	0.733 26	0.726 14						
BS008	145	5.530	0.742 37	0.730 97	0.205 15	0.511 96	0.511 77	0.512 45	-13.36	2 017.64

5 讨论

5.1 连云港二云母二长花岗岩和混合岩的源区特征

连云港二云母二长花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t) = -13.36 \sim -13.65$, 混合花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t) = -12.29 \sim -10.02$, 指示两者为地壳来源。在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解(图 9a)中, 两者均位于华南元古宙地壳的演化区之中。连云港二云母二长花岗岩和混合花岗岩的二阶段 Nd 模式年龄值相似, 为 1.7~2.1 Ga, 这与江南造山带中部的变质基底的二阶段模式年龄(1.87~2.14 Ga, 平均值 2.01 Ga)一致^[78-79]。因此, Nd 同位素组成说明, 连云港二云母二长花岗岩和混合花岗岩来源于华南元古宙地壳物质的重熔。

连云港混合花岗岩主要位于连云港二云母二长花岗岩和冷家溪群的接触部位, 部分位于长沙—平江断裂附近。与连云港二云母二长花岗岩相比, 混合岩具有较低的 Sr 含量和较高的 Y 和 Yb 含量, 与文献^[65]所测得的冷家溪群砂质板岩的相似, 只是具有更低的 Zr 和 Hf 含量。因此, 连云港混合花岗岩可能是较浅部的冷家溪群板岩部分熔融形成的。

根据 Eu 异常值将连云港二云母二长花岗岩分为两组的 CaO/Na₂O 值也存在差异, 其中 δEu 值较小的 3 个样品 BS005、BS008 和 BS008-1 具有较高的 CaO/Na₂O 值(0.24~0.39), 而其他样品的 CaO/Na₂O 值则较低(0.06~0.1), 说明前者可能来源于

相对贫泥质、富斜长石粗粒碎屑岩源区, 而后者来自于富泥质、贫斜长石源区^[80-81]。但两组样品的 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值都较低, 为贫黏土的源区, 这与文献^[44]的研究结果一致。

全岩 FeO^T、MgO 和 SiO₂ 的含量可以用来判断花岗岩源区的氧逸度的大小。如图 9b 所示, 绝大部分连云港二云母二长花岗岩的样品具有较低的 FeO^T/(FeO^T+MgO) 值, 位于 magnesian 区, 指示较为氧化的源区环境^[79-80]。只有三个样品 BS005、BS008 和 BS008-1 处于 magnesian-ferroan 的过渡区, 指示相对还原的源区环境。此外, 处于 magnesian-ferroan 的过渡区的 3 个样品还具有较大的 Eu-Sr-Ba 负异常和较低的 Cr 和 Co 的含量, 说明这些花岗岩样品是由相对干体系的熔体形成; 相反, 其他的大部分样品则产于相对富水的源区。

Th-LREE-Gd 和 Zr-Hf 可以用来衡量岩体形成的温度, 在地壳部分熔融过程中, 独居石、褐帘石和锆石是这些元素的主要赋存矿物^[82]。其中, 独居石和锆石的熔点较高, 其含量随着源区部分熔融温度的升高而增加^[83-84]。连云港二云母二长花岗岩的 Th-LREE-Gd 和 Zr-Hf 含量变化较小, 且都较低, 说明连云港二云母二长花岗岩源区温度较低, 这与连云港较低的锆石饱和温度(658.46~737.37 °C, 平均 686.95 °C)一致^[73,85]。石榴子石是重稀土元素的主要赋存矿物, 当花岗岩源区压力较大, 形成的石榴子石会吸附大量的重稀土元素, 造成熔体的重稀土亏损, 因此花岗岩 MREE/HREE 值(Gd/Yb

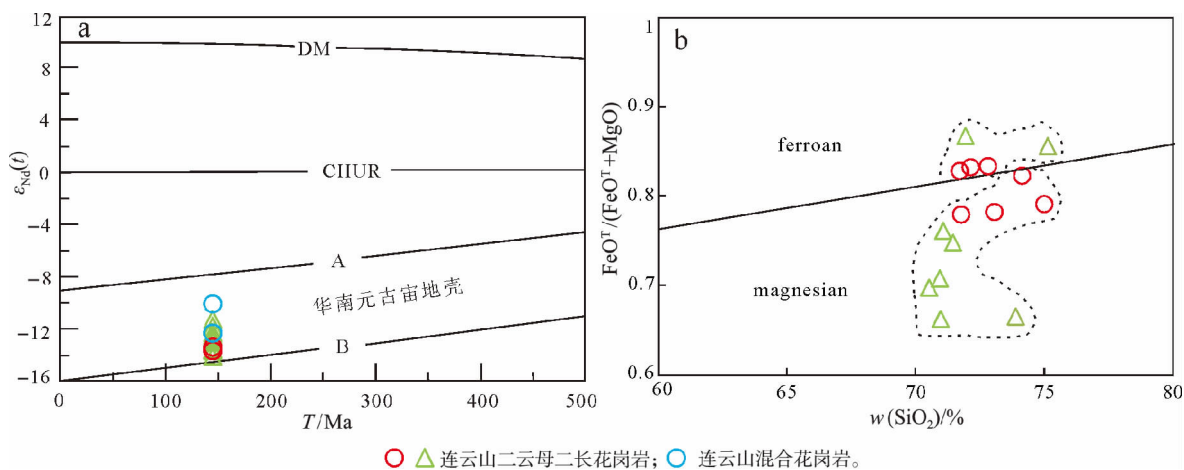


图 9 连云港二云母二长花岗岩和混合岩 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解(a)及全岩 FeO^T/(FeO^T+MgO)-SiO₂ 图解(b)
(底图据文献^[75,79])

Fig. 9 Diagrams of $\epsilon_{Nd}(t)-t$ (a) and whole-rock FeO^T/(FeO^T+MgO) versus SiO₂(b) of the Lianyungshan two-mica monzogranites and migmatites

和 Sm/Yb) 可以用来衡量花岗岩源区部分熔融的压力^[21]。连云山二云母二长花岗岩 MREE/HREE 值较高, 且变化较小, Gd/Yb 比值为 3.30~7.74, 平均值为 5.58, Sm/Yb 比值为 4.82~9.72, 平均值为 7.39, 指示源区较高的压力条件。连云山二云母二长花岗岩位于北东向的长沙—平江深大断裂的南东侧, 强过铝质(A/CNK>1.1), 锆石饱和温度较低, MREE/HREE 值较高, 属于高压低温型 SP 花岗岩。其形成的地壳厚度可能大于 50 km, 由加厚下地壳在深大断裂处减压熔融形成^[81]。

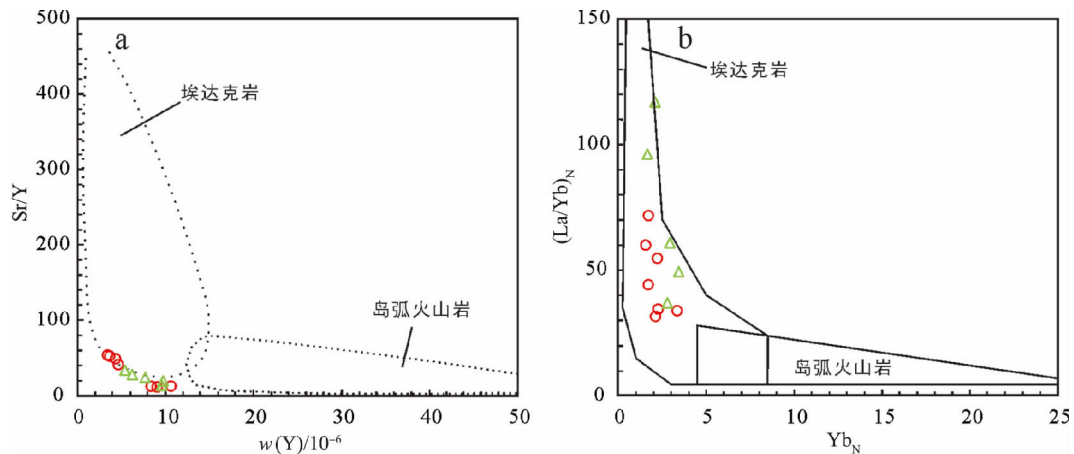
连云山二云母二长花岗岩具有较高的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量, Yb 和 Y 含量较低, 大部分样品的 Na₂O/K₂O 和 (La/Yb)_N 比值较高, 具有埃达克岩的特征(图 10)。前人研究指出, 连云山岩体具有典型壳源的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成和较低的 Mg 含量, 而且湘东北地区缺乏同时期的基性岩浆活动^[44]。因此, 连云山二云母二长花岗岩的埃达克质特征不是由俯冲板片熔融、玄武质岩浆 AFC 演化或者拆沉下地壳熔融形成的, 而是由于加厚下地壳的部分熔融。要使得连云山岩体具有埃达克特性, 部分熔融的源区要至少达到榴辉岩相, 石榴子石在源区达到稳定, 使得熔体中具有较低的 Yb 和 Y 值。

因此, 连云山二云母二长花岗岩为贫黏土的地下壳物质部分熔融的产物, 其源区具有一致且较低的温度和较高的压力。按照化学组成、湿度和氧逸度, 可以将源区分为两组, 一组为相对还原、干燥、贫泥质、富斜长石粗粒碎屑岩源区, 另一组为相对氧化、富水和贫斜长石的富泥质源区。

5.2 湘东北晚中生代构造演化

目前, 虽然对于古太平洋板块俯冲开始的时间和方式, 还存在争议, 但大部分学者都认同华南燕山期的岩浆活动与古太平洋板块俯冲作用有关^[5,8-9,16-17]。古太平洋板块的北西向平俯冲模式更适合解释距离俯冲带约 1 000 km 的湘东北的岩浆活动和北东向的构造格局(图 1)。

湘东北地区有发育广泛的燕山期花岗岩, 代表性的岩体有连云山岩体、望湘岩体、金井岩体和幕阜山岩体等(图 1)。这些岩体形成于中侏罗世—早白垩世, 大多为典型的 S 型花岗岩。地球化学特征显示, 湘东北燕山期花岗岩大部分为 magnesian 型, 少部分为 ferroan 型, 说明湘东北燕山期岩浆岩源区具有变化的氧逸度和湿度(图 11a)。燕山期的花岗岩的 Gd/Yb 和 Sm/Yb 变化较大, 但普遍较高, 指示岩浆源区具有较高的压力(图 11b, c)。较高的岩浆源区压力表明, 湘东北地区在中侏罗世—早白垩世仍处于地壳加厚的状态。燕山期花岗岩的锆石饱和温度变化较大, 一部分明显较低, 为 650~700 °C。但另一部分则相对较高(图 11b, c)。不过, 湘东北燕山期的花岗岩大多为 S 型花岗岩, 与连云山二云母二长花岗岩一样, 大多具有较多的继承锆石(图 4)。继承锆石会使得花岗岩中的 Zr 含量升高, 因此锆石饱和温度会大于源区的实际温度^[91]。由此可知, 平俯冲的太平洋板块在中侏罗世—早白垩世崩塌, 破裂和下沉俯冲板片和岩石圈脱水, 使得加厚的下地壳发生部分熔融, 形成低温、高压、氧逸度和湿度略有变化的岩浆源区(图 12a)。

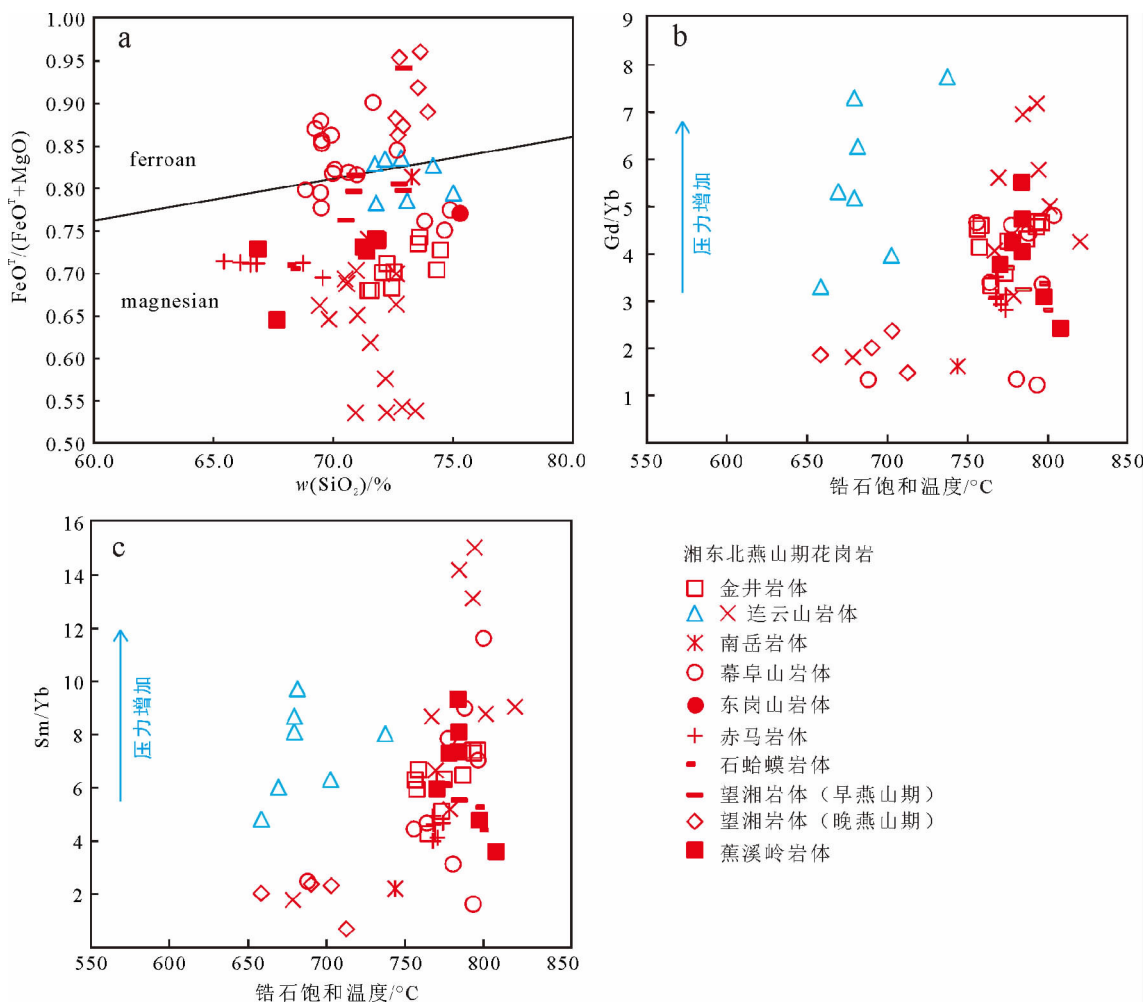


圆圈代表本文中的样品数据, 三角形代表的二云母二长花岗岩数据来自文献^[44]。

图 10 连云山二云母二长花岗岩 Sr/Y-Y(a) 和 (La/Yb)_N-Yb_N(b) 图解

(底图据文献^[86])

Fig. 10 Diagrams of Sr/Y vs. Y(a) and (La/Yb)_N vs. Yb_N(b) of the Lianyungshan two-mica monzogranites



a—花岗岩 ferroan-magnesian 分类图解(据文献[79]); b—Gd/Yb 和锆石饱和温度投图; c—Sm/Yb 和锆石饱和温度投图。其中蓝色符号代表的是本文的数据。连云港岩体数据来源于文献[44]; 金井岩体的数据来源于文献[35]; 南岳岩体和东岗山岩体数据来源于文献[87]; 幕阜山岩体数据来源于文献[87-88]; 赤马岩体和石蛤蟆岩体数据来源于文献[89]; 望湘岩体数据来源于文献[88,90]; 蕉溪岭岩体数据来源于文献[88]。

图 11 湘东北燕山期花岗岩全岩地球化学数据投图

Fig. 11 Whole rock geochemical data plot for the Yanshanian granite in Northeast Hunan Province

湘东北地区还发育了一系列晚中生代的基性岩。这些基性岩规模较小, 主要为玄武岩、辉绿岩脉和煌斑岩^[92-96]。前人研究表明, 湘东北地区晚中生代具有两期基性岩浆活动, 第一期基性岩浆活动约为 136 Ma, 以蕉溪岭煌斑岩脉为代表; 第二期基性岩浆岩年龄为 83~93 Ma。大部分晚中生代的基性岩具有 OIB 的地球化学特征, 为软流圈物质上涌, 混染地壳物质的结果^[92-94]。西楼细碧质玄武岩具有与软流圈地幔不同的 Nd 同位素成分($\epsilon_{Nd}(t) = -1.29 \sim -0.66$), 为岩石圈地幔低程度熔融的产物^[96]。基性岩浆活动表明, 湘东北地区在晚中生代时期, 大陆地壳减薄, 软流圈物质上涌, 岩石圈地幔发生部分熔融(图 12)。

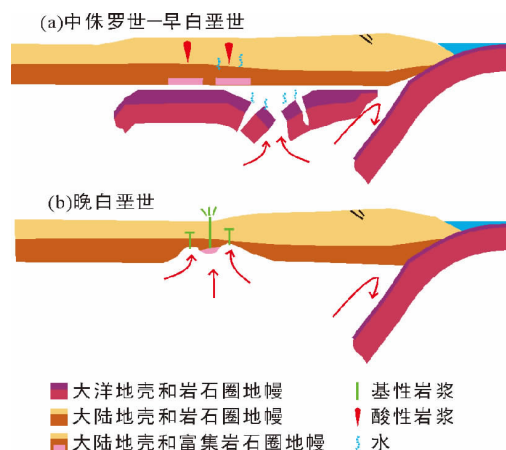


图 12 湘东北晚中生代构造演化模式图 (据文献[9,21]修改)

Fig. 12 Schematic illustration of the tectonic evolution model of Northeastern Hunan Province during Late Mesozoic

5.3 成矿学意义

湘东北地区位于著名的钦杭成矿带北西侧, 矿产资源丰富。该区的矿产以金为主, 还有铜、钴、铅、锌、铍、铌和钽等多金属矿产(图 1)。如图 13 所示, 在连云山二云母二长花岗岩的东北部, 湘东北地区的多金属矿产的分布具有明显的分带性^[44]。该区的矿产主要分布在长沙—平江断裂的附近, 成矿温

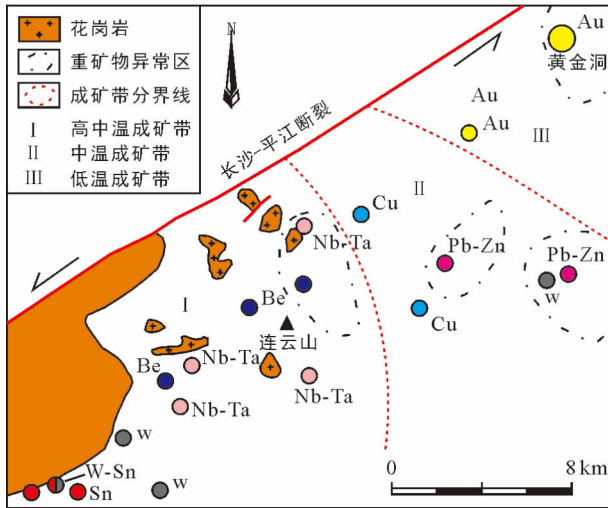


图 13 连云山二云母二长花岗岩东北部矿产分布示意图 (据文献^[44]修改)

Fig. 13 Sketch map showing the zoned poly-metallic mineralization to the northeast of the Lianyungshan two-mica monzogranites

度随着与连云山二云母二长花岗岩距离增加而降低。前人研究表明, 黄金洞金矿的成矿时代为(152±13) Ma, 与连云山二云母二长花岗岩((145±1) Ma, 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄)同期^[39]。金矿的成矿物质来源和成矿流体的来源主要来自于地层和深部, 长沙—平江断裂是导矿构造, 同期的岩浆岩为成矿流体的运移提供了能量^[38-39, 97-101]。井冲铜钴矿分布于连云山二云母二长花岗岩的外接触带, 赋存于构造热液蚀变带内, 该构造热液蚀变带与连云山二云母二长花岗岩有着密切的关系。其成矿时间与连云山岩体一致, 铜钴矿床的成矿物质主要来源于深部含矿岩浆。它们沿长平断裂带大规模侵入, 岩浆本身既带来部分成矿物质, 又提供动力和热能, 促使成矿元素的活化迁移和富集^[40, 43]。

由此可知, 连云山二云母二长花岗岩与其附近的多金属矿产的形成有关。150 Ma 左右, 太平洋板块回撤, 俯冲板片破裂和坍塌, 湘东北地区总体上处于挤压向伸展转换的构造环境之中, 但是其地壳仍处于加厚的状态之下。岩石圈地幔和下沉的俯冲板片脱水, 使得加厚的下地壳发生减压熔融, 形成具有埃达克岩特性的强过铝质岩浆源区。部分熔融形成的岩浆上涌, 同时驱动了深部的富金的成矿流体向上运移。含金流体在运移过程中, 不断萃取地层中

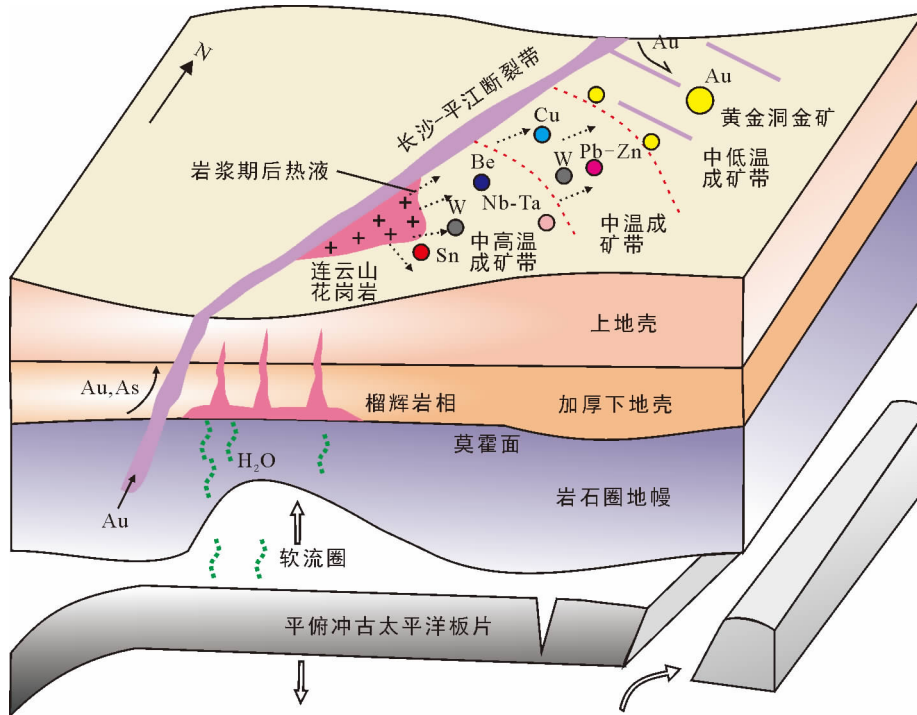


图 14 连云山二云母二长花岗岩形成的构造环境及其成矿作用示意图

Fig. 14 Schematic illustration of the tectonic setting and mineralization of the Lianyungshan two-mica monzogranites

的金和砷等元素,并在浅部北西西向次级断裂与北东向断裂交汇的部位富集、沉淀和成矿。岩浆在上升到一定的高度之后冷却,形成连云港二云母二长花岗岩,围岩与岩浆岩接触的部位发生混合岩化。富铜、钴、铅和锌等元素的岩浆期后流体,则在岩浆冷凝之后向围岩扩散,形成带状分布的多金属矿产(图 14)。

6 结论

(1)具有埃达克亲和性的连云港二云母二长花岗岩是加厚贫黏土下地壳物质部分熔融的产物,其源区具有一致且较低的温度和较高的压力,为高压低温型 SP 花岗岩。按照化学组成、湿度和氧逸度,可以将源区分为两组,一组为相对还原、干燥、贫泥质、富斜长石粗粒碎屑岩源区,另一组为相对氧化、富水和贫斜长石的富泥质源区。

(2)湘东北晚中生代岩浆活动与古太平洋板块的俯冲作用有关。中侏罗世—早白垩世,俯冲的古太平洋板块崩塌,破裂和下沉的俯冲板片和岩石圈脱水,使得加厚的下地壳发生部分熔融,形成低温、高压和氧逸度略有变化的燕山期花岗岩。晚白垩世,软流圈上涌,使得湘东北地区地壳减薄,形成少量的基性岩浆活动。

(3)连云港二云母二长花岗岩与湘东北地区燕山期的金及金多金属矿产密切相关。连云港二云母二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(145±1) Ma,与该区主要的成矿时间一致。上涌的岩浆为金矿的成矿物质和成矿流体的运移提供能量。岩浆的期后热液向围岩扩散,形成湘东北地区围绕连云港二云母二长花岗岩呈带状分布的多金属矿产。

感谢广州地球化学研究所马金龙老师和张乐老师进行的 Sr-Nd 同位素实验,以及李聪颖老师对锆石 LA-ICP-MS 定年实验的大力支持;两位匿名评审者提出的建议和意见促进了本文质量的提高,作者表示致谢!

参考文献

- [1] PIRAJNO F, BAGAS L. Gold and silver metallogeny of the South China Fold Belt: a consequence of multiple mineralizing events? [J]. *Ore Geology Reviews*, 2002, 20(3): 109-126.
- [2] MAO J W, TAKAHASHI Y, KEE W, et al. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: a case study of the Guikeng Pluton [J]. *Lithos*, 2011, 127(3): 535-551.
- [3] 王强, 赵振华, 简平, 等. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 315-324.
- [4] SHUO G, ZHU Y, QU H, et al. Geological characteristics and ore-forming time of the Dexing porphyry copper ore mine in Jiangxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86(3): 691-699.
- [5] ZHOU X, SUN T, SHEN W, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [6] ZHU K Y. Petrogenesis and tectonic setting of Mesozoic granitic rocks in Eastern South China [D]. Perth: Curtin University, 2014: 1-246.
- [7] 崔盛芹, 李锦蓉. 试论中国滨太平洋带的印支运动 [J]. *地质学报*, 1983(1): 51-62.
- [8] LI X H, LI Z X, LI W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from Central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 186-204.
- [9] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model [J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [10] CHEN C H, LEE C Y, SHINJO R. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts [J]. *Lithos*, 2008, 106(1): 83-92.
- [11] CHU Y, LIN W, FAURE M, et al. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, Central South China: implications from U-Pb age and Lu-Hf determinations of granites [J]. *Lithos*, 2012, 150: 243-255.
- [12] LI X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 293-305.
- [13] HSU K J, SHU L, JI L, et al. Mesozoic overthrust tectonics in South China [J]. *Geology*, 1988, 16(5): 418-421.
- [14] XIAO W, HE H. Early Mesozoic thrust tectonics of the Northwest Zhejiang Region (Southeast China) [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(7): 945-961.
- [15] ZHOU X, LI W. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3): 269-287.
- [16] JIANG Y J, JIANG S Y, DAI B, et al. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, Southeast China: implications for a continental arc to rifting [J]. *Lithos*, 2009, 107(3): 185-204.

- [17] JIANG Y J, ZHAO P, ZHOU Q, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China[J]. *Lithos*, 2011, 121(1): 55-73.
- [18] SUN W D, YANG X Y, FAN W M, et al. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: preface [J]. *Lithos*, 2012, 150: 1-5.
- [19] YANG S, JIANG S Y, ZHAO K D, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China [J]. *Lithos*, 2012, 150: 155-170.
- [20] LI J, ZHANG Y, DONG S, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 134: 98-136.
- [21] ZHU K Y, LI Z X, XU X S, et al. A Mesozoic Andean-type orogenic cycle in Southeastern China as recorded by granitoid evolution[J]. *American Journal of Science*, 2014, 314(1): 187-234.
- [22] 贺转利, 许德如, 陈广浩, 等. 湘东北燕山期陆内碰撞造山带金多金属成矿地球化学[J]. *矿床地质*, 2004, 23(1): 39-51.
- [23] WANG Q, XU J F, JIAN P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(1): 119-144.
- [24] WANG Y, FAN W, SUN M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: a case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 2007, 96(3): 475-502.
- [25] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 636-658.
- [26] 周永章, 曾长育, 李红中, 等. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向[J]. *地质通报*, 2012, 31(2): 486-491.
- [27] 周永章, 郑义, 曾长育, 等. 关于钦-杭成矿带的若干认识 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(2): 1-6.
- [28] YAO J L, SHU L S, SANTOSH M. Neoproterozoic arc-trench system and breakup of the South China Craton: constraints from N-MORB type and arc-related mafic rocks, and anorogenic granite in the Jiangnan orogenic belt[J]. *Precambrian Research*, 2014, 247: 187-207.
- [29] ZHENG Y, ZHOU Y Z, WANG Y, et al. A fluid inclusion study of the Hetai goldfield in the Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 73: 346-353.
- [30] 曾长育, 周永章, 郑义, 等. 钦-杭结合带在中生代构造转折事件以前的板块构造机制[J]. *地学前缘*, 2015, 22(2): 54-63.
- [31] 李红中, 周永章, 杨志军, 等. 钦-杭结合带硅质岩的分布特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2015, 22(2): 108-117.
- [32] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-841.
- [33] 广西地质矿产局. 广西区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-830.
- [34] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-722.
- [35] 李鹏春, 许德如, 陈广浩, 等. 湘东北金井地区花岗岩成因及地球动力学暗示: 岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 921-934.
- [36] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 等. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束: 湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 1-13.
- [37] 毛景文, 李延河, 李红艳, 等. 湖南万古金矿床地幔流体成矿的氦同位素证据[J]. *地质论评*, 1997, 43(6): 646-649.
- [38] MAO J W, KERRICH R, LI H, et al. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan Province, China: implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone[J]. *Geochemical Journal Japan*, 2002, 36(3): 197-208.
- [39] 许德如, 马驰, 陈广浩, 等. 湘东地区金矿床矿化年龄的测定及同位素地球化学示踪[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 616-623.
- [40] 易祖水, 罗小亚, 周东红, 等. 浏阳市井冲钴铜多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. *华南地质与矿产*, 2010(3): 12-18.
- [41] 湖南地质研究所. 湖南花岗岩单元一超单元划分及其成矿专属性[J]. *湖南地质*, 1995(8): 1-59.
- [42] 刘姝群, 张录秀, 金维群, 等. 湘东北燕山期花岗岩[J]. *华南地质与矿产*, 1999(4): 1-9.
- [43] 金维群, 刘姝群, 张录秀, 等. 湘东北铜多金属矿床控岩控矿构造研究[J]. *华南地质与矿产*, 2000(2): 51-57.
- [44] 许德如, 王力, 李鹏春, 等. 湘东北地区连云山花岗岩的成因及地球动力学暗示[J]. *岩石学报*, 2009, 25(5): 1056-1078.
- [45] SHU L, CHARVET J. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang-Shexian ductile shear zone: with HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan Region, South China)[J]. *Tectonophysics*, 1996, 267(1): 291-302.
- [46] LI X, ZHAO J, MCULLOCH M T, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from Southeastern China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 1997, 81(1): 129-144.
- [47] LI X H, LI W X, LI Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174(1): 117-128.

- [48] LIU S, YANG P, WANG Z, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb ages and geochemistry of Neoproterozoic low-grade metavolcanic rocks in Wuyuan-Dexing area of northeastern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 581-593.
- [49] LI Z X, ZHANG L, POWELL C M. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23(5): 407-410.
- [50] LI Z X, BOGDANOVA S, COLLINS A, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1): 179-210.
- [51] SHU L S, FAURE M, YU J H, et al. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): new evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2011, 187(3): 263-276.
- [52] WANG Y, ZHANG F, FAN W, et al. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: resolving intra-continental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. *Tectonics*, 2010, 29(6): 1-16.
- [53] LI Z X. Tectonic history of the major East Asian lithospheric blocks since the mid-Proterozoic: a synthesis[J]. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, 1998: 221-243.
- [54] 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. *地学前缘*, 2004, 10(3): 159-169.
- [55] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J]. *科学通报*, 2005, 50(12): 1259-1266.
- [56] YU J H, O'REILLY S, ZHAO L, et al. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: a geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic study[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 90(3): 271-300.
- [57] XIANG H, ZHANG L, ZHOU H, et al. U-Pb zircon geochronology and Hf isotope study of metamorphosed basic-ultrabasic rocks from metamorphic basement in Southwestern Zhejiang: the response of the Cathaysia Block to Indosinian orogenic event[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 788-800.
- [58] MAO J W, TAKAHASHI Y, KEE W S, et al. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: a case study of the Guikeng pluton[J]. *Lithos*, 2011, 127(3): 535-551.
- [59] WANG K X, CHEN P R, CHEN W F, et al. Magma mingling and chemical diffusion in the Taojiang granitoids in the Hunan Province, China: evidences from petrography, geochronology and geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2012, 106(3): 243-264.
- [60] ZHU K Y, LI Z X, XU X S, et al. Late Triassic melting of a thickened crust in Southeastern China: evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 265-279.
- [61] ZHOU T, GOLDFARB R J, PHILLIPS N G. Tectonics and distribution of gold deposits in China: an overview[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3): 249-282.
- [62] 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 305-314.
- [63] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553-1582.
- [64] DENG T, XU D R, CHEN G W, et al. Analysis of the geodynamic mechanism of the large-scale gold mineralization in Northeastern Hunan Province [J]. *Acta Geologica Sinica* 2014, 88(Suppl 2): 1600-1601.
- [65] XU D R, GU X, LI P, et al. Mesoproterozoic-Neoproterozoic transition: geochemistry, provenance and tectonic setting of clastic sedimentary rocks on the SE margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(5): 637-650.
- [66] 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2011, 30(7): 1001-1008.
- [67] 肖拥军, 陈广浩. 湘东北大洞—万古地区金矿构造矿定定位机制的初步研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(1): 38-44.
- [68] 符巩固, 许德如, 陈广浩, 等. 湘东北地区金成矿地质特征及找矿新进展[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(4): 416-422.
- [69] 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等. 液体和固体样品的 Sr 同位素组成[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 295-299.
- [70] LI X H, LIU D, SUN M, et al. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China[J]. *Geological Magazine*, 2004, 141(2): 225-231.
- [71] YUAN C, ZHOU M F, SUN M, et al. Triassic granitoids in the Eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(3): 481-492.
- [72] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 等. RESolution 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J]. *地球化学*, 2011, 40(1): 83-98.
- [73] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [74] IRVINE T, BARAGAR W. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- [75] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [76] MORRISON G W. Characteristics and tectonic setting of the

- shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 1980, 13(1): 97-108.
- [77] SUN S S, MCDONOUGH W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [78] 彭和求, 贾宝华, 唐晓珊. 湘东北望湘岩体的热年代学与阜山隆升[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(1): 11-15.
- [79] 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 等. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约[J]. *岩石学报*, 1993, 9(2): 115-124.
- [80] CHAPPEL B A, WHITE. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1992, 272: 1-26.
- [81] SYLVESTER P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29-44.
- [82] BEA F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: implications for the chemistry of crustal melts[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(3): 521-552.
- [83] MONTEL J M. A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas[J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1): 127-146.
- [84] HANCHAR J M, WATSON E B. Zircon saturation thermometry[J]. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 2003, 53(1): 89-112.
- [85] BOEHNKE P, WATSON E B, HATSON D, et al. Zircon saturation re-visited[J]. *Chemical Geology*, 2013, 351: 324-334.
- [86] DEFANT M, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [87] 贾大成, 胡瑞忠. 湘东北燕山晚期花岗岩构造环境判别[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 10-14.
- [88] 李鹏春. 湘东北地区中生宙花岗岩岩浆作用及其演化规律 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006: 1-123.
- [89] 彭头平, 席先武, 王岳军, 等. 湘东北早中生代花岗闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(3): 287-296.
- [90] 贾大成, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 湘东北中生代望湘花岗岩体岩石地球化学特征及其构造环境[J]. *地质学报*, 2003, 77(1): 98-103.
- [91] MILLER C F, MCDOWELL S M, MAPES R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529-532.
- [92] 贾大成, 胡瑞忠. 湘东北中生代基性岩脉岩石地球化学特征 [J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3): 37-41.
- [93] 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱, 等. 湘东北蕉溪岭富钠煌斑岩地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 459-467.
- [94] 贾大成, 胡瑞忠, 谢桂青. 湘东北中生代基性岩脉岩石地球化学及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2): 179-184.
- [95] WANG Y, FAN W, GUO F, et al. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu Fault, South China: implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *International Geology Review*, 2003, 45(3): 263-286.
- [96] 许德如, 贺转利, 李鹏春, 等. 湘东北地区晚燕山期细碧质玄武岩的发现及地质意义[J]. *地质科学*, 2006, 41(2): 311-332.
- [97] 罗献林. 论湖南前寒武系金矿床的成矿物质来源[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1990, 10(1): 13-25.
- [98] 刘亮明, 彭省临, 吴延之. 湘东北地区脉型金矿床成矿构造特征及构造成矿机制[J]. *大地构造与成矿学*, 1997, 21(3): 197-204.
- [99] 毛景文, 李红艳, 王登红, 等. 华南地区中生代多金属矿床形成与地幔柱关系[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1998, 17(2): 63-65.
- [100] 韩凤彬, 常亮, 蔡明海, 等. 湘东北地区金矿成矿时代研究 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(3): 563-571.
- [101] 李杰, 陈必河, 安江华, 等. 湖南黄金洞金矿成矿流体包裹体特征[J]. *湖南黄金洞金矿成矿流体包裹体特征*, 2011, 27(2): 163-168.