

文章编号: 1000-4734(2017)06-0791-10

华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用 研究进展与展望

阳杰华¹, 刘亮^{1*}, 刘佳²

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081; 2. 金杏矿业有限责任公司, 湖南邵阳 422000)

摘要: 华南广泛发育中生代花岗质岩石, 其形成伴随了巨量金属钨锡钼铋和铜铅锌等的成矿作用, 构成了一个世界罕见的大花岗岩省成岩成矿区。近年来, 高精度同位素定年已基本明确该区成岩成矿作用的时空分布格局, 侏罗纪花岗岩及相关的成矿作用高度集中, 成矿作用集中在 150~160 Ma 之间, 峰值为 156 Ma, 与成矿有关的花岗质岩石形成时代为 152~165 Ma 之间, 峰值为 159 Ma。随着近年来矿物原位微区测试技术的高速发展, 研究者获得了更多的岩浆演化信息, 并探讨岩浆演化过程中成矿元素迁移和富集的控制因素, 揭示出与不同类型金属成矿作用有关的花岗质岩浆的物理化学条件存在明显差别。同时, 学者们高度重视壳-幔相互作用与华南大花岗岩省成岩成矿作用的关联, 提出幔源组分通过不同方式参与中生代花岗岩的形成。笔者在论述这些研究进展的基础上, 提出华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用需要进一步研究的一些科学问题。

关键词: 中生代花岗岩; 成岩成矿作用; 华南地区; 进展及展望

中图分类号: P595; P611

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2017.06.014

作者简介: 阳杰华, 男, 副研究员, 博士, 主要从事花岗岩质岩石成因及其相关的成矿作用方面研究. E-mail: yangjiehua@vip.gyig.ac.cn

Current Progresses and Prospect for Genesis of Extensive Mesozoic Granitoid and Granitoid-Related Multi-Metal Mineralization in Southern China

YANG Jie-hua¹, LIU Liang^{1*}, LIU Jia²

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Jinxing Mining Corporation, Shaoyang 422000, China)

Abstract: Geology of Southern China is characterized by widespread development of Mesozoic granitoids, and a large number of granitoid-related multi-metal ore deposits (e.g., W, Sn, Mo, Bi, Cu, Pb and Zn) are intensively distributed in this region, constituting one of the world's Large Granitic Magmatism and Mineralization Province (LGMMP). Over the past decade, intensive scientific research has identified the precision age framework for magmatic activity and metallogenic event. These data have confirmed that Jurassic granitoids were mainly formed during 152–165 Ma with peaks at ca.159 Ma, whereas their associated ore deposits were mainly formed during 150–160 Ma, with a peak of ca.156 Ma. For an individual mining district, granitoid emplacement and related hydrothermal mineralization are basically penecontemporaneous. Meanwhile, with the rapid development of technology for *in situ* analysis of mineral, researchers have acquired a good deal of information from the magmatic evolution processes of Mesozoic granitoids, and revealed huge differences in physicochemical conditions for granitic magma among different kinds of metal mineralization. Also, dominant controlling factors for migration and enrichment of ore-forming elements during the

收稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家重点研发计划深地专项 (2016YFC0600405); 国家自然科学基金项目 (批准号: 41673054; 41303030; 41602060)

* 通讯作者, E-mail: liuliang@vip.gyig.ac.cn

magmatic evolution have attracted much attention for researchers. In addition, researchers have attached importance to the relationship between crust-mantle interaction and petrogenesis of granitoids, rose that mantle-derived materials can participate in their magmatic evolution in different ways, and finally, discussed the relevance between the LGMMP and crust-mantle interaction. Based on these studies, we present some scientific questions that require further study on LGMMP of Southern China.

Keywords: Mesozoic granitoids; granitoid-related mineralization; South China; Progresses and prospects

花岗岩是大陆地壳的主要组成部分，记录着陆壳形成与演化，壳-幔相互作用与岩石圈演化的丰富信息，是了解大陆深部动力学背景的探针。同时，众多大型-超大型金属矿床的形成与花岗岩在时空上和成因上密切相关。因此，花岗岩研究不但关系到陆壳乃至整个固体地球形成演化等重大基础理论问题，还关系到与花岗岩有关的各种矿产资源的寻找与开发问题，因而有关花岗岩成岩成矿作用的研究经久不衰。

华南地区是全球罕见的大花岗岩省分布区域，出露有不同时代花岗岩，其中尤以中生代花岗岩最为发育，出露面积达 135000 km²^[1]，占全区中生代岩浆岩总面积的 62%。在这些花岗岩的内外接触带密集分布一系列大型-超大型金属矿床（图 1），诸

多研究已认识到这些金属矿床的形成与花岗岩在时间上、空间上和成因上具有密切联系^[2-3]。因此，该区中生代花岗岩的成岩及其成矿作用一直是近些年来研究的热点。本文结合国内外近些年来花岗岩研究进展，综述了我国华南地区花岗岩成因研究及相关成矿作用的重要研究成果，并提出一些未来亟待解决的科学问题。

1 华南中生代花岗岩成因研究

近年来，分析测试方法和技术的飞速发展，获取了一大批高准确度、高精度的岩石化学、矿物化学及同位素数据，这为花岗岩成因研究提供了重要基础，使人们对花岗岩的起源、演化及其与成矿关系方面的认知更为深刻，主要体现在如下几个方面。

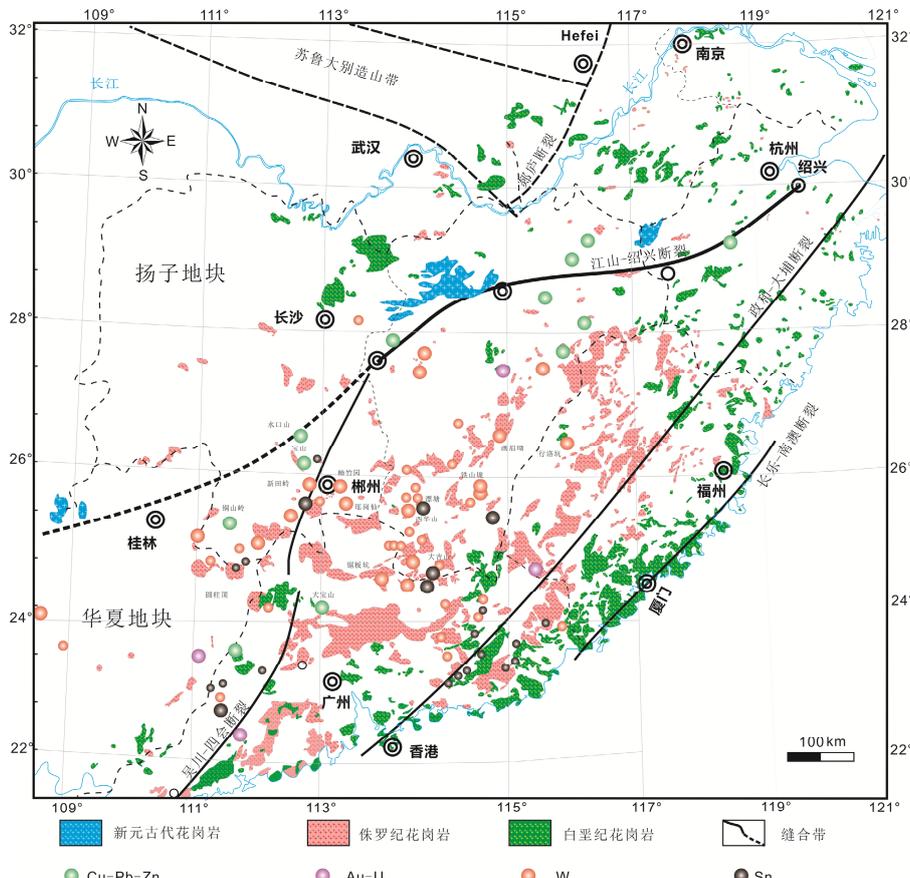


图 1 华南中生代花岗岩及金属矿床分布简图（据文献^[1,4]修改）

Fig. 1. Simplified map for distribution of Mesozoic granitoids and polymetallic ore deposits in Southern China.

1.1 高精度定年技术发展, 明确了花岗岩的时空分布格局

近年来, 人们除了利用高精度锆石 U-Pb 同位素定年方法以外, 还开发了楣石、磷灰石、金红石、独居石和磷钇矿等 U-Pb 同位素定年方法, 对华南地区不同时代不同类型花岗质岩石的侵位时间进行了大量的研究, 积累了大批高精度的测年数据, 并获得许多新的认识^[3,5]。笔者通过统计发现我国华南中生代花岗岩形成时间主要集中在晚三叠世(210~230 Ma)、中晚侏罗世(150~170 Ma)和早中白垩世(80~137 Ma) 3个阶段(图 2a), 其中晚三叠世花岗岩出露面积较小, 主要分布在华南内陆和武夷-云开山脉, 中晚侏罗世花岗岩主要分布在南岭地区和钦杭结合带中西段, 在南岭地区这些花岗岩呈 E-W 向分布于 3 个带, 北部骑田岭-九峰花岗岩带, 中部大东山-贵东花岗岩带, 南部佛冈-新丰江花岗岩带, 早中白垩世花岗岩则主要分布在东南沿海和长江中下游地区, 这些研究资料基本明确了我国华南中生代花岗岩的时间和空间分布规律。

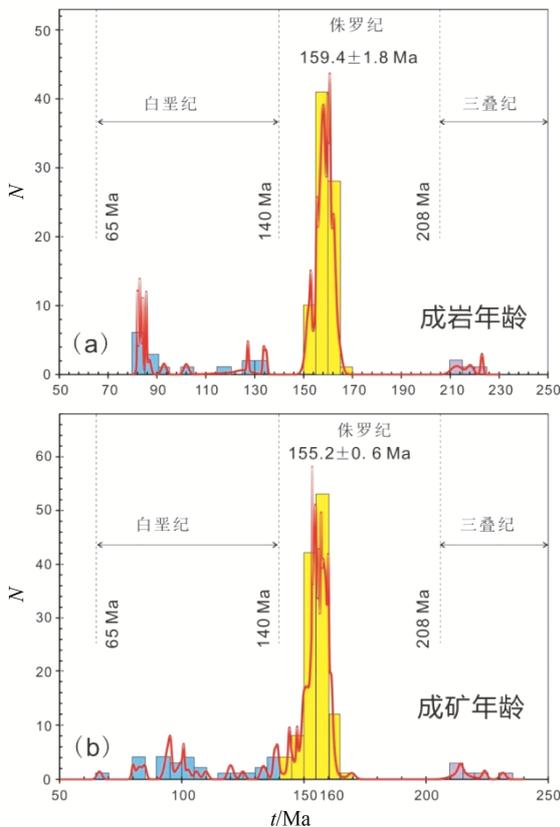


图 2 华南中生代花岗质岩石成岩时限 (a) 和相关金属矿床成矿时限 (b) (年龄数据引自文献^[2,6-16])
Fig. 2. Ages of Mesozoic granitoids (a) and related polymetallic ore deposits (b) in Southern China.

1.2 矿物原位微区分析技术为研究花岗岩成因注入新的活力

近年来, 矿物微区原位分析方法 (LA-ICP-MS 矿物原位微量元素分析, 锆石 Lu-Hf 和 O 同位素联合示踪等) 在花岗岩研究中得以广泛应用, 为揭示岩浆来源、岩浆演化过程和熔体/流体相互作用等方面提供了新的有效约束, 获得了许多重要认识^[17-18]。

1.2.1 提出了花岗质岩浆来源的多元性

早期传统的全岩元素及同位素分析结果, 通常只记录着岩石最终的平均成分, 难以对岩浆端元性质与演化过程进行有效制约。比如岩浆混合过程中不同端元的地球化学组成可能会均一化^[19]。而副矿物的原位同位素分析 (如锆石 Lu-Hf 和 O 同位素、石榴子石 O 同位素) 为鉴别出不同性质岩浆参与花岗岩的形成提供新的约束^[20], 且是研究花岗岩成因、地壳增生演化等极为有效的新方法^[21]。例如, Griffin 等(2002)^[22]对花岗岩及其镁铁质包体(MME)中锆石进行了原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析, 结合全岩地球化学资料, 提出花岗岩岩浆源区的多元性 (亏损地幔、富集地幔和下地壳物质) 和岩浆混合成因机制。Cheng 等(2014)^[23]通过对南岭龙岔河花岗岩和镁铁质包体及伴生贾沙辉长岩的系统锆石 Hf 同位素分析, 提出龙岔河花岗岩形成于壳源岩浆 (过铝质淡色花岗岩部分熔融) 与幔源岩浆 (类似与贾沙辉长岩同源) 的混合作用; 混合过程可分两个阶段, 早期在相对高温或地壳深部的条件下, 发生岩浆的机械混合作用, 晚期则以元素扩散化学混合为主。

1.2.2 精细刻画了花岗岩的岩浆演化过程

岩浆演化过程不仅与自身结晶作用有关, 还受其它成分混入的影响, 如何精细刻画岩浆过程一直是许多研究者研究的问题^[24]。比如岩浆混合过程中, 由于不同熔体之间的物理和化学相互作用, 会导致不平衡的结晶条件, 从而影响矿物晶体的成核和生长, 形成一些不平衡的复杂矿物内部结构或环带。近十年来, 学者们利用 LA-ICP-MS 矿物微区原位微量元素分析技术, 通过华南花岗岩包体中的副矿物或主要矿物的不平衡矿物结构 (如环斑结构长石和针状磷灰石等) 开展进一步的深入研究, 发现华南中生代一些花岗岩浆在形成和侵位过程中可能具有不同性质的岩浆混入, 从而导致部分矿物存在明显的同位素和元素不平衡现象^[3,22]。同时, 一些研究者针对花岗岩中主要矿物和副矿物进行了详

细研究并揭示了花岗岩的成岩过程^[25]。例如, Xie 等(2010)^[26]通过对骑田岭花岗岩中榍石进行了详细微区形貌和成分研究, 区分出三种不同类型的榍石, 认为这些榍石有效记录了岩浆、岩浆-热液过渡和热液三个不同演化阶段的信息。因此, 矿物原位微区分析技术的广泛应用, 为精细刻画华南中生代花岗岩的岩浆演化过程提供了许多成功的范例。

1.2.3 进一步限定了花岗岩的成岩条件

温度和压力是花岗岩原始岩浆形成过程中的两个重要条件^[27], 氧逸度及挥发性组分对花岗岩成因也具有重要的制约作用^[28-29]。近年来, 学者们对花岗岩中主要矿物(黑云母、角闪石及辉石等)或副矿物开展了矿物电子探针成分分析或者原位微量元素分析, 进一步约束了华南中生代花岗质岩浆演化过程的温度、压力、氧逸度及挥发性组分等变化情况^[30-31]。Zhang 等(2017)^[30]通过对德兴斑岩中继承锆石和岩浆锆石氧逸度的对比研究, 发现德兴斑岩岩浆具有高氧逸度特征, 而继承锆石具有低的氧逸度, 据此他们认为德兴斑岩的形成并不是继承新元古代源区特征。Li 等(2017)^[31]通过对比与不同金属矿床有关的花岗岩的氧逸度, 认为与 Cu(Au)-Mo、Cu-Pb-Zn、W、Sn 和 W-Sn 等不同成矿作用有关的花岗岩的氧逸度明显不同, 与 Cu(Au)-Mo 成矿有关的花岗质岩浆氧逸度最高, 其次是 Cu-Pb-Zn 成矿有关的花岗岩, 最低的是 Sn 成矿有关的花岗岩。

1.3 花岗岩成因与壳幔相互作用的联系得到高度关注

花岗岩作为大陆地壳的主要组成者, 其成因一方面与变质基底的性质和组成密切相关, 另一方面则受到来自地幔的物质与能量传输的影响。近年来, 幔源组分在花岗岩成岩过程中的重要性和普遍性已日益为人们所重视^[17]。一般认为 I 型花岗岩可以是壳幔混源岩浆作用的产物, 甚至少量 S 型花岗岩的成岩过程中也具有幔源组分的参与^[32]。针对华南中生代花岗岩而言, 诸多学者认为地幔能量对华南晚三叠世花岗岩的形成产生重大的影响, 且地幔物质对华南侏罗纪—白垩纪花岗岩的形成发挥了至关重要的作用^[33]。总体而言, 强调壳-幔作用的相互关系, 是近年来华南中生代花岗岩研究的一个重要进展, 同时也有学者提出了一些不同的看法。

1.3.1 提出幔源组分参与花岗岩成岩过程不同机制

人们普遍认为幔源岩浆活动提供的热, 是导致地壳物质重熔形成花岗岩的重要因素。对幔源岩浆参与花岗岩形成的机制, 则存在两种不同认识。一部分学者主张, 底侵的幔源岩浆先形成初生地壳, 而后再经部分熔融, 即幔源组分通过两阶段方式参与花岗岩的形成^[34]。另一些学者主张, 幔源组分主要通过与其诱发熔融产生的壳源岩浆发生岩浆混合作用方式直接参与花岗岩的形成^[17,22]。就华南地区中生代花岗岩而言, 大部分研究者认为许多晚中生代花岗岩的形成都有幔源物质的直接参与^[23]。

1.3.2 开展花岗岩及其伴生镁铁质岩石的联合研究

众多学者普遍认识到, 有效鉴别幔源组参与花岗质岩浆的形成, 应该开展花岗岩伴生的镁铁质岩石的研究, 比如花岗岩本身所携带的暗色微粒包体, 以及与花岗岩相伴生的基性岩(脉)。暗色微粒包体常携带着地球深部动力学过程的丰富信息, 是探索岩浆作用的深部过程以及了解寄主花岗岩浆起源、定位机制与成因演化的理想研究对象。基性岩脉作为幔源岩浆浅成侵位的产物, 常出于大陆伸展的构造背景, 其地球化学特征能为地幔源区的物质组成和深部过程提供重要制约。此外, 由辉长岩-花岗岩构成的杂岩体, 同样蕴含了其地球深部物质组成及深部岩浆作用机制的丰富信息, 且具有较为明确的构造指示意义。近年来, 人们对全球不同地区的花岗岩、其中暗色微粒包体及伴生的基性岩或基性岩脉, 开展了大量研究, 在探讨花岗岩成因和判别与其岩浆活动密切相关的地幔源区的确切性质等方面, 取得了许多成功的范例^[18,23]。

2 华南中生代花岗岩成矿作用

2.1 花岗岩成矿专属性及成矿时限

由于与不同类型金属成矿作用有关的花岗质岩石往往存在着较大差异, 因此花岗岩的成矿专属性一直以来都受到人们的高度重视^[35]。如 Ishihara 等(1979)^[36]提出 Cu-Pb-Zn-Mo 多金属成矿作用主要与磁铁矿系列的花岗岩有关, 而 W-Sn 矿化作用与钛铁矿系列花岗岩有关; Černý 等(2005)^[37]认为 Cu-Au 矿化作用主要与 M 型和 I 型花岗岩有关, 分异程度较低(Rb/Sr 比值小于 0.1), 而 W-Sn-Mo 和亲石稀有元素的矿化作用主要与高分异 I 型花岗岩

和 S 型花岗岩有关 (Rb/Sr 比值大于 1.0)。就华南中生代花岗岩的成矿作用, 徐克勤等 (1983) [38] 最早提出 Cu-Pb-Zn 多金属成矿作用与同熔型花岗岩有关, 而 W-Sn-U-Nb-Ta 等金属成矿作用与改造型花岗岩有关。最近一些学者提出华南地区一些 Cu-Au 矿床与高氧化的埃达克质花岗岩有关 [39]。这些研究一致表明, 成矿元素组合相似的矿床, 与其相关的花岗岩存在一些相似的地球化学特征, 这为找矿勘探工作提供了重要理论指导。然而, 最近一些研究发现, 一些 Cu-Pb-Zn 多金属矿床中同时存在 W 成矿作用, 如湖南铜山岭 Cu-Pb-Zn-W-Mo 多金属矿床和赣北朱溪、大湖塘 W-Cu 矿床。因此, 有关花岗岩的成矿专属性尚需开展进一步深入研究。

尽管花岗岩的成矿专属性还存在分歧, 但华南花岗岩成矿作用主要发生在中生代已经达成共识, 一些金属矿床存在明显时空分布规律, 并划分出不同的成矿带, 例如, 陈毓川等 (2012) [40] 划分出了长江中下游、江南隆起、赣东北 (钦杭带东段)、武夷-云开、南岭和东南沿海等 6 个成矿带。在成矿时间上, 近期发表了大量矿床中辉钼矿 Re-Os 和含钾矿物 Ar-Ar 等高精度同位素年龄数据, 笔者统计发现, 成矿作用大致发生在如下三个阶段 (图 2b): ①三叠纪 (210~230 Ma), 主要分布在南岭和武夷-云开成矿带, 形成有 W-Sn-Nb-Ta 等矿床, 如湘南荷花坪锡矿床的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 214.1 ± 1.9 Ma。②中晚侏罗世 (170~150 Ma), 发育于南岭地区及其邻区, 主要为钨锡多金属矿床和铜钼金铅锌多金属矿床。该阶段成矿主要集中在 150~160 Ma, 峰值为 156 Ma。如湖南水口山、铜山岭和宝山 Cu-Mo-Pb-Zn 多金属矿床的成矿年龄均约为 158 Ma [12,14-15,41]; 江西西华山钨矿和湖南瑶岗仙钨矿分别形成于 157.8 ± 0.9 Ma [42] 和 154.9 ± 2.6 Ma [9,43]; 南岭地区铜铅锌与钨锡成矿时间基本一致 (图 3)。华南只有少数铜金矿床形成于 170 Ma 左右, 如德兴斑岩铜矿 170.4 ± 1.8 Ma [44] 和大宝山铜铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为 164.7 ± 3 Ma [45]。③白垩纪 (76~140 Ma), 该阶段矿化在华南地区的分布特点是面积广泛, 矿床类型丰富, 呈不连续的矿集区出现。主要分布在以下区域: 滇东南-桂西钨锡成矿区, 成矿年龄比较集中, 为 76~89 Ma, 如个旧锡矿和都龙锡矿的形成年龄分别为 83.4 ± 2.1 Ma 和 82.0 ± 9.6 Ma [46]; 东南沿海的斑岩-浅成低温热液 Cu-Au-Ag 矿床和花岗岩有关的 W-Sn

成矿区, 成矿年龄主要集中在 90~110 Ma; 长江中下游成矿带, 成矿时代主要集中在 125~145 Ma, 与高钾钙碱性花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩型铜铁金钼多金属矿床形成于 135~145 Ma, 与富钠钙碱性花岗岩有关的磷灰石-磁铁矿矿床形成于 125~135 Ma。这两类矿床的成矿年龄分别与相关花岗岩的形成时间一致或稍晚于花岗岩的成岩年龄 [4]。一些研究者较详细地论述了上述不同成矿阶段的成矿背景与深部过程 [6,47]。

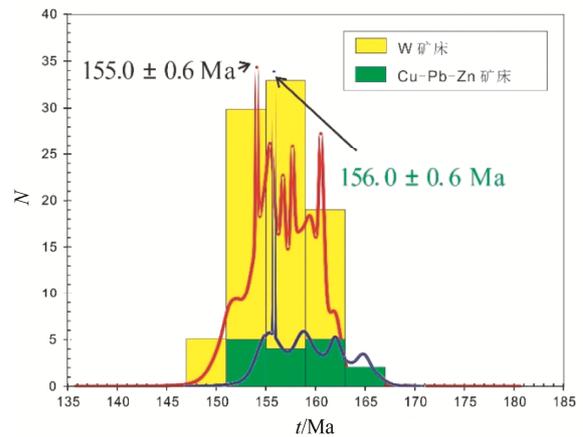


图 3 南岭地区 W-Sn 和 Cu-Pb-Zn 多金属成矿年龄频数分布图, 辉钼矿 Re-Os 和云母 Ar-Ar 同位素年龄数据来自文献 [9,12,14-15,41-43]

Fig. 3. Histograms of ages of W-Sn and Cu-Pb-Zn polymetallic deposits in Nanling Range.

2.2 岩浆演化过程中成矿元素迁移富集机理

长期以来, 许多研究者发现大量热液矿床在时间和空间上与花岗质侵入岩密切相关 [48-49], 探寻这些矿床与花岗质侵入岩之间的成因联系得到广泛关注 [48,50]。研究表明, 花岗岩源区含有大量成矿元素, 且这些元素随着岩浆的演化逐渐富集到残余熔体并最终选择进入岩浆流体相, 是花岗质岩浆形成热液矿床的重要前提 [51]。因此, 探寻岩浆演化过程中成矿元素迁移和富集的控制因素, 引起了研究者的高度重视。我国华南中生代花岗岩与成矿作用亦存在明显的时、空和成因联系, 许多研究者试图查明成矿元素在岩浆演化过程中如何发生迁移与分异。针对 W-Sn-Nb-Ta 和 Cu-Au-Pb-Zn 等成矿元素在岩浆演化过程中的迁移富集机理, 以往已取得一些重要研究成果, 初步揭示了岩浆演化过程中控制这些成矿元素地球化学行为的主要因素 [30,52]。

W-Sn-Nb-Ta 成矿作用方面: 由于成矿元素 W-Sn-Nb-Ta 都属于不相容元素, 在矿物-熔体的分

配系数小于 1.0。实验研究表明,随花岗质岩浆分异程度增高,岩浆中的非桥氧数(NBO)增加,Nb-Ta 在岩浆中的溶解度随之升高^[53],而 W 的溶解度则随着岩浆演化过程温度、压力、氧逸度和非桥氧数的变化而变化^[54],因而认为花岗质岩浆经历高分化的分异演化是导致 W-Sn-Nb-Ta 成矿的重要前提^[55]。针对我国南岭地区 W-Sn-Nb-Ta 成矿作用研究,一些研究者发现含 W、含 Sn 和含 Nb-Ta 花岗岩确实存在明显差别,含 Nb-Ta 花岗岩的分异程度显著高于含 W 花岗岩,含 Sn 花岗岩分异程度则较低^[56-57]。最近,一些研究者通过精细的矿物学研究发现,在与 W-Sn-Nb-Ta 成矿有关的高分异花岗岩中,一些矿物存在明显的交代作用和蚀变现象,并且在矿物不同结构位置一些元素表现出规律性的变化特征。例如,江西大余西华山和宜春雅山复式岩体,不同阶段花岗岩中黑云母的 Li、Rb、Cs、F、W、Nb、Ta 等元素的含量,随岩浆演化程度增加不断升高,但在云母的边部这些元素的含量明显降低^[52];随着岩浆演化程度的升高,锆石中的 Hf 含量不断增加,Zr/Hf 比值明显降低^[52]。这些研究一致认为,成矿元素 W-Sn-Nb-Ta 在花岗质岩浆中的地球化学行为,除了受岩浆结晶分异和岩浆性质影响以外,还与岩浆分异出的热液流体的性质和组成密切相关, Li、F 和 P 等挥发性组分对成矿也发挥了至关重要的作用,并据此初步建立了花岗岩岩浆-热液过渡态理论^[58]。

Cu-Au-Pb-Zn 成矿作用方面:对 Cu-Au-Pb-Zn 等元素在硅酸盐熔体、硫化物和镁铁质矿物中的分配行为,以往已开展大量实验研究。研究表明,除少量 Pb 和 Zn 分别进入黑云母和长石以外,大部分 Cu-Au-Pb-Zn 主要进入硫化物^[59]。而硫化物的结晶受氧逸度制约非常明显,如果岩浆氧逸度较低时,很容易形成硫化物并较早的结晶分异,导致残余熔体中成矿元素不能富集;如果岩浆具高氧逸度时,硫主要以氧化性硫的形式存在,并且溶解度很高,从而使残余熔体中逐步富集铜等亲硫的成矿元素。因此,目前大部分研究已经取得共识,Cu-Au-Pb-Zn 等成矿作用与高氧逸度岩浆有关^[50]。我国华南地区大部分与 Cu-Au-Pb-Zn 矿床有关的花岗质岩石氧逸度都非常高,如湖南水口山花岗闪长岩初始氧逸度为 $\Delta FMQ+3.0$,长江中下游大部分与 Cu 多金属成矿有关的高钾钙碱性岩浆具有非常高的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值^[39]。最近一些研究发现,挥发性组分也是制约亲硫元素在岩浆中地球化学行为的关键因素,尤其是 Cl 对这些元素的迁移发挥至关重要的作

用^[59],我国华南地区与 Cu-Au-Pb-Zn 成矿有关的中生代花岗岩中磷灰石和黑云母中 Cl 含量普遍非常高,显著高于与 W-Sn 成矿有关的花岗岩^[60]。

3 壳幔相互作用与大花岗岩省形成的驱动机制

近些年来,对华南中生代花岗岩研究的一个重要进展是,强调壳幔相互作用与花岗岩成因的相互关系。综合现有资料发现,地幔物质和能量对华南侏罗纪-白垩纪(燕山期)花岗岩的成因发挥了重要作用,而对中晚三叠世(印支期)花岗岩的形成则以热量贡献为主。

中晚三叠世华南陆块与其西南缘的印支陆块和北缘的华北陆块碰撞拼合,碰撞开始时间约为 243~258 Ma^[1,61],以挤压构造背景为主。其后,形成了一些以过铝质为主的 S 型花岗岩,对其年龄数据的统计发现,这些花岗岩主要形成于 204~243 Ma,进一步可划分为早阶段(约 234~243 Ma)和晚阶段(约 205~234 Ma)。总体来看,早阶段花岗岩被认为是加厚地壳在后碰撞阶段经部分熔融产生的岩浆结晶所致,可能形成于挤压构造背景,岩浆产生的热源则来自同位素放射生热或者地温梯度的增加^[61]。晚阶段花岗岩则被认为由地壳物质经脱水熔融产生,形成于碰撞造山后期发生的伸展构造背景,幔源岩浆发生底侵作用为其母岩浆的形成提供了所需要的热量,主要证据如湖南道县玄武岩中发现的辉长质下地壳捕虏体(220 Ma),具有亏损地幔来源的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和锆石 Hf 同位素组成^[21,62]。总体上,华南晚三叠世花岗岩主要起源于古老地壳沉积物质的部分熔融,地幔在物质上的贡献微乎其微,但幔源岩浆底侵作用可能为该期晚阶段花岗岩的形成提供了必要的热源^[63]。

华南侏罗纪-白垩纪花岗岩主要形成于两个阶段,包括燕山早期(196~140 Ma)和燕山晚期(140~86 Ma)^[64]。大多数学者认为该时期花岗岩的形成主要与地幔提供的热量诱发的地壳物质发生熔融并产生壳幔混合岩浆密切相关,花岗岩中幔源组分参与程度不一。总体而言,从早期到晚期幔源物质的贡献逐步递增。就燕山早期花岗岩而言,朱金初等(2006)^[65]在华南划分出了一条典型的 A 型花岗岩带,该花岗岩带位于钦杭结合带的中西段,被认为是燕山早期壳幔岩浆混合形成花岗岩的代表。Li 等(2009)^[66]提出南岭地区的里松和佛冈花岗质岩体为幔源岩浆与变沉积岩部分熔融产生的熔体发生不

同程度的混合作用形成。但总体而言, 幔源岩浆均为燕山早期花岗岩的形成提供了必要的热源, 而地幔组分参与花岗岩形成的比例有限, 大多数花岗岩并没有显示有明显地幔物质加入。

华南燕山晚期花岗质岩浆作用则主要集中于东南沿海地区, 形成了一条长约 800 km, 宽约 60~80 km, 沿 NE-NNE 方向延伸的花岗岩带。区内花岗岩以钾长花岗岩为主, 此外包括二长花岗岩、花岗闪长岩, 以及碱性花岗岩等多种岩石类型^[1,33,67], 区内花岗岩组合的最主要特征是钙碱性 I 型花岗岩与碱性 A 型花岗岩常呈复合杂岩体产出, 此外也可见少量中基性侵入体(辉长岩、辉长闪长岩等)与钙碱性 I 型花岗岩相伴产出。前者的典型实例如漳州、福州、青田以及普陀山-桃花岛复式岩体, 后者如沿福建东南沿海分布的平潭、泉州和花厝等杂岩体。这些 I 型花岗岩普遍具偏高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-6.8~-1.5)^[68], 并且普遍发育暗色微粒包体。研究者通过系统的锆石 Hf 同位素结合全岩 Sr-Nd 同位素研究, 提出该类型花岗岩形成于壳幔岩浆混合作用, 并且相比燕山早期花岗岩, 其幔源组分明显增加^[22,69]。此外, 浙闽沿海还存在大量的燕山晚期 A 型花岗岩, 北东段以碱性花岗岩为主, 如桃花岛、青田、太姥山和魁岐岩体; 而南西段以铝质 A 型花岗岩最为典型, 如白石山、金刚山、新村和乌山岩体。这些 A 型花岗岩与 I 型花岗岩在空间上密切共生, 被大多数学者认为是壳幔岩浆混合作用形成, 但幔源组分的贡献大于同期的 I 型花岗岩^[33,67]。实际上, 华南地区燕山晚期广泛存在壳幔相互作用已被早期相关岩石学和地球物理资料所证实^[70]。

如前文所提及, 虽然普遍认为华南许多花岗岩的形成存在明显地幔组分贡献, 但对幔源组分参与花岗岩成岩的方式目前还存在直接或间接参与两种不同看法^[34,69]。另一方面对参与中生代花岗岩成岩的幔源组分的源区性质也存在截然不同的观点。譬如, He 等(2010)^[63]和 Wang 等(2005)^[71]根据对福建洋坊霓辉石正长岩和铁山黑榴石正长岩的 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 认为华南印支期的陆下地幔为 EM II 型富集地幔, 但湖南道县玄武岩中发现的印支期辉长岩捕虏体的同位素研究则表明, 华南板块印支期陆下地幔有具有亏损特征^[21,62]。东南沿海地区的白垩纪辉长质岩石通常富集轻稀土和大离子亲石元素, 而亏损高场强元素(如 Nb、Ta 等), 并且具有中等富集的 Sr-Nd 同位素特征, 因而一些研究者也主张这些辉长质岩石应该起源于富集地

幔源区的部分熔融^[72], 但众多花岗质岩石的锆石 Lu-Hf 同位素组成^[22,69]及东南沿海代表性玄武岩和辉长岩的 Re-Os 同位素资料^[73]又指示, 晚中生代时期东南沿海陆下的地幔可能并不是富集的岩石圈地幔, 而极可能为具有亏损特性的软流圈地幔。

关于华南中生代大花岗岩省形成的驱动机制, 仍有很大的认识分歧。先后提出的模式主要有以下三种: (1) 活动大陆边缘构造-岩浆作用模式^[1,74-75]; (2) 阿尔卑斯型大陆碰撞模式^[76]; (3) 大陆拉张-裂解模式^[77]。目前, 大多数学者沿用活动大陆边缘构造-岩浆作用模式, 并从不同视角予以改进, 但对俯冲作用控制华南花岗岩-火山岩形成的起始时间仍有分歧。Zhou 等(2006)^[1]认为, 从侏罗纪开始的古太平洋板块对欧亚大陆板块的低角度俯冲及消减作用, 诱导了华南燕山期花岗岩-火山岩岩浆活动。Li 和 Li(2007)^[75]则认为太平洋板块向华南大陆的平板式俯冲起始于 265 Ma 前, 并诱发了华南印支期花岗岩的形成, 俯冲大洋板片的断裂拆离直接导致了大规模燕山早期板内岩浆活动。

4 面临的重大科学问题和挑战

强调壳-幔相互作用是近年来研究华南地区中生代花岗岩的热点。通常认为, 花岗岩可以通过两种方式形成, 其一是通过幔源与壳源岩浆的混合作用产生混源的花岗岩^[17], 致使大陆地壳增生。因此, 许多学者认为花岗岩的形成与地幔作用直接相关, 但这种认识在华南地区并未得到地质观察的直接支持。此外, 究竟是岩石圈地幔还是软流圈地幔物质参与花岗岩形成没有得到有效甄别, 其参与花岗岩形成的方式也不明确。其二是花岗岩可以通过陆壳物质发生重熔形成, 即陆壳物质再循环与调整发生陆壳再造, 形成新的改造型大陆地壳。问题是什么作用造成华南地区陆壳的某些部位的岩石发生熔融, 从而生成大规模的花岗质岩浆? 新的改造型大陆地壳形成的机制与过程又如何? 因此, 壳幔相互作用在大陆地壳形成过程的方式到底怎么样? 深部动力学过程如何制约大陆地壳的形成?

华南地区大面积中生代花岗岩的形成演化伴随巨量元素的活化、迁移与富集, 大规模的岩浆活动必然导致巨量金属成矿元素的堆积, 使地壳中高度分散的元素聚集, 导致大陆地壳中元素的强烈分异与重组。那么成矿元素究竟来自花岗岩本身还是来自其围岩和源岩? 成岩和成矿作用之间的本质关联

到底如何?目前对花岗质岩浆活动-陆壳形成-成矿作用的耦合机制认识尚不十分明确。

华南地区中生代巨量金属的堆积主要在南岭地区,不同金属成矿时间非常集中,并不是前人认为的铜铅锌成矿作用早于钨锡成矿作用。那么,什么样的背景能够造成巨量金属堆积,而且在同一构造背景下同一区域能够形成不同元素组合的矿床,其原因是什么?

综上所述,今后若干年我们对华南中生代花岗岩成岩成矿作用研究应该聚焦以下几个方面:

(1)矿物学研究。从目前已有的研究成果来看,总体上注重地球化学分析,对组成岩石的最基本单元矿物研究较少,矿物学才是岩石成因的最直接记录。因此,今后的研究应该加强矿物学研究,把地球化学和矿物学有机结合起来探讨。

(2)岩浆动力学过程。花岗质岩浆从形成、上侵到定位过程中,什么作用驱使岩浆向上运移,在这个期间岩浆动力学过程到底如何?岩浆在侵位期间发生了什么变化,与围岩是否发生了反应,岩浆期后熔/流体如何相互作用?这些过程如何控制成矿元素的行为?

(3)壳-幔相互作用-构造岩浆-成矿作用的耦合机制研究。由于不同的壳幔相互作用过程控制着不同类型的花岗岩浆活动,不同类型的花岗岩浆活动控制了不同类型的成矿作用。但是对壳幔相互作用-花岗岩浆活动-成矿作用的各种耦合机制目前尚缺乏完整的理解。例如以往研究一致认为与钨成矿有关的花岗岩是改造型花岗岩,没有明显的地幔物质参与。但近年通过硫化物稀有气体同位素研究发现,一些与改造型花岗岩有关的钨矿床的成矿流体中含有相当数量的地幔组分,如湖南瑶岗仙钨矿、江西西华山钨矿和粤北瑶岭-梅子窝钨矿等,如果成矿物质和成矿流体是从岩浆中分异出来的话,那么则存在明显的不匹配现象,造成这种解耦作用的原因是什么?或者是地幔物质确曾参与了改造型花岗岩的形成?目前对于地幔物质参与花岗岩形成的过程和方式还不明确,亟待解决。

(4)同时代不同矿种之间的成因联系研究。华南地区,尤其是南岭地区,分布着不同成矿元素组合的矿床,这些矿床的形成时代高度集中,揭示这些巨量金属堆积的动力学背景尤为关键,而且不同矿种之间的成因有什么关联?

参考文献:

- [1] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [2] Liang X Q, Dong C G, Jiang Y, et al. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar isotopic dating of the Xitian W-Sn polymetallic deposit, eastern Hunan Province, South China and its geological significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 85-100.
- [3] Zhang Y, Yang JH, Chen JY, et al. Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes[J]. *Lithos*, 2017, 278-281: 166-180.
- [4] Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267-294.
- [5] Yang J H, Peng J T, Zhao J H, et al. Petrogenesis of the Xihuashan Granite in southern Jiangxi Province, South China: constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86(1): 131-152.
- [6] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2329-2338.
- [7] 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 湖南芙蓉锡矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 2007, 26(3): 237-248.
- [8] 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的地球化学特征及成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(2): 97-109.
- [9] Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, et al. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(7): 661-669.
- [10] 毛景文, 李晓峰, Lehmann B, 等. 湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地球动力学意义[J]. *矿床地质*, 2004, 23(2): 164-175.
- [11] Huang X D, Lu J J, Sizaret S, et al. Petrogenetic differences between the Middle-Late Jurassic Cu-Pb-Zn-bearing and W-bearing granites in the Nanling Range, South China: A case study of the Tongshanling and Weijia deposits in southern Hunan Province[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(7): 1220-1236.
- [12] Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, et al. Geochronological and petrogeochemical constraints on the skarn deposits in Tongshanling ore district, southern Hunan Province: implications for Jurassic Cu and W metallogenic events in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 120-137.
- [13] Yang JH, Peng JT, Zheng YF, et al. Petrogenesis of the Mesozoic Shuikoushan peraluminous I-type granodioritic intrusion in Hunan Province, South China: middle-lower crustal reworking in an extensional tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 123: 224-242.
- [14] 卢友月, 付建明, 程顺波, 等. 湘南铜山岭铜多金属矿田成岩成矿作用年代学研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(6): 1061-1071.
- [15] Huang JC, Peng JT, Yang JH, et al. Precise zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Shuikoushan granodiorite-related Pb-Zn

- mineralization, southern Hunan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*,2015, 71: 305-317.
- [16] 王小飞, 戚华文, 胡瑞忠, 等. 粤北红岭钨矿中辉钨矿 Re-Os 同位素年代学及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2010, 29(3): 415-426.
- [17] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon[J]. *Science*,2007, 315(5814): 980-983.
- [18] Yang JH, Wu FY, Wilde S A, et al. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,2007, 153(2): 177-190..
- [19] Leshner C E. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing[J]. *Nature*,1990, 344(6263): 235-237.
- [20] Lackey J S, Erdmann S, Hark J S, et al. Tracing garnet origins in granitoid rocks by oxygen isotope analysis: examples from the South Mountain Batholith, Nova Scotia[J]. *The Canadian Mineralogist*,2011, 49(2): 417-439.
- [21] Guo F, Fan W M, Lin G, et al. Sm-Nd isotopic age and genesis of gabbro xenoliths in Daoxian County, Hunan Province[J]. *Chinese Science Bulletin*,1997, 42(21): 1814-1817..
- [22] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*,2002, 61(3-4): 237-269.
- [23] Cheng Y B, Spandler C, Mao J W, et al. Granite, gabbro and mafic microgranular enclaves in the Gejiu area, Yunnan Province, China: a case of two-stage mixing of crust-and mantle-derived magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,2012, 164(4): 659-676.
- [24] Lackey J S, Valley J W, Hinke H J. Deciphering the source and contamination history of peraluminous magmas using $\delta^{18}\text{O}$ of accessory minerals: examples from garnet-bearing plutons of the Sierra Nevada batholith[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,2006, 151(1): 20-44.
- [25] Yang JH, Peng JT, Hu RZ, et al. Garnet geochemistry of tungsten-mineralized Xihuashan granites in South China[J]. *Lithos*,2013, 177: 79-90.
- [26] Xie L, Wang RC, Chen J, et al. Mineralogical evidence for magmatic and hydrothermal processes in the Qitianling oxidized tin-bearing granite (Hunan, South China): EMP and (MC)-LA-ICPMS investigations of three types of titanite[J]. *Chemical Geology*,2010, 276(1-2): 53-68.
- [27] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报,2007, 23(6): 1217-1238.
- [28] Trail D, Watson E B, Tailby N D. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere[J]. *Nature*,2011, 480(7375): 79-82.
- [29] Smythe D J, Brenan J M. Cerium oxidation state in silicate melts: combined $f\text{O}_2$, temperature and compositional effects[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2015, 170: 173-187.
- [30] Zhang CC, Sun WD, Wang JT, et al. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: a zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2017, 206: 343-363.
- [31] Li X Y, Chi G X, Zhou Y Z, et al. Oxygen fugacity of Yanshanian granites in South China and implications for metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*,2017, 88: 690-701.
- [32] Clemens J D. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth-Science Reviews*,2003, 61(1-2): 1-18.
- [33] Zhao JL, Qiu JS, Liu L, et al. The Late Cretaceous I- and A-type granite association of southeast China: Implications for the origin and evolution of post-collisional extensional magmatism[J]. *Lithos*,2016, 240-243: 16-33.
- [34] Li X H, Li Z X, He B, et al. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia Block: *in situ* U-Pb, Lu-Hf and O isotope analyses of detrital zircons[J]. *Chemical Geology*,2012, 328: 195-207.
- [35] Blevin P L, Chappell B W. Chemistry, origin, and evolution of mineralized granites in the Lachlan fold belt, Australia; the metallogeny of I- and S-type granites[J]. *Economic Geology*,1995, 90(6): 1604-1619.
- [36] Ishihara S, Sawata H, Arpornsuwan S, et al. The magnetite-series and ilmenite-series granitoids and their bearing on tin mineralization, particularly of the Malay Peninsula region[J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*,1979, 11: 103-110.
- [37] Černý P, Blevin P L, Cuney M, et al. Granite-related ore deposit[A]. Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. *Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume*[M]. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, Inc., 2005: 337-370.
- [38] 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 等. 论花岗岩的成因系列——以华南中生代花岗岩为例[J]. 地质学报,1983, 57(2): 107-118.
- [39] Wang F Y, Liu SA, Li S G, et al. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of Mesozoic high Sr/Y porphyries from Ningzhen, eastern China: constraints on their petrogenesis, tectonic implications and Cu mineralization[J]. *Lithos*,2014, 200-201: 299-316.
- [40] 陈毓川, 王登红. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题[J]. 大地构造与成矿学,2012, 36(3): 315-321.
- [41] 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 等. 湖南宝山铜-钨多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报,2006, 22(10): 2483-2492.
- [42] Hu R Z, Wei W F, Bi X W, et al. Molybdenite Re-Os and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China[J]. *Lithos*,2012, 150: 111-118.
- [43] Wang Y L, Pei R F, Li J W, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Yaogangxian tungsten deposit, South China, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*,2008, 82(4): 820-825.
- [44] Lu J J, Hua R M, Yao C L. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit of Jiangxi Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2005, 69(Suppl.): A882.
- [45] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘,2004, 11(1): 45-55.
- [46] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报,2007, 23(5): 967-976.
- [47] 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 等. 华南陆块内成矿作用的一些科学问题[J]. 地学前缘,2010, 17(2): 13-26.
- [48] Blevin P L, Chappell B W. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*,1992, 83(1-2): 305-316.

- [49] Heinrich C A, Neubauer F. Cu-Au-Pb-Zn-Ag metallogeny of the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride geodynamic province[J]. *Mineralium Deposita*,2002, 37(6-7): 533-540.
- [50] Richards J P. The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: implications for metallogeny[J]. *Lithos*,2015, 233: 27-45.
- [51] Zajacz Z, Candela P A, Piccoli P M, et al. Solubility and partitioning behavior of Au, Cu, Ag and reduced S in magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2013, 112: 288-304.
- [52] Li J, Huang XL, He PL, et al. In situ analyses of micas in the Yashan granite, South China: constraints on magmatic and hydrothermal evolutions of W and Ta-Nb bearing granites[J]. *Ore Geology Reviews*,2015, 65: 793-810.
- [53] Van Lichtervelde M, Holtz F, Hancher J M. Solubility of manganotantalite, zircon and hafnon in highly fluxed peralkaline to peraluminous pegmatitic melts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,2010, 160(1): 17-32.
- [54] O'Neill H S C, Berry A J, Eggins S M. The solubility and oxidation state of tungsten in silicate melts: Implications for the comparative chemistry of W and Mo in planetary differentiation processes [J]. *Chemical Geology*, 2008, 255: 346-359.
- [55] O'Neill H S C, Berry A J, Eggins S M. The solubility and oxidation state of tungsten in silicate melts: implications for the comparative chemistry of W and Mo in planetary differentiation processes[J]. *Chemical Geology*,2008, 255(3-4): 346-359.
- [56] 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 等. 南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用[J]. 高校地质学报,2008, 14(4): 459-473.
- [57] 李洁, 黄小龙. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制[J]. 岩石学报,2013, 29(12): 4311-4322.
- [58] Wang R C, Fontan F, Chen X M, et al. Accessory minerals in the Xihuashan Y-enriched granitic complex, southern China: a record of magmatic and hydrothermal stages of evolution[J]. *The Canadian Mineralogist*,2003, 41(3): 727-748.
- [59] Nadeau O, Stix J, Williams-Jones A E. The behavior of Cu, Zn and Pb during magmatic-hydrothermal activity at Merapi volcano, Indonesia[J]. *Chemical Geology*,2013, 342: 167-179.
- [60] Ding T, Ma D S, Lu J J, et al. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province, Shi-Hang zone, China: implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*,2015, 69: 104-117.
- [61] Wang Y J, Fan W M, 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(3-4): 475-502.
- [62] Dai BZ, Jiang SY, Jiang YH, et al. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyuan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: petrogenesis and implications for lower crust evolution[J]. *Lithos*,2008, 102(1-2): 65-87.
- [63] He Z Y, Xu X S, Niu Y L. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China[J]. *Lithos*,2010, 119(3-4): 621-641.
- [64] Li XH, Li WX, Wang XC, et al. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*,2010, 119(3-4): 427-438.
- [65] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 南岭西段花山—姑婆山 A 型花岗质杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因[J]. 地质学报,2006, 80(4): 529-542.
- [66] Li X H, Li W X, Wang X C, et al. Role of mantle-derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: *in situ* zircon Hf-O isotopic constraints[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*,2009, 52(9): 1262-1278.
- [67] Chen JY, Yang JH, Zhang JH, et al. Petrogenesis of the Cretaceous Zhangzhou batholith in southeastern China: Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf-O isotopic evidence[J]. *Lithos*,2013, 162-163: 140-156.
- [68] Li ZX, Qiu JS, Yang XM. A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous[J]. *Earth-Science Reviews*,2014, 128: 232-248.
- [69] 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报,2008, 24(11): 2468-2484.
- [70] 徐夕生, 周新民, O'Reilly S Y, 等. 中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索[J]. 岩石学报,1999, 15(2): 217-223.
- [71] Wang Q, Li J W, Jian P, et al. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian-Triassic transtension[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2005, 230(3-4): 339-354.
- [72] Zhao JH, Hu R Z, Zhou MF, et al. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Mesozoic mafic intrusions in southern Fujian province, SE China: implications for lithospheric mantle evolution[J]. *Geological Magazine*,2007, 144(6): 937-952.
- [73] 周金城, 蒋少涌, 王孝磊, 等. 东南沿海晚中生代镁铁质岩的 Re-Os 同位素组成[J]. 岩石学报,2006, 22(2): 407-413.
- [74] Jahn B M, Zhou X H, Li J L. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: isotopic and geochemical constraints[J]. *Tectonophysics*,1990, 183(1-4): 145-160.
- [75] 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.
- [76] Hsü K J, Sun S, Li J L, et al. Mesozoic overthrust tectonics in South China[J]. *Geology*,1988, 16(5): 418-421.
- [77] Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial-distribution of rifting in China[J]. *Tectonophysics*,1991, 197(2-4): 225-243.