

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.569>



鄂东南地区鄂城岩体的时代、成因 及其对成矿作用的指示

丁丽雪^{1,2}, 黄圭成^{1,2}, 夏金龙^{1,2}

1.中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205

2.中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,湖北武汉 430205

摘要: 鄂城岩体位于鄂东南地区的最北部,是鄂东南地区的六大岩体之一。在该岩体的南缘接触带上产出了长江中下游地区最大的矽卡岩型铁矿床——程潮铁矿床。众多研究表明,程潮铁矿化与鄂城杂岩体的岩浆演化密切相关,然而目前对于成矿作用究竟是与花岗质岩还是闪长质岩有关仍存在争议。通过对鄂城杂岩体开展系统的锆石U-Pb年代学、元素地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究,结果表明该岩体主要由花岗岩、石英二长岩、花岗斑岩以及小面积的闪长岩组成,最早侵位于140±1 Ma(中粒闪长岩),之后依次侵位形成了细粒闪长岩(132±2 Ma)、花岗斑岩(130±2 Ma)、花岗岩(中细粒花岗岩129±2 Ma,中粒花岗岩129±1 Ma)和石英二长岩(129±1 Ma)。根据全岩地球化学特征,鄂城杂岩体的岩石组成大致可以分为两组:(1)花岗岩类,包括花岗岩、花岗斑岩和角闪石英二长岩,钾质,具有高SiO₂、低TiO₂、FeO_t、MnO、MgO含量等特征;(2)闪长岩类,包括中、细粒闪长岩,钠质,具有低SiO₂、高TiO₂、FeO_t、MnO、MgO含量等特征。这些岩石均富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE,如Rb、Th等),亏损高场强元素(HFSE,如Nb、P、Ti等),且花岗岩类具明显的负Eu异常,而闪长岩类则无此特征。在同位素组成方面,鄂城花岗岩类具有较负的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-11.7~-10.1)和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-22.91~-9.83),闪长岩类则具有稍高的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-7.6)和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-12.04~-4.69)。元素和同位素地球化学特征共同表明,鄂城花岗岩类属于高分异I型花岗岩,且主要来源于古元古代基底物质的部分熔融作用,源区可能有少量幔源物质的加入;闪长岩类主要来源于富集岩石圈地幔,且经历了一定的分离结晶作用。年代学结果显示,鄂城花岗岩类和细粒闪长岩的侵位时间均与程潮铁矿床的主成矿期吻合。结合野外接触关系以及前人的研究,程潮铁矿化可能与上述两类岩石均密切相关。从整个鄂东南地区的成矿作用来看,随着岩浆源区壳源物质贡献的增大以及岩浆分异程度的增加,岩浆作用与铁矿化的关系也更加密切。

关键词: 鄂东南地区;鄂城岩体;程潮铁矿;矽卡岩型铁矿;I型花岗岩;地球化学。

中图分类号: P581; P611

文章编号: 1000-2383(2018)07-2350-20

收稿日期: 2018-05-18

Age and Petrogenesis of the Echeng Intrusion in Southeastern Hubei Province: Implications for Iron Mineralization

Ding Lixue^{1,2}, Huang Guicheng^{1,2}, Xia Jinlong^{1,2}

1. Whuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Research Center for Petrogenesis and Metallogenesis of Granitic Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: The Echeng pluton is one of the six large plutons in southeastern Hubei Province, which is located in the northernmost of the region. The Chengchao iron deposit, the largest skarn iron deposit in the Middle-Lower reaches of Yangtze River belt, has occurred in the southern contact zone of the Echeng pluton. Many researches have showed that the Chengchao iron mineralization was closely connected with the magma evolution of the Echeng complex, whereas whether the mineralization is related to granitic rocks or dioritic rocks is still controversial. In this paper, we present U-Pb age, geochemical, and Sr-Nd-Hf

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.1212011120863,12120114005901)。

作者简介:丁丽雪(1982—),女,助理研究员,主要从事岩浆与成矿作用研究。ORCID: 0000-0003-1349-4452. E-mail: 569259265@qq.com

引用格式:丁丽雪,黄圭成,夏金龙,2018.鄂东南地区鄂城岩体的时代、成因及其对成矿作用的指示.地球科学,43(7): 2350-2369.

isotopic data to provide constraints on the petrogenesis of the Echeng intrusion and discuss the relationship of magma evolution and iron mineralization. The Echeng complex mainly consists of granite, quartz monzonite, granite porphyry and small-scale diorite. LA-ICP-MS zircon U-Pb data indicates that the Echeng complex began to emplace at 140 ± 1 Ma by medium-grained diorite phase, subsequently fine-grained diorite (132 ± 2 Ma), granite porphyry (130 ± 2 Ma), granite including medium-fine grained (129 ± 2 Ma) and medium-grained (129 ± 1 Ma) phases and quartz monzonite (129 ± 1 Ma) were emplaced in order. According to geochemical characteristics, all the rocks can broadly be divided into two groups: (1) granitoids including granite, granite porphyry, hornblende quartz monzonite are potassic and are characterized by high SiO_2 , low TiO_2 , FeO_{t} , MnO , MgO concentrations; (2) diorite including fine and medium grained diorites, are sodic and are characterized by low SiO_2 , high TiO_2 , FeO_{t} , MnO , MgO concentrations. These rocks are enriched in light rare earth elements (LREEs) and large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Th, and depleted in high field strength elements (HFSE) such as Nb, P and Ti. Moreover, the Echeng granitoids show obviously negative Eu anomalies but the diorites have no such a signature. The Echeng granitoids have more negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values ranging from -11.7 to -10.1 and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -22.91 to -9.83 , and the diorites have relatively high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value (-7.6) and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -12.04 to -4.69 . The geochemical and isotopic data suggests that the Echeng granitoids belong to highly fractionated I-type granites and were mainly derived from partial melting of the Paleoproterozoic basement, possibly with the addition of a small amount of mantle-derived materials, whereas the diorites were mainly originated from the enriched lithospheric mantle, followed by a certain degree of crystallization fractionation. The new geochronological data suggests that the Echeng granitoids and fine-grained diorite broadly coeval with the main mineralization of the Chengchao iron deposit. Combining with field contact relationship and previous research results, the Chengchao iron mineralization was probably related to the Echeng granitoids and fine-grained diorite. Based on the mineralizations in southeastern Hubei Province, magmatism is more closely related to iron mineralization with the increases of differentiation degrees and crustal contributions in the magma source.

Key words: southeastern Hubei Province; Echeng pluton; Chengchao iron deposit; skarn iron deposit; I-type granite; geochemistry.

0 引言

鄂东南地区是重要的铜、铁、金、钼、钨等内生金属矿产地,也是我国重要的矿集区之一.区内大中小矿床点密集分布,且尤以铁铜矿资源储量最为丰富.多年来的研究显示,鄂东南地区丰富的铁铜矿产具有明显的分区成群分布特征,即位于北区的鄂城岩体、铁山岩体、金山店岩体、灵乡岩体的接触带上盛产铁矿,而位于南区的阳新岩体、殷祖岩体以及铜山口、丰山洞等斑岩体的周边主要产出铜矿(Li *et al.*, 2008, 2009, 2014; Xie *et al.*, 2011a, 2011b, 2012; 姚磊等, 2012; 黄圭成等, 2013; 丁丽雪等, 2014; 王建等, 2014; Deng *et al.*, 2015; Xia *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2015).位于北区的程潮铁矿是鄂东南地区最具代表性的矽卡岩型铁矿床,也是长江中下游地区最大的矽卡岩型铁矿床.前人曾对该矿床的地质特征、矿物学、岩石学、成岩成矿时代、矿床成因等进行过相关研究,且多数学者认为该矿床的成矿作用与鄂城岩体的岩浆演化密切相关(骆地伟, 2008; 闵厚禄等, 2008; 王磊等, 2009; 夏金龙等, 2009; 姚磊等, 2012; 任喆等, 2012; 胡浩等, 2014; Li *et al.*, 2014).鄂城岩体为一复式杂岩

体,由多期岩浆侵位形成,组成该岩体的岩石类型包括花岗岩、花岗斑岩、石英二长岩和闪长岩等.目前对于程潮铁矿化作用究竟是与鄂城花岗质岩还是闪长质岩有关仍存在争议(夏金龙等, 2009; 姚磊等, 2012; Yao *et al.*, 2015),而通过对鄂城杂岩体开展更深入系统地研究、弄清该岩体的岩浆演化过程是解决这一问题的关键.本文在详细的野外调研以及系统采样的基础上,对鄂城杂岩体进行年代学、地球化学、全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素以及锆石 Lu-Hf 同位素的系统研究,以深入分析该岩体的成因进而探讨岩浆演化与成矿之间的关系,为深入认识程潮铁矿床的成因和成矿演化提供了新的资料和制约.

1 区域地质背景及岩体地质

1.1 区域地质背景

鄂东南矿集区位于长江中下游成矿带的最西端,大地构造位置属于扬子地台东北缘,北邻大别造山带.该矿集区处于隆起至凹陷过渡的沉积环境,以铜铁为主要优势矿种,共生或伴生钨、铅、钼、锌、金银等金属元素.区内矿床类型以矽卡岩型和斑岩型为主,成矿与晚中生代侵入岩密切相关.研究区内晚

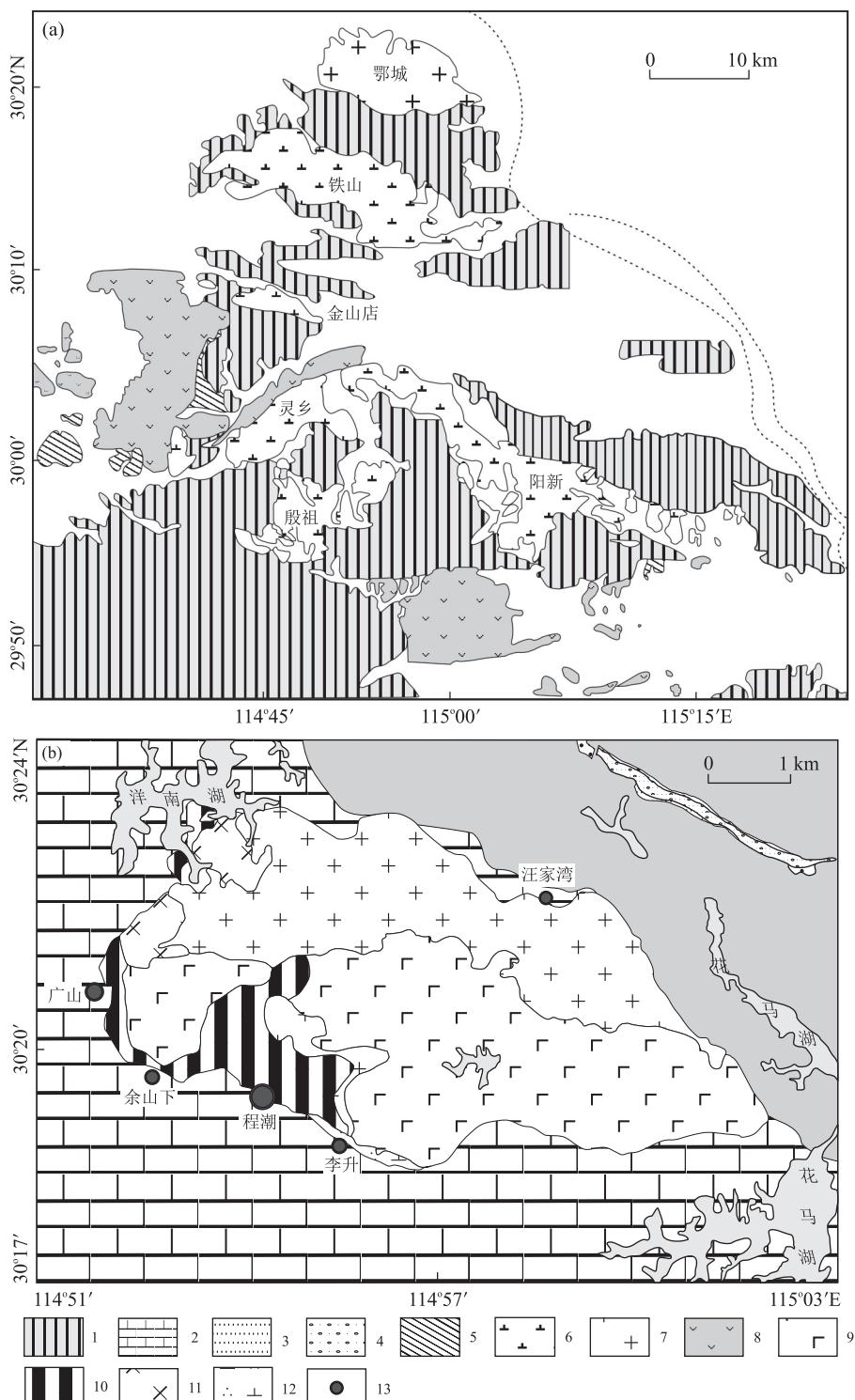


图 1 鄂东南地区地质简图(a)和鄂城岩体地质简图(b)

Fig.1 Geological sketch for southeast Hubei Province (a) and the Echeng intrusion (b)

1.第四系;2.晚三叠世—中侏罗世碎屑岩;3.三叠系大冶组和蒲圻组灰岩和碎屑岩;4.泥盆纪砂岩;5.志留纪碎屑岩;6.寒武纪—中三叠世碎屑岩、碳酸盐岩;7.辉长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩;8.花岗岩;9.火山岩;10.石英二长岩;11.花岗斑岩;12.细粒闪长岩;13.地点

中生代岩浆活动十分强烈，并显示多期次活动的特点。从北至南依次为鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新和殷祖 6 大岩体以及众多小岩体(群)(图 1a)。区内

地层出露齐全，除前震旦纪基底主要出露于大别山地区以外，从古生代到中新生代地层均有所发育，古生代地层主要发育于该地区的南部，中生代地层分

布较广,普遍缺失晚侏罗世地层(Xie et al., 2006, 2011a).

1.2 岩体地质及岩相学

鄂城岩体位于鄂东南地区最北端鄂州市的东南部,鄂城背斜和碧石渡向斜翼上,沿三叠系大冶组和蒲圻组层间界面侵入。岩体呈NWW向椭圆形展布,长约14 km,最大宽度约8 km,出露面积约85 km²。岩体为向南倾斜的“半蘑菇”形,倾角35°左右,南缘与蒲圻组接触;北缘向北超覆,超覆幅度2~3 km,深部转向南倾,倾角较陡;东、西两端分别向外侧伏。

该岩体为一复式杂岩体,主要由花岗岩、石英二长岩、花岗斑岩以及小面积的闪长岩组成(图1b),岩体深部亦可见石英闪长玢岩,晚期伴随有一些中酸性、中基性岩脉的侵入。因风化剥蚀和第四系覆盖,在地表各类岩石之间很难观察到接触关系。粗中粒花岗岩分布于岩体的北部东段,在西段过渡为细粒花岗岩;中细粒石英二长岩大面积分布于岩体南部东段以及西南部,局部呈似斑状结构(含斜长石斑晶)或渐变为角闪石英二长岩;花岗斑岩分布于岩体中南部程潮附近,并沿岩体边缘向西延伸至广山一带,西北部边缘亦有小面积出露;中粒闪长岩小面积分布于岩体的西北部;细粒闪长岩则出现在岩体中

部的南缘,以及程潮矿区附近零星产出。

花岗岩样品呈细—中粒结构,块状构造,主要由石英(25%~30%)、斜长石(10%~15%)、钾长石(45%~50%)和少量黑云母(3%~5%)组成(图2a)。石英呈不规则状分布于长石晶隙中,或与钾长石交互生长呈文象结构。钾长石以条纹长石为主,且为半自形板状或他形粒状。斜长石多为半自形—自形板状,且发生一定程度的高岭土化、绢云母化。副矿物包括磷灰石、榍石、磁铁矿等。

花岗斑岩为斑状结构,块状构造。斑晶主要由石英(15%~20%)和钾长石(40%~45%)组成(图2b)。石英呈不规则粒状或港湾状,有时以聚晶形式存在。晶体粒径主要分布在1.4~2.6 mm之间。钾长石呈半自形—他形粒状,以条纹长石为主。多数晶体因发生轻微的高岭土化蚀变,晶体表面较脏,个别晶体发育卡氏双晶。晶体粒径大小不均,且主要分布在2~4.8 mm之间。基质为显微晶质和细粒结构,主要由石英(10%)、钾长石(25%)、斜长石(3%)和少量黑云母(<1%)组成。

(角闪)石英二长岩样品为浅灰白色,中细粒二长结构,块状构造。主要由钾长石(40%)、斜长石(45%)、石英(10%)和角闪石(3%~5%)组成(图

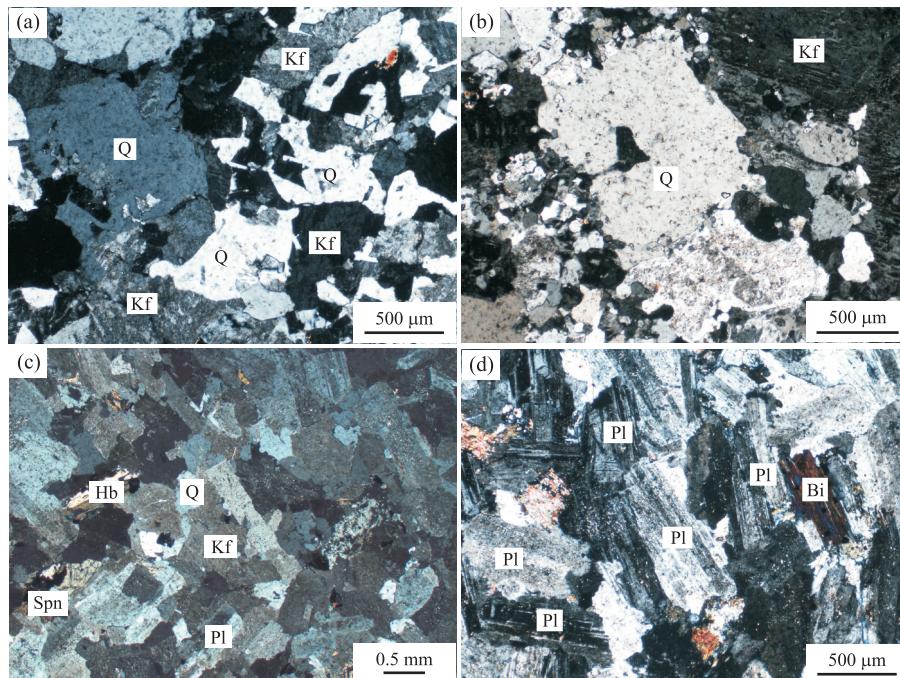


图2 鄂城岩体显微图片

Fig.2 Photomicrographs of the Echeng intrusion

a.鄂城中细粒花岗岩,主要由石英和钾长石组成;b.鄂城花岗斑岩,斑晶主要由石英和钾长石组成;c.鄂城角闪石英二长岩,细粒二长结构;d.鄂城细粒闪长岩,斜长石发育聚片双晶,Kf.钾长石;Pl.斜长石;Q.石英;Bi.黑云母;Hb.普通角闪石;Spn.榍石

2c).钾长石多呈他形粒状,斜长石自形程度相对较好,为半自形—自形板状或柱状,且发育聚片双晶。石英呈他形粒状,晶体粒径主要分布在 0.3~0.8 mm 之间,可见波状消光。角闪石为浅黄褐色,晶体较破碎,且以他形为主,部分晶体沿边部发生蚀变生成榍石、绿帘石等。副矿物包括磷灰石、榍石和磁铁矿等。

闪长岩样品为灰白、灰黑色,中、细粒结构,块状构造。主要由石英(3%~5%)、斜长石(70%~75%)和角闪石(10%~15%)组成,含少量钾长石(3%~5%)和黑云母(<1%)(图 2d)。斜长石多呈半自形—自形板状或板条状,且发育聚片双晶。多数晶体发生轻微的高岭土化、绢云母化,少数晶体发生一定程度的绿帘石化。角闪石为草绿色,以半自形—他形粒状或柱状为主,少数晶体发生轻微的绿泥石化。副矿物包括榍石、磁铁矿和绿帘石等。

前人研究表明,鄂城岩体周缘的铁矿床(点)的形成均与该杂岩的岩浆演化密切相关,代表性矿床有程潮铁矿、广山铁矿,以及余山下、李升、汪家湾、沙窝铁矿点等。其中,程潮铁矿床规模最大,目前已探明铁矿体 123 个,多为隐伏矿体。各矿体主要赋存于花岗岩或闪长岩与白云质大理岩、大理岩的接触带上或附近的矽卡岩中,少数矿体远离接触带赋存于大理岩、石膏中,并常与接触带上的矿体复合在一起。矿体大致向北西西低缓侧伏,顶板以闪长岩为主,次为大理岩、矽卡岩及硬石膏,底板大多为花岗岩,少数为矽卡岩,极少数为大理岩、闪长岩。呈岛状、半岛状分布于闪长岩及花岗岩中的大理岩、白云质大理岩捕虏体或舌状体,是矿化富集的部位。

2 分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析

锆石单矿物分选在河北廊坊市诚信地质服务公司完成。样品采用常规方法粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,将分选出的样品在双目镜下挑选出透明、无裂隙、无包裹体且具有代表性的锆石颗粒作为测试对象。将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,并抛光至锆石出露 1/2 左右。锆石的阴极发光(CL)和 U-Pb 同位素组成分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。阴极发光在美国 Gatan 公司生产的阴极萤光光谱仪(型号 Mono CL3+)上进行,设定场发射环境扫描电子显微镜高压(HV)为 10 kV,电流值(SP)=5 nA,工作距离为 8.0 mm。

锆石 U-Pb 同位素组成分析在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成。锆石分析点均采用 30 μm 的剥蚀孔径。详细的分析方法及仪器操作流程见 Yuan *et al.*(2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver4.0; Macquarie University)程序。年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正。元素浓度计算采用 NIST610 作外标, Si 作内标。普通铅校正采用 Andersen(2002)方法。锆石加权平均年龄的计算及谐和图的绘制利用 Isoplot3.0 软件(Ludwig, 2003)完成。

2.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定是与锆石测年样品相结合,在西北大学大陆动力学国家重点实验室装有 193 nm ArF 激光器的 Nu Plasma MC-ICP-MS 仪器上完成,详细的分析方法及实验流程见 Yuan *et al.*(2008)。实验过程中,激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气,斑束直径为 44 μm,剥蚀频率为 10 Hz,激光能量为 90 mJ,每个分析点的气体背景采集时间为 30 s,信号采集时间为 40 s。测定时采用锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作为外标,实验获得的上述 3 个标样的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 $0.282\ 302 \pm 0.000\ 012 (n=13, 2\sigma)$ 、 $0.282\ 730 \pm 0.000\ 007 (n=14, 2\sigma)$ 、 $0.282\ 005 \pm 0.000\ 010 (n=13, 2\sigma)$ 。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的计算中,采用 Blichert-Toft 和 Albarède(1997)所推荐的球粒陨石值,亏损地幔模式年龄(T_{DM})计算采用 Griffin *et al.*(2000)的推荐值。源区二阶段模式年龄(T_{DM2})计算采用 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 的平均大陆壳值。

2.3 全岩主量、微量元素及 Sr-Nd 同位素分析

全岩主、微量元素分析在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心(武汉综合岩矿测试中心)完成。主量元素的测试在 Magic_pro2440 型 X 射线荧光(XRF)光谱仪上完成,分析精度优于 5%。微量元素和稀土元素分析在型号为 Thermoelemental X7 的质谱仪(ICP-MS)上完成。全岩 Sr、Nd 同位素分析在中国地质调查局武汉地质矿产研究所同位素实验室完成。实验本底为 $\text{Sr}=1 \times 10^{-9} \text{ g}$, $\text{Nd}=2.13 \times 10^{-10} \text{ g}$ 。质谱分析在 MAT261 多接收质谱仪上完成,分别利用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375\ 2$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 9$ 对 Sr 和 Nd 进行质量分馏校正。分析过程中采用美国标准样 NBS987(Sr)和本实验室标准样 ZkbzNd(Nd)监测仪器工作状态,国家一级标准物质 GBW 04411(Rb-Sr)和 GBW 04419(Sm-Nd)监测分析流程。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 精度优于 1%, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 精度优于 0.5%,衰变常数采用 $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$,

$$\lambda(^{147}\text{Sm}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}.$$

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本文对鄂城杂岩体的 6 个代表性岩石样品进行了测年,锆石 U-Pb 同位素分析结果见附表 1。

中粒花岗岩(Dy256)样品采自鄂州市鄂城区沙窝乡新田铺,采样点的地理坐标为 $30^{\circ}21'19.9''\text{N}$ 、 $114^{\circ}58'58.7''\text{E}$ 。中粒花岗岩中的锆石主体为半自形—自形短柱状,无色或淡黄色,透明至半透明。锆石粒径分布在 $150\sim300\mu\text{m}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim2:1$ 。锆石的 Th、U 含量变化相对较大,分别为 $150\times10^{-6}\sim1057\times10^{-6}$ 和 $74\times10^{-6}\sim906\times10^{-6}$ 。Th/U 比值分布在 $0.66\sim2.41$ 之间,且多数锆石内部发育明显的振荡环带,表明为岩浆成因锆石。20 个锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3)。其中,3 个分析点(Dy256-05、Dy256-08、Dy256-10)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值相对偏低,均小于 120 Ma。目前鄂东南地区尚无类似年龄的报道,因此可能为混入锆石或分析过程中信号不稳造成的。其余 17 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄为 $129\pm1\text{ Ma}$,代表了鄂城中粒花岗岩的结晶年龄。

角闪石英二长岩(Dy258)样品采自鄂州市鄂城区沙窝乡新湾村南,采样点的地理坐标为 $30^{\circ}19'20.5''\text{N}$ 、 $115^{\circ}00'36.4''\text{E}$ 。角闪石英二长岩中的锆石为自形粒状或短柱状,无色透明,仅少数颗粒内部含包裹体略显浑浊。锆石粒径分布在 $140\times10^{-6}\sim200\times10^{-6}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim2:1$ 。锆石的 Th、U 含量变化不大,分别为 $121\times10^{-6}\sim331\times10^{-6}$ 和 $100\times10^{-6}\sim200\times10^{-6}$ 。Th/U 比值均大于 0.8,且多数锆石内部发育明显的振荡环带,表明为岩浆成因锆石。所有锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3),且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄为 $129\pm1\text{ Ma}$,代表了鄂城角闪石英二长岩的结晶年龄。

细粒花岗岩(YK1911-1)样品采自程潮铁矿 YK1911 钻孔,采样点的地理坐标为 $30^{\circ}19'7.2''\text{N}$ 、 $114^{\circ}54'4.2''\text{E}$ 。细粒花岗岩中的锆石为半自形—自形粒状,无色,透明至半透明。锆石粒径分布在 $100\times10^{-6}\sim160\times10^{-6}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim1:1.5$ 。锆石的 Th、U 含量分别为 $161\times10^{-6}\sim1127\times10^{-6}$ 和 $112\times10^{-6}\sim427\times10^{-6}$ 。Th/U 比值均大于 1,且锆

石内部发育明显的振荡生长环带,表明为岩浆成因锆石。除去 5 个谐和度较差的点(YK1911-1-02、YK1911-1-05、YK1911-1-08、YK1911-1-12、YK1911-1-16),其余 15 个锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3),且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄值为 $129\pm2\text{ Ma}$,代表了鄂城中细粒花岗岩的结晶年龄。

花岗斑岩(Dy262)样品采自程潮铁矿降压站附近,采样点的地理坐标为 $30^{\circ}19'42.1''\text{N}$ 、 $114^{\circ}54'31.6''\text{E}$ 。花岗斑岩中的锆石为半自形—自形柱状,少数颗粒为半截柱状或短柱状,无色,透明至半透明。锆石粒径分布在 $150\times10^{-6}\sim300\times10^{-6}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim4:1$ 。锆石的 Th、U 含量变化范围较大,分别为 $89\times10^{-6}\sim1796\times10^{-6}$ 和 $98\times10^{-6}\sim812\times10^{-6}$ 。Th/U 比值主要分布在 $0.36\sim2.55$ 之间,多数锆石内部发育明显的振荡生长环带,表明为岩浆成因锆石。所有锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3),且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄值为 $130\pm2\text{ Ma}$,代表了鄂城花岗斑岩的结晶年龄。

细粒闪长岩(Dy270)样品采自程潮铁矿矿区—430 m 东,南循环 8、9 穿脉之间。细粒闪长岩中的锆石为半自形—自形粒状或柱状,无色透明。锆石粒径分布在 $60\times10^{-6}\sim100\times10^{-6}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim3:1$ 。18 颗锆石的 Th、U 含量均相对偏低,且变化范围不大,分别为 $67\times10^{-6}\sim274\times10^{-6}$ 和 $59\times10^{-6}\sim182\times10^{-6}$ 。Th/U 比值较大,为 $0.97\sim1.50$,且多数锆石的内部发育较宽的振荡环带,表明为岩浆成因锆石。所有锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3),且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄值为 $132\pm2\text{ Ma}$,代表了鄂城细粒闪长岩的结晶年龄。

中粒闪长岩(Dy259)样品采自鄂州市新城区大鹰山,采样点的地理坐标为 $30^{\circ}22'25.2''\text{N}$ 、 $114^{\circ}54'22.3''\text{E}$ 。样品中的锆石为半自形柱状或粒状,无色透明,柱状颗粒双锥不发育。锆石粒径分布在 $150\times10^{-6}\sim200\times10^{-6}$ 之间,长宽比为 $1:1\sim3:1$ 。锆石的 Th、U 含量明显较细粒闪长岩(Dy270)偏高,分别为 $140\times10^{-6}\sim904\times10^{-6}$ 和 $112\times10^{-6}\sim419\times10^{-6}$ 。Th/U 比值较大,分布在 $1.17\sim2.16$ 之间,且锆石内部发育较宽的振荡环带或扇形分带,表明为岩浆成因锆石。20 个锆石分析点均分布在谐和线上或谐和线附近(图 3),且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中,获得其加权平均年龄值为 $140\pm1\text{ Ma}$,代表了鄂城

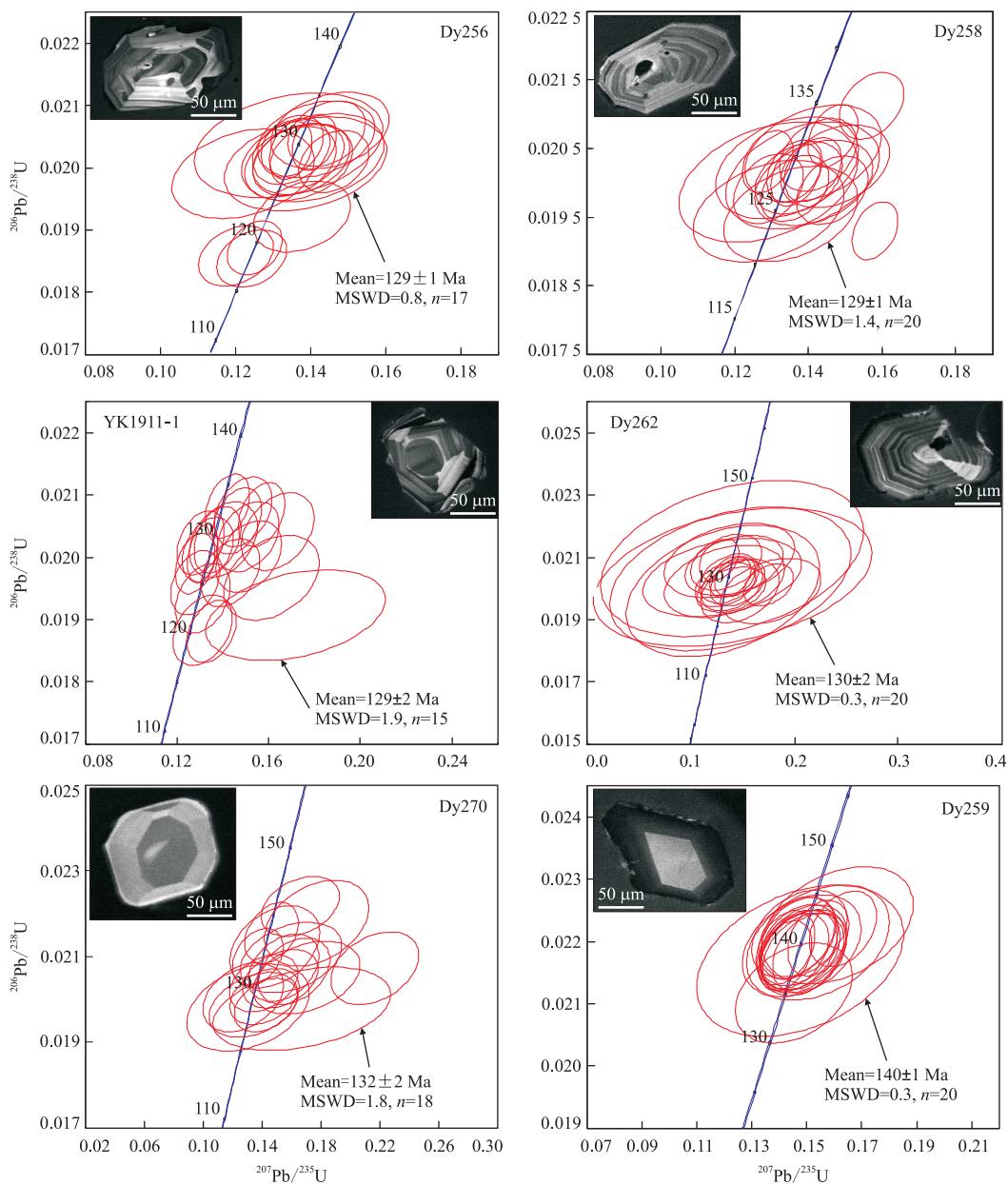


图 3 鄂城岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagrams for the Echeng intrusion

中粒闪长岩的结晶年龄。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

本文共对鄂城杂岩体的 5 个代表性样品进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析, 获得的数据见附表 2.

中粒花岗岩样品(Dy256)共分析了 11 个点. 所有分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布在 0.282 267~0.282 419 之间. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 -15.24~-9.83 之间, 加权平均值为 -13 ± 2. 对应的两阶段 Hf 模式年龄值 (T_{DM2}) 为 1.80~2.15 Ga, 加权平均值为 1.98 ± 0.06 Ga.

角闪石英二长岩样品(Dy258)共分析了 9 个点. 所有分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较均一, 且分布在

0.282 048~0.282 263 之间. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 -22.91~-15.31 之间, 加权平均值为 -17.5 ± 1.6. 对应的两阶段 Hf 模式年龄值 (T_{DM2}) 为 2.15~2.63 Ga, 除去一个数值偏大的测试点, 其余测试点的加权平均值为 2.24 ± 0.07 Ga.

中粒闪长岩样品(Dy259)共分析了 10 个点. 除了分析点 Dy259-7 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.282 204) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-17.11) 明显偏低以外, 其余分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均比较集中, 分别为 0.282 418~0.282 556 和 -9.50~-4.69, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 加权平均值为 -7.3 ± 1.1. 同样的, 除了分析点 Dy259-7

的两阶段 Hf 模式年龄值(2270 Ma)明显偏大外,其余分析点的两阶段 Hf 模式年龄值(T_{DM2})均分布在 $1.49 \sim 1.79 \text{ Ga}$ 之间,加权平均值为 $1.79 \pm 0.05 \text{ Ga}$ 。

花岗斑岩样品(Dy262)共分析了 10 个点,所有分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较均一,分布在 $0.282\,156 \sim 0.282\,355$ 之间。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 $-19.18 \sim -12.04$ 之间,加权平均值为 -14.5 ± 1.7 。对应的两阶段 Hf 模式年龄值(T_{DM2})分布在 $1.94 \sim 2.39 \text{ Ga}$ 之间,大致可分为两群,加权平均值分别为 $1.99 \pm 0.04 \text{ Ga}$ 和 $2.27 \pm 0.1 \text{ Ga}$ 。

细粒闪长岩样品(Dy270)共分析了 5 个点,所有分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布在 $0.282\,352 \sim 0.282\,526$ 之间。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 $-14.8 \sim -8.7$ 之间,加权平均值为 -9.2 ± 2.1 。对应的两阶段 Hf 模式年龄值(T_{DM2})为 $1.56 \sim 1.95 \text{ Ga}$,除去一个 T_{DM2} 值偏低的分析点(Dy270-13)以外,其余分析点的 T_{DM2} 值的加权平均值为 $1.84 \pm 0.06 \text{ Ga}$ 。

3.3 全岩地球化学

鄂城岩体的全岩地球化学分析数据见附表 3。从岩石地球化学数据来看,鄂城岩体的岩石组成大致可分为花岗岩类和闪长岩类两组。其中,花岗岩类(包括花岗岩、花岗斑岩和角闪石英二长岩)具有高 SiO_2 ($66.56\% \sim 77.10\%$)、低 TiO_2 ($0.14\% \sim 0.53\%$)、 FeO_t ($0.34\% \sim 2.66\%$)、 MnO ($0.01\% \sim 0.04\%$)、 MgO ($0.09\% \sim 1.55\%$) 含量等特征, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $0.89 \sim 1.56$, $\text{Mg}^{\#}$ 为 $20 \sim 56$;闪长岩类(包括中、细粒闪长岩)具有低 SiO_2 ($57.42\% \sim 67.72\%$)、高 TiO_2 ($0.61\% \sim 0.86\%$)、 FeO_t ($1.74\% \sim 6.91\%$)、 MnO ($0.03\% \sim 0.08\%$)、 MgO

($1.57\% \sim 2.54\%$) 含量等特征, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 $0.25 \sim 0.72$, $\text{Mg}^{\#}$ 为 $32 \sim 67$ 。在图 4a 中,两组岩石均分布在高钾钙碱性系列—钾玄岩系列区域。区域上与铜多金属矿床相关的侵入岩也分布在高钾钙碱性—钾玄岩系列区域,而与铁铜矿床相关的侵入岩主要分布在高钾钙碱性系列区域。在图 4b 中,两组岩石均分布在准铝质—弱过铝质区域。区域上与铜多金属矿床相关的侵入岩分布在准铝质—弱过铝质区域,而与铁铜矿床相关的侵入岩主要分布在准铝质区域。在图 5 中,闪长岩类和花岗岩类具明显不同的变化趋势,且总体上花岗岩类随着 SiO_2 含量的增高, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 、 Ba 、 Sr 含量逐渐降低,表明岩浆演化过程中可能存在铁镁质矿物、磷灰石、斜长石及钛铁矿的分离结晶作用。区域上与铜多金属以及铁铜矿床相关的侵入岩分布范围明显不同于鄂城岩体,但随着 SiO_2 含量的增高,它们的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 含量均表现出与鄂城岩体相似的变化趋势。此外,随着 SiO_2 含量的增加,与铁铜矿床相关的侵入岩在 Ba 、 Sr 含量上表现出与鄂城岩体相似的变化趋势,而与铜多金属矿床相关的侵入岩则表现出与其不同的趋势。

在图 6b、6d、6f 和 6h 中,花岗岩类总体表现为明显的 Rb、Th、K、U、Zr、Hf 正异常以及 Ba、Sr、Nb、P、Ti 负异常,闪长岩类则呈明显的 Rb、Th、Zr、Hf 正异常以及 Nb、P、Ti 负异常。在图 6a、6c、6e 和 6g 中,两类岩石稀土元素配分曲线均呈右倾型,但花岗岩类(角闪石英二长岩除外)呈明显的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.34 \sim 0.73$),而闪长岩类则无明显的

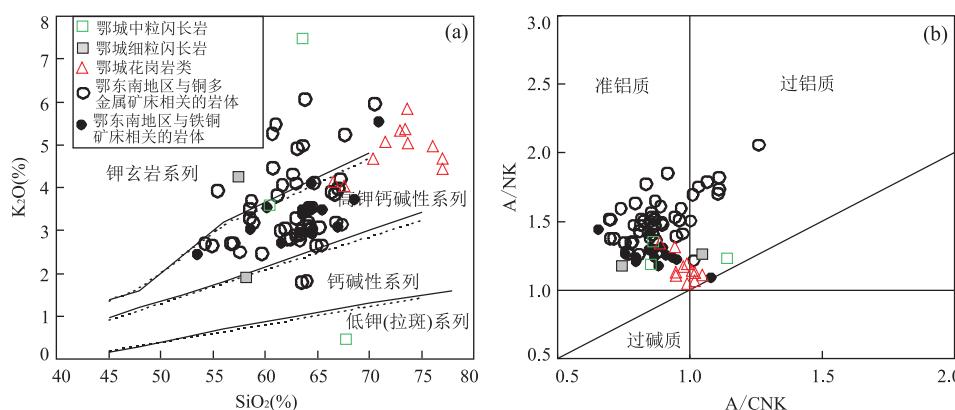


图 4 鄂城岩体 SiO_2 — K_2O 图解(a)和 A/CNK — A/NK 图解(b)

Fig.4 SiO_2 versus K_2O diagram (a) and A/CNK — A/NK diagram (b) for the Echeng intrusion

图 a 据 Rollison(1993);图 b 据 Maniar and Piccoli(1989)。与铜多金属矿床以及铁铜矿床相关的岩体数据引自 Li et al.(2009)、谢桂青等(2008)、Xie et al.(2011a, 2011b)以及未发表数据

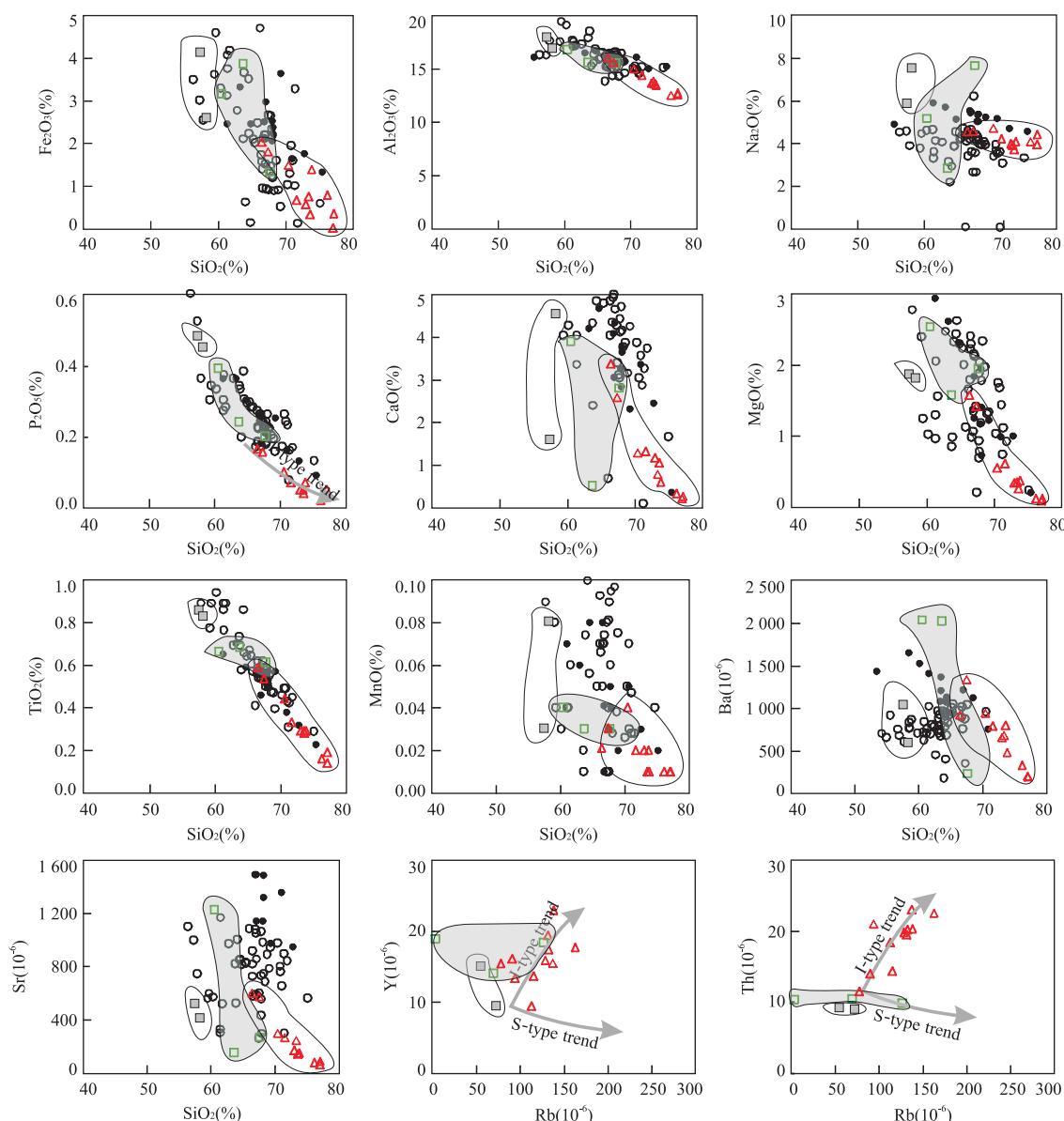


图 5 鄂城岩体 Harker 图解

Fig.5 Harker diagrams for the Echeng intrusion

图例以及引用数据来源同图 4

Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.72 \sim 0.93$)。区域上与铜多金属矿床以及铁铜矿床相关的侵入岩在微量元素及稀土元素方面均表现出与鄂城闪长岩类相似的特征。

3.4 全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素

本文共对鄂城岩体的 7 件代表性样品进行了 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析, 分析结果见附表 4。花岗岩类(包括花岗岩、花岗斑岩及角闪石英二长岩)的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值分布在 $0.70689 \sim 0.70800$ 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-11.7 \sim -10.1$, 对应的 T_{DM2} 值为 $1746 \sim 1874$ Ma; 闪长岩类的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值分布在 $0.70636 \sim 0.70752$ 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值略高, 为 -7.6 , 对应的 T_{DM2} 值为 $1544 \sim 1553$ Ma。

4 讨论

4.1 形成时代

本文新的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 鄂城杂岩体各岩相的侵位序次为: 中粒闪长岩相 (140 ± 1 Ma) \rightarrow 细粒闪长岩相 (132 ± 2 Ma) \rightarrow 花岗斑岩相 (130 ± 2 Ma) \rightarrow 花岗岩相(中细粒花岗岩 129 ± 2 Ma, 中粒花岗岩 129 ± 1 Ma) \rightarrow 角闪石英二长岩相 (129 ± 1 Ma)。根据野外接触关系观察, 细粒花岗岩与中粒花岗岩之间为渐变过渡关系, 中粒花岗岩与角闪石英二长岩之间界线清晰, 基本上为同

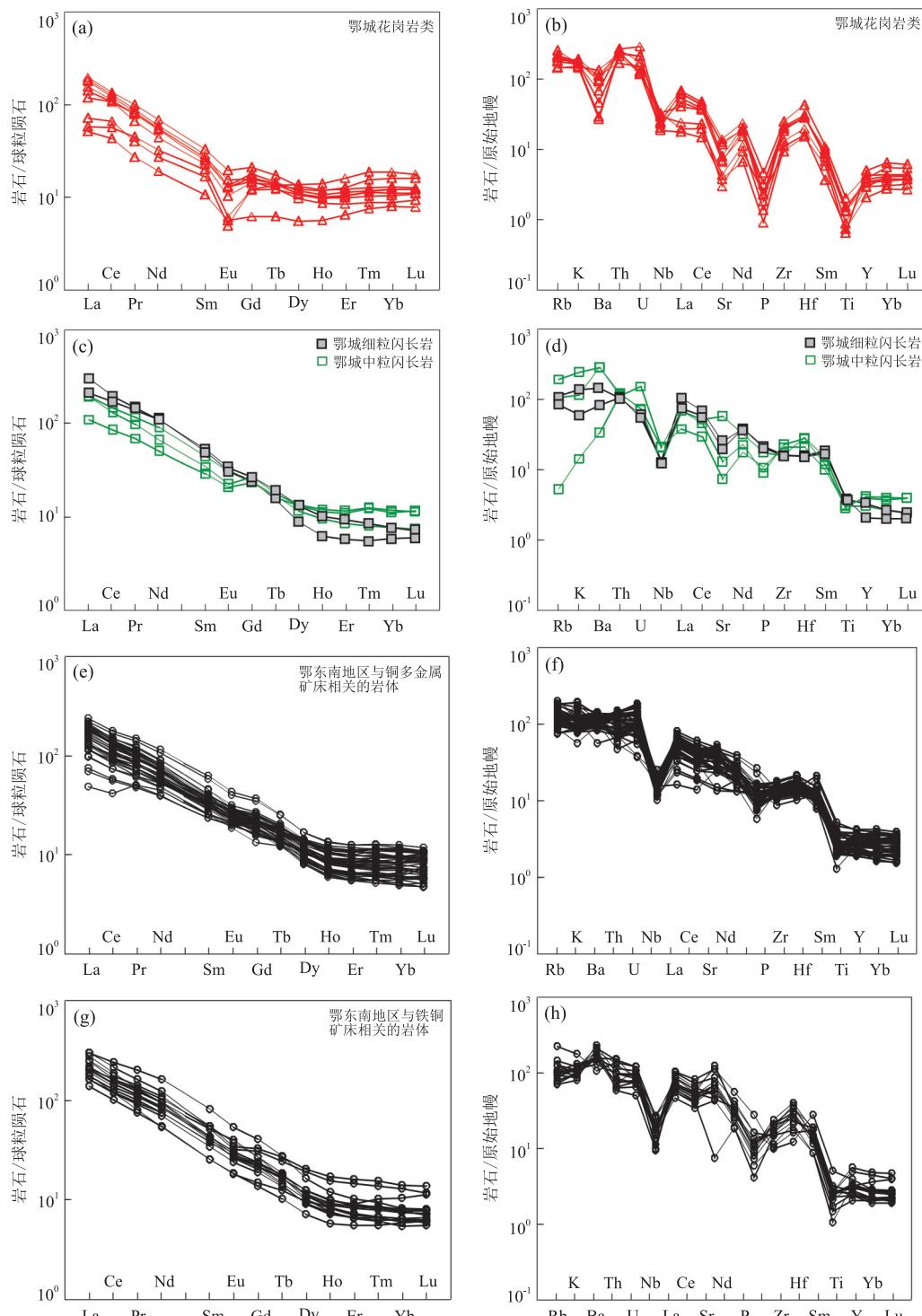


图 6 鄂城岩体(a,b,c,d)以及鄂东南地区与铜多金属矿床相关的岩体(e,f)和铁铜矿(g,h)相关的岩体稀土元素配分图解和微量元素蛛网图

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized element spider diagrams for the Echeng intrusion (a, b, c, d) and plutons related to copper polymetallic (e, f) and iron-copper deposits (g, h) in southeastern Hubei Province

原始地幔和球粒陨石标准值均引自 Sun and McDonough(1989);引用数据来源同图 4

时形成,与本文的锆石 U-Pb 定年结果基本吻合。研究表明,鄂东南地区晚中生代的岩浆活动最早始于晚侏罗世(~ 152 Ma),早白垩世早期达到高峰

(140 Ma 左右),至早白垩世中晚期(130 Ma 左右)岩浆侵入活动明显减弱,取而代之的是强烈的火山喷发作用(图 7)。本文报道的鄂城杂岩体侵位于

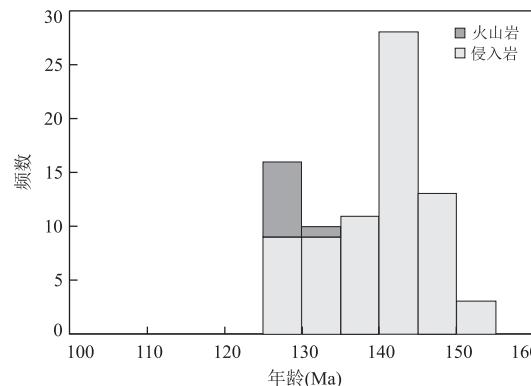


图 7 鄂东南地区晚中生代岩浆岩年龄直方图

Fig. 7 Age histograms of Late Mesozoic magmatism in southeastern Hubei Province

数据引自 Li *et al.* (2009, 2014)、Li *et al.* (2010)、Xie *et al.* (2006, 2011a, 2011b, 2012)、本文以及未发表数据

140~129 Ma, 岩浆活动持续了将近 11 Ma, 经历了鄂东南地区岩浆活动的高峰期至衰减期.

4.2 鄂城花岗岩类的成因

4.2.1 成因类型 从岩石地球化学特征来看, 鄂城花岗岩类的主量元素具有富 Si、Na、K, 贫 Ca、Mg、Al 的特征, 碱质含量高; 微量元素具有富集 Rb、Th、K、U、Zr、Hf, 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 的特征; 稀土元素呈典型的右倾“V”字型, 具较显著的负 Eu 异常, Σ REE 含量高, 轻、重稀土分馏明显, 表现出 A 型花岗岩的特征. 然而, 这些岩石具有较低的 Zr+ Nb+Ce+Y 含量 (173×10^{-6} ~ 403×10^{-6} , 均值为 293×10^{-6}), FeO_t/MgO (1.40~6.93, 均值为 3.35) 以及 $10000 \times$ Ga/Al 值 (2.07~2.51, 均值为 2.3), 上述特征与典型的 A 型花岗岩明显不同 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987). 因此, 可以排除属于 A 型花岗岩的可能性. 鄂城花岗岩类的 A/CNK 值介于 0.88~1.04, 在图 4 中样品分布在准铝质—弱过铝质区域. 实验研究表明, 在准铝质到弱过铝质岩浆中, 磷灰石的溶解度很低, 并在岩浆分异过程中随 SiO₂ 的增加而降低; 而在强过铝质岩浆中, 磷灰石的溶解度变化趋势则与之相反 (Wolf and London, 1994). 如附表 3 所示, 鄂城岩体所有样品的 P₂O₅ 含量均很低 (均在 0.20% 以下), 且随着 SiO₂ 含量的增加, P₂O₅ 含量呈下降趋势, 显示出与 I 型花岗岩一致的演化趋势 (Chappell, 1999). 这一趋势也得到了 Y-Rb 和 Th-Rb 图解 (图 5) 所表现出的正相关趋势的支持, 因为富 Y 矿物不会在准铝质 I 型岩浆演化的早期阶段结晶出来, 从而引起分异的 I 型花岗岩的 Y 含量高, 并与 Rb 含量呈正相关关系

(Li *et al.*, 2007a; 王赛等, 2016). 此外, 鄂城花岗岩类的固结指数(SI) 为 0.98~12.47 (多数小于 10), 分异指数(DI) 为 82~98, 与华南佛冈高分异 I 型花岗岩 (82~94; Li *et al.*, 2007b) 类似, 表明岩浆具有高分异的特征. 如附表 3 所示, 鄂城花岗岩类样品的烧失量均较低 (<1%), 因此可以排除蚀变可能对岩石成分产生影响. Zr/Hf、Nb/Ta 和 Y/Ho 等地球化学行为一致的元素 (简称双胞胎元素) 比值在一般的岩浆系统中并不发生数值的变化 (Green, 1995), 但当岩浆由于分异而发生性质上的明显改变时, 这些比值均将显著变小 (Bau, 1996). 因而, 有研究者提出, 同锆石 Zr/Hf 比值类似, 全岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值也可视为花岗岩浆结晶分异程度的标志 (Pérez-Soba and Villaseca, 2010; Ballouard *et al.*, 2016). 在图 8d 中, 鄂城花岗岩类均落入高分异花岗岩区域, 与图 8a~8c 显示的结果基本吻合. 综上, 笔者认为鄂城花岗岩类应属于高分异 I 型花岗岩.

4.2.2 岩石成因 自高分异 I 型花岗岩这一术语被提出以来, 该类岩石便得到了广泛关注 (Champion and Chappell, 1992; Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003a, 2003b; Li *et al.*, 2007b). 目前, 高分异 I 型花岗岩的形成机制主要有两种: (1) 由幔源岩浆底侵或侵入的下地壳的部分熔融形成 (Wu *et al.*, 2003b; Li *et al.*, 2007b); (2) 由两阶段岩浆过程形成, 首先是在下地壳中幔源玄武质岩浆和壳源长英质岩浆发生混合, 随后母岩浆发生广泛的结晶分异作用 (Chen *et al.*, 2000; 邱检生等, 2008; Zhu *et al.*, 2009; Tao *et al.*, 2013). 鄂城花岗岩类样品的 Nb/Ta 比值为 8.0~12.6, 低于地幔平均值 (60), 较接近于地壳平均值 (10), Zr/Hf 比值为 21.02~26.15, 也低于地幔值 (34~60) 而较接近于地壳平均值 (35.5; Wedepohl *et al.*, 1995), 表明壳源物质在鄂城花岗岩类的产生过程中占主导地位. 此外, 鄂城花岗岩类以负的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-11.7~-10.1) 和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-9.83~-22.91) 为特征, 对应的两阶段 Hf 模式年龄和 Nd 模式年龄分别为 1 800~2 300 Ma 和 1 746~1 874 Ma. 在图 9 中, 这些岩石主要分布在 1.8 Ga 与 2.5 Ga 地壳演化线之间的区域, 表明它们可能来源于古老的地壳物质. 在图 10 中, 鄂城花岗岩类主要分布在大别山变质岩区域, 进一步印证了它们来源于古老的壳源物质. 从鄂东南地区继承锆石的年代学来看, 北部地区即黄石—灵乡断裂以北地区以 ~1 100 Ma 为主, 其次是 1 800~2 000 Ma, ~2 500 Ma, 少量为 500~900 Ma,

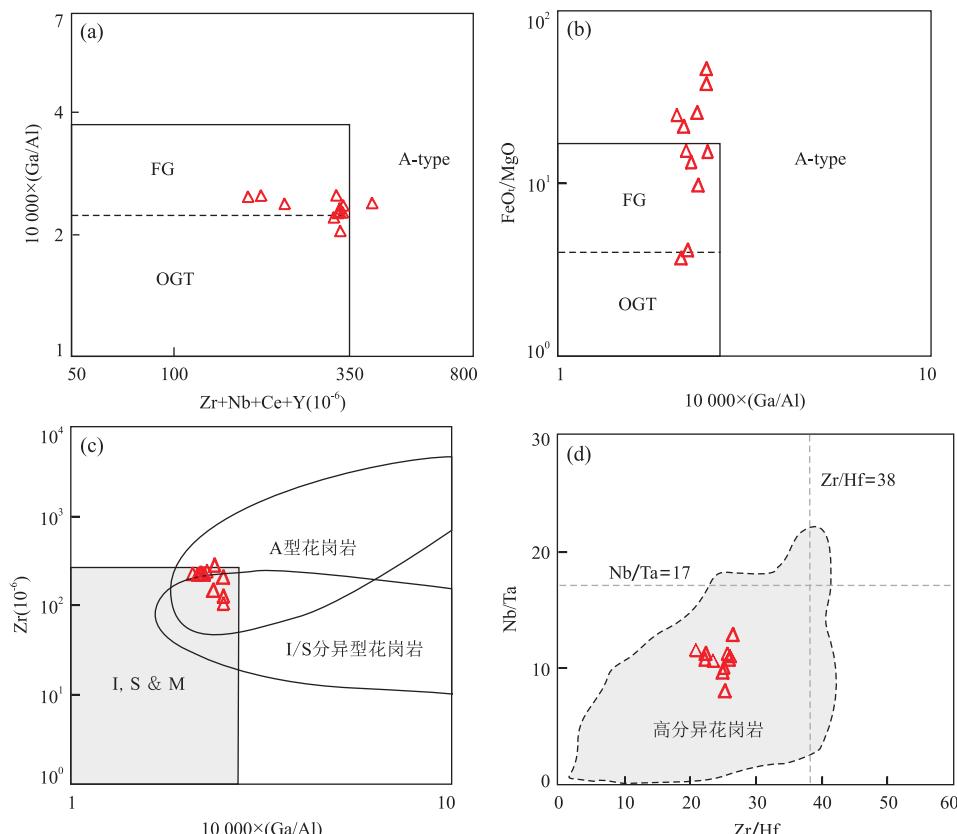


图8 鄂城花岗岩类的(a) $10000 \times (Ga/Al)$ - $(Zr+Nb+Ce+Y)$, (b) FeO_t/MgO - $10000 \times Ga/Al$, (c) $Zr-10000 \times (Ga/Al)$ 和(d) $Zr/Hf-Nb/Ta$ 图

Fig.8 (a) $10000 \times (Ga/Al)$ vs. $(Zr+Nb+Ce+Y)$, (b) FeO_t/MgO vs. $10000 \times Ga/Al$, (c) Zr vs. $10000 \times (Ga/Al)$ and (d) Zr/Hf vs. Nb/Ta diagrams of the Echeng granitoids

图8a,8b,8c据Whalen *et al.*(1987);图8d据吴福元等(2017);OGT, I, S&M型花岗岩;FG,高分异的I型花岗岩

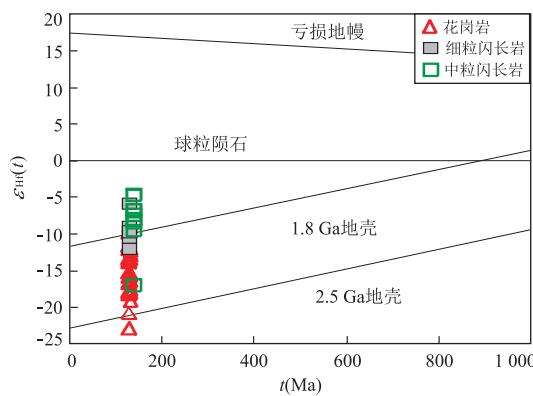
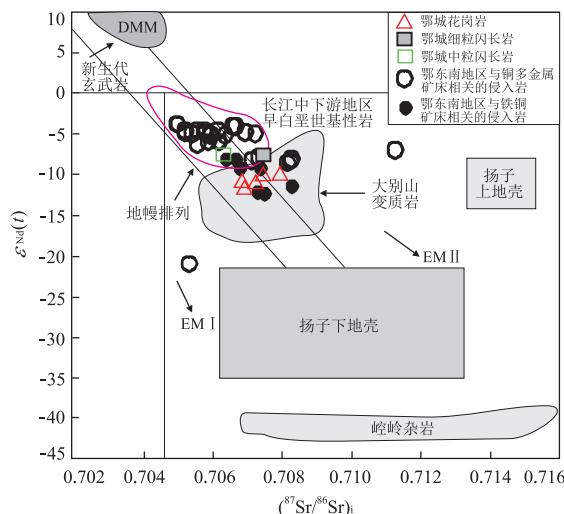


图9 鄂城岩体锆石Hf同位素组成

Fig.9 Zircon Hf isotopic compositions for the Echeng intrusion

2 700~2 900 Ma。鄂城花岗岩类对应的地壳模式年龄总体上与1 800~2 000 Ma的继承锆石的年龄相当,结合图11,它们应主要来源于古元古代基底物质的部分熔融作用。锆石的饱和温度(Watson and Harrison, 1983)计算表明,鄂城花岗岩类的母岩浆具有较高的温度($754\sim826^{\circ}\text{C}$),且分布在有地幔物

质参与的华南佛冈花岗岩范围之内($728\sim840^{\circ}\text{C}$) (图12; Li *et al.*, 2007a),表明在鄂城花岗岩质岩浆的形成过程中可能也有幔源物质的参与。综上,笔者认为鄂城高分异I型花岗岩类应主要起源于古元古代基底物质的部分熔融作用,源区可能有少量地幔物质的加入。显然,如果仅仅是上述母岩浆直接结晶,难以解释现今观察到的全岩主量元素和微量元素的地球化学特征。鄂城花岗岩类一些微量元素的亏损(如Ba、Sr、Eu、P、Nb和Ti等)指示其母岩浆可能经历了显著的分离结晶作用(Chappell, 1999)。如Nb和Ti负异常通常认为是由含Ti矿物相发生分离结晶作用所致(如钛铁矿和榍石),而明显的负Eu异常则表明可能存在斜长石和/或钾长石的分离结晶作用,Sr和Ba的强烈亏损进一步支持斜长石和钾长石的分离结晶作用,P的强烈亏损表明发生了磷灰石的分离结晶。此外,鄂城花岗岩类很低的Fe和Mg含量也与它们高分异的属性吻合,这些元素很可能是在黑云母和角闪石的分离结晶过程中被移除。

图 10 鄂城岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图Fig.10 Initial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the Echeng intrusion

DMM. 亏损地幔单元; EM(I, II). 富集地幔单元, 引自 Zindler and Hart(1986); 长江中下游地区早白垩世基性岩引自 Yan et al. (2008); 上地壳引自 Taylor and McLennan(1985); 扬子下地壳引自 Jahn et al.(1999); 岦岭杂岩和大别山变质岩引自 Ma et al.(2000); 与铜多金属矿床和铁铜矿床相关的侵入岩数据来源同图 4

4.3 鄂城闪长岩类的成因

从侵位时代来看, 鄂城闪长岩类分为早、晚两期。在图 5 中, 晚期侵位的细粒闪长岩与同期侵位的花岗岩类在成分上并不连续, 表明它们应来源于不同的岩浆源区。在岩石地球化学方面, 早晚两期闪长岩基本相似, 总体上具有低 SiO_2 , 高 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO_t 、 MgO 含量等特征。在微量元素方面, 它们总体表现出明显的 Nb、P、Ti 负异常以及 Rb、Th、Zr、Hf 正异常, 且 P、Ti 负异常明显较花岗岩类弱, 无明显的 Ba、Eu 异常。在同位素组成方面, 鄂城闪长岩类的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值略高于花岗岩类,

且其 Sr-Nd-Hf 同位素组成明显不同于扬子克拉通地壳岩石(图 10), 而与长江中下游地区早白垩世基性岩类以及区域上与铜多金属矿床相关的中酸性岩类相近(图 13, 图 14)。在图 9 中, 这些岩石主要分布在 1.8 Ga 地壳演化线与球粒陨石演化线之间的区域, 与花岗岩类明显不同。此外, 鄂城闪长岩类的锆石单阶段 Hf 模式年龄($T_{\text{DM}} = 1.0 \sim 1.2 \text{ Ga}$)和全岩单阶段 Nd 模式年龄($T_{\text{DM}} = 1.3 \text{ Ga}$)均与扬子克拉通东部早白垩世钾质—超钾质玄武岩的 Nd 模式年龄基本一致(刘洪等, 2002; Wang et al., 2006)。众多研究表明, 长江中下游地区早白垩世基性岩类以及区域上与铜矿化相关的中酸性侵入岩均显示出富集地幔的属性, 且主要来源于富集地幔(Wang et al., 2001; 刘洪等, 2002; Wang et al., 2006; Yan et al., 2008; Li et al., 2009; Xie et al., 2011a, 2011b; 丁丽雪等, 2016; 孙洋等, 2017)。综上, 笔者认为鄂城闪长岩类可能主要来源于富集岩石圈地幔源区。然而, 这样的源区直接熔融产生的是玄武质熔体而非安山质熔体(Nicholls and Ringwood, 1972; Green, 1973; Wilson, 1989)。尽管实验数据显示富硅熔体可以由地幔橄榄岩经低温部分熔融形成(Baker et al., 1995), 然而与地幔橄榄岩平衡的熔体的 $\text{Mg}^{\#}$ 可达 70~80(Falloon et al., 1997)。鄂城闪长岩类较低的 $\text{Mg}^{\#}$ (32~67) 表明它们的成分不可能代表原始的与橄榄岩矿物组合平衡的熔体, 而是经历了演化分异的地幔熔体, 这也被样品中具有较低的 Cr 和 Ni 含量所支持。此外, 在图 13 中, 鄂城闪长岩样品均显示出分离结晶的演化趋势, 表明结晶分异在岩浆演化过程中具有重要作用。从锆石的 Hf 同位素组成来看(附表 2), 除了点 Dy259-7 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-17.11) 明显偏低以外, 其余分析点的

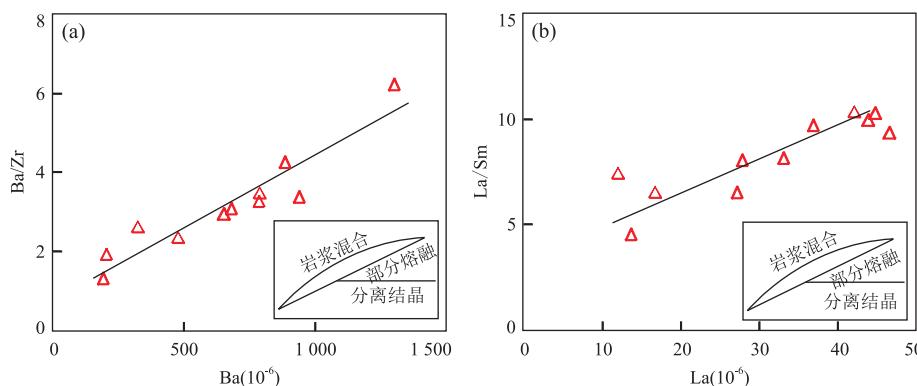


图 11 鄂城岩体花岗岩类(a)Ba/Zr-Ba 和(b)La/Sm-La 图解

Fig.11 (a) Ba/Zr vs. Ba and (b) La/Sm vs. La diagrams of the Echeng granitoids

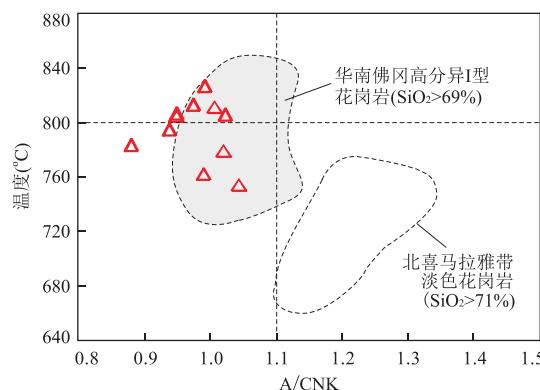


图 12 鄂城岩体花岗岩类的铝饱和指数(A/CNK)-锆石饱和温度图解

Fig.12 A/CNK vs. Zircon saturation temperature diagram of the Echeng granitoids

锆石饱和温度据 Watson and Harrison(1983)方法计算. 华南高分异 I 型花岗岩据 Li *et al.*(2007b); 北喜马拉雅带淡色花岗岩据 Zhang *et al.*(2004)

$\epsilon_{\text{HF}}(t)$ 值较均一, 主要分布在 $-4.69 \sim -12.04$ 之间, 表明在岩浆演化过程中可能存在一定的陆壳混染作用, 但较有限. 另外, 在锆石的 CL 图像中, 笔者并未发现核幔结构和古老的继承锆石, 进一步表明陆壳混染作用是十分有限的.

4.4 鄂城杂岩体的岩浆演化及其对成矿作用的指示

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果显示, 鄂城杂岩体的岩浆演化始于 140 Ma 左右小规模的闪长质岩浆的侵位, 随后在约 130 Ma 左右新的一股小规模的闪长质岩浆以及大规模的花岗质岩浆发生侵位, 并先后形成了细粒闪长岩、石英二长岩、花岗岩和花岗斑岩. 整个岩浆演化过程从 140 Ma \sim 129 Ma, 大致持续了约 11 Ma. 从整个长江中下游地区晚中生代的岩浆活动来看, 140 Ma 左右是区域上重要的岩浆活动期. 这一时期鄂东南地区的岩浆活

动主要发生在黄石—灵乡断裂以南地区, 而断裂以北地区的岩浆活动则相对较弱. 从地球化学特征来看, 鄂东南地区 140 Ma 左右的岩浆岩主要为中酸性岩, 属于高钾钙碱性—钾玄岩系列, 准铝质—弱过铝质, 分异指数均值为 75, 其全岩 Sr-Nd 同位素组成与长江中下游地区早白垩世基性岩相似(图 10), 这一时期的岩浆岩主要来源于富集地幔(Xie *et al.*, 2006, 2011a, 2011b; Li *et al.*, 2009), 且主要与铜多金属矿床有关, 以阳新、丰山洞、鸡笼山、李家湾、铜山口、龙角山、铜绿山等为代表. 目前整个鄂东南地区与矽卡岩型铁矿化有关的晚中生代岩浆作用大致可以分为两期(Xie *et al.*, 2011a, 2012): (1) 135 \sim 144 Ma 辉长岩、闪长岩和石英闪长岩, 以及矽卡岩型 Cu-Fe, Fe-Cu 和 Au-Cu 矿床(137 \sim 144 Ma); (2) 127 \sim 133 Ma 闪长岩、石英闪长岩和花岗岩以及相关的矽卡岩铁矿床(132 \sim 133 Ma). 其中, 135 \sim 144 Ma 的岩浆岩以中性岩为主, 属于高钾钙碱性系列, 准铝质, 分异指数均值为 80, 其全岩 Sr-Nd 同位素组成介于大别山变质岩和长江中下游地区早白垩世基性岩之间(图 10), 这一时期的岩浆已有较多壳源物质的加入, 且主要与铁铜金属矿床有关, 以铁山岩体为代表. 127 \sim 133 Ma 的岩浆岩以酸性岩为主, 主要分布在黄石—灵乡断裂以北地区, 属于高钾钙碱性—钾玄岩系列, 准铝质—弱过铝质, 分异指数均值为 84, 其全岩 Sr-Nd 同位素组成与大别山变质岩类似(图 10), 以鄂城、王豹山和金山店岩体为典型代表, 这一时期的岩浆作用以壳源为主, 且仅与铁矿化作用密切相关. 综合来看, 整个鄂东南地区随着岩浆源区壳源物质贡献的增大以及岩浆分异程度的增加, 岩浆作用与铁矿化的关系也更加密切(图 14, 图 15).

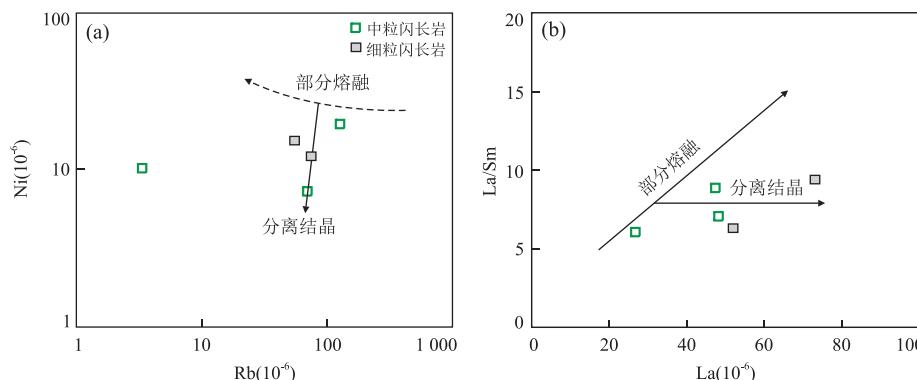


图 13 鄂城闪长岩的(a)Rb-Ni 和(b)La-La/Sm 图

Fig.13 (a) Rb vs. Ni and (b) La vs. La/Sm diagrams of the Echeng diorites

图据 Allègre and Minster(1978)

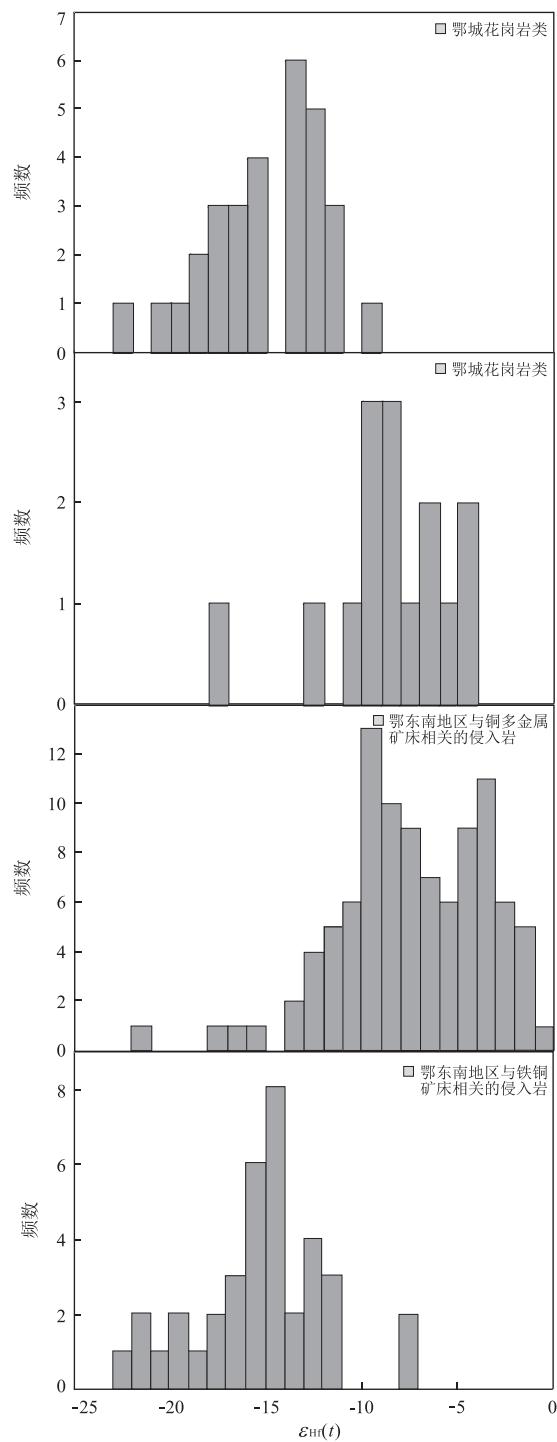


图 14 鄂城岩体以及鄂东南地区与铜多金属矿床和铁铜矿床相关的侵入岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 直方图

Fig.14 Histograms of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values for the Echeng complex and intrusions related to copper polymetallic deposits and Fe-Cu deposits

与铜多金属矿床以及铁铜矿床相关的侵入岩数据引自 Xie et al. (2011a, 2011b) 以及未发表数据

对于鄂城岩体而言, 中粒闪长岩的锆石 U-Pb 年龄与区域上第一期矽卡岩型铁矿化作用的时间吻合

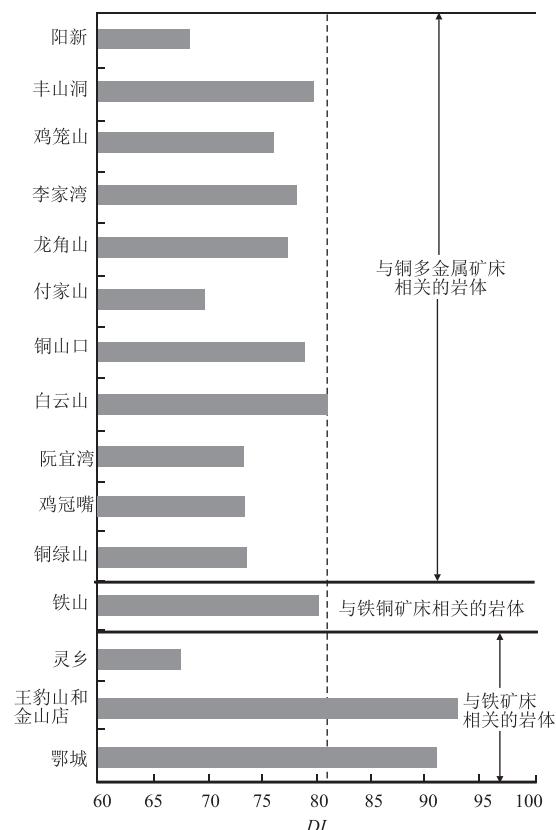


图 15 鄂东南地区与成矿作用相关的岩体的分异指数对比
Fig.15 Differentiation index diagram of intrusions related to mineralizations in southeastern Hubei Province
与铜多金属矿床以及铁铜矿床相关的岩体数据引自 Li et al. (2009);
谢桂青等(2008); Xie et al. (2011a, 2011b) 以及未发表数据

合, 但明显要早于目前已报道的程潮铁矿化的时间, 因此其与程潮铁矿床的主体矿化可能关系不大, 但是否与另一期成矿作用有关有待进一步研究。鄂城花岗岩类(包括花岗岩、花岗斑岩和角闪石英二长岩)和细粒闪长岩均侵位于 130 Ma 左右, 与程潮铁矿区矿体内包裹的角砾状石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(129 ± 2 Ma; Xie et al., 2012)基本一致, 且与区域上第二期的铁矿化作用时间吻合。Xie et al. (2012) 报道了来自湿矽卡岩阶段的磁铁矿矿石中金云母的 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 年龄为 132.6 ± 1.4 Ma, 并且认为这一年龄代表了成矿年龄。此外, 胡浩等(2014)报道了内矽卡岩中与磁铁矿共生的热液榍石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 131.2 ± 1.4 Ma, 并认为其代表了成矿年龄。从形成时代来看, 鄂城花岗岩类、细粒闪长岩均与程潮铁矿床的主要成矿期吻合。此外, 从野外接触关系来看, 程潮铁矿主要矿体产于花岗质岩与大理岩或花岗质岩与闪长质岩的接触带附近。因此, 鄂城花岗质岩和细粒闪长岩可能均与程潮铁矿化作用有关。姚磊等(2012)从

矿床的地质特征和稀土元素地球化学特征角度进行研究,结果显示鄂城花岗质岩与矽卡岩、矿体在稀土元素组成方面具有相似性,表明程潮铁矿的花岗质岩与矽卡岩和矿体在时间、空间和成因上都有着密切的联系。然而,从整个鄂东南地区来看,与矽卡岩型铁矿有关的侵入岩在岩石类型上基本上均为闪长岩类,如金山店铁矿床(石英闪长岩,130±1 Ma)、王豹山铁矿床(闪长玢岩,133±2 Ma)等。从侵位时间来看,鄂城细粒闪长岩(130 Ma)与上述闪长岩类应为同期岩浆作用的产物。此外,程潮铁矿的磁铁矿均含较低的 TiO_2 (0~0.2%)和 MnO (0~0.24%),与中国、加拿大、墨西哥和塞内加尔与闪长岩相关的矽卡岩型磁铁矿相似(Sangster, 1964; Zürcher et al., 2001; Schwartz and Melcher, 2004)。综上,鄂城细粒闪长岩很可能也与程潮铁矿化密切相关,然而其在铁矿化过程中具体扮演了怎样的角色还需进一步研究和探讨。

5 结论

本文对鄂城杂岩体的岩相学、元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成进行了较系统的研究,主要结论和认识如下:(1)鄂城杂岩体主要由花岗岩、花岗斑岩、石英二长岩以及中、细粒闪长岩组成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明,鄂城杂岩体的岩浆演化始于 140±1 Ma 小规模的中粒闪长岩的侵位,随后在约 130 Ma 左右新的一股小规模的闪长质岩浆以及大规模的花岗质岩浆发生侵位,并依次形成了细粒闪长岩、石英二长岩、花岗斑岩和花岗岩;(2)根据岩石地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素特征,鄂城杂岩体的岩石组成大致可以分为花岗岩类(花岗岩、花岗斑岩和角闪石英二长岩)和闪长岩类(中、细粒闪长岩)两组。其中,花岗岩类属于高分异 I 型花岗岩,主要起源于古元古代基底物质的部分熔融作用,源区可能有少量幔源物质的加入;闪长岩类主要来源于富集岩石圈地幔,且经历了一定的分离结晶作用;(3)年代学结果显示,鄂城花岗岩类和细粒闪长岩的侵位时间均与程潮铁矿床的主成矿期吻合。结合野外接触关系以及前人的研究,程潮铁矿化可能与鄂城花岗质岩和细粒闪长岩均有关;(4)整个鄂东南地区随着岩浆源区壳源物质贡献的增大以及岩浆分异程度的增加,岩浆作用与铁矿化的关系也更加密切。

致谢:测试分析得到了西北大学大陆动力学国

家重点实验室、中国地质调查局武汉地质矿产研究所同位素实验室、武汉综合岩矿测试中心相关工作人员的协助;野外工作得到了武钢矿业公司程潮铁矿相关工作人员的帮助;两位审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Allegre, C. J., Minster, J. F., 1978. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1—25. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(78\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0012-821x(78)90123-1)
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Baker, M.B., Hirschmann, M.M., Ghiorso, M.S., et al., 1995. Compositions of Near-Solidus Peridotite Melts from Experiments and Thermodynamic Calculations. *Nature*, 375 (6529): 308—311. <https://doi.org/10.1038/375308a0>
- Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., et al., 2016. Nb-Ta Fractionation in Peraluminous Granites: A Marker of the Magmatic-Hydrothermal Transition. *Geology*, 44(3): 231—234. <https://doi.org/10.1130/g38169.y.1>
- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323—333. <https://doi.org/10.1007/s004100050159>
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1—2): 243—258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Champion, D.C., Chappell, B.W., 1992. Petrogenesis of Felsic I-Type Granites: an Example from Northern Queensland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1—2): 115—126. <https://doi.org/10.1017/s026359330000780x>
- Chappell, B.W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535—551. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00086-3)
- Chen, C.H., Lin, W., Lu, H.Y., et al., 2000. Cretaceous Fractionated I-Type Granitoids and Metaluminous A-Type Granites in SE China: The Late Yanshanian Post-Orogenic Magmatism. *Transactions of the Royal Society of*

- Edinburgh : Earth Sciences*, 91 (1 – 2) : 195 – 205.
<https://doi.org/10.1017/s0263593300007379>
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2) : 189 – 200.
- Deng, X.D., Li, J.W., Zhou, M.F., et al., 2015. In-Situ LA-ICPMS Trace Elements and U-Pb Analysis of Titanite from the Mesozoic Ruanjiawan W-Cu-Mo Skarn Deposit, Daye District, China. *Ore Geology Reviews*, 65 : 990 – 1004. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.08.011>
- Ding, L.X., Huang, G.C., Xia, J.L., 2014. Petrogenesis of the Longjiaoshan-Fujiashan Porphyritic Intrusion in Southeastern Hubei Province and Implications for Cu-W Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 88 (8) : 1513 – 1527 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L.X., Huang, G.C., Xia, J.L., 2016. Petrogenesis of the Yangxin Complex in Southeast Hubei Province: Constraints from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Geological Journal of China Universities*, 22 (3) : 443 – 458 (in Chinese with English abstract).
- Falloon, T.J., Green, D.H., O'Neill, H.S.C., et al., 1997. Experimental Tests of Low Degree Peridotite Partial Melt Compositions: Implications for the Nature of Anhydrous Near-Solidus Peridotite Melts at 1 GPa. *Earth and Planetary Science Letters*, 152 (1 – 4) : 149 – 162. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00155-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00155-6)
- Green, D.H., 1973. Experimental Melting Studies on a Model Upper Mantle Composition at High Pressure under Water-Saturated and Water-Undersaturated Conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 19 (1) : 37 – 53. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90176-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90176-3)
- Green, T.H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120 (3 – 4) : 347 – 359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-x)
- Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (1) : 133 – 147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Hu, H., Duan, Z., Luo, Y., et al., 2014. Trace Element Systematic of Magnetite from the Chengchao Iron Deposit in the Daye District: A Laser Ablation ICP-MS Study and Insights into Ore Genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5) : 1292 – 1306 (in Chinese with English abstract).
- Huang, G.C., Xia, J.L., Ding, L.X., et al., 2013. Stage Division and Origin of Tonglushan Pluton in Southeast Hubei Province: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Geology in China*, 40 (5) : 1392 – 1408 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B.M., Wu, F.Y., Lo, C.H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157 (1/2) : 119 – 146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)
- Li, J.W., Vasconcelos, P.M., Zhou, M.F., et al., 2014. Longevity of Magmatic-Hydrothermal Systems in the Daye Cu-Fe-Au District, Eastern China with Implications for Mineral Exploration. *Ore Geology Reviews*, 57 : 375 – 392. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.002>
- Li, J.W., Zhao, X.F., Zhou, M.F., et al., 2008. Origin of the Tongshankou Porphyry-Skarn Cu-Mo Deposit, Eastern Yangtze Craton, Eastern China: Geochronological, Geochemical, and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints. *Mineral Deposita*, 43 (3) : 315 – 336. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0161-3>
- Li, J.W., Zhao, X.F., Zhou, M.F., et al., 2009. Late Mesozoic Magmatism from the Daye Region, Eastern China: U-Pb Ages, Petrogenesis, and Geodynamic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157 (3) : 383 – 409. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0341-x>
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., 2007a. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52 (14) : 1873 – 1885. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0259-0>
- Li, X.H., Li, W.X., Wang, X.C., et al., 2010. 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. *Lithos*, 119 (3 – 4) : 427 – 438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.018>
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2007b. 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? *Lithos*, 96 (1) : 186 – 204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>
- Liu, H., Qiu, J.S., Luo, Q.H., et al., 2002. Petrogenesis of the Mesozoic Potash-Rich Volcanic Rocks in the Luzong Basin, Anhui Province: Geochemical Constraints. *Geochimica*, 31 (2) : 129 – 140 (in Chinese with English abstract).

- abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:0379-1726.2002.02.004>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 1–70.
- Luo, D.W., 2008. Study on Contact Zone Tectonic and Deep Exploration in Chengchao Iron Deposit, Hubei Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ma, C.Q., Carl, E., Xu, C.H., et al., 2000. The Roots of the Dabieshan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Terrane: Constraints from Geochemistry and Nd-Sr Isotope Systematics. *Precambrian Research*, 102(3–4): 279–301. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(00\)00069-3](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(00)00069-3)
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co)
- Min, H.L., Xu, B.J., Ji, A., et al., 2008. Factor Analysis of Trace Elements of Chengchao Iron Ore. *Metalmine*, 38(9): 93–96 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1250.2008.09.028>
- Nicholls, I.A., Ringwood, A.E., 1972. Production of Silica-Saturated Tholeiitic Magmas in Island Arcs. *Earth and Planetary Science Letters*, 17(1): 243–246. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(72\)90282-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(72)90282-8)
- Pérez-Soba, C., Villaseca, C., 2010. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Peraluminous Granites: La Pedriza Pluton (Spanish Central System). *Geologica Acta*, 8(2): 131–149.
- Qiu, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of High Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry, and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468–2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z., Li, J.W., Hu, H., 2012. Fluid Inclusion Study of the Chengchao Iron Deposit in the Daye District, and Insights into Ore Genesis. *Mineral Deposits*, 31(S): 675–676 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2012.s1.341>
- Rollison, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Persentation, Interpretation. Pearson Education Limited, New York, 144–147.
- Sangster, D.F., 1964. The Contact Metasomatic Magnetite Deposits of Southwestern British Columbia (Dissertation). University of British Columbia, Vancouver. <https://doi.org/10.14288/1.0053070>
- Schwartz, M.O., Melcher, F., 2004. The Falémé Iron District, Senegal. *Economic Geology*, 99(5): 917–939. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.917>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, Y., Ma, C.Q., Liu, B., 2017. Record of Late Yanshanian Mafic Magmatic Activity in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 42(6): 891–908 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.077>
- Tao, J.H., Li, W.X., Li, X.H., et al., 2013. Petrogenesis of Early Yanshanian Highly Evolved Granites in the Longyuomba Area, Southern Jiangxi Province: Evidence from Zircon U-Pb Dating, Hf-O Isotope and Whole-Rock Geochemistry. *Science China Earth Sciences*, 56(6): 922–939. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4593-6>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Wang, J., Xie, G.Q., Yao, L., et al., 2014. Petrogenesis of Granodiorite Porphyry in Jilongshan Skarn Au Deposit of Southeast Hubei Province: Geochemical and Zircon U-Pb Dating constraints. *Mineral Deposits*, 33(1): 137–152 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2014.01.009>
- Wang, L., Hu, M.A., Zhang, W.S., et al., 2009. Structural Ore-Controlling Characteristic and Prospecting Direction in Chengchao Iron Deposit in Southeast Hubei. *Metalmine*, (4): 74–77 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1250.2009.04.021>
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., et al., 2006. Petrogenesis of Cretaceous Adakitic and Shoshonitic Igneous Rocks in the Luzong Area, Anhui Province (Eastern China): Implications for a Geodynamics and Cu-Au Mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.12.010>
- Wang, S., Ye, H.S., Yang, Y.Q., et al., 2016. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of the Huoshenmiao Pluton, Western Henan. *Earth Science*, 41(2): 293–316 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.022>
- Wang, Y.L., Zhang, Q., Wang, Y., 2001. Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks from Ningwu Area, and Its

- Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565—575 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2001.04.007>
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64 (2): 295—304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Wedepohl, K. H., Krueger, I., Hartmann, G., 1995. Medieval Lead Glass from Northwestern Europe. *Journal of Glass Studies*, 37: 65—82.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London.
- Wolf, M.B., London, D., 1994. Apatite Dissolution into Peraluminous Haplogranitic Melts: An Experimental Study of Solubilities and Mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127—4145. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90269-0)
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilde, S.A., et al., 2003a. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66 (3—4): 241—273. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0)
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilde, S.A., et al., 2003b. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (II): Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67 (3—4): 191—204. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(03\)00015-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(03)00015-x)
- Wu, F.Y., Liu, X.C., Ji, W.Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science in China (Series D)*, 47(7): 745—765 (in Chinese).
- Xia, J.L., Hu, M.A., Xu, B.J., et al., 2009. Geochemical Constraints on the Ore-Forming Materials of the Chengchao Iron Deposit, Hubei Province. *Geoscience*, 23 (2): 285—291 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8527.2009.02.013>
- Xia, J.L., Huang, G.C., Ding, L.X., et al., 2015. In Situ Analyses of Trace Elements, U-Pb and Lu-Hf Isotopes in Zircons from the Tongshankou Granodiorite Porphyry in Southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89 (5): 1588—1600. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12566>
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Li, R.L., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Dating for Volcanic Rocks of the Dasi Formation in Southeast Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River and Its Implications. *Chinese Science Bulletin*, 51 (24): 3000—3009. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2187-9>
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Li, R.L., et al., 2008. Geochemistry and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitoids in Southeastern Hubei Province and Constrains on the Timing of Lithospheric Thinning, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1917—1927 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Zhao, H.J., 2011a. Zircon U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of Late Mesozoic Intrusions in the Southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Belt (MLYRB), East China. *Lithos*, 125 (1—2): 693—710. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.04.001>
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Zhao, H.J., et al., 2011b. Timing of Skarn Deposit Formation of the Tonglushan Ore District, Southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt and Its Implications. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 62—77. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.005>
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Zhao, H.J., et al., 2012. Zircon U-Pb and Phlogopite ^{40}Ar - ^{39}Ar Age of the Chengchao and Jinshanidian Skarn Fe Deposits, Southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, China. *Mineral Deposita*, 47 (6): 633—652. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0367-2>
- Yan, J., Chen, J.F., Xu, X.S., 2008. Geochemistry of Cretaceous Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region, Eastern China: Characteristics and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(3/4): 177—193. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.11.002>
- Yao, L., Liu, J.L., Wang, J., et al., 2012. The Relationship between Granitoids and Mineralization of the Chengchao Large-Size Skarn Iron Deposit in Southeastern Hubei Ore Concentration Area. *Geology in China*, 39 (6): 1712—1726 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2012.06.019>
- Yao, L., Xie, G.Q., Mao, J.W., et al., 2015. Geological, Geochronological, and Mineralogical Constraints on the Genesis of the Chengchao Skarn Fe Deposit, Edong Ore District, Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 101: 68—82. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.01.018>
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chem-*

- ical Geology*, 247(1—2): 100—118. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.003>
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Zhang, H.F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. Causes and Consequences of Protracted Melting of the Mid-Crust Exposed in the North Himalayan Antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1—2): 195—212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.031>
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Wang, L.Q., et al., 2009. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Zayu Area of Eastern Gangdese, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(9): 1223—1239. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0132-x>
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical GeoDynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493—571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>
- Zürcher, L., Ruiz, J., Barton, M. D., 2001. Paragenesis, Elemental Distribution, and Stable Isotopes at the Peña Colorada Iron Skarn, Colima, Mexico. *Economic Geology*, 96(3): 535—557. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.3.535>
- 黄圭成,夏金龙,丁丽雪,等,2013.鄂东南地区铜绿山岩体的侵入期次和物源:锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据.中国地质,40(5): 1392—1408.
- 刘洪,邱检生,罗清华,等,2002.安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约.地球化学,31(2): 129—140.
- 骆地伟,2008.程潮铁矿接触带构造研究与深部找矿(硕士学位论文).中国地质大学(武汉).
- 闵厚禄,徐伯骏,季翱,等,2008.程潮铁矿矿石微量元素因子分析.金属矿山,38(9): 93—96.
- 邱检生,肖娥,胡建,等,2008.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.岩石学报,24(11): 2468—2484.
- 任喆,李建威,胡浩,2012.鄂东南地区程潮铁矿流体包裹体研究及其矿床成因意义.矿床地质,31(S): 675—676.
- 孙洋,马昌前,刘彬,2017.长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录.地球科学,42(6): 891—908.
- 王建,谢桂青,姚磊,等,2014.鄂东南鸡笼山矽卡岩型金矿床花岗闪长斑岩的成因:地球化学和锆石U-Pb年代学约束.矿床地质,33(1): 137—152.
- 王磊,胡明安,张旺生,等,2009.鄂东南程潮铁矿构造控矿特征及找矿方向.金属矿山,(4): 74—77.
- 王赛,叶会寿,杨永强,等,2016.豫西火神庙岩体桔石U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素组成.地球科学,41(2): 293—316.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,等,2017.高分异花岗岩的识别与研究.中国科学(D辑),47(7): 745—765.
- 夏金龙,胡明安,徐伯骏,等,2009.湖北程潮铁矿成矿物质来源的地球化学制约.现代地质,23(2): 285—291.
- 谢桂青,毛景文,李瑞玲,等,2008.鄂东南地区大型矽卡岩型铁矿床金云母⁴⁰Ar—³⁹Ar同位素年龄及其构造背景初探.岩石学报,24(8): 1917—1927.
- 姚磊,刘佳林,王建,等,2012.鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的花岗质岩与成矿关系探讨.中国地质,39(6): 1712—1726.
- 量元素组成及其矿床成因意义.岩石学报,30(5): 1292—1306.
- 黄圭成,夏金龙,丁丽雪,等,2014.鄂东南地区鄂城岩体的时代、成因及其对成矿作用的指示.地质学报,88(8): 1513—1527.
- 丁丽雪,黄圭成,夏金龙,2016.鄂东南地区阳新复式岩体成因:LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及Hf同位素证据.高校地质学报,22(3): 443—458.
- 胡浩,段壮,Luo, Y., 等,2014.鄂东程潮铁矿床磁铁矿的微

附中文参考文献

- 丁丽雪,黄圭成,夏金龙,2014.鄂东南地区龙角山—付家山斑岩体成因及其对成矿作用的指示.地质学报,88(8): 1513—1527.
- 丁丽雪,黄圭成,夏金龙,2016.鄂东南地区阳新复式岩体成因:LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及Hf同位素证据.高校地质学报,22(3): 443—458.
- 胡浩,段壮,Luo, Y., 等,2014.鄂东程潮铁矿床磁铁矿的微