

·专题研究·

鄂东南地区姜桥花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素特征及其地质意义

丁丽雪¹, 黄圭成¹, 夏金龙¹, 吴昌雄², 祝敬明², 金尚刚²

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要:鄂东南矿集区地处长江中下游成矿带的最西端。区内岩浆活动频繁,是长江中下游地区晚中生代岩浆岩带的重要组成部分。目前研究区内的含矿岩体(尤其是大岩体)已得到了广泛研究并取得了重要进展,但对不含矿岩体的研究还很薄弱。位于灵乡与殷祖岩体之间的姜桥岩体,是鄂东南地区众多小岩体中规模最大的一个,岩性为花岗闪长岩。本文利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)对其进行了精确的锆石 U-Pb 定年。结果表明姜桥花岗闪长岩侵位于 144 ± 1 Ma,属于早白垩世产物。锆石阴极发光(CL)图像显示,除了具有明显生长环带的岩浆锆石以外,样品中还存在少量具有古老核的继承锆石。岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为较低的负值,介于 $-9.1 \sim -14.6$ 之间。对应的两阶段模式年龄为 $1.77 \sim 2.11$ Ga,与部分继承锆石的 U-Pb 年龄一致,表明姜桥花岗闪长岩可能主要来源于古元古代的陆壳物质。继承锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-0.6 \sim -14.6$ 之间,对应的两阶段模式年龄为 $2.00 \sim 3.60$ Ga,暗示研究区内可能存在古太古代的基底。综合前人资料,认为姜桥花岗闪长岩的形成与岩石圈的伸展减薄有关,是区域构造体制大转折初期的产物。

关键词:长江中下游成矿带,鄂东南地区,姜桥岩体,早白垩世,岩石圈伸展

中图分类号: P597; P588.12⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0275-16

U-Pb ages and Hf isotope characteristics of zircons from Jiangqiao granodiorite in southeastern Hubei Province and their geological implications

DING Li-xue¹, HUANG Gui-cheng¹, XIA Jin-long¹, WU Chang-xiong², ZHU Jing-ming²
and JIN Shang-gang²

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China)

Abstract: Located in the westernmost part of the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt, the southeastern Hubei Fe-Cu province possesses extensive magmatism and is hence an important part of the Late Mesozoic magmatic belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Ore-forming plutons, especially large ones, have been extensively studied, with important progress achieved; nevertheless, the study of barren intrusions is very insufficient. Lying between the Lingxiang pluton and Yinzu pluton, the Jiangqiao intrusion consisting of granodiorite is the largest pluton among the small intrusions in southeastern Hubei Province. In this paper, the authors present high-precision zircon U-Pb age of the Jiangqiao granodiorite by using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The result indicates that its emplacement took place at 144 ± 1 Ma, suggesting a product of Early Cretaceous magmatism. The cathodoluminescence (CL) images of zircons

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2013-03-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查资助项目(1212011120863)

作者简介: 丁丽雪(1982-), 女, 助理工程师, 主要从事岩浆与成矿作用研究, E-mail: 569259265@qq.com

show that a few inherited zircons with ancient cores exist in the sample, except magmatic zircons with obvious overgrowth bands. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of magmatic zircons are relatively negative and vary from -9.1 to -14.6 . The corresponding two-stage model ages range from 1.77 Ga to 2.11 Ga, coincident with U-Pb ages of a few inherited zircons, indicating that the Jiangqiao granodiorite probably originated from Palaeoproterozoic crustal materials. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of inherited zircons range from -0.6 to -14.6 , corresponding to the two-stage model ages of $2.00 \sim 3.60$ Ga and therefore indicating that Palaeo-Archaean basement might exist in southeastern Hubei Province. These results, in combination with data available, suggest that the formation of the Jiangqiao granodiorite was related to lithospheric extension and thinning, thus being the initial product of tectonic regime transformation in eastern China.

Key words: middle and lower Yangtze metallogenic belt; southeastern Hubei Province; Jiangqiao intrusion; Early Cretaceous; lithospheric extension

长江中下游成矿带是我国东部重要的铜铁多金属成矿带之一,其形成与晚中生代大规模岩浆活动密切相关,是地质学界研究的热点地区之一。鄂东南矿集区地处长江中下游成矿带的最西端,区内岩浆活动十分频繁,中深成、浅成、超浅成侵入岩及喷出岩均有发育(图 1,图 2a)。早在 20 世纪 70~80 年代,许多学者就曾对这一地区岩浆岩的形成时代开展过大量研究,采用的测年方法主要是单矿物 K-Ar 法,全岩 Rb-Sr 法和传统的锆石 U-Pb 法,所得到的结果跨度很大(240~90 Ma,舒全安等,1992;苏欣栋等,1994;Pan and Dong,1999)。数据的精度普遍不高。自 90 年代以来,一些高精度测年方法(如 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法,单矿物激光剥蚀 Ar-Ar 法,硫化物 Re-Os 法)的引进及广泛应用,极大推动了鄂东南地区岩浆岩及成矿作用的研究,并获得了一批高精度的成岩和成矿年龄数据(Li *et al.*,2009,2010;Xie *et al.*,2006,2008,2011a,2011b;李华芹等,2009;陈富文等,2011;瞿泓滢等,2012)。Li 等(2009)利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对区内的侵入岩(主要是大岩体)进行了精确定年,结果表明鄂东南地区大规模的岩浆活动集中侵位于 $152 \sim 132$ Ma。Xie 等(2006,2008,2011a,2011b,2011c)也对鄂东南地区的岩浆岩(主要是成矿大岩体)做了大量工作,并提出区内侵入岩主体侵位于 $143 \sim 126$ Ma,且从早到晚存在由中基性向酸性演化的趋势,而火山岩则喷发形成于 $130 \sim 125$ Ma,且在成分上具有双峰式特征。总体上看,前人研究的重点是区内成矿岩体(尤其是大岩体),而对于不成矿岩体的研究还很薄弱。这在一定程度上制约了区域成岩成矿作用时空格架的建立及岩浆演化与成矿作用关系研究的深入。

姜桥岩体位于灵乡岩体与殷祖岩体之间,是鄂东南地区规模最大的一个小岩体(图 2b),目前在该岩体的内部及接触带附近均未见矿。本文首次利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法获得该岩体的精确侵位年龄,并在此基础上结合相应的锆石 Hf 同位素数据讨论了其岩石成因及构造背景。

1 区域地质概况

鄂东南矿集区位于扬子地台东北缘,长江中下游成矿带的最西端,北邻大别造山带。该矿集区与东部的九瑞、安庆、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇 6 个矿集区共同组成了长江中下游成矿带(图 1)。研究区内岩浆活动在燕山期最为强烈,且以岩浆侵入为主,晚期伴随有火山喷发作用(图 2a)。区内自北向南依次分布有鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新和殷祖 6 个大岩体和铜绿山、铜山口、姜桥、何锡铺、丰山洞等 30 多个小岩体。火山岩主要分布于保安-太和-灵乡和花湖一带。此外,在晚白垩世-渐新世的断陷盆地中还分布有少量新生代的玄武岩。

区内寒武系至第四系地层广泛出露(缺失中、下泥盆统和上侏罗统),且以青峰-襄广断裂为界,以北为秦岭区,以南为扬子区。本区变质基底主要由两部分地层组成,下部为以大别杂岩为代表的深变质岩系,上部为由冷家溪群和板溪群组成的浅变质岩系(翟裕生等,1992;雷如亮等,1994)。大别杂岩以二长花岗质片麻岩,花岗闪长质片麻岩、黑云斜长片麻岩等片麻岩类岩石为主(徐树桐等,2010),夹透晶状、条带状的榴辉岩(退变榴辉岩),均经历过超高压变质作用。研究表明,该套变质杂岩的原岩主要是扬子地块中北缘中、新元古代(主要是新元古代)

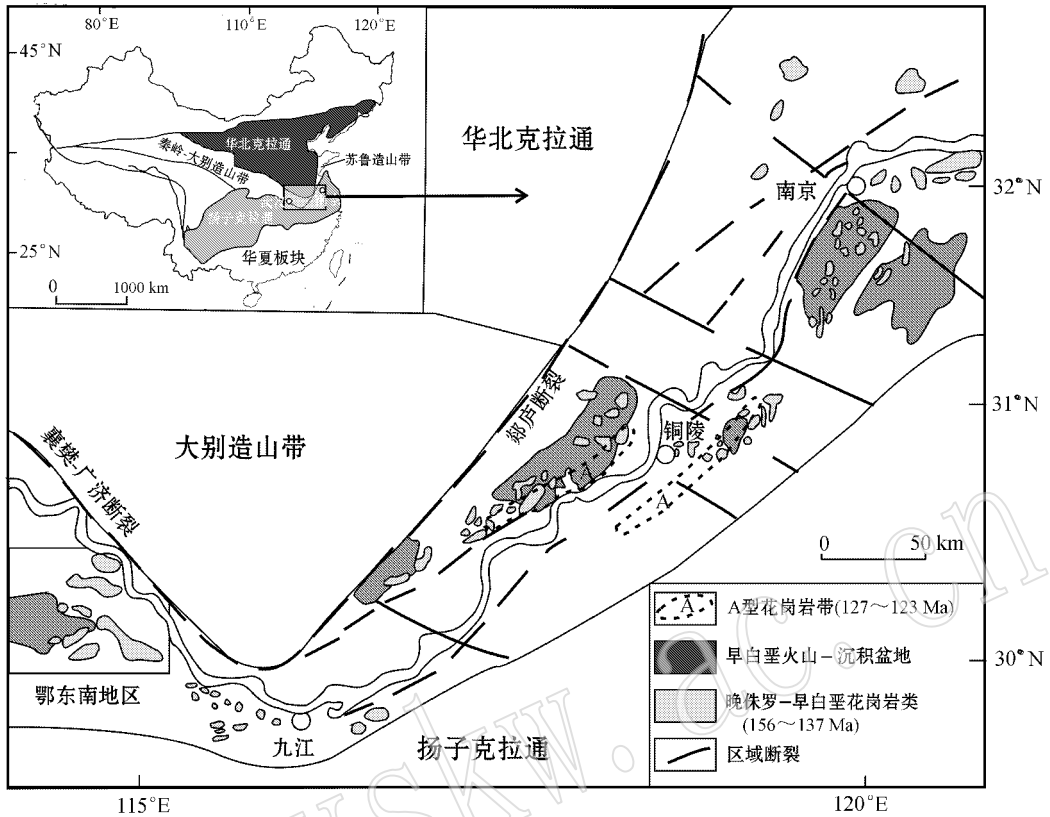


图 1 长江中下游地区晚中生代侵入岩及断层火山-沉积盆地分布简图

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of Late Mesozoic intrusions and fault-bounded volcano-sedimentary basins along the middle and lower reaches of the Yangtze River

基底 (Hacker *et al.*, 2000; 徐树桐等, 2002; Liu *et al.*, 2007)。冷家溪群和板溪群为一套新元古代浅变质岩系 (高林志等, 2011), 主要由板岩、粉砂质板岩、岩屑杂砂岩和凝灰质细碎屑岩组成, 局部夹火山岩 (陈公信等, 1996)。

2 岩体地质及样品描述

姜桥岩体出露于姜桥水库至眠羊地水库一带。岩体总体呈北东向延伸, 长 4.5 km, 宽 4 km, 总面积约 12 km², 为一平面形态呈葫芦状的岩株体 (图 2b)。岩性为花岗闪长岩, 沿大角山向斜北翼侵入。南部与二叠系栖霞组和茅口组灰岩、三叠系中、下统嘉陵江和大冶组灰岩均呈侵入接触, 接触面向南-南东倾斜。北缘在石任淑、吴家林一带, 超覆于三叠系灰岩之上, 接触面向南倾斜。东缘在小角山、困牛脑一带, 接触面向西倾斜。据物探资料推测, 岩体西缘在周家湾一带, 三叠系大理岩呈舌状体向南东插入其中, 接触面向西倾斜, 且倾角较缓。此外, 岩体内

部还发育有石英脉、细晶岩脉和闪长岩脉等多种岩脉。舒全安等 (1992) 根据野外观察、岩相等推测该岩体可能形成于燕山早期第二阶段, 且与铜绿山、铜山口、阮家湾、龙角山、鸡笼山、何锡铺等一系列小岩株属于同期。此外, 据物探资料推测, 姜桥花岗岩闪长岩体深部可能与殷祖杂岩体相连, 且相当于殷祖岩体的第三阶段侵入产物, 但迄今尚无确凿证据。目前姜桥岩体还缺乏精确的年代学研究。本文用于锆石 U-Pb 定年的岩石样品 (Dy311) 采于姜桥岩体西南缘的穿山隧道口 (30°00'50.0"N, 114°54'04.1"E), 岩性为花岗闪长岩。岩石呈灰白色, 中-细粒结构, 块状构造。矿物组成为石英 (20%~25%)、黑云母 (8%)、斜长石 (65%)、钾长石 (8%~10%) 及少量磷灰石 (<1%)、榍石 (<1%) 和不透明矿物 (<1%)。局部可见少量 (~3%) 较大矿物晶体, 由石英、钾长石和斜长石组成。岩石中石英多呈他形粒状, 晶体粒径主要分布在 0.2~0.7 mm 之间。黑云母呈黄褐色, 片状、长条状, 多数沿晶体边缘及解理发生一定程度的绿泥石化。斜长石多呈半自形-自

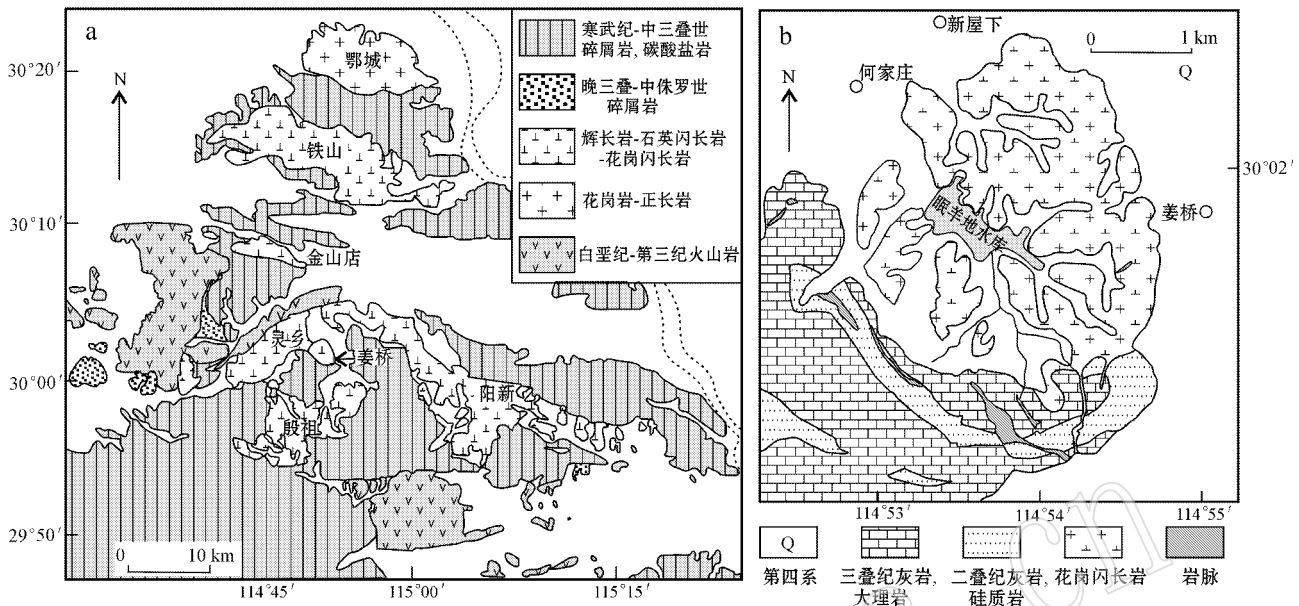


图 2 鄂东南地区地质及岩浆岩分布图(a, 据舒全安等, 1992)和姜桥岩体地质简图(b)

Fig. 2 The distribution of magmatic rocks in southeastern Hubei Province(a, after Shu Quan'an *et al.*, 1992) and simplified geological map of Jiangqiao intrusion(b)

形宽板状或粒状,少数呈板条状,多数晶体均发生一定程度的绢云母化、高岭土化。晶体粒径主要分布在 0.3~1.3 mm 之间,少数晶体粒径较大,最大可达 3.2 mm。钾长石多呈半自形-他形粒状,且多数发生一定程度的绢云母化、高岭土化。

3 分析方法

锆石单矿物分选在河北廊坊市诚信地质服务公司完成。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 公司生产的阴极荧光光谱仪(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,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。激光-电感耦合等离子体质谱仪由美国 PE 公司生产的 ELAN6100DRC 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 激光器以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统组成。测试过程中,除了少数锆石核部分分析点采用 20 μm 激光剥蚀孔径外,其余锆石分析点均采用 30 μm 的剥蚀孔径。详细的分析及仪器操作流程见参考文献(Yuan *et*

al., 2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver 4.0; 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 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2001)完成。

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定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,详细的分析及实验流程见文献(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 ,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。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ (De Bièvre and Taylor, 1993)和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ (Chu *et al.*, 2002)进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。在样品测定期间,获得锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282314 \pm 0.000011$ ($n = 23, 2\sigma$), GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282009 \pm 0.000012$ ($n = 23, 2\sigma$),与推荐值 0.2823075 ± 58 (2σ)(Wu *et al.*, 2006)和 0.282015 ± 0.000019 (2σ)(Elhlou *et al.*, 2006)吻合较好。 ϵHf 的计算采

用¹⁷⁶Lu衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 球粒陨石现今的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 772 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.033 2 (Blichert-Toft and Albarède, 1997); Hf 亏损地幔模式年龄 (t_{DM}) 的计算采用现今的亏损地幔¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283 25 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.038 4 (Vervoort and Blichert-Toft, 1999)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石多无色透明,少数因具有高铀含量而略显浑浊。自形-半自形柱状或粒状,粒径为 80~300 μm,长宽比为 1:1~1:5。多数锆石具有明显的岩浆振荡环带,属典型的岩浆结晶产物。少数粒状或短柱状锆石中可见明显的低亮度圆滑内核,偶见呈碎屑状的暗色内核(图 3)。本文对 21 颗锆石进行

了 U-Pb 同位素分析,其中 12 个分析点(Dy311-1~Dy311-12)位于锆石环带区,9 个分析点(Dy311-13~Dy311-21)位于锆石核部,结果见表 1 和图 4。如表 1 所示,锆石 U 含量普遍较低,且古老锆石核的 U 含量($27 \times 10^{-6} \sim 315 \times 10^{-6}$)总体较锆石环带区的 U 含量($136 \times 10^{-6} \sim 539 \times 10^{-6}$)略低。锆石 Th/U 比值总体较高,其中环带区的 Th/U 比值分布在 0.34~0.94 之间,而内部老核的 Th/U 比值则分布在 0.12~1.04 之间。如图 4 所示,锆石环带区 12 个分析点均分布于谐和线上或谐和线附近。其中,点 Dy311-06 和 Dy311-07 具有相对较老的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值,分别为 $157 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $152 \pm 3 \text{ Ma}$,与南部殷祖石英闪长岩的侵位年龄基本一致(Li *et al.*, 2009),表明岩体在侵位过程中可能捕获了早期岩浆岩中的锆石,或者暗示岩体深部可能存在与殷祖岩体同期侵位的隐伏岩体。其余 10 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年

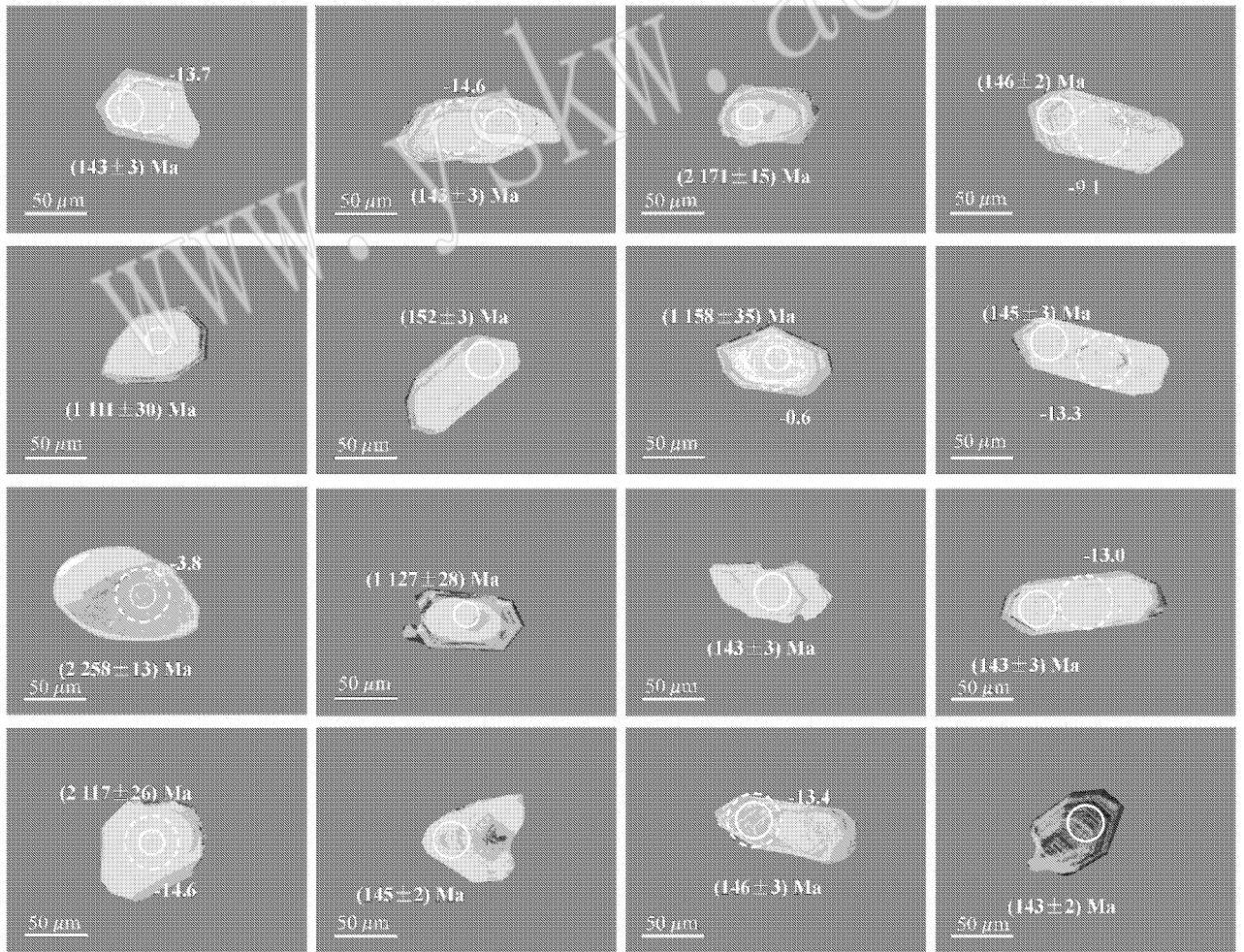


图 3 姜桥花岗闪长岩(Dy311)代表性锆石的阴极发光图像(CL)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from Jiangqiao granodiorite (Dy311)

表 1 姜桥花岗闪长岩(Dy311)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of granodiorite (Dy311) from Jiangqiao intrusion

分析点号	点位	$\omega_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
		Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ			
Dy311-01	环带区	115	298	0.39	0.0491	0.0027	0.1534	0.0080	0.0227	0.0004	151	126	145	7	145	2
Dy311-02	环带区	205	539	0.38	0.0521	0.0021	0.1614	0.0049	0.0225	0.0004	289	39	152	4	143	2
Dy311-03	环带区	155	438	0.35	0.0512	0.0024	0.1616	0.0061	0.0229	0.0004	250	54	152	5	146	3
Dy311-04	环带区	162	202	0.80	0.0533	0.0034	0.1652	0.0093	0.0225	0.0005	343	92	155	8	143	3
Dy311-05	环带区	86	136	0.63	0.0467	0.0037	0.1447	0.0112	0.0225	0.0004	35	179	137	10	143	3
Dy311-06	环带区	111	163	0.68	0.0522	0.0027	0.1780	0.0080	0.0247	0.0005	295	68	166	7	157	3
Dy311-07	环带区	150	159	0.94	0.0518	0.0030	0.1706	0.0085	0.0239	0.0005	276	79	160	7	152	3
Dy311-08	环带区	113	162	0.70	0.0464	0.0033	0.1449	0.0098	0.0227	0.0004	16	155	137	9	145	3
Dy311-09	环带区	64	188	0.34	0.0537	0.0034	0.1662	0.0101	0.0225	0.0004	357	147	156	9	143	3
Dy311-10	环带区	175	435	0.4	0.0485	0.0020	0.1529	0.0049	0.0229	0.0004	122	43	144	4	146	2
Dy311-11	环带区	197	256	0.77	0.0519	0.0024	0.1634	0.0062	0.0228	0.0004	281	55	154	5	146	3
Dy311-12	环带区	199	295	0.68	0.0483	0.0031	0.1493	0.0092	0.0224	0.0004	112	144	141	8	143	3
Dy311-13	核部	120	143	0.84	0.0766	0.0029	2.2724	0.0648	0.2153	0.0038	1111	30	1204	20	1257	20
Dy311-14	核部	51	303	0.17	0.1425	0.0044	6.6257	0.1141	0.3373	0.0053	2258	13	2063	15	1874	26
Dy311-15	核部	101	114	0.89	0.0772	0.0029	1.8840	0.0506	0.1770	0.0030	1127	28	1075	18	1051	16
Dy311-16	核部	11	27	0.40	0.1314	0.0051	6.9676	0.2041	0.3846	0.0077	2117	26	2107	26	2098	36
Dy311-17	核部	53	70	0.76	0.0784	0.0032	2.1844	0.0690	0.2020	0.0037	1158	35	1176	22	1186	20
Dy311-18	核部	326	315	1.04	0.0771	0.0025	1.8132	0.0339	0.1706	0.0027	1124	17	1050	12	1015	15
Dy311-19	核部	68	122	0.55	0.0794	0.0026	2.0090	0.0421	0.1835	0.0030	1182	19	1119	14	1086	16
Dy311-20	核部	27	226	0.12	0.1049	0.0031	2.2034	0.0542	0.1523	0.0026	1713	56	1182	17	914	14
Dy311-21	核部	58	149	0.39	0.1252	0.0040	3.4692	0.0929	0.2009	0.0035	2032	58	1520	21	1180	19

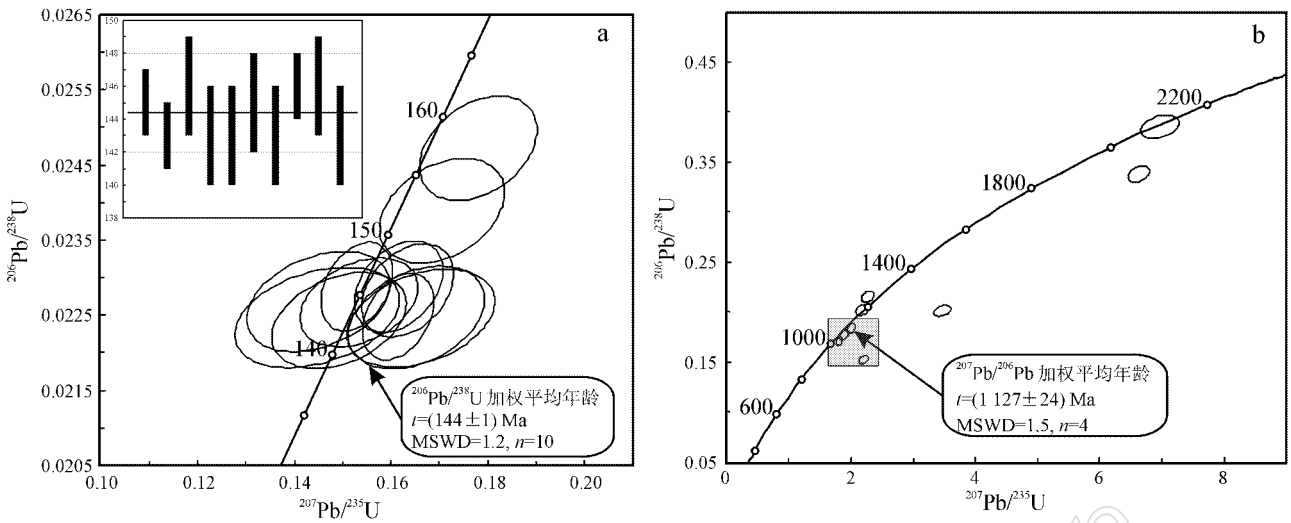


图 4 姜桥花岗岩闪长岩 (Dy311) 中岩浆锆石 (a) 和继承锆石 (b) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram for both magmatic (a) and inherited (b) zircons from Jiangqiao granodiorite (Dy311)

龄值分布于 $143 \pm 2 \text{ Ma} \sim 146 \pm 3 \text{ Ma}$ 之间, 加权平均值为 $144 \pm 1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.2$), 代表了姜桥花岗岩闪长岩的结晶年龄。此外, 位于锆石核部的 9 个分析点年龄明显较老, 为继承锆石。由于古老锆石 ($>1000 \text{ Ma}$) 多存在一定程度的铅丢失, 而 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 在相同的初始条件和共同的地质构造环境中具有同步变化的特征, 两者通常保持相对稳定的比值, 因此采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄来代表岩石的成岩年龄更为可靠 (Blank *et al.*, 2003)。9 个锆石核部分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值分布在 $1.11 \sim 2.26 \text{ Ga}$ 之间。其中, Dy311-13、Dy311-15、Dy311-17、Dy311-18 四个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值分布较集中, 并给出 $1127 \pm 24 \text{ Ma}$ 的加权平均值。Dy311-14、Dy311-20 和 Dy311-21 三个分析点均位于不一致线的下方, 表明其均发生一定程度放射成因 Pb 的丢失。此外, 还有一个年龄较老的点 (Dy311-16) 位于谐和线上, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $2117 \pm 26 \text{ Ma}$ 。

4.2 锆石的稀土元素特征

表 2 列出了姜桥花岗岩闪长岩中岩浆锆石和继承锆石的稀土元素 LA-ICP-MS 分析结果。如表 2 所示, 岩浆锆石的稀土元素总含量为 $630.9 \times 10^{-6} \sim 1278.6 \times 10^{-6}$, 继承锆石据稀土元素含量可分为两组: ① 1.1 Ga 左右的锆石稀土元素总含量相对较高, 为 $952 \times 10^{-6} \sim 2386.3 \times 10^{-6}$; ② 2.0 Ga 左右的锆石稀土元素总含量相对较低, 为 $104.6 \times 10^{-6} \sim 802.1 \times 10^{-6}$ 。显然, 1.1 Ga 左右的继承锆石稀土元

素总含量均较岩浆锆石和 2.0 Ga 左右的继承锆石高。在稀土元素球粒陨石标准化图上, 所有锆石分析点均具有轻稀土 (LREE) 亏损和重稀土 (HREE) 富集的特征 (图 5)。其中, 两个 2.0 Ga 左右的继承锆石分析点 (Dy311-20 和 Dy311-21) 与岩浆锆石吻合较好, 暗示其为岩浆锆石, 同时也表明两者之间可能存在演化关系。其余两个 2.0 Ga 左右继承锆石分析点 (Dy311-14 和 Dy311-16) 的稀土含量 (主要

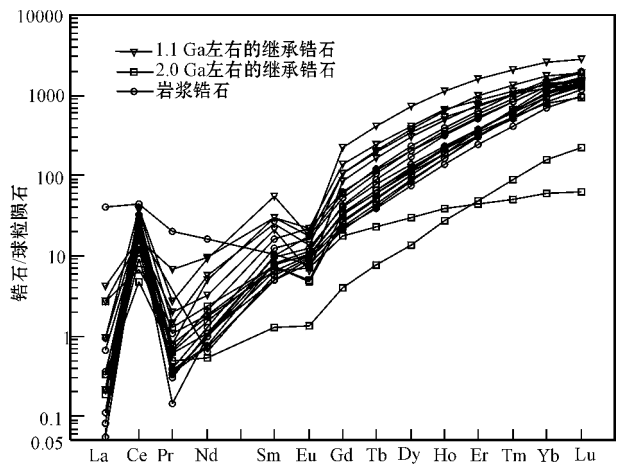


图 5 姜桥花岗岩闪长岩 (Dy311) 中岩浆锆石和继承锆石的稀土元素球粒陨石标准化图 (球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of both magmatic and inherited zircons from Jiangqiao granodiorite (Dy311) (normalization after Sun and McDonough, 1989)

表 2 姜桥花岗闪长岩(Dy311)锆石稀土元素组成

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 REE composition of zircon of granodiorite (Dy311) from Jiangqiao intrusion

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	Eu/Eu*
岩浆锆石																
Dy311-01	<0.015	18.6	0.02	0.7	2.3	1.6	18.4	7.1	88.9	34.1	161.2	35.8	385	74.8	1 241	0.51
Dy311-02	<0.015	19.2	<0.019	0.5	1.3	0.8	8.1	2.9	38.1	16.2	90.7	22.1	271.4	62.5	1 278.6	0.58
Dy311-03	0.1	15.6	0.05	0.5	1.2	0.7	6.3	2.4	32.3	13.7	75.6	19	232.5	53.4	1 046.4	0.62
Dy311-04	0	25.5	0.04	0.8	2.2	1.1	12.4	4.4	52	20	94.3	21.6	237.1	48.6	884.4	0.49
Dy311-05	15.1	42.7	2.75	11.4	2.5	0.7	6.8	2.2	28	11.7	60.3	14.7	172.7	37.2	630.9	0.46
Dy311-06	0.3	21.2	0.15	1.3	1.7	0.9	9.9	3.5	44.6	18.5	94.8	22.4	260.4	55.5	808.5	0.52
Dy311-07	0	31.1	0.09	1.5	3.7	1.9	19.4	6.6	76.7	28.6	133.3	29.3	314.7	62.1	1 017.8	0.56
Dy311-08	<0.025	20.3	0.05	0.7	1.9	0.9	10.3	3.8	46.5	18.7	95.4	22.5	253.6	53.5	802.2	0.48
Dy311-09	0.1	11.4	0.05	0.6	1.8	1	12.9	5.2	65.9	26.5	129.4	29.7	319.3	64.2	920	0.47
Dy311-10	0.2	16.9	0.09	0.8	1.2	0.8	6.9	2.5	33.6	14.2	76.9	18.9	230	51.4	1 064.4	0.65
Dy311-11	0.1	24.1	0.05	0.7	1.5	0.9	10.1	3.5	41.3	15.9	78.7	18.3	205.4	43.7	897.1	0.5
Dy311-12	<0.031	27.2	0.06	0.9	2.9	1.4	16.4	6.2	78.6	30.5	146.2	32.7	353.4	72.8	1 263.1	0.49
继承锆石																
Dy311-13	<0.081	35.5	0.2	4	5.7	1.2	32.2	12	146.1	54.6	239.6	47.9	427.3	71.7	1 340.8	0.21
Dy311-14	<0.066	8.7	<0.068	<0.38	0.3	0.1	1.2	0.5	5.2	2.3	12.1	3.2	38.3	8.6	434.5	0.51
Dy311-15	0.1	19.7	0.11	3.5	6.8	1.9	41.9	14.2	158.6	55.8	216.7	39.8	331.9	55.9	1 162.7	0.26
Dy311-16	<0.078	12.3	0.11	1.2	1.5	0.6	5.5	1.3	11.4	3.3	11	1.8	14.8	2.4	104.6	0.57
Dy311-17	1.6	15.7	0.91	6.9	6.8	1.6	32.7	11.2	128.5	45.1	183.3	36	306.4	52.2	952	0.26
Dy311-18	0.3	36.7	0.38	6.5	12.4	1.6	66.6	23.3	273	96.2	398.7	73.7	648.9	106.9	2 386.3	0.13
Dy311-19	1	14.7	0.27	2.3	4.8	0.6	26.4	9.5	116.6	42	185.8	36.2	341.4	58.4	1 029.8	0.12
Dy311-20	0.1	4.5	0.09	1.1	1.7	0.4	8.4	3.1	39.4	16.1	90.4	23.8	297.1	62.4	802.1	0.27
Dy311-21	1	6.5	0.18	1.7	1.7	0.4	10.5	3.8	47.4	18.5	86.9	18.9	194.5	36.5	635.2	0.24

是中稀土和重稀土)明显较岩浆锆石低。所有锆石分析点都具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常(图 5)其中,岩浆锆石($Eu/Eu^* = 0.46 \sim 0.65$)和 2.0 Ga 左右的继承锆石($Eu/Eu^* = 0.24 \sim 0.57$)Eu 异常基本一致,而 1.1 Ga 左右的锆石($Eu/Eu^* = 0.12 \sim 0.26$)Eu 负异常明显较前两者显著。

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见表 3。所有锆石颗粒的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值均小于 0.002,平均值为 0.000 8,表明锆石在形成后具有极低量的放射性成因 Hf 的积累。本文对样品 Dy311(花岗闪长岩)的 10 个锆石颗粒进行了分析,共计分析 10 个点(一颗锆石一个点),其中三个分析点位于锆石内部核心区,其余分析点均位于岩浆锆石的生长环带区。如表 3 所示,锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值明显可分为两组。3 个古老锆石核的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值明显偏低且变化范围较大,分布在 0.281 026~0.282 048 之间。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化也很大,且分布在 -0.6~-14.6 之间,对应的两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 2 003~3 596 Ma。岩浆锆石环带区分析点的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值明显较古老锆石核高且比较均一,变化范围为 0.282 275~

0.282 427,加权平均值为 $0.282\ 333 \pm 0.000\ 068$ (2σ , $n=6$)。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均为很低的负值,且分布在 -9.1~-14.6 之间,加权平均值为 -13.7(图 6a)。对应的两阶段模式年龄(t_{DM2})相对较老,变化范围为 1 772~2 112 Ma,平均为 2 061 Ma(图 6b)。

5 讨论

5.1 鄂东南地区岩浆岩侵位时代

鄂东南矿集区晚中生代侵入岩十分发育,区内自北向南依次出露了鄂城、铁山、金山店、灵乡、殷祖、阳新 6 大花岗岩类岩基,且它们均是由多次岩浆侵位形成的复式岩基。目前,六大岩体中除了殷祖岩体以外,其余岩体均与成矿作用密切相关。其中,铁山岩体主要由石英闪长岩和闪长玢岩组成,含少量辉长岩、花岗闪长斑岩及似斑状花岗闪长岩。Xie 等(2011c)分别利用 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得铁山石英闪长岩和辉长岩的侵位年龄为 142 ± 3 Ma 和 137 ± 2 Ma。Li 等(2009)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得铁山细粒黑云闪长岩的侵位年龄为 135.8 ± 2.4 Ma。金山店岩体主要由石英

表 3 姜桥花岗闪长岩(Dy311)锆石 Lu-Hf 同位素数据

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic data of granodiorite(Dy311) from the Jiangqiao intrusion

分析点号	Dy311-01	Dy311-02	Dy311-03	Dy311-04	Dy311-05	Dy311-06	Dy311-07	Dy311-08	Dy311-09	Dy311-10
年龄/Ma	2 258	146	1 713	143	145	1 158	143	146	143	2 117
$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	0.003 704	0.019 598	0.020 270	0.019 973	0.025 187	0.020 235	0.025 673	0.022 379	0.018 925	0.001 422
$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	0.000 173	0.000 970	0.000 860	0.000 907	0.001 101	0.000 782	0.001 092	0.001 066	0.000 833	0.000 050
$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	0.281 245	0.282 307	0.281 524	0.282 318	0.282 308	0.282 048	0.282 275	0.282 427	0.282 298	0.281 026
2σ	0.000 029	0.000 043	0.000 024	0.000 023	0.000 022	0.000 024	0.000 019	0.000 016	0.000 020	0.000 021
$\epsilon\text{Hf}(0)$	-54	-16.5	-44.1	-16.1	-16.4	-25.6	-17.6	-12.2	-16.8	-61.8
$\epsilon\text{Hf}(t)$	-3.8	-13.4	-7	-13	-13.3	-0.6	-14.6	-9.1	-13.7	-14.6
2σ	1	1.5	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7
t_{DM1}/Ma	2 742	1 335	2 411	1 317	1 338	1 686	1 383	1 169	1 342	3 023
2σ	78	121	66	63	62	66	52	46	57	54
t_{DM2}/Ma	3 045	2 039	2 827	2 016	2 038	2 003	2 112	1 772	2 059	3 596
2σ	126	192	106	101	98	105	83	73	91	88
$f_{\text{Lu/Hf}}$	-0.99	-0.97	-0.97	-0.97	-0.97	-0.98	-0.97	-0.97	-0.97	-1

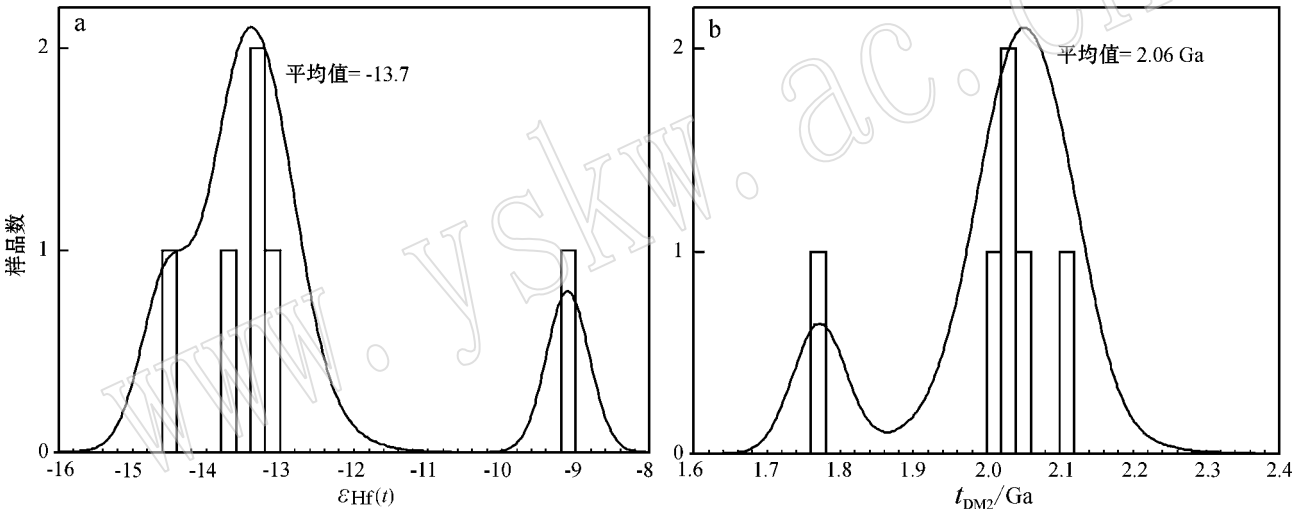


图 6 姜桥花岗闪长岩(Dy311)锆石 Hf 同位素组成 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 及锆石 Hf 两阶段模式 (t_{DM2}) 年龄直方图

Fig. 6 Histograms of zircon Hf isotopic compositions $\epsilon\text{Hf}(t)$ and two-stage model ages (t_{DM2}) for granodiorite of Jiangqiao intrusion

闪长岩组成,含小面积的闪长玢岩和花岗岩。Xie 等(2012)分别利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得金山店石英闪长岩和花岗岩的侵位年龄为 127 ± 2 Ma 和 133 ± 1 Ma。瞿泓滢等(2012)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得金山店石英闪长岩的侵位年龄为 128.6 ± 0.88 Ma。灵乡岩体主要由(石英)闪长岩和闪长玢岩组成。最新测年结果显示,灵乡闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 142 ± 1 Ma(Xie *et al.*, 2011a) 和 145.5 Ma(Li *et al.*, 2010)。阳新岩体主体岩性为石英闪长岩,含少量花岗斑岩。Xie 等(2011c)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得阳新石英闪长岩和

花岗斑岩分别侵位于 142 ± 1 Ma 和 141 ± 1 Ma。Li 等(2009)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得阳新石英闪长岩的侵位年龄为 138.5 ± 2.5 Ma。Li 等(2010)利用 SIMS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得阳新石英二长岩和闪长岩的侵位年龄分别为 139 Ma 和 141 Ma。鄂城岩体主要由花岗岩、花岗斑岩、石英二长岩及少量石英闪长岩组成,在岩石类型上明显不同于铁山岩体、灵乡岩体和阳新岩体。最新的测年数据表明,位于鄂城岩体东北部的石英闪长岩侵位于 143 ± 2 Ma(Xie *et al.*, 2011c),而中-粗粒花岗岩和位于程潮 Fe 矿区的石英闪长岩则分别侵位于(127 ± 1)Ma~(130 ± 1)Ma 和 129 ± 2 Ma(Xie *et al.*,

2009, 2011c)。显然,鄂城岩体侵位较早的岩石单元与铁山辉长岩、(石英)闪长岩、灵乡及阳新岩体的主体岩性近于同期,而侵位较晚的岩石单元则与金山店岩体近于同期。殷祖岩体由石英闪长岩、花岗闪长斑岩和辉长岩组成。最新测年结果显示,殷祖闪长岩和花岗闪长斑岩分别侵位于 151.8 ± 2.8 Ma (LA-ICP-MS; Li *et al.*, 2009) 和 146 Ma (SHRIMP; Li *et al.*, 2010), 较前述大岩体侵位时间略早。

除了上述大岩体以外,鄂东南地区还出露了铜绿山、铜山口、丰山洞、阮家湾、龙角山、鸡笼山、何锡铺、鸡冠咀等 30 多个小岩体。其中,与成矿关系密切的一些小岩体(如铜山口、鸡冠咀、铜绿山、鸡笼山、丰山洞、阮家湾等)目前在年代学方面已取得了重要进展。铜山口花岗闪长斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 140.6 ± 2.4 Ma (Li *et al.*, 2007)。王豹山二长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 127.5 ± 1.6 Ma (Li *et al.*, 2009)。Xie 等(2011b)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得鸡冠咀石英闪长岩的侵位年龄为 139 ± 1 Ma, 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得铜绿山石英闪长岩的侵位年龄为 140 ± 2 Ma, 这与 Li 等(2010)利用 LA-ICP-MS 磷灰石 U-Th-Pb 法测得的铜绿山 Cu-Fe 矿床的成矿年龄 136.0 ± 1.5 Ma 在误差范围内基本一致。陈富文等(2011)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得鸡笼山花岗闪长斑岩的侵位年龄为 137 ± 2 Ma。此外,谢桂青等(2006)还利用辉钼矿 Re-Os 同位素定年法对封山洞、阮家湾、千家湾、铜绿山五个典型矿床分别进行了成矿时代的测定,结果表明其集中形成于 140 ± 5 Ma, 间接限制了与成矿作用关系密切的小岩体的侵位年龄。最近 Xie 等(2011a)对鄂东南地区金牛盆地的火山岩也进行了系统研究,结果显示其主要喷发形成于 130~125 Ma 之间。

综上所述,鄂东南地区晚中生代岩体的侵位始于晚侏罗世 (~152 Ma), 之后岩浆活动经历了一个短暂的宁静期(约 6 Ma), 随后在早白垩世达到高潮(140 Ma 左右), 早白垩世中晚期(136~118) Ma 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, 同时伴随有少量花岗岩、次火山岩及中基性岩脉的产出(图 8a)。本文姜桥花岗闪长岩侵位于 144 Ma, 属鄂东南地区岩浆活动高峰期的产物。

5.2 岩浆源性性质

如表 4 所示, 本文样品中 6 个岩浆锆石分析点

的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 且分布在 $-9.1 \sim -14.6$ 之间。最近, Xie 等(2011b)在系统的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素研究的基础上将鄂东南地区广泛分布的晚中生代侵入岩大致分为三组: ① 花岗闪长岩和花岗斑岩 [141~146 Ma; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.5 \sim -1.6$]; ② 辉长岩、闪长岩和石英闪长岩 [136~143 Ma; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -19.1 \sim -5.4$]; ③ 闪长岩、石英闪长岩和花岗岩 [127~133 Ma; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -28.2 \sim -6.4$], 并且认为第一组岩系源于富集地幔源区, 第二、三组岩系均源于幔源(富集地幔)岩浆与古老下地壳物质的混合源区。姜桥花岗闪长岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与 Xie 等(2011b)所划分的第二、三组(石英闪长岩)岩系相似(图 7), 暗示它们可能来源于同一源区。然而, 样品中继承锆石的广泛存在则表明姜桥花岗闪长岩应主要来源于古老的地壳物质。此外, 虽然目前关于锆石的稀土元素含量是否能指示岩石的类型还存在争议 (Vavra *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2000), 但已有的研究表明幔源岩石(如金伯利岩、正长岩、幔源碳酸岩等)中的锆石均具有较低的稀土含量 ($< 300 \times 10^{-6}$) (Li *et al.*, 2000; Hoskin and Ireland, 2000)。姜桥花岗闪长岩中岩浆锆石较高的稀土总量 ($630.9 \sim 1278.6$) $\times 10^{-6}$ 一定程度上也支持了其壳源源区。

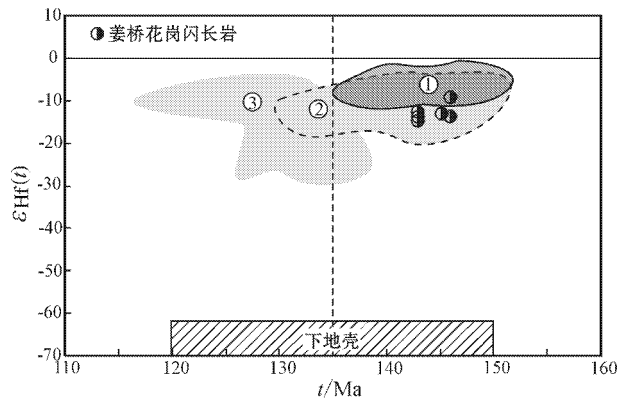


图 7 姜桥花岗闪长岩(Dy311)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 7 Plot of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus zircon U-Pb ages for Jiangqiao granodiorite (Dy311)

图中阴影区域①、②、③均来自 Xie 等(2011c), 见文中解释; 下地壳区域来自扬子克拉通崆岭变质岩中锆石 Hf 同位素数据 (Zhang *et al.*, 2006)

The shadow fields ①, ② and ③ are from Xie *et al.* (2011c); see the text for explanation; the zircon Hf isotopes for the lower crust are from Kongling metamorphic rocks in the Yangtze Craton (after Zhang *et al.*, 2006)

花岗岩中的继承锆石通常可作为示踪岩浆源区物质性质的指示剂 (Keay *et al.*, 1999)。从阴极发光图像 (图 3) 来看, 本文姜桥花岗闪长岩中许多锆石内部含有浑圆状或碎屑状的核, 且边部发育较薄的壳。测年结果显示, 这些锆石的核部年龄均较锆石生长环带区老, 因此为继承锆石, 代表了部分熔融前原岩中的锆石或岩浆侵位过程中捕获的围岩中的锆石。这些继承锆石的研究对于姜桥岩体源区的示踪及鄂东南地区基底性质的探讨具有重要意义。如表 1 所示, 样品中继承锆石的年龄明显可分为两组: 一组为中元古代晚期, 年龄值均分布在 1 100 Ma 左右, 另一组为古元古代, 年龄值分布在 1 713~2 258 Ma 之间。锆石的 Hf 模式年龄 t_{DM} 代表锆石寄主岩石源区从亏损地幔分离进入地壳的事件 (Zheng *et al.*, 2006; 陈道公等, 2007), 因此, 锆石的 Hf 模式年龄对于源区的示踪具有重要的参考价值。由于花岗岩一般是地壳物质再循环的产物, 因此, 对花岗岩而言锆石的两阶段 Hf 模式年龄 (平均地壳模式年龄 t_{DM2}) 通常反映了岩浆源区物质从亏损地幔中分离出来的大致时代, 而单阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 则缺乏明确的地质意义。如表 2 所示, 本文姜桥花岗闪长岩中岩浆锆石的两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 1 772~2 112 Ma, 与部分继承锆石的年龄 1 713~2 258 Ma 基本一致。此外, 在锆石稀土元素球粒陨石标准化图上 (图 5), 岩浆锆石的配分型式也与 2.0 Ga 左右的继承锆石较好地吻合。综上所述, 姜桥花岗闪长岩可能起源于古元古代基底。继承锆石分析点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 -0.6~-14.6 对应的 Hf 单阶段 1 686~3 023 Ma 和两阶段模式年龄 2 003~3 596 Ma 均明显大于锆石的结晶年龄, 表明其可能形成于古老陆壳物质的部分熔融作用, 同时暗示区内存在古老的古太古代基底。此外, 本文样品中约 1 100 Ma 继承锆石的存在一定程度上也证明了鄂东南地区存在中元古代基底物质。

5.3 动力学背景

综合前人研究, 鄂东南地区的岩浆活动始于殷祖石英闪长岩的侵位 (152 Ma), 而结束于王豹山正长岩的侵位 (119 Ma), 大致可以分为早期 152~136 Ma 中基性侵入岩和晚期 136~119 Ma 酸性侵入岩、火山岩和中基性岩脉两个阶段 (图 8a)。区内大规模的成矿作用主体形成于早白垩世 145~130 Ma (图 8b), 与成矿岩体的形成时代基本一致。近年来精确的年代学数据表明, 长江中下游成矿带岩浆岩的形

成时间主要集中于 145~120 Ma 之间 (图 8c, d; 吴才来等, 1996; 余金杰等, 2002; Sun *et al.*, 2003; 陈江峰等, 2003; 张旗等, 2003; 蒙义峰等, 2004; 王彦斌等, 2004a, 2004b; 徐夕生等, 2004; Di *et al.*, 2005)。同时, 这些岩浆活动在时空上具有明显的分区性和阶段性 (周涛发等, 2008)。145~135 Ma 的岩浆活动主要发生在断隆区 (如铜陵地区), 135~127 Ma 的岩浆活动则主要发生在断陷区 (如庐枞盆地、宁芜盆地), 而之后的 A 型花岗岩则集中形成于 127~123 Ma, 既可产生于断隆区, 又可产生于断凹区 (范裕等, 2008)。显然, 包括鄂东南地区在内的整个长江中下游地区很可能形成于统一的地球动力学背景。

多年来, 众多学者一直致力于长江中下游成矿带构造背景的探讨, 但至今仍存在争议。目前对于长江中下游成矿带构造背景的认识主要可归纳为两种: 一种认为与古太平洋板块的西向俯冲作用有关, 属于俯冲环境 (吴利仁等, 1982; 邓晋福等, 2000; 刘洪等, 2002; 汪洋等, 2004; Sun *et al.*, 2007; 孙卫东等, 2008); 另一种认为属于板内环境 (常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐勇成等, 1998; 王元龙等, 2001; 闫峻等, 2005; 谢智等, 2007)。尽管众说纷纭, 但多数学者均支持长江中下游大规模的成岩成矿作用与岩石圈的伸展减薄有关。这一理论也得到了岩石学、地球物理学等方面证据的有力支持。地球物理资料显示, 长江中下游成矿带主要金属矿床的产出位置正好是区域上地壳厚度最薄的地方 (翟裕生等, 1992), 反映岩石圈伸展减薄与大规模成矿作用之间的密切联系。同时, 长江中下游地区深地震反射剖面显示中下地壳存在似层状强反射, 可能为岩石圈地幔拆沉伸展诱发的基性或超基性岩浆底侵所致 (吕庆田等, 2004)。此外, 长江中下游地区还普遍存在代表伸展环境的早白垩世碱性侵入岩和火山岩, 如王豹山正长岩岩脉 (127.5 ± 1.6 Ma; Li *et al.*, 2009) 和具双峰式特征的金牛盆地火山岩 (130~125 Ma; Xie *et al.*, 2011a)。同样地, 早白垩世大陆裂谷型碱性玄武岩特征的基性包体 (杜杨松等, 2004) A 型花岗岩、变质核杂岩以及钾玄质火山岩充填的断陷盆地, 胶东地区基性脉岩等均充分说明包括长江中下游在内的中国东部早白垩世处于伸展环境。Wu 等 (2005) 通过研究发现中国东部燕山期的岩浆活动主要集中于 195~150 Ma 和 135~120 Ma 两个阶段, 且以第二阶段岩浆活

动最为强烈。然而,本文通过统计发现长江中下游地区的成岩成矿作用则主要分为 154~133 Ma 和 133~121 Ma 两个阶段(图 8c, d),且岩浆活动集中分布在第一阶段。明显地,长江中下游地区大规模岩浆活动时期正是中国东部中生代岩浆活动比较弱

的时期(王彦斌等 2004a, 2004b; Di *et al.*, 2005), 暗示长江中下游地区 150~130 Ma 期间巨量的岩浆活动可能代表了中国东部构造体制转折的开始。本文姜桥花岗闪长岩侵位于 144 Ma, 因此应为区域构造体制大转折初期的产物。

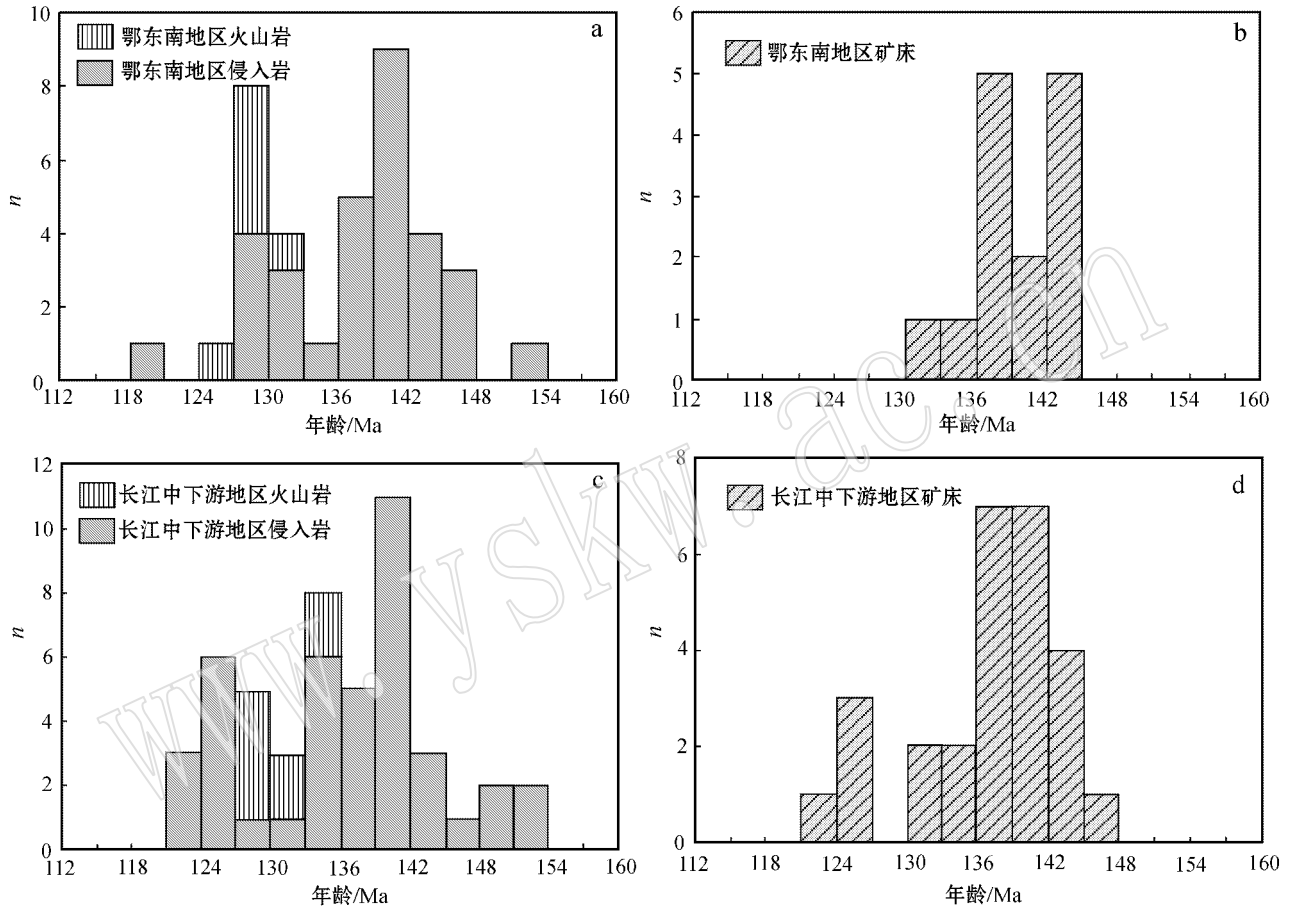


图 8 鄂东南(a, b)及长江中下游地区(c, d)晚中生代岩浆与成矿作用年龄分布直方图(数据来自 Li *et al.*, 2000, 2007, 2009, 2010; Sun *et al.*, 2003; 蒙义峰等, 2004; Xie *et al.*, 2006, 2007, 2008, 2011a, 2011b; 李华芹等, 2009; 陈富文等, 2011; 瞿泓滢等, 2012; 以及本文数据)

Fig. 8 Age histograms of Late Mesozoic magmatism and mineralization in southeastern Hubei Province (a, b) and middle and lower reaches of the Yangtze River (data after Li *et al.*, 2000, 2007, 2009, 2010; Sun *et al.*, 2003; Meng Yifeng *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2006, 2007, 2008, 2011a, 2011b; Li Huaqin *et al.*, 2009; Chen Fuwen *et al.*, 2011; Qu Hongying *et al.*, 2012 and this study)

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 姜桥花岗闪长岩侵位于 144 ± 1 Ma, 属于早白垩世产物。

(2) 姜桥花岗闪长岩中岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 $-9.1 \sim -14.6$ 之间。较负的 Hf 同位素组成

及继承锆石的广泛存在表明该岩体主要来源于古老的陆壳物质。岩浆锆石的二阶段 Hf 模式年龄为 $1.77 \sim 2.11$ Ga, 与部分继承锆石的年龄一致, 进一步表明源区可能为鄂东南地区古元古代基底物质。

(3) 姜桥花岗闪长岩的形成与岩石圈的伸展减薄有关, 为区域构造体制大转折初期的产物。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Black L P, Kamo S L, Williams I S, *et al.* 2003. The application of SHEIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards [J]. *Chemical Geology*, 200(1~2): 171~188.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei and Wu Yanchang. 1991. Copper and Iron Metallogenic Belt of the Middle and Lower Yangtze River [M]. Beijing: Geological Press, 1~379 (in Chinese).
- Chen Daogong, Ni Tao and Xie Liewen. 2007. Zircon Lu-Hf isotopic compositions of ultra-high pressure metamorphic rocks from Dabie Terrain, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 331~342 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fuwen, Mei Yuping and Li Huaqin. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating for granodiorite porphyry of the Fengshan orefield in eastern Hubei province and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 88~96 (in Chinese with English abstract).
- Chen Gongxin and Jin Jingwei. 1996. Lithostratigraphy of Hubei Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~284 (in Chinese).
- Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Zheng Yongfei, *et al.* 2003. The relation between Rb-Sr, Ar-Ar geochronometers and oxygen isotopic equilibrium of intrusions from eastern Anhui province, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 172~184 (in Chinese with English abstract).
- Chu Nanchin, Taylor R N, Chavagnac V, *et al.* 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567~1574.
- De Bièvre P and Taylor P D P. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements [J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 123(2): 149~166.
- Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Hailing, *et al.* 2000. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic-deep processes in East China [J]. *Geological Review*, 46(1): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatianjiao intrusions and its petrological implications in the Tongling Area, Anhui [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 795~802.
- Du Yangsong, Qin Xinlong and Tian Shihong. 2004. Mesozoic magmatism to hydrothermal process in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui province, China: evidence from xenoliths and their host [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 339~350 (in Chinese with English abstract).
- Elhoul S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of A-type granites in the Lujiang-Zongyang area and their significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715~1724 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, *et al.* 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed of Lengjiaxi and Banxi groups, north-eastern Hunan: constraints on the Wuling Movement [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1001~1008 (in Chinese with English abstract).
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13339~13364.
- Hoskin P W O and Ireland T. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 28(7): 627~630.
- Keay S, Steele D and Compston W. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: an application to the Lachlan foldbelt [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137(4): 323~341.
- Lei Ruliang, Zhao Jiqing and Xiong Jichuan. 1994. The Research on the Relationship of Diagenesis Evolution and Mineralization of Intermediate-Acid Intrusions in Southeastern Hubei Province [M]. 4 (in Chinese).
- Li Huaqin, Chen Fuwen and Mei Yuping. 2009. SHRIMP U-Pb zircon dating of the mineralized intrusion from Jiguanzui ore field in Eastern Hubei Province and its significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 411~417 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Deng Xiaodong, Zhou Meifu, *et al.* 2010. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China [J]. *Chemical Geology*, 270(1~4): 56~67.
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Vasconcelos Paulo, *et al.* 2007. Origin of the Tongshankou porphyry skarn Cu Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints [J]. *Mineralium Deposita*, 43(3): 316~336.
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, *et al.* 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383~409.
- Li Xianhua, Liang Xirong, Sun Min, *et al.* 2000. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons: Simultaneous in-situ analysis of U-Pb age and trace elements by LAM-ICP-MS [J]. *European Journal of Mineralogy*, 12(5): 1015~1024.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, *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[J]. *Lithos*, 119(3~4): 427~438.
- Liu Hong, Qiu Jiangsheng, Luo Zhaohua, *et al.* 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129~140 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yican, Li Shuguang and Xu Shutong. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gneisses in northern Dabie high T/P metamorphic zone, central China: Implication for decoupling within subducted continental crust[J]. *Lithos*, 96(1~2): 170~185.
- Lü Qingtian, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2004. Geophysical constraints on the underplating and dynamic evolution model in the Middle and Lower Yangtze region[J]. *Science in China: Series D*, 34(9): 783~794 (in Chinese).
- Ludwig K R. 2001. User's Manual for Isoplot/Ex(rev. 2. 49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1: 55.
- Meng Yifeng, Yang Zhusen, Zeng Pusheng, *et al.* 2004. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling metallogenic province[J]. *Mineral Deposits*, 23(3): 271~280 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yuanming and Dong Ping. 1999. The Lower Changjiang(Yangzi/ Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15(4): 177~242.
- Qu Hongying, Wang Haolin, Pei Rongfu, *et al.* 2012. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Tieshan and Jinshandian plutons in the southeastern Hubei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 147~165 (in Chinese with English abstract).
- Scherer E, Münker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293(5530): 683~687.
- Shu Quan'an, Chen Peiliang and Cheng Jianrong. 1992. Mineral Resources and Geology of Iron and Copper in Eastern Hubei Province [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 532 (in Chinese).
- Su Xindong and Liu Taohai. 1994. Application of isotopes to the geological study on the iron and copper deposits in southeastern Hubei province[J]. *Geology and Prospecting*, 30(1): 27~32 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, *et al.* 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3): 533~542.
- Sun Weidong, Ling Mingxing, Wang Fangyue, *et al.* 2008. Pacific plate subduction and Mesozoic geological event in eastern China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 218~225 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts; implication for mantle compositions and processes [A]. Saunders A D and Nory M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society of London, Special Publications, 42: 313~345.
- Sun Weidong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng *et al.* 2003. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze river, China[J]. *Economic Geology*, 98(1): 175~180.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, *et al.* 1998. *Geology of Polymetallic Copper-Gold Deposits Along the Yangtze River, Anhui Province* [M]. Beijing: Geological Press, 60~85 (in Chinese).
- Vavra G, Schmid R and Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380~404.
- Vervoort Jeff D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3~4): 533~556.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, *et al.* 2004a. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui [J]. *Geology in China*, 31(2): 169~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, *et al.* 2004b. SHRIMP U-Pb geochronology of pyroxene diorite in the Chaoshan gold deposit and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(4): 423~427 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Deng Jinfu and Ji Guangyi. 2004. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 297~314 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Zhang Qi and Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics and significance of volcanic rocks in Ningwu basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565~575 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, *et al.* 1996. Chronological study of intermediate-acid intrusive rocks from Tongling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(4): 299~306 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Wilde Simon A, *et al.* 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China [J]. *Chemical Geology*, 221(1~2): 127~156.
- Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 234: 105~126.
- Wu Liren, Qi Jinying, Wang Tingdu, *et al.* 1982. Mesozoic volcanic rocks in eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 3: 223~234 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, *et al.* 2006. Metallogenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo(W) deposits in southeastern Hubei Province: Constraints from Re-Os molybdenite ages [J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 43~52 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, *et al.* 2007. Re-Os molybdenite

- and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo(W) deposits in southeastern Hubei, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 90(3-4), 249~270.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, *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[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(24): 3 000~3 009.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, *et al.* 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 104(1~4): 216~230.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Xiongwei, *et al.* 2011a. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt(YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implication[J]. *Lithos*, 127(1~2): 144~164.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie, *et al.* 2011b. Timing of skarn deposit for mation of the Tonglushan ore district, southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 62~77.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen and Zhao Haijie. 2011c. 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[J]. *Lithos*, 125(1~2): 693~710.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie, *et al.* 2012. Zircon U-Pb and phlogopite ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China[J]. *Mineral Deposita*, 47(6): 633~652.
- Xie Guiqing. 2009. Geochronology and genesis of Late Mesozoic igneous rocks and its relation to skarn Cu-Fe-Au deposits in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, Eastern China[D]. The Report of Post-doctoral Fellowship in China University of Geosciences, Beijing, 183.
- Xie Zhi, Li Quanzhong, Chen Jiangfeng, *et al.* 2007. The Geochemical Characteristics of the Early-Cretaceous Volcanics in Luzhong Region and Their Source Significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235~249(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili, *et al.* 2002. Architecture and Kinematics of the Dabie Mountains Oroger[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 133(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutong, Wu Weiping, Lu Yiqun, *et al.* 2010. Low-grade metamorphic rocks in southern Dabie MT. : The Susong and Zhangbal-ing group[J]. *Geology of Anhui*, 20(1): 5~13(in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Fab Qincheng, O'Reilly S Y, *et al.* 2004. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1 883~1 891.
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, *et al.* 2005. Geochemistry of Late Mesozoic basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze regions: constraints on characteristics and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Geochimica*, 34(5): 455~469(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinjie and Mao Jingwen. 2002. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of albite in porphyry iron deposits from Ningwu basin[J]. *Process in Natural Science*, 12(10): 1 059~1 063(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, *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[J]. *Chemical Geology*, 247(1~2): 100~117.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Chen Huanhui, *et al.* 1992. The Study of Remote Sensing Geology and Metallogenic Regularity of Echeng-Tongling Area in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River[M]. Wuhan: China of University of Geosciences Press, 4(in Chinese).
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, *et al.* 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications[J]. *Science in China: Series D*, 33(4): 309~314(in Chinese).
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, *et al.* 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146(1~2): 16~34.
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie oroger[J]. *Chemical Geology*, 231(1~2): 135~158.
- Zhou Taofa, Fan Yu and Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River are[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1 665~1 678(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1~379.
- 陈道公, 倪涛, 谢烈文. 2007. 大别地体超高压变质岩石锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 23(2): 331~342.
- 陈富文, 梅玉萍, 李华芹. 2011. 鄂东丰山矿田花岗闪长斑岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. *地质学报*, 85(1): 88~96.
- 陈公信, 金经纬. 1996. 湖北省岩石地展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~284.
- 陈江峰, 谢智, 郑永飞, 等. 2003. 皖东侵入岩矿物 Rb-Sr 和 Ar-Ar 年代学及其与氧同位素平衡之间的关系[J]. *高校地质学报*, 9(2): 172~184.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山深部过程[J]. *地质论评*, 46(1): 41~48.

- 杜杨松,秦新龙,田世洪. 2004. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆-热液过程 来自岩石包体及其寄主岩的证据[J]. 岩石学报, 20(2): 339~350.
- 范裕,周涛发,袁峰,等. 2008. 安徽庐江-枞阳地区A型花岗岩的LA-ICPMS定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1715~1724.
- 高林志,陈峻,丁孝忠,等. 2011. 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——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 30(7): 1001~1008.
- 雷如亮,赵济晴,熊继传. 1994. 鄂东南中酸性侵入岩成岩演化与成矿关系研究报告[M]. 4.
- 李华芹,陈富文,梅玉萍. 2009. 鄂东鸡冠嘴矿区成矿岩体锆石SHRIMP U-Pb定年及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 33(3): 411~417.
- 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[J]. 地球化学, 31(2): 129~140.
- 吕庆田,侯增谦,杨竹森,等. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束[J]. 中国科学: D辑, 34(9): 783~794.
- 蒙义峰,杨竹森,曾普胜,等. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定[J]. 矿床地质, 23(3): 271~280.
- 瞿泓滢,王浩琳,裴荣富,等. 2012. 鄂东南地区与铁山和金山店铁矿有关的花岗质岩体锆石LA-ICP-MS年龄和Hf同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 147~165.
- 舒全安,陈培良,程建荣. 1992. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 532.
- 苏欣栋,刘陶海. 1994. 同位素地质在鄂东南铜铁矿床地质研究中的应用[J]. 地质与勘探, 30(1): 27~32.
- 孙卫东,凌明星,汪方跃,等. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 218~225.
- 唐永成,吴言昌,储国正,等. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 60~85.
- 汪洋,邓晋福,姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 20(2): 297~314.
- 王彦斌,刘敦一,蒙义峰,等. 2004a. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石SHRIMP年代学及其意义[J]. 中国地质, 31(2): 169~173.
- 王彦斌,刘敦一,曾普胜,等. 2004b. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石SHRIMP定年[J]. 地球学报, 25(4): 423~427.
- 王元龙,张旗,王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 17(4): 565~575.
- 吴才来,周玉娟,黄许陈,等. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4): 299~306.
- 吴利仁,齐进英,王昕渡,等. 1982. 中国东部中生代火山岩[J]. 地质学报, 3: 223~234.
- 谢桂青,毛景文,李瑞玲,等. 2006. 鄂东南地区Cu-Au-Mo(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿Re-Os同位素年龄[J]. 矿床地质, 25(1): 43~52.
- 谢智,李全忠,陈江峰,等. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. 高校地质学报, 13(2): 235~249.
- 徐树桐,刘贻灿,江来利,等. 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 133.
- 徐树桐,吴维平,陆益群,等. 2010. 大别山南部的低级变质岩: 宿松群和张八岭群[J]. 安徽地质, 20(1): 5~13.
- 徐夕生,范钦成, O'Reilly S Y, 等. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石U-Pb定年与成因探讨[J]. 科学通报, 49(18): 1883~1891.
- 闫峻,陈江峰,谢智,等. 2005. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约[J]. 地球化学, 34(5): 455~469.
- 余金杰,毛景文. 2002. 宁芜玢岩铁矿钠长石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及意义[J]. 自然科学进展, 12(10): 1059~1063.
- 翟裕生,姚书振,陈华慧,等. 1992. 长江中下游鄂城-铜陵一带遥感地质及成矿规律研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 4.
- 张旗,简平,刘敦一,等. 2003. 宁芜火山岩的锆石SHRIMP定年及其意义[J]. 中国科学 D辑, 33(4): 309~314.
- 周涛发,范裕,袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 24(8): 1665~1678.