

桐柏-大别造山带南缘中侏罗世基性岩的发现 及其构造意义

——来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据

刘 杰^{1,2}, 邓 新², 彭练红², 刘 浩², 徐大良²

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘 要: 桐柏-大别造山带南缘大洪山地区出露一套变质辉长辉绿岩脉, 该岩脉沿襄樊-广济断裂带侵入到大洪山造山带增生杂岩之中, 本文采用锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年方法, 获得了该变质辉长辉绿岩脉的岩浆锆石年龄为 163 ± 3 Ma, 代表岩脉的侵位结晶年龄, 是目前桐柏-大别造山带已知最早的造山后晚中生代岩浆活动记录之一, 表明桐柏-大别造山带南缘晚中生代岩浆活动开始于中侏罗世晚期, 与北大别地区初始深融作用时间相当, 比早白垩世大规模岩浆活动的峰期(~ 130 Ma)早约 30 Ma。锆石 Hf 同位素分析结果显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+5.8 \sim +10.8$ (平均值为 $+9.7 \pm 0.7$), 对应的单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 $387 \sim 595$ Ma (平均值为 434 ± 29 Ma), 明显大于岩脉成岩年龄, 表明岩浆源区主要来自于亏损地幔, 亏损地幔为早古生代伸展过程的产物。结合区域研究资料, 163 ± 3 Ma 是桐柏-大别碰撞造山带南缘中生代陆-陆碰撞后最古老的岩浆岩年龄之一, 与大别造山带山根软化的时代一致, 可能代表桐柏-大别造山带由挤压环境向伸展环境的初始转换时间, 据此认为桐柏-大别造山带从山根软化到大规模伸展垮塌间隔 ~ 30 Ma, 地幔经历了亏损-富集的转化过程。

关键词: 中侏罗世; 变质辉长辉绿岩; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 桐柏-大别造山带

中图分类号: P588.12⁺4; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0619-14

Discovery and tectonic significance of Middle Jurassic basic rocks on the southern margin of the Tongbai-Dabie orogenic belt: Evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope

LIU Jie^{1,2}, DENG Xin², PENG Lian-hong², LIU Hao² and XU Da-liang²

(1. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: Dahongshan area, located on the southern margin of the Tongbai-Dabie orogenic belt, has extensively exposed metamorphic gabbro-diorite. This dike intruded into the accretionary complex of the Dahongshan orogenic belt. In this paper, zircon U-Pb LA-ICP-MS dating method shows that the emplacement age of rock vein is 163 ± 3 Ma. The age of this mafic dike is one of the earliest known records of Late Mesozoic magmatic activities after the collision in the Tongbai-Dabie orogenic belt, suggesting that the Late Mesozoic magmatic activities in the Tongbai-Dabie orogenic belt started in late period of Middle Jurassic, which is similar to the time of initial

收稿日期: 2017-01-02; 接受日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402179, 41172189); 中国地质调查局项目(121201009000160902)

作者简介: 刘 杰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究造山带构造地质方面的工作, E-mail: 1341508484@qq.com; 通讯作者: 邓 新(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事造山带构造地质及岩石变形方面的工作, E-mail: cugxd@163.com。

anatexis in northern Dabie orogenic belt, and is about 30 Ma earlier than the peak period of the Early Cretaceous magmatism (~ 130 Ma). The analytical results of Hf isotope from zircon show that $\epsilon\text{Hf}(t)$ is $+5.8 \sim +10.8$ (with an average $+9.7 \pm 0.7$), and the corresponding single stage Hf model age t_{DMI} is $387 \sim 595$ Ma (mean value being 434 ± 29 Ma), obviously larger than the age of diagenesis. These data show that the source of magma was derived from depleted mantle, resulting from the remelting of the Early Paleozoic partially melted depleted mantle basaltic rocks. All the data show that 163 ± 3 Ma is one of the oldest magmatic rock records after the continent-continent collision of the Mesozoic Tongbai-Dabie orogenic belt, and this age is in agreement with that of root softening in Dabie orogenic belt. It possibly represents the conversion time of Dabie orogenic belt from compressional environment to extensional environment. It is therefore considered that the interval from root softening to large scale extensional collapse in Tongbai-Dabie orogenic belt is ~ 30 Ma.

Key words: Middle Jurassic; metamorphic gabbro-diorite; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Tongbai-Dabie orogenic belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41402179, 41172189); Project of China Geological Survey (121201009000160902)

秦岭-桐柏-大别造山带是扬子与华北板块之间的复合型碰撞造山带,它不仅是世界上出露规模最大、保存最好的高压-超高压变质区,也是陆-陆碰撞之后,在超高压和高压岩石剥露过程中岩浆活动最为强烈的地区之一,造山作用的长时间、多期次、超高压变质等特征引起了中外地质学者的广泛关注与深入研究(Okay *et al.*, 1989; 殷鸿福等, 1998; Hacker *et al.*, 1998; Jahn *et al.*, 1999; 张国伟等, 2003; 郑永飞, 2008; 吴元保等, 2013; Wu and Zheng, 2013; 郑永飞等, 2015; Dong and Santosh, 2016)。目前,大多数学者对于大别造山带印支期高压-超高压变质事件形成于三叠纪(240~200 Ma)已无异议,然而对于碰撞之后板片的折返、岩浆作用、壳幔作用及其构造体制转换等有关问题仍有不同认识(李曙光等, 1999; 邓晋福等, 2001, 2005; Li *et al.*, 2002; 董树文等, 2005; 续海金等, 2008; Zhao *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012; 郑永飞等, 2015)。

大量年代学研究表明,大别造山带碰撞后岩浆事件主要发生在早白垩世 120~140 Ma (Hacker *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2014),形成于特提斯构造域转为滨太平洋构造域后伸展背景下的下地壳部分熔融。世界上典型的碰撞造山带碰撞后花岗岩均发生于造山后 20~50 Ma 之间(马昌前等, 2006),伊比利亚半岛华力西造山带从俯冲碰撞到伸展塌陷,持续时间约 30 Ma (Evans *et al.*, 1998),美

国西海岸中生代造山带持续 20~30 Ma (Foster *et al.*, 2001),喜马拉雅造山带滞后 25~35 Ma (Weinberg and Dunlap, 2000)。而大别造山带花岗岩比印支期陆陆碰撞、超高压变质时间滞后约 100 Ma,因此,众多学者通过对岩浆岩、沉积地层、边界断裂的研究获得了构造体制转换的时间,认为挤压环境转为伸展环境的时间发生在 140~130 Ma (Hacker *et al.*, 2000; 马昌前等, 2003; Xu *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011; 朱光等, 2011; 邓新, 2013),这些研究都表明大别造山带伸展活动开始的时间在早白垩世初,而对三叠纪碰撞后至白垩纪之间的岩浆间歇期的壳幔作用、岩浆作用的认识程度却明显不足,尤其是侏罗纪地壳从加厚到减薄转换的时间及其岩浆侵入作用还需要深入研究。

最近笔者在桐柏-大别造山带南缘大洪山地区发现一条变辉长辉绿岩脉,利用锆石 U-Pb LA-ICP-MS 和锆石 Hf 同位素测试手段对变辉长辉绿岩进行了详细研究和探讨,确定了岩体的形成时代,并分析了物质来源、成因和构造环境,结果表明桐柏-大别山南缘中生代陆-陆碰撞后中晚侏罗世已经有岩浆活动的发生,该发现为碰撞后构造体制转换的发生时间、壳幔作用及岩浆演化提供了新的信息。

1 区域地质概况

研究区位于襄樊-广济断裂西段的大洪山-三里岗地区,区域上属于扬子板块北缘与秦岭-大别造山带之间的缝合带,以断层或韧性剪切带相接触,结合

带经历了长期而复杂的构造活动,包含了不同时代、不同来源的构造岩块和混杂基质,赋存着南秦岭微陆块和扬子板块相互作用的重要信息。三里岗蛇绿混杂岩带主要由土门-三里岗-杨家棚-小阜-源潭岛弧火山岩、大洪山俯冲增生杂岩、磨拉石建造及被动陆缘组成(董小鹏等,1998a; Dong *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2007),以蛇绿岩和岛弧火山岩的发育而具有缝合带残余物质性质,代表古板块缝合带消减杂岩的残余体。岛弧火山岩由三里岗花岗岩、基性熔岩、

辉长岩、辉绿岩墙组成,俯冲增生杂岩由不同性质的岩块与基质组成,被动陆缘由打鼓石群碳酸盐岩组成。最新的研究表明该构造带形成于新元古代约 860 Ma,为新元古代俯冲增生造山带(Dong *et al.*, 2015; 胡正祥等, 2015a; 廖明芳等, 2016; Xu *et al.*, 2016; 李怀坤等, 2016)。

本次研究的变辉长辉绿岩脉位于大洪山构造混杂岩内(图 1),呈 NW 向延伸,出露宽度约 20 m,延伸长度约 1~2 km,侵位于新元古代增生杂岩(绢云母千

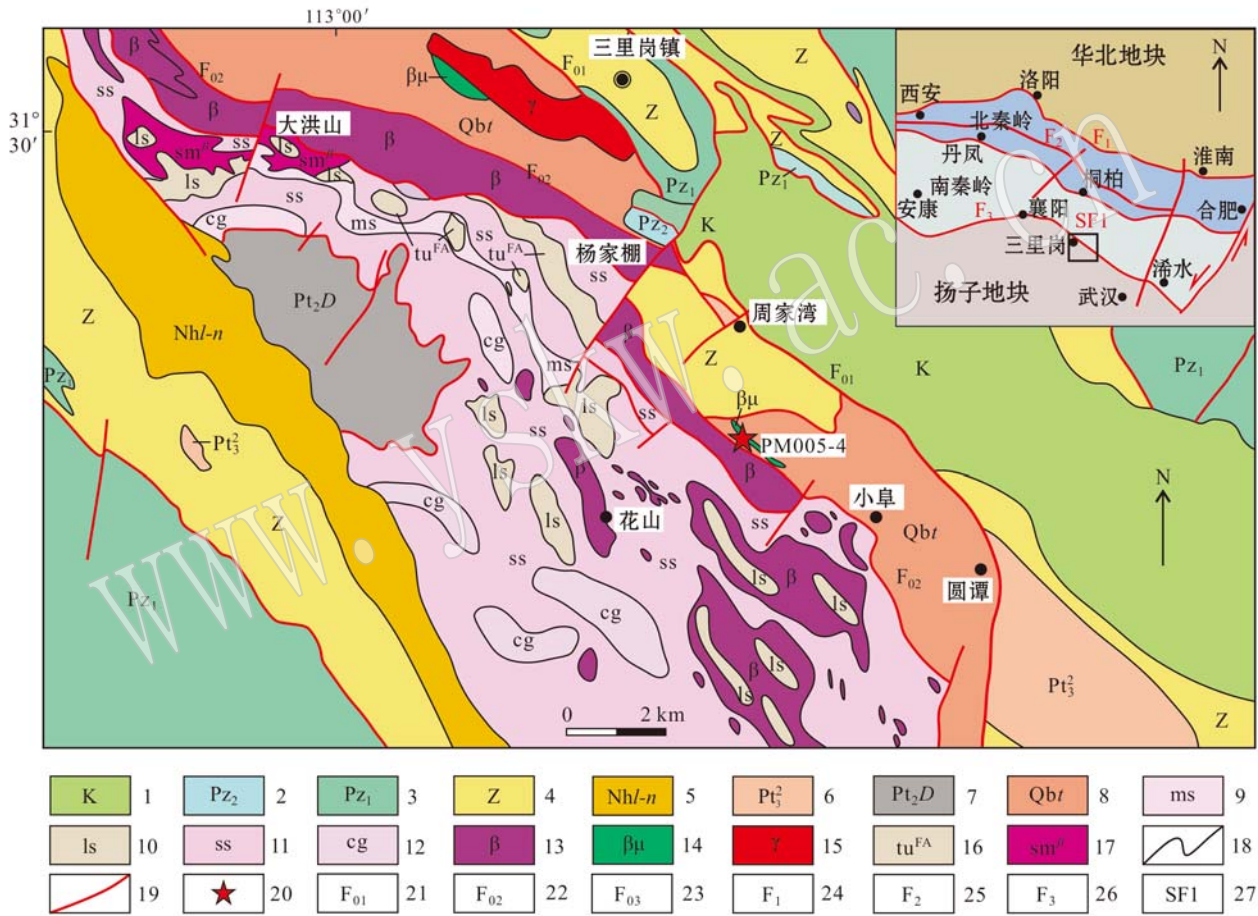


图 1 研究区地质简图(据胡正祥等,2015b)

Fig. 1 Simplified geological map of the study area(after Hu Zhengxiang *et al.*, 2015b)

1—白垩纪; 2—上古生界; 3—下古生界; 4—震旦系; 5—莲沱组-南沱组; 6—南华系; 7—中元古界打鼓石群(俯冲增生杂岩); 8—土门组(岛弧火山岩); 9—硅泥质岩; 10—碳酸盐岩(白云岩); 11—泥质岩; 12—砾岩、砂岩、泥岩; 13—玄武岩; 14—辉绿岩; 15—花岗岩; 16—砂质、白云质、凝灰质砾岩; 17—洋岛玄武岩; 18—地质界线; 19—断层; 20—采样点; 21—三里岗-三阳断裂; 22—板桥-屈山店-高关-张家冲断裂; 23—洪山寺-绿林-破岩山断裂; 24—武山-宝鸡断裂; 25—洛南-栾川-方城断裂; 26—勉略-青峰-襄广断裂; 27—商丹断裂

1—Cretaceous; 2—Upper Paleozoic; 3—Lower Paleozoic; 4—Sinian; 5—Liantuo Formation-Nantuo Formation; 6—Nanhuan System; 7—Mesoproterozoic Dagushi Group (subduction accretionary complex); 8—Tumen Formation (island arc volcanic rocks); 9—siliceous mudstone; 10—carbonate rocks(dolomite); 11—argillaceous rock; 12—conglomerate, sandstone and mudstone; 13—basalt; 14—diabase; 15—granite; 16—sandy, dolomitic, tuffaceous conglomerate; 17—ocean island basalt; 18—geological boundary; 19—fault; 20—sampling position; 21—Sanligang-Sanyang fault; 22—Banqiao-Qushandian-Gaoguan- Zhangjiachong fault; 23—Hongshansi-Lulin-Poyanshan fault; 24—Wushan-Baoji fault; 25—Luonan-Luanchuan-Fangcheng fault; 26—Mianlue-Qingfeng-Xiangguang fault; 27—Shangdan fault

枚岩)中,受后期断裂活动影响发生了动力变质作用。

2 岩相学及分析方法

2.1 岩石特征与岩相学

大洪山地区变质辉长辉绿岩样品采自周家湾南约3 km处公路旁(GPS坐标: $31^{\circ}25'47.00''\text{N}$, $113^{\circ}04'07.40''\text{E}$),样品编号为PM005-4。变质辉长辉绿岩呈脉状侵位于新元古代砂质绢云母千枚岩中,出露宽度约20 m,长约1~2 km(图2a、2b),呈灰绿色,

主要由基性斜长石(62%)、角闪石(20%)、辉石(10%)、钛铁矿(8%)和少量次生粘土矿脉组成(图2c、2d)。斜长石呈残余半自形板柱状,其他矿物呈半自形-他形晶粒状,其中基性斜长石粒径0.1~1 mm,角闪石粒径0.2~1 mm,辉石粒径0.2~1 mm。受襄樊-广济断裂带脆性活动的影响,辉长辉绿岩发生低绿片岩相变质(蚀变),导致斜长石局部发生粘土化,角闪石发生绿泥石化。岩石具变余辉长辉绿结构,块状构造。岩石中可见次生粘土矿物细脉呈枝叉状穿切分布。

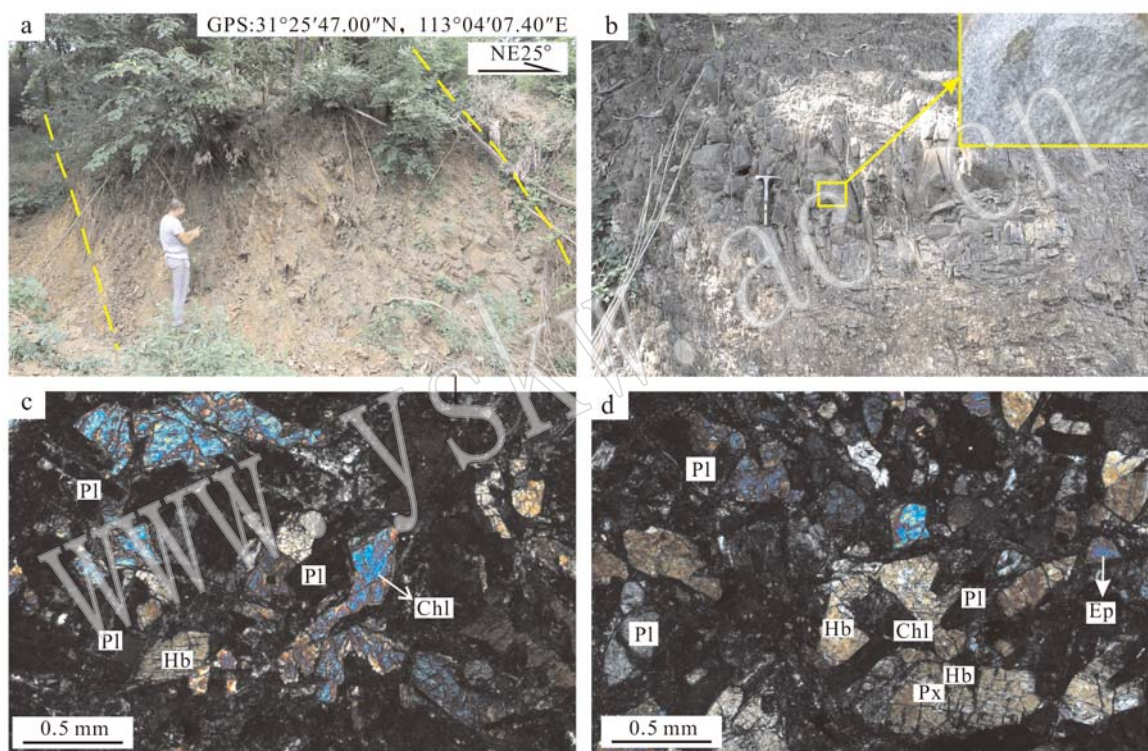


图2 变辉长辉绿岩野外(a、b)及镜下(c、d)特征

Fig. 2 Field photos(a, b) and photomicrographs (c, d) showing texture of the metamorphic gabbro-diabase

Pl—斜长石; Hb—角闪石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Px—辉石

Pl—plagioclase; Hb—hornblende; Chl—chlorite; Ep—epidote; Px—pyroxene

2.2 分析方法

取20 kg左右的样品,将样品粉碎至80目,经过淘洗和分选之后在实体显微镜下手工挑出待测锆石,锆石的分选和挑纯由河北省廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。将待测锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,待环氧树脂固化以后将样品打磨、抛光至锆石的核部。对锆石进行透、反射光显微照相以及阴极发光(CL)显微图像分析,在此基础上,选择合适的锆石颗粒和区域进行U-Pb年龄测定。

锆石原位微区U-Pb同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪上(LA-ICP-MS)上完成,激光剥蚀孔径为32 μm ,脉冲10 Hz,激光器能量110 mJ,采用锆石标准91500作为外标进行同位素分馏校正,仪器性能、分析方法、测试过程参考有关详述(Wiedenbeck *et al.*, 1995; Yuan *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004)。采用软件ICPMSDataCal对分析数据进行离线处理,单个测年同位素年龄的误差为

1 σ , 加权平均年龄具有 95% 的置信度。

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪上(LA-MC-ICPMS)上完成, 分析采用的激光斑束直径为 44 μm , 剥蚀频率为 10 Hz, 具体分析方法及仪器参数见文献(Yuan *et al.*, 2008)。 ^{176}Hf 的两个同质异位数 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 干扰采用如下校正值校正: $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.2669(12)$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886(13)$ 。 ϵHf 计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11}/\text{a}$, 球粒陨石现今值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$; 亏损地幔 Hf 模式年龄(t_{DMI})计算采用现今亏损地幔值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Chu *et al.*, 2006)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素定年

大洪山地区变质辉长辉绿岩(PM005-4)锆石 CL 图像研究显示, 锆石以短柱状、棱角状为主, 粒径大小在 50~100 μm , 长宽比 1:1~2:1, 颗粒较小且颗粒不完整, 可能是样品分选过程中机械破碎造成的, 颗粒的长/宽比实际可能更大。阴极发光强度较弱, 颜色多为灰白色(图 3), 少数不发育环带, 部分震荡环带较宽, 指示锆石结晶时温度较高, 微量元素扩散较快, 而没有核幔边结构和热液蚀变增生边, 表明

锆石结晶之后没有经受强烈区域变质和热液蚀变的改造, 显示其具有基性岩岩浆结晶锆石的特征(吴元保等, 2004)。

对 PM005-4 样品中 18 粒锆石进行 U-Pb 年代学测试, 得到有效数据点 18 个, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果见表 1。其中 2 个测点具有较大的年龄值(它们的表面年龄分别为点 2 的 2117 Ma、点 14 的 476 Ma)、可能为捕获锆石或继承锆石外, 其余 16 个数据点具有在误差范围内一致的年龄, 除了 4 号和 15 号数据点可能发生了铅丢失, 分布在不一致线下方外, 其余 14 个数据点基本落在不一致线上。16 粒锆石中 Th 含量分布在 $383 \times 10^{-6} \sim 3723 \times 10^{-6}$, U 的含量一般大于 1253×10^{-6} , Th/U 比值在 0.31~0.72 之间, 结合锆石阴极发光特征, 表明其为岩浆成因。16 个谐和锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $163 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=2.2)(图 4), 代表了大洪山变辉长辉绿岩的结晶年龄, 属于中侏罗世晚期。数据点 2 的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 表面年龄为 2117 Ma, 可能为 Columbia 超大陆聚合的响应; 数据点 14 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 476 Ma, 与桐柏造山带南缘古城畈群、兰家畈组玄武岩及南秦岭随州地区志留纪黄羊山碱性花岗岩时代相当, 可能记录了早古生代晚古生代早期的陆内裂解事件。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

对已经进行的锆石 U-Pb 测年的 11 颗锆石颗粒进行了 Lu-Hf 同位素分析, 结果见表 2。以 $t = 163$

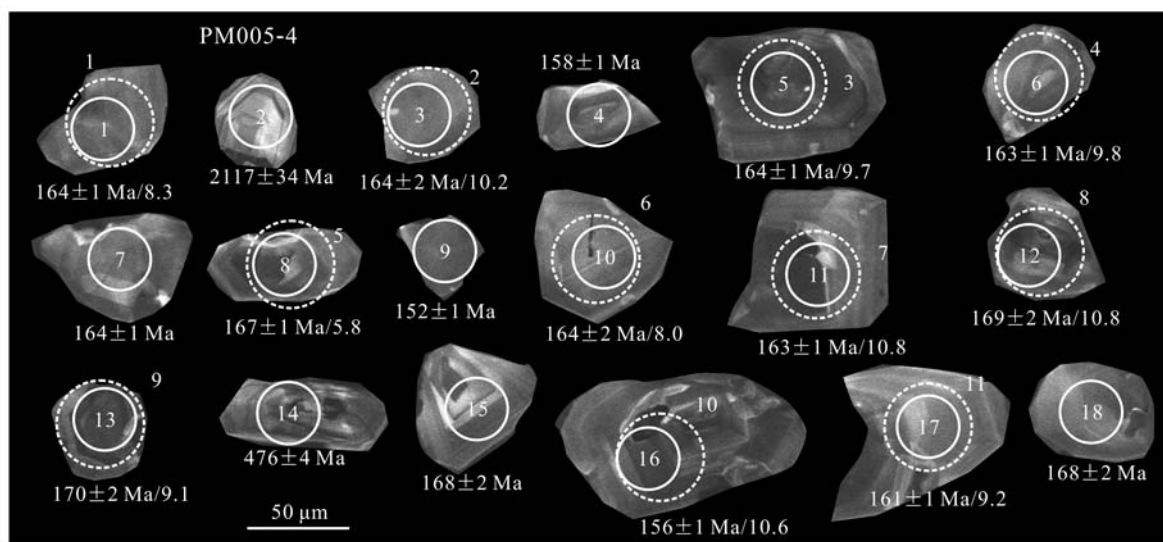


图 3 湖北大洪山地区变质辉长辉绿岩锆石阴极发光图像、对应年龄及 Hf 同位素

Fig. 3 CL images of zircon grains with initial Hf isotope ratios as $\epsilon\text{Hf}(t)$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the metamorphic gabbro-diorite from the Dahongshan area

表 1 大洪山地区变质辉长辉绿岩(PM005-4) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical results for the metamorphic gabbro-diorite (PM005-4) in the Dahongshan area

测点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb 总量	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
1	126	705	1839	0.38	0.049 3	0.001 7	0.175 9	0.005 8	0.025 8	0.000 2	165	80	164	5
2	404	153	255	0.60	0.131 4	0.002 6	7.170 9	0.158 7	0.391 7	0.003 9	2 117	34	2 133	20
3	112	628	1790	0.35	0.049 4	0.001 7	0.175 9	0.006 3	0.025 8	0.000 3	165	86	165	5
4	207	1054	2528	0.42	0.059 5	0.001 9	0.204 4	0.006 4	0.024 8	0.000 2	583	64	189	5
5	212	1254	2851	0.44	0.049 4	0.001 6	0.176 1	0.005 6	0.025 8	0.000 2	169	71	165	5
6	242	1397	3049	0.46	0.049 5	0.001 5	0.175 4	0.005 4	0.025 6	0.000 2	172	72	164	5
7	163	954	2262	0.42	0.049 3	0.001 6	0.176 3	0.005 7	0.025 8	0.000 2	165	78	165	5
8	155	858	2175	0.39	0.049 5	0.001 6	0.180 9	0.006 1	0.026 3	0.000 2	172	78	169	5
9	547	3723	5178	0.72	0.049 2	0.003 0	0.162 9	0.009 3	0.023 9	0.000 2	167	145	153	8
10	107	627	1713	0.37	0.049 4	0.001 9	0.176 1	0.006 6	0.025 8	0.000 2	165	91	165	6
11	93	528	1576	0.33	0.049 2	0.002 1	0.173 8	0.007 2	0.025 6	0.000 2	167	102	163	6
12	349	1834	3683	0.50	0.049 4	0.003 0	0.181 9	0.010 2	0.026 6	0.000 3	165	143	170	9
13	239	1317	3037	0.43	0.049 4	0.001 7	0.183 0	0.006 0	0.026 8	0.000 3	165	86	171	5
14	415	2140	1695	1.26	0.059 4	0.001 7	0.629 9	0.016 4	0.076 6	0.000 6	589	61	496	10
15	100	383	1253	0.31	0.049 3	0.008 1	0.200 8	0.018 1	0.026 5	0.000 4	165	344	186	15
16	125	668	1975	0.34	0.047 9	0.001 8	0.163 0	0.005 9	0.024 5	0.000 2	100	106	153	5
17	93	538	1597	0.34	0.049 3	0.001 8	0.172 7	0.006 3	0.025 3	0.000 2	165	90	162	5
18	177	957	2068	0.46	0.049 2	0.001 7	0.179 5	0.006 2	0.026 4	0.000 3	167	83	168	5

表 2 大洪山地区变辉长辉绿岩 (PM005-4) LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 LA-MC-ICPMS zircon Lu-Hf isotope data for the metamorphic gabbro-diorite (PM005-4) in the Dahongshan area

样品	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	t/Ma	$\epsilon\text{Hf}(t)$	$\pm(2\sigma)$	t_{DM1}/Ma	$\pm(2\sigma)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	t_{DM2}/Ma	$\pm(2\sigma)$
1.1	0.282 909	0.000 026	0.001 370	0.036 971	164	8.3	0.94	491	76	-0.96	896	170
3.1	0.282 962	0.000 028	0.001 245	0.033 523	164	10.2	1.00	415	81	-0.96	726	181
5.1	0.282 951	0.000 024	0.001 876	0.050 996	164	9.7	0.85	438	70	-0.94	768	154
6.1	0.282 953	0.000 024	0.001 586	0.043 199	163	9.8	0.83	431	68	-0.95	759	152
8.1	0.282 837	0.000 019	0.001 388	0.038 139	167	5.8	0.67	595	54	-0.96	1 124	121
10.1	0.282 900	0.000 027	0.001 137	0.031 151	164	8.0	0.96	502	78	-0.97	924	175
11.1	0.282 979	0.000 022	0.001 027	0.027 785	163	10.8	0.78	387	63	-0.97	669	141
12.1	0.282 978	0.000 027	0.001 543	0.041 783	169	10.8	0.96	394	79	-0.95	669	175
13.1	0.282 930	0.000 028	0.002 271	0.063 607	170	9.1	0.99	473	82	-0.93	831	179
16.1	0.282 974	0.000 023	0.001 197	0.032 840	161	10.6	0.80	396	64	-0.96	689	145
17.1	0.282 935	0.000 024	0.000 987	0.026 372	161	9.2	0.87	450	70	-0.97	815	157

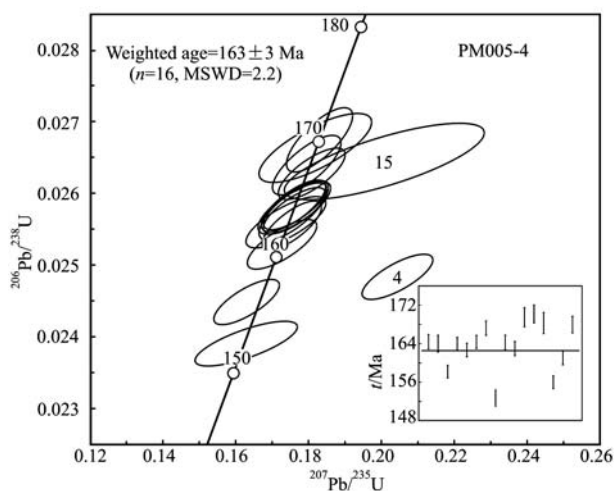
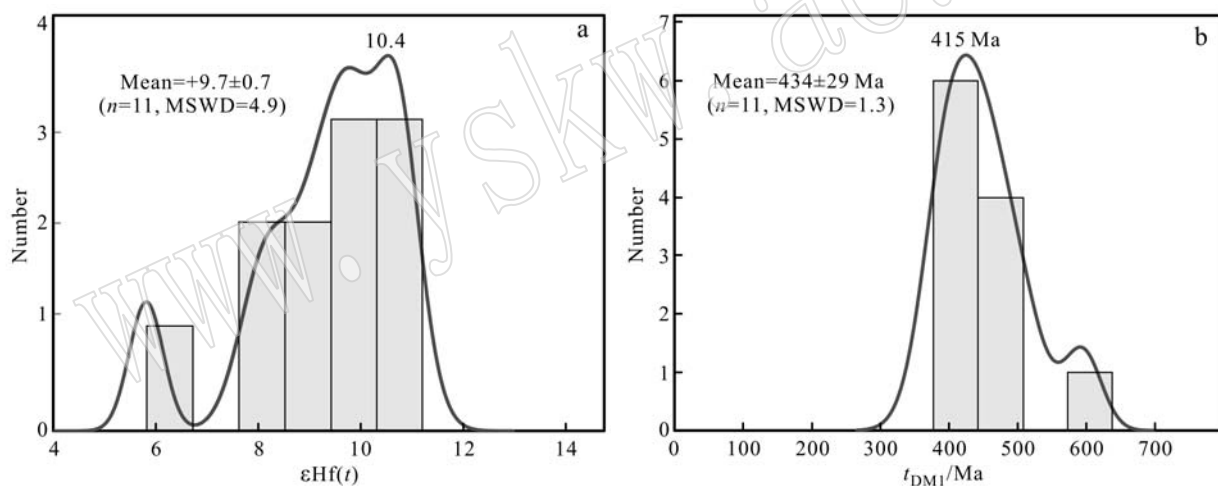


图4 变辉长辉绿岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of the metamorphic gabbro-diorite

图5 锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(a)和单阶段 Hf 模式年龄(b)柱状分布图Fig. 5 Histograms of zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ value and single-stage Hf model age (t_{DM1}) for zircon

纪岩浆活动,并且有一些以往被认为是侏罗纪的岩浆岩用新方法被重新厘定为早白垩世(图6),大量研究成果显示桐柏-大别造山带内部大量的晚中生代岩浆岩形成时间为140~115 Ma,峰期年龄130 Ma(李曙光等,1999;马昌前等,2003;续海金,2005;Wang *et al.*, 2007;张超等,2008;Zhao *et al.*, 2011;Xu *et al.*, 2012;Deng *et al.*, 2014),而仅在长江中下游铜、铁、金多金属成矿带内发现了晚侏罗世岩浆岩,分别为大冶地区的殷祖岩体和铜陵地区的沙滩角岩体,侵位时代为152 Ma(狄永军等,2005;Li *et al.*, 2009)。笔者在大洪山增生杂岩内发现的变辉长辉绿岩脉形成时代明显早于大别造山

Ma 计算出锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为0.282 837~0.282 979,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为+5.8~+10.8,加权平均结果为 $+9.7 \pm 0.7$ (NSWD=4.9)(图5a)。单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 介于387~595 Ma 之间,加权平均值为 434 ± 29 Ma (NSWD=1.3)(图5b)。这表明该变辉长辉绿岩脉主要源于早古生代的亏损地幔源区。

4 讨论

4.1 变辉长辉绿岩形成时代

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年结果表明,大洪山地区变辉长辉绿岩脉形成时间为 163 ± 3 Ma,其时代属于中侏罗世晚期。由于近些年 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石定年均未发现大别山存在侏罗

带内部岩浆岩的侵位时间,也略早于长江中下游岩浆岩的形成时代,它应该代表了桐柏-大别造山带及周缘迄今为止发现的最老的晚中生代岩浆活动事件。

4.2 构造体制转换时限

桐柏-大别造山带是扬子与华北板块之间的三叠纪陆-陆碰撞带,广泛发育的包含柯石英和金刚石的超高压变质岩说明发生过陆壳深俯冲(Okay *et al.*, 1989; Xu *et al.*, 1992),并且曾经存在加厚的山根。碰撞后岩浆活动的发生和发展是造山带加厚岩石圈构造垮塌和部分熔融的结果(郑永飞,2008),研究成果认为构造垮塌的机制是岩石圈拉张

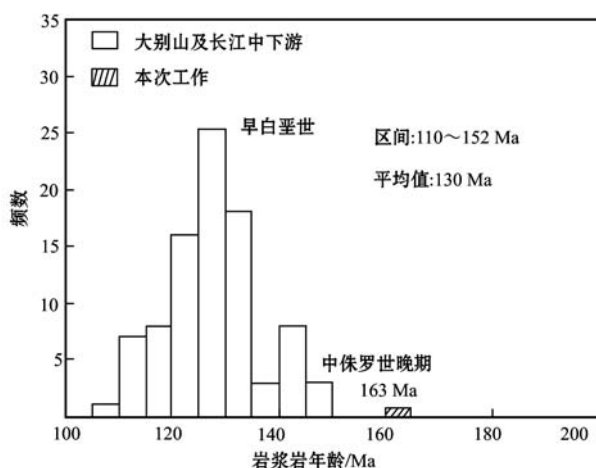


图6 大别造山带晚中生代岩浆岩形成年龄直方图

Fig. 6 Age histogram of Late Mesozoic magmatic rocks in Dabie orogen

或伸展环境的重力不稳定。因此,大别造山带三叠纪陆-陆碰撞后曾发生过挤压构造体制向伸展构造体制的转换。

桐柏-大别山早白垩世岩浆活动从侵位时间上可以分为早晚两期,早期岩浆岩侵位时间集中在 145~130 Ma,存在不同程度的构造变形,出现高 Sr/Y 和 La/Yb 特征的类埃达克质岩石(Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 童劲松, 2008; Huang *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2012);晚期岩浆岩侵位时间集中在 130~110 Ma(马昌前等,2003; Xu *et al.*, 2007, 2012; 邓新, 2013),构造变形弱或无构造变形,地球化学为低 Sr/Y 特征。因此,~130 Ma 可能是垮塌机制由岩石圈拉张转为重力拆沉的转折时间。

有关大别造山带及其邻区中生代造山作用的结束以及伸展作用的开始时间,存在着不同的认识。Hacker 等(2000)通过对花岗岩的年代学研究,认为大别造山带在 140~120 Ma 之间发生 NW-SE 向伸展;马昌前等(2003)通过花岗岩侵位年龄研究,认为地壳从挤压向伸展转换的时间在 135 Ma; Wu 等(2007)对北大别混合岩的年龄进行研究后认为,从挤压向伸展的转换时间是 145 Ma;续海金(2005)对北大别白垩纪花岗岩岩相学与年代学的研究认为 132 Ma 代表伸展减薄的开始;张超等(2008)通过对张榜花岗岩的研究,认为大别山巨量花岗岩活动的启动从 150 Ma 就已经开始;Wang 等(2011)通过磨子潭-晓天韧性剪切研究认为大别造山带在 143~110 Ma 之间发生了上盘向 NW 或 WNW 向的剪切

滑动,这代表大别造山带此时已开始伸展活动;邓新(2013)通过对北大别石鼓尖岩体的年代与磁组构研究认为构造体制转换时间为 141 Ma;Chen 等(2017)对南秦岭随应地块七尖峰岩体的研究认为,七尖峰岩体形成于 137 Ma,为钙碱性 I 型花岗岩,源区主要来自于加厚的古老下地壳熔融,显示此时南秦岭已经处于伸展构造体制,表明构造体制转换的时间要早于 137 Ma。

大陆碰撞造山带一个完整的造山旋回一般经过 3 个过程,即大陆碰撞造山(包括陆-陆碰撞、大陆深俯冲、超高压变质、深俯冲折返、加厚地壳和岩石圈根的形成)、山根的软化和活动、造山带伸展垮塌。Xu 和 Zhang(2017)通过对大别造山带混合岩的研究,认为山根的软化、活化发生在 160~110 Ma。本文在桐柏-大别造山带南缘大洪山地区襄樊-广济断裂带内发现的中侏罗世晚期的变辉长辉绿岩脉沿断裂带侵位,岩脉的侵位时代与北大别山根活化、初始深融作用时代相当,可能代表着陆-陆碰撞、超高压折返结束之后,桐柏-大别造山带由挤压环境向伸展环境转换的初始启动时间,即山根活化、构造体制初始转换时间可能不晚于 163 Ma,随后桐柏-大别造山带及其周缘处于滨太平洋构造域的伸展环境,先后经历了岩石圈伸展、重力拆沉,形成巨量 145~110 Ma 岩浆岩(图 7)。

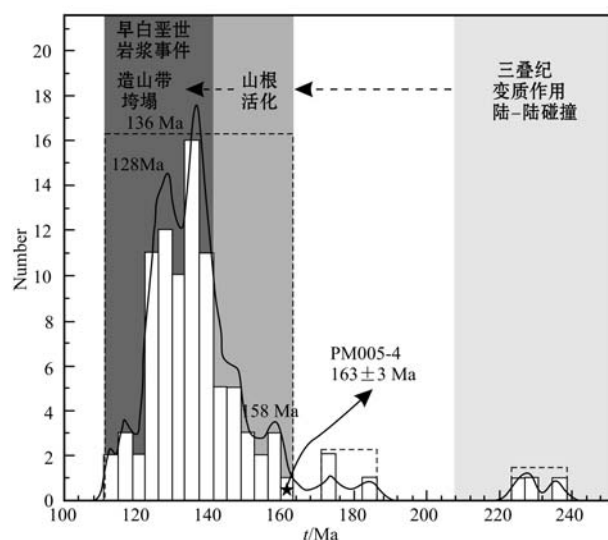


图7 大别造山带中生代岩浆锆石年龄直方图

(据 Xu and Zhang, 2017 修改)

Fig. 7 Age histogram of zircon from Mesozoic magma in Dabie orogen(modified after Xu and Zhang, 2017)

4.3 锆石 Hf 同位素与岩浆源区

本文变辉长辉绿岩脉锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+5.8 \sim +10.8$, 加权平均值为 $+9.7 \pm 0.7$, 表明该基性岩的源岩为亏损地幔, 而无明显的壳源物质混染。单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 介于 $387 \sim 595$ Ma 之间, 加权平均值为 434 ± 29 Ma。近年来, 相继在南秦岭发现了早古生代伸展作用的岩浆记录, 从陕西紫阳、岚皋向东到湖北竹溪、随州地区, 发育了一条古生代碱性超基性-基性岩带, 随州早古生代兰家畈组 (S_1l) 变辉斑玄武岩形成于板内伸展-初始裂谷环境 (董云鹏等 (1998b)), 随州早古生代黄羊山钠闪石英正长岩 (439 Ma) 形成于古特提斯洋扩张背景下的板内伸展环境 (Ma *et al.*, 2005)。本次研究的中侏罗世晚期变辉长辉绿岩脉的单阶段模式年龄为 434 Ma, 与南秦岭早古生代岩浆岩时代一致, 因此, 笔者认为大洪山变辉长辉绿岩在上升过程中没有受到明显的地壳混染, 其源区主要来自于亏损地幔, 亏损地幔为早古生代伸展过程的产物。

早白垩世桐柏-大别山地区不仅出现数量可观的基性侵入岩、火山岩, 而且出现更大规模的花岗岩, 这些基性岩和中酸性岩在同位素年龄上接近同时, 地球化学特征显示 $145 \sim 110$ Ma 花岗岩锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 $-35 \sim -20$ 之间 (图 8) (Xu *et al.*, 2007, 2012; Deng *et al.*, 2014), 源区为加厚的古老下地壳物质, 早白垩世 (126 Ma) 基性岩脉 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-12.04 \sim -18.84$, $\epsilon\text{Hf}(t) < -12$ (Wang *et al.*, 2005;

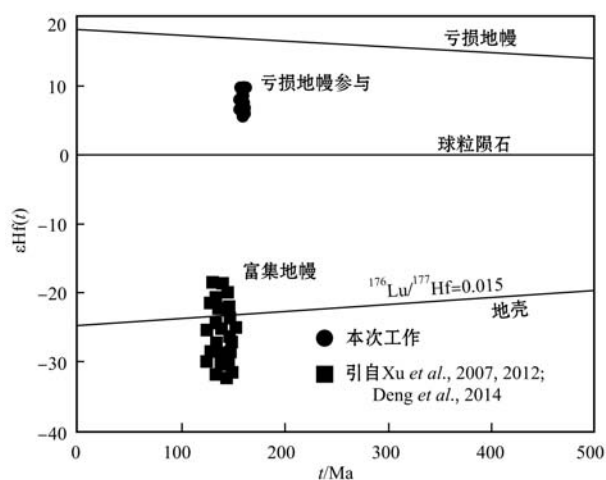


图 8 变辉长辉绿岩的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解

(Xu *et al.*, 2007, 2012; Deng *et al.*, 2014)

Fig. 8 Zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ versus t plot for the metamorphic gabbro-diorite (after Xu *et al.*, 2007, 2012; Deng *et al.*, 2014)

王世明等, 2010), 源区为富集岩石圈地幔。以上这些源区强烈富集的特征, 表明这是一期明显的壳幔置换事件, 岩浆事件是从深部地幔部分熔融开始, 随后很快扩展为大规模地壳部分熔融。而大别山南坡及扬子克拉通北缘晚白垩世东湖群红色砂岩中广泛出露玄武岩, 如黄陂和新洲, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 2.05 和 3.9 (周文戈, 1996), 表明其源区已属亏损地幔。

因此, 大别地区的地幔经历了亏损-富集-亏损的演化过程, 造山带伸展垮塌的初始阶段, 亏损地幔岩浆上涌提供了物质和热量, 形成晚侏罗世沿断裂带侵位的具有亏损地幔源区特征的基性岩脉, 随后的大规模伸展垮塌作用, 软流圈地幔上涌, 富集岩石圈地幔及古老下地壳发生部分熔融, 形成大量具埃达克质花岗岩和富集地幔特征的基性岩。

5 结论

(1) 桐柏-大别造山带南缘大洪山变辉长辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 163 ± 3 Ma, 形成于中侏罗世晚期, 是桐柏-大别造山带迄今为止发现的最早的中生代陆-陆碰撞后岩浆活动的准确记录, 由此显示桐柏-大别造山带山根活化、挤压环境向伸展环境的初始转换时间可能不早于 163 Ma。

(2) 锆石 Hf 同位素结果表明, 该基性岩源区主要来自于亏损地幔, 为早古生代伸展过程的产物。伸展初期, 幔源岩浆上涌提供物质与热量, 至大规模垮塌、拆沉, 幔源岩浆上涌只提供热量, 加厚的古老下地壳和岩石圈地幔发生部分熔融, 形成大量峰期年龄为 130 Ma 的岩浆岩。

(3) 晚中生代大别地区的地幔经历了亏损-富集-亏损的演化过程, 整个中央造山带不同区块相同时期出现的基性脉岩, 其地球化学特征差异更多受制于其原有的源区特征。

References

- Chen B, Jahn Borming and Wei C J. 2002. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: trace element and Nd-Sr isotope evidence[J]. *Lithos*, 60(1~2): 67~88.
- Chen Q Z, Jiang S Y and Duan R C. 2017. The geochemistry, U-Pb and Re-Os geochronology, and Hf isotopic constraints on the genesis of the Huangjiagou Mo deposit and related granite in the Dabie

- region, Hubei Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 504~517.
- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 34: 745~748.
- Deng Jinfu and Wu Zongxu. 2001. Lithospheric thinning event in the lower Yangtze craton and Cu-Fe metallogenic belt in the middle and lower Yangtze River reaches[J]. *Geology of Anhui*, 11(2): 86~91(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Zhao Guochun, Su Shangguo, *et al.* 2005. Structure overlap and tectonic setting of Yanshan orogenic belt in Yanshan era[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 157~165(in Chinese with English abstract).
- Deng Xin. 2013. Magma Emplacement Mechanism of the Tiantangzhai Granites Implication for the Dynamical Evolution, North Dabie Orogenic Belt, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Deng X, Yang K G, Polat Ali, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages, major and trace elements, and Hf isotope characteristics of the Tiantangzhai granites in the North Dabie orogen, Central China: tectonic implications[J]. *Geological Magazine*, 151(4): 916~937.
- Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and petrology significance of Xiaotongguanshan and Sahtanjiao Pluton in Tongling area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 804(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Hu Jianmin, Li Sanzhong, *et al.* 2005. Te Jurassic deformation in the Dabie Mountain and its tectonic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1189~1194(in Chinese with English abstract).
- Dong Y P and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29: 1~40.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, *et al.* 1998a. Disintegration of the Huashan group in the Dahong Mountain area, Northern Hubei[J]. *Regional Geology of China*, 17(4): 371~376(in Chinese with English abstract).
- Dong Y P, Zhang G W, Zhao X, *et al.* 2004. Geochemistry of the subduction-related magmatic rocks in the Dahong Mountains, northern Hubei Province—Constraint on the existence and subduction of the eastern Mianle oceanic basin[J]. *Science in China (D)*, 47(4): 366~377.
- Dong Y P, Zhang X M, Liu X M, *et al.* 2015. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 84~98.
- Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, *et al.* 1998b. Geochemistry of the Caledonian basin volcanic rocks in the south margin of Qinling orogenic belt and their tectonic implications[J]. *Geochimica*, 27(5): 432~441(in Chinese with English abstract).
- Evans N G, Gleizes G, Leblanc D, *et al.* 1998. Syntectonic emplacement of the Maladeta granite (Pyrenees) deduced from relationships between Hercynian deformation and contact metamorphism[J]. *Journal of the Geological Society*, 155(1): 209~216.
- Foster D A, Schafer C, Fanning C M, *et al.* 2001. Relationships between crustal partial melting, plutonism, orogeny, and exhumation: Idaho-Bitterroot batholith[J]. *Tectonophysics*, 342(3): 313~350.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1~4): 215~230.
- 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.
- Hu Zhengxiang, Chen Chao, Mao Xinwu, *et al.* 2015a. Documentation of Jingningian island-arc volcanic rocks and accretionary complexes in the Dahongshan region, northern Hubei and its tectonic significance[J]. *Resources Environment & Engineering*, 29(6): 757~766(in Chinese with English abstract).
- Hu Zhengxiang, Mao Xinwu, Tian Wangxue, *et al.* 2015b. Discovery of the Jinningian orogenic belt on the northern margin of Yangtze Craton in Mountain Dahong[J]. *Geological Survey of China*, 2(2): 33~39(in Chinese with English abstract).
- Huang F, Li S G, Dong F, *et al.* 2008. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 255(1): 1~13.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 1999. Crustal-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[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Li Huaikun, Tian Hui, Zhou Hongying, *et al.* 2016. Correlation between the Dagushi Group in the Dahongshan area and the Shennongjia Group in the Shennongjia area on the northern margin of

- the Yangtze Craton: Constraints from zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic systematics[J]. *Earth Science Frontiers*, 23: 1~16 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383~409.
- Li Shuguang, Hong Ji'an, Li Huimin, *et al.* 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusion in Dabie mountains and their geological implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(3): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Li S G, Huang F and Li H. 2002. Post-collisional lithosphere delamination of the Dabie-Sulu orogeny [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(3): 259~263.
- Liao Mingfang, Xin Yingbo, Li Linjing, *et al.* 2016. Discussion about genesis and formation age of Sanligang pluton in the Dahongshan Region, Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 30(2): 143~158 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Zircon geochronology of the low- ϵ intermediate granulite xenoliths from Danaping, Hannuoba, China[J]. *Geochimica*, 33(3): 261~268.
- Ma Changqian, She Zhenbing, Zhang Jinyang, *et al.* 2006. Crustal roots, orogenic heat and magmatism[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 130~139 (in Chinese with English abstract).
- Ma C Q, She Z P, Xu P, *et al.* 2005. Silurian A-type granitoids in the southern margin of the Tongbai-Dabieshan: Evidence from SHRIMP zircon geochronology and geochemistry[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(8): 1134~1145.
- Ma C Q, Yang K G, Ming H L, *et al.* 2004. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 47(5): 453~462.
- Okay A I, Xu S and Sengor A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1(4): 595~598.
- Shi Y R, Liu D Y, Zhang Z Q, *et al.* 2007. SHRIMP Zircon U-Pb dating of gabbro and granite from the huashan ophiolite, Qinling orogenic belt, China: Neoproterozoic suture on the Northern margin of the Yangtze Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 239~243.
- Tong Jinsong. 2008. Magmatism and Regional Tectonic Evolution of Orogenic Belt, on the Example of Dabie Orogen and Its Neighbouring Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609~2636.
- Wang Shiming, Ma Changqian, Wang Linyan, *et al.* 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Genesis of Early Cretaceous Basic Dykes from the Dabie Orogen[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 572~584 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Peng T P, *et al.* 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks[J]. *Chemical Geology*, 220(3~4): 165~189.
- Wang Y S, Xiang B W, Zhu G, *et al.* 2011. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China [J]. *Journal of Structural Geology*, 33(3): 362~380.
- Weinberg R F and Dunlap W J. 2000. Growth and deformation of the Ladakh Batholith, Northwest Himalayas: Implications for timing of continental collision and origin of calc-alkaline batholiths[J]. *The Journal of Geology*, 108(3): 303~320.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and its restriction on interpretation of U-Pb dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2013. Southward accretion of the North China Block and the tectonic evolution of the Qinling-Tongbai-Hong an orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2246~2250 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China [J]. *Gondwana Research*, 23: 1402~1428.
- Wu Y B, Zheng Y F, Tang J, *et al.* 2007. Zircon U-Pb dating of water-rock interaction during Neoproterozoic rift magmatism in South China[J]. *Chemical Geology*, 246(1~2): 65~86.

- Xu Haijin. 2005. Late Mesozoic Magmatic Intrusion Sequences Implication for the Transition of Tectonic Regimes, Central of the Dabie Orogenic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Xu H J, Ma C Q and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 240(3~4): 238~259.
- Xu H J, Ma C Q and Zhang J F. 2012. Generation of Early Cretaceous high-Mg adakitic host and enclaves by magma mixing, Dabie orogen, Eastern China[J]. *Lithos*, 142~143: 182~200.
- Xu Haijin, Ye Kai and Ma Changqian. 2008. Early Cretaceous granitoids in the North Dabie and their tectonic implications: Sr-Nd and zircon Hf isotopic evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 87~103 (in Chinese with English abstract).
- Xu H J and Zhang J F. 2017. Anatexis witnessed post-collisional evolution of the Dabie orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2017.04.001>
- Xu S T, Okay A I, Ji S Y, *et al.* 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 256(5 053): 80~82.
- Xu Y, Yang K G, Polat Ali, *et al.* 2016. The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic [J]. *Precambrian Research*, 275: 310~331.
- Yin Hongfu and Zhang Kexin. 1998. Evolution and characteristics of the central organic belt[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 437~442 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Chemical Geology*, 247: 100~118.
- 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[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zhang Chao and Ma Changqian. 2008. Large scale late Mesozoic magmatism in the Dabie Mountain: Constraints from Zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4): 71~79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, *et al.* 2003. Mianlue tectonic zone and Mianle suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Science in China (D)*, 33(12): 1 121~1 135 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, *et al.* 2008. Zircon U-Pb, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China[J]. *Chemical Geology*, 253: 222~242.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, *et al.* 2011. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture[J]. *Lithos*, 126(1~2): 99~114.
- Zheng Yongfei. 2008. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2 129~2 152 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Chen Yixiang, Dai Liqun, *et al.* 2015. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to collisional orogens[J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(6): 711~735 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenge. 1996. Qinling-Dabie Orogenic Belt after the Collision Tectonic Development and Geochemical Study of Regional Magmatism [D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Piao Xuefeng, Zhang Li, *et al.* 2011. Evolution of extensional direction in the Hefei basin and its dynamic mechanism[J]. *Geological Review*, 57(2): 153~166 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带[J]. *安徽地质*, 11(2): 86~91.
- 邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 等. 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, 29(2): 157~165.
- 邓新. 2013. 北大别天堂寨花岗岩岩侵位机制及其动力学过程[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 狄永军, 吴淦国, 张达, 等. 2005. 铜陵地区小铜官山河沙滩脚岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其岩石学意义[J]. *地质学报*, 79(6): 804.
- 董树文, 胡健民, 李三忠, 等. 2005. 大别山侏罗纪变形及其构造意义[J]. *岩石学报*, 21(4): 1 189~1 194.
- 董云鹏, 张国伟, 柳小明, 等. 1998a. 鄂北大洪山地区“花山群”的解体[J]. *中国区域地质*, 17(4): 371~376.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 1998b. 秦岭造山带南缘早古生代基

- 性火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地球化学, 27(5): 432~441.
- 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等. 2015a. 鄂北大洪山晋宁期岛弧火山岩和增生杂岩的厘定及地质意义[J]. 资源环境与工程, 29(6): 757~766.
- 胡正祥, 毛新武, 田望学, 等. 2015b. 扬子陆块北缘大洪山地区发现晋宁期造山带[J]. 中国地质调查, 2(2): 33~39.
- 李怀坤, 田辉, 周红英, 等. 2016. 扬子克拉通北缘大洪山地区打鼓石群与神农架地区神农架群的对比: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据[J]. 地学前缘, 23: 1~16.
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 5(3): 351~355.
- 廖明芳, 谢应波, 李琳静, 等. 2016. 湖北大洪山地区三里岗岩体成因及时代探讨[J]. 资源环境与工程, 30(2): 143~158.
- 马昌前, 余振兵, 张金阳, 等. 2006. 地壳根、造山热与岩浆作用[J]. 地学前缘, 13(2): 130~139.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. 中国科学, 33(9): 453~462.
- 童劲松. 2008. 造山带岩浆作用与区域构造演化——以大别造山带及其邻区为例[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王世明, 马昌前, 王琳燕, 等. 2010. 大别山早白垩世基性岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(4): 572~584.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 吴元保, 郑永飞. 2013. 华北陆块古生代南向增生与秦岭-桐柏-红安造山带构造演化[J]. 科学通报, 58(23): 2246~2250.
- 续海金. 2005. 大别造山带核部晚中生代岩浆侵位序列与构造体制转换[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 续海金, 叶凯, 马昌前. 2008. 北大别早白至纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Lu-Hf 同位素及其构造意义[J]. 岩石学报, 24(1): 87~103.
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 23(5): 437~442.
- 张超, 马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动: 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 矿物岩石, 28(4): 71~79.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学: D 辑, 33(12): 1121~1135.
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例[J]. 科学通报, 53(18): 2129~2152.
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带[J]. 中国科学: 地球科学, 45(6): 711~735.
- 周文戈. 1996. 秦岭-大别造山带碰撞后构造发展-区域岩浆作用地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 朱光, 朴学峰, 张力, 等. 2011. 合肥盆地伸展方向的演变及其动力学机制[J]. 地质论评, 57(2): 153~166.