# 大别造山带新太古代地壳岩石和 古元古代混合岩化作用

---来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据

邱啸飞<sup>1,2,3)</sup>, 江拓<sup>1,2)</sup>, 吴年文<sup>2)</sup>, 赵小明<sup>2)</sup>, 徐琼<sup>2,3)</sup>

1) 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,武汉,430205;

2) 中南地质科技创新中心,武汉,430205;3) 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,武汉,430074

内容提要:大别造山带北大别超高压变质带是研究秦岭-大别-苏鲁造山带古老基底演化过程的关键区域,其内 广泛发育的混合岩长期被认为主要形成于中生代。本文对北大别团风一带新识别出的一套混合岩开展了锆石 U-Pb定年和 Hf 同位素组成分析,结果显示,混合岩第一类锆石核部具有岩浆锆石特点,组成的不一致线上交点年 龄为2850±86 Ma,该年龄代表了混合岩原岩年龄。第二类锆石具有变质深熔锆石特点,其加权平均<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年 龄为2011±12 Ma,代表了混合岩化的时间。岩浆锆石多数具有负的ε<sub>Hf</sub>(t)值(-8.1~2.2),对应两阶段 Hf 同位 素模式年龄(T<sub>DM2</sub>)为3.6~3.0 Ga,表明原岩可能为大别造山带内古太古代地壳物质重熔形成,并可能在形成过程 中伴有少量幔源物质加入。与之相比,变质锆石均具有正的ε<sub>Hf</sub>(t)值(0.3~8.2),对应 T<sub>DM2</sub>为2.7~2.2 Ga,说明 在混合岩化变质深熔过程中锆石 Lu-Hf 同位素体系完全开放,导致了锆石 Hf 同位素组成的升高。本文研究表明, 大别造山带除了中生代混合岩化作用以外,还存在古元古代与 Columbia 超大陆聚合过程相关的一期混合岩化作 用,为目前已知的大别造山带内最早一期混合岩化作用。此外,该套混合岩原岩为太古宙岩石,且对应模式年龄高 达 3.6 Ga,这扩展了目前已知的大别造山带最古老岩石信息范围,表明大别造山带内太古宙古老地壳物质可能不 仅局限于黄土岭一带,还在北大别更广泛地区出露。

关键词:古元古代;混合岩;锆石 U-Pb 定年;Hf 同位素;太古宙岩石;大别造山带

大陆地壳的早期形成和演化过程长期以来都是 国际地学界关注的热点问题(Hawkesworth and Kemp, 2006)。了解和认识古老陆块大陆岩石圈的 早期形成特征,有助于理解大陆地壳增生历史和地 壳生长过程。太古宙岩石通常被认为代表了早期的 大陆地壳组成,因而成为了解大陆地壳成因的理想 对象。然而,大多数太古宙岩石都经历了后期再造、 变质、蚀变作用等地质过程的改造或破坏,因而其保 存和出露范围相对有限。

华南陆块和华北克拉通是我国东部最主要的两 个前 寒 武 纪 块 体 (Liu et al., 1992; Wilde and Zhao, 2005; Zhang et al., 2006a; Guo et al., 2014; Qiu et al., 2018a),它们被认为于三叠纪沿 秦岭-大别-苏鲁造山带碰撞拼合到一起(Hacker et al., 2000)。华北克拉通广泛出露太古宙 TTG 岩 石,且较完整记录了多阶段复杂地壳演化历史(Liu et al., 1992; Wan et al., 2012, 2019; Wang Yafe et al., 2015),而与之相比,华南陆块太古宙岩石仅 零星出露于其北部的扬子克拉通内,包括崆岭(Guo et al., 2014; Qiu et al., 2018a)以及钟祥等地区 (Wang Zhengjiang et al., 2013; Wang Kai et al., 2018),因而对华南陆块早期地质过程的了解显得相 对缺乏。显然,在华南陆块其他更广泛的地区寻找 太古宙基底岩石,对于认识华南陆块形成和演化具 有重要意义。近年来,部分研究者在扬子克拉通北 缘大别造山带黄土岭地区识别出少量的新太古代麻

 引用本文:邱啸飞,江拓,吴年文,赵小明,徐琼.2020.大别造山带新太古代地壳岩石和古元古代混合岩化作用——来自锆石 U-Pb 年 代学和 Hf 同位素证据.地质学报,94(3):729~738, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020131.
 Qiu Xiaofei, Jiang Tuo, Wu Nianwen, Zhao Xiaoming, Xu Qiong, 2020. Neoarchean crustal rocks and Paleoproterozoic migmatization in the Dabie orogen; evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes. Acta Geologica Sinica, 94(3):729~738.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41303026, 41530104)和中国地质调查局地质调查项目(编号 DD20190385, DD20190415)资助成果。 收稿日期:2019-08-15;改回日期:2019-12-29;网络发表日期:2020-01-02;责任编委:张招崇;责任编辑:周健。

作者简介:邱啸飞,男,1985年生。副研究员,博士,主要从事同位素地球化学、岩石地球化学和前寒武纪地质学研究。Email: qiuxiaofei@ mail.cgs.gov.cn。

粒岩和片麻岩,同时这些岩石的锆石 Lu-Hf 同位素 以及全岩 Sm-Nd 同位素组成也表明在大别造山带 内可能存在古太古代甚至更老的地壳岩石(Lei et al.,2008; Sun et al.,2008; Wu et al.,2008)。然 而,除了黄土岭地区以外,在大别造山带内目前尚未 见其他有关太古宙岩石记录的报道,由于露头的局 限性以及相对有限的研究,使得有关该地区这些早 期地壳岩石的性质、演化特点,以及太古宙岩石的出 露规模等均不清楚。

另一方面,在大别造山带内广泛出露的混合岩 被认为可能记录了区域上复杂的地质演化历史 (Faure et al., 2003; Wu et al., 2007a)。然而,有 关这些混合岩的时代、期次等问题仍存争议(Faure et al., 2003; Wu et al., 2007a, 2007b; Gong Songlin et al., 2007; Xia Bin et al., 2010),导致有 关该地区混合岩的成因也存在争议,包括正片麻岩 部分熔融成因和变质成因等(Gong Songlin et al., 2007; Chen et al., 2015; Chen Yongkang et al., 2017)。

本文对大别造山带北大别地块团风地区出露的 混合岩开展了系统的锆石内部结构、微量元素组成、 U-Pb 定年以及 Hf 同位素组成分析,不仅发现了该 混合岩原岩形成于新太古代的证据,而且表明大别 造山带内存在古元古代混合岩化作用。

## 1 区域地质概况

秦岭-桐柏-大别-苏鲁造山带是华北克拉通与华 南陆块之间的碰撞造山带,大别造山带位于该造山 带的中部(Zheng et al., 2005)。从北到南,其可通 过不同的矿物学、岩石学、地球化学以及变质级别 分为5个构造单元,依次为北淮阳低级变质带、北 大别高温超高压麻粒岩相带、中大别中温超高压 榴辉岩相带、南大别低温超高压榴辉岩相带以及 宿松低温高压蓝片岩相带。各构造单元之间均为 断层或韧性剪切带分隔,并被中生代白垩纪花岗岩 类侵入(图1)。

北大别带位于大别造山带北部,被北边晓天-磨 子潭断裂、东南部五河-水吼断裂、西南边马庙-太湖 断裂以及西边商城-麻城断裂相隔(Faure et al., 1999)。北大别岩石主要由一套英云闪长质混合岩 化片麻岩组成,夹少量镁铁质-超镁铁质岩、榴辉岩 及麻粒岩透镜体。北大别榴辉岩中存在微粒金刚 石,结合相关的年代学和岩石学研究,表明其经历了 中生代(240~220 Ma)由于陆壳深俯冲引起的超高 压变质作用(Tsai and Liou, 2000; Xie et al., 2004; Xu et al., 2005)。

北大别存在东西两个穹隆,东边为岳西穹隆,西 边为罗田穹隆(Wang Jianghai et al.,2002)。它们 具有相似的岩性构造特点。核部存在较强的混合岩 化,由片麻岩组成。除黄土岭地区麻粒岩和片麻岩 显示原岩年龄为~2766 Ma 并经历了古元古代(~ 2.0~1.9 Ga)麻粒岩相变质作用外(Lei et al., 2008),北大别混合岩锆石定年结果显示混合岩化主 要发生在早白垩世(Wu et al.,2007a,2007b)。

本文混合岩样品(18JM01)采自罗田穹隆西缘 的团风地区(图1)。野外见混合岩具有强烈变形条 带(图 2),这些条带相对狭窄,部分条带仅毫米级 别。混合岩总体出露规模有限,多呈似层状、透镜体 及不规则状产于大别群黑云(角闪)斜长片麻岩、变 粒岩之中,围岩主要是浅灰色黑云斜长片麻岩或浅 粒岩、变粒岩、含透闪石大理岩等,两者之间呈构造 接触关系。所研究样品为长英质斜长角闪混合岩, 基体与脉体之间界限相对模糊(图 2a,b),脉体明显 切割基体线理,有明显变形特征。样品具有柱状粒 状变晶结构,块状构造。岩石中主要矿物为角闪石 (~60%)、斜长石(~30%)、石英(~7%)、黑云母 (~2%),角闪石半自形、柱状,斜长石和石英为它 形,石英压扁拉长,具有波状消光(图 2c),镜下可见 长英质矿物边缘局部发育熔体相类似的结构特征 (图 2d)。副矿物为绿帘石、磁铁矿、榍石,蚀变矿物 为绢云母(图 2c,d)。

# 2 分析方法

野外样品采集后直接送往河北省廊坊市宇能岩 石矿物分选技术服务有限公司进行锆石分选工作。 样品破碎经摇床、淘洗、电磁分选等步骤后分离出锆 石,在双目镜下选出透明且具代表性锆石颗粒,然后 将其粘在环氧树脂上进行制靶,磨至锆石颗粒中心 部位后经抛光、喷碳等步骤处理后用于阴极发光 (CL)照相以确定锆石颗粒内部结构,在此基础上选 择合适的区域用于锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素 测定。锆石 CL 以及透、反射光照相均在北京锆年领 航科技有限公司采用配备英国 Gatan 公司生产的阴 极荧光探头装置系统的 JSM6510 扫描电镜上完成。

锆石的 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测定均在中 国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研 究室完成。测试仪器为装配 RESOlution 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 icapQ 型 ICP-MS 联



图 1 秦岭-大别-苏鲁造山带地质简图(a)和大别造山带地质简图及采样点(b)(据 Wu et al., 2007a 修改) Fig. 1 Schematic geological map for the Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt (a) and sketch geological map of the Dabie orogen and sampling location (b) (modified after Wu et al., 2007a)

NQ-北秦岭陆块;SQ-南秦岭块体;TB-桐柏杂岩;SL-苏鲁地体;EDB-东大别地体;WDB-西大别地体;YQWF-烟台-青岛-五连断裂 NQ-North Qinling block; SQ-South Qinling block; TB-Tongbai complex; SL-Sulu block; EDB-Eastern Dabie block; WDB-Western Dabie block; YQWF-Yantai-Qingdoo-Wulian fault



图 2 团风混合岩野外(a,b)及薄片正交光镜下照片(c,d) Fig. 2 Field outcrops (a, b) and photomicrographs (c, d) of the Tuanfeng migmatites Hb-角闪石;Bi-黑云母;Pl-斜长石;Q-石英 Hb-Hornblende; Bi-biotite; Pl-plagioclase; Q-quartz

机。实验中激光束斑直径为 29 μm,激光剥蚀时间 45 s,激光频率为 6~8 Hz,激光能量密度为 5 J/cm<sup>2</sup>。测定时采用国际锆石标准 91500 作为外部 标准来分析 U-Pb 同位素,NIST SRM612 作为外部 错石 Hf 同位素测定仪器为配备 RESOlution 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 Neptune plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-NS) 联机。锆石 Lu-Hf 同位素分析点选择在 LA-ICP-MS 年龄测试点附近(图 3)。激光束斑直径为 43  $\mu$ m,激光剥蚀时间 60 s,激光频率为 6~8 Hz,激光 能量密度为 5 J/cm<sup>2</sup>。测定时采用 91500、PLE 作为 标样。<sup>176</sup> Lu 对<sup>176</sup> Hf 的 干 扰 采 用 <sup>176</sup> Lu/<sup>175</sup> Lu = 0.02656 进行校正(Blichert-Toft et al., 1997),同 时假设 Lu 和 Hf 的分馏情况类似。<sup>176</sup> Yb 对<sup>176</sup> Hf 的 干扰采用实测无干扰<sup>173</sup> Yb 进行校正,同时设定 <sup>176</sup> Yb/<sup>173</sup> Yb 比值为 0.78696(Thirlwall and Anczkiewicz, 2004)来进行计算。

### 3 结果

#### 3.1 锆石形态结构特点

混合岩样品中锆石多为短柱状或椭圆状,无色透明至半透明,长度范围 50~120 mm,长宽比为 1:1至3:1。锆石 CL 照片显示(图3),锆石总体 可分为两类,第一类锆石占大多数,这些锆石阴极发 光图像较亮,且未见明显分带特征,表明其为典型的 变质成因锆石。第二类锆石数量较少,具有典型核-边结构,核部显示振荡环带,为岩浆锆石特征,这类 锆石边部较窄,溶蚀现象明显,无分带特征且与核部 界线清晰,表明可能由后期变质深熔作用形成 (Corfu et al., 2003)。

#### 3.2 锆石 U-Pb 定年结果

对长英质斜长角闪混合岩样品中 19 个锆石颗 粒进行了 19 个点的 U-Pb 年龄测定,其中 4 个分析 点位于第二类岩浆锆石区域,其他 15 个分析点位于 第一类变质锆石区域(表 1)。4 个位于岩浆锆石区 域的分析点具有相对较高的 Th (129×10<sup>-6</sup>~175 ×10<sup>-6</sup>)和 U (426×10<sup>-6</sup>~772×10<sup>-6</sup>)含量和较高 的 Th/U 比值(0.18~0.41),4 个锆石中除一个分 析点(18JM01-2)位于谐和线附近外,其余锆石均为 不谐和锆石,这些数据得到的不一致线与谐和线上 交点年龄为 2850±86 Ma (MSWD=1.19, n=4) (图 4),与谐和锆石 2805±31 Ma 的年龄在误差范 围内一致,可认为代表了混合岩原岩的形成年龄。



图 3 团风混合岩代表性锆石阴极发光(CL)照片 Fig. 3 CL images of representative zircons for the Tuanfeng migmatites

较小的圈为 U-Pb 同位素年龄分析点及对应的<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 表面年龄;较大的圈为 Lu-Hf 同位素分析点及对应的  $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 The smaller cycles show LA-ICP-MS U-Pb isotope analytical spots with corresponding apparent<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb ages, and the larger ones show locations of Lu-Hf isotope analyses with

15 个位于变质锆石区域的分析点具有低的 Th ( $6.76 \times 10^{-6} \sim 190 \times 10^{-6}$ )含量和相对低的 Th/U 比值( $0.13 \sim 0.39$ ),变质锆石年龄结果谐和度相对 比岩浆锆石高,除一个数据点(18JM01-20)以外,其 余均为谐和年龄或接近谐和(谐和度>90%)。14 个谐和数据点<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄加权平均为 2011± 12 Ma (MSWD=1.07, n=14),与所有点组成的不 一致线上交点年龄 1992±35 Ma (MSWD=0.37, n=15)在误差范围内一致(图 4),可能代表了混合 岩化过程中变质锆石的生长年龄。

#### 3.3 锆石 Hf 同位素特征

corresponding  $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$  values

对样品中12个锆石颗粒进行了12个点的Lu-Hf 同位素组成分析,其中4个分析点位于岩浆锆石 区域,8个分析点位于变质锆石区域,锆石 Lu-Hf 同 位素组成结果见表 2。岩浆锆石<sup>176</sup> Lu/<sup>177</sup> Hf 比值 (0.000679~0.001894)高于变质锆石(0.000545~ 0.000718)。同时,岩浆锆石与变质锆石相比也具有 较低的<sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf 比值(0.281014~0.281179)。 在对 ε<sub>Hf</sub>(t)值和 Hf 同位素模式年龄计算时,现今球 粒陨石和亏损地幔的176 Lu/177 Hf、176 Hf/177 Hf 分别采 用 0.0332、0.282772 (Blichert-Toft and Albarède, 1997)和 0.0384、0.283250 (Griffin et al., 2000)。两 阶段 Hf 同位素模式年龄(T<sub>DM2</sub>)计算时<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup> Hf 比 值采用大陆地壳平均值 0.015 (Griffin et al., 2002)。<sup>176</sup> Lu 的衰变常数  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$ (Albarède et al., 2006)。计算结果表明,4个岩浆 锆石分析点 ε<sub>щ</sub>(t)值变化范围为-8.1~2.2,对应

7	0	0
1	J	5

表 1 北大别团风混合岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircons from the Tuanfeng migmatites in the northern Dabie belt

	元素 (×10 <sup>-6</sup> )			同位素比值							表面年龄(Ma)					
点号	Th	U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	宿和度   /%
18JM01-1	23.0	132	0.17	0.1258	0.0031	5.629	0.15	0.3252	0.0041	2040	42	1920	22	1815	20	94
18JM01-4	12.6	98.8	0.13	0.1210	0.0030	5.650	0.15	0.3398	0.0044	1972	46	1924	22	1885	21	97
18JM01-5	7.50	21.9	0.34	0.1212	0.0051	6.004	0.26	0.3638	0.0062	1974	76	1976	37	2000	30	98
18JM01-7	15.7	110	0.14	0.1232	0.0029	5.684	0.14	0.3336	0.0035	2003	41	1929	22	1856	17	96
18JM01-9	190	831	0.23	0.1263	0.0027	5.596	0.14	0.3199	0.0038	2047	37	1915	21	1789	19	93
18JM01-11	12.3	46.5	0.27	0.1239	0.0040	6.040	0.19	0.3560	0.0055	2013	57	1982	27	1963	26	99
18JM01-12	6.76	20.5	0.33	0.1229	0.0048	5.868	0.22	0.3515	0.0071	1999	69	1957	33	1942	34	99
18JM01-13	25.8	133	0.19	0.1229	0.0027	5.695	0.13	0.3358	0.0046	1998	37	1931	20	1866	22	96
18JM01-14	10.4	34.6	0.30	0.1254	0.0039	6.278	0.19	0.3655	0.0058	2035	50	2015	27	2008	27	99
18JM01-15	14.3	77.1	0.19	0.1228	0.0034	6.026	0.17	0.3551	0.0048	1998	54	1980	25	1959	23	98
18JM01-21	8.82	24.4	0.36	0.1217	0.0062	5.646	0.30	0.3377	0.0077	1981	91	1923	46	1876	37	97
18JM01-22	14.0	62.9	0.22	0.1255	0.0034	5.709	0.16	0.3283	0.0042	2035	48	1933	25	1830	20	94
18JM01-25	81.8	368	0.22	0.1223	0.0027	5.128	0.12	0.3025	0.0031	1991	39	1841	19	1704	15	92
18JM01-17	43.2	150	0.29	0.1236	0.0032	5.470	0.15	0.3196	0.0040	2009	46	1896	23	1788	19	94
18JM01-20	15.1	38.2	0.39	0.1263	0.0051	4.820	0.22	0.2739	0.0040	2047	72	1788	38	1560	20	86
18JM01-2	175	426	0.41	0.1974	0.0038	14.11	0.33	0.5170	0.0063	2805	31	2757	22	2687	27	97
18JM01-3	129	627	0.21	0.1809	0.0032	9.338	0.20	0.3741	0.0051	2661	29	2372	20	2049	24	85
18JM01-10	137	772	0.18	0.1670	0.0033	7.967	0.20	0.3441	0.0050	2527	33	2227	22	1907	24	84
18JM01-19	171	561	0.30	0.1718	0.0035	8.977	0.25	0.3732	0.0062	2575	34	2336	26	2045	29	86





 $T_{DM2}$ 变化范围为 3576~3045 Ma。8 个变质锆石分 析点  $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围为 0.3~8.2,对应  $T_{DM2}$ 变化 范围为 2650~2189 Ma (图 5)。

4 讨论

#### 4.1 团风混合岩原岩形成时间及性质

本文所研究混合岩样品中原岩锆石显示了振荡 环带和相对高的 Th/U 比值,为典型的岩浆成因锆 石。这些岩浆锆石组成上交点年龄为 2850±86 Ma,说明该样品原岩形成时代为中太古代末到新太 古代初。这一年龄与 Wu et al. (2008)采自北大别 黄土岭地区麻粒岩原岩年龄接近,表明为大别造山 带内典型的太古宙陆壳物质年龄特征。样品中岩浆 锆石具有略低的  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值(-8.1~2.2)以及较原岩 形成时间偏老的亏损地幔模式年龄(3576~3045 Ma),此外总体上样品还具有较大的 ε<sub>Hf</sub>(t)值变化 范围,由于混合岩原岩锆石可能发生了后期混合岩 化过程中的变质重结晶,因而需要评价其 Hf 同位 素是否受到后期变质作用的影响。Zheng et al. (2005)指出,变质新生锆石可能会提高  $\epsilon_{\rm HI}(t)$ 值 3.1 到 13.5, 而固态重结晶锆石则可保存其 Hf 同位素 组成类似原岩锆石。类似的变质锆石效应在扬子 陆核崆岭杂岩和南极半岛混合岩中也都有发现 (Flowerdew et al., 2006; Zhang et al., 2006b). 但在本文中,三个不谐和年龄锆石(由于后期变质 作用影响而造成 Pb 丢失)分析点的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值反而 低于具有谐和年龄的锆石分析点。因此,本文倾 向于认为团风混合岩中原岩锆石变化的 Hf 同位 素组成代表了原岩原始的同位素组成,推测团风 混合岩样品原岩可能为大别造山带内古太古代地 壳物质重熔形成,并可能在形成过程中伴有少量 幔源物质加入。

与岩浆锆石相比,团风混合岩中变质锆石具有 更低的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf比值和更高的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值, 对应更高的 ε<sub>Hf</sub>(t)值(0.3~8.2)和更年轻的亏损地

表 2 北大别团风混合岩锆石 Hf 同位素组成 Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of the Tuanfeng migmatites in the northern Dabie belt

点号	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	1s	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	1s	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	1s	U-Pb 年 龄(Ma)	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	1s	$T_{\rm DM}({ m Ga})$	T <sub>DM2</sub> (Ga)	$f_{ m Lu/Hf}$
18JM01HF-10	0.281033	0.000012	0.001894	0.000036	0.067227	0.001953	2527	-8.1	0.8	3.157	3.576	-0.94
18JM01HF-19	0.281026	0.000009	0.001546	0.000014	0.050556	0.000803	2575	-6.6	0.8	3.138	3.526	-0.95
18JM01HF-02	0.281014	0.000010	0.001512	0.000018	0.048084	0.000397	2805	-1.9	0.8	3.152	3.416	-0.95
18JM01HF-03	0.281179	0.000011	0.000679	0.000008	0.022621	0.000285	2661	2.2	0.8	2.863	3.045	-0.98
18JM01HF-04	0.281619	0.000010	0.000650	0.000008	0.021512	0.000219	1972	2.4	0.7	2.265	2.491	-0.98
18JM01HF-05	0.281573	0.000012	0.000581	0.000003	0.018998	0.000140	1973	0.9	0.8	2.324	2.588	-0.98
18JM01HF-07	0.281542	0.000009	0.000707	0.000014	0.024375	0.000531	2003	0.3	0.7	2.374	2.650	-0.98
18JM01HF-11	0.281681	0.000019	0.000612	0.000008	0.019410	0.000201	2013	5.6	0.9	2.179	2.326	-0.98
18JM01HF-12	0.281585	0.000012	0.000718	0.000014	0.023742	0.000436	1999	1.7	0.8	2.316	2.600	-0.98
18JM01HF-14	0.281741	0.000014	0.000627	0.000004	0.019709	0.000064	2035	8.2	0.8	2.098	2.200	-0.98
18JM01HF-15	0.281601	0.000011	0.000629	0.000009	0.020754	0.000370	1998	2.4	0.8	2.288	2.514	-0.98
18JM01HF-21	0.281748	0.000018	0.000545	0.000004	0.018725	0.000171	1981	7.3	0.9	2.084	2.189	-0.98





Fig. 5 U-Pb age versus  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$  value of zircons from the Tuanfeng migmatites in the northern Dabie belt (Hf isotopic fields for the Kongling complex from Qiu Xiaofei

et al., 2014; Li et al., 2014; Guo et al., 2015)

幔模式年龄(2650~2189 Ma),这与大别造山带中 超高压榴辉岩和片麻岩中观察到的变质效应一致 (Zheng et al., 2005),说明古元古代具有高 <sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf比值和低 Lu/Hf 比值的变质流体显著 对变质增生锆石 Hf 同位素进行了改造(Zheng et al., 2005)。

扬子克拉通太古宙基底地壳物质的范围和组成 长期以来都不明确。近年来,随着同位素年代学工 作的深入,除扬子陆核崆岭杂岩以外,在扬子克拉通 其他前寒武纪基底出露区也陆续有太古宙地壳岩石 的报道。目前已在南秦岭块体鱼洞子群(Zhou et al., 2018; Chen et al., 2019)、陡岭杂岩(Wu et al., 2014; Nie et al., 2016)、钟祥胡集地区(Wang Zhengjiang et al., 2013; Wang Kai et al., 2018)陆 续发现了太古宙岩石。对大别造山带而言,新太古 代地壳岩石之前仅在黄土岭地区得到报道,本文在 团风地区也发现了新太古代岩石出露,表明北大别 地区的新太古代基底可能具有比现有认识更大的 规模。

#### 4.2 扬子克拉通北缘古元古代混合岩化作用

混合岩中锆石原位 U-Pb 定年能提供有关该岩 石的详细年龄信息,从而为了解区域上复杂的演化 过程提供约束(Foster et al., 2001; Keay et al., 2001)。结合 Hf 同位素组成,还可示踪源区特征以 及地壳熔体形成和锆石形成机制等(Flowerdew et al., 2006)。前人对北大别混合岩进行的年代学研 究显示,北大别混合岩主要形成于中生代白垩纪时 期。例如, Deng Shangxian et al. (1997)对北大别凤 凰关混合岩中浅色体开展的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明混合岩化作用时间为 129.3±0.8 Ma; Wang Jianghai et al. (2002)对北大别英云闪长 质混合岩中浅色体进行了 TIMS 锆石 U-Pb 年龄测 定,获得了 131.7±1.1 Ma 的年龄,将此看作北大 别混合岩化发生的时间。Wu et al. (2007)对北大 别凤凰关和漫水河地区混合岩开展的 SHRIMP 锆 石 U-Pb 定年结果则进一步表明,北大别存在两期 混合岩化作用,时代分别为 137±4 Ma 和 124±4 Ma。Chen Yongkang et al. (2017)对北大别混合岩 已发表的年龄数据进行了综合,认为混合岩化作用 发生的时间从 140 Ma 持续到 125 Ma,与区域上岩 浆作用时间基本对应。

本文在北大别地区混合岩中获得了 2011±12 Ma 的变质年龄,表明大别造山带内除已报道的早 白垩世混合岩化过程外,应还存在一期古元古代的

735

混合岩化作用。近年来,随着研究工作的不断开展, 在扬子克拉通北缘也越来越多的出现有关古元古代 变质-岩浆作用的报道(Wu et al., 2008; Wang Zhengjiang et al., 2015; Qiu Xiaofei et al., 2017)。已有研究表明,古元古代构造热事件在扬子 克拉通普遍存在。Ling et al. (2001)对崆岭杂岩中 含石榴子石的斜长角闪岩和副片麻岩进行了矿物-全岩 Sm-Nd 等时线年龄测定,分别获得了 1958 ±15 Ma 和 1939 ±44 Ma 的等时线年龄,提出在扬子克拉 通可能存在约 2.0~1.85 Ga 构造-岩浆热事件。此 外,Zhang et al. (2006b)在崆岭杂岩两个变泥质岩 中也分别获得了 1979 ± 22 Ma 和 1948 ± 46 Ma 的 变质锆石 U-Pb 年龄。Qiu Xiaofei et al. (2016, 2017)对崆岭杂岩变质表壳岩系中含石榴子石石英 岩分别开展了石榴子石-全岩 Sm-Nd 等时线和变质 锆石 U-Pb 定年,结果同样指示该地区存在~2.0 Ga的高压变质事件。该套表壳岩系的地球化学特 征则进一步表明以这套变沉积岩为代表的孔兹岩系 的形成可能与 Columbia 超大陆汇聚过程中的造山 作用密切相关(Qiu et al., 2018b)。Wu et al. (2008)在北大别黄土岭麻粒岩中获得了 2029±13 Ma 的变质锆石年龄,认为其代表了麻粒岩相变质 作用年龄, Chen et al. (1998, 2006)发现该期麻粒 岩相作用以顺时针 P-T-t 轨迹为特征,因而可能与 碰撞过程密切相关; Wang Zhengjiang et al. (2015) 对扬子克拉通北缘冷水杂岩中片麻状花岗岩和正长 花岗岩开展了锆石 U-Pb 定年,获得了 1960~1936 Ma 的年龄,地球化学特征显示这些花岗岩属于典 型的 I 型花岗岩,且这些花岗岩体可能形成于同碰 撞构造背景下古老地壳的部分熔融作用。Yin et al. (2013)对扬子陆核中变沉积岩和基性麻粒岩的 锆石 U-Pb 研究同样表明区域上存在~2.0 Ga 麻粒 岩相变质作用,同时,该研究还在崆岭杂岩中报道了 零星出露的~2.0 Ga 的含石榴子石花岗岩,地球化 学结果显示这些花岗岩为典型 S 型花岗岩,形成于 同碰撞构造背景之下。另外,在被认为同属扬子克 拉通北缘的朝鲜半岛中部的 Gyeonggi 地体东南部, 最近也识别出约 1.96~1.91 Ga 的与俯冲相关的变 质-岩浆事件(Oh et al., 2019)。古元古代变质作 用的叠加也被广泛记录在扬子克拉通太古宙 TTG 片麻岩和角闪岩中(e.g., Guo et al., 2015; Qiu Xiaofei et al., 2019)。基于这些年代学、岩石地球 化学数据、变质矿物组合以及顺时针的 P-T-t 轨迹, 使得多数学者提出扬子克拉通 2.0~1.9 Ga 变质作 用可能由弧-陆碰撞和(或)陆-陆碰撞事件引起,从 而支持将扬子克拉通作为 Columbia 超大陆的重要 组成部分(e.g., Zhang et al., 2006b; Yin et al., 2013; Qiu et al., 2018b; Qiu Xiaofei et al., 2019)。本次获得的混合岩化变质年龄与前人报道 的古元古代构造热事件年龄互为印证,进一步支持 了扬子克拉通北缘在古元古代存在一期构造-热 事件。

混合岩化过程常与碰撞造山带相联系,认为其 可能是造山带演化过程中地壳深熔作用产物,可能 代表了不同块体之间碰撞拼合的地壳深熔记录 (Foster et al., 2001)。在与造山过程相关的高级 变质地体中,混合岩主要由深熔作用形成。在碰撞 造山带从挤压缩短向伸展减薄的构造体制转换过程 中,随着地壳减薄有关的热流增加,常会引发部分熔 融作用,随着该过程的进一步发生,熔体与残留体之 间分离,并迁移聚集,最终形成花岗质熔体,而残留 体就成为麻粒岩。本文所获得的北大别混合岩化时 间为~2.0 Ga,这一年龄与北大别麻粒岩相变质作 用时间一致,也与北大别古元古代碰撞后花岗质 片麻岩侵位时代接近(Wu et al., 2008)。此外,团 风混合岩原岩时代为新太古代,同样与北大别黄 土岭麻粒岩的原岩年龄相似。这些结果表明,北 大别古元古代混合岩化与同时期麻粒岩之间可能 存在成因联系,它们可能都与Columbia 超大陆的聚 合过程相关。

## 5 结论

(1) 对北大别团风一带混合岩开展的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成分析结果表明,混合岩原 岩形成于 2850±86 Ma,代表了混合岩化的时间为 2011±12 Ma。

(2)团风混合岩原岩可能为大别造山带内古太 古代地壳物质重熔形成,并可能在形成过程中伴有 少量幔源物质加入;在混合岩化变质深熔过程中锆 石 Lu-Hf 同位素体系完全开放,导致了锆石 Hf 同 位素组成的升高。

(3)大别造山带除中生代混合岩化作用以外,应 还存在古元古代与 Columbia 超大陆聚合过程相关 的一期混合岩化作用,为目前已知的大别造山带内 最早一期混合岩化作用。

(4)大别造山带内太古宙古老地壳物质可能不 仅局限于黄土岭一带,还在北大别更广泛地区出露。 致谢:野外工作期间得到了中国地质调查局武 汉地质调查中心彭练红教授级高级工程师和邓新博 士的大力协助; 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素测定过 程中得到了中国地质调查局武汉地质调查中心童喜 润博士的热情帮助, 在此表示感谢。匿名审稿专家 对本文初稿进行了多次详细审阅并提出了许多宝贵 建议和意见, 在此深表谢意。

#### References

- Albarède F, Scherer E E, Blichert-Toft J, Rosing M, Simionovici A, Bizzarro M. 2006. γ-ray irradiation in the early Solar System and the conundrum of the <sup>176</sup>Lu decay constant. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70: 1261~1270.
- 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, 154: 243~258.
- Blichert-Toft J, Chauvel C, Albarède F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127: 248~260.
- Chen Nengsong, Sun Min, You Zhendong, Malpas J. 1998. Wellpreserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, central China. Journal of Metamorphic Geology, 24: 633~654.
- Chen Qiong, Sun Min, Zhao Guochun, Zhao Junhong, Zhu Weilin, Long Xiaoping, Wang Jun. 2019. Episodic crustal growth and reworking of the Yudongzi terrane, South China: constraints from the Archean TTGs and potassic granites and Paleoproterozoic amphibolites. Lithos, 326~327: 1~18.
- Chen Renxu, Ding Binghua, Zheng Yongfei, Hu Zhaochu. 2015. Multiple episodes of anatexis in a collisional orogen: zircon evidence from migmatite in the Dabie orogen. Lithos,  $212 \sim$ 215;  $247 \sim 265$ .
- Chen Yi, Ye Kai, Liu Jingbo, Sun Min. 2006. Multistage metamorphism of the Huangtuling granulite, Northern Dabie Orogen, eastern China: implications for the tectonometamorphic evolution of subducted lower continental crust. Journal of Metamorphic Geology, 16: 213~222.
- Chen Yongkang, Yan Jun, Liu Xiaoqiang, Zhang Yuanyuan, Li Quanzhong. 2017. Rock types of migmatites in the North Dabie and their petrogenesis. Journal of Mineral and Petrology, 37 (2): 18~32 (in Chinese with English abstract).
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 469~500.
- Deng Shangxian, Wang Jianghai, Chang Xiangyang. 1997. The age of migmatites in the Dabie complex from NE Hubei. Acta Geoscientia Sinica, 18(S1): 68~70 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Lin Wei, Shu Liangshu, Sun Yan, Schärer U. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks. Terra Nova, 11: 251~258.
- Faure M, Lin Wei, Schärer U, Shu Liangshu, Sun Yan, Arnaud N. 2003. Continental subduction and exhumation of UHP rocks. Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). Lithos, 70: 213~241.
- Flowerdew M J, Millar I L, Vaughan A P M, Horstwood M S A, Fanning C M. 2006. The source of granitic gneisses and migmatites in the Antarctic Peninsula: a combined U-Pb SHRIMP and laser ablation Hf isotope study of complex zircons. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151: 751 ~768.
- Foster D A, Schafer C, Fanning C M, Hyndman D W. 2001. Relationships between crustal partial melting, plutonism, orogeny, and exhumation: Idaho-Bitterroot batholith.

Tectonophysics, 342: 313~350.

- Gong Songlin, Chen Nengsong, Li Xiaoyan, Liu Xiaoming. 2007. LA-ICP MS U-Pb dating of zircons from two types of leucosomes in North Dabie Unit: evidence for Paleoproterozoic anatexis and Triassic subduction? Geological Journal of China Universities, 13 (3): 574 ~ 580 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E A, Jackson S E, van Achterbergh E, O'Reilly S, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 133~147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of the Hf isotopes Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237~269.
- Guo Jingliang, Gao Shan, Wu Yuanbao, Li Ming, Chen Kang, Hu Zhaochu, Liang Zhengwei, Liu Yongsheng, Zhou Lian, Zong Keqing, Zhang Wen, Chen Haihong. 2014. 3. 45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: implications for Early Archean crustal growth. Precambrian Research, 242: 82~95.
- Guo Jingliang, Wu Yuanbao, Gao Shan, Jin Zhenmin, Zong Keqing, Hu Zhaochu, Chen Kang, Chen Haihong, Liu Yongsheng. 2015. Episodic Paleoarchean-Paleoproterozoic (3.3 ~ 2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: implications for late Archean tectonics. Precambrian Research, 270: 246~266.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Mc Williams M O, Ireland T, Calvert A, Dong Shuwen, Wenk H R, Chateigner D. 2000.
  Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105: 13339 ~13364.
- Hawkesworth C J, Kemp A I. 2006. Evolution of the continental crust. Nature, 443: 811~817.
- Keay S, Lister G, Buick I. 2001. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece. Tectonophysics, 342: 275~312.
- Lei Nengzhong, Wu Yuanbao. 2008. Zircon U-Pb age, trace element, and Hf isotope evidence for Paleoproterozoic granulitefacies metamorphism and archean crustal remnant in the Dabie Orogen. Journal of China University of Geosciences, 19: 110~ 134.
- Li Longming, Lin Shoufa, Davis D W, Xiao Wenjiao, Xing Guangfu, Yin Changqing. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block. Precambrian Research, 255: 30  $\sim$ 47.
- Ling Wenli, Gao Shan, Zhang Benren, Zhou Lian, Xu Qidong. 2001. The recognizing of ca. 1.95 Ga tectono-thermal event in Kongling nucleus and its significance for the evolution of Yangtze Block, South China. Chinese Science Bulletin, 46: 326  $\sim$ 329.
- Liu Dunyi, Nutman A P, Compston W, Wu Jiashan, Shen Qihan. 1992. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. Geology, 20: 339~342.
- Liu Yongsheng, Zong Keqing, Kelemen P B, Gao Shan. 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates. Chemical Geology, 247: 133~153.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel (Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California). BGC Special Publication 1a, Berkeley, 55 pp.
- Nie Hu, Yao Jin, Wan Xin, Zhu Xiyan, Siebel W, Chen Fukun. 2016. Precambrian tectonothermal evolution of South Qinling

and its affinity to the Yangtze Block: evidence from zircon ages and Hf-Nd isotopic compositions of basement rocks. Precambrian Research, 286: 167~179.

- Oh C W, Lee B C, Yi S B, Ryu H I. 2019. Correlation of Paleoproterozoic igneous and metamorphic events of the Korean Peninsula and China; Its implication to the tectonics of Northeast Asia. Precambrian Research, 326; 344~362.
- Qiu Xiaofei, Ling Wenli, Liu Xiaoming. 2014. Correlation between the Mesoproterozoic Yangtze continental nucleus and the Shennongjia area: constraints from zircon geochronological and Hf isotope. Geological Science and Technology Information, 33 (2): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Yang Hongmei, Lu Shansong, Zhang Liguo, Duan Ruichun, Du Guomin. 2016. Geochronology of the khondalite series in the Kongling complex, Yangtze craton and its geological implication. Geotectonica et Metallogenia, 40(3): 549~558 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Zhao Xiaoming, Yang Hongmei, Wei Yunxu, Wu Nianwen, Lu Shansong, Jiang Tuo, Peng Lianhong. 2017. Paleoproterozoic metamorphic event in the nucleus of the Yangtze craton: evidence from U-Pb geochronology of the metamorphic zircons from the khondalite. Geological Bulletin of China, 36(5): 706~714 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Ling Wenli, Liu Xiaoming, Lu Shansong, Jiang Tuo, Wei Yunxu, Peng Lianhong, Tan Juanjuan. 2018a. Evolution of the Archean continental crust in the nucleus of the Yangtze block. Evidence from geochemistry of 3.0 Ga TTG gneisses in the Kongling high-grade metamorphic terrane, South China. Journal of Asian Earth Sciences, 154: 149~161.
- Qiu Xiaofei, Zhao Xiaoming, Yang Hongmei, Lu Shansong, Wu Nianwen, Jiang Tuo, Gu Tao, Wang Yunfeng 2018b. Geochemical and Nd isotopic compositions of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Kongling complex, South China block, implications for provenance and tectonic evolution. Geological Magazine, 155: 1263~1276.
- Qiu Xiaofei, Yang Hongmei, Zhao Xiaoming, Lu Shansong, Jiang Tuo, Duan Ruichun, Liu Chongpeng, Peng Lianhong, Wei Yunxu. 2019. Neoarchean granitic gneisses in the Kongling complex, Yangtze craton: petrogenesis and tectonic implications. Earth Science, 44(2): 415~426 (in Chinese with English abstract).
- Sun Min, Chen Nengsong, Zhao Guochun, Wilde S A, Ye Kai, Guo Jinghui, Chen Yi, Yuan Chao. 2008. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic study of the Huangtuling granulite, Dabie-Sulu belt, China: implication for the paleoproterozoic tectonic history of the Yangtze Craton. American Journal of Science, 308: 469  $\sim$ 483.
- Thirlwall M F, Anczkiewicz R. 2004. Multidynamic isotope ratio analysis using MC-ICP-MS and the causes of secular drift in Hf, Nd and Pb isotope ratios. International Journal of Mass Spectrometry, 235: 59~81.
- Tsai C H, Liou J G. 2000. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the Northern Dabie Complex, central-eastern China. American Mineralogist, 85: 1  $\sim$ 8.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Nutman A, Zhou Hongying, Dong Chunyan, Yin Xiaoyan, Ma Mingzhu. 2012. Multiple 3.8~3.
  1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 54~55: 18~30.
- Wan Yusheng, Xie Hangqiang, Dong Chunyan, Kröner A, Wilde S A, Bai Wenqian, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Ma Mingzhu, Li Yuan, Liu Dunyi. 2019. Hadean to paleoarchean rocks and zircons in China, In: Kranendonk M J V, ed. Earth's Oldest Rocks (Second Edition). Amsterdam: Elsevier, 293~327.
- Wang Jianghai, Sun Min, Deng Shangxian. 2002. Geochronological constraints on the timing of migmatization in the Dabie Shan, East-central China. European Journal of Mineralogy, 14: 513~ 524.

- Wang Kai, Li Zhengxiang, Dong Shuwen, Cui Jianjun, Han Baofu, Zheng Tao, Xu Yilong. 2018. Early crustal evolution of the Yangtze Craton, South China: new constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of ca. 2.9~2.6 Ga granitic rocks in the Zhongxiang Complex. Precambrian Research, 314: 325~352.
- Wang Yafei, Li Xianhua, Jin Wei, Zhang Jiahui. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3. 81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton. Precambrian Research, 263; 88~107.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Du Qiuding, Deng Qi, Yang Fei. 2013. The evolution of the Central Yangtze Block during early Neoarchean time: evidence from geochronology and geochemistry. Journal of Asian Earth Sciences, 77: 31~44.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Deng Qi, Du Qiuding, Zhou Xiaolin, Yang Fei, Liu Hao. 2015. Paleoproterozoic I-type granites and their implications for the Yangtze block position in the Columbia supercontinent: evidence from the Lengshui Complex, South China. Precambrian Research, 263: 157~173.
- Wilde S A, Zhao Guochun. 2005. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 519~522.
- Wu Yuanbao, Tang Jun, Zhang Shaobing, Zhao Zifu. 2007a. SHRIMP zircon U-Pb dating for two episodes of migmatization in the Dabie orogen. Chinese Science Bulletin, 52: 1836 ~1842.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming. 2007b. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: constraints on partial melting. Journal of Metamorphic Geology, 25: 991~1009.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, Gao Shan, Jiao Wenfang, Liu Yongsheng. 2008. Zircon U-Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie Orogen. Lithos, 101: 308~322.
- Wu Yuanbao, Zhou Guangyan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Qin Zhengwei, Wang Hao, Yang Jianzhou, Yang Saihong. 2014. Petrogenesis of Neoarchean TTG rocks in the Yangtze Craton and its implication for the formation of Archean TTGs. Precambrian Research, 254: 73~86.
- Xia Bin, Cai Zhourong, Zhang Yuquan, Zhong Lifeng, Wu Weiping, Wang Hong, Liu Liwen, Yang Zhiqing, Dong Chunyan. 2010. SHRIMP U-Pb dating of migmatite in Shiguan of Yuexi County, Dabie Mountains and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 84 (2): 206 ~ 210 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zhi, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Wang Zhengrong, Chen Jiangfeng, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2004. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. Chemical Geology, 231: 214~235.
- Xu Shutong, Liu Yican, Chen Guanbao, Ji Shouyuan, Ni Pei, Xiao Wanshen. 2005. Microdiamonds, their classification and tectonic implications for the host eclogites from the Dabie and SuLu regions in central eastern China. Mineralogical Magazine, 69: 509~520.
- Yin Changqing, Lin Shoufa, Davis D W, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Li Longming, He Yanhong. 2013. 2.  $1 \sim 1.85$  Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia. Lithos,  $182 \sim 183$ ;  $200 \sim 210$ .
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Zhao Zifu, Gao Shan, Wu Fuyuan. 2006a. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China. Earth and Planetary Science Letters, 252: 56~71.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Zhao Zifu, Gao Shan, Wu Fuyuan. 2006b. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope

evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China. Precambrian Research, 151: 265~288.

- Zheng Yongfei, Zhou Jianbo, Wu Yuanbao, Xie Zhi. 2005. Lowgrade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: a passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. International Geology Review, 47: 851~871.
- Zhou Guangyan, Wu Yuanbao, Li Long, Zhang Wenxiang, Zheng Jianping, Wang Hao, Yang Saihong. 2018. Identification of ca. 2.65 Ga TTGs in the Yudongzi complex and its implications for the early evolution of the Yangtze Block. Precambrian Research, 314: 240~263.

参考文献

- 陈永康, 闫峻, 刘晓强, 张媛媛, 李全忠. 2017. 北大别混合岩类型 及其成因. 矿物岩石, 37(2): 18~32.
- 邓尚贤,王江海,常向阳. 1997. 鄂东北大别杂岩中混合岩的形成 时代研究.地球学报,18(s1):68~70.

龚松林,陈能松,李晓彦,柳小明.2007.北大别两类浅色体的锆石

LA-ICPMS年龄——古元古代深熔作用和三叠纪俯冲证据?高校地质学报,13(3):574~580.

- 邱啸飞,凌文黎,柳小明. 2014. 扬子陆核与神农架地块中元古代 相互关系:来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的约束. 地质科 技情报,33(2):1~8.
- 邱啸飞,杨红梅,卢山松,张利国,段瑞春,杜国民.2016.扬子克 拉通崆岭杂岩孔兹岩系同位素年代学研究及其地质意义.大地 构造与成矿学,40(3):549~558.
- 邱啸飞,赵小明,杨红梅,魏运许,吴年文,卢山松,江拓,彭练红. 2017. 扬子陆核古元古代变质事件——来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据. 地质通报,36(5):706~714.
- 邱啸飞,杨红梅,赵小明,卢山松,江拓,段瑞春,刘重芃,彭练红, 魏运许.2019.扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因 及其构造意义.地球科学,44(2):415~426.
- 夏斌,蔡周荣,张玉泉,钟立峰,吴维平,王洪,刘立文,杨之青, 董春艳. 2010. 大别山岳西县石关混合岩锆石 SHRIMP 定年及 其地质意义. 地质学报,84(2): 206~210.

# Neoarchean crustal rocks and Paleoproterozoic migmatization in the Dabie orogen: evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes

QIU Xiaofei<sup>\*1,2,3)</sup>, JIANG Tuo<sup>1,2)</sup>, WU Nianwen<sup>2)</sup>, ZHAO Xiaoming<sup>2)</sup>, XU Qiong<sup>2,3)</sup>

1) Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, CGS, Wuhan, 430205;

2) Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan, 430205;

3) Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan, 430074

\* Corresponding author: qiuxiaofei@mail.cgs.gov.cn

#### Abstract

The northern Dabie ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt is one of the key regions to investigate the evolution of the basements of the Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt. Migmatites are widely distributed in the northern Dabie belt. Based on previous geochronological studies they have long been regarded as having been formed during the Mesozoic. Here, we report zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of migmatites from the Tuanfeng area in the northern Dabie belt. CL images reveal that the zircons can be divided into two groups. The first magmatic zircons yield an upper intercept age of  $2850\pm86$ Ma, dating magma emplacement of the protolith. The remaining zircons are metamorphic zircons. They gave a weighted mean <sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb age of 2011±12 Ma, which is interpreted as the age of migmatization. Most magmatic zircons have negative  $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$  values (-8.1~2.2), corresponding to two-stage Hf isotopic model ages ( $T_{\rm DM2}$ ) of 3.6~3.0 Ga, indicating that the protoliths might have formed by remelting of the Paleoarchean crustal rocks in the Dabie orogen, with involvement of minor mantle-derived melts. By contrast, metamorphic zircons have positive  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values (0.3~8.2), corresponding to  $T_{\text{DM2}}$  of 2.7~2.2 Ga, revealing an open Lu-Hf isotopic system during the Paleoproterozoic migmatization. Our study suggests a record of Paleoproterozoic migmatization during the assembly of the Columbia supercontinent, except for the Mesozoic migmatization. The protoliths of the Tuanfeng migmatites were formed in Neoarchean, with their  $T_{DM2}$  ages up to 3.6 Ga. It is thus inferred that the Archean basement might be widely distributed in the Dabie orogen.

Key words: Paleoproterozoic; migmatite; zircon U-Pb; Hf isotope; Archean rocks; Dabie orogenic belt