

邱啸飞, 卢山松, 谭娟娟, 等. 独居石 LA-ICP-MS U-Pb 法测定北大别木子店片麻杂岩变质年龄[J]. 岩矿测试, 2025, 44(1): 75-87. DOI: [10.15898/j.ykcs.202403050032](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202403050032).

QIU Xiaofei, LU Shansong, TAN Juanjuan, et al. Monazite LA-ICP-MS U-Pb Dating to Constrain the Metamorphic Age of the Muzidian Gneiss Complex in the Northern Dabie Orogen[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(1): 75-87. DOI: [10.15898/j.ykcs.202403050032](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202403050032).

独居石 LA-ICP-MS U-Pb 法测定北大别木子店片麻杂岩变质年龄

邱啸飞^{1,2}, 卢山松^{1,2}, 谭娟娟¹, 童喜润¹, 吴年文¹, 杨小莉¹, 邵鑫¹, 刘飞^{1,2}, 杨小丽^{1*}

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 北大别构造带木子店片麻杂岩是目前华南陆块范围内出露的最古老岩石, 但有关其变质时代和构造性质等问题仍缺乏研究。对这些岩石的变质时代开展研究, 对于了解华南陆块早期地壳演化过程具有重要意义。本文利用 LA-ICP-MS 方法对木子店片麻杂岩中两件片麻岩样品进行了独居石的微区原位 U-Pb 定年和微量元素分析, 采用独居石标准物质 44069 对年龄进行校正, 独居石标准物质 Trebilcock 作为监控, 测试结果与其推荐值在误差范围内相一致。结果显示, 大多数独居石具有均一、无环带特点, 且存在重稀土元素明显亏损以及负 Eu 异常, 暗示其可能形成于变质成因。两件片麻岩样品的独居石 U-Pb 年龄分别为 $129 \pm 1\text{Ma}$ 和 $130 \pm 1\text{Ma}$, 代表了木子店片麻杂岩发生变质作用的时间, 这一年龄与木子店地区早白垩世花岗岩的侵位年龄基本一致, 也与北大别造山带内大量出露的混合岩时代相吻合。研究认为大别造山带早白垩世加厚地壳的伸展垮塌和造山山根拆沉, 引起了变质作用和同时代的岩浆活动, 将北大别构造带从挤压向伸展的构造转换时间限定在 $\sim 130\text{Ma}$ 。

关键词: 木子店片麻杂岩; 变质作用; 独居石; 北大别构造带; 英云闪长片麻岩; LA-ICP-MS

要点:

- (1) 高空间分辨率 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年可对具有复杂演化历史的古老地壳岩石变质时代进行测定。
- (2) 木子店片麻杂岩独居石 LA-ICP-MS 定年结果表明其经历了 $\sim 130\text{Ma}$ 的高压变质作用。
- (3) 木子店片麻杂岩变质年龄与区域大规模岩浆作用时间一致, 将北大别构造带从挤压向伸展的构造转换时间限定为 $\sim 130\text{Ma}$ 。

中图分类号: P597.3; P587

文献标识码: A

华南陆块是亚洲东部重要的组成构造单元之一, 有关其形成和演化历史对充分认识亚洲大陆地壳形成、生长和演化都具有重要意义, 因而受到国内外研究者的广泛关注。然而, 相比于毗邻的华北克拉通, 由于显生宙巨厚沉积地层的覆盖所导致前寒武纪地质体出露极为有限, 导致目前有关华南陆块早期基底岩石的研究程度仍显相对薄弱, 有关其古老物质

组成、早期地壳岩石的形成时代和演化过程等一些关键科学问题也尚未完全探索清楚。

大别造山带北大别构造带长期以来被认为是华南陆块北缘卷入秦岭—大别碰撞造山带的部分^[1-4]。近年来越来越多的研究证据显示, 在该区域内可能存在太古宙乃至冥古宙的古老地壳物质残余^[1-4], 其中最为值得注意的是, 本研究团队最近在北大别

收稿日期: 2024-03-05; **修回日期:** 2024-06-24; **接受日期:** 2024-07-10; **网络出版日期:** 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272229, U2344210); 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金项目(PM202302); 中国地质调查局武汉地质调查中心“潜龙计划”青年拔尖人才项目(QL2022-02)

第一作者: 邱啸飞, 博士, 研究员, 主要从事同位素年代学和岩石地球化学研究。E-mail: qiuxiaofei@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 杨小丽, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩石矿物物质谱分析研究。E-mail: yangxiaoli@mail.cgs.gov.cn。

构造带木子店地区发现一套 TTG 片麻岩和斜长角闪岩的岩石组合(命名为“木子店片麻杂岩”)。已开展的锆石 U-Pb 年代学工作表明,这套岩石的原岩形成年龄为 3.8 ~ 3.6Ga,代表了目前华南陆块范围内已知的最古老地壳岩石^[4]。因此,对木子店片麻杂岩开展相应的研究工作,将对大别造山带乃至华南陆块古老地壳基底岩石的变质历史进行有效约束。另一方面,碰撞造山带内高级变质岩石往往保存了造山带构造-热事件的记录,木子店片麻杂岩位于秦岭—大别碰撞造山带,因而有关其变质时代和构造性质等同样也是深入了解造山带演化历史的关键问题。锆石和独居石 U-Pb 测年是目前最常用的对高级变质作用进行限定的测试方法^[5]。其中,锆石可在高级变质作用的不同阶段通过变质重结晶或增生等方式形成,通过对这些变质锆石生长区域开展定年分析,理论上可获得相对应的岩石发生变质作用过程的年龄。然而,许多情况下利用锆石 U-Pb 定年方法对高级变质岩进行变质年龄测定往往无法获得理想的结果。例如,在某些特定变质作用条件下(如缺乏变质流体的封闭体系)较难形成变质锆石;此外还存在部分锆石的变质增生区域过小而无法对其开展测量,这在古老基底岩石的锆石中尤为明显^[2,4,6]。同时,古老基底岩石通常经历了多期次不同程度的变质作用叠加,导致其锆石成因往往具有复杂性,在利用锆石 U-Pb 定年方法进行测量时可能会得到并无实际地质意义的“混合年龄”。另外,高级变质岩中锆石发生“Pb 丢失”现象而导致的不谐和问题也值得注意。因此,高级变质岩中锆石 U-Pb 年龄多用来对这些岩石的原岩时代进行测定。但与锆石不同的是,独居石在角闪岩相-麻粒岩相变质作用过程中相对更容易形成,加之其具有极高的 Th、U 含量(通常超过 $10^4 \mu\text{g/g}$),以及相对低的普通 Pb 含量(一般低于 $100 \mu\text{g/g}$)和异常缓慢的 Pb 扩散速率,使得它在岩石变质作用过程中难以产生“Pb 丢失”,因而成为对高级变质岩石变质时代进行限定的重要测试手段^[7-8]。

本文对北大别始太古代木子店片麻杂岩开展了 $13 \mu\text{m}$ 束斑大小的高精度 LA-ICP-MS 微区原位独居石 U-Pb 同位素年龄测定,结合独居石的微量元素组成,对该套岩石的变质时代及其构造指示意义进行了探讨。

1 区域地质概况

秦岭—桐柏—大别—苏鲁造山带是亚洲东部最

为重要的碰撞造山带之一,是华北克拉通和华南陆块于中生代最终碰撞拼合的结果。大别造山带位于该造山带中部,并可依据变质程度进一步分为北淮阳、北大别、中大别、南大别以及宿松 5 个构造带。其中,北大别构造带主体为一套混合岩化长英质片麻岩,夹少量镁铁质-超镁铁质岩、榴辉岩、麻粒岩、磁铁石英岩以及大理岩透镜体。前人所开展的锆石年代学研究结果显示,北大别构造带内大部分混合岩的原岩可能形成于新元古代,并在白垩纪经历了混合岩化作用^[9]。近年来,随着同位素年代学研究工作的逐步积累,在该构造带内亦陆续发现一批太古宙岩石,例如黄土岭麻粒岩、团风混合岩、贾庙花岗片麻岩以及木子店花岗片麻岩等^[1-4],锆石 U-Pb 定年结果显示,这些岩石的原岩形成时间主要集中在 2.7 ~ 2.5Ga 的新太古代,并经历了古元古代的构造-热事件^[1-4]。

在北大别构造带木子店地区,一系列花岗片麻岩、磁铁石英岩以及变超基性-基性岩零星出露,且被大规模早白垩世黑云二长花岗岩所侵入(图 1)。木子店片麻杂岩零星出露于木子店地区,该套岩石原属“大别群”(部分文献亦称“大别山杂岩”)组成部分,以英云闪长片麻岩为主,伴少量花岗闪长片麻岩、斜长角闪岩以及磁铁石英岩和变基性-超基性岩岩块。这些岩石总体变质程度达麻粒岩相,略高于区域上新太古代—古元古代花岗片麻岩类。由于强烈构造变形及后期高级变质作用影响,除可见白垩纪花岗岩类明显侵入木子店片麻杂岩外,其余各岩性之间接触关系不明。Wang 等(2023)^[4]对木子店片麻杂岩开展的锆石 U-Pb 定年结果则表明,该套岩石形成于 3.8 ~ 3.6Ga,代表了目前华南陆块范围内已知最古老岩石。

2 实验部分

2.1 样品采集与制备

两件用于独居石定年的样品均采自木子店片麻杂岩中的长英质部分(图 2 中 a, b),样品编号为 22MW11(角闪斜长片麻岩)和 22MW01(长英质片麻岩),采用地质锤进行采集,每件样品质量约 5kg。其中样品 22MW11 为角闪斜长片麻岩,呈灰白色,具有片状粒状变晶结构,片麻状构造。岩石主要由石英(含量 50% ~ 55%)、斜长石(25% ~ 30%)、角闪石(~ 15%)以及少量单斜辉石(~ 3%)构成(图 2c),副矿物包括磁铁矿、锆石及少量独居石和磷灰石等。样品 22MW01 为长英质片麻岩,野外呈浅灰白色,野

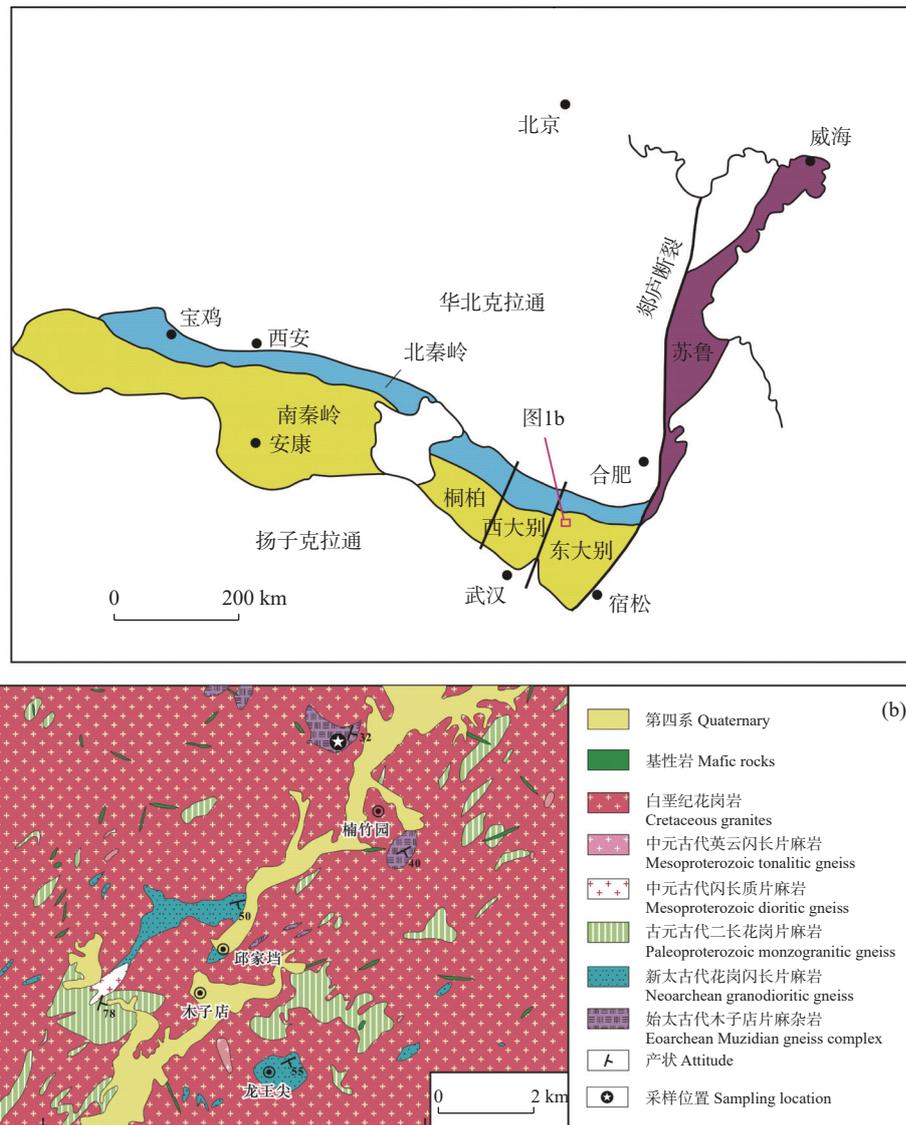


图1 (a) 秦岭—大别—苏鲁造山带地质简图; (b) 木子店地区区域地质简图 (据文献 [2] 修改)

Fig. 1 (a) Schematic geological map of the Qinling—Dabie—Sulu orogenic belt; (b) Schematic geological map of the Muzidian area and sampling location (Modified by Reference [2]).

外可见变基性岩捕掳体, 岩石具有片状粒状变晶结构, 片麻状构造。主要由石英 (55% ~ 60%)、斜长石 (25% ~ 30%)、角闪石 (13% ~ 15%) 以及少量黑云母 (~ 2%) 构成 (图 2d), 副矿物包括锆石、磁铁矿、独居石、磷灰石等。石英和斜长石颗粒以它形为主, 均具长轴定向特点, 斜长石粒径 0.2 ~ 2mm, 石英粒径变化范围较大, 从 0.2mm 到 1cm 不等, 与黑云母、角闪石等暗色矿物共同构成岩石片麻理。

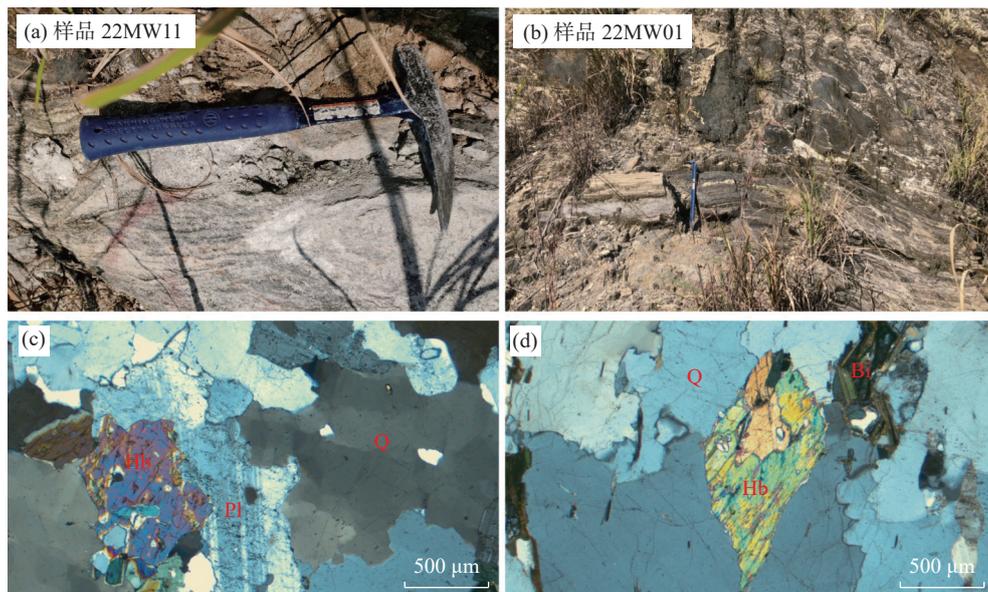
野外样品采集后, 送至河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司进行独居石分选。样品采用颞式破碎机破碎后, 通过传统重磁技术方法分离出独居石, 随后将其粘在环氧树脂上进行制靶, 经

抛光等步骤处理后用于开展背散射 (BSE) 照相, 并以此为基础选择合适区域进行独居石 U-Pb 定年分析。独居石制靶、透射光和反射光照相均在南京宏创科技有限公司完成。独居石 BSE 照相在中国地质调查局武汉地质调查中心实验测试室采用日本岛津公司 EPMA-1600 电子探针完成, 拍照工作条件为: 加速电压 15kV, 电流 10nA。

2.2 独居石 LA-ICP-MS 定年和微量元素分析

2.2.1 标准物质、测试仪器及关键参数

独居石的 U-Pb 年龄和微量元素的同时测定, 在中国地质调查局武汉地质调查中心实验测试室完成。测试仪器为 RESOLUTION S155 193nm 氟化氙准分子



Pl—斜长石；Hb—角闪石；Bi—黑云母；Q—石英。

图2 木子店片麻杂岩野外和镜下照片

Fig. 2 Field outcrop and photomicrographs for Muzidian gneiss complex: Pl—Plagioclase; Hb—Hornblende; Bi—Biotite; Q—Quartz.

激光剥蚀系统与 Icap-Q 型 ICP-MS 联机使用。测试激光束斑直径为 $13\mu\text{m}$ ，激光频率 3Hz，能量密度 $3.5\text{J}/\text{cm}^2$ 。每个样品点的分析时间为 90s，其中背景信号时间 15s，激光剥蚀时间 45s，尾吹时间 30s。

2.2.2 分析方法特点

测定时采用独居石国际标准物质 44069 对年龄进行校正。单个数据点误差为 1σ 。每分析 10 个样品点分析两次标准物质 44069，同时采用独居石标准物质 Trebilcock 作为未知样品对数据结果进行监控，测试结果与其推荐值 ($272\pm 2\text{Ma}$ [10]) 在误差范围内相一致。独居石中的微量元素含量以 USGS 参考玻璃 (BCR-2G、BIR-1G 和 BHVO-2G) 为校正标准，采用多外标-无内标法 [11] 对微量元素含量进行定量计算以扣除基体效应影响。USGS 玻璃中元素含量的推荐值参考 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算) 采用 ICPMSDataCal 软件 (Ver.10.9) 进行处理 [11]。年龄计算以及谐和图的绘制均采用 ISOPLOT 软件完成 [12]。

3 独居石形貌特征与分析结果

木子店片麻杂岩独居石样品的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 1。

样品 22MW11 中，独居石多为半自形到它形，

呈淡黄色、透明，长度范围为 $30\sim 60\mu\text{m}$ 。独居石 BSE 照片显示 (图 3) 大多数独居石颗粒没有明显的核边结构，仅少数颗粒具有狭窄的边缘。对该样品中 33 个独居石颗粒 33 个点进行了 U-Pb 年龄测定，所有分析均获得谐和年龄。独居石具有相对高的 Th 和 U 含量，对应 Th/U 比值为 $20.1\sim 83.0$ ，所获得分析点的年龄数据相对其原岩形成时代具有明显偏年轻的特点，除一个分析点具有明显偏老的年龄 ($150\pm 2\text{Ma}$) 以外，剩余 32 个分析点的年龄数据集中，具有相对一致的年龄，数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $129\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=1.8)(图 4a)。

样品 22MW01 中，独居石为半自形到自形，颜色为淡黄色，BSE 图像显示多数独居石为均质的，仅少部分颗粒显示具有斑点 (图 3b)。对该样品中 18 颗独居石 18 个数据点进行了分析，所有分析点均为谐和独居石。结果显示，所获得的年龄数据均远远小于岩石原岩的形成年龄，其中 16 个独居石颗粒年龄组成接近，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $130\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=2.1)，Th/U 比值介于 $25.2\sim 101$ 之间。剩余 2 个独居石颗粒具有明显偏低的 Th/U 比值 (分别为 8.2 和 19.2)，以及偏老的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (分别为 $236\pm 4\text{Ma}$ 和 $377\pm 4\text{Ma}$)，可能为继承独居石年龄 (图 4b)。

木子店片麻杂岩独居石样品的 LA-ICP-MS 微量元素测试结果见表 2。数据显示，所有独居石颗粒

表 1 北大别木子店片麻杂岩独居石 U-Pb 同位素组成和年龄值

Table 1 U-Pb isotopic ratios and apparent ages of monazite from Muzidian gneiss complex in the Northern Dabie Orogen.

样品 22MW11 测点	Th 含量 ($\mu\text{g/g}$)	U 含量 ($\mu\text{g/g}$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	
MW11-1	186410	7332	0.0491	0.0012	0.1344	0.0037	0.0198	0.0002	154	56	128	3	126	2	98
MW11-2	197307	3778	0.0470	0.0013	0.1296	0.0037	0.0200	0.0002	50.1	72	124	3	128	1	96
MW11-3	172276	3779	0.0501	0.0017	0.1404	0.0047	0.0204	0.0002	211	76	133	4	130	2	97
MW11-6	227338	6906	0.0484	0.0011	0.1323	0.0030	0.0199	0.0002	120	54	126	3	127	1	99
MW11-7	192879	4041	0.0483	0.0017	0.1353	0.0047	0.0204	0.0002	117	82	129	4	130	1	98
MW11-9	180820	4645	0.0500	0.0016	0.1365	0.0044	0.0199	0.0003	198	105	130	4	127	2	97
MW11-10	213252	10626	0.0483	0.0012	0.1363	0.0035	0.0205	0.0002	122	57	130	3	131	2	99
MW11-11	174629	4962	0.0507	0.0023	0.1447	0.0067	0.0208	0.0003	228	106	137	6	133	2	96
MW11-12	198507	3882	0.0486	0.0014	0.1374	0.0040	0.0206	0.0002	128	69	131	4	131	2	99
MW11-14	179763	3510	0.0471	0.0015	0.1312	0.0045	0.0201	0.0002	53.8	74	125	4	128	2	97
MW11-15	207922	2505	0.0490	0.0018	0.1356	0.0050	0.0203	0.0003	146	89	129	5	129	2	99
MW11-16	177388	6678	0.0475	0.0012	0.1314	0.0035	0.0200	0.0002	76.0	94	125	3	128	1	98
MW11-17	211743	2839	0.0499	0.0017	0.1404	0.0046	0.0205	0.0002	191	112	133	4	131	2	98
MW11-18	184015	2839	0.0474	0.0016	0.1328	0.0046	0.0204	0.0002	77.9	69	127	4	130	2	97
MW11-19	213105	3124	0.0473	0.0017	0.1320	0.0049	0.0203	0.0002	61.2	85	126	4	129	2	97
MW11-20	167763	4389	0.0502	0.0017	0.1399	0.0046	0.0203	0.0002	206	80	133	4	130	2	97
MW11-22	192664	8380	0.0497	0.0017	0.1406	0.0050	0.0204	0.0002	189	78	134	4	130	1	97
MW11-23	243780	4535	0.0481	0.0018	0.1334	0.0049	0.0202	0.0002	102	91	127	4	129	2	98
MW11-24	184068	3900	0.0492	0.0017	0.1364	0.0048	0.0201	0.0003	167	80	130	4	128	2	98
MW11-25	188850	8382	0.0484	0.0012	0.1335	0.0033	0.0199	0.0002	120	56	127	3	127	1	99
MW11-26	180843	6387	0.0483	0.0015	0.1359	0.0043	0.0204	0.0002	122	74	129	4	130	1	99
MW11-27	207930	5238	0.0476	0.0010	0.1301	0.0028	0.0198	0.0002	79.7	50	124	3	126	1	98
MW11-28	197678	2753	0.0471	0.0016	0.1340	0.0046	0.0206	0.0002	53.8	78	128	4	131	2	97
MW11-30	195694	3999	0.0484	0.0020	0.1332	0.0053	0.0201	0.0003	117	96	127	5	128	2	98
MW11-32	177606	5946	0.0506	0.0017	0.1398	0.0044	0.0201	0.0002	233	76	133	4	128	2	96
MW11-34	200061	3514	0.0493	0.0021	0.1388	0.0058	0.0206	0.0002	161	98	132	5	131	2	99
MW11-35	194798	5650	0.0476	0.0014	0.1329	0.0039	0.0203	0.0002	79.7	70	127	3	130	2	97
MW11-36	174154	2157	0.0498	0.0014	0.1358	0.0038	0.0199	0.0002	183	69	129	3	127	1	98
MW11-37	178861	2757	0.0493	0.0016	0.1365	0.0044	0.0202	0.0002	161	74	130	4	129	2	99
MW11-38	180591	6144	0.0474	0.0013	0.1363	0.0037	0.0210	0.0002	77.9	136	130	3	134	1	96
MW11-39	175177	6068	0.0469	0.0010	0.1313	0.0031	0.0203	0.0002	55.7	39	125	3	129	1	96
MW11-40	187657	4194	0.0473	0.0017	0.1348	0.0050	0.0208	0.0003	64.9	85	128	5	133	2	96

样品 22MW01 测点	Th 含量 ($\mu\text{g/g}$)	U 含量 ($\mu\text{g/g}$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	
MW1-1	166645	3043	0.0490	0.0018	0.1400	0.0050	0.0207	0.0003	150	85	133	5	132	2	99
MW1-5	262630	7005	0.0489	0.0010	0.1346	0.0029	0.0199	0.0002	143	45	128	3	127	1	99
MW1-7	191746	5815	0.0507	0.0018	0.1448	0.0051	0.0208	0.0003	233	82	137	5	133	2	96
MW1-8	133410	2873	0.0474	0.0019	0.1310	0.0050	0.0202	0.0002	77.9	83	125	5	129	2	96
MW1-9	181982	3623	0.0499	0.0014	0.1382	0.0039	0.0201	0.0003	191	67	131	4	128	2	97
MW1-10	242641	3159	0.0489	0.0019	0.1346	0.0053	0.0201	0.0002	143	91	128	5	128	2	99
MW1-12	252773	9255	0.0505	0.0011	0.1374	0.0031	0.0198	0.0002	217	84	131	3	126	2	96
MW1-14	240269	4057	0.0496	0.0029	0.1370	0.0087	0.0201	0.0003	189	135	130	8	128	2	98
MW1-18	139956	3108	0.0495	0.0015	0.1397	0.0045	0.0204	0.0003	169	70	133	4	130	2	98
MW1-21	263686	10469	0.0471	0.0010	0.1310	0.0031	0.0202	0.0003	53.8	149	125	3	129	2	97
MW1-22	226722	3006	0.0507	0.0018	0.1433	0.0050	0.0206	0.0003	228	82	136	5	131	2	96
MW1-23	224741	3177	0.0492	0.0017	0.1415	0.0053	0.0208	0.0002	167	82	134	5	133	2	98
MW1-25	230108	2332	0.0482	0.0021	0.1381	0.0060	0.0210	0.0003	109	95	131	5	134	2	98
MW1-26	144067	1911	0.0488	0.0022	0.1376	0.0062	0.0207	0.0003	200	103	131	6	132	2	99
MW1-29	268982	2672	0.0512	0.0020	0.1420	0.0052	0.0204	0.0003	250	86	135	5	130	2	96
MW1-30	156794	5440	0.0466	0.0017	0.1322	0.0047	0.0207	0.0003	31.6	91	126	4	132	2	95
MW1-6	69266	3613	0.0521	0.0025	0.2683	0.0128	0.0373	0.0006	300	105	241	10	236	4	97
MW1-27	34270	4206	0.0551	0.0013	0.4559	0.0107	0.0602	0.0006	417	58	381	8	377	4	98

注: ^{235}U 衰变常数为 $9.8485 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, ^{238}U 衰变常数为 $1.55125 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$; $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$ 。

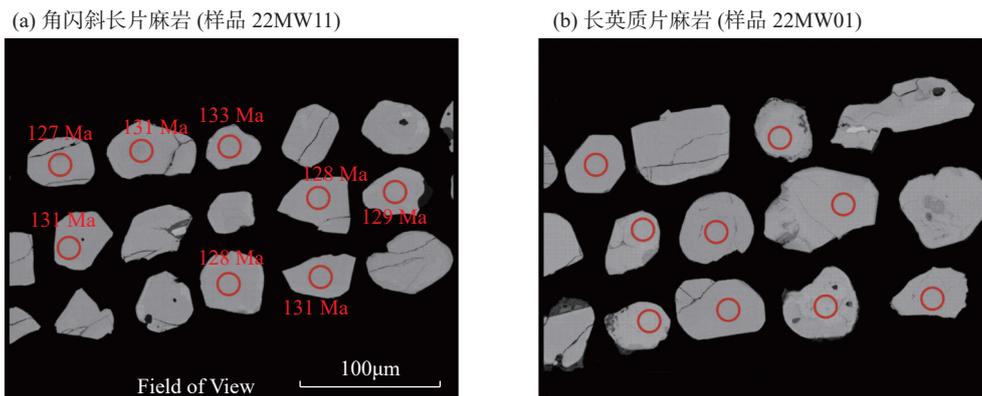


图3 北大别木子店片麻杂岩代表性独居石背散射图像

Fig. 3 BSE images of representative monazite from Muzidian gneiss complex in the Northern Dabie Orogen: (a) Amphibole-plagioclase gneiss (sample 22MW11); (b) Felsic gneiss (sample 22MW01).

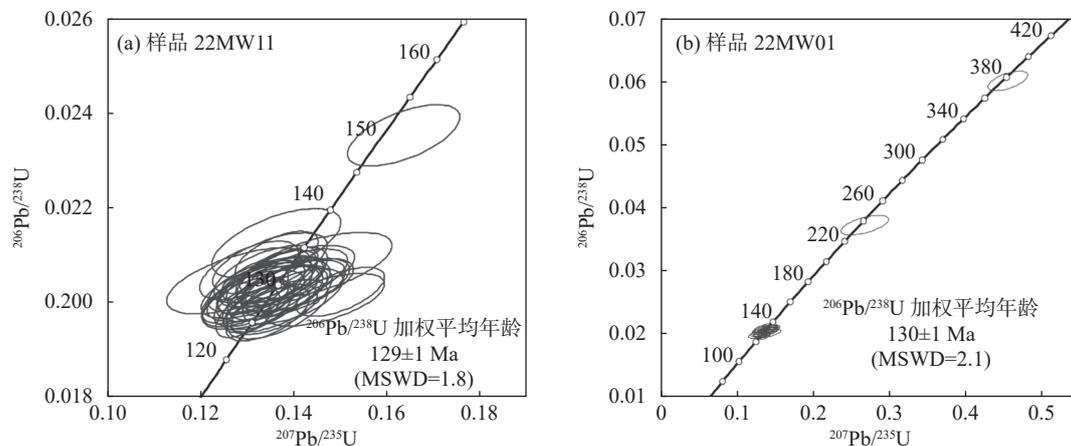


图4 北大别木子店片麻杂岩独居石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 U-Pb concordia of monazite from Muzidian gneiss complex in the Northern Dabie Orogen: (a) Amphibole-plagioclase gneiss (sample 22MW11); (b) Felsic gneiss (sample 22MW01).

具有相似的微量元素组成, 稀土元素配分模式图中表现为强烈的轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损 ($La/Yb=1610 \sim 5390$) 以及明显的 Eu 负异常 ($Eu/Eu^*=0.14 \sim 0.32$)。与样品 22MW11 相比, 样品 22MW01 中独居石显示出更低的重稀土元素含量、更高的轻重稀土元素分异, 以及更为明显的负 Eu 异常的特点 (图 5)。

4 木子店片麻杂岩的变质时代及其意义

4.1 木子店片麻杂岩的变质时代

秦岭—大别造山带作为世界上规模最大的高压-超高压变质带, 且经历了多阶段构造演化, 成为研究高压-超高压变质作用和造山带演化的热点地区。北大别构造带大规模出露早白垩世混合岩和后碰撞花岗岩, 表明该时期存在显著的构造-岩浆事件, 该过

程对构造带的物质组成、地壳再造等均具有重要影响^[9]。然而, 作为华南陆块已知最古老岩石, 木子店片麻杂岩是否亦受该时期变质作用影响, 目前仍缺乏了解。已有研究显示, 木子店片麻杂岩中的锆石 U-Pb 同位素年龄记录了这些岩石的原岩主要形成于 3.8 ~ 3.6Ga 的始太古代, 但仅少数锆石颗粒记录了零星的可能变质时代信息^[4]。与之相比, 在变质流体存在的情况下, 独居石相比锆石更容易发生再沉淀过程, 加之其具有极低的铅扩散速率, 因此其相对能够更准确地记录高级变质岩所经历的变质年龄。

本研究中, 木子店片麻杂岩中独居石颗粒以半自形到自形为主, 且未见显示明显的核-边结构, 表明它们可能主要为变质作用过程中形成的。最近研究显示, 变质和岩浆独居石相比热液独居石而言, 具有

表 2 北大别木子店片麻杂岩独居石微量元素组成

Table 2 Trace element contents of monazite from Muzidian gneiss complex in the Northern Dabie Orogen.

样品编号	元素含量 (μg/g)																	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Th	U	Si
MW11-1	138521	199176	15840	46140	4077	272	3066	173	573	80.0	160	12.7	56.9	6.34	2124	186410	7332	41727
MW11-2	143070	196675	14714	42334	3158	259	2589	121	364	49.5	100	8.18	36.5	4.26	1333	197307	3778	42534
MW11-3	138555	202502	16616	49693	4628	272	3447	207	703	95.7	185	14.5	68.5	6.74	2550	172276	3779	40078
MW11-6	137308	179216	12685	33671	2345	241	2247	91.9	288	40.0	85.3	6.54	34.8	4.10	1080	227338	6906	57053
MW11-7	140932	193833	15030	43731	3458	250	2770	134	418	56.2	112	8.65	37.6	4.11	1485	192879	4041	45845
MW11-9	140270	197158	15210	43927	3466	261	2779	137	450	63.4	127	10.0	43.4	4.35	1655	180820	4645	44196
MW11-10	138311	180924	12586	34588	2619	255	2446	112	373	50.4	103	8.28	35.3	3.94	1346	213252	10626	54893
MW11-11	133330	195509	15880	49487	4911	275	3691	238	862	117	223	17.7	76.2	8.04	3001	174629	4962	40191
MW11-12	128565	188117	15211	47303	4100	266	2922	159	506	68.9	135	10.4	47.7	4.97	1783	198507	3882	46016
MW11-14	138239	193244	15258	45785	3612	259	2779	133	413	54.4	110	7.74	35.9	3.82	1427	179763	3510	42572
MW11-15	125427	182828	14895	46925	3931	258	2809	140	434	55.1	112	8.01	34.5	3.83	1463	207922	2505	52004
MW11-16	135816	191316	14721	45225	3953	265	3100	168	581	78.5	153	12.0	53.3	5.81	2054	177388	6678	42943
MW11-17	129835	182962	14042	42579	3309	250	2523	115	348	46.4	95.9	6.78	33.8	3.39	1239	211743	2839	55636
MW11-18	136910	189546	14882	44646	3560	258	2766	133	411	54.7	109	7.87	36.7	3.94	1436	184015	2839	43140
MW11-19	128190	181294	14211	42072	3233	252	2499	116	347	45.9	94.0	7.21	35.1	3.29	1228	213105	3124	53381
MW11-20	135145	195703	15825	46799	4180	252	3259	184	625	88.3	170	14.0	61.8	6.45	2270	167763	4389	34881
MW11-22	132014	182367	13817	40792	3535	253	2938	156	525	72.4	140	11.3	49.1	5.29	1877	192664	8380	50744
MW11-23	114156	166619	13063	39294	2906	255	2167	98.8	282	36.8	78.1	5.72	25.5	2.92	982	243780	4535	65177
MW11-24	136312	189089	14052	40820	3094	248	2565	121	397	53.9	111	8.17	42.4	4.22	1439	184068	3900	43658
MW11-25	128308	183106	14339	43132	3672	256	2857	157	526	72.1	148	11.5	51.3	5.60	1942	188850	8382	46737
MW11-26	126226	185572	14703	44785	4464	271	3364	219	812	112	220	17.7	78.4	8.31	2975	180843	6387	40228
MW11-27	128463	176009	13386	38839	2958	244	2407	110	340	45.9	95.0	7.10	34.0	3.81	1213	207930	5238	50059
MW11-28	129218	181035	14100	41784	3095	255	2396	108	322	42.5	87.8	6.66	29.6	3.34	1142	197678	2753	47381
MW11-30	130004	180582	13751	41552	3166	246	2497	114	352	46.0	94.4	7.12	34.7	3.33	1237	195694	3999	45829
MW11-32	126189	182886	14535	44930	3789	252	2955	160	555	77.4	154	12.3	56.2	5.95	2012	177606	5946	42733
MW11-34	118846	170988	13533	41324	3394	245	2608	136	435	58.5	119	9.45	37.5	4.34	1566	200061	3514	60236
MW11-35	126117	178981	13751	41292	3120	255	2497	115	359	48.9	97.9	7.20	35.6	3.63	1295	194798	5650	47697
MW11-36	126109	183416	14810	48039	4040	255	2959	152	472	61.3	120	9.08	38.9	4.05	1556	174154	2157	42681
MW11-37	126057	180966	14600	45086	3688	249	2822	139	434	58.1	113	8.52	36.3	3.55	1490	178861	2757	45309
MW11-38	128255	179239	13777	40359	3255	252	2675	135	480	68.4	137	11.2	47.9	5.27	1786	180591	6144	43495
MW11-39	126166	183025	14320	43528	3707	257	2909	160	548	76.9	149	11.8	50.1	5.73	2044	175177	6068	41464
MW11-40	131049	177956	13209	38550	2909	232	2433	108	343	46.9	97.2	7.59	36.5	3.94	1258	187657	4194	45326
MW11-29	128500	180131	14261	43697	3424	241	2591	123	380	51.0	104	7.40	34.5	3.65	1348	191806	3201	48000

样品编号	元素含量 (μg/g)																	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Th	U	Si
MW1-1	158157	212653	15817	44459	3476	159	3116	146	445	59.4	115	8.86	36.1	4.02	1633	166645	3043	36883
MW1-5	123671	173235	13143	39498	2992	207	2474	115	350	47.4	96.8	7.53	32.1	3.50	1194	262630	7005	66654
MW1-7	156116	202450	14113	38157	2734	153	2721	113	358	47.1	99.2	7.67	33.4	3.31	1345	191746	5815	46068
MW1-8	170321	226809	16461	47368	3828	170	3456	173	539	72.1	137	10.1	42.8	4.50	1855	133410	2873	28844
MW1-9	149310	205327	15638	46605	3903	180	3248	168	543	69.5	136	10.4	44.0	4.18	1817	181982	3623	42624
MW1-10	129912	183044	14344	42810	3291	218	2623	125	382	51.6	106	8.17	34.5	3.79	1334	242641	3159	55240
MW1-12	127926	174960	13094	37233	2711	215	2326	99.3	302	40.7	83.1	6.35	28.2	3.19	1066	252773	9255	66267
MW1-14	129500	180618	13711	40271	2985	209	2443	113	344	47.5	94.4	7.94	36.9	4.69	1211	240269	4057	57984
MW1-18	165035	222645	15924	44681	3452	158	3143	145	454	60.8	119	8.75	39.0	3.99	1623	139956	3108	29700
MW1-21	121663	170826	12812	36653	2650	214	2237	100	311	42.8	86.2	7.09	30.2	3.12	1111	263686	10469	66797
MW1-22	135213	186713	14368	42543	3259	223	2590	117	353	45.7	94.3	6.77	30.5	2.86	1184	226722	3006	54088
MW1-23	128995	185314	14897	45653	3949	188	3060	171	561	76.1	145	10.9	46.3	4.84	1969	224741	3177	58256
MW1-25	133317	184376	14544	43366	3269	220	2615	123	379	52.1	103	7.82	34.9	3.41	1311	230108	2332	54878
MW1-26	168153	221184	15725	44612	3569	153	3163	149	439	56.8	107	7.57	31.2	3.38	1569	144067	1911	35698
MW1-29	120654	166938	13169	39012	3006	215	2364	111	348	46.8	94.5	6.89	31.3	3.49	1178	268982	2672	68041
MW1-30	164943	215486	15035	40775	2993	145	2873	128	389	51.0	101	7.42	31.5	3.02	1423	156794	5440	36654
MW1-6	169915	257423	20702	63531	5832	146	4160	211	605	73.9	137	9.41	39.2	3.80	1978	69266	3613	14800
MW1-27	189722	268973	20096	57313	4524	262	3735	189	590	76.3	145	9.28	39.7	3.84	1938	34270	4206	8600

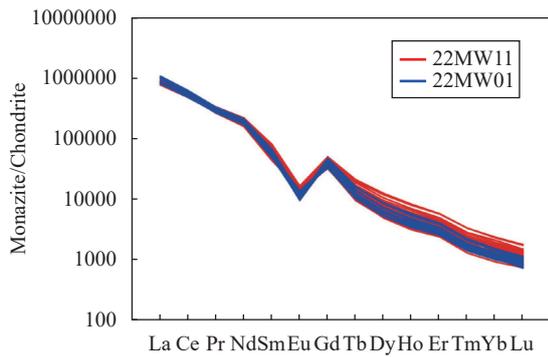


图5 北大别木子店片麻杂岩独居石稀土元素配分模式图
Fig. 5 REE patterns of monazite from Muzidian gneiss complex in the Northern Dabie Orogen.

明显更低的 Th 以及更低的 Ce 含量, 通常 Th/Ce 比值不超过 0.1 [13]。木子店片麻杂岩独居石的 Th/Ce 比值为 0.59 ~ 1.61, 排除了独居石的热液成因。同时, 独居石 Si/Ce、Ca/Ce 和 Y/LREEs 成因分类图中 [14], 岩浆成因的独居石分布范围很广, 集中在该分类图的中间位置, 而变质成因独居石往往具有相对低的 Y/LREEs 比值。木子店片麻杂岩独居石全部位于变质独居石区域内 (图 6), 证明了本研究所有独居石均为变质成因独居石。两件片麻岩样品的独居石 U-Pb 年龄分别为 129±1Ma 和 130±1Ma, 具有高度一致性。独居石的微量元素特点可进一步对其变质作用性质进行约束。木子店片麻杂岩样品的独居石均显示了相似的地球化学特点, 即轻稀土元素富

集、重稀土元素亏损及显著的负 Eu 异常 (图 5), 重稀土元素亏损以及轻、重稀土元素的高度分异是独居石形成在相对高的压力条件下的证据, 而明显的 Eu 负异常则表示在独居石形成过程中可能存在斜长石。样品 23MW11 中独居石具有相对更明显的负 Eu 异常, 表明其源区斜长石含量可能更高。变质独居石中 Y 含量被认为可能与其结晶温度相关 [16-17]。

本文对木子店片麻杂岩独居石开展了 Y 元素温度的计算, 结果显示这些独居石在 0.5GPa 压力条件下的形成温度变化范围在 583 ~ 962℃ 之间 (平均 735℃)。此外, 前人对北大别构造带同时代混合岩中淡色体开展的变质温压条件研究也表明, 其形成的 P-T 条件在 520 ~ 550MPa、760 ~ 820℃ [18]。因而, 本文认为来自木子店片麻杂岩的中生代独居石可能是在麻粒岩相变质作用下形成。

4.2 北大别构造带早白垩世构造-热事件

碰撞造山带地壳演化通常包含三个阶段, 即最初的地壳增厚、随后的地壳根部变质, 以及最后的加厚地壳伸展和垮塌。已有研究显示, 大别造山带在三叠纪华南陆块和华北克拉通的陆陆碰撞过程中大陆地壳曾增厚至 50km 以上, 但现今该地区地壳厚度仅 35 ~ 40km, 且缺失了造山带地壳根部, 暗示部分岩石圈已拆沉到地幔之中 [18], 该观点也得到大别地区地震层析图像研究结果的支持 [19-20]。随后, 因受侏罗纪古太平洋板块的西北向俯冲, 以及早白垩世 (135 ~ 130Ma) 古太平洋板块后撤过程所导致相

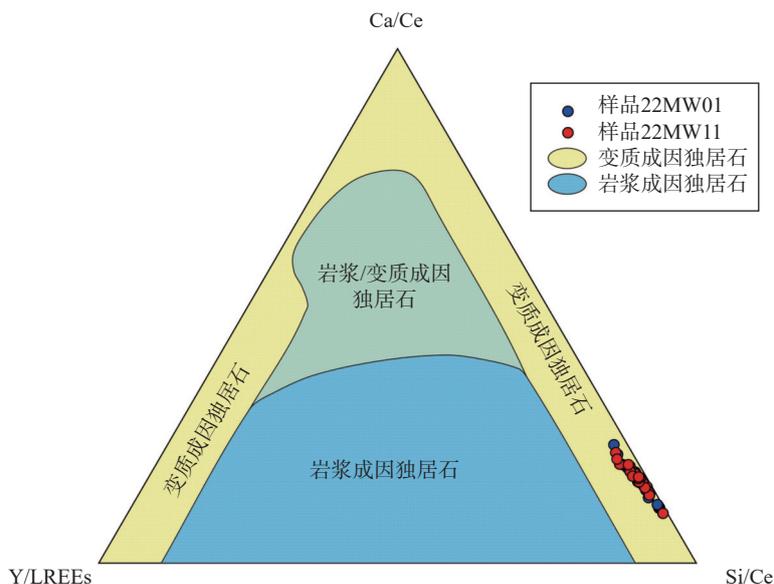


图6 独居石岩浆-变质成因判别图 (据文献 [15] 修改)
Fig. 6 Discrimination of monazite with igneous and metamorphic origins (Modified by Reference [15]).

应区域发生挤压及之后的伸展过程^[21], 在大别造山带发育大规模区域性地壳深熔作用, 导致大量晚中生代构造-岩浆作用形成。

Wu 等 (2007)^[9] 对北大别构造带漫水河、凤凰关、燕子河等多处混合岩开展了详细的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究, 结果显示大别造山带中生代可能存在两期混合岩化作用, 时间分别在 $139\pm 1\text{Ma}$ 和 $123\pm 1\text{Ma}$, 其认为前者可能形成于区域伸展拉张的构造背景, 后者则与大别造山带岩石圈垮塌和拆沉过程相关。胡俊良等 (2018)^[22] 对木子店地区出露最广泛的二长花岗岩进行了系统研究, 结果显示这些花岗岩主要形成于 $131\pm 1\text{Ma}$, 并具有明显的埃达克质岩石的地球化学特点, 认为它们可能是后碰撞伸展过程中加厚地壳部分熔融形成的。本文通过独居石 U-Pb 同位素定年方法, 在北大别构造带木子店片麻杂岩中获得 $\sim 130\text{Ma}$ 的变质作用, 进一步支持了在北大别构造带早白垩世存在强烈的构造-热事件。

大别造山带中生代花岗岩类大多数具有早白垩世年龄^[22-23]。前人研究结果表明, 这些后碰撞成因的花岗岩大多属于 I 型花岗岩, 并可依据时代、结构和地球化学组成等进一步分为两类, 其中早期 ($144\sim 130\text{Ma}$) 花岗岩多变形, 且具有典型埃达克质岩石的地球化学组成, 而晚期 ($130\sim 116\text{Ma}$) 花岗岩则未变形且没有埃达克质岩石的地球化学特点^[23]。早期花岗岩被认为来自三叠纪陆陆碰撞所导致的加厚地壳部分熔融, 晚期花岗岩则多认为来自岩石圈拆沉所诱发的地壳部分熔融过程^[24]。在这些过程中, 地壳部分熔融或软流圈地幔上涌过程中释放出来的流体在控制地壳变形、变质以及岩浆活动中都起到了关键作用。木子店片麻杂岩独居石 U-Pb 同位素年龄和大别造山带混合岩以及木子店地区广泛出露的黑云母二长花岗岩中获得的锆石 U-Pb 年龄

结果基本相一致, 显示北大别构造带在 $\sim 130\text{Ma}$ 存在几乎同时的变质、岩浆和混合岩化作用, 表明木子店片麻杂岩中生代变质作用可能与部分熔融过程相关。结合大别造山带两类中生代花岗岩类在变形特点和地球化学组成上的差异, 本文将大别造山带北大别构造带由挤压向伸展的构造转换时间大致限定为 $\sim 130\text{Ma}$ 。值得注意的是, 该期构造-热事件可能对以木子店片麻杂岩为代表的大别造山带太古宙—元古宙古老基底岩石的地球化学组成, 尤其是全岩同位素组成产生显著影响, 因而在后续对北大别构造带古老岩石开展进一步研究工作时需予以谨慎。

5 结论

对木子店片麻杂岩中两件片麻岩样品开展了 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年和微量元素测定, 结果显示大多数独居石可能形成于变质作用条件下, 两件片麻岩样品的独居石 U-Pb 年龄分别为 $129\pm 1\text{Ma}$ 和 $130\pm 1\text{Ma}$, 代表了木子店片麻杂岩发生变质作用的时间。

大别造山带早白垩世加厚地壳的伸展垮塌和造山山根拆沉, 引起变质作用和同时代的岩浆活动, 将北大别构造带从挤压向伸展的构造转换时间限定在 $\sim 130\text{Ma}$ 。大别造山带太古宙—元古宙古老基底岩石的地球化学组成, 尤其是全岩同位素组成产生了显著影响, 建议后续对北大别构造带古老岩石开展进一步研究工作时需谨慎予以考虑。

致谢: 在野外工作和论文写作期间, 与中国地质调查局武汉地质调查中心彭练红正高级工程师、田洋正高级工程师、徐大良正高级工程师和金巍高级工程师进行了有益讨论; 论文修改过程中, 审稿专家给予了宝贵的修改意见。在此一并表示感谢!

Monazite LA-ICP-MS U-Pb Dating to Constrain the Metamorphic Age of the Muzidian Gneiss Complex in the Northern Dabie Orogen

QIU Xiaofei^{1,2}, LU Shansong^{1,2}, TAN Juanjuan¹, TONG Xirun¹, WU Nianwen¹, YANG Xiaoli¹, SHAO Xin¹, LIU Fei^{1,2}, YANG Xiaoli^{1*}

(1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China;

2. Research Center of Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

HIGHLIGHTS

- (1) High spatial resolution LA-ICP-MS monazite U-Pb dating can be used to determine the metamorphic age of ancient crustal rocks with complex evolutionary histories.
- (2) The LA-ICP-MS dating results of monazite from Muzidian gneiss complex indicate that the complex experienced high-pressure metamorphism at ~130Ma.
- (3) The metamorphic age of Muzidian gneiss complex is consistent with the time of regional magmatic activity, constraining the tectonic regime switch time from compression to extension in the Northern Dabie orogenic belt to be ~130Ma.

ABSTRACT: The Muzidian gneiss complex (MGC) in the Northern Dabie Orogen is the oldest exposed rock formation in the South China block. However, there is still a lack of research on its metamorphic age and tectonic implications. LA-ICP-MS *in situ* U-Pb dating and trace element analysis of monazite were carried out on two gneiss samples from the MGC. The results show that most monazite grains exhibit homogeneous features with no zoning, evident depletion of HREEs and negative Eu anomalies, suggesting that they may be of metamorphic origin. The monazite U-Pb ages of the two gneiss samples are 129±1Ma and 130±1Ma, respectively, which represent the time of metamorphism of the MGC. These ages are broadly consistent with the emplacement age of the early Cretaceous granitoids in the Muzidian area, as well as the large amount of exposed migmatites in the Northern Dabie Orogen. Our study shows that the extensional collapse of the thickened continental crust and the delamination of the orogenic crustal root during the early Cretaceous of the Dabie Orogen caused contemporaneous metamorphism, migmatation, and magmatism, which constrained the tectonic regime switch time of the Northern Dabie Orogen from compression to extension to ~130Ma. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202403050032>.

KEY WORDS: Muzidian gneiss complex; metamorphism; monazite; Northern Dabie Orogen; tonalitic gneiss; LA-ICP-MS

BRIEF REPORT

Significance: The South China Block (SCB) is one of the important continental blocks in eastern Asia, and thus understanding its formation and evolutionary history is of great significance for fully recognizing the generation, growth, and evolution of the Asian continental crust. The Muzidian gneiss complex (MGC) in the Northern Dabie Orogen is the oldest rock known so far in the SCB, but there remains a lack of research on its metamorphic age and tectonic affiliation. Therefore, conducting research on the metamorphic age of the MGC is of great significance for understanding the early crustal evolution processes of the SCB.

Zircon U-Pb dating is currently the most commonly used method for constraining the timing of high-grade metamorphism^[5]. However, using this method to determine the metamorphic age of high-grade metamorphic rocks often fails to yield satisfactory results. Under certain specific metamorphic conditions, it is difficult to form metamorphic zircon. Moreover, some zircon grains have too small metamorphic overgrowth areas to be measured, which is particularly evident in zircons from ancient basement rocks^[2,4,6], as these rocks typically undergo multiple episodes of metamorphism of varying degrees, leading to complexity in the genesis of zircon. When using the zircon U-Pb dating method for measurement, it may result in “mixing age” that does not have meaningful geological significance.

In this study, high-precision LA-ICP-MS *in situ* monazite U-Pb dating with a spot size of 13m on the Eoarchean MGC from the Northern Dabie Orogen was conducted, and the metamorphic age and tectonic significance of these rocks in combination with the trace element composition of monazite was discussed. Compared to zircon, monazite is more likely to form during amphibolite- to granulite-facies metamorphism. Besides, the extremely high Th and U content (usually exceeding 10000 $\mu\text{g/g}$), relatively low common Pb content (generally below 100 $\mu\text{g/g}$), and exceptionally slow Pb diffusion rate make it difficult to produce “Pb loss” during the metamorphism, thus making it an ideal method for constraining the metamorphic age of high-grade metamorphic rocks.

Methods: Two samples used for monazite dating, 22MW11 and 22MW01, were both collected from the felsic part of the MGC in the Muzidian area of Macheng City (Fig.2a,b). The samples were collected by a geological hammer, with each sample weighing $\sim 5\text{kg}$. After crushing the samples with a jaw crusher, the monazites were separated using traditional heavy-magnetic techniques. They were then mounted on an epoxy resin. After polishing, the monazite grains were evaluated by backscattered electron (BSE) imaging to detect their internal structures.

The U-Pb age and trace element measurements of monazite were carried out at the Isotopic Laboratory at the Wuhan Center, China Geological Survey. The RESOLution S155 laser ablation system equipped with a 193nm ArF-excimer laser was used coupled with an Icap-Q type ICP-MS. Helium was used as the carrier gas and mixed with the make-up gas argon in cell. The laser spot diameter was 13 μm , with a laser frequency of 3Hz and an energy density of 3.5J/cm². The analysis time for each point was 90s, including a background acquisition (gas blank) time of 15s, followed by 45s of data acquisition from the sample, and a wash time of 30s.

During the measurement, the standard monazite 44069 was used for age calibration. The error for each single data point is 1σ . Monazite 44069 was analyzed twice in every 10 analyses of the unknowns. Reference monazite Trebilcock was analyzed as “unknowns” to act as the independent controls for reproducibility and instrument stability.

Trace element content of monazite was calibrated against multiple USGS reference materials (BCR-2G, BIR-1G, and BHVO-2G) without applying an internal standard to eliminate the influence of matrix effects^[11]. Offline processing of the analytical data (including the selection of sample and blank signals, correction of instrument sensitivity drift, and calculation of element content) was performed using the ICPMSDataCal software (ver. 10.9)^[11]. Concordia diagrams and weighted mean calculations were made using the software ISOPLOT^[12].

Data and Results: The LA-ICP-MS monazite U-Pb dating results of the Muzidian gneiss samples are shown in Table 1. For the sample 22MW11, 33 U-Pb analyses were performed on 33 monazite grains, and all analyses yielded concordant ages. Except for one analysis with a significantly older age (150 $\pm 2\text{Ma}$), the remaining 32 analyses exhibited relatively consistent age, with a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 129 $\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=1.8) (Fig.4a). For the sample 22MW01, 18 monazite grains were analyzed, all of which were concordant, with a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 130 $\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=2.1), with Th/U ratios ranging from 25.2 to 101. Two monazite grains had significantly lower Th/U ratios (8.2 and 19.2, respectively) and older ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages (236 $\pm 4\text{Ma}$ and 377 $\pm 4\text{Ma}$, respectively),

which may represent inherited ages (Fig.4b).

The LA-ICP-MS trace element results of the monazite from the Muzidian gneisses are listed in Table 2. All monazite grains have similar trace element compositions, characterized by strong enrichment of light rare earth elements (LREEs) and depletion of heavy rare earth elements (HREEs) ($La/Yb=1610-5390$), as well as an evidently negative Eu anomaly ($Eu/Eu^*=0.14-0.32$) (Fig.5).

Most monazites in this study are euhedral to subhedral, and core-rim structures cannot be observed, suggesting that they might be formed during metamorphic processes. The Th/Ce ratio of monazites in the Muzidian gneiss ranges from 0.59 to 1.61, which precludes the hydrothermal origin of monazites. Additionally, in the monazite classification diagrams of Si/Ce, Ca/Ce, and Y/LREEs^[18], all monazites from the Muzidian gneiss fall into the metamorphic monazite field (Fig.6), also indicating that all monazites in this study are of metamorphic origin. The trace element features of monazites can further constrain the nature of the metamorphism. The monazites exhibit similar geochemical features, enrichment of LREEs, depletion of HREEs, and evidently negative Eu anomalies (Fig.5). The depletion of HREEs and the high fractionation between LREEs and HREEs are evidence of monazite formation under relatively high-pressure conditions. Calculations of the Y temperature for the monazites from the Muzidian gneiss indicate that these monazites might be formed at temperatures ranging from 583°C to 962°C (average 735°C) under a pressure of 0.5GPa. Therefore, it is suggested that the Mesozoic monazite from the Muzidian gneiss may have formed under granulite-facies metamorphism.

The U-Pb isotopic ages of monazites in this study are essentially consistent with the ages of zircons obtained from the migmatites and widely exposed granitoids in the Dabie Orogen, indicating that there were almost contemporaneous metamorphic, magmatic, and migmatization processes in the North Dabie Orogen at ca.130Ma. This suggests that the Mesozoic metamorphism of the Muzidian gneisses may be related to partial melting processes, thus constraining the time of tectonic switch from compression to extension in the North Dabie Orogen to ~130Ma. It should be noteworthy that this period of the tectono-thermal event may have a significant influence on the geochemical compositions, especially for the whole-rock isotopic compositions, of the Archean—Proterozoic ancient basement rocks represented by the MGC in the Dabie Orogen. Therefore, caution should be exercised in future research on ancient rocks in the North Dabie Orogen.

参考文献

- [1] 邱啸飞, 江拓, 吴年文, 等. 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[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 729–738.
- [2] Qiu X F, Jiang T, Wu N W, et al. Neoproterozoic crustal rocks and Paleoproterozoic migmatization in the Dabie Orogen: Evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 729–738.
- [3] Qiu X F, Tong X R, Jiang T, et al. Reworking of Hadean continental crust in the Dabie Orogen: Evidence from the Muzidian granitic gneisses[J]. *Gondwana Research*, 2021, 89: 119–130.
- [4] Tian Y, Wang W, Jin W, et al. Neoproterozoic granitic rocks from the Jiamiao area of the Dabie Orogen: Implications on the formation and early evolution of the Yangtze Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65: 1568–1585.
- [5] Wang D, Qiu X F, Carlson R W, et al. The Eoarchean Muzidian Gneiss Complex: Long-lived Hadean crustal components in the building of Archean continents[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 605: 118037.
- [6] 张雅, 李全忠, 闫峻, 等. LA-ICP-MS 独居石 U-Th-Pb 测年方法研究[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(5): 637–649.
- [7] Zhang Y, Li Q Z, Yan J, et al. Analytical conditions for U-Th-Pb dating of monazite by LA-ICP-MS[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(5): 637–649.
- [8] 邱啸飞, 杨红梅, 赵小明, 等. 扬子克拉通崆崆杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 415–426.
- [9] Qiu X F, Yang H M, Zhao X M, et al. Neoproterozoic granitic gneisses in the Kongling Complex, Yangtze Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 415–426.
- [10] 陈妍, 潘家永, 钟福军, 等. 粤北长江铀田花岗岩独居石 U-Pb 同位素定年及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(1): 1–13.

- Chen Y, Pan J Y, Zhong F J, et al. U-Pb isotopic dating of monazite in granite from the Changjiang uranium orefield, Northern Guangdong Province and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(1): 1–13.
- [8] 杨世平, 杨细华, 李安邦, 等. 电子探针技术研究大别造山带富硫独居石地球化学特征及稀土矿化成因[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(4): 541–553.
- Yang S P, Yang X H, Li A B, et al. Study on geochemical characteristics and REE mineralization of S-enriched monazite in the Dabie Orogenic belt by electron probe microanalysis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(4): 541–553.
- [9] Wu Y B, Zheng Y F, Zhang S B, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: Constraints on partial melting[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 991–1009.
- [10] Tomascak P B, Eirik J K, Richard J W, et al. U-Pb monazite geochronology of granitic rocks from Maine: Implications for late Paleozoic tectonics in the Northern Appalachians[J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104: 185–195.
- [11] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. 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[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 133–153.
- [12] Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel (Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California)[M]. Berkeley: BGC Special Publication, 2003: 1–55.
- [13] Chen L, Hofstra A H, Li X H, et al. High resolution SIMS U-Th-Pb geochronology of small size (< 5 μ m) monazite: Constraints on the timing of Qiuling sediment-hosted gold deposit, South Qinling Orogen, Central China[J/OL]. *American Mineralogist*, 2024. DOI: [10.2138/am-2023-9210](https://doi.org/10.2138/am-2023-9210)
- [14] Wu L G, Li X H, Ling X X, et al. Further characterization of the RW-1 monazite: A new working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis[J]. *Minerals*, 2019, 9: 583.
- [15] Gratz R, Heinrich W. Monazite-xenotime thermobarometry: Experimental calibration of the miscibility gap in the binary system CePO₄-YPO₄[J]. *American Mineralogist*, 1997, 82: 772–780.
- [16] Wang H, Yang J H, Kröner A, et al. Extensive magmatism and metamorphism at ca. 3.2Ga in the Eastern Kaapvaal Craton[J]. *Precambrian Research*, 2020, 351: 105952.
- [17] Wang J H, Sun M, Deng S X, et al. Geochronological constraints on the timing of migmatization in the Dabie Shan, East-Central China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2002, 14: 513–524.
- [18] He Y, Li S, Hoefs J, et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous granitoids from the Dabie Orogen: Constraints on the recycled lower continental crust[J]. *Lithos*, 2013, 156–159: 204–217.
- [19] Huang R, Zhu L, Xu Y, et al. Crustal structure of Hubei Province of China from teleseismic receiver functions: Evidence for lower crust delamination[J]. *Tectonophysics*, 2014, 636: 286–292.
- [20] Jiang G, Zhang G, Zhao D, et al. Mantle dynamics and Cretaceous magmatism in East-Central China: Insight from teleseismic tomograms[J]. *Tectonophysics*, 2015, 664: 256–268.
- [21] Mao J, Liu P, Goldfarb R J, et al. Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 136: 104270.
- [22] 胡俊良, 刘劲松, 刘阿睢, 等. 北大别木子店岩体斑状黑云二长花岗岩的年龄与成因: 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(4): 750–759.
- Hu J L, Liu J S, Liu A S, et al. Age and petrogenesis of the porphyritic biotite monzogranite in the Muzidian Complex in Northern Dabie Mountains: Evidences from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and REE geochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(4): 750–759.
- [23] Li W T, Jiang S Y, Fu B, et al. Zircon Hf O isotope and magma oxidation state evidence for the origin of early Cretaceous granitoids and porphyry Mo mineralization in the Tongbai—Hong’an—Dabie Orogens, Eastern China[J]. *Lithos*, 2021, 389–399: 106281.
- [24] 江拓, 邱啸飞, 卢山松, 等. 桐柏—大别造山带南缘七尖峰花岗岩成因: 来自地球化学, 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的制约[J]. *中国地质*, 2020, 47(4): 1109–1126.
- Jiang T, Qiu X F, Lu S S, et al. Petrogenesis of the Qijianfeng granite in Southern Tongbai—Dabie Orogenic belt: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. *Geology in China*, 2020, 47(4): 1109–1126.