

胶东半岛燕山期变质作用

——来自苏鲁构造杂岩带乳山地区(石榴)斜长角闪岩锆石与榍石U-Pb测年的新证据

张连祥^{1,2}, 田忠华^{2*}, 刘平华², 文飞², 朱浩忠³, 张传恒¹, 叶张煌⁴

ZHANG Lianxiang^{1,2}, TIAN Zhonghua^{2*}, LIU Pinghua², WEN Fei², ZHU Haozhong³,
ZHANG Chuanheng¹, YE Zhanghuang⁴

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 山东科技大学地球科学与工程学院矿产地质系, 山东 青岛 266000;

4. 江西科技师范大学, 江西 南昌 330038

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Department of Mineral Geology, School of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266000, Shandong, China;

4. Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, Jiangxi, China

摘要:“燕山运动”泛指中国东部侏罗纪—白垩纪大规模构造运动,与之相关的构造作用及岩浆作用前人已有深入的研究,然而对于燕山运动相关变质作用却鲜有报道。通过对胶东半岛苏鲁构造杂岩带乳山地区(石榴)斜长角闪岩进行锆石及榍石U-Pb测年,发现念头石榴斜长角闪岩原岩时代为1708 Ma,变质时代为154 Ma;北庄斜长角闪岩早期变质时代为1840 Ma,晚期变质时代为145 Ma。综合上述年代学数据与近年有关胶东半岛燕山期构造-岩浆事件新进展,表明乳山地区(石榴)斜长角闪岩记录了燕山期变质作用,推测乳山地区燕山期变质作用发生于中国东部构造转换期(挤压到伸展),其成因可能与中国东部燕山造山过程中区域构造增厚作用有关,但目前不能排除该期变质作用可能与同期岩浆作用热驱动有关。

关键词:燕山运动;变质作用;锆石与榍石U-Pb定年;苏鲁构造杂岩带

中图分类号:P534.52;P534.53;P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0674-13

Zhang L X, Tian Z H, Liu P H, Wen F, Zhu H Z, Zhang C H, Ye Z H. Yanshanian metamorphism of Jiaodong Peninsula: New evidence from zircon and titanite U-Pb dating of (garnet) amphibolites in the Rushan area, Sulu tectonic complex belt. Geological Bulletin of China, 2021, 40(5): 674-686

Abstract: The “Yanshanian Movement” generally refers to the large-scale tectonic movement of the eastern China in Jurassic-Cretaceous. Its related structural and magmatic events have been deeply studied by previous researchers. However, a few Yanshanian metamorphic ages were reported previously in the eastern China. In this study, LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons and titanite from the (garnet) amphibolites in Rushan region indicates that: (1) the formation age of the Niantou garnet amphibolites was 1708 Ma, and

收稿日期:2020-08-10;修订日期:2020-12-05

资助项目:中国地质调查局项目《华北陆块中部与东部前寒武纪基础地质调查》(编号:DD20190003)和江西省教育厅科学技术研究重点项目《江南造山带赣东北段隆升剥蚀与毗邻盆地填充沉积作用耦合关系研究》(编号:JJ190586)

作者简介:张连祥(1987-),男,在读博士生,古生物学与地层学专业。E-mail:geoffreyzhang1105@163.com

* 通信作者:田忠华(1984-),男,博士,副研究员,前寒武纪构造变形研究方向。E-mail:tianzhonghua@cags.ac.cn

the metamorphic age was 154 Ma; (2) the early metamorphic age of the Beizhuang amphibolite was 1840 Ma, and the late metamorphic age was 145 Ma. On the basis of the above new zircon and titanite age and the new magmatic-tectonic data of the Jiaodong Peninsula, it is suggested that the garnet amphibolites of the Rushan region have ever recorded the Yanshanian metamorphic event, and it is speculated that the metamorphic event occurred in a special period of regional tectonic transformation stage (from compression to extension), and the origin of the metamorphism may be related to the regional tectonic thickening during the Yanshanian orogeny in eastern China, but at present it cannot be ruled out that the metamorphism of this period is possibly related to the thermal drive of magmatism at the same time.

Key words: Yanshanian movement; metamorphism; zircon and titanite U-Pb dating; Sulu tectonic complex belt

“燕山运动”由著名地质学家翁文灏先生提出^[1],一般泛指影响中国东部地区强烈的中生代构造运动。主要分 A 期地壳变动幕、中间火山幕和 B 期地壳变动幕^[2]。21 世纪前,大量学者对燕山运动的幕式运动方式提出不同看法,其中, Hsieh^[3]认为可以分为 5 期;赵宗溥等^[4]认为应该回归“燕山运动”提出的本意,专指中侏罗世中晚期造山运动,其主要标志为侏罗系底部大型不整合面(侏罗系髻髻山组火山岩不整合于煤炭系地层之上)。通过对山西地区陆相沉积盆地的深入研究,部分学者认为燕山运动的起始时代为 168 Ma^[5]。

“燕山运动”构造事件对欧亚大陆产生广泛影响,从欧亚板块东部到板块内部都有“燕山运动”的构造表现。例如,中国东部郯庐断裂持续性活动^[6],大巴山地区侏罗纪陆内造山作用^[7],中国西北地区北山侏罗纪大规模逆冲推覆构造^[8]。综合构造动力学机制,董树文等^[9]将燕山运动划分为 3 个构造期次,早期挤压应力作用期(175~136 Ma),中期伸展应力作用期(135~90 Ma)和晚期弱挤压应力作用期(约 80 Ma)。此分类方法全面反映了燕山运动幕式构造过程。早期挤压作用产生大量逆冲推覆构造及相关断层,中期伸展作用产生大量伸展性盆地及变质核杂岩^[10-12]。此外,从岩浆响应来说,燕山期岩浆主要可以分为 3 个活动峰期:160 Ma、140~120 Ma 和 110~90 Ma^[13]。

“燕山运动”无论是从构造上还是从岩浆作用上都有强烈响应。例如,部分地区发育薄皮构造,表现为上地壳基底和盖层内的滑脱构造(大巴山、山西台地和川西),判断依据为大量地震剖面^[9];部分地区(苏鲁—大别山和燕山)则表现为厚皮构造特征,指示下地壳受晚侏罗世强烈构造变形影响。与构造作用和岩浆作用不同的是,“燕山运动”期变质作用研究鲜有报道,仅大兴安岭北部与福建东南沿海地区等地区有少量报道^[7]。“燕山运动”作为中

生代大规模构造运动,尤其在中国东部地区(例如苏鲁造山带)表现为厚皮构造,是否会伴随有相应的变质作用?最近,笔者在胶北地体与北苏鲁超高压造山带接触带开展 1:5 万变质岩区专题填图的过程中,发现了乳山无极地区出露的含榴斜长角闪岩经历燕山期变质作用。基于此,本次研究对无极地区(石榴)斜长角闪岩不仅开展了详细的野外调查工作,而且开展相应的室内研究,主要包括锆石和榍石 U-Pb 定年工作。研究结果发现,研究区存在燕山期变质作用,故此探讨其形成原因及构造过程。

1 地质背景及样品岩石学特征

1.1 地质背景

研究区位于苏鲁超高压变质带内,烟台—青岛—五莲断裂带东南侧(图 1),岩石主要由花岗质片麻岩及大量榴辉岩透镜体,花岗质片麻岩和榴辉岩原岩时代均为新元古代,地球化学特征指示它们与扬子板块北缘的变质基底具有亲缘性,普遍经历中三叠世超高压榴辉岩相变质作用和晚三叠世角闪岩相退变质作用^[12, 14-16]。

需要指出的是,烟台—青岛—五莲断裂带东南侧除原岩为新元古代并经历三叠纪超高压变质作用的花岗质片麻岩和榴辉岩透镜体外,许多非超高压变质岩系也陆续被发现。例如,乳山—海阳出露一套典型的非超高压变质岩系,含有经历麻粒岩相变质作用的变基性岩,一般呈块状或构造透镜体形式发育于强变形的花岗质片麻岩中。部分学者认为麻粒岩来自于扬子板块变质基底^[17-18]。然而经过深入的研究,越来越多研究者认为这套岩石可能与胶—辽—吉带胶北地体古元古代变质岩具有较好的亲缘性,推测麻粒岩原岩来源于华北克拉通^[19-22]。熊志武等^[23]通过 Hf 同位素工作显示,威海地区泥质麻粒岩及石榴黑云片麻岩中 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围为 -3.7~

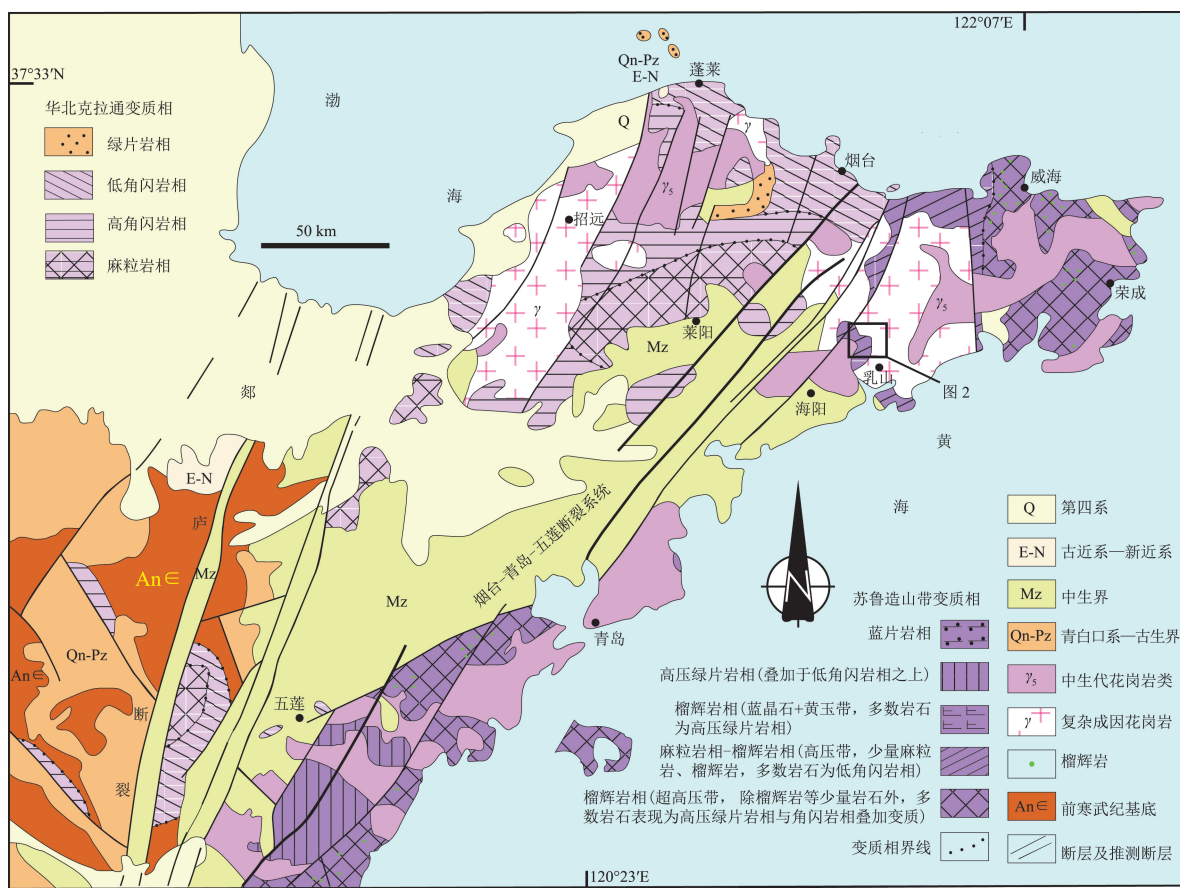


图1 胶东半岛变质地质图

Fig. 1 Metamorphic geological map in Jiaodong Peninsula

6.3, 二阶段模式年龄为 2.78~2.87 Ga, 认为这些地壳残片属于华北克拉通。

此外, 研究区还出露了一定规模的古元古代变沉积岩(图2)与少量的中元古代基性侵入岩^[24]。研究区发育大量侏罗纪—白垩纪花岗岩^[25], 其中可见大量元古宙—新元古代变质地层及其他捕虏体。

1.2 样品位置及岩石学特征

本次研究的样品石榴斜长角闪岩 19TZH10-1 采自午极镇念头村东(图2、图3), 岩石呈透镜体状产于含榴花岗岩中(图3)。野外露头呈暗灰色, 手标本可见大量斜长石(30%~40%)和角闪石(40%~50%)(图4-a)。此外, 可见暗红色石榴子石(约10%)分布于其他矿物之间。镜下可见自形—他形的石榴子石、斜长石及角闪石交织连晶, 呈粒状变晶结构(图4-b)。局部可见石榴子石边部发育有“白眼圈”结构, 与朱浩忠等^[24]发表的 19LR39-1 样品(图3, 西 50 m)一致。石榴斜长角闪岩围岩为石榴花岗岩, 其时代约为 120 Ma。

斜长角闪岩样品 19LR44-2 采集于午极镇北侧公路边(图3), 与古元古代荆山群黑云斜长片麻岩相伴产出。野外露头呈暗灰色, 可见大量白色花岗质浅色脉体(图4-c)。矿物组成主要为斜长石和角闪石(图4-d), 同时含少量的磁铁矿、锆石和榍石。

2 实验方法

锆石分选完成于河北省区域地质矿产调查研究所实验室。室内先将所取样品 19TZH10-1 和 19LR44-2 破碎至合适粒级, 后经清洗、烘干和筛选后, 采用磁选和重液分选出约 300 粒不同粒级的锆石及榍石晶体, 后在双目镜下挑选出颗粒较好、裂隙较少且晶形较完整的锆石和榍石晶体进行制靶。锆石阴极发光(CL)图像和榍石背散射电子图像(BSE)均拍摄于南京宏创地质勘查技术服务有限公司, 其拍摄实验仪器为 TESCAN 场发射扫描电镜(型号: MIRA 3LMH), 搭配 CL 探头。实验过程中加速电压为 7 kV, 吸收电流为 1.2 nA, 每 80 s 进行一次

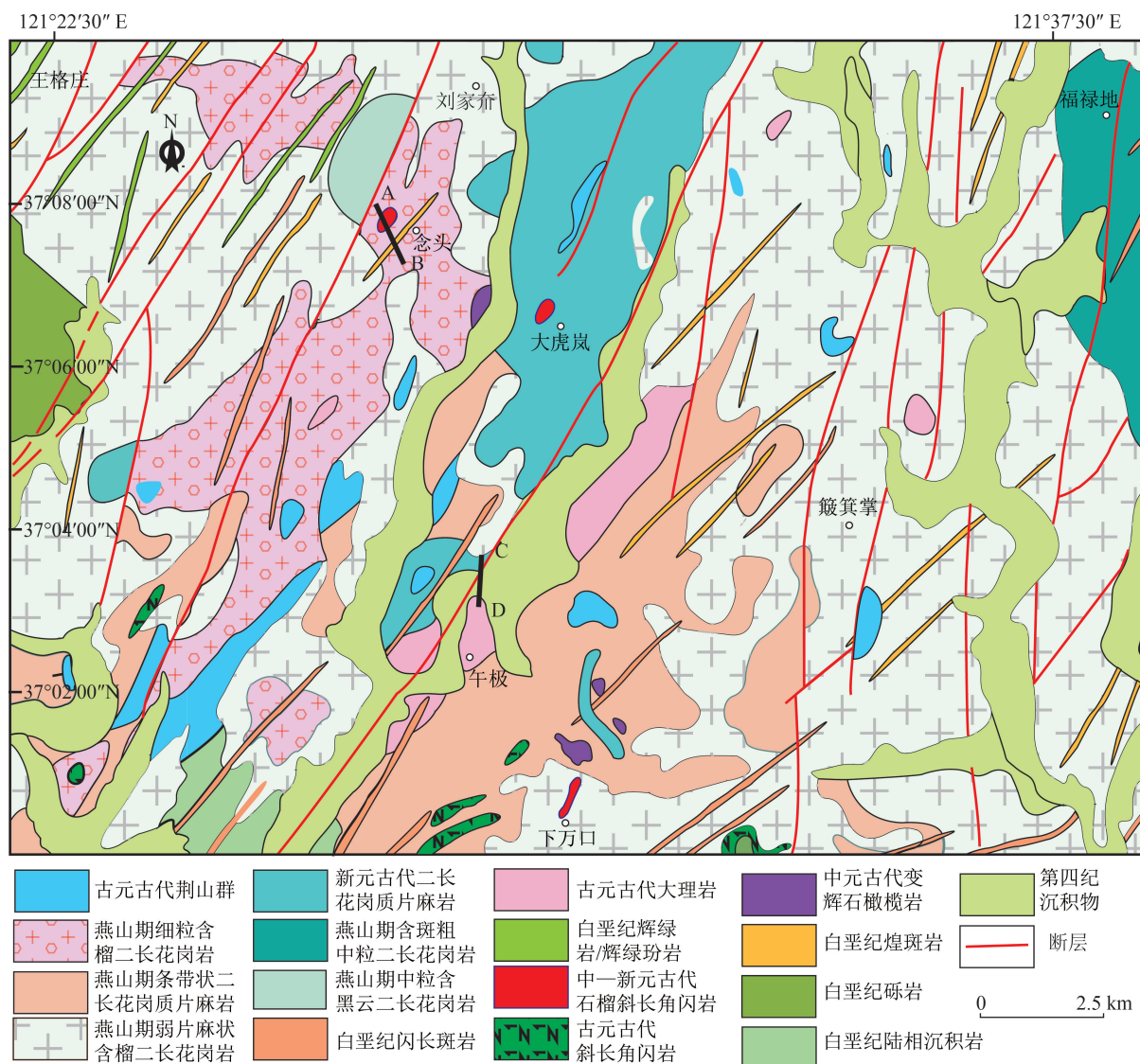


图 2 胶东半岛午极地区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Wuji area of the Jiaodong Peninsula

扫描。

使用锆石 CL 图像和榍石背散射电子图像,对 2 个样品进行年代学分析。其中 19TZH10-1 样品年龄测定在武汉上谱公司完成,具体方法见 Zong 等^[26]。样品 19TZH10-1 榍石 U-Pb 定年和样品 19LR44-2 锆石 U-Pb 定年实验在北京快科赛默科技有限公司实验室完成。所用实验仪器为安捷伦串联四级杆电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent ICP-MS/MS8900),联机使用的激光器型号是 ESI 公司生产的准分子激光剥蚀系统 New Wave NWR 193UC。其定年方法、仪器条件和数据处理见 Ji 等^[27]。其中,锆石 U-Pb 定年使用的标样为 91500,

榍石定年使用的标样为 OLT1。

3 结 果

3.1 样品 19TZH10-1 锆石及榍石年龄特征

样品 19TZH10-1 为石榴斜长角闪岩,在锆石 CL 图像中,绝大部分锆石呈板柱状 (图 5-a),少量出现裂纹,颗粒均一。值得注意的是,大部分锆石发育极窄的变质增生边 (约 10 μm),仅少量锆石的变质增生边达到 35 μm 。

本次研究对样品 19TZH10-1 中 25 个锆石微区开展了 U-Pb 测年,共获得 23 个有效数据点,分析结果见表 1。其中,23 个测点的 U 含量范围为

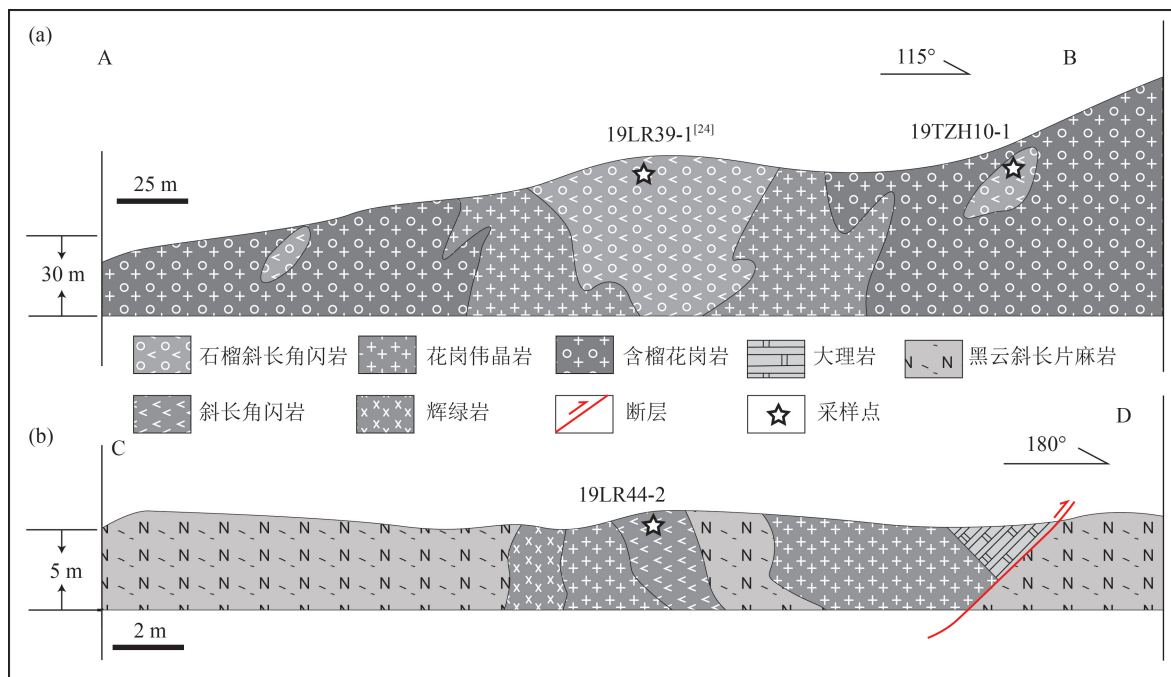


图3 念头石榴斜长角闪岩与含榴黑云二长花岗岩(a)及北庄斜长角闪岩与黑云斜长片麻岩(b)接触关系剖面示意图
Fig. 3 Geological cross section showing the relationships between the Niantou garnet amphibolites-bearing-garnet granites(a) and the Beizhuang amphibolites-biotite plagioclase gneiss(b)

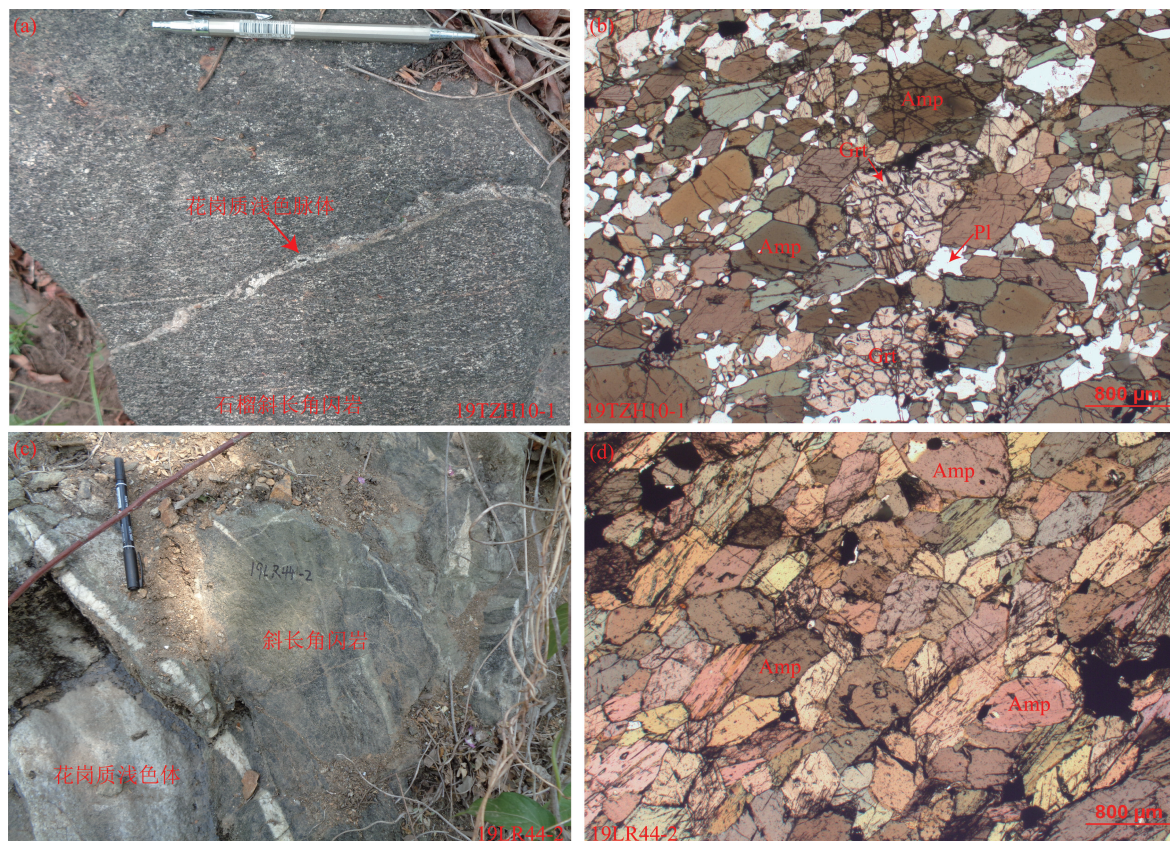


图4 乳山地区念头石榴斜长角闪岩(a,b)和北庄斜长角闪岩(c,d)野外及镜下显微结构照片

Fig. 4 Field photographs and photomicrographs of the Niantou garnet amphibolite(a,b) and the Beizhuang amphibolite(c,d) from the Rushan area
b, d 均为单偏光; Grt—石榴子石; Amp—角闪石; Pl—斜长石

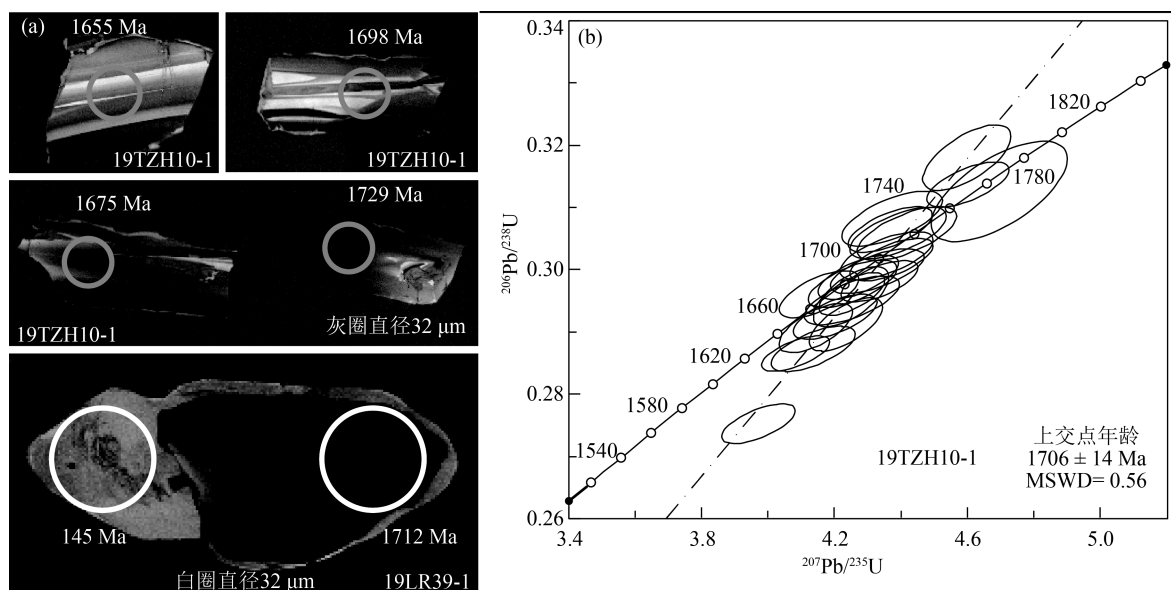


图 5 石榴斜长角闪岩样品 19TZH10-1 锆石阴极发光 (CL) 图像与锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 CL images and U-Pb concordia diagram of zircons from the garnet amphibolite sample 19TZH10-1

$638.25 \times 10^{-6} \sim 8868.82 \times 10^{-6}$, 相应的 Th/U 值为 $0.32 \sim 1.78$ 。在谐和曲线图解上, 23 个测点的 U-Pb 体系谐和度在 95% 以上, 23 个测点拟合的不一致线 (MSWD=0.56) 上交点年龄为 1706 ± 16 Ma, 因距离下交点较远, 未获得精确的下交点年龄。

此外, 本次研究还对样品 19TZH10-1 开展了榍石 U-Pb 测年, 定年结果见表 2。共获得 30 个有效数据点, 其中 Th/U 值为 $1.54 \sim 4.77$, 在 Tera-Wasserburg 图解上, 这些数据点构成一条线性良好的不一致线 (图 6), 下交点年龄为 154 ± 10 Ma。需要特别指出的是, 朱浩忠等^[24] 文中可见 1 颗锆石的变质增生边较宽 (图 5 左下), 并获得相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 145 Ma, 与上述榍石的下交点年龄在误差范围一致。

3.2 样品 19LR44-2 锆石年龄特征

样品 19LR44-2 (斜长角闪岩) 中锆石主要为浑圆状与不规则状, 在锆石阴极发光 (CL) 图像上, 可进一步将其分为 3 类 (图 7): 第一类锆石具有较强的阴极发光效应 (亮白色), 可隐约观察到振荡环带; 第二类锆石具有中等阴极发光效应 (灰色), 振荡环带不明显; 第三类锆石发暗发黑, 振荡环带不明显。此外, 有的锆石发现典型的核-边结构 (图 6)。

对该样品上述 3 类锆石进行 U-Pb 测年 (表 3), 可进一步划分为 2 组年龄。33 个古元古代锆石

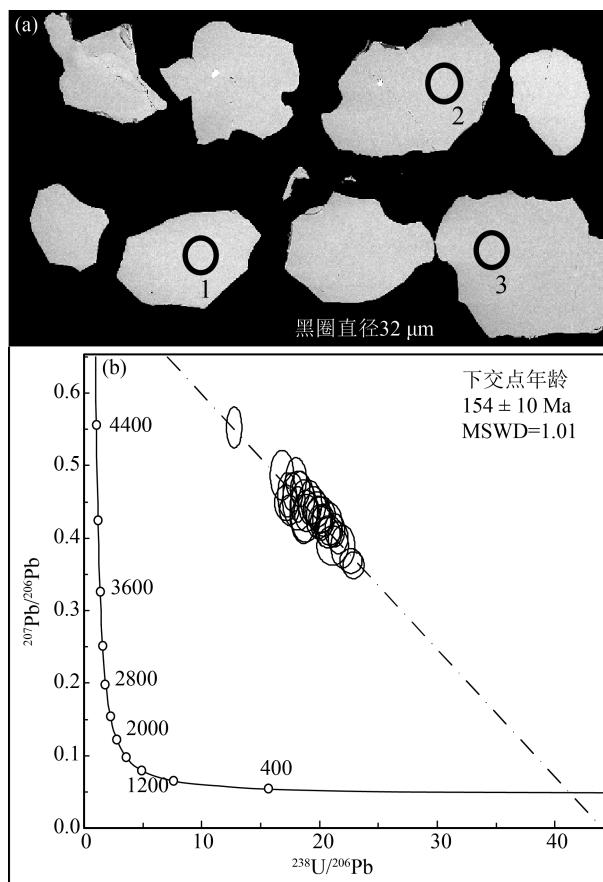


图 6 石榴斜长角闪岩样品 19TZH10-1 榍石背散射电子图像与 U-Pb 定年结果

Fig. 6 BES images and U-Pb concordia diagram of the metamorphic titanite from garnet amphibolite sample 19TZH10-1

表 1 乳山地区镇念头石榴斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of magmatic zircons from the Niantou garnet amphibolite in the Rushan area

样品分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度					
	Common Pb	Total Pb	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							
19TZXH10-1-22	169.53	953.64	747.11	1447.69	0.52	0.1079	0.0022	4.6974	0.1350	0.3126	0.0053	1765	42	1767	24	1754	26	99%
19TZXH10-1-10	254.35	2735.40	2913.94	2692.30	1.08	0.1059	0.0019	4.6027	0.0814	0.3137	0.0024	1729	32	1750	15	1759	12	99%
19TZXH10-1-13	11.44	1290.18	1388.14	1551.56	0.89	0.1049	0.0018	4.3359	0.0764	0.2982	0.0022	1713	31	1700	15	1682	11	98%
19TZXH10-1-02	66.88	11451.63	15810.62	8868.82	1.78	0.1048	0.0017	4.2355	0.0729	0.2912	0.0028	1711	29	1681	14	1648	14	98%
19TZXH10-1-24	36.25	1102.31	1196.31	1268.37	0.94	0.1047	0.0019	4.3730	0.0824	0.3017	0.0022	1709	34	1707	16	1700	11	99%
19TZXH10-1-11	26.39	928.40	944.74	933.18	1.01	0.1046	0.0019	4.6003	0.0879	0.3180	0.0035	1707	35	1749	16	1780	17	98%
19TZXH10-1-19	43.28	1243.21	1328.84	1387.98	0.96	0.1043	0.0022	4.4193	0.0986	0.3059	0.0029	1702	39	1716	19	1720	14	99%
19TZXH10-1-20	0.00	1113.48	1256.81	1223.24	1.03	0.1043	0.0022	4.3299	0.0930	0.2998	0.0023	1702	39	1699	18	1690	12	99%
19TZXH10-1-18	2.45	1327.93	1307.31	1621.15	0.81	0.1036	0.0022	4.3926	0.0962	0.3060	0.0027	1700	39	1711	18	1721	14	99%
19TZXH10-1-04	45.35	6788.49	9107.51	6518.69	1.40	0.1036	0.0016	4.2505	0.0749	0.2957	0.0032	1700	28	1684	15	1670	16	99%
19TZXH10-1-16	59.04	2980.62	3231.33	3700.83	0.87	0.1042	0.0019	3.9718	0.0735	0.2753	0.0021	1700	34	1628	15	1568	11	96%
19TZXH10-1-08	10.55	457.28	431.65	638.25	0.68	0.1041	0.0023	4.3579	0.0933	0.3023	0.0025	1698	41	1704	18	1703	13	99%
19TZXH10-1-23	15.98	555.20	576.59	749.90	0.77	0.1040	0.0022	4.2531	0.0943	0.2951	0.0026	1698	39	1684	18	1667	13	98%
19TZXH10-1-17	32.11	1344.13	1429.36	1765.74	0.81	0.1040	0.0021	4.1373	0.0840	0.2873	0.0024	1696	36	1662	17	1628	12	97%
19TZXH10-1-21	13.92	1987.68	2135.00	2464.27	0.87	0.1038	0.0020	4.2025	0.0834	0.2925	0.0024	1694	36	1675	16	1654	12	98%
19TZXH10-1-03	55.03	5306.66	5731.78	5967.90	0.96	0.1035	0.0016	4.2538	0.0653	0.2962	0.0023	1689	28	1684	13	1672	11	99%
19TZXH10-1-25	14.77	804.12	877.97	961.23	0.91	0.1033	0.0019	4.2723	0.0795	0.2988	0.0023	1684	33	1688	15	1685	12	99%
19TZXH10-1-07	14.86	2541.00	2849.57	2824.83	1.01	0.1031	0.0021	4.2557	0.0878	0.2978	0.0025	1681	38	1685	17	1680	13	99%
19TZXH10-1-06	32.76	628.59	640.87	751.30	0.85	0.1024	0.0023	4.3748	0.1000	0.3083	0.0029	1678	42	1708	19	1732	14	98%
19TZXH10-1-14	0.00	4828.21	5543.63	5497.82	1.01	0.1029	0.0017	4.1447	0.0733	0.2907	0.0026	1677	31	1663	15	1645	13	98%
19TZXH10-1-12	1.60	1150.96	805.18	2221.89	0.36	0.1028	0.0017	4.0833	0.0677	0.2866	0.0019	1676	25	1651	14	1624	9	98%
19TZXH10-1-09	24.61	1835.55	1943.51	2087.16	0.93	0.1028	0.0019	4.3688	0.0840	0.3065	0.0024	1676	35	1706	16	1724	12	99%
19TZXH10-1-05	41.29	458.87	289.35	898.88	0.32	0.1011	0.0019	4.1547	0.0789	0.2961	0.0025	1656	34	1665	16	1672	12	99%

表 2 乳山地区念头石榴斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果
Table 2 U-Th-Pb dating results of titanite from the Niantou garnet amphibolites in the Rushan area

样品分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb _{Total}	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{236}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
19TZH10-1#5	243	30.00	19.50	1.54	0.449	0.02	3.76	0.19	0.027	0.0027	375	17
19TZH10-1#8	264	43.10	24.20	1.78	0.427	0.016	2.99	0.13	0.0512	0.0021	321	13
19TZH10-1#3	271	46.50	25.49	1.82	0.42	0.024	2.74	0.13	0.0493	0.0021	310	13
19TZH10-1#10	288	43.40	22.77	1.91	0.446	0.021	3.21	0.15	0.0528	0.0022	332	14
19TZH10-1#16	278	44.50	21.41	2.08	0.437	0.036	3.24	0.22	0.0546	0.0027	343	17
19TZH10-1#21	282	47.40	22.37	2.12	0.428	0.027	3.15	0.18	0.0541	0.0029	339	18
19TZH10-1#13	294	49.80	22.19	2.24	0.468	0.02	3.55	0.15	0.0558	0.002	350	12
19TZH10-1#19	284	51.90	22.51	2.31	0.438	0.023	3.22	0.15	0.0541	0.0025	340	15
19TZH10-1#20	384	60.50	24.43	2.48	0.429	0.024	3	0.16	0.0508	0.0021	320	13
19TZH10-1#2	273	50.60	19.61	2.58	0.46	0.025	3.7	0.18	0.0589	0.0022	369	13
19TZH10-1#22	328	76.00	29.25	2.60	0.39	0.022	2.66	0.22	0.0478	0.0024	301	15
19TZH10-1#7	290	62.70	23.80	2.63	0.421	0.019	2.92	0.13	0.0504	0.0018	317	11
19TZH10-1#15	351	73.90	27.80	2.66	0.389	0.024	2.54	0.17	0.0462	0.0018	291	11
19TZH10-1#17	355	75.30	27.30	2.76	0.409	0.018	2.77	0.13	0.0498	0.0021	313	13
19TZH10-1#4	299	52.10	18.82	2.77	0.482	0.024	3.71	0.16	0.0565	0.0024	354	15
19TZH10-1#23	349	73.80	26.40	2.80	0.433	0.02	3.02	0.16	0.051	0.0025	321	15
19TZH10-1#9	304	58.80	20.07	2.93	0.464	0.022	3.65	0.18	0.0571	0.0024	357	14
19TZH10-1#14	294	40.90	13.57	3.01	0.553	0.023	6.08	0.26	0.0808	0.0031	500	18
19TZH10-1#1	305	61.00	19.57	3.12	0.439	0.017	3.55	0.18	0.0583	0.0022	365	13
19TZH10-1#24	320	67.60	21.51	3.14	0.452	0.033	3.44	0.22	0.0559	0.0032	350	19
19TZH10-1#30	274	60.80	19.27	3.16	0.447	0.02	3.39	0.14	0.0555	0.0017	348	10
19TZH10-1#6	392	84.30	26.31	3.20	0.425	0.018	2.86	0.12	0.0498	0.0019	313	12
19TZH10-1#28	353	110.10	31.40	3.51	0.363	0.015	2.21	0.1	0.0445	0.0013	280.5	8.3
19TZH10-1#12	377	90.30	25.21	3.58	0.408	0.017	2.76	0.13	0.049	0.0018	308	11
19TZH10-1#27	347	96.20	26.80	3.59	0.411	0.019	2.68	0.12	0.0475	0.0015	299	9.3
19TZH10-1#25	366	117.60	31.20	3.77	0.369	0.014	2.29	0.1	0.0452	0.0017	285	11
19TZH10-1#29	357	105.00	27.27	3.85	0.401	0.018	2.57	0.1	0.047	0.0015	295.8	9
19TZH10-1#11	387	89.40	22.35	4.00	0.44	0.02	3.1	0.13	0.0514	0.0021	323	13
19TZH10-1#8	292	72.30	16.50	4.38	0.487	0.028	4.03	0.22	0.0607	0.003	379	18
19TZH10-1#26	403	109.40	22.94	4.77	0.449	0.025	3.22	0.19	0.0525	0.0023	330	14

Table 3 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of zircons from the Beizhuang amphibolites in the Rushan area

样品分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%		
	Total Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ			
19LR44-2#3	78.9	127.5	1232	0.10	3.355	0.031	0.227	0.0022	1751	11	1493	7.1	1317	12	113.37
19LR44-2#80	26.7	42.7	355	0.12	3.993	0.049	0.261	0.0028	1805	16	1633	10	1494	14	109.3
19LR44-2#22	110.4	180.6	1168	0.15	3.64	0.035	0.239	0.0023	1802	10	1557	7.8	1380	12	112.86
19LR44-2#82	123.2	170.3	999	0.17	4.413	0.038	0.29	0.0027	1793	9.7	1714	7.2	1643	14	104.31
19LR44-2#1	251.2	309	1733	0.18	4.467	0.049	0.29	0.0036	1818	9.8	1724	9.3	1643	18	104.95
19LR44-2#7	100.1	133.8	755	0.18	4.254	0.043	0.279	0.0029	1802	12	1683	8.3	1587	14	106.07
19LR44-2#3	165.8	229	1224	0.19	3.38	0.047	0.225	0.0032	1772	13	1498	11	1308	17	114.53
19LR44-2#6	144.1	183	947	0.19	4.213	0.044	0.272	0.0027	1832	11	1675	8.6	1548	14	108.21
19LR44-2#20	63.3	113.1	593	0.19	2.795	0.054	0.191	0.0033	1726	20	1354	14	1127	18	120.14
19LR44-2#39	112.5	135.3	731	0.19	4.266	0.057	0.271	0.0037	1857	12	1685	11	1545	19	109.06
19LR44-2#8	121.8	159.4	720	0.22	4.555	0.046	0.295	0.0029	1827	10	1740	8.3	1664	15	104.56
19LR44-2#12	143.9	191.5	843	0.23	4.506	0.05	0.29	0.0028	1834	11	1732	9.4	1643	14	105.42
19LR44-2#15	47.9	59.4	248	0.24	5.268	0.056	0.332	0.003	1870	14	1862	8.9	1848	15	100.77
19LR44-2#16	34.4	48.6	204	0.24	4.816	0.059	0.307	0.0033	1851	17	1786	10	1726	16	103.48
19LR44-2#2	297.6	463.1	1805	0.26	3.385	0.031	0.226	0.0021	1766	9.1	1501	7.2	1315	11	114.14
19LR44-2#35	23.9	30.2	108	0.28	4.779	0.082	0.308	0.004	1831	25	1781	15	1731	20	102.89
19LR44-2#1	430	488.5	1675	0.29	4.778	0.052	0.31	0.0033	1817	10	1780	9.1	1742	16	102.16
19LR44-2#24	39.3	51.2	180	0.29	4.597	0.067	0.302	0.0038	1801	18	1748	12	1698	19	102.94
19LR44-2#26	72	104	314	0.33	4.387	0.053	0.284	0.003	1826	15	1708	9.9	1609	15	106.16
19LR44-2#23	49.1	63.9	177	0.36	4.722	0.06	0.305	0.0034	1825	17	1769	11	1715	17	103.15
19LR44-2#28	62.1	74.6	199	0.37	4.897	0.08	0.317	0.005	1826	17	1800	14	1772	25	101.58
19LR44-2#40	104.8	137	353	0.39	4.496	0.061	0.292	0.0037	1816	15	1728	11	1648	18	104.85
19LR44-2#19	162.2	215.3	511	0.42	4.798	0.054	0.309	0.0034	1840	12	1784	9.7	1733	17	102.95
19LR44-2#31	54.6	78	176	0.44	4.419	0.067	0.286	0.0041	1822	20	1713	13	1621	21	105.68
19LR44-2#21	99.8	128.5	276	0.47	4.721	0.05	0.31	0.0029	1805	14	1772	9	1737	14	101.99
19LR44-2#9	181.3	253.7	534	0.48	4.366	0.048	0.282	0.0032	1828	11	1704	9.1	1602	16	106.38
19LR44-2#10	21.9	30.39	63.7	0.48	4.436	0.072	0.29	0.004	1799	29	1716	13	1641	20	104.57
19LR44-2#14	13.7	18.38	38.4	0.48	4.51	0.11	0.294	0.005	1811	40	1725	20	1659	25	103.98
19LR44-2#29	650	903	1825	0.49	4.319	0.045	0.285	0.003	1791	9.5	1696	8.7	1616	15	104.93
19LR44-2#34	27.2	34.9	62.6	0.56	4.694	0.091	0.311	0.0046	1780	29	1763	16	1744	23	101.09
19LR44-2#25	11.8	14.23	23.9	0.60	5.26	0.15	0.339	0.0073	1815	48	1851	24	1879	35	98.51
19LR44-2#17	16.8	22.3	35.5	0.63	4.85	0.11	0.314	0.0057	1818	38	1786	19	1760	28	101.48
19LR44-2#38	29.8	46.1	72.9	0.63	3.758	0.093	0.248	0.0055	1795	41	1582	21	1427	28	110.86
19LR44-2#13	9.24	156.2	2290	0.07	0.144	0.003	0.021	0.0004	165	32	137	2.9	135	2.6	101.71
19LR44-2#18	10.33	170.9	1805	0.09	0.153	0.002	0.023	0.0002	158	31	145	2	144	1.5	100.91

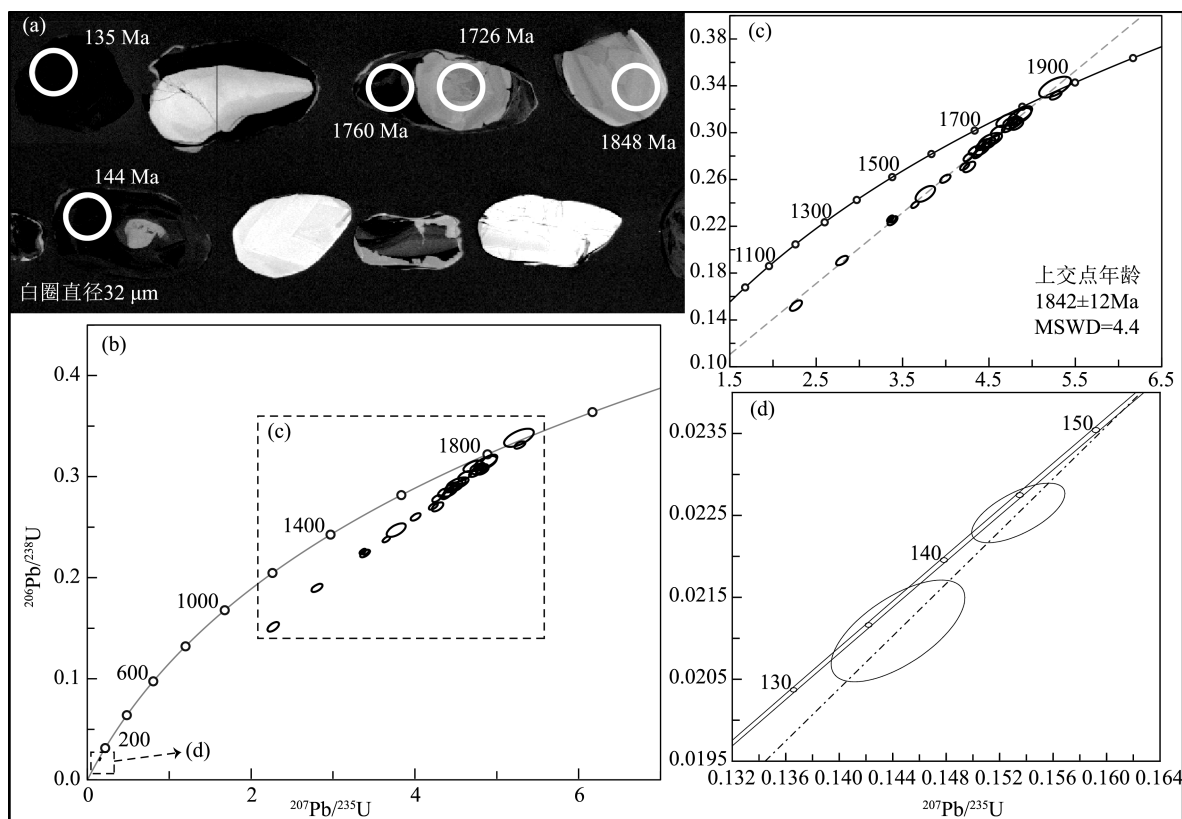


图7 乳山地区北庄斜长角闪岩(19LR44-2)锆石阴极发光(CL)图像及其年龄谐和图

Fig. 7 CL images of zircons and U-Pb concordia age diagrams of the Beizhuang amphibolite(19LR44-2) in the Rushan area

测点的U含量为 $23.90 \times 10^{-6} \sim 1825 \times 10^{-6}$, 相应的Th/U值为0.10~0.63, 平均值为0.36, 这些数据点构成一条线性良好的不一致线, 上交点年龄为 1835 ± 12 Ma, 由于测点离下交点较远, 得到不精确的下交点年龄为 216 ± 79 Ma。此外, 2个燕山期变质锆石测点U含量分别为 2290×10^{-6} 与 1805×10^{-6} , 相应的Th/U值分别为0.07与0.09, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 144 ± 1.5 Ma 和 135 ± 2.5 Ma。

4 讨论

4.1 燕山期变质作用的成因

对于乳山地区斜长角闪岩及含榴斜长角闪岩燕山期变质作用成因, 本文提出2种不同的认识加以讨论: ①变质作用与构造作用相关, 它们是侏罗纪挤压造山作用过程中区域变质-变形作用的产物。②变质作用与构造作用无关, 其成因与侏罗纪岩浆作用热接触变质相关。首先, 从构造角度来说, 胶东半岛下地壳在侏罗纪受厚皮构造控制, 大

量逆冲断层出现, 致使各类岩石发生大规模重复性叠置形成双冲构造^[28-29]。早期强烈挤压期构造发生于 $175 \sim 136$ Ma^[9], 与文中所得变质时代在时间上具有重叠期, 故此构造作用引起的区域性变质作用需要加以考虑。其次, 朱浩忠等^[24] 经过对19LR39-1进行详细的岩石学及相平衡模拟后, 发现2期变质作用存在于含榴斜长角闪岩中, 第一期含“白眼圈”退变质反应结构的变质事件可能发生在三叠纪。然而, 对于第二期含“红眼圈”结构的变质反应, 文中并未进行深入讨论, 本次研究根据锆石变质边部及榴石年代学特征, 推测其可能产生于“燕山运动”时期。

对于燕山期变质作用, 需要考虑岩浆热接触变质的主要因素为: ①到目前为止发现的约145 Ma变质作用都较局部, 本次研究得到的变质年龄非常少, 含榴斜长角闪岩(19LR39-1)中仅1颗锆石, 含榴斜长角闪岩(19LR44-2)中仅发现2颗锆石; ②如果是区域性变质作用, 胶东半岛地区古元古代沉

积岩或岩浆岩中都应该有记录,尤其是研究区荆山群内的泥质片岩,更应该记录燕山期变质事件,然而前人对此变质事件报道非常少,早期变质作用相关报道主要集中于三叠纪变质事件。

胶东半岛中生代主要发育 2 期岩浆作用(160 Ma 和 120 Ma)^[9],早期岩浆作用可能与挤压背景相关,晚期岩浆作用与伸展背景相关,二者之间也有少量岩浆活动。然而需要指出的是,本次研究所得约 143 Ma 变质锆石的石榴斜长角闪岩,其围岩为 120 Ma 石榴二长花岗岩^[24],斜长角闪岩 19LR44-2 的围岩伟晶岩形成时代也为 120 Ma 左右,并非 140 Ma 左右的岩浆岩。石榴斜长角闪岩是先发生变质作用,后被 120 Ma 围岩捕获带至地壳浅层位置。故此,围岩岩浆热接触变质作用的观点还需要进一步斟酌。

4.2 燕山期变质作用时代与区域构造事件联系

董树文等^[9]对燕山地区的逆冲推覆构造及地层不整合事件进行了全面综述,认为挤压构造初始时间为 175~160 Ma,持续时间为 30~35 Ma,此后由于大规模火山岩出现,于约 135 Ma 转换为受伸展环境控制的构造活动。该认识与 Wang 等^[30]一致,认为大青山地区陆内挤压变形发生在 170 Ma 左右,其主要依据为变形过程中生长地层的发育时代。大巴山地区挤压性构造发育时间被限定为 178~143 Ma^[31-32]。经过系统总结与研究,董树文等^[9]最终将“燕山运动”分为挤压期、主伸展期和弱挤压期,其时代分别为 175~136 Ma、135~90 Ma 和 80 Ma(图 8)。燕山期岩浆作用发育,主要集中在 3

个峰期:约 160 Ma、140~120 Ma 和 110~90 Ma^[13](图 8),其中胶东地区(本文研究区)岩浆作用主要集中在 160 Ma 和 120 Ma^[25]。

前人对中国东部燕山期变质作用变质岩的研究较少,仅董树文等^[7]对大兴安岭北部出露的一套变质岩沉积岩系进行了总结分析,并总结 U-Pb 锆石测年结果,获得其变质年龄为 159~163 Ma。本文获得:①石榴斜长角闪岩原岩年龄为 1734 Ma,并经历中生代变质作用(榍石年龄为 154 ± 10 Ma)。榍石封闭温度比锆石低,本次研究中榍石年龄特征能够指示变质作用发生。②通过锆石变质增生边可知,石榴斜长角闪岩变质时代约为 145 Ma。③斜长角闪岩第一期变质时代为 1850 ± 12 Ma,第二期变质时代为 145~135 Ma。由此可知,受“燕山运动”控制的变质时代为 145~135 Ma。需要指出的是,在经历强烈挤压变形期之后,研究区进入区域性快速伸展期,主要依据为大量白垩纪(135~120 Ma)变质核杂岩的形成^[10-12]。故此,笔者认为中生代变质作用发生于挤压背景转换为伸展背景的构造体制下(图 8)。

4.3 燕山期变质作用识别的意义

大规模不同地壳尺度逆冲推覆构造能够指示侧向增生/造山作用,以巨量增生楔/造山楔及岩石相互叠置使地壳加厚;岩浆作用则指示垂向增生,大量岩浆岩侵入同样会导致地壳加厚,二者共同作用,最终构成完整的造山过程(图 9)。对胶东半岛各岩石单元来说,早期 175~136 Ma 强烈挤压构造和 160 Ma 岩浆作用共同奠定了侏罗纪晚期—白垩

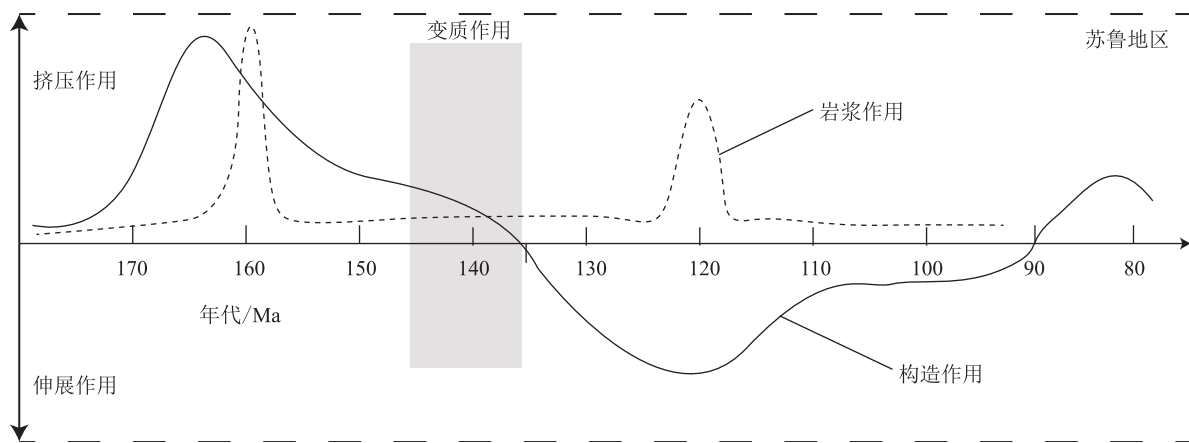


图 8 胶东半岛乳山地区燕山期岩浆作用—构造作用—变质作用关系示意图

Fig. 8 The schematic diagram showing the relationship between magmatism—structural deformation—metamorphism of the Yanshanian movement in the Rushan area, Jiaodong Peninsula

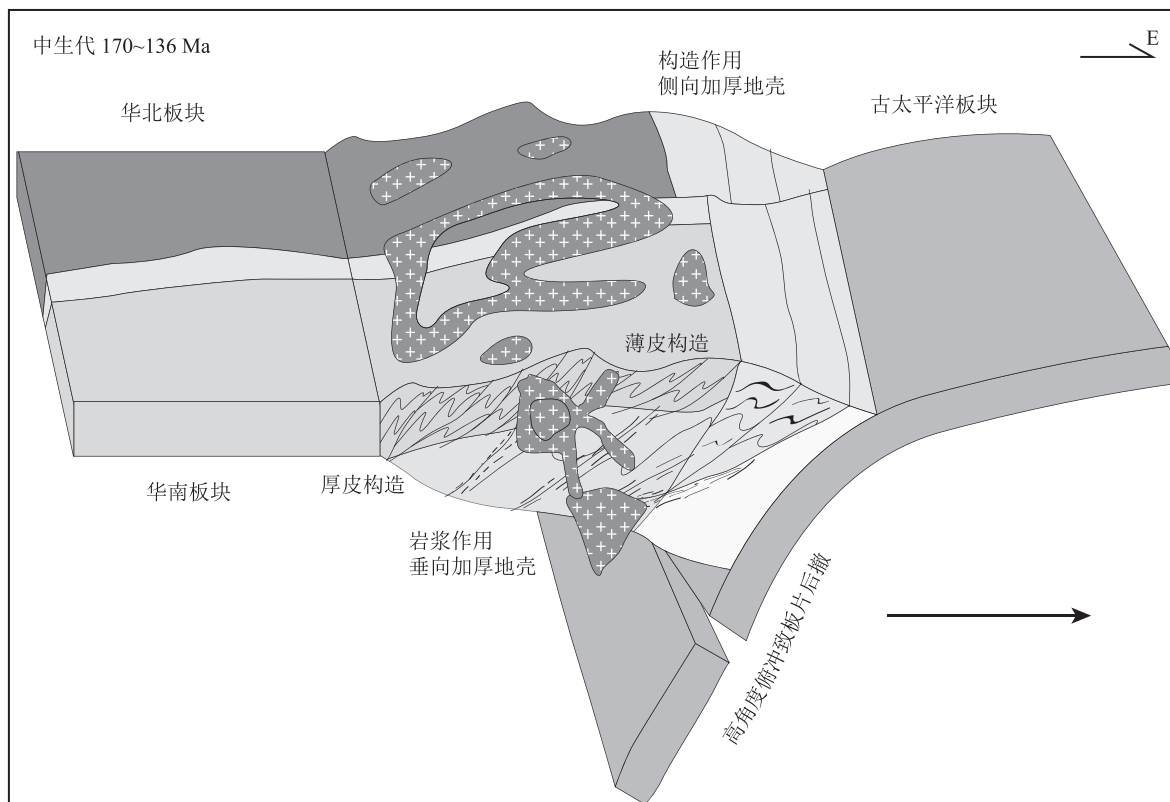


图 9 胶东半岛苏鲁地区燕山期构造演化简图(具体解释详见正文)

Fig. 9 The cartoon diagram showing tectonic model of the Yanshanian movement in the Sulu area, Jiaodong Peninsula

纪早期强烈的造山作用(图 9)。前文已述,变质作用的产生应该以构造因素为主导,岩浆作用影响也不容忽视。遗憾的是,胶东半岛受构造控制及岩浆局部影响的变质作用,并没有像其他增生造山带(安第斯造山带)那样发育。在大规模区域变质作用即将发生时(<145 Ma),由于古太平洋板块的俯冲角度过高,板片发生大规模后撤作用,致使欧亚板块东部地区发生大规模岩石圈拆沉,全区突然进入白垩纪伸展期^[33-34]。大规模伸展作用及伴随的伸展构造(变质核杂岩)使地壳快速减薄,从而阻碍了区域变质作用的发展。

值得指出的是,尽管中国东部在中生代造山阶段进入快速伸展期,还是有少量燕山期变质作用被报道,这对区域地质及造山作用过程的研究至关重要。随着研究的不断深入,越来越多的燕山期变质作用将被发现。故此,本次研究在胶东半岛发现燕山期变质作用的岩石,有力地说明中国东部燕山期造山作用过程不仅包括相关的岩浆作用和构造变形,可能还发育相关的变质作用,三者共同支撑了

完整的中国东部燕山期造山过程。即使造山带遭受了晚期构造作用的强烈破坏,其变质记录也应该有所保留,“燕山运动”亦如此。

5 结 论

(1)通过(含榴)斜长角闪岩锆石及榍石 U-Pb 定年,得出其经历中生代燕山期变质作用,时代约为 154~145 Ma。

(2)燕山期变质作用成因可能更大程度上与区域造山作用(构造作用)相关,但也不能忽略岩浆作用对该期变质作用的影响。

(3)燕山期变质作用发生在构造转换期(挤压到伸展),是导致变质事件记录较少的主要原因。

致谢:本文野外工作得到山东科技大学张书凯、李光速和苏虎虎,河北工程大学李同宇和郝志宣、中山大学田野、中国地质科学院地质研究所硕士研究生段瑞涵等的大力支持。此外,本文在撰写过程当中,与中国地质科学院地质研究所王伟副研究员进行了有益讨论。

参考文献

- [1] Wong W H. Crustal Movement in Eastern China[C]//Proceeding of the 3th Pan-Pacific Scientific Congress, 1926, 1: 265-285.
- [2] Wong W H. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1929, 8: 33-44.
- [3] Hsieh C Y. On the late Mesozoic-early Tertiary orogenesis and volcanism, and their relation to the formation of Metallic deposits in China[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1936, 15: 61-74.
- [4] 赵宗博, 何铸文. 北票地区的侏罗纪地层层序及燕山期火山活动、地壳运动及构造形态的几个问题[J]. 地质科学, 1959, 2: 45-48.
- [5] 李振宏, 董树文, 渠洪杰. 华北克拉通北缘侏罗纪造山过程及关键时限的沉积证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44: 1553-1574.
- [6] Zhao T, Zhu G, Lin S, et al. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan-lu Fault Zone, East China[J]. Earth Science Reviews, 2016, 152: 14-36.
- [7] 董树文, 张越桥, 赵越, 等. 中国大陆中-新生代构造演化与动力学分析[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [8] Zheng Y, Zhang Q, Wang Y, et al. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)—Gobi areas of China and southern Mongolia[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 1111-1126.
- [9] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与中-亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90 周年[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(6): 913-938.
- [10] Wang T, Guo L, Zheng Y, et al. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. Lithos, 2012, 154: 315-345.
- [11] Lin W, Ji W, Faure M, et al. Early Cretaceous extensional reworking of the Triassic HP-UHP metamorphic orogen in Eastern China[J]. Tectonophysics, 2015, 662: 256-270.
- [12] Liu J, Davis G A, Ji M, et al. Crustal Detachment and Destruction of the Keel of North China Craton: Constraints from Late Mesozoic Extensional Structures[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15: 72-81.
- [13] 邓晋福, 冯艳芳, 刘翠, 等. 古亚洲构造域侵入岩时-空演化框架[J]. 地质评论, 2015, 61(6): 1211-1224.
- [14] Ames L, Gaozhi Z, Baocheng X. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. Tectonics, 1996, 15: 472-489.
- [15] Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 45-83.
- [16] Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China[J]. Precambrian Research, 2008, 161: 389-418.
- [17] 郭敬辉, 翟明国, 叶凯, 等. 胶东海阳所高压变质基性岩的岩石化学和地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(5): 394-404.
- [18] Xiang H, Zhang Z M, Lei H C, et al. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature pelitic granulite in the north Sulu orogen: Constraints from petrology and geochronology[J]. Precambrian Research, 2014, 254: 273-289.
- [19] Liu F, Gerdes A, Liu P. U-Pb, trace element and Lu-Hf properties of unique dissolution-precipitation zircon from UHP eclogite in SW Sulu terrane, eastern China[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 169-183.
- [20] 刘利双, 刘福来, 王伟. 苏鲁超高压变质带东北端多种成因类型变基性岩: 来自岩石学同位素年代学及地球化学属性的制约[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2899-2924.
- [21] Xu H, Lei H, Xiong Z, et al. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulite-facies metamorphism in the Sulu orogen, eastern China: evidence from zircon and monazite in the pelitic granulite [J]. Precambrian Research, 2019, 33: 105430.
- [22] Feng P, Wang L, Brown M, et al. Separating multiple episodes of partial melting in polyorogenic crust: An example from the Haiyangsuo complex, northern Sulu belt, eastern China[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 2020, 132(5/6): 1235-1256.
- [23] 熊志武, 旭海金, 王攀, 等. 苏鲁造山带威海古元古代泥质麻粒岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其构造属性[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 504-526.
- [24] 朱浩忠, 田忠华, 王泽利, 等. 苏鲁构造杂岩带乳山地区(石榴)斜长角闪岩 $P-T$ 演化轨迹及其地质意义——来自岩石学、矿物化学及相平衡模拟的约束[J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3420-3435.
- [25] Zhao R, Wang Q F, Liu X F, et al. Architecture of the Sulu crustal suture between the North China Craton and Yangtze Craton: Constraints from Mesozoic granitoids[J]. Lithos, 2016, 266/267: 348-361.
- [26] Zong K, Liu Y, Gao C, et al. In situ U-Pb dating and trace element analysis of zircons in thin sections of eclogite: Redining constraints on the ultra high-pressure metamorphism of the Sulu terrane, China[J]. Chemical Geology, 2010, 269: 237-251.
- [27] Ji W Q, Wu F Y, Wang J M, et al. Early evolution of Himalayan orogenic belt and generation of Middle Eocene Magmatism: Constraint from Haweng Granodiorite Porphyry in the Tethyan Himalayan[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 236.
- [28] 董树文, 胡健民, 施伟, 等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆[J]. 地球学报, 2006, 27: 403-410.
- [29] 李秋生, 高锐, 张成科, 等. 残余壳根与“三明治”结构——燕山造山带中段地壳结构的主要特征[J]. 地球学报, 2008, 82: 129-136.
- [30] Wang Y C, Dong S W, Shi W, et al. The Jurassic structural evolution of the western Daqingshan area, eastern Yinshan belt, North China[J]. International Geology Review, 2017, 59(15): 1885-1907.
- [31] Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic tectonic evolution of the North Dabashan zone, South Qinling, central China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 64: 99-114.
- [32] 李鹏远, 张进江, 郭磊, 等. 大巴山逆冲推覆构造带前缘构造特征及变形年代学研究[J]. 地学前缘, 2010, 17: 191-199.
- [33] Zhu R, Zhang H, Zhu G, et al. Craton destruction and related resources[J]. International Journal of Earth Sciences, 2017, 106: 2233-2257.
- [34] 巫建华, 宋凯, 牛子良, 等. 河北围场御道口盆地流纹岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其他意义[J]. 地质通报, 2019, 38(7): 1191-1205.