

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.154>



乳山地区中生代花岗岩及捕虏体年代学、Hf 同位素特征对胶东半岛地壳演化的启示

李同宇¹, 金超^{1,2*}, 田忠华³, 王伟³, 郝志宣¹, 文飞⁴

1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北邯郸 056038

2. 河北省资源勘测研究重点实验室, 河北邯郸 056038

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 花岗岩是大陆地壳主要组成部分, 胶东半岛中生代花岗岩的出现是推演俯冲板片岩浆演化与构造演化的重要依据。因此, 通过研究乳山地区出露的花岗岩及其捕虏体(变质基性岩), 有助于更好的了解中生代胶东半岛的岩浆演化与地壳演化。该研究为胶东地区提供了新的主微量元素数据、U-Pb 和 Lu-Hf 同位素数据。岩石地球化学表明黑云母二长花岗岩具有高钾钙碱性特征, 相对贫钛、铁、锰、镁等元素, 岩体有可能是分异程度较高的 I 型或者 M 型花岗岩。大离子亲石元素 Ba 和 Sr 明显富集, 高场强元素 Zr 无明显亏损。斜长角闪岩 SiO_2 、 TiO_2 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 和 MgO 含量分别为 48.9%、0.68%、12.64% 和 7.33%, 为拉斑玄武岩成分, 全碱 $\text{ALK}(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 较低。大离子亲石元素 Ba 和 Sr 无明显富集, 高场强元素 Zr 弱亏损, 与石榴斜长角闪岩地球化学性质相似。锆石 CL 图像中花岗岩为岩浆锆石, 斜长角闪岩为变质重结晶锆石。黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 定年获得年龄为 $118.5\pm 2.7\text{ Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-15.4\sim -27.7$ ($\text{Mean}=-25.2\pm 1.4$), 相应二阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 为 2.16~2.90 Ga, 但大部分集中在 ~2.8 Ga。捕虏体斜长角闪岩锆石 U-Pb 上交点年龄为 $1\ 839\pm 27\text{ Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.5\sim 5.1$ ($\text{Mean}=3.23\pm 0.74$), 相应的一阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}1}$) 为 2.02~2.18 Ga。此外, 念头村含榴花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-25.1\sim -27.1$ ($\text{Mean}=-26.0\pm 0.18$), 相应的二阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 为 2.75~2.87 Ga。其捕虏体含榴斜长角闪岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $3.7\sim 4.4$ ($\text{Mean}=3.93\pm 0.21$), 相应的一阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}1}$) 为 1.99~2.03 Ga。上述数据指示花岗岩为华北太古宙地壳重新熔融的产物; 变质基性岩属华北荆山群物质。因此, 乳山地区中生代花岗岩及其捕虏体都具有华北板块的亲缘性。乳山地区模式年龄为太古宙的花岗岩暗示胶东半岛地壳演化的相关信息, 并不具备拆沉作用产生岩浆岩的特点。捕虏体(变质基性岩)可能为下地壳部分熔融后形成的新生地壳物质在短时间内携裹的产物。

关键词: 苏鲁造山带; 花岗岩; Hf 同位素; 岩浆演化; 岩石圈拆沉; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2022)08-2951-17

收稿日期: 2021-06-30

Hf Isotopic and Geochronological Characteristics of Mesozoic Granites and Xenoliths in Rushan Area and Its Implication on Crustal Evolution of Jiaodong Peninsula

Li Tongyu¹, Jin Chao^{1,2,*}, Tian Zhonghua³, Wang Wei³, Hao Zhixuan¹, Wen Fei⁴

1. School of Earth Sciences and Engineering, Heibei University of Engineering, Handan 056038, China

基金项目: 河北省高等学校青年拔尖人才基金(No.BJ2018010); 国家自然科学基金青年基金(No.42005133); 中国地质调查局地调项目(No.DD20190003)。

作者简介: 李同宇(1996—), 男, 在读研究生, 主要从事岩石学、地球化学工作。ORCID: 0000-0001-6341-2799. E-mail: 514566726@qq.com

* **通讯作者:** 金超, ORCID: 0000-0001-9826-7740. E-mail: baobei181920@126.com

引用格式: 李同宇, 金超, 田忠华, 王伟, 郝志宣, 文飞, 2022. 乳山地区中生代花岗岩及捕虏体年代学、Hf 同位素特征对胶东半岛地壳演化的启示. 地球科学, 47(8): 2951-2967.

Citation: Li Tongyu, Jin Chao, Tian Zhonghua, Wang Wei, Hao Zhixuan, Wen Fei, 2022. Hf Isotopic and Geochronological Characteristics of Mesozoic Granites and Xenoliths in Rushan Area and Its Implication on Crustal Evolution of Jiaodong Peninsula. *Earth Science*, 47(8): 2951-2967.

2. Key Laboratory for Resource Exploration Research of Hebei Province, Handan 056038, China

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

4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Granite is the main component of continental crust, and the occurrence of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula is an important basis for deducing magmatic evolution and tectonic evolution of subduction plates. Therefore, the study of granite and its xenoliths (meta-mafic rocks) exposed in Rushan area is helpful to better understand the magmatic evolution and crustal evolution of Jiaodong Peninsula in Mesozoic. This study provides new data of major and trace elements, U-Pb data and Lu-Hf isotopes for Jiaodong Peninsula. Petro-geochemistry shows that the biotite monzogranite has the characteristics of high potassium and calcium alkalinity, and is relatively poor in elements such as titanium, iron, manganese, and magnesium. The rock may be I-type or M-type granite with a high degree of differentiation. The large ion lithophile elements Ba and Sr are obviously enriched, and the high field strength element Zr has no obvious loss. The SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , and MgO content of the amphibolite are 48.9%, 0.68%, 12.64% and 7.33%, respectively. It is a tholeiitic basalt composition, and the total alkali ALK ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) is relatively low. The large ion lithophile elements Ba and Sr are not significantly enriched, and the high field strength element Zr is weakly depleted, which is similar to the geochemical properties of the garnet plagioclase amphibolite. The granite has magmatic zircon and the amphibolite contains metamorphic recrystallized zircon under zircon CL image. The zircon U-Pb dating age of the biotite monzogranite is 118.5 ± 2.7 Ma, and the value of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ is -15.4 to -27.7 (Mean $= -25.2 \pm 1.4$), and the corresponding two-stage model age ($T_{\text{DM}2}$) is 2.16 to 2.90 Ga, but most of them are concentrated in ~ 2.8 Ga. The upper intersection age amphibolite (xenoliths) is 1839 ± 27 Ma (zircon U-Pb), and the value of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ is 0.5 to 5.1 (Mean $= 3.23 \pm 0.74$), corresponding to the one-stage model age ($T_{\text{DM}1}$) is 2.02 to 2.18 Ga. In addition, the value of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of the granite-bearing granite in Niantou Village is -25.1 to -27.1 (Mean $= -26.0 \pm 0.18$), and the corresponding two-stage model age ($T_{\text{DM}2}$) is 2.75 to 2.87 Ga. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of the xenoliths (garnet amphibolite) is 3.7 to 4.4 (Mean $= 3.93 \pm 0.21$), and the corresponding one-stage model age ($T_{\text{DM}1}$) is 1.99 to 2.03 Ga. The above data indicate that the granite is the product of Archean crust remelting in the Eastern North China Craton; the meta-mafic rocks can be classified into the Jingshan Group of the North China Craton. Therefore, the Mesozoic granite and its xenoliths in the Rushan area have the same affiliation as the North China Craton. The granites with model ages of Archean age in the Rushan area suggest information about the crustal evolution of the Jiaodong Peninsula. It does not have the characteristics of magmatic rock produced by delamination. A short time after partial melting of the lower crust entrained, many ancient xenoliths (meta-mafic rocks) were carried to the subsurface by re-melting magma.

Key words: Sulu orogenic belt; granite; Hf isotope; magmatic evolution; lithospheric delamination; geochemistry.

0 引言

板块俯冲、碰撞时会形成加厚岩石圈,加厚岩石圈部分熔融导致各类造山带发生伸展塌陷(Xie *et al.*, 2006; Zhao and Zheng, 2009). 大别-苏鲁造山带是三叠纪时扬子克拉通向华北克拉通陆-陆深俯冲碰撞形成的超高压变质带(Ye *et al.*, 2000a),受古太平洋向欧亚大陆东缘俯冲作用的影响,导致加厚的岩石圈发生部分熔融,并发生拆沉减薄,这个过程中伴随着大规模的岩浆作用产生(Zhu *et al.*, 2017).

苏鲁造山带广泛发育中生代岩浆岩,包括晚三叠纪、晚侏罗纪和早白垩纪的岩浆岩(Zhao and Zheng, 2009),其中岩浆以花岗质岩浆为主. 前人已经对苏鲁造山带中生代花岗岩的年代学、主微量元素和同位素地球化学等方面做出了详尽的研究.

其中,王吉琰(2000)认为胶东半岛西部的玲珑花岗岩是来源于华北太古宙 TTG 片麻岩,属壳源成因花岗岩. 张华锋等(2004)通过对胶东昆嵛山高锆花岗岩地球化学特征的研究,认为其来源于扬子板块的基性下地壳. 郭敬辉等(2005)对苏鲁超高压变质带北部中生代花岗岩进行了 U-Pb 锆石定年,发现该地区中生代岩浆事件主要有 3 期,分别为三叠纪晚期(~ 210 Ma)、侏罗纪晚期($\sim 140 \sim 160$ Ma)和白垩纪早期(~ 110 Ma),并在花岗岩中发现了 700~800 Ma 的继承锆石,指示其为扬子板块部分熔融的产物. 此外,部分学者则认为苏鲁超高压变质带内花岗岩来源于胶东群部分熔融且没有幔源物质参与(赛盛勋等, 2016). 根据同位素地球化学研究,早白垩世花岗岩类的成因中,可能涉及来自富集的岩石圈地幔或贫化的软流圈地幔的不同程度组分(Hou *et al.*, 2007). 因此厘定苏鲁造山带中

生代花岗岩的物质归属及起源还存在着较大的争议。由于岩浆岩记录着大陆碰撞造山带岩石圈的热力学演化和地球化学演化,包含着关于大陆俯冲的重要信息,因此还需要进行深入的研究工作。

此外,大别—苏鲁造山带是地球上已知的最大的超高压变质带(Zheng, 2008)。带内不仅广泛出露超高压变质岩,如榴辉岩、花岗片麻岩等,而且广泛分布碰撞后的花岗岩(图1)(Zhao *et al.*, 2008, 2017)。榴辉岩中的金刚石包裹体、柯石英、石榴子石、金红石等超高压矿物的保存表明,大陆地壳曾遭受到超过200 km地幔深度的影响(Xu *et al.* 1992)。但是目前苏鲁地区的地壳厚度仅为32~35 km(Yang, 2002),显然造山带的加厚地壳已经减薄。尽管前人进入深入的科学研究,但岩石圈减薄的时间和方式仍然存在争议和不确定性。岩石圈减薄有两种模式:拆沉作用(Gao *et al.* 2004)和热力学—化学侵蚀(Xu, 2001)。然而,与岩石圈相对应的中生代地壳演化却很少有人研究。Hou *et al.*, (2007)通过对胶东地区侏罗世花岗岩(~158 Ma)和白垩世花岗岩(~126~130 Ma)地球化学对比,证实了胶东半岛西北部下地壳在晚侏罗世经历增厚过程后又在早白垩世陷入下伏地幔,开始发生拆沉作用。Cai *et al.* (2013)在胶东地区识别出两期基性岩脉,年龄分别为~117~116 Ma和~95~87 Ma,根据地球化学和同位素特征,表明胶东地区早白垩世(~117~116 Ma)由岩石圈地幔的富集向软流圈地幔的亏损过渡,故此该方面的研究工作需要深入的探讨。需要指出的是,苏鲁地区花岗岩中含有大量的基性岩捕虏体,它的出现在岩石成因上为胶东半岛的地壳演化提供了间接的证据。

此外,由于苏鲁造山带内卷入了大量的亲华北物质和亲华南物质,之后又经历了多期构造活动和岩浆活动,使苏鲁造山带内的岩石种类极其复杂(田忠华, 2021),广泛发育的中生代岩浆岩也破坏了苏鲁造山带内早期的构造格局(图1)。前人在苏鲁造山带边界限定问题上存在着很大的分歧(Ishizaka *et al.*, 2010)。这些观点虽然经过长时间的激烈争论,但是到目前为止尚没有定论。朱浩忠等(2020)通过对乳山地区含榴斜长角闪岩进行地球化学分析,推测华北板块与扬子板块的地壳缝合带可能是一条宽约80~100 km的构造杂岩带,但是并未限定界线。此外,部分学者则认为厘定苏鲁缝合带要充分考虑南北两侧沉积岩、岩浆岩特征和后期

构造破坏,而不是简单的以大型断裂为边界(Ma *et al.*, 2021; 田忠华, 2021)。因此,研究胶东地区花岗岩成因来源对约束苏鲁造山带地壳演化及造山带边界的启示显得尤为重要。

综上,本文以乳山地区黑云母二长花岗岩及内部捕虏体(斜长角闪岩)为研究对象,通过对野外露头的细致观察及更为深入的岩相学研究,同时结合CL图像、锆石U-Pb定年数据、主量元素特征和Hf同位素比值特征,探究黑云母二长花岗岩及其内部捕虏体(斜长角闪岩)的物质归属及起源,探讨胶东半岛地壳演化过程。此外,根据物质归属及起源等信息,约束苏鲁造山带边界等问题。

1 地质背景

苏鲁造山带属大别—苏鲁造山带东延部分,三叠纪由扬子板块向华北板块俯冲碰撞形成,受郯庐断裂左行走滑影响,苏鲁造山带向北平移~500 km的距离。首先,苏鲁造山带内的高压—超高压变质岩石不仅是世界上出露规模最大,而且也是保存最好的(Zheng *et al.*, 2004, 2006, 2008)。其次,苏鲁造山带在碰撞后发生多期剧烈的岩浆活动,岩石种类变得极其复杂。

从构造角度来讲,苏鲁造山带早期受到三叠纪构造的影响,后受西太平洋侏罗纪—白垩纪伸展构造的控制。其内部发育着NE、NNE向的脆性断裂,这可能与造山带西部郯庐断裂有关。从岩性角度上来讲,苏鲁造山带的前寒武基底为花岗片麻岩,主要组成为太古宙TTG片麻岩,古生代荆山群和粉子山群(Liu *et al.*, 2017)。研究区内也发育新元古代片麻岩。除此之外,研究区主要以中生代的花岗岩为主。各类花岗岩中广泛存在透镜体,如榴辉岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩的透镜体。

研究区位于北苏鲁超高压变质带内,隶属于山东省乳山市(图2)。研究区内岩性较为复杂,未发现太古宙TTG基底单元,变质岩主要为古元古代荆山群变沉积岩系(刘利双等, 2018),主要岩石组成为黑云斜长片麻岩,大理岩等,还有原岩时代为古元古代的变基性岩(含榴斜长角闪岩)等(朱浩忠等, 2020);出露的侵入岩主要为晚侏罗世弱片麻状黑云二长花岗岩,早白垩世含榴二长花岗岩以及新元古代弱片麻状含角闪石黑云二长花岗岩(王世进等, 2011; 田忠华等, 2021)。并且还有一些酸—基性岩脉穿插其中,例如,闪长斑岩侵入黑云母二长花

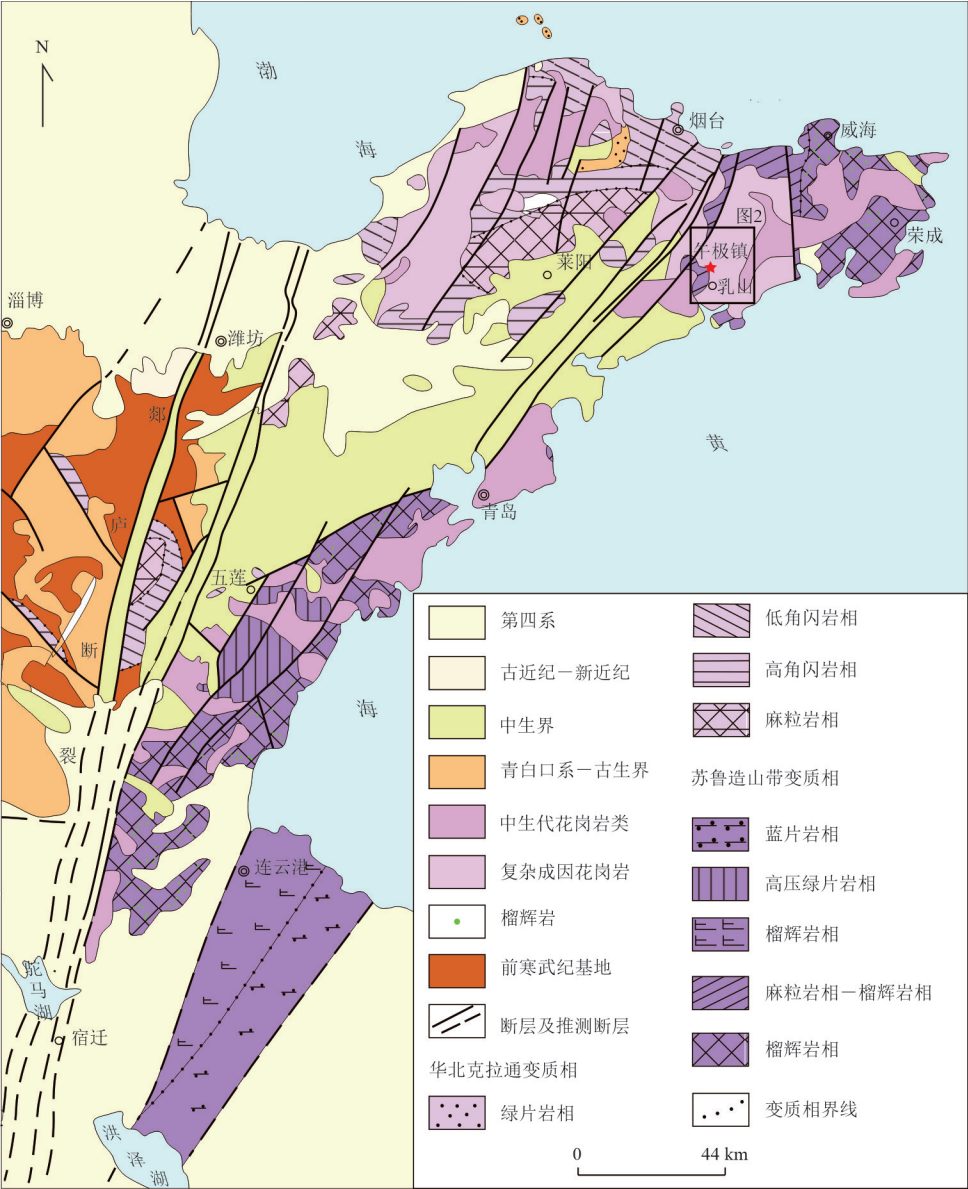


图1 苏鲁造山带地质简图
Fig.1 Geological map of Sulu orogenic belt

岗岩,煌斑岩侵入含榴二长花岗岩中.此外,研究区内NNE-SSW向脆性断裂发育,可能为郯庐断裂分支.本研究所采的黑云母二长花岗岩(19LR58-1)及其捕虏体斜长角闪岩(19LR58-2)位于午极镇正甲乔.另外所采含榴斜长角闪岩(19LR39-1)及其围岩含榴花岗岩(19LR39-2)位于午极镇念头村,详细地理位置,见图2.

2 分析方法

2.1 主量元素

主量元素分析实验完成于中国科学院地质与

地球物理研究所的岩矿制样与分析实验室.玻璃片法为样品制备方法,首先将样品19LR58-1、19LR58-2研磨成小于200 μm的粉末,将样品烘干称量、灼烧之后来计算其烧失量,这是为减少实验误差,最后将其制成玻璃片.实验测量在顺序式X-射线荧光光谱仪(AXIOS Minerals)进行.

2.2 锆石 CL 图像

在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成锆石的分选,并在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成拍摄CL图像,实验设备为TESCAN场发射扫描电镜(型号:MIRA 3LMH)搭配CL探头.7 kV和1.2 nA为实验过程中加速电压和吸收电流,

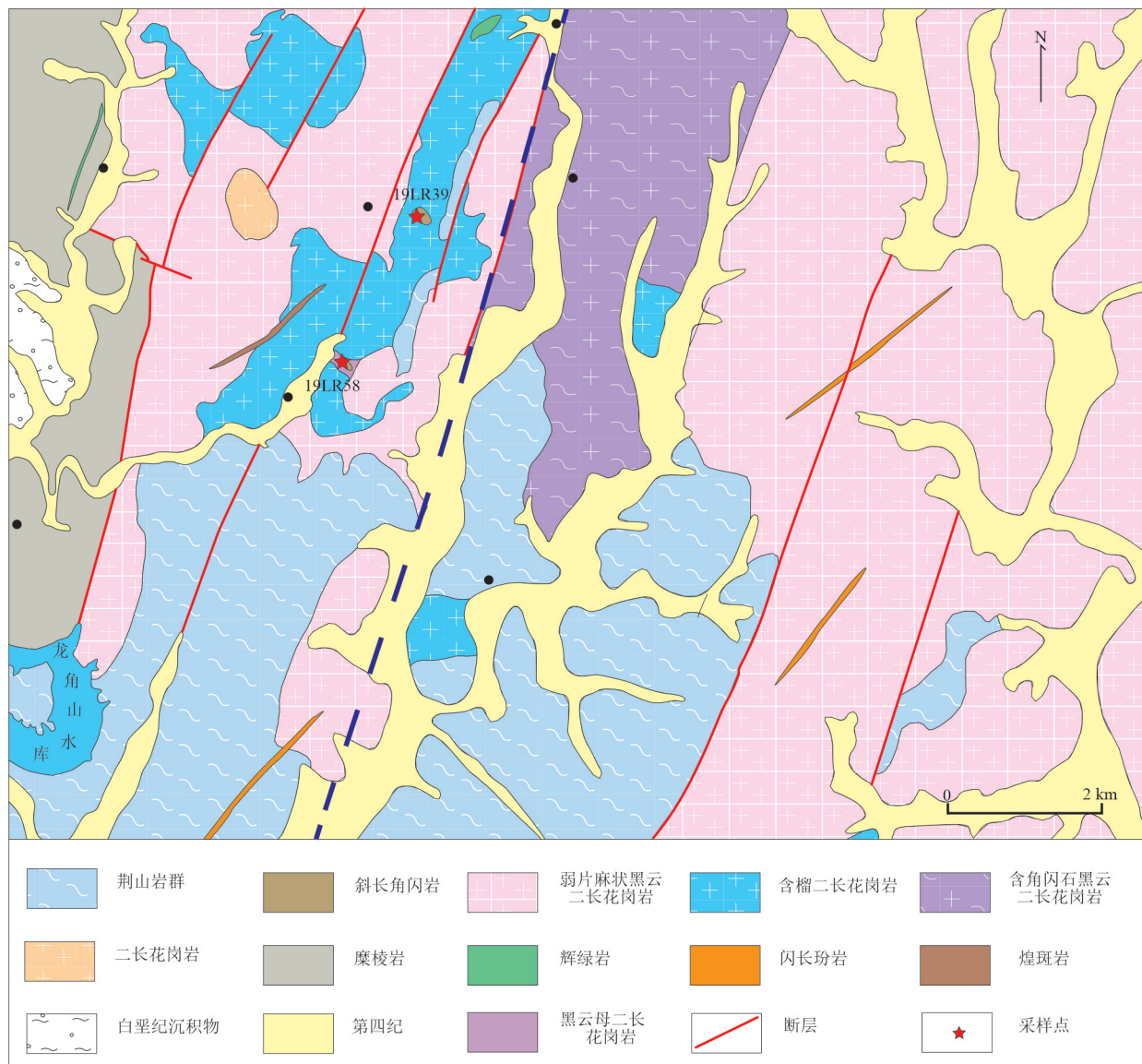


图 2 乳山午极地区地质简图
Fig.2 Geological sketch map of the Wuji Town, Rushan City

每一次扫描的间隔为 80 s.

2.3 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 年龄在北京快科赛默科技有限的串联四级杆电感耦合等离子体质谱(Agilent ICP-MS/MS 8900)测定. 搭载 ESI 公司准分子激光剥蚀系统 New Wave NWR 193UC. 激光采样为单点剥蚀,束斑和频率分别为 20 μm 和 5 Hz, 能量密度为 3.5 J/ cm^2 , 载气为高纯 He 气, 流速为 700 mL/min. 待激光剥蚀系统和 ICP-MS/MS 都开机预热完毕后利用 NIST SRM610 调谐使仪器的各项指标正常. 测试样品时使用 91500 锆石进行同位素分馏校正, 监控标样为 Plešovice 锆石.

离线数据处理采用澳大利亚墨尔本大学同位

素研究组开发的数据处理软件 Iolite(Paton *et al.*, 2010), 该软件剥蚀孔下分馏模型被优化, 并调用激光日志文件, 更加快捷与专业的处理数据. 锆石 U-Pb 年龄协和图与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄绘图计算使用 IsoPlot 4.15. 监控标样测试年龄值与推荐值在误差范围内一致.

2.4 锆石 LA-MC-ICP-MS 微区原位 Hf 同位素比值分析

在武汉上谱分析技术有限公司采用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)测定 Hf 同位素比值. 在测试过程中, 为提高信号稳定性和同位素比值测试精确度, 装备了信号平滑装置. 载气使用氦气, 为提高 Hf 元素灵敏度, 在剥蚀池之后

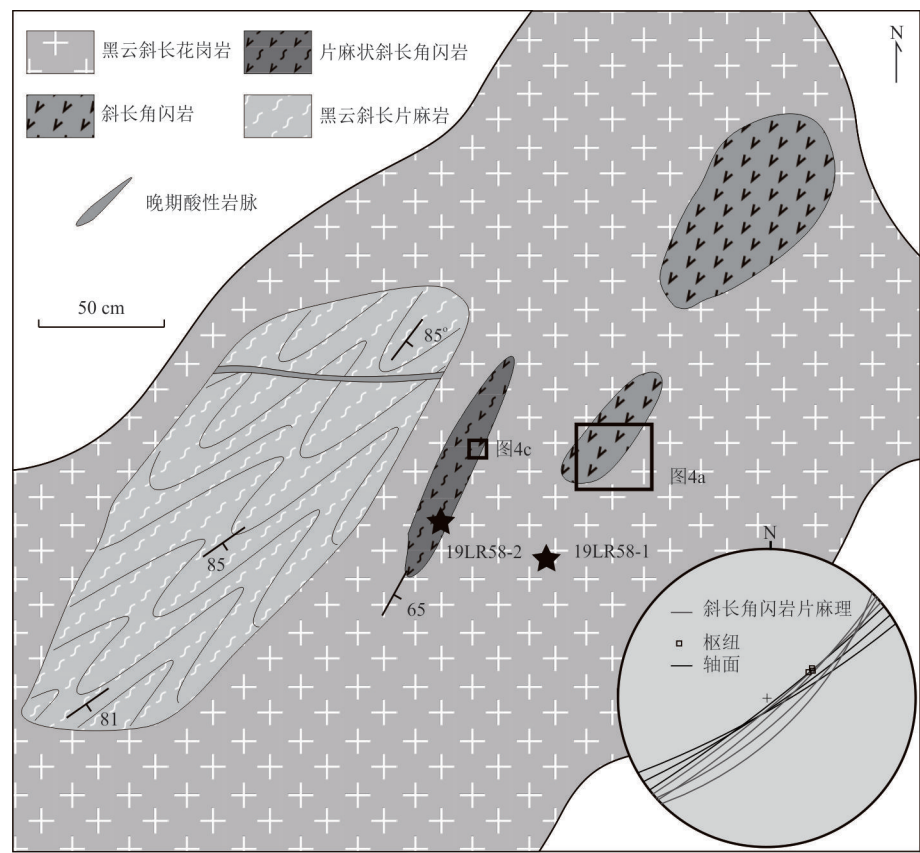


图3 正甲夼黑云母二长花岗岩及其捕虏体地质关系简图

Fig.3 Geological relationship between biotite monzogranite granite and its xenoliths of the Zhengjiakuang village

加入少量氮气. 采用 Neptune Plus 新设计高性能锥组合进行分析.

为确保分析数据的可靠性, 91500 和 GJ-1 两个国际锆石标准与实际样品同时分析. 91500 用于进行外标校正以进一步优化分析测试结果. GJ-1 作为第二标样监控数据校正质量. 91500 和 GJ-1 的外部精密度(2SD)优于 0.000 020. 测试值与推荐值确保在误差范围内一致.

3 野外地质关系与岩相学特征

研究样品采自山东省乳山市午极镇正甲夼及念头村(图 2). 笔者对正甲夼野外露头进行了大比例尺的填图工作(图 3), 野外地质观察中可见黑云母二长花岗岩(19LR58-1)捕虏斜长角闪岩(19LR58-2)及黑云斜长片麻岩, 捕虏边界清晰(图 4a、4c), 可见后期酸性岩脉侵入黑云斜长片麻岩. 另外可见斜长角闪岩中斜长石与角闪石定向排列形成片麻理(图 4c), 产状高角度倾向东南. 黑云斜长片麻岩内见一系列小褶皱, 轴面产状高角度倾向

东南, 枢纽线理高角度倾伏向东北. 念头村石榴斜长角闪岩以透镜体形状产于含榴花岗岩中(朱浩忠等, 2020).

黑云母二长花岗岩(19LR58-1)风化面与新鲜面均为灰白色(图 4a), 中—细粒粒状结构, 块状构造. 主要矿物组成为石英、斜长石、正长石和黑云母, 镜下观察石英含量约 50%, 斜长石含量约 25%, 正长石含量约 20%, 黑云母含量约 5%, 其他矿物少量. 岩相学观察中, 石英表面较为浑浊, 正低突起, 半自形—它形粒状; 斜长石表面浑浊, 部分斜长石发生绢云母化, 未见聚片双晶; 黑云母呈棕褐色, 片状分布, 还可见到绿泥石等副矿物, 可在野外手标本中看见正长石(图 4b).

斜长角闪岩(19LR58-2)风化面与新鲜面均为暗灰色(图 4c), 中—细粒粒状变晶结构, 块状构造或片麻状构造. 主要矿物为角闪石, 斜长石, 石英, 其中角闪石含量约 55%, 斜长石含量约 35%, 石英含量约 10%, 其他矿物少量. 岩相学观察中, 斜长石呈他形或者柱状, 发育明显的卡式双晶; 角闪石多色性明显, 呈现显著的橘黄色和绿色(图 4d).

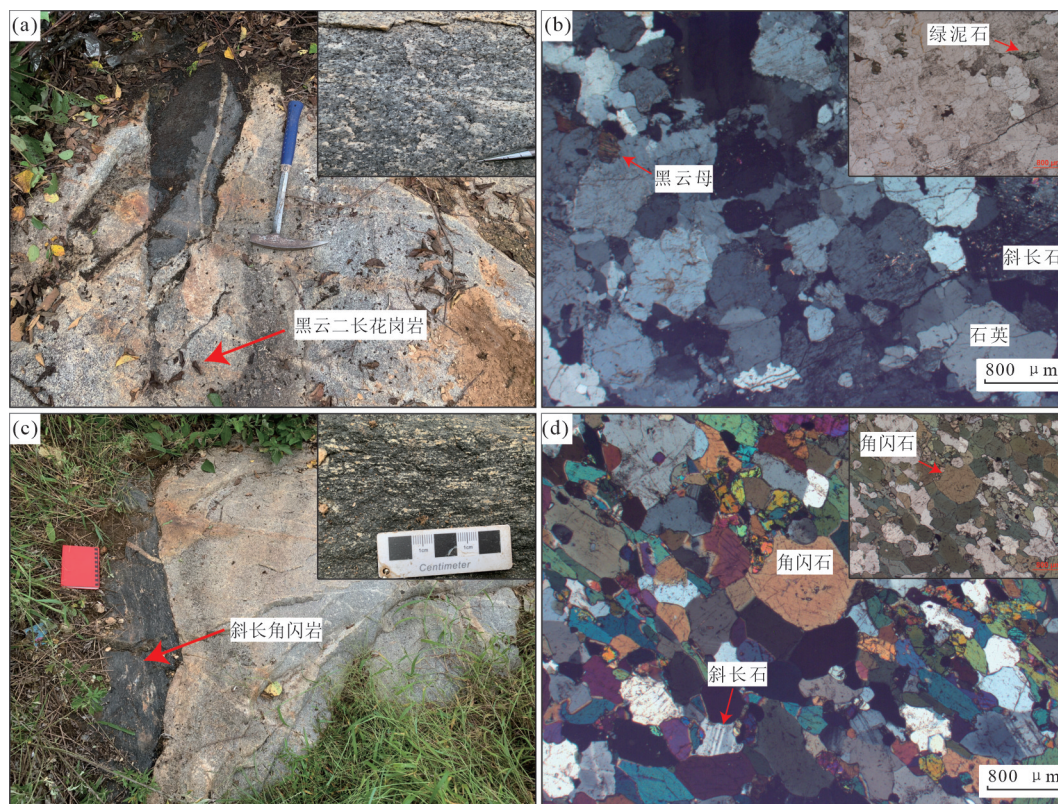


图4 (a、c)正甲角黑云母二花岗岩及其捕虏体(斜长角闪岩)野外照片;(b)黑云母二花岗岩显微结构;(d)斜长角闪岩显微结构
Fig.4 (a、c) Field photos between biotite monzogranite and its xenoliths (amphibolite) of the Zhengjiakuang village; (b) Microstructure of biotite monzogranite; (d) Microstructure of amphibolite

4 分析结果

4.1 地球化学特征

对研究区黑云母二长花岗岩(19LR58-1)及斜长角闪岩(19LR58-2)进行了主微量元素数据的分析测试,结果见附表1与附表2.

黑云母二长花岗岩(19LR58-1)主量元素分析结果显示, SiO_2 的含量为70.99%, TiO_2 的含量为0.20%, Al_2O_3 的含量为16.17%, TFe_2O_3 的含量为1.50%, MnO 的含量为0.03%, MgO 的含量为0.31%, CaO 的含量为2.36%, Na_2O 的含量为4.91%, K_2O 的含量为2.87%, P_2O_5 的含量为0.05%, LOI 的含量为0.57%, BaO 的含量为0.24%, SrO 的含量为0.17%.总体来说,黑云母二长花岗岩(19LR58-1)富硅,略富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 6\%$),具有高钾钙碱性,相对贫钛、铁、锰、镁等特征,其中 A/CNK 为1.59,表现出弱过铝质岩石的特征,有可能是分异程度较高的I型或者M型花岗岩.此外,微量元素分析结果中大离子亲石元素Ba和Sr明显富集,高场强元素Zr无明显亏损.

斜长角闪岩(19LR58-2)主量元素分析结果显示, SiO_2 的含量为48.90%, TiO_2 的含量为0.68%, Al_2O_3 的含量为13.61%, TFe_2O_3 的含量为12.64%, MnO 的含量为0.23%, MgO 的含量为7.33%, CaO 的含量为11.02%, Na_2O 的含量为3.11%, K_2O 的含量为1.07%, P_2O_5 的含量为0.08%, LOI 的含量为0.72%, BaO 的含量为0.02%, SrO 的含量为0.03%.总体来说,斜长角闪岩的原岩为基性岩,具有拉斑玄武岩成分,全碱 $\text{ALK}(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 较低,相比而言,岩石富钠贫钾、钛、锰、磷、钡等元素,其中样品的烧矢量(LOI)较小,表明其蚀变较弱.此外,微量元素分析结果中大离子亲石元素Ba和Sr无明显富集,高场强元素Zr弱亏损.与乳山地区石榴斜长角闪岩地球化学性质相似(朱浩忠等,2020).

4.2 锆石 CL 图像特征

黑云母二长花岗岩(19LR58-1)中锆石以长柱状晶形为主,灰褐色—灰黑色,自形程度比较好,少数锆石晶体表面有裂纹发育,锆石颗粒较为均匀,长约100~280 μm,长短轴比位于1.7~4.2,大部分锆石具有清晰的震荡环带结构,为典型岩浆岩锆石

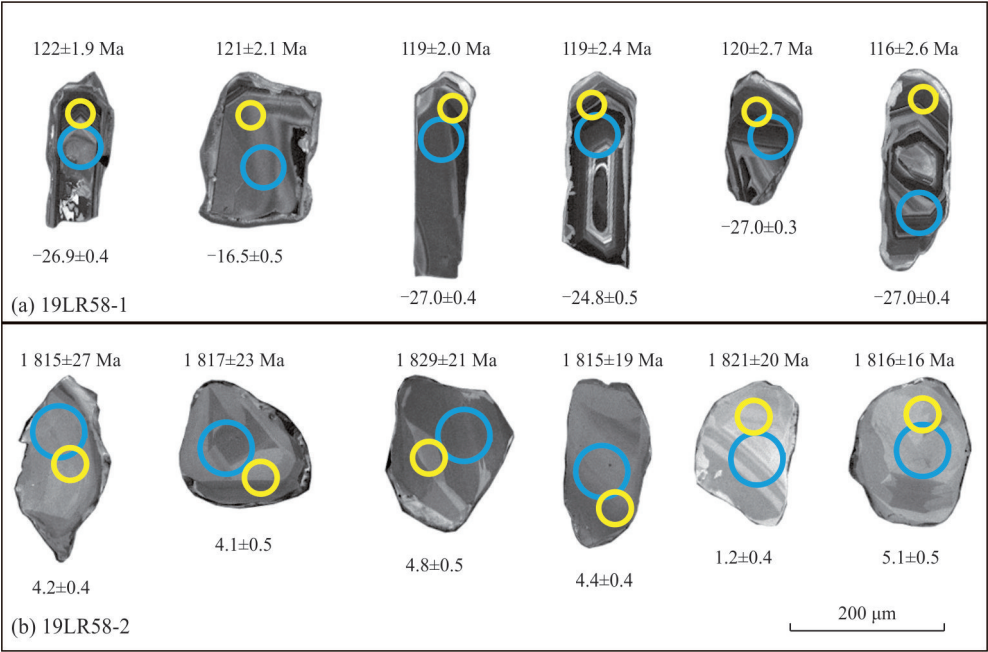


图5 (a)样品 19LR58-1 锆石 CL 阴极发光图像;(b)样品 19LR58-2 锆石 CL 阴极发光图像
Fig.5 (a) CL image of zircons for sample 19LR58-1; (b) CL image of zircons for sample 19LR58-2

(图 5a). 斜长角闪岩(19LR58-2)中锆石以浑圆状或椭圆状为主,灰白色—灰褐色,无明显环带,锆石颗粒较为均匀,长约 100~220 μm ,长宽比约 1.1~1.7,其特征指示这些锆石为变质重结晶锆石(图 5b).

4.3 锆石年代学

对样品黑云母二长花岗岩(19LR58-1)中的 18 个锆石微区分析定年结果如图 6a 与附表 3 所示. 锆石 Th 含量在 $(11\sim 2115)\times 10^{-6}$ 之间,U 含量在 $(570\sim 4820)\times 10^{-6}$ 之间,Th/U 比值在 0.01~0.44 之间,大部分集中于 0.02. 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 111~163 Ma 之间变化,但是大部分集中在~120 Ma (图 6a). 加权平均年龄为 118.5 ± 2.7 Ma (MSWD=3.9). 因此,样品 19LR58-1 的结晶年龄为 118.5 ± 2.7 Ma,指示白垩纪岩浆作用.

对样品斜长角闪岩(19LR58-2)中的 19 个锆石微区分析定年结果如图 6b 与附表 3 所示. 锆石 Th 含量在 $(16.56\sim 588)\times 10^{-6}$ 之间,U 含量在 $(78.8\sim 426)\times 10^{-6}$ 之间,Th/U 比值在 0.17~0.38 之间,大部分集中于 0.5 左右. 有一部分锆石年龄点位于谐和线以下(图 6b),可能是由于 Pb 丢失导致. 因此,最终得出其上交点年龄为 1839 ± 27 Ma,结合 CL 图像可知,斜长角闪岩的变质年龄为 1839 ± 27 Ma.

朱浩忠等(2020)已经对样品含榴斜长角闪岩(19LR39-1)及其围岩含榴花岗岩(19LR39-2)进行了锆石年代学研究,得出含榴斜长角闪岩的原岩时

代为 1734 ± 24 Ma,含榴花岗岩的形成时代为 117.5 ± 6.8 Ma.

4.4 锆石 Hf 同位素

在锆石 U-Pb 定年之后,对样品进行锆石微区原位 Hf 同位素比值分析,分析结果见附表 4.

对黑云母二长花岗岩(19LR58-1)20 颗锆石的 20 个分析点进行分析测试. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 922~0.282 250, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 329~0.002 677,以锆石年龄 t 计算得到 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.281 917~0.282 242,计算得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-15.4\sim -27.7$,加权平均值为 -25.2 ± 1.4 (MSWD=194)(图 7a). 计算得到二阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$)为 2 163~2 905 Ma(图 8a).

对斜长角闪岩(19LR58-2)20 颗锆石的 20 个分析点进行分析测试. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 733~0.281 790, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 070~0.000 741,以锆石年龄 t 计算得到 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.281 658~0.281 772,计算得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.5~5.1,加权平均值为 3.23 ± 0.74 (MSWD=51)(图 7b). 计算得到一阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}1}$)为 2 026~2 181 Ma(图 8b).

对含榴斜长角闪岩(19LR39-1)7 颗锆石的 7 个分析点进行分析测试. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 827~0.281 940, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 747~0.004 046,以锆石年龄 t 计算得到 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.281 791~0.281 811,计算得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.7~4.4,加权平均

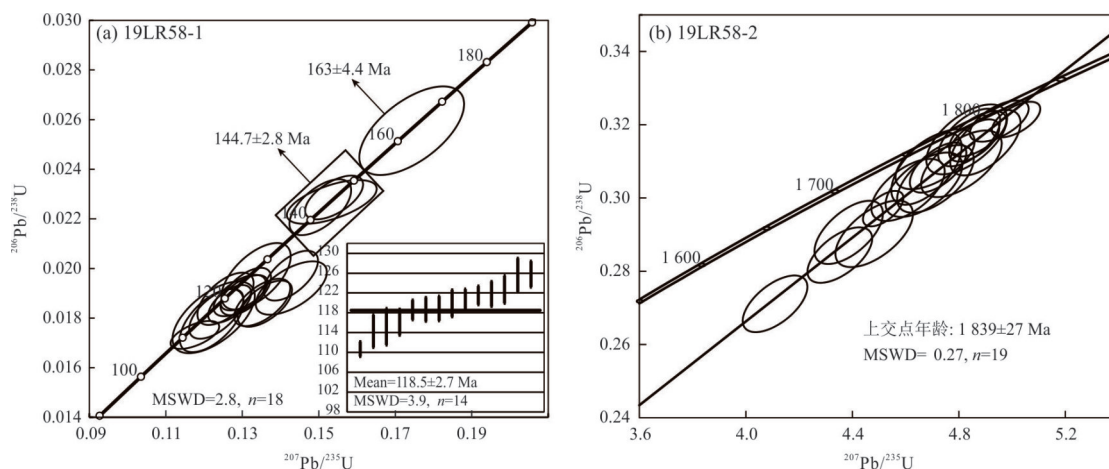


图 6 (a)样品 19LR58-1 锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权年龄平均图;(b)样品 19LR58-2 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.6 (a) Zircon U-Pb age concordia diagram and weighted average age diagram for samples 19LR58-1; (b) Zircon U-Pb age concordia diagram for samples 19LR58-2

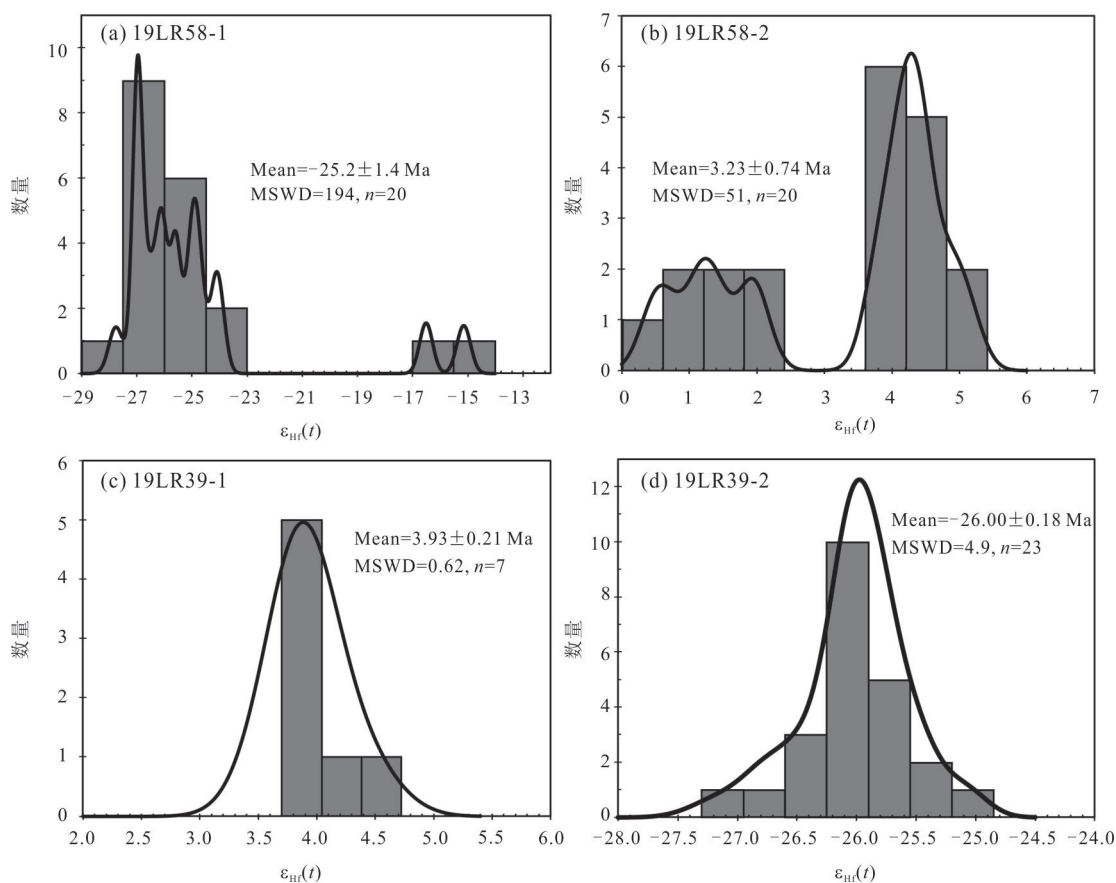


图 7 样品中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值频率直方图及加权平均值

Fig.7 Histograms of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and corresponding weighted mean values for samples

a. 黑云母二长花岗岩 (19LR58-1); b. 斜长角闪岩 (19LR58-2); c. 含榴斜长角闪岩 (19LR39-1); d. 含榴花岗岩 (19LR39-2)

值为 3.93 ± 0.21 ($\text{MSWD} = 0.62$) (图 7c). 计算得到一阶段模式年龄 (T_{DM1}) 为 1 990~2 030 Ma (图 8c).

对含榴花岗岩 (19LR39-2) 23 颗锆石的 23 个分析点进行分析测试. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 935~

0.281 986, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 520~0.002 711, 以锆石年龄 t 计算得到 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.281 927~0.281 983, 计算得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -25.1~-27.1, 加权平均值为 -26.0 ± 0.18 ($\text{MSWD} = 4.9$) (图 7d). 计算

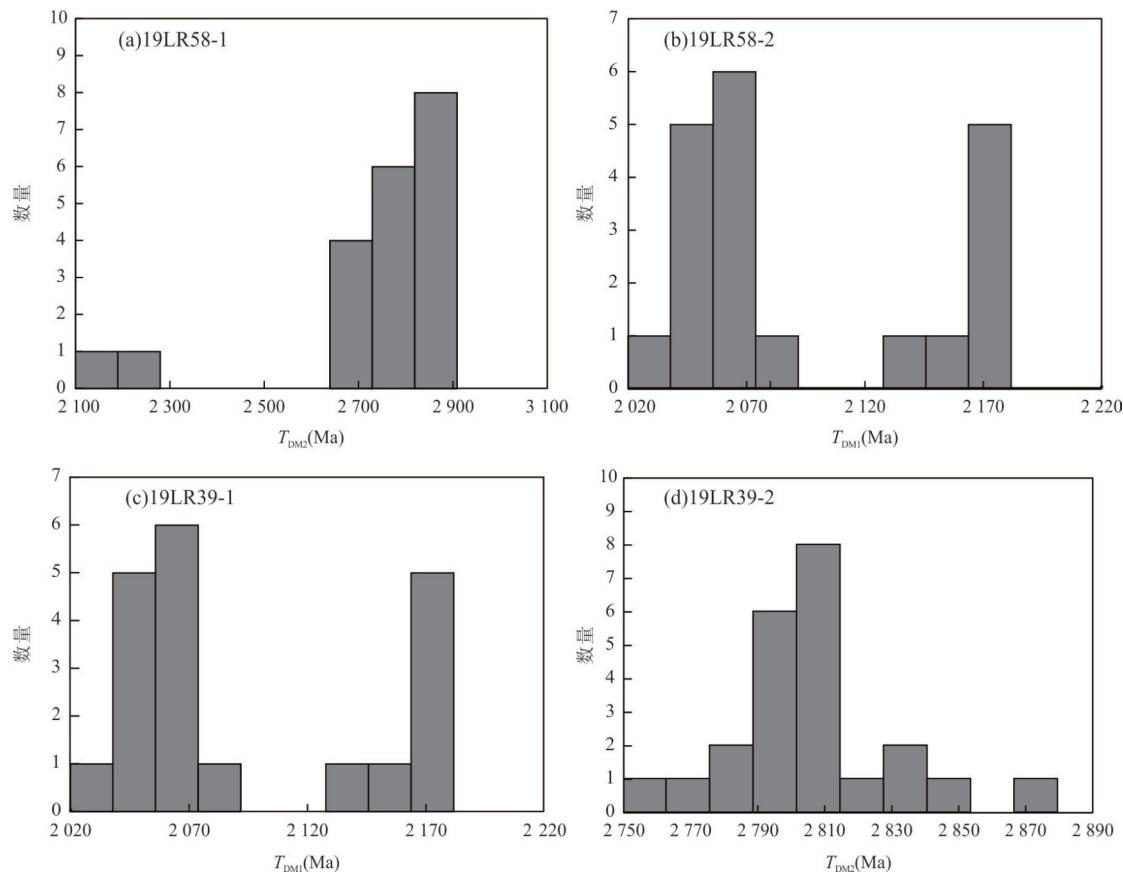


图 8 样品中锆石 Hf 模式年龄频率直方图

Fig.8 Hf model age frequency histogram of zircons for samples

a. 黑云母二长花岗岩 (19LR58-1); b. 斜长角闪岩 (19LR58-2); c. 含榴斜长角闪岩 (19LR39-1); d. 含榴花岗岩 (19LR39-2)

得到二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 2 752~2 876 Ma (图 8d).

5 讨论

5.1 岩浆起源

锆石在形成以后 Hf 的放射性没有明显的积累, 因此所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了原岩形成时其体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007). 其源区古老基底形成年龄基本可以用 Hf 的模式年龄来指示(Zheng *et al.*, 2005).

5.1.1 基性岩 苏鲁造山带主要出露三叠纪变质年龄的超高压变质岩石, 例如榴辉岩、斜长角闪岩、花岗片麻岩等(Ye *et al.*, 2000b). 近几年研究工作表明, 苏鲁造山带内也出露一些经历了古元古代变质作用的岩石, 例如苏鲁造山带麻粒岩的锆石和独居石定年均给出了一致的~1 840 Ma 变质年龄(Xu *et al.*, 2019). 本研究通过详细的锆石 CL 图像及其区域对比也证明了乳山地区斜长角闪岩(19LR58-

2) 的变质时代为 $1\,839\pm27$ Ma, 指示苏鲁造山带古元古代变质事件. 刘平华等(2020)通过对胶北地区石榴斜长角闪岩进行锆石 U-Pb 定年, 得出其中一类锆石的变质年龄变化于 $1\,906\pm54$ Ma 至 $1\,821\pm60$ Ma 之间. 前人研究表明, 扬子板块缺乏古元古代地质事件记录, 华北板块在 1.7~1.8 Ga 经历了一次伸展事件, 胶东地区荆山群和粉子山群的变质年龄为 1.7~1.8 Ga(Li *et al.*, 2012). 因此, 乳山地区斜长角闪岩(19LR58-2)的变质时代和胶北地区变质事件时代相吻合, 在属性上可能属于华北板块. 此外, 朱浩忠等(2020)通过对乳山地区含榴斜长角闪岩(19LR39-1)进行锆石 U-Pb 定年得出含榴斜长角闪岩的原岩时代为 $1\,734\pm24$ Ma, 指示着苏鲁造山带内~1 730 Ma 发生了一期基性岩浆事件. 彭澎等(2004)对华北克拉通~1 800 Ma 的镁铁质岩墙群进行了研究, 发现镁铁质岩墙群的主体发育开始于~1 780 Ma. 可能指示着苏鲁造山带与华北克拉通是同一期岩浆事件, 并且这期岩浆事件可能是哥伦比亚超大陆裂解的产物.

苏鲁造山带中的变基性岩分布比较广泛,且成因具有多样性(刘利双等, 2017). 本文进一步研究乳山地区斜长角闪岩(19LR58-2)及含榴斜长角闪岩(19LR39-1)的Hf同位素组成. 首先,斜长角闪岩(19LR58-2)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值0.5~5.1, Hf模式年龄 T_{DM1} 为2 026~2 181 Ma. 含榴斜长角闪岩(19LR39-1)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值3.7~4.4, Hf的模式年龄 T_{DM1} 值为1 990~2 030 Ma. 近些年来,研究工作者对胶辽吉带的变基性岩进行了大量的测年研究,发现这些基性岩浆侵位时间是多期次,分别为:2.06 Ga、2.11 Ga、2.12 Ga、2.14~2.16 Ga(Meng *et al.*, 2014). 两组样品的基性岩浆时代与胶辽吉带基性岩浆时代吻合. 其次,两者形成的锆石具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(接近亏损地幔)(图9),斜长角闪岩和含榴斜长角闪岩可能是2.0~2.1 Ga从亏损地幔中分异出来,可能指示古元古代新生地壳的生长和直接再造.

5.1.2 花岗岩 岩浆活动在大规模碰撞后表现剧烈,这通常是由俯冲加厚造山带的构造塌陷引起,苏鲁造山带内部花岗岩演化是多期次的,但是对于花岗岩的物质归属及起源仍存在争议. 刘福来等(2009)对苏鲁造山带黑云母花岗岩进行了准确的锆石U-Pb定年,发现3类锆石,第一类锆石的结晶年龄为790~782 Ma,第二类的结晶年龄为~219 Ma,第三类锆石的结晶年龄为~214 Ma. 丁伟(2018)通过对苏鲁造山带青云镇地区二长花岗岩的研究,表明此地区二长花岗岩的形成年龄为~126.6 Ma. 郭敬辉(2005)对北苏鲁威海地区中生代侵入岩进行了定年分析,确认该地区存有3期岩浆活动,分别为:~210 Ma、140~160 Ma、~110 Ma,并在花岗岩中发现大量700~80 Ma的继承锆石,指示这些花岗岩来源于扬子板块.

本研究通过详细的锆石CL图像、U-Pb定年及区域对比显示乳山地区黑云母二长花岗岩(19LR58-1)结晶年龄为 118.5 ± 2.7 Ma. 此外,进一步对乳山地区黑云母二长花岗岩(19LR58-1)和含榴花岗岩(19LR39-2)的Hf同位素进行了统计. 首先,黑云母二长花岗岩(19LR58-1) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有很大的负值,为-15.4~-27.7,模式年龄 T_{DM2} 值为2 163~2 905 Ma,具有较大的变化范围,因为其中有两颗锆石的 T_{DM2} 值为2 163 Ma和2 215 Ma,但大部分集中在~2 700~2 900 Ma. 2 100~2 200 Ma是胶辽吉造山带内岩浆活动最为强烈的阶段之一,路孝平等(2004)测得辽吉花岗岩的侵位年龄为~2 160 Ma,

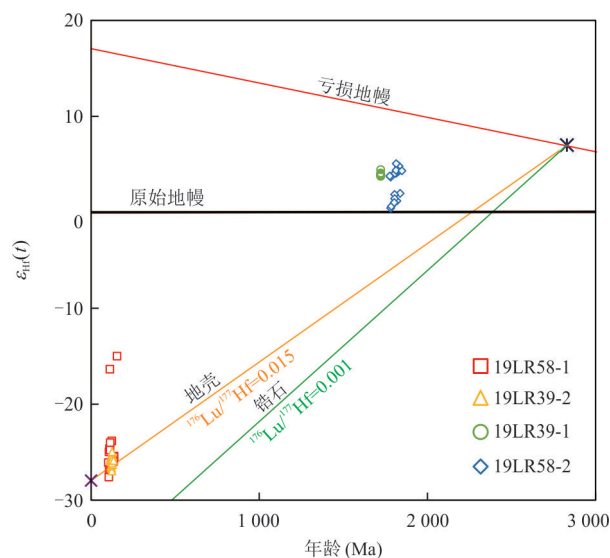


图9 Lu-Hf地壳演化图

Fig.9 The map of Lu-Hf crustal evolution

并表明该地区花岗岩是一种非造山A型花岗岩. 因此,这可能指示早白垩时期,乳山地区存有两类地壳. 也可能指示熔融过程中岩浆不充分混合或者岩浆侵位时的不均一混染作用(郑永飞等, 2007). 其次,含榴花岗岩(19LR39-2) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也具有很大负值,为-25.1~-27.1,模式年龄 T_{DM2} 值为2 752~2 876 Ma. 全球大陆地壳一次快速生长期在太古宙,在2.5~2.7 Ga时大约有80%的地壳形成(Condie *et al.*, 2009). 太古宙时期(~2.5~2.6 Ga、~2.7~2.8 Ga、~2.9~3.0 Ga、~3.3~4.0 Ga)华北克拉通也经历了多次的地壳生长过程(Zhai and Santosh, 2011),其中华北克拉通地壳的主要生长阶段是在~2.7~2.8 Ga,并在后期(~2.5 Ga)经历了再循环过程(Wan *et al.*, 2011). 本研究所得到的花岗岩的模式年龄 T_{DM2} 年龄与鲁西地区的花岗岩片麻岩时代(25~27亿年)相吻合(Wan *et al.*, 2011). 同时,杨玉伟等(2020)对辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩进行了Hf同位素分析,表明其 T_{DM2} 值大部分集中在~2 650~2 820 Ma,并得出该花岗质岩浆起源于太古宙TTG片麻岩. 此外,胶北地体玲珑花岗岩和苏鲁造山带内部的昆嵛山花岗岩,通过Hf同位素比值分析,均得出了一致的模式年龄 T_{DM2} (~2 600~2 900 Ma),指示胶北地体和苏鲁地体的花岗岩均是太古宙地壳部分熔融的产物(Zhang *et al.*, 2009). 由此可知,结合地球化学特征、壳幔体系 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 演化线(图9)与区域对比,乳山地区黑云母二长花岗岩(19LR58-1)和含榴花岗岩(19LR39-2)可能起源

于华北克拉通太古宙地壳物质重融.

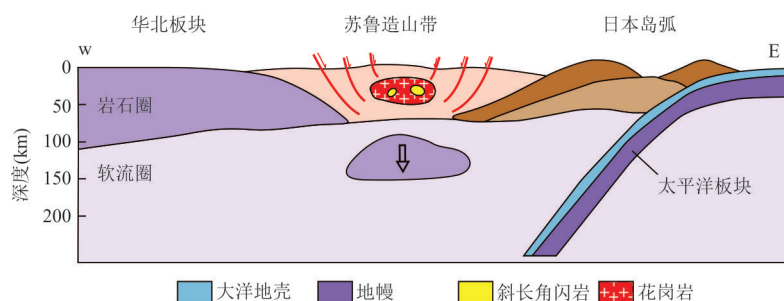
5.2 对胶东地区地壳演化的启示

俯冲增厚的陆地地壳通常在大陆板块碰撞时形成,大规模岩浆岩形成通常由俯冲加厚的造山带构造塌陷引起(Xie *et al.*, 2006). 研究表明三叠纪时,扬子板块向华北板块俯冲发生强烈的碰撞造山作用,导致了岩石圈增厚及造山带的地壳加厚(Xu *et al.*, 2006). 胶东地区具有埃达克特征花岗岩的出现可能表明它们在石榴子石稳定场的压力下形成,对应岩石圈深度为 50 km (Martin, 1999). Hou *et al.*, (2007)对胶东地区晚侏罗世玲珑花岗岩进行了 Sr-Nd 同位素组成,推测胶东地区晚侏罗世地壳厚度至少为 50 km. 这可能造成下地壳镁铁质—超镁铁质麻粒岩相转变为榴辉岩相(高山等, 1999). 岩石圈伸展运动导致的碰撞造山带构造塌陷通常会引起加厚大陆岩石圈的部分熔融(Zheng *et al.*, 2009),这能够产生具有各种成分的碰撞岩浆岩,特别是具有埃达克特征的花岗岩和一些正长花岗岩,指示苏鲁造山带在不同深度的部分熔融(Martin, 1999). 这种情况下,加厚造山地壳的部分熔融导致这些花岗岩化学成分壳内分异,并且大量提取长英质熔体会在造山带根部留下更多高密度镁铁质岩石. 目前地球物理探测表明,苏鲁造山带相对缺乏镁铁质下地壳,平均地壳厚度约 35 km (Yang *et al.*, 2002),而在侏罗纪造山地壳厚度大于 50 km. 因此,苏鲁造山带下地壳镁铁质的相对缺乏支持了胶东地区岩石圈地幔和镁铁质下地壳因中生代太平洋板块向西俯冲到欧亚大陆东缘之下的基底被侵蚀而发生拆沉作用的观点(Zhang *et al.*, 2009).

许多中生代岩浆岩在中国东部被发现,推测可能与下地壳拆沉作用有关系. 前人在胶东地区岩石圈拆沉时限做出了大量的研究(Guo *et al.*, 2006; Hou *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2012; Cai *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019),发现每个地区拆沉时限有所不同. 因此,这可能指示胶东半岛部分地区在~111~126 Ma 才开始拆沉. 其次,捕虏体(斜长角闪岩)的出现可能为岩石圈拆沉后,地幔上涌形成的新生地壳物质在短时间内携裹的产物(图 10),上涌的软流圈有助于岩石圈的拆沉减薄,促进幔源镁铁质物质底侵,并最终促进壳—幔相互作用. Yang *et al.*, (2012)在胶东地区花岗岩的研究中,发现早白垩世的花岗岩类 MgO 和 Sr/Y 含量较高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 也比晚侏罗世花岗岩类较高, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

在 -24.2~-18.6 之间,表明这可能由太平洋板块俯冲到华北克拉通之下并伴随软流圈上涌,发生岩石圈拆沉引起的. Li *et al.*, (2019)在胶东半岛通过对艾山杂岩(115~118 Ma)地球化学分析,显示出稍低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-17.9~-16.2)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-21.4~-15.3)和 $\delta^{18}\text{O}$ (6.6‰~7.9‰),指示胶东地区在~118 Ma 中岩石圈减薄阶段伴随着一个扩展过程. 并且在胶东半岛中生代三期岩浆事件(170~140 Ma、140~125 Ma、125~105 Ma)中, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -22.3~-10.8、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -29~-10,反映了部分熔融深度从 105~170 Ma 向上迁移,并在 105~125 Ma 中岩石圈减薄达到高峰(Zhao *et al.*, 2018).

拆沉作用也可以导致古老地壳熔融,形成来源于古老地壳物质的花岗岩. 本文通过对乳山地区黑云母二长花岗岩及其捕虏体(斜长角闪岩)地球化学对比研究,花岗岩的形成年龄为~111~126 Ma,而其模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 在 2.7~2.8 Ga. 研究区两个花岗岩样品 Hf 二阶段模式年龄都表示其为较老的太古宙基底部分熔融的产物,该模式年龄与鲁西地区太古宙 TTG 形成时代一致(Wan *et al.*, 2011),暗示乳山地区可能存在较厚的太古宙基底,从而减缓了拆沉作用的发生. 如果发生了拆沉,花岗岩的形成年龄(区域花岗岩形成年龄大都为 160 Ma 左右)应和源区年龄接近. 然而,乳山地区花岗岩虽然不具有拆沉作用产生岩浆岩的特点,但并不能说明拆沉还没有发生. Wang *et al.*, (2005)发现~171 Ma 时,扬子板块东南部德兴地区就发生拆沉作用. Gao *et al.*, (2004)根据辽宁西部高镁安山岩、英安岩和埃达克岩石的研究,推断~159 Ma 下地壳就已经开始拆沉,拆沉时间持续到早白垩纪. Xu *et al.*, (2006)认为郯庐断裂以西徐州—苏州地区在~131 Ma 开始拆沉. 在胶东地区,Guo *et al.*, (2006)根据苏鲁造山带埃达克质安山岩地球化学特征,推测在~114 Ma 下地壳开始拆沉. Cai *et al.* (2013)认为早白垩纪镁铁质岩脉(~117~116 Ma)是来源于富集的岩石圈地幔,其富集机制可能与扬子板块俯冲下地壳引起的交代作用有关. Hou *et al.*, (2007)通过对晚侏罗世玲珑花岗岩(~158 Ma)和早白垩世郭家岭花岗岩(~126~130 Ma)地球化学对比,证实了胶东半岛西北部下地壳在晚侏罗世经历增厚过程后又在早白垩世陷入下伏地幔,开始发生拆沉作用. 前人研究表明,这些花岗岩的形成时代与太平洋板块俯冲、后撤及岩石圈运动方向的转换有着非

图10 下地壳拆沉模式图(修改自 Li *et al.*, 2019)Fig.10 Model map of lower crust delamination(modified from Li *et al.*, 2019)

常好的耦合,为胶东地区早白垩世岩石圈拆沉减薄提供了直接证据。

此外,扬子板块与华北板块在三叠纪发生碰撞,胶东半岛东部地区为数不多的晚三叠世正长岩和镁铁质岩脉通常被认为是这种碰撞导致的造山后伸展体制(Zhao *et al.*, 2012). 在侏罗纪(140~160 Ma)时,古太平洋向西俯冲到欧亚板块之下,导致中国东部的地壳增厚和先前存在的古老地壳部分熔融(Wu *et al.*, 2005). 与此同时胶东地区形成了一些低镁埃达克质花岗岩(Hou *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2012). 早白垩期间(~120 Ma),胶东半岛受到了大规模伸展一走滑构造事件的影响,短时间内发生了大规模的岩浆活动,其中包括岩石圈和软流圈幔源基性岩(Guo *et al.*, 2004). 在此之后,所有的岩浆都来源与软流圈,岩石圈内部的岩浆活动几乎绝迹(Li *et al.*, 2014). 总体来说,胶东地区可能在晚侏罗世至早白垩世经历了快速的岩石圈减薄事件,这与区域上该时期岩石学、地球化学所显示的特征一致(Gao *et al.*, 2002, 2004).

5.3 对苏鲁造山带边界限定的启示

苏鲁造山带为三叠纪时扬子克拉通和华北克拉通发生陆-陆深俯冲碰撞形成的超高压变质带(Xu *et al.*, 2019),目前大部分学者认为苏鲁造山带是扬子克拉通向华北克拉通俯冲形成(Zheng *et al.*, 2013). 苏鲁造山带形成之后又经历了多次构造事件与岩浆事件,其形成时的面貌已经被改造:(1)三叠纪时期扬子板块与华北板块陆-陆碰撞,发生了多阶段造山过程;(2)140~160 Ma,胶东半岛受到古太平洋板块向西俯冲破坏,使三叠纪时期形成的构造发生变形. 同期,侏罗-白垩时期的岩浆活动在造山带内广泛发育,破坏了造山带内大量岩石单元;(3)~120 Ma,胶东半岛受到大规模伸展一走滑构造事件的影响,同期形成郯庐断裂与大规模变

质核杂岩群. 因此,对于造山带边界的限定,厘定造山带内部物质归属是重中之重,而不是简单的以大型断裂为边界(田忠华, 2021). 本文研究对象的数据结果前文已述,变质基性岩(样品 19LR58-2、19LR39-1)属于古元古代荆山群的物质,在属性上为华北克拉通的物质,花岗岩(样品 19LR58-1、19LR39-2)是华北克拉通太古宙古老地壳重新熔融的产物. 两组样品的物质归属都属于华北,因此,苏鲁造山带边界在南侧具有华北属性和华南属性的岩石单元之间(图2).

6 结论

通过对乳山地区花岗岩及其内部捕虏体进行野外与岩相学观察,并结合室内地球化学手段的研究,本文得出以下观点:

(1)研究区正甲沓黑云母二长花岗岩形成时代为 118.5 ± 2.7 Ma, 指示白垩纪时期对区域的岩浆作用;斜长角闪岩变质时代为 1839 ± 27 Ma, 指示古元古代(~1.8 Ga)变质事件.

(2)正甲沓黑云母二长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-15.4 \sim -27.7$, 二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)为 $2163 \sim 2905$ Ma, 大部分集中在 2800 Ma; 念头村含榴花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-25.1 \sim -27.1$, 二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)为 $2752 \sim 2876$ Ma. 指示花岗岩为华北太古宙古老地壳重新熔融的产物. 前者的捕虏体(斜长角闪岩) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.5 \sim 5.1$, 一阶段模式年龄($T_{\text{DM}1}$)为 $2026 \sim 2181$ Ma. 后者的捕虏体(含榴斜长角闪岩) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $3.7 \sim 4.4$, 一阶段模式年龄($T_{\text{DM}1}$)为 $1990 \sim 2030$ Ma. 结合 U-Pb 年龄数据, 这指示乳山地区古元古代基性岩浆事件, 此外, 变质基性岩也具有华北板块的亲缘性.

(3)捕虏体(变基性岩)可能为下地壳部分熔融后形成的新生地壳物质在短时间内携裹的产物. 结

合花岗岩及其捕虏体的物质归属和区域地质资料, 苏鲁造山带的地壳缝合带应在研究区域南侧具有华北属性和华南属性的岩石单元之间。

附表见本刊官网(www.earth-science.net)。

References

- Cai, Y. C., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2013. Evolution of the Lithospheric Mantle beneath the Southeastern North China Craton: Constraints from Mafic Dikes in the Jiaobei Terrain. *Gondwana Research*, 24(2): 601–621. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.013>
- Cheng, Y.Q., Chang, Y.F., Xu, H.F., et al., 2001. 1 to 500 000 Geological Map and Sepcification of the Dabie-Sulu Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing, 1–32(in Chinese).
- Condie, K. C., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2009. Granitoid Events in Space and Time: Constraints from Igneous and Detrital Zircon Age Spectra. *Gondwana Research*, 15(3/4): 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.06.001>
- Ding, W., Wang, T., Li, Y.B. et al., 2018. Petrogenesis of the Linshu Monzonitic Granite in the Southern Part of the Sulu Orogen. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 344–354.(in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Gao, S., Zhang, B.R., Jin Z.M. et al., 1999. Delamination of the Lower Crust in the Qinling Dabie Orogenic Belt. *Chinese Science (Part D: Earth Science)*, (6):532–541(in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os Evidence for Replacement of Ancient Mantle Lithosphere beneath the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3/4): 307–322. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(2\)00489-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(2)00489-2)
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2004. Origin of Early Cretaceous Calc-Alkaline Lamprophyres from the Sulu Orogen in Eastern China: Implications for Enrichment Processes beneath Continental Collisional Belt. *Lithos*, 78(3): 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.05.001>
- Guo, F., Fan, W. M., Li, C. W., 2006. Geochemistry of Late Mesozoic Adakites from the Sulu Belt, Eastern China: Magma Genesis and Implications for Crustal Recycling beneath Continental Collisional Orogens. *Geological Magazine*, 143(1): 1–13. <https://doi.org/10.1017/s0016756805001214>
- Guo, J.H., Chen, F.K., Zhang, X.M., et al., 2005. Evolution of Syncollision-Post-Collisinal Magmatism from North Sulu UHP Belt, Eastern China: Zircon U-Pb Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1281–130 (in Chinese with English abstract).
- Hou, M. L., Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., et al., 2007. Contrasting Origins of Late Mesozoic Adakitic Granitoids from the Northwestern Jiaodong Peninsula, East China: Implications for Crustal Thickening to Delamination. *Geological Magazine*, 144(4): 619–631. <https://doi.org/10.1017/s0016756807003494>
- Ishizaka, K., Hirajima, T., Zheng, X., 2010. Rb-Sr Dating for the Jiaodong Gneiss of the Su-Lu Ultra-High Pressure Province, Eastern China. *The Island Arc*, 3(3): 232–241. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1994.tb00109.x>
- Li, S. Z., Zhao, G. C., Santosh, M., et al., 2012. Paleoproterozoic Structural Evolution of the Southern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 200–203: 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.007>
- Li, H. Y., Huang, X. L., Guo, H., 2014. Geochemistry of Cenozoic Basalts from the Bohai Bay Basin: Implications for a Heterogeneous Mantle Source and Lithospheric Evolution beneath the Eastern North China Craton. *Lithos*, 196–197: 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.026>
- Li, X. H., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2019. Linking Lithospheric Thinning and Magmatic Evolution of Late Jurassic to Early Cretaceous Granitoids in the Jiaobei Terrane, Southeastern North China Craton. *Lithos*, 324–325: 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.11.022>
- Liu, F. L., Liu, L. S., Liu, P. H., et al., 2017. A Relic Slice of Archean-Early Paleoproterozoic Basement of Jiaobei Terrane Identified within the Sulu UHP Belt: Evidence from Protolith and Metamorphic Ages from Meta-Mafic Rocks, TTG-Granitic Gneisses, and Metasedimentary Rocks in the Haiyangsuo Region. *Precambrian Research*, 303: 117–152. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.014>
- Liu, F.L., Xue, H.M., Liu, P.H., 2009. Partial Melting Time of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Sulu UHP Terrane: Constrained by Zircon U-Pb Ages, Trace Elements and Lu-Hf Isotope Compositions of Biotite-Bearing Granite. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1039–1055.(in

- Chinese with English abstract).
- Liu, L.S., Liu, F.L., Wang, W., 2017. The Polygenetic Meta-Mafic Rocks from the Northeast of Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt: Insight from Petrology, Isotopic Chronology and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2899—2924(in Chinese with English abstract).
- Liu, L.S., Liu, F.L., Ji, L., et al., 2018. The Polygenetic Meta-Granitic Rocks and Their Geological Significance, within the North Sulu Ultrahigh-Pressure Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1557—1580(in Chinese with English abstract).
- Liu, P.H., Tian, Z.H., Wen, F., et al., 2020. Multiple High-Grade Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane, North China Craton: New Evidences from Zircon U-Pb Ages and Trace Elements Compositions of Garnet Amphibole and Granitic Leucosomes. *Earth Science*, 45(9): 3196—3216.(in Chinese with English abstract).
- Lu, X.P., Wu, F.Y., Zhang, Y.B., et al., 2004. Emplacement Age and Tectonic Setting of the Paleoproterozoic Liaoji Granites in Tonghua Area, Southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381—392. (in Chinese with English abstract).
- Ma, X.H., Zeng, Q.W., Tao, S.Y., et al., 2021. Mineralogical Characteristics and In-Situ Sulfur Isotopic Analysis of Gold-Bearing Sulfides from the Qilishan Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Earth Science*, 32(1): 116—126. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1370-2>
- Martin, H., 1999. Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archaean Granitoids. *Lithos*, 46(3): 411—429. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- Meng, E., Liu, F.L., Liu, P.H., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Paleoproterozoic Meta-Mafic Rocks from Central Liaodong Peninsula, Northeast China: Evidence from Zircon U-Pb Dating and in Situ Lu-Hf Isotopes, and Whole-Rock Geochemistry. *Precambrian Research*, 247: 92—109. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.017>
- Paton, C., Woodhead, J. D., Hellstrom, J. C., et al., 2010. Improved Laser Ablation U-Pb Zircon Geochronology through Robust Downhole Fractionation Correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06. <https://doi.org/10.1029/2009gc002618>
- Peng, P., Zhai, M.G., Zhang, H.F., et al., 2004. Geochemistry and Geological Significance of the 1.8 Ga Mafic Dyke Swarms in the North China Craton: an Example from the Juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 439—456(in Chinese with English abstract).
- Sai, S.X., Zhao T.M., Wang, Z.L., et al., 2016. Petrogenesis of Linglong Biotite Granite: Constraints from Mineralogical Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2477—2493 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Z.H., 2021. Structural Complexity of the Suture Zone: A Case Study from the Multi-Phase Modified Suture Zone in the Sulu Area. *Chinese Journal of Geology*. 56(2): 635—666.(in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Wang, S. J., et al., 2011. ~2.7Ga Juvenile Crust Formation in the North China Craton (Taishan - Xintai Area, Western Shandong Province): Further Evidence of an Understated Event from U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Zircon. *Precambrian Research*, 186(1/2/3/4): 169—180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.01.015>
- Wang, J.J., 2000. Discussion on Genesis of Linglong Granite. *Cluster of Geological Prospecting Theories*, 15(4): 289—289(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2005. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119—144. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
- Wang S.J., Wan Y.S., Guo R.P., et al., 2011. SHRIMP Zircon Dating of Linglong Type (Superunit) Granite in Eastern Shandong Province. *Land and Resources in Shandong Province*, 27(4):1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Wilde, S. A., et al., 2005. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Jurassic Granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1/2): 127—156. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.010>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F. et al., 2007. Lu-Hf Isotope Systematics and Their Application in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Z., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2006. Mineral Isotope Evidence for the Contemporaneous Process of Mesozoic Granite Emplacement and Gneiss Metamorphism in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(3): 214—235. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.028>
- Xu, H. J., Lei, H. C., Xiong, Z. W., et al., 2019. Paleoproterozoic Ultrahigh-Temperature Granulite-Facies Metamorphism in the Sulu Orogen, Eastern China: Evidence from Zircon and Monazite in the Pelitic Granulite. *Precambrian Research*, 333: 105430. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105430>
- Xu, S. T., Su, W., Liu, Y. C., et al., 1992. Diamond from the

- Dabie Shan Metamorphic Rocks and its Implication for Tectonic Setting. *Science*, 256(5053): 80–82. <https://doi.org/10.1126/science.256.5053.80>
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006. Mesozoic Adakitic Rocks from the Xuzhou-Suzhou Area, Eastern China: Evidence for Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.03.010>
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-Tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9/10): 747–757. [https://doi.org/10.1016/s1464-1895\(1\)00124-7](https://doi.org/10.1016/s1464-1895(1)00124-7)
- Yang, K. F., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2012. Reactivation of the Archean Lower Crust: Implications for Zircon Geochronology, Elemental and Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry of Late Mesozoic Granitoids from Northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*, 146–147: 112–127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.035>
- Yang, W. C., 2002. Geophysical Profiling across the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Eastern China. *Tectonophysics*, 354(3/4): 277–288. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(2\)00386-4](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(2)00386-4)
- Yang, Y. W., Yu, C., Wang, G. W., et al., 2020. Chronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotopes of the Paleoproterozoic Alkali Feldspar Granite from the Heigou Area in the Eastern Liaoning Province: Constraints on the Tectonic Evolution of the Liao-Ji Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2212–2226 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Cong, B. L., Ye, D. N., 2000a. The Possible Subduction of Continental Material to Depths Greater than 200 km. *Nature*, 407(6805): 734–736. <https://doi.org/10.1038/35037566>
- Ye, K., Yao, Y. P., Katayama, I., et al., 2000b. Large Areal Extent of Ultrahigh-Pressure Metamorphism in the Sulu Ultrahigh-Pressure Terrane of East China: New Implications from Coesite and Omphacite Inclusions in Zircon of Granitic Gneiss. *Lithos*, 52(1/2/3/4): 157–164. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00089-4](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00089-4)
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhang, H. F., Zhai, M. G., He, Z. F., et al., 2004. Petrogenesis and Implication of the Sodium-Rich Granites from the Kunyushan Complex, Eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 369–380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2009. Geochemical Evidence for Interaction between Oceanic Crust and Lithospheric Mantle in the Origin of Cenozoic Continental Basalts in East-Central China. *Lithos*, 110(1/2/3/4): 305–326. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.006>
- Zhao, R., Wang, Q. F., Deng, J., et al., 2018. Late Mesozoic Magmatism and Sedimentation in the Jiaodong Peninsula: New Constraints on Lithospheric Thinning of the North China Craton. *Lithos*, 322: 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.10.020>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2009. Remelting of Subducted Continental Lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1295–1318. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0134-8>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2008. Zircon U–Pb Ages, Hf and O Isotopes Constrain the Crustal Architecture of the Ultrahigh-Pressure Dabie Orogen in China. *Chemical Geology*, 253(3/4): 222–242. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.011>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Zhang, J., et al., 2012. Syn-Exhumation Magmatism during Continental Collision: Evidence from Alkaline Intrusives of Triassic Age in the Sulu Orogen. *Chemical Geology*, 328: 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.11.002>
- Zhao, Z. F., Liu, Z. B., Chen, Q., 2017. Melting of Subducted Continental Crust: Geochemical Evidence from Mesozoic Granitoids in the Dabie-Sulu Orogenic Belt, East-Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.03.038>
- Zheng, Y. F., 2008. A Perspective View on Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Continental Collision in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science Bulletin*, 53(20): 3081–3104. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0388-0>
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., Zhang, S. B., et al., 2007. Zircon Lu-Hf Isotope Study of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Granitic Gneiss in the Dabie Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 317–330 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., Zhao, Z. F., 2009. Chemical Geodynamics of Continental Subduction-Zone Metamorphism: Insights from Studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Core Samples. *Tectonophysics*, 475(2): 327–358. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.014>
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U

- Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale ^{18}O Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145—4165. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.007>
- Zheng, Y., Wu, Y., Zhao, Z., et al., 2005. Metamorphic Effect on Zircon Lu-Hf and U-Pb Isotope Systems in Ultrahigh-Pressure Eclogite-Facies Metagranite and Metabasite. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 378—400. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.025>
- Zheng, Y. F., Xiao, W. J., Zhao, G. C., 2013. Introduction to Tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189—1206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.10.001>
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(1/2): 135—158. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.005>
- Zhu, H. Z., Tian, Z. H., Wang, Z. L., et al., 2020. (Garnet Bearing) Plagioclase Amphibolite *P-T* Evolution Path and Its Geological Implications in Rushan Region, Sulu Tectonic Complex: Constraints by Petrology, Mineral Chemistry and Phase Equilibria Modeling. *Earth Science*, 45(9): 3420—3435(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Zhang, H. F., Zhu, G., et al., 2017. Craton Destruction and Related Resources. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 1—25.
- 程裕淇, 常印佛, 徐慧芬, 等. 2001. 大别—苏鲁造山带 1:500 000 地质图和说明书. 北京:地质出版社. 1—32.
- 丁伟, 王涛, 李彦波, 等. 2018. 苏鲁造山带南缘临沭县长花岗岩成因. 矿物岩石地球化学通报, 37(2): 344—354.
- 高山, 张本仁, 金振民, 等. 1999. 秦岭—大别造山带下地壳拆沉作用. 中国科学(D辑:地球科学), (6):532—541.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程:锆石 U-Pb 年代学. 岩石学报, (4): 1281—1301.
- 刘利双, 刘福来, 王伟, 2017. 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. 岩石学报, 33(9): 2899—2924.
- 刘利双, 刘福来, 冀磊, 等. 2018. 北苏鲁超高压变质带内多成因类型的变花岗岩岩石及其地质意义. 岩石学报, 34(6): 1557—1580
- 刘福来, 薛怀民, 刘平华, 2009. 苏鲁超高压岩石部分熔融时间的准确限定:来自含黑云母花岗岩中锆石 U-Pb 定年、REE 和 Lu-Hf 同位素的证据. 岩石学报, 25(5): 1039—1055.
- 刘平华, 田忠华, 文飞, 等. 2020. 华北克拉通胶北地体多期高级变质事件:来自石榴斜长角闪岩与花岗质浅色体锆石 U-Pb 定年与稀土元素的新证据. 地球科学, 45(9): 3196—3216.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. 岩石学报, (3): 381—392.
- 彭澎, 翟明国, 张华锋, 等. 2004. 华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义:以晋冀蒙交界地区为例. 岩石学报, (3): 439—456.
- 赛盛勋, 赵天明, 王中亮, 等. 2016. 玲珑黑云母花岗岩成因:矿物学特征约束. 岩石学报, 32(8): 2477—2493.
- 田忠华, 2021. 缝合带结构的复杂性:以苏鲁地区多期改造缝合带为例. 地质科学, 56(2): 635—666.
- 王吉琰, 2000. 玲珑花岗岩成因探讨. 地质找矿论丛, 15(4): 289—289.
- 王世进, 万渝生, 郭瑞朋, 等. 2011. 鲁东地区玲珑型(超单元)花岗岩的锆石 SHRIMP 定年. 山东国土资源, 27(4):1—7.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 杨玉伟, 余超, 王广伟, 等. 2020. 辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩年代学、地球化学、Hf 同位素特征及其对辽吉造山带构造演化的制约. 地质学报, 94(8): 2212—2226.
- 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报, (3): 369—380.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. 岩石学报, (2): 317—330.
- 朱浩忠, 田忠华, 王泽利, 等. 2020. 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. 地球科学, 45(9): 3420—3435.

附中文参考文献