地球科学
*Earth Science*
ISSN 1000-2383,CN 42-1874/P

# 《地球科学》网络首发论文

| | |
|---|---|
| 题目： | 山东青岛地区灵山岛早白垩世碎屑岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及其大地构造意义 |
| 作者： | 孟元库，李日辉，徐扬，侯方辉 |
| 收稿日期： | 2017-08-03 |
| 网络首发日期： | 2018-06-21 |
| 引用格式： | 孟元库，李日辉，徐扬，侯方辉．山东青岛地区灵山岛早白垩世碎屑岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及其大地构造意义．地球科学. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180620.1008.026.html |

pdoi: 10.3799/dqkx.2018.207

# 山东青岛地区灵山岛早白垩世碎屑岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及其大地构造意义

孟元库[1,2,3]，李日辉[1,2*]，徐扬[1,2]，侯方辉[1,2]

1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室，中国地质调查局青岛海洋地质研究所，山东青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室，山东青岛 266061
3. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037

摘要：苏鲁造山带东缘的灵山岛上发育有早白垩世碎屑岩，对其沉积的精确时代、成因机制和大地构造环境仍然存在着广泛的争议。本文利用 LA-ICP-MS 的方法对灵山岛上两套碎屑岩进行了锆石 U-Pb 测年，并对特征年龄谱中的代表性碎屑锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析，旨在探讨其沉积物质源区，进而为早白垩世时苏鲁造山带东缘地区的大地构造背景提供制约。（1）碎屑锆石 U-Pb 测年结果显示，莱阳群法家茔组和青山群八亩地组下部的碎屑岩沉积时代为 127±3 Ma 和 128±4 Ma，表明两套碎屑岩都是早白垩世中晚期的沉积产物；（2）灵山岛上两套碎屑岩具有完全相似的年龄谱以及锆石 Hf 同位素组成，表明发育软沉积变形的细粒粉砂岩、泥岩和上覆的含砾粗砂岩具有相似的物源，并且源区组成较为单一，主要以亲华北的胶北地体为主，其次的物源区为苏鲁造山带；（3）胶莱盆地下白垩统莱阳群和灵山岛下白垩统莱阳群的碎屑锆石年龄谱对比表明，灵山岛上的莱阳群碎屑岩明显不同于胶莱盆地的莱阳群，暗示在早白垩世时，灵山岛上的两套碎屑岩可能受到区域断裂的控制，沉积于一个相对独立的盆地。综合结果表明，灵山岛地区莱阳群法家茔组可能沉积于断陷湖盆的萎缩期，早期的沉积以湖相为主，晚期主要以河流相为主，在此期间遭受到了强烈的火山地震作用，诱发了下部的湖相的砂泥岩发生大规模的滑塌和软沉积变形。

关键词：碎屑锆石 U-Pb 定年；早白垩世；沉积物源；苏鲁造山带；灵山岛.

中图分类号：P548　　收稿日期：2017-08-03

**基金项目：**中国地质调查局工作项目（DD20160139, DD20160137）和中国博士后面上项目联合资助（2017M612220）.

**作者简介：**孟元库（1986—），男，博士后，主要从事构造地质学及造山带构造研究. E-mail: ykmeng@foxmail.com

***通讯作者：**李日辉. E-mail: rihuiliqd@qq.com

# U-Pb-Hf isotopes and tectonic significance of Early Cretaceous Detrital zircons in Lingshan Island, Qingdao of Shandong Province

MENG Yuanku[1,2,3], LI RiHui[1,2*], XU Yang[1,2], HOU Fanghui[1,2]

1. *Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao of Shandong* 266071;
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao* 266061;
3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037

**Abstract**: The Early Cretaceous clastic rocks were deposited in Lingshan Island, the eastern segment of the Sulu orogenic belt. However, the accurate depositional age, formation mechanism and tectonic setting of the Early Cretaceous clastic rocks are still ambiguous. In this study, we conducted systematically detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for two sets of clastic rocks in Lingshan Island, and carried out Lu-Hf isotopic analyses for the representative detrital zircons in order to better understand depositional provenance and provide new tectonic constraints for the eastern region of the Sulu orogenic belt during Early Cretaceous. (1) The detrital zircon U-Pb analyses demonstrate that the Fajiaying Formation and the clastic rocks from the bottom of the Bamudi Formation were deposited in the late periods of Early Cretaceous, showing the synchronous depositional ages within the uncertainties, 127±3 Ma and 128±4 Ma, respectively. (2) Moreover, two sets of clastic rocks have the same age spectra and similar Hf isotopic compositions, indicating that the sandstone or mudstone characterized by soft sedimentary deformations and pebbly sandstone have the similar sedimentary provenance, which was very single and mainly derived from the Jiaobei terrane akin to the north China craton attributes. (3) Comparison with the Jiaolai basin, the detrital zircons of the Laiyang Group in Lingshan Island show different age spectra. We argue that the sedimentary rocks from Lingshan Island might be deposited in a solo basin controlled by the fault different from the Jiaolai basin during the Early Cretaceous. Integrated with previous studies, the Fajiaying Formation of the Laiyang Group in Lingshan Island was potentially formed at the end of evolution of a lacustrine faulted-basin, and subsequently deposited a set of fluvial sediments characterized by pebbly sandstones at the top of the lacustrine sediments. Later on, the no diagenetic sediments suffered from the strong volcanic earthquake, resulting in the soft sedimentary deformations and slump structures.

**Keywords:** detrital zircons U-Pb dating; the Early Cretaceous; sedimentary provenance; the Sulu orogenic belt; Lingshan Island.

## 0 引言

大别-苏鲁造山带是华南板块和华北板块在三叠纪时陆陆碰撞的产物，是目前世界上出露规模最大的高压-超高压变质带（Xu et al., 1992; Liou et al., 1995; Yea et al., 2000; Zheng et al., 2003; Liu et al., 2004; Zhou et al., 2008; Leech and Webb, 2013; Liu et al., 2017）。由于郯庐断裂带的左行走滑，大别-苏鲁造山带被分割为两部分，即西侧的大别造山带和东延的苏鲁造山带（Yin and Nie, 1993; Xu and Zhu, 1994; Zhu et al., 2005; 朱光等，2005；周建波等，2016；Liu et al., 2017）。前人对苏鲁造山带的研究主要集中于超高压岩石和后碰撞火成岩的年代学、矿物学、岩石学和地球化学研究，而对苏鲁造山带中零星分布的白垩纪碎屑岩的研究程度相对较低，笼统地将其归为早白垩世莱阳群或青山群（山东省地质矿产局，1991；宋明春和王沛成，2003；吕洪波等，2011；李守军等，2017）。

在苏鲁造山带中，五莲-青岛-烟台断裂（WQYF）以东的中生代沉积岩系通常被认为是胶莱盆地陆相地层在盆地边缘的出露（山东地质矿产局，1991；宋明春和王沛成，2003；吴智平等，2004；李守军等，2017）。此后，对于该套地层的属性以及沉积时代一直沿袭着区调资料（山东地质矿产局，1991；宋明春和王沛成，2003），直到十余年以后，不同的专家学者从新的角度对五莲-青岛-烟台断裂以东的白垩纪沉积岩系的成因提出了新的认识（付永涛和虞子冶，2010；吕洪波等，2011；侯方辉等，2012；钟建华，2012；张海春等，2013；Shao et al., 2014; 孙建伟等，2014；Wang et al., 2014, 2015, 2016; 周瑶琪等，2015；Yang et al., 2016; 葛毓柱和钟建华，2017；张振凯等，2017；Zhou et al., 2017）。吕洪波等（2011）首次在苏鲁造山带东缘的灵山岛地区识别出半深海-深海浊积岩，认为早白垩世时苏鲁造山带东侧仍然存在古特提斯域的残余洋盆。付永涛和虞子冶（2010）和孙建伟等（2014）对青岛崂山八仙墩碎屑岩开展了野外调查，认为八仙墩碎屑岩发育有典型的鲍马序列，并且结合碎屑岩地球化学特征，强调该套碎屑岩为典型的半深海-深海浊积岩；在形成时代上，付永涛和虞子冶（2010）认为该套碎屑岩形成于奥陶纪的扬子被动陆缘，而孙建伟等（2014）强调其可能形成于侏罗纪。Wang et al. (2014, 2016) 对八仙墩和灵山岛的碎屑岩进行对比后认为在早白垩世

时山东半岛东缘地区存在一个海相盆地，八仙墩和灵山岛碎屑岩均形成于同一沉积盆地，在沉积环境和成因机制上明显不同于胶莱盆地早白垩世的陆相沉积物，但对海盆的成因机制提出了不同的看法。在吕洪波等（2011，2012，2013）认识的基础之上，张海春等（2013）认为这套早白垩世海相浊积岩仅见于灵山岛，无法与其他区域进行对比，为此建议建立一个新的岩石地层单位—灵山岛组。然而，钟建华等（2016）和李守军等（2017）对此提出了异议，强调“灵山岛组”是以三角洲相为主体的陆相浅水沉积，而非半深海-深海沉积。周瑶琪等（2015）则认为早白垩世苏鲁造山带东侧地区为典型的裂陷海盆，呈现出凹隆相隔的构造格局，与胶莱盆地具有很好的对比性，并强调五莲-青岛断裂是胶莱盆地和裂陷海盆的分界线。综上所述，苏鲁造山带东缘地区早白垩世时的大地构造环境仍然存在着激烈的争论，苏鲁造山带中零星分布的沉积岩系的时代、物源属性也缺乏系统性和针对性的研究。

碎屑锆石 U-Pb 年龄谱中年龄最小的锆石能精确的限定沉积地层的下限时代（一般沉积时代小于碎屑锆石的最小 U-Pb 年龄），其特征年龄谱和 Hf 同位素组成在物源示踪和大地构造亲缘性判别方面具有独特的优势，因此在沉积大地构造及造山带构造研究中得到广泛的应用，并取得了重要的科研成果（Grimmer et al., 2003; Weislogel et al., 2006; Xie et al., 2012; 周建波等，2016）。本文在前人研究的基础之上（Wang et al., 2014），补充了新的碎屑锆石 U-Pb-Hf 数据和火成岩（流纹岩和安山岩）的年龄数据，精确限定了灵山岛上两套碎屑岩的沉积时代，据此探讨了灵山岛上碎屑岩的沉积物源特征、沉积环境及其大地构造意义。

## 1 区域地质背景及样品描述

苏鲁造山带是秦岭-大别造山带的东延部分，宽约 180 公里，长约 750 公里，在大地构造位置上，西侧以左行走滑的郯庐断裂带（TLF）为界，北侧以五莲-青岛-烟台断裂（WQYF）为界，南侧边界为嘉山-响水断裂（JXF），整体呈 NNE-SSW 向展布（Xu et al., 2006; Zheng et al., 2003, 2005; 朱光等，2005；Zhou et al., 2008; Xu et al., 2016）（图 1a）。苏鲁造山带又称苏鲁超高压变质带，主要由北部的超高压变质带（UHP）和南部的高压变质带（HP）组成（Liu et al., 2004; Xu et al., 2006; 许志琴等，2006；Zheng, 2012）。高压和超高压变质带主要以角闪岩相退变质作用为主，它们之间以沭阳-锦屏缝合带为界（SJSZ）（Liu et al.,

2017）。

苏鲁造山带出露岩性主要以花岗质片麻岩和中生代火成岩为主，其次分布有少量的榴辉岩、大理岩、斜长角闪岩、超镁铁岩和古-中元古代变沉积岩，它们多以透镜体或者包裹体的形式分布在花岗质片麻岩中（Xu et al., 2006; Zheng et al., 2003, 2005; Ernst et al., 2007; Liu et al., 2017）。前人对超高压岩石、片麻岩和中生代火成岩进行了系统的年代学、矿物岩石学和同位素地球化学研究（Zheng et al., 2003, 2005, 2009; Liu et al., 2004; 郭敬辉等，2005；Zhou et al., 2008; Zhao and Zheng, 2009; Liu and Liou, 2011; Yang et al., 2005a, b; Xu et al., 2006; Xu et al., 2016; Zhao et al., 2016, 2017; Liu et al., 2017），研究结果表明：三叠纪时的超高压变质与华南板块向华北板块的北向俯冲有关，中生代火成岩的岩浆源区主要以深俯冲华南表壳物质的部分熔融为主。

灵山岛位于青岛市西南 40 公里的南黄海之中，总面积约 7.66 $km^2$，海拔 513.6 米，为中国北方第一高岛。灵山岛在大地构造上位于苏鲁造山带东侧（图 1a），岛上主要出露地层有早白垩世莱阳群法家茔组和早白垩世青山群八亩地组（图 1b）（山东省地质矿产局，1991；宋明春和王沛成，2003）。莱阳群法家茔组（$K_1Lf$）为一套典型的砂泥岩沉积，岩性主要为黄绿色薄层细砂岩、粉砂岩、页岩及泥岩，厚度从几十米到几百米不等（宋明春和王沛成，2003）。青山群八亩地组（$K_1Qb$）是一套典型的中基性火山岩，在区域上分布最为广泛，地层厚度大，在胶东地区的中生代沉积盆地中都可见到它的踪迹。前人对灵山岛地区开展了详细的地质调查，从下到上厘定了 5 个不同的岩性单元（图 1c），分别为镁铁质侵入体、中细粒砂泥岩、中厚层流纹岩、含砾粗砂岩及火山碎屑熔岩（图 1c）（Wang et al., 2014, 2016）。

灵山岛上，莱阳群法家茔组为典型的砂泥岩交互式沉积，可见明显的粒序层理（图 2a-b）。此外，这套厚层的沉积岩系中发育有大量的软沉积变形和滑塌构造（图 2c-g），可见典型的重荷模构造（图 2d）、砂岩透镜体（图 2e）、胀缩构造（Pinch and swell structures）（图 2f）以及小型生长断层（图 2g）等。研究区青山群八亩地组平行不整合于法家茔组之上（图 1b-c），主体由中-基性火山熔岩、火山角砾岩以及火山集块岩组成（图 2h-i），中间夹有河流相沉积（图 1c；图 2j）。

为了更好地限定灵山岛上两套碎屑岩的沉积时代，本论文除了对莱阳群法家

莹组上部及青山群八亩地组下部的碎屑岩进行样品采集外，还对岛上发育的流纹岩和八亩地组安山岩进行了采样（图 1b-c，图 3b）。显微照片显示，法家莹组的粉砂质泥岩主要由长石（~60%）、石英（~30%）和少量岩屑及黏土杂基组成（~10%）组成（图 4a-b）。镜下特征显示，长石表面绢云母化和粘土化，石英呈粒状产出，以基质的形式填充在长石周缘，整体结构为典型的杂基-颗粒支撑。来自于流纹岩上覆的含砾粗砂岩为典型的杂砂岩（图 4c），杂基含量约 60%，长石、石英以及白云母（绢云母）等矿物被杂基所包围，为典型的基质支撑结构；其中长石、石英颗粒具有明显的棱角状（图 4c），显示出低的成熟度，暗示了一个近源堆积的特征，这也与野外的观测相一致（图 3）。流纹岩层厚 5-15 米，呈岩席状产出，野外风化面为灰黄色，新鲜面为灰白色（图 3b），无明显蚀变（图 4d），斑晶矿物主要为高温石英和透长石、正长石，偶见钠长石，粒径多以 0.1mm~0.2mm 者居多，少数可达 1~2mm（图 4d）。上覆八亩地组安山岩为明显的斑状结构，斑晶主要为角闪石和斜长石，角闪石，黄褐色，半自形-自形晶，斜长石，板状，半自形-自形晶，可见聚片双晶，部分斜长石可见明显的环带结构（图 4e-f）；此外，安山岩中可见辉石斑晶。

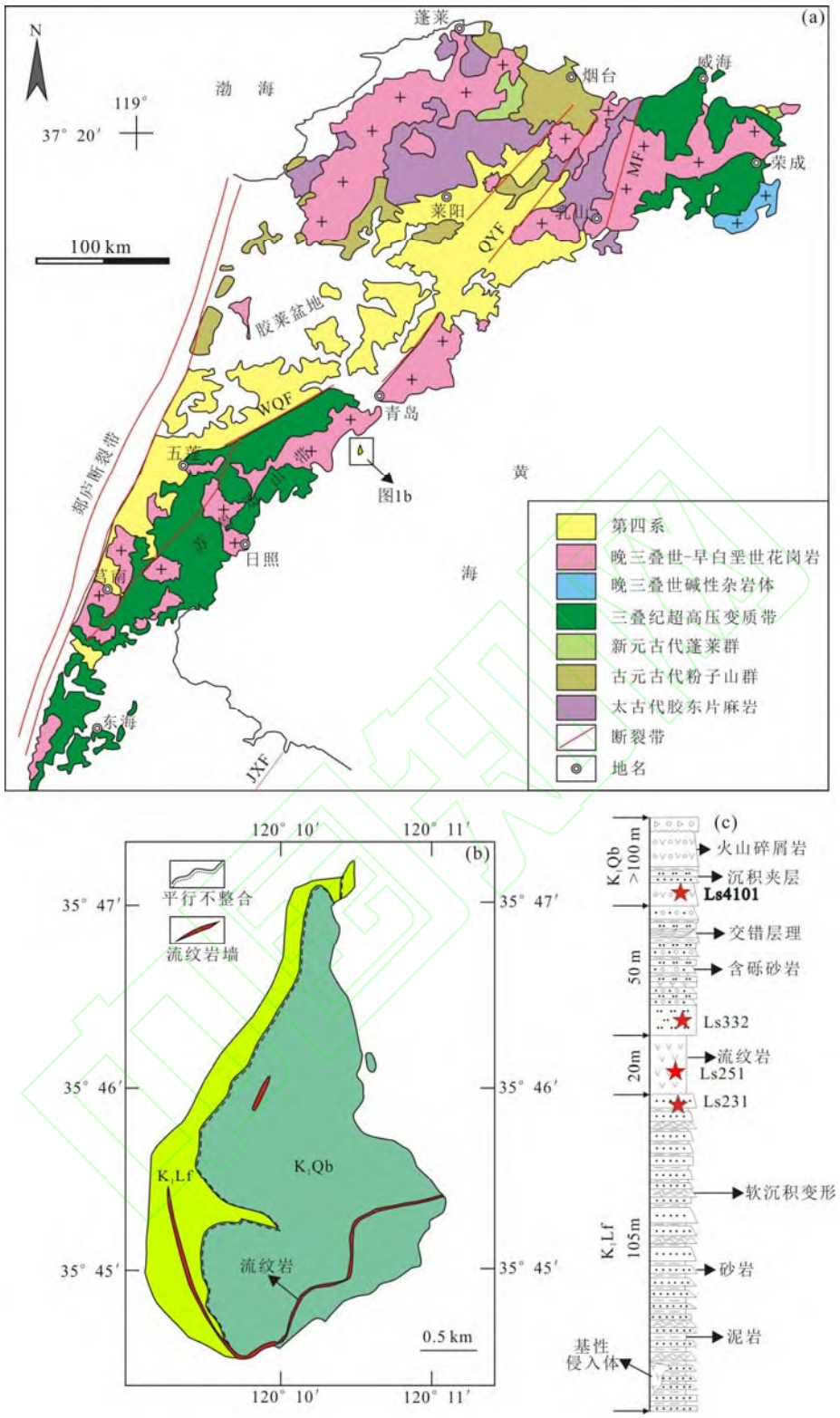


图 1 （a）苏鲁造山带及邻区大地构造简图；（b）灵山岛地区地质简图；（c）灵山岛地区岩性柱状剖面图（据 Wang et al., 2014 修改）

JXF=嘉山-响水断裂；WQYF=五莲-青岛-烟台-断裂；MF=米山断裂；$K_1Lf$=下白垩统莱阳群法家茔组；$K_1Qb$=下白垩统青山群八亩地组

Fig.1 (a) Tectonic framework of the Sulu orogenic belt and adjacent regions; (b) Geological simplified map of Lingshan Island region; (c) Columnar lithological section of Lingshan Island

region (modified from Wang et al., 2014)

JXF=Jiashan-Xiangshui fault; WQYF=Wulian-Qingdao-Yantai fault; MF=Mishan fault; $K_1Lf$ =Early Cretaceous Fajiaying Formation of Laiyang Group; $K_1Qb$ =Early Cretaceous Bamudi Formation of Qingshan Group


图 2 （a）莱阳群法家茔组野外露头；（b）莱阳群法家茔组砂泥岩互层沉积；（c）莱阳群法家茔组软沉积变形；（d）砂岩的重荷模构造；（e）砂岩透镜体；（f）胀缩构造；（g）小型生

长断层；（h）八亩地组中基性火山熔岩；（i）八亩地组火山集块岩；（j）八亩地组火山岩中的砂泥岩夹层

Fig.2 (a) Outcrops of the Fajiaying Formation of the Laiyang Group; (b) interbedded sand and mud of the Fajiaying Formation of the Laiyang Group; (c) soft seimentary deformations of the Fajiaying Formation of the Laiyang Group; (d) load cast structures of sandstone; (e) sandstone lenses; (f) pinch and swell structures; (g) small-scale growth faults; (h) the basic-intermediate volcanic lavas of the Bamudi Formation; (i) the volcanic breccia rocks of the Bamudi Formation; (j) detrital rocks interbedded in the volcanic rocks of the Bamudi Formation


图 3 灵山岛地区早白垩世碎屑岩、流纹岩和安山岩野外采样分布图

Fig.3 Field distributions and sampling locations of Early Cretaceous clastic rocks and rhyolite and andesitic rocks in Lingshan Island

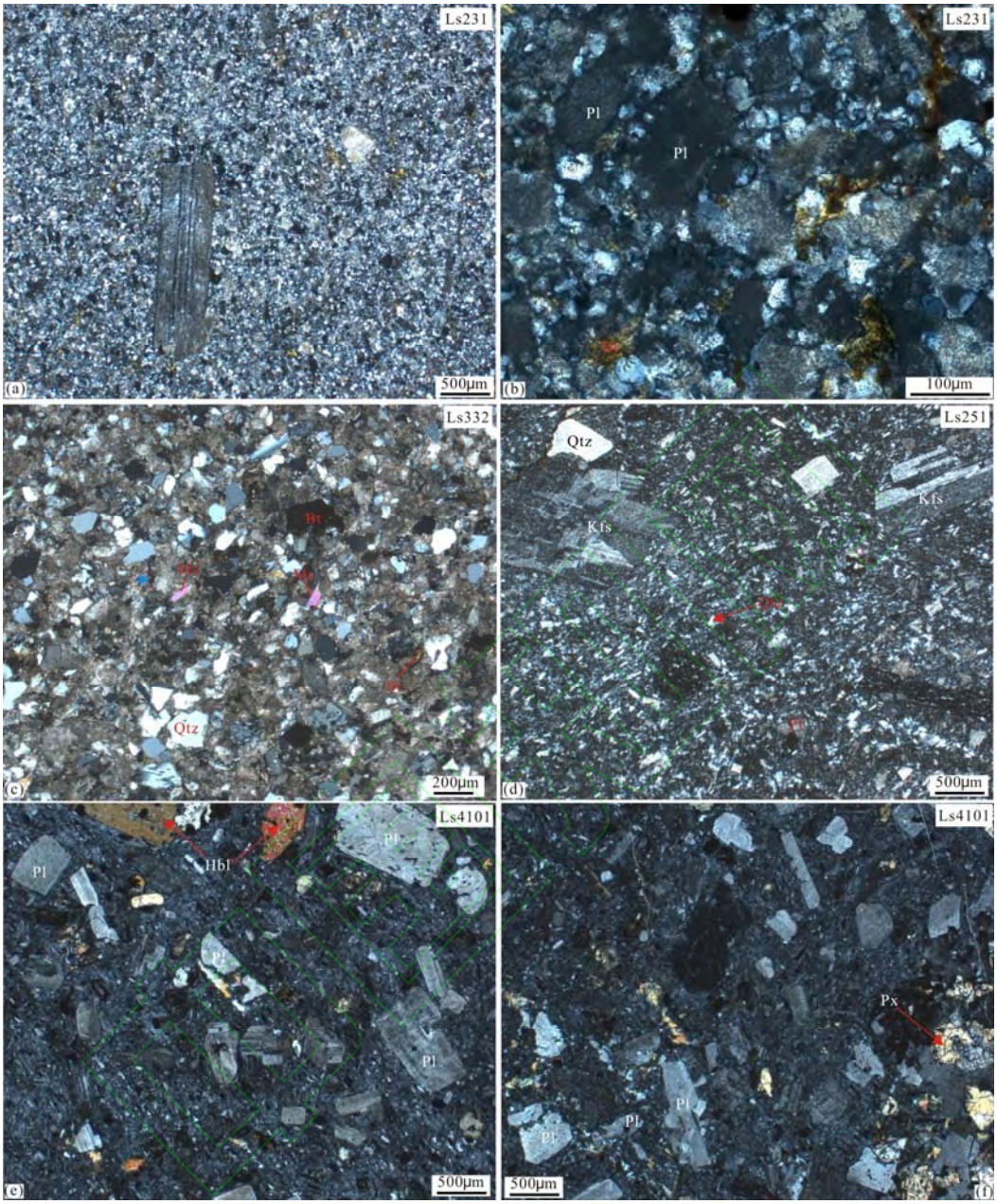


图 4 灵山岛早白垩世碎屑岩镜下显微照片（a-b 法家茔组碎屑岩；c 含砾粗砂岩；d 流纹岩；e 和 f 安山岩）

Bt=黑云母；Hbl=角闪石；Kfs=钾长石；Ms=白云母；Qtz=石英；Pl=斜长石；Px=辉石

Fig.4 Microstructural features of Early Cretaceous clastic rocks in Lingshan Island (a-b=showing detrital rocks of the Fajiaying Formation; c=showing pebbly sandstone; d=rhyolite; e and f=andesite)

Bt=biotite; Hbl=hornblende; Kfs=K-feldspar; Ms=muscovite; Qtz=quartz; Pl=plagioclase; Px=pyroxene

## 3 测试方法

锆石的分选工作在河北省地质测绘院岩矿实验中心完成。详细的操作步骤如

下：首先将所测试的岩石样品物理粉碎，按照重力和磁选的方法进行初步筛选，然后再在双目镜下进一步挑选（挑纯），确保已选的锆石完整，没有微小裂隙或破裂。下一步把已经挑选好的锆石粘在环氧树脂上，经抛光后进行透射光、反射光和阴极发光扫描电镜照相（CL, Cathode-luminescence images）。阴极发光照相在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成。最后根据 CL 图像进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。

本文锆石 U-Pb 测年工作在中国地质调查局天津地质调查中心完成。测试的仪器型号为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 以及与之配套的 Newwave U-Pb 193 激光剥蚀系统，剥蚀激光束斑直径为 35μm（图 5）（红色圆圈），剥蚀凹坑深度为 20~40μm。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成的硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标，$^{29}Si$ 作为内标元素进行校正。实验数据处理采用软件 ICPMSdataCal 9.0（Liu et al., 2008a），并对所测试的数据进行普通铅校正（Andersen, 2002）。谐和年龄（Concordant）及加权平均年龄（Weighted）计算采用 ISOPLOT (4.11 版本)软件完成，其中年龄大于 1000 Ma 采用 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 年龄，小于 1000 Ma 采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄，谐和度小于 90%的年龄不纳入年龄谱统计计算。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心完成。锆石 Lu-Hf 同位素分析在 U-Pb 定年的原位或相邻区域进行（图 5）（黄色圆圈）。本次实验中所使用的多接收电感耦合等离子体质谱仪为美国 Thermo Fisher 公司生产的 NEPTUNE，其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦标准。实验所用的激光器为美国 ESI 公司生产的 NEW WAVE193nm FX ArF 准分子激光器，波长为 193 nm，脉冲宽度小于 4 ns，束斑直径为 35μm，输出频率为 8~10 Hz，能量为 15 $J/cm^2$。详细的实验原理、分析技术和实验步骤参见吴福元等（2007）、耿建珍等（2011）。

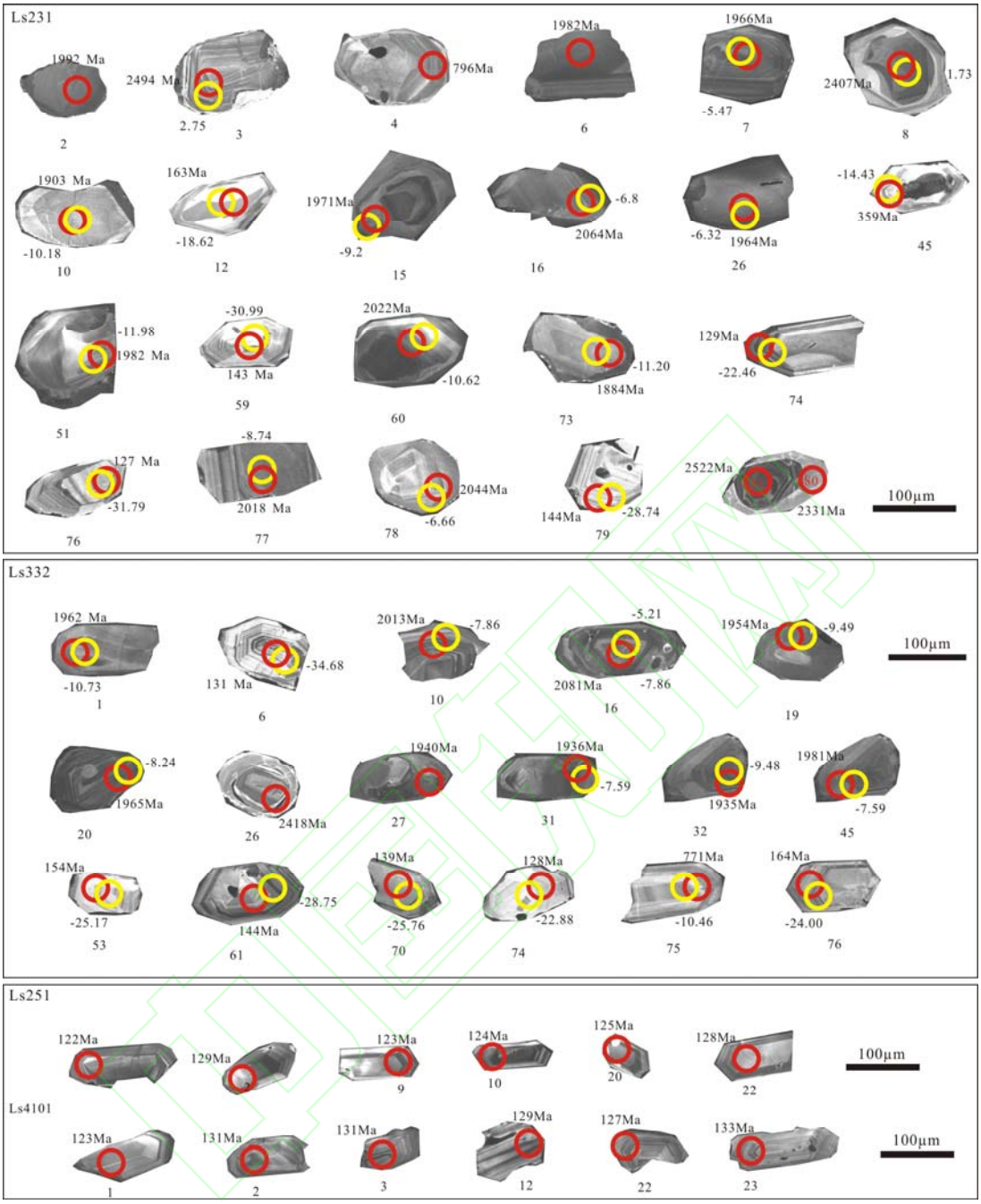


图 5 灵山岛早白垩世碎屑岩、流纹岩和安山岩代表性锆石阴极发光（CL）图像（红色圆圈为锆石 U-Pb 定年区域；黄色圆圈为锆石 Lu-Hf 分析区域）

Fig.5 Representative CL images of the early Cretaceous detrital zircons and rhyolite and andesite zircons in Lingshan Island（Red circle for zircon U-Pb dating domains; Yellow circle for zircon Lu-Hf analytical domains）

## 4. 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 定年结果

样品 Ls231 取自法家莹组的上部（图 3），岩性为典型的粉砂岩（图 4a-b）。采用 LA-ICP-MS 方法对 80 个碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素测试，扣除掉 9 个不

谐和的年龄外（不谐和度>10%），其余 71 个年龄为谐和年龄，均分布在谐和曲线附近（图 6a）。71 个年龄中，5 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 127~163 Ma，一颗锆石为 359 Ma，一颗为 796 Ma，剩余 64 颗锆石 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 年龄介于 1884~2522 Ma，时代从新太古代末期到古元古代中晚期，是本次测试中最为主要的年龄峰。大部分锆石发育有明显的震荡环带（图 5），并且具有较高的 Th/U 比值（>0.4）（图 7），暗示其为典型的岩浆成因锆石。此外，少数锆石无明显的环带结构，可见补丁状或斑杂状分带结构（图 5），并且具有较小的 Th/U 比值（图 7），表明这些锆石后期遭受过热液蚀变，为典型的变质成因锆石（Hoskin and Schaltegger, 2003）。样品 Ls231 测试结果见表 1。

样品 Ls332 位于中厚层流纹岩之上，八亩地组火山碎屑岩之下，为典型的含砾杂砂岩（图 3）。本次实验中共测试碎屑锆石 76 个，有效测点（不谐和度<10%）65 个，均分布在谐和曲线附近（图 6b）。分析结果显示，8 颗锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 128~164 Ma，时代为晚侏罗世到早白垩世，一颗锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 771 Ma，为新元古代早期，剩余 56 颗锆石年龄介于 1935~2418Ma，为古元代早中期，是本次实验中最为集中的年龄段。绝大部分锆石具有明显的岩浆韵律环带（图 5）以及高的 Th/U 比值（>0.4）（图 7），为典型的岩浆成因锆石。除此之外，个别锆石具有相对较低的 Th/U 比值和弱分带或者无分带的斑杂状结构，暗示了一个和变质或者热液有关的成因机制（Hoskin and Schaltegger, 2003）。样品 Ls332 分析结果见表 1。

样品 Ls251 来自于厚层的流纹岩席（图 3b）。锆石 CL 图像显示，被测锆石大多数为无色透明状，呈棱柱状或长柱状自形晶，长度介于 50~150μm，长宽比介于 1:1~3:1。此外，所测样品锆石的边部可见明显的岩浆韵律震荡环带（图 5b），这些特征与酸性起源的火成岩锆石 CL 的图像相一致（Corfu et al., 2003）。样品 Ls251 共获得 18 个有效测点，在 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图上，这些数据点均位于谐和曲线上或者附近（图 8a），表明样品后期没有遭受热液蚀变和没有发生明显的普通 Pb 丢失，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 124.6±1.1 Ma（MSWD=2.9），代表了流纹岩的成岩年龄。样品 Ls4101 来自于碎屑岩上覆的八亩地组火山熔岩，岩性为安山岩（图 1c）。锆石 CL 显示，被测锆石为透明-半透明状，可见明显的岩浆韵律环带，长度介于 40~120μm 之间，长宽比为 1:1~3:1。在

$^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图上，大多数测点均位于谐和曲线上或者附近（图 8b），表明所测样品没有明显的普通 Pb 丢失，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 129.2±1.5 Ma，代表了安山岩的成岩年龄。另外，样品 Ls251 和样品 Ls4101 中含有继承性锆石，其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值多为新元古代和晚三叠-二叠纪，暗示了早白垩世苏鲁造山带中酸性岩浆的源区可能来自于新元古代扬子北部陆缘物质的部分熔融，这也与前人获得认识相一致（张娟，2011；Zhao et al., 2016, 2017）。样品 Ls251 和 Ls4101 的锆石 U-Pb 测试结果见表 2。

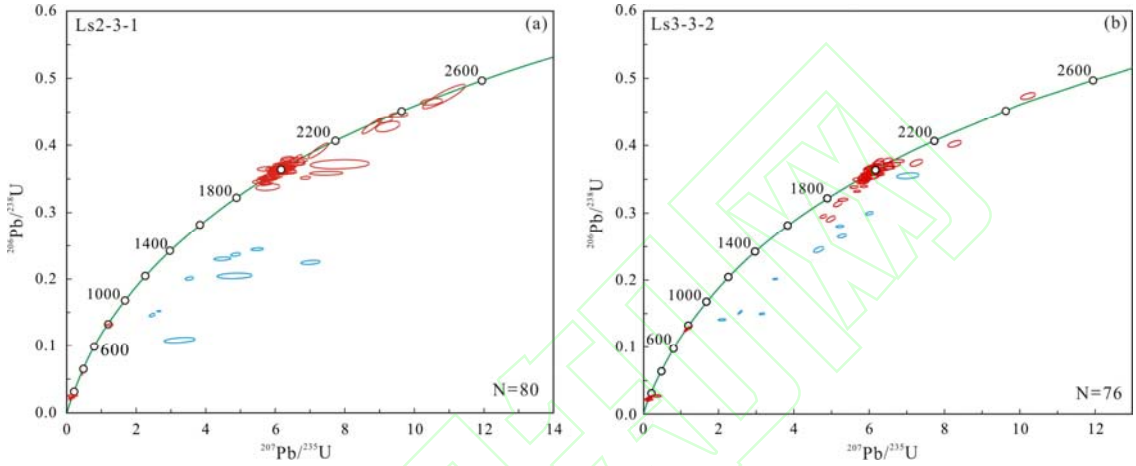


图 6 灵山岛碎屑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图（蓝色圆圈为谐和度小于 90%）；N 为锆石测试颗粒数

Fig.6 Zircon U-Pb Concordia plots for detrital zircons from sandstones in Lingshan Island (blue circles representing discordant U-Pb ages); N representing analyzed zircon grains number

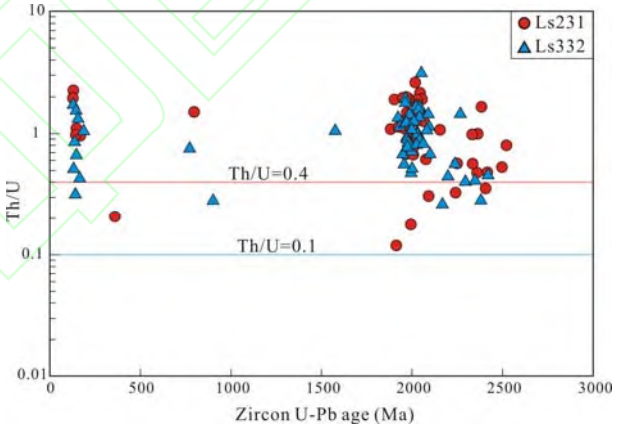


图 7 灵山岛碎屑锆石 Th/U 比值分布图

Fig.7 Detrital zircons Th/U values distributions in Lingshan Island

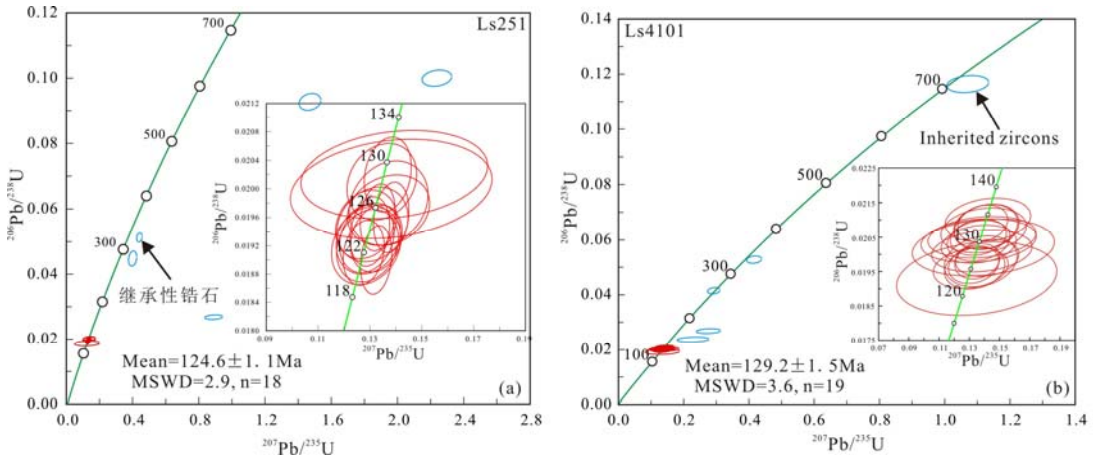


图 8 灵山岛流纹岩及安山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图（蓝色圆圈代表继承性锆石）

Fig.8 Zircon U-Pb Concordia plots from rhyolite and andesitic rocks in Lingshan Island (Blue circles representing inherited zircons)

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

两件样品（Ls231 和 Ls332）的代表性碎屑锆石 Lu-Hf 同位素测试结果见表 3。分析结果显示，早白垩世-晚侏罗世的碎屑锆石具有非常富集的 Hf 同位素组成，$\varepsilon_{Hf}(t)$值范围为-18.6~-36.5，二阶段模式年龄（$t_{DM2}$）介于 2354~3444 Ma，反映这些锆石的源区为古老地壳的再造。一颗晚古生代（359 Ma）的碎屑锆石也具有相对富集的 Hf 同位素组成，其中 $\varepsilon_{Hf}(t)$=-14.4，二阶段模式年龄为 2241 Ma。一颗新元古代（771Ma）的碎屑锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为-10.5，二阶段模式年龄为 2308 Ma。古元古代中晚期（1884~2081 Ma）的碎屑锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为-5.21~-12.0，二阶段模式年龄为 2926~3336 Ma。两颗古元古代早期的碎屑锆石（2407 Ma 和 2494 Ma）具有相对亏损的 Hf 同位素组成，正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值（+1.73 和+2.75）和相对年轻的二阶段模式年龄（2833 Ma 和 2826 Ma），显示了古元古代早期地壳生长的过程。碎屑锆石 U-Pb 年龄和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值的协变关系见图 9。

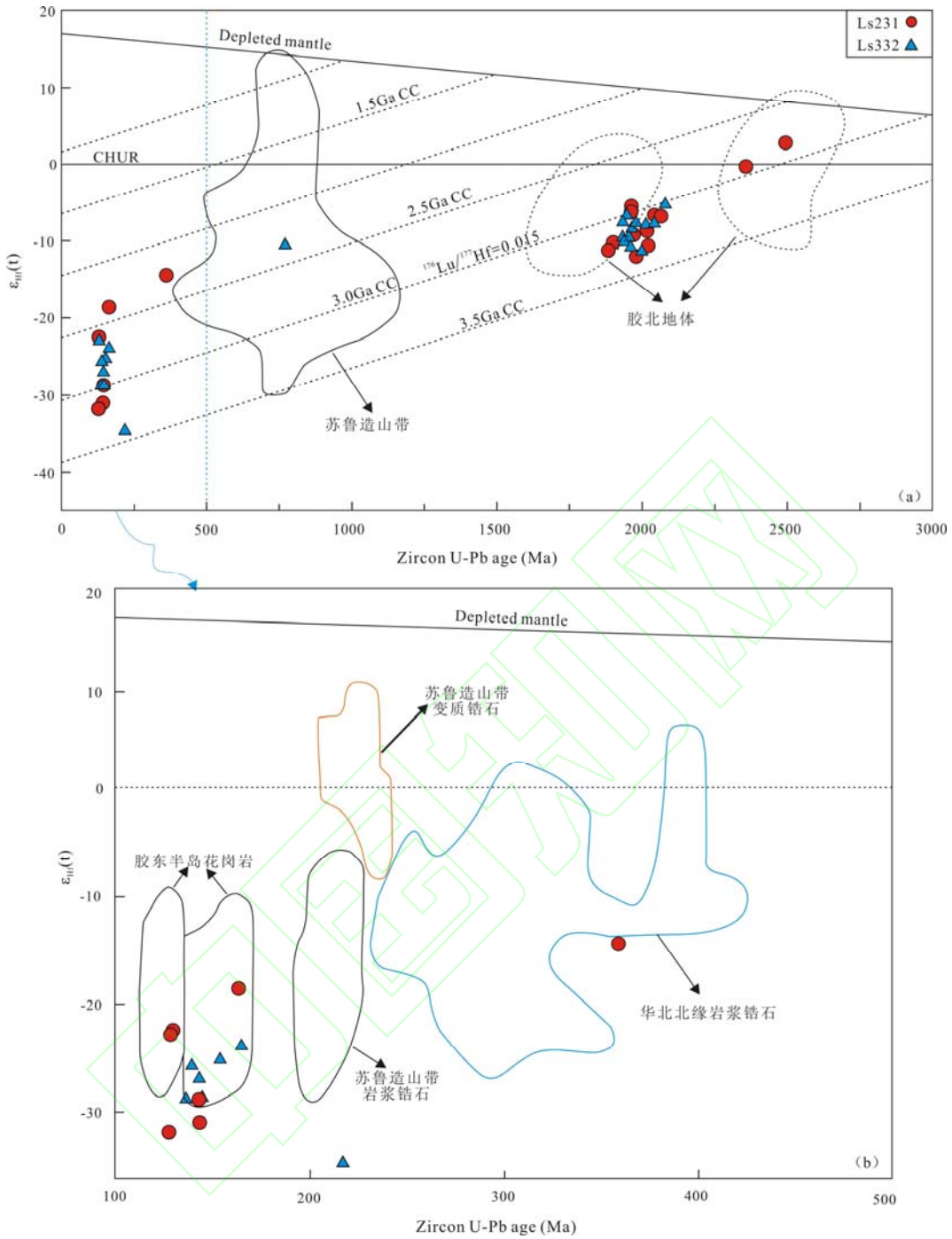


图 9 灵山岛早白垩世碎屑岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值与 U-Pb 年龄协变图解（锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值范围据 Yang et al., 2013）

Fig.9 Plots of $\varepsilon_{Hf}(t)$ values versus detrital zircon U-Pb ages in Lingshan Island ($\varepsilon_{Hf}(t)$ values fields modified from Yang et al., 2013)

表 1 灵山岛碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the detrital rocks in Lingshan Island

| Sample No. | Th | U | Th/U | $^{207}Pb/^{206}Pb$ | 1σ | $^{207}Pb/^{235}U$ | 1σ | $^{206}Pb/^{238}U$ | 1σ | $^{207}Pb/^{206}Pb$ | 1σ | $^{207}Pb/^{235}U$ | 1σ | $^{206}Pb/^{238}U$ | 1σ | 谐和度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LS231.1 | 174 | 365 | 0.48 | 0.15112 | 0.00649 | 7.47092 | 0.32026 | 0.35843 | 0.00179 | 2359 | 67 | 2170 | 38 | 1975 | 8 | 110 |
| LS231.2 | 77 | 47 | 1.63 | 0.12244 | 0.00290 | 6.11159 | 0.14324 | 0.36220 | 0.00205 | 1992 | 34 | 1992 | 20 | 1993 | 10 | 100 |
| LS231.3 | 24 | 46 | 0.53 | 0.16367 | 0.00319 | 10.49662 | 0.20726 | 0.46531 | 0.00315 | 2494 | 24 | 2480 | 18 | 2463 | 14 | 101 |
| LS231.4 | 136 | 92 | 1.49 | 0.06817 | 0.00422 | 1.23607 | 0.07685 | 0.13151 | 0.00084 | 874 | 120 | 817 | 35 | 796 | 5 | 103 |
| LS231.5 | 125 | 145 | 0.86 | 0.12165 | 0.00190 | 5.75297 | 0.09280 | 0.34301 | 0.00140 | 1981 | 23 | 1939 | 14 | 1901 | 7 | 102 |
| LS231.6 | 228 | 119 | 1.91 | 0.12174 | 0.00204 | 6.11562 | 0.10564 | 0.36441 | 0.00179 | 1982 | 24 | 1992 | 15 | 2003 | 8 | 99 |
| LS231.7 | 137 | 81 | 1.68 | 0.12063 | 0.00242 | 6.08470 | 0.13115 | 0.36574 | 0.00209 | 1966 | 30 | 1988 | 19 | 2009 | 10 | 99 |
| LS231.8 | 99 | 280 | 0.35 | 0.15543 | 0.00276 | 9.54899 | 0.17683 | 0.44564 | 0.00224 | 2407 | 25 | 2392 | 17 | 2376 | 10 | 101 |
| LS231.9 | 96 | 81 | 1.19 | 0.12217 | 0.00270 | 6.10449 | 0.13935 | 0.36237 | 0.00141 | 1988 | 35 | 1991 | 20 | 1993 | 7 | 100 |
| LS231.10 | 109 | 58 | 1.90 | 0.11650 | 0.00284 | 5.56108 | 0.14115 | 0.34616 | 0.00198 | 1903 | 37 | 1910 | 22 | 1916 | 9 | 100 |
| LS231.11 | 99 | 60 | 1.65 | 0.15339 | 0.01056 | 7.85648 | 0.56214 | 0.37170 | 0.00445 | 2384 | 107 | 2215 | 64 | 2037 | 21 | 109 |
| LS231.12 | 69 | 72 | 0.95 | 0.04875 | 0.02786 | 0.17644 | 0.10096 | 0.02555 | 0.00098 | 136 | 943 | 165 | 87 | 163 | 6 | 101 |
| LS231.13 | 155 | 537 | 0.29 | 0.16268 | 0.00330 | 5.48690 | 0.11947 | 0.24471 | 0.00132 | 2484 | 29 | 1899 | 19 | 1411 | 7 | 135 |
| LS231.14 | 88 | 72 | 1.22 | 0.11888 | 0.00312 | 5.97640 | 0.16462 | 0.36473 | 0.00224 | 1939 | 41 | 1972 | 24 | 2005 | 11 | 98 |
| LS231.15 | 200 | 137 | 1.46 | 0.12103 | 0.00324 | 6.03069 | 0.16762 | 0.36160 | 0.00176 | 1971 | 43 | 1980 | 24 | 1990 | 8 | 99 |
| LS231.16 | 79 | 63 | 1.26 | 0.12752 | 0.00418 | 6.54098 | 0.21812 | 0.37244 | 0.00203 | 2064 | 52 | 2051 | 29 | 2041 | 10 | 100 |
| LS231.17 | 105 | 77 | 1.37 | 0.12202 | 0.00395 | 6.12773 | 0.20396 | 0.36452 | 0.00138 | 1986 | 55 | 1994 | 29 | 2004 | 7 | 100 |
| LS231.18 | 125 | 85 | 1.48 | 0.12128 | 0.00349 | 6.11814 | 0.18070 | 0.36618 | 0.00122 | 1975 | 48 | 1993 | 26 | 2011 | 6 | 99 |
| LS231.19 | 130 | 108 | 1.20 | 0.12051 | 0.00312 | 5.86722 | 0.15799 | 0.35344 | 0.00200 | 1964 | 40 | 1956 | 23 | 1951 | 10 | 100 |
| LS231.20 | 594 | 974 | 0.61 | 0.21797 | 0.02055 | 3.25458 | 0.29656 | 0.10829 | 0.00262 | 2966 | 157 | 1470 | 71 | 663 | 15 | 222 |
| LS231.21 | 165 | 145 | 1.14 | 0.12097 | 0.00268 | 5.86010 | 0.13525 | 0.35165 | 0.00147 | 1971 | 35 | 1955 | 20 | 1942 | 7 | 101 |
| LS231.22 | 87 | 58 | 1.51 | 0.12179 | 0.00364 | 6.08215 | 0.18784 | 0.36243 | 0.00173 | 1983 | 49 | 1988 | 27 | 1994 | 8 | 100 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LS231.23 | 211 | 126 | 1.67 | 0.12368 | 0.00290 | 6.17567 | 0.15334 | 0.36249 | 0.00236 | 2010 | 35 | 2001 | 22 | 1994 | 11 | 100 |
| LS231.24 | 56 | 48 | 1.16 | 0.12429 | 0.00375 | 6.18896 | 0.19511 | 0.36151 | 0.00274 | 2019 | 45 | 2003 | 28 | 1989 | 13 | 101 |
| LS231.25 | 194 | 145 | 1.33 | 0.12254 | 0.00309 | 6.20333 | 0.16545 | 0.36746 | 0.00212 | 1993 | 39 | 2005 | 23 | 2017 | 10 | 99 |
| LS231.26 | 224 | 114 | 1.96 | 0.12054 | 0.00298 | 6.03719 | 0.15756 | 0.36356 | 0.00286 | 1964 | 35 | 1981 | 23 | 1999 | 14 | 99 |
| LS231.27 | 114 | 349 | 0.33 | 0.14122 | 0.00525 | 4.48568 | 0.16366 | 0.23037 | 0.00164 | 2242 | 66 | 1728 | 30 | 1336 | 9 | 129 |
| LS231.28 | 89 | 58 | 1.53 | 0.12594 | 0.00270 | 6.39030 | 0.14506 | 0.36813 | 0.00175 | 2042 | 34 | 2031 | 20 | 2021 | 8 | 100 |
| LS231.29 | 94 | 138 | 0.68 | 0.12350 | 0.00212 | 6.10956 | 0.11236 | 0.35899 | 0.00206 | 2007 | 24 | 1992 | 16 | 1977 | 10 | 101 |
| LS231.30 | 113 | 122 | 0.93 | 0.12337 | 0.00204 | 6.17931 | 0.11049 | 0.36346 | 0.00224 | 2005 | 23 | 2002 | 16 | 1999 | 11 | 100 |
| LS231.31 | 243 | 130 | 1.87 | 0.12470 | 0.00213 | 6.26631 | 0.11519 | 0.36462 | 0.00252 | 2025 | 23 | 2014 | 16 | 2004 | 12 | 100 |
| LS231.32 | 63 | 78 | 0.80 | 0.12364 | 0.00253 | 6.24879 | 0.13480 | 0.36668 | 0.00228 | 2009 | 29 | 2011 | 19 | 2014 | 11 | 100 |
| LS231.33 | 26 | 149 | 0.18 | 0.12247 | 0.00208 | 5.98562 | 0.10597 | 0.35458 | 0.00160 | 1992 | 25 | 1974 | 15 | 1956 | 8 | 101 |
| LS231.34 | 128 | 85 | 1.52 | 0.12441 | 0.00503 | 5.78763 | 0.22755 | 0.33791 | 0.00329 | 2020 | 56 | 1945 | 34 | 1877 | 16 | 104 |
| LS231.35 | 249 | 231 | 1.08 | 0.12047 | 0.00168 | 5.70544 | 0.09085 | 0.34354 | 0.00222 | 1963 | 19 | 1932 | 14 | 1904 | 11 | 101 |
| LS231.36 | 119 | 96 | 1.24 | 0.12214 | 0.00192 | 6.21479 | 0.10138 | 0.36919 | 0.00166 | 1988 | 23 | 2007 | 14 | 2026 | 8 | 99 |
| LS231.37 | 154 | 272 | 0.57 | 0.14179 | 0.00189 | 6.87418 | 0.09797 | 0.35172 | 0.00148 | 2249 | 19 | 2095 | 13 | 1943 | 7 | 108 |
| LS231.38 | 137 | 75 | 1.83 | 0.12157 | 0.00223 | 6.12650 | 0.11797 | 0.36559 | 0.00203 | 1979 | 26 | 1994 | 17 | 2009 | 10 | 99 |
| LS231.39 | 153 | 121 | 1.27 | 0.12141 | 0.00208 | 5.76768 | 0.10416 | 0.34466 | 0.00209 | 1977 | 23 | 1942 | 16 | 1909 | 10 | 102 |
| LS231.40 | 135 | 99 | 1.37 | 0.12308 | 0.00226 | 6.28526 | 0.11912 | 0.37055 | 0.00220 | 2001 | 25 | 2016 | 17 | 2032 | 10 | 99 |
| LS231.41 | 69 | 88 | 0.77 | 0.12223 | 0.00239 | 6.22134 | 0.12793 | 0.36918 | 0.00210 | 1989 | 28 | 2007 | 18 | 2026 | 10 | 99 |
| LS231.42 | 100 | 148 | 0.67 | 0.12042 | 0.00197 | 6.02267 | 0.10433 | 0.36277 | 0.00164 | 1962 | 24 | 1979 | 15 | 1995 | 8 | 99 |
| LS231.43 | 295 | 299 | 0.99 | 0.15160 | 0.00219 | 9.15578 | 0.14525 | 0.43814 | 0.00295 | 2364 | 18 | 2354 | 15 | 2342 | 13 | 101 |
| LS231.44 | 86 | 68 | 1.27 | 0.12116 | 0.00221 | 6.35316 | 0.12247 | 0.38008 | 0.00202 | 1973 | 27 | 2026 | 17 | 2077 | 9 | 98 |
| LS231.45 | 186 | 903 | 0.21 | 0.05791 | 0.00128 | 0.45742 | 0.01257 | 0.05726 | 0.00073 | 526 | 38 | 382 | 9 | 359 | 4 | 106 |
| LS231.46 | 495 | 572 | 0.86 | 0.12698 | 0.00212 | 2.66096 | 0.04584 | 0.15202 | 0.00053 | 2057 | 26 | 1318 | 13 | 912 | 3 | 145 |
| LS231.47 | 16 | 133 | 0.12 | 0.11714 | 0.00229 | 5.67207 | 0.11828 | 0.35121 | 0.00187 | 1913 | 30 | 1927 | 18 | 1940 | 9 | 99 |
| LS231.48 | 451 | 318 | 1.42 | 0.12772 | 0.00264 | 3.53609 | 0.08078 | 0.20081 | 0.00166 | 2067 | 29 | 1535 | 18 | 1180 | 9 | 130 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LS231.49 | 221 | 113 | 1.96 | 0.11945 | 0.00256 | 5.82805 | 0.13313 | 0.35384 | 0.00236 | 1948 | 31 | 1951 | 20 | 1953 | 11 | 100 |
| LS231.50 | 53 | 174 | 0.31 | 0.12954 | 0.00252 | 6.43102 | 0.13026 | 0.36008 | 0.00188 | 2092 | 28 | 2037 | 18 | 1983 | 9 | 103 |
| LS231.51 | 41 | 51 | 0.81 | 0.12175 | 0.00291 | 6.16504 | 0.15239 | 0.36734 | 0.00258 | 1982 | 34 | 2000 | 22 | 2017 | 12 | 99 |
| LS231.52 | 105 | 81 | 1.29 | 0.12431 | 0.00237 | 6.22241 | 0.13253 | 0.36331 | 0.00392 | 2019 | 23 | 2008 | 19 | 1998 | 19 | 101 |
| LS231.53 | 185 | 328 | 0.56 | 0.14899 | 0.00263 | 4.86365 | 0.09313 | 0.23675 | 0.00168 | 2334 | 23 | 1796 | 16 | 1370 | 9 | 131 |
| LS231.54 | 39 | 82 | 0.48 | 0.15634 | 0.00312 | 9.23568 | 0.22994 | 0.42775 | 0.00516 | 2416 | 26 | 2362 | 23 | 2296 | 23 | 103 |
| LS231.55 | 341 | 831 | 0.41 | 0.12236 | 0.00260 | 2.46196 | 0.05518 | 0.14602 | 0.00165 | 1991 | 24 | 1261 | 16 | 879 | 9 | 143 |
| LS231.56 | 62 | 42 | 1.48 | 0.12417 | 0.00461 | 6.19039 | 0.25240 | 0.36088 | 0.00320 | 2017 | 60 | 2003 | 36 | 1986 | 15 | 101 |
| LS231.57 | 369 | 395 | 0.93 | 0.22706 | 0.00690 | 7.01845 | 0.18408 | 0.22495 | 0.00203 | 3031 | 30 | 2114 | 23 | 1308 | 11 | 162 |
| LS231.58 | 90 | 509 | 0.18 | 0.17120 | 0.01201 | 4.83281 | 0.33258 | 0.20473 | 0.00278 | 2569 | 121 | 1791 | 58 | 1201 | 15 | 149 |
| LS231.59 | 114 | 118 | 0.97 | 0.04813 | 0.01858 | 0.15235 | 0.05897 | 0.02246 | 0.00051 | 106 | 613 | 144 | 52 | 143 | 3 | 101 |
| LS231.60 | 205 | 149 | 1.38 | 0.12451 | 0.00265 | 6.22689 | 0.14259 | 0.36298 | 0.00298 | 2022 | 29 | 2008 | 20 | 1996 | 14 | 101 |
| LS231.61 | 91 | 55 | 1.66 | 0.12480 | 0.00356 | 6.28677 | 0.18480 | 0.36578 | 0.00284 | 2026 | 41 | 2017 | 26 | 2010 | 13 | 100 |
| LS231.62 | 67 | 35 | 1.90 | 0.12685 | 0.00410 | 6.53247 | 0.21510 | 0.37426 | 0.00323 | 2055 | 46 | 2050 | 29 | 2049 | 15 | 100 |
| LS231.63 | 75 | 52 | 1.44 | 0.12357 | 0.00403 | 6.31659 | 0.21147 | 0.37112 | 0.00241 | 2008 | 50 | 2021 | 29 | 2035 | 11 | 99 |
| LS231.64 | 118 | 93 | 1.27 | 0.12449 | 0.00373 | 6.36301 | 0.19945 | 0.37111 | 0.00292 | 2022 | 44 | 2027 | 28 | 2035 | 14 | 100 |
| LS231.65 | 61 | 43 | 1.43 | 0.12564 | 0.00484 | 6.54039 | 0.26236 | 0.37756 | 0.00255 | 2038 | 62 | 2051 | 35 | 2065 | 12 | 99 |
| LS231.66 | 174 | 125 | 1.39 | 0.12203 | 0.00332 | 5.95555 | 0.17324 | 0.35403 | 0.00263 | 1986 | 41 | 1969 | 25 | 1954 | 13 | 101 |
| LS231.67 | 80 | 67 | 1.20 | 0.12212 | 0.00362 | 6.05742 | 0.18527 | 0.35980 | 0.00226 | 1987 | 46 | 1984 | 27 | 1981 | 11 | 100 |
| LS231.68 | 97 | 127 | 0.76 | 0.12256 | 0.00296 | 6.06452 | 0.15259 | 0.35895 | 0.00243 | 1994 | 35 | 1985 | 22 | 1977 | 12 | 100 |
| LS231.69 | 33 | 34 | 0.95 | 0.12285 | 0.00445 | 6.29374 | 0.23754 | 0.37118 | 0.00231 | 1998 | 59 | 2018 | 33 | 2035 | 11 | 99 |
| LS231.70 | 146 | 129 | 1.14 | 0.11791 | 0.00264 | 5.65416 | 0.12906 | 0.34779 | 0.00188 | 1925 | 33 | 1924 | 20 | 1924 | 9 | 100 |
| LS231.71 | 145 | 116 | 1.25 | 0.11888 | 0.00266 | 5.74502 | 0.13581 | 0.35033 | 0.00195 | 1939 | 34 | 1938 | 20 | 1936 | 9 | 100 |
| LS231.72 | 92 | 132 | 0.69 | 0.12109 | 0.00281 | 5.85857 | 0.14424 | 0.35073 | 0.00213 | 1972 | 35 | 1955 | 21 | 1938 | 10 | 101 |
| LS231.73 | 43 | 39 | 1.08 | 0.11528 | 0.00406 | 5.80021 | 0.20898 | 0.36490 | 0.00221 | 1884 | 57 | 1946 | 31 | 2005 | 10 | 97 |
| LS2-3-1-74 | 248 | 114 | 2.18 | 0.04885 | 0.00789 | 0.13630 | 0.02167 | 0.02024 | 0.00071 | 141 | 264 | 130 | 19 | 129 | 4 | 101 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LS2-3-1-76 | 210 | 108 | 1.94 | 0.04886 | 0.00529 | 0.13350 | 0.01438 | 0.01982 | 0.00046 | 141 | 198 | 127 | 13 | 127 | 3 | 100 |
| LS2-3-1-77 | 153 | 58 | 2.62 | 0.12427 | 0.00223 | 6.34372 | 0.13570 | 0.37026 | 0.00634 | 2018 | 17 | 2025 | 19 | 2031 | 30 | 100 |
| LS2-3-1-78 | 56 | 26 | 2.13 | 0.12606 | 0.00280 | 6.53240 | 0.16093 | 0.37586 | 0.00677 | 2044 | 21 | 2050 | 22 | 2057 | 32 | 100 |
| LS2-3-1-79 | 65 | 60 | 1.08 | 0.05006 | 0.02189 | 0.15559 | 0.06679 | 0.02254 | 0.00197 | 198 | 610 | 147 | 59 | 144 | 12 | 102 |
| LS2-3-1-80 | 24 | 23 | 1.06 | 0.13406 | 0.00333 | 7.24383 | 0.19306 | 0.39192 | 0.00743 | 2152 | 23 | 2142 | 24 | 2132 | 34 | 100 |
| LS2-3-1-81 | 93 | 95 | 0.98 | 0.14868 | 0.00262 | 8.77633 | 0.18519 | 0.42817 | 0.00738 | 2331 | 16 | 2315 | 19 | 2297 | 33 | 101 |
| LS2-3-1-82 | 12 | 15 | 0.80 | 0.16641 | 0.00634 | 10.85378 | 0.40608 | 0.47309 | 0.01192 | 2522 | 32 | 2511 | 35 | 2497 | 52 | 101 |
| Ls332.1 | 88 | 80 | 1.10 | 0.12041 | 0.00340 | 5.81529 | 0.16393 | 0.35030 | 0.00223 | 1962 | 51 | 1949 | 24 | 1936 | 11 | 101 |
| Ls332.2 | 174 | 98 | 1.78 | 0.12027 | 0.00202 | 5.31115 | 0.09017 | 0.32019 | 0.00129 | 1961 | 30 | 1871 | 15 | 1791 | 6 | 104 |
| Ls332.3 | 140 | 100 | 1.40 | 0.12523 | 0.00151 | 5.86587 | 0.07039 | 0.33964 | 0.00102 | 2032 | 21 | 1956 | 10 | 1885 | 5 | 104 |
| Ls332.4 | 147 | 186 | 0.79 | 0.12129 | 0.00130 | 6.10943 | 0.07296 | 0.36522 | 0.00216 | 1976 | 14 | 1992 | 11 | 2007 | 10 | 99 |
| Ls332.5 | 304 | 248 | 1.23 | 0.11939 | 0.00123 | 5.16788 | 0.07412 | 0.31377 | 0.00275 | 1947 | 18 | 1847 | 12 | 1759 | 14 | 105 |
| Ls332.6 | 108 | 210 | 0.51 | 0.05045 | 0.00997 | 0.14309 | 0.02846 | 0.02059 | 0.00019 | 217 | 404 | 136 | 25 | 131 | 1 | 103 |
| Ls332.7 | 99 | 77 | 1.29 | 0.12277 | 0.00175 | 5.86696 | 0.08569 | 0.34662 | 0.00178 | 1998 | 25 | 1956 | 13 | 1918 | 9 | 102 |
| Ls332.8 | 80 | 67 | 1.19 | 0.12277 | 0.00195 | 6.13669 | 0.09804 | 0.36264 | 0.00196 | 1998 | 28 | 1995 | 14 | 1995 | 9 | 100 |
| Ls332.9 | 125 | 40 | 3.13 | 0.12644 | 0.00334 | 6.40553 | 0.17255 | 0.36786 | 0.00365 | 2050 | 47 | 2033 | 24 | 2019 | 17 | 101 |
| Ls332.10 | 124 | 107 | 1.16 | 0.12387 | 0.00149 | 6.14913 | 0.08114 | 0.35996 | 0.00213 | 2013 | 22 | 1997 | 12 | 1982 | 10 | 101 |
| Ls332.11 | 201 | 122 | 1.65 | 0.12402 | 0.00140 | 5.68500 | 0.06479 | 0.33235 | 0.00092 | 2017 | 20 | 1929 | 10 | 1850 | 5 | 104 |
| Ls332.12 | 75 | 63 | 1.20 | 0.10784 | 0.00359 | 2.09887 | 0.07204 | 0.14094 | 0.00086 | 1765 | 66 | 1148 | 24 | 850 | 5 | 135 |
| Ls332.13 | 81 | 75 | 1.08 | 0.12247 | 0.00169 | 5.94795 | 0.08706 | 0.35213 | 0.00204 | 1992 | 24 | 1968 | 13 | 1945 | 10 | 101 |
| Ls332.14 | 46 | 40 | 1.15 | 0.12974 | 0.00244 | 6.74512 | 0.13009 | 0.37687 | 0.00157 | 2094 | 33 | 2079 | 17 | 2062 | 7 | 101 |
| Ls332.15 | 260 | 135 | 1.93 | 0.12031 | 0.00149 | 5.84608 | 0.07689 | 0.35226 | 0.00180 | 1961 | 22 | 1953 | 11 | 1945 | 9 | 100 |
| Ls332.16 | 99 | 94 | 1.06 | 0.12873 | 0.00195 | 6.52140 | 0.10199 | 0.36733 | 0.00203 | 2081 | 27 | 2049 | 14 | 2017 | 10 | 102 |
| Ls332.17 | 74 | 259 | 0.29 | 0.14407 | 0.00194 | 5.28126 | 0.07837 | 0.26574 | 0.00171 | 2277 | 23 | 1866 | 13 | 1519 | 9 | 123 |
| Ls332.18 | 153 | 140 | 1.09 | 0.12217 | 0.00156 | 6.04407 | 0.08686 | 0.35870 | 0.00257 | 1988 | 23 | 1982 | 13 | 1976 | 12 | 100 |
| Ls332.19 | 58 | 104 | 0.56 | 0.11971 | 0.00146 | 5.90955 | 0.07884 | 0.35796 | 0.00214 | 1954 | 21 | 1963 | 12 | 1972 | 10 | 100 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls332.20 | 200 | 183 | 1.09 | 0.12050 | 0.00123 | 6.25861 | 0.07684 | 0.37666 | 0.00273 | 1965 | 19 | 2013 | 11 | 2061 | 13 | 98 |
| Ls332.21 | 267 | 231 | 1.16 | 0.11914 | 0.00120 | 5.82419 | 0.08255 | 0.35441 | 0.00340 | 1944 | 18 | 1950 | 12 | 1956 | 16 | 100 |
| Ls332.22 | 109 | 128 | 0.86 | 0.12111 | 0.00137 | 5.78941 | 0.07577 | 0.34683 | 0.00242 | 1973 | 20 | 1945 | 11 | 1919 | 12 | 101 |
| Ls332.23 | 70 | 60 | 1.17 | 0.11947 | 0.00191 | 6.05213 | 0.10072 | 0.36751 | 0.00236 | 1950 | 28 | 1983 | 15 | 2018 | 11 | 98 |
| Ls332.24 | 74 | 110 | 0.68 | 0.11938 | 0.00162 | 6.05243 | 0.08832 | 0.36774 | 0.00234 | 1947 | 24 | 1983 | 13 | 2019 | 11 | 98 |
| Ls332.25 | 157 | 137 | 1.15 | 0.12073 | 0.00145 | 6.16311 | 0.08241 | 0.37025 | 0.00223 | 1969 | 21 | 1999 | 12 | 2031 | 11 | 98 |
| Ls332.26 | 44 | 96 | 0.46 | 0.15647 | 0.00168 | 10.21761 | 0.12871 | 0.47369 | 0.00322 | 2418 | 18 | 2455 | 12 | 2500 | 14 | 98 |
| Ls332.27 | 194 | 157 | 1.23 | 0.11889 | 0.00125 | 5.86889 | 0.06234 | 0.35814 | 0.00114 | 1940 | 19 | 1957 | 9 | 1973 | 6 | 99 |
| Ls332.28 | 61 | 68 | 0.90 | 0.12195 | 0.00173 | 5.93252 | 0.08600 | 0.35300 | 0.00150 | 1985 | 25 | 1966 | 13 | 1949 | 7 | 101 |
| Ls332.29 | 100 | 248 | 0.40 | 0.14537 | 0.00136 | 6.00941 | 0.06750 | 0.29988 | 0.00161 | 2292 | 17 | 1977 | 10 | 1691 | 8 | 117 |
| Ls332.30 | 56 | 62 | 0.90 | 0.12124 | 0.00189 | 6.24362 | 0.09999 | 0.37389 | 0.00235 | 1976 | 28 | 2011 | 14 | 2048 | 11 | 98 |
| Ls332.31 | 206 | 179 | 1.15 | 0.11861 | 0.00126 | 5.96604 | 0.07549 | 0.36512 | 0.00263 | 1936 | 19 | 1971 | 11 | 2006 | 12 | 98 |
| Ls332.32 | 117 | 104 | 1.13 | 0.11858 | 0.00155 | 5.97881 | 0.08323 | 0.36594 | 0.00145 | 1935 | 18 | 1973 | 12 | 2010 | 7 | 98 |
| Ls332.33 | 69 | 50 | 1.38 | 0.12180 | 0.00212 | 6.17296 | 0.11104 | 0.36799 | 0.00199 | 1983 | 31 | 2001 | 16 | 2020 | 9 | 99 |
| Ls332.34 | 173 | 171 | 1.01 | 0.12101 | 0.00131 | 5.94651 | 0.07484 | 0.35669 | 0.00229 | 1972 | 20 | 1968 | 11 | 1966 | 11 | 100 |
| Ls332.35 | 328 | 243 | 1.35 | 0.11762 | 0.00118 | 4.78603 | 0.05815 | 0.29524 | 0.00177 | 1921 | 18 | 1782 | 10 | 1668 | 9 | 107 |
| Ls332.36 | 52 | 64 | 0.82 | 0.12476 | 0.00189 | 6.09310 | 0.10390 | 0.35443 | 0.00292 | 2026 | 28 | 1989 | 15 | 1956 | 14 | 102 |
| Ls332.37 | 69 | 58 | 1.20 | 0.12036 | 0.00183 | 6.09708 | 0.09506 | 0.36792 | 0.00285 | 1961 | 22 | 1990 | 14 | 2020 | 13 | 99 |
| Ls332.38 | 125 | 133 | 0.94 | 0.12079 | 0.00126 | 6.04873 | 0.08912 | 0.36330 | 0.00380 | 1969 | 19 | 1983 | 13 | 1998 | 18 | 99 |
| Ls332.39 | 56 | 109 | 0.52 | 0.12279 | 0.00148 | 6.13478 | 0.07989 | 0.36248 | 0.00205 | 1998 | 21 | 1995 | 11 | 1994 | 10 | 100 |
| Ls332.40 | 201 | 152 | 1.32 | 0.12398 | 0.00154 | 4.98380 | 0.07913 | 0.29156 | 0.00285 | 2015 | 22 | 1817 | 13 | 1649 | 14 | 110 |
| Ls332.41 | 96 | 80 | 1.20 | 0.12466 | 0.00169 | 6.49087 | 0.08736 | 0.37792 | 0.00226 | 2024 | 24 | 2045 | 12 | 2067 | 11 | 99 |
| Ls332.42 | 115 | 277 | 0.42 | 0.14896 | 0.00157 | 8.26884 | 0.11768 | 0.40242 | 0.00313 | 2344 | 19 | 2261 | 13 | 2180 | 14 | 104 |
| Ls332.43 | 134 | 128 | 1.05 | 0.09748 | 0.00883 | 0.39341 | 0.03710 | 0.02906 | 0.00035 | 1576 | 170 | 337 | 27 | 185 | 2 | 182 |
| Ls332.44 | 65 | 63 | 1.03 | 0.12490 | 0.00193 | 6.22945 | 0.09119 | 0.36202 | 0.00169 | 2027 | 27 | 2009 | 13 | 1992 | 8 | 101 |
| Ls332.45 | 172 | 153 | 1.12 | 0.12166 | 0.00129 | 5.87076 | 0.06592 | 0.35006 | 0.00174 | 1981 | 19 | 1957 | 10 | 1935 | 8 | 101 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls332.46 | 178 | 118 | 1.51 | 0.12184 | 0.00160 | 6.00730 | 0.08067 | 0.35769 | 0.00208 | 1984 | 23 | 1977 | 12 | 1971 | 10 | 100 |
| Ls332.47 | 131 | 291 | 0.45 | 0.13749 | 0.00167 | 4.66113 | 0.08816 | 0.24535 | 0.00289 | 2196 | 21 | 1760 | 16 | 1414 | 15 | 124 |
| Ls332.48 | 118 | 81 | 1.45 | 0.12175 | 0.00183 | 6.07857 | 0.09490 | 0.36207 | 0.00168 | 1983 | 27 | 1987 | 14 | 1992 | 8 | 100 |
| Ls332.49 | 127 | 483 | 0.26 | 0.13509 | 0.00183 | 5.22482 | 0.07221 | 0.28052 | 0.00110 | 2165 | 23 | 1857 | 12 | 1594 | 6 | 116 |
| Ls332.50 | 200 | 119 | 1.68 | 0.12568 | 0.00193 | 6.31846 | 0.10073 | 0.36459 | 0.00114 | 2039 | 27 | 2021 | 14 | 2004 | 5 | 101 |
| Ls332.51 | 680 | 389 | 1.75 | 0.12299 | 0.00150 | 2.57680 | 0.03864 | 0.15227 | 0.00202 | 2067 | 16 | 1294 | 11 | 914 | 11 | 142 |
| Ls332.52 | 78 | 63 | 1.25 | 0.09956 | 0.02231 | 0.37248 | 0.08134 | 0.02732 | 0.00084 | 1617 | 428 | 321 | 60 | 174 | 5 | 185 |
| Ls332.53 | 112 | 83 | 1.34 | 0.04823 | 0.01707 | 0.16202 | 0.05604 | 0.02418 | 0.00054 | 109 | 674 | 152 | 49 | 154 | 3 | 99 |
| Ls332.54 | 92 | 85 | 1.08 | 0.12259 | 0.00159 | 6.15941 | 0.09115 | 0.36442 | 0.00235 | 1994 | 22 | 1999 | 13 | 2003 | 11 | 100 |
| Ls332.55 | 93 | 102 | 0.91 | 0.12556 | 0.00171 | 6.13637 | 0.09169 | 0.35461 | 0.00232 | 2037 | 24 | 1995 | 13 | 1957 | 11 | 102 |
| Ls332.56 | 83 | 173 | 0.48 | 0.12263 | 0.00172 | 5.87695 | 0.09247 | 0.34774 | 0.00270 | 1995 | 25 | 1958 | 14 | 1924 | 13 | 102 |
| Ls332.57 | 91 | 73 | 1.26 | 0.12360 | 0.00180 | 6.28478 | 0.09910 | 0.36886 | 0.00199 | 2009 | 26 | 2016 | 14 | 2024 | 9 | 100 |
| Ls332.58 | 72 | 49 | 1.46 | 0.14308 | 0.00325 | 7.03049 | 0.19471 | 0.35527 | 0.00280 | 2265 | 39 | 2115 | 25 | 1960 | 13 | 108 |
| Ls332.59 | 109 | 110 | 0.99 | 0.12481 | 0.00149 | 6.17633 | 0.07690 | 0.35907 | 0.00124 | 2028 | 21 | 2001 | 11 | 1978 | 6 | 101 |
| Ls332.60 | 43 | 64 | 0.68 | 0.12992 | 0.00230 | 6.65799 | 0.11949 | 0.37186 | 0.00197 | 2098 | 31 | 2067 | 16 | 2038 | 9 | 101 |
| Ls332.61 | 145 | 218 | 0.67 | 0.04950 | 0.00745 | 0.15554 | 0.02355 | 0.02261 | 0.00022 | 172 | 328 | 147 | 21 | 144 | 1 | 102 |
| Ls332.62 | 174 | 242 | 0.72 | 0.12291 | 0.00145 | 5.84435 | 0.07287 | 0.34500 | 0.00108 | 1999 | 21 | 1953 | 11 | 1911 | 5 | 102 |
| Ls332.63 | 86 | 60 | 1.43 | 0.12925 | 0.00196 | 6.53487 | 0.10212 | 0.36684 | 0.00124 | 2088 | 27 | 2051 | 14 | 2015 | 6 | 102 |
| Ls332.64 | 97 | 118 | 0.83 | 0.12733 | 0.00192 | 6.27155 | 0.09567 | 0.35747 | 0.00142 | 2061 | 26 | 2014 | 13 | 1970 | 7 | 102 |
| Ls332.65 | 95 | 337 | 0.28 | 0.15297 | 0.00215 | 3.16022 | 0.05098 | 0.14986 | 0.00090 | 2379 | 24 | 1447 | 12 | 900 | 5 | 161 |
| Ls332.66 | 208 | 170 | 1.22 | 0.12001 | 0.00149 | 5.60077 | 0.07318 | 0.33860 | 0.00126 | 1967 | 22 | 1916 | 11 | 1880 | 6 | 102 |
| Ls332.67 | 85 | 151 | 0.56 | 0.14057 | 0.00179 | 7.25246 | 0.11133 | 0.37431 | 0.00325 | 2235 | 22 | 2143 | 14 | 2050 | 15 | 105 |
| Ls332.68 | 127 | 82 | 1.55 | 0.12532 | 0.00192 | 6.09859 | 0.09243 | 0.35324 | 0.00181 | 2033 | 28 | 1990 | 13 | 1950 | 9 | 102 |
| Ls332.69 | 97 | 73 | 1.34 | 0.12586 | 0.00202 | 6.22155 | 0.09870 | 0.35878 | 0.00179 | 2043 | 28 | 2007 | 14 | 1976 | 9 | 102 |
| Ls332.70 | 52 | 163 | 0.32 | 0.04964 | 0.01037 | 0.15093 | 0.03162 | 0.02180 | 0.00025 | 189 | 417 | 143 | 28 | 139 | 2 | 103 |
| Ls332.71 | 303 | 342 | 0.89 | 0.12641 | 0.00168 | 3.51234 | 0.04745 | 0.20160 | 0.00064 | 2050 | 23 | 1530 | 11 | 1184 | 3 | 129 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls332.72 | 80 | 51 | 1.57 | 0.04745 | 0.02685 | 0.15095 | 0.08233 | 0.02245 | 0.00077 | 72 | 978 | 143 | 73 | 143 | 5 | 100 |
| Ls332.73 | 150 | 175 | 0.86 | 0.04916 | 0.00745 | 0.14510 | 0.02192 | 0.02137 | 0.00025 | 154 | 322 | 138 | 19 | 136 | 2 | 101 |
| LS3-3-2-76 | 28 | 64 | 0.43 | 0.04985 | 0.02101 | 0.17699 | 0.07329 | 0.02575 | 0.00213 | 188 | 587 | 165 | 63 | 164 | 13 | 101 |
| LS3-3-2-75 | 26 | 34 | 0.76 | 0.06669 | 0.00298 | 1.16783 | 0.05295 | 0.12702 | 0.00246 | 828 | 62 | 786 | 25 | 771 | 14 | 102 |
| LS3-3-2-74 | 69 | 40 | 1.74 | 0.04926 | 0.01289 | 0.13643 | 0.03550 | 0.02009 | 0.00068 | 160 | 404 | 130 | 32 | 128 | 4 | 102 |

表 2 灵山岛流纹岩及安山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of rhyolite and andesitic rocks in Lingshan Island

| Sample No. | Th | U | Th/U | $^{206}Pb/^{238}U$ | 1σ | $^{207}Pb/^{235}U$ | 1σ | $^{206}Pb/^{238}U$ | 1σ | $^{207}Pb/^{235}U$ | 1σ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls251.1 | 1289 | 837 | 1.54 | 0.0191 | 0.0002 | 0.1276 | 0.0032 | 122 | 1 | 122 | 3 |
| Ls251.2 | 1514 | 780 | 1.94 | 0.0202 | 0.0002 | 0.1369 | 0.0037 | 129 | 1 | 130 | 4 |
| Ls251.3 | 659 | 426 | 1.55 | 0.0268 | 0.0003 | 0.8905 | 0.0222 | 170 | 2 | 647 | 16 |
| Ls251.4 | 1316 | 715 | 1.84 | 0.0196 | 0.0002 | 0.1382 | 0.0028 | 125 | 1 | 131 | 3 |
| Ls251.5 | 277 | 1100 | 0.25 | 0.0513 | 0.0006 | 0.4412 | 0.0069 | 322 | 4 | 371 | 6 |
| Ls251.6 | 263 | 107 | 2.47 | 0.0187 | 0.0003 | 0.1263 | 0.0307 | 119 | 2 | 121 | 29 |
| Ls251.7 | 1041 | 609 | 1.71 | 0.0193 | 0.0002 | 0.1325 | 0.0041 | 123 | 1 | 126 | 4 |
| Ls251.8 | 1001 | 659 | 1.52 | 0.0194 | 0.0002 | 0.1300 | 0.0031 | 124 | 1 | 124 | 3 |
| Ls251.9 | 959 | 634 | 1.51 | 0.0193 | 0.0002 | 0.1294 | 0.0051 | 123 | 1 | 124 | 5 |
| Ls251.10 | 1725 | 745 | 2.31 | 0.0192 | 0.0002 | 0.1286 | 0.0055 | 123 | 1 | 123 | 5 |
| Ls251.11 | 1748 | 721 | 2.42 | 0.0193 | 0.0002 | 0.1288 | 0.0043 | 123 | 1 | 123 | 4 |
| Ls251.12 | 1282 | 805 | 1.59 | 0.0195 | 0.0002 | 0.1285 | 0.0048 | 124 | 1 | 123 | 5 |
| Ls251.13 | 1078 | 671 | 1.61 | 0.0201 | 0.0002 | 0.1346 | 0.0055 | 128 | 1 | 128 | 5 |
| Ls251.14 | 568 | 449 | 1.27 | 0.0195 | 0.0002 | 0.1310 | 0.0056 | 124 | 1 | 125 | 5 |
| Ls251.15 | 514 | 290 | 1.78 | 0.0192 | 0.0002 | 0.1291 | 0.0049 | 123 | 1 | 123 | 5 |
| Ls251.16 | 658 | 482 | 1.36 | 0.0198 | 0.0002 | 0.1372 | 0.0062 | 126 | 2 | 131 | 6 |
| Ls251.17 | 762 | 603 | 1.26 | 0.0197 | 0.0002 | 0.1372 | 0.0065 | 126 | 1 | 131 | 6 |
| Ls251.18 | 1080 | 826 | 1.31 | 0.0196 | 0.0002 | 0.1330 | 0.0027 | 125 | 1 | 127 | 3 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls251.19 | 455 | 194 | 2.34 | 0.0202 | 0.0003 | 0.1394 | 0.0147 | 129 | 2 | 133 | 14 |
| Ls251.20 | 423 | 158 | 2.68 | 0.0200 | 0.0003 | 0.1382 | 0.0159 | 128 | 2 | 131 | 15 |
| Ls251.21 | 392 | 1058 | 0.37 | 0.0448 | 0.0010 | 0.4002 | 0.0101 | 283 | 6 | 342 | 9 |
| Ls251.22 | 391 | 195 | 2.00 | 0.1000 | 0.0010 | 2.2374 | 0.0365 | 614 | 6 | 1193 | 19 |
| Ls251.23 | 986 | 510 | 1.93 | 0.0190 | 0.0002 | 0.1324 | 0.0025 | 121 | 1 | 126 | 2 |
| Ls251.24 | 279 | 230 | 1.21 | 0.0927 | 0.0011 | 1.4712 | 0.0270 | 571 | 7 | 919 | 17 |
| Ls4101.1 | 91.2 | 78.3 | 1.16 | 0.0193 | 0.0004 | 0.1349 | 0.0217 | 123 | 3 | 128 | 21 |
| Ls4101.2 | 172 | 184 | 0.93 | 0.0205 | 0.0002 | 0.1384 | 0.0146 | 131 | 2 | 132 | 14 |
| Ls4101.3 | 467 | 340 | 1.37 | 0.0205 | 0.0002 | 0.1360 | 0.0076 | 131 | 1 | 129 | 7 |
| Ls4101.4 | 287 | 188 | 1.52 | 0.0204 | 0.0002 | 0.1362 | 0.0085 | 130 | 2 | 130 | 8 |
| Ls4101.5 | 158 | 143 | 1.11 | 0.0207 | 0.0003 | 0.1395 | 0.0116 | 132 | 2 | 133 | 11 |
| Ls4101.6 | 113 | 191 | 0.59 | 0.0196 | 0.0002 | 0.1310 | 0.0101 | 125 | 2 | 125 | 10 |
| Ls4101.7 | 141 | 141 | 1.00 | 0.1164 | 0.0013 | 1.0705 | 0.0263 | 710 | 8 | 739 | 18 |
| Ls4101.8 | 183 | 160 | 1.15 | 0.0204 | 0.0003 | 0.1362 | 0.0156 | 130 | 2 | 130 | 15 |
| Ls4101.9 | 202 | 204 | 0.99 | 0.0203 | 0.0002 | 0.1363 | 0.0102 | 130 | 1 | 130 | 10 |
| Ls4101.10 | 408 | 320 | 1.27 | 0.0209 | 0.0002 | 0.1389 | 0.0068 | 133 | 1 | 132 | 6 |
| Ls4101.11 | 253 | 163 | 1.55 | 0.0196 | 0.0002 | 0.1336 | 0.0082 | 125 | 2 | 127 | 8 |
| Ls4101.12 | 108 | 89 | 1.20 | 0.0202 | 0.0003 | 0.1393 | 0.0192 | 129 | 2 | 132 | 18 |
| Ls4101.13 | 343 | 256 | 1.34 | 0.0198 | 0.0002 | 0.1353 | 0.0061 | 126 | 1 | 129 | 6 |
| Ls4101.14 | 110 | 103 | 1.06 | 0.0198 | 0.0003 | 0.1376 | 0.0098 | 126 | 2 | 131 | 9 |
| Ls4101.15 | 48.9 | 405 | 0.12 | 0.0528 | 0.0005 | 0.4159 | 0.0095 | 332 | 3 | 353 | 8 |
| Ls4101.16 | 19.5 | 434 | 0.05 | 0.0415 | 0.0005 | 0.2922 | 0.0077 | 262 | 3 | 260 | 7 |
| Ls4101.17 | 147 | 159 | 0.92 | 0.0201 | 0.0002 | 0.1383 | 0.0136 | 128 | 2 | 132 | 13 |
| Ls4101.18 | 110 | 155 | 0.71 | 0.0237 | 0.0004 | 0.2288 | 0.0199 | 151 | 2 | 209 | 18 |
| Ls4101.19 | 119 | 213 | 0.56 | 0.0268 | 0.0004 | 0.2763 | 0.0153 | 170 | 2 | 248 | 14 |
| Ls4101.20 | 230 | 164 | 1.41 | 0.0210 | 0.0003 | 0.1423 | 0.0116 | 134 | 2 | 135 | 11 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls4101.21 | 313 | 182 | 1.73 | 0.0197 | 0.0002 | 0.1329 | 0.0068 | 126 | 1 | 127 | 6 |
| Ls4101.22 | 321 | 230 | 1.40 | 0.0199 | 0.0002 | 0.1418 | 0.0086 | 127 | 1 | 135 | 8 |
| Ls4101.23 | 286 | 164 | 1.74 | 0.0208 | 0.0003 | 0.1408 | 0.0087 | 133 | 2 | 134 | 8 |
| Ls4101.24 | 286 | 164 | 1.74 | 0.0208 | 0.0003 | 0.1416 | 0.0087 | 133 | 2 | 134 | 8 |

表 3 灵山岛早白垩世碎屑岩代表性锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic analytical results of representative detrital zircons in Lingshan Island

| Sample No. | t (Ma) | $^{176}Yb/^{177}Hf$ | $^{176}Lu/^{177}Hf$ | 2σ | $^{176}Hf/^{177}Hf$ | 2σ | $\varepsilon_{Hf}(t)$ | 2σ | $f_{Lu/Hf}$ | $T_{DM}^{C}$ | 2σ | $T_{DM2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls231.1 | 2359 | 0.03063 | 0.00098 | 0.0000032 | 0.28131 | 0.0000286 | -0.27 | 1.02 | -0.97 | 2932 | 62 | 2906 |
| Ls231.7 | 1966 | 0.01646 | 0.00052 | 0.0000026 | 0.28139 | 0.0000280 | -5.47 | 0.99 | -0.98 | 2963 | 61 | 2926 |
| Ls231.8 | 2407 | 0.02727 | 0.00099 | 0.0000055 | 0.28133 | 0.0000158 | 1.73 | 0.56 | -0.97 | 2853 | 34 | 2833 |
| Ls231.10 | 1903 | 0.02114 | 0.00064 | 0.0000011 | 0.28131 | 0.0000209 | -10.18 | 0.74 | -0.98 | 3210 | 45 | 3165 |
| Ls231.12 | 163 | 0.02158 | 0.00066 | 0.0000027 | 0.28216 | 0.0000240 | -18.62 | 0.85 | -0.98 | 2353 | 53 | 2354 |
| Ls231.15 | 1971 | 0.01505 | 0.00047 | 0.0000033 | 0.28129 | 0.0000213 | -9.20 | 0.76 | -0.99 | 3198 | 46 | 3154 |
| Ls231.16 | 2064 | 0.01341 | 0.00047 | 0.0000057 | 0.28129 | 0.0000284 | -6.80 | 1.01 | -0.99 | 3124 | 61 | 3084 |
| Ls231.26 | 1964 | 0.03180 | 0.00095 | 0.0000166 | 0.28139 | 0.0000248 | -6.32 | 0.88 | -0.97 | 3015 | 54 | 2976 |
| Ls231.45 | 359 | 0.01337 | 0.00046 | 0.0000049 | 0.28215 | 0.0000133 | -14.43 | 0.47 | -0.99 | 2249 | 29 | 2241 |
| Ls231.51 | 1982 | 0.01722 | 0.00053 | 0.0000066 | 0.28120 | 0.0000232 | -11.98 | 0.82 | -0.98 | 3386 | 50 | 3336 |
| Ls231.59 | 143 | 0.02551 | 0.00092 | 0.0000035 | 0.28181 | 0.0000186 | -30.99 | 0.66 | -0.97 | 3126 | 40 | 3136 |
| Ls231.60 | 2022 | 0.01787 | 0.00053 | 0.0000028 | 0.28121 | 0.0000232 | -10.62 | 0.82 | -0.98 | 3332 | 50 | 3284 |
| Ls231.73 | 1884 | 0.00696 | 0.00022 | 0.0000014 | 0.28127 | 0.0000225 | -11.20 | 0.80 | -0.99 | 3259 | 49 | 3213 |
| Ls231.74 | 129 | 0.03235 | 0.00104 | 0.0000125 | 0.28207 | 0.0000225 | -22.46 | 0.79 | -0.97 | 2564 | 49 | 2568 |
| Ls231.76 | 127 | 0.03113 | 0.00112 | 0.0000028 | 0.28181 | 0.0000246 | -31.79 | 0.87 | -0.97 | 3136 | 53 | 3147 |
| Ls231.77 | 2018 | 0.02296 | 0.00068 | 0.0000012 | 0.28128 | 0.0000197 | -8.74 | 0.70 | -0.98 | 3205 | 43 | 3161 |
| Ls231.78 | 2044 | 0.02072 | 0.00064 | 0.0000077 | 0.28132 | 0.0000239 | -6.66 | 0.85 | -0.98 | 3099 | 52 | 3059 |
| Ls231.79 | 144 | 0.02225 | 0.00086 | 0.0000038 | 0.28188 | 0.0000212 | -28.74 | 0.75 | -0.97 | 2963 | 46 | 2971 |
| Ls332.1 | 1962 | 0.02136 | 0.00064 | 0.0000026 | 0.28125 | 0.0000196 | -10.73 | 0.70 | -0.98 | 3291 | 42 | 3244 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ls332.6 | 131 | 0.03388 | 0.00111 | 0.0000013 | 0.28167 | 0.0000220 | -34.68 | 0.78 | -0.97 | 3385 | 47 | 3393 |
| Ls332.8 | 1998 | 0.01001 | 0.00029 | 0.0000016 | 0.28120 | 0.0000261 | -11.26 | 0.93 | -0.99 | 3348 | 56 | 3299 |
| Ls332.10 | 2013 | 0.01519 | 0.00046 | 0.0000029 | 0.28129 | 0.0000226 | -7.86 | 0.80 | -0.99 | 3151 | 49 | 3109 |
| Ls332.16 | 2081 | 0.01978 | 0.00059 | 0.0000063 | 0.28133 | 0.0000248 | -5.21 | 0.88 | -0.98 | 3037 | 54 | 3000 |
| Ls332.19 | 1954 | 0.01161 | 0.00037 | 0.0000034 | 0.28128 | 0.0000212 | -9.49 | 0.75 | -0.99 | 3207 | 46 | 3162 |
| Ls332.20 | 1965 | 0.01256 | 0.00038 | 0.0000006 | 0.28131 | 0.0000193 | -8.24 | 0.68 | -0.99 | 3137 | 42 | 3095 |
| Ls332.23 | 1950 | 0.01877 | 0.00062 | 0.0000081 | 0.28138 | 0.0000219 | -6.64 | 0.78 | -0.98 | 3020 | 47 | 2981 |
| Ls332.27 | 1940 | 0.01366 | 0.00043 | 0.0000039 | 0.28128 | 0.0000186 | -9.95 | 0.66 | -0.99 | 3225 | 40 | 3180 |
| Ls332.31 | 1936 | 0.02500 | 0.00078 | 0.0000117 | 0.28136 | 0.0000184 | -7.59 | 0.65 | -0.98 | 3073 | 40 | 3032 |
| Ls332.32 | 1935 | 0.01203 | 0.00038 | 0.0000014 | 0.28130 | 0.0000172 | -9.48 | 0.61 | -0.99 | 3191 | 37 | 3147 |
| Ls332.45 | 1981 | 0.02798 | 0.00083 | 0.0000071 | 0.28134 | 0.0000176 | -7.59 | 0.62 | -0.97 | 3109 | 38 | 3067 |
| Ls332.53 | 154 | 0.01976 | 0.00062 | 0.0000036 | 0.28197 | 0.0000228 | -25.17 | 0.80 | -0.98 | 2777 | 49 | 2783 |
| Ls332.61 | 144 | 0.02819 | 0.00096 | 0.0000086 | 0.28188 | 0.0000205 | -28.75 | 0.73 | -0.97 | 2964 | 45 | 2971 |
| Ls332.66 | 1967 | 0.01637 | 0.00050 | 0.0000014 | 0.28131 | 0.0000193 | -8.38 | 0.69 | -0.98 | 3147 | 42 | 3105 |
| Ls332.69 | 2043 | 0.00739 | 0.00023 | 0.0000010 | 0.28127 | 0.0000195 | -7.68 | 0.69 | -0.99 | 3163 | 42 | 3121 |
| Ls332.70 | 139 | 0.02748 | 0.00093 | 0.0000025 | 0.28197 | 0.0000187 | -25.76 | 0.66 | -0.97 | 2776 | 41 | 2782 |
| Ls332.72 | 143 | 0.03708 | 0.00113 | 0.0000218 | 0.28193 | 0.0000232 | -26.92 | 0.82 | -0.97 | 2877 | 50 | 2883 |
| Ls332.73 | 136 | 0.04014 | 0.00127 | 0.0000045 | 0.28189 | 0.0000232 | -28.83 | 0.82 | -0.96 | 2962 | 50 | 2970 |
| Ls332.74 | 128 | 0.01983 | 0.00062 | 0.0000040 | 0.28206 | 0.0000254 | -22.88 | 0.90 | -0.98 | 2589 | 55 | 2594 |
| Ls332.75 | 771 | 0.06487 | 0.00205 | 0.0000357 | 0.28203 | 0.0000303 | -10.46 | 1.07 | -0.94 | 2329 | 66 | 2308 |
| Ls332.76 | 164 | 0.01838 | 0.00064 | 0.0000069 | 0.28201 | 0.0000236 | -24.00 | 0.83 | -0.98 | 2687 | 51 | 2691 |

## 5. 讨论

### 5.1 灵山岛碎屑岩沉积时代的限定

莱阳群主要由瓦屋夼组、林寺山组、止凤庄组、水南组、杨家庄组、龙旺庄组、曲格庄组、杜村组以及法家茔组组成（山东省地质矿产局，1991；宋明春和王沛成，2003）。对于莱阳群形成的时代一直存在着较大的争议，更多的学者倾向于莱阳群的时代应该划归为早白垩世，主要基于介形类、叶肢介等化石组合和火山岩夹层的锆石 U-Pb 定年（陈丕基等，1980；沈炎彬，1981；关绍曾，1989；李双应等，2008；Xie et al., 2012; Wang et al., 2014; 霍腾飞等，2015；彭楠等，2015；周建波等，2016）。然而，鱼类化石及其部分植物化石却不支持这一观点（刘宪亭等，1963）。李守军和谢传礼（1997）认为莱阳群的沉积时代应该始于晚侏罗世，一直延续到早白垩世。因此，灵山岛地区莱阳群法家茔组沉积时代的测定，为进一步精确限定其沉积时代提供了新的约束。

沉积岩系碎屑锆石的年龄谱具有丰富的年代学信息，其最小的年龄谱可以很好地界定沉积岩沉积的时代下限（Wilde et al., 2001; 周建波等，2016）。样品 Ls231 中两颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 127Ma 和 129Ma，平均值为 128 Ma，CL 图像显示（图 5），这两颗锆石具有明显的岩浆韵律环带，高的 Th/U 比值（>0.4）（表 1），为典型的岩浆成因。样品 Ls332 中最年轻的锆石年龄为 128 Ma，该锆石也具有明显的岩浆韵律环带（图 5）以及高的 Th/U 比值（>0.4）（表 1），暗示了一个岩浆成因的特征。研究结果表明，在误差范围内两件样品具有一致的沉积时代（128 Ma）。此外，沉积地层中穿插的岩席或者岩脉可以很好地限定沉积地层形成的上限年龄。野外观测显示（图 10），流纹岩和沉积岩为典型的侵入接触关系。锆石 U-Pb 结果显示，流纹岩形成于 124.6Ma（图 8a），为早白垩世中晚期，这也暗示了灵山岛上碎屑岩的沉积时代不晚于 125 Ma。综上所述，灵山岛上碎屑岩的沉积时代为 125~128Ma，为早白垩世中晚期，也暗示了莱阳群形成于早白垩世，这也与周建波等（2016）在胶莱盆地获得的认识相一致。其次，研究结果也表明，分布在流纹岩之上的含砾杂砂岩应归属于莱阳期法家茔组后期的一套湖泊萎缩后的河流相沉积。

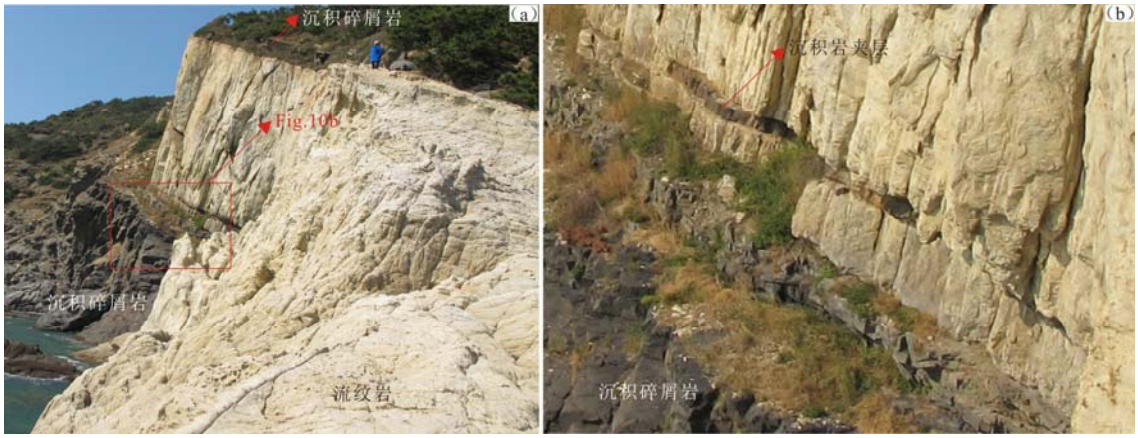


图 10 （a）灵山岛流纹岩与沉积碎屑岩野外关系分布图；（b）流纹岩中的沉积岩夹层

Fig.10 (a) Field relationship of rhyolitic dykes and sedimentary rocks; (b) Interbedded sedimentary layers of rhyolitic dyke

5.2 灵山岛碎屑岩沉积物源的示踪

两件样品的碎屑锆石有效测点共计 136 个，年龄介于 127~2522 Ma，可以分为几个不同的年龄区段（图 11）。（1）2522~2235 Ma 为古元古代早期阶段，峰期年龄为 2400 Ma，这些碎屑锆石具有高的 Th/U 比值 0.35~1.65，平均值为 0.75，为典型的岩浆成因锆石；其次古元古代早期阶段的两颗代表性锆石具有正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值（图 9a），此时华北地区的构造环境可能为典型的洋壳俯冲带或者主动大陆边缘（徐扬等，2011; Santosh et al., 2016），暗示了古元古代早期地壳生长的过程。华北克拉通（NCC）主要以发育新太古代（~2500 Ma）和古元古代（~1850 Ma）的岩浆活动为特征（Zhao et al., 2005; 徐扬等，2011；Sun et al., 2012; Yang et al., 2012; Yang et al., 2017）。虽然在华南崆岭群也有古元古代和新太古代岩浆事件的报道（Gao et al., 1999；Liu et al., 2008b; 徐扬等，2011），但与华北克拉通相比，华南地区则以发育新元古代含磷冰碛岩，双峰式岩浆活动最为典型（Liu et al., 2008b; 徐扬等，2011）。灵山岛地区的碎屑锆石 U-Pb 结果显示，所测样品明显缺乏新元古代的锆石年龄而不同于扬子克拉通（图 10a），因此它们的源区很可能来自于亲华北的胶北地体（图 9a；图 11b）。（2）1884~2152 Ma 阶段的碎屑锆石峰期年龄值为~1900 Ma，这组数据占有绝对的优势。这些碎屑锆石普遍具有较高的 Th/U 比值（>0.4）（图 7），暗示了一个岩浆成因的机制。少部分锆石具有相对较低的 Th/U 比值（<0.4），很可能和华北地区古元古代中期的麻粒岩-高角闪岩相的变质事件有关（周建波等，2013）。这些古元古代中期的代表性锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值介于-5.21~-11.98，它们与胶北地体的锆石 Hf 同位素组成相一致（图

9a）。其次，古元古代中期（~1900 Ma）的锆石在 Hf 同位素组成上明显不同于古元古代早期，这也表明了该时期的岩浆源区主要以古老地壳的再造为主。（3）第三个年龄段的锆石为新元古代，分布较少，年龄为 771 Ma 和 796Ma，Th/U 比值为 1.49 和 0.79（表 1），为典型的岩浆锆石。其中 771 Ma 的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为-10.46，二阶段模式年龄为 2308 Ma。新元古代的两颗碎屑锆石和苏鲁造山带超高压变质岩的原岩年龄相一致（Zhao et al., 2017），因此它们很可能来自于亲扬子的苏鲁造山带。（4）样品 Ls231 分布有一颗 359Ma 的碎屑锆石，该颗碎屑锆石具有明显的核幔结构，锆石的边部可见明显的岩浆韵律环带（图 5），核部为暗色的残余锆石。该碎屑锆石的年龄曾经在苏鲁造山带中的超高压岩石（CCSD 钻孔）和副片麻岩中获得（许志琴等，2006；Yang et al., 2009; 彭楠等，2015），因此晚古生代的碎屑锆石很可能来自于近源的苏鲁造山带。此外，该颗锆石具有相对较低的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值（-14.4），二阶段模式年龄为 2241Ma，显示了古老地壳的再造，这也和华北北缘晚古生代岩浆活动以及 Hf 同位素组成具有很好的耦合性（邵济安等，2015；Cao et al., 2013），即表明在苏鲁造山带形成的过程中，华北北缘的少量物质可能参与了造山带的形成。（5）晚侏罗世-早白垩世的岩浆岩在苏鲁造山带以及胶北地体中广泛分布（郭敬辉等，2005；Yang et al., 2005a, b; 张娟，2011；Xu et al., 2016; Zhao et al., 2016, 2017）。本次研究获得碎屑锆石年龄范围为 164~127 Ma，这些锆石具有高的 Th/U 比值（>0.4）（图 7），并且 CL 图像显示，它们均具有明显的岩浆韵律结构（图 5），为典型的岩浆成因锆石。锆石 Hf 同位素显示，晚侏罗世-早白垩世的碎屑锆石具有非常富集的 Hf 同位素组成（$\varepsilon_{Hf}(t)$=-18.62~-31.79）（图 9b），暗示其源区为古老地壳的部分熔融。结合锆石 U-Pb 年龄以及 Hf 同位素组成，灵山岛地区晚侏罗世-早白垩世碎屑锆石很可能来自于苏鲁造山带或胶北地体的中生代岩浆岩（图 11b-c）。

综合结果显示，亲华北的胶北地体是灵山岛碎屑岩最为重要的物质源区，其次亲扬子的苏鲁造山带也为灵山岛地区的碎屑岩提供了物源（图 11）。研究结果表明，在早白垩世时，苏鲁造山带可能存在着差异隆升，苏鲁造山带不同地区的古水流、碎屑锆石年龄峰值分布方面以及碎屑岩砾石物质组成方面均有明显的不同，表现为西南段隆升幅度较大，而东北段隆升幅度较小，并且可能经历了后期的构造塌陷（彭楠等，2015）。

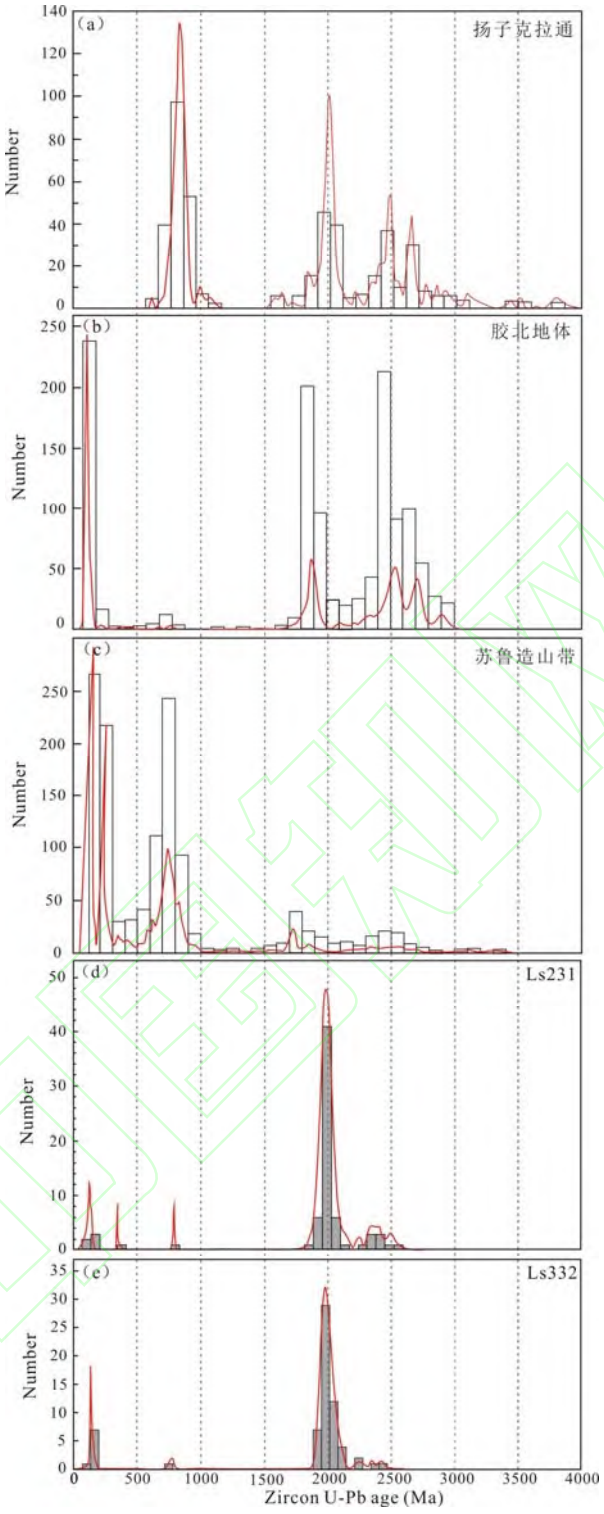


图 11 灵山岛碎屑岩锆石 U-Pb 年龄分布频率图（苏鲁造山带、胶北地体及扬子克拉通锆石年龄数据自 Xie et al., 2012; Wang et al., 2014, 2016; 周建波等，2016 等修改）

Fig.11 Cumulative probability plots and frequency histograms of detrital zircons U-Pb populations (referenced data modified from Xie et al., 2012; Wang et al., 2014, 2016; Zhou et al., 2016)

## 5.3 与胶莱盆地莱阳群物源的对比

胶莱盆地和苏鲁造山带之间以五莲-青岛-烟台断裂为界。本文的研究结果表

明，来自于断裂带以东的灵山岛地区的莱阳群在物源组成上和胶莱盆地明显不同。胶莱盆地莱阳群的碎屑锆石年龄谱系以中生代年龄为主（图 12a），而灵山岛地区莱阳群碎屑锆石的年龄以古元古代年龄为主（图 12b）。这些特征显示，亲华北的胶北地体是断裂带以东的灵山岛地区的主要物源区，而苏鲁造山带是断裂带以西胶莱盆地的主要物源。造成这种沉积物源的差异和当时的大地构造背景具有密切的关系。早白垩世时研究区及邻区以伸展构造为主（Ren et al., 2002; 刘俊来等，2008；Ni et al., 2013; Xia et al.,2016），由拆离断层形成的拉伸断陷盆地广泛发育。因此，这种主要物源的差别很可能和当时的古地貌以及区域性断陷盆地的分布有关（侯方辉等，2008；彭楠等，2015）。

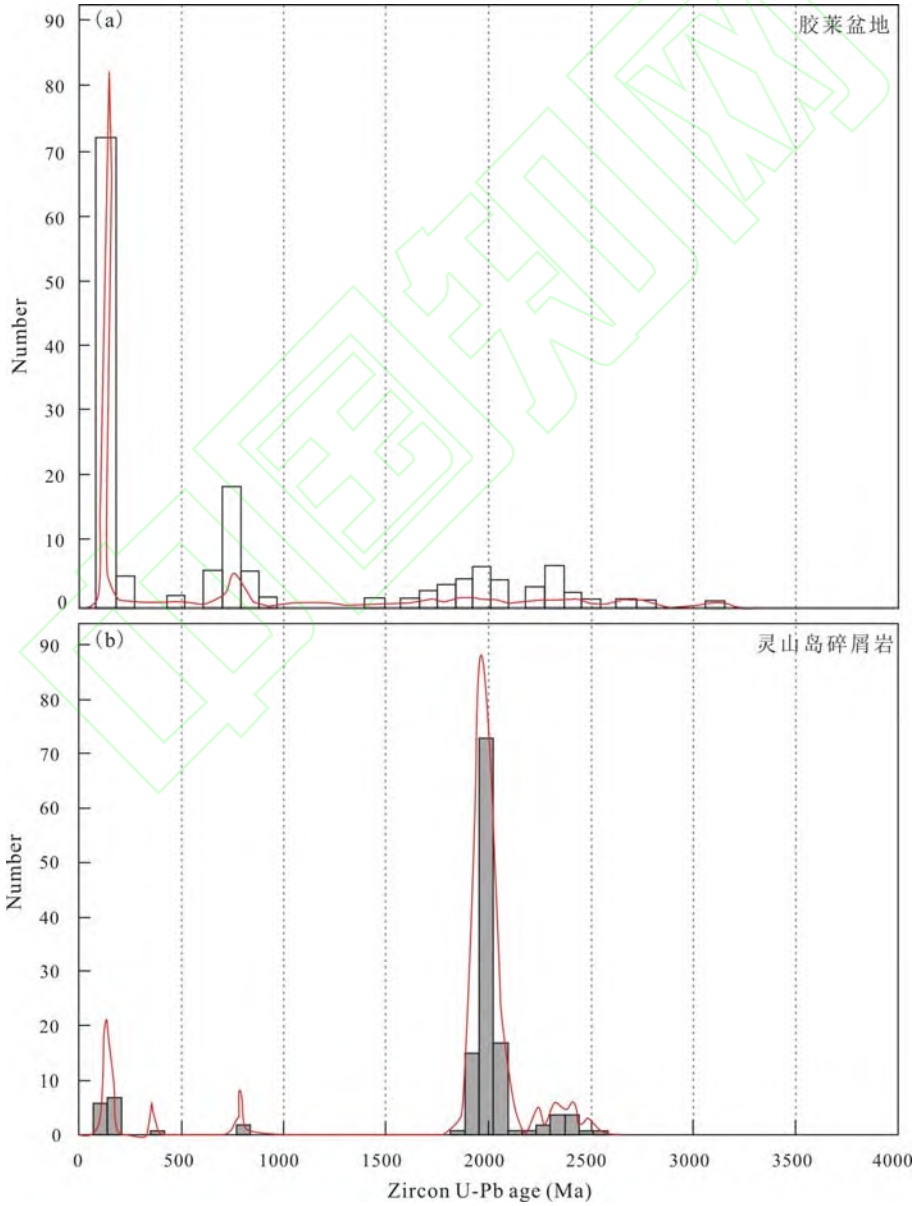


图 12　胶莱盆地莱阳群与灵山岛地区莱阳群碎屑锆石年龄对比图（图 12a 据周建波等修改，2016；图 12b 来自本文）

Fig.12 U-Pb probability diagrams of zircon data from Mesozoic sedimentary rocks of Jiaolai basin and Lingshan Island (referenced data for the Fig.12a drawn from Zhou et al., 2016, and Fig.12b drawn from this study)

5.4 沉积大地构造环境

苏鲁造山带东段灵山岛地区早白垩世时的大地构造环境以及岛上的两套碎屑岩的成因机制存仍然在着激烈的争论（吕洪波等，2011，2012，2013；钟建华，2012；张海春等，2013；董晓鹏，2014；Shao et al., 2014; Wang et al., 2014, 2015, 2016; 周瑶琪等，2015；Yang et al., 2016; 钟建华等，2016；李守军等，2017；张振凯等，2017；Zhou et al., 2017）。

在前人研究的基础之上，本次研究对灵山岛上发育的两套碎屑岩分别进行了取样（图 3），并且对两件样品进行了碎屑锆石 U-Pb 测试和 Hf 同位素分析。综合结果表明，莱阳群法家茔组和上覆的粗碎屑岩具有相同的沉积时代以及物源组成，暗示了一个从下到上快速沉降的过程。其次碎屑锆石中早白垩世-侏罗纪的锆石年龄和苏鲁造山带以及胶北地体中广泛分布的后碰撞花岗岩类的年龄相一致（张娟，2011；Yang et al., 2017），这充分表明了花岗岩类在侵入后不久便被剥蚀到地表。早白垩世-侏罗纪花岗岩类的快速折返时间和区内变质核杂岩中大型拆离断层形成的时代相一致（Ni et al., 2013; 周建波等，2016）。因此，研究区内大型伸展断裂构造的发育一方面导致区内大规模的火山岩浆活动，另一方面导致了早先侵位的花岗岩类和超高压岩石折返到地表，成为剥蚀物源区，构成了三维一体的变质核杂岩机制。早白垩世（~125 Ma）是中国东部岩石圈剪薄的峰期，其中最为直接的证据表现为广泛分布的断陷盆地、拆离断层、变质核杂岩以及大规模的岩浆火山活动（Ren et al., 2002; Wu et al., 2005; 刘俊来等，2008；张娟，2011；Liu et al., 2013; Ni et al., 2013; Xia et al., 2016）。因此，早白垩世时灵山岛地区也表现为以伸展构造为主的盆岭地貌，这也得到了地球物理资料的印证（侯方辉等，2008）。

流纹岩上部的含砾粗砂岩中可见虫孔构造、斜层理等，指示了一个河流相的沉积环境（图 13a-b）。下部的法家茔组细粒砂泥岩发育有良好的粒序层理，可见植物碎屑化石、叶肢介和鱼类化石等（图 12c-d）（李守军等，2017），显示了一个陆相淡水的沉积环境。早白垩世早期，由于拆离断层的伸展作用，断陷盆地开始接收沉积，沉积了厚层的湖相砂泥岩。到了早白垩世中晚期时，研究区内的断

陷湖盆处于演化的后期，发育了一套以风暴岩为特征的浅水湖泊相沉积（钟建华等，2016）。在断陷湖盆萎缩消亡期时，其上发育了一套河流相的含砾粗砂岩。整个沉积过程可以概括为：早白垩世时断陷湖盆初期规模较大，沉积了一套较厚的砂泥岩，到了湖盆萎缩、消亡时，以含砾的粗碎屑河流相沉积为主，随后火山爆发，其上覆盖了一套厚层的中基性火山角砾岩。通过对灵山岛上的中性火山岩进行锆石 LA-ICP-MS 定年，结果显示：上覆的火山岩的成岩时代和两套碎屑岩的沉积时代近乎一致（图 8b）。因此研究结果暗示了在湖盆沉积后不久，随后区内发生了强烈的火山喷发，引起了局部火山地震，导致断陷湖盆中未成岩的砂泥岩发生滑塌，形成大规模的软沉积变形和滑塌构造，这也和 Zhou et al. (2017)、葛毓柱和钟建华（2017）最新的研究成果相一致。

结合古生物化石（图 13）以及典型的风暴沉积（钟建华等，2016），本文认为灵山岛上发育的两套的碎屑岩为典型的河湖相沉积，而非半深海-深海沉积。灵山岛上的两套碎屑岩的岩性、沉积时代以及化石组合和莱阳群法家茔组较为接近，均为陆相沉积。因此，建议使用莱阳群法家茔组，而不建议使用被认为发育深海-半深海浊积岩的“灵山岛组”。


图 13 灵山岛地区碎屑岩及化石野外分布照片

（a）含砾粗砂岩中的虫孔构造；（b）含砾粗砂岩中的斜层理构造；（c）法家茔组砂泥岩中的叶肢介化石；（d）法家茔组砂泥岩中的植物根茎碎屑化石

Fig.13 Outcrop photos and fossils of detrital sedimentary rocks in Lingshan Island

(a) wormhole structures of the conglomerate-bearing sandstone; (b) oblique bedding of the conglomerate-bearing sandstone; (c) conchostraca fossils of the Fajiaying Formation; (d)

fragments of fossil plants of the Fajiaying Formation

## 6. 结论

（1）莱阳群法家茔组的碎屑锆石年龄显示，法家茔组和八亩地组下部的河流相碎屑岩具有一致的沉积时代，沉积时代为 125~128Ma 之间，表明了灵山岛上两套碎屑岩均为早白垩世中晚期的沉积产物。

（2）火山碎屑岩下部含砾粗砂岩为莱阳期湖盆演化后期典型的河流相沉积，而非造山后的磨拉石沉积。

（3）碎屑锆石年龄谱特征显示，灵山岛上早白垩世碎屑岩主要物源区来自于亲华北的胶北地体，少量物源来自苏鲁造山带。

（4）碎屑锆石年龄谱对比表明，灵山岛莱阳群碎屑岩与五莲-青岛-烟台断裂西侧的胶莱盆地具有不同的物源，它们均形成于不同的断陷盆地。

（5）早白垩世时，灵山岛地区为典型的河湖相沉积，而非深海-半深海沉积，建议使用莱阳群法家茔组之名，而不使用被认为是海相浊积岩命名的“灵山岛组”。

**致谢：**两位审稿专家对论文进行了认真的审阅，从论文的内容、结构和立意等方面提出了建设性的修改意见，使得论文的质量得到了质的提升，让作者受益匪浅，在此，对两位专家表示衷心的感谢。论文撰写的过程中和朱晓青博士进行了有益的讨论；数据处理的过程中得到了天津地质调查中心王家松工程师的大力帮助。

## References


Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U－Pb analyses that do not report $^{204}$Pb. Chemical Geology, 192(1－2): 59－79. doi: 10.1016/S0009－2541(02)00195－X

Cao, H.H., Xu, W.L., Pei, F.P., et al., 2013. Zircon U－Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic－Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the norther margin of the North China block. Lithos, 170－171: 191－207. doi: 10.1016/j.lithos.2013.03.006

Chen, P.J., Cao, M.Z., Pan, H.Z., et al., 1980. The problems of the continental deposit in the Shandong Province. Journal of Stratigraphy, 4(4): 301－309 (in Chinese with English abstract).

Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., et al., 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469－500. doi: 10.2113/0530469

Dong, X.P., 2014. Sedimentary environment and tectonic background of Lingshan Island in Early Cretaceous [Dissertation]. China University of Petroleum (East China), Qingdao, 1－81 (in Chinese with English abstract).

Ernst, W.G., Tsujimori, T., Zhang, R., et al., 2007. Permo－triassic collision, subduction－zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35(1): 73 － 110. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140146

Fu, Y.T., Yu, Z.Y., 2010. Metamorphosed marine clastic rocks in Qingdao: Tectonic attribute and implication. Chinese Journal of Geology, 45(1): 207－227 (in Chinese with English abstract).

Gao, S., Ling, W.L., Qiu, Y.M., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm－Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high－grade terrain of the Yangtze Craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anataxis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 2071－2088. doi: 10.1016/S0016－7037(99)00153－2

Ge, Y.Z., Zhong, J.H., 2017. Discussion about triggers of Early Cretaceous soft－sediment deformation structures on the Lingshan Island and the implications for Palaeo－environment. Geological Review, 63(4): 927－940 (in Chinese with English abstract).

Geng, J.Z., Li, H.K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA－MC－

ICP－MS. Geological Bulletin of China, 30(10): 1508－1513 (in Chinese with English abstract).

Grimmer, J.C., Ratschbacher, L., Williams, M.M., et al., 2003. When did the ultrahigh－pressure rocks reach the surface? A $^{207}Pb/^{206}Pb$ zircon, $^{40}Ar/^{39}Ar$ white mica, Si－in white mica, single－grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments. Chemical Geology, 197(1－4): 87－110. doi: 10.1016/S0009－2541(02)00321－2

Guan, S.Z., 1989. Middle Early Cretaceous nonmarine ostracods from the Laiyang basin, Shandong. Acta Micropalaeontologica Sinica, 6(2): 179－188 (in Chinese with English abstract)

Guo, J.H., Chen, F.K., Zhang, X.M, et al., 2005. Evolution of syn－ to post－collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: zircon U－Pb geochronology. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1281－1301 (in Chinese with English abstract).

Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27 － 62. doi: 10.2113/0530027

Hou, F.H., Li, R.H., Zhang, X.H., et al., 2012. Jiaolai basin extending into south Yellow Sea: evidence from a new seismic profile in south Yellow Sea. Marine Geology Frontiers, 28(3): 12－16 (in Chinese with English abstract).

Hou, F.H., Zhang, Z.X., Zhang, X.H., et al., 2008. Geologic evolution and tectonic styles in the south Yellow Sea basin. Marine Geology and Quaternary Geology, 28(5): 51－68 (in Chinese with English abstract).

Huo, T.F., Yang, D.B., Xu, W.L., et al., 2015. U－Pb ages and Hf Isotope compositions of detrital zircons from the sandstone in the Early Cretaceous Wawukuang Formation in the Jiaolai basin, Shandong province and its tectonic implications. Geotectonica et Metallogenia, 39(2): 355－368 (in Chinese with English abstract).

Leech, M.L., Webb, L.E., 2013. Is the HP－UHP Hong'an－Dabie－Sulu orogeny a piercing point for offset on the Tan－Lu fault? Journal of Asian Earth Sciences, 63: 112－129. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.08.005

Li, S.J., Xie, C.L., 1997. A discussion on the age of the Laiyang Formation in Laiyang basin, Shandong. Journal of Stratigraphy, 21(3): 233－238 (in Chinese with English abstract).

Li, S.J., Zhang, X.Y., Zhao, X.L., et al., 2017. Discovery of Fish and Conchostracan fossils in Lower Cretaceous in Lingshan Island, Qingdao, Shandong. Geological Review, 63(1): 1－6 (in Chinese with English abstract).

Li, S.Y., Meng, Q.R., Li, R.W., et al., 2008. Characteristics of material components from the Lower Cretaceous Laiyang Formation in Jiaolai basin, Shandong province, eastern China and constraints to the provenance. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2395－2406 (in Chinese with English abstract).

Liou, J.G., Banno, S., Ernst,W.G., 1995. Ultrahigh－pressure metamorphism and tectonics. Island Arc, 4(4): 233－239. 10.1111/j.1440－1738.1995.tb00146.x

Liu, F.L., Liou, J.G., 2011. Zircon as the best mineral for P－t－time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U－Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie － Sulu UHP rocks. Journal of Asian Earth Sciences, 40(1): 1 － 39. 10.1016/j.jseaes.2010.08.007

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, doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.014

Liu, F.L., Xu, Z.Q., Xue, H.M., 2004. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U－Pb dating of mineral inclusion－bearing zircons. Lithos, 78(4): 411－429. 10.1016/j.lithos.2004.08.001

Liu, J.L., Davis, G.A., Ji, M., et al., 2008. Crustal detachment and destruction of the North China craton: constraints from Late Mesozoic extensional structures. Earth Science Frontiers, 15(3): 72－81 (in Chinese with English abstract).

Liu, J.L., Shen, L., Ji. M., et al., 2013. The Liaonan/Wanfu paired metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Progressive exhumation and constraints on destruction of the North China craton. Tectonics, 32: 1121－1141. doi: 10.1002/tect.20064

Liu, X.M., Gao, S., Diwu, C.R., et al., 2008b. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies. American Journal of Science, 308(4): 421－468. doi: 10.2475/04.2008.02

Liu, X.T., Su, D.Z., Huang, W.L., 1963. The fossil of Lycoptera in North China. Science Press, Beijing, 1－39 (in Chinese).

Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008a. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA－ICP－MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1－2): 34－43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004

Lu, H.B., Wang, J., Zhang, H.C., 2011. Discovery of the Late Mesozoic Slump Beds in Lingshan Island , Shandong , and a Pilot Research on the Regional Tectonics. Acta Geologica Sinica, 85(6): 938－946 (in Chinese with English abstract).

Lu, H.B., Zhang, H.C., Wang, J., et al., 2012. Discovery of huge olistolith in the Late Mesozoic turbidites in Lingshan Island, Jiaonan, Shandong. Geological Reviews, 58(1): 80－81 (in Chinese).

Lu, H.B., Zhang, H.C., Wang, J., et al., 2013. Early Cretaceous flysch is not typical intracontinental delta sediments in Lingshan Island－Response to Professor Zhong Jianhua. Geological Reviews, 59(1): 11－14 (in Chinese).

Ni, J.L., Liu, J.L., Tang, X.L., et al., 2013. The Wulian metamorphic core complex: A newly discovered metamorphic core complex along the Sulu orogenic belt, eastern China. Journal of Earth Science, 24: 297－313. doi: 10.1007/s12583－013－0330－5

Peng, N., Liu, Y.Q., Kuang, H.W., et al., 2015. Provenance of Early Cretaceous Laiyang Group in Jiaolai Basin and its significance. Geology in China, 42(6): 1793－1810 (in Chinese with English abstract).

Ren, J.Y., Tamaki, K., Li, S.T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 344: 175 － 205. doi: 10.1016/S0040－1951(01)00271－2

Santosh, M., Teng, X.M., He, X.F., et al., 2016. Corrigendum to Discovery of Neoarchean suprasubduction zone ophiolite suite from Yishui Complex in the North China Craton. Gondwana Research, 38: 1－27. doi: 10.1016/j.gr.2015.10.017

Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resource., 1991. Regional Geology of Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House, Beijing, 1－639 (in Chinese).

Shao, J.A., He, G.Q., Tang, K.D., 2015. The evolution of Permian continental crust in northern part of North China. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 47－55 (in Chinese with English

abstract).

Shao, Z.F., Zhong, J.H., Li, Y., et al., 2014. Characteristics and sedimentary processes of lamina－controlled sand－particle imbricate structure in deposits on Lingshan Island, Qingdao, China. Science China Earth Sciences, 57(5): 1061－1076. doi: 10.1007/s11430－014－4848－x

Shen, Y.B., 1981. Cretaceous conchostracan fossils from eastern Shandong. Acta Palaeontologica Sinica, 20(6): 518－525 (in Chinese with English abstract)

Song, M.C., Wang, P.C., 2004. Regional Geology of Shandong province. Maps Press of Shandong province, Jinan, 144 (in Chinese).

Sun, J.F., Yang, J.H., Wu, F.Y., 2012. Precambrian crustal evolution of the eastern North China Craton as revealed by U－Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons from the Proterozoic Jing'eryu Formation. Precambrian Research, 200 － 203: 184 － 208. doi: 10.1016/j.precamres.2012.01.018

Sun, J.W., Fu, Y.T., Lan, C.L., 2014. Trace element geochemical characteristics of the marine clastic rocks in Qingdao and their sedimentary environments implications. Marine Sciences, 38(8): 75－81 (in Chinese with English abstract).

Wang, J., Chang, S.C., Lin, P., et al., 2016. Evidence of Early Cretaceous transpressioin in the Sulu orogenic belt, eastern China. Tectonophysics, 687: 44 － 55. doi: 10.1016/j.tecto.2016.09.005

Wang, J., Chang, S.C., Lu, H.B., et al., 2014. Detrital zircon U－Pb age constraints on Cretaceous sedimentary rocks of Lingshan Island and implications for tectonic evolution of Eastern Shandong, North China. Journal of Asian Earth Sciences, 96: 27 － 45. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.09.002

Wang, J., Chang, S.C., Wang, K.L., et al., 2015. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous igneous units from the central Sulu orogenic belt: Evidence for crustal delamination during a shift in the regional tectonic regime. Journal of Asian Earth Sciences, 112: 49－59. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.09.009

Weislogel, A.L., Graham, S.A., Chang, E.Z., et al., 2006. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan－Ganzi complex: Sedimentary record of collision of the North and South China blocks. Geology, 34(2): 97－100. doi: 10.1130/G21929.1

Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H., et al., 2001. Evidence from detrital zircons for the existence

of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature, 409(6817): 175－178.

Wu, F.Y., Li, X.H, Zheng, Y.F., 2007. Lu－Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185－220 (in Chinese with English abstract).

Wu, F.Y., Lin, J.Q., Wilde, S.A., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth and Planetary Science Letters, 233: 103－119. doi: 10.1016/j.epsl.2005.02.019

Wu, Z.P., Li, L., Li, W., et al., 2004. Sedimentary pattern of prototype basin in the deposition period of Laiyang Formation and the advantageous areas for oil and gas exploration of Jiaolai basin. Geotectonica et Metallogenia, 28(3): 330－337 (in Chinese with English abstract).

Xia, Z.M., Liu, J.L., Ni, J.L., et al., 2016. Structure, evolution and regional tectonic implications of the Queshan metamorphic core complex in eastern Jiaodong Peninsula of China. Science China Earth Sciences, 59(5): 997－1013. doi: 10.1007/s11430－015－5259－3

Xie, S.W., Wu, Y.B., Zhang, Z.M., et al., 2012. U－Pb ages and trace elements of detrital zircons from Early Cretaceous sedimentary rocks in the Jiaolai Basin, north margin of the Sulu UHP terrane: Provenances and tectonic impications. Lithos, 154: 346 － 360. doi: 10.1016/j.lithos.2012.08.002

Xu, H.J., Zhang, J.F., Wang, Y.F., et al., 2016. Late Triassic alkaline complex in the Sulu UHP terrane: Implications for post － collisional magmatism and subsequent fractional crystallization. Gondwana Research, 35: 390－410. doi: 10.1016/j.gr.2015.05.017

Xu, S.T., Okay, A.I., Ji, S.Y., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. Science, 256: 80－82.

Xu, Y., Feng, Y., Li, R.H., 2011. Main progresses in the study of Precambrian basement of Jiaobei terrane, Eastern China. Geoscience, 25(5): 965－974 (in Chinese with English abstract).

Xu, Z.Q., Liu, F.L., Qi, X.X., et al., 2006. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultra－high pressure metamorphic terrane. Acta Petrologica Sinica, 22(7): 1745－1760 (in Chinese with English abstract).

Xu, Z.Q., Zeng, L.S., Liu, F.L., et al., 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high－pressure－ultrahigh－pressure metamorphic terrane. Geological Society of America Special Paper, 403(1): 93－113. doi: 10.1130/2006.2403(5)

Xu. J.W., Zhu, G., 1994. Tectonic models of the Tan－Lu fault zone, eastern China. International

Geology Review, 36(8): 771－784. doi: 10.1080/00206819409465487

Yang, D.B., Xu, W.L., Xu, Y.G., et al., 2012. U－Pb ages and Hf isotope data from detrital zircons in the Neoproterozoic sandstones of northern Jiangsu and southern Liaoning provinces, China: Implications for the Late Precambrian evolution of the southeastern North China Craton. Precambrian Research, 216－219: 162－176. doi: 10.1016/j.precamres.2012.07.002

Yang, D.B., Xu, W.L., Xu, Y.G., et al., 2013. Provenance of sediments from Mesozoic basins in western Shandong: Implications for the evolution of the North China Block. Journal of Asian Earth Sciences, 76: 12－29. doi: 10.1016/j.jseaes.2013.07.027

Yang, J.H., Chung, S.L., Wilde, S.A., et al., 2005a. Petrogenesis of post－orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd－Sr isotopic evidence. Chemical Geology 214, 99－125. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.053

Yang, J.H., Wu, F.Y., Chung, S.L., et al., 2005b. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh－pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning. Chemical Geology, 222: 200－231. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.07.006

Yang, J.S., Li, T.F., Chen, S.Z., et al., 2009. Genesis of garnet peridotites in the Sulu UHP belt: examples from the Chinese continental scientific drilling project－main hole, PP1 and PP3 drill holes. Tectonophysics, 475: 359－382. doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.032

Yang, R.C., Loon, A.J.V., 2016. Early Cretaceous slumps and turbidites with peculiar soft－sediment deformation structures on Lingshan Island (Qingdao, China) indicating a tensional tectonic regime. Journal of Asian Earth Sciences, 129(1): 206 － 219. doi: 10.1016/j.jseaes.2016.08.014

Yea, K., Yao, Y., Katayama, I., et al., 2000. 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: 157－164. doi: 10.1016/S0024－4937(99)00089－4

Yin, A., Nie, S.Y., 1993. An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan－Lu and Honam fault systems, esstern Asia. Tectonics, 12(4): 801－813. doi: 10.1029/93TC00313

Zhang, H.C., Lu, H.B., Li, J.G., et al., 2013. The Lingshan Dao Formation: a new lithostratigraphic unit of the Early Cretaceous in Qingdao, Shandong ,China. Journal of

Stratigraphy, 37(2): 216－222 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J., 2011. A geochemical study of Mesozoic magmatic rocks in the Sulu orogen (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei, 87－117 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z.K., Zhou, Y.Q., Peng, T.M., et al., 2017. Geochemical characteristics and signatures of siltstones from Laiyang Group at Lingshan Island, Qingdao, Shandong. Earth Science, 42(3): 357－377 (in Chinese with English abstract)

Zhao, G.C., Sum, M., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Research, 136: 177－202. doi: 10.1016/j.precamres.2004.10.002

Zhao, R., Wang, Q.F., Liu, F.F., et al., 2016. Architecture of the Sulu crustal suture between the North China Craton and Yangtze Craton: Constraints from Mesozoic granitoids. Lithos, 266－267: 348－361. doi: 10.1016/j.lithos.2016.10.018

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, doi: 10.1016/j.jseaes.2017.03.038.

Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2009. Remelting of subducted continental lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie－Sulu orogenic belt. Science China Series D－Earth Sciences, 52(9): 1295－1318. doi: 10.1007/s11430－009－0134－8

Zheng, Y.F., 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zone. Chemical Geology, 328: 5－48. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.02.005

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: 327－358. doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.014

Zheng, Y.F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie－Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. Earth－Science Reviews, 62: 105－161. doi: 10.1016/S0012－8252(02)00133－2

Zheng, Y.F., Zhou, J.B., Wu, Y.B., et al., 2005. Low－grade metamorphic rocks in the Dabie－Sulu orogenic belt: A passive－margin accretionary wedge deformed during continent

subduction. International Geology Review, 47(8): 851 — 871. doi: 10.2747/0020 — 6814.47.8.851

Zhong, J.H., 2012. Lingshan Island Mesozoic sedimentary rocks in deep water far source turbidite or continental delta deposits? A discussion with Professor Lü Hongbo. Geological Review, 58(6): 1180—1182 (in Chinese).

Zhong, J.H., Ni, L.T., Shao, Z.F., et al., 2016. Tempestites and storm deposites in the Lower Cretaceous from Lingshan Island, Qingdao. Journal of Palaeogeography, 18(3): 381—398 (in Chinese with English abstract).

Zhou, J.B., Han, W., Song, M.C., 2016. The exhumation of the Sulu terrane and the forming of the Tancheng—Lujiang Fault: Evidence from detrital zircon U—Pb dating of the Mesozoic sediments of the Laiyang basin, Central China. Acta Petrologica Sinica, 32 (4): 1171—1181 (in Chinese with English abstract).

Zhou, J.B., Wilde, S.A., Zhao, G.C., et al., 2008. SHRIMP U—Pb zircon dating of the Wulian complex: Defining the boundary between the North and South China Cratons in the Sulu Orogenic belt, China. Precambrian Research, 162: 559 — 567. doi: 10.1016/j.precamres.2007.10.008

Zhou, J.B., Zeng, W.S., Cao, J.L., et al., 2013. The tectonic framework and evolution of the Sulu Orogen: evidence from the low—grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt. Chinese Science Bulletin, 58: 2338—2343 (in Chinese).

Zhou, Y.Q., Peng, T.M., Zhou, T.F, et al., 2017. Soft—sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province, East China. Journal of Palaeogeography, 6(2):162 — 181. doi: 10.1016/j.jop.2017.02.002

Zhou, Y.Q., Zhang, Z.K., Liang, W.D., et al., 2015. Late Mesozoic tectono—magmatic activities and prototype basin restoration in Eastern Shandong province, China. Earth Science Frontiers, 22(1): 137—156 (in Chinese with English abstract).

Zhu, G., Wang, Y.S., Liu, G.S., et al., 2005. $^{40}Ar—^{39}Ar$ dating of strike—slip motion on the Tan—Lu Fault Zone, East China. Journal of Structural Geology, 27: 1379 — 1398. doi: 10.1016/j.jsg.2005.04.007

Zhu, G., Xie, C.L., Wang, Y.S., et al., 2005. Characteristics of the Tan—Lu high—pressure strike

－slip ductile shear zone and its 40Ar－39Ar dating. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1687－1702 (in Chinese with English abstract).

Zhu, R.X., Chen, L., Wu, F.Y., et al., 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. Science China: Earth Science, 54: 789－797. doi: 10.1007/s11430－011－4203－4

## 附中文参考文献

陈丕基, 曹美珍, 潘华璋, 等, 1980. 山东中生代陆相地层问题. 地层学杂志, 4(4): 301－309.

董晓鹏, 2014. 灵山岛早白垩世沉积大地构造研究[硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学（华东）, 1－81.

付永涛, 虞子冶, 2010. 青岛垭口－八仙墩变质海相碎屑岩的属性及构造意义. 地质科学, 45（1）: 207－227.

葛毓柱, 钟建华, 2017. 灵山岛早白垩世软沉积物变形构造触发机制及其古环境意义探讨. 地质论评, 63（4）: 927－940.

耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA－MC－ICP－MS 测定. 地质通报, 30（10）: 1508－1513.

关绍曾, 1989. 山东莱阳盆地早白垩世中期非海相介形类. 微体古生物学报, 62（2）: 179－188.

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, 21（4）: 1281－1301.

侯方辉, 李日辉, 张训华, 等. 2012. 胶莱盆地向南黄海延伸－来自南黄海地震剖面的新证据. 海洋地质前沿, 28（3）: 12－16.

侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 2008. 南黄海盆地演化及构造样式地震解释. 海洋地质与第四纪地质, 28（5）: 61－68.

霍腾飞, 杨德彪, 许文良, 等. 2015. 胶莱盆地早白垩世瓦屋夼组砂岩碎屑锆石 U－Pb－Hf 同位素组成及其构造意义. 大地构造与成矿学, 39（2）: 355－368.

李守军, 谢传礼, 1997. 山东莱阳盆地莱阳组时代讨论. 地层学杂志, 21（3）: 233－238.

李守军, 张详玉, 赵秀丽, 等. 2017. 山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石. 地质论评, 63（1）: 1－6.

李双应, 孟庆任, 李任伟, 等. 2008. 山东胶莱盆地下白垩统莱阳组物质组分特征及其对物源

区的制约. 岩石学报, 24（10）: 2395－2406.

刘俊来, Gregory A.Davis, 纪沫, 等. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束. 地学前缘, 15（3）: 72－81.

刘宪亭, 苏德造, 黄为龙, 1963. 华北的狼鳍鱼化石. 北京: 科学出版社, 1－39.

吕洪波, 王俊, 张海春, 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. 地质学报, 85（6）: 938－946.

吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 2012. 山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑积岩块. 地质论评, 58（1）: 80－81.

吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 2013. 灵山岛早白垩世复理石不是陆内三角洲沉积—答钟建华教授. 地质论评, 59（1）: 11－14.

彭楠, 刘永清, 旷红伟, 等. 2015. 胶莱盆地早白垩世莱阳群沉积物源及地质意义. 中国地质, 42（6）: 1793－1810.

山东地质矿产局, 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1－639.

邵济安, 何国琪, 唐克东, 2015. 华北北部二叠纪陆壳演化. 岩石学报, 31（1）: 47－55.

沈炎彬, 1981. 胶东白垩纪叶肢介. 古生物学报, 20（6）: 518－525.

宋明春, 王沛成, 2004. 山东省区域地质. 济南: 山东省地图出版社, 144.

孙建伟, 付永涛, 兰朝利, 2014. 青岛八仙墩碎屑岩微量元素地球化学特征及沉积环境意义. 海洋科学, 38（8）: 75－81.

吴福元, 李献花, 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.

吴智平, 李凌, 李伟, 等. 2004. 胶莱盆地莱阳期原型盆地的沉积格局及有利油气勘探区选择. 大地构造与成矿学, 28（3）: 330－337.

徐扬, 冯岩, 李日辉, 2011. 胶北地块前寒武纪基底研究新进展. 现代地质, 25（5）: 965－974

许志琴, 刘福来, 戚学祥, 等. 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录. 岩石学报, 22（7）: 1745－1760.

张海春, 吕洪波, 李建国, 等. 2013. 山东青岛早白垩世新地产单位—灵山岛组. 地层学杂志, 37（2）: 216－222.

张娟, 2011. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究（博士学位论文）. 合肥: 中国科学技术大学, 87－117.

张振凯, 周瑶琪, 彭甜明, 等. 2017. 山东灵山岛莱阳群粉砂岩地球化学特征及意义. 地球科

学, 42（3）: 357－377.

钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 2016. 青岛灵山岛下白垩统风暴岩与风暴沉积的发现及意义. 古地理学报, 18（3）: 381－398.

钟建华, 2012. 灵山岛中生代沉积岩是深水远源浊积岩、还是陆内三角洲沉积？: 与吕洪波教授商榷. 地质论评, 58(6) : 1180－1182.

周建波, 曾维顺, 曹嘉麒, 等. 2013. 苏鲁造山带的构造格局与演化: 来自苏鲁超高压浅变质岩的制约.科学通报, 58:2338－2343.

周建波, 韩伟, 宋明春, 2016. 苏鲁地体折返与郯庐断裂活动: 莱阳盆地中生界碎屑锆石年代学的制约. 岩石学报, 32（4）: 1171－1181.

周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 等. 2015. 山东东部晚中生代构造－岩浆活动及原型盆地恢复. 地学前缘, 22（1）: 137－156.

朱光, 谢成龙, 王勇生, 等. 2005. 郯庐高压走滑韧性剪切带特征及其 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年. 岩石学报, 21（6）: 1687－1702.