

山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义

刘平华, 刘福来, 王 舫, 刘建辉

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 荆山群富铝片麻岩广泛分布于山东半岛早前寒武纪变质基底之中。锆石阴极发光图像分析和 U-Pb 定年结果表明, 荆山群富铝片麻岩中锆石成因比较复杂, 可划分为 3 种类型: 第一类为继承性(岩浆或碎屑)锆石, U-Pb 定年结果显示该类锆石微区记录了 ~2 650 Ma 和 ~2 100 Ma 两组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 这不仅表明研究区变质基底在中太古代末期和古元古代早期至少存在两期岩浆-热事件, 同时, 也说明荆山群原岩形成时代应晚于 2 100 Ma; 第二类为变质锆石, 记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 1 900~1 850 Ma 之间, 应代表荆山群富铝片麻岩峰期高压麻粒岩相变质时代; 第三类亦为变质锆石, 记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 1 840~1 820 Ma 之间, 应代表荆山群富铝片麻岩峰后中低压麻粒岩相退变质时代。该项成果准确地限定了荆山群富铝片麻岩的原岩形成时代、峰期高压麻粒岩相变质时代和峰后中低压麻粒岩相退变质时代的年代学格架, 对深入探讨华北克拉通东南缘高压麻粒岩的成因机制及其形成的动力学背景具有重要的科学意义。

关键词: 富铝片麻岩, 锆石, U-Pb 定年, 荆山群, 山东半岛

中图分类号: P588.34⁺5; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0829-15

U-Pb dating of zircons from Al-rich paragneisses of Jingshan Group in Shandong peninsula and its geological significance

LIU Ping-hua, LIU Fu-lai, WANG Fang and LIU Jian-hui

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Al-rich paragneisses in Jingshan Group are extensively distributed in the early Precambrian metamorphic basement of Shandong peninsula, southeast part of the North China Craton. Zircons separated from Al-rich paragneisses are divided into three main types based on cathodoluminescence (CL) and in situ U-Pb dating, i. e., inherited (magmatic or detrital) zircon, HP metamorphic zircon and retrogressive zircon. The inherited zircon records two group $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of ~2 650 Ma and ~2 100 Ma, indicating two magmatic-thermal events occurring in Neoproterozoic and Paleoproterozoic epochs and the existence of Paleoproterozoic protoliths of Al-rich paragneisses. In contrast, the homogeneous HP metamorphic zircon records younger $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages ranging from 1 900 Ma to 1 850 Ma, which represent peak HP granulite-facies metamorphic times of Al-rich paragneisses in Jingshan Group. The retrogressive zircon records the youngest $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of 1 840~1 820 Ma, which represent late medium- and low-granulites-facies retrograde metamorphic times of Al-rich paragneisses in Jingshan Group. These results indicate that the Paleoproterozoic protoliths of Al-rich paragneisses, together with their TTG rocks and mafic rocks, were subducted to coeval Paleoproterozoic HP metamorphism (1 900~1 850 Ma),

收稿日期: 2011-03-10; 修订日期: 2011-07-15

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(40725007), 国家自然科学基金创新群体项目(40921001); 中国地质调查局地质大调查资助项目(1212011120150, 1212010811065)

作者简介: 刘平华(1981-), 男, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: lph1213@126.com。

followed by late medium-and low-granulites-facies retrogression (1 840~1 820 Ma). This new result has very important significance for deep discussion of the genetic mechanism and geodynamic model of the HP granulites distributed in the southeast part of the North China Craton.

Key words: Al-rich paragneiss; zircon; U-Pb dating; Jingshan Group; Shandong peninsula

自林润生等(1988)正式提出荆山群以来到目前为止,随着研究工作的不断深入,已在山东半岛古元古代荆山群原岩建造、岩相学、成因矿物学、变质演化 $P-T$ 轨迹、变形作用、同位素年代学以及成因机制等研究领域取得了一系列重要成果和进展(张希道,1988;纪状义,1993;王沛成,1993;白瑾,1993;白瑾等,1996;卢良兆等,1996,1998;董永胜等,1998;王仁民等,1998;周喜文等,2003,2004,2007;Wan *et al.*,2006;Tang *et al.*,2007;Zhou X W *et al.*,2008;王舫等,2010;Tam *et al.*,2011)。特别是在安丘和栖霞地区荆山群孔兹岩系中,王仁民等(1998)和周喜文等(2004)先后报道了泥质高压麻粒岩,并对其变质演化进行了详细的研究。最近,笔者研究发现,在荆山群孔兹岩系分布的其他地区,也存在高压变质作用的信息(另文发表)。荆山群泥质高压麻粒岩的发现和深入研究,不仅指示古元古代山东半岛早前寒武纪变质基底的形成和演化涉及到俯冲-碰撞过程,同时,与断续带状分布的基性高压麻粒岩一样,也进一步说明山东半岛古元古代晚期(1 900~1 850 Ma)的高压麻粒岩相变质热事件具有区域性的特点。近年来,随着原位 U-Pb 定年技术的不断完善和发展,有关荆山群孔兹岩系同位素年代学资料已积累了一定的测试数据(纪状义,1993;Wan *et al.*,2006;Tang *et al.*,2007;Zhou X W *et al.*,2008;Tam *et al.*,2011),总结上述资料发现,有的研究者认为:加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{260}\text{Pb}$ 年龄为 $1\ 882 \pm 12\ \text{Ma}$ (MSWD = 3.2),代表了荆山群变质时代(Wan *et al.*,2006),也有研究者认为荆山群变质时代应变化于1 860~1 800 Ma 之间(Tam *et al.*,2011),还有研究者认为,荆山群泥质高压麻粒岩峰期变质时代为~1 900 Ma,峰后中低压麻粒岩相变质时代为1 860~1 800 Ma(Zhou X W *et al.*,2008)。然而,值得注意的是,与区内基性高压麻粒岩一样,荆山群泥质高压麻粒岩不仅经历了峰期变质作用,而且也受到峰后中-低压麻粒岩相和晚期角闪岩相变质热事件的改造,锆石的成因类型也十分复杂,单纯地依据 SHRIMP 或者 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年结果,很难准确确定泥质高压麻粒岩峰期

变质时代和峰后退变质时代。鉴于此,本文以山东半岛荆山群富铝片麻岩为重点研究对象,以成因矿物学和区域构造演化为主线,对荆山群富铝片麻岩中副矿物锆石阴极发光图像性质进行了系统分析,在此基础上采用 SHRIMP U-Pb 定年技术,对每件样品锆石进行原位 U-Pb 定年,最后,结合研究区内基性高压麻粒岩、超镁铁质岩和 TTG 片麻岩的最新年代学资料,对上述结果进行综合分析,阐明了山东半岛荆山群富铝片麻岩的原岩形成时代、峰期变质时代、晚期退变质时代及其地质意义。

1 地质背景

山东半岛位于华北克拉通东南缘(图1),北临渤海,西侧以郯庐断裂为界与鲁西地体相邻,东南侧以烟台-青岛-五莲断裂为界和苏鲁高压-超高压造山带相邻(图1)。区内出露的岩石类型以早前寒武纪变质岩和中生代花岗岩为主,在局部地区有少量中生代侏罗纪-白垩纪陆相火山岩、火山沉积岩和第三纪玄武岩。

区内早前寒武纪变质岩主要包括中-新太古代 TTG 片麻岩、古元古代荆山群和粉子山群孔兹岩系、新元古代蓬莱群浅变质岩系、变质超镁铁质岩、斜长角闪岩和基性高压麻粒岩。中-新太古代 TTG 片麻岩主要分布在栖霞地区,主要岩性有英云闪长质片麻岩、奥长花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩,前人研究结果表明:山东半岛 TTG 片麻岩形成时代至少可分为两期,分别为 2 900~2 700 Ma 和~2 500 Ma(Zhou J B *et al.*,2008;Jahn *et al.*,2008;刘建辉等,2011)。古元古代荆山群孔兹岩系主要分布在莱阳荆山、旌旗山和莱西南墅等地,岩性主要为夕线石榴黑云片岩-片麻岩、大理岩、石墨片岩-片麻岩、长石石英岩、黑云变粒岩等。荆山群普遍经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用(周喜文等,2003,2004,2007;王世进等,2009;王舫等,2010)。粉子山群主要分布于栖霞庙后、门楼与莱州粉子山等地,岩性主要为大理岩、黑云变粒岩、夕线黑云片岩-片麻岩、长石石英岩等,并普遍经历了绿片岩相-角闪岩相变质

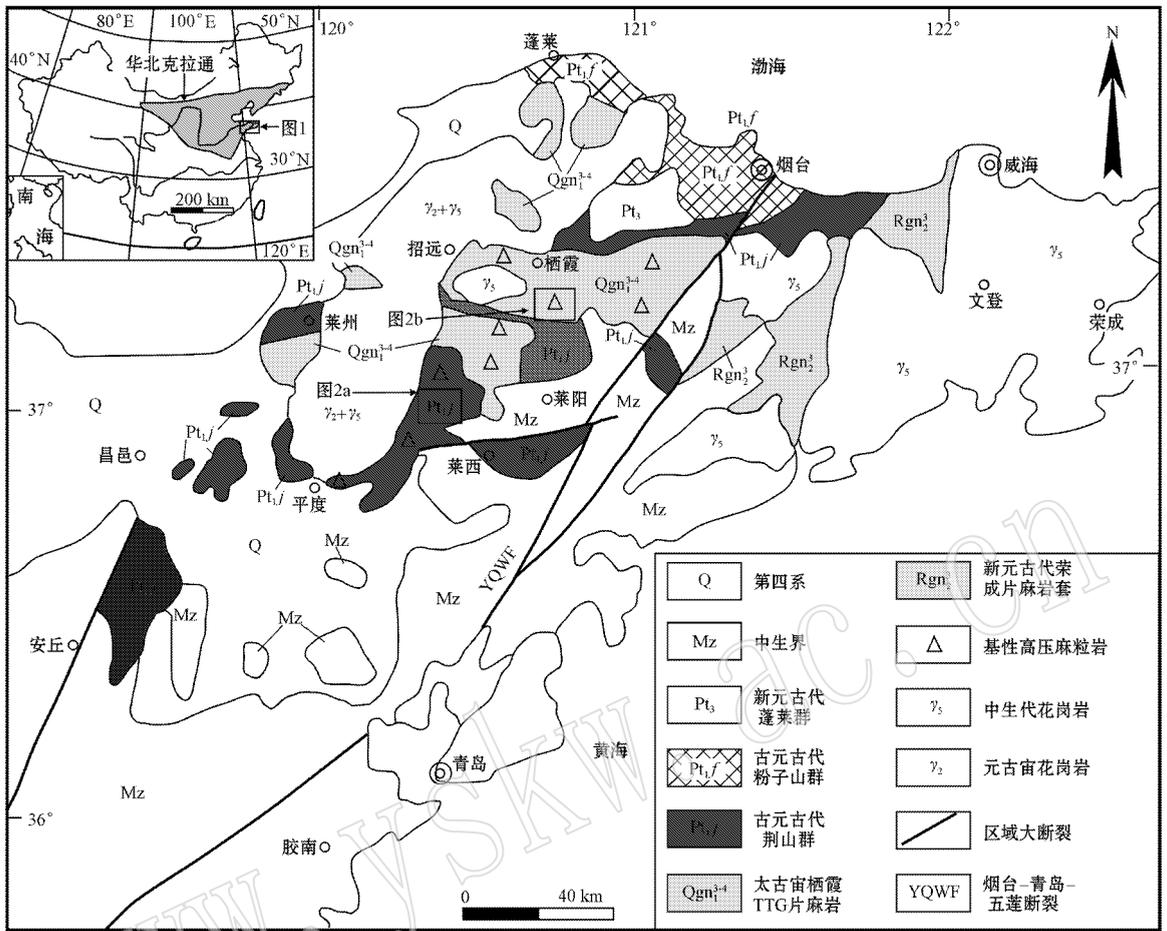


图 1 山东半岛地质简图及高压麻粒岩分布位置 [据周喜文等 (2003) 修改]

Fig. 1 Simplified geological map showing locations of HP granulites in Shandong peninsula (modified after Zhou et al., 2003)

作用。蓬莱群主要分布在蓬莱地区和栖霞北部,主要岩性有结晶灰岩、板岩、石英岩等,仅遭受了绿片岩相变质作用。在 TTG 片麻岩中分布有众多大小不等的透镜状超镁铁质岩、基性高压麻粒岩和斜长角闪岩包体,在平度-莱西-栖霞一带呈北东向断续分布,构成一条超镁铁质岩和高压麻粒岩混杂岩带(图 1)。白文吉等(1996)曾注意到这条混杂岩带大致与苏鲁高压-超高压变质带平行,推测是山东半岛第二条高压-超高压变质岩带,但已被后来岩石学、变质作用和同位素年代学等方面的研究所否定(李永刚等,1997;刘文军等,1998;周喜文等,2004;刘平等,2010,2011a,2011b)。区内中生代岩浆岩主要为燕山期玲珑复式花岗岩体,集中分布在招远至平度一带,在艾山地区也有少量出露,它们侵位于太古代

TTG 片麻岩及古元古代荆山群变质岩中。主要岩性为黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩,这些花岗岩体的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄多数集中在 120~160 Ma(王沛成等,1996;Wang et al.,1998;苗来成等,1998)。

区内荆山群孔兹岩系与栖霞 TTG 片麻岩主要存在两种接触关系:构造接触关系和不整合接触关系(图 2),并集中分布在以下几个地区:安丘峡山水库-柞山镇、平度马戈庄镇-云山镇、莱西南墅镇-日庄镇(图 2a)、莱西望城镇-古柳镇、莱阳沐浴店镇-观里镇(图 2b)、海洋发城镇-徐家集镇、栖霞铁口镇和栖霞松山镇,其中研究程度比较高的地区是莱西南墅镇-日庄镇和莱阳沐浴店镇-观里镇,本文研究的 2 件富铝片麻岩样品分别来莱西南墅镇-日庄镇和莱阳沐浴店镇-观里镇两个地区,具体采样点见图 2。

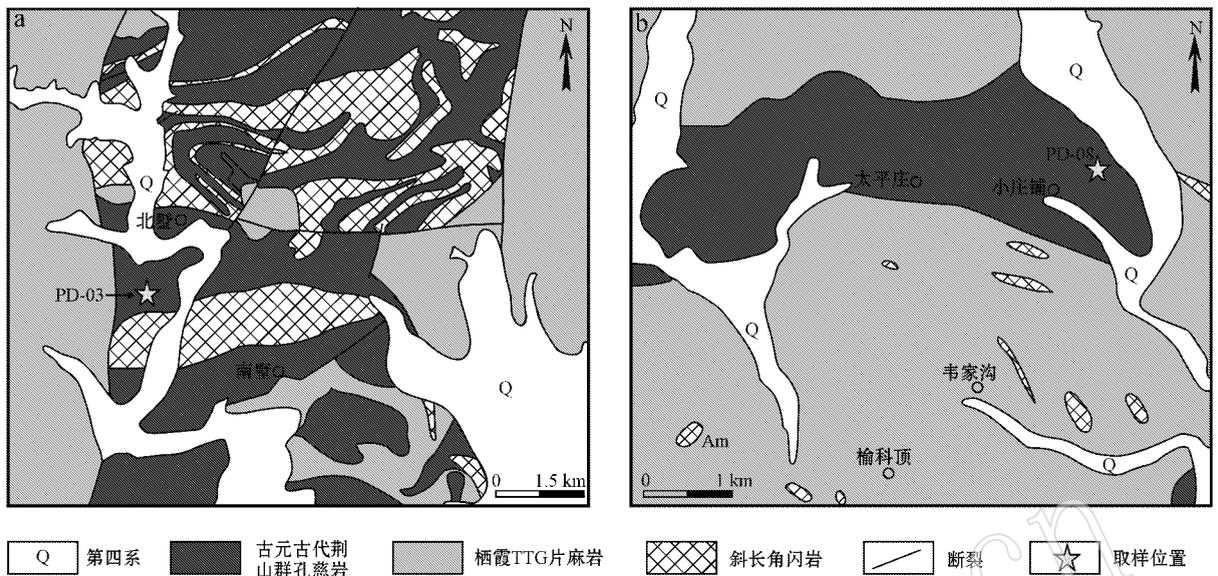


图2 研究区荆山群富铝片麻岩地质略图及采样位置

Fig. 2 Simplified geological map showing sampling locations of Al-rich paragneisses of Jingshan Group in the study area

a—莱西地区; b—栖霞地区
a—Laixi area; b—Qixia area

2 实验方法

本文对2件荆山群富铝片麻岩(包括1件泥质高压麻粒岩)样品进行了锆石原位U-Pb定年,每件样品约5 kg。锆石的分选工作在河北省廊坊区域地质调查院矿物分选实验室进行。首先将每件样品进行破碎至适当粒级,经清洗、烘干和筛选后,采用磁选和重液分选出不同粒级的锆石晶体,然后在双目镜下挑选出颗粒相对完整的锆石晶体400粒左右,制成符合激光拉曼测试、阴极发光图像照相、SHRIMP U-Pb定年的标准锆石靶。锆石的U、Th、Pb的测定在澳大利亚佩斯科挺大学SHRIMP II上进行,分析原理与分析流程见Wiedenbeck等(1995)和宋彪等(2002)。应用锆石标样M257(U含量 840×10^{-6})标定锆石的U、Th、Pb含量(Nasdala *et al.*, 2008),应用锆石标样TEMORA 1(年龄417 Ma Black *et al.*, 2004)进行年龄校正。测试过程中仪器质量分辨率约为4 800~5 700(1%峰高),一次离子流 O^{2-} 的强度为5~6 nA,一次离子流束斑大小约为20~25 μm 。每分析3个待测样品点进行一次TEMORA 1标样测定。每个测点记录采用5组扫描。数据处理采用LudwigSQUID1.02及IS-PLLOT程序。普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正。单个测定

的数据点误差采用 1σ 。误差为95%的置信度。

3 岩相学特征

本文研究的2件富铝片麻岩(包括1件泥质高压麻粒岩)外表常呈青灰色至灰黑色,夹白色和红色斑点,中粗粒鳞片变晶结构,片麻状构造明显,主要包括:夕线石榴斜长片麻岩(PD-03c-03)和泥质高压麻粒岩(PD-08a-03和QX20-1)。夕线石榴斜长片麻岩(PD-03c-03)的特征是以斜长石和石英为主(图3a、3b),含量约占65%,其中大部分斜长石遭受了不同程度的绢云母化等蚀变,不规则粒状石英常常具有波状消光等变形效应。粗粒石榴石呈变斑晶出现,裂纹发育,有的含有浑圆状石英、斜长石、黑云母和束状-细针状夕线石包体。夕线石常常为柱状,横向裂纹发育,有的夕线石沿石榴石边部分布,与石榴石直接接触(图3a、3b)。石榴石和夕线石含量约占30%,其他次要矿物主要包括黑云母、磁铁矿、金红石和锆石,含量约占5%。泥质高压麻粒岩外观上亦具有灰黑色,夹红色斑点,中粗粒鳞片变晶结构,片麻状构造明显。其主要构成矿物为斜长石、钾长石、石英、蓝晶石、夕线石、石榴石和棕红色黑云母(图3c、3d、3e、3f)。其中粗粒浑圆状石榴石变斑晶亦含石英、斜长石和黑云母等包体矿物(图3c)。

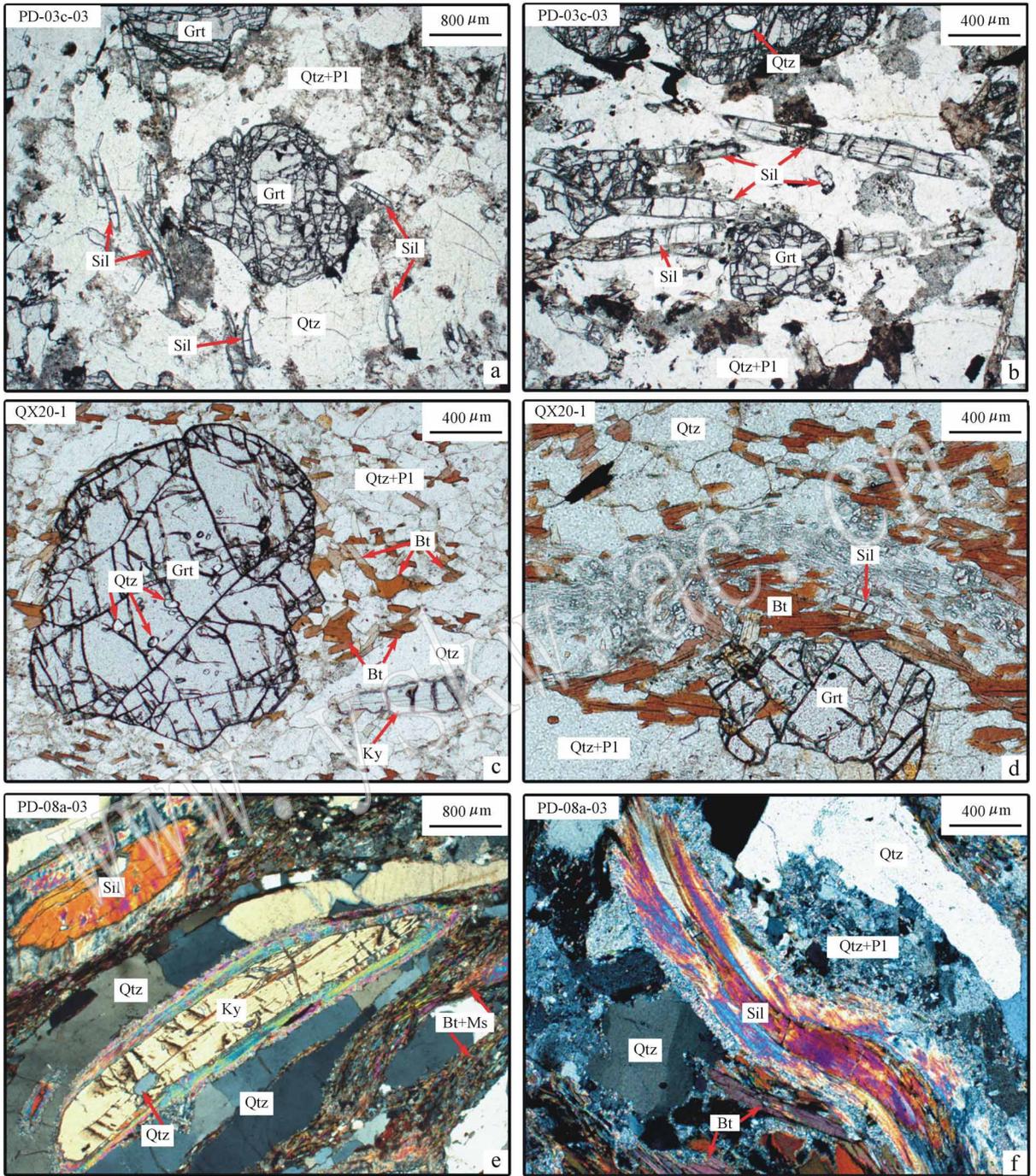


图 3 荆山群富铝片麻岩典型结构显微照片

Fig. 3 Photomicrographs showing typical textures of Al-rich paragneisses in Jingshan Group

a—夕线石-石榴石-斜长片麻岩中矿物组合：夕线石 (Sil) + 石榴石 (Grt) + 石英 (Qtz) + 斜长石 (Pl), 单偏光; b—粗粒柱状夕线石 (Sil) 沿石榴石 (Grt) 边部分布, 单偏光; c—石榴石 (Grt) 内部存在石英 (Qtz) 包体矿物, 基质中则分布有黑云母 (Bt) + 蓝晶石 (Ky) + 石英 (Qtz) + 斜长石 (Pl), 单偏光; d—石榴石 (Grt) 边部分布有棕红色黑云母 (Bt) 和细针柱状夕线石 (Sil), 单偏光; e—粗粒板状自形蓝晶石 (Ky) 被石英 (Qtz) 包裹, 其边部分布有珍珠云母 (Mrg), 正交偏光; f—沿粗粒柱状夕线石 (Sil) 边部分布有石英 (Qtz)、斜长石 (Pl) 和黑云母 (Bt), 正交偏光

a—Sil-Grt-Pl-paragneiss with mineral assemblage of sillimanite (Sil) + garnet (Grt) + quartz (Qtz) + plagioclase (Pl), PPL; b—coarse-acicular-columnar sillimanite (Sil) surrounding garnet (Grt), PPL; c—inclusions of quartz (Qtz) in garnet (Grt), and matrix mineral assemblage with biotite (Bt) + kyanite (Ky) + garnet (Grt) + quartz (Qtz) + plagioclase (Pl), PPL; d—fine-acicular-columnar sillimanite (Sil) and brownish red biotite (Bt) surrounding garnet (Grt), PPL; e—inclusion of quartz (Qtz) in coarse-slaty kyanite (Ky), and margarite (Mrg) surrounding the rim of kyanite (Ky), CPL; f—quartz (Qtz) + plagioclase (Pl) + biotite (Bt) surrounding the deformed-coarse-columnar sillimanite (Sil), CPL

蓝晶石板状晶形居多,少数者呈不规则状,沿主期片麻理方向分布,边部常具有珍珠云母的蚀变边(图3e),局部可见粗粒蓝晶石被棕红色黑云母斜切,夕线石常常可见两种类型,一种夕线石呈束状-细针柱状集合体,常常与棕红色鳞片状黑云母共生(图3d),另一种夕线石呈粗粒柱状晶形,并常见粗粒夕线石由于遭受变形作用而呈“S”形(图3f),局部可见粗粒夕线石具有蓝晶石假象。石榴石、蓝晶石和夕线石三者约占25%。黑云母为棕红色,细小鳞片状,沿主期片麻理方向分布,有的则分布在石榴石边部,与石榴石直接接触,含量约占10%。浅色矿物主要包括石英和长石,含量约占65%,其中长石包括斜长石和钾长石两种,大部分斜长石遭受了不同程度的绢云母化,前人研究表明:条纹长石既有正条纹长

石,也有反条纹长石(周喜文等,2004;王舫等,2010)。

4 锆石阴极发光图像

4.1 泥质高压麻粒岩(PD-8a-2)

泥质高压麻粒岩中锆石为紫红色,大部分具有浑圆状和柱状晶形,颗粒大小不一,集中变化于50~100 μm 之间,少数者变化于10~50 μm 之间。根据锆石阴极发光图像与晶体形态,可将锆石划分为2种类型:第一类锆石具有继承性核和相对弱发光(灰黑色-黑色)的边(图4a、4b)。具有强发光效应(白色)继承性核常常呈他形不规则状(图4b),而具有弱发光效应(灰黑色-黑色)继承性核常常呈自形

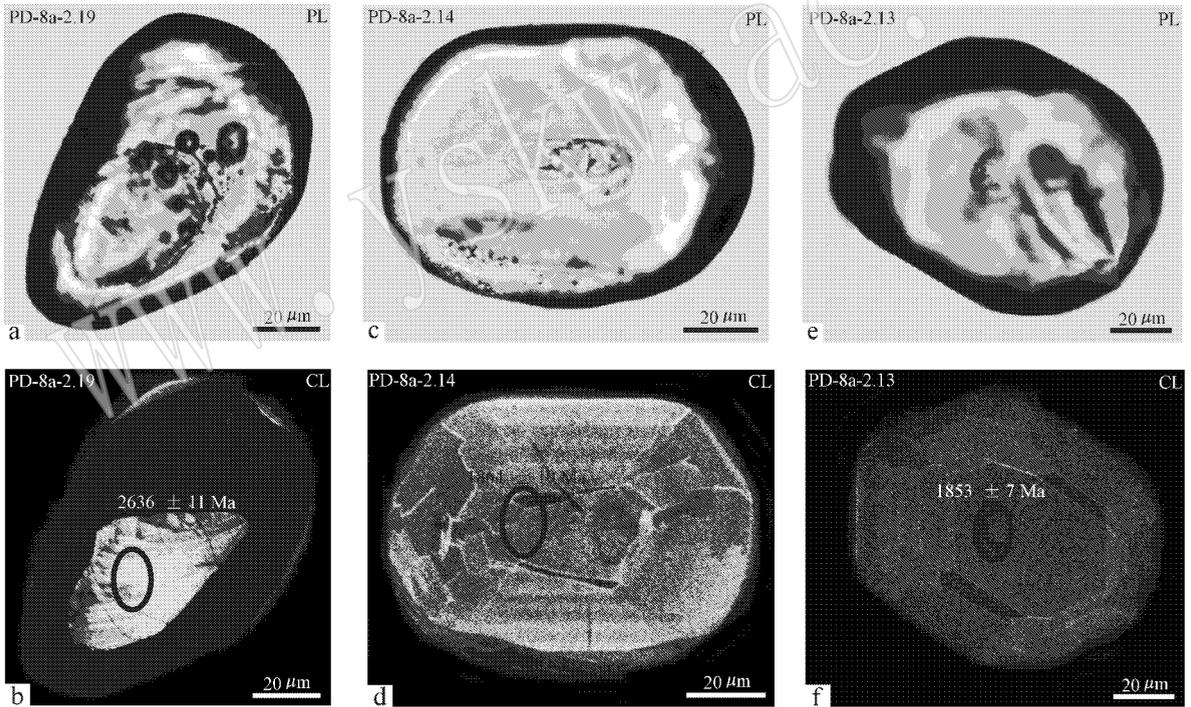


图4 泥质高压麻粒岩(PD-8a-2)锆石阴极发光图像与SHRIMP U-Pb定年结果

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images and SHRIMP U-Pb ages of host zircons from pelitic HP granulite (PD-8a-2)
 a—样品 PD-8a-2 中第 19 粒锆石呈浑圆状晶形; b—图 4a 中锆石阴极发光图像, 具有强发光继承性核和弱发光变质增生边, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; c—样品 PD-8a-2 中第 14 粒锆石呈浑圆状晶形; d—图 4c 中变质锆石阴极发光图像, 具有相对强发光效应, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; e—样品 PD-8a-2 中第 13 粒锆石呈柱状晶形; f—图 4e 中变质锆石阴极发光图像, 具有相对中等发光效应, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄
 a—zircon PD-8a-2.19 with rounded crystal form; b—CL image of the same zircon as in Fig. 4a, showing a high-luminescent core and low-luminescent metamorphic rim, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; c—zircon PD-8a-2.14 with rounded crystal form; d—CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 4c, showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; e—zircon PD-8a-2.13 with columnar crystal form; f—CL image of the same zircon as in Fig. 4e, showing a middle (grey) luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age

柱状,由于 U 含量较高,黑色继承性核内部结构模糊不清,其大小集中变化于 5~30 μm 之间。该类锆石边部常常具有均匀的灰黑色-黑色阴极发光效应,边部大小宽窄不一,有的只有几 μm ,有的则可达 10 μm 以上,为变质增生边(图 4a、4b);第二类锆石具有均匀的相对较强-中等发光效应,阴极发光图像为灰白色-灰色,颗粒大小不一,集中变化于 50~100 μm 之间,大部分晶体亦具有浑圆状和柱状晶形(图 4c、4d、4e、4f),有的锆石内部发育冷杉状分带结构和扇形分带结构,指示该类锆石是在麻粒岩相变质条件下形成的(Vavra *et al.*, 1996)。

4.2 夕线石榴斜长片麻岩 (PD-3c-2)

夕线石榴斜长片麻岩中锆石亦为紫红色,大部分具有浑圆状晶形,颗粒大小不一,集中变化于 20~

80 μm 之间。根据锆石阴极发光图像与晶体形态,可将锆石划分为 3 种类型:第一类锆石具有继承性核和相对弱发光(灰色-黑色)的边,不同颗粒锆石其核部微区阴极发光效应存在差异,有的核部微区具有均匀的极弱发光效应(黑色),有的继承性核部具有较强发光效应(白色-灰白色),并可见清晰的岩浆结晶环带,核部微区有的呈他形不规则状,有的呈自形柱状(图 5a、5b),而该类锆石边部常常具有均匀的较强-中等发光效应,阴极发光图像为灰白色-灰色,大小宽窄不一,集中变化于 5~30 μm 之间,为变质增生边(图 5a、5b);第二类锆石具有均匀的极弱发光效应,阴极发光图像为黑色-灰黑色,大部分晶体具有浑圆状晶形,少数者为自形柱状,颗粒大小不一,集中变化于 20~80 μm 之间(图 5c、5d)第三类

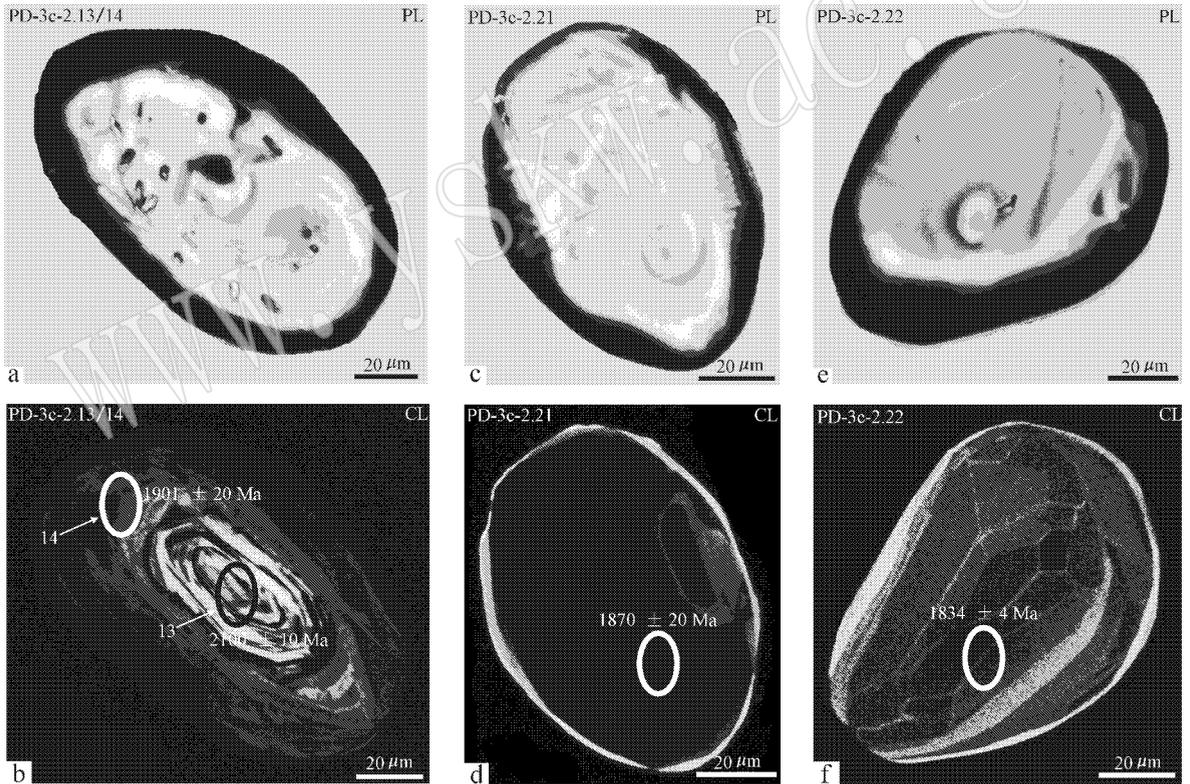


图 5 夕线石榴斜长片麻岩 (PD-3c-2) 阴极发光图像及 SHRIMP U-Pb 定年结果

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images and SHRIMP U-Pb ages of host zircons from Sil-Grt-Pl-paragneiss (PD-3c-2)
 a—样品 PD-3c-2 中锆石呈柱状晶形; b—图 5a 中锆石阴极发光图像,具有强发光继承性岩浆结晶核和弱发光变质增生边,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; c—样品 PD-3c-2 中第 21 粒锆石呈浑圆状晶形; d—图 5c 中变质锆石阴极发光图像,具有相对均匀的弱发光效应,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; e—样品 PD-3c-2 中第 22 粒锆石呈浑圆状晶形; f—图 5e 中变质锆石阴极发光图像,具有相对较强发光效应,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄
 a—zircon with columnar crystal form; b—CL image of the same zircon as in Fig. 5a, showing a high-luminescent magmatic core and low-luminescent metamorphic rim, and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages; c—zircon PD-3c-2.21 with rounded crystal form; d—CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 5c, showing a low-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; e—zircon PD-3c-2.22 with rounded crystal form; f—CL image of the same zircon as in Fig. 5e, showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age

锆石具有均匀的相对强发光效应,阴极发光图像为灰色-灰白色,颗粒大小不一,集中变化于 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ 之间,大部分晶体具有浑圆状晶形,有的锆石内部发育冷杉状分带结构和扇形分带结构(图5e、5f)指示该类锆石是在麻粒岩相变质条件下形成的(Vavra *et al.*, 1996)。

5 锆石 U-Pb 定年

采用 SHRIMP U-Pb 定年技术,对 2 件富铝片麻岩(PD-8a-2 和 PD-3c-2)进行了不同性质锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年测试,其结果列入表 1 和表 2 中。

5.1 泥质高压麻粒岩 (PD-8a-2)

样品 PD-8a-2 的 27 个不同性质锆石微区进行的 U-Pb 年龄结果(表 1)显示,泥质高压麻粒岩(PD-8a-2)中锆石记录了比较简单的年龄信息(图 6),可进一步划分为 2 组。其中,第一组 1 个继承性核部记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 636\pm 11\ \text{Ma}$,相应的 Th/U 比值为 0.59,该类锆石微区所记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与研究区 TTG 片麻岩、基性高压麻粒岩和超镁铁质岩锆石微区所记录的 $2\ 650\sim 2\ 500$

Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄十分相似,说明华北克拉通东南缘的变质基底在新太古代晚期存在一次重大的构造-热事件(Wan *et al.*, 2006; Zhou J B *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011; 刘平华等, 2011a, 2011b; 刘建辉等, 2011)。第二组 26 个变质锆石微区记录了十分相似的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,集中变化于 $1\ 879\pm 5\sim 1\ 847\pm 8\ \text{Ma}$ 之间,其加权平均年龄为 $1\ 868\pm 3\ \text{Ma}$ (MSWD=1.30, $n=26$),相应的 Th/U 比值异常小,变化于 $0.01\sim 0.07$ 之间,与研究区内基性高压麻粒岩和超镁铁质岩的高压麻粒岩相变质时代($1\ 850\sim 1\ 900\ \text{Ma}$)十分一致(刘平华等, 2011a, 2011b),说明变化于 $1\ 879\pm 5\sim 1\ 847\pm 8\ \text{Ma}$ 之间的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(加权平均年龄为 $1\ 868\pm 3\ \text{Ma}$, MSWD=1.30),应代表泥质高压麻粒岩峰期高压麻粒岩相变质时代。

5.2 夕线石榴斜长片麻岩 (PD-3c-2)

与样品 PD-8a-2 相比,样品 PD-3c-2 不同性质锆石微区记录的年龄信息相对复杂,并可进一步划分为 3 组(图 7,表 2)。其中,第一组 4 个继承性岩浆核部所记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2\ 216\pm 42\sim 2\ 100\pm 10\ \text{Ma}$ 之间,相应的 Th/U 比值变化于 $0.19\sim 2.58$ 之间,尽管由于受到后期热事件的影响,该类

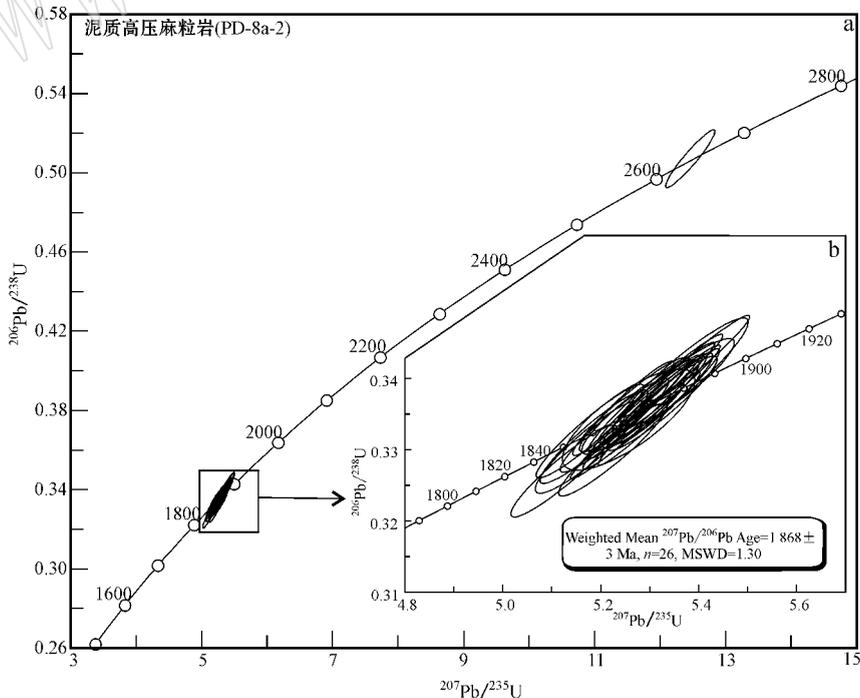


图 6 泥质高压麻粒岩 PD-8a-2 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄关系图解

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) of pelitic HP granulite (PD-8a-2)

表 1 PD-8a-2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 1 Results of SHRIMP U-Pb analyses of zircons from sample PD-8a-2

样品分析点号	$^{238}\text{U}/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	t/Ma
	U	Th									
第一组锆石 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 年龄: $2\ 636 \pm 11\ \text{Ma}$											
PD-8a-2.19	90	51	0.59	0.1782	0.67	12.46	2.0	0.507	1.90	$2\ 636 \pm 11$	$2\ 644 \pm 41$
第二组锆石 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 年龄: $1\ 879 \pm 5 \sim 1\ 847 \pm 8\ \text{Ma}$ [$\text{MSWD}=1.30, n=26$]											
PD-8a-2.4	1385	16	0.01	0.1149	0.28	5.299	1.3	0.334	1.30	$1\ 879 \pm 5$	$1\ 860 \pm 21$
PD-8a-2.1	345	11	0.03	0.1148	0.49	5.225	1.4	0.330	1.30	$1\ 877 \pm 9$	$1\ 838 \pm 21$
PD-8a-2.16	348	14	0.04	0.1148	0.49	5.325	1.4	0.337	1.30	$1\ 876 \pm 9$	$1\ 870 \pm 21$
PD-8a-2.2	642	21	0.03	0.1147	0.36	5.338	1.3	0.338	1.30	$1\ 875 \pm 6$	$1\ 875 \pm 20$
PD-8a-2.22	943	12	0.01	0.1146	0.28	5.267	1.3	0.333	1.20	$1\ 874 \pm 5$	$1\ 854 \pm 20$
PD-8a-2.27	1076	12	0.01	0.1145	0.26	5.241	1.3	0.332	1.20	$1\ 872 \pm 5$	$1\ 848 \pm 20$
PD-8a-2.18	885	11	0.01	0.1145	0.58	5.339	1.4	0.339	1.20	$1\ 872 \pm 10$	$1\ 884 \pm 20$
PD-8a-2.5	459	20	0.05	0.1144	0.48	5.316	1.4	0.337	1.30	$1\ 871 \pm 9$	$1\ 872 \pm 21$
PD-8a-2.25	1520	17	0.01	0.1144	0.23	5.311	1.2	0.337	1.20	$1\ 871 \pm 4$	$1\ 871 \pm 20$
PD-8a-2.21	905	10	0.01	0.1144	0.30	5.339	1.3	0.339	1.20	$1\ 870 \pm 5$	$1\ 879 \pm 20$
PD-8a-2.24	213	13	0.06	0.1144	0.63	5.363	1.7	0.340	1.60	$1\ 870 \pm 11$	$1\ 887 \pm 26$
PD-8a-2.10	780	10	0.01	0.1143	0.35	5.295	1.5	0.336	1.40	$1\ 869 \pm 6$	$1\ 867 \pm 23$
PD-8a-2.12	819	31	0.04	0.1143	0.31	5.398	1.3	0.343	1.20	$1\ 868 \pm 6$	$1\ 899 \pm 20$
PD-8a-2.17	267	16	0.06	0.1141	1.10	5.257	1.7	0.334	1.40	$1\ 865 \pm 20$	$1\ 859 \pm 22$
PD-8a-2.6	926	9	0.01	0.1140	0.29	5.328	1.3	0.339	1.20	$1\ 865 \pm 5$	$1\ 881 \pm 20$
PD-8a-2.26	844	12	0.01	0.1140	0.30	5.344	1.3	0.340	1.20	$1\ 864 \pm 5$	$1\ 887 \pm 20$
PD-8a-2.14	274	18	0.07	0.1140	0.57	5.281	1.5	0.336	1.30	$1\ 864 \pm 10$	$1\ 867 \pm 22$
PD-8a-2.9	882	17	0.02	0.1140	0.30	5.298	1.3	0.337	1.20	$1\ 864 \pm 5$	$1\ 873 \pm 20$
PD-8a-2.15	609	31	0.05	0.1138	0.35	5.278	1.3	0.336	1.30	$1\ 861 \pm 6$	$1\ 869 \pm 20$
PD-8a-2.7	375	18	0.05	0.1137	0.46	5.228	1.4	0.333	1.30	$1\ 860 \pm 8$	$1\ 855 \pm 21$
PD-8a-2.23	323	16	0.05	0.1137	0.49	5.125	1.4	0.327	1.30	$1\ 859 \pm 9$	$1\ 824 \pm 21$
PD-8a-2.3	321	23	0.07	0.1136	0.49	5.268	1.4	0.336	1.30	$1\ 858 \pm 9$	$1\ 869 \pm 21$
PD-8a-2.20	276	19	0.07	0.1136	0.59	5.176	1.4	0.330	1.30	$1\ 858 \pm 11$	$1\ 840 \pm 21$
PD-8a-2.8	343	16	0.05	0.1134	0.49	5.186	1.4	0.332	1.30	$1\ 854 \pm 9$	$1\ 847 \pm 21$
PD-8a-2.13	620	21	0.03	0.1133	0.37	5.246	1.3	0.336	1.30	$1\ 853 \pm 7$	$1\ 866 \pm 21$
PD-8a-2.11	468	13	0.03	0.1129	0.44	5.178	1.4	0.333	1.30	$1\ 847 \pm 8$	$1\ 851 \pm 21$

注: Pb* 为放射性成因的铅, 普通铅的校正采用 ^{204}Pb 的实测值, 所有误差均为 1σ 。

表2 PD-3c-2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 2 Results of SHRIMP U-Pb analyses of zircons from sample PD-3c-2

样品分析点号	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	t/Ma
	U	Th													
第一组锆石 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $2.216 \pm 42 \sim 2.100 \pm 10$ Ma															
PD-3C-2.12	85	212	2.58	7.290	0.380	3.8	2.216 ± 42	2.078 ± 51							
PD-3C-2.6	213	197	0.96	6.840	0.365	1.4	2.171 ± 10	2.010 ± 24							
PD-3C-2.8	328	59	0.19	6.840	0.372	2.0	2.140 ± 35	2.041 ± 35							
PD-3C-2.13	201	191	0.98	6.960	0.387	1.4	2.100 ± 10	2.112 ± 25							
第二组锆石 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $1.901 \pm 20 \sim 1.853 \pm 8$ Ma															
PD-3C-2.9	490	20	0.04	4.957	0.305	1.3	1.922 ± 12	1.718 ± 19							
PD-3C-2.14	424	3	0.01	5.414	0.337	1.3	1.901 ± 20	1.874 ± 21							
PD-3C-2.4	740	3	0.00	5.144	0.324	1.3	1.883 ± 8	1.809 ± 20							
PD-3C-2.15	739	12	0.02	5.203	0.328	1.4	1.877 ± 11	1.831 ± 22							
PD-3C-2.24	419	5	0.01	5.261	0.333	1.3	1.872 ± 7	1.854 ± 21							
PD-3C-2.21	891	30	0.03	5.211	0.330	1.3	1.870 ± 20	1.841 ± 21							
PD-3C-2.20	1223	12	0.01	5.271	0.334	1.2	1.868 ± 11	1.861 ± 20							
PD-3C-2.1	1035	13	0.01	4.940	0.315	1.2	1.855 ± 5	1.769 ± 19							
PD-3C-2.2	707	16	0.02	4.995	0.319	1.3	1.854 ± 6	1.787 ± 20							
PD-3C-2.3	495	10	0.02	4.962	0.317	1.3	1.853 ± 8	1.778 ± 20							
第三组锆石 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $1.844 \pm 8 \sim 1.834 \pm 4$ Ma [1.838 ± 4 Ma (MSWD=0.30, n=9, 除点 5.7, 18, 27)]															
PD-3C-2.7	357	15	0.04	4.840	0.311	1.3	1.844 ± 11	1.748 ± 20							
PD-3C-2.23	866	15	0.02	5.032	0.323	1.2	1.844 ± 8	1.808 ± 20							
PD-3C-2.17	440	179	0.42	5.064	0.325	1.3	1.844 ± 8	1.818 ± 20							
PD-3C-2.5	470	4	0.01	4.892	0.314	1.6	1.843 ± 9	1.764 ± 25							
PD-3C-2.16	757	15	0.02	4.999	0.322	1.2	1.842 ± 6	1.799 ± 19							
PD-3C-2.10	323	195	0.62	5.092	0.328	1.3	1.839 ± 10	1.831 ± 21							
PD-3C-2.25	518	125	0.25	5.083	0.328	1.3	1.839 ± 7	1.829 ± 20							
PD-3C-2.11	803	10	0.01	5.137	0.331	1.3	1.838 ± 6	1.846 ± 21							
PD-3C-2.19	508	31	0.06	4.976	0.321	1.3	1.838 ± 8	1.795 ± 20							
PD-3C-2.18	302	97	0.33	4.910	0.316	1.4	1.838 ± 10	1.775 ± 21							
PD-3C-2.26	404	5	0.01	5.077	0.327	1.3	1.837 ± 9	1.828 ± 20							
PD-3C-2.22	1285	13	0.01	5.067	0.327	1.3	1.834 ± 4	1.828 ± 20							
PD-3C-2.27	466	33	0.07	5.217	0.337	1.4	1.833 ± 9	1.875 ± 23							

注: Pb^* 为放射性成因的铅, 普通铅的校正采用 ^{204}Pb 的实测值, 所有误差均为 1σ 。

锆石微区发生铅丢失和不完全重结晶,但是仍然存在一个谐和的岩浆锆石微区,记录了~2 100 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,说明夕线石榴黑云片麻岩的原岩形成时代应晚于~2 100 Ma,这与前人报道的区内荆山群孔兹岩原岩形成时代是一致的(Wan *et al.*, 2006)。第二组 11 个变质锆石微区记录的十分相似的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,集中变化于 $1\ 901 \pm 20 \sim 1\ 853 \pm 8$ Ma 之间,相应的 Th/U 比值相对偏小,变化于 0.01~0.04 之间,该类变质锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄不仅与样品 PD-8a-2 锆石记录的高压麻粒岩相变质年龄($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中变化于 $1\ 879 \pm 5 \sim 1\ 847 \pm 8$ Ma 之间)十分一致,而且,在区域上与基性高压麻粒岩、超镁铁质岩、TTG 片麻岩中变质锆石微区所记录的高压变质时代十分相似,这不仅说明夕线石榴黑云片麻岩早期也曾经历了 1 900~1 850 Ma 的高压麻粒岩相变质作用,同时进一步证明山东半岛古元古代晚期(1 850~1 900 Ma)高压麻粒岩相变质热事件具有区域性的特点(刘平等 2011a, 2011b; 刘建辉等, 2011)。第三组 14 个变质锆石微区的 Th/U 比值变化于 0.01~0.42 之间,且记录了一组最年轻的年龄信息, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中变化于 $1\ 844 \pm 8 \sim 1\ 834 \pm 4$ Ma 之间,相应地加权

平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1\ 838 \pm 4$ Ma (MSWD=0.30, $n=9$, 除点 5、7、18、27)。在区域上,该组锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与区内基性高压麻粒岩和超镁铁质岩变质锆石中记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 1 840~1 820 Ma 之间的退变质时代十分一致(刘平等 2011a, 2011b)。因此,第三组锆石微区记录的集中变化于 $1\ 844 \pm 8 \sim 1\ 834 \pm 4$ Ma 之间的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,应代表夕线石榴斜长片麻岩的退变质时代。

6 讨论

6.1 原岩形成时代

前人研究表明(Barbey *et al.*, 1982, 1986; Dissanayake and Munasinghe, 1984; Perchuk *et al.*, 1985; 卢良兆等, 1996),孔兹岩系的原岩以长石石英粉砂岩和富粘土质长石石英杂砂岩类为主,夹粘土岩、泥灰岩和碳酸盐沉积。是长英质细粒陆源碎屑和粘土质风化产物及钙镁质碳酸盐化学沉积三者的混杂沉积建造,且富含有机质,形成于半稳定-较稳定的浅海相沉积环境。如上所述,由于孔兹岩系中富铝片麻岩原岩通常是长英质细碎屑岩和富有机质-粘土质页岩,这些岩石中常常含有大量的碎屑锆

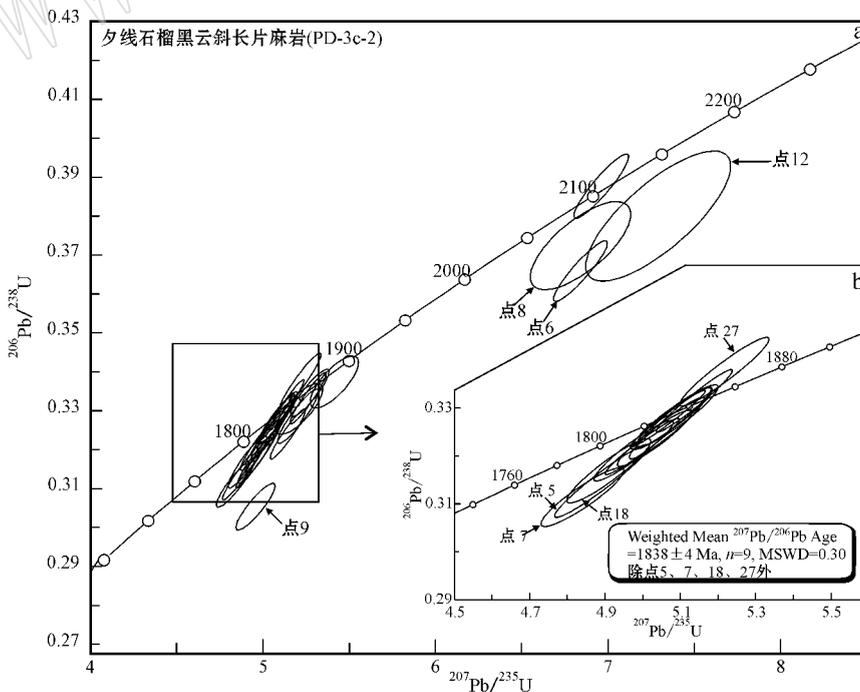


图 7 夕线石榴黑云斜长片麻岩 PD-3c-2 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄关系图解
 Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) of Sil-Grt-Pl-Paragneiss (PD-3c-2)

石,利用这些碎屑锆石进行原位的 $U-Pb$ 定年和年代学谱系对比研究,可以追溯这些碎屑锆石寄主岩石物源区的大地构造亲缘性 (Machado and Gauthier, 1996; Ireland *et al.*, 1998; Valverde-Vaquero *et al.*, 2000; Zhou J B *et al.*, 2008)。从图 8 可以明显看出,区内荆山群碎屑锆石年龄谱系与华北克拉通其他地区古元古代孔兹岩系中碎屑锆石年龄谱相似 (Wan *et al.*, 2006),主要峰值年龄分别是: ~ 2100 Ma、 ~ 2300 Ma、 ~ 2500 Ma 和 $2900 \sim 2800$ Ma,而缺少扬子克拉通基底岩石中锆石记录的新元古代岩浆-热事件,它们分别是 $1100 \sim 1000$ Ma 和 $850 \sim 700$ Ma (Li *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2006),说明荆山群原岩的物源区具有亲华北克拉通基底的属性,而不是少数研究者 (Tang *et al.*, 2007) 认为的研究区变质基底具有亲扬子克拉通基底属性。另外,本次研究的 2 件富铝片麻岩样品共测试了 5 个碎屑锆石微区,得到了两组具有实际地质意义的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄,分别是 ~ 2600 Ma 和 ~ 2100 Ma,其中最年轻的一组 (~ 2100 Ma) 与前人研究结果是一致的, Wan 等 (2006) 和 Tam 等 (2011) 分别获得了以下 4 组荆山群碎屑锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄: $2900 \sim 2800$ Ma、 ~ 2600 Ma、 $2500 \sim 2400$ Ma、 $2300 \sim 2200$ Ma。综合前人的研究资料,结合本次

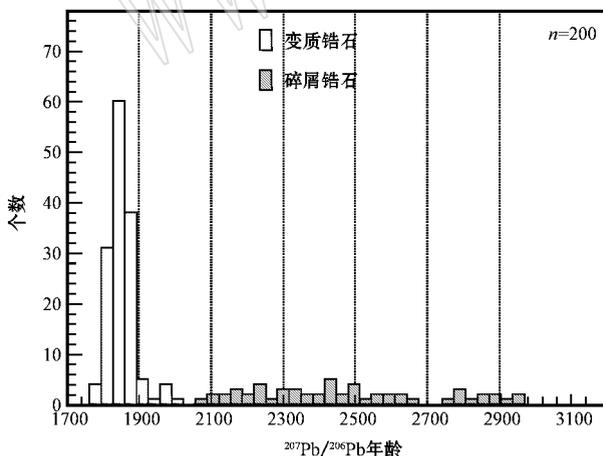


图 8 山东半岛荆山群孔兹岩系中锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄直方图

Fig. 8 Histograms of $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages of zircons from khondalites in Jingshan Group, Shandong peninsula
所有数据除引自本文外,还有 Wan *et al.* (2006); Zhou X W *et al.* (2008); Tam *et al.* (2011)

All data from not only this study, but also from Wan *et al.* (2006); Zhou X W *et al.* (2008); Tam *et al.* (2011)

研究,初步认为荆山群孔兹岩系原岩形成时代小于 ~ 2100 Ma。

6.2 高压麻粒岩相变质时代

前人研究结果表明 (周喜文等, 2004; 王舫等, 2010): 荆山群泥质高压麻粒岩经历了 4 个演化阶段: 早期进变质阶段 (M_1)、峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2)、峰后中低压麻粒岩相变质阶段 (M_3) 和晚期降温退变质阶段 (M_4), 具有顺时针 $P-T$ 演化轨迹, 先后经历了近等温减压 (ITD) 和近等压降温 (IBC) 的演化过程。泥质高压麻粒岩 (PD-8a-2) 中所有变质锆石微区记录了十分相近的年代学信息, 所记录的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄集中变化于 $1879 \pm 5 \sim 1847 \pm 8$ Ma 之间, 其加权平均年龄为 1868 ± 3 Ma (MSWD=1.30, $m=26$)。另外 1 件富铝片麻岩样品 (PD-3c-2), 也存在类似的变质锆石微区, 所记录的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄十分相似, 变化于 $1900 \sim 1850$ Ma 之间。结合前人的年代学资料 (Wan *et al.*, 2006; Zhou X W *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011; 刘平华等, 2011a, 2011b; 刘建辉等, 2011), 集中变化于 $1900 \sim 1850$ Ma 之间的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄与区内基性高压麻粒岩、超镁铁质岩和 TTG 片麻岩一样, 应代表荆山群富铝片麻岩峰期高压麻粒岩相的变质时代 (图 9)。

6.3 退变质时代

样品 PD-3c-2 中部分变质锆石微区还记录了一组更年轻的年龄, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄集中变化于 $1844 \pm 8 \sim 1834 \pm 4$ Ma 之间, 相应地 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 1838 ± 4 Ma, 在区域上, 该组锆石微区记录的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄与区内基性高压麻粒岩和超镁铁质岩变质锆石中记录的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄变化于 $1840 \sim 1820$ Ma 之间的退变质时代十分一致 (刘平华等, 2011a, 2011b), 因此, 变化于 $1840 \sim 1820$ Ma 之间的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄应代表山东半岛荆山群孔兹岩中富铝片麻岩的退变质时代 (图 9)。

7 结论

(1) 山东半岛荆山群孔兹岩系的原岩形成时代应小于 ~ 2100 Ma, 代表了山东半岛荆山群孔兹岩原岩——长石石英粉砂岩和富粘土质长石石英杂砂岩类为主, 夹粘土岩、泥灰岩和碳酸盐岩在半稳定-稳定的浅海环境下的成岩作用时间上限;

(2) 区内富铝片麻岩的峰期变质年龄为 $1900 \sim$

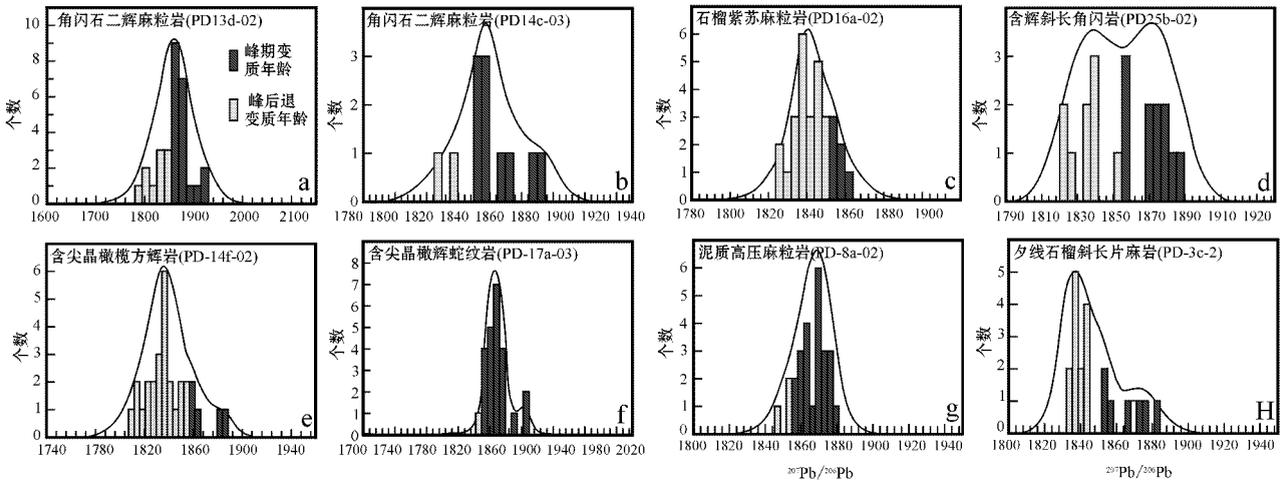


图 9 山东半岛高压麻粒岩及其相关岩石中变质锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄直方图 [所有数据除引自本文外, 还有刘平华等 (2011a, 2011b)]

Fig. 9 Histograms of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of metamorphic zircons from HP granulites and related rocks in Shandong Peninsula (data from Liu Pinghua *et al.*, 2011a, 2011b, as well as this study)

1 850 Ma, 代表了区内荆山群孔兹岩系的原岩与基性高压麻粒岩原岩一起, 俯冲至大约 50~60 km 的加厚地壳底部深处, 经历高压麻粒岩相变质作用的时间;

(3) 区内富铝片麻岩的退变质年龄为 1 840~1 820 Ma, 则代表了区内荆山群泥质高压麻粒岩抬升至约 25 km 深处, 遭受中低压麻粒岩相变质作用的改造时间, 而 ~1 810 Ma, 可能代表退变的泥质高压麻粒岩继续抬升约 15 km, 经历晚期降温退变质的时间;

(4) 该项成果对于重塑山东半岛高压麻粒岩及其相关岩石俯冲-折返的动力学模式以及重新认识华北克拉通东南缘早前寒武纪变质基底的演化过程具有重要的科学意义。

致谢 本文野外地质调查得到了薛怀民研究员和王金光高级工程师的指导和帮助, 在此一并致谢。适逢著名变质地质学家沈其韩院士九十华诞, 仅以此文向沈先生表达敬意和祝贺, 祝先生健康长寿!

References

Bai Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 100~105 (in Chinese with English abstract).
 Bai Jin, Dai Fengyan, Guo Jinjing, *et al.* 1996. The Precambrian Crustal Evolution of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 65~

80 (in Chinese with English abstract).
 Bai Wenji, Zhou Meifu, Hu Xufeng, *et al.* 1996. Mafic/ultramafic magmatism and tectonic evolution of the Northern China Craton [M]. Beijing: Sesimological Publishing House, 71~81 (in Chinese with English abstract).
 Barbery P, Capdevila R and Hameurt J. 1982. Major and transition trace element abundances in the khondalite suite of the granulite belt of Lapland (Fennoscandia); evidence for an early Proterozoic flysch belt [J]. *Precambrian Research*, 16(4): 273~290.
 Barbery P, Bernard-Griffiths J and Convert J. 1986. The Lapland charnockitic complex: REE geochemistry and petrogenesis [J]. *Lithos*, 19(2): 95~111.
 Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect: SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards [J]. *Chemical Geology*, 205(1~2): 115~140.
 Dissanayake C B and Munasinghe T. 1984. Reconstruction of the Precambrian sedimentary basin in the granulite belt of Srilanka [J]. *Chemical Geology*, 47(3~4): 221~247.
 Dong Yongsheng and Wang Wei. 1998. The style of metamorphic evolution of Early Proterozoic Jingshan Group in Eastern Shandong Province and its tectonic environment [J]. *Global Geology*, 17(3): 1~8 (in Chinese with English abstract).
 Ireland T R, Flöttmann T, Fanning C M, *et al.* 1998. Development of the early Paleozoic Pacific margin of Gondwana from detrital-zircon ages across the Delamerian orogen [J]. *Geology*, 26(3): 243~246.
 Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, *et al.* 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry [J]. *American Journal of Science*, 308(3): 232~269.

- Ji Zhuangyi. 1993. New data on isotope age of the Proterozoic Metamorphic rocks from Northern Jiaodong and its geological significance[J]. *Shandong Geology*, 9(1): 43~51(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Ge W C, *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 122: 45~83.
- Li Yonggang, Zhai Mingguo and Liu Wenjun. 1997. Sm-Nd geochronology of the high-pressure basic granulite, in Laixi, eastern Shandong[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 293~290(in Chinese with English abstract).
- Lin Runsheng and Yu Zhicheng. 1988. The Jinshan group in the Jiaobei uplift, Shandong[J]. *Shandong Geology*, 4(1): 1~21(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2011. Early Precambrian multi-stage magmatic and Metamorphic Events in Jiaobei Terrane, and their geological implications: Evidences from the LA-ICP-MS zircon U-Pb Chronology Analyses[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 135~143(in Chinese with English abstract).
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2010. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of mafic high-pressure (HP) granulites from the Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2039~2056(in Chinese with English abstract).
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2011a. Geological significance and in situ U-Pb dating of zircons from high-pressure (HP) granulites in Shandong Peninsula, eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 123~156(in Chinese with English abstract).
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2011b. Geological significance, genetic mineralogy and in situ U-Pb dating of zircons from the Early Precambrian ultramafic rocks in the Shandong Peninsula, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 2902~3020(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenjun, Zhai Mingguo and Li Yonggang. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulite in Laixi, Eastern Shandong, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449~459(in Chinese with English abstract).
- Lu Liangzhao, Xu Xuecheng and Liu Fulai. 1996. Early Precambrian Khondalites in North China[M]. Changchun: Changchun Publishing House, 219~234(in Chinese with English abstract).
- Lu Liangzhao and Dong Yongsheng. 1998. The P-T-X phase relations and their evolution for the equilibrium assemblages of Al-rich gneisses from Early Proterozoic Jingshan Group in East Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 140~15(in Chinese with English abstract).
- Machado N and Gauthier G. 1996. Determination of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages on zircon and monazite by laser-ablation ICPMS and application to a study of sedimentary provenance and metamorphism in southeastern Brazil[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(24): 5063~5073.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuang, Guan Kang, *et al.* 1998. The implications of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogenesis of the Linglong granite, East Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 198~206(in Chinese with English abstract).
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- Perchuk L L, Aranovich L Y, Podlesskii K K, *et al.* 1985. Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 3(3): 265~310.
- Song Biao, Zhang YuHai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geology Review*, 48(supp): 26~30(in Chinese).
- Tam P Y, Zhao G C, Liu F L, *et al.* 2011. Timing of metamorphism in the Palaeoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 150~162.
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen[J]. *Precambrian Research*, 152(1~2): 48~82.
- Valverde-Vaquero P, Dörr W, Belka Z, *et al.* 2000. U-Pb single-grain dating of detrital zircon in the Cambrian of central Poland: implications for Gondwana versus Baltica provenance studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(1): 225~240.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R, *et al.* 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337~358.
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 149(3~4): 249~271.
- Wang Fang, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2010. Metamorphic evolution of Early Precambrian khondalite series in North Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2057~2072(in Chinese with English abstract).
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 275~291.
- Wang Peicheng. 1993. A preliminary analysis on the deformation structure in the lower proterozoic [J]. *Shandong Geology*, 9(2): 36~44(in Chinese with English abstract).
- Wang Peicheng and An Yuhong. 1996. Main achievement and progress of the basic geological research over last ten years in eastern Shandong region[J]. *Shandong Geology*, 12(1): 8~23(in Chinese with English abstract).
- Wang Renmin, Qian Qing and Fan Tianli. 1998. Discovery of high-pressure granulites at south margin of North China Craton[A]. Department of Geology, Peking University. Collected Works of International Symposium on Geological Science[C]. Beijing: Seismological Publishing House, 568~573(in Chinese with English abstract).

- Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Chengji, *et al.* 2009. Forming ages of Early Precambrian metamorphic strata in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 25(10): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Zhang Xidao. 1988. Study on the cordierites in the Laiyang Region [J]. *Shandong Geology*, 4(1): 113~126 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Chemical Geology*, 231(1~2): 135~158.
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 160(3~4): 323~340.
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing, Dong Yongsheng, *et al.* 2003. Characteristics and genetic implications of diffusion zoning in garnet from Al-rich series of the Jingshan group in north Jiaodong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 752~760 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing, Geng Yuansheng, *et al.* 2004. Discovery and implications of the high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1942~1948 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing and Geng Yuansheng. 2007. Phase equilibria P-T path of the high- and low-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 135~143 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, *et al.* 2008. EPMA U-Th-Pb monazite and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 308(3): 328~350.
- 白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅铋成矿作用 [M]. 北京:地质出版社, 100~105.
- 白瑾, 戴凤岩, 郭进京, 等. 1996. 中国前寒武纪地壳演化 [M]. 北京:地质出版社, 65~84.
- 白文吉, 周美付, 胡旭峰, 等. 1996. 华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁杂岩及矿化特征 [M]. 北京:地震出版社, 71~81.
- 董永胜, 王微. 1998. 胶东早元古代荆山群变质作用演化样式及其构造环境探讨 [J]. *世界地质*, 17(3): 1~8.
- 纪壮义. 1993. 胶北元古界变质岩的同位素测年新成果及其地质意义 [J]. *山东地质*, 9(1): 43~51.
- 李永刚, 翟明国, 刘文军, 等. 1997. 胶东莱西地区高压麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学 [J]. *地质科学*, 32(3): 283~290.
- 林润生, 于志臣. 1988. 山东胶北隆起区荆山群 [J]. *山东地质*, 4(1): 21~30.
- 刘建辉, 刘福来, 刘平等. 2011. 胶北地体早前寒武多期岩浆、变质事件的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学证据及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 14(1): 135~143.
- 刘平等, 刘福来, 王舫, 等. 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化 [J]. *岩石学报*, 26(7): 2039~2056.
- 刘平等, 刘福来, 王舫, 等. 2011a. 山东半岛高压麻粒岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *地学前缘*, 18(1): 123~156.
- 刘平等, 刘福来, 王舫, 等. 2011b. 山东半岛早前寒武纪超镁铁质岩成因矿物学、锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 14(1): 2902~3020.
- 刘文军, 翟明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用 [J]. *岩石学报*, 14(4): 449~459.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系 [M]. 长春:长春出版社, 219~234.
- 卢良兆, 董永胜. 1998. 胶东早元古代荆山群富铝片麻岩中矿物共生的 P-T-X 关系及其演化 [J]. *岩石学报*, 14(2): 140~151.
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义 [J]. *岩石学报*, 14(2): 198~206.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. *地质论评*, 48(增刊): 26~30.
- 王舫, 刘福来, 刘平等. 2010. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化 [J]. *岩石学报*, 26(7): 2057~2072.
- 王沛成. 1993. 胶北下元古界变形构造初探 [J]. *山东地质*, 9(2): 36~44.
- 王沛成, 安郁宏. 1996. 鲁东地区十多年来基础地质研究的主要成果和进展 [J]. *山东地质*, 12(1): 8~23.
- 王仁民, 钱青, 范天立. 1998. 华北古陆块南缘高压麻粒岩的发现 [A]. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集 [C]. 北京:地震出版社, 568~572.
- 王世进, 万渝生, 张成基, 等. 2009. 山东早前寒武纪变质地层形成年代——锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据 [J]. *山东国土资源*, 25(10): 18~24.
- 张希道. 1988. 莱阳一带董青石的点滴研究 [J]. *山东地质*, 4(1): 113~126.
- 周喜文, 魏春景, 董永胜, 等. 2003. 胶北荆山群富铝岩系石榴石扩散环带特征及其成因指示意义 [J]. *岩石学报*, 19(4): 752~760.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 等. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义 [J]. *科学通报*, 49(14): 1424~1430.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 等. 2007. 胶北地块高压与低压泥质麻粒岩的相平衡关系与 PT 演化轨迹 [J]. *地学前缘*, 14(1): 135~143.

附中文参考文献