山东半岛高压麻粒岩中锆石的 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

Liu Pinghua， Liu Fulai*， Wang Fang， Liu Jianhui

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, *China*

Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, et al. *In-situ* U-Pb dating of zircons from high-pressure granulites in Shandong Peninsula, Eastern China and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 033-054

Abstract: High-pressure (HP) granulites as enclaves and irregular vein-like blocks are widely distributed in TTG gneisses of the Early Precambrian metamorphic basement of Shandong Peninsula, in the southeast of the North China Craton. Zircon grains separated from HP granulites are subdivided into three main types based on cathodoluminescence(CL), Laser Raman spectroscopy and *in-situ* U-Pb dating; they are inherited(magmatic) zircon, HP metamorphic zircon and retrogressive zircon. The obviously or weakly zoned, dark luminescent inherited(magmatic)zircon with mineral inclusions of apatite(Ap) records two group $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages of 2890—2915 Ma and 2510—2763 Ma, indicating two magmatic events occurring at Mesoarchean and Neoarchean epoches. In contrast, the homogeneous, HP metamorphic zircon with index HP mineral inclusions of garnet (Grt)+clinopyroxene(Cpx)+plagioclase(Pl)+quartz(Qtz)+rutile(Rt)+apatite(Ap) records younger $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages ranging from 1850 Ma to 1900 Ma, which represent peak HP granulite-facies metamorphic times. The retrogressive zircon with mineral inclusions of orthopyroxene(Opx)+plagioclase(Pl)+quartz(Qtz)+apatite(Ap)±amphibole(Amp), however, records the youngest $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages of 1820—1840 Ma, which represents late medium- and low-granulites-facies retrograde metamorphic times. This result indicates that Mesoarchean and Neoarchean igneous protoliths of mafic HP granulites, together with their TTG country rocks and meta-sedimentary rocks are subducted to coeval Paleoproterozoic HP metamorphism(1850—1900 Ma), followed by late medium- and low-granulites-facies retrogression(1820—1840 Ma). This new result is of very important significance for deeply discussing the genetic mechanism and geodynamic model of the HP granulites distributed in the southeast part of the North China Craton.

Key words: high-pressure granulites; zircon; U-Pb dating; metamorphic ages; Shandong Peninsula

摘 要：在山东半岛早前寒武纪变质基底中，高压麻粒岩常常呈透镜体或不规则脉状体广泛分布于 TTG 片麻岩之中。锆石中矿物包体激光拉曼测试、阴极发光图像分析及原位 U-Pb 定年结果表明，山东半岛高压麻粒岩中锆石成因十分复杂，可划分为 3 种类型：第一类锆石显示明显或弱的岩浆结晶环带，部分锆石保存磷灰石(Ap)等矿物包体，U-Pb 定年结果显示岩浆锆石记录了 2 890～2 915 Ma 和 2 510～2 763 Ma 两组$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄，表明研究区变质基底在中太古代末期和新太古代至少存在两期岩浆事件；第二类为变质锆石，保存了典型的高压麻粒岩相包体矿物组合石榴石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)+金红石(Rt)+磷灰石(Ap)，记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄集中在 1 850～1 900 Ma，应代表高压麻粒岩峰期高压麻粒岩相变质时代；第三类也为变质锆石，保存了峰后中低压麻粒岩相包体矿物组合斜方辉石(Opx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)

收稿日期：2010－11－08；**修回日期**：2010－12－01

基金项目：国家杰出青年科学基金项目(40725007)；中国地质调查局地质大调查项目 (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

* **通讯作者**：刘福来。E-mail：lfl0225@sina.com

+磷灰石(Ap)±角闪石(Amp),记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄集中1 820～1 840 Ma,应代表高压麻粒岩峰后中低压麻粒岩相退变质时代。该项成果不仅查明了山东半岛早前寒武纪变质基底麻粒岩中变质锆石普遍保存了高压麻粒岩相包体矿物组合,而且准确限定了麻粒岩的原岩形成时代、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:高压麻粒岩;锆石;U-Pb定年;变质时代;山东半岛

中图分类号:P597 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2321(2011)02-0033-22

0 引言

自从王仁民等[1]与翟明国等[2]率先报道了华北克拉通基底中高压麻粒岩以来,有关华北克拉通变质基底中高压麻粒岩的研究已引起了国内外研究者们的高度关注。近20年来,随着研究工作的不断深入,已在高压麻粒岩的原岩性质、岩相学、成因矿物学、变质演化 p-T 轨迹、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[3-19]。特别是在同位素年代学方面,随着锆石U-Pb定年技术的不断完善,有关华北克拉通早前寒武纪变质基底高压麻粒岩及其相关岩石的同位素年代学已积累了大量的测试数据[20-27]。多数研究者认为在1.85～1.95 Ga期间,华北克拉通曾经历了一次高压麻粒岩相变质事件,在此期间华北克拉通发生陆-陆碰撞、拼合形成统一的克拉通变质基底[26]。然而值得注意的是,华北克拉通基底中的高压麻粒岩不仅经历了峰期高压麻粒岩相变质作用,而且也受到峰后中一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。到目前为止,国内外许多学者对高压麻粒岩锆石U-Pb年代学数据所代表的真实地质意义,即能否代表峰期高压麻粒岩相变质时代仍存在不同的认识[28-32]。因此,在没有采用激光拉曼技术和阴极发光图像技术确定锆石内部矿物包体性质及其分布特征的前提下,单纯依据SIMS或者LA-ICP-MS U-Pb定年结果很难判断1.85～1.95 Ga究竟是代表峰期高压麻粒岩相变质时代,还是代表峰后中—低压麻粒岩相或者角闪岩相退变质时代。有鉴于此,本文以山东半岛高压麻粒岩为重点研究对象,以成因矿物学研究为主线,首先采用激光拉曼技术对高压麻粒岩中的副矿物锆石内部矿物包体进行鉴定,同时对锆石阴极发光图像性质进行系统分析,在此基础上采用SIMS U-Pb定年技术,对每件样品锆石进行原位定年,最后对上述结果进行综合分析,阐明山东半岛高压麻粒岩原岩形成时代、峰期高压麻粒岩相变质时代、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、火山沉积岩和少量的第三纪玄武岩。

研究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以及镁铁-超镁铁质岩石和高压麻粒岩。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片麻岩形成时代可分为两期,分别为2.7～2.9 Ga[34]和约2.5 Ga[35]。古元古代荆山群孔兹岩系主要分布在莱阳的荆山、旌旗山和莱西南墅等地,岩性主要为石榴夕线黑云片岩-片麻岩、大理岩、石墨片岩-片麻岩、长石石英岩、黑云变粒岩等,荆山群普遍经历角闪岩相-麻粒岩相变质作用[18-19,36]。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-角闪岩相变质作用。前人曾对荆山群和粉子山群中变质岩锆石进行了SHRIMP U-Pb定年测试,测试结果表明荆山群和粉子山群的变质时代为1.85～1.95 Ga[37],其变质时代和变质演化特征与研究区内基性高压麻粒岩十分相似[16,18],表明山东半岛前寒武纪变质基底在古元古代末期存在一次区域性的构造-热事件。蓬莱

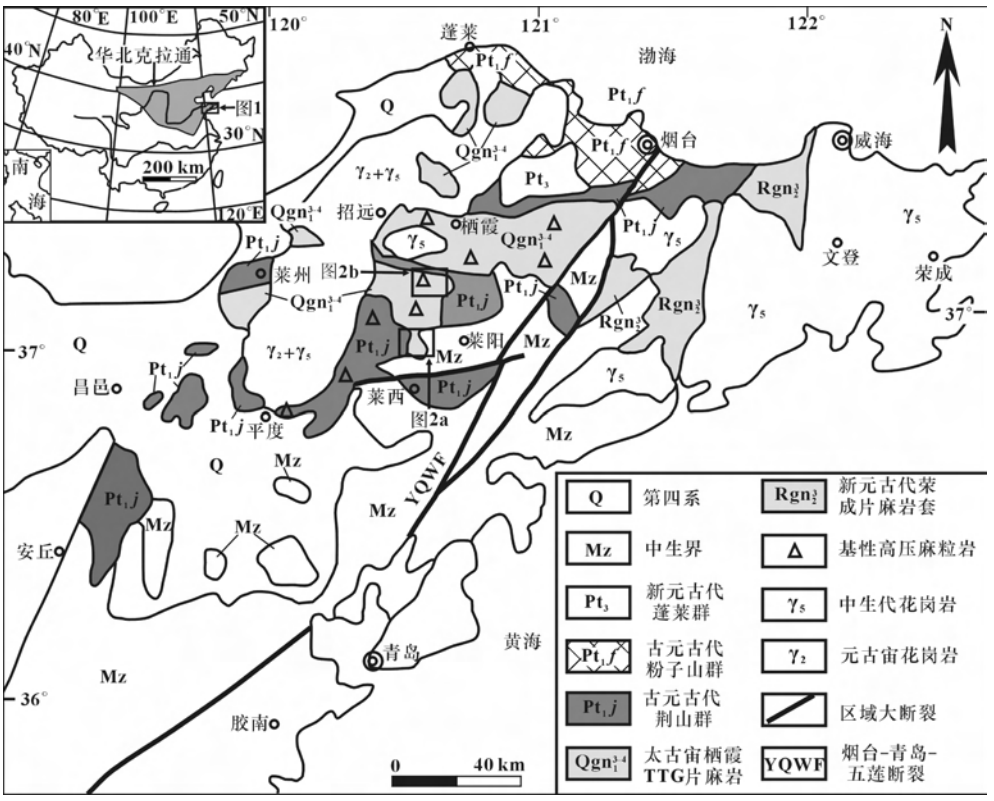


图 1　山东半岛地质简图及高压麻粒岩的分布位置

(据文献[33]修改)

Fig. 1　Simplified geological map and locations of HP granulites from Shandong Peninsula

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镁铁-超镁铁质岩、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,构成一条镁铁-超镁铁质岩和高压麻粒岩混杂岩带(图 1,2)。白文吉等[38]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,但已被后来岩石学和变质作用等方面的研究所否定[16,39]。本文研究的 5 件高压麻粒岩样品均以透镜体赋存于 TTG 片麻岩之中,主要位于莱西埠前庄、莱西前山珍村、莱西岚南和栖霞官道等地(图 2)。

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,它们侵入到太古宙 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 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄多数集中在 120～160 Ma[40-42]。

2　岩相学特征

本文研究的 5 件样品均为退变高压麻粒岩,普遍经历了后期退变质作用的改造,包括石榴紫苏麻粒岩(PD-16a)、石榴斜长角闪岩(PD-22a)、角闪二辉麻粒岩(PD-13d,PD-25b)和含辉斜长角闪岩(PD-14c)。

石榴紫苏麻粒岩(PD16a-01)。主要由斜方辉石(Opx)、斜长石(Pl)、石榴子石(Grt)、石英(Qtz)和磁铁矿(Mag)组成,次要矿物有黑云母(Bt)、角闪石(Amp)与钾长石(Kfs),副矿物主要有金红石(Rt)、磷灰石(Ap)和锆石(Zrn)等。在石榴子石(Grt)周围,分布有蠕虫状斜方辉石(Opx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)后成合晶或冠状体(图 3a),局部石榴子石(Grt)消失,完全被蠕虫状后成合晶所替代,斜方辉石经电子探针分析为紫苏辉石[43]。

石榴斜长角闪岩(PD22a-06)。主要由角闪石(Amp)、斜长石(Pl)、石榴子石(Grt)组成,次要矿物为石英(Qtz)和磁铁矿(Mag),副矿物主要有钛铁矿

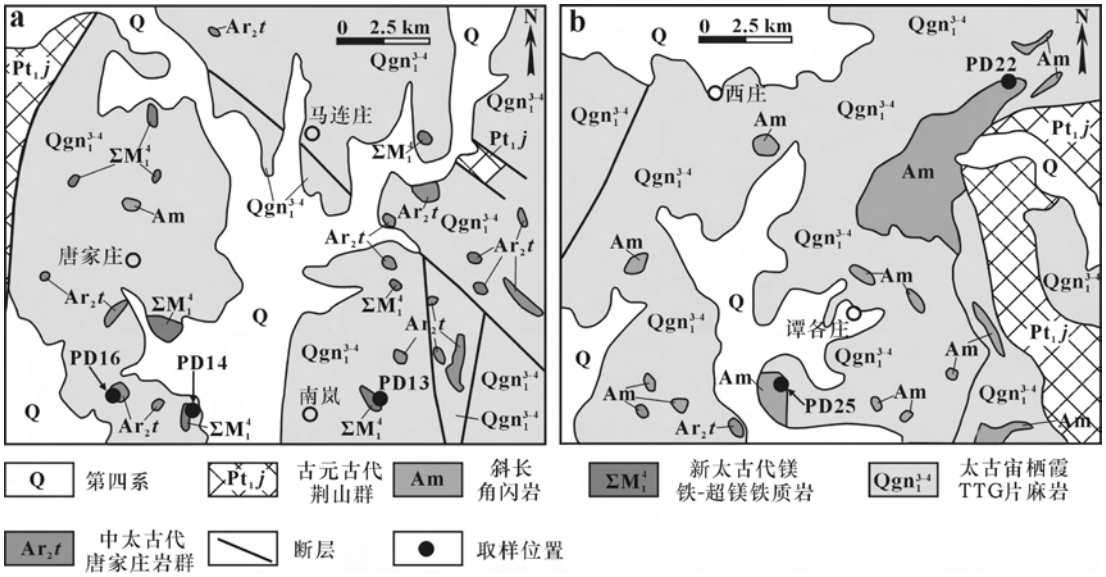


图 2 研究区高压麻粒岩地质略图及采样位置

Fig. 2 Geological map and sample locations of HP granulites in study area

a—莱西地区; b—莱阳地区。

(Ilm)、金红石(Rt)、磷灰石(Ap)和锆石(Zrn)等。在变斑晶石榴石边部,分布有角闪石(Amp)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)后成合晶,构成典型的"白眼圈"减压结构(图 3b)。

角闪二辉麻粒岩(PD-13d-02,PD-25b-02)。主要矿物有单斜辉石(Cpx)、斜方辉石(Opx)、角闪石(Amp)、斜长石(Pl)和石英(Qtz),次要矿物有黑云母(Bt)、钛铁矿(Ilm)和磁铁矿(Mag),副矿物主要有金红石(Rt)、磷灰石(Ap)和锆石(Zrn)等。细粒的斜方辉石、单斜辉石和角闪石彼此之间平衡共生(图 3c,3d)。粗粒的单斜辉石晶体表面常常分布有针状、棒状和乳滴状的斜长石和石英(图 3e)。

含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)。主要由角闪石(Amp)、斜长石(Pl)和单斜辉石(Cpx)组成,副矿物主要有钛铁矿(Ilm)、金红石(Rt)、磷灰石(Ap)和锆石(Zrn)等。角闪石有多个世代,颗粒较大者与斜长石和单斜辉石平衡共生,颗粒较小者常常分布在单斜辉石和斜长石晶体表面(图 3f)。

3 样品制备及实验研究方法

本文共研究了 5 件已退变的高压麻粒岩样品,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、SIMS U-Pb 定年的标准锆石靶。锆石的激光拉曼测试在国土资源部大陆动力学实验室进行,5 件高压麻粒岩锆石中矿物包体激光拉曼测试分析结果列入表 1。锆石的阴极发光图像分析在北京离子探针中心进行。锆石的 SIMS U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室和北京离子探针中心完成。上述各项分析采用的仪器型号、分析测试条件和步骤等详见文献[44-45]。

4 矿物包体与阴极发光图像

4.1 退变高压麻粒岩——石榴紫苏麻粒岩(PD-16a-02)

石榴紫苏麻粒岩中锆石为暗紫红色,颗粒大小不一,变化于 50~300 μm。根据锆石阴极发光图像、晶体形态和矿物包体,可将锆石划分为 4 种类型:第一类锆石具有相对弱发光(灰黑色)的继承性核和相对强发光(白色—灰白色)的边,灰黑色继承性核部具有明显的岩浆环带,边部宽窄十分不均匀,有的只有几 μm,有的则可达 100 μm 以上,发光性十分均匀,为典型变质成因,激光拉曼测试分析显示该类锆石核部和边部保存了少量矿物包体(图 4a,

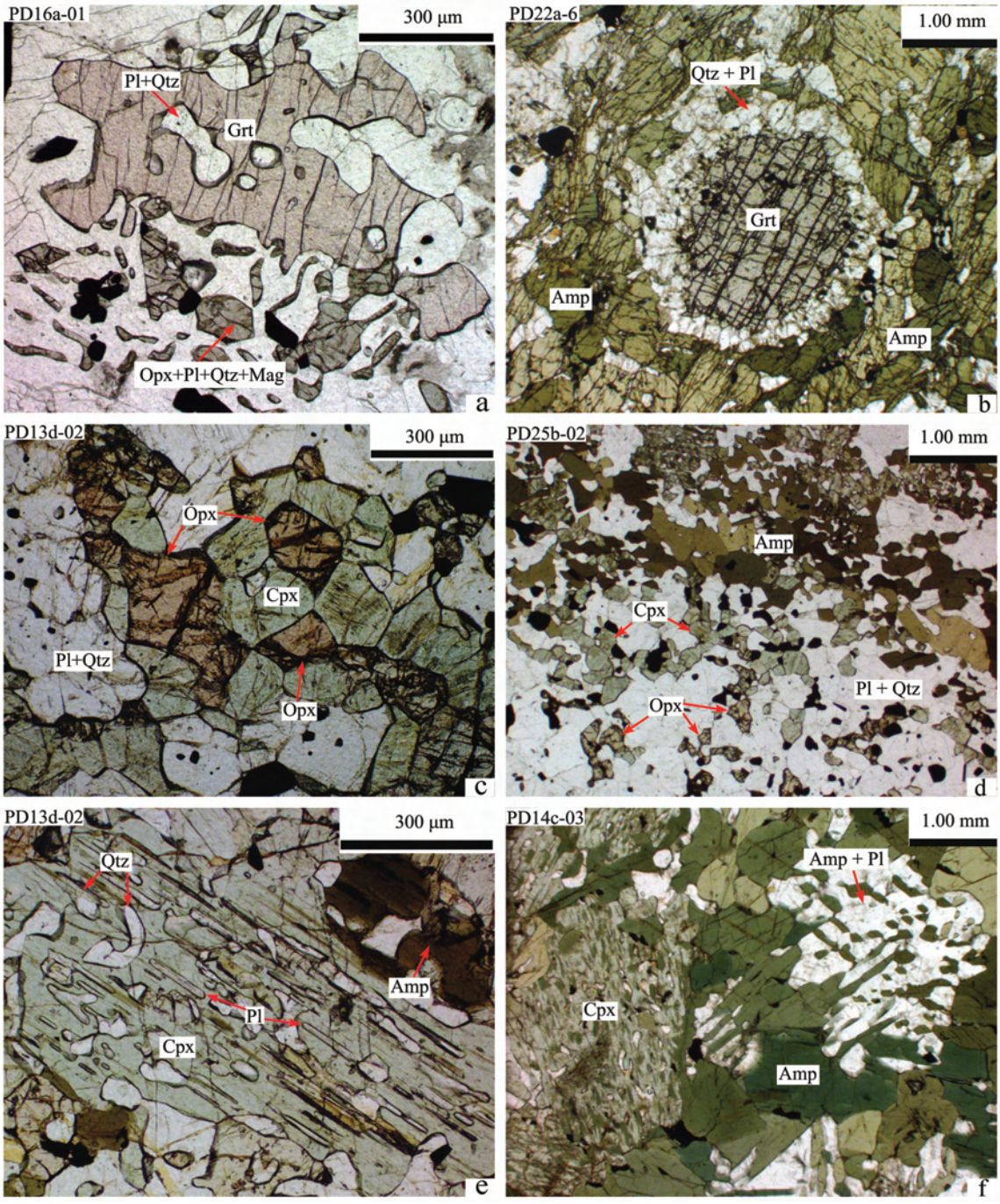


图 3　山东半岛高压麻粒岩显微结构照片(均为单偏光)

Fig. 3　Photomicrographs(all plane polarized light) of mineral assemblages in the matrix of HP granulites from Shandong Peninsula

a—残晶石榴石内部存在斜长石(Pl)+石英(Qtz)包体,沿其边部则转变为斜方辉石(Opx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)的后成合晶; b—石榴石边部的"白眼圈"结构,新生矿物斜长石(Pl)+石英(Qtz)围绕残晶石榴石(Grt)周围分布; c—斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)和斜长石(Pl)的平衡共生结构; d—角闪二辉麻粒岩共生矿物组合:单斜辉石(Cpx)+斜方辉石(Opx)+角闪石(Amp)+斜长石(Pl)+石英(Qtz); e—单斜辉石(Cpx)中的棒状斜长石(Pl)包体; f—含辉斜长角闪岩中的矿物组合:角闪石(Amp)+斜长石(Pl)+单斜辉石(Cpx)。

4b);第二类锆石大部分为它形、椭圆状,矿物包体十分少见(图 4c,4d),阴极发光图像具有弱发光效应(黑色—灰黑色),且发光性十分均匀,具有典型变质锆石的特点;第三类锆石为它形和浑圆状,矿物包体寥寥无几,仅个别含石英(Qtz)+斜长石(Pl)+磷灰石(Ap),具有较强的发光效应,阴极发光图像为灰色—灰白色,部分锆石发光性不均匀(图 4e,4f);第四类锆石也具有较强的发光效应,阴极发光图像

表 1 山东半岛高压麻粒岩锆石中矿物包体

Table 1 Mineral inclusions in zircons from HP granulites from Shandong Peninsula

矿物包体	(退变)高压麻粒岩		角闪二辉麻粒岩		含辉斜长角闪岩
	PD-16a-02	PD-22a-28	PD-13d-02	PD-25b-02	PD-14c-03
石榴石(Grt)		*	*		
单斜辉石(Cpx)			*		*
斜方辉石(Opx)	(*)				
斜长石(Pl)	(*)	*	*	*	*
石英(Qtz)	(*)	*	*	*	*
金红石(Rt)			*		
角闪石(Amp)	(*)	*			
磷灰石(Ap)	(*)	*	*	*	(*)
黑云母(Bt)				*	
绿帘石(Ep)				*	
雌黄(Orp)			(*)	*	
磁铁矿(Mag)			(*)	(*)	(*)
钛铁矿(Ilm)				(*)	
铬铁矿(Chr)					(*)
辉铋矿(Bi)				(*)	
榍石(Sph)		(*)		(*)	
方解石(Cal)		(*)		(*)	
流体包裹体(CO_2)					(*)

注:* 为锆石中主要矿物包体;(*)为锆石中少见的矿物包体。

为灰色—灰白色,该类锆石大部分晶体形态为它形—半自形,矿物包体十分少见(图 4g,4h),激光拉曼分析显示主要为斜方辉石(Opx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)+磷灰石(Ap)+角闪石(Amp),这与寄主岩石在近等温减压中低压麻粒岩相退变质阶段的矿物组合十分吻合。

4.2 退变高压麻粒岩——石榴斜长角闪岩(PD-22a-28)

石榴斜长角闪岩中锆石为紫红色,不同成因类型的锆石大小不一,变化于 20~250 μm。其晶体形态为半自形、它形和短柱状。根据锆石阴极发光图像、晶体形态和矿物包体性质,可将锆石划分为 3 种类型。第一类锆石具有相对弱发光(灰黑色)的继承性核和相对强发光(白色—灰白色)的边。其中灰黑色继承性核部矿物包体很少,主要为磷灰石(Ap),相应的阴极发光图像大多数具有典型的岩浆结晶环带,有的明显受到后期热事件影响岩浆结晶环带已模糊不清,边部宽窄不一且矿物包体也较少,主要为石榴子石(Grt)+斜长石(Ap)+石英(Qtz)+磷灰石(Ap),指示边部为高压麻粒岩在退变晚期角闪岩相阶段形成的变质增生锆石(图 5a,5b)。第二类锆石具有较强的发光性,阴极发光图像显示为灰色—灰白色,且发光效应比较均匀(图 5c,5d),大部分晶

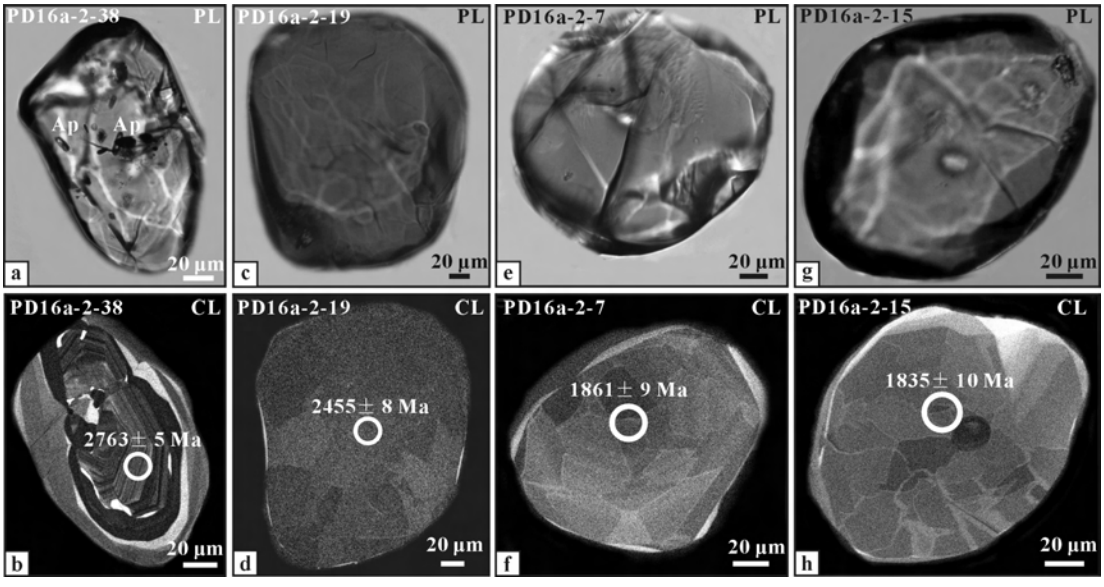


图 4 石榴紫苏麻粒岩(PD-16a-02)锆石中矿物包体、阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

Fig. 4 Plane-polarized light(PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence(CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from retrograde HP granulites(PD-16a-02)

a—样品 PD-16a-02 中第 38 粒锆石晶体继承性核部和边部保存的矿物包体 Ap;b—图 4a 中锆石阴极发光图像,具有弱发光继承性岩浆核、强发光变质增生边,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;c—样品 PD-16a-02 中第 19 粒锆石晶体无矿物包体;d—图 4c 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄; e—样品 PD-16a-02 中第 7 粒锆石晶体无矿物包体;f—图 4e 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;g—样品 PD-16a-02 中第 15 粒锆石晶体无矿物包体;h—图 4g 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

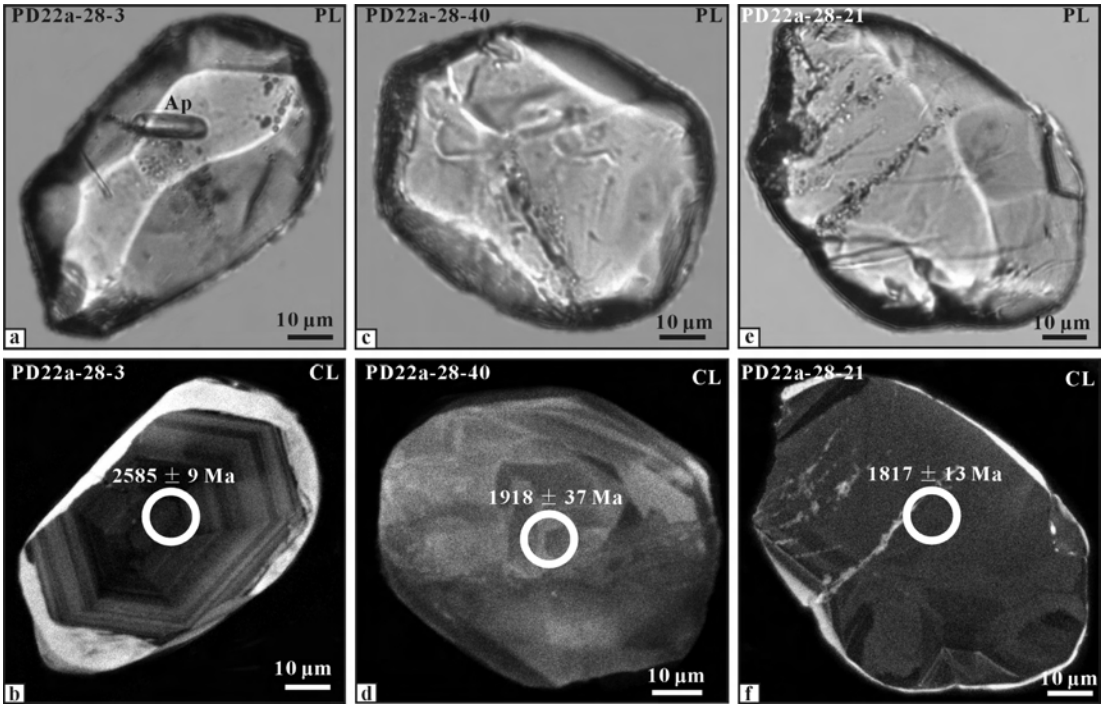


图 5　石榴斜长角闪岩(PD-22a-28)锆石中矿物包体、阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

Fig. 5　Plane-polarized light(PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence(CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from retrograde HP granulites(PD-22a-28)

a—样品 PD-22a-28 中第 3 粒锆石晶体继承性岩浆核部保存的矿物包体 Ap,边部无矿物包体;b—图 5a 中锆石阴极发光图像,具有弱发光的继承性岩浆核、强发光的变质增生边,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;c—样品 PD-22a-28 中第 40 粒锆石晶体无矿物包体;d—图 5c 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;e—样品 PD-22a-28 中第 21 粒锆石晶体无矿物包体;f—图 5e 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

体形态为椭圆形,少数为柱状,粒径变化于 50～150 μm,该类锆石未保存矿物包体。第三类锆石具有弱发光性(黑色—灰黑色),部分锆石具有强发光的窄边(图 5e,5f),该类锆石普遍具有规则的形态,大部分为短柱状,少数为椭圆状,与上述二类锆石对比,该类锆石颗粒偏小,一般为 20～100 μm。该类锆石微区矿物包体相对较多,主要为石榴子石(Grt)＋斜长石(Ap)＋石英(Qtz)＋角闪石(Amp),有的含少量的榍石(Spn)。此类锆石矿物包体与高压麻粒岩在退变晚期角闪岩相变质阶段的矿物组合十分一致。

4.3　角闪二辉麻粒岩(PD-13d-02 和 PD-25b-02)

尽管样品 PD-13d-02 和 PD-25b-02 均为角闪二辉麻粒岩,但是两者在锆石阴极发光图像、晶体形状和矿物包体等方面存在较大的差别。样品 PD-13d-02 中锆石均为典型的麻粒岩相变质条件下形成的锆石(图 6),具有相对强发光效应(白色—灰白色),其晶体形态主要为椭圆状和长柱状,少数为不规则状,且保存大量的包体矿物,激光拉曼分析主要包体矿物为石榴子石(Grt)＋单斜辉石(Cpx)＋斜长石(Pl)＋石英(Qtz)＋磷灰石(Ap),斜长石(Pl)以拉长石为主,矿物包体中含极少数磁铁矿(Mag)和雌黄(Orp)。从锆石保存的矿物包体可以明显看出,角闪二辉麻粒岩曾经历了早期高压麻粒岩相变质作用。

样品 PD-25b-02 中锆石相对比较复杂,根据锆石阴极发光图像、晶体形态和矿物包体,可将锆石划分 3 种类型:第一类锆石具有弱发光(灰黑色—灰色)的继承性核和较强发光(白色—灰白色)的边,相应的阴极发光图像显示核部具有典型的岩浆结晶环带。继承性核部矿物包体甚少,仅个别颗粒中有磷灰石(Ap),强发光效应边部较窄,边部宽度变化于 10～50 μm,边部未保存矿物包体(图 7a,7b)。第二类锆石的阴极发光图像亦具有弱发光(灰色－灰白色)继承性核和极窄的强发光(白色)边,且核部具有典型的岩浆结晶环带。激光拉曼测试显示核部含有大量的矿物包体,而边部未保存矿物包体。核部矿物包体主要为斜长石(Pl)＋石英(Qtz)＋磷灰石(Ap)＋黑云母(Bt)＋绿帘石(Ep)＋雌黄(Qrp)及少量的磁铁矿(Mag)、钛铁矿(Ilm)、辉铋矿(Bi)和

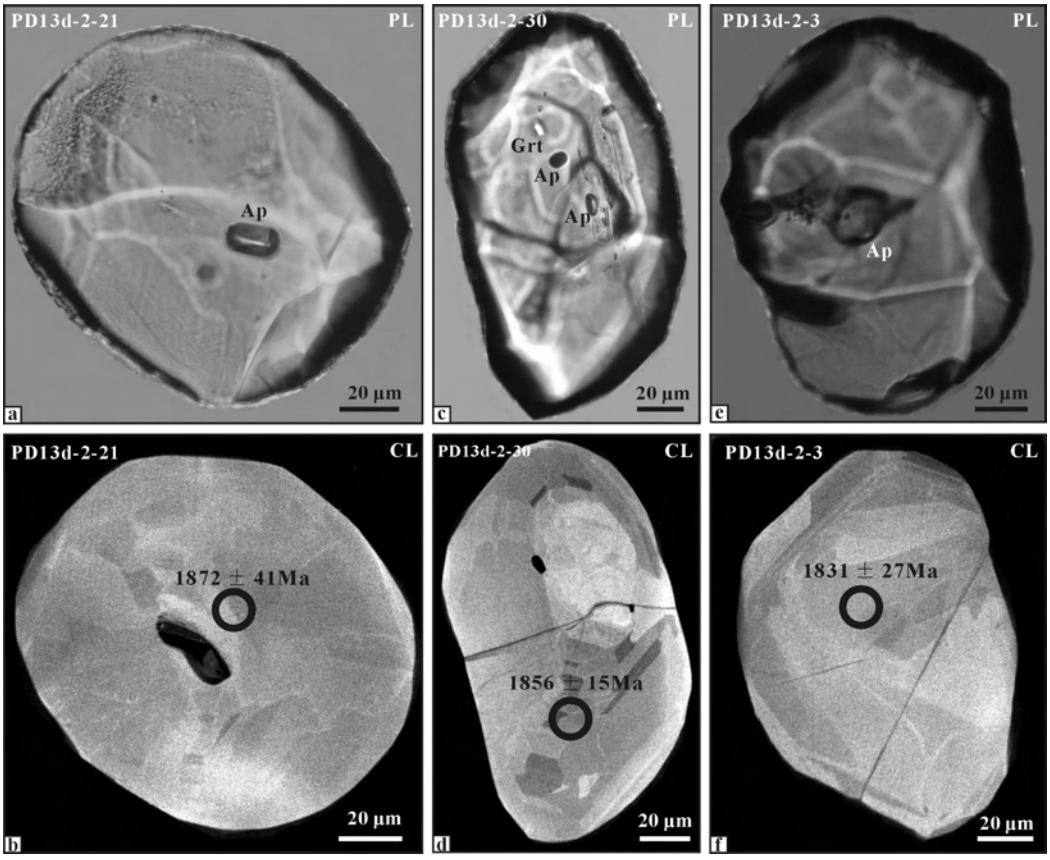


图 6 角闪二辉麻粒岩(PD-13d-02)锆石中矿物包体,阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

Fig. 6 Plane-polarized light(PL)images of mineral inclusions, cathodoluminescence(CL)images and SIMS U-Pb ages of host zircons from amphibole granulites(PD-13d-02)

a—样品 PD-13d-02 中第 21 粒锆石晶体保存的矿物包体 Ap;b—图 6a 中变质锆石阴极发光图像,具有相对均匀的强发光效应,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;c—样品 PD-13d-02 中第 30 粒锆石晶体保存的矿物包体 Grt+Ap;d—图6c 中变质锆石阴极发光图像,具有相对均匀的强发光效应,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;e—样品 PD-13d-02 中第 3 粒锆石晶体保存的矿物包体 Ap;f—图 6e 中变质锆石阴极发光图像,具有相对均匀的强发光效应以及$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄。

榍石(Sph)(图 7c,7d)。第三类锆石为典型的变质锆石,晶体形状主要为浑圆状和柱状,少数为不规则状,未保存矿物包体,自核部到边部阴极发光图像十分均匀,且具有较强光效应(白色—灰白色)(图 7e,7f,7g,7h)。

4.4 含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)

含辉斜长角闪岩中锆石为暗紫红色,大小不一,粒度变化于 50～300 μm。根据锆石阴极发光图像、晶体形态和矿物包体,可将锆石划分为 2 种类型。第一类锆石具有极弱发光效应(黑色)的核和强发光效应(白色—灰白色)的边。核部呈半自形长柱状和它形不规则状,显示弱岩浆结晶环带,且含有少量的矿物包体,主要为石英(Qtz)+斜长石(Pl)+单斜辉石(Cpx),少见磷灰石(Ap)。边部宽窄不一,未见矿物包体(图 8a,8b)。第二类锆石具有强发光效应(灰色—灰白色),晶体形态呈半自形柱状和椭圆状,少数呈它形,不规则状,且保存了少量的矿物包体,主要为石英(Qtz)+斜长石(Pl)+单斜辉石(Cpx),副矿物为磷灰石(Ap)+铬铁矿(Chr)+磁铁矿(Mag)(图 8c,8d,8e,8f)。

5 锆石 U-Pb 定年结果

采用 SIMS U-Pb 定年技术,对两件退变的高压麻粒岩(PD-16a-02 和 PD-22a-28)、两件角闪二辉麻粒岩(PD-13d-02 和 PD-25b-02)和一件含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)进行了不同性质锆石微区 SIMS U-Pb 定年测试,其结果列入表 2～6 中。

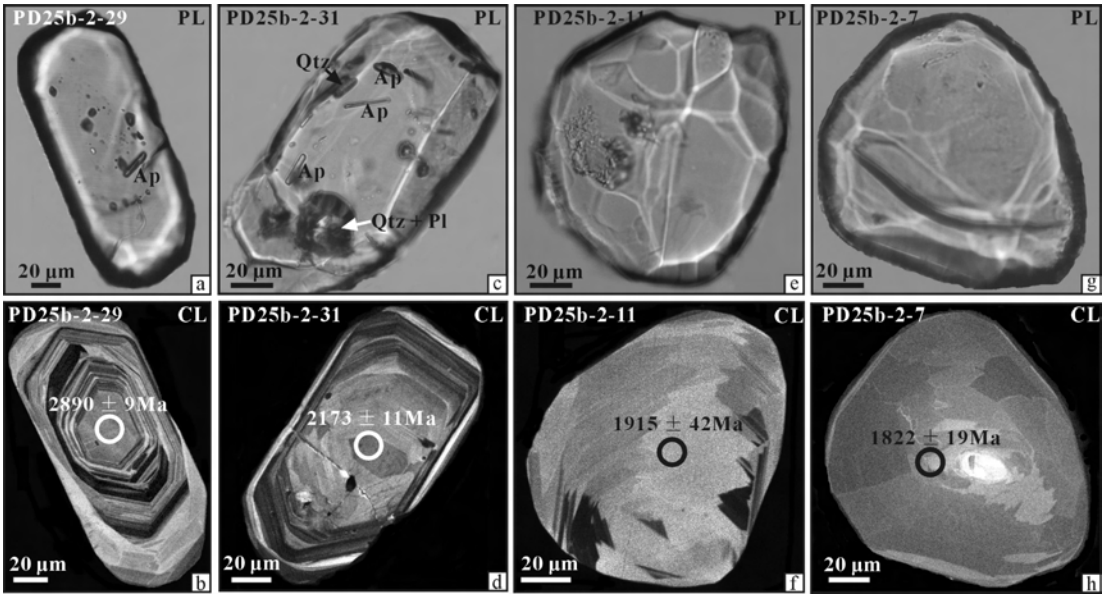


图 7　角闪二辉麻粒岩(PD-25b-02)锆石中矿物包体,阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

Fig. 7　Plane-polarized light(PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence(CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from amphibole granulites(PD-25b-02)

a—样品 PD-25b-02 中第 29 粒锆石晶体核部保存的矿物包体 Ap,边部无矿物包体;b—图 7a 中锆石阴极发光图像,具有弱发光的继承性岩浆核、强发光的变质增生边,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;c—样品 PD-25b-02 中第 31 粒锆石晶体核部保存的矿物包体为 Pl+Qtz+Ap,边部无矿物包体;d—图 7c 中锆石阴极发光图像,具有弱发光的继承性岩浆核、强发光的变质增生边,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄; e—样品 PD-25b-02 中第 11 粒锆石晶体无矿物包体;f—图 7e 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;g—样品 PD-25b-02 中第 7 粒锆石晶体无矿物包体;h—图 7g 中变质锆石阴极发光图像和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

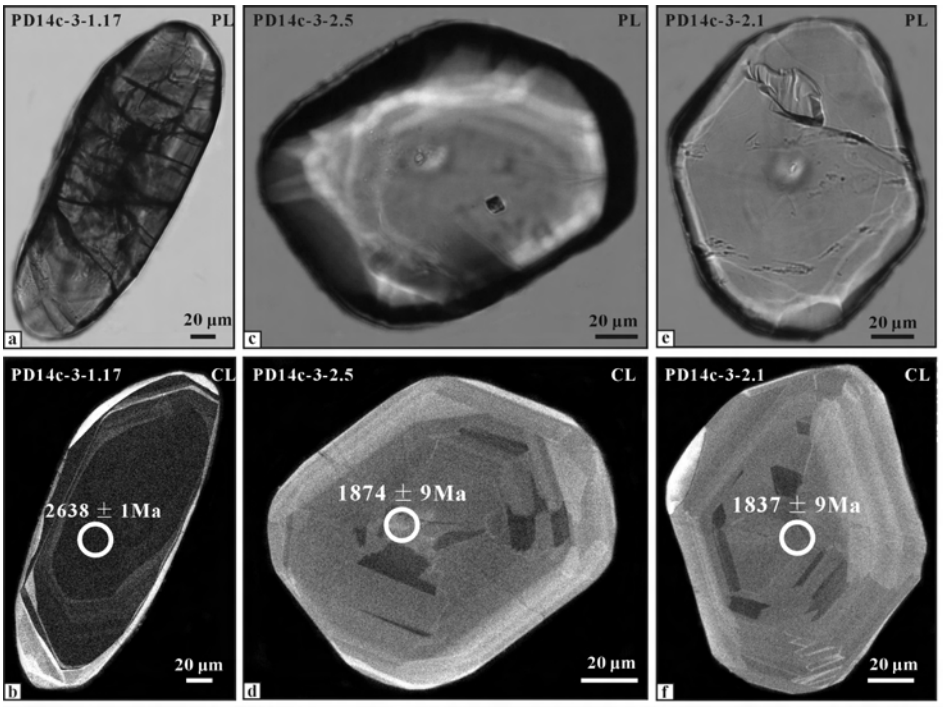


图 8　含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)锆石中矿物包体,阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

Fig. 8　Plane-polarized light(PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence(CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from pyroxene-bearing amphibolite(PD-14c-03)

a—样品 PD-14c-03 中第 17 粒锆石晶体无矿物包体;b—图 8a 中锆石阴极发光图像,具有弱发光的继承性核、强发光的变质增生边,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄;c—样品 PD-14c-03 中第 25 粒锆石晶无矿物包体;d—图 8c 中变质锆石阴极发光图像,具有较强发光效应,以及$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄;e—样品 PD-14c-03 中第 21 粒锆石晶无矿物包体;f—图 8e 中变质锆石阴极发光图像,具有较强发光效应以及$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

表 2 退变高压麻粒岩 PD-16a-02 锆石的 SIMS U-Pb 定年结果

Table 2 Results of SIMS U-Pb analyses of zircons from retrograde HP granulite PD-16a-02

样品分析点号	矿物包体	$w_B/10^{-6}$ U	Th	$^{206}Pb^*$	Th/U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±(%)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±(%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±(%)	年龄/Ma $^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{206}Pb^*/^{238}U$
第一组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 652±8)~(2 763±5) Ma(n=5)													
PD-16a-02-38	无	258	182	121	0.73	0.192 4	0.320 0	14.47	0.620 0	0.545 6	0.530 0	2 763±5	2 807±12
PD-16a-02-41	无	372	595	178	1.65	0.190 8	0.270 0	14.60	0.600 0	0.554 8	0.530 0	2 749±5	2 845±12
PD-16a-02-40	无	352	227	155	0.67	0.190 5	0.460 0	13.47	0.650 0	0.512 9	0.470 0	2 746±8	2 669±10
PD-16a-02-39	无	206	183	89.8	0.92	0.186 3	0.530 0	13.05	0.800 0	0.507 9	0.600 0	2 710±9	2 648±13
PD-16a-02-34	无	158	119	64.6	0.78	0.179 9	0.470 0	11.82	0.840 0	0.476 6	0.700 0	2 652±8	2 512±15
第二组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 195±6)~(2 511±6) Ma(n=9)													
PD-16a-02-36	无	760	10.9	302	0.01	0.165 4	0.370 0	10.55	0.510 0	0.462 7	0.350 0	2 511±6	2 452±7
PD-16a-02-30	无	2 528	37.4	1 020	0.02	0.164 0	0.120 0	10.63	0.270 0	0.470 1	0.240 0	2 497±2	2 484±5
PD-16a-02-08	无	738	98.1	299	0.14	0.163 2	0.310 0	10.60	0.480 0	0.470 9	0.360 0	2 489±5	2 488±8
PD-16a-02-18	无	365	47.2	144	0.13	0.161 6	0.400 0	10.21	0.880 0	0.458 3	0.780 0	2 472±7	2 432±16
PD-16a-02-28	无	884	164	346	0.19	0.161 3	0.270 0	10.15	0.420 0	0.456 2	0.330 0	2 470±5	2 423±7
PD-16a-02-19	无	552	72.3	219	0.14	0.159 9	0.460 0	10.18	0.600 0	0.461 5	0.400 0	2 455±8	2 446±8
PD-16a-02-06	无	519	68.6	188	0.14	0.155 0	1.800 0	9.000	1.900 0	0.421 2	0.470 0	2 402±31	2 266±9
PD-16a-02-22	无	2 591	22.6	959	0.01	0.150 5	0.640 0	8.940	0.800 0	0.430 9	0.470 0	2 352±11	2 310±9
PD-16a-02-05	无	558	72.6	184	0.13	0.137 4	0.340 0	7.261	0.540 0	0.383 3	0.410 0	2 195±6	2 092±7
第三组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 852±6)~(1 861±9) Ma(n=7)													
PD-16a-02-07	无	288	36.2	80.9	0.13	0.113 8	0.510 0	5.133	0.740 0	0.327 2	0.540 0	1 861±9	1 825±9
PD-16a-02-42	无	160	37.0	44.1	0.24	0.113 7	0.680 0	5.041	0.970 0	0.321 6	0.690 0	1 859±12	1 798±11
PD-16a-02-31	无	150	36.9	41.2	0.26	0.113 5	0.740 0	5.013	1.500 0	0.320 4	1.300 0	1 856±13	1 792±20
PD-16a-02-03	无	573	252	161	0.45	0.113 3	0.400 0	5.128	0.570 0	0.328 2	0.410 0	1 853±7	1 830±7
PD-16a-02-02	无	157	45.1	44.5	0.30	0.113 3	0.780 0	5.161	1.100 0	0.330 3	0.800 0	1 853±14	1 840±13
PD-16a-02-29	无	1 221	863	334	0.73	0.113 3	0.250 0	4.980	0.390 0	0.318 8	0.300 0	1 853±5	1 784±5
PD-16a-02-01	Qtz	847	437	236	0.53	0.113 2	0.320 0	5.060	0.500 0	0.324 1	0.390 0	1 852±6	1 810±6
第四组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 839±3) Ma(MSWD=0.66,n=17,除点 26、32、33、37、43 外)													
PD-16a-02-43	无	201	77.6	52.4	0.40	0.113 0	0.630 0	4.742	0.900 0	0.304 3	0.630 0	1 849±11	1 713±10
PD-16a-02-10	无	132	33.4	37.4	0.26	0.113 0	0.750 0	5.157	1.100 0	0.331 1	0.770 0	1 848±14	1 844±12
PD-16a-02-33	无	109	32.3	29.5	0.31	0.112 9	0.930 0	4.891	1.300 0	0.314 1	0.850 0	1 847±17	1 761±13
PD-16a-02-21	无	336	138	93.6	0.43	0.112 9	0.470 0	5.049	0.680 0	0.324 3	0.490 0	1 847±9	1 811±8
PD-16a-02-09	无	163	34.2	46.3	0.22	0.112 9	0.720 0	5.136	1.000 0	0.330 0	0.700 0	1 846±13	1 838±11
PD-16a-02-13	无	647	413	181	0.66	0.112 8	0.350 0	5.062	0.510 0	0.325 5	0.380 0	1 845±6	1 816±6
PD-16a-02-20	无	383	178	108	0.48	0.112 8	0.430 0	5.116	0.640 0	0.329 1	0.470 0	1 845±8	1 834±8
PD-16a-02-17	无	1 797	881	512	0.51	0.112 7	0.200 0	5.151	0.340 0	0.331 6	0.270 0	1 843±4	1 846±4
PD-16a-02-04	无	546	227	153	0.43	0.112 6	0.380 0	5.064	0.570 0	0.326 2	0.420 0	1 841±7	1 820±7
PD-16a-02-32	无	685	189	184	0.29	0.112 5	0.340 0	4.851	0.510 0	0.312 7	0.370 0	1 840±6	1 754±6
PD-16a-02-16	无	771	248	216	0.33	0.112 5	0.310 0	5.061	0.470 0	0.326 3	0.350 0	1 840±6	1 821±6
PD-16a-02-24	无	504	205	139	0.42	0.112 5	0.390 0	4.987	0.580 0	0.321 6	0.420 0	1 840±7	1 798±7
PD-16a-02-25	无	1 660	120.6	461	0.08	0.112 4	0.220 0	5.009	0.350 0	0.323 1	0.270 0	1 839±4	1 805±4
PD-16a-02-11	Qtz	603	226	171	0.39	0.112 4	0.370 0	5.112	0.540 0	0.330 0	0.390 0	1 838±7	1 838±6
PD-16a-02-26	无	154	50.7	41.7	0.34	0.112 3	0.800 0	4.886	1.100 0	0.315 6	0.710 0	1 837±15	1 768±11
PD-16a-02-12	无	1 121	403	314	0.37	0.112 3	0.260 0	5.051	0.410 0	0.326 3	0.310 0	1 837±5	1 820±5
PD-16a-02-15	无	258	47.5	71.7	0.19	0.112 2	0.530 0	4.999	1.000 0	0.323 2	0.850 0	1 835±10	1 805±13
PD-16a-02-37	无	524	238	138	0.47	0.112 1	0.400 0	4.726	0.570 0	0.305 7	0.410 0	1 834±7	1 720±6
PD-16a-02-14	Amp	830	225	231	0.28	0.112 1	0.310 0	5.006	0.670 0	0.323 9	0.600 0	1 834±6	1 809±9
PD-16a-02-23	无	133	33.0	36.9	0.26	0.111 7	0.880 0	4.961	1.200 0	0.322 1	0.760 0	1 828±16	1 800±12
PD-16a-02-27	无	466	244	128	0.54	0.111 7	0.410 0	4.931	0.590 0	0.320 1	0.430 0	1 828±7	1 790±7
PD-16a-02-35	无	264	141	72.2	0.55	0.111 6	0.570 0	4.890	0.800 0	0.317 9	0.560 0	1 825±10	1 779±9

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。

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn

表 3 退变高压麻粒岩 PD-22a-28 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 3 Results of SIMS U-Pb analyses of zircons from retrograde HP granulite PD-22a-28

样品分析点号	矿物包体	$w_B/10^{-6}$ U	Th	$^{206}Pb^*$	Th/U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±(%)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±(%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±(%)	年龄/Ma $^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{206}Pb^*/^{238}U$
第一组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 459±68)~(2 604±23) Ma(n=11)													
PD-22a-28.2	Ap+Qtz	51.2	35.4	35.9	0.69	0.174 8	1.377	0.514 8	1.563	12.405 1	2.084	2 604±23	2 677±34
PD-22a-28.32	无	56.9	34.8	37.9	0.61	0.174 6	0.561	0.494 6	1.532	11.908 5	1.631	2 603±9	2 590±33
PD-22a-28.3	Ap	172	137	118	0.79	0.172 8	0.571	0.491 8	1.509	11.720 8	1.614	2 585±9	2 579±32
PD-22a-28.17	无	57.2	40.8	37.5	0.71	0.172 7	1.186	0.481 9	1.588	11.476 5	1.982	2 584±20	2 535±33
PD-22a-28.30	Ap	49.6	27.8	34.3	0.56	0.170 7	3.313	0.514 2	1.507	12.105 2	3.640	2 565±54	2 675±33
PD-22a-28.8	无	8.13	0.407	4.41	0.05	0.168 7	2.668	0.455 5	1.791	10.593 6	3.213	2 545±44	2 420±36
PD-22a-28.15	Pl	94.8	15.3	54.0	0.16	0.167 6	0.795	0.471 5	1.520	10.893 4	1.715	2 533±13	2 490±31
PD-22a-28.45	无	197	46.5	116	0.24	0.165 2	0.308	0.480 6	1.500	10.948 9	1.531	2 510±5	2 530±31
PD-22a-28.37	无	602	636	408	1.06	0.163 7	0.214	0.466 8	1.504	10.535 9	1.519	2 494±4	2 470±31
PD-22a-28.18	Cal	19.5	0.143	11.05	0.01	0.163 5	1.679	0.486 0	1.589	10.954 6	2.312	2 492±28	2 554±34
PD-22a-28.33	无	1.72	0.066	—	0.04	0.160 3	4.114	0.474 5	1.712	10.487 8	4.456	2 459±68	2 503±36
第二组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 978±67)~(2 269±121) Ma(n=6)													
PD-22a-28.16	无	1.73	0.743	0.731	0.43	0.143 4	7.349	0.327 4	1.680	6.473 5	7.539	2 269±121	1 826±27
PD-22a-28.25	无	1.42	0.183	0.646	0.13	0.139 9	4.348	0.381 2	1.831	7.353 4	4.718	2 226±73	2 082±33
PD-22a-28.23	无	5.80	0.949	2.56	0.16	0.135 7	3.884	0.369 0	1.515	6.906 6	4.169	2 174±66	2 025±26
PD-22a-28.11	无	3.86	0.067	1.50	0.02	0.123 4	4.957	0.341 6	2.269	5.809 3	5.452	2 005±85	1 894±37
PD-22a-28.39	Pl	1.82	0.204	0.699	0.11	0.122 2	6.607	0.335 8	1.678	5.657 4	6.817	1 988±113	1 867±27
PD-22a-28.28	Pl+Grt	4.33	0.217	1.64	0.05	0.121 5	3.840	0.333 9	1.548	5.592 6	4.140	1 978±67	1 857±25
第三组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 853±45)~(1 920±92)Ma(n=11)													
PD-22a-28.35	无	1.51	0.331	0.590	0.22	0.117 6	5.277	0.333 6	1.501	5.410 2	5.486	1 920±92	1 856±24
PD-22a-28.40	无	18.8	1.15	6.93	0.06	0.117 5	2.075	0.327 1	1.514	5.299 2	2.569	1 918±37	1 825±24
PD-22a-28.42	无	1.40	0.035	—	0.03	0.115 6	7.175	0.338 7	1.728	5.400 8	7.380	1 890±124	1 881±28
PD-22a-28.47	无	2.03	0.484	0.806	0.24	0.115 3	5.198	0.334 5	2.771	5.316 7	5.890	1 884±91	1 860±45
PD-22a-28.1	无	8.40	0.370	—	0.04	0.115 2	4.063	0.326 1	1.610	5.178 4	4.370	1 883±71	1 819±26
PD-22a-28.5	无	30.3	0.881	11.2	0.03	0.115 0	2.310	0.327 6	1.704	5.195 4	2.871	1 880±41	1 827±27
PD-22a-28.13	无	1.72	0.224	—	0.13	0.114 6	14.702	0.399 1	2.094	6.304 4	14.850	1 873±244	2 165±39
PD-22a-28.27	无	0.568	0.060	—	0.11	0.114 0	12.066	0.329 1	1.598	5.173 5	12.172	1 864±203	1 834±26
PD-22a-28.41	无	2.37	0.047	0.864	0.02	0.113 6	4.294	0.325 3	1.629	5.093 3	4.593	1 857±76	1 815±26
PD-22a-28.44	无	92.8	3.91	35.0	0.04	0.113 3	0.665	0.335 9	1.524	5.248 7	1.662	1 853±12	1 867±25
PD-22a-28.43	无	6.74	0.530	2.64	0.08	0.113 3	2.515	0.345 6	1.555	5.398 5	2.957	1 853±45	1 913±26
第四组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 838±5)Ma(MSWD=2.10,n=6,包括点 19、20、21、29、36、38)													
PD-22a-28.29	无	432	108	167	0.25	0.113 1	0.320	0.327 6	1.505	5.107 2	1.539	1 849±6	1 827±24
PD-22a-28.38	无	601	139	235	0.23	0.112 7	0.261	0.330 8	1.507	5.139 1	1.529	1 843±5	1 842±24
PD-22a-28.34	无	0.307	0.010	—	0.03	0.112 7	30.004	0.405 4	1.729	6.296 9	30.054	1 843±462	2 194±32
PD-22a-28.31	无	5.41	0.219	2.17	0.04	0.112 5	2.497	0.357 0	1.503	5.536 2	2.914	1 840±45	1 968±26
PD-22a-28.24	无	4.80	1.01	1.62	0.21	0.112 4	3.913	0.285 9	1.665	4.429 8	4.252	1 838±69	1 621±24
PD-22a-28.36	无	757	129	294	0.17	0.112 1	0.238	0.334 9	1.501	5.177 1	1.520	1 834±4	1 862±24
PD-22a-28.19	无	1 294	409	520	0.32	0.112 0	0.404	0.334 3	1.501	5.161 7	1.554	1 832±7	1 859±24
PD-22a-28.20	无	634	212	251	0.33	0.111 8	0.426	0.327 3	1.502	5.047 1	1.561	1 829±8	1 825±24
PD-22a-28.26	无	3.58	0.393	1.40	0.11	0.111 2	3.309	0.340 7	1.617	5.224 5	3.683	1 820±59	1 890±27
PD-22a-28.21	无	236	42.8	89.8	0.18	0.111 0	0.733	0.328 4	1.506	5.028 3	1.675	1 817±13	1 831±24
PD-22a-28.10	Qtz	1.04	0.193	0.443	0.19	0.110 2	13.295	0.362 9	1.740	5.515 6	13.408	1 803±224	1 996±30
PD-22a-28.7	无	14.5	0.828	—	0.06	0.109 8	3.668	0.330 0	1.576	4.996 4	3.992	1 796±65	1 839±25
PD-22a-28.6	无	13.4	1.678	4.54	0.13	0.109 6	3.833	0.296 7	1.531	4.482 7	4.128	1 792±68	1 675±23
PD-22a-28.22	无	0.221	0.044	—	0.20	0.109 5	63.951	0.257 1	9.360	3.883 0	64.632	1 792±857	1 475±125
PD-22a-28.4	无	7.07	0.854	2.56	0.12	0.106 9	5.893	0.323 8	1.766	4.774 2	6.152	1 748±104	1 808±28

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。

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn

表 4 角闪二辉麻粒岩 PD-13d-02 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 4 Results of SIMS U-Pb analyses of zircons from amphibole granulite PD-13d-02

样品分析点号	矿物包体	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±(%)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±(%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±(%)	年龄/Ma	
		U	Th	$^{206}Pb^*$								$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{206}Pb^*/^{238}U$
第一组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 872±12) Ma (MSWD=0.52,n=21)													
PD-13d-02-28	Qtz+Grt	17.5	0.936	6.76	0.05	0.118 0	1.548	5.622 2	2.184	0.345 7	1.540	1 925±27	1 914±26
PD-13d-02-1	无	17.9	0.320	6.51	0.02	0.117 5	1.718	5.410 1	2.317	0.333 8	1.554	1 919±30	1 857±25
PD-13d-02-5	无	16.4	0.404	5.97	0.02	0.116 3	1.798	5.330 4	2.423	0.332 4	1.623	1 900±32	1 850±26
PD-13d-02-10	无	21.9	1.41	8.06	0.06	0.115 4	1.555	5.312 2	2.188	0.333 9	1.539	1 886±28	1 857±25
PD-13d-02-2	无	18.9	0.277	6.82	0.01	0.115 2	1.671	5.249 1	2.694	0.330 5	2.112	1 883±30	1 841±34
PD-13d-02-17	Ap	28.8	0.845	10.5	0.03	0.115 1	2.087	5.283 8	2.587	0.332 9	1.529	1 882±37	1 852±25
PD-13d-02-25	无	10.5	0.159	3.94	0.02	0.115 0	2.080	5.444 0	2.579	0.343 4	1.524	1 880±37	1 903±25
PD-13d-02-22	Ap	30.3	0.580	11.3	0.02	0.114 7	1.644	5.416 7	2.245	0.342 5	1.528	1 875±29	1 899±25
PD-13d-02-13	无	37.8	0.975	13.6	0.03	0.114 6	1.182	5.195 1	1.928	0.328 8	1.523	1 874±21	1 832±24
PD-13d-02-14	无	47.1	4.57	17.1	0.10	0.114 6	1.567	5.178 5	2.182	0.327 8	1.519	1 873±28	1 828±24
PD-13d-02-21	Ap	20.2	0.247	7.19	0.01	0.114 5	2.299	5.162 4	2.847	0.327 0	1.679	1 872±41	1 824±27
PD-13d-02-4	无	27.3	0.464	9.95	0.02	0.114 3	1.437	5.281 5	2.180	0.335 1	1.639	1 869±26	1 863±27
PD-13d-02-29	无	15.3	0.296	5.69	0.02	0.114 1	2.638	5.326 5	3.044	0.338 6	1.518	1 865±47	1 880±25
PD-13d-02-20	Ap	19.1	0.150	—	0.01	0.114 0	1.711	5.315 5	2.304	0.338 2	1.543	1 864±31	1 878±25
PD-13d-02-23	Ap	40.2	1.62	14.9	0.04	0.113 9	1.117	5.325 3	2.030	0.339 2	1.695	1 862±20	1 883±28
PD-13d-02-27	无	23.1	0.302	8.55	0.01	0.113 8	1.395	5.312 4	2.157	0.338 5	1.645	1 862±25	1 879±27
PD-13d-02-16	无	19.4	0.172	7.13	0.01	0.113 8	1.604	5.287 1	2.227	0.337 1	1.545	1 860±29	1 873±25
PD-13d-02-12	无	48.4	1.96	17.7	0.04	0.113 7	1.418	5.221 8	2.069	0.333 1	1.507	1 859±25	1 854±24
PD-13d-02-15	Ap	18.1	0.319	6.62	0.02	0.113 6	2.102	5.241 2	2.584	0.334 6	1.502	1 858±37	1 860±24
PD-13d-02-30	Grt+Ap	58.4	2.97	21.6	0.05	0.113 5	0.853	5.254 3	1.728	0.335 8	1.502	1 856±15	1 866±24
PD-13d-02-9	无	48.3	2.15	17.8	0.04	0.113 3	1.169	5.240 6	1.943	0.335 4	1.551	1 853±21	1 865±25
第二组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 802±31)～(1 846±30)Ma (n=8,点 7 除外)													
PD-13d-02-11	无	19.2	0.500	7.04	0.03	0.112 9	1.701	5.221 3	2.295	0.335 5	1.542	1 846±30	1 865±25
PD-13d-02-6	Rt+Pl	15.6	1.28	5.81	0.08	0.112 5	1.811	5.227 2	2.355	0.337 0	1.505	1 840±32	1 872±24
PD-13d-02-18	无	21.4	0.472	7.85	0.02	0.112 3	2.351	5.199 5	2.850	0.335 8	1.611	1 837±42	1 867±26
PD-13d-02-26	无	41.7	2.26	15.3	0.05	0.112 0	1.149	5.141 0	1.905	0.333 0	1.519	1 832±21	1 853±25
PD-13d-02-3	Ap	24.0	0.582	8.74	0.02	0.111 9	1.484	5.144 2	2.137	0.333 3	1.537	1 831±27	1 854±25
PD-13d-02-19	Grt+Ap	47.6	5.25	17.6	0.11	0.111 0	1.088	5.107 3	1.867	0.333 8	1.518	1 815±20	1 857±25
PD-13d-02-24	Ap	18.0	0.208	6.54	0.01	0.110 5	1.646	5.080 5	2.434	0.333 3	1.793	1 808±30	1 854±29
PD-13d-02-8	Grt	17.6	0.206	6.37	0.01	0.110 2	1.705	5.051 2	2.302	0.332 6	1.547	1 802±31	1 851±25
PD-13d-02-7	Ap	13.3	0.674	4.84	0.05	0.109 0	2.585	5.041 5	3.020	0.335 4	1.562	1 783±46	1 865±25

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 5 闪二辉麻粒岩 PD-25b-02 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 5 Results of SIMS U-Pb analyses of zircons from amphibole granulite PD-25b-02

样品分析点号	矿物包体	$w_B/10^{-6}$ U	Th	$^{206}Pb^*$	Th/U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±(%)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±(%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±(%)	年龄/Ma $^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{206}Pb^*/^{238}U$
第一组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 890±9)~(2 915±7) Ma (n=4,点 2 除外)													
PD-25b-02-5	Ap	223	62.2	160	0.28	0.211 21	0.443 2	16.303 0	1.593	0.559 8	1.530	2 915±7	2 866±36
PD-25b-02-15	Ap	351	75.0	257	0.21	0.210 63	0.168 8	16.690 0	1.509	0.574 7	1.500	2 910±3	2 927±35
PD-25b-02-25	无	167	63.8	123	0.38	0.209 92	0.255 5	16.143 4	1.554	0.557 8	1.533	2 905±4	2 857±35
PD-25b-02-29	Ap	62.5	27.6	46.0	0.44	0.208 00	0.564 9	15.918 6	1.644	0.555 1	1.544	2 890±9	2 846±36
PD-25b-02-2	Ap	382	110	247	0.29	0.195 10	0.363 4	13.658 9	1.546	0.507 8	1.503	2 786±6	2 647±33
第二组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 182±12) Ma (MSWD=0.60,n=6, 除点 24、36)													
PD-25b-02-35	Qtz+Pl+Bt+Ap	56.3	44.6	30.9	0.79	0.137 65	0.725 6	7.722 9	1.668	0.406 9	1.502	2 198±13	2 201±28
PD-25b-02-10	Ap	67.2	65.4	37.6	0.97	0.136 72	1.259 3	7.550 7	2.180	0.400 5	1.779	2 186±22	2 171±33
PD-25b-02-19	Ap	50.1	34.7	26.9	0.69	0.136 66	0.760 3	7.560 3	1.694	0.401 2	1.514	2 185±13	2 175±28
PD-25b-02-30	Ap	65.4	54.1	36.1	0.83	0.136 29	0.895 1	7.567 6	1.747	0.402 7	1.500	2 181±15	2 182±28
PD-25b-02-31	Qtz+Pl+Ap	72.6	58.8	39.0	0.81	0.135 67	0.651 4	7.416 6	1.744	0.396 5	1.618	2 173±11	2 153±30
PD-25b-02-21	Qtz+Pl+Ap+Cal	40.2	23.6	21.3	0.59	0.135 35	1.008 1	7.579 7	1.812	0.406 1	1.506	2 169±17	2 197±28
PD-25b-02-36	Ap	45.9	25.0	23.2	0.54	0.133 42	0.851 8	7.247 6	1.840	0.394 0	1.630	2 144±15	2 141±30
PD-25b-02-24	Qtz+Ap+Orp	64.6	46.2	34.1	0.72	0.133 21	0.777 2	7.209 5	1.697	0.392 5	1.509	2 141±14	2 135±27
第三组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 871±8) Ma (MSWD=0.53,n=11, 除点 4、11、17)													
PD-25b-02-4	无	20.0	2.24	7.52	0.11	0.118 13	3.225 5	5.348 5	3.739	0.328 4	1.892	1 928±57	1 831±30
PD-25b-02-11	无	20.0	0.184	7.59	0.01	0.117 29	2.377 9	5.480 0	2.856	0.338 8	1.581	1 915±42	1 881±26
PD-25b-02-16	无	31.3	0.295	11.4	0.01	0.115 62	0.875 8	5.191 7	1.747	0.325 7	1.512	1 890±16	1 817±24
PD-25b-02-34	无	30.0	0.766	11.2	0.03	0.115 27	1.356 0	5.280 9	2.093	0.332 3	1.594	1 884±24	1 849±26
PD-25b-02-13	无	77.4	1.01	28.3	0.01	0.114 95	0.606 7	5.187 2	1.623	0.327 3	1.505	1 879±11	1 825±24
PD-25b-02-32	无	32.5	1.06	12.2	0.03	0.114 81	1.130 6	5.271 7	1.903	0.333 0	1.531	1 877±20	1 853±25
PD-25b-02-18	无	75.8	1.30	28.4	0.02	0.114 57	0.639 7	5.276 8	1.638	0.334 1	1.508	1 873±11	1 858±24
PD-25b-02-22	无	140	3.87	52.6	0.03	0.114 53	0.454 5	5.281 3	1.571	0.334 4	1.504	1 873±8	1 860±24
PD-25b-02-8	无	81.5	2.83	30.7	0.03	0.114 43	1.225 6	5.291 2	1.954	0.335 4	1.522	1 871±22	1 864±25
PD-25b-02-27	无	87.6	1.26	32.8	0.01	0.114 30	0.739 8	5.281 5	1.673	0.335 1	1.501	1 869±13	1 863±24
PD-25b-02-20	无	18.3	0.429	6.81	0.02	0.113 63	1.330 5	5.208 0	2.051	0.332 4	1.561	1 858±24	1 850±25
PD-25b-02-14	无	66.3	2.13	24.9	0.03	0.113 55	0.720 5	5.224 8	1.670	0.333 7	1.507	1 857±13	1 856±24
PD-25b-02-23	无	107	2.63	39.7	0.02	0.113 43	0.741 6	5.193 6	1.678	0.332 1	1.505	1 855±13	1 848±24
PD-25b-02-17	无	24.6	1.05	8.92	0.04	0.113 22	0.994 3	5.028 6	1.829	0.322 1	1.536	1 852±18	1 800±24
第四组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 822±19)~(1 840±27) Ma (n=7,点 6、33 除外)													
PD-25b-02-6	无	4.79	0.087	—	0.02	0.112 47	8.537 1	4.992 3	8.668	0.321 9	1.500	1 840±147	1 799±24
PD-25b-02-12	无	91.0	14.2	33.8	0.16	0.112 46	1.486 9	4.997 3	2.131	0.322 3	1.526	1 840±27	1 801±24
PD-25b-02-1	无	306	15.2	114	0.05	0.112 35	0.641 9	5.123 3	1.638	0.330 7	1.507	1 838±12	1 842±24
PD-25b-02-28	无	67.1	1.39	24.8	0.02	0.112 32	0.720 0	5.107 5	1.688	0.329 8	1.527	1 837±13	1 837±24
PD-25b-02-3	无	45.9	1.36	17.4	0.03	0.112 30	1.926 2	5.235 5	2.654	0.338 1	1.825	1 837±34	1 878±30
PD-25b-02-9	无	87.6	1.63	32.8	0.02	0.111 70	1.180 1	5.162 0	1.914	0.335 2	1.507	1 827±21	1 863±24
PD-25b-02-26	无	6.99	0.116	2.69	0.02	0.111 45	3.225 8	5.285 7	3.584	0.344 0	1.561	1 823±57	1 906±26
PD-25b-02-7	无	123	3.09	45.6	0.03	0.111 40	1.035 8	5.108 0	1.832	0.332 6	1.511	1 822±19	1 851±24
PD-25b-02-33	无	2.78	0.079	1.06	0.03	0.105 46	4.060 1	4.966 4	4.331	0.341 5	1.507	1 722±73	1 894±25

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。

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn

http://www.earthsciencefrontiers.net.cn

表 6 含辉斜长角闪岩 PD-14c-03 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 6 Results of SIMS U-Pb analyses of zircon from pyroxene-bearing amphibolite PD-14c-03

样品分析点号	矿物包体	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±(%)	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±(%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±(%)	年龄/Ma	
		U	Th	$^{206}Pb^*$								$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{206}Pb^*/^{238}U$
第一组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(2 595±3)~(2 656±3) Ma(n=11)													
PD-14C-03-1.7	无	1 576	182	965	0.12	0.180 3	0.202 4	12.888	1.514	0.518 4	1.501	2 656±3	2 692±33
PD-14C-03-1.5	Pl+Ap	2 014	163	1 247	0.08	0.179 8	0.251 2	13.010	1.534	0.524 9	1.513	2 651±4	2 720±34
PD-14C-03-1.6	无	1 870	162	1 138	0.09	0.179 5	0.403 4	12.773	1.558	0.516 2	1.505	2 648±7	2 683±33
PD-14C-03-1.14	无	1 461	111	873	0.08	0.178 5	0.322 6	12.553	1.538	0.510 1	1.504	2 639±5	2 657±33
PD-14C-03-1.17	无	2 794	210	1 694	0.08	0.178 4	0.083 8	12.755	1.502	0.518 6	1.500	2 638±1	2 693±33
PD-14C-03-1.16	无	4 017	316	2 440	0.08	0.177 5	0.327 7	12.741	1.540	0.520 7	1.505	2 629±5	2 702±33
PD-14C-03-1.1	Qtz	2 233	167	1 396	0.07	0.177 5	0.505 7	12.833	1.587	0.524 5	1.505	2 629±8	2 718±33
PD-14C-03-1.20	无	2 927	224	1 742	0.08	0.177 2	0.087 7	12.558	1.503	0.514 0	1.500	2 627±1	2 673±33
PD-14C-03-1.9	无	1 104	89.0	649	0.08	0.176 4	0.462 9	12.249	1.571	0.503 7	1.501	2 619±8	2 630±33
PD-14C-03-1.13	Pl	2 625	250	1 562	0.10	0.174 3	0.433 4	12.221	1.566	0.508 6	1.504	2 599±7	2 651±33
PD-14C-03-1.10	Qtz	1 930	237	1 139	0.12	0.173 8	0.203 4	12.041	1.514	0.502 4	1.501	2 595±3	2 624±32
第二组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 923±75)~(2 495±16) Ma (n=6)													
PD-14C-03-2.3	无	30.5	0.274	16.9	0.01	0.163 8	0.966 9	10.973	1.817	0.485 8	1.538	2 495±16	2 553±32
PD-14C-03-2.6	无	100	0.753	53.1	0.01	0.162 8	0.608 2	10.522	1.671	0.468 6	1.556	2 485±10	2 478±32
PD-14C-03-1.12	Ap	46.9	0.079	21.9	0.00	0.143 6	1.486	8.234 4	2.124	0.415 8	1.518	2 271±25	2 242±29
PD-14C-03-2.9	无	4.44	0.559	1.99	0.13	0.141 1	6.744	7.694 9	6.938	0.395 4	1.628	2 241±112	2 148±30
PD-14C-03-2.7	无	4.05	0.221	1.52	0.05	0.122 8	3.609	5.702 0	4.025	0.336 8	1.782	1 997±63	1 871±29
PD-14C-03-2.10	无	4.20	0.084	—	0.02	0.117 8	4.315	5.564 0	4.677	0.342 6	1.804	1 923±75	1 899±30
第三组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 866±11)Ma (MSWD=2.2, n=9,点 1.18 除外)													
PD-14C-03-1.3	Qtz	116	2.24	44.3	0.02	0.115 9	0.534 4	5.494 6	1.597	0.343 9	1.504	1 894±10	1 905±25
PD-14C-03-1.8	Qtz	82	2.27	30.5	0.03	0.115 6	0.730 3	5.396 6	1.676	0.338 6	1.509	1 889±13	1 880±25
PD-14C-03-2.5	Ap+Qtz	197	5.14	71.7	0.03	0.114 6	0.510 4	5.284 2	1.586	0.334 4	1.502	1 874±9	1 860±24
PD-14C-03-1.2	无	209	5.62	79.3	0.03	0.114 3	0.637 0	5.380 0	1.630	0.341 4	1.500	1 869±11	1 893±25
PD-14C-03-1.4	无	144	4.01	53.4	0.03	0.113 6	0.503 4	5.248 0	1.604	0.335 1	1.523	1 857±9	1 863±25
PD-14C-03-1.15	无	390	8.67	145	0.02	0.113 6	0.361 1	5.288 4	1.545	0.337 7	1.502	1 857±7	1 876±24
PD-14C-03-2.4	无	188	7.29	68.2	0.04	0.113 6	0.571 9	5.193 6	1.609	0.331 7	1.504	1 857±10	1 847±24
PD-14C-03-1.18	无	177	7.19	63.0	0.04	0.113 4	0.545 0	5.064 3	1.600	0.324 0	1.504	1 854±10	1 809±24
PD-14C-03-1.11	无	177	4.55	65.7	0.03	0.113 3	1.105	5.291 1	1.867	0.338 6	1.505	1 853±20	1 880±25
PD-14C-03-1.19	无	305	4.16	113	0.01	0.113 3	0.539 4	5.276 8	1.617	0.337 7	1.524	1 853±10	1 876±25
第四组锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄:(1 825±12)~(1 837±9) Ma (n=2)													
PD-14C-03-2.1	无	187	10.1	70.1	0.05	0.112 3	0.505 6	5.276 7	1.590	0.340 7	1.507	1 837±9	1 890±25
PD-14C-03-2.2	无	159	5.52	57.5	0.03	0.111 6	0.684 2	5.115 7	1.651	0.332 6	1.502	1 825±12	1 851±24

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。

5.1　退变高压麻粒岩——石榴紫苏麻粒岩(PD-16a-02)

从43个不同性质锆石微区进行的U-Pb年龄结果(表2)来看,该退变高压麻粒岩(PD-16a-02)中的锆石记录了十分复杂的年龄信息(图9),并可进一步划分为4组。5个继承性岩浆结晶核部记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(2 652±8)～(2 763±5) Ma,相应的Th/U值变化于0.67～1.65,这组年龄与区内TTG片麻岩和石榴辉石岩继承性岩浆锆石核部记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄(2.6～2.7 Ga)十分相似,应代表高压麻粒岩原岩形成时代,指示研究区内在新太古代存在一次重要的岩浆事件[34,37,40]。9个变质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(2 195±6)～(2 511±6) Ma,主要集中在2.45～2.51 Ga,且Th/U值相对偏小(0.01～0.19),这组年龄与样品PD-14c-03以及栖霞地区TTG片麻岩所记录的2.4～2.5 Ga的变质年龄十分一致[34],充分证明了研究区的基底岩石在2.4～2.5 Ga期间存在一次重要的变质热事件。另外7个变质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(1 852±6)～(1 861±9) Ma,相应的Th/U比值变化于0.13～0.73,与PD-13d-02中锆石记录的峰期高压麻粒岩相变质年龄十分一致(见下文),应代表峰期高压麻粒岩相变质时代。其余22个变质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄相对年轻,集中于(1 825±10)～(1 849±11) Ma(表2,图9),相应的加权平均年龄为(1 839±3) Ma(MSWD=0.66,n=17,除点26、32、33、37、43外),Th/U值变化于0.08～0.66,该类锆石微区含有普遍斜方辉石(Opx)等矿物包体,表明该类锆石是在峰后近等温减压中低压麻粒岩相的退变质过程中形成的。因此,这组变质年龄应代表高压麻粒岩峰后近等温减压中低压麻粒岩相的退变质时代。

5.2　退变高压麻粒岩——石榴斜长角闪岩(PD-22a-28)

尽管样品(PD-22a-28)锆石中U、Th等元素含量极低,相应地计算出来的年龄结果误差较大,但43个不同性质锆石微区SIMS U-Pb定年结果仍可进一步划分出3组具有实际地质意义年龄(表3,图10)。其中11个继承性岩浆结晶核部微区记录了十分一致的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄,除个别微区外,多数集中在(2 510±5)～(2 604±23) Ma,这组年龄与栖霞亭口TTG片麻岩中原岩形成年龄(2 535±7) Ma十分一致[34],应代表高压麻粒岩原岩形成时代。第二组6个锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于

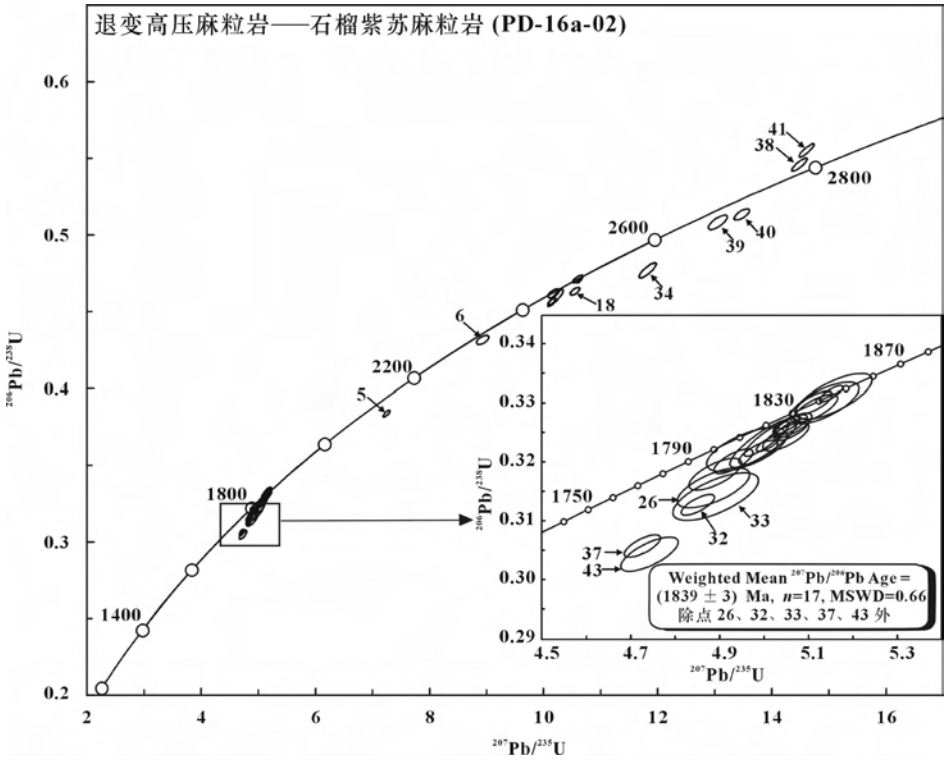


图9　退变高压麻粒岩PD-16a-02锆石的$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$年龄关系图解

Fig. 9　Zircon U-Pb concordia diagram($^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$) of retrograde HP granulite PD-16a-02

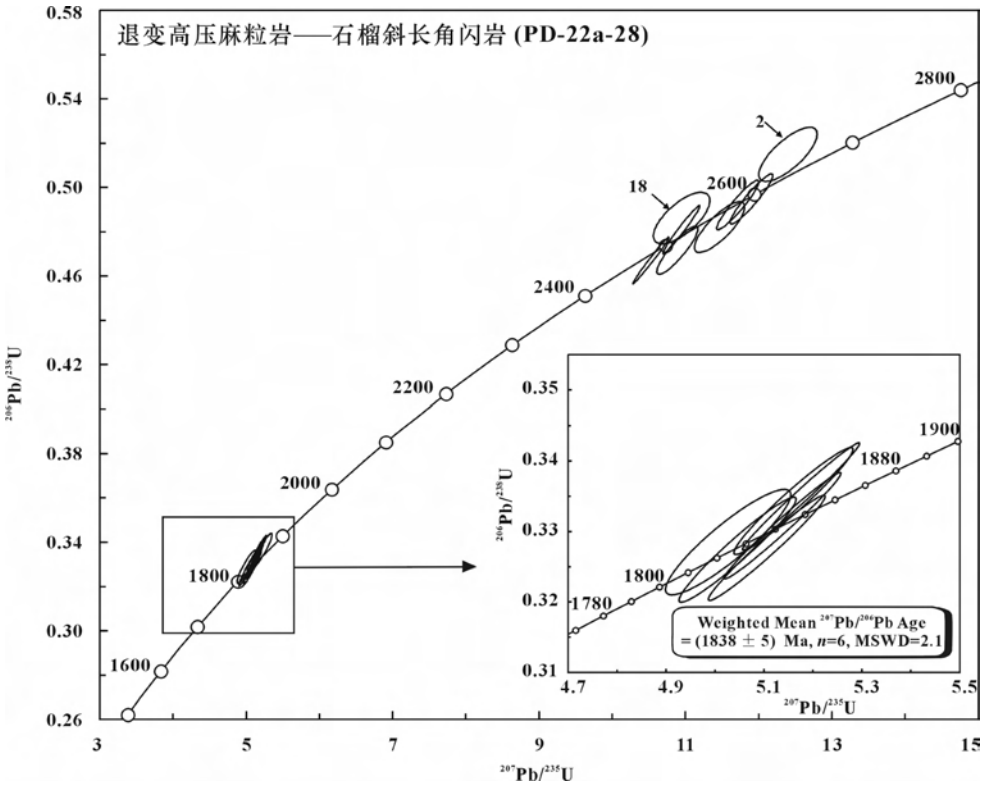


图 10 退变高压麻粒岩 PD-22a-28 锆石的$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$年龄关系图解

Fig. 10 Zircon U-Pb concordia diagram($^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$) of retrograde HP granulite PD-22a-28

(1 978±67)～(2 269±121) Ma,该组锆石微区的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄普遍比$^{206}Pb/^{238}U$年龄偏老,且$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄和$^{206}Pb/^{238}U$年龄误差均较大,这与锆石中 U、Th 等元素含量普遍偏低以及受到后期热事件影响,发生不完全重结晶和 Pb 丢失有密切关系,因此,这组年龄不具有实际的地质意义。第三组 11 个变质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄集中变化于(1 853±12)～(1 918±37) Ma,与上述 PD-16a-02 和 PD-13d-02(见下文)同类性质锆石微区记录的峰期高压麻粒岩相变质时代十分相似,应代表峰期高压麻粒岩相变质时代。第四组 15 个同类变质锆石微区记录了一组最年轻的年龄,$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(1 748±104)～(1 849±6) Ma,Th/U 值变化于 0.03～0.33,排除年龄误差大的数据外,加权平均年龄为(1 838±5) Ma(MSWD=2.10,n=6,包括点 19、20、21、29、36、38)。该类锆石微区含有角闪石等矿物包体,其记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄应代表晚期角闪岩相退变质时代。

5.3 角闪二辉麻粒岩 (PD-13d-02 和 PD-25b-02)

样品 PD-13d-02 不同性质锆石微区记录了 2 组具有实际地质意义的年龄(表 4,图 11)。其中第一组 21 个变质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(1 853±21)～(1 925±27) Ma,加权平均年龄为(1 872±12) Ma(MSWD=0.52,n=21),相应的 Th/U 比值较小,变化于 0.01～0.10,该类锆石微区保存了典型高压麻粒岩相矿物包体组合,主要为石榴子石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+金红石(Rt)+石英(Qtz),因此该类性质锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄应代表峰期高压麻粒岩相变质时代。第二组 9 个变质锆石微区记录了一组相对年轻的年龄信息,除一个微区外,其余 8 个微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄十分相近,变化于(1 802±31)～(1 846±30) Ma,这组变质年龄与样品 PD-16a-02 中含斜方辉石包体的锆石微区年龄十分一致,应代表峰后近等温减压(中低压)麻粒岩相退变质时代。

样品 PD-25b-02 锆石记录的年龄相对复杂,可进一步划分为 4 组具有实际地质意义的年龄(表 5,图 12)。其中 5 个继承性岩浆结晶核部微区的 Th/U 比值变化于 0.21～0.44,记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄集中于(2 890±9)～(2 915±7) Ma,表明其原岩形成时代为中太古代晚期,这组年龄与区内部分 TTG

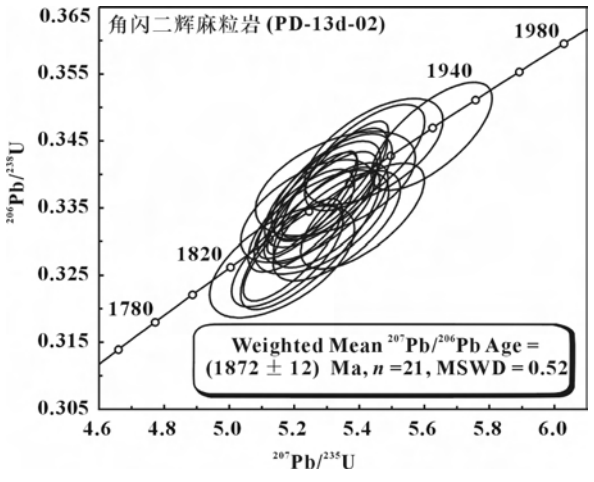


图 11　角闪二辉麻粒岩 PD-13d-02 锆石的 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄关系图解

Fig. 11　Zircon U-Pb concordia diagram ($^{207}Pb/^{235}U$ - $^{206}Pb/^{238}U$) of amphibole granulites PD-13d-02

片麻岩的原岩形成时代(约 2.9 Ga)十分一致,指示山东半岛早前寒武纪变质基底在约 2.9 Ga 存在一次重要的岩浆事件[34]。第二组 8 个岩浆结晶锆石微区的 Th/U 比值变化于 0.54～0.97,记录的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄变化于(2 141±14)～(2 198±13)Ma,除点 24 和点 36 外,加权平均年龄为(2 182±12) Ma(MSWD=0.60,n=6)。然而,值得注意的是,这组锆石微区主要矿物包体为斜长石(Pl)+石英(Qtz)+磷灰石(Ap)+黑云母(Bt)+绿帘石(Ep)+雌黄(Qrp),与角闪二辉麻粒岩锆石中应存在的矿物包体存在本质差异,表明该类锆石可能是角闪二辉麻粒岩经历了后期地质事件混染产物。第三组 14 个变质锆石微区的 Th/U 比值变化于 0.01～0.11,且记录了相对年轻的一组年龄,$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄变化于(1 852±18)～(1 928±57) Ma,相应地加权平均年龄为(1 871±8) Ma(MSWD=0.53,n=11,除点 4、11、17),这组年龄与样品 PD-13d-02 锆石记录的峰期高压麻粒岩相变质年龄十分一致,进一步证明研究区角闪二辉麻粒岩同样也经历了高压麻粒岩相变质作用。第四组 9 个变质锆石微区的 Th/U 比值变化于 0.02～0.16,且记录了一组最年轻的年龄信息,除点 6 和点 33 外,$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄集中变化于(1 822±19)～(1 840±27) Ma,这组年龄与样品 PD-16a-02 中含斜方辉石的锆石微区记录的年龄十分一致,应代表峰后近等温减压阶段(中低压)麻粒岩相的退变质时代。

5.4　含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)

样品 PD-14c-03 不同性质锆石微区 SIMS U-Pb

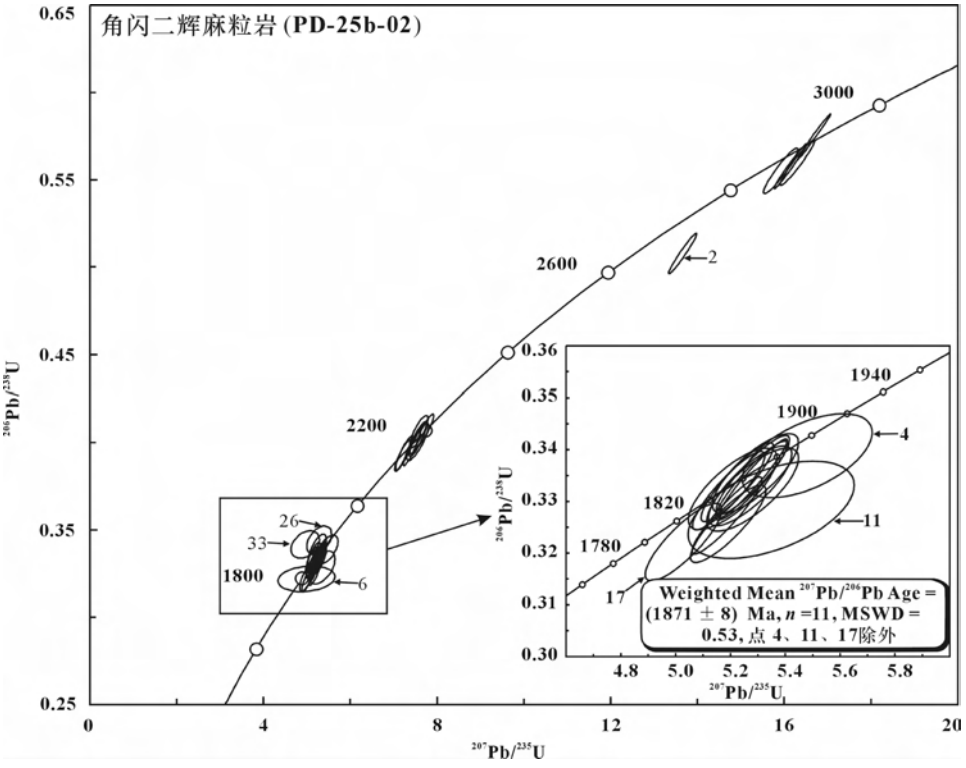


图 12　角闪二辉麻粒岩 PD-25b-02 锆石的 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄关系图解

Fig. 12　Zircon U-Pb concordia diagram($^{207}Pb/^{235}U$ -$^{206}Pb/^{238}U$) of amphibole granulites PD-25b-02

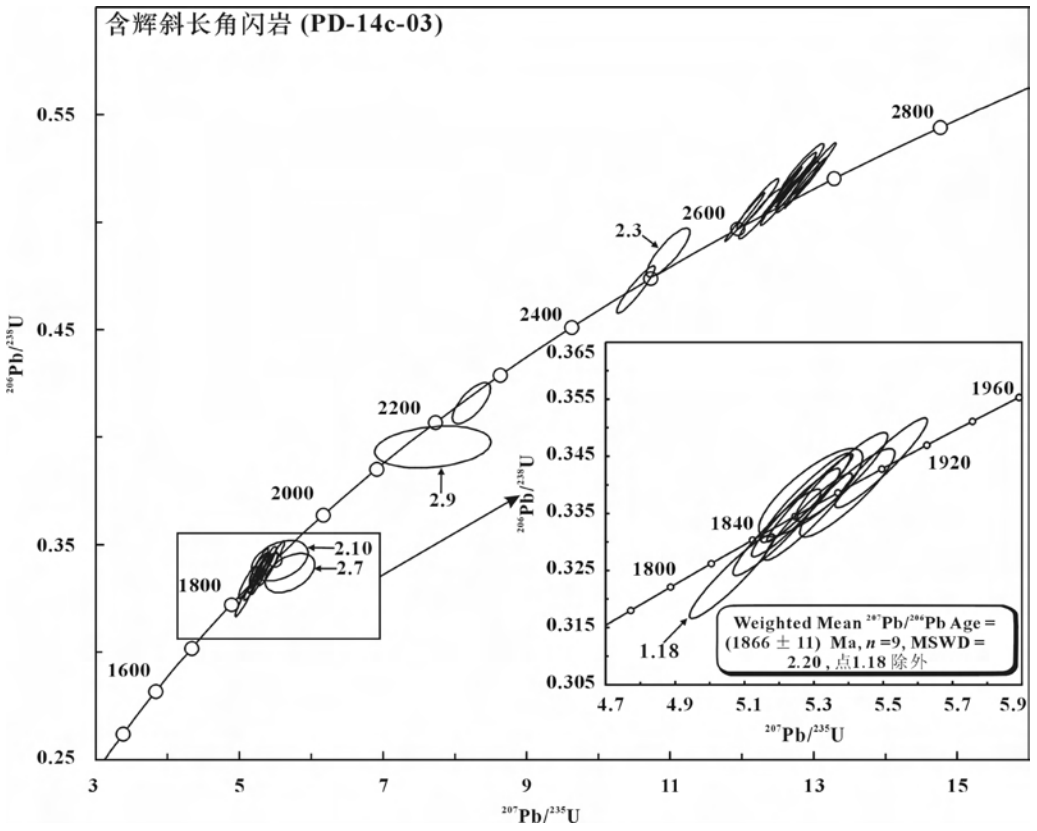


图 13 含辉斜长角闪岩 PD-14c-03 锆石的$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$年龄关系图解

Fig. 13 Zircon U-Pb concordia diagram($^{207}Pb/^{235}U$ -$^{206}Pb/^{238}U$) of pyroxene-bearing amphibolite PD-14c-03

年龄测试结果可分为 3 组(表 6,图 13)。第一组 11 个继承性岩浆锆石微区记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄集中变化于(2 595±3)～(2 656±3) Ma,保存的矿物包体主要为单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz),表明该组锆石记录的年龄应代表含辉斜长角闪岩的原岩形成时代。第二组锆石的阴极发光和矿物包体特征与第一类锆石十分相似,表明这组锆石仍为岩浆锆石,然而该类锆石记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄相对偏新,变化于(1 923±75)～(2 495±16)Ma,表明部分岩浆锆石明显受到后期热事件的影响而发生不完全重结晶和 Pb 丢失,因此该组锆石记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄不具有实际地质意义。第三组锆石为典型的变质锆石,10 个该类性质锆石微区的 Th/U 比值异常偏低,变化于 0.01～0.04,记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(1 853±10)～(1 894±10) Ma,加权平均年龄为(1 866±11) Ma(MSWD=2.20,n=9,除点 1.18),这组锆石保存的矿物包体为石榴子石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz),与角闪二辉麻粒岩(PD-13d-02)峰期高压麻粒岩相形成的锆石中的矿物包体是一致的,因此,该组年龄应代表含辉斜长角闪岩峰期高压麻粒岩相的变质时代。此外,2 个变质锆石微区记录的最年轻的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1 825±12) Ma 和(1 837±9) Ma,与样品 PD-16a-02 含斜方辉石锆石微区记录的年龄十分相似,表明该类岩石在峰后近等温减压阶段仍然有变质锆石的形成。

6 讨论与结论

6.1 高压麻粒岩锆石中矿物包体的指示意义

前人曾对华北克拉通早前寒武纪高压麻粒岩的岩石学、成因矿物学、变质演化以及同位素年代学进行了系统研究[1-27,32-43,46-48],但对于锆石中矿物包体特征及其指示意义还没有开展深入而系统的研究。本文研究发现,在山东半岛早前寒武纪变质基底中,无论是高压麻粒岩,还是分布广泛的角闪二辉麻粒岩和(含辉)斜长角闪岩的变质锆石中,均发现了石榴子石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)+金红石(Rt)+磷灰石(Ap)等典型的高压矿物包体组合,标志着古元古代末期山东半岛早前寒武纪变质基

底的高压麻粒岩相变质作用具有区域性的特点。

6.2 高压麻粒岩的原岩形成时代

本文研究的5件样品中的继承性岩浆锆石微区只有部分保存磷灰石(Ap)等矿物包体。SIMS U-Pb定年结果表明,研究区高压麻粒岩的原岩形成时代具有多期次的特点,$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄主要集中于2 890～2 915 Ma和2 510～2 763 Ma范围内,这与研究区TTG岩石记录的原岩形成时代十分一致。这进一步表明华北克拉通东南缘的变质基底在中太古代末期和新太古代存在两期重大的岩浆事件。

然而,值得注意的是,在含辉斜长角闪岩(PD-14c-03)的锆石样品中,其中一组继承性的岩浆锆石记录了古元古代的年龄信息(2 141±14)～(2 198±13) Ma。但是,该类锆石微区主要矿物包体为斜长石(Pl)+石英(Qtz)+磷灰石(Ap)+黑云母(Bt)+绿帘石(Ep)+雌黄(Qrp),与研究区高压麻粒岩原岩的标志性的矿物组合存在明显差别,表明这类锆石可能是受到后期热事件的影响而形成的混染锆石,也不排除是在锆石分选过程中的污染锆石。由此可见,在开展锆石U-Pb定年的过程中,采用激光拉曼技术和电子探针技术对锆石中矿物包体鉴别的重要性。

6.3 高压麻粒岩的峰期高压麻粒岩相变质时代

到目前为止,对有关山东半岛高压麻粒岩及其相关的岩石已进行了大量的原位锆石U-Pb定年测试研究(表7),但有关山东半岛高压麻粒岩峰期变质时代与退变质时代仍然存在分歧。部分研究者认为山东半岛基底岩石的变质时代为1.85～1.95 Ga[35,37,46-47];另一部分研究者认为山东半岛区域性变质作用发生的时代为1.80～1.85 Ga[37,48]。本文针对前人对山东半岛高压麻粒岩相变质时代存在不同的认识和解释,采用激光拉曼技术识别出在高压麻粒岩相变质阶段形成的锆石,该类锆石含有典型的高压矿物包体组合:石榴子石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+金红石(Rt)+石英(Qtz)。原位U-Pb定年结果显示所有样品中的该类性质锆石微区记录了十分相近的年代学信息(图14),其中样品PD-13d-02(角闪二辉麻粒岩)记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄变化于(1 853±21)～(1 925±27) Ma,加权平均年龄为(1 872±12) Ma;样品PD-16a-02(石榴紫苏麻粒岩)记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1 852±6～1 861±9)Ma,加权平均年龄为(1 854±11)Ma;样品PD-22a-28(石榴斜长角闪岩)记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1 853±45)～(1 920±92)Ma;样品PD-25b-02(角闪二辉麻粒岩)记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1 852±18)～(1 928±57) Ma,加权平均年龄为(1871±8)Ma;样品PD-14c-03(含辉斜长角闪岩)记录的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1 853±10)～(1 894±10)Ma,加权平均年龄为(1 866±11)Ma。结合前人的年代学资料,山东半岛高压麻粒岩峰期变质时代应在1 850～1 900 Ma(图14)。

表7 山东半岛高压麻粒岩及其相关岩石锆石U-Pb定年结果对比

Table 7 Results of U-Pb dating on zircons from HP granulite and its country-rocks, Shandong Peninsula

样品号	地点	岩石类型	变质年龄/Ma	参考文献	测试方法
03SD-06	栖霞寺口	斜长角闪岩	1 769±60	[48]	LA-ICP-MS
02SD-33	栖霞凤凰	基性麻粒岩	1 794±41		
S0141-1	烟台南部	二云夕线石榴片麻岩	1 882±12	[37]	SHRIMP
S0116-1	烟台东部	石榴白云石英片麻岩	1 850～1 900		
SD6	栖霞松山	斜长角闪岩	1 865±3	[35]	
LY-6	栖霞太平庄	泥质高压麻粒岩	1 846±9	[46]	
08JB06-4	莱西南山	高压麻粒岩	1 956±41	[47]	SHRIMP
08JB06-1-6	平度蟠桃	石榴辉石岩	1 884±42		
08JB07-1	栖霞太平庄	泥质高压麻粒岩	1 837±8		
08JB02-1	莱西南墅	石榴夕线片麻岩	1 939±15 1 821±8		
08JB03-1	莱西常家屯	石榴堇青黑云片麻岩	1 836±68		
08JB05-1	莱西南墅	透辉大理岩	1 817±9		
08JB02-10	莱西南墅	含石英长石大理岩	1 790±6		

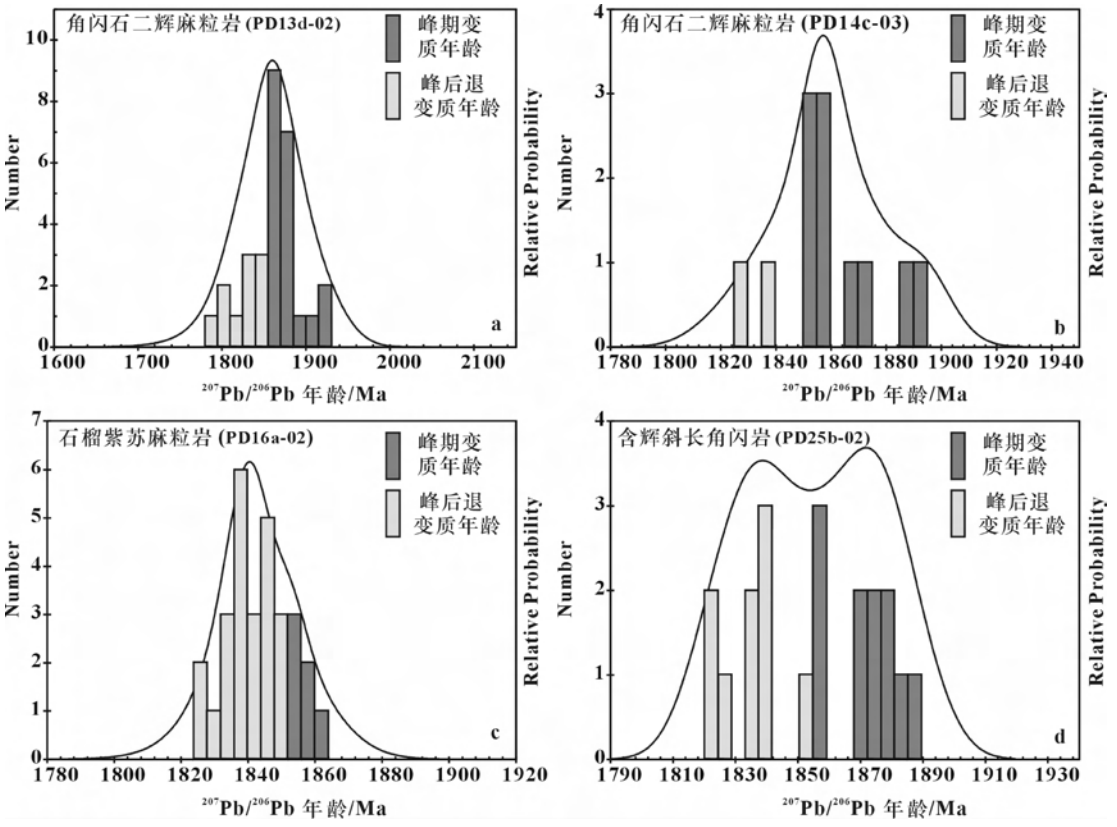


图 14 山东半岛高压麻粒岩变质锆石^{207}Pb/^{206}Pb年龄直方图

Fig. 14 Histograms of ^{207}Pb/^{206}Pb ages of metamorphic zircons from HP granulites, Shandong Peninsula

6.4 高压麻粒岩峰后退变质时代

对于山东半岛高压麻粒岩峰后近等温减压中低压麻粒岩相退变质时代,前人研究相对较少。本文研究发现两件样品,包括石榴紫苏麻粒岩(PD-16a-02)和石榴斜长角闪岩(PD-22a-28)均存在含斜方辉石和角闪石的退变质锆石,其中样品 PD-16a-02 中该类性质锆石记录的^{207}Pb/^{206}Pb 年龄为(1 825±10)~(1 849±11) Ma,加权平均年龄为(1 839±3) Ma;样品 PD-22a-28 中该类性质锆石记录的^{207}Pb/^{206}Pb年龄为(1 817±13)~(1 849±6) Ma,加权平均年龄为(1 838±5) Ma。在其他 3 件样品中,尽管缺少退变质的标志性矿物包体证据,但部分变质锆石也记录了类似的退变质年龄。上述定年结果显示研究区高压麻粒岩峰后近等温减压退变质时代为 1 820~1 840 Ma。

综合前人的研究成果[12,16,18,43,47],在山东半岛早前寒武纪的基底岩石中不仅存在基性高压麻粒岩,而且存在泥质高压麻粒岩,二者均具有典型近等温减压型顺时针 p-T 演化轨迹,指示山东半岛早前寒武纪变质基底高压变质岩系的形成与陆-陆俯冲-碰撞造山动力学背景有关。在(角闪)二辉麻粒岩和(石榴)斜长角闪岩的变质锆石中,保存了峰期高压麻粒岩相的矿物组合:石榴子石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+金红石(Rt)+石英(Qtz),这不仅表明这些岩石是高压麻粒岩的退变产物,而且充分说明山东半岛早前寒武纪变质基底在古元古代末期的高压麻粒岩相变质热事件具有区域性的特点。

锆石中矿物包体激光拉曼测试、阴极发光图像分析及原位 U-Pb 定年结果综合研究结果表明,山东半岛高压麻粒岩的峰期变质时代为 1 850~1 900 Ma,代表了区内高压麻粒岩的原岩俯冲至大约 55 km 深处[43]所经历高压麻粒岩相变质作用的时间。围岩 TTG 片麻岩中的变质锆石不仅记录了约 2.5 Ga 的变质热事件[34-35],而且也普遍记录了 1 850~1 900 Ma 的高压变质时代信息(另文发表),这进一步充分表明山东半岛变质基底在古元古代末期的高压麻粒岩相变质事件具有区域性的特点;而高压麻粒岩退变质时代为 1 820~1 840 Ma,则代表了区内高压麻粒岩抬升至约 25 km 深处[43]

所历中低压麻粒岩相作用的时间;变质锆石记录的最年轻年龄约为1 810 Ma,可能代表退变的高压麻粒岩继续抬升至15～20 km[43]经历晚期角闪岩相退变质的时间。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。

本文的锆石矿物包体激光拉曼测试在国土资源部大陆动力学重点实验室完成,并得到了阎玲老师的指导;锆石SIMS U-Pb定年测试在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针室和北京离子探针中心完成;数据处理过程中得到了李献华、李秋立研究员,董春艳、杜利林、宋彪和赵子然老师的帮助;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。

参考文献

[1] 王仁民,陈珍珍,陈飞. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义[J]. 岩石学报,1991(4):36-45.

[2] 翟明国,郭敬辉,阎月华,等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究[J]. 中国科学:B辑,1992,22(12):1325-1330.

[3] 郭敬辉,翟明国,李永刚,等. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学[J]. 岩石学报,1993,9(4):329-341.

[4] 郭敬辉,翟明国,李永刚,等. 华北太古宙高压基性麻粒岩的两类*p-T*轨迹及其构造意义:矿物化学和变质作用研究[J]. 岩石学报,1998,14(4):430-448.

[5] Guo J H, O'Brien P J, Zhai M G. High-pressure granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Metamorphic evolution, *p-T* paths and geotectonic significance[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2002, 20(8): 741-756.

[6] 翟明国,郭敬辉,李永刚. 晋冀蒙交界地区高压麻粒岩带及其相邻岩石组合性质[M]//钱祥麟,王仁民. 华北北部麻粒岩相带地质演化. 北京:地震出版社,1994:21-31.

[7] 翟明国. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩(HT-HP和HT-UHT)及其相关问题[J]. 岩石学报,2009,25(8):1753-1771.

[8] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites(retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(6): 1141-1170.

[9] 赵国春. 2002年北京彭罗斯会议:前寒武纪高压-高温麻粒岩相变质作用[J]. 科学通报,2002,47(21):1623,1680.

[10] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2003, 6(3): 417-434.

[11] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177-202.

[12] 赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报,2009,25(8):1772-1792.

[13] 刘福来,沈其韩,赵子然,等. 冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质矿物组合的确定及其形成的温压条件:来自锆石中矿物包裹体的信息[J]. 地质学报,2002,76(2):209-216.

[14] 耿元生,吉成林. 河北怀安东洋河地区石榴基性麻粒岩的变质演化[M]//钱祥麟,王仁民. 华北北部麻粒岩相带地质演化. 北京:地震出版社,1994:89-99.

[15] 马军,王仁民. 宣化—赤城高压麻粒岩带中蓝晶石-正条纹长石组合的发现及地质意义[J]. 岩石学报,1995,11(3):273-278.

[16] 刘文军,翟明国,李永刚. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用[J]. 岩石学报,1998,14(4):449-459.

[17] 魏春景,张翠光,张阿利,等. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的*p-T*条件及其地质意义[J]. 岩石学报,2001,17(2):269-282.

[18] 周喜文,魏春景,耿元生,等. 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,2004,49(14):1424-1430.

[19] 周喜文,魏春景,耿元生,等. 胶北地块高压与低压泥质麻粒岩的相平衡关系与*p-T*演化轨迹[J]. 地学前缘,2007,14(1):135-143.

[20] Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24(5): 629-642.

[21] Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping Terrain of northern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24(5): 577-595.

[22] 张华锋,翟明国,彭澎. 华北克拉通桑干地区高压麻粒岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质含义[J]. 地学前缘,2006,13(3):190-199.

[23] Li S Z, Zhao G C. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt in the eastern block of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2007, 158(1/2): 1-16.

[24] Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North

and South Liaohe Groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 2008, 163(3/4): 279-306.

[25] Guo S S, Li S G. SHRIMP zircon U-Pb ages for the Paleoproterozoic metamorphic-magmatic events in the southeast margin of the North China Craton[J]. Science in China: Series D, 2009, 52(8): 1039-1045.

[26] Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, et al. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2010, 177(3/4): 266-276.

[27] Wan Y S, Dong C Y, Wang W, et al. Archean basement and a Paleoproterozoic collision orogen in the Huoqiu Area at the southeastern margin of North China Craton: Evidence from sensitive high resolution ion micro-probe U-Pb zircon geochronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1): 91-104.

[28] Ashwal L D, Tucher R D, Zinner E K. Slow cooling of deep crustal granulites and Pb-loss in zircon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(18): 2839-2851.

[29] Roberts M P, Finger F. Do U-Pb zircon ages from granulites reflect peak metamorphic conditions[J]? Geology, 1997, 25(4): 319-322.

[30] Timmermann H, Šeedra V, Gerdes A, et al. The problem of dating high-pressure metamorphism: A U-Pb isotope and geochemical study on eclogites and related rocks of the Mariánské Lázně Complex, Czech Republic[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(7): 1311-1338.

[31] Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism:Constraints from rare-earth elements in zircon and garnet[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145(1): 61-74.

[32] 翟明国. 华北克拉通 2.1～1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1343-1354.

[33] 周喜文, 魏春景, 董永胜, 等. 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, 2003, 19(4): 752-760.

[34] Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, et al. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry[J]. American Journal of Science, 2008, 308(3): 232-269.

[35] Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. 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, 2008, 160(3/4): 323-340.

[36] 王世进, 万渝生, 张成基, 等. 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, 2009, 25(10): 18-24.

[37] Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. 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, 2006, 149(3/4): 249-271.

[38] 白文吉, 周美夫, 胡旭峰, 等. 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, 1993.

[39] 李永刚, 翟明国, 刘文军, 等. 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, 1997, 32(3): 283-290.

[40] 王沛成, 安郁宏. 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, 1996, 12(1): 8-23.

[41] Wang L G, Qiu Y M, Mcnaughton N J, et al. 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, 1998, 13(1): 275-291.

[42] 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 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, 1998, 14(2): 198-206.

[43] 刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 山东半岛高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2039-2056.

[44] Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector CAMECA without external standardization[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2009, 10(4): 1-21.

[45] Liu F L, Gerdes A, Zeng L S, et al. SHRIMP U-Pb dating, trace elements and the Lu-Hf isotope system of coesite-bearing zircon from amphibolite in the SW Sulu UHP Terrane, eastern China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(12): 2973-3000.

[46] Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, et al. 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, 2008, 308(3): 328-350.

[47] Tam P Y, Zhao G C, Liu F L, et al. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic 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, 2011, 19(1): 150-162.

[48] Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu Orogen[J]. Precambrian Research, 2007, 152(1/2): 48-82.