

山东半岛早前寒武纪高级变质基底中超镁铁质岩的成因*

刘平华 刘福来** 王舫 刘建辉

LIU PingHua, LIU FuLai**, WANG Fang and LIU JianHui

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

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

2010-12-01 收稿, 2011-01-22 改回.

Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011. Genetic characteristics of the ultramafic rocks from the Early Precambrian high-grade metamorphic basement in Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):922–942

Abstract The ultramafic rocks as enclaves are widespread distributed in TTG gneisses from the Early Precambrian metamorphic high-grade basement of Shandong Peninsula, SE North China Craton (NCC). A combined study of petrography, mineral transformation, temperature-pressure estimation and in situ U-Pb dating of zircons provided insight into the evolutionary history of ultramafic rocks. In general, the relict minerals of olivine (Mg-rich) + orthopyroxene (Mg-rich) + spinel (Mg-rich) are identified as the early magmatic mineral assemblage of protolith (M_1), which formed at 980 ~ 1050°C and 1.55 ~ 1.65GPa. In contrast, the high-pressure (HP) granulite-facies mineral assemblage (M_2), such as olivine (Fe-rich) + orthopyroxene (Fe-rich) + spinel (Fe-rich) is identified in the matrix of ultramafic rocks, yielding 840 ~ 880°C and 1.40 ~ 1.50GPa. The metamorphic zircons formed at this stage record HP granulite-facies metamorphic ages of 1858 ~ 1877Ma. The middle- and low-pressure (MLP) amphibolite-granulite facies mineral assemblage for the post-peak retrogressive stage (M_3), however, is mainly comprised by orthopyroxene, clinopyroxene, olivine, amphibole ((Na + k)-rich), spinel and magnetite (Cr-rich), which formed at 760 ~ 820°C and 0.55 ~ 0.65GPa. The metamorphic zircons crystallized at this stage record retrogressive ages of 1820 ~ 1840Ma. The amphibolite- and greenschist-facies mineral assemblage for the late cooling stage (M_4) is characterized by amphibole ((Na + k)-poor) + magnetite (Cr-poor) + serpentine ± chlorite ± phlogopite with P - T conditions of 500 ~ 600°C and 0.32 ~ 0.40GPa. The clockwise P - T - t path for the ultramafic rocks indicates that the Early Precambrian high-grade metamorphic basement in Shandong Peninsula, SE North China Craton experienced a collisional orogenic process during Paleoproterozoic. This new result has very important significance for deeply discussing the geodynamic model of crust thickening followed by lifting in a continent-continent collisional orogen of North China Craton.

Key words Ultramafic rock; Genetic mineralogy; Zircon; U-Pb dating; Metamorphic basement; Shandong Peninsula

摘要 山东半岛早前寒武纪高级变质基底广泛出露超镁铁质岩,它们呈大小不等的透镜体产于TTG片麻岩中,且与基性高压麻粒岩密切“伴生”。岩相学和矿物相转变分析、温压条件估算以及锆石原位U-Pb定年结果表明,山东半岛超镁铁质岩记录了十分复杂的演化历史,其中早期残留的原岩标志性的矿物组合(M_1)以尖晶石(富Mg)+橄榄石(富Mg)+斜方辉石(富Mg)为特征,相应的岩浆结晶温压条件 $T=980\sim 1050^\circ\text{C}$ 、 $P=1.55\sim 1.65\text{GPa}$;峰期高压麻粒岩相变质阶段(M_2)的典型矿物组合以尖晶石(富Fe)+橄榄石(富Fe)+斜方辉石(富Fe)为特征,相应的温压条件 $T=840\sim 880^\circ\text{C}$ 、 $P=1.40\sim 1.55\text{GPa}$,此阶段形成的变质锆石记录的高压麻粒岩相变质时代为1858~1877Ma;峰后中低压角闪-麻粒岩岩相退变质阶段(M_3)的矿物组合以斜方辉石+单斜辉石+橄榄石+角闪石(富Na+K)+尖晶石+磁铁矿(富Cr)为特征,相应的温压条件 $T=760\sim 820^\circ\text{C}$ 、 $P=0.55\sim 0.65\text{GPa}$,此阶段形成的变质锆石记录的退变质时代为1820~1840Ma;晚期低角闪岩相-绿片岩相变质阶段(M_4),以形成角闪石(贫Na+K)+磁铁矿(贫Cr)+蛇纹石±绿泥石±金云母的矿物组合为特征,相应的温压条件 $T=500\sim 600^\circ\text{C}$ 、 $P=0.32\sim 0.40\text{GPa}$ 。超镁铁质岩的变质演化具有典型碰撞造山带顺时针 P - T - t 轨迹,指示山东半岛超

* 本文受国家杰出青年基金项目(40725007)和中国地质调查局地质大调查项目(1212010811065)联合资助。

第一作者简介:刘平华,男,1981年生,博士研究生,岩石学专业,E-mail:lph1213@126.com

** 通讯作者:刘福来,男,博士生导师,岩石学专业,E-mail:lf0225@sina.com

镁铁岩是古老陆块之间碰撞造山的产物。该项成果对于进一步深入探讨华北克拉通东南缘早前寒武纪古老陆块的碰撞-拼贴及其演化的动力学过程具有重要科学意义。

关键词 超镁铁质岩;成因矿物学;锆石;U-Pb定年;变质基底;山东半岛

中图法分类号 P588.125; P575.1; P597.3

1 引言

自从刘文军等(1998)和周喜文等(2004)在山东半岛早前寒武纪变质基底中相继识别出基性高压麻粒岩和泥质高压麻粒岩以来,有关该地区的变质演化和同位素年代学的研究逐渐成为研究的热点。到目前为止,随着研究工作的不断深入,有关山东半岛早前寒武纪高压麻粒岩及其相关岩石的原岩性质、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成果和进展(李永刚等, 1997; 李三忠等, 2002; Wan *et al.*, 2006; 周喜文等, 2007; Tang *et al.*, 2007; Jahn *et al.*, 2008; Zhou JB *et al.*, 2008; Zhou XW *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011; 刘平华等, 2010, 2011; 王舫等, 2010; 刘建辉等, 2011)。然而值得注意的是,在山东半岛早前寒武纪变质基底中,特别是在莱西马连庄-莱阳河头店一带出露了许多与高压麻粒岩相

伴生的超镁铁质岩,这些超镁铁质岩常常以透镜体状产于TTG片麻岩之中。尽管前人(白文吉等, 1993)曾对该类岩石做了一些有益的研究,但有关其原岩形成时代、成因机制和变质演化历史等诸多方面的研究目前仍处于起步阶段,这些岩石是否和伴生的高压麻粒岩一样,也曾经历古元古代晚期(1850~1900Ma)高压麻粒岩相变质-热事件,目前仍不清楚。有鉴于此,本文以山东半岛早前寒武纪超镁铁质岩为重点研究对象,在详细的岩相学、成因矿物学、矿物间相互转变关系研究基础上,系统建立超镁铁质岩的矿物演化序列,确定不同演化阶段矿物共生组合特征,通过矿物化学的系统研究,配备适宜的地质温度计和压力计估算,确定超镁铁质岩石不同变质阶段的 $P-T$ 条件。在此研究基础上,采用激光拉曼技术对超镁铁质岩中锆石内部矿物包体进行鉴定,并对锆石阴极发光图像进行系统分析,最后,采用SIMS U-Pb定年技术,对每件样品中不同性质锆石进行定年,结合变质温压条件的估算结果,确定山东半岛早前寒武纪高级变质基

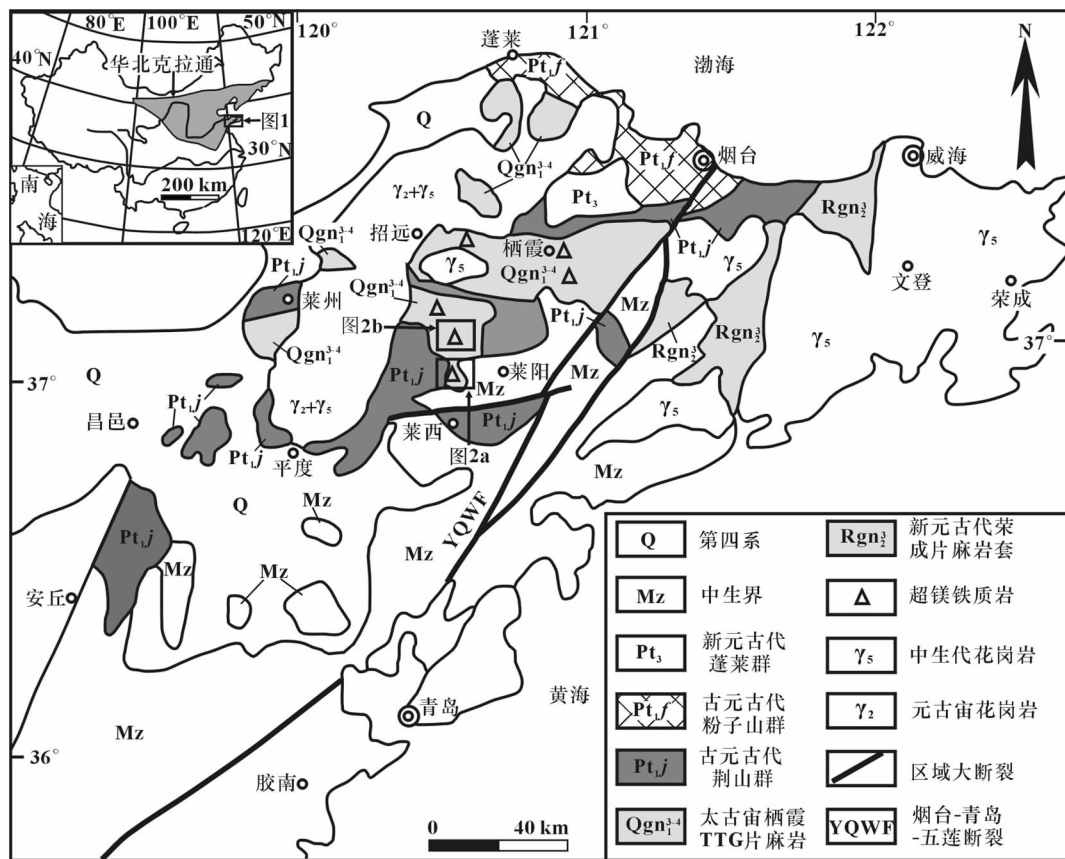


图1 山东半岛地质简图及超镁铁质岩的分布位置(据周喜文等, 2003 修改)

Fig. 1 Simplified geological map and locations of the ultramafic rocks from Shandong Peninsula (modified after Zhou *et al.*, 2003)

底中超镁铁质岩变质演化 $P-T-t$ 轨迹。

2 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-五莲断裂为界与苏鲁超高压变质带相邻(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。

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超镁铁质岩和高压麻粒岩。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 片麻岩的原岩形成时代可分为 2 期,分别为 2700 ~ 2900Ma 和 ~ 2500Ma (Zhou JB *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,荆山群普遍经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用(周喜文等, 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 1850 ~ 1950Ma,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(刘文军

等, 1998; 周喜文等, 2004; 刘平华等, 2010, 2011),表明山东半岛早前寒武纪变质基底在古元古代晚期存在一次重要的构造热事件。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、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、图2)。白文吉等(1993)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(李永刚等, 1997; 刘文军等, 1998; 刘平华等, 2010, 2011)。在莱西-莱阳-栖霞一带,规模比较大的超镁铁质岩块有:梨儿埠、苏家庄、小台子、李家草泊子、南山口、孙家夼、苏家庄南、孟家下夼和南岚岩块。本文研究的超镁铁质岩石均以透镜体赋存于 TTG 片麻岩之中,主要位于莱西南岚、莱西前山珍村、莱阳梨儿埠村等地(图2b)。

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,它们侵入在太古代 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 ~ 160Ma (王沛成等, 1996; Wang *et al.*, 1998; 苗来成等, 1998)。

3 实验方法

本文共对 10 件超镁铁质岩样品近 20 个探针片进行了系统的室内研究。首先,在显微镜下进行了岩相学特征观察与分析,选择典型超镁铁质岩探针片,进行矿物共生组合与

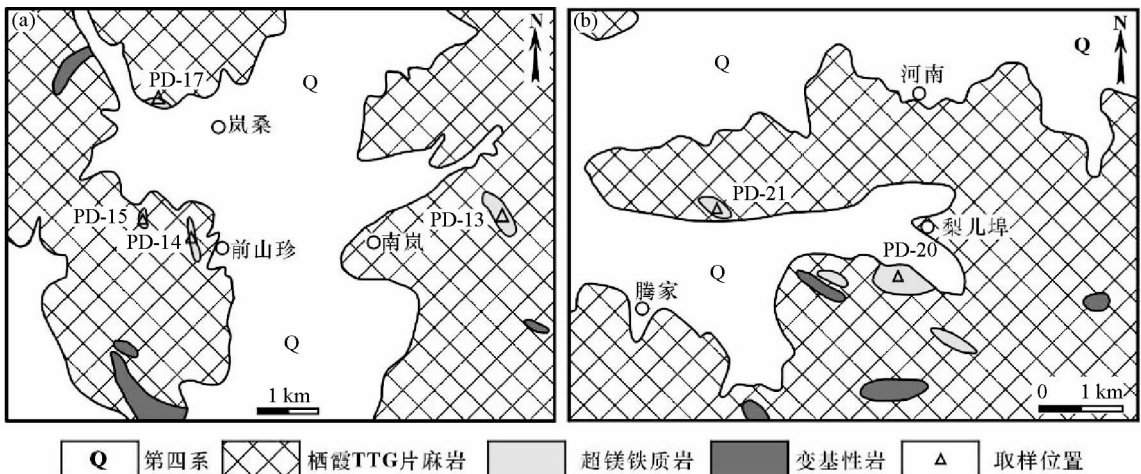


图2 研究区超镁铁质岩地质略图及采样位置

(a)-莱西地区; (b)-莱阳地区

Fig.2 Simplified geological map and sample locations of the ultramafic rocks in the studied area

(a)-Laixi area; (b)-Laiyang area

岩石结构构造的照相。然后,利用国土资源部大陆动力学重点实验室的扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对每件样品的矿物结构、相互间转变关系以及矿物成分变化特征进行系统观察和测试,扫描电镜为日本电子公司JSM-561LV型,电子束电压20kV,焦距20mm,束斑大小41nm,能谱仪是英国牛津公司INCA软件包版本4.4。然后,进行电子探针测试分析,矿物化学成分测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室JXA-8100型电子探针上进行,测试条件为加速电压15kV,电子流 1×10^{-8} A,束斑1 μ m,标准样品采用美国SPI公司53种标准矿物化学成分,矿物代号均采用沈其韩(2009)的资料。

本文还对3件超镁铁质岩样品进行了系统的年代学研究。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(约5kg)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。锆石中矿物包体的激光拉曼测试在国土资源部大陆动力学实验室进行。锆石的U-Pb定年在中国科学院地质与地球物理研究所CAMECA IMS-1280二次离子质谱仪(SIMS)上进行,分析测试方法和步骤以及数据处理详见Li *et al.* (2009)。

4 岩相学特征

本文研究的超镁铁质岩石主要为(蛇纹石化)含尖晶角闪橄榄方辉岩、含尖晶橄榄角闪二辉岩、含辉角闪石岩和(含橄辉)蛇纹岩。常见的矿物为橄榄石(Ol) + 斜方辉石(Opx) + 尖晶石(Spl) + 蛇纹石(Srp) \pm 角闪石(Amp) \pm 单斜辉石(Cpx),次要矿物为绿泥石(Chl) + 金云母(Phl) + 钛铁矿(Ilm) + 磁铁矿(Mag),副矿物主要有金红石(Rt)、磷灰石(Ap)和锆石(Zrn)等。根据斜方辉石和橄榄石中矿物包体性质、矿物转变结构和矿物成分等方面的系统研究,超镁铁质岩的矿物演化分为4个阶段,分别为:早期残留的原岩矿物组合(M₁)、峰期高压麻粒岩相变质阶段矿物组合(M₂)、峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段的矿物组合(M₃)和晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段的矿物组合(M₄)。

4.1 早期残留的原岩矿物组合(M₁)

超镁铁质岩保存的早期残留的原岩矿物组合(M₁)为橄榄石(Ol₁) + 斜方辉石(Opx₁) + 尖晶石(Spl₁),不含单斜辉石。早期残留的尖晶石(Spl₁)和橄榄石(Ol₁)一般呈小颗粒浑圆状,被大颗粒的斜方辉石所包裹(图3a),暗示在早期残留矿物相形成过程中存在下列转变反应:橄榄石(Ol) + 石英(Qtz) (斜方辉石(Opx);在基质中也见有残留的早期岩浆成因的橄榄石(Ol₁)、斜方辉石(Opx₁)和尖晶石(Spl₁),它们彼此之间呈粒状镶嵌结构(图3b),矿物颗粒大小变化

于0.02 ~ 1.50mm之间。与变质成因的矿物对比,上述矿物均以富Mg为其主要特征(见下文详述)。该类残留的早期原岩矿物组合与我国中生代玄武岩中尖晶石相地幔岩包体中的矿物组合十分相似(Yang *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 1998)。

4.2 峰期高压麻粒岩相变质阶段矿物组合(M₂)

高压麻粒岩相变质阶段(M₂)的典型矿物组合为橄榄石(Ol₂) + 斜方辉石(Opx₂) + 尖晶石(Spl₂)(图3c),尽管该矿物组合与M₁阶段矿物组合很相似,但同种矿物化学成分存在明显差异(见下文详述),总体上M₂阶段的变质矿物具有相对富Fe、贫Mg的特点。与M₁阶段深褐色尖晶石(Spl₁)不同,M₂阶段的尖晶石(Spl₂)常常为深绿色(图3c),常与变质成因的富Fe橄榄石(Ol₂)和斜方辉石(Opx₂)平衡共生。温压条件估算和锆石U-Pb定年结果也证实上述矿物组合形成于高压麻粒岩相变质阶段。

4.3 峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段矿物组合(M₃)

超镁铁质岩所保存的峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段(M₂)的矿物组合以含角闪石为特征,该阶段的形成角闪石(Amp₃),呈无色-浅绿色(图3d),与它形粒状的斜方辉石(Opx₃) + 单斜辉石(Cpx₃) + 橄榄石(Ol₃) + 尖晶石(Spl₃) + 富Cr-磁铁矿(Cr-Mag₃)平衡共生(图3d)。与M₁、M₂阶段的同种矿物相比,M₃阶段上述镁铁矿物相最富Fe,表明M₂阶段的矿物组合在M₃阶段向富铁端元成分的转变,并有新生退变矿物角闪石(Amp₃)的形成:

相对富镁矿物相(Ol₂ + Cpx₂ + Opx₂ + Spl₂) + 熔体/流体 \rightarrow

相对富Fe矿物相(Ol₃ + Cpx₃ + Opx₃ + Spl₃ + Amp₃) + 富Cr磁铁矿(Cr-Mag₃) + 流体

上述矿物间转变反应,不仅与岩相学观察十分一致,而且得到了实验岩石学的支持(Sen and Dunn, 1994)。另外,M₃阶段还存在一个标志性的矿物相转变结构:尖晶石(Spl₃)转变为富Cr-磁铁矿(Cr-Mag₃),有的富Cr磁铁矿核部可见残留的尖晶石(Spl₃)(图3e)。

4.4 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段矿物组合(M₄)

在大多数超镁铁质岩中,早期形成的橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石等矿物,已完全或部分转变成角闪石、蛇纹石、磁铁矿、绿泥石、金云母等次生矿物,其中,M₄阶段新生的角闪石(Amp₄)和贫Cr-磁铁矿(Mag₄)与M₃阶段同种矿物成分存在明显的差别(详见下文)。蛇纹石常常呈网格状,沿橄榄石裂隙分布,而贫Cr-磁铁矿(Mag₄)往往沿早期尖晶石的边部和裂隙分布(图3f),尖晶石与磁铁矿间的上述转变结构,在世界其他地区的超镁铁质岩中曾多次被报道(Karipi *et al.*, 2007; Farahat, 2008; Oh *et al.*, 2010),并

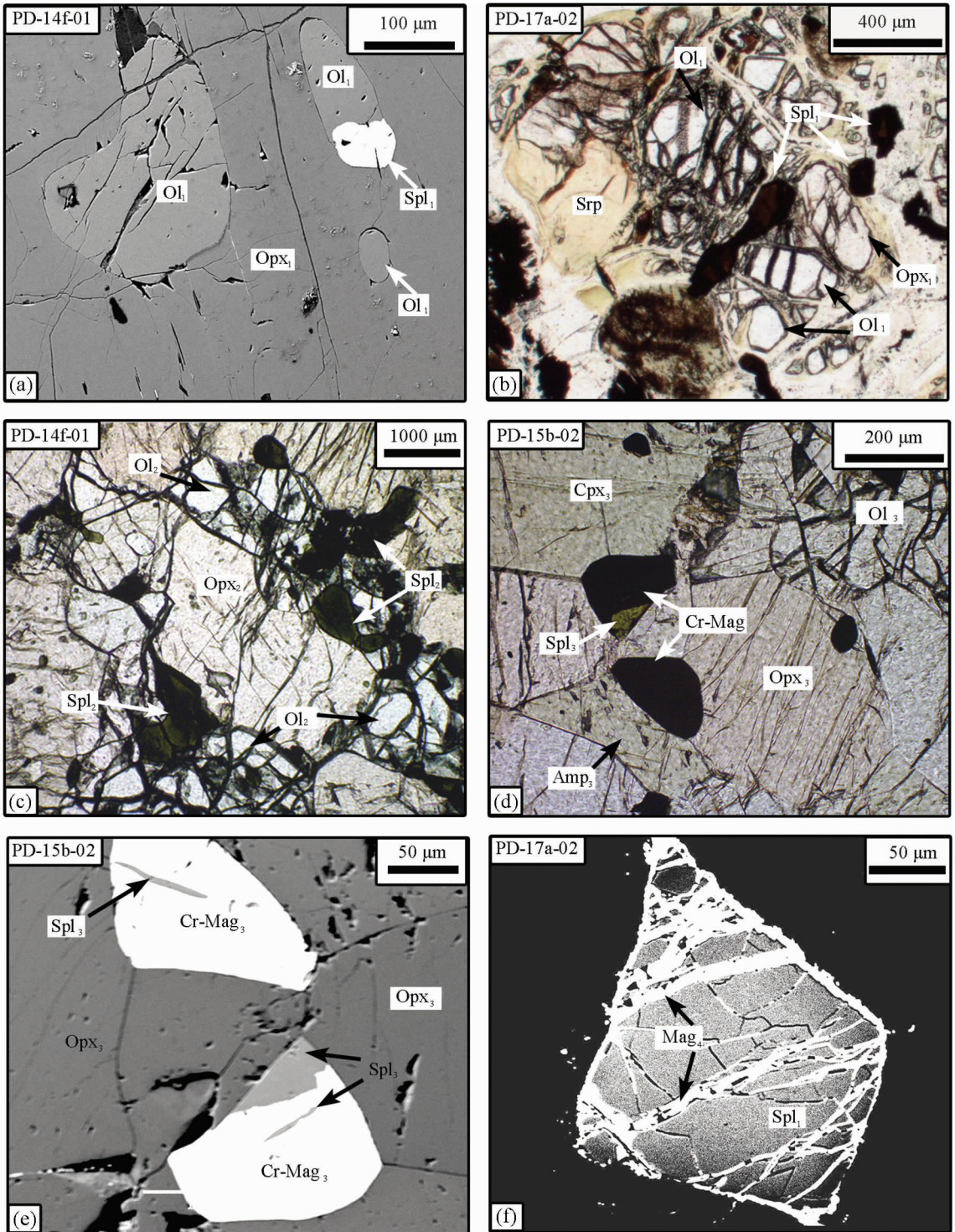


图3 山东半岛超镁铁质岩典型结构显微照片

(a)-斜方辉石(Opx_1)核部的包体矿物橄榄石(Ol_1) + 尖晶石(Spl_1), 背散射电子图像; (b)-含尖晶橄榄方辉蛇纹岩中残留的早期矿物组合(M_1): 橄榄石(Ol_1) + 斜方辉石(Opx_1) + 尖晶石(Spl_1), 单偏光; (c)-含尖晶橄榄方辉岩中的矿物组合: 斜方辉石(Opx_2) + 橄榄石(Ol_2) + 尖晶石(Spl_2), 单偏光; (d)-含尖晶橄榄角闪二辉岩共生矿物组合: 单斜辉石(Cpx_3) + 斜方辉石(Opx_3) + 橄榄石(Ol_3) + 角闪石(Amp_3) + 尖晶石(Spl_3) + Cr-磁铁矿($Cr-Mag_3$), 单偏光; (e)-沿 Cr-磁铁矿边部和核部残留的尖晶石(Spl_3), 背散射电子图像; (f)-沿早期尖晶石(Spl_1)周围和裂隙分布贫铬磁铁矿(Mag_4), 背散射电子图像

Fig. 3 Photomicrographs showing typical textures of the ultramafic rocks from Shandong Peninsula

(a)-relict magmatic minerals (M_1) of olivine(Ol_1) + spinel (Spl_1) as inclusions preserved in orthopyroxene (Opx_1), BSE image; (b)-relict magmatic mineral assemblage of olivine(Ol_1) + spinel(Spl_1) + orthopyroxene(Opx_1) preserved in the matrix of Spl -bearing Ol - Opx serpentinite, PPL; (c)-high-pressure granulite-facies metamorphic mineral assemblage (M_2) of olivine(Ol_2) + spinel(Spl_2) + orthopyroxene(Opx_2) preserved in the matrix of Spl -bearing Ol -orthopyroxenite, PPL; (d)-amphibolite-and granulite-facies retrograde mineral assemblages (M_3) of clinopyroxene (Cpx_3) + orthopyroxene (Opx_3) + olivine(Ol_3) + amphibole(Amp_3) + spinel(Spl_3) + Cr-magnetite ($Cr-Mag_3$) preserved in the matrix of Spl -bearing Ol - Amp -websterite, PPL; (e)-Cr-Magnetite ($Cr-Mag_3$) surrounding relict spinel (Spl_3), BSE image; (f)-low-Cr magnetite (Mag_4) distributing along the cracks of relict magmatic spinel (Spl_1) or surrounding the relict magmatic spinel (Spl_1), BSE image

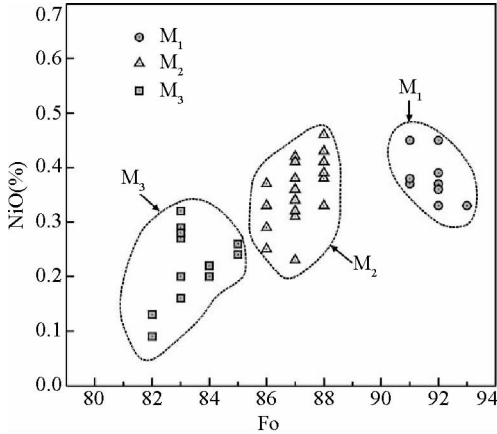


图4 山东半岛超镁铁质岩中橄榄石的 Fo-NiO (%) 成分关系图解

Fig.4 Relationship between Fo and NiO (%) of olivines from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula

普遍认为是尖晶石在低角闪岩相-绿片岩相变质条件下发生的典型矿物相退变结构。

5 矿物化学

5.1 橄榄石

本文对 49 个不同世代橄榄石的化学成分进行了测试, 其中 15 个具有代表性的分析结果列入表 1 中, 相应的 Fo 与 NiO (%) 相关关系如图 4 所示。从表 1 和图 4 中可以明显看出, 不同世代形成的橄榄石的化学成分存在明显差异。其中, 早期 (M_1) 原岩中残留的橄榄石 MgO 和 NiO 含量最高, 分别变化于 49.41% ~ 50.87% 和 0.33% ~ 0.45% 之间, 相应的 Fo 端员组分变化于 91 ~ 93 之间, 而 FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量最低, 集中变化于 7.71% ~ 8.42% 之间, 这与我国中生代玄武岩中尖晶石相地幔岩捕掳体中橄榄石的化学成分十分相似 (Yang *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 1998), 属于稳定于尖晶石相地幔岩的 $P-T$ 范围内的高镁橄榄石, 应代表原岩残留的橄榄石的化学成分。峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2) 形成的橄榄石 MgO 和 NiO 含量相对偏低, 分别变化于 45.63% ~ 47.90% 和 0.37% ~ 0.46% 之间, 相应的 Fo 端员组分变化于 86 ~ 89 之间, 而 FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量相对偏高, 集中变化于 12.19% ~ 14.13% 之间。峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质

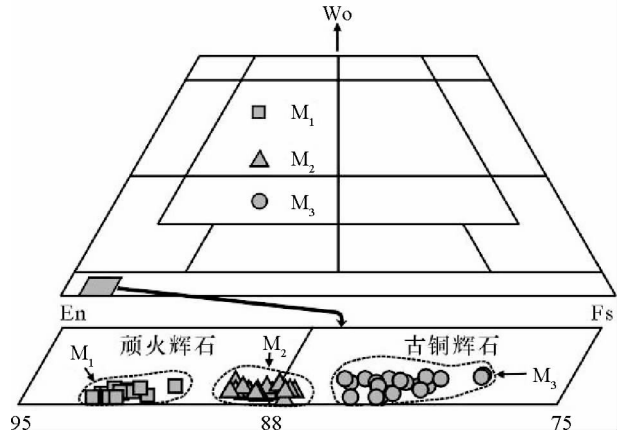


图5 山东半岛超镁铁质岩中斜方辉石的 Wo-Fs-En 图解 (据 Deer *et al.*, 1997)

Fig.5 Wo-Fs-En diagram of orthopyroxenes from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Deer *et al.*, 1997)

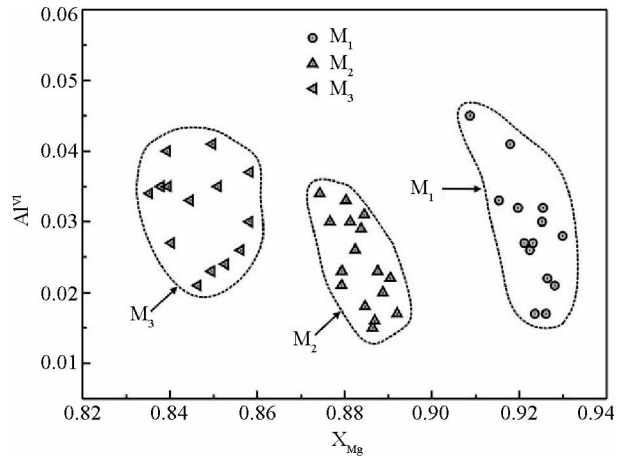


图6 山东半岛超镁铁质岩中斜方辉石的 X_{Mg} - Al^{VI} 成分关系图解

Fig.6 Relationship between X_{Mg} and Al^{VI} of orthopyroxenes from the ultramafic rocks in Shandong peninsula

阶段 (M_3) 形成的橄榄石 MgO 和 NiO 含量最低, 而 FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量最高, 分别变化于 42.90% ~ 44.67%、0.09% ~ 0.29% 和 15.16% ~ 17.06% 之间, 相应的 Fo 端员组分变化于 82 ~ 85 之间。

表1 山东半岛超镁铁质岩中橄榄石的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of olivines from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (wt%)

世代	M ₁					M ₂					M ₃				
SiO ₂	40.81	40.57	40.78	40.63	40.61	40.08	39.55	40.23	39.27	39.21	38.98	38.87	39.32	39.51	39.39
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO ^T	8.32	7.71	8.22	8.26	8.42	12.19	12.50	12.74	13.34	14.13	15.16	16.19	15.82	16.78	17.06
MnO	0.16	0.15	0.12	0.13	0.09	0.18	0.24	0.20	0.16	0.15	0.38	0.27	0.29	0.20	0.32
MgO	50.87	50.44	50.07	49.45	49.41	47.90	47.84	46.84	45.87	45.63	44.52	44.67	43.81	43.22	42.90
CaO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.01
NiO	0.45	0.33	0.36	0.38	0.37	0.38	0.46	0.41	0.38	0.37	0.24	0.26	0.29	0.09	0.13
Total	100.66	99.21	99.66	98.88	98.91	100.78	100.63	100.46	99.05	99.53	99.40	100.26	99.59	99.80	99.82
以4个为标准计算的阳离子系数															
Si	0.990	0.995	0.998	1.003	1.003	0.987	0.979	0.998	0.990	0.987	0.987	0.979	0.998	1.003	1.002
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.017	0.010	0.007	0.000	0.000	0.025	0.026	0.005	0.023	0.025	0.028	0.034	0.004	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.152	0.148	0.161	0.171	0.174	0.226	0.233	0.260	0.258	0.272	0.293	0.307	0.332	0.356	0.363
Mn	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	0.008	0.006	0.006	0.004	0.007
Mg	1.839	1.844	1.826	1.819	1.818	1.757	1.764	1.732	1.723	1.711	1.680	1.677	1.657	1.634	1.626
Ca	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
Fo	92	93	92	91	91	89	88	87	87	86	85	85	83	82	82

Fo = 100(Mg/(Mg + Fe²⁺)); FeO^T = FeO + Fe₂O₃; M₁-早期原岩中残留的橄榄石; M₂-峰期高压麻粒岩相变质阶段的橄榄石; M₃-峰后中低压角闪-麻粒岩相变质阶段的橄榄石

表2 山东半岛超镁铁质岩中斜方辉石的化学成分 (wt%)

Table 2 Chemical composition of orthopyroxenes from ultramafic rocks in Shandong Peninsula (wt%)

世代	M ₁					M ₂					M ₃				
SiO ₂	55.58	55.90	55.53	56.19	56.42	55.35	54.93	54.18	55.46	54.90	54.74	55.33	54.98	55.04	55.11
TiO ₂	0.00	0.04	0.10	0.04	0.06	0.10	0.10	0.16	0.15	0.15	0.06	0.09	0.00	0.08	0.03
Al ₂ O ₃	2.30	2.44	2.47	2.10	2.47	2.07	2.52	2.86	2.88	2.67	2.48	2.01	2.51	2.36	2.32
Cr ₂ O ₃	0.14	0.06	0.16	0.08	0.15	0.10	0.09	0.12	0.10	0.08	0.07	0.09	0.12	0.09	0.07
FeO ^T	5.98	5.86	6.47	6.18	6.18	9.12	9.31	9.46	9.18	9.45	10.93	10.06	11.45	11.34	11.17
MnO	0.21	0.18	0.14	0.23	0.28	0.22	0.14	0.20	0.19	0.21	0.25	0.24	0.22	0.26	0.28
MgO	34.74	34.83	33.96	34.51	34.10	32.73	32.78	31.88	32.74	32.57	31.03	31.50	30.60	30.64	30.72
CaO	0.20	0.12	0.15	0.21	0.29	0.17	0.18	0.23	0.20	0.17	0.42	0.10	0.44	0.32	0.36
Na ₂ O	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.07	0.02	0.09	0.00	0.00	0.07
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
NiO	0.00	0.09	0.00	0.03	0.10	0.08	0.00	0.04	0.06	0.06	0.04	0.07	0.03	0.00	0.00
Total	99.15	99.54	98.99	99.59	100.05	99.95	100.06	99.14	100.97	100.34	100.05	99.59	100.35	100.14	100.14
以6个为标准计算的阳离子系数															
Si	1.927	1.929	1.932	1.941	1.945	1.930	1.913	1.907	1.914	1.909	1.923	1.947	1.931	1.937	1.937
Ti	0.000	0.001	0.003	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002	0.000	0.002	0.001
Al ^{IV}	0.073	0.071	0.068	0.059	0.055	0.070	0.087	0.093	0.086	0.091	0.077	0.053	0.069	0.063	0.063
Al ^{VI}	0.021	0.028	0.033	0.027	0.045	0.015	0.016	0.026	0.031	0.018	0.026	0.030	0.035	0.035	0.033
Cr	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002
Fe ³⁺	0.035	0.034	0.026	0.030	0.002	0.048	0.054	0.056	0.045	0.055	0.048	0.023	0.030	0.022	0.032
Fe ²⁺	0.139	0.135	0.163	0.148	0.176	0.218	0.217	0.223	0.220	0.220	0.273	0.273	0.306	0.311	0.296
Mn	0.006	0.005	0.004	0.007	0.008	0.006	0.004	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008
Mg	1.795	1.792	1.761	1.776	1.752	1.701	1.701	1.673	1.684	1.688	1.625	1.652	1.602	1.607	1.609
Ca	0.007	0.004	0.006	0.008	0.011	0.006	0.007	0.009	0.007	0.006	0.016	0.004	0.017	0.012	0.014
Na	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.005	0.001	0.006	0.000	0.000	0.005
X _{Mg}	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.86	0.86	0.84	0.84	0.84

X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺); FeO^T = FeO + Fe₂O₃; M₁-早期原岩中残留的斜方辉石; M₂-峰期高压麻粒岩相变质阶段的斜方辉石; M₃-峰后中低压角闪-麻粒岩相变质阶段的斜方辉石

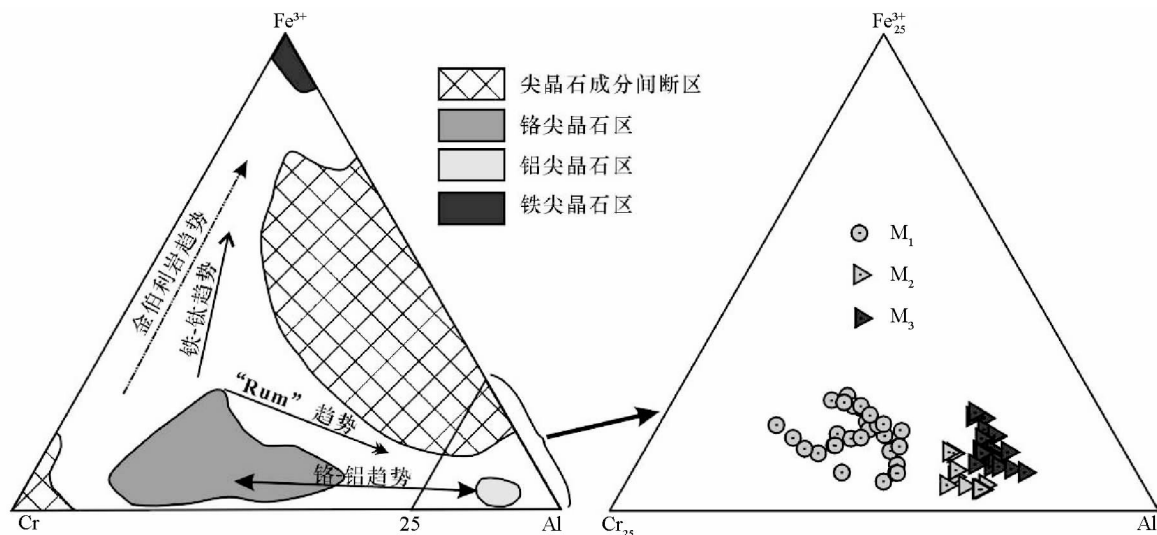


图7 山东半岛超镁铁质岩石中尖晶石的 Cr-Al-Fe³⁺ 成分图解 (据 Barnes and Roeder, 2001)

Fig.7 Cr-Al-Fe³⁺ compositional diagram of spinels from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Barnes and Roeder, 2001)

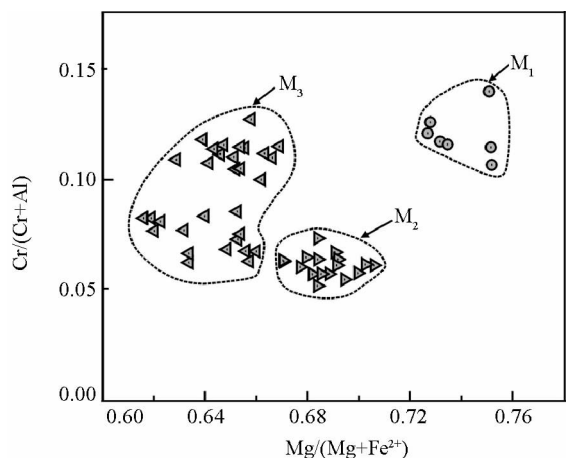


图8 山东半岛超镁铁质岩石中尖晶石的 Mg/(Mg + Fe²⁺) -Cr/(Cr + Al) 关系图解

Fig.8 Relationship between Mg/(Mg + Fe²⁺) and Cr/(Cr + Al) of spinels from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula

5.2 斜方辉石

45 个斜方辉石的化学成分如图 5 和图 6 所示,其中 15 个具有代表性的斜方辉石化学成分列入表 2 中。从表 2 以及图 5 和 6 中可以明显看出,不同世代斜方辉石的化学成分也存在明显差异。其中早期 (M₁) 原岩中残留的斜方辉石 MgO 含量最高,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量最低,分别变化于 33.96% ~ 34.83% 和 5.86% ~ 6.47% 之间,相应的 X_{Mg} (Mg/(Mg + Fe²⁺)) 变化于 0.91 ~ 0.93 之间,其化学成分均属于顽火辉石 (图 5)。而峰期高压麻粒岩相变质阶段

(M₂) 形成的斜方辉石 MgO 含量略有降低,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量略有升高,分别变化于 31.88% ~ 32.78% 和 9.12% ~ 9.46% 之间,相应的 X_{Mg} (Mg/(Mg + Fe²⁺)) 变化于 0.88 ~ 0.89 之间,其化学成分介于顽火辉石-古铜辉石之间 (图 5)。与上述两类斜方辉石对比,峰后角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M₃) 形成的斜方辉石的 MgO 含量最低,变化于 30.60% ~ 31.50% 之间,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量最高,集中变化于 10.06% ~ 11.45% 之间,相应的 X_{Mg} (Mg/(Mg + Fe²⁺)) 变化于 0.84 ~ 0.86 之间,其化学成分属于古铜辉石 (图 5)。上述特征表明,研究区超镁铁质岩中斜方辉石的化学成分不仅与寄主岩石的成分关系密切,而且明显受控于形成时的 P-T 条件。

5.3 尖晶石

54 个 M₁、M₂ 和 M₃ 三个世代的尖晶石的化学成分如图 7 和图 8 所示,其中 15 个具有代表性尖晶石的化学成分列入表 3 中,总体具有高铝-低铬的特点,但不同世代尖晶石的 MgO 和 FeO^T 含量存在明显差异。其中早期 (M₁) 原岩残留的尖晶石 MgO 含量最高,并集中变化于 18.05% ~ 19.01% 之间,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量最低,变化于 13.41% ~ 16.26% 之间,相应的 X_{Mg} (Mg/(Mg + Fe²⁺)) 值变化于 0.73 ~ 0.75 之间。与 M₁ 阶段相比,峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M₂) 形成的尖晶石 MgO 含量偏低,变化于 16.84% ~ 18.17% 之间,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量偏高,变化于 16.57% ~ 19.15% 之间,相应的 X_{Mg} (Mg/(Mg + Fe²⁺)) 值变化于 0.67 ~ 0.71 之间。与上述两类尖晶石对比,峰后角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M₃) 的尖晶石 MgO 含量最低,而 FeO^T (FeO + Fe₂O₃) 含量最高,分别变化于 15.25% ~ 16.98%

表3 山东半岛超镁铁质岩中尖晶石的化学成分 (wt%)

Table 3 Chemical compositions of spinels from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (wt%)

世代	M ₁					M ₂					M ₃					
SiO ₂	0.07	0.05	0.00	0.04	0.00	0.04	0.39	0.11	0.05	0.03	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	
TiO ₂	0.01	0.01	0.06	0.00	0.03	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	
Al ₂ O ₃	55.47	52.82	53.64	52.77	53.31	57.68	58.51	58.50	57.01	57.35	53.43	59.64	52.79	58.10	56.90	
Cr ₂ O ₃	10.16	10.89	10.95	11.89	11.42	5.60	5.73	5.32	5.75	5.78	10.04	5.42	10.31	7.80	7.63	
FeO ^T	13.41	16.26	15.23	15.65	15.47	18.07	16.57	18.00	19.15	18.04	19.51	17.43	19.25	18.27	19.97	
MnO	0.12	0.18	0.18	0.20	0.13	0.18	0.16	0.05	0.19	0.13	0.27	0.12	0.19	0.25	0.24	
MgO	19.01	18.93	18.25	18.09	18.05	17.96	18.17	17.59	16.86	16.84	16.57	16.98	15.96	15.59	15.52	
CaO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na ₂ O	0.00	0.00	0.06	0.04	0.04	0.04	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
NiO	0.33	0.28	0.28	0.27	0.27	0.49	0.38	0.45	0.44	0.43	0.35	0.45	0.47	0.31	0.15	
ZnO	0.51	0.57	0.50	0.50	0.51	—	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—	
Total	99.09	100.00	99.15	99.46	99.28	100.07	99.99	100.03	99.49	98.60	100.23	100.27	99.06	100.38	100.43	
以4个氧为标准计算的阳离子数																
Si	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.010	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	
Ti	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	
Al	1.734	1.655	1.692	1.667	1.684	1.780	1.799	1.805	1.781	1.803	1.684	1.840	1.690	1.811	1.778	
Cr	0.213	0.229	0.232	0.252	0.242	0.116	0.118	0.110	0.120	0.122	0.212	0.112	0.221	0.163	0.160	
Fe ³⁺	0.049	0.114	0.077	0.081	0.076	0.103	0.062	0.079	0.098	0.074	0.101	0.044	0.085	0.026	0.061	
Fe ²⁺	0.248	0.248	0.263	0.270	0.271	0.292	0.299	0.315	0.327	0.329	0.335	0.337	0.352	0.378	0.382	
Mn	0.003	0.004	0.004	0.005	0.003	0.004	0.004	0.001	0.004	0.003	0.006	0.003	0.004	0.006	0.005	
Mg	0.751	0.750	0.728	0.722	0.721	0.701	0.706	0.686	0.666	0.669	0.660	0.662	0.646	0.614	0.613	
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Na	0.000	0.000	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
X _{Mg}	0.75	0.75	0.73	0.73	0.73	0.71	0.70	0.69	0.67	0.67	0.66	0.66	0.65	0.62	0.62	
C _r [#]	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.11	0.06	0.12	0.08	0.08	

X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺) ; FeO^T = FeO + Fe₂O₃ ; X_{Cr} = Cr/(Cr + Al) ; M₁-早期原岩中残留的尖晶石 ; M₂-峰期高压麻粒岩相变质阶段的尖晶石 ; M₃-峰后中低压角闪-麻粒岩相变质阶段的尖晶石

表4 山东半岛超镁铁质岩中单斜辉石的化学成分 (wt%)

Table 4 Chemical composition of clinopyroxenes from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (wt%)

世代	M ₃																		
SiO ₂	51.99	56.45	54.16	53.80	53.91	51.88	52.38	53.73	54.51	54.15	51.99	53.04	53.50	52.03	53.15	52.88	53.33	53.07	53.48
TiO ₂	0.23	0.15	0.11	0.17	0.13	0.18	0.06	0.12	0.14	0.12	0.19	0.15	0.11	0.23	0.24	0.20	0.14	0.13	0.08
Al ₂ O ₃	2.62	1.98	1.84	2.05	2.34	2.43	2.10	2.25	2.12	1.75	2.24	2.38	2.06	2.44	1.91	2.44	2.04	2.44	1.83
Cr ₂ O ₃	0.03	0.10	0.06	0.05	0.12	0.05	0.05	0.06	0.07	0.04	0.15	0.11	0.09	0.06	0.03	0.03	0.03	0.06	0.07
FeO ^T	4.19	3.74	4.20	3.97	4.47	3.80	4.60	4.28	3.83	4.10	3.86	4.27	4.13	4.41	4.13	3.75	4.09	4.05	4.17
MnO	0.13	0.10	0.09	0.12	0.10	0.12	0.18	0.09	0.11	0.11	0.15	0.17	0.20	0.20	0.10	0.16	0.15	0.09	0.11
MgO	16.26	15.48	16.33	16.69	15.95	16.27	17.01	16.54	16.70	16.90	16.52	16.43	16.51	15.92	16.28	16.43	16.19	15.96	16.59
CaO	23.87	22.05	23.26	22.67	23.57	23.50	22.62	23.59	23.27	23.32	24.12	23.77	23.79	23.38	24.09	23.91	23.53	24.11	23.69
Na ₂ O	0.18	0.17	0.17	0.16	0.05	0.13	0.11	0.15	0.05	0.08	0.15	0.11	0.06	0.15	0.12	0.07	0.10	0.08	0.10
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.02	0.00	0.03	0.11	0.02	0.03	0.01	0.03	0.11	0.11	0.00	0.08	0.04	0.04	0.04	0.33	0.10	0.31	0.06
Total	99.53	100.22	100.25	99.79	100.66	98.40	99.12	100.86	100.91	100.68	99.40	100.51	100.49	98.86	100.09	100.20	99.70	100.30	100.19
以6个氧为标准计算的阳离子数																			
Si	1.907	2.030	1.972	1.965	1.958	1.923	1.927	1.946	1.968	1.964	1.907	1.930	1.947	1.926	1.942	1.933	1.957	1.942	1.951
Ti	0.006	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.002	0.003	0.004	0.003	0.005	0.004	0.003	0.006	0.007	0.005	0.004	0.004	0.002
Al	0.113	0.084	0.079	0.088	0.100	0.106	0.091	0.096	0.090	0.075	0.097	0.102	0.088	0.106	0.082	0.105	0.088	0.105	0.079
Cr	0.001	0.003	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
Fe ³⁺	0.073	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.058	0.014	0.000	0.000	0.086	0.034	0.013	0.038	0.027	0.023	0.000	0.008	0.021
Fe ²⁺	0.056	0.112	0.128	0.121	0.136	0.073	0.083	0.115	0.116	0.124	0.032	0.096	0.112	0.099	0.099	0.092	0.126	0.116	0.107
Mn	0.004	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.006	0.003	0.003	0.003	0.005	0.005	0.006	0.006	0.003	0.005	0.005	0.003	0.003
Mg	0.889	0.830	0.886	0.908	0.863	0.899	0.933	0.893	0.898	0.914	0.903	0.891	0.895	0.878	0.887	0.895	0.885	0.870	0.902
Ca	0.938	0.850	0.907	0.887	0.917	0.934	0.892	0.916	0.900	0.906	0.948	0.927	0.928	0.927	0.943	0.936	0.925	0.945	0.926
Na	0.013	0.012	0.012	0.011	0.004	0.009	0.008	0.011	0.003	0.006	0.011	0.008	0.004	0.011	0.009	0.005	0.007	0.006	0.007
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
X _{Mg}	0.94	0.88	0.87	0.88	0.86	0.92	0.92	0.89	0.89	0.88	0.97	0.90	0.89	0.90	0.90	0.91	0.88	0.88	0.89

X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺) ; FeO^T = FeO + Fe₂O₃ ; M₃-峰后中低压角闪-麻粒岩相变质阶段的单斜辉石

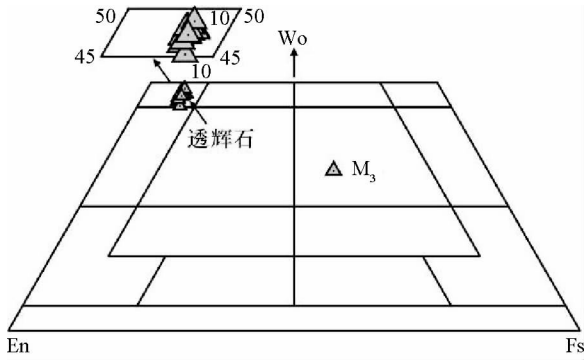


图9 山东半岛超镁铁质岩石中单斜辉石化学成分的Wo-Fs-En图解(据Deer et al., 1997)

Fig. 9 Wo-Fs-En diagram of clinopyroxene from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Deer et al., 1997)

和 17.43% ~ 19.97% 之间, 相应的 X_{Mg} ($Mg/(Mg + Fe^{2+})$) 值变化于 0.62 ~ 0.66 之间。上述特征同样表明, 不同阶段形成的尖晶石不仅受控于寄主岩石的化学成分, 而且与它们形成时的 $P-T$ 条件存在密切的成因关系。

5.4 单斜辉石

单斜辉石仅见于峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3), 19 个 M_3 阶段的单斜辉石的化学成分均落在透辉石区 (图9), 其化学成分列入表4中。单斜辉石的 SiO_2 含量变化于 51.88% ~ 56.45% 之间, MgO 含量变化于 15.48% ~ 17.01% 之间, FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量变化于 3.74% ~ 4.60% 之间, Al_2O_3 含量变化于 1.75% ~ 2.62% 之间。与研究区相“伴生”的基性高压麻粒岩中单斜辉石相比 (刘平华等, 2010), 超镁铁质岩石中的单斜辉石 MgO 含量明显偏高, FeO^T 含量偏低, Al_2O_3 含量十分相似, 表明不同岩石中单斜辉石的化学成分与寄主岩石的化学成分存在密切的成因联系。

5.5 角闪石

本文对 M_3 和 M_4 两个阶段共计 27 个角闪石的化学成分进行了测试, 其中 15 个具有代表性的化学成分列入表5中。峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3) 形成的角闪石, 其 SiO_2 含量变化于 45.34% ~ 46.94% 之间, Al_2O_3 含量变化于 11.46% ~ 12.13% 之间, MgO 含量变化于 17.09% ~ 17.49% 之间, FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量变化于 6.52% ~ 9.92% 之间, CaO 含量变化于 12.30% ~ 12.60% 之间, Na_2O 含量变化于 1.56% ~ 1.69% 之间, 在 $Si-Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 成分图解中均落在钙镁闪石质角闪石和镁闪石的过渡区 (图10)。与其相对比, 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M_4) 形成的角闪石, 其 SiO_2 、 MgO 含量明显偏高, 分别变化于 48.97% ~ 50.99% 和 18.75% ~ 20.20% 之间, 而 Al_2O_3 、

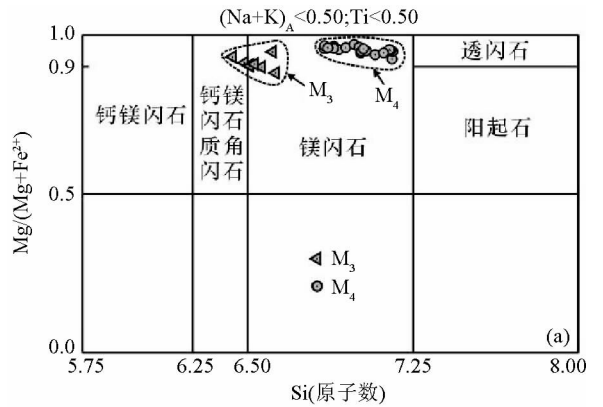


图10 山东半岛超镁铁质岩中角闪石的 $Si-Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 成分图解(据Deer et al., 1997)

Fig. 10 Relationship between Si and $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ of amphiboles from ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Deer et al., 1997)

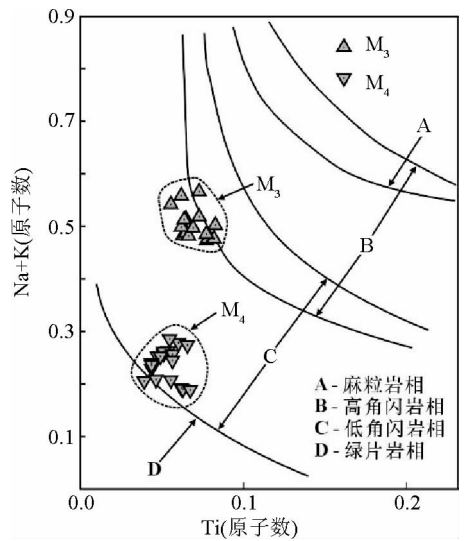


图11 山东半岛超镁铁质岩中角闪石的 $Ti-(Na + K)$ 成分图解(据靳是琴, 1991)

Fig. 11 Relationship between Ti and $(Na + K)$ of amphiboles from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Jin, 1991)

FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 和 Na_2O 含量明显偏低, 分别变化于 8.34% ~ 9.43%、3.59% ~ 5.42% 和 0.53% ~ 0.88% 之间, CaO 含量却十分相似, 变化于 11.77% ~ 12.53% 之间, 在 $Si-Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 成分图解中均落在镁闪石区 (图10)。在角闪石 $Ti-(Na + K)$ 成分图解中, M_3 阶段形成的角闪石均落在高角闪岩相-低角闪岩相过渡区, 而 M_4 阶段的角闪石则落在接近绿片岩相的低角闪岩相区 (图11)。

值得注意的是, 与交代地幔成因的褐色富钛、富铬成因的角闪石相比 (樊祺诚等, 1992), 本区超镁铁质岩中的角闪

表5 山东半岛超镁铁质岩中角闪石的化学成分 (wt%)

Table 5 Chemical compositions of amphiboles from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (wt%)

世代	M ₃							M ₄							
SiO ₂	45.34	46.22	46.14	45.58	46.94	46.01	46.74	50.08	49.07	48.97	50.35	50.56	50.43	50.99	50.60
TiO ₂	0.77	0.63	0.72	0.60	0.73	0.76	0.71	0.49	0.54	0.60	0.51	0.37	0.57	0.54	0.62
Al ₂ O ₃	12.05	11.57	11.78	11.69	11.71	12.13	11.46	9.17	9.30	9.07	8.62	9.43	8.68	8.49	8.34
Cr ₂ O ₃	0.36	0.46	0.38	0.56	0.45	0.42	0.42	0.53	0.39	0.50	0.58	0.77	0.30	0.33	0.30
FeO ^T	6.76	6.89	6.92	6.89	6.62	6.63	6.52	3.84	5.42	5.13	3.66	3.59	4.82	4.86	4.75
MnO	0.08	0.11	0.12	0.03	0.06	0.10	0.05	0.05	0.12	0.06	0.02	0.07	0.08	0.10	0.05
MgO	17.37	17.33	17.23	17.15	17.49	17.09	17.09	19.80	19.15	19.23	20.20	18.75	19.11	19.41	19.55
CaO	12.35	12.39	12.52	12.56	12.60	12.31	12.30	12.43	12.31	12.22	12.42	11.77	12.51	12.53	12.42
Na ₂ O	1.69	1.65	1.60	1.59	1.61	1.61	1.56	0.88	0.83	0.81	0.72	0.69	0.54	0.54	0.53
K ₂ O	0.23	0.27	0.28	0.25	0.23	0.20	0.25	0.18	0.20	0.20	0.17	0.18	0.10	0.10	0.11
NiO	0.11	0.00	0.07	0.04	0.13	0.25	0.04	0.04	0.08	0.11	0.34	0.16	0.41	0.29	0.30
Total	97.11	97.52	97.76	96.94	98.57	97.51	97.14	97.49	97.41	96.90	97.59	96.34	97.55	98.18	97.57
以23个氧为标准计算的阳离子数															
Si	6.434	6.533	6.514	6.488	6.566	6.510	6.630	6.947	6.847	6.866	6.985	7.079	7.018	7.040	7.027
Ti	0.082	0.067	0.076	0.064	0.077	0.081	0.076	0.051	0.057	0.063	0.053	0.039	0.060	0.056	0.065
Al	2.016	1.928	1.961	1.962	1.931	2.024	1.916	1.500	1.530	1.499	1.410	1.557	1.424	1.382	1.365
Cr	0.040	0.051	0.042	0.063	0.050	0.047	0.047	0.058	0.043	0.055	0.064	0.085	0.033	0.036	0.033
Fe ³⁺	0.536	0.452	0.442	0.476	0.374	0.412	0.291	0.283	0.467	0.437	0.305	0.167	0.356	0.359	0.372
Fe ²⁺	0.266	0.363	0.375	0.344	0.401	0.373	0.483	0.162	0.166	0.164	0.120	0.253	0.205	0.203	0.179
Mn	0.010	0.013	0.014	0.004	0.007	0.012	0.006	0.006	0.014	0.007	0.002	0.008	0.009	0.012	0.006
Mg	3.673	3.651	3.625	3.638	3.646	3.604	3.613	4.093	3.982	4.018	4.176	3.913	3.963	3.994	4.046
Ca	1.878	1.877	1.894	1.916	1.889	1.866	1.869	1.847	1.841	1.836	1.846	1.766	1.865	1.854	1.848
Na	0.465	0.452	0.438	0.439	0.437	0.442	0.429	0.237	0.225	0.220	0.194	0.187	0.146	0.145	0.143
K	0.042	0.049	0.050	0.045	0.041	0.036	0.045	0.032	0.036	0.036	0.030	0.032	0.018	0.018	0.019
Na + K	0.51	0.50	0.49	0.48	0.48	0.48	0.47	0.27	0.26	0.26	0.22	0.22	0.16	0.16	0.16
X _{Mg}	0.93	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91	0.88	0.96	0.96	0.96	0.97	0.94	0.95	0.95	0.96

$X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$; $FeO^T = FeO + Fe_2O_3$; M₃-峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段的角闪石; M₄-晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段的角闪石

表6 山东半岛超镁铁质岩不同阶段温压条件估算结果

Table 6 Temperature-pressure estimates of different evolutionary stages for the ultramafic rocks in Shandong Peninsula

阶段	矿物组合	P-T 条件
M ₁	Opx ₁ + Ol ₁ + Spl ₁	T = 980 ~ 1050°C, P = 1.55 ~ 1.65 GPa
M ₂	Opx ₂ + Ol ₂ + Spl ₂	T = 840 ~ 880°C, P = 1.40 ~ 1.50 GPa
M ₃	Opx ₃ + Ol ₃ + Spl ₃ + Cpx ₃ + Amp ₃ Mag ₃	T = 760 ~ 820°C, P = 0.55 ~ 0.65 GPa
M ₄	Amp ₄ + Mag ₄ + Srp ± Phl ± Chl	T = 500 ~ 600°C, P = 0.32 ~ 0.40 GPa

石, TiO₂、Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 含量显著地低于交代地幔成因的角闪石, 表明超镁铁质岩中的角闪石是构造折返退变质过程中形成的, 而不属于地幔成因的角闪石。

6 温压条件估算

如前所述, 研究区超镁铁质岩石经历了四个阶段的矿物演化, 即早期原岩残留的岩浆结晶阶段 (M₁) 的矿物组合、

峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M₂) 的矿物组合、峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M₃) 的矿物组合和晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M₄) 的矿物组合。根据不同阶段矿物组合的性质及其演化特征, 本文采用适用的温度计和压力计对不同阶段的 P-T 条件进行估算, 采用的温度计包括 Ol-Opx 温度计 (Brey and Köhler, 1990) 和 Opx-Cpx 温度计 (Taylor, 1998), 压力计包括尖晶石 Cr 的压力计 (O'Neil, 1981)、斜方辉石中 Fe 含量压力计 (Gasparik, 1987) 和基于角闪石中 Al 含量而建立的压力计 (Schmidt, 1992) 等。不同阶段 P-T 估算结果总结于表 6 中。

6.1 早期原岩残留的岩浆结晶阶段 (M₁) 矿物组合记录的温压条件

M₁ 阶段代表性的稳定矿物组合为斜方辉石 (高镁) + 橄榄石 (高镁) + 尖晶石 (高镁), 本文采用了相邻橄榄石和斜方辉石的核部成分以及与其共生的尖晶石的核部成分用于计算该阶段的 P-T 条件。对 1 件样品 15 个 Opx-Ol 矿物对进行了温度估算, 尽管估算结果比较分散, 但仍有 2 对估算的结果比较相近, 集中变化于 980 ~ 1050°C 之间, 应代表超镁

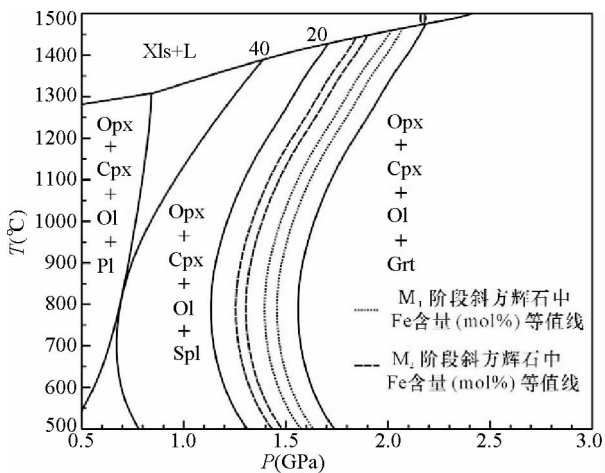


图 12 山东半岛超镁铁质岩中斜方辉石 Fe 含量 (mol%) 等值线 (据 Gasparik, 1987)

Fig. 12 The Fe-content (mol%) isopleths of the orthopyroxenes of the ultramafic rocks in Shandong Peninsula (after Gasparik, 1987)

铁质岩石早期岩浆结晶阶段 (M_1) 的温度条件。采用 3 件样品 11 个尖晶石核部成分, 利用尖晶石 Cr 的压力计进行该阶段的压力估算, 假设当时岩浆结晶平衡温度 $T = 1000^\circ\text{C}$, 估算的压力条件变化于 $2.00 \sim 2.30\text{GPa}$ 之间, 明显高于尖晶石相地幔岩稳定的压力范围 (Green and Wood, 1970; 吴春明, 2009), 表明采用尖晶石 Cr 的压力计对于早期岩浆结晶阶段 (M_1) 压力估算结果是不可靠的。然而前人研究 (Gasparik, 1987) 发现, 在 CFMAS 体系中, 稳定于尖晶石相的地幔岩中的斜方辉石, 其 Fe 的含量与温度无关, 而与压力具有很好的相关性。因此, 利用 M_1 阶段的斜方辉石 Fe 含量 (mol%) 等值线可确定山东半岛超镁铁质岩在 M_1 阶段的压力条件, 集中变化于 $1.55 \sim 1.65\text{GPa}$ 之间 (图 12)。

6.2 峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2) 矿物组合记录的温压条件

M_2 阶段的稳定矿物组合仍然是斜方辉石 + 橄榄石 + 尖晶石, 相对 M_1 阶段的同种矿物相比, 该阶段的矿物成分具有相对富铁的特点。本文仍采用相邻橄榄石和斜方辉石的核部成分以及与其相共生的尖晶石的核部成分用于估算该阶段的温度条件, 3 件样品 21 个 Opx-Ol 矿物温度估算结果仍然比较分散, 但仍有 3 对估算的温度结果比较合理, 集中变化于 $840 \sim 880^\circ\text{C}$ 之间, 应代表峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2) 的温度条件。对 1 件样品 8 个尖晶石核部成分, 利用尖晶石 Cr 的压力计估算的压力条件也明显高于研究区基性高压麻粒岩峰期的压力条件 (刘平华等, 2010), 显然, 尖晶石 Cr 的压力计对估算超镁铁质岩 M_2 阶段的压力条件仍然是不可靠的。然而, 在 CFMAS 体系中, 利用 M_2 阶段的斜方辉石 Fe 含量 (mol%) 等值线 (Gasparik, 1987), 可确定超

镁铁质岩在峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2) 的压力条件, 集中在 $1.40 \sim 1.50\text{GPa}$ 之间 (图 12), 这与研究区相邻的基性高压麻粒岩记录的峰期阶段压力条件十分相近 (刘平华等, 2010)。上述温压条件的估算结果进一步充分证明研究区超镁铁质岩石也经历了高压麻粒岩相变质作用。

6.3 峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3) 矿物组合记录的温压条件

M_3 阶段典型的共生矿物组合为斜方辉石 + 单斜辉石 + 橄榄石 + 角闪石 + 尖晶石 + Cr-磁铁矿。通过 1 件样品 11 个 Opx-Cpx 矿物对的温度估算结果和 1 件样品 8 个角闪石核部成分, 利用角闪石中 Al 压力计估算结果, 限定峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3) 的 P - T 条件为 $760 \sim 820^\circ\text{C}$, $0.55 \sim 0.65\text{GPa}$ (表 6)。

6.4 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M_4) 矿物组合记录的温压条件

M_4 阶段典型共生矿物组合为角闪石 + 磁铁矿 + 蛇纹石 ± 绿泥石 ± 金云母。标志性矿物相转变结构是贫 Cr 磁铁矿沿大颗粒尖晶石边部和裂隙分布, 前人研究这一矿物相转变的温度条件为 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ (Farahat, 2008; 表 6)。利用角闪石 Al 压力计 (Schmidt, 1992), 对 3 件样品 M_4 阶段形成的 20 个角闪石核部成分进行了压力估算, 压力变化于 $0.32 \sim 0.44\text{GPa}$ 之间 (表 6)。上述估算结果应代表研究区超镁铁质岩石晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M_4) 的温压条件。

7 锆石的矿物包体及阴极发光特征

本文对研究区含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03)、含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02) 和含尖晶橄榄角闪二辉岩 (PD-15b-02) 锆石中的矿物包体进行了系统的激光拉曼分析, 其包体矿物种类列入表 7 中。

7.1 含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03)

含尖晶橄榄方辉蛇纹岩中锆石为紫红色, 大部分具有浑圆状的晶形, 颗粒大小不一, 集中变化于 $15 \sim 50\mu\text{m}$ 之间, 少数者变化于 $50 \sim 100\mu\text{m}$ 之间。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: 第一类锆石具有相对强发光 (白色) 的继承性核和相对弱发光 (灰色-灰黑色) 的边, 白色继承性核部由于受到后期热事件的改造, 内部结构已模糊不清, 灰色-灰黑色边部极窄十分不均匀, 有的只有几微米, 有的则可达 $10\mu\text{m}$ 以上, 具有比较均匀发光性, 为典型变质增生边, 激光拉曼测试分析显示该类锆石核部和边部未保存矿物包体 (图 13a-d); 第二类锆石具有较弱的发光效应, 阴极发光图像为灰色-灰黑色, 发光均匀, 为变质

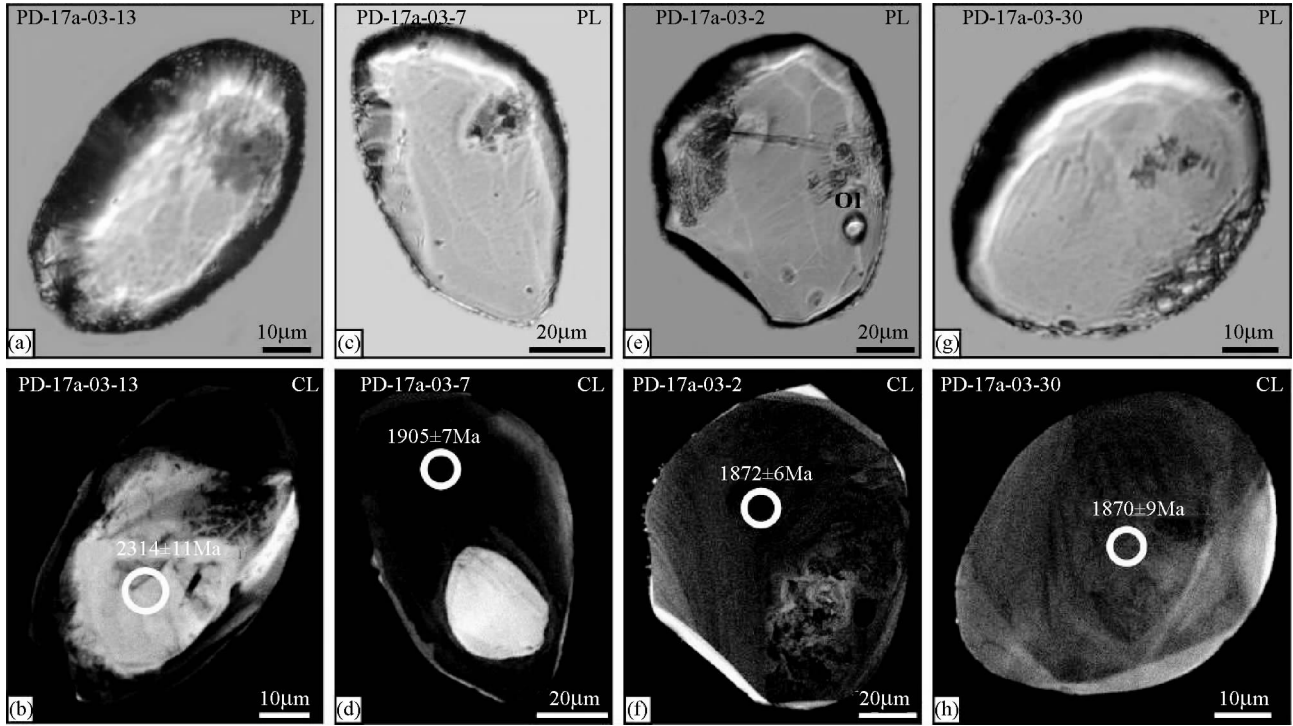


图 13 含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03) 锆石中矿物包体、阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

(a)-样品 PD-17a-03 中第 13 粒锆石晶体继承性核部和边部未保存的矿物包体;(b)-图 13a 中锆石阴极发光图像,具有较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-17a-03 中第 7 粒锆石晶体继承性核部和边部未保存的矿物包体;(d)-图 13c 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;(e)-样品 PD-17a-03 中第 2 粒锆石晶体保存矿物包体 Ol;(f)-图 13e 中变质锆石阴极发光图像,具有相对弱发光效应,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄;(g)-样品 PD-17a-03 中第 30 粒锆石晶体未保存矿物包体;(h)-图 13g 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

Fig. 13 Plane-polarized light (PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence (CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from Spl-bearing Ol-Opx-serpentinite (PD-17a-03)

(a)-zircon PD-17a-03-13 with no-mineral inclusions from core until rim; (b)-CL image of the same zircon as in Fig. 13a showing high-luminescent core and low-luminescent metamorphic rim, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (c)-zircon PD-17a-03-7 with no-mineral inclusions from core until rim; (d)-CL image of the same zircon as in Fig. 13c showing high-luminescent core and low-luminescent metamorphic rim, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (e)-zircon PD-17a-03-2 contains Ol; (f)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 13e showing a low-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (g)-zircon PD-17a-03-30 with no-mineral inclusions; (h)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 13g showing a homogeneous low-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age

表 7 山东半岛超镁铁质岩锆石中矿物包体

Table 7 Mineral inclusions in zircons from the ultramafic rocks in Shandong Peninsula

矿物包体	含尖晶橄 榄方辉岩	含尖晶橄 榄方辉蛇纹岩	含尖晶橄 榄角闪二辉岩
	PD-14f-02	PD-17a-03	PD-15b-02
橄榄石 (Ol)		*	
斜方辉石 (Opx)	*	*	
角闪石 (Amp)		*	
磁铁矿 (Mag)	*		
石英 (Qtz)	*		
磷灰石 (Ap)	*		
流体包裹体-CO ₂	*		

注: * 表示锆石中主要矿物包体

成因锆石,大部分晶体具有浑圆状的晶形,矿物包体十分少见(图 13e-h),主要为橄榄石(Ol) + 斜方辉石(Opx)(图 13e, f),这与寄主岩石在高压麻粒岩相变质演化阶段的矿物组合十分吻合。

7.2 含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02)

含尖晶橄榄方辉岩中锆石亦为紫红色,大部分具有浑圆状的晶形,颗粒大小不一,集中变化于 35 ~ 100 μm 之间。根据锆石阴极发光图像、晶体形态和矿物包体,可将锆石划分为两种类型:第一类锆石具有继承性核和相对弱发光(灰色-灰黑色)的边,有的继承性核部发育清晰的岩浆结晶环带,具有灰色-灰黑色的弱发光效应,有的核部由于受到后期热事件的改造,岩浆环带已模糊不清,具有白色的强发光效应,

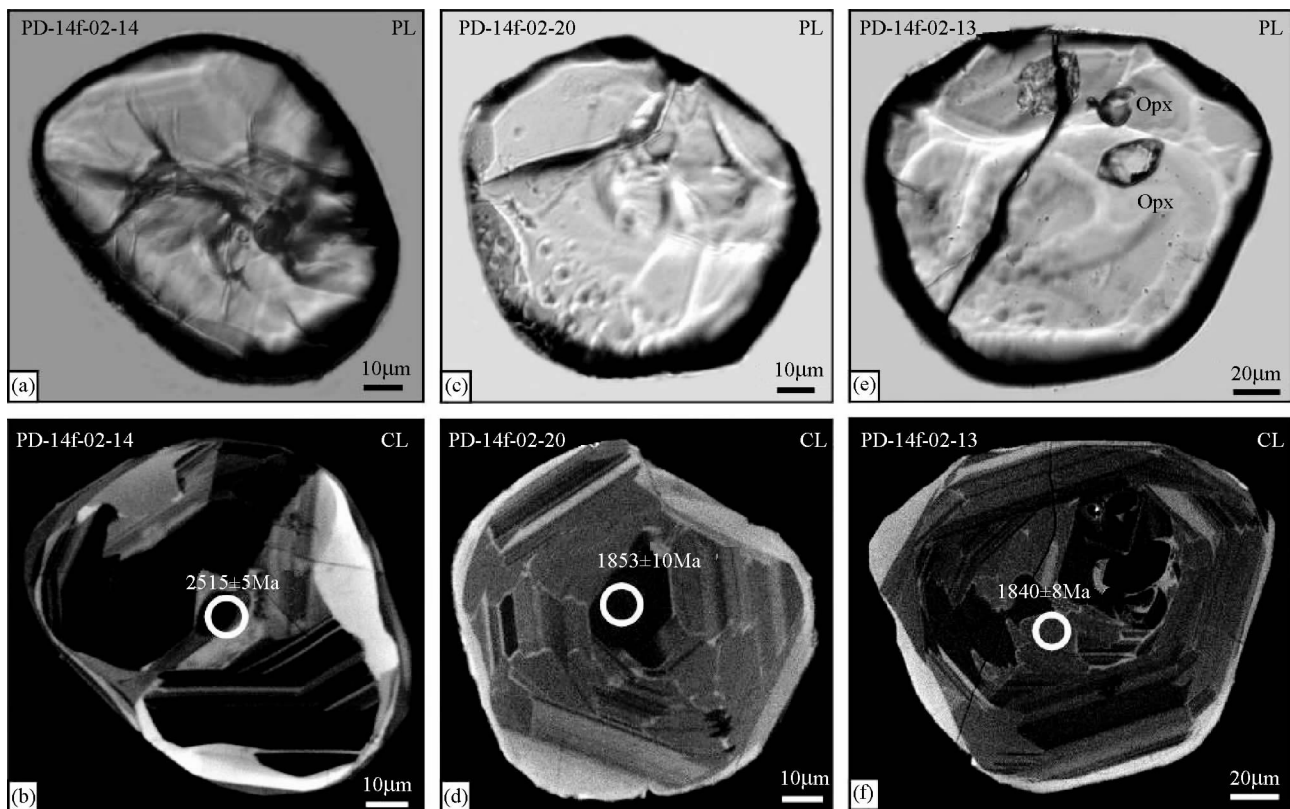


图 14 含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02) 锆石中矿物包体、阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

(a)-样品 PD-14f-02 中第 14 粒锆石晶体继承性岩浆核部和边部未保存的矿物包体;(b)-图 14a 中锆石阴极发光图像,具有较弱发光继承性核和强发光变质增生边,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄;(c)-样品 PD-14f-02 中第 20 粒锆石晶体未保存矿物包体;(d)-图 14c 中变质锆石阴极发光图像,具有较强发光效应,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄;(e)-样品 PD-14f-02 中第 13 粒锆石晶体保存矿物包体 Opx;(f)-图 14e 中变质锆石阴极发光图像,具有中等的发光效应,以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄

Fig. 14 Plane-polarized light (PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence (CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from Spl-bearing Ol-orthopyroxenite (PD-14f-02)

(a)-zircon PD-14f-02-14 with no-mineral inclusions from inherited magmatic core until rim; (b)-CL image of the same zircon as in Fig. 14a showing low-luminescent core and high-luminescent metamorphic rim, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (c)-zircon PD-14f-02-20 with no-mineral inclusions; (d)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 14c showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (e)-zircon PD-14f-02-13 contains Opx; (f)-CL image of the same zircon as in Fig. 14e showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age

灰色-灰黑色边部宽窄十分不均匀,有的只有几微米,有的则可达几十微米以上,发光性比较均匀,为变质增生边。该类锆石核部未保存矿物包体,边部保存的矿物包体甚少,主要为斜方辉石 (Opx) + 磷灰石 (Ap) ± 石英 (Qtz) (表 7)。上述特征表明该类锆石边部为寄主岩石在变质过程中形成的重结晶锆石;第二类锆石具有相对较强-中等的发光效应,阴极发光图像为灰色-灰白色,该类锆石大部分具有比较均匀发光效应,有的锆石内部发育冷杉状分带结构和扇形分带结构 (Vavra *et al.*, 1996),指示该类锆石是在麻粒岩相变质条件下形成的 (图 14d, f)。该类锆石大部分晶体具有浑圆状晶形,矿物包体相对较多 (表 7、图 14e),激光拉曼分析显示主要为斜方辉石 (Opx) + 磁铁矿 (Mag) + 石英 (Qtz), 含少量的磷灰石 (Ap) + CO_2 (流体)。

7.3 含尖晶橄榄角闪二辉岩 (PD-15b-02)

含尖晶橄榄角闪二辉岩 (PD-15b-2) 中锆石为紫红色,大部分具有浑圆状和不规则状晶形,颗粒大小不一,集中于 40 ~ 100 μm 之间。该样品中锆石成因相对简单,具有较强的发光效应,大部分锆石虽未保存矿物包体 (图 15a, c, d),但其内部普遍发育冷杉状分带结构和扇形分带结构 (图 15b, d, f),指示该类锆石在麻粒岩相变质条件下形成 (Vavra *et al.*, 1996)。

8 锆石的 U-Pb 定年结果

采用 SIMS U-Pb 定年技术,对 3 件超镁铁质岩 (PD-17a-

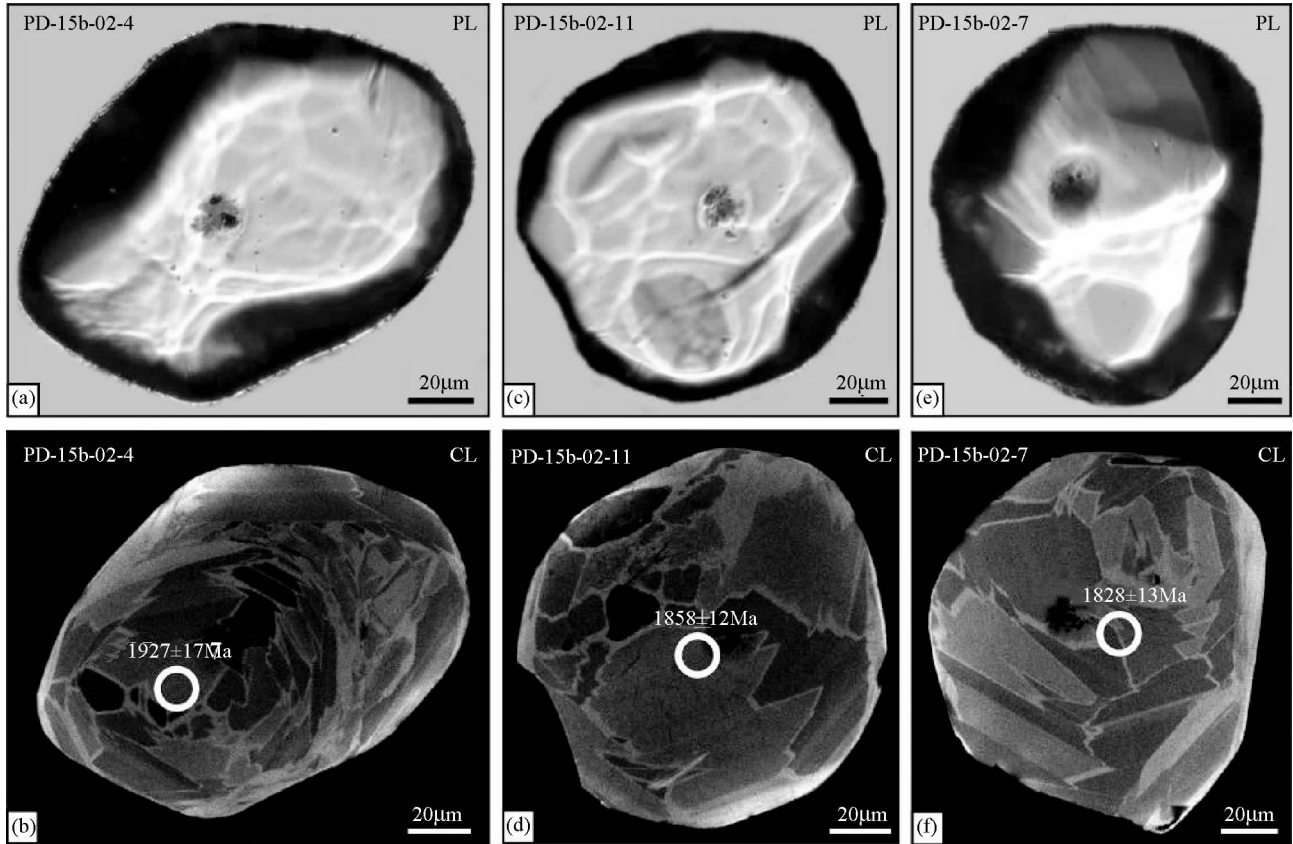


图 15 含尖晶橄榄角闪二辉岩 (PD-15b-02) 锆石中矿物包体、阴极发光图像及 SIMS U-Pb 定年结果

(a)-样品 PD-15b-02 中第 4 粒锆石晶体未保存的矿物包体;(b)-图 15a 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;(c)-样品 PD-15b-02 中第 11 粒锆石晶体未保存矿物包体;(d)-图 15c 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;(e)-样品 PD-15b-02 中第 7 粒锆石晶体未保存矿物包体;(f)-图 15e 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

Fig. 15 Plane-polarized light (PL) images of mineral inclusions, cathodoluminescence (CL) images and SIMS U-Pb ages of host zircons from Spl-bearing Ol-Amp-websterite

(a)-zircon PD-15b-02-4 with no-mineral inclusions; (b)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 15a showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (c)-zircon PD-15b-02-11 with no-mineral inclusions; (d)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 15c showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (e)-zircon PD-15b-02-7 with no-mineral inclusions; (f)-CL image of the same metamorphic zircon as in Fig. 15e showing a high-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age

03、PD-14f-02 和 PD-15b-02)、进行了不同性质锆石微区 SIMS U-Pb 定年测试,其结果列入表 8、表 9 和表 10 中。

8.1 含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03)

从样品 PD-17a-03 的 30 个不同性质锆石微区进行的 U-Pb 年龄结果 (表 8) 来看,含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03) 中锆石记录的年龄可划分为 2 组 (表 8、图 16),第一组 5 个继承性核部记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2083 \pm 12 \sim 2314 \pm 11\text{Ma}$ 之间,分散性强,相应的 Th/U 比值变化于 0.12 ~ 0.55 之间,这组锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄普遍比 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏老,而且,相应地锆石微区具有强发光效应 (白色),这可能与该类锆石受到后期热事件影响,发生不完全重结晶和 Pb 丢失有关,因此,这组年龄不具有实际的地质意义。第二组 25 个变质锆石记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄十分相

似,集中变化于 $1854 \pm 6 \sim 1888 \pm 8\text{Ma}$ 之间,加权平均年龄为 $1867 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD = 1.40, n = 20, 除点 1、3、6、11、14 外) (图 16),相应的 Th/U 比值较小,变化于 0.04 ~ 0.11 之间。该类变质锆石微区保存的矿物包体主要为:橄榄石 (Ol) + 斜方辉石 (Opx),与超镁铁质岩石峰期高压麻粒岩相变质阶段矿物组合一致。此外,该类性质锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 变质年龄与研究区基性高压麻粒岩锆石记录的峰期高压变质时代 (1850 ~ 1900Ma) 完全吻合。上述定年结果进一步证明研究区超镁铁质岩石同样也经历了古元古代晚期 ($1867 \pm 3\text{Ma}$) 高压麻粒岩相变质作用。

8.2 含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02)

含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02) 不同性质锆石微区记录了年龄信息相对复杂,并可进一步划分为 3 组 (表 9、图 17)。

表 8 含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03) 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 8 Results of U-Pb SIMS analyses of zircons from Spl-bearing Ol-Opx-serpentinite (PD-17a-03)

测点号	矿物包体	元素含量 ($\times 10^{-6}$)					$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$	$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{235\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$	$\pm (\%)$	年龄 (Ma)						
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$							$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{235\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$
第一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $2083 \pm 12 \sim 2314 \pm 11\text{Ma}$																			
PD-17a-03.13	无	60	7	30	0.12	0.14719	0.62	8.621	1.6	0.4248	1.5	2314 ± 11	2282 ± 29						
PD-17a-03.29	无	57	31	29	0.55	0.14059	0.96	7.628	1.8	0.3935	1.5	2234 ± 16	2139 ± 28						
PD-17a-03.12	无	102	38	50	0.37	0.14025	0.56	7.461	1.6	0.3858	1.5	2230 ± 10	2103 ± 27						
PD-17a-03.17	无	74	26	35	0.35	0.13972	0.96	7.218	1.8	0.3747	1.5	2224 ± 16	2051 ± 27						
PD-17a-03.21	无	118	15	51	0.12	0.12890	0.67	6.625	1.7	0.3728	1.6	2083 ± 12	2042 ± 28						
第二组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $1867 \pm 3\text{Ma}$ ($n=20$, 除点1、3、6、11、14 外)																			
PD-17a-03.6	无	162	11	58	0.07	0.11892	0.71	5.204	1.7	0.3174	1.5	1940 ± 13	1777 ± 23						
PD-17a-03.11	无	332	25	126	0.07	0.11665	0.36	5.369	1.6	0.3338	1.5	1905 ± 7	1857 ± 25						
PD-17a-03.1	无	339	26	133	0.08	0.11658	0.45	5.519	1.6	0.3433	1.5	1904 ± 8	1903 ± 25						
PD-17a-03.9	未知矿物	399	34	151	0.08	0.11551	0.44	5.281	1.6	0.3316	1.5	1888 ± 8	1846 ± 24						
PD-17a-03.4	无	376	15	139	0.04	0.11485	0.41	5.181	1.6	0.3272	1.5	1878 ± 7	1825 ± 24						
PD-17a-03.18	无	475	36	179	0.08	0.11467	0.41	5.241	1.6	0.3315	1.5	1875 ± 7	1846 ± 24						
PD-17a-03.25	无	487	49	186	0.10	0.11461	0.33	5.267	1.5	0.3333	1.5	1874 ± 6	1854 ± 24						
PD-17a-03.20	无	401	35	153	0.09	0.11457	0.37	5.288	1.5	0.3347	1.5	1873 ± 7	1861 ± 24						
PD-17a-03.2	Ol	417	35	159	0.08	0.11449	0.34	5.268	1.5	0.3337	1.5	1872 ± 6	1856 ± 24						
PD-17a-03.7	无	576	47	219	0.08	0.11445	0.28	5.277	1.5	0.3344	1.5	1871 ± 5	1860 ± 24						
PD-17a-03.23	无	449	37	172	0.08	0.11439	0.42	5.303	1.6	0.3362	1.5	1870 ± 8	1868 ± 24						
PD-17a-03.30	无	465	29	176	0.06	0.11437	0.51	5.275	1.6	0.3345	1.5	1870 ± 9	1860 ± 24						
PD-17a-03.8	无	383	40	147	0.10	0.11431	0.52	5.258	1.6	0.3336	1.5	1869 ± 9	1856 ± 24						
PD-17a-03.27	无	442	38	170	0.09	0.11409	0.64	5.319	1.6	0.3381	1.5	1866 ± 11	1878 ± 25						
PD-17a-03.16	无	428	21	159	0.05	0.11403	0.34	5.187	1.5	0.3299	1.5	1865 ± 6	1838 ± 24						
PD-17a-03.26	无	356	27	135	0.08	0.11400	0.42	5.244	1.6	0.3336	1.5	1864 ± 8	1856 ± 24						
PD-17a-03.5	无	420	34	157	0.08	0.11395	0.33	5.163	1.5	0.3286	1.5	1863 ± 6	1832 ± 24						
PD-17a-03.24	无	533	57	208	0.11	0.11378	0.33	5.344	1.6	0.3406	1.5	1861 ± 6	1890 ± 25						
PD-17a-03.28	无	463	34	176	0.07	0.11375	0.45	5.262	1.6	0.3355	1.5	1860 ± 8	1865 ± 24						
PD-17a-03.15	无	483	44	181	0.09	0.11370	0.30	5.137	1.5	0.3277	1.5	1859 ± 5	1827 ± 24						
PD-17a-03.19	无	421	36	159	0.08	0.11340	0.39	5.205	1.6	0.3329	1.5	1855 ± 7	1852 ± 24						
PD-17a-03.22	无	475	37	177	0.08	0.11340	0.58	5.118	1.7	0.3274	1.6	1855 ± 11	1826 ± 26						
PD-17a-03.10	无	462	42	173	0.09	0.11333	0.35	5.133	1.6	0.3285	1.5	1854 ± 6	1831 ± 25						
PD-17a-03.3	无	52	10	20	0.20	0.11330	2.7	5.213	3.2	0.3337	1.6	1853 ± 49	1856 ± 26						
PD-17a-03.14	无	49	4	18	0.08	0.11306	2.1	5.300	3.0	0.3400	2.1	1849 ± 38	1887 ± 35						

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 9 含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02) 锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 9 Results of U-Pb SIMS analyses of zircons from Spl-bearing Ol-orthopyroxenite (PD-14f-02)

测点号	矿物包体	元素含量 ($\times 10^{-6}$)					$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$	$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{235\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$	$\pm (\%)$	年龄 (Ma)						
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$							$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{235\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{207\text{Pb}^*}{206\text{Pb}^*}$	$\frac{206\text{Pb}^*}{238\text{U}}$
第一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $2160 \pm 7 \sim 2515 \pm 5\text{Ma}$																			
PD-14f-02.14	Opx (边部)	278	43	160	0.15	0.1658	0.28	10.90	1.5	0.4769	1.5	2515 ± 5	2514 ± 31						
PD-14f-02.9	无	289	12	141	0.04	0.1473	0.41	8.527	1.6	0.4199	1.5	2315 ± 7	2260 ± 29						
PD-14f-02.21	Qtz + Ap (边部)	63	25	30	0.40	0.1448	1.31	7.571	2.0	0.3793	1.5	2285 ± 22	2073 ± 27						
PD-14f-02.17	Qtz (边部)	528	107	252	0.20	0.1401	0.41	7.667	1.6	0.3970	1.5	2228 ± 7	2155 ± 28						
PD-14f-02.24	无	428	43	190	0.10	0.1347	0.43	7.073	1.6	0.3810	1.5	2160 ± 7	2081 ± 27						
第二组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: $1877 \pm 17\text{Ma}$ ($n=10$, MSWD = 5.30)																			
PD-14f-02.12	CO ₂	208	5	80	0.03	0.1172	0.46	5.508	1.6	0.3407	1.5	1914 ± 8	1890 ± 25						
PD-14f-02.32	无	310	8	117	0.03	0.1166	0.59	5.400	1.6	0.3358	1.5	1905 ± 11	1866 ± 24						
PD-14f-02.19	无	301	6	114	0.02	0.1153	0.61	5.393	1.6	0.3392	1.5	1884 ± 11	1883 ± 25						
PD-14f-02.27	无	317	10	120	0.03	0.1152	0.51	5.356	1.6	0.3372	1.5	1883 ± 9	1873 ± 24						
PD-14f-02.35	无	361	17	136	0.05	0.1140	0.58	5.248	1.6	0.3339	1.5	1864 ± 10	1857 ± 24						
PD-14f-02.31	未知矿物	239	13	89	0.05	0.1137	0.71	5.200	1.7	0.3316	1.5	1860 ± 13	1846 ± 25						
PD-14f-02.33	无	343	10	130	0.03	0.1136	0.60	5.282	1.6	0.3373	1.5	1857 ± 11	1874 ± 25						

续表 9

Continued Table 9

测点号	矿物包体	元素含量 ($\times 10^{-6}$)						年龄 (Ma)						
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	
PD-14f-02. 26	无	299	7	111	0.02	0.1134	0.59	5.181	1.6	0.3313	1.5	1855 \pm 11	1845 \pm 24	
PD-14f-02. 20	无	209	38	81	0.18	0.1133	0.57	5.193	1.6	0.3325	1.5	1853 \pm 10	1851 \pm 24	
PD-14f-02. 30	无	201	30	76	0.15	0.1132	0.89	5.113	1.7	0.3276	1.5	1851 \pm 16	1827 \pm 24	
第三组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: 1832 \pm 4Ma (n = 21, MSWD = 0.88)														
PD-14f-02. 1	Opx	76	8	29	0.10	0.1130	0.52	5.092	1.6	0.3269	1.5	1848 \pm 9	1823 \pm 24	
PD-14f-02. 11	无	94	11	35	0.11	0.1128	0.82	5.069	1.7	0.3258	1.5	1845 \pm 15	1818 \pm 24	
PD-14f-02. 13	Opx	146	13	53	0.09	0.1125	0.43	5.003	1.6	0.3226	1.5	1840 \pm 8	1803 \pm 24	
PD-14f-02. 3	无	83	9	32	0.11	0.1124	0.49	5.157	1.6	0.3327	1.5	1839 \pm 9	1851 \pm 24	
PD-14f-02. 7	无	111	17	42	0.16	0.1123	0.43	5.049	1.6	0.3259	1.5	1838 \pm 8	1819 \pm 24	
PD-14f-02. 8	无	133	22	51	0.16	0.1123	0.40	5.078	1.6	0.3280	1.5	1837 \pm 7	1829 \pm 24	
PD-14f-02. 2	Mag + Opx	92	11	34	0.12	0.1122	0.47	5.051	1.6	0.3264	1.5	1836 \pm 8	1821 \pm 24	
PD-14f-02. 34	无	147	17	55	0.11	0.1122	0.92	5.029	1.8	0.3252	1.5	1835 \pm 16	1815 \pm 24	
PD-14f-02. 36	无	203	23	74	0.11	0.1122	0.97	4.964	1.8	0.3210	1.5	1835 \pm 17	1795 \pm 24	
PD-14f-02. 16	无	241	47	93	0.20	0.1122	0.58	5.088	1.6	0.3290	1.5	1835 \pm 10	1834 \pm 24	
PD-14f-02. 28	无	202	13	75	0.07	0.1121	0.69	5.101	1.7	0.3300	1.5	1834 \pm 12	1838 \pm 24	
PD-14f-02. 4	无	78	9	29	0.11	0.1121	0.51	5.118	1.6	0.3312	1.5	1833 \pm 9	1844 \pm 24	
PD-14f-02. 6	无	103	12	38	0.12	0.1120	0.45	5.007	1.6	0.3241	1.5	1833 \pm 8	1810 \pm 24	
PD-14f-02. 18	无	224	37	87	0.17	0.1118	0.56	5.132	1.6	0.3331	1.5	1828 \pm 10	1853 \pm 24	
PD-14f-02. 29	Opx + Qtz	183	23	68	0.13	0.1117	1.0	5.000	1.8	0.3246	1.5	1828 \pm 18	1812 \pm 24	
PD-14f-02. 5	无	68	7	25	0.10	0.1114	0.55	4.963	1.6	0.3231	1.5	1823 \pm 10	1805 \pm 24	
PD-14f-02. 10	无	106	12	40	0.11	0.1113	0.46	5.055	1.6	0.3294	1.5	1821 \pm 8	1835 \pm 24	
PD-14f-02. 23	无	157	19	60	0.12	0.1111	0.74	5.069	1.7	0.3308	1.5	1818 \pm 13	1842 \pm 24	
PD-14f-02. 25	无	120	12	44	0.10	0.1109	0.85	4.937	1.7	0.3229	1.5	1814 \pm 15	1804 \pm 24	
PD-14f-02. 22	无	132	14	50	0.11	0.1108	0.99	5.045	1.8	0.3302	1.5	1813 \pm 18	1839 \pm 24	
PD-14f-02. 15	Qtz	126	10	47	0.08	0.1106	0.60	5.029	1.6	0.3298	1.5	1809 \pm 11	1837 \pm 24	

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 10 含尖晶橄榄角闪二辉岩 (PD-15b-02) 锆石的 SIMS U-Pb 定年结果

Table 10 Results of U-Pb SIMS analyses of zircons from Spl-bearing Ol-Amp-websterite (PD-15b-02)

测点号	矿物包体	元素含量 ($\times 10^{-6}$)						年龄 (Ma)						
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm (\%)$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	
第二组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: 2257 \pm 12Ma														
PD-15b-02. 12	无	72	22	36	0.30	0.1424	0.68	8.102	1.6	0.4126	1.5	2257 \pm 12	2227 \pm 28	
第一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: 1858 \pm 15Ma (n = 9, 除点 3、4、9、14 外)														
PD-15b-02. 14	无	180	54	61	0.30	0.1186	0.85	4.664	2.6	0.2851	2.4	1936 \pm 15	1617 \pm 35	
PD-15b-02. 4	无	149	51	61	0.34	0.1180	0.93	5.490	1.8	0.3373	1.5	1927 \pm 17	1874 \pm 25	
PD-15b-02. 9	无	158	59	65	0.37	0.1158	0.69	5.398	1.7	0.3380	1.5	1893 \pm 12	1877 \pm 25	
PD-15b-02. 10	无	104	25	41	0.24	0.1152	1.1	5.267	1.9	0.3316	1.5	1883 \pm 20	1846 \pm 24	
PD-15b-02. 8	无	166	69	69	0.41	0.1145	0.77	5.327	1.7	0.3375	1.5	1872 \pm 14	1875 \pm 25	
PD-15b-02. 11	无	115	26	45	0.23	0.1136	0.66	5.228	1.6	0.3336	1.5	1858 \pm 12	1856 \pm 24	
PD-15b-02. 3	无	166	60	65	0.36	0.1136	0.67	5.041	1.6	0.3219	1.5	1857 \pm 12	1799 \pm 24	
PD-15b-02. 13	无	129	32	50	0.25	0.1134	0.73	5.109	1.7	0.3268	1.5	1855 \pm 13	1823 \pm 24	
PD-15b-02. 15	无	108	28	42	0.26	0.1134	0.88	5.098	1.7	0.3262	1.5	1854 \pm 16	1820 \pm 24	
PD-15b-02. 6	无	120	28	46	0.23	0.1133	0.78	5.094	1.7	0.3260	1.5	1854 \pm 14	1819 \pm 24	
PD-15b-02. 2	未知矿物	123	33	49	0.27	0.1132	0.65	5.212	1.6	0.3338	1.5	1852 \pm 12	1857 \pm 24	
PD-15b-02. 5	无	95	21	36	0.23	0.1131	0.74	5.087	1.7	0.3263	1.5	1849 \pm 13	1820 \pm 24	
第三组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄: 1828 \pm 13 ~ 1840 \pm 13Ma (n = 2)														
PD-15b-02. 1	无	134	35	53	0.26	0.1125	0.72	5.146	1.7	0.3318	1.5	1840 \pm 13	1847 \pm 24	
PD-15b-02. 7	无	105	25	41	0.24	0.1117	0.71	5.112	1.7	0.3318	1.5	1828 \pm 13	1847 \pm 24	

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

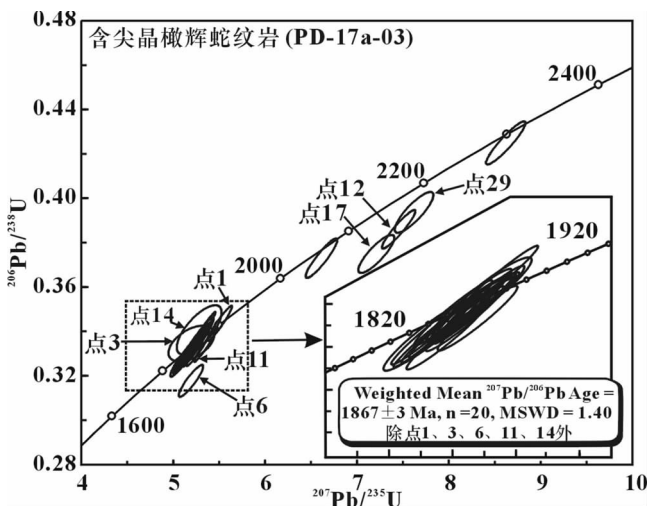


图 16 含尖晶橄榄方辉蛇纹岩 (PD-17a-03) 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解

Fig. 16 Zircon U-Pb concordia diagram ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of Spl-bearing Ol-Opx-serpentinite (PD-17a-03)

其中,第一组 5 个继承性核部锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2160 \pm 7 \sim 2515 \pm 5\text{Ma}$ 之间,相应的 Th/U 比值变化于 0.04 ~ 0.40 之间,这组锆石微区记录的大部分 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄普遍比 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏老,大部分分析点都位于谐和线的下方,仅个别点 (PD-14f-02. 14) 位于谐和线上,而且,该类锆石具有强发光效应 (白色),内部结构模糊不清,表明该类锆石继承性核部受到了后期热事件影响发生了不完全重结晶和 Pb 丢失,因此,这组年龄不具有实际的地质意义;第二组 10 个变质锆石记录的十分相似的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,集中变化于 $1851 \pm 16 \sim 1914 \pm 8\text{Ma}$ 之间,加权平均年龄为 $1877 \pm 17\text{Ma}$ (MSWD = 5.30, n = 10) (图 17),相应的 Th/U 比值相对偏小,变化于 0.02 ~ 0.18 之间。这组年龄与样品 PD-17a-03 锆石记录的高压麻粒岩相变质年龄 ($1854 \pm 6 \sim 1888 \pm 8\text{Ma}$; 加权平均年龄为 $1867 \pm 3\text{Ma}$) 十分一致,应代表超镁铁质岩是高压麻粒岩相变质时代;第三组 21 个变质锆石微区的 Th/U 比值变化于 0.07 ~ 0.17 之间,且记录了一组最年轻的年龄信息, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $1809 \pm 11 \sim 1848 \pm 9\text{Ma}$ 之间,多数集中变化于 $1821 \pm 8 \sim 1840 \pm 8\text{Ma}$ 之间,加权平均年龄为 $1832 \pm 4\text{Ma}$ (MSWD = 0.88, n = 21) (图 17),这组年龄与研究区高压麻粒岩峰后近等温减压阶段 (中低压) 麻粒岩相的退变质时代十分一致 (刘平华等, 2011),应代表超镁铁质岩石峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质时代。

8.3 含尖晶橄榄角闪二辉石岩 (PD-15b-02)

含尖晶橄榄角闪二辉石岩 (PD-15b-02) 不同性质锆石微区记录了年龄可划分为 3 组 (表 10、图 18)。第一组 1 个继承性核部锆石微区记录的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2257 \pm 12\text{Ma}$,

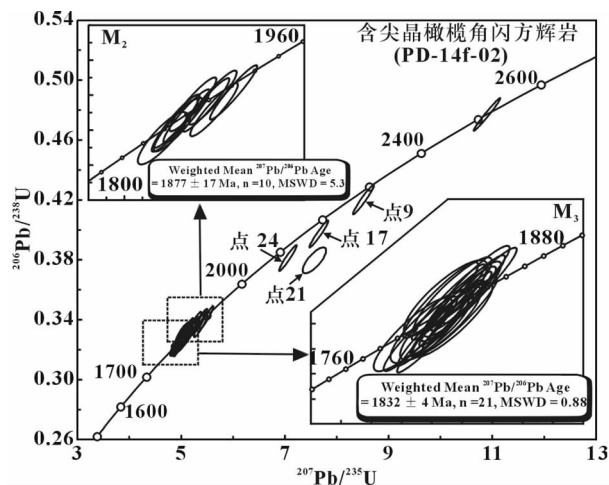


图 17 含尖晶橄榄方辉岩 (PD-14f-02) 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解

Fig. 17 Zircon U-Pb concordia diagram ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of Spl-bearing Ol-orthopyroxenite (PD-14f-02)

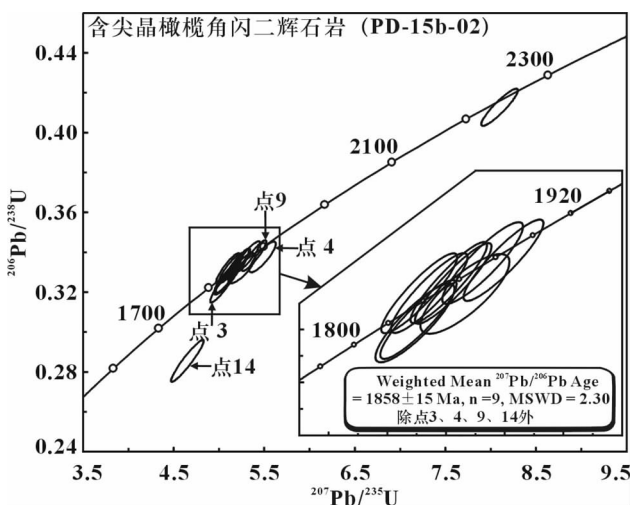


图 18 含尖晶橄榄角闪二辉石岩 (PD-15b-02) 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解

Fig. 18 Zircon U-Pb concordia diagram ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of Spl-bearing Ol-Amp-websterite (PD-15b-02)

相应的 Th/U 比值为 0.30;第二组 13 个变质锆石记录的十分相似的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,除点 3、4、9、14 外,集中变化于 $1849 \pm 13 \sim 1883 \pm 20\text{Ma}$ 之间,加权平均年龄为 $1858 \pm 15\text{Ma}$ (MSWD = 2.30, n = 9),相应的 Th/U 比值变化于 0.23 ~ 0.41 之间,这组年龄与样品 PD-17a-03 和 PD-14f-02 同类性质锆石记录的高压麻粒岩相变质年龄十分相似,应代表寄主岩石经历高压麻粒岩相变质作用的时间;第三组 2 个变质锆石微区记录了一组最年轻的年龄信息, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $1840 \pm 13\text{Ma}$ 和 $1820 \pm 13\text{Ma}$,表明寄主岩石在峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段仍然有少量变质锆石的形成。

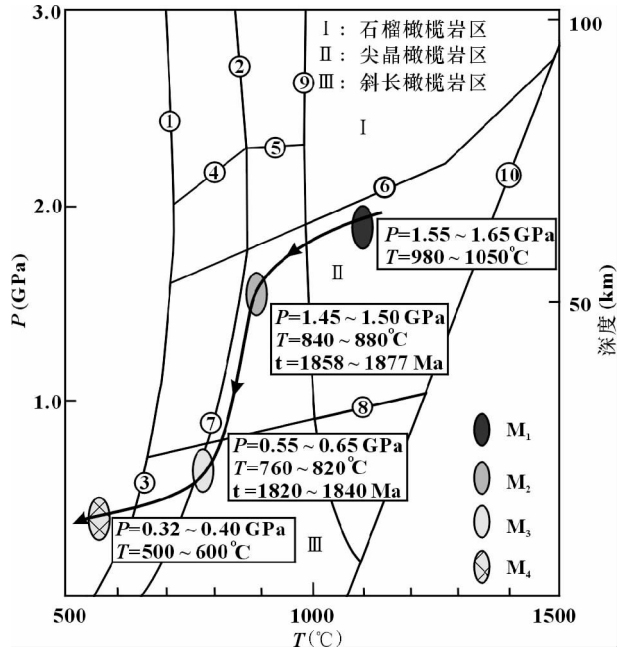


图 19 山东半岛超镁铁质岩演化 P - T - t 轨迹

相图与干的和湿的橄榄岩固相线的实验数据引自 Schmidt and Poli (1998) 和 Green and Ringwood (1970), 1-橄榄石 + 斜方辉石 + H_2O = 蛇纹石; 2-石榴石 + 橄榄石 + H_2O = 绿泥石 + 斜方辉石; 3-斜方辉石 + H_2O = 滑石 + 橄榄石; 4-绿泥石 + 单斜辉石 + 斜方辉石 = 角闪石 + H_2O ; 5-石榴石 + 单斜辉石 + 斜方辉石 + H_2O = 角闪石 + 橄榄石; 6-橄榄石 + 石榴石 = 斜方辉石 + 尖晶石; 7-斜方辉石 + 橄榄石 + 尖晶石 + H_2O = 绿泥石; 8-单斜辉石 + 斜方辉石 + 尖晶石 = 橄榄石 + 斜长石; 9-(湿的) 橄榄岩固相线; 10-(干的) 橄榄岩固相线

Fig. 19 The P - T - t path of the ultramafic rocks in Shandong Peninsula

Phase fields and experimental data relating hydrated peridotite and dry peridotite are from Schmidt and Poli (1998) and Green and Ringwood (1970), respectively. Reaction 1. orthopyroxene + olivine + H_2O = serpentine; reaction 2. garnet + olivine + H_2O = chlorite + orthopyroxene; reaction 3. orthopyroxene + H_2O = talc + olivine; reaction 4. chlorite + orthopyroxene + clinopyroxene = amphibole + H_2O ; reaction 5. garnet + clinopyroxene + orthopyroxene + H_2O = amphibole + olivine; reaction 6. olivine + garnet = orthopyroxene + spinel; reaction 7. orthopyroxene + olivine + spinel + H_2O = chlorite; reaction 8. clinopyroxene + orthopyroxene + spinel = olivine + plagioclase; 9-Hydrate peridotite solidus; 10-Dry peridotite solidus

9 山东半岛超镁铁质岩石变质演化 P - T - t 轨迹

根据岩相学、矿物演化序列、温压估算结果和锆石 U-Pb 定年结果的系统研究表明,山东半岛超镁铁质岩演化的 P - T -

t 轨迹具有顺时针型式(图 19)。从图 19 中可以明显看出,山东半岛超镁铁质岩中残留的早期 (M_1) 岩浆结晶矿物记录的温压条件为 $T = 980 \sim 1050^\circ\text{C}$ 、 $P = 1.55 \sim 1.65\text{GPa}$,表明未变质的超镁铁质岩起源于约 60km 的加厚地壳与上地幔之间过渡带的深度;在山东半岛古元古代造山带演化过程中,超镁铁质岩不断被抬升,并经历了高压麻粒岩相变质作用的改造,形成的稳定矿物组合为橄榄石(富 Fe) + 斜方辉石(富 Fe) + 尖晶石(富 Fe),记录的温压条件为 $T = 840 \sim 880^\circ\text{C}$ 、 $P = 1.40 \sim 1.50\text{GPa}$,表明超镁铁质岩已经抬升至约 50km 的加厚地壳深度,与区内基性高压麻粒岩的原岩一起卷入到同一构造带之中,并经历高压麻粒岩相变质作用 (M_2),此阶段形成的变质锆石记录的高压变质时代为 1858 ~ 1877Ma。自 M_1 到 M_2 阶段,压力略有下降,而温度却显著降低,表明超镁铁质岩经历了一个缓慢抬升的动力学演化过程;接着,高压变质的超镁铁质岩开始折返、抬升,直到 15 ~ 20km 的地壳深度,并经历了峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质作用 (M_3) 的叠加,相应的温压条件为 $T = 760 \sim 820^\circ\text{C}$ 、 $P = 0.55 \sim 0.65\text{GPa}$,此阶段形成的变质锆石记录的退变质时代为 1820 ~ 1840Ma。自 M_2 到 M_3 阶段,温度略有降低,而压力却显著下降,表明高压麻粒岩相变质超镁铁质岩石经历了一个快速抬升的动力学演化过程;最后,已经历退变质改造的超镁铁质岩继续抬升至地壳浅部,并经历了低角闪岩相-绿片岩相退变质作用 (M_4) 的再次改造,相应的退变质温压条件为 $T = 500 \sim 600^\circ\text{C}$ 、 $P = 0.32 \sim 0.40\text{GPa}$,至此,超镁铁质岩石的变质演化趋于结束。

10 结论

山东半岛早前寒武纪高级变质基底中的超镁铁质岩以透镜状产于 TTG 片麻岩中,在平度-莱西-莱阳-烟台一带沿 NE 向呈断续带状分布,且与基性高压麻粒岩密切“伴生”。

超镁铁质岩经历了四个阶段的演化,分别为早期残留的岩浆结晶阶段 (M_1),标志性的矿物组合以橄榄石(富 Mg) + 斜方辉石(富 Mg) + 尖晶石(富 Mg) 为特征;峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2),其典型的矿物组合以橄榄石(富 Fe) + 斜方辉石(富 Fe) + 尖晶石(富 Fe) 为其主要特征;峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3),以形成斜方辉石 + 单斜辉石 + 橄榄石 + 角闪石(富 (Na + K)) + 尖晶石 + 磁铁矿(富 Cr) 新的矿物组合为特征;晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M_4),以形成角闪石(贫 (Na + K)) + 磁铁矿(贫 Cr) + 蛇纹石 ± 绿泥石 ± 金云母的矿物组合为特征。

超镁铁质岩石记录的早期残留的岩浆结晶阶段 (M_1) 的温压条件为 $T = 980 \sim 1050^\circ\text{C}$ 、 $P = 1.55 \sim 1.65\text{GPa}$;峰期高压麻粒岩相变质阶段 (M_2) 的温压条件为 $T = 840 \sim 880^\circ\text{C}$ 、 $P = 1.40 \sim 1.55\text{GPa}$,高压变质时代为 1858 ~ 1877Ma;峰后中低压角闪-麻粒岩相退变质阶段 (M_3) 的温压条件为 $T = 760 \sim 820^\circ\text{C}$ 、 $P = 0.55 \sim 0.65\text{GPa}$,相应的退变质时代为 1820 ~

1840Ma;晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段 (M_4) 的温压条件为 $T = 500 \sim 600^\circ\text{C}$ 、 $P = 0.32 \sim 0.40\text{GPa}$ 。超镁铁质岩的 P - T - t 轨迹具有顺时针型式,与研究区基性高压麻粒岩变质演化 P - T - t 轨迹十分相似,具有典型碰撞造山带的特点。

致谢 矿物成分测试与分析得到了舒桂明老师、王长秋老师和陈方远老师的指导与帮助;温度和压力计算得到了吴春明老师的指导与帮助;锆石矿物包体激光拉曼测试得到阎玲老师的指导;锆石 SIMS U-Pb 定年测试和数据处理过程中得到了刘宇、唐国强、李献华研究员、李秋立博士和杜利林老师的帮助;野外地质调查得到了薛怀民老师和王金光老师的指导和帮助;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,谨以此文向沈先生表达敬意和祝贺,祝先生健康长寿!

References

- Bai WJ, Zhou MF, Hu XF, Cai YC and Zhen XH. 1993. Mafic/Ultramafic Magmatism and Tectonic Evolution of the Northern China Craton. Beijing: Sesimological Press, 71 - 81 (in Chinese)
- Barnes SJ and Roeder PL. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*, 42(12): 2279 - 2232
- Brey GP and Köhler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31(6): 1353 - 1378
- Deer WA, Howie RA and Zussman J. 1997. *Rock-Forming Minerals*. 2nd Edition. Washington D. C.: Geological Society Publishing House, 3 - 4
- Fan QC, Liu RX and Ma BL. 1992. Upper-mantle amphiboles from china and their genetic implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(4): 352 - 358 (in Chinese with English abstract)
- Farahat ES. 2008. Chrome-spinels in serpentinites and talc carbonates of the El Ideid-El Sodmein District, central Eastern Desert, Egypt: Their metamorphism and petrogenetic implications. *Chemie der Erde Geochemistry*, 68(2): 193 - 205
- Gasparik T. 1987. Orthopyroxene thermobarometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(3): 357 - 370
- Green DH and Ringwood AE. 1970. Mineralogy of peridotitic compositions under upper mantle conditions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 3: 359 - 371
- Jahn BM, Liu DY, Wan YS, Song B and Wu JS. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *American Journal of Science*, 308(3): 232 - 269
- Jin SQ. 1991. Composition characteristics of calc-amphiboles in different regional metamorphic facies. *Chinese Science Bulletin*, 36(11): 851 - 854 (in Chinese)
- Karipi S, Tskouras B, Hatzipanagiotou K and Grammatikopoulos TA. 2007. Petrogenetic significance of spinel-group minerals from the ultramafic rocks of the Iti and Kallidromon ophiolites (Central Greece). *Lithos*, 99(1 - 2): 136 - 149
- Li SZ, Hao DF, Han ZZ, Zhao GC and Sun M. 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328 - 340 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10(4): 1 - 21
- Li YG, Zhai MG and Liu WJ. 1997. Sm-Nd geochronology of the high-pressure basic granulite in Laixi, eastern Shandong. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 293 - 290 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FL, Liu PH, Wang F and Ding ZJ. 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943 - 960 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2010. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of mafic high-pressure (HP) granulites from the Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2039 - 2056 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011. Geological significance and in situ U-Pb dating of zircons from high-pressure (HP) granulites in Shandong Peninsula, eastern China. *Earth Science Frontiers*, 18(2), in press (in Chinese with English abstract)
- Liu WJ, Zhai MG and Li YG. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulite in Laixi, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449 - 459 (in Chinese with English abstract)
- Miao LC, Luo ZK, Guan K and Huang JZ. 1998. The implications of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogenesis of the Linglong granite, East Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 198 - 206 (in Chinese with English abstract)
- O'Neill HSC. 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77(2): 185 - 194
- Oh CW, Rajesh VJ, Seo J, Choi SG and Lee JH. 2010. Spinel compositions and tectonic relevance of the Bibong ultramafic bodies in the Hongseong collision belt, South Korea. *Lithos*, 117(1 - 4): 198 - 208
- Schmidt MW. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2): 304 - 310
- Schmidt MW and Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1 - 4): 361 - 379
- Sen C and Dunn T. 1994. Experimental modal metasomatism of a spinel lherzolite and the production of amphibole-bearing peridotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 422 - 432
- Shen QH. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 28(5): 495 - 500 (in Chinese with English abstract)
- Tam PY, Zhao GC, Liu FL, Zhou XW, Sun M and Li SZ. 2011. 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. *Gondwana Research*, 19(1): 150 - 162
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Research*, 152(1 - 2): 48 - 82
- Taylor WR. 1998. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolites and garnet websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 172(2 - 3): 381 - 408
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R and Compston W. 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337 - 358
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and

- Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3-4): 249-271
- Wang F, Liu FL, Liu PH and Liu JH. 2010. Metamorphic evolution of Early Precambrian khondalite series in North Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2057-2072 (in Chinese with English abstract)
- Wang LG, Qiu YM, McNaughton NJ, Groves DI, Luo ZK, Huang JZ, Miao LC and Liu YK. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 275-291
- Wang PC and An JT. 1996. Main achievement and progress of the basic geological research over last ten years in eastern Shandong region. *Shandong Geology*, 12(1): 8-23 (in Chinese with English abstract)
- Wang SJ, Wan YS, Zhang CJ, Yang EX, Song ZY, Wang LF and Wang JG. 2009. Forming ages of Early Precambrian metamorphic strata in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 25(10): 18-24 (in Chinese with English abstract)
- Wu CM. 2009. On the validity of the geobarometers in mantle rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2089-2112 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Menzies MA, Vroon P, Mercier JC and Lin CY. 1998. Texture-temperature-geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. *Journal of Petrology*, 39(3): 469-493
- Yang XZ, Xia QK, Delouie E, Dallai L, Fan QC and Feng M. 2008. Water in minerals of the continental lithospheric mantle and overlying lower crust: A comparative study of peridotite and granulite xenoliths from the North China Craton. *Chemical Geology*, 256(1-2): 33-45
- Zhang M, Suddaby P, O'Reilly SY, Norman M and Qiu JX. 2000. Nature of the lithospheric mantle beneath the eastern part of the Central Asian fold belt: Mantle xenolith evidence. *Tectonophysics*, 328(1-2): 131-156
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yu CM, Zhang HF, Pearson N and Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203-5225
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang XZ and Cheng H. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 160(3-4): 323-340
- Zhou XW, Wei CJ, Dong YS and Lu LZ. 2003. Characteristics and genetic implications of diffusion zoning in garnet from Al-rich series of the Jingshan Group in North Jiaodong. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 752-760 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XW, Wei CJ, Geng YS and Zhang LF. 2004. Discovery and implications of the high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1942-1948
- Zhou XW, Wei CJ and Geng YS. 2007. Phase equilibria $P-T$ path of the high- and low-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 135-143 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XW, Zhao GC, Wei CJ, Geng YS and Sun M. 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. *American Journal of Science*, 308(3): 328-350

附中文参考文献

- 白文吉, 周美付, 胡旭峰, 柴耀楚, 郑新华. 1993. 华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁杂岩及矿化特征. 北京: 地震出版社, 71-81
- 樊祺诚, 刘若新, 马宝林. 1992. 中国上地幔角闪石及其成因意义. *矿物学报*, 12(4): 352-358
- 靳是琴. 1991. 不同区域变质相中钙质角闪石的成分特征. *科学通报*, 36(11): 851-854
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 赵国春, 孙敏. 2003. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程. *地质学报*, 77(3): 328-340
- 李永刚, 翟明国, 刘文军, 郭敬辉. 1997. 胶东莱西地区高压麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学. *地质科学*, 32(3): 283-290
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 王舫, 丁正江. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 27(4): 943-960
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2039-2056
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011. 山东半岛高压麻粒岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义. *地学前缘*, 18(2), 出版中
- 刘文军, 翟明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区基性高压麻粒岩的变质作用. *岩石学报*, 14(4): 449-459
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 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. *岩石学报*, 14(2): 198-206
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495-500
- 王舫, 刘福来, 刘平华, 刘建辉. 2010. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2057-2072
- 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. *山东地质*, 12(1): 8-23
- 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 王金光. 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. *山东国土资源*, 25(10): 18-24
- 吴春明. 2009. 地幔岩矿物压力计评述. *岩石学报*, 25(9): 2089-2112
- 周喜文, 魏春景, 董永胜, 卢良兆. 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. *岩石学报*, 19(4): 752-760
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 张立飞. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 49(14): 1424-1430
- 周喜文, 魏春景, 耿元生. 2007. 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. *地学前缘*, 14(1): 135-143