

隐藏在苏鲁地体斜长角闪岩锆石中 超高压变质作用的信息

刘福来¹⁾ 张泽明¹⁾ 许志琴¹⁾ 杨经绥¹⁾ S. Maruyama²⁾

(1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8551, Japan)

摘 要 运用激光拉曼和阴极发光技术, 配备电子探针测试, 发现苏鲁地体地表露头和中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP1 和 CCSD-PP2 斜长角闪岩锆石中均保存以柯石英为代表的典型超高压矿物组合: 柯石英 + 石榴石 + 绿辉石 + 金红石, 柯石英 + 石榴石 + 绿辉石 + 多硅白云母 + 金红石 + 磷灰石, 柯石英 + 绿辉石 + 金红石, 柯石英 + 菱镁矿。该类矿物包体组合与苏鲁地体超高压榴辉岩的峰期矿物组合十分相似, 表明斜长角闪岩可能是由超高压变质的榴辉岩在构造抬升过程中退变质而成。

关键词 超高压矿物包体 锆石 激光拉曼 斜长角闪岩 苏鲁地体

Ultrahigh Pressure Metamorphic Traces Hidden in Zircons from Amphibolites of Sulu Terrane, Eastern China

LIU Fulai¹⁾ ZHANG Zeming¹⁾ XU Zhiqin¹⁾ YANG Jingsui¹⁾ S. Maruyama²⁾

(1) Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037;

2) Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8551, Japan)

Abstract Using the Laser Raman spectroscopy, cathodoluminescence method and electron microprobe analysis, the authors recognized coesite inclusions together with garnet, omphacite, phengite, magnesite, rutile and apatite inclusions in zircons from all amphibolite samples in pre-pilot drillhole CCSD-PP1 and CCSD-PP2 as well as in outcrops of Sulu terrane. The mineral inclusion assemblage preserved in zircons is similar to that in the matrix of eclogites formed during the UHP metamorphism. These data indicate that amphibolites might have been formed by the retrogression of UHP eclogites in the uplifting of Sulu terrane. The research is of great significance in probing into the genetic mechanism of amphibolites and the fluid-rock interaction during the tectonic uplift of Sulu terrane.

Key words UHP mineral inclusion zircon Laser Raman amphibolite Sulu terrane

苏鲁-大别地体是世界上规模最大的超高压变质带, 在榴辉岩围岩, 尤其是在各种类型正、副片麻岩锆石中, 以柯石英为代表的超高压包体矿物的广泛发现 (Tabata, 1998; Ye, 2000; 刘福来, 2001; Liu, 2001; 刘景波, 2001) 已基本平息了长期以来有关苏鲁-大别地体超高压榴辉岩与围岩片麻岩关系的争论 (Wang, 1992; Zhao, 1992; Cong, 1995; 从柏林, 1999)。然而, 在苏鲁地体, 尤其是在大面积出露的花岗质片麻岩中, 广泛分布规模不一的斜长角闪岩

透镜体或不规则团块。有关该类岩石是否也经历了超高压变质作用、是由何种变质岩退变质而成、其峰期变质矿物组合特征等, 至今仍未进行深入研究。因此, 对该类岩石成因机制的详细研究具有十分重要的科学意义。本文以苏北东海地区地表露头样品和中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP1、CCSD-PP2 岩心样品为对象, 重点研究各种类型斜长角闪岩锆石中矿物包体性质及其分布特征, 识别超高压矿物包体, 寻找超高压变质作用的证据, 结合

本文为国土资源部百名优秀青年科技人才计划和国土资源部科技项目“中国大陆科学钻探工程综合研究”(项目编号: 2002207)的部分成果。

改回日期: 2002-10-24, 责任编辑: 宫月萱。

第一作者: 刘福来, 1963年生, 研究员, 岩石学专业。

阴极发光特征,以确定锆石成因类型,进而阐明斜长角闪岩的成因机制。

1 斜长角闪岩的空间分布及矿物组合

在苏北东海地区,斜长角闪岩主要以透镜状、似脉状或不规则团块状分布于片麻岩类岩石中,在预先导孔CCSD-PP1和CCSD-PP2中,斜长角闪岩则呈“层状”或“夹层”形式赋存于花岗质片麻岩、副片麻岩中,或与榴辉岩直接接触(图1),斜长角闪岩与围岩呈突变接触关系。根据其矿物组合特征,可分为以下几种主要岩石类型:含石英斜长角闪岩、黑云绿帘斜长角闪岩、含钛铁矿榍石黑云绿帘斜长角闪岩和含榍石绿帘斜长角闪岩。相应的矿物组合为: Amp + Pl + Qtz, Ep + Bt + Amp + Pl, Ilm + Ttn + Bt + Ep + Amp + Pl 和 Ttn + Ep + Amp + Pl(图2)。

2 样品的采集及分析测试方法

在东海碱厂(样品号:JC1)、驼峰(样品号:TF1, TF2)、牛山(样品号:NS1, NS2)、毛北(样品号:MB1)、芝麻坊(样品号:ZM1)、房山(样品号:FS1,

FS2)和青龙山(样品号:QL1, QL2)等地共采集11件斜长角闪岩样品,每件样品约5~7 kg;在预先导孔CCSD-PP1(样品号:C120,采样深度:290 m; C125,采样深度:303 m; C162,采样深度:396 m; C182,采样深度:432.08 m)和CCSD-PP2(样品号:P2-14,采样深度:221 m; P2-15,采样深度:230 m; P2-15-1,采样深度:240 m; P2-39,采样深度:694 m; P2-40,采样深度:714 m; P2-50,采样深度:958 m; P2-51,采样深度:971 m; P2-51-1,采样深度:977 m)共采集12件样品,每件样品0.5~2 kg(图1)。首先将每件样品破碎、筛选和清洗后,经磁选和重液分离出锆石样品,在双目镜下挑选直径约30~80 μm形态完整的锆石50~100粒,将每件锆石样品制成符合激光Raman测试要求的标准样品。除部分锆石颗粒阴极发光在中国地质科学院矿床所电子探针室测试外,其余测试工作均在日本东京工业大学地球与行星科学系实验室进行。首先在显微镜下对锆石中矿物包体分布特征进行系统观察,然后采用JASCO NRS-2000型激光Raman谱仪对矿物包体进行详细鉴定,该谱仪存在一个

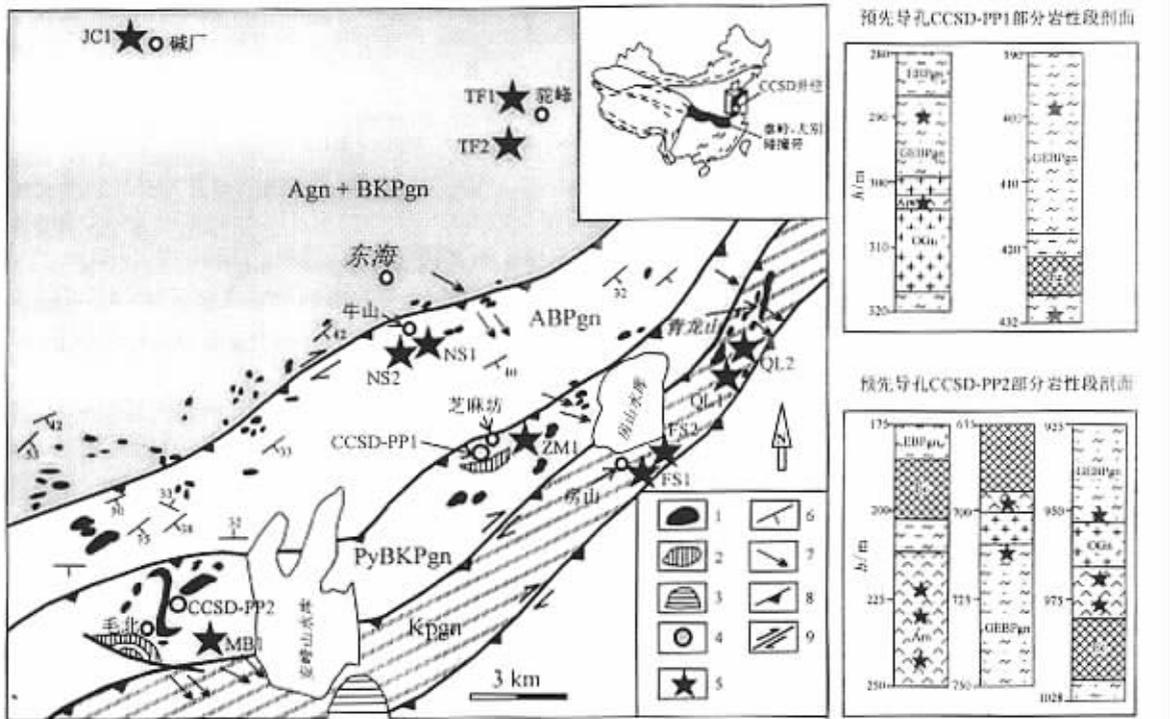


图1 苏北东海地区地质简图及其采样位置

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Donghai area in Sulu terrane and sample location

1-榴辉岩 2-橄辉岩 3-新生代盆地 4-钻孔 5-含柯石英斜长角闪岩 6-面理 7-线理 8-逆冲断层 9-右行走滑; Agn-含霓辉片麻岩;

BKpgn-黑云二长片麻岩; ABPgn-角闪黑云斜长片麻岩; PyBKpgn-含黄铁矿黑云二长片麻岩; kpgn-二长片麻岩; EBPgn-绿帘黑云斜长片麻岩;

GEBPgn-石榴绿帘黑云斜长片麻岩; Am-斜长角闪岩; OGn-花岗质片麻岩; Ec-榴辉岩

1-eclogite 2-peridotite 3-cenozoic basin 4-drillhole 5-coesite-bearing amphibolite 6-foliation 7-lineation 8-thrust 9-dextral strike-slip;

Agn-agirine-bearing gneiss; BKpgn-biotite two-feldspar gneiss; PyBKpgn-pyrite-bearing biotite two-feldspar gneiss; kPgn-two-feldspar gneiss;

EBPgn-epidote biotite plagioclase gneiss; GEBPgn-garnet epidote biotite plagioclase gneiss; Am-amphibolite; OGn-granitic gneiss; Ec-eclogite

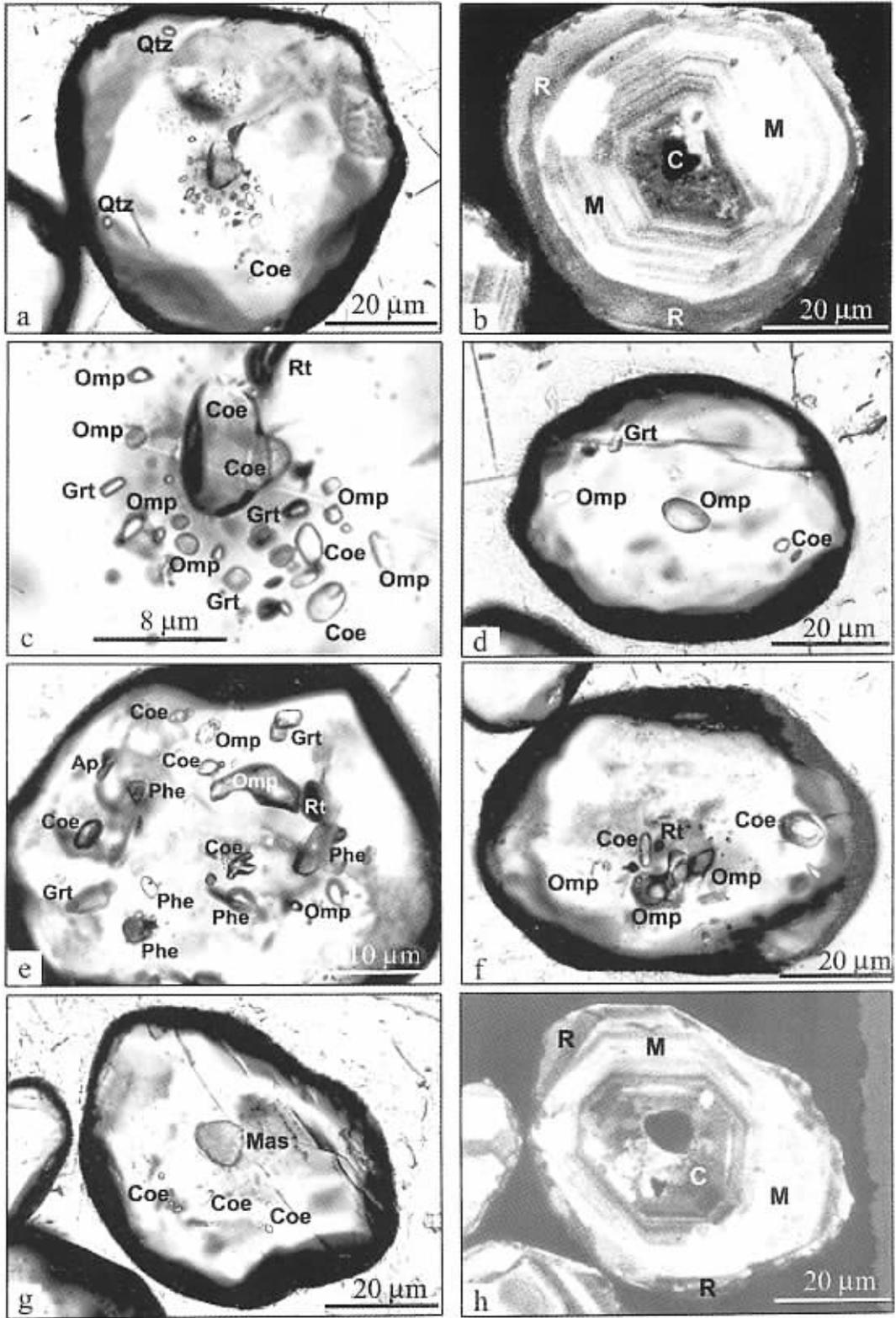


图 2 斜长角闪岩矿物组合及其结构的显微照片

Fig. 2 Photomicrographs (all plane polarized light) of mineral assemblage and texture of amphibolite

a-含石英斜长角闪岩 矿物组合为 Amp + Pl + Qtz(样品号 :P2-14 采样深度 221 m,单偏光); b-黑云绿帘斜长角闪岩 矿物组合为 Ep + Bt + Amp + Pl(样品号 :C120 采样深度 290 m,单偏光); c-含钛铁矿榭石黑云绿帘斜长角闪岩 矿物组合为 Ilm + Ttn + Bt + Ep + Amp + Pl(样品号 :NS1,单偏光); d-榭石绿帘斜长角闪岩 相应的矿物组合为 Ttn + Ep + Amp + Pl(样品号 :P2-50,采样深度 :958 m,单偏光); Amp-角闪石 ;Pl-斜长石 ;Qtz-石英 ;Ep-绿帘石 ;Bt-黑云母 ;Ilm-钛铁矿 ;Ttn-榭石

a-quartz-bearing amphibolite with mineral assemblage of Amp + Pl + Qtz (P2-14, 221 m depth); b-biotite epidote amphibolite with mineral assemblage of Ep + Bt + Amp + Pl (C120, 290 m depth); c-ilmenite and titanite-bearing biotite epidote amphibolite with mineral assemblage of Ilm + Ttn + Bt + Ep + Amp + Pl (NS1); d-titanite-bearing epidote amphibolite with mineral assemblage of Ttn + Ep + Amp + Pl (P2-50, 958 m depth); Amp-amphibole; Pl-plagioclase; Qtz-quartz; Ep-epidote; Bt-biotite; Ilm-ilmenite; Ttn-titanite

514.5 mm 线的氩离子激光器,光谱记数时间为 2~20 s,在每 0.5 波数步上记数,激光束斑约 1.5 μm ,再采用 JSM-5310 和 Oxford-miniCL 型阴极发光谱仪和光学显微镜对锆石及其矿物包体分布规律进行系统照像,最后采用 JEOL JXA 8800 型电子探针(加速电压:15 kV;电子束:12 nA)对重要矿物包体(如石榴石、绿辉石、菱镁矿和金红石等)进行定量分析。所有的矿物代号均采用文献 Kretz(1983)的资料。

3 斜长角闪岩锆石中矿物包体及分布

在苏北东海地表露头 and 预先导孔共计 23 件斜长角闪岩锆石样品中,均识别出以柯石英为代表的超高压矿物包体(图 3)。以预先导孔 CCSD-PP2 中含石英斜长角闪岩(样品号:P2-14,采样深度:221 m)为例,矿物包体自锆石晶体核部(C),经过渡带(M)至晶体边缘(R)具有规律性分布特征(图 3-a,c),且与阴极发光图像存在明显的对应关系(图 3-b)。其中在锆石晶体核部(C)保存大量矿物包体(图 3-a,c),包体矿物组合为柯石英(Coe)+石榴石(Grt)+绿辉石(Omp)+金红石(Rt);而在锆石晶体的过渡带(图 3-b 中 M 域),阴极发光图像显示密集的生长环带,相应的矿物包体与核部存在明显差异,主要表现为矿物包体含量明显减少,以柯石英为特征(图 3-a);至锆石的晶体边缘(R),则出现以石英(Qtz)为代表的非超高压矿物包体(图 3-a)相应的阴极发光图像则显示明显的退变边(图 3-b 中 R 域)。上述特征表明,该类斜长角闪岩中的锆石属于典型的变质锆石,在苏鲁地体深俯冲超高压变质阶段开始生长,自晶体核部(C)至晶体过渡带(M),依次包裹 Coe+Grt+Omp+Rt 和 Coe 等典型的超高压矿物包体。而在苏鲁地体构造抬升过程中,该类锆石进一步生长,在晶体边缘(R)则保存了以石英(Qtz)为代表的非超高压矿物包体。

在其他类型斜长角闪岩锆石样品中,包体矿物组合性质及其分布规律与上述斜长角闪岩存在较明显差异。以预先导孔 CCSD-PP1 绿帘黑云斜长角闪岩锆石样品(样品号:C120,采样深度:290 m)为例,多数锆石自晶体核部至边缘,均保存以 Coe+Grt+Omp 为代表的典型超高压矿物包体(图 3-d)。而在东海牛山地区含钛铁矿榴石黑云绿帘斜长角闪岩锆石样品中(样品号:NS1),绝大多数锆石均保存大量矿物包体,柯石英(Coe)自晶体中心至边缘均有分布,典型超高压包体矿物组合为 Coe+Grt+

Omp+Phe+Rt+Ap(图 3-e)。在预先导孔 CCSD-PP2 含榴石绿帘斜长角闪岩锆石样品中(样品号:P2-50,采样深度:958 m),多数锆石中柯石英分布规律与牛山斜长角闪岩十分相似,主要矿物包体为 Coe+Grt+Omp+Rt,部分锆石保存 Coe+Omp+Rt 等矿物包体(图 3-f)。值得注意的是,在该样品有的锆石颗粒中,首次发现菱镁矿(Mas)矿物包体(图 3-g)。从其相应的具明显分带性的阴极发光图像来看,菱镁矿(Mas)+柯石英(Coe)分布于晶体核部(C),而过渡带(M)则单纯保存以柯石英(Coe)为代表的超高压包体矿物(图 3-h),上述特征表明,菱镁矿应是超高压变质过程中的稳定矿物。此外,对该锆石样品 5 粒菱镁矿包体电子探针分析测试结果显示,MgO 为 29.99%~32.47%,FeO 为 17.47%~19.38%;相应的 $X_{\text{Mg}}[X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 为 0.74~0.77; $X_{\text{Fe}}[X_{\text{Fe}} = \text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 为 0.23~0.26。

4 斜长角闪岩锆石中包体矿物激光 Raman 光谱特征

东海地区 23 件斜长角闪岩锆石中均发现了柯石英包体,该类柯石英呈浑圆状,粒径约 1~10 μm 左右,其激光 Raman 光谱如图 4-a 所示,具有典型柯石英 525 cm^{-1} 主峰,并伴随 272 cm^{-1} 的弱峰。此外,该谱线还显示石英 470 cm^{-1} 的弱峰。石英包体只出现于含石英的斜长角闪岩锆石样品中(如样品 P2-14),且集中分布于锆石晶体的边缘(图 3-a)。石英包体通常呈浑圆状-不规则形状,粒径约 2~4 μm 之间,在 466 cm^{-1} 处呈强峰,并伴随 214 cm^{-1} 的弱峰(图 4-b)。石榴石和绿辉石包体在所有类型斜长角闪岩锆石样品中均有分布(图 3),它们呈浑圆状-不规则形状,粒径约 2~10 μm 之间,分别具有 908 cm^{-1} (图 4-c)和 683 cm^{-1} (图 4-d)的强峰。

多数多硅白云母包体分布于含黑云母的斜长角闪岩锆石样品中(如样品 NS1),通常呈不规则形状,粒径约 2~5 μm 之间,在 262 cm^{-1} 和 703 cm^{-1} 处呈双主峰(图 4-e)。菱镁矿包体只分布于样品 P2-50 部分锆石晶体中,一般呈浑圆状-不规则形状,粒径约 3~6 μm 之间,具有 1 093 cm^{-1} 强主峰,并伴随 318 cm^{-1} 的弱峰(图 4-f)。

5 讨论与结论

在苏鲁地体地表露头样品及中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP1 和 CCSD-PP2 岩心样

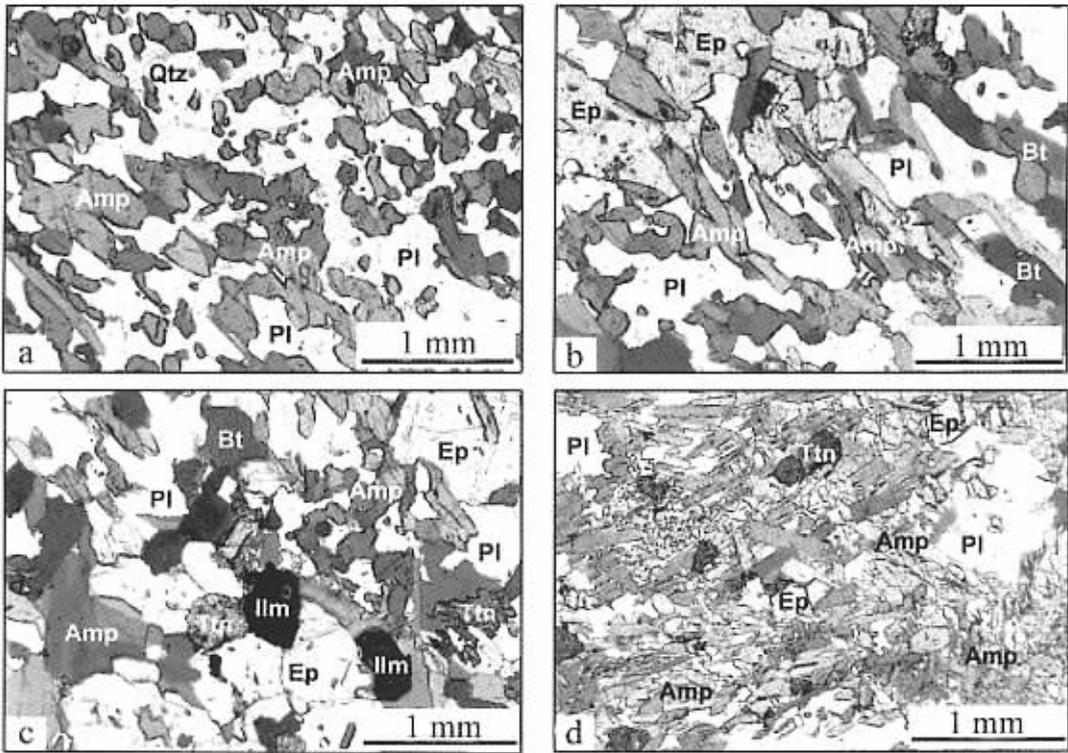


图 3 斜长角闪岩锆石中矿物包体显微照片及阴极发光图像

Fig. 3 Photomicrographs (all plane polarized light) of mineral inclusions in zircons and cathodoluminescence (CL) images of host zircons from amphibolites

a-含石英斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2 样品号:P2-14, 采样深度:221 m)锆石中的矿物包体(单偏光);b-a 中锆石的阴极发光图像(C, M, R 分别代表晶体核部、过渡带和边缘);c-显示 a 中锆石晶体核部(C)矿物包体柯石英+石榴石+绿辉石+金红石(单偏光);d-绿帘黑云斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP1 样品号:C120, 采样深度:290 m)锆石中体柯石英+石榴石+绿辉石等矿物包体(单偏光);e-含钛铁矿石榴黑云绿帘斜长角闪岩(东海牛山地区, 样品号:NS1)锆石中柯石英+石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石+磷灰石等矿物包体(单偏光);f-含榍石绿帘斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2 样品号:P2-50, 采样深度:958 m)第 20 粒锆石中柯石英+绿辉石+金红石等包体矿物(单偏光);g-含榍石绿帘斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2 样品号:P2-50, 采样深度:958 m)第 35 粒锆石中柯石英+菱镁矿等包体矿物(单偏光);h-为 g 中锆石阴极发光图像(C, M, R 分别代表晶体核部、过渡带和边缘);Coe-柯石英;Qtz-石英;Grt-石榴石;Omp-绿辉石;Rt-金红石;Phe-多硅白云母;Ap-磷灰石;Mas-菱镁矿

a-mineral inclusions preserved in zircon from P2-14 sample (pre-pilot drillhole CCSD-PP2, 221 m depth); b-CL image of the same zircon as in Fig. 3a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationships; c-zircon sample P2-14 (pre-pilot drillhole CCSD-PP2, 221 m depth) containing inclusions of Coe + Grt + Omp + Rt in the core of the same zircon as in Fig. 3a; d-zircon sample C120 (pre-pilot drillhole CCSD-PP1, 290 m depth) containing inclusions of Coe + Grt + Omp; e-zircon sample NS1 (Niushan, Donghai county) containing inclusions of Coe + Grt + Omp + Phe + Rt + Ap; f-the 20th zircon in zircon sample P2-50 (pre-pilot drillhole CCSD-PP2, 958 m depth) containing inclusions of Coe + Omp + Rt; g-the 35th zircon of zircon sample P2-50 containing inclusions of Coe + Mas; h-CL image of the same zircon as in Fig. 3f showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationships; Coe-coesite; Grt-garnet; Omp-omphacite; Rt-rutile; Phe-phengite; Ap-apatite; Mas-magnisite

品中,所有类型的斜长角闪岩的锆石中均发现以柯石英为代表的超高压矿物包体,标志着研究区斜长角闪岩曾普遍经历了超高压变质作用。

激光 Raman 和阴极发光研究表明,斜长角闪岩锆石中保存的超高压包体矿物组合为:柯石英+石榴石+绿辉石+金红石,柯石英+石榴石+绿辉石;柯石英+石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石+磷灰石;柯石英+绿辉石+金红石;柯石英+菱镁矿。该类矿物包体组合与苏鲁地体超高压榴辉岩的峰期超高压矿物组合十分相似,表明斜长角闪岩可能是由超高压变质的榴辉岩在构造抬升过程中退变而成。

阴极发光图像研究表明,自锆石晶体核部至晶

体过渡带显示明显而密集的成分环带(图 3-b, h),与“岩浆结晶生长环带”十分相似;但相应的矿物包裹体鉴定结果表明,自晶体核部至过渡带,矿物包体性质以含柯石英等典型超高压包体矿物组合为特征,表明该类锆石属于典型的变质锆石。因此,不能单纯依据锆石的阴极发光特征来直接判断锆石的成因类型。由此可见,必须将锆石的阴极发光图像与矿物包体性质及其分布特征的研究有机地结合起来,才能准确判断锆石的成因类型,进而采用离子探针技术对锆石不同微区进行测试,最终才能获得切合实际、具有重要科学意义的同位素年代学信息。有关该项研究目前正在进行中。

值得注意的是,在苏鲁超高压变质带中存在大

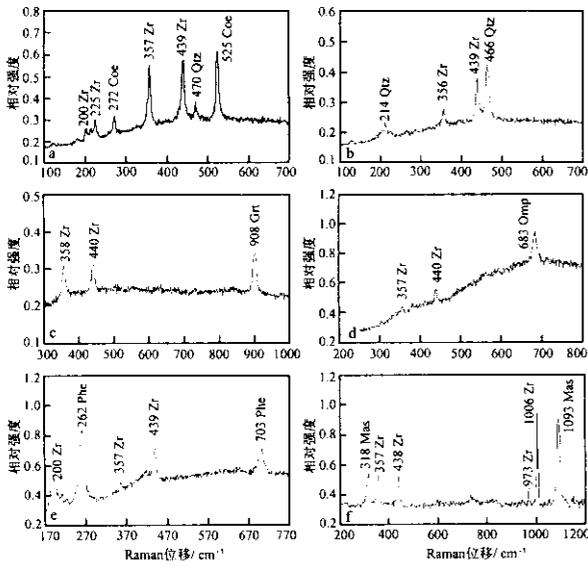


图4 斜长角闪岩锆石中典型包体矿物激光 Raman 光谱

Fig. 4 Representative Raman spectra of

inclusion minerals in zircons from amphibolites

a-含石英斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2 样品号:P2-14, 采样深度 221 m) 锆石中的柯石英 b-含石英斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2 样品号:P2-14, 采样深度 221 m) 锆石中的石英 c-绿帘黑云斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP1 样品号:C120, 采样深度 290 m) 锆石中石榴石 d-绿帘黑云斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP1 样品号:C120, 采样深度 290 m) 锆石中绿辉石 e-含金红石榴石黑云绿帘斜长角闪岩(东海牛山地区 样品号:NS1) 锆石中多硅白云母 f-含榴石绿帘斜长角闪岩(预先导孔 CCSD-PP2, 样品号:P2-50, 采样深度: 958 m) 第 35 粒锆石中菱镁矿, 包体矿物激光 Raman 谱图常含有奇主锆石 200, 225, 356~358, 438~440, 973, 1006 cm⁻¹ 的峰;

Coe-柯石英, Qtz-石英, Grt-石榴石, Omp-绿辉石;

Phe-多硅白云母, Mas-菱镁矿, Zr-锆石

a-coesite Raman spectrum of zircon sample P2-14 (pre-pilot drillhole CCSD-PP2 221 m depth); b-quartz Raman spectrum of zircon sample P2-14 (pre-pilot drillhole CCSD-PP2, 221 m depth); c-garnet Raman spectrum of zircon sample C120 (pre-pilot drillhole CCSD-PP1, 290 m depth) d-omphacite Raman spectrum of zircon sample C120 (pre-pilot drillhole CCSD-PP1, 290 m depth) e-phengite Raman spectrum of zircon sample NS1 (Niushan, Donghai county); f-magnisite Raman spectrum of the 35th zircon in zircon sample P2-50 (pre-pilot drillhole CCSD-PP2, 958 m depth); these spectra also contain host zircon peaks at 200, 225, 356~358, 438~440, 973, 1006 cm⁻¹ Coe-coesite;

Qtz-quartz, Grt-garnet, Omp-omphacite, Phe-phengite;

Mas-magnisite, Zr-zircon

量规模不一的榴辉岩透镜体或团块。为何有的榴辉岩基本上未发生退变,仍保存超高压变质阶段的矿物组合特征,而有的榴辉岩则已完全退变为斜长角闪岩,只在锆石中保存超高压信息。这一显著差异,是与原岩成分有关,还是受苏鲁地体构造抬升过程中流体性质及其不均匀性所控制,仍需进一步深入探讨。

致谢 在日本东京工业大学测试研究工作期间曾得到 I. Katayama 博士在仪器使用方面给予的悉

心指导,在此表示衷心感谢。本项工作得到中国地质科学院地质研究所“大陆动力学开放实验室”的资助。

参考文献

从柏林,王清晨. 1999. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. 科学通报, 44: 1127~1141.
 刘福来,许志琴,杨经绥等. 2001. 中国苏北预先导孔 CCSD-PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及其超高压变质作用的证据. 科学通报, 46: 241~246.
 刘景波,叶凯,从柏林等. 2001. 大别山超高压带片麻岩锆石中柯石英包体. 科学通报, 46: 1124~1127.

References

Cong B L, Zhai M G, Carswell D A et al. 1995. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, Central China. *European Journal of Mineralogy*, 7: 119~138.
 Cong Bailin, Wang Qingchen. 1999. The Dabie-Sulu UHP metamorphic belt: review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1127~1141 (in Chinese with English abstract).
 Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 227~279.
 Liu Fulai, Xu Zhiqin, Katayama I et al. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 59: 199~215.
 Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui et al. 2001. Mineral inclusions of zircon and UHP metamorphic evidence from paragneiss and orthogneiss of pre-pilot drillhole CCSD-PP2 in north Jiangsu province, China. *Chinese Science Bulletin*, 46: 241~246 (in Chinese with English abstract).
 Liu Jingbo, Ye Kai, Maruyama S et al. 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1124~1127 (in Chinese with English abstract).
 Tabata H, Yamauchi K, Maruyama S et al. 1998. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane: Mineral-inclusion study of zircons in gneisses from the Dabie Shan. In: Hacker B R, Liou J G, eds. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks*. London: Kluwer Academic Publishers, 261~273.
 Wang X M, Liou J G. 1992. Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China: Evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite. *Geology*, 19: 933~936.
 Ye K, Yao Y P, Katayama I et al. 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157~164.
 Zhao Z Y, Wang Q C, Cong B L. 1992. Coesite-bearing ultrahigh pressure metamorphic rocks from Donghai, northern Jiangsu province, eastern China: foreign or in situ? *Scientia Geologica Sinica*, 1: 43~58.