南苏鲁超高压带和高压带边界的准确限定
——来自变质岩锆石中矿物包体的证据

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 薛怀民
(中国地质科学院 地质研究所; 国土资源部 大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 南苏鲁地区由4个岩片组成, 自西北至东南依次为正片麻岩岩片(Ⅰ)、表壳岩岩片(Ⅱ)、含蓝晶石石英岩-大理岩岩片(Ⅲ)和副片麻岩-变火山岩-片岩岩片(Ⅳ)。上述构造岩片均经历了强烈的角闪岩相-绿片岩相退变质作用的改造。采用激光拉曼、阴极发光和电子探针分析技术, 对南苏鲁方圆约3 800 km^2 范围内93件锆石样品中的矿物包体进行了系统鉴定。结果表明, 在第Ⅰ和Ⅱ岩片样品的锆石中均发现以柯石英为代表的超高压(UHP)矿物包体, 而在第Ⅲ和Ⅳ岩片锆石中则保存以文石和多硅白云母为代表的高压(HP)矿物包体。由此推断, 第Ⅰ和Ⅱ岩片应归属超高压变质带, 而第Ⅲ和Ⅳ岩片应归属高压变质带。结合变质作用温压条件的研究结果, 确定超高压岩石峰期变质温压条件为 t = 723~ 852 ℃, $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa; 而高压变质岩石峰期变质温压条件为 t = 500~ 600 ℃, p = 1.2×10^3~ 2.5×10^3 MPa。最新区域填图结果表明, 南苏鲁东海地区超高压和高压带之间的接触界线为一典型的韧性剪切带。

关键词: 超高压带; 高压带; 锆石; 矿物包体; 南苏鲁
中图分类号: P57; P588.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000- 6524 (2005) 01- 0032- 15

The boundary between UHP and HP metamorphic belts in southwestern Sulu terrane, eastern China: Evidence from mineral inclusions in zircons from metamorphic rocks

LIU Fu_lai, XU Zhi_qin, YANG Jing_sui and XUE Huai_min
(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences; Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: The southwestern Sulu terrane in eastern China is divided into four fault_bounded lithological units, which are from northwest to southeast orthogneiss unit (Unit Ⅰ), supracrustal rock unit (Unit Ⅱ), kyanite_bearing quartzite_marble unit (Unit Ⅲ) and paragneiss_schist unit (Unit Ⅳ). Inclusions of index minerals in zircon separates of 93 samples from these units were identified by means of laser Raman spectroscopy and electron microprobe analysis. Coesite and coesite_bearing ultrahigh_pressure (UHP) mineral assemblages occur in zircon separates of various amphibolite_facies metamorphic rocks within Units Ⅰ and Ⅱ, whereas aragonite_ and phengite_bearing high_pressure (HP) mineral assemblages are preserved in zircons within many amphibolite_ to greenschist_facies metamorphic rocks in Units Ⅲ and Ⅳ. All the above evidence together with previous studies yields p_T estimates of peak metamorphic recrystallization at 723~ 852 ℃ and $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa for UHP rocks, and at 500~ 600 ℃ and p = 1.2×10^3~ 2.5×10^3 MPa for HP rocks. The spatial distribution of these p_T estimates and recent surface mapping result constrain an exact boundary between UHP and HP belts within

收稿日期: 2004-06-17; **修订日期**: 2004-08-06
基金项目: 国家自然科学基金重大项目(40399143); 国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716502); 国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目
作者简介: 刘福来(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩石学研究, E_mail: liufulai@ccsd.org.cn。

www.yskw.ac.cn

southern Sulu terrane along a ductile shear zones in Donghai region.

Key words: ultrahigh_pressure belt; high_pressure belt; zircon; mineral inclusion; southwestern Sulu terrane

众所周知, 锆石是岩石中常见的副矿物, 是进行同位素定年的理想矿物。近年来, 在超高压变质作用的研究中, 锆石通常被认为是超高压矿物(如柯石英和金刚石) 最好的保护"容器"(Sobolev *et al*., 1994; Chopin *et al*., 1995; Tabata *et al*., 1998; Parkinson *et al*., 1999; Katayama *et al*., 2000)。在苏鲁-大别超高压变质带中, 榴辉岩及其围岩锆石中柯石英包体的发现(Tabata *et al*., 1998; Ye *et al*., 2000; Liu F *et al*., 2001, 2002; Liu J *et al*., 2001) 证明了二者曾一起发生深俯冲, 并经历了超高压变质作用 (Wang *et al*., 1992; Okay *et al*., 1992; Zhang *et al*., 1995; Liou *et al*., 2000)。然而, 有关锆石中超高压和高压矿物包体在南苏鲁各个岩片中的分布特征仍缺乏深入而细致的研究, 根据各个岩片不同类型岩石锆石中标志性超高压和高压矿物包体来判断南苏鲁超高压带和高压带之间的边界至今尚未开展。鉴于此, 本文以南苏鲁东海及其邻区地表出露的变质岩石为重点研究对象, 首先查明锆石中标志性超高压和高压矿物包体的种类及其在锆石微区的分布特征, 然后确定经历了超高压和高压变质的陆壳岩石在区域上的分布规模, 最后结合最新区域填图结果(许志琴等, 2003), 准确限定南苏鲁地区超高压带和高压带之间的界线。

1　地质背景

众所周知, 位于华北板块和扬子板块之间的秦岭-大别超高压变质带是世界上规模最大的超高压变质带。它西起秦岭, 经大别向东北延伸至苏鲁一带, 全长约 2 000 km。苏鲁地体由超高压带和高压带组成(Zhang *et al*., 1995), 自江苏东海向东北延伸至山东威海地区, 全长约 320 km。其北侧以烟台-青岛-五莲断裂(YQWF) 为界与华北克拉通相临, 南侧以嘉山-响水断裂 (JXF) 为界与扬子克拉通相邻(图 1)。

根据岩石学、成因矿物学和地球化学以及最新区域地质填图的研究结果(许志琴等, 2003), 南苏鲁东海及其邻区约 3 800 km^2 范围内的地表露头主要由 4 个岩片组成, 自西北至东南依次为正片麻岩岩片(Ⅰ)、表壳岩岩片(Ⅱ)、含蓝晶石石英岩-大理岩岩片(Ⅲ)和副片麻岩-变火山岩-片岩岩片(Ⅳ)(图 1)。其中Ⅰ和Ⅱ岩片经历了强烈的角闪岩相退变质作用的改造, 而Ⅲ和Ⅳ岩片则经历了绿片岩相退变质作用的改造。

岩片Ⅰ主要由角闪岩相正片麻岩组成, 岩片内部见有许多大理岩、榴辉岩和超基性岩透镜体或团块。此外, 该岩片存在大量中生代花岗岩体(图 1)。岩片Ⅱ主要由各种变质表壳岩组成, 包括绿帘黑云二长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴角闪斜长片麻岩和二云二长片麻岩等。这些副片麻岩常夹有薄层蓝晶石英岩、蓝晶多硅白云母石英片岩以及大量榴辉岩和超基性岩透镜体和团块。在该岩片中还有少量正片麻岩。岩片Ⅲ主要由含蓝晶石和黄玉的石英岩、蓝晶多硅白云母石英岩、含多硅白云母石英片岩以及含多硅白云母和磷灰石大理岩组成。岩片Ⅳ主要由大量变火山岩、副片麻岩 (如石榴黑云斜长片麻岩等)、含云母和帘石的石英片岩以及少量的蓝片岩组成 (Zhang *et al*., 1995; 许志琴等, 2003)。

2　样品类型及测试方法

在南苏鲁 4 个岩片中共采集了 93 件样品, 采样位置如图 1。样品包括正片麻岩、副片麻岩、榴辉岩、斜长角闪岩、石英岩、大理岩和片岩等, 每件样品重 5 ~ 30 kg。首先将样品破碎、筛选、清洗后, 通过磁选和重液分离选出锆石, 在双目镜下进一步精选 50~ 400 μm 形态较完整的锆石晶体 100~ 300 粒, 制成符合激光 Raman 测试要求的标准样品。所有的测试工作均在日本东京工业大学地球与行星科学系和国土资源部大陆动力学重点实验室完成, 少量锆石阴极发光照相在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室完成。在测试过程中, 首先在显微镜下对锆石中矿物包体种类和分布特征进行系统观察, 然后采用 JASCO NRS_2000 型和 RENISHAW_1000 型激光 Raman 谱仪对矿物包体进行系统鉴定, 再采用 JSM_5310 型和 Mini CL 型阴极发光谱仪并配备光学显微镜对锆石的阴极发光环带、矿物包体在锆石中的分布规律进行系统观察和照相。最后采用 JEOL JXA 8800 型电子探针仪(加速电压 15 kV, 电子束12 nA) 对某些重要包体矿物(如石榴石、硬玉、绿

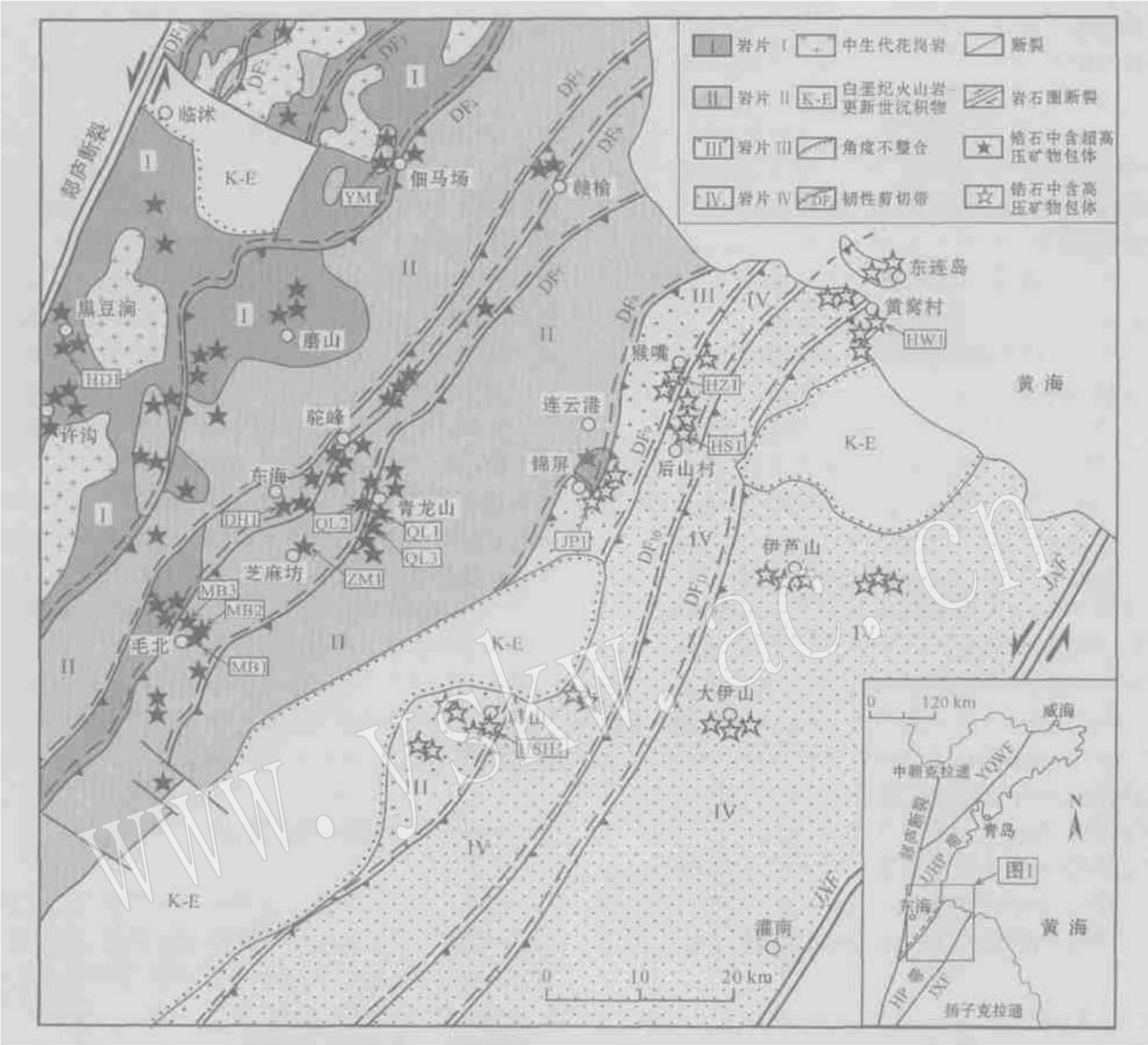

图 1 南苏鲁地区地质简图[根据许志琴等(2003)资料绘制]

Fig. 1 Tectonic sketch of southwestern Sulu terrane, showing major lithotectonic units and zircon samples (modified after Xu Zhiqin *et al*., 2003)

YQWF—烟台-青岛-五莲断裂; JXF—嘉山-响水断裂

YQWF—Yantai_Qingdao_Wulian fault; JXF—Jiashan_Xiangshui fault

www.yskw.ac.cn

辉石、多硅白云母等)的化学成分进行定量测试。所有的矿物代号均采用 Kretz(1983)的资料。

3 岩片Ⅰ和Ⅱ变质岩中锆石的矿物包体特征

3.1 副片麻岩中锆石的矿物包体

本文对代表性副片麻岩锆石微区矿物包体及相应的阴极发光图像进行了详细研究,包括青龙山地区的绿帘黑云二长片麻岩(QL1)、二云二长片麻岩(QL2)和毛北地区的石榴黑云角闪斜长片麻岩(MB1)。上述 3 种岩石锆石中保存了大量的矿物包体,主要包括柯石英(Coe)、石榴石(Grt)、绿辉石(Omp)、硬玉(Jd)、多硅白云母(Phe)、金红石(Rt)、石英(Qtz)和磷灰石(Ap)(图 2)。研究发现,锆石中的不同微区矿物包体性质及相应的阴极发光图像存在明显差异(图 2)。柯石英是副片麻岩锆石中保存的标志性超高压矿物包体,常见的超高压矿物包体

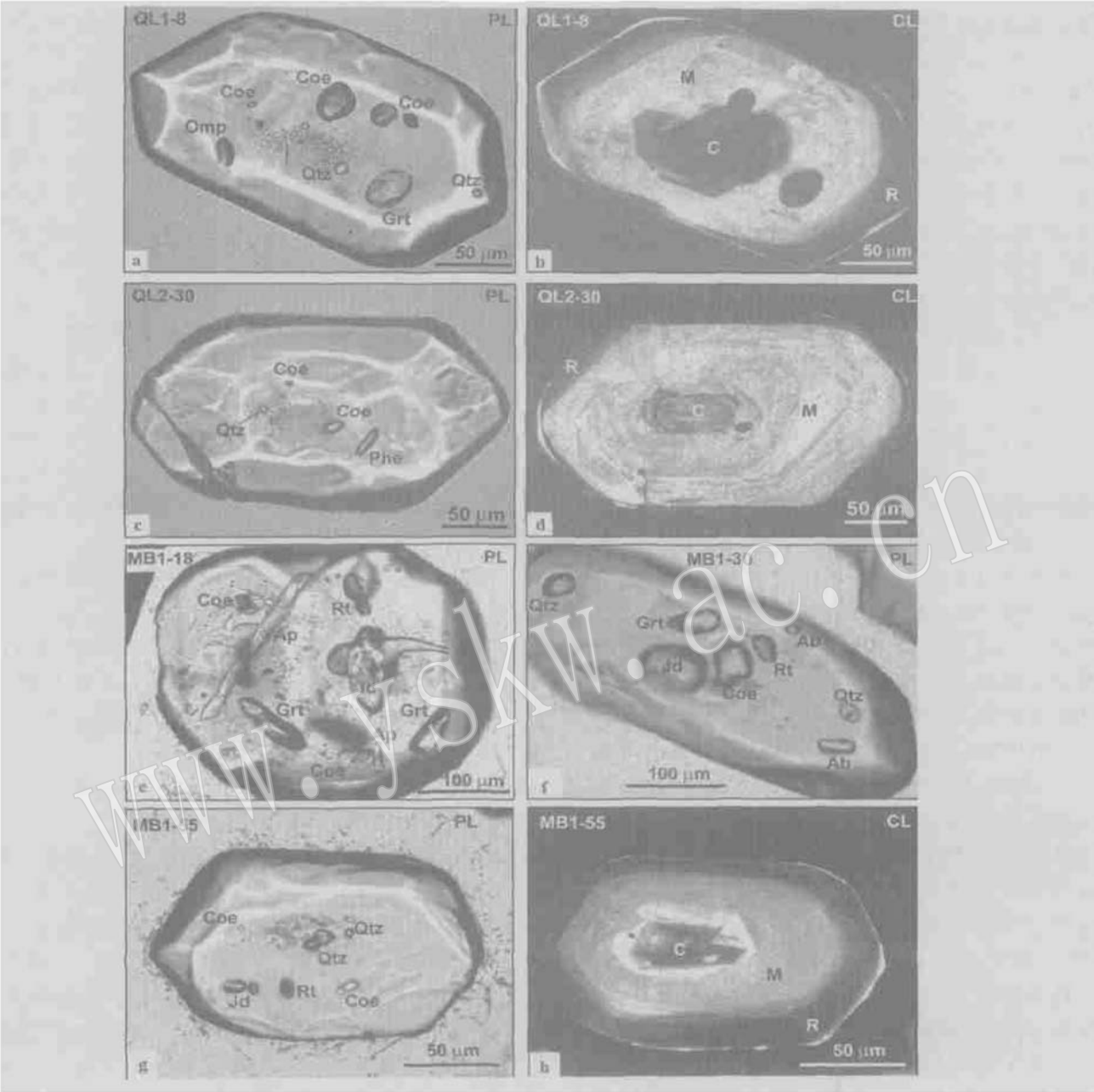

图 2　副片麻岩锆石及矿物包体的显微照片(PL)及相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 2　Plane_polarized light (PL) images and cathodoluminescence images (CL) of host zircons and mineral inclusions in zircons from paragneisses

a—样品 QL1_8 中锆石核部(C)、幔部(M)和边部(R)分别保存 Qtz、Coe+ Grt+ Omp 和 Qtz 包体矿物; b—图 2a 中锆石晶体, 具有低发光效应的继承性核、强发光效应的变质增生幔和低发光效应的变质增生边; c—样品 QL2_30 的核部、幔部分别保存 Qtz 和 Coe+ Phe 包体矿物; d—图 2c 中锆石晶体, 具有低发光效应的继承性核、强发光效应的变质增生幔和低发光效应的变质增生边; e—样品 MB1_18 保存 Coe+ Grt+ Jd+ Rt+ Ap 超高压包体矿物; f—样品 MB1_30 的核部和幔部分别保存 Coe+ Grt+ Jd+ Rt 超高压矿物包体和 Qtz+ Ab 低压包体矿物; g—样品 MB1_55 的核部和幔部分别保存 Qtz 和 Coe+ Jd+ Rt 包体矿物; h—图 2g 中锆石晶体, 具有低发光效应的继承性核、强发光效应的变质增生幔和低发光效应的变质增生边

a—sample QL1_8 contains Qtz inclusion in the core, Coe + Grt + Omp in the mantle, and Qtz inclusion in the rim; b—CL image of the same zircon as in Fig. 2a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; c—sample QL2_30 contains Qtz inclusion in the core and Coe + Phe in the mantle; d—CL image of the same zircon as in Fig. 2c showing core, mantle and rim relationship; e—sample MB1_18 contains Coe + Jd + Grt + Rt + Ap inclusion in the core and mantle; f—sample MB1_30 contains Coe + Grt + Jd + Rt in the core, and Qtz + Ab in the rim; g—sample MB1_55 contains Qtz inclusion in the core, and Coe + Jd + Rt in the mantle; h—CL image of the same zircon as in Fig. 2g showing core, mantle and rim relationship

www.yskw.ac.cn

组合为: Coe+ Grt+ Omp(图 2a)、Coe+ Phe(图 2c)、Coe+ Grt+ Jd+ Rt+ Ap(图 2e)、Coe+ Grt+ Jd+ Rt(图 2f)和 Coe+ Jd+ Rt(图 2g)。然而,柯石英、绿辉石和硬玉在副片麻岩的基质中从未发现(Liu *et al*., 2002)。研究表明,不同成分的副片麻岩,其锆石中保存的超高压矿物包体存在明显差异。如绿辉石通常与柯石英一起保存在绿帘黑云二长片麻岩(QL1)锆石中(图 2a、2b),而硬玉则保存在石榴黑云角闪斜长片麻岩(MB1)锆石中(图 2e、2f、2g、2h)。上述特征表明,超高压矿物组合的性质不仅受控于温压条件,而且与寄主岩石化学成分存在密切的成因关系(Liu *et al*., 2001, 2002)。

柯石英和石英包体常见于同一锆石晶体中(图 2a、2c、2f、2g),但相应的阴极发光图像则显示两种包体分布于不同性质的锆石微区中(图 2b、2d、2h)。以样品 QL1、QL2 和 MB1 为例,石英常保存在锆石晶体的核部(C)和边部(R),而柯石英则分布于锆石晶体的幔部(M)(图 2a、2b、2c、2d、2g、2h)。阴极发光图像显示该类锆石具有继承核、超高压变质增生的幔以及退变边的特点(图 2b、2d、2h)。但部分锆石晶体中矿物包体的分布特征与上述锆石存在明显差异,以 MB1_18 和 MB1_30 为例, Coe+ Grt+ Jd+ Rt+ Ap(图 2e)和 Coe+ Grt+ Jd+ Rt(图 2f)分布于锆石晶体的核部和幔部,而 Qtz+ Ab 等非超高压矿物包体则分布于锆石晶体的边部(图 2f),表明该类锆石有可能是在超高压变质阶段开始结晶生长,并明显叠加了后期退变质作用的痕迹。上述特征进一步证明,即使在同一副片麻岩样品中,不同锆石晶体可能具有完全不同的结晶-生长演化历史。

3.2 含蓝晶石石英岩中锆石的矿物包体

本文重点研究青龙山以南虎山地区的含蓝晶石石英岩锆石样品(QL3)。锆石中保存的矿物包体主要为柯石英、蓝晶石、金红石、磷灰石、多硅白云母以及少量的石榴石和绿辉石。在几百粒锆石晶体中,只有不到十粒保存石榴石和绿辉石包体,其相应的包体矿物化学成分与榴辉岩基质和副片麻岩锆石中的同种矿物成分存在明显差异,主要表现为石榴石 MnO 和 FeO 含量明显偏高,而 MgO 含量则明显偏低;绿辉石中的 Na_2O 和 Al_2O_3 含量明显高于榴辉岩和副片麻岩的同种包体矿物(另文详述),表明这些包体矿物明显受控于寄主岩石的化学成分。该类锆石保存的超高压矿物包体组合为: Coe+ Ky+ Rt+ Ap(图 3a)、Coe+ Ky+ Grt+ Omp+ Phe+ Ap(图 3b)和 Coe+ Ky+ Grt+ Omp+ Phe(图 3c),相应的阴极发光图像具有强发光效应的核部(C)和幔部(M)以及弱发光效应的边部(R)(图 3d)。超高压矿物包体集中分布于锆石晶体的核部和幔部,而在基质中很难发现(Zhang *et al*., 1995)。上述特征表明,含蓝晶石石英岩中的锆石主要形成于超高压变质阶段,捕获了超高压矿物包体,并屏蔽了后期角闪岩相变质作用的改造。因此,在该类锆石含柯石英微区可以获得精确的超高压变质年龄信息。

3.3 含透辉石大理岩中锆石的矿物包体

大理岩中的锆石比较少见,在约 30 kg 样品中,只分选出 10~ 30 粒锆石晶体,单晶十分细小,粒径 40~ 80 μm。大多数锆石中不含任何矿物包体,只有极少数含有柯石英等矿物包体。以佃马厂含透辉石大理岩(YM1)为例,有的锆石核部和幔部保存 Coe+ Di 包体,而边部则单纯保存 Coe 包体(图 3e);有的核部和幔部保存 Coe+ Arg 等超高压矿物包体(图 3f)。此外,在临沭、黑豆涧和许沟等地的大理岩锆石中,也发现了含柯石英的超高压矿物包体(图 1),表明南苏鲁地区正片麻岩岩片(Ⅰ)中所有大理岩透镜体和团块无疑也经历了超高压变质作用。

3.4 正片麻岩中锆石的矿物包体

正片麻岩的锆石与前述几类锆石样品均存在本质的差异:在同一样品中发现两类锆石,且在形态、粒度、阴极发光图像、矿物包体特征等方面均有明显区别(图 4)。第一类锆石呈半透明,颗粒粗大,粒径 200~ 500 μm,呈半自形,含有大量矿物包体和杂质,并发育裂隙;第二类锆石透明,颗粒细小,粒径 50~ 100 μm,呈他形晶-半自形晶,含有少量的矿物包体,裂隙不发育。研究表明,岩片Ⅰ和Ⅱ所有该类正片麻岩的两类锆石中均发现典型的柯石英包体(图 4)。以黑豆涧地区含磁铁矿和黑云母正片麻岩(HD1)为例,第一类锆石含有大量矿物包体和杂质,并发育裂隙,锆石中矿物包体分布特征及其阴极发光图像如图 4。通常该类锆石的核部均存在大量矿物包体,主要由 Qtz+ Kfs+ Ap 组成;锆石的幔部保存以柯石英为代表的超高压矿物包体;在锆石极窄的晶体边缘发现石英包体(图 4a、4b),表明该类锆石是在继承原岩锆石的基础上,于超高压阶段和晚期退变质阶段发生变质增生,依次在其幔部和边部包裹了柯石英和石英包体。第二类锆石中矿物包体相对比较少见,以柯石英为代表的超高压矿物包体主要分布于锆石强发光效应的核部和幔部,而在锆石弱发光的

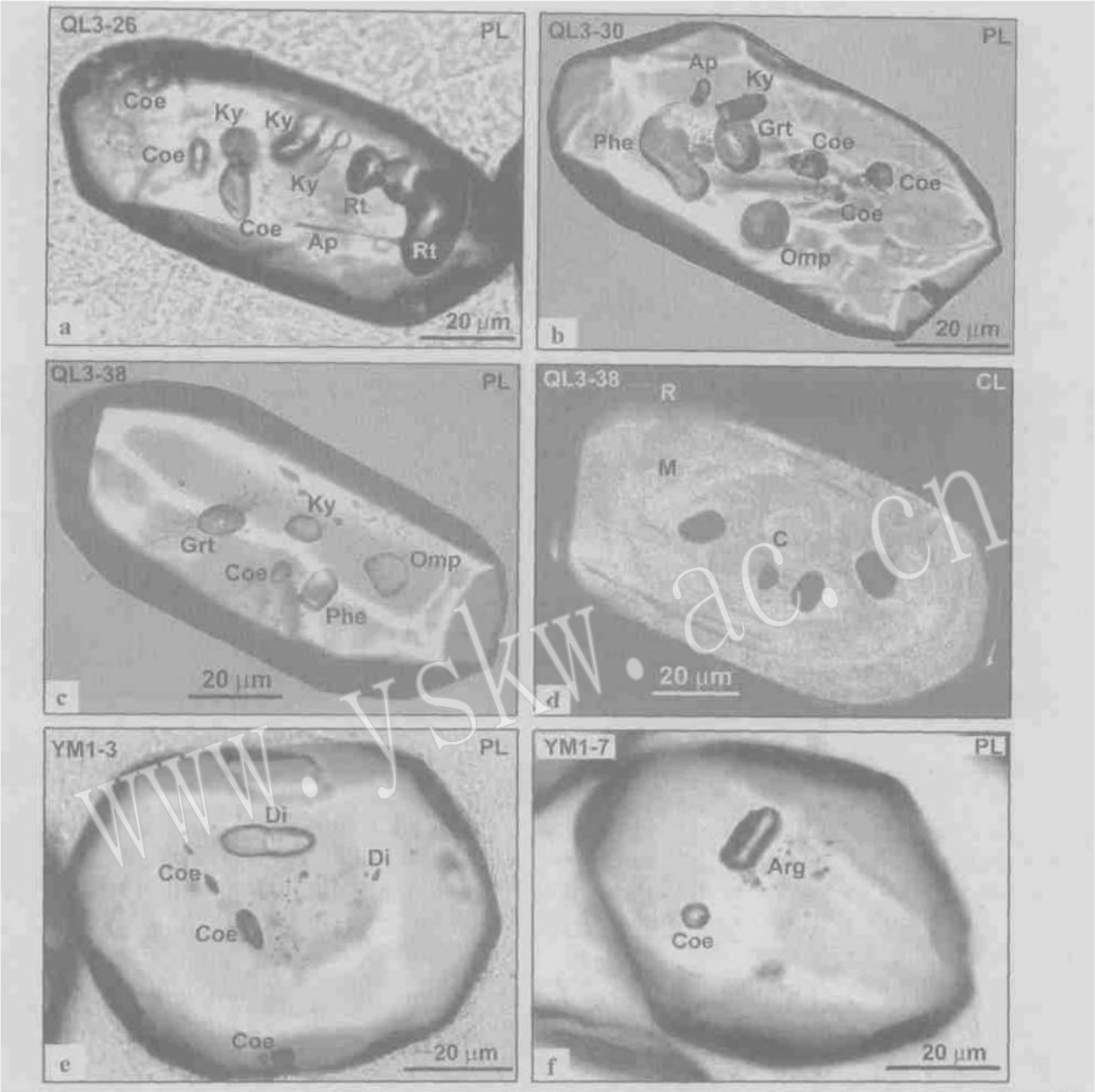

图 3　含蓝晶石石英岩和含透辉石大理岩锆石及矿物包体的显微照片(PL)和相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 3　Plane_polarized light (PL) images and cathodoluminescence images (CL) of host zircons and mineral inclusions in zircons from kyanite_bearing quartzite and diopside_bearing marble

样品 QL3_26 的核部和幔部保存 Coe+ Ky+ Rt+ Ap 超高压矿物包体; b—样品 QL3_30 的核部和幔部保存 Coe+ Ky+ Grt+ Omp+ Phe+ Ap 超高压矿物包体; c—样品 QL3_38 的核部和幔部保存 Coe+ Ky+ Grt+ Omp+ Phe 超高压矿物包体; d—图 3c 中锆石晶体的阴极发光图像, 显示强发光效应的核部和幔部以及弱发光效应的边部; e—样品 YM1_3 幔部保存 Coe+ Di 超高压矿物包体, 边部保存 Coe 包体; f—样品 YM1_7 保存 Coe+ Arg 超高压矿物包体

a—sample QL3_26 contains Coe + Ky + Rt + Ap inclusions in the core and mantle; b—sample QL3_30 contains Coe + Ky + Grt + Omp + Phe + Ap inclusions in the core and mantle; c—sample QL3_38 contains Coe + Ky + Grt + Omp + Phe inclusions in the core and mantle; d—CL image of the same zircon as in Fig. 3c showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; e—sample YM1_3 contains Coe + Di inclusions in the core and mantle, and Coe inclusions in the rim; f—sample YM1_7 contains Coe + Arg in the core and mantle

晶体边缘则保存了以石英为代表的低压矿物包体(图 4c ,4d)。上述特征表明, 该类锆石自超高压变质阶段开始结晶生长, 并经历了晚期退变质事件的改造。

www.yskw.ac.cn

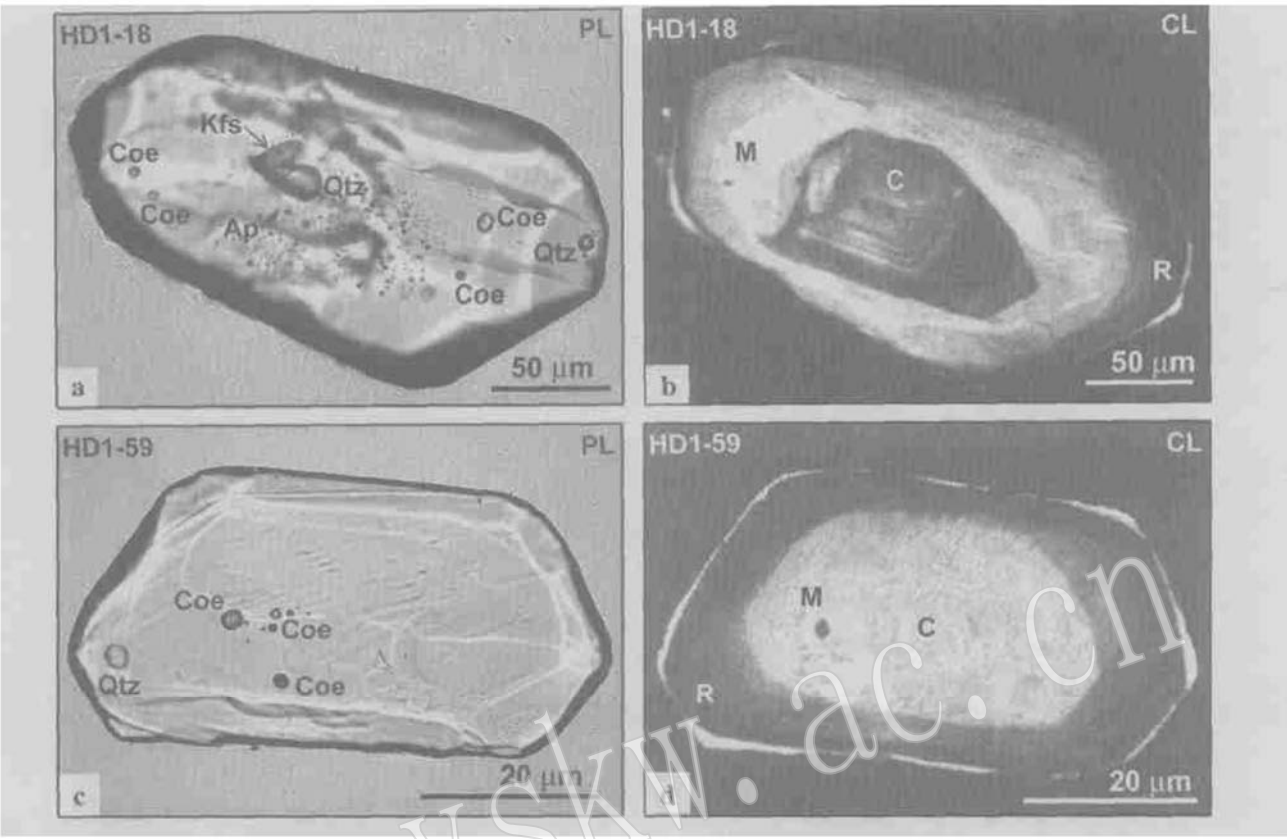

图 4 正片麻岩锆石及矿物包体的显微照片(PL)和相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 4 Plane-polarized light (PL) images and cathodoluminescence images (CL) of host zircons and mineral inclusions in zircons from orthogneiss

a—正片麻岩锆石样品(HD1)第 18 粒晶体(HD1_18)的核部保存 Qtz+ Kfs+ Ap 等矿物包体,幔部保存 Coe 超高压矿物包体,而边部则保存 Qtz 低压矿物包体; b—图 4a 中锆石的阴极发光图像,显示继承性锆石的核、超高压增生的幔和退变边; c—正片麻岩锆石样品(HD1)第 59 粒晶体(HD1_59)的核部和幔部保存 Coe 等超高压矿物包体,边部则保存 Qtz 低压矿物包体; d—图 4c 中锆石晶体的阴极发光图像,显示超高压增生的核部和幔部以及退变边

a—zircon grain HD1_18 from HD1 sample contains Qtz + Kfs + Ap in the core, Coe in the mantle, and Qtz in the rim; b—CL image of the same zircon as in Fig. 4a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; c—zircon grain HD1_59 from HD1 sample contains Coe inclusions in the core and mantle, and Qtz inclusion in the rim; d—CL image of the same zircon as in Fig. 4c showing core, mantle and rim relationship

3.5 斜长角闪岩和榴辉岩中锆石的矿物包体

研究发现,岩片Ⅰ和Ⅱ中斜长角闪岩的锆石中均发现大量的矿物包体,主要包括柯石英、石英、石榴石、绿辉石、多硅白云母、金红石、菱镁矿(Mgs)和磷灰石等,而这样的超高压组合在斜长角闪岩基质中从未发现(Liu *et al*., 2003)。以芝麻坊(ZM1)、牛山(DH1)和毛北(MB2)斜长角闪岩为例,在大多数锆石晶体中,含柯石英超高压矿物包体组合集中分布于锆石晶体的核部和幔部(图 5a、5b、5c),常见的超高压矿物组合为 Coe+ Grt+ Omp(图 5a)、Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt+ Ap(图 5b)和 Coe+ Mgs(图 5c),相应的锆石阴极发光图像显示低发光效应的核、强发光效应的幔以及狭窄的弱发光效应的退变边(图 5d)。此外,本文也对榴辉岩锆石中的矿物包体和阴极发光图像进行了深入研究。以毛北地区榴辉岩(MB3)为例,锆石中常见的超高压矿物包体组合以 Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt 为特征(图 5e),相应的锆石阴极发光图像则显示强发光的核部和幔部以及弱发光的边部(图 5f)。这些超高压矿物包体组合不仅与相应的榴辉岩基质中矿物组合完全一致,而且与斜长角闪岩锆石中保存的超高压矿物包体组合也十分相似,这充分表明了区内斜长角闪岩是超高压榴辉岩退变作用的产物。

www.yskw.ac.cn

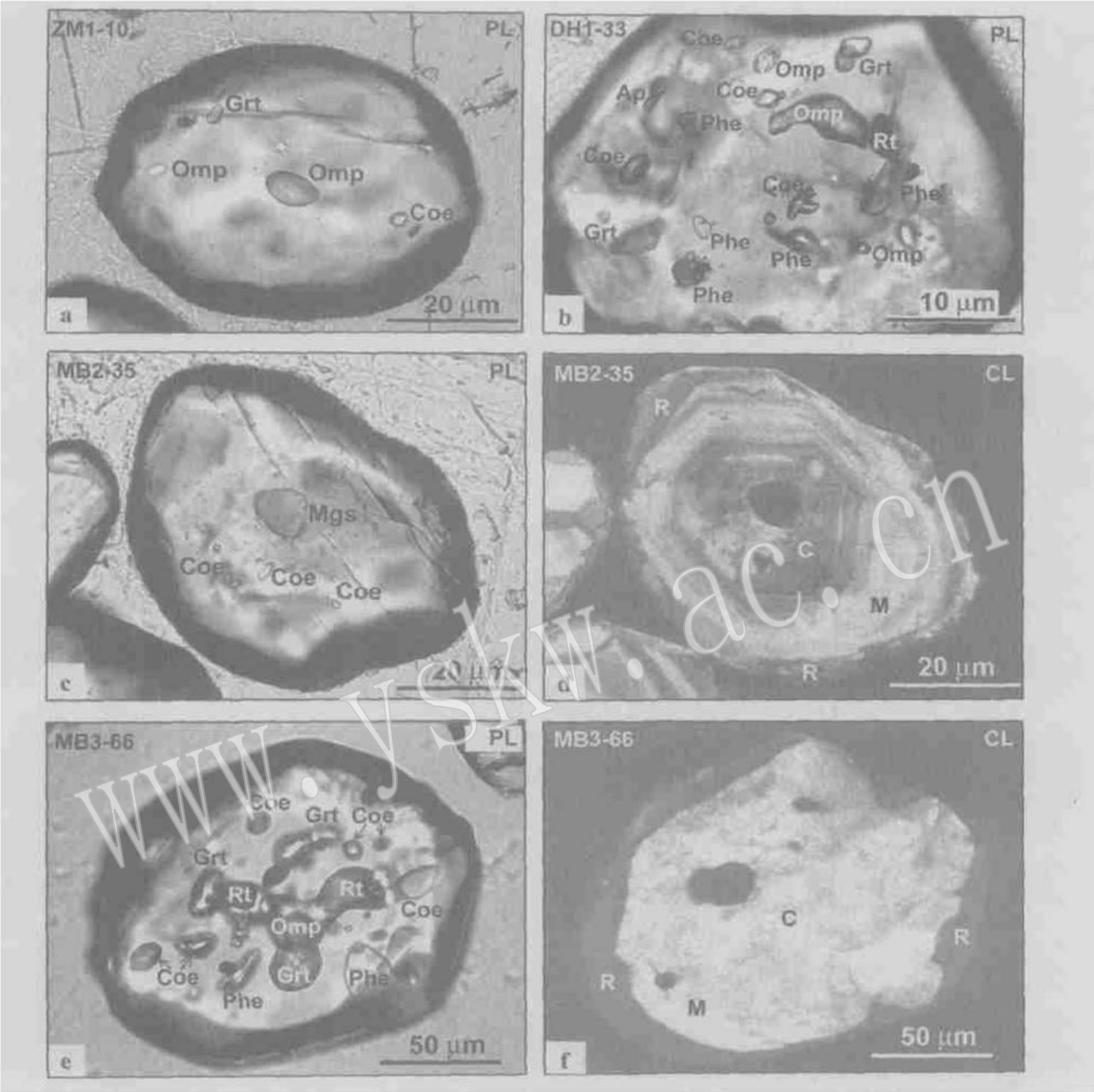

图 5　斜长角闪岩(ZM1、DH1、MB2)和榴辉岩(MB3)锆石及矿物包体的显微照片(PL)及相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 5　Plane_polarized light (PL) images and CL images of host zircons and mineral inclusions in zircons from amphibolite (ZM1, DH1 and MB2), and from surface eclogite (MB3)

a—锆石样品 ZM1 的第 10 粒晶体(ZM1_10)中保存的超高压矿物包体 Coe+ Grt+ Omp; b—锆石样品 DH1 的第 33 粒晶体(DH1_33)中保存的超高压矿物包体 Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt+ Ap; c—锆石样品 MB2 的第 35 粒晶体(MB2_35)中保存的超高压矿物包体 Coe+ Mgs; d—图 5c 中锆石的阴极发光图像; e—锆石样品 MB3 的第 66 粒晶体(MB3_66)中保存的超高压矿物包体 Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt; f—图 5e 中锆石的阴极发光图像

a—zircon grain ZM1_10 from ZM1 sample contains Coe + Grt + Omp inclusions in the core and mantle; b—zircon grain DH1_33 from DH1 sample contains Coe + Grt + Omp + Phe + Rt + Ap inclusions in the core and mantle; c—zircon grain MB2_35 from MB2 sample contains Coe + Mgs inclusions in the core and Coe in the mantle, respectively; d—CL image of the same zircon as in Fig. 5c showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; e—zircon grain MB3_66 from MB3 sample contains Coe + Grt + Omp + Phe + Rt inclusions in the core and mantle; f—CL image of the same zircon as in Fig. 5e showing core, mantle and rim

www.yskw.ac.cn

4 岩片 II和 IV变质岩锆石中矿物包体特征

激光拉曼测试结果表明,岩片 II和 IV(图 1) 所有类型岩石中的锆石均含有大量的矿物包体。研究发现,33 件样品中的锆石晶体内部不含任何超高压矿物包体(如柯石英),而只保存以文石和多硅白云母为代表的高压矿物包体组合。

4.1 副片麻岩中锆石的矿物包体

岩片 II和 IV锆石中的矿物包体明显不同于岩片 I 和 II锆石中的矿物包体,主要为文石、石榴石、多硅白云母、石英、钠长石和磷灰石。锆石中常见的高压包体矿物组合为: Arg+ Grt+ Phe+ Qtz(图 6a) 和 Grt+ Phe+ Ab+ Qtz+ Ap(图 6c)。由于该类副片麻岩经历了明显的角闪岩相-绿片岩相退变质作用的改造,因此,上述高压矿物组合在相应的基质中很难被保存。在同一副片麻岩样品中,单一锆石晶体不同微区中的矿物包体性质及其分布特征存在明显差异。以后山村石榴黑云二长片麻岩(HS1) 为例, Qtz + Ap 包体常保存在锆石晶体的核部,标志性高压包体矿物组合 Arg+ Grt+ Phe+ Qtz 和 Grt+ Phe+ Ab + Qtz+ Ap 保存在晶体的幔部,而锆石的晶体边缘则不含任何矿物包体(图 6a、6c),相应的阴极发光图像具有典型低发光效应的核、强发光效应的幔以及低发光效应的边的特点(图 6b、6d)。上述特征表明,副片麻岩中的锆石记录了原岩碎屑锆石的核、高压变质增生幔和退变质过程增生(或改造)边的结晶-生长演化历史。

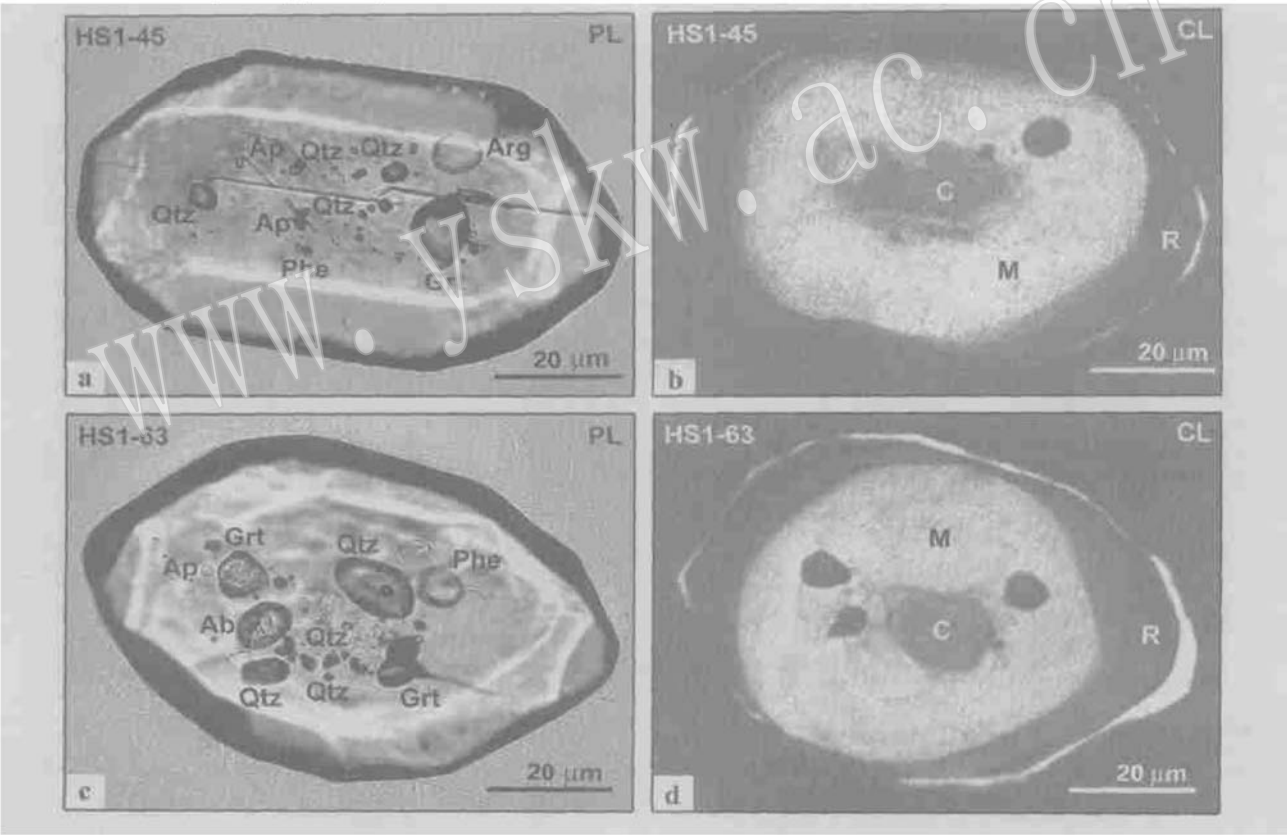

图 6 副片麻岩(HS1) 锆石及矿物包体的显微照片(PL) 及相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 6 Plane_polarized light (PL) images and CL images of host zircons and mineral inclusions in zircons from garnet_ and biotite_bearing two_feldspar gneiss (HS1)

a—锆石样品 HS1 中的第 45 粒晶体核部保存 Qtz+ Ap 包体,幔部保存 Arg+ Grt+ Phe+ Qtz 包体; b—图 6a 中锆石的阴极发光图像,显示明显的继承性核(C)、高压增生幔(M) 和退变边(R); c—锆石样品 HS1 中的第 63 粒晶体核部保存 Qtz 包体,幔部保存 Grt+ Phe+ Ab+ Qtz+ Ap 包体; d—图 6c 中锆石的阴极发光图像,显示明显的继承性核、高压增生幔和退变边

a—zircon grain HS1_45 from HS1 sample contains Qtz + Ap inclusions in the core, and Arg + Grt + Phe + Qtz in the mantle; b—CL image of the same zircon as in Fig. 6a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; c—zircon grain HS1_63 from HS1 sample contains Qtz inclusions in the core, Grt + Phe + Ab + Qtz + Ap in the mantle; d—CL image of the same zircon as in Fig. 6c showing core, mantle and rim relationship

www.yskw.ac.cn

4.2　含蓝晶石石英岩中锆石的矿物包体

在猴嘴(HZ1)和韩山(HSH1)含蓝晶石石英岩的锆石中也发现了高压矿物包体(图 7)。含蓝晶石石英岩中的锆石晶体相对较小(粒径 40~ 80 μm),矿物包体也相对较少,主要为蓝晶石、多硅白云母、石英和磷灰石,且集中保存在晶体的核部和幔部(图 7)。锆石中保存的标志性高压包体矿物组合主要为: Ky+ Phe+ Qtz+ Ap(图 7a)和 Ky+ Phe+ Qtz(图 7c),相应的阴极发光图像具有强发光效应的核-幔以及弱发光效应的边部(图 7b、7d)。上述特征表明该类锆石主要形成于高压变质阶段,因此,在含蓝晶石和多硅白云母的微区,采用 SHRIMP U_Pb 定年方法,可获得高压变质年龄的信息。

图 7　含蓝晶石石英岩(HZ1、HSH1)锆石及矿物包体的显微照片(PL)及相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 3　Plane_polarized light (PL) images and cathodoluminescence images (CL) of host zircons and mineral inclusions in zircons from kyanite_bearing quartzite

a—锆石样品 HZ1 中的第 29 粒晶体核部和幔部保存 Ky+ Phe+ Qtz+ Ap 高压矿物包体; b—图 7a 中锆石的阴极发光图像,显示明显的环带结构; c—锆石样品 HSH1 中的第 37 粒晶体核部和幔部保存 Ky+ Phe+ Qtz 高压矿物包体; d—图 7c 中锆石的阴极发光图像,显示明显的环带结构

a—zircon grain HZ1_29 from HZ1 sample contains Ky + Phe + Qtz + Ap inclusions in the core and mantle; b—CL image of the same zircon as in Fig. 7a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; c—zircon grain HSH1_37 from HSH1 sample contains Ky + Phe + Qtz inclusions in the core and mantle; d—CL image of the same zircon as in Fig. 7c showing core, mantle and rim relationship

4.3　大理岩中锆石的矿物包体

从岩片 III大理岩中分离出的锆石晶体十分细小,粒径 30~ 70 μm。大多数锆石不含矿物包体,只有少数含有细小矿物包体(图 8)。以锦屏地区含磷灰石大理岩(JP1)为例,有的锆石核部含有 Arg+ Qtz 高压矿物包体,边部含有 Ap 等矿物包体(图 8a);有的核部则含有 Arg 高压矿物包体,而边部无矿物包体(图 8c)。高压矿物包体组合明显对应于阴极发光图像中强发光效应的核,而锆石边部具有弱发光的特点(图 8b、8d)。上述特征表明,岩片 III中的含磷灰石大理岩无疑也经历了高压变质作用。

4.4　正片麻岩中锆石的矿物包体

岩片 III和 IV所有类型正片麻岩锆石中均保存大量矿物包体(图9),主要为石英、钾长石、多硅白云母

www.yskw.ac.cn

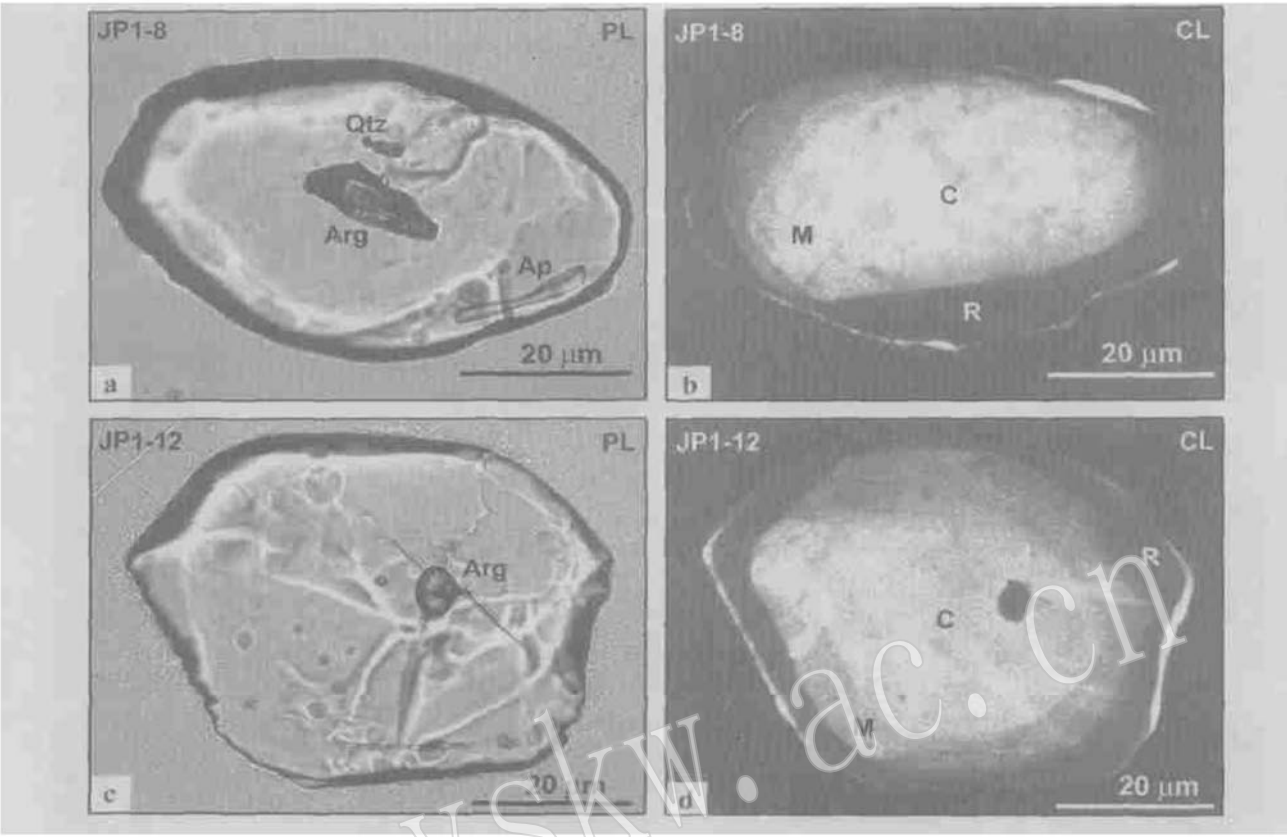

图 8 含磷灰石大理岩(JP1)锆石及矿物包体的显微照片(PL)及相应的阴极发光图像(CL)

Fig. 8 Plane_polarized light (PL) images and CL images of host zircons and mineral inclusions in zircons from apatite_bearing marble (JP1)

a—锆石样品 JP1 中的第 8 粒晶体核部保存 Arg+ Qtz 高压矿物包体, 边部则保存 Ap 等矿物包体; b—图 8a 中锆石的阴极发光图像, 显示明显的环带结构; c—锆石样品 JP1 中的第 12 粒晶体核部保存 Arg 高压矿物包体; d—图 7c 中锆石的阴极发光图像, 显示明显的环带结构特点

a—zircon grain JP1_8 from JP1 sample contains Arg + Qtz in the core, and Ap in the rim; b—CL image of the same zircon as in Fig. 8a showing core (C), mantle (M) and rim (R) relationship; c—zircon grain JP1_12 from JP1 sample contains Arg inclusion in the core; d—CL image of the same zircon as in Fig. 8c showing core, mantle and rim relationship

www.yskw.ac.cn

和磷灰石等。然而, 在这些锆石中从未发现超高压矿物(如柯石英等)包体, 明显不同于岩片Ⅰ和Ⅱ中的正片麻岩(图 4)。以黄窝村地区含磁铁矿和黑云母钾长花岗质片麻岩(HW1)为例, 绝大多数锆石自核部至边部均显示明显的岩浆结晶环带, 并不具备变质增生锆石的特点。只有极少数的锆石晶体显示岩浆结晶锆石的核、强发光效应的幔以及弱发光效应的再生边的特点(图 9b、9d)。然而, 变质增生的幔部和边部的宽度极窄, 均小于 15 μm, 明显不同于经历超高压变质正片麻岩锆石的阴极发光特征(图 4b、4d)。在继承性岩浆结晶锆石的核部, 常保存 Qtz+ Kfs+ Ap(图 9a)和 Qtz+ Kfs(图 9c)等矿物包体, 在变质增生的幔部则保存了 Phe+ Qtz(图 9a)和 Phe+ Qtz+ Ap(图 9c)等高压矿物包体; 而在锆石弱发光效应的增生边部未发现任何矿物包体。上述特征进一步表明, 岩片Ⅲ和Ⅳ正片麻岩的部分锆石的核部记录了岩浆结晶事件, 幔部记录了高压变质事件, 而其边部则记录了后期角闪岩相-绿片岩相退变质事件。

5 结论与讨论

在南苏鲁正片麻岩岩片(Ⅰ)表壳岩岩片(Ⅱ)中, 所有样品的锆石均保存以柯石英为代表的超高压矿物包体, 而在含蓝晶石石英岩-大理岩岩片(Ⅲ)和副片麻岩-变火山岩-片岩岩片(Ⅳ)中, 所有样品

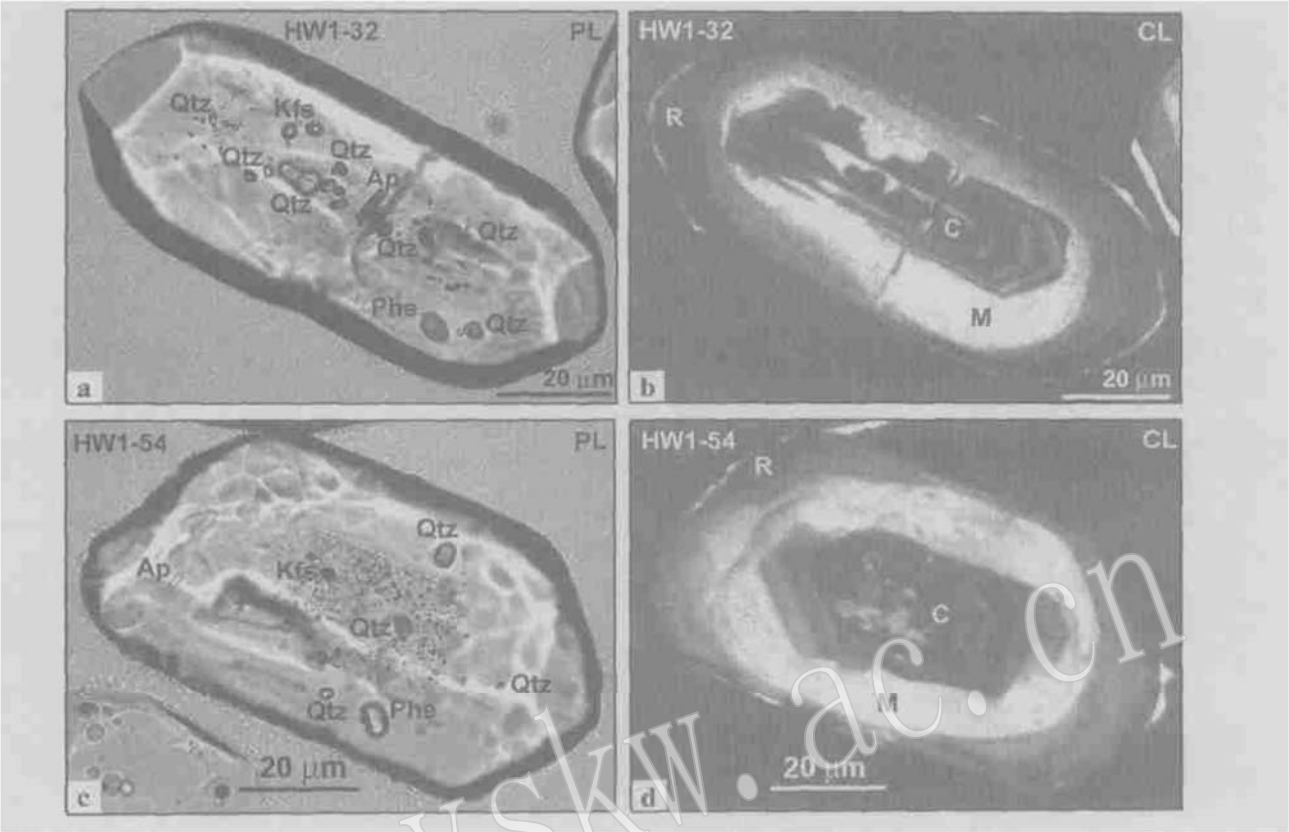

图 9　含磁铁矿和黑云母正片麻岩(HW1)锆石及矿物包体的显微照片(PL)及相应的阴极发光图象(CL)

Fig. 9　Plane_polarized light (PL) images and CL images of host zircons and mineral inclusions in zircons from magnetite_ and biotite_bearing potash feldspar orthogneiss (HW1)

a—锆石样品 HW1 中的第 32 粒晶体核部保存 Qtz+ Kfs+ Ap 等矿物包体, 幔部保存 Phe+ Qtz 高压矿物包体, 边部无矿物包体; b—图 9a 中锆石的阴极发光图像, 显示明显的岩浆结晶锆石的核、高压变质增生的幔和退变(改造)边; c—锆石样品 HW1 中的第 54 粒晶体核部保存 Qtz+ Kfs 等矿物包体, 幔部保存 Phe+ Qtz+ Ap 高压矿物包体, 边部无矿物包体; d—图 9c 中锆石的阴极发光图像, 显示明显的岩浆结晶锆石的核、高压变质增生的幔和退变(改造)边

a—zircon grain HW1_32 from HW1 sample contains Qtz + Kfs + Ap in the core, and Phe + Qtz in the mantle; b—CL image of the same zircon as in Fig. 9a showing core (C), mantle (M) and rim (M) relationship; c—zircon grain HW1_54 from HW1 sample contains Qtz + Kfs in the core, and Phe + Qtz + Ap in the mantle; d—CL image of the same zircon as in Fig. 9c showing core, mantle and rim relationship

的锆石则保存以文石和多硅白云母为特征的高压矿物包体。因此, 岩片Ⅰ和Ⅱ应归属超高压变质带, 而Ⅲ和Ⅳ应归属高压变质带。这些标志性的超高压和高压矿物在南苏鲁东海及其邻区的分布特征如图 1。最近, 详细的野外填图发现, 超高压带和高压带之间的界线为一典型的韧性剪切带 (许志琴等, 2003), 而标志性超高压矿物包体组合和高压矿物包体组合恰恰沿该剪切带两侧分布(图 1)。

超高压岩片规模的准确限定对重塑苏鲁-大别地体俯冲-折返模式有着重要的作用(Liou *et al*., 2000)。而以往众多研究结果均表明, 绝大多数柯石英和柯石英假像以及其他超高压变质作用证据的发现均集中于榴辉岩和超基性岩中(Wang *et al*., 1989; Okay *et al*., 1989; Yang J J *et al*., 1993; Zhang *et al*., 1995, 2003; Liou *et al*., 1996; Yang J J *et al*., 2003; Yang J S *et al*., 2003)。针对上述研究所存在的欠缺, 本文对南苏鲁岩片Ⅰ和Ⅱ中几乎所有岩石类型锆石中的矿物包体进行了系统研究, 结果不仅在榴辉岩锆石中发现了超高压矿物包体, 而且在榴辉岩围岩的锆石中, 包括经历强烈角闪岩相退变质改造的副片麻岩、正片麻岩、斜长角闪岩、大理岩和含蓝晶石石英岩普遍保存含柯石英的超高压矿物包体(图 1、表 1)。此外, 在中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD_PP1(深度 432 m)和 CCSD_PP2(深度 1 028 m) 的所有岩石类型锆石中也普遍发现柯石英等超高压矿物包体(表 1; Liu *et*

www.yskw.ac.cn

al., 2001, 2002, 2003)。含柯石英的超高压矿物包体在南苏鲁Ⅰ和Ⅱ岩片的三维空间的广泛分布,标志着由榴辉岩及其围岩所组成的巨量陆壳物质曾一起发生深俯冲,并经历了超高压变质作用。

根据锆石微区超高压矿物包体(如石榴石、绿辉石和多硅白云母)的化学成分,结合 Grt_Omp 地质温度计、Grt_Omp_Phe 地质压力计以及 Coe= Qtz 反应线的实验资料(Bohlen *et al*., 1982),对超高压峰期阶段温压条件进行了综合判断。估算结果表明,榴辉岩及其围岩含柯石英锆石微区记录了十分一致的温压条件,t = 723~ 852 ℃, $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa(表 1)。上述资料充分证明了榴辉岩及其围岩超高压峰期阶段的变质条件基本相似。

在岩片Ⅲ和Ⅳ中,所有类型岩石锆石中保存的矿物包体与超高压变质带的岩石存在本质的差别。锆石中标志性高压矿物文石和多硅白云母的发现,无疑证明了岩片Ⅲ和Ⅳ中的所有变质岩石,包括副片麻岩、正片麻岩、含蓝晶石石英岩、大理岩以及片岩等均经历了高压变质作用。最近研究发现,在韩山含蓝晶石石英岩中发现了高压变质的富含氟的黄玉,其峰期变质温压条件为 t = 500~ 600 ℃, p = 1.2×10^3 ~ 2.5×10^3 MPa(Zhang *et al*., 2003)。而笔

表 1 南苏鲁超高压(UHP)和高压(HP)变质岩锆石中保存的 UHP 和 HP 包体矿物及其形成的温压条件

Table 1 Index UHP and HP minerals identified as inclusions in zircons and *p_T* estimates of present and previous studies from both UHP and HP rocks in southwestern Sulu terrane, eastern China

变质带及钻孔	岩石类型	标志性 UHP 和 HP 矿物包体	温压条件
超高压(UHP)带(岩片Ⅰ和Ⅱ; 本文)	副片麻岩	Coe+ Grt+ Omp+ Phe Coe+ Grt+ Omp Coe+ Phe	t = 758~ 834 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
		Coe+ Jd+ Phe+ Rt Coe+ Grt+ Jd+ Rt+ Ap Coe+ Grt+ Jd+ Rt Coe+ Jd+ Rt	t = 766~ 838 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
	含蓝晶石石英岩	Coe+ Ky+ Rt+ Ap Coe+ Grt+ Omp+ Ky+ Phe+ Ap Coe+ Grt+ Omp+ Ky+ Phe	t = 737~ 818 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
	含透辉石大理岩	Coe+ Di Coe+ Arg	
	正片麻岩	Coe	
	斜长角闪岩	Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt+ Ap	t = 732~ 777 ℃(Liu F *et al*., 2003) $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
	榴辉岩	Coe+ Grt+ Omp+ Phe+ Rt	
超高压(UHP)带中的钻孔 PP1(Liu F *et al*., 2001)	副片麻岩	Coe+ Grt+ Omp Coe+ Jd+ Phe+ Ap Coe+ Grt	t = 814~ 852 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
	斜长角闪岩	Coe+ Grt+ Omp	
超高压(UHP)带中的钻孔 PP2(Liu F *et al*., 2002, 2003)	副片麻岩	Coe+ Grt+ Omp+ Rt Coe+ Grt+ Jd+ Phe+ Ap Coe+ Phe+ Rt+ Ap	t = 754~ 805 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
	斜长角闪岩	Coe+ Grt+ Omp+ Rt Coe+ Omp+ Rt Coe+ Mgs	t = 723~ 764 ℃ $p \geqslant 2.8 \times 10^3$ MPa
高压(HP)带(岩片Ⅲ和Ⅳ; 本文)	副片麻岩	Arg+ Grt+ Phe+ Qtz Grt+ Phe+ Ab+ Qtz+ Ap	t = 500 ~ 600 ℃(Zhang R *et al*., 2002) p = 1.2×10^3 ~ 2.5×10^3 MPa
	含蓝晶石石英岩	Ky+ Phe+ Qtz+ Ap Ky+ Phe+ Qtz	
	含磷灰石大理岩	Arg Arg+ Qtz	
	正片麻岩	Phe+ Qtz Phe+ Qtz+ Ap	

www.yskw.ac.cn

者的研究结果表明, 高压带岩石锆石中保存的标志性高压包体矿物组合为: Arg+ Grt+ Phe+ Qtz(图 6a) 、Phe+ Grt+ Ab+ Qtz(图 7c) 和 Arg ±Qtz(图 8a、8c) 。假设峰期温度条件为 500~ 600 ℃(Zhang *et al*., 2003) , 根据变质反应 Arg= Cal(Holland *et al*., 1990) 、Jd+ Qtz= Ab(Holland, 1980) 和 Coe= Qtz (Bohlen *et al*., 1982) 等实验资料, 确定上述岩石高压变质的峰期压力条件应为 1.2×10^3~ 2.5×10^3 MPa, 这与 Zhang 等(2003) 的估算结果完全一致。

以往同位素年代学研究结果表明, 苏鲁-大别地体超高压变质时代应为印支期(Li *et al*., 1993; Ames *et al*., 1996; Hacker *et al*., 1998, 2000) 。最近, 本文第一作者在系统研究锆石微区矿物包体分布特征和锆石阴极发光图像的基础上, 采用 SHRIMP U_Pb 定年技术, 对钻孔 CCSD_PP2 正、副片麻岩中不同性质锆石微区进行系统测试, 结果获得了 3 组具有实际意义的年龄信息(Liu *et al*., 2004) , 即在含石英等继承性锆石核部获得新元古代(> 680 Ma) 的原岩形成年龄, 在含柯石英的幔部获得 231 ±4 Ma 的超高压变质年龄, 而在含石英的退变边则获得了 211 ±4 Ma 的角闪岩相退变质年龄。这些 SHRIMP U_Pb 定年结果表明, 苏鲁地体新元古代的陆壳岩石在中三叠纪发生深俯冲至上地幔深度, 并经历了超高压变质作用, 之后于晚三叠纪构造抬升到中地壳的深度, 叠加了角闪岩相退变质作用, 相应的折返速率为 5.0 km/Ma (Liu *et al*., 2004) 。

此外, 在高压带的岩石中, 部分锆石也具有继承性的核、高压变质增生幔以及退变边的特点(图 6、图 9) 。因此, 对这样的锆石也可以采用 SHRIMP U_Pb 定年技术, 同样可以获得具有实际意义的年代学信息。该项工作目前正在进行中。

致谢　本文为国家自然科学基金重大项目(40399143) 、国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716502) 和国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目的联合资助成果。在成文过程中, 与张儒媛博士、沈其韩院士进行了有益的讨论。测试工作得到了国土资源部大陆动力学重点实验室的资助, 在此一并表示感谢。

References

Ames L, Zhou G and Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of high_pressure metamorphism with implications for collision of the Sino_Korean and Yangtze cratons, central China[J]. Tectonics, 15: 472~ 489.

Bohlen S R and Boettcher A. L. 1982. The quartz_coesite transformation: a pressure determination and effects of other components[J]. Journal of Geophysical Research, 87: 7 073~ 7 078.

Chopin C and Sobolev N V. 1995. Principal mineralogic indicators of UHP in crustal rocks[A]. Coleman R G and Wang X M. Ultra_High Pressure Metamorphism[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 96~ 131.

Enami M, Zang Q J and Yin Y J. 1993. High_pressure eclogites in north Jiangsu- southern Shandong Province, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1: 589~ 603.

Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, *et al*. 1998. Orogen_scale architecture of the ultrahigh_pressure Dabie- Hong' an- Tongbai Shan, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 161: 215 ~ 230.

Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, *et al*. 2000. Exhumation of ultrahigh_pressure continental crust in east central China[J]. Journal of Geophysical Research, 105: 13 339~ 13 364.

Holland T J B. 1980. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600~ 1 200 ℃[J]. American Mineralogist, 65: 125~ 134.

Holland T J B and Powell R. 1990. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2O-O_2$[J]. Journal of Metamorphic Geology, 8: 89~ 124.

Katayama I, Zayakhstan A A and Maruyama S. 2000. Progressive P_T records from zircon in Kokchetav UHP_HP rocks, northern Kazakhstan[J]. The Island Arc, 9: 417~ 427.

Li S, Chen Y, Cong B, *et al*. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite_bearing eclogite: timing and processes[J]. Chemical Geology, 109: 70~ 89.

Liou J G, Hacker B R and Zhang R Y. 2000. Into the forbidden zone [J]. Science, 287: 1215~ 1216.

Liou J G and Zhang R Y. 1996. Occurrence of intergranular coesite in Sulu ultrahigh_P rocks from China: Implications for fluid activity during exhumation[J]. American Mineralogist, 81: 1 217~ 1 221.

Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, *et al*. 2001. Mineral inclusions in zircons of para_ and orthogneiss from pre_pilot drillhole CCSD_PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Lithos, 59: 199 ~ 215.

Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, *et al*. 2002. Ultrahigh_pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling Site in eastern China[J]. European Journal of Mineralogy, 14: 499~ 512.

Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, *et al*. 2004. SHRIMP U_Pb ages of ultrahigh_pressure and retrograde metamorphism of gneissic rocks, southwestern Sulu terrane, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 22: 315~ 326.

Liu F L, Zhang Z M, Katayama I, *et al*. 2003. Ultrahigh_pressure metamorphic records hidden in zircons from amphibolites in Sulu terrane, eastern China[J]. The Island Arc, 12: 256~ 267.

Liu J B, Ye K, Maruyama S, *et al*. 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh_pressure zone of the Dabie Mountains, China[J]. Journal of Geology, 109: 523~ 535.

Okay A I, Xu S and Sengör A M C. 1989. Coesite from the Dabie Mountains eclogite, central China[J]. European Journal of Mineralogy, 1: 595~ 598.

Okay A I and Sengör A M C. 1992. Evidences for intra_continental thrust related exhumation of the ultra_high pressure rocks in China [J]. Geology, 20: 411~ 414.

Parkinson C D and Katayama I. 1999 Present day ultrahigh- pressure conditions of coesite inclusions in zircon and garnet: evidence from laser Raman microspectroscopy[J]. Geology, 27: 979~ 982.

Sobolev N V, Shatsky V S, Vavilov S V, *et al*. 1994. Zircon from ultrahigh pressure metamorphic rocks of folded regions as an unique containers of inclusions of diamond, coesite and coexisting minerals [J]. Dokl. Akad. Nauk., 334: 488~ 492 (in Russian).

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 Dabieshan[A]. Hacker B R and Liou J G. When continents collide: geodynamics and geochemistry of ultrahigh_pressure rocks[C]. Kluwer Academic Pulisher, 261~ 273.

Wang X M and Liou J G. 1992. Regional ultrahigh_pressure coesite_bearing eclogitic terrane in central China: evidence from country_rocks, gneiss, marble and metapelite[J]. Geology, 20: 933~ 936.

Wang X M, Liou J G and Mao H G. 1989. Coesite_bearing eclogites from the Dabie mountains in central China[J]. Geology, 17: 1 085 ~ 1 088.

Xu Zhigin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al*. 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh_pressure metamorphic belt, central China[J]. Acta Geologica Sinica, 77: 433~ 450 (in Chinese with English abstract).

Yang J J. 2003. Titanian clinohumite- garnet- pyroxene rock from the Su_Lu UHP metamorphic terrane, China: chemical evolution and tectonic implications[J]. Lithos, 70: 359~ 379.

Yang J J, Godard G, Kienast J R, *et al*. 1993. Ultrahigh_pressure (60 kbar) magnesite_bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China[J]. Journal of Geology, 101: 541~ 554.

Yang J S, Wooden C L, Wu C L, *et al*. 2003. SHRIMP U_Pb dating of coesite_bearing zircon from the ultrahigh_pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 21: 551~ 560.

Ye K, Yao Y, Katayama I, *et al*. 2000. Large areal extent of ultrahigh_pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh_pressure terrane of east China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss[J]. Lithos, 52: 157~ 164.

Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, *et al*. 1995. Petrology of ultrahigh_pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 13: 659~ 675.

Zhang R Y and Liou J G. 1997. Partial transformation of gabbro to coesite_bearing eclogite from Yangkou, the Su_Lu terrane, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 15: 183~ 202.

Zhang R Y, Liou J G and Shu J F. 2002. Hydroxyl_rich topaz in high_pressure and ultrahigh_pressure kyanite quartzites, with retrograde woodhouseite, from the Sulu terrane, eastern China[J]. American Mineralogist, 87: 445~ 453.

Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, *et al*. 2003. Ultrahigh_pressure metamorphism in the forbidden zone: the Xugou garnet peridotite, Sulu terrane, eastern China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 21: 539~ 550.

Zhang Z M, Xu Z Q and Xu H F. 2000. Petrology of ultrahigh_pressure eclogites from the ZK703 drillhole in the Donghai, eastern China [J]. Lithos, 52: 35~ 50.

附中文参考文献

许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. 地质学报, 77(4): 433~ 450.

www.yskw.ac.cn

致 谢

2004 年度, 许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间, 配合编辑部为本刊评审了稿件, 为提高刊物的质量做出了重要贡献。没有这些专家的辛勤劳动, 本刊是不可能在多方面取得进步的。为此, 本刊编辑部特向他们表示衷心的感谢!

这些专家有: (以汉语拼音为序)

白文吉 白志民 柴 红 陈从喜 陈培荣 邓万明 杜杨松 樊祺诚 范宏瑞 冯增昭
郭九皋 郭立鹤 郭正府 韩 成 洪大卫 冀志江 赖绍聪 李任伟 李胜荣 李献华
李延河 李艳兵 李之彤 廖立兵 刘 斌 刘昌实 刘池阳 刘和甫 刘贻灿 柳永清
鲁安怀 毛景文 倪 培 彭同江 沈上越 史仁灯 孙 岩 孙振亚 汤集刚 万天丰
万渝生 汪云亮 王道德 王道轩 王国灿 王河锦 王立本 王汝成 王 涛 魏春景
翁臻培 吴才来 吴大清 吴福元 吴宏海 吴堑虹 吴瑞华 肖金凯 徐树桐 徐学义
许效松 薛纪越 薛君治 杨崇辉 叶 凯 喻学惠 袁万明 曾荣树 张宏福 张建新
张 鼐 张 旗 张兴仁 张泽明 张招崇 赵元艺 赵云龙 郑文武 郑雅杰 郑永飞
钟广法 周金城 朱金初 朱永峰 邹天人

《岩石矿物学杂志》编辑部