

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定：来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据

刘福来¹⁾ 许志琴¹⁾ 宋彪²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 大陆动力学实验室, 北京, 100037

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京离子探针中心, 北京, 100037

内容提要 锆石微区矿物包体的激光拉曼和阴极发光测试以及相应的 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 苏鲁地体片麻岩锆石微区记录了十分复杂的年代学信息。其中副片麻岩锆石核部记录了345~743 Ma的继承性锆石年龄, 标志着原岩碎屑锆石来源的复杂性; 含柯石英的锆石微区记录了220~234 Ma的超高压变质年龄; 而含石英包体的边部则记录了202~219 Ma的退变质年龄。正片麻岩继承性锆石核部所记录的年龄为574~680 Ma, 表明原岩锆石曾经历了部分 Pb 丢失, 原岩的形成年龄应大于680 Ma; 含柯石英锆石微区所记录的超高压变质年龄为224~242 Ma; 而锆石边部所记录的退变质年龄为209~219 Ma。两类片麻岩锆石微区所隐藏的超高压变质和退变质年龄信息十分相近, 平均值分别为 229 ± 4 Ma 和 211 ± 4 Ma, 标志着苏鲁地体超高压变质时代应为印支期, 相应的构造抬升速率约5.6 km/Ma。该项成果不仅确定了苏鲁地体超高压变质和退变质时代, 而且对于深入探讨苏鲁地体快速折返过程中的动力学机制有着重要的科学意义。

关键词 SHRIMP U-Pb 定年 锆石 矿物包体 超高压变质 片麻岩 苏鲁地体

苏鲁—大别地体是世界上最著名的超高压变质带。近年来, 在榴辉岩围岩——花岗质片麻岩锆石中柯石英的发现 (Tabata et al., 1998; Ye et al., 2000; Liu F L, et al., 2001, 2002; Liu J B, et al., 2001; 刘福来等, 2003), 已基本平息了大别—苏鲁地体有关榴辉岩与其围岩的接触关系的争论。尤其是本文研究者在南苏鲁东海及其邻区三维空间的各种变质岩 (如副片麻岩、正片麻岩、斜长角闪岩、榴辉岩、大理岩、蓝晶石英岩和钙镁硅酸盐岩石等) 锆石中, 发现大量以柯石英为代表的超高压矿物包体组合, 标志着由榴辉岩及其围岩的原岩所组成的巨量陆壳物质曾广泛发生深俯冲, 并经历了超高压变质作用 (Liu F L, et al., 2001, 2002; 刘福来等, 2003)。到目前为止, 尽管许多研究者采用多种方法对苏鲁—大别超高压变质带的年代学等诸多方面进行了研究, 但有关超高压变质时代仍存在较大分歧, 长期以来各派仍存在激烈的争论。部分研究者认为大别—苏鲁地体超高压变质时代为太古宙—中新元古代 (Dong, 1993; 王来明等, 1994; Dong et al.,

1996; 康维国等, 1996); 另一部分研究者认为超高压变质时代为加里东期 (张泽明等, 1995; You et al., 1996; 简平等, 1997); 而多数研究者则认为超高压变质时代为印支期, 采用的测年方法包括 Sm-Nd 法 (杨建军, 1991; Li et al., 1989, 1993, 2000a)、Rb-Sr 法 (Li et al., 1994, 2000b)、锆石 U-Pb 法 (Ames et al., 1993, 1996; Rowley et al., 1997) 和 Ar-Ar 法 (Mattauer, 1985; Eide et al., 1994; Hacker et al., 1995)。

众所周知, 上述每一种年代学研究均存在一定程度上的欠缺。尤其是近年来有关锆石微区矿物包体及相应的阴极发光图像研究表明, 锆石的各微区记录了不同实际意义的年代学信息 (Liu F L, et al., 2001; 刘福来等, 2003)。因此, 采用传统的锆石 U-Pb 定年方法来确定大别—苏鲁地体超高压变质的峰期年龄, 实际上是一种混合年龄, 严格来讲不具有任何实际意义。然而, 离子探针微区定年技术是解决上述问题的关键手段, 许多研究者已经采用该种技术对大别—苏鲁超高压变质带的年代学进行

注: 本文为中国大陆科学钻探工程项目 (编号 2000409) 和国土资源部百名优秀青年科技人才项目的部分成果。

收稿日期: 2003-02-05; 改回日期: 2003-03-17; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 刘福来, 男, 1963年生, 博士。主要从事变质岩石学研究。通讯地址: 100037, 北京市百万庄路26号, 中国地质科学院地质研究所; 电话: 010-68328494; Email: liufulai@cags.net.cn。

研究。但多数研究者只根据锆石的阴极发光图像特征来测定锆石微区的 U-Pb 年龄,因而在年龄的合理解释上仍然存在许多人为的因素。如程裕淇院士等(2000)认为大别山碧溪岭榴辉岩锆石核部所测得的年龄 757 ± 7 Ma,应代表高压—超高压榴辉岩相变质年龄;简平等(2000)则认为大别山西部熊店榴辉岩高压—超高压变质年龄为 $424 \sim 480$ Ma;而 Hacker 等(1998)和 Maruyama 等(1998)将大别山榴辉岩围岩片麻岩分别获得的 $219 \sim 245$ Ma 和 $220 \sim 238$ Ma 的年龄解释为超高压变质年龄。由此可见,尽管许多研究者采用了 SHRIMP U-Pb 定年技术,但对锆石微区所获得的年龄数据的真正含义的认识上仍存在较大分歧。有鉴于此,本文以苏鲁地体片麻岩类岩石为重点研究对象,首先采用激光拉曼技术,对锆石微区矿物包体性质及其分布特征进行深入研究,识别超高压矿物在锆石微区的准确分布位置,再与锆石阴极发光图像进行对比,阐明各微区环带的成因机制。然后采用 SHRIMP 离子探针微区定年技术,对锆石不同微区进行年龄测试,最终获得具有实际意义,并能加以合理解释的年代学信息,为准确限定苏鲁地体超高压变质时代和构造抬升速率,以及建立大别—苏鲁超高压变质带的动力学模式提供重要的年代学证据。

1 样品采集及其岩相学特征

实验样品采集于南苏鲁东海地区中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP2 中,有关该钻孔位置、岩性组合及其随深度的变化特征详见 Liu F L 等(2002)文献资料。用于年代学研究的岩心样品共两件,分别为二云二长片麻岩(样品号: S1; 采样深度: 362 m) 和含黑云母二长花岗质片麻岩(样品号: S2; 采样深度: 889 m)。其中二云二长片麻岩呈浅灰色,鳞片粒状变晶结构,片麻状构造。矿物组成: 绿帘石, 黑云母, 多硅白云母, 斜长石, 钾长石和石英。绿帘石: 它形粒状或不规则粒状, 粒度 $0.5 \sim 2.0$ mm, 含量 3% 左右; 黑云母: 鳞片状一片状, 褐绿色—褐黄色多色性, 定向排列现象明显, 粒度 $0.5 \sim 1.0$ mm, 含量 18%; 多硅白云母: 定向排列现象明显, 粒度 $0.5 \sim 1.5$ mm, 含量 12% 左右; 斜长石: 它形粒状, 聚片双晶发育, 粒度 $0.5 \sim 1.0$ mm, 含量 13% 左右; 钾长石: 它形粒状, 粒度 $0.5 \sim 2.0$ mm, 含量 19% 左右; 石英: 它形粒状, 粒度 $0.5 \sim 1.0$ mm, 含量 35% 左右。含黑云母二长花岗质片麻岩呈浅肉红色, 花岗变晶结构, 弱片麻状构造。矿物组成: 黑云母, 斜

长石, 钾长石和石英。黑云母: 鳞片状一片状, 略具定向排列, 粒度 $0.5 \sim 1.0$ mm, 含量 5% 左右; 斜长石: 它形粒状, 聚片双晶发育, 粒度 $1.0 \sim 2.0$ mm, 含量 25% 左右; 钾长石: 它形粒状, 粒度 $1.0 \sim 3.0$ mm, 含量 30% 左右; 石英: 它形粒状, 粒度 $1.0 \sim 2.5$ mm, 含量 40% 左右。

此外,在上述两类片麻岩的薄片均见有副矿物锆石。绝大多数的锆石位于石英和长石中,少数在石英和长石粒间分布。锆石粒径约为 $0.1 \sim 0.3$ mm 左右,一般为圆滑的不规则柱状或短柱状。

2 分析测试研究方法

锆石微区矿物包体测试和微区结构观察均在日本东京工业大学(Tokyo Institute of Technology)地球与行星科学系实验室完成。锆石阴极发光图像测试少部分在日本千叶大学(Chiba University)进行,多数在中国地质科学院矿床研究所电子探针室阴极发光仪上进行。有关锆石样品的分选、制样、激光拉曼和阴极发光测试步骤详见 Liu F L 等(2002)文献资料。上述2件片麻岩样品(S1, S2) 锆石微区 U-Pb 定年测试在北京离子探针中心 SHRIMP II 离子探针仪上完成,仪器的实验条件与澳大利亚国立大学 SHRIMP II 基本一致(宋彪等, 2002),分析方法和步骤参见 Compston 等(1992) 文献资料。所有的矿物代号均采用 Kretz(1983) 的资料。

3 片麻岩锆石微区矿物包体性质、分布及其成因特征

3.1 副片麻岩锆石微区矿物包体性质、分布及其成因特征

预先导孔 CCSD-PP2 几乎所有类型的副片麻岩、正片麻岩、斜长角闪岩和榴辉岩的锆石中均保存以柯石英为代表的超高压矿物包体(Liu F L, et al., 2002)。但在同一锆石样品中,不同锆石晶体记录了各自复杂的结晶生长演化历史,且与阴极发光图像存在十分完好的对应关系(图版 I)。以二云二长片麻岩(S1) 锆石样品为例,有的锆石晶体核部保存 $\text{Qtz} + \text{Ap} + \text{杂质}$ (图版 I-1, 2) 和 $\text{Qtz} + \text{Ap}$ (图版 I-3, 4) 等包体矿物。幔部则保存以柯石英为代表的超高压矿物包体组合,常见的包体组合为 $\text{Coe} + \text{Phe} + \text{Ttn}$ (图版 I-1, 2) 和 $\text{Coe} + \text{Phe}$ (图版 I-3, 4)。在该类锆石晶体的边缘,尽管不含任何矿物包体,但相应的阴极发光图像显示明显的退变边(图版 I-2, 4)。上述特征表明,该类锆石是在继承原岩碎

屑锆石的基础上,于超高压峰期阶段开始结晶生长,在晶体的幔部包有以柯石英为代表的超高压矿物包体,而在锆石晶体的边部则记录了后期退变质历史。第二类锆石晶体的核部和幔部均分布大量超高压包体矿物 $\text{Coe} + \text{Rt} + \text{Ttn}$,而边部则见有 Qtz 等低压包体矿物(图版 I-5, 6),表明该类锆石是在超高压峰期阶段开始生长,形成了超高压的核部和幔部,以及退变质过程形成的边部。

3.2 正片麻岩锆石微区矿物包体性质、分布及其成因特征

正片麻岩除了在岩石化学成分、矿物组成、地球化学性质等方面与副片麻岩存在本质的差别外(Liu F L, et al., 2001),其锆石中矿物包体性质,尤其是相应的阴极发光图像特征明显不同于副片麻岩的锆石(图版 II)。以含黑云母二长花岗质片麻岩(S2)为例,绝大多数锆石具有典型继承性锆石的核,相应的阴极发光图像具有典型岩浆结晶锆石的特征(图版 II-2, 4, 6)。有的锆石晶体核部仍然保存十分典型的岩浆结晶环带(图版 II-2);而有的则明显遭受后期热事件的改造,岩浆结晶环带已模糊不清(图版 II-4, 6)。核部保存的典型低压矿物组合为 $\text{Qtz} + \text{Ap} + \text{杂质}$ (图版 II-1, 3)和 $\text{Qtz} + \text{Ap} + \text{Phe} + \text{杂质}$ (图版 II-5)。而在该类锆石晶体的幔部,则见有 Coe 和 $\text{Coe} + \text{Phe} + \text{Ap}$ 等超高压矿物包体(图版 II-1, 3, 5),相应的阴极发光图像则显示明显的再生结构(图版 II-2, 4, 6)。在该类锆石的晶体边缘,尽管未发现任何矿物包体,但阴极发光图像却显示了明显的退变边(图版 II-2, 4, 6)。

4 片麻岩锆石微区的年代学记录及其意义

4.1 副片麻岩锆石微区的年代学记录

在对二云二长片麻岩锆石样品(S1)共计150余粒锆石中矿物包体及相应的阴极发光图像详细研究的基础上,精选10粒具有代表性的锆石进行微区 SHRIMP U-Pb 定年研究,共进行28个微区年龄测试,其结果列入表1中,相应的 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* - ^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$ 相关图解如图1所示。

从表1和图1中可以看出,锆石微区记录了三组具有不同地质意义的年代学信息。如在第4粒锆石晶体中(表1;图版 I-1, 2),继承性锆石的核部(S1-4.1)记录的年龄为 $483 \pm 8 \text{ Ma}$,代表了原岩碎屑锆石的年龄;在含柯石英包体的幔部(S1-4.2)测得的年龄为 $228 \pm 4 \text{ Ma}$,代表了超高压变质年龄;而在锆

石晶体的边部(S1-4.3)测得的年龄为 $202 \pm 4 \text{ Ma}$,则代表了苏鲁地体构造抬升过程中的退变质年龄。在第8粒锆石晶体中,也记录了类似的年代学信息(表1;图版 I-3, 4)。在继承性锆石的核部(S1-8.1)记录了 $561 \pm 11 \text{ Ma}$ 的原岩碎屑锆石年龄;在含柯石英的幔部(S1-8.2; S1-8.3)记录了 $220 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $234 \pm 8 \text{ Ma}$ 的超高压变质年龄;而在锆石晶体边部(S1-8.4)则记录了 $206 \pm 4 \text{ Ma}$ 退变质年龄。

此外,对超高压变质阶段开始生长,而不具有继承性核的锆石微区也进行了 SHRIMP U-Pb 年龄测试,测试结果显示在含柯石英的微区中均获得了十分一致的超高压年龄信息。如在第52粒锆石晶体中(表1;图版 I-5, 6),含柯石英锆石核部(S1-52.1)记录的年龄为 $226 \pm 5 \text{ Ma}$;同样在含柯石英锆石的幔部(S1-52.2; S1-52.3)记录的年龄为 $225 \pm 7 \text{ Ma}$ 和 $224 \pm 3 \text{ Ma}$ 。三个微区所获得的年龄十分相似,代表了超高压变质年龄。值得注意的是,在该锆石的晶体边缘见有石英(Qtz)包体(图版 I-5),表明该锆石晶体边缘是在退变质过程中形成的,相应的年龄记录为 $206 \pm 3 \text{ Ma}$,与上述两颗锆石以及表1中其他锆石晶体边缘所获得的年龄十分相似,应代表苏鲁地体构造抬升过程中的退变质年龄。

综上所述,二云二长片麻岩(S1)继承性锆石核的U含量为 $79 \times 10^{-6} \sim 258 \times 10^{-6}$,Th含量为 $38 \times 10^{-6} \sim 185 \times 10^{-6}$,而相应的Th/U值为 $0.50 \sim 1.10$ 之间。核部的年龄记录为 $345 \sim 743 \text{ Ma}$,离散性强,表明原岩碎屑锆石来源的复杂性以及锆石可能发生Pb的部分丢失;含柯石英锆石微区U含量为 $21 \times 10^{-6} \sim 312 \times 10^{-6}$,Th含量为 $3 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$,而相应的Th/U值为 $0.01 \sim 0.77$ 之间,与继承性锆石核部对比Th含量明显偏低。含柯石英锆石微区记录的超高压变质年龄为 $220 \sim 234 \text{ Ma}$;锆石晶体边部的U、Th含量以及Th/U值均与含柯石英锆石微区十分相似(表1),其中U含量为 $99 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$,Th含量为 $3 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$,而相应的Th/U值为 $0.01 \sim 0.20$ 之间,所记录的退变质年龄为 $202 \sim 219 \text{ Ma}$ 。

4.2 正片麻岩锆石微区的年代学记录

在对含黑云母二长花岗质片麻岩锆石样品(S2)共计130余粒锆石中矿物包体及相应的阴极发光图像详细研究的基础上,精选9粒具有代表性的锆石进行微区 SHRIMP U-Pb 定年研究,共进行29个微区年龄测试,其结果列入表2中,相应的 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* - ^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$ 相关图解如图2所示。

表 1 中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP2 二云二长片麻岩(S1)的锆石 SHRIMP 分析结果
Table 1 U-Th-Pb SHRIMP zircon data from the phengite biotite two-feldspar gneiss(S1) in pre-pilot
drillhole CCSD-PP2, Chinese Continental Scientific Drilling Project

样品号及 微区号	分析微区	微区中矿物包体	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)
S1-3.1	核部	Qtz, Imp	258	185	0.74	0.0730 ± 0.0011	0.0607 ± 0.0016	455 ± 7
S1-3.2	幔部	Coe, Phe	30	8	0.28	0.0353 ± 0.0013	0.0320 ± 0.0110	224 ± 8
S1-3.3	边部	no	249	5	0.02	0.0347 ± 0.0005	0.0505 ± 0.0013	219 ± 3
S1-4.1	核部	Qtz, Ap	108	69	0.67	0.0779 ± 0.0012	0.0619 ± 0.0019	483 ± 8
S1-4.2	幔部	Coe, Phe, Ttn	128	9	0.07	0.0318 ± 0.0006	0.0535 ± 0.0070	228 ± 4
S1-4.3	边部	no	99	10	0.10	0.0464 ± 0.0056	0.0360 ± 0.0006	202 ± 4
S1-6.1	核部	Qtz, Ap	76	23	0.31	0.0550 ± 0.0010	0.0580 ± 0.0032	345 ± 6
S1-6.2	幔部	Coe, Phe, Ap, Ttn	169	15	0.09	0.0358 ± 0.0006	0.0508 ± 0.0024	227 ± 4
S1-8.1	核部	Qtz, Ap	79	38	0.50	0.0910 ± 0.0019	0.0571 ± 0.0057	561 ± 11
S1-8.2	幔部	Coe, Phe	312	3	0.01	0.0347 ± 0.0005	0.0473 ± 0.0023	220 ± 3
S1-8.3	幔部	Coe, Phe	37	14	0.39	0.0369 ± 0.0013	0.0497 ± 0.0099	234 ± 8
S1-8.4	边部	no	167	8	0.05	0.0324 ± 0.0006	0.0478 ± 0.0053	206 ± 4
S1-17.1	核部	Qtz, Imp	107	66	0.64	0.0973 ± 0.0016	0.0618 ± 0.0016	598 ± 9
S1-17.2	幔部	Coe, Phe	298	6	0.02	0.0353 ± 0.0005	0.0544 ± 0.0019	224 ± 3
S1-28.1	核部	Qtz, Phe, Ap	151	110	0.75	0.1221 ± 0.0018	0.0646 ± 0.0009	743 ± 10
S1-28.2	幔部	Coe, Phe	150	8	0.05	0.0355 ± 0.0006	0.0489 ± 0.0022	225 ± 4
S1-32.1	核部	Qtz, Ap, Imp	76	81	1.10	0.0876 ± 0.0015	0.0670 ± 0.0029	542 ± 9
S1-32.2	幔部	Coe, Phe	21	11	0.55	0.0368 ± 0.0011	0.0653 ± 0.0099	233 ± 7
S1-32.3	边部	Qtz, Ap	202	9	0.04	0.0336 ± 0.0010	0.0507 ± 0.0030	213 ± 4
S1-52.1	核部	Coe, Rt	22	10	0.46	0.0357 ± 0.0017	0.0610 ± 0.0123	226 ± 5
S1-52.2	幔部	Coe, Ttn	25	11	0.45	0.0355 ± 0.0011	0.0450 ± 0.0109	225 ± 7
S1-52.3	幔部	Coe, Ttn	292	3	0.01	0.0353 ± 0.0005	0.0541 ± 0.0011	224 ± 3
S1-52.4	边部	Qtz	237	3	0.01	0.0325 ± 0.0005	0.0520 ± 0.001	206 ± 3
S1-53.1	核部	Qtz	116	98	0.87	0.0937 ± 0.0015	0.0620 ± 0.0022	577 ± 9
S1-53.2	幔部	Coe, Phe	294	4	0.02	0.0346 ± 0.0005	0.0491 ± 0.0023	220 ± 3
S1-55.1	幔部	Coe, Phe, Ap	89	11	0.13	0.0361 ± 0.0010	0.0580 ± 0.0045	229 ± 6
S1-55.2	幔部	Coe, Phe, Ap	42	31	0.77	0.0361 ± 0.0011	0.0550 ± 0.0027	227 ± 7
S1-55.3	边部	Qtz	106	20	0.20	0.0323 ± 0.0008	0.0456 ± 0.0050	205 ± 5

注: Coe—柯石英; Qtz—石英; Phe—多硅白云母; Rt—金红石; Ttn—榍石; Ap—磷灰石; Imp—杂质。

从表2和图2中可以看出,花岗质片麻岩锆石微区也记录了三组具有不同地质意义的年龄数据。如在第38粒锆石晶体中(表2;图版Ⅱ-1,2),继承性锆石的核部(S2-38.1)显示明显的岩浆结晶环带,相应的年龄记录为 672 ± 7 Ma,代表了原岩的形成年龄;在含柯石英包体的幔部(S2-38.2; S2-38.3)测得的年龄为 226 ± 4 Ma 和 226 ± 5 Ma,代表了超高压变质年龄;而在锆石晶体的边部(S2-38.4)测得的年龄为 215 ± 3 Ma,代表了构造抬升过程中的退变质年龄。在第48粒锆石晶体中(表2;图版Ⅱ-3,4),继承性锆石的核部(S2-48.1)岩浆结晶环带已模糊不清,明显遭受后期热事件的改造,已发生了部分 Pb 丢失,相应的年龄记录为 574 ± 7 Ma;在含柯石英包体的幔部(S2-48.2; S2-48.3)测得的年龄为 235 ± 5 Ma 和 229 ± 3 Ma,应代表超高压变质年龄;而在锆石晶体的边部(S2-48.4)测得的年龄为 213 ± 6 Ma,

则代表了苏鲁地体构造抬升过程中的退变质年龄。在第49粒锆石晶体中,也记录了类似的年代学信息(表1;图版Ⅰ-5,6)。在继承性锆石的核部(S2-49.1)记录了 579 ± 9 Ma 的原岩锆石年龄,但已明显被改造;在含柯石英的幔部(S2-49.2; S2-49.3)记录的超高压变质年龄与上述两颗锆石十分相似(表2),分别为 236 ± 5 Ma 和 229 ± 6 Ma。

综上所述,含黑云母二长花岗质片麻岩(S2)继承性锆石核的 U 含量为 $221 \times 10^{-6} \sim 333 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $95 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$,而相应的 Th/U 值为 $0.44 \sim 0.68$ 之间,核部的年龄记录为 $574 \sim 680$ Ma,表明原岩锆石已发生 Pb 的部分丢失和后期热事件的改造,其原岩的形成年龄应大于 680 Ma;含柯石英锆石微区 U 含量为 $63 \times 10^{-6} \sim 355 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $6 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$,而相应的 Th/U 值为 $0.04 \sim 0.31$ 之间,与继承性锆石核部对比 Th 含量明显

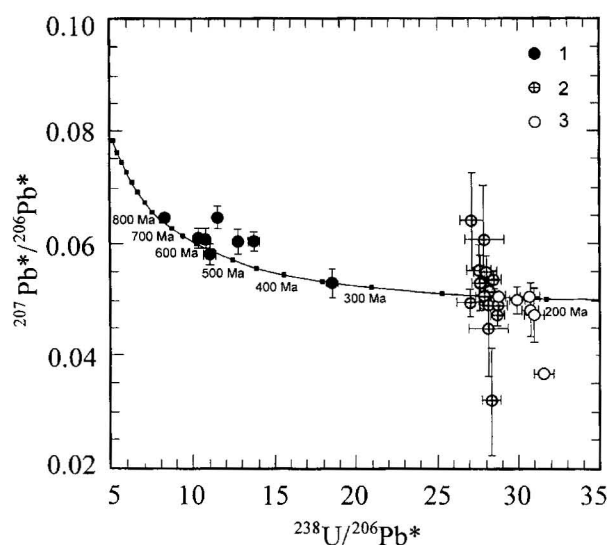


图 1 二云二长片麻岩(S1, 362 m)中锆石 SHRIMP U-Pb 一致曲线图

Fig. 1 Concordia diagram showing SHRIMP U-Pb data for zircons from phengite biotite two-feldspar gneiss (S1, 362 m depth) in pre-pilot drillhole CCSD-PP2, Chinese Continental Scientific Drilling Project

1—继承性(碎屑) 锆石的核部; 2—锆石中含柯石英包体的核部和幔部; 3—锆石的边部

1—Inherited (detrital) cores of zircons; 2—coesite-bearing cores and mantles of zircons; 3—retrogressive rims of zircons

偏低。含柯石英锆石微区记录的超高压变质年龄为 224~242 Ma; 锆石晶体边部的 U、Th 含量以及 Th/U 值均与含柯石英锆石微区十分相似(表 1), 其中 U 含量为 $61 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $13 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$, 而相应的 Th/U 值为 0.05~0.31 之间, 所记录的退变质年龄为 209~219 Ma。

本文研究的副片麻岩(S1) 和正片麻岩(S2) 锆石样品记录了相同的超高压变质年龄和退变质年龄, 平均值分别为 229 ± 4 Ma 和 211 ± 4 Ma。表明苏鲁地体的片麻岩类岩石超高压变质作用发生在印支期。此外, 许多研究者采用锆石 U-Pb 法、全岩-矿物的 Sm-Nd 法、Rb-Sr 法和多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法对苏鲁地体榴辉岩的原岩形成时代和超高压变质时代进行研究(杨建军, 1991; Li et al., 1989, 1993, 1994, 2000a, 2000b; Ames et al., 1993, 1996)。其中在青龙山、仰口等地的榴辉岩采用 Sm-Nd 法所获得超高压变质年龄为 226 ± 3 Ma、 221 ± 6 Ma 和 228 ± 6 Ma (Li et al., 2000a), 与本文采用 SHRIMP 方

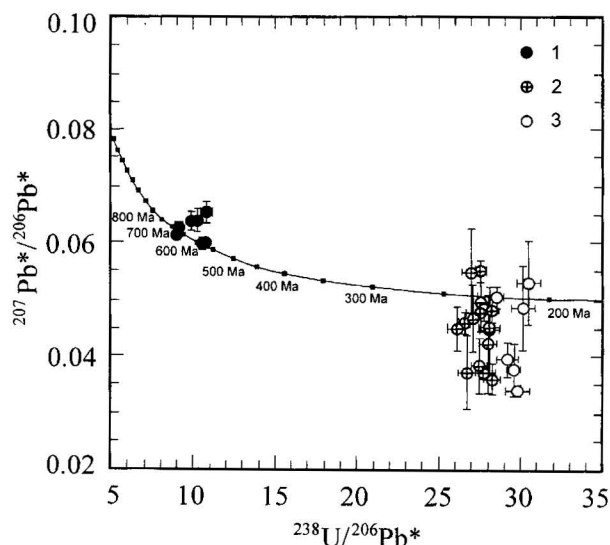


图 2 含黑云母二长花岗质片麻岩(S2, 889 m) 中锆石 SHRIMP U-Pb 一致曲线图

Fig. 2 Concordia diagram showing SHRIMP U-Pb data for zircons from biotite-bearing two-feldspar granitic gneiss (S2, 889 m depth) in pre-pilot drillhole CCSD-PP2, Chinese Continental Scientific Drilling Project

1—继承性锆石的核部; 2—锆石中含柯石英包体的幔部; 3—锆石的边部

1—Inherited cores of zircons; 2—coesite-bearing mantles of zircons; 3—retrogressive rims of zircons

法在片麻岩含柯石英锆石微区中测得的超高压变质年龄十分相似, 标志着苏鲁地体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, 并经历了印支期的超高压变质作用。

苏鲁地体构造抬升速率的确定是建立整个大别—苏鲁超高压变质带构造演化模式的重要参数。然而, 由于传统研究方法的局限性, 无法准确限定苏鲁地体构造抬升速率。本文采用 SHRIMP 技术, 在锆石晶体边缘获得与苏鲁地体构造抬升过程有关的退变质年龄为 211 ± 4 Ma, 与超高压变质年龄相差约 18 Ma。而大别—苏鲁地体榴辉岩中金刚石的发现 (Xu S, et al., 1992; Xu Z Q, et al., 1998), 标志着由榴辉岩及其围岩所组成的陆壳物质深俯冲的深度下限为 120 km, 而榴辉岩及其围岩所记录的角闪岩相退变质作用 (Zhang R Y, et al., 1995; Zhang Z M, et al., 2000), 以及片麻岩类岩石锆石退变边所保存的退变质矿物组合特征 (Liu F L, et al., 2001, 2002; 刘福来等, 2003), 证明了曾发生过深俯冲的大别—苏鲁地体, 在超高压变质之后的构造抬升

表 2 中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP2 含黑云母二长花岗质片麻岩(S2)的锆石 SHRIMP 分析结果

Table 2 U-Th-Pb SHRIMP zircon data from the biotite-bearing granitic gneiss(S2) in pre-pilot drillhole CCSD-PP2,

Chinese Continental Scientific Drilling Project

样品号及 微区号	分析微区	微区中矿物包体	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)
S2-15.1	核部	Qtz, Ap, Ttn, Cal, Imp	221	95	0.44	0.1112 ± 0.0013	0.0616 ± 0.0014	680 ± 8
S2-15.2	幔部	Coe	68	11	0.17	0.0363 ± 0.0007	0.0484 ± 0.0058	230 ± 4
S2-15.3	边部	no	135	14	0.11	0.0329 ± 0.0008	0.0478 ± 0.0075	210 ± 5
S2-22.1	核部	Qtz, Phe, Ap, Cal, Imp	251	166	0.68	0.0951 ± 0.0011	0.0597 ± 0.0015	586 ± 7
S2-22.2	幔部	Coe	81	10	0.12	0.0369 ± 0.0007	0.0467 ± 0.0074	233 ± 5
S2-22.3	边部	no	178	14	0.08	0.0347 ± 0.0005	0.0513 ± 0.0020	219 ± 3
S2-24.1	幔部	Coe	317	15	0.05	0.0361 ± 0.0005	0.0482 ± 0.0023	229 ± 3
S2-24.2	幔部	Coe	140	11	0.08	0.0358 ± 0.0006	0.0421 ± 0.0093	227 ± 4
S2-24.3	边部	no	83	17	0.21	0.0343 ± 0.0008	0.0389 ± 0.0037	217 ± 5
S2-33.1	幔部	Coe, Phe	83	6	0.07	0.0354 ± 0.0006	0.0366 ± 0.0030	224 ± 4
S2-33.2	幔部	Coe, Phe	111	14	0.13	0.0365 ± 0.0006	0.0381 ± 0.0053	231 ± 4
S2-33.3	幔部	Coe, Phe	164	13	0.08	0.0383 ± 0.0008	0.0450 ± 0.0041	242 ± 5
S2-33.4	边部	no	153	17	0.11	0.0331 ± 0.0008	0.0536 ± 0.0081	209 ± 5
S2-38.1	核部	Qtz, Ap, Imp	333	212	0.66	0.1099 ± 0.0012	0.0629 ± 0.0010	672 ± 7
S2-38.2	幔部	Coe, Phe, Ap	71	16	0.23	0.0357 ± 0.0007	0.0442 ± 0.0080	226 ± 4
S2-38.3	幔部	Coe, Phe, Ap	77	20	0.27	0.0356 ± 0.0007	0.0448 ± 0.0094	226 ± 5
S2-38.4	边部	no	287	13	0.05	0.0339 ± 0.0005	0.0372 ± 0.0048	215 ± 3
S2-42.1	核部	Qtz, Ap, Imp	276	128	0.48	0.1007 ± 0.0012	0.0640 ± 0.0016	619 ± 7
S2-42.2	幔部	Coe	355	14	0.04	0.0354 ± 0.0005	0.0480 ± 0.0026	224 ± 3
S2-42.3	幔部	Coe	72	12	0.18	0.0364 ± 0.0007	0.0475 ± 0.0048	230 ± 4
S2-47.1	核部	Qtz, Imp	151	98	0.67	0.0980 ± 0.0013	0.0641 ± 0.0019	603 ± 7
S2-47.2	幔部	Coe	295	10	0.04	0.0377 ± 0.0005	0.0462 ± 0.0026	239 ± 3
S2-48.1	核部	Qtz, Ap, Imp	263	142	0.56	0.0931 ± 0.0011	0.0665 ± 0.0019	574 ± 7
S2-48.2	幔部	Coe	74	11	0.15	0.0371 ± 0.0009	0.0550 ± 0.0083	235 ± 5
S2-48.3	幔部	Coe	195	12	0.06	0.0361 ± 0.0005	0.0550 ± 0.0016	229 ± 3
S2-48.4	边部	no	61	18	0.31	0.0336 ± 0.0009	0.0334 ± 0.0100	213 ± 6
S2-49.1	核部	Qtz, Phe, Ap, Imp	224	131	0.61	0.0939 ± 0.0012	0.0603 ± 0.0010	579 ± 9
S2-49.2	幔部	Coe	64	18	0.29	0.0373 ± 0.0007	0.0373 ± 0.0071	236 ± 5
S2-49.3	幔部	Coe	63	19	0.31	0.0361 ± 0.0010	0.0378 ± 0.0100	229 ± 6

注: Coe—柯石英; Qtz—石英; Phe—多硅白云母; Cal—方解石; Ttn—榍石; Ap—磷灰石; Imp—杂质。

至中下地壳约20~30 km 深度范围,由此判断大别—苏鲁超高压变质带实际抬升距离至少为100 km,相应的抬升速率约5.6 km/Ma。这充分证明大别—苏鲁地体在超高压变质以后,的确经历了一个快速折返的动力学演化过程。

5 讨论和结论

苏鲁超高压变质带正、副片麻岩的锆石均保存以含柯石英为特征的超高压矿物包体,且记录了十分复杂的变质演化历史。

副片麻岩锆石核部记录了345~743 Ma 的继承性锆石年龄,标志着原岩碎屑锆石来源的复杂性;含柯石英的锆石微区记录了220~234 Ma 的超高压变质年龄;而含石英包体的边部则记录了202~219 Ma 的退变质年龄。正片麻岩继承性锆石核部所显

示的年龄为574~680 Ma,表明原岩锆石曾经历了部分 Pb 丢失,原岩的形成年龄应大于680 Ma;含柯石英锆石微区所记录的超高压变质年龄为224~242 Ma;而锆石边部所记录的退变质年龄为209~219 Ma。

两类片麻岩锆石微区所记录的超高压变质年龄和退变质年龄均十分相近,平均值分别为 229 ± 4 Ma 和 211 ± 4 Ma,表明超高压变质时代应为印支期,由此推断超高压变质之后的构造抬升100 km 所需要的时间约18 Ma,相应的抬升速率约5.6 km/Ma。

上述成果充分表明苏鲁地体由榴辉岩及其围岩所组成的巨量陆壳物质曾广泛发生深俯冲,并经历了印支期超高压变质作用以及快速折返的动力学演化过程。该项成果对于大别—苏鲁超高压变质带构

造动力学模式的建立具有十分重要的科学意义。

由此可见,在超高压变质作用以及相应的年代学研究中,将锆石微区的矿物包体性质及其分布特征的研究,与锆石阴极发光图像和锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年测试紧密结合起来,是准确判断锆石各微区环带的成因机制以及合理解释其年代学涵义最为有效的方法和手段。值得注意的是,锆石微区矿物包体的激光拉曼测试,看似简单,但却是一项十分复杂而又繁琐的工作。由于锆石中常保存大量的不同性质的矿物包体(如图版 I, II),且分布于锆石中不同的深度层次,因而不能只根据个别颗粒来直接判断超高压矿物包体在锆石中的分布位置。以图版 I-3, 4 锆石为例,阴极发光图像清楚显示有 4 粒柯石英(Coe)已经出露于锆石的表面,且分布于锆石晶体的幔部(图版 I-4 中白色区域)。而图版 I-3 中左下角的一粒柯石英(Coe)看起来似乎位于锆石晶体的核部(对应于图版 I-4 中核部的黑色区域),但根据显微镜下的聚焦判断,该柯石英包体位于锆石磨面以下较深的位置,在照片的平面图像(图版 I-3)中不能有效反映其在锆石中的真正位置,会造成一种位置假象,实际上该粒柯石英应于其他柯石英包体一样均分布于锆石的幔部。这种现象常常会引起个别读者对锆石微区包体矿物真正位置的错误判断。因此,对锆石微区矿物包体的激光拉曼测试,必须对同一样品大量锆石中矿物包体进行统计,在显微镜下进行包体位置的细致分析,对照阴极发光图像,最终才能对锆石中矿物包体性质及其分布特征,以及锆石各阴极发光环带的成因进行准确而有效的判断,进而才能获得具有实际意义的 SHRIMP U-Pb 定年结果。

致谢:本文有关锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年测试,曾得到北京离子探针中心刘敦一研究员及全体实验人员的大力帮助,并提供了诸多方便,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 程裕淇,刘敦一,Williams I S,等. 2000. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石 SHRIMP 分析——晋宁期高压—超高压变质作用同位素年代学依据. 地质学报, 74(3): 193~205.
- 简平,杨巍然,李志昌,等. 1997. 大别山西部熊店加里东期榴辉岩——同位素年代学证据. 地质学报, 71(2): 133~140.
- 简平,刘敦一,杨巍然,等. 2000. 大别山西部河南罗山熊店加里东期榴辉岩锆石特征及 SHRIMP 分析结果. 地质学报, 74(3): 259~264.
- 康维国,胡克,梁万通,等. 1996. 华中元古宙高压变质带. 北京:

地质出版社.

- 刘福来,张泽明,许志琴. 2003. 苏鲁地体超高压矿物的三维空间分布. 地质学报, 77(1): 69~84.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评(增刊), 48: 26~30.
- 王来明,宋彪,吴洪祥,等. 1994. 山东榴辉岩的生成时代. 科学通报, 39: 1788~1791.
- 杨建军. 1991. 中国东部山东和江苏北部的榴辉岩、辉石岩和有关的超基性岩. 北京:地质出版社, 26~52.
- 张泽明,游振东,韩郁菁,等. 1995. 大别—苏鲁榴辉岩带的岩石学变质作用过程及成因研究. 地质学报, 69(4): 306~323.

References

- Ames L, Tilton G R, Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339~342.
- Ames L, Zhou G, Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472~489.
- Cheng Y Q, Liu D Y, Williams I S, Jian P, Zhuang Y X, Gao T S. 2000. SHRIMP U-Pb dating of zircons of a dark-coloured eclogite and a garnet-bearing gneissic-granitic rock from Bixiling, eastern Dabie area: Isotope chronological evidence of neoproterozoic HP-UHP metamorphism. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J. Geol. Soc.*, 149: 171~184.
- Dong S. 1993. Metamorphic and tectonic domains of China. *J. Metamorphic Geol.*, 11: 465~481.
- Dong S, Cui W, Zhang L, et al. 1996. The proterozoic glaucophane-schist belt and some eclogites of North Yangtze Craton, Central China. Beijing: Science Press, 139.
- Eide E A, McWilliams M O, Liou J G. 1994. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and exhumation of high-pressure to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in east-central China. *Geology*, 22: 601~604.
- Hacker B R, Wang Q. 1995. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism. *Tectonics*, 14: 994~1006.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S W. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~230.
- Jian P, Liu D Y, Yang W R, Williams I S. 2000. Petrographical study of zircons and SHRIMP dating of the Caledonian Xiong'dian eclogite, northwestern Dabie mountains. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 259~264 (in Chinese with English abstract).
- Kang W, Hu K, Liang W, et al. 1996. Proterozoic High-pressure Metamorphic Belt in Central East of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming mineral. *Am. Mineral.*,

- 68: 277~279.
- Li S, Hart S R, Zheng S G, Liu D L, Zhang G W, Guo A L. 1989. Timing of collision between north and south China blocks-The Sm-Nd isotopic age evidence. *Science in China*, 32: 1393~1400.
- Li S, Chen Y, Cong B, Zhang Z, Zhang R, Liou D, Hart S R, Zhou D. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 112: 343~350.
- Li S, Wang W, Chen Y, Liu D, Qiu J, Zhou H, Zhang Z. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chemical Geology*, 112: 343~350.
- Li S, Jagoutz E, Lo C, Chen Y, Li Q, Xiao Y. 2000a. Sm-Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, central China: A retrospective view. In Ernst W G, Liou J G, eds. *Ultra-High Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-Type Orogenic Belts*. Bellwether Publishing Ltd., Columbia, 234~244.
- Li S, Jagoutz E, Chen Y, Li Q. 2000b. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077~1093.
- Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, Yang J S, Maruyama S, Liou J G. 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 F L, Xu Z Q, Liou J G, Katayama I, Masago H, Maruyama S, Yang J S. 2002. Ultrahigh-pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling Site in eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 14: 499~512.
- Liu F L, Zhang Z M, Xu Z Q. 2003. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 69~84(in Chinese with English abstract).
- Liu J B, Ye K, Maruyama S, Cong B L, Fa H R. 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China. *J. Geol.*, 109: 523~535.
- Mattauer M, Matte P, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Qin X Z, Lun L Y, Qin T Y. 1985. Tectonics of the Qinling belt: build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317: 496~500.
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, Peng Z X, Baker J, Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 151: 191~203.
- Song B, Zhang Y H, Wan Y S, Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (Supp.): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Tabata H, Yamauchi K, Maruyama S, Liou J G. 1998. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane: Mineral-inclusion study of zircons in gneisses from the Dabieshan. In Hacker B R, Liou J G, eds. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*, London: Kluwer Academic Publisher, 261~273.
- Wang L, Song B, Wu H, Fu G. 1994. Forming age of Shandong eclogites $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of single-zircon crystals. *Chinese Science Bulletin*, 39: 1788~1791(in Chinese).
- Xu S, Okay A I, Ji S, Sengor A M C, Su W, Liú Y, Jiang L. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80~82.
- Xu Z Q, Yang W C, Zhang Z M, Yang T N. 1998. Scientific significance and site-selection researches of the first Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. *Continental Dynamics*, 3: 1~13.
- Yang J J. 1991. Eclogites, garnet pyroxenites and related ultrabasics rocks in Shandong and north Jiangsu of east China. Beijing: Geological Publishing House, 26~52(in Chinese).
- Ye K, Yao Y, Katayama I, Cong B L, Wang Q C, Maruyama S. 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.
- You Z D, Han Y J, Yang W R, Zhang Z M, Wei B Z, Liu R. 1996. The high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic belt in the east Qinling and Dabie Mountains, China. Wuhan: China University of Geosciences Press. 150.
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, Cong B L, Liou J G. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 13: 659~675.
- Zhang Z M, You Z D, Han Y J, Sang L K. 1995. Petrology, metamorphism and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 306~323(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xu Z Q, Xu H F. 2000. Petrology of ultrahigh-pressure eclogites from the ZK703 drillhole in the Donghai, eastern China. *Lithos.*, 52: 35~50.

图 版 说 明

图 版 I

1. 二云二长片麻岩(S1, CCSD-PP2, 采样深度: 362 m) 第4粒锆石(S1-4)中矿物包体分布特征,核部为 Qtz+Ap+杂质,幔部为 Coe+Phe+Ttn。
2. 为图版 I-1中锆石的阴极发光图像,显示明显的核、幔和边部结构。
3. 二云二长片麻岩(S1, CCSD-PP2, 采样深度: 362 m) 第8粒锆石(S1-8)中矿物包体分布特征,核部为 Qtz+Ap,幔部为 Coe+Phe。
4. 为图版 I-3中锆石的阴极发光图像,显示明显的核、幔和边部结构。
5. 二云二长片麻岩(S1, CCSD-PP2, 采样深度: 362 m) 第52粒锆石(S1-52)中矿物包体分布特征,核部和幔部为 Coe+Rt+Ttn,边部为 Qtz。
6. 为图版 I-5中锆石的阴极发光图像,显示明显的核-幔和边部结构。

构。

图版 II

1. 含黑云母二长花岗质片麻岩(S2, CCSD-PP2, 采样深度: 889 m) 第38粒锆石(S2-38) 中矿物包体分布特征,核部为 Qtz+Ap+杂质,幔部为 Coe+Phe+Ap。
2. 为图版 II-1中锆石的阴极发光图像,显示明显的核、幔和边部结构,且核部保存明显的岩浆结晶环带。
3. 含黑云母二长花岗质片麻岩(S2, CCSD-PP2, 采样深度: 889 m) 第48粒锆石(S4-48) 中矿物包体分布特征,核部为 Qtz+Ap+杂质,幔部为 Coe。
4. 为图版 II-3中锆石的阴极发光图像,显示明显的核、幔和边部结

构。

5. 含黑云母二长花岗质片麻岩(S2, CCSD-PP2, 采样深度: 889 m) 第49粒锆石(S2-49) 中矿物包体分布特征,核部为 Qtz+Phe+Ap+杂质,幔部为 Coe。

6. 为图版 II-5中锆石的阴极发光图像,显示明显的核、幔和边部结构。

PL—为显微镜下单偏光图像;CL—为阴极发光图像;阴极发光图像中的圆圈为 SHRIMP 测试微区,圆圈编号同表1, 2;Coe—柯石英;Phe—多硅白云母;Rt—金红石;Ttn—榍石;Ap—磷灰石;Qtz—石英。

Determination of UHP and Retrograde Metamorphic Ages of the Sulu Terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating on Zircons of Gneissic Rocks

LIU Fulai¹⁾, XU Zhiqin¹⁾, SONG Biao²⁾

1) *Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037*

2) *Ion Probe Center of Beijing, Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037*

Abstract

Combined study of Laser Raman, cathodoluminescence image and ion probe U-Pb dating reveals that zircons separated from gneissic rocks in the Sulu terrane recorded complicated geochronological traces. Some zircons from paragneiss retain inherited cores with inherited ages of 345~743 Ma, indicating the complexity of the detrital zircons in protoliths. Coesite-bearing domains of zircons recorded 220~234 Ma for UHP metamorphic conditions, and quartz-bearing rims of zircons recorded 202~219 Ma for the late-stage amphibolite facies overprint. The cores of zircons from orthogneiss recorded 574~680 Ma for inherited zircons, implying partial loss of Pb from zircon in the protolith, so the protolith age should be older than 680 Ma. Coesite-bearing domains of zircons recorded 224~242 Ma for UHP metamorphic conditions, and free-mineral inclusion rims of zircons recorded 209~219 Ma for the late-stage amphibolite facies. These data indicate that UHP metamorphism in the Sulu terrane occurred in the Indosinian time. The exhumation rate of the Sulu terrane is approximately 5.6 km/Ma calculated based on the SHRIMP data and relative P-T conditions. The large exhumation rate of the massif is in the same range as other UHP metamorphic terranes in the world, and suggests that slab decoupling may be a driving force for the exhumation of UHP metamorphic rocks from mantle depths.

Key words: SHRIMP; U-Pb dating; zircon; mineral inclusion; UHP metamorphism; gneiss; Sulu terrane

