

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

程裕淇¹⁾ 刘敦一¹⁾ I. S. Williams²⁾ 简平¹⁾ 庄育勋¹⁾ 高天山³⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

2) National University of Australia, G. P. O. Box 4, Canberra, A. C. T., 2601, Australia

3) 安徽省地质调查院, 合肥, 230026

内容提要 本文报道大别山安徽省岳西县碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石的锆石 SHRIMP 分析结果。深色榴辉岩的原岩为基性凝灰岩, 锆石在岩石中主要产于石英、石榴子石和绿辉石内, 为高压—超高压变质作用的产物, 内部主体形成年龄约为 757 ± 7 Ma, 代表高压—超高压榴辉岩相变质事件的时代; 经受了后期流体改造的锆石边部年龄为 223 ± 3 Ma。在片麻状花岗质岩石中, 发育韵律环带结构的深熔锆石形成于约 727 ± 15 Ma, 受后期流体改造的锆石边部年龄为 219 ± 3 Ma。综合野外地质关系、区域地质背景和锆石的岩相学特征, 笔者提出了碧溪岭榴辉岩相岩石高压—超高压变质作用发生于晋宁期, 印支期仅代表一次后期流体改造事件的观点。

关键词 大别山碧溪岭 深色榴辉岩 片麻状花岗质岩石 晋宁期 SHRIMP 测年

安徽省岳西县碧溪岭是世界上已知的最大榴辉岩相岩石出露区之一, 也是目前大别山区同位素地质年代学工作程度最高、有关超高压变质时代争议最多的热点地区之一。在这一地区, 针对榴辉岩、榴辉岩相岩石及其有关岩石, 已公开发表了至少 22 个锆石 U-Pb 数据, 6 条以上的 Sm-Nd 内部等时线年龄, 和一批多硅白云母、石榴子石和绿辉石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄(曹荣龙等, 1995; 刘若新等, 1995; 简平等, 1996; 李曙光等, 1996; 胡世玲等, 1999; 王松山等, 1999)。这些年龄大致可以划分为 5 组, 即新太古代、新元古代、加里东期、印支期和燕山期, 除燕山期外, 其他 4 期分别为不同的研究者解释为高压—超高压变质时代, 反映了高压—超高压变质岩同位素体系和地质演化的复杂性。同位素体系与原岩形成、高压—超高压变质作用或后期地质作用的关系是榴辉岩同位素地质年代学研究中的关键问题。近年, 笔者等通过碧溪岭地区大比例尺填图、剖面测制、露头观察及室内研究, 取得了榴辉岩相岩石的原岩性质和原岩建造、地质演化以及有关的变质岩类野外地质关系的一些新认识(程裕淇等, 另文发表), 并采集了同位素年代研究的各类岩石标本。本文介绍碧溪岭地区潜水东岸公路剖面的深色榴辉岩^①(样号

注: 本文为原地质矿产部重大基础项目(编号 9501102)和国土资源部同位素地质开放实验室资助的成果。

① 深色榴辉岩是一个简明、直观的宏观岩石名称。这类岩石主要是由色泽较深的石榴子石(富铁铝榴石分子)和绿辉石组成, 含金红石较多, 岩石化学特征是 SiO_2 含量低, 镁、铁含量高, 富含 TiO_2 。其原岩为基性凝灰岩或熔岩, 因而又可称为基性榴辉岩。文中提及的浅色榴辉岩也是一个宏观岩石名称, 这类榴辉岩的特征矿物是色泽较浅的石榴子石(富镁铝榴石和钙铝榴石分子)和硬玉质绿辉石以及含量不等的蓝晶石、(多硅)白云母和石英等; 同深色榴辉岩比较, 含铁和 TiO_2 都较低, SiO_2 稍高, K_2O 含量往往较高。其原岩主要为含有基性凝灰质的碎屑岩类。

本文 2000 年 4 月收到, 5 月改回, 周健编辑。

CP3-18, 原岩为基性凝灰岩)和含有榴辉岩相岩石残留体的中细粒片麻状花岗质岩石(个别标本中含微量石榴子石)(样号 CP3-24)的锆石 SHRIMP 分析和锆石内部结构等研究成果。研究表明:榴辉岩相变质事件发生于约 757 ± 7 Ma, 即晋宁期;片麻状花岗质岩石侵位于约 727 Ma;榴辉岩相岩石和片麻状花岗岩都受到了印支期的后期流体改造。其他榴辉岩相岩石和有关岩类的同位素地质年代研究正在进行中。阴极发光下的锆石 SHRIMP 测定由刘敦一和 I. S. Williams 在澳大利亚国立大学 SHRIMP II 上完成。分析方法参见 Compston 等(1992)。程裕淇和简平完成了本文锆石成因研究,并撰写了全文。

1 地质背景

碧溪岭地区的榴辉岩相岩石分布面积接近 0.8 km^2 , 主要由大致呈层状乃至不同规模和形态的条带状构造的浅色榴辉岩以及少量的石榴硬玉石英岩和白云母硬玉石英岩等岩类组成(约占总面积的十分之九), 其原岩大致是部分含有基性凝灰质的碎屑岩类。层状的深色榴辉岩及关系密切的石榴橄榄岩约占十分之一的面积, 前者具有变质的基性凝灰岩乃至基性熔岩的特征。浅色榴辉岩大致即为庄育勋(1998)所称的条带状榴辉岩, 主要由石榴子石(镁铝榴石和钙铝榴石分子百分数相对较高)和硬玉质绿辉石以及不同数量的石英组成, 并常含有少量(但含量有变化)的兰晶石和白云母等特征矿物以及微量的锆石等。曹荣龙等(1995)和刘若新等(1995)进行锆石同位素年龄测定的碧溪岭榴辉岩, 根据其矿物成分特征(包括锆石含量较多)推测, 似应为浅色榴辉岩类。深色榴辉岩主要由石榴子石(铁铝榴石分子百分数相对较高)和绿辉石组成, 并有一定数量的金红石, CP3-18 标本的岩相学特征(见后)具有一定的代表性。

在潜水东岸的公路剖面上, 可清楚地观察到浅色榴辉岩和深色榴辉岩(及有时密切伴生的石榴橄榄岩)的相互上下层位关系和局部的互层产状。这些岩石的原岩, 在总体上构成一套基性火山—沉积建造。潜水东岸连续出露的深色榴辉岩剖面长约 80 m, 含有变质的基性凝灰岩或熔岩 15 层(厚约 40 m), 研究样品(CP3-18)采自剖面的上部层位。片麻状花岗质岩石样品(CP3-24)采自潜水公路桥东端, 位于上述深色榴辉岩剖面北端以北约 200 m, 在露头上见到含有不规则的、深受改造乃至退变质的深色榴辉岩团块(图版 I-1), 说明榴辉岩的形成早于片麻状花岗质岩石的侵位。

2 岩石样品及所含锆石的岩相学特征

2.1 深色榴辉岩(CP3-18)

呈层状, 中细粒, 局部粒度稍粗。总体为暗绿色(绿辉石), 但含暗红色、棕红色不规则斑点和斑纹(石榴子石)。薄片呈粒度有变化的粒状变晶结构, 主要由石榴子石(约 52%)^①, 绿辉石(约 38%)组成, 前者一般粒度较细, 后者较粗, 局部呈不明显的变斑状结构, 还含金红石(7.5%±), 及微量的石英(约 0%~1%)、黄铁矿和角闪石(1%±)。角闪石沿剪切面产出, 系退变质矿物。少量绿辉石发育后成合晶结构。同一剖面同类岩石薄片中的不同矿物含量稍有变化, 并见有柯石英假象。

锆石在岩石中的赋存状态、与主晶的关系及其内部结构, 是分析锆石成因的最基础资料。碧溪岭潜水东侧深色榴辉岩中锆石含量极低, 在包括 CP3-18 在内的 12 个同类岩石的薄片

① 由董振信博士用电动显微测角台测定, 余同。

(总面积约 250 cm²,大薄片),仅鉴定出 10 颗锆石,它们分别产于石英(6 颗)、石榴子石(2 颗)和绿辉石(2 颗)内,似应与其主晶为同一世代的变质矿物。产于石英中的锆石呈明显的双层结构,由不规则状的、较不均匀的主体和相对均匀的边缘组成(图版 I-2,3)。内外两部分接触形态变化较大,边缘带宽度有变化。晶体一端与石英和相邻矿物的粒间界面接触的,其边缘带较宽,并深入主体内部(图版 I-3),而晶体全部产于石英之内的则边缘带较窄,与主体的接触面较为平直(图版 I-2)。见于榴辉岩相特征矿物石榴子石和绿辉石中的锆石基本上不显示双层结构,至少极不明显(图版 I-4,5)。看来,这些锆石的外部边缘带是后期流体对其“改造”(重熔或重结晶)所造成的,其内侧与主体部分的港湾状接触关系可作为旁证,其形成机理很可能与程裕淇(1944)在苏格兰培戴希尔(Bettyhill)混合岩中发现的奥长石净边(clear rim)相似。产于绿辉石、石英间界面的锆石中边缘层发育较好(图版 I-3),也可说明矿物粒间界面是流体活动的一种主要通道;而产于绿辉石和石榴子石中锆石的外部边缘层基本不明显,又可能说明同石英相比,这两种矿物更难为流体所渗透。

在约 4 kg 的深色榴辉岩样品中选出了约 200 粒锆石,粒径约为 0.1~0.3 mm,浅黄色,大多为不规则粒状,表面圆化,可与上述后期流体改造相印证。长粒状晶体(图版 I-6)顶端发育许多小晶面(图版 I-7),与程裕淇等(2000)报道的在固体介质中晶出的变质锆石的“受控生长面”相当,许多还显示了变质锆石特征的压痕现象(图版 I-8)。

薄片观察到的锆石的双层结构,在阴极发光(CL, Cathodoluminescence)下更清晰可见。锆石通常由较暗的内部主体和较亮的边缘带组成。边缘带可以是完整的但不规则的环状(图版 II-2,8),也可缺失一部分,其宽度、形态以及同主体的接触形态都较在薄片观察的有更多的变化(详后),这更进一步说明其形成是由于后期的流体活动的“改造”。内部主体的组构较为复杂,可较均匀(图版 II-9,14),也有一些呈单向条带或层纹状的(图版 II-2,15)。CL 照片中锆石的色泽深浅、分布的清晰度变化较大(图版 II-16),这可能是由于变质锆石晶出时的物理化学条件的差别以及后期流体改造的情况(二维乃至三维范畴)的不同而产生的现象。个别主体的轮廓和内部结构都类似于岩浆型锆石,是否就是原岩的岩浆晶出的锆石,有待于进一步探索。

2.2 片麻状花岗质岩石

岩石呈灰白色,中、细粒,其色泽、粒度、矿物成分和片麻状构造都不均匀,由(一)粒度较大、分布不均匀、形态复杂的长英质结集体(<5~8 mm)和(二)散布其间的深色和灰白色的矿物微点和小条组成,局部含暗红色的石榴子石微粒。后者大多构成较为细粒的片麻状构造,局部为波纹状展布的断续细条(图版 I-1)。(一)的总量远较(二)为少。偶见含有角闪石的剪切面遗迹。薄片中(一)主要由大多具波纹状外形的约 1~2 mm 的部分溶(熔)蚀的石英和长石组成(图版 I-2),后者以成分相当于钠—奥长石的为主,其余为钾长石类,也有少量高度白云母化、绿泥石化的黑云母和微量的楣石和更少量的锆石等;(二)大部分为边缘也呈波纹状但粒度大多在 0.5~1 mm 以下的石英和长石(也以钠—奥长石为主)(图版 I-2),所含后期生成的、不规则外形的白云母以及绿泥石较(一)中的为多,也有残存的黑云母,另有后期形成的绿帘石和微量楣石、锆石和磷灰石等,偶见外形极不规则的残存石榴子石(图版 I-2,3)。CP3-24 及同类岩石标本(CP3-25)3 个薄片的矿物含量测定^①,说明岩石不同部分的矿物含量变化较大(石

① 由董振信博士用电动显微求积台测定。

英 40.6%~49.8%;长石 32%~46.6%;白云母+绿泥石+残存黑云母 6.5%~16.2%;绿帘石 2%~5.8%;榍石 0.4%~0.5%;锆石 <0.1%),相应的尼格里值也有一定的变化范围(si , 327~481; al , 42~45; fm , 11~14; alk , 29~38; c , 6~15),总的岩石化学特征相当于过铝质奥长花岗岩,其岩石学特征与河北平山阜平群中具初步深熔特征的片麻状岩石(尼格里值为, si , 292; al , 39; fm , 18; c , 17; alk , 26; 据 Cheng et al., 1997 计算)类似,可以对比。结合实际矿物成分、薄片中所见的组构以及野外宏观地质特征一并考虑,可以认为(二)大致是经历了高度深熔(溶)改造的细粒黑云变粒岩(或含黑云母变粒岩),而(一)是其奥长花岗质成分的深熔产物,两者未经分异的混合物((一)和(二)的比例大致为 1:2,即深熔产物大致占 1/3)经历一定距离的运移后以“半原地花岗岩”的性质而就位(侵位)于榴辉岩及榴辉岩相岩石中,因而含有榴辉岩的残块(图版 I-1)。值得注意的是,(一)和(二)中的斜长石均较洁净,未保存深熔作用初期及后期的绢云母化现象,也未保存深熔作用中云母的夕线石化现象。看来,白云母化、绿泥石化和绿帘石化形成较晚,很可能同双层结构锆石的边缘带(见后)属同期流体活动的产物。石榴子石是否为变粒岩或榴辉岩的残留物,尚待研究。

在 CP3-24 和 CP3-25 两块标本的 6 个薄片(总面积约 180 cm²,大薄片)中共鉴定出 128 颗锆石,分布于(一)和(二)中的各 64 颗。绝大部分在石英和长石中。粒径为 0.1~0.3 mm。大多为圆化的不规则柱状(图版 I-6)或短柱状(约占总数的 2/3),其余为粒状,个别晶形较好(图版 I-4)。大部分锆石发育明显的双层结构(共 88 颗),其内部主体大多不均匀(图版 I-7),少数相对均匀(图版 I-6),边部外层的宽度和形态有一定的变化(图版 I-5~7; IV-17, 18),外层与主体的接触面有的呈明显的港湾状深入主体(图版 I-6; 图版 IV-17),少数主体还含有微小的核体(图版 I-7),可能是古老锆石的残粒。看来,大部分锆石形成于深熔作用过程中,因而具有柱状或短柱状的基本形态,大致可与河北平山阜平群浅粒岩经受深熔作用形成的锆石对比(程裕淇等, 2000),但由于受到后期流体作用的改造而呈不同程度的圆化,并形成边缘带。值得注意的是一颗位于白云母和长石界面的锆石不但晶形较好,且边缘带发育较典型(图版 I-6),可能与它位于作为流体通道的矿物粒间有关。

在约 4 kg 的样品中选出了约 200 粒的粗粒锆石,粒径约 0.3 mm,浅玫瑰色,大多为不规则的、圆化的柱状(图版 IV-20, 21)和粒状锆石,这些锆石表面受到了强烈的溶(熔)蚀作用,少数为较自形的稍圆化的柱状(图版 IV-19)或短柱状晶体。

阴极发光研究表明片麻状花岗质岩石中的锆石与深色榴辉岩中的相似,也基本上显示双层结构。在测年的 15 颗锆石中,主要的一类 8 颗(即图版 IV-5~7, 11~15),其内部在照片中为深色(即阴极发光下的暗区),含有分布不均、多少不等的淡色点(阴极发光下的亮点),大致与薄片组成不均匀的一类相当,可能是残留的深熔变粒岩的变质锆石。少数(图版 IV-1~3, 16)是不同程度地保留了岩浆型锆石内部的韵律环带甚至外部晶形(图版 IV-16)的深熔作用过程中晶出的锆石,可称为深熔锆石,但有的(图版 IV-1~3)外形圆化的具环带结构的锆石在照片中色泽较淡,可能是受到形成外部边缘层的流体的改造所造成的。但其中个别边缘层极薄(图版 IV-3 的左上侧),内部深熔锆石还含有上述变质锆石的残粒,实际上形成了三层结构,由核心、深熔增生(anatectic overgrowth)和边缘带组成,其增生部分发育韵律环带结构,似足以说明深熔锆石是以变质锆石为核心晶出的。这类锆石约占总数的 1/4,其阴极发光照片揭示的内部结构特征与 Vavra (1990)所描述的东阿尔卑斯 Tauern 构造窗前中生代基底中的深熔的(anatectic)、深成的(plutonic)片麻状花岗质岩石中锆石相似,可以类比,它们具有岩浆型锆石

的一般特征。实际上还存在第三类锆石(2颗,图版Ⅳ-8、9),在照片中色淡,较模糊,但局部还杂有不同线状分布的连续黑点,可能是变质锆石或“深熔锆石”受后期流体深刻改造后的残留物。外部边缘层与深色榴辉岩中的锆石的外层相似,其色泽、形态、宽度及其与内部主体的接触形状变化较大,说明各自所受后期流体改造程度有较大差别。此外,部分锆石(图版Ⅳ-3、5、7~9、16)很可能并非由内部主体直接改造所形成,而是以相应主体锆石为基础所晶出的另一期锆石的流体改造产物,因而出现另一种形式的三层结构,这说明岩石中有的锆石曾经历了3个世代的演化历史。

3 SHRIMP 分析结果

针对碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石锆石的双层结构的特点,进行了 SHRIMP 微区 U-Pb 同位素分析,两个样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数据和相应的表面年龄列于表1和表2,并分别投入一致曲线图(图1和图2)中。为讨论方便,还将 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄标于锆石分析点中的相应位置(图版Ⅲ、图版Ⅳ)。由于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄远不如 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄精确,下文将主要以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值来讨论锆石不同晶域的年代学意义。

3.1 深色榴辉岩(CP3-18)

对7个锆石的内、边两部分,8个锆石的内部,9个锆石的边部和2个内部较均匀的锆石进行了 SHRIMP 分析,共分析锆石26颗,获35个分析数据(表1)。

7个锆石颗粒的内、边两部分的分析结果(图版Ⅲ-1~7;表1,分析号2.1~25.2),表明其测点的同位素年龄值与矿物的内部结构和分析点在锆石中的位置具有明显的关系。在图版Ⅲ-1~5中(表1,分析号2.1~9.2),5颗锆石的边部分别给出287 Ma、219 Ma、412 Ma、231 Ma和219 Ma的年龄,内部部分给出623 Ma、689 Ma、569 Ma、684 Ma和657 Ma的年龄,其中4颗锆石(表1,分析号2.1~3.2、5.1~9.1)的内、边两部分年龄值具有很大的差异,分属于晋宁期和印支期(即后述的第一组和第三组年龄值范畴),而一颗的内、边部(分析号4.2、4.1)则分别给出569 Ma和412 Ma的年龄值,前者可能是晋宁期内部主体受后期强烈改造后的年龄值,而412 Ma的边部层圈则可能与主体的受更强烈的改造有关,甚至代表加里东期的增生,而照片左侧实际上还有未测定年龄的很窄的模糊边缘,因而这可能是一个代表3期形成的复合锆石。另一颗锆石的边部的两个分析点(分析号10.1、11.1)分别给出377 Ma和228 Ma的年龄值,后者与上述4颗锆石的边部层年龄相当,前者的成因意义还不清楚。第7颗锆石有4个测点,外部测点(分析号25.2)给出210 Ma的年龄值,相当于印支期;内部主体深色部分的测点(分析号25.3、25.4)给出403 Ma和427 Ma的年龄值,属于加里东期(即后述的第二组年龄值范畴);位于明暗两部交界的测点(分析号25.1)给出年龄值为296 Ma,是否由晋宁期主体锆石受到后期不同程度改造所产生的不同值,有待于研究。

8颗锆石(图版Ⅲ-8~15)内部主体的8个测点(分析号19.1~24.1、26.1、27.1)的年龄值都在晋宁期范畴内(只有一个偏低,为581 Ma),与上述锆石的同类年龄值范围基本相同。5颗锆石(图版Ⅲ-16~20)的边部层的测点(分析号1.1、7.1、14.1、16.1、18.1)和2个结构不明显但与一般边部层阴极发光特征相似的锆石(图版Ⅲ-21、22)的分析(分析号4.21、4.22)给出与上述印支期范畴基本一致的年龄值。但另4颗锆石(图版Ⅲ-23~26)的较宽的边部层(分析号6.1、8.1、12.1、13.1)给出了主要是加里东期范畴的年龄值。

表 1 碧溪岭深色榴辉岩(CP3-18)的锆石 SHRIMP 分析结果

Table 1 U-Pb SHRIMP data of zircons from the Bixiling dark-coloured eclogite (CP3-18)

分析号	点特征	图版 I 照片号	Pb ^① ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 及误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 及误差	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma) 及误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄(Ma) 及误差
2.1	边部	1	2	51	0.32	0.00102	0.0455 $\pm$ 0.0016	0.0390 $\pm$ 0.0058	287 $\pm$ 10	
2.2	内部	1	44	395	0.64	0.00031	0.1015 $\pm$ 0.0026	0.0631 $\pm$ 0.0021	623 $\pm$ 15	710 $\pm$ 71
3.1	边部	2	1	21	0.07	0.00244	0.0345 $\pm$ 0.0017	0.0385 $\pm$ 0.0103	219 $\pm$ 10	
3.2	内部	2	67	421	1.79	0.00005	0.1129 $\pm$ 0.0016	0.0636 $\pm$ 0.0008	689 $\pm$ 9	728 $\pm$ 27
4.1	边部	3	3	43	0.27	0.00009	0.0660 $\pm$ 0.0017	0.0428 $\pm$ 0.0045	412 $\pm$ 11	
4.2	内部	3	37	347	0.8	0.00002	0.0922 $\pm$ 0.0011	0.0640 $\pm$ 0.0009	569 $\pm$ 6	743 $\pm$ 31
5.1	边部	4	1	18	0.06	0.00545	0.0364 $\pm$ 0.0020	0.0367 $\pm$ 0.0094	231 $\pm$ 13	
5.2	内部	4	101	682	1.48	0.00003	0.1119 $\pm$ 0.0010	0.0637 $\pm$ 0.0006	684 $\pm$ 6	731 $\pm$ 19
9.1	边部	5	1	21	0.05	0.00090	0.0345 $\pm$ 0.0015	0.0331 $\pm$ 0.0072	219 $\pm$ 9	
9.2	内部	5	79	580	1.32	0.00002	0.1074 $\pm$ 0.0009	0.0647 $\pm$ 0.0005	657 $\pm$ 5	765 $\pm$ 18
10.1	边部	6	10	153	0.53	0.00027	0.0602 $\pm$ 0.0011	0.0565 $\pm$ 0.0032	377 $\pm$ 7	471 $\pm$ 129
11.1	边部	6	2	45	0.30	0.00001	0.0360 $\pm$ 0.0010	0.0436 $\pm$ 0.0072	228 $\pm$ 6	
25.1	内部	7	18	314	0.99	0.00004	0.0470 $\pm$ 0.0006	0.0537 $\pm$ 0.0014	296 $\pm$ 4	359 $\pm$ 60
25.3	内部	7	30	375	1.18	0.00015	0.0645 $\pm$ 0.0008	0.0580 $\pm$ 0.0017	403 $\pm$ 5	530 $\pm$ 65
25.4	内部	7	31	358	1.27	0.00010	0.0685 $\pm$ 0.0011	0.0606 $\pm$ 0.0012	427 $\pm$ 7	625 $\pm$ 44
25.2	边部	7	1	21	0.09	0.00299	0.0331 $\pm$ 0.0011	0.0386 $\pm$ 0.0086	210 $\pm$ 7	
19.1	内部	8	58	385	1.15	0.00004	0.1234 $\pm$ 0.0012	0.0638 $\pm$ 0.0007	750 $\pm$ 7	736 $\pm$ 22
20.1	内部	9	63	414	1.44	0.00004	0.1169 $\pm$ 0.0011	0.0638 $\pm$ 0.0006	712 $\pm$ 6	736 $\pm$ 19
21.1	内部	10	39	284	0.79	0.00002	0.1226 $\pm$ 0.0011	0.0654 $\pm$ 0.0010	745 $\pm$ 6	789 $\pm$ 34
22.1	内部	11	53	341	1.58	0.00006	0.1164 $\pm$ 0.0011	0.0640 $\pm$ 0.0011	710 $\pm$ 8	742 $\pm$ 36
23.1	内部	12	54	492	0.88	0.00001	0.0943 $\pm$ 0.0009	0.0631 $\pm$ 0.0011	581 $\pm$ 6	712 $\pm$ 36
24.1	内部	13	92	678	1.03	0.00002	0.1135 $\pm$ 0.0009	0.0639 $\pm$ 0.0005	693 $\pm$ 5	737 $\pm$ 16
26.1	内部	14	49	357	1.27	0.00002	0.1081 $\pm$ 0.0010	0.0642 $\pm$ 0.0007	662 $\pm$ 6	747 $\pm$ 23
27.1	内部	15	66	377	1.89	0.00011	0.1245 $\pm$ 0.0011	0.0633 $\pm$ 0.0008	757 $\pm$ 7	717 $\pm$ 25
1.1	边部	16	1	21	0.06	0.00514	0.0359 $\pm$ 0.0016	0.0344 $\pm$ 0.0081	227 $\pm$ 10	
7.1	边部	17	1	20	0.09	0.00174	0.0339 $\pm$ 0.0013	0.0426 $\pm$ 0.0079	215 $\pm$ 8	
14.1	边部	18	1	29	0.16	0.00001	0.0337 $\pm$ 0.0014	0.0385 $\pm$ 0.0076	214 $\pm$ 8	
16.1	边部	19	1	29	0.08	0.00259	0.0351 $\pm$ 0.0011	0.0526 $\pm$ 0.0095	222 $\pm$ 7	312 $\pm$ 366
18.1	边部	20	1	26	0.10	0.00241	0.0348 $\pm$ 0.0017	0.0455 $\pm$ 0.0082	221 $\pm$ 10	
15.1	结构 不明显	21	1	20	0.06	0.00123	0.0350 $\pm$ 0.0015	0.0331 $\pm$ 0.0092	222 $\pm$ 9	
17.1	结构 不明显	22	1	28	0.08	0.0038	0.0360 $\pm$ 0.0016	0.0487 $\pm$ 0.0063	228 $\pm$ 10	136 $\pm$ 279
6.1	边部	23	8	89	0.64	0.00022	0.0796 $\pm$ 0.0021	0.0593 $\pm$ 0.0026	494 $\pm$ 12	577 $\pm$ 100
8.1	边部	24	12	177	0.73	0.00006	0.0616 $\pm$ 0.0013	0.0590 $\pm$ 0.0016	429 $\pm$ 15	567 $\pm$ 59
12.1	边部	25	5	94	0.50	0.00001	0.0506 $\pm$ 0.0010	0.0421 $\pm$ 0.0036	318 $\pm$ 6	
13.1	边部	26	4	53	0.84	0.00071	0.0695 $\pm$ 0.0019	0.0550 $\pm$ 0.0056	433 $\pm$ 11	411 $\pm$ 247

① 放射性成因铅。

锆石不同晶域的同位素分析表明锆石内部的年龄大于外部,且同一结晶域内年龄值也存在一定的变化范围。因此,锆石的同位素体系可能因多期地质事件的影响变得十分复杂。全部分析数据可以划分为 3 组,分别对应于晋宁期、加里东期和印支期,它们反映了在深色榴辉岩演化过程中可能的多期地质事件的影响。

第一组 13 个数据。²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 569~757 Ma,加权平均值为 676 $\pm$ 2 Ma;²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb

年龄为 710~789 Ma, 加权平均值为 740 ± 7 Ma。这一年龄段的分析点无一例外地在锆石的内部。分析点在和谐图中具有较好的线性关系(图 1), 说明它们可能是同成因、同世代晶出的锆石。但这些年龄具有较大的变化范围, 年龄值的大小可能与锆石受后期改造程度的深浅不等有一定的关系。其中 5 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 710~757 Ma (图版 III-8~11、15; 分析号 22.1、20.1、21.1、19.1、27.1), 它们基本和谐, 或略具反向不一致性, 投入一致曲线附近(图 1)。这些锆石的边部较窄, 被分析的部分 CL 密度小, 色调较深, 可能

说明后期地质作用的影响相对较小。在其他 8 个年龄值相对较小的锆石内部部分, 或 CL 色调稍浅(图版 III-3、14), 或锆石中以高 CL 密度为特征的较亮的部分所占比例较大(图版 III-5、4、11), 或局部发育较大面积的亮度较大的区域。从而可以推断锆石内部年龄值的变化, 是后期地质作用造成的放射性成因铅部分丢失的结果。因此, 取最大且基本和谐的年龄, 即 757 ± 7 Ma 代表这类锆石的形成年龄(相当于晋宁期), 较为合理。

第二组 10 个分析数据。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 287~494 Ma, 其加权平均值 425 ± 34 Ma。其中 7 个分析点位于锆石的边部, 分析点所在位置的特征是 CL 亮度相对于给出印支期年龄的部分稍弱但较均匀(图版 III-1、3、6、23~26; 表 1 中分析号 2.1、4.1、10.1、6.1、8.1、12.1、13.1)。3 个测点位于同一锆石(图版 III-7)的内部。这组年龄变化范围大, 其地质意义较难解释, 存在两种可能性, 它可能代表一个增生事件, 也可能是晋宁期锆石改造不完全的结果。

第三组 12 个分析数据。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 214~231 Ma 的狭小范围内, 加权平均值为 223 ± 3 Ma。分析点位于锆石的边部或内部的均匀、无明显结构特征的部位(图版 III-22、23)。这组数据, 只有一个位于和谐线内, 绝大部分有明显的反向不一致性而投入和谐线外, 可能是某种复杂的地质作用所造成的, 根据前述岩相学探讨, 应归因于后期流体活动对早期(主要是晋宁期)锆石的改造。

3.2 片麻状花岗质岩石(CP3-24)

表 2 列出了 CP3-24 共 18 个 SHRIMP 分析点的结果, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值和测点在锆石中的位置见图版 IV-1~15。

3 个锆石内部主体的分析给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 678~727 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 514~813 Ma(表 2, 分析号 1.2、2.1、5.1)。这些深熔锆石显示类似岩浆型锆石的内部结构(图版 III-

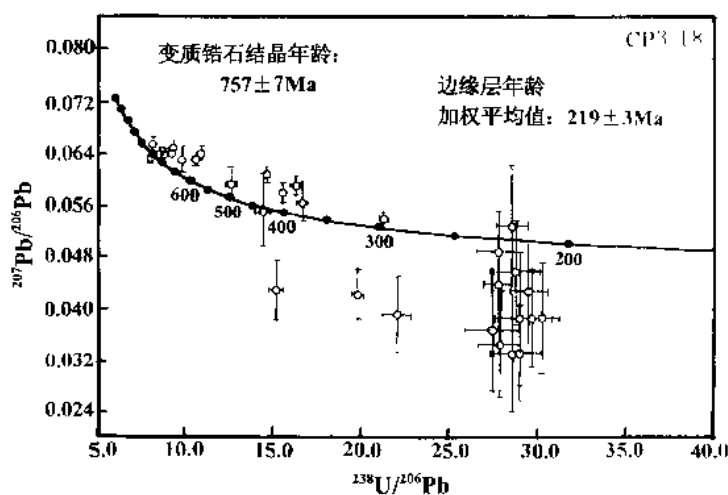


图 1 碧溪岭深色榴辉岩(CP3-18)中锆石 SHRIMP U-Pb 一致曲线图

Fig. 1 Concordia diagram showing SHRIMP U-Pb data for zircons from the Bixiling dark eclogite (CP3-18)

表 2 碧溪岭片麻状花岗质岩石(CP3-24)的 SHRIMP 分析结果

Table 2 SHRIMP data of zircons from the Bixiling gneissic-granitic rock (CP3-24)

分析号	分析点特征	图版Ⅳ 照片号	Pb ^① (× 10 ⁻⁶)	U (× 10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁴ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 及误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 及误差	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma) 及误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄(Ma) 及误差
1.1	外部	1	3	99	0.11	0.00112	0.0343±0.0009	0.0488±0.0031	217±5	140±143
1.2	内部,模糊韵律环	1	12	96	0.66	0.00024	0.1178±0.0021	0.0662±0.0027	718±12	813±88
2.1	内部,模糊韵律环	2	12	99	0.58	0.00052	0.1194±0.0026	0.0576±0.0023	727±15	514±92
5.1	内部,韵律环	3	9	81	0.53	0.00058	0.1109±0.0034	0.0597±0.0036	678±20	592±136
3.1	外部	4	7	227	0.15	0.00012	0.0349±0.0005	0.0478±0.0030	221±3	92±143
4.1	外部	5	2	66	0.12	0.00255	0.0353±0.0011	0.0480±0.0041	224±7	101±191
4.2	外部	5	2	47	0.33	0.00133	0.0363±0.0009	0.0465±0.0059	230±6	24±278
6.1	外部	6	1	44	0.36	0.00035	0.0340±0.0010	0.0424±0.0058	215±6	
8.1	外部	7	8	260	0.06	0.00004	0.0341±0.0005	0.0489±0.0014	216±3	143±70
8.2	外部	7	8	265	0.06	0.00012	0.0347±0.0019	0.0516±0.0019	220±3	269±88
9.1	外部	8	5	154	0.14	0.00057	0.0344±0.0005	0.0500±0.0020	218±3	194±98
10.1	外部	9	1	38	0.26	0.00001	0.0362±0.0010	0.0397±0.0067	229±6	
11.1	外部	10	3	89	0.17	0.00066	0.0351±0.0007	0.0438±0.0031	223±4	
13.1	外部	11	3	99	0.23	0.00049	0.0339±0.0006	0.0499±0.0032	215±4	189±157
14.1	外部	12	4	140	0.08	0.00012	0.0334±0.0006	0.0505±0.0023	212±4	219±109
15.1	外部	13	5	127	0.21	0.00064	0.0391±0.0008	0.0493±0.0026	247±5	164±126
7.1	外部	14	3	83	0.16	0.00198	0.0436±0.0009	0.0534±0.0043	275±5	344±191
12.1	外部	15	5	160	0.06	0.00625	0.0336±0.0007	0.0504±0.0049	213±5	212±212

① 放射性成因铅。

1~3)和圆化的外部形态。由于分析数据尚少,还不能精确地确定其年龄。但根据现有的资料,可以推断花岗质岩石的侵位时代约在 727 Ma 左右,属晋宁期范畴。但是,在残留的深熔变粒岩中另一类残留变质锆石(图版Ⅳ-4、10)的年龄值,本次研究未进行测定。

锆石的外层除去 1 个分析点给出 275 Ma ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄外,其余 14 个分析给出年龄范围

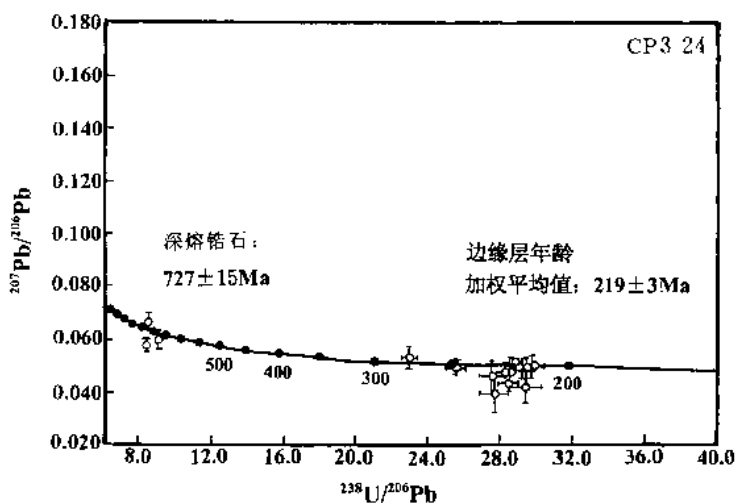


图 2 碧溪岭片麻状花岗质岩石(CP3-24) U-Pb 一致曲线图

Fig. 2 Concordia diagram showing SHRIMP U-Pb data for zircons from the Bixiling gneissic granitic rock (CP3-24)

为 212~247 Ma,加权平均值 219±3 Ma,这是锆石受后期流体改造的年龄值,属印支期的范畴。

3.3 Th/U 地球化学

表 1 和表 2 分别列出了锆石的 Th/U 值,它是分析锆石成因和元素迁移的一项重要地球化学标志。在碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石中,Th/U 值与锆石内部结构及年龄有明显的关系。

碧溪岭深色榴辉岩给出晋宁期年龄值的锆石(内部主体)的 Th/U 值变化范围为 0.64~1.89,给出加里东期范畴年龄值

(边部和内部)的变化范围为 0.5~1.27,给出印支期年龄值的(外部)Th/U 值为 0.05~0.3。总体来看,年龄值越大,Th/U 值越高,说明后期地质作用造成了 Th 相对于 U 的强烈亏损,可能与流体造成的溶(熔)蚀(或交代)作用有关。但是,晋宁期锆石的年龄值与 Th/U 值没有简单的正相关的关系,例如分析点 21.1,Th/U 值为 0.79,但给出了 745 Ma 的较高年龄值,而分析 3.2 的 Th/U 值高达 1.79,年龄仅为 689 Ma,因而可以推断:晋宁期锆石的较大 Th/U 值变化范围指示了源区 Th/U 值的不均匀性,这也可能是其变质成因的一个重要依据。受变质的岩浆锆石和深熔作用形成的锆石 Th/U 值通常变化范围很小(Vavra et al., 1999)。碧溪岭片麻状花岗质岩石也具有类似的现象,即其锆石的外部部分的 Th/U 值为 0.06~0.36,变化范围大,而发育韵律环带的内部部分为 0.53~0.66,变化范围小。也说明锆石的外部受到了强烈的流体改造作用,产生了 Th 的强烈亏损。

4 碧溪岭地区地质演化和同位素体系的讨论

碧溪岭深色榴辉岩及片麻状花岗质岩石的 SHRIMP 分析,都揭示了该地至少经历了晋宁期和印支期两期地质事件。根据榴辉岩的原岩建造和原岩性质、深色榴辉岩与片麻状花岗质岩石的野外地质关系、榴辉岩相岩石的地质演化过程以及锆石双层结构成因等因素进行综合分析,说明碧溪岭深色榴辉岩所经历的高压—超高压变质事件发生于晋宁期,榴辉岩相变质稍后发生了壳源花岗质岩浆半原地的侵位事件,它也可能代表早期的隆升事件。印支期流体活动的地质意义还不清楚。对于深色榴辉岩中锆石较为分散的加里东期范畴年龄值,虽目前还难以作出确切而合理的解释,但并不排除它曾经历了该期地质事件的可能性,这是因为在大别造山带的其他地区(如熊店,简平等,1997)存在着加里东期的榴辉岩相变质作用,而碧溪岭地区的榴辉岩也有经历了一期加里东期热事件的报道(胡世玲等,1999)。

4.1 晋宁期高压—超高压变质作用的年代学依据

碧溪岭深色榴辉岩锆石的内部主体形成于约 757 ± 7 Ma,它反映了高压—超高压变质事件的时代。主要依据有:

(1)野外地质关系。在片麻状花岗质岩石中见有不规则的残留榴辉岩团块,说明榴辉岩相变质作用应发生于花岗质岩石就位之前。片麻状花岗质岩石的侵位时代约为 727 ± 15 Ma,因此榴辉岩相变质年龄应老于该值。

(2)锆石成因的岩相学证据。碧溪岭深色榴辉岩原岩为基性凝灰岩或熔岩,在这类岩石中锆石含量通常极低,且颗粒细小。但是碧溪岭深色榴辉岩中却出现了颗粒粗大的锆石,说明其形成与超高压变质作用有关的可能性较大。更重要的是,部分锆石在岩石中赋存于榴辉岩相特征矿物石榴子石和绿辉石内,当为同世代的变质矿物;重砂矿物也显示了变质锆石的外部特征。镜下观察和阴极发光研究均揭示了双层结构的特点。锆石的内部不发育岩浆型锆石特征的结构,也暗示其高压—超高压变质成因。因此,从原岩性质、锆石在岩石中的赋存状态、内部结构、外部形态以及锆石的 Th/U 地球化学特征等多方面分析,都足以说明碧溪岭深色榴辉岩中的锆石是榴辉岩相高压—超高压变质作用的产物。

4.2 印支期区域性流体活动的年代学信息

碧溪岭深色榴辉岩锆石边部的第三组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值属印支期,加权平均值为 223 ± 3 Ma,与片麻状花岗质岩石锆石的外部边缘年龄的加权平均值 219 ± 3 Ma 很接近,两者年龄值的差别在年龄测定的误差范围以内,说明两者经历了同一期流体活动的改造。碧溪岭深色榴辉

岩锆石在薄片或阴极发光照片中均可观察到含明显流体改造特征的边部,片麻状花岗岩中锆石也清楚地显示了这种结构。因此,印支期的年龄可能仅反映与这一流体活动有关的事件。

4.3 同位素体系及存在问题讨论

碧溪岭地区榴辉岩相岩石原岩类型不止一种,一部分是变质的碎屑岩类,锆石的来源较为复杂,因而出现太古宙和古、中元古代的锆石年龄值(曹荣龙等,1995;刘若新等,1995)是符合地质实际情况的。本区以浅色榴辉岩为代表的榴辉岩相变质碎屑岩类的定年工作正在进行中,其成果将另文发表。

碧溪岭地区榴辉岩相岩石及相关岩石的 Sm-Nd 年龄值为 210~243 Ma(杨巍然等,1994;李曙光等,1996;Chavagnac et al., 1996),与这次获得的深色榴辉岩及片麻状花岗质岩石锆石受到流体改造后的印支期年龄值基本一致。这种情况可与南阿尔卑斯 Ivrea 地区麻粒岩相岩石(Vavra et al., 1996, 1999)的测年数值类比,Ivrea 地区代表麻粒岩相变质的前进增生锆石(prograde zircon overgrowth)年龄为 299 ± 5 Ma,而受蚀变的锆石边部的 U-Pb、全岩和矿物的 Sm-Nd 内部等时线、角闪石 Ar-Ar、白云母 Rb-Sr 等年龄均在 200 Ma 左右,反映了两次不同的地质事件。一些作者把 Sm-Nd 内部等时线年龄解释为榴辉岩相峰期变质年龄,主要依据石榴子石和绿辉石具有高封闭温度的性质(Humphries et al., 1982; Sneeringer et al., 1984),但是,在其适用性的评价中,没有考虑到 Sm-Nd 体系在可能受到后期流体作用影响所表现的开放体系性质。从碧溪岭地区榴辉岩的 Sm-Nd 内部等时线年龄与锆石受流体改造的边部的年龄一致这一事实来看,流体作用是可以导致被认为性质稳定的 Sm-Nd 同位素体系的重置(resetting)。因此碧溪岭地区的 Sm-Nd 内部等时线年龄也很可能是一个受到后期流体活动改造的年龄值。

以往文献中报道的碧溪岭地区的多硅白云母、绿辉石和石榴子石的 Ar-Ar 年龄范围为 665~321 Ma(曹荣龙等,1995;王松山等,1999;胡世玲等,1999)。一些研究者认为由于过剩 Ar 的影响造成了 Ar-Ar 年龄值的偏高,其中一个重要的依据是其年龄值远较 Sm-Nd 内部等时线年龄为高。事实上,这些年龄都还低于这次测得的晋宁期榴辉岩相高压—超高压变质年龄,从而有可能说明榴辉岩形成后曾经历了多期地质活动的影响。

5 结论性评述

综上所述,可以得出几点认识:

(1)以 CP3-18 为代表的碧溪岭深色榴辉岩经历的高压—超高压变质事件时代约为 757 ± 7 Ma。

(2)片麻状花岗质岩石侵位于 727 ± 15 Ma 前。

(3)深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石中受后期流体改造的锆石边部年龄为 219~223 Ma,表明它们经历了印支期流体活动,其地质意义尚待进一步研究。

(4)以深色榴辉岩为代表的本区榴辉岩相岩石,至少经历了晋宁期高压—超高压变质作用及印支期流体改造两个主要阶段的地质演化过程。它是否经历了一次加里东期的地质事件,还需更深入的综合性研究来作出较为肯定的结论。

承蒙沈其韩院士审阅初稿,并提出了宝贵的意见;董振信博士代为测定了两个岩石样品的矿物含量,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 曹荣龙,朱寿华.1995.安徽碧溪岭柯石英榴辉岩 U-Pb 与 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究.地球化学,22(4):152~161.
- 程裕淇,万渝生,高吉凤.2000.河北平山小觉地区阜平群变质作用和深熔作用同位素年代研究的初步报道.地质学报,74(1):30~38.
- 胡世玲,郝杰,李口俊等.1999.大别山榴辉岩激光探针 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄.地质科学,34(4):427~431.
- 简平,杨巍然,周慧芳.1996.大别山东部柯石英榴辉岩锆石 U-Pb 测年——多期超高压变质作用的证据.华南地质与矿产,(4):14~21.
- 简平,杨巍然,李志昌等.1997.大别山西部熊店加里东期榴辉岩——同位素年代学的证据.地质学报,71(2):133~140.
- 李曙光,Jagoutz E,肖益林等.1996.大别山—苏鲁地体超高压变质年代学——I. Sm-Nd 同位素体系.中国科学,26(3):251~257.
- 刘若新,樊祺诚,李惠民等.1995.大别山碧溪岭石榴橄榄岩—榴辉岩的原岩性质及同位素地质年代学.岩石学报,11(3):243~256.
- 王松山,葛宁洁,桑海清等.1999.多硅白云母过剩 Ar 成因及绿辉石 Ar-Ar 年龄谱意义.科学通报,44(24):2607~2613.
- 杨巍然,王林森,韩郁菁等.1994.大别蓝片岩—榴辉岩年代学研究.见:陈好寿主编.同位素地球化学研究.杭州:浙江大学出版社.177~195.
- 止育勋.1998.大别山超高压变质岩组合中石榴硬玉石英岩及相关岩石的特征——陆壳成因岩石的证据.中国地质,(4):30~34.
- 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.
- Chevignac V, Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China; Sm Nd ages, Geochemical characteristics and tectonic implications. Chemical Geology, (122): 337~358.
- Cheng Y C (程裕淇). 1944. The migmatite area around Bettyhill, Sutherland. Geol. Soc. London, Quart. Jour., Vol. xcix: 107~154.
- Cheng Yuqi, Gao Jifeng, Wan Yusheng. 1997. Notes on the anatexis of some metamorphic rock types of the late Archaean Fuping Group of northwestern Pingshan, Hebei Province, China. Proc. 1997, and 30th Int. l. Geol. Congr. Vol. 17, part 4: 173~185.
- Humphries F J, Cliff R A. 1982. Sm-Nd dating and cooling history of Scourian granulites, Sutherland. Nature, 295:517~517.
- Sneeringer M. 1984. Strontium and samarium diffusion in diopside. Geochim. Cosmochim. Acta, 48:1589~1608.
- Vavra G. 1990. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance; a Cathodoluminescence study. Contrib. Mineral Petrol., 106:90~99.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea zone (Southern Alps); an ionprobe (SHRIMP) study. Contrib. Mineral Petrol., 122: 337~358.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons; geochronology of the Ivrea Zone (South Alps). Contrib. Mineral Petrol., 134: 380~404.

图 版 说 明

图 版 I

1. 碧溪岭潜水东岸桥北舍不规则状榴辉岩团块的片麻状花岗质岩石. 记号笔(长 14 cm)处为榴辉岩的残块. 岩石中的暗色阴影,是并未完全“同化”的榴辉岩的残余. 片麻状花岗质岩石同位素分析样品(CP3-24)采于记号笔下方约 50 cm.
- 2~5. 碧溪岭深色榴辉岩锆石镜下特征.
2. CP3-35,产于石英中的锆石. 注意其双层结构,锆石内部主体较不均匀,外部为暗色的宽窄不均的边缘层带,其右上部较宽,且向主体蚕蚀. 正交偏光,12.5×25.
3. CP3-35,绝大部分产于石英中的锆石,其下端与另一矿物接触. 锆石的外部边缘层带大多较宽,局部呈港湾状深入主体. 正交偏光,12.5×40.
4. CP3-16,锆石产于石榴于石内,内部较均匀,外部边缘层不明显,且与主晶界面平直. 单偏光,12.5×40.
5. CP3-41,两粒锆石产于绿辉石内,内部较均匀,外部边缘层较窄或不明显,且与主晶间的界面较为平直. 单偏光,12.5×25.
- 6~8. 碧溪岭深色榴辉岩(CP3-18)锆石扫描电镜照片.

6. 长粒状锆石,表面受到了溶(熔)蚀,一端具圆化的外形(上端)。
7. 图片6中放大的晶体的一端,注意其“受控生长”的多晶面(multifaceted)特征和圆化的外形。
8. 锆石表面发育的压痕(小压坑)。

图版 II

1. 碧溪岭片麻状花岗质岩石标本(CP3-24),与实物约等大。详细说明见正文,注意其较粗粒(一)和较细粒(二)的两部分。Gt为石榴子石。
2. 片麻状花岗质岩石,照片右下侧(a—e点连线以下及右侧)为(一)较粗粒长英质部分,含少量的白云母,其余为(二)较细粒部分,含石榴子石(Gt),绿帘石(Ep)和白云母(Ms)的细粒部分。注意照片中的残留石榴子石。单偏光,12.5×40。参阅正文。
3. CP3-24,片麻状花岗质岩石中的极不规则的残留石榴子石,为白云母穿插,见于细粒的长英质结集体(二)的边缘。照片右侧和左下角为(一)粒度较大的长石和石英区。单偏光,12.5×4。
- 4~7. 片麻状花岗质岩石中锆石的镜下特征。
4. CP3-24,产于标本中(一)的粗粒长石内的自形长柱状锆石,其内部较均匀,双层结构不明显。单偏光,12.5×63。
5. CP3-25,产于标本中(二)的细粒长石中的锆石,圆化的短柱状,呈双层结构。注意较均匀的内部主体,和较薄的边缘层带。单偏光,12.5×40。
6. CP3-25,产于标本中(二)的细粒长石和白云母粒间的锆石,圆化不规则柱状,呈双层结构,主体较均匀,外部边缘层带发育,并呈港湾状深入锆石内部。单偏光,12.5×40。
7. CP3-24,产于标本中(一)的粗粒石英内的锆石,粒状,呈双层结构,注意其内部2个微小的浑圆的核心(左侧),较不均匀的内部主体,和宽窄有变化的边缘层带。单偏光,12.5×40。

图版 III

碧溪岭深色榴辉岩(CP3-18)中被测定锆石的阴极发光照片,图中标数值为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)。测点位置以圆圈表示。

- 1~7. 对锆石内外两部或边部进行过两次(1~6)或两次以上测定(7)的锆石;8~15. 对内部主体进行了测定的锆石;16~20. 边部给出印支期年龄范畴的锆石;21~22. 内部结构不明显的锆石;23~26. 边部给出古生代年龄范畴的锆石

注意锆石的结构特征。①除21和22外,其他颗粒均具有明显的双层结构特征,由色深的内部(低CL密度区)和较亮的外部边缘层(高CL密度区)组成。②锆石内部一般较均匀,不发育韵律状同心环带,但形态变化大,呈三角形、港湾状等不规则形态。③锆石外部边缘层宽窄有较大的变化,一般封闭,但个别部分缺失(如9、14、15、25)。④锆石外部边缘层常延伸至锆石的内部,如(2、4、7、11~14)。⑤个别锆石发育类似岩浆型的环带(10)。⑥照片3有三层结构的特点。参阅正文。

图版 IV

碧溪岭片麻状花岗质岩石(CP3-24)中被测定锆石(除16未测定外)的阴极发光照片,图中标数值为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)。测点位置以圆圈表示。

(1)1~3、16,内部见有深熔锆石的韵律状同心环带,2和16保存较好,1和3稍模糊,可能与受一定程度的后期流体改造有关。

(2)大部分锆石发育双层结构(1、2、4~15)。内部主体形态不规则。主要有两类,一类发育具深熔特征的韵律状同心环带,较均匀(1、2),另一类为深色(4、6、7、10~15),不均匀,受到了强烈的破坏,含较多的亮点,只有少数色泽相对较浅,应为更老的残留锆石;锆石的边缘层宽窄有较大的变化。

(3)部分锆石见有三层结构,如3和16,由内部核心、具韵律状同心环带的主体和仅部分显示的边缘层组成,内部核心也有不同的类型,如3的内部核心为深色且不均匀,而16的内部核心则为浅色,较均匀。参阅正文。

17~18. 片麻状花岗质岩石中锆石镜下特征(续)。

17. CP3-24,粒状锆石产于标本中(一)的粗粒石英内,呈双层结构,内部主体又由两部分组成,左侧物质不均匀,可能原为残留的变粒岩中的变质核体,右侧物质较均匀,可能为晶出子核体基础上的深熔锆石。注意外部边缘层深入内部蚕食现象。12.5×40。
18. CP3-24,不规则粒状锆石产于标本中(一)的粗粒石英中,内部不均匀,外部为宽窄有变化的边缘层。单偏光,12.5×40。
- 19~21. 片麻状花岗岩中锆石的扫描电镜照片。
19. 稍有圆化较自形的柱状锆石。
20. 圆化、不规则柱状锆石。
21. 圆化、很不规则的柱状锆石。

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

Cheng Yuqi¹⁾ Liu Dunyi¹⁾ I. S. Williams²⁾ Jian Ping¹⁾ Zhuang Yuxun¹⁾ Gao Tianshan³⁾

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

2) *Research School of Earth Sciences, Australian University, G. P. O Box 4,
Canberra, A. C. T., 2601, Australia*

3) *Anhui Academy of Geological Survey, Hefei, 230011, Anhui, China*

Abstract

The paper reports SHRIMP U-Pb zircon data of a dark-coloured eclogite and a post-eclogite garnet-bearing gneissic-granitic rock from the Bixiling area, Yuexi County, Anhui Province, in the eastern Dabie Mountains. The eclogite, which is metamorphosed basic tuff, contains very scarce zircons in omphacite or garnet, but more in quartz. They usually exhibit a double-layered texture clearly shown in cathodoluminescence images. Their main inner parts give a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 757 ± 7 Ma, representing the approximate age of the HP—UHP metamorphic event, during which the eclogite was formed. The outer peripheral parts of the zircons, which have been modified by late-stage fluids, give an age of 223 ± 3 Ma. The granitic rock contains more zircons of anatectic origin found mostly in feldspar and quartz and usually also showing a similar composite texture. The main inner parts of the anatectic zircons with rhythmic zoning give a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 727 ± 15 Ma for the approximate age of the emplacement of the granitic rock, and their outer parts, an age of 219 ± 3 Ma for a similar or even the same fluid transformation event. It is thus suggested that the HP—UHP metamorphism of the Bixiling eclogite facies rocks took place during the Neoproterozoic Jinningian, and the Indosinian age values may only represent a late event in the nature of fluid transformation.

Key words: Bixiling; Dabie Mountains; dark-coloured eclogite; gneissic-granitic rock; Neoproterozoic Jinningian; SHRIMP dating

作者简介

程裕淇,男,1912年生。1938年获英国利物浦大学地质系及地理系哲学博士学位。1955年被选聘为中国科学院学部委员(现院士)。曾任地质部副部长兼总工程师。长期从事变质地质学、矿床学研究。通讯地址:100037,北京百万庄26号,中国地质科学院;电话:010-68327326。

大别造山带岩石学结构和热结构 及其地质意义

邓晋福¹⁾ 戴圣潜^{1,2)} 吴宗絮³⁾ 赵海玲¹⁾ 杜建国²⁾ 罗照华¹⁾

1) 中国地质大学, 北京, 100083; 2) 安徽省地质调查研究院, 合肥, 230001

3) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029

内容提要 岩石学结构和热结构表明大别碰撞造山带是由两个不同岩石—构造单元叠置形成, 代表两个深部地壳物质剖面。本文通过对高压、超高压岩石形成过程中岩石物理(密度)性质分析, 指出大陆长英质地壳自身在特定岩石学结构情况下可以俯冲至地幔深度。低温、快速折返是缺乏同碰撞和碰撞后花岗岩类的主要原因。“浮沉子效应”是超高压岩石形成和折返的力学机制。

关键词 岩石学结构 热结构 超高压岩石 造山—深部过程 大别造山带

大别造山带的地质研究还存在着不少科学难题, 例如: ① 为何没有同碰撞花岗岩类的形成? 另外, 造山带两端——桐柏山和胶东有碰撞后侵入岩, 但大别山本部则没有? ② 为何没有伴随超高压(UHP)岩石快速折返的磨拉石堆积? ③ 超高压岩石的形成与折返是否必须有洋壳或大洋岩石圈的参与? 等等。关于大别造山带的岩石学结构与热结构, 在文献中还未见有系统地研究。本文基于这个角度对上述问题进行讨论, 并由此提出一个大别造山带超高压岩石形成与折返的动力学模型。

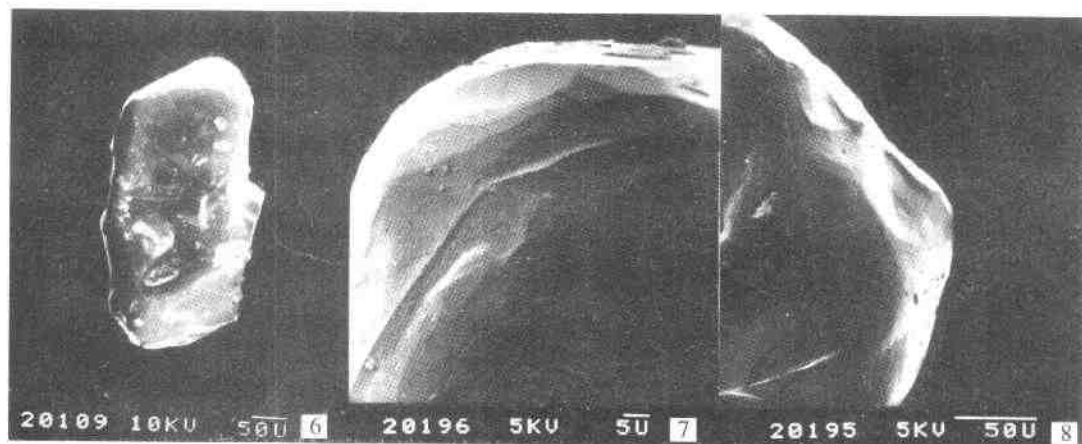
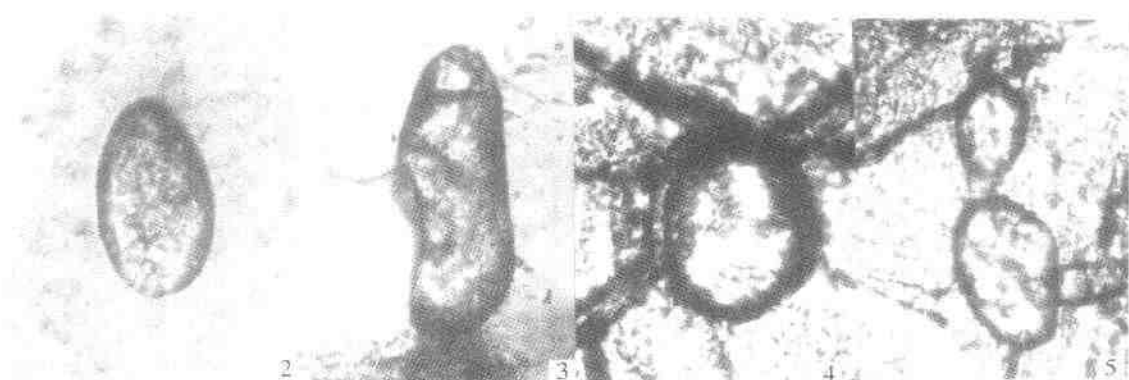
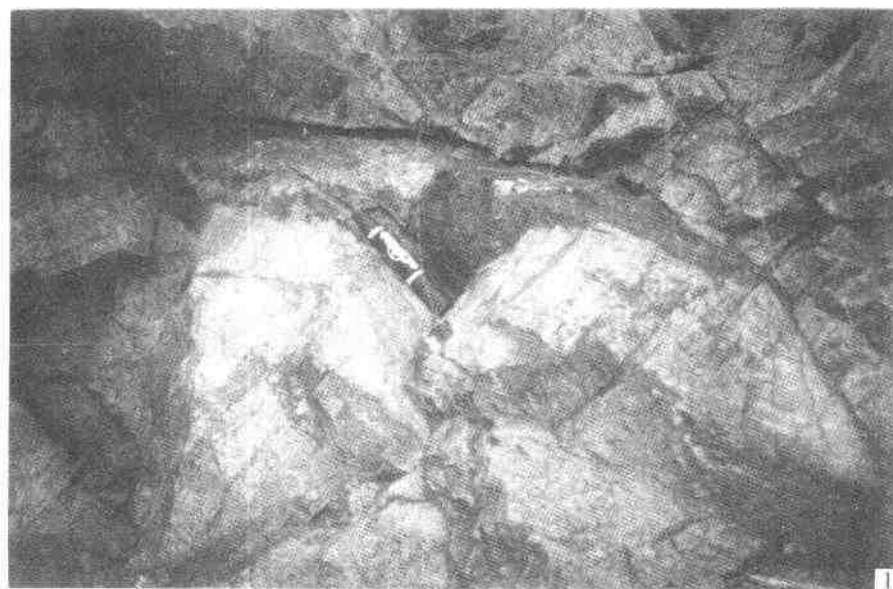
1 大别造山带的岩石学结构

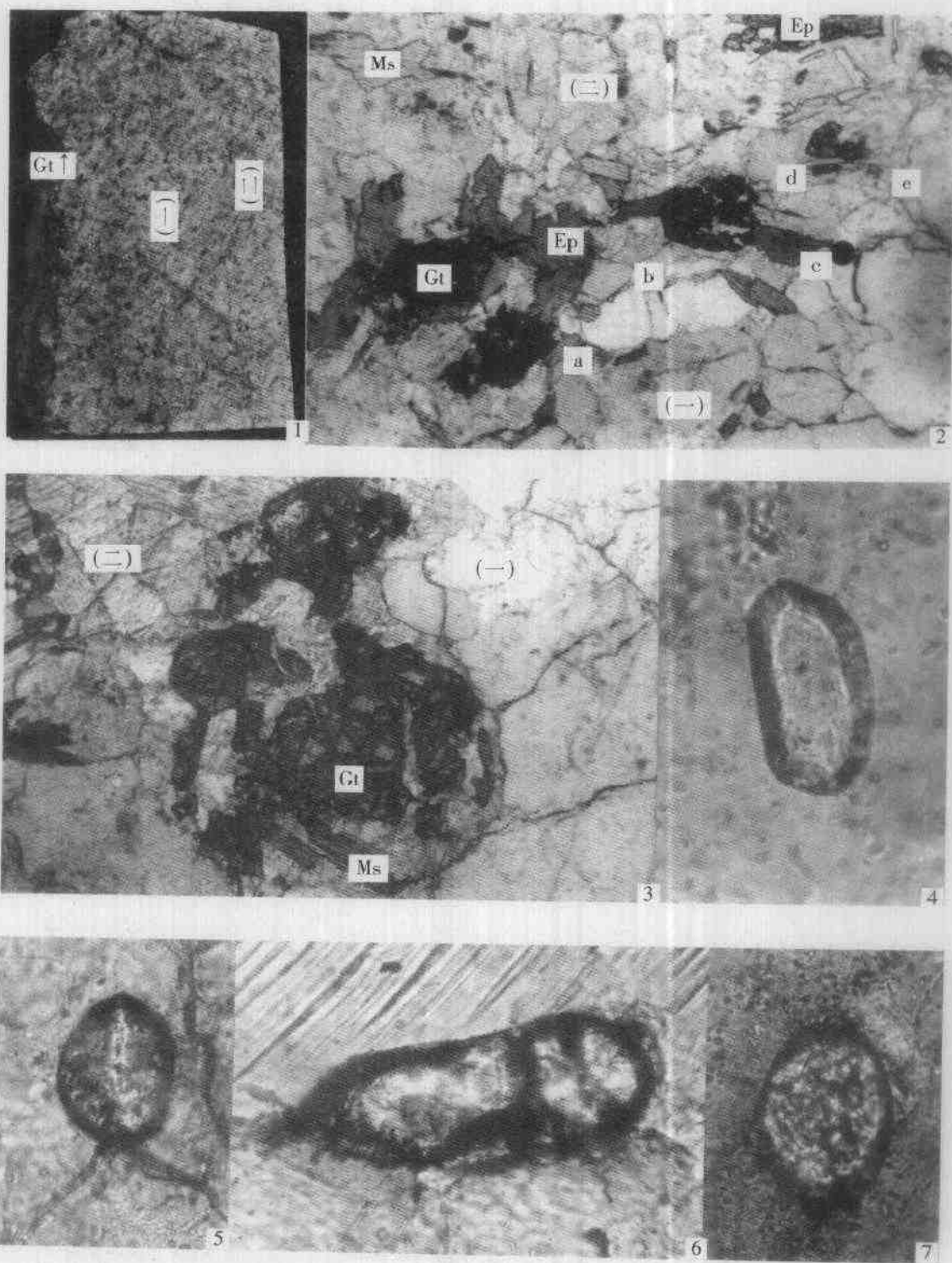
1.1 造山带的两类变质基底

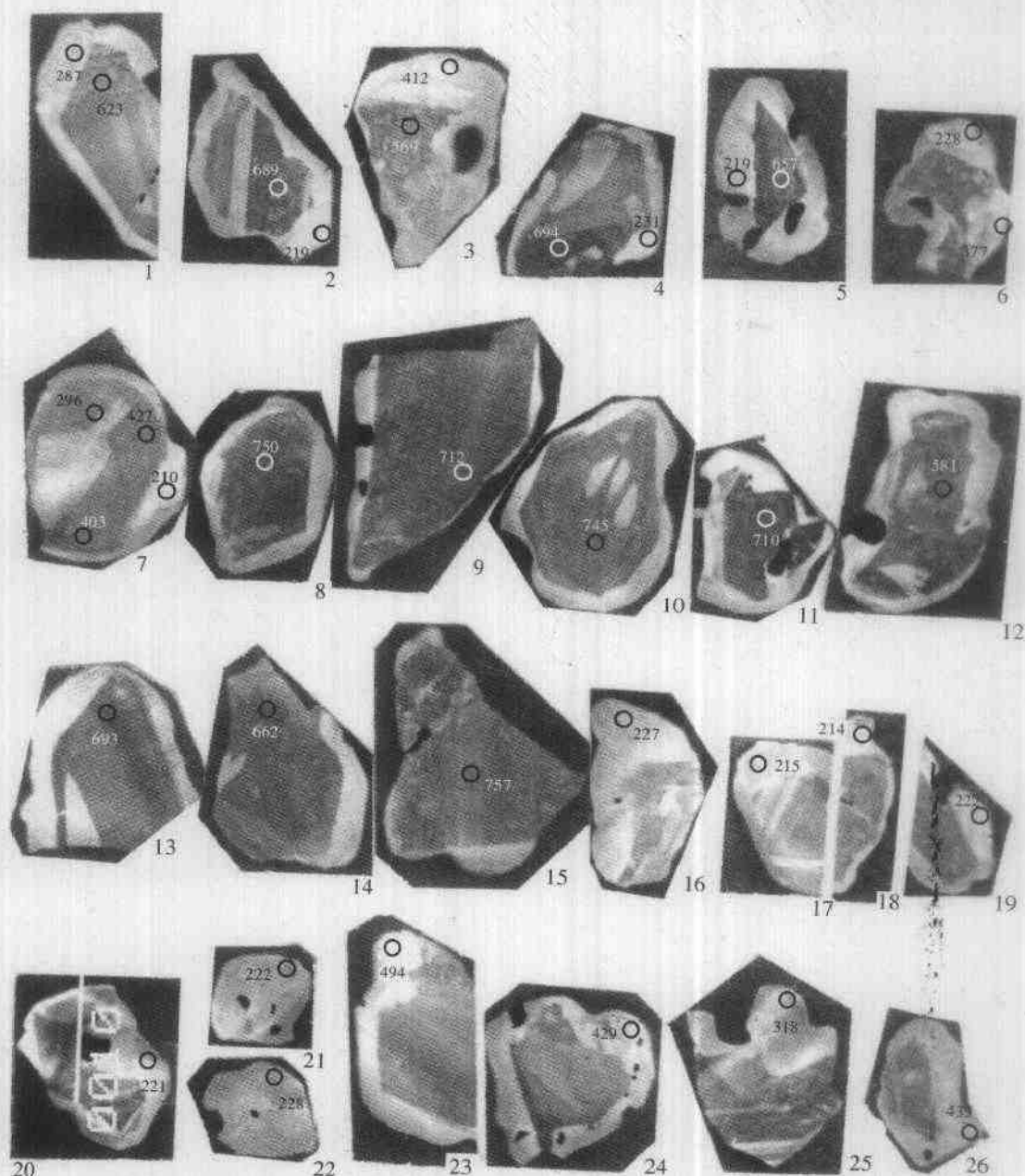
大别地区出露的基底主要由长英质片麻岩类构成, 但其南北部分有很大差异, 表现为: ① 北大别片麻岩类混合岩化发育, 粒度以中粗粒为主, 暗色矿物以角闪石为主, 并有辉石出现, 石榴子石少见; 而南大别片麻岩类无混合岩化作用, 粒度较细, 暗色矿物以黑云母、白云母、绿帘石为主, 常见石榴子石。② 南、北大别片麻岩类以潜山水吼糜棱岩带分割, 水吼糜棱岩为高温长石糜棱岩(董树文等, 1997), 长石糜棱岩比石英质糜棱岩形成深度大, 主要于下地壳环境下形成。③ 片麻理的总体产状不同, 从水吼糜棱岩往南, 片麻理总体向南倾; 而北大别片麻岩类总体向北倾。④ 北大别片麻岩类与北淮阳小溪河片麻岩类, 南大别片麻岩类与宿松变质岩类, 虽然其中有断裂构造把它们分开, 但均显示变质程度高低过渡关系。⑤ 北淮阳北缘发现的一系列指向北的逆冲断层指示大别造山带逆冲于合肥盆地之上; 南坡破凉亭 105 国道上, 地层强烈褶皱, 褶皱指向指示大别山向南逆冲于下扬子盆地之上。⑥ 南大别片麻岩中大量赋存超高压岩块或透镜体; 而北大别片麻岩中则很少有超高压岩石产出。因此, 以水吼糜棱岩为界, 可把

注: 本文得到原地质矿产部基础研究项目(编号 9501102-03-02 和 9501112)的资助。

本文 2000 年 1 月收到, 5 月改回, 刘淑春编辑。







x100 0008 15kV 500μm