

变质岩中锆石在薄片下的原位阴极发光研究

周丽芹, 李 宁, 董春艳, 万渝生

(中国地质科学院 地质研究所 北京离子探针中心, 北京 100037)

摘要: 大多数阴极发光研究都是在从岩石样品分选出的锆石上进行的。然而, 要弄清形成演化历史复杂的锆石成因很困难。为了克服这一不足, 更好地了解锆石是如何受周围环境的影响, 对变质岩广泛分布的大青山地区3个变质岩石样品进行了薄片下的锆石阴极发光研究。主要结论为: 包裹在造岩矿物中的锆石, 变质增生边不发育, 但可发生不同程度的重结晶; 流体对锆石重结晶和变质增生边形成具有重要的意义, 流体可来自岩石体系之外, 也可来自其内部; 以往的研究中, 一些重结晶锆石可能被错误地当作了变质增生锆石。

关键词: 锆石; 阴极发光; 原位分析; 变质岩

中图分类号: P578.94⁺1; P575.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1134-09

In-situ cathodoluminescence study of zircons in thin sections of metamorphic rocks

ZHOU Li-qin, LI Ning, DONG Chun-yan and WAN Yu-sheng

(Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Most cathodoluminescence imaging studies are focused on zircons separated from rock samples. However, it is difficult for this method to reveal origins of zircons with complex formation and evolution histories. In order to overcome the shortage and better understand the influence of the environment on zircons, the authors carried out cathodoluminescence study of zircons in thin sections for three metamorphic rock samples from Daqingshan, a typical area of extensively distributed high-grade metamorphic rocks. The main conclusions are as follows: ① Zircons occurring as enclaves in rock-forming minerals, such as quartz and feldspar, have rare overgrowth rims but can undergo recrystallization in different degrees. ② Fluid is very important for the recrystallization of zircons and overgrowth, and can be derived outside or inside the rock system. ③ It seems that some recrystallized zircons were wrongly regarded as overgrowth rims in previous studies.

Key words: zircon; cathodoluminescence; in-situ analysis; metamorphic rocks

锆石是很多岩石中都存在的副矿物。由于集许多优点于一身, 在年代学和其它研究中具有不可替代的作用(Ayers *et al.*, 2003; Valley *et al.*, 2005; Santosh *et al.*, 2009)。作为一门新的综合性学科, 锆石学正在逐渐形成。其中, 阴极发光图像已成为研究锆石成因的最重要方法之一, 根据阴极发

光图像确定锆石结构, 为锆石原位定年和年龄解释打下基础。但是, 到目前为止, 许多研究对象都只是从岩石样品中分选出的锆石。这对于成因简单的锆石可行, 如果锆石成因复杂, 有时则会影响对其成因及相关地质体形成演化历史的正确认识, 有必要在岩石薄片中直接观察锆石结构及与周围环境的关

收稿日期: 2014-02-08; 修订日期: 2014-06-30

基金项目: 中国地质调查局重点资助项目(1212010811033, 12120113013700)

作者简介: 周丽芹(1982-), 女, 硕士, 第四纪地质学专业, E-mail: zhoulinqin@bjshrimp.cn; 通讯作者: 万渝生(1958-), 男, 博士, 研究员, 地球化学专业, 主要从事早前寒武纪地质和年代学研究, E-mail: wanyusheng@bjshrimp.cn。

系。在所有的锆石中, 变质锆石的结构和成因最为复杂。基于以上考虑, 本文对大青山地区3个变质岩样品的锆石进行了薄片下的阴极发光研究。

变质锆石可划分为变质新生锆石和重结晶锆石两大类。变质新生锆石可为变质增生边或以单独颗粒形式存在。重结晶锆石可进一步划分为固态重结晶、流体参与下的重结晶或部分重结晶和完全重结晶锆石, 但这两种划分不是相互对应的, 例如, 流体参与下的重结晶可为完全重结晶, 也可为不完全重结晶。其它(造岩)矿物分解产生的Zr、Si等组分的成核和结晶, 锆石从变质流体(和深熔岩浆)中晶出, 原有锆石的溶解-再沉淀、交代置换和元素扩散等是变质新生锆石形成和原有锆石改造的重要机制。

1 样品简介

本文研究的3个样品都来自大青山地区。简要介绍如下。

1.1 石榴黑云片麻岩(NM0413)

样品取自古元古代早期的大青山表壳岩(Dong et al., 2014a)。岩石显示弱的深熔, 主要由斜长石、石英、棕色黑云母和石榴石组成。分选出的锆石呈长柱状, 两端圆滑, 具核-边结构, 核部碎屑锆石显示封闭环带(图1a)。一些锆石呈圆形, 其中的碎屑锆石粒度通常更小甚至完全消失。碎屑锆石的U含量和Th/U值分别为 $105 \times 10^{-6} \sim 1882 \times 10^{-6}$ 和0.09~1.13, 年龄变化范围为2 557~2 477 Ma。变质锆石的U含量和Th/U值分别为 $279 \times 10^{-6} \sim 1208 \times 10^{-6}$ 和0.01~0.27, 加权平均年龄为 2397 ± 10 Ma(Wan et al., 2009)。

1208×10^{-6} 和0.01~0.27, 加权平均年龄为 2397 ± 10 Ma(Wan et al., 2009)。

1.2 变质长石砂岩(NM0933)

样品取自古元古代晚期的上乌拉山群(Dong et al., 2012)。变质长石砂岩厚约3 m, 岩石新鲜面呈灰色, 矿物粒度较粗。主要由条纹长石、少量石英及棕色黑云母组成, 有石墨存在。分选出的锆石呈椭圆形, 阴极发光下核部碎屑锆石普遍显示重结晶特征(图1b), 变质增生边不发育。根据锆石内部结构和外部形态关系及组成和年龄, 认为碎屑锆石在流体条件下发生了完全重结晶。碎屑锆石U含量和Th/U值分别为 $53 \times 10^{-6} \sim 191 \times 10^{-6}$ 和0.53~1.93, 年龄为2.40~2.48 Ga。重结晶锆石和变质增生边锆石的组成和年龄类似, U含量和Th/U值分别为 $570 \times 10^{-6} \sim 1207 \times 10^{-6}$ 和0.11~0.21, 加权平均年龄为 1834 ± 11 Ma。

1.3 紫苏花岗质片麻岩(NM1119)

紫苏花岗质片麻岩(Liu et al., 2013)呈灰色, 粒度中等, 片麻理发育, 主要由钾长石、斜长石、石英、紫苏辉石、角闪石、磁铁矿和少量黑云母组成。一些辉石、角闪石和长石遭受蚀变转变为粘土矿物。分选出的锆石呈柱状和不规则状(图1c), 岩浆锆石具封闭环带, 但普遍遭受强烈重结晶, 环带模糊或完全消失。一些锆石边上形成变质增生边, 使锆石颗粒变得圆滑。岩浆锆石和变质锆石年龄分别为 1987 ± 19 Ma和 1896 ± 17 Ma。变质锆石的U含量和Th/U值分别为 $146 \times 10^{-6} \sim 263 \times 10^{-6}$ 和0.13~0.14。

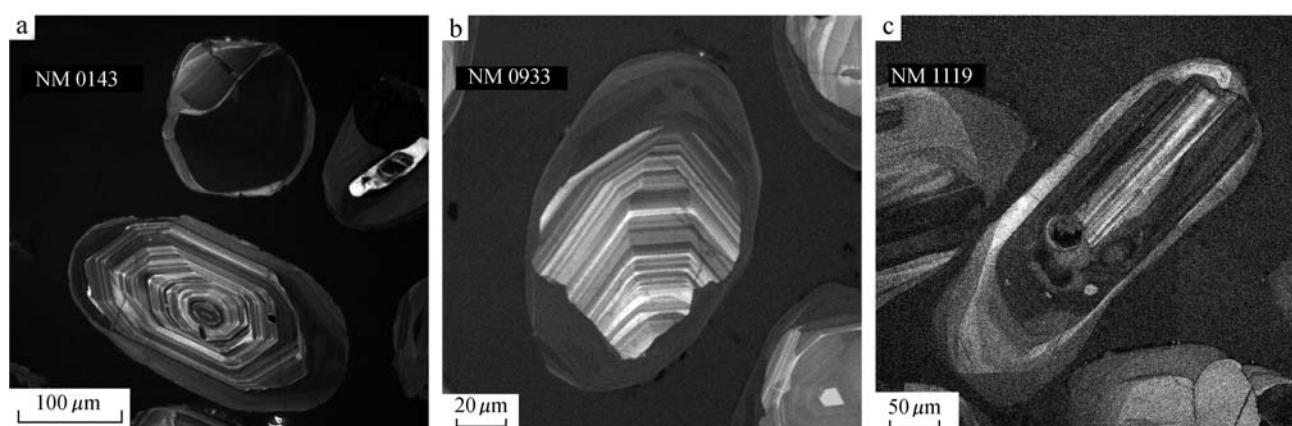


图1 大青山地区变质岩的锆石阴极发光图像(Wan et al., 2009; Dong et al., 2012; Liu et al., 2013)

Fig. 1 Cathodoluminescence images of zircons from metamorphic rocks in Daqingshan (from Wan et al., 2009; Dong et al., 2012; Liu et al., 2013)

2 分析方法

二次电子图像和阴极发光图像在北京离子探针中心日立 S-3000n 扫描电镜上完成。首先在蔡司显微镜下确定可能的锆石颗粒。把岩石薄片镀金，放在样品室中，寻找到可能的锆石颗粒。如果是锆石，则进行二次电子和阴极发光研究和照相。造岩矿物种类的确定主要是依据蔡司显微镜下的观察和不同矿物在二次电子和阴极发光下的图像特征。但在一些情况下只能确定矿物大的类型，未进一步区分斜长石和钾长石、黑云母和白云母、单斜辉石和斜方辉石。

3 锆石阴极发光

以下给出了各个样品具代表性的锆石阴极发光图像及相关二次电子图像。图中的第1列和第2列为二次电子图像，但放大倍数不同，第1列图像的范围更大。第3列为阴极发光图像，比例与第2列的相同。

3.1 石榴黑云片麻岩(NM0413)

锆石颗粒 a(图 2a)整个被包裹在石英中。岩石为变质沉积岩，由于整颗锆石都被包裹在石英之中，一种可能是该锆石在物源区岩石中就被包裹在石英中，与石英一道作为“岩屑”搬运沉积，另一种可能是锆石在变质作用过程中被包裹到了石英之中。不论哪种情况，石英都发生了强烈的重结晶作用。锆石呈椭圆形，核部发生重结晶，环带模糊。在右上侧和左下侧锆石内部环带结构被组成相对均匀、呈灰色的变质锆石域切割，变质锆石可能为重结晶成因。但窄的灰白色边为变质增生边。

锆石颗粒 b(图 2b)呈长柱状，两端被圆滑。周围造岩矿物为长石、石英和云母。碎屑锆石的边部比核部发生更强烈的重结晶作用。变质增生边很窄，主要存在于与云母接触的边上，局部切割了碎屑锆石内部环带结构。

锆石颗粒 c(图 2c)呈椭圆形，最外部存在窄的增生边。左侧为石英，变质增生和重结晶作用都不强。与之不同，边上分布有较多云母的锆石右侧发生了大范围的完全重结晶。比与云母接触的锆石颗粒 2 的重结晶作用明显更强，表明与锆石接触的含水矿物多少影响了其重结晶作用程度。锆石在右下端与石英接触，界线平直，而被包裹在石英中的锆石颗粒

1 边界圆滑。可能表明，这两种情况下影响变质增生边生长的因素不同，不同矿物的物理性质不同。在前一种情况下，石英相对于云母，刚性更强，与之接触的锆石为平直关系。在后一种情况下，锆石周围的介质相同，锆石生长表现出各向同性。

锆石颗粒 d(图 2d)呈椭圆形，但内部锆石为长柱状。周围造岩矿物为石英、长石、石榴石和云母。碎屑锆石核部发生部分重结晶。幔部发生完全重结晶或是变质增生边，难以确定。石榴石为变质矿物，与其它造岩矿物相比，石榴石边上的碎屑锆石重结晶程度无明显增强，变质增生边无明显增大。变质增生锆石向左插入石英和石榴石颗粒边界之间，可能说明这是一个可更好提供空间而有利于锆石生长的位置。锆石右下侧与云母接触，核部碎屑锆石被破坏，锆石颗粒形态向椭圆形方向变化，被溶解了的锆在上、下两侧再沉淀。如果是这样，上、下两侧的幔部锆石就可能是变质增生边。

锆石颗粒 e 和 f 在一起，都呈柱状，与石榴石、长石、石英和云母接触(图 2e)。颗粒 6 与石榴石接触处，碎屑锆石的原岩浆环带局部仍有保留。与云母接触处，重结晶程度明显更高。

3.2 变质长石砂岩(NM0933)

锆石颗粒 a 被包裹在长石中，呈椭圆形(图 3a)。仍大多保留岩浆锆石的自形形态，很可能在物源区就被包裹在长石中。碎屑锆石的几个角，特别是上侧看来被部分溶解，而在面上再沉淀，使锆石向椭圆形转变。变质增生边不宽。

锆石颗粒 b 的原碎屑锆石呈椭圆形，变质增生边很窄(图 3b)。具环带的碎屑锆石与组成均匀的变质锆石之间的切割关系，与分选出的锆石十分类似(图 1b)。碎屑锆石边上为长石，在左侧和下侧遭受流体交代蚀变作用更强(阴极发光图像中变为暗色)，锆石重结晶域更大，右上侧长石遭受流体交代相对较弱(呈不规则花纹状，也是流体交代蚀变的缘故)，锆石重结晶域较小。

锆石颗粒 c 呈短柱状-椭圆状，主要包裹在长石中，上部与石英接触(图 3c)。由于碎屑锆石本身呈自型形态，边部 U 含量高的暗色边可能主要为变质增生成因。长石遭受强烈流体交代蚀变。与长石接触的锆石，变质增生边更宽一些。

锆石颗粒 d 呈柱状，位于长石之中(图 3d)。从图 3d₁ 中可见，长石内部存在一由下向上的流体通道。交代蚀变作用使长石在阴极发光下的图像特征

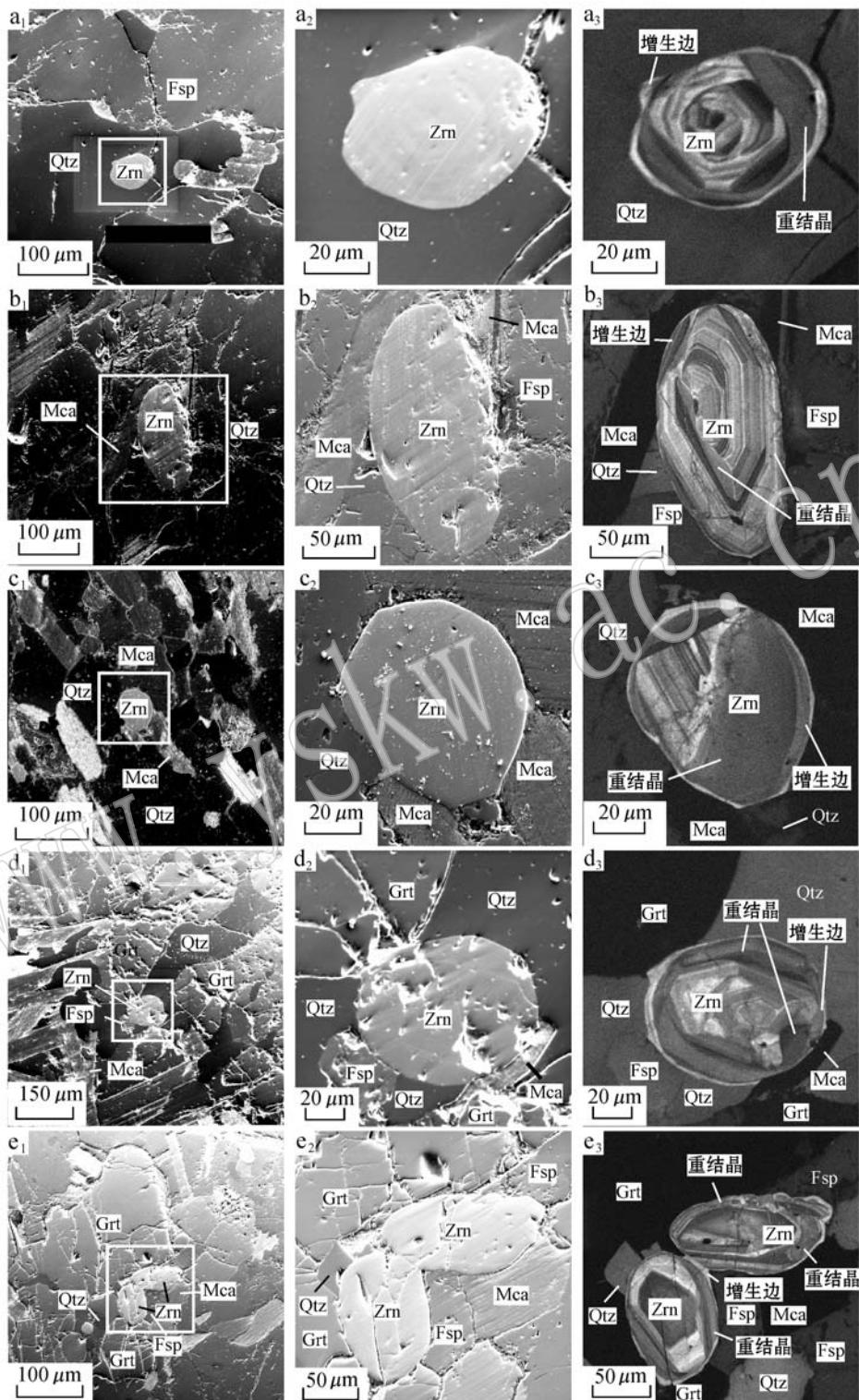


图2 大青山地区古元古代早期大青山表壳岩石榴黑云片麻岩(NM0413)在薄片下的二次电子图像(第1和第2列)和阴极发光图像(第3列)

Fig. 2 Second electron images (first and second columns) and cathodoluminescence images (third column) in thin section of garnet-biotite gneiss (NM0413) from the early Paleoproterozoic Daqingshan supracrustal rocks in Daqingshan
Zrn—锆石; Qtz—石英; Fsp—长石; Mca—云母; Grt—石榴石; A—流体交代
Zrn—zircon; Qtz—quartz; Fsp—feldspar; Mca—mica; Grt—garnet; A—fluid alteration

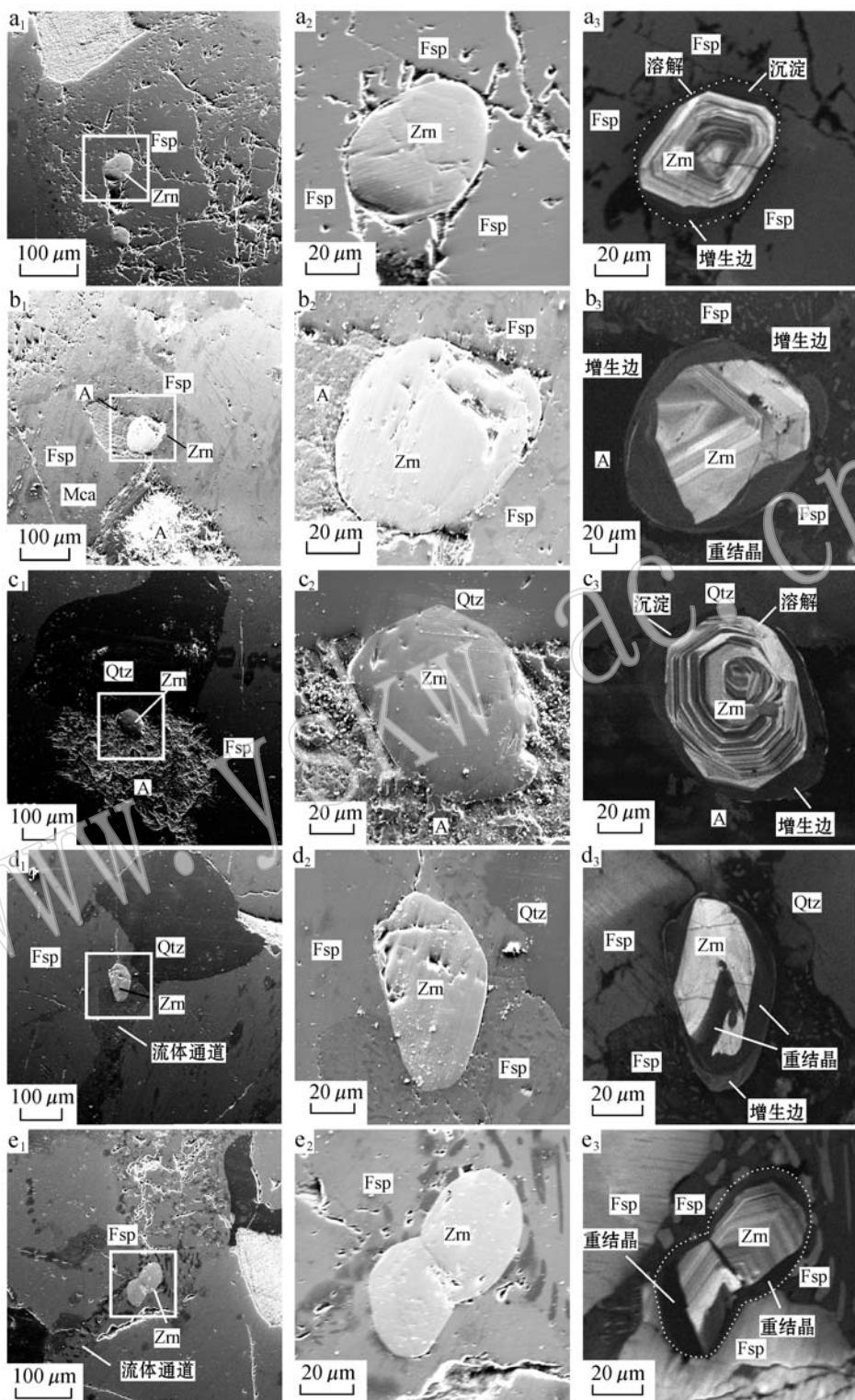


图3 大青山地区古元古代晚期上乌拉山岩群变质长石砂岩(NM0933)在薄片下的二次电子图像(第1和第2列)和阴极发光图像(第3列)

Fig. 3 Second electron images (first and second columns) and cathodoluminescence images (third column) in thin section of meta-arkosic sandstone (NM0933) from the late Paleoproterozoic Upper Wulashan Group in Daqingshan

Zrn—锆石; Qtz—石英; Fsp—长石; Mca—云母; Grt—石榴石; A—流体交代

Zrn—zircon; Qtz—quartz; Fsp—feldspar; Mca—mica; Grt—garnet; A—fluid alteration

发生了很大变化(图3d₃),组成也一定发生了变化。碎屑锆石发生完全重结晶,并有变质增生边形成。由于完全重结晶锆石和变质增生边的形成年龄几乎相同(Dong *et al.*, 2012),这一过程是连续的。变质增生边主要发育在锆石下部,可能表明携带锆的流体来自于下方。

锆石颗粒e(图3e)与颗粒d的形态和成因十分类似,但流体通道更为发育(图3e₁)。强烈的流体交代作用使长石不但在阴极发光图像中,而且在二次图像中也显示出明显的差异(图3e₂、3e₃)。碎屑锆石的左下侧和右下侧与变质锆石之间的切割关系十分清楚,变质锆石为重结晶成因。

3.3 紫苏花岗质片麻岩(NM1119)

该岩石原为岩浆成因,后遭受麻粒岩相变质作用叠加改造。所以,与变质沉积岩中的碎屑锆石形态有时难以确定(外生作用过程可改变原锆石的形态)不同,岩浆岩中的锆石在大多数情况下为岩浆成因,变质岩浆岩中的原有锆石多为自形形态。这为了解变质作用过程中锆石变化提供了更好机会。

锆石颗粒a被包裹在石英中(图4a)。锆石发生强烈重结晶,但变质增生边不发育。

锆石颗粒b呈椭圆形,周围主要为石英(图4b)。原岩浆锆石更长,在右下侧被破坏,溶解了的锆可能被带到两侧再沉淀,使锆石向椭圆形转变。

锆石颗粒c呈椭圆-不规则形态(图4c)。锆石右侧的中部虽然遭受强烈重结晶,但环带结构仍依稀保留,原为岩浆锆石。周围的长石遭受流体交代,右侧的长石遭受蚀变更强烈。这种相关性表明,锆石发生重结晶及变质增生边形成,与流体作用有关。

锆石颗粒d呈菱形,主要存在于角闪石中(图4d)。核部锆石发生强烈重结晶。变质增生边在核部锆石的左上方和右下方相对发育,而在这两端角闪石遭受流体交代。看来变质增生边的形成与角闪石关系不大,而与后期流体作用关系密切。

锆石颗粒e呈长柱状,但两端圆滑(图4e)。锆石周围矿物为辉石、角闪石和长石。岩浆锆石遭受强烈重结晶,但变质增生边不发育。与角闪石接触的锆石比与辉石接触的锆石的变质增生边似更发育一些,但变质增生边与流体交代作用关系看来更为密切。左下侧锆石发生溶解,在右下侧形成增生边。

锆石颗粒f呈椭圆形,周围矿物为辉石和长石,但发生强烈流体交代(图4f)。岩浆锆石遭受强烈重结晶,上侧阴极发光下不均匀的边部可能是流体条

件下遭受再次重结晶作用改造的结果,而下侧和右下侧与遭受流体交代的长石接触处存在变质增生边。

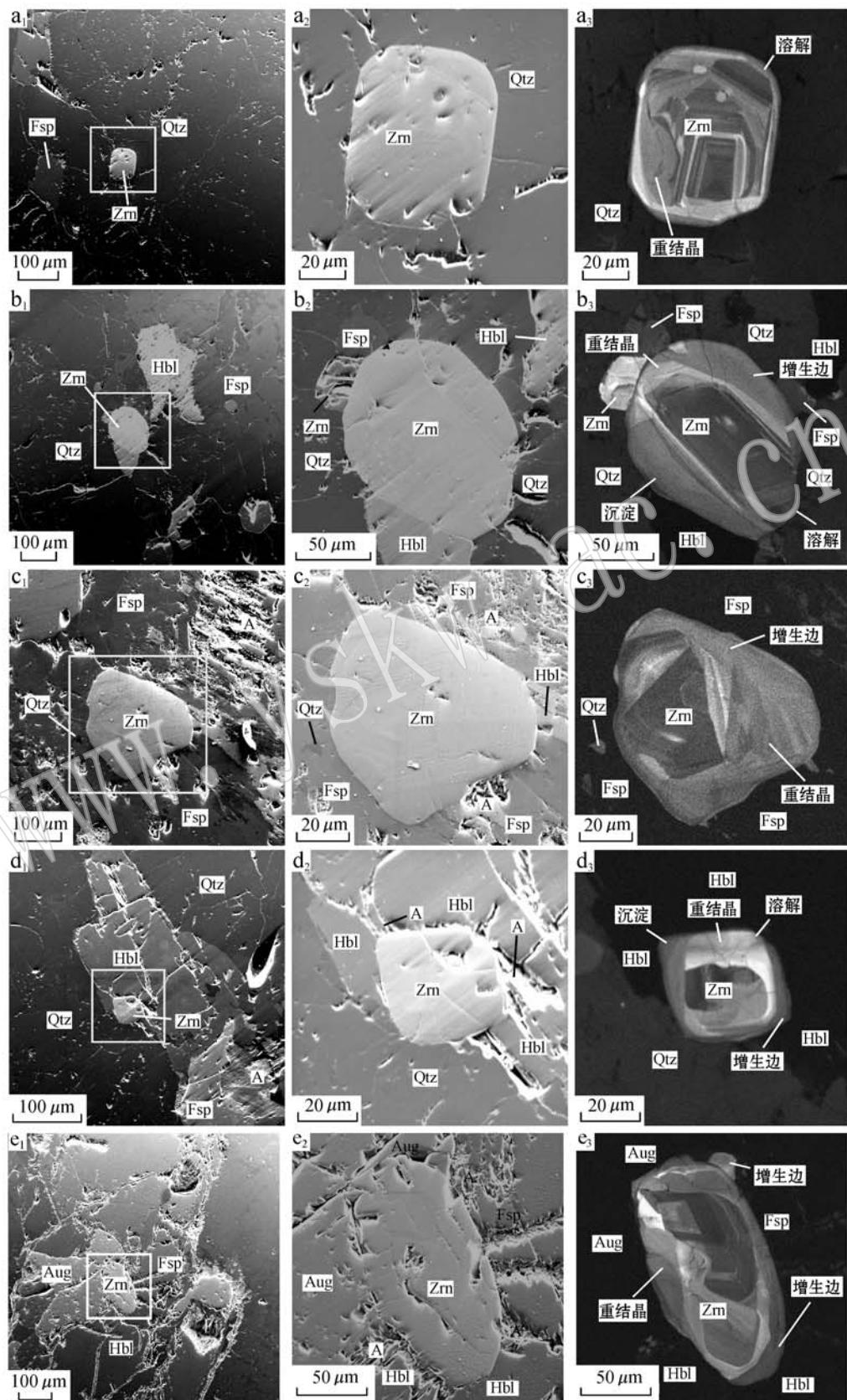
锆石颗粒g呈椭圆-不规则形,周围矿物为角闪石、石英和长石(图4g)。岩浆锆石发生强烈重结晶,在下侧与石英接触处岩浆锆石环带保留得更好。锆石上部重结晶作用更强,从结构看像是叠加在早期重结晶锆石之上的再次重结晶,相邻的角闪石遭受流体交代,推测两者之间存在联系。

锆石颗粒h呈椭圆形,周围的长石和石英遭受十分强烈的流体交代作用(图4h)。岩浆锆石也发生强烈重结晶。与其它重结晶岩浆锆石相比,该锆石中存在更多的矿物包裹体,它们为流体交代的产物。在岩浆锆石的左、右两侧,存在窄的变质增生边。

4 讨论和结论

包裹在石英中的锆石最不易生长变质增生边,但可遭受不同程度的重结晶,锆石的棱角逐渐圆滑,颗粒形态向椭圆-圆形方向发展(图2a₃、4a₃),表明即使在石英内部的“封闭体系”也存在溶解-再沉淀作用,但锆很难由石英颗粒的外部提供。包裹在石英中的锆石在变质重结晶和增生边发育程度上存在差异,可能与岩石遭受变质作用强度不同有关。一些有较大变质增生边的锆石,不排除是在变质增生边形成后再被包裹在石英中的可能。

与包裹在石英中的锆石类似,包裹在长石中的锆石变质增生边通常也不发育(图3a₃)。但是,长石比石英更易遭受流体交代蚀变,包裹在长石中的锆石更易遭受流体改造,发生重结晶作用和形成变质增生边。变质长石砂岩样品NM0933中,碎屑锆石发生重结晶,U-Th-Pb体系和O同位素都发生完全重置(Dong *et al.*, 2012; 未发表数据)。重结晶锆石的δ¹⁸O高达10.05‰~11.20‰,比一些碎屑锆石的δ¹⁸O明显增大,重结晶域的U含量明显增高,Th/U值明显降低。根据重结晶锆石的结构和组成特征,认为流体交代起了重要作用。但是,该岩石中含水矿物很少,故推测流体来自岩石体系之外。本文的研究支持了这一认识。薄片中观察,有变质增生边和强烈重结晶锆石周围的长石都发生了流体交代蚀变(图3c₃、3d₃、3e₃)。流体具有很强的渗透交代能力,使重结晶锆石不论在结构或组成上都发生很大变化。



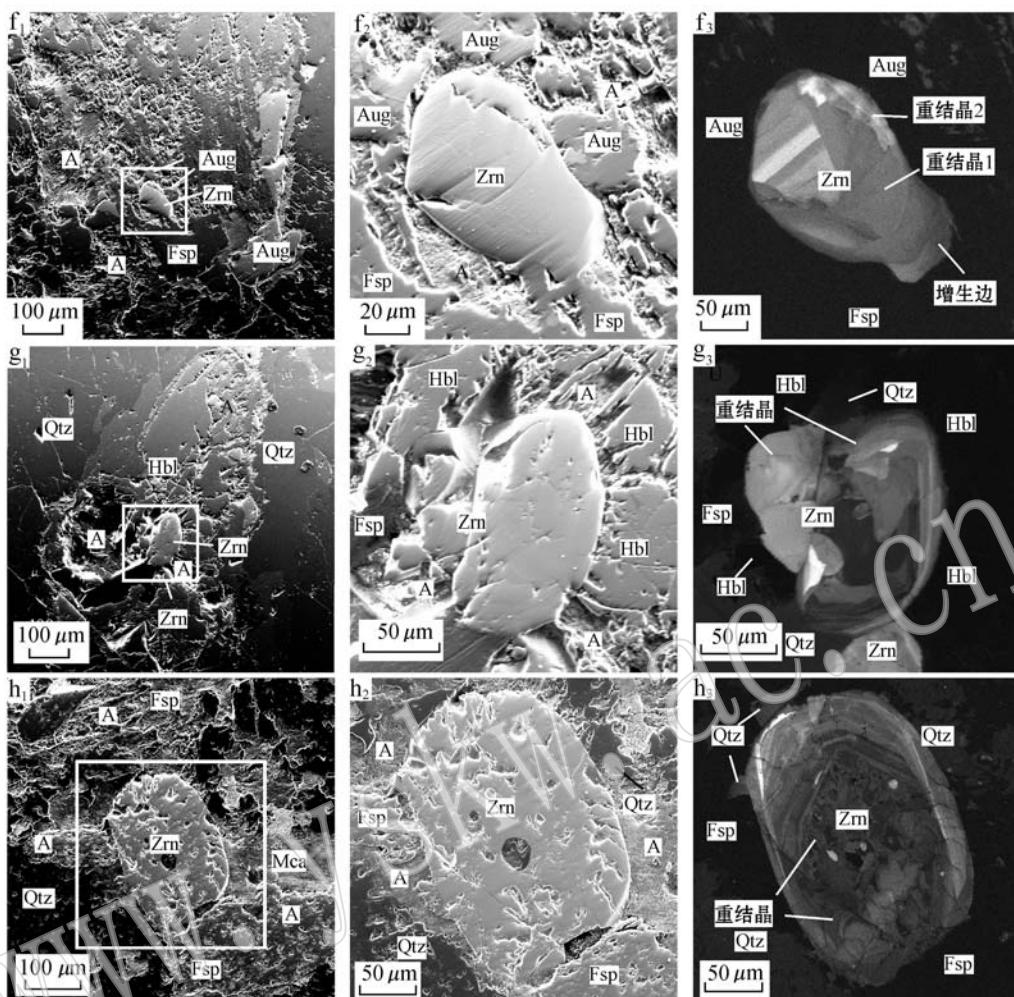


图 4 大青山地区古元古代紫苏花岗质片麻岩(NM1119)在薄片下的二次电子图像(第1列和第2列)和阴极发光图像(第3列)

Fig. 4 Second electron images (first and second columns) and cathodoluminescence images (third column) in thin section of Paleoproterozoic charnockitic gneiss (NM1119) in Daqingshan

Zrn—锆石; Qtz—石英; Fsp—长石; Mca—云母; Aug—辉石; Hbl—角闪石; A—流体交代

Zrn—zircon; Qtz—quartz; Fsp—feldspar; Mca—mica; Aug—augite; Hbl—hornblende; A—fluid alteration

在另一些情况下, 锆石遭受流体交代, 但形成的重结晶锆石在结构和组成上显示出大的变化, 并有交代成因的矿物包裹体形成(图 4h₃)。这可能表明流体在渗透交代锆石过程中组成和其它物理化学条件的不同。在样品 NM1119 的锆石颗粒 h 周围, 长石和石英都遭受强烈流体交代作用(图 4h₁、4h₂)。有必要从流体组成、温度、酸碱性、氧化还原条件等方面对锆石重结晶行为开展更深入的研究。

本次研究中, 未获得完全包裹在辉石和石榴石矿物中的锆石的阴极发光图像, 我们推测, 如果无流体参与, 包裹于这些矿物中的锆石的变质增生边也不发育。角闪石为含水矿物, 但本文中的紫苏花岗

质片麻岩样品为麻粒岩相变质产物, 其中的角闪石也为高级变质作用产物, 故含水不高, 与其接触的锆石显示出与辉石和石榴石接触的锆石特征类似, 但变质重结晶和变质增生边似更发育一些。与角闪岩相-高角闪岩相变质的石榴黑云片麻岩(NM0413)和变质长石砂岩(NM0933)相比, 麻粒岩相变质的紫苏花岗质片麻岩(NM1119)中的锆石变质重结晶作用更为发育, 表明变质程度对锆石行为存在明显影响。变质程度对锆石行为的影响需通过更多不同变质级别岩石样品的锆石特征对比来了解。

另一方面, 锆石行为还在很大程度上受微区环境(周围矿物)的影响。根据不同矿物颗粒之间锆石

及其关系的观察,可提供它们对锆石重结晶发生和变质增生边形成的影响的信息。石榴石、辉石和角闪石为铁镁质变质矿物,其中角闪石还含有少量水,但与石英、长石一样,它们边上锆石的变质增生边也不发育,仅发生于体系固态条件下的重结晶作用。一些与辉石、角闪石接触的锆石发生重结晶,看来是后期流体交代作用的结果(图4d₂、4d₃、4e₂、4e₃、4f₂、4f₃、4g₂、4g₃)。与其它矿物相比,含水矿物云母边上的锆石更易发生重结晶,并且重结晶的强弱(范围的大小)与相邻云母的多少存在明显的相关性(图2a₃、2b₃、2c₃、2e₃、3b₃)。与仅包裹在单一矿物内部的锆石相比,位于不同矿物之间的锆石更易发生重结晶和形成变质新生锆石(图2e₃、4b₃)。实际上也是后者中流体更易活动的缘故。

所以,流体存在看来是锆石发生强烈重结晶的重要条件。流体作用越强,锆石遭受重结晶越强。流体具有高U含量和低Th/U值的组成特征,使得被交代的重结晶锆石U含量增高, Th/U值降低(图3)。这种交代可使锆石U-Th-Pb体系和O同位素组成发生完全重置。需要指出的是,结构和同位素体系全新的锆石不一定是变质新生锆石,也可以是完全重结晶锆石。并且,以往似有扩大变质增生边的倾向,把变质重结晶锆石作为变质新生锆石。在图4c₃中,如果锆石右侧重结晶作用进一步发展,环带结构完全消失,就很难确定它们是完全重结晶或变质增生因了。

流体可来自岩石体系之外,也可来自岩石体系内部。云母边上的锆石更易发生重结晶,表明云母附近的微小空间流体十分丰富。在石榴黑云片麻岩样品NM0413中,棕色黑云母与变质锆石之间达到平衡(图2c₃)。这可能发生在角闪岩相或更高变质级别的变质条件下,但锆石的重结晶并不一定只是发生在进变质作用过程中。变质长石砂岩样品NM0933变质锆石年龄为1.83 Ga,为大青山地区古元古代晚期地壳抬升退变质阶段的年龄记录(Dong et al., 2012)。这与薄片下观察到的流体交代作用相一致。

总体上,薄片中的锆石与分选出的锆石在形态和结构上相同或类似,但薄片中发现的粒度细小的锆石更多。这可能表明分选过程中细粒锆石丢失更多。由于水的表面张力,粒度细小的锆石漂在水面上,更容易丢失。

致谢 研究过程中得到赵子然、颉颃强、马铭株的帮助,深表谢意。

References

- Ayers J C, DeLaCruz K, Miller C, et al. 2003. Experimental study of zircon coarsening in quartzite \pm H₂O at 1.0 GPa and 1 000°C, with implications for geochronological studies of high-grade metamorphism[J]. American Mineralogist, 88: 365~376.
- Dong C Y, Wan Y S, Xu Z Y, et al. 2012. Late Paleoproterozoic khondalites in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. Science China Earth Sciences, 55: 1~11.
- Dong C Y, Wan Y S, Wilde S A, et al. 2014. Early Paleoproterozoic supracrustal rocks at Daqingshan in the Khondalite Belt of North China Craton: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. Gondwana Research, dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.021.
- Liu S J, Dong C Y, Xu Z Y, et al. 2013. Paleoproterozoic episodic magmatism and high-grade metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating of magmatic suites from the Daqingshan area[J]. Geological Journal, 48: 429~455.
- Santosh M, Wan Y S, Liu D Y, et al. 2009. Anatomy of zircons from an ultra-hot orogen: The amalgamation of North China Craton within Columbia supercontinent[J]. Journal of Geology, 117: 429~443.
- Wan Y S, Liu D Y, Dong C Y, et al. 2009. The Precambrian Khondalite Belt in the Daqingshan area, North China Craton: evidence for multiple metamorphic events in the Palaeoproterozoic[A]. Reddy S M, Mazumder R, Evans D A D, et al. Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution[C]. Geological Society, London, Special Publications, 323: 73~97.
- Valley J W, Lackey J S, Cavosie A J, et al. 2005. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 150: 561~580.