

·综述与进展·

石英研究进展

张德贤^{1,2} 戴塔根¹ RUSK Brian G²

(1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 詹姆士库克大学 地球与环境科学学院
经济地质研究单元, 澳大利亚 昆士兰州 汤斯维尔 4811)

摘要: 石英是自然界三大类岩石(岩浆岩、沉积岩和变质岩)和地壳中广泛分布的一种矿物, 由于其具广泛分布性和化学稳定性, 可以用于示踪地质历史并解释地质过程, 因此近些年来引起了地质学家和矿物学家们的关注。本文结合实际科研就沉积岩、变质岩、岩浆岩以及一些热液矿床中石英的微量元素分布情况、石英在 CL 探测器耦合扫描电子显微镜(SEM-CL)和光学显微镜(OM-CL)下的颜色、发光强度及构造形貌特征等进行了探讨, 并对石英中微量元素与 CL 颜色、发光强度及构造之间的关系进行了阐述, 以此来提供研究石英的一个基础, 最后简单论述了如何应用石英的 CL 特征来示踪或鉴定不同成因的含石英的岩石。

关键词: 石英 阴极发光 微量元素 构造 示踪

中图分类号: P597; P588; P618

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0333-09

Advances in quartz research

ZHANG De-xian^{1,2}, DAI Ta-gen¹ and RUSK Brian G²

(1. School of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Economic Geology Research Unit, School of Earth and Environmental Sciences, Townsville 4811, Queensland, Australia)

Abstract: Quartz, one of the most abundant minerals in the earth crust and also a very important mineral, occurs in large quantities in igneous, sedimentary and metamorphic rocks as well as in some hydrothermal systems. Petrogenesis, oxygen-isotope and trace element geochemistry, physical properties and defect microstructures of quartz and chalcedony have been studied by mineralogists and geologists in the past two decades, but some related problems are still in controversy. Due to wide distribution and highly stable nature of quartz, a variety of petrologic, isotopic and geochemical provenance techniques have been developed over the past two decades to study the provenance of detrital quartz. Integrated scanning electron microscope CL, electron microprobe CL and optical microscopy analysis of single quartz grains are fairly simple and inexpensive techniques and are efficient methods for visualizing microtextures in minerals that are invisible in conventional transmitted-light microscopy. Quartz cathodoluminescence is commonly applied to decipher complex histories of geological process; however, the causes of quartz cathodoluminescence remain poorly understood, which may involve the variations in trace element concentrations in quartz. Different mechanisms of trace element uptake into the quartz lattice are discussed. For example, some trace elements in quartz may generally be incorporated into the crystal structure or bound in microinclusions (fluid mineral inclusions), and only a small amount of "foreign" elements can be incorporated into the crystal lattice; the substitutional incorporation of Al, Ge, Ti, Ga, Fe, H and P into Si position

收稿日期: 2010-09-01; 修订日期: 2010-11-05

基金项目: 澳大利亚 Xstrata-JCU-ARC Collaborative Project 资金; 中南大学博士学位创新选题联合资助项目(1343-7433400019); 2010年湖南省博士科研创新资助项目[1960-71131100088(cx2010B085)]

作者简介: 张德贤(1978-), 男, 中南大学与 James Cook University 联合培养博士生, 主要从事矿床地球化学方面的研究, E-mail: dxzhang 303@ gmail.com

is well established. Cathodoluminescence may help establish the succession of paragenetic associations in minerals and a wide variety of rocks, such as growth zoning, randomly oriented microcracks and healed microfractures, homogeneous patchy or mottled CL, deformed lamellae, grain shattering and dissolution or alteration features. The distinguishable characteristics among volcanic rock, pluton, sedimentation, metamorphism and quartz in veins are systematically summarized on the basis of the authors' recent research and literature reviews. The relationship between trace element geochemistry, cathodoluminescence texture and characteristics of cathodoluminescence are discussed. In the end of this paper, the authors attempt to provide a flow chart to illustrate the identification of various kinds of quartz in nature.

Key words: quartz; cathodoluminescence; trace element; texture; trace

石英是自然界中最常见且分布最广的矿物之一,主要分布于岩浆岩(火山岩)、变质岩及沉积岩(表 1)。含石英的沉积岩在崩解后会形成砂粒,富含石英的砂岩及其变质产物石英岩也主要是由石英组成。除此之外,石英还是热液矿脉、金属矿脉内最常见的脉石矿物之一(Klein *et al.*, 1998)。石英在地质环境中几乎无处不在,它的形成温度介于 50~750℃ 之间,不像其他热液矿物易于蚀变,且化学成分相对单一、比较稳定,即使在退变质反应后其物理化学性质也只发生轻微的改变,因此很多地质学家将石英作为一种可靠的矿物去示踪地质历史和地质过程,效果显著(Monecke *et al.*, 2002; Rusk, 2002, 2008; Götze, 2009)。目前国际上对石英的研究热点有其矿物来源和成因、氧同位素特征、微量元素地球化学特征、物理性质及结构中的晶体缺陷等(Bahadur, 1995; Rusk and Reed, 2002, 2006, 2008; Bakker, 2009; Bersani *et al.*, 2009; Botis and Pan, 2009; Götze, 2009; Jourdan *et al.*, 2009; Kotzeva *et al.*, 2009; Larsen *et al.*, 2009; Muller and Welch, 2009; Pan *et al.*, 2009; Stevens-Kalceff, 2009)。

表 1 石英在岩石圈中的丰度(Rösler, 1981; Götze, 2009)

Table 1 Abundance of quartz in the lithosphere (after Rösler, 1981; Götze, 2009)

岩石类型	石英含量/ $10^{18}t$	相对比例/%
岩浆岩	8.05	93.6
变质岩	0.28	3.2
沉积岩	0.28	3.2

目前就石英的物理性质方面,地质学中应用较成熟的主要是应用阴极发光研究其构造特征。阴极发光(Cathodoluminescence, 简称 CL)全称阴极射线致发光,也叫电子激光光。目前,常用的阴极发光有光学显微镜阴极发光(OM-CL)、扫描电镜阴极发光

(SEM-CL)和电子探针阴极发光(EMP-CL)。应用 CL 图像可以清楚地观察石英的显微构造(图 1)(Marshall, 1988; Evans *et al.*, 1994; Dickinson and Milliken, 1995; Seyedolali *et al.*, 1997; Milliken and Laubach, 2000; Boggs *et al.*, 2001; 2002; Rusk and Reed, 2002; Bernet and Bassett, 2005; Rusk, 2006; Götze, 2009; 张绍平等, 1989; 彭惠娟等, 2010),从而解释其来源或成因。石英的阴极发光颜色和发光强度可反映出其构造(texture 或称 fabric)成因和微量元素地球化学特征的不同,不同成分、不同构造特征的石英又可提供相应的地质历史过程相关信息,因此自 20 世纪 70 年代以来,很多地质学家开始利用石英阴极发光特征来示踪石英的起源(Dennen, 1964, 1967; Marshall, 1988; Seyedolali *et al.*, 1997; Boggs *et al.*, 2002; Stevens-Kalceff, 2009; Götze, 2009; 张绍平等, 1989; 卢秋霞, 2000; 杨勇等, 2003; 彭惠娟等, 2010)。在石英的微量元素地球化学方面,目前较成熟的技术主要是借助于激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行微量元素的成分分析(Zingernagel, 1978; Parnell *et al.*, 1996; Rusk and Reed, 2002; Muller *et al.*, 2003; Rusk, 2006; 2008; Kotzeva *et al.*, 2009; Muller and Welch, 2009)。

石英虽然是简单和最常见的一种矿物,但是关于石英的研究一直是矿物学和地质学中一个重要的部分,如 2008 年在挪威召开的第 33 届世界地质大会上就将“石英研究前沿——成因、晶体化学和岩浆岩中的石英、变质岩中的石英及热液石英的重要性”研究列为专题,共收录了 11 篇文章,反映了过去 15 年间石英研究的成果。由此可见,国际上对于石英的研究一直不断。笔者在本文中仅就石英中微量元素分布情况、不同成因的石英(包括沉积岩、变质岩、

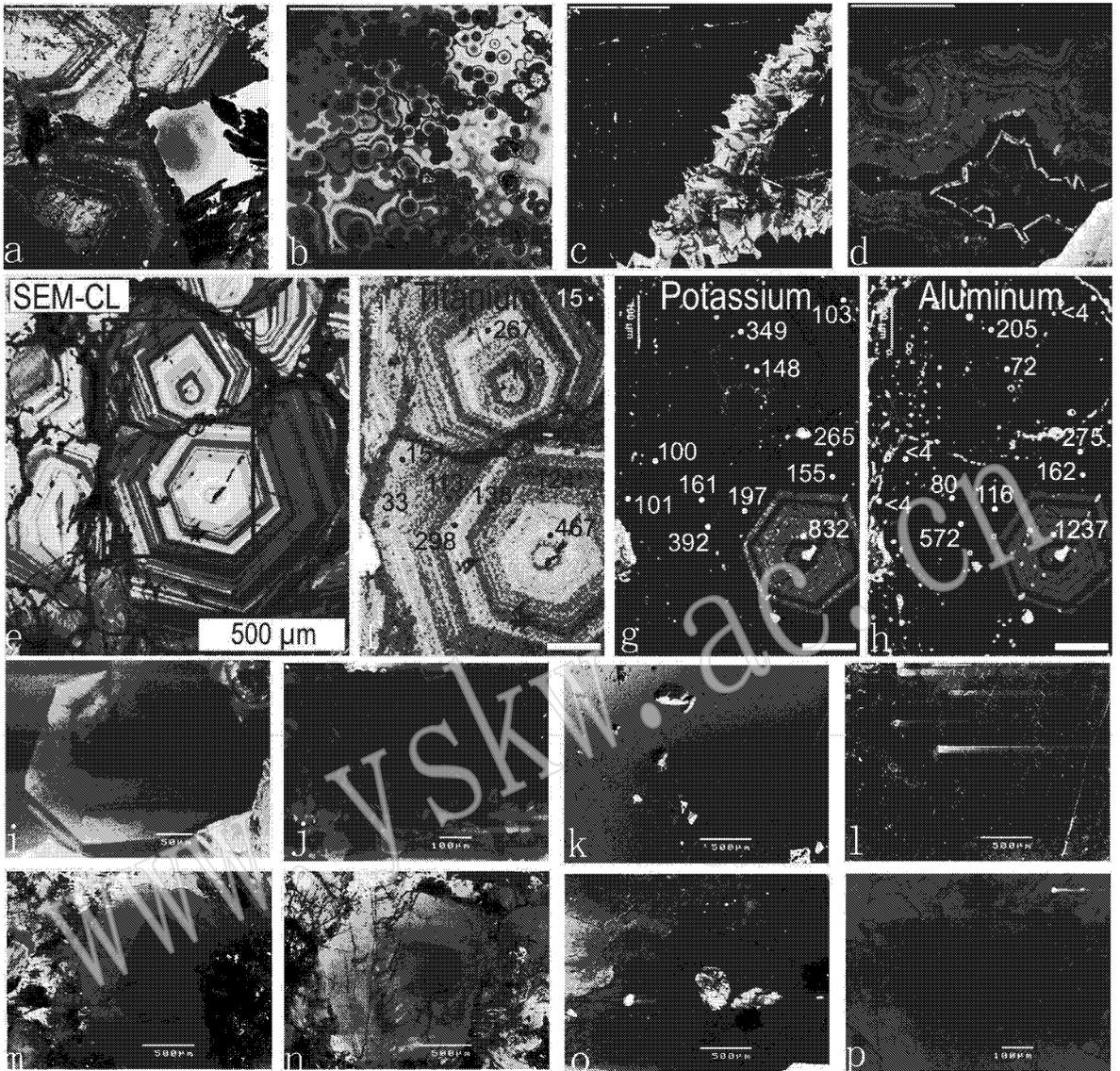


图 1 各种不同的 CL 构造

Fig. 1 Various CL textures

a, b, c, d 取自不同的热液脉中的石英, 显示了复杂的增生历史; e, f, g, h 显示了光强度与微量元素含量间的对应关系; e 为 SEM-CL 图像, f, g, h 均是电子探针测定石英中不同环带微量元素 Ti, K, Al 的分布情况及其与光强度的对应关系; i, j, k, l 均来自澳大利亚 Ernest Henry IOCG (铁氧化物型) 矿床; i 为一个石英晶体, 显示了其生长环带; j 显示了不同期次的石英生长, 无明显生长环带的石英为相对早期石英, 经变质或变形已不具环带构造, 而后期具环带构造的石英则充填于早期的空隙之内; k 和 l 为同一视域, 其中 k 为背射图像, 而 l 为 SEM-CL 图像, 仍显示两期石英, 晚期的石英充填于已角砾化了的早期石英空隙间; m, n 是采自新英格兰造山带 smoky cape 的 A 型花岗岩, 显示仍具弱的生长环带; o 是采自澳大利亚新南威尔士 Berridale 基地的 I 型花岗岩, 具不规则的碎片状和斑杂状; p 是来自 Coziusco batholith-Sawpick creek 的 S 型花岗岩, 可见其愈合裂纹, 说明: 图 a~h 来自于 Brian 演示文稿和文章 (Brian *et al.*, 2002, 2006, 2008), i~p 来自本次研究

a, b, c, d quartz samples were collected from a variety of hydrothermal veins, showing complex overgrowth history; e, f, g, h demonstrate the relationship between luminous intensity and trace element concentrations; e is a SEM-CL image; f, g, h show Ti, K, Al distribution in quartz revealed by EMPA as well as their relationship to luminous intensity; i, j, k, l samples were collected from Ernest Henry IOCG deposit of Australia, i is cathodoluminescence image of an individual quartz grain, showing complex zonal growth; j shows different generations of quartz, where quartz without obvious growth zoning is quartz of relatively early stage, which has been deformed or metamorphosed, and the quartz of late stage with clear zoning growth fills in cracks of earlier quartz; k and l are in the same view, k is a back-scattered image, whereas l is a SEM-CL image, which shows two generations of quartz: the later angular quartz fills the cracks of earlier brecciated quartz; m and n samples were collected from A-type granite of New England orogen smoky cape, and this quartz has weak growth zoning; o is a I-type granite from Berridale base, which is irregular and taxitic, p is a S-type granite sample from Coziusco batholith-Sawpick creek, and healed cracks can be found in this sample

Note: images a~h are from the powerpoint slides and paper of Brian Rusk (after Rusk *et al.*, 2002, 2006, 2008), images i~p are from this study.

岩浆岩以及一些热液矿床中的石英)在 CL 下的特征进行探讨,并对石英中微量元素与 CL 颜色、发光强度及构造特征之间的关系进行阐述,最后简单讨论 CL 的应用,以期抛砖引玉,借此拓展研究石英的思路。而对于石英的微量元素、构造特征及 REE 特征方面,笔者将另文论述。要说明的是,本文涉及的石英来源广泛,不局限于一个区域。

1 石英中微量元素

矿物中的微量元素在解释矿物形成条件、示踪矿物来源和热液来源、建立矿床成因模型方面有着重要的作用。由于石英广泛分布于岩浆岩、变质岩和沉积岩中,所以很多研究者试图应用石英中的微量元素去解释其成因(Dennen, 1964, 1967; Suttner and Leininger, 1972; Götze *et al.*, 2001a, 2004; Larsen, 2002; Muller *et al.*, 2003; Landtwing and Pettke, 2005; Götze and Kempe, 2008; Götze, 2009; Muller and Welch, 2009)。通常来说,石英中微量元素的变化主要是由于某些离子掺入晶格结构或者其中存在微小的包裹体(流体包裹体或者矿物包裹体)而引起的。由于石英具有特定的结构并且其中 Si^{4+} 较小,所以只有少量的“外来(foreign)”元素可以进入石英晶格而发生替代。元素 Al、Ge、Ti、Ga、Fe、H 和 P 可以替代石英中 Si 的位置(Weil, 1984; Bahadur, 1995; Götze *et al.*, 2001a, 2004)。在石英晶体中发生替代时,电价不足可通过不同的离子来补偿,而这些离子通常在晶体结构中平行 *c* 轴分布,已发现的处于空隙位置的离子通常是碱性离子,如 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ ,但有时也包括 Cu、Ag、Al、Fe、Ti、Co、Cr、Ni 等元素的离子(Dennen, 1964; Suttner and Leininger, 1972; Weil, 1984; Sim and Catlow, 1989; Götze *et al.*, 2001a, 2004; Muller *et al.*, 2003; Landtwing and Pettke, 2005; Miyoshi *et al.*, 2005; Muller and Welch, 2009)。石英中大部分的微量元素主要以微粒的包裹体形式存在,其中 Jung (1992) 提出仅仅 Al、B、Ge、Fe、H、K、Li、P 和 Ti 是在结构上并入的,而其他诸如 Ca、Cu、Mg、Mn、Pb 和 U 主要是以固态和液态包裹体形式存在。Rossman 等(1987)提出石英中的 Sr、Rb、Sm、Nd 通常也是结构性并入,并且讨论了流体包裹体在这些元素并入过程中的作用。Gerler (1990) 发现元素 Cl、Br、Na、Ca、Sr 和 Mn 的含量与流体包裹体中

水的含量之间具有明显的相关性,并且指出 100% 的 Cl、Br 和 I 集中于流体包裹体中,还有一些其他诸如 Ag、Au、K、Li、F、Mg、Ba、Cs、B、Hg、Fe、Co、Cu、Pb、Sb、Zn 和 U 的元素,也存在于石英流体包裹体中(Czarnanske *et al.*, 1963; Pinckney and Haffty, 1970; Gerler and Schnier, 1989; Gerler, 1990; Pettke and Diamond, 1995; Parnell *et al.*, 1996; Kurosawa *et al.*, 2003, 2008; Bakker, 2009; Bersani *et al.*, 2009; Kotzeva *et al.*, 2009)。同时还发现,元素 K、Cs、Rb、Fe、Cr、Co、Al、Ba、Sc、W、U 和 REE 与石英中的矿物包裹体也有着密切的关系,这表明微量元素进入石英的机制是变化的,甚至一个特定的元素在单个的晶体中的分布也是变化的。

20 世纪中期研究者们对于微量元素在石英中的分布情况很感兴趣,但由于技术原因,无法定量分析石英中的微量元素含量。时至今日,激光剥蚀等离子质谱仪(Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, 简称 LA ICP-MS)、毛细管离子分析(Capillary Ion Analysis, 简称 CIA)和电子自旋共振(Electron Spin Resonance, 简称 ESR)的应用结合,使得定量分析石英中的微量元素成为可能,研究者陆续取得了一系列的成果(Rusk *et al.*, 2006, 2008; Bakker, 2009; Botis and Pan, 2009; Götze, 2009; Kotzeva *et al.*, 2009; Larsen *et al.*, 2009; Muller and Welch, 2009; Pan *et al.*, 2009; Stevens-Kalceff, 2009)。Pan 等(2009)应用单晶电子顺磁共振(EPR)光谱在石英中发现了一种由铀矿物衰变产生的中生所发射的过氧酸原子团,而这种过氧酸原子团被广泛应用在地质学、考古学和核工业的放射性测量和定年中,相关的实验方法及实验过程见 Pan 等(2009)、Botis 和 Pan (2009)。Stevens-Kalceff (2009)应用阴极发光(CL)光谱研究了石英中自然的和 CL 激发的点缺陷,通过 CL 研究发现了大的缺陷中心,这其中包括填隙中的 O 原子(0.968 eV)和价补偿替代的 Fe^{3+} (1.65 eV)、一个非桥接的 O 洞中氢氧基(1.95 eV)而非桥接的杂质(比如 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+)等则在 1.9 eV 附近、价补偿的 Al^{3+} 中心(3.3 eV)、中性自由氧空缺(4.3 eV)与 CL 释放非晶化有关的“E”中心(2.3 eV)。Götze 等(2009)的研究则主要集中于用复合的多种分析手段(如 XRD、OM-SEM、LA ICP-MS、SEM 和氧同位素)研究玉髓、微晶石英和石英晶簇的形成以及石英的物理性质与结构构造的多样性之间的关系。Jourdan 等(2009)和

Lehmann 等(2009)主要研究热液石英中的微量元素生长环带问题和氧同位素。

Rusk 等(2002, 2006, 2008)在研究 Montana 斑岩铜矿后,将石英中的微量元素与其构造联系起来(如图 1e、1f、1g、1h),并指出石英中 Al 含量反映了热液流体中 Al 的溶解度,Al 含量主要取决于 pH 值,同时 Al 含量变化反映出的 pH 值波动说明了金属硫化物进入了热液系统。岩浆来源石英中 Ti 常被用于地质温度计计算石英不同生长阶段的岩浆温度(Wark *et al.*, 2007),高 Ti 含量的石英形成温度 $>500^{\circ}\text{C}$,且形成压力较高。

2 石英的 CL 颜色和构造(texture)

2.1 CL 颜色

地质学家们自 20 世纪 70 年代起就对石英的荧光产生了浓厚的兴趣,并应用于示踪。Zinkernagel (1978)首次应用荧光仪研究了石英发光性和不同源岩之间的关系。荧光仪的应用目的在于能够在可见光范围内定量检查 CL 的颜色(Marshall, 1988),很多研究者应用荧光仪观察石英的 CL 颜色,并将其作为鉴定不同来源石英的标准(Zingernagel, 1978; Marshall, 1988; 卢秋霞, 2000; 彭惠娟等, 2010)。Zinkernagel (1978)认为在 OM-CL 下呈蓝光到紫光为火成岩(岩浆岩)和一些接触变质岩中石英的特征,褐色则是变岩浆岩、变沉积岩和一些接触变质岩、区域变质岩及含金石英脉中的石英的特征,而无荧光现象的石英在沉积岩中则是自生来源。自 Zinkernagel (1978)研究发表以后,石英 CL 颜色和来源之间关系的研究引起了极大的重视(Seyedolali *et al.*, 1997; Götze *et al.*, 2001a; Bernet and Bassett, 2005)。张绍平等(1989)系统总结了中国的碳酸盐岩中石英的阴极发光特征。卢秋霞(2000)系统总结了黔东南及桂西北金矿硅质及石英的阴极发光特征。彭惠娟等(2010)在研究西藏甲马斑岩-砂卡岩铜矿床中斑岩中的石英时发现 SEM-CL 和 OM-CL 具有明显的对应关系:SEM-CL 中微弱的石英 CL 对应 OM-CL 中的红色至淡棕色,而 SEM-CL 中明亮的石英 CL 对应 OM-CL 中的蓝色至紫色。然而,也有一些研究者们认为在荧光仪下观察 CL 是一项比较主观的过程,随后一种定量的方式,即应用研究 CL 发射光谱被广泛用于石英 CL 的研究中(Marshall, 1988; Götze *et al.*, 2001b)。然而, Boggs (2002)在

进行了大量的实验研究后发现,仅靠 CL 颜色来确定石英的来源是不可靠的,一些弱变质的变火山岩仍保持其源岩的生长环带现象,在一些比较浅的深成岩石英中也出现类似火山岩的 CL 颜色,一些不具生长环带的热液石英也易与深成岩石英的颜色相混淆。由于 CL 颜色叠加问题的存在,所以在确定石英来源的时候,综合考虑 SEM-CL 和构造分析,可能比只考虑 CL 颜色相对更加可靠。有些研究者又提出 CL 接近紫外波段(ultraviolet, 简称 UV)的放射部分可能会提供更加准确的来源信息,如杨勇等(2003)对次生石英的紫外阴极发光机理进行了讨论,指出其阴极荧光特征与其生成条件有着密切的关系。此类技术的发展仍在进一步探索中。

2.2 CL 构造

Seyedolali 等(1997)的 SEM-CL 研究发现石英颗粒具备一系列的构造特征,比如生长环带、愈合裂纹、暗黑色条痕以及补丁状等特征,而这些特征在普通岩石学显微镜和背散射电镜下均无法观察到。结合 Bernet 和 Bassett (2005)及 Rusk 等(2002, 2006, 2008)的研究和笔者的结果,表 2 和表 3 总结了 SEM-CL 和光学显微镜下不同来源,包括深成岩、火山岩、变质岩及粗中粒砂岩中的同一个单体石英颗粒的 SEM-CL 特征及光学特征。通常来说,石英的构造特征依据其成因可分为原生和次生两大类,原生构造主要包括生长环带(如图 1 中的 a~j 及 m、n)定向微裂隙和愈合裂纹(类似缝合线),均一的 CL(图 1p)显示非均匀的补丁状和斑驳状构造(如图 1-o),而次生构造主要指颗粒的破碎、定向微裂隙、变形双晶、非均一的补丁状和斑杂状及均一的 CL 这 5 种情况。原生构造主要受石英自生的生长或构造影响(Rusk *et al.*, 2002, 2008),而次生构造则主要是由于重结晶或变形所致(Milliken and Laubach, 2000)。

2.3 微量元素、SEM-CL 及 OM-CL 颜色与 CL 构造之间的关系

石英中阴极发光现象是由于多种因素所引起的,比如晶体缺陷(Stevens-Kalceff, 2009)、晶格空位、晶格顺序、变形机制和杂质等(Zingernagel, 1978; Landtwing and Pettke, 2005; Miyoshi *et al.*, 2005; Rusk *et al.*, 2006, 2008; Wark *et al.*, 2007),比如 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 H^{+} 、 Li^{+} 、 K^{+} 等离子子的影响。构造不同表现在 OM-CL 下的颜色不同和 SEM-CL 下光强度的不同。例如,一些经过了变质和变形的

表 2 应用 SEM-CL 和光学特征鉴定不同类型石英对照表 [据 Bernet 和 Basset(2005)修改]

Table 2 Quartz types identified by their combined SEM-CL and optical features (after Bernet and Bassett , 2005)

石英类型	SEM-CL 特征	光学特征	说明
深成岩石英	淡灰色的 CL 微裂隙和愈合裂纹 (随机定向) 罕见环带结构	单晶质或 < 3 多晶体 无波状消光到弱波状消光	可能包含流体包裹体拖尾和矿物包裹体(如磷灰石或锆石)
火山岩石英	淡灰至黑的 CL 均一或补丁状 CL 常见环带结构 大的张裂隙	单晶质 无波状消光 大的张裂隙	包裹体和张裂隙在两种手段下均可见, 裂隙形成于快速冷凝过程中
脆性变形石英(低级变质条件下)	具定向的微裂隙和 愈合裂纹	单晶质或多晶质 弱的波状消光	构造诱发的微裂隙存在于多种遭受脆性变形的石英中, 在同一石英颗粒上可能出现多次的定向微裂隙和愈合裂纹
韧性变形石英(低-中级变质条件下)	变形双晶 复杂剪切	弱到强的波状消光 变形双晶	构造诱发的变形双晶可能存在于遭受韧性变形的石英中 可能会出现复杂的剪切模式(Seyedolali <i>et al.</i> , 1997)
低级-中级变质石英	淡灰至黑色 CL 补丁状和斑驳状 CL	弱到强的波状消光	火山岩、深成岩中和其他来源但遭受了低到中级变质叠加的石英
高级变质石英-重结晶石英	黑色 CL	多晶(与非波状消光到弱波状消光的石英镶嵌)	重结晶石英在光学显微镜下易于区别, 高级变质石英见 Seyedolali 等(1997)
脉石英	淡灰至黑色 CL 均一 CL 环带 CL 补丁状 CL 罕见微裂隙	单晶体线或多晶体线 弱到强的波状消光	脉石英通常类似变质岩重结晶和微晶石英
破碎石英	明显的裂隙网络(黑线)	裂隙和液体包裹体 强的波状消光	(Seyedolali <i>et al.</i> , 1997 ; Boggs <i>et al.</i> , 2001 ; Boggs <i>et al.</i> , 2002)
重结晶碎屑, 在埋藏和成因过程中脆性变形石英	晶体破碎	单晶体或多晶体, 取决于石英类型 弱到强的波状消光(取决于继承的消光行为)	光学显微镜下颗粒看起来像经过了压溶, 但在 SEM-CL 下显微颗粒破碎(Dickinson and Milliken , 1995 ; Milliken and Laubach , 2000)
微晶石英	黑色的 CL	单晶体	应用光学显微镜易于观察

石英 构造的不同导致部分石英晶体具很弱的 CL 光强度(如图 1i~1l) , 而另一些则显示中到强的 CL 光强度(如某些热液矿床中石英和脉石英, 图 1a~1p) 。至于单个晶体中光强度的影响因素更多, 如火山岩和深成岩中的石英经常具生长环带, 这主要是由于温度和冷凝速度起了重要的作用(Rusk and Reed , 2002 ; Miyoshi *et al.* , 2005) , 而诸如愈合裂纹、暗色条痕和补丁状构造则是由于晶体错位导致构造作用或晶体增长过程中的推移作用造成的(Seyedolali *et al.* , 1997) 。 Rusk 等(2002 , 2006) 曾利用电子探针定量分析 SEM-CL 中的不同条带, 在解释地质过程方面取得了巨大的成功(如图 1e~1h) 。

3 应用

通过上面的讨论可知在实际判断石英来源和解释地质过程中, 应该将 CL 特征、微量元素变化与构造联系起来。图 2 集成了不同岩石类型中石英在 SEM-CL 和光学 CL 下的鉴定特征, 提供了一套简易快速的石英的鉴别流程, 可用于一般情况下的石英鉴定。但是, 在地质解释方面, 应考虑地质过程和微量元素变化的作用。石英的研究目前仍不够成熟, 这是因为, 一方面, 不同类型石英的构造特征研究仍不够完善, 另一方面, 由于 SEM-CL 和 OM-CL 等仍

表 3 石英 SEM-CL 特征和物理性质 根据 Seyedolali(1997)、Bernet 和 Basset(2005)修改]

Table 3 Description of SEM-CL characteristics and features(after Seyedolali , 1997 ; Bernet and Bassett , 2005)

特征	描述	石英类型	百分比	说明
原生	形成于结晶或冷却或结晶之后			
环带	同心环带比非同心环带常见，环带宽度不同，对称和非对称，样品内环带无明显变化	火山岩型 深成岩型 脉型石英	~50% <5% <5%	在火山岩型石英中非常常见，但在深成岩和脉型石英中较少，晶体增长过程中涉及到岩浆和热液
随机定向微裂隙和愈合裂纹	相对较薄(<10 μm)黑灰至黑色线，有时候呈蛛网状。	深成岩型 脉型石英	100% 1%	与冷却相关的随机定向微裂隙和愈合裂纹主要存在于所有的深成岩石英中，脉石英中较罕见
均一的 CL	CL 在整个晶体中无明显变化，呈灰-灰黑-黑色	火山岩型 重结晶	~30%	在火山岩中的石英中较常见
非均一的补丁状和斑驳状	CL 对应的变化在于不规则碎片状和斑驳状的明暗 CL 模式	火山岩型 脉型石英	~20% <10%	在火山岩中的石英中较常见，少量存在于脉石英中
次生	形成于变形和重结晶			
颗粒破碎	沉积岩压固过程中的脆性变形	任何类型	未见	取决于压紧作用的强度和基质成分(Dickinson and Milliken , 1995 ; Milliken and Laubach , 2000)
具定向的微裂隙	类似于原生的微裂隙，但是平行排列，可能有好几组	任何类型	100% 脆性变形	典型的石英遭受了脆性变形，构造引起的微裂隙已愈合
变形双晶	非常细，相互平行，紧密排列，黑灰色线，可能存在几组	任何类型，取决于变质程度	100% 韧性变形	典型的石英遭受了弱的脆性变形(例如石英受低级变质叠加)
非均一补丁状或斑驳状	CL 通常非常暗并具不规则状，局部出现亮的 CL	低-中级变质石英	可变，取决于变形程度	石英具典型的波状消光，可见明显重结晶石英亚晶边界和镶嵌结构(Seyedolali et al . , 1997)
均一 CL	黑色的 CL，其余什么都看不见	重结晶石英包括大部分的脉石英及高级变质石英	90% 全部重结晶石英	非常典型、强烈和完全的重结晶，常见于中到高级变质岩和重结晶的脉石英中

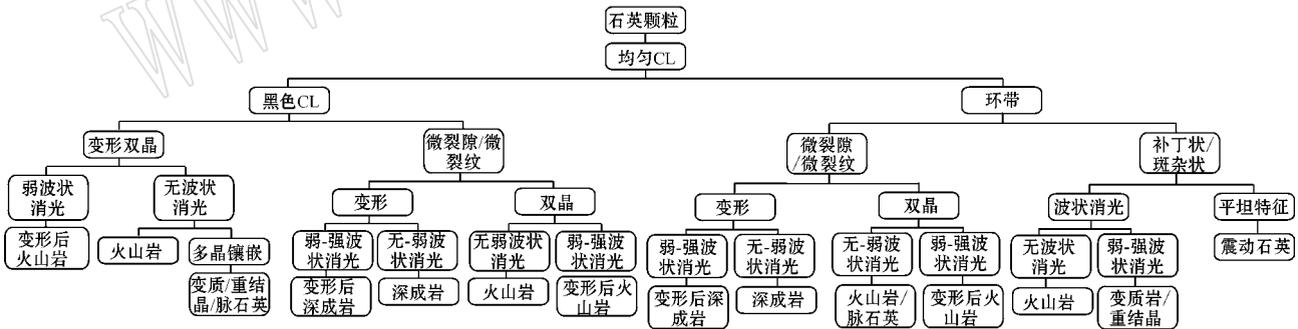


图 2 基于 SEM-CL 和光学显微镜下不同类型岩石中石英类型鉴定流程图 [根据 Bernet 和 Basset(2005)修改]

Fig. 2 Flow-chart showing steps to identify quartz types based on a combination of SEM-CL and petrographic features (after Bernet and Bassett , 2005)

处于一种定性的、主观的观察阶段，随机性较大，影响较多。然而可喜之处在于，近些年一些定量手段的发展，如 LA-ICP、CIA 和电子自旋共振(Electron Spin Resonance , ESR)等为研究石英提供了有利的手段，使得石英研究从定性、半定量跨越到了定量，目前 LA ICP-MS 已被成功应用于石英微量元素地球化学研究和流体包裹体的研究中，其余两种技术仍

在尝试当中。和其他学科一样，关于石英的研究，前方的路还很长，亟待进一步的工作。

致谢 感谢 Nick Oliver 提供的 Xstrata-JCU-ARC Collaborative project 的项目资金支持，同时也感谢詹姆士库克大学 AAC 实验中心(Advanced Analysis Centre)胡毅博士(Dr Yi Hu)及 Dr Kevin

Blake 的有益讨论及 Dr Shane Askew 和 Dr Jen Whan 在实验过程中的热情帮助。

References

- Bahadur H. 1995. Hydroxyl defects in germanium-doped quartz: Defect dynamics and radiation effects [J]. *Physical Review B*, 52 : 7 065.
- Bakker R J. 2009. Reequilibration of fluid inclusions: Bulk-diffusion [J]. *Lithos*, 112 : 277~288.
- Bernet M and Bassett K. 2005. Provenance analysis by single-quartz-grain sem-cl/optical microscopy [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 75 : 492~500.
- Bersani D, Salvioli-Mariani E, Mattioli M, et al. 2009. Raman and micro-thermometric investigation of the fluid inclusions in quartz in a gold-rich formation from lepeguare mining district (honduras, central america): *Spectrochimica Acta Part A* [J]. *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 73 : 443~449.
- Boggs S, Jr Kwon Y I, Goles G G, et al. 2002. Is quartz cathodoluminescence color a reliable provenance tool? A quantitative examination [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72 : 408~415.
- Boggs S, Krinsley D H, Goles G G, et al. 2001. Identification of shocked quartz by scanning cathodoluminescence imaging [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 36 : 783~791.
- Botis S M and Pan Y. 2009. Theoretical calculations of [AlO₄/m⁺] defects in quartz and crystal-chemical controls on the uptake of Al [J]. *Mineral Mag.*, 73 : 537~550.
- Czarnamanske G K, Roedder E and Burns F C. 1963. Neutron activation analysis of fluid inclusions for copper, manganese, and zinc [J]. *Science*, 140 : 401~403.
- Dennen W H. 1964. Impurities in quartz [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 75 : 241~246.
- Dennen W H. 1967. Trace elements in quartz as indicators of provenance [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 78 : 125~130.
- Dickinson W W and Milliken K L. 1995. The diagenetic role of brittle deformation in compaction and pressure solution, Etjo sandstone, Namibia [J]. *The Journal of Geology*, 103 : 339~347.
- Evans J, Hogg A J C, Hopkins M S, et al. 1994. Quantification of quartz cements using combined sem, cl, and image analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 64 : 334~338.
- Gerler J. 1990. Geochemische Untersuchungen an Hydrothermalen, Metamorphengranitischen und Pegmatitischen Quarzen und Deren Flüssigkeitseinschlüssen (Unpublished PhD thesis) [D]. University Göttingen.
- Gerler J and Schnier C. 1989. Neutron activation analysis of liquid inclusions exemplified by a quartz sample from the ramsbeck mine, frg [J]. *Nucl. Geophys*, 3 : 41~48.
- Götze J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz-geological interpretation and technical application [J]. *Mineral. Mag.*, 73 : 645~671.
- Götze J and Kempe U. 2008. A comparison of optical microscope- and scanning electron microscope-based cathodoluminescence (cl) imaging and spectroscopy applied to geosciences [J]. *Mineral Mag.*, 72 : 909~924.
- Götze J, Plötze M, Graupner T, et al. 2004. Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 : 3 741~3 759.
- Götze J, Plötze M and Habermann D. 2001a. Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz - a review [J]. *Mineralogy and Petrology*, 71 : 225~250.
- Götze J, Plotze M, Tichomirowa M, et al. 2001b. Aluminium in quartz as an indicator of the temperature of formation of agate [J]. *Mineral. Mag.*, 65 : 407~413.
- Jourdan A-L, Vennemann T W, Mullis J, et al. 2009. Oxygen isotope sector zoning in natural hydrothermal quartz [J]. *Mineral. Mag.*, 73 : 615~632.
- Jung L. 1992. High purity natural quartz, part i: " High purity natural quartz for industrial uses ". Part ii: High purity natural quartz markets for suppliers and users [J]. *Quartz Technology*.
- Klein C, Hurlbut C S and Dana J D. 1998. *Manual of mineralogy* (after james d. Dana) [M]. John Wiley & Sons.
- Kotzeva B G, Guillong M, Stefanova E, et al. 2009. La-icp-ms analysis of single fluid inclusions in a quartz crystal - a methodological survey [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101 : 55~55.
- Kurosawa M, Ishii S and Sasa K. 2008. Quantitative pixe analyses of single fluid inclusions in quartz crystals with a 1.92-mev tandemron [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266 : 3 633~3 642.
- Kurosawa M, Shimano S, Ishii S, et al. 2003. Quantitative trace element analysis of single fluid inclusions by proton-induced x-ray emission (pixe): Application to fluid inclusions in hydrothermal quartz [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 4 337~4 352.
- Landtwing M R and Pettke T. 2005. Relationships between sem-cathodoluminescence response and trace-element composition of hydrothermal vein quartz [J]. *American Mineralogist*, 90 : 122~131.
- Larsen R B. 2002. The distribution of rare-earth elements in k-feldspar as an indicator of petrogenetic processes in granitic pegmatites: Examples from two pegmatite fields in southern norway [J]. *Canadian Mineralogist*, 40 : 137~151.
- Larsen R B, Jacamon F and Kronz A. 2009. Trace element chemistry and textures of quartz during the magmatic hydrothermal transition of oslo rift granites [J]. *Mineral. Mag.*, 73 : 691~707.
- Lu Qixia. 2000. Siliceous cathodoluminescence and analysis of origion of ore materials for micro-fine disseminated gold deposits [J]. *Geotectonica et Metalogenia*, 24(1): 75~80(in Chinese with English abstract).
- Marshall D J. 1988. *Cathodoluminescence of Geological Materials* [M]. Springer: Unwin Hyman.
- Milliken K and Laubach S. 2000. Brittle deformation in sandstone diagenesis as revealed by scanned cathodoluminescence imaging with ap-

- plication to characterization of fractured reservoirs[A]. Pagel M V , Barbin P B and Ohnenstetter D. Cathodoluminescence in Geosciences[C]. Berlin : Springer-Verlag , 225~244.
- Miyoshi N , Yamaguchi Y and Makino K. 2005. Successive zoning of Al and H in hydrothermal vein quartz[J]. American Mineralogist , 90 : 310~315.
- Monecke T , Kempe U and Götz J. 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz : A reconnaissance study[J]. Earth and Planetary Science Letters , 202 : 709~724.
- Muller A and Welch M D. 2009. Frontiers in quartz research : Preface [J]. Mineral. Mag. , 73 : 517~518.
- Muller A , Wiedenbeck M , Kerkhof A M V D , et al. 2003. Trace elements in quartz—a combined electron microprobe , secondary ion mass spectrometry , laser-ablation icp-ms , and cathodoluminescence study[J]. Eur. J. Mineral. , 15 : 747~763.
- Pan Y , Nilges M J and Mashkovtsev R I. 2009. Radiation-induced defects in quartz : A multifrequency epr study and dft modelling of new peroxy radical[J]. Mineral. Mag. , 73 : 519~535.
- Parnell J , Carey P F and Monson B. 1996. Fluid inclusion constraints on temperatures of petroleum migration from authigenic quartz in bitumen veins[J]. Chemical Geology , 129 : 217~226.
- Peng Huijuan , Wang Xiongwu , Tang Juxing , et al. 2010. The application of quartz cathodoluminescence in study of igneous rock[J]. Rock and Mineral Analysis , 29(2) : 153~160(in Chinese with English abstract).
- Pettke T and Diamond L W. 1995. Rb-Sr isotopic analysis of fluid inclusions in quartz : Evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer systematics using synthetic fluid inclusions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 59 : 4 009~4 027.
- Pinckney D M and Haffty J. 1970. Content of zinc and copper in some fluid inclusions from the cave-in-rock district , southern illinois[J]. Economic Geology , 65 : 451~458.
- Rösler H J. 1981. Lehrbuch der mineralogie. 2. Aufl. , veb deutscher verlag für grundstoffindustrie[M]. Germany : Leipzig , 833.
- Rossmann G R , Weis D and Wasserburg G J. 1987. Rb , Sr , Nd and Sm concentrations in quartz[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 51 : 2 325~2 329.
- Rusk B G and Reed M H. 2002. Scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the butte porphyry copper deposit , montana[J]. Geology , 30 : 727~730.
- Rusk B G , Lowers H A and Reed M H. 2008. Trace elements in hydrothermal quartz : Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation[J]. Geology , 36 : 547~550.
- Rusk B G , Reed M H , Dilles J H , et al. 2006. Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at butte , montana[J]. American Mineralogist , 91 : 1 300~1 312.
- Seyedolali A , Krinsley D H , Boggs S , et al. 1997. Provenance interpretation of quartz by scanning electron microscope-cathodoluminescence fabric analysis[J]. Geology , 25 : 787~790.
- Sim F and Catlow C R A. 1989. Mott-littleton calculations on defects in α -quartz[J]. International Journal of Quantum Chemistry , 36 : 651~675.
- Stevens-Kalceff M A. 2009. Cathodoluminescence microcharacterization of point defects in α -quartz[J]. Mineral. Mag. , 73 : 585~605.
- Suttner L J and Leininger R K. 1972. Comparison of the trace element content of plutonic , volcanic , and metamorphic quartz from southwestern montana[J]. Geological Society of America Bulletin , 83 : 1 855~1 862.
- Wark D A , Hildreth W , Spear F S , et al. 2007. Pre-eruption recharge of the bishop magma system[J]. Geology , 35 : 235~238.
- Weil J A. 1984. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz[J]. Physics and Chemistry of Minerals , 10 : 149~165.
- Yang Yong and Chen Nengsong. 2003. Uv-cathodoluminescence mechanism of secondary enlarged quartz and its importance[J]. Rock and Mineral Analysis , 22 : 1~4(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaoping and Dun Tiejun. 1989. Application of the cathodoluminescence microscope in the mineral identification[J]. Journal of Xi'an College of Geology , 11(1) : 40~49(in Chinese with English abstract).
- Zingernagel V. 1978. Cathodoluminescence of quartz and its application to sandstone petrology[J]. Contribution to Sedimentology , 8.

附中文参考文献

- 卢秋霞. 2000. 微细浸染型金矿的硅质阴极发光与成矿物源分析 [J]. 大地构造与成矿学 , 24(1) : 75~80.
- 彭惠娟 , 汪雄武 , 唐菊兴 等. 2010. 石英阴极发光在火成岩研究中的应用 [J]. 岩矿测试 , 29(2) : 153~160.
- 杨 勇 , 陈能松. 2003. 次生石英的紫外阴极发光机理及意义 [J]. 岩矿测试 , 22(1) : 1~4.
- 张绍平 , 顿铁军. 1989. 阴极发光显微镜在岩矿鉴定方面的应用 [J]. 西安地质学院学报 , 11(1) : 40~49.