

花岗岩中钾长石巨晶成因及研究方法概述

侯国旺, 李红艳*, 牛之建, 王栋

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘 要: 钾长石巨晶在花岗岩中较为常见, 对花岗岩的成因具有重要指示意义。本文介绍了花岗岩中钾长石巨晶的最新研究进展, 重点梳理了钾长石巨晶的一些典型地质特征, 讨论了钾长石巨晶的形成机制, 详细介绍了关于钾长石巨晶原位地球化学研究的最新进展, 提出了存在的问题及未来可能的一些研究方向。

关 键 词: 钾长石巨晶; 结构加粗; Rb-Sr-Pb 同位素; Ba 振荡环带; 阴极发光; 岩浆混合

中图分类号: P578.968 文章编号: 1007-2802(2017)02-0345-09 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2017.02.019

Review on the K-feldspar Megacryst in Granite and Research Methodology

HOU Guo-wang, LI Hong-yan*, NIU Zhi-jian, WANG Dong

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: K-feldspar megacryst is common in granite, and plays an important role in the study of the genesis of granite. This article summarizes the update research progress on K-feldspar megacryst, including the typical geological characteristics, the formation mechanism of K-feldspar megacryst, and the latest progress of in situ geochemistry research. This article also points out the existing problems and certain future important research fields.

Key words: K-feldspar megacryst; textural coarsening; Rb-Sr-Pb isotope; Ba oscillatory zoning; cathodoluminescence; magma mixing

在花岗岩中常见大量的半自形-自形钾长石巨晶, 一般呈肉红色、板柱状, 多具环带结构。Johnson 和 Glazner (2010) 将钾长石巨晶定义为长轴大于 5 cm 的晶体, 而且该尺寸对应着火山岩中所发现钾长石巨晶的最大值。

花岗质岩石中的钾长石巨晶对于岩体的成因具有重要的指示意义 (Allen, 1991; Perugini *et al.*, 2003; Slaby and Martin, 2008)。花岗岩是大陆地壳最主要的岩石类型, 其成因机制研究对探讨大陆的形成和演化至关重要。因而, 对于钾长石巨晶的矿物学研究也由来已久, 积累了大量的成果。近年来, 随着地质学研究手段的不断发展, 特别是微区微束分析技术的广泛应用, 地质学家已开始着手准确重建钾长石巨晶演化历史, 探讨的问题也愈加深入 (Slaby and Gorze, 2004; Slaby *et al.*, 2007a, 2007b; Vernon and Paterson, 2008; Higgins, 2011a, 2011b)。

因此, 有必要及时梳理相关的研究进展, 探讨未来的研究方向。

目前对于钾长石巨晶的成因主要有 2 种相对的观点: 一种观点认为钾长石巨晶结晶于岩浆演化早期, 当钾长石巨晶结晶时岩浆房中仍存在大量的熔体 (Piwinskii and Wyllie, 1970; Winkler and Schultes, 1982; Morgan and London, 2003); 而另一种观点则认为钾长石巨晶是岩浆晚期通过结构加粗形成的 (Higgins, 1999; Johnson and Glazner, 2010; Higgins, 2011a; Glazner and Johnson, 2013), 此时岩浆房中的晶体大部分已经结晶, 当晶体长时间处于接近其液相线温度的条件下, 小于临界尺寸的晶体颗粒就会发生溶解而供应大颗粒晶体的生长。

本文针对花岗岩中钾长石巨晶成因和相关研究方法, 从 5 个方面综述其研究进展。

收稿日期: 2016-05-17 收到, 2016-06-03 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272090, 41673058); 中国地质调查局项目 (12120113090200)

第一作者简介: 侯国旺 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 花岗岩与金成矿关系. E-mail: 1169039241@qq.com.

* 通讯作者简介: 李红艳 (1967-), 女, 研究员, 研究方向: 地球化学、矿物学. E-mail: hylcags@126.com.

1 钾长石巨晶的基本地质特征

总结国内外诸多学者对钾长石巨晶的研究,钾长石巨晶主要有如下基本地质特征:

(1)钾长石巨晶中最为普遍的是微斜长石,具有出溶条纹(徐夕生等,2002;马昌前和王人镜,1990;Siebel *et al.*,2005;Moore and Sisson,2008),钾长石巨晶粒度一般大于5 cm (Johnson and Glazner,2010)。

(2)钾长石巨晶具有许多典型火成成因显微结构和化学特征,如简单双晶(Moore and Sisson,2008),Ba的振荡环带(Slaby *et al.*,2007b;Moore and Sisson,2008),自形的斜长石包裹体(Slaby and Götze,2004),钾长石中的包裹体矿物或周围小颗粒矿物呈同心带状分布(马昌前和王人镜,1990;徐夕生等,2002;Moore and Sisson,2008)。

(3)在岩浆流动面理中钾长石巨晶呈线状分布(Paterson *et al.*,1989;Vernon,2000;Zak *et al.*,2007),或在有些花岗岩中出现钾长石巨晶的机械堆积(Bateman and Chappell,1979;Healy *et al.*,2000;Collins *et al.*,2006),暗示巨晶漂浮在足够多的流体中,发生了自由移动。

(4)在许多花岗岩体中,钾长石巨晶参与了岩浆混合过程,有些镁铁质包体中包裹有来自寄主花岗岩中的钾长石巨晶;镁铁质微粒包体的边界被钾长石巨晶穿透,指示巨晶在包体和寄主花岗岩固结之前就已经存在(Vernon,1986;Waight *et al.*,2000a;Gagnevin,2004;Slaby and Martin,2008;Renjith *et al.*,2014)。

(5)钾长石巨晶中的生长环带,主要表现在Ba含量的变化上,反映了巨晶在岩浆中的生长历史;分布在一些环带中的矿物包裹体,反映了当时生长在周围岩浆中的小晶体附着在正在生长的巨晶表面(Vernon,1986)。钾长石巨晶生长环带的成分基于正在生长的巨晶周围的流体成分变化(Perini *et al.*,2003;Vernon,2004),所以流体成分的改变被封存在了环带剖面中,保存了岩浆演化过程的详细信息。

(6)钾长石巨晶有时具有斜长石(更长石)膜而构成环斑结构(Waight *et al.*,2000b;徐夕生等,2002;Slaby and Götze,2004),表明在钾长石巨晶的生长过程中有更为基性的岩浆注入到了初始岩浆系统中。有些钾长石巨晶的外侧发育有延伸至基质中的石英或钾长石“卷须”(tendrils of K-feldspar)(Higgins,1999;Johnson and Glazner,2010;李小伟

等,2010;牛之建,2015)。Higgins(1999)将这种卷须解释为钾长石巨晶在冷却过程中晚期生长的证据,而Johnson和Glazner(2010)则将其解释为钾长石巨晶发生结构加粗过程的保留,卷须可能代表着晶粒间钾长石向巨晶中迁移的残留通道。

2 钾长石巨晶的结晶时间

关于钾长石巨晶的结晶时间,已有的研究工作主要提出了2种观点。

(1)钾长石巨晶形成于岩浆作用早期。这种观点认为,钾长石巨晶结晶于岩浆作用早期。当钾长石巨晶结晶时,岩浆房中仍然存在大量的熔体(Piwinskii and Wyllie,1970;Winkler and Schultes,1982;Morgan and London,2003),巨晶中包裹有小颗粒斜长石、黑云母和角闪石等形成的同心状环带(Vernon and Paterson,2008),而且在花岗岩中出现钾长石巨晶的机械堆积(Bateman and Chappell,1979;Healy *et al.*,2000;Collins *et al.*,2006),暗示巨晶漂浮在足够多的熔体中,从而在没有破碎和塑性变形的情况下发生移动。

在岩浆流动面理中钾长石巨晶呈线状分布(Paterson *et al.*,1989;Vernon,2000;Zak *et al.*,2007),Vernon和Paterson(2008)认为这暗示着漂浮在流体中的巨晶是独立运移的,而不是原地生长的。Clemens和Wall(1981)和Winkler和Schultes(1982)的实验研究表明,当钾长石开始结晶时岩浆中有60%~70%的熔体存在。前者的实验对象为澳大利亚Victorian中部晚泥盆S型花岗岩和火山岩的4个天然样品,实验条件为700~900℃,1~700 MPa,水逸度0.1~1.0;而后的实验对象为法国、瑞士和德国的3个花岗岩样品(水压为500 MPa),而且还发现碱性长石开始结晶时的温度只比固相线温度高6~10℃。

岩浆混合作用是岩浆演化的重要机制。在岩浆混合环境中,富Ba碱性长石可以在相对高温环境中成核并生长。Ba可以使碱性长石的稳定域扩展到更高的温度,可达850℃(Morgan and London,2003),这可以帮助钾长石较早成核(Slaby *et al.*,2007b),而且可以避免晶体在不均一的混合岩浆环境中转移时发生快速溶解。相对较早的成核作用也意味着它们生长于一个富液相的环境,即岩浆含有50%~70%的熔体(Piwinskii and Wyllie,1970)。

(2)钾长石巨晶形成于岩浆作用晚期。天然熔岩和花岗闪长岩的实验研究都表明,钾长石巨晶是在结晶序列的晚期成核和生长的。英安质熔岩和

火成碎屑岩含有占 5% (vol) 或更少的钾长石颗粒, 含 40%~60% 结晶颗粒的 Uturuncu 火山的英安岩中没有钾长石晶体, 甚至没有显微斑晶 (Sparks *et al.*, 2008); 而 Lund 火山凝灰岩中, 虽然岩石中有超过 50% 的结晶颗粒, 但透长石的体积分数仅为 0%~5% (Maughan *et al.*, 2002; Folkes *et al.*, 2011)。Whitney (1988) 研究了水含量对花岗岩结晶度的影响, 结果显示在 200 MPa 时, 水饱和条件下大约有 35% 的结晶度时, 钾长石才会加入到结晶组合; 而在水不饱和条件下, 钾长石参与到结晶组合需要更高的结晶度 (Glazner and Johnson, 2013; 牛之建, 2015; 图 2a, 2b)。

Higgins (1999) 的结构加粗理论认为, 小的晶体颗粒相对较大晶体颗粒具有更高的单位体积表面能, 所以为了使系统中的能量达到最小, 小于临界尺寸的晶体颗粒就会发生溶解以供应大颗粒晶体的生长。但这种现象只能发生在晶体长时间处于接近其液相线温度的条件下, 因为在这种条件下其成核率为零, 而大于临界尺寸的晶体却具有高的生长速率。Moore 和 Sisson (2008) 研究发现, 钾长石巨晶中包裹的楣石缺乏亚固相线生长温度, 说明巨晶生长时侵入体从来没有冷却到固相线温度之下。如果花岗岩体在冷却过程中快速通过了碱性长石的液相线, 碱性长石就无法发生明显的加粗作用, 从而形成缺乏巨晶的花岗岩 (Higgins, 2011a)。而 Johnson 和 Glazner (2010) 则认为在深成岩体侵位过程中发生基性岩浆的多次脉冲式注入, 导致小的、高能量的钾长石晶体发生重融和重结晶, 从而促进巨晶的生长。

Higgins (1999) 还指出, 岩体侵位时石英、斜长石和镁铁质矿物晶体就已经存在, 其在钾长石之前成核, 且此时的晶体可能要大于钾长石, 但由于处于过冷状态, 未发生溶解, 所以就限制了这些晶体的加粗作用。许多其他矿物颗粒被包裹进正在生长的钾长石巨晶中, 尤其是具有类似晶体结构的矿物如斜长石, 这是因为这 2 种矿物的界面能比较低。而那些矿物结构不太类似的矿物因具有较高的界面能 (如角闪石), 从而会倾向于堆积在巨晶旁边。

徐夕生等 (2002) 在研究南岭佛冈花岗质杂岩体中钾长石巨晶时, 分析了 Swanson (1977)、Fenn (1977) 和 Dowty (1980) 的实验, 从晶体的成核与生长速率 2 个方面解释了钾长石巨晶的成因。他们认为, 晶体从熔体中析出, 包括成核和生长 2 个过程, 而且它们与过冷度 (即液相线温度和晶体实际结晶温度之差) 密切相关。他们指出, 在过冷度约为

100℃ 时, 钾长石与斜长石的成核密度相仿, 但钾长石的生长速度远大于斜长石, 这与花岗岩体中出现钾长石巨晶而不是斜长石巨晶, 以及斜长石、黑云母等矿物被包裹在钾长石巨晶中的特征相一致; 在过冷度约为 170℃ 时, 石英的成核密度大于钾长石, 但是钾长石的生长速度远大于石英, 因而石英呈细粒状分布于钾长石中形成“珠边”结构; 在过冷度约为 350℃ 时, 处于花岗质岩浆的共结点温度时, 钾长石、斜长石和石英的生长速度相近, 但成核密度依然都很高, 因而花岗质岩石基质中的钾长石、斜长石和石英晶体均在岩浆演化的较晚期结晶呈较细的颗粒, 与钾长石巨晶构成双峰式粒径。

花岗闪长岩的固相线温度通常被认为大约是 650~700℃ (Winkler and Schultes, 1982; Whitney, 1988), 该温度似乎会限制巨晶生长。但是 B 和 Li 等成分的存在可以使花岗闪长质体系的固相线温度降低到约 400℃ (Sirbescu and Nabelek, 2003)。所以长石矿物的再平衡温度说明, 至少有少量的流体存在使得温度降低到约 400℃。较低的黏度和较高的扩散速率也说明流体系统中存在有少量的熔体 (Nabelek and Sirbescu, 2006), 该特征可以进一步促进在极低的熔体分数下进行晚期的结构加粗过程 (Johnson and Glazner, 2010)。

3 钾长石巨晶的固溶体系

钾长石巨晶在花岗岩中很常见, 但在化学成分类似的火山岩中却少见 (Higgins, 2011a), 而且花岗岩中的钾长石 (不管是否是巨晶) 几乎都比火山岩中的要富 K (Glazner and Johnson, 2013), 即巨晶通常含有更高含量的 K, 成分一般为 Or_{75-90} (Kerrick, 1969)。相反, 英安岩和低硅流纹岩中的钾长石则含有更多含量的钠长石, 成分一般为 Or_{40-70} (Stix and Gorton, 1990; Stimac and Wark, 1992)。

钾长石巨晶中最为普遍的是微斜长石, 具有出溶条纹 (徐夕生等, 2002; Siebel *et al.*, 2005; Moore and Sisson, 2008)。因为碱性长石的 Si、Al 有序度随着温度的降低而增加 (Smith, 1974), 微斜长石通常被认为是在低温下结晶的具 Si-Al 有序结构的钾长石稳定变体, 而它们与钠长石构成条纹形成微斜条纹长石, 其稳定温度通常在 450℃ 以下, 一般为 $375 \pm 50^\circ\text{C}$; 而且矿物学研究表明, 具简单双晶的微斜长石一般是在 450℃ 以下的条件下结晶的 (徐夕生等, 2002)。如果钾长石巨晶在典型的岩浆温度下一开始就具有平衡组分, 那么它们所具有的高 K 含量就要求大量出溶出钠长石 (Glazner and Johnson,

2013)。一般认为导致出溶的化学驱动力是2种相反的力量(图1):表面能和应变能,当出溶作用继续进行,表面能由于互相交生体的加粗作用而降低,出溶片晶也开始变成几毫米厚从而可以观察到;结构应变由于2个相的界面发生移动而降低,而且因为取向关系应变能也变得最低(Parsons *et al.*, 2005)。

图1a中a点熔体的成分为 $Ab_{30}Or_{70}$ (高温时钾长石为透长石),当该熔体温度降低到液相线时,结晶出富K碱性长石 $c_1(Ab_7Or_{93})$;随着温度继续下降,刚晶出的碱性长石晶体不断地与剩余熔体发生反应,其中结晶出的固体成分沿固相线变化(如 c_2 点);到达 c_3 点时,结晶出的晶体成分与初始熔体成分相同($Ab_{30}Or_{70}$),此时熔体完全转变为固态。体系温度继续下降,越过固相线到达固溶体分离线上的 a_4 点时,钠长石固溶体便从钾长石固溶体的主晶中出溶出来,并沿着钾长石主晶的某些结晶学方向分布,就形成了条纹长石(徐夕生和邱检生, 2010)。

Glazner和Johnson(2013)也描述了产生微斜长石的熔体演化路径(与图1b类似),代表典型英安岩岩浆的熔体冷却产生成分约为 Or_{70-80} 的钾长石。当熔体到达共晶点E时,钾长石到达N点,在该点钠长石M从熔体中共结出来。在共晶点发生连续结晶,从而使熔体不断减少。当系统进一步冷却

时,钠长石变得更加富Na质,而出溶作用导致钾长石逐渐变得富K质。当成分到达 Or_{90} 时需要出溶温度降低到 $400\sim 450^{\circ}C$,而且这一变化还受控于压力。图1b中因为水压足够高从而使固相线与固溶体分离线相交。

4 钾长石巨晶的原位地球化学研究

矿物尺度上的同位素数据有效地记录了岩浆在经历晶体生长时同位素值的变化,因而提供了一种研究岩体成因的新视角。原位分析技术的发展,使得对钾长石进行精确的Rb-Sr、Pb同位素和Ba等元素的微区分析成为现实。这些信息对于研究巨晶形成、岩体成因和演化过程都具有重要意义。但遗憾的是,目前对于钾长石巨晶的微区研究仍然比较缺乏。

4.1 Rb-Sr 同位素研究

钾长石巨晶的原位Rb-Sr同位素研究可以为岩浆混合过程和岩体演化过程研究提供重要的约束。如Waight等(2000b)对Wilson's Promontory岩基(产自Lachlan褶皱带)镁铁质包体中的长石巨晶进行的原位Sr-Nd同位素测定发现,花岗岩的碱性长石巨晶和包体中的斜长石巨晶都具有明显而类似的核-边同位素变化,初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值从核部的0.7095~0.7098减小为边部的0.7091,这可能与巨晶从寄主花岗岩运移到包体岩浆中进行后续生长时,处于

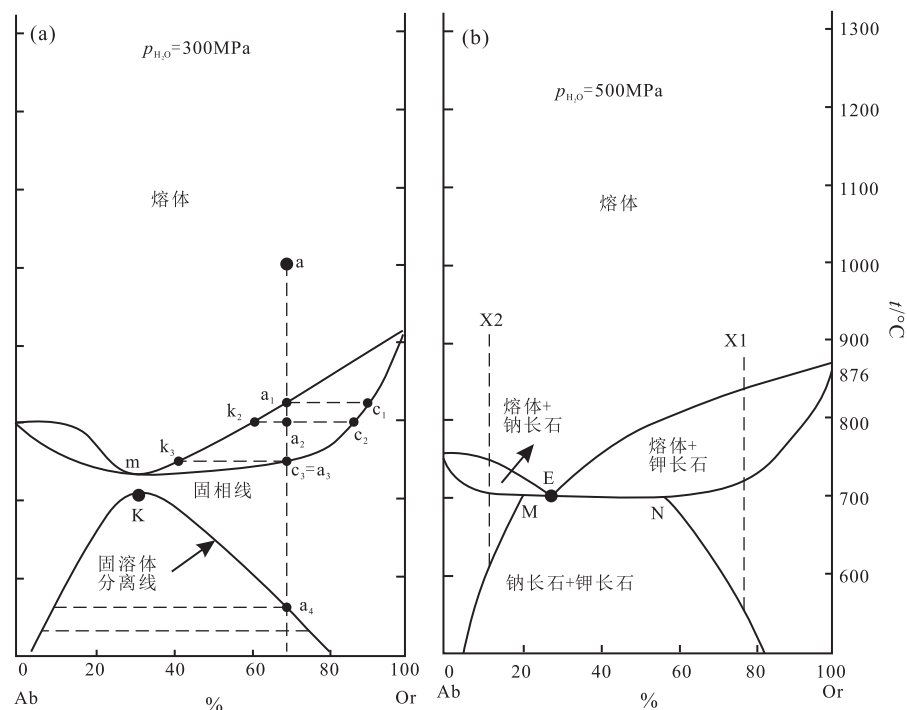


图1 碱性长石的Ab-Or二元系相图(底图据Hall, 1987)

Fig.1 Ab-Or binary phase diagram of alkali feldspar(modified after Hall, 1987)

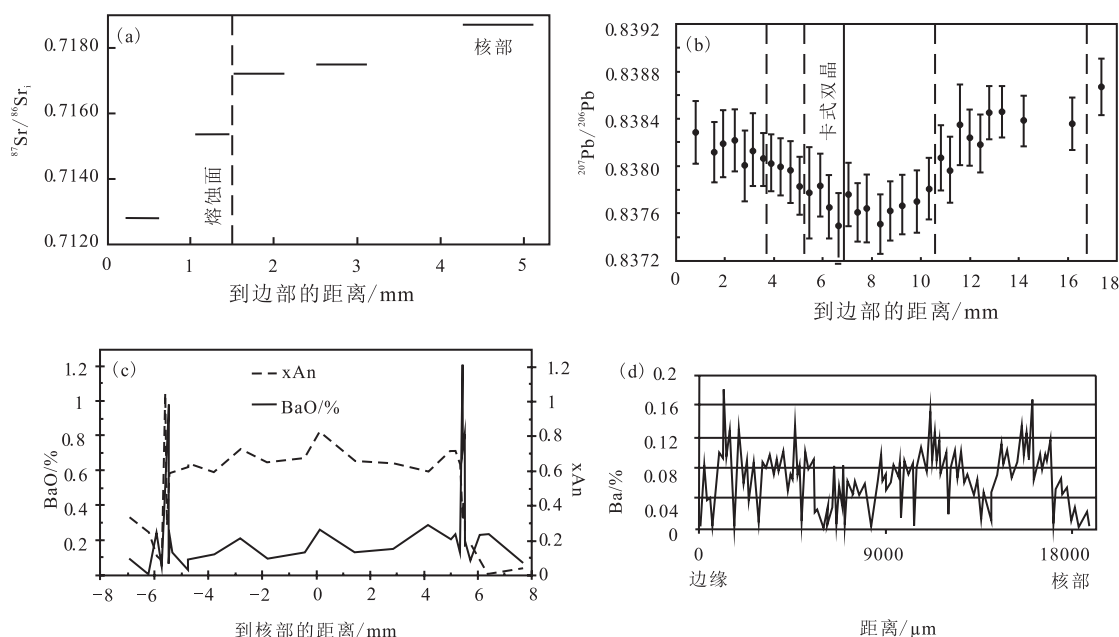
一个更为基性、同位素富集程度较小的环境有关;而 Sr-Nd 同位素呈互补形式,则说明长石是火成结晶作用形成的,而不是交代蚀变或与晚期流体/熔体相互反应形成的。Gagnevin 等(2004)对 Elba 岛西部的 Monte Capanne 岩体镁铁质包体中的钾长石巨晶进行了原位 Sr 同位素研究,发现从核部到边部初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值连续降低(图 2a),认为这不是由于寄主岩之间的平衡作用形成的,而是晶体生长于一个具低放射性成因 Sr 同位素的熔体环境中造成的。而 Farina 等(2014)对 Elba 岛 San Martino 岩体二长花岗岩中的钾长石巨晶进行了原位 Sr 同位素研究时,得到了与 Waight 等(2000b)一致的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化值,同样认为这与幕式岩浆混合作用有关。

Siebel 等(2005)用微钻技术研究了 Bavarian Forest 岩体钾长石巨晶的 Sr 同位素组成,发现 Pattersdorf 花岗闪长岩中钾长石巨晶的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值很均一,而 Kirchdorf 正长岩中钾长石巨晶具有明显不均一的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,但是从核部到边部没有系统性变化。他们提出这可能是由于发生了 Sr 同位素交换的结果,因为在缓慢冷却的岩石中,钾长石中的 Sr 同位素在低于 500°C 时仍会发生扩散(Cherniak and Watson, 1992),所以如果沿着 Bavarian 带存在着长时间的持续高温(约 $500 \sim 700^\circ\text{C}$),就会导致钾长石内部的 Sr 同位素发生交换。而且含水条件下长石(斜长石和钾长石)中的

Sr 扩散要快一个数量级(Giletti, 1991; Cherniak and Watson, 1992),因而他们根据区域野外地质现象认为, Saunstein 花岗闪长岩钾长石巨晶和基质中互相重叠的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,说明至少在手标本尺度上, Rb-Sr 体系发生了完全重置过程,而且该过程可能是由岩浆期后热液或交代事件引起的,该流体具有低的 Sr 含量和/或低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。

4.2 Pb 同位素研究

Slaby 等(2007b)尝试用微钻+TIMS 方法对 Szklarska Poreba Huta 花岗岩中的单个碱性长石巨晶进行了核部和边部的 Pb 同位素分析。因为扩散速率的计算证明,即使在 800°C 时 Pb 的扩散也非常慢,以至于在 $1 \sim 2 \text{ Ma}$ 内不能在钾长石巨晶中达到平衡(Gagnevin *et al.*, 2005),所以碱性长石通常可以有效地记录结晶岩浆的 Pb 同位素组成。他们观察发现样品中也没有任何发生蚀变的现象,因而认为巨晶核部和边部轻微的 Pb 同位素差别不是由岩浆中同位素不平衡导致的,而是单个长石晶体中原位的放射性成因 Pb 积累造成的,即均一的 Pb 同位素组成代表了结晶出巨晶的母岩浆初始的特征。而 Gagnevin 等(2005)曾用 LA-ICP-MS 的方法对 Elba 岛 Capanne 岩体二长花岗岩中的钾长石巨晶进行了 Pb 同位素研究,发现 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值在巨晶中呈明显的环带分布(图 2b),他们结合区域地质特征认为,这些不同的环带反映了动态岩浆



(a) 钾长石巨晶初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的原位剖面图(Gagnevin *et al.*, 2004); (b) 钾长石巨晶 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值的原位剖面图(Gagnevin *et al.*, 2005); (c) 具有斜长石环边的钾长石巨晶 BaO 含量剖面图(Gagnevin *et al.*, 2004); (d) 钾长石巨晶 Ba 元素含量剖面图(Slaby *et al.*, 2007a)

图2 钾长石巨晶 Sr、Pb 同位素值和 Ba 元素含量剖面图

Fig.2 Sr, Pb isotopic values and Ba content profile of K-feldspar megacrysts

体系下巨晶的结晶过程,是巨晶生长过程中有不同 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值的岩浆重新加入到原始岩浆中导致的结果。

4.3 Ba 振荡环带研究

不仅在花岗质侵入体中的钾长石巨晶具有 Ba 的振荡环带(Vernon, 1986; Slaby *et al.*, 2002, 2007a, 2007b; Moore and Sisson, 2008),在火山岩中的钾长石巨晶也显示 Ba 的振荡环带(Lipman *et al.*, 1997; Bachmann *et al.*, 2002; Higgins, 2011b),它们均记录了多期次的岩浆活动。因为如果钾长石巨晶形成于岩浆后期的结构加粗作用,那么就需要使晶体长时间处于接近其液相线温度的条件下(Higgins, 1999),而 Ba 振荡环带记录的多期次岩浆活动则刚好提供了这样的条件。另外,还可以结合锆石 Hf 同位素组成(Yang *et al.*, 2007a, 2007b)和磷灰石的 Sr 同位素组成(Tsuboi and Suzuki, 2003; Tsuboi, 2005; Gaweda, 2008),从矿物同位素组成的角度探讨岩浆所具有的一些初始特征和演化过程,因为岩浆混合作用发生的时间通常比花岗岩结晶相对较早,而较早形成的花岗质矿物(锆石、磷灰石等)才有可能记录更多基性岩浆的信息(Didier, 1987)。

在碱性长石中, Ba 可以替换 Ca (Mahood and Stimac, 1990; Blundy and Wood, 1991)或 K (Guo and Green, 1989; Icenhower and London, 1996),因为它们具有类似的电荷或离子半径。当 Ba 替换 Ca 时就会发生晶格中四面体配位的重新调整,从而使得长石结构的无序度增加(Viswanathan and Kielhorn, 1983),所以富 Ba 巨晶具有无序结构(Borkowska, 1966)。Ba 还可以使碱性长石的稳定域扩展到更高的温度,可达 850℃ (Morgan and London, 2003),导致较早的成核作用,而且可以避免晶体在不均一的混合岩浆环境中转移时发生快速溶解。

多少 Ba 进入到碱性长石还基于熔体结构(Ewart and Griffin, 1994; White *et al.*, 2003),尤其是与熔体中 Al_2O_3 含量有关,而 LREE 则替换长石中的 Ca (Ren, 2004),因而在晶体研究中, Ca-Ba-Al 与 LREE 之间有明显的相关性。Slaby 等(2007a)对 Karkonosze 花岗岩中的碱性长石巨晶进行了电子探针研究,发现同一个晶体中从核部到边部 Ba 含量的变化呈韵律分布(图 2d),不同样品中随着 SiO_2 含量的升高 Ba 成分呈降低趋势,由此识别出多重岩浆混合形式。而 Slaby 等(2007b)对 Szklarska Poreba Huta 花岗岩中的碱性长石巨晶进行了电子探针和 LA-ICP-MS 的剖面分析,发现每个晶体至少具有一个富 Ba 和一个贫 Ba 的环带。他们研究发

现高 Ba 含量与高 LREE 含量相关,而低 Ba 含量与低 LREE 含量相关,而且基性斜长石与富 LREE 的岩浆有关,而富 Na 斜长石则与贫 LREE 的环境有关,从而重建了混合岩浆中不同混合程度区域的成分变化。Slaby 等(2002)认为巨晶中富 Ba 环带生长在一个温度达 810℃ 的混合岩浆中,该混合岩浆混合程度较低且富镁铁质成分(上地幔来源的煌斑质熔体, Slaby *et al.*, 2007a)。贫 Ba 环带结晶于富长英质成分的较均一岩浆中,温度为 670~710℃。这 2 种过程都发生在碱性长石的稳定域内(Morgan and London, 2003)。

Johnson 和 Glazner (2010) 研究加利福尼亚 Tuolumne 侵入体中的钾长石巨晶时观察到有 Ba 的锯齿状环带。他们认为出现的多个熔蚀期和 Ba 生长环带的形态是多次重新加热事件的证据。Moore 和 Sisson (2008) 在研究内华达山脉东部一些岩体中钾长石巨晶时,也认为钾长石巨晶显示的 Ba 振荡环带记录了多次岩浆注入活动。但是 Cox 等(1996)曾提出每个新生长环带中的 Ba 来源于先存钾长石的熔融,而不是新加入的富 Ba 岩浆。正在生长的巨晶最外部的壳与具明显高 Ba 含量的先存小颗粒钾长石晶体发生熔融,释放出的 Ba 元素进行重新分配,在冷却过程中新的熔体重结晶到先存的钾长石、斜长石和石英晶体上。

5 钾长石巨晶的阴极发光

长石的阴极发光对岩浆混合中结晶环境的变化非常敏感,因而进入到长石中的微量元素能反映它们结晶过程中的化学环境(Singer *et al.*, 1995; Tepley *et al.*, 2000; Ginibre *et al.*, 2002)。其中的许多元素在长石中还是有效的活化剂(Mora and Ramssy, 1992; Götze *et al.*, 2000),而且发光所需要的元素成分含量可以很低,通常低于电子探针或其他空间分析技术的检测限,因而长石的阴极发光可能会提供岩浆混合程度的信息。

Slaby 和 Götze (2004) 用阴极发光研究了波兰 Karkonosze 花岗岩中环斑结构碱性长石巨晶,观察长石相似的发光特征发现巨晶中斜长石包裹体都具有一个绿色的发光核部,发光中心绿色的强度向着晶体的边缘方向减弱,他们的研究认为,花岗闪长岩和花岗岩中巨晶的核部似乎都具有共同的来源,从而构建了一个岩浆混合过程。而 Slaby 等(2008)则结合 Karkonosze 花岗岩镁铁质包体中钾长石巨晶的阴极发光图像和电子探针及 LA-ICP-MS 剖面分析,进一步研究了该花岗岩体岩浆动力学

过程。

6 结论

钾长石巨晶在许多花岗岩体中都有发育,而且巨晶能够保存结晶岩浆同位素(如 Rb-Sr、Pb)及一些特征元素(如 Ba)的特征,因而研究花岗岩体及镁铁质包体中的钾长石巨晶,能够对岩浆温度、含水量等条件提供限定,帮助识别岩浆混合作用过程,为深入研究岩浆演化过程提供重要约束。

但是有关钾长石巨晶的研究仍需加强,不少问题亟须解决,如巨晶的 X 光衍射或透射电镜工作仍然不足,钾长石巨晶形成于岩浆作用早期还是晚期依然存在争论,形成钾长石巨晶结构加粗作用的热力学驱动机制仍然不确定,通过钾长石巨晶来研究岩浆演化过程的文献依然很少,而且关于钾长石巨晶中条纹结构的研究特别缺乏。原位微区技术和纳米技术的发展将会给钾长石巨晶的研究带来新的机会,因而钾长石巨晶研究领域有巨大的科研前景。

参考文献 (References):

- Allen C M. 1991. Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle Pluton, Southeast California; mineral, chemical, and isotopic evidence. *American Mineralogist*, 76(3-4): 574-588
- Bachmann O, Dungan M A, Lipman P W. 2002. The Fish Canyon magma body, San Juan volcanic field, Colorado: Rejuvenation and eruption of an upper-crustal batholith. *Journal of Petrology*, 43(8): 1469-1503
- Bateman P C, Chappell B W. 1979. Crystallization, fractionation, and solidification of the Tuolumne Intrusive Series, Yosemite National Park, California. *Geological Society of America Bulletin*, 90(5): 465-482
- Blundy J D, Wood B J. 1991. Crystal-chemical controls on the partitioning of Sr and Ba between plagioclase feldspar, silicate melts, and hydrothermal solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1): 193-209
- Borkowska M. 1966. Petrography of Karkonosze granite. *Geologia Sudetica*, 2: 7-119
- Cherniak D J, Watson E B. 1992. A study of strontium diffusion in K-feldspar, Na-K feldspar and anorthite using Rutherford backscattering spectroscopy. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(3): 411-425
- Clemens J D, Wall V J. 1981. Origin and crystallization of some peraluminous(S-type) granitic magmas. *The Canadian Mineralogist*, 19(1): 111-131
- Collins W J, Wiebe R A, Healy B, Richards S W. 2006. Replenishment, crystal accumulation and floor aggradation in the megacrystic Kambera Suite, Australia. *Journal of Petrology*, 47(11): 2073-2104
- Cox R A, Dempster T J, Bell B R, Rogers G. 1996. Crystallization of the Shap Granite: Evidence from zoned K-feldspar megacrysts. *Journal of the Geological Society*, 153(4): 625-635
- Didier J. 1987. Contribution of enclave studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas. *Geologische Rundschau*, 76(1): 41-50
- Dowty E. 1980. Crystal growth and nucleation theory and the numerical simulation of igneous crystallization. In: Hargraves R B ed. *Physics of Magmatic Processes*. Princeton: Princeton University Press, 419-485
- Ewart A, Griffin W L. 1994. Application of proton-microprobe data to trace-element partitioning in volcanic rocks. *Chemical Geology*, 117(1-4): 251-284
- Farina F, Dini A, Rocchi S, Stevens G. 2014. Extreme mineral-scale Sr isotope heterogeneity in granites by disequilibrium melting of the crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 399: 103-115
- Fenn P M. 1977. The nucleation and growth of Alkali Feldspars from hydrous melts. *Canadian Mineralogist*, 15(4): 135-161.
- Folkes C B, de Silva S L, Wright H M, Cas R A F. 2011. Geochemical homogeneity of a long-lived, large silicic system; evidence from the Cerro Galán caldera, NW Argentina. *Bulletin of Volcanology*, 73(10): 1455-1486
- Gagnevin D, Daly J S, Poli G. 2004. Petrographic, geochemical and isotopic constraints on magma dynamics and mixing in the Miocene Monte Capanne monzogranite (Elba Island, Italy). *Lithos*, 78(1-2): 157-195
- Gagnevin D, Daly J S, Waight T E, Morgan D, Poli G. 2005. Pb isotopic zoning of K-feldspar megacrysts determined by Laser Ablation Multi-Collector ICP-MS: Insights into granite petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(7): 1899-1915
- Gaweda A. 2008. An apatite-rich enclave in the High Tatra granite (Western Carpathians): Petrological and geochronological study. *Geologica Carpathica*, 59(4): 295-306
- Giletti B J. 1991. Rb and Sr diffusion in alkali feldspars, with implications for cooling histories of rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(5): 1331-1343
- Ginibre C, Wörner G, Kronz A. 2002. Minor and trace-element zoning in plagioclase: Implications for magma chamber processes at Paríacota volcano, northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(3): 300-315
- Glazner A F, Johnson B R. 2013. Late crystallization of K-feldspar and the paradox of megacrystic granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(3): 777-799
- Götze J, Krbetschek M R, Habermann D, Wolf D. 2000. High-resolution cathodoluminescence studies of feldspar minerals. In: Pagel M, Barbin V, Blanc P, Ohnenstetter D. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin Heidelberg: Springer, 245-270
- Guo J F, Green T H. 1989. Barium partitioning between alkali feldspar and silicate liquid at high temperature and pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 102(3): 328-335
- Hall A. 1987. *Igneous Petrology*. McGraw-Hill, 1-714
- Healy B C, Collins W J, Richards S W, Wiebe R A. 2000. Chemical effects of squeezing a crystal mush during compressive deformation:

- The Kameruka Pluton, Lachlan Fold Belt. Geological Society of Australia Abstracts 59, 216
- Higgins M D. 1999. Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: A crystal size distribution (CSD) study of microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California. Geological Society, London, Special Publications, 168(1): 207–219
- Higgins M D. 2011a. Textural coarsening in igneous rocks. International Geology Review, 53(3-4): 354–376
- Higgins M D. 2011b. Quantitative petrological evidence for the origin of K-feldspar megacrysts in dacites from Taapaca volcano, Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 162(4): 709–723
- Icenhower J, London D. 1996. Experimental partitioning of Rb, Cs, Sr, and Ba between alkali feldspar and peraluminous melt. American Mineralogist, 81(5-6): 719–734
- Johnson B R, Glazner A F. 2010. Formation of K-feldspar megacrysts in granodioritic plutons by thermal cycling and late-stage textural coarsening. Contributions to Mineralogy and Petrology, 159(5): 599–619
- Johnson M C, Rutherford M J. 1989. Experimentally determined conditions in the fish canyon tuff, Colorado, magma chamber. Journal of Petrology, 30(3): 711–737
- Kerrick D M. 1969. K-feldspar megacrysts from a porphyritic quartz monzonite, central Sierra Nevada, California. American Mineralogist, 54(5-6): 839–848
- Lipman P, Dungan M, Bachmann O. 1997. Comagmatic granophyric granite in the Fish Canyon Tuff, Colorado: Implications for magma-chamber processes during a large ash-flow eruption. Geology, 25(10): 915–918
- Mahood G A, Stimac J A. 1990. Trace-element partitioning in pantellerites and trachytes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(8): 2257–2276
- Maughan L L, Christiansen E H, Best M G, Grommé C S, Deino A L, Tingey D G. 2002. The Oligocene Lund tuff, great basin, USA: A very large volume monotonous intermediate. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 113(1-2): 129–157
- Moore J G, Sisson T W. 2008. Igneous phenocrystic origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks from the Sierra Nevada batholith. Geosphere, 4(2): 387–400
- Mora C I, Ramseyer K. 1992. Cathodoluminescence of coexisting plagioclases, Boehls Butte anorthosite; CL activators and fluid flow paths. American Mineralogist, 77(11-12): 1258–1265
- Morgan G B, London D. 2003. Trace-element partitioning at conditions far from equilibrium: Ba and Cs distributions between alkali feldspar and undercooled hydrous granitic liquid at 200 MPa. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(6): 722–738
- Nabelek P I, Sirbescu M L C. 2006. A kinetic model for crystallization of very low temperature pegmatitic melts. EOS Transactions American Geophysical Union, 87(36): 53
- Parsons I, Thompson P, Lee M R, Cayzer N. 2005. Alkali feldspar microtextures as provenance indicators in siliciclastic rocks and their role in feldspar dissolution during transport and diagenesis. Journal of Sedimentary Research, 75(5): 921–942
- Paterson S R, Vernon R H, Tobisch O T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. Journal of Structural Geology, 11(3): 349–363
- Perini G, Tepley F J, Davidson J P, Conticelli S. 2003. The origin of K-feldspar megacrysts hosted in alkaline potassic rocks from central Italy: A track for low-pressure processes in mafic magmas. Lithos, 66(3-4): 223–240
- Perugini D, Poli G, Christofides G, Eleftheriadis G. 2003. Magma mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: Evidence from mafic microgranular enclaves. Mineralogy and Petrology, 78(3-4): 173–200
- Piwoński A J. 1968. Study of batholithic feldspar; Sierra Nevada, California. Contrib Miner Petrol, 17(3): 204–223
- Piwoński A J, Wyllie P J. 1970. Experimental studies of igneous rock series: Felsic body suite from the needle point pluton, Wallowa batholith, Oregon. The Journal of Geology, 78(1): 52–76
- Ren M H. 2004. Partitioning of Sr, Ba, Rb, Y, and LREE between alkali feldspar and peraluminous silicic magma. American Mineralogist, 89(8-9): 1290–1303
- Renjith M L, Charan, S N, Subbarao D V, Babu E V S S K, Rajashekar V B. 2014. Grain to outcrop-scale frozen moments of dynamic magma mixing in the syenite magma chamber, Yelagiri Alkaline Complex, South India. Geoscience Frontiers, 5(6): 801–820
- Siebel W, Reitter E, Wenzel T, Blaha U. 2005. Sr isotope systematics of K-feldspars in plutonic rocks revealed by the Rb-Sr microdrilling technique. Chemical Geology, 222(3-4): 183–199
- Singer B S, Dungan M A, Layne G D. 1995. Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K, and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: Clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. American Mineralogist, 80(7-8): 776–798
- Sirbescu M L C, Nabelek P I. 2003. Crustal melts below 400°C. Geology, 31(8): 685–688
- Slaby E, Galbarczyk-Gasiorowska L. 2002. Barium in alkali feldspar megacrysts from Szklarska Poreba Huta porphyritic granite-possible indicator of magma mixing. Mineralogical Society of Poland Special Papers, 20: 198–201
- Slaby E, Götze J. 2004. Feldspar crystallization under magma-mixing conditions shown by cathodoluminescence and geochemical modelling—a case study from the Karkonosze pluton (SW Poland). Mineralogical Magazine, 68(4): 561–577
- Slaby E, Galbarczyk-Gasiorowska L, Seltmann R, Müller A. 2007a. Alkali feldspar megacryst growth: Geochemical modelling. Mineralogy and Petrology, 89(1-2): 1–29
- Slaby E, Seltmann R, Kober B, Müller A, Galbarczyk-Gasiorowska L, Jeffries T. 2007b. LREE distribution patterns in zoned alkali feldspar megacrysts from the Karkonosze pluton, Bohemian Massif—implications for parental magma composition. Mineralogical Magazine, 71(2): 155–178
- Slaby E, Martin H. 2008. Mafic and felsic magma interaction in granites: The Hercynian Karkonosze Pluton (Sudetes, Bohemian Massif). Journal of Petrology, 49(2): 353–391
- Slaby E, Götze J, Wörner G, Simon K, Wrzalik R, Śmigielski M. 2008. K-feldspar phenocrysts in microgranular magmatic enclaves: A cathodoluminescence and geochemical study of crystal growth as a marker

- of magma mingling dynamics. *Lithos*, 105(1-2): 85-97
- Smith J V. 1974. Feldspar minerals. Berlin Heidelberg: Springer, 1-699
- Sparks R S J, Folkes C B, Humphreys M C S, Barfod D N, Clavero J, Sunagua M C, McNutt S R, Pritchard M E. 2008. Uturuncu volcano, Bolivia: Volcanic unrest due to mid-crustal magma intrusion. *American Journal of Science*, 308(6): 727-769
- Stimac J A, Wark D A. 1992. Plagioclase mantles on sanidine in silicic lavas, Clear Lake, California: Implications for the origin of rapakivi texture. *Geological Society of America Bulletin*, 104(6): 728-744
- Stix J, Gorton M P. 1990. Variations in trace element partition coefficients in sanidine in the Cerro Toledo Rhyolite, Jemez Mountains, New Mexico: Effects of composition, temperature, and volatiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10): 2697-2708
- Swanson S E. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. *American Mineralogist*, 62(9-10): 966-978
- Tepley F J, Davidson J P, Tilling R I, Arth J G. 2000. Magma mixing, recharge and eruption histories recorded in plagioclase phenocrysts from El Chichón Volcano, Mexico. *Journal of Petrology*, 41(9): 1397-1411
- Tsuboi M, Suzuki K. 2003. Heterogeneity of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios within a single pluton: Evidence from apatite strontium isotopic study. *Chemical Geology*, 199(3-4): 189-197
- Tsuboi M. 2005. The use of apatite as a record of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and indicator of magma processes in the Inagawa pluton, Ryoke belt, Japan. *Chemical Geology*, 2005, 221(3-4): 157-169
- Vernon R H. 1986. K-feldspar megacrysts in granites-phenocrysts, not porphyroblasts. *Earth-Science Reviews*, 23(1): 1-63
- Vernon R H. 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Visual Geosciences*, 5(2): 1-23
- Vernon R H. 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 606
- Vernon R H, Paterson S R. 2008. How late are K-feldspar megacrysts in granites? *Lithos*, 104(1-4): 327-336
- Viswanathan K, Kielhorn H M. 1983. Al, Si distribution in a ternary (Ba, K, Na) - feldspar as determined by crystal structure refinement. *American Mineralogist*, 68(1-2): 122-124
- Waight T E, Dean A A, Maas R, Nicholls I A. 2000a. Sr and Nd isotopic investigations towards the origin of feldspar megacrysts in microgranular enclaves in two I-type plutons of the Lachlan Fold Belt, southeast Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47(6): 1105-1112
- Waight T E, Maas R, Nicholls I A. 2000b. Fingerprinting feldspar phenocrysts using crystal isotopic composition stratigraphy: Implications for crystal transfer and magma mingling in S-type granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(2): 227-239
- White J C, Holt G S, Parker D F, Ren M H. 2003. Trace-element partitioning between alkali feldspar and peralkalic quartz trachyte to rhyolite magma. Part I: Systematics of trace-element partitioning. *American Mineralogist*, 88(2-3): 316-329
- Whitney J A. 1988. The origin of granite: The role and source of water in the evolution of granitic magmas. *Geological Society of America Bulletin*, 100(12): 1886-1897
- Winkler H G F, Schultes H. 1982. On the problem of alkali feldspar phenocrysts in granitic rocks. *Neues Jahrbuch fuer Mineralogie. Monatshefte*, 12: 558-564
- Xu X S, Zhou X M, Wang D Z. 2002. The K-feldspar Megacrysts in Granites: A Case study of Microcline Megacrysts in Fogang Granitic Complex, South China. *Geological Journal of China Universities*, 8(2): 121-128
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007a. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242(1-2): 155-175
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. 2007b. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(2): 177-190
- Zak J, Parterson S R, Memeti V. 2007. Four magmatic fabrics in the Tuolumne batholith, central Sierra Nevada, California(USA): Implications for interpreting fabric patterns in plutons and evolution of magma chambers in the upper crust. *Geological Society of America Bulletin*, 119(1-2): 184-201
- 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 黄丹峰. 2010. 花岗岩类中钾长石巨晶成因研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 29(2): 210-215
- 马昌前, 王人镜. 1990. 北京周口店岩体中钾长石巨晶的特征及成因. *矿物学报*, 10(4): 323-331
- 牛之建. 2015. 上庄金矿红化蚀变与钾长石巨晶成因及对成矿条件的约束. 硕士学位论文, 中国地质大学(北京)
- 徐夕生, 周新民, 王德滋. 2002. 花岗岩中的钾长石巨晶: 以南岭佛冈花岗质杂岩体中微斜长石巨晶为例. *高校地质学报*, 8(2): 121-128
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京: 科学出版社

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)