

石榴子石反应边及其地质意义

——以大兴安岭第四纪火山岩为例

隋建立

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 大兴安岭第四纪火山岩(包括诺敏河火山区和哈拉哈河-绰尔河火山区)地幔包体中含有少量石榴子石,普遍发育矿物反应边。根据显微照片和BSE图像特征,石榴子石反应边可分为3类:①冠冕状石榴子石反应边,包裹在石榴子石矿物外部,具有一期或者多期反应的特征,厚度通常为0.1~1 mm,反应边矿物组合为Opx+Glass、Cpx+Glass、Grt+Sp等;②脉状石榴子石反应边,深入矿物内部,呈脉状分布特征,宽度为几百微米,长度为几毫米,通常为二期反应的产物,反应边矿物组合为Opx+Glass;③微裂隙石榴子石反应边,石榴子石内部发育极细的网脉状分布的微裂隙,沿着裂隙发育几微米到十几微米的薄层反应边,反应边矿物组合为Sp+Glass。结合电子探针分析研究,将这些石榴子石反应边的成因机制归为两类:①岩浆/熔体与石榴子石反应成因。石榴子石反应边的化学成分与石榴子石明显不同,K₂O、Na₂O等元素含量比石榴子石高一两个数量级,暗示地幔硅酸盐熔体或者碱性岩浆参与石榴子石分解反应,石榴子石外面包裹的冠冕状反应边大多属于该类成因;②等化学分解成因(isochemical breakdown)。石榴子石反应边的总体成分与石榴子石相当,无明显的外源物质加入,暗示在封闭环境下石榴子石发生等化学分解,脉状石榴子石反应边和微裂隙石榴子石反应边通常属于该类成因,冠冕状石榴子石反应边是否属于该类成因有待进一步研究。大兴安岭第四纪地幔包体中发现两种不同成因类型的石榴子石反应边,记录了地幔熔体反应和富集的过程以及地幔温度变化和隆升历史,为深入研究地幔地球化学成分变化和热演化历史提供了重要证据。

关键词: 大兴安岭; 石榴子石反应边; 电子探针; 等化学分解; 地幔演化

中图分类号: P578.94⁺7; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0037-10

Reaction rims of garnet and its geological significant: A case study on Quaternary volcanics in Da Hinggan Mountains

SUI Jian-li

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: Mantle xenoliths, with minor garnets, have been found in the Quaternary volcanic rocks in Da Hinggan Mountains. Reaction rims, documenting significant records of mantle dynamic evolution, are common in most of the garnets. Optical photomicrographs and BSE pictures demonstrate three types of reaction rims of garnets, ① coronal rims, a thin layer of 0.1~1 mm enclosing the relic garnet, with a typical mineral assemblage of Opx+Glass, Cpx+Glass or Grt+Sp; ② vein rims, vein-like strips in several 100 μ m in width and several millimeter in length, with a typical mineral assemblage of Opx+Glass; ③ microfracture rims, very thin reaction rims of several to several ten micrometers thick along microfractures in garnet, with a typical mineral assemblage of Sp+Glass. On the aspect of

收稿日期: 2021-05-21; 接受日期: 2021-07-29; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(40972048)

作者简介: 隋建立(1974-), 男, 博士, 助理研究员, 火山学、岩石学、地球化学专业, E-mail: suijianli@ies.ac.cn.

网络首发时间: 2021-12-20; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.p.20211217.1043.002.html>

petrogenesis, these reaction rims were divided into two types, ① origin of magma/melt reaction with garnet: Some reaction rims have quite different bulk chemical composition from the precursor garnets. For example, K_2O and Na_2O compositions in garnet reaction rims are one or two orders of magnitude higher than those in precursor garnets, indicating that compositions from mantle melts or alkaline magmas were induced to the mineral assemblages of reaction rims; ② origin of isochemical breakdown of garnet: The other reaction rims have nearly the same bulk chemical compositions as the precursor garnet, indicating isochemical breakdown of garnet without any significant chemical compositions from mantle melts or other minerals, especially the vein rims and microfracture rims. Hence two types of garnet reaction rims with quite different origins were found in Quaternary volcanic rocks in Da Hinggan Mountains. These garnet reaction rims provide evidences of K_2O - and Na_2O -rich melt reactions and mantle refertilizing processes, as well as evidences of evolution of mantle p - T conditions. Studies on garnet reaction rims may light on further understanding on chemical evolution and thermal history of lithospheric mantle in Da Hinggan Mountains.

Key words: Da Hinggan Mountains; garnet reaction rim; electronic probe analysis; isochemical breakdown; mantle evolution

Fund support: Natural National Sciences Foundation of China(40972048)

石榴子石是地幔的重要组成矿物之一,分布范围从岩石圈上地幔一直到 660 km 深度的地幔过渡带。中国东部新生代碱性火山岩携带大量地幔橄榄岩包体,岩石类型主要以尖晶石相橄榄岩为主,并有少量石榴子石相橄榄岩。在中国东部从北到南 30 多个新生代火山岩区中,已经报道发现的石榴子石相地幔橄榄岩包体主要分布在河北汉诺坝、河南鹤壁、安徽女山、浙江新昌、浙江西垅、福建闽清、福建明溪、广东麒麟等地以及东北大兴安岭地区的诺敏河火山区和哈拉哈河-绰尔河火山区(樊祺诚等, 2008; Su *et al.*, 2011; 隋建立等, 2012)。这些地幔石榴子石中完全新鲜的比较罕见,大部分发育复杂的石榴子石反应边结构,反应边的矿物组合、化学成分和成因机制为岩石圈地幔动力学演化研究提供了重要依据。

对石榴子石反应边的研究由来已久。1882 年 Schrauf 专门创造一个词汇“kelyphite”(石榴子石次变边)来描述波希米亚地区的石榴子石退变现象,迄今已有 100 多年的研究历史。一些学者沿用专有名词 kelyphite 指代石榴子石次变边,而另外一些学者更愿意使用 symplectite,甚至在一些文章中同时使用 kelyphite 和 symplectite。石榴子石反应边广泛出现在不同地质背景的石榴子石中,例如造山带地体麻粒岩以及金伯利岩和碱性火山岩携带的地幔包体等。Godard & Martin(2000)回顾了石榴子石次变边的百年研究历史,将其成因机制分为 3 类: ① 岩浆成因,地幔石榴子石与原生岩浆或者后期岩浆反应或者与地幔硅酸盐熔体反应,形成含熔体玻璃的石

榴子石反应边(Spacek *et al.*, 2013; Xiao *et al.*, 2018; Kargin *et al.*, 2019); ② Opx 成因,地幔斜方辉石解体形成一些含 Opx+Cpx+Sp 矿物组合的反应边结构(Niida, 1984),但是这个解释无法说清楚石榴子石残斑的来源; ③ 石榴子石与橄榄石反应,造山带、超高压带等退变质过程中石榴子石与橄榄石反应形成石榴子石反应边(Reid & Dawson, 1972; Grütter *et al.*, 2006)。除了上述 3 种成因机制,最近一些研究表明,石榴子石在封闭条件下的等化学分解(isochemical breakdown)也可以形成石榴子石次变边或者后成合晶(symplectite)结构(Keankeo *et al.*, 2000; Dégi *et al.*, 2010; Obata *et al.*, 2013, 2014)。

总之,长期以来对于这类石榴子石反应边缺乏足够的认识,其成因机制还存在广泛争议。本文以大兴安岭第四纪火山岩携带的石榴子石相地幔橄榄岩为例,通过岩相学和电子探针主量元素分析,初步研究了石榴子石反应边的矿物组合、化学成分及其成因机制。

1 地质背景和岩相学特征

大兴安岭第四纪火山活动(图 1)大致分为南、北两个区,南区集中在哈拉哈河-绰尔河(哈河火山区)地区,北区主要分布在诺敏河-奎勒河河谷地区(诺敏河火山区)。两个地区的火山岩性不同,诺敏河第四纪火山岩属于钾质火山岩系列(K_2O 含量为 2%~4%,并且 $K_2O > Na_2O$),与邻区科洛-五大连池

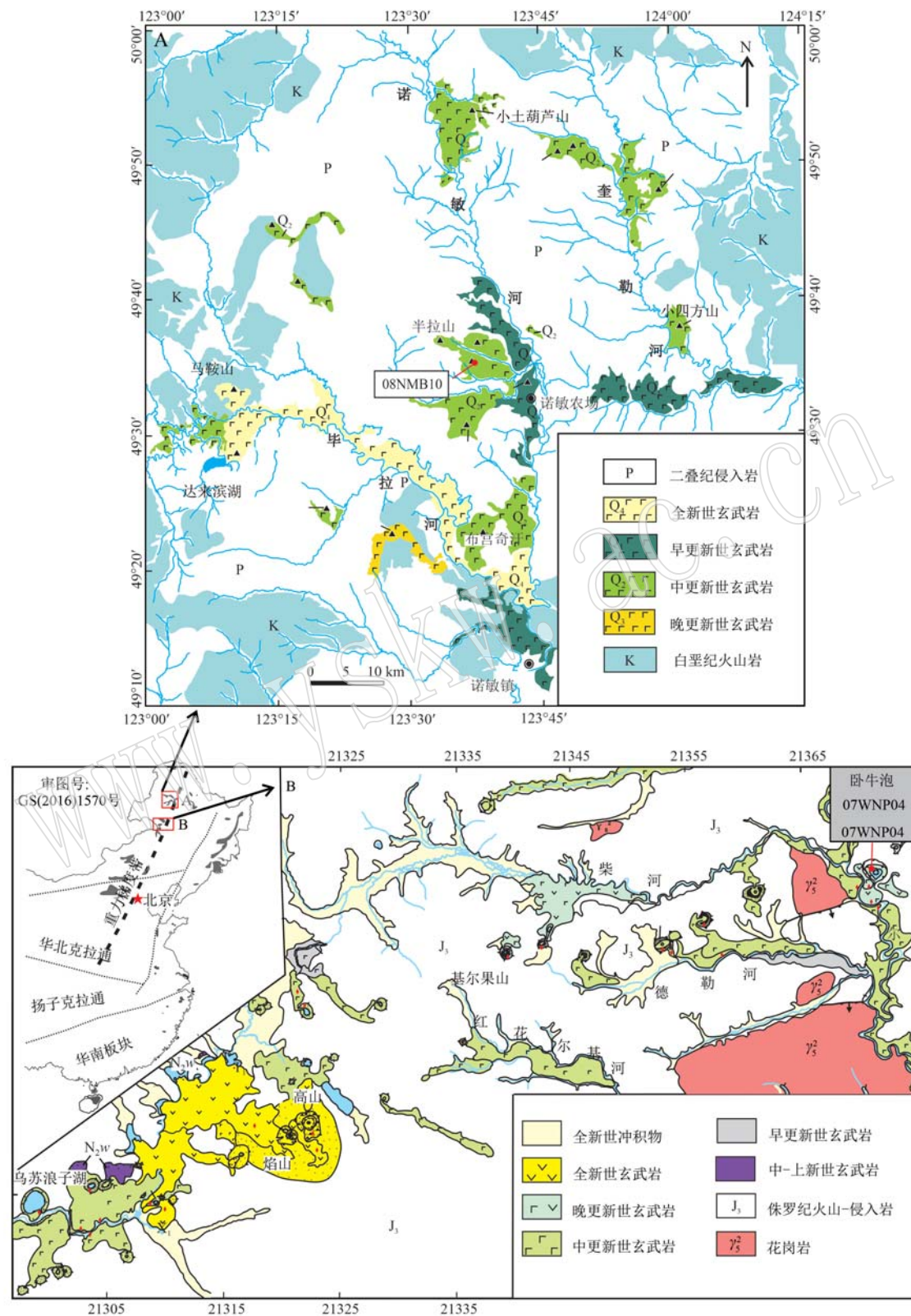


图 1 大兴安岭新生代火山岩分布示意图及采样点位置[根据樊祺诚等(2011, 2012)修改]

Fig. 1 Sketch distribution map of Cenozoic volcanic rocks with sample locations in Da Hinggan Mountains (after Fan Qicheng *et al.*, 2011, 2012)

钾质火山岩相似(K_2O 含量为 4%~6%),而哈河火山岩为钠质系列火山岩(K_2O 含量为 1%~2%)(樊祺诚等, 2011, 2012)。古生代以来,大兴安岭地区受到古亚洲洋、鄂霍次克海和西太平洋等多期大洋板片俯冲的影响(Zhang *et al.*, 2010),构造活动频繁,岩石圈动力学演化复杂,熔体-岩石反应(Liu *et al.*, 2016)、岩石圈拆沉(Zhao *et al.*, 2013, 2014)等机制改造了区域地幔。

大兴安岭诺敏河第四纪碱性火山岩携带大量地幔岩包体(图 2a、2b),包体大小从几毫米到十几厘米,包裹在玄武岩中,或者风化脱落。新鲜的地幔岩

包体呈橄榄绿色(橄榄岩),或者暗绿色、青绿色(辉石岩);风化后包体表明呈现砖红色或者土黄色,内部出现铁锈色等现象。新鲜的石榴子石呈明显的石榴红色(深红色到浅红色、有光泽)(图 2b),而大部分地幔石榴子石因为被石榴子石反应边包裹(图 2c、2d),甚至内部也出现大量微裂隙并发育矿物反应边,因此很多地幔石榴子石手标本看起来呈土状光泽,野外很容易被忽略。显微镜下新鲜的石榴子石呈粉红色(图 2d),反应边为暗色集合体(图 2c、2d),隐晶质或者玻基隐晶质结构,高倍镜下部分矿物微晶可以识别。

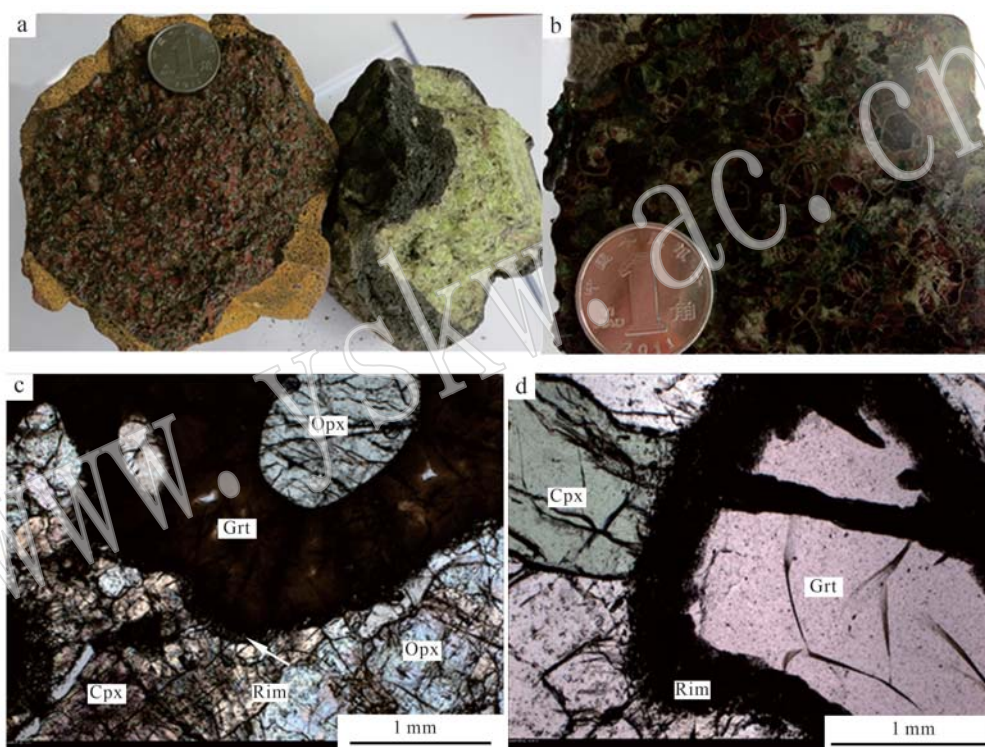


图 2 地幔橄榄岩和石榴子石反应边岩相学特征

Fig. 2 Petrological features of mantle peridotites and garnet reaction rims

a—地幔橄榄岩包体,右边草绿色的是被岩浆包裹的新鲜橄榄岩,左边橄榄岩氧化呈铁锈色,外面包裹的寄主玄武岩已经完全剥落,样品采自诺敏半砬山; b—石榴子石橄榄岩抛光面,暗红色石榴子石被浅色反应边包裹,样品采自大兴安岭南段德勒河; c—石榴子石外面包裹着薄层反应边,内部残留蚀圆状辉石斑晶,样品 08NMB10,正交偏光; d—粉色石榴子石斑晶被暗色反应边包裹,内部还出现脉状发育的反应边,样品 07WNP04,正交偏光; Rim—反应边; Grt—石榴子石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石

a—mantle peridotites, the right is a fresh peridotite with light green color, enclosed by basalt, and the left is oxidized and rust-colored (sample from Banlashan of Nuomin); b—a polished section of garnet peridotite, in which garnets were enclosed by light colored reaction rims (sample from Delehe of south Da Hinggan Mountains); c—a garnet is enclosed by thin reaction rim, with relic orthopyroxenes, sample 08NMB10, cross light; d—corona rims and dyke rims in a garnet, sample 07WNP04, cross light; Rim—rim; Grt—garnet; Cpx—clinopyroxene; Opx—orthopyroxene

大兴安岭第四纪火山岩地幔包体石榴子石矿物主要成分为镁铝榴石,其中北区诺敏河石榴子石成分为 $Pyr_{66-72}Alm_{13-14}Gro_{6-10}Ura_{4-7}$ (隋建立等, 2012),南区哈拉哈河石榴子石为 Pyr_{71-79} (樊祺诚等, 2008),两个地区的成分有明显差别。从中国东

部新生代地幔包体统计研究结果看,石榴子石矿物成分具有比较宽的展布范围,以镁铝榴石和铁铝榴石系列为主(Huang and Xu, 2010),相对而言大兴安岭石榴子石成分的分布范围比较集中,具有富镁贫钙、贫铁特征,与福建明溪的石榴子石成分(Qi *et*

al., 1995)接近。根据地幔矿物平衡温度和压力计算,哈拉哈河石榴子石二辉橄榄岩平衡温压分别为 1 115~1 199℃和 2.36~2.47 GPa,来源深度为 76~79 km (樊祺诚等, 2008);诺敏河石榴子石橄榄岩的平衡温压分别为 1 114~1 168℃和 2.14~2.33 GPa,来源深度为 70~75 km (隋建立等, 2012)。这些数据显示研究区具有较高的地温梯度,与中国东部新生代火山岩区的地温梯度特征 (Huang and Xu, 2010)一致。

2 石榴子石反应边特征

全球幔源石榴子石来源有两种不同的构造背景:造山带地体麻粒岩和岩浆(包括碱性岩浆和科马提岩)地幔包体。中国东部新生代碱性玄武岩携带大量地幔包体,其中的石榴子石普遍发育反应边,但

是长期以来对于此类石榴子石反应边缺乏足够重视,研究稀少。本文对大兴安岭地区第四纪火山岩中典型石榴子石反应边进行了电子探针成分分析, BSE 图像和电子探针分析在中科院地质与地球物理研究所完成,仪器为日本电子的 JXA-8100,加速电压为 15 kV,电子束流 10 nA,束斑直径 1~3 μm 。

根据矿物反应边的形态结构,可大致将大兴安岭第四纪火岩岩地幔包体中石榴子石分为 3 种:①冠冕状反应边(图 2c、2d、图 3a),围绕石榴子石颗粒周围发育薄层反应边,厚度 1 mm 左右,扫描电镜背散射图像中可以清楚地看到不同期次的反应边呈环带状分布,它们的矿物颗粒大小和矿物组合不同,暗示石榴子石反应边是多期成因的结果;②脉状反应边(图 2d、图 3b),部分石榴子石反应边深入石榴子石矿物内部,甚至贯穿整个矿物,呈网脉状分布,宽度为零点几毫米,长度为几毫米;③微裂隙反应边,

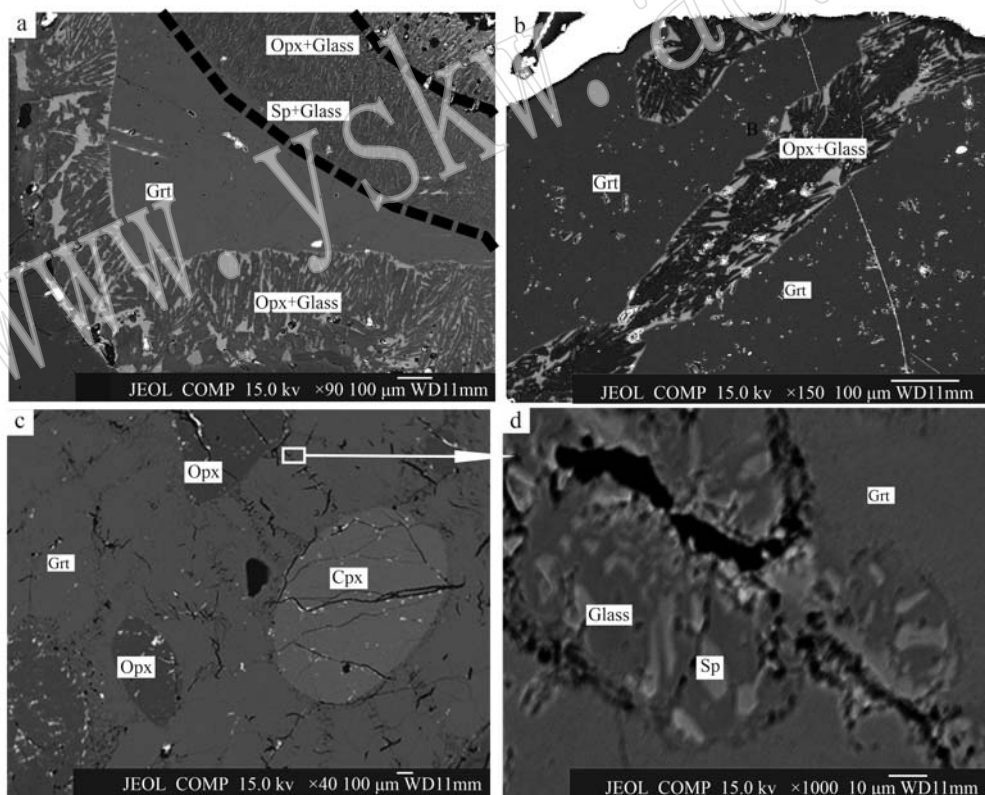


图 3 石榴子石反应边 BSE 图像

Fig. 3 BSE pictures of three types of garnet reaction rims

a—石榴子石反应边的期次和矿物组合(样品 07WNP04); b—石榴子石内部发育的脉状反应边,反应边与一条矿物裂隙相交,显示该反应边发育晚于矿物裂隙,反应边不是熔体或者岩浆沿着裂隙侵入矿物并与石榴子石反应形成,而是地幔温压条件改变所致(样品 07WNP04); c—后生石榴子石包裹着单斜辉石和斜方辉石矿物残斑,残斑呈浑圆状,石榴子石发育大量不规则微裂隙(样品 08NMB10) d—微裂隙放大,显示几十微米厚度的反应边,生成退变的石榴子石和微晶尖晶石(样品 08NMB10)

a—coronal rims show multiple stages of petrogenesis (sample 07WNP04); b—vein rims spread into the garnet mineral, two vein rims cover through a crack, indicating that these vein rims were not formed by melt or magma along the cracks in the minerals (sample 07WNP04); c—garnet with many micro cracks, enclosing relic minerals of Cpx and Opx (sample 08NMB10); d—very thin reaction rims, with several ten micrometers wide, along with the micro cracks (sample 08NMB10)

石榴子石发育大量不规则微裂隙,具有海绵状结构,沿着微裂隙发育极其薄层的石榴子石反应边,厚度一般只有几到几十微米。

石榴子石反应边成分复杂,一般由快速反应的微晶矿物和熔体玻璃组成。已经报道的石榴子石反应边矿物包括石榴子石、单斜辉石、斜方辉石、橄榄石、尖晶石、钛铁氧化物、钙钛矿、绿泥石、斜长石、角闪石、金云母等,从典型的高压矿物钙钛矿到低压矿物绿泥石、斜长石,反映了地幔温度、压力等条件的变化;从无水矿物到含水矿物金云母、角闪石,反映了地幔流体组分活动的证据(Godard & Martin, 2000)。本区地幔石榴子石反应边的矿物种类包括石榴子石(Grt)、橄榄石(Ol)、单斜辉石(Cpx)、斜方辉石(Opx)、尖晶石(Sp)、熔体玻璃(Glass)等(矿物成分见表1),矿物组合分别为Grt+Sp、Opx+Glass、Cpx+Glass等,不同成因类型的石榴子石反应边矿物组合和化学成分不同;同类型、不同期次的石榴子石反应边矿物形态、组合也有明显变化,例如图3a显示了3期冠冕状反应边微晶矿物从针状到近似板条状变化,暗示区域岩石圈地幔经历了多期复杂演化。

电子探针分析数据(表1)显示,石榴子石主晶为镁铝榴石,反应边的石榴子石几乎全都是钙铝榴石,对应的Mg、Cr、Fe和Si等成分进入尖晶石等矿物,直至演化成比钙铝榴石更贫硅的熔体玻璃;尖晶石主要是铝尖晶石,Cr含量比较低, $Cr^{\#} [Cr/(Al+Cr)]$ 为3.8~9.1。反应边的橄榄石矿物Fo指数 $[Mg/(Mg+Fe)]$ 为83~87,相对地幔橄榄石($Fo>90$)略显贫镁富铁,与岩浆橄榄石相当。反应边辉石矿物以斜方辉石为主,单斜辉石较少;大部分辉石几乎不含 Na_2O 、 K_2O ($<0.1\%$),继承了石榴子石贫 Na_2O 、 K_2O 的特点。斜方辉石继承了石榴子石铝质成分,铝含量高达3%~17%,为富铝斜方辉石。玻璃有两类,一类几乎不含 Na_2O 、 K_2O (如表1中07WNP04),与原始的石榴子石成分类似;一类含有显著的 Na_2O 、 K_2O (如表1中07WNP09,熔体玻璃中 Na_2O 含量为3.27%~4.29%),暗示有其它矿物或者熔体成分加入。

3 讨论

石榴子石反应边的成因机制与岩石圈地幔动力学演化密切相关。前文总结石榴子石反应边有4种重要的成因机制:岩浆/熔体成因、辉石反应边成因、

石榴子石和橄榄石、石榴子石等化学分解成因。本文不讨论辉石反应边,也没有发现明显的石榴子石和橄榄石反应证据,重点讨论岩浆/熔体成因和等化学分解成因机制在大兴安岭地区的作用和影响。

3.1 岩浆/熔体成因石榴子石反应边

高温的碱性岩浆在上升过程中分解、破坏围岩,部分地幔岩碎片和地幔矿物碎片被寄主岩浆带到地表,形成地幔包体(mantle xenolith)和捕虏晶(xenocryst)。由于基性岩浆的温度高达1200~1400℃以上,很容易与地幔岩反应,所以通常见到的地幔包体都有一定的溶蚀现象,甚至蚀圆成规则的椭球形,如汉诺坝玄武岩中大量椭球形地幔包体堆积在熔岩流底部,蔚为壮观(樊祺诚等, 2001)。同样,地幔矿物捕虏晶也会被岩浆溶蚀,形成各种矿物反应边,矿物反应边以及熔体包裹体的成因来源到底是寄主岩浆还是幔源熔体一直是个热议的问题,反应边矿物和玻璃成分可以提供区分来源的证据。

熔体玻璃是岩浆成因石榴子石反应边的重要特征之一(Godard & Martin, 2000),玻璃成分与来源密切相关。从表1可以看出,反应边玻璃 Na_2O 、 K_2O 含量通常很低,在0.5%以下;但是在07WNP09样品中一部分富碱玻璃的 Na_2O 含量达到3.27%~4.29%,比地幔石榴子石 Na_2O 含量高两个数量级。从反应边矿物组合看,玻璃含量往往大于50%,因此石榴子石无法为熔体玻璃提供足够的 Na_2O ;而碱性岩浆和地幔熔体则可以大量提供 Na_2O 、 K_2O 。

至于区分地幔熔体还是寄主岩浆熔体来源,大兴安岭钾质熔体恰好提供了一个新的区分手段。此前研究发现该区地幔有多种硅酸盐熔体活动,成分从钾质到钠质变化,其中部分钾质熔体 K_2O 含量明显高于岩浆,尤其是哈河地区部分熔体 K_2O 含量(高达7%)为玄武岩的数倍,暗示深部地幔熔体交代来源(隋建立等, 2014)。总之,从矿相学和电子探针数据可以看出,大兴安岭石榴子石反应边与地幔熔体/流体和基性岩浆密切相关,二者的具体贡献和矿物反应细节可以通过反应边玻璃的 Na_2O 、 K_2O 含量区分,进一步详细研究可以做微区微量元素和同位素分析。

3.2 封闭体系下石榴子石分解反应

等化学分解成因是指无外来成分参与、近似封闭体系下石榴子石分解反应(isochemical breakdown),简单说就是石榴子石+熔体反应、石榴子石+橄榄石反应不是必需的,石榴子石本身可以随着地

表 1 石榴子石反应边矿物主量元素成分
Table 1 Major element compositions of minerals in garnet reaction rims

 $w_B/\%$

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	备注
07WNP04													
Grt	41.41	0.21	22.38	1.58	7.05	0.30	20.69	5.24	0.03	0.00	0.06	98.95	
Cpx	42.45	0.24	22.40	1.50	6.93	0.29	20.92	5.18	0.06	0.00	0.03	99.98	Wo ₁₃ En ₇₃ Fs ₁₄
Opx	45.40	0.18	17.69	2.32	6.51	0.28	25.49	1.58	0.01	0.00	0.00	99.46	Wo ₅ En ₈₄ Fs ₁₂
Opx	50.04	0.17	9.73	0.42	7.00	0.29	28.90	1.89	0.00	0.00	0.02	98.47	Wo ₄ En ₈₄ Fs ₁₂
Glass	50.01	0.42	21.69	0.12	6.13	0.28	5.32	15.20	0.12	0.00	0.01	99.30	
Glass	49.75	0.43	21.61	0.04	5.92	0.28	5.34	15.07	0.11	0.00	0.03	98.58	
Glass	48.54	0.42	22.92	0.10	6.09	0.26	5.69	14.86	0.11	0.02	0.00	99.01	
07WNP09													
Sp	0.13	0.38	59.30	3.53	15.08	0.11	20.60	0.00	0.01	0.00	0.17	99.30	Cr [#] =3.8
Sp	0.76	0.06	59.53	7.10	9.35	0.17	21.76	0.15	0.00	0.01	0.01	98.90	Cr [#] =7.4
Sp	0.08	0.11	59.87	7.52	10.28	0.20	21.67	0.01	0.00	0.00	0.07	99.81	Cr [#] =7.8
Sp	0.24	0.30	57.02	8.07	12.48	0.14	21.50	0.00	0.00	0.02	0.26	100.02	Cr [#] =8.7
Sp	0.35	0.07	57.94	8.27	11.34	0.27	20.37	0.10	0.00	0.00	0.04	98.74	Cr [#] =7.4
Sp	0.18	0.27	55.86	8.29	12.64	0.16	20.82	0.00	0.00	0.03	0.25	98.48	Cr [#] =9.1
Ol	40.13	0.03	0.03	0.19	12.27	0.47	46.65	0.15	0.00	0.01	0.00	99.92	Fo ₈₇
Ol	39.75	0.07	0.04	0.21	15.34	0.58	43.93	0.23	0.00	0.00	0.01	100.16	Fo ₈₃
Cpx	50.18	0.47	8.05	0.64	5.06	0.14	17.94	15.62	1.04	0.00	0.03	99.16	Wo ₃₅ En ₇₃ Fs ₉
Opx	50.43	0.12	9.58	1.80	6.96	0.23	28.29	2.23	0.00	0.00	0.00	99.63	Wo ₅ En ₈₃ Fs ₁₂
Opx	51.66	0.10	9.21	0.37	6.72	0.28	29.94	1.54	0.01	0.01	0.00	99.84	Wo ₃ En ₈₆ Fs ₁₁
Opx	48.20	0.15	13.11	1.73	6.57	0.30	27.17	1.91	0.04	0.00	0.00	99.17	Wo ₄ En ₈₄ Fs ₁₂
Opx	48.14	0.16	13.08	1.48	7.07	0.27	26.69	1.96	0.01	0.00	0.04	98.89	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	48.49	0.19	12.84	1.51	7.00	0.29	26.97	1.96	0.04	0.00	0.04	99.32	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	46.37	0.21	16.16	1.68	7.21	0.25	26.01	1.50	0.03	0.00	0.01	99.43	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	46.96	0.05	14.77	1.77	6.99	0.29	26.81	1.73	0.02	0.00	0.03	99.42	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	46.14	0.18	15.03	2.15	6.98	0.27	26.26	1.97	0.00	0.00	0.04	99.01	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	45.04	0.21	17.30	2.09	6.79	0.22	25.68	1.60	0.00	0.00	0.00	98.93	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	45.85	0.24	15.23	2.27	6.61	0.34	26.18	1.99	0.01	0.01	0.02	98.76	Wo ₅ En ₈₃ Fs ₁₂
Glass	51.58	0.15	29.20	0.01	0.60	0.02	0.29	14.03	3.57	0.16	0.05	99.65	
Glass	51.36	0.05	28.49	0.00	0.73	0.02	0.34	13.77	3.63	0.11	0.00	98.50	
Glass	51.67	0.00	28.69	0.03	0.59	0.04	0.18	13.24	4.29	0.24	0.01	98.97	
Glass	49.91	0.13	30.55	0.10	0.62	0.01	0.16	14.85	3.27	0.17	0.00	99.76	
Glass	45.84	0.35	30.95	0.03	1.19	0.04	0.55	18.76	0.44	0.05	0.00	98.20	
Glass	45.02	0.07	32.12	0.11	0.99	0.03	0.83	19.39	0.41	0.02	0.00	98.98	
Glass	46.30	0.60	29.87	0.17	1.52	0.06	0.99	18.15	0.27	0.06	0.02	98.02	
08NMB10													
Grt	42.83	0.17	22.11	2.21	6.90	0.33	19.62	5.56	0.03	0.00	0.04	99.80	
Cpx	53.11	0.54	4.85	1.17	2.78	0.05	15.90	19.61	1.58	0.01	0.02	99.62	Wo ₄₅ En ₅₀ Fs ₅
Cpx	52.21	0.33	6.45	1.04	3.72	0.16	16.86	17.53	1.34	0.01	0.03	99.67	Wo ₄₀ En ₅₃ Fs ₇
Cpx	42.56	0.16	21.83	2.24	6.96	0.27	19.63	5.69	0.02	0.00	0.00	99.36	Wo ₁₅ En ₇₀ Fs ₁₅
Opx	50.81	0.12	9.42	1.69	7.22	0.31	27.46	2.17	0.02	0.02	0.00	99.26	Wo ₅ En ₈₂ Fs ₁₃
Opx	52.47	0.12	7.28	0.62	7.40	0.40	28.33	1.96	0.00	0.00	0.02	98.60	Wo ₄ En ₈₃ Fs ₁₃
Opx	55.18	0.16	3.48	0.79	5.55	0.11	31.73	0.90	0.12	0.01	0.09	98.09	Wo ₂ En ₈₉ Fs ₉
Opx	55.37	0.18	3.41	0.78	5.84	0.11	32.31	0.92	0.13	0.00	0.20	99.26	Wo ₂ En ₈₉ Fs ₉
Opx	54.87	0.14	3.29	0.59	5.74	0.16	32.35	0.90	0.15	0.00	0.14	98.32	Wo ₂ En ₈₉ Fs ₉
Sp	0.20	0.27	54.70	8.58	12.54	0.23	18.91	0.09	0.00	0.00	0.02	95.56	Cr [#] =9.5
Sp	0.24	0.13	55.04	8.47	10.51	0.24	18.07	0.07	0.02	0.02	0.10	92.91	Cr [#] =9.4
Sp	0.26	0.11	54.94	8.95	10.50	0.28	18.03	0.07	0.00	0.01	0.00	93.15	Cr [#] =9.9

幔温度压力演化(可能包括矿物含水量变化)而分解,等化学分解在快速反应条件下来不及形成完全稳定的矿物组合,而是形成一些隐晶质的、亚平衡的矿物组合,即反应边组合。早期研究提到过一些石榴子石等化学分解现象(Chinner, 1962; Mukhopadhyay, 1991),只是未能引起广泛重视并深入研究。Obata 等人(Dégi *et al.*, 2010; Obata *et al.*, 2013, 2014)通过一系列高温高压实验和地质实例研究,指出石榴子石分解是石榴子石反应边的一种重要的成因机制。在大兴安岭3类石榴子石反应边中,07WNP04样品脉状石榴子石反应边矿物组合以Opx+Glass为主,电子探针数据(表1)显示其Opx和Glass中的Na₂O、K₂O含量极低(均低于0.1%),与地幔石榴子石成分一致,比较符合石榴子石等化学分解的特征。

石榴子石内部微裂隙可能也不受外来硅酸盐熔体或者岩浆的影响,微裂隙反应边是等化学分解的产物。显微镜下,微裂隙不明显。BSE图像显示石榴子石晶体内部发育大量不连续的微裂隙,受外源熔体影响较少,矿物组合为Grt+Sp,无明显的Na₂O、K₂O成分,而地幔流体和硅酸盐熔体、岩浆中都含有明显的Na₂O、K₂O成分,因此这种晶体内部的微裂隙石榴子石反应边是石榴子石分解产物,暗示大兴安岭岩石圈地幔温度、压力快速改变,石榴子石内部出现不规则应力裂隙和矿物化学反应,地幔高温、快速隆升。

已知的等化学分解成因石榴子石反应边的报道有:捷克摩尔多瓦带(Moldanubian Zone)麻粒岩地体石榴子石反应边,矿物组合为Opx+Sp+Pl(Obata *et al.*, 2013);澳大利亚新南威尔士 Delegate 霞石岩质角砾岩筒中的石榴子石反应边,矿物组合为Cpx(镁质斜铁辉石)+Sp+An(Keankeo *et al.*, 2000);巴拿马盆地碱性玄武岩携带的下地壳麻粒岩包体中的石榴子石,反应边矿物组合An+Opx+Sp(Dégi *et al.*, 2010);意大利西西里岛 Hyblean 高原玄武质角砾岩筒中的石榴子石辉石岩包体,反应边矿物组合Opx+Sp+Pl(Sapienza *et al.*, 2001)。这些等化学分解成因石榴子石反应边的地质背景包括造山带地体和岩浆包体,反应边矿物组合主要是Opx+Sp+Pl。本文发现的大兴安岭石榴子石等化学分解有关的反应边,矿物组合有Opx+Glass和Sp+Glass两种,说明等化学分解还有更多的矿物组合。从矿物成分看,大兴安岭石榴子石反应边Opx的铝质成分较高,铝含

量高达3%~17%,为富铝斜方辉石;尽管辉石Ca成分很低(Wo<5%),但是已经不符合严格意义的斜方辉石晶系,只是用Opx、Cpx区分两类不同成分的辉石。富铝斜方辉石是等化学分解成因石榴子石反应边的另一个重要特征,上述几个地区Opx均有富铝特征,部分辉石继承了石榴子石的高铝成分,或者由熔体玻璃和长石继承。

等化学分解与高温和低压有关,地幔石榴子石的稳定区间为55~70 km以下,压力降低时从石榴子石相到尖晶石相转变,形成反应边结构,这是上地幔最重要的矿物相转变之一(Xu *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2001; 樊祺诚等, 2001; Zhang *et al.*, 2001; Huang & Xu, 2010)。从成因机制看,满足石榴子石等化学分解的高温、低压条件的地质过程主要是造山带隆升、超高压带俯冲折返以及地球早期科马提岩浆快速喷发和显生宙碱性岩浆喷发等。大兴安岭地区既有造山带地幔隆升的背景,同时这些包体也是第四纪岩浆快速喷发上升携带到地表的产物,详细区分二者的影响还需要更多的工作。

4 结论

石榴子石具有反应边是中国东部地幔包体的一个重要特点,岩相学和电子探针研究显示大兴安岭第四纪火山岩地幔包体中石榴子石反应边具有两种截然不同的成因机制:

(1) 岩浆或者熔体与岩石反应,石榴子石反应边矿物组合中出现富含钾、钠的熔体玻璃或者含水矿物等,暗示反应体系开放,有外来流体和碱质成分加入;

(2) 地幔石榴子石等化学分解,矿物组合为Grt+Sp或者Opx+Glass,重要特征是系统成分与石榴子石相当,没有明显的钾、钠等外来物质加入,矿物学特征表现为脉状或者更加细微的微裂隙。

大兴安岭第四纪地幔包体中两种不同成因类型的石榴子石反应边,记录了地幔熔体反应和富集的过程以及地幔温度变化和隆升历史,为深入研究地幔地球化学成分变化和热演化历史提供了重要证据。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所毛騫、马玉光指导完成电子探针分析工作;感谢中国地震局地质研究所樊祺诚研究员、李霓研究员、潘

波、赵勇伟等的指导和参与。

References

- Chen S, O'Reilly SY, Zhou X, *et al.* 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenoliths[J]. *Lithos*, 56(4): 267~301.
- Chinner G A. 1962. Almandine in Thermal Aureoles[J]. *Journal of Petrology*, 3(3): 316~340.
- Dégi J, Abart R, Trk K, *et al.* 2010. Symplectite formation during decompression induced garnet breakdown in lower crustal mafic granulite xenoliths: Mechanisms and rates[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 159(3): 293~314.
- Fan Qicheng and Sui Jianli. 2001. The granulite-eclogite facies cumulate xenoliths in Hannuoba area: The evidence of the crust-mantle transitional zone[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, (1): 23~27 (in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Zhao Yongwei, *et al.* 2008. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2 563~2 568 (in Chinese with English abstract).
- Fan Q and Sui J. 2009. Fan Qicheng, Sui Jianli. 2009. Phase transition of upper mantle rock in China and its significance[J]. *Journal of Earth Science*, 18(3): 387~391.
- Fan Qicheng, Zhao Yongwei, Li Daming, *et al.* 2011. Studies on Quaternary volcanism stages of Halaha river and Chaoer river area in the Great Xing'an Range: Evidence from K-Ar dating and volcanic geology features[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2 827~2 832 (in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Zhao Yongwei, Sui Jianli, *et al.* 2012. Studies on Quaternary volcanism stages of Nuomin river area in the Great Xing'an Range: Evidence from petrology, K-Ar dating and volcanic geology features[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 092~1 098 (in Chinese with English abstract).
- Godard G and Martin S. 2000. Petrogenesis of kelyphites in garnet peridotites: A case study from the Ulten zone, Italian Alps[J]. *Journal of Geodynamics*, 30(1~2): 117~145.
- Grütter H, Latti D and Menzies A. 2006. Cr-saturation arrays in concentrate garnet compositions from kimberlite and their use in mantle barometry[J]. *Journal of Petrology*, 47(4): 801~820.
- Huang X and Xu Y. 2010. Thermal state and structure of the lithosphere beneath eastern China: A synthesis on basalt-borne xenoliths[J]. *Journal of Earth Science*, 21(5): 711~730.
- Kargin A V, Sazonova L V, Nosova A A, *et al.* 2019. Phlogopite in mantle xenoliths and kimberlite from the Grib pipe, Arkhangelsk province, Russia: Evidence for multi-stage mantle metasomatism and origin of phlogopite in kimberlite[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(5): 1 941~1 959.
- Keankeo W, Taylor W R and Fitzgerald J D. 2000. Clinoferrrosilite-bearing kelyphite: A breakdown product of xenolithic garnet, Delegate breccia pipes, New South Wales, Australia[J]. *Mineral. Mag.*, 64(3): 469~479.
- Liu J Q, Chen L H, Zeng G, *et al.* 2016. Lithospheric thickness controlled compositional variations in potassic basalts of Northeast China by melt-rock interactions[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(6): 2 582~2 589.
- Mukhopadhyay B. 1991. Garnet breakdown in some deep seated garnetiferous xenoliths from the central Sierra Nevada: Petrologic and tectonic implications[J]. *Lithos*, 27(1): 59~78.
- Niida K. 1984. Petrology of the Horoman Ultramafic Rocks in the Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, Japan[J]. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4, Geology and mineralogy*, 21(2): 197~250.
- Obata M, Ohi S and Miyake A. 2014. Experimental synthesis of isochemical kelyphite—A preliminary report[J]. *Journal of Mineralogical & Petrological Sciences*, 109(2): 91~96.
- Obata M, Ozawa K, Naemura K, *et al.* 2013. Isochemical breakdown of garnet in orogenic garnet peridotite and its implication to reaction kinetics[J]. *Mineral. Petrol.*, 107(6): 881~895.
- Qi Q, Taylor L and Zhou X. 1995. Petrology and Geochemistry of Mantle Peridotite Xenoliths from SE China[J]. *Journal of Petrology*, 36(1): 55~79.
- Reid A M and Dawson J B. 1972. Olivine-garnet reaction in peridotites from Tanzania[J]. *Lithos*, 5(2): 115~124.
- Sapienza G, Scribano V and Calvari S. 2001. Kelyphitic breakdown of garnets from pyroxenite xenoliths, south-eastern Sicily, Italy[J]. *Periodico di Mineralogia*, 70(3): 377~386.
- Spacek P, Ackerman L, Habler G, *et al.* 2013. Garnet breakdown, symplectite formation and melting in basanite-hosted peridotite xenoliths from Zinst (Bavaria, Bohemian Massif) [J]. *Journal of Petrology*, 54: 1 691~1 723.
- Su B, Zhang H, Tang Y, *et al.* 2011. Geochemical syntheses among the cratonic, off-cratonic and orogenic garnet peridotites and their tectonic implications[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 100(4): 695~715.

- Sui Jianli, Fan Qicheng and Xu Yigang. 2012. Discovery of garnet peridotite xenoliths from the Nuomin Quaternary volcanic field, the Great Xing'an Range, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 130~1 138 (in Chinese with English abstract).
- Sui Jianli, Li Ni, Fan Qicheng, *et al.* 2014. Phlogopites and potassic melts in mantle xenoliths from Nuomin volcanic field, northern Great Xing'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3 587~3 594 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Y, Zhang H F, Liang Z, *et al.* 2018. Origin of sapphirine- and garnet-bearing clinopyroxenite xenoliths entrained in the Jiande basalts, SE China[J]. *Lithos*, 304~307: 95~108.
- Xu Y G, Lin C Y, Shi L B, *et al.* 1995. A petrological paleogeotherm of the upper mantle of eastern China and its geological implications [J]. *Science in China (Series B)*, 25(8): 874~881.
- Zhang H F, Sun M, Lu F X, *et al.* 2001. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China[J]. *Geochemical Journal-Japan*, 35(5): 315~332.
- Zhang Z C, Mao J W, Wang Y B, *et al.* 2010. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong'an adularia-sericite epithermal gold deposit, Lesser Hinggan Range, Heilongjiang province, NE China, Constraints on the metallogenesis [J]. *Ore Geology Review*, 37(3~4): 158~174.
- Zhao Y W, Fan Q C, Bai Z D, *et al.* 2013. Quaternary volcanism in the Nuomin River and Kuile river area of the greater Hinggan Mountains [J]. *Science China Earth Sciences*, 56(2): 173~181.
- Zhao Y W, Fan Q C, Zou H B, *et al.* 2014. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic field, Inner Mongolia: Implications for the origin of potassic volcanic rocks in Northeastern China[J]. *Lithos*, 196~197(0): 169~180.

附中文参考文献

- 樊祺诚, 隋建立. 2001. 汉诺坝麻粒岩相-榴辉岩相堆晶岩捕虏体——壳-幔过渡带的证据[J]. *中国科学基金*, 15(1): 23~27.
- 樊祺诚, 隋建立. 2009. 中国东部上地幔岩石相转变及其意义[J]. *地球科学*, 34(3): 387~391.
- 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 等. 2008. 大兴安岭中部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究[J]. *岩石学报*, 24(11): 2 563~2 568.
- 樊祺诚, 赵勇伟, 李大明, 等. 2011. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山分期: K-Ar 年代学与火山地质特征[J]. *岩石学报*, 27(10): 2 827~2 832.
- 樊祺诚, 赵勇伟, 隋建立, 等. 2012. 大兴安岭诺敏河第四纪火山岩分期: 岩石学, 年代学与火山地质特征[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 092~1 098.
- 隋建立, 樊祺诚, 徐义刚. 2012. 大兴安岭诺敏河石榴石橄榄岩捕虏体的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 130~1 138.
- 隋建立, 李 霓, 樊祺诚, 等. 2014. 大兴安岭北部诺敏河地幔金云母及钾质地幔熔体研究[J]. *岩石学报*, 30(12): 3 587~3 594.