

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^{*}

隋建立^{1,2} 樊祺诚² 徐义刚¹

SUI JianLi^{1,2}, FAN QiCheng² and XU YiGang¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国地震局地质研究所活动构造与火山实验室, 北京 100029

1. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China*

2011-12-10 收稿, 2012-03-05 改回.

Sui JL, Fan QC and Xu YG. 2012. Discovery of peridotite xenoliths from the Nuomin river Quaternary volcanic field, the Great Xing'an Range, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1130–1138

Abstract The Nuomin river Quaternary volcanos are located in northern Great Xing'an Range, at the northern part of the North-South Gravity Lineament. Mantle xenoliths from these volcanos include abundant Sp-peridotite ($\text{Ol}_{40-55}\text{Opx}_{20-35}\text{Cpx}_{0-10}\text{Grt}_{5-25}$) and subordinate Gt-peridotite ($\text{Ol}_{45-65}\text{Opx}_{30-40}\text{Cpx}_{0-15}\text{Sp}_{0-10}$). The low Cpx mode (usually less than 3%) in these peridotites reveals that the mantle rocks are mainly harzburgites. Similar to mantle xenoliths recovered in Hahe area, most of the Nuomin river Sp-harzburgites have high-Mg[#] olivine (Fo_{91-92}) and high Cr[#] (31~47) chromite, indicating a refractory nature of the lithospheric mantle beneath the Great Xing'an Range. The plot of olivine mode against Fo contents in olivine further indicates the preservation of Proterozoic-Late Archean mantle in this area. Application of geothermobarometers to the mantle xenoliths suggests that the Gt-peridotites are equilibrated at a pressure of 2.14~2.33 GPa (corresponding to 70~75 km) and a temperature of 1114~1168°C. These data define a relatively high thermal gradient for the upper mantle beneath the Great Xing'an Range, similar to those for many Cenozoic volcanic fields in eastern China.

Key words Lithospheric mantle; Garnet peridotite and spinel peridotite; Mineral chemistry; Nuomin river Quaternary volcanos

摘 要 在重力梯度带北端的大兴安岭诺敏河第四纪火山岩中发现石榴石相和尖晶石相地幔橄榄岩捕虏体, 其矿物组成分别为 $\text{Ol}_{40-55}\text{Opx}_{20-35}\text{Cpx}_{0-10}\text{Grt}_{5-25}$ 和 $\text{Ol}_{45-65}\text{Opx}_{30-40}\text{Cpx}_{0-15}\text{Sp}_{0-10}$ 。两种地幔相橄榄岩均以方辉橄榄岩为主, 说明研究区上地幔具有难熔的特点。其高 Mg[#] 橄榄石 Fo_{91-92} 和高 Cr[#] Cr_{31-47} 尖晶石特征与南区哈河的地幔橄榄岩特征一致。在橄榄石含量与 Fo 图解上, 敏河橄榄岩包体落在太古代和元古代地幔区域, 揭示大兴安岭地区岩石圈地幔可能保留了较多古老的残余地幔。根据石榴石橄榄岩的平衡温压条件 (1114~1168°C 和 2.14~2.33 GPa), 推测来源深度为 70~75 km。这些数据暗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相似。

关键词 岩石圈地幔特征; 石榴石和尖晶石橄榄岩捕虏体; 矿物化学; 诺敏河第四纪火山

中图法分类号 P588.125

1 引言

研究表明 (O'Reiley, 1981; Klemme and O'Neill, 2000),

在上地幔温度下, 大于 1.6 GPa 时尖晶石相橄榄岩就会向石榴石相转变; 而地幔温度和成分的变化也会显著影响相变深度 (Grütter *et al.*, 2006), 在 Cr 饱和条件下, Sp/Gt 相转变的压力可以达到 2.4 GPa (Klemme, 2004)。对于中国东部岩石

^{*} 本文受国家自然科学基金项目 (40972048) 和同位素地球化学国家重点实验室开放基金联合资助。

第一作者简介: 隋建立, 男, 1974 年生, 博士后, 主要从事火山与地球内部化学研究, E-mail: suijianli@ies.ac.cn

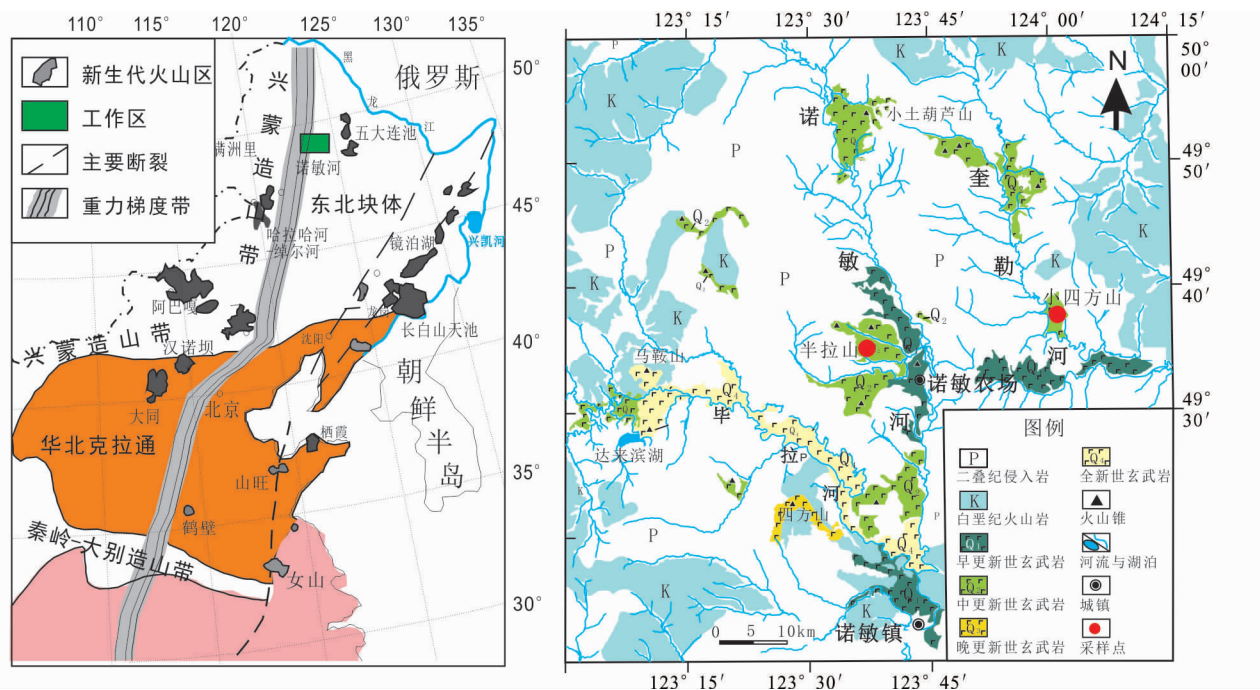


图1 诺敏河第四纪火山岩分布和采样位置图(据樊祺诚等,2012 修改)

Fig.1 Map showing distribution of Quaternary volcanic rocks in the Nuomin river area and sampling locations of mantle xenoliths (modified after Fan *et al.*, 2012)

圈,实验研究(樊祺诚等,1997)和大量地质实例研究(Fan and Hooper, 1989; Fan *et al.*, 2000; 樊祺诚等,2008; Su *et al.*, 2011)表明,Sp/Grt相变发生在55~70km的范围。中国东部尽管发生了岩石圈减薄和克拉通破坏,但是岩石圈厚度仍有60~120km(Menzies *et al.*, 1993, 2007; Xu, 2007; Zhu and Zheng, 2009),所以岩石圈下部岩石组成为仍然是石榴石相或者石榴石/尖晶石过渡相。由于对石榴石相橄榄岩有可靠的温压计(Xu *et al.*, 1993; Huang and Xu, 2010),因此含石榴石地幔岩捕虏体是研究深部岩石圈动力学演化的关键样品之一。

中国东部新生代发生大规模的岩浆活动,许多产地携带大量地幔岩捕虏体为研究岩石圈地幔组成和演化提供了直接证据。但大部分地幔岩捕虏体为尖晶石相橄榄岩,只有在中国东部少数几个地方和西秦岭等地发现有石榴石橄榄岩包体(Fan and Hooper, 1989; 曹荣龙和朱寿华,1990; 金淑燕和潘顺安,1998; 喻学惠,1991; Su *et al.*, 2011)。东北地区是我国新生代火山作用最强烈的地区,如天池火山、龙岗火山、镜泊湖火山、五大连池火山等(图1左),但这些火山携带的多为尖晶石相地幔橄榄岩。直到最近几年才在大兴安岭中北部哈拉哈河-绰尔河第四纪火山(以下简称哈河火山区)中发现了石榴石相地幔橄榄岩(樊祺诚等,2008),为研究这一地区深部岩石圈地幔的组成和过程打开了窗口。本文根据我们在诺敏河第四纪火山岩中新发现的石榴石相和尖晶石相两种地幔橄榄岩,在岩石学、矿物学和温压平衡条件研究基础上,初步探讨大兴安岭地区岩石圈地幔的组成、结构和

古地温特征。

2 地质背景

诺敏河火山区(图1)位于大兴安岭北部东麓,在嫩江上游的诺敏河及其支流毕拉河、奎勒河流域,分布24座保存较好的第四纪火山,火山岩面积600多平方千米,火山岩类型属于钾质火山岩系列(樊祺诚等,2012)。本文研究的样品来自于两个地区:半拉山中更新世熔岩台地和小四方山中更新世火山锥(图1右)。

半拉山(当地俗称羊圈)位于诺敏农场西北,为中更新世火山,玄武岩风化较强,玄武岩中被剥落的地幔岩捕虏体堆放于田间地头,唾手可得,捕虏体大小约5~30cm。小四方山火山位于奎勒河上游的黑桦梁子村,火山锥高约50m,破火山口朝向西,锥体西坡挖开的剖面露出大量地幔捕虏体,岩石类型与半拉山基本相同,但捕虏体大小相对较小(3~10cm)。

3 岩石学

诺敏河地幔捕虏体的岩石类型主要是尖晶石相橄榄岩,其中以方辉橄榄岩为主,二辉橄榄岩相对较少;石榴石相橄榄岩捕虏体比较罕见(野外粗略估计约占1%),也是以方辉橄榄岩为主。地幔捕虏体一般呈浑圆状,表面有锈红色风化

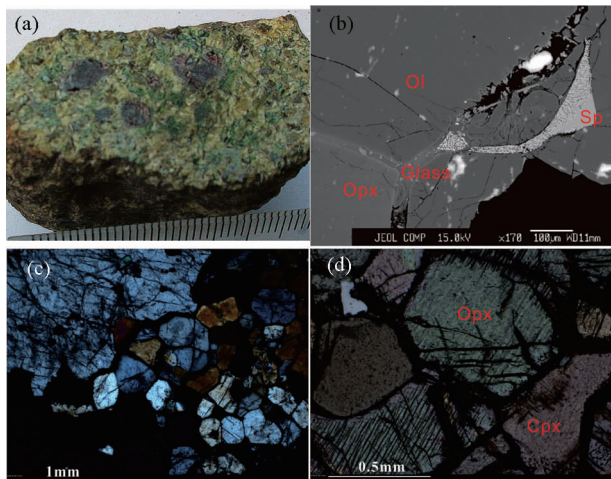


图2 诺敏河地幔橄榄岩的岩相学特征

(a)-石榴石-二辉橄榄岩,手标本;(b)-熔体-矿物反应,电子探针背散射图像;(c)-残斑结构,显微照片;(d)-辉石出溶结构,显微照片

Fig. 2 Petrographic features of the mantle xenoliths from Nuomin river

壳。绝大部分石榴石发育次变边,风化面呈土灰色,但是切开标本仍可以看到新鲜的石榴石呈玫瑰红色、粗粒状(0.5~1.5cm)(图2a);一些捕虏体矿物边界和裂隙有熔体包裹体,并可能与尖晶石、辉石等反应形成反应边(图2b);捕虏体以残斑结构为主,局部有重结晶特点(图2c);部分辉石矿物显示出溶条带(图2d)。

根据显微镜下观察统计,石榴石橄榄岩矿物组成为 $Ol_{40-55}Opx_{20-35}Cpx_{0-10}Grt_{5-25}$,尖晶石橄榄岩矿物组成为 $Ol_{45-65}Opx_{30-40}Cpx_{0-15}Sp_{0-10}$,大部分橄榄岩中单斜辉石极少(不到3%),所以岩石类型以方辉橄榄岩为主,这与邻区哈河第四纪火山岩中橄榄岩捕虏体的情况类似(赵勇伟和樊祺诚,2011)。以难熔方辉橄榄岩为主地幔橄榄岩捕虏体的存在,说明大兴安岭下岩石圈地幔具有难熔的残余地幔的特征。部分诺敏河捕虏体矿物和矿物粒间含有囊状熔体(图2b),其特征与相邻的哈河地幔橄榄岩中的熔体(樊祺诚等,2008)相似。这可能说明本区上地幔经历了熔体与难熔橄榄岩的相互作用,少量相对饱满的二辉橄榄岩的成因可能与此过程有关(Zhang *et al.*, 2002; Zhang, 2005; Tang *et al.*, 2008, 2012)。橄榄岩中辉石出溶结构(图2d)则记录了这种地幔演化过程的温度、压力的变化(Huang *et al.*, 2007)。

4 矿物化学

我们采用中国科学院地质与地球物理所 SX500 型电子探针针对各类橄榄岩和辉石岩捕虏体的矿物成分做了系统的分析,分析用的样品为标准的0.03mm岩石薄片,表面碳质镀膜,仪器的工作条件为10kV加速电压、20mA电流、1 μ m

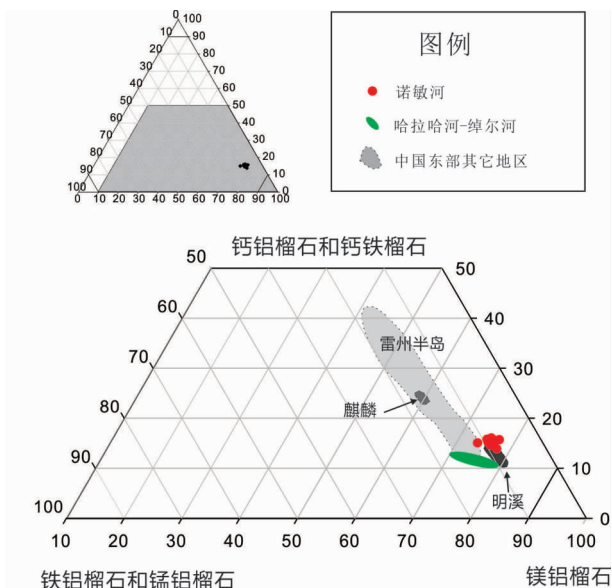


图3 地幔石榴石矿物组成三元图解(据 Huang *et al.*, 2007)

Fig. 3 Chemical variation of garnet in mantle xenoliths (after Huang *et al.*, 2007)

束斑直径,分析结果见表1。

石榴石橄榄岩中的石榴石主要成分为镁铝榴石 Pyr_{66-72} ,以及少量铁铝榴石 Alm_{13-14} 、钙铝榴石 Gro_{6-10} 、铬铝榴石 Ura_{4-7} ,其它组分不超过5%。根据石榴石 $Pyr(Mg)$ 、 $Gro + And(FeMn)$ 、 $Alm + Spe(Ca)$ 组分做三元图解(图3),可以看出中国东部石榴石主要是镁铝榴石和铁铝榴石固溶体系列(Huang *et al.*, 2007)。诺敏河石榴石落在在中国东部石榴石分布范围的下方,更加富镁贫钙,大致与福建明溪和哈河(樊祺诚等,2008)的石榴石成分相当。

石榴石钙、铬组成反映了地幔构造背景和压力。 $CaO-Cr_2O_3$ 关系图上(图4a)诺敏地幔石榴石具有相对较高的Ca含量(5%~7%)和相对较低的Cr含量(1.6%~2.2%);而哈河仅有一个石榴石数据(CaO 5.6%、 Cr_2O_3 1.8%)与诺敏河类似,其它石榴石钙含量更低(CaO 1.6%~2.3%)、而铬含量略高(Cr_2O_3 0.8%~2.8%),落在Sobolev(1977)定义的低钙方辉橄榄岩区间。相应的石榴石 $CaO-Cr_2O_3$ 压力关系图(图4b),诺敏河火山落在18~22kb(1.9~2.3GPa)之间,而哈河火山地幔石榴石橄榄岩来源更深,大致在22~28kb,这个结果与下文温度压力计算基本吻合。

石榴石相橄榄岩中的斜方辉石($Wo_2En_{89}Fs_9$)和尖晶石相橄榄岩中的斜方辉石($Wo_{1-2}En_{90-92}Fs_{8-9}$),均为顽火辉石($En_{>88}$),但成分略有变化,尖晶石相中更加富镁。斜方辉石中 Al_2O_3 的含量为3.5%~4%,个别样品低至2.6%,总体低于邻区哈河火山区。单斜辉石为绿色的铬透辉石($Wo_{1-2}En_{90-92}Fs_{8-9}$), Cr_2O_3 含量为1%~1.5%,对应单位辉石分子中Cr原子含量为0.2~0.4,与邻区哈河火山捕虏体相似。

表 1 诺敏河火山地幔捕虏体电子探针分析数据 (wt%)
Table 1 EPMA analyses (wt%) of mantle xenoliths from the Nuomin river volcanic field

岩相		石榴石相地幔橄辉岩																									
样品号	08NMB01					08NMB011					08NMB02					08NMB09					08NMB10					09NMB52	
矿物	Ol 45	Opx 20	Cpx 10	Grt 25	Ol 50	Opx 35	Cpx 5	Grt 10	Ol 65	Opx 35	Grt 10	Ol 45	Opx 40	Grt 15	Ol 50	Opx 30	Grt 20	Ol 60	Opx 25								
SiO ₂	41.45	55.37	52.55	42.79	41.01	55.17	52.49	42.26	40.94	55.17	42.71	42.90	42.87	41.46	55.39	42.92	42.56	40.74	55.45								
TiO ₂	0.04	0.29	0.34	0.12	0.00	0.24	0.44	0.23	0.01	0.24	0.28	0.38	0.27	0.03	0.29	0.34	0.16	0.00	0.12								
Al ₂ O ₃	0.00	3.63	4.28	22.31	0.02	3.94	5.26	22.52	0.05	3.94	22.23	21.32	23.21	0.02	3.83	22.67	21.83	0.02	3.99								
Cr ₂ O ₃	0.04	0.65	1.13	1.60	0.04	0.73	1.40	1.75	0.04	0.73	2.08	2.39	1.57	0.03	0.50	1.74	2.24	0.04	0.78								
FeO	8.22	5.74	2.93	6.81	9.24	6.03	3.05	6.99	9.26	6.03	7.13	6.68	7.58	8.92	5.77	6.39	6.96	8.94	5.71								
MnO	0.08	0.15	0.07	0.34	0.12	0.13	0.09	0.30	0.11	0.13	0.32	0.27	0.37	0.10	0.13	0.34	0.27	0.11	0.12								
MgO	48.75	32.22	16.33	19.95	49.32	32.42	16.08	20.82	49.44	32.42	20.07	18.79	21.01	48.03	31.81	18.72	19.63	49.70	33.14								
CaO	0.05	0.82	19.80	5.15	0.08	0.99	18.74	4.98	0.06	0.99	5.32	5.86	4.95	0.07	0.98	5.88	5.69	0.06	0.93								
Na ₂ O	0.01	0.10	1.33	0.02	0.02	0.19	1.83	0.03	0.01	0.19	0.02	0.00	0.04	0.02	0.12	0.33	0.02	0.00	0.13								
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00								
NiO	0.48	0.14	0.08	0.00	0.35	0.10	0.06	0.02	0.44	0.10	0.03	0.05	0.01	0.30	0.11	0.05	0.20	0.34	0.09								
Total	99.14	99.11	98.84	99.12	100.20	99.94	99.45	99.89	100.36	99.94	100.19	98.65	101.86	98.98	98.95	99.37	99.26	99.36	99.95	100.45							
Si	1.02	1.93	1.92	3.05	1.00	1.92	1.91	3.00	1.00	1.91	3.01	3.08	2.98	1.02	1.93	3.05	3.05	1.00	1.91								
Al	0.00	0.15	0.18	1.87	0.00	0.14	0.23	1.88	0.00	0.16	1.85	1.80	1.90	0.00	0.16	1.90	1.84	0.00	0.16								
Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00								
Cr	0.00	0.02	0.03	0.09	0.00	0.02	0.04	0.10	0.00	0.02	0.13	0.14	0.09	0.00	0.01	0.10	0.02	0.00	0.02								
Ni	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00								
Fe	0.17	0.17	0.09	0.41	0.19	0.17	0.09	0.41	0.19	0.17	0.42	0.40	0.44	0.18	0.17	0.38	0.17	0.41	0.16								
Mn	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00								
Mg	1.78	1.67	0.89	2.12	1.79	1.70	0.87	2.20	1.80	1.67	2.16	2.01	2.18	1.76	1.65	1.98	1.76	2.09	1.70								
Ca	0.00	0.03	0.78	0.39	0.00	0.03	0.73	0.38	0.00	0.04	0.39	0.45	0.37	0.00	0.04	0.45	0.03	0.42	0.03								
Na	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.01	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.05	0.01	0.02	0.01								
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00								
Total	2.98	3.99	4.01	7.96	3.00	4.00	4.01	8.01	3.00	4.00	8.00	7.93	8.01	2.98	3.98	7.95	7.99	3.00	4.00								
Mg [#]	91.4	90.9	90.9	83.9	90.5	91.0	90.4	84.1	90.5	90.5	83.6	83.4	83.2	90.6	90.8	83.9	83.7	90.8	91.2								
En		89.4	50.7			89.4	51.4			88.8					89.0				89.5								
Fs		73.6	89.0			68.5	84.7			69.3					75.3				74.2								
Wo		0.4	9.5			0.6	12.9			0.7					0.5				0.5								
Pyr				71.9				73.5			72.4	69.1	72.6			66.2											
Alm				13.8				13.3			13.9	13.8	14.4			12.7											
Gro				8.8				6.9			6.3	8.5	7.5			10.1											
Ura				4.6				4.9			6.4	7.0	4.3			4.9											

续表 1
Continued Table 1

岩相		尖晶石相地幔橄辉岩																												
样品号	08NMB05						08NMB06						08NMB07						08NMB19						08NMB23					
矿物	Ol 55	Opx 45	Cpx <5	Ol 60	Opx 35	Sp 5	Ol 65	Opx 35	Ol 45	Opx 35	Cpx 15	Sp 5	Ol 68	Opx 35	Cpx 10	Sp 5	Ol 50	Opx 35	Cpx 10	Sp 5	Ol 50	Opx 35	Cpx 10	Sp 5						
SiO ₂	41.01	55.50	52.87	40.914	55.83	0.09	41.04	56.19	41.34	56.69	53.71	0.00	0.68	40.68	55.28	52.05	0.01	40.68	55.28	52.05	0.01	40.68	55.28	52.05	0.01					
TiO ₂	0.02	0.29	0.86	0.00	0.09	0.51	0.02	0.06	0.00	0.04	0.20	0.11	0.05	0.96	0.12	0.53	0.07	0.00	0.12	0.53	0.07	0.00	0.12	0.53	0.07					
Al ₂ O ₃	0.02	3.48	2.83	0.02	3.67	36.74	0.01	2.61	0.00	2.59	3.27	40.82	39.54	28.36	4.06	5.79	57.48	0.01	4.06	5.79	57.48	0.01	4.06	5.79	57.48					
Cr ₂ O ₃	0.06	0.71	1.48	0.09	0.74	30.98	0.04	0.62	0.04	0.52	1.08	26.78	29.91	37.73	0.29	0.67	9.31	0.01	0.29	0.67	9.31	0.01	0.29	0.67	9.31					
FeO	8.64	5.54	4.34	8.20	5.35	13.63	8.42	5.29	7.77	5.13	1.66	12.26	8.61	15.79	6.08	2.32	11.09	9.24	6.08	2.32	11.09	9.24	6.08	2.32	11.09					
MnO	0.12	0.14	0.10	0.12	0.12	0.19	0.12	0.13	0.13	0.12	0.08	0.22	0.19	0.17	0.17	0.08	0.15	0.13	0.17	0.08	0.15	0.13	0.17	0.08	0.15					
MgO	50.10	33.54	18.97	49.52	33.56	18.28	49.77	33.79	51.16	34.87	16.56	18.57	20.51	16.93	33.42	15.10	20.44	49.84	33.42	15.10	20.44	49.84	33.42	15.10	20.44					
CaO	0.09	0.80	17.55	0.08	0.99	0.01	0.07	0.83	0.01	0.43	22.83	0.01	0.00	0.01	0.46	21.38	0.00	0.03	0.46	21.38	0.00	0.03	0.46	21.38	0.00					
Na ₂ O	0.01	0.12	0.87	0.02	0.09	0.01	0.01	0.10	0.00	0.01	0.87	0.00	0.03	0.13	0.03	1.47	0.00	0.00	0.03	1.47	0.00	0.00	0.03	1.47	0.00					
K ₂ O	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00					
NiO	0.36	0.07	0.05	0.40	0.10	0.28	0.36	0.14	0.42	0.10	0.04	0.20	0.34	0.19	0.08	0.00	0.39	0.41	0.08	0.00	0.39	0.41	0.08	0.00	0.39					
Total	100.43	100.21	99.95	99.38	100.55	100.74	99.86	99.77	100.89	100.51	100.30	98.95	99.20	100.87	100.01	99.39	98.94	100.35	100.01	99.39	98.94	100.35	100.01	99.39	98.94					
Si	1.00	1.91	1.92	1.00	1.91	0.00	1.00	1.94	1.00	1.94	1.94	0.00	0.00	0.02	0.99	1.91	0.00	0.99	1.91	1.89	0.00	0.99	1.91	1.89	0.00					
Al	0.00	0.14	0.12	0.00	0.15	1.22	0.00	0.11	0.00	0.10	0.14	1.35	1.30	0.98	0.16	0.26	1.77	0.00	0.16	0.26	1.77	0.00	0.16	0.26	1.77					
Ti	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00					
Cr	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.69	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.59	0.70	0.87	0.01	0.02	0.19	0.00	0.01	0.02	0.19	0.00	0.01	0.02	0.19					
Ni	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00					
Fe	0.18	0.16	0.13	0.17	0.15	0.32	0.17	0.15	0.16	0.15	0.05	0.29	0.32	0.39	0.18	0.07	0.24	0.19	0.18	0.07	0.24	0.19	0.18	0.07	0.24					
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Mg	1.82	1.72	1.03	1.81	1.72	0.77	1.81	1.74	1.84	1.78	0.89	0.78	0.72	0.74	1.72	0.82	0.80	1.81	1.72	0.82	0.80	1.81	1.72	0.82	0.80					
Ca	0.00	0.03	0.68	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.88	0.00	0.00	0.00	0.02	0.83	0.00	0.00	0.02	0.83	0.00	0.02	0.83	0.00	0.00					
Na	0.00	0.01	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00					
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Total	3.00	4.01	4.01	3.00	4.00	3.03	3.00	4.00	3.00	4.00	4.00	3.03	3.01	3.04	4.01	4.01	3.02	3.01	4.00	4.01	3.02	3.01	4.00	4.01	3.02					
Mg [#]	91.2	91.5	88.6	91.5	91.8		91.3	91.9	92.1	92.4	94.5				90.7	91.9		90.6	90.7	91.9					9.8					
Cr [#]						36.1						30.6	35.5	47.2																
En		90.1	55.8		90.0			90.5		91.6	48.7																			
Fs		8.4	7.2		8.1			7.9		7.6	2.8																			
Wo		1.5	37.1		1.9			1.6		0.8	48.4																			

注: Mg[#] = 100 * Mg/(Mg + Fe); Cr[#] = 100 * Cr/(Cr + Al); 阳离子计算, 橄榄石以 4 个 O 原子为基础, 辉石 6 个 O, 石榴石 12 个 O, 尖晶石 6 个 O

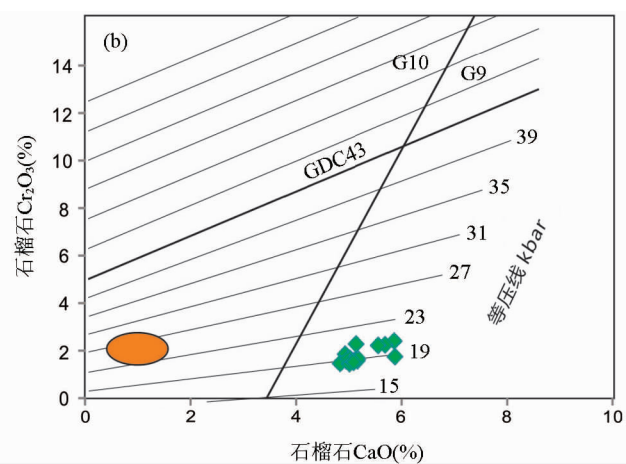
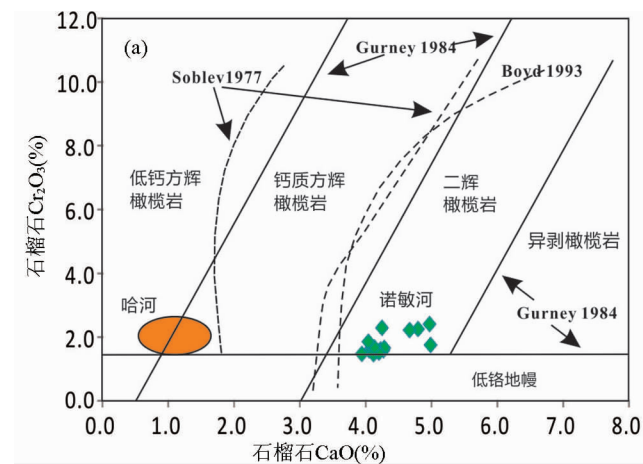


图4 地幔石榴石 $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ 相关关系分类图和平衡压力(据 Grütter *et al.*, 2006)

Fig.4 $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ classification diagram of mantle garnet and equilibrium pressures (after Grütter *et al.*, 2006)

辉岩中的斜方辉石 ($\text{Wo}_{1-2}\text{En}_{77-85}\text{Fs}_{13-22}$) 为古铜辉石, 单斜辉石主要是普通辉石 ($\text{Wo}_{41-42}\text{En}_{46-50}\text{Fs}_{9-12}$), 与橄榄岩明显不同。

诺敏河火山区尖晶石相橄榄岩中, 除了样品 08NMB23 之外 ($\text{Fo} = 90.6$), 其余样品的橄榄石镁指数普遍较高 $\text{Fo}_{91.3-92.4}$, 属于难熔的高镁橄榄石 (Zhang *et al.*, 2007; 吴福元等, 2008); 对应尖晶石主要为褐红色的铬尖晶石, 具有高铬低铝的特点 (Cr_2O_3 12% ~ 16%、 Al_2O_3 28% ~ 41%), 铬指数 $\text{Cr}^\#$ 30.6 ~ 47.2, 与中国东部方辉橄榄岩的铬尖晶石成分一致 (Fan and Hooper, 1989), 推测诺敏岩石圈上地幔的主体是难熔的残余地幔。与邻区哈河的尖晶石相地幔橄榄岩 (赵勇伟和樊祺诚, 2011) 特征一致, 暗示大兴安岭地区岩石圈地幔保留了较多古老的难熔残余地幔。

从橄榄石的百分含量 (Ol mode %) 与其 Fo 的相关图解 (图 5) 中, 同样可以发现大兴安岭诺敏河与哈河地幔橄榄岩 (包括石榴石相和尖晶石相两类橄榄岩) 已经偏离 Boyd (1989) 定义的大洋地幔趋势、靠近太古代和元古代地幔区域, 而中国东部大部分玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体覆盖在大洋趋势上 (Xu, 2001), 表明大兴安岭岩石圈地幔具有接近古老地幔的特征。

5 平衡温度压力计算

温压计算的数据取舍, 我们遵循两个原则: (1) 选择新鲜的矿物做电子探针分析, 温压计算的矿物对要相邻。因为随着微区分析技术的发展, 越来越多的证据显示矿物微观尺度的地球化学不均一性, 所以要尽可能利用相邻矿物对的平衡关系, 避免矿物地球化学不均一性影响; (2) 用矿物镁指数 $\text{Mg}^\#$ 检验剔除异常矿物值 (Huang and Xu, 2010; Wu and Zhao, 2011), 因为地质温度计、压力计的理论依据是化学反应的热力学原理, 平衡矿物间的元素分配系数是温度和压力

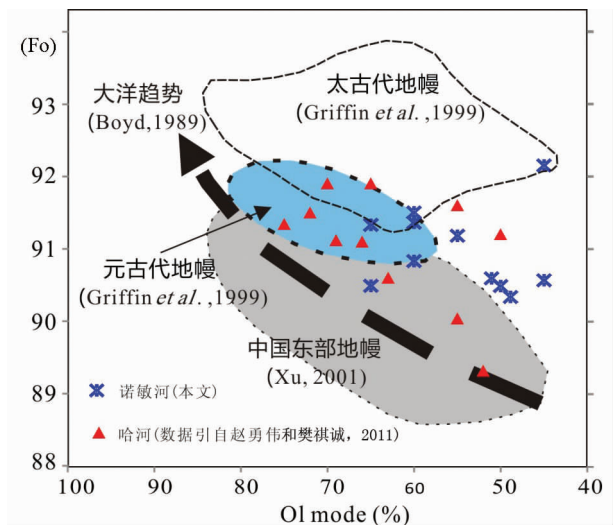


图5 Fo-olivine mode 图解

Fig.5 Fo-olivine mode diagram

的函数, 而异常的矿物镁指数值不代表平衡反应结果。

适用于地幔岩地质温度和压力计很多, 各有利弊, 最近 Huang and Xu (2010) 和 Wu and Zhao (2011) 采做了系统的总结对比。对于石榴石-二辉橄榄岩的温度, 一般认为 Wells (1977) 温度偏低, 推荐用 Brey and Köhler (1990) 温度公式计算; 对于压力, 几种版本的石榴石-斜方辉石压力计 Taylor (1998)、Nickel and Green (1985)、Brey *et al.* (2008) 都可用, 为了方便与中国东部石榴石地幔比较, 推荐用 Nickel and Green (1985)。石榴石方辉橄榄岩中缺少单斜辉石, 不能用二辉石温度计, 我们用 Grt-Opx 矿物对 (Harley, 1984) 同时计算了石榴石-二辉橄榄岩和方辉橄榄岩的平衡温度, 用于相互比较。温度、压力结果见表 2。

比较上述温度压力计算结果 (表 2), 诺敏河石榴石-二辉橄榄岩的压力为 2.14 ~ 2.33 GPa (相当于 70 ~ 75 km), 温度为

表2 诺敏河石榴石相地幔岩温度(℃)和压力(GPa)计算结果

Table 2 *P-T* estimation of mantle xenoliths from Nuomin river Quarternary volcanic rocks

岩性		石榴石二辉橄榄岩				
	计算方法	08NMB01	08NMB01	08NMB11	08NMB11	08NMB11
温度	Brey and Köhler(1990)	1114	1116	1144	1159	1168
	Taylor(1998)	1236	1241	1237	1253	1252
	Wells(1977)	1019	1022	1020	1033	1031
	Harley(1984)	1215	1210	1250	1236	1186
压力	Brey and Köhler(1990)	2.02	2.09	1.97	2.18	2.03
	Brey <i>et al.</i> (2008)	1.82	1.90	1.77	2.01	1.86
	Nickel and Green(1985)	2.20	2.25	2.14	2.33	2.21

岩性		石榴石方辉橄榄岩				
	计算方法	08NMB02	08NMB02	08NMB02	08NMB09	08NMB10
温度	Harley(1984)	1232	1223	1236	1207	1161
压力	Brey and Köhler(1990)	1.77	1.73	1.73	2.05	1.76
	Brey <i>et al.</i> (2008)	1.61	1.57	1.50	1.89	1.59

1114~1168℃。表2对比显示石榴石方辉橄榄的温度与石榴石二辉橄榄岩大致相同,而压力大约低0.3GPa(相当于60~65km)。温度和压力计算显示,诺敏河比哈河(2.36GPa)压力略低,与前文石榴石CaO-Cr₂O₃关系(图4b)的结果一致,相互印证,说明前者来源相对较浅。

由于尖晶石相橄榄岩中的单斜辉石极少,个别样品的平衡温压计算结果也不理想,故本文未采纳。

诺敏河石榴石二辉橄榄岩平衡温度和压力反映了比较高的地温梯度,与邻区哈河石榴石二辉橄榄岩的研究结果(樊祺诚等,2008)类似,表明大兴安岭地区现代岩石圈地幔具有大洋型地温梯度特征,与中国东部新生代火山岩地幔捕虏体研究结果(徐义刚等,1995;Xu *et al.*, 1996; Lin *et al.*, 1998;樊祺诚和隋建立,2009;Huang and Xu,2010)一致,也与地球物探测结果大致吻合。地球物理探测研究表明,中国东部华北和东北地区地壳厚度为~40km(马杏垣,1989)、岩石圈厚度为80~90km(方盛明等,2001);An and Shi (2006)等通过温度场反演岩石圈厚度为100 km左右;而全球深震探测研究(Ai and Zhang, 2003; Zhao, 2004)显示,西太平洋板片滞留在中国东部的660km地幔过渡带,俯冲板片向西到大兴安岭、太行山一带。这些地球物理证据,一方面说明大兴安岭地区岩石圈厚度比较薄,另一方面说明上地幔深部长期扰动的存在,所以能够获得比较高的地温梯度。

6 结论

(1)大兴安岭诺敏河第四纪火山岩中地幔岩捕虏体,包括石榴石相和尖晶石相两种地幔橄榄岩,它们均以方辉橄榄岩为主。两种地幔橄榄岩的岩石类型和矿物学特征(高Mg[#]橄榄石和高Cr[#]尖晶石)与南区哈河的地幔橄榄岩特征相一致。在橄榄石百分含量与Fo的相关图中,诺敏河样品落在太古代-元古代地幔区域,显示该区上地幔具有古老地幔的特点。

(2)石榴石橄榄岩的平衡温压分别为1114~1168℃和2.14~2.33GPa,因此其来源深度为70~75km。这些数据暗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相似。

致谢 电子探针分析得到中科院地质与地球物理研究所电子探针实验室的毛骞、马玉光的大力帮助,表示感谢。感谢两位审稿专家张招崇教授和汤艳杰副研究员对本文提出了宝贵的意见。

References

Ai Y, Zheng T, Xu W, He Y and Dong D. 2003. A complex 660km discontinuity beneath Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1–2): 63–71

An M and Shi Y. 2006. Lithospheric thickness of the Chinese continent. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(3–4): 257–266

Boyd FR. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1–2): 15–26

Brey GP and Köhler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 31(6): 1353–1378

Brey GP, Bulatov VK, Gurnis AV and Lahaye Y. 2008. Experimental melting of carbonated peridotite at 6–10GPa. *J. Petrol.*, 49(4): 797–821

Cao RL and Zhu SH. 1990. Ryacolite-olivine-diopside mineral assemblages of mantle metasomatism in garnet lherzolite xenoliths from Xilong, Zhejiang Province. In: Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (ed.). *Collected Papers on Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China*. Beijing: Seismological Publishing House, 34–44 (in Chinese)

Fan QC and Hooper PR. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. *J. Petrol.*, 30(5): 1117–1158

Fan QC, Liu RX, Xie HS, Zhang YM, Xu P and Lin ZR. 1997. Experimental study of spinel-garnet phase transition in upper mantle and its significance. *Science in China (Series D)*, 40(4): 383–389

- Fan QC, Sui JL, Zhao YW, Sun Q, Li N and Du XX. 2008. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2563–2568 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC and Sui JL. 2009. Phase transition of upper mantle rock in eastern China and its significance. *Earth Science*, 34(3): 387–391 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Zhao YW, Sui JL, Li DM and Wu Y. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1092–1098 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM, Zhang HF, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? *J. Petrol.*, 41(7): 933–950
- Fang SM, Yu QF and Zhang XK. 2001. Characteristics of the lithospheric bottom interface and seismicity in eastern China and its vicinity. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(4): 48–53 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, O'Reilly SY and Ryan CG. 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. In: Fei Y, Berta CM and Mysen BO (eds.). *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation*. Houston: Geochemical Society, 13–46
- Grütter H, Latti D and Menzies A. 2006. Cr-saturation arrays in concentrate garnet compositions from kimberlite and their use in mantle barometry. *J. Petrol.*, 47(4): 801–820
- Harley SL. 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(4): 359–373
- Huang XL, Xu YG, Lo CH, Wang RC and Lin CY. 2007. Exsolution lamellae in a clinopyroxene megacryst aggregate from Cenozoic basalt, Leizhou Peninsula, South China: Petrography and chemical evolution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(6): 691–705
- Huang XL and Xu YG. 2010. Thermal state and structure of the lithosphere beneath eastern China: A synthesis on basalt-borne xenoliths. *Journal of Earth Science*, 21(5): 711–730
- Jin SY and Pan SA. 1998. Mantle-derived xenoliths of spinel-garnet lherzolite from Nushan and their implications for petro-physics. *Earth Science*, 23(5): 475–479 (in Chinese with English abstract)
- Klemme S and O'Neill HS. 2000. The near-solidus transition from garnet lherzolite to spinel lherzolite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138(3): 237–248
- Klemme S. 2004. The influence of Cr on the garnet-spinel transition in the Earth's mantle: Experiments in the system $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ and thermodynamic modelling. *Lithos*, 77(1–4): 639–646
- Lin CY, Shi LB, Han XL and Zhang X. 1998. Thermal structure and rheology of the upper mantle beneath Zhejiang Province. *Science in China (Series D)*, 28(2): 97–104
- Ma XY. 1989. *Lithospheric Dynamics Atlas of China*. Beijing: China Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Menzies MA, Fan W and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. Geological Society, London, Special Publications, 76(1): 71–81
- Menzies M, Xu Y, Zhang H and Fan W. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 96(1–2): 1–21
- Nickel KG and Green DH. 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 73: 758–170
- O'Neill HSC. 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77(2): 185–194
- Sobolev NV. 1977. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. Ann Arbor, Michigan: Edwards Brothers, Inc.
- Su BX, Zhang HF, Tang YJ, Chisonga B, Qin KZ, Ying JF and Sakyi P. 2011. Geochemical syntheses among the cratonic, off-cratonic and orogenic garnet peridotites and their tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 100(4): 695–715
- Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Zhang J and Liu XM. 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 101: 435–452
- Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Su BX, Chu ZY, Xiao Y and Zhao XM. 2012. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean mantle through diverse melt refertilization. *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2012.1001.1006
- Taylor WR. 1998. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolites and garnet websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 172: 381–408
- Wells PRA. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62(2): 129–139
- Wu CM and Zhao GC. 2011. The applicability of garnet-orthopyroxene geobarometry in mantle xenoliths. *Lithos*, 125(1–2): 1–9
- Wu FY, Xu YG, Gao S and Zheng JP. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145–1174 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, O'Reilly SY, Zhou X and Griffin WL. 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust-mantle boundary at Qilin, southeastern China. *Lithos*, 38(1–2): 41–62
- Xu YG, Ross JV and Mercier JCC. 1993. The upper mantle beneath the continental rift of Tanlu, eastern China: Evidence for the intra-lithospheric shear zones. *Tectonophysics*, 225(4): 337–360
- Xu YG, Lin CY, Shi LB *et al.* 1995. A petrological paleogeotherm of the upper mantle of eastern China and its geological implications. *Science in China (Series B)*, 25(8): 874–881 (in Chinese)
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 747–757
- Xu YG. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. *Lithos*, 96(1–2): 281–298
- Yu XH. 1991. Mantle xenoliths and megacryst in ultramafic lamprophyres in Haoti, Gansu Province. *Geological Science and Technology Information*, 10(Suppl.): 97–107 (in Chinese)
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241–254
- Zhang HF. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3–4): 768–780
- Zhang HF, Nakamura E, Sun M, Kobayashi K, Zhang J, Ying JF, Tang YJ and Niu LF. 2007. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: Evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China Craton. *International Geology Review*, 49(7): 658–679
- Zhao D. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1–2): 3–34
- Zhao YW and Fan QC. 2011. Characteristics of lithospheric mantle beneath the Great Xing'an Range: Evidence from spinel peridotite xenoliths in the Halaha River and Chaoer River area. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2833–2841 (in Chinese with English abstract)
- Zhu R and Zheng T. 2009. Destruction geodynamics of the North China craton and its Paleoproterozoic plate tectonics. *Chinese Science*

Bulletin, 54(19): 3354–3366

附中文参考文献

曹荣龙, 朱寿华. 1990. 浙江西堍石榴石二辉橄榄岩包体中发现的透长石-橄榄石-透辉石地幔交代组合. 见: 中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会编. 中国上地幔特征与动力学论文集. 北京: 地震出版社, 34–44

樊祺诚, 刘若新, 谢鸿森, 张月明, 徐平, 林卓然. 1997. 上地幔尖晶石-石榴是相转变实验研究及其意义. 中国科学(D辑), 27(2): 109–114

樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 孙谦, 李霓, 杜星星. 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. 岩石学报, 24(11): 2563–2568

樊祺诚, 隋建立. 2009. 中国东部上地幔岩石相转变及其意义. 地球科学, 34(3): 387–391

樊祺诚, 赵勇伟, 隋建立, 李大明, 武颖. 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. 岩石学报, 28(4): 1092–1098

方盛明, 余钦范, 张先康. 2001. 中国东部及其邻域岩石圈底界面特征及地震活动性. 地球物理学报, 44(4): 48–53

金淑燕, 潘顺安. 1998. 女山玄武岩中央晶石-石榴石二辉橄榄岩包体及其岩石物理意义. 地球科学, 23(5): 475–479

马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社

吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145–1174

徐义刚, 林传勇, 史兰斌, Mercier JCC, Ross JV. 1995. 中国东部上地幔地温线及其地质意义. 中国科学(B辑), 25(8): 874–881

喻学惠. 1991. 甘肃宕昌好梯超镁铁煌斑岩中深源包体和巨晶. 地质科技情报, 10(增刊): 97–107

赵勇伟, 樊祺诚. 2011. 大兴安岭岩石圈地幔特征——哈拉哈河-绰尔河橄榄岩捕虏体的证据. 岩石学报, 27(10): 2833–2841