

# 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\*

樊祺诚 隋建立 赵勇伟 孙谦 李霓 杜星星

FAN QiCheng, SUI JianLi, ZHAO YongWei, SUN Qian, LI Ni and DU XingXing

中国地震局地质研究所, 北京 100029

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

2008-10-22 收稿, 2008-10-30 改回.

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

**Abstract** About 30 Quaternary volcanoes, which can be divided into two stages of Pleistocene and Holocene volcanoes, distribute in the area of Chaoyer Rive and Halaha River, middle of Daxin'anling Mountain Range. Many mantle xenoliths of spinel-and garnet-facies peridotites occur in the volcanic rocks. The garnet peridotites are mainly garnet lherzolites, with typical mineral assemblage of Ol + Opx + Cpx + Gt. Calculated  $P$ - $T$  condition of the garnet lherzolite (with fresh garnet, no kelyphite-rim) is 1164°C and 2.36 GPa, equals to the depth of 76km. This result agrees with former researches on  $P$ - $T$  conditions of other four-phase garnet lherzolite in eastern China, but differs from that of the five-phase spinel/garnet lherzolite (general less than 70km). The fact indicates that magmas of these volcanoes were derived from the mantle source in garnet-facies, which is deeper than 70km.

**Key words** Middle Daxing'an Mountain Range; Quaternary volcanoes; Xenoliths of garnet lherzolite; Petrology and mineralogy;  $P$ - $T$  condition

**摘要** 大兴安岭中部的绰尔河—哈拉河地区分布有近30座第四纪火山,初步分为更新世火山和全新世火山两期。火山岩中含有丰富的尖晶石橄榄岩和石榴石橄榄岩捕虏体,石榴石橄榄岩的类型主要是石榴石二辉橄榄岩。根据绰尔河新鲜的石榴石二辉橄榄岩  $P$ - $T$  平衡条件估计(1164°C, 2.36GPa),其形成深度约76km。这与中国东部其它地方四相共存的石榴石二辉橄榄岩类似,区别于五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩形成条件(<70km),证实它们是来自尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩相转变带之下深度超过70km的石榴石橄榄岩稳定区。

**关键词** 大兴安岭中部;第四纪火山;石榴石二辉橄榄岩捕虏体;岩石学与矿物学特征; $P$ - $T$ 平衡条件

中图分类号 P588.125

## 1 引言

中国东部新生代玄武岩中含有丰富的地幔橄榄岩捕虏体,其中尖晶石橄榄岩最为常见。石榴石橄榄岩则极为少见,笔者认为真正四相(Ol + Opx + Cpx + Gt)平衡共生的石榴石二辉橄榄岩只见于浙江新昌和福建闽清二地。而具有尖晶石相橄榄岩与石榴石相橄榄岩相转变带特征的五相(Ol + Opx + Cpx + Gt + Sp)平衡共生的尖晶石/石榴石橄榄岩,也仅

见于福建明溪、浙江西堍、安徽女山、河南鹤壁和河北汉诺坝等少数几个地方(Fan and Hooper, 1989; 樊祺诚和刘若新, 1990, 1994),这些少数稀缺样品为我们建立中国东部岩石圈组成结构提供了重要约束,一直是我们努力追寻的目标。最近,我们在大兴安岭中部第四纪火山岩中除了发现含有丰富的尖晶石橄榄岩,还发现十分难觅的石榴石橄榄岩捕虏体,这为探讨大兴安岭地区岩石圈地幔组成、演化和新生代火山岩浆起源提供了重要信息。

\* 国家自然科学基金(40772038)和地震行业专项(200808014)资助。

第一作者简介:樊祺诚,男,1948年生,研究员,主要从事火山与地球内部化学研究, E-mail: fqc@ies.ac.cn

## 2 火山地质背景

最新地质调查资料显示,在大兴安岭中部的绰尔河—哈拉河地区约 1000km<sup>2</sup> 内分布有近 30 座第四纪火山,火山活动持续到全新世。根据火山地质和年代学研究(刘嘉麒,1987;白志达等,2005;赵勇伟等,2008),可分为更新世火山和全新世火山两期,最新火山喷发活动距今约 2000 年(白志达等,2005)。这里火山岩浆与水的相互作用演绎了水火相容的地质奇观,汇聚了各种火山地貌(火山锥、熔岩隧道、结壳熔岩、渣状熔岩、熔岩冢、喷气锥、火山碎屑席等),以及与火山成因有关的各种湖泊(如明珠般的火山口湖、火山堰塞湖、低平火山口湖、火山熔岩塌陷湖等)和众多温泉,成为研究火山成因和喷发机理的难得场所,是我国又一处天然火山博物馆。随着阿尔山火山温泉国家地质公园的兴建,关注该区火山的学者也越来越多。我们在研究区多处火山岩中还发现来自地幔的橄榄岩捕虏体,特别是罕见的石榴石橄榄岩捕虏体的发现,带来了火山区的深部信息。

## 3 石榴石橄榄岩捕虏体类型与岩石学特征

绰尔河—哈拉河地区第四纪火山岩是一套碱性玄武岩,火山岩中超镁铁质捕虏体丰富,有尖晶石相和石榴石相橄榄岩两类,以及各种辉石岩和巨晶矿物。在绰尔河地区的卧牛泡子、德勒河、黑瞎洞、驼峰岭、岩山、地池等多处火山岩(火山地质参见赵勇伟等,2008,图 1)中都见有地幔橄榄岩捕虏体和辉石、歪长石等巨晶矿物。不同地点火山岩中所含石榴石橄榄岩与尖晶石橄榄岩数量多寡不一,对所采样品经室内分拣,卧牛泡子以石榴石橄榄岩占绝大多数,德勒河石榴石橄榄岩约占一半,黑瞎洞和驼峰岭只发现个别石榴石橄榄岩。石榴石橄榄岩大小一般 3cm~5cm,少数 >10cm,以浑圆状常见。

经显微镜观察统计,本区石榴石橄榄岩的矿物组成百分含量为 Ol<sub>45-65</sub>Opx<sub>10-25</sub>Cpx<sub>5-15</sub>Gt<sub>5-20</sub>,主要属于石榴石二辉橄榄岩。除极个别样品(O7WNP04)的石榴石保持新鲜,颗粒较大(1mm~2mm),在单偏光下透明,略显淡粉红色,保留较平直的晶体边缘和很窄的黑色边(图 1a)。其它所有样品的石榴石均遭受熔蚀和地幔交代作用,棕褐色浑圆状,边缘呈毛刺状(图 1b)。常见石榴石次蚀变边(kelyphite),由橄榄石、辉石、尖晶石等细粒矿物和基质组成,正交偏光下围绕蚀变的石榴石核心呈五颜六色环状镶边(图 1c)。橄榄石和两种辉石新鲜,少数样品可见矿物具定向排列和发育三联点结构(图 1d,e)。橄榄石和辉石颗粒内部含有丰富的流体包裹体(图 1f)。

## 4 石榴石二辉橄榄岩矿物化学与 P-T 平衡条件

石榴石二辉橄榄岩矿物测试分析在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,仪器型号为 CAMECA SX51,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 20nA,束斑 5μm。卧牛泡子(WNP)和德勒河(DHL)两地 9 个石榴石二辉橄榄岩矿物电子探针分析结果见表 1。石榴石二辉橄榄岩的橄榄石为镁橄榄石(Fo<sub>89-91</sub>),NiO 含量 0.37%~0.47%。斜方辉石主要为顽火辉石,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 分别为 4%~5%和 1%~2%,少数古铜辉石相对富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(6%~7%)和 CaO(2%~3%)。单斜辉石为铬透辉石,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量一般变化于 1.0%~1.5%,个别小于 1%。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>一般变化于 4%~6%,个别大于 7%。石榴石富 MgO(21%~31%)、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1%~3%),其镁铝石榴石组分含量很高(Pyr=71~79)。尖晶石见于石榴石次蚀变边,主要呈淡褐色或灰绿色的富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(53%~63%)贫 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4%~15%)的铝尖晶石,区别于中国东部五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩中与橄榄石、辉石平衡共生的铬尖晶石。上述矿物学特征与中国东部新生代玄武岩中的石榴石二辉橄榄岩矿物化学成分相符(Fan and Hooper,1989)。

尽管目前在估算地幔橄榄岩形成条件出现一些新的温压计算方法,笔者比较了几种温压计,认为还是 Wells(1977)的二辉石温度计和 Nickel and Green(1985)的斜方辉石—石榴石压力计适用于石榴石二辉橄榄岩形成温压条件的计算。由于绰尔河地区的石榴石二辉橄榄岩的石榴石均已严重蚀变,本文只选择其中唯一新鲜的样品(O7WNP04)计算其平衡温压条件,分别为 1164℃和 2.36 GPa,根据深度计算公式  $D = 4.02 + 3.03P(\text{Ave Lallement } et al., 1980)$ ,相当于 76km。

## 5 讨论

中国东部新生代玄武岩中含有丰富的地幔橄榄岩,但绝大多数是橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石四种矿物相组成的尖晶石橄榄岩,只有新昌、闽清、明溪、西堍、女山、鹤壁、汉诺坝等少数几个地方发现含石榴石的橄榄岩,笔者又将其划分为四矿物相的石榴石橄榄岩(Ol + Opx + Cpx + Gt,见于新昌和闽清)和五矿物相的尖晶石/石榴石橄榄岩(Ol + Opx + Cpx + Sp + Gt,见于明溪、西堍、女山、鹤壁和汉诺坝),并结合高温高压下相转变实验结果,提出中国东部上地幔尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩相转变带深度为 55km~70km(Fan *et al.*, 1997)。本文报道的大兴安岭中部绰尔河石榴石橄榄岩与新昌、闽清类似,属于四相共存的石榴石二辉橄榄岩。这里将中国东部新生代玄武岩中发现的石榴石相二辉橄榄岩和尖晶石/石榴石二辉橄榄岩的矿物化学成分与 P-T 平衡条件计算结果归纳于表 2 和表 3,以便比较。

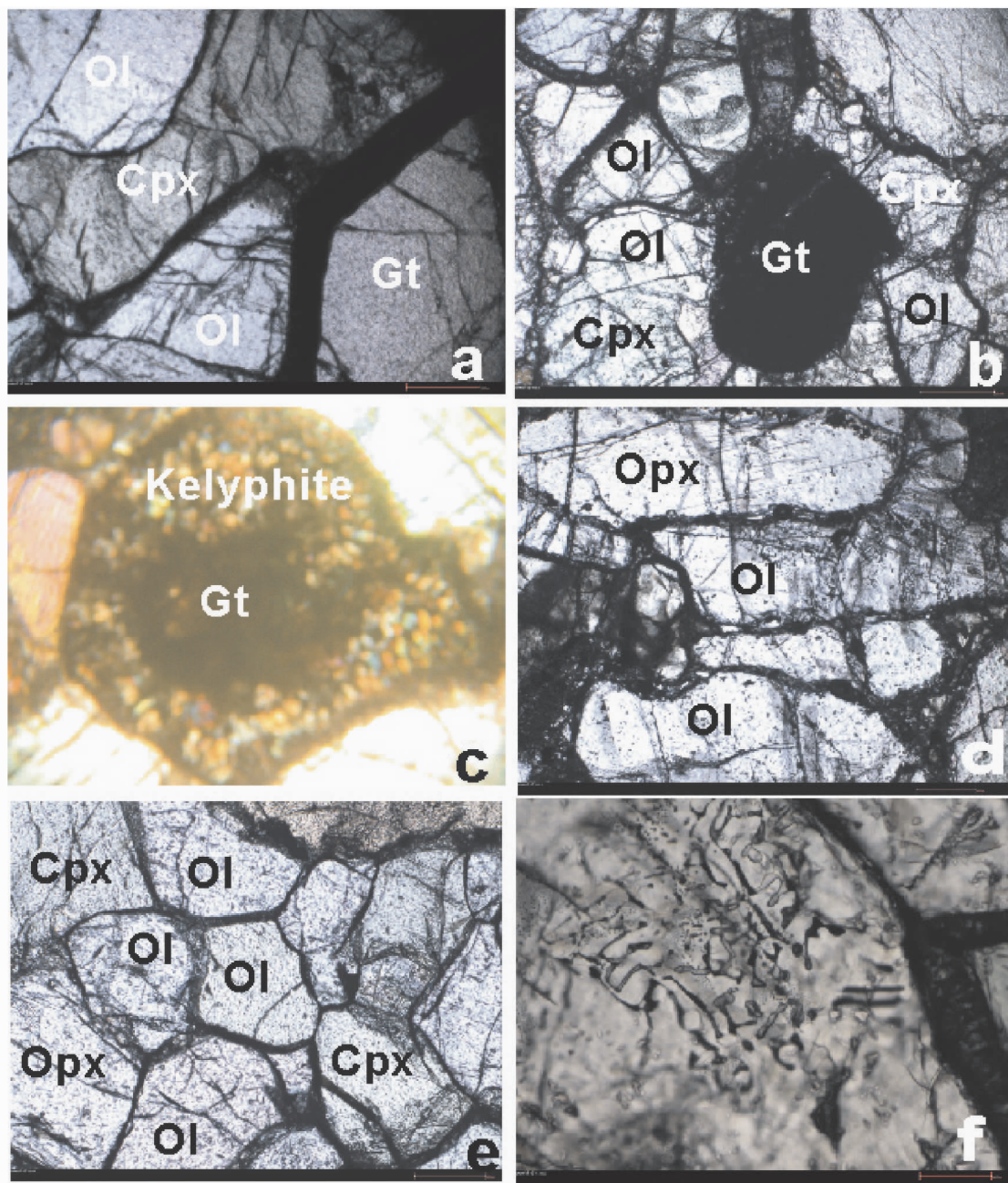


图1 石榴石二辉橄榄岩显微照片

a-新鲜石榴石,边缘平直(07WNP04),单偏光×25;b-棕褐色浑圆状蚀变质石榴石(07WNP11),单偏光×25;c-石榴石次变边(07WNP04),正交偏光×100;d-橄榄石、辉石具定向排列(07WNP07),单偏光×25;e-橄榄石、辉石三连点结构(07WNP07),单偏光×25;f-橄榄石、辉石矿物中丰富的流体包裹体(07WNP04),单偏光×200。Ol-橄榄石;Opx-斜方辉石;Cpx-单斜辉石;Gt-石榴石

Fig.1 Photographs of garnet lherzolite through optical microscope

a-fresh garnet with straight edge(07WNP04),plane-polarized light ×25; b-metasomatic garnet in brown color (07WNP11), plane-polarized light ×25; c-garnet with kelyphite rim (07WNP04), crossed polars ×100. d-directional fabric of olivine and pyroxene(07WNP07),plane-polarized light ×25; e-triple junction of olivine and pyroxene (07WNP07), plane-polarized light ×25; f-distribution of fluid inclusion in olivine and pyroxene (07WNP04),plane-polarized light ×200. Ol-olivine; Opx-orthopyroxene; Cpx-clinopyroxene; Gt-garnet

表1 绰尔河地区石榴石二辉橄榄岩矿物电子探针分析结果(wt%)

Table 1 Electro microprobe analyses of minerals in garnet lherzolite from Chaoer River(wt%)

橄榄石									
样号	07WNP02	07WNP04	07WNP05	07WNP06	07WNP07	07WNP09	07WNP11	07DHL01	07DHL02
SiO <sub>2</sub>	41.34	40.14	41.54	41.34	40.47	39.87	41.03	40.29	40.67
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.03	0.09	0.02	0.13	0.09	0.06	0.08	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.01	0.13	0.03	0.04	0.09	0.16	0.03	0.05
FeO	9.66	9.76	9.99	9.78	9.85	9.75	9.41	9.15	9.86
MnO	0.10	0.16	0.16	0.18	0.20	0.14	0.15	0.08	0.18
MgO	49.51	49.07	49.55	48.75	49.39	49.72	49.50	49.69	48.70
CaO	0.14	0.13	0.19	0.12	0.12	0.19	0.14	0.09	0.10
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.07	0.03	0.00
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
NiO	0.37	0.47	0.43	0.42	0.38	0.47	0.41	0.39	0.41
Total	101.34	99.79	102.13	100.67	100.58	100.36	100.92	99.88	100.07
Fo	90.1	90.0	89.8	89.9	89.9	90.1	90.4	90.6	89.8
斜方辉石									
SiO <sub>2</sub>	55.07	54.81	55.30	53.38	55.49	52.99	54.88	54.99	55.43
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.21	0.14	0.20	0.02	0.24	0.07	0.00	0.24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	0.53	0.65	0.59	1.05	0.61	1.00	1.06	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.09	3.93	5.20	5.95	4.42	6.84	5.17	5.08	4.35
FeO	6.08	5.89	6.11	6.33	5.98	7.41	5.99	6.06	6.44
MnO	0.17	0.00	0.04	0.22	0.11	0.23	0.07	0.09	0.10
MgO	32.86	32.96	31.69	29.38	32.40	29.94	31.71	31.42	32.50
CaO	1.55	1.03	1.60	3.61	1.66	2.02	1.70	1.84	0.96
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.19	0.24	0.14	0.06	0.14	0.21	0.25	0.21
K <sub>2</sub> O	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
NiO	0.11	0.12	0.08	0.06	0.02	0.04	0.15	0.06	0.15
Total	100.93	99.68	101.05	99.90	101.21	100.46	100.95	100.85	100.70
Wo	3	2	3	7	3	4	3	4	2
En	88	89	87	82	88	84	87	87	88
Fs	9	9	10	10	9	12	9	10	10
单斜辉石									
SiO <sub>2</sub>	52.88	52.41	52.88	52.44	52.13	50.97	52.30	52.69	52.22
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.54	0.39	0.29	0.19	0.48	0.13	0.38	0.68
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.06	1.20	1.10	1.21	1.35	0.21	1.41	1.50	0.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.91	5.49	6.50	5.03	4.56	7.71	5.75	5.47	6.30
FeO	3.40	3.13	4.24	3.37	3.48	6.16	3.90	3.22	3.58
MnO	0.08	0.10	0.11	0.06	0.15	0.19	0.14	0.12	0.17
MgO	18.82	16.50	19.05	16.98	18.74	18.91	19.13	16.55	16.48
CaO	20.42	18.70	15.25	19.44	19.47	14.68	16.27	19.10	17.81
Na <sub>2</sub> O	0.26	1.80	1.35	1.31	0.38	1.02	1.18	1.89	1.79
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01
NiO	0.05	0.04	0.07	0.07	0.05	0.07	0.16	0.09	0.09
Total	100.94	99.93	100.94	100.22	100.52	100.41	100.35	101.03	100.02
Wo	41	42	34	43	40	32	35	43	41
En	53	52	59	52	54	57	58	51	52
Fs	6	6	8	6	6	11	7	6	7
石榴石									
SiO <sub>2</sub>	43.73	40.24	45.46	50.99	46.87	43.71	46.59	46.00	44.63
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.22	0.19	0.10	0.11	0.22	0.11	0.07	0.25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.77	1.55	1.81	0.77	2.46	2.34	2.12	1.48	1.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.17	23.10	14.79	5.93	12.41	17.30	12.99	15.71	17.04
FeO	7.03	7.29	6.77	6.87	6.56	7.01	6.47	6.62	7.38
MnO	0.32	0.33	0.31	0.35	0.38	0.28	0.32	0.36	0.36
MgO	27.60	21.48	27.87	30.79	28.18	26.16	28.30	27.88	26.38
CaO	2.01	5.36	1.74	2.28	2.03	2.10	2.27	1.56	1.72
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.04	0.01	0.08	0.04	0.03	0.00	0.02	0.00
K <sub>2</sub> O	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
NiO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09	0.00	0.01	0.02	0.00
Total	100.73	99.66	98.94	98.15	99.13	99.15	99.17	99.73	99.18
Pyr	78.6	73.1	77.0	71.3	75.5	77.7	75.5	77.8	77.0
尖晶石									
SiO <sub>2</sub>	0.12		1.89	0.33		0.49	0.86		0.17
TiO <sub>2</sub>	0.04		0.51	0.06		0.06	0.06		0.51
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.80		8.04	9.15		6.50	14.69		3.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55.22		56.15	58.96		61.10	52.77		63.19
FeO	10.21		11.73	9.15		9.58	12.21		12.10
MnO	0.31		0.21	0.20		0.11	0.23		0.21
MgO	20.01		19.71	21.84		21.94	19.18		20.90
CaO	0.08		0.56	0.08		0.12	0.22		0.04
NiO	0.05		0.04	0.02		0.10	0.00		0.06
Total	99.83		98.82	99.78		100.00	100.21		100.99
Cr <sup>+</sup>	14.4		8.8	9.4		6.7	15.7		3.9

表2 中国东部石榴石相二辉橄榄岩和尖晶石/石榴石二辉橄榄岩矿物化学成分(wt%)

Table 2 The mineral chemistry of garnet lherzolites and spinel/garnet lherzolites in eastern China (wt%)

岩石	产地	矿物	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Total	Fo	Wo	En	Fs	Pyr	Cr <sup>#</sup>
石榴石	绰尔河(1)	Ol	41.34	0.08	0.08	0.04	9.66	0.10	49.51	0.14	0.00	100.96	90					
		En	55.07	0.03	4.09	0.91	6.08	0.17	32.86	1.55	0.04	100.79		3	88	9		
		Di	52.88	0.04	3.91	1.06	3.40	0.08	18.82	20.42	0.26	100.87		41	53	6		
		Gt	43.73	0.04	2.77	17.17	7.03	0.32	27.60	2.01	0.03	100.70						79
二辉橄榄岩	新昌(3)	Ol	40.31	nd	0.07	0.02	10.28	0.11	49.00	0.09	nd	99.89	89					
		En	54.07	0.18	5.01	0.61	6.14	0.13	32.54	1.08	0.25	99.99		2	88	10		
		Di	51.50	0.62	6.57	1.04	3.66	0.11	16.11	17.77	1.80	99.18		41	52	7		
		Gt	41.87	0.19	22.72	1.31	6.33	0.26	20.72	5.01	0.93	99.35						74
石榴石	闽清(1)	Ol	40.57	nd	0.10	0.03	9.54	0.10	49.14	0.13	nd	99.59	90					
		En	53.71	0.18	5.90	0.71	5.92	0.10	32.01	1.49	0.30	100.30		3	88	9		
		Di	51.51	0.38	6.98	1.19	4.17	0.09	17.57	16.63	1.64	100.14		38	55	7		
		Gt	42.56	0.29	23.11	1.64	6.32	0.26	20.80	5.20	0.29	100.44						74
尖晶石	明溪(4)	Ol	40.74	nd	0.03	0.03	9.70	0.09	49.89	0.09	nd	100.57	90					
		En	54.63	0.13	4.42	0.59	5.89	0.18	32.92	0.95	0.17	99.88		2	89	9		
		Di	51.95	0.31	5.55	1.19	2.71	0.07	16.10	19.01	1.74	98.63		44	51	5		
		Gt	42.47	0.07	22.23	1.65	7.14	0.28	21.06	5.06	0.02	99.98						74
石榴石	西垄(1)	Sp	0.13	0.00	47.66	20.88	11.59	0.18	20.01	0.00	0.00	100.45						23
		Ol	40.73	nd	nd	nd	8.44	0.14	50.24	0.10	nd	99.65	91					
		En	54.56	0.07	5.50	0.62	5.26	0.11	32.66	1.04	nd	99.82		2	90	8		
		Di	52.35	0.17	6.45	1.16	2.71	0.05	16.78	18.81	1.50	99.98		42	53	5		
二辉橄榄岩	女山(1)	Gt	42.75	0.10	23.28	1.57	6.50	0.25	21.09	5.12	nd	100.66						74
		Sp	0.00	0.29	51.12	17.37	10.04	0.00	20.82	0.00	nd	99.64						19
		Ol	40.80	0.01	0.00	0.02	10.49	0.13	48.66	0.11	0.00	100.22	89					
		En	53.64	0.16	5.65	0.37	7.06	0.16	32.52	0.22	0.00	99.78		0	89	11		
石榴石	鹤壁(1)	Di	51.03	0.48	7.53	0.69	3.90	0.13	16.33	17.97	1.70	99.76		41	52	7		
		Gt	42.17	0.16	22.34	1.04	7.69	0.45	21.86	4.87	0.06	100.64						75
		Sp	0.12	0.21	56.42	9.01	11.78	0.08	21.30	0.40	0.01	99.33						10
		Ol	40.35	nd	0.07	0.09	9.58	0.18	48.05	0.11	0.00	98.43	90					
二辉橄榄岩	汉诺坝(1)	En	56.27	0.20	5.70	0.44	6.17	0.16	30.30	1.18	0.18	100.60		2	87	10		
		Di	53.06	0.63	7.32	1.01	2.97	0.13	15.66	18.21	1.74	100.73		43	51	6		
		Gt	42.03	0.23	23.14	1.19	7.20	0.32	19.80	5.48	0.09	99.48						72
		Sp	0.20	0.25	54.07	10.96	10.30	0.00	23.10	0.00	0.00	98.88						12
石榴石	汉诺坝(1)	Ol	40.72	nd	0.05	0.02	8.28	0.10	49.84	0.10	nd	99.11	92					
		En	54.51	0.07	5.69	0.47	5.46	0.13	32.70	1.02	0.13	100.18		2	89	9		
		Di	52.35	0.38	6.97	0.72	3.05	0.11	16.31	19.44	1.33	100.66		44	51	6		
		Gt	42.60	0.16	23.89	0.74	6.36	0.25	21.08	5.14	0.01	100.23						74
尖晶石	汉诺坝(1)	Sp	0.11	0.10	56.80	10.18	10.14	0.08	21.86	0.00	nd	99.27						11

绰尔河为本文数据;新昌、闽清、明溪、汉诺坝数据引自 Fan and Hooper (1989);鹤壁引自樊祺诚和刘若新(1994);西垄引自曹荣龙和朱寿华(1990);女山引自金淑燕和潘顺安(1998);括号内数字为分析样品个数;Cr<sup>#</sup> = 100 × Cr/(Al + Cr)

表3 中国东部石榴石相二辉橄榄岩和尖晶石/石榴石二辉橄榄岩  $P$ - $T$  平衡条件

Table 3  $P$ - $T$  estimation for garnet lherzolite and spinel/garnet lherzolite in eastern China

岩石	产地	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ (GPa)	深度(km)
石榴石	绰尔河	1164	2.36	76
二辉橄榄岩	新昌	1115	2.47	79
	闽清	1199	2.43	77
尖晶石/石榴石	明溪	1058	2.05	66
二辉橄榄岩	西壑	1103	1.93	62
	女山	1114	1.91	62
	鹤壁	1039	1.97	64
	汉诺坝	1182	1.89	61

$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )-采用 Wells (1977) 计算; $P$ (GPa)-采用 Nickel and Green (1985) 计算;深度  $D=4.02+3.03P$  (Lallement *et al.*, 1980)

大兴安岭中部绰尔河石榴石二辉橄榄岩类似于新昌和闽清的四相共存的石榴石二辉橄榄岩,它们的石榴石次变边中出现少量铝尖晶石,区别于五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩中与橄榄石、辉石平衡共生的铬尖晶石。它们具有相对高的平衡温压条件(1115~1199 $^{\circ}\text{C}$ 和2.36~2.47GPa),形成深度超过70km(76km~79km),而五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩形成深度小于70km(表3)。这再次证实它们是来自尖晶石相与石榴石向橄榄岩相转变带(55km~70km)之下的石榴石橄榄岩稳定区(Fan *et al.*, 1997)。石榴石橄榄岩矿物中丰富的流体包裹体,以及石榴石中普遍的蚀变边,可能记录了地幔热事件和交代作用,乃须进一步研究。最近我们在大兴安岭北部诺敏河地区新生代玄武岩中又发现石榴石橄榄岩捕虏体(研究中),石榴石二辉橄榄岩作为目前来自地球最深处的样品,结合尖晶石橄榄岩、巨晶矿物和火山岩的综合研究,可能有助于我们进一步建立整个大兴安岭地区的深部岩石圈地幔组成与演化历史。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室毛莺、马玉光在电子探针分析过程中的热情支持和帮助。感谢张宏福、张招崇两位审稿人和俞良军编辑对本文提出的宝贵修改意见。

## References

Ave Lallement HL, Mercier HG, Carter JC and Ross JV. 1980. Rheology of upper mantle: Inferences from peridotite xenoliths. *Tectonophysics*, 70: 85 - 113

Bai ZD, Tian MZ, Wu FD, Xu DB and Li TJ. 2005. Yanshan, Gaoshan: Two active volcanoes of the volcanic cluster of Arshan, Inner Mongolian. *Earthquake Research in China*, 21: 113 - 117 (in Chinese with English abstract)

Cao RL and Zhu SH. 1990. Rhyacolite-olivine-diopside mineral assemblages of mantle metasomatism in garnet lherzolite xenolith from Xilong, Zhejiang Province. In: Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society

of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 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. Petrology*, 30: 1117 - 1158

Fan QC and Liu RX. 1994. Spinel-garnet lherzolite in Late Tertiary limburtic pipe from Hebi, Henan provinces and its genesis. In: OuYang ZY (ed.). *New Progress in Mineralogy, Petrology and Geochemistry Study in China*. Lanzhou: Lanzhou University Press, 141 - 142 (in Chinese)

Fan QC, Liu RX, Xie HS, Zhang MY, Xu P and Lin ZR. 1997. Experimental research on spinel-garnet transition and its significance. *Chinese Science (Series D)*, 40(4): 383 - 389

Fan QC and Liu RX. 1990. Study on phase transition of multiple spinel-garnet peridotites in upper mantle beneath Eastern China. In: Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China. Beijing: Seismological Publishing House, 72 - 82 (in Chinese)

Jin SY and Pan SA. 1998. Mantle-derived xenoliths of spinel-garnet lherzolite from Nushan and their implications for petro-physics. *Earth Science*, 23: 475 - 479 (in Chinese with English abstract)

Liu JQ. 1987. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 21 - 31 (in Chinese with English abstract)

Nickel KG and Green DH. 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlite and diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73: 158 - 170

Wells PRA. 1977. Pyroxenothermometry in simple and complex systems. *Contr. Miner. Petrol.*, 62: 129 - 139

Zhao YW, Fan QC, Bai ZD, Sun Q, Li N, Sui JL and Du XX. 2008. Preliminary study on Quaternary volcanoes in the Halaha River and Chaoer River area in Daxing'an Mountain range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2569 - 2575 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

白志达, 田明中, 武法东, 徐德兵, 李团结. 2005. 焰山、高山——内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山. *中国地震*, 21(1): 113 - 117

曹荣龙, 朱寿华. 1990. 浙江西壑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主编. 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. 1990. 上地幔尖晶石-石榴石复合橄榄岩与相转变. 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主编. 中国上地幔特征与动力学论文集. 北京: 地震出版社, 72 - 82

樊祺诚, 刘若新. 1994. 河南鹤壁晚第三纪玻基辉橄榄岩筒中尖晶石/石榴石二辉橄榄岩及成因. 见: 欧阳自远主编. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 141 - 142

金淑燕, 潘顺安. 1998. 女山玄武岩中尖晶石—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

刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. *岩石学报*, (1): 21 - 31

赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 孙谦, 李霓, 隋建立, 杜星星. 2008. 大兴安岭哈拉哈河—滦尔河地区第四纪火山活动初步研究. *岩石学报*, 24(11): 2569 - 2575