

安徽女山地幔橄榄岩捕虏体的同位素组成： 中国东部新生代岩石圈地幔时代制约*

刘志超¹ 吴福元¹ 储著银¹ 徐夕生²

LIU ZhiChao¹, WU FuYuan¹, CHU ZhuYin¹ and XU XiSheng²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

2. 南京大学地球科学系内生金属矿产成矿机制研究国家重点实验室,南京 210093

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2009-12-16 收稿,2010-01-27 改回.

Liu ZC, Wu FY, Chu ZY and Xu XS. 2010. Isotopic compositions of the peridotitic xenoliths from the Nushan area, Anhui Province; Constraints on the age of subcontinental lithospheric mantle beneath the East China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4):1217–1240

Abstract Nushan volcano, located in Anhui Province, contains abundant and various mantle-derived peridotitic xenoliths, including spinel lherzolite, garnet lherzolite and spinel-garnet lherzolite, with minor harzburgite. Some spinel lherzolites contain amphibole, phlogopite and apatite, indicating that they had experienced mantle metasomatism. Petrological, mineralogical and geochemical data of the spinel lherzolites and harzburgites revealed that the former are fertile and the latter are refractory. Depleted Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the spinel lherzolites indicate that they are typical of oceanic peridotites, rather than of Archean lithospheric mantle. Furthermore, most spinel lherzolites have high $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios. Although the lithospheric mantle beneath the Nushan area has been strongly metasomatized by fluids/melts, the Os isotopes and PGE (Platinum Group Element) data display that the Os isotopic composition of the Nushan peridotites are not significantly affected by later mantle metasomatism processes. All these geochemical data of most spinel lherzolites indicate that the lithospheric mantle beneath Nushan are young (Phanerozoic) additions to the subcontinental lithospheric mantle (SCLM) from the convective asthenospheric mantle. However, one harzburgite has relatively lower $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of 0.1184 and ancient Re-depletion age of 1.5Ga, suggesting existence of some ancient component in the asthenosphere.

Key words Nushan; Lithospheric mantle; Sr-Nd-Hf-Os isotope; PGE

摘要 位于安徽省境内的女山新生代碱性玄武岩中含有大量而且类型丰富的地幔橄榄岩包体,主要类型有尖晶石相、石榴石相、尖晶石-石榴子石过渡相二辉橄榄岩以及少量的方辉橄榄岩,其中部分尖晶石二辉橄榄岩样品中出现富含挥发分的角闪石、金云母和磷灰石。本文选择该区的尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩包体进行了较为详细的岩石学、矿物学、地球化学研究工作。结果显示,除2个方辉橄榄岩表现难熔特征外,其它25件尖晶石相二辉橄榄岩均具有饱满的主量元素组成。二辉橄榄岩样品的Sr-Nd-Hf同位素均表现为亏损地幔的性质,不同于古老克拉通型难熔、富集的岩石圈地幔。富含挥发份交代矿物的出现以及轻稀土元素不同程度的富集,表明女山岩石圈地幔经历了较为强烈的交代作用,然而Re-Os同位素及PGE分析结果表明交代作用并没有显著改变Os同位素组成。二辉橄榄岩样品均具有较高的Os同位素组成,结合其饱满的主量元素组成,亏损的同位素特征,表明女山地区岩石圈地幔整体为新生岩石圈地幔。但1个方辉橄榄岩样品给出了较低的Os同位素比值0.1184,其Re亏损年龄为1.5Ga,它可能来自于软流圈中残留的古老难熔地幔。

关键词 女山; 岩石圈地幔; Sr-Nd-Hf-Os同位素; PGE

中图法分类号 P588.125

* 本文受国家自然科学基金项目(40634019)资助。

第一作者简介: 刘志超,女,1983年生,博士研究生,岩石学专业,E-mail: liuzhichao@mail.igcas.ac.cn

1 引言

华北克拉通在显生宙期间经历过显著的岩石圈减薄这一认识,是近十余年来中国东部地质研究的重要进展 (Fan and Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1995a, 1998; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001)。一系列研究显示,古生代时华北东部存在一个厚达 200km、低地温、主量元素贫脊、同位素富集、以方辉橄榄岩为主的古老克拉通型岩石圈地幔;而新生代的华北岩石圈为薄的(80~100km)、高地温、主量元素饱满、同位素亏损、以二辉橄榄岩为主的新生大洋型岩石圈地幔(鄂莫岚和赵大升, 1987; 池际尚, 1988; Fan and Hooper, 1989; Fan and Menzies, 1992; 徐义刚, 1995b; 池际尚和路风香, 1996; Griffin *et al.*, 1998; Menzies and Xu, 1998; 吴福元和孙德有, 1999; 郑建平, 1999; 吴福元等, 2000, 2003; Xu, 2001; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003, 2006; 郑建平等, 2006a; Zhang *et al.*, 2008)。尽管国内外学者对华北东部岩石圈减薄这一现象取得共识,但对岩石圈减薄发生的具体时间、空间范围、动力学机制等还存在着较大的争议,尤其是减薄的机制,更是目前争论的焦点(吴福元等, 2008)。归纳起来,目前对岩石圈减薄的机制主要有两种观点:一是拆沉模式,认为古老的岩石圈地幔已经与下地壳一起拆沉进入软流圈地幔(邓晋福等, 1994, 1996, 2006; Gao *et al.*, 1998, 2002, 2004; 吴福元和孙德有, 1999; 吴福元等, 2000, 2003a; Wu *et al.*, 2003b, 2005, 2006; Xu *et al.*, 2006a, b, 2008; Deng *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2007; Yang and Li, 2008),那么现今的岩石圈地幔应该在整体上都是新生的。另外一种观点是热侵蚀模式,其基本含义为上涌的软流圈自下向上不断地软化剥蚀岩石圈地幔,并使其减薄(Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Xu *et al.*, 2004, 2008; Zhang *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 1998, 2001, 2006b, c, 2007),那么在岩石圈地幔的顶部应该还残留有古老岩石圈地幔。与热侵蚀模型类似的是橄榄岩-熔体相互作用,该模式认为软流圈来源熔体的作用是导致克拉通破坏的重要原因(Zhang *et al.*, 2002, 2007; 张宏福等, 2004; Zhang, 2005; 张宏福, 2006; Tang *et al.*, 2008),其具体过程是古老的岩石圈地幔受到熔体的交代作用后转变为具有新生特点的岩石圈地幔。显然,不同减薄机制模型预测了华北地区应存在的不同岩石圈地幔类型,因此地幔橄榄岩包体的研究是解决岩石圈减薄问题最重要途径之一。本文通过对女山地幔橄榄岩的岩石学和地球化学研究,对该区的岩石圈地幔性质和时代取得了新的认识,并在此基础上讨论了其对华北岩石圈减薄机制的制约。

2 地质背景及岩石学特征

女山火山位于郯庐断裂以东的华北与扬子板块碰撞带

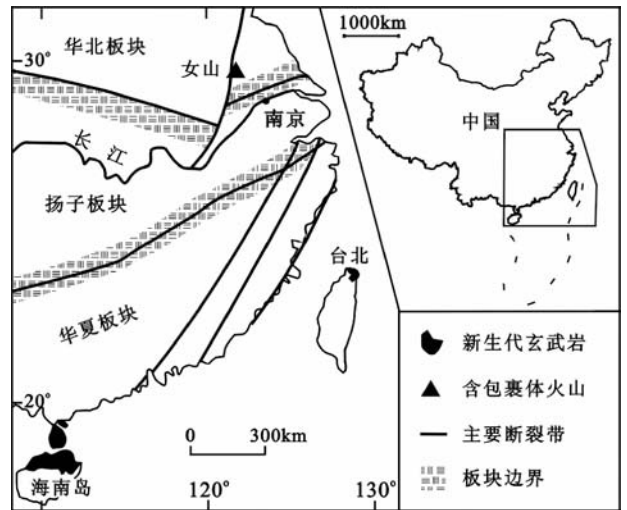


图1 女山火山大地构造背景图(底图据 Xu *et al.*, 2003)

Fig. 1 Geological setting map of the Nushan peridotitic xenoliths (after Xu *et al.*, 2003)

中(图1),喷发于更新世中期。火山岩主要为强碱性的碧玄岩、霞石岩和碱性橄榄玄武岩,其中包含有大量而且类型丰富的深源包体。其幔源包体的主要岩石类型为尖晶石二辉橄榄岩,还存在少量的石榴子石二辉橄榄岩,尖晶石石榴子石二辉橄榄岩及方辉橄榄岩。部分女山地幔橄榄岩包体中出现大量的角闪石、磷灰石、金云母富挥发份的矿物。此外,女山碱性玄武岩中还含有大量的矿物巨晶、辉石岩、麻粒岩和花岗片麻岩等捕虏体(李捷和张文佑, 1937; 周新民和陈图华, 1980; 张儒瑗和从伯林, 1983; 肖增岳和王艺芬, 1986; 陈道公, 1988; 周新民等, 1992; Xia *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1998, 2000, 2003; Zou *et al.*, 2000; 李建平等, 2001; Huang *et al.*, 2003; Xia *et al.*, 2004; Xu and Bodinier, 2004; Zhi *et al.*, 2004; 于慧敏等, 2005; 郝艳涛等, 2006; 支霞臣等, 2007)。

本次研究工作共采集了 27 件女山地幔橄榄岩包体,其中两件样品为方辉橄榄岩,其它均为二辉橄榄岩包体。包体大小不等,最大直径近 20cm,绝大部分样品新鲜,呈绿色,只有两个样品(08NS15 和 08NS16)由于后期在近地表受氧化作用而略显褐色。不同样品的结构变化较大,有粗粒、残碎斑状和等粒变晶结构之分,部分样品具有显著的叶理。样品的主要矿物组合为橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石。其中,橄榄石为无色,中粗粒,自形到半自形,偶有扭折带发育;斜方辉石,无色,中粒,自形半自形;单斜辉石呈翠绿色,中细粒,自形到半自形;尖晶石,呈褐色,他形,常产于颗粒间。此外,在 7 个尖晶石二辉橄榄岩样品中还发现有角闪石存在,大部分角闪石粒度较小,生长在矿物颗粒间,并常在尖晶石周围出现,呈黄褐色。其中样品 08NS03 中角闪石含量最丰富,粒度较大,直径可达 3~4mm。同时,该样品中还含

表1 女山地幔橄榄岩包体矿物组成和主化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical compositions (wt%) of the Nushan peridotitic xenoliths

样品号	含交代矿物二辉橄榄岩									不含交代矿物二辉橄榄岩				
	NS-06	NS-07	NS-08	NS-11	08NS03	08NS09	08NS14	08NS15	08NS16	NS-01	NS-02	NS-03	NS-04	NS-05
Ol	70.15	70.32	60.86	63.55	61.67	60.28	64.09	68.24	58.64	55.92	63.06	63.32	64.48	62.65
Opx	17.23	18.36	23.81	21.83	20.39	21.58	23.16	16.99	23.33	28.98	18.35	20.15	21.25	19.53
Cpx	8.62	8.28	10.90	11.65	15.60	16.28	9.45	14.29	16.23	12.32	14.00	13.78	9.56	14.28
Sp	2.11	2.00	3.30	1.69	少量	2.20	2.44	2.42	2.97	0.87	2.60	1.97	2.53	2.50
Hb	少量	少量	少量	少量	~2%	—	—	少量	少量	—	—	—	—	—
Ap	—	—	—	—	少量	—	少量	—	—	—	—	—	—	—
Phl	—	—	—	—	—	少量	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	44.01	44.47	44.55	45.42	44.51	44.60	44.48	43.75	44.89	45.72	43.88	44.89	43.97	44.34
TiO ₂	0.05	0.08	0.07	0.09	0.11	0.11	0.14	0.06	0.07	0.06	0.12	0.05	0.10	0.08
Al ₂ O ₃	2.17	2.17	3.26	2.49	3.76	3.69	2.71	2.88	3.55	3.00	3.44	2.89	2.99	3.44
Fe ₂ O ₃ ^T	9.30	8.95	9.35	8.70	8.73	9.01	9.43	9.46	8.81	8.31	9.48	8.85	9.39	8.98
MnO	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
MgO	41.84	42.25	39.46	40.16	39.09	38.68	40.52	40.27	38.34	38.51	39.25	39.8	40.35	39.22
CaO	1.85	1.76	2.31	2.43	2.75	3.12	1.93	2.65	3.03	2.50	2.90	2.83	2.15	2.88
Na ₂ O	0.03	0.02	0.06	0.04	0.07	0.08	0.05	0.06	0.10	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06
K ₂ O	<0.01	<0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.08	0.01	0.06	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01
烧失量	-0.39	-0.36	-0.33	-0.21	-0.07	-0.40	0.16	-0.27	-0.17	0.87	-0.26	-0.29	-0.09	-0.37
总量	99.00	99.47	98.89	99.30	99.10	99.04	99.02	99.02	98.82	99.17	99.03	99.21	99.06	98.78

样品号	不含交代矿物二辉橄榄岩										方辉橄榄岩		
	NS-09	NS-10	08NS01	08NS02	08NS04	08NS05	08NS06	08NS07	08NS08	08NS17	08NS18	08NS11	08NS13
Ol	64.44	60.58	62.38	69.05	49.53	65.25	62.22	61.05	63.75	61.92	53.15	76.77	68.07
Opx	15.77	22.46	23.82	21.23	22.56	21.87	20.33	20.97	23.77	23.42	26.21	17.10	26.73
Cpx	14.90	13.88	13.03	7.41	25.07	10.17	15.12	14.76	9.30	14.15	19.56	4.74	4.11
Sp	2.90	2.69	1.67	1.33	3.65	2.50	3.32	2.62	2.41	2.23	2.88	1.34	0.67
Hb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ap	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Phl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	43.63	44.42	44.57	43.59	45.45	44.48	44.26	43.75	44.87	44.56	45.36	43.73	44.40
TiO ₂	0.12	0.15	0.10	0.13	0.12	0.02	0.09	0.12	0.02	0.10	0.15	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	3.58	3.66	3.23	2.32	4.66	2.54	3.77	3.75	2.28	3.59	4.57	1.56	1.09
Fe ₂ O ₃ ^T	9.43	9.96	9.10	9.43	8.15	8.84	8.56	9.88	8.53	9.11	9.13	9.04	8.72
MnO	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11
MgO	38.95	38.02	39.41	41.39	35.42	41.10	39.26	38.73	41.31	39.17	36.65	43.94	43.97
CaO	2.92	2.67	2.50	1.59	4.97	2.26	3.03	2.88	2.16	2.78	3.69	1.02	1.17
Na ₂ O	0.07	0.06	0.06	0.03	0.15	0.03	0.08	0.08	0.02	0.07	0.13	0.01	0.01
K ₂ O	0.01	<0.01	0.02	0.03	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
烧失量	0.28	-0.08	-0.07	0.34	-0.29	-0.39	-0.18	-0.31	-0.31	-0.38	-0.44	-0.35	-0.34
总量	99.14	99.03	99.08	99.04	98.77	99.00	99.01	99.03	99.01	99.15	99.38	99.01	99.71

Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Sp-尖晶石; Hb-角闪石; Ap-磷灰石; Phl-金云母

表2 女山地幔橄榄岩包体中橄榄石矿物化学成分 (wt%)

Table 2 Major element compositions in olivines from the Nushan peridotitic xenoliths (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
含交代矿物二辉橄榄岩													
NS-06	41.90	0.00	0.00	0.03	49.12	0.03	9.30	0.13	0.38	0.01	0.00	100.90	90.4
NS-07	42.10	0.00	0.01	0.02	49.30	0.04	9.05	0.12	0.39	0.02	0.00	101.05	90.7
NS-08	41.62	0.01	0.01	0.02	48.52	0.02	9.88	0.14	0.34	0.01	0.00	100.56	89.7
NS-11	42.16	0.00	0.00	0.02	48.93	0.03	9.29	0.15	0.36	0.01	0.00	100.96	90.4
08NS03	40.70	0.03	0.01	0.00	47.01	0.05	12.01	0.17	0.36	0.02	0.02	100.40	87.5
08NS09	41.01	0.01	0.04	0.00	48.24	0.09	10.50	0.15	0.36	0.03	0.02	100.47	89.1
08NS14	41.16	0.00	0.00	0.00	48.58	0.04	9.79	0.13	0.41	0.00	0.01	100.14	89.8
08NS15	40.03	0.01	0.01	0.02	47.50	0.04	10.80	0.15	0.42	0.01	0.00	98.99	88.8
08NS16	40.52	0.02	0.04	0.02	47.87	0.04	11.05	0.13	0.39	0.01	0.00	100.10	88.6

续表 2

Continued Table 2

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
不含交代矿物二辉橄辉岩													
NS-01	41.85	0.02	0.04	0.02	48.88	0.10	9.89	0.12	0.33	0.02	0.00	101.27	89.8
NS-02	41.66	0.01	0.01	0.01	48.82	0.07	9.82	0.16	0.34	0.02	0.00	100.92	89.9
NS-03	41.73	0.02	0.04	0.03	48.79	0.10	9.27	0.12	0.37	0.03	0.00	100.48	90.4
NS-04	41.74	0.00	0.06	0.02	48.90	0.06	9.41	0.12	0.37	0.02	0.01	100.71	90.3
NS-05	41.60	0.01	0.03	0.02	48.49	0.08	9.57	0.14	0.38	0.02	0.01	100.35	90.0
NS-09	41.88	0.00	0.03	0.02	48.36	0.09	9.85	0.15	0.35	0.02	0.00	100.75	89.7
NS-10	41.07	0.01	0.03	0.03	47.01	0.09	11.27	0.14	0.33	0.01	0.00	99.99	88.2
08NS01	40.59	0.02	0.04	0.00	47.88	0.09	10.56	0.16	0.38	0.01	0.00	99.74	89.0
08NS02	40.86	0.01	0.05	0.00	48.21	0.10	10.25	0.14	0.40	0.01	0.01	100.05	89.3
08NS04	40.74	0.01	0.01	0.00	48.32	0.03	10.51	0.12	0.41	0.01	0.01	100.17	89.1
08NS05	41.32	0.02	0.01	0.00	48.79	0.04	9.88	0.13	0.42	0.00	0.00	100.61	89.8
08NS06	40.87	0.03	0.02	0.00	48.18	0.05	9.98	0.11	0.40	0.01	0.01	99.66	89.6
08NS07	40.74	0.04	0.06	0.00	48.37	0.11	10.82	0.14	0.35	0.01	0.00	100.64	88.8
08NS08	41.62	0.01	0.00	0.00	49.29	0.04	9.52	0.15	0.40	0.00	0.00	101.03	90.2
08NS17	40.27	0.03	0.03	0.05	47.61	0.10	10.55	0.13	0.37	0.02	0.01	99.16	89.0
08NS18	40.49	0.03	0.00	0.04	47.28	0.11	11.40	0.12	0.41	0.02	0.01	99.92	88.2
方辉橄辉岩													
08NS11	41.32	0.01	0.01	0.00	48.72	0.05	9.41	0.10	0.41	0.02	0.01	100.06	90.2
08NS13	41.19	0.01	0.03	0.00	49.14	0.11	9.18	0.10	0.40	0.00	0.01	100.17	90.5

表 3 女山地幔橄辉岩包体中斜方辉石矿物化学成分 (wt%)

Table 3 Major element compositions in orthopyroxenes from the Nushan peridotitic xenoliths (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
含交代矿物二辉橄辉岩													
NS-06	57.54	0.10	3.45	0.42	33.45	0.49	5.88	0.13	0.11	0.12	0.00	101.70	91.0
NS-07	56.73	0.12	3.79	0.48	32.93	0.63	5.69	0.12	0.08	0.16	0.00	100.72	91.2
NS-08	56.08	0.04	3.70	0.40	32.56	0.52	6.24	0.15	0.06	0.09	0.00	99.84	90.3
NS-11	56.64	0.11	4.01	0.39	32.50	0.60	5.92	0.16	0.09	0.12	0.01	100.55	90.7
08NS03	56.28	0.05	2.29	0.15	32.29	0.54	7.58	0.19	0.07	0.11	0.02	99.59	88.4
08NS09	53.99	0.18	5.79	0.33	31.10	1.05	6.57	0.14	0.09	0.17	0.00	99.42	89.4
08NS14	55.81	0.07	3.78	0.36	32.80	0.52	6.14	0.15	0.10	0.14	0.01	99.88	90.5
08NS15	54.37	0.07	4.02	0.31	32.09	0.48	6.91	0.20	0.07	0.13	0.00	98.66	89.2
08NS16	54.69	0.05	3.84	0.33	31.92	0.57	6.84	0.15	0.08	0.16	0.01	98.65	89.3
不含交代矿物二辉橄辉岩													
NS-01	55.08	0.16	5.67	0.44	31.48	1.08	6.23	0.15	0.08	0.18	0.01	100.56	90.0
NS-02	55.43	0.11	5.11	0.37	31.98	0.84	6.13	0.11	0.11	0.15	0.01	100.36	90.3
NS-03	55.32	0.08	5.00	0.55	31.68	1.04	5.87	0.15	0.12	0.15	0.00	99.95	90.6
NS-04	55.98	0.11	4.54	0.42	32.42	0.74	5.93	0.15	0.09	0.12	0.00	100.50	90.7
NS-05	55.31	0.16	5.48	0.48	31.46	1.07	6.00	0.14	0.09	0.16	0.01	100.35	90.3
NS-09	55.50	0.17	5.67	0.42	31.34	1.08	6.21	0.13	0.10	0.20	0.01	100.83	90.0
NS-10	54.92	0.20	5.54	0.49	30.57	1.11	7.59	0.16	0.10	0.20	0.01	100.89	87.8
08NS01	53.40	0.15	5.72	0.35	30.39	1.08	6.57	0.13	0.10	0.18	0.00	98.07	89.2
08NS02	54.47	0.12	5.21	0.58	31.38	1.09	6.29	0.15	0.12	0.16	0.00	99.58	89.9
08NS04	54.99	0.10	4.17	0.08	31.89	0.52	6.70	0.15	0.09	0.08	0.01	98.79	89.5
08NS05	56.05	0.03	3.39	0.10	33.00	0.47	6.30	0.14	0.09	0.05	0.01	99.62	90.3
08NS06	54.59	0.11	4.56	0.10	31.83	0.61	6.24	0.13	0.08	0.10	0.00	98.37	90.1
08NS07	54.05	0.17	5.71	0.35	30.89	1.07	6.83	0.14	0.07	0.19	0.00	99.47	89.0
08NS08	56.46	0.01	3.17	0.22	33.22	0.48	6.06	0.15	0.08	0.03	0.00	99.88	90.7
08NS17	53.66	0.20	5.74	0.42	30.56	1.07	6.66	0.15	0.11	0.19	0.00	98.75	89.1
08NS18	53.64	0.15	5.80	0.41	30.57	1.06	7.16	0.15	0.10	0.20	0.01	99.26	88.4
方辉橄辉岩													
08NS11	55.94	0.06	3.79	0.36	32.52	0.62	5.82	0.14	0.10	0.10	0.01	99.47	90.9
08NS13	56.22	0.05	3.15	0.61	32.83	1.23	5.76	0.14	0.09	0.03	0.01	100.11	91.1

表4 女山地幔橄榄岩包体中单斜辉石矿物化学成分 (wt%)

Table 4 Major element compositions in clinopyroxenes from the Nushan peridotitic xenoliths (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
含交代矿物二辉橄榄岩													
NS-06	54.17	0.30	5.87	1.08	14.68	19.72	2.40	0.08	0.05	2.16	0.00	100.50	91.6
NS-07	53.66	0.64	6.20	1.26	14.60	19.31	2.41	0.09	0.03	2.28	0.00	100.47	91.5
NS-08	53.72	0.18	6.06	0.91	14.51	19.74	2.63	0.10	0.03	2.19	0.00	100.06	90.8
NS-11	53.82	0.41	6.32	0.92	14.50	19.54	2.41	0.10	0.01	1.99	0.01	100.03	91.5
08NS03	53.63	0.19	5.33	0.76	14.37	18.94	3.29	0.12	0.05	2.40	0.01	99.10	88.6
08NS09	51.38	0.54	7.57	0.58	15.17	18.09	3.54	0.08	0.05	1.72	0.01	98.74	88.4
08NS14	54.38	0.26	5.93	0.95	14.13	18.12	2.51	0.08	0.07	3.06	0.00	99.49	90.9
08NS15	51.73	0.33	6.70	0.78	13.77	18.80	2.87	0.09	0.03	2.54	0.00	97.65	89.5
08NS16	52.96	0.24	6.72	0.73	13.83	18.69	2.86	0.11	0.04	2.80	0.00	98.98	89.6
不含交代矿物二辉橄榄岩													
NS-01	52.58	0.54	7.51	0.76	15.66	18.10	3.39	0.12	0.06	1.70	0.01	100.42	89.2
NS-02	52.73	0.58	7.23	0.69	15.21	18.96	2.93	0.08	0.04	1.81	0.01	100.27	90.2
NS-03	53.06	0.20	6.36	0.97	15.86	18.50	3.08	0.09	0.07	1.64	0.01	99.82	90.2
NS-04	53.10	0.39	6.36	0.87	15.30	19.65	2.72	0.08	0.07	1.64	0.00	100.19	90.9
NS-05	52.40	0.43	7.00	0.79	15.71	18.39	3.15	0.09	0.02	1.63	0.01	99.62	89.9
NS-09	52.86	0.53	7.38	0.79	15.60	17.99	3.35	0.09	0.07	1.77	0.01	100.42	89.2
NS-10	52.71	0.51	7.25	0.86	15.53	17.77	4.05	0.12	0.06	1.75	0.01	100.63	87.2
08NS01	51.32	0.56	7.51	0.58	15.19	17.72	3.56	0.09	0.04	1.78	0.01	98.36	88.4
08NS02	52.24	0.36	6.90	0.97	15.62	17.96	3.31	0.11	0.02	1.78	0.01	99.28	89.4
08NS04	51.97	0.58	6.70	0.58	14.42	19.85	2.78	0.09	0.04	1.91	0.01	98.92	90.2
08NS05	52.61	0.15	4.51	0.59	15.28	21.79	2.31	0.07	0.04	1.03	0.01	98.39	92.2
08NS06	52.05	0.54	6.61	0.59	14.34	19.79	2.58	0.08	0.06	1.88	0.01	98.53	90.8
08NS07	51.51	0.52	7.54	0.67	15.28	17.83	3.72	0.08	0.08	1.91	0.02	99.16	88.0
08NS08	53.62	0.04	3.48	0.62	16.44	22.45	2.27	0.09	0.07	0.63	0.02	99.71	92.8
08NS17	51.06	0.56	7.42	0.71	14.91	18.39	3.49	0.11	0.09	1.74	0.00	98.48	88.4
08NS18	50.99	0.58	7.58	0.68	15.03	17.92	3.76	0.10	0.06	1.79	0.01	98.50	87.7
方辉橄榄岩													
08NS11	53.16	0.31	5.61	0.97	15.32	19.85	2.52	0.06	0.03	1.70	0.01	99.55	91.6
08NS13	53.35	0.06	3.11	0.87	17.80	20.96	2.86	0.09	0.08	0.27	0.02	99.48	91.7

表5 女山地幔橄榄岩包体中尖晶石矿物化学成分 (wt%)

Table 5 Major element compositions in spinels from the Nushan peridotitic xenoliths (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Cr [#]	F (%)
含交代矿物二辉橄榄岩													
NS-06	0.05	0.09	51.89	16.04	19.72	10.93	0.15	0.31	0.01	0.00	99.19	0.17	6.4
NS-07	0.08	0.21	49.41	17.73	19.29	10.92	0.15	0.30	0.03	0.01	98.12	0.19	7.6
NS-08	0.02	0.03	52.80	13.82	19.51	11.58	0.14	0.35	0.01	0.01	98.27	0.15	5.0
NS-11	0.04	0.10	54.00	12.49	19.86	10.05	0.13	0.35	0.00	0.00	97.03	0.13	3.9
08NS03	0.44	0.74	43.88	21.00	19.09	12.39	0.14	0.30	0.02	0.02	98.32	0.24	9.9
08NS09	0.07	0.24	57.83	8.82	21.13	11.01	0.10	0.40	0.02	0.01	99.64	0.09	—
08NS14	0.04	0.01	52.33	15.72	19.76	11.29	0.14	0.34	0.02	0.00	99.67	0.17	6.1
08NS15	0.03	0.04	55.07	10.77	19.45	11.74	0.13	0.38	0.01	0.01	97.63	0.12	2.5
08NS16	0.01	0.02	56.22	10.43	19.66	11.59	0.12	0.36	0.02	0.01	98.45	0.11	2.0
不含交代矿物二辉橄榄岩													
NS-01	0.10	0.24	56.61	9.59	20.96	10.99	0.11	0.33	0.02	0.00	98.97	0.10	1.2
NS-02	0.06	0.16	57.51	8.98	20.99	10.30	0.11	0.38	0.01	0.01	98.50	0.09	—
NS-03	0.11	0.13	51.90	14.43	20.31	11.11	0.11	0.33	0.00	0.00	98.42	0.16	5.5
NS-04	0.04	0.16	54.13	12.28	20.40	10.63	0.11	0.35	0.01	0.01	98.14	0.13	3.8
NS-05	0.10	0.18	55.57	10.49	20.74	10.29	0.12	0.35	0.00	0.00	97.85	0.11	2.1
NS-09	0.09	0.23	55.44	9.39	20.62	10.87	0.12	0.38	0.00	0.01	97.14	0.10	1.2

续表 5

Continued Table 5

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Cr [#]	F (%)
NS-10	0.12	0.30	53.94	10.79	19.82	13.07	0.10	0.36	0.01	0.00	98.51	0.12	2.7
08NS01	0.08	0.23	56.69	8.92	20.92	11.49	0.12	0.37	0.01	0.00	98.83	0.10	0.5
08NS02	0.10	0.14	52.36	14.90	20.29	11.66	0.12	0.30	0.00	0.01	99.87	0.16	5.7
08NS04	0.01	0.10	59.14	7.45	20.73	11.00	0.10	0.36	0.01	0.02	98.92	0.08	—
08NS05	0.01	0.01	55.04	12.88	20.04	11.18	0.12	0.34	0.00	0.01	99.65	0.14	4.0
08NS06	0.05	0.12	58.21	9.08	20.81	10.23	0.11	0.40	0.01	0.01	99.03	0.09	—
08NS07	0.09	0.24	56.07	9.53	20.61	12.27	0.13	0.36	0.01	0.01	99.33	0.10	1.2
08NS08	0.04	0.03	50.77	17.65	19.36	11.86	0.17	0.31	0.02	0.00	100.22	0.19	7.3
08NS17	0.08	0.20	56.68	9.20	20.41	11.31	0.10	0.36	0.02	0.01	98.38	0.10	0.8
08NS18	0.08	0.22	57.49	8.15	20.11	11.72	0.10	0.41	0.03	0.00	98.33	0.09	—
方辉橄榄岩													
08NS11	0.11	0.09	50.00	17.56	19.65	11.11	0.15	0.30	0.02	0.01	99.02	0.19	7.4
08NS13	0.06	0.14	30.86	37.21	16.88	14.58	0.21	0.23	0.01	0.00	100.18	0.45	16.0

F-部分熔融程度

表 6 女山地幔橄榄岩包体中角闪石、磷灰石、金云母、斜长石矿物化学成分 (wt%)

Table 6 Major element compositions in amphiboles, apatites, phlogopites and plagioclases from the Nushan peridotitic xenoliths (wt%)

	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO ^T	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
	NS-06	41.98	1.67	14.17	1.39	16.49	10.47	3.74	0.07	0.11	3.39	1.02	94.54
	NS-07	44.21	2.58	13.75	1.60	16.74	10.02	3.50	0.05	0.11	3.61	1.04	97.21
	NS-08	44.09	1.32	14.28	1.30	16.98	10.51	3.75	0.03	0.09	3.30	1.42	97.06
角闪石	NS-11	43.72	1.99	14.10	1.21	16.95	10.51	3.42	0.06	0.10	3.40	1.20	96.65
	08NS03	43.93	1.76	13.43	0.85	16.77	9.96	4.62	0.09	0.10	3.75	1.19	96.48
	08NS15	42.69	1.79	14.72	1.06	4.24	0.09	16.57	9.91	0.13	3.98	0.56	95.75
	08NS16	43.06	1.10	15.12	0.97	4.17	0.06	16.76	9.87	0.12	4.06	0.77	96.07
金云母	08NS09	37.16	6.26	16.28	0.90	17.96	0.07	5.08	0.02	0.24	0.30	9.61	94.06
斜长石	08NS14 ^a	61.50	0.22	22.11	0.06	0.01	4.06	0.20	0.00	0.00	8.40	1.43	97.99
	08NS14 ^b	57.39	0.14	25.40	0.08	0.09	7.82	0.25	0.00	0.03	6.69	0.64	98.54
		P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	CaO	MnO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl	Total	
磷灰石	08NS03	39.03	0.11	1.43	49.97	0.07	0.54	1.42	0.02	0.24	1.15	93.61	
	08NS14	41.00	0.32	0.32	52.55	0.03	0.22	0.83	0.01	2.20	1.03	97.35	

a, b 分别为 08NS14 矿物颗粒间脉体中不同成分特征的斜长石

的海洋趋势线分布,两个方辉橄榄岩落入亏损区。另外,对比含交代矿物的二辉橄榄岩与其它二辉橄榄岩样品,它们的主量元素变化范围大体一致,前者的 Mg[#] 值为 89.4 ~ 90.4, 后者 Mg[#] 为 88.7 ~ 90.6, 表明它们的饱满程度没有显著差别。

5 矿物成分特征

5.1 橄榄石

橄榄石化学成分分析结果显示(表 2),两个方辉橄榄岩中橄榄石的 Mg[#] 相对偏高,分为 90.2 和 90.5;含交代矿物的

二辉橄榄岩组 Mg[#] 值范围是 87.5 ~ 90.7, 不含交代矿物的二辉橄榄岩样品为 88.2 ~ 90.4, 后者变化范围相似。女山地区橄榄岩包体中的橄榄石 Mg[#] 较低的特点,明显不同于太古代岩石圈地幔的难熔特征,而与华北克拉通东部新生代地幔包体的饱满特征相似(郑建平, 1999; 郑建平, 2006a)。

5.2 斜方辉石

斜方辉石的电子探针分析结果列于表 3,方辉橄榄岩 08NS13 中的斜方辉石具有最高的 Cr[#] 值 11.5, Mg[#] 值较高为 91.1, 而另一个方辉橄榄岩 08NS11 的斜方辉石的 Cr[#] 偏低为 6.1, Mg[#] 值较高为 90.9。含交代矿物的二辉橄榄岩中斜方辉

石的 Cr[#]值为 3.7~7.8, Mg[#]值为 88.4~91.2, 不含交代矿物的二辉橄榄岩中斜方辉石的 Cr[#]值为 1.3~6.9, Mg[#]值为 87.9~90.7, 两组二辉橄榄岩样品之间没有本质差别。

5.3 单斜辉石

根据表 4 所列的分析结果显示, 含交代矿物的二辉橄榄岩的 Al₂O₃ 含量为 5.33%~7.57%, CaO 含量为 18.09%~19.74%; 不含交代矿物的二辉橄榄岩的 Al₂O₃ 含量为 3.48%~7.58%, CaO 含量为 17.72%~22.45%; 两个方辉橄榄岩的 Al₂O₃ 含量分别为 5.61% 和 3.11%, CaO 含量分别为 19.85% 和 20.96%。另外我们可以发现女山地幔橄榄岩包体中单斜辉石的 Na₂O 含量具有较大的变化范围。方辉橄榄岩 08NS13 具有所有样品中最低的 Na₂O 含量 0.27%, 而 08NS11 的 Na₂O 含量为 1.7%; 有角闪石出现的二辉橄榄岩包体与其它二辉橄榄岩相比 Na₂O 的含量普遍偏高。

女山地幔橄榄岩包体中单斜辉石的微量元素组成列于表 7。橄榄岩中单斜辉石是微量元素最主要的载体, 在不含水的橄榄岩中, 90% 以上的 REE 赋存在单斜辉石中 (Stosch, 1982), 因此单斜辉石中的微量元素组成可以代表全岩的组成特征。如图 4a, 含交代矿物的二辉橄榄岩除一个含金云母的样品 (08NS09) 外都具有轻稀土相对重稀土富集的配分型式。从微量元素配分图 (图 4b) 中可以看出, 这些含交代矿物的二辉橄榄岩的微量元素同样具有不同的配分特征。08NS03 是一个富集角闪石的样品, 且有磷灰石出现, 不同于其它贫角闪石或只有磷灰石出现的样品 (08NS14), 它没有表现出 Nb、Ta 的亏损, 且具有 Zr、Hf 富集的特征。08NS09 也显示了与其它含交代矿物的样品不同的特征, 没有表现出 Th、U 富集和 Nb、Ta 亏损的特征。如图 4c、4d 所示, 不含交代矿物的二辉橄榄岩的稀土、微量元素特征也可分为三类, 一类为轻稀土相对于重稀土略显亏损, 大多数样品都具有这样的特征; 第二类为 NS-03 所表现的轻稀土相对于重稀土略微富集的特征, 表明部分不含交代矿物的二辉橄榄岩同样受到了后期交代作用; 另一类为 08NS05 和 08NS08 具有的勺型的稀土配分型式, 同样是受到后期交代作用的影响。两个方辉橄榄岩的稀土配分型式也不相同, 如图 4e, 08NS13 具有较低的重稀土含量, 表明它经历了较高度度的熔融抽取, 轻稀土相对略为富集, 应是后期的熔/流体交代作用的结果。而 08NS11 的重稀土含量较高, 轻稀土含量相对略为亏损。

5.4 尖晶石

方辉橄榄岩 08NS13 中的尖晶石具有最高的 Cr[#]值 0.45, 另一个方辉橄榄岩 08NS11 的 Cr[#]值为 0.19; 二辉橄榄岩中尖晶石的 Cr[#]具有较宽的变化范围, 其中含交代矿物的二辉橄榄岩与其它二辉橄榄岩样品具有相似的尖晶石 Cr[#], 分别为 0.09~0.24 和 0.08~0.19。尖晶石的 Cr[#]是部分熔融程度的一个很好指标, 随着部分熔融程度增大, 尖晶石中的 Cr[#]也随之增大, 可以利用它估算地幔橄榄岩遭受到的部分熔融程度

表 7 女山地幔橄榄岩包体中单斜辉石微量、稀土元素丰度 ($\times 10^{-6}$)

Table 7 Trace element compositions of clinopyroxenes from the Nushan peridotitic xenoliths ($\times 10^{-6}$)

样品号	含交代矿物二辉橄榄岩									
	NS-06	NS-07	NS-08	NS-11	08NS03	08NS09	08NS14	08NS15	08NS16	
Li	1.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.6	20	2.2	2.9	
Sc	67	56	63	61	46	59	79	71.2	72	
Ti	2009	3349	1086	2079	1864	4205	2349	2948	2025	
V	257	283	257	263	166	274	301	295	283	
Cr	7071	8165	6110	6139	5420	5707	8362	5760	5553	
Co	18	21	19	19	20	29	20	19	20	
Ni	293	338	302	327	292	440	329	271	323	
Cu	2.0	2.8	2.0	2.8	0.97	2.2	1.0	6.3	2.0	
Rb	0.06	0.05	0.05	0.04	0.44	0.03	0.05	0.08	0.18	
Sr	170	94	283	194	357	87	283	182	171	
Y	13	11	16	15	21	19	15	14	15	
Zr	21	25	35	40	387	30	22	18	11	
Nb	0.23	0.19	0.26	1.1	10	0.86	0.36	0.23	0.07	
Ba	0.12	0.09	0.27	0.52	11	0.13	0.61	1.31	0.33	
Hf	0.63	0.88	0.67	0.72	9.3	1.0	0.64	0.58	0.52	
Ta	0.02	0.01	0.01	0.07	0.86	0.06	0.04	0.02	0.01	
Pb	0.43	0.53	0.65	0.31	0.81	0.06	0.43	0.48	0.55	
U	0.24	0.58	0.30	0.27	0.20	0.03	0.16	0.27	0.31	
Th	0.93	1.6	1.1	0.92	0.84	0.10	0.64	1.03	1.1	
La	7.7	3.9	13	9.5	13	1.5	8.6	8.0	7.8	
Ce	14.3	7.4	33	21	39	4.6	25	16	17	
Pr	1.5	0.88	4.2	2.5	5.8	0.79	3.4	1.5	1.9	
Nd	5.6	4.5	18	11	28	4.8	14	5.4	7.2	
Sm	1.5	1.6	3.9	2.6	7.0	1.8	3.1	1.4	1.6	
Eu	0.59	0.69	1.4	0.95	2.2	0.73	1.2	0.59	0.65	
Gd	1.8	2.0	3.5	2.6	6.5	2.6	3.0	1.9	2.0	
Tb	0.34	0.36	0.54	0.45	0.89	0.47	0.43	0.33	0.37	
Dy	2.3	2.2	3.2	2.8	5.0	3.5	2.8	2.5	2.6	
Ho	0.53	0.44	0.64	0.59	0.86	0.73	0.57	0.56	0.59	
Er	1.5	1.1	1.6	1.6	2.0	2.1	1.5	1.7	1.7	
Tm	0.21	0.15	0.22	0.23	0.25	0.29	0.22	0.24	0.25	
Yb	1.5	0.99	1.6	1.6	1.5	2.0	1.5	1.7	1.6	
Lu	0.20	0.13	0.21	0.21	0.20	0.27	0.20	0.25	0.24	
样品号	不含交代矿物二辉橄榄岩									
	NS-01	NS-02	NS-03	NS-04	NS-05	NS-09	NS-10	08NS01	08NS02	
Li	1.4	1.41	1.42	1.6	1.4	1.4	1.8	1.7	1.4	
Sc	45	57	49	54	47	44	44	51	50	
Ti	2892	3149	1186	2383	2335	2997	2614	3699	2224	
V	229	257	221	260	236	241	208	237	221	
Cr	4776	4548	5823	5596	5103	5074	5104	5028	7869	
Co	26	23	24.4	23	27	28	25	26	27	
Ni	387	351	383	371	407	427	358	396	421	
Cu	2.2	2.7	2.2	2.4	2.4	4.0	2.3	1.9	1.8	
Rb	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	
Sr	77	73	50	77	61	80	84.6	77	79	
Y	16	19	12	13	14	15	15	17	12	
Zr	30	31	6.4	23	22	30	35	30	18	
Nb	0.27	0.15	1.8	0.60	0.21	0.30	0.51	0.26	0.29	
Ba	0.11	0.18	0.09	0.11	0.09	0.14	0.10	0.12	0.09	
Hf	0.90	0.99	0.26	0.63	0.69	0.88	0.99	0.93	0.42	

续表 7

Continued Table 7

不含交代矿物二辉橄辉岩									
样品号	NS-01	NS-02	NS-03	NS-04	NS-05	NS-09	NS-10	08NS01	08NS02
Ta	0.02	0.01	0.13	0.02	0.01	0.02	0.06	0.02	0.03
Pb	0.03	0.07	0.04	0.07	0.21	0.10	0.05	0.05	0.06
U	0.01	0.01	0.09	0.05	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Th	0.02	0.01	0.29	0.20	0.02	0.20	0.09	0.02	0.03
La	1.1	0.85	2.0	1.6	0.73	1.1	1.7	1.1	1.4
Ce	4.1	3.3	3.7	3.5	2.7	4.6	5.2	3.9	4.7
Pr	0.7	0.66	0.44	0.60	0.51	0.75	0.90	0.69	0.74
Nd	4.3	4.2	2.1	3.5	3.2	4.3	5.3	4.2	3.9
Sm	1.7	1.7	0.87	1.3	1.3	1.7	1.8	1.6	1.3
Eu	0.69	0.76	0.37	0.59	0.59	0.73	0.70	0.65	0.49
Gd	2.2	2.5	1.4	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	1.7
Tb	0.43	0.49	0.29	0.35	0.37	0.41	0.42	0.42	0.31
Dy	2.8	3.3	2.1	2.4	2.6	2.7	2.8	3.1	2.2
Ho	0.62	0.74	0.47	0.53	0.56	0.60	0.60	0.65	0.46
Er	1.7	2.0	1.3	1.4	1.6	1.6	1.6	1.9	1.4
Tm	0.24	0.30	0.19	0.21	0.22	0.23	0.22	0.28	0.19
Yb	1.6	2.0	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8	1.3
Lu	0.22	0.28	0.18	0.20	0.22	0.22	0.21	0.26	0.18

不含交代矿物二辉橄辉岩							方辉橄辉岩		
样品号	08NS04	08NS05	08NS06	08NS07	08NS08	08NS17	08NS18	08NS11	08NS13
Li	1.5	1.5	1.4	1.9	1.3	1.6	1.9	1.5	0.00
Sc	80	73	73	54	64	51	50	74	42
Ti	3924	938	3547	4076	346	3728	4273	3126	441
V	266	239	265	250	229	250	250	260	182
Cr	4319	5182	4932	5442	5948	5495	4447	7923	7387
Co	18	19	20	27	21	28	27	21	28
Ni	291	308	329	395	342	414	370	351	473
Cu	1.2	0.77	0.87	3.0	0.89	1.6	2.5	1.9	2.9
Rb	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03
Sr	72	2.9	70	108	1.5	82	96	56	24.1
Y	21	11	20	16.8	4.8	16	17	14	1.9
Zr	30.7	0.49	29	32.2	0.08	27	38	16	3.3
Nb	0.19	0.19	0.16	1.0	0.13	0.75	0.57	0.77	0.31
Ba	0.06	0.09	0.06	0.41	0.05	0.12	0.07	0.11	0.39
Hf	0.98	0.06	0.98	0.94	0.01	0.85	1.4	0.55	0.15
Ta	0.02	0.01	0.01	0.15	0.01	0.06	0.05	0.02	0.02
Pb	0.04	0.04	0.04	0.06	0.01	0.02	0.04	0.06	0.04
U	0.01	0.02	0.01	0.07	0.00	0.03	0.02	0.04	0.03
Th	0.02	0.05	0.04	0.25	0.01	0.09	0.06	0.15	0.10
La	0.98	0.18	0.88	2.8	0.06	1.4	1.7	1.5	0.97
Ce	3.1	0.18	3.2	7.2	0.14	4.5	5.6	3.7	2.1
Pr	0.60	0.02	0.61	1.05	0.01	0.77	0.97	0.57	0.29
Nd	3.7	0.15	3.8	5.7	0.05	4.3	5.7	3.2	1.4
Sm	1.6	0.23	1.6	1.9	0.05	1.7	2.0	1.2	0.38
Eu	0.63	0.13	0.66	0.75	0.02	0.69	0.89	0.49	0.11
Gd	2.6	0.75	2.5	2.6	0.20	2.2	3.2	1.8	0.36
Tb	0.48	0.19	0.47	0.44	0.06	0.41	0.55	0.33	0.05
Dy	3.7	1.7	3.6	3.2	0.66	2.9	3.6	2.5	0.36
Ho	0.82	0.41	0.77	0.66	0.18	0.60	0.72	0.54	0.08
Er	2.5	1.3	2.3	1.9	0.62	1.8	2.1	1.5	0.22
Tm	0.35	0.20	0.31	0.26	0.10	0.26	0.27	0.22	0.04
Yb	2.3	1.4	2.2	1.7	0.80	1.7	1.7	1.5	0.28
Lu	0.34	0.20	0.30	0.24	0.11	0.23	0.26	0.21	0.04

(Hellebrand *et al.*, 2001) (适用于 $0.1 < Cr^{\#} < 0.6$)。我们的计算结果为两个方辉橄辉岩 08NS13 与 08NS11 经历的部分熔融程度分别约为 16% 与 7%; 二辉橄辉岩中含交代矿物的包体经历的部分熔融程度约为 2% ~ 10%, 其他不含交代矿物的二辉橄辉岩部分熔融程度约为 1% ~ 8%。结果表明, 女山地区的岩石圈地幔大都经历了低至中等程度的部分熔融, 只有少量的方辉橄辉岩样品经历了较高等度的部分熔融抽取。

5.5 角闪石、磷灰石、金云母及斜长石

样品中角闪石均为非闪石, 其成分 (表 6) 与世界其它地区碱性玄武岩中橄辉岩包体中的角闪石成分类似 (Wilkinson and Lemaitre, 1987)。作为最主要的交代矿物, 角闪石富含微量元素, 且许多微量元素的含量高于相应样品中的单斜辉石。如图 5a 稀土元素配分图所示, 角闪石的轻稀土元素相对于重稀土元素明显富集。从微量元素蛛网图中可以看出, 二辉橄辉岩 08NS03 中的角闪石表现出明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 的正异常, 不同于其它贫角闪石样品 Ta、Zr、Hf 亏损的特点 (图 5b)。

我们对 08NS03 和 08NS14 中的磷灰石分别进行了原位主量元素与微量元素测定 (表 6、表 8)。结果显示两个样品中的磷灰石在主量元素与微量元素成分上都十分相似。主要成分除了 P 与 Ca 外还含有一定量的 SiO_2 , FeO, MgO, Na_2O , 以及一定量的挥发份元素 F (08NS03 为 0.2%, 08NS14 为 2.2%) 和 Cl (08NS03 为 1.2%, 08NS14 为 1.0%)。在稀土配分图中可以看出 (图 5c), 磷灰石的稀土元素含量极高, 并且强烈富集轻稀土元素。其它大部分微量元素的含量极高, 相对亏损 Rb、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 元素 (图 5d)。这些磷灰石都具有较高 Sr ($\sim 10000 \times 10^{-6}$), Th ($125 \times 10^{-6} \sim 157 \times 10^{-6}$), U ($36 \times 10^{-6} \sim 39 \times 10^{-6}$) 含量, 中等的 Y ($146 \times 10^{-6} \sim 193 \times 10^{-6}$), Ba ($209 \times 10^{-6} \sim 316 \times 10^{-6}$) 含量, 以及较高的 Sr/Y (~ 53) 比值, 较低的 Sr/Th ($50 \sim 82$) 比值, 较低并且接近原始地幔 Ce/Th ($12 \sim 18$, PM = 21) 比值, 这些成分特征与 O'Reilly and Griffin (2000) 文章中描述的受到来自于类似原始地幔源区的碳酸盐熔体或富 CO_2 的流体交代产生的磷灰石相近, 而与从富含碳酸质-硅质成分的岩浆中结晶形成的磷灰石存在明显差别。

只有一个样品 08NS09 发现金云母, 其矿物主量元素成分见表 6。从稀土配分和微量元素蛛网图中 (图 5e, f) 可以看出金云母中的大部分稀土微量元素含量较低, 只有 Rb、Ba、Nb、Ta、Ti 元素较为富集。

样品 08NS14 矿物颗粒间的脉体中还发育有斜长石, 电子探针的分析结果显示 (表 6) 其 An 变化范围为 19 ~ 38, 主要为中酸性的更长石-中长石。

5.6 温度特征

根据矿物成分的电子探针结果, 我们计算了女山地幔橄

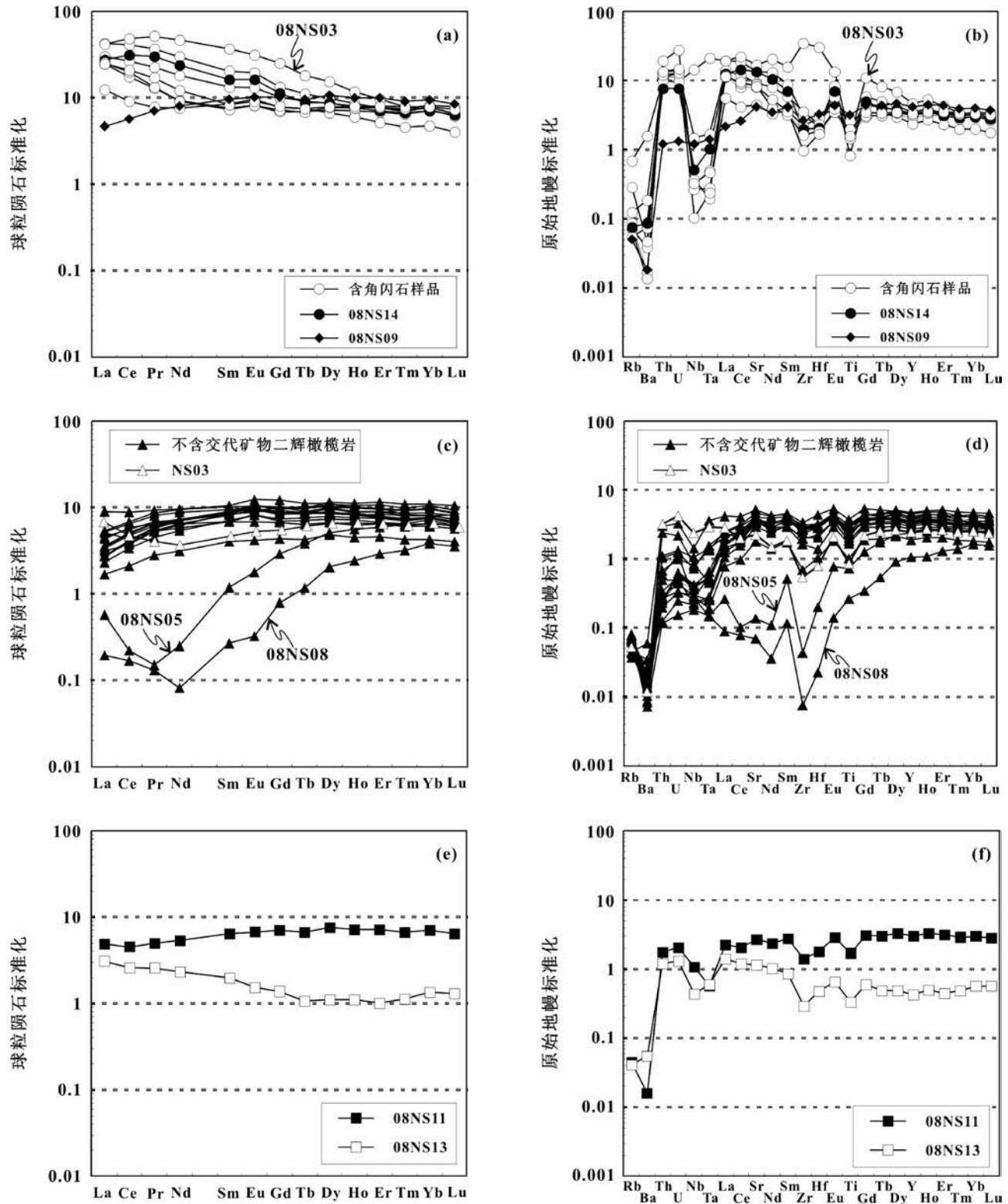


图4 女山地幔橄辉岩包体中单斜辉石的稀土配分型式和微量元素蛛网图(球粒陨石标准值和原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 REE patterns and trace element spidergrams of clinopyroxenites from the Nushan peridotitic xenoliths (chondrite data and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

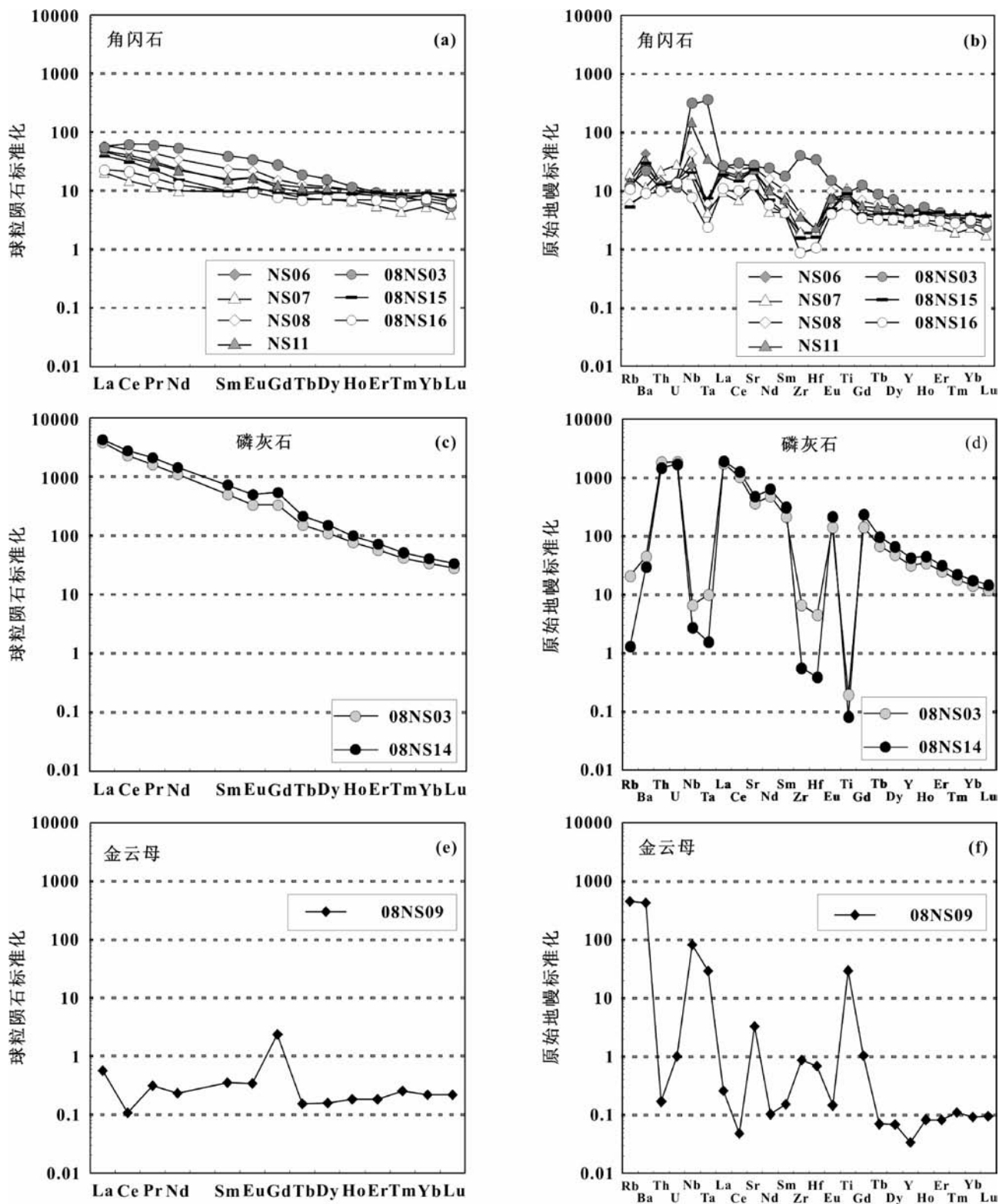


图5 女山地幔包体中角闪石、磷灰石、金云母的稀土配分和微量元素蛛网图(球粒陨石标准值和原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 REE pattern and trace element spidergrams of amphibole, apatite and phlogopite from Nushan peridotitic xenoliths (chondrite data and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

表 8 女山地幔橄榄岩包体中角闪石、磷灰石、金云母的微量、稀土元素丰度 ($\times 10^{-6}$)Table 8 Trace element compositions of amphibole, apatite and phlogopite from the Nushan peridotitic xenoliths ($\times 10^{-6}$)

样品号	角闪石							金云母		磷灰石	
	NS06	NS07	NS08	NS11	08NS03	08NS15	08NS16	08NS09	08NS03	08NS14	
Li	0.0	0.0	1.7	0.0	0.82	27	4.2	1.3	1.8	1.4	
Sc	50	37	48	46	28	49	41	8.70	2.9	1.6	
Ti	9404	13894	7177	11836	11718	11515	7249	38499	231	105	
V	383	36	370	377	219	383	343	450	7.0	3.0	
Cr	9170	10422	7885	7703	6943	7631	7451	7128	103	353	
Co	40	41	37	41	39	40	41	65	9.1	2.2	
Ni	921	940	799	931	766	894	964	1661	154	67	
Cu	2.2	5.0	2.5	4.9	1.1	121	3.0	16	14	17	
Rb	9.3	12	3.8	8.7	7.4	6.2	3.6	290	13	0.83	
Sr	481	252	535	468	571	475	259	69	7787	10313	
Y	17	12	21	20	21	17	13.	0.15	146	193	
Zr	21	22	46	40	438	17	9.7	9.8	75	6.2	
Nb	19	13	30	102	220	14	5.4	59	4.8	2.0	
Ba	290	78	60	218	152	201	61	2998	316	209	
Hf	0.57	0.62	0.67	0.70	10	0.50	0.33	0.21	1.4	0.12	
Ta	0.23	0.17	0.24	1.4	14	0.30	0.10	1.2	0.42	0.07	
Pb	1.4	1.9	1.7	1.1	2.0	2.2	1.7	0.34	13	9.6	
U	0.30	0.58	0.27	0.29	0.24	0.29	0.28	0.02	39	36	
Th	1.2	1.8	1.2	1.1	0.97	1.1	0.83	0.01	157	125	
La	15	6.5	19	14.6	18	12.4	7	0.18	1224	1334	
Ce	33	12	41	30	51	26	18	0.09	1852	2252	
Pr	3.7	1.3	5	3.3	7.0	2.6	1.9	0.04	183	237	
Nd	14	5.9	21	13.5	33	9.3	7.5	0.14	658	865	
Sm	2.9	1.9	4.6	3.1	7.7	1.9	1.9	0.07	95	139	
Eu	1.2	0.79	1.6	1.2	2.5	0.81	0.67	0.02	24	36	
Gd	2.9	2.4	4.0	3.3	7.3	2.4	2.0	0.61	87	141	
Tb	0.46	0.37	0.63	0.56	0.94	0.43	0.34	0.01	7.4	11	
Dy	3.1	2.3	3.7	3.6	5.2	3.0	2.3	0.05	36	49	
Ho	0.67	0.49	0.76	0.76	0.85	0.67	0.51	0.01	5.7	7.4	
Er	1.7	1.2	1.9	2.0	2.0	2.0	1.5	0.04	12	16	
Tm	0.24	0.14	0.27	0.28	0.25	0.28	0.20	0.01	1.3	1.7	
Yb	1.7	1.1	1.7	1.9	1.4	1.9	1.5	0.05	7.1	8.6	
Lu	0.21	0.13	0.22	0.26	0.18	0.27	0.20	0.01	0.90	1.1	

榄岩包体的形成温度(表9)。利用计算的温度计有:Wood and Banno (1973)、Wells (1977)二辉石温度计,Brey and Kohler (1990)二辉石 Ca 温度计和斜方辉石中 Ca 温度计,Witt-Eickschen and Seck (1991)斜方辉石中的 Cr-Al 温度计。虽然不同的温度计给出的温度存在一定的差别,但温度高低的趋势大体是一致的。含交代矿物的二辉橄榄岩样品中除含金云母的 08NS09 外,其余样品均具有较低的形成温度(881~1033℃),08NS09 的平衡温度较高,为 1025~1140℃。不含交代矿物的二辉橄榄岩大都具有较高的平衡温度(1009~1167℃),个别样品的温度较低(08NS05, 08NS06, 08NS08) 847~1038℃。两个方辉橄榄岩的温度相差较大,08NS11 为典型的低温样品(943~1067℃),而 08NS13 却显示为高温特点(1028~1111℃)。根据 Xu *et al.* (1998) 获得的女山地区新生代时期的地温曲线,可以估算这些橄榄岩

包体的来源深度(如图6)。含交代矿物的二辉橄榄岩大都来源深度较浅(小于48km),只有含金云母样品 08NS09 来源较深,约65km。不含交代矿物的二辉橄榄岩的来源深度范围最广,约25~72km。两个方辉橄榄岩分别来自于大约45km和65km的较深层位,并没有“漂浮”在岩石圈地幔浅部。

6 Sr-Nd-Hf-Os 同位素

11 件二辉橄榄岩样品单斜辉石 Sr-Nd-Hf 同位素分析结果见表 10。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围是 0.7023~0.7037, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 是 0.51292~0.51346,均表现了亏损地幔的同位素特征,明显不同于华北克拉通古生代金伯利岩中地幔橄榄岩,而与华北克拉通东部新生代地幔包体的同位素组成相似。

表9 女山地幔橄榄岩包体温度计算结果 (°C)

Table 9 Calculated equilibrium temperature (°C) of the Nushan peridotitic xenoliths

样品号	Wood and Banno (1973)	Wells (1977)	Brey and Kohler (1990) ^a	Brey and Kohler (1990) ^b	Eickschen and Seck (1991)	
NS-06	1043	936	980	891	998	
NS-07	1057	951	1004	939	1033	
NS-08	1021	917	956	906	991	
含交代矿物二辉橄 榄岩	NS-11	1062	961	1015	934	1027
08NS03	1006	916	970	910	819	
08NS09	1138	1067	1140	1069	1025	
08NS14	1025	920	1000	906	958	
08NS15	987	885	930	893	918	
08NS16	984	881	932	928	935	
NS-01	1164	1094	1166	1074	1080	
NS-02	1117	1032	1099	1009	1033	
NS-03	1161	1083	1146	1066	1110	
NS-04	1102	1010	1061	980	1037	
NS-05	1162	1087	1149	1071	1107	
NS-09	1167	1097	1167	1073	1097	
不含交代矿物二辉橄 榄岩	NS-10	1147	1096	1160	1083	1095
08NS01	1146	1080	1151	1080	1049	
08NS02	1155	1083	1152	1075	1102	
08NS04	1021	924	955	905	882	
08NS05	996	887	861	882	847	
08NS06	1030	929	964	943	905	
08NS07	1136	1069	1142	1075	1030	
08NS08	1038	933	909	888	896	
08NS17	1119	1046	1111	1077	1068	
08NS18	1126	1063	1131	1074	1052	
方辉橄 榄岩	08NS11	1067	966	1001	943	991
08NS13	1178	1099	1111	1109	1028	

a-二辉石 Ca 温度计; b-斜方辉石 Ca 温度计

在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 对应图上, 这些样品表现出一定的相关性 (图 7a), 含交代矿物的二辉橄榄岩样品相对其它不含交代矿物的二辉橄榄岩具有更高的 Sr 同位素比值和更低的 Nd 同位素比值。另外, 这些样品的 Hf 同位素组成同样表现为亏损地幔特征, 且 Hf 同位素比值变化范围较宽 ($\epsilon_{Hf}(t)$ 为 9.1 ~ 28.5, NS-03 具有异常高的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 68.6), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的变化与样品中是否含有交代矿物不存在相关性 (图 7b)。磷灰石原位 Sr、Nd 同位素测定的结果列于表 11, 其中 08NS03 中磷灰石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.70333, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512820; 08NS14 中磷灰石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.70312, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512960, 均表现为亏损特征 (图 7a)。

女山地区的橄榄岩包体的全岩 Os 同位素如表 12 所示。这些包体均具有较低的 Re 含量 ($0.02 \times 10^{-9} \sim 0.17 \times 10^{-9}$), 低于原始上地幔值 (0.34×10^{-9}) (Meisel *et al.*,

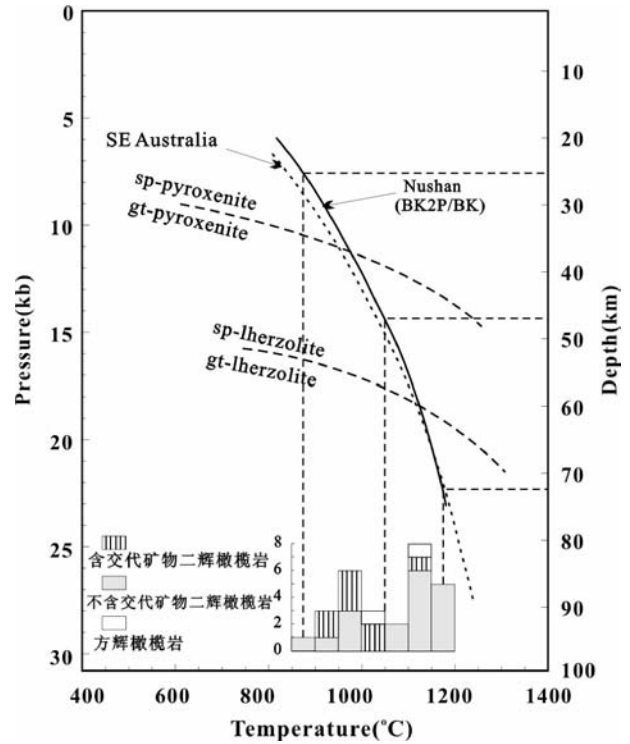


图6 女山地温曲线 (底图据 Xu *et al.*, 1998)

柱状图温度计算根据 Brey and Kohler (1990) 二辉石 Ca 温度计

Fig. 6 Geotherm of Nushan (after Xu *et al.*, 1998)

2001), 表明它们为岩石圈地幔成因, 且较少受到后期富 Re 物质的干扰; Os 含量变化范围较大, 为 $0.87 \times 10^{-9} \sim 3.45 \times 10^{-9}$, 大部分样品的 Os 含量相对于原始地幔 (3.4×10^{-9}) (McDonough and Sun, 1995), 都表现为亏损特征。27 个样品中的 18 个样品的 Os 含量 $< 1.5 \times 10^{-9}$, 甚至其中的 6 个样品 Os 含量 $< 1 \times 10^{-9}$, 这在岩石圈地幔橄榄岩中较为少见, 可能是分析过程的块金效应导致, 也可能是地幔橄榄岩在经历部分熔融后又有其它作用造成 Os 同位素的活化迁移降低了其在残余地幔中的丰度, 如原生的含 Os 硫化物分解。

女山地幔橄榄岩包体的全岩¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值范围是 0.0305 ~ 1.0622, 其中有 6 个样品的¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值高于原始上地幔 (0.435)。可能是由于 Re-Os 同位素体系在部分熔融后受到扰动, 导致相对的 Re 的得到和/或 Os 的丢失, 结果造成¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值增大。分析得到的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值范围为 0.1183 ~ 0.1323 (NS-02 的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值异常高, 为 0.1372), 大多与现代深海橄榄岩相似。方辉橄榄岩 08NS11 具有最低 Os 同位素比值 (0.1184), 另一个方辉橄榄岩 08NS13 的 Os 同位素比值较高为 0.1223。从图 8a 中可以看出, 女山地幔橄榄岩包体的¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 与¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 间缺乏明显的线性关系。Al₂O₃ 与¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 间也不存在明显的线性关系。

我们选择一部分样品中对其进行铂族元素 (Platinum group element, 简称 PGE) 的分析, 包含 Os, Ir, Ru, Pt, Pd。长

表 10 女山地幔橄榄岩包体单斜辉石的 Sr-Nd-Hf 同位素特征

Table 10 Sr-Nd-Hf isotopic data of the clinopyroxenes from Nushan peridotitic xenoliths

样品号	含交代矿物二辉橄榄岩			不含交代矿物二辉橄榄岩						
	NS-06	NS-07	NS-08	NS-01	NS-02	NS-03	NS-04	NS-05	NS-09	NS-10
Rb ($\times 10^{-6}$)	0.04	0.08	0.50	0.30	0.17	1.37	0.08	0.05	0.08	0.08
Sr ($\times 10^{-6}$)	153	86.6	297	38.8	71.2	49.3	85.1	54.1	73.6	82.6
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.001	0.003	0.005	0.022	0.007	0.080	0.003	0.003	0.003	0.003
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.703388	0.703420	0.703680	0.702744	0.702422	0.703172	0.702823	0.702270	0.702267	0.702928
2σ	0.000010	0.000012	0.000012	0.000013	0.000012	0.000009	0.000013	0.000008	0.000012	0.000013
Sm ($\times 10^{-6}$)	1.40	5.28	1.33	2.23	0.612	1.43	1.74	2.09	2.41	1.10
Nd ($\times 10^{-6}$)	6.53	5.83	18.1	4.52	4.99	1.88	3.94	4.06	4.32	4.70
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1300	0.5479	0.0443	0.3048	0.0741	0.4600	0.2660	0.3114	0.3371	0.1418
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.513013	0.512948	0.512921	0.513175	0.513392	0.513440	0.513251	0.513460	0.513216	0.513119
2σ	0.000013	0.000014	0.000012	0.000013	0.000013	0.000012	0.000013	0.000025	0.000011	0.000014
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	7.2	5.7	5.4	10.3	14.7	15.6	11.8	15.9	11.1	9.3
Lu ($\times 10^{-6}$)	0.172	0.067	0.230	0.101	0.205	0.116	0.183	0.164	0.140	0.138
Hf ($\times 10^{-6}$)	0.466	0.645	1.133	0.487	0.693	0.179	0.543	0.479	0.670	0.672
$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	0.0526	0.0148	0.0289	0.0295	0.0421	0.0921	0.0478	0.0487	0.0297	0.0291
$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	0.283548	0.283029	0.283153	0.283509	0.283381	0.284711	0.283529	0.283577	0.283275	0.283299
2σ	0.000010	0.000010	0.000009	0.000012	0.000008	0.000022	0.000011	0.000013	0.000007	0.000008
$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	27.4	9.1	13.5	26.1	21.5	68.55	26.8	28.5	17.8	18.6

表 11 女山地幔橄榄岩包体磷灰石 Sr-Nd 同位素特征

Table 11 Sr-Nd isotopic data of the apatites from Nushan peridotitic xenoliths

样品号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
08NS03	0.001	0.0002	0.70333	0.00003	0.0946	0.0020	0.512820	0.000023	3.7
08NS14	0.000	0.0001	0.70312	0.00002	0.0951	0.0017	0.512960	0.000039	6.4

表 12 女山地幔橄榄岩 Os 同位素分析结果

Table 12 Os isotopic data of the Nushan peridotitic xenoliths

样品号	Al ₂ O ₃	Re	Os	$\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}$	$\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}$	σ	γ_{Os}	t_{RD}	t_{MA}	
	(wt%)	($\times 10^{-9}$)	($\times 10^{-9}$)					(Ga)	(Ga)	
含交代矿物 二辉橄榄岩	NS-06	2.17	0.08	1.46	0.2753	0.1217	0.0002	-6.1	1.08	2.93
	NS-07	2.17	0.04	1.41	0.1289	0.1211	0.0001	-6.5	1.16	1.65
	NS-08	3.26	0.11	0.49	1.0622	0.1239	0.0001	-4.4	0.78	-0.54
	NS-11	2.49	0.12	1.72	0.3335	0.1256	0.0002	-3.1	0.55	2.37
	08NS03	3.76	0.11	1.48	0.3472	0.1260	0.0263	-2.8	0.50	2.48
	08NS09	3.69	0.16	0.94	0.8024	0.1262	0.1423	-2.6	0.47	-0.56
	08NS14	2.71	0.04	1.19	0.1462	0.1191	0.0785	-8.1	1.43	2.15
	08NS15	2.88	0.02	1.13	0.1003	0.1254	0.1552	-3.3	0.58	0.76
	08NS16	3.55	0.06	1.58	0.1709	0.1272	0.0803	-1.9	0.33	0.55
	不含交代矿物 二辉橄 榄岩	NS-01	3.00	0.07	3.14	0.1134	0.1260	0.0002	-2.7	0.49
NS-02		3.44	0.12	0.87	0.6588	0.1372	0.0001	5.9	-1.06	1.99
NS-03		2.89	0.06	1.72	0.1642	0.1266	0.0002	-2.3	0.42	0.67
NS-04		2.99	0.07	1.22	0.2826	0.1252	0.0000	-3.4	0.61	1.73
NS-05		3.44	0.12	1.30	0.4481	0.1317	0.0001	1.6	-0.29	7.88
NS09		3.58	0.03	0.94	0.1516	0.1269	0.1063	-2.1	0.37	0.57
NS-10		3.66	0.06	0.89	0.3297	0.1241	0.0002	-4.2	0.75	3.09
08NS01		3.23	0.03	0.91	0.1348	0.1255	0.0466	-3.1	0.56	0.82
08NS04		4.66	0.10	1.16	0.4097	0.1323	0.0370	2.1	-0.37	-7.30
08NS05		2.54	0.11	1.19	0.4265	0.1257	0.1134	-3.0	0.55	28.53

续表 12

Continued Table 12

样品号	Al ₂ O ₃ (wt%)	Re (×10 ⁻⁹)	Os (×10 ⁻⁹)	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	σ	γ _{Os}	t _{RD} (Ga)	t _{MA} (Ga)	
08NS06	3.77	0.13	1.57	0.3958	0.1262	0.2357	-2.6	0.47	5.28	
不含交代矿物 二辉橄 榄岩	08NS07	3.75	0.07	1.61	0.2126	0.1261	0.0260	-2.7	0.48	0.93
	08NS08	2.28	0.03	1.08	0.1208	0.1272	0.1300	-1.9	0.34	0.46
	08NS17	3.59	0.13	1.08	0.5946	0.1263	0.1864	-2.6	0.46	-1.24
	08NS18	4.57	0.17	1.03	0.7821	0.1299	0.0901	0.2	-0.04	0.05
方辉橄 榄岩	08NS11	1.56	0.02	3.45	0.0305	0.1184	0.1102	-8.7	1.54	1.65
	08NS13	1.09	0.03	2.61	0.0626	0.1223	0.0000	-5.6	1.01	1.17

表 13 女山地幔橄辉岩铂族元素分析结果

Table 13 PGE data of the Nushan peridotitic xenoliths

样品号	Os (×10 ⁻⁹)	Ir (×10 ⁻⁹)	Ru (×10 ⁻⁹)	Pt (×10 ⁻⁹)	Pd (×10 ⁻⁹)	Re (×10 ⁻⁹)	
08NS-03	1.48	2.04	3.97	4.68	2.05	0.11	
含交代矿物 二辉橄 榄岩	08NS-09	0.94	1.78	3.16	4.21	1.91	0.16
	08NS-14	1.19	1.78	3.10	2.99	1.25	0.04
	08NS-15	1.13	2.25	4.51	5.49	2.75	0.02
	08NS-16	1.58	2.04	4.03	5.85	3.63	0.06
不含交代矿物 二辉橄 榄岩	08NS-05	1.19	2.13	3.29	5.93	2.22	0.11
	08NS-06	1.57	2.26	4.57	5.09	2.04	0.13
	08NS-07	1.61	2.61	4.73	4.52	2.13	0.07
	08NS-08	1.08	1.17	2.22	6.29	3.73	0.03
	08NS-18	1.03	1.73	3.66	5.14	2.61	0.17
方辉橄 榄岩	08NS-11	3.45	2.98	4.64	5.40	0.72	0.02
	08NS-13	2.61	2.23	3.36	6.06	2.12	0.03

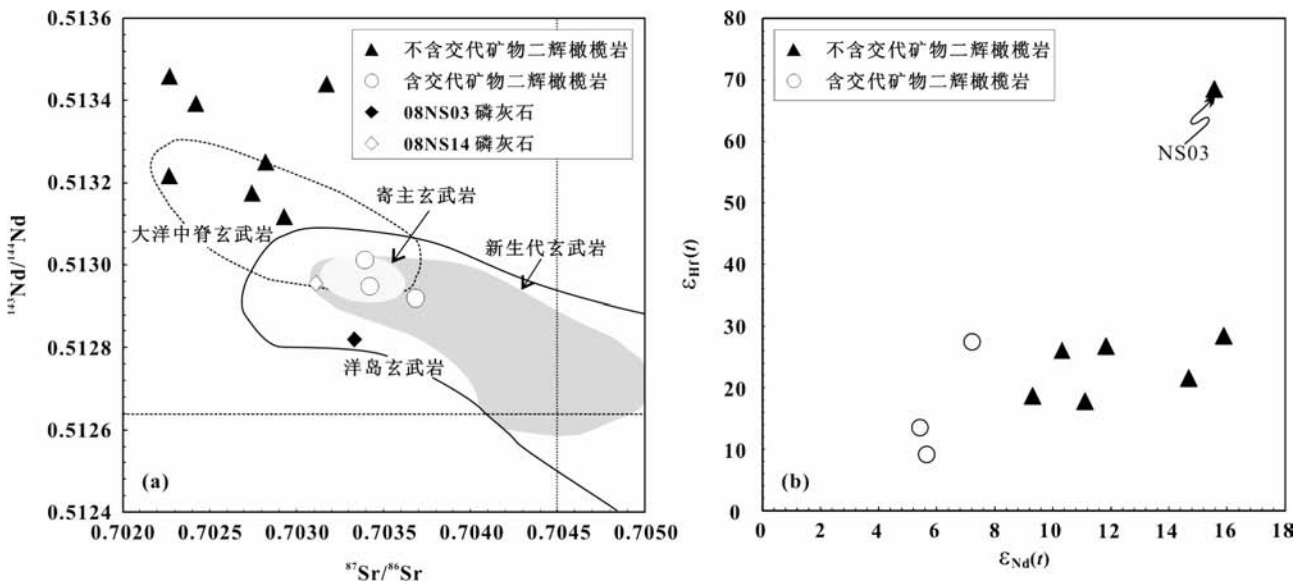


图 7 女山地幔橄辉岩包体的 Sr-Nd-Hf 同位特征 (Sr-Nd 对应图底图根据 Xu *et al.*, 2004)

Fig. 7 Sr-Nd-Hf isotopic variations of the Nushan peridotitic xenoliths (after Xu *et al.*, 2004)

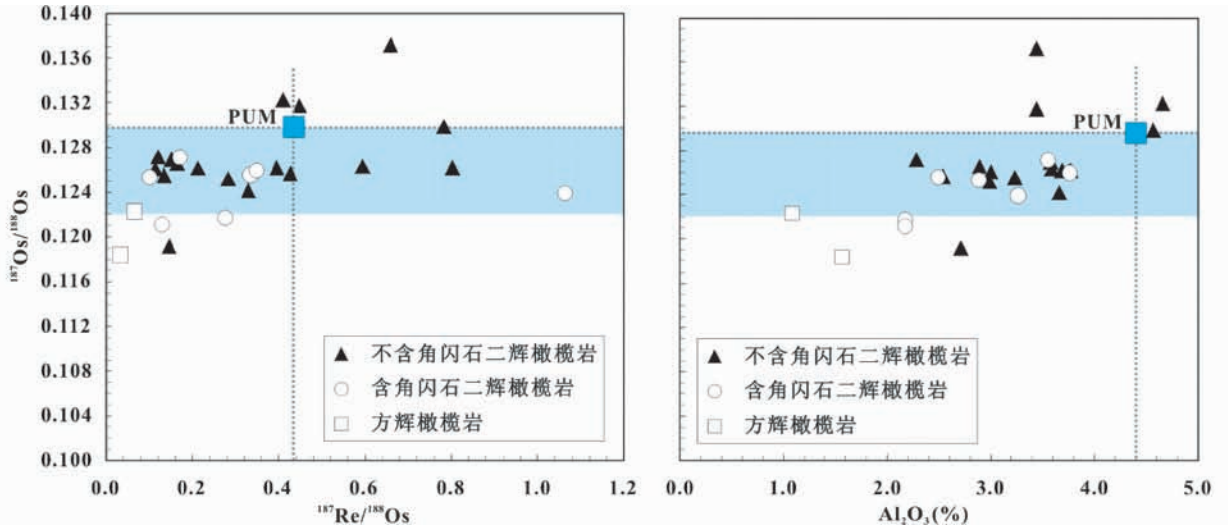


图8 女山地幔橄榄岩包体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 Al_2O_3 相关图

Fig. 8 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ and Al_2O_3 variation diagrams

期以来的研究表明, PGE 在地幔橄榄岩中主要赋存于硫化物中, 可以根据元素间密切程度将 PGE 划分为 IPGE (Os, Ir, Ru) 和 PPGE (Pt, Pd) (Barnes *et al.*, 1985)。IPGE 与 PPGE 的差别表现在地幔部分熔融过程中 IPGE 趋于相容, 而 PPGE 趋于不相容 (Brugmann *et al.*, 1987)。Re 元素的性质近似于 PPGE。

PGE 元素分析结果列于表 13。如图 9a, 含交代矿物的二辉橄榄岩样品球粒陨石标准化后 PGE 大体呈平坦的模式分布, 没有表现出强烈的 PGE 分异, 即 PPGE 相对于 IPGE 一定程度的亏损, 各样品均亏损 Re 元素。不含交代矿物的二辉橄榄岩具有相似的 PGE 分配型式 (图 9b), 其中 08NS08 的 IPGE 含量在所有样品中最低, PPGE 含量比其它样品略显富集, 表现出 PPGE 相对于 IPGE 上翘的形式。两个方辉橄榄岩样品表现出 Pd 与 Re 的亏损, 但另一个 PPGE 元素 Pt 没有亏损迹象, 没有表现出 PGE 分异特征 (图 9c)。

7 讨论

7.1 女山地区岩石圈地幔的部分熔融和后期交代作用

从上述资料可以看出, 女山地区新生代玄武岩中的橄榄岩属熔体抽取后的地幔残留。这些地幔橄榄岩中的橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 均小于 91, 不同于古老的克拉通型地幔的难熔特征。利用尖晶石 $\text{Cr}^\#$ 估算出方辉橄榄岩 08NS13 经历了约为 16% 的较高程度部分熔融, 而另一个方辉橄榄岩 08NS11 经历了约 7% 的部分熔融; 其余二辉橄榄岩样品的部分熔融程度较低, 大多小于 10%。利用单斜辉石中 Yb 与 Y 的含量同样可以很好的估算岩石圈地幔经历的部分熔融程度, 如图 10 所示, 方辉橄榄岩 08NS13 经历了最高程度的部分熔融 ~ 17%, 另一个方辉橄榄岩的部分熔融程度较低, 与利用尖晶石 $\text{Cr}^\#$ 估

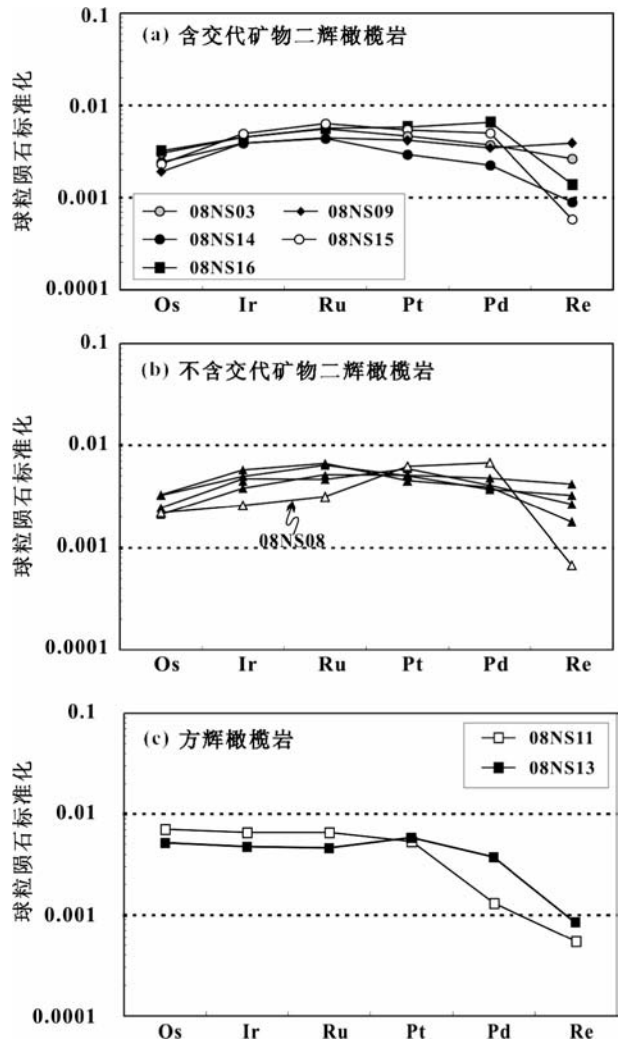


图9 女山地幔橄榄岩包体铂族元素配分图

Fig. 9 PGE patterns of the Nushan peridotitic xenoliths

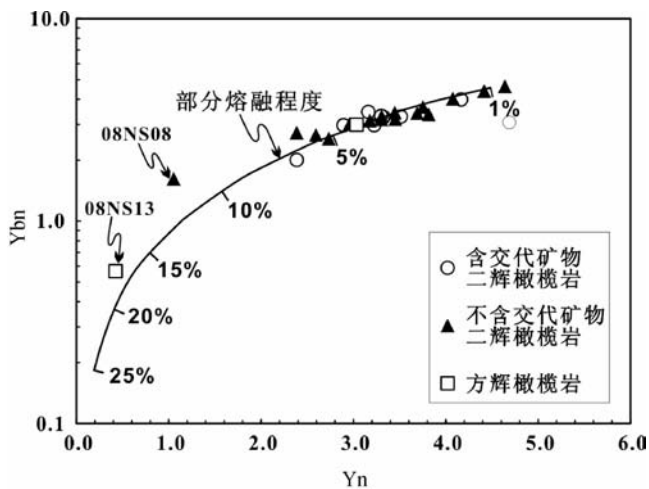


图 10 单斜辉石 Y-Yb 含量估算部分熔融程度 (底图根据 Xu et al., 2000)

Fig. 10 Fractional melting modeling of Y vs Yb in cpx (after Xu et al., 2000)

算部分熔融程度的结果相似; 二辉橄辉岩 08NS08 的部分熔融程度明显高于其它二辉橄辉岩, 其它二辉橄辉岩的部分熔融程度均小于 10%, 含交代矿物的二辉橄辉岩与不含交代矿物的二辉橄辉岩经历的部分熔融程度相似。综合前面所述资料, 二辉橄辉岩样品中含交代矿物的样品与不含交代矿物的样品在主要元素、橄辉石 $Mg^{\#}$ 、尖晶石 $Cr^{\#}$ 及重稀土含量等均没有本质差别, 饱满程度类似。总体看来, 女山地区新生代玄武岩中橄辉岩具有与大洋型岩石圈地幔相似的饱满特征, 与华北地区古生代金伯利岩中难熔的橄辉岩包体存在明显差别。

女山地幔橄辉岩包体中出现大量的含挥发份矿物角闪石、磷灰石、金云母表明该区的岩石圈地幔经历过显著的交代作用。但从前述的资料可以看出, 女山地区不同类型地幔橄辉岩的交代特征并不完全相同。方辉橄辉岩样品 08NS13 轻稀土元素表现了后期富集的特征, 而另一个方辉橄辉岩样品 08NS11 轻稀土元素略微的亏损, 难以分辨出后期交代的特征。这可能暗示着 08NS11 样品没有受到强烈的后期交代作用, 或者是由于样品 08NS11 经历的部分熔融程度较低, 稀土元素含量较高, 后期的交代作用难以显著改变稀土配分特征。出现显性交代矿物的二辉橄辉岩样品也具有不同的稀土配分特征, 含角闪石与磷灰石的样品都不同程度的富集轻稀土元素, 但是含有金云母的样品 08NS09 却亏损轻稀土元素。其它不含交代矿物的二辉橄辉岩样品大都亏损轻稀土元素, 少量样品 (NS03) 表现出轻稀土后期富集的交代特征。女山地区岩石圈地幔的交代特征存在差异性, 可能是由于交代作用的空间范围局限性, 也可能由于交代作用对不同的岩石类型具有选择性。

交代地幔橄辉岩的熔体/流体来源途径主要有寄主岩浆、软流圈、俯冲或拆沉进入软流圈的壳源物质。虽然对女

山地幔橄辉岩交代介质的性质还存在不同的看法, 但是前人的工作证明交代事件发生在喷发前不久 (李建平等, 2001; Xu et al., 2003; Xu and Bodinier et al., 2004)。Xu et al. (2003) 通过对比全岩、单斜辉石及寄主玄武岩的 Sr-Nd 同位素组成发现, 女山地幔包体的全岩具有更高的放射性 Sr 同位素组成, 推测这是由于交代介质具有较高含量的放射性成因 Sr 所致; 而寄主玄武岩的 Sr-Nd 同位素组成位于淋滤过的单斜辉石与全岩之间, 表明女山地幔橄辉岩的交代介质不可能是寄主玄武岩。我们的研究进一步限定了交代介质的特征和来源。如图 7a 所示, 三个受到显性交代的含角闪石二辉橄辉岩比其它二辉橄辉岩样品具有更低的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 和更高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素组成, 暗示交代介质具有类似原始地幔或者更富集的 Sr-Nd 同位素组成, 不可能是来源于软流圈的具有亏损同位素组成的熔体/流体。显性交代矿物磷灰石的成分和同位素组成可以很好的限制交代介质的性质, 如前面资料所述, 女山地幔橄辉岩中出现的磷灰石具有较高的 Sr、Th、U 含量和 Sr/Y 比值, 较低的 Sr/Th、Ce/Th 比值, 与来自原始地幔的富 CO_2 熔体/流体交代产生的磷灰石相似 (O'Reilly and Griffin, 2000)。磷灰石的原位 Sr-Nd 同位素分析结果同样暗示了交代介质具有相对富集的同位素组成。此外, 我们发现一个受交代程度最强烈, 富角闪石和磷灰石的样品 08NS03, 表现出了与其它含交代矿物的二辉橄辉岩样品不同的稀土微量元素特征, 它的单斜辉石与角闪石都富集 Nb、Ta、Zr、Hf 高场强元素, 但是明显不富集 Ti, 由于 Ti 在 H_2O 和 CO_2 的流体中溶解度较低 (Schneider and Eggler, 1986), 所以可限定交代介质成分具有富 H_2O 和 CO_2 特征。样品 08NS14 脉体中出现中酸性的斜长石表明交代介质应该是硅饱和的长英质熔体, 应该有壳源物质的贡献。樊祺诚等 (2005) 曾对中国东部新生代地幔橄辉岩捕虏体中的熔融包裹体进行了详细的分析, 发现它们大都属于高钾钙碱系列的英安岩和安山岩, 并指出这种富钾中酸性硅酸盐更具大陆特点, 推测其来源是被捕获的中生代岩石圈壳-幔相互作用的熔体。综上所述, 我们可以推断女山地幔橄辉岩的交代介质具有类似原始地幔或者更富集的 Sr-Nd 同位素组成, 富集高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf, 富含 H_2O 和 CO_2 , 且硅饱和, 其源区可能有俯冲或拆沉进入软流圈的壳源物质的贡献。

7.2 女山地区岩石圈地幔的年代

从岩石成分和矿物学的角度来看, 女山岩石圈地幔与典型的太古宙克拉通型岩石圈地幔明显不同, 而是与大洋岩石圈地幔或元古宙-显生宙的岩石圈地幔存在一定的类似性, 显示了年轻的特征。

获得岩石圈地幔年代更直接的手段是通过 Os 同位素分析, 但是由于地幔中广泛的熔体/流体作用, 不能排除它对地幔岩的 Os 同位素组成的影响。下面我们就熔体/流体的作用对 Os 同位素模式年龄可能产生的影响进行讨论。首先是玄武质熔体对地幔橄辉岩的再富集作用。如果地幔岩经历

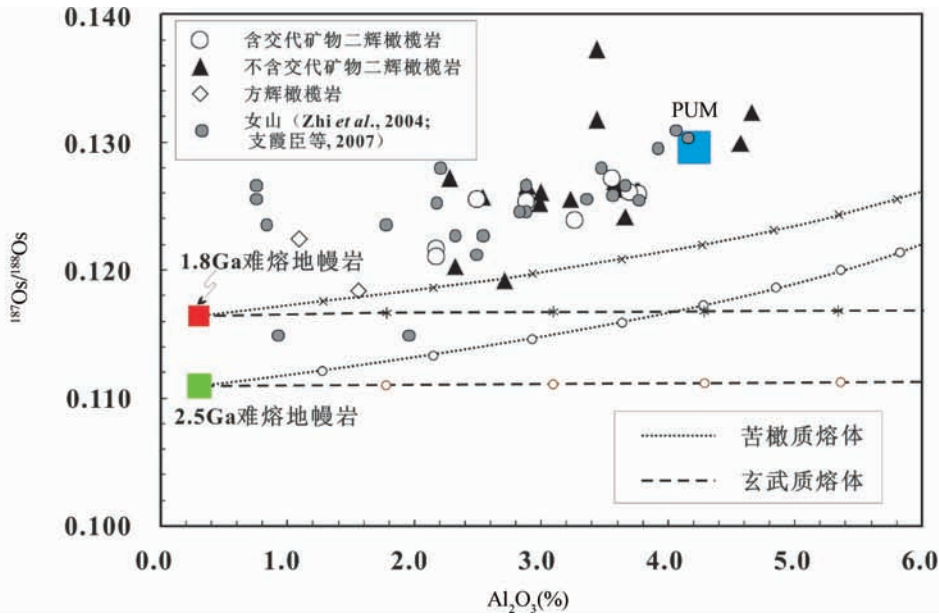


图 11 难熔地幔橄榄岩再富集作用模拟示意图

假设难熔地幔橄榄岩为 $\sim 2.5\text{Ga}$, $\text{Os} = 3.5 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.111$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3\%$; 难熔地幔橄榄岩为 1.8Ga , $\text{Os} = 3.5 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1165$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3\%$; 苦橄质熔体 $\text{Os} = 1 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.15$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$; 玄武质熔体 $\text{Os} = 5 \times 10^{-11}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.15$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\%$

Fig. 11 Simulation refertilization of refractory peridotite

refractory peridotite $\sim 2.5\text{Ga}$, $\text{Os} = 3.5 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.111$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3\%$; another refractory peridotite $\sim 1.8\text{Ga}$, $\text{Os} = 3.5 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1165$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3\%$; picritic melt $\text{Os} = 1 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.15$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$; basaltic melt $\text{Os} = 5 \times 10^{-11}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.15$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\%$

部分熔融后不久,发生了熔体再富集作用,那么对 Re-Os 同位素体系没有明显的影响,因为较短的时间内不会有明显的 Os 同位素衰变积累。如果地幔岩部分熔融后很久发生了熔体再富集作用,那么它的 Os 同位素组成会受到比较微弱的影响,而主量元素如 Al_2O_3 和 CaO 会受到强烈影响。因为玄武质熔体中虽然具有较高的 Os 同位比值 ($0.125 \sim 0.23$),但是它的 Os 含量却比残余地幔岩低两个数量级 ($1 \times 10^{-12} \sim 50 \times 10^{-12}$),而 Al_2O_3 和 CaO 的含量却比残余地幔岩高一个数量级以上。如图 11 所示,我们模拟计算了熔体再富集作用对古老的难熔地幔橄榄岩主量元素和 Os 同位素组成的影响。假设古老的难熔地幔橄榄岩(极高程度的熔融抽取已使 Re 元素全部迁出)受到熔体的再富集作用,其主量元素 Al_2O_3 含量急剧增加,而 Os 同位素比值增加趋势比较缓慢,Os 同位素和主量元素 Al_2O_3 组成变化表现为一条曲线。女山地幔橄榄岩包体的数据点(本次工作及 Zhi *et al.*, 2004; 支霞臣等, 2007)全部都落在 2.5Ga 的难熔岩石的再富集演化曲线的上方,并且绝大多数的数据点同时落在 1.8Ga 难熔岩石的再富集演化曲线上方,表明女山地幔橄榄岩包体较高的 Os 同位素比值的组成不可能是古老的难熔地幔橄榄岩受到后期熔体再富集作用形成的。

开放体系下的熔岩反应是影响地幔岩 Os 同位素组成的另一个因素。已有研究证明在高熔/岩比的条件下,大量的熔体可能会导致地幔橄榄岩 Re-Os 体系的变化,Os 含量显著降低, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值显著升高,这可能是因为富含 Os 等 PGE 的原生硫化物在高熔/岩比的反应中发生溶解,而具有高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值,较低 Os 元素含量的次生硫化物从熔体/中沉淀出来 (Buchl *et al.*, 2002)。高比例的熔岩反应会导致地幔橄榄岩岩性的转变以及矿物组成的变化,如上地幔的熔体通道中,上升玄武质或苦橄质的熔体会与地幔橄榄岩发生反应,消耗辉石而生成新的镁橄榄石,最终形成苦橄岩 (Kelemen, 1990)。而大陆岩石圈地幔通常难以形成大规模的高熔/岩比条件。安徽女山处于华北板块与华南板块的碰撞带中,扬子板块的俯冲以及后来的太平洋板块俯冲可能提供了大量的流体/熔体。通过矿物及岩石学等方面的工作显示女山地幔橄榄岩虽然经历了较为广泛的交代作用,但是在岩石类型、矿物百分含量、矿物成分和结构上没有表现出经历过高熔/岩比反应的证据。与华东北部其它地区的新生代地幔橄榄岩相似,女山地幔橄榄岩以二辉橄榄岩为主,存在少量的方辉橄榄岩;二辉橄榄岩中橄榄石的百分含量为 $49.53\% \sim 70.32\%$,方辉橄榄岩为 $68.07\% \sim 76.77\%$;二辉橄榄岩中橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 为 $87.6 \sim 90.7$,

方辉橄榄岩为 90.3 和 90.6。包括女山在内的华北东部地区的岩石圈地幔都具有相似的性质, 它们的演化成因也该类类似, 我们难以想象出一个可以提供大量的流体/熔体的源区, 使整个中国东部岩石圈地幔都经历了高比例的熔/岩反应。

大陆岩石圈地幔的熔岩反应, 通常以低熔/岩比的反应为主, 由于 Os 等 PGE 主要赋存在硫化物中, 我们这里着重讨论硫化物熔体对地幔橄榄岩 Re-Os 体系的影响。包裹于硅酸盐矿物中的硫化物固溶体通常是在地幔岩熔融抽取过程中的残留物, 亏损放射性 Os 同位素, 富含 PGE 元素; 而熔体中的硫化物具有较高的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os, 但是 Os 等 PGE 含量较低 (比原生硫化物固溶体低两个数量级), 且更亏损 IPGE。所以, 通常情况下硫化物熔体对地幔橄榄岩 Re-Os 体系的影响比较微弱。但是在特殊情况下, 如残余地幔岩中的原生硫化物发生了分解, 或者硫化物熔体的量十分可观, 那么也会对残余地幔岩的 Os 同位素组成造成强烈的影响。这些发生了显著改变的地幔岩会 Os 含量降低, Os 同位素比值升高, 并且 PPGE 由于受到后期富集而明显上翘, Re 元素也会发生富化。女山地幔橄榄岩大部分样品 Os 元素含量偏低, Os/Ir 比小于 1, 暗示着可能发生过原生硫化物的分解。但是除 08NS08 样品 PPGE 相对 IPGE 稍显富集外, 其余样品的 PGE 都没有 PPGE 上翘趋势, 且绝大多数样品亏损 Re, 没有表现出后期硫化物熔体作用的特征。这可能是由于硫化物的分解发生在喷发前不久, 或者发生在火山喷发过程中, 没有流体/熔体对地幔橄榄岩 PGE 交代改造的机会。发生在近期的硫化物分解对 Os 同位素比值不会重要产生影响。因此, 我们认为女山地幔橄榄岩可能在喷发前不久发生过一定程度原生硫化物的分解丢失, 其 Re、Os 含量受到了一定的影响, 但是没有受到后期硫化物熔体显著的改造作用, 其 Os 同位素比值及 Re 亏损年龄受到的影响比较微弱。

综上所述, 女山地幔橄榄岩 Os 同位素应代表了原始岩石圈地幔的组成。二辉橄榄岩中不同交代特征的样品具有相似的 Re-Os 同位素组成, 表明交代作用对 Os 同位素组成没有显著影响, 结合前面资料所述它们在岩石学、矿物学特征上没有本质差别, 应是相近年龄属性的岩石圈地幔。由于二辉橄榄岩较低的熔融抽取程度, 难以获得确切的地幔形成时代, 而方辉橄榄岩经历了高度熔融亏损, 通常会给出比较可靠的岩石圈地幔年龄。在我们分析的样品中, 两个方辉橄榄岩给出的 Os 同位素比值分别为 0.1184 和 0.1223, Re 亏损年龄为 1.5Ga 和 1.0Ga, 模式年龄为 1.7Ga 和 1.2Ga, 而这个元古代年龄能否代表女山岩石圈地幔的年代还值得商榷。首先, 女山地幔橄榄岩以饱满的二辉橄榄岩为主, 与古老的克拉通型难熔地幔岩特征不同。并且这些二辉橄榄岩样品都具有亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 而我们通常认为古老的难熔地幔应该具有富集的同位素组成。即使古老的难熔地幔具有弱亏损的同位素组成, 但由于富集轻稀土, 其 Nd 同位素也难以演化为相似于 MORB 的强亏损的同位素组成。另外, 这些二辉橄榄岩虽然受到了不同程度的交代作用, 但是

其较高的 Os 同位素组成不是后期熔体/流体作用的结果, 而应代表了岩石圈地幔本身的 Os 同位素组成。因此, 我们认为女山岩石圈地幔总体为新生岩石圈地幔。

7.3 对华北岩石圈减薄机制的启示

女山火山位于华北板块和扬子板块的碰撞带中, 由于目前对两板块间缝合线的位置还存在不同的看法 (Okay and Sengör, 1992; Li, 1994; Chung, 1999; Zhang, 2000; Chung and Li, 2000; Faure *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2004), 因此我们难以简单的判断其岩石圈地幔究竟归属于华北板块还是扬子板块。但通过对比我们发现, 女山地幔橄榄岩包体的特征与整个中国东部包括东北地区、华北克拉通东部、华南地区新生代玄武岩中地幔橄榄岩都极其相似 (如图 12): 以饱满的二辉橄榄岩为主; 大都具有亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素特征; 二辉橄榄岩的 Os 同位素比值都与大洋橄榄岩相似; 少量的方辉橄榄岩给出较为古老的元古宙年龄; 而这些地区却具有不同的地壳演化历史, 但岩石圈地幔的演化历史却近乎相同 (吴福元等, 2008)。我们没有寻找到古老难熔物质转变为年轻特征的岩石圈地幔的确凿证据, 因此一个比较合理的解释就是这些岩石圈地幔都是新生的。而这些新生的岩石圈地幔中还夹杂有具有元古代年龄的地幔物质, 它们可能是先前拆沉的古老岩石圈地幔物质还未来得及在软流圈中被完全均一化, 便被再次捕获增生, 也可能是软流圈中原本就存在的古老的地幔物质 (Liu *et al.*, 2008)。

8 结论

(1) 位于华北板块与扬子板块碰撞带中的女山新生代玄武岩携带了大量的地幔包体, 岩石类型以二辉橄榄岩为主, 存在少量的方辉橄榄岩。详细的岩石学和矿物学研究显示, 方辉橄榄岩经历过较高度度的熔融抽取, 而其它二辉橄榄岩都具有饱满的主量元素组成。结合其亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素特征, 以及较高的 Os 同位比值, 我们认为女山岩石圈总体表现为新生岩石圈地幔的特征, 难熔的方辉橄榄岩可能为残存在软流圈中的古老岩石圈地幔物质。

(2) 女山地幔橄榄岩中出现大量的含水矿物, 表明该区岩石圈地幔经历过较为强烈的交代作用, 矿物微量元素的资料显示女山不同类型地幔橄榄岩表现出不同的交代特征, 这可能是因为交代作用范围具有局限性或者交代作用对岩石类型具有选择性。交代矿物的微量元素及同位素特征显示交代介质的性质类似于原始地幔来源的熔体/流体, 橄榄岩交代脉体中出现中酸性斜长石表明交代介质具有硅饱和的特征, 进而暗示其来源可能是俯冲或拆沉进入软流圈的壳源物质。

(3) 女山地区岩石圈地幔虽然经历了较为强烈的交代作用, 但是具有不同交代特征的二辉橄榄岩样品在 Re-Os 同位素组成上没有表现出系统差别, 因此, 不同交代特征的二

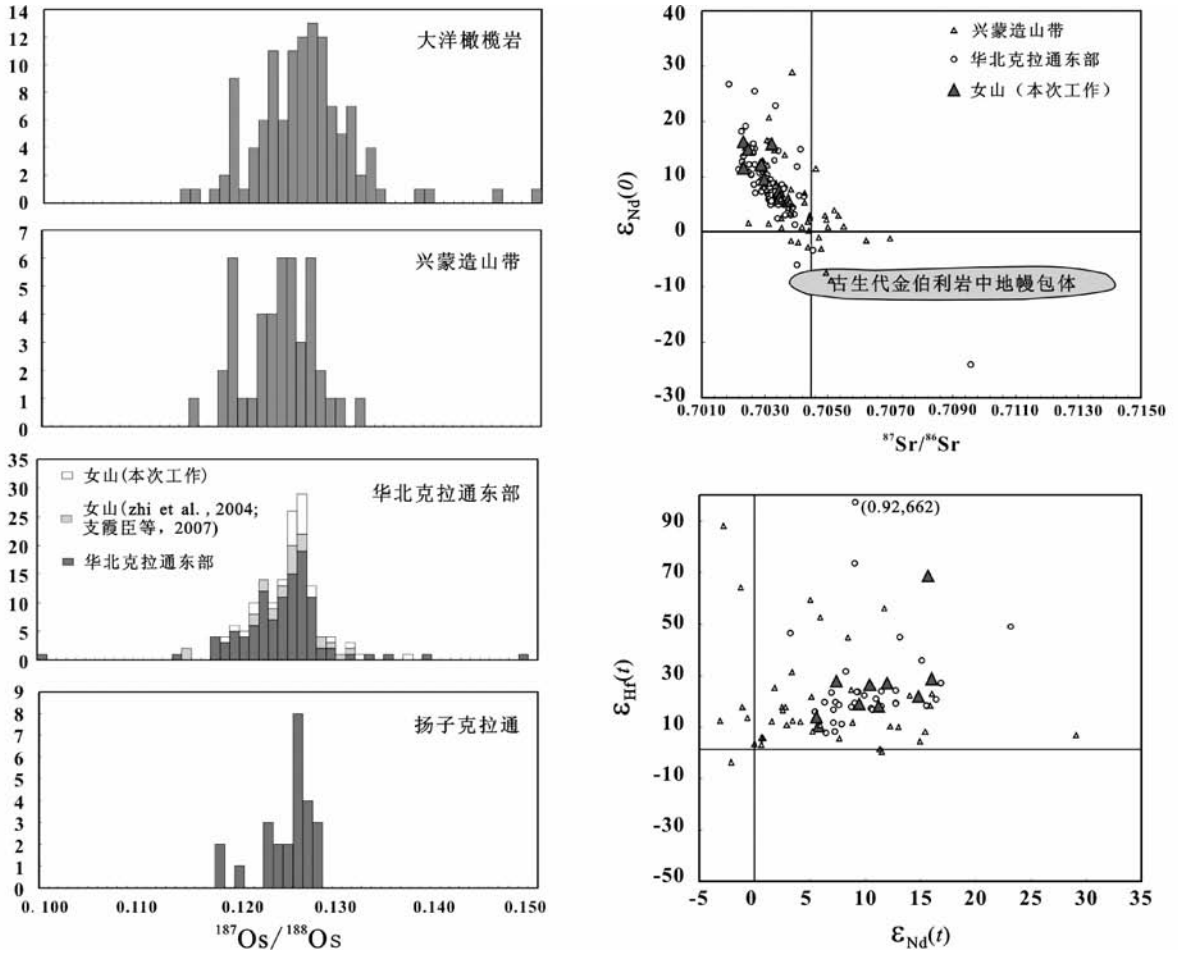


图 12 中国东部新生代岩石圈地幔包体的 Os 同位素组成和 Sr-Nd-Hf 同位素特征对比

Os 同位素资料:大洋橄榄岩资料来自 Martin, 1991; Roy-Barman and Alle' gre, 1994; Snow and Reisberg, 1995; Brandon *et al.*, 2000; Standish *et al.*, 2002; Alard *et al.*, 2005; Harvey *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008; 兴蒙造山带据 Wu *et al.*, 2003b; 周琴等, 2007; 张彦龙, 2008; 华北克拉通东部据 Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003b, 2006; Zhi *et al.*, 2004; 支霞臣等, 2007; 肖燕, 2009; Chu *et al.*, 2009; 扬子克拉通东部据 Reisberg *et al.*, 2005. Sr-Nd-Hf 同位素资料:兴蒙造山带据 Fan *et al.*, 2000; 周琴等, 2007; 张彦龙, 2008; 华北克拉通东部据 Fan *et al.*, 2000; Zou *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2006; 肖燕, 2009; Chu *et al.*, 2009

Fig. 12 Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterization of the Cenozoic mantle xenoliths from Eastern China

Osmium isotopic compositions of abyssal peridotites are from Martin, 1991; Roy-Barman and Alle' gre, 1994; Snow and Reisberg, 1995; Brandon *et al.*, 2000; Standish *et al.*, 2002; Alard *et al.*, 2005; Harvey *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008; Os isotope data of Xingmeng fold belts are from Wu *et al.*, 2003b; Zhou *et al.*, 2007; Zhang, 2008; Os isotope data of Eastern North China Craton are from Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003b, 2006; Zhi *et al.*, 2004; Zhi *et al.*, 2007; Xiao, 2009; Chu *et al.*, 2009; Os isotope data of Yangtze Craton are from Reisberg *et al.*, 2005. Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Xingmeng fold belts are from Fan *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2007; Zhang, 2008; Sr-Nd-Hf isotope data of eastern North China Craton are from Fan *et al.*, 2000; Zou *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2006; Xiao, 2009; Chu *et al.*, 2009

辉橄榄岩应属同时代的岩石圈地幔。PGE 球粒陨石标准化配分模式显示,后期的熔体/流体作用并未显著的影响女山地幔橄榄岩的 PGE 组成,也没有显著影响 Os 同位素组成。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所多接收等离子质谱实验室、固体同位素实验室、电子探针实验室和西北大学动力学国家重点实验室各位老师的热心帮助,感谢杨进辉研究员和刘传周博士的讨论和指导,感谢周琴及纪伟强等的帮助。

References

- Alard O, Luguet A, Pearson NJ, Griffin WL, Lorand JP, Gannoun A, Burton KW and O'Reilly SY. 2005. In situ Os isotopes in abyssal peridotites bridge the isotopic gap between MORBs and their source mantle. *Nature*, 436: 1005 - 1008
- Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 53: 303 - 323
- Birck JL, Roy-Barman M and Capmas F. 1997. Re-Os isotopic

- measurements at the femtomole level in natural samples. *Geostand. Newslett.*, 21: 19–27
- Boyd FR. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96: 15–26
- Brandon AD, Snow JE, Walker RJ, Morgan JW and Mock TD. 2000. ^{190}Pt - ^{186}Os and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of abyssal peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 177: 319–335
- Brey GP and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II: New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 31: 1353–1378
- Brugmann GE, Arndt NT, Hofmann AW and Tobschall HJ. 1987. Noble-metal abundances in komatiite suites from Alexo, Ontario, and Gorgona-Island, Colombia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 2159–2169
- Buchl A, Brugmann G, Batanova VG, Munker C and Hofmann AW. 2002. Melt percolation monitored by Os isotopes and HSE abundances: A case study from the mantle section of the Troodos ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 204: 385–402
- Chen DG and Peng ZC. 1988. K-Ar ages and Pb, Sr isotopic characteristics of some Cenozoic volcanic rocks from Anhui and Jiangsu provinces, China. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 3–12 (in Chinese with English abstract)
- Chi JS. 1988. The Study of Cenozoic Basalts and Upper Mantle beneath Eastern China. Wuhan; China University of Geosciences Publishing House, 277 (in Chinese)
- Chi JS and Lu FX. 1996. Kimberlites and the Features of Paleozoic Lithospheric Mantle in North China Craton. Beijing: Science Press, 292 (in Chinese)
- Chu ZY, Wu FY, Walker RJ, Rudnick RL, Pitcher L, Puchtel IS, Yang YH and Wilde SA. 2009. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton. *J. Petrol.*, 50: 1857–1898
- Chung SL. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between north and south China; A reply. *J. Geol.*, 108: 743–747
- Chung SL and Li ZX. 2000. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. *J. Geol.*, 107: 301–312
- Cohen AS and Waters FG. 1996. Separation of osmium from geological materials by solvent extraction for analysis by thermal ionisation mass spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, 332: 269–275
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Luo ZH and Du YS. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent. *Geosci.*, 8: 349–356 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Zhao HL, Mo XX, Wu ZX and Luo ZH. 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 110 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Su SG, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S and Wu ZX. 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? Or thermal erosion and chemical metasomatism? *Earth Sci. Frontiers*, 13(2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Su SG, Niu YL, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S and Wu ZX. 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96: 22–35
- E ML and Zhao DS. 1987. Cenozoic Basalts and Deep-Seated Rock Xenoliths in Eastern China. Beijing: Science Press, 499 (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: 1117–1158
- Fan QC, Sui JL, Xu P, Li N, Sun Q and Wang TH. 2006. Si- and alkali-rich melt inclusions in minerals of mantle peridotites from eastern China: Implication for lithospheric evolution. *Sci. China (Series D)*, 49: 43–49
- Fan WM and Menzies MA. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica Metallogenia*, 16: 171–180
- Fan WM, Zhang HF, Baker J, Javis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? *J. Petrol.*, 41: 933–950
- Faure M, Lin W and Gretton NL. 2001. Where is the north China-South China block boundary in eastern China? *J. Geol.*, 29(2): 119–122
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hu YK. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 1959–1975
- Gao S, Rudnick RL, Carlson RW, McDonough WF and Liu YS. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 307–322
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY and Ryan CG. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, AGU Geodyn. Ser., 27: 107–126
- Hao YT, Xia QK, Yang XZ and Wang RC. 2006. Water in minerals of peridotite xenoliths from Cenozoic basalts in Nushan volcano, SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1713–1722 (in Chinese with English abstract)
- Harvey J, Gannoun A, Burton KW, Rogers NW, Alard O and Parkinson IJ. 2006. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re-Os isotopes in abyssal peridotites from the Mid-Atlantic ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 244: 606–621
- Hellebrand E, Snow JE, Dick HJB and Hofmann AW. 2001. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature*, 410: 677–681
- Huang F, Li SG and Yang W. 2007. Contributions of the lower crust to Mesozoic mantle-derived mafic rocks from the North China Craton: Implications for lithospheric thinning. In: Zhai MG, Windley BF, Kusky TM and Meng QR (eds.). *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia*. Geological Society Special Publication, 280: 55–75
- Huang XL, Xu YG and Liu DY. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68(1): 127–149
- Kelemen PB. 1990. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma I phase-relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite. *J. Petrol.*, 31: 51–98
- Li J and Zhang WY. 1937. Nushan volcano, locating in Xuyu Country Anhui Province. *Geol. Rev.* 2: 141–145 (in Chinese)
- Li JP and Zhang S. 2004. Redox of amphibole-bearing mantle peridotite from Nushan, Anhui Province in eastern China and its implications. *Sci. China (Series D)*, 45(4): 325–336
- Li ZX. 1994. Collision between the North and South China blocks: A crust-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *J. Geol.*, 22: 739–742
- Liu CZ, Snow JE, Hellebrand E, Brugmann G, von der Handt A, Buchl A and Hofmann AW. 2008. Ancient, highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 452: 311–316
- Martin CE. 1991. Osmium isotopic characteristics of mantle-derived rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 1421–1434
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. *Chem. Geol.*, 120: 223–253
- Meisel T, Walker RJ, Irving AJ and Lorand JP. 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65: 1311–1323

- Menzies MA, Fan WM and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoproses and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard HM, Alabaster T, Harris NBW and Neary CR (eds.). *Magmatic Processes and plate Tectonic. Geol. Soc. Special Publ.*, 76; 71–81
- Menzies MA and Xu YG. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. AGU Geodyn. Ser.*, 27; 155–165
- Okay AI and Sengör AMC. 1992. Evidence for continental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20; 411–414
- O'Reilly SY and Griffin WL. 2000. Apatite in the mantle: Implications for metasomatic processes and high heat production in Phanerozoic mantle. *Lithos*, 53; 217–232
- Reisberg L, Zhi XC, Lorand JP, Wagner C, Peng Z and Zimmermann C. 2005. Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China: Evidence for contrasting effects of melt percolation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 239; 286–308
- Roy-Barman M and Alle' gre CJ. 1994. ¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os ratios of midocean ridge basalts and abyssal peridotites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58; 5043–5054
- Schneider ME and Eggler DH. 1986. Fluids in equilibrium with peridotite minerals-implications for mantle metasomatism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50; 711–724
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank Rhenium-Osmium analysis. *Anal. Chem.*, 67; 2136–2141
- Snow JE and Reisberg L. 1995. Os isotopic systematics of the MORB mantle: Results from altered abyssal peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133; 411–421
- Standish JJ, Hart SR, Blusztajn J, Dick HJB and Lee KL. 2002. Abyssal peridotite osmium isotopic compositions from Cr spinel. *Geochim. Geophys. Res.*, 7; 1004, doi: 10.1029/2001GC000161
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42; 313–345
- Stosch HG. 1982. Rare-Earth element partitioning between minerals from anhydrous spinel peridotite xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46; 793–811
- 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
- Wells PRA. 1997. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62; 129–139
- Witt-Eickchen G and Seck HA. 1991. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: An improved version of an empirical geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 106; 431–439
- Wilkinson JFG and Lemaitre RW. 1987. Upper mantle amphiboles and micas and Ti₂O, K₂O and P₂O₅ abundances and 100Mg/(Mg⁺Fe²⁺) ratios of common basalts and andesites-implications for modal mantle metasomatism and undepleted mantle compositions. *J. Petrol.*, 28; 37–73
- Wood BJ and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42; 109–124
- Wu FY and Sun DY. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *J. Changchun Uni. Sci. Tech.*, 29; 313–318 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Zhang GL and Ren XW. 2000. Deep geodynamics of Yanshan Movement. *Geol. J. China Uni.*, 6; 379–388 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo CL. 2003a. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3); 51–60 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Walker RJ, Ren XW, Sun DY and Zhou XH. 2003b. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chem. Geol.*, 196; 107–129
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233; 103–119
- Wu FY, Walker RJ, Yang YH, Yuan HL and Yang JH. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70; 5013–5034
- 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)
- Xia L, Xia Z, Zhang C and Xu XS. 1993. On the relationship between mantle metasomatism and partial melting: Evidence from mantle-derived lherzolite xenoliths from Nushan, China. *Chinese J. Geochem.*, 12; 289–307
- Xia QK, Dallai L and Delouie E. 2004. Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene megacrysts from Nushan volcano, SE China. *Chem. Geol.*, 209; 137–151
- Xiao Y. 2009. Newly-accreted lithosphere-asthenosphere interaction: Evidence from mantle peridotite xenoliths. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Xiao ZY and Wang YF. 1986. Characters and genesis of the ultramafic xenoliths from adjacent areas of the Jiangsu and Anhui Province. *Geol. Rev.*, 32; 339–349 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Gao S, Wang QH, Wang DY and Liu YS. 2006a. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34(9); 721–724
- Xu WL, Wang QH, Wang DY, Guo JH and Pei FP. 2006b. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *J. Asian Earth Sci.*, 27; 230–240
- Xu WL, Hergt JA, Gao S, Pei FP, Wang W and Yang DB. 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg[#] signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265(1–2); 123–137
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhou XM and Huang XL. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere beneath Nushan, East Central China. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. AGU Geodyn. Ser.*, 27; 167–196
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL and Zhou XM. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: An LAM-ICPMS trace element study. *J. Petrol.*, 41(1); 111–148
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL and Zhou XM. 2003. Enrichment of upper mantle peridotite: Petrological, trace element and isotopic evidence in xenoliths from SE China. *Chem. Geol.*, 198(3–4); 163–188
- Xu YG, Fan W and Lin G. 1995a. Lithosphere-asthenosphere interaction: A comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai area. *Geotectonic Metallogeny*, 19; 1–13
- Xu YG, Lin CY, Shi LB, Mercier JCC and Ross JV. 1995b. Upper mantle geotherm for eastern China and its geological implications. *Sci. China (Series B)*, 38; 1482–1492
- Xu YG, Menzies MA, Vroon P, Mercier JC and Lin CY. 1998. Texture-temperature-geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. *J. Petrol.*, 39; 469–493
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26; 747–757
- Xu YG and Bodinier JL. 2004. Contrasting enrichments in high- and low-temperature mantle xenoliths from Nushan, eastern China: Results of a single metasomatic event during lithospheric accretion? *J. Petrol.*, 45; 321–341
- Xu YG, Huang XL, Ma JL, Wang YB, Iizuka Y, Xu JF, Wang Q and

- Wu XY. 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147: 750 – 767
- Xu YG, Blusztajn J, Ma JL, Suzuki K, Liu JF and Hart SR. 2008. Late Archean to Early proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. *Lithos*, 102: 25 – 42
- Yang YH, Wu FY, Wilde SA, Liu XM, Zhang YB, Xie LW and Yang JH. 2009. In situ perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chem. Geol.*, 264: 24 – 42
- Yang W and Li SG. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102: 88 – 117
- Yu HM, Xia QK, Dallai L and Chazot G. 2005. Oxygen isotope and trace element compositions of peridotite xenoliths from Nushan volcano, SE China and implications for mantle metasomatism. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 829 – 838 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY, Xu YG, Huang XL, Ma JL, Ge WC, Zhang HH and Qin XF. 2009. Hf-Nd isotopic decoupling in continental mantle lithosphere beneath Northeast China: Effects of pervasive mantle metasomatism. *J. Asian Earth Sci.*, 35: 554 – 570
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144(2): 241 – 253
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Zhou MF, Fan WM and Zheng JP. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67: 4373 – 4387
- Zhang HF, Ying JF, Xu P and Ma YG. 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle. *Chinese Sci. Bull.*, 49: 961 – 966
- Zhang HF. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237: 768 – 780
- Zhang HF. 2006. Peridotite-melt interaction: An important mechanism for the compositional transformation of lithospheric mantle. *Earth Sci. Frontiers*, 13(2): 65 – 75 (in Chinese with English abstract)
- 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. *Inter. Geol. Rev.*, 49: 658 – 679
- Zhang HF, Goldstein SL, Zhou XH, Sun M, Zheng JP and Cai Y. 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 155: 271 – 293
- Zhang KJ. 2000. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China: An extended discussion. *J. Geol.*, 108: 739 – 742
- Zhang RY and Cong BL. 1983. Petrogenesis and tectonic implications of the basanite and peridotitic xenoliths from Nushan volcano, Anhui Province. *Petrological Research*, 3: 111 – 127 (in Chinese)
- Zhang YL. 2008. Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterization of the mantle peridotite in Nuomin-Keluo and constraints on the mantle-crust evolution. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)
- Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China. *Inter. Geol. Rev.*, 40: 471 – 499
- Zheng JP. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning beneath East China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 126 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP and Lu FX. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shangdong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 65 – 74 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX, Zhang M and Pearson NJ. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57: 43 – 66
- Zheng JP, Lu FX, Griffin WL, Yu CM, Zhang RS, Yuan XP and Wu XL. 2006a. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China—evidence from peridotites. *Earth Sci. Frontiers*, 13(2): 76 – 85 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yang JS, Li TF, Zhang M, Zhang RY and Liou JG. 2006b. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China. *J. Petrol.*, 47: 2233 – 2256.
- Zheng JP, Lu FX, Griffin WL, Yu CM, Zhang RS, Yuan YX and Wu XL. 2006c. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: Age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite. *Geology*, 34: 705 – 708
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yu CM, Zhang HF, Pearson N and Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 5203 – 5225
- Zhi XC and Qin X. 2004. Re-Os isotope geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from eastern China: Constraints on the age and thinning of lithosphere mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 989 – 998
- Zhi XC, Reisberg L and Xu XS. 2007. Re-Os geochemistry of mantle peridotite xenoliths from Nushan. *J. Uni. Sci. Tech. China*, 37 (8): 945 – 952 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Q, Wu FY, Chu ZY, Yang YH, Sun DY and Ge WC. 2007. Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterizations of the Jiaohe peridotite xenoliths in Jinlin province and constraints on the lithospheric mantle age in northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1269 – 1280 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Chen TH. 1980. Cenozoic basalt volcanic cones and their characters of the eruption in the vicinity of Nanjing. *J. Nanjing Uni.*, 2: 83 – 103 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Yu JH and Xu XS. 1992. Discovery and significance of granulite xenoliths in the Nushan basalt, East China. *Chinese Sci. Bull.*, 37(20): 1730 – 1734
- Zou HB, Zindler Z, Xu XS and Qi X. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chem. Geol.*, 171: 33 – 47

附中文参考文献

- 陈道公, 彭子成. 1988. 皖苏若干新生代火山的钾氩年龄和铅铀同位素特征. *岩石学报*, 2: 3 – 12
- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社
- 池际尚, 路风香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划. *现代地质*, 8: 349 – 356

- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,吴宗絮,罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社
- 邓晋福,苏尚国,刘翠,赵国春,赵兴国,周肃,吴宗絮. 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论:是拆沉,还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘, 13: 105-119
- 樊祺诚,随建立,徐平,李霓,孙谦,王团华. 2005. 中国东部地幔矿物中富硅、碱熔融包裹体:对岩石圈演化的启示. 中国科学(D辑), 35(10): 907-913
- 郝艳涛,夏群科,杨晓志,王汝成. 2006. 安徽女山新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物的含水性研究. 岩石学报, 22: 1713-1722
- 李建平,张生. 2001. 中国东部安徽女山含角闪石地幔橄榄岩的氧化-还原状态及其意义. 中国科学(D辑), 31: 648-655
- 李捷,张文佑. 1937. 安徽盱眙县女山火山口. 地质论评, 2: 141-145
- 吴福元,孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 29: 313-318
- 吴福元,孙德有,张广良,任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 6: 379-388
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10: 51-60
- 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
- 肖燕. 2009. 新增生岩石圈地幔与软流圈的相互作用:来自地幔橄榄岩捕虏体的证据. 博士学位论文. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所
- 肖增岳,王艺芬. 1986. 苏皖毗邻地区玄武质岩石中的超镁铁包体及其成因探讨. 地质论评, 32: 339-349
- 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: 874-881
- 于慧敏,夏群科, Dallai L, Chazot G. 2005. 安徽女山橄榄岩包体的氧同位素比值和微量元素组成:地幔交代作用. 岩石学报, 21: 829-838
- 张宏福,英基丰,徐平,马玉光. 2004. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶:对岩石圈地幔置换过程的启示. 科学通报, 49: 784-789
- 张宏福. 2006. 橄榄岩-熔体的相互作用:岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 13: 65-75
- 张儒瑗,从柏林. 1983. 安徽女山碧玄岩及其橄榄岩类包体的成因岩石学和大地构造意义. 岩石学研究, 3: 111-127
- 张彦龙. 2008. 诺敏-科洛地区地幔橄榄岩 Sr-Nd-Hf-Os 同位素组成及其与壳幔演化关系. 硕士学位论文. 长春:吉林大学
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉:中国地质大学出版社
- 郑建平,路凤香, Griffin WL, 余淳梅,张瑞生,袁晓萍,吴秀玲. 2006. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用. 地学前缘, 13: 76-85
- 支霞臣, Reisberg L, 徐夕生. 2007. 安徽女山幔源橄榄岩捕虏体 Re-Os 同位素地球化学. 中国科学技术大学学报, 37(8): 945-952
- 周琴,吴福元,储著银,杨岳衡,孙德友,葛文春. 2007. 吉林蛟河地幔橄榄岩包体的 Sr-Nd-Hf-Os 同位素特征与岩石圈地幔时代. 岩石学报, 23: 1269-1280
- 周新民,陈图华. 1980. 南京附近新生代玄武岩火山锥及其喷发特征. 南京大学学报(自然科学版), (2): 83-103
- 周新民,于津海,徐夕生. 1992. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义. 科学通报, 37: 1198-1201