

中国东部上地幔岩石相转变及其意义

樊祺诚, 隋建立

中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要: 中国东部新生代玄武岩和大别—苏鲁超高压变质带中的含石榴石相橄榄岩, 带来了发生在上地幔的尖晶石→石榴石相转变和铝辉石→贫铝辉石+石榴石的重要信息, 为中国东部上地幔岩石结构分层奠定了重要基础. 通过岩石学与实验岩石学的研究, 推导出发生相转变的 P - T 条件, 为建立中国东部大陆上地幔岩石分层结构提供了重要约束. 尖晶石二辉橄榄岩向石榴石二辉橄榄岩相转变发生在 55~70 km, 随着深度增加, 石榴石二辉橄榄岩从富铝石榴石二辉橄榄岩 (70~120 km) 转变为贫铝石榴石二辉橄榄岩 (>120~150 km).

关键词: 含石榴石橄榄岩捕虏体; 超高压变质石榴石橄榄岩; P - T 平衡条件; 高温高压相转变实验; 上地幔岩石分层.

中图分类号: P583 文章编号: 1000-2383(2009)03-0387-05 收稿日期: 2009-01-12

Phase Transition of Upper Mantle Rock in Eastern China and Its Significance

FAN Qi-cheng, SUI Jian-li

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

Abstract: The rare samples of garnet bearing peridotites (GBPs), either from alkaline volcanics or from orogenic belt, provide important information of the evolution of subcontinental lithospheric upper mantle. Cenozoic volcanic rocks widely spread in eastern China, and GBPs occur in the volcanic fields of Mingxi, Xilong, Hebi, Nüshan, Hannuoba and Chaoerhe. According to the occurrence of spinel, the mantle xenoliths from above volcanic fields can be divided into two groups as Gt peridotite and Gt/Sp peridotite. Electronic probe data reveal the P - T conditions of these xenoliths as (1) Gt peridotite from depths over 70 km, and (2) Gt/Sp peridotite from 55–70 km. Meanwhile, orogenic garnets from Dabie-Sulu UHP belt also facilitate the understanding of the subcontinental lithospheric upper mantle of eastern China. Variations of garnets in the Gt lherzolite from the UHP belt record the evolution of subduction from Al-rich Gt (70–120 km) to Al-poor Gt (>120–150 km). Garnets and their metamorphic reactions reveal the mantle compositions and evolution in eastern China.

Key words: garnet bearing peridotites; UHP metamorphic GBPs; P - T condition; high P - T experiment on facies transition; rocks layers of upper mantle.

1 中国东部新生代玄武岩及其地幔岩石捕虏体

中国东部绵延数千公里的新生代玄武岩及其丰富的地幔岩石捕虏体, 提供了研究中国东部上地幔的直接样品. 根据中国东部新生代玄武岩中地幔岩石捕虏体的统计发现, 岩石类型以尖晶石二辉橄榄岩为主, 其次是方辉橄榄岩和纯橄岩, 同时伴有少量辉石岩, 其相对含量变化因地而异. 根据大量尖晶石二

辉橄榄岩的平衡温度、压力数据所推导的中国东部上地幔地温线具有海洋地温或靠近大陆裂谷地温的特点, 上地幔尖晶石相橄榄岩的形成深度主要限于 35~60 km (刘若新等, 1981; 鄂莫岚和赵大升, 1987; 池际尚, 1988; Fan and Hooper, 1989; Xu *et al.*, 1995).

相对于尖晶石相橄榄岩, 中国东部新生代玄武岩中石榴石相橄榄岩捕虏体则极为少见, 就目前所知, 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、福建闽清和大兴安岭地区 (Fan and Hooper, 1989; 樊祺诚等, 2008). 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) 共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩, 也仅见于福建明溪、浙江西垄、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; 曹荣龙和朱寿华, 1990; 樊祺诚和刘若新, 1990, 1994; 金淑燕和潘顺安, 1998; 樊祺诚等, 2008), 这些少数稀缺样品为建立中国东部上地幔岩石结构分层提供了重要约束, 也为探讨中国东部上地幔组成、演化和新生代火山岩浆起源提供了重要信息. 地幔中富铝矿物相转变在地幔物质组成、矿物组合与岩石分层结构, 以及由相转变引起的岩石与构造变形方面都有重要的动力学意义.

2 尖晶石向石榴石相转变

中国东部 5 处新生代玄武岩中代表性五相平衡共生的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩和四相平衡共生

的石榴石二辉橄榄岩矿物电子探针分析结果归纳于表 1 和表 2. 其主要矿物化学成分相近, 没有明显差别, 橄榄石为镁橄榄石 (Fo89-91), 斜方辉石为顽火辉石 (En88-90)、单斜辉石为铬透辉石 ($\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.7\% \sim 1.2\%$), 石榴石为镁铝石榴石 (Pyr72-79). 采用 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, 对中国东部目前已知的少数几个地方的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩 P - T 条件进行计算, 结果列于表 3.

尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩的相转变是发生于上地幔条件下最重要的富铝矿物相转变之一, 五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩被视作上地幔尖晶石相向石榴石相橄榄岩转变的证据, MacGregor (1970) 和 O'Neill (1981) 采用人工合成样品在 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) 系统实验测定了尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩的相转变的 P - T 条件 (1.6~1.9 GPa). 笔者曾分别采用尖晶石二辉橄榄岩天然样品和人工合成样品作为实验

表 1 中国东部新生代玄武岩中代表性尖晶石/石榴石二辉橄榄岩矿物化学成分 (%)															
Table 1 Mineral compositions of representative spinel/garnet lherzolite in Cenozoic basalts from eastern China (%)															
产地	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Total	Fo	En	Pyr	Cr [#]
明溪	Ol	40.74	nd	0.03	0.03	9.70	0.09	49.89	0.09	nd	100.57	90			
	Opx	54.63	0.13	4.42	0.59	5.89	0.18	32.92	0.95	0.17	99.88		89		
	Cpx	51.95	0.31	5.55	1.19	2.71	0.07	16.10	19.01	1.74	98.63		51		
	Gt	42.47	0.07	22.23	1.65	7.14	0.28	21.06	5.06	0.02	99.98			74	
	Sp	0.13	0.00	47.66	20.88	11.59	0.18	20.01	0.00	0.00	100.45				23
西垄	Ol	40.73	nd	nd	nd	8.44	0.14	50.24	0.10	nd	99.65	91			
	Opx	54.56	0.07	5.50	0.62	5.26	0.11	32.66	1.04	nd	99.82		90		
	Cpx	52.35	0.17	6.45	1.16	2.71	0.05	16.78	18.81	1.50	99.98		53		
	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
女山	Ol	40.80	0.01	0.00	0.02	10.49	0.13	48.66	0.11	0.00	100.22	89			
	Opx	53.64	0.16	5.65	0.37	7.06	0.16	32.52	0.22	0.00	99.78		89		
	Cpx	51.03	0.48	7.53	0.69	3.90	0.13	16.33	17.97	1.70	99.76		52		
	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
鹤壁	Ol	40.35	nd	0.07	0.09	9.58	0.18	48.05	0.11	0.00	98.43	90			
	Opx	56.27	0.20	5.70	0.44	6.17	0.16	30.30	1.18	0.18	100.60		88		
	Cpx	53.06	0.63	7.32	1.01	2.97	0.13	15.66	18.21	1.74	100.73		51		
	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
汉诺坝	Ol	40.72	nd	0.05	0.02	8.28	0.10	49.84	0.10	nd	99.11	92			
	Opx	54.51	0.07	5.69	0.47	5.46	0.13	32.70	1.02	0.13	100.18		89		
	Cpx	52.35	0.38	6.97	0.72	3.05	0.11	16.31	19.44	1.33	100.66		51		
	Gt	42.60	0.16	23.89	0.74	6.36	0.25	21.08	5.14	0.01	100.23			74	
	Sp	0.11	0.10	56.80	10.18	10.14	0.08	21.86	0.00	nd	99.27				11

注: 数据引自 Fan and Hooper (1989)、樊祺诚和刘若新 (1994)、曹荣龙和朱寿华 (1990)、金淑燕和潘顺安 (1998); Fo, Ol 中镁橄榄石分子; Pyr, 镁铝石榴石; Ol, 橄榄石; En, Opx 中顽火辉石分子; Opx, 斜方辉石; Cpx, 单斜辉石; Gt, 石榴石; Sp, 尖晶石; Cr[#] = 100×Cr/(Al+Cr); nd, 未测.

表 2 中国东部新生代玄武岩中代表性石榴石二辉橄榄岩矿物化学成分(%)

Table 2 Mineral compositions of representative garnet lherzolite in Cenozoic basalts from eastern China (%)

产地	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Total	Fo	En	Pyr
绰尔河	Ol	41.34	0.08	0.08	0.04	9.66	0.10	49.51	0.14	0.00	100.96	90		
	Opx	55.07	0.03	4.09	0.91	6.08	0.17	32.86	1.55	0.04	100.79		88	
	Cpx	52.88	0.04	3.91	1.06	3.40	0.08	18.82	20.42	0.26	100.87		53	
	Gt	43.73	0.04	2.77	17.17	7.03	0.32	27.60	2.01	0.03	100.70			79
新昌	Ol	40.31	nd	0.07	0.02	10.28	0.11	49.00	0.09	nd	99.89	89		
	Opx	54.07	0.18	5.01	0.61	6.14	0.13	32.54	1.08	0.25	99.99		88	
	Cpx	51.50	0.62	6.57	1.04	3.66	0.11	16.11	17.77	1.80	99.18		52	
	Gt	41.87	0.19	22.72	1.31	6.33	0.26	20.72	5.01	0.93	99.35			74
闽清	Ol	40.57	nd	0.10	0.03	9.54	0.10	49.14	0.13	nd	99.59	90		
	Opx	53.71	0.18	5.90	0.71	5.92	0.10	32.01	1.49	0.30	100.30		88	
	Cpx	51.51	0.38	6.98	1.19	4.17	0.09	17.57	16.63	1.64	100.14		55	
	Gt	42.56	0.29	23.11	1.64	6.32	0.26	20.80	5.20	0.29	100.44			74

注: 大兴安岭绰尔河引自樊祺诚等(2008); 新昌、闽清数据引自 Fan and Hooper(1989); Fo, Ol 中镁橄榄石分子; Pyr, 镁铝榴石; Ol, 橄榄石; En, Opx 中顽火辉石分子; Opx, 斜方辉石; Cpx, 单斜辉石; Gt, 石榴石; nd, 未测。

表 3 中国东部新生代玄武岩中含石榴石相橄榄岩 *P-T* 平衡条件

Table 3 *P-T* estimation for garnet-bearing peridotites in Cenozoic basalts from eastern China

岩石	产地	<i>T</i> (℃)	<i>P</i> (GPa)	深度(km)
尖晶石/石榴石二辉橄榄岩	明溪	1 058	2.05	66
	西垄	1 103	1.93	62
	女山	1 114	1.91	62
	鹤壁	1 039	1.97	64
	汉诺坝	1 182	1.89	61
石榴石二辉橄榄岩	绰尔河	1 164	2.36	76
	新昌	1 115	2.47	79
	闽清	1 199	2.43	77

注: *T*(℃), 采用 Wells(1977)的方法计算; *P*(GPa), 采用 Nickel and Green (1985)的方法计算; 深度 *D*=4.02+30.3*P*(Lallement *et al.*, 1980)。

的初始物料, 在高温高压(*T*=1 100 ℃和 *P*=1.8~2.0 GPa)下均实现了尖晶石二辉橄榄岩向尖晶石/石榴石二辉橄榄岩的转变, 其实验 *P-T* 条件与由矿物温压计计算的中国东部五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩 *P-T* 平衡条件基本一致。因此, 提出中国东部大陆上地幔尖晶石二辉橄榄岩向石榴石二辉橄榄岩相转变带深度约为 55~70 km (Fan *et al.*, 1997a), 而中国东部上地幔石榴石二辉橄榄岩形成深度则大于 70 km (表 3)。

3 铝辉石向贫铝辉石+石榴石相转变

大家知道, 新生代玄武岩中石榴石二辉橄榄岩的辉石是相对富铝的斜方辉石和单斜辉石 (Al₂O₃ 分别为 5%~6% 和 6%~7%), 全岩的 Al₂O₃ 为

4%~5%, 由矿物温压计推算的形成深度大于 70 km。金伯利岩中石榴石橄榄岩捕虏体被认为是来自 100 km 以上的更大深度, 其辉石的 Al₂O₃ 含量相对较低, 斜方辉石和单斜辉石的 Al₂O₃ 一般分别小于 1% 和 2.5%, 全岩的 Al₂O₃<2% (Dawson, 1980; Fan and Hooper, 1989)。笔者在研究苏鲁—大别超高压变质带石榴石橄榄岩时 (樊祺诚等, 1992, 1996; Fan *et al.*, 1996), 普遍发现极端贫铝 (Al₂O₃ 一般为 0%~0.2%) 乃至无铝的斜方辉石 (表 4), 这与阿尔卑斯高压变质橄榄岩的情况类似 (Carswell, 1986)。根据矿物温压计计算的 *P-T* 平衡条件变化为 700~800 ℃和 4.0~5.0 GPa, 推导出超高压变质作用应发生在 120~150 km 以上深度 (樊祺诚等, 1992, 1996; Fan *et al.*, 1996)。

自然界中铝辉石可以看成无铝辉石中石榴石的固溶体, 高压下可以使铝辉石向贫铝辉石+石榴石转变 (Ringwood, 1967), 所以铝辉石向贫铝辉石+石榴石相转变发生在上地幔更高压力条件下的富铝矿物相转变。笔者曾采用天然样品在超高压 (4.5~5.5 GPa) 下实现了铝顽辉石向贫铝辉石+石榴石的转变 (Fan *et al.*, 1997b), 由此得出随上地幔深度加大, 铝顽辉石趋于贫铝, 同时向石榴石转变, 所以由辉石中的 Al₂O₃ 含量可粗略判断石榴石橄榄岩相对的来源深度。

4 结论

地震波随深度变化和在某些深度上的不连续性

表 4 大别—苏鲁超高压变质带超镁铁岩辉石矿物化学成分(%)

Table 4 Pyroxene compositions of ultramafic rocks from Dabie-Sulu ultrahigh-presure metamorphic belt (%)

地点	样号	岩性	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Total
毛 屋	Am23-7	石榴石二辉岩	Opx	57.97	0.00	0.15	0.03	5.14	0.00	36.07	0.07	0.00	99.43
			Cpx	53.83	0.08	2.72	0.18	2.58	0.00	15.60	21.68	2.40	99.07
	Am24-2c	石榴石二辉岩	Opx	58.97	0.01	0.18	0.00	5.14	0.07	35.16	0.02	0.00	99.55
			Cpx	54.89	0.00	1.67	0.00	2.42	0.04	15.97	21.86	1.62	98.47
碧 溪 岭	DX420-1	石榴石橄榄岩	Opx	56.28	0.01	0.07	0.15	8.32	0.07	34.61	0.06	0.02	99.59
			Cpx	53.65	0.06	0.58	0.79	3.62	0.05	16.33	22.26	1.81	99.15
	DX10-3	石榴石橄榄岩	Opx	55.30	0.00	0.10	0.17	8.80	0.15	35.55	0.00	0.05	100.12
			Cpx	52.90	0.00	1.06	1.06	3.83	0.07	16.38	22.44	1.85	99.59
	DX405-2	石榴石二辉岩	Opx	57.66	0.00	0.16	0.14	8.04	0.20	33.90	0.11	0.00	100.21
			Cpx	55.27	0.00	0.08	1.10	3.85	0.13	15.37	22.15	2.06	100.01
	DX418	石榴石二辉岩	Opx	56.99	0.06	0.05	0.17	7.74	0.00	34.29	0.11	0.00	99.41
			Cpx	53.07	0.00	0.18	0.69	3.73	0.06	16.80	23.85	0.89	99.27
东 海	Sp-10	石榴石橄榄岩	Opx	56.71	0.00	0.00	0.11	5.67	0.00	37.73	0.05	0.03	100.3
			Cpx	52.60	0.00	0.00	1.29	2.74	0.00	17.16	23.33	1.75	98.87
	168-5	石榴石橄榄岩	Opx	57.69	0.00	0.06	0.27	6.25	0.20	35.65	0.16	0.05	100.33
			Cpx	54.28	0.05	0.50	0.05	1.71	0.03	17.24	23.22	0.67	97.75
	132-9	石榴石橄榄岩	Opx	58.01	0.01	0.10	0.20	5.55	0.10	35.51	0.08	0.00	99.56
			Cpx	54.90	0.04	1.25	1.15	2.07	0.03	16.18	22.26	1.20	99.08
	JD-10	石榴石橄榄岩	Opx	56.28	0.00	0.03	0.12	6.07	0.09	36.92	0.13	0.10	99.74
			Cpx	53.09	0.02	1.53	1.40	3.01	0.07	16.15	21.98	2.23	99.48
荣 成	155-1	石榴石橄榄岩	Opx	56.43	0.00	0.06	0.17	5.99	0.07	37.73	0.12	0.05	100.62
			Cpx	53.88	0.08	0.50	0.73	2.36	0.00	17.61	23.91	0.96	100.03

注:碧溪岭和东海 JD-10 为本文新提供数据,其他引自樊祺诚等(1992,1996);Opx. 斜方辉石;Cpx. 单斜辉石.

给地球内部物质分层结构以启迪,中国东部新生代玄武岩和大别—苏鲁超高压变质带中的含石榴石相橄榄岩,为我们带来了发生在上地幔的相转变的宝贵信息和实物证据. 通过岩石学与实验岩石学的研究,推导出发生相转变的 $P-T$ 条件,为建立上地幔岩石分层结构提供了重要约束. 中国东部大陆上地幔尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩相转变发生在 55~70 km,随着深度增加,石榴石二辉橄榄岩从富铝石榴石二辉橄榄岩(70~120 km)转变为贫铝石榴石二辉橄榄岩(>120~150 km).

References

Ave Lallemand, H. G. , Mercier, J. C. C. , Carter, J. L. , et al. , 1980. Rheology of the upper mantle: Inferences from peridotite xenoliths. *Tectonophysics*, 70: 85—113.

Cao, R. L. , Zhu, S. H. , 1990. Sanidine-olivine-diopside mantle metasomatic association found in a garnet lherzolite xenolith from Xilong, Zhejiang Province. In: Professional committee for mantle mineralogy, petrology and geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, ed. , Collected papers on upper mantle characteristics and dynamics of China. Seismological Publishing House, Beijing, 34—44 (in Chinese).

Carswell, D. A. , 1986. The metamorphic evolution of Mg-Cr type Norwegian garnet peridotites. *Lithos*, 19 (3—4): 279—297.

Chi, J. S. , 1988. Study on Cenozoic basalt and upper mantle in China (with special concern to kinberlite). China University of Geosciences Press, Beijing (in Chinese).

Dawson, J. B. , 1980. Kimberlites and their xenoliths. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

E, M. L. , Zhao, D. S. , 1987. Cenozoic basalt and xenolith from depth in China. Science Press, Beijing (in Chinese).

Fan, Q. C. , Hooper, P. R. , 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. *J. Petrology*, 30(5): 1117—1158.

Fan, Q. C. , Liu, R. X. , 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, ed. , Collected papers on upper mantle characteristics and dynamics of China. Seismological Publishing House, Beijing, 72—82 (in Chinese).

Fan, Q. C. , Liu, R. X. , 1994. Spinel-garnet lherzolite in Late Tertiary limburgitic pipe from Hebi, Henan Province

- and its genesis. In: Ouyang, Z. Y., ed., New progress in mineralogy, petrology and geochemistry study in China. Lanzhou University Press, Lanzhou, 141—142 (in Chinese).
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Xie, H. S., et al., 1997a. Experimental study of spinel-garnet phase transition in upper mantle and its significance. *Science in China (Ser. D)*, 40(4): 383—389.
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Xie, H. S., et al., 1997b. Ultrahigh pressure (4.5—5.5 GPa) experimental research on pyroxene-garnet transition and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 42(17): 1456—1459.
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Ma, B. L., 1992. Preliminary study on high-pressure metamorphism of ultramafic rocks in North Jiangsu-South Shandong region. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1): 90—96 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Ma, B. L., et al., 1996a. The petrology and ultrahigh-pressure metamorphism of Maowu mafic-ultramafic rock block in Dabieshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 29—47 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Zhang, Q., et al., 1996b. The petrology and high pressure mineral assemblage of mafic-ultramafic rocks in ultrahigh pressure zone of Dabieshan Mountains. *Science in China (Ser. D)*, 39(3): 329—336.
- Fan, Q. C., Sui, J. L., Zhao, Y. W., et al., 2008. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2563—2568 (in Chinese with English abstract).
- Jin, S. Y., Pan, S. A., 1998. Mantle-derived xenoliths of spinel-garnet lherzolite from Nushan and their implications for petro-physics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 475—479 (in Chinese with English abstract).
- Lallement, H. L., Mercier, H. G., Carter, J. C., et al., 1980. Rheology of upper mantle: Inferences from peridotite xenoliths. *Tectonophysics*, 70(1—2): 85—113.
- Liu, R. X., Yang, M. E., Xu, H. J., et al., 1981. Preliminary study of ultramafic xenoliths from Cenozoic alkaline basalts in North China. *Seismological Geology*, 3(3): 1—16, 4(4): 39—48 (in Chinese with English abstract).
- MacGregor, I. D., 1970. The effect of CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 and Al_2O_3 on the stability of spinel and garnet peridotites. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 3: 372—377.
- Nickel, K. G., Green, D. H., 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlite and diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73(1): 158—170.
- O'Neil, H. S. C., 1981. The transition between lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contrib. Miner. Petrol.*, 77: 185—194.
- Ringwood, A. E., 1967. The pyroxene-garnet transformation in the earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2(3): 255—263.
- Wells, P. R. A., 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contr. Miner. Petrol.*, 62(2): 129—139.
- Xu, Y. G., Lin, C. Y., Shi, L. B., et al., 1995. Upper mantle geotherm for eastern China and its geological implications. *Science in China (Ser. B)*, 38(12): 1482—1492.

附中文参考文献

- 曹荣龙, 朱寿华, 1990. 浙江西堍石榴石二辉橄榄岩包体中发现的透长石—橄榄石—透辉石地幔交代组合. 见: 中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会主编, 中国上地幔特征与动力学论文集. 北京: 地震出版社, 34—44.
- 池际尚, 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 北京: 中国地质大学出版社.
- 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.
- 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岩筒中尖晶石/石榴石二辉橄榄岩及成因. 见: 欧阳自远编, 中国矿物岩石学地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 141—142.
- 樊祺诚, 刘若新, 马宝林, 1992. 苏北—胶南高压变质超镁铁岩的初步研究. 岩石学报, 1: 90—96.
- 樊祺诚, 刘若新, 马宝林, 等, 1996. 大别山毛屋超高压变质镁铁—超镁铁的原岩与变质作用. 岩石学报, 12(1): 29—47.
- 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 等, 2008. 大兴安岭中部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究. 岩石学报, 24(11): 2563—2568.
- 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——中国地质大学学报, 23(5): 475—479.
- 刘若新, 杨美娥, 胥怀济, 等, 1981. 华北新生代碱性玄武岩中超镁铁质捕虏体的初步研究. 地震地质, 3(3): 1—16, 4(4): 39—48.