

东北和华北地区上地幔成分和热状态对比及对中国东部岩石圈减薄的启示*

于宋月^{1,2} 徐义刚¹ 黄小龙¹ 葛文春³ 程锦¹

YU SongYue^{1,2}, XU YiGang¹, HUANG XiaoLong¹, GE WenChun³ and CHENG Jin¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2007-03-10 收稿, 2007-05-11 改回.

Yu SY, Xu YG, Huang XL, Ge WC and Cheng J. 2007. Comparison of composition and thermal state of the upper mantle beneath northeast and north China: Implications for lithospheric thinning in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1252 - 1268

Abstract Mantle composition and its overlying crust age are considered having a positive correlation; more refractory mantle underneath the crust with older ages. Comparison has been carried out on the composition and thermo-barometric condition of spinel peridotite xenoliths from NE China and N China. It is revealed that peridotites from Northeast China are more depleted in basaltic compositions than those from North China. However, the crust in NE China has a younger age than that in North China. This decoupling between crust age and mantle composition indicates that the lithosphere mantle in N and NE China may have been modified after its formation. Specifically, the crust-mantle decoupling in North China is due to the Mesozoic lithospheric thinning and accretion; whereas that in NE China resulted from the combined effect of intense crust movement and the Mesozoic lithospheric thinning processes. The compositional difference of the upper mantle between two areas is certainly related to different degrees of partial melting. The extent of partial melting is dependent upon many factors whose relative contribution is difficult to assess at this stage. Comparison of equilibrium temperature of peridotites and thermal state indicates that the lithosphere mantle beneath NE China is cooler than that under North China. This suggests that either lithospheric thinning took place earlier in NE China than in N China, or the extent of lithospheric thinning in N China is greater than in NE China, highlighting the temporal and spatial variation of the lithospheric thinning process in eastern China.

Key words North China, Northeast China, Thermal state, Peridotite xenoliths, Lithosphere thinning

摘要 地幔成分与其上覆地壳年龄存在相关关系, 年龄越老, 地幔越亏损玄武质组分。本文对产于东北和华北地区的尖晶石相橄榄岩包体的成分进行了统计分析, 结果显示东北地区橄榄岩包体比华北地区包体更亏损玄武质组分。这说明东北岩石圈地幔比华北上地幔更难熔, 但其上覆地壳年龄却远小于华北地区地壳的年龄。这种地壳年龄和地幔组分之间的解耦暗示东北和华北地区的岩石圈地幔形成之后发生了大规模的改造。华北地区的壳幔解耦与中生代岩石圈减薄和增生有关, 而东北地区的壳幔解耦则是该区地壳的多期改造和中生代岩石圈减薄和增生等过程综合作用的结果。两地区地幔成分的差异显然与部分熔融程度的不同有关, 但影响部分熔融程度的因素很多, 目前尚不能确定。包体的平衡温度统计和地温线对比显示东北岩石圈的地温梯度低于华北的地温梯度, 可能是东北地区岩石圈减薄的时间要早于华北地区, 或者华北岩石圈减薄

* 国家自然科学基金(编号: 40673038, 49925308)和中国科学院百人计划项目资助成果。

第一作者简介: 于宋月, 男, 1979年生, 博士研究生, 岩石地球化学专业, E-mail: ysy@gig.ac.cn

程度可能大于东北地区的结果,因此中国东部岩石圈减薄存在时空不均一性。

关键词 华北; 东北; 热状态; 橄榄岩包体; 岩石圈减薄

中图法分类号 P588.125

1 引言

Griffin *et al.* (2003) 认为大陆地壳和地幔的形成是相同的构造热事件造成的,因此地壳和下覆岩石圈地幔是耦合的,也就是说,地幔成分和其上覆地壳年龄存在相关关系,并分出三种地幔类型,其中太古宙型地幔(>2.5Ga)最难熔(即最亏损玄武质组分),元古宙型地幔(2.5~1.0Ga)次之,显生宙型地幔(<1.0Ga)最饱满。O'Reilly *et al.* (2006) 认为不同类型岩石圈地幔的热状态和厚度也不同,其中太古宙型地幔最冷(35~40mW/m²)、最厚(180~240km);其次是元古宙型地幔(40~45mW/m²,150~180km),显生宙型地幔最热(>50mW/m²)、最薄(60~140km)。中国东部由4个大的构造单元组成(Yang *et al.*, 1986),分别是东北褶皱带,华北克拉通,扬子克拉通和华南褶皱带(图1),其中华北克拉通是世界上最古老的陆核之一(最老的地壳锆石 U-Pb 年龄为3.8Ga; Liu *et al.*, 1992),地壳岩石的平均 Nd 模式年

龄为2.6Ga左右,说明其最后一期大规模的构造热事件发生在太古宙。东北褶皱带作为天山-兴蒙褶皱带的一部分,其地壳年龄较年轻,花岗岩的钨模式年龄为0.5~1.0Ga (Jahn *et al.*, 2000),说明最后一次大规模的构造岩浆事件发生在中生代或者更年轻,褶皱带内部也有一些元古代微陆块,如松辽地块、佳木斯地块(马文璞,1992)。根据 Griffin *et al.* (2003)和 O'Reilly *et al.* (2006) 的观点,华北地区地幔应“冷”而“厚”,其成分应落入太古宙地幔范围内,东北地区地幔相对“热”而“薄”,其成分应落入显生宙地幔范围内。为了验证这种推理是否正确,笔者对产于华北和东北地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的成分和平衡温度进行了统计分析,试图通过对两地区地幔成分和热状态的对比来揭示两地区地幔演化的特点。

2 方法

前人用橄榄岩包体和块体的成分来研究岩石圈地幔成分(McDonough, 1990),或者用石榴石捕虏晶反演的全岩成分来代表岩石圈地幔成分(Griffin *et al.*, 2003)。本文主要将新生代玄武岩中橄榄岩包体作为研究对象。这一方法的局限性是包体分布的时空不均一性。为此,我们在统计分析中考虑了包体产出的位置,玄武岩的喷发时间,单个地点的包体的数量和代表性。我们总共考察了16个地点的包体(图1),其中7个位于东北地区,9个位于华北地区。虽然在空间上分布并不均匀,但也基本涵盖了整个地区。这些包体均产于中新世以来的玄武岩中,因此可以用来代表现今岩石圈地幔的成分。为了使包体成分具有代表性,每个地点(五大连池除外)统计样品的数量均大于14个,最多达40个。所有的平衡温度数据统一用 Witt-Eickschen and Seck (1991) 的 Cr-Al 温度计计算所得,在包体平衡温度计算过程中,对于化学成分未达到平衡的矿物采用的是矿物边部的成分数据,这是因为矿物边部成分代表的是包体产出前所在地幔最新的温压状态。数据分析采用每个地区取算术平均值和1倍标准偏差(1 σ),数据的统计分析结果列于表1和表2,笔者所做的双辽、蛟河、尚志包体的矿物成分分析结果列于表3,蛟河石榴石辉石岩的温压计算结果列于表4。

3 结果

3.1 东北和华北地区橄榄岩包体成分对比

对两地区橄榄岩包体的主量元素组成的平均值统计发现,东北地区的包体要比华北地区包体更加亏损玄武质组分(图2);在 Ca-Al 的相关图解中,华北地区包体并没有落在

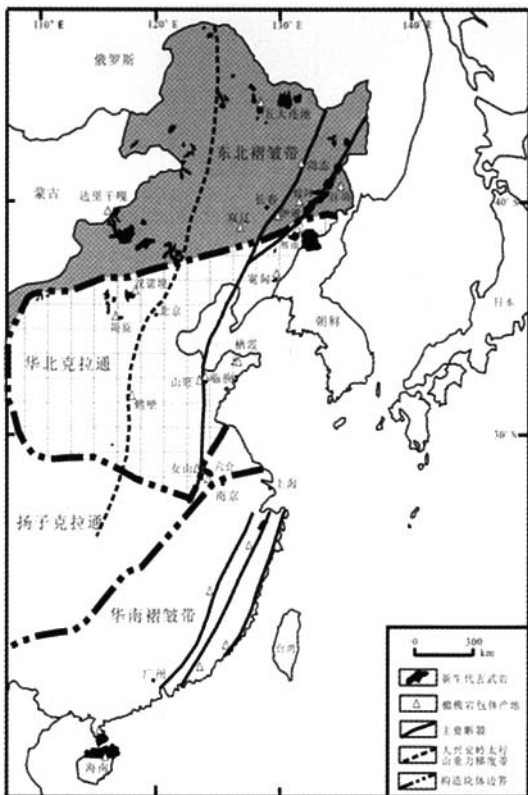


图1 中国东部地质简图和包体采样点位置。

Fig. 1 Simplified geological map of Eastern China and sampling localities of xenoliths

表1 东北和华北地区新生代玄武岩中橄榄岩包体成分的平均值

Table 1 Averaged compositions of peridotite xenoliths hosted in Cenozoic basalts from Northeast and North China

样品产地	MgO		CaO		Al ₂ O ₃		TiO ₂		Mg/Si		样品数 (个)	参考文献	
	平均值	1σ	平均值	1σ	平均值	1σ	平均值	1σ	平均值	1σ			
东北地区	蛟河	43.53	1.9	1.36	0.68	1.52	0.64	0.03	0.03	1.3	0.07	15	数据见表3
	五大连池	44.44	2.4	1.47	0.76	1.01	0.45	0.06	0.04	1.35	0.12	7	Zhang <i>et al.</i> (1998)
	双辽	42.23	2.48	1.86	0.96	1.98	0.97	0.06	0.04	1.25	0.1	25	Wu <i>et al.</i> (2003); 数据见表3
	汪清	42.17	3.14	1.95	1.02	2.27	1.25	0.08	0.05	1.22	0.12	16	Wu <i>et al.</i> (2003); Xu <i>et al.</i> (1998)
	达里干嘎	42.18	2.34	2.11	0.84	2.24	0.92	0.06	0.04	1.23	0.08	14	Wiechert <i>et al.</i> (1997)
华北地区	辉南	42.77	3.20	1.69	1.07	1.92	1.04	0.09	0.04	1.28	0.12	44	鄂莫岚和赵大升(1987); Wu <i>et al.</i> (2003); Xu <i>et al.</i> (2003)
	宽甸	41.82	2.63	2.67	1.04	2.56	0.98	0.10	0.07	1.28	0.11	10	鄂莫岚和赵大升(1987)
	汉诺坝	40.57	1.90	2.24	0.63	2.64	0.74	0.09	0.04	1.17	0.07	28	Song and Frey (1989); Rudinick <i>et al.</i> (2004); Chen <i>et al.</i> (2001)
	阳原	41.04	2.00	2.17	0.97	2.38	0.80	0.07	0.03	1.18	0.06	30	马金龙和徐义刚(2006); 刘讲锋(2005)
	栖霞	41.58	2.52	1.95	0.81	1.89	0.94	0.05	0.05	1.21	0.08	27	鄂莫岚和赵大升(1987); Zheng <i>et al.</i> (1998); Rudinick <i>et al.</i> (2004)
	六合	40.10	1.90	2.58	0.83	2.80	0.80	0.09	0.04	1.16	0.05	16	陈道公等(1994)
	女山	40.08	2.18	2.63	0.76	2.89	0.85	0.11	0.04	1.17	0.08	14	鄂莫岚和赵大升(1987); Xu <i>et al.</i> (1998)
	山汪	40.01				3.38		0.12		1.20		14	Zheng <i>et al.</i> (1998)
临朐	38.83	2.55	2.45	0.97	3.08	1.01	0.19	0.06	1.13	0.10	15	鄂莫岚和赵大升(1987)	

表2 东北和华北地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的矿物化学成分和平衡温度的平均值

Table 2 Averaged equilibrium temperatures and compositions of minerals of peridotite xenoliths hosted in Cenozoic basalts from Northeast and North China

样品产地	平衡温度(℃)		Cr [#] (Cpx)		Cr [#] (Sp)		样品数 (个)	参考文献	
	平均值	1σ	平均值	1σ	平均值	1σ			
东北地区	尚志	843	31	12.12	3.53	21.81	9.05	10	数据见表3
	伊通	902	65	8.97	2.7	16.06	6.97	44	Fan <i>et al.</i> (2000); 徐义刚(1994); 数据见表3
	蛟河	891	37	15.07	3.89	26.32	9.1	14	数据见表3
	五大连池	926	69	15.73	4.54	31.11	14.13	12	Zhang <i>et al.</i> (1998)
	双辽	957	78	13.97	6.04	27.17	14.12	28	Wu <i>et al.</i> (2003); Fan <i>et al.</i> (2000); 数据见表3
	汪清	878	49	13.07	6.41	23.35	15.6	29	Wu <i>et al.</i> (2003); Xu <i>et al.</i> (1998)
	达里干嘎	919	20	10.75	3.19	23	17	16	Wiechert <i>et al.</i> (1997)
华北地区	辉南	887	54	11.92	4.84	27.33	12.32	47	Fan <i>et al.</i> (2000); Wu <i>et al.</i> (2003); Xu <i>et al.</i> (2003)
	宽甸	945	69	8.24	3.32	11.47	3.57	22	鄂莫岚和赵大升(1987); 徐义刚(1994)
	汉诺坝	942	49	9.13	4.25	16	6.73	62	Song and Frey (1989); Rudinick <i>et al.</i> (2004); Chen <i>et al.</i> (2001); 鄂莫岚和赵大升(1987)
	阳原	964	39	13.08	5.75	22.94	13.86	19	马金龙和徐义刚(2006); 刘讲锋(2005)
	栖霞	902	18	11.5	5.14	21.13	14.25	29	Zheng <i>et al.</i> (1998); Rudinick <i>et al.</i> (2004)
	六合	977	82	9.95	3.32	16.42	8.3	40	陈道公等(1994); 徐义刚(1994)
	女山	997	76	8.3	3.13	14.09	7.23	34	Xu <i>et al.</i> (1998); Xu and Bodinier(2004)
	山汪	962	21	7.49	2.12	11.87	4.63	12	Zheng <i>et al.</i> (1998)
临朐	954	58	9.91	8.32	17.24	15.06	12	徐义刚(1994)	

表3 双辽和蛟河橄榄岩矿物化学成分

Table 3 Representative mineral chemistry of peridotite xenoliths from Shuangliao and Jiaohé

产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BBT-1 二辉橄榄岩				BBT-2 方辉橄榄岩				BBT-4 方辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.01	0.07	0.80	0.03	0.01	0.04	1.21	0.03	0.02	0.06	1.20	0.04
SiO ₂	41.18	54.95	52.22	0.11	40.93	55.95	52.76	0.02	41.25	56.23	53.17	0.05
MgO	49.72	33.72	16.86	19.27	49.49	35.14	16.03	17.71	49.76	35.21	15.93	17.33
MnO	0.13	0.15	0.09	0.18	0.12	0.14	0.06	0.18	0.13	0.14	0.07	0.23
TiO ₂	0.03	0.08	0.12	0.13	0.02	0.04	0.08	0.09	0.03	0.02	0.09	0.05
Al ₂ O ₃	0.04	4.07	4.83	44.86	0.01	2.13	3.35	37.90	0.01	2.17	3.31	35.90
CaO	0.09	1.11	20.28	0.00	0.03	0.42	21.16	0.01	0.03	0.50	21.84	0.01
NiO	0.13	0.14	0.05	0.38	0.18	0.12	0.03	0.22	0.14	0.09	0.05	0.22
FeO	9.64	6.26	3.09	13.19	8.67	5.41	2.11	11.32	8.87	5.59	2.14	12.21
Cr ₂ O ₃	0.02	0.58	0.92	22.05	0.01	0.43	1.27	31.12	0.02	0.44	1.31	33.88
总量	100.99	101.13	99.25	100.18	99.47	99.82	98.06	98.60	100.23	100.45	99.13	99.91
Mg [#]	0.903	0.907	0.908	0.724	0.911	0.921	0.932	0.738	0.910	0.919	0.930	0.719
产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BBT-5 方辉橄榄岩				BBT-6 方辉橄榄岩				BBT-7 二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.01	0.03	1.17	0.02	0.01	0.10	1.14	0.03	0.02	0.09	0.70	0.04
SiO ₂	41.07	56.43	52.92	0.04	40.85	55.20	52.22	0.09	41.02	55.03	52.23	0.13
MgO	49.78	35.67	15.82	17.68	49.45	33.96	16.75	17.70	49.08	33.92	16.90	18.36
MnO	0.12	0.14	0.09	0.22	0.11	0.14	0.08	0.23	0.14	0.12	0.08	0.19
TiO ₂	0.03	0.04	0.07	0.09	0.03	0.05	0.10	0.15	0.01	0.06	0.13	0.16
Al ₂ O ₃	0.02	1.91	3.25	35.05	0.02	3.21	4.16	35.61	0.02	3.46	4.07	41.70
CaO	0.02	0.40	21.79	0.01	0.11	1.05	19.77	0.01	0.09	1.00	20.91	0.02
NiO	0.14	0.07	0.03	0.18	0.14	0.11	0.10	0.24	0.12	0.13	0.05	0.35
FeO	8.71	5.64	2.09	11.70	8.90	5.53	2.83	13.32	9.22	5.75	2.78	13.11
Cr ₂ O ₃	0.04	0.35	1.23	35.35	0.02	0.73	1.16	31.51	0.03	0.60	0.92	25.93
总量	99.90	100.68	98.43	100.32	99.61	100.07	98.29	98.88	99.74	100.18	98.76	99.96
Mg [#]	0.911	0.919	0.931	0.731	0.909	0.917	0.914	0.705	0.905	0.914	0.916	0.716
产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BBT-8 二辉橄榄岩				BBT-9 方辉橄榄岩				BBT-10 方辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.02	0.18	1.37	0.01	0.02	0.08	1.02	0.02	0.01	0.10	1.08	0.01
SiO ₂	41.02	53.91	51.12	0.10	41.36	55.97	52.92	0.07	41.02	55.19	52.34	0.09
MgO	48.91	32.56	15.87	20.56	49.94	34.74	17.23	15.73	50.16	34.28	16.88	18.62
MnO	0.14	0.15	0.09	0.13	0.11	0.14	0.08	0.27	0.15	0.13	0.09	0.20
TiO ₂	0.05	0.18	0.55	0.28	0.02	0.07	0.15	0.42	0.03	0.09	0.20	0.29
Al ₂ O ₃	0.03	5.10	6.81	54.29	0.02	2.06	3.00	22.14	0.01	3.40	4.42	37.71
CaO	0.10	1.15	18.68	0.01	0.10	1.07	19.92	0.00	0.09	1.07	19.88	0.01
NiO	0.12	0.13	0.07	0.39	0.14	0.13	0.06	0.19	0.13	0.10	0.07	0.26
FeO	9.96	6.24	3.53	12.16	8.64	5.31	2.68	16.55	8.35	5.25	2.74	12.13
Cr ₂ O ₃	0.04	0.46	0.75	11.97	0.05	0.70	1.34	45.13	0.04	0.81	1.33	30.40
总量	100.34	99.96	98.85	99.90	100.40	100.27	98.39	100.51	99.97	100.41	99.01	99.72
Mg [#]	0.898	0.904	0.890	0.753	0.912	0.922	0.921	0.631	0.915	0.922	0.917	0.734
产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BBT-11 二辉橄榄岩				BBT-12 方辉橄榄岩				BLS-1 二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.01	0.08	0.77	0.02	0.02	0.79	1.31	0.01	0.01	0.10	1.43	0.02
SiO ₂	41.29	54.27	51.87	0.09	41.02	53.27	51.58	0.02	41.06	55.15	51.89	0.05

续表 3

Continued Table 3

产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BBT-11 二辉橄辉岩				BBT-12 方辉橄辉岩				BLS-1 二辉橄辉岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
MgO	49.62	33.70	16.98	18.54	49.22	23.20	14.90	20.58	49.15	33.95	15.21	20.96
MnO	0.12	0.15	0.08	0.20	0.14	0.11	0.08	0.13	0.14	0.15	0.08	0.13
TiO ₂	0.04	0.09	0.15	0.24	0.01	0.30	0.54	0.03	0.02	0.12	0.42	0.12
Al ₂ O ₃	0.03	3.68	4.23	39.69	0.01	4.66	5.67	58.50	0.01	3.94	5.89	57.77
CaO	0.11	1.14	20.34	0.02	0.03	12.57	21.71	0.01	0.05	0.63	20.75	0.00
NiO	0.15	0.08	0.09	0.36	0.14	0.08	0.06	0.41	0.13	0.12	0.08	0.46
FeO	9.52	5.85	2.97	14.19	10.07	4.09	2.50	9.88	10.64	6.52	2.74	10.90
Cr ₂ O ₃	0.03	0.66	0.96	26.31	0.03	0.48	0.67	9.94	0.01	0.27	0.61	9.64
总量	100.87	99.71	98.45	99.63	100.65	99.55	99.02	99.51	101.20	100.95	99.08	100.03
Mg [#]	0.904	0.912	0.911	0.702	0.898	0.911	0.915	0.789	0.893	0.904	0.909	0.776
产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽											
	BLS-2 方辉橄辉岩				BLS-3 二辉橄辉岩				BLS-5 二辉橄辉岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.01	0.13	1.76	0.02	0.03	0.11	1.56	0.01	0.02	0.15	1.54	0.02
SiO ₂	41.04	56.13	53.27	0.04	40.90	54.77	51.49	10.18	40.95	53.99	51.44	0.07
MgO	49.98	35.37	16.03	16.46	49.35	33.97	15.35	27.88	49.18	33.45	15.54	20.62
MnO	0.10	0.14	0.08	0.27	0.14	0.14	0.08	0.13	0.14	0.15	0.08	0.12
TiO ₂	0.02	0.03	0.10	0.15	0.03	0.13	0.52	0.13	0.03	0.14	0.47	0.20
Al ₂ O ₃	0.03	1.93	3.58	27.53	0.01	3.94	6.22	42.20	0.03	4.82	6.48	57.83
CaO	0.04	0.67	20.01	0.00	0.05	0.69	20.42	0.05	0.07	0.94	19.26	0.00
NiO	0.14	0.10	0.05	0.19	0.13	0.12	0.04	0.43	0.14	0.13	0.08	0.43
FeO	8.71	5.34	2.27	14.05	9.85	6.40	2.81	10.91	10.40	6.47	3.34	10.74
Cr ₂ O ₃	0.04	0.56	1.59	41.65	0.05	0.33	0.75	7.90	0.00	0.36	0.62	9.36
总量	100.08	100.39	98.74	100.36	100.51	100.59	99.25	99.77	100.93	100.59	98.82	99.37
Mg [#]	0.912	0.923	0.927	0.678	0.900	0.905	0.908	0.821	0.895	0.903	0.893	0.776
产地 样品号 岩石名称 矿物	双辽								蛟河			
	BLS-6 二辉橄辉岩				NBS-1 二辉橄辉岩				YQS-1 二辉橄辉岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.00	0.05	0.76	0.01	0.01	0.04	1.26	0.02	0.00	0.02	0.58	0.01
SiO ₂	40.87	55.94	52.98	0.03	40.85	55.45	51.34	0.03	41.16	55.57	52.13	0.07
MgO	49.54	34.93	16.91	17.30	49.48	34.72	15.28	20.88	49.61	34.96	16.04	19.33
MnO	0.12	0.13	0.06	0.23	0.16	0.14	0.09	0.13	0.13	0.15	0.07	0.15
TiO ₂	0.01	0.03	0.08	0.11	0.02	0.14	0.62	0.10	0.00	0.06	0.14	0.03
Al ₂ O ₃	0.02	2.42	3.00	36.13	0.02	3.28	5.57	57.62	0.01	2.92	3.80	52.09
CaO	0.06	0.71	22.02	0.00	0.03	0.41	21.78	0.00	0.01	0.42	23.30	0.01
NiO	0.14	0.13	0.04	0.23	0.14	0.13	0.06	0.44	0.15	0.12	0.08	0.42
FeO	9.01	5.47	2.29	13.27	9.85	6.37	2.63	10.27	9.57	6.39	2.34	12.57
Cr ₂ O ₃	0.02	0.49	0.97	32.55	0.05	0.23	0.68	10.32	0.02	0.30	0.73	15.23
总量	99.75	100.29	99.12	99.84	100.58	100.91	99.31	99.81	100.64	100.90	99.19	99.86
Mg [#]	0.908	0.920	0.930	0.701	0.900	0.907	0.913	0.785	0.903	0.908	0.925	0.735
产地 样品号 岩石名称 矿物	蛟河											
	YQS-2 方辉橄辉岩				YQS-3 方辉橄辉岩				YQS-4 方辉橄辉岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.02	0.03	1.22	0.00	0.01	0.03	0.70	0.00	0.01	0.02	1.14	0.01
SiO ₂	41.28	57.14	54.03	0.03	41.09	55.58	52.36	0.02	41.01	56.17	52.89	0.02
MgO	50.36	36.00	16.18	14.53	49.53	34.87	16.12	18.96	49.86	35.24	15.80	18.05
MnO	0.12	0.13	0.08	0.31	0.12	0.15	0.08	0.16	0.12	0.13	0.08	0.19
TiO ₂	0.01	0.04	0.05	0.06	0.04	0.06	0.10	0.04	0.02	0.06	0.17	0.05

续表 3

Continued Table 3

产地		蛟河											
样品号	YQS-2				YQS-3				YQS-4				
岩石名称	方辉橄榄岩				方辉橄榄岩				方辉橄榄岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Al ₂ O ₃	0.00	1.37	2.37	25.65	0.00	2.78	3.60	50.18	0.01	2.33	3.60	43.56	
CaO	0.01	0.46	22.10	0.00	0.02	0.41	22.89	0.01	0.02	0.46	22.41	0.00	
NiO	0.14	0.09	0.08	0.17	0.15	0.11	0.04	0.34	0.15	0.08	0.04	0.29	
FeO	8.34	5.43	1.88	16.36	9.82	6.27	2.15	12.58	8.90	5.81	1.89	12.66	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.33	1.40	43.59	0.02	0.31	0.74	18.09	0.05	0.37	1.17	25.37	
总量	100.27	101.01	99.40	100.70	100.75	100.57	98.75	100.37	100.09	100.66	99.19	100.20	
Mg [#]	0.916	0.923	0.939	0.615	0.901	0.909	0.931	0.731	0.910	0.916	0.938	0.720	
产地		蛟河											
样品号	YQS-5				YQS-6				YQS-7				
岩石名称	二辉橄榄岩				方辉橄榄岩				二辉橄榄岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Na ₂ O	0.02	0.02	0.65	0.02	0.02	0.05	1.19	0.00	0.01	0.05	1.83	0.03	
SiO ₂	41.15	55.99	52.38	0.03	41.20	56.01	52.66	0.02	41.27	55.59	52.08	0.03	
MgO	49.45	35.03	16.03	18.02	49.92	35.18	15.66	19.28	49.06	34.60	14.42	19.98	
MnO	0.12	0.14	0.06	0.17	0.13	0.17	0.07	0.19	0.14	0.16	0.07	0.12	
TiO ₂	0.01	0.05	0.16	0.06	0.01	0.04	0.11	0.05	0.02	0.12	0.50	0.06	
Al ₂ O ₃	0.01	2.41	3.53	46.07	0.00	2.88	4.14	47.71	0.00	3.34	6.20	55.64	
CaO	0.03	0.39	23.27	0.01	0.01	0.42	22.38	0.01	0.02	0.43	21.01	0.02	
NiO	0.13	0.06	0.03	0.31	0.14	0.06	0.04	0.29	0.13	0.12	0.07	0.37	
FeO	9.45	6.20	2.21	14.50	8.79	5.71	2.02	11.81	10.43	6.64	2.27	11.16	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.35	0.82	21.09	0.05	0.35	1.08	21.15	0.03	0.30	0.93	12.30	
总量	100.37	100.62	99.12	100.29	100.25	100.86	99.34	100.49	101.09	101.34	99.38	99.69	
Mg [#]	0.904	0.910	0.929	0.691	0.911	0.917	0.933	0.746	0.894	0.904	0.919	0.763	
产地		蛟河											
样品号	YQS-8				YQS-9				YQS-10				
岩石名称	方辉橄榄岩				二辉橄榄岩				方辉橄榄岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Na ₂ O	0.03	0.05	1.20	0.01	0.04	0.08	1.81	0.02	0.02	0.03	0.78	0.02	
SiO ₂	41.33	56.03	53.19	0.03	41.30	55.33	51.96	0.02	41.38	56.45	53.23	0.01	
MgO	49.77	35.05	16.02	17.51	48.79	34.07	14.60	20.63	49.87	35.01	16.44	17.09	
MnO	0.15	0.14	0.08	0.22	0.15	0.15	0.07	0.11	0.13	0.15	0.08	0.21	
TiO ₂	0.03	0.01	0.09	0.09	0.02	0.12	0.55	0.12	0.02	0.07	0.15	0.15	
Al ₂ O ₃	0.01	2.60	3.62	39.31	0.01	3.82	6.49	58.03	0.01	2.30	2.98	37.81	
CaO	0.03	0.59	21.68	0.00	0.01	0.48	20.56	0.00	0.03	0.51	22.58	0.03	
NiO	0.13	0.07	0.08	0.27	0.13	0.13	0.04	0.44	0.38	0.27	0.15	0.64	
FeO	9.37	6.00	2.29	13.81	9.95	6.48	2.62	10.56	9.16	5.72	2.06	13.53	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.48	1.24	29.68	0.02	0.30	0.80	9.86	0.02	0.40	0.94	31.18	
总量	100.84	100.99	99.49	100.92	100.38	100.96	99.51	99.80	101.01	100.91	99.40	100.64	
Mg [#]	0.905	0.913	0.926	0.695	0.898	0.904	0.909	0.779	0.907	0.917	0.935	0.695	
产地		蛟河											
样品号	YQS-11				YQS-12				YQS-13				
岩石名称	方辉橄榄岩				方辉橄榄岩				橄榄辉石岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Na ₂ O	0.03	0.07	1.30	0.02	0.02	0.09	0.87	0.03	0.02	0.13	1.71	0.03	
SiO ₂	41.45	56.53	53.16	0.02	41.30	55.68	52.83	0.05	40.76	53.90	51.66	0.06	

续表 3
Continued Table 3

产地 样品号 岩石名称 矿物	蛟河											
	YQS-11 方辉橄榄岩				YQS-12 方辉橄榄岩				YQS-13 橄辉辉石岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
MgO	50.42	35.26	15.84	18.36	49.64	34.29	16.63	18.76	46.94	32.34	14.83	20.79
MnO	0.13	0.14	0.07	0.17	0.12	0.12	0.10	0.17	0.15	0.15	0.11	0.08
TiO ₂	0.02	0.05	0.14	0.08	0.00	0.07	0.15	0.12	0.00	0.08	0.34	0.08
Al ₂ O ₃	0.02	2.45	3.88	41.45	0.01	3.17	3.92	42.86	0.04	4.92	7.17	63.13
CaO	0.03	0.53	21.74	0.00	0.05	0.84	21.18	0.00	0.07	0.72	19.36	0.01
NiO	0.39	0.35	0.12	0.83	0.13	0.14	0.03	0.31	0.11	0.10	0.06	0.47
FeO	8.89	5.46	2.00	11.83	9.22	5.69	2.57	12.40	12.95	7.95	3.73	12.07
Cr ₂ O ₃	0.05	0.41	1.08	28.32	0.04	0.51	1.06	25.75	0.02	0.10	0.27	3.27
总量	101.36	101.26	99.33	101.08	100.52	100.59	99.35	100.45	101.05	100.39	99.23	99.97
Mg [#]	0.911	0.921	0.934	0.736	0.906	0.916	0.921	0.731	0.867	0.880	0.877	0.756

产地 样品号 岩石名称 矿物	蛟河											
	YQS-14 方辉橄榄岩				YQS-15 二辉橄榄岩				YQS-16 方辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.00	0.03	0.77	0.01	0.01	0.06	2.21	0.03	0.01	0.07	1.45	0.01
SiO ₂	41.15	56.16	53.13	0.03	41.32	56.27	54.31	0.03	41.31	55.99	52.98	0.04
MgO	49.88	34.06	16.47	17.51	49.65	35.04	15.38	16.80	49.96	35.00	15.73	18.62
MnO	0.12	0.12	0.06	0.24	0.14	0.12	0.06	0.23	0.13	0.15	0.08	0.19
TiO ₂	0.01	0.04	0.05	0.09	0.00	0.09	0.23	0.17	0.01	0.05	0.19	0.11
Al ₂ O ₃	0.00	2.41	2.91	36.74	0.00	2.26	3.59	34.80	0.02	2.88	4.34	43.17
CaO	0.06	0.53	22.57	0.00	0.03	0.56	19.93	0.01	0.05	0.56	21.00	0.00
NiO	0.22	0.11	0.04	0.25	0.13	0.13	0.07	0.23	0.14	0.12	0.08	0.33
FeO	8.78	5.60	1.93	12.92	9.11	5.58	2.38	14.20	9.40	5.84	2.08	11.97
Cr ₂ O ₃	0.02	0.48	1.14	32.79	0.02	0.44	1.27	33.57	0.02	0.48	1.33	25.91
总量	100.22	99.53	99.07	100.56	100.41	100.55	99.42	100.05	101.05	101.15	99.25	100.35
Mg [#]	0.911	0.916	0.939	0.709	0.907	0.919	0.921	0.680	0.905	0.915	0.932	0.737

产地 样品号 岩石名称 矿物	尚志											
	GLS-1 方辉橄榄岩				GLS-2 二辉橄榄岩				GLS-3 二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.026	0.0335	0.579	0.038	0.006	0.0255	1.2262	0.0125	0.009	0.018	1.4855	0.025
SiO ₂	41.1535	56.385	53.242	0.0285	41.0715	55.9155	52.7894	0.061	41.0115	56.756	53.2165	0.126
MgO	48.916	34.784	16.9305	16.615	48.4055	33.263	15.7414	20.65833	48.5505	33.8815	15.6355	18.427
MnO	0.085	0.1185	0.0745	0.189	0.1285	0.135	0.0728	0.103667	0.102	0.1775	0.0875	0.1455
TiO ₂	0.009	0.084	0.238	0.2675	0.007	0.038	0.306	0.056667	0	0.0675	0.214	0.1245
Al ₂ O ₃	0.058	2.106	2.627	35.592	0.0095	3.506	5.138	58.80933	0.024	2.7525	4.664	48.97
CaO	0.094	0.3765	22.5775	0	0.0335	0.4305	21.6886	0.002	0.045	0.3585	21.3315	0.014
NiO	0.6735	0.124	0.0525	0.342	0.6115	0.162	0.05925	0.639333	0.6115	0.1345	0.0305	0.5045
FeO	8.5835	5.411	1.7745	13.482	9.9305	6.536	2.0432	8.816333	9.6715	6.318	2.193	12.596
Cr ₂ O ₃	0.015	0.304	0.7465	33.327	0.03	0.249	0.6268	10.45733	0.015	0.257	0.848	19.1055
总量	99.5985	99.7265	98.842	99.881	100.2335	100.2605	99.69165	99.6165	100.04	100.721	99.706	100.038
Mg [#]	0.911	0.920	0.945	0.689	0.898	0.902	0.933	0.808	0.900	0.906	0.928	0.725

产地 样品号 岩石名称 矿物	尚志											
	GLS-4 二辉橄榄岩				GLS-5 方辉橄榄岩				GLS-6 二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
Na ₂ O	0.009	0.027	0.351	0.023	0	0.016333	0.616	0	0	0.0245	0.8005	0.004
SiO ₂	41.088	56.323	53.582	0.03	41.234	56.64367	53.2895	0.028	40.8175	56.1655	52.696	0.0295
MgO	48.577	33.5575	16.9435	19.4565	49.661	34.39833	16.4405	19.712	49.044	33.9755	16.1115	19.257
MnO	0.134	0.159	0.124	0.1385	0.165	0.120333	0.04	0.1005	0.162	0.15	0.0315	0.123
TiO ₂	0.015	0.0385	0.106	0.017	0.023	0.017	0.0935	0.026	0.012	0.0435	0.1895	0.0545

续表 3

Continued Table 3

产地		尚志											
样品号	GLS-4				GLS-5				GLS-6				
岩石名称	二辉橄榄岩				方辉橄榄岩				二辉橄榄岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Al ₂ O ₃	0.016	2.7375	2.4465	49.83	0.006	2.11	2.817	49.017	0.01	2.5515	4.0375	54.492	
CaO	0.012	0.399	23.7365	0.008	0.0165	0.258	23.713	0.024	0.019	0.2545	22.886	0.013	
NiO	0.63	0.095	0.0865	0.4315	0.721	0.136667	0.0305	0.461	0.6605	0.1365	0.112	0.514	
FeO	9.017	6.518	1.778	11.5195	8.2785	5.707333	1.9855	9.199	9.5115	6.295	2.0615	11.592	
Cr ₂ O ₃	0.039	0.2595	0.5065	18.087	0.0315	0.257333	0.6195	21.042	0.006	0.139	0.613	13.632	
总量	99.537	100.114	99.6605	99.541	100.1365	99.665	99.645	99.6095	100.2425	99.7355	99.539	99.711	
Mg [#]	0.907	0.903	0.945	0.752	0.915	0.916	0.937	0.794	0.903	0.907	0.934	0.749	
产地		尚志											
样品号	GLS-7				GLS-8				GLS-9				
岩石名称	二辉橄榄岩				方辉橄榄岩				二辉橄榄岩				
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	
Na ₂ O	0.016	0.008	0.362	0.009	0.005	0.048	2.2145	0.031	0.033	0.019	1.499667	0.013	
SiO ₂	40.9865	56.0965	53.1865	0.036	40.923	56.057	52.0705	0.0385	41.293	55.737	52.43233	0.0225	
MgO	49.079	33.7	16.856	18.357	49.4905	33.8935	14.538	19.1045	48.04	33.1265	15.114	20.8065	
MnO	0.097	0.1545	0.0855	0.1165	0.098	0.175	0.0685	0.165	0.1875	0.1925	0.075	0.1225	
TiO ₂	0.0125	0.0325	0.1365	0.023	0.006	0.1395	0.728	0.2595	0.007	0.0645	0.376667	0.0245	
Al ₂ O ₃	0.02	2.19	2.8575	46.5155	0.027	2.961	5.9375	46.121	0.004	3.6995	5.460333	58.759	
CaO	0.046	0.36	23.4275	0	0.0395	0.4675	20.638	0.009	0.045	0.4135	21.79433	0.001	
NiO	0.622	0.128	0.086	0.432	0.6465	0.2095	0.1125	0.424	0.562	0.16	0.073	0.5685	
FeO	9.45	6.273	1.9765	11.824	8.3915	5.6225	2.1135	10.159	10.063	6.7475	2.434	10.578	
Cr ₂ O ₃	0	0.211	0.741	22.7275	0.024	0.3555	1.3945	23.549	0.015	0.2335	0.583667	9.399	
总量	100.329	99.1535	99.715	100.0405	99.651	99.929	99.8155	99.8605	100.2495	100.3935	99.843	100.2945	
Mg [#]	0.903	0.906	0.939	0.736	0.914	0.916	0.925	0.772	0.896	0.898	0.918	0.780	
产地		尚志											
样品号	GLS-10												
岩石名称	二辉橄榄岩												
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp									
Na ₂ O	0	0.028	1.216	0.03									
SiO ₂	41.2645	56.04	53.4445	0.0475									
MgO	48.26	34.274	16.1075	17.087									
MnO	0.1365	0.1445	0.085	0.1605									
TiO ₂	0.0085	0.059	0.174	0.149									
Al ₂ O ₃	0	2.108	3.3335	40.439									
CaO	0.014	0.353	21.888	0.007									
NiO	0.3335	0.131	0.003	0.364									
FeO	10.0775	6.4	2.312	12.862									
Cr ₂ O ₃	0.021	0.2915	1.041	28.2135									
总量	100.1155	99.829	99.6045	99.3595									
Mg [#]	0.896	0.906	0.926	0.705									

表4 吉林蛟河石榴辉石岩的温压计算结果

Table 4 Calculated equilibrium temperatures and pressures of garnet pyroxenites from Jiaohe, Jilin province

	BK2P/BKN90		BM85/NG85		BM85/BKN90		BKCa/NG85	
	T(°C)	P(GPa)	T(°C)	P(GPa)	T(°C)	P(GPa)	T(°C)	P(GPa)
YQSX-2	1029	1.88	969	1.54	970	1.65	965	1.52
YQSX-7	1022	1.63	973	1.44	973	1.43	1011	1.57
YQSX-12	902	1.35	868	1.23	868	1.22	903	1.37
YQSX-13	1004	1.69	938	1.41	938	1.38	975	1.55
YQS-19	808	0.98	767	0.82	767	0.83	915	1.37

T(BK2P) = Brey and Köhler (1990) 二辉石温度计。

P(BKN90) = Brey *et al.* (1990) 压力计。

T(BM85) = Bertrand and Mercier (1985) 二辉石温度计。

P(NG85) = Nickel and Green (1985) 石榴石-斜方辉石压力计。

T(BKCa) = Brey and Köhler (1990) 斜方辉石温度计。

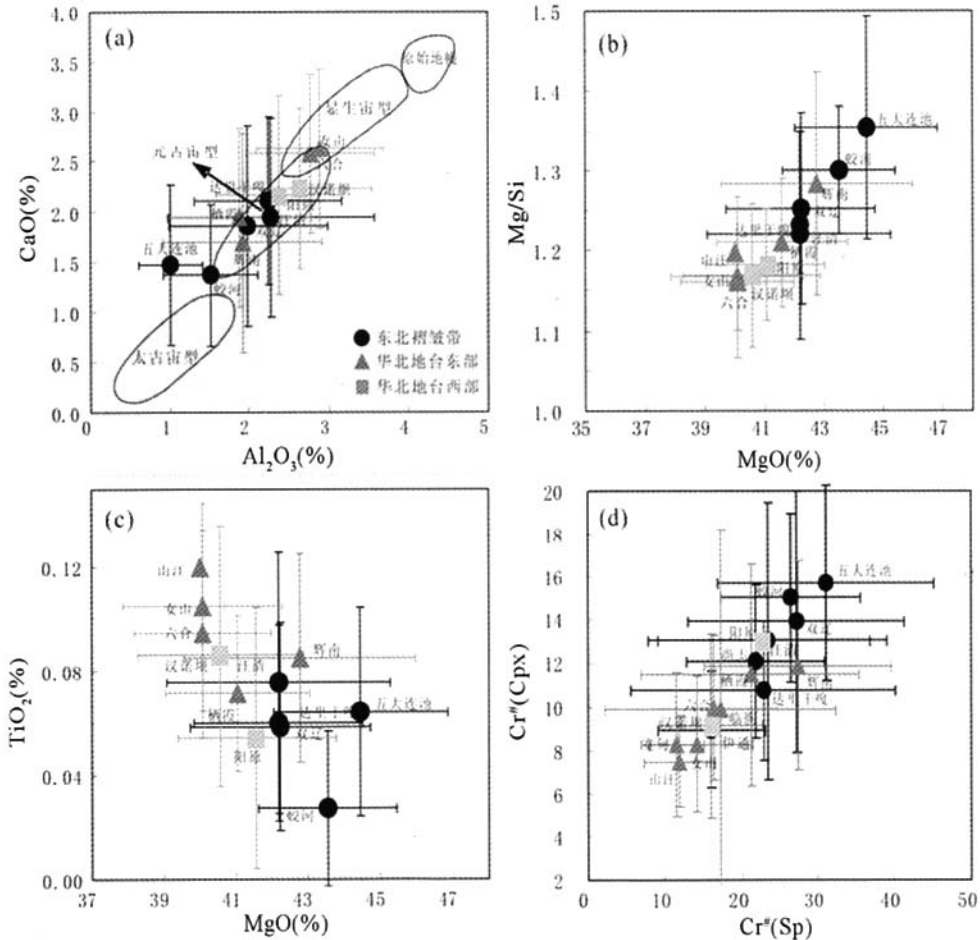


图2 橄榄岩全岩 CaO 与 Al₂O₃ 的相关图解(a), 橄榄岩中 MgO 与 TiO₂ (b)、Mg/Si (c) 相关图解, 以及尖晶石中的 Cr[#] 与单斜辉石中的 Cr[#] (d) 相关图解。图 a 中不同地幔类型的划分据 Griffin *et al.* (2003)。注意东北地区橄榄岩包体相对于华北地区的更亏损 Ca、Al、Ti 等易熔组分。

Fig. 2 (a) CaO vs Al₂O₃ in whole rock of peridotites(a), (b-c) Variation diagrams of MgO versus TiO₂ (b), Mg/Si (c), and Cr[#] in Cpx versus Cr[#] in spinel (d). Division of different mantle types in (a) is after Griffin *et al.* (2003). Note that the peridotites from Northeast China are more depleted than those from North China

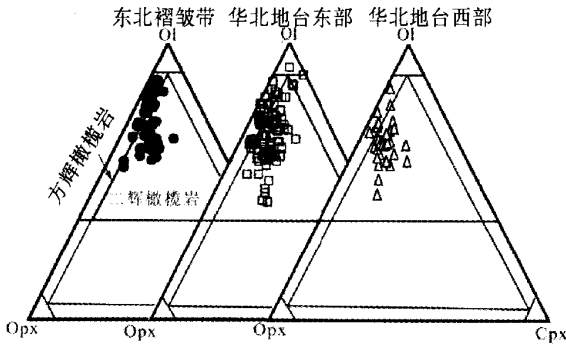


图3 东北地区和华北地区橄榄岩包体矿物含量的三角图解
Fig. 3 Ol-Cpx-Opx triangle plot for peridotites from Northeast China and North China

亏损的古宙型地幔范围内,而是落在饱满的显生宙和元古宙范围内,而东北地区包体落在元古宙地幔范围内,其中五大连池和蛟河两地的包体成分最为亏损,出了元古宙型地幔范围(图2a)。华北地区包体相对东北地区具有低Mg和Mg/Si、高Ti的特征(图2b, c)。除了全岩化学成分的差异外,两者在矿物含量和矿物成分方面也有一定差别,华北地区包体中方辉橄榄岩的数量略少于东北地区(图3),华北地区包体中尖晶石和单斜辉石的Cr[#]低于华北包体的相应值(图2d),表现出更饱满的特征。同样,由于单斜辉石中重稀土组成受地幔交代作用的影响较小,因此其含量的高低直接与岩石的亏损程度有关。用单斜辉石中的Yb和Y含量进行部分熔融程度模拟计算的结果显示华北地区样品更多集中在低程度部分熔融的区域(<5%,图4a),特别是女山、

阳原、汉诺坝的包体都具有饱满的特征,而东北地区的则在0~15%的区域内均匀分布(图4b),除了位于郯庐断裂带内部的伊通包体部分熔融程度较低外,其他地区橄榄岩包体多表现为中等程度的部分熔融。以上事实均说明华北岩石圈地幔的难熔程度小于东北地区地幔。

3.2 东北和华北地区地幔热状态对比

总体上东北地区包体的平衡温度比华北地区略低(图5a)。华北地区除栖霞外其他产地的包体的平均温度均>940℃,而东北地区除双辽和五大连池外,其余产地的包体的平均温度均<910℃。此外,东北地区包体中平衡温度大于1000℃的包体数量也少于华北地区(图5b)。在吉林蛟河产有石榴辉石岩,根据其矿物化学计算的平衡温压结果显示该地区地温梯度要比华北地区女山的地温梯度低(图6)。因此,东北地区现今上地幔可能比华北地区的“冷”。

4 东北和华北岩石圈地幔成分差异的原因

导致东北和华北地区岩石圈地幔整体上体现出成分差异的可能因素有:(1)中国东部岩石圈地幔的组成可能是分层的,两个地区的包体可能来源于不同的深度;(2)熔体/流体的交代反应:熔体/流体交代使橄榄岩中的Cpx逐渐被Opx和Ol代替(Cpx + melt = Opx + Ol),形成贫瘠的方辉橄榄岩(Kelemen *et al.*, 1998);(3)不同程度的部分熔融(Frey and Prinz, 1978):熔体抽取使得橄榄岩亏损Al、Ca、Ti等玄武质组分,橄榄岩的亏损程度与部分熔融程度成正相关关系,部分熔融程度越高,橄榄岩成分越难熔,同时Cpx含量减少,橄榄石含量和Fo升高。以下就这几种可能性进行逐一分析。

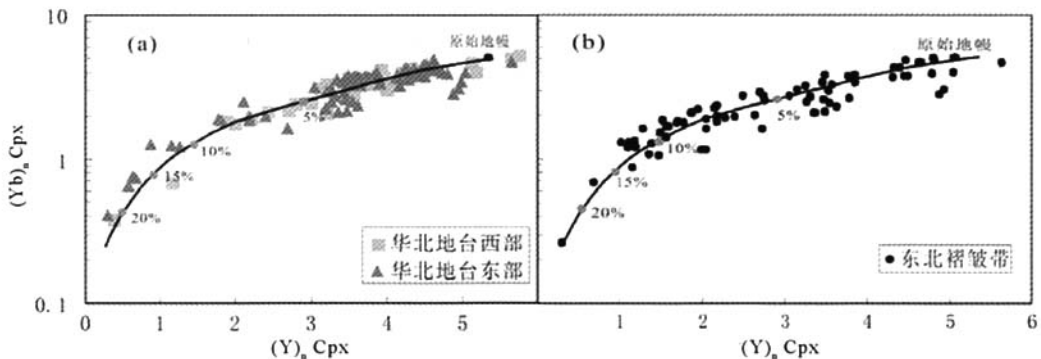


图4 华北(a)和东北地区(b)橄榄岩包体中单斜辉石的Y和Yb相关图解。华北地区大部分数据落在低部分熔融区(<5%),东北地区的大部分数据均匀分布在中低部分熔融区(0~15%),部分熔融线根据Johnson *et al.* (1990)的分离熔融模型计算获得。下标n代表原始地幔标准化,数据引自Sun and McDonough (1989)

Fig. 4 Y versus Yb in clinopyroxenes from peridotites from North China(a) and Northeast China(b). Most data from North China fall in the field of low degree of partial melting (<5%), while most data from Northeast China fall in the field of medium and low degree of partial melting (<15%). The melting trends within spinel stability field are calculated using the fractional melting model of Johnson *et al.* (1990). Normalization data are from Sun and McDonough (1989)

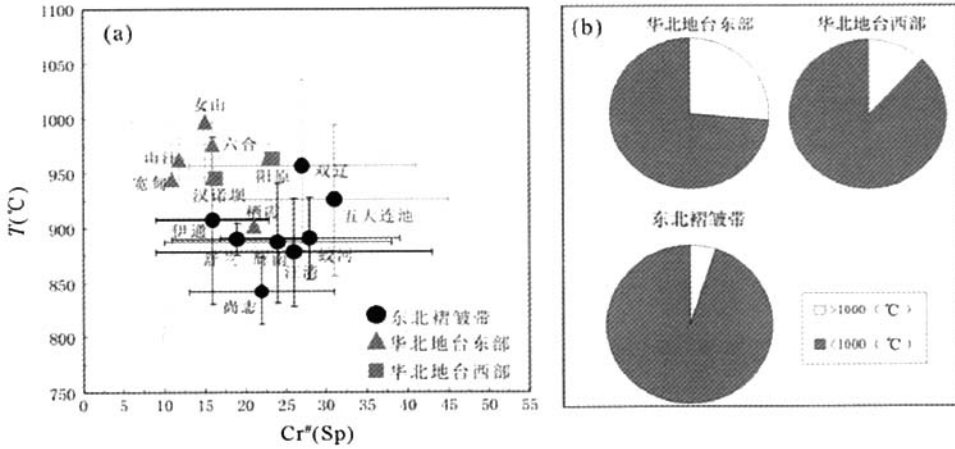


图5 东北地区和华北地区包体的平衡温度

(a) 橄榄岩平衡温度和尖晶石的 Cr# 相关图解; (b) 橄榄岩平衡温度统计饼图。平衡温度计算统一用 Witt-Eickschen and Seck (1991) 的 Cr-Al 温度计计算所得

Fig. 5 Equilibrium temperature of peridotite xenoliths from Northeast China and North China. (a) Cr# of Sp versus Temperature of peridotites. (b) Cake diagram of equilibrium temperature of peridotites. Equilibrium temperature of peridotites are calculated using the Cr-Al thermometer of Witt-Eickschen and Seck (1991)

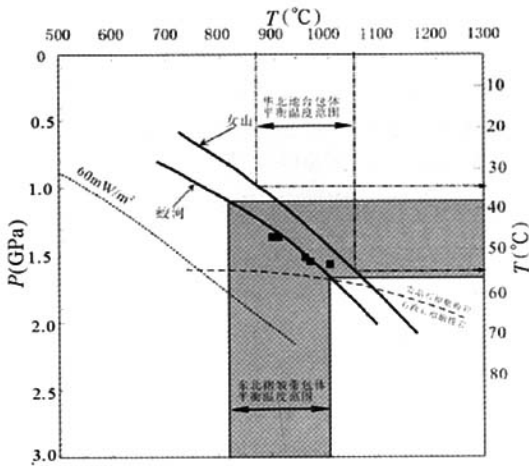


图6 根据吉林蛟河石榴石辉石岩的平衡温压确定的地温线

图中还显示了华北女山地区的地温线 (Xu *et al.* 1998), 尖晶石相-石榴石相橄榄岩转变带据 O' Neill (1981), 虚线表明的大陆地温线据 Pollack and Chapman (1977), 注意东北和华北地区显示不同的地温梯度, 但两地包体的起源深度大致相同

Fig. 6 The geotherm constructed using equilibrium temperature and pressure of garnet pyroxenites from Jiaohe, Jilin Province. The geotherm from Nushan (Xu *et al.*, 1998) is shown for comparison. The transition between spinel- and garnet-lherzolites is taken from O' Neill (1981). Dash lines show the model continental geotherms corresponding to 60mW/m² heat flows (Pollack and Chapman, 1977), Note the different thermal gradients in NE and N China, but the roughly same derivation depth of the studied xenoliths from the two regions

4.1 不同的包体起源深度

东北地区包体的平衡温度(850°C ~ 950°C)比华北地区包体(900°C ~ 1000°C)略低。如果两地包体均平衡于一致的地温梯度线的话,平衡温度的差异就意味着两地包体起源深度的不同。不过需要注意的是,新生代时两地岩石圈的地温梯度可能有所不同(图6)。如果蛟河的地温梯度可以代表东北地区地温梯度的话,那么东北地区地温梯度比华北的低。将两个地区包体的平衡温度投影于相应地区的地温梯度,就可以发现两者对应的深度相差不大(图6)。考虑到计算的误差,可以认为两地包体的起源深度没有差别。这一认识与两地包体均为尖晶石相橄榄岩是一致的。

4.2 不同程度的熔体-岩石相互作用

熔体/流体交代可以使橄榄岩中的 Cpx 逐渐被 Opx 和 Ol 代替 (Cpx + melt = Opx + Ol), 形成难熔的方辉橄榄岩 (Kelemen *et al.*, 1998)。如前所述,按照壳幔耦合推测,东北地区地幔应该是饱满的,而实际统计结果却落在相对亏损玄武质的元古宙型地幔范围,这是否与熔体-岩石相互作用有关呢? 已有的研究表明,位于华北的辉南方辉橄榄岩是二辉橄榄岩-熔体相互作用的结果 (Xu *et al.*, 2003), 通过岩石-熔体相互作用形成的难熔橄榄岩通常具有异常高的 Fe, Ti 含量(图8)。但在东北地区类似的证据还不多,由图8可知,东北地区绝大部分难熔橄榄岩不具有高 Fe, Ti 的特征, 因此我们认为,熔体-岩石相互作用不是造成东北包体相对亏损玄武质组分的主要原因。

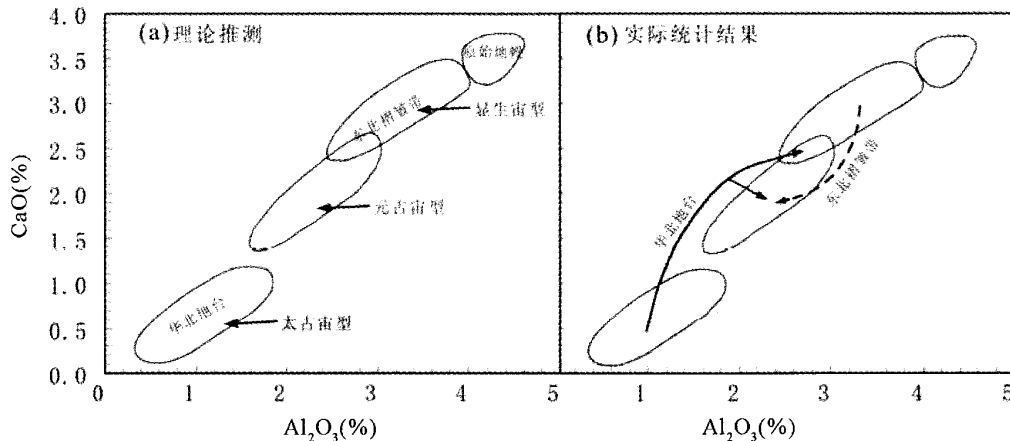


图7 (a) 根据 Griffin *et al.* (2003) 理论推测的结果, 华北地区应落在太古宙型地幔范围, 东北地区落在显生宙型地幔范围。(b) 实际统计结果显示华北地区落在显生宙型地幔范围, 而东北地区则落在元古宙型地幔范围
 Fig.7 (a) According to Griffin *et al.* (2003), the upper mantle beneath North China is expected to belong to the Archean type, while the upper mantle in Northeast China belongs to the Phanerozoic type. (b) The compositions of the peridotites xenoliths show that the upper mantle under North China is of a Phanerozoic type, whereas that beneath Northeast China is of Proterozoic type

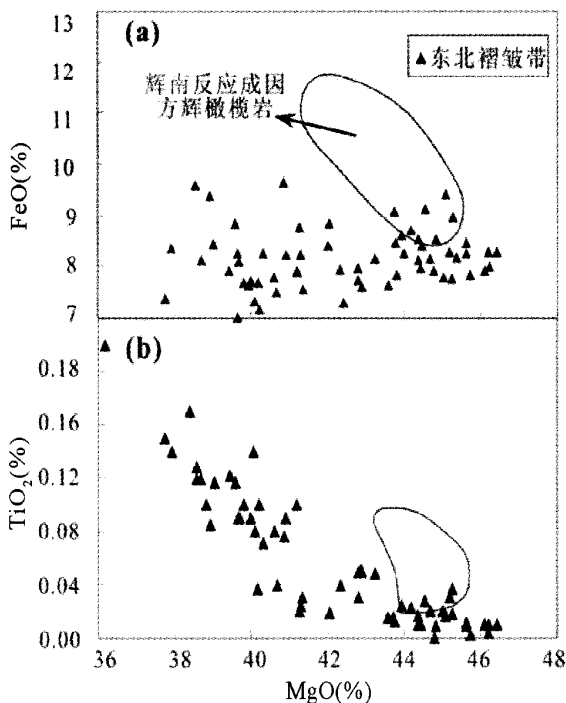


图8 东北地区橄榄岩包体全岩成分特征, (a) 全岩 MgO-FeO 相关图解; (b) 全岩 MgO-TiO₂ 相关图解
 Fig.8 Whole rock composition of peridotite xenoliths from Northeast China, (a) Plot of MgO against FeO for peridotite xenoliths; (b) Plot of MgO against TiO₂ for peridotite xenoliths

4.3 不同程度的部分熔融

所考察的样品显示了 MgO-CaO 和 MgO-Al₂O₃ 的负相关关系, 因此大多数包体被解释成为部分熔融的残余 (Xu *et al.*, 1998; Fan *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 1998; Rudnick *et al.*, 2004)。从这一角度看, 东北和华北岩石圈地幔的成分差异更可能是不同程度的部分熔融造成的。如图 4 所示, 大多数华北地区的样品是低程度部分熔融 (<5%) 的残余, 而大多数东北地区的样品周围是低程度—中等程度部分熔融 (<15%) 的残余。

5 东北和华北岩石圈地幔成分差异的动力学因素

5.1 地幔柱引起上地幔温度的升高?

地幔热柱对流上升会导致周边地幔温度的升高, 使得地温线切割固相线而发生熔融, 靠近地幔柱的上地幔通常发生大程度的熔融, 形成难熔的橄榄岩残余 (Dick *et al.*, 1984)。在大陆环境, 当地幔热柱和裂谷重叠的情况下会形成大量的熔浆 (White and McKenzie, 1989)。因此, 造成东北和华北岩石圈地幔成分差异的一种可能因素是其深部动力学背景的不同。前人认为大兴安岭环状火山岩带的形成与深部地幔柱有关 (邓晋福等, 1996; 林强等, 1998), 张招崇等 (2000) 认为黑龙江镜泊湖玄武岩的富集特征和地幔柱的作用有关, 那么东北地区地幔经历的大程度部分熔融是否与地幔柱的存在有关呢? 讨论这一问题需要了解研究区地幔熔融发生的时间。Os 同位素资料显示该地区岩石圈地幔中既有元古宙

地幔成分,也有新生地幔(Wu *et al.*, 2003),但两者的比例尚不清楚,考虑到东北褶皱带花岗岩的Nd模式年龄为0.5~1.0Ga(Jahn *et al.*, 2000),而松辽盆地及周边中生代-新生代发育大规模的岩浆活动,因此我们认为东北地区最后的大规模构造岩事件应该在显生宙,也就是说东北地区上地幔的主体是“新”的。由此推测,如果东北地区存在地幔柱的话,应该会造成周围岩石圈地幔的温度升高,但橄榄岩包体平衡温度统计显示东北的地幔却比华北的要冷。此外,东北地区150~350km的地幔深度范围内存在S波高速异常,被认为存在冷而稳定的地幔物质(Zhang, 1998),最近的地震层析结果显示也现在太平洋板片俯冲滞留在地幔转换带中(Lei and Zhao, 2005),这些地球物理深部探测结果说明新生代东北地区应该不存在地幔柱,东北地区上地幔较大的亏损程度与地幔柱无关。

5.2 地幔形成年龄的差异?

如果东北地区和华北地区上地幔的形成时代不同,东北上地幔形成于元古宙,而华北上地幔形成于显生宙,这可以解释两者之间的主量元素组成的差异,因为元古宙时的地幔温度要高于现今的地幔温度,那时的地幔熔融程度相对较大。不过,橄榄岩包体的Os同位素研究揭示了复杂的地幔年龄结构,东北和华北上地幔包体均既有元古宙年龄,也有现代年龄(Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003, 2006)。如果东北地区地幔存在更多的元古宙地幔,那么其地幔平均成分会比华北更亏损玄武质组分。但遗憾的是,两种类型地幔所占的相对比例尚无法确定。不过如前所述,东北地区最后的大规模构造岩事件可能在显生宙,东北地区上地幔的主体是“新”的,因此其成分应该较为饱满,与实际观察结果不同,因此,我们倾向于认为形成时代不是造成两地区成分差异的主要因素。

5.3 不同的岩石圈拉张程度?

中国东部岩石圈在晚中生代经历了大规模减薄(Menzies *et al.*, 1993; Xu, 2001),当岩石圈减薄时,软流圈会绝热(减压)上升以填充因岩石圈减薄形成的空间。理论模拟显示(McKenzie and Bickle, 1988),在软流圈潜能温度相同的情况下,岩石圈拉张程度越高,熔浆生成量就越大,岩石圈地幔作为熔融的残留就越难熔。同样处于拉张环境下的东北和华北地区,其岩石圈的拉张程度可能是不相同的。新生代时期东北地区的岩浆活动和盆地的发育程度比华北地块更强,这可以解释东北岩石圈地幔较为难熔的特点。难点在于地质演化过程可能有多次的拉张和地幔熔融事件,而现在观察到的地幔成分是多期作用的结果,因此给出确切的判断并不容易。如果我们以古生代和新生代为始末点,那么通过对比这两个时代圈厚度的变化,可以大致了解两个地区岩石圈的累计拉张程度。华北克拉通古生代时岩石圈最大厚度大于180km(Menzies and Xu, 1998)。虽然东北地区中生

代以前的岩石圈厚度不太清楚,但作为非克拉通区,其形成时的岩石圈厚度应该比华北克拉通的要小。现在两地区的岩石圈厚度没有明显的差别,因此我们推测华北地区的拉张拉张程度很可能大于东北地区。如果这个推论正确的话,华北地区岩石圈应该比东北地区的更贫瘠,这和我们观察到的相反,因此岩石圈拉张程度不能很好解释两地区的成分差异。

5.4 俯冲洋壳释放流体和挥发份的影响?

地幔发生部分熔融的程度可能与是否存在流体和挥发份有关,因为挥发份的存在可以大大降低地幔固相线的位置,导致原本亏损的地幔再次发生部分熔融,例如由于流体引起的地幔熔融使俯冲带的上覆地幔变得更难熔(Bonatti and Michael, 1989)。中国东部受到太平洋板片的俯冲,东北地区可能还受到古亚洲洋板片俯冲的影响,地质历史中还可能有尚未认识到的俯冲过程,因此如果东北和华北地区受俯冲影响的程度不同,地幔发生部分熔融程度也会有所不同。当然,东北地区上地幔也不是简单意义上的俯冲带上的地幔楔,因为由于大洋沉积物中具有高的放射性成因Os, Sr,从而使被板片析出流体交代的地幔楔具相对较高的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ (Widom *et al.*, 2003)和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Beccaliva *et al.*, 2004),而 Cr_2O_3 与 Al_2O_3 的相关图解(图9a)以及Os同位素(图9b)显示东北地区地幔不具有俯冲带上覆地幔的特征。不过,对五大连池新生代火山岩中橄榄岩包体惰性气体同位素的研究表明,地幔交代介质可能来源于古亚洲洋俯冲板片(赖勇等, 2005)。长白山玄武岩的源区可能有太平洋板块俯冲组分的影响(樊祺诚等, 1998)。最近,张辉煌等(2006)发现东北始新世双辽玄武岩具有低Sr同位素比值和高Fe含量等特征,显示其岩浆源区具有HIMU端员。由于HIMU玄武岩的形成可能与古老再循环俯冲洋壳的参与有关,因此双辽玄武岩可能为寻找太平洋板块俯冲作用直接参与中国东部岩石圈减薄作用提供了重要线索。遗憾的是,目前的资料尚不足以鉴别东北和华北地区地幔受俯冲流体的影响程度,有待今后进一步的工作。

6 东北和华北地区壳幔解耦的地质意义

统计分析结果显示,虽然东北地区地壳为显生宙年龄,华北地区地壳为太古宙年龄,但东北地区包体成分却落入元古宙地幔范围内,而华北地区包体成分则多落入显生宙地幔范围内(图7),年轻地壳下的上地幔比古老地壳下的上地幔更加亏损。因此研究区壳幔是解耦的。下面讨论这种大尺度上壳幔解耦所隐含的地质意义。

6.1 华北地区岩石圈地幔成分的改变与岩石圈减薄

华北地区具有太古宙地壳,按照Griffin *et al.* (2003)的

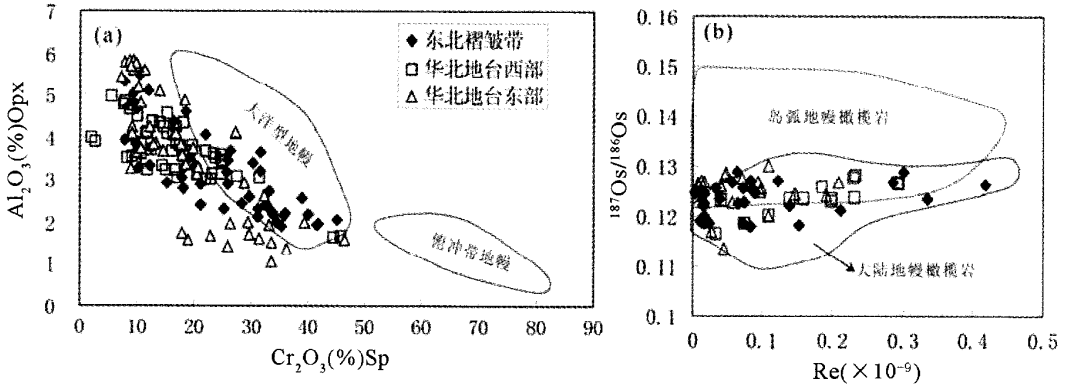


图9 (a) 斜方辉石的 Al_2O_3 与尖晶石的 Cr_2O_3 相关性图解; (b) 橄辉岩包体 Re-Os 同位素图解. (a) 中不同地幔范围的划分根据 Bonatti and Michael (1989), (b) 中岛弧地幔橄辉岩和大陆地幔橄辉岩数据引自 Widom *et al.* (2003), Brandon *et al.* (1999), Peslier *et al.* (2000) 和 Meisel *et al.* (2001)

Fig. 9 (a) Cr_2O_3 in Sp versus Al_2O_3 in Opx; (b) Correlation between Re and $^{187}Os/^{186}Os$. Oceanic and subduction-related mantle domains in (a) are after Bonatti and Michael (1989). Data of sub-arc mantle wedge and continental mantle are from Widom *et al.* (2003), Brandon *et al.* (1999), Peslier *et al.* (2000) and Meisel *et al.* (2001)

观点,该区岩石圈地幔应该是贫瘠的方辉橄辉岩。事实上,古生代金伯利岩中的橄辉岩包体和金刚石中矿物包体都表现出贫瘠的特征,方辉橄辉岩占包体总数的 34% ~ 40%,成分落入太古宙地幔成分范围 (Zheng and Lu, 1999; Zhang *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2001),并具有富集的 Sr, Nd 同位素和低 $^{187}Os/^{186}Os$ 的特征 (Zheng and Lu, 1999; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2006)。这些均表明至少到古生代,华北地区地幔仍然保持了典型的太古宙克拉通型地幔的特征。但是华北新生代玄武岩中橄辉岩包体却表现出饱满的大洋型地幔特征,如橄辉石的 $Mg^{\#}$ 在 89 ~ 91 之间 (Zheng *et al.*, 1998; Rudinick *et al.*, 2004; Fan *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 1998; Xu and Bodinier, 2004),绝大部分具有亏损的 Sr-Nd 同位素特征 (Tatsumoto *et al.*, 1992; Song and Frey, 1989; Fan *et al.*, 2000; Rudinick *et al.*, 2004)。因此,古生代以来华北地区地幔发生了改变 (图 7),因此岩石圈减薄和随后的增生 (Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001) 是华北壳幔解耦的根本原因。

这里有两个问题需要作进一步的阐明。

(1) 上述解释只适用于重力梯度带以东的华北东部地区,因为 Os 同位素研究证明该区的确有显生宙新增生的岩石圈地幔 (Gao *et al.*, 2002; 吴福元等, 2003),但华北西部地区上地幔均具有元古宙年龄 (Gao *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2007),这暗示该地区岩石圈的增生发生在元古宙。然而华北西部和华北东部橄辉岩包体在主要元素成分上没有明显的区别,这可能说明显生宙型和元古宙型地幔在主要元素成分上并不象 Griffin 定义的那样存在明确的成分差异。一个明显的例子是 Os 模式年龄为早元古代的汉诺坝橄辉岩和模式年龄为现代的栖霞橄辉岩在成分上没有任何差异 (Gao

et al., 2002; Rudinick *et al.*, 2004)。

(2) 就华北东部而言,古生代金伯利岩捕获的是太古宙地幔,而新生代玄武岩捕获的是元古代和现代地幔 (Wu *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2002),如果该地区现今岩石圈地幔由岩石圈减薄后的残余和新增生的地幔组成的话 (Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001),应该看到的是太古宙地幔和现代地幔的组合,而不是现在观察到的元古宙地幔和现代地幔的组合,这是今后需要回答的一个重要问题。对这一矛盾可以构想以下几种解释方案: (a) 古生代金伯利岩中和新生代玄武岩包体的研究,特别是 Os 同位素定年还不够,无法全面地体现该区不同时代岩石圈的性质。另一方面,新生代玄武岩包体中有太古宙、元古宙和显生宙时形成的硫化物,但全岩 Os 同位素分析掩盖了太古宙的信息。不过从新生代玄武岩中包体的主要元素成分来看,现今岩石圈地幔存在太古宙地幔组分的可能性不大,当然这一结论尚需地球物理深部探测来验证。(b) 古生代时华北岩石圈地幔具有分层结构,即元古宙地幔位于太古宙地幔上方 (Wu *et al.*, 2006),因此中生代岩石圈减薄过程中太古宙地幔为新生地幔所置换,形成元古宙地幔残留和新生地幔的现今岩石圈地幔组成。但是华北地区是否存在这样的岩石圈分层结构尚需要做进一步的工作,但至少世界上其他典型克拉通下岩石圈的研究成果 (Pearson, 1999) 不支持这一观点。(c) Wu *et al.* (2006) 提出了一个大胆的设计,认为华北现今的岩石圈地幔是外来的,因此其元古宙地幔和新生地幔可能形成于扬子地块。但是,很多证据说明元古宙 (≈ 25 亿年) 地幔熔融是华北克拉通的一次重要事件。例如,辽宁复县金伯利岩中麻粒岩包体是晚太古代—早元古代来源于亏损地幔的岩浆底侵于下地壳的产物 (Zheng *et al.*, 2004),这一事件同样记录在山东侏罗—

早白垩侵入岩中继承锆石中(徐义刚等,2007)。因此元古宙地幔应该是华北岩石圈原有的组成部分。

6.2 东北地区岩石圈地幔是否也发生了变化?

东北褶皱带花岗岩的 Nd 模式年龄为 0.5 ~ 1.0Ga (Jahn *et al.*, 2000),因此该区不可能存在与华北古生代时一样的难熔地幔。如果说与地幔成分相关的地壳年龄应该是最后一次大规模构造岩浆事件的年龄 (Griffin *et al.*, 2003),那么东北地区最后的大规模构造岩浆事件应该是在古生代,该区的橄榄岩包体应该相应落在显生宙型地幔范围内,但事实上东北地区橄榄岩落在元古宙型地幔中。东北地区存在元古宙地幔也为 Os 同位素研究所证实 (Wu *et al.*, 2003),该地区是年轻地壳下有老地幔,这种壳幔解耦的性质与华北地区老地壳下有年轻地幔的结构是不一样的,而与北美一些地区的性质 (Peslier *et al.*, 2000) 相似。考虑到东北地区存在元古宙微陆块 (马文璞,1992),因此我们认为,东北地区原先应该存在元古宙壳幔组合,但该区地壳经历了多期改造,其地壳的模式年龄反映了该区最后一期大规模的地壳活动时间,而下覆元古宙地幔只受到了部分的影响。考虑到东北也存在新生地幔 (Wu *et al.*, 2003),东北地区可能也经历了中生代岩石圈减薄和增生过程,不过目前的认知水平还不足以阐明减薄和增生的程度和范围。

6.3 两地区地幔热状态差异的地质意义

东北地区现今岩石圈的地温梯度要低于华北地区,说明现在的东北岩石圈地幔比华北的要“冷”,这种现象有两种可能的解释:(1)华北岩石圈减薄程度可能大于东北地区,岩石圈-软流圈界面更浅,岩石圈更“热”;(2)东北岩石圈减薄和再增生过程发生的时间要早于华北地区,较长时间的热调整使得东北岩石圈的地温梯度要比华北的低。

7 结论

(1)虽然华北地区比东北地区具有更古老的地壳年龄,但对新生代玄武岩中橄榄岩包体成分的对比发现其地幔成分相对于东北地区更饱满,这和根据 Griffin *et al.* (2003) 的理论预测结果不一致,暗示华北地区的岩石圈地幔可能发生了改造,这与前人关于华北地区岩石圈发生了置换的观点是一致的。东北地区的壳幔结构是年轻地壳下有老地幔,这种壳幔解耦的性质与华北地区老地壳下有年轻地幔的结构不同,可能与该区地壳的多期改造有关,考虑到东北也存在新生地幔,因此东北地区可能也经历了中生代岩石圈减薄和增生过程。东北地区岩石圈的现今地温梯度比华北的要低,岩石圈要“冷”,暗示东北地区岩石圈减薄的时间要早于华北地区,或者华北岩石圈减薄程度可能大于东北地区,即中国东部岩石圈减薄存在时空不均一性。

(2)华北和东北地区地幔成分的差异可能是多种因素综合作用的结果。其中最可能的因素包括:(a)东北地区地幔受俯冲流体的影响程度可能要大于华北地区;(b)岩石圈减薄过程中软流圈底辟上升时发生不同程度的部分熔融。目前对这些因素的作用方式还了解得不多,有待今后深入的工作。

致谢 两位评审者提出了宝贵的修改意见,在样品的分析测试和文章撰写过程中得到了刘颖高级工程师、陈林丽工程师、马金龙工程师、秦秀峰同学的帮助,在此一并致以谢意。

References

- Beccaluva L, Bianchini G, Bonadiman C, Siena F and Vaccaro C. 2004. Coexisting anorogenic and subduction-related metasomatism in mantle xenoliths from the Betic Cordillera (southern Spain). *Lithos*, 75: 67-87
- Bertrand P and Mercier JCC. 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene; Toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77: 109-122
- Brandon AD, Becker H, Carlson RW and Shirey SB. 1999. Isotopic constraints on time scales and mechanisms of slab material transport in the mantle wedge: Evidence from the Simcoe mantle xenoliths, Washington, USA. *Chemical Geology*, 160: 387-407
- Brey GT, Köhler T and Nickel KG. 1990. Geothermobarometry in four phase lherzolites, part I: Experimental results from 10 ~ 60Kb, *J. Petrol.*, 31: 1313-1352
- Brey GT and Köhler T. 1990. Geothermobarometry in four phase lherzolites, part II: New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 31: 1353-1378
- Bonatti E and Michael PJ. 1989. Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 91: 297-311
- Chen DG, Li BX, Zhi XC and Han JM. 1994. Mineral chemistry, REE composition of peridotites in Liuhe Jiangsu Province and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 10: 68-80. (in Chinese with English abstract)
- Chen SH, O'Reilly SY, Zhou XH, Griffin WL, Zhang GH, Sun M, Feng JF and Zhang M. 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenoliths. *Lithos*, 56: 267-301
- Dick HJB, Fisher RL and Bryan WB. 1984. Mineralogical variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69: 88-106
- Deng JF, Mo XX and Zhao HL. 1996. Continental root-plume tectonics-Key to continental dynamics. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- E ML and Zhao DS. 1987. Cenozoic basalts and their deep-seated xenoliths, eastern china. Beijing: Scientific Press (in Chinese)
- Fan QC, Liu RX, Zhang GH and Sui JL. 1998. The genesis and evolution of bimodal volcanic rocks in Wangtian'e Volcano, Changbaishan. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 305-317 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM, Zhang HF, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and Off Craton: Where is the Archaean Keel? *Journal of Petrology*, 41: 933-950
- Frey FA and Green DH. 1974. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38: 1023-1059
- Frey FA and Prinz M. 1978. Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: Petrologic and Geochemical data bearing on their petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 129-176

- Gao S, Rudnick RL, Carlson RW and McDonough WF. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 307–322
- Griffin WL, Zhang A, O'Reilly SY and Ryan CG. 1998. Phanerozoic Evolution of the Lithosphere Beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. *Am. Geophys. Union Geodynamics Ser.*, 27: 107–126
- Griffin WL, O'Reilly SY, Abe N, Aulbach S, Davies RM, Pearson NJ, Doyle BJ and Kivi K. 2003. The origin and evolution of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Research*, 127: 19–41
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoids generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82–92
- Johnson KTM, Dick HJB and Shimizu N. 1990. Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *J. Geophys. Res.*, 95: 2661–2678
- Kelemen PB, Hart SR and Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 164: 387–406
- Lai Y, Liu YL, Huang BL and Chen YJ. 2005. The characteristics of noble gases in mantle-derived xenoliths in Wudalianchi and Kuandian' NE China: MORB-like mantle and metasomated mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1373–1381 (in Chinese with English abstract)
- Lei JS and Zhao DP. 2005. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia. *Tectonophysics*, 397: 281–295
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339–342
- Liu JF. 2005. Characteristic of mantle lithosphere in west part of North China Craton: informations provided by mantle derived xenoliths from Cenozoic basalts in Yangyuan Hebei Province. Master's degree paper
- Lin Q, Ge WC, Sun DY, Wu FY, Yuan ZK, Min GD, Chen MZ, Lin WY, Quan ZC and Yi CX. 1998. Tectonic implications of Mesozoic volcanic rocks in Northeast China. *Scientia Geologica Sinica*, 33: 129–139 (in Chinese with English abstract)
- Ma JL and Xu YG. 2006. Old EMI-type enriched mantle under the middle North China Craton as indicated by Sr and Nd isotopes of mantle xenoliths from Yangyuan, Hebei Province. *Chinese Science Bulletin*, 51: 1190–1196 (in Chinese)
- Ma WP. 1992. Regional tectonic resolution and theorys and plate tectonics in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- McDonough. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 101: 1–18
- 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
- Meng QR. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155–174
- Menzies MA, Fan WM and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss > 120km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard HM, Alabaster T, Harris NBW and Neary CR (eds). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society. London, Special Publication, 76: 71–78
- Menzies MA and Xu YG. 1998 Geodynamics of the North China Craton. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, 155–165
- Nickel KG and Green DH. 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73: 158–170
- O'Reilly SY and Griffin WL. 2006. Imaging global chemical and thermal heterogeneity in subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications. *Tectonophysics* (in press)
- O'Neill HSC. 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 77: 185–194
- Peslier AH, Reisberg L, Ludden J and Francis D. 2000. Re-Os constraints on harzburgite and lherzolite formation in the lithospheric mantle: A study of Northern Canadian Cordillera xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3061–3071
- Pearson DG. 1999. The age of continental roots. *Lithos*, 48: 171–194
- Pollack HN and Chapman DS. 1977. On the regional variation of heat flow, geotherms and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, 38: 279–296
- Rudnick RL, Gao S, Ling WL, Liu YS and McDonough WF. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609–637
- Song Y and Frey FA. 1989. Geochemistry of peridotites xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 97–113
- Tatsumoto M, Basu AR, Huang WK, Wang JW and Xie GH. 1992. Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: Enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113: 107–128
- White RS and McKenzie D. 1989. Magmatism at rift zone: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *J. Geophys. Res.*, 94: 7685–7729
- Widom E, Kepezhinskas P and Defant M. 2003. The nature of metasomatism in the sub-arc mantle wedge: Evidence from Re-Os isotopes in Kamchatka peridotite xenoliths. *Chemical Geology*, 196: 283–306
- Witt-Eickchen G and Seck. 1991. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: An improved version for an empirical geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 106: 431–439
- Wu FY, Walker RJ, Ren XW, Sun DY and Zhou XY. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chemical Geology*, 196: 107–129
- Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo LL. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10: 51–60 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Walker RJ, Yang YH, Yuan HL and Yang JH. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5013–5034
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhou XM and Huang XL. 1998. The Nature of the Cenozoic Lithosphere at Nushan, Eastern China. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. *Am. Geophys. Union Geodynamics 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. *Journal of petrology*, 41: 111–148
- Xu YG, Lin CY, Shi LB, Mercier JCC and Ross JV. 1995. Upper mantle geotherm for eastern China and its geological implications. *Science in China (Series B)* 38: 1482–1492
- Xu YG. 2001. Thermo-Tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel Beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Phys. Chem. Earth*, 26: 747–757
- Xu YG, Menzies MA, Thirlwall MF, Huang XL, Liu Y and Chen XM. 2003. "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 487–505
- 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? *Journal of Petrology*, 45: 321–341
- Xu YG, Blusztajn J, Ma JL, Suzuki K, Liu JF and Hart SR. 2007. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath a reactivated craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi, western North China. *Lithos*, 10. 1016/j.lithos.2007.04.005

- Yang T, Cheng Y and Wang H. 1986. The Geology of China. Clarendon Press, Oxford, 303
- Zhang M, Zhou XH and Zhang JB. 1998. Nature of the Lithosphere Mantle Beneath NE China: Evidence from Potassic Volcanic Rocks and Mantle Xenoliths. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Am. Geophys. Union Geodynamics Ser., 27: 167-196
- Zhang YS. 1998. Three-Dimensional Upper mantle Structure beneath East Asia and its Tectonic Implications. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia eds. Am. Geophys. Union Geodynamics Ser., 27: 11-23
- Zhang HH, Xu YG, Ge WC and Ma JL. 2006. Geochemistry of late Mesozoic-Cenozoic basalts in Yitong-Datun area, Jilin Province and implication. Acta Petrologica Sinica, 22: 1579-1596 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Menzies MA, Lu FX and Zhou XH. 2000. Major and trace elements in xenolithic and megacrystic garnets from Paleozoic kimberlites in North China. Science in China (Series D), 30: 128-134
- Zhang ZC, Li YN, Li SC, Xin Y, Li YM and Wang XZ. 2000. Geochemistry of the Jingbohu Holocene basaltic rocks, Heilongjiang Province, and discussion on their deep processes. Acta Petrologica Sinica, 16: 327-336 (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 and Lu FX. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong 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 and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China. International Geology Review, 40: 471-49
- Zheng JP, Griffin WL and O'Reilly SY. 2004. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China Craton. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 79-103
- 化学、稀土元素组成及其意义. 岩石学报. 10(1): 68-80
- 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, 赵海玲等. 1996. 大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社
- 樊祺诚, 刘若新, 张国辉, 随建立. 1998. 长白山望天鹅火山双峰式火山岩的成因演化. 岩石学报. 14(3): 305-317
- 马文璞. 1992. 区域构造解析-方法理论和板块构造. 北京: 地质出版社
- 马金龙, 徐义刚. 2006. 河北阳原幔源包体的 Sr-Nd 同位素特征指示华北克拉通中部存在 EMI 型古老富集地幔. 科学通报. 51: 1190-1196
- 赖勇, 刘玉琳, 黄宝玲, 陈衍景. 2005. 五大连池和宽甸包体的惰性气体同位素特征-MORB 型地幔和交代型地幔. 岩石学报. 21(5): 1373-1381
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 闵庚德, 陈明植, 李文远, 权致纯, 尹成孝. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. 地质科学. 33(2): 129-139
- 刘讲锋. 2005. 华北克拉通西部岩石圈地幔的性质: 河北阳原新生代玄武岩中幔源包体提供的信息. 硕士学位论文
- 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
- 徐义刚, 巫祥阳, 罗震宇, 马金龙, 黄小龙. 2007. 山东中侏罗纪-早白垩纪侵入岩的锆石 Hf 同位素组成及其意义. 岩石学报, 23: 307-316
- 张招崇, 李兆鼎, 李树才, 新影, 李兆木, 王先政. 2000. 黑龙江镜泊湖地区全新世玄武岩的地球化学特征及其深部过程探讨. 岩石学报. 16(3): 327-336
- 张辉煌, 徐义刚, 葛文春, 马金龙. 2006. 吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报. 22(6): 1579-1596

附中文参考文献

陈道公, 李彬贤, 支霞臣, 韩建明. 1994. 江苏六合橄榄岩包体的矿物