

安徽女山麻粒岩包体: 矿物学特征、下地壳地温曲线及其成因意义*

黄小龙^{1,2} 徐义刚¹ 王汝成² 陈小明²

HUANG XiaoLong^{1,2}, XU YiGang¹, WANG RuCheng² and CHEN XiaoMing²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

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

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

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

2001-12-24 收稿, 2002-03-18 改回.

Huang XL, Xu YG, Wang RC and Chen XM. 2002. The Nüshan granulite xenoliths from Anhui province, China: mineralogical characteristics, the lower crustal geotherm and their implications for genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3):383–391

Abstract The main mineral assemblage of granulite xenolith in Nüshan basalt is Opx+Cpx+Pl. The granulite xenoliths are commonly in banded structure, with fine-grained homeblastic texture or heteroblastic texture. The chemical compositions of orthopyroxene and clinopyroxene in Nüshan granulite xenoliths are very similar to those of North China Archean granulite terrain, while are distinctively different from those of Hannuoba granulite xenolith. Based on the test of the garnet-bearing granulite in the world, the authors confirm that the combination of the Wells (1977) geothermometer and the McCarthy & Patiño Douce (1998) geobarometer is suitable for application to the granulite. The equilibrium $T-P$ of Nüshan granulite xenolith vary in 809~899 C and 0.60~0.95 GPa, respectively. The lower crustal geotherm of Nüshan based on the equilibrium $T-P$ of Nüshan granulite xenoliths is very similar to the extrapolated upper part of Xu's geotherm (1998) based on the garnet-bearing mantle-derived xenoliths. The petrological Moho depth based on the Nüshan geotherm is ca 31 km consistent with the seismic Moho depth, which shows that there is no obvious crust-mantle transition zone in the area. The absence of strong underplating and the mineralogical characteristics of the granulite xenoliths imply that the Nüshan granulite xenoliths should be the source from the basement of the North-China craton.

Key words Granulite xenolith, Equilibrium $T-P$, Geotherm, Nüshan

摘要 女山玄武岩中麻粒岩包体的主要矿物组合为 Opx+Cpx+Pl, 均呈条带状构造, 具有细粒粒状变晶结构或不等粒结构。女山麻粒岩包体的斜方辉石及单斜辉石的化学成分都非常相似于华北太古代麻粒岩地体, 而明显区别于汉诺坝麻粒岩包体。通过对世界上含石榴石麻粒岩的检验, 表明 Wells(1977)二辉石温度计与 McCarthy & Patiño Douce (1998)的 Cpx+Pl+Qz 压力计的温压计组合是计算麻粒岩平衡温压的可行方法, 并得到了女山麻粒岩包体平衡温度分布于 809~899 C 之间, 主要集中于 850±20 C, 平衡压力为 0.60~0.95 GPa。由麻粒岩包体的平衡温压所建立起来的女山地区下地壳地温曲线与 Xu *et al.* (1998) 建立的上地幔地温曲线上延部分非常吻合。根据地温线推得的“岩石学”Moho 面深度为 31 km±, 与“地震”Moho 面深度相一致, 表明女山地区不具有明显的壳幔过渡带。女山地区缺乏强烈的底侵作用以及麻粒岩包体的特征矿物化学成分暗示了女山麻粒岩包体可能来源于华北克拉通结晶基底。

关键词 麻粒岩包体; 平衡温压; 地温曲线; 女山

中图法分类号 P588.346

* 国家杰出青年基金(49925308)、国家攀登预选项目(95-预-39)、中国博士后科学基金、南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金资助。

第一作者简介: 黄小龙, 男, 1972 年生, 博士, 岩石学专业, E-mail: xlhuang@gig.ac.cn

1 概述

目前有关下地壳的信息主要基于对因构造作用而出露于地表的麻粒岩地体和由碱性玄武岩或金伯利岩携带至地表的麻粒岩相包体的研究。但前者多属太古宙和元古宙,并且都经历过复杂的地质构造与变质演化历史才抬升到地表;相比之下,后者的演化历史要简单得多,麻粒岩包体的快速上升过程使其免受环境温压条件变化的影响,从而保持其原有的结构构造,因而能更直观地反映下地壳的特点(Rudnick, 1992)。国内学者已相继在华北克拉通的安徽女山和河北汉诺坝新生代碱性玄武岩中发现了麻粒岩包体(图1)(周新民等, 1992; 谢漫泽等, 1993; 樊祺诚等, 1996),并做了许多卓有成效的工作。国内以往的工作主要集中在汉诺坝的麻粒岩包体上,对其岩石学、矿物学、元素地球化学、Sr-Nd-Pb同位素、变质温压以及锆石年代学等方面都已进行了大量的工作(谢漫泽等, 1993; 陈道公等, 1997; 樊祺诚等, 1996, 1998; 张国辉等, 1998a, b; 陈绍海等, 1998; Chen *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001);但是,对于同属华北克拉通的女山麻粒岩包体的研究则相对较为薄弱(周新民等, 1992; Yu & Zhou, 1993)。本文拟对女山麻粒岩包体的矿物成分、平衡温压作较为详细的研究,结合前人资料建立起女山地区新生代时期较为完整的下地壳-上地幔地温曲线,并据此对女山麻粒岩包体进行成因制约。

2 岩相学特征

本次研究的对象均为含有两种辉石(Opx 和 Cpx)的高级变质岩包体,呈次棱角状,包体长径约 2~20cm,主要矿物组合为 Opx+Cpx+Pl(表1),大部分样品含有石英,属于二辉麻粒岩。在所有样品中均未发现角闪石、石榴石、蓝晶石和夕线石等,与前人研究结果(周新民等, 1992)相一致,但在样品 NS202 及 NS206 中都有少量的黑云母出现。磁铁矿及磷灰石是女山麻粒岩包体中最主要的副矿物,相似于汉诺坝基性麻粒岩(陈绍海等, 1998);磷灰石多呈自形柱状,有些则呈浑圆它形,主要包裹于板状斜长石大晶体中或分布于斜长石矿物间隙。女山麻粒岩包体结构可以分为两种,其一为细粒粒状变晶结构,长石和辉石的粒径都相对较小,并且斜长石、辉石之间的三连点结构常见;另一种为不等粒结构,部分板状斜长石的粒径相对较大,常有出溶叶片,在较大的斜长石或辉石间有细粒斜长石重结晶现象,有些具有扭折变形的双晶,明显经受了构造挤压。岩石常呈条带状构造,主要由斜长石与辉石类矿物的相对分离形成矿物分布不均一,个别具有明显的压扁构造(如 NS207),辉石及长石都略呈定向排列。女山麻粒岩包体的辉石矿物不存在麻粒岩包体中常见的辉石反应边结构(Rudnick, 1992; 陈绍海等, 1998; 黄小龙等, 2001),表明女山麻粒岩包体已经经历了较充分的麻粒岩相变质作用过程。

3 矿物成分特征

对女山麻粒岩包体进行了大量的电子探针成分分析,并对不同矿物颗粒以及各矿物的不同部位进行多点分析。结果表明,大部分样品中的辉石及长石的成分都相对均一。但也有少数样品矿物成分并不均匀,如 NS202 中斜方辉石核部与边部具有成分差异,边部较核部相对高 Mg 低 Fe,而 NS206 不同颗粒单斜辉石有相对较明显的成分差异(表2)。

3.1 斜方辉石

女山麻粒岩包体中斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 指数为 0.50~0.62(表2),端元组成为 $Wo_{0.8-1.3}En_{48.9-61.3}Fs_{37.6-49.8}$ (表2),均属于紫苏辉石。Bhattacharyya (1971)曾据斜方辉石的 $MgO + FeO + Fe_2O_3 + 0.775Al_2O_3$ 值来判断其成因来源,大于 44.304 者为变质成因,反之为岩浆成因,女山麻粒岩包体的斜方辉石该值为 46.057~48.397,应属麻粒岩相变质作用产物。总体而言,女山麻粒岩包体中斜方辉石成分相似于华北太古代麻粒岩地体而明显不同于汉诺坝麻粒岩包体,后者具有明显较高的 En 组成(图2),女山麻粒岩包体与华北麻粒岩地体具有相似的 FeO、MgO、 Al_2O_3 含量,其 $Mg^{\#}$ 指数及 Al_2O_3 含量都明显低于汉诺坝麻粒岩包体,而 FeO 含量则明显高于汉诺坝麻粒岩包体(图3a, b)。

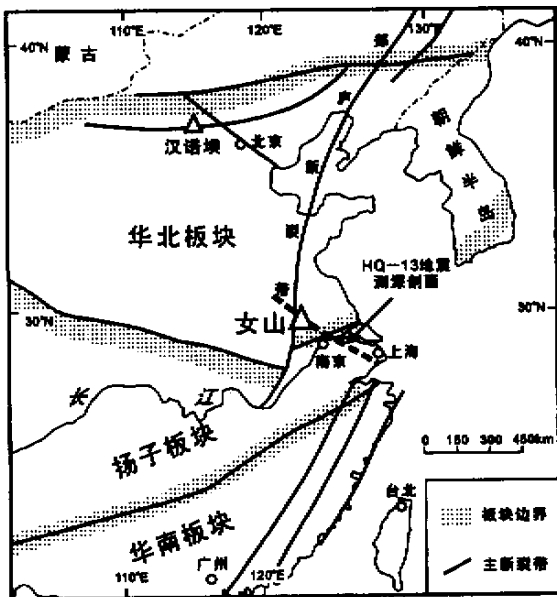


图1 中国东部构造框架简图

根据 Xu *et al.* (1998) 简化

Fig. 1 Tectonic sketch map of the eastern China

表 1 女山麻粒岩包体矿物组合及结构构造特征

Table 1 The mineral assemblages and constructs of Nüshan granulite xenoliths

样品	矿物组合	结构构造
NS201	Opx+Cpx+Pl(+Mt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构, 三连点结构发育
NS202	Opx+Cpx+Pl+Bi(+Mt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构, 三连点结构发育
NS203	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构, 三连点结构发育
NS204	Opx+Cpx+Pl(+Mt+Apt)	条带状构造, 不等粒结构
NS205	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt)	条带状构造, 略具粒状变晶结构, 不等粒结构
NS206	Opx+Cpx+Pl+Bi(+Mt+Apt)	条带状构造, 局部重结晶, 不等粒结构
NS207	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt+Apt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构
NS210	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt+Apt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构
NS212	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt+Apt)	略具条带状构造, 局部重结晶, 不等粒结构
NS213	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt+Apt)	条带状构造, 局部重结晶, 不等粒结构
NS214	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt)	条带状构造, 不等粒结构
NS217	Opx+Cpx+Pl+Qz(+Mt)	条带状构造, 细粒粒状变晶结构

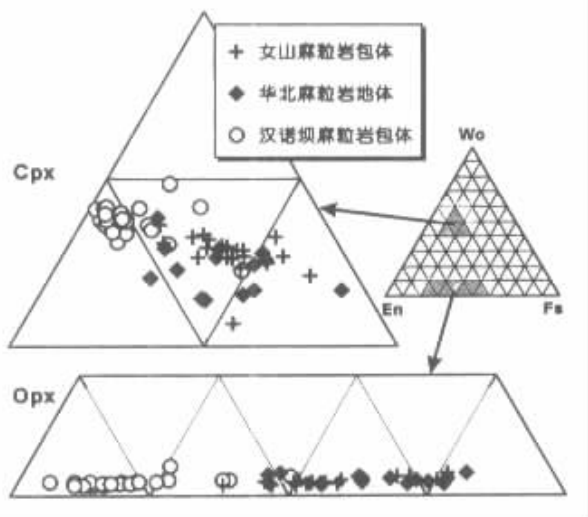


图 2 女山麻粒岩包体 Opx-Cpx 端元组成

资料来源: 部分女山麻粒岩包体引自 Xu *et al.* (1998), 部分华北太古代麻粒岩地体引自郭敬辉等(1998)、刘福来等(1997), 部分汉诺坝麻粒岩包体引自陈绍海等(1998)

Fig. 2 The end-members of Opx and Cpx in the Nüshan granulite xenoliths

3.2 单斜辉石

女山麻粒岩中单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 指数介于 0.62~0.70 (表 2) 之间, 其端元组成为 $Wo_{41.5-46.8}En_{33.1-38.0}Fs_{16.6-20.5}$, 基本上属于次透辉石的范围。与 Opx 的情况一样, 女山麻粒岩包体与华北太古代麻粒岩地体的单斜辉石成分类似, 但与汉诺坝麻粒岩包体有较大差异。女山麻粒岩包体与华北麻粒岩地体的单斜辉石端元组成相似, 均具有较高的 Fs 端元, 明显不同于汉诺坝麻粒岩包体的单斜辉石 (基本上属于透辉石范围) (图 2), 女山麻粒岩包体与华北麻粒岩地体的 $Mg^{\#}$ 指数和 Na_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 含量都明显低于汉诺坝麻粒岩包体 (图 3c,d)。

3.3 斜长石

女山麻粒岩包体中斜长石成分变化较大, 其中 An 分子含量介于 33.0%~50.2%, Ab 分子含量介于 46.4%~65.6%, Or 分子含量介于 1.0%~4.6%, 属于中长石-拉长石范围, 相似于华北麻粒岩地体及汉诺坝麻粒岩包体的斜长石成分范围。

4 P、T 条件及女山下地壳地温曲线

女山麻粒岩包体的矿物组合以 $Cpx+Opx+Pl$ 为主, 基于 $Cpx+Opx$ 这一矿物对的地质温度计以 Wells (1977) 和 Wood & Banno (1973) 的方法应用最为广泛, 总体上由 Wells (1977) 二辉石温度计得出的结果 (T1, 表 3) 略高于由 Wood & Banno (1973) 得出的结果 (T2, 表 3), 但在误差范围内可以认为这两种方法得出的结果相似。女山麻粒岩的温度分布于 809~899 C 之间 (Wells 方法, 表 3), 主要集中于 850±20 C, 总体上低于汉诺坝麻粒岩包体的平衡温度 (陈绍海等, 1998)。

以往对于不含石榴石的麻粒岩因没有合适的压力计而不能进行平衡压力计算。McCarthy & Patiño Douce (1998) 最近提供了仅需 $Cpx+Pl+Qz$ 矿物组合的压力计, 并且适合于较大的成分及温度、压力范围 (全岩 $Mg^{\#} \geq 32.5$, $T \geq 700$ C, $P \geq 0.4$ GPa; McCarthy & Patiño Douce, 1998)。女山大部分麻粒岩包体的矿物组合为 $Opx+Cpx+Pl+Qz$, 其全岩 $Mg^{\#}$ 大于 32.5 (另文发表), 由 Wells (1977) 和 Wood & Banno (1973) 得到的平衡温度均大于 700 C, 满足 McCarthy & Patiño Douce (1998) 压力计的适用条件。为进一步检验该压力计的适用性, 我们对含石榴石麻粒岩用 McCarthy & Patiño Douce (1998) 压力计计算的结果与用文献中常用的 Newton & Perkins (1982) 压力计计算的结果以及原文实际结果 (史兰斌等, 2000; Yamamoto, 1993; Hölttä *et al.*,

2000)进行对比, 都成很好的 1:1 线性关系(图 4)。同时, 我们还对陈绍海等(1998)中的汉诺坝麻粒岩包体进行压力计算, 由 McCarthy & Patiño Douce (1998)方法所得的结果为 0.88~1.20 GPa, 与前人研究结果(陈绍海等, 1998; 史兰斌等, 2000; Chen *et al.*, 2001)相符合。本文分别以 McCarthy & Patiño Douce (1998)中公式 5 和公式 7 计算了女山麻粒岩包体的平衡压力如表 3 所示, 总体上由公式 5 所得的结果 P1 略大于由公式 7 所得的结果 P2, 考虑到公式 7 比公式 5 具有

较低的误差范围(McCarthy & Patiño Douce, 1998), 本文取公式 7 所得结果, 即以 Wells (1977)计算的温度所得压力为 0.43~0.95 GPa(表 3), 具有较宽的压力范围。另外, 考虑到由 McCarthy & Patiño Douce (1998)压力计计算的 0.60 GPa 以下的结果明显低于实际压力值(图 4), 我们认为由 McCarthy & Patiño Douce (1998)方法所得女山麻粒岩包体平衡压力为 0.60~0.95 GPa。

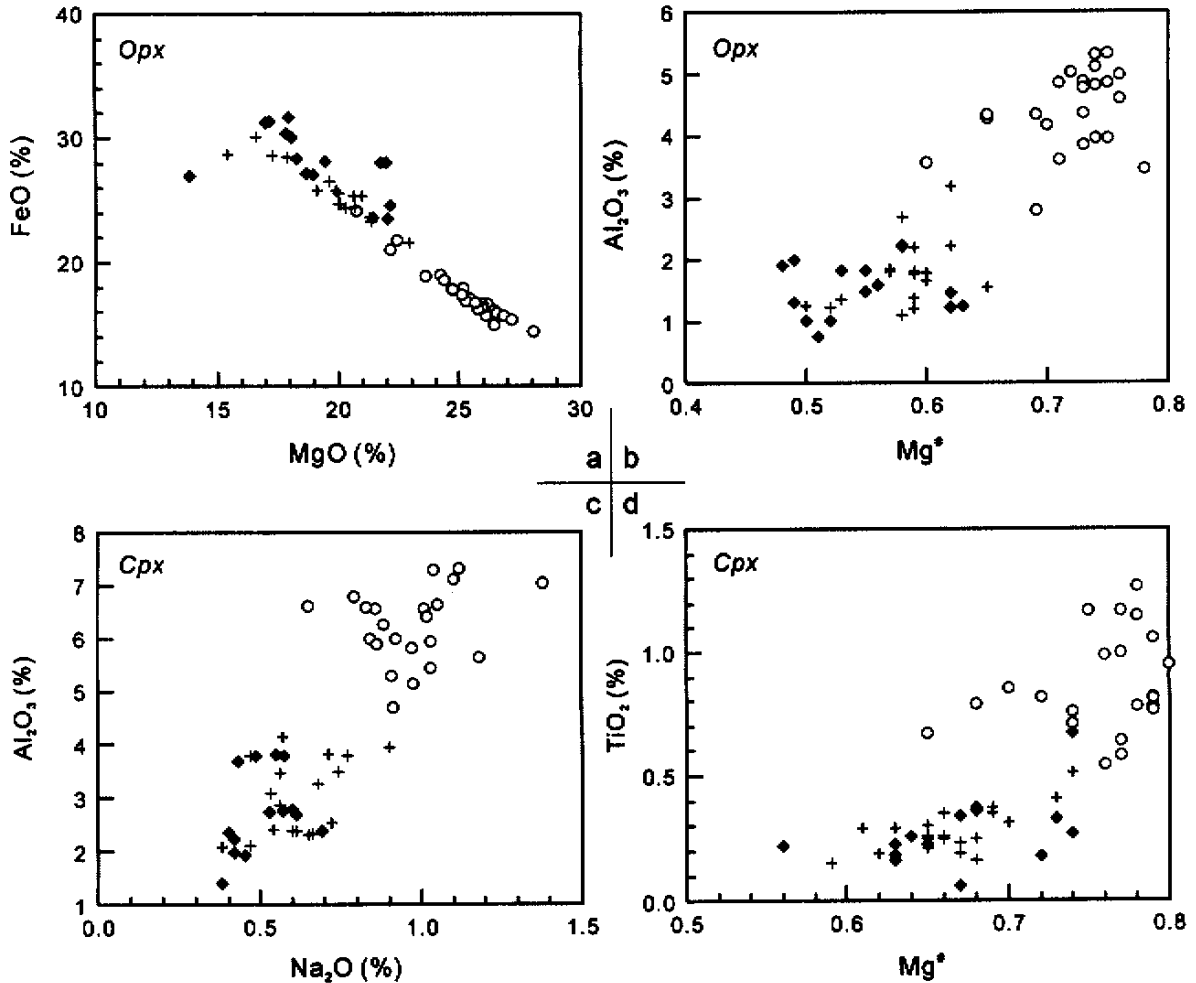


图 3 女山麻粒岩包体 Opx—Cpx 成分特征 (图例及资料来源同图 2)

Fig. 3 Compositional characteristics of Opx and Cpx in the Nüshan granulite xenoliths

Xu *et al.* (1998)通过含石榴石橄榄岩及辉石岩包体建立起了女山地区的上地幔地温曲线。该地温曲线有效点的温压分别是 $P > 1.6$ GPa, $T > 1000$ °C, 而对于浅部岩石圈的温压缺乏足够控制点。Xu *et al.* (1998)以复合包体 Nu9505(尖晶石辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩)的形成温度、存在的特殊结构, 并结合相转换带关系推得壳幔过渡带的地温曲线, 这一做法的合理性毋庸置疑, 但是对其准确性却难以判断。女

山麻粒岩包体平衡温、压数据则可以弥补这一不足, 提供了女山地区下地壳地温梯度的制约(图 5, 部分计算结果低于 0.60 GPa 的样品未纳入其中)。从图 5 可知, 由麻粒岩包体所控制的女山下地壳地温曲线与 Xu *et al.* (1998)所建立的地温曲线上延部分是非常相近的, 由此可以建立起女山地区较为完整的下地壳—上地幔地温曲线(图 5), 非常类似于澳大利亚东南部的地温曲线(O'Reilly & Griffin, 1985)。

表2 女山麻粒岩包体矿物电子探针成分

Table 2 EMPA results (%) of minerals in Nüshan granulite xenoliths

样品	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	Mg [#]	Wo (An)	En (Ab)	Fs (Or)
NS201	Cpx	49.74	0.35	4.13	0.18	9.89	0.16	12.43	20.83	0.57	0.00	98.28	0.69	45.4	37.7	16.8
	Opx	51.00	0.00	3.19	0.11	23.29	0.23	21.33	0.54	0.02	0.00	99.71	0.62	1.1	61.3	37.6
	Pl	55.27	0.00	28.17	0.64	0.14	0.00	0.01	9.99	5.10	0.58	99.90		50.2	46.4	3.5
NS202	Cpx	50.65	0.35	3.79	0.04	11.15	0.20	12.41	21.66	0.47	0.01	100.73	0.66	45.5	36.2	18.3
	Opx-c	52.70	0.08	1.86	0.04	25.85	0.38	19.13	0.43	0.07	0.01	100.55	0.57	0.9	56.3	42.7
	Opx-r	52.20	0.06	2.21	0.08	23.62	0.35	21.31	0.41	0.09	0.03	100.36	0.62	0.8	61.1	38.0
	Pl	56.97	0.00	28.06	0.04	0.17	0.04	0.02	7.82	6.17	0.48	99.77		40.0	57.1	2.9
NS203	Cpx	51.39	0.21	2.39	0.00	11.24	0.31	11.79	21.17	0.60	0.02	99.12	0.65	45.7	35.4	18.9
	Opx	50.60	0.09	1.80	0.01	26.58	0.53	19.61	0.61	0.04	0.00	99.87	0.57	1.2	56.1	42.7
	Pl	58.59	0.01	25.92	0.07	0.13	0.03	0.00	7.13	7.53	0.57	99.98		33.3	63.6	3.2
NS204	Cpx	51.08	0.23	3.48	0.00	10.83	0.04	12.22	21.75	0.74	0.01	100.38	0.67	46.1	36.0	17.9
	Opx	50.30	0.05	2.68	0.07	25.84	0.35	19.87	0.47	0.11	0.00	99.74	0.58	1.0	57.3	41.8
	Pl	58.56	0.01	26.30	0.47	0.08	0.02	0.01	7.67	6.22	0.73	100.07		38.7	56.9	4.4
NS205	Cpx	51.64	0.25	2.87	0.00	11.51	0.34	12.13	21.11	0.56	0.02	100.43	0.65	44.9	35.9	19.1
	Opx	51.77	0.11	1.79	0.08	24.42	0.40	20.25	0.64	0.11	0.00	99.57	0.60	1.3	58.9	39.8
	Pl	58.78	0.00	26.08	0.06	0.14	0.05	0.00	7.74	6.60	0.80	100.25		37.5	57.9	4.6
NS206	Cpx-1	50.84	0.30	3.71	0.10	10.85	0.11	12.43	20.89	0.78	0.03	100.04	0.65	41.5	38.0	20.5
	Cpx-2	50.80	0.31	3.78	0.32	9.21	0.31	12.29	21.38	0.77	0.01	99.18	0.70	46.8	37.4	15.7
	Opx	51.61	0.05	2.19	0.00	24.78	0.46	20.02	0.44	0.07	0.02	99.64	0.59	0.9	58.5	40.6
	Pl	58.19	0.00	26.43	0.74	0.20	0.02	0.01	7.48	6.11	0.52	99.70		39.1	57.7	3.2
NS207	Cpx	50.88	0.19	2.79	0.00	10.68	0.43	12.23	21.85	0.57	0.00	99.62	0.67	46.3	36.0	17.7
	Opx	51.31	0.06	1.81	0.00	25.42	0.72	20.60	0.55	0.00	0.01	100.48	0.59	1.1	58.4	40.4
	Pl	57.76	0.03	26.20	0.00	0.11	0.00	0.00	8.51	5.94	0.55	99.10		42.8	54.0	3.3
NS210	Cpx	51.55	0.19	2.34	0.24	12.08	0.18	11.12	21.83	0.66	0.00	100.19	0.62	46.7	33.1	20.2
	Opx	50.85	0.07	1.26	0.03	30.06	0.30	16.58	0.62	0.10	0.00	99.87	0.50	1.3	48.9	49.8
	Pl	59.07	0.01	24.74	0.67	0.08	0.03	0.01	6.73	7.14	0.65	99.13		33.0	63.3	3.8
NS212	Cpx	50.21	0.26	3.26	0.04	11.15	0.17	11.92	21.44	0.68	0.01	99.14	0.66	45.9	35.5	18.6
	Opx	52.00	0.08	1.77	0.01	24.75	0.33	20.04	0.49	0.00	0.01	99.48	0.59	1.0	58.5	40.5
	Pl	58.99	0.00	26.05	0.19	0.08	0.00	0.00	7.61	6.33	0.73	99.98		38.2	57.5	4.4
NS213	Cpx	51.54	0.16	2.42	0.05	10.12	0.09	12.25	21.21	0.54	0.00	98.38	0.68	46.0	36.9	17.1
	Opx	52.54	0.03	1.37	0.02	25.36	0.33	20.60	0.51	0.03	0.02	100.81	0.59	1.0	58.5	40.4
	Pl	59.48	0.01	26.47	0.06	0.02	0.00	0.00	7.11	7.16	0.41	100.72		34.6	63.0	2.4
NS214	Cpx	50.56	0.25	2.39	0.04	10.23	0.15	12.44	21.99	0.61	0.00	98.66	0.68	46.5	36.6	16.9
	Opx	51.56	0.05	1.66	0.00	24.49	0.48	20.69	0.53	0.01	0.00	99.47	0.60	1.1	59.4	39.5
	Pl	57.63	0.00	26.26	0.01	0.04	0.00	0.00	7.77	6.81	0.51	99.03		37.5	59.5	2.9
NS217	Cpx	51.06	0.37	2.09	0.00	10.16	0.08	12.62	22.40	0.38	0.01	99.17	0.69	46.8	36.7	16.6
	Opx	51.12	0.06	1.20	0.00	25.42	0.00	20.92	0.43	0.00	0.00	99.15	0.59	0.9	59.0	40.2
	Pl	59.98	0.00	24.91	0.00	0.12	0.04	0.02	7.35	7.96	0.18	100.56		33.4	65.6	1.0

注：(1)矿物成分由南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 JXA8800M 型电子探针仪测定，测试条件：加速电压 15kV、探针电流 10nA、束斑直径 1μm、ZAF 修正法；(2)Opx-c 和 Opx-r 分别为同一颗粒的核部及边部成分，Cpx-1 和 Cpx-2 分别为不同颗粒的矿物成分。

表 3 安徽女山麻粒岩包体平衡温度、压力

Table 3 The equilibrium temperature and pressure of Nüshan granulite xenoliths

样品	T1(°C)	按 T1 计算		T2(°C)	按 T2 计算	
		P1(GPa)	P2(GPa)		P1(GPa)	P2(GPa)
NS201	899	0.93	0.91	874	0.91	0.89
NS202c	887	0.93	0.87	848	0.91	0.83
NS202r	877	0.93	0.86	855	0.91	0.84
NS203	851	0.71	0.65	830	0.70	0.63
NS204	853	0.90	0.87	834	0.89	0.85
NS205	865	0.78	0.76	841	0.76	0.74
NS206	896	0.97	0.95	860	0.95	0.91
NS207	831	0.79	0.76	821	0.79	0.75
NS210	804	0.67	0.64	779	0.66	0.62
NS212	838	0.82	0.78	820	0.81	0.77
NS213	865	0.68	0.67	839	0.67	0.65
NS214	809	0.49	0.48	804	0.49	0.47
NS217	819	0.46	0.45	813	0.46	0.45
Nu8901	851	0.52	0.52	817	0.51	0.49
Nu8902	874	0.77	0.76	862	0.76	0.74
Nu8903	846	0.42	0.43	816	0.40	0.35
Nu9518	820	0.77	0.73	826	0.77	0.74
Nu9521	843	0.75	0.72	809	0.73	0.69
Nu9523	845	0.64	0.62	825	0.63	0.61

注: (1)T1、T2 分别为 Wells (1977)、Wood & Banno (1973)二辉石温度计, P1、P2 分别为 McCarthy & Patiño Douce (1998)中的公式 5、公式 7 计算的结果; (2)NS206 的 P、T 以 Cpx-1 计算; (3)Nu8901、Nu8902、Nu8903、Nu9518、Nu9521、Nu9523 矿物成分引自周新民等(1992)、Xu *et al.* (1998)。

由于女山麻粒岩包体的最高平衡温度不超过 900°C, 尖晶石二辉橄榄岩包体的最低平衡温度不低于 900°C, 因此可以认为女山地区新生代时期的壳幔边界温度为 900°C, 结合下地壳-上地幔地温曲线, 对应的壳-幔边界深度约为 31km (图 5)。HQ-13 地震测深剖面(张四维等, 1988)正好通女山地区, 由 V_p 所示的莫霍面深度约为 31km, 因此可以认为女山地区的壳幔边界深度为 31km±, 其壳幔边界是相对分明的边界, 与汉诺坝存在壳幔过渡带(陈绍海等, 1998; 史兰斌等, 2000; Chen *et al.*, 2001)是明显不同的。

5 女山麻粒岩包体成因意义

中生代以来华北岩石圈减薄已是许多地质学家的共识 (*e.g.* Fan & Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 1995, 1998, 2000; Xu, 2001), 但对减薄机制及程度(即岩石圈地幔全部是新增生的? 还是有部分残余?)仍存在不同的看法。例如女山地幔橄榄岩包体的主

量元素和矿物模式含量的研究显示该区上地幔岩石圈为显生宙形成的, 其成分范围远离克拉通地幔区域而与大洋趋势线相近(Xu *et al.*, 1998, 2000)。但是, 苏皖地区新生代碱性玄武岩中的地幔橄榄岩包体 Re-Os 同位素研究的结果表明该区古老岩石圈地幔存在的可能性(支霞臣等, 1996, 2001a, b)。作为来自于与上地幔紧邻的下地壳样品, 麻粒岩包体可为上述争论提供一个侧面的判断依据。如果岩石圈地幔全部是新增生的, 那么岩石圈减薄程度巨大, 软流圈顶部直达 Moho 面; 可以想象, 在这种情况下, 地幔对下地壳的能量、物质传输是巨大的, 下地壳的温度会明显增高, 经历显著的等压升温的变质作用(Platt *et al.*, 1998)。

女山下地壳-上地幔地温曲线非常相似于澳大利亚东南部地温曲线, 具有相对较高的大地热流密度值(~80 mW/m²), 有些样品具有部分重结晶现象, 有些样品具有不均一的矿物成分, 均表明女山下地壳麻粒岩曾经受了中国东部中、新生代时期的软流圈上涌、岩石圈减薄事件的影响。但是, 大部分女山麻粒岩包体的结构构造及成分特征并未显示出经受了明显的升温过程, 明显不同于汉诺坝麻粒岩包体(陈绍

海等,1998;黄小龙等,2001),造成这种差别的原因可能有两种:①女山下地壳所经受的中、新生代时期的构造热事件影响明显弱于汉诺坝下地壳,从侧面反映出该区仍有古老岩石圈地幔残存的可能性;实际上,Xu *et al.* (2000)的研究也已表明女山地区岩石圈地幔上部有少部分强烈亏损的尖晶石橄榄岩的存在,可能是古老岩石圈地幔的残留;②相对于汉诺坝麻粒岩包体,女山的麻粒岩包体已经经受了较充分的物质再平衡,如女山地区现代测量的大地热流密度值($\sim 65 \text{ mW/m}^2$;王良书等,1995)明显低于女山下地壳-上地幔地温曲线所显示的新生代时期的大地热流密度值,这种差别暗示了该区岩石圈在新生代时期经历了从热到冷的热松弛过程,主要是晚第三纪至今的岩石圈-软流圈界面的下降(Menzies *et al.*, 1993; Xu, 2001)。

在澳大利亚东南部、Spitsbergen、河北汉诺坝等地都有明显的壳幔过渡带(O'Reilly & Griffin, 1985; Amundsen *et al.*, 1987; Chen *et al.*, 2001; 史兰斌等,2000),在这些壳幔过渡带中都存在丰富的各类岩石包体(如麻粒岩、辉石岩、尖晶石橄榄岩等),反映出在寄主玄武岩喷发前曾具有较强的玄武质岩浆的底侵作用发生。对女山中、下地壳岩石包体的研究已经表明,女山下地壳的主要成分为麻粒岩相(周新民等,1992; Xu *et al.*, 1998; 本文),麻粒岩与地幔橄榄岩及辉石岩之间明显分界,下地壳-上地幔地温曲线的建立也表明女山地区新生代时期的岩石学壳幔边界与现代地震 Moho 面是非常一致的,不存在明显的壳幔过渡带,暗示了女山下地壳在新生代时期所经受的玄武质岩浆底侵作用以及壳幔混合作用都是相对较弱的。

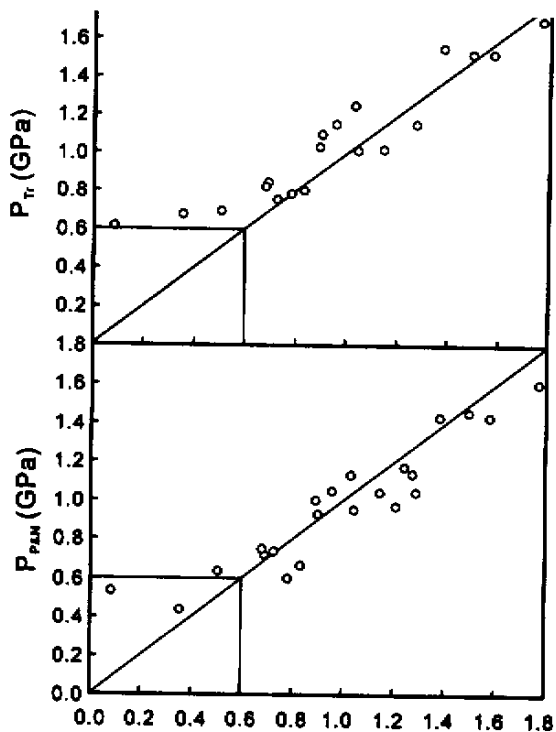


图4 含石榴石麻粒岩由不同方法所得压力比较

$P_{M\&P}$ 为 McCarthy & Patiño Douce (1998)压力计, $P_{P\&N}$ 为 Newton & Perkins (1982)压力计, P_{Tr} 为原文实际压力;资料来源:史兰斌等(2000)、Yamamoto (1993)、Hölttä *et al.* (2000)

Fig. 4 Pressure comparisons for garnet-bearing granulite using different geobarometers

另外,由女山麻粒岩包体与汉诺坝麻粒岩包体及华北太古代麻粒岩地体的矿物化学成分对比可知,女山麻粒岩包体与汉诺坝麻粒岩包体存在较大差异,这种差异存在的原因

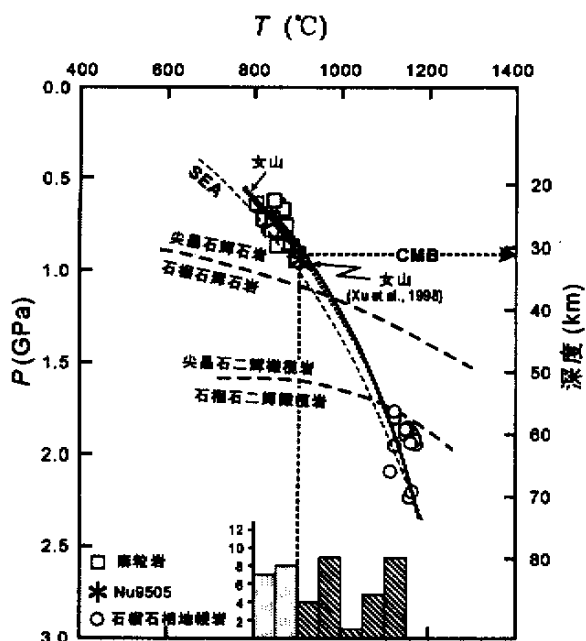


图5 女山地区下地壳-上地幔地温曲线

温度分布直方图中阴影区为麻粒岩,斜线区为尖晶石二辉橄榄岩。上地幔地温曲线及地幔岩的资料来源均据 Xu *et al.* (1998)。SEA为澳大利亚东南部地温曲线(O'Reilly & Griffin, 1985),CMB为女山壳幔边界。

Fig. 5 Nüshan geotherm for the lower crust and upper mantle

一方面可能是因两地区分处于华北克拉通的南、北缘而事实存在的下地壳物质成分横向不均一性,另一方面可能是它们所处的深度差异、时代差异。女山麻粒岩包体的平衡压力总

体上低于汉诺坝麻粒岩包体,表明其形成深度较小;女山麻粒岩包体的矿物化学成分非常相似于华北麻粒岩地体,在很大程度上反映出女山麻粒岩包体可能来源于早先存在的华北克拉通结晶基底。当然,对女山麻粒岩包体的成因探讨还有待于微量元素地球化学及同位素年代学的深入研究。

致谢: 南京大学地球科学系的徐夕生教授提供了部分样品,孙涛博士协助了野外工作,中国地震局地质研究所的林传勇研究员提供了部分资料,谨此致谢。

References

- Amundsen HEF, Griffin WL & O'Reilly SY. 1987. The lower crust and upper mantle beneath northwestern Spitsbergen: evidence from xenoliths and geophysics. *Tectonophysics*, 139: 169–185
- Bhattacharyya C. 1971. An evaluation of the chemical distinctions between igneous and metamorphic orthopyroxenes. *Amer. Mineral.*, 56: 499–506
- Chen DG, Zhi XC, Li BX, Wang YX & Yang JD. 1997. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei province. *Geochimica*, 26(1): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Chen SH, O'Reilly SY, Zhou XH, Griffin WL, Zhang GH, Sun M, Feng JL, Zhang M. 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: evidence from xenoliths. *Lithos*, 56: 267–301
- Chen SH, Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Feng JL & Xie MZ. 1998. Petrological investigations on the granulite xenoliths from Hannuoba basalts, northern Sino-Korean craton. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 366–380 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC & Liu RX. 1996. The high-temperature granulite xenoliths in Hannuoba basalt. *Chin. Sci. Bull.* 41, 235–238 (in Chinese)
- Fan QC, Liu RX, Li HM, Li N, Sui JL & Lin ZR. 1998. Zircon geochronology and rare earth element geochemistry of granulite xenoliths from Hannuoba. *Chin. Sci. Bull.*, 43: 133–137 (in Chinese)
- Fan WM & Menzies MA. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171–180
- Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY *et al.*. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M. F., Chuang, S. L., Lo, C. H., *et al.* (editors), *Mantle dynamics and plate interactions in east Asia*. American Geophysical Union, *Geodynamics series* 27: 107–126
- Guo JH, Zhai MG, Li YG & Yan YH. 1998. Contrasting metamorphic *P-T* paths of Archaean high-pressure granulites from the North China craton: metamorphism and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 430–448 (in Chinese with English abstract)
- Hölttä P, Huhma H, Mänttari I, Peltonen P & Juhanaja J. 2000. Petrology and geochemistry of mafic granulite xenoliths from the Lahtojoki kimberlite pipe, eastern Finland. *Lithos*, 51: 109–133
- Huang XL, Xu YG, Chu XL, Zhang HX & Liu CQ. 2001. Geochemical comparative studies of some granulite terranes and granulite xenoliths from North China craton. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 318–328 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL. 1997. The metamorphic reaction and water activity of basic granulite in the Datong-Huaian region. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 27–43 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Jin SY, Hu SH, Sun M, Zhao ZB, Feng JL. 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China Craton: implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65: 2589–2604
- McCarthy TC & Patiño Douce AE. 1998. Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's – anorthite (SCAn) geobarometer. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 675–686
- Menzies MA, Fan W & Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard HM *et al.* (eds.). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*, Geological Society Special Publication No. 76, 71–81
- Newton RC & Perkins D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *American Mineralogist*, 67: 203–222
- O'Reilly SY & Griffin WL. 1985. A xenolith-derived geotherm for southeastern Australia and its geological implications. *Tectonophysics*, 111: 41–63
- Platt JP, Soto JI, Whitehouse MJ, Hurford AJ & Kelley SP. 1998. Thermal evolution, rate of exhumation, and tectonic significance of metamorphic rocks from the floor of the Alboran extensional basin, western Mediterranean. *Tectonics*, 17: 671–689
- Rudnick RL. 1992. Xenoliths-samples of the lower continental crust. In: Fountain D. M. *et al.* (Editors), *Continental Lower Crust*. Elsevier, Amsterdam, pp269–316
- Shi LB, Lin CY, Chen XD & Han XL. 2000. A xenolith-derived geotherm for the lower crust and upper mantle beneath Hannuoba area, Hebei province, China and its geologic implications. *Seismology and Geology*, 22(1): 37–46 (in Chinese with English abstract)
- Wang LS, Li C, Shi YS & Wang YH. 1995. Distributions of geotemperature and terrestrial heat flow density in lower Yangtze area. *Acta Geophysica Sinica*, 38(4): 469–476 (in Chinese with English abstract)
- Wells PRA. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62: 129–139
- Wood BJ & Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 46: 1–15
- Xie MZ, Feng JL, Zhang GL, Yuan WM, Zhou XH & Ren SL. 1993. The discovery of granulite xenoliths in Hannuoba basalt, North Hebei, China. *Journal of Hebei College of Geology*, 16(6): 587–592 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhou XM, Huang XL. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere beneath Nüshan, East Central China. In: Flower MFJ *et al.* (Eds.). *Mantle dynamics*

- and plate interactions in east Asia, *Geodynamics Series*, Vol. 27, American Geophysical Union, Washington, DC, 167—196
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL & Zhou XM. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China; an LAM-ICPMS trace element study. *J. Petrology*, 41(1): 111—148
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26A: 747—757
- Xu YG, Fan WM & Lin G. 1995. Lithosphere-asthenosphere interactions: a comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai Area. *Geotectonica et Metallogenia*, 19: 1—13
- Yamamoto H. 1993. Contrasting metamorphic *P-T*-time paths of the Kohistan granulites and tectonics of the western Himalayas. *Journal of the Geological Society*, London, 150: 843—856
- Yu JH & Zhou XM. 1993. Granulite-facies middle-lower crustal xenoliths from Nūshan alkali basalt in northeastern Anhui province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 12(4): 339—351
- Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Chen SH & Feng JL. 1998a. Highly chemical heterogeneity in the lower crust and crust-mantle transitional zone; geochemical evidences from xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei province. *Geochimica*, 27 (2): 153—169 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Chen SH & Feng JL. 1998b. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba Basalts, Hebei Province, and their implications for geologic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (2): 190—197 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SW, Zhang SX, Tang RY. 1988. Interpretation of the Fuliji-Fengxian DSS profile in Xiayangzi region. *Acta Geophysica Sinica*, 6: 637—648 (in Chinese with English abstract)
- Zhi XC, Peng ZC, Chen DG, Sun WD & Yu CJ. 2001a. The osmium isotopic compositions and model age of mantle peridotite xenoliths from Jiangsu-Anhui area and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 11—18 (in Chinese with English abstract)
- Zhi XC, Reisberg L, Pen ZC & Yu CJ. 2001b. Re-Os isotope geochemistry of lithospheric mantle beneath northeastern Yangtze craton; constraint on the origin and evolution of continental lithospheric mantle. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 248—250 (in Chinese with English abstract)
- Zhi XC, Zheng YF, Du AD. 1996. The $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ isotope of Cenozoic basalt and mantle-derived peridotite xenolith from Anhui-Jiangsu area. *Chin. Sci. Bull.*, 41(3): 245—247 (in Chinese)
- Zhou XM, Yu JH & Xu XS. 1992. Discovery and significance of granulite xenoliths in the Nūshan basalt, East China. *Chinese Science Bulletin*, 37: 1730—1734.
- 石岩类包体 Nd, Sr, Pb 同位素成因信息. *地球化学*, 26(1): 1—11
- 陈绍海, 张国辉, 周新华, 孙敏, 冯家麟, 谢温泽. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石学特征. *岩石学报*, 14(3): 366—380
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. *科学通报*, 43(2): 133—137
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 41(3): 235—238
- 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 阎月华. 1998. 华北太古宙高压基性麻粒岩的两类 PT 轨迹及其构造意义: 矿物化学和变质作用研究. *岩石学报*, 14(4): 430—448
- 黄小龙, 徐义刚, 储雪蕾, 张鸿祥, 刘丛强. 2001. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征及对比. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 318—328
- 刘福来. 1997. 怀安-大同一带基性麻粒岩变质反应序列与水活度. *岩石学报*, 13(1): 27—43
- 史兰斌, 林传勇, 陈孝德, 韩秀伶. 2000. 由包体推导的河北汉诺坝下地壳-上地幔地温线及其地质意义. *地震地质*, 22: 37—46
- 王良书, 李成, 施央申, 汪屹华. 1995. 下扬子区地温场和大地热流密度分布. *地球物理学报*, 38(4): 469—476
- 谢温泽, 冯家麟, 张改兰, 袁万明, 周新华, 任胜利. 1993. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现. *河北地质学院学报*, 16(6): 587—592
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 陈绍海, 冯家麟. 1998a. 下地壳及壳幔过渡带化学不均一性—河北汉诺坝地区深源捕虏体元素地球化学证据. *地球化学*, 27(2): 153—169
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 陈绍海, 冯家麟. 1998b. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 14(2): 190—197
- 张四维, 张锁喜, 唐荣余. 1988. 下扬子地区符离集-奉贤地震测深资料解释. *地球物理学报*, 31(6): 637—648
- 支霞臣, 彭子成, 陈道公, 孙卫东, 余春江. 2001a. 苏皖地区幔源橄辉岩捕虏体的钨同位素组成、模式年龄及其意义. *岩石学报*, 17: 11—18
- 支霞臣, Reisberg L, 彭子成, 余春江. 2001b. 扬子克拉通东北缘岩石圈地幔的 Re-Os 同位素地球化学: 大陆岩石圈地幔的形成和演化的制约. *矿物岩石地球化学通报*, 20: 248—250
- 支霞臣, 郑永飞, 杜安道. 1996. 苏皖地区新生代玄武岩和幔源橄辉岩包体的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$. *科学通报*, 41(3): 245—247
- 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(13): 1198—1201.

附中文参考文献

- 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 王银喜, 杨杰东. 1997. 汉诺坝玄武岩中辉