

南岭东段麻粒岩相变质岩的发现及其地质意义*

于津海 周新民 赵蕾 陈小明

YU JinHai, ZHOU XinMin, ZHAO Lei and CHEN XiaoMing

内生金属矿床机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093

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

2003-02-12 收稿, 2003-07-20 改回.

Yu JH, Zhou XM, Zhao L and Chen XM. 2003. Discovery and implications of granulite facies metamorphic rocks in the eastern Nanling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):461-467

Abstract This paper presents the petrologic characteristics of the granulite facies metamorphic rocks found for the first time in the eastern Nanling, South China. Their protoliths are sedimentary rocks based on the mineral assemblages and compositions. Petrogenetic grid and T - P calculations indicate that the peak metamorphism took place at temperature of 750~880°C and pressure of ~1.1 GPa. It is suggested that these surficial sediments were carried into lower crust by some tectonic processes, and underwent granulite facies metamorphism. P - T - t path of isothermal decompression indicates rapid exhumation history, which was likely related with Mesozoic extension. The compositions of the Nanling granulites are evidently different from those of mafic granulite xenoliths in the coastal region of southeastern China, implying that the lower crust components beneath both regions are possibly different. Accordingly, the distinct type of granites in both regions resulted probably from the difference of lower crustal composition.

Key words Granulite facies metamorphic rocks, Eastern Nanling, Lower crustal composition

摘要 本文报道了在南岭东段闽西南中元古代桃溪组变质岩中发现的麻粒岩相变质岩。其矿物组合和化学成分显示这些变质岩的原岩是沉积岩。成岩格子和温压计算限定它们的峰期变质作用发生在750~880°C和1.1 GPa的高温高压条件下,表明这些表壳岩由于构造作用曾经成为下地壳的物质组成,并经历了麻粒岩相变质作用。等温降压的 P - T - t 轨迹指示它们很可能是在中生代伸展构造背景下快速抬升到浅部。这些麻粒岩的成分显然与东南沿海地区发现的基性麻粒岩捕虏体的不同,暗示这两地区下地壳的物质组成可能存在差异,也许这就是造成两个地区花岗岩类型不同的最主要原因。

关键词 麻粒岩相变质岩;南岭东段;下地壳组成

中图法分类号 P588.346

在华南地块几乎没有麻粒岩相变质基底出露的报道,除了扬子西缘(川西)和琼中地区(陆怀鹏等,1999;张业明等,1999),所发现的麻粒岩或麻粒岩相变质岩都是以包体的形式存在于玄武岩中(于津海等,2002,2003)或花岗岩中(陈斌等,1994;杜杨松等,1999)。在华南出露的变质地体的变质程度通常只达到低角闪岩相,如浙南的八都群、闽北的麻源群、闽西的天井坪组、福建沿海的澳角群、赣南的寻坞群以及赣北的星子群(江西地矿局,1985;胡雄建等,1991;Zhao *et al.*, 1999;庄建民等,2000);局部可达高角闪岩相(陈斌,1997)。低角闪岩相变质岩一般形成于中地壳(15~20 km深部),不能代表下地壳的物质,也不可能是花岗质岩浆的源

区物质。本研究第一次在南岭东部发现了确凿证据的麻粒岩相变质岩,这为研究华南东部下地壳的组成以及花岗岩源区特征提供了最直接的证据。

1 域地质概况

南岭东段的闽西南地区位于武夷山加里东褶皱带的南端,出露各时代(中元古代-晚中生代)的沉积岩或变质岩以及以中生代为主的花岗岩(图1)。区内主体构造是NE-NNE

* 本研究由国家自然科学基金重点项目(No. 40132010,40273018)资助

第一作者简介:于津海,男,1962年9月出生,博士,副教授,岩石学专业, E-mail: jhyu@nju.edu.cn

向,但是在北部的楼子坝和南部的澄江地区,地层和岩石片理的走向大多呈 NW-NWW 向,这样围绕红山岩体的变质岩的片理大致呈环状分布(图 1),因此,该地区的岩石单元组合被认为是一个变质核杂岩(张顺金等,2000)。红山花岗岩体以及中元古代-早古生代的变质岩构成了变质核杂岩的内核,分布于外围的与下伏地层不整合接触的泥盆纪等沉积岩被认为是流变层上的盖层。核杂岩南部基底变质岩主要是中元古代桃溪(岩)组,而北部基底是由震旦纪-寒武纪的浅

变质岩组成。本文研究的样品采自核杂岩南部的桃溪(岩)组(图 1)。桃溪(岩)组被分为上下两段,下段以变粒岩为主,上段以各种片岩为主(庄建民等,2000)。实际上,许多所谓的变粒岩以及一部分片岩都是片麻岩,以往的研究确定这些变质岩的变质程度是低角闪岩相(庄建民等,2000)。本次研究采集到的石榴矽线黑云二长片麻岩和黑云透辉斜长片麻岩赋存于桃溪(岩)组的下段。

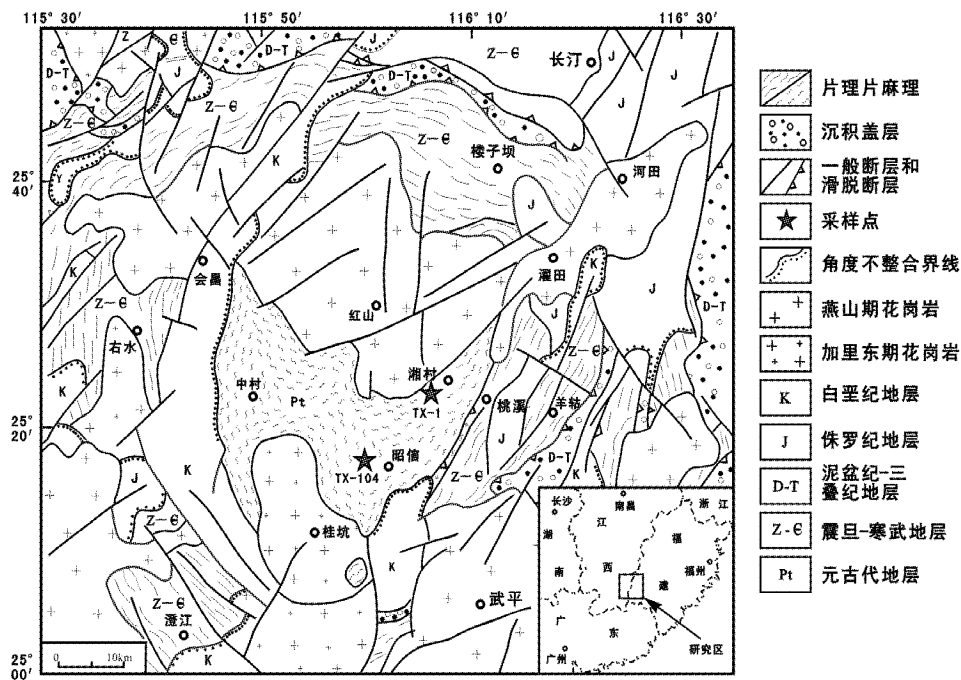


图 1 闽西南桃溪地区地质简图(据张顺金等(2000)修改)

Fig. 1 Sketch geological map of Taoxi region of southwestern Fujian province (after Zhang *et al.*, 2000)

2 样品基本特征

石榴矽线黑云二长片麻岩(TX-104)呈中粒柱状鳞片粒状变晶结构,片麻状构造;矿物组合是柱状矽线石(5%) + 粒状石榴子石(4%) + 钾长石(30%) + 斜长石(20%) + 黑云母(6%) + 石英(33%) + 磁铁矿。柱状矽线石常分布于黑云母附近并伴随有磁铁矿(图 2A),说明矽线石的形成与黑云母的分解有关。另一方面,岩石中几乎不含原生白云母(极少量的白云母是后期退变质作用形成),且富含钾长石,表明岩石可能发生了白云母 + 石英 = 矽线石 + 钾长石 + H₂O 的变质反应(>650°C)。岩石中的钾长石主要是条纹正长石(图 2B),部分斜长石中也出现钾长石条纹(即反条纹长石)(图 2C)。所有这些都说明岩石曾经经历了非常高温的变质作用。特别有意义的是除了矽线石,岩石中还存在蓝晶

石,显微结构特征表明蓝晶石呈残留状(图 2D),或被矽线石穿插(图 2E),暗示发生了降压作用。石榴子石周围的尖晶石冠状边也指示了降压过程(图 2F)。岩石最后还受到了低温退变质作用的影响,表现在一部分正长石转变成了微斜长石,正长石和斜长石的出溶,石榴子石被绿泥石交代以及白云母交代长石。

黑云透辉斜长片麻岩(TX-1)呈细粒鳞片粒状变晶结构,弱片麻状构造;矿物组合是透辉石 + 黑云母 + 斜长石 + 石英 + 钾长石;退变矿物包括绿泥石、白云母、方解石和榍石。透辉石呈短柱状-粒状,弱定向分布,周边有时被绿泥石交代包裹(图 2G);斜长石呈板柱状-粒状,双晶发育清晰,消光角 >30°,有弱的绢云母化(图 2H);黑云母为细小鳞片状,常退变质为绿泥石。岩石中含有较多的石英,他形粒状。化学分析显示该岩石以富 SiO₂(66.4%)、CaO(8.4%),低 Al₂O₃(11.5%)、K₂O(2.58%)、Na₂O(0.64%)为特征,原岩很可能是一种富 Ca 杂砂岩。

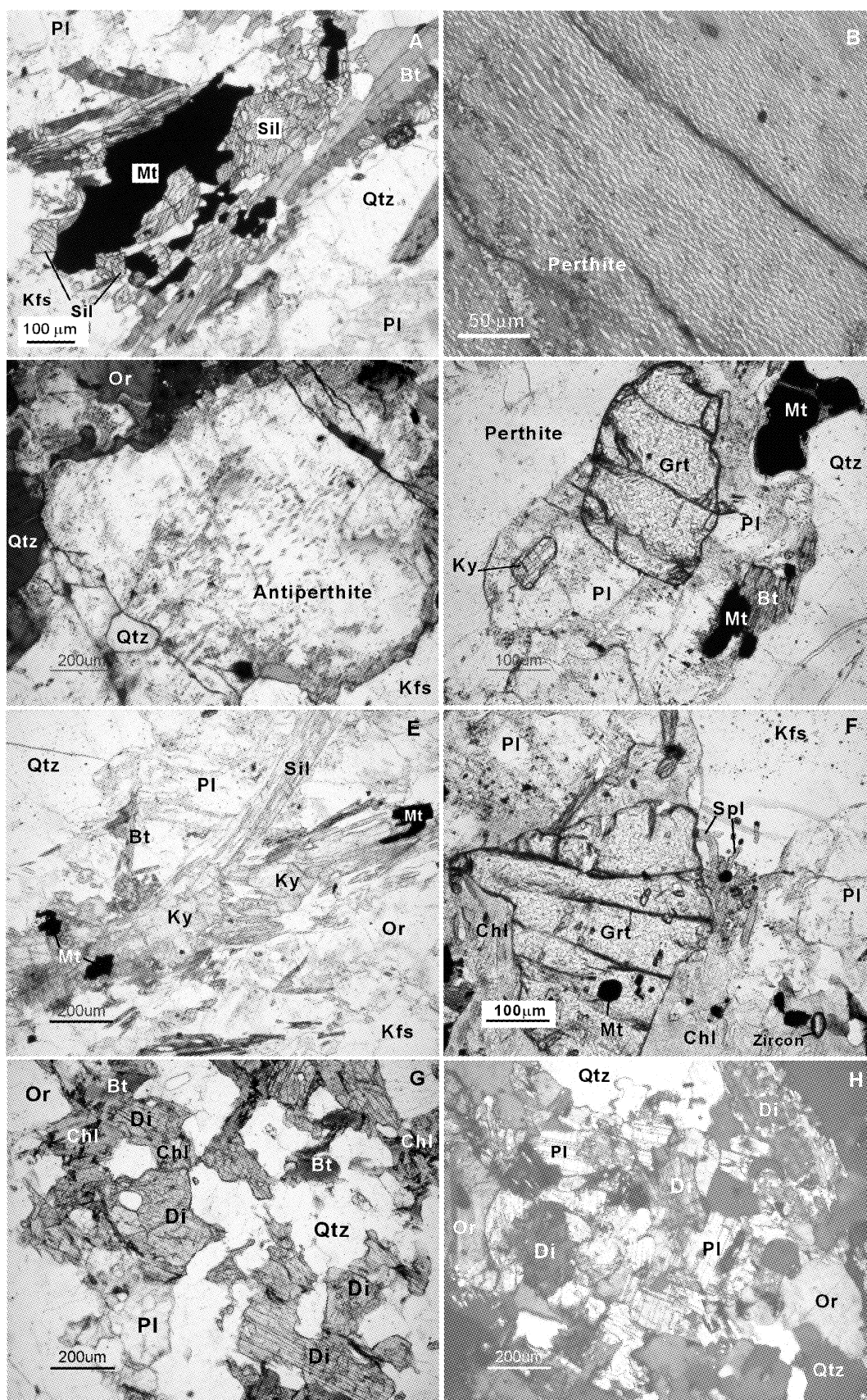


图2 闽西南麻粒岩相变质岩的显微照片

A-F 是样品 TX-104, G-H 是样品 TX-1; B、C 和 H 是在正交镜下, 其它在单偏光下; A. 柱状矽线石与黑云母和磁铁矿的关系; B. 条纹正长石的出溶条纹; C. 反条纹长石, 条纹主要分布于中部, 边部富 Na; D. 残留的蓝晶石被斜长石包裹; E. 柱状矽线石穿插于板柱状蓝晶石中, 蓝晶石呈残留状; F. 石榴子石边部的冠状尖晶石, 石榴子石周边还被绿泥石交代; G. 透辉石弱定向; H. 解理清晰的斜长石(中部)和透辉石被绿泥石包裹(右上)。比例尺见左下线段。照片及图 3 中的矿物代号根据 Kretz (1983)。

Fig. 2 Micro-photographs of granulite facies metamorphic rocks from southwestern Fujian Province

A-F are for sample TX-104 and G-H for TX-1. B, C and H are under crossed polars and the others in plane polarized light. A. relationship of sillimanite with kyanite and magnetite; B. exsolution texture of orthoclase; C. exsolution lamellae in inner portion of antiperthite and Na-rich plagioclase on the rim; D. relict kyanite in plagioclase; E. prismatic sillimanite penetrating and cutting residual kyanite; F. spinel coronae on the rim of garnet and chlorite replacing garnet; G. slightly directional diopside; H. clear cleavage of Ca-rich plagioclase (center) and diopside surrounded by chlorite (upper-right). Scale bar at bottom-left is from 0.05 ~ 0.2 mm. Mineral abbreviations in photographs and Fig. 3 are after Kretz (1983).

3 矿物成分

两个样品的电子探针分析是由于津海和陈小明在南京大学地球科学系国家重点实验室完成的。分析结果表明石榴矽线片麻岩的石榴子石成分均一, 没有明显的环带, 属于富 Mg 铁铝榴石 ($\text{Alm}_{0.63}\text{Py}_{0.24}\text{Sps}_{0.10}\text{Gro}_{0.03}$)。石榴子石含有较高的 MnO (4.23%), 这在高级变质岩的石榴子石中很少见的。这可能一方面与全岩相对富 MnO (0.15%) 相关(本区其它云母片岩的 MnO 为 0.03% ~ 0.09%), 另一方面, 因为岩石中石榴子石和黑云母等镁铁质矿物都很少, 而石榴子石对 Mn 又具有强烈的相容性, 所以造成 Mn 在石榴子石中的富集。黑云母属于 Mg 质黑云母 ($\text{Mg}^{\#} = 0.48$), 特别是这些黑云母富含 TiO_2 (4.07% ~ 4.47%, 表 1), 明显高于角闪岩相和绿片岩相变质岩中的黑云母, 而相似于麻粒岩相变质岩中的黑云母 (Indares & Martignole, 1985)。由于条纹正长石出溶作用的影响, 钾长石中钠长石 (Ab) 组分明显降低, 但是一些出溶不明显的正长石中, Ab 可达 23% (表 1)。斜长石为更长石 ($\text{An} = 16.2 \sim 17.7$), 环带不发育, 只是在边部 An 值略有降低 (An_{12}), 这可能与后期的退变质作用有关。

透辉斜长片麻岩中单斜辉石是典型的次透辉石 ($\text{Wo}_{0.49}\text{En}_{0.34}\text{Fs}_{0.17}$)。与华南基性麻粒岩捕虏体的单斜辉石相比(于津海等, 2002), 本样品的次透辉石以富 CaO、低 Al_2O_3 、 Na_2O 和 TiO_2 为特征(表 1)。本样品的斜长石也同样富 CaO, 其 An 组分高达 78.7 ~ 83.0 (表 1), 这显然与全岩的富 CaO (8.43%) 相关。因为在该岩石中不存在其它富 Ca 矿物, 如角闪石和绿帘石等, 所以全岩的 CaO 都分配到单斜辉石和斜长石中, 造成了两矿物都明显富 Ca。与石榴矽线片麻岩相似, 本样品的黑云母也属于富 Ti 的 Mg 质黑云母 ($\text{Mg}^{\#} = 0.53$, $\text{TiO}_2 = 2.66\% \sim 3.74\%$)。

4 形成条件

根据矿物组合和岩相学特征结合相图(成岩格子), 样品 TX-104 和 TX-1 都应该形成于高角闪岩相以上的变质条件下(图 3, B 区), 样品 TX-104 曾经降压到 C 区(形成尖晶

石), 并最后降温到 D 区(退变组合 $\text{Chl} + \text{Mic} + \text{Ms} + \text{Pl}$)。为了更准确限定变质作用的形成条件, 本文利用了多种温度计和压力计进行温压估算。由于黑云母富 Ti, 本文选用 Indares & Martignole (1985) 的对 Ti 校正的石榴子石-黑云母 (Grt-Bt) 温度计, 获得了石榴矽线片麻岩的形成温度是 840 ~ 870°C (如设 $P = 0.5 \sim 1.0\text{GPa}$)。实际上, Thompson (1976) 和 Ganguly & Saxena (1984) 的 Grt-Bt 温度计同样产生了 830 ~ 850°C 的高温。将斜长石与出溶不明显的正长石结合, 利用二长石 (Pl-Kfs) 温度计 (Stomer, 1975; Whitney *et al.*, 1977) 获得的温度在 600 ~ 740°C 之间(如设 $P = 0.5 \sim 1.0\text{GPa}$), 将斜长石边部与钾长石出溶条纹结合产生的二长石温度是 380 ~ 420°C (设 $P = 0.3\text{GPa}$)。根据石榴矽线片麻岩的矿物组合, 石榴子石-斜长石-矽线石-石英 (grt-pl-sill-qtz) 压力计被用来计算变质的压力。不同学者标定的 grt-pl-sill-qtz 压力计产生了相同的压力计算值 (1.11 ~ 1.15GPa)。显然, 这些温压计算值与成岩格子限定的温压范围是一致的。

单斜辉石-黑云母 (cpx-bt) 温度计 (Perchuk *et al.*, 1985) 和 pl-kfs 温度计被用来限定样品 TX-1 的形成温度。Cpx-Bt 温度计产生的温度是 730 ~ 770°C, 而 pl-kfs 温度计获得的温度在 750 ~ 830°C 之间。考虑到石榴矽线片麻岩中正长石的出溶作用, 实际温度应高于二长温度计所估计的 (> 660 ~ 740°C)。这样, 所有温压估算和岩相学特征都表明这两个岩石曾经经历了麻粒岩相的变质作用, 而且原始形成压力可能在 1.1GPa 以上(蓝晶石稳定域), 即 35km 以下的下地壳。

5 结论和地质意义

上述的岩相学特征和温压计算指示石榴矽线二长片麻岩和黑云透辉斜长片麻岩都受到了麻粒岩相变质作用。其中石榴矽线片麻岩的峰期变质的温度为 830 ~ 880°C, 压力达 1.1GPa (甚至更高); 而透辉斜长片麻岩的形成温度是 750 ~ 830°C (1.0GPa)。岩石后期经历了绿片岩相的退变质作用, 分别形成了绿泥石 + 白云母 + 微斜长石 + 低 An 斜长石和绿泥石 + 白云母 + 方解石 + 楣石的矿物组合。而样品 TX-104 中石榴子石边部的冠状尖晶石指示岩石曾等温降压至图 3C 区 (780 ~ 870°C, 0.2 ~ 0.4GPa)。这样峰期后的变质作用构成了一个先等温降压后等压降温的顺时针 P - T - t 轨迹。

表1 闽西南麻粒岩相变质岩的矿物成分和温压估计

Table 1 Mineral compositions and *P-T* estimations of the granulites of SW Fujian

样品号 矿物名称	TX-104										TX-1			
	Ky	Grt	Bt	Pl-c	Or	Pl-r	Mic-e	Sil	Ms	Chl	Di	Bt	Pl	Kf
SiO ₂	36.85	37.13	35.50	64.58	64.31	64.67	65.37	36.33	46.17	26.78	50.42	37.25	47.42	63.20
TiO ₂	0.01	0.04	4.26	0.01	0.04	0.02	0.00	0.04	0.00	0.66	0.07	3.25	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	62.18	22.97	18.97	22.05	19.46	21.57	19.09	62.14	35.88	19.00	1.19	16.19	33.06	19.48
FeO	1.04	28.34	18.75	0.01	0.00	0.17	0.02	0.93	2.25	25.80	10.59	17.99	0.04	0.00
MnO	0.01	4.23	0.21	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.71	0.44	0.26	0.08	0.03
MgO	0.00	6.14	9.70	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	1.01	10.81	12.17	11.44	0.01	0.00
CaO	0.02	1.07	0.07	3.51	0.16	2.56	0.08	0.00	0.01	0.16	24.56	0.01	16.81	0.06
Na ₂ O	0.02	0.03	0.11	9.39	2.52	10.17	0.66	0.00	0.32	0.00	0.22	0.06	2.14	0.75
K ₂ O	0.01	0.00	8.71	0.18	12.66	0.25	14.78	0.00	9.73	0.14	0.01	9.36	0.05	15.50
Total	100.14	99.95	96.23	99.73	99.15	99.44	100.06	99.50	95.38	84.05	99.68	95.80	99.64	99.03
Mg [#]		0.28	0.48						0.44	0.43	0.67	0.53		
An, Wo, Alm		63.08		16.9	0.8	12.0	0.4				49.4		81.0	0.3
Ab, En, Pyr		24.34		82.0	23.0	86.5	6.3				34.0		18.7	6.8
Or, Fs, Sps		9.53		1.1	76.2	1.4	93.2				16.6		0.3	92.8
地质温压计	Grt-Bt			Or ~ Pl-c			Mic-e ~ Pl-r		Grt-Sil-Pl-Qtz		Cpx-Bt		Kfs-Pl	
	I&M	TH	G&S	ST	W&S	ST	W&S	GH	PE	PE	ST	W&S		
P (GPa)	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.3	0.3	1.15	1.10				0.5 ~ 1.0	
T (°C)	878	853	835	663	743	375	422	850	850	730 ~ 780	751 ~ 821	760 ~ 827		

* 电子探针分析仪为 JXA8800 型, 测试条件是加速电压 15kV, 束电流 10^{-8} A, 电子束直径 $<1\mu\text{m}$ 。表中矿物代号同 Kretz (1983), Mic-e 为斜长石中的钾长石出溶条纹。An, Ab, Or; Wo, En, Fs 和 Alm, Pyr, Sps 分别对应于长石, 辉石和石榴子石的端元组分。温压计代号的含义 I&M- Indares & Martignole (1985); TH- Thompson (1976); G&S- Ganguly & Saxena (1984); ST- Stormer (1975); W&S- Whitney and Stormer (1977); GH- Ghent (1976); PE- Perchuk *et al.* (1985)。

两个岩石的矿物组合和岩石化学表明它们都是副片麻岩, 这意味着原来形成于地表的这些岩石曾被带入了下地壳深部, 在那里受到了麻粒岩相的变质作用, 在后来的某一地质时期又被抬升到浅部, 并最终剥蚀出露于地表。桃溪组被认为形成于中元古代 (马金清等, 1993), 因此, 它们很可能是在晚元古代晋宁期构造运动中被带到了地壳深部 (造山带根部), 而它们的抬升应该发生于印支-燕山早期, 即伴随桃溪变质核杂岩的形成。从深部到浅部的近于等温降压过程 (图 3, A→C) 以及缺失角闪岩相退变质作用的矿物组合都表明岩石从下地壳到上地壳的抬升是非常快速的, 这与变质核杂岩形成于伸展构造的背景相吻合。

这些麻粒岩相副片麻岩的确定表明至少在南岭东段的下地壳可能是以副变质岩为主, 这与东南沿海下地壳主要是底侵的基性麻粒岩组成不同 (Zhou *et al.*, 2000; Yu *et al.*, 2003)。这种不同很可能是南岭东段 (富含强过铝花岗岩) 与华南沿海 (以准铝-弱过铝 I 型花岗岩为主) 在花岗岩类型

上差异的最主要原因。另一方面, 750 ~ 870°C 的高温暗示这些麻粒岩相变质岩很可能发生过部分熔融。实验显示在高压下 ($>0.4\text{GPa}$) 白云母消失最可能是由部分熔融作用造成的 (Le Breton & Thompson, 1988; Vielzeuf & Holloway, 1988)。Gardien 等 (1995) 在 1.0GPa 压力下的缺水熔融实验也显示二云母片麻岩的固相线是 750°C, 这时白云母也基本消失。而石榴子石和矽线石是在 825°C 时消耗了黑云母和斜长石才形成的。在 900°C 以下, 熔融产生的岩浆是过铝花岗岩, 而残留的是 grt + sil + bt + qtz + pl + kfs, 这一组合与桃溪石榴矽线片麻岩的完全一致。而当温度超过 950°C 时, 将会出现紫苏辉石而钾长石逐渐消失。上述分析说明桃溪石榴矽线片麻岩很可能是低程度 ($<30\%$) 熔融的残留体。这无疑为南岭东段诸多过铝 S 型花岗岩是由变质沉积岩部分熔融形成而不是 I 型花岗岩分离结晶形成的认识提供了有力的证据。

但是, 由于缺少详细的年代学资料和地球化学研究, 目

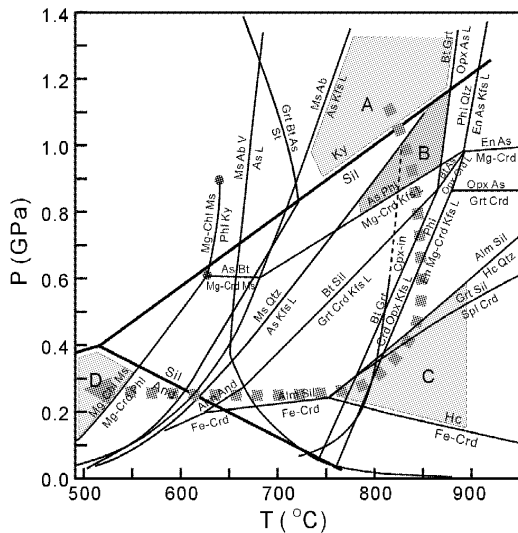


图3 矽线石片麻岩的成岩格子和 P - T - t 轨迹

A. 峰前变质(残留 Ky), B. 峰期变质组合(Sil + Grt + Bt + Or + Pl); C. 等温降压(Grt → Spl); D. 退变质(Chl + Ms + Mic + Na-rich Pl)。基本图根据 Spear *et al.* (1999) 修改而成。

Fig. 3 Petrogenetic grid and P - T - t path of the Taoxi sillimanite gneiss

A. pre-peak metamorphic condition (from relict kyanite); B. peak metamorphism (from assemblage of sil + grt + bt + or + pl); C. post-peak isothermal decompression (garnet to spinel); D. retrograde metamorphism forming chl + ms + mic + Na-rich pl. Basic phase diagram is after Spear *et al.* (1999).

前我们还无法确定这些麻粒岩的形成和抬升历史与华南地壳演化的确切关系,也无法详细讨论它们与附近大量中生代花岗岩的成因联系。这些正是我们将要进行和正在进行的下一步工作的重点。

致谢 作者感谢两位匿名的审稿者对本文提出的修改意见,他们的意见促使作者进一步思考,从而也提高了本文的质量。本次研究的野外工作得到了福建省区域地质调查队陈泽霖先生和庄建民高工以及研究生谢磊的大力支持,在此表示衷心感谢!

References

Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1984. Regional Geology of Jiangxi Province. Beijing: Geological Publishing House, 564 - 601 (in Chinese with English abstract)

Chen Bin and Zhuang Yuxun. 1994. The petrology and petrogenesis of Yunlu charnockite and its granulite inclusion, western Guangdong, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 10 (2): 139 - 149 (in Chinese with English abstract)

Chen Bin. 1997. Petrographic evidences and tectonic significance for two

phases of metamorphism in sillimanite- and garnet-bearing mica schists of Pintan-Dongshan metamorphic zone of eastern Fujian, China. *Acta Petrologica Sinica*, 13 (3): 380 - 394 (in Chinese with English abstract)

- Du Yangsong, Collerson K D, Zhao Jianxin and Pang Baocheng. 1999. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-type granites in the junction of Guangdong and Guangxi provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 309 - 314 (in Chinese with English abstract)
- Ganguly J and Saxena S K. 1984. Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermo-barometry. *Am. Mineral.*, 69: 88 - 97
- Gardien V, Thompson A B, Grujic D and Ulmer P. 1995. Experimental melting of biotite + plagioclase + quartz muscovite assemblages and implications for crustal melting. *J. Geophys. Res.*, 100 (B8): 15581 - 15591
- Ghent E D. 1976. Plagioclase-garnet-Al₂SiO₅-quartz: a potential geobarometer and thermometer. *Am. Mineral.*, 61: 710 - 714
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Kang Hainan, Tong Zhaoxu, Chen Chenghua and Ye Guogui. 1991. Geological features of the Lower Proterozoic Bado Group of southwestern Zhejiang and implications. *Regional Geology of China*, (3): 234 - 240 (in Chinese with English abstract)
- Indares A and Martignole J. 1985. Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies; the influence of Ti and Al in biotite. *Am. Mineral.*, 70: 272 - 278
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 58: 277 - 279
- Le Breton N and Thompson A B. 1988. Fluid-absent (dehydration) melting of biotites in metapelites in the early stages of crustal anatexis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 226 - 237
- Lu Huaipeng, Xu Shijin, Wang Rucheng and Shen Weizhou. 1999. Metamorphism of the Shaba granulites in western Sichuan. *J. Nanjing Univ. (Natural Sciences)*, 35(3): 296 - 302 (in Chinese with English abstract)
- Ma Jinqing and Wang Wenteng. 1993. Basic characteristics and the stratigraphic time of middle and lower Proterozoic metamorphic rocks in the Yongding area, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 12(4): 268 - 279 (in Chinese)
- Perchuk L L, Aranovich L Ya, Podlsskii K K, Lavrant'eva I V, Gerasimov V Yu and Fedkin V V. 1985. Precambrian granulites of the Aldan Shield, eastern Siberia, USSR. *J. Metamorph. Geol.*, 3: 265 - 310
- Spear F S, Kohn M J and Cheney J T. 1999. P - T path from anatectic pelites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 17 - 32
- Stomer J C. 1975. A practical two-feldspar geothermometer. *Am. Mineral.*, 60: 667 - 674
- Thompson A B. 1976. Mineral reactions in pelitic rocks; II. Calculation of some P - T - X (Fe-Mg) phase relations. *Am. J. Sci.*, 276: 425 - 454
- Vielzeuf D and Holloway J R. 1988. Experimental determination of fluid-

- absent melting relations in the pelitic system; consequences for crustal differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98: 257 – 276
- Whitney J A and Storner J C. 1977. The distribution of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ between coexisting microcline and plagioclase and its effect on geothermometric calculations. *Am. Mineral.*, 62: 687 – 691
- Yu Jinhai, Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 2003. Late Mesozoic Crust-Mantle Interaction and Lower Crust Components in South China: A Geochemical Study of Mafic Granulite Xenoliths from Cenozoic Basalts. *Science in China*, 46(5): 447 – 460
- Yu Jinhai, Zhao Lei and Xu Xisheng. 2002. Discovery and implications of granulite facies xenoliths from some Cenozoic basalts, SE China. *Geol. J. China Uni.*, 8(3): 280 – 292 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Shunjin, Huang Changqi, Chen Zhelin, Chen Jinliang and Chao Mingzhi. 2000. Discussion on main features and formation mechanism of the convoluted structures of Taoxi metamorphic core complex in Wuyi Mountains, South China. *Geology of Fujian*, 19(4): 188 – 196 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Yeming, Zhang Renjie, Hu Ning, Zhang Shuhuai and Duan Qifa. 1999. High grade metamorphic complexes in Middle Hailand Island: ages of the Pb-Pb single zircons and their geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 284 – 288 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Guochun and Cawood P A. 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China craton. *Am. J. Sci.*, 299: 309 – 339
- Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269 – 287
- Zhuang Jianmin, Huang Quanzhen, Deng Benzong, Guo Bin and Jie Yujin. 2000. Strata subdivision and petrology of Precambrian metamorphic rocks in Fujian Province. Xiamen: Xiamen University Press, 80 – 90 (in Chinese)
- ### 附中文参考文献
- 陈斌, 庄育勋. 1994. 粤西云炉紫苏花岗岩及其麻粒岩包体的主要特点和成因讨论. *岩石学报*, 10(2): 139 – 149
- 陈斌. 1997. 福建平潭-东山变质带夕线石榴云母片岩中两期变质作用的岩相学证据及其构造意义. *岩石学报*, 13(3): 380 – 393
- 杜杨松, Collerson K D, 赵建新, 庞保成. 1999. 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩包体的特征和成因. *岩石学报*, 15(2): 309 – 314
- 胡雄建, 许金坤, 康海男, 童朝旭, 陈程华, 叶国贵. 1991. 浙西南下元古界八都群的地质特征及其意义. *中国区域地质*, (3): 234 – 240
- 江西省地质矿产局. 1984. 福建省区域地质志. 北京: 地质出版社, 564 – 601
- 陆怀鹏, 徐士进, 王汝成, 沈渭洲. 1999. 川西沙坝麻粒岩原岩特征及变质作用. *南京大学学报(自然科学)*, 35(3): 296 – 302
- 马金清, 王文腾. 1993. 福建永定地区下、中元古界变质岩基本特征及地层时代依据. *福建地质*, 12(4): 268 – 279
- 于津海, 徐夕生, 周新民. 2002. 华南沿海基性麻粒岩捕虏体的地球化学研究和下地壳组成. *中国科学*, 32(5): 384 – 393
- 于津海, 赵蕾, 徐夕生. 2002. 中国东南新生代玄武岩中麻粒岩相捕虏体的新发现及其意义. *高校地质学报*, 8(3): 280 – 292
- 张顺金, 黄昌旗, 陈泽霖, 陈金良, 曹明志. 2000. 华南武夷山区桃溪旋转变质核杂岩构造的基本特征及形成机制探讨. *福建地质*, 19(4): 188 – 196
- 张业明, 张仁杰, 胡宁, 张树淮, 段其发. 1999. 琼中高级变质岩中单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄及其地质意义. *地球学报*, 20(3): 284 – 288
- 庄建民, 黄泉祯, 邓本忠, 郭斌, 揭育金. 2000. 福建省前寒武纪变质岩岩石地层单位划分研究. 厦门: 厦门大学出版社, 80 – 90