

琼中麻粒岩的成因及地质意义

徐德明, 马大铨, 张业明, 谢才富

(宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 对琼中前寒武纪高级变质杂岩中的麻粒岩进行了较系统的岩石学和矿物学研究, 并利用不同的矿物温压计估算了麻粒岩形成的温压条件。结果表明, 本区麻粒岩形成于高温低压(低 p/T) 环境, 属于典型的低压麻粒岩, 其峰期变质温度为 $824 \pm 15^\circ\text{C}$, 压力小于 0.5 GPa, 晚期岩石发生了退变冷却, 终止温度为 705°C 左右, 压力与峰期时的压力相近, 麻粒岩相变质作用具有顺时针的 $p-T$ 轨迹, 早期可能经历了一个缓慢降压升温的过程, 峰期之后的退变则表现出近等压冷却(IBC) 的特点。结合岩石变形作用较弱的特点及区域大地构造背景, 认为琼中低压麻粒岩形成于陆缘拉伸环境, 其可能的机制是, 由于地壳拉伸减薄, 导致软流圈减压上隆产生岩浆, 上覆地壳岩石(包括已经结晶的岩浆) 受到下部岩浆热源的影响而发生进变质, 随后受拉伸扰动的地热梯度向正常地热梯度恢复, 从而形成具有降压升温过程和 IBC 过程的顺时针 $p-T$ 轨迹。

关键词: 低压麻粒岩; $p-T$ 轨迹; 地壳拉伸; 琼中

中图分类号: P588.3; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524-(2007)01-0035-07

Origin and geological significance of granulites from Qiongzong complex

XU De-ming, MA Da-quan, ZHANG Ye-ming and XIE Cai-fu

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, China)

Abstract: Petrological and mineralogical characteristics of the granulites from the Qiongzong complex were studied in this paper, and the temperature and pressure conditions for the formation of the granulites were estimated by a variety of geothermometers and geobarometers. The results show that the granulites belong to typical low-pressure granulites formed in an environment of high-temperature and low-pressure (low p/T), with peak temperature being $824 \pm 15^\circ\text{C}$ and corresponding pressure lower than 0.5 GPa. The granulites were cooled during late retrograde reaction which terminated at the temperature of 705°C , with the corresponding pressure near the peak. Therefore, the $p-T$ path of the low-pressure granulites from the Qiongzong complex was clockwise, composed of two phases of heating during early slow decompression and nearly isobaric cooling (IBC) during late retrograde reaction. Combining characteristics of the $p-T$ path of the granulites with the features of relatively weak deformation and regional tectonic setting, it is considered that the low-pressure granulites from the Qiongzong complex were formed in an environment of crustal extension. The possible mechanism is as follows: because the crust was thinned by extension, the crustal heat flux was raised by the introduction of magmas generated through decompression of the asthenosphere, and then prograde metamorphism took place in the overlying rocks (including crystallized magma); afterwards the geothermal gradient disturbed by extension was restored to normal gradient and, as a result, the clockwise $p-T$ path composed of two phases of heating during decompression.

收稿日期: 2006-02-27; 修订日期: 2006-09-21

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(200013000127)

作者简介: 徐德明(1964-), 男, 汉族, 在职博士, 高级工程师, 岩石、矿物学专业, 现主要从事岩石学、地球化学研究及资源调查评价工作, 电话: 13972021281, 0717-6346504, E-mail: yc502xdm@yahoo.com.cn。

sion and nearly isobaric cooling (IBC) was produced.

Key words: low-pressure granulite; *p-T* path; extension of crust; Qiongzong

分布于琼中上安地区的前寒武纪麻粒岩相变质杂岩,是海南岛迄今发现的唯一达麻粒岩相的变质岩系,它无疑是研究和探讨海南岛乃至整个“华夏古陆”基底组成和演化历史的重要地质实体。马大铨等(1998)、张业明等(1997,1999)分别对这套变质杂岩进行过初步的岩石学和年代学研究,但对岩石成因尚未进行深入探讨,对其中麻粒岩的研究则更少;徐德明等(2006)最近从中鉴别出高Ti和低Ti两类麻粒岩,并通过地球化学特征的对比研究,认为它们的原岩分别为与其相伴生的基性火山岩和浅成基性岩。麻粒岩的形成时代可能与晋宁期浅成基性岩的侵位时代(1000 Ma左右)(谭忠福等,1991;马大铨等,1998)相当,但他们对麻粒岩的形成条件和构造环境仍未进行深入研究。考虑到麻粒岩在了解地球深部物质组成和结构以及探讨陆壳形成和演化方面的重要性(翟明国等,2001),本文拟对琼中麻粒岩的岩石学和矿物学特征进行系统研究,并在此基础上讨论其成因。

1 地质产状和岩石特征

海南岛前寒武纪基底岩石零星分布于琼西地区的抱板—感城一线及琼中地区的黄竹岭—冲卒岭一带,大体上分别沿戈枕断裂和白沙断裂两侧展布(图1),以往常统称为抱板杂岩。一般由3部分组成,即变质表壳岩、长城纪末(1400 Ma左右)侵入的花岗岩、蓟县纪末(1000 Ma左右)形成的酸性和基性侵入体(马大铨等,1998)。其中变质表壳岩称为抱板群,时代归属古中元古代(马大铨等,1998),其下部由变质火山岩组成(戈枕村组),上部为变质碎屑岩及大理岩(峨文岭组)。它们大都经历了绿片岩相—角闪岩相变质,而麻粒岩仅见于琼中上安地区的麻粒岩相变质杂岩中(图1),此外,琼西南冲卒岭地区的斜长角闪岩和斜长片麻岩中有时含有透辉石,个别含紫苏辉石,局部变质条件可能达到或接近于麻粒岩相。

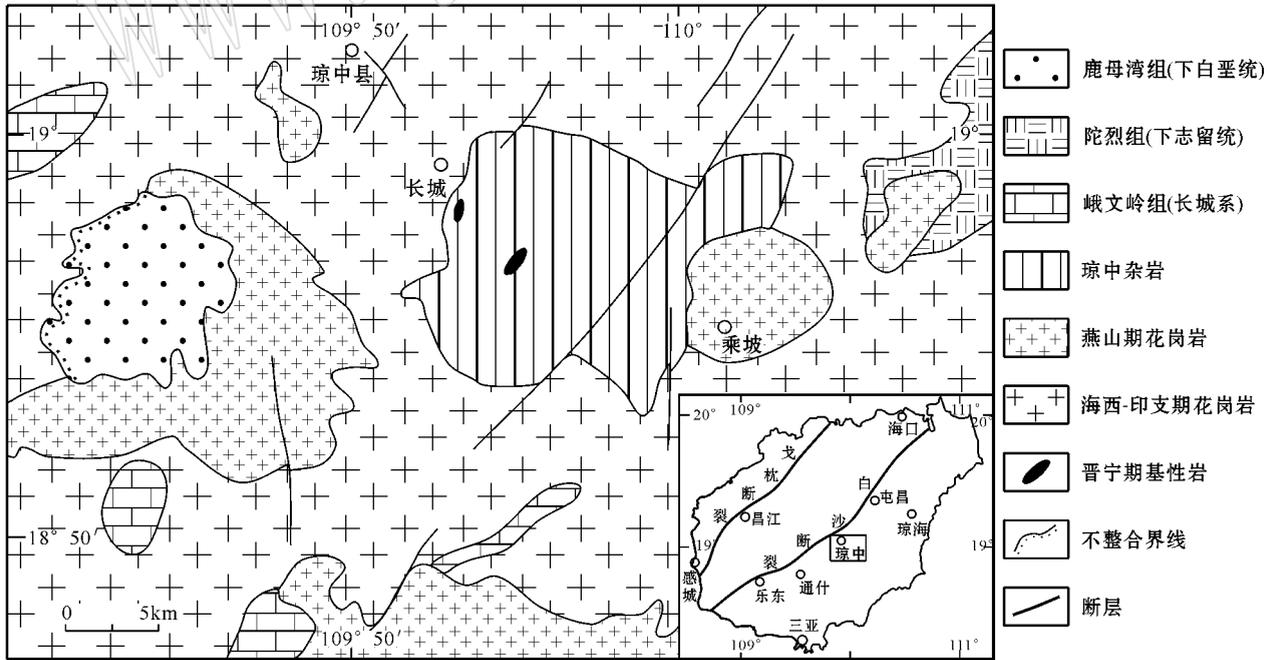


图 1 琼中麻粒岩相变质杂岩区域地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the Qiongzong metamorphic complex in Hainan Island

琼中麻粒岩相变质杂岩主要由斜长片麻岩和斜长角闪岩、麻粒岩、混合岩及紫苏花岗岩等组成。其

中以斜长片麻岩和斜长角闪岩为主,除少数切割片麻理的斜长角闪岩(原岩为后期基性脉岩)外,一般认为它们可以和抱板群戈枕村组对比(马大铨等,1998),紫苏花岗岩呈脉状或透镜状分布于片麻岩中,厚一般为数米,最大出露地段宽约120 m,混合岩化作用主要表现为钾质交代和钾质花岗岩脉的穿

插,麻粒岩呈孤岛状残留体产于黑云(角闪)斜长片麻岩中,或以包体形式存在于紫苏花岗岩中,主要岩石类型为黑云二辉斜长麻粒岩和黑云紫苏麻粒岩。 SiO_2 含量为48.70%~51.34%,属基性麻粒岩。

琼中麻粒岩具细粒花岗变晶结构(图2a),块状或弱片麻状构造。主要矿物成分为:斜长石(中、拉

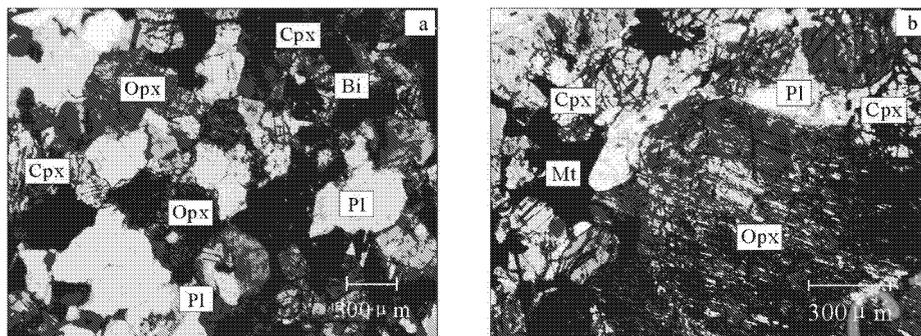


图 2 琼中麻粒岩的显微结构特征

Fig. 2 Microstructure of the granulites from the Qiongzong complex

a—黑云二辉斜长麻粒岩,由斜长石、斜方辉石、单斜辉石及少量黑云母组成,细粒花岗变晶结构,样品1650-2;b—麻粒岩中的斜方辉石含单斜辉石出溶叶片并具单斜辉石、斜长石、磁铁矿环边,样品B326;Opx—斜方辉石,Cpx—单斜辉石,Pl—斜长石,Bi—黑云母,Mt—磁铁矿
a—biotite two-pyroxene granulite consisting of plagioclase, orthopyroxene, clinopyroxene and few of biotites, with granoblastic texture, sample 1650-2;b—orthopyroxene contained fine exsolution of clinopyroxene lamellae and rimed by clinopyroxene, plagioclase and magnetite, sample B326;
Opx—orthopyroxene, Cpx—clinopyroxene, Pl—plagioclase, Bi—biotite, Mt—magnetite

长石(45%~60%)斜方辉石(20%~30%)单斜辉石(0~12%)黑云母(5%~15%)角闪石(0~5%)石英(2%~5%)副矿物有磁铁矿、磷灰石等。斜长石一般为他形粒状,少数为半自形板状,粒径0.2~1.2 mm,斜长石中有时可见乳滴状钾长石嵌晶,辉石多为他形-半自形柱粒状,粒径0.3~1.1 mm,颗粒较粗的斜方辉石常具单斜辉石、斜长石、磁铁矿环边,其内部有时可见单斜辉石出溶叶片(图2b);黑云母呈棕红色,多为半自形叶片状,片长0.3~0.8 mm,具弱定向,其含量与斜方辉石含量互为消长,角闪石和石英多为填隙状,粒径较小,一般为0.4 mm左右。岩石常发生退变质,此时黑云母和角闪石明显增多,有时透辉石也显著增加。

2 矿物化学成分特征

2.1 斜方辉石

琼中麻粒岩中斜方辉石的化学成分列于表1。其中 SiO_2 含量变化较小, FeO^* 含量变化较大,并与 MgO 含量之间呈负相关; Al_2O_3 含量很低,明显低于印度马德拉斯地区(Weaver *et al.*, 1978)以及中国

冀东迁西、内蒙古集宁、山东沂水等地基性麻粒岩中该值(沈其韩等,1992,2000),而与新疆西南天山木扎尔特低压基性麻粒岩的类似(李强等,2004)。本区斜方辉石的 $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值为45~58,属紫苏辉石-铁紫苏辉石;在 $\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 对 Al_2O_3 图解(Bhattacharyya, 1971)上,都落入变质成因区(图3); Al^{VI} 值几乎都为0,按照 Al^{VI} 值随压力增大而增大的规律(沈其韩等,1992),反映其形成压力较低,这与该区麻粒岩不含石榴石等高压矿物是一致的。样品B334具有成分环带,其核部成分中含有少量的 Al^{VI} ,可能代表了早期升温阶段的成分特征,边部 SiO_2 、 MgO 含量增高,而 Al_2O_3 、 TiO_2 含量明显降低,总体上与其他样品类似,表明峰期压力已有所下降。

2.2 单斜辉石

本区麻粒岩中单斜辉石的 Al_2O_3 含量也较低,但比共生斜方辉石的要高, Al^{IV} 大于 Al^{VI} ; Na_2O 含量较低, CaO 含量较高(表1), $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值为59~71,属透辉石-次透辉石。在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 图解(张儒瑗等,1983)上,都落入变质钙质辉石区(图4)。实验证明与斜方辉石平衡共存的单斜辉石的固

表 1 琼中麻粒岩矿物电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Microprobe analyses of minerals of granulites from the Qiongzong complex

矿物	单斜辉石			斜方辉石						黑云母				角闪石	
	B326a	B326b	B332	B323	B326a	B326b	B332	B334 中心→边缘		B323	B326b	B332	B334	B332	B334
SiO ₂	50.27	50.63	51.29	51.09	49.33	50.22	50.78	49.25	51.07	36.43	37.16	36.89	35.96	48.99	44.26
TiO ₂	0.25	0.31	0.27	0.03	0.16	0.07	0.05	0.22	0.18	5.03	5.37	4.30	4.42	0.95	1.95
Al ₂ O ₃	1.55	1.15	1.10	0.72	0.68	0.64	0.57	1.54	0.45	13.88	13.33	13.54	13.88	5.68	9.60
FeO*	12.86	12.78	10.93	26.71	30.60	32.03	28.67	29.50	30.52	17.21	17.75	15.12	17.51	12.57	15.50
MnO	0.34	0.35	0.53	0.59	0.69	0.51	1.00	0.86	0.89	0.08	0.07	0.32	0.07	0.43	0.18
MgO	11.58	11.55	12.62	19.23	16.14	15.78	18.19	16.33	17.06	12.50	12.53	14.09	12.36	14.76	11.30
CaO	22.66	22.66	22.42	0.92	1.04	1.01	0.97	1.03	0.97	0.14	0.30	0.16	0.22	12.11	12.05
Na ₂ O	0.38	0.46	0.07	0.08	0.20	0.07	0.16	0.21	0.25	0.17	0.22	0.41	0.29	0.92	1.71
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	10.03	10.20	10.97	10.07	0.60	1.21
Total	99.89	99.91	99.23	99.37	98.85	100.33	100.42	98.94	101.39	95.47	96.93	95.80	94.78	97.01	97.76
	O=6			O=6						O=11				O=23	
Si	1.926	1.939	1.955	1.964	1.952	1.962	1.956	1.936	1.962	2.768	2.789	2.786	2.763	7.1962	6.6222
Al ^{IV}	0.070	0.052	0.045	0.033	0.032	0.029	0.026	0.064	0.020	1.232	1.179	1.205	1.237	0.804	1.378
Al ^{VI}	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.011	0.000	0.000	0.020	0.181	0.315
Ti	0.007	0.009	0.008	0.001	0.005	0.002	0.001	0.007	0.005	0.287	0.303	0.244	0.255	0.105	0.2194
Fe ³⁺	0.136	0.131	0.046	0.064	0.106	0.071	0.109	0.088	0.096	0.000	0.000	0.000	0.000	0.401	0.060
Fe ²⁺	0.271	0.274	0.301	0.790	0.898	0.970	0.806	0.875	0.877	1.093	1.114	0.955	1.125	1.130	1.877
Mn	0.011	0.011	0.017	0.019	0.023	0.017	0.033	0.029	0.029	0.005	0.004	0.020	0.005	0.0535	0.0228
Mg	0.661	0.659	0.717	1.102	0.952	0.919	1.044	0.957	0.977	1.416	1.402	1.586	1.416	3.2323	2.5205
Ca	0.930	0.930	0.915	0.038	0.044	0.042	0.040	0.043	0.040	0.011	0.024	0.013	0.018	1.9057	1.9315
Na	0.028	0.034	0.005	0.006	0.015	0.005	0.012	0.016	0.019	0.025	0.032	0.060	0.043	0.262	0.496
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.972	0.976	1.057	0.987	0.1124	0.2309

样品由北京大学现代分析测试中心分析, Fe³⁺、Fe²⁺按电价差法计算。

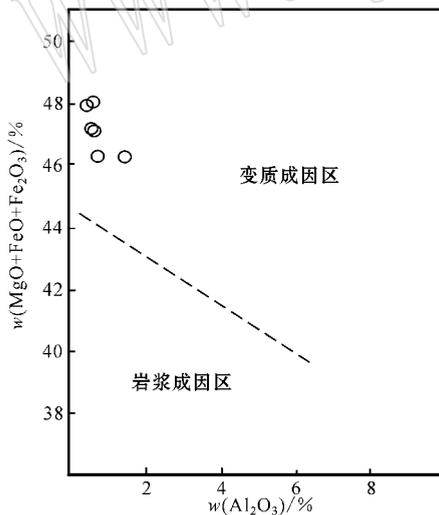


图 3 斜方辉石的 $MgO + FeO + Fe_2O_3 - Al_2O_3$ 图解
(底图据 Bhattacharyya, 1971)

Fig. 3 $MgO + FeO + Fe_2O_3$ versus Al_2O_3 diagram of orthopyroxene (base map after Bhattacharyya, 1971)

溶性随温度升高而增大,在低于 1385°C 的条件下,压力对其中 CaO 含量的影响很小(Davis *et al.*, 1966),但硬玉组分(Na、Al^{VI})随压力增大而增加。本

区麻粒岩中单斜辉石的 CaO 含量略高于冀东迁西、内蒙集宁、山东沂水等地基性麻粒岩的(沈其韩等, 1992 2000),而与印度马德拉斯的相近(Weaver *et al.*, 1978),但几乎都不含硬玉组分,这表明它们形成于较低的 p/T 环境。

2.3 角闪石

本区麻粒岩中角闪石的化学成分除 CaO 含量较稳定外,其他氧化物的含量均有明显变化(表 1),总体上 Al₂O₃、FeO* 含量较低,而 MgO 含量较高。两个样品的 Ca + Na 值均大于 1.34,而 Na 值均小于 0.67,按 Leake(1978)的分类,都属钙质角闪石。在 Ti - Al^{IV} 图解上(图略),它们分别位于角闪岩相区和麻粒岩相区,其中样品 B332 的 TiO₂、Na₂O 和 K₂O 含量明显低于样品 B334,前者可能代表了退变质阶段的成分特征,根据 Al^{IV} - Si 变异图(Rasse, 1974)推算的压力都小于 0.5 GPa(低压型)。

2.4 黑云母

本区麻粒岩中的黑云母呈特征鲜明的棕红色,与角闪岩相或绿片岩相中的黑云母(一般为棕黄色、褐色)有明显区别,其化学成分列于表 1。与印度马

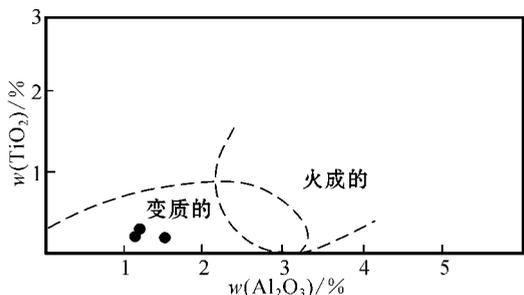


图 4 单斜辉石的 $Al_2O_3 - TiO_2$ 图解(底图据 Vejnár, 1975 转引自张儒媛等, 1983)

Fig. 4 Al_2O_3 versus TiO_2 diagram of clinopyroxene (base map after Vejnár, 1975 quoted from Zhang Ruyuan *et al.*, 1983)

德拉斯(Weaver *et al.*, 1978)以及中国冀东迁西、内蒙古集宁、山东沂水等地基性麻粒岩(沈其韩等, 1992 2000)相比, 本区黑云母的 TiO_2 、 MgO 、 K_2O 含量较高, 而 Al_2O_3 、 FeO 、 Na_2O 含量较低。上述成分通常除受原岩成分和共生矿物影响之外, 还随变质程度的高低而变化, 其中 Ti 含量往往随变质程度的增高而增加, Al^{VI} 含量随温度降低或压力升高而增大(张儒媛等, 1983)。与新疆西南天山木扎尔特低压基性麻粒岩相比, 本区黑云母的 Ti 含量明显偏高, Al^{VI} 含量明显偏低, 表明本区黑云母要比木扎尔特低压基性麻粒岩的形成温度(681~705℃)高而压力(0.54~0.58 GPa)(李强等, 2004)低, 这与辉石反映的低 p/T 环境及岩石中角闪石的含量低甚至完全消失相一致。

3 麻粒岩的成因

3.1 麻粒岩相变质作用的温压条件

利用不同的共生矿物对计算麻粒岩的结晶温度, 结果列于表 2 和表 3。用 Wood 等(1973)及 Wells(1977)二辉石温度计估算的温度分别为 809~839℃(平均 824℃) 及 850~870℃(平均 860℃), 其中

Wood 等(1973)方法得到的结果与 Pattison 等(2003)重新校正的一些世界著名麻粒岩地体中基性麻粒岩的矿物结晶温度(平均 $816 \pm 12^\circ C$) 非常接近, 而用 Wells(1977)方法所得到的结果偏高, 用吴春明等(1999)黑云母-斜方辉石温度计估算的温度为 704~825℃(表 3), 其中部分与 Wood 等(1973)法得到的结果相近, 另有部分偏低, 利用同样的矿物对采用 Perchuk 法也得到类似的结果, 低值部分可能代表了退变质阶段的温度条件。本文根据前述岩相和矿物学特征的讨论, 以 Wood 等(1973)方法得到的结果作为本区麻粒岩相峰期变质作用的温度, 晚期变质作用的温度以部分(低值)黑云母的结晶温度为代表, 大致为 705℃。

矿物组合中无合适的可用来估算压力的矿物对, 本文以角闪石 $Al^{IV} - Si$ 变异图(Rasse, 1974)推算的峰期和晚期变质作用压力都小于 0.5 GPa, 均属于低压范围, 与其他特征矿物反映的低压环境相一致。

3.2 麻粒岩成因及构造意义的讨论

变质作用 $P-T-t$ 演化的全过程可分为峰期前的进变质、变质峰期及变质峰期后的退变质 3 个阶段。麻粒岩是高温变质作用的产物, 由于受反应动力学因素的制约, 人们观察到的多是退变质过程。Harley (1989) 将麻粒岩的退变归纳为近等温降压 (ITD) 和近等压降温 (IBC) 两类, 并以此说明麻粒岩形成环境的多样性。ITD 麻粒岩与(碰撞)增厚陆壳的拉张或构造减薄有关, 而 IBC 麻粒岩的形成环境有岩浆增

表 2 琼中麻粒岩二辉石平衡温度

Table 2 Two-pyroxene temperature of granulites from the Qiongzong complex

样号	X_{Fe}^{Opx}	$\alpha_{Mg_2Si_2O_6}^{Opx}$	X_{Fe}^{Cpx}	$\alpha_{Mg_2Si_2O_6}^{Cpx}$	$t_1/^\circ C$	$t_2/^\circ C$
B326a	0.485	0.211	0.031	0.291	823	861
B326b	0.513	0.204	0.03	0.294	809	850
B332	0.436	0.254	0.035	0.296	839	870

t_1 据 Wood 和 Banno (1973); t_2 据 Wells (1977)

表 3 琼中麻粒岩黑云母-斜方辉石平衡温度

Table 3 Biotite-orthopyroxene temperature of granulites from the Qiongzong complex

样号	X_{Fe}^{Bio}	X_{Mg}^{Bio}	X_{Ti}^{Bio}	X_{Al}^{Bio}	X_{Mg}^{Opx}	X_{Fe}^{Opx}	Kd	$t/^\circ C$
B323	0.5043	0.3894	0.1024	0.0039	0.5824	0.4172	0.9277	825
B326b	0.4973	0.3952	0.1075	0.0000	0.5134	0.4841	1.1867	704
B332	0.5695	0.3428	0.0877	0.0000	0.564	0.4352	1.282	707
B334	0.5028	0.3995	0.0907	0.0070	0.5255	0.4717	1.1295	750

温度计公式据吴春明等(1999)

生、正常地壳拉伸和增厚地壳拉伸等3种。根据对变质带的热模拟和 P - T - t 轨迹的研究,并结合其他地质特征而提出的麻粒岩的构造-环境成因模式主要有3种:①大陆碰撞带地壳增厚模式(England and Thompson, 1984; Ellis, 1987; Harley, 1989);其 P - T - t 轨迹具有明显增压过程及顺时针的演化趋势;②大陆拉伸岩石圈减薄模式(Winckham and Oxburgh, 1985; Sandiford and Powell 1986);其 P - T - t 轨迹表现为拉伸期间恒压或降压升温到麻粒岩相,在拉伸结束之后发生恒压或增压冷却;③大陆弧岩浆增生模式(Harley, 1989; Bohlen, 1987, 1991);位于岩浆增生带或增生带之下的岩石的 P - T - t 轨迹显示逆时针近等压冷却(IBC)的演化趋势,而位于岩浆增生带之上的岩石的 P - T - t 轨迹则具有顺时针近等压降温(IBC)的特点。

琼中麻粒岩的峰期变质矿物组合为斜长石+黑云母+石英+紫苏辉石±透辉石±角闪石±钾长石,不含石榴石是其重要特征。岩石中角闪石含量低,紫苏辉石含量与黑云母含量互为消长,反映出紫苏辉石可能是由角闪石和黑云母脱水反应形成的,涉及的变质反应可能为 $Hb + Q \rightarrow Hy + Di + Pl + H_2O$ 及 $Hb + Bi + Q \rightarrow Hy + Kf + Pl + H_2O$, 反应温度为 $824 \pm 15^\circ\text{C}$ 、压力小于 0.5 GPa , 所处深度约 19 km , 相应的地温梯度约 $43^\circ\text{C}/\text{km}$ 。斜方辉石的成分环带表明岩石早期经历了升温过程,而且当时压力较高(可能接近或略大于 0.5 GPa)。辉石反应边结构及出溶叶片的存在反映晚期岩石发生了退变冷却,终止温度为 705°C 左右,压力与峰期时的压力相近。由此可见,本区麻粒岩的形成和演化具有顺时针的 p - t 轨迹,其峰期后的退变过程类似于 IBC(近等压冷却)(图5)。在上述成因模式中,陆壳碰撞增厚模式显然不适应于低压麻粒岩;虽然在岩浆增生带之上可以形成具有顺时针 IBC 轨迹的低压麻粒岩(Harley, 1989),但从产出特征看,琼中麻粒岩并非位于岩浆增生带之上,因而也不能用岩浆增生模式来解释。研究表明(杨森楠, 1989; 张业明等, 1997; 许德如等, 2001),新元古代早期是华南(包括扬子和华夏)大陆继古中元古代之后又一剧烈的扩张时期,主要表现为以板溪群(海南岛为石碌群)为代表的裂陷槽沉积及幔源岩浆活动广泛分布。因此,根据 p - T 轨迹特征,并结合岩石变形作用较弱的特点及区域大地构造背景,我们认为琼中麻粒岩的形成可能与地壳拉伸构造环境有关。其可能的机制是,由于地壳拉伸

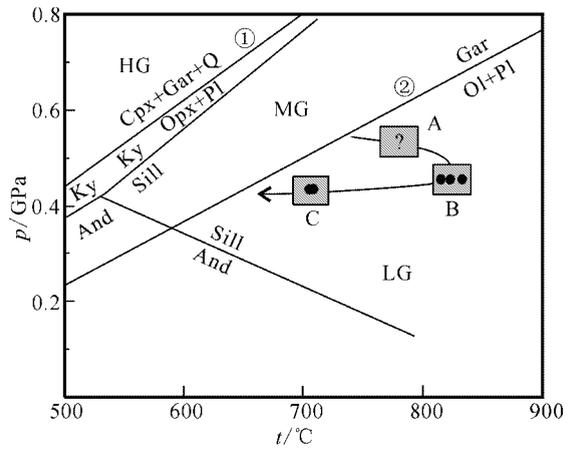


图5 琼中麻粒岩 p - T 轨迹

Fig. 5 p - T path of granulites from the Qiongzong complex. A, B, C 分别代表峰期前、峰期和峰期后3个阶段;①、②分别代表典型石英拉斑玄武岩和橄榄拉斑玄武岩中石榴石出现的反应曲线(Green and Ringwood, 1967),将麻粒岩划分为高压(HG)、中压(MG)和低压(LG)3种类型; Al_2SiO_5 多型转变线图(Holdaway, 1971)。A, B, C represent three stages of pre-, syn- and post-peak respectively; curves ① and ② represent the appearance of garnets in a typical quartz-tholeiite and in an olivine-tholeiite respectively (Green and Ringwood, 1967), which divide granulites into three types of high-, medium- and low-pressure granulite (LG); Al_2SiO_5 phase diagram is after Holdaway (1971).

减薄,导致软流圈减压上隆产生岩浆(Harley, 1989),上覆地壳岩石(包括已经结晶的岩浆)受到下部岩浆热源的影响而发生进变质,随后受拉伸扰动的地热梯度向正常地热梯度恢复,从而形成具有降压升温过程和 IBC 过程的顺时针 p - T 轨迹。

4 结论

(1) 琼中麻粒岩形成于高温低压条件,属于典型的低压麻粒岩,其峰期变质温度为 $824 \pm 15^\circ\text{C}$ 、压力小于 0.5 GPa 。晚期岩石发生了退变质冷却,终止温度为 705°C 左右,压力与峰期时的压力相近。

(2) 琼中低压麻粒岩的变质作用演化具有顺时针的 p - T 轨迹,早期可能经历了一个缓慢降压升温的过程;峰期之后的退变质则表现出近等压冷却(IBC)的特点。

(3) 琼中低压麻粒岩可能是由于地壳拉伸减薄,导致软流圈减压上隆产生岩浆,上覆地壳岩石(包括已经结晶的岩浆)受到下部岩浆热源影响而形成的。

References

Bhattacharyya C. 1971. An evolution of the chemical distributions be-

- tween igneous and metamorphic orthopyroxenes[J]. *Am. Min.*, 56: 499~506.
- Bohlen S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites[J]. *J. Geol.* 95: 617~632.
- Bohlen S R. 1991. On the formation of granulites[J]. *J. Meta. Geol.*, 9: 223~229.
- Davis B T and Boyd F R. 1966. The join $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ at 30 kilobars pressure and its application to pyroxenes from kimberlites [J]. *J. Geophys. Res.*, 71: 3567~3576.
- Ellis D J. 1987. Origin and evolution of granulites in normal and thickened crust[J]. *Geology*, 5: 167~170.
- England P C and Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. *J. Petrol.*, 25: 894~928.
- Green D H and Ringwood A E. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 767~833.
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective [J]. *Geol. Mag.*, 126(3): 215~247.
- Holdaway M J. 1971. Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram[J]. *Am. J. Sci.*, 271: 97~131.
- Leake B E. 1978. Nomenclature of amphiboles[J]. *Can. Min.*, 16: 501~520.
- Li Qiang and Zhang Lifei. 2004. The *p-t* path and geological significance of low-pressure granulite-facies metamorphism in Muzhaerte, southwest Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 583~594 (in Chinese with English abstract).
- Ma Daquan, Huang Xiangding, Chen Zhepei, et al. 1998. The Crystalline Basement of Hainan Island: Sequence and Age of Baoban Group[M]. Wuhan: Chinese University of Geosciences Press, 15~45 (in Chinese).
- Pattison D R M, Chaco T, Farquhar J, et al. 2003. Temperatures of granulite-facies metamorphism: constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange [J]. *J. Petrol.*, 44: 867~900.
- Rasse P. 1974. Al and Ti contents of hornblende indicators of pressure and temperature of regional metamorphism[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 45: 231~236.
- Sandiford M A and Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension: modern and ancient examples[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 151~158.
- Shen Qihan, Shen Kun, Geng Yuansheng, et al. 2000. Constitutions of the Yishui Complex in Shandong and Its Evolution[M]. Beijing: Geological Publishing House, 78~102 (in Chinese).
- Shen Qihan, Xu Huifen, Zhang Zongqing, et al. 1992. Early Precambrian Granulites in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 16~182 (in Chinese).
- Tan Zhongfu, Jiang Dahai, Ma Guogan, et al. 1991. The isotopic age of Baoban Group in Hainan and its geological significance[J]. *Regional Geology of China* (3): 240~245 (in Chinese with English abstract).
- Weaver B L and Tamey J. 1978. Madras granulites: Geochemistry and *p-t* conditions of crystallization[A]. *Archaean Geochimistry*[C]: 177~240.
- Wells R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contrib. Min. Petrol.* 62: 129~139.
- Winckham S and Oxburgh E. 1985. Continental rift as a setting for regional metamorphism[J]. *Nature*, 318: 330~333.
- Wood B J and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems[J]. *Contrib. Min. Petrol.*, 42: 109~124.
- Wu Chunming, Pan Yusheng and Wang Kaiyi. 1999. Refinement of the biotite-orthopyroxene geothermometer with applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 463~468 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Ma Daquan, Zhang Yeming, et al. 2006. Genesis of Qiongzong granulite: constraints of rare earth element geochemistry [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deru, Lin Ge, Liang Xinquan, et al. 2001. The records of the evolution of Precambrian lithosphere: the evidence of petrology and geochemistry of basic rocks on Hainan island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 598~608 (in Chinese with English abstract).
- Yang Sennan. 1989. The formation features and tectonic evolution of the South China taphrogenic system[J]. *Earth Science*, 14(1): 29~36 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Liu Wenjun. 2001. The formation of granulite and contribution to evolution of the continental crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 28~38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruyuan and Cong Bailin. 1983. *Mineralogical Thermometer and Barometer*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 29~167 (in Chinese).
- Zhang Yeming, Zhang Renjie, Hu Ning, et al. 1999. High grade metamorphic complex in Middle Hainan Island: ages of the Pb-Pb single zircons and their geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 284~288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yeming, Zhang Renjie, Yao Huazhou, et al. 1997. Proterozoic tectonic evolution of Hainan Island[J]. *Earth Science*, 22(4): 395~400 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李强, 张立飞. 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 *p-t* 轨迹及其地质意义[J]. *岩石学报* 20(3): 583~594.
- 马大铨, 黄香定, 陈哲培, 等. 1998. 海南岛结晶基底——抱板群层序与时代[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 15~45.
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩[M]. 北京: 地质出版社, 16~182.
- 沈其韩, 沈昆, 耿元生, 等. 2000. 山东沂水杂岩的组成与地质演化[M]. 北京: 地质出版社, 78~102.
- 谭忠福, 蒋大海, 马国干, 等. 1991. 海南抱板群的同位素年龄及其地质意义[J]. *中国区域地质* (3): 240~245.
- 吴春明, 潘裕生, 王凯怡. 1999. 黑云母-斜方辉石温度计的重新标度及其应用[J]. *岩石学报*, 15(3): 463~468.
- 徐德明, 马大铨, 张业明, 等. 2006. 琼中麻粒岩的成因: 稀土元素地球化学制约[J]. *华南地质与矿产* (1): 1~5.
- 许德如, 林舸, 梁新权, 等. 2001. 海南岛前寒武纪岩石圈演化的记录: 基性岩类地球化学证据[J]. *岩石学报*, 17(4): 598~608.
- 杨森楠. 1989. 华南裂陷系的建造特征和构造演化[J]. *地球科学*, 14(1): 29~36.
- 翟明国, 刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献[J]. *岩石学报*, 17(1): 28~38.
- 张儒媛, 丛柏林. 1983. 矿物温度计和矿物压力计[M]. 北京: 地质出版社, 29~167.
- 张业明, 张仁杰, 胡宁, 等. 1999. 琼中高级变质杂岩中单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球学报* 20(3): 284~288.
- 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 等. 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化[J]. *地球科学* 22(4): 395~400.