

华夏地块显生宙的变质作用期次和特征

于津海, 王丽娟, 魏震洋, 孙涛, 舒良树

(内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要: 华夏地块主要存在四期变质作用。加里东期变质作用呈北东向展布于华夏的大部分地区, 变质作用可达麻粒岩相, 且麻粒岩断续分布平行于造山带, 此期变质作用是在挤压造山构造背景下发生, 很可能与扬子地块向冈瓦那大陆北缘聚合-碰撞, 造成大陆边缘沉积物变形-变质有关。根据粤东梅县片麻岩和兴宁混合岩的LA-ICPMS锆石U-Pb定年以及邻区独居石U-Pb年代学的研究, 海西的变质作用主要发生在260~280 Ma, 年轻于欧洲典型的海西期造山时代。华夏地块的海西期变质作用分布局限, 它们可能形成于拉张构造背景。印支期变质岩在华夏有较广泛的分布, 西南端大容山—十万大山的印支期变质作用可达麻粒岩相, 其他地区的变质作用具有中低压相系的特征, 记录了造山后期伸展构造背景。LA-ICPMS锆石U-Pb定年指示华夏中部粤中地区的印支期变质作用发生在231~232 Ma。燕山期变质岩主要分布于东南沿海和台湾中央山脉, 显示了双变质带的特点, 表明与太平洋板块向东南沿海俯冲作用密切相关。从印支期到燕山期, 变质带的方向发生了转变, 说明影响华夏地块变质作用的构造域发生了改变。

关键词: 华夏地块; 显生宙变质作用; 麻粒岩相; 锆石U-Pb定年

中图分类号: P588.3; P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2007) 03-0474-10

1 引言

华夏地块的基底变质岩主要出露于武夷和云开地区, 在南岭地区也有零星分布。这些变质岩一般被认为具有角闪岩相—绿片岩相的变质级(福建省地质矿产局, 1985; 广东省地质矿产局, 1988; 浙江省地质矿产局, 1989), 而且具有新元古代以前的变质年龄(聂永红等, 1995; 赵凤清等, 1995; 胡恭仁等, 1999; Zhao & Cawood, 1999)。Zhao & Cawood (1999)认为闽北麻源群的变质作用可以分出四期, 它们都发生在新元古代早期, 由扬子地块与华夏地块的碰撞引起。但是, 最近可靠的年代学研究显示闽北许多变质岩的原岩形成于新元古代以后(820~750 Ma)(舒良树, 2006; Wan et al, 2007), 显然变质作用必定晚于新元古代。新的年代学资料还表明许多基底

变质岩的变质作用主要发生在早古生代的加里东期, 部分地区还叠加了海西期、印支期和燕山期的变质-变形作用。这些变质作用的分布、变质类型、强度和伴随的岩浆活动都有明显区别, 反映了不同时期造山作用的特点。

2 加里东变质作用

早古生代的加里东变质作用是华夏地块最强的一期变质作用, 华夏地块的大多数地区受到这期变质作用影响, 这期变质作用还影响到了北部扬子地块的部分地区。加里东期的变质作用通常被认为主要表现为混合岩化作用, 变质级一般为角闪岩相—绿片岩相(广东省地质矿产局, 1988)。但是, 麻粒岩相变质岩在华夏地块一些地区零星出露(图1), 而且定年结果显示它们大多形成于加里东期, 如云开大山的云炉地区

收到日期: 2007-05-05; 修回日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40634022; 40672125; 40221301)资助

作者简介: 于津海, 男, 1962年9月生, 教授, 从事岩石学和地球化学研究。E-mail: jhyu@nju.edu.cn

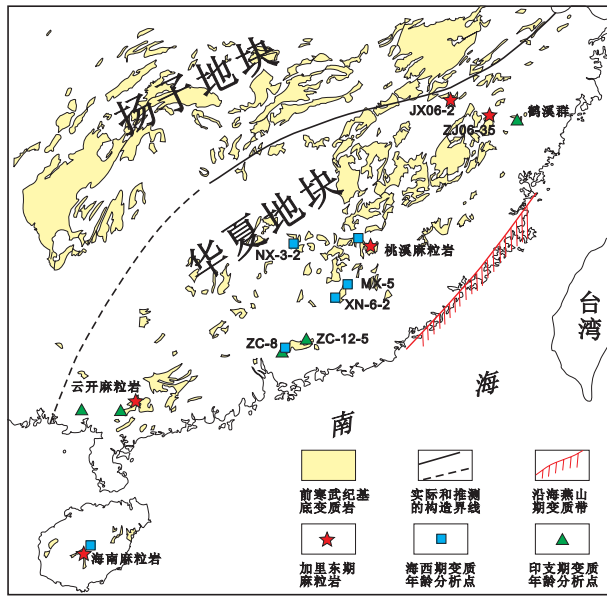


图1 华南前寒武纪基底分布和一些特殊变质岩及定年点

Fig. 1 Distribution of Precambrian basements in South China and locations of some special metamorphic rocks and dating samples

(陈斌等, 1994; 杜杨松等, 1999; Wang et al, 2007), 南武夷的桃溪地区(于津海, 2003, 2005), 以及琼中地区(张业明等, 1999)。最近, 我们又在赣东北和浙西南地区新发现了一些麻粒岩相变质岩。因此, 加里东变质作用的强度和成因必须重新认识。

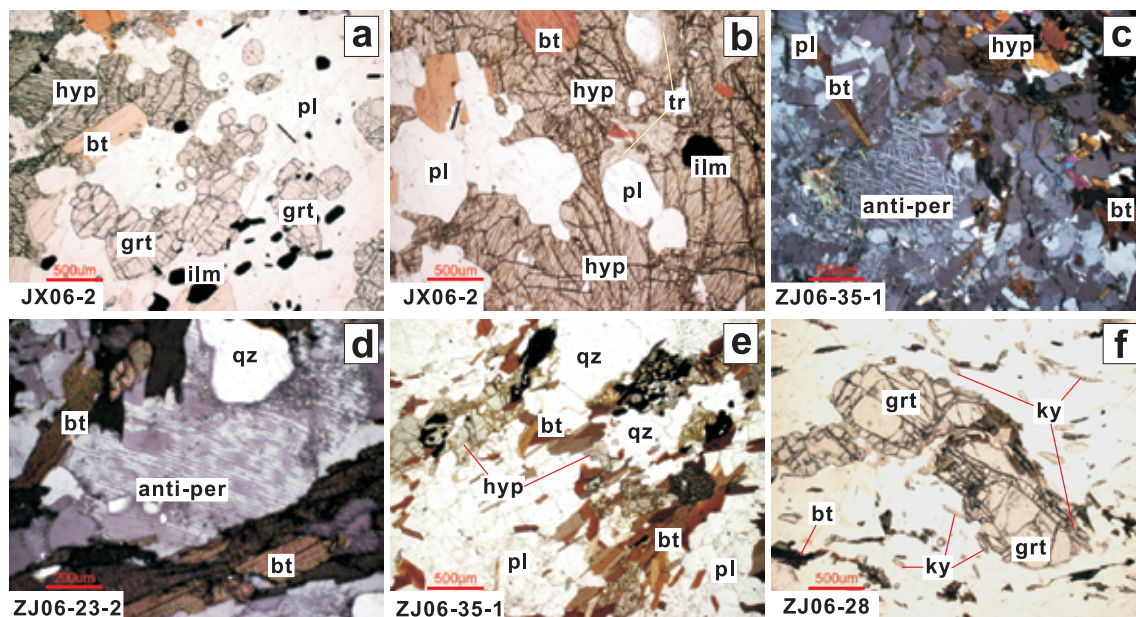
云开大山云炉地区的麻粒岩相变质岩为泥质麻粒岩或紫苏花岗岩, 麻粒岩多呈包体产出于加里东花岗岩中, 岩石以长英质为主, 常含有紫苏辉石和/或石榴子石, 典型的矿物组合是斜长石 + 黑云母 + 石英 + 紫苏辉石 + 石榴子石 ± 钾长石(杜杨松等, 1999)。温压计算显示它们形成于780~880℃和0.53~0.71 GPa, 属于低压高温麻粒岩相变质产物。锆石U-Pb定年显示云开地区的高级变质作用-深熔作用发生在420~450 Ma(陈斌等, 1994; Wang et al, 2007)。

南武夷桃溪地区的麻粒岩相变质岩的原岩也是沉积岩, 最常见的两种岩石的矿物组合是石榴子石 + 柱状矽线石 + 条纹长石 + 反条纹长石 + 少量黑云母和斜长石 + 透辉石 + 黑云母 + 钾长石, 缺乏原生白云母, 但在前者中常见残留蓝晶石。温压估算显示前者的峰期变质温度可达835~878℃, 压力为~1.1 GPa, 后者的变质温度也

达750~820℃(于津海等, 2003)。详细的锆石形态学和U-Pb定年指出, 原岩中的碎屑锆石(继承核)主要形成于新元古代晚期(~735 Ma), 而麻粒岩相变质过程中形成的增生锆石形成于440 Ma左右(于津海等, 2005)。

出露于海南岛中部的基底变质岩中包含少量受退变质作用影响的基性麻粒岩(张业明等, 1999), 岩石含斜长石45%~60%、紫苏辉石20%~35%、透辉石0~10%、黑云母5%~15%、角闪石0~5%和石英2%~5%, 受退变质影响强烈的岩石中角闪岩含量增加。岩石化学分析结果指示它们的原岩是基性火成岩(徐德明等, 2006)。张业明等(1999)用单颗粒锆石蒸发法测定了黑云斜长片麻岩和麻粒岩中锆石形成年龄, 分别获得了 1483 ± 13 Ma和 499 ± 24 Ma的Pb-Pb年龄。他们将前者解释为麻粒岩相变质时代, 后者代表叠加改造的退变质年龄。但是, 黑云斜长片麻岩没有麻粒岩相变质残留, 在其变质过程中没有新生锆石形成, 1483 Ma更可能代表了其原岩的形成时代, 这一年龄值也与海南岛中元古代一次强烈的岩浆活动一致(Li et al, 2002; 许德如等, 2006)。而麻粒岩中获得的锆石年龄应该代表麻粒岩相变质时代, 因为基性岩通常形成较少的锆石, 而在其麻粒岩相变质过程中可以有较多新生锆石的形成。

北武夷位于华南加里东造山带的东北部, 这里的变质岩主要是这期变质作用的产物。赣东北麻粒岩发现于弋阳南10 km处的刘湾村, 该岩石原被误定为紫苏辉长岩, 实际上岩石具有典型的变晶结构和变质矿物组合。岩石呈中粗粒鳞片粒状变晶结构, 长石具等轴粒状, 且常见平衡三连点(图2a, b), 而非辉长结构。主要矿物包括斜长石, 黑云母, 石榴子石和紫苏辉石, 含少量石英和钛铁矿。在部分紫苏辉石周围常形成一圈无色的透闪石边(图2b), 有些透闪石可呈束状颗粒单独出现, 是退变质的产物。黑云母呈独立颗粒常被紫苏辉石包裹, 不具火成岩中的反应边结构, 其通常呈棕红色, 显示富Ti的高级变质成因特征。角闪石的缺失和黑云母的稳定性限定了变质温度在850~950℃左右, 石榴子石和紫苏辉石的稳定可以初步限定变质压力是在0.9 GPa以上1.5 GPa以下(图3a)。



矿物符号含义: bt-黑云母, grt-石榴子石, hyp-紫苏辉石, ilm-钛铁矿, ky-蓝晶石, anti-per-反条纹长石, pl-斜长石, qz-石英, tr-透闪石。

图2 北武夷地区麻粒岩相变质岩的显微结构

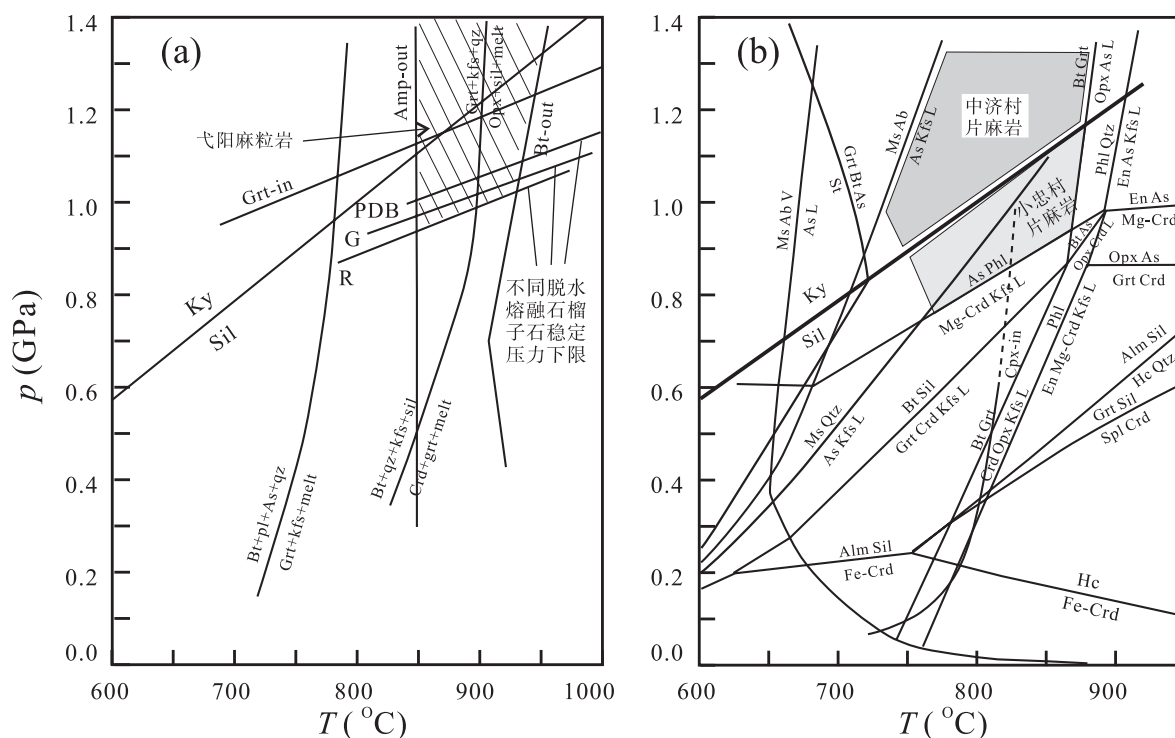
Fig. 2 Microtextures of some granulite facies metamorphic rocks in northern Wuyishan area

浙西南分布有大量前寒武纪变质岩, 以往都认为它们的变质程度主要是角闪岩相, 部分为绿片岩相 (浙江省地质矿产局, 1989; 胡雄健等, 1991)。但是, 详细的岩相学观察指出浙西南龙泉—遂昌地区的许多变质岩可能曾经历过麻粒岩相的变质作用, 尽管由于随后的退变质作用或后期变质作用的影响, 大多数的麻粒岩相变质痕迹已被抹去。但在这一地区的许多变质岩中都含有反条纹长石, 包括淡竹花岗闪长质片麻岩、里庄花岗片麻岩和田后花岗闪长质片麻岩 (图2c, d)。反条纹长石是麻粒岩相变质岩特有的长石, 不见于角闪岩相和以下的变质作用, 而岩浆岩中多以正条纹长石常见。在一些变质岩中还具有代表高级变质作用的矿物组合, 如遂昌大柘镇的田后片麻岩具有 $opx + bt + kfs + anti-per + qz$ 矿物组合、遂昌城西小忠村的泥质片麻岩具有柱状 $sill + grt + bt + pl + qz \pm kfs$, 以及龙泉中济村的 $grt + ky + bt + pl + qz \pm kfs \pm anti-per$ (图2e, f)。泥质岩石中缺失 st 限定 $grt + ky + bt$ 组合的稳定下限是 $650\sim 700^\circ\text{C}$ (Jones et al, 2000); 这些变质岩中都不含原生白云母, 说明可能发生了 $ms + qz = ky + kfs + H_2O$ 的反应或 $ms + pl + qz = kfs + ky + \text{熔体}$ 的脱水部分熔融。这些反应表明变质作用都发生在

700°C 和 0.8 GPa 以上 (图3b)。另外, 单斜辉石形成的温度通常也在 800°C 以上 (图3b), 所有这些表明北武夷地区的变质作用达到了麻粒岩相。

3 海西期变质作用

华夏地块的海西期岩浆—变质事件是最弱的, 岩浆活动主要形成两类岩石: (1) 过铝质或钙碱性花岗岩, 它们主要分布于海南岛 (Li et al, 2006; 谢才富等, 2007); (2) 碱性岩石, 包括碱性正长岩 (Wang et al, 2005)、碱性花岗岩 (夏斌等, 2006) 和钾玄质侵入岩 (谢才富等, 2006), 分散在福建、粤西和海南岛。海西期的变质作用过去报道较少, 这可能与后期强烈的岩浆—变质热事件的改造以及相应定年工作的缺乏有关。最近笔者对南岭地区花岗岩和基底变质岩的研究中发现了较多海西期变质事件的信息。对粤北南雄地区潭溪片麻岩和粤中增城混合岩中独居石的 $U\text{-Pb}$ 定年分别获得了 276 Ma 和 267 Ma 的年龄 (于津海等, 2007; Yu et al, 2007a), 由于它们的原岩都形成于新元古代, 所以该年龄指示它们的变质作用时代。在对闽西南印支期红山花岗岩的定年研究中, 也获得其中独居石年龄为 280 Ma , 明显不同于岩浆锆石的形成时代 (225



图中部分符号的含义: alm-铁铝榴石, amp-角闪石, As-sil or ky, sil-矽线石, ms-白云母, crd-堇青石, kfs-钾长石, cpx-单斜辉石, opx-斜方辉石, Hc-尖晶石, L-流体, 其它同图2说明。

图3 北武夷变质岩的成岩格子图: (a) 基性 (主要根据 Jones et al (2002)); (b) 泥质 (主要根据 Spear et al (1999))

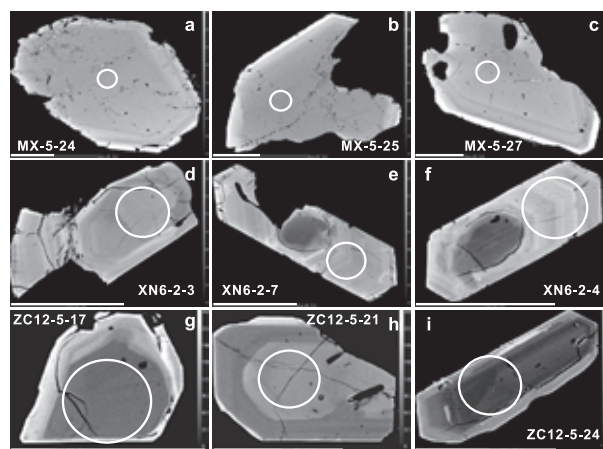
Fig. 3 Petrogenetic grid for some metamorphic rocks from northern Wuyishan area

Ma), 而可能是捕获源区或围岩的, 指示该地区曾发生海西期变质事件 (Yu et al, 2007b)。

本次研究, 我们对采自粤东梅县地区的一个片麻岩 (MX-5) 和兴宁县的一个混合岩 (XN-6-2) 进行了定年研究。梅县片麻岩是一个黑云母二长片麻岩, 不含特征变质矿物, 无法限定它们的温压条件。岩石中包含两类锆石: 一类属于碎屑锆石, 具有不同的形态, 是原岩的继承锆石; 另一类锆石具有短柱状、浅绿色、颗粒较大 (0.40 mm × 0.20 mm)、表面浑浊内部透明。在BSE图像中, 这类锆石不发育韵律环带, 呈多边形晶形, 常具有一圈亮的蚀变边 (图4a-c), 这类锆石含有较高的U和Th含量和低的Th/U比值 (<0.20, 表1)。兴宁混合岩多为条带状或片麻状, 从中分选出的锆石大多呈棕色自形柱状, BSE图像显示锆石常具有一个继承核, 继承核无内部结构, 不同颗粒核的BSE亮度不同 (图4d-f); 增生边有弱的环带构造, 具中等BSE亮度。无论继承核还是增生边都具有低Th含量和高U含量, 因此, Th/U比值极低 (<0.06)。所有这些内部结构特征和Th/U比值

都表明这些锆石属于变质成因的。

LA-ICPMS锆石U-Pb定年显示, 5颗梅县片麻岩中变质成因锆石的年龄都是谐和的 (表1, 图5a), 它们的加权平均值是 277 ± 3 Ma, 表明它们是海西期变质作用中形成的。对兴宁混合岩中11颗锆石的13次定年分析结果表明继承核是在加里



图中左下角线段为100 μm, 圈为分析蚀点, 其直径大约45 μm

图4 三个变质岩中锆石的背散射图像

Fig. 4 BSE images of zircons for three metamorphic samples

表1 华夏地块某些变质岩的锆石U–Pb定年结果
Table 1 LA-ICPMS zircon U–Pb dating results for some metamorphic rocks from the Cathaysia Block

样号	Isotope ratios						Ages (Ma)						Th	U	Th/U
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ± 1 σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ± 1 σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ± 1 σ		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ± 1 σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ± 1 σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ± 1 σ		(× 10 ⁻⁶)		
梅县片麻岩 (MX-5)															
-27c	0.05094	0.00049	0.31226	0.00363	0.04446	0.00054	238	22	276	3	280	3	1732	9870	0.18
-24c	0.05107	0.00049	0.30836	0.00357	0.04380	0.00053	244	21	273	3	276	3	1731	9288	0.19
-18	0.05117	0.00049	0.30975	0.00356	0.04391	0.00053	248	22	274	3	277	3	2485	11950	0.21
-25c	0.05132	0.00050	0.30952	0.00359	0.04375	0.00053	255	22	274	3	276	3	1748	8723	0.20
-21	0.05148	0.00049	0.31121	0.00353	0.04386	0.00052	262	23	275	3	277	3	1893	13537	0.14
兴宁县混合岩 (XN-6-2)															
-3	0.05618	0.00056	0.59014	0.00693	0.07618	0.00091	459	23	471	4	473	5	48	3450	0.014
-4	0.05322	0.00053	0.34982	0.00409	0.04767	0.00057	338	23	305	3	300	4	354	6148	0.059
-5r	0.05303	0.00103	0.28234	0.00426	0.03861	0.00047	330	45	253	3	244	3	69	2008	0.034
-5c	0.06075	0.00105	0.62864	0.00813	0.07505	0.00086	630	38	495	5	467	5	308	5467	0.056
-6c	0.05726	0.00056	0.61311	0.00725	0.07767	0.00096	502	22	486	5	482	6	110	5323	0.021
-7	0.05152	0.00051	0.29611	0.00350	0.04168	0.00050	264	23	263	3	263	3	172	4128	0.042
-9	0.05154	0.00055	0.29018	0.00352	0.04082	0.00048	265	25	259	3	258	3	123	3418	0.036
-11	0.05055	0.00051	0.29111	0.00348	0.04176	0.00051	220	24	259	3	264	3	120	3731	0.032
-14	0.05371	0.00054	0.32876	0.00393	0.04438	0.00053	359	23	289	3	280	3	90	2692	0.033
-15c	0.05530	0.00054	0.59922	0.00706	0.07857	0.00095	424	22	477	4	488	6	125	3518	0.035
-26	0.05351	0.00058	0.36159	0.00458	0.04901	0.00062	350	25	313	3	308	4	75	2701	0.028
-27	0.05396	0.00057	0.29832	0.00376	0.04010	0.00050	369	24	265	3	253	3	115	1943	0.059
博罗县电气石二长片麻岩 (ZC-12-5)															
-20	0.10035	0.00307	1.97813	0.05403	0.14297	0.00195	1631	58	1108	18	861	11	107	143	0.75
-33	0.07127	0.00075	1.20996	0.01483	0.12336	0.00148	965	22	805	7	750	8	212	1047	0.20
-16	0.06291	0.0011	0.72793	0.01305	0.08391	0.00107	705	38	555	8	519	6	156	272	0.57
-34	0.05728	0.00062	0.58701	0.00767	0.07433	0.00093	502	24	469	5	462	6	525	973	0.54
-36q	0.05948	0.00082	0.54191	0.0085	0.06611	0.00087	585	31	440	6	413	5	114	444	0.26
-31	0.05656	0.00065	0.47472	0.00617	0.06103	0.00075	474	26	394	4	382	5	252	871	0.29
-35	0.05633	0.00074	0.40581	0.00604	0.05226	0.00067	465	30	346	4	328	4	107	386	0.28
-29	0.05978	0.00149	0.31895	0.00684	0.03869	0.00049	596	55	281	5	245	3	414	3565	0.12
-26	0.05255	0.00058	0.26634	0.00335	0.03683	0.00045	309	26	240	3	233	3	224	1307	0.17
-24	0.05506	0.00065	0.2769	0.00366	0.03653	0.00045	415	27	248	3	231	3	828	889	0.93
-17	0.0529	0.0008	0.26499	0.00423	0.03639	0.00045	325	35	239	3	230	3	399	338	1.18
-25	0.05224	0.00061	0.26163	0.0034	0.03639	0.00044	296	27	236	3	230	3	405	1026	0.39
-21	0.05357	0.00065	0.26671	0.00358	0.03617	0.00044	353	28	240	3	229	3	471	658	0.72
-32	0.05948	0.0007	0.28393	0.00377	0.03468	0.00043	585	26	254	3	220	3	399	829	0.48

东造山作用中变质形成，它们的平均年龄是476 ± 13 Ma，而增生边形成于253~308 Ma（表1，图5a），也是在海西期变质作用过程中结晶的。显然，海西期变质作用在华夏地块有一定的分布，而且在局部可以达到高级变质程度。但是，华夏地块的海西期热事件的时间晚于典型的欧洲海西期造山作用的时间（350~300 Ma）。

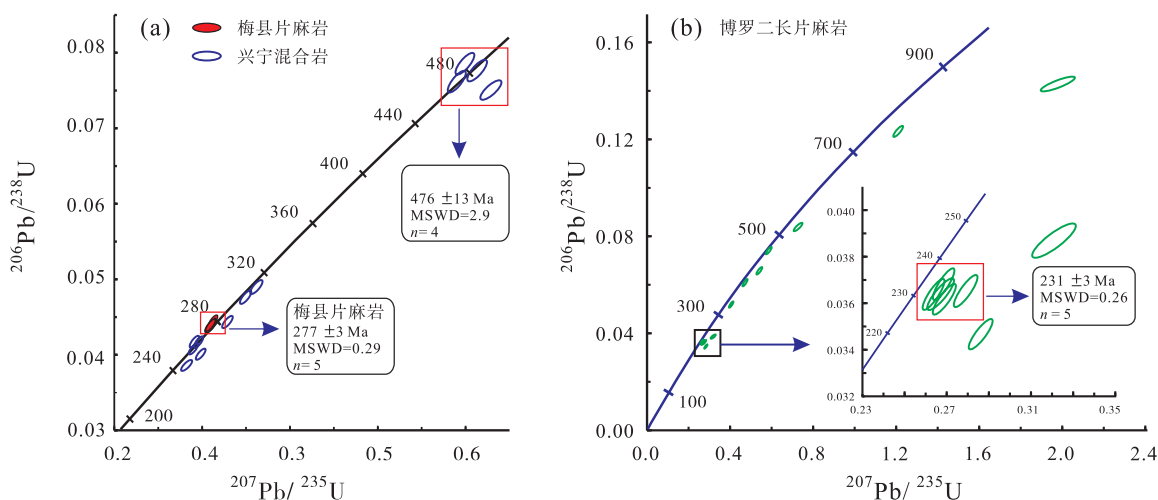


图5 粤中—粤东三处变质岩中锆石的U-Pb谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams for three metamorphic rocks from eastern and central Guangdong Province

4 印支期变质作用

受扬子地块与华北地块以及Sibumasu地块与印支-华南地块碰撞的影响, 华南地块普遍受到印支期热事件的作用, 其中, 印支期的岩浆活动在华夏地块特别发育, 其重要性已被越来越多的学者所认识, 但关于印支期变质作用的分布及性质的研究相对薄弱。彭松柏等(2004)对大容山—十万大山花岗岩中麻粒岩相包体的研究显示, 这些麻粒岩的变质作用发生在印支期。云开地区的变质作用和部分熔融主要发生在加里东期, 但也叠加印支期变质作用(~236 Ma, Wang et al, 2007)。实际上, 印支期变质作用不仅限于华夏地块的西南角, 而已影响到中部, 甚至东北部, 如浙东的鹤溪群(陈多福等, 1998)和粤东龙川地区的片麻岩(于津海等, 2006)。

在华夏中部的粤中增城地区出露一些变质岩和混合岩。以往都认为它们是加里东变质作用的产物(广东省地矿局, 1988)。但是, 新的锆石年代学研究显示它们中的许多是在印支期变质作用形成。出露于增城市南10 km处的混合岩(ZC-8)的原岩是沉积岩, 其中含有大量原岩的碎屑锆石, 但也存在新生的变质结晶锆石。LA-ICPMS锆石U-Pb定年显示这些变质成因的锆石形成于印支期(232 Ma, Yu et al, 2007a)。

邻近的博罗县西部出露一片变质岩, 岩石类型包括黑云母斜长片麻岩、含电气石二长片麻

岩、白云母花岗片麻岩、斜长角闪岩和条纹状混合岩等。本文对电气石二长片麻岩进行了定年研究。分选出来的锆石较小(0.15 × 0.07 mm), 具有自形-半自形, 具简单和宽的环带(图4g-i), 一些锆石具有一层亮的增生边(图4g)。对14颗锆石的U-Pb同位素分析显示它们的年龄较为分散, 但大多靠近谐和曲线, 除了一颗最老的锆石(图5b)。14颗锆石中有7颗具有印支期的年龄(220~245 Ma, 表1), 其中5颗锆石的年龄基本一致, 它们的加权平均值是231 ± 3 Ma, 与增城混合岩的变质时代一致。这一年龄应该代表此变质岩的变质年龄, 而其他锆石的年龄表明它们或是加里东变质作用形成的, 或是原岩的碎屑锆石, 但它们都受到了印支期变质作用的影响而发生了不同程度的Pb丢失, 使年龄的谐和性降低。

印支期变质岩的矿物组合显示变质作用是以中低压变质相系为特征, 最常见的岩石类型是黑云母斜长片麻岩和二云母二长片麻岩, 可含石榴子石, 但不出现蓝晶石, 也不含红柱石或堇青石等典型低压矿物, 暗示这些变质岩是在印支期造山作用中的晚期形成, 而西南地区可达麻粒岩相变质强度的变质作用应该发生在碰撞造山的峰期。

5 燕山期变质作用

晚中生代燕山期的变质作用主要发育在沿海地区, 即长乐—南澳变质带, 这里的变质岩往往包含红柱石、矽线石和尖晶石等典型低压变质矿

物(于津海等, 2002a), 显示此变质带以低压变质相系为特征, 它们与台湾中央山脉的高压变质带的形成时代一致, 两者构成双变质带。沿海地区除了出露这些低压高温变质岩, 还存在以捕虏体形式出现于新生代玄武岩中的基性麻粒岩, 年代学和地球化学研究指示这些基性麻粒岩是晚中生代玄武质岩浆底侵于下地壳结晶-变质形成(徐夕生等, 1999; 于津海等, 2002b)。

6 变质作用的成因

加里东变质作用是华夏地块最强的影响范围最广的一期变质作用。从华夏地块的西南到东北都存在麻粒岩相变质作用(图1)。加里东麻粒岩相变质带呈NE向展布, 指示碰撞造山的挤压应力方向是NW-SE。但是, 关于加里东造山作用的性质仍有很大分歧, 一种传统的观点是华南加里东造山是典型的“沟-弧-盆”体系(郭令智等, 1980; 马瑞士, 2006), 即由大洋板块向华南俯冲碰撞形成, 但近年来越来越多的资料显示华南不存在加里东的大洋俯冲碰撞作用。首先, 那些被认为是“蛇绿岩套”的岩石不具蛇绿岩套的基本特征, 即分散在加里东造山带中的只有零散的蛇纹岩和变质基性火山岩(绿片岩和斜长角闪岩), 没有辉长岩、辉长质堆晶岩、辉绿岩墙、深海硅质岩等组分; 第二, 对所谓的“早古生代”变质玄武岩(绿片岩)的锆石定年指出这些基性火山岩形成于新元古代(797~853 Ma, 舒良树, 2006); 第三, 加里东期的岩浆活动以形成过铝质花岗岩为特征, 缺失钙碱性火山岩, 更没有代表火山弧特征的安山岩形成。

舒良树(2006)认为华南造山带是在元古代变质基底上震旦—早古生代巨厚沉积物褶皱造山形成, 但造山作用的驱动力尚不清楚。Wang et al (2007)在研究了云开地区的加里东(450~400 Ma)热事件后认为它们是扬子地块与华夏地块碰撞的结果, 响应于华北与华南之间的俯冲—碰撞。但是加里东造山带遍布整个华夏地块, 并不局限于扬子地块与华夏地块接触带附近, 而且高级的麻粒岩相变质作用仅分布于华夏内部, 扬子地块南缘与华夏地块接触地带的变质作用大多仅为绿片岩相, 甚至更低。显然, 加里东造山带不

是华夏地块与扬子地块碰撞的结果, 而是扬子地块与华夏地块东南侧的一个大陆挤压形成, 这个未知的大陆很可能是冈瓦那大陆。首先, 对华夏地块晚新元古代沉积物源区的分析显示了它们具有与冈瓦那大陆的东印度和东南极地块极强的亲缘性(Yu et al, 2007a)。另外, 与喜马拉雅地区新元古代—早古生代地层和构造的对比也同样证明了这一认识。喜马拉雅被认为是北冈瓦那大陆的一部分(DeCelles et al, 2000, Gehrels et al, 2003; Myrow et al, 2003), 其中Greater Himalaya和Lesser Himalaya带中的新元古代—早古生代沉积物显示了与华夏核部南岭地区同时代沉积物相似的年龄谱(Yu et al, 2007a), 而且这些沉积物也同样遭受到了早古生代的变质作用影响。因此, 笔者认为在新元古代—早古生代时期, 华夏和Himalaya都是北冈瓦那大陆被动大陆边缘的一部分, 并在冈瓦那超大陆聚合的晚期受到外来陆块的挤压而发生褶皱变形—变质作用。从晚古生代到新生代, 这些陆块从冈瓦那大陆逐渐分离向北运动, 在不同时间拼贴到东亚地块上(Metcalf, 2006)。

现有的资料显示华夏地块的海西期变质作用主要分布于南岭中东部, 不具成带性, 变质程度也没有达到麻粒岩相。对梅县片麻岩中锆石的成分分析显示它们具有很高的U、Th含量, 不同于麻粒岩相或榴辉岩相形成的变质锆石, 暗示变质过程中存在丰富的流体作用, 这可能与深部流体的上升有关。结合这一时期岩浆活动以碱性岩为特征, 可以推测华夏地块的海西期变质作用主要是在拉张构造背景下发生的, 与岩浆活动密切相关。

最典型的印支期变质作用发生在Sibumasu与印支地块以及华南与华北地块之间的碰撞带中, 但是在华南内部, 特别是华夏地块, 印支运动的影响也非常强烈, 以广泛发育印支期花岗岩为特征, 并伴随有变质作用的发生, 而且局部地区变质程度可达到麻粒岩相。印支期的变质带似乎呈NEE向展布(图1), 暗示了大致南北向的挤压作用。所以, 在印支时期华夏地块不仅受到Sibumasu地块从西南方向的碰撞挤压作用, 还可能(也许更重要)受到来自南方的挤压作用。大多数印支期变质岩的矿物组合指示变质作用具有中低压相系特征, 表明它们

主要是在造山作用中的晚期形成。

华夏地块燕山期变质作用的分布和双变质带特征表明它们的形成与太平洋板块向中国东南的俯冲作用密切相关。沿海高温低压变质带与台湾中央山脉的高压低温变质带的分离与后期俯冲造成的弧后拉张作用有关。这一时期变质带的方向与印支期的明显不同, 表明构造应力场的明显转变, 暗示它们是受两个不同构造域的控制, 此转变的时间是在燕山早期的侏罗纪。

参考文献 [References]:

- 陈斌, 庄育勋. 1994. 粤西云岭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): 139–150.
- [Chen Bin, Zhuang Yuxun. 1995. The petrology and petrogenesis of Yunlu charnockite and its granulite inclusion, west Guangdong, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 10 (2): 139–150. (in Chinese with English abstract)]
- 陈多福, 李献华, 潘晶铭, 等. 1998. 浙江景宁鹤溪群斜长角闪岩变质新生锆石特征、离子探针 (SHRIMP) U-Pb 年龄及地质意义. 矿物学报, 18 (4): 396–400.
- [Chen Duofu, Li Xianhua, Pan Jingming, et al. 1998. Metamorphic newly produced zircons, SHRIMP ion microprobe U-Pb age of amphibolite of Hexi Group, Zhejiang and its implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 18 (4): 396–400. (in Chinese with English abstract)]
- DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, et al. 2000. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan orogenic belt in Nepal. *Science*, 288: 497–499.
- 杜杨松, Collerson K D, 赵建新, 等. 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.
- [Du Yangsong, Collerson K D, Zhao Jianxin, et al. 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)]
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志. 北京: 地质出版社. p1–850.
- [Fujian Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. Regional Geology of the Fujian Province. Beijing: Geol. Publ. House, p 1–850. (in Chinese)]
- Gehrels G E, DeCelles P G, Martin A, et al. 2003. Initiation of the Himalayan Orogen as an early Paleozoic thin-skinned thrust belt. *GSA Today*, 13: 4–9.
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社. p1–750.
- [Guangdong Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. Regional Geology of Guangdong Province. Beijing: Geol. Publ. House, p1–750. (in Chinese)]
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质文集 (1). 北京: 地质出版社, 109–116.
- [Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. 1980. The Geotectonic framework and crustal evolution of south China. Scientific Papers on Geology for International Exchange (1). Beijing: Geol. Publ. House, 109–116. (in Chinese)]
- 胡恭仁, 章邦桐, 于瑞莲. 1999. 赣中变质岩带的Sm-Nd, Rb-Sr同位素年代学研究. 地质评论, 45 (2): 129–134.
- [Hu Gongren, Zhang Bangtong, Yu Ruilian. 1999. A study on Sm-Nd and Rb-Sr isochron ages of the central Jiangxi metamorphic belt. *Geological Review*, 45 (2): 129–134. (in Chinese with English abstract)]
- 胡雄健, 许金坤, 童朝旭, 等. 1991. 浙西南前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, p1–278.
- [Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Chaoxu, et al. 1991. The Precambrian Geology of Southwestern Zhejiang Province. Beijing: Geol. Publ. House, pp 1–278. (in Chinese with English abstract)]
- Jones K A, Strachan R A. 2000. Crustal thickening and ductile extension in the NE Greenland Caledonides: a metamorphic record from anatectic pelites. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 719–735.
- Jones K A, Escher J C. 2000. Near-istothermal decompression within a clockwise P-T evolution recorded in migmatitic mafic granulites from Clavering, NE Greenland: implications for the evolution of the Caledonides. *J. Metamorphic Geol.*, 20: 365–378.
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *Geology*, 114: 341–353.
- Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30: 163–166.
- 马瑞士. 2006. 华南构造演化新思考—兼论“华夏古陆”说中的几个问题. 高校地质学报, 12 (4): 448–456.
- [Ma Ruishi. 2006. New thought about the tectonic evolution of the South China: discussion on several problems of the Cathaysian oldland. *Geol. J. China Univ.*, 12 (4): 448–456. (in Chinese with English abstract)]
- Metcalf I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9: 24–46.
- Myrow P M, Hughes N C, Paulsen T S, et al. 2003. Integrated tectonostratigraphic analysis of the Himalaya and implications for its tectonic reconstruction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212 (3–4): 433–441.
- 聂永红, 李曙光, 葛宁洁, 等. 1995. 浙西南北园八都群石榴斜长角闪岩的变质特征及年代. 矿物学报, 15 (4): 442–450.
- [Nie Yonghong, Li Shuguang, Ge Ningjie, et al. 1995. Metamorphic features and ages of garnet amphibolites in Beiyuan, southwestern Zhejiang province, China. *Acta Mineral. Sinica*, 15 (4): 442–450. (in Chinese with English abstract)]
- 彭松柏, 付建明, 刘云华. 2004. 大容山—十万大山花岗岩带中A型紫苏花岗岩、麻粒岩包体的发现及意义. 科学技术与工程, 4 (10): 832–834.
- [Peng Songbai, Fu Jianming, Liu Yunhua. 2004. The discovery and significance of A-type charnokite in the southeastern Guangxi Province, China. *Sci. Techn. Engin.*, 4 (10): 832–834. (in Chinese with English abstract)]
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12 (4): 418–431.
- [Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt. *Geol. J. China Univ.*, 12 (4): 418–431. (in Chinese with English abstract)]
- Spear F S, Kohn M J, Cheney J T. 1999. P-T path from anatectic pelites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 17–32.

- Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. **2007**. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units. *Gondwana Research*, doi: 10. 1016/j. gr. 2006. 10. 016.
- Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, et al. **2007**. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Research*, doi: 10. 1016 / j. gr. 2006. 10. 003.
- Wang Q, Li J W, Jian P, et al. **2005**. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230: 339–354.
- 夏斌, 林清茶, 张玉泉. 2006. 广东罗定龙塘碱性花岗岩锆石SHRIMP定年及地质意义. *地质科学*, 41 (3): 511–517.
- [Xia Bin, Lin Qingcha, Zhang Yuquan. **2006**. Zircon SHRIMP dating of the Longtang alkaline granite at Luoding, Guangdong, and its geological implications. *Chin. J. Geol.*, 41 (3): 511–517. (in Chinese with English abstract)]
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 2006. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义. *科学通报*, 51 (16): 1944–195.
- [Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, et al. **2006**. Identification of Hercynian shoshonitic intrusive rocks in central Hainan Island and its geotectonic implications. *Chin. Sci. Bull.*, 51 (20): 2507–2519]
- 谢才富. 2007. 海南岛海西期同逆冲侵入岩组合的厘定及其构造意义. 南京大学博士论文, p121.
- [Xie Caifu. **2007**. Identification of the Hercynian Syn-thrust intrusive association in Hainan Island (SE China) and its geotectonic implications. PhD thesis of Nanjing University, p1–121]
- 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. *华南地质与矿产*, (2): 1–5.
- [Xu Deming, Ma Daquan, Zhang Yeming, et al. **2006**. Genesis of Qiongzong granulites: constraints of rare earth element geochemistry. *Geol. Mineral Res. S. China*, (2): 1–5. (in Chinese with English abstract)]
- 徐夕生, 周新民, O' Reilly SY, 等. 1999. 中国东南下地壳物质与花岗岩成因探索. *岩石学报*, 15: 217–223.
- [Xu Xisheng, Zhou Xinmin, O' Reilly S Y, et al. **1999**. Exploration for the lower crustal material and granite genesis in southeastern China. *Acta Petrol. Sinica*, 15: 217–223. (in Chinese with English abstract)]
- 许德如, 夏斌, 李鹏春, 等. 2006. 海南岛西北部前寒武纪花岗质岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 30(4): 510–518.
- [Xu Deru, Xia Bin, Li Pengchun, et al. **2006**. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Precambrian granitoids in northwest Hainan Island and its geological implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 30 (4): 510–518. (in Chinese with English abstract)]
- Yu J H, Griffin W L, Wang L J, et al. **2007a**. Where was South China in the Rodinia supercontinent? Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons. *Precam. Res.*, (under review)
- Yu J H, O' Reilly S Y, Zhao L, et al. **2007b**. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: a geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic study. *Mineral. Petrol.*, doi: 10. 1007 / s00710-006-0180-2.
- 于津海, 舒良树. 2002a. 福建沿海变质作用、岩浆活动和断裂构造. 见: 王德滋和周新民著: 中国东南晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社, p40–73.
- [Yu Jinhai, Shu Liangshu. **2002a**. Metamorphism, Magmatism and tectonics in coastal region of Fujian Province, SE China. // Wang Dezi, Zhou Xinmin, eds. Origin of Late Mesozoic Granitic Volcanic and Intrusive Complex and Crustal Evolution in Southeastern China. Beijing: Science Press, p40–73. (in Chinese)]
- 于津海, 徐夕生, 周新民. 2002b. 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.
- [Yu Jinhai, Xu Xisheng, 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]
- 于津海, 周新民, 赵蕾, 等. 2003. 南岭东段麻粒岩相变质岩的发现及其地质意义. *岩石学报*, 19 (3): 461–467.
- [Yu Jinhai, Zhou Xinmin, Zhao Lei, et al. **2003**. Discovery and implications of granulite facies metamorphic rocks in the eastern Nanling, China. *Acta Petrol. Sinica*, 19 (3): 461–467. (in Chinese with English abstract)]
- 于津海, 周新民, O' Reilly S Y, 等. 2005. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质-锆石的U-Pb-Hf同位素研究. *科学通报*, 50 (16): 1758–1767.
- [Yu Jinhai, Zhou Xinmin, O' Reilly S Y, et al. **2005**. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains. *Chin. Sci. Bull.*, 50 (18): 2080–2089]
- 于津海, 王丽娟, 周新民, 等. 2006. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代. *地球科学*, 31 (1): 38–48.
- [Yu Jinhai, Wang Lijuan, Zhou Xinmin, et al. **2006**. Compositions and formation history of the basement metamorphic rocks in northeastern Guangdong Province. *Earth Science—J. China Uni. Geosci.*, 31(1): 38–48. (in Chinese with English abstract)]
- 于津海, O' Reilly S Y, 王丽娟, 等. 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成. *科学通报*, 52 (1): 11–18.
- [Yu Jinhai, O' Reilly S Y, Wang Lijuan, et al. **2007**. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust. *Chin. Sci. Bull.*, 52 (1): 13–22]
- 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. *地球学报*, 20 (3): 284–288.
- [Zhang Yeming, Zhang Renjie, Hu Ning, et al. **1999**. High grade metamorphic complexes in middle Hainan Island: ages of the Pb-Pb single zircons and their geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (3): 284–288. (in Chinese with English abstract)]
- 赵凤清, 金文山, 甘晓春, 等. 1995. 华夏地块前加里东期变质基底的特征以及深部地壳性质. *地球学报*, (3): 235–245.
- [Zhao Fengqing, Jin Wenshan, Gan Xiaochun, et al. **1995**. Discussions on the characteristics of the deep crust and pre-Caledonian metamorphic basement in the Cathaysia block, southeastern China. *Acta Geoscientia Sinica*, (3): 235–245. (in Chinese with English abstract)]
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–617.
- [Zhejiang Bureau of Geology and Mineral Resources. **1989**. Regional Geology of Zhejiang Province. Beijing: Geol. Publ. House, pp1–617. (in Chinese)]
- Zhao G C, 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.

Phanerozoic Metamorphic Episodes and Characteristics of Cathaysia Block

YU Jin-hai, WANG Li-juan, WEI Zhen-yang, SUN Tao, SHU Liang-shu

*(State Key Laboratory for Crust–Mantle Evolution and Mineral Deposits Research,
Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)*

Abstract: There were several episodes of metamorphism in the Cathaysia Block. The Caledonian metamorphism occurred over the most area, and the highest grade was up to granulite facies. The granulites scatter over the Cathaysia Block with NE direction parallel to orogeny belt. It is proposed that the metamorphism took place in the orogenic setting, which likely resulted from the assembling and colliding of the Yangtze Block to the northern Gondwanaland, leading to deformation and metamorphism of sediments in the passive continental margin of the northern Gondwanaland. According to LA ICP-MS zircon U–Pb dating results of the Meixian gneiss and Xingning migmatite in eastern Guangdong Province and geochronological data of the monazites from nearby metamorphic rocks, the Hercynian metamorphism in the Cathaysia Block mainly took place at 260~280 Ma, younger than the typical Hercynian orogeny event in the central European continent. The Hercynian metamorphism in the Cathaysia Block was locally distributed, and probably occurred under the extension setting. The Indosinian metamorphism was wider in the Cathaysia Block, and the metamorphic grade in the Darongshan–Shiwandashan area at southwestern Cathaysia might reach granulite facies. The metamorphism in other regions was characterized by middle-low pressure facies series, which might be related with the extension setting in late Indosinian orogeny. LA ICP-MS zircon U–Pb isotope analyses indicate that the Indosinian metamorphism in the central Cathaysia occurred at 231~232 Ma. The Yanshanian metamorphic rocks, which are distributed along the coastal area of southeastern China and Central Range of Taiwan, show the feature of paired metamorphic belts. It probably suggests that the metamorphism be closely related with the subduction of Pacific Ocean under the southeastern China. The directions of metamorphic belt were different from Indosinian to Yanshanian events, indicating that tectonic regime influencing the Cathaysia Block was transformed in these two episodes.

Key words: Cathaysia Block; Phanerozoic metamorphism; granulite facie; zircon U–Pb dating