

文章编号:1671-4814(2015)02-079-10

钦杭结合带加里东期榴闪岩超高压变质作用研究^{*}

姜 杨¹, 陈志洪¹, 谭桂丽¹, 杨祝良¹, 周效华¹, 袁 强², 余明刚¹, 赵希林¹, 段 政¹

(1 南京地质矿产研究所, 南京 210016)

(2 浙江省地质调查院, 杭州 311203)

摘要:对钦杭结合带首次发现的加里东期榴闪岩进行了详细的年代学、矿物学和变质作用研究。结果表明,榴闪岩的变质时代为 454 ± 4 Ma, 经历了早期角闪岩相进变质、中期榴辉岩相峰期变质和晚期角闪岩相退变质三个阶段,具顺时针 P-T-t 轨迹。早期角闪岩相进变质作用阶段的矿物共生组合为角闪石+斜长石+石英,温压条件分别为 $719^{\circ}\text{C} \sim 795^{\circ}\text{C}$ 和 $7.56\text{KPa} \sim 8.30\text{KPa}$;中期榴辉岩相峰期变质作用阶段的矿物共生组合为石榴子石+绿辉石(后期退变为透辉石+钠长石)+石英,温压条件分别为 $668^{\circ}\text{C} \sim 821^{\circ}\text{C}$ 和 $26.42\text{KPa} \sim 33.46\text{KPa}$;晚期角闪岩相退变质作用阶段的矿物共生组合为石榴子石+角闪岩+斜长石+石英(即榴闪岩),相应的温压条件分别为 $611^{\circ}\text{C} \sim 854^{\circ}\text{C}$ 和 $4.76\text{KPa} \sim 9.30\text{KPa}$ 。结合前人资料推断,区域内加里东期可能经历了榴辉岩相超高压变质→高温麻粒岩相退变质→角闪岩相退变质的演化过程。钦杭结合带首次厘定出加里东期超高压变质作用,表明华夏和扬子两大陆块碰撞拼合发生在加里东期。

关键词:超高压变质;顺时针 P-T-t 轨迹;榴闪岩;加里东期;钦杭结合带

中图分类号:P588.34

文献标识码:A

钦杭结合带是扬子与华夏两大陆块碰撞拼合形成的巨型构造带,大体沿钦州湾呈北东向延伸至杭州湾,全长近 2000 km。一般认为这两大陆块在晋宁期发生碰撞,至加里东期完全拼合形成完整的华南陆块。但关于晋宁运动与加里东运动的动力学机制与演变过程、两大陆块碰撞方式与构造演化、以及钦杭结合带的边界等,至今仍存在较大争议,这直接制约了对华南大地构造格局的全面认识^[1-10]。

浙江省境内的江山—绍兴断裂带是钦杭结合带地质构造现象丰富、前寒武纪变质基底(主要包括陈蔡岩群和部分八都岩群)出露较广泛的地段(图 1a),也是最早得到公认的结合带,蕴含着有关钦杭结合带形成演化的重要线索,一直以来都是国内外地质学界研究和解剖华南大地构造的热点地区。该带内的龙游县八都岩群长英质片麻岩中首次发现了呈孤立小岩块出露的加里东期榴闪岩,推测其可能是由榴辉岩退变质形成的^[12]。笔者等对龙游榴闪岩

开展了系统的岩石学和矿物学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素等分析,陆续取得一系列新成果。本文重点介绍龙游榴闪岩的角闪岩相进变质、榴辉岩相峰期变质和角闪岩相退变质阶段的矿物组合和变质温压条件,说明该榴闪岩确由榴辉岩发生角闪岩相退变质形成。江绍结合带加里东期超高压变质作用研究,对探讨华夏、扬子两大陆块碰撞拼贴时限与方式以及加里东运动的性质具有重大意义。

1 研究区概况

钦杭结合带江山—绍兴段沿线是浙江省前寒武纪变质基底的主要分布区,包括八都岩群和陈蔡岩群等,岩性有片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩、大理岩和石英岩等(图 1a)。研究区龙游县境内的变质岩系以副片麻岩为主,间夹斜长角闪岩(图 1b)。该套变质岩在《浙江省区域地质志》中被归入陈蔡岩群^[13],之后的 1:5 万区调中曾单独建立龙游岩群^①,在地

^{*} 收稿日期:2014-11-05 改回日期:2014-12-13 责任编辑:汪建宁
基金项目:中国地质调查局项目(项目编号:12120114005801 和 12120113065200)和国家自然科学基金青年基金项目(项目编号:41002024)资助。
第一作者简介:姜杨,1980 年生,女,助理研究员,从事华南前寒武纪地质研究。

层清理时沿用《浙江省区域地质志》的地层划分方案,仍主要归入陈蔡岩群^[14]。但胡雄健等提出龙游溪口地区变质岩层位相当于浙西南龙泉地区的八都岩群^[15];陈绍海等的研究也表明龙游地区的斜长角闪岩具有 MORB 的地球化学特征,与陈蔡地区典型的陈蔡岩群斜长角闪岩(岛弧型和洋岛型)明显有

别^[16];加之片麻岩中普遍含石墨^①,具有八都岩群的岩性特征,近年来浙江省地矿系统倾向于将龙游溪口地区的变质岩系划归八都岩群。总之,龙游县境内的变质岩系研究程度不高,其原岩时代、变质时代及层位归属等,尚存在争议。本文沿用浙江省地矿系统新的划分方案,将其归入八都岩群。

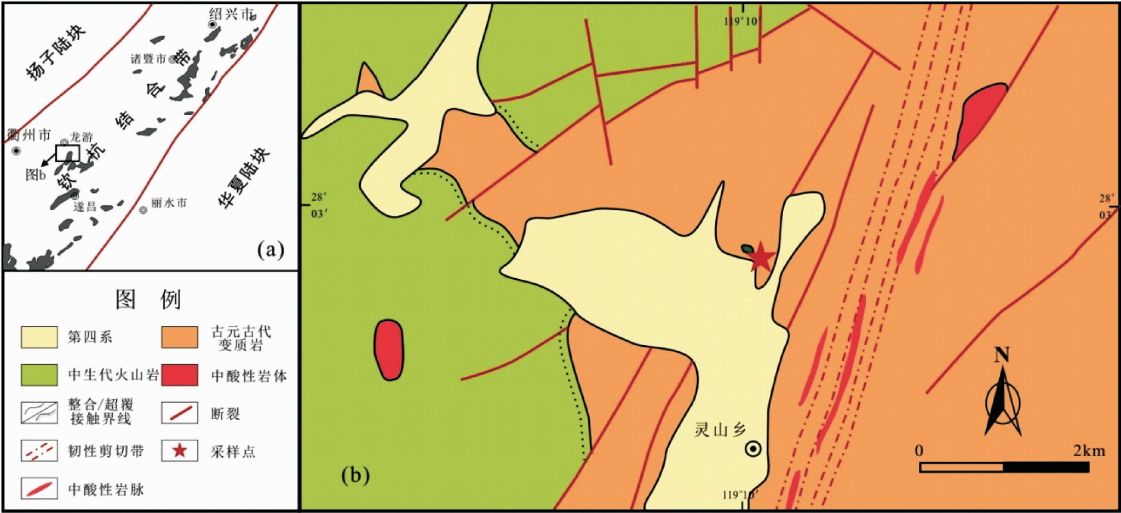


图 1 研究区区域地质简图(图 b 据文献[11]修改)

Fig. 1 Regional geological sketch map of the studied area

2 变质作用阶段及其温压条件

龙游榴闪岩的露头可见结晶粗大的矿物,主要由粗粒角闪石和石榴子石组成,其中石榴子石多呈团块状集合体产出,角闪石多呈类似辉石的近等轴短柱状,两种矿物含量基本相当,粒径一般在 0.5~1.5 cm,多数为 1 cm 左右(图 2a)。

镜下观察显示,榴闪岩呈柱状粒状变晶结构,主要矿物为石榴子石(45%~50%)、角闪石(40%~45%)、斜长石(5%)及石英(±3%),并残留少量辉石,偶见黑云母、绿泥石和金红石(图 2b)。石榴子石呈淡粉色粒状,表面裂纹发育,颗粒大小不一,一般在 1~5mm 之间,多呈聚斑状产出;发育筛状结构,含较丰富的矿物包裹体,包裹体类型包括石英、斜长石、角闪石、磷灰石等(图 2b、图 2c),记载了早期进变质阶段的矿物共生组合和石榴子石的生长证据;石榴子石边部发育典型的斜长石与角闪石后成合晶结构,暗示岩石经历了强烈的角闪岩相退变质。角闪石有两类,其中一类颗粒较小,多与斜长石一起围绕石榴子石分布,单偏光下多呈黄绿色—黄色的多色性,与斜长石一起构成了石榴子石的反应边(图 2b、图 2c);另一类则是保留辉石假象的角闪石,矿物颗粒较大,最大可达 2~3 mm,多呈褐色—黄褐色的多色性,部分矿物颗粒中间亦可见少量辉石残

留(图 2b),反映角闪石为辉石后期退变而成。斜长石晶形以他形为主,聚片双晶结构发育,多充填于其他矿物颗粒之间。岩石中亦可见钛铁矿周围包裹榴石等反应边结构(图 2b),均是榴闪岩减压退变质的记录。值得注意的是,局部可见较为自形斜长石和角闪石,接触边界平直且三联点结构发育,并有少量他形石榴子石残留(图 2d),反映岩石退变过程中局部已达到较为稳定的平衡状态。

根据上述岩相学特征分析,榴闪岩至少经历了角闪岩相进变质、榴辉岩相峰期变质和角闪岩相退变质三个阶段,各阶段的矿物共生组合详见下述。

为进一步确定榴闪岩不同变质作用阶段的矿物共生组合及单矿物化学成分并其计算温压条件,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 JCSA733 型电子探针仪进行了矿物成分分析,分析加速电压为 15kv,电流 20nA,分析结果见表 1。

(1)角闪岩相进变质作用阶段

从石榴子石包裹的矿物推测,该阶段主要矿物共生组合为:斜长石+角闪石+石英,其他矿物可能包括磷灰石等。

斜长石以钙长石为主,进行标准矿物计算后获得的 An 含量为 74~82,Ab 含量为 15~24,Or 含量极低(<0.4)。在 Smith 的长石分类图解^[17]中基

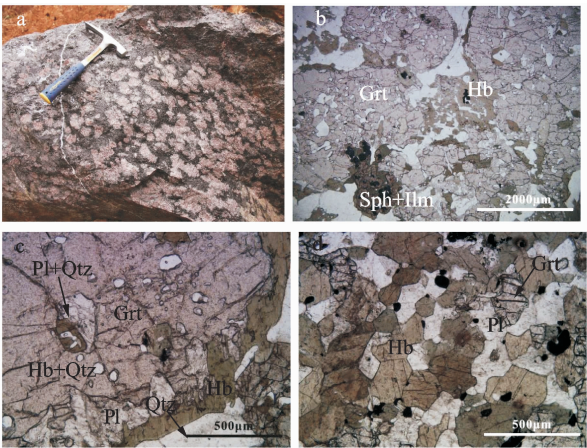


图 2 龙游榴闪岩露头 and 显微照片

Fig. 2 Outcrop and microphotographs of the Longyou garnet amphibolites

a-榴闪岩露头;b-石榴子石呈集合体产出,见钛铁矿发育榍石反应边;c-石榴子石发育筛状结构,包裹有早期进变质形成的斜长石、角闪和石英等矿物,外围被退变质形成的斜长石和角闪石包围而呈反应边结构;d-榴闪岩中局部可见退变质形成的斜长石和角闪石呈稳定结构,并有它形石榴子石残留。Grt-石榴子石;Hb-角闪石;Qtz-石英;Pl-斜长石;Sph-榍石;Ilm-钛铁矿

本位于倍长石区域内(图 3)。角闪石的 SiO₂ 含量均偏低(<43.74%)、CaO 和 TiO₂ 含量较高(分别为 11.78%~11.89%和 1.02%~1.40%);计算求得角闪石的 Si 为 6.44~6.47,Ca_B>1.88,TiO_B<0.12,而(Na+K)_A 为 0.31~0.38,在角闪石分类图解^[18]中均位于铁普通角闪石区域,以富铁钙质角闪石为主(图 4)。

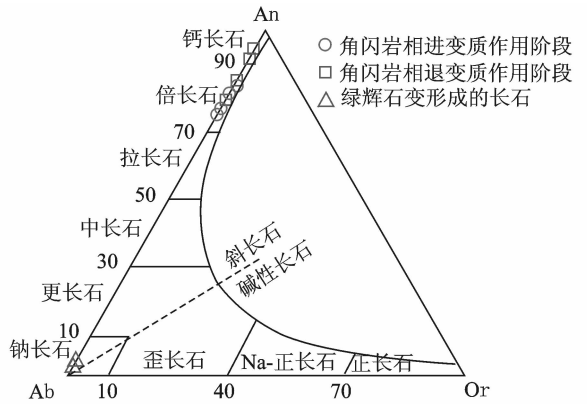


图 3 长石 An-Ab-Or 分类图解^[17]

Fig. 3 Ab-An-Or discrimination diagram of feldspars

利用角闪石-斜长石-石英温度计^[19]和角闪石 Al 压力计^[20]计算获得的温压条件分别为 719℃~795℃和 7.56Kpa~8.30Kpa(表 1)。

(2)榴辉岩相峰期变质作用阶段

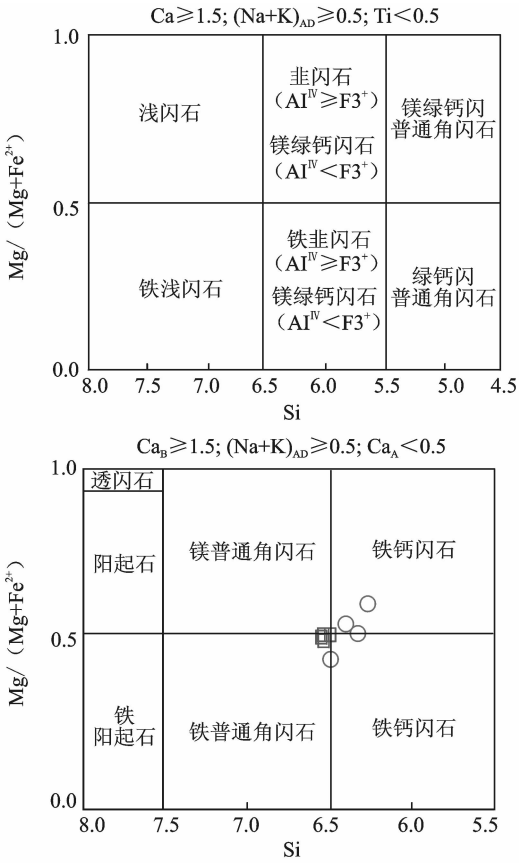


图 4 角闪石分类图解^[18](图例同图 3)

Fig. 4 Discrimination diagrams of amphibolites

研究表明榴辉岩在后期退变质过程中,绿辉石将逐渐分解为透辉石和富钠质的斜长石,特别在强烈的角闪岩相退变质过程中,透辉石和富钠质斜长石会继续分解而难以保留^[21]。本次岩相学研究表明,龙游榴闪岩中的角闪石残留有未完全发生分解的细粒透辉石,且获得了可靠的富钠质斜长石成分,证明榴闪岩曾发生过绿辉石分解为透辉石和富钠质斜长石的退变质过程。据此推断,榴辉岩相峰期变质作用阶段的矿物组合应为石榴子石(核部)+绿辉石±石英。

电子探针分析表明,石榴子石(核部)具有较高的 FeO 含量(>28.69%),CaO 含量中等(8.81%和 7.75%),MgO 和 MnO 含量较低(分别为<3.21%和<0.87%),相应的铁铝榴石(Alm)分子分别为 64.1%和 64.5%,钙铝榴石分子(Gro)分别为 21.5%和 20.6%,镁铝榴石分子(Pyr)为 12.7%和 12.9%,锰铝榴石分子(Spe)基本<2%,钙铁榴石分子(And)基本为 0,反映石榴子石具有高铁的特征。单斜辉石各端元中 En 约 31.9%和 30.7%,Wo 约为 49.8%和 49.2%,Fs 为 18.3%和 20.1%,在 Wo-Fs-En 分类图解中均位于透辉石区域(图略)。

表 1 龙游榴闪岩单矿物化学分析和温压条件计算结果

Table 1 Mineral chemical analyses and P-T conditions of the Longyou garnet amphibolites

样品号	角闪岩相进变质作用阶段										榴辉岩相峰期变质作用阶段					角闪岩相退变质作用阶段										
	6-10	6-9	1-19	1-20	3-10	3-11	2-8	2-9	1-17	1-14	Pl7	3-6	3-2	Pl11	5-1	5-3	5-2	2-7	2-11	2-10	7-4	7-2	7-1	7-6	7-8	7-7
矿物	角闪石	钙长石	角闪石	钙长石	角闪石	钙长石	角闪石	钙长石	石榴石	透辉石	钠长石	石榴石	透辉石	钠长石	石榴石	角闪石	钙长石	石榴石	角闪石	钙长石	石榴石	角闪石	钙长石	石榴石	角闪石	钙长石
SiO ₂	43.21	48.87	43.72	48.44	43.74	49.62	43.74	47.42	38.81	52.04	69.34	38.44	51.31	69.54	39.32	42.50	47.48	38.92	42.97	48.76	39.19	41.95	44.95	39.08	42.58	45.13
TiO ₂	1.28	0.00	1.02	0.00	1.40	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	1.16	0.00	0.00	1.23	0.00	0.03	1.44	0.00	0.03	1.11	0.00
Al ₂ O ₃	13.42	32.24	12.65	33.11	12.67	31.41	12.65	32.89	21.16	1.17	19.14	21.07	1.15	19.92	21.43	14.35	33.76	21.67	13.13	31.45	21.93	15.01	35.30	21.54	13.40	34.18
FeO	15.62	0.08	18.70	0.11	17.36	0.00	18.36	0.16	28.69	11.28	0.03	28.77	12.38	0.53	26.4	17.79	0.13	25.79	18.01	0.00	26.57	14.96	0.02	27.82	16.42	0.04
MnO	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.87	0.03	0.00	0.65	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.84	0.00	0.00	0.73	0.05	0.00
MgO	9.19	0.00	8.81	0.00	9.20	0.00	8.83	0.00	3.19	11.04	0.02	3.21	10.65	0.00	3.51	8.93	0.00	3.09	8.06	0.00	3.74	10.02	0.00	3.99	9.68	0.00
CaO	11.79	14.73	11.78	16.61	11.89	15.30	11.85	17.21	8.81	24.00	0.65	7.75	23.74	0.69	9.78	11.87	17.54	8.12	11.90	16.20	9.81	11.45	18.70	8.70	11.96	18.23
Na ₂ O	1.09	2.50	1.06	2.17	0.93	2.79	1.07	1.76	0.00	0.24	11.29	0.00	0.27	10.14	0.00	1.48	1.72	0.00	1.11	2.22	0.00	1.43	0.66	0.00	1.42	0.95
K ₂ O	0.91	0.00	0.76	0.03	1.02	0.01	0.90	0.07	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.00	0.69	0.00	0.00	1.09	0.03	0.00	0.93	0.00	0.00	0.75	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	96.52	98.42	98.54	100.47	98.21	99.13	98.50	99.51	101.41	99.77	100.61	100.11	99.55	100.92	101.09	98.77	100.63	98.52	97.50	98.66	102.11	97.19	99.63	101.89	97.37	98.53
Pyr									12.7			12.9			13.8		12.0			14.4				15.6		
Alm									64.1			64.5			58.3		56.3			57.3				61.0		
Spe									1.7			2.0			1.4		2.1			1.8				1.6		
Gro									21.5			20.6			26.5		29.6			26.5				21.7		
And									0.0			0.0			0.0		0.0			0.1				0.1		
En										31.9			30.7													
Fs										18.3			20.1													
Wo										49.8			49.2													
Or	0			0.2		0.1		0.4			0.4			0.5			0.0		0.2				0.0			0
Ab	21			18		24		15			95			85			15		19				6			8
An	74			80		74		82			1			3			84		77				93			90
Si	6.48		6.44		6.47		6.46								6.25				6.46		6.18				6.33	
Ca _B	1.89		1.88		1.88		1.88								1.87				1.92		1.81				1.91	
TiO _B	0.11		0.12		0.12		0.12								0.13				0.08		0.19				0.09	
(Na+K) _B	0.38		0.31		0.34		0.35								0.42				0.45		0.39				0.46	
温度(℃)	719		778		729		795			668			821				716		611		854				790	
压力(Kbar)	8.30		7.57		7.57		7.56		26.42				33.46		5.32/8.94				4.76/8.09		8.39/9.53				9.30/8.26	

钠长石颗粒 Ab 含量 >85 , An 和 Or 含量很低(分别 <3 和 <0.5)(图 3)。

利用石榴子石单斜辉石温度计^[22]和石榴子石—单斜辉石—斜长石—石英压力计^[23]计算,结果表明榴辉岩相峰期变质温压条件分别为 $668^{\circ}\text{C}\sim 821^{\circ}\text{C}$ 和 $26.42\text{KPa}\sim 33.46\text{KPa}$ (表 1)。

(3)角闪岩相退变质作用阶段

岩石在经历了榴辉岩相峰期变质之后,最终退变至角闪岩相,形成了以石榴子石+角闪石+斜长石+石英共生组合为主的榴闪岩;钛铁矿亦发生分解反应,析出铁质而形成榍石。

与峰期石榴子石(核部)成分相比,该阶段的石榴子石 FeO 含量明显降低($<27.82\%$)而 CaO 和 MgO 含量(分别为 $8.12\%\sim 9.81\%$ 和 $3.09\%\sim 3.99\%$)则略有升高;相应的铁铝榴石分子($56.3\%\sim 61.0\%$)明显降低而钙铝榴石($21.7\%\sim 29.6\%$)和镁铝榴石分子($12.0\%\sim 15.6\%$),有所上升,锰铝榴石分子(Spe)和钙铁榴石分子(And)含量基本不变。

斜长石亦以钙长石为主,与进变质阶段的斜长石相比,CaO 含量升高而 Na_2O 含量降低,标准矿物计算结果表明其 An 含量为 $77\sim 93$,Ab 含量为 $6\sim 19$,而 Or 含量极低(<0.2),在 Smith 的长石分类图解^[17]中位于倍长石钙长石区域内(图 3)。

与进变质阶段形成的角闪石相比,退变质阶段形成的角闪石 SiO_2 和 FeO 含量略有降低而 Al_2O_3 含量则明显升高;计算得到的 Si 为 $6.18\sim 6.46$, $\text{Ca}_B>1.81$, $\text{TiO}_B<0.19$,而 $(\text{Na}+\text{K})_A$ 为 $0.39\sim 0.46$,在角闪石分类图解^[18]中基本位于铁普通角闪石钙质闪石区域(图 4)。

利用角闪石—斜长石—石英温度计^[19]和石榴子石—角闪石—斜长石—石英压力计^[24],估算角闪岩相退变质作用的温压条件分别为 $611^{\circ}\text{C}\sim 854^{\circ}\text{C}$ 和 $4.76\text{KPa}\sim 9.30\text{KPa}$;而利用角闪石—斜长石—石英温度计^[19]和角闪石 Al 压力计^[20]计算获得的温压条件分别为 $653^{\circ}\text{C}\sim 872^{\circ}\text{C}$ 和 $8.09\text{KPa}\sim 9.53\text{KPa}$ (表 1)。上述两种计算方法获得的温度范围差异不大,而压力范围则有较大差异。根据榴闪岩最终的矿物共生组合,选取前一种温压计计算方法获得的结果作为角闪岩相退变质的温压条件。

从上述角闪岩相进变质—榴辉岩相峰期变质—角闪岩相退变质过程的温压条件可以推断,岩石形成于高温超高压条件下,经历了近等温升压的进变质作用阶段至近等温降压的退变质作用阶段,具有顺时针的 P-T-t 轨迹,与典型的碰撞造山带的 P-T-t 轨迹一致^[25]。

需说明的是,本次并未获得岩石经历了麻粒岩相退变质作用阶段的相关证据,但是角闪岩相退变质作用阶段的温压条件计算结果,部分已进入麻粒岩相区域,暗示岩石可能经历了麻粒岩相退变质作用阶段。

3 锆石 U-Pb 年代学

3.1 分析方法

锆石用人工重砂方法选出,然后在双目镜下挑纯,粘贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行阴极发光(CL)图象分析。CL 照相在中国地质科学院矿产资源研究所完成。锆石 LA-ICP-MS 测年在南京大学壳幔演化与成矿作用研究国家重点实验室完成,采用的仪器型号为 Agilent 7500 a,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统,分析时激光束斑直径为 $30\mu\text{m}$,激光脉冲重复频率为 5Hz ;实验原理和详细的测试方法见文献^[26]。ICP-MS 的分析数据 GLITTER4.0 程序计算获得同位素比值、年龄和误差。普通铅校正采用 Andersen 的方法进行^[27],校正后的结果用 ISO-PLOT 程序(ver. 2.49)完成年龄计算和谐和图绘制^[28]。

3.2 测试结果

对榴闪岩(10BSST-1)共完成了 28 个锆石年龄的测定,分析结果见表 3。标定测年锆石大部分为短柱状到长柱状,长/宽为 $1:1\sim 3:1$,颗粒大小约 $10\sim 250\mu\text{m}$ 。锆石的 U、Th 含量极低(分别为 $16\sim 81\mu\text{g/g}$ 和 $3\sim 25\mu\text{g/g}$),Th/U 比值为 $0.08\sim 0.85$ (大部分 <0.4),属于典型的变质锆石^[29];阴极发光(CL)图象强度较弱,具变质锆石所特有的弱分带或面状分带特征(图 5)。测年结果显示,28 个测点的($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)加权平均年龄为 $454\pm 4\text{Ma}$ (MSWD=0.6, $n=28$),代表了榴闪岩的变质时代(图 6),这与汪建国等报道的变质年龄($451\pm 8/-18$)Ma 基本一致^[11]。

4 讨论

榴闪岩是高压变质的代表性岩石,既可由进变质作用形成,也可由退变质作用形成。高压进变质形成的榴闪岩见于秦岭造山带^[30]、祁连造山带^[31]等地;在苏鲁一大别造山带发现超高压相榴辉岩退变质形成的高压相榴闪岩^[32]。龙游榴闪岩的变质时代为 $454\pm 4\text{Ma}$,经历了角闪岩相进变质—榴辉岩相峰期变质—角闪岩相退变质作用过程,说明江绍带加里东期曾发生深俯冲并快速折返。

表 2 龙游榴闪岩的锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 Zircon U-Pb isotope of the Longyou garnet amphibolites

Spots	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	年龄						同位素比值					
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ
1-01	12	24	0.50	0.055 7	0.004 9	0.548 1	0.047 0	0.071 3	0.001 6	442	200	444	31	444	9
1-02	5	33	0.16	0.055 5	0.004 7	0.539 8	0.044 9	0.070 6	0.001 7	432	195	438	30	440	10
1-03	6	16	0.38	0.055 6	0.006 7	0.546 3	0.064 5	0.071 3	0.001 8	436	274	443	42	444	11
1-04	11	39	0.27	0.055 8	0.004 0	0.544 9	0.037 7	0.070 9	0.001 5	442	163	442	25	442	9
1-05	8	51	0.15	0.056 0	0.002 8	0.560 6	0.027 1	0.072 6	0.001 2	453	113	452	18	452	7
1-06	8	40	0.19	0.056 1	0.002 5	0.562 2	0.024 5	0.072 6	0.001 1	458	100	453	16	452	7
1-07	13	59	0.21	0.056 1	0.002 6	0.563 4	0.025 1	0.072 8	0.001 2	457	103	454	16	453	7
1-08	8	31	0.25	0.056 0	0.003 8	0.565 3	0.038 0	0.073 2	0.001 4	452	157	455	25	456	9
1-09	3	24	0.13	0.056 5	0.008 0	0.582 1	0.080 0	0.0747	0.0027	472	318	466	51	465	16
1-10	3	42	0.08	0.055 9	0.005 3	0.562 5	0.051 6	0.073 1	0.002 1	448	215	453	34	455	12
1-11	16	81	0.20	0.055 9	0.002 2	0.568 6	0.021 4	0.073 8	0.001 1	449	88	457	14	459	7
1-12	4	22	0.18	0.056 7	0.005 3	0.572 1	0.052 4	0.073 3	0.001 6	478	213	459	34	456	10
1-13	5	41	0.13	0.055 8	0.004 6	0.564 1	0.045 3	0.073 3	0.001 7	446	189	454	29	456	10
1-14	17	56	0.30	0.055 4	0.004 0	0.571 3	0.040 1	0.074 7	0.001 7	430	166	459	26	465	10
1-15	3	20	0.16	0.057 3	0.008 2	0.572 5	0.080 0	0.072 5	0.002 4	502	321	460	52	451	14
1-16	8	38	0.21	0.059 6	0.003 4	0.609 6	0.034 3	0.0742	0.0013	589	128	483	22	461	8
1-17	8	27	0.28	0.055 9	0.004 2	0.566 7	0.042 0	0.073 5	0.001 4	450	173	456	27	457	9
1-18	7	37	0.18	0.056 1	0.002 8	0.576 2	0.028 6	0.074 5	0.001 2	457	115	462	18	463	7
1-19	6	22	0.26	0.056 5	0.006 5	0.583 7	0.066 2	0.074 9	0.002 1	472	264	467	42	466	13
1-20	16	19	0.85	0.056 2	0.006 0	0.562 2	0.059 2	0.072 6	0.001 7	459	244	453	38	452	10
1-21	6	68	0.09	0.056 1	0.005 4	0.573 1	0.053 7	0.074 1	0.002 2	456	221	460	35	461	13
1-22	14	27	0.52	0.056 1	0.003 9	0.572 7	0.039 4	0.074 0	0.001 3	457	159	460	25	460	8
1-23	25	67	0.38	0.058 7	0.005 7	0.591 5	0.055 2	0.073 2	0.002 3	555	219	472	35	455	14
1-24	11	19	0.58	0.055 8	0.008 9	0.552 7	0.086 1	0.071 9	0.002 5	444	349	447	56	447	15
1-25	7	17	0.44	0.056 6	0.007 3	0.552 8	0.070 4	0.070 9	0.001 9	475	294	447	46	441	11
1-26	5	26	0.20	0.055 3	0.004 8	0.568 4	0.048 7	0.074 6	0.001 6	424	199	457	32	464	9
1-27	16	81	0.20	0.056 1	0.002 4	0.557 7	0.023 6	0.072 1	0.001 2	456	98	450	15	449	7
1-28	13	26	0.49	0.057 5	0.012 7	0.567 2	0.122 9	0.071 6	0.003 7	509	450	456	80	446	22

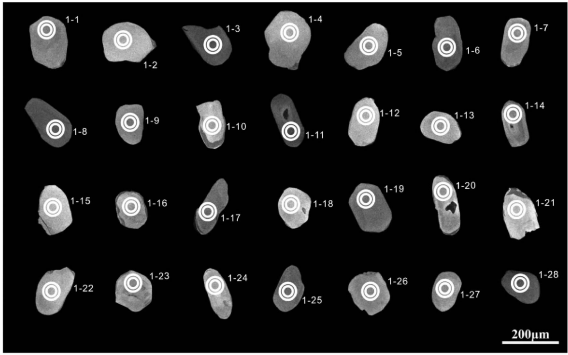


图 5 龙游榴闪岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 CL images of zircons from the Longyou garnet amphibolites

在钦杭结合带江绍段沿线,八都岩群和陈蔡岩群在空间上可共生,岩石组合和变质相也大致相似。不同的是,八都岩群的原岩可能主要属古元古代,而

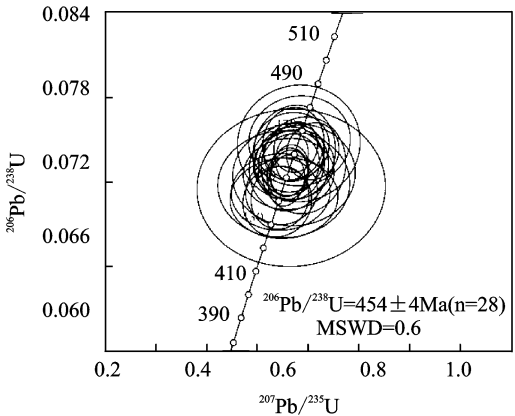


图 6 龙游榴闪岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagram of zircons from the Longyou garnet amphibolites

陈蔡岩群原岩主要属新元古代^[15,33-37]。比较而言,对陈蔡岩群变质作用研究较多,如前人报道了陈蔡

岩群变质岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 415.1 Ma, 反映其主变质时代属加里东期^[38]; 变质作用发生于中高温、中—低压条件下^[39], 变质相大多达到高绿片岩相—角闪岩相, 根据变质共生矿物对 $\Delta^{18}\text{O}$ 值得出变质温度为 554℃~573℃, 平均 $565\pm 15^\circ\text{C}$ ^[40]; 亦有研究表明陈蔡岩群经历了低角闪岩相到高角闪岩相两个阶段的变质, 前者温压条件分别为 530℃~580℃和 0.4 GPa~0.5 GPa; 主变质晚期温度明显增高, 出现高角闪岩相矿物组合, 其温压条件估算分别为 600℃~700℃和 0.6 GPa~0.8 GPa^[41]。陈蔡岩群中石榴子石成分特征也反映其变质程度达到角闪岩相, 根据镁在石榴石—黑云母矿物对的分配与温度关系计算, 其变质温度为 550℃~700℃, 压力为 400 MPa~800 MPa, 相当于中压角闪岩相^[42]。前人在陈蔡岩群变质岩中还发现少量多硅白云母等—中—高压变质矿物^[43-44]; 通过对陈蔡岩群变质岩中角闪石的研究, 提出存在麻粒岩相变质的迹象^[39]。此外, 还有研究表明, 陈蔡岩群变质作用有从早期十字石—矽线石相向晚期低绿片岩相退变的过程^[45], 结合遂昌已发现麻粒岩相变质作用^[46], 龙游榴闪岩超高压变质作用可能反映研究区曾经历过较强烈的退变质作用过程。

如前所述, 一般认为扬子和华夏两大陆块与晋宁期发生碰撞, 之后发生裂解, 至加里东期发生陆内造山事件导致两大陆块最终拼合而成统一的华南大陆^[1-7, 47]。有关华南陆内造山模式的主要依据包括: ①华夏地块大规模分布的加里东期花岗岩以 S 型的过铝质花岗岩为主, 缺乏后造山 A 型花岗岩、钙碱性花岗岩等^[7, 48-49]; ②区内缺乏反映加里东期古华南海关事件的岛弧安山岩和蛇绿岩套等^[7]; ③华夏地区加里东期幔源岩浆活动微弱, 鲜见同期火山岩和基性岩^[6-7], Wang et al. 报道了华夏地块内部规模较小的 4 个基性岩体, 将其解释为加里东期陆内造山作用的产物^[50]; ④华南缺乏加里东期高压超高压变质岩, 仅局部见有高压麻粒岩相变质作用^[46, 51]。

然而, 关于扬子和华夏两大陆块的碰撞拼合时间以及华南加里东运动的性质(陆内造山还是陆陆碰撞造山)始终存在重大分歧。如徐备等认为扬子和华夏板块于元古代晚期(震旦纪前)发生碰撞造山运动, 加里东期又有一次碰撞事件^[52]; 王德滋和沈渭洲提出华夏地块与扬子地块之间至少经历了 3 次大的碰撞拼贴(晋宁期、加里东期和海西—印支期), 相应形成了 3 期碰撞型花岗岩, 并最终于印支期发生碰撞拼合^[53]; 彭松柏等则提出, 云开信宜、高州一

带加里东期基性侵入岩($392\pm 53\text{Ma}$)形成于俯冲—碰撞大陆边缘的火山弧构造背景, 且是俯冲—碰撞后伸展—拆沉—底侵作用阶段的产物^[54]; 吴浩若亦提出志留纪早期江南海盆封闭, 扬子地块和华夏地块之间形成加里东褶皱带, 赣东北蛇绿岩带为加里东褶皱带和华夏地块之间的接合带^[55]。

本次研究揭示龙游榴闪岩是榴辉岩退变质作用的产物, 这是钦杭结合带内首次发现超高压变质作用, 说明华夏和扬子两大陆块真正的碰撞拼贴应发生在加里东期。榴闪岩相对富 Ti($> 2\%$)和 Na($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}> 1.2$)、高 Nb 含量($> 9\ \mu\text{g/g}$), 具有富铌玄武岩的地球化学特征, 其锆石初始 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(454\text{ Ma})=0.95\sim 5.47$ (笔者暂未发表数据), 推断其原岩可能为形成于大洋俯冲环境的基性岛弧岩浆岩, 从另一方面佐证了榴闪岩原岩形成之时两大陆块之间可能仍存在强烈的洋—陆俯冲作用而尚未发生碰撞拼合。钦杭结合带超高压变质作用的厘定, 说明加里东运动的本质为陆陆碰撞造山而非陆内造山, 这对探讨华南的大地构造演化历史具有重要意义。

5 结论

(1) 钦杭结合带龙游榴闪岩的变质时代为 $454\pm 4\text{Ma}$, 经历了早期角闪岩相进变质、中期榴辉岩相峰期变质和晚期角闪岩相退变质三个阶段, 具顺时针 P-T-t 轨迹; 暗示其属于陆陆碰撞造山的产物。

(2) 钦杭结合带内加里东期超高压变质作用的厘定, 说明华夏和扬子两大陆块碰撞拼合发生在加里东期。

致谢: 本研究得到肖庆辉、陆松年、邓晋福、潘桂棠等先生的指导, 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室吴春明教授和李晔博士在温压条件计算方面给予帮助, 与浙江省地质调查院王孔忠高工、陈忠大高工、顾明光高工、汪建国高工和余盛强工程师进行过多次研讨, 加拿大滑铁卢大学林寿发教授、南京地质矿产研究所邢光福研究员、沈加林高工、王存智助理研究员和洪文涛研究实习员等提供了有益的建议, 在此一并表示诚挚谢意!

注释

① 浙江省地质矿产厅. 1:5 万衢州市幅、龙游县幅、灵山幅、沐尘幅、蕉川幅区域地质调查报告(内部资料). 1995.

参考文献

- [1] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145:111-130.
- [2] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 2007, 159:117-131.
- [3] Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Lithos*, 2009, 174:117-128.
- [4] Li X H, Li W X, Li Q L, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the ~850Ma Gangbian alkaline complex in South China: Evidence from in situ zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes and whole-rock geochemistry[J]. *Lithos*, 2010, 114 (1-2): 1-15.
- [5] 李献华,李武显,何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解——观察、解释与检验[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(6):543-559.
- [6] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(7):1035-1052.
- [7] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Kwangsiian curst anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains[J]. *Lithos*, 2011, 127: 239.
- [8] 姜杨,赵希林,林寿发,等. 扬子克拉通东南缘新元古代陆缘弧型 TTG 的厘定及其构造意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(8):1461-1474.
- [9] 周永章,郑义,曾长育,等. 关于钦—杭成矿带的若干认识[J]. *地学前缘*, 2015, 22(2):1-6.
- [10] 杨明桂,吴富江,宋志瑞,等. 赣北:华南地质之窗[J]. *地质学报*, 2015, 89(2):222-233.
- [11] 汪建国,余盛强,胡艳华,等. 江山—绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征[J]. *中国地质*, 2014, 41(4):1356-1363.
- [12] 邢光福,姜杨,陈志洪,等. 钦杭结合带首次发现加里东期榴闪岩[J]. *资源调查与环境*, 2013, 24(4): 封 2.
- [13] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [14] 浙江省地质矿产局. 浙江省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [15] 胡雄健,许金坤,康海男,等. 浙西南下元古界八都群的地质特征及意义[J]. *中国区域地质*, 1991, (3):234-240.
- [16] 陈绍海,周新华,李继亮. 浙江陈蔡群斜长角闪岩的地球化学特征及其大地构造背景探讨[J]. *Scientia Geologica Sinica*, . 1999, 34(2):154-165.
- [17] Smith J V. Feldspar Minerals II. Chemical and Textural Properties [M]. Heidelberg: Springer Verlag, 1974.
- [18] Leake B E and 21 others. Nomenclature of amphiboles, report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *Mineral . Mag .*, 1997, 61:295-321.
- [19] Holland T and Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 116: 433-447.
- [20] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al in hornblende barometer[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1992, 110: 304-310.
- [21] 刘贻灿,徐树桐,李曙光,等. 大别山北部榴辉岩的退变质特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(4):299-304.
- [22] Ravna K. The garnet - clinopyroxene Fe²⁺-Mg geothermometer: an updated calibration[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18:211-219.
- [23] Eckert J O Jr., Newton R C, Kleppa O J. The ΔH of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry [J]. *American Mineralogist*, 1991, 76: 148-160.
- [24] Dale J, Holland T, Powell R. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 140: 353-362.
- [25] 邓晋福,莫宣学,肖庆辉,等. 地质事件序列与造山过程的 p-T-t 轨迹[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(4): 336-342
- [26] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 2004, 211: 47-69.
- [27] Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chem. Geol.*, 2002, 192: 59-79.
- [28] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2. 06; A geochrono-

- logical tool kit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999, 1a: 48.
- [29] Koschek Q. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. Journal of Microscopy, 1993, 171(3):223-232.
- [30] 郭进京,李怀坤,陈志宏. 秦岭造山带秦岭杂岩研究中有关问题讨论[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(2):95-102.
- [31] 苏建平,胡能高,付国民. 祁连西段龚岔口地区榴闪岩的高压变质作用及其地质意义[J]. 矿物学报, 2004, 24(4):391-397.
- [32] 戚学祥,唐哲民,闫玲. 中国大陆科学钻探预先导孔(CCS-D-PP2)榴闪岩的地球化学组成及其地质意义[J]. 地球科学, 2006, 31(4):539-550.
- [33] 于津海,王丽娟,魏震洋,等. 华夏地块显生宙的变质作用期次和特征[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3):474-483.
- [34] 陈正宏,李寄岬,谢佩珊,等. 利用 EMP 独居石定年法探讨浙闽武夷山山地区变质基底岩石与花岗岩的年龄[J]. 高校地质学报, 2008, 14(1):1-15.
- [35] 向华,张利,周汉文,等. 浙西南变质基底基性-超基性变质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究: 华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(4): 401-413.
- [36] 胡艳华,顾明光,徐岩,等. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(11):1661-1670.
- [37] Yu J H, O'Reilly S Y, Zhou M F, et al. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block[J]. Precambrian Research, 2012, 222-223:424-449.
- [38] 叶瑛,兰玉琦. 浙江省陈蔡群的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄与变质年代[J]. 岩石学报, 1994, 10(2):193-201.
- [39] 谢谔克,史鸿竣,黄海,等. 浙江诸暨陈蔡群的角闪石研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1986, 7(3):57-70.
- [40] 徐步台. 浙江陈蔡群变质矿物的氧同位素组成及其平衡分馏温度[J]. 岩石矿物学杂志, 1986, (5):362-367.
- [41] 兰玉琦,叶瑛,兰翔. 浙江陈蔡群孔兹岩系的原岩建造和变质作用[J]. 浙江地质, 1995, 11(2):7-13.
- [42] 陈迪云和徐伟昌. 浙江陈蔡群变质岩变质条件及构造环境的地球化学探讨[J]. 矿物岩石, 1993, 13(2):29-36.
- [43] 水涛,徐步台,梁如华,等. 中国浙闽变质基底地质[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [44] 王礼胜. 浙江绍兴—江山断裂带白云母形成条件研究[J]. 河北地质学院学报, 1991, 14(3):281-290.
- [45] 赵国春和孙德有. 浙西南陈蔡群变质阶段划分及变质作用 p-T-D 轨迹研究[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(3):246-253.
- [46] 赵磊,周喜文. 浙西南八都群泥质麻粒岩的变质演化与 pT 轨迹[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(1):61-72.
- [47] Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions [J]. GSA Bulletin, 2010, 122: 772-793.
- [48] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4):556-565.
- [49] 张芳荣,舒良树,王德滋,等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(1):248-260.
- [50] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Origin of paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence[J]. Lithos, 2013, 160-161: 37-54.
- [51] 于津海,周新民, O'Reilly Y S, 等. 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[J]. 科学通报, 2005, 50(16):1758-1767.
- [52] 徐备,郭令智,施央申. 皖浙赣地区元古代地体和多期碰撞造山带[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [53] 王德滋,沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 209-220.
- [54] 彭松柏,金振民,付建明,等. 两广云开隆起区基性侵入岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2006, 25(4):434-441.
- [55] 吴浩若. 赣东北蛇绿岩带相关地质问题的构造古地理分析[J]. 古地理论, 2003, 5(3): 328-342.

Discussion on the ultrahigh-pressure metamorphism
of Caledonian garnet amphibolite in the Qinzhou-Hangzhou joint belt

JIANG Yang¹, CHEN Zhi-hong¹, TAN Gui-li¹, YANG Zhu-liang¹, ZHOU Xiao-hua¹,
YUAN Qiang², YU Ming-gang¹, ZHAO Xi-lin, DUAN Zheng¹
(1 *Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China*)
(2 *Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China*)

Abstract: By studying on the chronology, mineralogy and metamorphism of Caledonian garnet amphibolite first discovered in the Qinzhou-Hangzhou joint belt, it is concluded that the garnet amphibolite, which possesses typical clockwise P-T-t path including amphibolite-facies prograde metamorphism in early stage, eclogite-facies(UHP) peak metamorphism in middle stage and amphibolite-facies retrogressive metamorphism in late stage, yields a metamorphic age of 454 ± 4 Ma. The mineral assemblage of the amphibolite-facies prograde metamorphism in early stage is amphibole(Amp)+plagioclase(Pl)+quartz(Qtz) with temperature of $719^{\circ}\text{C}\sim795^{\circ}\text{C}$ and pressure of $7.56\text{Kpa}\sim8.30\text{Kpa}$, the eclogite-facies(UHP) peak metamorphism in middle stage has the mineral assemblage of garnet(Gt)+akmite (retrograde to diopside+albite) $\pm\text{Qtz}$ with temperature of $668^{\circ}\text{C}\sim821^{\circ}\text{C}$ and pressure of $26.42\text{Kpa}\sim33.46\text{Kpa}$, the amphibolite-facies retrogressive metamorphism in late stage is composed of $\text{Gt}+\text{Amp}+\text{Pl}\pm\text{Qtz}$ with temperature of $611^{\circ}\text{C}\sim854^{\circ}\text{C}$ and pressure of $4.76\text{Kpa}\sim9.30\text{Kpa}$. Combined with the previous studies, it is proposed that the Qinzhou-Hangzhou joint belt had undergone evolutionary process of eclogite-facies(UHP) metamorphism, granulite-facies retrogressive metamorphism and amphibolite-facies retrogressive metamorphism in Caledonian. The first discovery of the Caledonian UHP metamorphism in the Qinzhou-Hangzhou joint belt indicates that the collision between Cathaysia and Yangtze blocks occurred in Caledonian.

Key words: ultrahigh-pressure metamorphism; clockwise P-T-t path; garnet amphibolite; Caledonian; the Qinzhou-Hangzhou joint belt

