

浙西南八都群泥质麻粒岩的变质演化与 pT 轨迹

赵磊, 周喜文

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 浙西南古元古界八都群是目前华夏地块最古老的变质基底, 以往研究认为其变质程度仅达角闪岩相。近来在对遂昌地区八都群富铝片麻岩的研究过程中, 发现了具有“石榴石+夕线石+正/反条纹长石+黑云母”特征组合的泥质麻粒岩, 表明该地体曾经历麻粒岩相变质改造。通过岩相学与矿物化学分析, 确定该岩石经历了3个阶段的演化过程, 即: 早期进变质阶段(M_1), 形成“石榴石+黑云母+白云母+夕线石+斜长石+石英”的矿物组合; 变质峰期阶段($M_{2,3}$), 形成“石榴石+夕线石+三元长石+黑云母+石英”的矿物组合; 峰期后降压冷却阶段(M_4), 形成“黑云母+白云母+新生斜长石+石英”的矿物组合。岩石中石榴石普遍发育与降温过程有关的扩散成分环带和与降压过程有关的斜长石后生合晶。通过石榴石-黑云母温度计和 GASP 压力计估算变质峰期的温压条件为 $800 \sim 850^\circ\text{C}$ 、 $0.6 \sim 0.7 \text{ GPa}$, 峰期后退变质阶段的温压条件为 $560 \sim 590^\circ\text{C}$ 、 $0.25 \sim 0.33 \text{ GPa}$, 具有顺时针样式的 pT 演化轨迹, 反映一种陆壳碰撞增厚、后又拉伸减薄的动力学过程。

关键词: 华夏地块, 浙西南, 八都群, 泥质麻粒岩, 顺时针 pT 演化轨迹

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0061-12

The metamorphic evolution and pT path of pelitic granulite from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province

ZHAO Lei and ZHOU Xi-wen

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Paleoproterozoic Badu Group in southwestern Zhejiang Province is the oldest metamorphic basement in the Cathaysia block, and its metamorphic grade was previously considered to be only of amphibolite facies. Recently, pelitic granulite with the typical mineral assemblage of garnet + sillimanite + perthite + antiperthite + biotite was discovered in the Al-rich gneiss of Suichang area. According to petrographic observation, micro-mineral composition and calculating results from garnet-biotite thermometer and GASP barometer, three stages of metamorphism were recognized in the pelitic granulite. The early prograde metamorphic stage (M_1) was detected on the basis of inclusions of biotite, muscovite and sillimanite in garnet. The peak metamorphic stage ($M_{2,3}$) is characterized by the presence of garnet, biotite, sillimanite and ternary feldspar, with a probable pT condition of $0.6 \sim 0.7 \text{ GPa}$ at ca. $800 \sim 850^\circ\text{C}$. The post-peak retrograde metamorphic stage (M_4) was recognized according to the mineral assemblage of biotite, garnet, fresh plagioclase and muscovite, with a pT condition of $560 \sim 590^\circ\text{C}$ and $0.25 \sim 0.33 \text{ GPa}$. The garnet from the pelitic granulite developed both diffu-

收稿日期: 2011-07-29; 修订日期: 2011-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872123), 国土资源部百名优秀青年科技人才奖励计划, 科技部基本科研业务费, 地质大调查项目(1212010611702)

作者简介: 赵磊(1987-), 男, 硕士生, 变质岩石学专业, E-mail: black3stone@126.com; 通讯作者: 周喜文(1970-), 博士, 研究员, 变质地质学专业, E-mail: chouxw@163.com

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20111018.1611.001.html>

sion zoning and symplectite of plagioclase related to the lowering of temperature and pressure, respectively. A clock-wise pT path has been constructed for the pelitic granulite which is consistent with the thinning process of the thickened continental crust.

Key words: Cathaysia block; southwestern Zhejiang Province; Badu Group; pelitic granulite; clock-wise pT path

麻粒岩作为中下部地壳岩石的代表,其成因对于探讨地壳早期的演化过程具有十分重要的意义(翟明国,2009;Brown,2009)。与基性麻粒岩相比,泥质麻粒岩作为变质沉积岩,其到达中下部地壳位置必然要经历构造加厚过程,需要特定的地球动力学过程,因而构造指示意义更加明确。与华北克拉通相比,华夏地块麻粒岩相变质岩石的分布非常局限,目前文献报道的仅限于广东云开大山地区(陈斌等,1994;杜杨松等,1999)、广西大容山-十万大山地区(彭松柏等,2004)、南武夷山桃溪地区(于津海等,2003)和海南岛中部(张业明等,1999)。从时代来看,上述麻粒岩的原岩除海南中部的基性麻粒岩为中元古代外,其余都在新元古代—早古生代之间(于津海等,2007),变质时代除十万大山为印支期外(彭松柏等,2004;赵亮等,2010),其余则多集中在加里东期(陈斌等,1994;杜杨松等,1999;张业明等,1999;于津海等,2005),表明目前华夏地块的主体主要受加里东期构造体制控制。但是,对于华夏地块的古老基底(八都群和麻源群)是否曾经历麻粒岩相变质改造,从现有资料还很难确认。虽然有学者指出位于北武夷山的江西弋阳、浙江遂昌地区存在含紫苏辉石的岩体,认为其可能也经历了麻粒岩相变质改造(于津海等,2007;Liu *et al.*,2010),但是由于其周围的变质表壳岩仅达绿片岩相-角闪岩相(胡雄健等,1991;赵国春等,1994;兰玉琦等,1995),说明这种认识尚存在不确定性。最近,我们在浙西南遂昌地区的八都群中发现了含“石榴石+夕线石+黑云母+正/反条纹长石”特征组合的泥质麻粒岩,这对于重新认识华夏地块早前寒武纪古老基底的演化过程无疑具有重要指示意义。

1 区域变质地质概况

浙西南地体位于华夏地块东北部,处于华夏地块与江南造山带的交接部位,西北部为江山-绍兴断裂,东南部为丽水-海丰断裂。区内出露的古老变质岩系主要是古元古代八都群和中新元古代龙泉群。浙西南八都群是目前华夏地块的最古老变质基底,

呈“窗口状”出露于中生代火山岩盖层之中,主要由一系列陆源碎屑沉积的变质表壳岩和花岗岩组成,混合岩化发育,具有 2.0~2.4 Ga 的碎屑锆石年龄和 1.85~1.95 Ga 的花岗岩侵入年龄(胡雄健等,1991;甘晓春等,1993,1995;刘锐,2009),属古元古代无疑。八都群的建群历史较短,在 1990 年以前的地质志和地质图中,多使用前震旦系(或前泥盆系)陈蔡群来表示本区地层,变质程度以绿片岩相-低角闪岩相为主,局部达高角闪岩相(兰玉琦等,1995)。胡雄健等(1991)根据原岩建造和岩石组合、构造-岩浆活动历史、年代学等方面的差异,将旧称陈蔡群中变质程度较深(角闪岩相)时代较为古老并且花岗质岩石发育的那一部分,从陈蔡群中解体出来,称为八都群(Pt_1bd),其岩石类型主要包括含榴黑云斜长片麻岩、含榴黑云长石石英岩、黑云片岩、斜长角闪岩等,普遍含有石榴石、夕线石和石墨等。八都群下部为基性火山岩-硬砂岩建造,中部(主体)为陆源碎屑岩建造,上部为粘土岩建造,其典型的岩性组合分布于龙泉地区(胡雄健等,1991),从下往上可分为汤源组、堃头组、张岩组、泗源组和大岩山组。

本文所报道的泥质麻粒岩(夕线石榴黑云片麻岩)位于龙泉以北的遂昌—大柘一带(图 1)。该地段出露的岩石主体为花岗质片麻岩,包括黑云二长片麻岩、角闪斜长片麻岩和石榴角闪片麻岩等,夹厚度不等的夕线石榴黑云片麻岩(泥质麻粒岩)、不纯大理岩和斜长角闪岩夹层。混合岩化作用发育,局部可见含紫苏辉石和石榴石的花岗岩侵入体,与围岩渐变过渡。岩石普遍遭受风化剥蚀,新鲜样品较为少见。

2 岩相学与矿物化学

遂昌一带八都群出露的夕线石榴黑云片麻岩具有典型麻粒岩相变泥质岩石特征,中粗粒变晶结构,片麻状构造,主要矿物组成(以样品 WY03-2 为例)包括:石榴石(10%~15%)、夕线石(10%~15%)、黑云母(15%~20%)、斜长石(20%~25%)、钾长石(5%~10%)、石英(20%~25%),以及少量的金红

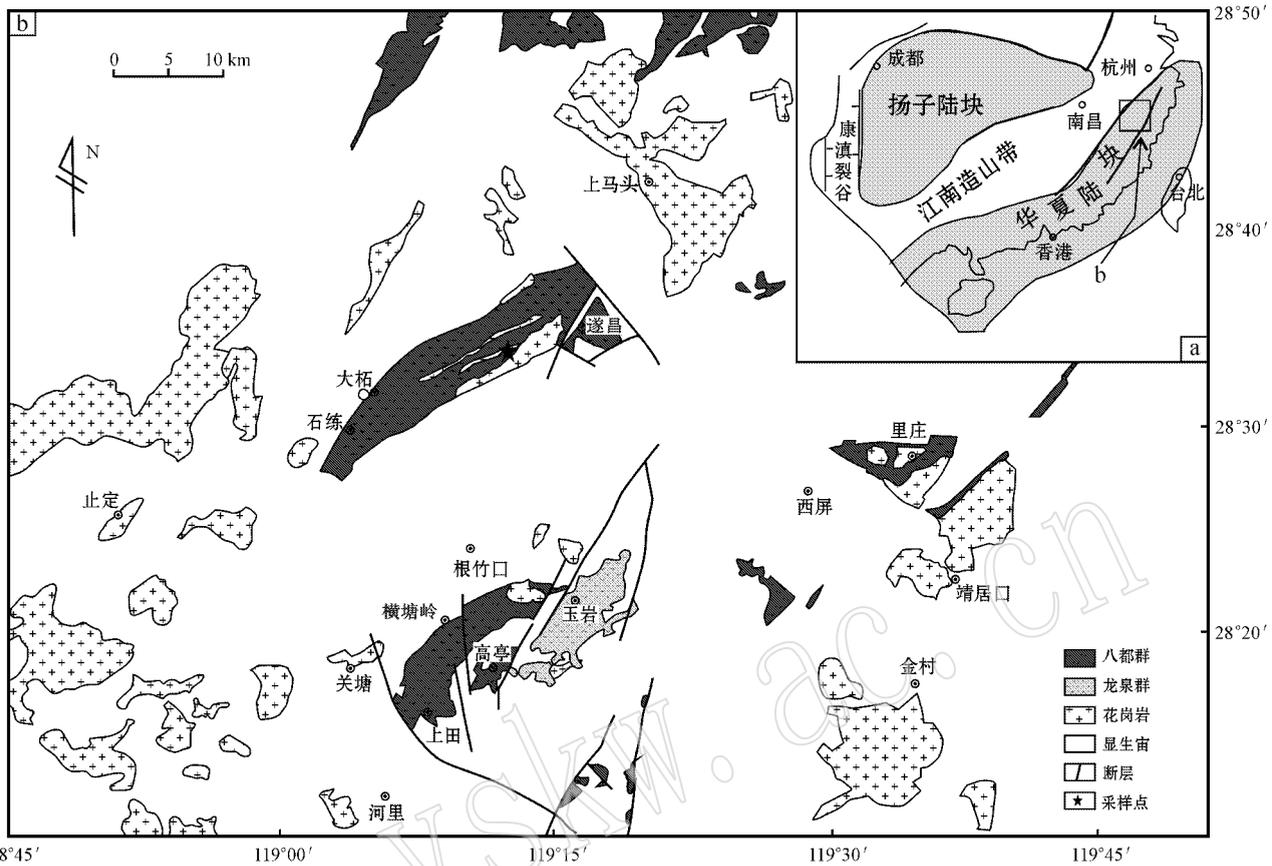


图 1 华南陆块地质简图 (a) 和浙西南遂昌-大柘地区地质简图 (b)

Fig. 1 Geological sketch map of South China Block (a) and Suichang-Dazhe area in southwestern Zhejiang Province (b)

石、锆石和晶质石墨等副矿物。此外,在个别样品(如 WY03-1)中可见少量白云母 (<3%)。本区泥质麻粒岩主要矿物岩相学与矿物化学特征如下:

2.1 石榴石

本区泥质麻粒岩中的石榴石形态多数近等轴状,个别不太规则,受后期改造明显。粒径大小不一,大者直径可达 2 mm 以上,内部常包裹长石、石英、黑云母和夕线石等矿物(图 2a)。颗粒较小者不足 0.1 mm。部分石榴石发育明显的后生合晶,合晶成分主要是斜长石(图 2b),只是成分普遍遭受了蚀变改造。石榴石的外围常被黑云母、斜长石、石英等包围,在应力集中部位,后期黑云母定向排列,将浑圆状石榴石完全包围,形成类似压力影。电子探针分析结果表明,本区石榴石主要为镁-铁铝榴石 ($Alm_{66.0\sim 80.2}Pyr_{8.4\sim 26.9}Gro_{3.2\sim 7.8}Spes_{1\sim 8}$) (表 1),晶体核部 MgO 含量可达 4%~7%,CaO 含量 2%~2.5%。但不同样品存在差异,样品 WY03-2 中石榴石的镁、钙含量均高于样品 WY03-1。在 Nandi (1967) 的石榴石成分与变质带关系图解中,本区石

榴石成分全部投在夕线石带上(图 3),在卢次(1964)石榴石化学成分 $CaO - MgO - FeO + MnO$ 图解(转引自龙桃成,2005)中,本区石榴石核部成分都分布于麻粒岩相区和角闪岩相靠近麻粒岩相的一侧(图 4),表明石榴石核部记录了岩石麻粒岩相变质阶段的信息,可以利用该成分估算变质峰期温压条件。

成分剖面显示,本区石榴石具有明显成分环带特征,表现为从晶体核部到边缘 Fe 含量升高, Mg 含量降低(图 5),属典型扩散环带。Ca 含量轻微降低,表明岩石曾经历减压过程(Spear and Florence, 1992),这与石榴石周围发育斜长石后生合晶的结构一致。Mg 含量的降低表明石榴石在降温过程中曾与其他矿物之间发生过 Fe-Mg 交换反应。进一步分析表明,这种交换反应主要受相邻镁铁质矿物控制,即与长英质矿物接触的石榴石边部 Mg 含量明显高于与黑云母接触的石榴石边部。因此,可以利用相邻石榴石-黑云母边部成分估算变质作用后期 Fe-Mg 交换反应和扩散作用停止时的封闭温度。

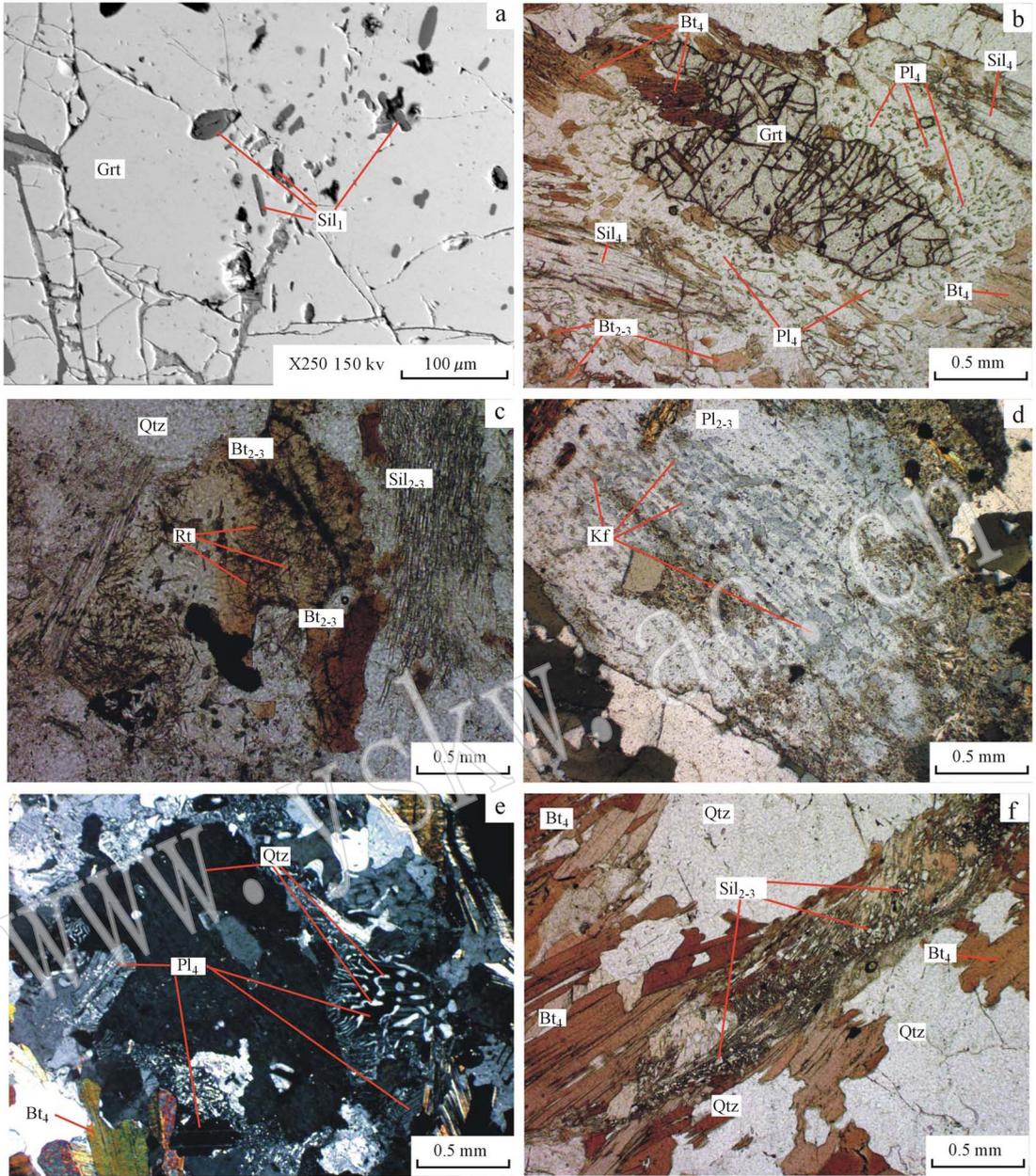


图 2 浙西南八都群麻粒岩显微结构照片

Fig. 2 Typical photographs of mineral assemblages and textures of pelitic granulite from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province

a—石榴石中包裹的夕线石颗粒(Sil₁),背散射电子图像; b—石榴石残晶及其后成合晶,后成合晶遭受蚀变,成分主要为斜长石(Pl₄),其外围有峰期(Bt_{2,3})和峰期后黑云母(Bt₄)以及变质晚期板状夕线石(Sil₄),单偏光; c—峰期黑云母(Bt_{2,3})中金红石包体(Rt)以及峰期形成的针柱状夕线石(Sil_{2,3}),单偏光; d—反条纹长石,单偏光; e—长石(Pl₄)与石英(Qtz)混杂在一起,正交偏光; f—峰期形成的夕线石(Sil_{2,3})被后期黑云母(Bt₄)包围,单偏光

a—inclusions of sillimanite (Sil₁) in garnet, BSE image; b—relic garnet and its symplectite, the composition of the altered symplectite being mainly plagioclase (Pl₄), biotite formed during the peak metamorphic stage (Bt_{2,3}) and the post-peak metamorphic stage (Bt₄), and the tablet sillimanite formed during the post-peak metamorphic stage (Sil₄), PPL; c—inclusions of rutile (Rt) in peak metamorphic stage biotite (Bt_{2,3}), peak metamorphic stage sillimanite (Sil_{2,3}), PPL; d—antiperthite, PPL; e—intergrowth texture of post-peak metamorphic stage plagioclase (Pl₄) and quartz (Qtz), CPL; f—peak metamorphic stage sillimanite (Sil_{2,3}) surrounded by biotite (Bt₄) of M₄, PPL

表 1 浙西南八都群泥质麻粒岩代表性矿物化学成分

Table 1 Representative compositions of minerals in pelitic granulite from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province $w_B/\%$

样品号	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	WY03-1	WY03-2	$w_B/\%$
矿物	Grt	Grt(r)/Bt	Grt(r)/Pl	Grt	Bt	Grt	Bt	Bt(r)	Bt	Mus	Sill	Rt	anti/kfs	anti/Pl	Pl2	Per/Ab					
SiO ₂	38.03	37.76	38.71	38.88	35.03	38.85	35.82	35.10	35.26	46.32	37.01	0.16	63.44	59.14	58.96	69.45					
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.06	2.80	0.02	3.20	2.14	4.44	0.16	0.02	98.99	0.00	0.01	0.00	0.00					
Al ₂ O ₃	21.00	20.42	20.43	20.66	19.09	20.72	17.69	19.29	17.72	36.08	60.87	0.07	18.36	24.57	25.64	19.07					
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.00	0.13	0.00	0.04	0.11	0.04	0.03	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04					
<FeO>	33.68	35.65	35.47	30.23	18.36	30.25	16.47	20.55	17.32	0.97	0.17	0.80	0.00	0.00	0.09	0.14					
MnO	1.05	1.31	1.44	0.56	0.34	0.34	0.12	0.09	0.06	0.00	0.02	0.00	0.04	0.08	0.00	0.00					
MgO	4.29	2.82	3.47	6.67	6.83	8.20	9.37	8.66	8.17	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
CaO	2.08	1.78	1.68	2.44	0.01	2.47	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09	6.60	8.42	0.20					
Ni ₂ O	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.31	0.20	0.18	0.39	0.00	0.01	1.63	7.70	6.78	11.10					
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	10.48	0.00	10.53	10.03	10.72	11.33	0.00	0.02	15.88	0.25	0.21	0.10					
Total	100.17	99.77	101.21	99.50	94.38	99.49	93.58	96.22	93.92	95.93	98.14	100.14	99.44	98.35	100.1	100.10					
Si	3.02	3.05	3.07	3.06	2.70	3.05	2.76	2.67	2.73	3.07	1.00	0.00	2.97	2.68	2.64	3.02					
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.19	0.12	0.26	0.01	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00					
Al	1.97	1.94	1.91	1.91	1.74	1.92	1.61	1.73	1.62	2.82	1.94	0.00	1.01	1.31	1.35	0.98					
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01					
Fe ²⁺	2.24	2.41	2.35	1.99	1.18	1.99	1.06	1.31	1.12	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Mn	0.07	0.09	0.10	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Mg	0.51	0.34	0.41	0.78	0.80	0.80	0.94	0.98	0.94	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Ca	0.18	0.15	0.14	0.21	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.32	0.40	0.01					
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.03	0.03	0.05	0.00	0.00	0.15	0.68	0.59	0.94					
K	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	0.00	1.04	0.97	1.06	0.96	0.00	0.00	0.95	0.01	0.01	0.01					

表中数据由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室分析；Bt(r)—黑云母边部；Grt(r)/Pl—石榴石边部与斜长石接触；Grt(r)/Bt—石榴石边部与黑云母接触；anti/kfs—反条纹长石中钾长石微晶；anti/Pl—反条纹长石中斜长石主晶；Per/Ab—一条纹长石中的钠长石微晶。

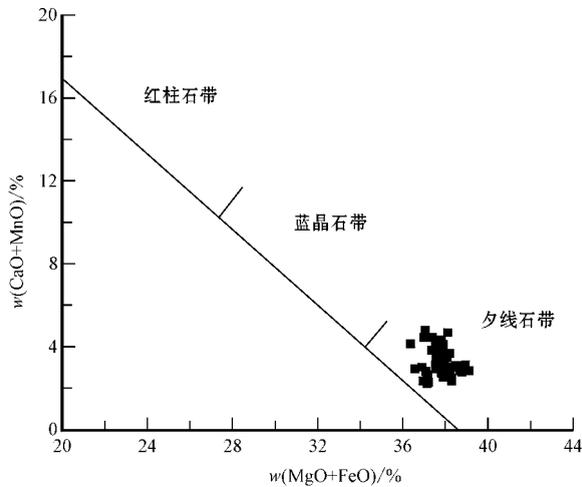


图 3 浙西南八都群片麻岩中石榴石成分与变质带关系图解 (Nandi, 1967)

Fig. 3 Relationship between the composition of garnet from gneiss of the Badu Group in southwestern Zhejiang Province and the metamorphic belt (Nandi, 1967)

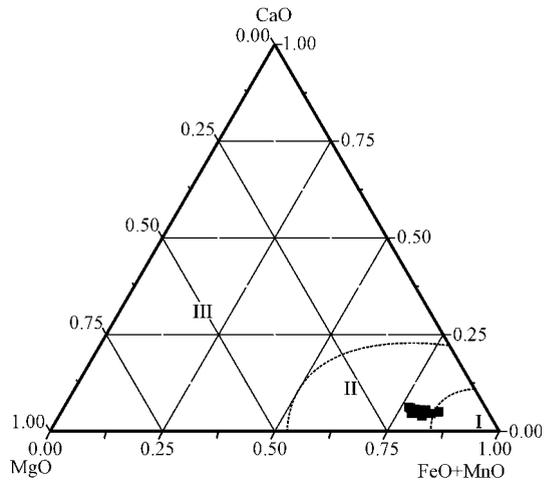


图 4 浙西南八都群片麻岩中石榴石核部化学成分的 CaO-MgO-FeO+MnO 图解 (转引自靳是琴等, 1984)

Fig. 4 CaO-MgO-FeO+MnO diagram of garnet from gneiss of the Badu Group in southwestern Zhejiang Province (from Jin Shiqin *et al.*, 1984)
I—角闪岩相; II—麻粒岩相; III—榴辉岩相
I—amphibolite facies; II—granulite facies; III—eclogite facies

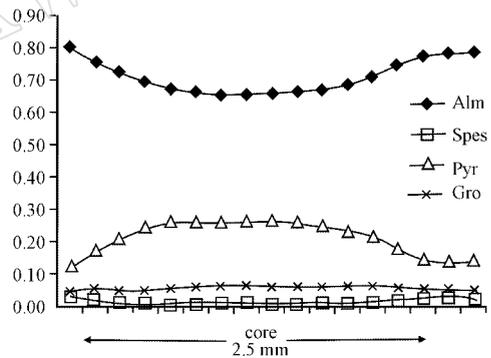
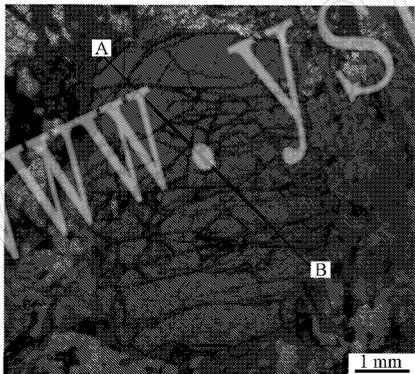


图 5 浙西南八都群麻粒岩中石榴石的成分剖面

Fig. 5 Compositional profiles of garnet in granulite from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province

Alm—铁铝榴石; Spes—锰铝榴石; Pyr—镁铝榴石; Gro—钙铝榴石
Alm—almandite; Spes—spessartite; Pyr—pyrope; Gro—grossularite

2.2 黑云母与白云母

本区富铝片麻岩中的黑云母普遍呈棕褐色,按形态和产状可划分为 3 种类型:第 1 种黑云母以包体形式存在于大颗粒石榴石之中,呈细小鳞片,可能为早期进变质阶段形成的黑云母(Bt₁);第 2 种黑云母呈不规则鳞片状或败絮状,常与针柱状夕线石或金红石交生在一起(图 2c),很可能是变质峰期发生脱水熔融后残留的黑云母(Bt_{2,3});第 3 种黑云母含量最高,占基质中黑云母总量的 90% 以上,并构成了主期片麻理(图 2e、2f),镜下普遍呈较规则的片状,

内部较干净,应为峰期后重结晶的产物(Bt₄)。成分分析结果显示(表 1),3 种黑云母的成分差异不大,说明它们降温过程中均遭受了不同程度的均一化改造。但某些远离石榴石颗粒、包裹于长英质矿物之中的黑云母往往具有较高的 Ti 含量和较低的 Mg 含量,有可能接近峰期黑云母的成分。在特罗戈娃(1965)的 TiO₂-FeO/(FeO+MgO)变质相分类图解(图 6)中,本区黑云母全部投在了角闪岩相区,说明峰期后降温过程中,黑云母与石榴石之间的 Fe-Mg 交换反应对黑云母成分的改造较为强烈。因此,利

用该成分估算的峰期温度应低于实际变质温度。部分样品(WY03-1)中含有少量白云母,呈不规则片状,略具定向性,硅含量变化在 45.28%~46.32%,可能为退变质过程中体系发生水化反应所致(Spear *et al.*, 1999)。另有少量细鳞片状白云母,可能为后期蚀变产物。

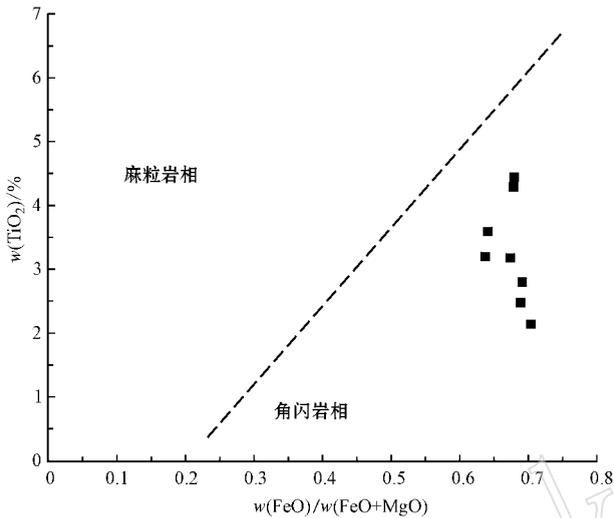


图 6 浙西南八都群中片麻岩中黑云母的 $\text{TiO}_2\text{-FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 图解(转引自靳是琴等, 1984)

Fig. 6 $\text{TiO}_2\text{-FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ diagram of biotite from gneiss of the Badu Group in southwestern Zhejiang Province (from Jin Shiqin *et al.*, 1984)

2.3 斜长石和钾长石

本区富铝片麻岩中的长石以斜长石为主,钾长石相对较少。其中斜长石存在 4 种类型,按生成先后可划分为 3 个世代:第 1 世代斜长石(Pl_1)是以包体形式存在于石榴石之中,颗粒细小,普遍蚀变,可能为进变质阶段产物。第 2 世代斜长石($\text{Pl}_{2,3}$)是以反条纹长石主晶形式存在,颗粒粗大,其中可见较多斑块状钾长石出溶微晶(图 2f),表明该长石在变质峰期应为三元长石。第 3 世代斜长石(Pl_4)包括两种类型,一种是以石榴石后生合晶形式存在,形态不规则,表面轻微蚀变(图 2b);另一种呈细小颗粒存在于基质之中,或与蠕虫状石英交生在一起(图 2e)。成分分析结果(表 1)显示,第 3 世代斜长石的钙含量明显高于其他斜长石,表明其很可能是由石榴石在退变质过程中发生转换反应生成: $\text{Gr}(\text{Gros})+2\text{Sil}+\text{Qtz}=3\text{Pl}(\text{An})$, 因此利用石榴石-夕线石-斜长石-石英(GASP)压力计可以估算退变质阶段的压力条件。

本区富铝片麻岩中的钾长石主要以出溶微晶形

式存在于大颗粒反条纹长石之中(图 2f),少量以正条纹长石主晶形式存在,多数蚀变比较严重,难以取得可信成分数据。

2.4 夕线石

本区富铝片麻岩中的夕线石含量较高,产状主要有 3 种:第 1 种是以细针状包体形式存在于石榴石中(图 2a),可能为变质峰期较早阶段由白云母发生脱水分解形成的夕线石(Sil_1);第 2 种夕线石外形呈针柱状(图 2c)或破碎状(图 2f),多与峰期黑云母交生,可能为变质峰期由黑云母发生脱水熔融反应生成($\text{Sil}_{2,3}$);第 3 种夕线石颗粒较大,呈板柱状外形(图 2b),应为变质峰期较晚阶段由原来的夕线石发生重结晶所致(Sil_4)。

2.5 矿物组合演化

根据上述岩相学与矿物化学分析结果,可将八都群泥质麻粒岩的变质演化过程划分为三阶段四幕:即早期进变质阶段(M_1)、变质峰期阶段(M_{2-3})和峰期后降压冷却阶段(M_4)。

早期进变质阶段(M_1)以形成 $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Mus}+\text{Pl}+\text{Sill}+\text{Qtz}$ 的矿物组合为特征,相当于低角闪岩相,该阶段矿物目前主要以包体形式存在于石榴石之中;变质峰期 M_2 阶段,随着温度升高,白云母发生脱水分解($\text{Mu}+\text{Qtz-Sil}+\text{Kfs}+\text{H}_2\text{O}$),形成 $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Sill}+\text{Kfs}+\text{Pl}+\text{Qtz}$ 的特征组合。变质峰期 M_3 阶段,随着温度进一步升高,白云母消失,黑云母发生脱水分解($\text{Bt}+\text{Qtz}=\text{Grt}+\text{Sil}+\text{Kfs}+\text{Melt}$),并引发部分熔融,形成 $\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Sill}+\text{Ter}$ (三元长石)+ Qtz 的特征组合,变质作用达到高峰。峰期后降压冷却阶段(M_4)、退变质初期,体系的降压速率可能大于降温,导致石榴石外围发育斜长石后生合晶,同时由于温度下降,三元长石分离为正/反条纹长石。之后体系逐渐转变为以降温为主,由于 Fe-Mg 交换作用使得石榴石边部普遍发育扩散环带,岩石局部由于水化作用形成少量晚期的白云母。

3 变质 pT 条件与 pT 演化轨迹

根据本区富铝片麻岩的矿物组合特点,本文选取石榴石-黑云母温度计和 GASP 压力计来估算变质峰期与峰期后降压、冷却阶段的温压条件。所用估算公式为 Holdway(2000)的石榴石-黑云母温度计公式和 Holdway(2001)的 GASP 压力计公式。从矿物化学分析结果可知,石榴石所包裹的黑云母、斜

长石等成分已普遍遭受峰期和后期改造,无法用于估算早期进变质阶段的温压信息。但同一样品中,大颗粒石榴石的核部成分变化很小,且镁含量最高,表明其受后期改造较弱,可能接近于峰期成分。基质中,远离石榴石等镁铁矿物,处于长英质矿物之间的黑云母具有最低的镁含量。二者配对,可以最大限度地获得接近峰期的温度估算值。同样,石榴石

核部成分与基质中大颗粒斜长石核部成分配对则可以获得接近峰期的压力估算值。对于峰期后石榴石-黑云母间 Fe-Mg 交换反应和石榴石-斜长石间转换反应停止时的封闭温度与封闭压力,则可以利用相互接触的石榴石/黑云母、石榴石/斜长石边部成分进行估算。据此估算获得的本区泥质麻粒岩的变质峰期与峰期后退变质阶段的温压数值如表 2、表 3 所示。

表 2 石榴石-黑云母温度计计算结果

Table 2 Calculated results from GB geothermometer

样号	采点位置	X_{Mg}^{Grt}	X_{Mg}^{Bt}	$\ln K_D$	$t/^\circ\text{C}$	温度性质
WY03-2	不相邻 Grt、Bt 中心成分	0.286	0.457	0.739	789	峰期 $M_{2.3}$ 阶段
WY03-2	不相邻 Grt、Bt 中心成分	0.284	0.457	0.752	791	峰期 $M_{2.3}$ 阶段
WY03-2	不相邻 Grt、Bt 中心成分	0.287	0.457	0.737	795	峰期 $M_{2.3}$ 阶段
WY03-1	相邻 Grt、Bt 边缘成分	0.095	0.429	1.967	561	峰期后 M_4 阶段
WY03-1	相邻 Grt、Bt 边缘成分	0.103	0.429	1.881	574	峰期后 M_4 阶段
WY03-1	相邻 Grt、Bt 边缘成分	0.121	0.446	1.770	575	峰期后 M_4 阶段
WY03-2	相邻 Grt、Bt 边缘成分	0.130	0.500	1.900	569	峰期后 M_4 阶段
WY03-2	相邻 Grt、Bt 边缘成分	0.148	0.504	1.760	591	峰期后 M_4 阶段

表 3 石榴石-夕线石(蓝晶石、红柱石)-斜长石-石英(GASP)压力计计算结果

Table 3 Calculated results from GASP geobarometer

样号	采点位置	X_{Ca}^{Grt}	X_{An}^{Pl}	$\ln k$	p/GPa	压力性质
WY03-1	不相邻 Grt、Pl 中心成分	0.073	0.290	-4.210	0.70	峰期阶段 $M_{2.3}$ 压力
WY03-1	不相邻 Grt、Pl 中心成分	0.073	0.290	-4.279	0.68	峰期阶段 $M_{2.3}$ 压力
WY03-1	不相邻 Grt、Pl 中心成分	0.054	0.290	-5.161	0.59	峰期阶段 $M_{2.3}$ 压力
WY03-1	相邻 Grt、Pl 边缘成分	0.054	0.317	-5.569	0.33	峰期后 M_4 压力
WY03-1	相邻 Grt、Pl 边缘成分	0.054	0.332	-5.430	0.31	峰期后 M_4 压力
WY03-1	相邻 Grt、Pl 边缘成分	0.054	0.404	-6.482	0.25	峰期后 M_4 压力

估算结果显示,八都群泥质麻粒岩变质峰期温度介于 $789\sim 795^\circ\text{C}$ 之间。考虑到基质中黑云母成分遭受过不同程度的改造,该温度值应低于实际变质温度,大约相差 50°C 左右。事实上,由于该泥质麻粒岩中含有大量反条纹长石,说明在变质峰期存在含三元长石的矿物组合,其稳定的温度至少在 800°C 以上。峰期压力的估算结果介于 $0.59\sim 0.70\text{ GPa}$ 之间,考虑到 Ca 组分在石榴石和斜长石中扩散速率都很慢,受外界影响较小,该数值估计与实际压力相差不大。综合矿物组合与温压估算结果,推断八都群富铝片麻岩变质峰期的温压条件为 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 、 $0.60\sim 0.70\text{ GPa}$,相当于中压麻粒岩相。峰期后退变质晚期矿物封闭温度与封闭压力估算结果分别为 $560\sim 590^\circ\text{C}$ 、 $0.25\sim 0.33\text{ GPa}$,说明体系在峰期后同时经历了降压与冷却过程,但降压的幅度更大,总体呈现顺时针 pT 演化轨迹的特征(图 7)。

4 讨论

浙西南八都群作为原陈蔡群中变质程度较高的部分,前人对其变质作用开展了较多工作(胡雄健等,1991;陈迪云等,1993;兰玉琦等,1995),普遍认为其最高变质程度达角闪岩相。后来,在遂昌地区发现了含紫苏辉石的花岗岩,推断其变质程度可能达到了麻粒岩相(刘锐,2009),但是由于该紫苏花岗岩周边的变质表壳岩的变质程度普遍不高,使得这种认识存在一定的不确定性。从本文对八都群富铝片麻岩的分析结果看,石榴石普遍发育扩散环带(图 5)表明其曾经历较长时间的高温改造(Spear and Florence,1992)。石榴石核部成分中镁、钙组分较高,锰含量低,在成因分析图解中均落在夕线石带和麻粒岩相区域(图 3、图 4),表明其峰期变质条件已

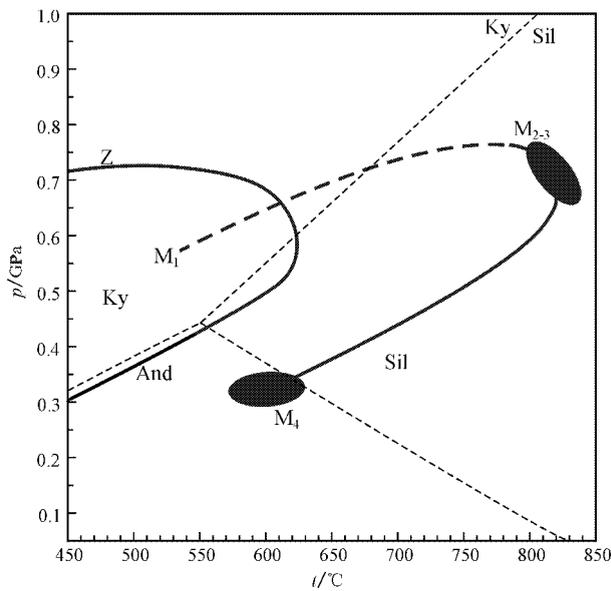


图 7 浙西南八都群泥质麻粒岩的变质 pT 演化轨迹

Fig. 7 Metamorphic pT path of gneiss from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province
 M_1 —早期进变质阶段; $M_{2,3}$ —峰期变质阶段; M_4 —峰后退变质阶段; 轨迹 Z—赵国春等(1994)给出的相邻陈蔡群变质 pT 演化轨迹

M_1 —early prograde metamorphic stage; $M_{2,3}$ —peak granulite-facies metamorphic stage; M_4 —late retrograde metamorphic stage; Path Z—metamorphic pT path of the Chencai Group from Zhao Guochun *et al.* (1994)

达麻粒岩相。同时,岩石矿物组合中存在正、反斜纹长石和板柱状夕线石,表明变质峰期曾存在含三元长石的矿物组合,其稳定的温度至少在 800°C 以上,进一步证实该富铝片麻岩经历了麻粒岩相的变质改造。前人的工作之所以认为本区的变质程度仅达角闪岩相,可能一方面与区域上富铝片麻岩整体变质程度不高、泥质麻粒岩仅在局部出露有关,另一方面就是本区变质表壳岩普遍经历了退变质改造,导致岩石出现白云母等低温矿物,黑云母的成分亦呈现角闪岩相特征(图 6),据此所估算的峰期温度也就在 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 之间(兰玉琦等,1995)。

从前文分析可知,本区泥质麻粒岩中的白云母主要是由降温过程中体系发生水化反应所成,黑云母的成分亦普遍遭受了 Fe-Mg 交换反应的影响,已无法真实地反映变质峰期的温、压特征,因此在使用过程中必须对估算结果进行必要的修正。本文在对石榴石、黑云母和斜长石微区成分详细分析的基础上,选择最可能接近实际的微区点位成分,利用石榴

石-黑云母温度计(Holdway,2000)和 GASP 压力计(Holdway,2001)对变质峰期和峰期后矿物封闭阶段的温压条件进行了估算,通过适当的修正,获得本区八都群富铝片麻岩变质峰期的温压条件大致为 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ 、 $0.6\sim 0.7\text{ GPa}$,峰期后退变质晚期的温压条件为 $560\sim 590^{\circ}\text{C}$ 、 $0.25\sim 0.33\text{ GPa}$,具有顺时针样式的 pT 演化轨迹(图 7)。该轨迹与赵国春等(1994)报道的浙西南陈蔡群的变质作用 pT 轨迹样式相同,但其峰期变质条件与本区八都群相比明显偏低。

变质作用 pT 演化轨迹呈顺时针样式,往往反映一种与陆-陆碰撞、地壳加厚有关的变质动力学过程。但本区八都群泥质麻粒岩的 pT 演化轨迹与典型碰撞造山作用又不完全一致。变质峰期温度虽较高,但压力并不大,峰期后并未出现碰撞造山特有的近等温降压过程(ITD),而是在降压的同时发生降温,整体表现较为平缓。这种 pT 演化轨迹的形成有两种可能。一种就是岩石真实变质过程的记录,反映了中低压麻粒岩相变质的演化过程,即较浅层次地壳的构造加厚过程;另一种可能就是由早期的高压麻粒岩相变质作用退变而来。由于在邻近的龙泉八都群和诸暨陈蔡群中均存在含蓝晶石的变质表壳岩(兰玉琦等,1995;于津海等,2007),推测变质程度较高的遂昌地区富铝片麻岩早期很可能也存在含蓝晶石的矿物组合,如果进变质过程中保持足够的压力(大于 1.0 GPa),该蓝晶石即使在 800°C 以上的高温都可能稳定,伴随着白云母和黑云母的脱水分解,形成“蓝晶石+钾长石”的高压麻粒岩相组合,在峰期后降压退变过程中,蓝晶石会转变为夕线石,形成目前所见到的“夕线石+钾长石”的中压麻粒岩相组合。由于本区泥质麻粒岩中发育石榴石退变为斜长石的后生合晶结构,表明其曾经历快速减压过程。如果这些中压麻粒岩是由高压麻粒岩退变而来,则表明其曾经历与陆-陆碰撞造山有关的构造演化过程。事实上,在华北克拉通的很多地方,经过高压麻粒岩相变质的泥质岩石,目前绝大多数都以中低压泥质麻粒岩的形式存在,如胶东地区的荆山群(周喜文等,2004,2007)和内蒙西部的贺兰山群(周喜文等,2010)。

对于八都群的变质时代,前人虽开展了大量工作(胡雄健等,1992;王银喜等,1992;胡雄健,1994;杨杰东等,1994;甘晓春等,1995),但多采用的是传统的 Rb-Sr、Sm-Nd 和单颗粒锆石 U-Pb 等方法定

年,受技术方法所限,这些数据往往缺乏明确的指示意义。最近, Yu 等(2009)利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 原位定年手段对浙西南地区广泛出露并与八都群密切伴生的古元古代花岗岩进行了系统研究,发现这些花岗岩不论是 S 型或是 A 型,都具有 1 850~1 900 Ma 的成岩年龄(不一致线上交点年龄)和 200~240 Ma 的变质改造年龄(下交点年龄),Hf 模式年龄集中在 27~28 亿年。同样,刘锐(2009)利用 LA-ICPMS 获得的遂昌地区含紫苏辉石花岗岩的锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄为 $1\ 851 \pm 11$ Ma,下交点年龄为 197 ± 20 Ma。这些数据表明本区至少曾经经历两期(古元古代末和印支期)大的构造热事件的影响。由于浙西南地区古元古代花岗岩的规模明显大于印支期,本文所报道的泥质麻粒岩采样位置与遂昌地区含紫苏辉石花岗岩层位相当,彼此相距不足 3 km,据此推断浙西南八都群麻粒岩相变质作用很可能与古元古末这期构造热事件有关,并极有可能是全球古元古末 1.8~2.1 Ga 哥伦比亚(Columbia)超大陆聚合事件(Zhao *et al.*, 2004)在华夏地块的反映。

5 结论

(1)浙西南八都群变质表壳岩中存在含“石榴石+夕线石+黑云母+条纹长石”特征组合的泥质麻粒岩,表明该地区曾经历较广泛区域的麻粒岩相变质作用。

(2)岩相学和矿物化学分析表明,八都群泥质麻粒岩中石榴石普遍发育扩散环带,表现为核部成分均匀,向边部 Mg、Ca 含量逐渐降低,Fe 含量增高,表明在降温之前,其呈经历较长时间的均一化改造。大颗粒石榴石核部成分具有麻粒岩相变质特征,可以用于估算变质峰期的温压、条件。黑云母成分则普遍遭受了后期改造,目前都表现为角闪岩相变质特征。

(3)根据矿物组合演化特征,利用石榴石-黑云母温度计和 GASP 压力计估算变质各阶段温压条件,通过适当修正,确定八都群泥质麻粒岩变质峰期的温压条件为 800~850℃、0.6~0.7 GPa,峰期后退变质晚期石榴石-黑云母间 Fe-Mg 交换反应停止时的封闭温度和封闭压力为 560~590℃、0.25~0.33 GPa。体系在峰期后同时经历了降压与冷却过程,但降压的幅度更大,总体呈现顺时针演化轨迹的特征,

反映一种陆壳碰撞增厚、后又拉伸减薄的动力学过程。

致谢 矿物成分测试与分析得到中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师的指导和帮助;研究过程中,与中国地质科学院地质研究所刘平华、王舫、肖玲玲博士进行了有益的讨论,在此一并致谢!

References

- Brown M. 2009. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record [J]. *Journal of the Geological Society*, 318(1): 37~74.
- Chen Bin and Zhuang Yuxun. 1994. The petrology and petrogenesis of Yunlu chanoekite and its granulite inclusion, west Guangdong, south China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(2): 139~150 (in Chinese with English abstract).
- Chen Diyun and Xu Weichang. 1993. The Geochemical study of metamorphic conditions and tectonic settings for metamorphic rocks of Chencai Group, Zhejiang, China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (2): 29~36 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 309~314 (in Chinese with English abstract).
- Gan Xiaochun, Li Huimin and Sun Dazhong. 1993. Geochronological study on the Precambrian metamorphic basement in northern Fujian [J]. *Geology of Fujian*, 12(1): 17~32 (in Chinese with English abstract).
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong, *et al.* 1995. A geological study on early proterozoic granitic rocks, southwestern Zhejiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Holdaway M. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 85(7~8): 881~892.
- Holdaway M. 2001. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 86(10): 1 117~1 129.
- Hu Xiongjian. 1994. Geochronology of Lower Proterozoic Badu Group, Southwestern Zhejiang Province [J]. *Geochemica*, 23(S1): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun and Tong Chaoxu. 1991. The Precambrian Geology of Southwestern Zhejiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~278 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Chaoxu, *et al.* 1992. Geochronology of the middle Proterozoic Longquan Group in Southwestern Zhejiang

- [J]. *Geological Review*, 38(3): 271 ~ 278 (in Chinese with English abstract).
- Jin Shiqin and Li Hongchao. 1984. Brief Introduction to Minerageny [M]. Changchun : Jilin University Publishing House (in Chinese).
- Lan Yuqi, Ye Ying, Lan Xiang, *et al.* 1995. Metamorphic geology of khondalite series from Chencai Group in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang University*, 29(3): 303 ~ 309 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rui. 2009. Pre-hercynian Crustal Antexis in the Cathaysia Block : A Case Study from Zhejiang and Fujian Province [D]. Dr. Thesis. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Liu R, Zhou H W, Zhang L, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotope composition of the Mayuan migmatite complex, NW Fujian Province, Southeast China : Constraints on the timing and nature of a regional tectonothermal event associated with the Caledonian orogeny [J]. *Lithos*, 119(3 ~ 4): 163 ~ 180.
- Nandi K. 1967. Garnets as indices of progressive regional metamorphism [J]. *Mineral Mag.*, 36 : 83 ~ 93.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Fu Jianming, *et al.* 2004. Origin of charnockite and its tectonic significance [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (04): 63 ~ 70 (in Chinese with English abstract).
- Spear F S and Florence F P. 1992. Thermobarometry in granulites : pitfalls and new approaches [J]. *Precambrian Research*, 55(1 ~ 4): 209 ~ 241.
- Spear F S, Kohn M J and Cheney J T. 1999. P-T paths from anatectic pelites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 17 ~ 32.
- Wang Yinxi, Yang Jiedong, Guo Lingzhi, *et al.* 1992. The discovery of the lower proterozoic granite in Longquan, Zhejiang Province, and the age of the basement [J]. *Geological Review*, 38(6): 525 ~ 531 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiedong, Xu Shijin, Wang Yinxi, *et al.* 1994. Determination on Sm-Nd and Rb-Sr ages of amphibolite from Badu Group in Longquan, Zhejiang Province, and its geological implications [J]. *Geochemica*, 23(S1): 25 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, *et al.* 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China [J]. *Precambrian Research*, 174(3 ~ 4): 347 ~ 363.
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Wei Zhenyang, *et al.* 2007. Phanerozoic Metamorphic Episodes and characteristics of Cathaysia Block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 474 ~ 483 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, *et al.* 2005. Zircon U-Pb-Hf isotopic research on the formation time of the basement granulite facies metamorphic rocks and the characteristics of their protolith in the eastern Nanling [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(16): 1 758 ~ 1 767.
- Yu Jinhai, Zhou Xoumin, Zhao Lei, *et al.* 2003. Discovery and implications of granulite facies metamorphic rocks in the eastern Nanling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 461 ~ 467 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton : Their genetic relation and geotectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 753 ~ 1 771 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yeming, Zhang Renjie and Hu Ning. 1999. High grade metamorphic complexes 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).
- Zhao Guochun and Sun Deyou. 1994. The studies on metamorphic stages and metamorphic PTD path of Chencai Group, southwestern Zhejiang Province [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(3): 246 ~ 253 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent : assembly, growth and breakup [J]. *Earth-Science Reviews*, 67 : 91 ~ 123.
- Zhao Liang, Guo Feng, Fan Weiming, *et al.* 2010. Crustal evolution of the shiwandashan area in South China : Zircon U-Pb-Hf isotopic records from granulite enclaves in Indo-sinian granites [J]. *Chinese Science Bulletin (English edition)*, 55(19): 2 028 ~ 2 038.
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing and Geng Yuansheng. 2007. Phase equilibria and P-T path of high- and low-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 135 ~ 143 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing, Geng Yuansheng, *et al.* 2004. Discovery and implications of the high-pressure pelitic granulite from the Qixia region in Jiaobei massif [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1 424 ~ 1 430.
- Zhou Xiwen, Zhao Guochun and Geng Yuansheng. 2010. Helanshan high pressure pelitic granulite : petrologic evidence for collision event in the western block of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2 113 ~ 2 121 (in Chinese with English abstract).

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 [J]. *岩石学报*, 10(2): 139 ~ 150.
- 陈迪云, 徐伟昌. 1993. 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*, (2): 29 ~ 36.
- 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 [J]. *岩石学报*, 15(2): 303 ~ 314.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中. 1993. 闽北前寒武纪基底的地质年代学研究 [J]. *福建地质*, 13(1): 17 ~ 32.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 等. 1995. 浙西南早元古代花岗岩质岩石的年代 [J]. *岩石矿物学杂志*, 14(1): 1 ~ 8.
- 胡雄建. 1994. 浙西南下元古界八都群的地质年代学 [J]. *地球化学*, 23(S1): 18 ~ 24.
- 胡雄建, 许金坤, 童朝旭. 1991. 浙西南前寒武纪地壳 [M]. 北京 : 地质出版社, 1 ~ 278.
- 胡雄建, 许金坤, 童朝旭, 等. 1992. 浙西南中元古界龙泉群的地质年

- 代学 J]. 地质评论, 38(3): 271-278.
- 靳是琴, 李鸿超. 1984. 成因矿物学概论[M]. 长春: 吉林大学出版社.
- 兰玉琦, 叶瑛, 兰翔, 等. 1995. 浙江陈蔡群孔兹岩系的变质地质学研究 J]. 浙江大学学报, 29(3): 303-309.
- 刘锐. 2009. 华夏地块前海西期地壳深熔作用——以浙闽地区为例(博士学位论文)[D]. 中国地质大学.
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 等. 2004. 紫苏花岗岩成因及构造意义 J]. 华南地质与矿产, (4): 63-70.
- 王银喜, 杨杰东, 郭令智, 等. 1992. 浙江龙泉早元古代花岗岩的发现及基底时代的讨论 J]. 地质评论, (6): 525-531.
- 杨杰东, 徐士进, 王银喜, 等. 1994. 浙江龙泉八都群斜长角闪岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 年龄测定及其意义 J]. 地球化学, 23(S1): 25-31.
- 于津海, 王丽娟, 魏震洋, 等. 2007. 华夏地块显生宙的变质作用期次和特征 J]. 高校地质学报, 13(3): 474-483.
- 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 J]. 科学通报, 50(16): 1758-1767.
- 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 J]. 岩石学报, 19(3): 461-467.
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩(HT-HP 和 HT-UHT)及其相关问题 J]. 岩石学报, 25(8): 1753-1771.
- 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.
- 赵亮, 郭锋, 范蔚茗, 等. 2010. 广西十万大山地壳演化: 来自印支期花岗岩中麻粒岩包体锆石 U-Pb 及 Hf 同位素记录 J]. 科学通报, 55(15): 1489-1498.
- 赵国春, 孙德有. 1994. 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, 24(3): 246-253.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 等. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义 J]. 科学通报, 49(14): 1424-1430.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生. 2007. 胶北地块高压与低压泥质麻粒岩的相平衡关系与 *p-T* 演化轨迹 J]. 地学前缘, 14(1): 135-143.
- 周喜文, 赵国春, 耿元生. 2010. 贺兰山高压泥质麻粒岩——华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据 J]. 岩石学报, 26(7): 2113-2121.

2010 年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率
1	中国科学地球科学	2.296	3998	0.95	16	高校地质学报	0.993	954	0.95
2	岩石学报	1.788	4558	0.64	17	地球化学	0.992	1570	0.94
3	地质学报	1.774	3046	0.87	18	现代地质	0.974	1275	0.77
4	地质力学学报	1.697	576	0.62	19	地质与勘探	0.892	1295	0.67
5	矿床地质	1.648	1818	0.85	20	西北地质	0.845	482	0.81
6	大地构造与成矿学	1.551	786	0.76	21	矿物岩石	0.832	760	0.88
7	地质论评	1.351	1989	0.94	22	地质科学	0.828	1345	0.91
8	岩矿测试	1.280	904	0.72	23	吉林大学学报地球科学版	0.801	1264	0.82
9	地球科学	1.216	1899	0.87	24	岩石矿物学杂志	0.784	803	0.89
10	地球学报	1.215	1432	0.77	25	地层学杂志	0.693	624	0.83
11	地球科学进展	1.174	2434	0.91	26	地质科技情报	0.689	970	0.83
12	中国地质	1.144	1364	0.82	27	矿物岩石地球化学通报	0.583	520	0.95
13	沉积学报	1.118	2283	0.91	28	新疆地质	0.469	735	0.79
14	地质通报	1.116	2177	0.86	29	矿物学报	0.459	673	0.92
15	地学前缘	1.031	2747	0.93	30	沉积与特提斯地质	0.269	421	0.93

本表数据引自《2011 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。