

文章编号: 1000-4734(2013)01-0110-09

福建东山坑北复式岩体中蓝绿色角闪石 矿物学特征及其形成环境探讨

史维鑫^{1,2}, 张达¹, 石建基³, 狄永军¹, 李野¹, 张垚垚¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 国土资源实物地质资料中心, 河北 燕郊 065201;

3. 福建省闽东南地质大队, 福建 泉州 362021)

摘要: 角闪石作为福建东山坑北复式岩体的主要变质特征矿物之一,其详细的成因矿物学研究对解释该套岩体的变质变形特征和条件具有一定的指导意义。本文应用电子探针分析和斜长石-角闪石温压计、黑云母-石榴子石温压计对该区花岗岩中蓝绿色角闪石进行了成分分析和温压条件的研究。研究表明该区变质变形花岗岩中蓝绿色角闪石为铁浅闪石,大部分为岩浆结晶和次生交代的角闪石。通过斜长石-角闪石温压计计算出其压力为 0.40~0.72 GPa, 变质温度大约为 543~557 °C。通过石榴石-黑云母温度计计算其变质温度为 546~590 °C。角闪石的成因矿物学研究表明坑北岩体的变质程度为低角闪岩相-高绿片岩相。变质作用相当于燕山造山运动的第Ⅲ幕,是与深大断裂有关的低压高温型区域。

关键词: 坑北复式岩体; 变质花岗岩; 蓝绿色角闪石; 温压计; 低角闪岩相-高绿片岩相

中图分类号: P571; P578

文献标识码: A

作者简介: 史维鑫,女,1984年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: shiweixincugb@163.com

福建东山坑北复式岩体位于平潭-东山构造带的南段,深变质的东部构造亚带和浅变质的西部构造亚带的过渡带^[1]。该岩体中的侵入岩经历了多期的变质变形作用,但根据野外产状、残余组构及矿物特征等,仍可确定其原岩为不同成分的花岗质侵入岩。在晚侏罗世岛美单元中已变质变形的正长花岗岩和早侏罗世牛牯山单元的糜棱岩化花岗闪长岩中均发现了蓝绿色角闪石。前人认为蓝绿色角闪石是具低角闪岩相的变质特征矿物,但对该区蓝绿色角闪石的成分、成因及形成环境等方面未做深入的研究。笔者通过岩相学、矿物成分分析和温压条件的估算等方面对坑北岩体中变质变形花岗岩中的蓝绿色角闪石进行深入研究,旨在探讨其成因、变质变形条件和区域变质的温压条件,为长乐-南澳变质带的变质作用特征、演化和大地构造背景等提供信息。

1 地质背景与采样位置

长乐-南澳变质带出露于闽粤沿海地区,沿福建长乐至广东南澳一线呈北东向带状展布。变质带内发育长乐-建设、三山-诏安及平潭-南澳等三条北东向次级断裂带。以三山-诏安断裂为界,变质带分为东、西两个亚带^[13,15]。本文研究对象坑北复式岩体空间上受到NE向的平潭-东山构造带(也称东亚带)的控制(图1)。区域上出露的地层主要为前泥盆系亲营山组、上三叠统文宾山组、下侏罗统梨山组、上三叠统-下侏罗统(未分)、上侏罗统长林组、南园组、下白垩统黄坑组、寨下组及第四系等。下白垩统黄坑组是区内未变质的最老的地层,黄坑组之下的地层都发生或局部发生了变质变形作用。由于变质带内变质变形的花岗质岩石较为复杂,石建基^[15]以岩体与围岩的接触关系及侵入岩岩石学、岩石化学、地球化学特征,及锆石 U-Pb 同位素测年研究等为主要依据,结合岩体(石)变质变形特征,将变质带中的变质变形花岗岩类划分为早侏罗世、晚侏罗世、早白垩世早期等3期,并将3期中各类侵入岩按先后次序(由地质接触关系确定)及岩浆演化规律,归并为早侏罗世东山序列、晚侏罗世古美山

收稿日期: 2012-04-23

基金项目: 地质调查项目武夷山植被覆盖区成矿地质背景研究与成矿要素综合推断(资助号: 1212011085472); 武夷山成矿带中生代推覆构造与铜多金属找矿方向研究(资助号: 1212010813064); 武夷山成矿带铜多金属成矿规律研究(资助号: 1212010533105); 111计划(资助号: B07011)

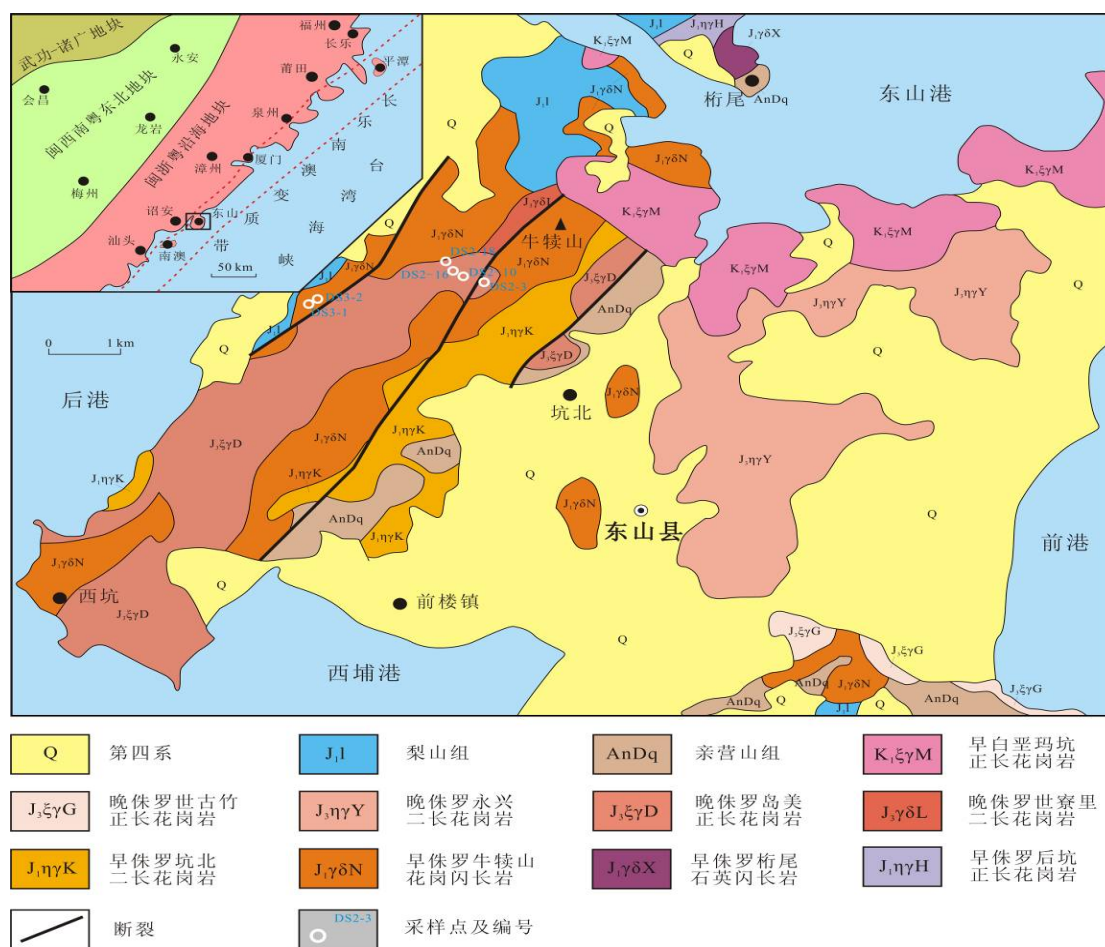


图1 东山坑北地区地质简图(底图据诏安1:50000图)

Fig. 1. Schematic geological map of Kengbei area, Dongshan County.

序列及早白垩世早期漳浦序列等3个由石英闪长岩(英云闪长岩)-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩组成的成分演化序列。

坑北复式岩体是区域上知名的岩体之一,其主体位于福建东山岛西北部的西坑-牛犊山一带,平面上呈北东-南西向展布的椭圆形,长约14~15 km,宽约4.5 km,面积约40 km²。该复式岩体的原岩是由早侏罗世、晚侏罗世及晚侏罗世-早白垩世石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩等组成。姜平^[1]根据变质岩石空间分布、接触关系、岩石学及矿物学、岩石化学、地球化学等特征,将该岩体划分为六个基本单元。其中蓝绿色角闪石主要赋存于晚侏罗世岛美单元的正长花岗岩和早侏罗世牛犊山单元的花岗闪长岩中。

晚侏罗世岛美单元的正长花岗岩大多受糜棱岩化作用,形成糜棱岩化细粒正长花岗岩、糜棱岩化中粒正长花岗岩及糜棱岩化似斑粗粒正长花岗岩。岩石呈灰白、深灰色,变形强度分带

较明显,细粒花岗结构,片麻状构造,主要矿物为斜长石(15%~20%),钾长石(50%~55%),石英(25%~30%),黑云母(5%)和少量角闪石。

早侏罗世牛犊山单元的糜棱岩化花岗闪长岩颜色呈灰、深灰色,全岩变形均匀,具明显的条纹-条痕状构造,残斑结构,基质呈糜棱结构。岩石由残斑(30%~35%)和基质(65%~70%)组成,残斑成分为斜长石、钾长石、石英等,呈长透镜状,石英具强烈波状消光。基质成分有斜长石、钾长石、石英、黑云母、角闪石等,呈微粒变晶状,黑云母呈细小鳞片状。基质绕残斑分布,浅色与暗色矿物聚集成条纹-条痕状,定向性明显。

样品取自坑北岩体晚侏罗世岛美单元和早侏罗世牛犊山单元中,晚侏罗世岛美单元采集样品共计4块,样品号为DS2-3, DS2-10, DS2-16和DS2-18。早侏罗世牛犊山单元采集样品2块,样品号为DS3-1和DS3-2(图1)。

2 岩相学与矿物成分分析

为了更好的研究坑北岩体中蓝绿色角闪石的岩相学特征、矿物成分及变质变形程度,本文选取朱同兴^[5]藏北羌塘中部才多茶卡地区蓝闪石片岩中的蓝闪石的岩相学特征和电子探针分析数据与本文的蓝绿色角闪石对比。

2.1 岩相学分析对比

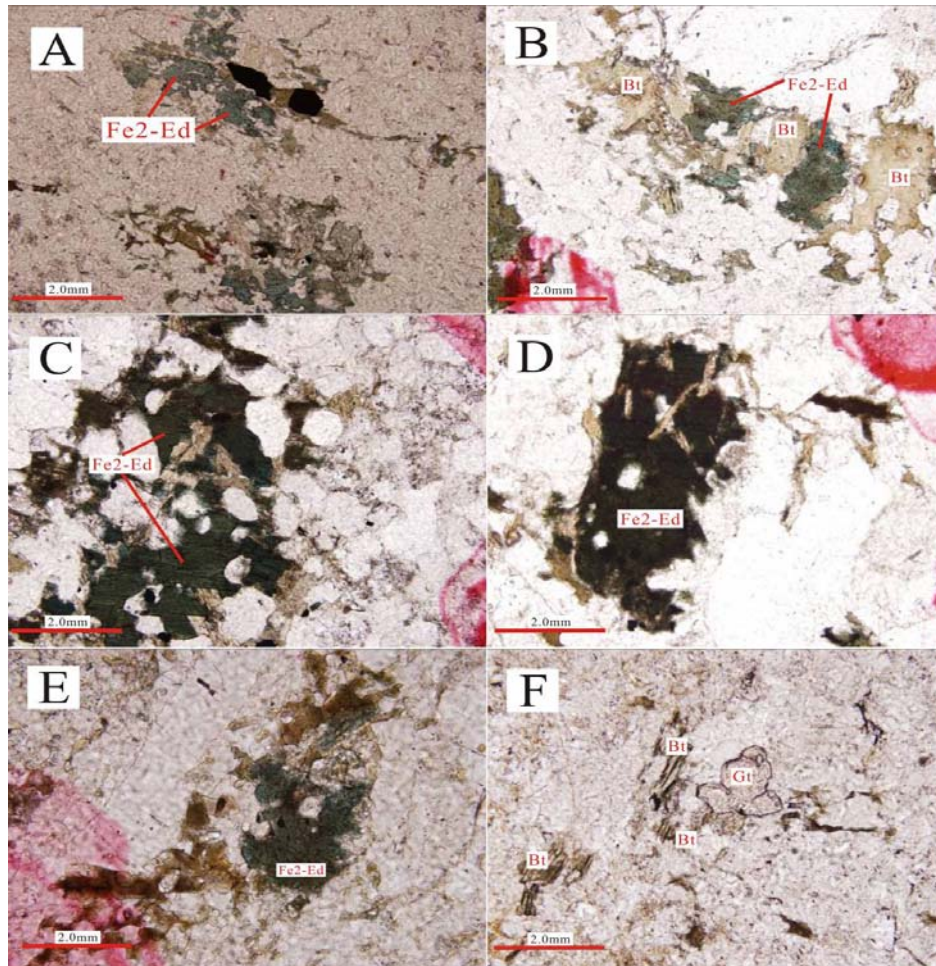
坑北复式岩体中蓝绿色角闪石的光性特征如下:呈板状,纤维状。单偏光下呈蓝绿色-绿色(图2),强多色性。正中突起,不完全消光,干涉色为一级顶到二级底。 $\{110\}$ 解理完全,正延性,二轴晶正光性。蓝闪石片岩中蓝闪石的光性特征如下:呈细长柱状;单偏光下呈湖蓝色,长轴平行偏光方向时为深蓝色,干涉色为一级灰-

紫,近于平行消光($c \wedge N_g$ $6^\circ \sim 10^\circ$)。二轴晶负光性,光轴角变化大,一般为 45° ^[5]。

2.2 角闪石矿物化学成分分析对比

本次矿物测试分析由核工业北京地质研究院分析测试研究中心电子探针分析实验室完成,仪器型号为 JXA-8100,工作条件为加速电压 20 kV,电子束流 1×10^{-8} A,分析方式为波谱分析,矿物分析数据见表1(附蓝闪石对比数据)。角闪石结构式根据 23 个氧原子为基准,采用 $\Sigma FM=13$ 法计算角闪石的阳离子数^[16,29](表1)。

蓝绿色角闪石中 $w(\text{SiO}_2) = 40.97\% \sim 44.67\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8.16\% \sim 11.91\%$, $w(\text{MgO}) = 4.22\% \sim 6.87\%$, $w(\text{FeO}^*) = 23.10\% \sim 27.08\%$, $w(\text{Na}_2\text{O}) = 1.04\% \sim 1.72\%$ 。而蓝闪石^[5] $w(\text{SiO}_2) = 52.91\% \sim 57.30\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8.61\% \sim 14.18\%$,



A-样品 DS2-3 浅色细粒正长花岗岩中蓝绿色角闪石,暗色矿物为黄铜矿,单偏光; B-样品 DS2-10 糜棱岩化细粒正长花岗岩中的蓝绿色角闪石,单偏光; C-样品 DS2-16 深色细粒正长花岗岩中蓝绿色角闪石,单偏光; D-样品 DS2-18 糜棱岩化粗粒正长花岗岩中的蓝绿色角闪石,单偏光; E-样品 DS3-1 条纹-条痕状花岗闪长岩中蓝绿色角闪石,单偏光。F-样品 DS3-2 糜棱岩化花岗闪长岩中石榴子石和黑云母,单偏光

图2 坑北岩体样品显微照片

Fig. 2. Microphotograph of porphyry from Kengbei area.

表 1 代表性角闪石的电子探针分析结果 (w_B%)

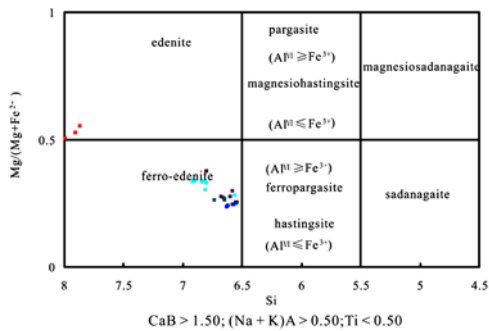
Table 1. Electron probe analyses for representative amphiboles

	DS2-3								DS2-10						DS2-16		
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	1	2	3
SiO ₂	43.47	41.99	44.13	43.08	44.37	44.62	44.67	43.98	41.61	41.4	42.67	41.66	42.07	41.25	44.32	43.82	42.13
TiO ₂	0.19	0.02	0.28	0.31	0.17	0.10	0.21	0.18	1.29	1.25	1.44	1.20	1.40	1.34	0.9	0.65	0.37
Al ₂ O ₃	9.03	11.01	8.52	8.29	8.42	8.31	8.16	9.04	9.80	9.83	9.18	9.54	9.75	10.10	8.62	8.84	11.91
FeO	25.12	25.38	25.1	24.92	24.91	24.72	24.87	24.52	26.13	26.32	25.85	25.59	24.71	26.07	23.32	23.10	23.40
MnO	1.49	1.25	1.47	1.42	1.50	1.78	1.90	1.38	0.84	0.64	0.87	0.70	0.71	0.78	1.53	1.46	1.41
MgO	5.49	5.06	6.29	6.31	6.25	6.23	6.17	6.19	4.61	4.67	5.00	4.94	5.37	4.53	6.87	6.71	5.80
CaO	10.43	11.12	10.24	10.33	10.27	10.21	10.16	10.71	11.25	11.1	10.58	10.93	11.24	11.09	10.81	10.81	11.04
Na ₂ O	1.43	1.29	1.58	1.52	1.28	1.49	1.45	1.26	1.36	1.33	1.49	1.35	1.36	1.37	1.26	1.23	1.26
K ₂ O	1.07	1.22	0.86	0.84	0.89	0.86	0.92	1.01	1.30	1.30	1.20	1.28	1.36	1.35	1.01	0.99	1.29
Total	97.72	98.34	98.47	97.02	98.06	98.32	98.51	98.27	98.19	97.84	98.28	97.19	97.97	97.88	98.64	97.61	98.61
Si	6.807	6.559	6.839	6.795	6.890	6.912	6.915	6.814	6.549	6.54	6.672	6.600	6.583	6.513	6.808	6.800	6.497
Al ^{IV}	1.193	1.441	1.161	1.205	1.110	1.088	1.085	1.186	1.451	1.46	1.328	1.400	1.417	1.487	1.192	1.200	1.503
Al ^{VI}	0.473	0.586	0.395	0.337	0.431	0.429	0.404	0.464	0.367	0.371	0.364	0.381	0.381	0.393	0.369	0.417	0.661
Ti	0.022	0.002	0.033	0.037	0.020	0.012	0.024	0.021	0.153	0.149	0.169	0.143	0.165	0.159	0.104	0.076	0.043
Al ^T	1.666	2.027	1.556	1.541	1.541	1.517	1.489	1.651	1.818	1.83	1.692	1.781	1.798	1.88	1.561	1.617	2.164
Fe ³⁺	0.338	0.258	0.327	0.286	0.400	0.373	0.376	0.371	0.273	0.269	0.342	0.297	0.305	0.267	0.406	0.401	0.306
Fe ²⁺	2.951	3.058	2.926	3.002	2.835	2.829	2.844	2.806	3.167	3.208	3.039	3.094	2.929	3.176	2.59	2.597	2.711
Mn	0.198	0.165	0.193	0.190	0.197	0.234	0.249	0.181	0.112	0.086	0.115	0.094	0.094	0.104	0.199	0.192	0.184
Mg	1.282	1.178	1.453	1.484	1.447	1.439	1.424	1.43	1.082	1.1	1.166	1.167	1.253	1.066	1.573	1.552	1.333
Ca	1.750	1.861	1.700	1.746	1.709	1.695	1.685	1.778	1.897	1.879	1.773	1.855	1.885	1.876	1.779	1.797	1.824
Na	0.434	0.391	0.475	0.465	0.385	0.447	0.435	0.378	0.415	0.407	0.452	0.415	0.413	0.419	0.375	0.37	0.377
K	0.214	0.243	0.170	0.169	0.176	0.17	0.182	0.2	0.261	0.262	0.239	0.259	0.271	0.272	0.198	0.196	0.254
Total	17.328	17.769	17.229	17.255	17.141	17.144	17.113	17.28	17.545	17.561	17.35	17.485	17.493	17.613	17.155	17.215	17.858
	DS2-18			DS3-1						蓝闪石对比数据*							
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	D4010DB1	D4003N1	D4003N1					
SiO ₂	42.94	41.88	41.98	42.13	40.97	42.18	41.57	42.30	41.39	57.30	54.82	52.91					
TiO ₂	1.15	1.20	0.96	1.63	1.63	0.80	1.06	1.60	1.50	0.16	0.01	0.27					
Al ₂ O ₃	9.26	10.09	9.44	9.64	10.07	9.72	9.95	9.55	9.77	14.18	8.82	8.61					
FeO	25.29	25.54	25.34	25.5	26.29	26.14	26.68	26.40	27.08	7.54	14.59	14.34					
MnO	1.09	1.14	1.05	0.71	0.60	0.93	0.74	0.76	0.56	0.02	0.06	0.05					
MgO	4.59	4.22	4.65	4.74	4.33	4.60	4.59	4.35	4.27	5.19	8.27	8.85					
CaO	10.64	11.07	11.15	11.12	10.86	10.71	10.57	10.59	10.63	6.30	1.09	1.52					
Na ₂ O	1.70	1.55	1.38	1.04	1.71	1.28	1.42	1.72	1.52	6.96	6.92	5.84					
K ₂ O	1.34	1.47	1.33	1.20	1.23	1.06	1.20	1.26	1.21	0.00	0.00	0.00					
Total	98.00	98.16	97.28	97.71	97.69	97.42	97.78	98.53	97.93	97.65	94.58	92.39					
Si	6.728	6.583	6.648	6.617	6.489	6.661	6.568	6.622	6.546	7.87	7.995	7.904					
Al ^{IV}	1.272	1.417	1.352	1.383	1.511	1.339	1.432	1.378	1.454	0.13	0.005	0.096					
Al ^{VI}	0.438	0.452	0.410	0.402	0.368	0.470	0.421	0.384	0.367	2.165	1.511	1.42					
Ti	0.136	0.142	0.114	0.193	0.194	0.095	0.126	0.188	0.178	0.017	0.001	0.03					
Al ^T	1.710	1.869	1.762	1.784	1.880	1.809	1.853	1.762	1.821	2.295	1.516	1.516					
Fe ³⁺	0.326	0.276	0.297	0.423	0.236	0.358	0.282	0.305	0.280	0.589	0.910	0.699					
Fe ²⁺	2.988	3.081	3.059	2.926	3.246	3.094	3.244	3.152	3.302	0.866	1.780	1.787					
Mn	0.145	0.152	0.141	0.094	0.080	0.124	0.099	0.101	0.075	0.002	0.007	0.006					
Mg	1.072	0.989	1.098	1.110	1.022	1.083	1.081	1.015	1.007	1.063	1.798	1.971					
Ca	1.786	1.864	1.892	1.871	1.843	1.812	1.789	1.776	1.801	0.927	0.170	0.243					
Na	0.516	0.472	0.424	0.317	0.525	0.392	0.435	0.522	0.466	1.853	1.957	1.691					
K	0.268	0.295	0.269	0.240	0.249	0.214	0.242	0.252	0.244	0.000	0.000	0.000					
Total	17.384	17.593	17.465	17.361	17.644	17.451	17.571	17.457	17.541	14.893	15.224	15.154					

注: 蓝闪石对比数据引自朱同兴等, 2010.

$w(\text{MgO}) = 5.19\% \sim 8.85\%$, $w(\text{FeO}^*) = 7.54\% \sim 15.97\%$, $w(\text{Na}_2\text{O}) = 5.84\% \sim 7.08\%$ 。矿物成分数据对比得出蓝绿色角闪石富 FeO^* , 贫 MgO , Na_2O 。

根据 Leake^[2]提出的角闪石分类方案, 本区岩体中的角闪石属于钙质角闪石组 [$(\text{Ca}+\text{Na})\text{B} \geq 1.34$, $\text{NaB} < 0.67$, $\text{CaB} > 1.34$]。将所测定的坑北岩体蓝绿色角闪石样品和蓝闪石样品投入角闪石分类图解中 (图 3), 所测定的蓝绿色角闪石落在铁闪闪石区范围内。



Edenite 浅闪石; Ferro-Edenite 铁浅闪石; Pargasite 韭闪石; Ferropargasite 铁韭闪石; Magnesiohastingsite 镁绿钙闪石; Hastingsite 绿钙闪石

图 3 钙质角闪石的分类图解(底图据 Leake 等^[3])

Fig. 3. Classification of calcic amphiboles.

2.3 角闪石成因类型

马昌前等^[6-7]根据不同成因角闪石的 Si、Ti 含量, 做出了角闪石成因判别图解; 研究分析将钙质角闪石的 Si-Ti 变异图划分为五个区域, 分别对应于不同的成因类型。结合本区角闪石的 Si-Ti 成分特点得出坑北岩体中蓝绿色角闪石为岩浆结晶的产物, 少部分为次生变化或交代产物。近一步反应出坑北岩体侵入岩原岩为花岗岩, 后发生变质变形作用 (图 4、5)。

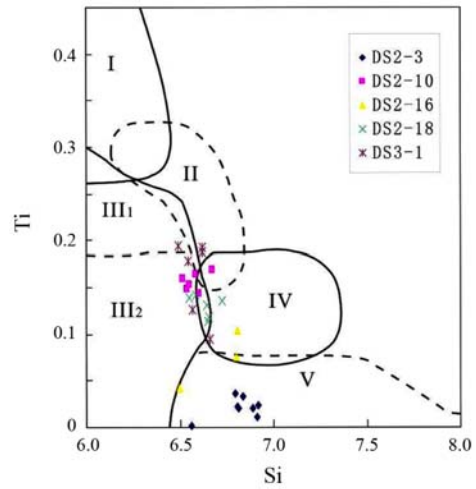
3 讨论

3.1 变质变形温压条件

3.1.1 角闪石-斜长石温压计

晚侏罗世岛美单元的变质变形正长花岗岩中, 变质矿物组合为角闪石+黑云母+斜长石+钾长石+石英, 通过角闪石压力计^[21]计算得出坑北岩体中蓝绿色角闪石形成的压力为 $0.40 \sim 0.72$ GPa。角闪石-斜长石温度计^[22]测量获得正长花岗

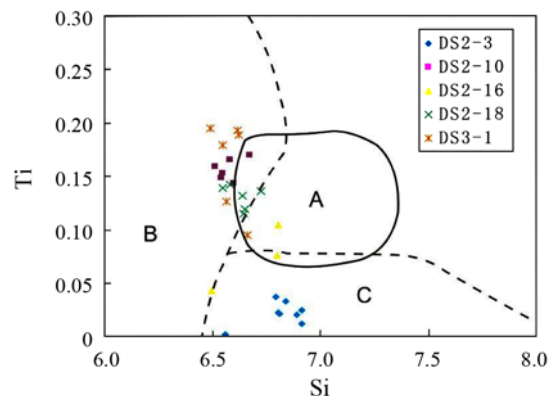
岩的变质温度达 $543 \sim 557$ °C。



I -火山岩中的火成角闪石; II -基性超基性岩中的火成角闪石; III -中 (III1) 高级 (III2) 变质岩中的角闪石; IV -中酸性侵入岩中火成岩角闪石; V -退变的或交代成因的角闪石

图 4 钙质角闪石的 Si-Ti 变异图及成因类型划分 (底图据马昌前等^[6])

Fig. 4. Si-Ti variation figure for calcic amphiboles and genetic classification.



A-酸性岩浆结晶的角闪石; B-深源捕虏晶; C-次生及交代角闪石

图 5 花岗岩类中钙质角闪石的成因类型 (底图据马昌前等^[6])

Fig.5. Genetic type of calcic amphiboles from granite.

3.1.2 石榴子石-黑云母温压计

早侏罗世牛犊山单元糜棱岩化花岗闪长岩变质矿物主要有: 角闪石+黑云母+斜长石+钾长石+石英, 黑云母+铁铝榴石+长石+绿泥石+石英等。长英质矿物构成的多晶条带与暗色矿物 (黑云母、角闪石) 条带相间构成条带状、条纹状构造, 其变质作用大致相当于低角闪岩相^[15]。石榴

石-黑云母矿物对是岩浆岩,尤其是变质岩中最为常见的矿物对,该温度计目前被广泛应用于变质作用的温度条件的研究^[11,16,30]。根据 Kurt 等^[32]对变质泥岩的 KFMASH 体系的稳定组合分布及 P - t 反应约束得出本区的变质温度范围为 520~800 °C、压力范围达 0.67~0.81 GPa (图 6)。本文选取样品 DS3-2 中石榴子石和黑云母紧密共生样品进行测试,黑云母和石榴子石电子探针数据见表 2 和表 3 (表 3 中 1*, 3* 样品数据用于温压计算)。选择 Holdaway 等^[18]所标度的石榴子石-黑云母温度计进行变质条件的估算,结果显示其变质温度大约为 546~590 °C。

3.2 形成时代讨论

本文对东山晚侏罗世岛美单元的正长花岗岩进行了锆石微区 (LA-ICPMS) 测年,其等时线年龄为 142.75±0.46 Ma (未发表资料)。石建基^[15]对东山牛牯山花岗闪长岩 (构造变粒岩) 进行了锆石微区 (LA-ICPMS) 测年,其等时线年龄为 149.26±0.53 Ma,并研究表明该年龄值应为晚期变质变形年龄。年代讨论证明了变质变形作用的年代肯定要早于 149.26±0.53 Ma。

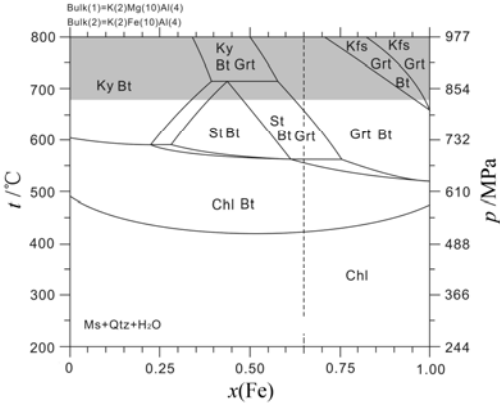


图 6 变质泥岩中的 KFMASH 体系的稳定组合分布及 p - t 反应约束 (底图据 Kurt 等^[32])

Fig. 6. Distribution of stable assemblages in the system KFMASH of the pelite and the p - t reaction constraint.

3.3 大地构造属性

近年的研究已证明长乐-南澳变质带是一条大型的中生代韧性剪切带,坑北岩体在空间上受到了该变质带的控制。孔华^[26]等和石建基^[27]根据不同变质相带的构造变形特征,将长乐-南澳变质带划分为 3 期变形:

表 2 代表性黑云母的电子探针分析结果 (w_B/%)
Table 2. Electron probe analyses for representative biotite

	DS2-3					DS2-10		DS2-16	DS3-1		DS3-2	
	1	2	3	4	5	1	2	1	1	2	1*	2*
SiO ₂	36.68	36.28	37.62	35.49	35.36	34.57	34.38	34.85	34.57	33.43	34.37	33.40
TiO ₂	3.43	3.43	2.38	3.07	2.66	3.18	3.22	0.93	2.15	2.63	2.52	2.95
Al ₂ O ₃	15.12	14.74	14.36	14.28	15.30	15.03	15.19	16.16	17.36	17.96	17.73	17.88
FeO	25.54	26.88	26.17	27.02	26.61	27.25	26.60	23.46	28.21	27.63	27.90	27.62
MnO	0.40	0.54	0.42	0.51	0.54	0.46	0.47	0.72	0.46	0.39	0.57	0.67
MgO	5.52	5.94	6.60	6.42	5.85	5.64	5.63	7.90	3.66	3.16	2.81	2.43
CaO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.05
Na ₂ O	0.02	0.08	0.08	0.10	0.15	0.09	0.00	0.08	0.14	0.17	0.04	0.06
K ₂ O	9.64	9.43	9.38	9.38	9.43	9.16	9.59	9.80	9.36	9.49	9.45	9.60
Total	96.35	97.32	97.01	96.30	95.90	95.38	95.08	93.90	95.91	94.91	95.43	94.66
Si	2.855	2.817	2.907	2.797	2.791	2.755	2.748	2.778	2.743	2.684	2.740	2.694
Al ^{IV}	1.145	1.183	1.093	1.203	1.209	1.245	1.252	1.222	1.257	1.316	1.260	1.306
Al ^{VI}	0.241	0.166	0.215	0.124	0.214	0.167	0.179	0.296	0.367	0.384	0.406	0.394
Ti	0.201	0.200	0.138	0.182	0.158	0.191	0.194	0.056	0.128	0.159	0.151	0.179
Fe ³⁺	0.269	0.219	0.231	0.163	0.174	0.179	0.168	0.088	0.199	0.194	0.240	0.224
Fe ²⁺	1.394	1.527	1.460	1.618	1.582	1.637	1.610	1.476	1.673	1.662	1.620	1.639
Mn	0.026	0.036	0.027	0.034	0.036	0.031	0.032	0.049	0.031	0.027	0.038	0.046
Mg	0.640	0.688	0.760	0.754	0.688	0.670	0.671	0.939	0.433	0.378	0.334	0.292
Ca	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
Na	0.003	0.012	0.012	0.015	0.023	0.014	0.000	0.012	0.022	0.026	0.006	0.009
K	0.957	0.934	0.925	0.943	0.950	0.931	0.978	0.997	0.948	0.972	0.961	0.988
Total	7.731	7.781	7.769	7.837	7.826	7.821	7.832	7.912	7.801	7.806	7.760	7.776

表 3 代表性石榴子石的电子探针分析结果 (w_B/%)

Table 3. Electron probe analyses for representative garnet

	DS3-2						
	1*	2	3*	4	5	6	7
SiO ₂	36.54	38.98	37.33	36.61	38.53	37.70	37.68
TiO ₂	0.02	0.08	0.04	0.04	0.02	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	20.79	19.97	20.11	20.3	20.06	20.59	21.37
FeO	27.94	20.07	27.57	27.31	27.83	28.98	24.83
MnO	7.48	10.75	8.85	7.85	9.49	8.19	10.88
MgO	0.45	0.15	0.40	0.50	0.44	0.37	0.32
CaO	5.88	8.91	6.14	6.11	4.44	4.14	4.38
Total	99.11	98.95	100.46	98.77	100.82	99.99	99.58
Si	2.992	3.137	3.018	3.006	3.092	3.058	3.049
Ti	0.001	0.005	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001
Al	2.007	1.894	1.916	1.965	1.897	1.968	2.038
Fe ³⁺	0.000	0.011	0.070	0.029	0.041	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.914	1.339	1.794	1.846	1.827	1.966	1.680
Mn	0.519	0.733	0.606	0.546	0.645	0.563	0.746
Mg	0.055	0.018	0.048	0.061	0.053	0.045	0.039
Ca	0.516	0.768	0.532	0.538	0.382	0.360	0.380
Total	8.003	7.906	7.986	7.994	7.938	7.958	7.931
Pyr	1.83	1.26	1.62	2.05	1.81	1.52	1.26
Alm	63.58	54.97	60.20	61.73	62.86	66.58	54.97
Sps	17.24	24.39	20.34	18.25	22.19	19.06	24.39
Gro	17.14	12.42	14.31	16.50	11.04	12.19	12.42
Andr	0.00	0.00	3.54	1.47	2.09	0.00	0.00
Other	0.22	6.96	0.00	0.00	0.00	0.66	6.96

注: Pyr-镁铝榴石, Alm-铁铝榴石, Sps-锰铝榴石, Gro-钙铝榴石,

Andr-钙铁榴石, Other 为钙钒榴石、钙锆榴石、钙铬榴石;

阳离子数以 12 个氧为基础计算。

第 I 期是晚侏罗世 (155~145 Ma) 低角闪岩相变质, 该相带变形强烈, 广泛分布 NE 向的片麻理及流劈理, 发育 NE 向 b 线理及 NW 向微倾伏的 a 线理、云母鱼等显微构造。压力为 0.47~0.58 GPa, 温度为 550~620 °C。

第 II 期是晚侏罗世末 (145~137 Ma) 高绿片岩相变质、中深层次的长石-石英相塑性变形, 变质岩中的片柱状矿物出现了晚期的折劈理、膝折

等现象。发育韧性剪切带、剪切叶理、布丁构造及拔丝构造。压力为 0.1~0.5 GPa, 温度为 450~520 °C。

第 III 期: 早白垩世早期 (约 125 Ma) 低绿片岩相变质、中-浅层次石英相韧-脆性变形。该期变形波及整个变质带, 但对低角闪岩相带和高绿片岩相的构造形迹无重大影响, 只是表现为花岗岩体中节理发育、岩石破碎。压力为 0.1~0.2 GPa, 温度为 170~350 °C。

郭福祥^[28]认为长乐-南澳变质岩带是燕山造山运动伴生产物, 形成于中侏罗世之后, 早白垩世之前, 华南燕山造山第三幕造就了长乐-南澳带绿片岩相-低角闪岩相变质岩带。坑北复式岩体中蓝绿色角闪石的成因矿物学研究证明了坑北岩体的变质程度为低角闪岩相-高绿片岩相, 为低压高温变质区域。同时也证明了长乐-南澳变质带是一条经历三期变质变形的中生代韧性剪切带, 与前人论述一致。

4 结 论

(1) 坑北复式岩体中蓝绿色角闪石为铁浅闪石。

(2) 坑北岩体中蓝绿色角闪石部分发生次生变化, 为原岩发生变形变质作用产生的。

(3) 通过斜长石-角闪石温压计计算得出其压力为 0.40~0.72 GPa, 变质温度大约为 543~557 °C; 且石榴石-黑云母计算其变质温度为 546~590 °C。研究显示了坑北岩体的变质程度为低角闪岩相-高绿片岩相, 角闪石成因矿物学研究表明坑北岩体是与长乐-南澳断裂带有关的低压高温型区域。

致谢: 野外工作得到福建东山岛国土资源部林股长的热情帮助, 在室内电子探针实验过程中得到核工业北京地质研究院分析测试研究中心葛祥坤老师的帮助, 在此向他们表示诚挚的感谢!

参 考 文 献:

- [1] 姜平. 福建东山坑北复式岩体的地质特征及其变质变形作用[J]. 福建地质, 2004, 24(1): 25-32.
- [2] Leake B E. Nomenclature of amphibole [J]. *Am. Mineral*, 1978, (63): 1023-1052.
- [3] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S. Nomenclature of amphiboles report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Mineral and Mineral Names [J]. *American Mineralogist*, 1997, (82): 1019-1037.
- [4] 石永红, 朱光, 王道轩, 等. 皖中张八岭群“蓝片岩”中钠质角闪石及其变质 p-T 条件分析[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 179-188.
- [5] 朱同兴, 张启跃, 冯心涛, 等. 西藏羌塘中部才多茶卡蓝闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及地质意义[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1448-1456.
- [6] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田. 花岗岩类岩浆动力学-理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 169-180.
- [7] 王式光, 姜长义, 王廷印, 等. 太行山北段某些燕山期花岗岩类岩石中黑云母和角闪石的化学特征[C]. 国际花岗岩地质和成矿关系论文集,

- 1982: 21-37.
- [8] Chivas A R. Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyre copper mineralization. Part I: Mafic silicate from the Koloula igneous complex contrib [J]. *Mineral Petrol*, 1981, 78: 389-403.
- [9] 张东阳, 张招崇, 艾羽, 等. 西天山莱尔斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩体矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(1): 3-16.
- [10] 杨富贵, 王中刚, 刘从强, 等. 西北准噶尔地区碱性花岗岩体中角闪石的地质地球化学意义[J]. *矿物学报*, 1999, 19(1): 70-76.
- [11] 何德锋, 钟宏, 朱维光. 石榴石-黑云母地质温度计在四川拉拉铜矿床的应用[J]. *矿物学报*, 2008, 28(2): 127-132.
- [12] 雷敏, 吴才来, 高前明, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩及其包体的成因和矿物温度计的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(3): 271-288.
- [13] 陈斌. 福建平潭-东山变质带夕线石榴云母片岩中两期变质作用的岩相学证据及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 380-393.
- [14] 陆丽娜, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 胶西北郭家岭花岗闪长岩侵位深度: 来自角闪石温度计和流体包裹体的证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1521-1532.
- [15] 石建基. 长乐—南澳变质带构造变形特征及动力学研究[D]. 中国地质大学(北京). 2010.
- [16] 刘俊, 刘家军, 等. 黑云母全铝压力计估算胶东西北部玲珑花岗岩杂岩剥蚀程度[J]. *矿物学报*, 2009, 增刊: 481-482.
- [17] 赵一鸣, 谭惠静, 袁润广, 等. 含氯角闪石在闽西南砂卡岩铁矿床中的发现及其地质意义[J]. *地质评论*, 1980, 26(4): 300-306.
- [18] Holdaway M J. Application of new experimental and garnet margules data to the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85: 881-892.
- [19] Ferry J M, Spear F S. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1978, 66: 113-117.
- [20] Perchuk L L, Lavrent'eva. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite [A]. Saxena S K. *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions* [M]. New York: Springer, 1983: 199-239.
- [21] Wu Chun-ming, Cheng Ben-he. Valid garnet-biotite (GB) geothermometry and garnet-aluminum silicate-plagioclase-quartz (GASP) geobarometry in metapelitic rocks [J]. *Lithos*, 2006, 89: 1-23.
- [22] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure an experimental calibration of the Al-in-Hornblende barometer [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110: 304-310.
- [23] Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1994, 116(4): 433-47.
- [24] Mason G H. The mineralogy and textures of the Costal Batholith, Peru. In: Pitcher W S et al. *Magmaism at a Plate Edge* [M]. Blackie Halsted Press, 1985: 156-166.
- [25] 王志洪, 卢华复. 长乐—南澳韧性剪切带走滑特征探讨[J]. *地质评论*, 1996, 42(1): 1-7.
- [26] 孔华, 袁奎荣, 郭福祥. 福建长乐-南澳变质带演化的 pT 轨迹[J]. *桂林工学院学报*, 1996, 16(1): 19-25.
- [27] 石建基. 长乐-南澳断裂带中生代活动特征及大地构造属性[J]. *吉林大学学报*, 2010, 40(6): 1333-1342.
- [28] 郭福祥, 袁奎荣. 长乐—南澳变质岩带形成的大地构造背景与变质幕[J]. *桂林工学院学报*, 1996, 16(2): 102-109.
- [29] 牛利锋, 张洪福. 南太行山地区中基性侵入岩中角闪石的矿物学及其成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(2): 269-277.
- [30] 刘春花, 杨林, 尹京武, 等. 新疆库鲁克塔格兴地塔格群中石榴石的矿物学特征研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 234-242.
- [31] 许顺山, 吴淦国, 邓军. 岩浆侵位机制研究综述[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(4): 8-14.
- [32] Kurt B, Rodney G. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* [M]. New York: Springer, 2011: 270-274.

Mineralogy Characteristics and Formation Environment of Turquoise Amphiboles from Kengbei Complex Rocks in Dongshan County, Fujian Province, China

SHI Wei-xin^{1,2}, ZHANG Da¹, SHI Jian-ji³, DI Yong-jun¹, LI Ye¹, ZHANG Yao-yao¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Geological Cores and Samples Center, Yanjiao 065201, China;

3. Southeastern Fujian Geology Party of Fujian Province, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Genesis research on amphibole, a mineral with metamorphic characteristics Kengbei complex rocks, has significant assist for the explanation of the deformation characteristics and conditions metamorphism. In this paper, we analyzed the elements and studied the temperature-pressure condition for turquoise amphibole from the granite by using electron microprobe, plagioclase-amphibole geothermobarometer and manometer and garnet-biotite geothermobarometer and manometer. Results show that turquoise amphibole from the metamorphic granite from Dongshan County, Fujian Province, China is Ferro-Edenites, mostly with magmatic crystallization and secondary replacement amphibole, under the pressure of 0.40 – 0.72 GPa, at the metamorphic temperature of 543 – 557 °C. The rock of Kengbei metamorphic grade is mainly low amphiboles facie-high green schist facie. The metamorphism equivalents to the phase III of the Yanshan Orogeny, and is of the low-voltage high temperature type, with some connection with the deep fault.

Key words: Kengbei complex rock; metamorphic granite; turquoise amphibole; thermobarometer; manometer; low amphiboles facie; high green schist facie