

doi: 10.12029/gc20160304

黄长煌. 福建东山变质岩 LA-ICP-MS 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 738-750.

Huang Changhuang. Isotopic age of zircon of the Dongshan metamorphic rocks in Fujian Province and its geological significance[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 738-750(in Chinese with English abstract).

福建东山变质岩 LA-ICP-MS 同位素年龄 及其地质意义

黄长煌

(福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘要: LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法测得东山地区变质岩的年龄为 176.8 Ma、203 Ma、230 Ma、1320 Ma、1810 Ma 等, 其中 176.8 Ma 为火山-沉积岩中的岩浆锆石, 代表着地层形成的年龄; 203 Ma、230 Ma 为继承岩浆碎屑锆石, 代表了晚三叠世源区火成岩的物源年龄; 1810 Ma、1320 Ma 为变质岩继承锆石, 代表了基底物源年龄。地球化学分析结果表明: 岩石具贫硅、高铝、铁、富钾, Co、Ni、V 含量低, Ba、Rb、Zr、Hf、U、Th 及 La 含量高, 具壳源特征; 稀土元素总量较高, 轻稀土略富集, 轻、重稀土元素分异不明显, 无明显的负铕异常, 表明变质岩的部分物质与地幔有关。福建东山地区亲营山组可能属早侏罗世晚期华夏陆块边缘进入裂陷期海陆交互火山-沉积的产物。

关键词: 东山苏峰山; 亲营山组; LA-ICP MS 锆石定年; 早侏罗世晚期

中图分类号: P593⁺.3; P588.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)03-0738-13

Isotopic age of zircon of the Dongshan metamorphic rocks in Fujian Province and its geological significance

HUANG Chang-huang

(Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, Fujian, China)

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating was carried out for Dongshan metamorphic rocks in Fujian Province. Their ages obtained are 176.8 Ma, 203 Ma, 230 Ma, 1320 Ma and 1810 Ma respectively. Among them, the 176.8 Ma is the age of magmatic zircon in volcanic-sedimentary rocks, representing the formation age of the sedimentary rock; 203 Ma and 230 Ma represent Late Triassic granitoids; 1320 Ma and 1810 Ma represent the metamorphic basement age of metamorphic rocks. The geochemical data indicate that these metamorphic rocks have poor Si and high Al, Fe, K and are characterized by low Co, Ni, V content and high Ba, Rb, Zr, Hf, U, Th, La values, exhibiting crust source features; relatively high REE content, slight enrichment of LREE, indistinct fractionation between LREE and HREE, and weak negative Eu anomaly all indicate that sources of the metamorphic rocks might have been mantle-crust and granitoids of I series. The Qingyingshan Formation seems to have been the early Jurassic product of the marine-terrigenous facies at the rifting stage, accompanied by volcanism.

收稿日期: 2015-06-17; 改回日期: 2016-04-28

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114043301)资助。

作者简介: 黄长煌, 男, 1962年生, 高级工程师, 地质矿产专业; E-mail: 1154423711@qq.com。

Key words: Dongshan area; Qingyingshan Formation; zircon LA-ICPMS dating; Early Jurassic

About the first author: HUANG Chang-huang, male, born in 1962, senior engineer, engages in geological and resources survey; E-mail: 1154423711@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120114043301).

福建东山地区属于华夏陆块的边缘,位于长乐—南澳断裂带的东侧^[1-8]。亲营山组是长乐—南澳构造带中最为典型的变质岩(图1)^②。长期受到研究者的关注,并赋予不同的大地构造意义,成为长期争议的热点^[1,4,6,7],争议的焦点是亲营山组的形成时代、是否为副变质岩及形成的大地构造环境^[1-11]。部分研究者认为变质岩属古老基底的部分,属震旦纪^[4,11];也

有研究者认为属晚三叠世至侏罗世沉积岩经过燕山期的变质而成^[6,9];近年来有不少研究者发现部分变质岩属正变质岩^[1,7],即中生代侵入岩体经过变质变形作用的产物,部分研究者^[1]甚至推论本断裂带的变质岩均属正变质岩。本文通过对东山地区变质岩的系统野外调研,结合锆石同位素定年和岩石地球化学等资料,证实亲营山组属副变质岩,其形

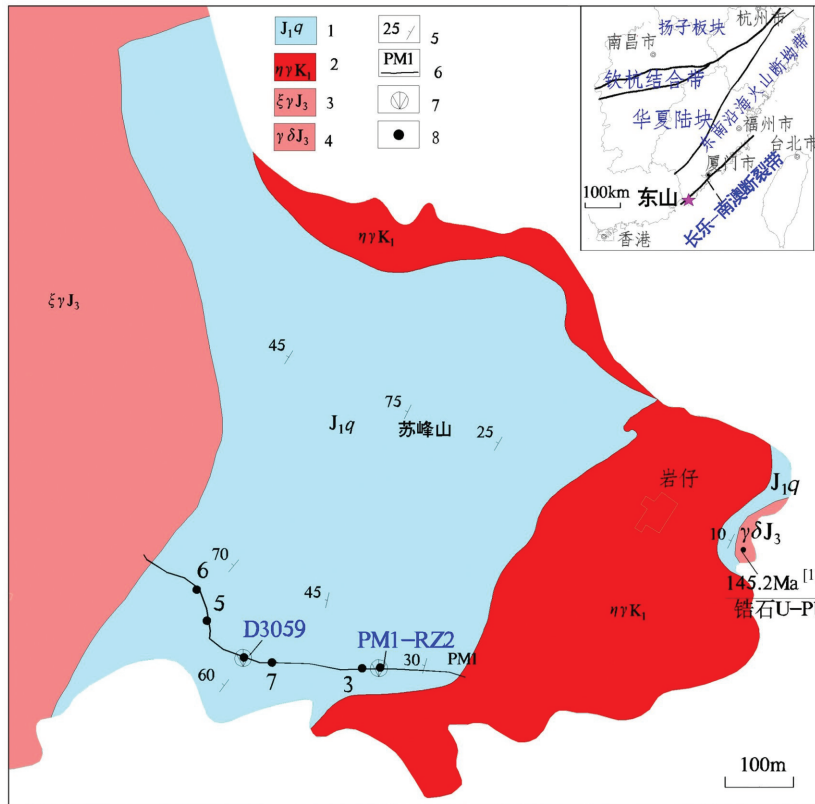


图1 东山地区变质岩分布地质简图

1—亲营山组;2—早白垩世花岗岩;3—晚侏罗世花岗岩;4—晚侏罗世花岗岩闪长岩;5—片理产状;6—剖面;7—同位素定年样品;8—岩石样(硅酸盐、稀土、微量元素)

Fig. 1 Simplified geological map showing the distribution of metamorphic rocks in the Dongshan area

1—Qingyingshan Formation; 2—Early Cretaceous granite; 3—Late Jurassic granite; 4—Late Jurassic granodiorite; 5—Schistosity attitude; 6—Geological section; 7—Isotope analysis sample; 8—Rock analysis sample

①福建省地矿局区域地质调查队,南京地质矿产研究所. 长乐—东山断裂带、平潭—南澳褶皱带性质及意义的研究. 1986—1988.

②福建省地质调查研究院. 中华人民共和国厦门市幅、东山县幅 1:25万区域地质报告. 2002.

成时代为早侏罗世晚期。

1 地质概况

长乐—南澳断裂带在沿海出现以片岩、片麻岩、糜棱岩为主的变质岩,包括曾受高度关注的“澳角群”的亲营山组和岩雅组。亲营山组零星散布于沿海平潭、福清锦城、莆田忠门、龙海港尾及东山一带,而以东山地区分布面积最大,也最具代表性。

东山地区亲营山组主要分布在苏峰山^[1],呈北东向展布,向两侧进入大海,面积约0.6 km²。岩石组成为浅灰色含矽线石石榴石二云石英片岩为主,夹含石墨二云片岩、黑云变粒岩等(图2)。野外露头较好的主要有公路壁、海边沿岸及苏峰山顶脊,相对连续,其他之处则呈断续状。变质岩大致显示其物质层特征,云母片岩、二云片岩、云母石英片岩及矽线石石榴石二云石英片岩均显示一定的物质层特点,一般层厚0.3~1 m,不同的物质层间的界线较清楚,如云母片岩与云母石英片岩之间的界线可分。含石墨二云片岩的石墨分布较均匀,可作为副变质岩的特征性证据。含石墨二云片岩中的变粒岩夹层的产状较稳定,原岩可能属火山—沉积岩类,即沉凝灰岩或凝灰质沉积岩类。

野外地质调查表明亲营山组的时代上限为晚侏罗世,证据:(1)岩仔海边的晚侏罗世片麻状糜棱

岩化二长花岗岩(145.2 Ma)^[1],侵入矽线石白云母石英片岩,在接触带上可见有似伟晶岩团块、石英质脉等;(2)在冬古—岩仔公路上,还见有早白垩世早期的弱片麻状二长花岗岩侵入二云片岩。

2 亲营山组岩石地球化学特征

本次测试了东山变质岩亲营山组6件变质岩的全岩常量、微量和稀土元素样品。常量元素的分布变化较大(表1),如SiO₂含量为61%~70%、K₂O含量为3%~6%,全铁4%~12%,表明原岩不止一种;即矽线石石榴石云母石英片岩、二云片岩、变粒岩及含石墨云母片岩等原岩存在铁、铝等成分的差异,与中—酸性岩较接近,反映沉积岩源岩的特点。对变质岩成分进行投影(图3~图4),结果显示样品点均落在沉积岩区,没有点落入火成岩区,说明原岩属于沉积岩变质而成的副变质岩。

微量元素(表1)总体变化也较大,元素含量Sn为1.72×10⁻⁶~6.11×10⁻⁶,Nb 18.3×10⁻⁶~20.96×10⁻⁶,Zr 215×10⁻⁶~786×10⁻⁶;Co、Ni、V含量低,约为地壳丰度的0.5倍^[1];Ba、Rb、Zr、Hf、U、Th及La含量明显高,达地壳丰度的3~5倍;成矿元素W、Sn、Mo及Pb、Zn、Au含量较高,约为地壳丰度的2倍。微量元素蛛网图(图5-a)显示:各样品的曲线特征相似,均为左高右低的右倾斜曲线;Sr、Ba、Nb相对亏损,呈

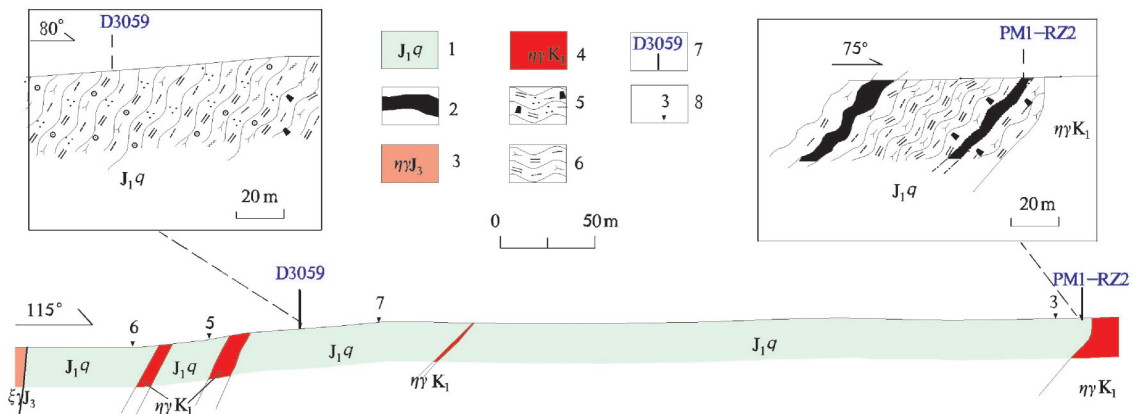


图2 东山岩仔—过冬早侏罗世晚期亲营山组(J₁q)剖面图
1—亲营山组;2—变粒岩;3—晚侏罗世花岗岩;4—早白垩世花岗岩;5—含石墨二云石英片岩;6—矽线石云母片岩;7—同位素定年样;8—岩石样(硅酸盐、稀土、微量元素)

Fig. 2 Geological section of the early Jurassic Qinyingshan Formation (J₁q) from Yanzi to Guodong in Dongshan area
1—Qinyingshan Formation; 2—Leptite; 3—Late Jurassic grainite; 4—Early Cretaceous grainite; 5—Graphite-bearing two-mica quartz schist; 6—Sillimanite mica schist; Geological section; 7—Isotope analysis sample; 8—Rock analysis sample

表1 东山变质岩亲营山组全岩常量元素(%),微量和稀土元素(10^{-6})分析数据
 Table 1 Analytical whole-rock data for metamorphosed rocks and major parameters
 (major elements: %; trace elements: 10^{-6})

样号	PM01-Rz2	PM01-3	PM01-5	PM01-6	PM01-7	D3059	地壳丰度 ^[13]	
岩性	变粒岩(原岩 含火山碎屑物)	炭质二云 片岩	片岩	片岩	云母片岩	矽线石榴石二云片岩	泰勒 1964	黎彤 1976
SiO ₂	60.62	60.93	63.49	66.17	69.78	64.86		
TiO ₂	0.86	0.69	0.68	0.74	0.93	0.69		
Al ₂ O ₃	21.28	21.18	21.53	19.01	13.77	17.74		
FeO	0.65	0.42	1.24	0.9	0.82	0.83		
Fe ₂ O ₃	3.11	4.25	2.92	4.41	5.26	5.54		
Fe ₂ O ₃ T	3.83	4.72	4.3	5.41	6.17	6.46		
FeOT	2.68	3.3	3.01	3.78	4.32	4.52		
MnO	0.066	0.023	0.17	0.07	0.196	0.129		
MgO	1.02	0.66	0.91	0.65	1.34	1.05		
CaO	0.08	0.09	0.06	0.03	0.18	0.07		
Na ₂ O	0.39	0.32	0.4	0.21	0.22	0.28		
K ₂ O	5.36	4.86	4.89	4.01	1.36	4.18		
P ₂ O ₅	0.034	0.058	0.032	0.032	0.101	0.107		
烧失量	5.89	6.43	3.39	3.32	5.76	4.12		
总量	99.43	99.96	99.85	99.65	99.8	99.68		
<i>al</i>	55.53	54.39	56.45	52.09	42.43	45.27		
<i>fm</i>	27.27	30.33	27.66	34.92	50.91	41.68		
<i>c</i>	0.38	0.42	0.29	0.15	1.01	0.32		
<i>alk</i>	16.81	14.86	15.60	12.84	5.65	12.72		
Si	268.45	265.49	282.50	307.70	364.89	280.89		
k	0.90	0.91	0.89	0.93	0.80	0.91		
<i>mg</i>	24.69	14.13	21.83	12.91	20.52	16.26		
<i>c/fm</i>	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01		
Mo	1.51	4.04	1.46	0.67	0.92	2.59	1.5	1.3
Sn	5.99	5.26	6.11	4.62	1.72	3.87	2	1.7
Ag	0.02	0.037	0.049	0.08	0.051	0.202	0.07	0.08
Au	0.72	0.73	0.52	0.85	0.61	0.68	0.4	0.35
Co	7.7	5.8	9.23	11.1	10.79	24.31	25	25
Ni	30.32	22.25	23.7	36.43	85.18	60.97	75	89
Zn	131.5	75.47	145.2	163.4	76.29	226	70	94
Rb	293.8	258.7	295.4	218	114.4	305	90	78
Sr	35.03	36.53	36.51	28.84	28.45	33.19	375	480
Nb	23.58	16.9	20.96	19.15	19.88	18.3	20	19
Cd	0.071	0.089	0.051	0.031	0.064	0.376	0.2	0.2
Ba	915.3	707.7	743.2	558.3	328.2	593.6	425	390
Hf	7.83	6.16	6.68	5.68	23.36	6.1	3	1.5
W	6.58	3.95	3.96	3.83	7.29	3.17	1.5	1.1
Pb	27.94	22.57	22.62	24.08	12.15	21.83	12.5	12
Bi	0.26	0.89	0.25	0.37	0.15	0.25	1.7	0.4
Th	15.54	18.15	16.06	14.64	15.37	11.46	9.6	5.8
U	8.7	8.41	4.95	3.14	3.54	3.68	2.7	1.7
Cr	93.6	80.4	68.9	75.6	115.9	73.4	100	110
V	100.9	135.6	75.5	92.2	71.4	75.2	135	140
Zr	263	244	257	215	786	220	165	130
La	61.76	66.77	36.33	45.56	11.05	44.13	30	39
Ce	110.4	119.9	57.54	91.49	21.38	81.09	60	43
Pr	15.1	16.41	8.55	10.82	2.78	10.96	8.2	5.7
Nd	56.86	62.78	31.39	40.34	10.57	41.81	28	26
Sm	11.11	11.76	5.77	7.6	2.28	8.58	6	6.7
Eu	2.46	2.32	1.64	1.56	1.12	1.74	1.2	1.2
Gd	9	8.99	4.73	6.23	2.06	7.18	5.4	6.7
Tb	1.26	1.2	0.73	0.93	0.37	1.09	0.9	1.1
Dy	6.42	5.41	3.88	4.41	2.15	5.75	3	4.1
Ho	1.18	0.88	0.75	0.77	0.41	1.07	1.2	1.4
Er	3.76	2.38	2.25	2.34	1.27	3.23	2.8	2.7
Tm	0.57	0.31	0.33	0.34	0.18	0.46	4.8	3
Yb	4.14	2.09	2.23	2.24	1.25	3.11	0.3	2.7
Lu	0.67	0.33	0.36	0.36	0.2	0.48	0.5	0.8
Y	32.97	21.31	20.61	20.53	11.46	28.14	39	24
TREE	317.66	322.84	177.09	235.52	68.53	238.82	191.3	168.1
δEu	0.73	1.06	1.13	0.98	1.03	1.06		
(La/Yb) _N	10.06	21.54	10.98	13.71	5.96	9.57		
Rb/Sr	8.39	7.08	8.09	7.56	4.02	9.19		

注: $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; 下角标 N 表示为球粒陨石标准化后值; 斜体字母为尼格里指数。

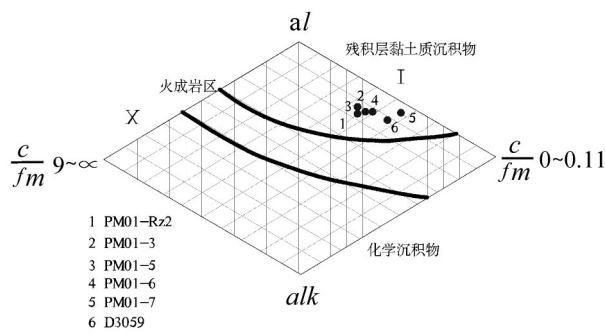


图3 东山变质岩尼格里图解(据文献[12])
Fig.3 Nigri diagram of metamorphic rocks in Dongshan

明显的“V”形谷。这些现象表明变质岩源岩具一定的相似性,主要为陆壳物质。稀土元素(表1)含量: La 为 $11.05 \times 10^{-6} \sim 66.77 \times 10^{-6}$, Ce 为 $21.38 \times 10^{-6} \sim 91.49 \times 10^{-6}$, Eu 为 $1.12 \times 10^{-6} \sim 2.32 \times 10^{-6}$, Y 为 $11.46 \times 10^{-6} \sim 28.14 \times 10^{-6}$, 也变化较大,但稀土配分曲线(图5-b)十分相似,为左高右低的斜线,表明各种元素没有明显亏损,具有“I型”花岗岩特点,原岩可能为由壳幔混合的岩浆岩类。各样品在稀土元素含量

的差别较明显,而元素配分曲线却高度一致,可能反映了火成岩经历了剥蚀、搬运和沉积过程,形成了一定程度的物质分异的结果。

3 锆石样品特征

3.1 取样岩石

本次碎屑锆石样品有2件,即 PM01-RZ2 和 D3059,均在东山岩仔—冬古剖面(公路)上。PM1-RZ2 样品为变粒岩,夹在含石墨白云母片岩中,厚度 0.5~0.8 m,相对稳定(图2)。D3059 样品为含石榴石砂线石白云母片岩,露头约 30 m 宽,岩性单一。采样点的岩石露头属工程机械挖出的新鲜岩石,在露头尺度内未见有侵入岩等引起热事件的干扰物,岩石中取得的锆石可作为测试对象。

样品已做多种测试,包括全岩硅酸盐全分析、稀土元素、微量元素、人工重砂及锆石测年等。

3.2 镜下观察

PM1-RZ2: 石榴石黑云斜长变粒岩,具粒状变晶结构、片状变晶结构,片理构造。矿物主要有石英 37%、斜长石 30%、黑云母 30%,含少量石榴石

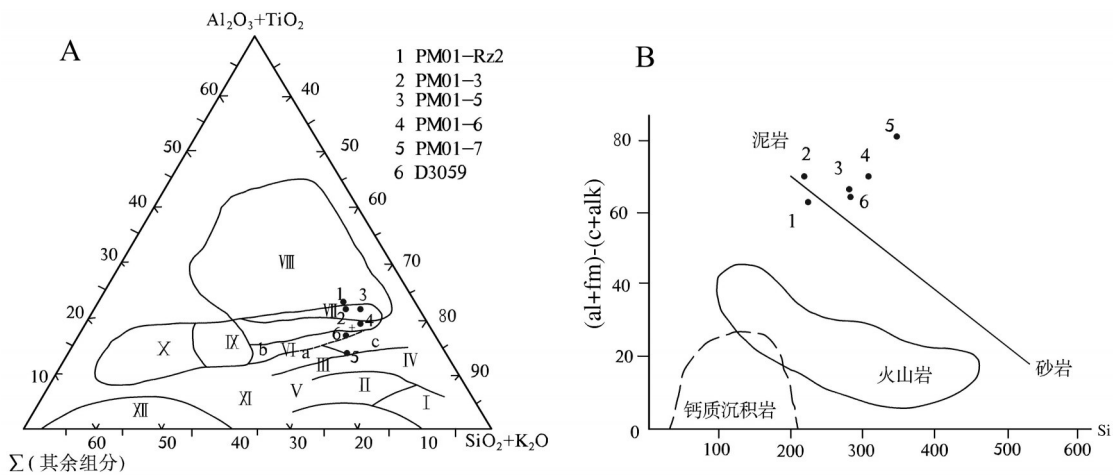


图4 东山变质岩原岩判别图解(据文献[12])

A— $(Al_2O_3+TiO_2)-(SiO_2+K_2O)-\Sigma$ (其余组分)图解: I—石英砂岩、石英岩区; II—少矿砂岩、石英岩质砂岩区; III—复矿砂岩区; IV—长石质砂岩区; V—钙质砂岩; VI—化学上弱分异的沉积物区; a—主要为杂砂岩亚区, b—主要为复矿粉砂岩亚区, c—泥质砂岩及寒带和温带气候的陆相黏土区; VII—化学上分异中等的沉积物,寒带和温带气候的海陆相黏土区; VIII—潮湿气候带化学上强分异的黏土区; IX—碳酸盐质含铁黏土和陆相黏土区; X—泥炭岩区; XI—硅质泥灰岩及含铁砂岩区; XII—含铁石英岩(黏土碧玉岩)区; B— $Si-(ai+fm)-(c+alk)$ 图解

Fig. 4 Discrimination diagram for the original rocks of metamorphic rocks in Dongshan

A—Plot of $(Al_2O_3+TiO_2)-(SiO_2+K_2O)-\Sigma$ (other composition). I—Quartz sandstone and quartz; II—Ore-lacking quartz sandstone; III—Multi-component sandstone; IV—Feldspar sandstone; V—Calcareous sandstone; VI—Sedimentary regions after weak chemical differentiation, a—Miscellaneous sandstone, b—Complex mineral powder sandstone; c—Muddy sandstone and continental mudstone in frigid zone and temperate zone; VII—Clay-rock in humid climate zone after strong chemical differentiation; IX—Carbonate iron-bearing clay and continental clay area; X—Clay limestone; XI—Silica clay limestone; XII—Ferruginous quartzite (clay jasperite); B— $Si-(ai+fm)-(c+alk)$ 图解

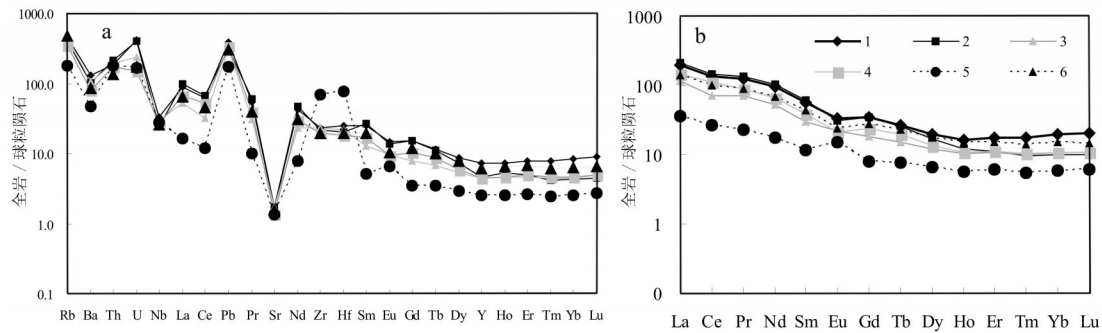


图5 原始地幔标准化微量元素蛛网图及稀土元素模式图(球粒陨石标准化值据文献[14])
(样品同图3)

Fig.5 Primitive-mantle-normalized trace elements patterns for Dongshan metamorphic rocks and chondrite-normalized REE patterns for Dongshan metamorphic rocks (after reference [14])

3%,各矿物分布较均匀。其片状矿物黑云母沿(001)定向排列,构成岩石之片理构造。粒状矿物(石英、斜长石)长轴具定向排列(与片理一致)。其中石榴石呈粒状变晶结构,呈等轴粒状外形,矿物粒径在0.2~1.5 mm。

D3059:白云母片岩,岩石呈片状-粒状变晶结构、片理构造及皱纹构造,岩石主要有石英40%、白云母48%、黑云母12%,各矿物分布均匀。石英具粒状变晶结构,呈等轴粒状或不规则状外形,矿物粒径在0.1~0.25 mm。矿物长轴具定向排列(与片理一致),具波状消光。

镜下观察表明,岩石受到强烈变质,原岩特征消失。副矿物锆石新鲜,可满足测试要求。

3.3 人工重砂

从PM1-RZ2和D3059样品挑出的锆石可分2类:滚圆的和非滚圆的。磨圆锆石主要为黄色、玫瑰色、玻璃光泽,晶体大部分粗糙,有黄色、黑色,具铁染,内部包体模糊,0.04~0.11 mm,以次棱角柱状、次滚圆粒状为主,表面较粗糙,代表长程搬运的产物。非滚圆锆石由(110)(111)(311)(131)组成聚形及(100)(111)组成聚形为次,粒度细小,0.06~0.15 mm。D3059样品锆石略呈磨圆,而PM1-RZ2样品未磨圆,锆石有火山晶屑破裂状,外形平直,可能属火山作用形成的晶屑。

4 锆石测试分析

4.1 锆石测试方法

锆石通过精选制靶后,进行了锆石阴极发光

(CL)图像和透反照相。锆石阴极发光(CL)图像(图6)表明,PM1-RZ2和D3059的锆石中没有裂隙、包体等缺陷的仅不到半数,

磨圆锆石尤甚,应属沉积源区的继承锆石^[15]。未磨圆锆石具火山作用产生的裂理、碎屑等,符合测试条件的也仅有半数。为保障测试结果有效,本次的测点基本上避开裂纹与包裹体的影响。选作测年的锆石震荡环带、核环构造发育。

测点的布置目的性明确。在磨圆锆石中,主要选择锆石震荡环带,部分选择在核部;对于未磨圆锆石主要选择在其边缘的震荡环带。锆石同位素测年工作在中国地质科学院矿产资源所同位素研究室完成。

锆石微量元素含量和U-Pb同位素定年利用LA-ICP-MS同时分析完成。激光剥蚀系统为Newwave UP213,ICP-MS为Bruker M90。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入ICP之前通过一个Y型接头混合。每个时间分辨分析数据包括15~20 s的空白信号和45 s的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal^[16-17]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同文献[16]。

锆石微量元素含量利用SRM610作为外标、Si作内标的方法进行定量计算^[17]。这些USGS玻璃中元素含量的推荐值据GeoReM数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。U-Pb同位素定年

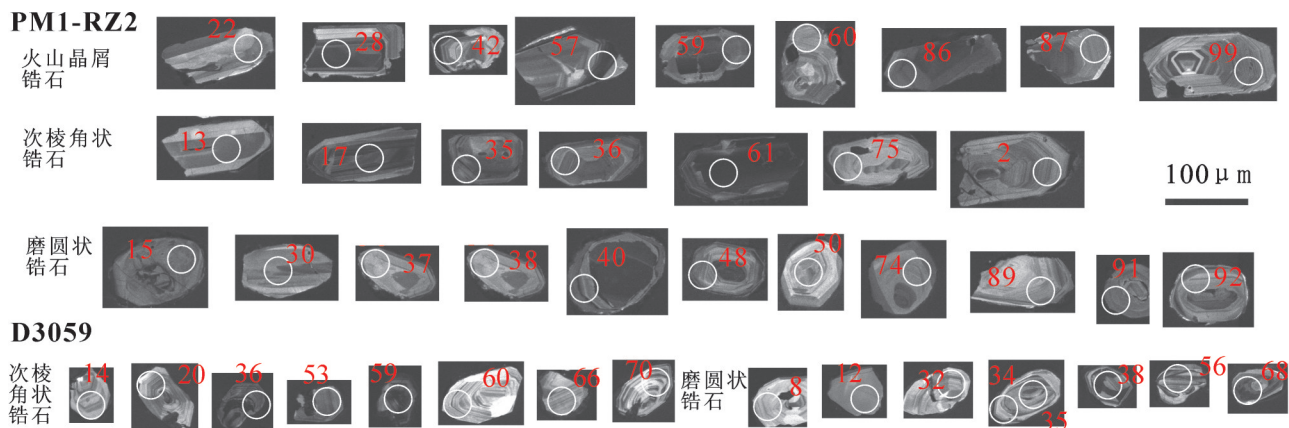


图6 东山变质岩锆石CL特征及测点位置

Fig.6 CL characteristics and analyzed spots of zircon from the metamorphosed rocks of Dongshan

中采用锆石标准GJ-1作外标进行同位素分馏校正,每分析5~10个样品点,分析2次GJ-1。对于与分析时间有关的U-Th-Pb同位素比值漂移,利用GJ-1的变化采用线性内插的方式进行了校正^[7]。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用Isoplot完成。

4.2 锆石同位素测年

从PM1-RZ2和D3059样品中共获得89组测年数据,锆石U-Pb同位素分析结果和计算的表观年龄值见表2。本次主要采用图解的方法来处理相关数据及求得年龄值。当年龄<1000 Ma时,采用锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄;当年龄≥1000 Ma时,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄及其均值。

PM1-RZ2样品取自石墨云母片岩所夹的变粒岩,其锆石可分为3类,火山碎屑锆石、次棱角状岩浆锆石和变质锆石。火山碎屑锆石具碎裂状、不规则状等,裂纹发育,一般50~100 μm,震荡环带发育,Th/U比值0.35~0.8,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄谱(图7-a),对应的年龄为176.8 Ma峰值。次棱角状岩浆锆石具次棱角状,震荡环带发育,一般80~120 μm,Th/U比值0.45~0.9,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄谱,对应的年龄为230 Ma峰值。变质锆石呈滚圆状,颗粒30~70 μm,震荡环带一般不发育,Th/U比值为0.05~0.4,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb频谱图曲线有一个峰值,其加权平均年龄为(1863±28) Ma,代表了其变质岩中源区不明的锆石形成年龄。

D3059样品取自含石榴石矽线石二云片岩,其锆石主要有2类:岩浆锆石和变质锆石。岩浆结晶锆石多呈不规则状,边缘可见磨圆现象,呈短柱状,

一般50~70 μm,长短轴比为1~2,震荡环带十分清楚,可能属于源区的火山(火成)岩碎屑物经搬运后的继承锆石。²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄谱(图7-b)存在1个峰值,(203.5±4.1) Ma,与谐和年龄(203.5±2.1) Ma一致,代表了不明物源区中的晚三叠世(火山)岩浆结晶形成的火成岩类。变质锆石的磨圆度高,基本呈浑圆状,40~70 μm,震荡环带不清,属不明物源区长距离搬运的碎屑锆石。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb曲线存在2个峰值,分别为(1315±150) Ma、(1811±26) Ma,代表着变质结晶锆石的源岩为中元古代和古元古代火成岩。

4.3 锆石稀土元素特征

在对亲营山组变质岩锆石进行同位素测年的同时,还测了锆石的稀土元素含量值。以锆石的测年结果为依据,进行分类与作图。

样品PM1-RZ2、D3059的锆石稀土配分曲线(图8)均为左低右高的曲线,可能与锆石对稀土元素的选择性吸收有关。样品PM1-RZ2按锆石同位素年龄值176.8 Ma、230.6 Ma和1863 Ma分别作图,稀土曲线特征如下:(1)年龄值176.8 Ma、230.6 Ma的锆石属岩浆(火山)成因锆石,其分布曲线形成了紧密线束,特别是重稀土部分更加紧密,反映物质来源的一致性,代表岩浆作用(火山碎屑或火成岩)的物质特征;(2)年龄值1863 Ma的稀土存在很大的变化区间,重稀土分散性十分明显,表现为很大的分布区间。反映了锆石来源的多样性,明显区别于年龄值176.8 Ma、230.6 Ma的高度一致,同时还具较明显的Eu亏损,代表了物质变化较大和经过较明显分异的表壳岩特征。

表 2 锆石 U-Th-Pb 同位素分析数据和计算的年龄值
Table 2 Analytical data of zircon U-Pb isotopes and calculated age values

测点号	总 Pb/ 10^{-6}	^{232}Th / 10^{-6}	^{238}U / 10^{-6}	Th/U	同位素比值					表面年龄/Ma					谐和度	
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
PM1-RZ2-1	45.73	529.55	1172.06	0.45	0.0506	0.0019	0.2542	0.0136	0.0359	0.0011	220.4	87	230	227.6	7	98%
2	32.99	110.08	909.35	0.12	0.0533	0.0019	0.2679	0.0131	0.0366	0.0014	342.7	88	241	231.4	8.5	95%
3	9.35	159.12	239.38	0.66	0.0509	0.0082	0.249	0.0445	0.0354	0.003	235.3	333.3	225.8	224.3	18.7	99%
5	12.29	149.07	325.58	0.46	0.0521	0.0035	0.253	0.0198	0.0354	0.0015	300.1	153.7	219	224.5	9.1	98%
12	13.38	111.13	365.73	0.3	0.0482	0.0037	0.2381	0.0277	0.0357	0.0026	109.4	174	216.9	226	16.3	95%
13	6.98	100.92	163.14	0.62	0.0543	0.0049	0.2765	0.0264	0.0366	0.0013	383.4	203.7	247.8	231.7	7.9	93%
15	70.98	128.57	198.39	0.65	0.1158	0.0037	4.747	0.1716	0.2987	0.0092	189.17	58.8	1775.6	1684.9	45.5	94%
16	10.18	97.32	272.54	0.36	0.0478	0.0026	0.2368	0.014	0.0358	0.001	100.1	112.9	215.8	226.7	6.3	95%
17	41.74	417.95	1058.89	0.39	0.0516	0.002	0.2632	0.0112	0.0369	0.001	333.4	82.4	237.3	233.5	6.5	98%
18	14.21	107.31	382.75	0.28	0.051	0.0026	0.2562	0.0121	0.0368	0.0008	239	118.5	231.6	233.1	4.7	99%
22	11.67	153.14	399.54	0.38	0.0463	0.0047	0.1775	0.0164	0.0279	0.0009	13.1	225.9	165.9	177.7	5.6	93%
28	22.57	258.12	791.99	0.33	0.0544	0.0053	0.2005	0.0168	0.0273	0.0018	387.1	222.2	185.5	173.8	11.1	93%
29	7.97	98.86	201.46	0.49	0.0519	0.0026	0.2548	0.013	0.036	0.0006	179.7	113.9	230.5	227.7	3.9	98%
30	147.47	14.98	525.93	0.03	0.1112	0.0041	4.4042	0.2985	0.2889	0.0191	820.4	66.4	1713.1	1635.8	95.4	95%
33	34.23	410.77	869.60	0.47	0.0574	0.0021	0.2824	0.0105	0.0358	0.0008	509.3	76.8	252.6	226.5	4.8	89%
34	9.90	311.44	165.56	1.88	0.0595	0.0066	0.2892	0.0263	0.0373	0.0024	583.4	244.4	257.9	235.9	15.2	91%
35	17.56	150.45	457.59	0.33	0.0546	0.0039	0.2822	0.0248	0.0371	0.0019	394.5	159.2	252.4	235	12.1	92%
36	21.71	236.60	544.44	0.43	0.055	0.0023	0.2783	0.0132	0.0364	0.0004	413	91.7	249.3	230.4	2.8	92%
37	157.12	153.08	471.98	0.32	0.1138	0.0021	4.8337	0.1243	0.3073	0.0059	186.1	33.3	1790.8	1727.5	29	96%
38	93.47	114.14	279.99	0.41	0.1123	0.0022	4.6476	0.1021	0.3002	0.0047	1836.7	30.6	1757.9	1692.3	23.2	96%
40	362.43	66.53	1065.43	0.06	0.1172	0.0019	5.3815	0.1219	0.3321	0.0063	1914.5	29.3	1881.9	1848.6	30.4	98%
41	142.70	118.64	412.05	0.29	0.1128	0.0019	4.9994	0.0962	0.3201	0.0036	1855.6	31.2	1819.2	1790.4	17.4	98%
42	19.96	438.72	610.62	0.72	0.0538	0.005	0.2022	0.0167	0.0274	0.0007	361.2	213.9	187	174	4.6	92%
46	13.03	176.21	417.45	0.42	0.0559	0.0029	0.2168	0.0111	0.0282	0.0004	455.6	119.4	199.2	179.3	2.6	89%
48	210.87	149.03	691.75	0.22	0.1123	0.0016	4.3546	0.0611	0.2804	0.002	1838.9	27	1703.8	1593.2	9.9	93%
50	197.56	73.71	599.37	0.12	0.1149	0.0017	4.9085	0.0703	0.309	0.0022	1879.6	27.3	1803.7	1735.7	10.9	96%
54	4.58	98.43	136.79	0.72	0.0558	0.0076	0.1969	0.0264	0.027	0.001	455.6	299.8	182.5	171.5	6.3	93%
57	212.07	52.38	703.51	0.52	0.051	0.0016	0.1984	0.0058	0.0282	0.0004	239	78.7	183.8	179.2	2.5	97%
58	212.07	52.38	645.80	0.08	0.1161	0.0018	4.821	0.0784	0.2991	0.0042	1898.2	27.5	1788.6	1686.9	20.9	94%
59	28.81	432.01	880.65	0.49	0.0484	0.0017	0.1881	0.0071	0.028	0.0004	116.8	85.2	175	177.9	2.7	98%
60	9.78	199.67	284.51	0.7	0.0566	0.0106	0.2079	0.0307	0.0275	0.001	476	379.6	191.8	174.6	6.5	90%
61	55.85	1210.28	1160.46	1.04	0.051	0.0025	0.2535	0.0122	0.0358	0.0009	239	114.8	229.4	227	5.3	98%
63	14.11	171.83	320.42	0.54	0.0539	0.0042	0.2714	0.0194	0.0369	0.0008	364.9	177.8	243.8	233.4	4.7	95%
64	48.37	46.84	143.61	0.33	0.1119	0.0022	4.6391	0.1081	0.2989	0.0051	1831.5	35.2	1756.3	1685.9	25.1	95%
70	19.82	243.90	486.49	0.5	0.0525	0.0023	0.2663	0.0111	0.0369	0.0004	305.6	127.8	239.8	233.6	2.8	97%
72	270.71	103.38	906.35	0.11	0.1163	0.0008	4.6468	0.0411	0.2884	0.0018	1899.7	177	1757.7	1633.5	8.9	92%
74	77.78	92.95	275.96	0.34	0.1099	0.0019	3.9364	0.0668	0.2587	0.0022	798.2	32.1	1621.2	1483.1	11.5	98%
75	23.62	423.38	557.74	0.79	0.0546	0.0033	0.2817	0.0177	0.0372	0.0005	398.2	137	252	235.4	3.2	93%
77	49.94	947.15	1654.34	0.57	0.0508	0.0011	0.1951	0.004	0.0277	0.0002	231.6	47.2	180.9	176.4	1.3	97%
80	361.20	396.14	1146.00	0.35	0.1132	0.0016	4.6467	0.0687	0.2954	0.0026	1853.7	24.8	1757.7	1668.6	13.1	94%
86	20.43	259.31	698.21	0.37	0.0512	0.0035	0.1946	0.0129	0.0275	0.0005	255.6	157.4	180.5	175.1	3.2	96%
87	8.26	133.74	269.84	0.5	0.0491	0.005	0.1856	0.0188	0.0273	0.0007	153.8	222.2	172.9	173.8	4.7	99%
89	104.16	93.50	305.50	0.31	0.1153	0.002	4.974	0.0906	0.3118	0.0032	1884.9	31.6	1814.9	1749.6	15.9	96%

续表 2

测点号	总 Pb/ 10^{-6}	^{232}Th $/10^{-6}$	^{238}U $/10^{-6}$	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma				谱和度				
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
90	30.63	707.90	925.28	0.77	0.0523	0.0035	0.2005	0.0131	0.0277	0.0005	298.2	151.8	185.6	11.1	176.4	3.2	94%
93	81.01	151.37	253.81	0.6	0.1103	0.0031	4.0726	0.111	0.2679	0.0049	1805.6	50.8	1648.8	22.2	1530.3	25.1	92%
94	16.80	323.38	365.99	0.88	0.0505	0.0038	0.2615	0.0189	0.0376	0.0006	220.4	175.9	235.9	15.2	238.1	3.4	99%
97	89.54	209.09	248.37	0.84	0.1126	0.0019	4.4708	0.0775	0.2883	0.003	1842.3	31.2	1725.6	14.4	1633	14.9	94%
98	8.32	104.86	198.27	0.53	0.0535	0.0032	0.2716	0.0147	0.0374	0.0007	350.1	135.2	244	11.8	236.5	4.1	96%
99	14.81	334.37	446.31	0.75	0.0481	0.002	0.1839	0.0077	0.0277	0.0004	101.9	-100.9	171.4	6.6	176.1	2.8	97%
100	3.70	65.76	116.61	0.56	0.0499	0.0082	0.1901	0.0385	0.027	0.0016	190.8	340.7	176.7	32.8	171.9	9.7	97%
D3059-1	47.59	349.60	1192.72	0.29	0.052	0.0016	0.263	0.008	0.0365	0.0004	287.1	70.3625	237.1	6.4	230.8	2.5	97%
3	177.67	68.83	621.25	0.11	0.1114	0.0023	4.0578	0.0784	0.2629	0.0022	1833.335	38.735	1645.9	15.7	1504.4	11.4	91%
4	22.84	75.04	1089.61	0.07	0.0886	0.006	0.0182	0.0185	0.0185	0.0002	1395.99	129.6325	209.8	15.1	118.2	1.5	44%
6	142.91	87.26	497.84	0.18	0.1101	0.0018	4.0285	0.0735	0.2641	0.0031	1811.11	29.63	1640	14.8	1510.6	16	91%
8	8.18	93.48	298.15	0.31	0.0827	0.0085	0.2362	0.0219	0.0235	0.0007	1261.105	197.2225	231.6	17.7	150	4.4	57%
9	64.40	436.22	1538.71	0.28	0.0563	0.0024	0.3094	0.0139	0.0397	0.0007	464.86	99.065	273.7	10.7	250.8	4.2	91%
13	19.97	436.22	440.66	0.99	0.1171	0.0159	0.4747	0.059	0.0303	0.0014	1922.225	246.1425	394.4	40.6	192.7	8.5	91%
14	16.00	188.62	455.90	0.41	0.0517	0.0039	0.2266	0.0164	0.0319	0.0007	333.39	174.05	207.4	13.6	202.5	4.6	97%
15	48.58	1005.64	1265.57	0.79	0.0528	0.0031	0.235	0.0145	0.0321	0.0005	316.725	133.315	214.3	11.9	203.8	3.3	94%
16	148.27	72.99	871.68	0.08	0.1137	0.0021	2.5639	0.0666	0.1629	0.0032	1861.115	34.4175	1290.4	19	972.7	17.6	71%
19	54.50	329.97	1452.19	0.23	0.053	0.0023	0.2694	0.0111	0.0369	0.0006	327.835	96.2875	242.2	8.9	233.5	3.6	96%
22	179.99	144.87	925.92	0.16	0.1116	0.0041	2.8679	0.096	0.1855	0.0026	1827.775	66.36	1373.5	25.2	1097.1	14	77%
24	9.09	105.95	341.34	0.31	0.0853	0.0175	0.2561	0.0478	0.0222	0.001	1321.91	405.5575	231.5	38.6	141.5	6.3	51%
28	197.08	327.34	1075.86	0.3	0.1077	0.0031	2.423	0.0719	0.1621	0.0028	1761.11	52.93	1249.4	21.3	968.3	15.4	74%
29	126.99	52.99	439.57	0.12	0.1179	0.0045	4.3368	0.1928	0.2642	0.0057	1924.385	69.13	1700.4	36.7	1511.4	29.2	88%
34	79.88	232.23	590.77	0.39	0.1069	0.0028	1.8759	0.0503	0.1267	0.002	1747.83	48.455	1072.6	17.8	769.1	11.5	67%
35	100.32	166.55	586.34	0.28	0.1111	0.0028	2.4458	0.1051	0.1585	0.0053	1817.59	45.2175	1256.2	31	948.5	29.5	72%
36	49.40	324.28	1464.60	0.22	0.0596	0.0032	0.2649	0.0154	0.0321	0.0009	590.77	112.79	238.6	12.4	203.6	5.4	84%
37	7.63	13.18	287.94	0.05	0.0836	0.0087	0.2834	0.0308	0.0247	0.0008	1283.335	169.9075	253.3	24.3	157.4	5	53%
38	47.79	608.34	1103.22	0.55	0.0826	0.0076	0.403	0.0341	0.0354	0.0005	1261.105	149.075	343.8	24.7	224.2	3.2	57%
41	32.19	69.79	783.06	0.09	0.0551	0.002	0.3172	0.0141	0.042	0.0017	416.715	74.9925	279.7	10.9	265	10.7	94%
42	52.76	479.85	1355.33	0.35	0.0558	0.0037	0.2731	0.0167	0.0358	0.0008	455.6	143.5025	245.2	13.3	226.5	5	92%
44	134.52	111.33	466.06	0.24	0.1107	0.0026	4.1147	0.142	0.2692	0.007	1810.185	42.5975	1657.2	28.2	1536.9	35.7	92%
45	209.42	176.35	1038.36	0.17	0.1075	0.0029	2.8265	0.1071	0.1906	0.0059	1766.665	49.2275	1362.6	28.4	1124.5	32	80%
46	248.54	207.19	1214.61	0.17	0.1079	0.0025	2.8387	0.0841	0.1908	0.0039	1764.81	42.7475	1365.8	22.3	1125.5	21.3	80%
49	17.42	250.21	415.68	0.6	0.0552	0.0038	0.2642	0.0188	0.0351	0.001	420.42	157.39	238	15.1	222.2	6	93%
53	33.37	372.06	937.98	0.4	0.0533	0.0049	0.2347	0.0199	0.0322	0.0011	342.65	209.2325	214.1	16.4	204.5	6.9	95%
56	366.19	484.09	1234.07	0.39	0.1151	0.0019	4.2133	0.0916	0.2655	0.0052	1883.335	35.3375	1676.6	17.8	1517.9	26.5	90%
58	168.34	162.44	980.30	0.17	0.1102	0.0018	2.5278	0.0522	0.1657	0.0025	1802.775	29.32	1280.1	15	988.2	13.6	74%
59	70.83	1719.84	1730.20	0.99	0.0539	0.0027	0.2386	0.0109	0.0322	0.0009	368.57	111.1	217.2	8.9	204.2	5.7	93%
60	18.66	267.24	524.15	0.51	0.0517	0.0087	0.2314	0.0399	0.0324	0.0013	272.285	348.105	211.4	32.9	205.8	7.9	97%
61	184.31	149.43	829.07	0.18	0.1095	0.002	3.219	0.0596	0.2129	0.0033	1791.665	33.335	1461.8	14.3	1244.1	17.3	83%
62	22.76	316.27	518.04	0.61	0.0564	0.0037	0.3007	0.02	0.0386	0.0008	477.82	146.2775	267	15.6	244.1	4.9	91%
64	10.85	322.17	272.59	1.18	0.0537	0.0058	0.234	0.0266	0.0315	0.0011	361.165	244.4125	213.5	21.9	200.1	6.9	93%
66	15.84	122.03	498.49	0.24	0.0571	0.0046	0.2382	0.016	0.0308	0.0011	494.485	181.46	216.9	13.1	195.4	6.9	89%
67	188.42	261.72	1876.54	0.14	0.1057	0.0017	1.39	0.0243	0.0953	0.0011	1727.775	34.2575	884.7	10.3	586.7	6.7	59%
68	233.16	55.76	1080.52	0.05	0.1091	0.0025	3.2516	0.0826	0.2157	0.0026	1784.26	41.51	1469.6	19.7	1259.3	13.7	84%

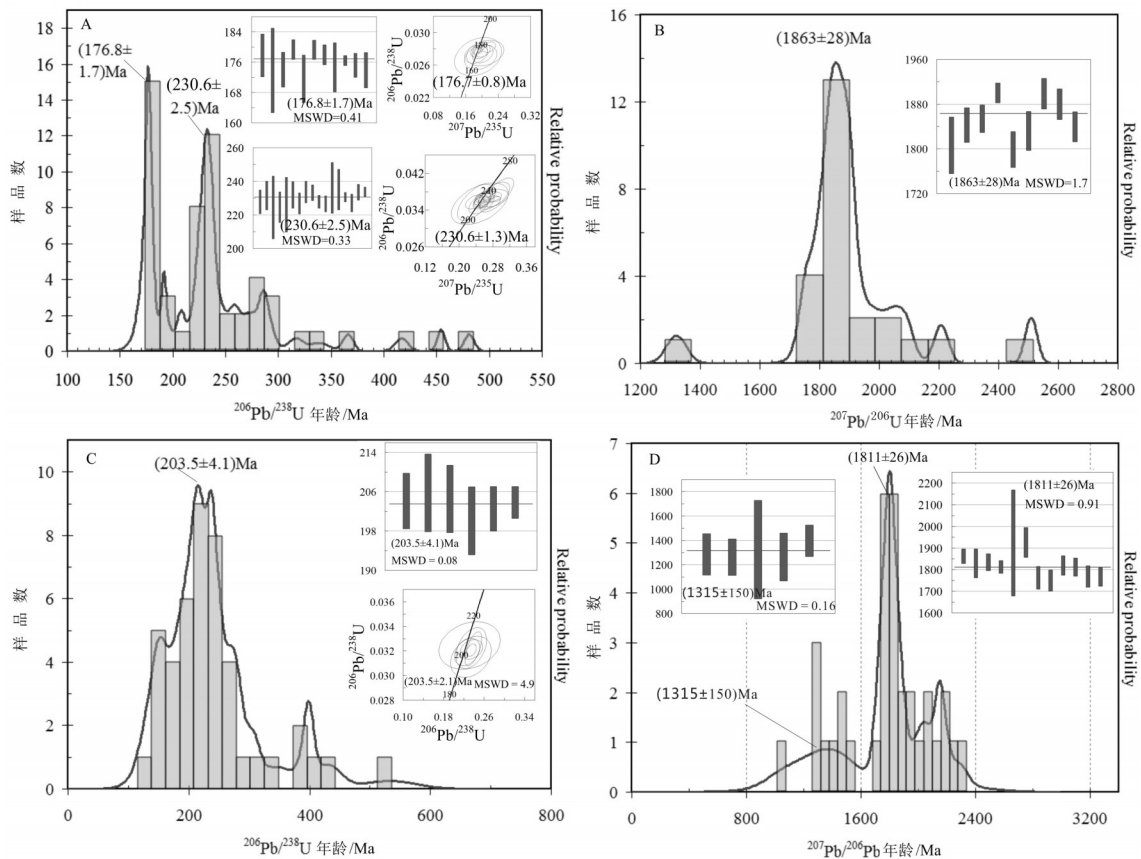


图7 亲营山组(PM1-RZ2)变质岩锆石U-Pb年龄图解(据表2)

Fig.7 U-Pb age histograms of the detrital zircons from the Qingyingshan Formation (sample PM1-RZ2) (based on Table 2)

样品 D3059 以锆石按年龄 203.5 Ma、1315 Ma 及 1811 Ma 分别作图,其稀土曲线特征显示:(1) 年龄为 203.5 Ma 的稀土配分曲线一致性好,与 PM1-RZ2 的岩浆成因(年龄值 176.8 Ma、230.6 Ma)稀土配分曲线十分相似,在重稀土区域形成高度一致的线束,反映了它们均属岩浆成因,属燕山期(火山)岩浆结晶的产物;(2)年龄为 1315 Ma 及 1811 Ma 的锆石均表现为稀土配分曲线的分散特点。1315 Ma (中元古代)的锆石稀土含量较高, Eu 亏损程度低,曲线分散,形态变化较大,反映了物源的多样性; 1811 Ma(古元古代)的锆石稀土含量较低, Eu 亏损较明显,其配分曲线形态及分布范围变化较大,以变质结晶锆石为主,来源与表壳岩有关。不同时代锆石的稀土元素特征也反映了物源的多样性特点,其中 203.5 Ma 代表了晚三叠世火山(岩浆)活动的产物。

综上,锆石的稀土元素特征,特别是配分曲线

能较好地说明锆石的地质意义,中生代年龄的锆石具有基本一致的配分曲线,特别是重稀土形成紧密线束,反映了岩浆成因的同一性;而元古宙锆石配分曲线变化大,反映了物质来源的多样性。

5 讨论

5.1 亲营山组的形成时代

亲营山组的形成时代,是一个长期争议的问题。早期研究者^[4]认为属前泥盆纪,这多来自于 20 世纪的测年资料及与华夏陆块类似变质岩的对比。本次所取的 2 个样品、有 2 类锆石:一类为滚圆状锆石,主要为变质结晶锆石,其次为岩浆结晶锆石,其年龄均为新元古代(1315 Ma、1811 Ma、1863 Ma),为继承锆石,代表了源区物质的形成时代。另一类锆石为岩浆结晶,部分具类似于火山成因的晶屑锆石特征,如震荡环带发育,具不规则裂面的尖棱角状;时代为中三叠世—晚侏罗世(230.6 Ma、

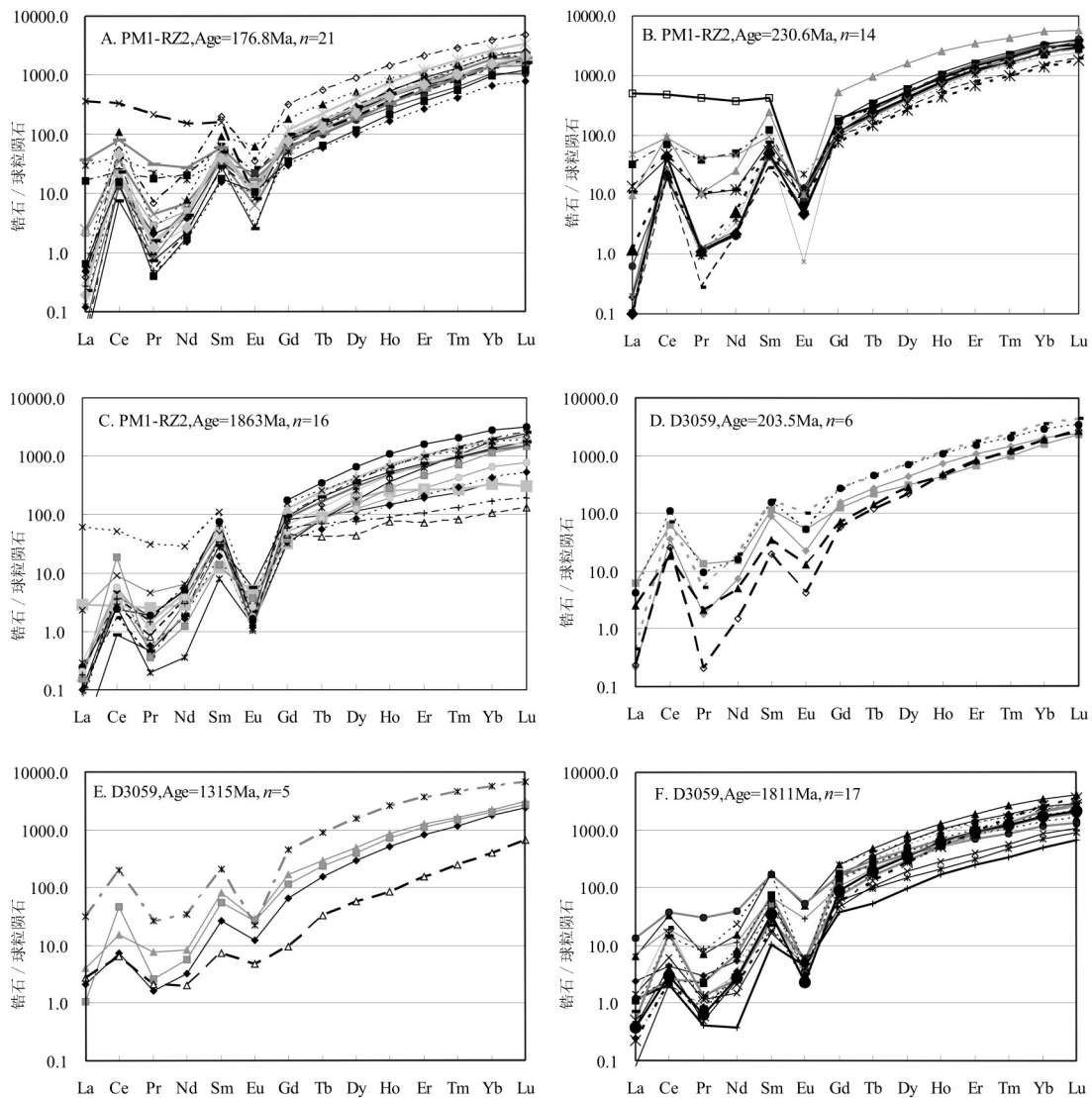


图8 亲营山组(PM1-RZ2、D3059)锆石稀土元素模式图(球粒陨石标准化值据文献[14])

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of the zircons of Qingyingshan Formation (sample PM1-RZ2, D3059) (chondrite-normalized data after reference [14])

203.5 Ma、176.8 Ma),最有意义的是176.8 Ma,具有火山成因的晶屑特征,结合样品的产状为含炭质云母片岩中的变粒岩(火山-沉积岩类),代表了沉积-火山作用的时代,即亲营山组的时代为早侏罗世晚期。

岩石成岩之后,经历了绿片岩相-低角闪岩相变质过程,本次未能定出变质作用的确切时间,但可推断变质作用发生在岩石(176.8 Ma)形成之后、花岗岩(145.2 Ma)^[1]侵入之前,即本区亲营山组变质年龄为176.8~145.2 Ma,为早侏罗世晚期至晚侏罗世之间。

5.2 亲营山组的沉积构造环境

野外调查还发现亲营山组多处夹有含炭云母片岩。原岩为含炭质,这是副变质岩的重要特征性标志,也具有明确的指相意义,地球化学及其原岩恢复投影图(图2~图3)也验证了这种认识,为海陆交互相或湖泊-沼泽相。由于研究区属欧亚大陆板块边缘,一定程度上反映了欧亚大陆构造环境演化的历程。中三叠世-中侏罗世,华夏陆块经历了挤压期和伸展期。中三叠世-晚三叠世的挤压期,华夏陆块与印支古陆、扬子大陆板块碰撞^[18-20]形成了

闽西南陆表海的闭合^[2,3],在晚三叠世挤压形成的陆相盆地沉积,局部夹有火山沉积。亲营山组中一晚三叠世火山成因的锆石晶屑可能与此有关。早侏罗世晚期,进入了伸展期,在华夏陆块见有藩坑组等“双峰式”火山碎屑岩^[19,20],本区的亲营山组(原岩为火山沉积岩)即形成于此期。长乐—南澳断裂带位居华夏陆块之边缘,具有更为强烈的构造活动,即表现为强烈的挤压—伸展,属于中生代火山作用的活跃地带。在中一晚三叠世挤压作用形成的造山带,从早侏罗世晚期开始,因陆内伸展而出现裂隙,并在断裂的东南一侧接受沉积,即华南在印支期活动高峰期(250~205 Ma)挤压之后,早侏罗世晚期—中侏罗世(180~160 Ma)出现了A型花岗岩和双峰式火山作用,代表了伸展构造期^[21-25]。区域上,200~180 Ma 仍然属于后造山挤压期,到180~160 Ma才出现双峰式岩浆活动^[21-24]。

亲营山组岩石稀土元素配分曲线具有高度一致性,6个样品均类似于幔源的特征,呈左高右低的直线,没有Eu亏损。结合岩石中富含火山成因的锆石晶屑,说明物质来源为I型花岗岩类岩浆。

内陆区存在早侏罗世晚期—中侏罗世双峰式火山岩(藩坑组)^[2,3],而中一晚三叠世(火山)岩浆岩十分少见,难以成为亲营山组地层的物源。是否存在有别于华夏古陆主体部分的另一块体,在中一晚三叠世不是形成山间盆地,而是出现规模巨大的(火山)岩浆活动带,其中已经有部分被长乐—南澳断裂带活动而向深部下插消亡?如是,则可推测,在中一晚三叠世(230 Ma、203 Ma)长乐—南澳断裂带即已活动,出现在华夏陆块的边缘裂隙。这还尚待今后进一步研究。

6 结 论

通过对东山地区亲营山组的野外地质特征、岩石地球化学、同位素年代学等分析,结合中生代区域构造作用的特征,得出初步认识如下:

(1)东山地区亲营山组变质岩属副变质岩,原岩是由陆源碎屑岩夹火山沉积岩所组成。

(2)亲营山组的形成时代为(176.7±0.82) Ma,属早侏罗世晚期。

(3)亲营山组形成的大地构造环境为华夏陆块的裂隙期,即处于初始伸展的构造环境。

致谢:参加野外调查的人员有周维瑀、吴继东、李荣安、许仙斌、郑明泉、林捷等,锆石定年测试得到了中国地质科学院矿产资源所侯可军研究员的指导和帮助,由郑明泉等完成;本文成文过程中受到了陈润生总工程师、张必龙博士及徐维光副总工程师等的帮助,审稿专家和责任编辑李亚萍对论文提出了宝贵修改意见,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 冯艳芳,邓晋福,肖庆辉,等. 长乐—南澳构造带花岗岩类年代学岩石组合与构造演化[M]. 北京:地质出版社,2013.
Feng Yanfang, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, et al. The Granite Chronology, Rock Assemblage and Tectonic Evolution of the Changle-Nan'ao Fault Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013(in Chinese).
- [2] 福建省地质勘查开发局. 福建省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1985.
Bureau of Geological and Exploration of Fujian Province. Regional geology of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985(in Chinese).
- [3] 福建省地质勘查开发局. 福建省地质图(1:500000)及说明书[M]. 福州:福建省地图出版社,1998.
Bureau of Geological and Exploration of Fujian Province. Geological Map of Fujian Province (1:500000) and Its Instruction Manual[M]. Fuzhou: Fujian Map Publishing House, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [4] 黄辉,郭坤一,李声固,等. 福建省长乐—南澳断裂带、平潭—东山褶皱带基本特征的研究[J]. 福建地质,1993,12(1): 48-67.
Huang Hui, Guo Kunyi, Li Shenggu, et al. Study on the basic characteristics of the Changle-Nan'ao faulted belt and Pingtan-Dongshan folded belt in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 1993, 12(1): 48-67 (in Chinese with English abstract).
- [5] 郭令智,施央申,马瑞士,等. 中国东南部地体构造的研究[J]. 南京大学学报,1984,1(20): 732-739.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi, et al. Tectonostratigraphic Terranes of Southeast China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1984, 1(20): 732-739(in Chinese with English abstract).
- [6] 周旋,于津海. 福建沿海中生代变质带中花岗质岩石的地球化学[J]. 地球化学,2001,30(3): 282-292.
Zhou Xuan, Yu Jinhai. Geochemistry of the granitoids in metamorphic belt of coastal Fujian Province[J]. Geochemistry, 2001, 30(3): 282-292(in Chinese with English abstract).
- [7] 邢光福,卢清地,姜扬,等. 闽东南长乐—南澳断裂带“片麻状”浆混杂岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报,2010,29(1): 31-43.
Xing Guangfu, Lu Qingdi, Jiang Yang, et al. Identification and significance of “gneissic” magma-mixed complex in the Changle-

- Nan'ao fault zone, southeast Fujian China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1): 31-43(in Chinese with English abstract).
- [8] 舒良树, 于津海, 王德滋. 长乐—南澳断裂带晚中生代岩浆活动与变质—变形关系[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3):368-378.
Shu Liangshu, Yu Jianhai, Wang Dezi. Late Mesozoic granitic magmatism and its relation to metamorphism—ductile deformation in the Changle—Nan'ao fault zone, Fujian Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 368-378(in Chinese with English abstract).
- [9] 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 等. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1092-1101.
Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang et al. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. Geology in China, 2010, 37(4) : 1092-1101 (in Chinese with English abstract).
- [10] 石建基. 闽南沿海地区变质变形侵入岩时序划分及其地质意义[J]. 福建地质, 2010, 29(4) : 323-333.
Shi Jianji. Division and geological meanings of the Timing sequence for the metamorphosed and deformed intrusive rocks in the coastal area of south Fujian[J]. Geology of Fujian, 29(4): 323-333(in Chinese with English abstract).
- [11] 石建基, 张守信. 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(地球科学版), 2010, 40(6): 1333-1343.
Shi Jianji, Zhang Shouxin. Characters of the Mesozoic tectonic activity and geotectonic setting of Changle—Nan'ao fault zone[J]. Journal of Jilin University(Earth Science edition), 2010, 40(6): 1333-1343(in Chinese with English abstract).
- [12] 王仁民. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
Wang Renming. Metamorphic Protolith Graphical Criterion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese).
- [13] 赵伦山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1987.
Zhao Lunshan. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese).
- [14] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematizes of oceanic basalts: Implication for mantle compositions and processes[C]. Geological Society, 1989, 42: 313-345.
- [15] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[C]// Hancher J M, Hoskin P W O(eds). Zircon. Review in Mineralogy & Geochemistry, Mineralogical Society of America, Washinton DC, 2003, 53(1): 27-62.
- [16] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using Laser Ablation—Multi ion Counting—ICP—MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4):481-492 (in Chinese with English abstract).
- [17] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling—induced melt—peridotite interactions in the Trans—North China Orogen: U—Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [18] Shu Liangshu, Faure Michel, Wang Bo, et al. Late Paleozoic—Early Mesozoic Geological Features of South China: Response to the Indosinian Collision Event in Southeast Asia[J]. Comptes rendus Geoscience (C R Geosci), 2008, 340(2/3): 151-165.
- [19] Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34:376-391.
- [20] Wang Dezi, Shu Liangshu. Late Mesozoic basin and range tectonics and related igneous rock assemblages of Southeast China[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2):109-124.
- [21] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 2006, 29: 26-33.
- [22] 邓平, 舒良树, 余心起, 等. 闽西—赣南早—中侏罗世盆地及其火山岩特征[J]. 岩石学报, 2004, 20(3):521-532.
Deng Ping, Shu Liangshu, Yu Xinqi, et al. Early—Middle Jurassic basins and features of igneous rocks in the western Jiangxi region[J]. Acta Petrological Sinica, 2004, 20(3):521-532 (in Chinese with English abstract).
- [23] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10):876-884.
Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso—Cenozoic basins in southeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10):876-884 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王彬, 舒良树, 杨振宇. 赣闽粤地区早、中侏罗世构造地层研究[J]. 地层学杂志, 2006, 30(1):42-49.
Wang Bin, Shu Liangshu, Yang Zhenyu. Study of the early—middle Jurassic tectono—stratigraphy in the Jiangxi—Fujian—Guangdong, SE China[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(1) : 42-49 (in Chinese with English abstract).
- [25] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3):573-593.
Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China., 2009, 36(3) : 573-593 (in Chinese with English abstract).