

doi: 10.12029/gc20180108

黄长煌. 2018. 台湾东澳片岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 45(1): 81-94.

Huang Changhuang. 2018. Zircon U-Pb isotopic geochronology of Tongao schist in Taiwan and its geological significance [J]. Geology in China, 45 (1): 81-94(in Chinese with English abstract).

## 台湾东澳片岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义

黄长煌

(福建省地质调查研究院, 福州 350013)

**摘要:**台湾东澳片岩位于台湾东部,属太鲁阁带的北东部分,由绿泥绿帘片岩、绿泥钠长片岩、云母石英片岩、石英片岩夹含石墨云母片岩组成。在野外地质调查的基础上,结合岩石学、岩石主微量元素分析研究结果表明,原岩为玄武岩、副长岩或碱性玄武岩及陆源碎屑岩,岩石主要为碱性系列,具低 Ba、Sr 和高 Pb,稀土总量普遍较低,具有轻稀土富集、铀无亏损的稀土分布模式,与陆源裂陷的火山(岩浆)-沉积作用特征类似;锆石可分为自形晶或尖棱角状、次棱角状及圆状三类;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄具多个峰值,其中  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  有 4 个,最小值为  $(95\pm 3)\text{Ma}$ ,为自形晶或尖棱角状锆石,代表了晚白垩世火山作用的时代;其余 3 个分别为  $(118\pm 2)\text{Ma}$ (早白垩世)、 $(160\pm 5)\text{Ma}$ (晚侏罗世)、 $(250\pm 3)\text{Ma}$ (早三叠世),为次棱角状和少量自形晶锆石,代表了相应时代源岩的岩浆年龄; $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄峰值 2 个,分别为  $(1838\pm 41)\text{Ma}$  和  $(2404\pm 27)\text{Ma}$ (古元古代),为磨圆状的变质锆石或岩浆锆石,代表了古元古代变质基底的年龄。东澳片岩形成时代为晚白垩世,属欧亚陆块边缘构造环境下火山-沉积作用的产物。

**关键词:**台湾东澳片岩;火山岩;LA-ICP MS 锆石定年;晚白垩世;大陆边缘裂陷

中图分类号:P588.34<sup>4</sup>;P597 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)01-0081-14

## Zircon U-Pb isotopic geochronology of Tongao schist in Taiwan and its geological significance

HUANG Changhuang

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

**Abstract:** Located in the eastern part of Taiwan, the Tongao schist belongs to the northeast part of Tailuko belt and is composed of chlorite epidote schist, chlorite albite schist, mica quartz schist, quartz schist, and mica schist intercalated with graphite mica schist layer. Based on geological survey in combination with petrologic as well as major and trace element analysis, the authors hold that the original rocks were basalt, foidite or alkaline basalts and terrigenous clastic rocks. The rocks are mainly of alkaline series characterized by low Ba, high Sr and Pb, generally low total rare earth, and REE distribution patterns with features of LREE enrichment and no loss of europium. These features are similar to features of terrigenous rifting (magmatic) volcano-sedimentary rock combination. Zircons can be divided into three types, i.e., euhedral or sharply angular, subangular, and rounded ones. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages have multiple peaks, in which there are four  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ratios; the minimum value is  $(95\pm 3)\text{Ma}$ ,

收稿日期:2016-06-15;改回日期:2017-09-13

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。

representing euhedral zircons or sharply angular zircons and indicating late Cretaceous volcanic activity; the remaining three values are  $118\pm 2$  Ma (Early Cretaceous),  $160\pm 5$  Ma (Late Jurassic), and  $(250\pm 3)$  Ma, Early Triassic), representing subangular and small euhedral zircons and indicating the magma age of corresponding source rock; there are two  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  surface peak ages, i.e.,  $1838\pm 41$  Ma and  $2404\pm 27$  Ma (Paleoproterozoic), representing rounded metamorphic zircons or magmatic zircon and indicating the age of Paleoproterozoic metamorphic basement. The Tongao schist was formed during the late Cretaceous in the Eurasian continental margin tectonic environment, being a product of volcanic-sedimentary activity.

**Key words:** Tongao schist in Taiwan; volcanic rocks; LA-ICP MS zircon dating; Late Cretaceous; epicontinental rift

**About the first author:** HUANG Changhuang, male, born in , senior engineering, major in mineral resources and geology; E-mail: 1154423711@qq.com.

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

## 1 地质概况

台湾东部位于欧亚板块东南缘,其东南部与菲律宾海板块,东北部与西太平洋板块聚合接触,以台东纵谷地壳对接带为界,西部属欧亚大陆板块,东北部为太平洋板块,东南部属菲律宾海板块(福建省地质调查研究院,2015;福建省地质矿产局1992)。太鲁阁带和玉里带是欧亚板块的边缘,东澳片岩(Ta)是由林启雄与林伟雄(1995)创立的,属太鲁阁带的北东部(福建省地质调查研究院,2015;福建省地质矿产局,1992;Huang, et al., 1997),其岩石组合为一套变质的沉积-火山岩(图1),是太鲁阁带代表性变质岩。对其形成时代、构造属性存在较大争议,一种意见认为,东澳片岩是原地或准原地的,代表了欧亚陆块的边缘火山-沉积构造环境的产物(福建省地质矿产局,1992;林启文,高铭建,2009);另一种意见认为属构造混杂岩(福建省地质调查研究院,2015);其时代归属于晚中生代,早于86~92 Ma的侵入岩形成年龄。本次在野外地质研究的基础上,采取了地球化学和同位素定年样,研究了东澳片岩的地球化学特征和形成年龄,并取得较大进展,对研究区地质体的认识具有重要参考意义。苏(澳)花(莲)公路剖面是研究东澳片岩的重要地区,东澳片岩由6层组成,未见底,被猴椅山断层切断,而与南苏澳层(Ns)(新近纪)的泥质板岩相隔。

第1层为云母片岩、石英片岩夹石墨云母片岩。

第2层为绿泥钠长片岩,原岩可能为火山岩。岩石露头良好,常形成陡峭地形。 $> 100$  m的岩石露头岩石组成单一,单层厚度巨大。岩石呈浅灰色,风化为灰白色,鳞片粒状变晶结构,片状构造,

主要矿物为钠长石(80%)和绿泥石(20%)。钠长石呈灰白色,柱粒状变晶结构,矿物粒径0.1~0.3 mm,具聚片双晶,折射率与树胶接近,切面浑浊。绿泥石呈鳞片变晶结构,片径0.03~0.1 mm,绿色,干涉色低。钠长石与绿泥石定向排列,构成岩石之片理构造。岩石遭受动力作用,部分矿物产生破碎,被方解石、石英矿物交代,裂隙(近平行片理)内充填有次生的方解石和石英。副矿物为磁铁矿。

第3层为石英云母片岩夹中层状大理岩或透镜状大理岩,上下夹绿泥片岩。

第4层为中层状大理岩、石英云母片岩。大理岩为灰白色,滴盐酸发泡剧烈。粒状变晶结构、晶粒结构、镶嵌结构。矿物全为方解石,等轴粒状或不规则状,粒径0.2~0.8 mm,彼此紧密镶嵌,长轴略显定向排列。方解石闪突起,具聚片双晶,菱面体解理,高级干涉色。石英云母片岩呈浅灰色,鳞片粒状变晶结构,片状构造,变余中厚层状,单层厚度0.5~0.8 m。

第5层为石英云母片岩与硅质岩、大理岩、绿泥石片岩、黑云片岩。变余薄层-中层状,单层厚度为0.1~0.5 m。黑云片岩台湾研究者称为黑色片岩,岩石呈深灰色,鳞片状结构,片状构造,主要由黑云母组成。绿泥石片岩及黑云片岩原岩可能为基性火山岩。本层原岩为灰岩与基性火山岩组合。

第6层为绿帘绿泥片岩,原岩可能为海相玄武岩(李寄瑛等,2016年野外考察)。绿帘绿泥片岩呈粒状鳞片变晶结构,片理构造,主要矿物有绿泥石(40%)、绿帘石(60%)。鳞片状矿物绿泥石沿(001)面定向排列,构成岩石之片理构造。绿帘石为粒状变晶结构,显微粒状,粒径0.02~0.1 mm,无色略带

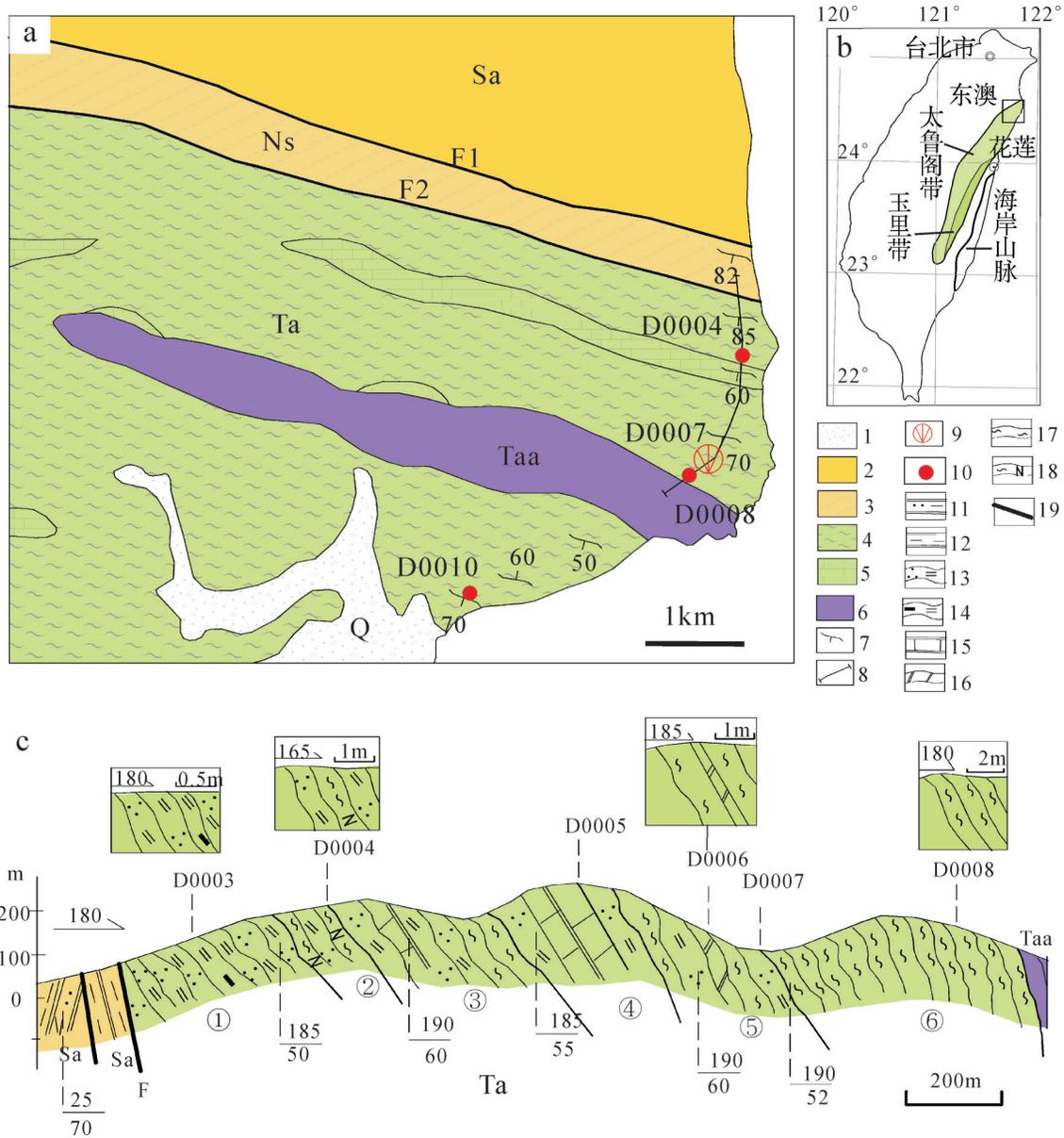


图1 台湾东澳地区地质简图(a)、构造位置图(b)和剖面示意图(c)

a: 1—第四纪; 2—苏澳层(Sa) 板岩及硬页岩; 3—南苏澳层(Sa) 板岩、变质砂岩与板岩互层; 4—东澳片岩(Ta) 石墨云母片岩及石英云母片岩、绿泥片岩; 5—大理岩; 6—角闪岩; 7—片理产状; 8—剖面; 9—同位素年龄样; 10—化学样; 11—变质泥质粉砂岩; 12—板岩; 13—变质白云母石英砂岩; 14—含炭质云母片岩; 15—大理岩; 16—硅质岩; 17—绿帘绿泥片岩; 18—白云母钠长片岩; 19—断层(F)

(a, c 修改自林启文等, 2009; b 修改自福建省地质调查研究院, 2015)

Fig.1 Simplified geological map (a), tectonic map (b) and geological section (c) of Tongao, Taiwan

a: 1—Quaternary; 2—Suao Formation (slate and argillite); 3—Nansua Formation (slate and altered sandstone interbedded with slate); 4—Graphite mica schist and quartz-mica schist; chlorite schist; 5—Marble; 6—Amphibolite; 7—strike and dip of bedding plane; 8— Geological section; 9—Isotope analysis sample; 10— Rock analysis sample; 11—Metamorphic argillaceous siltstone, 12—Slate, 13—Metamorphic muscovite quartz sandstone, 14—Carbonaceous mica schist, 15—Marble; 16—Siliceous rocks, 17—Epidote chlorite schist, 18—Muscovite albite schist, 19—Fault (F)

(a, c modified after Lin Chiiwen et al., 2009, b modified after Fujian Institute of Survey, 2015)

黄色,微弱多色性,干涉色鲜艳。绿泥石呈鳞片状变晶结构,片径0.03~0.1mm,绿色,干涉色低。岩石遭受动力作用,产生破碎裂隙,裂隙内有方解石、石英

矿物充填。副矿物为磁铁矿。

南侧为角闪片岩(Taa),原岩可能为岩体。

东澳片岩的变质程度为绿片岩相,大致可判断

原岩,其下部(第1~2层)为粗碎屑岩—碱性火山岩,中部(第3~5层)为陆源碎屑岩、碳酸盐或硅质岩、玄武岩—碱性火山岩,上部(第6层)为玄武岩。

本次取样主要为第2层的绿泥钠长片岩(D0004)、第5层的黑云片岩(D0007)、第6层绿泥片岩(D0008和D0010)共4件,均作全岩主量、微量元素分析,D0007进行锆石定年分析。

## 2 地球化学

本次东澳片岩的主、微量元素分析样品4件(表1),即D0004、D0007、D0008、D0010。

主量元素的分布范围较小, SiO<sub>2</sub> 含量为37%~49%,一般小于45%,多属超基性岩—基性岩,如D0008(绿帘绿泥片岩),原岩可能为玄武岩。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

表1 东澳片岩全岩主量元素(%),微量和稀土元素(10<sup>-6</sup>)分析数据

Table 1 Analytical whole-rock data for Tongao schist and major parameters (major elements: wt%, trace elements: 10<sup>-6</sup>)

序号	1	2	3	4		1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	39.43	37.01	43.87	49.02	Pr	5.62	4.43	9.39	5.35
TiO <sub>2</sub>	1.89	1.48	3.16	1.41	Nd	23.65	18.42	38.72	21.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.93	13.34	15.59	16.21	Sm	5.3	4.15	8.35	4.81
FeO	5.78	5.92	9.32	6.68	Eu	1.75	1.42	2.74	1.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.54	3.20	3.32	0.99	Gd	4.9	4.08	7.29	4.56
MnO	0.29	0.22	0.37	0.26	Tb	0.77	0.62	1.1	0.73
MgO	6.09	5.56	9.02	5.55	Dy	3.39	2.79	4.73	3.42
CaO	14.70	15.83	4.10	6.44	Ho	0.69	0.59	0.9	0.74
Na <sub>2</sub> O	3.22	3.38	0.89	1.52	Er	1.77	1.53	2.23	1.93
K <sub>2</sub> O	0.63	0.46	3.66	2.85	Tm	0.22	0.2	0.27	0.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.29	0.21	0.37	0.26	Yb	1.43	1.3	1.64	1.78
CO <sub>2</sub>	9.16	10.08	1.03	4.8	Lu	0.17	0.16	0.16	0.21
SO <sub>3</sub>	0.03	0.013	0.012	0.014	Y	20.7	17.8	23.1	21.3
灼量	2.12	2.307	4.028	3.036	AR	1.34	1.3	1.6	1.48
总量	99.65	99.62	99.65	99.61	SI	31.6	30	34.4	31.6
Mo	0.81	0.17	0.18	0.40	FL	20.8	19.5	52.6	40.4
Sn	1.77	0.99	1.86	2.57	A/CNK	0.36	0.38	1.21	0.94
Ag	0.23	0.10	0.10	0.09	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	3.85	3.84	4.55	4.37
Au	48.62	0.86	0.88	1.33	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.2	0.14	4.11	1.88
Co	50.19	48.02	63.78	35.32	τ	4.61	6.73	4.65	10.42
Ni	178.20	111.80	101.20	73.68	∑LREE/	3.97	3.73	5.2	3.85
Zn	111.00	96.67	224.70	113.80	∑HREE				
Rb	17.44	17.54	67.53	78.92	∑REE	101.2	79.5	173.9	99.7
Sr	495.00	325.60	108.70	432.60	(La/Yb) <sub>N</sub>	11.04	9.46	14.7	9.29
Nb	25.18	18.77	32.65	16.89	δEu	1.03	1.04	1.05	1.09
Cd	0.46	0.24	0.35	0.59	Rb/Sr	0.04	0.05	0.62	0.18
Ba	247.80	67.97	593.80	1172.00	Th/U	3.85	3.47	11.47	6.37
Hf	5.15	3.74	6.41	3.86	Ba/Sr	0.5	0.21	5.46	2.71
W	0.61	0.45	0.67	1.82	Q	0.00	0.00	0.00	4.20
Pb	24.72	14.36	13.04	20.65	C	0.00	0.00	3.84	0.00
Bi	0.67	0.39	0.11	0.32	Or	4.24	0.00	23.09	18.47
Th	2.73	2.05	3.67	5.03	Ab	1.30	0.00	8.04	14.11
U	0.71	0.59	0.32	0.79	An	18.49	22.94	19.13	31.79
Cr	264.2	261.7	163.2	137.9	Lc	0.00	2.46	0.00	0.00
V	140.5	160.1	259.3	166.6	Ne	16.11	17.89	0.00	0.00
Zr	156.3	116.4	237.2	149.4	Di	48.21	38.67	0.00	1.13
La	22.01	17.15	33.62	23.06	Hy	0.00	0.00	30.70	25.14
Ce	42.85	33.88	81.08	43.25	Ol	0.00	3.23	2.74	0.00

注:序号1为D0004,绿泥钠长片岩;序号2为D0007-1,黑云片岩;序号3为D0010,钠长绿泥片岩;序号4为D0008,绿帘绿泥片岩;δEu = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>;下角标N表示为球粒陨石标准化后值。

含量为12%~14%,多数样品铝含量偏低,CIPW标准矿物刚玉(C) 0~3.84%,A/CNK为0.36~1.21,变化较大,属偏过铝质至强过铝质。铁锰镁钙含量变化大,尤其钙变化更大,可能与其中的大理岩条带有关。碱质含量3.84%~4.55%, $K_2O/Na_2O$ 值为0.14~4.11,变化大,2件样品CIPW标准矿物出现霞石(Ne)。对岩石成分进行TAS图解投影(图2):D0004和D0007-1落在F区(副长岩( $ol<10\%$ )),D0010在U1响岩质碱玄武岩区,D0008在B(玄武岩)区,各点均落在碱性系列内。说明绿片岩及绿泥钠长片岩等原岩属于碱质含量较高的玄武岩和副(似)长岩类。

岩石微量元素的地球化学特征:(1)第一过渡元素Ti、V、Cr、Mn、Co和Ni含量变化较小,最大值与最小值比在2以内,如Co  $35.32\times 10^{-6}\sim 63.78\times 10^{-6}$ 。(2)亲石元素变化范围出现分组差异。大离子亲石元素(LILE)的Rb、Sr、Ba变化大,最大值与最小值比

为5~8,如Sr  $109\times 10^{-6}\sim 495\times 10^{-6}$ ;Rb  $17.44\times 10^{-6}\sim 78.92\times 10^{-6}$ 、Ni  $73.68\times 10^{-6}\sim 178.20\times 10^{-6}$ ;放射性生热元素U、Th含量最大值与最小值比约2.5,如U  $0.32\times 10^{-6}\sim 0.79\times 10^{-6}$ ;不相容元素HREE、Zr、Hf等最大值与最小值比主要在2.5以内,如Zr  $116.4\times 10^{-6}\sim 237.2\times 10^{-6}$ 、Hf  $3.74\times 10^{-6}\sim 6.41\times 10^{-6}$ 。第一过渡元素、亲石元素的放射性生热元素,以及岩浆作用过程易于进入熔体中的不相容元素等相对变化范围较小,说明本区火山岩具有某些共同特性。大离子亲石元素(LILE)变化范围大,显示了岩石存在的差异性。微量元素蛛网图(图3a)显示各样品的曲线特征相似,均为左高右低的右倾斜曲线;Pb形成峰值;Rb、Ba、Sr、Nb元素变化范围较大,可能与岩石所含的长石等矿物差别有关;各样品在Nd之后几乎没有差异,代表了物质同源且未经过分异的特点。(3)稀土元素含量一般变化范围较小,最大值与最小值比约为2,如La为  $17.15\times 10^{-6}\sim 33.62\times 10^{-6}$ ,Eu为  $1.42\times 10^{-6}\sim 2.74\times 10^{-6}$ ,Y为  $17.8\times 10^{-6}\sim 23.1\times 10^{-6}$ ;稀土配分曲线(图3b)十分相似,为左高右低的斜线,各元素没有明显亏损。岩石具 $SiO_2$ 低、铁镁质较高的特点,原岩可能与幔源物质及其分异物有关。各样品在稀土元素含量的差别,表现为配分曲线高度不同,各元素却同步变化,反映了幔源物质上涌过程,形成了一定程度的物质分异。

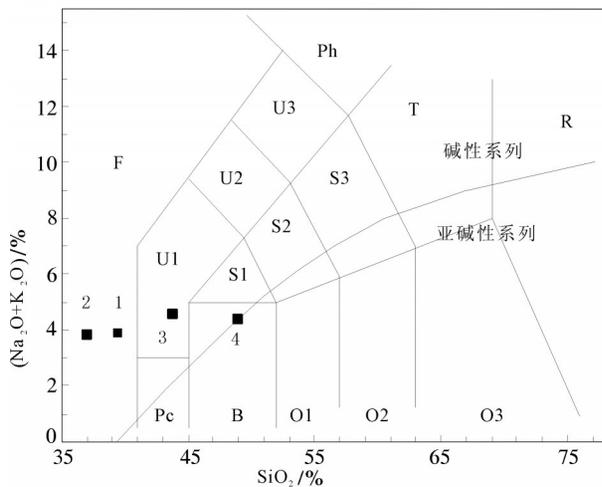


图2 东澳片岩的TAS图解(据Le Maitre等,1989;邓晋福等,2015)

Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; R—流纹岩; F—副长石岩( $ol<10\%$ ,碧玄岩;  $ol>10\%$ ,碱玄岩); S1—粗面玄武岩; S2—玄武粗安岩; S3—粗安岩; T—粗面岩( $Q<20\%$ ),粗面英安岩( $Q>20\%$ ); U1—响岩质碱玄武岩; U2—碱玄质响岩; U3—响岩

Fig.2 TAS diagram of Tongao schist (after Le Maitre et al, 1989; Deng Jinfu et al,2015)

Pc—Pico-basalt; B—Basalt; O1—Trachy-basalt; O2—Andesite; O3—Dacite; R—Rhyolit; F—Foidite ( $ol<10\%$ , basanite);  $ol>10\%$ , tephrite); S1—Trachy basalt; S2—Basaltic trachy-andesite; S3—Trachy-andesite; T—Trachyte ( $Q<20\%$ , Trachy-dacite  $Q>20\%$ ); U1—Tephrite basalt; U2—Phono-tephrite; U3—Tephri-phonolite

### 3 锆石样品特征

#### 3.1 取样岩石

本次锆石同位素定年测试样品1件,即D0007,采自苏(澳)花(莲)公路壁,岩石露头连续,样品新鲜。由于绿片岩的原岩可能为玄武岩或超基性火山岩,其锆石含量低且颗粒小,挑选锆石难度大,故采用碎屑锆石的定年思路。D0007号样品取自黑云母片岩(图1),原岩可能为陆源碎屑+超基性火山岩。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,包括岩石薄片鉴定、全岩主微量元素分析、人工重砂分析等。

#### 3.2 镜下观察

D0007为黑云片岩(第5层),岩石呈黑色,显微鳞片变晶结构,片状构造,主要矿物有绿泥石(10%)、黑云母(60%)、石英(30%),各矿物分布均

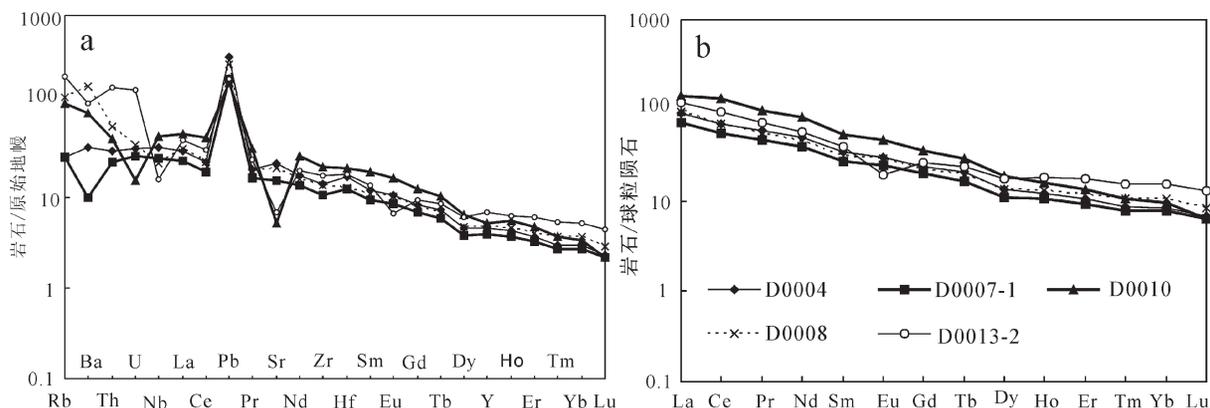


图3 原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及稀土元素模式图(b)  
(原始地幔及球粒陨石标准化值据文献Sun et al.,1989)

Fig.3 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized TREE patterns (b) for Tongao schist (chondrite-normalized data after Sun S S.McDonough W F.,1989 (based on Table 1)

匀。鳞片状矿物沿(001)面定向排列,构成岩石之片状构造。黑云母呈显微鳞片状,褐色,多色性不明显。绿泥石为显微鳞片状,片径0.03~0.1mm,淡绿色,干涉色低。石英,粒径0.01~0.06 mm,切面较浑浊。副矿物为榍石。

### 3.3 人工重砂

D0007的人工重砂分析表明,矿物较简单,有锆石(偶见)、磷灰石(<1.25 mg)和磁铁矿(3586.66 mg)、少量黄铁矿。锆石主要为浅粉色、浅玫瑰色,棱角柱状、次棱角柱状、圆状,金刚光泽,透明,晶体表面光洁。0.08~0.15 mm,延长系数1:1.5~1:2。主要为次浑圆至浑圆粒状聚形;次要为柱面(100)(110)锥面(311)(131)组成的次棱角柱状聚形。

## 4 锆石测试分析

### 4.1 锆石测试方法

锆石通过精选制靶后,进行了阴极发光(CL)图像和透反照相。锆石在阴极发光(CL)等图像中选择和圈定测点(图4),所选测的锆石没有裂隙、包体等缺陷,符合测试要求。

据形态特征,锆石分为三类:第1类为自形晶或尖棱角状,环带宽大而不发育;第2类为次棱角状-次圆状,环带相对发育;第3类为圆状或具磨圆状边缘的碎屑锆石,为环带不发育的变质锆石或为环带发育的岩浆锆石,应属沉积源区的继承锆石(Liu et al,2010)。

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冶金地质总局山东局测试中心完成。

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Coherent公司的GeoLas Pro 193nm准分子激光器,等离子体质谱仪系统为Thermo iCAPQ。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约15 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(Liu et al., 2010; 侯可军等, 2009)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同参考文献。

锆石微区U-Pb定年及微量元素测试。采用国际标准样品91500做外标,GJ-1、PL、TEM、QH做盲样测试,精确度在3%以内。微量元素外部标准Nist610、BHVO-2G、BIR-2G,采用Si作内标的方法进行定量计算(Liu et al, 2010)。

U-Pb同位素定年中采用锆石标准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(Liu et al., 2010)。锆石样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用



图4 东澳片岩锆石CL特征及测点位置  
Fig.4 CL characteristics and analyzed spots of zircon from Tongao schist

Isoplot完成。

#### 4.2 锆石同位素定年

从D0007样品中获得97组有效数据,锆石U-Pb同位素分析结果和计算的表现年龄值见表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<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄及其均值;当年龄 ≥ 1000 Ma时,采用<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb表面年龄及其均值。

D0007样品有3类锆石,自形晶或尖棱角状锆石、次棱角状岩浆锆石和圆状变质或岩浆锆石,测试结果显示:<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄谱(图5a)出现4个年龄峰值,最小为(95±3)Ma (MSWD=1.8),属早白垩世,测点分布于自形晶或尖棱角状锆石中,Th/U比值主要为0.61~0.99,属岩浆锆石,代表了早白垩世玄武岩

浆形成的年龄;另外3个峰值分别为(118±2)Ma(早白垩世,MSWD=2.0)、(160±5)Ma(早侏罗世,MSWD=4.8)、(250±3)Ma(早三叠世,MSWD=1.6),测点主要为次棱角状,少量自形晶锆石,Th/U比值一般为0.35~1.3,为岩浆锆石,年龄分别代表了早白垩世、早侏罗世和早三叠世的物源区的岩浆活动时代。

<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb频谱图出现2个峰值(图5b),其加权平均年龄为(1838±41)Ma(古元古代,MSWD=4.8)和(2404±27)Ma(古元古代,MSWD=0.6),测点均为磨圆状锆石,其Th/U比值为0.07~0.32(变质锆石)及0.4~1.62(岩浆锆石),代表了变质岩中源区不明的基底的锆石形成年龄。

#### 4.3 锆石稀土元素特征

在锆石同位素定年分析的同时,还测得锆石的

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-Th-Pb isotopes and calculated age values

测点号	总 Pb	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ $/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		表面年龄/Ma		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	I $\sigma$	谐和度			
				I $\sigma$	1 $\sigma$	I $\sigma$	1 $\sigma$	I $\sigma$	1 $\sigma$	I $\sigma$	1 $\sigma$						
D007-1	196.26	568.03	627.64	0.91	0.0948	0.0018	2.9101	0.0607	0.2212	0.0029	1524.1	36.9	1384.5	15.8	1288.3	15.4	92%
2					0.9283	0.0921	84.1543	24.8884	1.2502	0.5130	1835.2	25.9	1907.5	15.1	5228.1	1496.1	85%
3	142.32	188.22	317.03	0.59	0.1121	0.0016	5.5441	0.0971	0.3561	0.0042	1835.2	25.9	1907.5	15.1	1963.7	20.0	97%
4	103.58	131.39	482.28	0.27	0.1064	0.0019	2.6686	0.0577	0.1808	0.0025	1738.6	33.2	1319.8	16.0	1071.5	13.6	79%
5	180.64	144.66	1050.22	0.14	0.1059	0.0015	2.2408	0.0421	0.1522	0.0020	1731.5	31.6	1193.9	13.2	913.0	10.9	73%
6	87.64	2450.45	1861.07	1.32	0.0605	0.0015	0.2830	0.0076	0.0337	0.0005	620.4	53.7	253.0	6.0	213.6	2.8	83%
7	106.22	209.34	279.55	0.75	0.1047	0.0017	4.0785	0.0681	0.2806	0.0030	1709.6	29.5	1650.0	13.6	1594.3	15.0	96%
8	804.21	506.54	1682.77	0.30	0.1556	0.0022	8.5530	0.1423	0.3957	0.0045	2409.3	24.4	2291.6	15.1	2149.0	20.7	93%
9	12.54	168.64	233.20	0.72	0.0541	0.0017	0.3057	0.0091	0.0410	0.0005	376.0	70.4	270.8	7.1	259.2	3.3	95%
10	7.70	115.77	242.38	0.48	0.0537	0.0023	0.1938	0.0080	0.0262	0.0004	361.2	96.3	179.8	6.8	166.8	2.7	92%
11	85.33	122.98	190.66	0.65	0.1149	0.0020	5.4032	0.0965	0.3390	0.0036	1879.6	27.0	1885.4	15.3	1881.6	17.2	99%
12	18.47	153.22	412.74	0.37	0.0508	0.0013	0.2765	0.0073	0.0394	0.0005	231.6	65.7	249.9	5.8	249.1	3.1	99%
13	11.52	143.14	417.02	0.34	0.0476	0.0015	0.1691	0.0053	0.0258	0.0004	79.7	151.8	158.7	4.6	164.3	2.3	96%
14	24.24	263.92	502.08	0.53	0.0527	0.0015	0.2926	0.0085	0.0400	0.0005	316.7	69.4	260.6	6.6	252.9	3.1	96%
15	16.62	219.97	722.83	0.30	0.0506	0.0016	0.1458	0.0050	0.0208	0.0003	233.4	72.2	138.2	4.4	132.6	2.1	95%
16	45.70	842.07	1384.33	0.61	0.0819	0.0021	0.2708	0.0058	0.0241	0.0003	1243.5	51.4	243.3	4.7	153.8	2.2	74%
17	110.54	99.43	168.09	0.59	0.1567	0.0023	10.8063	0.1671	0.4953	0.0049	2420.7	29.8	2506.6	14.4	2593.4	21.1	96%
18	4.06	38.13	77.50	0.49	0.0586	0.0040	0.3246	0.0201	0.0423	0.0009	553.7	151.8	285.4	15.4	267.3	5.5	93%
19	93.30	108.38	239.44	0.45	0.1167	0.0021	5.1512	0.1017	0.3169	0.0042	1905.9	32.6	1844.6	16.8	1774.8	20.4	96%
20	2.91	179.85	103.20	1.74	0.0534	0.0043	0.1287	0.0107	0.0179	0.0006	346.4	175.0	122.9	9.6	114.5	3.5	92%
21	26.26	308.58	532.47	0.58	0.0506	0.0013	0.2865	0.0079	0.0406	0.0006	233.4	61.1	255.8	6.2	256.8	3.8	99%
22	115.59	145.55	176.10	0.83	0.1509	0.0025	9.7589	0.1603	0.4652	0.0054	2366.7	28.7	2412.3	15.1	2462.4	23.9	97%
23	14.42	249.77	322.26	0.78	0.0475	0.0016	0.2293	0.0076	0.0348	0.0005	72.3	77.8	209.6	6.3	220.5	3.0	94%
24	16.51	51.08	213.57	0.24	0.0527	0.0016	0.5100	0.0147	0.0700	0.0010	316.7	63.9	418.4	9.9	435.9	6.1	95%
25	5.52	87.98	104.75	0.84	0.0544	0.0031	0.2870	0.0146	0.0396	0.0008	387.1	127.8	256.2	11.5	250.3	5.1	97%
26	17.40	37.73	237.84	0.16	0.0525	0.0014	0.4959	0.0134	0.0680	0.0009	309.3	56.5	408.9	9.1	423.8	5.3	96%
27	31.39	142.74	446.37	0.32	0.0547	0.0013	0.4728	0.0110	0.0622	0.0007	466.7	53.7	393.1	7.6	389.0	4.0	98%
28	56.96	528.99	1636.91	0.32	0.0490	0.0011	0.2085	0.0045	0.0306	0.0003	150.1	56.5	192.3	3.8	194.3	2.1	98%
29	20.91	28.29	31.57	0.90	0.1563	0.0046	9.9965	0.2587	0.4639	0.0091	2416.4	49.7	2434.5	23.9	2456.6	40.1	99%
30	85.64	38.99	151.28	0.26	0.1567	0.0038	10.1208	0.2455	0.4650	0.0092	2420.1	36.0	2445.9	22.4	2461.6	40.3	99%
31	55.97	112.45	156.02	0.72	0.0910	0.0020	3.3835	0.0732	0.2671	0.0030	1455.6	41.8	1500.6	17.0	1526.0	15.4	98%
32	29.04	495.27	522.23	0.95	0.0481	0.0013	0.2724	0.0078	0.0406	0.0006	105.6	63.0	244.6	6.2	256.8	4.0	95%
33	6.70	223.23	221.56	1.01	0.0556	0.0033	0.1563	0.0083	0.0210	0.0005	435.2	131.5	147.5	7.3	134.2	3.0	90%
34	12.19	107.19	282.78	0.38	0.0542	0.0023	0.2722	0.0103	0.0365	0.0006	388.9	96.3	244.5	8.2	231.3	3.9	94%
35	243.14	209.93	665.56	0.32	0.1105	0.0019	4.6839	0.0776	0.3043	0.0034	1807.1	31.5	1764.4	13.9	1712.5	16.8	97%

续表 2

测点号	总 Pb	<sup>232</sup> Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U /10 <sup>-6</sup>	Th/U	同位素比值		表面年龄/Ma		谐和度							
					<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U								
36	2.36	105.44	106.94	0.99	0.0573	0.0046	0.1217	0.0091	0.0161	505.6	175.9	116.7	8.2	103.2	3.0	87%
37	22.35	320.84	473.68	0.68	0.0537	0.0017	0.2743	0.0077	0.0369	366.7	73.1	246.1	6.1	233.7	3.4	94%
38	11.59	593.62	374.29	1.59	0.0484	0.0022	0.1281	0.0056	0.0194	116.8	105.5	122.4	5.0	123.7	1.9	98%
39	16.85	216.21	648.74	0.33	0.0512	0.0018	0.1619	0.0056	0.0229	255.6	81.5	152.4	4.9	146.3	2.4	95%
40	11.48	220.04	403.62	0.55	0.0486	0.0021	0.1560	0.0063	0.0233	131.6	99.1	147.2	5.5	148.5	2.5	99%
41	28.14	616.32	477.32	1.29	0.0519	0.0015	0.2787	0.0079	0.0387	279.7	64.8	249.6	6.3	244.6	2.9	97%
42	7.31	85.92	139.06	0.62	0.0509	0.0026	0.2930	0.0146	0.0422	235.3	112.0	260.9	11.5	266.5	5.1	97%
43	9.76	51.83	65.50	0.79	0.0631	0.0028	0.9654	0.0409	0.1121	709.3	293.5	686.1	21.1	685.1	10.6	99%
44	10.41	78.99	209.46	0.38	0.0584	0.0021	0.3444	0.0125	0.0427	542.6	77.8	300.5	9.5	269.3	4.1	89%
45	14.47	44.15	1050.05	0.04	0.0498	0.0019	0.0993	0.0039	0.0145	187.1	119.4	96.1	3.6	93.0	1.7	96%
46	24.75	212.14	532.08	0.40	0.0514	0.0016	0.2820	0.0088	0.0396	261.2	72.2	252.3	7.0	250.4	3.4	99%
47	109.95	191.87	472.28	0.41	0.1257	0.0033	3.1715	0.0880	0.1808	2039.2	46.6	1450.3	21.4	1071.2	13.7	69%
48	16.52	167.51	339.86	0.49	0.0526	0.0018	0.2941	0.0107	0.0402	309.3	77.8	261.8	8.4	254.3	3.4	97%
49	22.80	361.47	456.55	0.79	0.0538	0.0020	0.2886	0.0112	0.0389	364.9	89.8	257.4	8.9	246.1	4.1	95%
50	7.82	313.30	376.51	0.83	0.0538	0.0034	0.1133	0.0077	0.0151	361.2	144.4	109.0	7.0	96.9	2.4	88%
51	4.06	118.74	159.38	0.19	0.0774	0.0045	0.1830	0.0099	0.0180	1131.5	116.4	170.6	8.5	114.9	2.3	60%
53	14.15	63.19	334.10	0.75	0.0519	0.0016	0.2643	0.0082	0.0367	279.7	68.5	238.1	6.5	232.3	3.1	97%
54	4.81	156.10	242.67	0.64	0.0472	0.0023	0.0984	0.0046	0.0152	57.5	111.1	95.3	4.3	97.4	1.7	97%
55	2.87	112.98	104.72	1.08	0.0627	0.0046	0.1510	0.0093	0.0187	698.2	127.8	142.8	8.2	119.7	3.0	82%
56	17.14	222.66	326.12	0.68	0.0520	0.0015	0.2852	0.0085	0.0396	283.4	68.5	254.8	6.7	250.4	2.9	98%
57	5.54	116.00	108.03	1.07	0.0526	0.0026	0.2632	0.0127	0.0367	309.3	111.1	237.2	10.2	232.1	4.1	97%
58	10.26	116.72	195.76	0.60	0.0545	0.0021	0.3040	0.0114	0.0406	390.8	88.9	269.5	8.8	256.6	3.8	95%
59	7.06	172.30	293.47	0.59	0.0499	0.0022	0.1282	0.0058	0.0185	190.8	105.5	122.5	5.2	118.4	1.9	96%
60	377.78	157.27	526.88	0.30	0.2665	0.0048	19.2969	0.4898	0.5184	3287.0	28.2	3056.8	24.5	2692.2	41.6	87%
61	0.64	26.35	27.90	0.94	0.1838	0.0312	0.3482	0.0518	0.0153	2687.4	283.5	303.3	39.0	98.1	5.0	87%
62	5.02	76.22	144.83	0.53	0.0523	0.0029	0.1994	0.0106	0.0280	301.9	132.4	184.7	8.9	178.1	3.3	96%
63	10.10	83.87	109.12	0.77	0.0589	0.0018	0.5620	0.0176	0.0695	564.9	66.7	452.8	11.4	433.1	6.6	95%
64	25.86	192.86	869.41	0.22	0.0499	0.0014	0.1772	0.0047	0.0255	190.8	64.8	165.6	4.0	162.3	2.1	97%
65	8.90	71.64	190.17	0.38	0.0517	0.0019	0.2764	0.0095	0.0391	272.3	83.3	247.8	7.5	247.3	3.4	99%
66	432.25	87.77	1329.06	0.07	0.1173	0.0017	4.7005	0.0851	0.2884	1916.7	20.2	1767.3	15.2	1633.7	20.6	92%
67	15.45	173.31	482.15	0.36	0.0494	0.0014	0.1808	0.0050	0.0266	168.6	66.7	168.8	4.3	169.4	2.3	99%
68	24.33	395.44	772.22	0.51	0.0489	0.0014	0.1706	0.0047	0.0253	142.7	64.8	160.0	4.0	160.9	2.0	99%
69	119.85	145.66	593.04	0.25	0.1164	0.0032	2.5895	0.0869	0.1596	1902.2	49.7	1297.7	24.6	954.8	17.5	69%
70	210.61	116.53	534.94	0.22	0.1144	0.0020	5.0743	0.0940	0.3189	1872.2	31.5	1831.8	15.7	1784.6	16.8	97%
71	97.18	249.17	205.38	1.21	0.1126	0.0021	4.8206	0.0925	0.3086	1842.6	34.4	1788.5	16.1	1734.0	17.0	96%
72	35.85	698.73	515.56	1.36	0.0541	0.0015	0.3421	0.0105	0.0456	376.0	56.5	298.8	7.9	287.2	4.5	96%
73	39.52	728.98	843.84	0.86	0.0486	0.0012	0.2208	0.0059	0.0343	127.9	61.1	210.8	4.9	217.5	2.5	96%
74	5.98	84.35	160.48	0.53	0.0586	0.0047	0.2296	0.0182	0.0286	550.0	174.1	209.9	15.0	181.5	4.0	85%
75	34.22	327.11	693.81	0.47	0.0527	0.0013	0.2996	0.0075	0.0410	316.7	55.6	266.1	5.8	259.0	3.4	97%

续表 2

测点号	总 Pb	$^{232}\text{Th}$ / $10^{-6}$	$^{238}\text{U}$ / $10^{-6}$	Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma			谐和度					
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
76	31.35	212.06	259.19	0.82	0.0567	0.0016	0.6991	0.0195	0.0888	479.7	63.0	538.2	11.6	548.6	6.7	98%
77	7.97	182.09	293.83	0.62	0.0506	0.0031	0.1449	0.0072	0.0211	220.4	140.7	137.4	6.4	134.4	3.8	97%
79	13.18	181.78	354.67	0.51	0.0487	0.0017	0.2033	0.0072	0.0303	200.1	80.5	187.9	6.1	192.1	3.0	97%
80	88.39	111.86	108.64	1.03	0.1983	0.0039	15.0579	0.3037	0.5449	2812.7	37.8	2818.9	19.2	2803.9	29.2	99%
81	27.96	435.20	538.48	0.81	0.0541	0.0021	0.2992	0.0119	0.0396	372.3	87.0	265.8	9.3	250.6	4.2	94%
82	33.46	422.31	593.65	0.71	0.0537	0.0019	0.3172	0.0112	0.0424	366.7	79.6	279.8	8.7	267.5	3.3	95%
83	146.74	59.96	583.81	0.10	0.1083	0.0021	3.2690	0.0687	0.2158	1772.2	34.9	1473.7	16.3	1259.5	14.2	84%
84	41.47	152.11	294.87	0.52	0.0646	0.0015	1.0250	0.0279	0.1133	761.1	50.8	716.4	14.0	691.7	9.0	96%
85	4.72	101.11	149.37	0.68	0.0569	0.0039	0.1883	0.0127	0.0242	487.1	153.7	175.1	10.9	154.2	3.3	87%
87	71.34	92.00	175.30	0.52	0.1070	0.0019	4.7995	0.0919	0.3215	1750.0	31.9	1784.8	16.1	1797.3	19.0	99%
88	26.25	715.27	551.94	1.30	0.0519	0.0018	0.2276	0.0076	0.0316	283.4	77.8	208.2	6.3	200.4	3.0	96%
89	9.02	264.98	307.45	0.86	0.0509	0.0020	0.1544	0.0061	0.0219	235.3	90.7	145.8	5.3	139.7	2.1	95%
90	37.95	1393.53	1680.55	0.83	0.0479	0.0012	0.1141	0.0029	0.0171	98.2	57.4	109.7	2.7	109.1	1.4	99%
91	2.60	98.29	114.36	0.86	0.0528	0.0043	0.1186	0.0091	0.0170	320.4	185.2	113.8	8.3	108.7	2.8	95%
92	6.98	246.68	401.76	0.61	0.0467	0.0024	0.0924	0.0049	0.0144	35.3	114.8	89.7	4.5	92.1	1.8	97%
93	28.78	323.82	656.85	0.49	0.0498	0.0015	0.2498	0.0076	0.0360	183.4	63.9	226.4	6.2	227.7	3.4	99%
94	7.05	86.73	137.13	0.63	0.0523	0.0024	0.2852	0.0121	0.0401	298.2	105.5	254.8	9.5	253.2	4.2	99%
95	8.17	375.08	298.24	1.26	0.0531	0.0051	0.1309	0.0122	0.0181	331.5	250.9	124.9	11.0	115.9	3.8	92%
96	21.95	138.85	592.08	0.23	0.0511	0.0018	0.2215	0.0075	0.0311	255.6	79.6	203.2	6.2	197.1	2.8	96%
97	34.41	224.61	741.36	0.30	0.0509	0.0015	0.2734	0.0080	0.0384	235.3	66.7	245.4	6.4	243.0	3.0	99%
98	49.20	370.27	1739.29	0.21	0.0468	0.0011	0.1586	0.0039	0.0242	35.3	64.8	149.5	3.4	154.4	1.8	96%
99	26.20	299.90	1162.83	0.26	0.0535	0.0018	0.1416	0.0049	0.0189	350.1	80.5	134.4	4.4	120.8	2.0	89%
100	16.20	91.13	302.22	0.30	0.0479	0.0022	0.2794	0.0111	0.0448	94.5	103.7	250.2	8.8	282.5	23.4	87%
D0004-1	39.32	469.95	1240.25	0.45	0.0479	0.0019	0.1395	0.0057	0.0209	94.5	-106.5	132.6	5.1	133.2	2.4	99%
2	100.53	1728.89	1581.47	0.68	0.0667	0.0022	0.2296	0.0070	0.0248	831.5	65.7	209.9	5.8	158.2	3.2	71%
3	10.04	100.41	225.93	0.24	0.1138	0.0154	0.2611	0.0354	0.0175	1860.8	246.0	235.5	28.5	112.0	3.5	28%
4	14.21	245.46	306.72	0.43	0.0537	0.0024	0.1514	0.0064	0.0206	366.7	101.8	143.2	5.7	131.6	2.4	91%
5	6.09	146.50	147.50	0.32	0.0505	0.0035	0.1153	0.0081	0.0166	220.4	159.2	110.8	7.3	106.4	2.4	95%
6	10.87	243.19	286.67	0.29	0.0467	0.0031	0.1086	0.0071	0.0169	35.3	151.8	104.7	6.5	108.1	2.0	96%
7	31.91	443.25	907.82	0.32	0.0471	0.0022	0.1338	0.0061	0.0204	53.8	113.0	127.5	5.4	130.3	1.9	97%
8	25.30	81.35	44.90	0.41	0.0744	0.0033	1.6292	0.0725	0.1588	1053.7	90.7	981.5	28.0	950.3	16.2	96%
9	260.57	352.40	451.23	0.64	0.0980	0.0016	3.6536	0.0634	0.2672	1587.0	30.7	1561.3	13.8	1526.7	15.1	97%
11	26.11	540.63	278.71	0.33	0.0577	0.0024	0.1796	0.0073	0.0225	520.4	86.1	167.7	6.3	143.6	1.9	84%
13	26.72	663.26	616.34	0.28	0.0483	0.0025	0.1106	0.0054	0.0165	122.3	109.2	106.5	4.9	105.7	1.4	99%
14	573.29	855.17	818.66	0.89	0.1134	0.0018	4.4190	0.0671	0.2801	1854.6	27.8	1715.9	12.6	1591.8	19.1	92%
15	338.37	156.06	562.79	0.75	0.1418	0.0020	7.9857	0.1220	0.4032	2249.7	24.7	2229.4	13.8	2183.6	21.2	97%
17	59.92	78.65	750.55	0.52	0.0577	0.0011	0.5434	0.0103	0.0674	520.4	42.6	440.7	6.8	420.6	4.1	95%
18	1.77	38.47	73.29	0.35	0.0668	0.0130	0.1367	0.0319	0.0151	831.5	414.8	130.1	28.5	96.6	7.9	70%
20	46.89	357.57	429.64	0.50	0.0559	0.0015	0.3803	0.0108	0.0487	450.0	61.1	327.3	7.9	306.4	4.3	93%

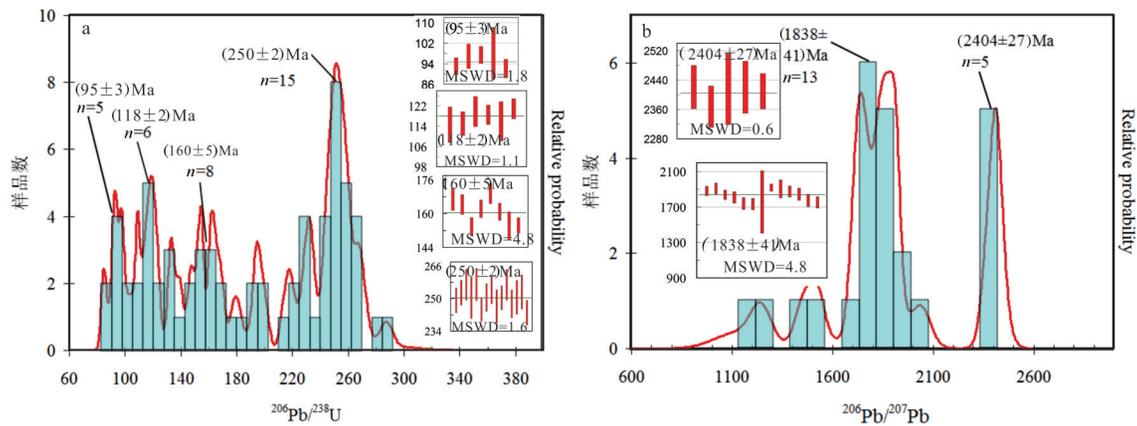


图5 东澳片岩(D0007)锆石U-Pb法测点及年龄图解(据表2)

Fig.5 U-Pb age histograms of the detrital zircons from Tongao schist (sample D0007) (based on Table 2)

稀土元素含量值。以D0007样品的锆石的稀土元素含量值作图。锆石稀土配分曲线(图6)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。

按锆石年龄95 Ma、118 Ma、160 Ma、250 Ma、1838 Ma和2404 Ma相应测点分别作图,其稀土曲线特征显示:(1)年龄为95 Ma的稀土配分曲线一致性好,稀土总量较高,在重稀土区域形成高度一致的线束,Ce富集,La、Pr、Eu中度亏损,反映了锆石结晶时的岩浆已经出现了稀土元素的分异;(2)年龄为118 Ma、160 Ma、250 Ma的稀土配分曲线具分散特点,表现为富Ce、La、Eu中度亏损,Pr的低度亏损;(3)年龄为1838 Ma、2404 Ma的稀土配分曲线由左至右相对平缓,说明古元古代的物质轻重稀土的分异相对不明显,Ce富集不明显,La、Pr中度亏损,Eu低度亏损。

## 5 讨论

### 5.1 东澳片岩的形成时代

东澳片岩的形成时代,是一个长期争议的问题。由于绿片岩原岩为玄武岩和碱性火山岩,属低Zr和SiO<sub>2</sub>的岩石,岩浆结晶锆石很少,多数锆石来自源岩或从围岩中捕获,给锆石定年工作造成很大困难。

多数研究者认为东澳片岩属晚中生代,这多据侵入于东澳片岩的花岗岩类岩体年龄为84~92 Ma(福建省地质调查研究院,2015),从而推测东澳片岩

形成的时代为92 Ma之前。本次样品划分出3类锆石:自形晶或尖棱角状锆石、次棱角状岩浆锆石和圆状变质锆石或岩浆锆石。前者属岩浆锆石,含量低,颗粒小,可能属玄武质岩浆结晶的产物,其年龄代表了火山岩(岩浆)形成的时代,即(95±3)Ma,代表东澳片岩的原岩之(火山)岩浆活动的时代,因火山活动与火山岩地层形成的时代接近,由此推断东澳片岩形成的时代为晚白垩世。此年龄比侵入东澳片岩的花岗岩类(84~92 Ma)略早,与前人的认识不矛盾。

<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄谱的其余3个峰值,即(118±2)Ma(早白垩世)、(160±5)Ma(早侏罗世)和(250±3)Ma(早三叠世),测点主要分布在次棱角状岩浆锆石上,前者见少量自形晶,后者基本为次棱角状,随着年龄的增加,磨圆度有增加趋势。这些年龄分别代表了早白垩世、早侏罗世和早三叠世的物源区的岩浆活动时代。118 Ma的峰值在长春桥的碎屑锆石中也有出现(Yui et al., 2012),是台湾东部地层之源区分布较广泛的岩浆事件。上述年龄与福建沿海地区的岩浆事件对应性较好,其中(118±2)Ma(早白垩世)为长乐—南澳断裂带闭合的活动时代;(160±5)Ma(早侏罗世)为藩坑组火山岩形成年龄;(250±3)Ma(早三叠世)为闽西南陆表海关闭年龄(福建省地质调查研究院,2015)。

<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb频谱图出现2个峰值:1838 Ma(古元古代)、(2404±27)Ma,均为磨圆状锆石,或为变质锆石或为岩浆锆石,代表了不明的变质岩源区的锆石形

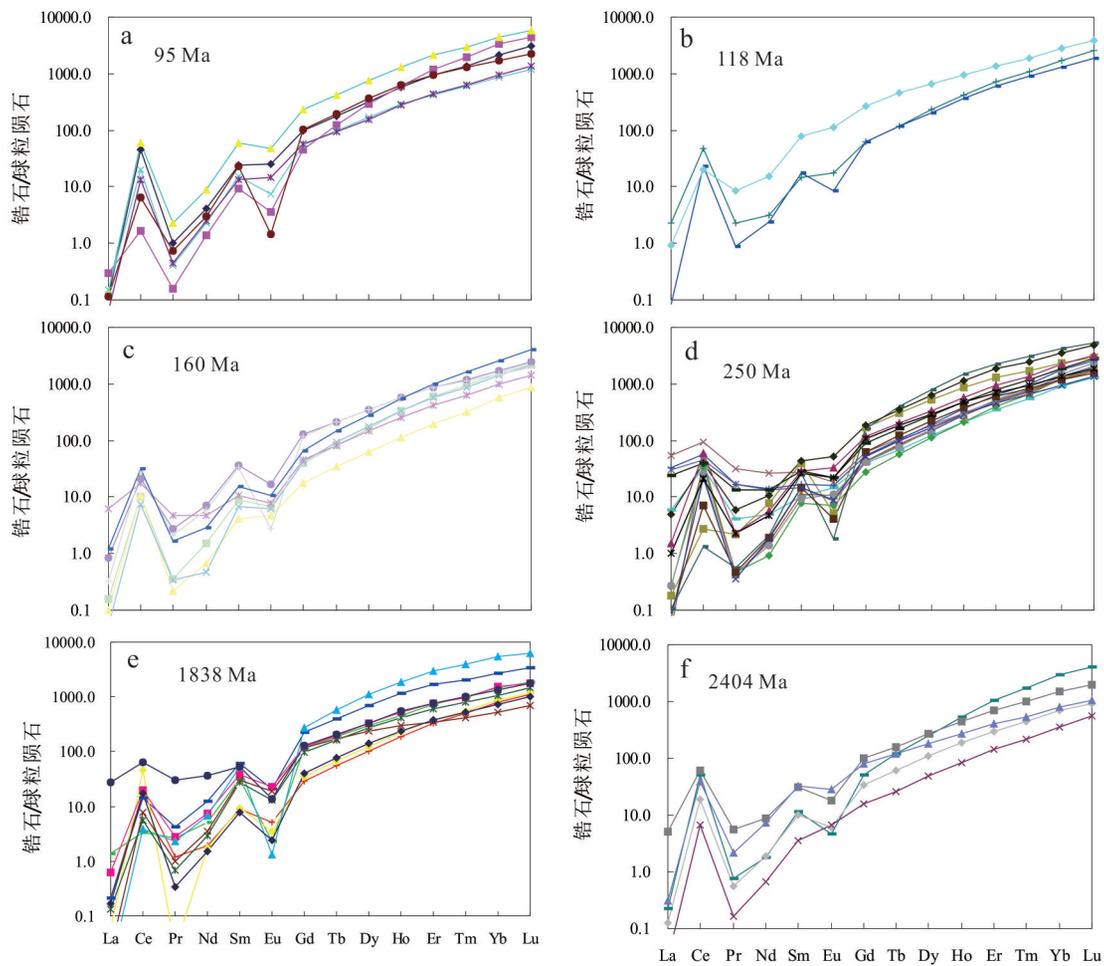


图6 东澳片岩(D0007)锆石稀土元素配分图(据Sun S S & McDonough W F.19897)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of the the zircons of Tongao schist (D0007)for Tongao schist (chondrite-normalized data after Sun S S.McDonough W F., 1989)

成年龄,是否为华南陆块的变质基底年龄,还有待今后研究。

岩石成岩之后,经历了绿片岩相-低角闪岩相变质过程(陈肇夏,1998),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东澳片岩的原岩(95 Ma)形成之后、由于花岗岩(84~92 Ma)已经强烈变形变质(福建省地质调查研究院,2015),而未变形变质的花岗岩体年龄为82 Ma(本次),说明东澳片岩变质年龄为95~82 Ma,为晚白垩世。

综上,东澳片岩形成的年龄为95 Ma,源岩物质十分复杂,有中生代的火成岩,也有古元古代不明基底的物质,其变形变质年龄可能为95~82 Ma。

## 5.2 东澳片岩的沉积构造环境

东澳片岩是太鲁阁带的北东部,台湾学者提出

了许多板块模型。Chai(1972)提出的弧-陆碰撞模式,认为前古近-新近纪是一个薄弱带。John(1972)提出了来自东部的海洋板块向西俯冲,形成中央造山带,第一阶段为晚中生代,东澳片岩是其俯冲作用的产物。李松茂等(1987)认为海洋地质资料表明台湾东部地区属欧亚大陆边缘,晚中生代属陆地,燕山期受到来自东部的太平洋板块挤压而发生强烈的构造作用。黄奇瑜等(Yui et al.,2012)称东澳片岩等变质岩为向东俯冲的欧亚大陆基底。俞震甫等(Yui et al.,2012)据长春层变质岩之碎屑锆石定年成果,认为太鲁阁带北部的东澳片岩属晚白垩世弧前环境。

野外调查发现东澳片岩多处夹有含石墨云母片岩。原岩含炭质,这是副变质岩的重要特征性标

志,也具有明确的指相意义,结合东澳片岩之原岩构成:下部(1~2层)夹含炭质碎屑岩夹超基性火山岩,中部(3~5层)为陆源碎屑岩、碳酸盐、硅质岩、玄武岩及副长石岩,上部(6层)为(超)基性火山岩,这种组合可能形成于浅海相或海陆交互相至浅海相(陆棚)海。这与福建省地质调查研究院(2015)的认识基本一致。Shu et al.(2009)在研究华南构造环境时,认为福建沿海地区的白垩世(燕山晚期)火山岩与华夏陆块的火山活动没有差别的观点,均属陆相沉积-火山作用的构造环境,与本次认识基本相符。

火山岩的硅质含量低,主要属超基性岩类,有玄武岩、副长石岩等,岩石化学特征反映了富碱和富铁镁特点,这种岩石组合反映了源自地幔岩浆分异形成(超)基性岩的火山-沉积作用构造环境,具较薄地壳和张性构造环境特征,可能是欧亚陆块边缘带。

碎屑锆石年龄的分布,一定程度上反映了构造环境演化的历程。欧亚大陆在印支期活动峰期(250~205 Ma)挤压(毛建仁等,2014),东澳片岩出现了早三叠世的碎屑岩浆锆石年龄(250 Ma)。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(舒良树等,2004;徐先兵等,2009),在华夏陆块见有藩坑组等“双峰式”火山碎屑岩(舒良树等,2004),东澳片岩源岩的岩浆锆石(160 Ma)也有反映。福建沿海出现的晚侏罗世—早白垩世的岩浆活动(黄长煌,2015;冯艳芳等,2013;黄长煌,2016a,2016b),在本区也有相应锆石年龄(143~121 Ma)相对应;早白垩世(100~120 Ma)为长乐—南澳断裂带闭合期,在福建沿海发生了强烈花岗岩类侵入活动及火山作用,本区也发生强烈岩浆活动,其锆石年龄峰值为94 Ma和107 Ma,并形成了东澳片岩的火山物质。上述的共同性,说明东澳片岩属欧亚陆块的组成部分,可能与长乐—南澳断裂带为界的沿海地区属同一构造单元。

此论点还有另外的3个现象支持:(1)从长春层的碎屑锆石同位素年龄(Yui et al,2012),与福建沿海的东山苏峰山地区和龙海深澳地区的亲营山组变质岩(黄长煌,2016a;2016b)之碎屑锆石年龄的峰值基本相对应;(2)本区与长乐—南澳断裂带的火山岩微量及稀土元素特征相似,岩石稀土元素配分曲线具有高度一致性,呈左高右低的直线,没有Eu亏损。均类似于幔源及其分异的岩浆地球化学特征,

说明均属共同的地幔物质分异的产物;(3)长乐—南澳断裂带闭合后,福建沿海地区出现的晶洞花岗岩,属典型的“A型花岗岩”,陈政宏等(2016年台北会议交流)认为晶洞花岗岩与台湾东部岩浆作用的具相关性,二者的岩浆年龄均为84~92 Ma,可能属同一构造单元的不同部位,一个是内陆带的张性构造环境,另一个是陆缘的张性构造环境。这些也从另外角度说明了长乐—南澳断裂带以东至台湾同属一个构造单元的合理性。

综上,东澳片岩形成的构造环境为大陆边缘,具有地幔分异物的玄武岩-副长石火山岩浆作用,其形成的沉积环境为海陆交互相-浅海相,大地构造环境属于欧亚陆块的边缘构造环境。

## 6 结 论

通过对台湾东澳片岩的野外地质特征、岩石地球化学、同位素年代学等研究,结合中生代区域构造作用的特征,得出初步认识如下:

(1)东澳片岩源岩属沉积-火山岩组合,为副变质岩,原岩为陆源碎屑岩、基性-碱性火山岩等。

(2)东澳片岩的形成时代为(95±3) Ma,属晚白垩世。

(3)东澳片岩形成的大地构造环境为欧亚陆块的边缘。

**致谢:**参加野外调查的人员有陈润生、周维瑀、许仙斌、郑明泉,台湾大学的陈政宏、李寄瑀,台湾东华大学的刘莹三,台湾师范大学的叶恩肇等。锆石定年测试得到了中国冶金总局山东局测试中心李凤春的指导和帮助;本文成文过程中得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对论文提出了宝贵修改意见,在此表示衷心感谢。

## References

- Bureau of geological and exploration of Fujian Province. 2015. Regional Geology of Tawan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chai B H T. 1972. Structure and tectonic evolution of Taiwan. *Tour[J]. Sciences*, 272:389-422.
- Chen Zaoxia. 1998. Metamorphic rocks of Taiwan[M]. Central Geological Survey, Moea (in Chinese with English abstract).
- Huang Chiyue, Wu Weiyu, Chang Chungpai, Tsao S, Yuan Peter B, Lin

- Chingweei, Kuan Yuanxia. 1997. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 281: 31-51.
- Huang Changhuang. 2015. Fujian Dongshan late Mesozoic granite LA-ICP-MS zircon isotope dating and its geological significance[J]. *Geology of Fujian*, 34(4): 261-271 (in Chinese with English abstract).
- Huang Changhuang. 2016a. Zircon U-Pb isotopic geochronology of metamorphic rock in the shen'ao area, Longhai, Fujian Province and its geologic significance [J]. *East China Geology*, 37(1):28-35 (in Chinese with English abstract).
- Huang Changhuang. 2016b. Isotopic age of zircon of the Dongshan metamorphic rocks in Fujian Province and its geologic significance[J]. *Geology in China*, 43(3):738-750(in Chinese with English abstract).
- Huang C Y, Jien C W, Chang C P, Peter B. 2008. The Lichi Melange: A tectonic collision complex originated from sheared forearc in Coastal Range, eastern Taiwan[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 436: 127-154.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. 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*, 51: 537-571.
- Mao Jianren, Li Zilong, Ye Min. 2014. Mesozoic tectonic-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Sciences*, 57:2853-2877(in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34:376-391.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi Wang Bin, Zhu Puding. 2004. Geological features and tectonic evolution of Mesozoic-Cenozoic basins in southeastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9/10):876-884 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiaom, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 36(3): 573-593 (in Chinese with English abstract).
- Yui T F, Maki K, Lan C Y, Hirata T, Chu H T, Kon Y, Yokoyama T D, Jahn B M, Ernst W G. 2012. Detrital zircons from the Tananao metamorphic complex of Taiwan: Implications for sediment provenance and Mesozoic tectonics[J]. *Tectonophysics*, 541-543: 31-42.

### 附中文参考文献

- 陈肇夏. 1998. 台湾的变质岩[M]. 经济部中央地质调查所.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉等. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. *地质论评*, 61(4):717-734.
- 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 邢光福. 2013. 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.
- 福建省地质矿产局. 1992. 台湾省区域地质志[M]. 地质出版社.
- 福建省地质调查研究院. 2015. 台湾省区域地质志[M]. 地质出版社.
- 黄长煌. 2015. 福建东山晚中生代花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石同位素定年及其地质意义[J]. *福建地质*, 34(4):261-271.
- 黄长煌. 2016a. 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*, 43(3):738-750.
- 黄长煌. 2016b. 福建龙海深澳变质岩锆石 U-Pb 同位素年代学及地质意义[J]. *华东地质*, 37(1):28-35.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4):481-492.
- 李松茂, 曾维军. 1987. 台湾地质与板块构造模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 7(4):29-37.
- 林启文, 高铭建. 2009. 1:5 万台湾地质图说明书. 苏澳幅, 第二版[M]. 经济部中央地质调查所.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景[J]. *中国科学:地球科学*, 44(12):2593-2617.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起, 王彬, 祖辅平. 2004. 中国东南部中-新生代盆地特征与构造演化[J]. *地质通报*, 23(9-10):876-884.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. *中国地质*, 36(3):573-593.