

粤西福湖岭混合岩及其原岩的地质年代学研究

周登赞, 徐夕生

(南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 为了深入认识华夏地块早古生代陆内造山作用相应的地壳再造过程, 本文选取粤西福湖岭混合岩进行了详细的岩相学以及锆石 U-Pb 年代学研究。根据混合岩化程度, 粤西福湖岭混合岩剖面由上而下可以分为 3 部分: 混合岩化沉积变质岩、条带状混合岩和混合花岗岩。根据岩性与岩相学特征, 福湖岭混合岩又可分为古成体、暗色体和浅色体。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果及与区域上基底变质岩资料的对比研究表明, 福湖岭混合岩的原岩(古成体)是形成于新元古代的变质沉积岩。粤西福湖岭混合岩的形成时代为 441~435 Ma, 是华夏地块早古生代陆内造山事件的重要产物。

关键词: 粤西; 混合岩; 混合花岗岩; 变质沉积岩; 早古生代

中图分类号: P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0473-15

Geochronology of Fuhuling migmatite and its protolith in western Guangdong

ZHOU Deng-yun and XU Xi-sheng

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to further understand the crust reworking process related to the early Paleozoic intracontinental orogeny in the Cathaysia Block, this paper presents detailed studies of lithology, petrography and zircon U-Pb dating of the Fuhuling migmatites in western Guangdong Province. With the increasing migmatization, these rocks can be divided into three rock types: migmatized para-metamorphic rock, stromatic migmatite and migmatitic granite (diatexite). According to lithological and petrographic characteristics, the Fuhuling migmatites can be divided into three suites: paleosomes, melanosomes, and leucosomes. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results together with a comparison with the data of metamorphic basements from this region suggest that the protolith (paleosome) was meta-sedimentary rocks deposited in the Neoproterozoic, and the migmatization occurred at 441~435 Ma, related to the early Paleozoic intracontinental orogeny in South China.

Key words: western Guangdong; migmatite; migmatic granite; metasedimentary rock; early Paleozoic

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41430208)

混合岩是由芬兰地质学家 Sederholm(1907)首次提出, 其指出混合岩是由两部分组成的片麻状岩石: ① 具有叶理的原岩(变质的沉积岩或者火成岩); ② 原岩重熔后形成的或者外来注入的物质。

Sawyer 等(2008)根据前人研究, 总结出混合岩的定义为: 在中高级变质区域内发育的从微观到宏观均具有多相性的, 并由岩相学上两个或以上不同的部分组成的岩石。其中一个部分必须是由部分熔融形

收稿日期: 2017-03-01; 接受日期: 2017-06-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430208)

作者简介: 周登赞(1990-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 694975665@qq.com; 通讯作者: 徐夕生(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 火成岩岩石学研究方向, E-mail: xsxu@nju.edu.cn。

成,并且包含成因相关的两种组分(浅色体和暗色体)。通常情况下,混合岩是由原岩部分熔融形成的新成体(neosome)和未发生混合岩化的古成体(paleosome)组成。其中新成体进一步分为浅色体(leucosome)和暗色体(melanosome)两部分。

混合岩化作用(深熔作用)是大陆地壳演化的重要过程,在古老地壳基底再造过程中普遍发育,与造山运动的演化密切相关(Sawyer, 1991; Brown, 2001; Rubatto *et al.*, 2001; White *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2007)。在深熔作用区域,熔体从固相残留体中分离并迁移,形成岩浆并侵位冷凝形成花岗岩(如 Brown, 2004; Olsen *et al.*, 2004)。混合岩中的浅色体是熔体是否分离迁移以及岩浆运移上升的印记,常见的网脉状浅色体就是熔体迁移的复杂通道,我们可以由此研究熔体在网脉状通道中分离聚集直到熔体迁移出混合岩体系形成花岗质岩浆,上升至地壳浅部形成花岗质侵入岩的过程(Brown, 2007)。

混合岩的时代研究主要集中于约束原岩的形成时代以及深熔作用发生的时代。地壳深熔作用的精确年代学研究对理解部分熔融、花岗岩侵位和造山带演化过程具有至关重要的意义(Foster *et al.*, 2001; Rubatto *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2012, 2014; Xia *et al.*, 2014b; Yu *et al.*, 2015)。近年来,锆石 CL/BSE 成像与原位 U-Pb 定年被广泛应用于混合岩研究。锆石原位 U-Pb 同位素定年是最常用的定年方法,混合岩中的锆石保存了固态重结晶以及生长的信息。使用原位测试分析方法可以同时分析锆石颗粒的内部(也就是原岩的残留锆石)和部分熔融发生时形成的增生边,从而确定精确时代。此外,混合岩中的继承锆石保存了原岩类型的信息,通过定年可以有效地确定原岩是沉积岩还是火成岩,以及变质作用发生的时间。浅色体保存着地壳深熔作用的信息,浅色体中的自形柱状新生锆石具有典型的岩浆环带,通常 Th/U 值很低,是深熔作用过程中产生的熔体中结晶的深熔锆石(如: Liu *et al.*, 2012)。因此,部分熔融形成的长英质浅色体中锆石的原位微区 U-Pb 定年是厘定地壳深熔和混合岩化时间的重要手段(Solar *et al.*, 1998; Burda and Gaweda, 2009; Liu *et al.*, 2010)。

华夏地块早古生代发生了强烈的构造热事件,混合岩和花岗岩广泛发育,它们是变质基底再造、地壳深熔作用的产物(王江海等, 1999; Xu *et al.*,

2005; 刘锐等, 2008; 曾雯等, 2008; Liu *et al.*, 2010)。华夏地块早古生代武夷-云开造山带被认为是世界范围内为数不多的板内造山带之一,该造山带的研究对于解决东亚地区的形成和演化具有重要意义(Li *et al.*, 2010; Charvet *et al.*, 2011)。花岗岩类以及相关的高级变质岩广泛分布在武夷-云开造山带内部(刘锐等, 2008; Yu *et al.*, 2009; Wan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011),混合岩化作用普遍,为研究区域变质作用-深熔作用与造山作用的关系,混合岩与花岗岩的成因联系提供了有利的条件。目前,对于区内深熔作用,包括岩石学特征以及熔体产生的机制等方面的研究仍较薄弱,另外对于变质作用-深熔作用-岩浆作用的时代及其成因联系的研究也有待深入,特别是对深熔作用的时限以及与板内造山的关系仍是尚未解决的关键地质科学问题。这些研究对于探讨华夏地块演化具有重要意义(如 Wang *et al.*, 2007)。

华夏地块粤西福湖岭地区发育混合岩和混合花岗岩,岩石变形特征和接触界限清晰,区域内广泛发育浅色体,同时其岩相学的变化,揭示了混合岩在形成时壳内岩石从部分熔融到最终形成花岗质岩浆的过程,以及福湖岭混合岩中岩石熔融过程中的流变现象,为花岗岩成因以及地壳深熔作用、大陆流变学以及地球动力学背景的研究提供了一处不可多得的天然剖面。为了了解地壳深熔作用的热机制,确定造山带内部分熔融作用的时间,本文对粤西福湖岭混合岩中浅色体、古成体及混合花岗岩进行了详细的岩相学观察以及精确的锆石 U-Pb 定年,从而确定粤西福湖岭地区地壳深熔作用的时间及其原岩的形成时代。

1 地质背景和岩相学特征

粤西阳西县位于吴川-四会深断裂的东南侧,区域内出露地层以寒武系八村群地层和第四系为主(图 1)。八村群原岩以中-薄层细粒长石石英砂岩为主,现已普遍变质为变粒岩夹绢云母石英片岩、石英岩、云母片岩。区域内普遍发育混合岩化作用,混合岩主要为条痕状、条带状混合岩以及混合花岗岩。

福湖岭位于广东阳西县沙扒镇海滨地带,福湖岭面积约 1 km²。山坡上的出露地层应属于寒武-前寒武纪的复理石建造,经历不同程度的变质,岩性以云母石英片岩为主;其下发育各种类型混合岩,山脚

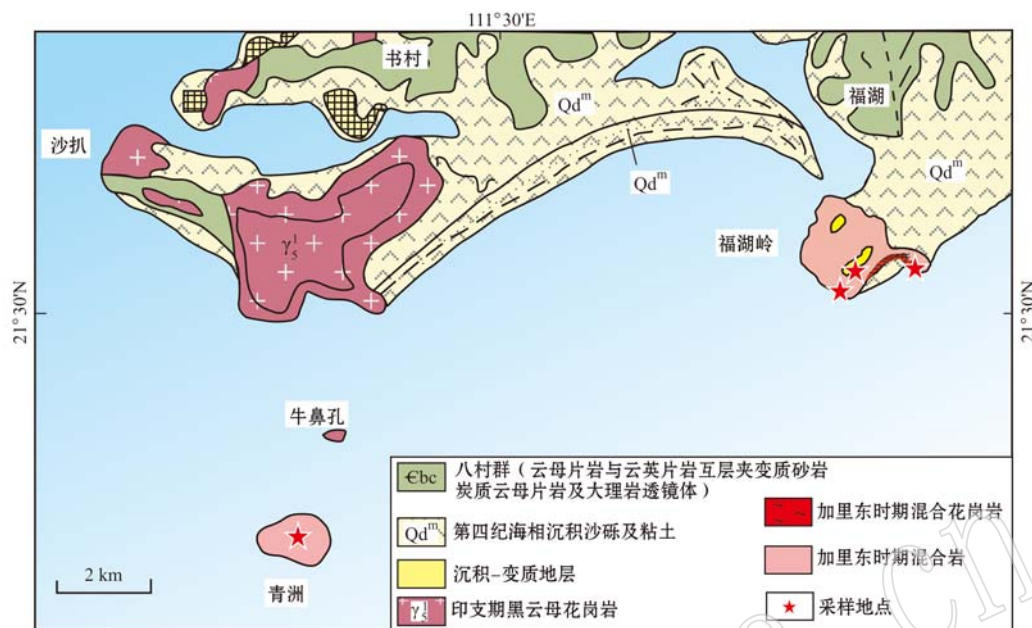


图1 粤西福湖岭地区地质简图(改编自广东省地质局区域地质测量大队, 1964^①)

Fig. 1 Sketch geological map of Fuhuling, western Guangdong(modified after Regional Geological Survey Party, Guangdong Bureau of Geology, 1964^①)

发育混合花岗岩。地层面及混合岩层理面总体向西倾斜。

福湖岭混合岩的宏观特征呈现不均一性,随着混合岩化程度的增加,混合岩区域内浅色体含量增加,浅色体矿物粒度增大,不同类型的混合岩中浅色体形态与数量差异较大,混合岩剖面由上而下可以分为几部分:① 混合岩化沉积变质岩:主要由条纹状和斑点状混合岩以及云母石英片岩组成。其中浅色体的含量<10%,主要呈透镜体状或不连续条带状沿原始岩石的层理产出。② 条带状混合岩:浅色体的含量为10%~40%,浅色体主要呈连续的条带状平行于混合岩的面理(图2a)。在局部地区,岩石发生强烈的塑性变形,浅色体以无根褶皱形式存在(图2b),在褶皱的转折端浅色体呈现“M”形(图2c)。这类粘性褶皱是在熔体流动过程中形成的,表明在区域混合岩化过程中浅色体经历了岩浆阶段(McLellan, 1984; Sawyer, 1998)。此外,在部分条带状混合岩中可见石榴子石颗粒,粒径为0.5~1 cm。③ 混合花岗岩:位于剖面底部,混合花岗岩内包裹大量大小不等的岩块(图2d, 2e)。岩块应为混合岩的原岩,部分岩块内可见原岩转化为浅色体和暗色体(图2e)。局部具有花岗岩外观,其中暗色条带变得更细

更短,呈条痕状排列,浅色体含量进一步升高,形态趋于不规则状并进一步联通,浅色体与暗色体界线更加模糊(图2f)。

研究区域内的混合岩主要由浅色体、暗色体、古成体和混合花岗岩4部分组成:

浅色体(14YX09, 15YX03)主要矿物组成为钾长石(30%~38%),斜长石(25%~30%),石英(35%~40%)以及少量白云母、黑云母,局部可见石榴子石(图3a, 3b)和矽线石,副矿物为锆石、榍石、磷灰石等。黑云母有两种形态,主要呈自形片状分布于石英长石颗粒之间,可能是后期熔体结晶的产物;另一种是熔融残留的他形结构(图3b)。钾长石主要为正长石和微斜长石,后者可见格子双晶,包裹石英、斜长石残留颗粒(图3c)。斜长石可见聚片双晶,局部发生绢云母化。而浅色体14YX06主要由钾长石、斜长石和石英构成,三者含量超过了95%,可见少量白云母。

暗色体(15YX05)为混合岩中产出的暗色条带(图3d),宽度在毫米到厘米之间,主要组成矿物为黑云母、石榴子石以及石英和斜长石,副矿物为锆石、榍石、磷灰石等。黑云母含量较高,呈条带状分布。局部石榴子石中可见黑云母、长石、石英包裹体。

① 广东省地质局区域地质测量大队. 1964. 广东省阳江幅1:20万地质图.

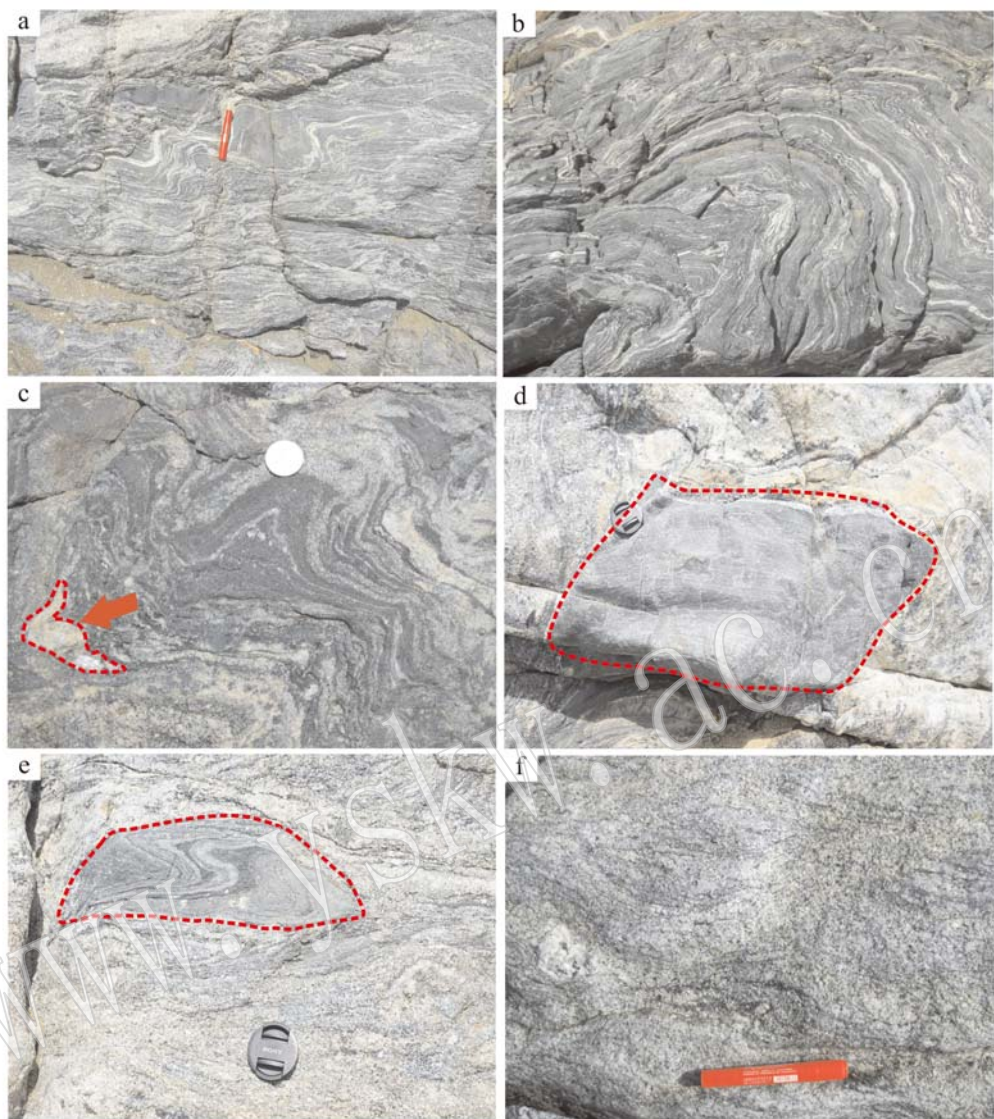


图 2 福湖岭混合岩野外特征

Fig. 2 Field petrography of Fuhuling migmatites

a—条带状混合岩；b—条带状混合岩发生强烈的塑性变形(无根褶皱)；c—褶皱的转折端浅色体呈现“M”形；d—混合花岗岩内古成体(原岩岩块)；e—原岩初步转化为浅色体和暗色体；f—混合花岗岩

a—stromatic migmatite; b—strong plastic deformation in stromatic migmatite (rootless fold); c—leucosomes at the bending of the fold exhibiting “M” shape; d—paleosome in the migmatitic granite (protolith); e—protolith transformed into leucosome and melanosome; f—migmatitic granite

古成体(14YX05)主要矿物组成为钾长石(15%~20%)、斜长石(20%~25%)、石英(40%~45%)和黑云母(15%~20%)，以及少量石榴子石、磁铁矿，副矿物为磷灰石、锆石等(图 3e)。黑云母为主要暗色矿物，呈细小的板片状，有一定的定向。

混合花岗岩(14YX01, 15YX01)具有类似花岗岩的组成和结构，主要矿物组成为钾长石、斜长石、石英、黑云母以及少量石榴子石、矽线石、白云母，副矿物为锆石、绿泥石、磷灰石等。混合花岗岩中黑云

母较浅色体含量高，呈微弱的定向排列。在样品 14YX01 中可见石榴子石+黑云母+白云母+斜长石(GBMP)的矿物组合(图 3f)。

2 分析方法

锆石分选是采用传统的重砂分选方法完成。首先选择未受污染的代表性样品破碎到 60 目左右，再经重砂淘选和电磁选，分选出无磁性的重矿物颗粒，

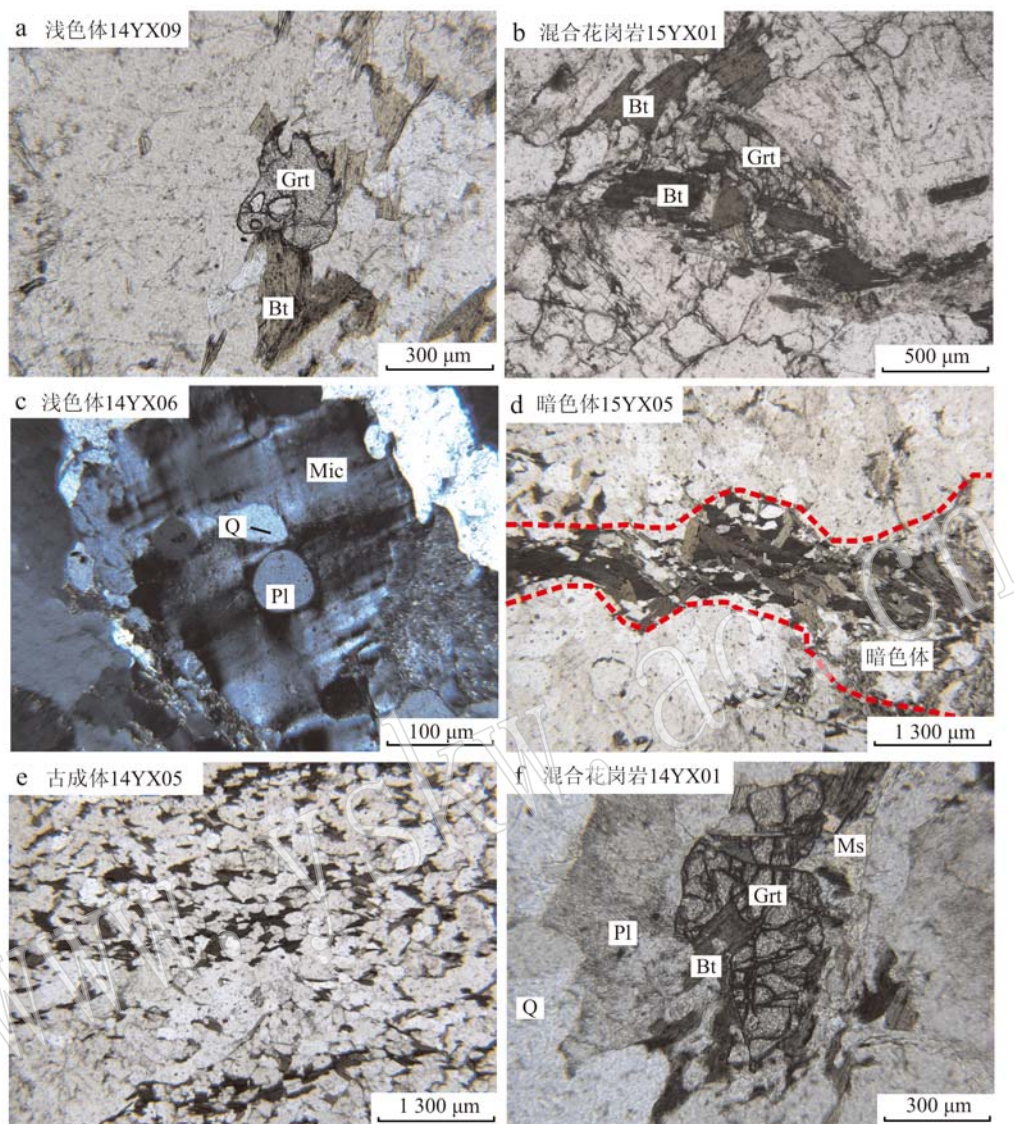


图3 福湖岭混合岩的显微岩相学

Fig. 3 Microphotographs of Fuhuling migmatites

a—浅色体中石榴子石; b—熔融残留石榴子石和黑云母; c—微斜长石包裹石英、斜长石残留颗粒; d—暗色体中黑云母呈条带状排列;
e—古成体镜中褐色黑云母呈微弱的定向排列; f—混合花岗岩中石榴子石+黑云母+白云母+斜长石矿物组合; Grt—石榴子石; Bt—黑云
母; Mic—微斜长石; Pl—斜长石; Q—石英; Ms—白云母

a—garnet in leucosome; b—residual garnet and biotite; c—microcline with early quartz and plagioclase core; d—biotites with banded structure in melanosome; e—weakly oriented arrangement of biotites in paleosome; f—assemblage of garnet, biotite, muscovite and plagioclase in migmatitic granite; Grt—garnet; Bt—biotite; Mic—microcline; Pl—plagioclase; Q—quartz; Ms—muscovite

在立体显微镜下随机挑选出约 200 颗锆石颗粒。然后将分选出的锆石颗粒粘在双面胶上,并沿直线排列整齐,然后用混合有固化剂的环氧树脂胶结。待环氧树脂固化后,抛光至锆石颗粒中心露出,制成样品靶。

在显微镜下对制成样品靶后的锆石样品进行透射光和反射光的观察和照相,分析锆石的晶形、包裹

体和裂缝等外观特征,然后进行阴极发光(CL)图像分析,进一步研究锆石的内部结构特征,并为在锆石 U-Pb 定年分析中选择合适的点位。CL 图像分析主要在南大内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室扫描电镜实验室 Carl Zeiss Supra 55 型场发射扫描电子显微镜上完成。

锆石 U-Pb 年龄测定在南大内生金属矿床

成矿机制研究国家重点实验室完成。本次实验采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 和相干公司 (Coherent) 生产的 GeoLas Pro 型激光剥蚀系统。工作参数为: 波长 193 nm, 激光脉冲重复频率 5 Hz, 脉冲能量为 10 J/cm², 激光剥蚀束斑直径为 32 μ m, 剥蚀时间 60 s, 背景测量时间 40 s, 停留时间 ²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 依次为 15、30、10、10、15 ms。质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1 (609 Ma; Jackson *et al.*, 2004)。ICP-MS 的分析数据通过即时分析软件 GLITTER (van Achterbergh *et al.*, 2001) 计算获得同位素比值、年龄和误差, 并假定标样的分析误差为 1%。每组 (RUN) 测试开始和结束前, 分别分析 GJ-1 标样 2 次, 中间分析未知样品 10 次, 以及 1 次已知年龄样品 Mud Tank (TIMS 年龄: 732 $\pm$ 5 Ma; Black and Gulson, 1978)。普通铅校正采用 Andersen 等 (2002) 的方法进行。校正后的结果用 Isoplot 程序 (ver. 3.23, Ludwig, 2003) 完成年龄计算和谐和图的

绘制 (分析结果见表 1)。

3 分析结果

3.1 古成体 (14YX05)

古成体 (14YX05) 中锆石大多呈次圆的短柱状和不规则状 (图 4a, 4b, 4c), 少部分锆石为较自形长柱状。锆石 CL 图像显示大部分锆石具有明显的核-边结构, 核部锆石具有明显的熔蚀特征, 指示经历了后期的变质作用改造, 边部锆石具较亮的 CL 强度, 具面状分带特征, 具有深熔作用所形成的锆石特点 (Andersson *et al.*, 2002; Zeh *et al.*, 2010)。另外有些锆石颗粒发育裂痕或富含包裹体, 这些复杂的锆石形态特征和内部结构说明锆石成因具有多样性, 也表明了原岩的沉积成因。具核-边结构的边部太窄不能进行年龄分析, 因此均是对其核部进行分析。

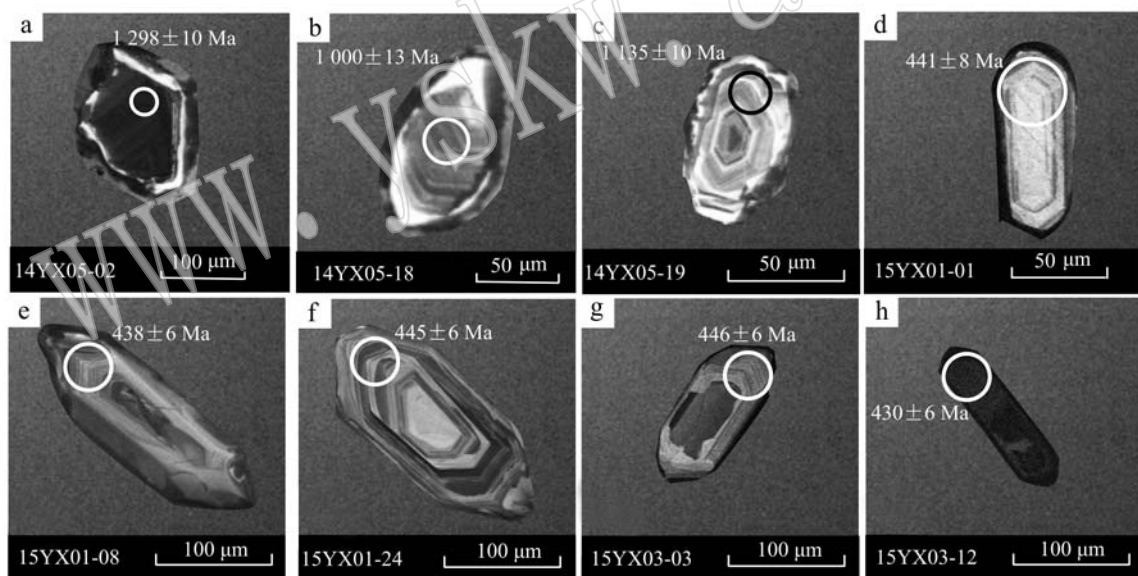


图 4 福湖岭混合岩中锆石的典型 CL 图像 (圆圈为 LA-ICP-MS 测试点)

Fig. 4 Typical CL images of zircons from samples of the Fuhuling migmatite (the circles are spots for U-Pb dating)

对 14YX05 进行了 22 个点的 U-Pb 年龄测定 (表 1), 其年龄谐和度较高, 这些锆石的年龄变化范围较大。最古老的年龄为 2 511 Ma (Th/U = 0.36), 为太古代年龄。最年轻的谐和锆石年龄为 624 Ma (Th/U = 0.48)。该样品中含量最多的为中元古代-新元古代晚期 (1 298 ~ 907 Ma) 的锆石, 该样品中还有少量古元古代的锆石 (图 5a)。

3.2 混合花岗岩 (15YX01)

样品 15YX01 中锆石主要为自形长柱状, 锆石长度约 100 ~ 200 μ m, 发育振荡环带 (图 4d, 4e, 4f)。少数锆石具有弱环带特征, 其对应的锆石 Th/U 比值通常很低 (Th/U < 0.2), 显示出变质锆石的特征。此外, 超过 70% 的锆石 Th/U 较高 (0.30 ~ 1.89), 应为岩浆锆石。对混合花岗岩样品 15YX01

表 1 福湖岭混合岩中锆石 U-Pb 定年结果
Table 1 U-Pb dating results of zircons from migmatites in Fuhuling

分析点	同位素比值				年龄/Ma				$w_B/10^{-6}$				Th/U		
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Th		U				
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
古成体 14YX05															
14YX05-01	0.076 14	0.000 85	1.813 62	0.023 82	0.172 77	0.002 14	1.099	23	1 050	9	1 027	12	82.6	1 805	0.05
14YX05-02	0.086 89	0.000 97	2.592 11	0.033 73	0.216 38	0.002 66	1.358	22	1 298	10	1 263	14	136	1 255	0.11
14YX05-03	0.110 36	0.001 28	4.569 63	0.061 81	0.300 34	0.003 77	1.805	22	1 744	11	1 693	19	174	233	0.75
14YX05-04	0.075 90	0.000 91	1.929 17	0.026 08	0.184 35	0.002 24	1.092	25	1 091	9	1 091	12	47.5	480	0.10
14YX05-05	0.078 92	0.001 11	2.159 78	0.032 44	0.198 49	0.002 43	1.170	28	1 168	10	1 167	13	104	461	0.22
14YX05-06	0.076 63	0.000 95	1.986 69	0.027 64	0.188 04	0.002 31	1.112	25	1 111	9	1 111	13	42.7	247	0.17
14YX05-07	0.165 45	0.002 05	10.857 71	0.155 58	0.476 06	0.006 11	2.512	21	2 511	13	2 510	27	117	362	0.32
14YX05-08	0.071 70	0.000 89	1.616 71	0.022 75	0.163 54	0.002 05	977	26	977	9	976	11	146	309	0.47
14YX05-09	0.100 05	0.001 29	3.808 08	0.055 20	0.276 09	0.003 51	1.625	25	1 594	12	1 572	18	51.4	122	0.42
14YX05-10	0.074 83	0.000 99	1.763 07	0.025 73	0.170 90	0.002 12	1.064	27	1 032	9	1 017	12	201	261	0.77
14YX05-11	0.070 31	0.000 94	1.464 66	0.021 55	0.151 09	0.001 88	937	28	916	9	907	11	116	284	0.41
14YX05-12	0.105 93	0.001 24	4.539 05	0.060 53	0.310 82	0.003 78	1.731	22	1 738	11	1 745	19	75.8	394	0.19
14YX05-13	0.076 07	0.000 89	2.016 42	0.027 19	0.192 26	0.002 38	1.097	24	1 121	9	1 134	13	155	296	0.52
14YX05-14	0.074 18	0.001 12	1.972 86	0.031 46	0.192 90	0.002 39	1.046	31	1 106	11	1 137	13	358	761	0.47
14YX05-15	0.083 09	0.001 00	2.495 79	0.033 92	0.217 87	0.002 68	1.271	24	1 271	10	1 271	14	93.7	283	0.33
14YX05-16	0.085 59	0.000 99	2.515 85	0.033 74	0.213 20	0.002 65	1.329	23	1 277	10	1 246	14	180	501	0.36
14YX05-17	0.073 19	0.000 89	1.710 15	0.023 69	0.169 47	0.002 11	1.019	25	1 012	9	1 009	12	54.8	323	0.17
14YX05-18	0.072 62	0.001 35	1.678 44	0.033 51	0.167 82	0.002 42	1.003	39	1 000	13	1 000	13	222	1 021	0.22
14YX05-19	0.077 57	0.000 98	2.057 81	0.029 14	0.192 41	0.002 40	1.136	26	1 135	10	1 134	13	110	217	0.51
14YX05-20	0.060 60	0.000 81	0.848 99	0.012 58	0.101 62	0.001 28	625	29	624	7	624	7	129	267	0.48
14YX05-21	0.072 26	0.000 92	1.652 48	0.023 77	0.165 87	0.002 09	993	26	991	9	989	12	166	481	0.35
14YX05-22	0.077 33	0.001 00	2.308 69	0.033 76	0.216 56	0.002 75	1 130	26	1 215	10	1 264	15	90.1	613	0.15
混合花岗岩 15YX01															
15YX01-01	0.055 74	0.002 39	0.543 81	0.022 76	0.070 77	0.001 35	442	98	441	15	441	8	100	146	0.69
15YX01-02	0.057 27	0.001 21	0.564 33	0.012 50	0.071 47	0.001 06	502	48	454	8	445	6	107	174	0.61
15YX01-03	0.055 58	0.001 11	0.531 44	0.011 14	0.069 36	0.000 98	436	46	433	7	432	6	130	154	0.84
15YX01-04	0.056 93	0.001 37	0.543 44	0.013 29	0.069 24	0.001 02	489	54	441	9	432	6	58.8	138	0.43
15YX01-05	0.055 59	0.000 96	0.531 81	0.009 94	0.069 39	0.000 97	436	39	433	7	432	6	64.1	239	0.27
15YX01-06	0.055 55	0.001 03	0.528 36	0.010 44	0.068 99	0.000 97	434	42	431	7	430	6	55.0	195	0.28
15YX01-07	0.055 46	0.000 92	0.534 45	0.009 67	0.069 90	0.000 96	431	38	435	6	436	6	91.1	406	0.22
15YX01-08	0.055 24	0.001 05	0.535 63	0.010 90	0.070 33	0.001 02	422	43	436	7	438	6	178	302	0.59
15YX01-09	0.055 92	0.001 12	0.539 30	0.011 30	0.069 96	0.000 99	449	46	438	7	436	6	67.9	276	0.25
15YX01-10	0.055 91	0.001 37	0.539 04	0.013 64	0.069 94	0.001 09	449	56	438	9	436	7	864	456	1.89
15YX01-11	0.057 85	0.001 29	0.553 44	0.012 59	0.069 39	0.000 99	524	50	447	8	432	6	27.9	293	0.10
15YX01-12	0.055 54	0.001 10	0.536 09	0.011 21	0.070 01	0.001 02	434	45	436	7	436	6	95.2	323	0.30
15YX01-13	0.055 50	0.001 55	0.539 65	0.015 07	0.070 52	0.001 09	432	64	438	10	439	7	185	142	1.30

续表 1
Continued Table 1

分析点	同位素比值				年龄/Ma				$w_B/10^{-6}$		Th/U				
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		Th	U		
15YX01-14	0.056 41	0.001 01	0.548 47	0.010 50	0.070 52	0.000 98	469	41	444	7	439	6	80.8	326	0.25
15YX01-15	0.056 80	0.001 49	0.546 83	0.014 65	0.069 84	0.001 11	484	59	443	10	435	7	91.0	134	0.68
15YX01-16	0.055 68	0.000 96	0.534 59	0.009 95	0.069 63	0.000 96	440	39	435	7	434	6	29.9	420	0.07
15YX01-17	0.056 96	0.001 12	0.565 46	0.011 58	0.072 01	0.001 00	490	44	455	8	448	6	42.7	451	0.09
15YX01-18	0.056 29	0.001 09	0.556 25	0.011 36	0.071 68	0.001 00	464	44	449	7	446	6	62.5	326	0.19
15YX01-19	0.057 37	0.001 26	0.565 02	0.012 68	0.071 43	0.001 02	506	49	455	8	445	6	60.2	203	0.30
15YX01-20	0.056 03	0.001 43	0.556 79	0.014 64	0.072 08	0.001 15	454	58	449	10	449	7	82.4	757	0.11
15YX01-21	0.055 91	0.001 40	0.556 70	0.014 02	0.072 22	0.001 06	449	57	449	9	450	6	46.8	679	0.07
15YX01-22	0.055 99	0.001 06	0.554 72	0.011 25	0.071 86	0.001 04	452	43	448	7	447	6	60.2	452	0.13
15YX01-23	0.056 63	0.001 20	0.560 91	0.012 36	0.071 83	0.001 04	477	48	452	8	447	6	79.4	688	0.12
15YX01-24	0.055 89	0.000 95	0.551 19	0.010 23	0.071 54	0.001 01	448	39	446	7	445	6	297	283	1.05
15YX01-25	0.056 95	0.001 20	0.558 99	0.012 28	0.071 18	0.001 05	490	48	451	8	443	6	71.1	371	0.19
15YX01-26	0.055 84	0.001 62	0.539 16	0.015 55	0.070 05	0.001 09	446	66	438	10	446	7	83.5	203	0.41
15YX01-27	0.054 24	0.001 14	0.529 62	0.011 67	0.070 82	0.001 04	381	48	432	8	441	6	72.8	187	0.39
15YX01-28	0.055 08	0.000 89	0.542 30	0.009 51	0.071 41	0.000 97	415	37	440	6	445	6	49.5	311	0.16
15YX01-29	0.055 74	0.001 14	0.540 32	0.011 44	0.070 31	0.000 99	442	47	439	8	438	6	191	269	0.71
15YX01-30	0.056 08	0.001 14	0.553 34	0.011 81	0.071 57	0.001 05	456	46	447	8	446	6	78.3	402	0.19
15YX01-31	0.055 95	0.001 22	0.552 69	0.012 36	0.071 65	0.001 02	450	50	447	8	446	6	91.6	170	0.54
15YX01-32	0.053 80	0.001 18	0.532 35	0.012 03	0.071 77	0.001 04	363	51	433	8	447	6	70.1	172	0.41
15YX01-33	0.054 63	0.001 21	0.542 32	0.012 32	0.072 00	0.001 06	397	51	440	8	448	6	69.9	398	0.18
浅色体 15YX03															
15YX03-01	0.106 64	0.002 26	3.736 92	0.081 02	0.254 28	0.003 58	1743	40	1579	17	1461	18	854	891	0.96
15YX03-02	0.057 46	0.001 09	0.558 14	0.011 15	0.070 47	0.001 01	509	43	450	7	439	6	638	2151	0.30
15YX03-03	0.055 92	0.000 99	0.552 52	0.010 37	0.071 65	0.000 99	449	40	447	7	446	6	1089	1893	0.58
15YX03-04	0.071 81	0.001 17	1.608 50	0.028 13	0.162 46	0.002 18	981	34	974	11	970	12	100	548	0.18
15YX03-05	0.085 44	0.001 21	2.655 23	0.042 87	0.225 40	0.003 09	1326	28	1316	12	1310	16	77.2	416	0.19
15YX03-06	0.056 83	0.001 30	0.549 39	0.012 74	0.070 12	0.001 03	485	52	445	8	437	6	101	875	0.12
15YX03-07	0.055 06	0.002 05	0.542 54	0.019 69	0.071 46	0.001 26	415	85	440	13	445	8	266	786	0.34
15YX03-08	0.060 98	0.002 56	0.585 80	0.023 74	0.069 67	0.001 42	639	93	468	15	434	9	369	1346	0.27
15YX03-09	0.057 38	0.002 53	0.539 96	0.022 69	0.068 25	0.000 91	506	99	438	15	426	5	817	2170	0.38
15YX03-10	0.055 74	0.002 22	0.552 58	0.021 66	0.071 95	0.001 35	442	91	447	14	448	8	400	1090	0.37
15YX03-11	0.070 32	0.001 29	1.505 98	0.029 82	0.155 37	0.002 25	938	38	933	12	931	13	195	527	0.37
15YX03-12	0.055 50	0.000 85	0.528 24	0.009 38	0.069 04	0.001 00	432	35	431	6	430	6	292	932	0.31
15YX03-13	0.056 10	0.000 90	0.531 98	0.009 74	0.068 78	0.001 00	456	36	433	6	429	6	351	609	0.58
15YX03-14	0.055 49	0.000 85	0.530 56	0.009 36	0.069 36	0.001 00	432	35	432	6	432	6	307	855	0.36
15YX03-15	0.054 93	0.000 72	0.530 91	0.008 51	0.070 11	0.001 00	409	30	432	6	437	6	609	1434	0.42
15YX03-16	0.180 48	0.002 66	12.407 04	0.211 47	0.498 65	0.007 58	2657	25	2636	16	2608	33	125	99.0	1.27
15YX03-17	0.055 25	0.000 71	0.528 95	0.008 39	0.069 44	0.000 99	422	29	431	6	433	6	579	1855	0.31
15YX03-18	0.058 50	0.000 84	0.552 60	0.009 32	0.068 52	0.000 99	549	32	447	6	427	6	361	1207	0.30

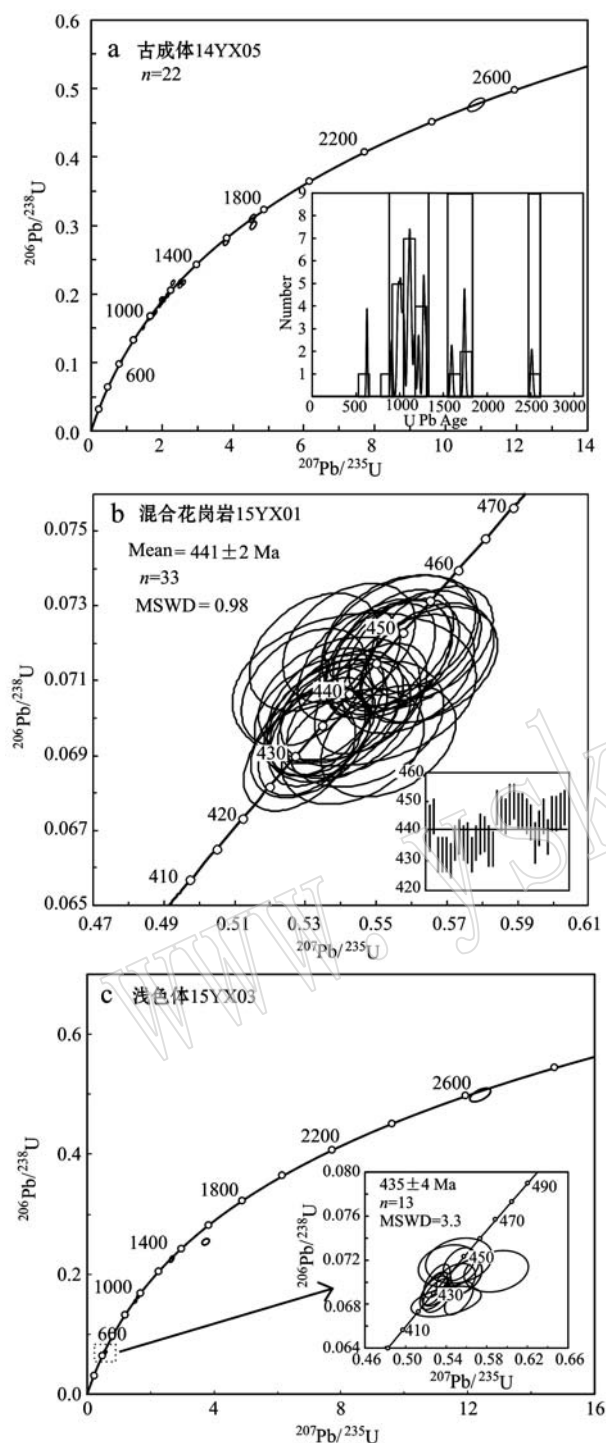


图5 福湖岭混合岩样品中锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 Concordia diagrams of LA-ICP-MS U-Pb dating for zircons from the studied migmatites in Fuhuling

中岩浆锆石进行了 33 个点的年龄分析, 年龄具有很好的谐和性, 大多落在谐和曲线上或附近。其谐和年龄变化范围为 456~430 Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 441 ± 2 Ma (MSWD=0.98) (图 5b)。

3.3 浅色体(15YX03)

样品 15YX03 中锆石主要呈自形长柱状, CL 图像发光较弱(图 4g, 4h), 少量锆石呈半自形结构。另外, 少数锆石呈核-边结构, 核部具有明亮的 CL 强度, 显示弱的振荡环带表明其受到了后期变质作用的影响。边部锆石 CL 发光较弱, 呈现弱环带特征, 表明其变质成因。

对 15YX03 样品中 18 个锆石进行 18 个测试点的分析显示, 除一颗锆石年龄不谐和外, 其它 17 颗锆石均落在谐和曲线上或附近(图 5c)。除去 4 颗继承锆石 (970 ± 12 Ma, 1316 ± 12 Ma, 931 ± 13 Ma, 2636 ± 16 Ma), 其测定位置均为具核-边结构的核部。其它 13 颗锆石的分析点为具核-边结构的锆石边部以及新生锆石, 年龄变化范围为 448~427 Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 435 ± 4 Ma (MSWD=3.3)。

4 讨论

4.1 原岩形成时代与物质组成

混合岩中继承锆石的 U-Pb 年龄研究可以用来约束混合岩原岩的形成时代与物源(如 Clemens, 2003), 分析显示粤西福湖岭混合岩中继承锆石包含最多的是新元古代的锆石, 峰值年龄与 Grenville 造山期相当, 岩石中还包含了形成于中元古代以及少量新太古代的锆石, 表明该地区存在新太古代的地壳物质。其中继承锆石中最年轻的谐和锆石年龄为 624 Ma, 表明混合岩原岩的形成时代不会早于该年龄。此外, 由于混合岩之上被寒武纪八村群地层覆盖, 且粤西福湖岭混合岩的变质程度明显高于寒武纪八村群地层的低级变质岩。由此推测, 福湖岭混合岩的原岩应是形成于新元古代的一套变质沉积岩, 由类似物质组成的新元古代沉积岩在华南华夏地块是普遍存在的。丁兴等(2005)报道古寨混合岩的锆石年龄谱表明其原岩形成于新元古代; 于津海等(2006)对粤东北龙川、兴宁和谭溪地区的变质岩研究表明其原岩的沉积时代被限定在新元古代; 南岭地区的增城以及粤西云开地区的基底变质岩的原岩形成时代均类似于福湖岭混合岩(于津海等, 2005, 2007; 刘锐等, 2008; Yu *et al.*, 2010)。

样品中继承锆石以富含 Grenville 期并含有一定数量的中元古代锆石为特征, 类似于华夏地块西部云开地区以及南岭地区的年龄分布特征, 表明混合

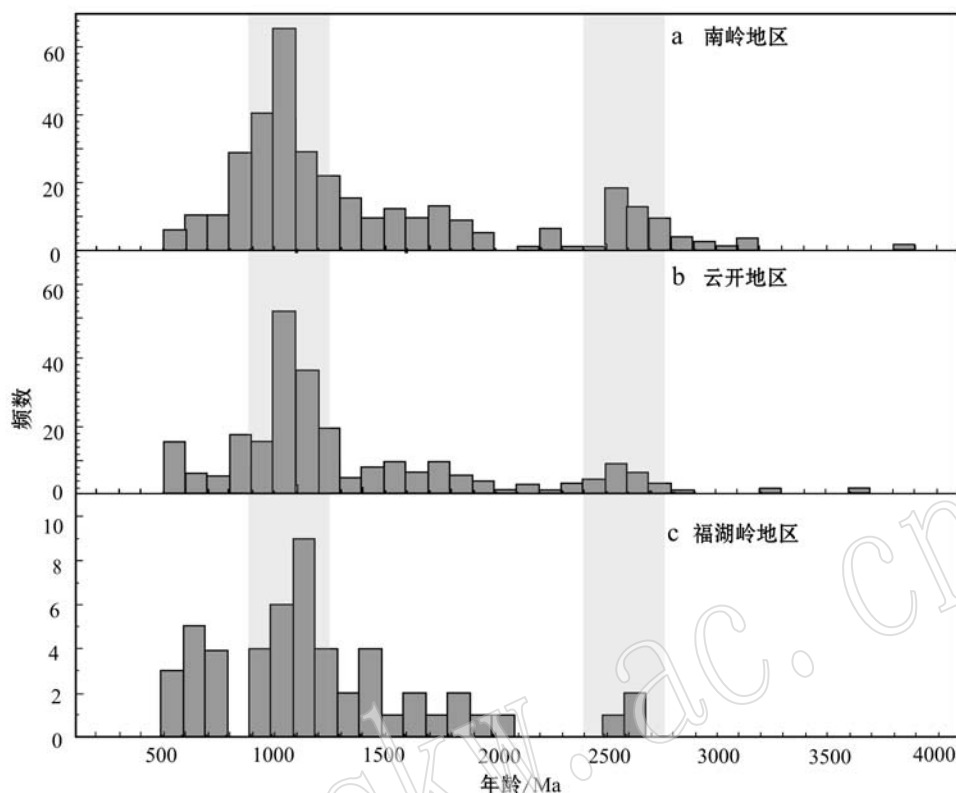


图 6 锆石年龄谱对比图

Fig. 6 Comparison of U-Pb age spectra of zircons

数据来源: 南岭地区(于津海等, 2007; Yu *et al.*, 2008, 2010; Xu *et al.*, 2005, 2007), 云开地区(周雪瑶等, 2014)

Data source: Nanling region(Yu Jinhai *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2008, 2010; Xu *et al.*, 2005, 2007), Yunkai terrane: (Zhou Xueyao *et al.*, 2014)

岩原岩的物源与云开及南岭地区相似(图 6)。Yu 等(2008)指出在新元古代晚期, 南岭地区靠近 Grenville 造山带, 该造山带可能发育在华夏地块南部, 为福湖岭地区混合岩中 Grenville 期锆石的主要来源。另外, 中元古代的锆石(1 600~1 200 Ma)大量存在于云开以及南岭地区的沉积岩中(Xu *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2008; 周雪瑶等, 2014)。

4.2 混合岩化作用时代

华夏地块早古生代发生了强烈的构造热事件, 变质岩、混合岩和花岗岩广泛发育, 近来的相关研究表明, 它们是板内造山作用致使地壳缩短加厚进而引发的地壳深熔作用的产物(王江海等, 1999; Xu *et al.*, 2005; Zeng *et al.*, 2008; 刘锐等, 2008; Liu *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2014b)。华夏板块东部浙江龙游片麻岩是华南早古生代现有的最古老的变质岩(460 Ma; Li *et al.*, 2010), 表明华夏地块早古生代造山作用开始时间不晚于 460 Ma。另外, Wan 等(2010)研究表明粤西云开地区高州杂岩中岩浆锆石

与变质锆石的年龄变化在 455~422 Ma 之间, 且在华夏板块西部云开地块广泛存在的造山运动晚期的花岗岩形成于约 420 Ma(Wang *et al.*, 2010), 证明在华夏板块早古生代造山运动持续了至少 40 Ma。这与 Li 等(2010)对武夷-云开造山带现有的年龄数据分析获得的 460~415 Ma 造山作用时间一致。粤西福湖岭混合岩中浅色体(15YX03)和混合花岗岩(15YX01)对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 435 ± 4 Ma 和 441 ± 2 Ma, 表明粤西福湖岭混合岩形成于早古生代, 是华南早古生代陆内造山事件的产物。

表 2 列举了前人对华夏地块早古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学测试数据, 其结果可信度较高。年龄统计结果显示, 早古生代混合岩化发生的时间主要集中在 450~415 Ma 之间, 而花岗岩岩浆作用峰期主要集中在 460~410 Ma, 表明华夏地块混合岩化作用与花岗岩岩浆作用形成时间近乎一致(图 7)。例如: 福建西北部的麻源混合岩杂岩体中变质作用

表2 华夏地块早古生代混合岩与花岗岩的年龄统计表

Table 2 List of collected ages of the early Paleozoic migmatites and granites in the Cathaysia Block

位置	岩体	岩性	年龄/Ma	测试手段	参考文献
早古生代混合岩					
浙江	松阳八都群蟹头组	混合岩	436±5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	陈正宏等, 2008
	捣臼湾组	混合岩	433±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	Li <i>et al.</i> , 2010
福建	福建北部	混合岩	440~435	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	刘锐等, 2008
	西天井坪组	混合岩	447±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	曾雯等, 2008
	西天井坪组	混合岩化角闪岩	446±5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2010
	麻源群	混合岩浅色体	439±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2010
	麻源群	混合岩化角闪岩	423±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Li <i>et al.</i> , 2011
江西	黎川	混合岩	454±11	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	永丰	混合岩	452±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	诸广	混合岩	425±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Xu <i>et al.</i> , 2005
	菖蒲	混合岩	446±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	徐先兵等, 2009
	周潭群	混合岩化角闪岩	435±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Li <i>et al.</i> , 2011
广东	福湖岭	混合岩	441~435	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	本文
	高州	混合岩	456~438	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
早古生代花岗岩					
浙江	下湾	二长花岗岩	413±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Xia <i>et al.</i> , 2014a
	墩头	花岗闪长岩	411~409	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Xia <i>et al.</i> , 2014a
	庆元	片麻状花岗岩	430±9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
福建	四堡	花岗岩	432±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	Li <i>et al.</i> , 2010
	宁化	黑云母花岗岩	448±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	张爱梅等, 2010
	桃溪	片麻状花岗岩	438±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	张爱梅等, 2010
	连城玮埔	花岗岩	427±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	陈正宏等, 2008
	黄坑	黑云母花岗岩	438±5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2010
	麻沙	淡色花岗岩	442±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2010
	山庄	二长花岗岩	424±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
江西	山庄	黑云母二长花岗岩	441±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	张家坊	黑云母二长花岗岩	440±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	明月山	片麻状花岗岩	445±8	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	南庙	片麻状花岗岩	455±9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	福坑	片麻状花岗岩	424±6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	黄坡	片麻状花岗岩	410±10	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	板杉铺	二长花岗岩	418±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
湖南	宏夏桥	花岗闪长岩	432±6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	彭公庙	二长花岗岩	405±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	苗儿山	二长花岗岩	400±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	苗儿山	二长花岗岩	415±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	苗儿山	二长花岗岩	415±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
广东	高州	紫苏花岗岩	439±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013
	云炉	紫苏花岗岩	450±10	单颗粒锆石 TIMS	陈斌等, 1994
	信宜	黑云母二长花岗岩	467~465	SHRIMP 锆石 U-Pb	彭松柏等, 2006
	信宜	片麻状花岗岩	443~430	SHRIMP 锆石 U-Pb	Wan <i>et al.</i> , 2010
	金垌	片麻状花岗岩	449±5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	石窝	片麻状花岗岩	415±7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
广西	大宁	钾长石花岗岩	419±6	SHRIMP 锆石 U-Pb	程顺波等, 2009
	海洋山	黑云母二长花岗岩	431±7	SHRIMP 锆石 U-Pb	程顺波等, 2012
	海洋山	黑云母二长花岗岩	429±11	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2012
	钦甲	黑云母钾长石花岗岩	412±2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011
	新寨	黑云母二长花岗岩	439±2	单颗粒锆石 TIMS	唐专红等, 2003

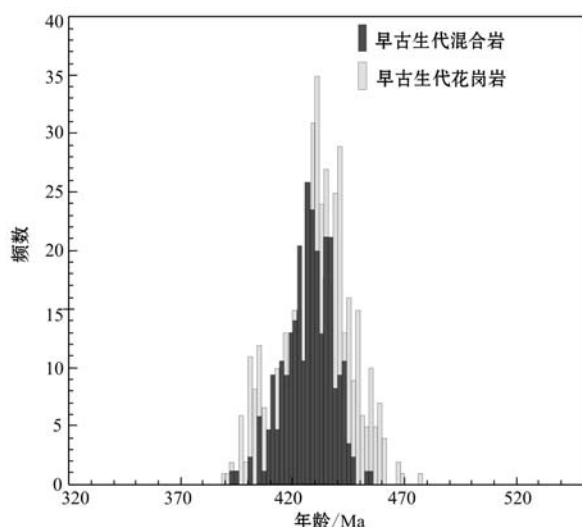


图 7 华夏早古生代混合岩和花岗岩锆石年龄谱对比图

Fig. 7 Comparison of zircon U-Pb age spectra of the early paleozoic migmatites and granites in the Cathaysia Block
数据来源: 混合岩(Xu *et al.*, 2005; 曾雯等, 2008; 徐先兵等, 2009; Li *et al.*, 2010, 2011; Liu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; 本文); 花岗岩(Li *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2014a)

Data source: migmatites (Xu *et al.*, 2005; Zeng Wen *et al.*, 2008; Xu Xianbing *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009, 2011; Liu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; this study); granites (Li *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2014a)

开始于 453 Ma, 而杂岩体混合岩中浅色体年龄约 439 Ma, 花岗岩年龄为 442~438 Ma, 并且该区域内的变质作用、深熔作用和岩浆作用是受华夏地块早古生代造山运动影响日益加深的不同响应(Liu *et al.*, 2010)。徐先兵等(2009)报道了福建菖蒲混合岩的定年结果为 446 ± 4 Ma, 玮埔花岗岩的定年结果为 447~441 Ma, 且花岗岩与混合岩呈交代侵入接触关系。另外, 武夷地区和云开地区的花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄值为 457~415 Ma, 峰值为 436 Ma(Wang *et al.*, 2011)。Wan 等(2010)对高州杂岩中岩浆锆石与变质锆石的研究表明其年龄变化范围在 455 Ma 至 422 Ma 之间, 这与 Wang 等(2013)对云开地区的混合岩与紫苏花岗岩的年龄研究结果一致(440~425 Ma)。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明, 粤西福湖岭混合岩的原岩是新元古代的变质沉积岩, 原岩中含有太古代的地壳物质成分。

(2) 粤西福湖岭混合岩的形成时代为 441~435 Ma, 表明该地区混合岩形成于早古生代, 是华夏地块早古生代陆内造山事件的重要产物。

(3) 华夏地块早古生代混合岩化作用与岩浆作用近于同时发生, 具有十分密切的成因联系。

致谢 审稿专家以及编辑认真评阅本文, 并提出宝贵意见, 在此深表感谢!

References

- Andersson J, Möller C and Johansson L. 2002. Zircon geochronology of migmatite gneisses along the Mylonite Zone (S Sweden): A major Sveconorwegian terrane boundary in the Baltic Shield[J]. *Precambrian Research*, 114: 121~147.
- Black L P and Gulson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways range, Northern Territory[J]. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3): 227~232.
- Brown M. 2001. Orogeny, migmatites and leucogranites: A review[J]. *Journal of Earth System Science*, 110(4): 313~336.
- Brown M. 2004. The mechanism of melt extraction from lower continental crust of orogens[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 95(1~2): 35~48.
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences[J]. *Journal of the Geological Society*, 163: 709~730.
- Burda J and Gaweda A. 2009. Shear-influenced partial melting in the Western Tatra metamorphic complex: geochemistry and geochronology[J]. *Lithos*, 110: 373~385.
- Charvet J, Shu L S, Faure M, *et al.* 2011. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 309~330.
- Chen Bin and Huang Fusheng. 1994. On the origin of migmatites Yunlu, Western Guangdong Province[J]. *Acta Geological Sinica*, 68(3): 231~240(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenghong, Lee Chiyu, Hsieh Peishan, *et al.* 2008. Approaching the age problem for some metamorphosed Precambrian basement rocks and Phanerozoic granitic bodies in the Wuyishan area: the application of EMP monazite age dating[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 1~15(in Chinese with English abstract).

- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Chen Xiqing, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geochemical characteristics of Haiyangshan Monzogranitic Batholith, Northeast Guangxi[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(2): 132~140 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Xu Deming, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith in northeast Guangxi[J]. *Geology in China*, 36(6): 1 278~1 288 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth Science Review*, 61: 1~18.
- Ding Xing, Zhou Xinmin and Sun Tao. 2005. The episodic growth of the continental crustal basement in South China: single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Guzhai granodiorite in Guangdong[J]. *Geological Review*, 51(4): 382~392 (in Chinese with English abstract).
- Foster D A, Schafer C and Fanning C M. 2001. Relationships between crustal partial melting, plutonism, orogeny, and exhumation: Idaho-Bitterroot batholith[J]. *Tectonophysics*, 342: 313~350.
- Li L M, Sun M, Wang Y J, *et al.* 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from migmatized amphibolites in the Cathaysia Block: Implications for the early Paleozoic peak tectonothermal event in South-eastern China[J]. *Gondwana Research*, 19: 191~201.
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, *et al.* 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, south-eastern South China: new age constraints and pressure-temperature conditions [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 772~793.
- Liu F L, Robinson P T and Liu P H. 2012. Multiple partial melting events in the Sulu UHP terrane: zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within amphibolite and gneiss[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(8): 887~906.
- Liu Q, Wu Y B, Wang H, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatites from the North Qinling terrane and their geological implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32: 177~193.
- Liu Rui, Zhang Li, Zhou Hanwen, *et al.* 2008. Petrogenesis of the Caledonian migmatites and related granites in northwest Fujian Province, South China: syn-deformational crustal anatexis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 205~1 222 (in Chinese with English abstract).
- Liu R, Zhou H W, Zhang L, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions 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: 163~180.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211: 47~69.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.00: A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley 70.
- McLellan E. 1984. Deformational behaviour of migmatites and problems of structural analysis in migmatite terrains[J]. *Geological Magazine*, 121(4): 339~345.
- Olsen S N, Marsh B D and Baumgartner L P. 2004. Modelling mid-crustal migmatite terrains as feeder zones for granite plutons: the competing dynamics of melt transfer by bulk versus porous flow[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 95(1~2): 49~58.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Liu Yunhua, *et al.* 2006. Geochemical characteristics of basic intrusive rocks in the Yunkai uplift, Guangdong-Guangxi, China, and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 434~441 (in Chinese with English abstract).
- Rubatto D, Williams I S and Buic I S. 2001. Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(4): 458~468.
- Sawyer E W. 1991. Disequilibrium melting and the rate of melt-residuum separation during migmatization of mafic rocks from the Grenville front, Quebec[J]. *Journal of Petrology*, 32: 701~738.
- Sawyer E W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites[J]. *Journal of Petrology*, 39: 1 147~1 167.
- Sawyer E W and Chicoutimi C. 2008. Working with migmatites[M]. Independent.
- Sederholm J J. 1907. Om Granit Och Gneiss, Deras Uppkomst, Uppträdande Och Utbredning Inom Urberget I Fennoskandia[M]. Bull. Commission géologique de Finlande, 23: 110.
- Solar G S, Pressley R A, Brown M, *et al.* 1998. Granite ascent in convergent orogenic belts: testing a model[J]. *Geology*, 26(8): 711~714.
- Tang Zhuanhong and Li Rongsen. 2003. The geology characteristics

- and explore evolution model of Xingzhai plutons in the North of Guangxi[A]. South China Youth Geoscience Symposium[C]. 136~140(in Chinese with English abstract).
- Van Achterbergh E, Ryan C G, Jackson S E, *et al.* 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS: Appendix[A]. Sylvester P J. Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry in the Earth Sciences: Principles and Applications: Mineralog[M]. Assoc. Canada Short Course Series, Ottawa, 239~243.
- Wan Y, Liu D, Wilde S A, *et al.* 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 37(2): 140~153.
- Wang Jianghai, Tu Xianglin and Sun Dazhong. 1999. U-Pb dating of anatectic migmatites at Gaozhou in the Yunkai Block, western Guangdong, China[J]. Geochimica, 28(3): 231~238(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, *et al.* 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block[J]. Gondwana Research, 12(4): 404~416.
- Wang Y J, Zhang A M, Cawood P A, *et al.* 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an Early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia[J]. Precambrian Research, 249: 144~161.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, *et al.* 2011. Kwangsiian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains[J]. Lithos, 127: 239~260.
- Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, *et al.* 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. Tectonics, 29(6): TC6020.
- White R W, Pomeroy N E and Powell R. 2005. An in situ Metatextite-diatextite transition in upper amphibolite facies rocks from Broken Hill, Australia[J]. Journal of Metamorphic Geology, 23: 579~602.
- Wu Y B, Zheng Y F, Zhang S B, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: constraints on partial melting[J]. Journal of Metamorphic Geology, 25: 991~1 009.
- Xia B, Zhang L F and Bader T. 2014a. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic analyses of migmatite from the "paired metamorphic belt" in Chinese SW Tianshan: Constraints on partial melting associated with orogeny[J]. Lithos, 192~195.
- Xia Y, Xu X S, Zou H B, *et al.* 2014b. Early Paleozoic crust-mantle interaction and lithosphere delamination in South China Block: evidence from geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes of granites[J]. Lithos, 184~187, 416~435.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liangshu, *et al.* 2009. Zircon LA-ICP MS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in Southwest Fujian and the Changpu migmatite in South Jiangxi: constrains to the timing of Caledonian Movement in Wuyi Mountains[J]. Geology Review, 55(2): 277~285(in Chinese with English abstract).
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2005. Relict Proterozoic basement in the Nanling Mountains (SE China) and its tectonothermal overprinting[J]. Tectonics, 24: TC2003.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes[J]. Precambrian Research, 158(1): 51~78.
- Yu Jinhai, O'Reilly S Y and Wang Lijuan. 2007. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust[J]. Chinese Science Bulletin, 52(1): 13~22(in Chinese with English abstract).
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, *et al.* 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent? Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons[J]. Precambrian Research, 164(1~2): 1~15.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, *et al.* 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments[J]. Precambrian Research, 181(1~4): 97~114.
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Zhou Xinmin *et al.* 2006. Compositions and formation history of the basement metamorphic rocks in northeastern Guangdong province[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 31(1): 38~48(in Chinese with English abstract).
- Yu J H, Wang L, 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, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, *et al.* 2005. U-Pb-Th isotope compositions of zircons from granulite-fac metamorphic basement in

- the East Nanling: implications for geochronology and petrogenesis of the protoliths[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50: 1 758~1 767 (in Chinese).
- Yu S Y, Zhang J X, Sun D Y, *et al.* 2015. Petrology, geochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope of granitic leucosomes within felsic gneiss from the North Qaidam UHP terrane: Constraints on the timing and nature of partial melting[J]. *Lithos*, 218~219: 1~21.
- Zeh A, Gerdes A, Barton J, *et al.* 2010. U-Th-Pb and Lu-Hf systematics of zircon from TTG's, leucosomes, meta-anorthosites and quartzites of the Limpopo Belt (South Africa): Constraints for the formation, recycling and metamorphism of Palaeoarchaean crust[J]. *Precambrian Research*, 179(1~4): 50~68.
- Zeng Wen, Zhang Li, Zhou Hanwen, *et al.* 2008. Caledonian reworking of Paleoproterozoic basement in the Cathaysia Block: Constraints from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements[J]. *Science Bulletin*, 53(6): 895~904 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Aimei, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronology and Hf isotope compositions of Caledonian granites from the Qingliu area, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(3): 408~418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F F, Wang Y J, Zhan A M, *et al.* 2012. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of middle Paleozoic (Kwanghsian) massive granites in the eastern South China Block[J]. *Lithos*, 150: 188~208.
- Zhou Xueyao, Yu Jinhai, Wang Lijuan, *et al.* 2014. Compositions and formation of the basement metamorphic rocks in Yunkai terrane, western Guangdong Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 855~882.
- 陈 斌, 黄福生. 1994. 粤西云炉地区混合岩的成因研究[J]. *地质学报*, 68(3): 231~240.
- 陈正宏, 李寄岬, 谢佩珊, 等. 2008. 利用 EMP 独居石定年法探讨浙闽武夷山地区变质基底岩石与花岗岩的年龄[J]. *高校地质学报*, 14(1): 1~15.
- 程顺波, 付建明, 陈希清, 等. 2012. 桂东北海洋山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年和地球化学研究[J]. *华南地质与矿产*, 28(2): 132~140.
- 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 2009. 桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究[J]. *中国地质*, 36(6): 1 278~1 288.
- 丁 兴, 周新民, 孙 涛. 2005. 华南陆壳基底的幕式生长——来自广东古寨花岗岩闪长岩中锆石 LA-ICPMS 定年的信息[J]. *地质论评*, 51(4): 382~392.
- 刘 锐, 张 利, 周汉文, 等. 2008. 闽西北加里东期混合岩及花岗岩的成因: 同变形地壳深熔作用[J]. *岩石学报*, 24: 1 205~1 222.
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 等. 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 31(1): 110~120.
- 唐卓红, 李容森. 2003. 桂北新寨复式岩体地质特征及侵位机制初探[C]. 华南青年地学学术研讨会.
- 王江海, 涂湘林. 1999. 粤西云开地块内高州地区深熔混合岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. *地球化学*, 28(3): 231~238.
- 徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 等. 2009. 闽西南玮埔岩体和赣南莒蒲混合岩锆石 La-ICPMS U-Pb 年代学: 对武夷山加里东运动时代的制约[J]. *地质评论*, 55(2): 277~285.
- 于津海, O'Reilly S Y, 王丽娟, 等. 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成[J]. *科学通报*, 52(1): 11~18.
- 于津海, 王丽娟, 周新民, 等. 2006. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代[J]. *地球科学*, 31(1): 38~48.
- 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): 1 758~1 767.
- 曾 雯, 张 利, 周汉文, 等. 2008. 华夏地块元古代基底的加里东期再造: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素制约[J]. *科学通报*, 3: 335~344.
- 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2010. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. *大地构造与成矿学*, 34(3): 408~418.
- 周雪瑶, 于津海, 王丽娟, 等. 2014. 粤西云开地区基底变质岩的组成和形成[J]. *岩石学报*, 31(3): 855~882.

附中文参考文献