

云开地区加里东期花岗岩 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

王 磊 龙文国 周 岱

(中国地质调查局武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430223)

摘要:对云开地区 1:25 万区调中划归前寒武纪或新元古代的(片麻状)花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得的年龄分别为(443.3±2.6)Ma(样品 1009, 陆川县陆透水库东南)、(445.7±2.3)Ma(样品 1010, 陆川县月桐村)、(441.1±2.0) Ma(样品 1012, 高州市谢鸡镇)和(443.7±1.7)Ma(样品 10108, 信宜市朱砂镇), 表明它们属于加里东期的产物而不是以往认为的前寒武纪基底或新元古代岩石。结合前人的研究表明, 这些花岗岩主要由元古宙基底岩石发生深熔作用而成, 是华南地区加里东期陆内造山作用的响应。随着云开地区前寒武纪基底中大量加里东期年龄的发现, 说明加里东运动对该区的影响非常强烈, 1:25 万区调中划归前寒武纪基底或新元古代的部分片麻状花岗岩应归属加里东期。云开地区前寒武纪基底主要是以片麻岩类为代表的高州杂岩和以变沉积岩类为代表的云开群, 高州杂岩形成时代为中新元古代, 云开群形成时代可能为新元古代。从整个华夏地块来看, 存在古—中元古代结晶基底, 但出露可能并不像以往认为的那么广泛。

关键词:前寒武纪基底; 花岗岩; 加里东期; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 年龄; 云开地区

中图分类号: P587; P597+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)04-1016-14

扬子地块和华夏地块在新元古代拼合成华南陆块^[1-5], 随后发生了裂解, 但并未形成新的洋壳, 华南陆块自新元古代后进入陆内演化阶段, 早古生代的加里东运动和中生代的印支运动均为陆内造山作用^[6-14]。扬子地块的结晶基底主要由太古宙崆岭群和古元古代物质组成^[15-17], 其东南缘褶皱基底由冷家溪群及同时代的四堡群、梵净山群、双桥山群等组成^[3-4, 18]。华夏地块的基底以往认为主要由古元古代的八都群、麻源群、云开群和周潭群等组成, 岩性包括片岩、片麻岩、角闪岩、混合岩和变火山岩等^[10, 19-21]。近年来, 于上述华夏地块的前寒武纪基底岩石中获得了不少新元古代甚至更年轻的锆石年龄(包括变质年龄和岩石形成年龄)^[9-11, 22-28], 获得的古元古代或更老的年龄数据较少^[11, 20, 29-32], 从而引起人们对华夏古陆是否存在的争议。Wan et al.^[23-24]、Wang et al.^[9, 25]和 Li et al.^[11]通过对华夏地块前寒武纪基底的研究, 提出该区以

往的基底岩石单元“群”应被修正为“杂岩”, 其时代归属还有待进一步的探讨。

两广交界的云开地区是华夏地块前寒武纪基底出露的主要地区之一。学者们对该区基底的划分及时代归属、花岗岩和混合岩的成因、时代及形成背景等开展过一些研究^[33-42], 以往的研究结果一直认为云开地区的基底主要形成于古元古代到中新元古代。近年来, 在该区基底岩石中陆续报道了一些加里东期年龄^[8-10, 22, 24-25, 28], 除一部分为变质年龄外, 主要为变质岩、花岗岩和混合岩的形成年龄。这些新的高精度年龄的获得, 使得云开地区乃至整个华夏地块的基底划分及时代归属重新成为了研究焦点。本研究中, 采用 LA-ICP-MS 技术, 对云开地区 4 个片麻状花岗岩(1:25 万区调中 3 个划归前寒武纪基底、1 个划归新元古代花岗岩)中的锆石进行了 U-Th-Pb 同位素测定, 均获得了 440 Ma 左右的加里东期

收稿日期: 2012-08-08; 改回日期: 2012-12-14

基金项目: 中国地质调查局基础地质综合研究项目“软杭成矿带(西段)基础地质调查综合研究”(1212011085416)资助。

作者简介: 王磊, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 从事岩石学、矿床学和大地构造研究; E-mail: cugleiwang@gmail.com。

年龄,结合在这类基底岩石(包括花岗岩、变质岩和混合岩)中已获得的加里东期年龄等数据,进一步探讨了云开地区前寒武纪基底的时代归属。

1 地质背景

云开地块位于广东西部和广西东部交界地区,呈北东-南西向展布,东西两侧界限分别为吴川—四会断裂带和岑溪—博白断裂带,大地构造上被认为是华夏地块中武夷—云开加里东褶皱带或武云造山带的西南部分^[1](图 1-a)。云开地块长期被认为是高级改造的古元古代到中元古代深层次基底岩石、中等变质的晚新元古代到早古生代浅层次变质基底的出露区,盖层岩石由弱变质到未变质的寒武纪—泥盆纪地层组成^[38]。此外,还出露一些古生代到早中生代沉积物及大量的花岗质岩石^[9,39,43-44]。其中有些岩石被后期二叠纪—三叠纪(P-T)、侏罗纪(J)、白垩纪(K)的花岗岩侵入^[28](图 1-b)。深层变质基底岩石主要出露在高州地区,因而也被称为高州杂岩;浅层次基底岩石分布更为广泛,为云开群的主体^[28]。也有学者采用下、上部基底^[25]和高级变质基底、浅变质基底^[24],分别大致对应钟增球等^[38]提出的深层变质基底和浅层变质基底。覃小锋等^[22]将该区前寒武纪变质杂岩解体为古元古代天堂山岩群、中新元古代云开岩群和新元古

代变形变质深成侵入岩。天堂山岩群大致对应深层变质基底,后两者大致对应浅层变质基底。其中,新元古代侵入岩主要由片麻状(眼球状)黑云母二长花岗岩和花岗质片麻岩组成^[22]。近来有些学者提出这些新元古代的岩石形成于早古生代加里东期^[9,24,28]。

深变质的高州杂岩,主要由角闪岩相(局部为麻粒岩相)、表壳岩石和混合岩组成。表壳岩石主要由副片麻岩、片岩、石英岩和大理岩组成。麻粒岩相的变沉积物中聚集夕线石+石榴石+堇青石,显示了一个低压的特征。它们的原岩为泥砂质岩石(并有少量碳酸盐岩)、基性-酸性的火山-沉积岩^[24]。岩石多发生一定程度的混合岩化,沿面理方向常有长英质脉体贯入,受变形作用的改造,长英质脉体普遍发生透镜化、石香肠化,深层次的剪切流变作用十分发育^[22]。浅变质的基底围绕高州杂岩分布,由以往认为的云开群、早古生代到志留纪地层组成^[24]。其中,云开群为一套变质的陆缘碎屑岩,主要由片岩、板岩、千枚岩,以及一些副片麻岩、角闪岩和大理岩组成,夹少量碳酸盐岩和基性-酸性火山岩^[22,24,38]。岩石变质程度相对较低,以浅变质的绿片岩相为主,局部达到低角闪岩相;原岩为泥砂质岩石、基性-酸性火山-沉积岩^[24]或一套类复理石-复理石建造^[22]。

最近,覃小锋等^[22]在天堂山岩群(即高州杂岩)

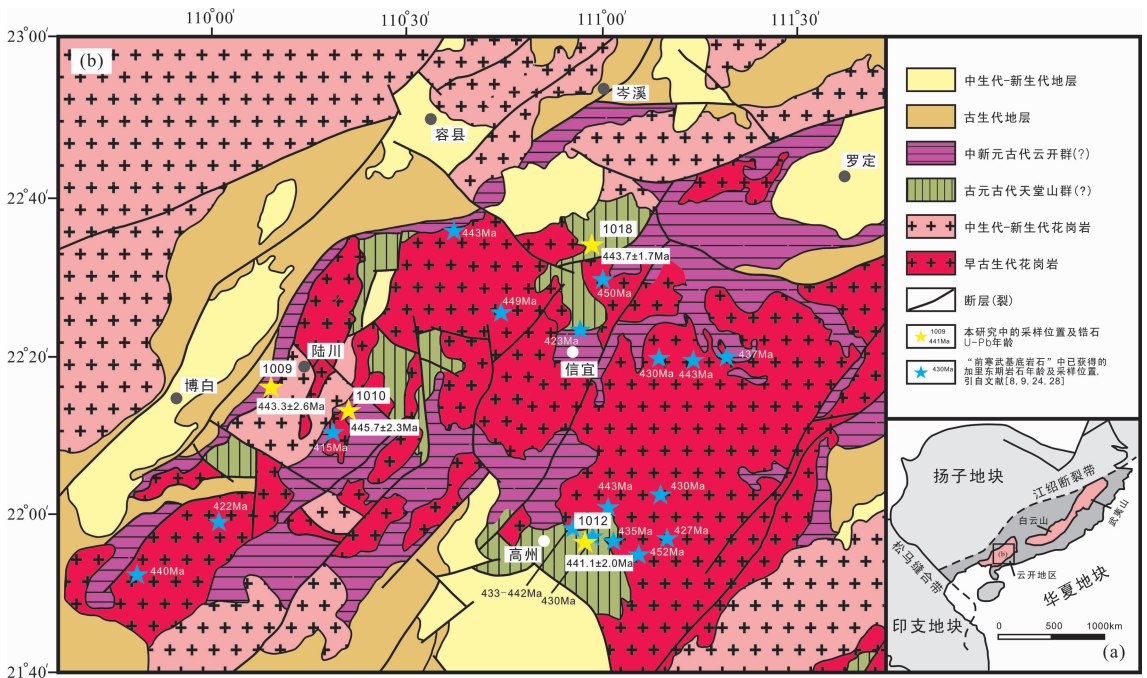


图 1 云开地区地质图 (据文献[22, 24, 28]修改)
Fig.1 Geological map of Yunkai area (after References [22, 24, 28])

和云开群的岩石中获得了 439~455 Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,将其解释为变质年龄。Wan et al.^[24] 在高州杂岩中获得了大约 440 Ma 的变质锆石年龄,以及主要集中在 800~1200 Ma 的老锆石年龄。Wang et al.^[25] 在云开群的一个副片麻岩中获得 (423±7)Ma 的岩浆锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄,以及 522~2619 Ma 的老锆石年龄;Wang et al.^[9] 在云开群中获得 3 个正片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 443~452 Ma, 2 个花岗岩年龄为 (449±5)Ma 和 (415±7)Ma。Wang et al.^[10] 测定的云开群中含石榴石角闪岩和麻粒岩包体的变质年龄分别为 (446±12)Ma 和 (428±18)Ma,前者形成年龄为 (785±36)Ma。Chen et al.^[11] 在高州杂岩的高温麻粒岩、片麻岩和紫苏花岗岩中测定的锆石 U-Pb 年龄和独居石 EMP 年龄为 428~443 Ma。叶真华等^[14]采用 Ar-Ar 法获得云开群炭质千枚岩中薄层硅质岩形成年龄为 (872±8.6)Ma。Wan et al.^[24]获得侵入高州杂岩和云开群中的 3 个花岗岩形成年龄为 430~443 Ma,也对其形成时代进行了约束。另外,以往认为云开地区的混合岩形成于早新元古代^[33,36]、加里东期和海西期^[34,40,43]、印支期^[35];最近,Wang et al.^[9]采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法获得

高州地区混合岩中淡色体形成年龄为 (435±8)Ma。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

本次研究共采集 4 个花岗岩样品用于锆石 U-Pb 定年,采样位置见图 1-a。样品 1009、1012 和 1018 在 1:25 万玉林幅、阳春幅区调中划归前寒武纪天堂山岩群或云开群,样品 1010 在 1:25 万玉林幅区调中划归新元古代侵入岩。其中,样品 1009 采自陆川县陆透水库东南 (110°12'2.0", 22°16'7.4"), 岩性为浅灰色-浅黄色中细粒片麻状黑云母二长花岗岩,岩石呈中细粒结构,片麻状构造,风化严重(图 2-a);样品 1010 采自陆川县月垌村 (110°20'9.9", 22°14'11.8"), 岩性为灰白色中细粒片麻状黑云母二长花岗岩,岩石呈中粒结构,片麻状构造(图 2-b),矿物组成为(图 2-c):石英(±25%)、斜长石(±35%)、钾长石(±30%)、黑云母(±8%)和其他(±2%);样品 1012 采自高州市谢鸡镇 (110°58'51.4"E, 21°55'17.2"N), 岩性为浅灰白色-浅肉红色中粗粒片麻状含斑黑云母二长花岗岩,岩石呈中粗粒结构,片麻状构造(图 2-d)。局部见糜棱岩化,钾长石斑晶被挤压破

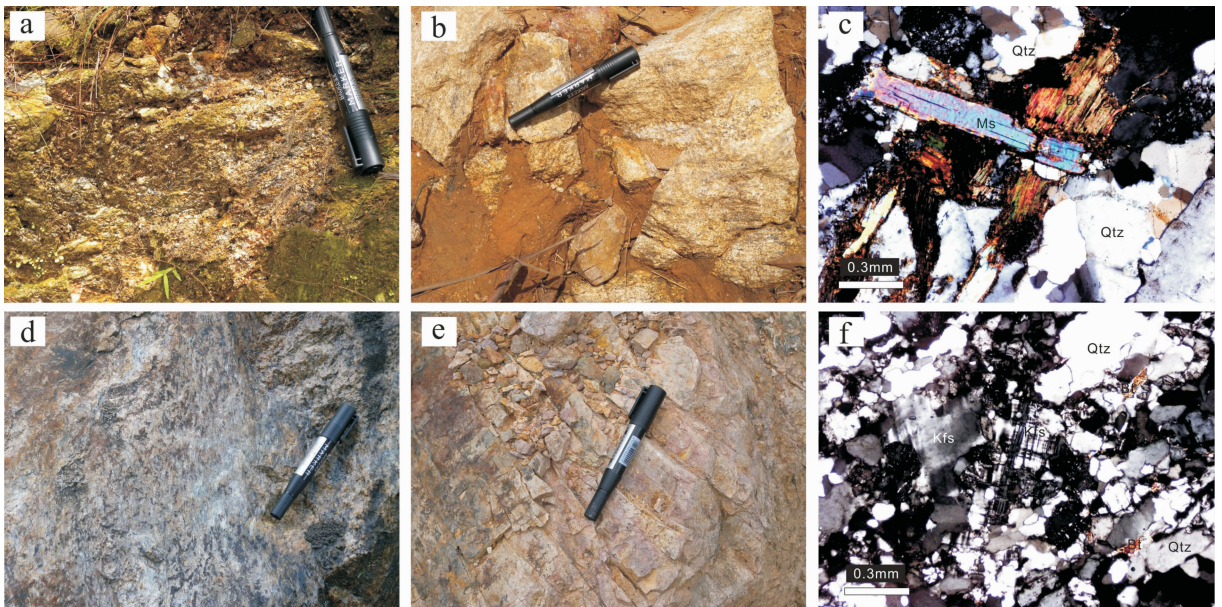


图 2 云开地区花岗岩定年样品及显微照片

a—片麻状黑云二长花岗岩(样品 1009); b、c—片麻状黑云二长花岗岩及显微照片(样品 1010); d—含斑黑云二长花岗岩(样品 1012); e、f—中细粒二长花岗岩及显微照片(样品 1018); Bt—黑云母; Ms—白云母; Qtz—石英; Kfs—钾长石

Fig.2 Photographs and photomicrographs of the dated granite samples in the Yunkai area

a—Gneissic biotite monzogranite (sample 1009); b and c—Gneissic biotite monzogranite and its photomicrograph (sample 1010); d—Biotite monzogranite (sample 1012); e and f—Fine-medium grained monzogranite and its photomicrograph (sample 1018)

Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Qtz—Quartz; Kfs—potassium feldspar

碎;样品 1018 采自信宜市朱砂镇(110°58'3.8"E,22°33'55.9"N),岩性为浅肉红色中细粒二长花岗岩,岩石呈细粒结构,块状构造(图 2-e),矿物组成为(图 2-f):石英(±35%)、斜长石(±20%)、钾长石(±35%)、黑云母(±5%)和其他(±5%)。

2.2 分析方法

锆石分选在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。在测试之前,先在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)进行透射光和反射光拍照,并利用 JEOL JXA-8100 型电子探针对锆石进行阴极发光(CL)照相。锆石 U-Th-Pb 同位素测试在 GPMR 利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)完成。测试过程中采用束斑直径为 32 μm。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^[45-46]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu et al.^[45-47]。所有锆石分析点的 U-Pb 同位素体系均较谐和,利用 Andersen^[48]的普通铅校正程序 ComPbCon#3-151 进行校正时,同位素结果基本未发生改变,表明普通铅含量很低。锆石 U-Pb 年龄计算及谐和图均采用 Isoplot/Ex_ver3^[49]完成。此次将 GJ01 作为未知年龄锆石进行了测试,

拟合的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (600.3±2.8)Ma (MSWD=0.16,n=16)。

3 分析结果

样品 1009(片麻状黑云母二长花岗岩)中的锆石呈半自形到自形状,部分锆石为碎块;恢复形态后,主要为短柱状(长 80~150 μm,宽 50~100 μm)和长柱状(长 100~200 μm,宽 50~80 μm)。CL 图像揭示绝大多数锆石具有清楚的振荡环带,为典型的岩浆锆石^[50-51],部分锆石存在明显的核-边结构,核部具有较强的发光性,无明显的结构,少数可见残留的岩浆环带(图 3-a)。对其中 15 颗锆石进行了 16 个点的测年,样品均落在谐和线或其附近(表 1,图 4-a)。13 个分析点岩浆环带清楚,其中 11 个分析点 Th 和 U 含量变化范围分别为 63×10⁻⁶~266×10⁻⁶ 和 198×10⁻⁶~574×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.13~0.72, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 (439±4) Ma~(447±5) Ma,其加权平均值为(443.3±2.6) Ma(MSWD=0.22),代表了花岗岩形成年龄;11 号分析点 Th 和 U 含量为 181×10⁻⁶ 和 1509×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.12, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (404±4)Ma,未参加平均值计算;7 号分析点 Th 和 U 含量为 350×10⁻⁶ 和 699×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.50, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (861±10)Ma,为新元古代继

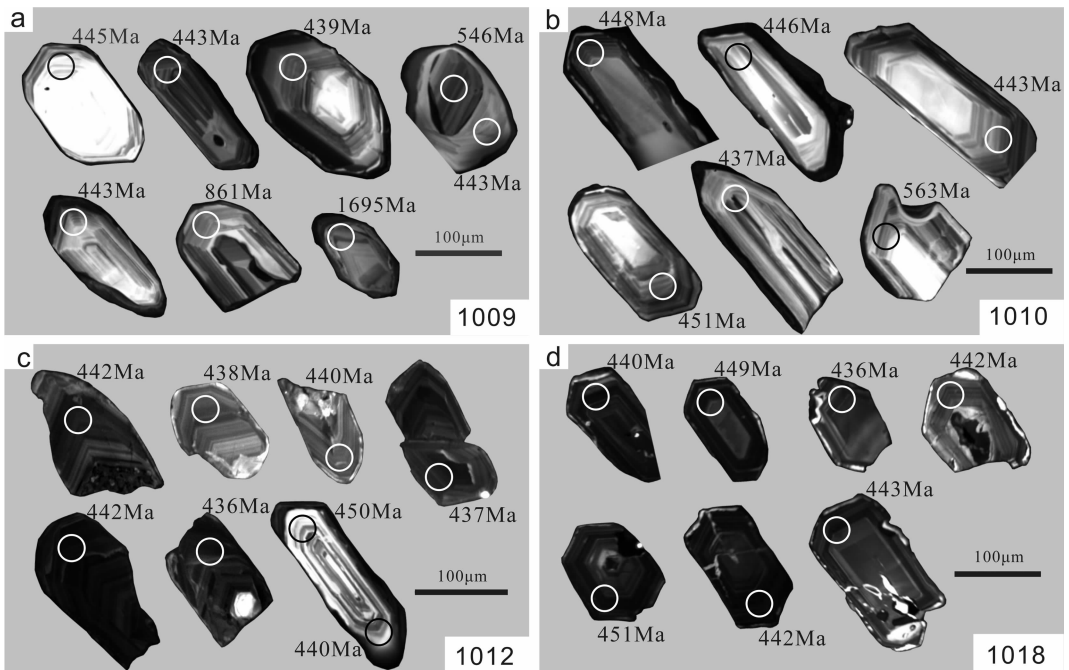


图 3 云开地区花岗岩中典型锆石阴极发光照片

Fig.3 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from granites in Yunkai area

表 1 云开地区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 U-Th-Pb isotope analyses for zircons from granites in Yunkai area

点号	Pb 10 ⁻⁶	Th 10 ⁻⁶	U 10 ⁻⁶	Th/U	同 位 素 比 值						同 位 素 年 龄 /Ma					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
样品 1009 (片麻状黑云母二长花岗岩)																
1	17	95	198	0.48	0.0572	0.0022	0.5636	0.0222	0.0715	0.0008	498	87	454	14	445	5
2	42	71	541	0.13	0.0573	0.0015	0.5638	0.0157	0.0713	0.0008	502	59	454	10	444	5
3	34	266	369	0.72	0.0565	0.0017	0.5518	0.0153	0.0711	0.0007	472	67	446	10	443	4
4	445	72	574	0.13	0.0542	0.0014	0.5275	0.0135	0.0705	0.0006	389	57	430	9	439	4
5	69	174	668	0.26	0.0580	0.0015	0.7085	0.0182	0.0884	0.0008	532	57	544	11	546	5
6	189	63	232	0.27	0.0519	0.0020	0.5051	0.0187	0.0711	0.0008	280	87	415	13	443	5
7	124	350	699	0.50	0.0674	0.0016	1.3359	0.0355	0.1429	0.0018	850	44	861	15	861	10
8	23	134	247	0.54	0.0593	0.0025	0.5835	0.0242	0.0718	0.0008	589	91	467	16	447	5
9	23	85	270	0.31	0.0508	0.0021	0.5008	0.0214	0.0712	0.0007	232	98	412	14	443	4
10	38	77	479	0.16	0.0537	0.0022	0.5269	0.0213	0.0710	0.0007	361	58	430	14	442	4
11	109	181	1,509	0.12	0.0548	0.0020	0.4918	0.0178	0.0647	0.0006	406	80	406	12	404	4
12	29	182	317	0.57	0.0546	0.0021	0.5384	0.0212	0.0712	0.0008	398	87	437	14	443	5
13	107	39	364	0.11	0.1039	0.0026	3.6366	0.1180	0.2506	0.0051	1695	46	1558	26	1442	26
14	42	104	532	0.19	0.0536	0.0015	0.5311	0.0150	0.0716	0.0008	354	58	433	10	446	5
15	41	186	485	0.38	0.0568	0.0016	0.5621	0.0168	0.0712	0.0007	483	63	453	11	443	4
16	68	42	173	0.24	0.2211	0.0042	9.1625	0.2758	0.2966	0.0068	2991	31	2354	28	1674	34
样品 1010 (片麻状黑云母二长花岗岩)																
1	16	137	164	0.84	0.0590	0.0025	0.5877	0.0235	0.0732	0.0008	569	90	469	15	455	5
2	29	172	343	0.50	0.0548	0.0016	0.5400	0.0161	0.0712	0.0007	467	60	438	11	443	4
3	37	92	465	0.20	0.0549	0.0016	0.5355	0.0156	0.0707	0.0006	406	67	435	10	440	4
4	29	92	369	0.25	0.0572	0.0016	0.5619	0.0163	0.0711	0.0007	498	63	453	11	443	4
5	86	413	1,008	0.41	0.0557	0.0013	0.5534	0.0131	0.0716	0.0006	443	55	447	9	446	4
6	16	105	188	0.56	0.0559	0.0022	0.5455	0.0216	0.0706	0.0008	456	82	442	14	440	5
7	26	53	335	0.16	0.0540	0.0016	0.5346	0.0166	0.0716	0.0007	369	67	435	11	446	4
8	21	61	261	0.24	0.0543	0.0016	0.5422	0.0162	0.0724	0.0007	383	64	440	11	450	4
9	15	38	197	0.19	0.0556	0.0017	0.5399	0.0158	0.0706	0.0006	435	67	438	10	440	4
10	43	68	558	0.12	0.0555	0.0011	0.5533	0.0115	0.0721	0.0005	435	46	447	8	449	3
11	42	171	502	0.34	0.0562	0.0011	0.5598	0.0120	0.0720	0.0006	461	44	451	8	448	4
12	37	532	335	1.59	0.0579	0.0016	0.5711	0.0151	0.0717	0.0007	528	61	459	10	446	4
13	30	105	372	0.28	0.0556	0.0016	0.5509	0.0149	0.0720	0.0007	435	61	446	10	448	4
14	23	80	284	0.28	0.0605	0.0018	0.6071	0.0198	0.0722	0.0008	633	60	482	13	449	5
15	50	740	453	1.63	0.0539	0.0016	0.5214	0.0146	0.0701	0.0006	365	65	426	10	437	4
16	21	53	262	0.20	0.0541	0.0019	0.5375	0.0182	0.0724	0.0008	372	75	437	12	451	5
17	22	76	274	0.28	0.0563	0.0018	0.5480	0.0166	0.0708	0.0008	461	70	444	11	441	5
18	73	130	759	0.17	0.0572	0.0011	0.7232	0.0170	0.0912	0.0013	498	41	553	10	563	8
19	25	43	329	0.13	0.0539	0.0015	0.5323	0.0148	0.0716	0.0007	365	63	433	10	446	4
20	39	52	554	0.09	0.0521	0.0015	0.5164	0.0167	0.0718	0.0011	300	60	423	11	447	7
21	31	232	341	0.68	0.0534	0.0016	0.5397	0.0168	0.0733	0.0008	346	70	438	11	456	5

续表 1

点号	Pb 10 ⁻⁶	Th 10 ⁻⁶	U 10 ⁻⁶	Th/U	同 位 素 比 值					同 位 素 年 龄 Ma						
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
样品 1012 (片麻状含斑黑云母二长花岗岩)																
1	215	86	2852	0.03	0.0558	0.0009	0.5478	0.0087	0.0706	0.0005	456	35	444	6	440	3
2	193	92	2567	0.04	0.0545	0.0008	0.5369	0.0077	0.0709	0.0005	394	36	436	5	442	3
3	202	97	2692	0.04	0.0554	0.0006	0.5435	0.0067	0.0706	0.0005	428	-6	441	4	440	3
4	190	80	2502	0.03	0.0542	0.0006	0.5460	0.0071	0.0725	0.0006	389	56	442	5	451	3
5	180	99	2401	0.04	0.0542	0.0006	0.5340	0.0058	0.0711	0.0004	389	56	434	4	443	3
6	177	77	2347	0.03	0.0560	0.0007	0.5508	0.0064	0.0710	0.0004	450	21	446	4	442	2
7	284	142	3767	0.04	0.0550	0.0008	0.5361	0.0076	0.0703	0.0004	413	27	436	5	438	3
8	211	93.8	2772	0.03	0.0557	0.0011	0.5453	0.0110	0.0706	0.0006	443	46	442	7	440	3
9	161	103	2087	0.05	0.0568	0.0012	0.5573	0.0117	0.0709	0.0006	483	46	450	8	442	4
10	256	118	3345	0.04	0.0575	0.0010	0.5604	0.0098	0.0703	0.0005	509	34	452	6	438	3
11	228	117	2974	0.04	0.0564	0.0010	0.5481	0.0093	0.0700	0.0004	478	37	444	6	436	3
12	267	112	3453	0.03	0.0569	0.0011	0.5665	0.0105	0.0717	0.0006	487	36	456	7	447	3
13	193	83	2542	0.03	0.0564	0.0012	0.5481	0.0115	0.0701	0.0005	478	51	444	8	437	3
14	219	95	2865	0.03	0.0559	0.0010	0.5511	0.0097	0.0710	0.0005	450	45	446	6	442	3
15	30	358	294	1.22	0.0577	0.0020	0.5624	0.0188	0.0706	0.0007	517	74	453	12	440	4
16	23	220	243	0.90	0.0575	0.0018	0.5724	0.0173	0.0723	0.0008	522	73	460	11	450	5
17	207	110	2753	0.04	0.0556	0.0009	0.5437	0.0091	0.0707	0.0005	435	37	441	6	440	3
样品 1018 (中细粒二长花岗岩)																
1	114	777	1249	0.62	0.0563	0.0011	0.5572	0.0102	0.0712	0.0005	465	43	450	7	443	3
2	161	1304	1735	0.75	0.0550	0.0009	0.5403	0.0090	0.0706	0.0005	413	37	439	6	440	3
3	93	624	1031	0.61	0.0558	0.0009	0.5620	0.0099	0.0724	0.0006	456	35	453	6	451	4
4	130	751	1477	0.51	0.0570	0.0008	0.5623	0.0073	0.0710	0.0003	500	30	453	5	442	2
5	77	512	869	0.59	0.0564	0.0010	0.5569	0.0094	0.0712	0.0005	478	37	449	6	443	3
6	93	634	1039	0.61	0.0565	0.0009	0.5550	0.0089	0.0709	0.0005	472	35	448	6	442	3
7	124	847	1313	0.64	0.0555	0.0008	0.5510	0.0087	0.0715	0.0006	432	33	446	6	445	3
8	118	822	1296	0.63	0.0563	0.0010	0.5587	0.0097	0.0716	0.0005	465	34	451	6	446	3
9	111	798	1216	0.66	0.0559	0.0011	0.5516	0.0112	0.0713	0.0006	456	17	446	7	444	4
10	160	1200	1723	0.70	0.0559	0.0011	0.5515	0.0110	0.0710	0.0006	456	17	446	7	442	4
11	110	735	1187	0.62	0.0576	0.0012	0.5803	0.0124	0.0723	0.0007	522	51	465	8	450	4
12	121	836	1322	0.63	0.0561	0.0011	0.5650	0.0114	0.0721	0.0009	457	43	455	7	449	6
13	141	1288	1451	0.89	0.0591	0.0013	0.5797	0.0125	0.0699	0.0013	572	46	464	8	436	8
14	120	876	1276	0.69	0.0574	0.0013	0.5735	0.0130	0.0712	0.0013	506	50	460	8	443	8
15	126	919	1346	0.68	0.0578	0.0012	0.5875	0.0122	0.0726	0.0013	520	44	469	8	452	8
16	123	872	1327	0.66	0.0573	0.0012	0.5688	0.0117	0.0708	0.0010	506	46	457	8	441	6

锆石年龄。另外3个分析点(5、13和16)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (或 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)年龄分别为 $(546\pm 5)\text{Ma}$ 、 $(1695\pm 46)\text{Ma}$ 和 $(2991\pm 31)\text{Ma}$,5号分析点位于锆石核部,为继承锆石年龄,13和16号分析点记录了华夏基底中元古代和太古宙的物质信息。

样品1010(片麻状黑云母二长花岗岩)中的锆石均较自形,主要为长柱状或椭圆状(长 $120\sim 250\mu\text{m}$,宽 $50\sim 80\mu\text{m}$),少数为锥状。CL图像揭示绝大多数锆石为典型的岩浆锆石^[50-51](图3-b)。对其中21颗锆石进行了21个点的测年,样品均落在谐和线上及附近,结果见表1和图4-b。21个分析点岩浆环带清楚,其中20个分析点Th和U含量变化范围分别为 $43\times 10^{-6}\sim 740\times 10^{-6}$ 和 $164\times 10^{-6}\sim 1008\times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.12\sim 1.63$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(437\pm 4)\text{Ma}\sim (456\pm 5)\text{Ma}$,其加权平均值为 $(445.7\pm 2.3)\text{Ma}$ (MSWD=1.2),代表了花岗岩形成年龄;18号分析点Th和U含量为 130×10^{-6} 和 759×10^{-6} ,Th/U比值为0.17, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(563\pm 8)\text{Ma}$,与样品1009中5号分析点的年龄一致,可能代表一次弱的构

造-岩浆事件(泛非期)。

样品1012(片麻状含斑黑云母二长花岗岩)中的锆石多为碎块,恢复形态后,主要为长柱状和锥状。CL图像揭示绝大多数锆石为典型的岩浆锆石^[50-51],部分锆石存在明显的核-边结构,核部结构复杂,少数可见残留的岩浆环带(图3-c);在CL图像中,几乎所有的锆石发暗明显,对应U含量高($2087\times 10^{-6}\sim 3767\times 10^{-6}$)。对其中16颗锆石进行了17个点的测年,样品均落在谐和线上及附近,结果见表1和图5-c。17个分析点岩浆环带清楚,它们的Th、U含量可以分为两类:一类包括15个分析点,Th和U含量变化范围分别为 $77\times 10^{-6}\sim 142\times 10^{-6}$ 和 $2087\times 10^{-6}\sim 3767\times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.03\sim 0.05$,这类锆石为岩浆锆石,其Th/U低比值主要由于U含量过高所致;另一类为15和16号分析点(位于同一颗锆石中),Th含量分别为 358×10^{-6} 、 220×10^{-6} ,U含量分别为 297×10^{-6} 、 243×10^{-6} ,Th/U比值为 $0.90\sim 1.22$ 。17个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(436\pm 3)\text{Ma}\sim (451\pm 3)\text{Ma}$,其加权平均值为 $(441.1\pm 2.0)\text{Ma}$ (MSWD=1.6),代表

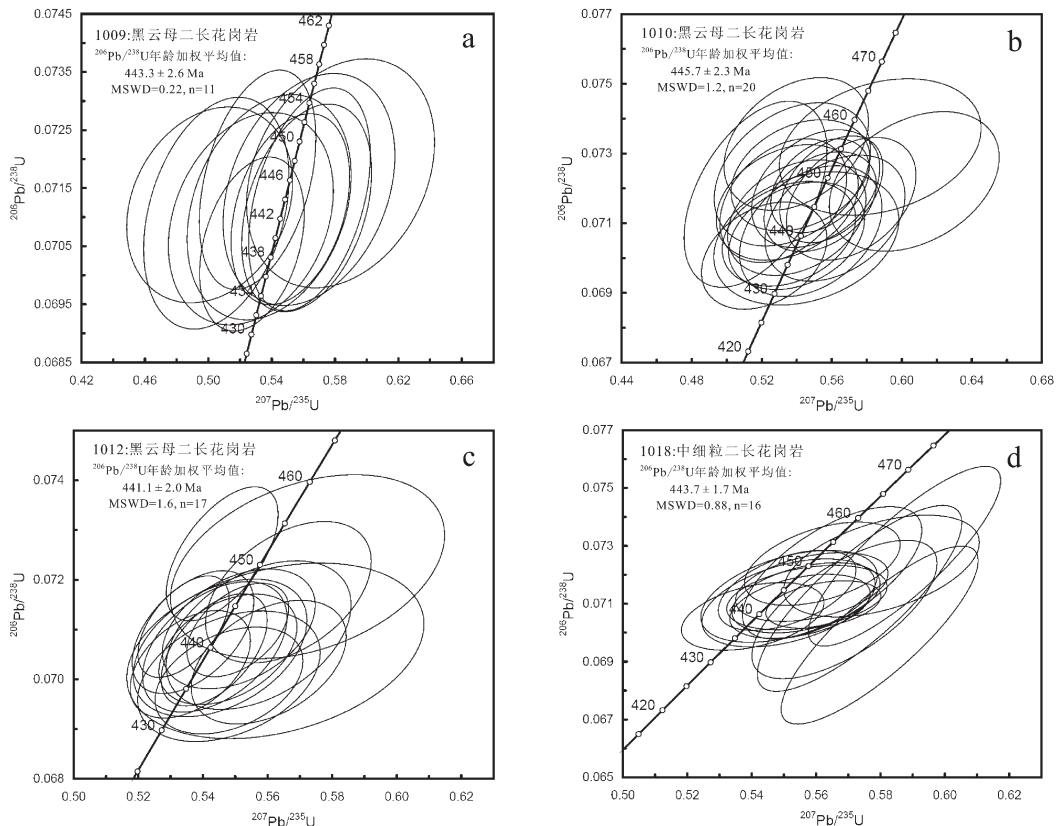


图4 云开地区花岗岩中锆石U-Pb谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagrams for zircons from granites in Yunkai area

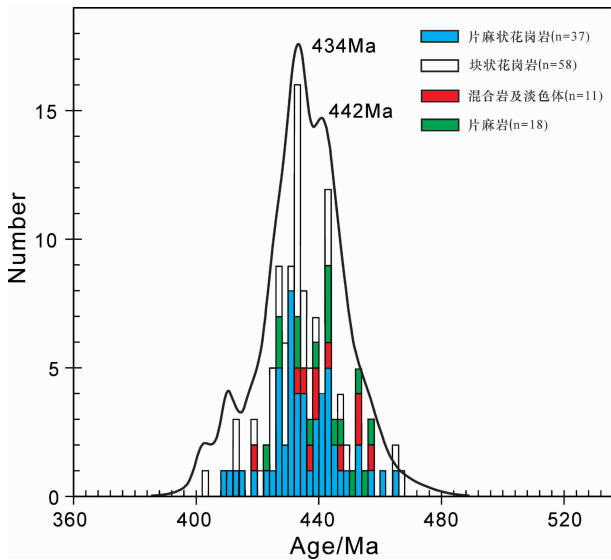


图 5 华南东部加里东期花岗岩类锆石 U-Pb 年龄频率分布图(数据引自表 2, [55-62], [9] 及文中文献)

Fig.5 Frequency of zircon U-Pb ages for Caledonian granites in eastern South China Block (data after Table 2, [55-62], [9] and References in the text)

了花岗岩形成年龄。

样品 1018(中细粒二长花岗岩)中的锆石均为半自形到自形,部分锆石为碎块;恢复形态后,主要为长柱状(长 $80\sim 150\ \mu\text{m}$, 宽 $40\sim 80\ \mu\text{m}$)、短柱状(长 $80\sim 120\ \mu\text{m}$, 宽 $50\sim 80\ \mu\text{m}$)和锥状。CL 图像揭示绝大多数锆石为典型的岩浆锆石^[50-51],部分锆石存在明显的核-边结构,核部结构较为复杂,少数依稀可见残留的岩浆环带(图 3-d);在 CL 图像中,几乎所有的锆石发暗明显,对应高的 Th 和 U 含量(表 1)。对其中 16 颗锆石进行了 16 个点的测年,样品均落在谐和线上或其附近(图 4-d)。16 个分析点岩浆环带清楚,Th 和 U 含量变化范围分别为 $512\times 10^{-6}\sim 1304\times 10^{-6}$ 和 $869\times 10^{-6}\sim 1735\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 $0.51\sim 0.89$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(436\pm 8)\text{Ma}\sim (452\pm 8)\text{Ma}$, 其加权平均值为 $(443.7\pm 1.7)\text{Ma}$ (MSWD=0.88),代表了花岗岩形成年龄。

4 讨论

近年来,在云开地区“前寒武纪基底”岩石中获得了大量的加里东期年龄(表 2),岩石包括麻粒岩、角闪岩、变质岩包体、片麻岩和花岗岩等,加里东期

年龄则包括变质年龄和岩石形成年龄。如在高州杂岩中获得了 $439\sim 455\ \text{Ma}$ 的变质年龄, $428\sim 444\ \text{Ma}$ 的岩石形成年龄,以及 $800\sim 1200\ \text{Ma}$ 的老锆石年龄^[22,24,28];在云开群中获得了 $428\sim 446\ \text{Ma}$ 的变质年龄, $415\sim 452\ \text{Ma}$ 的岩石形成年龄,以及 $522\sim 2619\ \text{Ma}$ 的老锆石年龄^[9-10,24-25](本研究及未发表数据)。事实上,Wan et al.^[8-9],Wang et al.^[23-24]和 Chen et al.^[28]已利用上述数据对该区前寒武纪基底分布进行了修正,本研究中样品 1009、1010 在修正后的图中位于早古生代和中生代花岗岩的过渡部位,样品 1012、1018 位于晚新元古—早古生代的“云开表壳岩系”。说明云开地区“前寒武纪基底”部分实属加里东期的产物,加里东运动在该区的响应比以往认为的要强烈。云开地区“前寒武纪基底”实际由 3 套岩石组合而成:片麻状花岗岩(近年来划归加里东期)、片麻岩类(普遍混合岩化)和变质沉积岩类(片岩、石英岩类)。片麻岩类是高州杂岩的主体,锆石 LA-ICP-MS 测年结果显示其时代约 $1.0\ \text{Ga}$,属于中新元古代(笔者未发表数据);变沉积岩类为云开群的主体,其角闪岩夹层的结晶年龄为 $(785\pm 36)\text{Ma}$ ^[10],炭质千枚岩中薄层硅质岩形成年龄为 $(872\pm 8.6)\text{Ma}$ ^[41],暗示其形成时代可能为新元古代。

扩大到整个华夏地块,在武夷山、武功山和白云山等地区与云开地区有类似之处。Yang et al.^[26]对白云山地区“前寒武纪基底”中 3 个长英质片麻岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,获得其形成年龄为 $439\sim 446\ \text{Ma}$ 。Wang et al.^[9]对武功山地区 3 个片麻状花岗岩、2 个正片麻岩和 1 个混合岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得其形成年龄为 $424\sim 456\ \text{Ma}$,老锆石年龄范围为 $510\sim 2649\ \text{Ma}$,并在 1 个片麻状花岗岩中获得了大约 $428\ \text{Ma}$ 的变质锆石年龄;对北武夷山地区 2 个片麻状花岗岩、1 个正片麻岩和 1 个混合岩中的淡色体进行了测年,获得的岩石形成年龄为 $410\sim 457\ \text{Ma}$,老锆石年龄范围为 $639\sim 2004\ \text{Ma}$,并在 1 个混合岩的淡色体中获得了 $454\ \text{Ma}$ 左右的变质锆石年龄;对南武夷山地区 6 个片麻状花岗岩和 2 个正片麻岩进行了定年,获得的岩石形成年龄为 $426\sim 438\ \text{Ma}$,老锆石年龄为 $530\sim 2584\ \text{Ma}$;上述岩石以往被认为是元古宙变质岩。Wan et al.^[23]对南武夷山地区黑云母片麻岩进行了锆

表 2 云开地区“前寒武纪基底”中具加里东期年龄的地质体
 Table 2 Geological bodies with the age of the Caledonian from “Precambrian basement” in Yunkai area

岩石单元	样品	采样位置	岩石类型	测试方法	岩浆锆石年龄	变质锆石年龄	参考文献
					/Ma	/Ma	
天堂山岩群	1009	陆川陆透水库	片麻状黑云二长花岗岩	LA-ICP-MS	443.3 ± 2.6		本研究
青白口纪花岗岩	1010	陆川月洞	片麻状黑云二长花岗岩	LA-ICP-MS	445.7 ± 2.3		本研究
前寒武基底	1012	高州谢鸡	含斑黑云二长花岗岩	LA-ICP-MS	441.1 ± 2.0		本研究
天堂山岩群	1018	信宜朱砂	中细粒二长花岗岩	LA-ICP-MS	443.7 ± 1.7		本研究
天堂山岩群	TW3602-1	北流清水口	石榴辉石岩	SHRIMP		439 ± 8	[22]
云开岩群	TW3086-1	北流石窝	斜长角闪岩	SHRIMP		455 ± 10	[22]
	TW3102-1	北流新丰	花岗质片麻岩	SHRIMP		454 ± 6	[22]
早前寒武基底	02YK-42	高州云潭	黑云母正片麻岩	LA-ICP-MS	427.1 ± 4.2		[8]
晚前寒武基底	02YK-75	信宜池洞	黑云母副片麻岩	LA-ICP-MS		423 ± 7	[8]
元古代混合岩	02YK-27	信宜河坝铺	花岗质片麻岩	LA-ICP-MS	429.6 ± 5.2		[8]
元古代混合岩	02YK-50	博白大洞	花岗质片麻岩	SHRIMP	421.9 ± 9.8		[8]
	02YK-60	博白松旺	叶片状花岗岩	LA-ICP-MS	440.7 ± 5.6		[8]
云开群	G0104-1		二云母片麻岩	SHRIMP	443 ± 9		[24]
云开群	G0105-1		黑云母片麻岩	SHRIMP		438 ± 8	[24]
高州杂岩	L114		片麻岩	SHRIMP		441 ± 10	[24]
云开群	09YK-8B	信宜云炉	正片麻岩	LA-ICP-MS	450 ± 8		[9]
云开群	09YK-10A	信宜金洞	片麻状花岗岩	LA-ICP-MS	449 ± 5		[9]
云开群	09YK-12A	容县黎村	正片麻岩	LA-ICP-MS	443 ± 7		[9]
云开群	09YK-15A	北流石窝	片麻状花岗岩	LA-ICP-MS	415 ± 7		[9]
	09YK-16T	高州谢鸡	混合岩中淡色体	LA-ICP-MS	435 ± 8		[9]
云开群	09YK-17	高州新洞	正片麻岩	LA-ICP-MS	452 ± 6		[9]
云开群	GD-4	高州谢鸡	含石榴角闪岩	SHRIMP	785 ± 36	446 ± 12	[10]
	HG-153	高州云炉	麻粒岩包体	SHRIMP		428 ± 18	[10]
高州杂岩	GZ-09		麻粒岩	LA-ICP-MS	428 ± 16		[28]
高州杂岩	GZ-09		麻粒岩	EMP monazite	432 ± 12		[28]
高州杂岩	GZ-11		麻粒岩	LA-ICP-MS	442.2 ± 5.2		[28]
高州杂岩	GZ-11		麻粒岩	EMP monazite	433 ± 10		[28]
高州杂岩	GZ-13		麻粒岩	LA-ICP-MS	440.7 ± 6.1		[28]
高州杂岩	GZ-05		正片麻岩	LA-ICP-MS	433.3 ± 3.6		[28]
高州杂岩	GZ-03		紫苏花岗岩	LA-ICP-MS	432.5 ± 3.2		[28]
高州杂岩	GZ-07		紫苏花岗岩	LA-ICP-MS	433.7 ± 3.5		[28]
高州杂岩	GZ-07		紫苏花岗岩	EMP monazite	434 ± 11		[28]
高州杂岩	23GX11		副片麻岩	LA-ICP-MS	443.6 ± 9.0		[28]
高州杂岩	GZ-08		正片麻岩	LA-ICP-MS	436.2 ± 4.4		[28]

石 SHRIMP U-Pb 测年, 获得麻源群 2 个黑云母片麻岩中变质锆石年龄为 (458 ± 6) Ma, 岩石形成年龄小于或等于 (807 ± 12) Ma, 以及主要集中在 800~1000 Ma 的碎屑锆石年龄; 万全群和马面山群 2 个

黑云母片麻岩形成年龄为 (728 ± 8) Ma 和 (751 ± 7) Ma; 交溪组和迪口组中主要集中在 800~1000 Ma 的碎屑锆石年龄。Li et al.^[11]对武夷山地区和浙北及邻区基底岩石进行了锆石 SHRIMP U-Pb 和云母矿

物 Ar-Ar 定年,获得武夷山地区 3 个花岗岩年龄为 432~452 Ma, 云母片岩变质年龄为 420~438 Ma; 陈蔡杂岩中花岗岩、片麻岩、混合岩和变火山岩形成年龄为 433~460 Ma, 变火山岩变质年龄为 425~426 Ma。同时, Li et al.^[11] 还在武夷山地区万年群中获得了 788~800 Ma 的变火山岩形成年龄, 马面山群中 (826±7) Ma 的云母片岩形成年龄, 陈蔡杂岩中 838~841 Ma、(1781±21) Ma 的火山岩或变火山岩形成年龄。Yu et al.^[20-21, 54] 对华夏地区前寒武纪基底作了大量研究, 提出华夏地块存在大量古元古代晚期 (约 1.8 Ga)、新太古代 (约 2.5 Ga)、中太古代 (3.0~3.2 Ga) 和古太古代 (约 3.8 Ga) 的碎屑物质, 经历了上述几次重要的地壳生长长期及古老物质的再循环; 并在武夷山地区桃溪组的 1 个变泥质片麻岩和 1 个变粒岩中获得了 414~493 Ma 的变质 (或深熔) 增生锆石年龄。郑建平等^[52] 通过对西部华夏晚中生代—新生代火山岩中锆石捕虏晶的 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究, 也提出西部华夏有未暴露的太古宙基底, 主体年龄为 2.5~2.9 Ga, 但基底经历了复杂的改造过程。

此外, 其他学者在华夏地块的八都群、麻源群、陈蔡群、周潭群、桃溪组中也获得了大量的加里东期、晋宁期岩石形成年龄, 加里东期变质年龄, 以及新元古代到太古宙的老锆石年龄^[11, 18, 25, 53-56]。大量研究已表明, 在华夏地块中存在古—中元古代结晶基底, 太古宙的年龄记录主要表现为碎屑锆石和继承锆石。而且中元古代结晶基底出露有限, 目前仅有少量高精度年龄报道, 东部华夏出露最老岩石年龄为 1.8 Ga^[11, 20, 29-32], 西部华夏云开地区出露最老岩石年龄为 1.0 Ga (笔者未发表数据), 海南岛出露的最老岩石为 1.4 Ga^[57] (笔者未发表数据)。由此看来, 整个华夏地块前寒武纪基底出露并不像以往认为的那么广泛, 很多以往划归古—中元古代的基底岩石, 其形成时代被重新厘定为新元古代—早古生代, 但不排除许多元古宙甚至太古宙基底物质受到后期新元古代—早古生代构造热事件的再造。尽管如此, 上述研究结果足以表明加里东运动在华夏地区的响应比以往认为的要强烈。

将华南已发表的 124 个加里东期花岗岩、混合岩及片麻岩年龄 (主要为 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 年龄) 作频数分布图 (图 5), 其年龄范围在 400~465 Ma, 集中分布于 434~442 Ma, 片麻状花岗岩、块状花岗岩、混合岩及片麻岩的年龄分布范围基

本类似。云开地区片麻状花岗岩年龄介于 415~452 Ma, 集中在 420~440 Ma (表 2), 与华南加里东期花岗岩年龄分布一致。这些花岗岩主要分布在武夷—云开地区, 并跨越江山—绍兴断裂至雪峰山, 但止于安化—溆浦断裂, 主要呈面状展布, 不同于洋陆造山带岩浆活动成带状展布。片麻状花岗岩的 Sr-Nd-Hf 同位素资料显示, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要集中在 +2.4~-19.4, 对应的模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 范围为 1.4~2.17 Ga^[9]; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 主要集中在 -1.2~-13.4, 对应的模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 范围为 1.2~2.5 Ga^[9, 11, 20-21, 25], Hf 模式年龄与 Nd 模式年龄基本一致, 与块状花岗岩无明显差异^[55-59]。均落入华夏地块前寒武基底年龄范围内, 但明显要高于片麻状花岗岩本身的形成年龄。而且这些片麻状花岗岩普遍为过铝质, 富含铝矿物, 且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.709\sim 0.729$ ^[9, 11, 18, 40]。说明这些花岗岩主要是由古元古代、中新元古代及少量早古生代的基底物质发生深熔作用形成的, 深熔作用同时还引起了混合岩化及韧性流变。地壳加厚引发的深熔作用主要是由华南地区加里东期陆内造山作用引起, 尽管该造山作用的动力学机制目前还存在一定的争议^[8-11, 60, 63-64]。花岗岩的片麻理应为加里东期和 (或) 印支期构造—热事件引起的韧性流变作用所致, 出露面积较小或处于构造—热事件中心的花岗岩体受韧性流变作用较强片麻理明显, 出露面积较大 (岩基) 或远离构造—热事件中心的花岗岩体受韧性流变作用较弱片麻理不明显, 仍保留块状构造特征。

5 结论

对云开地区 1:25 万区调中划归前寒武纪基底或新元古代的 4 个片麻状花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年, 年龄为 441~445 Ma, 属于加里东期 (早古生代)。结合已有的研究成果, 认为云开地区前寒武纪基底主要为以片麻岩类为代表的高州杂岩和以变沉积岩类为代表的云开群, 以往认为是基底的片麻状花岗岩大部分属于加里东期; 高州杂岩形成时代为中新元古代, 云开群形成时代可能为新元古代。从整个华夏地块来看, 存在古—中元古代结晶基底, 出露可能并不像以往认为的那么广泛, 加里东运动在华南地区的响应比以往认为的要强烈。加里东期陆内造山运动引起华南地区地壳加厚, 导致元古宙到早古生代基底岩石发生深熔作用, 形成了大量过铝质的 S 型花岗岩 (包括本研究中的片麻状花岗岩)、并

引起了混合岩化及韧性流变。

致谢: 锆石阴极发光照相和锆石 U-Pb 同位素测试的过程中, 分别得到了中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)郑曙高级工程师和胡兆初研究员的帮助; 成文过程中与中国地质大学徐旺春博士进行了有益的探讨; 审稿专家及编辑提出了很好的修改意见, 在此一并致谢!

参考文献(References):

- [1] Li Z X, Zhang L H, Powell C M. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23:407-410.
- [2] Zhao G C, Cawood P A. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: new evidence for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China craton [J]. *American Journal of Science*, 1999, 299:309-339.
- [3] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, south China: Implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2006, 145:111-130.
- [4] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *Precambrian Research*, 2007, 59:117-131.
- [5] Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny [J]. *Geology*, 2011, 39:299-302.
- [6] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. *Tectonics*, 2007, 26:1-21.
- [7] Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, et al. 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*, 2010, 29:1-16.
- [8] Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, et al. 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*, 2007, 12 (4):404-416.
- [9] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Kwangsian 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*, 2011, 127:239-260.
- [10] Wang Y J, Wu C M, Zhang A M, et al. Kwangsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites [J]. *Lithos*, 2012, 150:227-242.
- [11] Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions [J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122:772-793.
- [12] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4):418-431.
Shu L S. Predevonian Tectonic Evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(4):418-431 (in Chinese with English abstract).
- [13] Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia [J]. *C. R. Geoscience*, 2008, 340:151-165.
- [14] 张国伟, 郭安林, 董云鹏. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学 [J]. *地质前缘*, 2011, 18(3):1-12.
Zhang G W, Guo A L, Dong Y P, et al. Continental geology, tectonics and dynamics. *Earth Science Frontiers* [J], 2011, 18(3):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [15] Gao S, Lin W L, Qiu Y M. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 13 (14):2071-2088.
- [16] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of > 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. *Geology*, 2000, 28 (1):11-14.
- [17] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton [J]. *Geology*, 2006, 34:417-420.
- [18] 刘锐, 张利, 周汉文, 等. 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*, 2008, 24(6):1205-1222.
Liu Rui, Zhang Li, Zhou Hanwen, et al. Petrogenesis of the Caledonian migmatites and related granites in northwestern Fujian province, south China: syn-deformational crustal anatexis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (6):1205-1222 (in Chinese with English abstract).
- [19] Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: coeval arc magmatism and sedimentation [J]. *Precambrian Research*, 2009, 170:27-42.
- [20] Yu J H, Wang L J, Griffin W L, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China [J]. *Precambrian Research*, 2009, 174:347-363.
- [21] Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L J, et al. 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*, 2010, 181:

- 97-114.
- [22] 覃小锋, 潘元明, 李江, 等. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学[J]. 地质通报, 2006, 25 (5):553-559.
Qin Xiaofeng, Pan Yuanming, Li Jiang, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Yunkai metamorphic complex in southeastern Guangxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (5):553-559 (in Chinese with English abstract).
- [23] Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units [J]. Gondwana Research, 2007, 12:166-183.
- [24] Wan Y S, Liu D Y, Wilde S A, et al. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 37:140-153.
- [25] Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, et al. 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, 2007, 12: 404-416.
- [26] Yang D S, Li X H, Li W X, et al. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Baiyunshan gneiss (central Guangdong, south China): constraints on the timing of early Palaeozoic and Mesozoic tectonothermal events in the Wuyun (Wuyi-Yunkai) Orogen [J]. Geological Magazine. 2010, 147:481-496.
- [27] Liu R, Zhou H W, Zhang L, et al. 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, 2011, 119:163-180.
- [28] Chen C H, Liu Y H, Lee C Y, et al. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the polymetamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai Massif), South China: Emphasis on the in-situ EMP monazite dating [J]. Lithos, 2012, 144/145:109-129.
- [29] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35:179-182.
- [30] Li L M, Sun M, Wang Y J, et al. Geochronological and Geochemical study of Paleoproterozoic gneissic granites and clinopyroxenite xenoliths from NW Fujian, SE China: Implications for the crustal evolution of the Cathaysia Block [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41:204-212
- [31] Li X H. Timing of the Cathaysia Block formation: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology [J]. Episodes, 1997, 20(3): 188-192.
- [32] 汪相, 陈洁, 罗丹. 浙西南淡竹花岗岩闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义[J]. 地质论评, 2008, 54 (3):387-398.
Wang Xiang, Chen Jie, Luo Dan. Study on petrogenesis of zircons from the Danzhu granodiorite and its geological implication [J]. Geological Review, 2008, 54 (3):387-398(in Chinese with English abstract).
- [33] 简平. 云开隆起西南端混合岩、花岗岩同位素地质年代学研究 [J]. 广东地质, 1991, 6(2):58-67
Jian Ping. U-Pb dating on zircon from migmatites and granites at the southwestern end of Yunkai upwarped district, South China [J]. Guangdong Geology, 1991, 6:58-67 (in Chinese with English abstract).
- [34] 于津生, 桂训唐, 黄琳. 广东罗定泗纶混合岩田同位素组成特征 [J]. 广东地质, 1991, 6(3):73-82
Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Huang Lin. Sr-Nd-O-H isotope compositions of Silun migmatite field in Luoding, Guangdong [J]. Guangdong Geology 6, 73-82 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张伯友, 俞鸿年. 糜棱岩、混合岩、花岗岩三者成因联系——粤西深层次推移构造研究的特殊意义 [J]. 地质论评, 1992, 38(5): 407-413.
Zhang Boyou, Yu Hongnian. The genetic relationship of mylonites, migmatites and granites——with special reference to the deep-level napple structure in western Guangdong [J]. Geological Review, 1992, 38(5):407-413(in Chinese with English abstract).
- [36] 周汉文, 游振东, 钟增球, 等. 云开隆起区钾长球斑片麻状黑云母花岗岩锆石特征研究——形貌、成分以及 U-Pb 同位素年龄 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(4):427-433.
Zhou Hanwen, You Zhendong, Zhong Zengqiu, et al. Characteristics of zircons in Orbicular gneissic biotite——granite from Yukai uplifted area [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(4):427-433 (in Chinese with English abstract).
- [37] 周汉文, 游振东, 钟增球, 等. 云开隆起区热中心式区域混合岩的成因研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(3): 332-340.
Zhou Hanwen, You Zhendong, Zhong Zengqiu, et al. origin of thermal center type of migmatites in the Yunkai uplift [J]. Earth Science ——Journal of China University of Geosciences, 1997, 22 (3): 332-340 (in Chinese with English abstract).
- [38] 钟增球, 游振东, 周汉文, 等. 云开隆起区基底的组成、演化及其基本结构格局 [J]. 中国区域地质, 1996, 56:36-43.
Zhong Zengqiu, You Zhendong, Zhou Hanwen, et al. The evolution and basic structural framework of the basement of the Yunkai uplift [J]. Regional Geology of China, 1996, 56:36-43 (in Chinese with English abstract).
- [39] 彭少梅, 符力奋, 周国强, 等. 云开地块构造演化及片麻状花岗岩质岩石的剪切深熔成因 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1-167.
Peng Shaomei, Fu Lifen, Zhou Guoqiang, et al. Tectonic Evolution of Yunkai Massif and its Shearing Anatectic Origin of Gneissic Granitic Rocks [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996:1-167(in Chinese with English abstract).
- [40] 王江海, 涂湘林, 孙大中. 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, 1999, 28(3):231-238.
- Wang Jianghai, Tu Xianglin, Sun Dazhong. U-Pb dating of anatectic migmatites at Gaozhou in the Yunkai Block, western Guangdong, China [J]. *Geochimica*, 1999, 28 (3):231-238 (in Chinese with English abstract).
- [41] 叶真华, 劳秋元, 胡世玲. 云开大山云开群地层时代和层序的研究现状与新认识[J]. 地质论评, 2000, 46(5):449-454.
- Ye Zhenhua, Lao Qiuyuan, Hu Shiling. Some remarks on the geologic age and stratigraphic sequence of Yukai Group in Yunkai mountains [J]. *Geological Review*, 2000, 46 (5):449-454 (in Chinese with English abstract).
- [42] 彭松柏, 金振民, 刘云华, 等. 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, 2006, 31(1):110-120.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Liu Yunhua, et al. Petrochemistry, chronology and tectonic setting of strong prealuminous anatectic granitoids in Yunkai orogenic belt [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31 (1):110-120 (in Chinese with English abstract).
- [43] 广东地矿局. 广东省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1988: 1-941.
- Guangdong BGMR (Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province). *Regional Geology of the Guangdong Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-941 (in Chinese with English abstract).
- [44] 广西地矿局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1985:1-853.
- Guangxi BGMR (Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region). *Regional Geology of the Guangxi Zhuang Autonomous Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985:1-853 (in Chinese with English abstract).
- [45] 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 of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537-571.
- [46] Liu Y S, Hu Z C, Gao S. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257:34-43.
- [47] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55:1535-1546.
- [48] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192:59-79.
- [49] Ludwig K R. ISOPLOT 3: a geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication 4, 2003:74.
- [50] Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W, et al. Atlas of zircon textures [J]. *Review Mineral Geochemistry*, 2003, 53:469-495.
- [51] Wu Y B, Zheng Y F. Genetic mineralogy of zircon and its constraint on the interpretation of U-Pb zircon ages [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16):1589-1604.
- [52] 郑建平, Griffin W L, 汤华云, 等. 西部华夏地区深部可能存在于华北和扬子大陆相似的太古代基底 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 549-557.
- Zheng Jianping, Griffin W L, Tang Huayun, et al. Archean basement similar to the north China and Yangtze continents may exist beneath the western Cathaysia [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(4):549-557(in Chinese with English abstract).
- [53] Zeng W, Zhang L, Zhou H W, et al. Caledonian reworking of Paleoproterozoic basement in the Cathaysia Block: Constraints from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6):895-904.
- [54] Yu J H, Zhou X M, O'Reilly Y S, et al. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 2080-2089.
- [55] 王彦斌, 王登红, 韩娟, 等. 湖南益将稀土-钨矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据[J]. 中国地质, 2010, 37(4):1062-1070.
- Wang Yanbin, Wang Denghong, Han Juan, et al. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from quartz-diorite in the Yijiang REE-Sc deposit, Rucheng County, Hunan: constraints on the timing of Caledonian magmatic activity in South China [J]. *Geology in China*, 2010, 37 (4):1062-1070 (in Chinese with English abstract).
- [56] 张爱梅, 王岳军, 范蔚民, 等. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(3):408-418.
- Zhang Aimei, Wang Yuejun, Fan Weimin, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions of Caledonian Granites From the Qingliu Area, Southwest Fujian [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34 (3):408-418 (in Chinese with English abstract).
- [57] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(1):248-260.
- Zhang Fangrong, Shu Lianshu, Wang Dezi, et al. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (1):248-260 (in Chinese with English abstract).
- [58] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 江西付坊花岗岩体的年代学、地球化学特征及其成因研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2):161-176.
- Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, et al. Study on geochronological, geochemical features and Genesis of the Fufang Granitic pluton in Jiangxi Province, South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16 (2):161-176 (in Chinese with English abstract).
- [59] Zhang Y, Shu L S, Chen X Y. Geochemistry, geochronology, and petro-genesis of the early Paleozoic granitic plutons in the central-

- southern Jiangxi Province, China [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2011, 54(10):1492–1510.
- [60] Charvet J, Shu L S, Faure M, et al. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39:309–330.
- [61] Xu X B, Zhang Y Q, Shu L S, et al. LA-ICP-MS U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the sheared metamorphic rocks in the Wuyishan: Constraints on the timing of Early Paleozoic and Early Mesozoic tectono-thermal events in SE China [J]. *Tectonophysics*, 2011, 501:71–86.
- [62] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. *Geology*, 2002, 30:163–166.
- [63] Faure M, Shu L S, Wang B, et al. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Paleozoic Orogen of SE China [J]. *Terra Nova*, 2009, 21(5):360–368.
- [64] 戎嘉余, 詹仁斌, 许红根, 等. 华夏古陆于奥陶-志留纪之交的扩展证据和机制探索[J]. *中国科学(D辑)*, 2010, 40(1):1–17.
- Rong Jiayu, Zhan Renbin, Xu Honggen, et al. Expansion of the Cathaysian Oldland through the Ordovician-Silurian transition: Emerging evidence and possible dynamics [J]. *Science in China (Series D)*, 2010, 40(1):1–17(in Chinese).

Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Caledonian granites from Precambrian basement in Yunkai area and its geological implications

WANG Lei, LONG Wen-guo, ZHOU Dai

(Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan 43023, Hubei, China)

Abstract: LA-ICP-MS U-Pb dating was conducted for zircons from four gneissic granites in Yunkai area, which were assigned to Precambrian basement rocks or Neoproterozoic intrusion in 1:250000 geological survey. The dating yielded $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean of 443.3 ± 2.6 Ma (sample 1009, Lutou Reservoir in Luchuan City), 445.7 ± 2.3 Ma (sample 1010, Yuedong in Luchuan city), 441.1 ± 2.0 Ma (sample 1012, Xieji in Gaozhou city) and 443.7 ± 1.7 Ma (sample 1018, Zhusha in Xinyi city), suggesting that these rocks are Caledonian products rather than Precambrian basement or Neoproterozoic intrusive rocks. In combination with previous studies, the authors hold that these granites probably resulted from partial melting of the Proterozoic materials due to the Caledonian orogeny in South China. These results and recently published data (Caledonian) for the so-called Precambrian basement rocks, such as the crystallization age or metamorphic age of gneissic granite and gneiss, indicate that Yunkai area has undergone extensive reformation by the Caledonian orogeny. Actually, the Precambrian basement of Yunkai area mainly consists of gneissic rocks and meta-sedimentary rocks, which serve as the representative of the Gaozhou complex and the Yunkai Group, respectively. The Gaozhou complex was formed during the Meso- to Neo-proterozoic and the Yunkai Group might have been formed in the Neoproterozoic. The Paleo- to Meso-Proterozoic crystallized basement does exist in Cathaysia Block, however, which is not so widely distributed as previously thought.

Key words: Precambrian basement; granite; Caledonian; LA-ICP-MS; zircon U-Pb age; Yunkai area

About the first author: WANG Lei, male, born in 1981, doctor, assistant researcher, engages in the study of tectonics and mineral deposits; E-mail: cugleiwang@gmail.com.