

武夷地块中古元古代镁铁质-超镁铁质岩石的发现 ——剖面介绍及岩石学、岩相学、年代学特征

汪建国, 余盛强, 赵旭东, 吴 鸣, 顾明光, 胡艳华

(浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311203)

摘 要: 通过 1:250 000 衢州区域地质调查, 在武夷地块浙西南地区发现古元古代镁铁质-超镁铁质岩石。该套岩石在金华、龙游一带呈面状分布, 金华张村出露最为完整, 主要由辉石角闪石岩、角闪石岩、斜长阳起石岩、斜长辉石岩和斜长角闪岩等组成。对辉石角闪石岩与阳起石岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析, 分别获得其成岩年龄为 $1\ 834 \pm 14$ Ma (MSWD=0.23, $N=16$) 和 $1\ 839 \pm 17$ Ma (MSWD=0.22, $N=11$)。暗示这套镁铁质-超镁铁质岩石为古元古代岩浆活动的产物。这一发现表明, 约 1 830 Ma 武夷地块处于板内伸展构造环境, 同时该时期武夷地块已经具备足够的刚性, 以致产生大规模的脆性破裂以及可能由地幔对流作用引发的基性岩浆活动, 推测在约 1.83 Ga 武夷地块已经具有克拉通的性质。

关键词: 古元古代, 镁铁质-超镁铁质岩石, 武夷地块, 浙西南

中图分类号: P588.12⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0617-13

The discovery of Paleoproterozoic mafic-ultramafic rocks in the Wuyishan Block: Description of profile and characteristics of petrology, petrography and isotope geochronology

WANG Jian-guo, YU Sheng-qiang, ZHAO Xu-dong, WU Ming, GU Ming-guang and HU Yan-hua
(Geological Survey Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 311203, China)

Abstract: A suite of Paleoproterozoic mafic-ultramafic rocks was discovered in the Wuyishan Block in southwest Zhejiang Province through 1:250 000 regional geological survey of Quzhou Sheet. These mafic-ultramafic rocks comprising mainly pyroxene hornblendite, hornblendite, plagioclase actinolite, plagioclase pyroxenite and amphibolite are exposed perfectly in Zhangcun Village of Jinhua County and spatially exhibit planar-shaped distribution in Jinhua County and Longyou County. Zircon U-Pb dating with LA-ICP-MS shows that the formation age of pyroxene hornblendite is $1\ 834 \pm 14$ Ma (MSWD = 0.23, $N = 16$), and that of actinolite is $1\ 839 \pm 17$ Ma (MSWD = 0.22, $N = 11$), which suggest that these mafic-ultramafic rocks formed during the Paleoproterozoic magmatism. This discovery reveals that the Wuyishan Block was experiencing intraplate extension process at about 1 830 Ma and that the Wuyishan Block might have been a rigid continent at that time so that large-sized brittle fractures could be formed in the interior of the Wuyishan Block and induced basic magmatism resulting from mantle convection. Based on these facts and inference, the authors hold that the Wuyishan Block already had been cratonized at about 1.83 Ga.

Key words: Paleoproterozoic; mafic-ultramafic rocks; Wuyishan Block; southwest of Zhejiang Province

收稿日期: 2013-11-25; 修订日期: 2014-06-06

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220549) 浙江省地质勘查资金项目(省资 2010001)

作者简介: 汪建国(1977-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查, E-mail: WJGLYP09@sina.com

镁铁质岩石既能为上地幔的物质组成提供制约,又蕴含着有关古大陆聚合和分离时代及过程的重要信息,具有明确的构造及地球动力学意义(Williams *et al.*, 2001)。全球基性岩的资料显示,地球演化过程中全球范围内存在多期基性岩浆活动,这些基性岩浆活动可能与全球周期性超大陆的聚合和裂解以及地幔物质对流有关(Ernst *et al.*, 1996; Kullerud *et al.*, 2006)。其中,古元古代的基性岩浆活动为地球演化过程中一期重要的事件,它们广泛出露于各古老克拉通内,对于研究古元古代地球演化具有重要意义(Yale and Carpenter, 1998; Condie, 1998; 李江海等, 1997)。在武夷地块中,越来越多的古元古代构造-热事件陆续被发现(Li, 1997; Li *et al.*, 2000; Xiang *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2012),但目前对这些地质事件的性质还存在认识分歧。二十世纪九十年代初期浙江省区测大队(浙江省地质调查院前身)开展1:5万衢州等五幅区调工作中在溪口一带发现局部夹有角闪石岩的斜长角闪岩,认为其原岩为基性火山熔岩和基性脉岩,前人文献中也提到在该区零星出露角闪石岩等(胡雄健等, 1991),但是对于镁铁质-超镁铁质岩石组合较为详细的野外特征、岩石学以及年代学工作目前尚未报道。笔者等在2012年开展的1:25万衢州市幅区域地质调查中,在浙江金华张村一带新发现的古元古代镁铁质-超镁铁质岩石组合不仅能提供详实的第一手野外调查资料,还能为进一步深入研究武夷地块构造属性及早期构造演化提供最新的岩石学、年代学信息。

1 地质背景

研究区地处武夷地块北缘的浙西南地区(图1),是武夷地块前寒武纪变质岩系的出露地区之一。区域上出露的前寒武纪变质基底为古元古代八都岩群,代表性岩石为黑云斜长片麻岩、变粒岩、黑云片岩和斜长角闪岩等,经历了角闪岩相中高温区域变质作用和较强烈的混合岩化作用(胡雄健等, 1991; 甘晓春等, 1995; Yu *et al.*, 2012)。近年, Yu等(2009)利用LA-ICP-MS锆石U-Pb原位定年手段发现与八都岩群密切伴生的古元古代花岗岩具有1 850~1 900 Ma的成岩年龄与200~240 Ma的变质改造年龄,赵磊等(2012)在遂昌地区八都岩群中发现泥

质麻粒岩,推测浙西南八都岩群麻粒岩相变质作用可能与古元古代末的构造热事件有关。上述数据表明本区经历了古元古代末与印支期两期变质事件。本次新发现的古元古代镁铁质-超镁铁质岩呈面状分布(图1),构造侵位于八都岩群,由于共同经历了印支期的变质事件,图面表现为不规则状。调查区八都岩群主体与白垩纪火山-沉积岩系呈角度不整合接触,局部呈断裂接触;白垩纪酸性岩体侵入八都岩群与白垩纪火山-沉积岩系;北东、北北东向断裂发育。为了查清古元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石组合和空间产出特征,笔者等选择浙江金华张村进行详细的剖面测制,并对该套岩石组合进行了系统的岩石学和年代学研究。

2 剖面介绍

浙江金华张村出露的古元古代镁铁质-超镁铁质岩呈北东向,与北东向断裂走向一致;北东侧与八都岩群片麻岩断裂接触,北西侧白垩纪酸性岩体侵入其中,南东侧白垩纪火山岩覆盖其上,南西与白垩纪酸性岩体断裂接触。本次选择1:1 000大比例尺进行地质剖面测制(剖面位置见图1),总体方位北东向,起点与白垩纪侵入岩断裂接触,终点与八都岩群片麻岩断裂接触,剖面长约1.5 km,根据岩性变化和接触关系,将该套岩层划分为41层(图2),不仅划分不同岩类,还识别出多条北东向展布后期侵入的镁铁质岩墙群,具体描述如下。

金华张村古元古代镁铁质-超镁铁质岩剖面描述:

白垩纪花岗岩

----- 断 裂 -----

1. 深紫灰色蛇纹石化辉石橄榄岩(与2层角闪石岩断裂接触) 30 m
2. 灰黑色角闪石岩,发育3条细粒斑状花岗岩脉与3条辉绿岩脉 45 m
3. 灰绿色辉绿岩(脉) 2 m
4. 灰黑色角闪石岩 2.5 m
5. 深灰色斜长角闪岩,顶部见宽约0.5 m的正长岩岩脉顺层侵入 3 m
6. 深灰色角闪石岩 39 m
7. 灰绿色辉绿岩(脉) 2 m
8. 深灰色含透辉斜长角闪岩 15 m
9. 灰绿色辉绿岩(夹灰色辉长岩脉) 16 m

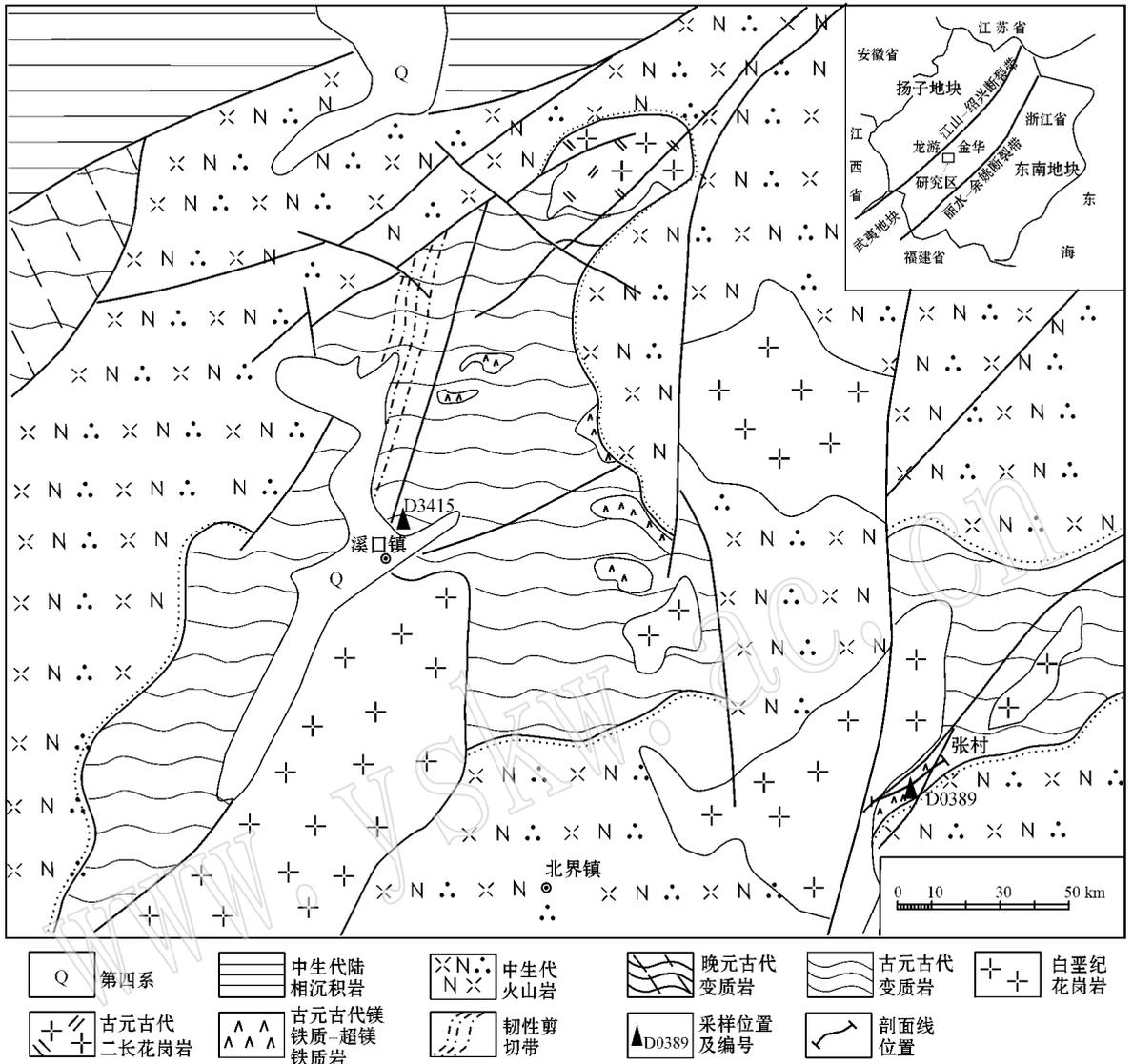


图 1 浙江龙游-金华一带古元古代镁铁质-超镁铁质岩分布示意图

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of Paleoproterozoic Mafic-ultramafic rocks in Longyou-Jinhua area of Zhejiang Province

10~11. 含黑云角闪斜长片麻岩	208 m	24. 深灰绿色辉长岩(脉)	90 m
12. 灰绿色辉绿玢岩(脉)	17 m	25. 灰绿色辉绿玢岩(脉)	45 m
13. 浅灰色辉绿岩(脉),含角闪石岩、黑云斜长片麻岩、花岗闪长岩包体	61 m	26. 灰绿色粗玄岩与玄武岩组成基本层序	10 m
14. 灰绿色辉绿岩(脉)	30 m	27. 灰绿色辉绿玢岩(脉)	11 m
15. 灰绿色辉绿玢岩(脉)	10 m	28. 灰黑色辉石角闪石岩	57 m
16. 灰色角闪斜长片麻岩	2 m	29. 灰色斜长角闪岩	64 m
17. 深灰绿色斜长角闪岩	55 m	30. 灰绿色辉绿岩(脉)	41 m
18. 深灰绿色阳起石化斜长辉石岩,似片麻状构造	59 m	31. 花岗斑岩	2 m
19. 深灰绿色阳起石化斜长辉石岩,块状构造	5 m	32. 灰绿色辉绿岩(脉)	1 m
20. 深灰绿色阳起石化斜长辉石岩,似片麻状构造	16 m	33. 斜长角闪岩	0.5 m
21. 深灰绿色辉绿玢岩(脉)	9 m	34. 灰白色角闪斜长片麻岩	1 m
22. 灰色斜长角闪岩	50 m	35. 灰绿色辉绿岩(脉),局部可见花岗质岩石捕虏体	22 m
23. 灰绿色斜长阳起石岩	44 m	36. 灰色斜长角闪岩	1.5 m

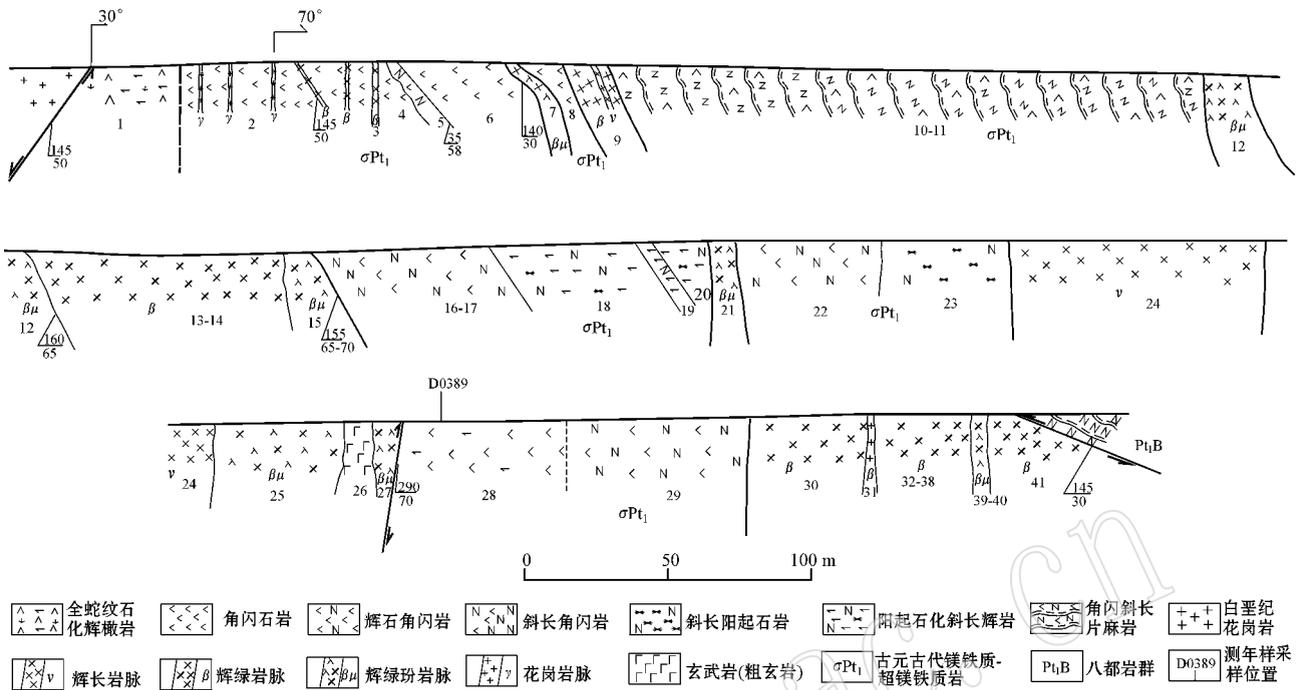


图 2 金华张村一带古元古代镁铁质-超镁铁质岩实测剖面图

Fig. 2 Measured geological cross section of Paleoproterozoic mafic-ultramafic rocks of Zhangcun Village in Jinhua

- 37. 灰绿色辉绿岩(脉) 7 m
- 38. 灰色辉绿岩(脉),含花岗闪长玢岩 钾长石巨晶包体 1.5 m
- 39. 灰绿色辉绿玢岩(脉) 1.5 m
- 40. 灰绿色辉绿玢岩(含长石斑晶)脉) 3 m
- 41. 灰绿色辉绿岩(无斑 粗粒)脉) 6 m
- 断裂接触 -----
- 古元古代八都岩群 片麻岩

中,侵入界面清晰可见(图 3a, 3b, 3c),岩墙群未发生变质且含角闪石岩、黑云斜长片麻岩等包体,分布于四周的白垩纪火山岩和侵入岩中未见岩墙群侵入,根据上述野外特征可判断镁铁质岩墙群形成时代晚于古元古代镁铁质-超镁铁质岩,早于白垩纪火山岩与侵入岩,属后期侵入。镁铁质喷出岩由粗玄武岩与玄武岩组成(26层),其两侧均被镁铁质岩墙群侵入;辉石橄榄岩(1层)南西侧以断裂方式与白垩纪侵入岩接触,北东侧与角闪石岩接触关系被掩盖,推测为断裂接触。

3 岩石学和岩相学特征

笔者系统采集了各类样品,本文重点对古元古代镁铁质-超镁铁质岩开展了岩石学和岩相学研究。

角闪石岩:灰黑色,表面呈球状风化。粒柱状变晶结构,块状构造。主要矿物组成为角闪石(95%~100%)和少量单斜辉石(<5%),粒径分别为0.5~5 mm和0.2~1.2 mm。角闪石发育角闪石式解理,横切面解理夹角约120°。单斜辉石发育辉石式解理,横切面上两组解理近垂直。局部见辉石包裹于角闪石内,被角闪石交代(图 3d)。原岩为角闪石岩。

辉石角闪石岩:灰黑色,粒柱状变晶结构,块状

详细的地质剖面表明,该套岩石类型较为复杂,包括超镁铁质岩与镁铁质岩两大类,超镁铁质岩包括角闪石岩、辉石角闪石岩和斜长辉石岩,镁铁质岩由含透辉斜长角闪岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、斜长阳起石岩组成。其中:斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩与角闪石岩出露最为普遍,辉石角闪石岩、斜长阳起石岩、斜长辉石岩、含透辉斜长角闪岩规模相对较小。根据原岩变化、矿物粒度变化、斜长石含量增多和角闪石含量减少,该套岩石可划分为5个韵律,主要反映了原岩为角闪石岩(或辉石岩)与辉长岩构成的岩石组合(表1)。

除上述岩类外,剖面中还识别出后期的镁铁质岩墙群、喷出岩以及辉石橄榄岩。其中:铁镁质岩墙群由辉绿岩、辉绿玢岩和辉长岩组成,多达20~30条,沿北东方向侵入古元古代镁铁质-超镁铁质岩

构造(图 3e),主要由角闪石(70%±)和单斜辉石(25%±)组成,并含少量斜长石(5%)。角闪石(大)和辉石(小)具定向特征(图 3f),推测原岩为角闪石岩。

斜长辉石岩:深灰绿色,粒柱状变晶结构,块状构造,似片麻状构造。主要矿物组合为辉石(85%~90%)、斜长石(10%±)和少量黑云母(<5%)。原岩为辉石岩。

含透辉斜长角闪岩:深灰绿色,粒柱状变晶结构,定向构造,主要矿物组成为斜长石(45%~50%)、角闪石(45%±)及少量透辉石(5%~10%)。斜长石呈他形粒状,局部斜长石集合体呈板状,保留了基性斜长石长板状的外形。角闪石横切面具角闪石式解理,长轴大致呈定向排列。副矿物有磁铁矿、磷灰石、钛铁矿与锆石。原岩为辉长岩。

斜长角闪岩:深灰绿色,鳞片粒柱状变晶结构(图 3g),块状构造,由斜长石(60%~65%)、角闪石(35%±)和少量黑云母(<5%)组成,副矿物有磁铁矿、磷灰石、钛铁矿与锆石等。斜长石发育机械双晶,被钾长石呈斑块状交代构成反条纹长石,局部斜长石集合体的形态仍保留斜长石板状晶形。个别露头可见斜长角闪岩渐变过渡为角闪石岩并保留了原岩的辉长结构(图 3h),推测原岩为辉长岩。

斜长阳起石岩:深灰绿色,粒状纤柱状变晶结构,块状构造,由阳起石(55%±)与斜长石(45%±)组成,含少量榍石和钛铁矿等副矿物。原岩为辉长岩。

黑云斜长片麻岩:浅灰色,鳞片柱粒状变晶结构,片麻状构造,由斜长石(65%~70%)、角闪石(20%~25%)和黑云母(10%±)组成。斜长石见机械双晶。黑云母常呈集合体分布,与角闪石集结定向排列。

阳起石岩(溪口一带,点号 D3415):深灰绿色,等粒粒状变晶结构,块状构造。由阳起石(98%±)与磁铁矿(2%±)组成。阳起石可见 56°解理夹角。

4 年代学特征

4.1 测试方法

为确定古元古代镁铁质-超镁铁质岩的形成时代,选取剖面第 28 层辉石角闪石岩(样品编号 D0389)以及溪口一带出露的阳起石岩(样品编号 D3415)开展了同位素测年工作。两件样品的锆石均用人工重砂方法选出,然后在双目镜下挑纯,选出晶

形较好、具代表性的锆石粘贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行阴极发光(CL)图象分析。锆石 LA-ICP-MS 测年在南京大学成矿作用国家重点实验室完成,采用的仪器型号为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统。分析时激光束斑直径为 25 μm,激光脉冲重复频率为 5 Hz。实验原理和详细的测试方法见文献(Jackson *et al.*, 2004)。ICP-MS 的分析数据通过 GLITTER4.0 程序计算获得同位素比值、年龄和误差。普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法进行,校正后的结果用 ISOPLOT 程序(ver. 3.75)(Ludwig, 2001)完成年龄计算和谐和图的绘制。

4.2 分析结果

4.2.1 D0389

对辉石角闪石岩中的 19 颗锆石共计完成了 24 个测点的 LA-ICP-MS 分析,U-Pb 同位素组成列于表 2。锆石大部分为短柱状,长宽比为 1:1~2:1,颗粒大小约 50~100 μm(图 4)。从阴极发光图像分析,1、2、3、5、6、10、12、13、14、15、18、19 号等 12 颗锆石具有岩浆环带与板条状特征,Th/U 比值范围为 0.32~1.39,为岩浆锆石。4、7、8 号 3 颗锆石具核边结构,核部为环带与板条状特征,Th/U 比值范围为 1.13~1.14,反映岩浆锆石特征;锆石边部为较窄的阴影状结构,Th/U 比值范围为 0.25~0.41,反映了变质增生边特征,测定的年龄反映了核边混合年龄。上述 15 颗锆石共计 20 个分析点,Th 和 U 的含量相对较高,分别集中在 34×10^{-6} ~ 294×10^{-6} 和 86×10^{-6} ~ 707×10^{-6} ,给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄范围为 1326~1849 Ma。在谐和图(图 5)上,有 16 个点落在谐和线上,其余 4 个点均发生了不同程度的 Pb 丢失而偏离谐和线,但 20 个分析点构成一条很好的不一致线,上下交点年龄值分别为 1839 ± 9 Ma、 255 ± 28 Ma(MSWD = 4.2)。16 个谐和点给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 1834 ± 14 Ma(MSWD = 0.23),与上交点年龄在误差范围内大致相同。另外 9、11、16、17 号等 4 颗锆石分析点的 Th(10×10^{-6} ~ 25×10^{-6})和 U(61×10^{-6} ~ 150×10^{-6})的含量极低,Th/U 比值在 0.05~0.19 之间,可能代表变质成因,根据 3 个谐和点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 246 ± 18 Ma(MSWD = 16),与下交点的年龄基本一致,暗示辉石角闪石岩可能受到印支期变质改造的影响。

表 2 样品 D0389 锆石 LA-ICP-MS 年龄测定结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon dating results of sample D0389

分析点号	元素含量/ 10^{-6}		元素比值		同位素比值						年龄/Ma				
	Th	U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ	1σ	1σ
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ
D0389-1.1	131	387	0.34	0.111 01	0.001 9	4.848 00	0.094 04	0.316 77	0.004 85	1 816	32	1 793	16	1 774	24
D0389-2.1	54	155	0.35	0.110 62	0.002 1	4.809 04	0.092 89	0.315 32	0.004 31	1 810	35	1 786	16	1 767	21
D0389-2.2	294	707	0.42	0.109 20	0.001 3	3.778 11	0.056 03	0.250 95	0.003 43	1 786	23	1 588	12	1 443	18
D0389-3.1	262	308	0.85	0.111 85	0.001 7	4.676 63	0.077 47	0.303 29	0.004 08	1 830	28	1 763	14	1 708	20
D0389-4.1	165	146	1.13	0.111 32	0.001 7	5.029 21	0.086 15	0.327 69	0.004 61	1 821	28	1 824	15	1 827	22
D0389-4.2	34	137	0.25	0.085 44	0.002 2	1.003 55	0.026 69	0.085 20	0.001 48	1 326	52	706	14	527	9
D0389-5.1	130	404	0.32	0.111 38	0.001 5	4.277 19	0.065 66	0.278 54	0.003 79	1 822	24	1 689	13	1 584	19
D0389-6.1	155	207	0.75	0.111 82	0.001 6	4.623 91	0.075 59	0.299 94	0.004 15	1 829	7	1 754	14	1 691	21
D0389-7.1	118	104	1.14	0.110 70	0.002 4	5.037 08	0.114 45	0.330 06	0.005 55	1 811	39	1 826	19	1 839	27
D0389-7.2	79	191	0.41	0.111 48	0.001 8	4.811 93	0.084 33	0.313 10	0.004 31	1 824	30	1 787	15	1 756	21
D0389-8.1	197	175	1.13	0.111 90	0.001 7	4.854 79	0.082 32	0.314 69	0.004 46	1 831	28	1 794	14	1 764	22
D0389-8.2	58	195	0.30	0.096 97	0.002 6	1.934 42	0.044 12	0.143 68	0.002 04	1 567	51	1 093	15	871	12
D0389-9.1	25	448	0.05	0.051 24	0.001 0	0.268 35	0.005 62	0.037 98	0.000 55	252	46	241	4	240	3
D0389-10.1	98	92	1.06	0.113 17	0.001 9	5.022 57	0.090 10	0.321 91	0.004 55	1 851	30	1 823	15	1 799	22
D0389-11.1	10	61	0.17	0.129 95	0.007 7	0.721 19	0.040 23	0.040 25	0.000 79	2 097	107	551	24	254	5
D0389-12.1	140	415	0.34	0.111 35	0.001 4	4.849 00	0.071 93	0.315 86	0.004 29	1 822	23	1 793	12	1 769	21
D0389-13.1	79	149	0.53	0.112 65	0.002 0	4.772 33	0.091 55	0.307 29	0.004 54	1 843	33	1 780	16	1 727	22
D0389-14.1	145	450	0.32	0.112 71	0.001 6	4.806 87	0.079 68	0.309 36	0.004 40	1 844	26	1 786	14	1 738	22
D0389-15.1	124	234	0.53	0.113 00	0.001 6	4.902 40	0.080 27	0.314 68	0.004 36	1 848	27	1 803	14	1 764	21
D0389-15.2	176	592	0.30	0.113 08	0.001 7	4.823 15	0.079 55	0.309 36	0.004 25	1 849	27	1 789	14	1 738	21
D0389-16.1	23	122	0.19	0.052 26	0.001 7	0.285 45	0.009 52	0.039 62	0.000 62	297	78	255	8	250	4
D0389-17.1	13	150	0.09	0.050 29	0.002 0	0.277 25	0.010 91	0.039 98	0.000 71	208	94	248	9	253	4
D0389-18.1	119	86	1.39	0.113 27	0.001 9	4.740 07	0.083 41	0.303 55	0.004 15	1 853	30	1 774	15	1 709	21
D0389-19.1	195	392	0.50	0.112 70	0.001 6	4.948 50	0.079 60	0.318 48	0.004 22	1 843	27	1 811	14	1 782	21

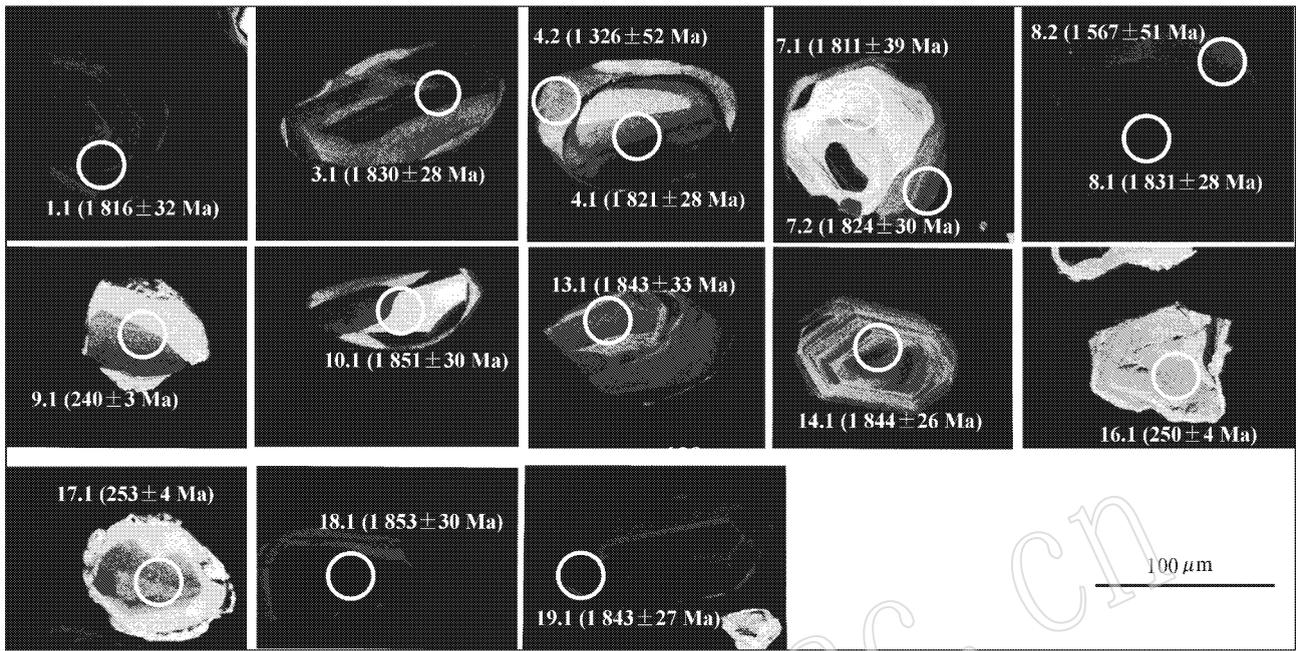


图 4 样品 D0389 锆石 CL 图像
Fig. 4 Zircon CL images of sample D0389

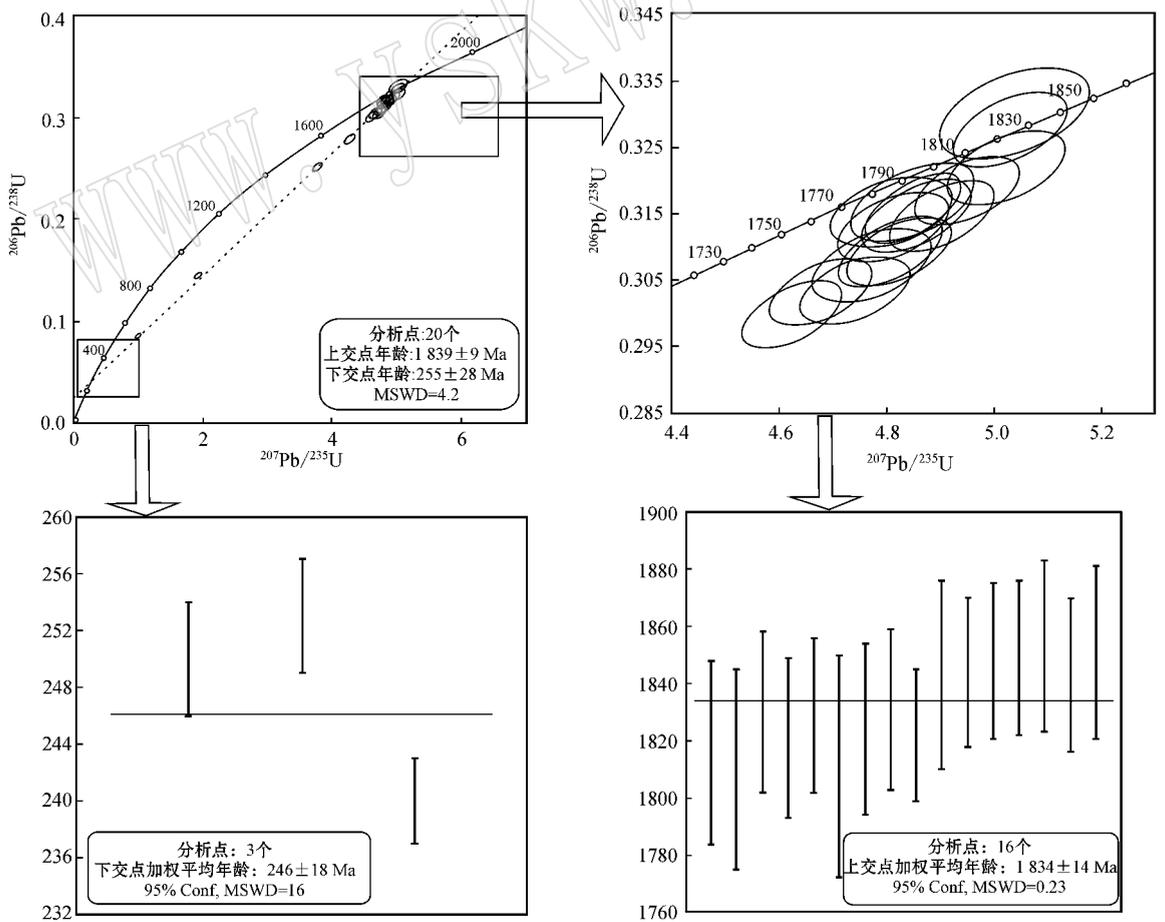


图 5 样品 D0389 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of sample D0389

4.2.2 D3415

对阳起石岩中的 15 颗锆石完成了 17 个测点的 LA-ICP-MS 分析, U-Pb 同位素组成见表 3。测年锆石大部分为短柱状或长柱状, 长/宽比为 2:1~3:1, 颗粒大小约 100~140 μm (图 6)。测年结果显示, 11 颗锆石 13 个分析点的 Th ($42 \times 10^{-6} \sim 427 \times 10^{-6}$) 和 U ($96 \times 10^{-6} \sim 548 \times 10^{-6}$) 含量相对较高, 相应的 Th/U 比值范围为 0.23~1.49, 锆石岩浆环带与板条状特征清楚, 为典型岩浆锆石; 5.1, 7.1 号 2 颗锆石具核边结构, 核部具分带特征, 2 个分析点 Th ($170 \times 10^{-6} \sim 248 \times 10^{-6}$) 和 U ($513 \times 10^{-6} \sim 785 \times$

10^{-6}) 含量较高, Th/U 比值范围为 0.22~0.48, 为岩浆锆石, 边部无分带, 为变质增生边, 由于增生边太窄, 无法进行测年分析, 不能确定变质时代; 上述 13 颗锆石 15 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄范围为 1 812~1 855 Ma。在谐和图上 (图 7), 有 11 个点落在谐和线上, 其余 4 个点因 Pb 丢失而偏离谐和线, 但 15 个分析点构成一条很好的不一致线, 上下交点年龄值分别为 $1 851 \pm 17 \text{ Ma}$ 、 $225 \pm 7 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.09)。11 个谐和点给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $1 839 \pm 17 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.22), 与上交点年龄接近。

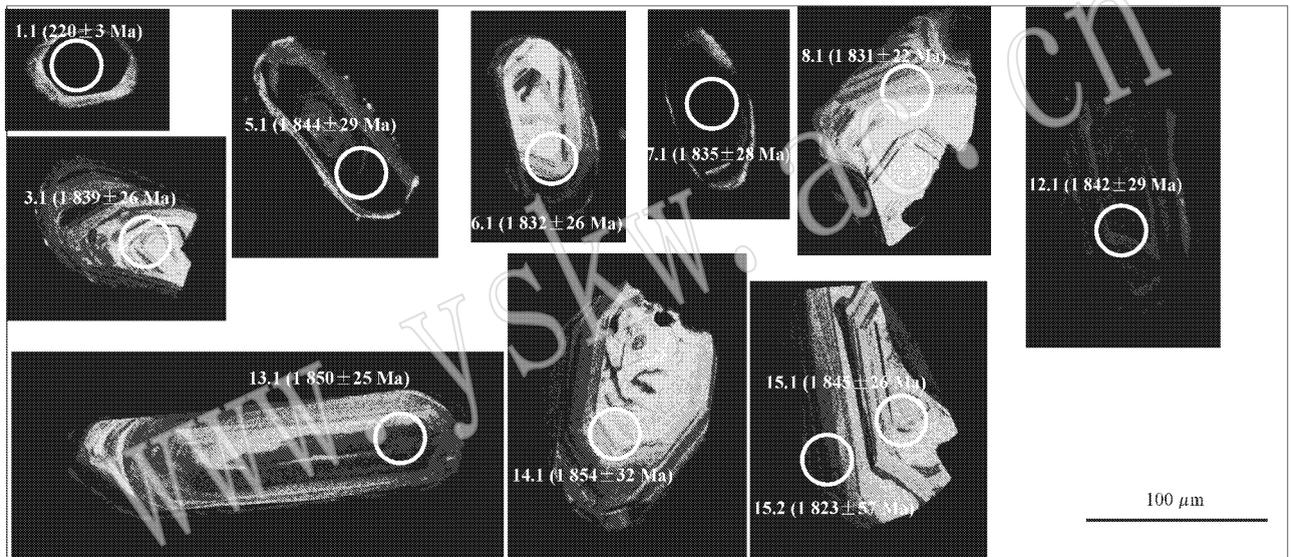


图 6 样品 D3415 锆石 CL 图像

Fig. 6 Zircon CL images of sample D3415

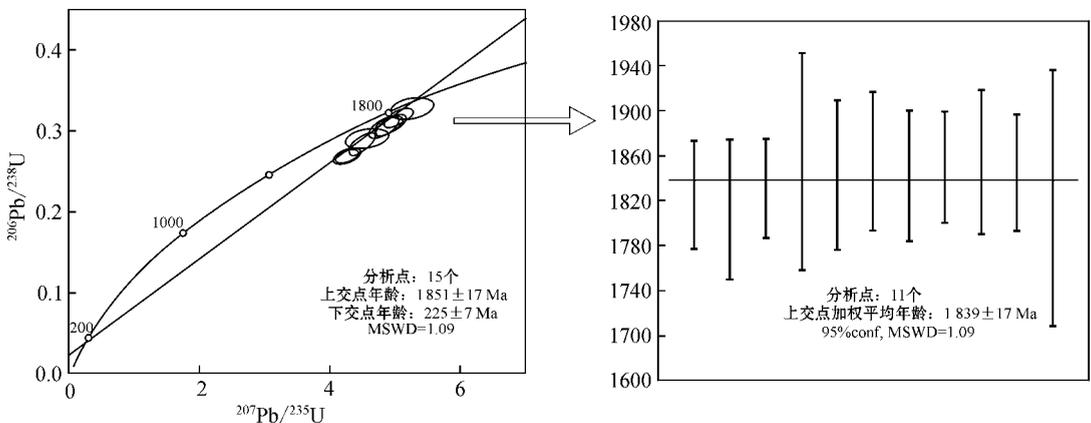


图 7 样品 D3415 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram of sample D3415

表 3 样品 D3415 锆石 LA-ICP-MS 年龄测定结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon dating results of sample D3415

分析点号	元素含量/ 10^{-6}			元素比值			同位素比值						年龄/Ma		
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
D3415-1.1	38	2845	0.01	0.05159	0.00103	0.24704	0.00366	0.03473	0.00047	47	224	3	220	3	
D3415-2.1	9	769	0.01	0.04917	0.00120	0.25577	0.00659	0.03772	0.00063	58	231	5	239	4	
D3415-3.1	141	348	0.41	0.11245	0.00157	4.31648	0.06796	0.27841	0.00373	26	1697	13	1583	19	
D3415-4.1	150	296	0.51	0.11159	0.00143	4.96243	0.07483	0.32255	0.00439	24	1813	13	1802	21	
D3415-4.2	197	433	0.45	0.11076	0.00185	4.99328	0.09514	0.32693	0.00503	31	1818	16	1823	24	
D3415-5.1	170	785	0.22	0.11274	0.00179	4.15602	0.07664	0.26734	0.00410	29	1665	15	1527	21	
D3415-6.1	427	287	1.49	0.11200	0.00156	4.13477	0.06644	0.26777	0.00372	26	1661	13	1529	19	
D3415-7.1	248	513	0.48	0.11219	0.00171	4.14860	0.06908	0.26823	0.00356	28	1664	14	1532	18	
D3415-8.1	83	250	0.33	0.11190	0.00135	4.89266	0.07101	0.31714	0.00430	22	1801	12	1776	21	
D3415-9.1	42	96	0.44	0.11342	0.00297	5.14172	0.13612	0.32859	0.00563	48	1843	23	1832	27	
D3415-10.1	114	204	0.56	0.11265	0.00198	4.68691	0.08522	0.30182	0.00405	33	1765	15	1700	20	
D3415-11.1	116	294	0.39	0.11344	0.00192	4.85494	0.08587	0.31045	0.00409	31	1794	15	1743	20	
D3415-12.1	59	254	0.23	0.11263	0.00178	4.87492	0.08195	0.31395	0.00412	29	1798	14	1760	20	
D3415-13.1	238	325	0.73	0.11311	0.00150	4.96981	0.07632	0.31866	0.00430	25	1814	13	1783	21	
D3415-14.1	88	220	0.40	0.11334	0.00195	4.83680	0.09220	0.30945	0.00463	32	1791	16	1738	23	
D3415-15.1	86	211	0.41	0.11281	0.00161	4.76743	0.07715	0.30645	0.00418	26	1779	14	1723	21	
D3415-15.2	166	548	0.30	0.11144	0.00341	4.45978	0.13494	0.29035	0.00513	57	1724	25	1643	26	

另外2颗锆石(编号1.1, 3.1)为短柱状,颗粒大小 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,面状分带特征,具有低的Th含量($9\times 10^{-6}\sim 38\times 10^{-6}$)和高的U含量($769\times 10^{-6}\sim 2\ 845\times 10^{-6}$),Th/U比值为0.01,为变质成因。2个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在220~239 Ma之间,与下交点年龄基本一致,反映阳起石岩可能受到印支期变质改造作用的影响。

5 讨论

由于基性岩的锆石既可能从围岩中捕获而来,也可以从基性岩浆中结晶,而只有从基性岩浆中结晶的锆石的年龄才能代表基性岩形成年龄。因此,对于基性岩年龄的测定必须选择原生的岩浆锆石进行测定(侯贵廷等,2005)。本文样品的锆石具有较宽的岩浆环带或无明显分带特征,与一些基性岩浆中结晶锆石的特征(吴元保等,2004)类似,部分颗粒具有清楚的振荡环带,这种类型的锆石在基性岩脉中也有报道(Kröner *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008a)。绝大部分锆石具有较低的Th、U含量和较高的Th/U比值(>0.2),这些特征与基性岩浆中结晶的锆石特征一致。因此,本文进行年龄测定的锆石为基性岩中结晶的锆石颗粒。这些岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值分别为 $1\ 834\pm 14\ \text{Ma}$ (MSWD=0.23)和 $1\ 839\pm 17\ \text{Ma}$ (MSWD=0.22),与不一致线上交点年龄一致,应该代表了辉石角闪石岩与阳起石岩的形成年龄。

众所周知,在古元古代发生过超大陆聚合和裂解有关的重要地质事件,如全球性的碰撞造山事件和Columbia超级大陆的形成(Zhao, 2001; Zhao *et al.*, 2006)、大陆地壳的快速生长(Condie, 1998, 2000)、超级地幔柱活动(Condie *et al.*, 2001)等。在中国东部的华北陆块(Zhao, 2001; Zhai and Liu, 2003; Wan *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007)和扬子陆块(Zhang *et al.*, 2006a, 2006b; Liu *et al.*, 2008b)同样存在着与Columbia超大陆聚合和裂解有关的古元古代大规模构造-岩浆作用的响应。在武夷地块中,古元古代构造-热事件多有报道,如古元古代(1.89~1.76 Ga)的A型和S型花岗岩和裂谷型基性岩(天井坪组)等(Li, 1997; Li *et al.*, 2000), Yu等(2012)提出华夏陆块可能存在一个与Columbia超大陆汇聚有关的造山旋回:1.89~1.83 Ga为同造山-后造山期,1.80~

1.76 Ga为非造山(裂谷)期;然而, Xiang等(2008)强调板内基性-超基性的岩浆活动早在~1.85 Ga就已开始; Xia等(2012)认为武夷地块北部古元古代A和S型花岗岩(1.89~1.85 Ga)形成于板内裂谷环境。我们注意到,武夷地块古元古代岩浆活动其实在相对较短的时间内(1.89~1.76 Ga)发生,暗示它们可能是同一构造-热事件背景下的产物。

武夷地块~1.83 Ga的镁铁质-超镁铁质岩的发现,为深入理解武夷地块的早期构造格局的演化提供了新的地质内容。一般认为,基性岩中锆石的产出指示其结晶岩浆处于Zr饱和状态,因此这种镁铁质-超镁铁质岩浆可能由相对难熔的岩石圈地幔发生熔融所形成的(Zheng *et al.*, 2008)。形成于板内的基性岩通常与大陆地壳或岩石圈伸展作用产生的刚性破裂相联系(Mathieu *et al.*, 2008),它们是大陆板块刚性化及其古应力状态最直接的地质标志(Desmond *et al.*, 2008)。本文研究结果显示,武夷地块发育有1.83 Ga的镁铁质超镁铁质岩石组合,它们的产出意味着该时期武夷地块已经具备足够的刚性特征,以致能产生大规模的脆性破裂,而这套镁铁-超镁铁质岩石组合的产生可能与地幔对流作用有关,因此我们推测武夷地块克拉通化的完成应不晚于1.83 Ga。

6 结论

(1)获得武夷地块浙西南龙游-金华地区辉石角闪石岩、阳起石岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为 $1\ 834\pm 14\ \text{Ma}$ (MSWD=0.23)、 $1\ 839\pm 17\ \text{Ma}$ (MSWD=0.22),为古元古代岩浆活动的产物,并受到印支期一定的变质改造作用影响。

(2)结合区域资料,可以认为,~1.83 Ga的龙游-金华地区的镁铁质-超镁铁质岩的形成,可能与Columbia超大陆裂解导致的大陆岩石圈的伸展构造环境有关。

致谢 在野外工作中得到袁强高级工程师、程光华教授级高工的帮助;在研究过程中得到邢光福研究员、陈志洪助理研究员、姜杨助理研究员、王涛研究员、余明刚助理研究员、罗以达教授级高工、杨经绥研究员、张泽明研究员、贺振宇博士后、向华博士后的指导与帮助;董学发工程师参与了部分野外工作,在此一并感谢。

References

- Andersen T. 2002. Corrections of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192 : 59~79.
- Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents : A mantle avalanche connection [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 163 : 97~108 (10.1016/S0012-821X(98)00178-2).
- Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents : A mantle avalanche connection [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 163 : 97~108.
- Condie K C. 2000. Episodic continental growth models : Afterthoughts and extension [J]. *Tectonophysics*, 322 : 153~162.
- Condie K C, Des Marais D J and Abbott D. 2001. Precambrian superplumes and supercontinents : A record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates [J]. *Precambrian Research*, 106 : 239~260.
- Desmond E M, John R B, John W, *et al.* 2008. Creation of a continent recorded in zircon zoning [J]. *Geology*, 36(3) : 239~242.
- Ernst R E, Buchan K L, West T D, *et al.* 1996. Diabase (Dolerite) dike swarms of the world [J]. *Open File-Geol Surv Can.*, 3241 : 1~104.
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong, *et al.* 1995. A Geochronological study on early Proterozoic granitic rocks, Southwestern Zhejiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1) : 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun and Tong Zhaoxu. 1992. Southwest Zhejiang Precambrian Geology [M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~278 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Liu Yulin, Li Jianghai, *et al.* 2005. The SHRIMP U-Pb chronology of mafic dyke swarms : A case study of Laiwu diabase dykes in western Shandong [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 3(24) : 179~185 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation microprobe- inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 211 : 47~69.
- Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, *et al.* 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China : Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 146 : 45~67.
- Kullerød K, Skjervli K P, Corfu F, *et al.* 2006. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dikes, West Troms Basement Complex, Norway : The concluding act of early Palaeoproterozoic continental breakup [J]. *Precambrian Research*, 150 : 183~200.
- Li Jianghai, He Wenyuan and Qian Xianglin. 1997. Genetic mechanism and tectonic setting of proterozoic mafic dyke swarm its implication for paleoplate reconstruction [J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(3) : 272~281 (in Chinese with English abstract).
- Li X H. 1997. Timing of the Cathaysia Block formation : constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology [J]. *Episodes*, 20 : 188~192.
- Li X H, Sun M, Wei G J, *et al.* 2000. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of amphibolites in the Cathaysia Block, southeastern China : evidence for an extremely depleted mantle in the Paleoproterozoic [J]. *Precambrian Research*, 102 : 251~262.
- Ludwig K R. 2001. Users Mantle for Isoplot/Ex (rev 2.49) : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochron Cent Spec Pub., 1~55.
- Liu S, Hu R Z, Gao S, *et al.* 2008a. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, East China : Constraints on their petrogenesis and geodynamic significance [J]. *Chem. Geol.*, 255 : 325~349.
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, *et al.* 2008b. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies [J]. *Am. J. Sci.*, 308 : 421~468.
- Mathieu L, Van W D, Vries B, *et al.* 2008. Dykes, cups, saucers and sills : Analogue experiments on magma intrusion into brittle rocks [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 271 : 1~13.
- Williams H, Turner S, Kelley S, *et al.* 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet : New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism [J]. *Geology*, 29 : 339~342.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16) : 1859~1864 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton : Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event [J]. *Precambrian Research*, 149 : 249~271.
- Wang Y J, Zhao G C, Fan W M, *et al.* 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dikes from western Shandong Province : Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 154 : 107~124.
- Xiang H, Zhang L, Zhou H W, *et al.* 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from mafic-ultramafic basement rocks of southwestern Zhejiang : response to the Indosinian orogeny of the metamorphic basement of the Cathaysia Block [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 51 : 788~800.

- Xia Y, Xu X S and Zhu K Y. 2012. Paleoproterozoic S- and A-type granites in southwestern Zhejiang: Magmatism metamorphism and implications for the crustal evolution of the Cathaysia basement[J]. *Precambrian Research*, 216~219: 177~207.
- Yale L B and Carpenter S J. 1998. Large igneous provinces and giant dike swarms: Proxies for supercontinent cyclicality and mantle convection[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 163: 109~122.
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton [J]. *Geol. Mag.*, 138: 87~91.
- Zhai M G and Liu W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 122: 183~199.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2006. Some key issues in reconstructions of Proterozoic supercontinents[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 28: 3~19.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2006a. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146: 16~34.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2006b. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Research*, 151: 265~288.
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, *et al.* 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 163: 351~383.
- Yu J H, Wang L J, 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 J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2012. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 424~449.
- Zhao Lei and Zhou Xiwen. 2012. The metamorphic evolution and pT path of pelitic granulite from the Badu Group in southwestern Zhejiang Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(1): 61~72(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义[J]. *高校地质学报*, 3(3): 272~281.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 等. 1995. 浙西南古元古代花岗岩岩石的年代[J]. *岩石矿物学杂志*, 14(1): 1~8.
- 胡雄健, 许金坤, 童朝旭. 1991. 浙西南前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1~278.
- 侯贵廷, 刘玉琳, 李江海, 等. 2005. 关于基性岩墙群的 U-Pb SHRIMP 地质年代学的探讨——以鲁西莱芜辉绿岩岩墙为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 179~185.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1 859~1 604.
- 赵磊, 周喜文. 2012. 浙西南八都群泥质麻粒岩的变质演化与 pT 轨迹[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(1): 61~72.