文章编号: 0254 - 5357(2014)06 - 0892 - 08

LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 同位素定年:对闽北地区稻香组形成时代的制约

赵希林[1], 余明刚[1*], 姜 杨[1], 李亚楠[1,2], 靳国栋[1], 陈志洪[1], 邢光福[1]
(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 闽北地区地区基岩的露头连续较差,但其独特的岩石组合及变质变形特征表明稻香组确实存在,稻香组在前人的研究工作中一直作为寒武纪浅变质岩系,曾测得其 Sm - Nd 模式年龄值为(500 ± 35) Ma,但是由于测试方法的局限性,这一形成年龄的可靠性值得商榷。激光剥蚀 - 电感耦合等离子体质谱(LA - ICP - MS)U - Pb 同位素年代学测试技术能为研究地层的形成时代提供最直接、精确的证据。本次研究对稻香组气孔状玄武岩和硅质岩中的锆石进行 LA - ICP - MS U - Pb 同位素年代学测试,为研究稻香组的层位归属提供了精确的地质年代学证据。结果表明,稻香组中气孔状玄武岩最新的一组年龄为(111.4 ± 2.0) Ma,表明其形成于晚中生代早白垩世,这一年龄应代表稻香组形成年龄的下限,为稻香组形成的最早年龄提供了约束,这一结果也与硅质岩中最小一组年龄 124 Ma 相一致(硅质岩中最新的一组年龄代表了其形成年龄的下限)。气孔状玄武岩和硅质岩的年龄表明稻香组很可能包括了元古代 - 古生代 - 中生代的物质信息,需要进一步将其解体,至少形成于中生代的气孔状玄武岩和硅质岩应单独划分出来。稻香组年龄的获得丰富了闽西北地区前寒武纪基底演化资料,为研究该区区域构造演化提供了新的年龄支持。

稻香组硅质岩样品采集

稻香组凝灰质粉砂岩样品采集

关键词: 稻香组; 硅质岩; 玄武岩; LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 同位素定年; 晚中生代早白垩世; 闽北地区
中图分类号: P588.145; P597.3 **文献标识码:** A

闽北—浙西南地区前寒武纪基底岩石分布广泛,出露有天井坪岩群、大金山岩组、南山岩组、马面山岩群(东岩组、大岭组、龙北溪组)、陈蔡岩群、八都岩群、盖洋群等,是探讨华南大陆边缘早期地壳演化历史的重要窗口。

稻香组是在 1∶50000 政和县、后山、川石幅区调时创名,命名地点位于区内政和县东北 3.5 km 处的稻香村,由 1∶200000 浦城幅区调项目在政和附近所划分的"溪口组"解体而来,系指出露于政和县城关、星溪、稻香—铁山一带在龙北溪组或东岩组细碧角斑岩建造之上的一套浅变质岩系,其岩石组合、变质特点与本区其他变质地层有很大差别,由于其在闽北地区相对较广泛,且与闽北其他变质岩系也毫无可比性,出露因此单独建组。

由于闽北地区基岩露头连续较差,顶底出露不全,接触关系不明,迄今为止关于稻香组的岩石组合、时代问题以及存在与否一直以来均存不少的异议,制约了对稻香组的进一步研究。1∶50000 政和县、后山、川石幅区调项目在星溪本组沉凝灰岩和绢云千枚岩中采获微古植物 *Trematosphaeridium holtedahlii*、

收稿日期: 2014 - 05 - 04; **修回日期:** 2014 - 11 - 05; **接受日期:** 2014 - 11 - 15
基金项目: 中国地质调查局基础地质调查项目(1212011085446,12120113070800)
作者简介: 赵希林,硕士,助理研究员,主要从事岩石学及矿床学研究。E-mail: zxl24@126.com。
通讯作者: 余明刚,在读博士,助理研究员,主要从事火山岩研究。E-mail: ymg1003@126.com。

Trematosphaeridium sp.、*Protosphaeridium* sp.、*Laminarites antiquissimus*,在政和稻香—高堀剖面大理岩中采获的 *Turuchanica temete*、几丁虫 *Chitinozoan* 微古生物化石主要见于南方震旦纪,部分见于青白口纪和蓟县纪或早寒武世;徐一伟等[1]在政和稻香组安山质凝灰岩中获得的 Sm－Nd 模式年龄值为(800±50) Ma,据其中绿片岩组合及沉凝灰岩的模式年龄,将之归并到东岩组;揭育金[2]则认为稻香—高堀剖面是一套呈断片叠置的不同时代的岩石组合,而把稻香组定义为一套细砂岩、粉砂岩、硅质岩、泥岩的组合,时代为晚古生代;1∶25 万周宁幅区调项目测得侵入于稻香组的中基性超浅成侵入岩(斜长角闪石岩)Sm－Nd 模式年龄值为(500±35) Ma,认为稻香组的真实成岩年龄应介于 800～500 Ma 之间,但是由于测试方法的局限性,这一形成年龄的真实性和可靠性值得进一步的验证。虽然该地区基岩的露头连续差,目前还未获得稻香组更多令人信服的证据,但其独特的组合及变质变形特征,表明其确实存在,而对它的全面认识仍有待进一步研究。本文在对政和县星溪剖面开展野外地质剖面测量的基础上,对稻香组中硅质岩和气孔状玄武岩的锆石通过高精度的 LA－ICP－MS U－Pb 同位素年代学研究,限定其形成时代,为闽北地区构造演化提供新的资料。

1　闽北地区稻香组的分布特征

政和县稻香—高堀剖面为稻香组的正层型剖面,由闽北地质大队于 1983 年 9 月实测,1∶25 万周宁幅区调项目对此剖面进行了修测。政和县稻香－高堀剖面稻香组下部为(绿帘)阳起石化安山质(晶屑)凝灰岩,夹薄层粉砂质泥岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩;中部为硅质岩、泥质硅质岩、硅质泥岩互层,夹少量凝灰质细砂岩;上部(斜长)(绿帘)阳起片岩、大理岩,夹少量的泥质硅质岩。

本组岩石在区内各地岩性组合基本可以对比,与建组剖面岩石面貌也极为相似,在政和星溪本组中还见夹有薄层的沉凝灰岩、(绢云)千枚岩等。政和铁山一带还夹有碳质泥岩或石煤,部分变质成为石墨片岩。

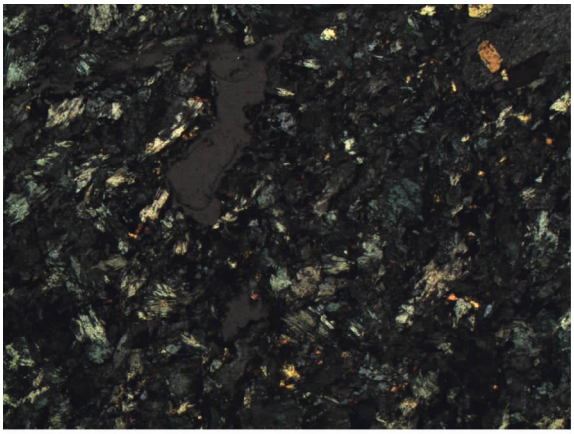
2　样品特征和 LA－ICP－MS U－Pb 定年测试

2.1　样品特征

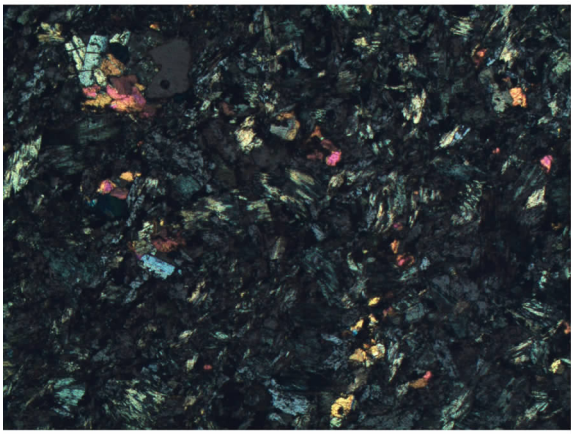
本次研究对剖面上的硅质岩和气孔玄武岩进行了精确的锆石 LA－ICP－MS U－Pb 测试工作,用于测试的样品均采自较新鲜露头,样品未风化,无蚀变现象,均匀无条带。

117DX－1 号样品岩性为硅质岩,岩石角呈砾状,灰白色。

117DX－3 号样品岩性为气孔状玄武岩,岩石呈灰绿色,气孔状构造,细粒－隐晶质结构,见少量的橄榄石斑晶(在局部聚集形成聚斑结构),基质由玄武质玻璃、少量的斜长石和辉石组成(见图 1)。



117DX-1号样品硅质岩



117DX-3号样品气孔状玄武岩

图 1　稻香组气孔状玄武岩镜下照片(50 倍)

Fig. 1　Mineralogical characteristics of Basalts of Daoxiang formation

2.2　LA－ICP－MS U－Pb 定年测试方法

锆石的分离采用传统的人工重砂分离,分离工作是在河北省区域地质矿产调查研究所完成的。样品破碎后手工淘洗分离出重砂,经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石(均大于 1000 粒)。选取代表性锆石制靶后通过透射光和反射光照相,并进行阴极发光分析,以确定锆石颗粒的内部结构。

锆石制靶和测年均在合肥工业大学 LA－ICP－MS 实验室完成,采用的仪器型号为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 Geo Las 2005。仪器激光束版直径为 32 μm,激光脉冲重复频率为 6 Hz。使用人工合成硅酸盐玻璃质标准矿物 NIST SRM610 进行仪器最佳化。每轮(run)测试中包括已知年龄样品 Mud Tank(TIMS 年龄:(732±5) Ma[3]);本次测年过程中,Mud Tank 的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均结果为(731.5±3.6) Ma (MSWD=0.38,n=60),与 TIMS 年龄结果在误差范围内一致。U－Pb 同位素定年中采用哈佛大学国际标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次锆石标准 91500。对于与分析时间有关的 U－Th－Pb 同位素比值漂移,利用锆石标准 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正[4]。锆石标准 91500 的 U－Th－Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等[5]。分析数据采用 ICPMSDataCal 程序计算获得同位素比值、年龄及误差[4,6],详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等[4,6－7]。锆石样品的 U－Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 完成[8]。

3　锆石 U－Pb 年龄和稀土元素特征

3.1　稻香组气孔玄武岩和硅质岩锆石 U－Pb 年龄

样品 117DX－1 中锆石为无色透明,阴极发光图像显示岩石中大部分锆石晶形发育较差,多为碎屑锆石,锆石的 Th/U 值介于 0.11～1.28 之间,平均值为 0.44。样品的测试数据见表 1,单个数据点的误差为 1σ。对 32 粒锆石的测试结果表明,其年龄较为复杂,跨度为 124～952 Ma,其中最晚一组年龄为 124 Ma,应该代表其形成年龄的下限,稻香组硅质岩的形成时代不早于 128 Ma(图 2a);同时样品中其他测点给出不同的年龄信息,主要有几组:952 Ma、738 Ma、576 Ma、400～451 Ma、388 Ma、179～140 Ma,这些锆石应为继承性锆石,表现出了源区的复杂性。

样品 117DX－3 中锆石为无色透明,阴极发光图像显示其锆石分两种:一种是锆石晶形发育良好,具有韵律环带,显示岩浆锆石的特征(一般认为 Th/U 值大于 0.1 的锆石为岩浆期锆石)[9];另外一种具有一定的磨圆,可能为继承性锆石,本次研究对这两种锆石均进行了测试工作。样品的测试数据见表 1,单个数据点的误差为 1σ。对 34 粒锆石的测试结果表明,锆石年龄复杂,其中 14 个岩浆期锆石具有相对较高的 Th/U 值(介于 0.91～2.87 之间,平均值为 1.67),其 Th 和 U 的含量较高(分别介于 55～2080 μg/g 和 28～756 μg/g 之间,平均值分别为 625 μg/g 和 351 μg/g),14 个测点有谐和的 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 和 $n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$ 表面年龄,数据点全部落入谐和线上或者附近区域(图 2b),获得的 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 加权平均年龄为(111.4±2.0) Ma(n=14, MSWD=8,其中 7 个测点 4、7、9、10、11、28、34 偏离谐和线,不计入统计范围,见图 2b),这一年龄应代表其形成年龄,属于晚中生代早白垩世;继承性锆石的年龄较为复杂,其年龄变化范围介于 170～1832 Ma 之间,暗示了其受到了地壳的混染作用及物源的复杂性。

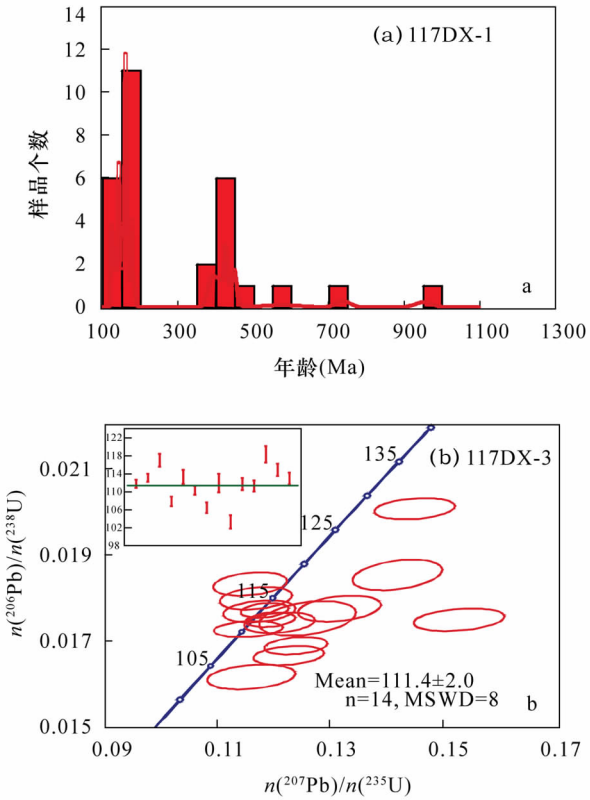


图 2　样品 117DX－1 年龄频谱图(a)和 117DX－3 锆石 U－Pb年龄谐和图(b)

Fig. 2　Relative probability density diagram of ages (a) and U-Pb Concordia diagram for the samples 117DX-1

3.2　锆石稀土元素特征

样品 117DX－1 中锆石均富集 HREEs,锆石稀土元素球粒陨石标准化曲线呈左倾型(图 3),重稀土元素逐步富集,并显示明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常;同时,其年龄与稀土含量表现出一定的相关性,锆石年龄越老,其∑REEs 越高,反之,锆石年龄越年轻,其∑REEs越低,造成这一现象的原因尚不清楚。

表 1　政和地区稻香组硅质岩(117DX－1)及气孔状玄武岩(117DX－3)锆石 LA－ICP－MS U－Pb 定年结果

Table 1　LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating results of Cherts and vesicular basalt of Daoxiang formation in Zhenghe

点位	样品 117DX－1(硅质岩)												
	U (μg/g)	Th (μg/g)	Th/U	$^{206}Pb^*/^{238}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{235}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$ (±1σ)		$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄 (Ma, ±1σ)		$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (Ma, ±1σ)	
1	306	230	0.75	0.0200	0.0005	0.1309	0.0065	0.0480	0.0023	98	111	128	3
2	143	138	0.96	0.0209	0.0006	0.1554	0.0110	0.0542	0.0037	376	156	133	4
3	653	157	0.24	0.0643	0.0017	0.4879	0.0157	0.0549	0.0015	409	63	402	10
4	802	213	0.27	0.0256	0.0007	0.1786	0.0068	0.0504	0.0017	213	50	163	4
5	576	178	0.31	0.0621	0.0016	0.5031	0.0174	0.0587	0.0017	567	60	388	10
6	447	201	0.45	0.0693	0.0018	0.6158	0.0239	0.0644	0.0021	754	75	432	11
7	272	208	0.76	0.1592	0.0042	1.7268	0.0582	0.0790	0.0024	1172	55	952	23
8	1309	190	0.15	0.0257	0.0008	0.2022	0.0104	0.0569	0.0024	500	97	164	5
9	1048	240	0.23	0.0253	0.0007	0.2051	0.0077	0.0589	0.0020	561	72	161	4
10	416	167	0.40	0.0621	0.0017	0.4949	0.0199	0.0578	0.0021	524	84	388	10
11	659	178	0.27	0.0717	0.0020	0.5762	0.0194	0.0583	0.0017	543	65	446	12
12	3240	546	0.17	0.0257	0.0007	0.1787	0.0057	0.0502	0.0013	211	63	164	4
13	289	200	0.69	0.0222	0.0006	0.1473	0.0072	0.0479	0.0021	94.5	104	142	4
14	1330	286	0.21	0.0265	0.0007	0.1880	0.0068	0.0512	0.0016	250	72	169	4
15	517	229	0.44	0.0224	0.0006	0.2449	0.0147	0.0787	0.0045	1166	114	143	4
16	3029	498	0.16	0.0249	0.0006	0.1751	0.0060	0.0508	0.0014	232	65	158	4
17	553	145	0.26	0.0934	0.0093	0.8550	0.1254	0.0612	0.0029	656	102	576	55
18	456	126	0.28	0.0660	0.0017	0.5388	0.0186	0.0589	0.0018	565	65	412	11
19	1423	1301	0.91	0.1213	0.0033	1.4853	0.0486	0.0895	0.0030	1417	65	738	19
20	591	167	0.28	0.0679	0.0020	0.6854	0.0452	0.0696	0.0035	917	104	424	12
21	1007	289	0.29	0.0287	0.0007	0.2084	0.0076	0.0525	0.0017	306	72	182	5
22	308	392	1.28	0.0210	0.0006	0.2289	0.0126	0.0796	0.0042	1187	104	134	4
23	75.0	36.0	0.48	0.0225	0.0003	0.1612	0.0085	0.0522	0.0028	295	122	143	1.9
24	139	68.0	0.49	0.0236	0.0003	0.1724	0.0081	0.0528	0.0025	320	112	150	1.6
25	1134	71.2	0.06	0.0252	0.0002	0.1852	0.0036	0.0531	0.0010	332	44.4	161	1.4
26	814	97.9	0.12	0.0281	0.0003	0.1964	0.0038	0.0505	0.0010	220	44.4	179	1.7
27	202	23.1	0.11	0.0686	0.0005	0.5252	0.0113	0.0554	0.0012	428	43.5	428	3.1
28	96.1	43.0	0.45	0.0200	0.0003	0.1766	0.0088	0.0647	0.0032	765	104	128	1.7
29	74.3	27.6	0.37	0.0195	0.0003	0.1427	0.0066	0.0539	0.0026	369	109	124	1.7
30	193	34.0	0.18	0.0725	0.0008	0.6311	0.0140	0.0630	0.0013	709	46.3	451	4.8
31	1077	562	0.52	0.0256	0.0003	0.2027	0.0044	0.0573	0.0012	502	48.1	163	1.6
32	196	60.6	0.31	0.0227	0.0003	0.1631	0.0053	0.0521	0.0017	300	74.1	145	1.7

点位	样品 117DX－3(气孔玄武岩)												
	U (μg/g)	Th (μg/g)	Th/U	$^{206}Pb^*/^{238}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{235}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$ (±1σ)		$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄 (Ma, ±1σ)		$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (Ma, ±1σ)	
1	531	1191	2.24	0.0175	0.0001	0.1195	0.0036	0.0495	0.0013	172	63	112	1
2	756	2080	2.75	0.0177	0.0001	0.1185	0.0034	0.0486	0.0013	128	61	113	1
3	261	278	1.06	0.0183	0.0002	0.1159	0.0053	0.0463	0.0022	13.1	107.4	117	1
4	316	446	1.41	0.0189	0.0002	0.2305	0.0127	0.0882	0.0046	1388	102	121	1
5	926	779	0.84	0.0345	0.0006	0.7684	0.0367	0.1522	0.0051	2372	53	219	4
6	531	1479	2.78	0.0169	0.0002	0.1240	0.0045	0.0535	0.0018	346	50	108	1
7	340	467	1.38	0.0192	0.0002	0.1482	0.0072	0.0561	0.0027	457	107	123	1
8	203	510	2.52	0.0177	0.0002	0.1317	0.0060	0.0547	0.0023	398	101	113	2
9	352	612	1.74	0.0178	0.0002	0.1859	0.0081	0.0763	0.0033	1106	85	114	1
10	348	315	0.91	0.0201	0.0002	0.1450	0.0058	0.0524	0.0019	302	86	128	1
11	290	343	1.18	0.0182	0.0003	0.2142	0.0159	0.0830	0.0050	1278	117	116	2
12	470	826	1.76	0.0173	0.0002	0.1156	0.0050	0.0485	0.0020	124	92	110	1
13	284	374	1.32	0.0167	0.0002	0.1227	0.0051	0.0535	0.0020	346	83	107	1
14	215	196	0.91	0.0175	0.0003	0.1260	0.0070	0.0524	0.0028	302	116	112	2
15	178	67.6	0.38	0.3287	0.0032	5.3291	0.1239	0.1172	0.0011	1915	17	1832	15
16	30.1	32.1	1.06	0.0267	0.0009	1.1266	0.0934	0.2878	0.0209	3406	113	170	6

（续表 1）

点位	样品 117DX－3（气孔玄武岩）												
	U (μg/g)	Th (μg/g)	Th/U	$^{206}Pb^*/^{238}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{235}U$ (±1σ)		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$ (±1σ)		$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄 (Ma, ±1σ)		$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (Ma, ±1σ)	
17	265	287	1.08	0.0162	0.0002	0.1161	0.0064	0.0524	0.0027	302	116	103	1
18	989	123	0.12	0.2497	0.0013	3.9470	0.0830	0.1145	0.0006	1872	10	1437	7
19	651	1209	1.86	0.0175	0.0002	0.1529	0.0066	0.0639	0.0024	739	81	112	1
20	1082	81.6	0.08	0.2451	0.0011	3.7870	0.0944	0.1121	0.0006	1835	9	1413	6
21	619	35.3	0.06	0.0376	0.0003	0.2635	0.0075	0.0508	0.0008	232	71	238	2
22	256	139	0.54	0.0497	0.0005	0.4025	0.0194	0.0586	0.0023	554	87	312	3
23	776	26.7	0.03	0.0373	0.0003	0.2667	0.0072	0.0520	0.0010	283	44	236	2
24	425	720	1.69	0.0174	0.0002	0.1211	0.0051	0.0502	0.0017	211	81	111	1
25	504	112	0.22	0.2926	0.0016	4.7253	0.1051	0.1169	0.0007	1910	11	1654	8
26	967	179	0.18	0.2696	0.0011	4.2620	0.0972	0.1143	0.0006	1869	10	1539	6
27	372	513	1.38	0.0185	0.0003	0.1419	0.0065	0.0559	0.0024	450	96	118	2
28	236	286	1.21	0.0190	0.0003	0.1355	0.0062	0.0527	0.0023	322	98	121	2
29	1056	197	0.19	0.2809	0.0023	4.3398	0.0782	0.1118	0.0006	1829	10	1596	11
30	451	259	0.57	0.0268	0.0003	0.2017	0.0077	0.0551	0.0019	417	78	170	2
31	138	64.8	0.47	0.0628	0.0007	0.4694	0.0171	0.0545	0.0018	394	72	393	4
32	230	661	2.87	0.0180	0.0002	0.1169	0.0052	0.0476	0.0021	79.7	109.3	115	1
33	268	276	1.03	0.0177	0.0002	0.1175	0.0052	0.0483	0.0019	122	93	113	1
34	28.2	55.0	1.95	0.0185	0.0006	0.1836	0.0147	0.0788	0.0072	1166	180	118	4

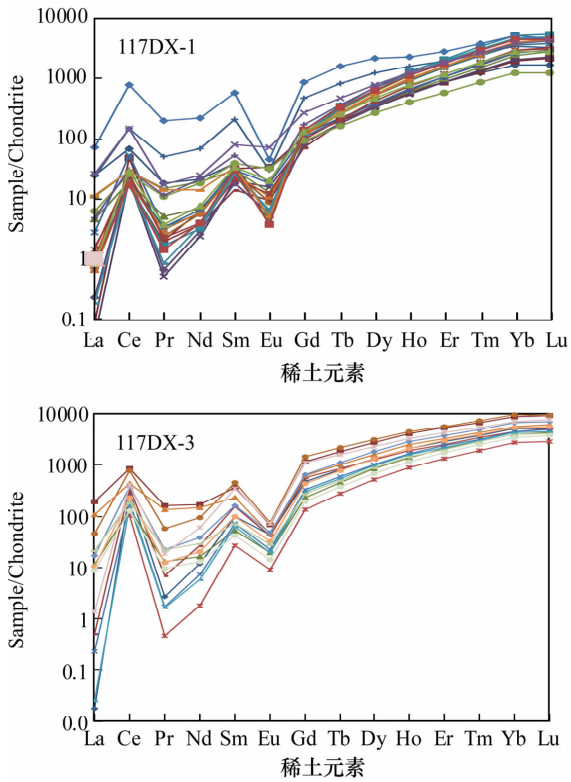


图 3　样品 117DX－1 和 117DX－3 锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 3　Chondrite normalized REE patterns of sample 117DX-1 and 117DX-3

样品 117DX－3 中锆石均富集 HREEs，锆石稀土元素球粒陨石标准化曲线呈左倾型（图 3），这是由于脱晶作用[10]或者是有小部分富集 HREEs 的矿物加入所导致（独居石、褐帘石）[11]。轻稀土元素分馏程度低，并显示明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常，均具有岩浆锆石的特点；但是继承性锆石和岩浆期锆石又显示出一定的差别，继承性锆石的∑REEs 含量相对岩浆期锆石特别低，5 粒年龄大于 1000 Ma 的测点其∑REEs 平均值仅为 963.33 μg/g，12 粒继承性锆石的∑REEs 平均值为 860.70 μg/g，均远小于 21 粒岩浆期锆石（年龄介于 105～130 Ma 之间）的∑REEs 平均值 2294.26 μg/g，这些继承性锆石的 HREEs 元素与岩浆期锆石的 HREEs 元素含量相一致而轻稀土含量低，造成这种原因的可能是由于继承性锆石中富 LREEs 元素的包裹体被破坏而导致的；且继承性锆石的 Eu/Eu* 平均值为 0.20，高于岩浆期锆石的 Eu/Eu* 值（0.15）。

5　锆石 LA－ICP－MS U－Pb 年龄对稻香组的形成时代及物质源区的制约

5.1　锆石 LA－ICP－MS U－Pb 年龄对稻香组形成时代的制约

自 1924 年 Grabau 基于东南沿海地区泥盆纪砂岩不整合于变质基底之上而提出“华夏古陆（Cathaysia）”的概念以来，中外地质学家对华夏地块的地质构造及其演化特征进行了深入的研究[12－25]。华夏地块是一个后期改造作用复杂的地块，以强烈的加里东期和印支期变质与岩浆改造为主要特征[26]。有关华夏地块变质基底的大地构造的意义一直有争论，如许靖华等[27]认为华夏地块是元古宙－中三叠世洋盆于印支运动形成的特提斯型造山带；水涛等[21]认为华夏地块是形成于中元古代

漂移古大陆－华夏古陆;Ren 等[28]认为华夏地块为受加里东期造山运动改造的古陆。

近年来随着锆石定年技术的不断进步,华夏地块前寒武纪基底研究取得了许多重要的进展。如原认为属于晚太古代的天井坪岩群可能形成于古元古代,李献华等[29]利用锆石 SHRIMP U－Pb 法测得天井坪岩群斜长角闪岩中的结晶锆石年龄为(1766 ± 19) Ma,Wan 等[24]也测定了天井坪岩群黑云片麻岩的结晶锆石 SHRIMP U－Pb 法年龄,测得其$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1790 ± 19) Ma,与李献华等[29]的年龄数据接近,古元古代地层除了天井坪组外,还有陈蔡岩群、八都岩群等,这些均为同位素年龄所证实[30－36]。原先划为中元古代的变质地层,其原岩时代大多实属新元古代,部分可能为更年轻的早古生代地层,但普遍经历了加里东期变质作用[23－25,37－38]。

闽北地区出露的前寒武纪基底地质体众多,关于闽北地区的构造演化也众说纷芸,造成这一现象的根本原因是其形成时代难以确定。稻香组在前人的研究工作中一直作为寒武纪浅变质岩系,但是本次研究对稻香组中硅质岩和气孔状玄武岩的锆石 LA－ICP－MS 测试结果表明,稻香组的组成和成因可能比前人认为的更加复杂。气孔玄武岩最新的一组年龄为(111.4 ±2.0) Ma,表明其形成于晚中生代早白垩世,这一年龄应代表了稻香组形成年龄的下限,为稻香组形成的最早年龄提供了约束,这一结果也与硅质岩中最小一组年龄 124 Ma 相一致(硅质岩中最新的一组年龄代表了其形成年龄的下限)。

5.2　锆石 LA－ICP－MS U－Pb 年龄反映的源区信息

硅质岩中其他锆石给出了不同的年龄信息,其中 952 Ma 的年龄与区域上新元古代地层相对应,如 Li 等[36]利用锆石 SHRIMPU－Pb 法测得陈蔡岩群石榴片麻岩(原岩为泥岩)年龄为 660 ~ 950 Ma,Wan 等[24]利用锆石 SHRIMPU－Pb 法测得麻源岩群大金山岩组黑云片麻岩年龄为 0.8 ~ 1.0 Ga,本样品 952 Ma 的年龄暗示了硅质岩源区中应包含新元古代早期物质;738 Ma 和 576 Ma 的年龄信息在区域上也有反映,如 Wan 等[24]利用锆石 SHRIMPU－Pb 法测得的万全岩群下峰岩组黑云片麻岩的年龄为(728 ± 8) Ma,测得天井坪组黑云片麻岩的碎屑锆石年龄为 503 ~622 Ma,同时也与许多学者获得的区域上的前寒武纪基底的锆石年龄相一致[24,36－39],暗示了硅质岩源区中应包含新元古代中、晚期物质;400 ~ 451 Ma 的年龄与武夷山地区加里东期岩浆作用的时间相近,该时期是武夷山地区加里东期岩浆作用最强烈的时期,硅质岩中该期锆石年龄的发现暗示其源岩可能包括了加里东期岩浆岩;值得说明的是,硅质岩中一期年龄为 388 Ma,该时期是武夷山地区区域剪切作用最强烈时期,华南加里东晚期发生韧性剪切变形作用的时间被限定在 390 ~ 420 Ma[40－41],388 Ma 的年龄与这一剪切作用的上限年龄相一致;140 ~ 179 Ma 的年龄在区域上报道较多,包括南园组火山岩及花岗岩类在内,区域上该时期形成的岩浆岩已有众多报道,上述年龄的发现指示了稻香组硅质岩物质源区的复杂性,可能包括从新元古代变质岩、加里东期岩浆岩、中生代南园组(同时期的岩浆岩)等一系列的物质源区。

玄武岩样品中的年龄信息也较丰富,其岩浆期锆石得出了(111.4 ± 2.0) Ma 的年龄,这一年龄应代表了稻香组形成年龄的下限;同时,相对岩浆期锆石,继承性锆石 Th 和 U 含量较低,Th/U 值也相对较低,年龄变化于 1413 ~ 1832 Ma 的测点 15、18、20、25 和 26,其 Th/U 值介于 0.08 ~ 0.38 之间(平均值为 0.20),推测来源于元古代变质基底;另外还出现了 393 Ma(测点 31)和 312 Ma(测点 22)的年龄信息,指示其源区可能包含了加里东期－海西期的源区物质,区域上有关加里东期地质体众多,但是与 321 Ma 同时代的海西期的年龄报道较少,仅于津海等[42]在福建省周宁县五凤楼片麻状花岗岩中得到了(313 ± 4) Ma 的年龄;测点 5、21、23 的年龄为 219 ~ 238 Ma,指示其源区可能含了印支期的岩浆作用的信息;测点 16 和 30 为 170 Ma,表明其源区的含中晚侏罗世的物质,这些继承性锆石推测是在玄武质岩浆上升过程中捕获围岩的锆石而得到的。总之,样品 117DX－3 的锆石年龄测试结果表明,稻香组的气孔状玄武岩形成于晚中生代早白垩世,且形成过程中受到了地壳物质的混染作用,锆石年龄中包括了早－中元古代、加里东期－海西期、早燕山期等一系列的年龄信息,暗示了其源区的复杂性。气孔玄武岩(111.4 ± 2.0) Ma 年龄的获得为研究稻香组的形成、闽北地区的构造演化等提供了新的证据。

这些年龄的获得表明,稻香组可能比前人所认为的更加复杂,需要进一步的解体,至少形成于中生代的气孔状玄武岩和硅质岩应单独划分出来。

6　结语

前人研究工作中仅根据部分古生物学资料和 Sm－Nd 等时线年龄等将其时代定为寒武纪,但是由于 Sm－Nd 等时线年龄缺乏可靠性,这一结论的可靠性值得商榷。本次研究对稻香组中的硅质岩和气孔状玄武岩进行了精确的激光剥蚀－电感耦合等离子体质谱(LA－ICP－MS)U－Pb 同位素年代学测试工作,

获得气孔玄武岩最新的一组年龄为(111.4 ±2.0) Ma,表明其形成于晚中生代早白垩世,这一年龄应代表了稻香组形成年龄的下限,为稻香组形成的最早年龄提供了约束。这一结果也与硅质岩中最小一组年龄 124 Ma 相一致(硅质岩中最新的一组年龄代表了其形成年龄的下限)。同时,气孔状玄武岩锆石年龄中包括了早 - 中元古代、加里东期 - 海西期、早燕山期等一系列的年龄信息;硅质岩中锆石测试结果表明其可能包括从新元古代变质岩、加里东期岩浆岩、中生代南园组(同时期的岩浆岩)等一系列的物质源区,暗示了其源区的复杂性。这些 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄的获得表明,稻香组可能比前人所认为的更加复杂,需要进一步的解体,至少将形成于中生代的气孔状玄武岩和硅质岩应单独划分出来。稻香组 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄的获得丰富了闽西北地区前寒武纪基底演化资料,为研究该区区域构造演化提供了新的年龄支持。

7 参考文献

[1] 徐一伟,林雪萍. 政和"稻香组"地质时代的确定及其变质火山岩岩石成因探讨[J]. 福建地质, 1990,9(4):266 - 280.

[2] 揭育金. 福建政和地区"稻香组"问题的探讨[J]. 福建地质,2004,23(3):124 - 130.

[3] Black L P, Gulson B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory[J]. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1978, 3: 227 - 232.

[4] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51:537 - 571.

[5] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 1995, 19:1 - 23.

[6] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 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.

[7] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535 - 1546.

[8] Ludwig K R. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. California: Berkeley Geochronology Center, 2003.

[9] 吴元保,郑永飞. 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,2004,49(16):1589 - 1604.

[10] Belousova E A, Griffin W L, Oreilly S Y, Fisher N L. Igneous zircon: Trace element compositon as and indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143:602 - 622.

[11] Whitehouse M J. Rare Earth Elements in Zircon: A Review of Applications and Case Studies from the Outer Hebridean Lewisian Complex, NW Scotland [M]// Vance D, Müller W, Villa I M, eds. Geochronology: Link the Isotopic Record with Petrology and Textures. Geological Society of London, 2003: 49 - 64.

[12] 黄汲清. 中国主要地质构造单位[J]. 地质专报, 1945,甲种第 20 号:1 - 134.

[13] 陈国达. 中国地台"活化区"的实例并着重讨论"华夏古陆"问题[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1956, 36(3): 239 - 272.

[14] 张文佑. 中国大地构造纲要[M]. 地质专刊,第 1 号. 北京:科学出版社,1958.

[15] 黄汲清. 中国地质构造基本特征的初步总结[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1960, 40(1):1 - 37.

[16] 谢家荣. 中国大地构造问题[J]. 地质学报,1961,41(2):218 - 239.

[17] 谢家荣. 中国东南地区大地构造主要特征[M]//陈国达. 中国大地构造基本问题. 北京:科学出版社, 1964.

[18] 任纪舜. 中国东南泥盆纪前几个大地构造问题的初步探讨[J]. 地质学报,1964,44(4):418 - 431.

[19] 郭令智. 华南大地构造格架与地壳演化[M]. 北京: 地质出版社,1980.

[20] 任纪舜,陈廷愚,刘志刚. 中国东部构造单元划分的几个问题[J]. 地质论评,1984,30(4):382 - 385.

[21] 水涛,徐步台. 中国浙闽变质基底地质[M]. 北京:科学出版社,1988.

[22] 胡宗良,陈兴高,汪方展,吴泽有. 对闽西北盖洋群划分及时代归属的新认识——以明溪盖洋地区为例[J]. 中国地质,2003,30(3):247 - 253.

[23] Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 2005, 136:51 - 66.

[24] Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, Zhuang J M, Song B, Shi Y R, Du L L. 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.

[25] Li L M, Sun M, Wang Y J, Xing G F, Zhao G C, Lin S F, Xia X P, Charvet J, Shu L S, Faure M, Choulet F, Wang B, Lu H F, Breton N L. 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.

[26] 于津海,王丽娟,魏震洋,孙涛,舒良树. 华夏地块显

生宙的变质作用期次和特征[J]. 高校地质学报,2007,13(3):474 - 483.
[27] 许靖华,孙枢,李继亮. 是华南造山带而不是华南地台[J]. 中国科学(化学),1987,10:1107 - 1115.
[28] Ren J S. On the geotectonics of Southern China[J]. *Acta Geologica Sinica—English Edition*,1990,64(4):275 - 287.
[29] 李献华,王一先,赵振华,陈多福,张宏. 闽浙古元古代斜长角闪岩的离子探针锆石 U - Pb 年代学[J]. 地球化学,1997,27(4):327 - 334.
[30] 胡雄健,许金坤,童朝旭主编. 浙西南前寒武纪地质[M]. 北京:地质出版社,1991:1 - 278.
[31] 胡雄健,许金坤,康海男,童朝旭,陈程华,叶国贵. 浙南中元古界龙泉群的地质特征及构造演化[J]. 中国区域地质,1992(1):20 - 30.
[32] 金文山,庄建民,杨传夏,陈云钊. 福建前加里东区域变质岩系的岩石学、地球化学和变质作用特征[J]. 福建地质,1992,11(4):241 - 262.
[33] 甘晓春,李惠民,孙大中,庄建民. 闽北前寒武纪基底的地质年代学[J]. 福建地质,1993,12(1):17 - 32.
[34] 甘晓春,李惠民. 浙西南早元古代花岗质岩石的年代[J]. 岩石矿物学杂志,1995,14(1):1 - 8.
[35] 向华,张利,周汉文,钟增球,曾雯,刘锐,靳松. 浙西南变质基底基性 - 超基性变质岩锆石 U - Pb 年龄、Hf 同位素研究:华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应[J]. 中国科学(地球科学),2008,38(4):401 - 413.
[36] Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L, Bao C. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern South China: New age constraints and Pressure-temperature conditions[J]. *Geological Society of America Bulletin*,2010,122:772 - 793.
[37] 于津海,周新民, O'Reilly Y S,赵蕾,Griffin W L,王汝成,王丽娟,陈小明. 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,2005,50(16):1758 - 1767.
[38] 张达,吴淦国,彭润民,吴建设,狄永军,张祥信,汪群峰. 闽中地区马面山群东岩组变质岩形成的古构造环境研究[J]. 地学前缘,2005,12(1):310 - 320.
[39] 徐先兵,张岳桥,舒良树,贾东,王瑞瑞,许怀智. 武夷山地区前寒武纪地层沉积时代研究[J]. 地层学杂志,2010,34(3):254 - 267.
[40] 舒良树,卢华复,贾东,夏菲,福赫. 华南武夷山早古生代构造事件的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年龄研究[J]. 南京大学学报(自然科学版),1999,35(6):668 - 674.
[41] 舒良树,于津海,贾东,王博,沈渭洲,张岳桥. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报,2008,27(10):1581 - 1593.
[42] 于津海,刘潜,胡修棉,王勤,O'Reilly S Y. 华南晚古生代岩浆活动的新发现:岛弧还是陆内造山?[J]. 科学通报,2012,57(31):2964 - 2971.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Isotopic Dating: Constraints on the Time of the Daoxiang Formation in North Fujian Province

ZHAO Xi-lin[1], *YU Ming-gang*[1*], *JIANG Yang*[1], *LI Ya-nan*[1,2], *JIN Guo-dong*[1], *CHEN Zhi-hong*[1], *XING Guang-fu*[1]

(1. Nanjing Center of Geological Survey, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;
2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Although there is poor outcrop in the area, the Daoxiang formation exposed in North Fujian has unique rock assemblage and metamorphism, and deformation characteristics show that the Daoxiang group does exist, and belongs to metamorphic rock of the Cambrian period in previous research with Sm-Nd model age as (500 ± 35) Ma. However, the limitations of the test method, adversly influence the the reliability of the formation age. LA-ICP-MS U-Pb dating provides reliable and precise evidence of the formation age of the rocks. Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of basalt and siliceous rocks carried out by this group show that the newest age of basalt is (111.4 ± 2.0) Ma, i. e. belonging to Early Cretaceous, which represents the lower limit of the formation age. The result is consistent with that of siliceous rocks, the newest of which is 124 Ma. The inherited zircon ages indicate proterozoic-paleozoic-mesozoic materials may be included in the source region, so the Daoxiang formation should be further disintegrated, the Vesicular basalt and Siliceous rocks which formed at Mesozoic should be separated from the Daoxiang formation. The discovery of all these ages enriches research work of tectonic evolution of Daoxiang formation and provides valuable data of the isotopic geochronological age.

Key words: Daoxiang formation; siliceous rocks; basalts; LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating; Early Cretaceous; North Fujian Province