

浙江诸暨地区石角-璜山侵入岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄

——对超镁铁质球状岩成因的启示

王孝磊¹, 舒徐洁¹, 邢光福², 谢思文¹, 张春晖¹, 夏 晗¹

WANG Xiao-lei¹, SHU Xu-jie¹, XING Guang-fu²,

XIE Si-wen¹, ZHANG Chun-hui¹, XIA Han¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室/南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;

2. 中国地质调查局南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research/School of Earth Science and Engineering,
Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:对分布于江南造山带东段江绍断裂带附近的浙江诸暨地区石角-璜山侵入岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作, 石角角闪辉石岩和璜山石英闪长岩的结晶年龄分别为 $844\text{Ma} \pm 3\text{Ma}$ 和 $818\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ 。该年龄结果表明, 石角村附近的超镁铁质岩(包括球状辉闪岩)与其外围的闪长岩可能并非同时形成。江绍断裂带附近分布的多个闪长岩体的形成时代介于 930~820Ma 之间。对这些超镁铁质岩和闪长岩的精细岩石成因研究将有助于揭示扬子和华夏在新元古代时期的拼接过程。

关键词: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 球状岩; 新元古代; 诸暨地区; 江南造山带

中图分类号: P597^{+.3}; P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2012)01-0075-07

Wang X L, Shu X J, Xing G F, Xie S W, Zhang C H, Xia H. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Shijiao-Huangshan intrusive rocks in Zhuji area, Zhejiang Province: implications for the petrogenesis of the ultramafic orbicular rocks. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1): 75-81

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating work was carried out for the Shijiao-Huangshan intrusive rocks from Zhuji area of Zhejiang Province, which is also tectonically adjacent to the Jiangshan-Shaoxing fault of eastern Jiangnan orogen. The dating results indicate that the Shijiao amphibole pyroxenite and Huangshan quartz diorites were crystallized at $844 \pm 3\text{ Ma}$ and $818 \pm 6\text{ Ma}$, respectively, suggesting that they, including the Shijiao orbicular perknites, were probably formed in different periods. Combined with other new available dating results, the authors hold that the Neoproterozoic diorites along the Jiangshan-Shaoxing fault might have been formed during the span of ca. 930-810 Ma. Further studies of the petrology and petrogenesis of the ultramafic rocks and diorites will shed light on the Neoproterozoic amalgamation processes between the Yangtze and Cathaysia blocks.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; orbicular rocks; Neoproterozoic; Zhuji area; Jiangnan orogen

华南大陆以其巨量、多期次的显生宙岩浆作用和有关的钨、锡、铀、稀土元素等(多)金属矿床为特

色,受到国内外研究者的广泛关注。前寒武纪构造-岩浆过程构筑了华南大陆的构造框架,成为华南大

收稿日期: 2011-03-24; 修订日期: 2011-10-11

资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项《华夏-扬子板块结合带北东段的形成与破坏及其成矿作用》(编号: 200811015)和国家自然科学基金面上项目《江南造山带新元古代典型花岗岩类的形成及其侵位-剥蚀的时差研究》(批准号: 41072144)

作者简介: 王孝磊(1979-), 男, 副教授, 从事华南前寒武纪岩石学研究。E-mail: wxl@nju.edu.cn

地构造演化的基础科学问题。近年来,随着全球 Rodinia 超大陆学说^[1]的引入,围绕华南前寒武纪岩浆岩的成因和构造背景产生了较大的学术争论^[2-6],尤其对于扬子地块和华夏地块之间的江南造山带新元古代岩浆作用性质有明显不同的认识^[4,7-9]。在江南造山带东段,出露有与俯冲相关的蛇绿岩^[10]和岛弧火山岩^[9,11],并被其后的骆家门组前陆磨拉石沉积不整合覆盖^[12-13],记录了扬子地块和华夏地块拼合的历史。两地块在元古宙的拼接以江山-绍兴(江绍)断裂带为界线^[14],该断裂带附近出露一系列独立的闪长岩体,代表了拼接的“胶合剂”^[13]。浙江诸暨地区的石角-璜山复合侵入体是最具代表性的闪长岩体,出露有世界唯一的一例超镁铁质球状岩^[15],其成因对于岩浆岩石学和华南前寒武纪地质演化的研究都具有重要意义。周新民等^[13,15]对该超镁铁质球状岩及其相关的岩石学现象进行了系统描述和岩相学研究,认为该岩石是在超镁铁质岩和闪长岩接触部位产生的“构造陷井”中由耗散结构理论的自组织机理由内向外结晶而成的,不同于水涛^[16]的水下喷溢产生的飞溅熔浆坠落压叠并冷却成球团的成因模式。本文采用 LA-ICP-MS 技术,对球状岩寄主的超镁铁质岩及外围的石英闪长岩进行了锆石 U-Pb 定年,以期对岩石成因研究提供参考。

1 地质背景

石角-璜山复合岩体出露于浙江省诸暨市化泉乡和绍兴市平水镇一带(图 1-a),整体呈 NE 向透镜状沿江绍断裂带展布,出露面积约 44km²。总体上,该复合岩体可分为 2 个部分:石角岩体和璜山岩体。石角岩体岩性以灰绿、墨绿色的辉石角闪岩、角闪辉石岩及少量橄榄岩为主,具有堆晶结构,呈岩块或大致向南倾斜的透镜体散布于璜山岩体的石英闪长岩岩体中,面积约 1km²。最大的一个辉闪岩体位于石角村附近,呈 WE 向椭圆状展布,面积约 0.5km²,出露仅百余平方米的珍稀的超镁铁质球状辉闪岩即在该岩体中。作为石角超镁铁质岩寄主岩石的璜山岩体,其岩性以灰绿色、灰白色石英闪长岩为主,局部可过渡为闪长岩,块状构造,局部发生糜棱岩化和绿泥石化作用。糜棱岩化作用大约发生在 370~353Ma^[18]。在黄坛阳一带,璜山岩体的东侧侵入于双溪坞群之中,局部为断层接触关系。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

本次工作样品采自石角村北山坡,采样点如图 1-b 所示,岩性分别为角闪辉石岩(09ZJ-1-2)和石英闪长岩(09ZJ-3-4)。角闪辉石岩呈墨绿色,半自形粒状结构(图 2-a),显微镜下观察,其组成矿物和含量估计为:单斜辉石 65%、角闪石 30%、磁铁矿 5%。单斜辉石多为柱状和粒状,常被包裹于角闪石之中,被黝帘石细小集合体所交代;角闪石为它形,具黄褐色—浅黄绿色多色性,有的颗粒大小可达 1cm 以上。石英闪长岩为中粒半自形粒状结构(图 2-b),样品较新鲜,主要矿物组成为斜长石 65%、石英 20%和角闪石 15%。斜长石已明显泥化、绢云母化;角闪石具浅黄—绿色多色性,发生绿泥石化和黑云母化,黑云母有明显变形;石英有波状消光。这些应力变形应为后期所致。

2.2 分析方法

用人工重砂法从岩石样品 09ZJ-1-2 和 09ZJ-3-4 中分选出锆石,用环氧树脂固定并抛光使颗粒露出核部,制靶工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行。结合锆石的透射光、反射光和阴极发光(CL)图像,来选择合适的点位进行微区原位定年分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作在北京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行,使用与 Agilent 7500a ICP-MS 相连接的 New Wave 213nm 激光取样系统完成。

分析过程中,激光束斑直径采用 21μm,频率为 5Hz。样品经剥蚀后,由 He 气作为载气,再和 Ar 气混合后进入 ICP-MS 进行分析。U-Pb 分馏利用澳大利亚锆石标样 GJ-1(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 608.5Ma±1.5Ma)^[20]来校正,锆石标样 Mud Tank(交点年龄为 732Ma±5Ma)^[21]作为参考标样,控制分析精度。每个测试流程的开头和结尾分别测 2 个 GJ-1 标样,另外测试 1 个 Mud Tank 标样和 10 个待测样品点。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计数由 GLITTER 软件(ver. 4.4)在线获得。详细的分析方法和流程见 Griffin 等^[19]和 Jackson 等^[20]的文献。前期对 09ZJ-1-2 和 09ZJ-3-4 定年样品的锆石 U-Pb 同位素各分析了 15~20 个点。为了验证数据的可靠性,后期又对 2 个样品中的锆石分别进行了大约 10 个点的分析,其年龄结果与前期测试的结果完全吻合,说明数据质

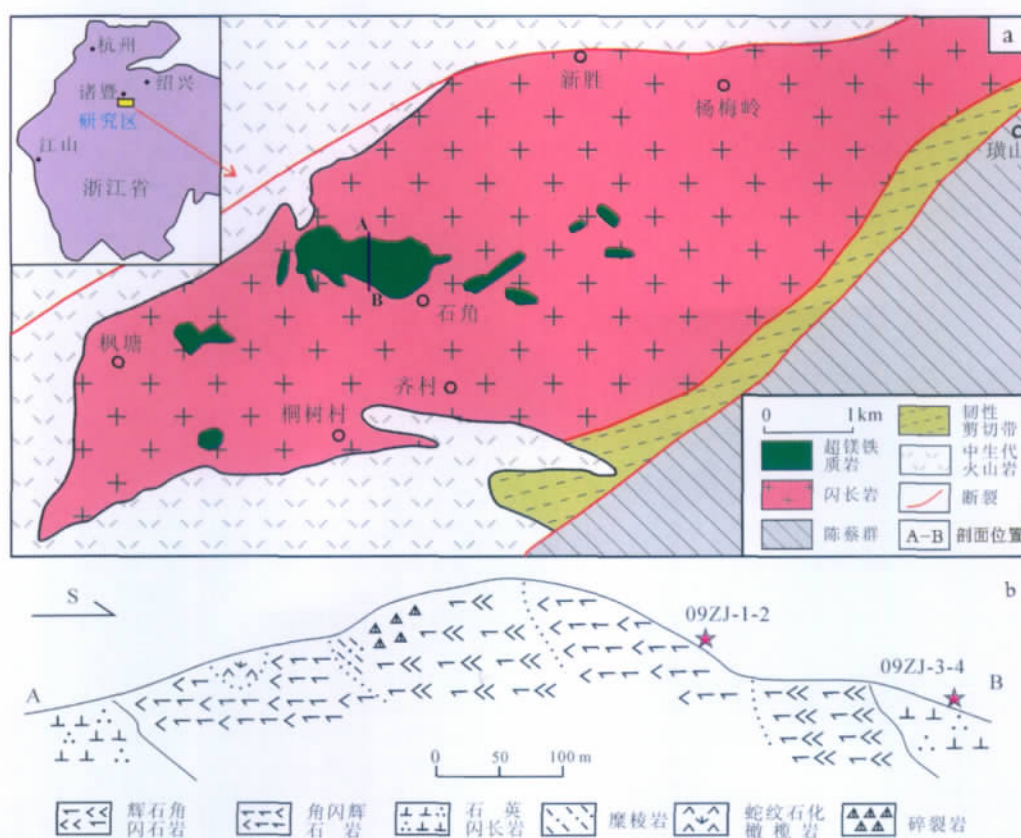


图 1 浙江诸暨地区石角-璜山侵入岩地质简图(a)和石角超镁铁质岩剖面(b)

(a 图据参考文献[13,17]修改;b 图引自参考文献①)

Fig. 1 Simplified geological map of Shijiao-Huangshan intrusive rocks and geological section of the ultramafic rocks in Zhuji area, Zhejiang Province

量可靠性较高。所有的锆石定年分析点的 U-Pb 同位素体系均较谐和,利用普通铅校正程序 ComPb-Corr#3_15G^[22]进行校正时,同位素结果也未发生改变,表明普通铅的含量很低。锆石谐和图用 Isoplot 程序(ver. 2.06)^[23]完成。分析结果如表 1 所示。

3 分析结果

从 2 个样品中分选出的锆石均较自形,岩浆结晶的环带明显,其中角闪辉石岩(09ZJ-1-2)中的锆石多为碎块,而石英闪长岩(09ZJ-3-4)锆石的晶形较为完整。从形态恢复来看,辉石角闪岩的锆石多为短柱状(长 150~100 μm ,宽 100~80 μm)或板片状(长 250~200 μm ,宽 150~100 μm)。闪长岩的锆石为短柱状、长柱状和粒状,最长者可达 400 μm ,宽在 200~100 μm 之间。在 CL 图像(图 3)和表 1 中,辉石角闪岩的锆石略发暗,对应的

Th、U 含量较高(Th 含量为 $2318 \times 10^{-6} \sim 91 \times 10^{-6}$,U 含量为 $1555 \times 10^{-6} \sim 84 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 3.24~0.51);闪长岩的锆石则发亮,对应的 Th、U 含量相对较低(Th 含量为 $95 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$,U 含量为 $55 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 1.74~0.96)。

对角闪辉石岩样品 09ZJ-1-2 共分析了 31 个点,样品点均落于谐和线上(图 4-a),且较一致,所得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $844\text{Ma} \pm 3\text{Ma}$ ($n=31$, MSWD=0.57),代表了角闪辉石岩的结晶年龄。对石英闪长岩样品 09ZJ-3-4 共分析了 24 个点,每个分析点的不同同位素比值年龄也均谐和一致(图 4-b),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $818\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ ($n=24$, MSWD=0.28),代表了该闪长岩的结晶年龄。

4 讨论

石角-璜山复合侵入体因其内部特殊的岩石类

表 1 诸暨-璜山侵入岩 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 the Zhuji-Huangshan intrusive rocks

分析点	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	同位素比值 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	同位素比值 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	同位素年龄 /Ma $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	同位素年龄 /Ma $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	同位素年龄 /Ma $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
09ZJ-1-2 角闪辉石岩															
1	225	209	1.07	0.0678	0.0013	1.32	0.02	0.1408	0.0012	861	39	852	9	849	7
2	317	618	0.51	0.0669	0.0024	1.27	0.04	0.1390	0.0019	835	75	834	18	839	11
3	359	270	1.33	0.0670	0.0011	1.29	0.02	0.1401	0.0011	838	35	843	8	845	6
4	836	592	1.41	0.0676	0.0011	1.31	0.02	0.1411	0.0012	855	35	852	8	851	6
5	957	515	1.86	0.0674	0.0009	1.31	0.01	0.1407	0.0010	850	28	849	6	849	6
6	1789	552	3.24	0.0677	0.0014	1.30	0.02	0.1394	0.0012	860	43	847	10	841	7
7	1191	705	1.69	0.0677	0.0011	1.31	0.02	0.1407	0.0011	861	33	852	8	849	6
8	809	582	1.39	0.0673	0.0011	1.31	0.02	0.1408	0.0010	846	34	848	8	849	6
9	403	587	0.69	0.0671	0.0015	1.29	0.03	0.1398	0.0013	841	47	843	11	844	7
10	215	159	1.35	0.0671	0.0014	1.30	0.02	0.1402	0.0012	841	43	845	10	846	7
11	1538	716	2.15	0.0675	0.0012	1.31	0.02	0.1413	0.0011	852	38	852	9	852	6
12	711	672	1.06	0.0678	0.0014	1.30	0.02	0.1389	0.0012	862	42	845	10	839	7
13	1264	877	1.44	0.0673	0.0011	1.30	0.02	0.1402	0.0010	847	33	846	7	846	6
14	91	84	1.08	0.0677	0.0015	1.31	0.03	0.1401	0.0012	860	46	849	11	845	7
15	99	89	1.10	0.0671	0.0042	1.31	0.08	0.1419	0.0032	841	134	850	34	855	18
16	394	245	1.61	0.0670	0.0010	1.28	0.02	0.1383	0.0010	839	32	836	7	835	6
17	1523	1406	1.08	0.0675	0.0013	1.32	0.02	0.1416	0.0011	853	40	853	9	853	6
18	1056	1187	0.89	0.0672	0.0016	1.30	0.03	0.1401	0.0013	845	52	845	12	845	7
19	208	285	0.73	0.0677	0.0012	1.29	0.02	0.1386	0.0011	860	37	843	9	836	6
20	2135	1273	1.68	0.0674	0.0010	1.29	0.02	0.1390	0.0011	850	33	842	7	839	6
21	2202	1555	1.42	0.0680	0.0022	1.30	0.04	0.1389	0.0016	867	67	846	17	838	9
22	2318	1220	1.90	0.0671	0.0009	1.29	0.01	0.1394	0.0010	840	30	841	6	841	6
23	246	162	1.53	0.0686	0.0013	1.32	0.03	0.1393	0.0018	886	40	853	11	841	10
24	114	161	0.71	0.0673	0.0015	1.31	0.03	0.1411	0.0018	848	47	850	13	851	10
25	96	108	0.89	0.0692	0.0015	1.32	0.03	0.1385	0.0019	906	47	855	13	836	11
26	567	562	1.01	0.0673	0.0011	1.30	0.02	0.1405	0.0018	847	34	847	10	847	10
27	918	540	1.70	0.0674	0.0011	1.30	0.02	0.1403	0.0018	850	36	847	10	846	10
28	875	651	1.34	0.0681	0.0017	1.31	0.03	0.1395	0.0019	872	54	850	15	842	11
29	626	365	1.71	0.0678	0.0013	1.31	0.03	0.1398	0.0018	862	42	848	11	843	10
30	317	497	0.64	0.0675	0.0013	1.30	0.03	0.1400	0.0018	852	42	847	11	845	10
31	960	434	2.21	0.0666	0.0013	1.30	0.03	0.1414	0.0019	825	40	845	11	853	10
09ZJ-3-4 石英闪长岩															
1	26	23	1.11	0.0665	0.0023	1.26	0.04	0.1369	0.0022	823	75	826	20	827	13
2	26	17	1.55	0.0664	0.0064	1.25	0.11	0.1362	0.0046	820	209	822	52	823	26
3	21	18	1.16	0.0663	0.0061	1.24	0.11	0.1352	0.0044	817	198	817	49	818	25
4	26	18	1.46	0.0677	0.0044	1.26	0.08	0.1353	0.0032	858	137	828	35	818	18
5	22	18	1.24	0.0684	0.0025	1.27	0.05	0.1344	0.0022	880	78	831	21	813	12
6	35	22	1.58	0.0672	0.0024	1.26	0.04	0.1361	0.0022	843	76	828	20	822	12
7	36	23	1.55	0.0676	0.0021	1.24	0.04	0.1332	0.0020	855	67	819	18	806	11
8	32	21	1.57	0.0663	0.0025	1.22	0.04	0.1337	0.0022	815	79	811	20	809	12
9	18	17	1.10	0.0681	0.0063	1.27	0.11	0.1354	0.0045	871	199	833	50	818	26
10	14	15	0.93	0.0672	0.0026	1.25	0.05	0.1352	0.0022	843	82	825	21	818	12
11	95	55	1.74	0.0681	0.0041	1.26	0.07	0.1340	0.0032	872	129	827	33	811	18
12	13	16	0.82	0.0675	0.0051	1.24	0.09	0.1331	0.0035	852	161	818	41	806	20
13	9	9	0.96	0.0687	0.0081	1.26	0.15	0.1334	0.0054	891	255	830	65	807	30
14	24	20	1.21	0.0678	0.0025	1.25	0.05	0.1342	0.0023	862	78	825	20	812	13
15	11	12	0.97	0.0675	0.0032	1.26	0.06	0.1354	0.0024	853	101	828	26	818	13
16	47	35	1.35	0.0667	0.0023	1.25	0.04	0.1365	0.0021	827	72	825	19	825	12
17	29	32	0.89	0.0668	0.0022	1.26	0.04	0.1369	0.0020	832	69	828	18	827	11
18	26	34	0.76	0.0673	0.0034	1.27	0.06	0.1369	0.0028	846	108	832	28	827	16
19	53	59	0.91	0.0667	0.0026	1.26	0.05	0.1371	0.0024	828	83	828	22	828	14
20	24	29	0.81	0.0665	0.0031	1.26	0.06	0.1372	0.0024	821	101	826	26	829	14
21	64	41	1.56	0.0669	0.0043	1.24	0.08	0.1340	0.0033	834	139	817	35	811	19
22	50	35	1.42	0.0662	0.0022	1.25	0.04	0.1366	0.0020	813	72	822	19	826	12
23	29	23	1.27	0.0662	0.0028	1.23	0.05	0.1349	0.0021	813	91	815	24	816	12
24	57	35	1.63	0.0662	0.0022	1.23	0.04	0.1348	0.0020	814	71	815	18	815	11

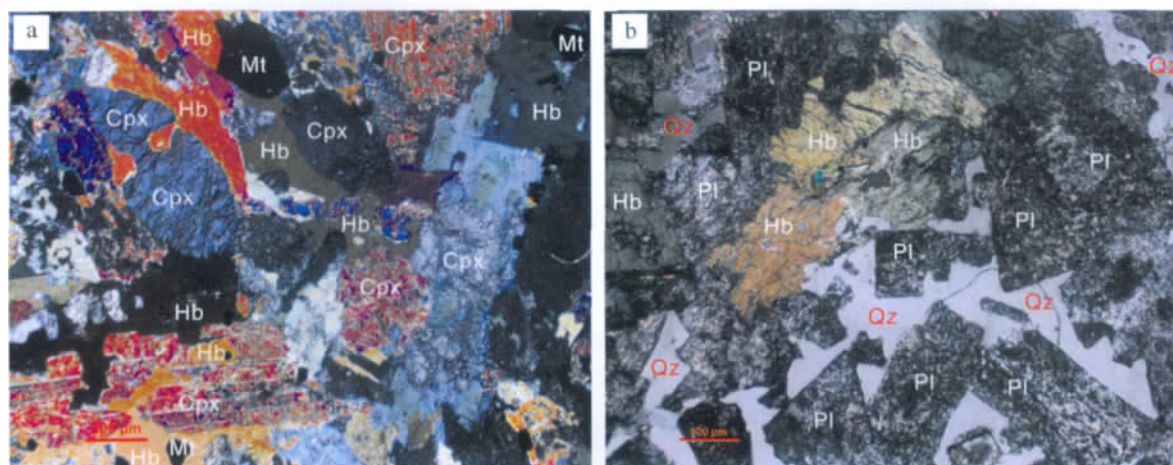


图 2 石角-璜山侵入体定年岩石显微图像

Fig. 2 Microphotographs of the dated samples from the Shijiao-Huangshan intrusive rocks
(a)角闪辉石岩;(b)石英闪长岩;Cpx—单斜辉石;Hb—角闪石;Mt—磁铁矿;Pl—斜长石;Qz—石英

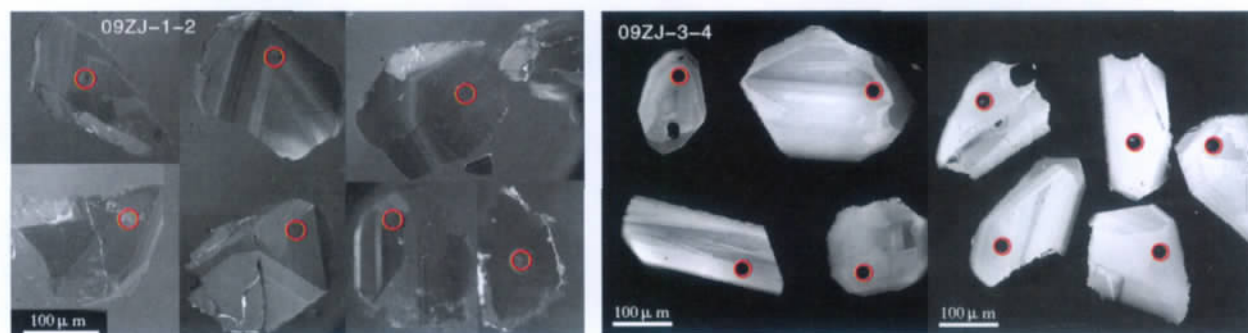


图 3 石角-璜山侵入体代表性锆石的 CL 图像

Fig. 3 Representative CL images for zircons from the Shijiao-Huangshan intrusive rocks
圆圈代表激光同位素分析点的位置

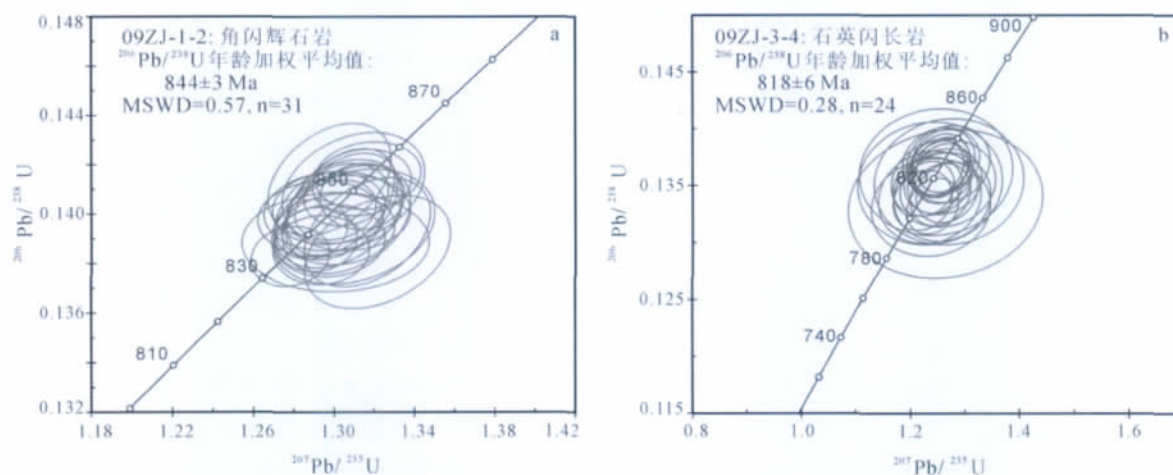


图 4 石角-璜山侵入体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia for zircons from the Shijiao-Huangshan intrusive rocks

型(超镁铁质球状岩)和构造位置(江绍断裂带附近)而受关注。对于璜山石英闪长岩,周新民等^[13]报道的从中分选出的角闪石的 K-Ar 稀释法年龄为 $888\text{Ma} \pm 10\text{Ma}$ 。对于石角超镁铁质岩,劳秋元等^[2]和水涛等^[24]分别报道了其角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和 K-Ar 年龄,分别为 $832.2\text{Ma} \pm 6.8\text{Ma}$ 和 844Ma 。石角地区的超镁铁质岩,包括角闪辉石岩和辉石角闪岩,甚至还有少量橄榄岩的报道,构成了一套堆晶序列。本文所报道的角闪辉石岩年龄 $844\text{Ma} \pm 3\text{Ma}$ 与前人的结果基本一致,且该 U-Pb 年龄不受蚀变和后期改造的影响,应该能较为准确地代表超镁铁质岩的结晶时代。另外,本文所给出的璜山石英闪长岩的年龄也与前人的结果基本相当,但稍晚于角闪石 K-Ar 年龄,可能说明早期角闪石 K-Ar 同位素分析中有微量大气氩或过剩氩的存在。然而,取自璜山石英闪长岩体西南角桐树村—枫塘之间的闪长岩样品锆石离子探针 U-Pb 年龄为 840Ma 左右(李武显信告),璜山岩体东北的漓浦岩体中的闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $841\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ ^[25],这表明璜山闪长岩体可能是多期次形成的。本文所获的 $818\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ 可能仅代表石角超镁铁质岩周围的石英闪长岩的结晶年代。

显然,超镁铁质岩和石英闪长岩存在一个明显的年龄间隔,表明 2 种岩浆可能并非同时形成的。倘若如此,石角球状辉闪岩的形成可能也不能用 2 种不同性质的岩浆在“构造陷井”中由某种自组织过程而形成这一机理^[15]来解释。一种可能的解释是,石英闪长岩上升过程中将早期形成的超镁铁质岩以包体的形式携带上来。超镁铁质岩和石英闪长岩中的角闪石多色性有明显的差异,前者可呈黄褐色,后者仅为绿色,说明 2 种岩浆的形成深度有差异,前者较深,后者相对较浅。在颗粒粒度上,超镁铁质岩明显粒度较大,笔者在野外所采集的辉闪岩中有的辉石和角闪石颗粒甚至可达 2cm 以上,也表明其形成深度相对闪长岩更深。因此,二者不太可能在同一深度结晶,但这些岩相学特征用“捕获”的模式均可以解释。另外如前所述,笔者了解到其他学者新近获得的璜山闪长岩某些部位的年龄为 840Ma 左右,与超镁铁质岩相近。这意味着该区存在与超镁铁质岩同期的闪长质岩浆活动,而超镁铁质岩的形成可能与该期闪长岩有关。

沿江绍断裂带两侧分布的包括石角—璜山复合

侵入体在内的多个闪长岩体被认为是扬子—华夏 2 个块体拼接的“胶合剂”^[13]。事实上,最近发表的锆石微区 U-Pb 同位素定年工作显示,这些闪长岩的形成时代存在一定的差异。比如,Ye 等^[26]报道的桃红闪长岩和西裘(原称赵婆岙岩体)花岗闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $913\text{Ma} \pm 15\text{Ma}$ 和 $905\text{Ma} \pm 14\text{Ma}$ 。董传万等^[3]报道的江山石英闪长岩的锆石稀释法 U-Pb 年龄为 $924\text{Ma} \pm 23\text{Ma}$ 。陈志洪等^[27]报道的西裘岩体中的斜长花岗岩和闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $902\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ 和 $932\text{Ma} \pm 7\text{Ma}$ 。已有的数据资料表明,沿江绍断裂带分布的这些闪长质岩石的年龄在 $930 \sim 820\text{Ma}$ 之间,并非同时形成的。其年龄值可大致分为 2 组,一组在 $930 \sim 880\text{Ma}$ 之间,与双溪坞弧岩浆作用、同碰撞岩浆作用的时间一致;另外一组在 820Ma 左右,与沿江南造山带广泛分布的花岗岩类岩石(如皖南休宁、许村、歙县岩体,江西九岭岩体,桂北三防岩体等)的结晶年代非常接近,很可能代表了碰撞后的岩浆作用组合。因此,沿江绍断裂带分布的这些闪长岩的形成时代和成因可能不尽相同。它们形成的构造背景究竟如何?哪些能真正作为扬子和华夏地块拼接后的“胶合剂”?“胶合”的内在地质过程是什么?……这些问题值得进一步探讨。对这些闪长岩的深入研究将会为精确厘定江南造山带的形成和演化提供进一步的制约。

5 结 论

(1)沿江绍断裂带分布的浙江诸暨地区石角角闪辉石岩的结晶年龄为 $844\text{Ma} \pm 3\text{Ma}$,石英闪长岩的结晶年龄为 $818\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ 。

(2)石角的超镁铁质球状岩的形成,可能并非是超镁铁质和中性岩浆物理混合过程中由“构造陷阱”形成的,而可能是闪长岩形成过程中捕获早期已结晶的超镁铁质岩所致。

(3)对石角—璜山侵入体和沿江绍断裂带分布的一系列闪长岩成因的精细研究,将有助于揭示扬子—华夏 2 个块体的拼接历史。

致谢:南京大学地球科学与工程学院武兵老师和西北大学地质系弓虎军老师在锆石激光定年和 CL 拍照过程中给予帮助,成文过程中浙江省地调院有关专家和李武显研究员提出了建设性的意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J]. Science, 1991, 252: 1409–1412.
- [2] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2002, 196: 51–67.
- [3] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Res., 2003, 122: 85–109.
- [4] Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China [J]. Precambrian Res., 2008, 163: 351–383.
- [5] 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 Res., 2009, 170: 27–42.
- [6] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件 [J]. 高校地质学报, 2009, 15(4): 453–459.
- [7] 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 Res., 2007, 159(1/2): 117–131.
- [8] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带是否是格林威尔期造山带?——关于华南前寒武纪地质的几个问题 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(1): 64–72.
- [9] Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks [J]. Precambrian Res., 2009, 174: 117–128.
- [10] Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: petrogenesis and tectonic implications [J]. Precambrian Res., 1997, 81(1/2): 129–144.
- [11] 程海. 浙西北晚元古代岛弧火山岩的地球化学研究 [J]. 地球化学, 1993, 1: 18–27.
- [12] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局 [J]. 中国科学(B 辑), 1987, 17(4): 414–422.
- [13] 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质 [J]. 中国科学(B 辑), 1992, 22(3): 296–303.
- [14] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556–565.
- [15] 周新民, 朱云鹤, 陈建国. 超镁铁球状岩的发现及其成因研究 [J]. 科学通报, 1990, 35(8): 604–606.
- [16] 水涛. 浙江绍兴—江山断裂带发现超镁铁质熔岩 [J]. 科学通报, 1984, 29(8): 487–489.
- [17] 张福勤, 谢鸿森, 许祖鸣. 华南前寒武纪镁铁—超镁铁杂岩的岩石大地构造格架 [C] // 李继亮. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 162–172.
- [18] 朱云鹤, 周新民. 江绍断裂带中闪长岩类的糜棱岩化作用 [J]. 火山地质与矿产, 1994, 15(1): 23–34.
- [19] Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons [J]. Precambrian Res., 2004, 131: 231–282.
- [20] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. Chem. Geol., 2004, 211: 47–69.
- [21] Black L P, Gulson B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory [J]. BMR J. Aust. Geol. Geophys., 1978, 3: 227–232.
- [22] Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chem. Geol., 2002, 192: 59–79.
- [23] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.06: A geochronological tool kit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999, 1a: 48.
- [24] 水涛, 徐步台, 梁如华, 等. 绍兴—江山古陆对接带 [J]. 科学通报, 1986, 31(6): 444–448.
- [25] 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.
- [26] Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Craton [J]. Gondwana Res., 2007, 12: 144–156.
- [27] 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 等. 江山—绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据 [J]. 中国科学(D 辑), 2009, 7: 994–1008.
- ① 浙江省地质矿产局. 1:5 万区域地质调查报告(陈蔡幅). 1987.
- ② 劳秋元, 胡世玲. 第四届全国同位素地质年代学、同位素地球化学学术讨论会论文(摘要)汇编. 1989: 44–45.
- ③ 董传万, 张登荣, 董良云, 等. 浙江江山石英闪长岩体的锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学——江绍断裂带晚元古代火成岩组合与成因. 2005 年全国岩石学与地球动力学会议论文摘要集, 2005.