

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.01.009

湘东北仓溪岩群锆石 U-Pb 年龄及新元古代弧盆系演化

谭满堂, 龙文国, 魏运许, 邓新, 田洋, 王晶, 金巍,
徐大良, 徐扬, 黄皓

TAN Man-Tang, LONG Wen-Guo, WEI Yun-Xu, DENG Xin, TIAN Yang, WANG Jing, JIN Wei,
XU Da-Liang, XU Yang, HUANG Hao

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:湘东北仓溪岩群位于江南造山带中段, 曾被认为属于古元古代, 近年来的同位素测年显示其主要形成于新元古代早期。本次研究通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年分析, 获得仓溪岩群中绢云石英千枚岩、斜长角闪岩、透闪石岩形成年龄分别为 858.3 ± 3.7 Ma, 844.3 ± 14.0 Ma, 815.0 ± 10.0 Ma, 后期辉绿岩脉侵入年龄为 196.6 ± 3.3 Ma。综合表明仓溪岩群主要形成于新元古代早期 815~865 Ma 之间, 并受到印支期构造活动的一定影响。仓溪岩群主要是新元古代早期形成的俯冲增生杂岩, 由一套变沉积岩、变基性岩或蛇绿岩残片混杂组成, 是该时期扬子陆块周边广泛存在的洋壳俯冲以及扬子陆块东南缘江南造山带中段弧-陆碰撞事件的重要产物。

关键词:仓溪岩群; 锆石 U-Pb 定年; 新元古代弧盆系, 湘东北

中图分类号: P597; P534.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)04-0120-15

Tan M T, Long W G, Wei Y X, Deng X, Tian Y, Wang J, Jin W, Xu D L, Xu Y and Huang H. 2022. Zircon U-Pb Dating of the Cangxi Complex-Group and the Evolution of Neoproterozoic Arc Basin System in Northeast Hunan. *South China Geology*, 38(1): 120-134.

Abstract: The Cangxi Complex-Group is located on the middle part of Jiangnan orogenic belt in northeast Hunan, once considered to belong to Paleoproterozoic but in recent years form in the early Neoproterozoic through new isotopic dating. According to LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating, it is suggested that the formation ages of sericite quartz phyllite, amphibolites and tremolite are 858.3 ± 3.7 Ma, 844.3 ± 14.0 Ma and 815.0 ± 10.0 Ma, and the invasion age of diabase dyke is 196.6 ± 3.3 Ma. All those show that the Cangxi Complex-Group mainly formed during 815 ~ 865 Ma in the early Neoproterozoic, and affected by Indosinian tectonic activities. The Cangxi Complex-Group is a subduction accretionary complex formed in the early Neoproterozoic and mainly composed of a set of metasedimentary, metabasic rocks or ophiolite fragments, also important products of the widespread oceanic crust subduction around the Yangtze block and the arc-continental collision in the middle of the Jiangnan orogenic belt on the southeast margin of the Yangtze block.

Key words: Cangxi Complex-Group; zircon U-Pb dating; Neoproterozoic arc basin system; northeast Hunan

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-1-24

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20221634, DD20190374, DD20160031)

第一作者: 谭满堂 (1975—), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查、地质矿产勘查工作, E-mail: 573247772@qq.com

华南中部沿扬子陆块东南缘的皖、浙、赣、湘、黔、桂发育一套长条状展布的前寒武纪地质单元,曾被黄汲清等(1945, 1954, 1980)称为中元古代的“江南古陆”、“江南地轴”或“江南台隆”等。随着板块构造理论的兴起和应用,该地质单元逐渐被认为是一个扬子陆块与华夏地块之间自新元古代以来多期作用形成的一个复合造山带——江南造山带,并且在原认为是中元古代的变质地层、岩浆岩中陆续获得了小于 1000 Ma 的年龄数据,证明江南造山带的地层时代和火山活动主体时代为新元古代。

新元古代 1000~820 Ma 时期,受控于全球罗迪尼亚超大陆的汇聚,扬子陆块周缘发育“沟-弧-盆”体系,发生洋壳俯冲作用,形成相应的弧岩浆岩和与之相配套的蛇绿岩或俯冲增生杂岩,并在 820 Ma 左右转化为陆形成克拉通基底(刘宝珺等, 1993; 郭令智等, 1996; 邓晋福等, 2016; 潘桂棠等, 2016; 张克信等, 2018)。扬子陆块东南缘及其外侧为一个由一系列岛弧和盆地组成的江南弧盆系,随着华南洋向北西俯冲,产生弧-陆碰撞,形成增生型造山带。江南造山带东段赣东北 MOR 型蛇绿岩最先形成于约 1061 Ma 的洋中脊环境,并经历了约 970 Ma 时期的洋内俯冲作用下 SSZ 环境的改造(王存智等, 2016a),皖南伏川 SSZ 型蛇绿岩形成于 840~820 Ma 时期(丁炳华等, 2008),证实了新元古代扬子陆块周缘洋壳俯冲及弧-陆碰撞事件在该地区的存在。但江南造山带西段新元古代俯冲增生事件直接的物质记录较少:湘桂地区无典型蛇绿混杂岩等直接证据(徐德明等, 2012),仅贾宝华等(2004)报道了湖南浏阳文家市一带存在元古宙蛇绿岩套残片;周金城等(2003)提出湖南省浏阳地区具典型 N-MORB 属性的南桥玄武岩可能为沿古俯冲带分布的洋壳残片。

湘东北文家市地区大地构造上位于江南造山带中段,近年来前人利用高精度锆石 U-Pb 测年将该地区变质基底冷家溪群形成时代基本限定在新元古代青白口纪早期(834~822 Ma)(高林志等, 2011a, 孙海清等, 2009, 2012),同时在其中解体出一套稍早于冷家溪群的构造杂岩——仓溪岩群。仓溪岩群出露于湘东北文家市镇南东至江西省宜春市袁州区磁化镇北西一带,最初由湖南省区域

地质调查所从原冷家溪群解体出“涧溪冲岩群、仓溪岩群和连云山杂岩”而来,岩石组合为一套区域变质的沉积碎屑岩—火山岩,是以海相陆源碎屑岩、酸性火山碎屑岩为主夹裂隙喷溢基性火山岩-次火山岩序列经区域高绿片岩—低角闪岩相变质而形成的,以残留的构造岩片产出在冷家溪群中,现今呈现为整体无序、局部有序的状态(唐晓珊等, 1999; 张晓阳, 2000; 车勤建等, 2005)。早期的 Sm-Nd 全岩等时线测得仓溪岩群形成年龄在 1857~2090 Ma 之间,属古元古代(张晓阳, 2000; 唐晓珊等, 2004);但其中变火山岩锆石 U-Pb 年龄却为 855 ± 5 Ma(高林志等, 2011b, 2011c)、变辉绿岩年龄为 804 ± 3.5 Ma(湖南省地质调查院, 2018)。最近龙文国等(2021)在湘东北浏阳文家市地区原仓溪岩群中厘定出一套增生混杂岩,其基质为变质沉积岩类,岩块岩性主要为变基性火山岩、变基性侵入岩、变砂岩类及少量碳酸盐岩,对基质和岩块进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得变质含凝灰质砂岩(基质)和变辉长岩(岩块)的原岩形成年龄分别为 859 ± 5 Ma、 846 ± 19 Ma,其研究认为浏阳文家市地区在新元古代时期经历了碰撞造山全过程,形成了文家市地区的混杂岩,构成江南造山带的重要组成部分。

虽然湖南省地质调查院(2018)综合各种同位素年龄结果将仓溪岩群提升至中元古代,但认为需进一步研究解释,其物质组成、形成时代以及构造属性依然是区域地质研究的重要关注点,并对扬子东南缘江南造山带的构造演化的研究产生影响。本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对仓溪岩群中陈家湾岩组中绢云石英千枚岩及变基性岩的形成年龄进行了精确的厘定,将仓溪岩群形成时代限定于新元古代,结合区域研究综合表明仓溪岩群为扬子陆块东南缘新元古代弧盆系演化过程中江南造山带中段弧-陆碰撞的重要产物。

1 仓溪岩群的岩石组合

湖南省地质调查院(2018)在编写《湖南省区域地质志》时将原冷家溪群中解体出来的“涧溪冲群”归并到新仓溪岩群的下部,合称新的“仓溪

2 锆石 U-Pb 测年

2.1 样品采集及岩相学特征

仓溪岩群呈北东向构造岩片状或透镜状产于冷家溪群内,为酸、中、基性浅成侵入岩与绿片岩相变质的火山碎屑岩、火山岩组成的整体无序、局部

有序的变质岩系,原生沉积构造已无法识别。

本次研究在其中的陈家湾岩组(曾称枫梓冲岩组第二岩性段)中采集了透闪石岩(LY15-3)、斜长角闪岩(LY15-7)、辉绿岩脉(LY15-15)、绢云石英千枚岩(LY15-16)(图 1、图 2)等样品进行锆石 U-Pb 定年研究。

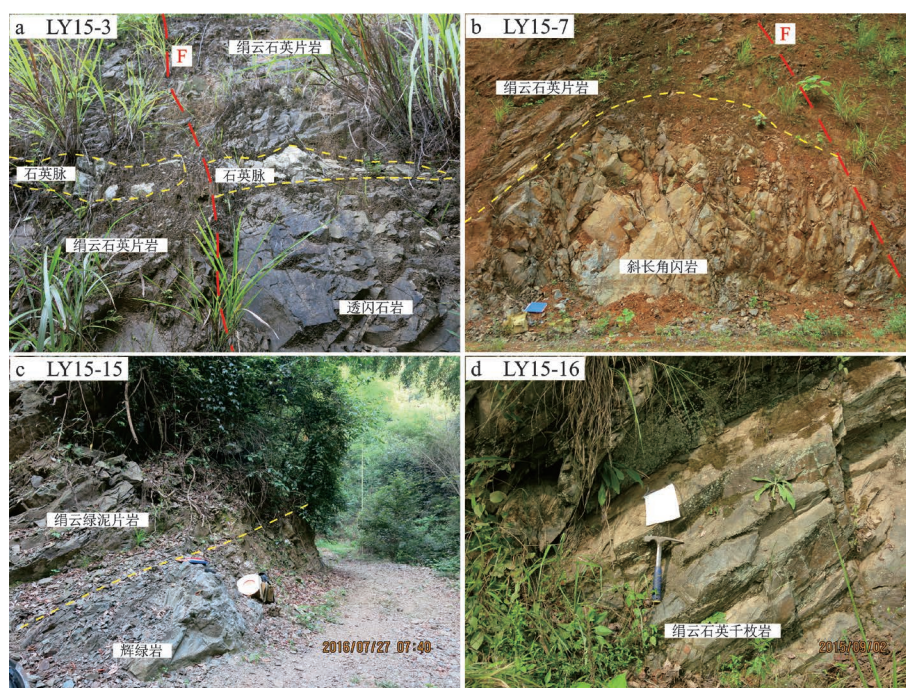


图 2 样品采集点野外露头照片

Fig. 2 Field outcrop photos of sampling points

a- 花木村北透闪石岩 ;b- 仓溪村北斜长角闪岩 ;c- 道士屋场辉绿岩脉 ;d- 仓溪村南绢云石英千枚岩

样品 LY15-3 采集于仓溪村南侧花木村附近(图 1、图 2a),坐标为:N28°00'27.6"、E113°57'00.8"。岩性为透闪石岩,具柱状变晶结构,块状构造,矿物主要由透闪石(78%±)、绿泥石(4%±)、及斜长石(8%±)、黝帘石(8%±)组成,另见微量石英(2%±),副矿物见不透明金属矿物(图 3a)。岩石整体蚀变强烈,蚀变矿物以透闪石为主,局部残留未蚀变的板状斜长石,推断原岩为基性岩,呈似层状夹于绢云石英片岩之中,被断层切割,断层破碎带宽约 30-50 cm,并切割石英脉。

样品 LY15-7 采集于仓溪村附近(图 1、图 2b),坐标为:N28°01'32.0"、E113°56'34.7"。岩性为斜长角闪岩,具粒状、柱状变晶结构,块状构造,矿物主要由角闪石(18%±)、斜长石(70%±)及少量绿泥

石(7%±)、绿帘石(5%±)组成(图 3b),原岩为铁镁质的火成岩。斜长角闪岩呈团块或透镜状夹于绢云母石英片岩之中,发育黝帘石化,接触面附近岩石产生强烈劈理或片理化,局部被后期断层切割。

样品 LY15-15 采集于仓溪村西侧道士屋场附近(图 1、图 2c),坐标为:N28°01'11.0"、E113°55'20.1"。岩性为细-中粒辉绿岩,具细-中粒辉绿结构或嵌晶含长结构,块状构造。矿物由基性斜长石(66%±)、普通辉石及斜方辉石(32%±)和少量石英(2%±)组成(图 3c),呈宽 3-5 m 的脉状侵入于绿泥绢云片岩中,接触界面平直略有起伏,片岩接触带附近发育 10-30 cm 的褪色蚀变带,岩脉走向与片岩片理大体一致,为北东 50-70°,接触面产状为 150°∠50°。

样品 LY15-16 采集于仓溪村南侧(图 1、图 2d), 坐标为: N28°00'56.0"、E113°56'56.5"。岩性为绢云石英千枚岩, 具显微片状粒状变晶结构, 千枚状构造。主要由石英(50%±)、绢云母(50%±)及少量绿泥石组成(图 3d)。该样品采集位置与高林

志等(2011 年)所采“变凝灰岩”的位置基本一致, 其主要成分中长英质含量占 65%~50%, 绢云母和绿泥石占 35%~40%。本次所采样品 LY15-16 与其成分一致、含量比例略有差异, 原岩为含凝灰质成份的砂泥质岩或泥质硅质岩。

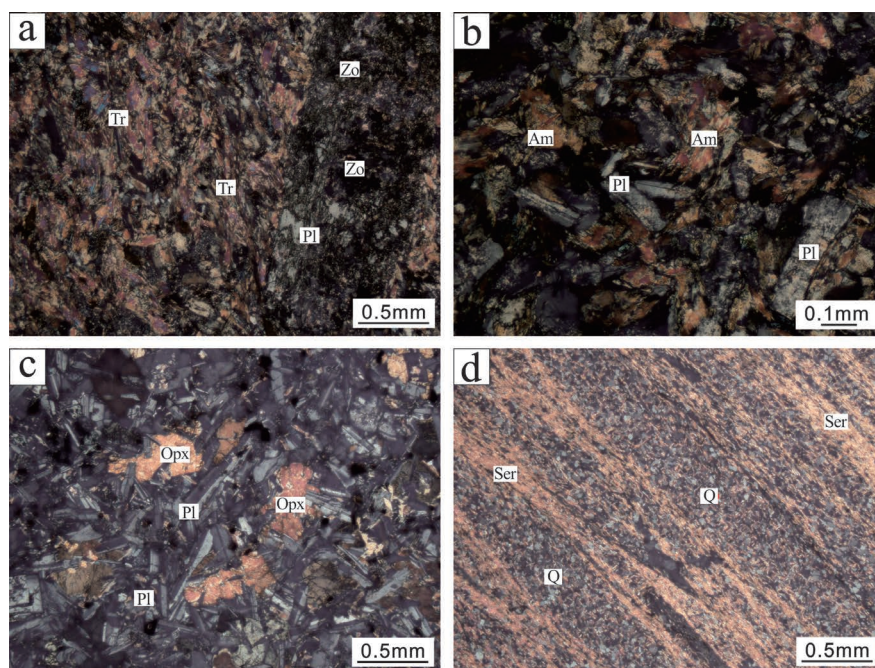


图 3 岩矿鉴定显微照片

Fig. 3 Micrograph of rock and mineral identification

a-LY15-3; b-LY15-7; c-LY15-15; d-LY15-16

Zo- 黝帘石; Tr- 透闪石; Pl- 斜长石; Am- 角闪石; Opx- 斜方辉石; Ser- 绢云母; Q- 石英

2.2 样品测试

所采样品在河北省廊坊市宇能(宇恒)矿物分选综合实验室进行处理与锆石单矿物挑选。其中 LY15-3 获得锆石 50 粒(0.02-0.1 mm), LY15-7 获得锆石约 40 粒, 且多似老变质锆石, LY15-15 获得锆石 75 粒, LY15-16 锆石数量超过 1000 粒。

挑选出来的锆石颗粒在武汉上谱分析科技有限责任公司进行制靶、阴极发光照相及激光剥蚀(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 定年分析。锆石测年分析采用相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLasPro), 使用安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700), 激光能量 80 mJ, 频率 5 Hz, 激光束斑直径 32 μm 。实验分析条件及流程见 Liu Y S et al.(2008, 2010)。

LY15-3: 样品中锆石粒径一般在 20-100 μm

之间, 晶形较好, 核部与条纹状或板状环带清晰可见, 同时有部分锆石具有变质边; 大部分为岩浆成因锆石, 少量继承锆石和变质锆石(图 4a)。LY15-7: 样品中锆石粒径一般在 50-75 μm 之间, 数量较少, 形态大多残缺不全, 核部和环带残留程度不等, 主要为岩浆成因锆石, 其次有少量继承锆石(图 4b)。LY15-15: 样品中锆石粒径一般在 50-100 μm 之间, 晶形较复杂。大部分晶形较完整, 呈长条状或板状, 边部条纹、环带较清晰, 为岩浆成因; 少部分晶形略有残缺, 保留核部与增生边, 为继承锆石且蚀变明显(图 4c)。LY15-16: 样品中锆石粒径一般在 50-100 μm 之间, 晶形大多较完整或以半自形为主, 且多数保留条纹或板状环带韵律结构, 部分锆石核部清晰, 为岩浆成因(图 4d)。



图 4 锆石阴极发光图像及测点年龄值

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence image and age of measuring points
白色实线圆圈为 U-Pb 年龄测试位置

2.3 测年结果

四个样品的测年结果见表1。

样品 LY15-3(透闪石岩):该样品共测试了17个测点,其中除了测点01 击穿,测点05、06、07、17 的谐和度较低,测点02、03 位于锆石核部,记录的是继承锆石的年龄,其Th/U 比值分别为0.42和0.38, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 1515 ± 76.2 Ma 和 1522 ± 46.0 Ma(当 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于1 000 Ma 时采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)。其余10 个测点显示了两组年龄,第一组测点09、11、12、15,记录的是锆石核部边缘的生长年龄,其Th/U 比值在0.1~0.62 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $(765 \pm 8.1 \text{ Ma}) \sim (905 \pm 12.6 \text{ Ma})$ 之间,平均年龄 815.0 ± 10.0 Ma(MSWD=2.2),大致可代表透闪石岩(原岩变基性岩)的形成年龄(图5a-a1)。第二组测点04、08、10、13、14、16,其Th/U 比值在0.06~0.46 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在237~260 Ma 之间,谐和年龄值 247.4 ± 5.7 Ma

(MSWD=0.40) (图5a-a2)。

样品 LY15-7(斜长角闪岩):该样品共测试了14 个测点,各测点总体谐和度较高。测点06、07、08、09 位于锆石核部,记录的是继承锆石的年龄,其Th/U 比值在0.55~1.43 之间, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 $(1360 \pm 18.7 \text{ Ma}) \sim (2444 \pm 22.3 \text{ Ma})$ 之间。测点13 谐和度 $93\% < 95\%$ 。剩余测点01、02、03、04、05、10、11、12、14 的年龄接近,主要记录了锆石边部环带结构的生长年龄,其Th/U 比值在0.28~1.02 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在774~874 Ma 之间,谐和年龄值为 844.3 ± 14.0 Ma(MSWD=1.9) (图5b),可代表斜长角闪岩原岩-变基性岩的形成时间。

样品 LY15-15(辉绿岩脉):该样品共测试了18 个测点,其中测点12 谐和度为85%, $< 95\%$,测点04、05、13 的CL 图像明显泛白呈亮白色,应是铀异常导致;测点1 锆石呈密集细条纹状,疑似酸性岩浆锆石混入杂质。测点2、09、10、11、14、15 的锆石

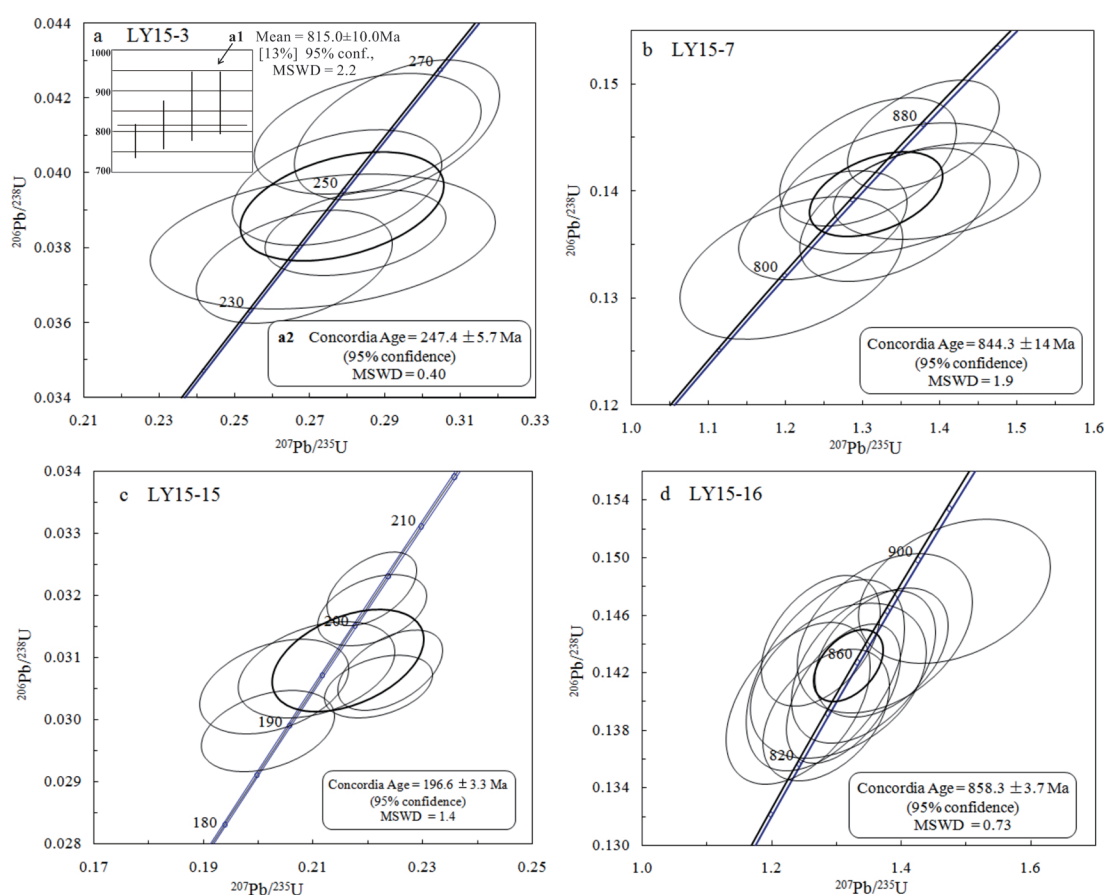


图5 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analysis results of the Chenjiawan rock formation of Cangxi Complex-Group

样品及 测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值				年龄值 (Ma)				谐和度 %				
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	$\pm \sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \sigma$		
LY15-3 (透闪石岩)																
01	491	1157	0.42	0.0944	0.0035	0.4577	0.0170	0.0349	0.0006	1517	69.8	383	11.9	221	3.6	46
02	73.3	174	0.42	0.0943	0.0038	3.1489	0.1496	0.2384	0.0047	1515	76.2	1445	36.6	1379	24.5	95
03	49.7	130	0.38	0.0942	0.0023	3.7105	0.1069	0.2821	0.0051	1522	46.0	1574	23.1	1602	25.7	98
04	72.4	1235	0.06	0.0513	0.0018	0.2931	0.0112	0.0412	0.0008	254	86.1	261	8.8	260	4.7	99
05	95.1	138	0.69	0.0675	0.0047	0.3800	0.0249	0.0408	0.0011	852	146	327	18.3	258	6.6	76
06	116	170	0.68	0.0754	0.0072	0.1813	0.0159	0.0174	0.0005	1080	192	169	13.7	111	3.1	58
07	211	233	0.91	0.1214	0.0106	0.1849	0.0147	0.0113	0.0004	1977	156	172	12.6	72.4	2.3	18
08	253	892	0.28	0.0530	0.0019	0.2822	0.0098	0.0384	0.0005	328	76.8	252	7.8	243	2.9	96
09	133	317	0.42	0.0693	0.0021	1.4441	0.0426	0.1508	0.0023	909	63.0	907	17.7	905	12.6	99
10	132	288	0.46	0.0515	0.0034	0.2735	0.0188	0.0382	0.0007	265	154	245	15.0	242	4.6	98
11	34.7	357	0.10	0.0684	0.0022	1.2945	0.0417	0.1364	0.0019	880	64.8	843	18.5	824	10.7	97
12	84.1	513	0.16	0.0703	0.0023	1.4466	0.0479	0.1486	0.0025	939	62.5	908	19.9	893	14.1	98
13	135	644	0.21	0.0516	0.0022	0.2658	0.0106	0.0375	0.0006	333	100	239	8.5	237	3.8	99
14	88.9	728	0.12	0.0507	0.0022	0.2773	0.0114	0.0396	0.0006	228	98.1	248	9.1	250	3.9	99
15	309	498	0.62	0.0687	0.0018	1.2015	0.0319	0.1260	0.0014	900	53.7	801	14.7	765	8.1	95
16	110	357	0.31	0.0506	0.0023	0.2854	0.0123	0.0411	0.0007	220	99.1	255	9.7	259	4.1	98
17	214	313	0.68	0.0895	0.0066	0.3730	0.0270	0.0306	0.0007	1417	142	322	19.9	194	4.3	50
LY15-7 (斜长角闪岩)																
01	74.9	120	0.62	0.0665	0.0036	1.2077	0.0591	0.1328	0.0027	820	111.1	804	27.2	804	15.5	99
02	125	150	0.83	0.0663	0.0025	1.3070	0.0469	0.1427	0.0024	817	77.8	849	20.6	860	13.8	98
03	102	362	0.28	0.0680	0.0023	1.2175	0.0386	0.1295	0.0018	870	70.4	809	17.7	785	10.1	97
04	114	165	0.69	0.0662	0.0024	1.2483	0.0446	0.1368	0.0021	813	77.8	823	20.1	827	11.8	99
05	111	298	0.37	0.0666	0.0024	1.1749	0.0429	0.1276	0.0020	826	77.8	789	20.0	774	11.4	98
06	259	307	0.84	0.0956	0.0025	3.6938	0.1042	0.2779	0.0036	1539	50.0	1570	22.6	1581	18.3	99
07	380	265	1.43	0.1613	0.0037	10.0955	0.2433	0.4500	0.0052	2469	37.8	2444	22.3	2395	23.0	98
08	125	205	0.61	0.0859	0.0021	2.8161	0.0702	0.2368	0.0030	1400	48.1	1360	18.7	1370	15.7	99
09	96.7	177	0.55	0.1121	0.0028	5.0734	0.1351	0.3260	0.0044	1833	45.1	1832	22.6	1819	21.2	99
10	170	420	0.40	0.0684	0.0019	1.3790	0.0402	0.1453	0.0021	881	58.5	880	17.2	874	11.8	99
11	572	562	1.02	0.0702	0.0026	1.3421	0.0505	0.1378	0.0026	1000	75.9	864	21.9	832	14.5	96
12	102	109	0.94	0.0701	0.0035	1.3474	0.0632	0.1403	0.0025	931	99.1	866	27.3	846	14.1	97
13	198	694	0.29	0.0764	0.0022	1.6542	0.0460	0.1553	0.0017	1106	52.8	991	17.6	931	9.3	93
14	329	365	0.90	0.0712	0.0026	1.3965	0.0548	0.1400	0.0018	962	74.1	887	23.2	845	10.3	95

续表 1

样品及 测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值				年龄值 (Ma)				谐和度				
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	$\pm \sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \sigma$	%		
LY15-15 (辉绿岩脉)																
01	745	587	1.27	0.2761	0.0018	0.0517	0.0018	0.0100	0.0386	0.0006	81.5	248	7.9	244	3.4	98
02	828	623	1.33	0.2657	0.0023	0.0531	0.0023	0.0108	0.0363	0.0004	99.1	239	8.7	230	2.7	96
03	1292	1171	1.10	0.2018	0.0020	0.0489	0.0020	0.0080	0.0298	0.0004	90	187	6.8	189	2.7	98
04	124	203	0.61	0.3959	0.0028	0.0561	0.0028	0.0189	0.0517	0.0008	111	339	13.7	325	5.1	95
05	478	463	1.03	0.2269	0.0024	0.0496	0.0024	0.0113	0.0330	0.0005	115	208	9.3	209	2.9	99
06	677	725	0.93	0.2106	0.0022	0.0494	0.0022	0.0094	0.0308	0.0005	137.945	194	7.9	196	3.2	99
07	951	682	1.39	0.2029	0.0022	0.0480	0.0022	0.0090	0.0305	0.0005	112.9	188	7.6	194	3.1	96
08	3158	2192	1.44	0.2220	0.0015	0.0523	0.0015	0.0065	0.0305	0.0003	66.7	204	5.4	194	2.1	95
09	1162	1113	1.04	0.2224	0.0019	0.0485	0.0019	0.0091	0.0331	0.0004	90	204	7.5	210	2.5	97
10	1060	948	1.12	0.2327	0.0016	0.0500	0.0016	0.0074	0.0339	0.0004	105.5	212	6.1	215	2.7	98
11	1089	1357	0.80	0.2417	0.0017	0.0531	0.0017	0.0087	0.0330	0.0005	106.5	220	7.1	209	2.8	95
12	181	250	0.73	0.5412	0.0038	0.0659	0.0038	0.0292	0.0606	0.0013	120.4	439	19.2	379	7.7	85
13	257	377	0.68	1.7244	0.0023	0.0756	0.0023	0.0516	0.1662	0.0023	56.5	1018	19.2	991	12.9	97
14	773	810	0.95	0.2516	0.0018	0.0519	0.0018	0.0089	0.0353	0.0004	84.2	228	7.3	224	2.7	98
15	636	579	1.10	0.2344	0.0024	0.0497	0.0024	0.0118	0.0341	0.0005	111.1	214	9.7	216	3.1	98
16	2470	2868	0.86	0.2207	0.0011	0.0498	0.0011	0.0054	0.0321	0.0004	51.8	203	4.5	204	2.4	99
17	1871	2500	0.75	0.2241	0.0014	0.0527	0.0014	0.0063	0.0308	0.0004	61.1	205	5.2	196	2.7	95
18	2335	1880	1.24	0.2208	0.0014	0.0502	0.0014	0.0066	0.0318	0.0004	32.4	203	5.5	202	2.4	99
LY15-16 (绢云石英千枚岩)																
01	109	257	0.42	1.5995	0.0021	0.0700	0.0021	0.0530	0.1651	0.0029	63.0	970	20.7	985	16.1	98
02	190	242	0.78	1.2761	0.0018	0.0639	0.0018	0.0376	0.1442	0.0019	59.3	835	16.8	868	10.5	96
03	454	616	0.74	1.2664	0.0015	0.0664	0.0015	0.0299	0.1375	0.0016	46.3	831	13.4	830	9.0	99
04	126	178	0.71	1.3115	0.0019	0.0679	0.0019	0.0359	0.1405	0.0020	59.3	851	15.8	848	11.2	99
05	116	209	0.55	1.4327	0.0021	0.0657	0.0021	0.0456	0.1581	0.0022	66.7	903	19.0	946	12.4	95
06	73.7	109	0.67	1.2831	0.0025	0.0656	0.0025	0.0498	0.1418	0.0027	75.0	838	22.2	855	15.3	98
07	115	144	0.80	1.4829	0.0029	0.0724	0.0029	0.0605	0.1476	0.0020	76.9	923	24.8	888	11.5	96
08	121	200	0.60	5.5035	0.0023	0.1088	0.0023	0.1247	0.3633	0.0045	37.8	1901	19.5	1998	21.3	95
09	82.6	130	0.63	1.3423	0.0026	0.0684	0.0026	0.0455	0.1424	0.0022	880	864	19.7	858	12.3	99
10	94.9	131	0.73	1.3749	0.0027	0.0682	0.0027	0.0552	0.1447	0.0023	81.5	878	23.6	871	12.7	99
11	93.5	421	0.22	5.1431	0.0026	0.1078	0.0026	0.1259	0.3416	0.0045	44.8	1843	20.8	1895	21.9	97
12	252	455	0.55	1.5857	0.0021	0.0734	0.0021	0.0451	0.1548	0.0018	58.8	965	17.7	928	10.3	96
13	141	168	0.84	1.3696	0.0022	0.0691	0.0022	0.0422	0.1434	0.0018	67.7	876	18.1	864	10.3	98
14	219	270	0.81	1.2844	0.0020	0.0666	0.0020	0.0401	0.1390	0.0019	64.0	839	17.8	839	10.6	99
15	95.5	107	0.89	1.3034	0.0028	0.0669	0.0028	0.0555	0.1415	0.0022	88.9	847	24.5	853	12.4	99
16	101	130	0.78	1.3504	0.0026	0.0641	0.0026	0.0525	0.1527	0.0025	83.3	868	22.7	916	13.7	94
17	104	260	0.40	13.0466	0.0037	0.1753	0.0037	0.3012	0.5352	0.0068	34.9	2683	21.8	2763	28.8	97
18	79.3	160	0.49	1.2410	0.0025	0.0645	0.0025	0.0452	0.1399	0.0023	81.5	819	20.5	844	13.0	97
19	268	339	0.79	1.2032	0.0018	0.0659	0.0018	0.0351	0.1313	0.0016	59.3	802	16.2	795	8.9	99
20	153	162	0.94	1.3798	0.0027	0.0657	0.0027	0.0556	0.1513	0.0021	85	880	23.7	908	12.0	96

具有明显的核部与增生边,为继承锆石,记录了其蚀变年龄(未参与年龄计算)。其余测点 03、06、07、08、16、17、18 的锆石主要呈板状或条带状,自形程度较高,环带较清晰,主要记录了锆石边部环带的生长年龄,谐和度较高,Th/U 比值较大,在 0.75~1.44 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 189~204 Ma 之间,谐和年龄值为 196.6 ± 3.3 Ma(MSWD=1.4) (图 5c),可代表辉绿岩脉的侵入时间大约在印支期末。

样品 LY15-16(绢云石英千枚岩):该样品共测试了 20 个测点,总体谐和度较高。其中测点 08、11、17 位于锆石核部,记录的是继承锆石的年龄,其余测点记录了锆石边部环带的生长年龄,Th/U 比值较大,在 0.42~0.94 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $(795 \pm 8.9$ Ma)~ $(985 \pm 16.1$ Ma)之间,谐和年龄值为 858.3 ± 3.7 Ma(MSWD=0.73) (图 5d)。本次采集的样品与高林志等(2011c)的采样位置相同,所测得的年龄值也与其所获得的 855 ± 5 Ma 的年龄基本一致,可以认为是仓溪岩群陈家湾岩组绢云石英千枚岩的原岩-含凝灰质砂泥质岩的形成年龄。

3 讨论

3.1 仓溪岩群形成时代探讨

仓溪岩群的早期同位素测年方法以 Sm-Nd 全岩等时线法为主,所获年龄值介于 1857~2090 Ma 之间,被认为是吕梁造山运动巅峰时期的产物,该时期亏损上地幔柱及深部构造活动频繁、强烈,导致壳、幔岩石较高程度的部分熔融和岩浆侵入-喷发事件的发生(张晓阳,2000;唐晓珊等,2004;湖南省地质调查院,2018)。

但近年来的高精度锆石 U-Pb 年龄均指示仓溪岩群形成于中-新元古代(表 2)。

从表 2 可以看出,近年来高精度锆石 U-Pb 年龄值主要集中在 815.0~861.2 Ma 之间。此外,张玉芝等(2015)在湘赣交界慈化地区的冷家溪群(原文)识别出安山岩和英安岩,其采样地点实际位于文家市南东侧仓溪一带,应在目前所指的仓溪岩群之内,获得该火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 832 ± 12 Ma,代表其喷发年龄。龙文国等(2021)

表 2 仓溪岩群同位素年龄统计表
Table 2 Statistical table of isotopic age of the Cangxi Complex-Group

层位	岩石	同位素年龄 (Ma)	测试方法	资料来源
枫梓冲岩组	绿泥石白云母长石石英片岩(变质凝灰岩)	2090 ± 20	全岩 Sm-Nd	张晓阳, 2000; 唐晓珊等, 2004
陈家湾岩组	黝帘石阳起石岩	2030 ± 8	全岩 Sm-Nd	张晓阳, 2000; 唐晓珊等, 2004
斫木冲岩组	透闪石阳起石片岩	2068 ± 17	全岩 Sm-Nd	唐晓珊等, 2004
	斜长角闪岩	1857.5	全岩 Sm-Nd	
雷公糙岩组	透闪石片岩	1957 ± 3a	全岩 Sm-Nd	唐晓珊等, 2004
陈家湾岩组	变凝灰岩	855 ± 5	SHRIMP 锆 U-Pb	高林志等, 2011c
	斜长角闪岩(变辉绿岩)	804 ± 3.5	SHRIMP 锆 U-Pb	湖南省地质调查院, 2018
	绢云石英千枚岩	858.3 ± 3.7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	本文
	斜长角闪岩(变基性岩)	844.3 ± 14.0	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	透闪石岩(变基性岩)	815.0 ± 10.0	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
南棚下岩组 (原涧溪冲群)	变辉绿岩	837 ± 5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang Y Z et al., 2016
	凝灰岩	835 ± 6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	千枚岩	845 ± 23	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
清风亭岩组	变质沉积岩	842.3 ± 9.7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	龙文国等, 2019
		861.2 ± 5.6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	变基性岩	846 ± 19	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
岩脉	辉绿岩	219.6 ± 6.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	龙文国等, 2019
		217 ± 0.9	SHRIMP 锆 U-Pb	湖南省地质调查院, 2018
		196.6 ± 3.3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	本文
混杂岩基质	变质含凝灰质砂岩	859 ± 5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	龙文国等, 2021
混杂岩岩块	变辉长岩	846 ± 19	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	

的测年显示仓溪岩群中基质原岩的形成时代小于 859 Ma, 岩块形成时代与之同时或稍晚。因此, 仓溪岩群中的变沉积岩及变基性岩的同位素年龄主要介于 815~865 Ma 之间, 结合区域地质, 仓溪岩群以构造残片就位在冷家溪群中, 总体上其形成时代稍早于冷家溪群, 至少可确定为新元古代。

另外, 本次研究获得印支期辉绿岩脉的侵入年龄为 196.6 ± 3.3 Ma, 透闪石岩中也存在一组 247.4 ± 5.7 Ma 的年龄值, 该采样点附近断裂活动明显且发育后期石英脉, 推测是后期构造热液活动影响的结果。龙文国等(2019)测得文家市南桥一带侵入于冷家溪群的基性岩(原被认为形成时代为前寒武纪)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 219.6 ± 6.5 Ma; 湖南省地质调查院(2018)报道了斜长角闪岩(变辉绿岩)的一组年龄为 217 ± 0.9 Ma。综合表明文家市地区仓溪岩群和冷家溪群受到了印支期构造-岩浆活动的影响, 发育许多辉绿岩、闪长岩等各类后期岩脉, 早期岩石遭受了不同程度的蚀变。

3.2 仓溪岩群构造属性

湘东北文家市地区处于江南造山带中段, 是江南造山带东西段衔接的关键位置, 存在较多新元古代大洋板块俯冲证据:

贾宝华等(2004)认为文家市仓溪一带残留有蛇绿岩套残片, 由变沉积岩、变玄武岩、变辉绿岩、变辉长岩、变辉石岩类及变硅质岩组成, 提出文家市蛇绿岩可能形成于洋中脊-岛弧的过渡环境, 即弧前有限小洋盆的构造环境, 可以作为新元古代早期扬子陆块周缘大洋板块俯冲的证据之一。

伍光英等(2005)的研究表明“仓溪岩群”南棚下岩组(原涧溪冲群)变质火山-沉积岩系为变质火山岩夹变质粘土质沉积岩, 原岩为以低钾拉斑玄武岩为主、低钾玄武安山岩次之的火山-次火山岩系, 其中的斜长角闪岩的原岩可能为玄武安山质次火山岩岩床或辉绿岩岩墙, 南棚下岩组变质火山岩类岩石物质来源于亏损地幔, 形成于大洋拉张环境。

周金城等(2003, 2005, 2014)在南桥发现了具有高度亏损 N-MORB 属性的玄武岩-辉绿岩, 形成时代 838~860 Ma, 认为其不是弧后盆地玄武岩, 或许是沿俯冲带局部仰冲到岛弧上的上部洋壳碎

片, 也有可能是弧前盆地中洋壳基底的残留, 是九岭古岛弧的重要证据之一。

张玉芝等(2015)于文家市南仓溪一带识别出安山岩和英安岩, 其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 832 ± 12 Ma, 代表其喷发年龄, 其地球化学特征属于高镁安山岩, 具有“弧型”特征, 可能来源于受板片熔体/流体或者俯冲再循环沉积物交代的难熔地幔源区, 暗示江南造山带中段(湘东北地区)在约 832 Ma 时仍处在消减阶段, 扬子陆块与华夏地块尚未完全拼合。Zhang Y Z et al.(2016)获得文家市北西侧涧溪冲一带原“涧溪冲群”(即南棚下岩组)中层状变辉绿岩、凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 837 ± 5 Ma、 835 ± 6 Ma, 千枚岩中年龄峰值为 870 Ma, 最年轻碎屑锆石的年龄为 845 ± 23 Ma, 变基性岩属于拉斑玄武岩和玄武安山岩系列, 具有弧火山岩的地球化学特征。Zhang Y Z et al. (2013)还获得文家市北东侧的水口和南桥冷家溪群中玄武岩的 SHRIMP 和 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 860 ± 20 Ma、 838 ± 12 Ma, 形成于弧后盆地。

新元古代早期(~840 Ma)沿江南造山带中段发育完整的弧-盆系统, 是 Rodinia 外缘增生造山带弧陆碰撞增生作用的响应。华南新元古代早期弧-弧后体系形成于 ~990-820 Ma 期间 Rodinia 外缘增生造山带, 这些弧-弧后体系的形成和闭合促使扬子陆块和华夏地块在不同地段持续拼合, 并最终形成华南陆块(Wang Y J et al., 2013, 2019; Yao J L et al., 2019 a)。

本文及龙文国等(2019)的综合研究认为: 在华南洋向北西俯冲的构造背景下, 文家市地区经历了碰撞造山的全过程, 形成了文家市构造混杂岩, 构成了江南造山带的重要组成部分, 物质组成包括弧前、岛弧、弧后不同地质背景的沉积岩系、火山岩系、同碰撞期或后碰撞期侵入的花岗岩类及中基性岩类。文家市混杂岩是江南造山带中段俯冲-增生过程中的重要产物, 其中仓溪岩群处于俯冲增生楔及弧前盆地的位置, 其变沉积岩系、变基性岩或蛇绿岩残片组合可视为新元古代俯冲增生杂岩。

3.3 扬子东南缘弧盆系演化

江南造山带为扬子陆块与华夏地块自中元古代末以来多期作用形成的增生型造山带, 其地

层和火山活动主体为新元古代。在新元古代早期(1.0~0.80 Ga)的俯冲 - 碰撞阶段,洋陆俯冲导致强烈的岩浆岩活动,形成了一系列蛇绿混杂岩(带)、岛弧岩浆岩、碰撞花岗岩、后碰撞裂谷岩浆岩等。江南造山带东段出露有代表着洋壳残留的赣东北蛇绿岩套(1.0~0.97 Ga)、皖南歙县(伏川)SSZ 型蛇绿岩套(840~820 Ma),赣东北樟树墩发育 ~830 Ma 高镁闪长岩和 ~825 Ma 的高镁安山岩(丁炳华等,2008;王存智等,2015,2016 a,2016b),指示当时赣东北地区属于扬子陆块周缘俯冲带的组成部分。扬子陆块黄陵地区南部发育中 - 新元古代(1120~974 Ma)庙湾蛇绿岩(蒋幸福,2014)。武汉地质调查中心在 2019-2021 年开展红安 - 咸宁地区区域地质调查项目中于扬子陆块北缘大悟宣化店 - 红安高桥 - 永佳河混杂岩带中识别出中 - 新元古代的岩块(片),其中包含蛇绿混杂岩的残留岩块,大别山南缘蕲春构造混杂岩中各类岩块主体形成于新元古代,记录了中新元古代扬子北缘洋陆俯冲的过程(徐扬等,2021)。云开地区西北缘信宜贵子坑 - 增城构造混杂带是含有蛇绿岩的俯冲增生杂岩带,其中的新元古代蛇绿岩(824 ± 77 Ma、 815 ± 75 Ma)是华南新元古代古华南洋留存的重要证据(彭松柏等,1999,2006;虞鹏鹏等,2017)。

这些蛇绿岩或俯冲增生杂岩的存在表明在中元古代末到新元古代初,扬子陆块周边都可能存在洋壳的俯冲,并伴随有新元古代早期的岛弧岩浆活动,湘东北文家市仓溪岩群厘定为新元古代俯冲增生杂岩是这一论点的重要补充。本文综合本次测年结果与前人研究成果,将扬子陆块东南缘弧盆系演化过程总结如下:

(1)新元古代早期古华南洋向西北俯冲,扬子陆块东南缘及其外侧形成了一系列的岛弧和盆地,包括大洋岛弧、大陆边缘弧、弧前盆地、弧后盆地和弧间盆地等,构成了一个复杂的多岛弧盆体系或沟弧盆组合,可分为北东段、中段和南西段。北东部怀玉一带为大洋岛弧,中西部东南边缘为大陆边缘弧,内侧为弧后盆地,湘东北 - 九岭位于中部弧盆系,弧后盆地中沉积冷家溪群或双桥山群(Yao J L et al., 2019a, 2019b)。

(2)新元古代古华南洋洋壳俯冲 - 陆缘增生具有多阶段性连续增生的特征,从北东段开始,逐渐向南西段延伸。在 900~870 Ma,浙西 - 赣东北一带率先发生洋内俯冲 - 弧陆碰撞增生,早期的蛇绿岩受到了来自俯冲带的流体 / 熔体的交代,经历了 SSZ 环境的改造。

(3)在 870~820 Ma 期间,华南洋壳 NNW 向俯冲加剧,第二阶段俯冲增生开始,弧后盆地开启,形成火山 - 碎屑沉积建造,岛弧岩浆作用显著,伴随基性 - 超基性岩、海相火山岩喷发或侵位,形成一系列镁铁质 - 超镁铁质岩石、高镁闪长岩、高镁安山岩和玄武岩(科马提质玄武岩)等,基底岩石部分熔融形成花岗闪长岩。湘东北文家市地区在此阶段经历了俯冲增生过程,形成了文家市仓溪俯冲增生杂岩、南桥 N-MORB 特性的玄武岩、弧后盆地沉积(冷家溪群)等岩石,其俯冲增生模式如图 6。古华南洋的俯冲 - 增生作用除了形成镁铁质 - 长英质火山岩外,还产生大量年龄在 845~815 Ma 之间的 S 型花岗岩(Shu L S et al., 2021),如湘东北地区的葛藤岭花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 845 ± 5 Ma 等(Deng T et al., 2018)。

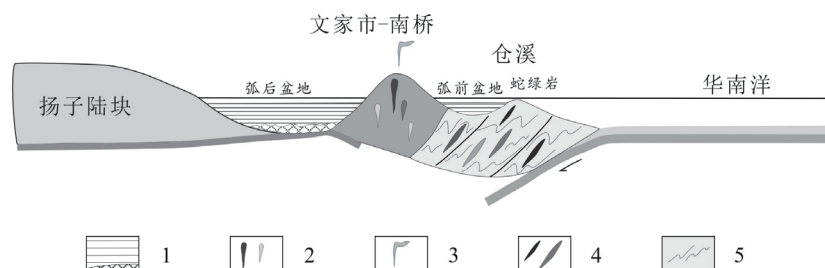


图 6 文家市 - 仓溪地区新元古代弧盆系及俯冲增生模式

Fig. 6 Neoproterozoic arc basin system and subduction accretion model in Wenjiashi-Cangxi area

1- 火山 - 碎屑沉积物; 2. 弧岩浆作用; 3- 火山活动; 4- 变基性岩岩块; 5- 变沉积岩

(4)在 820 Ma~810 Ma 期间,扬子陆块与其东南缘的岛弧之间发生弧—陆碰撞造山,盆地封闭,冷家溪群强烈褶皱并产生低级变质,挤压褶皱和断裂逆冲导致地壳增厚,形成雪峰山造山带。

(5)在 810 Ma-800 Ma,弧陆碰撞基本结束,进入挤压减弱、应力松弛的后碰撞—造山阶段,产生强烈的(强)过铝花岗岩浆活动,湘中南城步地区可能继续受到东南侧残留洋盆的俯冲影响形成新的岛弧和花岗岩侵入(柏道远等,2010)。

4 结论

(1)在文家市地区仓溪岩群中获得变沉积岩—绢云石英千枚岩、斜长角闪岩和透闪石岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 858.3 ± 3.7 Ma、 844.3 ± 14.0 Ma 和 815.0 ± 10.0 Ma;后期辉绿岩脉年龄为 196.6 ± 3.3 Ma,透闪石岩中具有 247.4 ± 5.7 Ma 的改造年龄。综合表明仓溪岩群形成于新元古代早期 815~860 Ma 之间,后期受到印支期构造活动的一定影响。

(2)仓溪岩群是新元古代早期的俯冲增生杂岩,主要由一套变沉积岩、变基性岩或蛇绿岩残片混杂组成,是该时期扬子陆块周缘广泛发生的洋壳俯冲作用形成的,是扬子陆块东南缘新元古代江南造山带弧—陆碰撞的产物。

本次研究及成文得益于“江南造山带地质志”及“中南地区区域地质志”相关项目的实施,得到了中国区域地质志项目组李廷栋院士、潘桂棠、肖庆辉、陆松年等老师的指导和启迪,武汉地质调查中心牛志军研究员等及“鄂东—湘东北地区地质矿产调查”项目组给予了重要支持和帮助,在实验测试中自然资源部中南矿产资源监督检测中心及武汉上谱分析科技有限责任公司提供了协助,一并表示感谢。编辑部以及审稿专家对本文进行了详细指导和修改,在此特别致谢。

参考文献:

柏道远,贾宝华,刘伟,陈必河,刘耀荣,张晓阳.2010.湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对

江南造山带新元古代构造演化的约束[J].地质学报,84(12):1715-1726.

车勤键,伍光英,唐晓珊,彭和求.2005.湘东北中元古代冷家溪群的解体及其地质意义[J].华南地质与矿产,(1):47-53+71.

邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,熊龙.2016.华南地区侵入岩时空演化框架[J].地质论评,62(1):3-16.

丁炳华,史仁灯,支霞臣,郑磊,陈雷.2008.江南造山带存在新元古代(~850 Ma)俯冲作用——来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据[J].岩石矿物学杂志,27(5):375~388.

高林志,陈峻,丁孝忠,刘耀荣,张传恒,张恒,刘燕学,庞维华,张玉海.2011a.湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄—对武陵运动的制约[J].地质通报,30(7):1001-1008.

高林志,丁孝忠,庞维华.2011b.中国中—新元古代地层年表的修正—锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约[J].地层学杂志,35(1):1-7.

高林志,丁孝忠,庞维华,刘燕学,陆松年,刘耀荣,陈峻,张玉海.2011c.湘东北前寒武纪仓溪岩群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J].地质通报,30(10):1479-1484.

郭令智,卢华复,施央申,马瑞士,孙岩,舒良树,贾东,张庆龙.1996.江南中—新元古代岛弧的运动学和动力学[J].高校地质学报,2(1):1-13.

湖南省地质调查院.2018.湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社.

黄汲清,任纪舜,姜春发,张郑坤.1980.中国大地构造及其演化—1:400 万中国大地构造图简要说明[M].北京:科学出版社.

黄汲清.1945.中国主要地质构造单位[M].北京:地质出版社.

黄汲清.1954.中国区域地质的特征[J].地质学报,34(3):217-245.

贾宝华,彭和求,唐晓珊,何江南,郭乐群.2004.湘东北文家市蛇绿混杂岩带的发现及意义[J].现代地质,18(2):229~236

蒋幸福.2014.扬子克拉通黄陵背斜庙湾蛇绿杂岩成因及大地构造意义[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文.

刘宝珺,许效松,潘杏南,黄慧琼,徐强.1993.中国南方古

- 大陆沉积、地壳演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社.
- 龙文国, 金巍, 王晶, 柯贤忠, 田洋, 谭满堂. 2021. 湘东北浏阳文家市地区新元古代混杂岩形成时代的厘定 [J]. 华南地质, 37(4):458-463.
- 龙文国, 柯贤忠, 田洋, 牛志军, 金巍, 陕亮, 王晶. 2019. 鄂东—湘东北区域地质调查报告 [R]. 武汉: 武汉地质调查中心.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化 [J]. 地质前缘, 23(6):1-23.
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 何龙清, 蔡明海, 刘云华. 2006. 云开地区新元古代蛇绿岩的地球化学证据及其构造意义 [J]. 地质学报, 80(6):814-825.
- 彭松柏, 战明国, 彭少梅, 张业明, 付建明. 1999. 云开地区蛇绿混杂岩的发现及意义 [J]. 华南地质与矿产, (1):24-25.
- 孙海清, 陈俊, 孟德保, 何江南. 2009. 湘东北地区冷家溪群大药菇组 [J]. 华南地质与矿产, (4):54-58.
- 孙海清, 黄建中, 郭乐群, 陈俊. 2012. 湖南冷家溪群划分及同位素年龄约束 [J]. 华南地质与矿产, 28(1):20-26.
- 唐晓珊, 黄建中, 张晓阳. 1999. 湖南早元古代“仓溪岩群”及其划分 [J]. 湖南地质, 18(4):220-224.
- 唐晓珊, 贾宝华, 黄建中, 彭和求, 郭乐群, 何江南. 2004. 湖南早前寒武纪变质结晶基底的 Sm-Nd 同位素年龄 [J]. 资源调查与环境, 25(1):55-63.
- 王存智, 黄志忠, 邢光福, 余明刚, 洪文涛. 2016a. 赣东北蛇绿岩地幔橄榄岩岩石成因及其地质意义 [J]. 中国地质, 43(4):1178-1188.
- 王存智, 邢光福, 余明刚, 黄志忠, 洪文涛, 赵希林, 周效华, 段政, 鞠冬梅. 2015. 赣东北蛇绿岩形成时代及构造环境—樟树墩辉长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学约束 [J]. 岩石矿物学杂志, 34(3):309-321.
- 王存智, 余明刚, 黄志忠, 洪文涛, 赵希林, 姜杨, 周效华, 段政, 邢光福. 2016b. 赣东北蛇绿岩带新元古代 (~800Ma) 高镁安山岩的发现及其意义 [J]. 地质论评, 62(5):1185-1200.
- 伍光英, 李金冬, 唐晓珊, 黄建中, 肖庆辉, 车勤键, 彭和求. 2005. 湘东北浏溪冲新太古代变质沉积—火山岩岩石矿物学和岩石地球化学研究 [J]. 中国地质, 32(1):82-89.
- 徐扬, 杨振宁, 邓新, 王令占, 刘浩, 金鑫镖, 张维峰, 魏运许, 彭练红, 黄海永. 2021. 西大别南缘印支期吕 - 高桥 - 永佳河构造混杂岩带的厘定及其构造意义 [J]. 地球科学, 46(4):1173-1198.
- 徐德明, 蒯志永, 龙文国, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 2012. 钦杭成矿带的研究历史与现状 [J]. 华南地质与矿产, 28(4):277-289.
- 虞鹏鹏, 周永章, 郑义, 陈炳辉, 杨威, 牛佳, 周维丽. 2017. 钦 - 杭结合带南段新元古代俯冲作用: 来自粤西贵子混杂岩变基性岩年代学和地球化学的证据 [J]. 岩石学报, 33(3):739-752.
- 张克信, 徐亚东, 何卫红, 于洋, 王丽君, 王嘉轩, 寇晓虎, 骆满生. 2018. 中国新元古代青白口纪早期 (1000~820Ma) 洋陆分布 [J]. 地球科学, 43(11):3837-3852.
- 张晓阳. 2000. 湘东北文家市地区仓溪岩群 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义 [J]. 湖南地质, 19(3):155-158.
- 张玉芝, 王岳军, 郭小飞, 甘成势, 邢晓婉, 宋菁菁. 2015. 江南中段慈化地区新元古代高镁安山岩的厘定及其构造意义 [J]. 地球科学 - 中国地质大学学报, 40(1):1781-1795.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑锋. 2003. 南桥高度亏损 N-MORB 的发现及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 22(3):211-216.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2014. 江南造山带新元古代构造 - 岩浆演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2005. 江南造山带西段岩浆作用特性 [J]. 高校地质学报, 11(4):527-533.
- Deng T, Xu D R, Chi G X, Zhu Y H, Wang Z L, Chen G W, Li Z H, Zhang J L, Ye T W and Yu D S. 2018. Revisiting the ca. 845-820-Ma S-type granitic magmatism in the Jiangnan Orogen: new insights on the Neoproterozoic tectono-magmatic evolution of South China [J]. International Geology Review, 61(4):1-21.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 257:34-43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J and Chen H H. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 55: 1535-1546.

- Shu L S, Yao J L, Wang B, Faure M, Charvet J and Chen Y. 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block[J]. *Earth-Science Reviews*, 216:103596.
- Wang Y J, Zhang A M, Cawood P A, Fan W M, Xu J F, Zhang G W and Zhang Y Z. 2013. Geochronological, geochemical and Nd – Hf – Os isotopic fingerprinting of an early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 231:343-371.
- Wang Y J, Zhang Y Z, Cawood P A, Zhou Y Z, Zhang F F, Yang X and Cui X. 2019. Early Neoproterozoic assembly and subsequent rifting in South China: Revealed from mafic and ultramafic rocks, central Jiangnan Orogen[J]. *Precambrian Research*, 331: 105367.
- Yao J L, Cawood P A, Shu L S and Zhao G C. 2019a. Jiangnan Orogen, South China: A ~970-820Ma Rodinia margin accretionary belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 196:102872.
- Yao J L, Shu L S, Cawood P A and Zhao G C. 2019b. Differentiating continental and oceanic arc systems and retro-arc basins in the Jiangnanorogenic belt, South China[J]. *Geological Magazine*, 156:2001-2016.
- Zhang Y Z, Wang Y J, Geng H Y, Zhang Y H, Fan W M and Zhong H. 2013. Early Neoproterozoic (~850Ma) back-arc basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and petrogenetic constraints from meta-basalts[J]. *Precambrian Research*, 231:325-342.
- Zhang Y Z, Wang Y J. 2016. Early Neoproterozoic (~840Ma) arc magmatism: Geochronological and geochemical constraints on the metabasites in the Central Jiangnan Orogen[J]. *Precambrian Research*, 275:1-17.