

·基础地质·

# 湘东北前寒武纪仓溪岩群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

高林志<sup>1</sup>, 丁孝忠<sup>1</sup>, 庞维华<sup>1</sup>, 刘燕学<sup>1</sup>, 陆松年<sup>2</sup>, 刘耀荣<sup>3</sup>, 陈 峻<sup>3</sup>, 张玉海<sup>1,4</sup>

GAO Lin-zhi<sup>1</sup>, DING Xiao-zhong<sup>1</sup>, PANG Wei-hua<sup>1</sup>, LIU Yan-xue<sup>1</sup>,

LU Song-nian<sup>2</sup>, LIU YAO-rong<sup>3</sup>, CHEN Jun<sup>3</sup>, ZHANG Yu-hai<sup>1,4</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170;

3. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410114; 4. 北京离子探针中心, 北京 100037

1. *Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China;*

2. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*

3. *Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410114, Hunan, China;*

4. *The Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China*

**摘要:**在湘东北地区浏阳市文家市仓溪岩群底部枫梓冲岩组(长英质二云母片岩)变凝灰岩中发现近百粒锆石, 锆石虽然形态不相同, 但 CL 图像显示出典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构。该类锆石的 U、Th 含量较高, Th/U 值变化范围为 0.32~0.87, 均属于岩浆结晶的产物。获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $855\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ , 该年龄改变了仓溪岩群枫梓冲岩组的时代, 对重新厘定江南造山带的构造格局有着重要意义。

**关键词:**湘东北; 前寒武纪; 仓溪岩群; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P597\*.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2011)10-1479-06

Gao L Z, Ding X Z, Pang W H, Liu Y X, Lu S N, Liu Y R, Chen J, Zhang Y H. SHRIMP zircon U-Pb dating of metamorphic tuff from the Precambrian Cangxi Complex-Group in northeastern Hunan. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1479-1484

**Abstract:** This paper reports a SHRIMP U-Pb age ( $855\text{ Ma} \pm 5\text{ Ma}$ ) of metamorphic tuff from the Fengzichong Complex-Formation. Although zircons have different forms, their CL images show typical magmatic oscillatory zoning. The zircons have relatively high content of U and Th, with Th/U ratios vary in the range of 0.32~0.87. Therefore, they are of magmatic origin. The new data change the traditional stratigraphic correlation of the Cangxi Complex-Group in northeastern Hunan. Therefore, the SHRIMP U-Pb dating of the metamorphic tuff from the Fengzichong Complex-Formation at the bottom of the Cangxi Complex-Group is of great significance in understanding of the tectonic framework of the "Jiangnan Orogenic Belt" in Hunan.

**Key words:** northeastern Hunan; Precambrian; Cangxi Complex-Group; SHRIMP zircon U-Pb dating

21 世纪初从湘东北地区冷家溪群中新识别出一套“绿岩”岩组, 主要由角闪岩、斜长岩和干枚岩组成, 其 Sm-Nd 等时限年龄为  $(2090 \pm 20) \sim$

$(1860 \pm 17)\text{Ma}$ , 为此将该“绿岩”组合从原来的中元古代“冷家溪群”划分出来, 创建了仓溪岩群<sup>[1-2]</sup>, 一度成为“江南古陆”古老的变质结晶基底(古元古代

收稿日期: 2011-05-29; 修订日期: 2011-07-04

资助项目: 中国地质调查局地调项目《中国新元古代年代地层格架及其全球对比》(编号: 121201011120131)和科技部科技基础性工作专项《中国地质志欧亚大陆大地构造图编制》(编号: 2011FY120100)

作者简介: 高林志(1955-), 男, 研究员, 从事生物地层、层序地层、灾变事件地层研究。E-mail: gaolzh@cags.net.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

溇沱群),该论点曾引起不少同行的争议。然而,近年来江南古陆变质基底冷家溪群年代地层有了新数据,特别是根据斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 的测年结果,将冷家溪群限定为 834~822Ma 的新元古代晚期的沉积,从此再次撼动江南造山带中段变质基底地层的时代。与此同时,新一轮区域地质志修编中也激发人们重新思考湘东北地区的“绿岩”岩组在地层柱中的位置。仓溪岩群主要由白云母片岩、石英黑云母片岩、白云母斜长片麻岩、片理化英安质、流纹质、角斑质凝灰岩、似层状变辉绿岩、变玄武岩、次闪石片岩、角闪片岩、斜长角闪片麻岩、黝帘石-阳起石片岩、变层状细碧岩组成。仓溪岩群自下而上划分出 4 个岩组,即枫梓冲岩组、陈家湾岩组、斫木冲岩组和雷公造岩组,4 个岩组均为断层接触关系。尽管 4 个岩组已依据 Sm-Nd 等时线年龄建立了彼此的叠置关系<sup>[3]</sup>,但是同位素年代学的工作依然是该地区的主要科学问题。仓溪岩群仅出露在长沙-平江大断裂东侧,湖南浏阳市以东,出露面积 50~70km<sup>2</sup>,其特点是几乎所有岩层的新生层理均被构造变质新生面理所置换。研究区构造部位介于扬子块体与华夏块体之间,属“雪峰古陆”东北段,习称幕阜构造块体,东与江西九岭构造带相连;西南与雪峰山构造带相接<sup>[3-4]</sup>。

## 1 地质背景

华南地区的构造格架在中国地质学界始终是争论的焦点,不同的地质理论曾产生激烈的碰撞。黄汲清<sup>[5]</sup>将桂北-黔西南-湘西北-赣北-皖南-浙江前寒武纪浅变质岩区称之为“江南古陆”。陈国达<sup>[6]</sup>认为扬子准地台以南地区属“华夏活化区”(地洼),是吕梁运动(1.8Ga)使古老的变质岩构成的“下构造层”。20 世纪 80 年代以来,一些学者依据板块构造观点进一步解释了华南大地构造,将“江南古陆”视为沿扬子板块东缘的增生元古宙岛弧褶皱带<sup>[7-10]</sup>。许靖华<sup>[11-12]</sup>将雪峰山隆起定义为异地成因的构造岩片,将板溪群定为混杂岩。上述观点在不同时期都引起强烈的争论。唐晓珊等<sup>[1]</sup>对雪峰古陆的大地构造性质、板溪群和武陵运动的性质进行了系统分析,建立了湘东北中-新元古代地层年代格架。贾宝华等<sup>[3]</sup>依据 Sm-Nd 同位素分析和部分离子探针测年结果,认为湖南浏阳文家市地区存在古元古代结晶基底和中元古代冷家溪群、新元古代板溪群的地层序

列。目前,关于湘东北前寒武纪地层争论的焦点是其时代的确定和在地层柱中的位置。

## 2 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

### 2.1 地层序列和采样层位

本文锆石样品来自文家市苍溪岩群剖面(图 1)。仓溪岩群自下而上划分为枫梓冲岩组、陈家湾岩组、斫木冲岩组和雷公造岩组(图 2-A、B、D),划归古元古代溇沱群。本文测年样品(W100914-7)采自苍溪岩群最底部枫梓冲岩组(图 2-C),采样坐标为 28°00.56.6'N、113°56.56.5'E。所采集的变凝灰岩样品主要成分为长英质,占 60%~65%,绢云母和绿泥石占 35%~40%。

### 2.2 分析方法

锆石 U-Pb 年龄测定在北京离子探针中心的 SHRIMP-II 上进行。详细的分析流程见有关的参考文献<sup>[13-17]</sup>,原始数据的处理和锆石 U-Pb 谐和图的绘制采用 Ludwig<sup>[18]</sup>编写的 Squid 和 Isoplot 程序。普通 Pb 校正根据参考文献<sup>[19]</sup>的计算模式。数据表中,年龄的误差为 1 $\sigma$  绝对误差,同位素比值的误差为 1 $\sigma$  相对误差;文中所使用的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值和谐和年龄计算值为 95%的置信度。

### 2.3 分析结果

锆石的阴极发光图像(CL)特征:所采锆石虽形态不相同,但是 CL 图像显示出典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构,均属于岩浆结晶的产物(图 3)。根据可见光图像选择无包裹体和裂纹的锆石,根据阴极发光图像选择测点,避免一次离子流的入射位置跨不同世代的晶体区域。样品 W100914-7(苍溪岩群枫梓冲岩组)的锆石晶形完好,为浅黄色—无色透明的钝圆形晶体;锆石粒度多在 100~200 $\mu$ m 之间。

锆石的 U、Th 含量和 Th/U 比值:大量的研究表明,岩浆锆石的 U、Th 含量较高,Th/U 比值较大(一般大于 0.4)。枫梓冲岩组样品(W100914-7)22 个测点中 U 含量变化范围为  $88 \times 10^{-6} \sim 340 \times 10^{-6}$ ,Th 含量变化范围为  $32 \times 10^{-6} \sim 244 \times 10^{-6}$ ,Th/U 值变化范围为 0.32~0.87(表 1)。

锆石 U-Pb 年龄:枫梓冲岩组样品(W100914-7)共测试了 22 个数据点。有 4 个数据点与主群不一致,其中 3 个数据点(12.1,14.1,17.1)为继承锆石的数据(图 3),数据点(11.1)可能为选矿过程中混入的

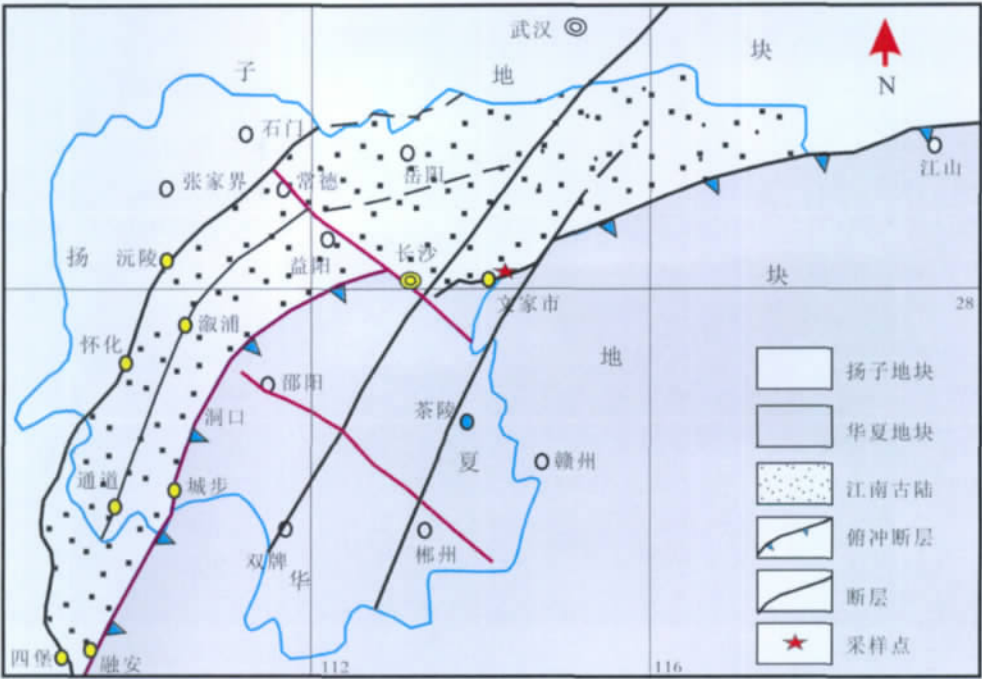


图 1 湘东北地区大地构造略图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Tectonic map of northeastern Hunan



图 2 文家市地区苍溪岩群的特征和采样点(野外照片来自丁孝忠)

Fig. 2 Cangxi Complex-Group in Wenjiashi area and sampling localities

A—湖南省与江西省交界处仓溪岩群剖面;B—仓溪岩群枫梓冲岩组露头剖面;

C—枫梓冲岩组锆石样品采样点;D—仓溪岩群上部露头剖面



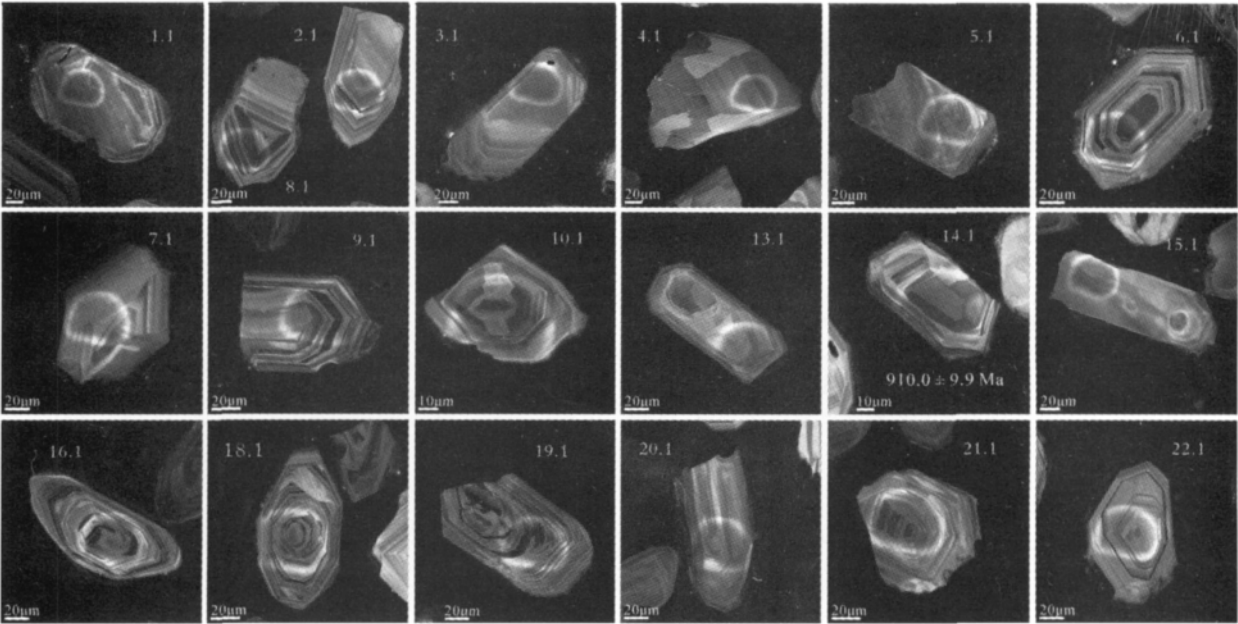


图 3 苍溪岩群枫梓冲岩组锆石阴极发光特征

Fig. 3 Features of zircons in CL of the Cangxi Complex-Group

表 1 样品 W100914-7 锆石 SHRIMP U-Th-Pb 年龄测定结果  
Table 1 Isotope compositions of zircon W1009143-7 from the Cangxi Complex-Group, measured by SHRIMP

测点	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> /%	U /10 <sup>-6</sup>	Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb* /10 <sup>-6</sup>	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U 年龄/Ma	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb 年龄/Ma	不谐 和度/%	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb* (±%)	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U (±%)	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U (±%)	绝对 误差
1.1	0.20	243	205	0.87	30.0	865 ± 12	782±37	-11	6.96±1.5	0.0652 ±1.8	0.1437±1.5	0.657
2.1	0.27	95	32	0.35	11.6	852 ± 11	699±57	-22	7.08±1.4	0.0627±2.7	0.1413±1.4	0.471
3.1	0.15	125	89	0.73	15.5	866 ± 11	755±43	-15	6.958±1.3	0.0644±2.0	0.1437±1.3	0.554
4.1	0.11	128	83	0.67	15.5	850 ± 11	672±47	-26	7.097±1.3	0.0619±2.2	0.1409±1.3	0.521
5.1	0.12	224	116	0.54	27.1	846.7±9.1	778±32	-9	7.124±1.2	0.06511±1.5	0.1404±1.2	0.602
6.1	0.00	217	139	0.66	26.1	844.3±9.3	844±28	0	7.146±1.2	0.06719±1.4	0.1399±1.2	0.653
7.1	0.31	98	50	0.53	11.9	849 ± 11	683±63	-24	7.10±1.4	0.0623±3.0	0.1408±1.4	0.438
8.1	--	217	68	0.32	27.0	871.4±9.5	872±27	0	6.909±1.2	0.06812±1.3	0.1447±1.2	0.660
9.1	0.08	353	149	0.44	44.2	874.6±8.6	873±23	0	6.882±1.0	0.06813±1.1	0.1453±1.0	0.682
10.1	0.20	162	149	0.95	19.4	841.0±9.6	840±34	0	7.176±1.2	0.0671±1.6	0.1394±1.2	0.598
11.1	0.38	140	123	0.91	8.27	428.4±5.6	383±84	-12	14.55±1.3	0.0543±3.7	0.06871±1.3	0.339
12.1	0.09	92	70	0.78	16.4	1215±15	1182±34	-3	4.823±1.4	0.0794±1.7	0.2073±1.4	0.623
13.1	0.14	121	98	0.84	14.5	842 ± 11	785±41	-7	7.165±1.4	0.0653±1.9	0.1396 ±1.4	0.580
14.1	0.00	198	159	0.83	25.8	910.0±9.9	886±28	-3	6.596±1.2	0.06858±1.3	0.1516±1.2	0.655
15.1	0.37	88	61	0.72	10.9	869 ± 19	776±51	-12	6.93±2.3	0.0651 ±2.4	0.1443±2.3	0.697
16.1	--	108	88	0.83	12.9	835 ± 10	899±45	7	7.233±1.3	0.0690±2.2	0.1383±1.3	0.526
17.1	0.00	340	244	0.74	44.7	916.5±9.1	894±30	-2	6.546±1.1	0.06885±1.4	0.1528±1.1	0.592
18.1	0.36	126	95	0.78	15.5	859 ± 11	766±61	-12	7.014±1.3	0.0647±2.9	0.1426±1.3	0.411
19.1	0.11	252	130	0.53	30.8	855.3±8.9	768±28	-11	7.048±1.1	0.06480±1.3	0.1419±1.1	0.638
20.1	0.07	428	322	0.78	52.3	856.5±8.2	791±20	-8	7.038±1.0	0.06552±0.93	0.1421±1.0	0.742
21.1	0.19	111	71	0.66	13.4	852 ± 11	720±60	-18	7.080±1.4	0.0633 ±2.8	0.1412±1.4	0.442
22.1	0.23	98	69	0.73	12.0	857 ± 11	809±67	-6	7.036±1.4	0.0661±3.2	0.1421±1.4	0.402

注: Pb<sub>c</sub> 为普通 Pb 的 <sup>206</sup>Pb 占全部 <sup>206</sup>Pb 的百分比, Pb\* 代表放射成因 Pb, 用于校正待测样品和与之同时测定的标准样品的误差为 0.32%(1σ), 普通 Pb 校正采用实测的 <sup>234</sup>Pb  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

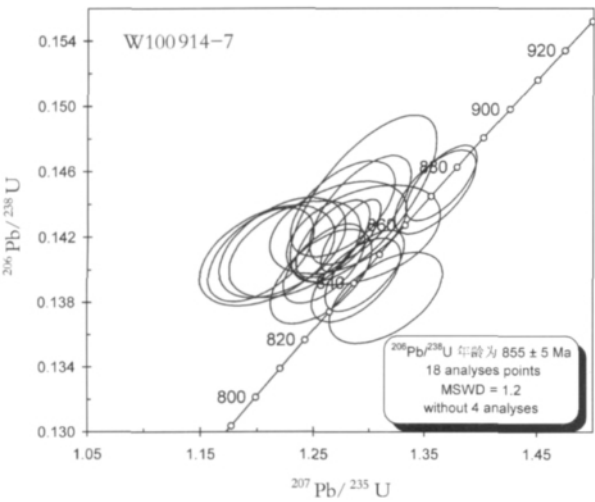


图 4 苍溪岩群凝灰岩锆石 U-Pb 谐和图  
Fig. 4 Zircon U-Pb concordant diagram of tuff bedding of the Cangxi Complex-Group

锆石。其余 18 个数据点均位于谐和线上或谐和线附近(图 4),18 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $855\text{Ma}\pm 5$  Ma,对应的  $\text{MSWD}=1.2$ 。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  平均加权年龄代表苍溪岩群枫梓冲岩组中变凝灰岩的形成时代。

3 地质意义

苍溪岩群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相变质而形成的。枫梓冲岩组是一套浅色变质岩系,在强应变带中为浅灰色-白灰色石英云母片岩、白云母石英片岩;在弱应变域中为片理化英安质凝灰岩、片理化流纹质凝灰岩、片理化石英角斑质凝灰岩,具备了保存最佳测年样品(锆石)的基本条件。本文获得的仓溪岩群底部枫梓冲岩组的长英质二云母片岩、变凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 平均加权年龄为  $855\text{Ma}\pm 5\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=1.2$ ),结合锆石的 CL 图像(图 3)和  $\text{Th}/\text{U}$  值(表 1)所显示的岩浆成因的特征,该定年结果应代表了苍溪岩群枫梓冲岩组同沉积火山喷发的凝灰岩的年龄,这将彻底改变现有对仓溪岩群为古元古代地层的认识。本文锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的报道,将进一步为扬子古陆(湖南省浏阳市文家市地区)苍溪岩群枫梓冲岩组定位于新元古代地层和对该区构造古地理格局的影响提供最新的同位素年代学证据(图 5)。

结合笔者对湘东北岳阳地区冷家溪群及其上

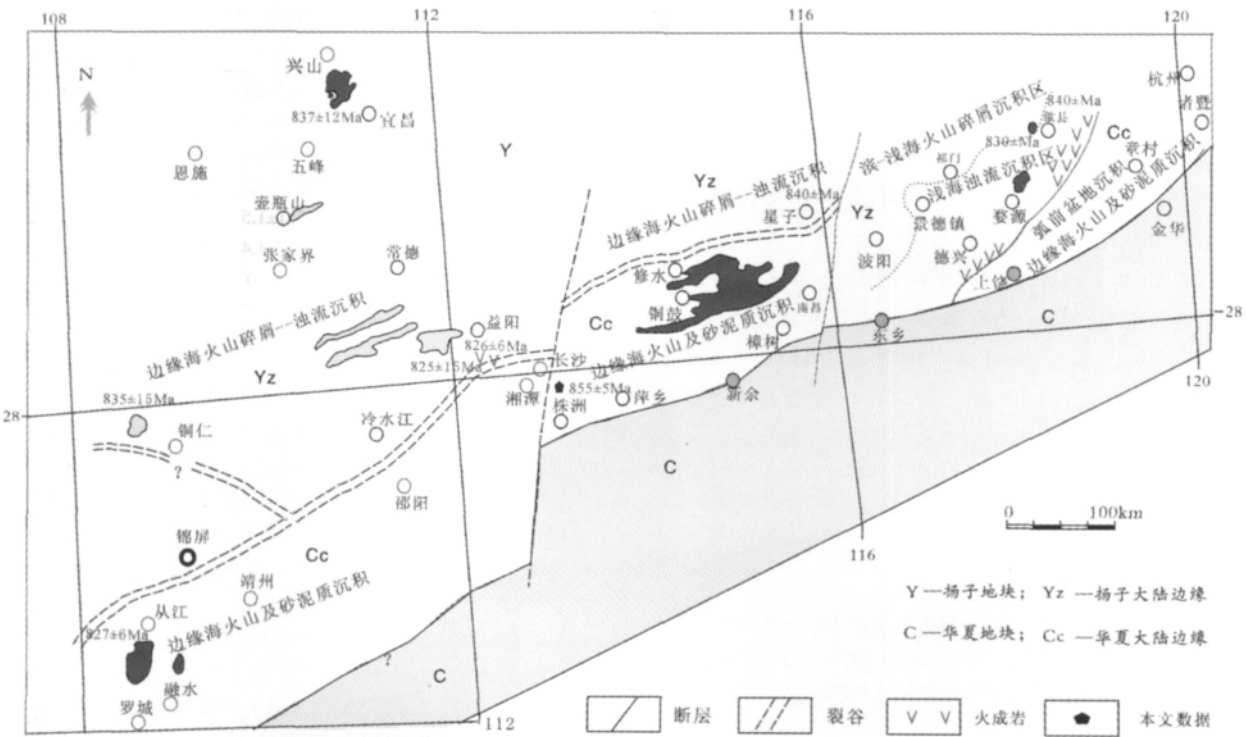


图 5 扬子地块与华夏地块新元古代早期构造格局<sup>①</sup>

Fig. 5 Early Neoproterozoic tectonic pattern between Yangtze and Cathaysia plates

覆板溪群斑脱岩中锆石的研究, 精确地测得冷家溪群小木平组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ( $822\text{Ma} \pm 10\text{Ma}$ )、板溪群张家湾组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ( $802.6\text{Ma} \pm 7.6\text{Ma}$ )<sup>[20]</sup>, 以及“江南造山带”东部变质基底的双桥山群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ( $829 \sim 831\text{Ma}$ )<sup>[21]</sup>、黔东南—桂北地区四堡群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ( $841\text{Ma}$ )<sup>[22]</sup>、下江群的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ( $814\text{Ma}$ )<sup>[23]</sup>, 将冷家溪群与其相应的变质地层明确定位于新元古界, 重新界定“武陵运动”的时限、同期地层的区域对比和构造演化模式<sup>[20]</sup>。将冷家溪群与双桥山群、梵净山群、四堡群、双溪坞群视为同期产物, 均为低变质绿片相岩系, 构成了“江南古陆”前南华纪变质基底。然而, 苍溪岩群变质岩发育在湖南浏阳文家市地区, 位于钦杭构造带之中, 受韧性剪切带的构造影响发生强烈变质作用, 其特点为地层变质、变形较深, 地层时代较晚, 笔者认为解译华南地区南华纪之前形成的一套变质绿片岩的构造关系是认识江南造山带的地质背景、成矿条件, 以及对江南造山带地层划分等问题的关键。

4 结 论

(1) 本文报道的湖南浏阳文家市地区苍溪岩群的变凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $855\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ , 显示沉积地层的时代为青白口纪晚期。

(2) 该年龄对重新认识“江南造山带”将引发人们新的思考, 即该重大的地球动力学和构造转换事件的时间是青白口纪晚期。

致谢: 北京 SHRIMP 中心刘敦一研究员在测试期间给予技术保障, 颜颀强博士对数据进行处理, 宋彪研究员对数据进行审核, 周慧女士协助高清晰阴极发光照相, 王自强教授、闫全人研究员、杨崇辉研究员对文稿提出修改建议, 在此一并致谢。

参考文献

[1] 唐晓珊, 黄建中, 张晓阳. 湖南早元古代“仓溪岩群”及其划分[J]. 湖南地质, 1999, 18(4): 220-224.  
[2] 唐晓珊, 贾宝华, 黄建中, 等. 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, 2004, 25(1): 55-63.  
[3] 贾宝华, 彭和球. 湘东北前寒武纪地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-138.  
[4] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-205.  
[5] 黄汲清. 中国主要地质构造单元[M]. 北京: 地质出版社, 1956: 1-162.

[6] 陈国达. 中国地台“活动区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题[J]. 地质学报, 1956, 36(3): 239-272.  
[7] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化[C]//第 26 届国际地质大会论文集(1). 北京: 地质出版社, 1980: 109-116.  
[8] 郭令智, 施央申, 马瑞士, 等. 江南元古代板块运动和岛弧构造的形成和演化[C]//中国地质学会, 中国地质科学院. 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集(1). 北京: 地质出版社, 1986: 30-37.  
[9] 李春昱. 中国板块构造的轮廓[J]. 中国地质科学院院报, 1981, 2(1): 12-34.  
[10] 乔秀夫, 耿树芳. 华南前寒武纪板块构造[C]//中国及邻区大地构造论文集. 北京: 地质出版社, 1981: 77-91.  
[11] 许靖华. 薄壳板块构造模式与碰撞型造山运动[J]. 中国科学(B 辑), 1980, 11: 1081-1089.  
[12] 许靖华. 是华南造山带不是华南地台[J]. 中国科学(B 辑), 1987, 12: 1107-1115.  
[13] 宋彪, 张玉海, 万渝生. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48 (增刊): 26-30.  
[14] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇纹岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报, 2003, 77 (3): 317-327.  
[15] Clauoué-Long J C, Compston W, Roberts J, et al. Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analysis[M]//Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. SEPM Special Publication, 1995: 3-21.  
[16] Lance P B, Sandra L K, Charlotte M A, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2003, 200: 155-170.  
[17] Lance P B, Sandra L K, Ian S Williams, et al. The Application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: a critical appraisal of four zircon standards[J]. Chemical Geology, 2003, 200: 171-188.  
[18] Ludwig K R. SQUID 1.02, a user's manual[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2. 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA. 2001.  
[19] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-stage model[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1975, 26: 207-221.  
[20] 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 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, 2011, 30(7): 1001-1008.  
[21] 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1744-1751.  
[22] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 黔东南—桂北地区四堡群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 2010, 29 (9): 1259-1267.  
[23] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 下江群甲路组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层意义[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1071-1082.  
① 王自强, 高林志, 丁孝忠. “江南古陆”变质基底形成的构造环境及演化特征[J]. 中国地质, 2011, 待刊.