

萍乡东桥岩门寨组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及南华冰期底界年代探讨

柏道远, 马铁球, 钟 响, 李 彬, 熊 雄

(湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410016)

摘 要: 目前关于南华系底界年代存在早(780 Ma 或 760 Ma)、晚(725 Ma 或 720 Ma)两种不同观点。本文对萍乡东桥板溪期晚期岩门寨组顶部的凝灰岩进行了 28 颗锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析, 由早到晚获得 5 组主要年龄, 并分析探讨了各组年龄锆石形成的地质背景。第 1 组和第 2 组锆石均为继承性岩浆锆石, 平均年龄分别为 805.5 ± 10.6 Ma 和 767.6 ± 7.7 Ma, 分别与扬子东南缘 810~800 Ma 期间的岛弧岩浆活动和板溪期中期 760 Ma 前后的岩浆活动有关。第 4 组和第 5 组锆石为变质成因锆石, 平均年龄分别为 390.8 ± 2.8 Ma 和 211.2 ± 1.5 Ma, 分别与加里东晚期和印支晚期的构造-热事件有关。第 3 组共 11 颗岩浆锆石的平均年龄为 717.2 ± 8.9 Ma, 为凝灰岩的成岩年龄。该年龄为南华冰期底界 720 Ma 的年龄提供了约束。此外, 本文讨论并提出前人在湘中碧溪获得的长安组下部 760 Ma 左右 U-Pb 年龄为继承性锆石年龄, 且发现在误差范围内有 50% 锆石的年龄上限也为 720 Ma 左右, 暗示成岩年龄实为 720 Ma 而非 760 Ma。

关键词: 岩门寨组; 凝灰岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 南华系底界; 萍乡东桥

中图分类号: P588.21⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)05-0637-11

Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the tuff of Yanmenzhai Formation in Dongqiao, Pingxiang, with a discussion on the bottom age of Nanhua System

BAI Dao-yuan, MA Tie-qiu, ZHONG Xiang, LI Bin and XIONG Xiong

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410016, China)

Abstract: There exist two different viewpoints concerning the bottom age of Nanhua System. i. e., early age (780 Ma or 760 Ma) and late age (725 Ma or 720 Ma). Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of a tuff sample from the upper part of Yanmenzhai Formation in Dongqiao, Pingxiang, was carried out, and 28 analyses of zircons show five main age groups. Then the authors probed into the geological settings of the five age groups and reached the following conclusions. The first and the second age groups with weighted mean age of 805.5 ± 10.6 Ma and 767.6 ± 7.7 Ma respectively came from inherited magmatic zircons, and were related to the island-arc magmatism on the southeastern margin of Yangtz Block during 810~800 Ma and the magmatism of 760 Ma in middle Banxi Period respectively. The fourth and the fifth age groups with weighted mean age of 390.8 ± 2.8 Ma and 211.2 ± 1.5 Ma respectively came from metamorphic zircons, and were related to the late Caledonia tectonic-hydrothermalism and the late Indonian tectonic-hydrothermalism respectively. The third age group with weighted mean age of 717.2 ± 8.9 Ma came from 11 magmatic zircons and represents the formation age of the tuff. The age of 717.2 ± 8.9 Ma provides a constraint for the bottom age of 720 Ma of Nanhua System. In addition, the authors studied the zircon U-Pb ages of around 760 Ma which came from the lower

收稿日期: 2014-12-14; 修订日期: 2015-04-01

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011120793, 1212011120816, 1212011220750-02)

作者简介: 柏道远(1967-), 男, 研究员级高级工程师, 长期从事区域地质调查与基础地质研究, E-mail: daoyuanbai@sina.com。

part of Chang'an Formation in Bixi, center Hunan; it is pointed out that the ages came from inherited zircons, and that the upper limit age of 720 Ma held by 50 percent of the zircons suggests that the rock-forming age is 720 Ma rather than 760 Ma.

Key words: Yanmenzhai Formation; tuff; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; bottom age of Nanhua System; Dongqiao, Pingxiang

自 2001 年全国地层委员会正式提出南华系(全国地层委员会, 2001, 2002)以来, 关于南华系底界划分存在 2 种不同观点。一种将南华系底界置于“南华大冰期”沉积底部(薛耀松等, 2001; 彭学军等, 2004; 张启锐等, 2006, 2007; 黄晶等, 2007; 汪正江, 2008; 汪正江等, 2013a, 2013b), 另一种主张将南华系底界置于板溪群及相当层位地层的底部(四堡或武陵造山运动不整合面之上)(王剑等, 2003, 2006, 2009; 王剑, 2005)。鉴于板溪群和上覆南华纪冰期沉积间存在明显的沉积-构造转换过程(汪正江等, 2013a, 2013b), 本文采用前一种观点, 将南华系定义为南华冰期沉积地层, 其中最早的冰期地层为长安组或江口组。

目前, 关于南华系底界年代存在或早或晚的不同认识, 前者主张为 800 Ma(尹崇玉等, 2003)或 780 Ma(高林志等, 2010a; 全国地层委员会《中国地层表》编委会, 2012^①)或 760 Ma(孙海清等, 2014), 后者提出为 725 Ma(张世红等, 2008)或 720 Ma 左右(柏道远等, 2010, 2011; 汪正江等, 2013b; 张启锐, 2014)。近年来, 笔者对萍乡东桥岩门寨组(板溪期高涧群顶部地层)顶部的凝灰岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 717.2 ± 8.9 Ma 的成岩年龄数据, 进一步佐证了南华系底界年代为 720 Ma 左右的认识。

1 地层序列及采样层位

湖南省新元古代中期板溪群分布于衡阳—双牌一线北西, 并以芷江—溆浦—双峰—衡山一线为界, 分为北面的沅陵—安化小区和南面的黔阳—双峰小区, 其地层组成见表 1(湖南省地质矿产局, 1997)。沅陵—安化小区内板溪群习称“红板溪”, 主要沉积环境为滨海—浅海陆棚; 黔阳—双峰小区内板溪群习称“黑板溪”, 又称高涧群, 主要沉积环境为浅水陆棚—深水陆棚。板溪群之下为冷家溪群, 之上为南华系

表 1 湖南省板溪期地层序列及上、下地层

Table 1 Stratigraphic sequence of Banxi Period in Hunan Province

时 代	地层序列	
	沅陵-安化小区	黔阳-双峰小区
南华纪	长安组	长安组
青白口纪	板溪期	岩门寨组
	牛牯坪组 百合垄组 多益塘组	架视田组 砖墙湾组 黄狮洞组
	五强溪组 通塔湾组 马底驿组	
	横路冲组 宝林冲组	石桥铺组
	冷家溪期	冷家溪群
	冷家溪群	冷家溪群

长安组。

本文锆石年龄样品采自萍乡东桥镇广寒寨以南的公路边(图 1), 地层区位上属板溪群的黔阳—双峰小区。研究区为 NE 向的广寒寨—江西山次级隆起, 主要出露板溪群、南华系和寒武系。隆起北面为萍江凹陷, 主要发育泥盆纪—早三叠世海相沉积、晚三叠世类前陆盆地沉积(舒良树等, 2004)和白垩纪断陷盆地沉积; 隆起西侧为醴陵—攸县白垩纪断陷盆地; 隆起南面凹陷区发育上古生界(图 1)。区域上 NE 向至 NEE 向逆断裂发育。

区内板溪群地层自下而上依次发育黄狮洞组绢云母板岩、夹白云石团块板岩, 砖墙湾组条带状板岩、粉砂质板岩夹粉砂岩, 架视田组砂岩、粉砂岩和粉砂质板岩以及岩门寨组凝灰质板岩、板岩夹凝灰岩。岩门寨组总厚 2 670 m, 上与长安组平行不整合接触(图 1)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样采于东桥—广寒寨剖面, 样品编号 Z-9, 采样部位距岩门寨组顶约 340 m(真厚度)。采样点附近剖面自西往东依次为岩门寨组和长安组, 岩层倾向 NW, 地层倒转(图 2)。岩门寨组自下而上总体可分为 2 部分(图 2), 下部由

① 全国地层委员会《中国地层表》编委会. 2012. 《中国地层表》(暂行).

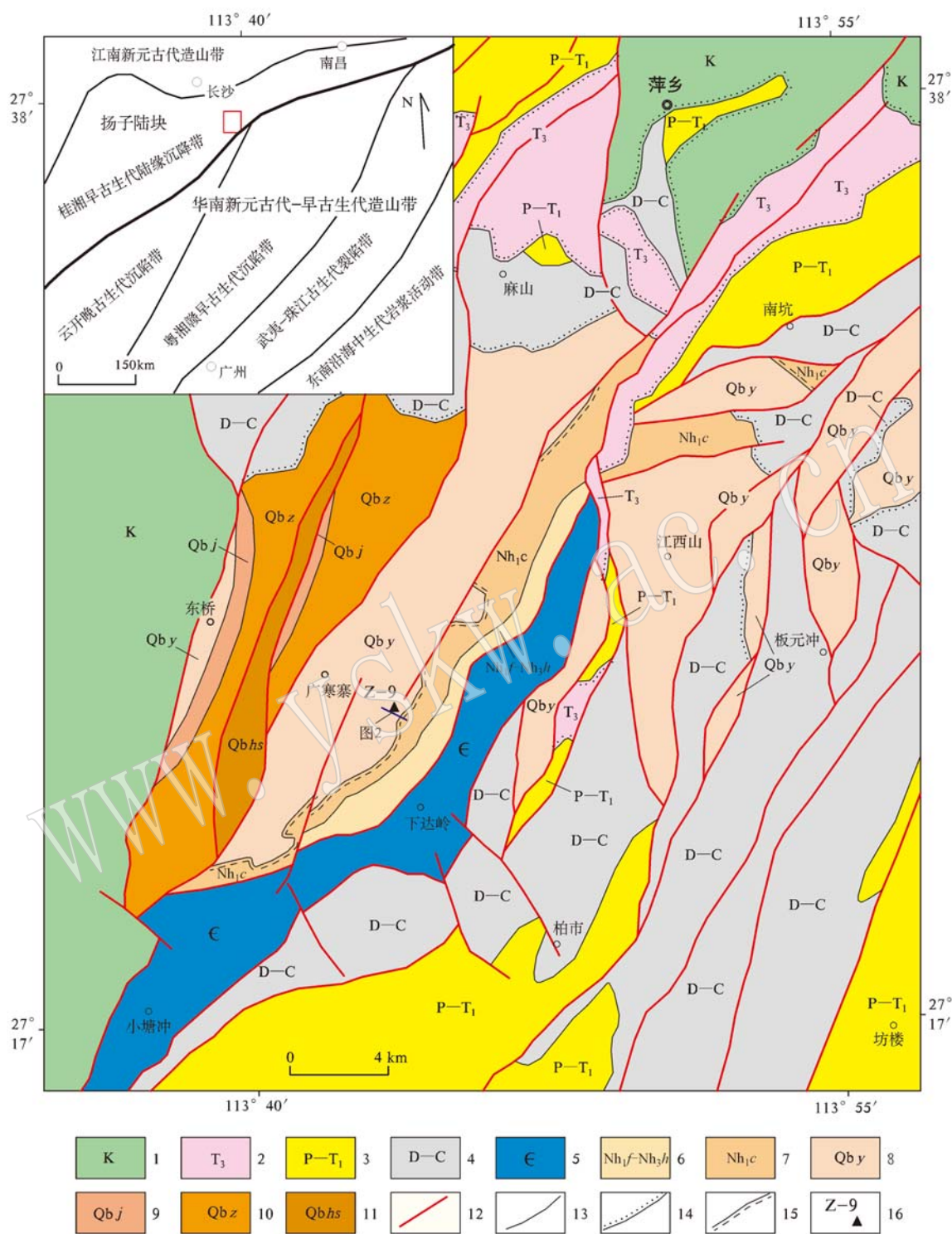


图1 采样位置及区域地质略图

Fig. 1 Sampling sites and regional geological sketch map

1—白垩系; 2—上三叠统; 3—二叠系-下三叠统; 4—泥盆系-石炭系; 5—寒武系; 6—下南华统富禄组-上南华统洪江组; 7—下南华统长安组; 8—青白口纪岩门寨组; 9—青白口纪架枫田组; 10—青白口纪砖墙湾组; 11—青白口纪黄狮洞组; 12—断裂; 13—整合地质界线; 14—角度不整合地质界线; 15—平行不整合地质界线; 16—LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样采集点及样号

1—Cretaceous; 2—Upper Triassic; 3—Permian-Lower Triassic; 4—Devonian-Carboniferous; 5—Cambrian; 6—Lower Nanhuan Fulu Formation-Upper Nanhuan Hongjiang Formation; 7—Lower Nanhuan Chang'an Formation; 8—Qingbaikouan Yanmenzhai Formation; 9—Qingbaikouan Jia-jiantian Formation; 10—Qingbaikouan Zhuangqiangwan Formation; 11—Qingbaikouan Huangshidong Formation; 12—fault; 13—geological boundary; 14—angular unconformity; 15—parallel unconformity; 16—location and serial number of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating sample

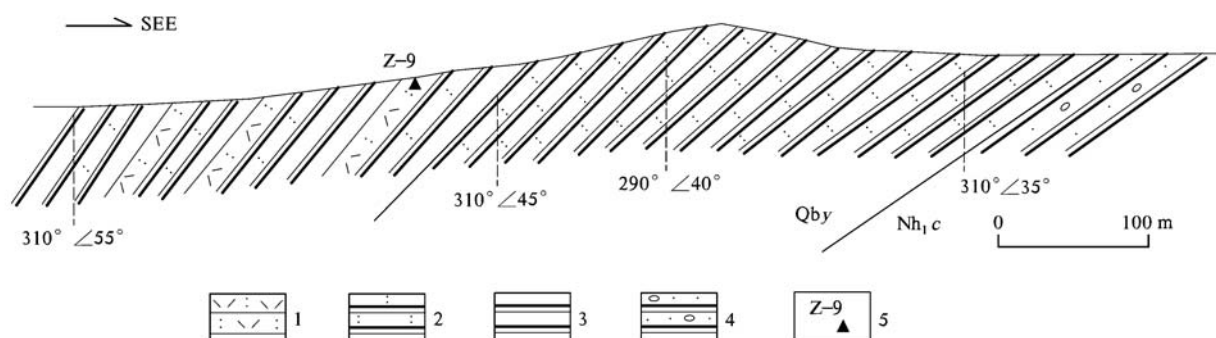


图 2 采样位置及地层剖面

Fig. 2 Sampling site and stratigraphic section

1—凝灰岩; 2—(含)凝灰质板岩; 3—板岩; 4—含砾砂质板岩; 5—LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样采集点及样号

1—tuff; 2—tuffaceous slabstone; 3—slate; 4—gravel-bearing slate; 5—location and serial number of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating sample

凝灰岩、条带状凝灰质绢云母板岩、板岩三者构成多个旋回,上部为条带状(含)凝灰质绢云母板岩。样品采自下部凝灰岩,岩石单层厚 20~40 cm,由隐晶质长英质(90%)及少量铁泥质、绢云母、绿泥石等组成。长安组为黄绿色厚层块状含砾砂质绿泥石绢云母板岩,不显层理;砾石含量 20%~25%,砾石可见擦痕。长安组中见落石构造,显冰水成因,大体为近滨-滨外陆棚与冰水-冰筏沉积。

2 分析方法

凝灰岩碎样和锆石挑选由湖南省地质调查院实验室完成。将岩石样品粗碎后用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石,再于双目镜下挑选出晶形较好且透明度较高的锆石。

在中国地质科学院矿产资源研究所和地质研究所分别进行样品的制靶、反射光照相和阴极发光扫描电镜图像分析。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析在矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm²,以 He 为载气。激光剥蚀采用单点剥蚀的方法,数据分析前以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127(Nasdala *et al.*, 2008)为外标进行校正。数据处理采用 ICOMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2009),锆石年龄谱和图由 Isoplot 3.0 程序完成(Ludwig, 2003)。详细实验测试过程参见侯可军等(2009)。样品分析过程中,Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 337 Ma,对应的推荐年龄为

337.13 \pm 0.37 Ma (2 σ)(Sláma *et al.*, 2008),两者在误差范围内完全一致。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

用于定年的样品锆石为透明的自形晶体,以短柱状为主,无色或黄褐色。阴极发光图像显示出岩浆结晶的振荡环带或均质结构(图 3)。共分析 28 颗锆石的 U-Pb 同位素组成,分析结果见表 2。以 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值作为参考年龄讨论如下。

由表 2 可见,除样品 Z-9-3(879.6 \pm 5.1 Ma)、Z-9-11(505.0 \pm 4.7 Ma)、Z-9-12(244.1 \pm 4.2 Ma)离散外,其它年龄数据自早至晚可分为 5 组:

第 1 组,包括锆石 Z-9-8 和 Z-9-19,具岩浆结晶震荡环带(图 3),Th/U 值为 1.48、0.21,平均 0.84, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 820.0 \pm 16.4 Ma 和 791.1 \pm 4.8 Ma,平均为 805.5 \pm 10.6 Ma。

第 2 组,包括锆石 Z-9-28、Z-9-21,具岩浆结晶震荡环带(图 3),Th/U 值分别为 0.70、1.4,平均 1.05, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 767.9 \pm 4.9 Ma 和 767.4 \pm 10.6 Ma,平均为 767.6 \pm 7.7 Ma。

第 3 组,锆石数量最多,包括 Z-9-9、Z-9-16、Z-9-13、Z-9-22、Z-9-1、Z-9-18、Z-9-2、Z-9-4、Z-9-10、Z-9-6、Z-9-27 等 11 颗,多具岩浆结晶震荡环带(图 3);Th/U 值分别为 1.18~3.11,平均 1.75;测点大多位于谐和曲线上,少数偏离谐和线,但与其它测点一道呈水平线状集中分布(图 4);²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值 707.9 \pm 9.8 Ma~723.9 \pm 5.8 Ma 之间,平均 717.2 \pm 8.9 Ma(MSWD=0.49)。顺便指出,部分测点偏离谐和线的线状分布特征与²⁰⁷Pb难以测准有关,并表明锆

表 2 东桥岩门寨组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from tuff in Yanmenzhai Formation in Dongqiao

测点号	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$				比值										年龄/Ma					
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		1σ	1σ
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
Z-9-3	54.2	185.2	355.5	0.071 71	0.000 21	1.445 11	0.009 40	0.146 20	0.000 90	0.004 04	0.000 75	977.5	5.6	907.8	3.9	879.6	5.1	81.6	15.0	
Z-9-8	69.3	57.2	38.7	0.139 75	0.010 75	3.140 55	0.310 09	0.135 65	0.002 89	0.005 29	0.002 11	2 223.8	133.6	1 442.7	76.2	820.0	16.4	106.6	42.5	
Z-9-19	24.8	55.9	266.0	0.066 34	0.000 25	1.194 16	0.008 74	0.130 58	0.000 84	0.004 14	0.001 13	816.7	12.0	797.9	4.0	791.1	4.8	83.5	22.7	
Z-9-28	58.7	275.1	393.3	0.065 99	0.000 22	1.151 24	0.008 75	0.126 51	0.000 86	0.002 31	0.000 58	805.6	7.4	777.8	4.1	767.9	4.9	46.6	11.6	
Z-9-21	91.0	81.9	58.5	0.140 12	0.011 52	2.744 47	0.261 23	0.126 42	0.001 85	0.005 29	0.001 44	2 228.7	142.4	1 340.6	71.0	767.4	10.6	106.6	29.0	
Z-9-9	50.7	246.0	150.3	0.066 27	0.000 37	1.086 47	0.011 35	0.118 84	0.001 00	0.002 34	0.001 07	816.7	12.2	746.8	5.5	723.9	5.8	47.2	21.6	
Z-9-16	21.2	104.2	75.4	0.063 12	0.000 55	1.030 98	0.011 41	0.118 67	0.001 02	0.003 42	0.000 92	722.2	18.5	719.4	5.7	722.9	5.9	69.0	18.5	
Z-9-13	12.6	79.4	34.7	0.063 03	0.000 62	1.026 32	0.013 41	0.118 47	0.001 29	0.002 54	0.000 88	709.3	22.2	717.1	6.7	721.7	7.4	51.4	17.7	
Z-9-22	7.5	45.5	28.9	0.061 02	0.000 65	0.990 82	0.014 14	0.118 19	0.001 42	0.004 77	0.001 24	638.9	24.1	699.1	7.2	720.1	8.2	96.2	24.9	
Z-9-1	10.3	60.6	25.1	0.067 84	0.001 03	1.104 15	0.023 79	0.118 11	0.001 66	0.004 08	0.000 64	864.8	31.5	755.4	11.5	719.7	9.6	82.4	12.9	
Z-9-18	10.1	30.1	25.0	0.062 01	0.000 69	1.007 16	0.017 59	0.117 79	0.001 59	0.003 58	0.001 55	675.9	24.1	707.4	8.9	717.8	9.2	112.5	31.2	
Z-9-2	24.7	137.8	87.4	0.063 61	0.000 39	1.032 14	0.009 70	0.117 71	0.000 86	0.003 80	0.000 63	727.8	13.0	720.0	4.8	717.4	5.0	76.7	12.7	
Z-9-4	40.4	281.8	90.6	0.063 59	0.000 41	1.026 21	0.009 60	0.117 05	0.000 79	0.003 20	0.000 68	727.8	10.2	717.0	4.8	713.5	4.5	64.7	13.8	
Z-9-10	32.1	162.4	95.9	0.063 17	0.000 37	1.018 55	0.009 58	0.117 02	0.000 94	0.002 22	0.001 18	722.2	13.0	713.2	4.8	713.4	5.4	44.8	23.9	
Z-9-6	3.6	31.0	26.0	0.064 17	0.001 29	1.030 79	0.046 13	0.116 66	0.004 76	0.005 66	0.002 04	746.3	42.6	719.3	23.1	711.3	27.5	114.2	41.0	
Z-9-27	6.8	36.1	30.5	0.062 26	0.000 87	0.994 79	0.019 00	0.116 07	0.001 69	0.003 90	0.000 99	683.3	34.3	701.2	9.7	707.9	9.8	78.6	20.0	
Z-9-11	6.9	47.4	39.7	0.063 32	0.000 69	0.709 10	0.009 03	0.081 49	0.000 79	0.003 60	0.001 65	720.4	24.1	544.2	5.4	505.0	4.7	72.7	33.2	
Z-9-23	18.6	160.2	296.5	0.054 14	0.000 29	0.487 01	0.004 68	0.065 25	0.000 53	0.001 82	0.000 45	376.0	11.1	402.9	3.2	407.5	3.2	36.8	9.1	
Z-9-25	37.7	346.0	577.0	0.055 60	0.000 22	0.478 40	0.004 42	0.062 38	0.000 50	0.001 39	0.000 32	435.2	13.9	397.0	3.0	390.1	3.0	28.1	6.4	
Z-9-5	25.3	116.4	491.8	0.054 91	0.000 21	0.470 43	0.003 47	0.062 17	0.000 42	0.001 89	0.000 48	409.3	9.3	391.5	2.4	388.8	2.6	38.2	9.7	
Z-9-24	83.9	660.0	1 523.5	0.055 45	0.000 15	0.474 36	0.003 82	0.062 05	0.000 48	0.001 51	0.000 36	431.5	0.9	394.2	2.6	388.1	2.9	30.6	7.2	
Z-9-26	27.7	259.2	409.1	0.054 70	0.000 25	0.466 01	0.003 90	0.061 81	0.000 45	0.001 36	0.000 31	398.2	9.3	388.4	2.7	386.6	2.7	27.5	6.3	
Z-9-7	45.2	306.7	213.6	0.061 75	0.000 40	0.521 39	0.004 48	0.061 33	0.000 45	0.001 56	0.000 53	664.8	14.8	426.1	3.0	383.7	2.7	31.5	10.7	
Z-9-12	248.4	328.9	366.3	0.216 17	0.004 18	1.113 76	0.019 23	0.038 59	0.000 68	0.002 55	0.001 00	2 953.7	31.2	760.0	9.2	244.1	4.2	51.5	20.1	
Z-9-15	16.0	140.2	682.1	0.050 33	0.000 24	0.232 80	0.001 94	0.033 56	0.000 25	0.001 25	0.000 36	209.3	11.1	212.5	1.6	212.8	1.5	25.2	7.2	
Z-9-20	159.4	906.3	1 565.9	0.071 97	0.001 17	0.332 65	0.006 52	0.033 37	0.000 24	0.001 22	0.000 34	984.9	33.0	291.6	5.0	211.6	1.5	24.7	6.8	
Z-9-14	39.9	629.9	1 327.6	0.050 91	0.000 21	0.233 90	0.002 27	0.033 32	0.000 29	0.000 77	0.000 24	235.3	13.9	213.4	1.9	211.3	1.8	15.6	4.8	
Z-9-29	100.1	434.6	1 719.6	0.061 66	0.000 44	0.279 95	0.002 13	0.032 98	0.000 19	0.000 74	0.000 20	661.1	10.2	250.6	1.7	209.2	1.2	14.9	4.1	



图 3 岩门寨组凝灰岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from tuff in Yanmenzhai Formation

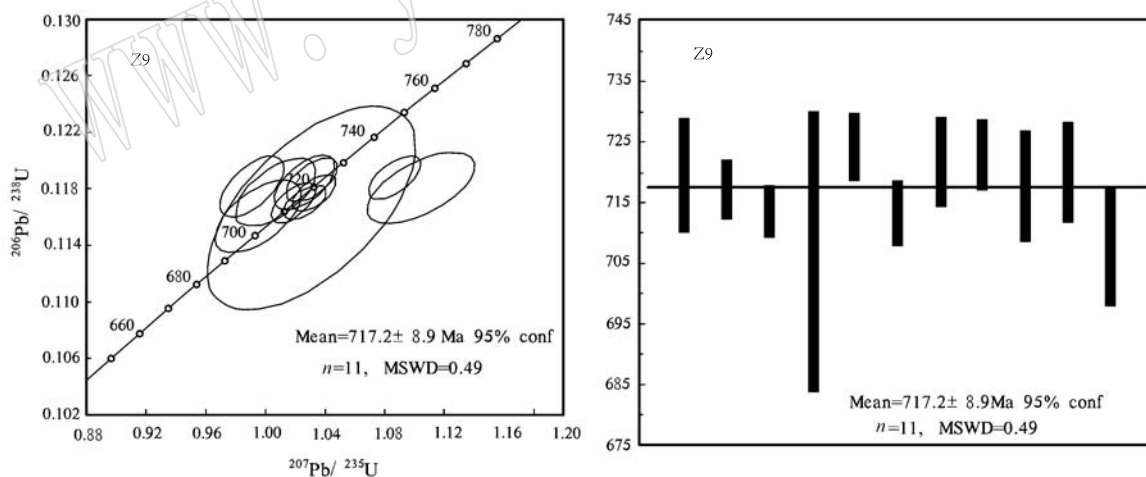


图 4 岩门寨组凝灰岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram of zircons from tuff in Yanmenzhai Formation

石颗粒在形成后 U-Pb 同位素体系封闭, 不影响 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值(陈卫锋等, 2007)。

第 4 组, 锆石数量较多, 包括 Z-9-23、Z-9-25、Z-9-5、Z-9-24、Z-9-26、Z-9-7 等 6 颗, 结晶环带欠发育; Th/U 值为 0.24~1.44, 平均 0.65; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 383.7 ± 2.7 Ma~ 407.5 ± 3.2 Ma 之间, 平均

为 390.8 ± 2.8 Ma。

第 5 组, 锆石数量也较多, 包括 Z-9-15、Z-9-20、Z-9-14、Z-9-29 等 4 颗, 结晶环带不发育; Th/U 值为 0.21~0.58, 平均 0.38; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 209.2 ± 1.2 Ma~ 212.8 ± 1.5 Ma 之间, 平均为 211.2 ± 1.5 Ma。

4 讨论

4.1 不同时代锆石形成的地质背景

根据样品所在地层层位,结合区域地质资料和构造演化背景,初步分析推断上述5组不同年龄锆石的成因及形成时代如下。

第1组平均年龄为 805.5 ± 10.6 Ma 的锆石显然为继承性锆石,因为已有大量的年龄数据表明,板溪群及对应地层的下部—中上部的年龄为 800~765 Ma 左右(Zhou *et al.*, 2007; 吴荣新等, 2007; 高林志等, 2008, 2010b; 汪正江等, 2010), 作为板溪期地层顶部样品所在的凝灰岩形成时代不可能为 805 Ma 左右。岩浆结晶震荡环带及平均 0.84 的高 Th/U 值指示本组锆石为岩浆成因。该期锆石可能与区域上 810~800 Ma 期间华南洋洋壳俯冲发生的岛弧岩浆活动有关。已有资料表明, 820~810 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(武陵运动或四堡运动), 造成江南造山带主体内板溪群与冷家溪群之间的角度不整合; 810~800 Ma 期间江南造山带主体进入后碰撞环境并形成强过铝(黑云母)花岗岩, 而造山带东侧城步地区因华南海洋壳俯冲而形成新的岛弧, 805.7 ± 9.2 Ma 的新元古代花岗岩即为岛弧岩浆活动产物(柏道远等, 2010, 2011)。从区域构造背景来看, 样品所在的广寒寨地区与城步地区一样, 位于江南造山带的东南缘, 因此 810~800 Ma 期间发生了岛弧岩浆活动。

第2组平均年龄为 767.6 ± 7.7 Ma 的锆石也为继承性锆石(详细论证见后文), 岩浆结晶震荡环带及平均 1.05 的高 Th/U 值也表明其为岩浆成因。湘西黔阳辉绿岩 747 ± 18 Ma、通道超基性岩 756 ± 12 Ma 和 772 ± 11 Ma(Wang *et al.*, 2008)、古丈辉绿岩 768 ± 28 Ma(Zhou *et al.*, 2007)以及桂北龙胜辉长辉绿岩 761 ± 8 Ma(葛文春等, 2001)等年龄数据反映板溪期中期 760 Ma 前后有一次基性-超基性岩浆活动, 推测本组锆石的形成与此次岩浆活动有关。

第3组平均年龄为 717.2 ± 8.9 Ma 的锆石具岩浆结晶震荡环带, Th/U 平均值高达 1.75, 表明其为岩浆成因锆石。该组锆石数量最多, 其年龄应代表凝灰岩的形成时代。值得指出的是, 与第1组和第2组岩浆锆石相关的岩浆未喷出地表而于一定深度内冷却成岩, 其锆石在本次 717.2 ± 8.9 Ma 的火山喷发事件中被捕虏而成为继承性锆石。

第4组平均年龄为 390.8 ± 2.8 Ma 的锆石和第5组平均年龄为 211.2 ± 1.5 Ma 的锆石结晶环带欠发育或不发育, Th/U 值较低, 平均分别为 0.65 和 0.38(在中低级变质锆石比值范围内), 且形成时代远晚于青白口纪晚期的地层时代, 应为变质成因。鉴于区域上加里东期花岗质岩浆活动时代主要为 440~390 Ma(舒良树, 2012), 推测第4组锆石的形成与加里东晚期的构造-热事件有关。近些年新获得的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据显示, 雪峰造山带南东侧的湘中南-湘东南地区大量发育的印支期花岗岩体的形成时代主要为 230~205 Ma 期间的晚三叠世(柏道远等, 2014 及其参考文献), 因此可初步推断第5组锆石的形成与印支晚期的构造-热事件有关。加里东晚期和印支晚期的的花岗质岩浆活动分别形成于广西运动之后(柏道远等, 2004)和印支运动之后(柏道远等, 2007, 2014)的后碰撞阶段, 具有挤压减弱、应力松弛的构造环境。这种环境使得热流体易于活动, 从而有利于变质锆石的形成。此外, 研究区断裂构造发育(图1), 野外调查发现不同方向的节理、裂隙也非常密集, 为与变质作用相关的弥散在固体岩石中的热流体的运移提供了通道, 也为变质锆石的生成提供了有利条件。

值得指出的是, 浅变质岩中可能并不难形成变质锆石, 如马慧英等(2014)在湘中碧溪长安组底部浅变质凝灰岩中即分辨和挑选出了形态、颜色特征有别的一组岩浆锆石和一组变质锆石, 分别占比 82% 和 18%, 并测得变质锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 431.3 ± 4.3 Ma, 表明其为加里东期热事件产物。该处变质锆石的 Th/U 值一般为 0.23~0.68, 个别可达 1.30, 平均 0.55, 与本文变质锆石的 Th/U 值一致。

4.2 锆石年龄对南华系底界年龄的约束

如上述, 凝灰岩锆石 U-Pb 分析样品 Z-9 的第3组平均年龄 717.2 ± 8.9 Ma 代表岩层形成时代。鉴于岩门寨组厚达 2 669.9 m, 而采样层位距岩门寨组顶界只有约 340 m, 该年龄值应近似于岩门寨组顶界年龄, 结合年龄误差范围, 厘定岩门寨组顶界年龄为 720 Ma 左右。区域上南华系长安组与岩门寨组为平行不整合-整合接触, 长安组与岩门寨组之间为连接或近连续沉积, 因此进一步推断长安组底界即南华系底界年龄为 720 Ma。

这一认识得到其它年龄资料的支持, 如湖南芷江板溪群牛牯坪组火山灰的锆石 SHRIMP U-Pb 年

龄为 725 ± 10 Ma (Zhang *et al.*, 2008), 湘东南泗洲山大江边组上部泥质岩中最年轻锆石年龄为 734 ± 4 Ma (伍皓等, 2013), 锦屏敦寨隆里组顶部、桂北龙胜拱洞组顶部及湘南通道拱洞组顶部的凝灰质岩石中锆石 LA-ICP-MS 年龄分别为 733 ± 18 Ma、 734 ± 7 Ma 和 740 ± 6 Ma (汪正江等, 2013b)。这些样品均采自板溪期地层的上部或顶部, 倾向于指示上覆长安组底界年龄约为 720 Ma。此外, 湘中大乘山长安组二段底部凝灰质板岩中最小碎屑锆石年龄为 720 ± 12 Ma (杜秋定等, 2013), 考虑误差因素, 最大可为 732 Ma, 与长安组 720 Ma 底界年龄相吻合。

部分研究者主张的南华冰期底界年龄远早于本文的 720 Ma。高林志等 (2010a) 和全国地层委员会 (全国地层委员会《中国地层表》编委会, 2012)^① 提出以 780 Ma 作为南华冰期底界年龄。孙海清等 (2014) 获得湘中碧溪地区南华纪长安组下部沉凝灰岩锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 751 ± 5 Ma 和 764 ± 10 Ma, 据此提出南华系底界年龄为 760 Ma 左右。

鉴于岩浆结晶捕虏锆石的大量存在, 除非锆石为后期变质成因, 否则火山-沉积岩中锆石的 U-Pb 年龄可能大于火山喷发或沉积年龄 (即锆石源于先期岩浆活动的结晶), 但不可能小于火山-沉积年龄。因此, 从前述有关年龄资料出发, 将南华系与板溪群的分界时代厘定为 720 Ma 显然更为合适, 碧溪地区南华纪长安组下部约 760 Ma (孙海清等, 2014) 以及本文第 2 组 767.6 ± 7.7 Ma 的年龄均应为继承性锆石年龄。此外, 笔者发现碧溪凝灰岩锆石 U-Pb 分析数据实际包含了 720 Ma 左右成岩的重要信息: 尽管碧溪地区长安组下部沉凝灰岩的均值年龄为 760 Ma 左右, 但如考虑年龄误差, 则有 50% 锆石的年龄上限也为 720 Ma 左右 (图 5)。如此“巧合”的信息强烈暗示这些锆石主要形成于喷发之前, 在 720 Ma 左右喷出地表, 且喷发前后有少许增生, 720 Ma 左右的上限年龄即为锆石增生部分的客观反映。顺便指出, 与 Z-9 样品中第 2 组年龄一样, 碧溪沉凝灰岩 751 ± 5 Ma 和 764 ± 10 Ma 的锆石年龄正好反映了 760 Ma 前后的一次岩浆热事件。

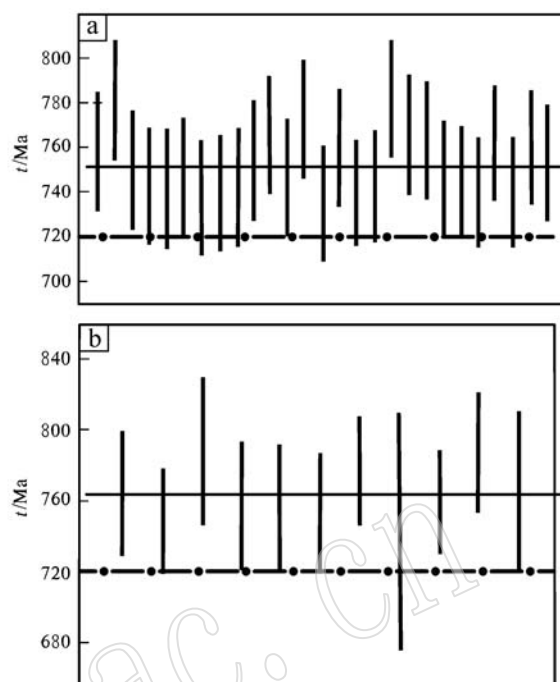


图 5 碧溪长安组下部沉凝灰岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (据孙海清等, 2014)

Fig. 5 Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the sedimentary tuff in the lower part of Chang'an Formation in Bixi (after Sun Haiqing *et al.*, 2014)

a—LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; b—SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; 点划线为本文所示年龄上限

a—LA-ICP-MS zircon U-Pb ages; b—SHRIMP zircon U-Pb ages; dash dot line show upper limit age

5 结论

(1) 萍乡东桥板溪期晚期岩门寨组顶部凝灰岩中锆石从早至晚存在 5 组主要 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 平均分别为: 第 1 组 (805.5 ± 10.6 Ma)、第 2 组 (767.6 ± 7.7 Ma)、第 3 组 (717.2 ± 8.9 Ma)、第 4 组 (390.8 ± 2.8 Ma) 和第 5 组 (211.2 ± 1.5 Ma)。

(2) 第 1 组和第 2 组锆石均为继承性岩浆锆石, 分别与扬子东南缘 810~800 Ma 期间的岛弧岩浆活动和板溪期中期 760 Ma 前后的岩浆活动有关。第 4 组和第 5 组锆石为变质成因锆石, 分别与加里东晚期

① 全国地层委员会《中国地层表》编委会. 2012. 《中国地层表》(暂行).

和印支晚期的构造-热事件有关。第3组为岩浆锆石,代表凝灰岩成岩年龄。

(3) 岩门寨组顶部凝灰岩 717.2 ± 8.9 Ma 的年龄为南华冰期底界 720 Ma 的年龄提供了约束。

References

- Bai Daoyuan, Chen Bihe, Zhong Xiang, *et al.* 2014. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province[J]. *Geology in China*, 41(6): 2 002~2 018(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Liu Wei, *et al.* 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the igneous rocks from Chengbu, Hunan: constraints on the Neoproterozoic tectonic evolution of Jiangnan orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1 715~1 726(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Zhong Xiang, *et al.* 2011. Neoproterozoic tectonic evolution of the Xiefeng orogenic zone in Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(3): 78~87(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry of Caledonian Miao'ershan pluton in the western part of the Nanling Mountains and their tectonic significances[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 407~423(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu, *et al.* 2007. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 197~212(in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province. 1997. *Stratigraphy (lithostratic) of Hunan Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Chen Weifeng, Chen Peirong, Huang Hongye, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of granites and their enclaves from Baimashan pluton in Hunan[J]. *Science in China(Series D)*, 37(7): 873~893(in Chinese).
- Chinese Commission on Stratigraphy. 2001. *Chinese Stratigraphic Manual and Its Reference*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chinese Commission on Stratigraphy. 2002. *Chinese Regional Stratigraphic Chart and Its Reference*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Du Qiuding, Wang Zhengjiang, Wang Jian, *et al.* 2013. LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from the Neoproterozoic Chang'an Formation in central hunan and its geological implicatons[J]. *Geological Review*, 59(2): 334~344(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Dai Chuangu, Liu Yanxue, *et al.* 2010b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuffaceous bed of Xiajiang Group in Guizhou Province and its stratigraphic implication[J]. *Geology in China*, 37(4): 1 071~1 080(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Gao Qian, *et al.* 2010a. New geological time scale of Late Precambrian in China and geochronology[J]. *Geology in China*, 37(6): 1 014~1 020(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China—constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1 744~1 751(in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.* 2001. Mafic intrusions in Longsheng area: age and its geological implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 112~118(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Huang Jing, Chu Xuelei, Zhang Qirui, *et al.* 2007. Constraints on the age of Neoproterozoic global glaciations[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 249~256(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb age, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537~571.
- Ludwig K R. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.0: Geochronological Toolkit for Microsoft Excel* [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4:1~70.
- Ma Huiying, Sun Haiqing, Luo Lai, *et al.* 2014. Application of heavy placer mineral identification for sorting zircons from volcanic rocks to improve geochronology method[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 30(3): 187~193(in Chinese with English abstract).
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Peng Xuejun, Liu Yaorong, Wu Nengjie, *et al.* 2004. Correlation of the Nanhuan strata on the southern margin of Yangtze Block[J]. *Journal of Stratigraphy*, 28(4): 354~359(in Chinese with English abstract).

- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1 035~1 053(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, *et al.* 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeast China[J]. Geological Bulletin of China, 23(9~10): 876~884(in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Kosler J and Condon D J. 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249: 1~35.
- Sun Haiqing, Huang Jianzhong, Du Yuansheng, *et al.* 2014. Isotope ages and significance of Nanhuaian Chang'an Formation in the southeastern Yangtze Craton[J]. Geological Science and Technology Information, 33(2): 15~20(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian. 2005. New advances in the study of "the Nanhuaian System"—with particular reference to the stratigraphic division and correlation of the Nanhuaian System, South China[J]. Geological Bulletin of China, 24(6): 491~495(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Li Xianhua, Duan T Z, *et al.* 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating for the Cangshuipu volcanic rocks and its implications for the lower boundary age of the Nanhua strata in South China[J]. Chinese Sci. Bull., 48: 1 663~1 669.
- Wang Jian and Pan Guitang. 2009. Neoproterozoic South China palaeocontinents: an overview[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(5): 818~825(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Zeng Shaoguang, Chen Wenxi, *et al.* 2006. The Neoproterozoic rift systems in southern China: New evidence for the sedimentary onlap and its initial age[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(4): 1~7(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic mafic rocks from western Hunan, South China: implications for petrogenesis and post-orogenic extension[J]. Geol. Mag., 145(2): 215~233.
- Wang Zhengjiang. 2008. A proposal to establish the Banxi System and discussion on its foundation—Based mainly on studies in eastern Guizhou area[J]. Geological Review, 54(3): 296~306(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Jiang Xinsheng, Du Qiuding, *et al.* 2013a. Depositional transformation from Banxi Period to Nanhua Glacial Period in Southeast Margin of Yangtze Block and its implications to stratigraphic correlation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(3): 385~395(in Chinese with English abstract).
- Wang Z J, Wang J, Duan T Z, *et al.* 2010. Geochronology of middle Neoproterozoic volcanic deposits in Yangtze Craton interior of South China and its implications to tectonic settings[J]. Sci. China Earth Sci., 53: 1 307~1 315, doi: 10.1007/s11430-010-4012-1.
- Wang Zhengjiang, Xu Xiaosong, Du Qiuding, *et al.* 2013b. Discussion on the bottom of Nanhua System: Evidences from sedimentology and isotopic geochronology[J]. Advances in Earth Science, 28(4): 477~489(in Chinese with English abstract).
- Wu Hao, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2013. Ages and provenance of the Neoproterozoic Dajiangbian Formation and Aiqiling Formation in Southeast Hunan Province: U-Pb Geochronological Evidence of Detrital Zircons[J]. Geological Review, 59(5): 853~868(in Chinese with English abstract).
- Wu Rongxin, Zheng Yongfei and Wu Yuanbao. 2007. Zircon U-Pb age and isotope geochemistry of Neoproterozoic Jingtan volcanics in south Anhui[J]. Geological Journal of China Universities, 13(2): 282~296(in Chinese with English abstract).
- Xue Yaosong, Cao Ruiji and Tang Tianfu. 2001. The Sinian stratigraphic sequence on the Yangtze region and correlation to the late Precambrian strata of North China[J]. Journal of Stratigraphy, 25(3): 207~216(in Chinese with English abstract).
- Yin Chongyu, Liu Dunyi, Gao Linzhi, *et al.* 2003. Age of the lower boundary of Nanhua and of Gucheng glaciation: evidence of SHRIMP U-Pb dating[J]. Chinese Sci. Bull., 48(16): 1 721~1 725(in Chinese).
- Zhang Qirui. 2014. Comment on the age 780 Ma at the lower boundary of the Nanhua Period[J]. Journal of Stratigraphy, 38(3): 336~339(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qirui and Chu Xuelei. 2006. The stratigraphic classification and correlation of the Jiangkou glaciation in the Yangtze Block and the stratotype section of the Nanhua System[J]. Journal of Stratigraphy, 30(4): 306~314(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qirui and Chu Xuelei. 2007. Problems in defining the Nanhua Period[J]. Journal of Stratigraphy, 31(3): 321~327(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q R, Li X H, Feng L J, *et al.* 2008. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze Platform, South China[J]. J. Geol., 116: 423~429.
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Dong Jin, *et al.* 2008. New zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuqingxi Formation of Banxi Group in South China and its geological significance[J]. Science in China(Series D), 38(12): 1 496~1 503(in Chinese).
- Zhou Jibin, Li Xianhua, Ge Wenchun, *et al.* 2007. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia[J]. Gondwana Research, (12): 184~197.

附中文参考文献

- 柏道远, 陈必河, 钟 响, 等. 2014. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景[J]. 中国地质, 41(6): 2 002~2 018.
- 柏道远, 贾宝华, 刘 伟, 等. 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): 1 715~1 726.
- 柏道远, 贾宝华, 钟 响, 等. 2011. 雪峰造山带新元古代构造演化框架[J]. 沉积与特提斯地质, 31(3): 78~87.
- 柏道远, 钟 响, 贾朋远, 等. 2004. 南岭西段加里东期苗儿山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(3): 407~423.
- 柏道远, 周 亮, 马铁球, 等. 2007. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 26(3): 197~212.
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 37(7): 873~893.
- 杜秋定, 汪正江, 王 剑, 等. 2013. 湘中长安组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 59(2): 334~344.
- 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 2010b. 黔东南地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层意义[J]. 中国地质, 37(4): 1 071~1 080.
- 高林志, 丁孝中, 曹 茜, 等. 2010a. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J]. 中国地质, 37(6): 1 014~1 020.
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 2008. 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, 27(10): 1 744~1 751.
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 2001. 龙胜地区镁铁质侵入体: 年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 36(1): 112~118.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 湖南省地质矿产局. 1997. 湖南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 黄 晶, 储雪蕾, 张启锐, 等. 2007. 新元古代冰期及其年代[J]. 地质学前沿, 14(2): 249~256.
- 马慧英, 孙海清, 罗 来, 等. 2014. 基于重砂鉴定技术的火山岩锆石精选与测年方法关系探讨[J]. 华南地质与矿产, 30(3): 187~193.
- 彭学军, 刘耀荣, 吴能杰, 等. 2004. 扬子陆块东南缘南华系地层对比[J]. 地层学杂志, 28(4): 354~359.
- 全国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1 035~1 053.
- 舒良树, 周新民, 邓 平, 等. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 23(9~10): 876~884.
- 孙海清, 黄建中, 杜远生, 等. 2014. 扬子地块东南缘南华系长安组同位素年龄及其意义[J]. 地质科技情报, 33(2): 15~20.
- 王 剑. 2005. 华南“南华系”研究新进展——论南华系地层划分与对比[J]. 地质通报, 24(6): 491~495.
- 王 剑, 李献华, Duan T.Z., 等. 2003. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据[J]. 科学通报, 48(46): 1 726~1 731.
- 王 剑, 潘桂棠. 2009. 中国南方古大陆研究进展与问题评述[J]. 沉积学报, 27(5): 818~825.
- 王 剑, 曾昭光, 陈文西, 等. 2006. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 1~7.
- 汪正江. 2008. 关于建立“板溪系”的建议及其基础的讨论[J]. 地质论评, 54(3): 296~306.
- 汪正江, 江新胜, 杜秋定, 等. 2013a. 湘黔桂邻区板溪期与南华冰期之间的沉积转换及其地层学涵义[J]. 沉积学报, 31(3): 385~395.
- 汪正江, 王 剑, 段太忠, 等. 2010. 扬子克拉通内新元古代中期酸性火山岩的年代学及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 40(11): 1 543~1 551.
- 汪正江, 许效松, 杜秋定, 等. 2013b. 南华冰期的底界讨论: 来自沉积学与同位素年代学证据[J]. 地球科学进展, 28(4): 477~489.
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元宝. 2007. 皖南新元古代井潭组火山岩 U-Pb 定年和同位素地球化学研究[J]. 高校地质学报, 13(2): 282~296.
- 伍 皓, 江新胜, 王 剑, 等. 2013. 湘东南新元古界大江边组和埃岐岭组的形成时代和物源[J]. 地质论评, 59(5): 853~868.
- 薛耀松, 曹瑞骥, 唐天福. 2001. 扬子区震旦纪地层序列和南、北方震旦系对比[J]. 地层学杂志, 25(3): 207~216.
- 尹崇玉, 刘敦一, 高林志, 等. 2003. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP U-Pb 定年证据[J]. 科学通报, 48(16): 1 721~1 725.
- 张启锐. 2014. 关于南华系底界年龄 780 Ma 数值的讨论[J]. 地层学杂志, 38(3): 336~339.
- 张启锐, 储雪蕾. 2006. 扬子地区江口冰期地层的划分对比与南华系层型剖面[J]. 地层学杂志, 30(4): 306~314.
- 张启锐, 储雪蕾. 2007. 南华系建系问题探讨[J]. 地层学杂志, 31(3): 321~327.
- 张世红, 蒋干清, 董 进, 等. 2008. 华南板溪群五强溪组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(12): 1 496~1 503.