

武当地块与扬子陆核区新元古代早期沉积岩碎屑 锆石 U-Pb 年代学对比及其地质意义

卢山松^{1,2}, 江拓^{1,2}, 彭三国², 彭练红², 谭娟娟^{1,2}, 邱啸飞^{1,2}

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心 同位素地球化学研究室, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局
花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 系统收集并总结了武当地块与扬子陆核区(崆岭地区)已发表的新元古代沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 年代学数据, 对二者的相互关系进行分析, 并讨论了扬子克拉通北缘新元古代时期的构造演化过程及特征。对前人发表的年代学数据进行的统计和对比结果表明, 武当地块沉积岩中碎屑锆石年龄谱记录了~710 Ma 和~2.5 Ga 的年龄峰值, 同时缺乏>3.0 Ga 年龄的锆石, 表明其沉积物来源可能并非扬子陆核区, 其在新元古代之前可能作为一个独立的微陆块与扬子陆核区(崆岭地区)分离开来, 二者于新元古代中期发生碰撞拼合而成为一个整体。

关键词: 扬子陆核区; 武当地块; 碎屑锆石; U-Pb 年代学; 微陆块

中图分类号: P588.2; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0646-09

Comparison of detrital zircon U-Pb geochronology between the Wudang block and the Yangtze continental nucleus in terms of Neoproterozoic sedimentary rocks

LU Shan-song^{1,2}, JIANG Tuo^{1,2}, PENG San-guo², PENG Lian-hong², TAN Juan-juan^{1,2} and QIU Xiao-fei^{1,2}

(1. Laboratory of Isotopic Geochemistry, Wuhan Center of Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: In this paper, the authors discussed the relationship between the Wudang block and the Yangtze continental nucleus (the Kongling area) and the evolution of the Northern Yangtze Craton during the Neoproterozoic, based on the collection of published detrital zircon U-Pb data from the Neoproterozoic sedimentary rocks in this area. Through the comparison between the data from the two regions, two major age populations (~710 Ma and ~2.5 Ga) were found for the Wudang block, meanwhile, the absence of old ages (>3.0 Ga) is obvious, indicating that the sedimentary source might not have come from the Yangtze continental nucleus. The Wudang block might have been a microcontinent, which was separated from the Yangtze continental nucleus (represented by the Kongling area) before the Neoproterozoic, and then collided with the latter again during the middle Neoproterozoic to form a complete body.

Key words: Yangtze continental nucleus; Wudang block; detrital zircon; U-Pb geochronology; microcontinent

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41303026); China Geological Survey Project (DD20160030)

收稿日期: 2016-12-13; 接受日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41303026); 中国地质调查局地质调查项目(121201009000160902)

作者简介: 卢山松(1986-), 男, 土家族, 助理研究员, 主要从事同位素地球化学和岩石地球化学研究, E-mail: luyin_student@163.com; 通讯作者: 邱啸飞(1985-), 男, 汉族, 副研究员, 主要从事同位素地球化学和岩石地球化学研究, E-mail: qxf-424@126.com。

扬子克拉通由于被巨厚的显生宙地层覆盖, 鲜有大范围的前寒武纪地质体出露, 因此至今有关扬子克拉通太古宙至新元古代的演化过程仍相对缺乏系统、详细的了解(Gao *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2014)。目前多数学者认为华南陆块是扬子克拉通和华夏陆块沿江南造山带碰撞拼合而成, 然而近年来随着研究的逐渐深入, 有证据表明现有规模的扬子克拉通本身可能由不同次一级陆块于元古宙经多次碰撞拼合形成(Bai *et al.*, 2011; Qiu *et al.*, 2011, 2015; Wu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012a, 2012b; 邱啸飞等, 2014; Jiang *et al.*, 2016)。

崆岭地区出露了华南陆块最古老的岩石, 被认为是扬子克拉通的陆核区。南秦岭是秦岭造山带的重要构造单元之一, 其长期以来被认为代表了扬子克拉通北缘卷入造山带的部分(Zhang *et al.*, 1995)。部分研究者提出, 在泥盆纪勉略洋盆打开以前, 南秦岭是扬子克拉通北缘的一部分(Zhang *et al.*, 2001; Dong *et al.*, 2011, 2016)。武当地块作为南秦岭构造带中的重要组成部分, 被认为代表了南秦岭前震旦纪浅变质过渡基底。这两个地区保存了大量的太古宙—新元古代的地质信息, 因而成为研究扬子克拉通前寒武纪地质演化构造过程的窗口。

武当地块主体由武当群组成, 前人的研究表明其时代归属于新元古代(蔡志勇等, 2006; 祝禧艳等, 2008; 凌文黎等, 2007, 2010; 张永清等, 2013; Wang *et al.*, 2013; Li and Zhao, 2016)。已有的地质调查工作并未观察到武当群与以崆岭变质基底岩系为代表的扬子克拉通古老结晶基底的接触关系, 使得对两者之间相互关系的了解十分有限。显然, 甄别武当地块与扬子陆核区在新元古代之前的相互关系, 对认识南秦岭早期地质演化历史及扬子克拉通北缘前寒武纪时期的构造演化过程均具有重要的意义。

本文系统收集和总结了前人已发表的武当地块与扬子陆核区(崆岭地区)中新元古代沉积地层碎屑锆石的 U-Pb 年代学数据, 以此来探讨二者于新元古代时期的相互关系。

1 区域地质概况

秦岭造山带位于我国中央造山带的中部, 西部连接昆仑—祁连造山带, 东部连接大别—苏鲁造山带, 以商丹缝合带为界, 分为南秦岭和北秦岭(图 1a)。

秦岭—大别造山带呈近东西向分隔华北克拉通与华南陆块, 被认为是古特提斯洋东端发生闭合的结果(Dong and Santosh, 2016), 是中国最重要的碰撞造山带之一。

1.1 武当地块

武当地块位于南秦岭的东端(图 1a), 区域上为隆升构造的核部。武当地块基底主要为武当群, 耀岭河群整合覆盖之上, 两者都经历了绿片岩相变质(图 1b)。武当群出露于湖北省西北部郧县、郧西县、竹山县和房县一带, 主要为一套变质基性(钠质和钾质)、酸性火山喷发—沉积岩系, 具有双峰式火山岩的基本特征。地层由下至上划分为杨坪组、双台组和拦鱼河组。杨坪组为一套以变质陆源碎屑岩为主, 偶夹少量变质火山岩的岩石组合, 以发育变质厚层块状砂岩、杂砂岩—中薄层粉砂岩、泥岩韵律为特征。双台组为一套以变火山岩为主夹少量变沉积岩的组合, 属海相盆地火山喷发沉积夹陆源碎屑沉积。拦鱼河组是一套以细粒陆源碎屑岩为主体夹少量变酸性火山岩的组合(陈公信等, 1996)。耀岭河群以变基性火山岩为主, 夹少量变酸性火山岩和变泥质岩(凌文黎等, 2007)。武当群和耀岭河群都被不同规模的基性岩墙群所侵入。前人对武当群进行了一定程度的年代学研究, 如: 武当群上部变沉积岩中晶屑凝灰岩获得的不太精确的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 744 ± 36 Ma(蔡志勇等, 2006); 5 件双台组火山—火山碎屑岩的锆石 U-Pb 定年结果为 755 ± 3 Ma(凌文黎等, 2007); 武当群下部双台组中变质中酸性火山岩的锆石 U-Pb 定年结果为 756 ± 6 Ma(祝禧艳等, 2008); 对 3 件变质酸性火山岩进行的锆石 U-Pb 定年的结果为 675.2 ± 3.1 Ma, 暗示武当群中可能还存在南华纪地层(张永清等, 2013); Wang 等(2013)对武当群中的变火山岩和变沉积岩分别进行了锆石 U-Pb 定年, 其中变火山岩的年龄为 726 ± 8 Ma, 而变沉积岩碎屑锆石的分析结果则表明其最大沉积年龄可能为 ~ 750 Ma。

1.2 扬子陆核区(崆岭地区)

崆岭地区位于扬子克拉通核部, 区内出露的崆岭杂岩体是华南地区已知的最古老的基底物质(图 1c), 岩石经历了高角闪岩相—麻粒岩相的变质过程, 总出露面积约 360 km^2 , 主要由 TTG 片麻岩、斜长角闪岩和少量花岗质片麻岩组成。崆岭杂岩被古元古代圈椅墙花岗岩、古元古代基性岩脉及新元古代黄陵花岗岩基和辉绿岩墙侵入, 所有岩石被南华系

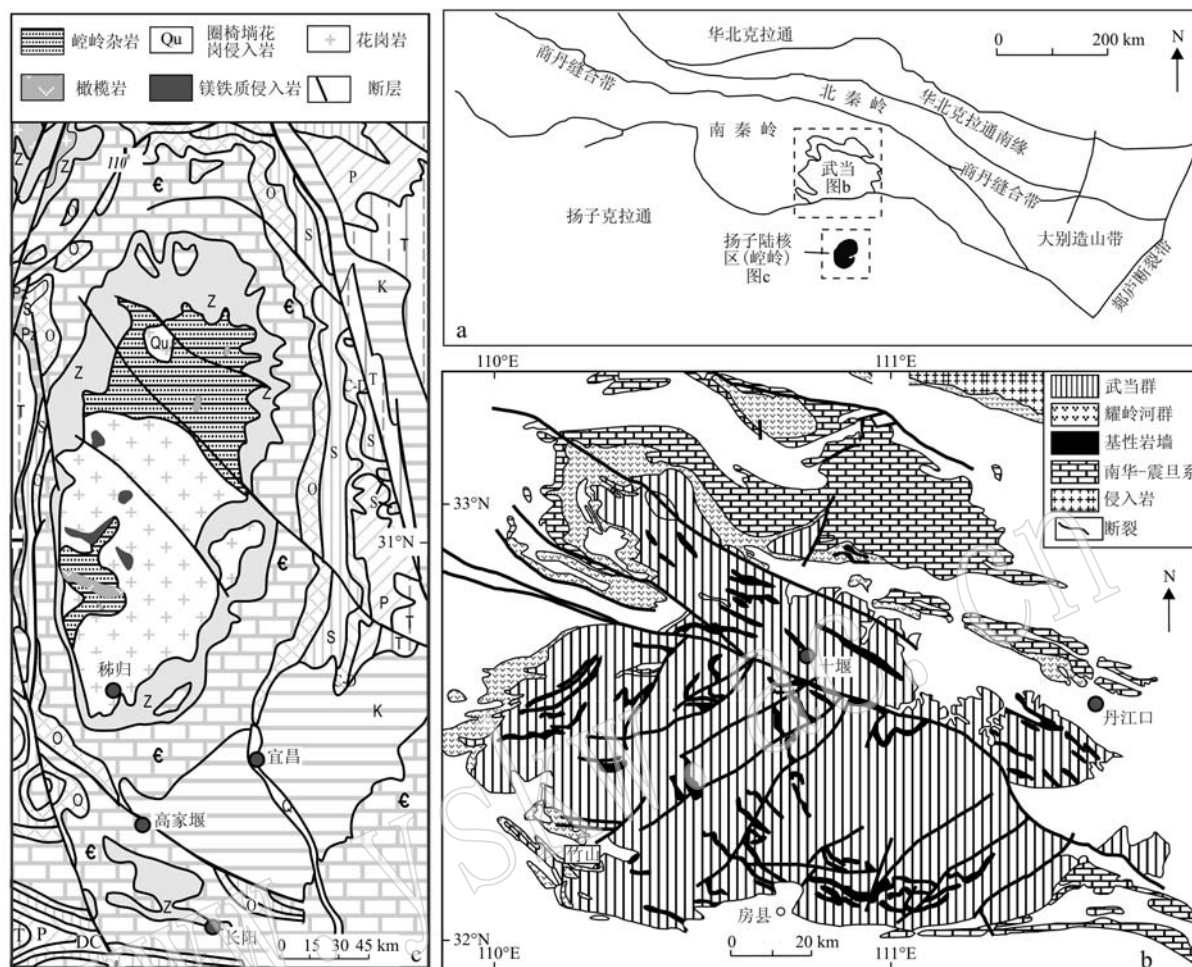


图 1 武当地块和扬子陆核区区域构造位置[a, 据 Hu 等(2016)修改]和地质简图[b, c, b 据凌文黎等(2010)修改, c 据 Bai 等(2011)修改]

Fig. 1 Tectonic location (a, modified after Hu *et al.*, 2016) and sketch geological map (b and c, b modified after Ling Wenli *et al.*, 2010, c modified after Bai *et al.*, 2011) of the Wudang block and the Yangtze continental nucleus

莲沱组和南沱组不整合覆盖。前人对崆岭杂岩进行了细致的研究,取得了大量的年代学成果。例如, Zhang 等(2006)对莲沱组中的碎屑锆石进行了分析,获得的最老锆石年龄是 3802 ± 8 Ma, 这是目前扬子克拉通已报道的最古老的锆石年龄,指示区内可能存在 3.8 Ga 的古老地壳;焦文放等(2009)对崆岭杂岩东北部混合片麻岩进行的锆石 U-Pb 测年表明其原岩形成于 3218 ± 13 Ma, 并具有 2732 ± 16 Ma 的变质年龄;Gao 等(2011)对奥长花岗质片麻岩的测年结果表明,其原岩形成于 3302 ± 7 Ma;魏君奇等(2012)对崆岭杂岩中斜长角闪岩包体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,结果显示其形成于约 3.0 Ga, 并可能受到了 2.7 Ga 和 2.5 Ga 的后期变质改造;Guo 等(2014)在两件花岗片麻岩中获得的最大年龄约为 3.4 Ga, 并认为其代表了原岩的年龄,是目

前华南地区报道的最古老的地质体年龄。

2 武当地块与扬子陆核区碎屑锆石 U-Pb 年龄数据对比

本文收集了近年来武当地块(武当群和耀岭河群)和扬子陆核区中新元古代变沉积地层中碎屑锆石的原位 U-Pb 年龄数据,并对所收集锆石数据进行了一定程度的筛选。考虑到 ^{207}Pb 放射性子体同位素的累积问题,对于 > 1.0 Ga 的数据使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,对于 < 1.0 Ga 的数据则使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,所有年龄都选取了谐和度较高(90%以上)的数据,所选取的锆石年龄均大于 640 Ma。经过上述筛选过程后,分别统计了 360 颗武当地块和 1020 颗扬子陆核区碎屑锆石的 U-Pb 年龄数

据。两个区域的锆石年龄统计结果见图2。

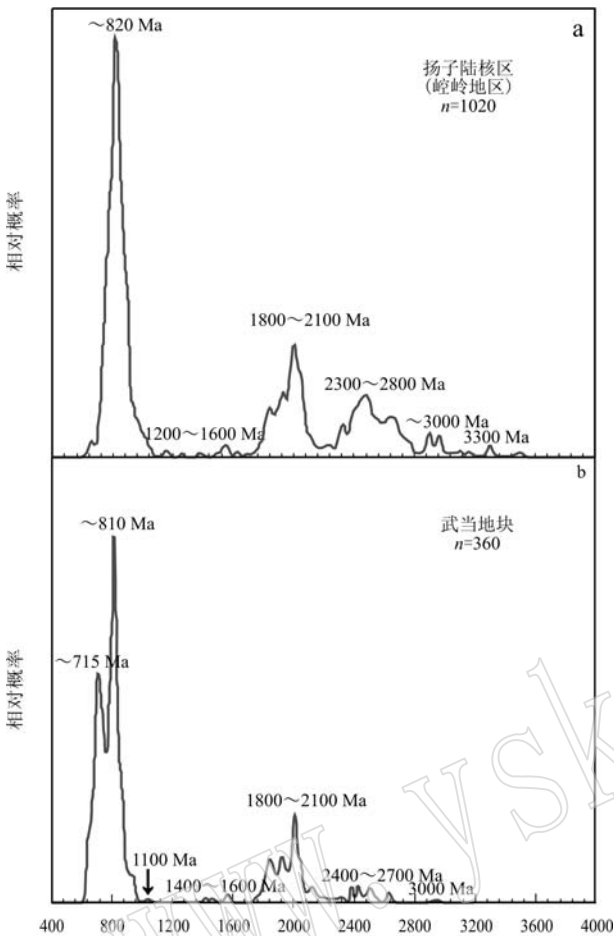


图2 扬子陆核区和武当地块碎屑锆石年龄分布图

Fig. 2 Detrital zircon U-Pb age distributions of Yangtze continental nucleus and the Wudang block
 扬子陆核区碎屑锆石数据引自 Zhang 等(2006)、Liu 等(2008)、Hofmann 等(2011)和 Wang 等(2013),武当地块的数据引自祝禧艳等(2008)、凌文黎等(2010)和 Wang 等(2013)
 Data for Yangtze continental nucleus are from Zhang *et al.* (2006), Liu *et al.* (2008), Hofmann *et al.* (2011), Wang *et al.* (2013); data for the Wudang block are from Zhu Xiyan *et al.* (2008), Ling Wenli *et al.* (2010), Wang *et al.* (2013)

从图2中可以看出,扬子陆核沉积地层中碎屑锆石年龄主要集中在780~1000 Ma、1800~2100 Ma、2300~2800 Ma、~3000 Ma和~3300 Ma,另外还有一些1200~1600 Ma的年龄数据。总体来看,碎屑锆石年代学统计显示扬子陆核区分别存在2900~3400 Ma、2400~2700 Ma、1800~2100 Ma以及780~900 Ma等多期重要构造-岩浆事件。武当地块沉积岩中碎屑锆石年龄谱集中在640~950 Ma、1800~2200 Ma和2400~2600 Ma,另外包含

一些1400~1600 Ma的锆石。值得注意的是,武当地块新元古代地层碎屑锆石中并未记录>3000 Ma的年龄,区内最老的锆石年龄为~2900 Ma(仅一颗),显示前寒武纪主要构造-岩浆事件发生在2400~2600 Ma、1900~2000 Ma以及710~810 Ma。

对比两个地区的年龄谱,虽然两者具有大体相似的形态,但存在两个明显的区别:①新元古代时期扬子陆核区只有一个峰值(~820 Ma),武当地块存在两个年龄峰值,其中~810 Ma的峰值与扬子陆核区相近,而另一个年龄峰值~715 Ma在扬子陆核区没有出现。需要指出的是,扬子克拉通北缘乃至整个扬子克拉通目前尚未有大规模~710 Ma的岩浆岩出露,有限的报道仅来自一些沉积地层中的凝灰质粉砂岩记录(Lan *et al.*, 2015);②扬子陆核区存在大量>3000 Ma的锆石年龄记录,最古老的锆石年龄甚至可达3800 Ma,而武当地块中最老的锆石年龄只有2942 Ma,中太古代之前的年龄峰值亦不明显。

对于出现这些差别的原因,一种可能是由于武当地块已发表的碎屑锆石数目明显小于扬子陆核区,更为可能的则是在太古宙和晚新元古代,武当地块和扬子陆核区分别经历了不同的地质过程。

3 武当地块沉积源区

传统观点认为,南秦岭块体和扬子克拉通在前寒武纪可能经历了相似的构造-岩浆热事件(Yu *et al.*, 2008),因而大多数研究者将南秦岭块体视作华南陆块北缘的重要组成部分,或者二者在新元古代时期应该处于相同的大地构造背景之下(凌文黎等, 2010)。长期以来,在大别-苏鲁造山带大陆深俯冲与折返地球动力学过程的研究中,将扬子克拉通作为发生过深俯冲作用的陆块进行识别的一个重要标志是变质原岩中出现晋宁期岩浆锆石的年代学记录(薛怀民等,2002; Zheng *et al.*, 2003, 2004)。本文统计的碎屑锆石年龄谱结果表明,虽然武当地块碎屑锆石中存在大量~810 Ma的年龄记录,但其缺乏3000 Ma以上古老锆石,此外,武当地块的碎屑锆石年龄谱明显存在早古元古代约2300~2500 Ma以及晚新元古代~715 Ma年龄的记录,而目前同时期岩浆岩在扬子陆核区乃至整个扬子克拉通均缺乏出露,暗示扬子克拉通古老的基底物质并未给武当地块的沉积作用提供物质来源。显然,对于武当地块

碎屑锆石年龄谱中缺乏 $>3\ 000\ \text{Ma}$ 的年龄峰值需要重新考虑其他可能的沉积物质来源。

位于商丹断裂带南侧、南秦岭构造带中的陡岭杂岩,是区域上少有的几个古老岩块之一,被认为是南秦岭构造块体的古老结晶基底。前人对陡岭杂岩中片麻岩开展的同位素年代学工作显示其正片麻岩样品形成于 $2\ 500\ \text{Ma}$ 左右。例如,胡娟等(2013)在陡岭杂岩5件闪长质-花岗质片麻岩样品中获得了 $2\ 469\sim 2\ 509\ \text{Ma}$ 的岩浆锆石年龄,指示南秦岭块体基底存在古元古代—新太古代的岩浆事件。最近,Nie等(2016)同样在陡岭杂岩3件正片麻岩样品中获得了 $2\ 433\sim 2\ 478\ \text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄,证明陡岭杂岩存在早古元古代的岩浆事件。此外,对陡岭杂岩中变沉积岩进行的碎屑锆石 U-Pb 定年结果显示,其年龄谱峰值与武当地块类似。例如,陆松年等(2009)对陡岭岩群瓦屋场组云母石英片岩中的锆石进行了分析,在42个分析点中最大的锆石年龄为 $3\ 027\pm 8\ \text{Ma}$ 。由于分析的点位较少,获得的年龄较为分散,但依然可以看出主要年龄分布于新元古代时期($0.8\sim 1.0\ \text{Ga}$),除此之外, $1.4\sim 1.6\ \text{Ga}$ 、 $1.8\sim 2.0\ \text{Ga}$ 、 $\sim 2.5\ \text{Ga}$ 的年龄也均有分布。胡娟等(2013)对陡岭杂岩中石榴黑云斜长片麻岩进行了分析,120个分析点中存在两个主要峰值(分别为 $2.60\ \text{Ga}$ 和 $2.48\ \text{Ga}$)和3个次要峰值(分别为 $1.96\ \text{Ga}$ 、 $1.40\ \text{Ga}$ 和 $0.82\ \text{Ga}$),最老的锆石年龄为 $3\ 032\pm 19\ \text{Ma}$ 。此外,Nie等(2016)对3件副片麻岩样品中的82颗锆石进行了分析,获得的最老锆石年龄为 $2\ 882\ \text{Ma}$,主要年龄峰值分别为 $2.5\ \text{Ga}$ 、 $2.0\ \text{Ga}$ 、 $1.5\ \text{Ga}$ 和 $0.8\ \text{Ga}$,与武当地块沉积岩中碎屑锆石年龄特征一致。另外需要指出的是,与武当地体类似,陡岭杂岩的年龄谱中同样缺乏 $3.0\ \text{Ga}$ 以上的古老年龄。综上所述,我们发现陡岭杂岩和武当地块的碎屑锆石年龄谱分布具有相似的特点,表明两者可能在前寒武纪具有统一的构造演化过程,同时,陡岭杂岩中存在显著的 $\sim 2.5\ \text{Ga}$ 构造-岩浆事件,与崆岭杂岩的年龄特征明显不同,因此,虽然陡岭杂岩在武当地块中目前未见出露,但以前者为代表的南秦岭基底岩系可能提供了武当群沉积地层的一部分物质来源。除此之外,武当群沉积地层中还存在大量约 $750\sim 680\ \text{Ma}$ 的碎屑锆石,该年龄段的岩浆事件在扬子克拉通较少报道,但在武当地块以及南秦岭地区却广泛出现(祝禧艳等,2008;凌文黎等,2010;张永清等,2013;Zhu *et al.*, 2014; Li and Zhao, 2016; Wang

et al., 2016; Hu *et al.*, 2016)。例如,凌文黎等(2010)在双台组砂岩里的碎屑锆石中获得的最年轻的峰值年龄为 $\sim 755\ \text{Ma}$;Zhu等(2014)对耀岭河群中的长英质火山岩进行了年代学研究,其中获得的一个年龄为 $731\pm 11\ \text{Ma}$;Li和Zhao(2016)对侵入武当群和耀岭河群之中的基性岩墙进行了锆石 U-Pb 定年,获得的年龄为 $715\pm 14\ \text{Ma}$ 。因此,我们认为南秦岭新元古代岩浆岩可能也是武当地块碎屑物质的主要来源之一。这一推论得到了武当群中新元古代末期碎屑锆石形态的支持,这些锆石普遍具有较好的自形特点,锆石磨圆度较差,表明并未遭受远距离搬运作用,具近源性特点。

4 武当地块和扬子陆核区新元古代时期的相互关系

近30年来,扬子克拉通核部及其周缘获得了大量的新元古代岩浆事件的同位素年龄记录,然而对于这些年龄所代表的地质意义目前还存在争议(Zhou *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Zhao and Zhou, 2007, 2008; Zheng *et al.*, 2007, 2008; Wang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2013)。这一争论的原因很大程度上是对扬子克拉通内部构造块体前寒武纪基底的认识相对有限。因此,厘清武当地块和扬子陆核区之间新元古代之前的相互关系,有助于提高对新元古代大地构造格局的认识程度。

最近,在扬子陆核区黄陵背斜南部宜昌太平溪-邓村之间分布的庙湾超镁铁-镁铁质岩石组合中识别出了一套蛇绿岩组合,并在其中获得了 $1.1\sim 0.98\ \text{Ga}$ 的年龄,该组合被认为是古大洋蛇绿岩残片(彭松柏等,2010; Peng *et al.*, 2012b)。Jiang等(2016)对与庙湾蛇绿岩套共生的一套变沉积岩也进行了研究,认为碎屑锆石的核部获得的 $\sim 1.0\ \text{Ga}$ 的年龄代表其沉积年龄,锆石边部获得的 $942\sim 935\ \text{Ma}$ 的年龄是其发生角闪岩相变质的时间,并认为该年龄可与格林威尔期(Grenvillian)造山事件相对比。同时,在北部与庙湾蛇绿岩毗邻的神农架地区,也存在一套 Grenvillian 陆缘岛弧环境的火山岩组合(钙碱性玄武岩、碱性玄武岩、拉斑质安山岩岩石组合,出露于神农架群上部郑家垭组中),已有研究显示其中安山岩锆石 U-Pb 年龄为 $1\ 103\pm 8\ \text{Ma}$ (Qiu *et al.*, 2011),而钙碱性玄武岩的年龄则为 $1\ 063\pm 16\ \text{Ma}$ (Qiu *et al.*, 2015)。此外,在扬子克拉通北缘随南

花山地区最近确认了一套蛇绿混杂岩带,其位于扬子陆核区的东部,曾被认为是该地区存在古生代洋盆和俯冲消减作用的证据(Dong *et al.*, 2004; Lai *et al.*, 2004)。然而,最新的研究表明该套蛇绿岩的时代可能为新元古代。Shi 等(2007)在花山蛇绿岩中的辉长岩和花岗岩中获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 947 ± 14 Ma 和 876 ± 17 Ma,从而将古洋盆的时间限定于新元古代时期。最近, Xu 等(2016)对随南地区的基性岩墙(~ 871 Ma)和三里岗花岗闪长岩(~ 860 Ma)也进行了年代学研究,获得了相似的结果,地球化学数据进一步表现出其具弧火山岩的特征,可能记录了扬子克拉通北缘另一次的洋壳俯冲事件。这些证据可能指示了扬子陆核区与其以北地区于中元古代末期—新元古代早期可能发生碰撞拼合过程(邱啸飞等,2014)。

考虑到武当地块和崆岭-神农架地区紧密的空间分布特征,随南地区可能存在与神农架地区类似的俯冲弧,因此主张将武当地块作为一个独立的次一级微陆块,其可能于新元古代中期与崆岭地区所代表的扬子陆核区发生碰撞拼合,最终形成了统一的扬子克拉通块体。

5 结论

通过对比武当地块和扬子陆核区中新元古代变沉积地层中碎屑锆石的原位 U-Pb 年龄数据,主要得出以下结论:

(1) 武当地块与扬子陆核区总体具有相似的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱,但武当地块缺乏古老锆石年龄记录(>3000 Ma),指示二者的物质源区不同。结合前人的研究资料,认为武当地块的沉积物来源主要是南秦岭块体前寒武纪深变质结晶基底(以陡岭杂岩为代表)和浅变质过渡基底(以武当群和耀岭河群为代表)。

(2) 结合区域构造演化特点,认为武当地块在早新元古代之前是一个相对独立的微陆块。新元古代中期的汇聚过程使得武当地块(微陆块)与扬子陆核之间发生碰撞拼合。

致谢 中国地质大学(武汉)凌文黎教授和中国地质调查局武汉地质调查中心魏运许教授级高级工程师在本文成文过程中与笔者进行了有益交流,在此表示感谢!

References

- Bai Xiao, Ling Wenli, Duan Ruichun, *et al.* 2011. Mesoproterozoic to Paleozoic Nd isotope stratigraphy of the South China continental nucleus and its geological significance[J]. *Science in China Earth Sciences*, 54(11): 1665~1674.
- Cai Zhiyong, Luo Hong, Xiong Xiaolin, *et al.* 2006. A discussion on the age of the meta-sedimentary rocks in the upper part of the Wudang Group constrained by the grain-zircon U-Pb dating[J]. *Journal of Stratigraphy*, 30(1): 60~63(in Chinese with English abstract).
- Chen Gongxin and Jin Jingwei. 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Hubei Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~284(in Chinese).
- Dong Yunpeng and Santosh M. 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29: 1~40.
- Dong Yunpeng, Safonova Inna and Wang Tao. 2016. Tectonic evolution of the Qinling orogen and adjacent orogenic belts[J]. *Gondwana Research*, 30: 1~5.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer Franz, *et al.* 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213~237.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhao Xia, *et al.* 2004. Geochemistry of the subduction-related magmatic rocks in the Dahong Mountains, northern Hubei Province: Constraint on the existence and subduction of the eastern Mianlüe oceanic basin[J]. *Science in China Ser. D—Earth Sciences*, 47(4): 366~377.
- Gao Shan, Yang Jie, Zhou Lian, *et al.* 2011. Age and growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *American Journal of Science*, 311: 153~182.
- Guo Jingliang, Gao Shan, Wu Yuanbao, *et al.* 2014. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 242: 82~95.
- Hofmann M, Linnemann U, Rai V, *et al.* 2011. The India and South China cratons at the margin of Rodinia - Synchronous Neoproterozoic magmatism revealed by LA-ICP-MS zircon analyses[J]. *Lithos*, 123: 176~187.
- Hu Fangyang, Liu Shuwen, Santosh, *et al.* 2016. Chronology and tectonic implications of Neoproterozoic blocks in the South Qinling Oro-

- genic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 30: 24~47.
- Hu Juan, Liu Xiaochun, Chen Longyao, *et al.* 2013. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling Complex in the South Qinling orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(34): 3 579~3 588(in Chinese with English abstract).
- Jiang Xingfu, Peng Songbai, Pokat Ali, *et al.* 2016. Geochemistry and geochronology of mylonitic metasedimentary rocks associated with the Proterozoic Miaowan ophiolite complex, Yangtze craton, China: Implications for geodynamic events[J]. *Precambrian Research*, 279: 37~56.
- Jiao Wenfang, Wu Yuanbao, Peng Min, *et al.* 2009. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science in China Ser. D—Earth Sciences*, 39(7): 972~978(in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, *et al.* 2004. Geochemistry and regional distribution of ophiolites and associated volcanics in Mianlüe suture, Qinling-Dabie Mountains[J]. *Science in China Ser. D—Earth Sciences*, 47(4): 289~299.
- Lan Zhongwu, Li Xianhu, Zhu Maoyan, *et al.* 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U-Pb zircon age constraints and regional and global significance[J]. *Precambrian Research*, 263: 123~141.
- Li Qiwei and Zhao Junhong. 2016. Petrogenesis of the Wudang mafic dikes: Implications of changing tectonic settings in South China during the Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 272: 101~114.
- Li Xianhu, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma[J]? *Precambrian Research*, 122(1~4): 45~83.
- Ling Wenli, Duan Ruichun, Liu Xiaoming, *et al.* 2010. U-Pb dating of detrital zircons from the Wudangshan Group in the South Qinling and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(12): 1 153~1 161(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Ren Bangfang, Duan Ruichun, *et al.* 2007. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(12): 1 445~1 456(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Diwu Chunrong, *et al.* 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies [J]. *American Journal of Science*, 308: 421~468.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Wang Huichu, *et al.* 2009. Detrital zircon population of Proterozoic metasedimentary strata in the Qinling-Qilian-Kunlun Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 195~2 208(in Chinese with English abstract).
- Nie Hu, Yao Jin, Wan Xin, *et al.* 2016. Precambrian tectonothermal evolution of South Qinling and its affinity to the Yangtze Block: Evidence from zircon ages and Hf-Nd isotopic compositions of basement rocks[J]. *Precambrian Research*, 286: 167~179.
- Peng Min, Wu Yuanbao, Gao Shan, *et al.* 2012a. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A-type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: Constraints on petrogenesis and geologic implications[J]. *Gondwana Research*, 22: 140~151.
- Peng Songbai, Kusky T, Jiang Xingfu, *et al.* 2012b. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 21: 577~594.
- Peng Songbai, Li Changnian, Kusky T M, *et al.* 2010. Discovery and its tectonic significance of the Proterozoic Miaowan ophiolites in the southern Huangling anticline, western Hubei, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 8~20(in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Ling Wenli and Liu Xiaoming. 2014. Correlation between the Mesoproterozoic Yangtze continental nucleus and the Shennongjia area: Constraints from zircon geochronological and Hf isotope[J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(2): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Ling Wenli, Liu Xiaoming, *et al.* 2011. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton[J]. *Precambrian Research*, 191: 109~119.
- Qiu Xiaofei, Yang Hongmei, Lu Shansong, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of Grenville-aged (1 063 ± 16 Ma) metabasalts in the Shennongjia district, Yangtze block: implications for tectonic evolution of the South China Craton[J]. *International Geology Review*, 57(1): 76~96.
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Zongqing, *et al.* 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating of gabbro and granite from the Huashan ophiolite, Qinling orogenic belt, China: Neoproterozoic suture on the northern margin of the Yangtze Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 239~243.

- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, *et al.* 2013. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 261~1 272.
- Wang Ruirui, Xu Zhiqin, Sntosh M, *et al.* 2016. Late Neoproterozoic magmatism in South Qinling, Central China: Geochemistry, zircon U-Pb-Lu-Hf isotopes and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 683: 43~61.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Wuxian, *et al.* 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review[J]. *Gondwana Research*, 15: 381~395.
- Wei Junqi and Wang Jianxiang. 2012. Zircon age and Hf isotope compositions of amphibolite enclaves from the Kongling complex[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 589~600(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Gao Shan, Zhang Hongfei, *et al.* 2011. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the northwestern Yangtze Block and its geological implications [J]. *Precambrian Research*, 200~203: 26~37.
- Xu Yang, Yang Kunguang, Polat Ali, *et al.* 2016. The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 275: 310~331.
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Liu Xiaochun. 2002. U/Pb zircon dating of granitic gneisses in eastern Dabie Mountains, Central China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 165~173(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, O'Reilly Suzanne Y, Wang Lijuan, *et al.* 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent? Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 164(1~2): 1~15.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing : Science Press, 1~855(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren and Lai Shaocong. 1995. Tectonics and structure of Qinling orogenic belt[J]. *Science in China(Series B)*, 38(11): 1 379~1 394.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3. 8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 252: 56~71.
- Zhang Yongqing, Zhang Jian, Li Huaikun, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology of the meta acidic volcanic rocks from the Wudangshan Group, Southern Qinling Mountains, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 922~930(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precambrian Research*, 152: 27~47.
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2008. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution [J]. *Lithos*, 104: 231~248.
- Zhao Junhong, Zhou Meifu, Zheng Jianping, *et al.* 2013. Neoproterozoic tonalite and trondhjemite in the Huangling complex, south China: crustal growth and reworking in a continental arc environment[J]. *American Journal of Science*, 313(6): 540~583.
- Zheng Yongfei, Fu Bin, Gong Bing, *et al.* 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime [J]. *Earth-Science Reviews*, 62(1~2): 105~161.
- Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, *et al.* 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China [J]. *Precambrian Research*, 163: 351~383.
- Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Chen Fukun, *et al.* 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4 145~4 165.
- Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, *et al.* 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust[J]. *Lithos*, 96: 127~150.
- Zhou Meifu, Kennedy Allen, Sun Min, *et al.* 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions in the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 110(5): 611~618.
- Zhu Xiyun, Chen Fukun, Nie Hu, *et al.* 2014. Neoproterozoic tectonic evolution of South Qinling, China: Evidence from zircon ages and geochemistry of the Yaolinghe volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 245: 115~130.
- Zhu Xiyun, Chen Fukun, Wang Wei, *et al.* 2008. Zircon U-Pb ages of

volcanic and sedimentary rocks of the Wudan Group in the Qinling Orogenic Belt within western Henan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(6): 817~829(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 等. 2006. 武当群上部变沉积岩组时代归属问题: 单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地层学杂志, 30(1): 60~63.
- 陈公信, 金经纬. 1996. 湖北省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 胡娟, 刘晓春, 陈龙耀, 等. 2013. 扬子克拉通北缘约 2.5 Ga 岩浆事件: 来自南秦岭陡岭杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 科学通报, 58(34): 3 579~3 588.
- 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 2009. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(7): 972~978.
- 凌文黎, 段瑞春, 柳小明, 等. 2010. 南秦岭武当山群碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 55(12): 1 153~1 161.
- 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 2007. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 52(12): 1 445~1 456.
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 2009. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 25(9): 2 195~2 208.
- 彭松柏, 李昌年, Kusky M, 等. 2010. 鄂西黄陵背斜南部元古宙庙湾蛇绿岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 29(1): 8~20.
- 邱啸飞, 凌文黎, 柳小明. 2014. 扬子陆核与神农架地块中元古代相互关系: 来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的约束[J]. 地质科技情报, 33(2): 1~8.
- 魏君奇, 王建雄. 2012. 崆岭杂岩中斜长角闪岩包体的锆石年龄和 Hf 同位素组成[J]. 高校地质学报, 18(4): 589~600.
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 大别山东部花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质科学, 37(2): 165~173.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张永清, 张健, 李怀坤, 等. 2013. 南秦岭武当山群变质酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 87(7): 922~930.
- 祝禧艳, 陈福坤, 王伟, 等. 2008. 豫西地区秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 地球学报, 29(6): 817~829.