

doi:10.3799/dqkx.2015.094

扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义

邱啸飞^{1,2}, 杨红梅^{1*}, 张利国¹, 赵小明², 段桂玲¹, 卢山松¹, 谭娟娟¹, 施念¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 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: 扬子陆核崆岭高级变质地体内出露一套强变形的基性—超基性岩岩石组合, 主要呈似层状、透镜状分布于崆岭群中, 该套变基性—超基性岩组合对扬子陆块早期构造演化过程具有重要意义。通过同位素稀释法(isotope dilution thermal ionization mass spectrometry, 简称 ID-TIMS)获得该套岩石组合中蛇纹石化方辉橄榄岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\,063 \pm 12$ Ma, 说明 Sm-Nd 同位素体系可用于对超低含量、发生强蚀变作用的超基性岩样品进行定年。样品 Nd 同位素组成相对均一($\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $6.90 \sim 7.32$), 表明形成于封闭体系中, 其对应 Nd 同位素两阶段模式年龄为 $1.13 \sim 1.09$ Ga, 与形成年龄接近, 说明来自亏损软流圈地幔部分熔融。结合区域上已有的中元古代末期到新元古代早期构造岩浆事件研究, 认为在该时期扬子陆块可能由多个微陆块组成, 就扬子陆核而言, 其与扬子陆块西侧之间很可能存在分隔的大洋。

关键词: 扬子陆核; 庙湾蛇绿岩; Sm-Nd 等时线; 同位素; 地质年代学; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2015)07-1121-08

收稿日期: 2014-10-22

Geochronology of Serpentinized Harzburgite in Miaowan Ophiolite, Yangtze Block and Its Tectonic Implications

Qiu Xiaofei^{1,2}, Yang Hongmei^{1*}, Zhang Ligu¹, Zhao Xiaoming², Duan Guiling¹,
Lu Shansong¹, Tan Juanjuan¹, Shi Nian¹

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Research Center of Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: A series of strongly-deformed mafic-ultramafic rocks occur at the Kongling high-grade metamorphic terrain in Yangtze continental nucleus, scattering in the Miaowan Formation in layers and podiforms. This metamafic-ultramafic rock association is of great significance to the early tectonic evolution of Yangtze block. In this study, ID-TIMS whole-rock Sm-Nd isochron dating is carried out for the serpentinized harzburgite and amphibolite from this rock suite. The results indicate that the serpentinized harzburgite was formed at $1\,063 \pm 12$ Ma, showing that it is feasible to date tiny amount of heavily-altered ultramafic rocks by means of the Sm-Nd isotopic system. The comparatively uniform Nd isotopic composition (with $\epsilon_{Nd}(t)$ value ranging from 6.90 to 7.32) indicates that they were formed in a closed system. Two-stage Nd modal age of $1.13 - 1.09$ Ga is close to their emplacement time, implying an origin of partial melting from depleted asthenospheric mantle. Combined with documented work on late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic tectonic-magmatic events in the area, it is suggested that the Yangtze block may have been composed of several microcontinents at that time. There could have been an ocean separating the Yangtze continental nucleus from western Yangtze continental segment.

Key words: Yangtze continental nucleus; Miaowan ophiolite; Sm-Nd isochron; isotope; geochronology; petrology; geochemistry.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41303026); 中国地质调查局地质调查项目(Nos.12120114005701, 1212011220512, 1212011121102).

作者简介: 邱啸飞(1985-), 男, 博士, 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: qiu Xiaofei@geochemist.cn

* **通讯作者:** 杨红梅, E-mail: ycyanghmei@163.com

引用格式: 邱啸飞, 杨红梅, 张利国, 等, 2015. 扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1121-1128.

0 引言

不同大陆块体间的拼合与裂解过程对认识其形成过程及早期演化规律具有重要意义(Condie, 1998; Hawkesworth and Kemp, 2006), 因而长期受到国内外研究者的高度重视。蛇绿岩代表了造山过程中古洋盆被消耗后残留的洋壳及上地幔残片, 其通常沿板块缝合带出露, 对于识别古老的大洋岩石圈以及造山带中古板块缝合线具有重要指示意义(Dilek *et al.*, 2007; Dilek and Furnes, 2011)。对蛇绿岩进行高精度的年代学测定, 对于构建造山带构造演化年代学格架、恢复古地理环境以及识别大陆块体在超大陆重建方案中的位置均可起到约束作用(马中平等, 2004; 李尚林等, 2012; 黄强太等, 2015)。蛇绿岩岩石组合中基性—超基性岩作为蛇绿岩套重要组成部分, 对其开展系统的年代学研究, 可用于对存在的蛇绿岩组合进行判别, 进而对区域上可能存在的板块造山拼合过程及其构造演化模式作出限定(Dong *et al.*, 2008)。

在扬子陆块核部地区, 除少量太古宙基底出露(Jiao *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2011)外, 还出露多套基性—超基性岩体。相对太古宙—古元古代地层, 目前对于这些基性—超基性岩体的年代学和系统的地球化学研究仍相对缺乏。鄂西黄陵背斜南部宜昌崆岭高级变质地体内出露出一套变基性—超基性岩石组合, 最近开展的初步研究(Peng *et al.*, 2012)显示, 该套中元古代末期—新元古代早期基性—超基性岩可能是一套肢解的蛇绿岩组合的组成部分, 基于变辉长岩和变辉绿岩墙中锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年分析结果(1 118~974 Ma), 部分研究者将该蛇绿岩套归为格林威尔期, 认为可能代表了扬子陆块北缘一次中元古代末期的碰撞事件。然而, 由于缺乏超基性岩的年代学数据, 导致解决这些变辉长岩和变辉绿岩是否与超基性岩为同时代产物、其地幔源区组成及相互关系等问题时缺乏直接证据。

本文在近年来对该地区开展的野外地质调查基础上, 报道了在该套岩石组合超基性岩中获得的较高精度 Sm-Nd 同位素等时线年龄, 结合前人对该套蛇绿岩其他岩石类型已开展的研究成果, 对扬子陆核早期碰撞拼合事件与构造演化进行了初步探讨。

1 区域地质概况

崆岭高级变质地体(也称“崆岭杂岩”)为目前华

南克拉通已报道的最古老结晶基底, 总出露面积约为 360 km², 被新元古代黄陵花岗岩侵入而分隔成南、北两部分, 主体为北部崆岭杂岩, 主要由高角闪岩相—麻粒岩相变质岩组成。而南部崆岭杂岩则大致可分为 3 套岩石组合: 下部古村坪岩组以 TTG 片麻岩为主, 夹少量斜长角闪岩、变粒岩; 中部小渔村岩组为一套孔兹岩系, 该孔兹岩系主要为以含石墨和富铝矿物石榴子石为特征的黑云斜长片麻岩、黑云片岩、云英片岩, 夹大理岩、石英岩、斜长角闪岩、变粒岩等, 岩石富含石榴子石、电气石与磁铁矿等; 上部庙湾岩组主要由层状细粒斜长角闪岩以及石英岩组成, 夹少量薄层大理岩, 蛇纹石化橄榄岩、方辉橄榄岩、辉长辉绿岩等则呈独立岩片或岩块沿 NWW 向出露于庙湾岩组中(Peng *et al.*, 2012)。

作为华南克拉通最具代表性的古老结晶基底, 前人对崆岭基底岩系进行了大量的年代学研究。然而目前研究主要集中在北部崆岭杂岩, 而南部崆岭杂岩的年代学工作则开展得相对有限(Gao *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2014)。例如, Gao *et al.* (2011) 对南部崆岭高级变质地体中古村坪组中花岗闪长片麻岩进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 其原岩形成于 $2\ 981 \pm 13$ Ma, 暗示南部崆岭杂岩中 TTG 片麻岩岩石组合可能与北部崆岭杂岩中 TTG 片麻岩为同时代产物。最近, Peng *et al.* (2012) 将南部崆岭杂岩庙湾岩组中出露的一套强变形变质超镁铁质—镁铁质岩石组合定义为蛇绿混杂岩的一部分, 并认为其可能形成于中元古代且被后期的构造运动肢解。他们还认为庙湾岩组具有典型蛇绿岩套岩石组合, 主要由方辉橄榄岩、豆荚状铬铁矿、纯橄岩、辉长岩、席状岩墙、变枕状熔岩、硅质岩以及构造大理岩组成, 呈构造杂岩体出露, 界线受断层控制, 从而推测庙湾地区可能存在蛇绿岩套(Peng *et al.*, 2012)。目前仅少数学者曾对庙湾蛇绿岩中不同岩石单元进行了定年工作, 如 Peng *et al.* (2012) 分别对该蛇绿岩中辉长岩与辉绿岩脉进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得了 978 ± 12 Ma 和 $1\ 001 \pm 16$ Ma 的年龄, 同时在两个变辉长岩样品中也分别获得了 $1\ 118 \pm 24$ Ma 与 974 ± 11 Ma 的年龄; 此外, Deng *et al.* (2012) 对席状岩墙中两个变斜长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 分别获得了 $1\ 026 \pm 79$ Ma 和 $1\ 043 \pm 23$ Ma 的年龄, 而对岩墙底部的变辉长岩定年结果则显示该套岩石形成于 $1\ 096 \pm 32$ Ma。综合起来看, 南部崆岭杂岩下部古村坪组

位素比值测定,另一份用于 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值测定.所称样品溶解离心后得到的上层清液用阳离子交换树脂进行 REE 的分离和纯化,其中含稀释剂的解吸液蒸干后直接用于 Sm、Nd 含量质谱分析,未加稀释剂的解吸液则继续进行 Nd 的纯化,用于 Nd 同位素比值分析.制备好的样品采用配有多接收系统的热电离质谱仪(Finnigan Triton Ti)完成同位素比值测定.

样品在质谱分析过程中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值产生的质量分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 900$ 进行校正,Sm、Nd 含量采用同位素稀释法公式计算获得.整个分析过程分别用标准物质 GBW04419、BCR-2 以及 ZkbzNd(JMC)对全流程和仪器进行监控.获得的国家标准物质 GBW04419 测定值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\ 715\pm 0.000\ 005$ (平均值, $n=4$), $\text{Sm}=3.032\times 10^{-6}$, $\text{Nd}=10.07\times 10^{-6}$;国际标样 BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 $0.512\ 633\pm 0.000\ 003$ (平均值, $n=10$), $\text{Sm}=6.637\times 10^{-6}$, $\text{Nd}=29.32\times 10^{-6}$;ZkbzNd(JMC)标准溶液的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511\ 550\pm 0.000\ 005$ (平均值, $n=7$),与各自推荐值在误差范围内完全一致,Sm、Nd 含量及 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值测量误差 $< 5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值单次测量分析精度优于十万分之一.实验全流程 Sm、Nd 本底分别为 7×10^{-11} 和 9×10^{-11} .上述分析工作均在中国地质调查局武汉地质

调查中心同位素地球化学实验室完成.

3 样品分析结果

庙湾岩组中超基性—基性岩全岩的 Sm-Nd 同位素组成分析结果列于表 1.表 1 中同时列出了这些样品计算的 Nd 同位素模式年龄.需要说明的是,由于本文所研究的方辉橄榄岩在其形成过程中存在一定的堆晶现象,这一过程可能导致不同程度的 Sm/Nd 比值分馏,故在进行 Nd 同位素模式年龄计算的时候采用两阶段演化模型更为合理,可以最大程度地减少因堆晶过程中 Sm-Nd 分馏而造成的影响,其计算结果相对而言能更真实地反映其初始岩浆物质的平均地壳居留时间.

在进行模式年龄和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值计算时, t 取 Sm-Nd 等时线年龄 1 063 Ma,结果显示方辉橄榄岩具有极低的 Sm($0.050\ 2\times 10^{-6}\sim 0.391\ 5\times 10^{-6}$)和 Nd($0.216\ 3\times 10^{-6}\sim 1.040\ 0\times 10^{-6}$)含量,方辉橄榄岩 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化范围大,在 0.108 6~0.227 6 之间变化,斜长角闪岩(zg94-8)的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值则为 0.179 7.样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 6.90~7.32,接近当时亏损地幔值平均值(约 7.60).

为避免庙湾蛇绿岩方辉橄榄岩与斜长角闪岩非同源,本文利用 Isoplot 3.0 软件对方辉橄榄岩进行

表 1 庙湾蛇绿岩蛇纹石化方辉橄榄岩及斜长角闪岩 Sm-Nd 同位素组成

Table 1 Whole rock Sm-Nd isotopic composition of the Miaowan ophiolite

样号	样品	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$T_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
zg94-1	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.282 1	0.790 8	0.215 7	0.513 135	0.000 009	1.11	7.13
zg94-2	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.204 2	0.561 9	0.219 7	0.513 167	0.000 010	1.10	7.20
zg94-3	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.391 5	1.040 0	0.227 6	0.513 210	0.000 012	1.12	6.97
zg94-4	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.179 8	0.566 9	0.191 8	0.512 976	0.000 015	1.10	7.29
zg94-5	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.103 8	0.321 9	0.195 0	0.513 020	0.000 013	1.06	7.71
zg94-6	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.067 9	0.216 3	0.189 9	0.512 955	0.000 021	1.11	7.13
zg94-7	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.167 1	0.507 5	0.199 1	0.513 008	0.000 013	1.13	6.91
zg94-8	斜长角闪岩	1.396 5	4.698 5	0.179 7	0.512 891	0.000 010	1.10	7.27
zg94-9	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.208 1	0.653 4	0.192 6	0.512 962	0.000 016	1.13	6.90
zg94-10	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.300 5	0.835 6	0.217 4	0.513 150	0.000 017	1.10	7.18
zg94-11	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.257 6	0.866 5	0.179 7	0.512 880	0.000 011	1.12	7.05
zg95-1	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.068 8	0.353 4	0.117 7	0.512 446	0.000 018	1.12	7.03
zg95-2	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.083 2	0.421 3	0.119 4	0.512 466	0.000 014	1.10	7.19
zg95-3	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.124 4	0.659 1	0.114 1	0.512 425	0.000 012	1.11	7.10
zg95-4	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.050 2	0.242 7	0.124 9	0.512 493	0.000 020	1.12	6.96
zg95-5	蛇纹石化方辉橄榄岩	0.085 5	0.475 9	0.108 6	0.512 390	0.000 010	1.11	7.17

注: Sm、Nd 含量根据 ID-TIMS 测量结果计算获得,误差 $< 5\%$;计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和两阶段模式年龄时,年龄 t 采用 Sm-Nd 等时线年龄 1 063 Ma; $T_{2\text{DM}}$ 计算过程中参数($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.213\ 7$,($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.513\ 150$,($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CC}}=0.118\ 0$ (DM、CC 分别代表亏损地幔和大陆地壳); $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值计算过程中参数($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CHUR}}=0.196\ 7$,($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CHUR}}=0.512\ 638$.

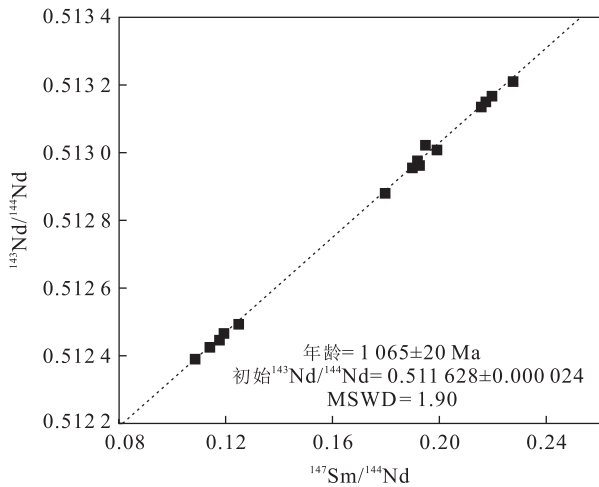


图 3 庙湾蛇绿岩蛇纹石化方辉橄榄岩—斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 等时线

Fig. 3 Whole rock Sm-Nd isochron of the serpentized harzburgites and amphibolites in the Miaowan ophiolite

了全岩 Sm-Nd 等时线年龄计算, 结果示于图 3, 15 件方辉橄榄岩样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 之间存在较好的线性关系, 构成的等时线年龄为 $1\ 063 \pm 12\ \text{Ma}$ (MSWD=0.84). 需要指出的是, 本文所研究超基性—超基性岩全岩样品的初始 Nd 同位素组成相对均一, 其模式年龄为 1.13~1.09 Ga; 此外, 前人对该套样品的元素地球化学组成的研究结果显示, 其稀土元素分布特点表现为中稀土元素略亏损的 U 型特征, 与典型造山带蛇绿岩中变地幔橄榄岩特点相似(彭松柏等, 2010), 元素含量并未发生显著变化, 说明虽然庙湾岩组方辉橄榄岩与斜长角闪岩经历了强变形变质, 且经历了以蛇纹石化为主的近地表蚀变作用过程, 但这些地质过程并未改变本文所研究样品中记录的原始 Sm-Nd 同位素组成, 显示 Sm-Nd 同位素体系相对稳定, 难以受到后期地质事件的干扰, 故可认为该等时线年龄代表了庙湾岩组该套超基性岩的形成年龄而非混合年龄(图 3).

4 讨论

4.1 庙湾岩组超基性岩形成时代

由于超基性岩中 SiO_2 和 Zr 含量极低, 因此几乎不结晶锆石, 而 Rb、Sr 作为高活动性元素, 在后期变质或蛇绿岩构造肢解变形过程中其同位素体系易受干扰, 加上其属于大离子亲石元素, 在超基性岩中含量极低, 这导致传统的锆石 U-Pb 法及 Rb-Sr 等时线法等常用定年方法难以开展, 且有关超基性

岩定年长期以来是同位素年代学研究的盲点和难点. 近年来, Re-Os 等时线方法成为对超基性岩定年的手段之一, 但 Re/Os 比值在单一地质体中变化往往不大, 且 Re、Os 含量在自然界中具有极低含量, 而且同样容易受到后期地质作用干扰, 因此就现阶段来看, 用 Re-Os 等时线方法对超基性岩定年的成功案例仍相对较少. 与之相比, Sm、Nd 等稀土元素本身具有相对较强的稳定性, 加上 ^{147}Sm 半衰期较长, 在对古老超基性岩定年研究中往往能够获得相对理想的结果.

本文 15 件样品获得的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\ 063 \pm 12\ \text{Ma}$ (图 3), 指明该蛇纹石化方辉橄榄岩为扬子陆块格林威尔期岩浆作用产物. 前文已经提到, 现有的研究显示, 庙湾蛇绿岩中的辉绿岩、变辉长岩以及斜长花岗岩均主要形成于 1 118~985 Ma 的格林威尔期 (Deng *et al.*, 2012; Peng *et al.*, 2012). 本研究获得了庙湾蛇绿岩中橄榄岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\ 063 \pm 12\ \text{Ma}$, 对庙湾蛇绿岩石组合的年代学工作作了重要补充, 结合区域上这些已有的年代学数据, 证明庙湾岩组中蛇纹石化方辉橄榄岩为蛇绿岩套的重要组成部分, 从而证实扬子陆核南部崆岭高级变质地体中确实存在格林威尔期被肢解的蛇绿岩套岩石组合, 而其中以蛇纹石化方辉橄榄岩为代表的超基性岩应属蛇绿混杂岩中最早期的岩浆产物之一.

4.2 庙湾蛇绿岩蛇纹石化方辉橄榄岩源区特征

本文获得的 15 件蛇纹石化方辉橄榄岩样品 Nd 同位素组成相对均一, 说明大多数样品形成于封闭体系, 其 Nd 同位素组成特征能代表初始岩浆信息. 本文研究显示, 庙湾超基性岩样品具有亏损的 Nd 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 6.90 \sim 7.32$), 而 Nd 同位素模式年龄介于 1.13~1.09 Ga, 与 Sm-Nd 等时线年龄接近, 暗示庙湾超基性—基性侵入体为亏损地幔熔融产物. 最近学者们对蛇纹石化方辉橄榄岩进行的地球化学组成研究进一步支持了这一结论. 已发表的地球化学研究表明, 蛇纹石化方辉橄榄岩的稀土元素呈明显的 U 型稀土元素分配模式, 即存在中稀土元素亏损现象, 且样品微量元素组成无明显元素异常, 显示出类似于洋中脊玄武岩 (MORB) 的地球化学组成 (彭松柏等, 2010). 综合方辉橄榄岩 Nd 同位素组成和元素地球化学特征, 笔者认为庙湾蛇绿岩中橄榄岩可能来源于亏损的软流圈地幔源区部分熔融, 形成于类似大洋中脊的构造环境下. 这一结论与区域上同时代斜长花岗岩、席状岩墙等的报道基

本一致(Deng *et al.*, 2012).结合近期对庙湾岩组中蛇纹石化方辉橄榄岩、辉长岩以及席状岩墙开展的系统的地质学和地球化学工作,本文的研究结果表明,庙湾岩组岩石组合可能为一套与俯冲有关的(SSZ型)蛇绿岩。

4.3 庙湾蛇绿岩套对扬子陆核早期形成和构造演化的指示

华南克拉通和河北克拉通是中国东部最重要的前寒武纪大陆块体,长期以来受到了国内外地质研究者的广泛关注.然而相对于华北克拉通,目前对于华南克拉通的形成过程了解仍相对有限,主要体现在对其内部次一级组成块体的初始规模、形成及演化过程缺乏全面认识.而扬子陆核作为华南克拉通的重要组成部分,目前对其研究主要集中在 860~750 Ma 的构造—岩浆事件,这些事件大多与拉张有关,反映了其在 Rodinia 超大陆裂解过程中的响应.然而,超大陆的形成伴随了各组成陆块的相互聚合和随后的裂解过程(Cawood *et al.*, 2013).因此,对扬子陆核于中—新元古代之前发生的与聚合相关的构造—岩浆事件进行识别,对认识其形成演化过程显得十分重要。

近年来随着研究工作的不断深入,尤其是对扬子陆核中元古代末期到新元古代早期构造—岩浆事件研究的逐步开展,一系列与该时期俯冲—碰撞相关的岩浆作用得以报道.例如,在扬子陆核东南缘,江绍断裂带东段有蛇绿岩带(Ye *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2009; 薛怀民等, 2010).对扬子东南缘双溪坞群火山—沉积岩开展的同位素年代学研究表明,双溪坞群形成于 926~849 Ma,而侵入于双溪坞群中的桃红英云闪长岩、西裘花岗闪长岩、高 Mg 闪长岩以及富 Nb 辉绿岩定年结果表明,该套俯冲相关的岩浆岩组合侵入时代为 932~905 Ma(Ye *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2009),其岩石组合类型及地球化学特征表明,双溪坞群可能属于扬子陆核东南缘新元古代早期形成的岛弧地体.在扬子陆核西缘,四川省西部年龄为 $1\ 014 \pm 8$ Ma 的二长花岗岩岩体显示了同碰撞花岗岩的地球化学特征(杨崇辉等, 2009),而云南省昆阳群底部一套与岛弧有关的安山质熔结凝灰岩的定年结果为 $1\ 032 \pm 9$ Ma (Zhang *et al.*, 2007).在扬子陆核西北缘,汉南杂岩中西乡火山岩系年龄为 950~895 Ma,并且由拉斑质玄武岩、钙碱性玄武岩和安山岩组成,显示出典型的大陆岛弧火山岩组合(Ling *et al.*, 2003).另外,最近对四川省旺苍地区一套发育强构造变形变质的变火山岩地层进

行的初步研究表明,其形成于约 880~860 Ma 的新元古代早期,并具有典型岛弧岩浆岩的地球化学特征,可能记录了扬子陆核西北缘早新元古代的另一次与俯冲碰撞相关的地质事件(Berkana *et al.*, 2011).而在扬子陆核, Qiu *et al.* (2011) 在扬子陆核崆岭杂岩西北神农架地区识别出一套格林威尔期陆核构造环境下形成的中基性火山岩岩石组合,锆石 U-Pb 定年结果显示其形成于 $1\ 103 \pm 8$ Ma.基于以上这些新的发现和年代学数据,部分研究者提出有规模扬子陆核可能是多个次一级陆核于 Rodinia 超大陆聚合背景下最终碰撞拼合形成,而非统一整体(Bai *et al.*, 2011; Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2012; 邱啸飞等, 2014).

本文对庙湾蛇绿岩组合中蛇纹石化方辉橄榄岩开展的同位素年代学研究表明其形成时间为 $1\ 063 \pm 12$ Ma,对庙湾蛇绿岩岩石组合的时代作了重要补充.综合目前已有的对扬子陆核黄陵背斜南部太平溪、邓村一带崆岭杂岩庙湾岩组中该套强变形变质超镁铁质—镁铁质岩到斜长花岗岩的年代学和地球化学研究,证明其可能为一套晚中元古代到早新元古代混杂堆积的古大洋蛇绿岩残片,从而支持扬子陆核多板块拼合观点(彭松柏等, 2010; Qiu *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2012; Peng *et al.*, 2012; 本文).

结合区域上前人的工作,本文认为现今规模扬子陆核的形成可能经历了较现有观点来看更为复杂的演化过程,在新元古代之前其可能经历了次一级陆核相互拼接、增生的演化过程.本文的研究表明,就扬子陆核而言,在中元古代末期到新元古代早期其和扬子陆核西侧神农架地区之间很可能存在分隔的大洋,两者可能是由于格林威尔期洋—陆俯冲而最终拼贴在一起。

5 结论

(1) 本文对崆岭杂岩庙湾岩组中蛇纹石化方辉橄榄岩—斜长角闪岩岩石组合进行的同位素稀释法(ID-TIMS)矿物—全岩 Sm-Nd 等时线测年结果表明,该套超基性—基性侵入体的形成年龄为 $1\ 063 \pm 12$ Ma ($n=16$, MSWD=1.4),证明蛇纹石化方辉橄榄岩形成于格林威尔期,为庙湾蛇绿岩组合的重要组成部分。

(2) 蛇纹石化方辉橄榄岩全岩样品具有极低的 Sm、Nd 含量,而 Nd 同位素组成相对均一,暗示 Sm-Nd 同位素体系对于超低含量 (10^{-7}) 超基性岩

样品的定年有效。样品 Nd 同位素两阶段模式年龄为 1.13~1.09 Ga, 与其形成年龄在误差范围内基本一致, 说明其来自亏损软流圈地幔部分熔融。

(3) 结合区域上已有的中元古代末期到新元古代早期构造—岩浆事件研究, 笔者认为在中元古代末期到新元古代早期扬子陆核区与其西侧神农架地区之间很可能存在分隔的大洋。

References

- Bai, X., Ling, W. L., Duan, R. C., et al., 2011. Mesoproterozoic to Paleozoic Nd Isotope Stratigraphy of the South China Continental Nucleus and Its Geological Significance. *Science in China (Ser. D)*, 54(11): 1665—1674.
- Berkana, W., Ling, W. L., Qiu, X. F., et al., 2011. Early Neoproterozoic Arc Magmatism along the Northwestern Margin of the Yangtze Craton and Its Connection with the South China Block Evolution during the Rodinia Assembly. *Mineralogical Magazine*, 75: A54.
- Cawood, P. A., Wang, Y. J., Xu, Y. J., et al., 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A Fragment of Greater India Lithosphere? *Geology*, 41(8): 903—906.
- Chen, K., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2013. 2.6—2.7 Ga Crustal Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472—490.
- Chen, Z. H., Guo, K. Y., Dong, Y. G., et al., 2009. Possible Early Neoproterozoic Magmatism Associated with Slab Window in the Pingshui Segment of the Jiangshan-Shaoxing Suture Zone: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Geochemistry. *Science in China (Ser. D)*, 52(7): 925—939.
- Condie, K. C., 1998. Episodic Continental Growth and Supercontinents: A Mantle Avalanche Connection? *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1): 97—108.
- Deng, H., Kusky, T. M., Wang, L., et al., 2012. Discovery of a Sheeted Dike Complex in the Northern Yangtze Craton and Its Implications for Craton Evolution. *Journal of Earth Science*, 23(5): 676—695. doi: 10.1007/s12583-012-0287-9
- Dilek, Y., Furnes, H., 2011. Ophiolite Genesis and Global Tectonics: Geochemical and Tectonic Fingerprinting of Ancient Oceanic Lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3—4): 387—411.
- Dilek, Y., Furnes, H., Shallo, M., 2007. Suprasubduction Zone Ophiolite Formation along the Periphery of Mesozoic Gondwana. *Gondwana Research*, 11: 453—475.
- Dong, Y. P., Zhou, M. F., Zhang, G. W., et al., 2008. The Grenvillian Songshugou Ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(3—4): 325—335.
- Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses. *American Journal of Science*, 311(2): 153—182.
- Guo, J. L., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2014. 3.45 Ga Granitic Gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean Crustal Growth. *Precambrian Research*, 242(1—2): 82—95.
- Hawkesworth, C., Kemp, A., 2006. Evolution of the Continental Crust. *Nature*, 443(7113): 811—817.
- Huang, T. Q., Li, J. F., Xia, B., et al., 2015. Petrology, Geochemistry, Chronology and Geological Significance of Ophiolite in Middle Segment of Bangonghu-Nujiang Suture Zone, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 34—48 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science in China (Ser. D)*, 52(9): 1393—1399.
- Li, S. L., Wang, X. L., Duan, J. M., et al., 2012. Findings and Its Geological Significance of the Upper Devonian Ophiolite in Hujerte Area, Damao County, Inner Mongolia, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 18—24 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2003. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for Amalgamation and Break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122(1—2): 111—140.
- Ma, Z. P., Xia, L. Q., Xia, Z. C., et al., 2004. Method of Ophiolite Geochronology Study and the Related Problems. *Northwestern Geology*, 37(3): 103—108 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B., Kusky, T. M., Jiang, X. F., et al., 2012. Geology, Geochemistry, and Geochronology of the Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Implications for South China's Amalgamation History with the Rodinian Supercontinent. *Gondwana Research*, 21(2—3): 577—594.
- Peng, S. B., Li, C. N., Kusky, T. M., et al., 2010. Discovery and Its Tectonic Significance of the Proterozoic Miaowan Ophiolites in the Southern Huangling Anticline, Western Hubei, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 8—20 (in Chinese with English abstract).

- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., 2014. Correlation between the Mesoproterozoic Yangtze Continental Nucleus and the Shennongjia Area: Constraints from Zircon Geochronological and Hf Isotope. *Geological Science and Technology Information*, 33(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3–4): 101–119.
- Wu, Y. B., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2012. Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Paleoproterozoic Arc Related Granitoid in the Northwestern Yangtze Block and Its Geological Implications. *Precambrian Research*, 200: 26–37.
- Xue, H. M., Ma, F., Song, X. Q., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of the Neoproterozoic Granitoid Association from Eastern Segment of the Jiangnan Orogen, China: Constraints on the Timing and Process of Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3215–3244 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. H., Geng, Y. S., Du, L. L., et al., 2009. The Identification of the Grenvillian Granite on the Western Margin of the Yangtze Block and Its Geological Implications. *Geology in China*, 36(3): 647–657 (in Chinese with English abstract).
- Ye, M. F., Li, X. H., Li, W. X., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronological and Whole-Rock Geochemical

Evidence for an Early Neoproterozoic Sibao'an Magmatic Arc along the Southeastern Margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12: 144–156.

- Zhang, C. H., Gao, L. Z., Wu, Z. J., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Age of Tuff from the Kunyang Group in Central Yunnan: Evidence for Grenvillian Orogeny in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1517–1525.

附中文参考文献

- 黄强大, 李建峰, 夏斌, 等, 2015. 西藏班公湖—怒江缝合带中段江错蛇绿岩岩石学、地球化学、年代学及地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(1): 34–48.
- 李尚林, 王训练, 段俊梅, 等, 2012. 内蒙古达茂旗胡吉尔特晚泥盆世蛇绿岩的发现及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(1): 18–24.
- 马中平, 夏林圻, 夏祖春, 等, 2004. 蛇绿岩年代学研究方法及应注意的问题. *西北地质*, 37(3): 103–108.
- 彭松柏, 李昌年, Kusky, T. 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. *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. *地质科技情报*, 33(2): 1–8.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等, 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. *岩石学报*, 26(11): 3215–3244.
- 杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 等, 2009. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的厘定及其地质意义. *中国地质*, 36(3): 647–657.