

doi:10.3799/dqkx.2016.023

扬子克拉通北缘神农架地区矿石山组 Pb-Pb 等时线年龄及其地质意义

卢山松^{1,2}, 邱啸飞^{1,2}, 谭娟娟^{1,2}, 吕红^{1,2}, 杨红梅^{1,2}, 王志先³, 钟权³

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

3. 湖北省神农架国家地质公园管理局, 湖北木鱼坪 442421

摘要: 扬子克拉通北缘神农架地区出露了大量中元古代碳酸盐岩地层, 但已有的同位素年代学资料有限, 故对神农架群矿石山组白云岩开展了全岩 Pb-Pb 等时线测年。研究表明, 矿石山组白云岩²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变化范围相对较大, 为 18.753~23.106, 而²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 则变化范围相对较小, 分别为 15.606~16.046 和 37.793~38.599。八件白云岩样品²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 之间呈良好的线性关系, 构成 Pb-Pb 等时线年龄为 $1\,632 \pm 75$ Ma (MSWD=8.7), 代表了矿石山组地层主体沉积时代, 与已有的年代学结果可对应, 表明 Pb-Pb 同位素体系可对古老的碳酸盐岩地层进行较为精确地定年。结合前人对于神农架群的年代学资料, 确定神农架群的沉积时限应为 1 600~1 100 Ma 的中元古代。

关键词: 神农架群; 矿石山组; Pb-Pb 等时线; 中元古代; 碳酸盐岩; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2016)02-0317-08

收稿日期: 2015-08-05

The Pb-Pb Isochron Age of the Kuangshishan Formation in Shennongjia Area on the Northern Margin of the Yangtze Craton and Its Geological Implications

Lu Shansong^{1,2}, Qiu Xiaofei^{1,2}, Tan Juanjuan^{1,2}, Lü Hong^{1,2}, Yang Hongmei^{1,2}, Wang Zhixian³, Zhong Quan³

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

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Hubei Shennongjia National Geopark Administrative Bureau, Muziping 442421, China

Abstract: The Shennongjia Group, located on the northern margin of the Yangtze Craton, shows a series of well-preserved succession of the Mesoproterozoic carbonate strata. However, geochronological data collected from this area are limited. In this study, we report a Pb-Pb isochron age for the Kuangshishan Formation of the Shennongjia Group. The ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios of the dolostone of the Kuangshishan Formation show wide variations from 18.753 to 23.106. On the contrary, the ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb ratios and the ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb ratios have a limited range from 15.606 to 16.046 and 37.793 to 38.599, respectively. 8 dolostone samples data show an obvious linear relationship between ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb, yielding a Pb-Pb isochron age of $1\,632 \pm 75$ Ma (MSWD=8.7) which represent the depositional age for the Kuangshishan Formation. This age accords well with previous published data, indicating that a precise stratigraphic age of the ancient carbonate strata can be obtained through Pb-Pb dating technique. Combined with previous researches, we suggest that the age span of the Shennongjia Group is 1 600 to 1 100 Ma of Mesoproterozoic.

Key words: Shennongjia Group; Kuangshishan Formation; Pb-Pb isochron; Mesoproterozoic; carbonate; petrology.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No.41303026); 中国地质调查局项目(Nos.12120114005701, 1212011121102).

作者简介: 卢山松(1986—), 男, 助理研究员, 硕士, 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

引用格式: 卢山松, 邱啸飞, 谭娟娟, 等, 2016. 扬子克拉通北缘神农架地区矿石山组 Pb-Pb 等时线年龄及其地质意义. 地球科学, 41(2): 317—324.

0 引言

近十多年来,由于测试仪器及分析技术的发展,同位素测年技术在地质学领域起到了重要作用,人们对岩浆岩结晶时代和变质岩变质年龄的约束上取得了大量成果.然而与之相比,对沉积岩沉积时代进行直接测定依然是个难题.近年来,碎屑锆石被广泛应用于沉积岩定年(李怀坤等,2007;李洪颜等,2009;Abati *et al.*,2010;万渝生等,2010;Tucket *et al.*,2013;高福红等,2014;杨恩林等,2014),但获得的年龄仅能限定沉积时代的上限,且研究对象主要适用于碎屑沉积岩(如砂岩等).而对于碳酸盐岩地层而言,由于缺乏碎屑锆石,传统放射性同位素定年就显得尤为重要.自从 Moorbath *et al.*(1987)首次对津巴布韦灰岩直接进行 Pb-Pb 等时线定年以来,国内外的研究者做了大量的后续工作(高劭等,1995,1996;乔秀夫和高劭,1997;Toulkeridis *et al.*,1998;周汉文等,1998;Fölling *et al.*,2000;张巧大等,2002;常向阳等,2004;Chen *et al.*,2004,2009;Gopalan *et al.*,2013;Kuznetsov *et al.*,2013),结果均显示 Pb-Pb 等时线可用于解决碳酸盐岩地层的时代问题.沉积岩 Pb-Pb 等时线方法理论上需要岩石样品中存在相对高的 U 含量,同时在沉积成岩作用过程中 U/Pb 比值要具有足够大的变化范围.在海相碳酸盐岩形成过程中,由于 U 在海水中中度可溶,居留时间较长(1 Ma);与之相比,Pb 在海水中高度不溶且居留时间很短(≤ 50 a).由此,导致海水中具有高 U/Pb 值(最高可达 1 000)以及 μ 值($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)(典型的 μ 值一般从几十到几百)(Chen *et al.*,1986),使得碳酸盐岩理论上成为良好的 U-Pb 及 Pb-Pb 定年对象.

神农架群位于扬子克拉通北缘神农架地区,为一套巨厚的碳酸盐岩地层夹多层火山岩和陆源碎屑岩组合,未见其底界,时代归属传统上认为属中元古代.然而,相较于与之临近的崆岭高级变质地体,目前对于这些沉积—火山岩地层的年代学和系统的地球化学研究仍相对薄弱(Qiu *et al.*,2011;李怀坤等,2013).同时,由于缺乏可靠的同位素年代学数据,对于神农架群层序的划分也出现了多种不同的方案(刘成新等,2004;Qiu *et al.*,2011;李怀坤等,2013;Wang *et al.*,2013).最近报道的为数不多的可靠同位素年代学数据包括:在郑家垭组安山质熔结凝灰岩中获得的锆石 U-Pb 年龄 $1\,103\pm 8$ Ma(Qiu *et al.*,2011);在野马河组凝灰岩中获得的锆石

U-Pb 年龄 $1\,215.8\pm 2.4$ Ma;在大岩坪组砂屑硅质白云岩碎屑锆石中获得的最年轻锆石 U-Pb 年龄为 1.4 Ga 左右(李怀坤等,2013);此外,在郑家垭组、大窝坑组和矿石山组中获得的碎屑锆石最年轻的年龄分别为 1.6 Ga、1.6 Ga 和 2.2 Ga(肖志斌,2012).除此之外,角度不整合于神农架群之上的马槽园群原本被认为是新元古代地层,然而最近的研究似乎暗示马槽园群实际为碳酸盐岩台地上的裂陷槽重力流沉积,其同沉积的凝灰岩锆石($1\,165\pm 14$ Ma 和 $1\,157\pm 19$ Ma)及碎屑锆石表明其时代可能为中元古代末期,与下伏神农架群中上部地层时代相当,原角度不整合面实际可能为冲刷—充填界面(邓奇等,2013;Wang *et al.*,2013).这些已有的研究多是针对神农架群中碎屑沉积岩和火山岩开展,而区内出露最为广泛的与碳酸盐岩相关的同位素年代学研究则相对缺乏.由此可见,神农架群作为扬子克拉通乃至华南陆块为数不多的中元古代沉积—火山地层,对其最具代表性的碳酸盐岩地层进行细致的同位素年代学工作,对于讨论我国南方中元古代地层的划分以及扬子克拉通中元古代构造演化过程等关键地质问题具有重要的意义.

本文在近年来对该地区开展的野外地质调查基础上,对神农架群中的出露最为完善的矿石山组地层进行了 Pb-Pb 等时线研究,对神农架群主体沉积时代归属进行了探讨.

1 区域地质概况

研究区位于扬子克拉通西北缘的鄂西神农架—崆岭地区,位于我国地势第二阶梯的东部边缘,属大巴山脉东延余脉,北以青峰断裂与秦岭造山带为界,南东与黄陵隆起相邻,整体上为中高山地貌,山脉走向与区域地质构造方向线一致.神农架群位于扬子陆块黄陵背斜西北约 70 km 的神农架构造穹窿,总出露面积约为 $1\,830\text{ km}^2$ (图 1).

对于神农架地区的区域地质调查开始于 20 世纪 60 年代早期,区内未见结晶基底岩系出露,神农架群受马槽园群和(或)南华系—震旦系覆盖,变质程度较弱.一直以来,神农架群被认为归属于中元古代,但缺乏可靠的同位素年代学数据,对于其中分组也存在较大的分歧.1974 年神农架群首先被湖北省地质调查院分成了 8 个组,随后天津地质矿产研究所(现天津地质调查中心)提出了另一种 11 个组的划分方案(李铨和冷坚,1987).湖北省地质调查院在

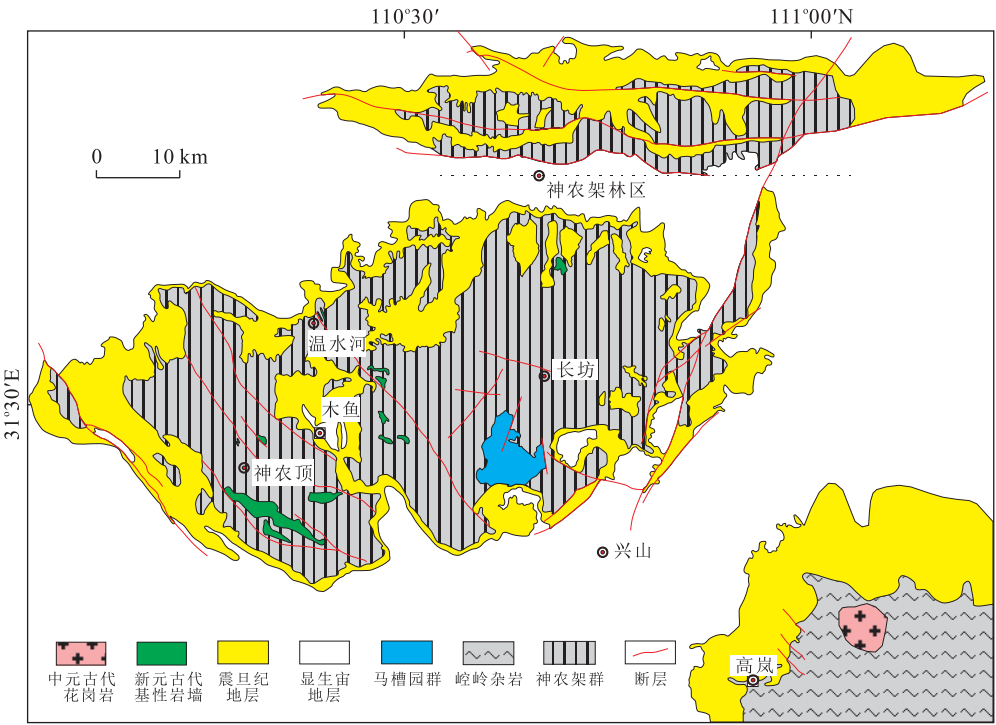


图 1 神农架地区地质简图
Fig.1 Geological sketch of Shennongjia region
据 Qiu et al. (2011) 修改

2004 年开展的 1 : 25 万区调中又对神农架群的划分提出了新的看法,将这 11 个组合并为 4 个组,并对之前的地层顺序进行了调整,即将神农架群划分为:郑家垭组、石槽河组、大窝坑组和矿石山组 4 个岩石地层单位以及石槽河组大岩坪岩楔这个非正式填图单位,并从原神农架群中解体出新元古代青白口纪凉风垭组(刘成新等,2004).目前,被大众广泛接受的分组方案依然是由李铨和冷坚(1987)提出的,仅在神农架群顶部增加了一个郑家垭组(Qiu et al.,2011;李怀坤等,2013).综合来看,本文主张将神农架群分为 12 个组,从底向上由鹰窝洞组、大岩坪组、乱石沟组、大窝坑组、矿石山组、台子组、野马河组、温水河组、石槽河组、送子园组、瓦岗溪组以及郑家垭组构成(图 2).目前神农架群沉积岩同位素年代学的研究积累仍相对有限.20 世纪 80 年代前人对神农架群台子组上部的炭质页岩进行 U-Pb 等时线研究,获得的年龄为 $1\,332\pm67\text{ Ma}$,而对野马河组白云岩的研究则获得了精度不太高的 $1\,307\pm100\text{ Ma}$ 的 Pb-Pb 等时线年龄.此外,对神农架群中不同层位的石英砂岩进行了碎屑锆石 U-Pb 年代学研究,揭示其年龄谱中最主要的峰值约为 1.6 Ga (肖志斌,2012).

本文主要对神农架群中部的矿石山组进行研究,

矿石山组厚度约为 442 m,主要为灰色中—薄层细—泥晶白云岩和叠层石白云岩.研究样品采自神农架景区内矿石山附近(图 1),样品主要沿公路边神农架群标准剖面选择岩石变形相对较弱的矿石山组进行采集(图 2),共采集 9 件白云岩样品,岩性主要为泥晶白云岩、泥质条带白云岩以及含叠层石白云岩.

2 分析方法及测试结果

全岩 Pb 同位素分析在武汉地质调查中心同位素地球化学研究室完成.称取 100 mg 岩石样品于 Teflon(聚四氟乙烯)低压密封溶样罐中,加入 6 mol/L 的 HCl 和 6 mol/L 的 HNO₃ 各 4 mL,将溶样罐置于电热板上于 190 ℃ (7 d) 分解样品,待样品全溶后蒸干,加入适量 6 mol/L 的 HCl 2~3 次并蒸干,最后加入适量体积比为 1 : 1 的 HBr 和 HCl 混合酸.将已转化成混合酸介质的样液进行离心分层,取上层清液,通过 AG-1×8(200~400 目)阴离子树脂交换柱.样品上柱交换前,先用高纯水和 6 mol/L 的 HCl 交替清洗交换柱 2~3 次.样品上柱后,用 5~10 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 HBr 淋洗杂质两次,再用 5 mL 浓度为 0.5 mol/L 的 HCl 淋洗一次,最后

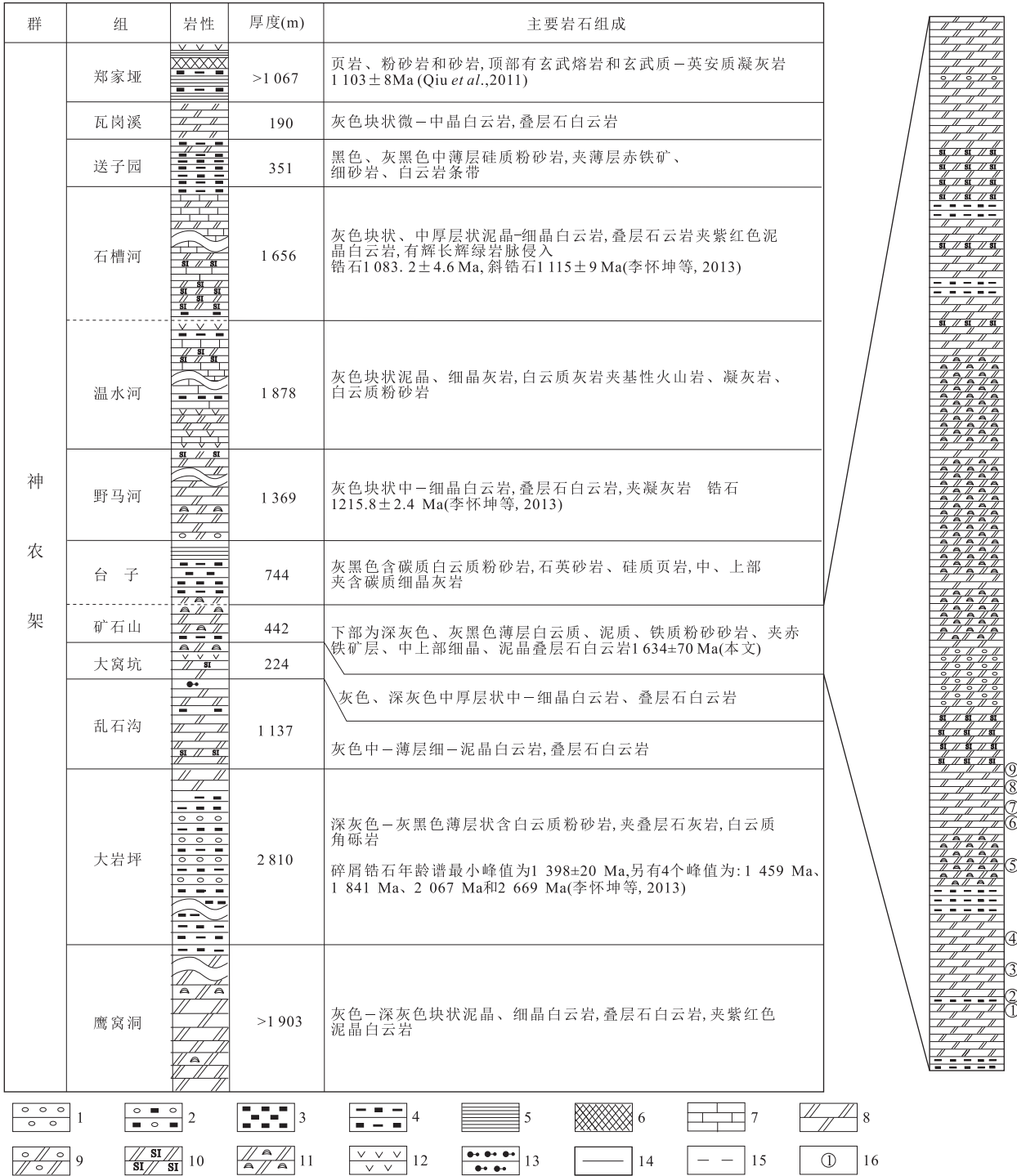


图 2 神农架地区中元古代地层柱状图及采样点位

Fig.2 Mesoproterozoic stratigraphic histogram of the Shennongjia area and the sampling locations of the Kuangshishan Formation 1.砾岩;2.砂砾岩;3.砂岩;4.粉砂岩;5.页岩/板岩;6.燧石;7.石灰岩;8.白云岩;9.角砾状白云岩;10.硅质条带白云岩;11.叠层石白云岩;12.火山岩;13.凝灰岩;14.整合接触关系;15.平行不整合接触关系;16.采样点;据李怀坤等(2013)修改

用10 mL 浓度为 6 mol/L 的 HCl 解析 Pb.实验用的 HCl、HNO₃ 和 HBr 均为市售优级纯并经过亚沸蒸馏两次,实验用水均为二次去离子水.

将金属铯带焊接于支架上,置于去气装置中约 5A 电流下去气 20 min.再将硅胶溶液、硼砂溶液、样品 Pb、体积分数为 3%的 H₃PO₄ 依次点在铯带上.Pb 同位素比值的测定在 TIMS(Finnigan MAT-261)上完成.样品铅同位素比值的内部精度优于0.1%,重复样的测定结果在误差范围内一致,全流程空白为<2 ng.

表 1 神农架群矿石山组 Pb 同位素组成

Table 1 Pb isotope compositions of carbonate rocks from the Kuangshishan Formation, Shennongjia Group

序号	样号	岩性	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2δ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2δ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2δ
1	12SNJ-72	块状白云岩	19.038	0.005	15.641	0.004	38.135	0.006
2	12SNJ-73	含黑色叠层石白云岩	19.774	0.005	15.707	0.004	37.897	0.008
3	12SNJ-75	块状白云岩	18.753	0.002	15.606	0.002	37.793	0.004
4	12SNJ-76	块状白云岩	20.322	0.007	15.740	0.006	38.341	0.009
5	12SNJ-77	含黑色叠层石白云岩	18.433	0.004	15.625	0.004	38.241	0.010
6	12SNJ-78	泥质条带白云岩	23.106	0.003	16.046	0.002	38.100	0.005
7	12SNJ-81	泥质条带白云岩	19.621	0.005	15.711	0.004	38.016	0.007
8	12SNJ-83	含叠层石白云岩	19.786	0.006	15.719	0.008	38.599	0.003
9	12SNJ-84	块状白云岩	21.076	0.005	15.830	0.004	38.114	0.001

采用美国国家标准物质 NBS981 监测仪器状态, NBS981 的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 测定平均值为 0.914 55 ± 0.000 05, 与其推荐值(0.914 64 ± 0.000 33)在误差范围内完全一致, 表明测试数据可靠可信。

本文对采自神农架群矿石山组的 9 件样品进行了 Pb 同位素分析, 分析结果列于表 1 中, 结果显示矿石山组白云岩²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变化范围相对较大, 为 18.433 ~ 23.106, 而²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 则变化范围相对较小, 分别为 15.606 ~ 16.046 和 37.793 ~ 38.599。

Pb-Pb 等时线年龄采用 ISOPLOT 软件(V3.41)计算, 9 件样品构成的等时线年龄为 1 593 ± 130 Ma(MSWD=28), 相对于等时线 12SNJ-77 明显偏离, 将该点剔除后剩余的 8 件样品构成的 Pb-Pb 等时线年龄为 1 632 ± 75 Ma(MSWD=8.7)。

3 讨论

3.1 神农架群矿石山组沉积时代

长期以来, 有关沉积岩直接定年是同位素年代学研究的难点之一, 目前较为普遍的做法是通过古生物化石组合来对沉积地层时代进行判定(Westerhold *et al.*, 2008)。然而对于化石组合较少完整保存的前寒武纪变沉积地层, 则仍难以对其沉积时代进行直接测定。对陆源碎屑沉积岩而言, 目前多利用其所含碎屑锆石进行 U-Pb 同位素年代学测定, 通过最年轻的碎屑锆石年龄来约束最老的沉积年龄。而对缺乏碎屑物质的碳酸盐岩沉积岩, 则多利用 K-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd 等时线等测年方法进行直接测定。然而在许多情况下, 由于在沉积岩后期成岩过程中这些同位素体系容易受到影响, 导致传统的 K-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd 等时线法等常用定年方法在对碳酸盐岩, 尤其是前寒武纪碳酸盐岩的测年成功率不

高(Chen *et al.*, 2009)。与之相比, 由于 U-Pb 同位素体系母子体元素在海水中居留时间的差异, 使得 Pb-Pb 等时线法在近年来对古老碳酸盐岩的定年中往往能够获得较为理想的结果(张巧大等, 2002; Gopalan *et al.*, 2013; Kuznetsov *et al.*, 2013)。

对神农架群矿石山组的年代学研究, 目前只有肖志斌(2012)对该组石英粉砂岩中的碎屑锆石进行了 U-Pb 定年分析, 其结果表明, 矿石山组碎屑锆石的年龄谱中峰值分别在 2.2 Ga 左右、2.8 Ga 左右和 3.2 Ga 左右, 且最年轻的碎屑锆石在 1.6 Ga 左右(只有一颗), 显示其沉积时代不应早于 1.6 Ga。本文 8 件样品获得的矿石山组白云岩全岩 Pb-Pb 等时线年龄为 1 632 ± 75 Ma(图 3), 与该岩组碎屑岩中最年轻的碎屑锆石年龄几乎一致, 对神农架群年代学数据作了重要补充, 其结果应该是真实可信的, 表明矿石山组地层主体沉积时代应在中元古代早期。结合区域上已有的研究成果, 说明神农架群确实为华南陆块为数不多的中元古代沉积地层。

3.2 对神农架群地层划分方案的约束

以往对于神农架群同位素年代学的积累较少, 最早是由李铨和冷坚(1987)将其时代限定为 1 650 ~ 1 000 Ma, 而将上覆马槽园群的时代限定为 1 000 ~ 800 Ma, 同时将神农架群分为上下两个亚群和 11 个组, 并认为上下亚群之间的界线年龄约为 1 400 Ma。然而限于当时的分析技术条件, 其时代划分依据是不够充分的(李怀坤等, 2013)。

湖北省地质调查院在 2002—2004 年期间 1 : 25 万的神农架幅区调工作基础上, 将神农架群原有的分组情况作了重大修改, 将其合并重整为 4 个组, 认为郑家垭组为神农架群底部, 而矿石山组则在神农架群的顶部, 并在神农架群之上创建一个新的地层——凉风垭组(刘成新等, 2004)。该研究表明神农架群底部郑家垭组为一套以陆源碎屑岩为主地层,

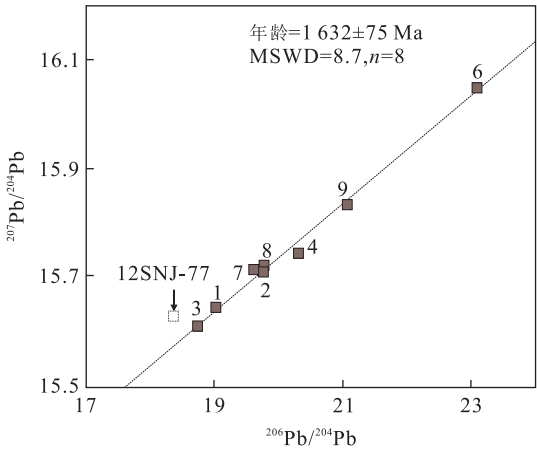


图 3 神农架群矿石山组 Pb-Pb 等时线
Fig.3 Pb-Pb isochron of carbonate rocks from the Kuangshishan Formation, Shennongjia Group

上覆巨厚以碳酸盐岩为主的海相地层。

Liu *et al.* (2010)沿用了湖北省地质调查院的划分方法对神农架群顶底层位的凉风垭组和郑家垭组中的碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素分析, 结果发现两套地层中碎屑锆石的年龄谱组成相似, 其中最年轻的碎屑锆石年龄为~1.6 Ga. 同样的, 肖志斌 (2012)对郑家垭组、大窝坑组、矿石山组以及凉风垭组的碎屑锆石进行了分析: 郑家垭组总体显示出约 1.6 Ga、约 1.8 Ga 和 2.9 Ga 的峰值年龄特征; 大窝坑组峰值年龄出现在 1.6 Ga、2.0 Ga 和 2.7~2.8 Ga; 矿石山组年龄峰值为约 2.2 Ga、约 2.8 Ga 和约 3.2 Ga; 凉风垭组的年龄峰值为 2.1 Ga、2.8 Ga 和约 3.2 Ga. 肖志斌 (2012)将郑家垭组沿用湖北地质调查院建组时的定义, 将其做为神农架群底部地层单元, 同时结合其中火山岩的年龄 (Qiu *et al.*, 2011), 将神农架群底部的年龄限定于 1 150 Ma. 结合本地区缺少 1.0~0.8 Ga 锆石年龄的特征, 作者认为神农架群是在中元古代晚期沉积形成, 并将沉积时代限定在 1 150~1 000 Ma.

然而, Qiu *et al.* (2011)最近报道了郑家垭组中安山质熔结凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 103±8 Ma, 从而认为郑家垭组应为神农架群的顶部地层, 其年龄应大致代表了神农架群的沉积上限, 该文同时主张仍采用天津地质矿产研究所提出的神农架群地层划分方案, 只是基于湖北省地质调查院的区调研究在其顶部加上一个新的组 (郑家垭组). 随后, 李怀坤等 (2013)沿用 Qiu *et al.* (2011)对神农架群提出的划分方案对神农架群碎屑岩地层中碎屑锆石年龄组成进行了分析. 其结果表明, 神农架群大岩坪

组砂屑硅质白云岩中最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄值约为 1 400 Ma, 指示神农架群的沉积时代最早应不超过 1 400 Ma. 在综合了侵入石槽河组中的辉长辉绿岩的斜锆石年龄及郑家垭火山岩锆石年龄后, 该研究表明神农架群沉积时代应限定在 1 400~1 100 Ma.

由此可见, 无论是对于神农架群的地层层序问题还是沉积时代问题, 不同的研究者仍然抱有很大分歧. 本文结果显示神农架群下亚群顶部矿石山组主体沉积年龄约为 1.6 Ga, 这一年龄明显老于已报道的郑家垭组火山岩年龄 (Qiu *et al.*, 2011), 支持 Qiu *et al.* (2011)和李怀坤等 (2013)将郑家垭组作为神农架群最顶部地层单元的划分方案. 本文的研究结果同时表明神农架群底界沉积时代不会晚于 1 600 Ma, 这与肖志斌 (2012)获得的神农架群不同地层的碎屑锆石年龄谱最年轻的峰值年龄 (约 1.6 Ga) 相一致, 结合已报道的郑家垭组中火山岩的锆石 U-Pb 年龄结果, 暗示将神农架群的沉积时代限定于 1 600~1 100 Ma. 然而需要指出的是, 大岩坪组虽然为下伏于矿石山组的地层, 但是在其碎屑锆石年龄谱中却出现了小于矿石山组沉积年龄的年龄值, 这说明在神农架亚群内部层序仍需要进一步进行厘清, 包括矿石山组顶部的不整合面的代表意义也尚不明确. 显然仅凭目前对神农架群开展的基础地质和同位素年代学研究还无法对这些关键地质问题进行解答, 需要在未来野外地质调查和室内科学研究方面做出努力.

致谢: 匿名审稿人对本文提出了宝贵的意见和建议, 笔者在此表示衷心的感谢!

References

Abati, J., Aghzer, A.M., Gerdes, A., et al., 2010. Detrital Zircon Ages of Neoproterozoic Sequences of the Moroccan Anti-Atlas Belt. *Precambrian Research*, 181 (1-4): 115-128. doi:10.1016/j.precamres.2010.05.018

Chang, X.Y., Chen, L.Z., Hu, S.X., et al., 2004. Pb-Pb Isotope Dating of the Chengjiang Fauna-Bearing Beds. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 181-184 (in Chinese with English abstract).

Chen, J.H., Edwards, R.L., Wasserburg, G.J., 1986. ²³⁸U, ²³⁴U and ²³²Th in Seawater. *Earth and Planetary Science Letters*, 80(3-4): 241-251. doi:10.1016/0012-821X(86)90108-1

Chen, D.F., Dong, W.Q., Zhu, B.Q., et al., 2004. Pb-Pb Ages of Neoproterozoic Doushantuo Phosphorites in South

- China: Constraints on Early Metazoan Evolution and Glaciation Events. *Precambrian Research*, 132(1-2): 123-132. doi:10.1016/j.precamres.2004.02.005
- Chen, Y. Q., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2009. Pb-Pb Dating of Black Shales from the Lower Cambrian and Neoproterozoic Strata, South China. *Chemie der Erde*, 69(2): 183-189. doi:10.1016/j.chemer.2008.12.005
- Deng, Q., Wang, J., Wang, Z. J., et al., 2013. New Evidence for the Age of the Macaoyuan Group on the Northern Margin of the Yangtze Block, South China—Implications for Stratigraphic Correlation and Palaeogeographic Framework. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 631-638 (in Chinese with English abstract).
- Förling, P. G., Zartman, R. E., Frimmel, H. E., 2000. A Novel Approach to Double-Spike Pb-Pb Dating of Carbonate Rocks: Examples from Neoproterozoic Sequences in Southern Africa. *Chemical Geology*, 171(1-2): 97-122. doi:10.1016/S0009-2541(00)00204-7
- Gao, F. H., Yang, Y., Wang, F., et al., 2014. Determination of the Early Paleozoic Strata in Eastern Heilongjiang Province: Evidence from Field Geology and Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 39(5): 499-508 (in Chinese with English abstract).
- Gao, M., Qiao, X. F., Liu, D. Y., et al., 1995. Direct Determination of the Pb-Pb Age of Carbonate Rocks of the Sailinhudong Formation of Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 4: 348-352 (in Chinese with English abstract).
- Gao, M., Liu, D. Y., Li, Y. A., 1996. Direct Dating of Carboniferous Coral Fossils from Carbonate Using Pb-Pb Isotopic Method. *Geological Review*, 42(1): 22-29 (in Chinese with English abstract).
- Gopalan, K., Kumar, A., Kumar, S., et al., 2013. Depositional History of the Upper Vindhyan Succession, Central India: Time Constraints from Pb-Pb Isochron Ages of Its Carbonate Components. *Precambrian Research*, 233: 108-117. doi:10.1016/j.precamres.2013.04.014
- Kuznetsov, A. B., Ovchinnikova, G. V., Gorokhov, I. M., et al., 2013. Age Constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from Combined Sr Isotopes and Pb-Pb Dating of Carbonates from the Baikal Type Section, Southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 51-66. doi:10.1016/j.jseas.2011.06.003
- Li, H. K., Lu, S. N., Xiang, Z. Q., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Geochronological Research on Detrital Zircons from Complex-Group in the Western Segment of the North Qilian Mountains, Northwest China. *Geological Review*, 53(1): 133-140 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Zhang, C. L., Xiang, Z. Q., et al., 2013. Zircon and Baddeleyite U-Pb Geochronology of the Shennongjia Group in the Yangtze Craton and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 673-697 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., Xu, Y. G., Huang, X. L., et al., 2009. Activation of Northern Margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotopes of Detrital Zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu-Jingle Basin. *Chinese Science Bulletin*, 54(4): 677-686. (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Leng, J., 1987. The Upper Precambrian in the Shennongjia Region. Tianjin Science and Technology Press, Tianjin (in Chinese).
- Liu, C. X., Mao, X. W., Wei, Y. X., et al., 2004. A Preliminary Research on Stratigraphic Sequence of Shengnong Group. *Resources Environment & Engineering*, 18(Suppl.): 5-16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Ling, W. L., Gao, S., 2010. Proterozoic Crustal Evolution of Yangtze Craton Revealed by Detrital Zircons from Shennongjia Area, South China. In: 19th V. M. Goldschmidt Conference, Knoxville (United States). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(12): A621.
- Moorbath, S., Taylor, P. N., Orpen, J. L., et al., 1987. First Direct Radiometric Dating of Archaean Stromatolitic Limestone. *Nature*, 326: 865-867. doi: 10.1038/326865a0
- Qiao, X. F., Gao, M., 1997. Carbonate Pb-Pb Isotopic Dating of Qingbaikouan System in Northern China and Its Significance. *Earth Science*, 22(1): 1-7 (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. doi: 10.1016/j.precamres.2011.09.011
- Toulkeridis, T., Goldstein, S. L., Clauer, N., et al., 1998. Sm-Nd, Rb-Sr and Pb-Pb Dating of Silicic Carbonates from the Early Archaean Barberton Greenstone Belt, South Africa: Evidence for Post-Depositional Isotopic Resetting at Low Temperature. *Precambrian Research*, 92(2): 129-144. doi:10.1016/S0301-9268(98)00071-0
- Tucker, R. T., Roberts, E. M., Hu, Y., et al., 2013. Detrital Zircon Age Constraints for the Winton Formation, Queensland: Contextualizing Australia's Late Cretaceous Dinosaur Faunas. *Gondwana Research*, 24(2): 767-779. doi:10.1016/j.gr.2012.12.009
- Wan, Y. S., Miao, P. S., Liu, D. Y., et al., 2010. Formation Ages and Source Regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo

- and Dongjiao Groups in the Wutai and Dongjiao Areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb Dating of Detrital Zircons; Resolution of Debates over Their Stratigraphic Relationships. *Chinese Science Bulletin*, 55 (7): 572—578 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Deng, Q., Wang, Z. J., et al., 2013. New Evidences for Sedimentary Attributes and Timing of the “Macaoyuan Conglomerates” on the Northern Margin of the Yangtze Block in Southern China. *Precambrian Research*, 235: 58—70. doi:10.1016/j.precamres.2013.06.003
- Westerhold, T., Röhl, U., Raffi, I., et al., 2008. Astronomical Calibration of the Paleocene Time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 257 (4): 377—403. doi:10.1016/j.palaeo.2007.09.016
- Xiao, Z. B., 2012. Research of the Detrital Zircon from Mesoproterozoic Sedimentary Strata in the North Margin of Yangtze Craton, China (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 28—39 (in Chinese with English abstract).
- Yang, E. L., Lü, X. B., Shi, P., et al., 2014. Detrital Zircon Age of Stratigraphic Sinian-Cambrian in East Guizhou and Its Geological Significance. *Earth Science*, 39 (4): 387—398 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. D., Song, T. R., He, Z. J., et al., 2002. Pb-Pb Age Determination of Meso- to Neoproterozoic Carbonates in the Ming Tombs District, Beijing. *Geological Review*, 48 (4): 416—423 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. W., Li, X. H., Liu, Y., et al., 1998. Pb-Pb Dating of Marbles from Longxiu Area within Yunkai Complex and Its Geological Implication. *Geoscience*, 12 (2): 180—184 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 常向阳, 陈良忠, 胡世学, 等, 2004. 含澄江动物群地层的 Pb-Pb 同位素定年. *地球学报*, 25 (2): 181—184.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 等, 2013. 扬子北缘元古宇马槽园群时代归属新证据——对地层对比和古地理格局的启示. *地质通报*, 32 (4): 631—638.
- 高福红, 杨扬, 王枫, 等, 2014. 黑龙江省东部早古生代地层的确定: 地质与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. *地球科学*, 39 (5): 499—508.
- 高励, 刘敦一, 李永安, 1996. 用 Pb-Pb 同位素方法直接测定石炭系碳酸盐岩珊瑚化石年龄. *地质论评*, 42 (1): 22—29.
- 高励, 乔秀夫, 刘敦一, 等, 1995. 直接测定内蒙古腮林忽洞组碳酸盐岩 Pb-Pb 同位素年龄. *中国区域地质*, 4: 348—352.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等, 2007. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *地质论评*, 53 (1): 133—140.
- 李怀坤, 张传林, 相振群, 等, 2013. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. *岩石学报*, 29 (2): 673—697.
- 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 等, 2009. 华北克拉通北缘晚古生代活化: 山西宁武—静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素证据. *科学通报*, 54 (5): 632—640.
- 李铨, 冷坚, 1987. 前寒武纪地质研究: 神农架上前寒武系. 天津: 天津科学技术出版社.
- 刘成新, 毛新武, 魏运许, 等, 2004. 神农架群地层层序初探. *资源环境与工程*, 18 (增刊): 5—16.
- 乔秀夫, 高励, 1997. 中国北方青白口系碳酸盐岩 Pb-Pb 同位素测年及意义. *地球科学*, 22 (1): 1—7.
- 万渝生, 苗培森, 刘敦一, 等, 2010. 华北克拉通高凡群、溁沱群和东焦群的形成时代和物质来源: 碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约. *科学通报*, 55 (7): 572—578.
- 肖志斌, 2012. 中元古代扬子北缘神农架地区沉积岩碎屑锆石研究 (硕士学位论文). 西安: 西北大学, 28—39.
- 杨恩林, 吕新彪, 石平, 等, 2014. 黔东南震旦—寒武系转换期碎屑锆石年龄及其地质意义. *地球科学*, 39 (4): 387—398.
- 张巧大, 宋天锐, 和政军, 等, 2002. 北京十三陵地区中—新元古界碳酸盐岩 Pb-Pb 年龄研究. *地质论评*, 48 (4): 416—423.
- 周汉文, 李献华, 刘颖, 等, 1998. 粤西龙修地区大理岩的 Pb-Pb 年龄及其地质意义. *现代地质*, 12 (2): 180—184.