



移动阅读

兰中伍, 2023. 华南南华系年代地层学研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 180–187. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01001)

LAN Z W, 2023. Research progress on the chronostratigraphic study of Nanhua System in South China.[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 180–187. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01001)

华南南华系年代地层学研究进展

兰中伍^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学与地层学国家重点实验室, 江苏 南京 2100083; 3. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 华南南华系对应于国际上的成冰系, 关于其沉积时限长期存在争议。近十余年来, 通过高精度锆石 U-Pb 定年, 已经基本敲定南华系的重要时间节点。长安组底界年龄被限定在 ca. 717 Ma, 莲沱组顶部沉积时间被限定在 ca. 714 Ma。长安冰期中期暂时冰退的时间被限定在 ca. 690 Ma, 冰期终止时间限定在 ca. 659 Ma。小行星撞击地球可能导致了长安冰期中期的暂时冰退, 这期间形成的风暴沉积构造和丘状交错层理可以提供最直接的沉积学证据。结合世界其它地区报道的年龄, 斯图特(长安)冰期的起止时间限定在了 717~659 Ma。马力诺(南沱)冰期的启动时间被大致限定为 649 Ma, 终止时间被限定在 ca. 635 Ma。结合世界其它地区年龄数据, 马力诺冰期的启动时间可限定在 649~639 Ma。随着后续工作的深入, 马力诺冰期的启动时间范围应会被进一步缩小。华南南华系沉积时限的准确厘定对于理解全球成冰纪地质-生物-环境事件具有重要意义。马力诺冰期持续时间约 14 Myr, 远远小于长安冰期的持续时间(约 58 Myr)。冰期末期大规模岩浆作用是导致这两次冰期持续时间不同的直接原因。通过模拟计算发现, 扬子北缘裂谷岩浆作用可以促使马力诺冰期提前 2~5 Myr 结束。

关键词: 南华系; 成冰系; 沉积时代; 长安组; 南沱组

中图分类号: P597

文献标识码: A

Research progress on the chronostratigraphic study of Nanhua System in South China.

LAN Zhongwu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 19 Beitucheng Xilu, Chaoyang District, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 2100083, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Nanhua system in South China correlates with the Cryogenian, depositional age of which remains disputed. In the past decade, key depositional age points of the Nanhua system have been ascertained by means of high precision zircon U-Pb

收稿日期: 2022-12-27; 改回日期: 2023-01-04; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 兰中伍(1981—), 副研究员, 主要从事前寒武纪年代地层学研究。E-mail: lzw1981@126.com

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42273025), 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室开放课题(SKLL-Z202001), 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学与地层学国家重点实验室开放课题(223115), 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(GPMR201902)

geochronology. The basal Chang'an Formation is constrained to be ca. 717 Ma, whereas the top Liantuo Formation is constrained to be ca. 714 Ma. Glacial retreat during the middle Chang'an glacial period is constrained to be ca. 690 Ma, and the final glacial retreat for the Chang'an glacial period is constrained to be ca. 659 Ma. In combination with radiometric ages reported from other worldwide regions, the initiation and termination age of the Sturtian glaciation is constrained to be ca. 717-659 Ma. The onset and termination ages of Nantuo glaciation are roughly constrained to be ca. 649 Ma and ca. 635 Ma, respectively. In combination with radiometric ages reported from other worldwide areas, the onset age of the Marinoan glaciation can be constrained to be ca. 649-639 Ma. With ongoing work in future, age span for the initiation of Marinoan glaciation can be further shortened. Precisely dating the depositional age of the Nanhua System in South China will aid us in understanding the global geological and biological events during the glaciation. The duration of Marinoan glaciation is constrained to be ca. 14 Myr, which is much shorter than that of the Sturtian glaciation (ca. 58 Myr). Large-scale magmatism in the end of glaciation is the main reason that induced the difference in the time span of these two glaciations. By means of calculation and climate modelling, we found that magmatism in the northern Yangtze Block can foreshorten the Marinoan glaciation to 2-5 Myr.

Key words: Nanhua system; Cryogenian; depositional age; Chang'an Formation; Nantuo Formation

0 引言

成冰纪因发生了全球性的冰川事件而得名。成冰纪时,地球表面经历了两次全球性的冰川事件,被厚厚的冰雪覆盖,厚度可达几百米至几千米,又称为雪球地球事件,包括早期的斯图特(Sturtian, 720~660 Ma)冰川事件和晚期的马力诺(Marinoan, 650~635 Ma)冰川事件(Hoffman et al., 2017)。当时地球表面温度下降到零下 50 摄氏度,这种极端压抑的气候条件严重扰动了海洋和大气的化学组成,限制了生命的演化。从另一方面来讲,雪球地球事件发生在罗迪尼亚超大陆裂解和冈瓦纳超大陆聚合的转折期。这一关键时期发生的地质—生物—环境事件有机地联系在一起,引起了国内外交叉学科的广泛关注,从不同学科、不同视角发表了大量的高质量文章(Hoffman et al., 2017)。

任何重大事件的研究都需要首先建立精准的时间框架,成冰系也不例外。近些年来,针对不同的研究对象,选用不同的分析技术,围绕成冰系积累了大量的年代学数据,更新了我们对冰期发生时间和持续时间的认识。当然,这些年代地层学工作也离不开我们中国学者的重要贡献(Lan et al., 2014, 2015a, b, 2020; Liu et al., 2015; Jiang et al., 2016; Yu et al., 2016; Wang et al., 2016, 2019; Song et al., 2017; Zhou et al., 2019)。华南的南华系对应于国际上的成冰系,长安冰期和南沱冰期分别对应于国际上的斯图特冰期和马力诺冰期。深水相区南华系和下伏拉伸系地层出露完整,保存完好(张启锐和兰中伍, 2016)。本文系统总结了近些年来

围绕华南南华系开展的高精度锆石 U-Pb 年代学工作, 以期为进一步工作提供借鉴。

1 南华系沉积时代

南华系在湖南—贵州—广西交界地区广泛出露,在这一带开展的年代地层学工作也最多。笔者详细总结了湖南—贵州—广西—湖北四个地区共 7 条剖面的年代地层学工作,地理区域涵盖广西省三江县、湖南省石门县,湖南省龙山县、贵州省将军山、贵州省松桃县、湖北省九龙湾和湖北省长阳县(图 1)。华南南华盆地的南华系从下至上依次包括长安组、富禄组、古城组、大塘坡组和南沱组,岩性组成依次为冰川杂砾岩、砂岩、含砾砂岩、粉砂岩/页岩和冰川杂砾岩。长安组和南沱组冰川杂砾岩分别沉积于斯图特冰期和马力诺冰期。古城组含砾砂岩也沉积于斯图特冰期,为斯图特冰期的末期冰期(张启锐和储雪蕾, 2006; 朱茂炎等, 2016; Hu and Zhu, 2020)。富禄组砂岩在斯图特冰期间冰期时沉积形成,大塘坡组粉砂岩/页岩沉积于斯图特冰期—马力诺冰期的间冰期。

1.1 斯图特(长安)冰期

南华系底界年龄长期存在争议(周传明, 2016; 张启锐和兰中伍, 2016)。由于冰川侵蚀作用,冰川杂砾岩和下伏地层为不整合接触,所以下伏地层的沉积时代不能用来准确限定冰川杂砾岩的初始沉积时间。另外,有的剖面虽然连续,拉伸系和成冰系整合接触,但是前人从边界处采集的火山灰里碎屑物质较多,混入了一些碎屑锆石或者继承锆石,这些锆石的年龄只能代表采样层位的最大沉积时

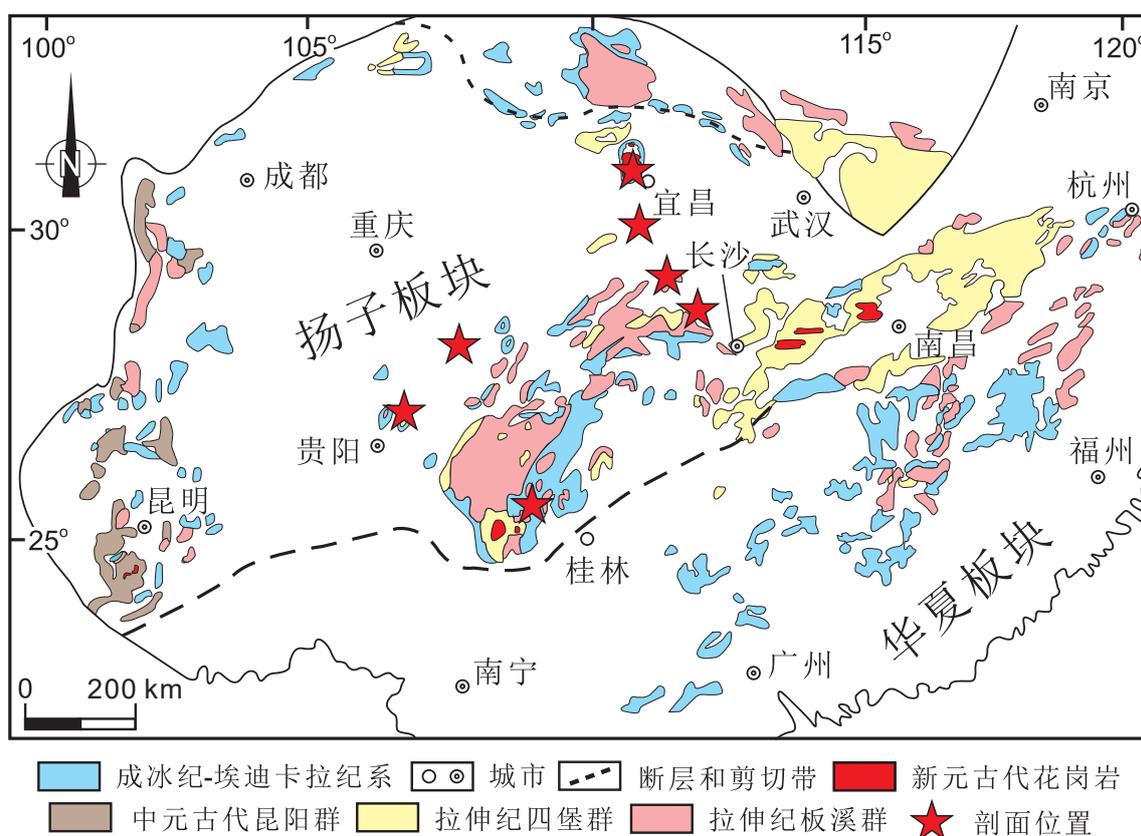


图1 华南南华盆地年代地层学工作的代表性剖面 (修改自 Zhou et al., 2019)

Fig. 1 Representative sections for chronostratigraphic study in the Nanhua Basin of South China (modified from Zhou et al., 2019)

间。基于这些原因,南华系底界年龄最初被限定在了 850~780 Ma。

Lan et al.(2014)通过多年野外考察,在湘黔桂交界地区发现了两条深水相剖面,那里拉伸系和成冰系出露完整,保存完好,拉伸系和成冰系地层整合接触。更重要的是,在拉伸系和成冰系边界处发现了火山凝灰岩,通过锆石 Cameca IMS 1280 SIMS U-Pb 定年,得到了 715.9 ± 2.8 Ma 和 716.1 ± 3.4 Ma 的年龄。随后,在相同层位不同剖面,柏道远等(2015)从板溪群岩门寨组顶部得到了一个 717.2 ± 8.9 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; Jiang et al.(2016)从开建桥组顶部得到了一个 715.0 ± 9.8 Ma 的锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄和一个 718.8 ± 9.4 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; Wang et al.(2016)从丹洲群拱洞组顶部得到了一个 716.8 ± 6.8 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; Song et al.(2017)从板溪群顶部得到了一个 714.6 ± 5.2 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; 蔡娟娟等(2018)从长安组底部获得了一个 719.6 ± 6.1 Ma 的锆石 LA-

ICP-MS U-Pb 年龄(图 2)。这些年龄和 Lan et al.(2014)报道的年龄在误差范围内相一致,进一步证实了南华系底界年龄大致为 720 Ma 是可靠的。

Lan et al.(2020)在 Lan et al.(2014)研究基础上,经过进一步高精度锆石 TIMS U-Pb 定年,得到了一个 720.2 ± 1.4 Ma 的年龄,代表采样层位的沉积时代。因采样层位距离南华系底界还有一段沉积间隔(约 20 m),运用蒙特卡洛模拟方法把成冰系的底界年龄限定在了 717.61 ± 1.65 Ma。MacDonald et al.(2010, 2018)从加拿大西北部地区成冰系底界得到了 716.9 ± 0.4 Ma 和 717.4 ± 0.1 Ma 的年龄。Bowring et al.(2007)从阿曼地区成冰系冰川杂砾岩内获得了一个 714.2 ± 0.6 Ma 的年龄,这个年龄源自冰川杂砾岩内部,说明冰川杂砾岩的初始沉积时间应该大于 714 Ma。综合考虑年龄误差和采样层位, Lan et al.(2014, 2020)的年龄和加拿大西北部地区及阿曼地区的年龄相一致,说明冰川杂砾岩的初始沉积时间是全球同步的,斯图特冰期的全球启动时间是同时的,精确限定为 ca. 717 Ma。

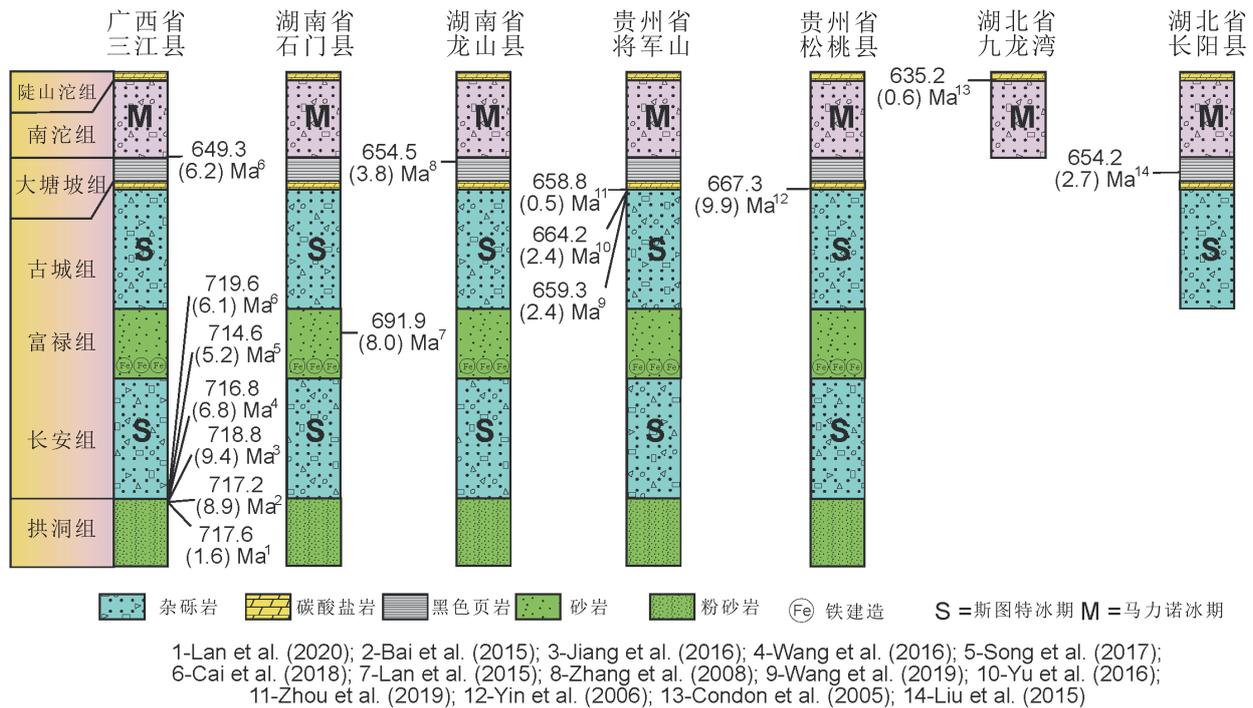


图2 华南长安冰期和南沱冰期的时间限定(括号内的数字代表年龄误差)。

Fig. 2 Age constraints on the Chang'an and Nantuo glaciations in South China (numbers in the brackets represent age errors)

气候动力学模拟表明,雪球地球形成时,必须要求全球冰川同时发生、同时结束,冰盖当时同时、快速覆盖了赤道和低纬度地区。要证明这一过程,需要直接的年代学证据。在 ca. 717 Ma 时,华南、阿曼和加拿大西北部地区分别位于北纬 30 度、南纬 23 度和赤道附近地区,说明冰盖当时同时、快速覆盖了赤道和低纬度地区。因此,成冰系底界年龄的获得不仅验证了雪球地球发生的全球同时性,也为气候动力学模型提供了可靠的年代学证据。Lan et al. (2014) 文章发表后,国际地层委员会成冰系分会主席 Graham Shields 发表文章 (Shields-Zhou et al., 2016), 对该文的工作给予充分的肯定,大篇幅正面评价。鉴于本文的工作集中于深水相区连续剖面,结合本文获得的年龄,建议把成冰系底界年龄由原来的 850 Ma 修订为 720 Ma。也就是说,从 2015 年开始,国际地质年表中成冰系底界年龄就已经是 720 Ma, 850 Ma 没有地质意义,因为那时候没有冰川事件发生。华南地区拉伸系和成冰系出露完整,保存完好,深水相区拉伸系和成冰系整合接触, Shields-Zhou et al. (2016) 建议把该地区的剖面当做成冰系全球标准层型剖面点 (GSSP) 的候选剖面。

斯图特冰期中期出现了一段无冰时期,沉积了一套砂岩和泥岩,在华南、澳大利亚等多个地区都有出现,含有条带状铁建造、丘状交错层理及风暴沉积 (Hu and Zhu, 2020; Lan et al., 2022a; Qi et al., 2023)。在华南板块和劳亚板块内,这套砂岩和泥岩组合内还出现了火山灰夹层,年龄分别为 691.9 ± 8.0 Ma (Lan et al., 2015a) 和 684 ± 4.0 Ma~ $688.6 \pm 9/-6$ Ma (Ferri et al., 1999; Fanning and Link, 2008; Lund et al., 2009; Condon and Bowring, 2011; Keeley et al., 2013), 和当时小行星撞击地球的时间相吻合 (Spray et al., 1999; Jourdan, 2012)。火山灰、交错层理和风暴沉积的出现,指示当时流水沉积环境,说明当时小行星撞击地球可能触发了斯图特冰盖的暂时消退 (Lan et al., 2022a)。目前只有在澳大利亚和苏格兰地区发现了撞击记录,其它地区没有发现,这是因为冰盖在不同纬度地区厚度不一样。此外,撞击体的大小也不一样,所以对冰盖造成了不同程度的刨蚀。除此之外,冰川侵蚀作用以及大洋板块俯冲作用也会不同程度地抹掉陆地及洋底撞击记录。

关于长安冰期的终止时间也取得了一系列新进展。Zhou et al. (2004) 从大塘坡组底部碳酸盐岩

内火山灰夹层中获得了一个锆石 TIMS U-Pb 年龄 662.9 ± 4.3 Ma。Zhou et al.(2019)通过进一步高精度锆石 CA-ID-TIMS U-Pb 定年,把这个年龄修订为 658.8 ± 0.5 Ma。尹崇玉等(2006)从贵州黑水溪大塘坡组底部凝灰岩中获得了一个锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄 667.3 ± 9.9 Ma; Yu et al.(2016)从贵州将军山大塘坡组底部凝灰岩中获得了一个锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 664.2 ± 2.4 Ma; Wang et al.(2019)从贵州将军山大塘坡组底部凝灰岩中获得了一个锆石 SIMS U-Pb 年龄 659.3 ± 2.4 Ma。综合考虑采样层位和测试误差,这些年龄和 Zhou et al.(2019)报道的年龄相一致,所以华南地区长安冰期的终止时间可限定为 659 Ma。Cox et al.(2018)从澳大利亚斯图特冰川杂砾岩上部夹层火山灰中获得了一个锆石 CA-ID-TIMS U-Pb 年龄 663.03 ± 0.11 Ma,代表了斯图特冰期终止的最大年龄限定。综合考虑采样层位和测试误差,斯图特冰期在全球上最可能的终止时间暂时限定为 659 Ma。

1.2 马力诺(南沱)冰期

关于南沱冰期的启动时间,目前没有直接、可靠的年龄限定。Zhang et al.(2008)和 Liu et al.(2015)从大塘坡组中上部夹层火山灰内分别获得了锆石 SIMS U-Pb 年龄 654.5 ± 3.8 Ma 和 654.2 ± 2.7 Ma,蔡娟娟等(2018)从南沱组底部含砾砂岩中得到了一个锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 649.3 ± 6.2 Ma,这些年龄均代表南沱冰期启动的最大年龄限定。Kendall et al.(2006)从澳大利亚斯图特-马力诺间冰期黑色页岩内获得了 645.1 ± 4.8 Ma 和 657.2 ± 5.4 Ma 的 Re-Os 年龄,在误差范围内和 Zhang et al.(2008)和 Liu et al.(2015)报道的火山灰锆石 U-Pb 年龄相一致,也代表了马力诺冰期启动的最大时间限定。Bao et al.(2018)通过旋回地层学研究,把大塘坡组的沉积时限限定在 9.8 Myr。如果按照其底部沉积年龄为 659 Ma 计算,大塘坡组顶部沉积年龄为 649 Ma。Prave et al.(2016)从纳米比亚马力诺冰川杂砾岩中部获得了一个锆石 CA-ID-TIMS U-Pb 年龄 639.29 ± 0.26 Ma,代表了马力诺冰期启动的最小时间限定。这些年龄数据说明马力诺冰期的启动时间为 649~639 Ma。相信随着后续研究工作的深入,马力诺冰期的启动时间范围很可能会逐渐变窄。

南沱冰期的终止时间已基本确定。南沱组杂砾岩被陡山沱组盖帽碳酸盐岩所覆盖,南沱冰期的

终止时间主要是来自陡山沱组盖帽碳酸盐岩的年龄限定。Condon et al.(2005)最早从盖帽碳酸盐岩底部火山灰夹层中获得了一个锆石 TIMS U-Pb 年龄 635.23 ± 0.57 Ma。Zhou et al.(2019)从云南峨山县南沱组顶部盖帽碳酸盐岩内获得了一个锆石 TIMS U-Pb 年龄 634.57 ± 0.88 Ma。前人从澳大利亚马力诺冰川杂砾岩上部接近冰川杂砾岩—盖帽碳酸岩界线处火山灰夹层中获得了一个锆石 TIMS U-Pb 年龄 636.41 ± 0.45 Ma(Calver et al., 2013),从纳米比亚地区马力诺冰川杂砾岩上部接近冰川杂砾岩—盖帽碳酸岩界线处火山灰夹层中获得了一个锆石 TIMS U-Pb 年龄 635.21 ± 0.59 Ma(Prave et al., 2016)。Lan et al.(2022b)从盖帽碳酸盐岩底部得到一个方解石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 636.5 ± 7.4 Ma。综合考虑采样层位和年龄误差,这些年龄限定了马力诺冰期的终止时间为 635 Ma。

1.3 南华裂谷充填序列

华南拉伸系和成冰系的另一个重要进展就是建立了三峡地区莲沱组和湘黔桂交界地区的板溪群/丹洲群/下江群的对比。Lan et al.(2015b)把莲沱组的底部和顶部年龄分别限定在了 780 Ma 和 714 Ma,相当于板溪群/丹洲群/下江群的中上部沉积。最近,徐琼等(2021)从三峡地区莲沱组顶部获得了 724 ± 8 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,和 Lan et al.(2015b)报道的年龄(714 ± 8 Ma)在误差范围内相一致。宁括步等(2022)通过对大洪山地区莲沱组底部凝灰岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,得到了一个 798.4 ± 4.5 Ma 年龄。新的年龄数据再次说明,莲沱组区域上可以和板溪群/丹洲群/下江群中上部、武当群及随县群对比,为“晋宁造山运动”不整合面之上、南华系冰川杂砾岩之下的一套裂谷充填沉积物,可能为裂谷盆地全面打开之后快速沉积充填的沉积序列(宁括步等, 2023)。一般认为,莲沱组属于河流相沉积(Du et al., 2013),而板溪群/丹洲群/下江群为海相沉积(朱茂炎等, 2016),说明二者为同时异相沉积。莲沱组顶部年龄指示拉伸系和成冰系的界线可能在莲沱组顶部附近,但是在宜昌三峡地区,南沱冰期前的沉积记录都没有保存,只保存了南沱冰期和冰期之后的沉积记录,说明南沱冰期冰川侵蚀作用可能把相当于大塘坡组和长安组的沉积记录都侵蚀掉了(Lan et al., 2015b)。三峡地区,莲沱组直接覆盖在黄陵花岗岩和崆岭群之上,这套花岗岩和变质岩代表了相

对稳定的古陆块,和湘黔桂南华裂谷地区沉积的南华系及拉伸系相比,前者更容易受到冰川侵蚀作用的影响。冰盖由陆地向海洋推进过程中,海平面下降,暴露地表的地质层遭受剥蚀,这些剥蚀现象在湘西北和黔中地区的板溪群中都有记录(张晓阳等, 1995; 张世红等, 2008)。但是,莲沱组完整的沉积记录在扬子西缘和东南缘都有保存,那里出露与莲沱组相似的紫红色粗碎屑陆相沉积。

2 马力诺冰期和斯图特冰期持续时间不同的原因

马力诺冰期末期经历了大规模裂谷岩浆作用,在华南、西伯利亚和塔里木等多个地区都有发生,时间为 ca. 643~635 Ma, 对应于罗迪尼亚超大陆最后一期裂解(Lan et al., 2022c)。相比之下,斯图特冰期末期没有大规模裂谷岩浆作用,只有零星的火山灰,出露在华南、澳大利亚和劳亚板块内。火山灰和同期厚层火山岩只出现在斯图特冰期中期,并且只出现在劳亚板块内。这说明,马力诺冰期末期经历了大规模岩浆作用致使冰期提前结束,而斯图特冰期末期没有大规模岩浆作用所以经历了很长一段时间才积累了足够多的二氧化碳致使冰川最终消融。

扬子北缘裂谷火山岩出露规模最大,出露面积约 30 000 平方千米,主要由玄武岩和流纹岩组成,被盖帽碳酸盐岩直接覆盖,这为裂谷岩浆作用促使冰川消融提供了最直接的岩石学证据。通过高精度锆石 TIMS U-Pb 定年,这套火山岩的喷发时代限定为 641~637 Ma(Lan et al., 2022c), 结合前人从盖帽碳酸盐岩中获得的夹层火山灰锆石 TIMS U-Pb 年龄(Condon et al., 2005), 火山岩喷发时间可限定为 641~635 Ma, 喷发时限长达 6 Myr。通过对这套火山岩进行气候模拟研究,发现扬子北缘裂谷岩浆作用在 6 Myr (641~635 Ma)内排放的二氧化碳可以促使马力诺冰期提前 2~5 Myr 结束(Lan et al., 2022c)。

3 盖帽碳酸岩形成时间和形成机制

如前所述,马力诺冰川杂砾岩及其上覆盖帽碳酸盐岩是支持雪球地球假说的最直接的岩石学证据,这套沉积岩石组合指示了冰期结束后气候突然变暖的转变过程。封存在冷冻土中的甲烷释放引起的温室效应可能促进了马力诺冰盖的融化,其功

效可能相当于压死骆驼的最后一根稻草。盖帽碳酸盐岩中异常低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值($<-45\text{‰}$)的出现是甲烷参与厌氧氧化的主要化学地层学证据,然而这一过程是发生在冰期末期还是埃迪卡拉纪早期或者是埃迪卡拉纪中—晚期尚无定论。Lan et al. (2022b) 从盖帽碳酸盐岩底部获得了一个非常有意义的方解石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 $636.5 \pm 7.4 \text{ Ma}$ 。这个年龄在误差范围内和全球马力诺冰期终止时间相吻合,新的年龄数据表明方解石在埃迪卡拉纪早期形成,不可能在埃迪卡拉纪晚期或者寒武纪热液活动中形成。因此证实了冰期末期甲烷释放并参与厌氧氧化过程形成了低 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值的方解石。更重要的是,甲烷释放后带来的温室效应会进一步促进冰盖融化,直至冰盖完全消融。

4 结论

近 10 年的锆石 U-Pb 年龄数据基本厘清了南华盆地南华系的年龄框架,解决了长期存在的争议。南华系底界年龄被限定为 ca. 716 Ma, 和阿拉伯努比亚板块及劳亚板块上成冰系的底界年龄相一致,证明了冰川发生的同时性,也证明了气候动力学模拟的有效性。长安冰期的结束时间被限定为 ca. 659 Ma, 结合世界其它地区报道的年龄并结合采样层位和年龄误差,把斯图特冰期的终止时间限定在了 ca. 659 Ma。古城段底界年龄为 ca. 690 Ma, 和劳亚板块上测得的斯图特冰期内间冰期的时间相一致,说明斯图特冰期中期发生了全球性的暂时冰退,丘状交错层理和风暴沉积物的出现指示当时局限海道的开放水沉积环境,可能和当时小行星撞击地球有关。

莲沱组可能为穿时沉积,其沉积时限跨越了包括板溪群、长安组和大塘坡组的沉积时限,但由于冰川侵蚀作用,在三峡地区只有相当于板溪群的层位出露。南沱冰期的启动时间被限定为 ca. 649 Ma, 结合世界其它地区报道的年龄,马力诺冰期的启动时间可限定在 649~639 Ma。南沱冰期的终止时间被限定为 ca. 635 Ma, 和世界其它地区马力诺冰期的终止时间相一致。

冰期末期大规模岩浆作用是导致斯图特冰期和马力诺冰期持续时间不同的主要原因,模拟计算表明扬子北缘裂谷岩浆作用释放的二氧化碳可以促使马力诺冰期提前 2~5 Myr 结束。岩浆作用释放二氧化碳导致气候变暖,促进地表解冻,封存在

冷冻土中的甲烷释放产生温室效应,进一步促进冰盖融化,直至完全消融。甲烷厌氧氧化产生方解石的年龄为 ca. 636 Ma, 误差范围内和冰期终止时间相吻合,因此也证实了甲烷释放和冰盖最终消融的因果关系。

References

- Bai D Y, Ma T Q, Zhong X, et al., 2015. 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 [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34: 637–647 (in Chinese with English abstract).
- Bao X J, Zhang S H, Jiang G Q, et al., 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 483: 52–63.
- Bowring S A, Grotzinger J P, Condon D J, et al., 2007. Geochronologic constraints on the chronostratigraphic framework of the Neoproterozoic Huqf Supergroup, Sultanate of Oman [J]. *American Journal of Sciences*, 307: 1097–1145.
- Cai J J, Cui X Z, Lan Z W, et al., 2018. Onset time and global correlation of the Cryogenian glaciations in Yangtze Block, South China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 20: 65–86 (in Chinese with English abstract).
- Calver C R, Crowley J L, Wingate M TD, et al., 2013. Globally synchronous Marinoan deglaciation indicated by U-Pb geochronology of the Cottons Breccia, Tasmania, Australia [J]. *Geology*, 41: 1127–1130.
- Condon, D, Zhu, M Y, Bowring, S et al., 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China [J]. *Science*, 308: 95–98.
- Condon D J, Bowring S A, 2011. Chapter 9: A user's guide to Neoproterozoic geochronology [J]. *Memoir of Geological Society of London*: 36.
- Cox G M, Isakson V, Hoffman P F, et al., 2018. South Australian U-Pb zircon (CA-ID-TIMS) age supports globally synchronous Sturtian deglaciation [J]. *Precambrian Research*, 315: 257–263.
- Du Q D, Wang Z J, Wang J, et al., 2013. Geochronology and paleoenvironment of the pre-Sturtian glacial strata: evidence from the Liantuo Formation in the Nanhua rift basin of the Yangtze Block, South China [J]. *Precambrian Research*, 233: 118–131.
- Fanning C M, Link P K, 2008. Age constraints for the Sturtian glaciation: data from the Adelaide Geosyncline, South Australia and Pocatello Formation, Idaho, USA [J]. *Geological Society of Australia Abstract*, 91: 57–62.
- Ferri F, Rees C J, Nelson J L, et al., 1999. Geology and mineral deposits of the northern Kechika Trough between Gataga River and the 60th parallel. *Bulletin of Bureau of Columbia Ministry* [J]. *Energy Mines*, 107: 1–122.
- Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al., 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology [J]. *Science Advances*, 3: e1600983.
- Hu C L, Zhu M Y, 2020. Lithofacies and glacio-tectonic deformation structures of the Tiesi'ao/Dongshanfeng Formations on the Yangtze Block, South China: Implications for Sturtian Glaciation dynamics [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538: 109481.
- Jiang Z F, Cui X Z, Jiang X S, et al., 2016. New zircon U-Pb ages of the pre-Sturtian rift successions from the western Yangtze Block, South China and their geological significance [J]. *International Geology Review*, 58: 1064–1075.
- Jourdan F, 2012. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique applied to planetary sciences and terrestrial impacts [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 59: 199–224.
- Keeley J A, Link P K, Fanning C M, et al., 2013. Pre- to synglacial rift-related volcanism in the Neoproterozoic (Cryogenian) Pocatello Formation, SE Idaho: new SHRIMP and CA-ID TIMS constraints [J]. *Lithosphere*, 5: 128–150.
- Kendall B, Creaser R A, Selby D, 2006. Re-Os geochronology of postglacial black shales in Australia: Constraints on the timing of "Sturtian" glaciation [J]. *Geology*, 34: 729–732.
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al., 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations [J]. *Precambrian Research*, 255: 401–411.
- Lan Z W, Li X H, Zhang Q R, et al., 2015a. Global synchronous initiation of the 2nd episode of Sturtian glaciation: SIMS zircon U-Pb and O isotope evidence from the Jiangkou Group, South China [J]. *Precambrian Research*, 267: 28–38.
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al., 2015b. 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.
- Lan Z W, Huyskens M H, Lu K, et al., 2020. Towards refining the onset age of Sturtian glaciation in South China [J]. *Precambrian Research*, 338: 105555.
- Lan Z W, Mitchell R N, Gernon T M, et al., 2022a. Did an asteroid impact cause temporary warming during snowball Earth? [J] *Earth and Planetary Science Letters*, 581: 117407.
- Lan Z W, Wu S T, Roberts, N M W, et al., 2022b. Geochronological and geochemical constraints on the origin of highly $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ -depleted calcite in basal Ediacaran cap carbonate [J]. *Geological Magazine*, 159: 1323–1334.
- Lan Z W, Huyskens M H, Le Hir G, et al., 2022c. Massive volcanism may have foreshortened the Marinoan snowball Earth [J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2021GL097156.
- Liu P J, Li X, Chen S., et al., 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation [J]. *Science Bulletin*, 60: 958–963.
- Lund K, Aleinikoff J N, Evans K V, et al., 2009. SHRIMP U-Pb dating of recurrent Cryogenian and Late Cambrian-Early Ordovician alkalic magmatism in central Idaho: Implications for Rodinia rift tectonics [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 122: 430–453.
- MacDonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, et al., 2010. Calibrating the Cryogenian [J]. *Science*, 327: 1241–1243.
- MacDonald F A, Schmitz M D, Strauss J V, et al., 2018. Cryogenian of Yukon [J]. *Precambrian Research*, 319: 114–143.

- Ning K B, Deng Q, Cui X Z, et al., 2022. Zircon U-Pb age and stratigraphic significance of the tuff from the lowermost Liantuo Formation in the Dahongshan area of the northern Yangtze Block [J]. Geological Bulletin of China, In press. (in Chinese with English abstract), <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20220824.1708.002.html>.
- Prave A R, Condon D J, Hoffmann K H, et al., 2016. Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation [J]. *Geology*, 44: 631–634.
- Qi L, Hou M C, Cawood P A, et al., 2023. Neoproterozoic storm deposits in western Yangtze: Implications for the sea conditions during the middle Sturtian glaciation [J]. *Precambrian Research*, 384: 106945.
- Shields-Zhou G A, Porter S, Halverson G P, 2016. A new rock-based definition for the Cryogenian Period (circa 720–635 Ma) [J]. *Episode*, 39: 3–8.
- Song G, Wang X, Shi X, et al., 2017. New U-Pb age constraints on the upper Banxi Group and synchrony of the Sturtian glaciation in South China [J]. *Geoscience Frontiers*, 8: 1161–1173.
- Spray J G, Kelley S P, Dence M R, 1999. The Strangways impact structure, Northern Territory, Australia: geological setting and laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 172: 199–211.
- Wang D, Zhu X K, Zhao N, et al., 2019. Timing of the termination of Sturtian glaciation: SIMS U-Pb zircon dating from South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*: 287–294.
- Wang Z J, Wang J, Du Q D, et al., 2016. Geochronological and geochemical evidence for the sedimentary transformation from the Banxi Period to Nanhua Glacial Period [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90: 1915–1916.
- Xu Q, Jiang T, Hou L C, Zhao X M, et al., 2021. Detrital Zircon Compositions of U-Pb Ages and Hf Isotope for Sandstone of Liantuo Formation from Three Gorges Area, Yangtze Block and Its Geological Significance [J]. *Earth Science*, 46, 1217–1230 (in Chinese with English abstract).
- Yin C Y, Wang Y G, Tang, F, et al., 2006. SHRIMP II U-Pb Zircon Date from the Nanhuan Datangpo Formation in Songtao County, Guizhou Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 273–278 (in Chinese with English abstract).
- Yu W C, Du Y S, Zhou Q, et al., 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating from the Nanhuan Datangpo Formation in Songtao area, East Guizhou and its geological significance [J]. *Geological Review*, 62: 539–549.
- Zhang Q R, Chu X L, 2006. The stratigraphic classification and correlation of the Jiangkou glaciation in the Yangtze Block and the stratotype section of the Nanhuan System [J]. *Journal of Stratigraphy*, 30: 306–314 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q R, Lan Z W, 2016. An update on the chronostratigraphy of the Nanhuan System [J]. *Journal of Stratigraphy*, 40: 297–301 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Jiang G, Han Y, 2008a. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China [J]. *Terra Nova*, 20: 289–294.
- Zhang S H, Jiang G Q, Dong J, et al., 2008b. New SHRIMP U-Pb age from the Wuqiangxi Formation of Banxi Group: Implications for rifting and stratigraphic erosion associated with the early Cryogenian (Sturtian) glaciation in South China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 38: 1496–1503.
- Zhang X Y, Huang J Z, Tang X S, 1995. Strata sequence and stratigraphic framework of Banxi Period in Hunan [J]. *Hunan Geology*, 14: 27–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C M, Tucker R, Xiao S, et al., 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in South China [J]. *Geology*, 32: 437–440.
- Zhou C M, 2016. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze Block, South China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 40: 120–135 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C M, Huyskens M H, Lang X G, et al., 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations [J]. *Geology*, 251: 251–254.
- Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H, et al., 2016. Neoproterozoic strata, source, reservoir and cover development and sedimentary environment in South China. In: Sun, S and Wang, T. G. (eds), *Middle-Neoproterozoic Geology and Hydrocarbon Resources in Eastern China*, pp. 107–135 (in Chinese).

附中文参考文献

- 柏道远, 马铁球, 钟响, 等, 2015. 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. *岩石矿物学杂志*, 34: 637–647.
- 蔡娟娟, 崔晓庄, 兰中伍, 等, 2018. 华南扬子陆块成冰纪冰川作用的启动时限及其全球对比. *古地理学报*, 20: 65–86.
- 宁括步, 邓奇, 崔晓庄, 等, 2023. 扬子陆块北缘大洪山地区莲沱组底部凝灰岩锆石 U-Pb 定年及其地层学意义. *地质通报*, 待刊.
- 徐琼, 江拓, 侯林春, 等, 2021. 扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *地球科学*, 46: 1217–1230.
- 尹崇玉, 王砚耕, 唐烽, 等, 2006. 贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄 [J]. *地质学报*, 80: 273–278.
- 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. *地层学杂志*, 30: 306–314.
- 张启锐, 兰中伍, 2016. 南华系、莲沱组年龄问题的讨论. *地层学杂志*, 40: 297–301.
- 张世红, 蒋干清, 董进, 等, 2008. 华南板溪群五强溪组 SHRIMP II 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层学意义. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 38: 1496–1503.
- 张晓阳, 黄建中, 唐晓珊, 1995. 湖南板溪期地层层序分析及格架探讨. *湖南地质*, 14: 27–30.
- 周传明, 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比 [J]. *地层学杂志*, 40: 120–135.
- 朱茂炎, 张俊明, 杨爱华, 等, 2016. 华南新元古代地层、生-储-盖层发育与沉积环境. 见: 孙枢, 王铁冠, 主编. *中国东部中-新元古界地质学与油气资源*, 107–135. 北京: 科学出版社.