doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.02.001

中南地区南华纪地层序列及对重大地质事件的响应

牛志军,宋 芳,何垚砚,安志辉,田 洋,刘 浩,杨文强

NIU Zhi-Jun, SONG Fang, HE Yao-Yan, AN Zhi-Hui, TIAN Yang, LIU Hao, YANG Wen-Qiang

1. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室,湖北武汉 430205;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205

1. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:罗迪尼亚超大陆裂解、雪球地球、锰铁成矿作用耦合是南华纪重大地质事件。中南地区南华纪地层广泛分布,自北而南沉 积类型丰富,本文以冰期沉积、锰矿层和铁矿层为标志,以同位素年龄为格架,厘定了南华纪岩石地层和年代地层序列,自北而南 对比了超大陆裂解事件、斯图特冰期、马里诺冰期、成锰事件、成铁事件、火山事件和早期生命演化事件沉积的差异性。本文认为 中南地区南华系表现为两次冰期和一次间冰期的沉积特征,下铁上锰、南铁北锰的时空格局揭示了裂谷的演化历程。建议进一 步聚焦南华系存在的关键地质问题,加强锰铁成矿作用与全球重大地质事件的响应关系调查研究,为新一轮找矿突破战略行动 提供理论支撑。

关键词:南华系;雪球地球;锰矿层;铁矿层;超大陆裂解中图分类号:P611;P534.3文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)02-0173-13

Niu Z J, Song F, He Y Y, An Z H, Tian Y, Liu H and Yang W Q. 2023. Nanhuan (Cryogenian) Stratigraphic Sequence in Central-south China and Its Response for Major Geological Events. *South China Geology*, 39(2):173–185.

Abstract: Breakup of the Rodinia Supercontinent, the Snowball Earth and manganese and iron mineralization coupling have been significant geological events during the Nanhuan (Cryogenian). The Nanhuan strata has been widely distributed in Central-south China, with variety sedimentation types being gradual transition from south to north. This review redefines the Nanhuan lithostratigraphy and chronostratigraphy sequence in Central-south China in the framework of regional glacial deposits, manganese deposits, iron deposits and isotopic ages. Regional geological events including breakup, Sturtian and Marinoan, manganization and iron-forming, volcanism activity, and early life evolution have been compared from north to south, focusing on the differences. This paper approved two glaciations with one interglaciation sedimentation preserved in Central-south China. And rifting evolution could be revealed by temporal and spatial distribution of iron and manganese. Further geological survey could be aimed at relationship between regional manganese-iron mineralization and global geological events to provide basic geological supports for the Prospecting Breakthrough Strategy Action. **Key words:** Nanhuan; Snowball Earth; manganese deposit; iron ore bed; supercontinent breakup

收稿日期:2023-2-21;修回日期:2023-5-25

第一作者:牛志军(1970—),男,研究员,从事区域地质和地层学调查研究工作,E-mail: niuzhijun@mail.cgs.gov.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(U2244212、41772019)、中国地质调查局项目(DD20230226, DD20221634)

罗迪尼亚超大陆形成与演化是中一新元古代 全球地质演化的重要事件(Cawood et al., 2018),晚 期的成冰纪时期裂谷系发育,出现地球演化过程中 极寒气候的典型代表一雪球地球事件(Hoffman et al., 1998;赵彦彦和郑永飞, 2011;周传明, 2016),全 球大气、海洋环境剧烈波动,紧随其后的埃迪卡拉 纪是地球多细胞生物的宏体化和多样化阶段。因而 成冰系是了解极寒气候、生物进化、超大陆演化及 三者之间关系的重要窗口。

南华系为全国地层委员会2001年以宜昌地区 莲沱组一南沱组层位建立,底界年龄值主要存在 780 Ma (2014年版中国地层表)和~720 Ma (2023年 版国际年代地层表)两种观点。周传明(2016)认为成 冰系的提出以新元古代全球性冰期事件为依据,南 华系作为与之相对应的系级单位,底界应放在最早 的冰期沉积底部,本文所指的南华系即相当于国 际地层表中的成冰系(720~635 Ma),统的划分采用 周传明(2016)方案,以两次冰期一次间冰期划分为 三个统,底界年龄分别为720 Ma、660 Ma、651 Ma。

华南作为罗迪尼亚超大陆的组成部分(Cawood et al., 2018), 南华纪地层广泛分布, 自北而南 沉积类型丰富,以冰川沉积、铁矿层、锰矿层作为区 域对比的标志,结合同位素年代数据,年代地层、岩 石地层序列基本建立。尽管如此,扬子陆块与周边, 如深水相区华夏地块、岩浆活动强烈的南秦岭地区 冰期的精细对比仍然存在较多争议(李聪等, 2010; 何卫红等, 2014; 潘桂棠等, 2016; Qi L et al., 2020; 湖北省地质调查院, 2021; Lan Z W et al., 2022)。同 时,华南在经历了新元古代晚期裂解事件后形成的 古地理格局奠定了前泥盆纪锰矿、磷矿、金矿、铁 矿、铅锌矿及页岩气等矿产的产出层位和分布格局 的基础(牛志军等, 2022)。目前全国正在开展新一 轮找矿突破战略行动,南华系是锰、铁、金、银等赋 存层位,特别是锰矿为中南地区重点调查矿种。罗 迪尼亚超大陆裂解、雪球地球、大规模锰矿成矿作 用耦合是成冰纪研究的关键科学问题(杜远生等, 2015),本文梳理了中南地区该时期地层序列研究 现状,对其间的全球重大地质事件、成矿事件的响 应关系进行讨论,为新一轮找矿突破战略行动提供 理论支撑。

1 南华纪地层序列与建造特征

本文据中南地区南华系大地构造格局、岩性组 合、沉积序列特征,在赵小明等(2015)的研究基础 上,将其划分为华北地层区、扬子地层区、华夏地层 区、南海地层区(图1),但与赵小明等(2015)不同的 是未将郴州-临武带作为扬子与华夏地层区界线, 海南地层区单独划分开来。由于华北地层区在中南 地区出露面积小,且未见南华系,本文不作讨论。其 余各分区特征简述如下。

1.1扬子地层区(Ⅱ)

(1)大别地层分区(Ⅱ₁):新元古界分布最广的 为红安岩群,由于岩石组合原始叠置关系被造山作 用破坏,其层序划分一直存在争议。湖北省地质调 查院(2021)厘定其为天台山岩组、七角山岩组和黄 麦岭岩组,从湖北省地质调查院(2021)、刘浩等 (2023)报道的各岩组同位素年龄来看,目前还没有 明确的南华系层位信息。

(2)武当-随枣地层分区(Ⅱ2):该分区东部随枣 地区以往称随县群和过路湾组,西部武当地区称武 当群和耀岭河组(群),目前统一厘定为武当群和耀 岭河组(湖北省地质矿产局, 1996)。关于武当群的 内部划分仍存在不同意见,但多认可上部层位为 双台组变火山-沉积岩建造,同位素年代学显示双 台组下部主要形成于760~730Ma间(蔡志勇等, 2006; Ling W L et al., 2008; 凌文黎等, 2010; 湖北 省地质调查院, 2021)。Liu H et al.(2018)和武汉地 质调查中心(2019a)分别获得随县群、双台组原岩 同位素 U-Pb 年龄为 720~700 Ma。本文认为双台 组上部有部分层位属南华纪早期。耀岭河组为变 基性火山岩夹变中酸性火山岩、变碎屑岩建造,变 火山岩锆石 U-Pb 年龄主要集中于 645~632 Ma (蔡志勇等, 2007; Ling W L et al., 2008; 邓乾忠等, 2016; 湖北省地质调查院, 2021; Lan Z W et al., 2022)_o

(3)扬子地层分区(Ⅱ₃):南华纪该分区北浅南 深的古地理格局已经形成,沉积了冰碛砾岩夹间冰 期炭泥岩和含锰岩石。以往将湖北境内莲沱组(湖 北省地质矿产局,1996)、湖南省境内渫水河组(杨 0

25

20

105°



海 ÍW 曾母暗沙 ŝ 南海诸岛 三亚 R 110 115 图1 中南地区南华纪地层分区图

O

海口

5mes

Fig. 1 Stratigraphic subregion of Nanhuan strata in Central-south China

彦均等, 1984; 彭学军等, 2004; 尹崇玉等, 2015)置 于南华系下统,同位素年代学研究表明其主要形成 于 780 ~ 720 Ma 或略晚至 714 Ma (马国干等, 1984; Du Q D et al., 2013; 尹崇玉等, 2015; 高林志 等, 2015; Lan Z W et al., 2015; 宋芳等, 2016; 周传 米, 沉积时限为 660~649 Ma(尹崇玉等, 2015; Liu

明,2016),主体属青白口系。

南华系下统上部为古城组冰碛砂砾岩或含砾 泥岩建造,厚度从零至数十米,区域分布不广泛。中 统大塘坡组为泥岩和含锰页岩建造,厚度从零至数

250km

PJ et al., 2015; 李明龙等, 2019)。上统南沱组为含砾泥岩建造,局部地区下部出现中层状细纹层泥岩,厚15~270m,区域分布广泛,与下伏地层多呈平行不整合接触。地质时代限定于651~635 Ma (Zhang SH et al., 2008)。在神农架地区产丰富的宏体碳质压膜化石(Ye Q et al., 2015)。

(4)江南地层分区(II4):该分区南华系为冰期 夹间冰期砂岩、炭质页岩夹含锰碳酸盐岩、含锰砂 岩等,是华南地区裂陷槽和锰矿层、铁矿层最为发 育的地区。目前多划分为两个小区(湖南省地质调 查院,2017;牛志军等,2020),本文划定小区的界线 为贵州黎平-湖南怀化-株洲一线,区别是长安组发 育及下伏层位(板溪群或高涧群)的不同。

下统下部长安组在该线以北不发育,或厚度较 薄而不易区分,该线以南为含砾砂岩板岩建造,厚 度 0~2574 m,王剑等(2012)认为这种厚度变化体 现了地堑盆地与裂谷间区或古隆起区的差异。尽 管多数学者认为长安组底界年龄与成冰系底界~ 720 Ma一致,但实际上780~720 Ma数据均有报道 (Zhang Q R et al., 2008;孙海清等, 2014;伍皓等, 2015;高林志等, 2015;宋芳等, 2016;蔡娟娟等, 2018;兰中伍, 2023)。下统中部为富禄组砂岩建造, 局部间夹含砾砂岩,底部为含铁岩系,下部凝灰岩 锆石 SHRIMP U-Pb年龄为669±13 Ma(尹崇玉等, 2015)。下统上部古城组为冰碛砾岩建造,厚4.7~ 123.8 m,其多见于黎平-怀化-株洲一线以北,向南 则不发育。伍皓等(2015)认为湘西托口地区古城组 沉积时代晚于705 Ma。

中统大塘坡组为含锰页岩建造,部分地区上部 见较厚的粉砂质板岩,为华南地区重要的赋锰层 位。同位素年龄限定于660~650 Ma(Zhou C M et al., 2004;尹崇玉等, 2015;余文超等, 2016; Bao X J et al., 2018; 兰中伍, 2023)。

上统冰碛岩层位在黎平-怀化-株洲一线以北称为南沱组,局部不整合覆于不同层位之上(湖南省地质调查院,2017),以南称洪江组或黎家坡组,为泥砾岩为主夹砂板岩建造,以是否显示层理、含砾岩石特征、条带状构造等与南沱组区分(湖南省地质矿产局,1997),厚100~2069m,反映裂谷的沉积特点。同位素年代学研究认为其沉积时限与扬

子地层分区南沱组相当(兰中伍, 2023)。

1.2 华夏地层区(Ⅲ)

(1)湘南-桂东地层分区(Ⅲ,):南华系下部为泗 洲山组板岩建造,局部夹含砾板岩及白云岩,这是 中南地区南部较为明确的冰期沉积物;中部为天子 地组板岩夹砂岩建造,夹条带状赤铁矿层和白云质 灰岩透镜体;上部为正园岭组砂岩夹板岩建造(唐 晓珊等,1994;湖南省地质矿产局,1997;湖南省地 质调查院,2017)。QiL et al.(2020)研究认为泗洲山 组、天子地组、正园岭组分别形成于720~690 Ma、 690~666 Ma、666~635 Ma。

(2)云开地层分区(Ⅲ₂):粤西南华系下部为大 绀山组片岩、石英岩夹炭质千枚岩、硅质岩、灰岩、 凝灰岩及黄铁矿层,上部活道组以片岩为主夹千枚 岩、大理岩(广东省地质矿产局,1996)。但近年来大 绀山组出现了 432.5±1.3 Ma (锆石 U-Pb 年龄, Zhang Y Y et al., 2021)或 389±62 Ma(Re-Os 等时线 年龄, Qiu W J et al., 2018)的年龄信息。粤北英德、 连平大绀山组为变(含砾)长石石英细砂岩夹变粉 砂岩、千枚岩等,在嶂背获得碎屑锆石 420 Ma 峰 值年龄数据(待发表)。粤北坝里组砂岩夹板岩建 造,局部见凝灰质砂岩、千枚岩、硅质板岩等,多 划为埃迪卡拉系下部(广东省地质矿产局,1996; 江西省地质矿产勘查开发局, 2017; Qi L et al., 2018),牛志军等(2020)依据岩性组合对比,厘定其 时代为晚南华世。

(3)武夷地层分区(Ⅲ₃):粤东地区南华系以往 划分为楼子坝组和丁屋岭组,张开毕等(2005)认为 丁屋岭组砾岩时代为晚泥盆世,楼子坝组为砂岩 板岩夹硅质岩建造。福建长汀楼子坝命名剖面的 楼子坝组碎屑锆石年龄从655~635 Ma均有报道 (福建省地质调查研究院, 2016; Qi L et al., 2018; Wang W et al., 2018),福建省地质调查研究院 (2017)在地质志编写中认为其均属埃迪卡拉系。本 文通过岩性对比暂将粤东楼子坝组限定为晚南华 世-埃迪卡拉纪。

1.3 南海地层区(IV)

仅出露于海南昌江石碌地区,为石灰顶组砂岩 泥岩建造,夹硅质岩、赤铁矿粉砂岩,时代为南华 纪-埃迪卡拉纪(海南省地质调查院, 2017),本文将

其底部含铁层位暂归南华系。

中南地区自北而南的南华系序列对比见图2。

从湖北十堰至湖南桂阳地区南华纪岩石地层格架 的对比见图3。



图2 中南地区南华系序列及其对比

Fig. 2 Correlation of Nanhuan Sequences in Central-south China

1.玄武岩; 2.安山岩; 3.变砂岩; 4.石英岩; 5.变铁质石英砂岩; 6.变粉砂岩; 7.板岩; 8.绿帘片岩; 9.角闪片岩; 10.白云钠长变粒岩;
11.白云钠长片麻岩; 12.(砂质)砾岩; 13. 冰碛砾岩; 14.(含砾)砂岩; 15.泥岩; 16.粉砂质泥岩; 17.硅/锰质泥岩; 18.(含粉砂)凝灰质泥岩;
19.页岩; 20.大理岩; 21.白云岩; 22.硅质岩; 23.铁质岩; 24.断层/平行不整合



图3 中南地区南华纪岩石地层格架对比示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing correlation of Nanhuan lithostratigraphic sequence in the central-south China
1. 冰碛岩; 2. (含砾)砂岩; 3. 铁质砂岩; 4. 泥岩; 5. 粉砂质泥岩; 6. 锰质泥岩; 7. 玄武岩/安山岩; 8. 宋洛生物群层; 9. 青白口纪晚期砂泥岩
建造; 10. 青白口纪早期或更早期基底; 11. 相变线; Qb₂Nh₁s-双台组; Nh₁c -长安组; Nh₁f -富禄组; Nh₁g -古城组; Nh₁s -泗洲山组; Nh₂d -大塘 坡组; Nh₁-t -天子地组; Nh₃n -南沱组; Nh₃h -洪江组; Nh₃z -正园岭组; Nh₃y-耀岭河组

2 南华纪重大地质事件的对比

2.1 裂解事件

青白口纪晚期一埃迪卡拉纪是罗迪尼亚超大 陆大规模解体时期,随着持续的裂离作用,扬子和 塔里木与超大陆西部的澳大利亚渐渐远离(潘桂棠 等,2016)。南华纪的裂解在扬子陆块南、北缘较为明 显(旷红伟等,2019; Yang F L et al., 2020),但北缘陆 内伸展-裂解的启动时限有南华纪中期700~680 Ma (Dong Y P et al., 2011; 武汉地质调查中心, 2019a; Yang F L et al., 2020)和青白口纪晚期(Ling W L et al., 2008; 湖北省地质调查院, 2021)的不同认识。

目前普遍认为扬子陆块内部及东南缘自820 Ma 后进入伸展-裂解阶段(Wang J and Li Z X, 2003; Li Z X et al., 2003; 张国伟等, 2013; 宋芳等, 2016; 陈 建书等, 2016; 牛志军等, 2020),由于裂陷作用引起 的"堑-垒"构造格局发育,导致区内南华纪岩石地 层单位厚度变化明显,短距离内从数米可达数千 米。堑-垒构造带主要集中于桂北龙胜一湘中零陵 一带,地垒、地堑相间呈 NE-NNE 向排列,地堑区 是锰矿床富集的主要地区,次级地堑是成锰小盆 地(王剑等, 2012; 杜远生等, 2015; 吴定金等, 2020)。

华夏陆块是否存在南华纪裂谷带,目前尚有争议:一是部分学者认为华夏地区也发生了裂解,但 裂谷作用夭折,未形成新的大洋,而是形成多个微 块体(舒良树等,2020; Shu L S et al., 2021),其间沉 积巨厚的南华纪 - 奥陶纪砂泥岩建造;二是部分学 者提出南华纪华夏地区为多岛洋弧盆体系边缘海 盆地(何卫红等,2014;赵小明等,2015;张克信等, 2023),而非裂谷盆地。

2.2 雪球地球事件

新元古代"雪球地球"事件自Williams于1975 年提出以来,一直处于地学研究的前沿,比较明确 的4次规模较大的冰川事件分别为凯噶斯(Kaigas) 冰期、斯图特(Sturtian)冰期、马里诺(Marinoan)冰期 及噶斯奇厄斯(Gaskiers)冰期(赵彦彦和郑永飞, 2011; 尹崇玉等, 2015)。中南地区南华纪冰碛岩层 被大多数学者认为是斯图特冰期、马里诺冰期的沉 积产物。

2.2.1 斯图特冰期对比

武当-随枣地区双台组上部层位目前没有明确 的冰期属性报道。

扬子陆块内部,湖北境内及湘西北地区为古城 组含砾板岩层系,一般多将其对比于斯图特冰期, 但对于其是完全还是晚期属于该冰期(尹崇玉等, 2015;兰中伍,2023)则存在认识差异。

扬子陆块东南缘长安组具有典型冰期沉积特 征,多被认为是斯图特冰期在华南开始的标志(赵 彦彦和郑永飞, 2011; 张启锐等, 2012; 杜秋定等, 2013; 陈建书等, 2016; 蔡娟娟等, 2018), 但斯图特 冰期形成的地层序列则有不同认识。部分学者将长 安组与斯图特冰期对比(林树基等, 2013; 卢定彪 等,2018),将其与古城冰期、南沱冰期作为南华系 三分依据,并将富禄组和大塘坡组作为间冰期沉 积。林树基等(2013)提出富禄间冰期划分出3个间 冰段2个冰段,层位有富禄组、古城组和大塘坡组 (原文将古城组和大塘坡组归入富禄组)。目前多认 为斯图特冰期由若干期次组成(MacDonald et al., 2010; 兰中伍, 2023), 张启锐和储雪蕾(2006) 提出江 口冰期对比于斯图特冰期,涵盖层位自长安组、富 禄组至古城组,本文赞同此认识,但精细的对比需 讲一步研究。

从东西方向来看,江南地层分区富禄组多见有 砾石层,如贵州松桃两界河(林树基等,2013)、广西 三江良口(张启锐和储雪蕾,2006;广西壮族自治区 区域地质调查院,2016)、湖南怀化新路河(张启锐 等,2012)、湖南岳阳新开(武汉地质调查中心, 2019b)等均可见及,局部可在富禄组顶部见少量含 砾砂岩层(宋芳等,2016),笔者认为这些含砾砂岩 层部分层位仍具有冰期的沉积特点(张启锐等, 2012)。

从南北方向来看,江南地层分区北部长安组多 不发育,在湖南桃源马金洞可见厚度很小的长安组 存在,且横向上很快消失,这应是与富禄组底部砂 岩相变,而非全部由沉积间断造成的。而江南地层 分区南部古城组多不发育,1:25万武冈幅、永州幅 区调报告(湖南省地质调查院,2013)中无此组记 述,本文认为相当于该次级冰期层位是存在的,但 由于水体较深相变为富禄组顶部(含砾)砂岩层。

通过沉积时限和沉积特征两方面的对比,本文 认为在堑-垒古地理格局下,裂陷槽内从长安组至 古城组地层发育全且厚度大,向裂陷槽边部或外侧 厚度变薄,且相变为富禄组层位,扬子陆块东南缘 长安组、富禄组、古城组属于多次次级冰期和间冰 期的沉积产物。

华夏地层区,南华系底部泗洲山组为板岩、含 砾板岩及白云岩,显示为寒冷气候下冰筏与正常海 洋环境的混合沉积(湖南省地质调查院,2017)。Qi L et al. (2020)及笔者的最新研究(待发表)也认为其 具有冰期沉积属性。

2.2.2 马里诺冰期对比

扬子北缘耀岭河组砾石层多认为具"冰筏坠 石"特征(王寿琼等,1989;湖北省地质矿产局, 1996;刘鸿允等,1999)。早期王寿琼等(1989)提出耀 岭河组下部与长安组冰期可对比,上部与南沱组冰 期相当。邓乾忠等(2016)认为耀岭河组(群)相当于 古城组-南沱组层位。从目前获得的同位素年龄来 看(湖北省地质调查院,2021;吴年文等,2021;Lan ZW et al., 2022;兰中伍,2023),耀岭河组应为马里 诺冰期火山-沉积作用产物。

学术界关于扬子地层区南沱组/洪江组冰碛砾 岩与马里诺冰期相对应的认识已经达成共识(张启 锐和储雪蕾, 2006; 赵彦彦和郑永飞, 2011; 林树基 等, 2013; 尹崇玉等, 2015)。

华夏地层区南华系上部为正园岭组,在郴州桂 阳大江边存在明显的杂砾岩层位(唐晓珊等, 1994; Qi L et al., 2020),湖南省地质矿产局(1997)认 为其可能是寒冷气候下的冰筏相产物,Qi L et al. (2020)研究表明正园岭组具有低的化学蚀变指数 (CIAcor = 58.5~62.1),粤北坝里组和粤东楼子坝组 砂岩板岩建造目前未发现有明确的冰期沉积记录, 但Qi L et al. (2018)提出闽西楼子坝组沉积地球化 学特征反映出与马里诺冰期一致的寒冷气候特点。 粤西和粤北大绀山组与活道组地质时代目前存疑, 本文不讨论。总体来看,华夏地区南华纪深水盆地 相浊积岩建造,除湘南泗洲山地区外,典型的冰期 沉积特征不明确。深水盆地中沉积连续,应该更加 完整地保存了"雪球地球"事件的记录,因而华夏地 区冰期沉积需要进一步深入研究。

2.3 主要成矿事件

2.3.1 成锰事件

南华纪成锰事件记录于大塘坡组中、下部层 位。中南地区目前较为明确的锰矿层仅见于扬子地 层分区和江南地层分区内,分布在湖北长阳古城、 贵州松桃-湖南花垣-重庆秀山、湖南湘潭-安化、湖 南溆浦-贵州从江一带。湘黔桂地区自西向东依次 为凤凰-三都地堑、锦屏-怀化地垒、新化-宁乡地堑 和衡阳-衡东地垒,在堑-垒构造带内形成了松桃、 黔阳和湘潭3个陆缘裂谷成锰沉积盆地(中国冶金 地质总局湖南地质勘查院, 2018; 吴定金等, 2020)。 锰矿层一般产于含锰岩系下部,中夹1-2层碳酸锰 矿,以层状、似层状或透镜状产出。特别是江南地层 区,如黔东北南华裂谷盆地西段各次级裂谷盆地控 制了锰矿层的形成与展布,在裂陷中心,大塘坡组 厚度大,锰成矿作用强,锰矿资源量巨大(周琦等, 2016; 马晓辉等, 2022)。裂陷边部或外侧厚度变薄 或缺失,向南在江南地层分区南部,当时处于相对 开阔环境,由于封闭条件相对较差,多见含锰板岩、 粉砂质板岩,很少形成锰矿层。

中国冶金地质总局湖南地质勘查院(2018)通 过研究黔东-湘中地区成锰盆地,提出以NE-NEE 向同沉积断裂带与NW向断裂带的交汇部位及附 近为中心,形成聚锰地堑盆地和工业锰矿层(陈旭 等,2021),整个成锰盆地内部呈现隆凹相间的构造 格局。对于南华系序列及锰矿层横向变化,以往多 强调了NE-NEE向断裂的制约作用,笔者认为NW 向常德-安仁基底断裂带(柏道远等,2021)及与之 平行的一系列断裂带对南华系区域展布及沉积环 境、成矿特征的影响应该引起更多的关注。

2.3.2 成铁事件

南华系成铁事件主要记录于富禄组和江西境 内下坊组,含铁岩系出露于桂北三江-龙胜、湖南洞 口、新宁、祁东、江西萍乡、新余一带,以湖南安仁、 祁东一带较为稳定,在关帝庙南部有祁东铁矿,以 其产出的典型地区称为三江式、江口式、新余式条 带状铁矿。含铁建造由薄层赤铁矿、磁铁矿与硅质、 泥质、砂质板岩互层组成,属高硅铁质建造,各地厚 度变化很大,显示出裂谷成矿特点(汤加富等, 1987)。矿体呈层状、似层状、透镜状,平行于岩层产出,湖南通道-江口、江华码市等地厚3~80m;广西 三江-龙胜一带厚64~125m。

含铁建造主要分布于江南地层分区,在扬子地 层分区铁矿层极少见,向南至华夏地层区,湖南桂 阳天子地组底部层位为紫红色板岩夹厚15~20 cm 条带状的赤铁矿层(湖南省地质矿产局,1997),一 般不构成铁矿层。在湘南和赣南地区,天子地组、沙 坝黄组以不含铁或少含铁的砂岩建造为主,沉积水 体偏深,不利于成矿。海南石灰顶组下部也见有含 赤铁矿岩系。从含铁层位和区域分布来看,铁矿层 主要发育于扬子陆块东南缘,呈带状展布,延伸方 向与陆块东南缘走向近一致,明显受区域构造控制 (汤加富等,1987)。

另外,在鄂西北武当隆起的北缘、西北缘及 西南缘南华纪晚期耀岭河组上部变细碧角斑岩 建造中普遍含有磁铁矿层,郧西陈家垭一带形成 具工业价值的矿床,共有5层磁铁矿。含铁岩系产 出受火山喷发-沉积控制,火山喷发作用影响着 成矿物质富集(湖北省地质调查院,2021; 徐鹏 等,2022)。

2.4 火山事件

中南地区南华纪火山岩除武当-随枣地层分区 外总体不发育,或为较薄的凝灰岩层(Zhou C M et al., 2004; Zhang S H et al., 2008; Liu P J et al., 2015; Qi L et al., 2020)。武当-随枣地区晚南华世耀岭河 组为碱性玄武岩-流纹岩组合,厚度大,出露规模 大,主体岩性为变质玄武岩、细碧角斑岩、石英角斑 岩、火山碎屑岩等,可能局部含有粗面岩、安山岩、 流纹岩,总体以基性火山岩为主,酸性火山岩相对 较少,形成于大陆裂谷环境(湖北省地质调查院, 2021)。Lan Z W et al.(2022)通过模拟计算认为耀岭 河组火山作用释放的二氧化碳促使马里诺冰期提 前2~5 Ma结束。

2.5 早期生命演化事件

中南地区南华系产疑源类化石,属种丰富,在 部分地区建有化石组合,但最有意义的是宋洛生物 群(Ye Q et al., 2015)的发现,其以宏体碳质压膜化 石为主,产出层位是湖北神农架宋洛地区南沱组黑 色页岩夹层(安志辉等, 2021)。宋洛生物群是雪球 地球期间全球唯一的底栖宏体真核藻类化石记录, 其中既有南华纪之前的简单化石类型,又有一些南 华纪之后的复杂化石类型。需要光合作用的底栖固 着藻类及古环境分析表明雪球地球中-低纬度区存 在开放水域(Ye Q et al., 2015; Song H Y et al., 2023),进而促进了雪球地球模型的更新。

3 问题与建议

3.1 南华纪冰期的精确时限与地层对比

目前中南地区南华系序列已经建立,但跨越扬 子陆块至华夏地块南北向的南华系对比仍有一些 基本问题没有解决,核心是冰期事件的对比。一是 莲沱组的问题,其底界年龄目前均确定为780 Ma, 但上部或顶部是否有属于南华系冰期沉积及其古 气候学特征需要重新审视。湘鄂交界地区的湖南石 门至湖北通山、湖南岳阳一带的莲沱组或渫水河组 或许是破解这一问题的关键。二是长安组的底界年 龄,这涉及到凯噶斯、斯图特冰期在中南地区的对 比问题。除前文所述的中国地层表(780 Ma)和国际 年代地层表(~720 Ma)的区别外,较多文献也出现 了~750 Ma年龄数据(杜秋定等, 2013; 孙海清等, 2014; 宋芳等, 2016)。三是富禄组形成的古气候特 征总体上是沉积于间冰期的相对寒冷时期,还是冰 期中的相对温暖时期。四是南华系的统的划分,由 于前述对冰期对比认识的差异,目前对于统的界线 划分出现多种不同方案(林树基等, 2013; 尹崇玉 等,2015;周传明,2016)。

扬子陆块及周缘南华系自南而北沉积相分带 明显,深水盆地相、陆相-滨浅海相、强烈火山活动 背景下的雪球地球事件精细对比较为困难,华夏地 层区深水相冰期沉积特征及区域对比仍然较为模 糊。扬子北缘武当群顶部是否为冰期层位、耀岭河 组冰期层位时限问题还需要深入研究,耀岭河组基 性-酸性双峰式火山活动在雪球事件中的作用(Lan ZW et al., 2022)、雪球地球中冰盖的动态特征及是 否存在局部开放水域 (Song HY et al., 2023)等都 是需要深入探讨的重大科学问题。

3.2 南华纪裂解事件与锰铁等成矿地质背景

扬子陆块及周缘新元古代为弧盆-裂谷体系背

景下的中间高两侧低的古地理格局,赋存其间的铁 矿、锰矿、磷矿、金矿等矿产资源分布具有一定的区 域分带性,扬子陆块前寒武纪基底格局也奠定了后 期华南地区早古生代-中生代大规模岩浆作用与成

矿的基础(牛志军等, 2022)。跨越扬子陆块北缘、南 缘,新元古代裂解事件是共识,但开始伸展时限是 否具有同步性还不清晰,而且华夏地区南华纪是否 存在裂谷作用尚不明确。

除鄂西北南华纪晚期陈家垭式海相火山岩型 磁铁矿床之外(徐鹏等, 2022),南华纪铁质沉积更 多分布于桂北-湘中-赣中地区,桂北湘中地区以三 江式、江口式赤铁矿为主,赣中为新余式磁铁石英 岩为主(杨明桂和王光辉, 2020),南华纪中期裂谷 作用"堑-垒"构造格局导致的成锰小盆地(杜远生 等, 2015; 周琦等, 2016; 吴定金等, 2020)位于湘黔 桂交界和湘中一带。这种从层位上看下铁上锰、从 地理位置上南铁北锰的时空格局(杨明桂和王光 辉,2020)揭示出处于陆地(或台地)与盆地过渡地带 的扬子陆块东南缘裂谷系逐渐增大增深的演化 特点。

铁矿形成的环境与机理存在不同认识,多数学 者认为总体上与冰层消融之后海洋和大气循环恢 复正常的氧化环境有关(卢定彪等, 2018),部分学 者认为与海底火山活动相关(余志庆等, 1989)。张 启锐和储雪蕾(2006)认为富禄组铁矿层仍具备冰 期的沉积特征,提出铁矿层是斯图特冰期地层对比 的一个重要的全球性标志。闫斌等(2010)认为含铁 建造铁同位素特征表明该时期只是在"雪球地球" 事件中较为温暖的气候时期,但还未达到间冰期阶 段。成锰盆地的成因及锰矿的形成机理也有不同认 识(付胜云和谢小青, 2010; 杜远生等, 2015; 周琦 等,2016;中国冶金地质总局湖南地质勘查院, 2018; 付勇和郭川, 2021; 陈旭等, 2021), 尽管均认 为半封闭的裂陷盆地有利于锰质聚集,但总体来 看,裂解过程对锰、铁等矿产形成机理的制约目前 仍不清晰,同时NW向的常德-安仁基底隐伏断裂 带(柏道远等, 2021)构造演化过程及其对锰矿的控 岩控矿特征值得深入研究。

3.3 华夏块体属性与华南洋演化历程

来,前人在华夏基底物质组成、变质变形、岩浆演 化、陆壳再造等方面的研究取得了诸多共识,但对 华夏的构造属性及造山作用类型和动力学机制仍 然存在争议。不同模式的关键点是华南洋的演化及 华夏沉积盆地类型:一是陆内造山模式,华夏和扬 子陆块于新元古代早期发生碰撞拼贴形成了统一 的华南板块,二者间不存在华南洋,随后在超大陆 裂解背景下,早期为南华裂谷盆地,晚期发生板内 造山作用转变为陆内前陆盆地(Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; 张国伟等, 2013; 舒良树等, 2020; Shu L S et al., 2021);二是增生造山模式,华夏与扬 子陆块以江山-绍兴-郴州断裂带为界,二者之间至 早古生代华南洋分隔,早期属多岛洋深海-半深海 环境,自边缘海盆地至弧前-弧间-弧后盆地,中晚 奥陶世后为弧后前陆盆地(何卫红等, 2014; 潘桂棠 等, 2016; 张克信等, 2023), 华南直到早古生代晚期 完成拼贴形成统一地块;三是碰撞造山模式,华夏 为与早古生代碰撞造山相关的周缘前陆盆地(Lin S F et al.,2018).

华夏地区新元古代-早古生代(火山-)碎屑岩建 造序列是一致的,砂岩中普遍存在典型的1.0~0.9 Ga格林威尔期和600~500 Ma泛非期碎屑锆石年 龄峰值(Yao J L et al., 2011; Yao W H et al., 2014; Li XH et al., 2014; 牛志军等, 2020)。华夏型(火山-)碎 屑岩建造序列自南华纪至早古生代持续向NW向 的扬子陆块东南缘方向推进(牛志军等, 2020),这 是早古生代增生造山模式不能很好解释的,同时这 种建造序列与物源在华夏内部各微块体间的差异 及其时空迁移变化还不清晰,因而也无法确定是否 有裂谷盆地的沉积特点。

建议在下一步的地质调查工作中,以梳理出的 关键地质问题为导向,以华南板块新元古代聚散过 程对资源环境效应及其全球对比研究为主线,选择 武当-随枣、桂北-湘中、粤东-云开等地区开展1:5 万、1:2.5万区调、矿调和综合研究,重点区域大比 例尺解剖,填/编制系列地质矿产图,厘定扬子陆块 北缘、内部、东南缘、华夏地块南华系序列,着力解 决扬子陆块及周缘新元古代中-晚期裂谷系统时空 叠置关系、华夏块体属性、成矿背景等基础地质问 自1924年葛利普提出"华夏古陆"概念近百年 题,查明锰矿、铁矿的成矿时限与重大地质事件耦 合关系,为新一轮找矿突破战略行动提供理论 支撑。

参考文献:

- 安志辉,叶琴,胡军,童金南,田力.2021.神农架成冰纪宋洛 生物群的赋存层位厘定[J/OL].地球科学.https://kns. cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211125.1908.016.html
- 柏道远,陈迪,凌跃新,吴能杰,李彬,李银敏,杨俊.2021.湖南 常德-安仁断裂及其控岩控矿特征[M].武汉:中国地质 大学出版社.
- 蔡娟娟,崔晓庄,兰中伍,王 剑,江卓斐,邓 奇,卓皆文,陈风霖, 江新胜.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[J].古地理学报,20(1):65-86.
- 蔡志勇,罗洪,熊小林,吴德宽,吴贤亮,孙三才,杨军.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.
- 蔡志勇,熊小林,罗洪,吴德宽,孙三才,饶帮良,王寿琼.2007. 武当地块耀岭河群火山岩的时代归属:单锆石 U-Pb 年 龄的制约[J].地质学报,81(5):620-625.
- 陈旭,李朗田,丛源,曹景良,黄飞,雷玉龙,肖德长,李连 支.2021.湘中地区成锰盆地内部聚锰槽盆结构初探[J]. 资源环境与工程,35(5):580-586.
- 陈建书,戴传固,彭成龙,王敏,卢定彪,王雪华,骆 珊.2016.湘 黔桂相邻区新元古代 820~635 Ma时期裂谷盆地充填 序列与地层格架[J].中国地质,43(3):899-920.
- 邓乾忠,杨青雄,毛新武,孔令耀.2016.湖北武当一随枣地区 中一晚南华世岩石地层序列与年代学研究[J].资源环 境与工程,30(2):132-142.
- 杜秋定,汪正江,王剑,卓皆文,谢尚克,邓奇,杨菲.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.
- 杜远生,周琦,余文超,王萍,袁良军,齐靓,郭华,徐源.2015. Rodinia超大陆裂解、Sturtian冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用[J].地质科技情报,34(6):1-7.
- 福建省地质调查研究院.2016.福建1:5万长汀县、南岩、策 田、濯田幅区域地质调查报告[R].
- 福建省地质调查研究院.2017.中国区域地质志·福建志[M]. 北京:地质出版社.
- 付 勇,郭川.2021.南华盆地新元古代成冰纪成锰作用及其 成矿背景[J].地质论评,67(4):973-991.
- 付胜云,谢小青.2010.湘西及邻区早震旦世锰矿成矿规律探 讨[J].中国锰业,28(3):30-33.
- 高林志,尹崇玉,丁孝忠,王泽九,张恒.2015.华南地区新元古

代年代地层标定及地层对比[J].地球学报,36(5): 533-545.

- 广东省地质矿产局.1996.广东省岩石地层[M].武汉:中国地 质大学出版社.
- 广西壮族自治区区域地质调查院.2016.广西1:5万水口、林 溪、龙额乡、良口幅区域地质调查报告[R].
- 海南省地质调查院.2017.中国区域地质志·海南志[M].北京: 地质出版社.
- 何卫红,唐婷婷,乐明亮,邓晋福,潘桂棠,邢光福,骆满生,徐亚 东,韦一,张宗言,肖异凡,张克信.2014.华南南华纪一二 叠纪沉积大地构造演化[J].地球科学——中国地质大 学学报,39(8):929-953.
- 湖北省地质矿产局.1996.湖北省岩石地层[M].武汉:中国地 质大学出版社.
- 湖北省地质调查院.2021.中国区域地质志·湖北志[M].北京: 地质出版社.
- 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.
- 湖南省地质调查院.2013.湖南1:25万武冈幅、怀化幅区域 地质调查报告[R].
- 湖南省地质调查院.2017.中国区域地质志·湖南志[M].北京: 地质出版社.
- 江西省地质矿产勘查开发局.2017.中国区域地质志・江西 志[M].北京:地质出版社.
- 旷红伟,柳永清,耿元生,白华青,彭楠,范正秀,宋换新,夏晓 旭,王玉冲,陈骁帅.2019.中国中新元古代重要沉积地质 事件及其意义[J].古地理学报,21(1):1-30.
- 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.
- 李 聪,陈世悦,张鹏飞,张 跃,王 玲,毕明威.2010.华南加里东 期陆内构造属性探讨[J].中国石油大学学报(自然科学 版),34(5):18-24.
- 李明龙,田景春,方喜林,郑德顺,许克元,陈林,曹文胜,赵军, 冉中夏.2019.鄂西走马地区大塘坡组顶部泥岩碎屑锆 石LA-ICP-MS U-Pb年龄及其地质意义[J].沉积与特提 斯地质,39(1):22-31.
- 林树基,卢定彪,肖加飞,熊小辉,李艳桃.2013.贵州南华纪冰 期地层的主要特征[J].地层学杂志,37(4):542-557.
- 凌文黎,段瑞春,柳小明,程建萍,毛新武,彭练红,刘早学,杨红梅,任邦方,2010.南秦岭武当山群碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J],科学通报,55(12):1153-1161.
- 刘浩,徐扬,张维峰,徐大良,魏运许,邓新,金鑫镖,彭练 红.2023.西大别红安岩群含磷岩系的形成时代及物源 分析[J].华南地质,39(2):278-291.

- 刘鸿允,郝杰,李曰俊,1999.中国中东部晚前寒武纪地层与 伍皓,江新胜,王剑,汪正江,杜秋定,邓奇,崔晓庄,杨 地质演化[M].北京:科学出版社.
- 卢定彪,张德明,吴开彬,跃连红,黄文俊.2018.华南新元古代 南华大冰期气候岩石地层对比[J].中国科技论文,13(9): 1060-1067.
- 马国干,李华芹,张自超.1984.华南地区震旦纪时限范围的研 究[J].中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊.8: 1-29
- 马晓辉,刘阳,张向宁,李艳翔,张雪,任良良,赵亮亮.2022.湘 西南大岩坳向斜"大塘坡式"锰矿成矿地质条件及成矿 预测[J].华南地质,38(3):521-532.
- 牛志军,邓新,刘浩,李福林,宋芳,何垚砚,杨文强.2022.扬子 陆块南北缘新元古代火山-沉积岩系研究现状与问 题[J].华南地质,38(1):27-45.
- 牛志军,杨文强,宋芳,何垚砚,田洋.2020.湘桂地区新元古代 地层序列物源分析构造演化[M].北京:科学出版社.
- 潘桂棠,陆松年,肖庆辉,张克信,尹福光,郝国杰,骆满生,任 飞,袁四化.2016.中国大地构造阶段划分和演化[J].地学 前缘,23(6):1-23.
- 彭学军,刘耀荣,吴能杰,陈建超,李建清.2004.扬子陆块东南 缘南华纪地层对比[J].地层学杂志,28(4):354-359.
- 舒良树,陈祥云,楼法生.2020.华南前侏罗纪构造[J].地质学 报,94(2):333-360.
- 宋芳,牛志军,刘浩,何垚砚,杨文强.2016.鄂东南地区南华系 沉积特征与接触关系:扬子陆块内部与东南缘盆地对 比的良好借鉴[J].地层学杂志,40(3):251-260.
- 孙海清,黄建中,杜远生,罗来,伍皓.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+27.
- 汤加富,符鹤琴,余志庆.1987.华南晚前寒武纪硅铁建造的层 位、类型与形成条件[J].矿床地质,6(1):1-10.
- 唐晓珊,黄建中,张纯臣.1994.华南地体北缘(湖南部分)前寒 武纪地层[J].中国区域地质,(4):303-310.
- 王剑,段太忠,谢渊,汪正江,郝明,刘伟.2012.扬子地块东南 缘大地构造演化及其油气地质意义[J].地质通报,31 (11):1739-1749.
- 王寿琼,周骏华,胡文虎.1989.湖北武当地区耀岭河群火山-冰川沉积及其地层意义[J].地层学杂志,13(1):14-21+81.
- 吴定金,龚光林,雷玉龙,曹景良.2020.扬子陆块东南缘早南 华世大塘坡早期岩相古地理及锰矿床地质意义[J].中 国锰业,38(2):6-12.
- 吴年文,江拓,徐琼,赵小明,赵龙,邱啸飞.2021.南秦岭随枣 地块耀岭河组双峰式火山岩:对扬子克拉通北缘大陆 裂解过程的约束[J].地质通报,40(6):920-929.

- 菲.2015.湘西托口地区南华系沉积地层学研究及其地 质意义[J].地层学杂志.39(3):300-309.
- 武汉地质调查中心.2019a.湖北1:5万十堰市、吕家河、薛家 村、土城幅区域地质调查报告[R].
- 武汉地质调查中心.2019b.1:5万郭镇市、白羊田、北港镇区 域地质调查报告[R].
- 徐鹏,李欢,谢家涛,王球.2022.鄂西北地区海相火山岩型铁 矿成矿规律及找矿方向[J].矿产勘查.13(5):548-566.
- 闫斌,朱祥坤,唐索寒,朱茂炎.2010.广西新元古代BIF的铁 同位素特征及其地质意义[J].地质学报,84(7): 1080-1086.
- 杨明桂,王光辉.2020.华南新元古代晚期地层层序与南华间 冰期一冰后期大规模沉积成矿作用[J].华东地质,41(3): 197-208.
- 杨彦均,魏绪寿,陈文斌,张立志,侯东南,赵德星,朱鸿.1984. 湖南省石门县杨家坪上前寒武系剖面研究[J].湖南地 质,3(4):1-96.
- 尹崇玉,高林志,刘鹏举,唐烽,王自强,陈寿铭.2015.中国新元 古代生物地层序列与年代地层划分[M].北京:科学出版 衦
- 余文超,杜远生,周琦,王萍,袁良军,徐源,潘文,谢小峰,齐 靓,焦良轩.2016.黔东松桃地区大塘坡组LA-ICP-MS锆 石U-Pb年龄及其地质意义[J].地质论评,62(3):539-549.
- 余志庆,汤家富,符鹤琴.1989."新余式"铁矿地质特征及其成 因[J].矿床地质,8(4):1-10.
- 张国伟,郭安林,王岳军,李三忠,董云鹏,刘少峰,何登发,程顺 有,鲁如魁,姚安平.2013.中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学,43(10):1553-1582.
- 张开毕,陈金良,林亨才,黄昌旗,罗志兴.2005.闽西南地区南 华纪一震旦纪岩石地层的划分与对比[J].中国地质.32 (3):363-369.
- 张克信,何卫红,徐亚东,翟刚毅,石万忠,陆永潮.2023.华南青 白口纪一三叠纪构造-地层区划及特征[J].华南地质,39 (1):1-23.
- 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,黄晶,储雪蕾.2012.湖南怀化新路河地区的南华 系[J].地层学杂志,36(4):761-763.
- 赵小明,张开明,毛新武,马铁球,黄友义,莫位仁,吴年文,王汉 荣.2015.中南地区大地构造相特征与成矿地质背景研 究[M].武汉:湖北人民出版社.
- 赵彦彦,郑永飞.2011.全球新元古代冰期的记录和时限[J].岩 石学报,27(2):545-565.

- 中国冶金地质总局湖南地质勘查院.2018.扬子陆块东南缘 南华系锰矿成矿预测与选区报告[R].
- 周琦,杜远生,袁良军,张遂,余文超,杨胜堂,刘雨.2016.黔湘 渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制 作用[J].地球科学,41(2):177-188.
- 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(2):120-135.
- Bao X J, Zhang S H, Jiang G Q, Wu H C, Li H Y, Wang X Q, An Z Z, Yang T S. 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.
- Cawood P A, Zhao G C, Yao J L, Wang W, Xu Y J, Wang Y J. 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents[J]. Earth-Science Reviews, 186(1): 173-194.
- Charvet J, Shu L S, Faure M, Choulet F, Wang B, Lu H F, Breton N L. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. Journal of Asian Earth Science, 39(4): 309-330.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Zhang X N, Chen Q, Yang C, Yang Z. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif [J]. Precambrian Research, 189(1-2): 66-90.
- Du Q D, Wang Z J, Wang J, Qiu Y S, Jiang X S, Deng Q, Yang F. 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(3): 118-131.
- Faure M, Shu L S, Wang B, Charvet J, Choulet F, Monié P. 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China[J]. Terra Nova, 21(5): 360-368.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Schrag D P. 1998.A Neoproterozoic Snowball Earth[J]. Science, 281 (5381): 1342-1346.
- Lan Z W, Huyskens M H, Le Hir G, Mitchell R N, Yin Q Z, Zhang G Y, Li X H. 2022. Massive volcanism may have foreshortened the Marinoan Snowball Earth [J]. Geophysical Research Letters, 49, e2021GL097156.
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, Zhang Q R, Li Q L. 2015. Revis-

iting 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 X H, Li Z X, Li W X. 2014. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: A synthesis[J]. Gondwana Research, 25(3): 1202-1215.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents, evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 122(1-4): 85-109.
- Lin S F, Xing G F, Davis D W, Yin C Q, Wu M L, Li L M, Jiang Y, Chen Z H. 2018. Appalachian-style multi-terrane Wilson cycle model for the assembly of South China[J]. Geology, 46(4): 319-322.
- Ling W L, Ren B F, Duan R C, Liu X M, Mao X W, Peng L H, Liu Z X, Cheng J P, Yang H M. 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication[J]. Chinese Science Bulletin, 53 (14): 2192-2199.
- Liu H, Zhao J H, Cawood P A, Wang W. 2018. South China in Rodinia: Constrains from the Neoproterozoic Suixian volcano-sedimentary group of the South Qinling Belt[J]. Precambrian Research, 314: 170-193.
- Liu P J, Li X H, Chen S M, Lan Z W, Yang B, Shang X D, Yin C Y. 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation[J]. Science Bulletin, 60(10): 958-963.
- MacDonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, Roots C F, Jones D S, Maloof A C, Strauss J V, Cohen P A, Johnston D T, Schrag D P. 2010. Calibrating the Cryogenian[J]. Sciences, 327(5970): 1241-1243.
- Qi L, Cawood P A, Xu Y J, Du Y S, Zhang H C, Zhang Z K. 2020. Linking South China to North India from the late Tonian to Ediacaran: Constraints from the Cathaysia Block[J]. Precambrian Research, 350, 105898.
- Qi L, Xu Y J, Cawood P A, Du Y S. 2018. Reconstructing Cryogenian to Ediacaran successions and paleogeography of the South China Block[J]. Precambrian Research,

314: 452-467.

- Qiu W J, Zhou M F, Li X C, Williams-Jones A E, Yuan H L. 2018. The genesis of the giant Dajiangping SEDEX-type pyrite deposit, South China[J]. Economic Geology, 113 (6): 1419-1446.
- Shu L S, Yao J L, Wang B, Faure M, Charvet J, Chen Y. 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block[J]. Earth-Science Reviews, 216, 103596.
- Song H Y, An Z H, Ye Q, Stüeken E E, Li J, Hu J, Algeo T J, Tian L, Chu D L, Song H J, Xiao S H, Tong J N, 2023. Mid-latitudinal habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation[J]. Nature Communications, 14(1):1-9.
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. Precambrian Research, 122(1-4): 141-158.
- Wang W, Zeng M F, Zhou M F, Zhao J H, Zheng J P, Lan Z F. 2018. Age, provenance and tectonic setting of Neoproterozoic to early Paleozoic sequences in southeastern South China Block: Constraints on its linkage to western Australia-East Antarctica[J]. Precambrian Research, 309: 290-308.
- Yang F L, Zhou X F, Peng Y X, Song B W, Kou X H. 2020. Evolution of Neoproterozoic basins within the Yangtze Craton and its significance for oil and gas exploration in South China: An overview[J]. Precambrian Research, 337, 105563.

- Yao J L, Shu L S, Santosh M. 2011. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry—New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China[J]. Gondwana Research, 20(2-3): 553-567.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, Li X H, Yang J H. 2014. From Rodinia to Gondwanaland: A tale of detrital zircon provenance analyses from the southern Nanhua Basin, South China[J]. American Journal of Science, 314(1): 278-313.
- Ye Q, Tong J N, Xiao S H, Zhu S X, An Z H, Tian L, Hu J. 2015. The survival of benthic macroscopic phototrophs on a Neoproterozoic snowball Earth[J]. Geology, 43(6): 507-510.
- Zhang Q R, Li X H, Feng L J, Huang J, Song B. 2008. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze platform, South China[J]. Journal of Geology, 116(4): 423-429.
- Zhang S H, Jiang G Q, Han Y G. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China[J]. Terra Nova, 20(4): 289-294.
- Zhang Y Y, Luo T Y, Gan T, Zhou M Z, Han X Q. 2021. Early Silurian Wuchuan-Sihui-Shaoguan exhalative sedimentary pyrite belt, South China: Constraints from zircon dating for K-bentonite of the giant Dajiangping deposit[J]. Acta Geochimica, 40(1): 1-12.
- Zhou C M, Tucker R, Xiao S H, Peng Z X, Yuan X L, Chen Z. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in South China[J]. Geology, 32(5): 437-440.