



移动阅读

郎咸国, 陈家乐, 2023. 成冰纪全球冰期事件的环境效应研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 651–660. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.06001

LANG X G, CHEN J L, 2023. Research progress on environmental effects of the Cryogenian global glaciation[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 651–660. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.06001

成冰纪全球冰期事件的环境效应研究进展

郎咸国, 陈家乐

(成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059)

摘要: 成冰纪全球冰期是地球历史上最极端的冰室气候事件, 冰川作用波及赤道区域, 全球可能都遭受了冰封, 海洋广泛缺氧, 生物演化进程迟滞。然而, 冰期结束之后, 大气氧浓度迅速升高, 海洋发生逐步氧化, 大型带刺疑源类和真核多细胞藻类在埃迪卡拉纪开始繁盛, 出现最早的动物, 地表生物圈发生了翻天覆地的变化。显然, 成冰纪全球冰期事件是地球系统演化的重要转折。认识冰期的环境效应是认识埃迪卡拉纪生物演化的关键, 也是打开地表宜居环境演化的钥匙。本文总结了近年来成冰纪全球冰期的气候假说、冰期沉积特征、海洋氧化还原条件及冰期后的大气与海洋环境剧变等方面的研究进展, 简要分析了全球冰期研究中存在的问题, 并对该领域未来研究提出了展望与建议。

关键词: 雪球地球; 南沱组; 生产力; 氧化; 新元古代

中图分类号: P58

文献标识码: A

Research progress on environmental effects of the Cryogenian global glaciation

LANG Xianguo, CHEN Jiale

(Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Cryogenian global glaciation events are Earth's most extreme icehouse climate. During these glaciations, ice sheets extended to the equatorial region. It is suggested that the ocean was completely frozen and suffered from widespread marine anoxia, which delayed biological evolution. After the end of the glaciation, atmospheric oxygen levels significantly increased, leading to deep-ocean oxidation and the diversification of multicellular algae in the early Ediacaran. Obviously, the Cryogenian global glacial event was an important turning point in the evolution of the Earth system. Understanding how the glaciations altered the environment is the key to understanding biological evolution, and the habitable environment of the Ediacaran Period. The present paper provides a summary of recent research progress in the areas of climate hypothesis, glacial sedimentation characteristics, ocean redox conditions, and post-glacial atmospheric and marine environment drastic changes during the global glacial period. It also briefly analyzes the existing problems in global glacial research and proposes future research directions.

Key words: snowball Earth; Nantuo Formation; primary productivity; oxidation; Neoproterozoic

0 引言

成冰纪发育有地球演化史上最极端的冰室气

候, 至少发育两次全球性冰期事件, 以斯图特(Sturtian)冰期(717~660 Ma)和马里诺(Marinoan)冰期(约 650~635 Ma)为代表, 我国华南的长安

收稿日期: 2023-05-14; 改回日期: 2023-06-02; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 郎咸国(1986—), 男, 研究员, 主要从事沉积学教学与科研工作。E-mail: langxianguo19@cdut.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金(41802024)

(江口)冰期和南沱冰期分别与之对应(Hoffman et al., 1998; 储雪蕾, 2004; 张启锐和储雪蕾, 2006)。在这两次冰期过程中,全球广泛发育了冰川杂砾岩。古地磁证据显示,这些冰川杂砾岩在低纬度地区甚至是赤道区域亦存在,说明当时的冰川作用波及低纬度海平面,全球可能遭受了极寒,甚至完全冰冻(Kirschvink, 1992)。

成冰纪全球冰期事件与地史上其他冰期相比,具有特殊性,且对地表环境造成了显著的影响。成冰纪极端冰室气候事件与罗迪尼亚超大陆的裂解有关(崔晓庄等, 2014),持续时间长达数千万年之久,导致全球海洋呈现了广泛的缺氧现象(Huang et al., 2011)。比如,条带状含铁建造在消失了十亿年之后,重新出现在冰期地层中,意味着当时的海洋可能重新回到了太古宙和早元古代时的缺氧富铁状态(闫斌等, 2010)。成冰纪全球沉积格局也发生了巨大变化,全球普遍存在的大陆冰盖严重减缓了大陆化学风化作用,使得物理剥蚀作用占据了主导地位。当时海相沉积记录则主要是以冰期杂砾岩为主的碎屑岩沉积,碳酸盐岩沉积较少。直至在冰期结束后,全球范围内几乎同时沉积了一套数米厚的碳酸盐岩(Jiang et al., 2006)。由于碳酸盐岩直接覆盖在冰川杂砾岩之上,因此又被称之为盖帽碳酸盐岩。盖帽碳酸盐岩具备显著的碳同位素负偏(Lang et al., 2016)。低的碳同位素值进一步说明极端冰期严重减缓了碳埋藏。全球冰期结束后,还造成了全球深部海洋与大气的快速氧化,开启了埃迪卡拉纪大气海洋氧化的序幕(Sahoo et al., 2012)。古生物化石记录显示,真核生物在冰川消融后迅速辐射,多细胞藻类快速繁盛,紧接着出现了最早的动物(Yuan et al., 2011)。由此可见,成冰纪全球冰期事件改变了大气与海洋环境,促进了高等生态系

统的建立,是宜居地球环境演化的加速剂(图1)。

全球性极端冰期事件是地球演化的关键转折期,是地球系统科学长期关注的热点。近年来,在全球冰期气候模式、沉积过程、冰期结束及大气海洋氧化机制等领域取得了一些重要的进展。本文聚焦冰期的气候模式假说、冰期过程及结束后的海洋环境剧变等问题,总结分析取得的进展及所面临的问题,旨在为下一步研究提供参考。

1 冰期气候假说

成冰纪全球事件的特殊性决定了其气候模式不同于显生宙的冰室气候。为了解释全球分布的冰川杂砾岩、条带状含铁建造、盖帽碳酸盐岩及其存在的碳同位素负偏,多种气候假说先后被提出,例如,“雪球地球”假说(Hoffman et al., 1998)、“雪水交融地球”假说(Hyde et al., 2000)、“巨蟒气候”假说(Abbot et al., 2011)、“超大陆不等时裂解”假说(Eyles and Januszczak, 2004)、“薄冰地球”假说(McKay, 2000)以及“大倾角”假说等(Williams, 2008)。

“雪球地球”假说认为全球冰期事件与罗迪尼亚超大陆裂解有关。在冰期开始前,超大陆裂解导致低纬度地区形成了大量的陆块,引起强烈的大陆化学风化作用,消耗了大气中的二氧化碳。同时由于陆地主要分布在低纬度地区,这样的海陆格局可以有效地克服陆地反照率导致的降温负反馈效应,引起全球气温失控下降,造成极端冰期。极端低温可达零下50℃,地表被完全冰封,不存在冰期沉积,所有冰期地层都是雪球解体后的沉积(Hoffman et al., 1998; Kirschvink, 1992)。虽然“雪球地球”假说可以解释全球性盖帽碳酸盐岩的沉积,以及条带状含铁建造的重现,但却无法解释冰



图1 雪球地球冰期结束后真核生物辐射演化

Fig. 1 Radiation of eukaryotes after the end of the Snowball Earth

期地层中黑色页岩沉积与底栖宏体化石记录(Ye et al., 2015),更无法解释两次全球冰期的持续时间为何不同(Rooney et al., 2015)。

“雪水交融地球”假说着重强调冰期过程中的海洋并非完全冰封,而是于低纬度地区(纬度 $<25^{\circ}$)呈开阔状态(Hyde et al., 2000)。该假说可以解释低纬度地区的冰川沉积旋回,为冰期过程中的生命生存和化石记录解释提供了条件。但是气候模拟显示,该气候状态下,冰川很难在 25° 维持稳定,仅能够在 10° 以内的区域呈现未冰冻的状态(Abbot et al., 2010)。因此,开阔的水域面积可能比较局限。这种气候状态对大气 CO_2 浓度敏感,模拟显示 $\sim 1\,000\times 10^{-6}$ 的大气 CO_2 浓度可以造成“雪水交融地球”的融化和解体,这个值与地球化学观测证据并不相符(Huang et al., 2016),并且低的大气 CO_2 浓度也很难解释盖帽碳酸盐岩的沉积及其对应的碳同位素负偏(Hoffman et al., 2017a)。

“巨蟒气候”假说是介于“雪球地球”假说和“雪水交融地球”假说之间的一种气候模型(Abbot et al., 2011)。该假说强调冰期过程中海洋近乎完全冰封,冰线可能达到南北纬 10° 左右,但在赤道区域存在一些小面积的开放水域。开放的水体随着季节的变化,就像一条巨蟒一样缠绕地球的赤道。这种气候状态的形成主要是由于低纬度地区干旱,造成海冰降雪较少甚至裸露,低的反照率进一步阻止了冰盖的发育,从而避免了全球冰冻。实际上,该假说是为了弥补“雪水交融地球”假说的不足而提出的一种气候状态。这种条件下,全球冰川的消融需要较高的大气 CO_2 浓度,以解决盖帽碳酸盐岩沉积所需的碳来源。实际上,该假说是对全球冰期事件的一种折中的解释方案,需要更多的地质证据支持。

“超大陆不等时裂解”假说认为成冰纪全球冰期事件与地质历史时期的其他冰期无异,但并非是完全冰冻的极端冰期(Eyles and Januszczak, 2004)。该假说认为全球广泛分布的类似冰川沉积的混杂堆积岩可能并不是完全由冰川作用所致,相反,这些沉积跟当时的大地构造背景有关。强调成冰系地层中两套大规模陆源混杂堆积岩为构造作用形成的碎屑流沉积,是由于罗迪尼亚超大陆(Rodinia)的逐步裂解所致,并不能代表全球性冰期事件(Eyles and Januszczak, 2004)。罗迪尼亚超大

陆在裂解过程中,形成了一系列的裂谷盆地。盆地内巨厚的混杂堆积岩和滑塌成因的钙质碎屑岩大部分是水下碎屑流成因,而非冰川成因。局部的冰川沉积,比如坠石,可能与局部的冰期或者大陆裂解导致的地形和海拔有关。因此,该假说强调两次全球冰期事件沉积可能代表了6~7亿年前超大陆裂解有关的裂谷盆地充填沉积,并且随着盆地充填,粗碎屑流沉积主要转变为浅水沉积。但是该假说对盖帽碳酸盐岩的沉积及其碳同位素负偏没有给出合理的解释,也需要更多的证据来支持。

“薄冰地球”假说主要是针对冰期过程中的生命生存提出的一种状态(McKay, 2000)。该假说认为冰期过程中的海洋仍然是完全冰封的,但赤道地区的冰盖厚度很薄,仅为数米厚,可以让太阳辐射穿过冰川达到海洋内部,从而维持光合作用的进行。该假说的成立需要两个条件:一是赤道地区的冰盖具有较高的透射率,即干净的海冰;二是低纬度赤道的低降雪量,进而造成海冰裸露和形成低的海冰反照率(Pollard and Kasting, 2005)。然而,这两个条件还没有在地质观测中得到证实。此外,该气候条件的结束所需的 CO_2 浓度比地质观测证据低一个数量级,可能也无法解释盖帽碳酸盐岩的形成。

“大倾角”假说指的是当时的地球倾角不同于现在的 23.5° ,而是可能达到了 $>54^{\circ}$ (Williams, 2008)。这种条件下,地球的气候分带和大气风带与现在刚好相反,高纬度地区相对温暖,而赤道地区则成为了极寒地区,导致大量冰川发育,全球气候季节变化更加显著。该假说提出,在新元古代成冰纪时期,赤道地区是寒冷的,而高纬度地区可能则相对温暖,海洋存在开阔水域。但对于成冰纪全球冰期事件而言,该假说可能无法有效解释冰川消融和开始的全球等时性以及盖帽碳酸盐岩沉积及其碳同位素负偏。

尽管上述假说可能均存在一定程度上的问题,并不能全面解释成冰纪全球冰期事件的沉积学和地球化学特征,但是这些假说均指出当时全球冰期气候的严重性和特殊性。显然,这些冰期可能不同于地质历史上其他冰期,并且从地球系统演化的角度来看,成冰纪全球冰期事件既是灾难气候,也是机遇事件。冰期的发生虽然打破并改变了原有的地表气候平衡,但也改变了全球海洋性质,为海洋

生命演化奠定了基础。

2 冰期沉积特征

成冰纪全球冰期沉积岩性以碎屑岩为主,全球广泛发育巨厚层的混杂堆积岩、丰富的沉积构造和显著的岩相变化是冰期沉积最典型的特征。混杂堆积岩主要由无分选的、成分复杂多样的砾石与细粒基质构成,具有很低的成分成熟度和结构成熟度(Allen and Etienne, 2008)。其中个别大砾石的表面可以见到冰川擦痕,常被解释为冰川发育的证据。冰期地层中还存在一些细粒的沉积岩,局部发育有冰川沉积特有的沉积构造“坠石构造”。斯图特冰期内部还发育有条带状含铁建造沉积。在我国华南,斯图特冰期沉积内部的富禄组也存在典型的条带状含铁建造层,但是南沱冰期内部则不发育条带状含铁建造(Lang et al., 2018a)。这些细粒沉积物被认为与极端的冰期事件所导致的海洋缺氧有关。

尽管混杂堆积岩、条带状含铁建造和冰川坠石构造说明成冰纪经历了极端的冰室气候灾难,但是,这些沉积特征却并非冰川沉积所独有的,也存在多解性。比如,混杂堆积岩还常见于陆源混杂堆积的泥石流沉积物,或者水下碎屑流沉积物。例如纳米比亚西北部地区的 Chuos 组和 Ghaub 组中的混杂堆积岩,之前认为全部代表冰川作用沉积,近期则被解释成为重力碎屑流沉积物(Nascimento et al., 2016)。Le Heron et al.(2017)在研究美国加州死谷地区的成冰系地层时,识别出了滑塌成因的混杂堆积岩。这些杂砾岩有一个共同的特点是含有巨砾石,而且砾石以盆内成因的碳酸盐岩和砂岩为主,极易与冰川成因的杂砾岩混淆(Le Heron et al., 2017)。除此之外,正如超大陆裂解不等时假说所提出的,在超大陆裂解过程中,一系列裂谷盆地的发育更容易形成重力碎屑流成因的混杂堆积岩(Eyles and Januszczak, 2004)。在深水相沉积区,常见厘米级至分米级的“孤石”,表现为砾石突然出现在细砂岩或粉砂岩中的现象。其实,在重力流沉积过程中,大砾石的超速现象,也可以形成类似“冰川坠石”的“孤石”构造(Le Heron et al., 2017)。由此可见,成冰纪极端冰期的沉积过程可能存在多期性和旋回性,并非一次性的冰川事件。

我国华南南华系南沱组是典型的冰期沉积地

层,且在整个南华盆地的浅水至深水环境均发育分布(Lang et al., 2018a)。基于南沱组的露头沉积学研究和沉积相分析发现,冰期地层存在多种岩石类型,包括混杂堆积岩、(粉)砂岩、碳酸盐岩和泥页岩等(图 2)。这些岩石类型可以归纳为 3 种不同的岩相组合类型:冰川近缘相组合、冰川远缘相组合以及非冰川沉积。研究发现,南沱组内部的岩石类型和岩相组合在纵向上变化显著(图 3)。实际上,新元古代全球冰期沉积具有空间差异性,横向厚度和纵向岩相均表现出明显的变化(Hoffman et al., 2017b)。例如,冰盖消融后,在浅水相区卸载形成的混杂堆积物,在水流、波浪或者潮汐的作用下,被改造或重新被搬运(Hoffman et al., 2017b)。冰川卸载时,沉积中心极易发生迁移,造成沉积物厚度的横向显著变化(Hoffman et al., 2017b)。由于浅水相区更容易被冰川侵蚀或改造,岩相与沉积地层厚度的差异性在浅水沉积相区表现的特别明显,仅在公里尺度内,杂砾岩的厚度便可以发生数量级的变化。冰期沉积的空间差异,给冰期地层对比及沉积环境认识带来了相当的难度。然而,南沱组的这些相组合变化在南华盆地浅水相和深水相具有很好的可对比性,说明在盆地尺度内,南沱冰期过程中的冰盖的动态活动是可以对比的。这意味着南沱冰期至少存在两次冰进-冰退旋回,或者南沱组由两次冰期沉积和两次非冰期沉积序列构成。大塘坡组与南沱组界线处,黑色页岩转变为混杂堆积岩代表了冰盖的推进,代表第一次冰期开始发育。南沱组中部混杂堆积岩转变为细粒沉积以及薄层的碳酸盐岩代表了第一次冰期沉积的结束。中上部重新出现厚层的混杂堆积岩则代表了第二次冰期事件沉积,而南沱组顶部的粉砂岩沉积则是冰期消融时的沉积记录。

高精度的相分析显然是可以恢复雪球地球过程中的冰川动力学演化过程(Lang et al., 2018a)。南沱组的沉积学研究显示,冰期过程中的冰盖是活动的,冰盖存在冰进-冰退旋回,说明整个南沱冰期依然存在活跃的水气循环(Lang et al., 2018a)。需要注意的是,南沱组可能并不等同于马里诺雪球地球冰期,其包括两次冰期事件:第一次冰期沉积则记录的应该是雪球地球发生之前的一次区域性冰川事件;第二次冰期则可能是雪球地球事件(Lang et al., 2018a)。这种观点可以解释为何马力诺冰期

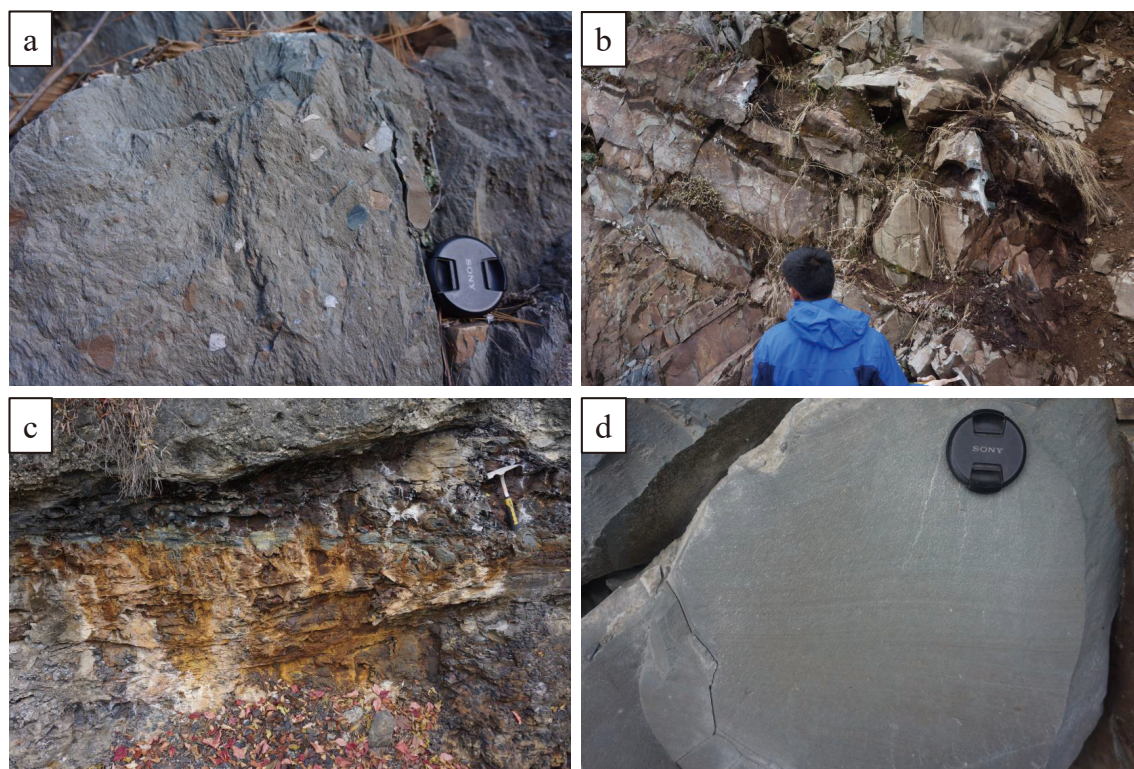


图2 华南南沱组岩石类型

Fig. 2 Lothologies of the Nantuo Formation, South China

的开始时间在全球各地均不同,即区域冰期事件的存在必然无法全球等时对比。除此之外,在南沱组顶部普遍存在一套细粒碎屑岩沉积,这说明南沱冰期的结束应该发生在南沱组内部,而非盖帽碳酸盐岩沉积之时(Zhang et al., 2008)。冰期结束和盖帽碳酸盐岩的沉积之间存在一个明显的时间间隔。澳大利亚地区的成冰纪记录也与南沱组相似,在盖帽碳酸盐岩之下,发育一套细粒的非冰川沉积记录,这些粉砂岩具有一些典型的浅水波痕,为开阔海水的证据,说明全球冰期的消融和盖帽碳酸盐岩沉积存在时间差(Lang et al., 2018a)。

从冰期沉积学的角度来看,沉积记录与全球冰封的状态是不一致的,不支持雪球地球假说。相反,沉积学的特征更倾向于一个非完全冰冻的气候,即当时的海洋依然存在开阔的水域,并且冰盖活动也是活跃的。但是,最终揭示冰期真实的气候状态,还需要全球不同板块和纬度地区更多的浅水-深水相系列剖面的沉积学研究。

3 冰期海洋氧化还原条件

极端冰期事件造成了地表水循环停滞,大量的

陆地和海洋被冰川覆盖,减缓了大陆风化作用,造成海洋与大气隔离,导致海洋接收的物质供给减少,冰期海水主要为缺氧富铁状态(Hoffman et al., 2017a)。

缺氧富铁的证据主要是基于条带状含铁建造和碳酸盐岩夹层的研究。在斯图特冰期地层中,重新出现的条带状含铁建造被认为是海洋缺氧的直接证据。条带状含铁建造主要出现在太古宙和古元古代时期,当时大气氧气浓度极低,海水缺氧铁化(富集 Fe^{2+})。成冰纪的条带状含铁建造的出现说明冰期过程中的海水也是铁化的。来自冰期地层的铁组分研究发现,活性铁和总铁含量的比值小于 0.38,同时黄铁矿与活性铁含量比低于 0.8,意味着成冰纪海洋为缺氧铁化,证实了这一观点。Lechte and Wallace(2016)对澳大利亚和纳米比亚地区的条带状含铁建造的元素和沉积学研究发现,其铁含量可高达 50%,而且并不存在 Ce 异常,这进一步表明冰期过程中的海水是富集铁的。我国华南南沱组内部的碳酸盐岩夹层的元素地球化学和稀土分析显示,冰期碳酸盐岩具有很高的铁和锰含量,其中铁和锰的平均含量均大于 $10\,000 \times 10^{-6}$,明

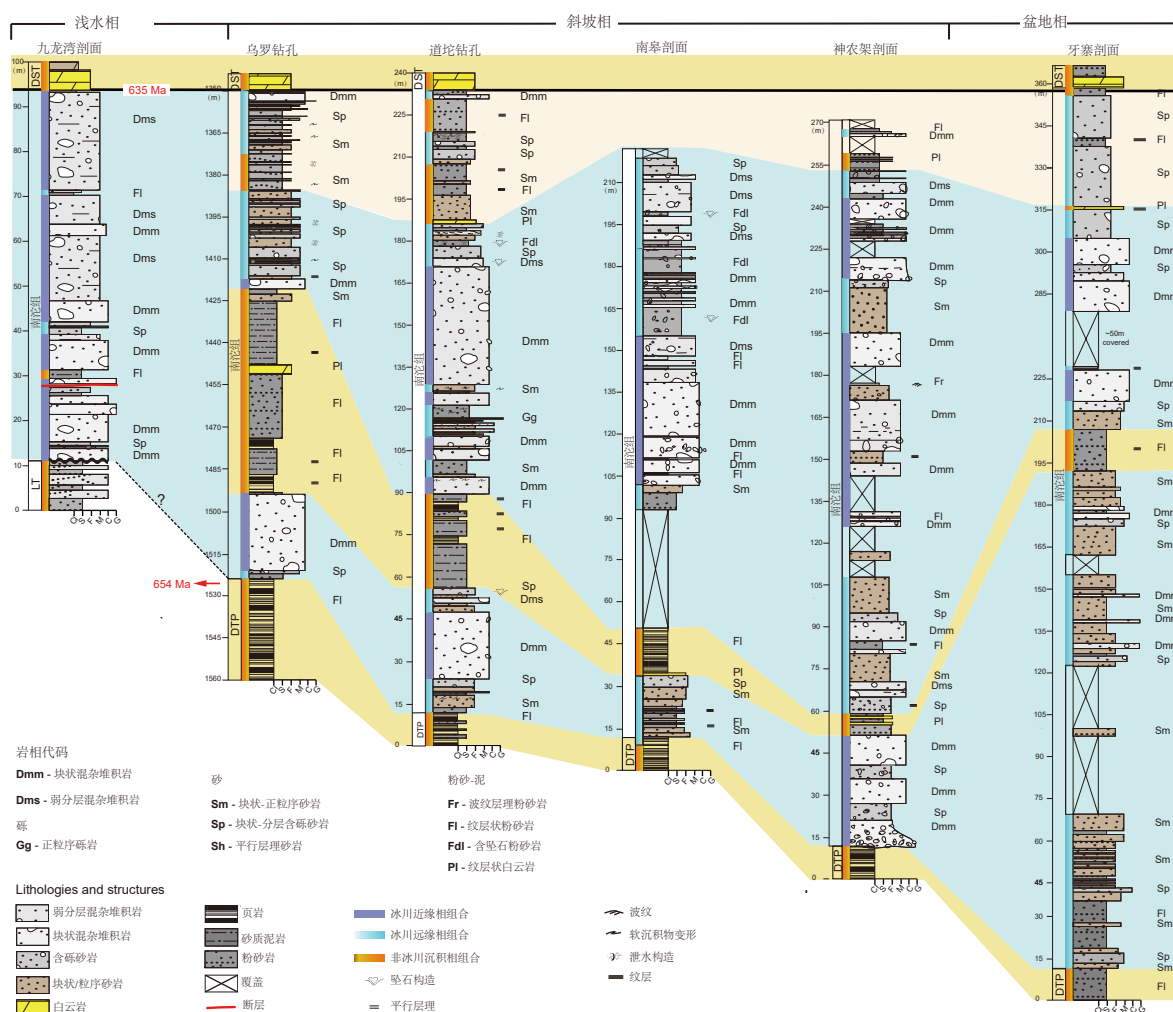


图3 华南南沱组沉积序列与演化 (Lang et al., 2018a)

Fig. 3 Sedimentary sequence and evolution of the Nantuo Formation, South China (Lang et al., 2018a)

显高于显生宙碳酸盐岩的铁锰含量,代表了当时海水是富铁锰的(冯永等, 2021)。南沱组的碳酸盐岩与条带状含铁建造类似,也不存在 Ce 异常。缺氧环境中的铁,可能来自深部热液或者冰川陆源输入。

然而,冰期海洋可能并非全部为缺氧铁化,在受冰川沉积影响显著的陆架区,海洋可能为分层的,在冰川接触线或近缘环境为氧化,而在冰川远缘环境则为缺氧铁化。比如,条带状含铁建造的铁同位素值在冰川接地线(接触线)最低,平均为 -0.5‰ 左右。在冰川近缘环境,铁同位素值较高,平均为 $+1\text{‰}$ 左右;在冰川远缘环境,铁同位素值最高,可以达到 $+2\text{‰}$ (Lechte et al., 2019)。铁同位素在空间上的梯度变化与 Ce 异常变化一致,由浅水至深水均呈现递增趋势(Lechte et al., 2019)。在冰川接触

线附近, Ce 异常小于 1。在冰川近缘环境, Ce 异常约等于 1。在冰川远缘环境, Ce 异常大于 1。铁同位素与 Ce 异常的空间梯度变化与铁铝比值(Fe/Al)呈相反关系,由冰川接触线至冰川近缘、冰川远缘环境, Fe/Al 比值逐渐降低。这种空间梯度主要是冰期海水的氧化还原分层所致(Lechte et al., 2019)。在冰川接触线附近,冰川携带的大量融水含有丰富的氧气泡,局部形成富氧环境。在冰川接触线附近,大量的还原铁被氧化为铁氧化物或氢氧化物。这个过程可以造成海水铁同位素的降低,即铁的氧化比例越高,则沉积物铁同位素值越低, Fe/Al 比值就越高。于是,形成冰川融化导致大量氧气注入海洋的情况,即所谓的“冰川氧泵”。该研究表明,即使在全球完全冰冻的条件下,陆架海水在冰川消融驱动的状态下,可以呈现氧化还原分层现象。

华南南沱组的沉积学与地球化学研究则认为,全球冰期过程中的海洋氧化还原状态存在交替动态演化的特征,依次经历了贫氧氧化、缺氧铁化和缺氧硫化,冰川沉积旋回变化及其伴随的溶解氧输入可能是氧化还原动态演化的关键控制因素(Shen et al., 2022)。除此之外,南沱组的黄铁矿硫同位素和有机碳同位素研究认为,冰期过程中的海洋存在活跃的生物地球化学循环过程。虽然海洋初级生产力处于较低的水平,但是冰期过程中仍然存在明显的陆源输入和有机质埋藏,可能为真核生物的辐射奠定基础(Ma et al., 2022)。南沱组的氮同位素研究也证实了雪球地球过程中存在有氧氮循环,指示了冰期过程中存在开阔的水域和氧化环境(Song et al., 2023)。由此可见,全球冰期过程中的海洋氧化还原条件在时间上和空间上都存在差异性,并非长期处于缺氧铁化状态。

4 冰期结束后的大气与海洋环境剧变

成冰纪全球冰期的结束以全球范围内沉积一套数米厚的碳酸盐岩为标志,由于该套碳酸盐岩直接覆盖在冰期沉积岩之上,被称之为盖帽碳酸盐岩。雪球地球假说认为,冰期过程中持续的火山作用,

释放了大量的 CO_2 , 造成强烈的温室效应,才终结了亘古极寒。极高的 CO_2 也会引起强烈的大陆风化作用,向海洋中注入了大量 Mg 、 Ca 离子,造成了盖帽碳酸盐岩沉积,紧接着,真核生物发生辐射演化。气候模拟显示,冰川消融十分迅速,极端冰室气候向温室气候转变快速完成,大气与海洋系统发生了显著的环境变化。以南沱冰期为例,全球冰川短时间快速消融导致了极端的大陆化学风化作用、海洋短暂缺氧硫化、生产力的快速恢复和氧气的迅速增加(图4)。

从冰碛杂砾岩到冰后期盖帽碳酸盐岩的沉积转换是冰期结束的标志性事件,是冰期结束的最后阶段。来自云南地区南沱组冰川杂砾岩顶部的一套沉凝灰岩地层的高精度锆石 U-Pb CA-ID-TIMS 年龄分析发现,南沱冰期消融时间为 634.57 ± 0.88 Ma, 该年龄值与前人报道的来自湖北宜昌南沱组之上盖帽碳酸盐岩顶部的 635.23 ± 0.57 Ma 基本一致,精确限定了该极端气候结束的时间应该在 ~ 635 Ma, 同时,也限定了冰期后盖帽碳酸盐岩的沉积时限小于 1 百万年(Zhou et al., 2019)。

高精度年龄数据说明全球冰期的解体是一个迅速的过程。在这一过程中,高的大气 CO_2 浓度必

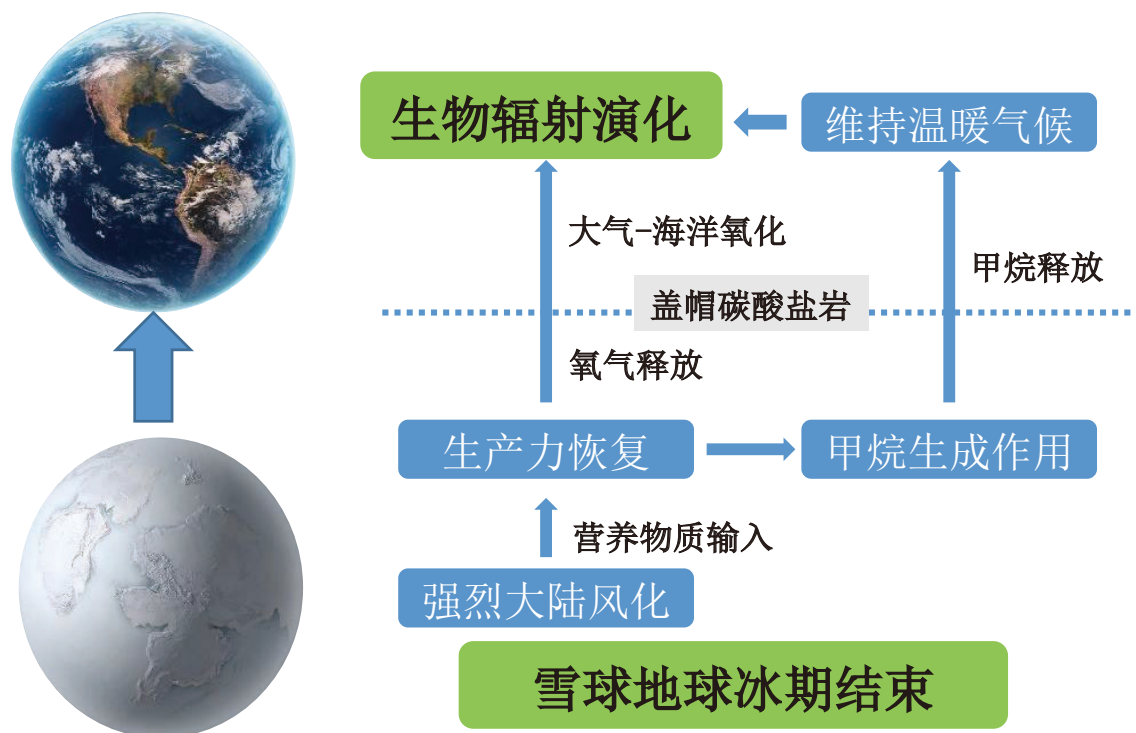


图4 雪球地球结束后的大气与海洋环境变化

Fig. 4 Environmental changes in atmosphere and ocean after the melting of the snowball Earth

然会引起强烈的大陆化学风化作用,从而使得大量碱性物质进入海洋,并以盖帽碳酸盐岩的形式沉淀下来。华南南沱组冰期沉积和陡山沱组底部的盖帽碳酸盐岩的镁同位素研究发现,南沱组上部地层中出现了一次显著的镁同位素正漂移(^{26}Mg 富集),而盖帽碳酸盐岩中的镁同位素值已经显著降低(Huang et al., 2016)。由于在化学风化过程中,岩石中的镁会发生显著的同位素分馏,使得风化残余物中富集重的镁同位素(^{26}Mg),而且 ^{26}Mg 的富集程度与化学风化强度直接相关,镁同位素可以用来指示地质历史时期的化学风化强度。南沱组的镁同位素结果表明冰川消融后的确伴随有强烈的化学风化作用。但与雪球地球假说的预测不同,最强化学风化作用要明显早于盖帽碳酸盐岩的沉积,这也与沉积学证据一致,说明盖帽碳酸盐岩沉积存在滞后效应。造成盖帽滞后沉积可能是由于冰期结束时大气高 CO_2 浓度造成海洋酸化的结果。随着化学风化作用对大气中 CO_2 的消耗和海水pH值的升高,最终导致了盖帽碳酸盐岩在全球范围的沉积。

强烈的大陆化学风化作用为海洋带来大量的营养盐,促进了初级生产力的恢复与爆发。华南南沱组顶部发育有大量的沉积型黄铁矿结核,是冰期后硫酸盐风化输入增强和初级生产力爆发的主要证据(Lang et al., 2018b)。黄铁矿结核的大小与含量在空间上存在明显变化的规律,由深水相至浅水相都呈逐渐降低的趋势。单个黄铁矿结核的不同部位具有相同的硫同位素值,同一沉积环境的不同黄铁矿结核的硫同位素差别不大,但是不同沉积相区则表现出明显的差异性。根据黄铁矿硫同位素与含量模型的数值模拟,南沱组顶部黄铁矿结核的大量生成代表了极端冰期结束时全球海洋存在短暂的缺氧硫化状态。由于海洋的硫化需要大量有机质的输入,因此南沱组顶部大量黄铁矿的沉积代表了海洋初级生产力在冰期结束后的快速恢复与爆发。

海洋初级生产力的爆发还体现在冰期消融后碳同位素的快速变化。根据全球盖帽碳酸盐岩的碳同位素数据统计,盖帽碳酸盐岩沉积时的海水碳同位素约为-3‰,这个值明显高于冰期海水值(-6‰)。那么冰期结束过程中应该存在海水无机碳同位素的快速升高,在千年到万年尺度内,升高

了3‰(He et al., 2021)。生产力的快速恢复造成的有机碳埋藏可能是此正偏的原因。有机碳的快速埋藏和黄铁矿结核的大量生成可以直接导致大气的氧化。因此,盖帽碳酸盐岩沉积时大气氧气浓度可能已经升高。结合陡山沱组浅水陆棚—斜坡—盆地相等多个盖帽碳酸盐岩剖面的碳同位素研究发现,盆地环境的盖帽碳酸盐岩的中上部存在明显的碳同位素负漂移,而斜坡相则基本保持不变。盆地相的碳同位素负漂移可能是由于深部水体中溶解有机碳(DOC)的氧化所造成,与冰期结束后温盐环流的恢复有关(Lang et al., 2016)。因此,盖帽碳酸盐岩记录的碳同位素变化进一步支持了冰期消融过程中大气与海洋的氧化,为埃迪卡拉纪动物演化奠定了条件。

5 问题与展望

近二十年来,成冰纪极端冰期事件在沉积学、冰期海洋氧化还原和冰期结束及环境变化方面取得了长足进步,发现全球冰期的沉积具有旋回性,揭示了冰期海洋氧化还原条件的时空差异性,盖帽碳酸盐岩沉积对冰川消融的滞后性等。全球冰期的结束虽短暂,却出现了强烈的大陆风化、海洋的缺氧分层、生产力的快速恢复、有机碳的埋藏和大气氧气浓度的升高。可以说,该时间段是极端冰室气候向温室气候的快速转换阶段,是地表环境由极端非稳态向稳态转变的时期,是宜居地球环境建立的开端。但是,在成冰纪极端冰期的气候演化、沉积记录以及地球化学特征等方面依然存在诸多争议。

作为现在学术界的主流观点,雪球地球假说常被接受并用于解释成冰纪全球冰期的沉积与地球化学特征,但至今仍然缺乏全球冰封的直接证据。特别是冰期沉积学的研究发现了一系列的开放水体证据后,雪球地球假说遭到质疑。冰期沉积除了粗粒碎屑岩外,也包括砂岩、粉砂岩,甚至是页岩夹层,岩相在垂向序列上表现为频繁变化。岩相的变化常被解释为冰川作用的消融与推进,代表冰期过程中气候冷暖的波动(Hu et al., 2020; Lang et al., 2018a; Leather et al., 2002)。在极端寒冷气候条件下,大气呈现反哈德利环流现象,赤道地区冰川发生升华作用,运移至亚热带地区沉降下来,使得冰盖由高纬度向赤道方向对流。在此过程中,中-高

纬度冰盖表面覆载的火山、风尘碎屑物质,对流至低纬度(<25°)冰川内部,也可以形成细粒沉积物。因此,冰期气候与沉积的旋回性是否是由气候的冷暖波动引起的,需要中纬度地区的冰期沉积序列来验证。除此之外,受制于粗粒碎屑岩在地球化学研究中的先天劣势,系统的冰期地层地球化学研究,开展较少且存在争议。冰期地层的大陆风化研究表明,极端冰期过程中存在水循环活跃的间冰期。这一观点也得到了来自纳米比亚冰期地层的氮同位素支持,冰期过程中存在活跃的生物固氮和反硝化作用(Johnson et al., 2017; Song et al., 2023)。气候与海洋生物地球化学的变化可能对冰期过程中的大气圈产生影响,比如大气中的氧气与二氧化碳浓度可能会升高。未来研究,需要更多关注冰期陆相沉积记录,揭示冰期中大气组分演化,可能为理解极端气候提供新的思路。

致谢: 谨对两位匿名审稿人的建设性意见表示由衷感谢。

References

- Abbot D S, Pierrehumbert R T, 2010. "Mudball: Surface dust and Snowball Earth deglaciation" [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115: D03104. doi: 10.1029/2009JD012007.
- Abbot D S, Voigt A, Koll D, 2011. The Jormungand global climate state and implications for Neoproterozoic glaciations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116 (D18): 4121–4132.
- Allen P A, Etienne J L, 2008. Sedimentary challenge to Snowball Earth[J]. *Nature geoscience*, 1 (12): 817–825.
- Chu X L, 2004. Snowball Earth during the Neoproterozoic[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23 (3): 233–238 (in Chinese with English abstract).
- Cui X Z, Jiang X S, Wang J, et al., 2014. Filling sequence and evolution model of the Neoproterozoic rift basin in central Yunnan Province, South China: Response to the breakup of Rodinia Supercontinent[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32 (3): 399–409 (in Chinese with English abstract).
- Eyles N, Januszcak N, 2004. 'Zipper-rift': a tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 65 (1–2): 1–73.
- Feng Y, Gu S Y, WU Z Y, et al., 2021. Oceanic redox condition of the Nantuo Formation at the Wuhe profile, Guizhou Province: Evidences from its geochemistry and mineralogy[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41 (1): 33–44 (in Chinese with English abstract).
- He R, Lang X, Shen B, 2021. A rapid rise of seawater $\delta^{13}\text{C}$ during the deglaciation of the Marinoan Snowball Earth[J]. *Global and Planetary Change*, 207.
- Hoffman P F, 2017a. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology[J]. *Science Advances*, 3: e1600983.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al., 1998. A Neoproterozoic snowball earth[J]. *Science*, 281: 1342–1346.
- Hoffman P F, 2017b. Sedimentary depocenters on Snowball Earth: Case studies from the Sturtian Chuos Formation in northern Namibia[J]. *Geosphere*, 13 (3): 811–837.
- Hu J, 2020. Glacial origin of the Cryogenian Nantuo Formation in eastern Shennongjia area (South China): Implications for macroalgal survival[J]. *Precambrian Research*, 351.
- Huang J, Chu X, Jiang G, et al., 2011. Hydrothermal origin of elevated iron, manganese and redox-sensitive trace elements in the c. 635 Ma Doushantuo cap carbonate[J]. *Journal of the Geological Society*, 168 (3): 805–816.
- Huang K J, Teng F Z, Shen B, et al., 2016. Episode of intense chemical weathering during the termination of the 635 Ma Marinoan glaciation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113: 14904–14909.
- Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al., 2000. Neoproterozoic 'snowball Earth' simulations with a coupled climate/ice-sheet model[J]. *Nature*, 405 (6785): 425–429.
- Jiang G, Kennedy M J, Christie-Blick N, et al., 2006. Stratigraphy, Sedimentary Structures, and Textures of the Late Neoproterozoic Doushantuo Cap Carbonate in South China[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76 (7): 978–995.
- Johnson B W, Poulton S W, Goldblatt C, 2017. Marine oxygen production and open water supported an active nitrogen cycle during the Marinoan Snowball Earth[J]. *Nature Communications*, 8: 1316.
- Kirschvink J L, 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball Earth. The Proterozoic Biosphere: a multidisciplinary study[M]. Cambridge University Press, New York, 51–52.
- Lang X, Chen J, Cui H, et al., 2018a. Cyclic cold climate during the Nantuo Glaciation: Evidence from the Cryogenian Nantuo Formation in the Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 310: 243–255.
- Lang X, Shen B, Peng Y, et al., 2018b. Transient marine euxinia at the end of the terminal Cryogenian glaciation[J]. *Nature Communications*, 9 (1): 3019.
- Lang X, Shen B, Peng Y, et al., 2016. Ocean oxidation during the deposition of basal Ediacaran Doushantuo cap carbonates in the Yangtze Platform, South China[J]. *Precambrian Research*, 281: 253–268.
- Le Heron D P, Tofaif S, Vandyk T, et al., 2017. A diamictite dichotomy: Glacial conveyor belts and olistostromes in the Neoproterozoic of Death Valley, California, USA[J]. *Geology*,

- 45 (1) : 31 – 34 .
- Leather J, Allen P A, Brasier M D, et al., 2002. Neoproterozoic snowball Earth under scrutiny: Evidence from the Fiq glaciation of Oman[J]. *Geology*, 30 (10) : 891 – 894 .
- Lechte M, Wallace M, 2016. Sub-ice shelf ironstone deposition during the Neoproterozoic Sturtian glaciation[J]. *Geology*, 44 (11) : 891 – 894 .
- Lechte M A, Wallace W M, Hood S A, et al., 2019. Subglacial meltwater supported aerobic marine habitats during Snowball Earth[J]. 116 (51) : 25478–25483.
- Ma H, Shen B, Lang X, et al., 2022. Active biogeochemical cycles during the Marinoan global glaciation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 321 (3) : 155 – 169 .
- McKay C, 2000. Thickness of tropical ice and photosynthesis on a snowball earth[J]. *Geophysical Research Letters*, 27 (14) : 2153 – 2156 .
- Nascimento D B, Ribeiro A, Trouw R A J, et al., 2016. Stratigraphy of the Neoproterozoic Damara Sequence in northwest Namibia: Slope to basin sub-marine mass-transport deposits and olistolith fields[J]. *Precambrian Research*, 278: 108 – 125 .
- Pollard D, Kasting J F, 2005. Snowball Earth: A thin-ice solution with flowing sea glaciers[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110 (C7) .
- Rooney A D, Strauss J V, Brandon A D, et al., 2015. A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations[J]. *Geology*, 43 (5) : 459 – 462 .
- Sahoo S K, Planavsky J N, Kendall B, et al., 2012. Ocean oxygenation in the wake of the Marinoan glaciation[J]. *Nature*, 489 (7417) : 546 – 549 .
- Shen W, Zhu X, Yan B, et al., 2022. Secular variation in seawater redox state during the Marinoan Snowball Earth event and implications for eukaryotic evolution[J]. *Geology*, 50 (11) : 1239 – 1244 .
- Song H, An Z, Ye Q, et al., 2023. Mid-latitude habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation[J]. *Nature Communications*, 14: 1564 .
- Williams G E, 2008. Proterozoic (pre-Ediacaran) glaciation and the high obliquity, low-latitude ice, strong seasonality (HOLIST) hypothesis: Principles and tests[J]. *Earth-Science Reviews*, 87 (3) : 61 – 93 .
- Yan B, Zhu X K, Tang S H and Zhu M Y, 2010. Fe Isotopic Characteristics of the Neoproterozoic BIF in Guangxi Province and its Implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 84 (7) : 1080 – 1086 (in Chinese with English abstract).
- Ye Q, Tong J, Xiao S, et al., 2015. The survival of benthic macroscopic phototrophs on a Neoproterozoic snowball Earth[J]. *Geology*, 43 (6) : 507 – 510 .
- Yuan X, Chen Z, Xiao S, et al., 2011. An early Ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes[J]. *Nature*, 470 (7334) : 390 – 393 .
- Zhang S, Jiang G, Han Y, 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China[J]. *Terra Nova*, 20 (4) : 289 – 294 .
- 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 (4) : 306 – 314 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C, Huyskens M H, Lang X, et al., 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations[J]. *Geology*, 47 (3) : 251 – 254 .

附中文参考文献

- 储雪蕾, 2004. 新元古代的“雪球地球”[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23 (3) : 233 – 238.
- 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等, 2014. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应[J]. *沉积学报*, 32 (3) : 399 – 409.
- 冯永, 顾尚义, 吴忠银, 等, 2021. 贵州五河南沱组形成的氧化还原环境: 地球化学与矿物学证据[J]. *矿物学报*, 41 (1) : 33 – 44.
- 闫斌, 朱祥坤, 唐索寒, 等, 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.
- 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.