中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 4 期： 1593–1603
经典永流传
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

“雪球地球”假说的发展与挑战

宋虎跃[1*]，沈冰[2]，刘永岗[3]，叶琴[1]

1. 地质微生物与环境全国重点实验室，中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院，武汉 430074
2. 北京大学地球与空间科学学院，北京 100871
3. 北京大学物理学院，北京 100871
* 通讯作者，E-mail：hysong@cug.edu.cn

2025-10-14收稿，2026-02-10修回，2026-03-03接受，2026-03-13网络版发表
国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFF0810300)和国家自然科学基金项目(42372024)资助

摘要 从1871年新元古代冰川沉积物第一次被发现，到1931年同时期类似的冰川沉积物被证实在全球不同大陆广泛分布，尽管当时新元古代全球板块古地理位置未知，冰川理论存在很大争议，但是这一全球性的特殊地质现象仍被地质学者广泛关注。随着板块构造理论及相关古地磁研究的发展，20世纪90年代正式发表的两篇关键文章奠定了“雪球地球”假说的基础。这些研究首次使用“雪球地球(Snowball Earth)”一词来解释新元古代低纬度地区出现冰川的现象，系统地提出全球冰封的“雪球地球”假说，使其成为国际地质学和气候学领域的研究热点。本文解读这两篇重要的经典论文，重温两位科学家如何基于地质现象提出科学假说，该假说阐述了冰期结束后的盖帽碳酸盐岩沉积及其异常碳同位素组成、条带状铁建造沉积、全球冰川的同步启动与结束等的机理和过程。与已发展较为成熟的板块构造理论不同，“雪球地球”假说作为一个地质学上的科学假说，尽管已获很多证据佐证，但仍面临诸多质疑和挑战。与该假说全球冰封核心思想存在矛盾的主要包括沉积、古生物、地球化学等方面的记录，仍有待进一步研究来揭示更多的科学本质。为此，本文对过去30多年“雪球地球”假说的发展和挑战进行了简单的梳理，以期为今后的相关研究工作提供参考。

关键词 “雪球地球”假说，新元古代，硬雪球模型，水带模型，冰-陆模型

1 引言

“雪球地球”(Snowball Earth)是地质学中为了解释前寒武纪一些地质时期出现的全球分布的冰川沉积记录/现象而提出的假说。该假说认为，在这些时期，整个地球(海洋和陆地)被冰雪覆盖，即全球冰封的硬雪球模型(Hard Snowball model)，是全球性的大冰期(Kirschvink，1992；Hoffman等，1998)。研究表明，类似的全球性大冰期在元古宙早期和晚期曾多次发生，其中新元古代晚期成冰纪的冰期事件被关注和研究的最多，该时期记录了两次全球性冰期，分别为较古老的斯图特冰期(Sturtian，~717–660 Ma)和较年轻的马里诺冰期(Marinoan，~650–635 Ma)。

从成冰纪冰川沉积物第一次被发现(1871年)到“雪球地球”假说的提出间隔了120多年，经历了地质现象被发现、冰川成因理论早期被质疑、板块构造理论诞生为古地理重建奠定基础，以及可靠的古地磁学证据的获取，最终，Kirschvink教授于1992年首次使用“雪球地球”一词来解释低纬度的冰川现象(Kirschvink，1992)。Hoffman等于1998年发表的论文，标志着经典的硬雪球模型(Hoffman等，1998)正式确立。该假说认为新元古代晚期出现了全球冰封的严酷冰川事件，并系统地解释了全球冰期的同步启动和终止、冰期结束后“盖帽碳酸盐岩”的全球广泛沉积，以及盖帽碳酸盐岩中异常的碳同位素组成等关键地质证据。同时，该假说还提出“雪球地球”极端气候是生命演化的“过滤器”和“瓶颈”，对早期多细胞复杂生命崛起具有显著影响。尽管许多研究结果支持全球冰封的硬雪球模型(见Hoffman等，2017总结)，但也有一些

中文引用格式：宋虎跃, 沈冰, 刘永岗, 叶琴. 2026. “雪球地球”假说的发展与挑战. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1593–1603, doi: 10.1360/SSTe-2025-0351
英文引用格式：Song H, Shen B, Liu Y, Ye Q. 2026. Snowball Earth hypothesis: Development and challenge. Science China Earth Sciences, 69(4): 1556–1565, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1888-7

© 2026《中国科学》杂志社

证据与之存在矛盾，为此相关学者相继提出了其他模型作为补充或替代，如水带模型(Water-belt model，也被称为泥球模型/Slushball model或软雪球模型/Soft Snowball model，Hyde等，2000)、“耶梦加得状态”(Jormungand state，Abbot等，2011)、冰陆模型(Icy-continent model，Shen等，2025)等，这些模型虽然解决了硬雪球模型存在的某些问题，但其真实性和可靠性仍有待进一步的检验。“雪球地球”假说的提出在国际上掀起研究热潮，促进了多学科交叉和深时地球系统科学的发展，研究范畴涵盖沉积学、古地理学、古生物学、古气候学、古环境学和年代学等多个学科领域(图1)。本文重点解读了“雪球地球”假说的2篇经典论文，同时对早期为“雪球地球”假说奠定基础和提供关键科学依据的9篇核心论文、“雪球地球”假说进一步发展的2篇重要论文进行概述。

2　历史背景

1871年，Thomson首次报道了苏格兰西南部艾莱岛波特阿斯卡格(Port Askaig)的新元古代冰川沉积物(当时描述为“寒武纪”，Thomson，1871)，此后类似的冰川沉积物陆续在全球其他大陆被发现，但20世纪60年代之前，国际学者对其冰川成因的解释存在很大争议(Hoffman，2011)。此后，随着板块运动理论的发展和古地磁学相关工作的开展，Kirschvink(1992)根据古地磁结果，提出低纬度赤道地区曾形成冰川沉积物，并首次使用“雪球地球”解释该现象。6年后，Hoffman等(1998)在此基础上，结合地球化学和地质证据提出“雪球地球”假说(硬雪球模型)。根据Hoffman(2011)关于新元古代冰川研究历史的介绍，从“雪球地球”地质现象的发现到假说提出的过程，可大致分为五个阶段：

第一阶段(1871–1908年)，新元古代冰川沉积物的发现。该阶段见证了全球多个大陆新元古代(当时报道为“寒武纪”)冰川沉积地层的发现和识别：包括苏格兰西南部、澳大利亚南部、挪威东北部、斯瓦尔巴群岛西部、中国南方以及印度西北部，识别标准主要为具有冰川擦痕的非层状基质支撑砾岩。第二阶段(1909–1941年)，新元古代冰川沉积物全球分布格局的确立。1909年至1937年间，已确认存在新元古代冰川沉积物的大陆数量从5个增至14个，新增地区包括非洲南部、中部及西部、亚洲中部与北部、北美洲东西两岸以及南美洲东部。至1937年莫斯科第17届国际地质大会时，除南极洲外，全球所有大陆均发现了新元古代冰川沉积物。新元古代冰川记录的全球分布特征，彻底改变了学界对前寒武纪气候极端性的认知。第三阶段(1942–1964年)，反驳与质疑阶段。该阶段研究揭示了新元古代冰川作用的两个重要发现：(1) 古地磁证据显示新元古代冰川曾延伸至低古纬度乃至赤道地区；(2) 紧随新元古代冰期之后出现的真核生物辐射现象。然而，随着20世纪50年代浊流理论对递变层理成因的揭示，部分学者将“冰碛岩”重新解释为非冰

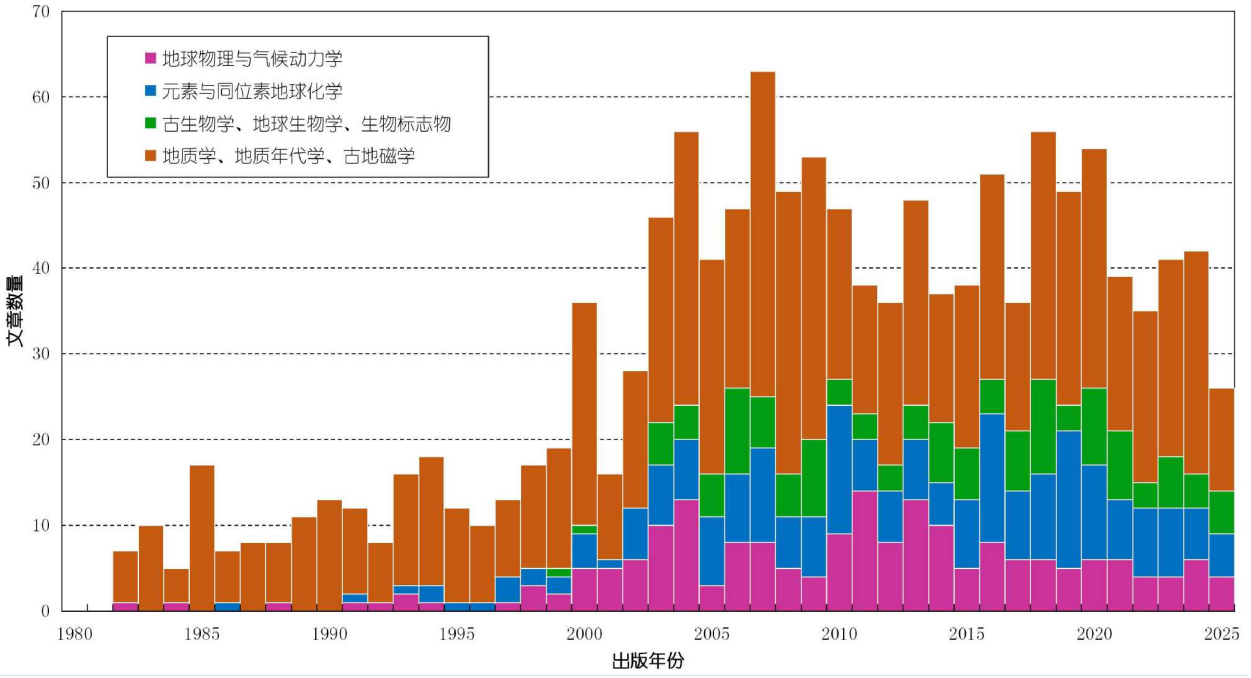


图 1　1982年以来关于新元古代成冰纪冰期研究论文的发表情况。在Hoffman等(2017)基础上改进

川成因的块体流沉积，使低纬度冰川假说遭遇强烈质疑。这些争议反映了当时沉积学理论与冰川地质学的激烈碰撞，而相关讨论会议则成为新元古代冰川研究从现象描述转向机制分析的重要转折点。第四阶段(1965–1981年)，板块构造理论为“雪球地球”假说的提出奠定基础。这一时期标志着板块构造理论从科学争议走向主流认知的关键阶段(见郑永飞和李振新，2025详述)。板块构造理论通过揭示岩石圈运动机制，为重建新元古代古地理格局奠定了基础，该时期的研究据此重新厘定了新元古代冰川作用的范围。此外，一些研究发现了独特的化学沉积物(如含铁建造、含锰地层和盖帽碳酸盐岩)，并将其作为识别新元古代冰川事件的标志性指标。同时，对经典波特阿斯卡格冰碛岩(Port Askaig Tillite)的重新研究，确立了前寒武纪冰川沉积的判别标准。同时，简单能量平衡模型显示，地球可能因冰反照率反馈而进入全球冻结状态，这为“雪球地球”假说提供了初步的理论支撑。第五阶段(1982–1997年)，“雪球地球”假说产生前夕。这一时期出现了诸多重要进展，包括对冰川-海洋过程及沉积物认识的深化，碳同位素作为地层对比工具的广泛应用，对近源冰川-海洋沉积物古纬度可靠的古地磁约束的获取，对冰川期后“盖帽碳酸盐岩”特殊沉积学特征的深入理解，以及对低纬度低海拔冰川化成因机制的深入研究。该阶段新的科学发现和理论发展为1998年“雪球地球”假说的提出奠定了基础。

在新元古代冰川早期研究发展的过程中，前寒武纪晚期大冰期概念、冰反照率反馈机制、硅酸盐风化-温室效应负反馈机制的提出和建立对“雪球地球”假说的提出具有重要的意义，这里有必要对这些发展进行简单概述。

(1) 前寒武纪晚期大冰期概念的确立：1964年，Harland连续发表的3篇重要学术论文(Harland，1964a，1964b；Harland和Rudwick，1964)全面系统地论述前寒武纪晚期大冰期的关键证据、具体特征及其对地层对比、生命演化的重要意义。提出以“冰筏沉积”(ice-rafting)作为关键证据区分冰碛岩的冰川成因与滑塌、浊流等非冰川过程。结合挪威、格陵兰等地的岩石古磁学结果证实该时期冰川沉积形成于赤道附近，并且通过汇编冰碛岩在现今地球的分布和前寒武纪的古地理分布明确冰川沉积在全球广泛分布。同时，Harland在缺乏同位素年代学证据约束的情况下，通过低纬度冰川的广泛分布提出冰川事件全球同步性的假设，并且大胆地提出这次显著的冰川事件可以作为全球范围内进行前寒武纪地层对比的关键时间标尺。此外，Harland认为这次大冰期的结束以及随之而来的气候和环境剧变(如海平面上升)，可能为寒武纪初期后生动物的快速辐射提供生态机遇。这3篇论文成功地将岩石学、沉积学、地层学、古地磁学和古生物学联系起来，对前武纪晚期大冰川证据进行全面、系统地总结，将分散的发现整合成一个连贯的全球性事件图景，极大地推动了低纬度冰川假说的发展，同时为后来的“雪球地球”假说提供了早期的关键证据。

(2) 低纬度冰期记录的不同认识和解释：以Harland为代表的学者认为前寒武纪晚期大冰期具有全球性和同步性特征，但是一些学者对其提出不同的观点和质疑。1971年，Crawford和Daily在Nature上发表短评(Crawford和Daily，1971)，首先肯定了前寒武纪晚期冰川的广泛分布，但对这些冰川的全球同步性提出了质疑。他们依据晚古生代冈瓦纳大陆的冰川中心是随时间移动的科学推论，指出前寒武纪晚期大冰期冰川本质上是一种极地或近极地现象，其分布范围会随着极移而改变。他们认为，随着前寒武纪晚期地球极点的移动，冰川中心也随之从一个大陆迁移到另一个大陆。因此，不同大陆上发现的冰碛岩应该是在不同时间形成的(穿时的)，它们只是记录了极点漂移的路径，而非一次单一全球性的冰冻事件。Crawford和Daily从“气候事件对比”转向“极移-冰川耦合分析”，将板块构造(大陆漂移)、极移和气候事件结合起来进行动态分析，尽管他们的观点被后来的研究否定，但是他们提出的质疑使得后来的“雪球地球”理论在论证上更加严谨。

围绕低纬度冰川的成因，针对冰川序列中暖水碳酸盐岩、蒸发岩、红层与冰碛岩的共生现象，Williams (1974，1975)提出地球黄赤交角(ε)在前寒武纪晚期显著增大的假说来解释这些矛盾，即“大倾角假说”。提出当ε >54°时，低纬度地区太阳年辐射量将低于两极，导致冰川优先在赤道地区发育。ε增大还会造成全球季节性增强、气候分带减弱，进而导致冰川沉积、碳酸盐岩、红层和蒸发岩的特定组合同时出现在当时的低纬度地区。他认为如果大倾角是主要原因，那么低纬度冰川事件应该在全球范围内是基本同步的。Williams将天体力学和古气候学结合，提出了一个颠覆传统的大胆假设，为前寒武纪极端气候事件和特殊的沉积现象提供了自洽的机制解释，但其缺乏地球倾角大规模变化的记录，在后续研究中未被广泛接受。

(3) 早期气候模型的发展：Budyko于1969年率先提出了一个基于能量平衡的简化气候模型(Budyko，1969)，定量研究太阳辐射变化对地球气候的影响。该研究不仅建立了辐射-温度的定量关系，同时首次提出冰反照率正反馈的放大效应,对第四纪大冰期的发展进行解释。更为重要，文章提出一个革命性的概念：当冰盖推进到一个临界纬度(约北纬50°)后，冰反照率反馈将失去控制，导

致冰盖迅速向赤道扩张，即使辐射轻微减少(1.6%)，也可能引发全球冻结。同年，Sellers构建了一个基于能量平衡的简单数值模型(Sellers，1969)，定量研究不同因素对全球气候的影响。研究发现太阳常数只需减少2%–5%就可能足以引发新的冰河时代，揭示全球气候系统对辐射强迫的高度敏感性。该能量平衡模型从物理学上定量地证明，由于冰反照率正反馈的存在，地球气候系统内在的不稳定性可能导致全球性的冰川事件。这两篇论文实质上是“雪球地球”假说的早期表述，为Kirschvink(1992)和Hoffman等(1998)提出“雪球地球”假说提供了关键的数理基础和科学依据。

Walker等(1981)率先提出“硅酸盐风化-温室效应负反馈机制”，解释地表温度在数十亿年地质尺度上的稳定性。核心是将硅酸盐风化速率和全球平均温度联系起来，而温度又通过CO_2的温室效应与大气CO_2分压相关联，从而构成一个稳定的反馈回路。该研究为解决“雪球地球”事件如何终结这一关键难题提供合理的物理机制：如果全球冰川作用发生(全球冰封)，硅酸盐风化速率应降至近乎零，而CO_2将以火山释放的速率在大气中积累，当CO_2积累到一定的浓度将会产生极其强大的温室效应，导致全球冰盖快速融化，使地球脱离全球冰封状态。这一机制同时可以解释多(两)期次雪球重复发生，是支撑“雪球地球”假说的关键科学依据。

综上，Budyko(1969)和Sellers(1969)阐明地球如何启动“雪球地球”状态(通过冰反照率正反馈)，而Walker等(1981)则解释了地球如何能够“逃逸”这个状态(通过火山CO_2积累和风化暂停的负反馈)，这些研究均对“雪球地球”假说的发展具有十分重要的意义。

3　经典解读

20世纪90年代是从“前寒武大冰期”概念发展到“雪球地球”假说(全球冰封的硬雪球模型)的重要时期。Kirschvink于1992年首次提出“Snowball Earth”一词并阐述了其核心思想，Hoffman于1998年在Science杂志上发表了题目为“A Neoproterozoic Snowball Earth”的研究论文，为该假说提供了强有力的证据，从而使其成为地学领域的研究热点。以下是对这两篇经典论文的解读，它们共同构筑了经典“雪球地球”假说的理论框架和证据基石。

Kirschvink首次使用“Snowball Earth，雪球地球”一词来解释新元古代低纬度出现的冰川沉积现象(Kirschvink，1992)。他首先论证古地磁证据的可靠性，结合当时可靠的古地磁数据，证实澳大利亚地区在马里诺冰期时位于赤道附近。在此基础上，他提出在新元古代晚期地球大部分陆地可能集中在中低纬度地区，由于海水和陆地对太阳辐射的吸收存在显著差异，这种古地理格局会从根本上削弱全球的热量吸收，从而引发全球冰封。他认为这一机制无需借助此前提出的“地球大倾角”等特殊假定条件。并且，他猜想“雪球地球”的终结是由于冰封导致大陆风化和海洋有机碳埋藏几乎停滞，从而使得大气CO_2不断积累导致的。尽管当时还缺乏足够的证据来验证自己的推测，Kirschvink仍前瞻性地推论了“雪球地球”的几个重要含义：(1) “雪球地球”应该是全球同步启动和结束的，这有待放射性年龄、古地磁、古生物和地球化学证据的验证；(2) 新元古代全球相似的沉积岩性特征，可能代表了同时期全球性的气候波动；(3) 全球冰封会导致海水缺氧并且富含二价铁，而冰期后再次出现的条状带铁建造可能是二价铁再次被氧化的产物(图2)。(4) 最后，Kirschvink进一步明确，“雪球地球”极端气候在生命从原生生物/原核生物向埃迪卡拉动物群等后生动物的演化中发挥决定作用。该论文将全球性冰川作用的证据(低纬度冰川、碳酸盐岩-冰碛岩组合、条带状铁建造再现)整合到一个统一的框架下，并赋予其“雪球地球”这个形象且有力的名称。清晰阐述了导致全球冰封(冰反照率反馈)和逃逸全球冰封(火山CO_2积累)的物理-化学机制，开创性地将极端冰期与紧接着的寒武纪生命大爆发联系起来，提出了冰期作为生物演化“触发器”的假说。该论文是“雪球地球”假说正式确立的奠基性文献。

Hoffman等(1998)通过对纳米比亚新元古代冰川沉积物和上覆的盖帽碳酸盐岩开展系统的碳同位素研究，发现盖帽碳酸盐的碳同位素组成异常偏负(图3)，结合热沉降历史的估计，推测海洋表层的初级生产力已经崩溃了数百万年，这种情况是由长期的全球冰雪覆盖(“雪球地球”)导致的。与此同时，全球冰封也阻碍了海气交换，导致大气CO_2的聚集异常缓慢，使得“雪球地球”持续数百万年。经过长期的积累，当地面火山喷发将大气中的CO_2浓度提高到现代水平的350倍时，冰期突然结束。这种迅速的终止使得地球快速变暖，形成极端的温室条件。同时，大气中巨量的CO_2向海洋的转移，导致温暖的表层海水中碳酸钙快速沉淀，从而产生了全球范围内均能观测到的盖帽碳酸盐岩。该论文将冰封(雪球阶段)、碳同位素负偏的成因、解冻(温室阶段)、盖帽碳酸盐岩的成因整合成为“雪球地球”的动态模型。该模型不仅对地质现象、过程机制、模型概念进行定性描述，还对“雪球地球”的持续时间、CO_2的积累、沉积速率进行定量估算并进一步阐述和论证了“雪球地球”的全球等时性、多(两)期次、生命演化关联性。该论文将Kirschvink(1992)提出的概念转变为一个具有强大预测和解释能力的科学假说，为“雪球地球”假说提供了关键的地球化学证据链和完整

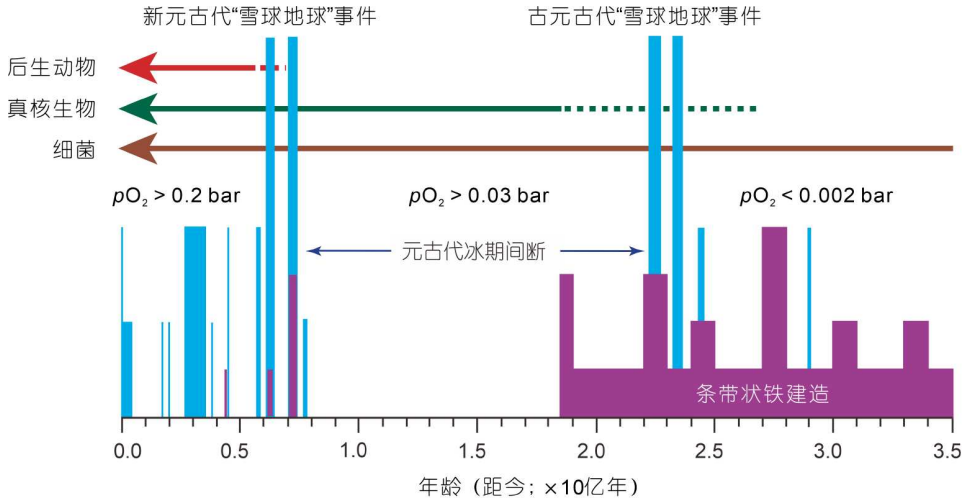


图2 条带状铁建造沉积、大气氧气浓度、生命演化过程与“雪球地球”事件的联系。紫色代表条带状铁建造沉积，蓝色代表地质历史时期重要冰期，修改自Hoffman和Schrag(2002)

的行为模型，是“雪球地球”研究领域一篇里程碑式的著作。

4 经典验证与挑战

4.1 经典验证

经典“雪球地球”假说(硬雪球模型)提出后，Hoffman和Schrag(2002)从六个方面系统论证了该假说的合理性：(1) 新元古代晚期近乎全球所有大陆分布冰碛岩(图4和图5)；(2) 古地磁证据显示冰川线曾长期延伸至赤道附近；(3) 地层记录表明冰川事件的起始和终止可能是突发的，并且是全球同时的；(4) 再次出现的条带状铁建造沉积；(5) 冰期结束时，全球范围内出现特殊的盖帽碳酸盐岩，覆盖在连续的冰期沉积物之上；(6) 每次冰川事件前后分别出现极端的碳同位素异常漂移。同时，该文章也简单阐述和解释了当时学界对该假说的三方面质疑，包括陆地冰川成因机制、雪球时期海水的同位素演化以及真核生物如何存活的问题。

年代学限定“雪球地球”的时限：随着高精度U-Pb和Re-Os定年技术的发展，成冰纪两次冰期起始和结束时间得到了很好的限定。根据加拿大获得的火山岩U-Pb锆石年龄(CA-ID-TIMS法)，斯图特冰期的起始年龄被限定在~717.5–716.3 Ma(Macdonald等，2010)，与后续报道的其他地区的年龄基本一致(如Lan等，2020)，其结束年龄被限定在~660 Ma(Rooney等，2014，2015；Zhou等，2019)。目前，基于全球多个大陆的数据结果，马里诺冰期的结束年龄被限定在~635 Ma(Hoffmann等，2004；Condon等，2005)，然而，其起始时间仍缺乏直接、可靠的年龄限定。来自华南的旋回地层学结果指示马里诺冰期的起始时间为650 Ma(Bao等，2018)，明显早于在华南南沱组(马里诺冰期)冰碛岩和纳米比亚冰碛岩中下部地层中获得的年龄(分别为~636 Ma、~639 Ma；Zhang等，2008；Prave等，2016)，更为可靠精确的起始年龄仍需进一步的工作。尽管存在争议，目前地质学者普遍认为新元古代的两次“雪球地球”事件是全球同步启动和同步结束的，这与Kirschvink(1992)和Hoffman等(1998)最初的推测一致，为经典硬雪球模型提供了有力的证据。

4.2 质疑与挑战

(1) 气候模拟结果：“雪球地球”假说提出不久，Hyde等(2000)通过耦合气候/冰盖模型对这一时期特殊气候阶段进行计算机模拟。他们发现，即便仅将太阳常数(太阳辐射强度)调整为低于现今水平，同时维持大气CO_2浓度接近现代值，模型也能模拟出符合地质证据的、快速的全球冰进与冰退过程。在此基础上，将这些结果与大气环流模型结合时，部分模拟结果显示赤道带存在开放水域，能够为多细胞生物的生存提供避难所，即水带模型。但是，该模型模拟的气候条件难以维持数百万至上千万年，也无法解释全球范围内广泛分布的盖帽碳酸盐岩沉积现象(Schrag和Hoffman，2001)。此后，Abbot等(2011)提出一种新的全球气候状态——“耶梦加得状态”(Jormungand state)。在此状态下，海洋近乎完全冰封，但赤道附近保留一条极狭窄的无冰带。该研究通过两种大气环流全球气候模型及Budyko-Sellers模型，验证了“耶梦加得状态”的存在。该模型既能解释气候强滞后性，又能为生物存活提供可能。需要指出的是，这些气

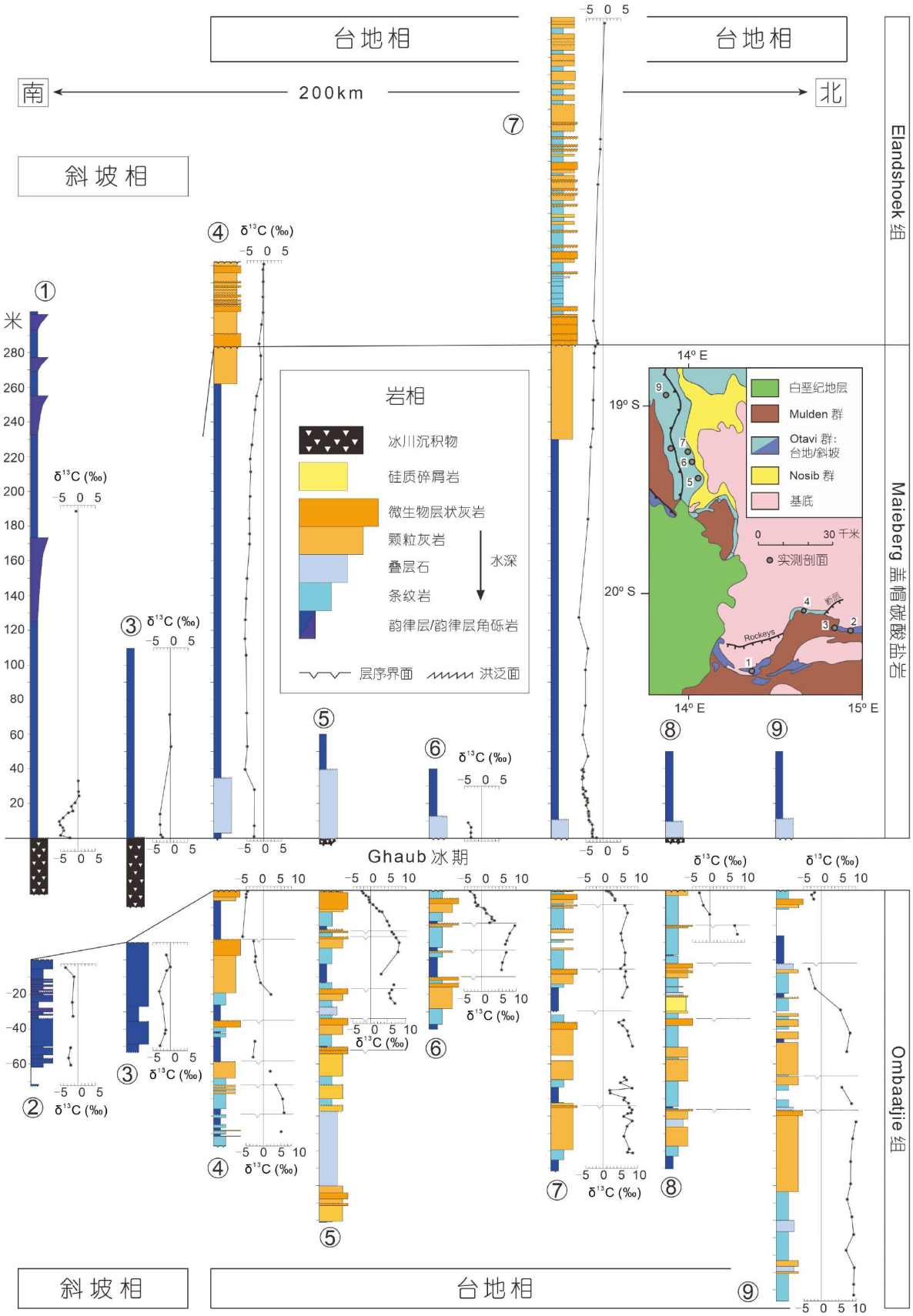


图 3　纳米比亚Otavi台地新元古代晚期不同沉积相碳同位素结果综合图(修改自Hoffman等，1998)

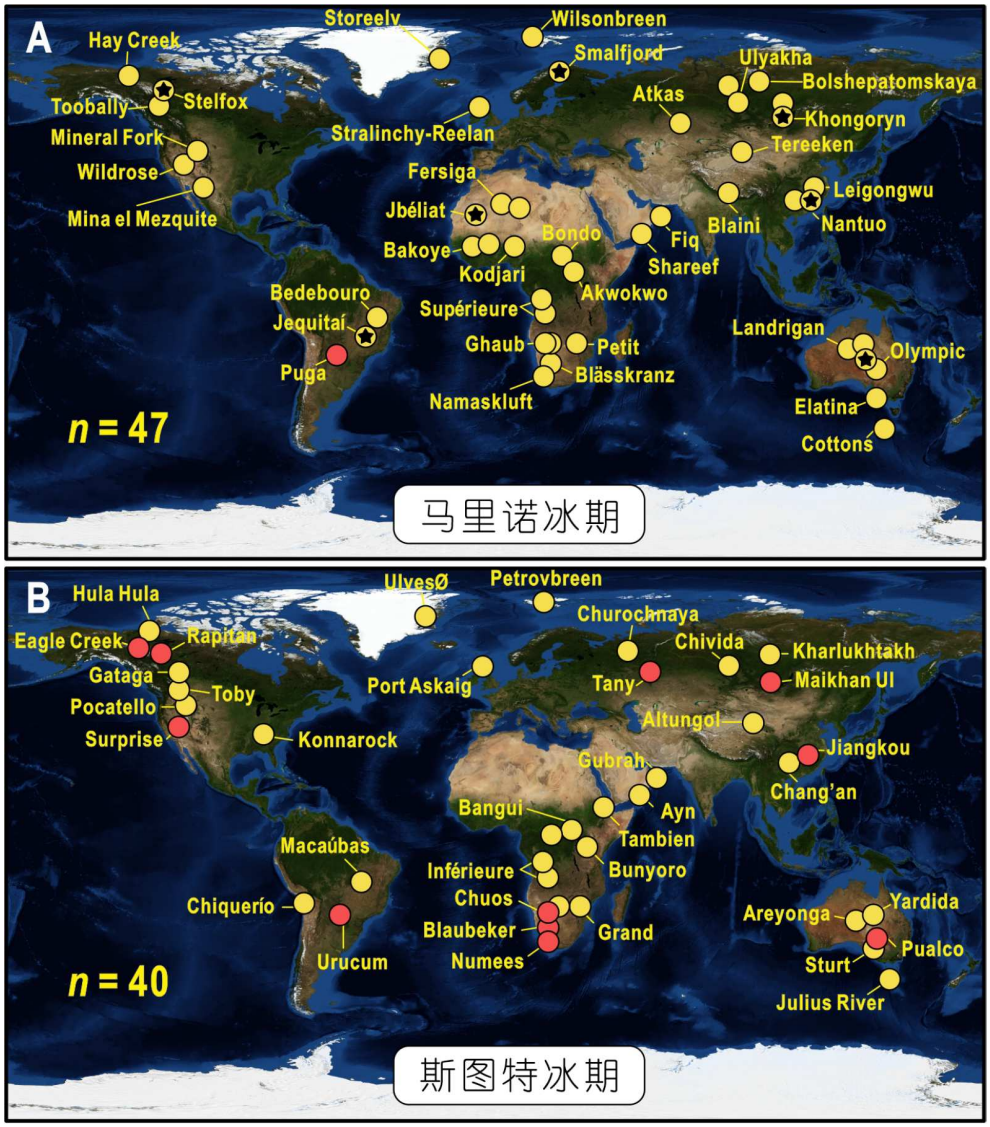


图 4 新元古代斯图特和马里诺冰期冰川沉积物在现今的全球分布情况。(A) 马里诺冰期，(B) 斯图特冰期。圆圈代表冰川沉积物的产出位置，红色圆圈代表同时有条带状铁建造的产出位置，修改自Hoffman等(2017)

候模拟本身都存在明显的局限性，比如，Hyde等(2000)研究中的气候/冰盖耦合模拟使用的是能量平衡模式，对大气环流、云和降水等的模拟极度简化，而且为了能够得到开放海域，将海冰反照率设置得很低，而在其非耦合模拟中虽然采用了大气环流模式，但陆地冰盖则是事先给定的。简单来讲，Hyde等(2000)以及后续的类似研究，如Peltier等(2007)和Liu等(2017)其实没能证明在形成低纬度陆地冰盖的同时可以维持低纬度开放水域，而只是证明了这样的气候态如果可以形成的话则可以稳定存在。Abbot等(2011)提出的“耶梦加得状态”则只能在大气环流模式中得到，在更真实的大气-海洋环流模式中，只要存在开放海域，低纬度的海冰厚度就会非常小，并存在显著的季节性移动，对大气CO_2的升高也非常敏感，不存在“耶梦加得状态”中的磁滞现象。换句话说，在耦合的大气-海洋环流模式模拟中，只存在软雪球，而不存在“耶梦加得状态”。

(2) 古生物证据：硬雪球模型认为，“雪球地球”时期整个地球表面被冰层完全覆盖，海洋也被冻结，生命只能在冰层表面或者冰下的局部“避难所”勉强生存。为此，Hoffman提出了冰尘模型(Cryoconites model)，以解释在硬雪球条件下生命的潜在生存空间。该模型认为，火山灰和大气风尘所形成的尘埃在冰川表面累积，形成冰尘。冰尘吸收太阳辐射，降低冰面反照率，使下方冰层融化，形成微小孔洞或数十米的融水区域(即冰尘穴)，从而可能为蓝藻及部分真核生物提供生存空间(Hoffman，2016；Hoffman等，2017)。尽管该模型为冰期生物存活提供了

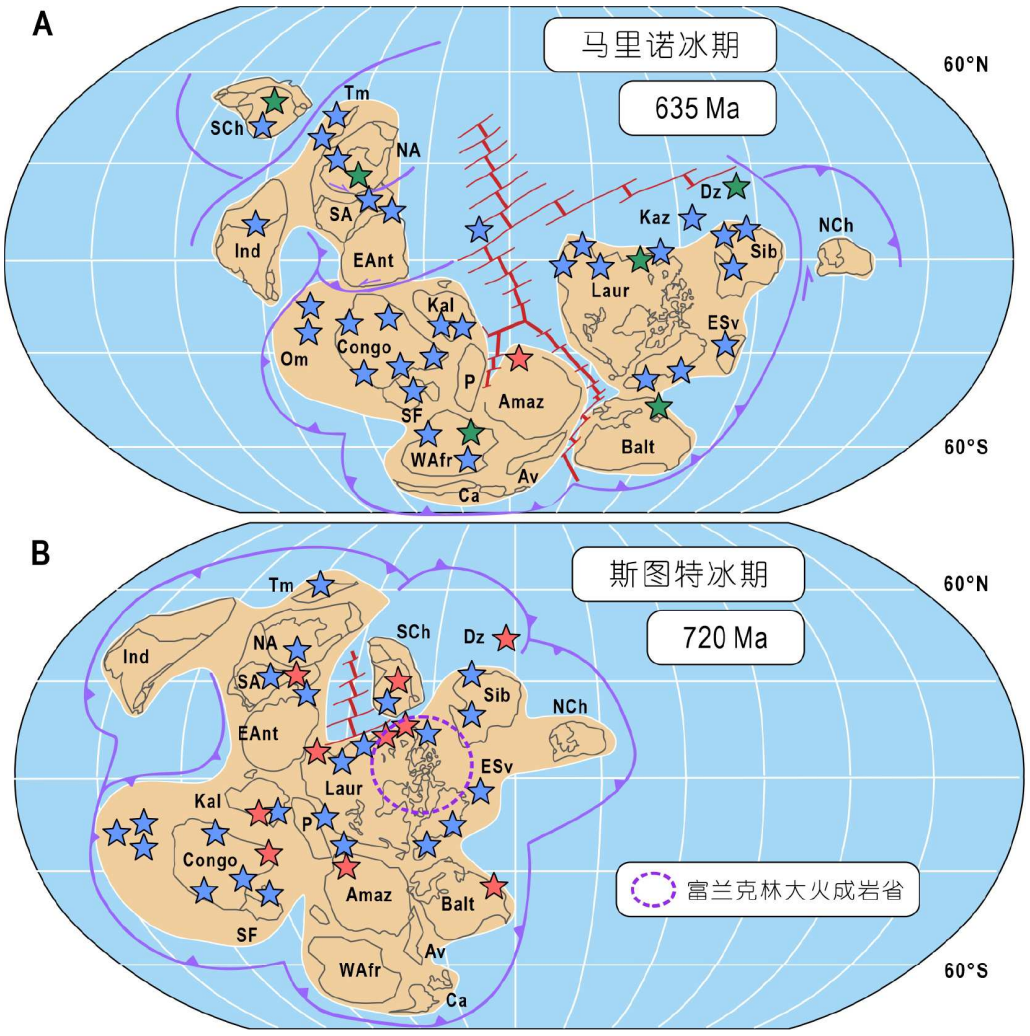


图 5　新元古代斯图特和马里诺冰期冰川沉积物的全球分布情况。(A) 马里诺冰期，(B) 斯图特冰期。五角星代表冰川沉积物的产出位置，其中红色星标指示同时含条带状铁建造的位置，绿色星标代表马里诺冰期后盖帽碳酸盐岩中自生重晶石的产出位置，修改自Hoffman等(2017)

一种可能解释，但需要通过地质观测进行检验。同时冰尘穴形成的融水通过冰臼等排水系统涌入冰下海洋，可能导致表面液态水难以长期维持，限制了生命栖居地的稳定性。Ye等(2015)报道了华南神农架宋洛地区南华系南沱组中的宏体碳质压膜化石，并命名为宋洛生物群。这些化石保存于陆架环境沉积的冰成杂砾岩之间的薄层黑色页岩中，其中部分化石被鉴定为底栖宏体藻类。与典型冰尘生态系的生物不同(Hoffman，2025)，这些宏体藻类的生长与繁殖必须依赖于阳光进行光合作用，且其纤细的固着器对基底要求较高，需要生活在具泥质基底、透光的开放水域中。因此，这表明在马里诺“雪球地球”时期，中纬度扬子板块曾存在间歇性的开放水域，为底栖宏体光合生物在透光带内提供了可栖息的基底。这些开放水域可能是宏体光合生物在马里诺“雪球地球”的避难所，并对硬雪球模型构成了重要的地质约束。作为该时期目前已知唯一的宏体化石组合，宋洛生物群是检验不同“雪球地球”模型的关键证据之一。未来研究应着重评估其生物多样性和生态复杂性，以深入探索生命在极端冰期环境中的适应机制。

(3) 沉积学证据：全球分布的新元古代大型冰川含砾泥岩(由多源、分选性差的砾质沉积物组成)标志着冰盖的广泛存在。近年来，国内外地质学者在澳大利亚、华南、纳米比亚(刚果)、斯瓦尔巴群岛(波罗的)、西非及苏格兰(阿瓦隆)等大陆的成冰纪冰川序列中，均开展了精细的沉积学分析(Lang等，2018；见Shen等，2025总结)。研究表明，这些大陆的斯图特期冰川与马里诺期冰川序列具有共同特征，即含砾泥岩与无砾石或细碎屑岩相(砂岩、粉砂岩、泥岩甚至碳酸盐岩)的交替沉积。尽管全球冰封“雪球地球”假说认为，即便海洋处于冻结状态，含砾泥岩与无砾石细碎屑岩相的交替沉积仍可能发

生(Benn等，2015)，但是这种旋回沉积应局限于冰流最活跃的赤道区，难以解释在全球中高纬度地区同样广泛存在的周期性交替沉积现象(Shen等，2025)。

(4) 活跃的生物地球化学循环和初级生产力：经典“雪球地球”假说认为全球冰封基本抑制了初级生产力水平，使得碳同位素组成稳定在偏轻的范围(Hoffman等，1998)。然而，最近一些研究表明“雪球地球”时期海洋中存在活跃的生物地球化学循环。例如：Johnson等(2017)在马里诺冰期发现偏重的氮同位素组成，指出同时期存在有氧氮循环、开阔水域和活跃的初级生产力。Ma等(2022)发现南沱冰期沉积物的有机碳同位素和黄铁矿硫同位素呈现显著的变化，结合定量数值模拟证实该时期存在活跃的碳、硫生物地球化学循环，但其生产力水平相对较低。Shen等(2022)针对南沱组冰碛岩开展了黄铁矿铁、硫同位素和铁组分研究工作，结果显示马里诺冰期海洋氧化还原状态与冰川消长同步波动，记录了间歇性的海水氧化事件。Song等(2023)在宋洛生物群所在黑色页岩中发现偏重的氮同位素组成，指示该地区存在包括生物固氮、有氧硝化、反硝化作用的完整有氧氮循环过程。此外，黑色页岩较高的有机碳含量(4%)指示当时的初级生产力可能处在较高的水平。这些结果都指示“雪球地球”时期存在开放水域和活跃的生物地球化学循环，对经典的硬雪球模型中全球冰封完全抑制海洋初级生产力的观点提出挑战。

5 经典延伸

Hoffman等(2017)在*Science Advances*发表综述论文，对成冰纪地质年代学、古地理学、雪球大气动力学和水文循环、雪球冰盖范围和可变性、低纬度海冰边缘稳定性、海洋冰川动力学、冰尘生态系统、冰下海洋动力学和成冰纪冰川终止特有的“盖帽碳酸盐岩”序列进行了系统总结，旨在通过发表的地质证据、地球化学数据和气候模型成果将“雪球地球”科学假说提升为科学理论。该综述指出，年代学证据显示斯图特冰期的开始和斯图特、马里诺冰期的结束是全球同步的，进一步明确“雪球地球”的全球性和等时性特征。地球化学数据和气候模拟结果表明，马里诺冰期结束时大气CO_2浓度达现代大气水平(PAL)的100倍(Bao等，2008)。基于气候动力学相关研究进一步阐述“冰反照率反馈”和“硅酸盐风化恒温器”对“雪球地球”启动和逃逸的控制机理。基于相关模型结果进一步阐明极端冰封条件下生命避难所及其对生命演化的影响。模拟显示全球冰封导致热带大气环流发生逆转，形成赤道沙漠带，并在其他区域产生净积雪与霜冻积累作用。海洋冰层不断增厚，形成向赤道方向流动的海冰川，其动力来源包括水循环作用以及冰层底部的冻结-融化过程。随着CO_2浓度上升，热带冰盖流速加快但质量持续损失，最终对轨道参数变化变得敏感。赤道区尘埃堆积催生了冰表贫营养融水生态系统“冰尘穴”，为蓝藻和部分真核生物提供了适宜环境，这些认识对经典硬雪球模型进行了重要补充。该论文总结了多个复杂的气候模型(GCM)模拟结果，重现了“雪球地球”的气候状态，其预测情景与地质记录高度吻合。文章进一步将“雪球地球”假说系统化、定量化，同时对关于“雪球地球”假说的主要质疑(如生命如何存活？冰川如何流动？盖帽碳酸盐如何形成？)进行了直接回应。该论文通过综合地质学、地球化学、古生物学和气候模型的最新成果，不仅极大地巩固和丰富了“雪球地球”假说，同时重塑了我们对于地球系统运作方式、极端气候变化及其与生命演化相互作用的理解。最近，Hoffman(2025)在PNAS发表Perspective文章，提出生态系统迁移假说，以解释“雪球地球”时期海洋光合生物化石(如大型真核多细胞生物)的存在。该假说认为，早在成冰纪雪球事件前，极地-高山地区就已建立了多样化的超冰缘与冰缘生物群落。当雪球事件发生时，这些生物群落随冰缘同步向赤道迁移，并在该区域繁盛演化；当雪球事件结束后，其中部分类群返回极地-高山地区，另一部分则留在海洋。该假说认为“雪球地球”时期光合生物无需依赖薄层海冰的特殊状态也能生存和演化。

经典的硬雪球模型从1998年正式提出来以后，受到了各方的质疑和挑战。虽然全球冰封是解决若干地质观测的一个非常迷人的解释，但是该模型严重缺乏沉积学证据的支持。事实上，在当初提出“雪球地球”模型的时候，Hoffman重点关注了冰期的全球分布，缺乏对冰期沉积细致的沉积学分析。虽然之后陆续有学者依据沉积学观测对“雪球地球”模型进行质疑，认为沉积学证据证明“雪球地球”冰期的冰盖是活动的，指示了冰期未完全冰封的可能。然而，如何维持海洋不完全冰封长达千万年之久，在此之前缺少一个逻辑完备的解释。虽然不完全冰封的水带模型/软雪球模型在2000年就被提出来(Hyde等，2000)，但其逻辑上并不能自圆其说，这也就导致了虽然硬雪球模型存在致命的问题，却一直以来缺少一个能够自洽的模型来替代。其核心的问题在于无法解释存在开放海洋的“雪球地球”冰期过程中的碳循环。气候模型表明，如果要维持冰期中存在开放的海洋，那么大气的CO_2浓度必须保持在一个很低的水平；同时冰期沉积物中缺少碳酸盐岩的沉积表明当时海洋可能是碳酸盐岩不饱和的。这表明冰期过程中，地球表层的碳库较小，这与冰期结束后盖帽碳酸盐岩的沉积所需要的大量的碳矛

盾。因此，在广泛存在开放海洋的状态下，全球冰期中和冰期结束后的碳是不平衡的，我们需要寻找一个机制，在冰期中将火山喷出的CO_2暂时地储存起来，而到了冰期结束以后，这些暂存的碳又被转换成CO_2释放回大气中。值得注意的是，碳只能是被暂时的储存，而不能被永久的埋藏，否则也不能解决冰期结束后地球表层碳的快速富集。Shen等(2025)中国学者通过对华南南沱组的研究，提出冰期海洋的初级生产力将地幔释放的CO_2转变成溶解有机碳而储存在缺氧非硫化的深海中，直到冰期结束后，海洋的翻转和DOC的氧化，使得大气变成了高CO_2的状态，即和“雪球地球”模型所预测的化冰状态完全一致。由此提出了“冰雪大陆，冰-陆(Icy Continent)”模型，认为冰川广泛地在陆地分布，并一定程度地延伸到海洋中，但是仍然存在广泛开放的海洋。这一模型为全球冰期维持开放海洋提供了一个合理的(虽然不一定是唯一的)解释，使得非全球冰封的“雪球地球”模型完成逻辑上的自洽。相比于经典的硬雪球模型来说，新模型除了能够解释传统模型所能解释的现象以外，还和沉积学证据更加一致。同时，在新模型中，生命如何度过全球冰期不再是问题。

6 结语

从1871年“雪球地球”的沉积记录被发现，到1998年经典假说被系统提出，新元古代“雪球地球”作为地质史上最为极端的气候事件之一，因其颠覆性的全球冰封假说及其与生命演化和大氧化事件的潜在关联，不仅受到国际地质学者和气候学者的广泛关注，同时也引发普通大众的广泛兴趣。与其他学术假说的动态演进发展类似，“雪球地球”假说也经历了提出、验证与修正阶段，与已经发展成熟的学术理论(如板块构造理论)不同，“雪球地球”假说目前仍面临诸多质疑和挑战，因此还未升格为被普遍接受的理论。

经典的“雪球地球”假说(硬雪球模型)主张持续数千万年的稳定冰封状态，解释了全球冰川作用的同步起始与终止、盖帽碳酸盐岩的沉积及其异常的碳同位素组成、条带状铁建造的再次出现等地质现象。该假说还认为冰层之上的冰尘环境为生命延续提供了居所，并得到了一些气候模拟结果的支持。然而，目前仍有若干地质现象与硬雪球模型存在矛盾，主要包括：(1) 全球范围内冰川杂砾岩与砂岩、粉砂岩、泥岩、碳酸盐岩的旋回交替沉积；(2) 存在与冰尘生态系统(由蓝藻、绿藻、真菌、原生生物等组成)不同的宏体藻类化石；(3) 存在活跃的生物地球化学循环过程和较高的初级生产力。在经典硬雪球模型、水带模型之后，我国学者提出冰-陆模型和动态有机碳库假说来进一步解释“雪球地球”现象。这些模型的验证，仍有赖于未来在年代学、沉积学、古生物学、沉积地球化学、古气候学、地球系统数值模拟等领域的深入工作。

参考文献

郑永飞, 李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55: 2104–2110

Abbot D S, Voigt A, Koll D. 2011. The Jormungand global climate state and implications for Neoproterozoic glaciations. J Geophys Res, 116: D18103

Bao H, Lyons J R, Zhou C. 2008. Triple oxygen isotope evidence for elevated CO_2 levels after a Neoproterozoic glaciation. Nature, 453: 504–506

Bao X, Zhang S, Jiang G, et al. 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China. Earth Planet Sci Lett, 483: 52–63

Benn D I, Le Hir G, Bao H, et al. 2015. Orbitally forced ice sheet fluctuations during the Marinoan Snowball Earth glaciation. Nat Geosci, 8: 704–707

Budyko M I. 1969. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. Tellus A-Dynamic Meteorol Oceanogr, 21: 611–619

Condon D, Zhu M, Bowring S, et al. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. Science, 308: 95–98

Crawford A R, Daily B. 1971. Probable non-synchroneity of Late Precambrian glaciations. Nature, 230: 111–112

Harland W B. 1964a. Critical evidence for a great infra-Cambrian glaciation. Geol Rundsch, 54: 45–61

Harland W B. 1964b. Evidence of late Precambrian glaciation and its significance. In Nairn A E M, ed. Problems in Palaeoclimatology. London: John Wiley & Sons. 119–149

Harland W B, Rudwick M J S. 1964. The great infra-Cambrian ice age. Sci Am, 211: 28–36

Hoffman P F. 2011. A history of Neoproterozoic glacial geology, 1871–1997. In: Arnaud E, Halverson G P, Shields-Zhou G, eds. The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. London: Geological Society of London. 17–37

Hoffman P F. 2016. Cryoconite pans on Snowball Earth: Supraglacial oases for Cryogenian eukaryotes? Geobiology, 14: 531–542

Hoffman P F. 2025. Ecosystem relocation on Snowball Earth: Polar-alpine ancestry of the extant surface biosphere? Proc Natl Acad Sci USA, 122: e2414059122

Hoffman P F, Schrag D P. 2002. The snowball Earth hypothesis: Testing the limits of global change. Terra Nova, 14: 129–155

Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. Sci Adv, 3: e1600983

Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. Science, 281: 1342–1346

Hoffmann K H, Condon D J, Bowring S A, et al. 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: Constraints on Marinoan glaciation. Geology, 32: 817–820

Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. 2000. Neoproterozoic ‘snowball Earth’ simulations with a coupled climate/ice-sheet model. Nature, 405: 425–429

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. Nat Commun, 8: 1316

Kirschvink J L. 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The

snowball Earth. In: Schopf J W, Klein C, eds. The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study. Cambridge: Cambridge University Press. 51–52
Lan Z, Huyskens M H, Lu K, et al. 2020. Toward refining the onset age of Sturtian glaciation in South China. Precambrian Res, 338: 105555
Lang X, Chen J, Cui H, et al. 2018. Cyclic cold climate during the Nantuo Glaciation: Evidence from the Cryogenian Nantuo Formation in the Yangtze Block, South China. Precambrian Res, 310: 243–255
Liu Y, Peltier W R, Yang J, et al. 2017. Strong effects of tropical ice-sheet coverage and thickness on the hard snowball Earth bifurcation point. Clim Dyn, 48: 3459–3474
Ma H, Shen B, Lang X, et al. 2022. Active biogeochemical cycles during the Marinoan global glaciation. Geochim Cosmochim Acta, 321: 155–169
Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, et al. 2010. Calibrating the Cryogenian. Science, 327: 1241–1243
Peltier W R, Liu Y, Crowley J W. 2007. Snowball Earth prevention by dissolved organic carbon remineralization. Nature, 450: 813–818
Prave A R, Condon D J, Hoffmann K H, et al. 2016. Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation. Geology, 44: 631–634
Rooney A D, Macdonald F A, Strauss J V, et al. 2014. Re-Os geochronology and coupled Os-Sr isotope constraints on the Sturtian snowball Earth. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 51–56
Rooney A D, Strauss J V, Brandon A D, et al. 2015. A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations. Geology, 43: 459–462
Schrag D P, Hoffman P F. 2001. Life, geology and snowball Earth. Nature, 409: 306
Sellers W D. 1969. A global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. J Appl Meteorol, 8: 392–400
Shen B, Lang X, Wang R, et al. 2025. Resolving the Snowball Earth conundrum: The role of marine dissolved organic carbon pool. Sci Bull, 70: 2173–2189
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. Geology, 50: 1239–1244
Song H Y, An Z, Ye Q, et al. 2023. Mid-latitudinal habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation. Nat Commun, 14: 1564
Thomson J. 1871. On the stratified rocks of Islay. In: Proceedings of the 41st Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Edinburgh. 110–111
Walker J C G, Hays P B, Kasting J F. 1981. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. J Geophys Res, 86: 9776–9782
Williams G E. 1974. Discussion of Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity. J Geol Soc Lond, 130: 599–601
Williams G E. 1975. Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity. Geol Mag, 112: 441–465
Ye Q, Tong J, Xiao S, et al. 2015. The survival of benthic macroscopic phototrophs on a Neoproterozoic snowball Earth. Geology, 43: 507–510
Zhang S, Jiang G, Han Y. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China. Terra Nova, 20: 289–294
Zhou C, Huyskens M H, Lang X, et al. 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations. Geology, 47: 251–254

（责任编委：郑永飞）