

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.006>



新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用

陈欣阳^{1,2,3}, 李彪^{2,3}, 李超^{1,2,3}

1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059
2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059
3. 成都理工大学沉积与生物地球化学国际研究中心, 四川成都 610059

摘要: 新元古代成冰纪(约 720~635 Ma)发生了两次全球范围的雪球地球事件(斯图特冰期和马里诺冰期),是地球生命系统和环境演化的重要转折期。越来越多的证据显示雪球地球时期的气候和海洋氧化还原状态存在显著的时空波动,然而这一特征背后的碳循环-海陆系统交互以及冰期气候波动的驱动机制还很不清楚。作为链接雪球地球发育、海洋化学和生物演化最为关键过程之一的大陆风化作用目前仍旧没有被有效刻画是其中的一个重要原因。本文综述了现有风化指标及其在成冰纪化学风化强度方面的研究现状,在此基础上,统计了全球 28 个成冰纪剖面(含钻孔)867 件碎屑岩样品的主量元素数据,利用 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 这一高效风化指标定量重建了从拉伸纪晚期到埃迪卡拉纪早期全球平均化学风化强度的演化趋势,发现了多次化学风化的强弱波动,表明冰期的启动和结束均与化学风化作用息息相关。此外,马里诺冰期的平均风化强度显著高于斯图特冰期,可能暗示马里诺冰期存在一定程度的水循环。未来的研究应进一步推动多指标的综合应用,以加深对成冰纪化学风化机制的理解,为全球环境演化的探索提供更多深入的视角和证据支持。

关键词: 新元古代;成冰纪;化学风化指标;雪球地球;碳循环;气候变化。

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2025)03-1048-18

收稿日期: 2024-12-04

Chemical Weathering during the Neoproterozoic Snowball Earth Events

Chen Xinyang^{1,2,3}, Li Biao^{2,3}, Li Chao^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. International Center for Sedimentary Geochemistry and Biogeochemistry Research, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Two global-scale Snowball Earth events occurred during the Cryogenian period of the Neoproterozoic era (ca. 720–635 Ma), representing a crucial transition period for the Earth's biological systems and environmental evolution. An increasing amount of evidence indicates that there are spatio-temporal fluctuations in the climate and marine redox state during the Snowball glaciation. However, the driving mechanisms of the carbon cycle-land-ocean system interaction and glacial climate fluctuations during this period remain largely unclear. Continental weathering is a key process linking snowball development, ocean chemistry, and biological evolution, but existing research has been unable to effectively characterize continental weathering during the Snowball period. This paper summarizes the current status of proxies for chemical weathering intensity during the Cryogenian period, and

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2022YFF0800100);国家自然科学基金项目(Nos. 42425002, 42373070, 42130208)。

作者简介: 陈欣阳(1987–), 男, 研究员, 博士, 主要从事非传统稳定同位素与风化作用研究。ORCID: 0000-0002-7706-688X。E-mail: xinyangchen@cdut.edu.cn

引用格式: 陈欣阳, 李彪, 李超, 2025. 新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用. 地球科学, 50(3): 1048–1065.

Citation: Chen Xinyang, Li Biao, Li Chao, 2025. Chemical Weathering during the Neoproterozoic Snowball Earth Events. *Earth Science*, 50(3): 1048–1065.

statistically analyzes the major-element data of 867 clastic rock samples from 28 Cryogenian sections (including drill cores) worldwide. Using the index of $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$, the evolutionary trend of the global average chemical weathering intensity from the Late Tonian period to the Early Ediacaran period is quantitatively reconstructed. Three fluctuations in chemical weathering intensity are discovered, indicating that the onset and termination of glaciation are closely related to chemical weathering. In addition, the average weathering intensity during the Marinoan glaciation is significantly higher than that during the Sturtian glaciation, possibly suggesting the existence of a certain degree of hydrological circulation during the Marinoan glaciation. Future research can further apply the comprehensive application of multiple proxies to deepen the understanding of the chemical weathering mechanisms during the Cryogenian period, and provide more in-depth perspectives and evidence to support the exploration of global environmental evolution.

Key words: Neoproterozoic; Cryogenian; chemical weathering intensity; Snowball Earth; carbon cycle; climate change.

0 引言

新元古代成冰纪(约720~635 Ma)是地球生命系统和环境演化的重要转折期.该时期最显著的特点是发生了两次从极地到赤道几乎完全被冰封的冰期事件(也被称为“雪球地球”事件),即斯图特冰期(Sturtian Glaciation,约717~660 Ma)和马里诺冰期(Marinoan Glaciation,约650~635 Ma)(Hoffman *et al.*, 1998, 2017; Wang and Li, 2003; Zhu and Wang, 2011; Zhou *et al.*, 2019),分别对应中国华南江口冰期和南沱冰期(Zhang *et al.*, 2011; Lang *et al.*, 2018a; Hu *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020).成冰纪也是地球生命系统从以单细胞微生物为主导向多细胞复杂生命为主导的关键转折期,特别是宏体藻类化石记录在这一时期表现出了有别于成冰纪之前的结构特征,并在之后的埃迪卡拉纪迅速演化,使得雪球冰期成为连接复杂生命演化的重要桥梁(Ye *et al.*, 2015).雪球冰期发育同时伴随着超大陆的裂解与聚合(Li *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)、大气和海洋的快速增氧(Och and Shields-Zhou, 2012)等构造和表生环境转变事件,解析这些重大地质事件与雪球地球极端气候及生物演化之间的关系是地球科学研究的前沿领域,可以为更好地理解地球宜居性演化规律提供宝贵依据.

大陆化学风化作用是连接地表岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的重要纽带,深刻影响着地球宜居性的演化(Nesbitt *et al.*, 1980; Berner *et al.*, 1983; Lipp *et al.*, 2020).大陆化学风化对雪球地球发育的调控至少体现在以下两个方面:(1)大陆化学风化作用主要包括硅酸盐岩和碳酸盐岩的风化,硅酸盐岩风化导致大气 CO_2 的净移除而碳酸盐岩风化则是大气 CO_2 的源,而 CO_2 这一温室气体浓度的高低就决定了雪球发育的规模和期次(Shields,

2007; Gernon *et al.*, 2016);(2)风化作用产生的溶解离子通过河流输入到海洋,既为海洋生物提供了必需的营养元素(如磷),又在一定程度上影响着海洋的氧化还原状态(Mills *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2022; Dodd *et al.*, 2023).磷等关键营养盐含量的高低又决定了海洋初级生产者的类型,因为只有营养盐充足时真核宏观藻类才会繁盛,这暗示雪球地球期间藻类的勃发与当时陆源风化间的密切关系.大陆风化在地质时间尺度上驱动大气圈、水圈、生物圈和大陆地壳的化学演化,是海洋环境演化的重要驱动力之一,进而影响着生命演化和地球气候变化.关于化学风化作用最常被讨论的两个指标包括风化强度和风化速率(或风化通量),前者是指沉积物受化学风化改造的程度(或元素流失程度);而后者指单位时间内陆表岩石化学剥蚀总量,风化强度受到风化速率和持续时间的共同影响,从而反映出一段时间内区域综合化学风化程度(傅寒晶等, 2021).由于成冰纪沉积岩的特殊性质,关于该时期的大陆风化主要围绕风化强度展开.

1 成冰纪化学风化研究现状

1.1 传统主量元素风化指标

由于风化作用的性质和程度在不同地域和不同条件下会有很大的差异,前人已经提出了多种基于主量元素含量的指标来衡量和描述化学风化作用的强度,即由于化学作用导致的易溶元素流失的程度(Nesbitt *et al.*, 1980).上地壳60%以上的体积为长石,因此硅酸盐风化主要表现为长石的蚀变以及向黏土矿物转变的程度(Nesbitt and Young, 1984, 1989).该类指标数量众多,详见表1.

这些常用指标已经在多篇综述中被详细阐述(徐小涛和邵龙义, 2018; 傅寒晶等, 2021; 李绪龙

表 1 常用主量元素风化指标及适用范围

风化指标	计算公式	指标适用范围
WIP	$100 \times (\text{CaO}^*/0.7 + 2\text{Na}_2\text{O}/0.35 + 2\text{K}_2\text{O}/0.25 + \text{MgO}/0.9)$	不适用于强风化情况,受石英含量的影响显著
CIA	$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \times 100$	受源区影响较大,同时成岩作用也会对其产生影响
CIW	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$	没有考虑钾长石中的 Al 元素,不适用于物源区母岩中钾长石富集的样品
PIA	$100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})$	仅适用于判断母岩中含有斜长石而不含钾长石的物源区风化程度
ICV	$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$	对 CIA 值计算的检查,表征矿物成分的成熟度
CIX	$100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	该指标不用考虑 CaO

注:式中氧化物均为摩尔含量;CaO*为硅酸盐中CaO的摩尔含量.

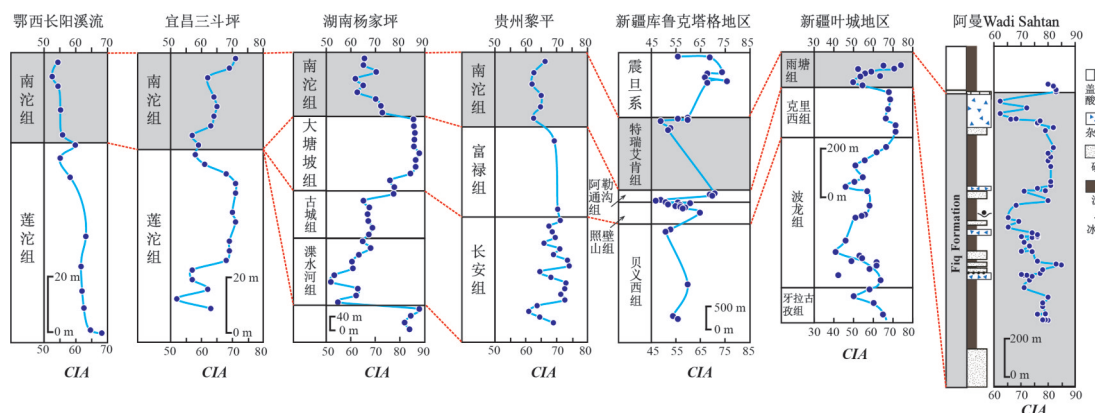


图 1 全球新元古代成冰纪马里诺冰期的 CIA 记录对比

Fig.1 Comparison of the global CIA records in the Cryogenian glacial deposits

数据来自冯连君等(2004)、王自强等(2006)、Rieu *et al.*(2007)、刘兵等(2007)、赵小明等(2011)、蔡雄飞等(2017)、李王鹏等(2022)

等, 2022; Fu *et al.*, 2023), 因此这里仅做简略介绍. 化学蚀变指数(CIA, Chemical Index of Alteration)由Nesbitt and Young(1982)提出. 高CIA值通常表明岩石遭受了强烈的化学风化, 低CIA值反映出较弱的化学风化作用, 通常被认为与寒冷和干燥的气候条件相对应. 斜长石蚀变指数(PIA)、化学风化指数(CIW)、化学风化指数CIX(Chemical Index of Weathering excluded CaO)、帕克风化指数(WIP, Weathering Index of Parker)也是基于类似的原理, 只是考虑了一些元素异常富集的影响. ICV(Index of Compositional Variability)是用来衡量沉积物或沉积岩成分成熟度的一个指标. 当ICV值大于1时, 表明细碎屑岩石中的黏土物质含量较少, 成分成熟度较低, 而当ICV值小于1时, 则表明岩石中含有较多的黏土成分, 说明岩石经历了较强烈的化学风化作用或经历了再循环作用(Cox *et al.*, 1995).

针对成冰纪冰期沉积的碎屑岩或冰碛岩基质

的风化作用研究主要是根据主量元素组成来反映雪球冰期大陆风化作用的强弱变化(冯连君等, 2003; Bahlburg and Dobrzinski, 2011). 这些研究的主要思路是依据CIA在研究剖面垂向上的变化来重建陆地化学风化作用强度(Nesbitt *et al.*, 1996; Ding *et al.*, 2009; 齐靓等, 2015; Wang *et al.*, 2020). 例如笔者对全球马里诺冰碛岩(包括我国华南南沱组、新疆库鲁克塔格特瑞艾肯组、新疆叶城雨塘组, 以及阿曼Fiq组等)的CIA数据汇总发现(冯连君等, 2004; 王自强等, 2006; Rieu *et al.*, 2007; 刘兵等, 2007; 赵小明等, 2011; 蔡雄飞等, 2017; 李王鹏等, 2022; 图1), 马里诺冰期细碎屑岩与冰碛岩基质的CIA主要分布在50到80之间并呈现一定的波动, 而且与马里诺冰期之前的样品相比, CIA有所降低, 因此指示了冰期的化学风化作用较弱, 这与沉积记录上从砂岩/泥页岩到冰碛岩的转变是一致的. 但是不同区域的样品在CIA的变化范围和

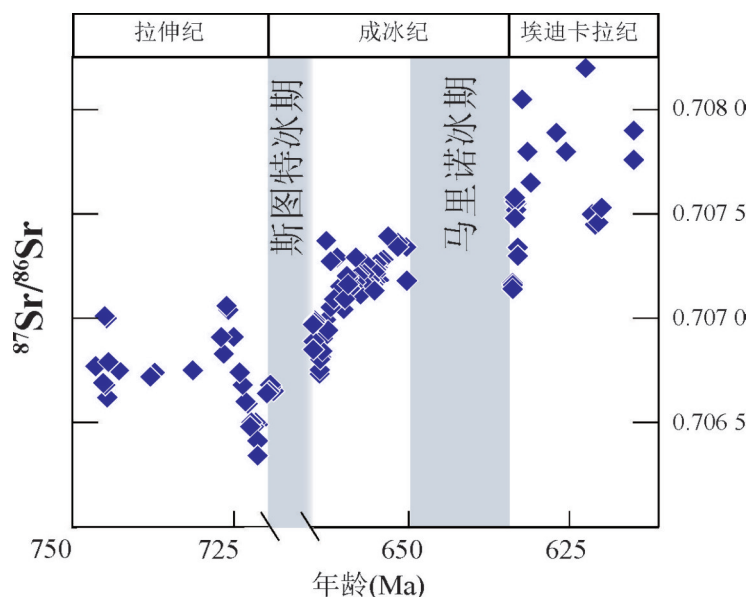


图2 新元古代成冰纪海水Sr同位素演化曲线(据Cox *et al.*, 2016)

Fig.2 The Sr isotope record of the Neoproterozoic seawater from marine carbonates (Cox *et al.*, 2016)

趋势上都显示出明显的差异性,湖北宜昌三斗坪地区的南沱组CIA从底部的59升高到顶部的70(王自强等, 2006),而湖南杨家坪的南沱组CIA值则表现出自底至顶降低的趋势。类似的,同处于塔里木板块的叶城地区和库鲁克塔格地区也呈现出较大的差异,导致基于CIA来重建风化作用和气候变化的关系方面存在多解性(图1)。此外,CIA的应用需要考虑:(1)沉积再风化和风化淋滤作用;(2)不同环境粘土矿物组合(冯连君等, 2003);(3)成岩过程中钾的交代;(4)源区成分的变化(徐小涛和邵龙义, 2018; 吴忠银和顾尚义, 2019)等一系列因素。尽管CIA记录已经揭示在马里诺冰期全球的风化作用存在波动性和时空差异,但是单个剖面上的波动很难与全球其他地区联系对比,特别是CIA的绝对值受到诸多因素的影响,对于雪球地球这一特殊时期大陆化学风化与气候之间的关联还没有得到很好的制约,极大地限制了人们理解陆地-海洋系统的关联如何为真核生物穿越极端气候创造条件。

需要指出的是,CIA指数更多地反映的是源区岩石长期的综合风化历史,而不是瞬时的化学风化状态(Shao and Yang, 2012)。这意味着,即使是在较短的地质时间尺度内,沉积物的CIA值也可能受到源区岩石化学组成的显著影响。例如,从花岗岩等岩石风化而来的沉积物可能具有与原岩相比较高的CIA值,哪怕是经过了较强的风化作用。而且由于CIA是基于化学组成相对均一的岩

石而设计的,原岩成分的变化,或者后期钾交代作用、变质作用或旧沉积岩的再循环沉积都可能对其结果造成干扰(Ohta and Arai, 2007)。因此,在使用主量元素含量作为化学风化指数时,还需要考虑源区岩石的成分、风化历史以及后续地质作用对其可能产生的影响。这需要结合其他地质证据和分析方法,以获得更为全面的风化作用判断。

1.2 锶同位素风化指标

碳酸盐岩锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)是研究全球大陆风化速率常用的指标,用来指示全球平均风化速率(通量)随时间的演化。全球新元古代碳酸盐岩地层的Sr同位素记录曲线(Jacobsen and Kaufman, 1999; Halverson *et al.*, 2007, 2010; Cox *et al.*, 2016)显示成冰纪的两次全球冰期开始前都有Sr同位素的显著降低,并在冰期结束后伴随着Sr同位素的快速上升(图2)。冰期结束的Sr同位素快速升高可能指示了大规模冰川作用暴露剥蚀的古老陆壳被风化(Rooney *et al.*, 2014)。然而成冰纪沉积记录以碎屑质冰碛岩为主,缺乏适合使用Sr同位素的碳酸盐岩记录。同时已有的Sr同位素记录时间相对分散,分辨率不足以对冰期内部的风化作用连续演化加以刻画。正是因为缺失了两次雪球地球期间的Sr同位素记录,使得前人对化学风化在雪球地球过程中所扮演的角色存在不确定性(Cox *et al.*, 2016)。由拉伸纪晚期到斯图特冰期开始之前($\sim 850\sim 730$ Ma)Sr同位素普遍较低,同时泥页岩中

Nd 同位素 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 则相对较高 (> -3), 指示该时期出现了大规模陆地大火成岩省的强烈喷发, 例如位于劳伦古陆的 Mackenzie 大火成岩省和主要位于低纬度地区的 Franklin 大火成岩省等, 这些新生玄武岩普遍具有较低的放射性成因 Sr 同位素和 Nd 同位素, 从而使得 Sr 和 Nd 同位素均显示出地幔特征 (Cox *et al.*, 2016). 特别是在斯图特冰期启动之前有一次显著的 Sr 同位素降低和 Nd 同位素升高, 被认为是低纬度地区 Franklin 大火成岩省经历了强烈和快速的化学风化作用. 正是这些大火成岩省玄武岩的风化消耗了大气 CO_2 , 使得地球进入了冰室气候. 然而这一解释与第二次冰期即马里诺冰期前后相对稳定的碳酸盐岩 Sr 同位素记录相矛盾 (Kennedy *et al.*, 2001). 并且 Sr 同位素反映的是风化速率或通量的变化, 而 CIA 等指标则反映了元素流失的程度, 即风化强度, 这两者既有关联又有所区别. 总的来说, 当前已有的研究无法有效刻画成冰纪, 特别是雪球地球期间大陆风化整体的波动情况, 亟需寻找更加合适的指标.

2 依靠主量元素识别源岩成分变化与风化作用

前人已经统计出全球新元古代冰期 (包括成冰纪和埃迪卡拉纪冰期) 共计 77 条不同剖面, 分布于 22 个古板块上 (Hoffman and Li, 2009). 近年来有越来越多成冰纪沉积记录的元素地球化学数据的报道. 此外, 很多同位素体系, 特别是一些非传统稳定同位素 (如 Li、Mg、K、Rb) 在示踪风化作用方面也有了更多的应用, 也有一些在成冰纪风化作用中的应用. 例如华南斯图特冰期结束后的间冰期大塘坡组底部出现了一次超过 5‰ 的 $\delta^7\text{Li}$ 负偏 (Wei *et al.*, 2020), 从而指示了冰期结束后陆地风化的增强, 为海洋系统提供了营养元素和硫酸盐, 进而导致了海洋缺氧. 这些工作为未来的研究奠定了基础. 本文在总结关于成冰纪大陆风化方面研究进展的基础上, 综合统计了全球 28 个成冰纪剖面 (钻孔) 867 件样品的主量元素数据, 通过全球对比, 结合新指标 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$, 对成冰纪大陆风化作用做出更深一步的阐释, 并探讨其对该时期全球碳循环与气候变化的影响.

2.1 主成分分析法区分源岩组成与化学风化

从理论上说, 源岩的组成变化 (例如火成岩的结晶分异过程) 和化学风化过程 (例如土壤剖面经

历的成土过程) 会导致不同的元素经历不同的过程, 从而使得一些特定的元素比值在这两个主要过程中沿不同的方向演化. 基于这一思想, 前人收集了 15 件来自澳大利亚南部的一条连续土壤剖面的样品 (Lipp *et al.*, 2020), 该剖面发育于泥盆纪 Toorong 花岗闪长岩之上, 包含完整的从源岩到风化残余土的序列并被作为研究化学风化的经典剖面 (Nesbitt, 1979); 将能够代表火成岩由基性向酸性演化序列的 135 件火山岩样品 (Crater Lake, Oregon), 利用主成分分析法 (PCA) 并以上地壳平均成分为基准, 可以清晰地识别出两个不同的演化趋势 (即源岩成分趋势和风化趋势, 图 3) (Lipp *et al.*, 2020). 在此基础上将统计到的数千件河流细粒沉积物、土壤、细碎屑岩等样品进行主成分分析, 并利用所得到的源岩成分趋势和风化趋势对数据进行两个维度上的拆分, 从而分别得到了能够有效指示沉积岩所经历的风化强度指标 ω 和能够指示源岩成分的指标 ϕ . 通过比较 ω 和一系列风化指标, 包括 CIA、CIW 等, 发现 ω 与 CIA、CIW 等均存在一定的相关性, 但是在风化强度较高的样品中, CIA 和 CIW 均接近饱和, 只有氧化铝和氧化钠比值的自然对数值 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 与 ω 具有强烈的正相关关系, 在 ω 与 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 协变图上, 样品在源岩组成上的差异被显著压缩, 从而说明 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 可以作为化学风化强度的有效指标. 与之相对应的, $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 则与源岩组成指标 ϕ 具有强烈的正相关关系, 表明该比值可以有效地指示沉积岩的源岩组成差异, 而受风化作用影响较小. 其原因可能是因为岩浆演化过程中 Mg 指数随着 SiO_2 含量显著降低, 而 K 则因为其较强的不相容性, 在酸性岩浆中较为富集, 所以 K/Mg 比值可以有效指示源岩的成分. 而在利用 CIA 等指标计算风化强度时往往需要考虑 K、Mg、Ca 等元素的综合因素, 而这些元素又或多或少受到其他因素的控制, 而 Na 则主要赋存在斜长石中, 因此 Na 的流失可以有效指示斜长石的风化蚀变程度. 当然在实际应用中也要考虑因为后期成岩改造或者在海水中发生离子交换而导致异常高的 Na 含量. 例如河流沉积物被搬运到海洋环境中时, 由于盐度的巨大差异, 黏土矿物中吸附的 Ca 往往会和海水中的 Na、K、Mg 发生交换, 由于海水中 Na 离子含量远高于其他离子, 从而导致离子交换反应使得 Na 的相对富余而 Ca 相对缺失.

2.2 成冰纪碎屑岩风化指标特征

本文汇总了包括我国 (华南扬子板块和塔里木板块)、挪威斯瓦尔巴群岛、阿曼、美国、加拿大、澳

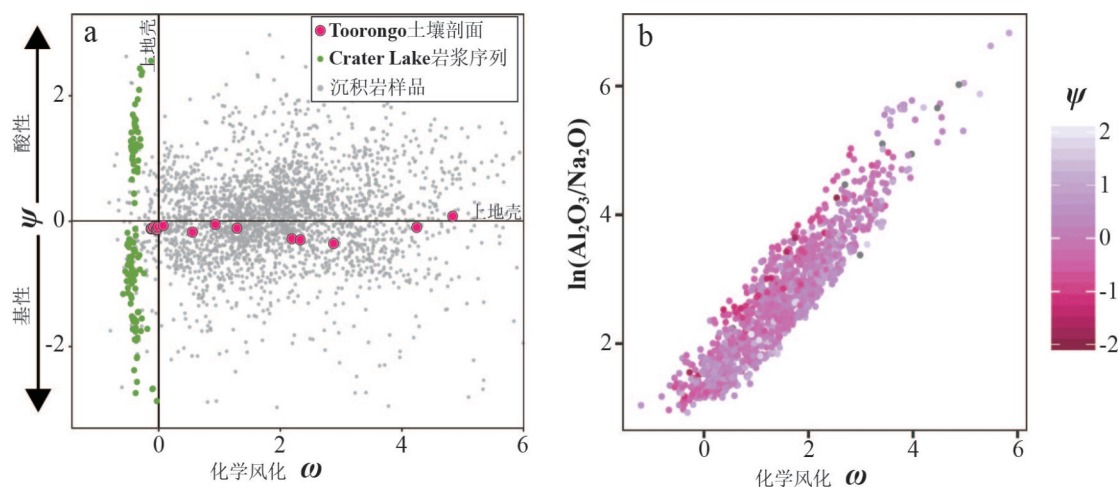


图3 Lipp *et al.*(2020)提出的指示源岩成分指数(ψ)与化学风化指数(ω)示意图(a)以及 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 与化学风化指数(ω)协变图(b)

Fig.3 Cross-plot of weathering proxy (ω) and protolith proxy (ψ) based on the study by Lipp *et al.* (2020) (a), cross-plot between weathering proxy (ω) and natural log ratio $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ (b)

利用主成分分析法(PCA),以上地壳平均组成为基准,结合现代土壤剖面以及岩浆演化序列的主量元素变化,可以识别出由土壤剖面代表的风化趋势 ω 和岩浆演化序列代表的源岩成分趋势。而氧化铝和氧化钠比值的自然对数值和风化指标具有显著的线性相关性,表明 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 可以作为良好的风化强度指标

大利亚等地在内的28个成冰纪剖面(含钻孔)962件样品的主量元素数据,考虑到硅酸盐风化指标往往容易受到碳酸盐的影响从而低估了Al的绝对含量,因此排除了95件CaO含量超过8%的样品,对所得867件样品的主量元素含量数据展开分析(附表1)。首先计算了表1中所列出的各项风化指数作为参考,可以看出所统计的样品各项风化指标均比较接近正态分布(图4),以CIA为例,峰值出现在62~70之间,依照传统对CIA的解释,属于中等风化强度,这与样品中以成冰纪间冰期样品数量较多有关($n=454$),因为冰期沉积主要为冰碛岩和冰川杂砾岩,砾石的成分主要为未经风化的源岩,因此需要选取不含砾石的基质成分来分析,但是这种分离往往很难彻底。而间冰期则以泥页岩、粉砂岩为主,因此比较容易获得较准确、能够反映风化的主量元素含量。CIA值较高的样品主要为成冰纪前后的拉伸纪晚期与埃迪卡拉纪早期样品,这也符合冰期前后气候相对较为温和的观点(赵彦彦和郑永飞, 2011; Hoffman *et al.*, 2017)。

需要注意的是,传统的CIA往往还需要通过ACNK图解来帮助校正由于受到后期钾交代作用而使得沉积岩的数据落在了“理想风化趋势线”以下,并趋近于三角图上的 K_2O 极点。本文计算的CIA并没有经过钾交代的校正,这是因为最新的研究表

明,过去对于ACNK图解的解释往往过于片面。大量现代土壤风化剖面以及古土壤的研究表明,并没有一个万金油似的机理来产生所谓的“理想风化趋势线”(Algeo *et al.*, 2025),如果在岩石风化过程中,含K的矿物转变成伊利石,或者由于成岩作用过程中原始的黏土矿物与海水或孔隙水发生K的交代作用,吸收了更多的K,那么沉积岩数据在ACNK图上将向伊利石端靠近或偏向于 K_2O 极,但是原生矿物溶解与次生矿物的形成通常受到反应动力学的影响,特别是 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 相对于 K_2O 的流失速率,如果 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 在钾长石开始风化前已经被淋滤(通常是斜长石风化),将会导致样品在ACNK图上逐渐远离CN点而趋向A-K轴;如果 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 和 K_2O 的流失速率接近,这时才会出现类似于“理想风化趋势线”的平行于A-CN轴的分布;如果 K_2O 的流失快于 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$,例如土壤中大量的自生蒙脱石形成,则会产生样品紧贴着A-CN轴分布的现象。针对本文总结的867件样品做ACNK图解(图5),结果显示,无论是我国(华南扬子板块和塔里木板块)、还是挪威、北美、澳大利亚等地区,这些成冰纪的碎屑岩基本都沿着源岩为玄武岩/英云闪长岩/花岗岩的风化趋势分布,表现为逐渐向伊利石靠近,说明风化作用过程中 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 相对于 K_2O 的流失速率更快,即斜长

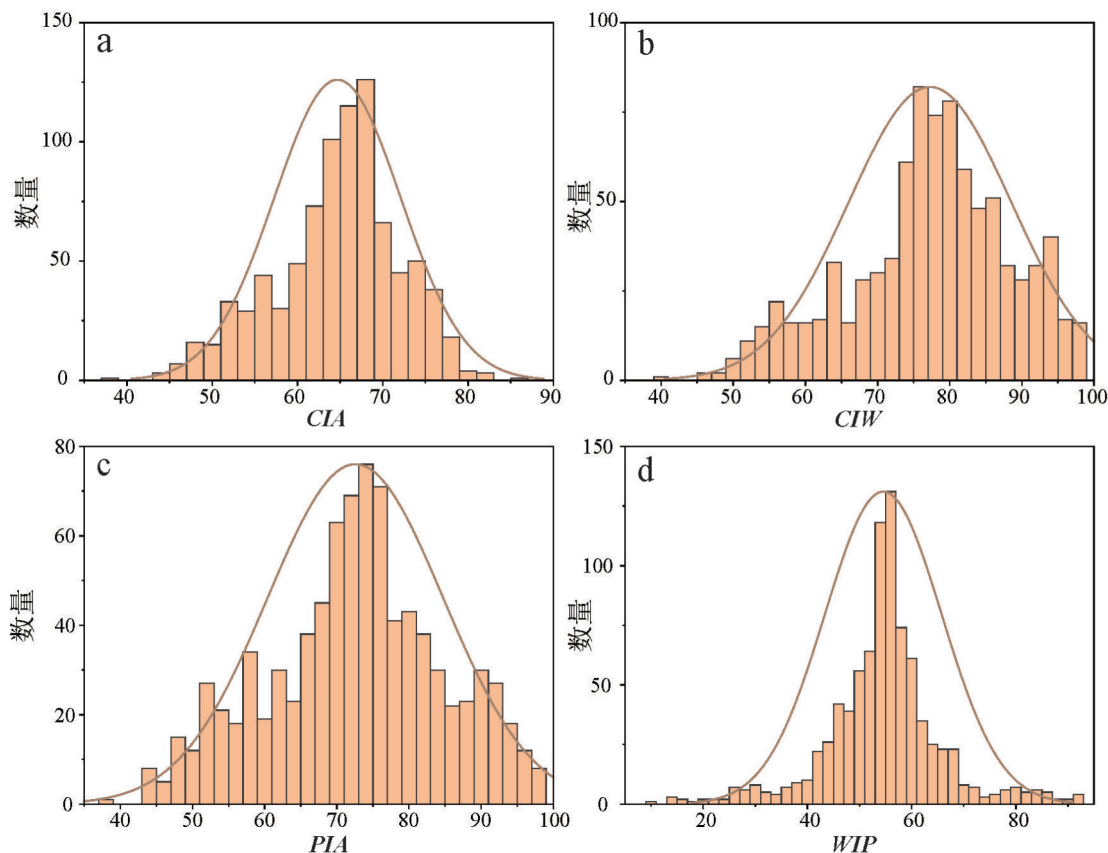


图4 本文统计的867件样品的CIA(a)、CIW(b)、PIA(c)、WIP(d)风化指标的统计分布直方图

Fig.4 The histograms of the calculated weathering proxies CIA(a), CIW(b), PIA(c) and WIP(d) for the 867 samples compiled in this study

图中样品各指标总体较为接近正态分布,主要是因为间冰期的样品数据占主导,而间冰期的风化强度高于冰期.更高的风化强度主要出现在成冰纪前的拉伸纪晚期以及之后的埃迪卡拉纪早期

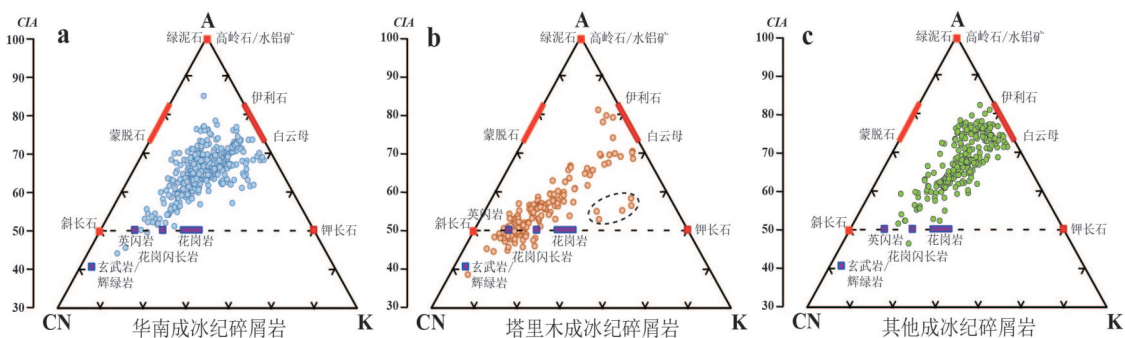


图5 成冰纪碎屑岩的ACNK图解

Fig.5 ACNK diagrams of the Cryogenian siliciclastic rocks

全球该时期的数据较为一致,均呈现出从源岩为玄武岩/英云闪长岩/花岗岩,向伊利石/白云母方向演化,说明源岩的化学风化过程中Ca和Na的流失要快于K,指示了斜长石的优先风化.仅在塔里木阿克苏地区的苏盖尔布拉克组和叶城地区的雨塘组中5件样品数据表现出K的富集

石风化占主导作用.塔里木阿克苏地区埃迪卡拉系苏盖尔布拉克组3件样品和叶城地区雨塘组顶部2件样品(图5b虚线框内样品点)表现出K含量异常的现象,可能与样品岩性为砂岩/粗砂岩有关,表明样品可能经历了后期成岩蚀变或K交代.

前人已经验证了 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 这一指标可以高效地反映沉积岩所经历的化学风化作用,而较少受源岩成分差异的影响(Lipp *et al.*, 2020),而 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 则主要反映了源岩成分差异.本文统计的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 结果类似于正态分布,均值为

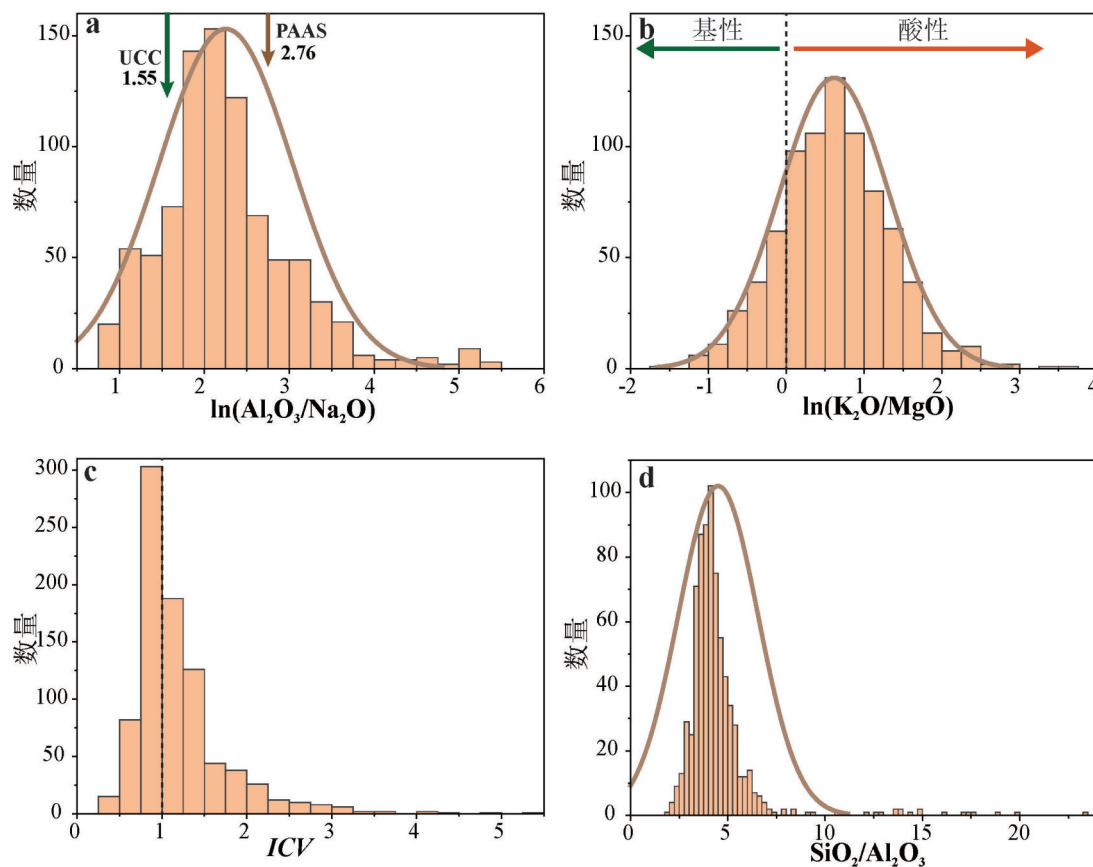


图6 成冰纪碎屑岩风化指标 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ (a)、指示源岩成分差异的指标 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ (b)、指示沉积物再循环的指标 ICV (c), 以及 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值(d)的统计直方图

Fig.6 Histograms of the compiled proxies $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ (a) for weathering intensity, $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ (b) for protoliths, ICV (c) for compositional variability and sediment recycling, and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (d) ratio of the compiled Cryogenian siliciclastic rocks

2.25(图6a).作为参考,花岗闪长岩的平均成分计算得出的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.43, I型和S型花岗岩平均值为 1.47, 上地壳平均值(UCC, upper continental crust)为 1.55, 而后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)的平均值为 2.76 (Taylor and McLennan, 1985; Wedepohl, 1995; Rudnick and Gao, 2014), 因此成冰纪碎屑岩的化学风化程度介于平均上地壳和页岩之间. 数据库 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 的直方图显示结果与 CIA 的分布较为接近(图6a), 均指示了样品库中以中等风化强度的样品占主导, 这也与整个成冰纪处于较低的气温相吻合. 指示源岩成分差异的 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 指标则更符合正态分布, 平均值为 0.62(图6b), 作为参考, 上地壳的 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 平均值为 0.12, 花岗闪长岩为 0.45, PAAS 为 0.52. 与之相比, 玄武岩等基性岩具有较低的 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 值, 例如哥伦比亚玄武岩(BHVO-2)的 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 为 -0.7, 夏威夷玄武岩(BHVO-2)为

-2.63. 如图3a所示, $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}) > 0$ 指示源岩成分偏中酸性而 < 0 则代表偏基性. 成冰纪沉积岩样品的 $\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{MgO})$ 平均值指示这一时期的风化源区地表出露的岩石以中酸性为主, 也有部分来自基性的源岩风化.

此外, 成分分异指数 ICV 主要集中在1附近, 平均值 1.2, 说明大部分样品的成熟度较低, 为初次风化的产物, 但是因为前文提到的样品库里间冰期的样品占多数, 因此存在成熟度稍高的黏土矿物含量略高的样品. 碎屑沉积岩的搬运过程也会因为分选带来化学成分上的偏差, 例如石英通常较长石更为稳定, 因此分选作用难免会导致 SiO_2 含量的上升, 从而稀释了 Al_2O_3 的含量, 导致 CIA 的计算产生误差. 本文统计的样品中绝大多数样品的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值低于5, 说明分选作用至少在成冰纪时期对风化指标造成的偏差较小, 也从一个

侧面反映了成冰纪时期平均水循环较弱。

3 成冰纪全球平均化学风化强度与气候波动

3.1 雪球地球与化学风化强度演化

成冰纪雪球地球事件是地球演化史上一个重要的转折点,不仅改变了地球的地质构造和气候系统,还为地球生物的演化和适应提供了新的挑战和机遇。过去依靠单一或少数剖面的风化强度研究,往往只能得到一个片面的认识,而且因为纬度、构造、温度等因素的差异,所得出的风化强度也存在很强的空间差异性。这种情况不仅存在于通过主量元素含量得到的指标,也对一些同位素指标产生显著的影响。例如对全球不同地区新元古代海水 Sr 同位素的重建结果表明,由于超大陆聚合裂解所伴随的大火成岩分布对于化学风化的速率起了主要的控制因素,这些古地理因素直接影响了新元古代从 800 Ma 到 635 Ma 的全球海水 Sr 同位素变化 (Godd  ris *et al.*, 2017)。另一个维度的不确定性来自于时间。冰期的启动和结束,乃至冰期持续过程中存在冰进-冰退序列 (Lang *et al.*, 2018b; Hu *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2022), 都深刻地影响着地球表层系统,因此有必要从时间演化的角度深刻剖析全球风化强度随着冰期活动的变化规律,从而使人们能够更好地理解地球气候系统的复杂性和其对全球环境演变的影响,为今后面对全球气候变化挑战提供重要的科学参考和启示。

正如 1.2 节所述,前人利用 Sr 同位素和 Nd 同位素的分析结果,提出了成冰纪地球经历了“火与冰假说”,认为成冰纪的冰川事件可能与低纬度地区的玄武岩风化有关,导致大气 CO₂ 的急剧消耗,进而促使全球气候变冷。成冰纪初期的火山活动可能在 Rodinia 超大陆的低纬度地区发生,并伴随着火山裂谷边缘的发育以及多个大火成岩省 (如 Willouran、Guibei、Gunbarrel 和 Franklin 大火成岩省) 的侵位 (Li *et al.*, 2013)。这些火山作用和基性物质的风化增加了海洋中非放射性成因 Sr 含量和较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 同时可能导致全球气候变冷。这些观点也得到了一些 CIA 研究的支持,即在斯图特冰期开始之前,出现了一次强烈的大陆风化作用,导致地球不可避免地进入了冰期。类似的机理也常常被用来解释显生宙奥陶纪末大冰期成因 (Pogge von Strandmann *et al.*, 2017)。但是如果斯图特冰期是由于大

火成岩省的喷发所导致,是否每一次地质历史时期其他类似规模的大火成岩省喷发都会引发雪球地球事件?大规模火山作用在马里诺冰期结束时才有记录,是否说明火山作用又可以促进冰期的结束 (Lan *et al.*, 2022)?化学风化作用作为连接陆地与海洋的桥梁,在这些过程中究竟扮演了什么样的角色?

为了回答上述问题,笔者统计了样品中的 CIA、CIW、PIA 和 WIP 与新的风化指标 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 之间的相关性 (图 7),结果显示 CIA、CIW 和 PIA 在风化中等和较弱的区间均与 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 保持了一定的线性关系,但是在风化较强的区间则 CIA 趋向于发散,CIW 和 PIA 则是在高风化强度的区间趋向于饱和,可能是由于 Mg 和 Ca 的丢失较为彻底,因此变化较不明显。CIA 在某些样品中,特别是风化程度较高的样品中的确显示出一些 K 含量的差异,因为后两个参数都不考虑 K 的影响,因此也和 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 具有更好的相关性。而 WIP 因为不考虑 Al 的关系,因此和其他几个指标都没有太好的相关性,而更加适合比较同一个风化剖面上、源岩组成一致样品的化学风化强度。因此统计整个新元古代成冰纪沉积岩样品的 WIP 似乎不能很好地反映风化的强度。

统计区大多数地区成冰纪的地层主要包括两次冰期和间冰期,但是在华南扬子板块由于处于伸展拉张环境而沉积了巨厚的岩层,特别是在对应于斯图特冰期的地层中发现了两次典型的冰川沉积 (古城冰期和长安冰期) 和中间的非冰川沉积 (例:富禄组),因此笔者将统计到的样品按照时代划分成 7 组,分别是成冰期雪球地球启动之前的拉伸纪晚期 ($n=59$, n 代表统计的样品数量),斯图特冰期 (包括塔里木叶城地区的波龙冰期、库鲁克塔格地区的阿勒通沟冰期、阿克苏地区的巧恩布拉克冰期、华南地区的长安冰期, $n=91$)、斯图特间冰期 (主要包括华南地区的富禄组及其对应地层, $n=17$)、斯图特冰期 2 (主要包括华南的古城冰期, $n=57$)、成冰纪间冰期 (对应华南的大塘坡组, $n=454$)、马里诺冰期 (包括塔里木叶城地区的雨塘冰期、库鲁克塔格地区的特瑞爱肯冰期、阿克苏地区的尤尔美那克冰期、华南地区的南沱冰期, $n=170$)、以及上覆于马里诺冰期沉积的埃迪卡拉纪早期 ($n=19$)。

计算得到的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 按照不同时期划分得到的结果如图 8 所示,统计的平均值与中位数

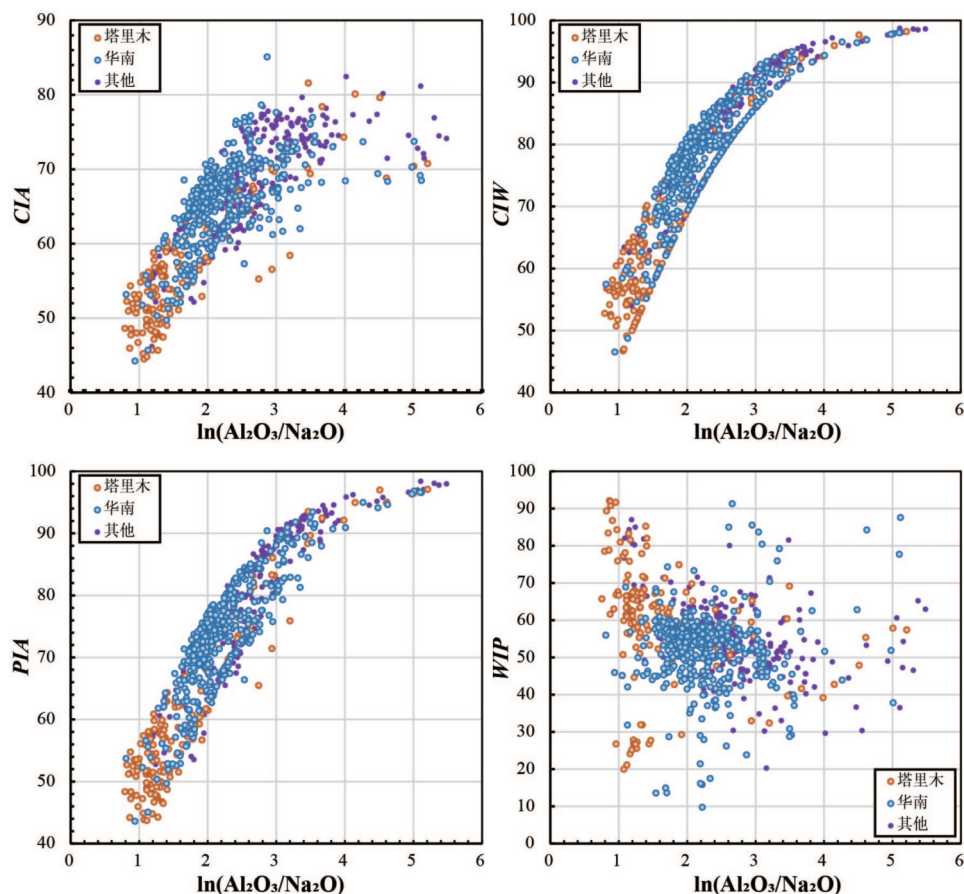


图7 CIA 、 CIW 、 PIA 、和 WIP 与风化指标 $\ln(Al_2O_3/Na_2O)$ 之间的相关性图解

Fig.7 The cross-plots between traditional weathering proxies CIA , CIW , PIA , WIP and $\ln(Al_2O_3/Na_2O)$

其中 CIA 、 CIW 以及 PIA 均与 $\ln(Al_2O_3/Na_2O)$ 存在较好的正相关关系,但是在风化程度较高的区域, CIA 表现得更加发散,表明在强风化地区,由于化学动力学的差异,碱金属 K 、 Na 和碱土金属 Ca 、 Mg 可能出现差异性风化.而 CIW 和 PIA 在强风化区则趋向饱和,可能是由于 Ca 和 Mg 接近于完全流失,从而使得 CIW 和 PIA 对较强烈的化学风化不够敏感

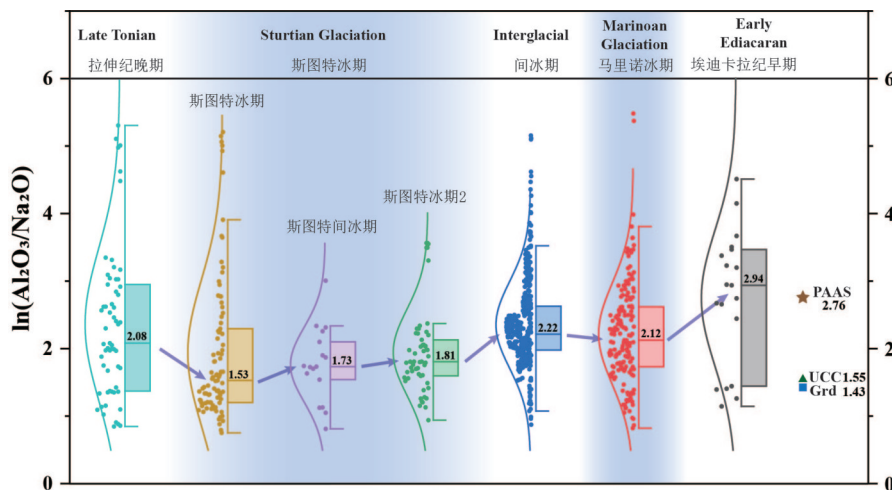


图8 新元古代成冰纪前后风化指标 $\ln(Al_2O_3/Na_2O)$ 随时间的演化示意

Fig.8 The box-whisker plot of $\ln(Al_2O_3/Na_2O)$ values from the Late Tonian to the Early Ediacaran

图中每一个箱线图左边为统计样品的拟合正态分布曲线,中间为统计数据点分布,右边为箱线图,箱体上下边界分别对应数据的上下四分位数,箱体内水平横线和数字为中位数.上下须线连接的水平横线表示数据的最大值和最小值,须线之外的点为异常值.图右侧棕色五角形代表后太古宙澳大利亚页岩 (Taylor and McLennan, 1985) (PAAS),绿色三角形为平均上地壳 (Rudnick and Gao, 2014) (UCC),蓝色正方形为花岗闪长岩 (Wedepohl, 1995) (Grd)

较为接近,考虑到个别异常值的影响,后续讨论以中位数的变化为主.从拉伸纪进入斯图特冰期时, $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 的平均值和中位数均有明显的下降,中位数从 2.08 降到 1.53.拉伸纪晚期的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值已经显著低于 PAAS 的平均值 2.76,说明拉伸纪晚期的气候条件已经变得较为干冷,并且这一趋势在进入斯图特冰期后进一步降低,斯图特冰期的中位值 1.53 已经与花岗岩/花岗闪长岩接近,表明风化似乎趋近于零.从斯图特冰期到斯图特间冰期(即长安组到富禄组),风化作用得到一定的恢复(中位数=1.73),但仍处于较冷的阶段,之后的斯图特冰期 2(即古城冰期)的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 中位数并没有太大的变化(1.81),有可能说明斯图特冰期内部虽然存在着气候的波动,但整体仍然处于较冷的状态,这也可能是斯图特冰期持续时间较长的一个原因,即大气二氧化碳浓度仍然较低,不足以支持较强的化学风化作用(Lan *et al.*, 2015).

进入到成冰纪的间冰期, $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 的中位数有一个显著的上升(2.21),甚至超过了冰期启动之前拉伸纪晚期的风化强度,强烈的化学风化意味着有合适的环境条件促进易溶元素的丢失,因此斯图特冰期的结束伴随着气候的显著回暖,这一时期全球范围内也沉积了大规模的含有机质黑色页岩,表明海洋生产力得到了一定的恢复.在我国华南地区,特别是大塘坡组底部也是重要的锰矿形成时期,可能与华南陆架边缘的氧化还原条件改变相关(Cheng *et al.*, 2021).尽管海洋氧化还原状态改变的最终推手还未有定论,特别是在冰期和暖室气候的转变阶段,大陆风化作用可能发挥了关键作用,通过影响地表和水体中的化学反应和物质输送,进而影响海洋的氧化还原状态.虽然具体的控制机制还需要更多的研究来明确,但大陆风化作用在地球化学和氧化还原动态中的潜在重要性已经引起了广泛的关注.例如 Wei *et al.* (2020) 在大塘坡组下部的页岩和泥质粉砂岩中观察到显著的锂同位素($\delta^7\text{Li}$)负偏移,这表明硅酸盐风化的强度在这段时间逐渐增强.这种现象被认为与温暖的气候条件以及冰川侵蚀暴露的新鲜矿物表面有关.

从间冰期进入到马里诺冰期, $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值中位数从 2.21 略微降低至 2.12,平均值和整体趋势也反映了一致的下降.而马里诺冰期时的风化强度明显高于斯图特冰期(中位数 1.53),这种显著的差异有可能是导致马里诺冰期仅仅持续了大约

10 Ma 的因素之一.但是马里诺冰期全球都有冰碛岩的记录,并且古地理重建显示赤道地区也存在冰期记录,因此另一个可能性是低 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值代表了马里诺冰期的初始阶段化学风化作用其实更低,而高值则反映了冰消期全球快速解冻,大气二氧化碳积累到了较高水平,这意味着虽然地层学证据表明马里诺冰期一度扩展到低纬度地区,但是在雪球地球解冻的阶段存在相对高的化学风化强度,表明存在相对活跃的水循环.这与近年来越来越多的新证据不谋而合,例如古生物(Ye *et al.*, 2015)、N 同位素(Song *et al.*, 2023)、Fe 组分及 Fe-S 同位素(Shen *et al.*, 2022)均指向一个可能存在的中低纬度开阔水域 Slushball(泥球地球)场景,马里诺冰期晚期可能存在频繁的全球构造活动,大规模裂谷岩浆作用在多个板块发生,这时期正是 Rodinia 超大陆最后一期裂解(Lan *et al.*, 2022),因此大气 CO_2 含量可能较高,从而导致风化作用也较为强烈.

冰期结束标志着地球气候系统的显著演变.冰期全球性的冰盖覆盖大陆,地球的气候处于极端寒冷状态.冰期结束后,大量的冰盖融化释放了大量的淡水进入海洋,引发了海洋的盐度和化学成分变化.海洋的盐度变化可能影响了海水的密度和环流模式,进而影响了全球的海洋循环系统(Gan *et al.*, 2024).相较于马里诺冰期,埃迪卡拉纪早期的沉积记录就已经发生剧烈的变化, $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值中位数飙升至 2.94,图 8 中个别样品来自塔里木板块埃迪卡拉系底部的砂岩/粗砂岩,可能受到了后期成岩作用影响.如果排除这几个样品的影响,埃迪卡拉纪早期的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值估计值将更高,表明马里诺冰期结束后,地球表层环境进入了一个崭新的阶段,迅速进入温暖湿润的暖室气候.前人通过研究华南松桃钻孔样品中南沱组末期泥页岩中的镁同位素($\delta^{26}\text{Mg}$),识别出一段在冰期结束前就已经出现的强烈化学风化作用(Huang *et al.*, 2016),这些 $\delta^{26}\text{Mg}$ 异常高的样品同样具有较高的 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 值(平均值=2.33),这一剧烈的化学风化事件不仅导致了马里诺冰期后全球碳酸盐岩盖层的产生,而且可能还为海洋带来了丰富的营养物质,这反过来又可能促进了初级生产力、海洋氧化作用并最终导致了埃迪卡拉纪复杂真核生物的多样化.

3.2 成冰纪冰期内部风化作用差异巨大

虽然雪球地球假说得到了地质年代学、碳酸盐岩碳同位素记录,以及盖帽碳酸盐沉积学的支持,

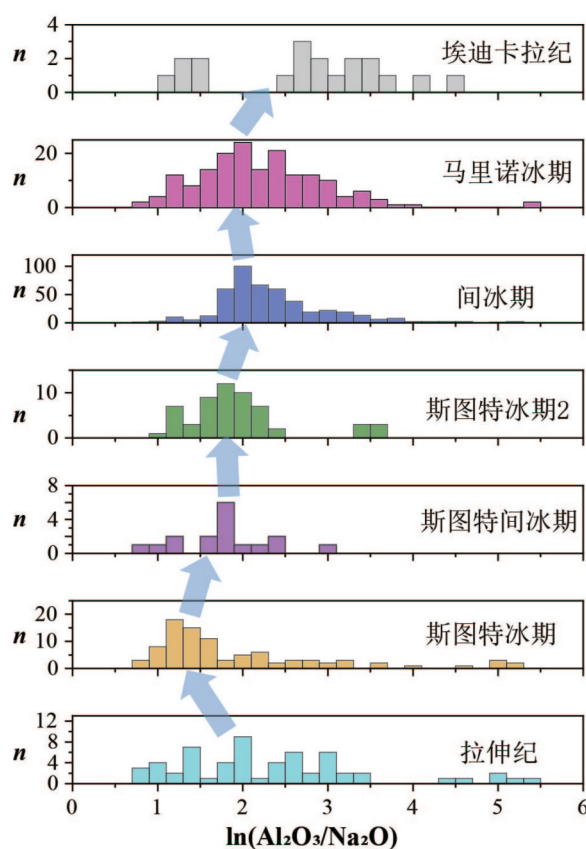


图9 新元古代成雪球地球事件及前后各时期化学风化的直方图

Fig.9 The histograms of $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ values divided by different periods ranging from the Late Tonian, Sturtian ice age, interglacial, Marinoan glaciation, and Early Ediacaran

图中箭头为 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 中位值随时间的变化, 显示出多次强弱波动

但是近年来越来越多的证据表明雪球冰期时冰盖和海洋化学状态存在动态变化. 主要表现在(1)沉积相: 例如挪威斯瓦尔巴岛 Wilsonbreen 组 马里诺冰期、美国死亡谷 Kingston Peak 组、澳大利亚以及我国华南长安冰期和南沱冰期沉积岩均表现出垂向上的沉积构造和沉积相变化, 反映了当时冰进-冰退的沉积旋回 (Allen and Etienne, 2008; Hu *et al.*, 2012, 2020; Benn *et al.*, 2015; Busfield and Le Heron, 2016; Fairchild *et al.*, 2016; Fleming *et al.*, 2016; Lang *et al.*, 2018b); 此外雪球地球假说认为冰期的海水相对碳酸盐矿物是不饱和的, 然而近期在我国华南多个南沱冰期钻孔样品以及澳大利亚 Sturtian 冰期沉积岩中发现同沉积白云岩层, 表明雪球地球时期海水钙镁离子处于过饱和状态 (Gernon *et al.*, 2016; 沈洪娟等, 2020; Hood *et al.*, 2022; 祁钰等, 2022). (2) 海水氧化还原状态: 近期对南沱组冰期沉积岩中自生黄铁矿铁硫同位素以及沉积岩铁组分的研究表明, 这样的冰期旋回同时伴随着

海洋氧化还原状态的变化, 在冰退期底水变得更加氧化, 而冰进期则更加缺氧 (Shen *et al.*, 2022). 这一发现打破了传统雪球地球假说的全球海洋因为冰封而缺氧的固有假设. (3) 生物化石记录: 一些学者提出冰层表面由于升华作用产生的淡水池塘或者地热温泉附近可能为蓝细菌等提供生存避难所 (Hoffman, 2016), 并提出了在雪球地球期间可能在赤道附近存在带状开放水域 (water belt), 也被称为泥球地球模型 (Pierrehumbert *et al.*, 2011). 我国华南南沱组黑色页岩夹层中保存了丰富的底栖宏体藻类化石 (Ye *et al.*, 2015), 并且表现出与埃迪卡拉纪宏体藻类形态类型相似的功能组合, 这些底栖藻类的生存需要光合作用和稳定的空间. 最新研究利用该化石层的黑色页岩 N 同位素特征, 发现该时期存在一个活跃的氮循环, 表明中纬度地区存在开阔水域 (Song *et al.*, 2023). 以上这些新发现对过去的雪球地球气候模型带来了新的挑战: 在规模上, 雪球冰期期间,

冰川发育未能覆盖全球,在中低纬度海洋存在开阔水体;在时间上,雪球冰期并非一次持续的冰期事件,而是被多次的间冰期发育所打断。

本研究对全球多个成冰纪剖面样品的总结同样发现在每个时期,风化强度都不是一成不变的,尽管统计结果的中位值和均值能够反映出全球在该时期的平均风化强度,彼此间仍存在巨大的空间和时间差异(图 9)。正如前人在全球新元古代 Sr 同位素研究中所发现的,由于构造活动的差异性,存在大规模火成岩喷发的区域有新鲜暴露的可供化学风化的岩石,同时由于岩浆去气所带来的高 CO_2 、 SO_2 等挥发性物质,都可以促进硅酸盐的化学风化(Godd  ris *et al.*, 2017)。此外,由于定年技术的限制,火山灰夹层锆石 U-Pb 尽管可以获得高精度的年龄数据(兰中伍, 2023),但是受限于火山灰的空间分布,很多地层年龄得不到很好地约束,这也为精细对比全球同时期不同地区剖面带来了困难。因此本研究重点在于从全球宏观的角度,利用 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 这一指标来反演成冰纪全球平均风化强度。随着更多高精度年龄数据的发表,未来将有可能对不同剖面做出更精细的刻画,这些研究结果对理解成冰纪全球气候变化过程中陆地表层风化作用的时空分布具有重要意义。成冰纪期间的大陆风化作用记录了地球表面与大气、水文系统之间的相互作用,对于理解全球气候变化过程至关重要。冰期的启动和结束往往伴随着全球气候的剧烈变化,这些变化不仅影响大陆风化速率,还对地表形态和生态系统产生深远影响。通过分析不同期间的大陆风化作用,可以揭示过去全球气候变化的时空模式,有助于预测未来气候变化的可能趋势和影响。

大陆风化作用对地球化学循环(如 C、Si、Ca 等元素的循环)具有重要影响。在冰期期间,冰川活动和寒冷气候条件通常限制了大陆风化的速率,导致大气中 CO_2 浓度上升。而在间冰期,气候变暖可能加速大陆风化,通过化学风化作用将大气中的 CO_2 捕获到陆地,从而对全球碳循环产生影响。大陆风化将 C、Si 等元素输送到海洋影响到海洋中的溶解有机碳(DOC)和溶解无机碳(DIC)的含量和分布,进而影响海洋的酸碱度和生物地球化学过程。这些对全球海洋系统的调节作用和地球化学循环过程具有十分重要的意义。

总的来说,成冰纪期间大陆风化作用的研究不仅可以深化人们对过去地球气候变化历史的

理解,还对预测未来气候变化趋势和环境演变具有重要意义。通过综合考察不同时期大陆风化的变化,可以揭示地球系统动态变化的机制,为全球变化研究和应对提供科学依据和政策建议。

4 总结与展望

综合评估成冰纪沉积岩的化学风化强度涉及多种指标,其中基于元素含量的风化指标已被广泛应用,但由于存在多解性,需要结合其他指标进行综合评价。同位素在此领域的应用研究较为薄弱,特别是在成冰纪的应用实例较少,特定同位素的分馏机制有待进一步深入研究。

化学风化作用在成冰纪显然经历了多次强烈的变化。目前的地球化学证据主要集中在一些指标如 CIA、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 Nd 同位素等,但这些数据受限于少数剖面 and 岩性。因此,迫切需要更多地球化学手段来反映成冰纪化学风化的强度和作用范围,以更好地还原古海洋环境。这些研究不仅提供了对“雪球地球”事件新的理解,同时也揭示了现有理解不足导致的普遍分歧。

$\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 可以作为一个良好的风化作用替代指标,与传统的 CIA、CIW 等指标相比,该指标对风化的变化更为敏感,同时对源岩的岩性变化较为不敏感。通过统计全球区域的 867 件碎屑岩的主量元素数据,结果显示 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 在同一时期不同剖面记录的风化强度信息存在显著差异,这表明成冰纪大陆风化可能受到地理条件、大火成岩省以及后期地质构造变化等局部或区域因素的影响而存在空间差异性。另一方面, $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 的平均结果表明,从斯图特冰期形成前的拉伸纪晚期直到马里诺冰期结束的埃迪卡拉纪早期,大陆风化作用经历了多次减弱再增强的循环,这些来自全球的数据代表了该时期的全球平均风化强度,因此具有全球对比意义。由于 $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 指标对源岩成分不敏感,而硅酸盐的风化则主要受控于地表气候条件,因此笔者的结果为风化作用与冰期的发育和衰退之间提供了直接的联系。未来更加精细的地层和年代框架将更有利于探索全球冰期与化学风化之间的因果联系。

此外,成冰纪具有特殊的沉积序列,在两次雪球地球事件内部均发现了沉积相的变化,同时风化指标也表明冰期内部存在着气候旋回,一些地区还沉积了海相碳酸盐岩,这为未来研究提供了新的方向

和挑战.新兴的同位素分析技术,例如Li、K、Rb等碱金属元素的同位素体系也可能带来更多新的认识.

综合来看,考虑到全球实例研究的空间差异性和源汇系统的复杂性,需要综合多指标进行评估才能更加全面地理解成冰纪的化学风化作用.元素地球化学和同位素地球化学的综合应用,能够有效提升评估的精确性.而通过大数据统计的方法也许能为深入揭示成冰纪地球碳循环过程的复杂性和动态性提供新思路,有助于更全面地理解地球系统中化学风化的作用和影响.

致谢:感谢编辑部对稿件的处理,感谢两位匿名审稿人提出的宝贵修改意见!

附表见<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.006>.

References

- Algeo, T. J., Hong, H. L., Wang, C. W., 2025. The Chemical Index of Alteration (CIA) and Interpretation of ACNK Diagrams. *Chemical Geology*, 671: 122474. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122474>
- Allen, P. A., Etienne, J. L., 2008. Sedimentary Challenge to Snowball Earth. *Nature Geoscience*, 1: 817–825. <https://doi.org/10.1038/ngeo355>
- Bahlburg, H., Dobrzinski, N., 2011. A Review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and Its Application to the Study of Neoproterozoic Glacial Deposits and Climate Transitions. *Geological Society, London, Memoirs*, 36: 81–92. <https://doi.org/10.1144/m36.6>
- Benn, D. I., Le Hir, G., Bao, H. M., et al., 2015. Orbitally Forced Ice Sheet Fluctuations during the Marinoan Snowball Earth Glaciation. *Nature Geoscience*, 8: 704–707. <https://doi.org/10.1038/ngeo2502>
- Berner, R. A., Lasaga, A. C., Garrels, R. M., 1983. The Carbonate-Silicate Geochemical Cycle and Its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide over the Past 100 Million Years. *American Journal of Science*, 283(7): 641–683. <https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.641>
- Busfield, M. E., Le Heron, D. P., 2016. A Neoproterozoic Ice Advance Sequence, Sperry Wash, California. *Sedimentology*, 63(2): 307–330. <https://doi.org/10.1111/sed.12210>
- Cai, X. F., Luo, Z. J., Ye, Q., 2017. Sedimentary Characteristics of the Nantuo Formation in Siduping, Hunan and Its Coupling Relationship with Paleoclimate. *East China Geology*, 38(2): 91–98 (in Chinese with English abstract)
- Cheng, M., Zhang, Z. H., Algeo, T. J., et al., 2021. Hydrological Controls on Marine Chemistry in the Cryogenic Nanhua Basin (South China). *Earth-Science Reviews*, 218: 103678. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103678>
- Cox, G. M., Halverson, G. P., Stevenson, R. K., et al., 2016. Continental Flood Basalt Weathering as a Trigger for Neoproterozoic Snowball Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 446: 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.016>
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Ding, H. F., Ma, D. S., Yao, C. Y., et al., 2009. Sedimentary Environment of Ediacaran Glacigenic Diamictite in Guozigou of Xinjiang, China. *Chinese Science Bulletin*, 54(18): 3283–3294. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0443-5>
- Dodd, M. S., Shi, W., Li, C., et al., 2023. Uncovering the Ediacaran Phosphorus Cycle. *Nature*, 618: 974–980. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06077-6>
- Fairchild, I. J., Fleming, E. J., Bao, H. M., et al., 2016. Continental Carbonate Facies of a Neoproterozoic Panglaciation, North-East Svalbard. *Sedimentology*, 63(2): 443–497. <https://doi.org/10.1111/sed.12252>
- Feng, L. J., Chu, X. L., Zhang, Q. R., et al., 2003. CIA (Chemical Index of Alteration) and Its Applications in the Neoproterozoic Clastic Rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539–544 (in Chinese with English abstract)
- Feng, L. J., Chu, X. L., Zhang, Q. R., et al., 2004. New Evidence for a Cold Climate during the Deposition of the Xieshuihe Formation in Northeast Hunan. *Science Bulletin*, 49(12): 1172–1178 (in Chinese).
- Fleming, E. J., Benn, D. I., Stevenson, C. T. E., et al., 2016. Glacitectorism, Subglacial and Glacilacustrine Processes during a Neoproterozoic Panglaciation, North-East Svalbard. *Sedimentology*, 63(2): 411–442. <https://doi.org/10.1111/sed.12251>
- Fu, H. J., Jian, X., Liang, H. H., 2021. Research Progress of Sediment Indicators and Methods for Evaluation of Silicate Chemical Weathering Intensity. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(6): 1192–1209 (in Chinese with English abstract)
- Fu, H. J., Jian, X., Pan, H. Q., 2023. Bias in Sediment Chemical Weathering Intensity Evaluation: A Numerical Simulation Study. *Earth-Science Reviews*, 246: 104574.

- <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104574>
- Gan, T., Tian, M., Wang, X. K., et al., 2024. Lithium Isotope Evidence for a Plumeworld Ocean in the Aftermath of the Marinoan Snowball Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(46): e2407419121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2407419121>
- Gernon, T. M., Hincks, T. K., Tyrrell, T., et al., 2016. Snowball Earth Ocean Chemistry Driven by Extensive Ridge Volcanism during Rodinia Breakup. *Nature Geoscience*, 9: 242–248. <https://doi.org/10.1038/ngeo2632>
- Goddéris, Y., Le Hir, G., Macouin, M., et al., 2017. Paleogeographic Forcing of the Strontium Isotopic Cycle in the Neoproterozoic. *Gondwana Research*, 42: 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.013>
- Halverson, G. P., Dudás, F. Ö., Maloof, A. C., et al., 2007. Evolution of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Composition of Neoproterozoic Seawater. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256(3–4): 103–129. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.028>
- Halverson, G. P., Wade, B. P., Hurtgen, M. T., et al., 2010. Neoproterozoic Chemostratigraphy. *Precambrian Research*, 182(4): 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.04.007>
- Hoffman, P. F., 2016. Cryoconite Pans on Snowball Earth: Supraglacial Oases for Cryogenian Eukaryotes? *Geobiology*, 14(6): 531–542. <https://doi.org/10.1111/gbi.12191>
- Hoffman, P. F., Abbot, D. S., Ashkenazy, Y., et al., 2017. Snowball Earth Climate Dynamics and Cryogenian Geology - Geobiology. *Science Advances*, 3(11): e1600983. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600983>
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., et al., 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *The American Journal of Science*, 281(5381): 1342–1346. <https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>
- Hoffman, P. F., Li, Z. X., 2009. A Paleogeographic Context for Neoproterozoic Glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 277(3–4): 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.03.013>
- Hood, A. V. S., Penman, D. E., Lechte, M. A., et al., 2022. Neoproterozoic Syn-Glacial Carbonate Precipitation and Implications for a Snowball Earth. *Geobiology*, 20(2): 175–193. <https://doi.org/10.1111/gbi.12470>
- Hu, J., Li, C., Tong, J. N., et al., 2020. Glacial Origin of the Cryogenian Nantuo Formation in Eastern Shennongjia Area (South China): Implications for Macroalgal Survival. *Precambrian Research*, 351: 105969. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105969>
- Hu, J., Wang, J. S., Chen, H. R., et al., 2012. Multiple Cycles of Glacier Advance and Retreat during the Nantuo (Marinoan) Glacial Termination in the Three Gorges Area. *Frontiers of Earth Science*, 6(1): 101–108. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0179-9>
- 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. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113(52): 14904–14909. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607712113>
- Jacobsen, S. B., Kaufman, A. J., 1999. The Sr, C and O Isotopic Evolution of Neoproterozoic Seawater. *Chemical Geology*, 161(1): 37–57. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00080-7)
- Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., Prave, A. R., 2001. Carbon Isotopic Composition of Neoproterozoic Glacial Carbonates as a Test of Paleooceanographic Models for Snowball Earth Phenomena. *Geology*, 29(12): 1135–1138. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)0291135:cicong>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)0291135:cicong>2.0.co;2)
- Lan, Z. W., 2023. Research Progress on the Chronostratigraphic Study of Nanhua System in South China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(1): 180–187 (in Chinese with English abstract)
- Lan, Z. W., Huyskens, M. H., Le Hir, G., et al., 2022. Massive Volcanism may Have Foreshortened the Marinoan Snowball Earth. *Geophysical Research Letters*, 49(6): e2021GL097156. <https://doi.org/10.1029/2021gl097156>
- Lan, Z. W., Li, X. H., Zhang, Q. R., et al., 2015. Global Synchronous Initiation of the 2nd Episode of Sturtian Glaciation: SIMS Zircon U-Pb and O Isotope Evidence from the Jiangkou Group, South China. *Precambrian Research*, 267: 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.06.002>
- Lang, X. G., Chen, J. T., Cui, H., et al., 2018b. Cyclic Cold Climate during the Nantuo Glaciation: Evidence from the Cryogenian Nantuo Formation in the Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 310: 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.03.004>
- Lang, X. G., Shen, B., Peng, Y. B., et al., 2018a. Transient Marine Euxinia at the End of the Terminal Cryogenian Glaciation. *Nature Communications*, 9: 3019. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05423-x>
- Li, W. P., Li, H. L., Wang, Y., et al., 2022. Neoproterozoic Glaciations in Yecheng Area, Southwestern Margin of the Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 29(3):

- 356—380 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. L., Zhang, X., Lin, C. M., et al., 2022. Overview of the Application and Prospect of Common Chemical Weathering Indices. *Geological Journal of China Universities*, 28(1): 51—63 (in Chinese with English abstract)
- Li, Z. X., Evans, D. A. D., Halverson, G. P., 2013. Neoproterozoic Glaciations in a Revised Global Palaeogeography from the Breakup of Rodinia to the Assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, 294: 219—232. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.05.016>
- Lipp, A. G., Shorttle, O., Syvret, F., et al., 2020. Major Element Composition of Sediments in Terms of Weathering and Provenance: Implications for Crustal Recycling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(6): e2019GC008758. <https://doi.org/10.1029/2019gc008758>
- Liu, B., Xu, B., Meng, X. Y., et al., 2007. Study on the Chemical Index of Alteration of Neoproterozoic Strata in the Tarim Plate and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1664—1670 (in Chinese with English abstract).
- Mills, B., Watson, A. J., Goldblatt, C., et al., 2011. Timing of Neoproterozoic Glaciations Linked to Transport-Limited Global Weathering. *Nature Geoscience*, 4: 861—864. <https://doi.org/10.1038/ngeo1305>
- Nesbitt, H. W., 1979. Mobility and Fractionation of Rare Earth Elements during Weathering of a Granodiorite. *Nature*, 279: 206—210. <https://doi.org/10.1038/279206a0>
- Nesbitt, H. W., Markovics, G., Price, R. C., 1980. Chemical Processes Affecting Alkalies and Alkaline Earths during Continental Weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659—1666. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90218-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90218-5)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299: 715—717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523—1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1989. Formation and Diagenesis of Weathering Profiles. *Journal of Geology*, 97(2): 129—147. <https://doi.org/10.1086/629290>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M., et al., 1996. Effects of Chemical Weathering and Sorting on the Petrogenesis of Siliciclastic Sediments, with Implications for Provenance Studies. *Journal of Geology*, 104(5): 525—542. <https://doi.org/10.1086/629850>
- Och, L. M., Shields-Zhou, G. A., 2012. The Neoproterozoic Oxygenation Event: Environmental Perturbations and Biogeochemical Cycling. *Earth-Science Reviews*, 110(1—4): 26—57. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2011.09.004>
- Ohta, T., Arai, H., 2007. Statistical Empirical Index of Chemical Weathering in Igneous Rocks: A New Tool for Evaluating the Degree of Weathering. *Chemical Geology*, 240(3/4): 280—297. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>
- Pierrehumbert, R. T., Abbot, D. S., Voigt, A., et al., 2011. Climate of the Neoproterozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39: 417—460. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152447>
- Pogge von Strandmann, P. A. E., Desrochers, A., Murphy, M. J., et al., 2017. Global Climate Stabilisation by Chemical Weathering during the Hirnantian Glaciation. *Geochemical Perspectives Letters*, 230—237. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1726>
- Qi, L., Yu, W. C., Du, Y. S., et al., 2015. Paleoclimate Evolution of the Cryogenian Tiesi'ao Formation Datangpo Formation in Eastern Guizhou Province: Evidence from the Chemical Index of Alteration. *Geological Science and Technology Information*, 34(6): 47—57 (in Chinese with English abstract)
- Qi, Y., Gu, S. Y., Zhao, F. Q., 2022. Redox Characteristics of Marine Environment of Nantuo Glaciation, Nanhua Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 715—729 (in Chinese with English abstract)
- Rieu, R., Allen, P. A., Plotze, M., et al., 2007. Compositional and Mineralogical Variations in a Neoproterozoic Glacially Influenced Succession, Mirbat Area, South Oman: Implications for Paleoweathering Conditions. *Precambrian Research*, 154(3—4): 248—265. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.01.003>
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(1): 51—56. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317266110>
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2014. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), Elsevier, Oxford. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08->

- 095975-7.00301-6
- Shao, J. Q., Yang, S. Y., 2012. Does Chemical Index of Alteration (CIA) Reflect Silicate Weathering and Monsoonal Climate in the Changjiang River Basin? *Chinese Science Bulletin*, 57(10): 1178–1187. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4954-5>
- Shen, H. J., Gu, S. Y., Zhao, S. F., et al., 2020. The Sedimentary Geochemical Records of Ocean Environment during the Nantuo (Marinoan) Glaciation in South China—Carbon and Oxygen Isotopes and Trace Element Compositions of Dolostone in Nantuo Formation, Nanhuan System, in Eastern Guizhou. *Geological Review*, 66(1): 214–228 (in Chinese with English abstract).
- Shen, W. B., Zhu, X. K., Yan, B., et al., 2022. Secular Variation in Seawater Redox State during the Marinoan Snowball Earth Event and Implications for Eukaryotic Evolution. *Geology*, 50(11): 1239–1244. <https://doi.org/10.1130/G50147.1>
- Shi, W., Mills, B. J. W., Li, C., et al., 2022. Decoupled Oxygenation of the Ediacaran Ocean and Atmosphere during the Rise of Early Animals. *Earth and Planetary Science Letters*, 591: 117619. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117619>
- Shields, G. A., 2007. A Normalised Seawater Strontium Isotope Curve: Possible Implications for Neoproterozoic–Cambrian Weathering Rates and the Further Oxygenation of the Earth. *eEarth*, 2(2): 35–42. <https://doi.org/10.5194/ee-2-35-2007>
- Song, H. Y., An, Z. H., Ye, Q., et al., 2023. Mid-Latitudinal Habitable Environment for Marine Eukaryotes during the Waning Stage of the Marinoan Snowball Glaciation. *Nature Communications*, 14: 1564. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37172-x>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford.
- Wang, J., Li, Z. X., 2003. History of Neoproterozoic Rift Basins in South China: Implications for Rodinia Break-up. *Precambrian Research*, 122(1–4): 141–158. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00209-7)
- Wang, P., Du, Y. S., Yu, W. C., et al., 2020. The Chemical Index of Alteration (CIA) as a Proxy for Climate Change during Glacial–Interglacial Transitions in Earth History. *Earth-Science Reviews*, 201: 103032. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103032>
- Wang, Z. Q., Yin, C. Y., Gao, L. Z., et al., 2006. The Character of the Chemical Index of Alteration and Discussion of Subdivision and Correlation of the Nanhua System in Yichang Area. *Geological Review*, 52(5): 577–585 (in Chinese with English abstract)
- Wedepohl, K. H., 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Wei, G. Y., Wei, W., Wang, D., et al., 2020. Enhanced Chemical Weathering Triggered an Expansion of Euxinic Seawater in the Aftermath of the Sturtian Glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 539: 116244. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116244>
- Wu, Z. Y., Gu, S. Y., 2019. Potassium Enrichment of Diamictite in Neoproterozoic Nantuo Glaciation in South China: An Example from the Cryogenian Nantuo Formation in Songtao, Guizhou Province. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 36(5): 43–49 (in Chinese with English abstract)
- Xu, X. T., Shao, L. Y., 2018. Limiting Factors in Utilization of Chemical Index of Alteration of Mudstones to Quantify the Degree of Weathering in Provenance. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 515–522 (in Chinese with English abstract)
- Ye, Q., Tong, J. N., Xiao, S. H., et al., 2015. The Survival of Benthic Macroscopic Phototrophs on a Neoproterozoic Snowball Earth. *Geology*, 43(6): 507–510. <https://doi.org/10.1130/G36640.1>
- Yu, W. C., Algeo, T. J., Zhou, Q., et al., 2020. Cryogenian Cap Carbonate Models: A Review and Critical Assessment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 552: 109727. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109727>
- Zhang, Q. R., Chu, X. L., Feng, L. J., 2011. Neoproterozoic Glacial Records in the Yangtze Region, China. *Geological Society, London, Memoirs*, 36: 357–366. <https://doi.org/10.1144/M36.3>
- Zhang, S. H., Evans, D. A. D., Li, H. Y., et al., 2013. Paleomagnetism of the Late Cryogenian Nantuo Formation and Paleogeographic Implications for the South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.022>
- Zhao, X. M., Liu, S. D., Zhang, Q. X., et al., 2011. Geochemical Characters of the Nanhua System in Changyang, Western Hubei Province and Its Implication for Climate and Sequence Correlation. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 576–585 (in Chinese with English abstract)
- Zhao, Y. Y., Zheng, Y. F., 2011. Record and Time of Neoproterozoic Glaciations on Earth. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 545–565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou, C. M., Huyskens, M. H., Lang, X. G., et al., 2019.

Calibrating the Terminations of Cryogenian Global Glaciations. *Geology*, 47(3): 251–254. <https://doi.org/10.1130/G45719.1>

Zhu, M. Y., Wang, H. F., 2011. Neoproterozoic Glaciogenic Diamictites of the Tarim Block, NW China. *Geological Society, London, Memoirs*, 36: 367–378. <https://doi.org/10.1144/M36.33>

中文参考文献

蔡雄飞, 罗中杰, 叶琴, 2017. 湖南四都坪南沱组沉积特征与古气候变化耦合关系. *华东地质*, 38(2): 91–98.

冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等, 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地学前缘*, 10(4): 539–544.

冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等, 2004. 湘西北南华系溁水河组寒冷气候成因的新证据. *科学通报*, 49(12): 1172–1178.

傅寒晶, 简星, 梁杭海, 2021. 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展. *古地理学报*, 23(6): 1192–1209.

兰中伍, 2023. 华南南华系年代地层学研究进展. *沉积与特提斯地质*, 43(1): 180–187.

李王鹏, 李慧莉, 王毅, 等, 2022. 塔里木盆地西南缘叶城地区新元古代冰期事件. *地学前缘*, 29(3): 356–380.

李绪龙, 张霞, 林春明, 等, 2022. 常用化学风化指标综述: 应用与展望. *高校地质学报*, 28(1): 51–63.

刘兵, 徐备, 孟祥英, 等, 2007. 塔里木板块新元古代地层化学蚀变指数研究及其意义. *岩石学报*, 23(7): 1664–1670.

齐靓, 余文超, 杜远生, 等, 2015. 黔东南华纪铁丝坳期–大塘坡期古气候的演变: 来自CIA的证据. *地质科技情报*, 34(6): 47–57.

祁钰, 顾尚义, 赵凤其, 2022. 南华盆地南沱冰期海水氧化还原特征. *沉积学报*, 40(3): 715–729.

沈洪娟, 顾尚义, 赵思凡, 等, 2020. 华南南华纪南沱冰期海洋环境的沉积地球化学记录: 来自黔东南南华系南沱组白云岩碳氧同位素和微量元素的证据. *地质论评*, 66(1): 214–228.

王自强, 尹崇玉, 高林志, 等, 2006. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论. *地质论评*, 52(5): 577–585.

吴忠银, 顾尚义, 2019. 华南新元古代南沱杂砾岩中富钾现象的研究: 以贵州松桃南沱组为例. *贵州大学学报(自然科学版)*, 36(5): 43–49.

徐小涛, 邵龙义, 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素. *古地理学报*, 20(3): 515–522.

赵小明, 刘圣德, 张权绪, 等, 2011. 鄂西长阳南华系地球化学特征的气候指示意义及地层对比. *地质学报*, 85(4): 576–585.

赵彦彦, 郑永飞, 2011. 全球新元古代冰期的记录和时限. *岩石学报*, 27(2): 545–565.