王叶, 延晓冬. 2011. 新元古代地球气候研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 399-406. Wang Ye, Yan Xiaodong. 2011. The study progress on the Earth's climate during the Neoproterozoic [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 399-406.

新元古代地球气候研究进展

王叶^{1,2,3} 延晓冬¹

1 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 南京航空航天大学民航飞行学院, 南京 210016

摘要 新元古代曾发生过强烈的全球性冰川作用, 本文回顾了新元古代晚期全球性冰川作用存在的证据及其特点, 论述了新元古代冰期产生的原因, 综述了一些代表性的“雪球地球”模型并探讨了“雪球地球”对早期生物演化的影响, 最后对未来“雪球地球”研究趋势进行了展望。

关键词 雪球地球 地轴倾斜度 温室效应 CH₄ 渗漏 生命演化

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0399-08 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

The Study Progress on the Earth's Climate during the Neoproterozoic

WANG Ye^{1,2,3} and YAN Xiaodong¹

1 Key Laboratory of Regional Climate - Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Civil Aviation College of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Abstract A strong global glaciation took place on the Earth in Neoproterozoic. The evidences and characteristics of the glaciation during the Neoproterozoic is reviewed first while the mechanism of the glaciation is discussed. Then the models of the “Snowball Earth” and the effects of the glaciation on early life growth are summarized. Finally, the future development trend of “Snowball Earth” is forecasted.

Key words Snowball Earth, obliquity, greenhouse effect, CH₄ seepage, life evolution

1 引言

1987年, Sumner et al. (1987) 通过研究层状粉砂岩, 发现新元古代的冰川曾经到达过热带地区的海平面。之后许多的检测也相继证实了这个结论 (Schmidt et al., 1991; Schmidt and Williams, 1995; Sohl et al., 1999), 于是人们重新

关注新元古代的冰川作用。通过对各大陆的新元古代冰川沉积物地层学、地质年代学和古地磁等的研究, Evans (2000) 指出, 许多冰成岩石出现在 10°N~10°S 之间的赤道附近, 甚至没有超出 60°N~60°S。总之, 许多地质资料和古纬度记录证明, 新元古代晚期地球上曾发生过全球性的冰川作用, 在冰期期间冰川作用非常强烈, 甚至赤道地区也全被冰雪覆盖, 致使地球变成了一个冰

收稿日期 2009-01-17 收到, 2011-01-08 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB400500, 国家自然科学基金项目 40675048, 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950900

作者简介 王叶, 女, 博士, 主要从事全球气候变化研究。E-mail: wytea@126.com

冻雪封的“雪球”。因而一些学者提出了关于新元古代冰川的“雪球”理论。

1992年,对于推进到赤道附近海平面(即低纬度和低海拔)的全球性冰川作用,Kirschvink(1992)首次用“雪球事件”进行了解释:有利于全球出现冰川的条件是大陆板块基本上都聚集在中、低纬度地区,这就使得亚热带地区的反射率极大的提高,云层不再重要,热带地区大陆面积的增加加速了硅酸盐的风化,大气中 CO_2 浓度降低导致地表温度的进一步下降。与此同时,中、高纬度形成的冰川使海面降低,使部分大陆架和内陆海露出海平面,陆地面积增加,这进一步增加了地球的反射率,冰盖反射的结果最终使气候不稳定,使全球全部冰冻。地球能够从“雪球地球”返回,主要原因是板块构造驱动的长期碳循环使大气温室气体含量不断增加。

1998年 Hoffman et al. (1998) 根据覆盖在新元古代冰川沉积之上的帽碳酸盐岩的碳同位素研究指出,各地一致的碳同位素异常意味着地表海洋的生物产率曾中断数百万年。他们用全球性冰川作用(即“雪球地球”)解释了生物产率的中断,他们认为只有当地球的去气作用造成大气中 CO_2 高达现在的350倍时,地球上出现极端的温室效应,冰川才快速结束。之后大气 CO_2 很快转移至海洋,在海洋中生成大量的碳酸钙沉淀,形成全球都出现的帽碳酸盐岩。对于在前寒武纪末期产生并一直扩展到赤道附近的全球性冰期,Hoffman(1999)给出的解释为新元古代晚期聚集在赤道附近的罗迪尼亚超大陆的裂解使大陆边缘海面积迅速增加,边缘海生物初级产率和有机碳埋藏量也随之大大增加,造成大气中 CO_2 含量迅速减少,进而驱动了失控的冰反射灾变,形成了“雪球地球”。当时的海洋都被冰冻,冰盖扩展到赤道,平均厚约1 km,全球温度骤降至大约 -50°C 。海底火山释放出的 CO_2 积累在冰盖之下,随着 CO_2 不断的积累,最终冰盖破裂, CO_2 进入大气,产生极端的“温室效应”,使冰川迅速消融、退却,全球温度急剧上升至大约 50°C 。

“雪球地球”假说引起人们对新元古代冰川的兴趣,进而重新探索那个时期冰川作用产生的各种可能原因。本文主要围绕雪球地球假说探讨目前国际上比较流行的一些观点与说法。

2 雪球地球假说

“雪球地球”可以很好地解释冰期及冰期后许多特有的地质现象。它的提出得到许多学者的认同,因而引发了人们对雪球形成原因的探究,并提出了多种不同的“雪球”模型。同时,“雪球”期间生命的发展与演化也得到了广泛的关注与重视。

2.1 “雪球”的提出及存在证据

“雪球地球”可以解释很多地质现象,如新元古代全球冰川沉积物的同时性、碳同位素组成的显著变化、全球广泛分布的盖帽碳酸盐岩、新元古代冰川地层中出现的条带状铁矿层等。

(1) 碳同位素:新元古代冰期地层由于缺乏放射性同位素定年和生物地层学(Knoll, 2000)条件,而只能以碳同位素地层学作为主要手段作对比,确定它们的的同时性。海相碳酸盐岩和盆地埋藏的有机碳的碳同位素组成是地质历史上碳生物地球化学循环的记录,其长期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化可以进行全球对比(Veizer et al., 1999; Saltzman et al., 2000)。如碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值受成岩作用的影响有限,基本保持了沉积时海水的同位素记录。新元古代晚期海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化超过10‰,明显大于地质历史上其他时期的变化幅度。新元古代晚期海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现较大的同位素漂移,明显高于其他地质时期的变化幅度,表现为冰期前富 $\delta^{13}\text{C}$,而直接覆盖在冰川沉积之上的冰后盖帽碳酸盐岩为强负值,最低达到 -7% 。冰期前后出现了10‰~15‰的碳同位素负漂移。新元古代冰期事件的碳同位素记录在各大陆都可以见到,其显著的负漂移不仅可以作为全球地层对比的基础,也表明冰川时间的同时性。

Hoffman et al. (1998)把冰期前高于5‰的碳酸盐岩的碳同位素记录归因于赤道附近的Rodinia超大陆裂解:裂解大大提高了生物沉积产率,而冰期生物产率几乎降至0,造成碳同位素显著的负漂移。至于帽碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值达到 -6% ,是由于“雪球地球”事件期间洋中脊排出的 CO_2 所致;其 $\delta^{13}\text{C}$ 值正好为 $-6\% \pm 1\%$ 。

(2) 盖帽碳酸盐岩:绝大多数的新元古代冰川沉积物顶部都覆盖有连续成层的白云岩,称为

帽碳酸盐岩 (Hoffman et al., 1998; James et al., 2001), 其厚度从几米到几十米, 所代表的时间只有数千年, 是快速沉积的产物, 它的广泛存在表明了新元古代冰期前后气候发生了突变。盖帽碳酸盐具有许多特殊的沉积组构。一些盖帽碳酸盐岩中发育了与传统意义不同的帐篷状构造, 它们平行或近似平行整个区域的古倾斜面, 具有尖头状的轴部, 表明是冰后期在高震荡的流动区域内连续沉积形成 (Hoffman and Schrag, 2002), 可能是超级风暴沉积。有些地区盖帽碳酸盐岩中发育了结晶扇, 这是海底快速堆积形成的文石晶体簇向上呈扇形展布的灰岩建造。尽管单个结晶扇很小, 但他们呈礁状聚集在一起, 厚度达几米至几十米。海底结晶扇的形成表明海底水体中的碳酸盐达到很高程度的过饱和 (Grotzinger and Knoll, 1995)。Hoffman et al. (1998) 与 Hoffman and Schrag (2002) 认为是极端温室气候下大陆强烈化学风化导致的大量碱质和碳酸盐输入海洋, 使海底碳酸盐过饱和, 形成文石的快速结晶堆积 (冯东等, 2006)。

(3) 条带状铁矿层 (BIF 铁矿): 新元古代冰川地层中广泛出现铁矿层, 类似于古元古代 (约 2400 Ma 前) 的条带状磁铁矿层。然而 1800 Ma 以后, 它在地球上消失了 (Isley and Abbott, 1999)。这被认为是与地球上第一次大气氧增加有关, 大约 2400 Ma 前大气氧第一次增加之前 (Karhu and Holland, 1996), 海洋深部水体是缺氧的, 通过河流流入海洋的硫酸盐补给数量很少 (Canfield et al., 2000; Farquhar et al., 2000)。2400 Ma 以后硫酸盐补给量有了一定程度的增加, 使细菌还原硫酸盐的速度随之提高, 但深部水体的缺氧看来还在持续。只有到大约 1800 Ma 硫酸盐还原速度超过输入到海洋的活化铁的速度时, 条带状铁矿才消失。此后, 大约 1000 Ma 间地球上没有出现条带状铁矿层。而新元古代冰期, 海洋完全冰封, 厚厚的冰盖阻碍了大气圈中的氧进入海洋, 海水变得停滞缺氧, 来自洋中脊和洋底沉积物淋滤出的 Fe^{2+} , 在还原的海水中得以不断富集, 一旦冰期结束, 冰盖消融, 大气和海洋循环重新出现, 上升洋流把 Fe^{2+} 带到浅部氧化, 形成了又一次全球性的条带状铁矿层。在新元古代冰期, 加拿大、巴西、纳米比亚、南非、澳大

利亚和我国扬子江地区又出现了 BIF 铁矿。这是因为全球范围海洋冰盖阻碍了大气圈中的氧进入海洋, 使海水近于停滞和缺氧, 来自洋中脊和洋底沉积物淋滤出的 Fe^{2+} 在底部海水中富集, 一旦冰期结束, 上升洋流把 Fe^{2+} 带到浅部氧化, 遂形成又一次全球性的 BIF 铁矿 (Hoffman et al., 1998; Hoffman and Schrag, 2002)。

2.2 雪球地球的形成与终结

根据全球广泛分布的冰川沉积物及一些古地磁资料, 新元古代晚期是一次全球性的冰期, 冰盖可能达到了赤道附近。对于全球性冰期的成因主要有“雪球地球”和“地轴倾斜”等假说。

2.2.1 地轴倾斜假说

“地轴倾斜”假说从天体物理学的角度解释了地球变冷的原因 (Williams, 1993)。整个地球寒冷还是温暖, 取决于地球表面接受太阳辐射的强度, 现代冰川作用局限在高纬度地区, 那里接受太阳的辐射较弱。如果地球赤道面和黄道面的夹角大于 54° , 而不是现在的 23.5° , 那么赤道附近的年平均温度就要低于极地温度, 气候的分带特征将与现在相反, 极地没有冰盖发育, 冰川作用局限在中低纬度, 这样可以解释低纬度、低海拔地层的冰成沉积层序 (Jenkins, 2000a, 2000b)。地球也只是在 600 Ma 以后由于转速降低自转倾角急剧减小, 自转倾角降低使得气候的季节变化有利于其后生物的繁衍。问题是即使在较大倾角下赤道附近仍会有季节变化, 冰川也难以保存 (Hoffman and Maloof, 1999)。此外, 持续的大倾角也不能解释新元古代冰川的发生与消亡。现在看来“地轴倾斜”假说缺乏有效的科学依据, 面临诸多的困难 (冯东等, 2006)。

2.2.2 CO_2 假说

造山运动引起了地球上大面积的剥蚀和沉积, 化学剥蚀和有机物的沉积导致大气中 CO_2 的消耗量超过火山运动释放的 CO_2 , 从而使大气中的 CO_2 失去平衡。与“温室效应”正好相反, CO_2 从空气中大量消失, 导致“冰室效应”, 全球气温迅速降低, 首先在地球两极的海洋上形成冰盖, 当冰盖的面积扩大到中纬度时, 就形成了一个恶性循环, 大部分的太阳光被冰面反射出地球, 储存到地球上的热量越来越少, 从而使得地球表面更加寒冷。因此, 在相对较短的时间内, 全球都被

冰雪覆盖,形成了“大雪球”。在这冰天雪地的年代,造山活动越来越少,化学剥蚀和有机物的沉积速度明显减慢,因而大气中 CO_2 的补给量超过了消耗量。经过数百万年的日积月累, CO_2 达到一定浓度时,“温室效应”就开始了,其结果是地球温度迅速升高,“大雪球”融化,地球又恢复到它本来的面目。

Hyde et al. (2000) 运用耦合的气候/冰盖模式,模拟了“雪球”形成的过程。以减少的太阳常数和与目前近似的 CO_2 浓度作为输入条件,就能使地球达到快速进入和“逃离”“雪球”的转折点。模拟也揭示,“雪球”环境可与赤道海洋开放水域共存,从而使多细胞生物有存活的条件。Jenkins and Smith (1999) 运用 GCM 耦合 50 m 平板海洋模式,模拟了太阳常数减少 6%, CO_2 浓度不断变化下的地球气候。结果显示,当 CO_2 体积分数低于一个阈值 (1700×10^{-6}) 时,冰川环境就在极地到赤道(包括海洋)的广大地区出现。运用耦合的气候/地球化学模式,Donnadieu et al. (2003) 模拟了“雪球”之前的古地理变化对大气 CO_2 浓度和气候变化的影响。结果发现,古大陆的裂解会导致径流增加、风化加强,从而大大降低大气 CO_2 浓度,使地球从“温室”向“冰室”转变,最终导致“雪球地球”的产生(丁仲礼和熊尚发,2006)。

“雪球地球假说”和“地轴倾斜假说”都能解释低纬度冰川现象,然而,“雪球地球假说”还能解释一些“地轴倾斜假说”不能解释的现象,例如碳酸盐岩碳同位素漂移、带状铁建造和冰期之后的碳酸盐帽沉积,并且把全球性气候变冷与超大陆聚合联系在一起,引起了不同学科科学家的重视。但是,“雪球地球假说”遇到了新的挑战。古气候模型计算和一些沉积记录显示,新元古代冰川并未覆盖整个地球,而是处于一个动态冰川活动环境,地球上存在局部未被冻结的地区,因此形成了“雪水地球假说”。由于“雪球地球假说”将极端气候变迁(低纬度冰川发育)与全球板块构造演化(超大陆聚合和裂解)、地球化学异常(碳同位素漂移)和新元古代晚期生命演化(埃迪卡拉生物群分异)等一系列地球系统突变联系在一起,大大激发了人们研究新元古代时期地球系统突变的热情。

2.2.3 CH_4 渗漏假说

帽碳酸盐岩是雪球时期很重要的一种地质现象。Kennedy et al. (2001) 等认为盖帽碳酸岩的产生与永久冻土层中天然气水合物的分解有关。天然气水合物是由天然气(主要是 CH_4)和水组成的一种类似冰状的固体物质,主要赋存于大陆边缘海底和极地永久冻土带。温度和压力的变化可导致天然气水合物的分解,释放出甲烷气,即形成 CH_4 渗漏。渗漏 CH_4 通过(细菌)氧化作用转变为 CO_2 ,海水硫酸盐还原为硫化氢,与孔隙水中的钙、镁、铁离子结合,形成方解石、文石、白云石、黄铁矿等组成的冷泉碳酸盐岩沉淀。冷泉碳酸盐岩常发育一些特殊的结构,如溶蚀、平底晶洞、凝块等。

新元古代时期,由于气温较低,在永久冻土层和大陆边缘海底沉积物中,可能形成了地球历史上数量最大的天然气水合物(Condon et al., 2002)。 CH_4 是一种温室气体,它的温室效应比 CO_2 高一个数量级。冰期之后气候变暖,海侵使大陆架和内部盆地的大面积永久冻土层被海水淹没, CH_4 水合物失稳分解, CH_4 释放进入大气,大气中 CH_4 气体含量的增加增强了温室效应,进一步加快冰盖的融化,水合物释放的大量 CH_4 经氧化生成 CO_2 ,转变为碳酸氢根,与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 结合,形成全球分布的钙帽碳酸盐岩(Whiticar et al., 1986)。

“ CH_4 渗漏”假说从另一个角度解释了盖帽碳酸盐岩的成因。盖帽碳酸盐岩具有现代海底冷泉碳酸盐岩类似的沉积组构、碳同位素随时间的变化特征、碳同位素的质量守恒估计、强烈负偏移的碳同位素等证据均支持“ CH_4 渗漏”假说。“雪球地球”和“ CH_4 渗漏”假说都涉及海水碳同位素的短期变化。“ CH_4 渗漏”假说回避了“雪球地球”假说中提出的大气中需要很长的时间来聚集如此高浓度的 CO_2 ,但它为新元古代晚期盖帽碳酸盐岩碳同位素的短期变化提供了一个合理的解释。此外,作为一种强烈的温室气体, CH_4 气体的存在也可以帮助解释“雪球地球”假说中“雪球”的快速融化。

2.3 “雪球”模型的提出

目前,研究者基于地质观察、气候模拟和地球化学研究结果,提出了多种不同的“雪球”模

型，归纳起来有以下几种代表性的假说。

2.3.1 “硬壳雪球”

作为“硬壳雪球”模型的主要代表人物之一，Hoffman et al. (1998)、Hoffman and Schrag (2002) 认为：“雪球”期间，地球完全被冰覆盖，生物的初始产率几乎降到 0。由于冰盖遮住了阳光，海洋生物的光合作用严重削弱，冰雪融水、冰雪由于重力作用减薄或消融且没有新的降雪而裸露的陆块，还有那些火山岛屿，为各种细菌和简单的真核生物提供了栖息的场所。Warren et al. (2002) 利用光谱模型以 $320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的太阳光通量和 0.5 的反照率为边界条件，计算了赤道地区冰盖的厚度，发现：当地球表面温度为 -12°C 以下时，冰盖的厚度将达 100 m 以上，如此厚的冰完全遮挡了太阳光，从而阻止了海洋生物光合作用的发生。总之，持该观点的研究者都认为“雪球”时期，不存在无冰的水体，生物只能生活在局部相对温暖的地方。这种说法也有一定的不足，比如地质资料证实该时期生物主要生活在海洋中。另外，在如此寒冷、不稳定的恶劣环境中，一些多细胞藻类也不易生存 (Kerr, 2000)。至于火山岛屿附近或大地热流较高的地区，一些古细菌如产甲烷菌、极端嗜热菌等可能在高压、黑暗、缺氧、含硫等极端环境下生存，但在这种环境中，由于缺乏光合作用所必需的太阳能，光合真核生物也是无法生存的。所以雪球时期生命存在于几个孤立的火山岛附近也只是一种猜想，这也是“硬壳雪球”假说受到的最大挑战。

2.3.2 “半溶雪球”

Hyde et al. (2000) 利用耦合的能量平衡/冰盖模型对新元古代雪球时期的气候进行了模拟。结果显示，当太阳辐射下降 6%，大气中 CO_2 浓度与现在相当时，就可导致“雪球”的产生。但同时发现在全球冰川时期，地球并没有完全被冰覆盖，到古纬度 25° 地区，冰盖厚度仅达 1~10 m，在赤道地区还存在着无冰的水体。与 Hoffman et al. (1998) 的“硬壳雪球”相对应，称之为“半融雪球”。实际上，早在 Kirschvink (1992) 提出的“雪球”模型的论文中，就指出“赤道区域的海洋，仍可能吸收大量的太阳光能，也许能阻止冰盖的形成，从而可能在赤道的冰海中形成一些热的水洼，并随季节轻微的移动”。该观点得到了

许多学者的支持。

Baum and Crowley (2001)、Crowley et al. (2001)、Condon et al. (2002) 的模拟结果同样显示在赤道附近有一个环形的无冰水体分布带。Runnergar (2000) 认为上述模型主要是基于真核生物的生存环境来考虑的，无冰水体的存在对生命的生存具有非常重要的意义。首先，这些无冰的水体是生命与大气进行 CO_2 和 O_2 交换的窗口；其次，没有厚冰层的遮挡，海洋光合作用可以接受较充足的阳光进行光合作用；最后，这些局部无冰水体的存在，表明在赤道地带，水体的温度能达到 0°C 左右，有利于生物的生存和演化。Chandler and Sohl (2000) 从冰川形成与所需水蒸气的物质平衡关系来考虑雪球时期的环境，认为如果海洋中冰盖范围逐渐增加，降雪量将逐渐减少，冰期沉积物沉积必须具备大规模活动的、润湿的大陆冰川，而这与“雪球”时期水动力循环几乎停滞的状态是相矛盾的。一些冰期沉积物具有明显的擦迹和远距离搬运的标志，甚至还有冰川流动造成的变形构造，一些冰期沉积物甚至可以厚达千米。Chiritie et al. (1999) 也发现许多明显水动力存在的地质现象，并认为如果地球完全冰封，空气中就没有充分的水汽而形成降雪，冰川就不能移动，就不能形成如此厚的冰期沉积物。在 Marinoan 冰期还发现海平面下降大于 160 m 等地质现象，表明这些沉积物是在正常温度条件下沉积的，在冰缘或附近存在着较强烈的水动力循环。Arnaud (2004) 在苏格兰新元古界 Port Askaig 冰期地层中发现了具有大型交错层理的砂岩，并认为是水下大型沙丘搬运而形成的，这些大型沙丘被认为是在潮汐流的作用下形成的，从而表明在冰期存在无冰水体的沉积条件。

这种观点也遭到了一些人的反对。Schrag and Hoffman (2001) 认为“半融雪球”不能解释碳酸盐岩及碳同位素负偏移等新元古代时期的一些地质现象。认为一旦在赤道地区出现无冰水体，由于水的巨大热容量就会导致整个雪球的快速消融，这与新元古代雪球持续很长时间的事实是不吻合的，并且无冰水体也不能解释海水中铁的聚集和条带状铁矿的形成 (李美俊等, 2006)。Pelletier et al. (2007) 利用模型对碳周期与气候系统在新元古代晚期的耦合演化进行了研究。结果发现，

当表面温度下降时,大气中的氧被吸收进海洋中,加快了大量溶解的有机碳的重新矿化速度。这将导致大气中 CO₂ 增加和温室变暖效应增强,使得一个完全的雪球状态不能形成。

2.3.3 薄冰假说

Schrag and Hoffman(2001) 提出,光合生物可以在赤道地区厚度较薄的冰盖下生存。Mckuy(2000) 利用“能量平衡方程”,Donnadieu et al.(2003) 利用“通用冰川作用模型”对“雪球”时期的气候进行了模拟,得出结论:当赤道地区的气温足够高,能使冰盖厚度小于 10 m,这样的厚度能使光线透过,从而使光合生物得以生存。同时冰山的崩裂很容易打破这些薄冰层,从而导致季节性无冰水体和使浮冰携带的碎屑物沉积下来。

“薄冰”模型实际上是一个介于“雪球”和“半融雪球”之间的假说,目前支持该观点的研究还不多。该假说尽管可以弥补“雪球”假说中光合生物生存缺乏透光带的不足,但该模型中的海洋仍然是缺氧的环境,对生物的生长不利。

3 争论

新元古代冰期的存在和规模得到广泛认可后,相应的一些问题被提了出来,如雪球的持续时间和冰期的次数等。

3.1 “雪球地球”存在及持续时间

Bodiselsch et al.(2005) 分析了来自赤道非洲赞比亚和刚果的 3 个钻芯,他们认为富含铀的陨星尘埃在冰封的地球上累积,直到地球突然融化。冰雪里累积的铀元素,将储藏在海洋中单一的、薄薄的一层沉积物中。冰雪融化前铀元素累积的越多,表明地球被冰封的时间越长。如果地球没有被完全冰封,就不会出现铀元素的累积。他们发现在冰川沉积物顶部到盖帽碳酸盐岩底部之间存在铀元素丰度的强峰。在所有 3 份岩芯里,约 635 Ma 前的 Marinoan 冰期结束时,都存在一个峰。如果 650 Ma 前陨星物质降落到地球上的速率与过去 80 Ma 间差不多,那么地球曾经作为一个雪球存在了至少 3~12 Ma 左右? 而此前对这个时期的估计在 4~30 Ma 之间。Bodiselsch et al.(2005) 的数据同时也证实了新元古代晚期地球被完全冰封(张同钢等,2002)。

3.2 冰期的次数

在新元古代碳酸盐岩和有机物的碳同位素研究中发现,在异常高值后往往出现异常低值。这些成对的高低变化,一般都与冰期地层相对应。一些地质学家根据冰岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线推断,认为新元古代至少有 4~5 个可区分开的冰期。此观点受到不少学者的支持,但也受到了一些人的质疑。反对者强调指出,在已知的新元古代地层剖面上,冰期都没有超过两个。在我国,关于古气候的研究很多(王会军和曾庆存,1992;刘海生等,2008),但关于冰期次数的讨论并不多。南方震旦系有两个冰期,新疆库鲁克塔格有 3 个冰期,是没有多少争议的(张启锐等,2002)。

4 未来研究方向

新元古代晚期“雪球地球”的成因、终结机制及持续时间、发生次数的争论还将继续。结合当前关于“雪球地球”的研究,我们认为未来将会在下面几个方面取得突破,这在一定程度上也代表了古气候研究的发展方向:

(1) 全球性新元古代冰期地质记录的对比与整合。以条带状铁矿为例,它的分布并不均匀,因此并不是新元古代雪球沉积都普遍存在的特征,有的甚至沉积在冰期沉积物之下,而且雪球也不是唯一能解释其成因的假说。全球性的研究和对比工作不够,所以还不能完全肯定“雪球”假说所解释的“令人困惑”的地质现象是全球性的,还需要更多地质资料的充实与验证。

(2) 以碳同位素为手段,研究新元古代时期的碳循环,以碳循环为纽带,从岩石圈、水圈、生物圈和大气圈等各圈层的相互作用来研究“雪球”时期生物生存演化环境的变化特征以及当时所对应的气候特征。

(3) 从生物演化的内外因入手。因为生物的演化是内因和外因相互作用的结果。生物种群演化一个重要的观点是:在环境的重压下,某一物种的数量急剧减少,并伴随 DNA 的重组,并在其后截然不同的环境中重新繁盛起来。“雪球”时期极端寒冷的环境和其后极端“温室”环境的变化正好提供了这样一个条件,就如 Hoffman et al.(1998)、Hoffman and Schrag(2002) 和 Schrag

and Hoffman (2001) 所描述的那样, 在 100 多万年的时间内, 地球从一个低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的雪球, 突然变为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上炽热的“热球”, 并形象地称之为“冰冻—煎烤时间”, 对生物的演化而言, “雪球”事件就如同一个瓶颈, 只要冲过了这个瓶颈, 就爆发式演化起来 (李美俊等, 2006)。

(4) 盖帽碳酸岩的成因与“雪球地球”的终结机制, 与超大陆的裂解以及之后地球上出现多细胞的后生动物, 继而进入寒武纪“生物大爆发”等重大变化密切相关。因此, 应该把地质历史上的一系列的相关事件作为一个系统来研究, 以此来揭示事件发生的本质。

(5) 冰期成因的探讨仍是个关键问题, 当前关于“雪球假说”和“地轴倾斜假说”的争论十分有利于问题的深入。此外, 从地质或地球内部对冰期形成进行探究也将是古气候研究很重要的一个方面。

(6) 地质与气象的结合将会极大的促进“雪球地球”的深入研究。气候模拟为“雪球地球”提出各种可能的解释与假说, 而地质资料将会对这些“可能”提供证据。

参考文献 (References)

Arnaud E. 2004. Giant cross-beds in the Neoproterozoic port Askaig formation, Scotland; Implications for Snowball Earth [J]. *Sedimentary Geology*, 165: 155–174.

Baum K S, Crowley T J. 2001. GCM response to late Precambrian (~590 Ma) ice-covered continents [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (4): 583–586.

Bodiselsch B, Koeberl C, Master S, et al. 2005. Estimating duration and intensity of Neoproterozoic snowball glaciations from Ir Anomalies [J]. *Science*, 308: 239–242.

Canfield D E, Habicht K S, Thamdrup B. 2000. The Archean sulfur cycle and the early history of atmospheric oxygen [J]. *Science*, 288: 658–661.

Chandler M A, Sohl L E. 2000. Climate forcings and the initiation of low-latitude ice sheets during the Neoproterozoic Varanger glacial interval [J]. *J. Geophys. Res.*, D105: 20737–20756.

Chirritie B N, Sohl L E, Kennedy M J. 1999. Considering a Neoproterozoic Snowball Earth [J]. *Science*, 284: 1087a.

Condon D J, Prave A R, Benn D I. 2002. Neoproterozoic glacial-rainout intervals: Observations and implications [J]. *Geology*, 30: 35–38.

Crowley T J, Hyde W T, Peltier W R. 2001. CO_2 levels required

for deglaciation of a “Near – Snowball” Earth [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2): 283–286.

丁仲礼, 熊尚发. 2006. 古气候数值模拟: 进展评述 [J]. *地学前缘*, 13 (1): 021–031. Ding Zhongli, Xiong Shangfa. 2006. Numerical modeling in paleoclimate study: Progress and problem [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 13 (1): 021–031.

Donnadieu Y, Fluteau F, Ramstein G, et al. 2003. Is there a conflict between the Neoproterozoic glacial deposits and the snowball earth interpretation: An improved understanding with numerical modeling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 208: 101–112.

Evans D A D. 2000. Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climate paradox [J]. *Am. J. Sci.*, 300: 347–433.

Farquhar J, Bao H, Thiemens M. 2000. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle [J]. *Science*, 289: 756–758.

冯东, 陈多福, 刘芊. 2006. 新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制 [J]. *沉积学报*, 24 (2): 235–241.

Feng Dong, Chen Duofu, Liu Qian. 2006. Formation of Late Neoproterozoic cap carbonates and termination mechanism of “Snowball Earth” [J]. *Acta Sedimentologica Sinica (in Chinese)*, 24 (2): 235–241.

Grotzinger J P, Knoll A H. 1995. Anomalous carbonate precipitates: Is the Precambrian the key to the Permian? [J]. *Palaios*, 10: 578–596.

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

Hoffman P F. 1999. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the Snowball Earth [J]. *Journal of African Earth Science*, 28 (1): 17–33.

Hoffman P F, Maloof A C. 1999. Glaciation: The snowball theory still holds water [J]. *Nature*, 397: 384.

Hoffman P E, Schrag D P. 2002. The snowball earth hypothesis: Testing the limits of global change [J]. *Terra Nova*, 14: 129–155.

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: 425–429.

Isley A E, Abbott D H. 1999. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 15461–15477.

James N P, Narbonne G M, Kyser T K. 2001. Late Neoproterozoic cap carbonates: Mackenzie Mountains northwestern Canada: Precipitation and global glacial meltdown [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 38: 1229–1262.

Jenkins G S, Smith S R. 1999. GCM simulations of Snowball Earth conditions during the late Proterozoic [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 2263–2266.

Jenkins J S. 2000a. Global climate model high-obliquity solution to the ancient climate puzzles of the faint-young Sun paradox and

- low-latitude Proterozoic glaciation [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 7357–7370.
- Jenkins J S. 2000b. The “Snowball Earth” and the Precambrian climate [J]. *Science*, 288: 975–976.
- Karhu J A, Holland H D. 1996. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen [J]. *Geology*, 24: 149–152.
- Kennedy M J, Christie–Blick N, Sohl L E. 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth’s coldest intervals? [J]. *Geology*, 29: 443–446.
- Kerr A R. 2000. An appealing snowball earth that’s still hard to swallow [J]. *Science*, 287: 1734–1736.
- Kirschvink J L. 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The Snowball Earth [M] // Schopf J W, Klein C, Eds. *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 51–52.
- Knoll A H. 2000. Learning to tell Neoproterozoic time [J]. *Precambrian Res.*, 100: 3–20.
- 李美俊, 王铁冠, 王春江. 2006. 新元古代“雪球”假说与生命演化的环境 [J]. *沉积学报*, 24 (1): 107–112. Li Meijun, Wang Tieguan, Wang Chunjiang. 2006. “Snowball Earth” Hypothesis and the palaeoenvironment for life evolution during the Late Neoproterozoic [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 24 (1): 107–112.
- 刘海生, 侯胜利, 方念乔, 等. 2008. 东北印度洋沉积岩芯热释光与古气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 45–52. Liu Haisheng, Hou Shengli, Fang Nianqiao, et al. 2008. Thermoluminescence and paleoclimate change using sedimentary cores in northeast Indian Ocean [J]. *Climatic and Environmental Research*, 13 (1): 45–52.
- Mckuy C P. 2000. Thickness of tropical ice and photosynthesis on a Snowball Earth [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 2153–2156.
- Peltier W R, Liu Y, Crowley J W. 2007. Snowball Earth prevention by dissolved organic carbon remineralization [J]. *Nature*, 450: 813–819.
- Runnegar B. 2000. Loophole for Snowball Earth [J]. *Nature*, 405: 403–404.
- Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, et al. 2000. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level [J]. *Palaeogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 162: 211–223.
- Schmidt P W, Williams G E, Embleton B J J. 1991. Low paleolatitude of late Proterozoic glaciation; Early timing of remanence in haematite of the Elatina formation, South Australia [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105: 355–367.
- Schmidt P W, Williams G E. 1995. The Neoproterozoic climate paradox; Equatorial paleolatitude for Marinoan glaciation near sea level in South Australia [J]. *Earth Planet. Sci. Letter*, 134: 107–124.
- Schrag D P, Hoffman P F. 2001. Life, geology and Snowball Earth [J]. *Geophysics*, 409: 306.
- Sohl L E, Christie–Blick N, Kent D V. 1999. Paleomagnetic polarity reversals in Marinoan (ca. 600 Ma) glacial deposits of Australia; Implications for the duration of low-latitude glaciations in Neoproterozoic time [J]. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 111: 1120–1139.
- Sumner D Y, Kirschvink J L, Runnegar B N. 1987. Soft-sediment paleomagnetic fold tests of late Precambrian glaciogenic sediments [J]. *Eos.*, 68: 1251.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chem. Geol.*, 161: 59–88.
- 王会军, 曾庆存. 1992. 9000年前古气候的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 16 (3): 313–321. Wang Huijun, Zeng Qingcun. 1992. Numerical simulation of the climate 9000 years ago [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 16 (3): 313–321.
- Warren S G, Brandt R E, Grenfell C T, et al. 2002. Snowball Earth; Ice thickness on the tropical ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (C10): 3167.
- Whiticar M J, Faber E, Schoell M. 1986. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments; CO_2 reduction vs. acetate fermentation—Isotope evidence [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50: 693–709.
- Williams G E. 1993. History of the earth’s obliquity [J]. *Earth Science Review*, 34: 1–45.
- 张启锐, 储雪蕾, 张同钢, 等. 2002. 从“全球冰川”到“雪球假说”——关于新元古代冰川事件的最新研究 [J]. *高校地质学报*, 8 (4): 473–481. Zhang Qirui, Chu Xuelei, Zhang Tonggang, et al. 2002. From global glaciation to Snowball Earth; Recent researches on the Neoproterozoic glaciation events [J]. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 8 (4): 473–481.
- 张同钢, 储雪蕾, 陈孟莪, 等. 2002. 新元古代全球冰川事件对早期生物演化的影响 [J]. *地学前缘* (中国地质大学, 北京), 9 (3): 49–56. Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Chen Meng’e, et al. 2002. The effect of the Neoproterozoic global glaciation on the early biological evolution [J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 9 (3): 49–56.