

文章编号: 1001-8166(2005)11-1226-08

## 冰雪地球的研究进展综述<sup>\*</sup>

胡永云, 闻新宇

(北京大学物理学院大气科学系, 暴雨与旱涝灾害试验室, 北京 100871)

**摘 要:** 在大约 6 ~7 亿年前的新元古代时期, 地球是否曾经被冰雪完全覆盖而成为了一个“冰雪地球”? 如果是, 什么诱发了这种全球性的冰川期? 又是什么导致了它的融化? 新元古代时期的极端气候变化对其后的寒武纪生命大爆发有何影响? 围绕这些问题, 古地质、古生物和古气候学界在最近几年展开了广泛的研究和激烈争论。根据现有的研究结果, 地球在新元古代时期确实经历了数次地球历史上最为严重的全球性冰川期, 但地球是否被完全冰封还需要更充分的古地质和古生物方面的证据来证明, 利用气候模式对各种可能的外部强迫的模拟试验表明“冰雪地球”是很难形成的, 并且, 如果地球进入完全被冰封的状态, 它将是难以被融化的, 关于新元古代时期剧烈的气候变化对寒武纪生命大爆发所起的作用存在 2 种观点, 一种认为气候变化导致了原始生命的基因突变并诱发了寒武纪生命爆发, 另一种认为这种影响主要是生态方面的。

**关键词:** 冰雪地球, 新元古代冰川期, 气候变化, 温室气体, 地球演化, 生命进化

**中图分类号:** P467 **文献标识码:** A

### 0 引 言

1998 年第 281 期的《科学》杂志刊登了以哈佛大学地质学教授 Paul Hoffman 为首的一批科学家关于新元古代时期全球性冰川的一篇文章<sup>[1]</sup>, 该文的作者们根据 Kirschvink<sup>[2]</sup>的建议和他们自己在纳米比亚实地考察的结果提出了“冰雪地球”(Snowball Earth)的假说。他们认为在距今约 6 ~7 亿年前的新元古代时期地球经历了数次全球性的冰川期(一般认为 2 ~4 次), 在这些冰川期, 地表气温降至 -50℃, 地球(包括海洋)完全被冰雪覆盖, 海冰的厚度达 1 ~2 km, 陆地上的冰川和积雪厚达数公里, 整个地球变成了一个巨大的冰雪球。这些学者的最初兴趣主要集中在古地质方面, 后来, 他们的研究兴趣逐渐扩展到了古生物和古气候领域。Hoffman 等<sup>[3, 4]</sup>提出新元古代的全球性冰封对其后的寒武纪生命快速繁衍(也就是“寒武纪生命大爆发”, 大约

在 5.75 ~5.25 亿年前之间)有着重要影响。因为, 在寒武纪之前的近 30 ~40 亿年间, 地球上的原始生命均以简单的真核细胞的形式存在, 而自寒武纪开始地球上的生命迅速地繁衍并朝着复杂多样化发展。

“冰雪地球”假说是一个对新元古代时期气候变化的大胆设想, 它涉及了古地质、古生物和古气候等地球科学领域的许多基本问题。该假说一经提出, 便在地学界引起了巨大的反响和争论<sup>[4-6]</sup>。本文将综述近几年来有关“冰雪地球”的研究进展和争论要点。文章是这样安排的: 第 1 部分简要介绍“冰雪地球”假说的形成历史; 第 2 部分简述这一假说在古地质和古生物领域的争论要点; 本文的重点集中在第 3 部分, 也就是气候学方面的研究进展和争论, 尤其是使用数值气候模式的模拟结果; 第 4 部分是总结。

\* 收稿日期 2005-04-12; 修回日期 2005-07-12。

\* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“使用全球气候模式研究冬季早期和晚期相反气候趋向”(编号: 40575031); 国家自然科学基金重点项目“北极平流层异常对亚洲及北太平洋地区的天气气候影响研究”(编号: 40533016)资助。

作者简介: 胡永云(1965-), 男, 河南唐河人, 教授, 主要从事气候动力学和气候模拟研究。E-mail: yyhu@pku.edu.cn

## 1 “冰雪地球”假说的提出

“冰雪地球”假说的提出最早可以追溯至 20 世纪 60 年代,剑桥大学地质学家 Harland 等<sup>[7]</sup>根据两方面的证据提出了新元古代全球性冰川的假说:第一,在所有的陆地上均发现了新元古代时期冰川遗留的痕迹;第二,根据这些冰川遗迹层中岩石的磁场方向,他们推测在新元古代大陆基本集中在赤道附近。地球上的岩石大多包含具有磁性的铁矿颗粒,在火山喷发的岩浆冷却变硬之前,在地球磁场的作用下,这些铁矿颗粒的磁场方向应该与当地的地球磁场方向保持一致。如果当时的大陆位于赤道附近,这些颗粒的磁场方向是水平的,如果大陆位于地球的两极附近,这些颗粒的磁场方向差不多是垂直的。当岩石变硬之后,如果铁矿颗粒的磁场方向没有受其他因素的影响,它们的磁场方向便记录了在岩石形成时大陆所在的纬度(但这种方法并不能确定大陆的经度)。在 20 世纪 60 年代,大陆漂移说已开始被学术界接受,新元古代时期陆地集中在热带地区这一观点也是可以接受的,所以这两方面的证据大致可以说明冰川曾经在热带地区出现过。但是,Harland 等的全球性冰川假说仅限于陆地,他们并没有说明热带海洋是否被冰封。

第一个提出地球在新元古代时期(包括陆地和海洋)曾完全被冰雪覆盖的是加州理工学院的地质学教授 Kirschvink<sup>[2]</sup>,也是他首先提出了“冰雪地球”的概念。他之所以认为在新元古代的冰川期陆地和海洋完全被冰封是因为他发现在新元古代的冰川残余物中含有铁。Kirschvink 推测只有在海洋完全被冰封,海洋中氧的来源被切断情况下,铁溶解于海水中的现象才能发生(在无氧的情况下,铁是可以溶解于水的)。当海冰融化后,大气中的氧进入海洋中并与铁发生化学反应,使铁从海水中沉淀出来并混合到冰川的残余物中。

公认的证据表明在新元古代时期地球曾经历了数次冰川期和温暖期交替的过程<sup>[2]</sup>。那么,为什么全球性冰川在新元古代时期重复出现,也就是什么原因触发了“冰雪地球”形成和融化的交替? Kirschvink 认为这与当时大气中  $\text{CO}_2$  含量的变化有关。我们知道  $\text{CO}_2$  是一种重要的温室气体,它在大气中的含量影响着大气的温度。 $\text{CO}_2$  是火山喷发产生的气体之一,火山爆发释放的  $\text{CO}_2$  在大气中不断累积将导致大气中  $\text{CO}_2$  含量的升高,而雨水的冲刷把大气中的  $\text{CO}_2$  带到地面并与岩石中的硅酸盐发生化学

反应而生成碳酸氢盐,当碳酸氢盐随河水流入海洋后,它进一步与钙、镁等反应而沉淀到海底,这些过程决定了  $\text{CO}_2$  在大气中的含量。如果雨水的冲刷和地面化学反应起主导作用,大气中的  $\text{CO}_2$  含量降低,温室效应减弱,地表温度也随之降低,最终导致全球性的冰封。反之,如果陆地和海洋完全被冰雪覆盖,地—气系统中的水循环被削弱,降水的减少使得  $\text{CO}_2$  在大气中不断累积,又由于地面的岩石被覆盖, $\text{CO}_2$  与岩石的化学反应无法进行,这样火山喷发释放的  $\text{CO}_2$  便累积在大气中。经过数百万年甚至上千万年的冰封状态,大气中的  $\text{CO}_2$  将累积到相当高的程度,其温室效应将使得温度升高并导致冰雪消融。Kirschvink 的工作并没有在正式的学术刊物上发表,他本人也觉得这一假说还缺乏充分的证据和完整的解释,所以,他的假说并没有引起学术界的重视。

Hoffman 等<sup>[3,4]</sup>对“冰雪地球”假说提出了更多的证据和更为全面的解释。他们的证据源于 2 个方面:第一,通过在纳米比亚的考察,他们发现新元古代冰川层均被一层深厚的碳酸盐岩覆盖,他们认为这层碳酸盐岩是“冰雪地球”开始融化时大气中的  $\text{CO}_2$  被雨水带到地面与岩石发生化学反应所产生的结果。如此深厚的碳酸盐岩层意味着大气中的  $\text{CO}_2$  曾经达到过很高的程度,他们认为这些证据印证了 Kirschvink 关于“冰雪地球”导致  $\text{CO}_2$  的在大气中的累积以及  $\text{CO}_2$  的温室效应造成“冰雪地球”融化这一物理机制的猜想。第二,在冰川遗迹层上面的碳酸盐岩中,他们发现碳元素( $^{12}\text{C}$ )与其同位素( $^{13}\text{C}$ )的比值在冰川期前后有着明显的异常, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值与有机生命的活动有关,海洋中的藻类和微生物在光合作用的过程中更倾向于吸收  $^{12}\text{C}$ ,如果在某一时期地球上的有机生命旺盛, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值将偏高,如在现代生态环境下  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值偏高。相反,如果“冰雪地球”确实存在过,它势必造成大量的有机生命死亡,有机物对  $^{12}\text{C}$  的摄取量减少,从而导致  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值偏低。Hoffman 等<sup>[1]</sup>发现在新元古代的冰川期前后  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值均偏低,他们推测这是“冰雪地球”期间大量有机生物死亡所造成的。但值得注意的是 Hoffman 等<sup>[1]</sup>发现的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值偏低并不是对应于“冰雪地球”期间,而是“冰雪地球”的前后,他们强调“冰雪地球”期间的海洋和陆地处于冰封状态,没有碳酸盐岩的形成。“冰雪地球”假说被新近的结果所支持,Podselitsch 等<sup>[8]</sup>根据在赞比亚和刚果的钻探结果发现异常高的铀沉积在 630 Ma 前的形成的碳酸盐岩底部。他们认为只有在地球长期处于完

全被冰封的状态下,源于太空的铍(陨石和彗星尘埃)才能在地表不断累积,否则,它将被冲刷到海洋里。根据他们估计,地球在 630 Ma 前被冰封了至少 3 Ma 甚至 12 Ma。

在他们新版的“冰雪地球”假说中,Hoffman 等认为之所以数次全球性的冰川期都发生在新元古代这样一个特定的时期,而没有发生地球历史的其它时期,与新元古代特殊的大陆分布有关。他们指出当陆地处于热带地区时,它基本不被冰雪覆盖,这有利于  $\text{CO}_2$  与岩石发生化学反应,而且,热带较强的降雨也使得大气中的  $\text{CO}_2$  更多地被带到地面,这一特殊的陆地分布使得当时大气中的  $\text{CO}_2$  含量易于降到相当低的程度,所以易于形成全球性的冰川。新元古代之后,大陆向中高纬度漂移,现在,陆地大部分位于中高纬度,而且高纬度的陆地常年被冰雪覆盖,这不利于大气中的  $\text{CO}_2$  与地面岩石间的化学反应,所以,自新元古代到现在的几亿年间,虽然冰川期时有发生,但并没有达到“冰雪地球”的程度。有证据显示在新元古代之前的几十亿年间,虽然太阳的辐射强度更弱,但却没有出现过这样全球性的冰川期<sup>[3]</sup>。

新元古代的“冰雪地球”对生命进化的意义,特别是对寒武纪生命大爆发的意义,也是 Hoffman 等的“冰雪地球”假说中的一个重要内容。按照他们的假说,新元古代的原始生命不仅要经受极端寒冷气候的考验,还要经历极端炎热气候的考验<sup>[3,9]</sup>,因为当“冰雪地球”开始融化时,大气中的  $\text{CO}_2$  含量还非常高,地面的气温有可能高达 50<sup>[10]</sup>,这种极端高温的气候被称之为“热室”(hothouse,相对于通常所说的温室,greenhouse)。Hoffman 等<sup>[3]</sup>认为这种剧烈的寒冷和炎热气候的交替对生命进化起着选择和过滤的作用,在这样极端气候交替出现的条件下,大部分生命死亡,一部分生命为适应极端的环境张力而经历了迅速的基因变异,这些基因变异使生命得以朝着复杂的种类进化。所以,他们建议新元古代的极端气候变化对生命的进化有着重要影响并触发了寒武纪生命大爆发。

## 2 “冰雪地球”假说遇到的挑战

“冰雪地球”假说所遭遇到的反对和挑战几乎来自各个方面。第一是冰川遗迹层上面深厚的碳酸盐岩形成的原因,Kennedy 等<sup>[11]</sup>认为单纯的  $\text{CO}_2$  沉降很难在“冰雪地球”融化时造成这样深厚的碳酸盐岩层,他们猜想海底丰富的可燃冰(储存甲烷的

冰块)释放出的甲烷是“冰雪地球”的融化和碳酸盐岩层形成的重要原因,因为,甲烷的含量非常丰富,而且它也是一种有效的温室气体。如果这一猜想是正确的,地球变暖和冰川的消退并不需要地球完全被冰封来累积火山喷发所释放的  $\text{CO}_2$ 。换句话说,冰川遗迹层上面碳酸盐岩层并不能作为证明地球曾被完全冰封过的证据。

第二是热带陆地冰川层的形成。按照“冰雪地球”的假说,在新元古代的冰川期,热带海洋也将被近 1 km 厚的冰雪覆盖。如果是这样的话,从海洋到大气的水汽来源被切断,那么降水(雪)将非常弱,这无法解释在澳大利亚发现的将近 1 km 厚的冰川层(在新元古代,澳洲大陆靠近赤道),因为这么厚的冰川要求热带海洋必须向大气输送足够的水汽,并且这些水汽降至地面并形成冰雪,这意味着至少热带海洋不能完全被冰封<sup>[12]</sup>。Hoffman 等<sup>[4]</sup>争论道,从冰川期到“冰雪地球”的转化是一个迅速的过程,在热带海洋被完全冰封之前仍有足够的水汽自海洋蒸发到大气中并沉降到陆地形成深厚的冰川层。Pierrehumbert<sup>[13]</sup>则怀疑在很短的时间内大气降水能否在热带大陆上形成几公里厚的冰川。但是,如果热带海面保持开放,水和碳的循环将持续进行,氧也将溶于水中,这与 Kirschvink 的大气中  $\text{CO}_2$  的累积以及冰川遗迹中的铁含量异常等推论相矛盾。

第三,尽管 Hoffman 等特别强调了新元古代碳酸盐岩中偏低的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值是“冰雪地球”存在的一个重要证据,但他们并没有提供新元古代冰川期这一比值的直接证据。另一方面,Christie-Blick<sup>[5]</sup>和 Kennedy<sup>[14]</sup>从不同大陆搜集到的证据表明新元古代冰川期前后  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的值并没有明显异常,他们认为在新元古代的冰川期原始生命的消亡并不像 Hoffman 等所说的那样严重,或者说冰川期的寒冷以及随后的“热室”期的炎热并不像 Hoffman 等所建议的那样严重。根据这些,Christie-Blick 等<sup>[5]</sup>和 Kennedy<sup>[14]</sup>更倾向于一个“雪水交融的地球”(Slushball Earth),也就是热带维持开放的洋面。

第四,尽管大量的证据显示新元古代时期热带大陆存在冰川痕迹,但这些证据是否说明那时的冰川是全球性的还存在争论。William 等<sup>[15-18]</sup>试图用地球自转轴的大角度倾斜来解释新元古代热带大陆的冰川及其明显的季节性变化。他认为当地轴的倾角大于 54 时,高纬度地区的温度将比赤道地区高,而且热带气候的季节变化将非常明显,这样一来,热带大陆有可能被冰雪覆盖,而中高纬度则不一定有冰

川存在。Hoffman 等<sup>[3]</sup>反驳到,虽然从理论上讲地轴的倾角可以很大,例如导致月球形成等突发事件可能会造成较大的地轴倾角,但这样的机会并不多见,尤其是一旦地轴倾角变得较小时,它将由于地球和月球之间的引力而自我稳定<sup>[19]</sup>。Hoffman 等<sup>[3]</sup>特别指出大地轴倾角理论无法解释冰川层上面的碳酸盐岩层的形成和 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  值的异常等现象。Pierrehumbert<sup>[10]</sup>指出热带冰川显著的季节变化很可能与“冰雪地球”条件下较大的温度季节变化有关。其它研究结果也不认同大地轴倾角理论<sup>[20-22]</sup>。

第五,“冰雪地球”假说关于新元古代冰川期对生命进化以及寒武纪生命大爆发的影响的解释也同样遇到了挑战。生命的存在和延续需要液态水和适当的温度,在地球完全被冰封的环境下,生命如何生存和延续将是一个巨大的问题。Hoffman 等<sup>[3,23]</sup>假设即使在“冰雪地球”的情况下仍可能有液态水的存在,如在温泉附近。另外,他们又提出即使在“冰雪地球”的情况下,热带洋面上仍有空洞(loop holes)存在<sup>[24]</sup>,这些空洞为当时的原始生命提供了避难场所,但他们特别强调这些空洞的存在与Christie-Blick 等建议的“雪水交融的地球”以及Hyde 等<sup>[25]</sup>的开放的热带洋面有着根本的不同。Knoll<sup>[12]</sup>认为一个“雪水交融的地球”更有利于解释为什么新元古代的生命可以延续,而且我们也不必为当时生命生存所需要的环境做太多假设。但是,正如下面将讨论的,“冰雪地球”和“雪水交融的地球”代表着两种截然不同的气候态,它们之间的差别并不是细微的。Knoll 进一步指出,即使这一小部分生命可以在这些空洞中或温泉附近度过漫长寒冷的冰封期,但如何度过冰川消退后的炎热期还是一个需要回答的问题。更重要的是,Knoll 也不赞同Hoffman 等的原始生命为适应“冰雪地球”的环境张力而产生基因变异以及这些基因变异触发了后来生命大爆发的观点。Knoll 认为新元古代极端的气候环境对当时生命进化的影响很可能是由于生态方面的原因,而非基因方面的。他指出当冰川期出现时,地球上只有很少一部分可以生存下来,冰川的消退为这一少部分生命提供了巨大的生存和繁衍空间,在这样的生态环境里,生存竞争是非常微弱的,这为各种生命的生存和繁衍提供了条件,所以,生命的进化似乎并不特别需要由环境张力导致的基因变化。Knoll 又指出大气中的氧含量对生命演化才起着至关重要的作用,寒武纪生命大爆发很可能与自新元古代后期开始的大气中氧含量升高有关,而氧含量升

高似乎与新元古代的极端寒冷和炎热气候没有必然的联系。

### 3 气候学方面的争论

对气候学家们来说,“冰雪地球”并不是一个陌生的概念,早在 20 世纪 60 年代,气候学家们已根据理想的气候模式得出“冰雪地球”至少在理论上是存在的<sup>[26-28]</sup>。这种理想化的气候模式是根据能量平衡的原理建立起来的(也就是地球向外的长波辐射与其接收太阳的短波辐射相等),所以称之为能量平衡模式(Energy Balance Model,EBM)。在该模式中,地表温度取决于太阳和地球之间的平衡,而该辐射平衡取决于地表的反射率,也就是冰雪覆盖的面积。EBM 模式给出了 2 种稳定的气候态和 1 种介于这两者之间的不稳定气候态。这两种稳定的气候态一种相当于“现代气候”,另一种则对应着“冰雪地球”气候。不稳定的气候态大致代表着冰川延伸至中纬度的冰川期。如果某种气候扰动使得中纬度的冰川向较低纬度延伸,冰川面积的加大将导致地球反射率增加,地面气温因而变冷,温度的降低造成冰川向更低的纬度延伸,从而导致地表反射率增加和更强的气温降低,这种正反馈机制最终将导致“冰雪地球”。反之,如果某种扰动导致中纬度冰川消融,这种正反馈机制将导致冰川继续向高纬度消退和地表反射率降低,气候朝向“现代气候”态转化。虽然后来的学者们对 EBM 模式进行了许多改进<sup>[29-32]</sup>,但它给出的 2 个稳定和 1 个不稳定的气候态的基本结论并没有太大改变。

尽管 EBM 模式从理论上给出了一个稳定的“冰雪地球”气候态,但恐怕很少有气候学家相信它在地球的 46 亿年历史中确实存在过,甚至连该模式的建立者们自己都怀疑它曾经发生过<sup>[26,27]</sup>。一方面是因为从理论上讲,一旦地球进入“冰雪地球”这样一个稳定的气候态,地球将陷入永远被冰封的状态,而无法由于气候系统的内部扰动回到“现代气候”,就像现在火星的冰封状态一样<sup>[33,34]</sup>。另一方面,从观测事实来看,在地球历史上虽然发生过许多或大或小的冰川期,但现有的确切资料表明这些冰川从没有延伸到低于南北纬度 30° 的地区。在我们人类生存的过去几百万年中,虽然地球处于一个相对寒冷时期,冰川期也曾多次出现过,但没有证据显示冰川曾延伸到热带地区。在 2 万年前的人类历史上的最后一次大冰川期,冰川在北半球也仅延伸至北纬 40° 的地区。在过去的几千万年间,热

带海面不仅没有被冰封过,而且无论中高纬度处于冰川期或者暖期,热带海面的温度变化都不超过 4 [35~38]。

什么外部原因触发了“冰雪地球”及其融化一直是气候学家们非常感兴趣的问题。使用 EBM 和全球环流模式 (General Circulation Model, GCM), 气候学家们检验了各种可能导致“冰雪地球”的外界强迫因子,如太阳辐射(新元古代太阳辐射强度大约比现在的低 6%)、地轴倾角、地球自转速度、海洋环流对热量的输送等[39~46]。模拟结果表明这些外界强迫均不能触发全球性冰封,特别地,Chandler 等[41]发现即使这些强迫因子共同作用也无法导致全球性的冰封。Hyde 等[25]使用 EBM 模式并考虑冰川动力学的作用发现当  $\text{CO}_2$  在大气中的体积混合比降至  $1.3 \times 10^{-4}$  时(大致相当于现在  $\text{CO}_2$  浓度的  $1/3$ ,现在大气中的  $\text{CO}_2$  的混合比大约是  $3.7 \times 10^{-4}$ ) 陆地将被完全被冰雪覆盖。可是当他们使用相同的条件强迫 GCM 时,海冰只延伸到南北纬度 25 的地方。Chandler 等[41]使用 GCM 发现即使  $\text{CO}_2$  的混合比降至  $0.4 \times 10^{-4}$  和太阳辐射减少 6%,热带仍有大面积陆地无法被冰封,使用海气耦合 GCM 和类似的强迫条件, Poulsen 等[42]也发现热带陆地和海洋不能被冰封。这些模拟试验表明外界强迫所产生的结果似乎更接近于一个“雪水交融的地球”,而非“冰雪地球”。

与地球能否完全被冰封同样重要的一个问题是一旦“冰雪地球”形成后,它将怎样被融化。使用 EBM 模式,Caldeira 等[47]的结论是如果大气中  $\text{CO}_2$  的含量达到 0.12 个大气压的临界值(相当于目前  $\text{CO}_2$  浓度的 350 倍),热带海冰有可能开始融化(Tajika[48]给出的临界值是 0.16 个大气压)。但他们的假定是热带海冰在 260 K 的年平均温度下便开始融化。Pierrehumbert<sup>10,49]</sup>指出对于中纬度地区来说,由于温度的季节变化较大,260 K 的年平均温度意味着夏季的温度将有可能高于冰点温度(273.15 K),但热带海面温度的季节变化不大,只有当年平均温度接近 270 K 时海冰才有可能开始融化,而若要达到 270 K 的温度, $\text{CO}_2$  的含量将不得低于 0.29 个大气压。在不考虑云的辐射效应的情况下,Hyde 等[25]发现大约需要 0.3 个大气压的  $\text{CO}_2$  来融化“冰雪地球”,但 Pierrehumbert<sup>10]</sup>指出如果把云的负反馈辐射效应考虑进去,Hyde 等所建议的  $\text{CO}_2$  临界值实际相当于 0.7 个大气压。

这些 EBM 模拟结果给我们印象是,当  $\text{CO}_2$  的含量达到足够高的程度时,“冰雪地球”是有可能被融化的,可是,GCM 模拟结果则表明这些 EBM 试验所建议的  $\text{CO}_2$  临界值远不能使“冰雪地球”融化。使用海气耦合模式,Pierrehumbert<sup>10,49]</sup>发现即使在太阳辐射强度为现在的 94% 并且  $\text{CO}_2$  含量达到 0.2 个大气压的情况下,热带地区的温度也只有 240 K,比冰点温度低将近 33 K。如果按现在的  $\text{CO}_2$  增长速度,并且假定其中的  $2/3$  通过雨水的冲刷又回到海洋中,那么在现在的大气中累积到 0.2 个大气压的  $\text{CO}_2$  将至少需要 2 800 万年。他进一步指出  $\text{CO}_2$  的含量从 0.1 个大气压增加到 0.2 个大气压,相应的温度增加也只有 2 K,按照这一递推率推算,若要达到 273 K 的温度, $\text{CO}_2$  的含量将必须高达 3.2 个大气压。虽然  $\text{CO}_2$  含量有达到这样高浓度的可能性,但这样高的  $\text{CO}_2$  浓度的确是需要想象力的。这里需要注意的一个问题是在“冰雪地球”条件下  $\text{CO}_2$  含量的升高所产生的温室效应与现代气候条件下的不同<sup>[12]</sup>。在现代气候条件下, $\text{CO}_2$  增加造成的温度升高将导致更多的水汽自海洋蒸发,大气中水汽的增加将导致更强的升温(在不考虑云的辐射效应的情况下),因为水汽是比  $\text{CO}_2$  更有效的温室气体<sup>[50]</sup>。而在“冰雪地球”的条件下,大气中的水汽含量非常微弱, $\text{CO}_2$  增加产生的温室效应比现代气候条件下弱得多。

GCM 与 EBM 模式有着本质的不同,第一,GCM 模式能够更真实地反映大气和海洋环流的运动状况以及这些流体运动在热量输送和全球能量平衡的调整中所起的作用,这不像 EBM 模式那样使用水平扩散的方案来参数化热量自热带向中高纬度的输送;第二,GCM 模式能够更真实地反映大气的垂直温度层结及其随气候变化的自我调整,而 EBM 模式无法刻画大气的垂直温度层结,所以这两种模式给出不同的结果并不奇怪。从这一点来看,Hofman 等把理想的 EBM 模式给出的“冰雪地球”气候态作为理论依据似乎过分地强调了该模式的真实性。

正是使用了 GCM,Pierrehumbert<sup>10,11]</sup>得以给出“冰雪地球”难以融化的一些基本原因:“冰雪地球”条件下大气垂直温度递减率非常弱,尤其是在冬半球,大气在垂直方向几乎是等温的,这意味着大气与地面差不多的温度向外辐射能量,大气的温室效应因而较弱;“冰雪地球”条件下云的温室效应也很微弱,这是因为大气中的水汽含量很低,云量很少(尤其是高云较少);由于大气中水汽的缺

乏,潜热释放少,对流运动较弱,所以哈德雷环流比较浅薄和狭窄。Pierrehumbert<sup>[10]</sup>发现哈德雷环流的垂直尺度只有 9 ~10 km (现在的哈德雷环流高度可达 13 km 左右),其下沉支在南北纬度 20° 的地方,而不是现在的 30°,这样一来,热带对流层顶较低,对流层顶的温度相对较高,热带大气的温室效应较弱;另一方面,Pierrehumbert还发现“冰雪地球”条件下的哈德雷环流的强度较大,其较强的经向运动把较多的热量输送到副热带<sup>[51]</sup>,使得赤道附近的温度不易升高;由于缺乏大容量的液态水的存在,大气下垫面的热力惯性非常小,所以,“冰雪地球”条件下的地表温度的日变化和季节变化均非常大(这有点类似于现在火星表面的“天气”和“气候”状况<sup>[34]</sup>),尤其是夜晚和冬半球的温度异常地低,这些都不利于冰雪的融化。

值得注意的是,无论是EBM还是GCM,这些模式中的云物理、辐射以及动力学过程的参数化方案都是根据现代的观测事实建立起来的,这些参数化方案能否真实和有效地模拟新元古代时期的气候变化还是一个很大的问题(即使模拟现代气候,云的参数化也还存在很大的问题)。Pierrehumbert<sup>[10]</sup>指出云物理和地面反射率的参数化是影响模拟结果的最重要的因素,他也指出在极端寒冷和CO<sub>2</sub>含量较高的条件下,CO<sub>2</sub>的相变过程对大气辐射收支可能有着重要的影响。在研究火星早期是否有液态水存在的工作中,Forget等<sup>[52]</sup>发现干冰云(固态CO<sub>2</sub>冰晶)的温室效应有可能使火星表面温度达到足以使液态水存在的程度。数值模拟中使用的地形分布也可能影响模拟结果,Hoffman等<sup>[3]</sup>指出现有的模拟中所使用的地形与他们建议的有很大不同,他们建议的地形分布是陆地基本散布在赤道附近,而不像Hyde等<sup>[25]</sup>和Chandler等<sup>[41]</sup>所使用的那样差不多有50%的陆地处于南半球的中高纬度。

## 4 结 论

综上所述,“冰雪地球”的观点还仅仅处于假说阶段。到目前为止,尽管所有的证据都表明在新元古代时期确实发生过地球历史上最为严重的冰川期,但这些证据还不能充分证明地球在新元古代时期被完全冰封过。其实,学术界争论的关键点不在于地球在新元古代是否经历过严重的冰川期,而是热带洋面是否完全被冰封过。这不是一个细节问题,而是一个根本问题,因为热带洋面冰封与否代表着两种截然不同的气候态,它涉及到当时的原始生

命如何延续、地—气系统中水和碳循环能否持续以及气候系统能否自我调整等基本问题。就现有的证据而言,开放的热带洋面(也就是“雪水交融的地球”)似乎更合理一些,虽然它无法解释碳酸盐岩中铁和钽的含量偏高的现象,但它比较有利于生命的延续。热带水循环的维持有利于解释热带陆地深厚的冰川层,它也使得大气的温室效应更为有效,有利于冰川的融化。什么原因诱发了新元古代全球性的冰川期?又是什么导致了冰川的融化和消退?目前的研究还不能对这些基本问题给出明确的答案,现有的模拟结果表明“冰雪地球”是难以形成的,而且,一旦“冰雪地球”形成,它将是很难被融化的。新元古代时期的极端气候变化应该对寒武纪生命爆发有着重要影响,但它的影响是什么还存在争论。相对而言,Knoll<sup>[1]</sup>的观点更易被接受,也就是极端气候变化对生命进化的影响是生态方面的,寒武纪生命大爆发与大气中氧含量的升高有着更直接的关系,而环境气候变化导致基因突变的观点则缺乏足够证据和说服力。

关于“冰雪地球”的争论还将持续,它的发生与否最终还需要更充分的事实证据来证明,另一方面,气候模式对重建新元古代的气候状态以及研究其变化的成因提供了一个重要工具。将来的数值模拟研究需要注重以下等几个方面:虽然海洋中甲烷的释放被认为有可能是导致“冰雪地球”融化的原因之一,但还没有这方面的模拟研究,需要注意的是,与模拟CO<sub>2</sub>的温室效应不同,对甲烷的模拟需要考虑它的生命期及其化学(氧化)反应问题;热带洋面冰封与否不仅与海洋环流及其对热量的输送有关,还应该与海冰运动有关,现有的研究还没有考虑海冰动力学的问题;在极端寒冷和高浓度CO<sub>2</sub>的情况下,干冰云对辐射的影响也还没有反映在现有的模拟实验中;云和地表反射率的参数化以及陆地的分布对“冰雪地球”的形成和融化的影响也需要中心验证。

“冰雪地球”的研究和争论涉及了地球演变和气候变化中的一些最基础性的问题,这些研究工作给我们的重要启发之一是剧烈的气候变化是有可能的。按照Kirschvink和Hoffman等的观点,新元古代时期之所以发生数次如此剧烈的气候变化是因为当时的陆地分布和大气中CO<sub>2</sub>含量的变化。我们今天所处的是一个CO<sub>2</sub>含量相对较高和大部分陆地处于中高纬度(而且高纬度大陆被冰雪所覆盖)这样一个特定条件下的稳定的气候态(这在地球历史上还

没有出现过) 较高的  $\text{CO}_2$  含量使得大气的温室效应较强, 而高纬度的冰雪反射太阳辐射, 它们之间的平衡使得现代气候不至于太冷或太暖。仅从陆地分布来说, 我们还不用担心在我们所关心的时段内“冰雪地球”的再次出现。但是人类活动造成的  $\text{CO}_2$  含量的持续升高则有可能造成高纬度冰雪的融化并打破现代的稳定气候态, 如果这种平衡被破坏, 我们将必须为无法预见的气候变化做好准备。

#### 参考文献 (References):

- [1] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball Earth [J]. *Science*, 1998, 281: 1342-1346.
- [2] Kirschvink J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball Earth [A]. In: Schopf J W, Klein C, eds. *The Proterozoic Biosphere* [C]. Cambridge University Press, 1992.
- [3] Hoffman P F, Schrag D P. Snowball Earth [J]. *Scientific American*, 2000, 282: 62-75.
- [4] Hoffman P F, Schrag D P. The snowball Earth hypothesis: Testing the limits of global change [J]. *Terra Nova*, 2002, 14: 129-155.
- [5] Christie-Blick N, Sohl L E, Kennedy M J. Considering a Neoproterozoic snowball Earth [J]. *Science*, 1999, 284: 541-7.
- [6] Schrag D P, Hoffman P F, Hyde W T, et al. Life, geology and snowball Earth [J]. *Nature*, 2001, 409: 306-307.
- [7] Harland W B, Rudwick M J S. The great intra-Cambrian ice age [J]. *Scientific American*, 1964, 211: 28-36.
- [8] Bodiseltsh B, Koeberl C, Master S, et al. Estimating duration and intensity of Neoproterozoic snowball glaciations from Iran anomalies [J]. *Science*, 2005, 308: 239-242.
- [9] Higgins J A, Schrag D P. A test of a snowball Earth [J]. *Geochemical Geophysical Geosystem*, 2003, 4(3): doi:10.1029/2002GC000403.
- [10] Pierrehumbert P T. Climate dynamics of a hard snowball Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: doi:10.1029/2004JD005162.
- [11] Kennedy M J, Christie-Blick N, Sohl L E. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals [J]. *Geology*, 2001, 29: 443-446.
- [12] Knoll A H. *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [13] Pierrehumbert P T. The hydrological cycle in deep-time climate problems [J]. *Nature*, 2002, 419: 191-198.
- [14] Kennedy M J, Christie-Blick N, Prave A R. Carbon isotopic composition of Neoproterozoic glacial carbonates as a test of paleoceanographic models for snowball Earth phenomena [J]. *Geology*, 2001, 29: 1135-1138.
- [15] Williams G E. Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity [J]. *Geological Magazine*, 1975, 112: 441-444.
- [16] Williams G E. History of the Earth's obliquity [J]. *Earth-Science Review*, 1993, 34: 1-45.
- [17] Williams G E, Kasting J F, Frakes L A. Low-latitude glaciation and rapid changes in the Earth's obliquity explained by obliquity-oblateness feedback [J]. *Nature*, 1998, 396: 453-455.
- [18] Williams G E. Geological constraints on the Precambrian history of the Earth's rotation and the Moon's orbit [J]. *Review of Geophysics*, 2000, 38: 37-59.
- [19] Laskar J, Joutel F, Robutel P. Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon [J]. *Nature*, 1993, 361: 615-617.
- [20] Donnadieu Y, Fluteau F, Ramstein G, et al. Is high obliquity a plausible cause for Neoproterozoic glaciations? [J]. *Geophysical Research Letter*, 2002, 29: doi:10.1029/2002GL015902.
- [21] Levard B, Laskar J. Climate friction and the Earth's obliquity [J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 154: 970-990.
- [22] Ramstein G, Donnadieu Y, Godden S Y. Proterozoic glaciations [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2004, 336: 639-646.
- [23] Hoffman P F, Maloof A C. Glaciation the snowball theory still holds water [J]. *Nature*, 1999, 397: 384-387.
- [24] Runnegar B. Loophole for snowball Earth [J]. *Nature*, 2000, 405: 403-404.
- [25] Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. Neoproterozoic "snowball Earth" simulations with a coupled climate/ice-sheet model [J]. *Nature*, 2000, 405: 425-429.
- [26] Budyko M I. Polar ice and climate [A]. In: Fletcher J O, ed. *Proceedings of the Symposium on the Arctic Heat and Budget and Atmospheric Circulation* [C]. Santa Monica, CA: The Rand Corp, 1966, 3-21.
- [27] Budyko M I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth [J]. *Tellus*, 1969, 21: 611-619.
- [28] Sellers W D. A global climate model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8: 392-400.
- [29] North G R. Analytical solution to a simple climate model with diffusive heat transport [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 1301-1307.
- [30] North G R. Theory of energy-balance climate models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 2033-2043.
- [31] North G R, Cahalan R F, Coakley J A. Energy balance climate models [J]. *Reviews of Geophysics Space Physics*, 1981, 19: 91-121.
- [32] Ghil M, Childress S. *Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamical Theory, and Climate Dynamics* [M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [33] Kargel J S, Strom R G. Global climate change on Mars [J]. *Scientific American*, 1996, 275: 80-88.
- [34] Leovy C. Weather and climate on Mars [J]. *Nature*, 2001, 412: 245-249.
- [35] Betts A K, Ridgway W. Climatic equilibrium of the atmospheric convective boundary layer over a tropical ocean [J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1989, 46: 2621-2641.
- [36] Crowley T J, North G R. *Paleoclimatology* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1991.

- [ 37 ] Sellwood B W , Price G D , Valdes P J . Cooler estimates of Cretaceous temperatures [ J ] . *Nature* , 1994 , 370 : 453-455 .
- [ 38 ] Guilderson T P , Fairbanks R G , Rubenstein J L . Tropical temperature variations since 20 , 000 years ago : Modulating interhemispheric climate change [ J ] . *Science* , 1994 , 263 : 663-665 .
- [ 39 ] Crowley T J , Baum S K . Effect of decreased solar luminosity on late Precambrian ice extent [ J ] . *Journal of Geophysical Research* , 1993 , 98 : 16 723-16 732 .
- [ 40 ] Jenkins G S , Smith S R . GCM simulations of snowball Earth conditions during the late Proterozoic [ J ] . *Geophysical Research Letter* , 1999 , 26 : 2 263-2 266 .
- [ 41 ] Chandler M A , Sohl L E . Climate forcings and the initiation of low-latitude ice sheets during the Neoproterozoic Varanger glacial interval [ J ] . *Journal of Geophysical Research* , 2000 , 105 : 20 737-20 756 .
- [ 42 ] Poulsen C J , Pierrehumbert P T , Jacob R L . Impact of ocean dynamics on the simulation of the Neoproterozoic " snowball Earth " [ J ] . *Geophysical Research Letter* 2001 , 28 : 1 575-1 578 .
- [ 43 ] Donnadieu Y , Fluteau F , Ramstein G , et al . 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 Letter* , 2003 , 208 : 101-112 .
- [ 44 ] Donnadieu Y , Ramstein G , Fluteau F , et al . The impact of atmospheric and oceanic heat transports on the sea-ice-albedo instability during the Neoproterozoic [ J ] . *Climate Dynamics* , 2004 , 22 : 293-306 .
- [ 45 ] Lewis J P , Weaver A J , Johnson S T , et al . Neoproterozoic " snowball Earth " : Dynamic sea ice over a quiescent ocean [ J ] . *Paleoceanography* , 2003 , 18 . doi : 10.1029 / 2003PA000926 .
- [ 46 ] Lewis J P , Eby M , Weaver A J , et al . Global glaciation in the Neoproterozoic : Reconciling previous modeling results [ J ] . *Geophysical Research Letter* 2004 , 31 . doi : 10.1029 / 2004GL019725 .
- [ 47 ] Caldeira K , Kasting J F . Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds [ J ] . *Nature* , 1992 , 359 : 226-228 .
- [ 48 ] Tajika E . Faint young Sun and the carbon cycle : Implication for the Proterozoic global glaciations [ J ] . *Earth and Planetary Science Letter* , 2003 , 214 : 443-453 .
- [ 49 ] Pierrehumbert P T . High levels of atmospheric carbon dioxide necessary for the termination of global glaciation [ J ] . *Nature* , 2004 , 429 : 646-649 .
- [ 50 ] Lindzen R S . Climate dynamics and global change [ J ] . *Annual Review of Fluid Mechanics* , 1994 , 26 : 353-378 .
- [ 51 ] Hu Y , Tung K , Liu J . A closer comparison of early and late winter atmospheric trends in the Northern Hemisphere [ J ] . *Journal of Climate* 2005 , 18 : 2 924-2 936 .
- [ 52 ] Forget F , Pierrehumbert R T . Warming early Mars with carbon dioxide clouds and scatter infrared radiation [ J ] . *Science* , 1997 , 278 : 1 273-1 276 .

## ON STUDIES OF SNOW BALL EARTH

HU Yong-yun , W EN Xin-yu

(Department of Atmospheric Sciences and Laboratory of Severe Storms and Flood Disasters ,  
School of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China)

**Abstract :** Had Earth ever been completely covered by snow and ice and become a giant "snowball Earth" during the Neoproterozoic about 600 ~700 million years before? If it had , what caused this global freezing? What led it to melt? What had the violent climate changes during the Neoproterozoic impacted on the Cambrian life explosion? In the past few years , these problems have drawn extensive studies and intensive controversies in the fields of paleo-geology , paleontology , and paleoclimatology . According to existing results , it is generally thought that during the Neoproterozoic Earth had experienced several most severe global glaciations in Earth's history . However , it needs further geological and paleo-biological evidence to prove whether Earth had been completely frozen or not ; numerical simulations with various external forcings showed that the formation of a hard "snowball Earth " is almost impossible , and if Earth runs into complete freezing , it is hard to get back out ; there are two controversial points of views that such violent climate changes during the Neoproterozoic might have important impacts on the Cambrian life explosion . One is that the climate changes can induce mutations that fuel biological innovation , and the other one is that the impacts are on ecosystems .

**Key words :** Snowball Earth ; Neoproterozoic ice age ; Climate change ; Greenhouse gases ; Earth evolution ; Cambrian life explosion .