

文章编号: 1000-0550(2006) 02-0235-07

# 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

冯东<sup>1,2,3</sup> 陈多福<sup>1,2</sup> 刘芊<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所边缘地质重点实验室 广州 510640  
2 中国科学院广州天然气水合物研究中心 广州 510640 3 中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 新元古代晚期约 635 Ma 的地球发育了到达赤道附近的冰川作用,地质记录上表现为代表寒冷气候的冰期沉积杂砾岩,直接被代表温暖环境的碳酸盐岩层(常称盖帽碳酸盐岩)覆盖。由于盖帽碳酸盐岩奇特的岩石学和地球化学特征,引起了对其成因认识的巨大争论,提出了“雪球地球”和“甲烷渗漏”等假说。“雪球地球”假设可以解释一些令人困惑的地质现象,如低纬度和低海拔冰川沉积、盖帽碳酸盐岩、碳酸盐  $\delta^{13}\text{C}$  负漂移和条带状铁矿层等,但许多科学家对此提出了质疑。最近对盖帽碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}$  分析结果(最低达  $-4\text{‰}$ )、盖帽碳酸盐岩发育的类似现代冷泉碳酸盐岩沉积组构等似乎支持“甲烷渗漏”假说。

**关键词** 新元古代 雪球地球 盖帽碳酸盐岩 天然气水合物 甲烷渗漏

**第一作者简介** 冯东 男 1980 年出生 博士研究生 地球化学与沉积学

**中图分类号** P534.4 **文献标识码** A

## 1 前言

元古代时期地球至少经历了五次冰期<sup>[1,2]</sup>,其中大约 635Ma 左右的新元古代晚期 Marinoan 冰期强度最大,冰川覆盖了整个地球,即“雪球地球”(Snowball Earth)<sup>[3-5]</sup>。“雪球地球”假说提出后引起了科学界的广泛讨论,人们对新元古代冰期环境特征与成因演化过程、导致冰期终结原因已成为当今地学研究中的一大热门课题。

盖帽碳酸盐岩(cap carbonates)是指沉积于新元古代冰碛岩之上,主要由微晶方解石和白云石等组成的相对均质的薄层状碳酸盐岩地层,直接覆盖在全球性冰川沉积物之上<sup>[6]</sup>。盖帽碳酸盐岩在全球各地广泛分布<sup>[7-10]</sup>。这一冰期沉积与温暖环境的碳酸盐岩共生的现象一直是地球科学界的难题,受到许多学者的关注。

盖帽碳酸盐岩具有独特的岩石学和地球化学特征,对于其成因,主要有“分层海洋上升流”、“雪球地球”和“甲烷渗漏”等假说。最近的研究表明可能由于天然气水合物的分解释放大量甲烷导致冰期的终结及盖帽碳酸盐岩的形成<sup>[7,8]</sup>,似乎更激起了学者们的兴趣,使得探索冰期终结原因及盖帽碳酸盐岩的成

因研究成为当前地学研究最主要的热点之一。

因此深入了解目前研究动态,将加深对“雪球地球”相关现象的认识,推动国内相关研究的开展。本文综合新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制等研究的新成果,对新元古代晚期“雪球地球”的形成模式、盖帽碳酸盐岩的特征和成因及“雪球地球”的终结机制进行介绍。

## 2 全球冰川是怎样形成的?

根据冰川沉积物的全球广泛分布、及冰碛岩的古纬度记录,新元古代晚期的 Marinoan 冰期是一次全球性的冰期,冰盖可能到达了赤道附近<sup>[4,11]</sup>。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。

### 2.1 雪球地球假说

“雪球地球”假说的雏形即“全球冰河化”假说在 20 世纪 60 年代首先被提出<sup>[3]</sup>,后经许多学者发展和完善,发展到目前熟知的“雪球地球”假说<sup>[4,9,10]</sup>。“雪球地球”假说认为:聚集在赤道附近的 Rodinia 超大陆的裂解使大陆边缘海面积迅速增加,降雨和降雪量增加,大规模火山喷发形成的大量玄武岩发生强烈的消耗  $\text{CO}_2$  的化学风化作用 ( $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$

+  $SD_2$ )<sup>[12]</sup>, 大气中二氧化碳的含量急剧下降, 产生冰室效应, 随着地球冰雪面积的不断增大, 能量反射增强, 随之冰室效应同步增强, 结果使得两极的冰盖不断扩大, 向低纬度推进。当冰盖推进至纬度 30°附近时, 其速度将迅猛增加, 导致全球性冰盖的发育, 形成“雪球地球”。这种机制可以很好地解释新元古代晚期出现的全球性低纬度、低海拔冰川, 也阐明了为什么以后的地质历史时期没有再现“雪球地球”<sup>[9 10]</sup>。

## 2.2 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<sup>[13]</sup>。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°, 而不是目前的 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<sup>[14 15]</sup>。地球只是在 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后生动物繁衍<sup>[13]</sup>。问题是即使是在较大倾角下赤道附近仍会有季节变化, 冰川也难以保存<sup>[16]</sup>。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特征。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。

## 3 盖帽碳酸盐岩的特征及“雪球地球”的终结机制

### 3.1 雪球地球假说

Hoffman 等<sup>[9 10]</sup>结合先前的“雪球地球”假说<sup>[13]</sup>对“雪球”的终结提出了新的认识, 认为冰期整个地球表面被厚厚的冰层覆盖, 正常的大气降水和侵蚀作用停滞, 没有蒸发作用, 消耗二氧化碳的硅酸盐化学风化作用停止, 二氧化碳和海洋水体的交换作用也将停止, 大气中二氧化碳不能被消耗掉, 但火山活动并未减弱, 大气二氧化碳不断积累, 在浓度超过某一极限(相当于现在含量的 350 倍<sup>[17]</sup>)时, 温室效应超过冰室效应, 冰盖融化, 大量水蒸气重返大气。水蒸气也是一种强温室气体, 与二氧化碳共同作用, 使赤道附近的气温快速上升到 40~50°C。整个地球在很短的时间内由最冷的冰期进入到最温暖的冰后期。

“雪球地球”假说提出后得到许多学者的认同, 它可以解释冰期及冰期后许多特有的地质现象, 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: 新元古代晚期海相碳酸盐岩的  $\delta^{13}C$  值出现较大的同位素漂移(大于 10‰)<sup>[9 10]</sup>, 明显高于其它地质时期的变化幅度, 表现为冰前富  $^{13}C$  (碳酸盐岩的  $\delta^{13}C$  值大于 5‰, 最高可达 11‰), 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‰(图 1)。这种碳同位素负漂移记录在各大洲(非洲、澳大利亚、亚洲、北美洲等)均有发育, 并具有同时性。对此, Hoffman 等<sup>[9 10]</sup>认为冰前期赤道附近的 Rodinia 超大陆裂解, 大大提高了生物的繁衍和演化, 海洋生物进行光合作用时优先吸取  $^{12}C$ , 而  $^{13}C$  则留在海水中, 形成了冰前期碳酸盐岩地层的  $\delta^{13}C$  高值。而冰期来临, 植物光合作用强度减弱, 到冰盛期生物产率几乎为零, 无法改变原始幔源碳的同位素比值 ( $\delta^{13}C = -6 \pm 1\text{‰}$ ), 因此, 盖帽碳酸盐岩记录了冰期来源于地幔的  $\delta^{13}C$  值。

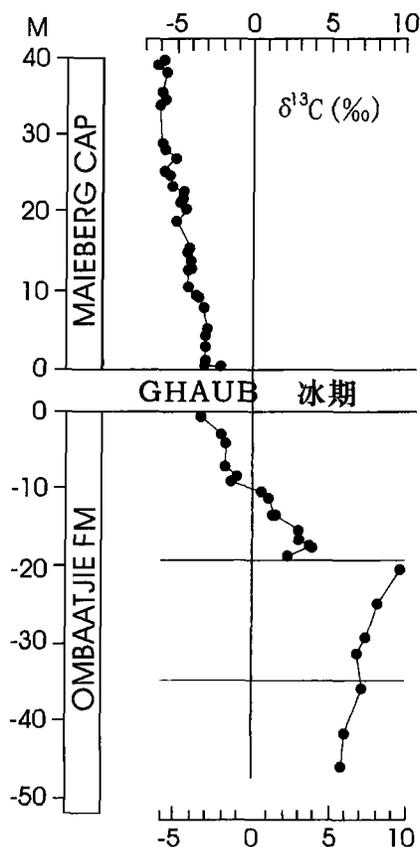


图 1 纳米比亚 Ghaub 冰期前后的碳同位素变化<sup>[9]</sup>

Fig 1 Carbon isotopic variation under/above Ghaub Glacial strata in Namibia<sup>[9]</sup>

(2) 盖帽碳酸盐岩: 新元古代盖帽碳酸盐岩主要为白云岩, 厚度从几米到几十米, 直接覆盖在冰川沉

积物之上<sup>[18]</sup>, 所代表的时间却只有数千年<sup>[9]</sup>, 是快速沉积的产物, 表明了气候的突变。盖帽碳酸盐岩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 (tepee-like structure), 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<sup>[10]</sup>, 可能是超级风暴沉积<sup>[19]</sup>。有些地区盖帽碳酸盐岩中发育了结晶扇 (crystal fan), 尽管单个结晶扇很小 (< 1 m), 但它们呈礁状聚集在一起, 厚度达几米到几十米。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<sup>[20]</sup>, 其树枝状—棱柱状的 (dendritic-prismatic) 生长习性暗示了快速、有限扩散的方式生长<sup>[21]</sup>。Hoffman 等<sup>[9, 10]</sup>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。

(3) 条带状铁矿层: 新元古代冰川地层中广泛出现铁矿层, 类似于古元古代 (约 2 400 Ma 前) 的条带状磁铁矿层。然而 1 800 Ma 以后, 它在地球上消失了, 一直到新元古代冰期才再次出现<sup>[22]</sup>。铁有两种存在状态, 在还原条件下, 低价铁 Fe(II) 溶于海水; 在氧化条件下, 高价铁 Fe(III) 难溶于水。铁矿层建造的发育需要三个先决条件<sup>[23, 24]</sup>: 1) 海洋缺氧 Fe(II) 得以不断富集; 2) H<sub>2</sub>S 和 Fe(II) 流量比 < 2, 黄铁矿 (FeS<sub>2</sub>) 埋藏只能消耗海洋中部分 Fe(II); 3) 存在促使铁矿层沉淀的催化剂。大约 2 400 Ma 前大气氧第一次增加之前, 海洋深部水体是缺氧的, 通过河流带入海洋的硫酸盐数量很少<sup>[25-27]</sup>。2 400 Ma 以后, 带入海洋的硫酸盐数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, 但深部水体还处在的缺氧状态。到了大约 1 800 Ma 海洋中硫酸盐数量增加到一定程度, 使细菌还原硫酸盐生成的 H<sub>2</sub>S 足以将全部的 Fe(II) 以 FeS<sub>2</sub> 形式埋藏, 条带状铁矿层从此消失<sup>[28]</sup>。此后大约 1 000 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, 海水变的停滞缺氧, 来自洋中脊和洋底沉积物淋滤出的二价铁, 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, 上升洋流把二价铁带到浅部氧化, 形成了又一次全球性的条带状铁矿层<sup>[9, 10]</sup>。

### 3.2 甲烷渗漏假说

Kennedy 等<sup>[7]</sup>认为盖帽碳酸盐岩与永久冻土层

中天然气水合物分解甲烷的渗流有关。天然气水合物是由天然气 (主要是甲烷) 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, 即形成甲烷渗漏。渗漏甲烷通过 (细菌) 氧化作用转变为二氧化碳, 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组构, 如溶蚀、平底晶洞、凝块等。由于冷泉碳酸盐岩的碳来源于水合物中的碳同位素极负的生物成因甲烷 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{甲烷}}$ : -32‰ ~ -84‰), 通常具有特别负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{碳酸盐岩}}$  值 (-15‰ ~ -61‰)<sup>[29-31]</sup>。

在新元古代冰期, 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<sup>[7, 18]</sup>。甲烷是一种温室气体, 它的温室效应比二氧化碳高一个数量级。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, 甲烷水合物失稳分解, 释放甲烷进入大气, 大气中甲烷气体含量的增加, 增强了温室效应, 进一步加快冰盖的融化<sup>[7]</sup>。水合物释放的大量甲烷经氧化生成二氧化碳, 转变为碳酸氢根, 与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 结合, 形成全球分布的盖帽碳酸盐岩<sup>[32]</sup>。

“甲烷渗漏”假说从另外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值 ( $\delta^{13}\text{C}$  低达 -41‰) 等证据均支持“甲烷渗漏”假说。

(1) 盖帽碳酸盐岩的沉积组构: 盖帽碳酸盐岩具有两种奇特的沉积组构, 与现代甲烷渗漏形成的冷泉碳酸盐岩非常相似, 而且在全球范围内的盖帽碳酸盐岩中均有发育<sup>[7]</sup>。至今对其成因没有令人满意的解释。首先是在盖帽碳酸盐岩的底部发育的层内膨胀和胶结作用, 层状裂隙层横向上过渡为圆丘状的或帐篷状构造, 层理有时突然中断形成角砾化, 裂隙内多期次等厚胶结作用表明了层内的膨胀和胶结作用, 横向上地层的变薄和上覆地层的超覆表明了持续的海底地形凸起。这些奇特的沉积相的成因目前还不清楚, 但它们在现代和古代冷泉系统中非常普遍, 因此 Kennedy 等<sup>[7]</sup>认为是永久冻土层天然气水合物分解释放的甲烷缓慢渗流的产物。其次是海底发育含有大量垂向的管状组构 (tube-like structure) 的细菌成因

纹层状沉积, 横向上不连续的生物丘状体和包卷丘状体、及凝块结构表明是生物成因的。这些管状组构与现代冷泉碳酸盐岩中常见的沉积组构非常相似, 而且含有现代天然气渗漏系统的沉积矿物黄铁矿和重晶石<sup>[7, 33]</sup>, Kennedy等<sup>[7]</sup>认为是天然气渗漏的通道。冷泉系统中细菌席可以起到对上浮气体的封盖作用, 气体在沉积物渗透率和粘结性容许的情况下间歇地渗透穿过细菌席, 当沉积物的粘结性非常强时, 气体侧向迁移, 冲破沉积层, 形成气泡<sup>[33]</sup>。在渗透性相对较好的沉积物中, 如盖帽碳酸盐岩底部板状白云岩和下伏的杂砾岩中, 气体可以扩散通过。因此, 在不同的沉积物中观察到不同形态的管状组构无疑与渗漏相关<sup>[7]</sup>。

(2) 碳同位素变化特征: 新元古代时期大陆冰盖圈闭了大量的有机物质, 当冰盖开始融化, 近海冰盖由于海平面的上升而融化, 冻土带天然气水合物失稳释放大量的甲烷, 这些甲烷的一个典型特点就是严重的亏损<sup>13</sup>C(生物成因甲烷), 导致盖帽碳酸盐岩中碳同位素的异常<sup>[7]</sup>。Kennedy等<sup>[7]</sup>对纳米比亚北部 M a l e b e r g 组盖帽碳酸盐岩研究发现, 碳同位素漂移随时间的变化特征表明有一同位素亏损的碳源额外突然加入到海洋—大气系统中(图 2)。碳同位素恢复到正常需要  $10^5$  年的时间(图 2B)。此外, 碳同位素质量守恒计算表明, 由水合物失稳所释放的碳量与冰后期盖帽碳酸盐岩的碳量是一致的。假定现代溶解的无机碳的数量为  $10^4$  Gt 海洋碳同位素组成为 0‰, 天然气水合物分解的甲烷的碳同位素值为  $-60$ ‰, 那么使盖帽碳酸盐岩碳同位素发生 5‰的负漂移, 至少需要  $3 \times 10^{17}$  摩尔的甲烷气。同时根据碳酸盐岩数量估算, 在面积为  $2.7 \times 10^7$  km<sup>2</sup> 的现代大陆架上覆盖 1m 厚的盖帽碳酸盐岩需要  $8 \times 10^{17}$  摩尔的碳酸盐<sup>[7]</sup>, 这与对北极大陆架释放甲烷气体的估算值  $7 \times 10^{17}$  摩尔中所含的碳量是一致的<sup>[34]</sup>。加之新元古代晚期冻土带到达赤道附近以及内陆盆地中广泛发育的天然气水合物分解释放的碳足以在全球形成几米厚的碳酸盐岩层<sup>[7, 8]</sup>。

(3) 盖帽碳酸盐岩中碳同位素值的强烈负偏移: Jiang等<sup>[8]</sup>在中国南方陡山沱组底部盖帽碳酸盐岩中, 检测到含草莓状黄铁矿的亮晶方解石凝块及被方解石亮晶围绕的球状粒碳酸盐岩具有极负的碳同位素组成, 分别为  $-41.166$ ‰和  $-35.167$ ‰。如此负的碳同位素组成的盖帽碳酸盐岩确切地表明了与甲烷渗漏有关, 结合现代甲烷渗漏沉积中常见产物草莓状

黄铁矿和重晶石, 表明了是渗漏甲烷经微生物作用的产物, 可能与天然气水合物的分解有关。

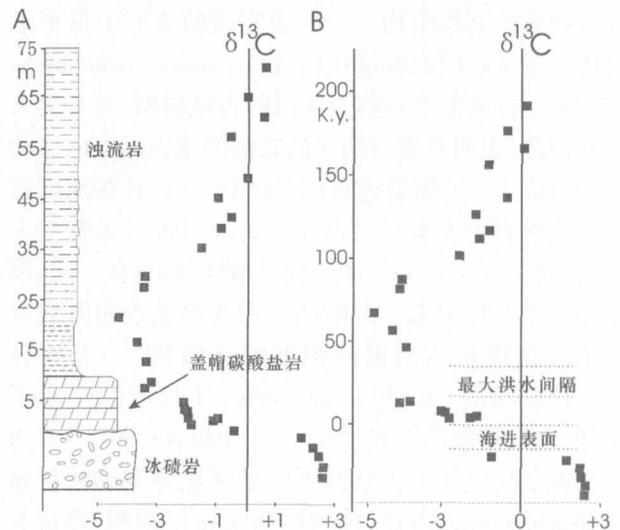


图 2 纳米比亚北部 Duuwater 的 Maiberg 组碳同位素变化  
A 对应地层位置; B 对应时间<sup>[7]</sup>。

Fig. 2 Carbon isotopic variation from Maiberg Formation, Duuwater, northern Namibia plotted against stratigraphic position (A) and interpretation of time (B)

## 4 争论和认识

“雪球地球”和“甲烷渗漏”假说都涉及海水碳同位素的短期变化。“甲烷渗漏”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(10 Ma)来聚集如此高浓度的二氧化碳, 但它为新元古代晚期盖帽碳酸盐岩中碳同位素的短期变化提供了一个合理的解释<sup>[35]</sup>。此外, 甲烷气体也是一种强烈的温室气体, 它的存在也可以帮助解释“雪球地球”假说中“雪球”的快速融化。

(1) 冰雪是否覆盖了整个地球: Condon等<sup>[18]</sup>观察到新元古代冰期(Hoffman等<sup>[9]</sup>认为冰封的时代)大洋海底含有层状岩屑的岩石, 如果岩屑到达海底, 说明大洋已经融化, 表明新元古代冰期每年至少有一段时间大洋是没有被冻结的。冰期数值模拟结果并不支持完全冰封的海洋, 由于巨大的海洋水体包含了大量的能量, 新元古代冰期冰盖只到达了现在欧洲的北部, 冰盖的规模不可能封住整个大洋<sup>[36]</sup>。其次如果大洋结冰, 无疑会伴随出现海平面的明显下降, 但目前没有此方面的地质学证据。这些都对“雪球地球”假说提出了置疑。相比较, “泥球地球”(Slushball Earth)似乎更有说服力<sup>[37]</sup>, “泥球地球”的核心内容

是大陆被冰川完全封盖, 而赤道附近的海洋只有部分被冰封盖<sup>[38 39]</sup>。

(2) 冰期结束的触发机制: 问题的焦点主要集中在当时的大气中是否具有触发“雪球”融化的临界二氧化碳浓度。Pierrehumbert<sup>[36]</sup>的大气环流模型使用逐步增加大气中二氧化碳含量的方法计算触发“雪球地球”融化的临界(极限)二氧化碳浓度, 结果表明即使二氧化碳浓度达到目前大气二氧化碳浓度的 550 倍(0.2 bar), 也不能使“雪球”融化。他还强调即使大气中二氧化碳的浓度再高, 如果没有别的未知因素的影响, “雪球地球”融化似乎不太可能。

(3) 盖帽碳酸盐岩的成因: Jiang 等<sup>[8]</sup>发现的盖帽碳酸盐岩中存在的碳同位素极度负值(-41.166‰)似乎强烈支持了盖帽碳酸盐岩的“甲烷渗漏”假说。然而, Shapiro<sup>[40]</sup>指出如果是碳氢化合物成因的碳酸盐岩为什么在盖帽碳酸盐岩中没有发现沥青质? 对此, Kennedy 等认为冻土带的天然气水合物通常缺少沥青质, 而且天然气水合物是在数千年的时间里缓慢分解释放的, 只能扰动渗漏区域附近的海底<sup>[41]</sup>。对于 Kennedy 等<sup>[7]</sup>认为盖帽碳酸盐岩中由天然气渗漏形成的帐篷状构造, 2005 年 Hoffman 及同事在《科学》上著文认为是冰后期的巨型风暴沉积<sup>[19]</sup>。Kennedy 等<sup>[7]</sup>提出“甲烷渗漏”假说的证据之一管状组构也遭到了质疑。Hoffman<sup>[9 10]</sup>等对一些盖帽碳酸盐岩中常见的微生物成因的生物礁和生物层(叠层石)的成因提出异议, 认为内部含有垂向的管状或板状微晶灰岩沉积物和胶结物充填的叠层石是由于微晶灰岩沉积物在叠层石表面浅的小沟或小槽内聚集, 使其在形态上发生变化而形成的<sup>[9 10]</sup>。并非“甲烷渗漏”假说所述的由于气体渗漏成因<sup>[7]</sup>。

(4) 碳同位素变化: 碳同位素数据对于不同假说的验证起到非常关键的作用, 但目前只有少数几个地区发现的碳同位素数据支持各自的观点, 还没有普遍性。而且 Kennedy 等对“雪球地球”假设的另一个核心证据提出了质疑。通过对来自纳米比亚、形成于陆地冰盖融化之前的碳酸盐岩石样本的分析, 他们并没有发现 Hoffman 等<sup>[9]</sup>在他们的地质证据中所发现的特殊(冰期前碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值大于 5‰, 最高达 11‰)碳同位素证据<sup>[40]</sup>。对于天然气水合物渗漏分解假说, 虽然已有碳同位素数据的支持, 但数据目前还很少, 在获得大多数人的认同之前, 还要做大量的工作。

(5) 锶同位素: 海水 Sr 同位素组成主要受控于

陆壳风化作用和由海底热液活动, 前者具有高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 后者具有低的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值<sup>[43 44]</sup>。冰期和冰后期沉积物中锶同位素数值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 没有明显的变化(从冰川沉积物的 0.707 2 到之上几百米的 0.707 7)<sup>[42]</sup>, 不支持“雪球地球”假说中冰期风化作用的严重减少或甚至停止, 以及冰期结束后岩石物理化学风化作用的迅速增强<sup>[9]</sup>, 与“甲烷渗漏”假说一致<sup>[2 32]</sup>。Hoffman 等<sup>[10]</sup>则认为冰期前后碳酸盐岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的微小变化可能是由于冰期非常短暂, 没有造成海水中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的较大变化, 或者是由于冰期后超级温室下强烈的风化作用, 碳酸盐岩溶解对  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的缓冲作用。

(6) 地球的“雪球”时期有多长: 最近 Bodiseltitsch 等<sup>[45]</sup>分析了来自赤道非洲赞比亚和刚果的三个钻芯, 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 635 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<sup>[9 46]</sup>。Bodiseltitsch 等<sup>[45]</sup>的数据同时也证实了新元古代晚期地球被完全冰封。

## 5 小结

新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制的争论还将继续。“雪球地球”与“甲烷渗漏”假说可能并不是非此即彼的关系, 许多观点也许都是正确的。盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制的最终确定还需要大量研究工作来解决。盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制, 及与 Rodinia 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, 应该把地质历史上一系列的相关事件作为一个系统来研究, 而对新元古代晚期盖帽碳酸盐岩成因的探讨, 必将起到承前启后的作用。

## 参考文献 (References)

- 1 Kaufman A I, Knoll G H, Nabbon G M. Isotopes, ice ages and ter-

- minimal Proterozoic earth history. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 1997, 94: 6600~6605
- 2 Jacobsen S B, Kaufman A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 1999, 161: 37~57
  - 3 Harland W B. Critical evidence for a great intra-Cambrian glaciation. *Geology Rundschau*, 1964, 54: 45~61
  - 4 Kirschvink J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth. In: Schopf J W, Klein C, eds. *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge University Press, 1992, 51~52
  - 5 Hoffmann K H, Condon D J, Bowring S A, et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: Constraints on Marinoan glaciation. *Geology*, 2004, 32: 817~820
  - 6 王家生, 甘华阳, 魏清, 等. 三峡“盖帽”白云岩的碳、硫稳定同位素研究及其成因探讨. *现代地质*, 2005, 19(1): 14~20 [Wang Jiasheng, Gan Huayang, Wei Qing, et al. Stable isotopes of carbon and sulfur of cap dolomite in the Three Gorges and its mechanism discussion. *Geoscience*, 2005, 19(1): 14~20]
  - 7 Kennedy M J, Christie-Blick N, Sohl L E. A re-Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions: a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest interval. *Geology*, 2001, 29: 443~446
  - 8 Jiang G, Kennedy M J, Christie-Blick N. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 2003, 426: 822~826
  - 9 Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 1998, 281: 1342~1346
  - 10 Hoffman P E, Schrag D P. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 2002, 14: 129~155
  - 11 Schmidt P W, Williams S W E. The Neoproterozoic climatic paradox: Equatorial paleolatitude for Marinoan glaciation near sea level in South Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134: 107~124
  - 12 Archer D. Who threw that snowball? *Science*, 2003, 302: 791~792
  - 13 Williams S W E. History of the earth's obliquity. *Earth Science Review*, 1993, 34: 1~45
  - 14 Jenkins J S. Global climate model high-obliquity solution to the ancient climate puzzles of the faint-young Sun paradox and low-latitude Proterozoic glaciation. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 7357~7370
  - 15 Jenkins J S. The "Snowball Earth" and Precambrian Climate. *Science*, 2000, 288: 975~976
  - 16 Hoffman P F, Malof A C. Glaciation: the snowball theory still holds water. *Nature*, 1999, 397: 384
  - 17 Callegre K, Kasting J F. Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds. *Nature*, 1992, 359: 226~228
  - 18 Condon D J, Prave A R, Benn D I. Neoproterozoic glacial-rainout intervals: observations and implications. *Geology*, 2002, 30: 35~38
  - 19 Allen P A, Hoffman P F. Extreme winds and waves in the aftermath of a Neoproterozoic glaciation. *Nature*, 2005, 433: 123~127
  - 20 Grotzinger J P, Knoll A H. Anomalous carbonate precipitates: Is the Precambrian the key to the Permian? *Pakistan*, 1995, 10: 578~596
  - 21 Lasaga A C. *Kinetic theory in the Earth sciences*. Princeton: Princeton University Press, 1998, 1~728
  - 22 Isley A E, Abbott D H. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 15: 461~477
  - 23 Dever J I. Geochemical model for the origin of Precambrian banded iron formations. *Geological Society of America Bulletin*, 1974, 85: 1099~1106
  - 24 Holland H D. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton: Princeton University Press, 1984, 1~598
  - 25 Kathu J A, Holland H D. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen. *Geology*, 1996, 24: 149~152
  - 26 Canfield D E, Habicht K S, Thamdrup B. The Archean sulfur cycle and the early history of atmospheric oxygen. *Science*, 2000, 288: 658~661
  - 27 Farquhar J, Bao H, Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle. *Science*, 2000, 289: 756~758
  - 28 Canfield D E. A new model for Proterozoic ocean chemistry. *Nature*, 1998, 396: 450~453
  - 29 Kvenvolden K A. Methane hydrate: A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*, 1988, 71: 41~51
  - 30 陈多福, 陈先沛, 陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征. *沉积学报*, 2002, 20(1): 34~40 [Chen Duofu, Chen Xianpei, Chen Guangqian. Geology and geochemistry of cold seepage and venting-related carbonates. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 34~40]
  - 31 冯东, 陈多福, 苏正, 等. 海底天然气渗漏系统微生物作用及冷泉碳酸盐岩的特征. *现代地质*, 2005, 19(1): 26~32 [Feng Dong, Chen Duofu, Su Zheng, et al. Characteristics of cold seep carbonates and microbial processes in gas seep system. *Geoscience*, 2005, 19(1): 26~32]
  - 32 Whiticar M J, Faber E, Schoell M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO<sub>2</sub> reduction vs acetate fermentation - Isotope evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 693~709
  - 33 Bohlen G, Greinert J, Suess E, et al. Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability. *Geology*, 1998, 26: 647~650
  - 34 Kvenvolden K A. A primer on the geological occurrence of gas hydrate. In: Henriot J P, Menier J, eds. *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society, London, Special Publication, 1998, 137: 9~30
  - 35 Jacobsen S B. Gas hydrates and deglaciations. *Nature*, 2001, 412: 691~693
  - 36 Pierrehumbert R T. High levels of atmospheric carbon dioxide necessary for the termination of global glaciation. *Nature*, 2004, 429: 646~649
  - 37 Lubick N. Snowball fights. *Nature*, 2002, 417: 12~13
  - 38 Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. Neoproterozoic snowball Earth: simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature*, 2000, 405: 425~429

- 39 Crowley T J, Hyde W T, Peltier W R. CO<sub>2</sub> levels required for deglaciation of a "Near-Snowball" Earth. *Geophysical Research Letters* 2001, 28(2): 283~286
- 40 Shapiro R S. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest interval? *Comment Geology*, 2002, 30: 761~762
- 41 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 interval? Reply. *Geology*, 2002, 30: 763
- 42 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. *Geology*, 2001, 29: 1135~1138
- 43 Asmerom Y. Strontium isotopic variation of Neoproterozoic seawater: implication for crystal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1991, 55: 2883~2894
- 44 Montañez I P. Integrated Sr isotope variations and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: Implication for the evolution of Cambrian seawater. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr. *Geology*, 1996, 24(10): 917~920
- 45 Bodiseltsh B, Koeberl C, Master S, *et al.* Estimating Duration and Intensity of Neoproterozoic Snowball Glaciations from Ir Anomalies. *Science*, 2005, 308: 239~242
- 46 Caldeira K. Continental-pelagic carbonate partitioning and the global carbonate-silicate cycle. *Geology*, 1991, 19: 204~206

## Formation of Late Neoproterozoic Cap Carbonates and Termination Mechanism of "Snowball Earth"

FENG Dong<sup>1, 2, 3</sup> CHEN Duo-fu<sup>1, 2</sup> LU Qian<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry and South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

2 Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** The Earth's most severe glaciation is considered to have occurred about 635 million years ago in the late Neoproterozoic era and is believed to have engulfed the entire earth under ice to create what can be described as "Snowball Earth". Carbonate rocks directly and ubiquitously overlie Neoproterozoic glacial diamictites on almost every continent and are commonly referred to as "cap carbonates". Their unusual facies and strongly negative carbon isotopic signature stirred up considerable debates in the academic community, as they wonder how cap carbonates could have formed, thus "Snowball Earth" and "Methane Seep" were hypothesized. The "Snowball earth" hypothesis can explain many phenomena related to the Neoproterozoic glaciations; cap carbonates have been controversially ascribed to the aftermath of almost complete shutdown of the ocean ecosystems for millions of years during such ice ages. Conversely, it has also been suggested that these carbonate rocks were the result of destabilization of methane hydrates during deglaciation and concomitant flooding of continental shelves and interior basins. Recent carbon isotopic data of cap carbonates ( $\delta^{13}\text{C}$  as low as  $-41\%$ ) provides direct evidence for methane-influenced process during deglaciation, strongly supported "Methane Seep" hypothesis.

**Key words** cap carbonate, snowball Earth, gas hydrates, methane seep, Neoproterozoic