

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0107-06

新元古代“雪球”假说与生命演化的环境

李美俊^{1,2} 王铁冠^{1,2} 王春江^{1,2}

(1 中国石油大学“石油天然气成藏机理”教育部重点实验室 北京 102249

2 中国石油大学(北京)资源与信息学院 北京 102249)

摘要 新元古代末期,地球至少经历了两次全球性的冰川作用,研究者提出了“雪球”假说来解释新元古代时期一系列特殊的地质现象,该假说已成为研究新元古代全球冰川作用和其后生物大爆发事件的窗口。但一些学者并不赞成地球曾经是被冰雪完全覆盖的“雪球”,并分别提出了“半融雪球/无冰水体”和“薄冰”假说。尽管每一种假说都不能解释所有的地质、地球化学现象,但越来越多的证据,特别是分子有机地球化学和古生物学的证据表明,“雪球”时期的海洋并没有完全被冰封盖,在赤道地区的冰盖可能很薄或存在无冰的水体。无冰水体的存在可以使一些光合生物继续生存和演化,这对其后的“寒武纪生物大爆发”事件和生命演化具有重要的意义。

关键词 新元古代 雪球 寒武纪生物大爆发 光合生物 无冰水体

第一作者简介 李美俊 男 1972 年出生 博士后 有机地球化学与石油地质学

中图分类号 P534.4 **文献标识码** A

新元古代时期曾发生过至少两次全球性冰川作用的观点已得到普遍承认^[1]。基于冰反照律反馈效应(albedo feedback)导致冰盖扩张的观点, Budyko 最先提出了全球冰川化的假说^[2]。Kirschvink 提出了“雪球”(Snowball Earth)模型^[3],并对低纬度冰川沉积物和紧邻冰期沉积物之上条带状铁矿层等奇特的新元古代地质现象作出了较为合理的解释。

Hoffman 等利用“雪球”假说对纳米比亚位于冰期沉积物之上的盖帽碳酸盐岩(cap carbonate)的碳同位素值负偏移现象进行了较为合理的解释^[4],从而引发了一轮“雪球”研究的热潮。尽管“雪球”假说还不能完全合理地解释所有新元古代冰期前后诸多的地质、地球化学现象,但它对低纬度地区冰川的分布、条带状铁矿层的形成,冰后或冰间盖帽碳酸盐岩的分布和碳同位素负偏移等令人困惑的地质现象做出了较好的解释。到目前为止,还没有哪一个假说能对所有上述地质、地球化学现象能做出如此合理的解释^[1],因此“雪球”假说已成为研究生命演化、古气候与古环境变迁、早期地球圈层相互作用等重大地球科学问题的重要突破口,极大地激起了地质学家、地球化学家、古生物学家和气候学家们的研究兴趣。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,并对不同模型

中,生命生存和演化的环境进行了分析,归纳起来有以下几种代表性的假说。

1 “硬壳雪球”(Hard Snowball Earth)

按照“雪球”假说,在新元古代末期,地球至少两次完全被冰覆盖,生物的初始产率几乎降到零^[4],该模型被后来的研究者称为“硬壳雪球”(Hard Snowball Earth)模型^[5]。Hoffman 等认为,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^[4],还有那些火山岛屿,就如现在的芬兰岛和夏威夷群岛一样,为各种细菌和简单的真核生物提供了栖息的场所^[6]。

Warren 等以 320W m^{-2} 的太阳光通量和 0.5 的反照率为边界条件,利用光谱模型(spectral model)计算了赤道地区冰盖的厚度,发现当地球表面温度在 -12°C 以下时,冰盖的厚将达 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。作者们认为那些位于岛屿或海岸线,具有比平均大地热流高的地方,可以为光合真核生物提供避难所^[7]。

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,生物只能在局部相对温暖的地方避

难。一些作者认为 Hoffman 等提出非生物生活在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的可能性不大, 一是因为该时期生物主要生活在海洋中, 二是因为在如此严寒、不稳定的环境中, 一些多细胞藻类(如绿藻、红藻、褐藻等)也不易生存^[1]。

至于火山岛屿附近或者大地热流较高的地区, 一些古细菌如产甲烷菌、极端嗜酸嗜热菌等可能在高压、黑暗、缺氧、含硫等极端环境下生存, 就如“黑烟囱”理论所描述的环境那样^[8], 但是在这种环境中, 由于缺乏光合作用所必需的太阳能, 光合真核生物是无法生存的。所以 Hyde 等也认为雪球时期生命存在于几个孤立的火山岛附近只是一种猜想^[9], 这也是“硬壳雪球”假说受到的最大挑战。

2 “半溶雪球”或无冰水体 (Slushball or Open Water)

Hyde 等利用耦合的能量平衡/冰盖模型 (coupled energy balance/ice-sheet model) 对新元古代雪球时期的气候进行了模拟。结果显示, 当太阳光度下降 6%, 大气中 CO₂ 浓度与现在地球上相当时, 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 1~10m, 在赤道地区还存在着无冰的水体^[9]。与 Hoffman 等人的“硬壳雪球” (hard snowball earth) 相对应, 称之为“半融雪球” (Slushball/Semifrozen Snowball Earth)^[9]。

实际上, 早在 Kirschvink 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, 也许能阻止了冰盖的形成, 从而可能在赤道的冰海中形成一些热的水洼 (puddle), 并随季节轻微地移动。”^[3] 该观点得到了许多学者的支持。

Baum 等^[10], Crowley 等^[11], Jenkins 等^[12], Condon 等^[13] 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。Runnegar^[5] 认为上述模型主要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, 没有厚冰层的遮挡, 海洋光合生物可以接受较充足的阳光进行光合作用; 其次, 这些无冰的水体也是生命与大气进行二氧化碳 (CO₂) 和氧气 (O₂) 交换的窗口; 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℃ 左右, 有利于生物的生存和演化。

Chandler 和 Soh 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, 冰期沉积物沉积必需具备大规模活动的、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^[14]。

一些冰期沉积物具有明显的擦痕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^[15]。Christie-Blick 等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湿气, 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^[16]。

Amaud 在苏格兰新元古界 Port A Skaig 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^[17]。

但 Schrag 和 Hoffman 不赞成 Hyde 等人的观点, 认为“半融雪球”不能解释盖帽碳酸盐岩及碳同位素负偏移等新元古代时期的地质现象。认为一旦在赤道地区出现无冰水体, 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 (约几个百万年), 并且无冰水体存在也不能解释海水中铁的聚集和条带状铁矿的形成^[6]。

我国南方扬子区已成为研究新元古代冰期环境与生命大爆发事件的重要地区之一^[18]。古地磁资料显示, 新元古代时期, 扬子区位于北纬约 37°^[19]。Wang 等在扬子区鄂北、湘西等不同剖面中的新元古代冰期——江口和南沱冰期 (分别相当澳大利亚的 Sturtian (~750 Ma) 和 Marinoan (~600 Ma)^[18]) 沉积物中, 检测出丰富的来自真核生物的甾类和主要来自原核生物的藿烷类等生物标志化合物 (图 1), 表明雪球时期, 在中高纬度的地区, 生物, 特别是真核生物的生命活动仍没有停止。同时发现主要来自于叶绿素- α 的姥鲛烷和植烷等类异戊二烯烃类, 证明光合作用没有停止。但相对于间冰期大塘坡组以及冰后期的陡山沱、灯影组以及早寒武世沉积物而言, 有机碳含量和姥鲛烷与植烷浓度要低 1 到 2 个数量级, 表明光合生物的活动确实减弱。从分子地球化学角度证实“雪球”时期存在着有限的无冰水体^[20]。

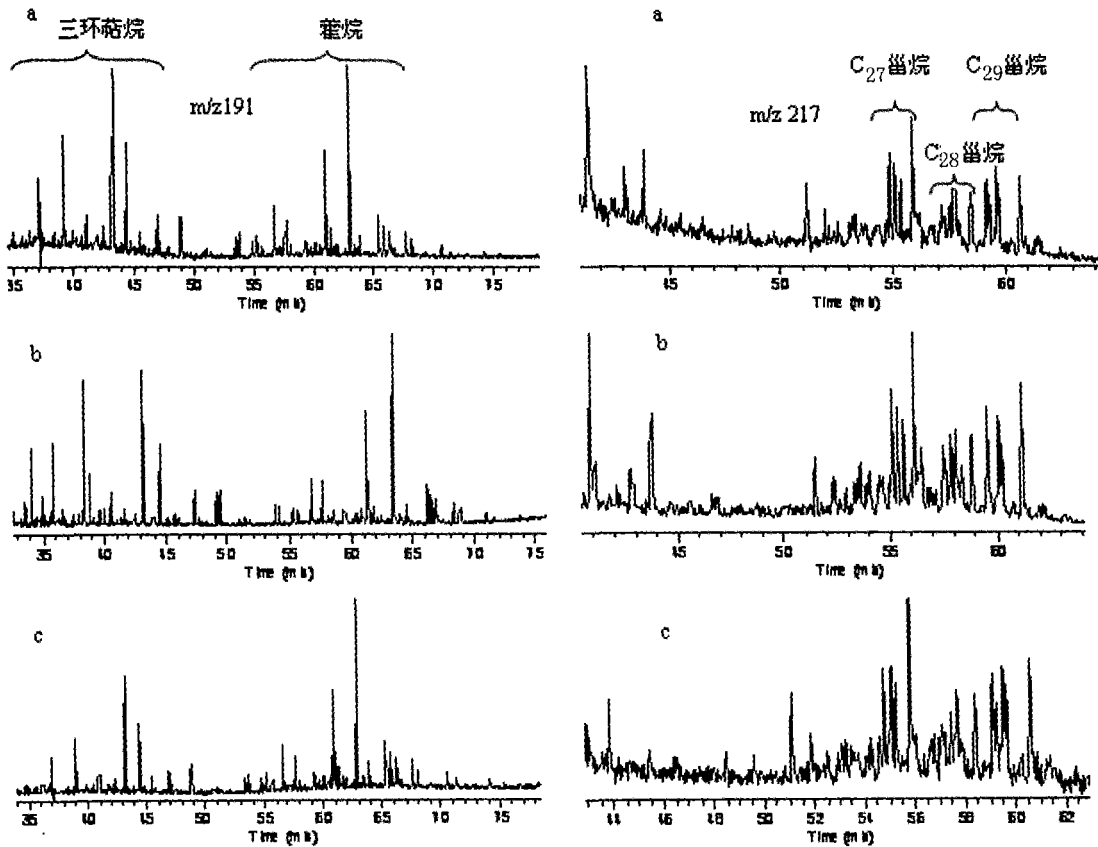


图 1 南沱冰碛层中的三环、五环萜烷和甾烷系列质量色谱图 ($m/z191$ 和 $m/z217$)

(样品来源 a 湖南田坪; b 湖南安化; c 湖南留茶坡)

Fig. 1 $m/z191$ and $m/z217$ mass chromatograms showing the tricyclic, pentacyclic terpanes and steranes detected from diamictite in the Nantuo tillite (samples sources a Tianping section, Hunan; b Anhua section, Hunan; c Liuchapo section, Hunan)

3 薄冰 (Thin Ice-Sheet) 假说

Schrag 和 Hoffman 认为光合生物可以赤道地区厚度较薄的冰盖下生存^[6], McKay 利用“能量平衡方程”(energy balance equation), Donnadieu 利用“通用冰川作用模型”(general circulation model)对“雪球”时期的气候进行了模拟,预测在赤道地区的气温足够高,能使冰盖厚度小于 10m,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^[21, 22]。

“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。笔者认为,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强烈缺氧的环境,对生物的生长不利。

4 “雪球”时期前后的生命

生命的起源可以追溯到“雪球”时期以前的太古宙,约在 38 亿年前的太古宙,地球上以原核生物为标志的原始生命就可能开始存在^[23, 24]。Summons 等^[25], Pratt 等^[26], Peng 等^[27], Wu 等^[28]分别在北澳大利亚的麦克阿瑟 (McArthur) 盆地、北美中大陆断裂系 (Mid-continent Rift System)、华北蓟县剖面 and 张家口庞家剖面的中元古界地层检测出大量可靠的生物标志化合物,包括甾烷、藿烷以及长链的类异戊二烯烃等,其中甾烷类生物标志化合物的出现表明真核生物大约在 17 亿年前可能就已存在。在紧邻新元古代冰期前的地层中同样发现大量生物存在的地球化学证据,如 Summons 等^[29, 30]分别在北美亚利桑那州大峡谷约 0.85Ga 地层中,澳大利亚 Amadeus 盆地 Bitter Springs 组 (约 0.85Ma) 和 Pertatataka 组 (约 0.6Ga) 地

层中, Wang 和 Simonet^[31, 32] 在华北东燕山区下马岭组沥青砂岩 (~ 0.76Ga) 中发现大量的甾萜类生物标志化合物。

关于冰期末至早寒武世沉积物中古生物化石和生物标志化合物的研究就不胜枚举了, 例如著名的埃迪卡拉生物群 (Ediacara 5.4 亿年) 就是紧接新元古代最后一次冰期而发生的一次以大型多细胞动物为特征的生命大爆发事件^[33], 到早寒武世以澄江生物群 (Chengjia Biota 5.3 亿年)^[34] 为代表的寒武纪生命大爆发事件。有证据表明光合真核藻类生在雪球前后的时期都存在^[20, 35]。Wang 等从扬子区晚新元古代一早寒武世剖面江口和南沱冰期沉积物和冰期前后沉积物有机质中都检测出丰富的甾萜类生物标志化合物^[20]。Knoll 的研究也表明, 约 7 亿年前演化的细菌和真核藻类经过新元古代末的冰期仍存活下来^[35]。

所以, 分子地球化学证据表明, 生命活动在“雪球”时期受到了严重影响, 但并没有完全停止, 这也是众多反对“硬壳雪球”假说的最重要理由。

5 问题与探索

“雪球”假说对新元古代末期的地质记录做出了比较合理的解释, 尽管支持者以不能解释条带磁铁矿、盖帽碳酸盐岩等地质现象为由, 对“薄冰”假说、“半熔融雪球”假说进行反驳, 但“雪球”假说不能对雪球时期生命的存在和演化环境提出合理的解释, 其所谓的“热点”或者“避难所”等观点也没有直接的证据。

“半融雪球”和“薄冰”假说中的薄冰和无冰水体, 似乎对生命的生存和演化较为有利, 该模型也得到了模拟结果和分子地球化学证据的证实, 但对一些地质现象的解释还缺乏说服力, 这也是 Hoffman 等人反对这种观点的主要依据。

笔者认为, 关于“雪球”时期生物生存演化的环境研究应该作好以下几方面的工作: 一是进行全球性“雪球”时期地质记录的对比与整合。以条带状铁矿为例, Kennedy 认为分布并不均匀, 因此并不是新元古代雪球沉积都普遍具有的特征, 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^[36]。笔者认为在某些地区, 在某些时间段内, 海洋可能是与大气相通的, 从而溶解一定的氧气, 也说明无冰水体在地区上和时间内分布的不均匀性。再如盖帽碳酸盐岩的分布和同位素的偏移现象主要集

中在澳大利亚、那米比亚和中国等一些地区, 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。

二是以碳酸盐岩中的碳和沉积有机质碳同位素为手段, 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、生物圈和大气圈的相互作用来“雪球”时期生物生存演化环境的变化特征。

三是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, 并伴随着 DNA 的重组, 并在其后截然不同的环境中重新繁盛起来^[37, 38]。“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 和 Schrag 所描述的那样, 在 100 多年的时间内, 地球从低于 -50°C 的雪球, 突变为 +50°C 以上的炽热的“热球”, 并形象地称之为“冰冻—煎烤事件” (freeze-thaw event)^[39], 对生物的演化而言, “雪球”事件就如一个瓶颈一样, 只要冲过了这个瓶颈, 就爆发式演化起来 (bottle neck and flush)^[37]。

参考文献 (References)

- 1 Kerr A R. An appealing snowball earth that's still hard to swallow. *Science*, 2000, 287: 1734~1736
- 2 Budýko M I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 1969, 21: 611~619
- 3 Kirschvink J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The Snowball Earth. In: Schopf J W, Klein C, eds. *The Proterozoic Biosphere*. New York: Cambridge University Press, 1992, 51~52
- 4 Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 1998, 281: 1342~1346
- 5 Runnegar B. Loophole for snowball earth. *Nature*, 2000, 405: 403~404
- 6 Schrag D P, Hoffman P F. Life, geology and snowball earth, and the response of Hyde, et al. *Nature*, 2001, 409: 306
- 7 Warren S G, Brandt R E, Grenfell C T, et al. Snowball Earth: Ice thickness on the tropical ocean. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C10): 3167
- 8 Rise Project Group. East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments. *Science*, 1980, 207: 1421~1433
- 9 Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. Neoproterozoic Snowball Earth simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Science*, 2000, 405: 425~429
- 10 Baum S K, Crowley T J. GCM response to late Precambrian (~590Ma) ice-covered continents. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4): 583~586

- 11 Crowley T J, Hyde W T, Peltier W R. CO₂ levels required for deglaciation of a “Near-Snowball” Earth. *Geophysical Research Letters* 2001
- 12 Jenkins G S, Smith S R. GCM simulations of snowball earth conditions during the late Proterozoic. *Geophysical Research Letters* 1999 26: 2263~ 2266
- 13 Condon A R, Prave A R, Benn D I. Neoproterozoic glacial–rainout observations and implications. *Geology* 2002, 30: 35~ 38
- 14 Chandler M A, Sohl L E. Climate forcings and the initiation of low-latitude ice sheets during the Neoproterozoic Varanger glacial interval. *Journal of Geophysical Research* 2000, D105: 20737~ 20756
- 15 McMechan M E, Vreeland diamictites–Neoproterozoic glaciogenic slope deposits, Rocky Mountains, Northeast British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 2000 48: 246~ 261
- 16 Chiriac-Blick E N, Sohl L E, Kennedy M J. Considering a Neoproterozoic snowball earth. *Science* 1999 284: 1087a
- 17 Amaid E. Giant cross-beds in the Neoproterozoic port A skaig formation, Scotland: implications for snowball earth. *Sedimentary Geology* 2004 165: 155~ 174
- 18 张启锐, 储雪蕾, 张同钢, 等. 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. *高校地质学报*, 2002, 8(4): 473~ 481 [Zhang Qirui, Chu Xuelei, Zhang Tonggang *et al.* From global glaciation to “snowball earth”: recent research on the Neoproterozoic glaciation event. *Geological Journal of China Universities* 2002, 8(4): 473~ 481]
- 19 Zhang Qirui, Piper J D A. Palaeomagnetic study of Neoproterozoic glacial rocks of the Yangzi Block: Paleolatitude and configuration of South China in the late Proterozoic Supercontinent. *Precambrian Research* 1997, 85: 173~ 199
- 20 Wang Tieguan, Wang Chunjiang, Zhang Weibiao *et al.* Initial organic geochemical investigation on late Neoproterozoic–Early Cambrian sediments in Yangtze region, China. *Progress in Natural Science* 2003, 13(12): 936~ 941
- 21 McKay C P. Thickness of tropical ice and photosynthesis on a snowball earth. *Geophysical Research Letter* 2000 27: 2153~ 2156
- 22 Donnadieu Y, Fluteau E, Rostein G *et al.* Is there a conflict between the Neoproterozoic glacial deposits and the snowball earth interpretation: an improved understanding with numerical modeling. *Earth and Planetary Science Letters* 2003, 208: 101~ 112
- 23 Mojzsis S J, Arrhenius G, Mckeegeen K D *et al.* Evidence for life on Earth before 3.8 billion year ago. *Nature* 1996 384: 55~ 59
- 24 Schopf J W, Paker B. Early Archean (3.3~ 3.5 billion-year-old) microfossils from the Warrawoona Group, Australia. *Science* 1987, 237: 70~ 73
- 25 Summons R E, Powell T G, Boreham G J. Petroleum geology and geochemistry of the middle Proterozoic McArthur Basin, Northern Australia: Composition of extractable hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1988 52: 1747~ 1763
- 26 Pratt L M, Summons R E, Hieshin G B. Sterane and triterpane biomarkers in the Precambrian Nonesuch formation, North American Midcontinent Rift. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1991, 55: 911~ 916
- 27 Peng P A, Sheng G Y, Fu J M *et al.* Biological markers in 1.7 billion year old rock from the Tuanshanzi Formation, Jixian strata section, North China. *Organic geochemistry* 1998, 29: 1321~ 1329
- 28 吴庆余, 刘志礼, 盛国英, 等. 前寒武纪富藻礁石层中的生物标志化合物. 见: 中国科学院地球化学研究所有机地球化学实验室研究年报(生物标志物和干酪根). 贵阳: 贵州人民出版社, 1986 [Wu Qingyu, Liu Zhili, Sheng Guoying *et al.* Biomarkers in chert beds enriched in algae of Precambrian. In: *Annual Research Report of Organic Geochemical Key Laboratory, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (Biomarkers and Kerogen)*. Guiyang: The Guizhou People's Press, 1986]
- 29 Summons R E, Boreham G J, Eglinton G *et al.* Distinctive hydrocarbon biomarkers from fossiliferous sediments of the late proterozoic Walcott member, Chuar Group, Grand canyon, U. S. A. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1988, 52: 2625~ 2637
- 30 Summons R E, Powell T G. Petroleum source rocks of the Amadeus Basin. In: Korsch R J, Kennard J M, eds. *Geological and Geophysical Studies in the Amadeus Basin*. Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin, 1991, 236: 511~ 524
- 31 Wang Tieguan. A novel tricyclic terpane biomarker series in the Upper Proterozoic bituminous sandstone, eastern Yanshan region. *Science in China (series B)*, 1990, 34(4): 479~ 489
- 32 Wang T G, Simoneit B R T. Tricyclic terpanes in Precambrian bituminous sandstones from the eastern Yanshan region, North China. *Chemical Geology* 1995 25: 341~ 351
- 33 Hoffman H J, Narbonne G M, Aitken J D. Ediacaran remains from intertillite beds in northwest Canada. *Geology* 1998 18: 1199~ 1202
- 34 陈均远, 周桂琴, 朱茂炎, 等. 澄江生物群—寒武纪生命大爆发的见证. 台中: 台湾国立自然博物馆出版社, 1996 [Chen Junyuan, Zhou Guiqin, Zhu Maoyan *et al.* *Chengjiang biotas—The Testimony of the Cambrian Explosion*. Taizhong: Taiwan Nature and Science Museum Press, 1996]
- 35 Knoll A H. The early evolution of eukaryotes: A geological perspective. *Science* 1985, 227: 57~ 59
- 36 Kennedy M J, Runnegar B, Prave A R, Hoffman K H, Arthur M A. Two or four Neoproterozoic glaciations? *Geology* 1998 26: 1059~ 1063
- 37 Hoffman P F. The break-up of Rodinia: birth of Gondwana, true polar wander and the snowball earth. *Journal of African Earth Sciences* 1999, 28(1): 17~ 33
- 38 Pennisi E. How the genome readies itself for evolution. *Science* 1998 281: 1131~ 1134
- 39 Hoffman P F, Schrag D P. Snowball Earth. *Scientific American* 2000, 282: 62~ 75

“Snowball Earth” Hypothesis and the Palaeoenvironment for Life Evolution during the Late Neoproterozoic

LIM E-jun^{1,2} WANG Tie-guan^{1,2} WANG Chun-jiang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Education Ministry, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. Earth Science and Information College, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract During the Neoproterozoic, earth suffered through at least two globe-engulfing ice age. Researchers proposed “Snowball earth” hypothesis to explain a series of puzzling Neoproterozoic sedimentary recordings. This hypothesis has become an ancient widow for the study of global glaciation and bio-radiation aftermath. Other researchers, however, do not agree that the earth has been completely ice-covered. They proposed alternative hypotheses, such as “Slushball/ Semifrozen Earth”, and “Thin-ice” models. Although, each hypothesis cannot explain all the geological and geochemical recordings, more and more evidence, especially, molecular organic geochemical and biological evidences show that the ocean was not entirely ice-covered during “Snowball Earth” age. Thin ice sheets or open water zones remained in tropical areas. The open water zone is essential for the survival and evolution of photosynthetic organisms, which would make a significant impact on the “Cambrian Bio-radiation” and the evolution of life on the earth.

Key words Neoproterozoic, “Snowball Earth”, Cambrian Bio-radiation, photosynthetic organism, open water