

新元古代的“雪球地球”

储雪蕾^{1,2}

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院 矿物资源研究重点实验室, 北京 100029

摘 要:“雪球地球”假说的提出解释了一些新元古代冰川现象,如低纬度和低海拔冰川沉积、帽碳酸盐岩、负的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移和 BIF 铁矿等现象。尽管有不同的假说与解释,但“雪球地球”最为流行。“雪球地球”事件被认为起因于地球系统的变化,如 Rodinia 超大陆的裂解、超级地幔柱的活动及古地磁真极的漂移等。“雪球地球”的极端气候环境变化,促进了生命的演化,造成了寒武纪生物大爆发。

关 键 词:新元古代;冰川事件;雪球地球;古全球环境变化

中图分类号:P534.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2004)03-0233-06

1987 年, J. L. Kirschvink 等研究了澳大利亚 Elatina 组中一块粉红色韵律发育的层状粉砂岩后,证实它属于新元古代冰期沉积于赤道附近浅海环境的 Elatina 组细砂岩,这意味着新元古代的冰川曾经到达过热带地区的海平面^[1]。反复的检测也证实了这个结论^[2~4]。于是,人们重新注目新元古代的冰川作用。D. A. D. Evans^[5]研究了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后指出,许多冰成岩石出现在纬度 10° 以内的赤道附近,甚至没有超出纬度 60°。

新元古代的冰川沉积物与显生宙的冰川沉积物的岩性很相近,但分布和成因模式却与显生宙不同。新元古代晚期冰川沉积物广泛分布于各大陆,往往被帽碳酸盐岩 (cap carbonate, 主要是白云岩) 直接覆盖,没有明显的沉积间断。这意味着冰期之后的气候突然转暖^[6~8]。帽碳酸盐岩长期被作为新元古代冰期地层及冰期地层区域对比的标志^[9,10]。

1 “雪球地球”假说

1992 年, J. L. Kirschvink^[11] 首次提出新元古代曾经出现几次“雪球地球”事件,用此来解释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。他指出,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,这种情况不寻常,在地球随后的历史上再也没有出现过。他认为这种地理条件的响应就是亚热带地区的反射率极大

的提高,云层不再重要;高、中纬度形成的冰川使海平面降低,使部分大陆架和内陆海露出海平面,陆地面积增加,进一步提高了地球的反射率;同时,热带地区大陆面积的增加加速了硅酸岩的风化,大气中 CO_2 浓度降低导致地表温度进一步下降,冰盖反射的结果最终使气候不稳定,使全球的海洋都冰冻。

冰反射引发的大灾难在其它星球上也发生过,它是持久的、不可逆转的。然而,地球能够从“雪球地球”返回是有“救世主”的。这“救世主”就是板块构造驱动的长期碳循环 (洋中脊、岛弧火山释放的 CO_2) 使大气温室气体含量不断增加,而极端的气候使生物初级产率和有机碳的埋藏几乎终止^[11~13]。

真正引起人们重视的还是 1998 年 P. F. Hoffman 等^[14]重提“雪球地球”假说。他们根据南部非洲纳米比亚以及世界其他地区直接覆盖在新元古代冰川沉积之上帽碳酸盐岩的碳同位素研究指出,各地一致的碳同位素负异常意味着地表海洋的生物产率曾中断数百万年。他们认为生物产率的中断能够用全球性冰川作用 (即“雪球地球”) 解释,只有当海底火山的去气造成大气中 CO_2 高达现在的 350 倍时,地球上出现极端的温室环境,冰川才快速结束。大气 CO_2 转移至海洋,在温暖的地表海洋中生成碳酸钙沉淀,形成全球都出现的帽碳酸盐岩。显然,与显生宙的几次大冰期不同,新元古代的冰川扩展到赤道附近。为什么会在前寒武纪末期产生几次这样的全球性冰期呢? P. F. Hoffman 认为这与新元古代

晚期聚集在赤道附近的 Rodinia 超大陆的裂解有关:超大陆的裂解使大陆边缘海面积迅速增加,大大增加了边缘海生物初级产率和有机碳埋藏量,造成大气中的“温室”气体 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”^[15,16]。按照这一假说,聚集在赤道周围的超大陆解体是引发那次“灾变”的起因。当时的海洋都被冰冻,冰盖推进到赤道,平均厚约 1 km,全球温度骤降至大约 -50。每次冰期持续大约 10 Ma,海底火山释放出的 CO_2 积累在冰盖之下。一旦冰盖破裂, CO_2 便进入到大气,就足以产生极端的“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^[17]。“雪球地球”假说重新引起人们对新元古代冰期成因的兴趣,而重新审视那个时期冰川作用产生的沉积学、地层学和地球化学记录,去检验它正确与否^[18]。

2 “雪球地球”的检验

J. L. Kirschvink^[11]认为“雪球地球”假说有待地质事实的检验,归纳起来有三个方面:1)新元古代各地出现的冰成沉积岩至少是同时形成的;2)广泛分布的记录了气候波动(从冰室转变为温室)的地层岩性应该相同,反映了全球范围的气候变化;3)严酷的冰冻切断了全球大气与海洋的交换,海水会滞流、缺氧, Fe^{2+} 富集于深部海水;一旦冰期结束, Fe^{2+} 便随上升洋流进入表层水,氧化而生成 BIF 铁矿。P. F. Hoffman 等人^[17,19]认为这正是“雪球地球”假说的优势,它能够圆满解释新元古代冰期及其之后特有的地质现象。

(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^[5]和生物地层学^[20]条件,而只能以碳同位素地层学为主要手段作对比,确定它们的同时性。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^[21,22]。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^[21]。

新元古代晚期海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化超过 10 ‰^[23],明显地大于地质历史上其它(如显生宙或晚新元古代之前)时期的变化幅度^[24,25]。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大变化出现于新元古代的冰川沉积,表现为冰期前富 ^{13}C (碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于 5 ‰)和冰期后的贫 ^{13}C (碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于 0 ‰)。帽碳酸盐岩普遍贫 ^{13}C ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近地幔的 -6 ± 1 ‰。冰期前后出现了 10 ‰~15 ‰的碳同位素负漂移。新元古代晚期冰期事件的碳同位素记录在各大陆(非洲、澳

大利亚、亚洲、北美洲等)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,也表明冰川事件的同时性。

P. F. Hoffman^[15]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 超大陆的裂解:裂解大大提高了生物初级产率,而冰期生物产率几乎降至零,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 ± 1 ‰。

(2) 帽碳酸盐岩:绝大多数的新元古代冰川沉积物顶部上都覆盖有连续成层的白云岩(灰岩很少),厚度从几米到几十米,称为帽碳酸盐岩^[19,26~32]。它与下伏的冰成沉积岩在岩性上差别非常之大,看起来是连续沉积的,几乎没有再造作用和显著沉积间断的证据^[19,26,33]。帽碳酸盐岩是海侵的产物,它的广泛存在意味着新元古代冰期前后气候发生了突变,从冰川覆盖到热带,而且在全球同时发生在^[26,34]。

有些地区在帽碳酸盐岩之上会出现结晶扇(crystal fan),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^[28,30~32]。尽管单个结晶扇很小(不及 1cm),但胶结在一起,堆积厚度达 50 m。形成于海底的结晶扇表明海底水体达到很高程度的碳酸盐过饱和^[30],其生长习性暗示它是快速生长的^[35]。P. F. Hoffman 等^[19]认为这正反映了极端温室气候下大陆的强烈化学风化造成大量碱质和碳酸盐流入海洋,使海底碳酸盐过饱和,文石快速结晶与堆积。

(3) BIF(条带状铁建造)铁矿:BIF 是前寒武纪早期十分发育的一种铁矿类型,三价铁氧化物和燧石呈相间的条带沉积,大面积出现,与海底火山和热液的通道没有直接关系。然而,在大约 1850 Ma 以后,它在地球上消失了^[36]。这被认为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^[37],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^[38,39]。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 硫酸盐还原的速度超过输入到海洋的活化铁(可以形成 FeS_2 的铁)的速度时,BIF 铁矿才消失^[40]。此后,大约 10 亿年间地球上 BIF 铁矿销声匿迹。

在新元古代冰期,加拿大^[41,42]、巴西^[43,44]、纳米比亚、南非^[45]、澳大利亚^[46]和我国扬子地区又出

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。

3 争论与进展

(1) 低纬度冰川的成因:J. L. Kirschvink^[11]和P. F. Hoffman等人^[14]根据冰川的日光反射率理论提出“雪球地球”假说。他们认为,一旦两极极地的冰盖推进到纬度30°左右时,太阳辐射到地球的能量大部分被反射出去。制衡冰川推进的太阳辐射能失去了平衡,冰川就会迅速覆盖地球,包括低纬度大陆与海洋。极地冰川推进到中低纬度(小于纬度30°)的驱动力是温室 CO_2 气体的迅速消耗。只有大陆化学风化与淋滤作用异常剧烈时,大气圈 CO_2 浓度才会迅速下降。这一情景最有利的大地构造格局是各大陆都在赤道附近,即新元古代业已形成的超大陆Rodinia在赤道附近发生裂解的时候。看起来,以日光反射率为基础的“雪球地球”假说似乎很好地解释了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就再也没有出现“雪球地球”。

此外,在发现澳大利亚Elatina组的低纬度冰川时就有另一种解释,认为地球自转与公转轨道之间夹角的变化可能产生的气候变异导致晚前寒武纪的低纬度冰川。当地球自转与黄道面之间倾角大于54°时,赤道附近的年平均温度就要低于极地温度^[47~50],就可能出现低纬度冰川^[1],这就是澳大利亚Elatina组出现低纬度、低海拔冰成沉积岩层序^[51,52]的原因。G. E. Williams^[51]认为地球只是在600 Ma以后由于转速降低自转倾角急剧减小,才导致自转倾角稳定在小的倾角,这样的气候季节变化适宜于生物生活。可是,在较大倾角下赤道附近仍会有季节变化,冰川难以保存^[53]。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,如帽碳酸盐岩沉积等^[19,54,55];600 Ma以后地球自转速度减慢也只是一种推测^[56,57],缺乏科学依据。目前看来,这种假说面临的困难比“雪球地球”假说还要多些。

(2) “雪球地球”的扳机:启动“雪球地球”的扳机是什么?国际上公认的新元古代冰期有两期,分别发生于730 Ma左右的Sturtian冰期和在600 Ma前后的Marinoan冰期;各大陆都有其沉积记录,是公认的两次“雪球地球”事件的证据。Sturtian冰期与Rodinia超大陆的裂解同时发生,启动了超大陆的裂

解并伴随有强烈的岩浆事件。Y. Godd  is等^[58]根据现代玄武岩风化规律和气候模型计算得知,只要在赤道附近存在面积为 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的玄武岩省,其风化作用就足以迅速消耗大气中的 CO_2 ,扳动“雪球地球”的扳机。一般来讲,玄武岩容易化学风化,是花岗岩风化速度的8倍左右。他们认为,Laurentian大陆在780 Ma时期由于超级地幔柱的活动,形成了一个大火成岩省,位置恰好在赤道地区。玄武岩如果持续风化50 Ma,所消耗的全球大气 CO_2 就能达到启动“雪球地球”的 CO_2 浓度临界值。

究竟是什么机制造成大气 CO_2 浓度的迅速降低?它与全球构造格局有什么关系?Y. Donnadieu等^[59]又进一步采用气候-地球化学耦合模型模拟Rodinia裂解的大陆位置与大气 CO_2 消耗的关系。结果表明,大陆剧烈的风化作用会造成大气 CO_2 浓度的降低,只有裂解的大陆都在赤道附近,这样的构造格局才能使大气的 CO_2 浓度减少到 1320×10^{-6} ,使全球气候由“温室”转变为“冰室”。他们认为,Marinoan冰期的“雪球地球”事件的起因应该与Sturtian冰期时相似,当时分离的大陆也在赤道附近,这就是“雪球地球”的起因。大约590 Ma以后,相当一部分大陆漂离赤道地区,以后地球上就再也没有发生“雪球地球”事件。

最新的古地磁与年代学的研究表明,大约800 Ma时Rodinia超大陆可能从极地一直延伸到赤道^[60],根本不可能具有扳动“雪球地球”扳机的可能。Z. X. Li等人^[60]认为是随后的超级地幔柱活动造成了真极漂移(TPW),才使裂解的Rodinia超大陆在750 Ma左右都围绕在赤道附近。原南北展布的Rodinia超大陆其极地附近的大陆下地幔柱活动,造成TPW漂移。从800 Ma到750 Ma左右,TPW围绕格陵兰附近的旋转轴,经历了近90°的快速旋转,才造成Rodinia超大陆都到了赤道附近。因此,他们认为导致Sturtian时期的“雪球地球”与超级地幔柱的活动所引起的TPW快速漂移有关。

(3) 帽碳酸盐岩、“甲烷渗漏”假说与生物大爆发:P. F. Hoffman等人^[14,15]认为帽碳酸盐岩的形成是由于“雪球地球”期间切断了大气与海洋的物质交换,持续的海底火山活动使地幔去气排出的 CO_2 在冰雪覆盖的海洋中积累。一旦冰盖破裂,持续大约10 Ma积累的 CO_2 足以使地球表面的气候由极端的“冰室”转变为极端的“温室”。大陆剧烈的化学风化携带大量碱质进入海洋,从而形成大面积、快速沉淀的帽碳酸盐岩,帽碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也普遍与地幔的碳同位素组成($-5\text{‰} \sim -7\text{‰}$)接近。

对帽碳酸盐岩的成因与负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的另一个解释是 M. J. Kennedy 等^[61]提出的。他们认为新元古代的帽碳酸盐岩一般比较薄(2 m 以下),岩性比较均一,具有微细纹理,主要由微晶白云石组成;它覆盖在陆相和海相冰成和与冰川作用有关的沉积物之上;底部界线分明,局部见有剥蚀作用;上界为浓缩层或轻微递变层,含有经成岩作用改造的结核或胶结的碳酸盐岩层,并向上变薄过渡为页岩。他们认为这样的岩石特征表明帽碳酸盐形成于较深(可深达数百米)的海底,是冰期后海平面上升和海进的记录。局部的大量文石假晶海底结晶扇是过饱和海水中快速沉积的产物。帽碳酸盐具有两种明显不同且怪异的沉积相,最底部往往有一层层理形态多变、成分复杂的碳酸盐岩层,很难给出令人满意的解释。M. J. Kennedy 等^[61]为此提出了“甲烷渗漏(methane seeps)”假说。他们认为这样的沉积与陆地永久冻土层中天然气水合物变得不稳定有关。冰期之后气候变暖,原来广泛出露的大陆架和内部盆地被海水淹没,致使大面积的永久冻土层被海水淹没,造成天然气水合物不稳定,甲烷逸出、氧化,形成帽碳酸盐岩。主要证据:1)帽碳酸盐岩与众不同的组构与冷甲烷渗漏产生的碳酸盐岩相似,且成为帽碳酸盐岩的共同特征;2)碳同位素漂移随时间的变化显示是一个同位素亏损的碳突然加入到海洋-大气系统;3)质量守恒估计由水合物不稳定所释放的碳的数量和产生的帽碳酸盐岩的数量是吻合的。

“甲烷渗漏”假说的提出无疑为直接覆盖在冰成岩石之上的帽碳酸盐岩提供了又一种解释,但也同样遭遇到怀疑与质询。R. S. Shapiro^[62]从现有的或保留下来的碳氢化合物成因的碳酸盐岩的接触关系、岩相组构和地球化学等方面分析,对 M. J. Kennedy 等^[61]的假说表示怀疑。他指出如果是碳氢化合物成因的碳酸盐岩为什么没有在各地的帽碳酸盐岩中发现任何沥青质?他认为地球化学的证据可能更重要,碳氢化合物成因的碳酸盐岩特别亏损 ^{13}C ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以从-20‰变化到-100‰。一年之后,G. Jiang 等人^[63]拿出了第一个新元古代冰期之后帽碳酸盐岩“甲烷渗漏”成因的稳定同位素证据。他们在中国三峡地区震旦系陡山沱组底部的帽碳酸盐岩段检测到高达-41‰的碳同位素组成。同位素特征结合岩相组构,包括草莓状黄铁矿、重晶石的出现都证实有“甲烷渗漏”。越来越多的事实表明,天然气水合物在全球碳循环与气候变化中担当着重要角色,有趣的是新元古代冰期结束时的“甲烷渗漏”究竟与后生动物的“诞生”有着什么样的关系?

这方面的研究格外引人注目。

J. L. Kirschvink 和 T. D. Raub^[64]认为甲烷的“熔化”点燃了寒武纪生物大爆发。从 Vendian 到寒武纪期间 TPW 的解释表明,那一时期板块运动异乎寻常地快,碳同位素频繁、高幅振荡,使显生宙数亿年的变化显得相形见绌。然而,这些看似无关的事件是密切相关的。Rodinia 超大陆的裂解,造成赤道附近的大陆边缘和陆棚-斜坡相沉积了大量贫 ^{13}C 的有机碳,使间冰期沉积的无机碳明显富集 ^{13}C 。TPW 的漂移使富有机碳的沉积物运移到高纬度,使生物成因的甲烷作为天然气水合物层或永久冻土贮存下来。Vendian 晚期持续的沉积增加了更多的水合物与天然气储备,而且形成深部的稳定高压甲烷贮藏。TPW 的突变带这些气藏回到赤道附近,变暖而引起的贮存环境的变化,使甲烷不时地释放出来,产生脉冲式的“温室”气体排放,使大气温室气体浓度突然增高,致使全球气候也频繁出现高温。温度与生物多样性密切相关。在高温下新陈代谢的生化反应动力学加快了生物的世代交替,并且使无脊椎动物丰富、繁盛。随着海侵甲烷的释放出现反复的短暂高温和 TPW 变化造成的全球洋流的改变,势必增大多样性,产生后生动物的辐射。

4 小 结

“雪球地球”事件的发生与晚前寒武纪整个地球系统的重大变化有着十分密切的关系,它绝不是一个孤立的冰川事件。与整个显生宙的冰川作用不同,新元古代冰川推进到赤道及其附近的海面。尽管对这一罕见冰川现象有不同的假说与解释,但是越来越多研究者把它们与“雪球地球”联系起来,与 Rodinia 超大陆的裂解、超级地幔柱的活动及古地磁真极漂移一起来考虑。同样,在新元古代“雪球地球”前后,大气圈氧含量也经历了一次明显的增加,原已持续了近 1 Ga 深部的硫化海洋转变为氧化,海水的碳、硫和锆同位素记录都曾发生地质历史上最大幅度的变化。就在“雪球地球”之后不久,地球上出现了多细胞的后生动物,继而进入寒武纪的“生物大爆发”。这一系列重大地质事件表明它们是密切相关的。从这个角度来看,新元古代的“雪球地球”起因于那一时期地球系统的转变。

参考文献(Reference):

- [1] Sumner D Y, Kirschvink J L, Runnegar B N. Soft-sediment paleomagnetic fold tests of late Precambrian glaciogenic sediments [J]. *Eos*, 1987, 68: 1251.

- [2] Schmidt P W, Williams G E, Embleton B J J. Low palaeolatitude of Late Proterozoic glaciation: Early timing of remanence in haematite of the Elatina Formation, South Australia[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 105: 355 - 367.
- [3] Schmidt P W, Williams G E. The Neoproterozoic climatic paradox: Equatorial paleolatitude for Marinoan glaciation near sea level in South Australia[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 134: 107 - 124.
- [4] Sohl L E, Christie-Blick N, Kent D V. 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. Am. Bull.*, 1999, 111: 1120 - 1139.
- [5] Evans D A D. Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox[J]. *Am. J. Sci.*, 2000, 300: 347 - 433.
- [6] Mawson D. The Elatina glaciation[J]. *Trans. R. Soc. S. Aust.*, 1949, 73: 117 - 121.
- [7] Plumb K A. Late Proterozoic (Adelaidean) tillites of the Kimberley-Victoria River region, Western Australia and Northern Territory[A]. Hambrey M J, Harland W B eds. *Earth's Pre-Pleistocene glacial record*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 504 - 514.
- [8] Myrow P M, Kaufman A J. A newly discovered cap carbonate above Varangerage glacial deposits in Newfoundland[J]. *Can. J. Sed. Res.*, 1999, 69: 784 - 793.
- [9] Dunn P R, Thomson B P, Rankama K. Late Precambrian glaciation in Australia as a stratigraphic boundary[J]. *Nature*, 1971, 231: 498 - 502.
- [10] Kennedy M J, Runnegar B, Prave A R, Hoffmann K-H, Arthur M A. Two or four Neoproterozoic glaciations?[J]. *Geology*, 1998, 26: 1059 - 1063.
- [11] Kirschvink J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball earth[A]. Schopf J W, Klein Ceds. *The Proterozoic biosphere*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 51 - 52.
- [12] Walker J C G, Hays P B, Kasting J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature[J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86: 9776 - 9782.
- [13] Caldeira K, Kasting J F. Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds[J]. *Nature*, 1992, 359: 226 - 228.
- [14] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Schrag D P. A Neoproterozoic snowball Earth[J]. *Science*, 1998, 281: 1342 - 1346.
- [15] Hoffman P F. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth[J]. *J. Afr. Earth Sci.*, 1999, 28: 17 - 33.
- [16] Schrag D P, Berner R A, Hoffman P F. On the initiation of a snowball Earth[J]. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 2002, 3: 1 - 21.
- [17] Hoffman P F, Schrag D P. Snowball Earth[J]. *Sci. Am.*, 2000, 282: 62 - 75.
- [18] Eyles N, Januszcak N. 'Zipper-rift': A tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma[J]. *Earth Sci. Rev.*, 2004, 65: 1 - 73.
- [19] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P. Comings and goings of global glaciations on a Neoproterozoic tropical platform in Namibia[J]. *GSA Today*, 1998, 8: 1 - 9.
- [20] Knoll A H. Learning to tell Neoproterozoic time[J]. *Precambrian Res.*, 2000, 100: 3 - 20.
- [21] Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebner S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chem. Geol.*, 1999, 161: 59 - 88.
- [22] Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, Lohman K C, Robison R A, Chang W T, Peng S, Ergaliev E K, Runnegar B. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 2000, 162: 211 - 223.
- [23] Jacobsen S B, Kaufman A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater[J]. *Chem. Geol.*, 1999, 161: 37 - 57.
- [24] Brasier M D, Lindsay J F. A billion years of environmental stability and the emergence of eukaryotes: New data from northern Australia[J]. *Geology*, 1998, 26: 555 - 558.
- [25] Kah L C, Lyons T W, Chesley J T. Geochemistry of a 1.2 Ga carbonate-evaporite succession, northern Baffin and Bylot Islands: Implications for Mesoproterozoic marine evolution[J]. *Precambrian Res.*, 2001, 111: 203 - 234.
- [26] Williams G E. Sedimentology, stable-isotope geochemistry and palaeoenvironment of dolostones capping late Precambrian glacial sequences in Australia[J]. *J. Geol. Soc. Australia*, 1979, 26: 377 - 386.
- [27] Fairchild I J, Hambrey M J. The Vendian succession of north-eastern Spitsbergen: Petrogenesis of a dolomite-tillite association[J]. *Precambrian Res.*, 1984, 26: 111 - 167.
- [28] Aitken J D. The Ice Brook Formation and Post-Rapitan, Late Proterozoic glaciation, Mackenzie Mountains, northwest Territories[J]. *Geol. Surv. Can. Bull.*, 1991, 404.
- [29] Brookfield M E. Problems in applying preservation, facies and sequence models to Sinian (Neoproterozoic) glacial sequences in Australia and Asia[J]. *Precambrian Res.*, 1994, 70: 113 - 143.
- [30] Grotzinger J P, Knoll A H. Anomalous carbonate precipitates: Is the Precambrian the key to the Permian?[J]. *Palaos*, 1995, 10: 578 - 596.
- [31] Kennedy M J. Stratigraphy, sedimentology, and isotope geochemistry of Australian Neoproterozoic postglacial cap dolostones: Deglaciation, $\delta^{13}\text{C}$ excursions, and carbonate precipitation[J]. *J. Sed. Res.*, 1996, 66: 1050 - 1064.
- [32] James N P, Narbonne G M, Kyser T K. Late Neoproterozoic cap carbonates: Mackenzie Mountains northwestern Canada: Precipitation and global glacial meltdown[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 2001, 38: 1229 - 1262.
- [33] Deynoux M. Periglacial polygonal structures and sand wedges in the late Precambrian glacial formations of the Taoudeni Basin in Adrar of Mauretania (West Africa)[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 1982, 39: 55 - 70.
- [34] Schermerhorn L J G. Late Precambrian mixtites: glacial and/or non-glacial?[J]. *Am. J. Sci.*, 1974, 274: 673 - 824.
- [35] Lasaga A C. Kinetic theory in the Earth sciences[M]. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- [36] Isley A E, Abbott D H. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 15,461 - 15,477.

- [37] Karhu J A, Holland H D. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen[J]. *Geology*, 1996, 24: 149 - 152.
- [38] Canfield D E, Habicht K S, Thamdrup B. The Archean sulfur cycle and the early history of atmospheric oxygen[J]. *Science*, 2000, 288: 658 - 661.
- [39] Farquhar J, Bao H, Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle[J]. *Science*, 2000, 289: 756 - 758.
- [40] Canfield D E. A new model for Proterozoic ocean chemistry[J]. *Nature*, 1998, 396: 450 - 453.
- [41] Young G M. Iron-formation and glaciogenic rocks of the Rapitan Group, Northwest Territories, Canada[J]. *Precambrian Res.*, 1976, 3: 137 - 158.
- [42] Klein C, Beukes N J. Sedimentology and geochemistry of the glaciogenic late Proterozoic Rapitan iron-formation in Canada[J]. *Econ. Geol.*, 1993, 84: 1733 - 1774.
- [43] Urban H, Stribny B, Lippolt H J. Iron and manganese deposits of the Urucum district, Mato Grosso do Sul, Brazil[J]. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 1375 - 1392.
- [44] Graf J L, O'Connor E A, van Leeuwen P. Rare earth element evidence of origin and depositional environment of Late Proterozoic ironstone beds and manganese-oxide deposits, SW Brazil and SE Bolivia[J]. *J. S. Am. Earth Sci.*, 1994, 7: 115 - 133.
- [45] Martin H. The Precambrian geology of South West Africa and Namaqualand[A]. *Precambrian Research Unit. University of Cape Town*[C]. South Africa, 1965.
- [46] Lottermoser B G, Ashley P M. Geochemistry, petrology and origin of Neoproterozoic ironstones in the eastern part of the Adelaide geosyncline, South Australia[J]. *Precambrian Res.*, 2000, 101: 49 - 67.
- [47] Williams G E. Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity[J]. *Geol. Mag.*, 1975, 112: 441 - 444.
- [48] Hunt B G. The impact of large variations of the Earth's obliquity on the climate[J]. *J. Meteor. Soc. Jpn*, 1982, 60: 309 - 318.
- [49] Oglesby R J, Ogg J G. The effect of large fluctuations in obliquity on climates of the late Proterozoic[J]. *Paleoclimates*, 1999, 2: 293 - 316.
- [50] Jenkins G S. 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.*, 2000, 105: 7357 - 7370.
- [51] Williams G E. History of the Earth's obliquity[J]. *Earth Sci. Rev.*, 1993, 34: 1 - 45.
- [52] Williams G E. Geological constraints on the Precambrian history of the Earth's rotation and the Moon's orbit[J]. *Rev. Geophys.*, 2000, 38: 37 - 59.
- [53] Hoffman P F, Maloof A C. Glaciation: the snowball theory still holds water[J]. *Nature*, 1999, 397: 384.
- [54] Hambrey M J, Harland W B. Earth's pre-pleistocene glacial record[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- [55] Narbonne G M, Aitken J D. Neoproterozoic of the Mackenzie Mountains, northwestern Canada[J]. *Precambrian Res.*, 1995, 73: 101 - 121.
- [56] Ito T, Masuda K, Hamano Y, Matsui T. Climate friction: A possible cause for secular drift of Earth's obliquity[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 15147 - 15161.
- [57] Pais M A, Le Mouél J L, Lambeck K, Poirier J P. Late Precambrian paradoxical glaciation and obliquity of the Earth - A discussion of dynamical constraints[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 174: 155 - 171.
- [58] Godderis Y, Donnadieu Y, Nédélec A, Dupré B, Dessert C, Grard A, Ramstein G, François L M. The sturtian 'snowball' glaciation: Fire and ice[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, 211: 1 - 12.
- [59] Donnadieu Y, Godderis Y, Ramstein G, Nédélec A, Meert J. A "snowball Earth" climate triggered by continental break-up through changes in runoff[J]. *Nature*, 2004, 428: 303 - 306.
- [60] Li Z X, Evans D A D, Zhang S. A 90° spin on Rodinia: Possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 220: 409 - 421.
- [61] 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.
- [62] Shapiro R S. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? Comment[J]. *Geology*, 2002, 30: 761.
- [63] Jiang G, Kennedy M J, Christie-Blick N. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates[J]. *Nature*, 2003, 426: 822 - 826.
- [64] Kirschvink J L, Raub T D. A methane fuse for the Cambrian explosion: Carbon cycles and true polar wander[J]. *C. R. Geoscience*, 2003, 335: 65 - 78.

“Snowball Earth” During the Neoproterozoic

CHU Xue-lei^{1,2}

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Key Lab. for Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: A hypothesis of “snowball Earth” has been presented to explain phenomena related to the Neoproterozoic glaciations, such as the low-latitude and low-altitude glacial deposits, cap carbonates, negative $\delta^{13}\text{C}$ shifts, BIF, and others. Even though there are several hypotheses or theories to discuss the Neoproterozoic glacial events, the “snowball Earth” hypothesis is still popular and predominant. The events of “snowball Earth” have been considered to initiate from changes in Earth's system, such as the break-up of Rodinia supercontinent, activity of superplume, and paleomagnetic TPW. The extreme climate arisen from “snowball Earth” may promote evolution of life and trigger the “Cambrian Explosion”.

Key words: Neoproterozoic; glacial events; snowball Earth; global change in paleo-environment