

雪球地球

文·圖一單希瑛

雪球地球假說原先是為了解釋出現在熱帶緯度的冰川的地質現象。根據模型，當冰川分布到緯度25至30度之間，冰層反射的回饋會造成冰川快速伸展到赤道。所以熱帶出現冰川沉積表示全球都被冰所覆蓋。但

板塊會隨時間而飄移，想在地球漫長歷史裡斷定某一地塊在某個時間點的位置並不容易。古地磁資料可用來推測岩石形成時的緯度。根據古地磁數據，一些新元古代冰川造成的岩層沉積在赤道附近緯度10度之內。

在雪球地球時期，碳-13及碳-12的同位素比值也出現異常。生物化學作用，包括光合作用，傾向於用較輕的碳-12。所以海洋中生物體內的¹³C/¹²C會略比地球的均值低，而海水中則此值較高，無機沉積物中¹³C/¹²C也會較高。但在雪球地球事件中，¹³C/¹²C值卻驟降。這與氣候急凍，消滅了大部分光合作用生物所造成的影響一致。根據密集分析全球沉積物碳-13的峰值可以認出新元古代時有4次冰期，其中以6億5千萬年前的Marinoan最為重要(圖1)。

條帶狀鐵礦(圖2)是氧化鐵與燧石互層的沉積岩。它們的沉積通常與大氣的氧氣升高有關。古元古代時，溶於海水中的鐵離子與光合作用生成的氧氣接觸，於是便沉澱為氧化鐵。要形成這種富鐵沉積，海洋必須在缺氧環境下累積足夠的二價鐵離子於水中，然後才與後來出現的氧形成氧化鐵沉澱。雪球地球的支持者主張，條帶狀鐵礦的再次出現就是海洋冰封缺氧的結果。

新元古代冰川沉積的頂部常常蓋著一層數公尺到數十公尺的化學沉澱石灰岩或白雲岩。這層碳酸鹽蓋層(cap carbonates)形成的機制仍無定論。一般說法是雪球地球融化，大氣中大量的二氧化碳造成酸雨，風化了暴露地表的矽酸鹽及碳酸鹽，沖刷到海洋中形成層狀碳酸鹽沉積。這種非生物形成的碳酸鹽蓋層出現於雪球地球冰碛沉積的頂部。

地球表面鈹的含量非常低，而宇宙塵是地表鈹的重要來源。在雪球地球時期，鈹會累積在冰蓋上，融冰後形成的沉積物便會富含鈹。在碳酸鹽蓋層下的確發現了鈹的異常富集，並且顯示冰期應該延續了3百萬年。不過，隕石的撞擊也可能造成鈹的富集。

雪球地球形成的機制

雪球地球的發端必須有起始的冷卻機制，使地球的冰雪覆蓋增加。地球冰雪覆蓋增加就會增加反射率，於是形成越來越冷的正回饋。當冰雪累積到一個程度，冷卻作用便無法回頭。分布在赤道的陸地有助於這個正回饋，因為這能讓太陽輻射最強赤道附近也被冰雪覆蓋。

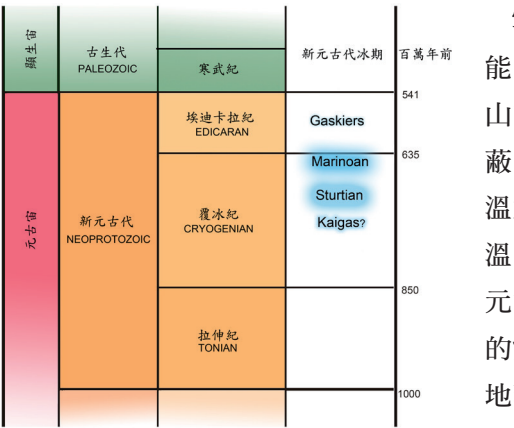


圖1 新元古代的冰期，其中Marinoan及Sturtian較顯著。

比海洋反射率高，所吸收的太陽熱能較少。再者，熱帶陸地多雨，河流流量大，侵蝕作用也大。當矽酸鹽岩石暴露在空氣中會產生風化作用，用去大氣中的二氧化碳。

不管誘發機制為何，早期的冷卻作用使地球被冰雪覆蓋的面積增加，因此反射回太空的太陽能增加，進一步使地球更冷也更增加冰雪覆蓋的面積。這種正回饋循環最終使得冰封赤道成為像今日的南極一樣冷。

從全球冰川時期復甦

據估計，要解凍地球所需的二氧化碳濃度需為今天的350倍，也就是大氣的13%是二氧化碳。因為地球幾乎全被冰封，大氣中的二氧化碳無法與風化釋出的鹼金屬離子作用而消耗掉。經過幾百萬年，主要靠火山噴發所累積的二氧化碳及甲烷達到能引起溫室效應的量，熱帶的冰開始融化，然後出現不再被冰雪覆蓋的區域，這個區域顏色比冰蓋深，因此能吸收更多太陽能，於是便啟動了融冰的正回饋。

陸地上冰川的融化會形成大量冰川沉積，造成侵蝕及風化。被帶到海中的沉積物會含有豐富營養鹽，配合高濃度的二氧化碳，藍綠菌類爆發式繁盛，這又讓大氣中的氧含量快速提升，有利於多細胞生命的發展。正回饋循環能在不到一千年的時間將地球解凍，氧氣的補充及二氧化碳的消滅則需要稍長的時間。

二氧化碳含量的降低有可能讓地球再度冰封，結冰融冰循環可能一直重複，這似乎便是新元古代的情況。一直到大陸飄到靠近極區，大範圍冰封便較難形成了。

反對者的意見

反對雪球地球假說的理由之一是新元古代的沉積交替出現覆冰及融冰證據。融冰的證據來自冰墜石(圖3)、氣候循環的地化證據及冰川與淺海沉積的交替互層。阿曼一處位於北緯13度，年代自712到545百萬年前(涵蓋Sturtian及Marinoan冰期)的沉積紀錄就有冰川及非冰川沉積。

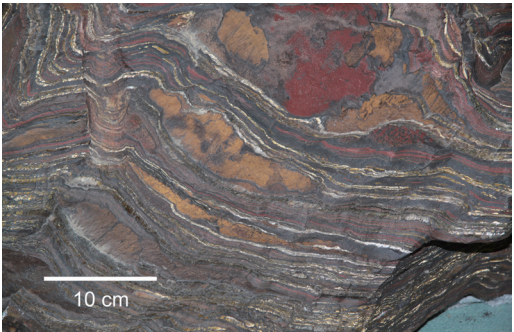


圖2 條帶狀鐵礦

雪球地球的發端有許多可能的誘發機制，例如超級火山的噴發使陽光被火山灰遮蔽；大氣中氧的上升使強力溫室氣體甲烷與氧反應變成溫室能力較弱的二氧化碳；元古宙較年輕的太陽，放射的能量比現今少6%；或者是地球軌道的擾動。熱帶地區的大陸分布可能是雪球地球發端時所必須。首先，陸地

尼克·艾爾斯(Nick Eyles)認為新元古代的雪球地球跟地球歷史中的任何一個冰期沒什麼不同，而妄想找出單一成因是注定要失敗的。他提出新元古代的兩個大陸張裂事件—羅迪尼亞超大陸張裂形成原始太平洋，及波羅地大陸與勞倫亞古陸分開形成原始大西洋—與冰期重合。協同張裂出現的板塊抬升會形成高原，就像今天東非裂谷兩側的高原。這麼高的海拔便能出現冰川。

條帶狀鐵礦曾被認為是全球冰川作用的證據，因為它們需要海中溶有二價鐵及缺氧的海水，但新元古代條帶狀鐵礦分布很侷限，表示它們可能不是在冰封的海洋中形成，而是形成於內陸海。內陸海比較容易出現特殊的化學環境，高蒸發率能濃縮鐵離子，而不時中斷的循環會讓底層水缺氧。大陸漂移伴隨沉降，便能形成這樣的內陸水體。

地軸高角度傾斜—60°—是另一個不需全球冰封卻能解釋赤道冰川的論點，這樣的傾斜形同將地球的陸地放到高緯度。另一個較不極端的假說是地球的磁軸傾斜60°。不論是以上哪種狀況，冰川將如今天一樣侷限在小範圍，而不是雪球地球。

慣性交替真極漂移是另一個解釋新元古代時低緯度冰川沉積的假說。這個假說主張在新元古代，地軸因大陸分布的不平均而不只一次的漂移。如此便能造成相同的冰川沉積分布而不需要它們沉積在赤道緯度。這個假說在物理論證上是合理的。

歷經冰封世界後的生命

新元古代是多細胞生物長足發展的時代。在所謂雪球地球之後，生物的尺寸與複雜度都有相當大的進展。雪球地球對多細胞生命的效應可能經由親屬選擇(kin selection)機制產生。生物出現器官層級的分化，特別是不可逆的最後分化，需要細胞放棄自我複製行為以使群體不會被破壞。從基因的短期效益來說，讓它的細胞忽視群體傳來的訊號，儘量的自我複製將可得到更多後代。有人論述因為雪球地球會大量削減任何一個種的族群大小，於是這些小族群來自有限的祖先，這使得他們間的親緣關係變得非常近。當關係很親近時，利他行為會增加。冰河期之後繁榮的族群中，高度的親緣關係可能讓形成複雜動物所需的細胞個體克服自我複製的驅力，此為地球歷史中首見。

雪泥地球

多數人接受新元古代曾出現冰期，但是否整個地球都被冰封則仍有許多爭議，有些科學家便提出「雪泥地球」(Slushball Earth)假說，認為赤道附近沒被冰封，水文循環仍起作用。根據對沉積循環的研究，發現「雪球」時期穿插著短暫的暖期，類似更新世冰期的狀況。狹義的雪球地球假說無法解釋交替出現的冰期及間冰期沉積，也不能解釋冰蓋邊緣的消長。

不論新元古代是否出現過雪球地球，這段期間內的確出現了3到4次顯著的冰期。Marinoan是其中規模最大的，Sturtian冰期的分布也很廣泛。一般認為Gaskiers冰期並未廣布全球。而此中最早的Kaigas，有人認為它不是冰期，有人則認為它屬於定年不佳的Sturtian的一部分。