

## 早期的地球(三) –元古宙 Proterozoic

文·圖／董國安、張智雄、莊祐濬、林佳燕、林秋玫

### 摘要

元古宙的地球已逐漸具有較大規模的現代的板塊構造，從約 25 億年前－凱諾蘭超大陸（目前已知最早的聯合大陸的形成）；到約 18 億年前－哥倫比亞超大陸；至約 10 億年前－羅迪尼亞超大陸皆是。羅迪尼亞超大陸約在 8 億年前開始裂解，部分陸地變成淺海大陸棚，行光合作用的藍綠菌大量增加，藍綠菌導致疊層石形成，促使二氧化碳濃度降低，導致地球寒冷化而溫度急速降低，開始長達 1000 萬年的雪球世界，科學上稱雪球事件。幸運的，地球能從冰雪世界中走出，轉變為溫暖的地球，為即將到來的埃迪卡拉生物群及寒武紀大爆發揭開序幕。

關鍵詞：元古宙、現代板塊構造運動、大陸地殼演化、雪球地球、埃迪卡拉生物群

## 前言

元古宙，是前寒武時期(Precambrian)三個地質年代單位(冥古宙、太古宙、元古宙)最後的一個宙(Eon)，開始於同位素年齡 25 億年前，結束於 5.41 億年前。這長達近 20 億年的元古宙，可次分為 3 個地質時代(Era)：古元古代(Paleoproterozoic, 25-16 億年前)，中元古代(Mesoproterozoic, 16-10 億年前)和新元古代(Neoproterozoic, 10-5.41 億年前)(圖 1)。全球單一的超大陸(Supercontinent)藉由板塊的聚合作用，經歷數億年的時間在元古宙首次誕生。經由大量有形體的化石證明，古菌類生命也已在地球蓬勃的發展。元古宙的大氣已經是氧氣含量豐富。這個時期發現了許多菌類、藻類植物和古代微生物化石，因此也被稱為「菌藻時代」。

## 元古宙大事件

### A. 現代「板塊構造運動」

地球何時開始真正的板塊構造運動?關鍵證據之一為是否存在超高壓與高壓變質指標-榴輝岩(Eclogite)與藍閃片岩(Blueschist)。一般認為太古宙時期的高地熱流使得大陸地殼的機械性質較軟弱而不堅硬，難以維持一定的地殼厚度並在板塊邊界形成碰撞帶；較厚的太古宙海洋地殼相對於現今薄而冷的板塊特性，也難以進行高角度的隱沒作用，因而無法有效驅動板塊構造過程。地球持續的冷卻作用讓大陸地殼逐漸堅硬，在太古宙晚期(30-25 億年前)地殼強度增強至能夠在板塊之間進行碰撞和隱沒，於是才開始了現代「板塊構造運動」，進而構成真正的碰撞帶和隱沒帶。隱沒的海洋板塊脫水，流體釋放引起上覆地函楔形的部分熔融，同時沿著逐漸加深的隱沒帶，產生綠色片岩相-角閃岩相-榴輝岩相的變質(圖 2)，當中藍閃片岩形成於地下深度 30 公里以下；隱沒帶前緣低溫高壓的變質環境、榴輝岩(eclogite)形成於地下深度 50 公里以下，是隱沒板塊深處的超高壓產物。藍閃片岩與榴輝岩皆是現代板塊構造運動的最佳隱示。

### B. 大陸地殼演化

現代板塊作用至今約有 25 億年歷史(圖 3)，最早的大陸可能是由 Kaapvaal 及 Pilbara 兩個克拉通(Craton)或稱穩定地塊組成的瓦巴拉大陸，只不過當時的陸塊大小尚不足以稱為超大陸。目前已知最早的超大陸為凱諾蘭超大陸，於 27 億年前開始聚合，24.5 億年前開始分離。之後經過了約 5 億年，板塊再度聚合形成哥倫比亞超大陸。哥倫比亞超大陸由 Ur、Nena、Atlantica 三大陸塊群組成，科學家透過觀察北美西緣、印度東部、西澳南部和東南極的相鄰地區的古造山帶及侵入岩體與其年代，推估當時三大陸塊的碰撞事件始於 20-18 億年前。哥倫比亞超大陸裂開時間則約在 15 億年前。約 10 億年前，陸塊再度聚合形成羅迪尼亞(Rodinia)超大陸，由古地磁研究得知：羅迪尼亞大陸的分布可能以赤道以南為中心，而羅迪尼亞大陸的中心一般認為是北美克拉通(或稱勞倫大陸)，周圍環繞著當時幾乎

所有存在的克拉通，而環繞羅迪尼亞超大陸的古海洋稱為米諾維亞洋。約 8 億年前，羅迪尼亞大陸因受到地函熱柱上衝而開始分裂。新元古代大量岩漿流與火山爆發的證據在每個大陸都有發現，這些是羅迪尼亞大陸分裂的證據。

### C. 雪球事件

在元古代的末期(7.5-6 億年前)，地球遭到冰雪冰封，或稱為雪球事件，冰川融化沉積的過程中，形成冰磧石是此事件的重要證據(圖 4)。科學家採集這些岩石觀察，發現某些冰磧石竟在赤道地區形成，這代表當時冰川已擴展到炎熱的赤道區域。如果連赤道地區都被冰川所覆蓋，那地球儼然就是顆大雪球，這一切的發生也和我們耳熟能詳的溫室氣體—二氧化碳(CO<sub>2</sub>)有關。在地球持續冷卻的同時，許多陸地開始出露於海洋且受到風化，風化作用會消耗大氣中的 CO<sub>2</sub>，所以風化作用增強，連帶著消耗 CO<sub>2</sub> 的量也就越多，大氣中的碳被送往海洋中沉積，使大氣缺乏溫室氣體。另外，羅迪尼亞超大陸再次分裂，也促使風化作用增強，大量的玄武岩質岩漿在加拿大北部噴發(當時加拿大位在赤道區)。玄武岩富含鈣離子(Ca<sup>2+</sup>)因風化而釋出，與 CO<sub>2</sub> 發生反應後即封存了 CO<sub>2</sub>。這些過程致使溫室氣體缺乏，無法維持地球的溫度，更導致地球溫度一路下滑，CO<sub>2</sub> 則塵封在冰雪當中。經過數百萬年後，火山開始活動，把大量 CO<sub>2</sub> 再次帶回到大氣中，於是溫室效應復始、冰雪開始融化、反射太陽輻射的量逐漸減少，地球溫度開始上升，雪球地球結束，迎接而來的是埃迪卡拉生物群。

### D. 埃迪卡拉生物群

1946 年，古生物學家 Reg Sprigg 於澳大利亞南部的埃迪卡拉山地的岩層中發現了大量的海洋無脊椎化石，大多呈現管狀、藻體狀，並因此將其命名為埃迪卡拉生物群(Ediacaran biota)，為人類目前所發現最早的多細胞生物群。國際地質科學聯合會於 1974 年，認定其為前寒武紀晚期(6.4-5.4 億年前)的動物群。

在埃迪卡拉生物身上發現海浪沖刷所造成之波浪狀痕跡和藻類的假根，由此推斷其形成的環境應於海洋，證實了埃迪卡拉生物實為海洋生物的一種。埃迪卡拉生物群的主要特色為：扁平、固著生長、沒有口腔等消化器官，例如：恰尼蟲(Charnia)，外型上與葉片相似(圖 5)，其一生固著於海床上幾乎不移動，而是隨海水飄盪，以濾食微生物維生，身長可達 2 公尺。迪更遜水母則外觀呈橢圓扁平狀，身長可達 1 公尺(圖 5)，具有底部移動的能力，是當時海洋中常見的生物之一。目前對於埃迪卡拉生物群的了解仍十分有限，但隨著科技進步，人類所能做的探索與分析更多，相信一定能揭開埃迪卡拉生物群的神秘面紗。

## 結論

元古宙的地球已逐漸具有較大規模的現代的板塊構造，從約 25 億年前—凱諾蘭超大陸(目前已知最早的聯合大陸)的形成；到約 18 億年前—哥倫比亞超大陸；至約 10 億年前羅迪尼亞超大陸皆是。羅迪尼亞超大陸約在 8 億年前開始裂解，部分陸地變成淺海大陸棚，行光合作用的藍綠菌大量增加，藍綠菌導致疊層石形

成，促使二氧化碳濃度降低，導致地球寒冷化而溫度急速降低，開始地球長達 1000 萬年的雪球世界，科學上稱雪球事件。幸運的，地球能成從冰雪世界中走出，轉變為溫暖的地球，為即將到來的埃迪卡拉生物群及寒武紀大爆發揭開序幕。

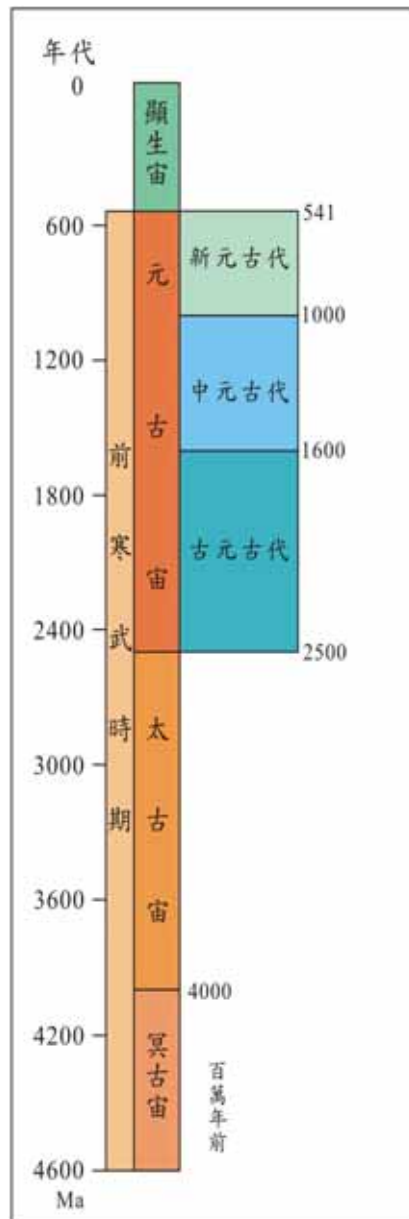


圖 1. 元古宙地質年代表。



圖 2. 現代「板塊構造運動」示意圖。

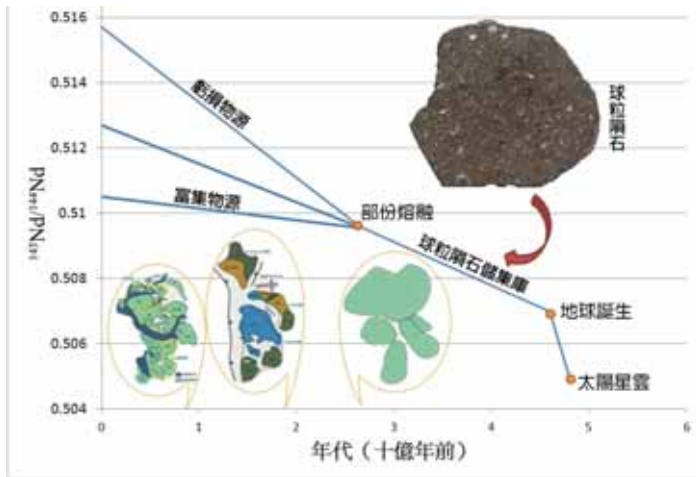


圖 3. 大陸地殼及鈾同位素演化趨勢圖



圖 4. 冰磧石的特徵為分選性差、磨圓度差、稜角分明，都是證明雪球事件的重要證據。



圖 5. 埃迪卡拉生物群復原圖。左下方為狄克遜水母化石標本影像。