

早期的地球(二)－太古宙 Archean

文·圖／董國安

摘要

太古宙屬於前寒武紀，根據國際地層委員會(The International Commission on Stratigraphy) 2014 年所公佈地質年代表，太古宙是接續冥古宙之後，以目前發現最古老岩石為起始，大約距今約 40 億年前；太古宙結束於 25 億年前的大氧化事件(Great Oxygenation Event)，以甲烷為主的還原性的太古宙原始大氣轉變為氧氣豐富的氧化性的元古宙大氣，並導致了持續 3 億年的地球第一個冰河時期－休倫冰河時期。太古宙並可次分始太古代(4000-3600 Ma)，主要指地球表面凝固的最早時期；古太古代(3600-3200 Ma)，主要指出現最早藍綠藻，也是最古老化石出現的年代；中太古代(3200-2800 Ma)，主要為疊層石出現的年代；新太古代(2800-2500 Ma)，為地球形成以來第一次冰河期。

關鍵詞：太古宙、始太古代、綠岩帶、藍綠菌、層狀鐵礦

前言

太古宙屬於前寒武紀，根據國際地層委員會(The International Commission on Stratigraphy) 2014 年所公布的地質年代表，太古宙是接續冥古宙之後，以目前發現最古老岩石為起始，大約距今 40 億年前；太古宙結束於 25 億年前的大氧化事件(Great Oxygenation Event)，以甲烷為主的還原性的太古宙原始大氣轉變為氧氣豐富的氧化性的元古宙大氣，並導致了持續 3 億年的地球第一個冰河時期－休倫冰河時期。太古宙並可次分為始太古代(4000-3600 Ma)，主要指地球表面凝固的最早時期；古太古代(3600-3200 Ma)，主要指最早出現藍綠藻，也是最古老化石出現的年代；中太古代(3200-2800 Ma)，主要為疊層石出現的年代；新太古代(2800-2500 Ma)，地球形成以來第一次冰河期（圖 1）。

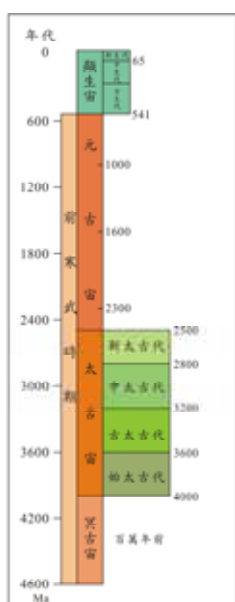


圖 1. 太古宙地質年代表

太古代大事件(40-25 億年前)

1. 最古老的岩石

迄今地球上最古老物質是 44 億年前澳洲西部捷克山(Jack Hill)變質沉積岩中所含之鋯石，但目前地球上最古老的岩石是加拿大西北部阿卡斯塔(Acasta)地區的片麻岩，經由 SHRIMP U-Pb 定年分析為 40 億年前形成(Bowring and Williams, 1999, Contrib Mineral Petrol)（圖 2）。

當地球的原始地殼上，開始逐步形成水，到 40 億年前左右原始的水圈可能已具雛形，同時出現了最早的沉積，逐步形成地殼的沉積圈。但至今保留下來的始太古代沉積物僅在少數古陸核有發現，老於 36 億年(始太古代)的岩石也非常罕見。目前只有加拿大、格陵蘭、澳大利亞、中國大陸、南極和南非幾個古老陸塊

殘存至今（圖 3）。除上述加拿大阿卡斯塔(Acasta)地區的 40 億年片麻岩；丹麥屬地-格陵蘭島西方的依蘇阿(Isua)地區有 38-37 億年的片麻岩、條帶狀鐵礦、變質枕狀熔岩、超基性岩等岩石；南非巴布頓綠岩基底的安得森片麻岩；南極洲 Napier Complex 有 38.5 億年的正片麻岩；中國大陸遼寧省鞍山市東邊白家坟地區有 38 億年的糜棱岩化奧長花崗岩和冀東黃柏峪的曹莊岩組鉻雲母石英岩（其中的殘餘鉛石年齡為 38 億年）為其代表。這些岩石直接記錄了始太古代的沉積作用、岩漿活動和構造運動及變質作用等重大地質事件之發生、發展過程。



圖 2. 地球最古老的岩石-加拿大西北部 Acasta 地區的片麻岩

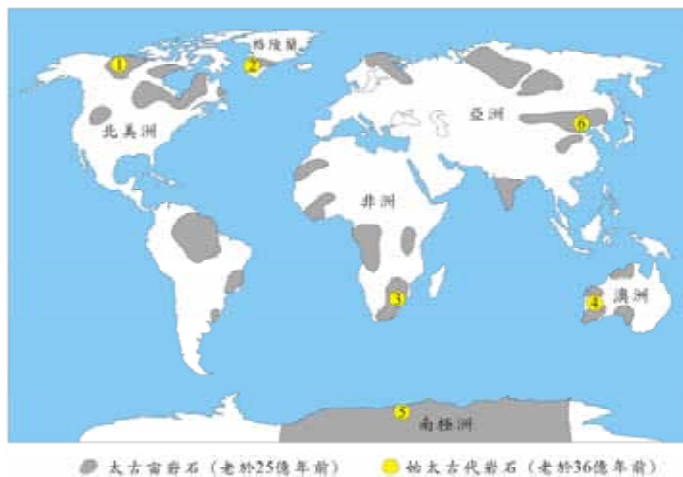


圖 3. 始太古代與太古代岩石分布圖

2. 大陸地殼的形成

地球的地殼可依其不同組成成分分為：矽鋁質的大陸地殼與矽鎂質的海洋地殼。現今的矽鋁質大陸地殼可經由板塊作用在板塊邊緣的隱沒帶(Subduction zone)形成，但太古宙(40-25 億年前)因地殼溫度較高，並沒有真正板塊構造運動，那太古宙大量中-酸性矽鋁質的大陸地殼又如何形成的？太古宙時期的地函與地殼溫度較高，能夠進入地函的水分較少，太古宙時期的原始地殼原為單一矽鎂質的海洋地殼，在較高溫的下部地殼(含角閃石玄武岩質)，因析出少量的水分，而

使下部地殼產生部分熔融作用(Partial melting)，形成中-酸性岩漿，也就是太古宙花崗岩的成因，早期大陸地殼也就形成。

太古宙時期地殼主要由花崗質片麻岩區與綠岩帶(Greenstone belt)構造單元所組成，其中花崗質片麻岩區主要由英雲閃長質片麻岩、奧長花崗質片麻岩、花崗閃長質片麻岩(通稱為 TTG 片麻岩)所組成。綠岩帶主要岩石組合為科馬提岩、變質高鎂玄武岩、具枕狀構造玄武岩、埃達克質火山岩和化學沉積條帶狀磁鐵石英岩和其他少量變質沉積岩。這些綠岩帶將花崗質片麻岩區連接在一起，形成太古宙時期的地殼(圖4)。

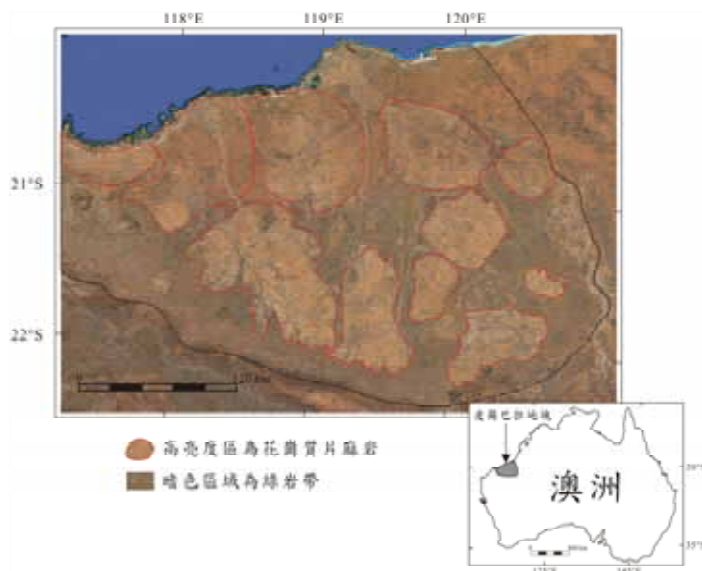


圖 4. 澳洲西部皮爾巴拉地塊是標準太古代地塊，由花崗質片麻岩區與綠岩帶構造單元所組成。

3. 生命誕生與生物進化

地球是因太陽系中細粒塵埃、隕石岩塊等物質，經撞積作用(Accretion)而形成，故在地球早期歷史中(冥古代 46-40 億年前)，或許已有生命的出現，但因頻繁且巨大的隕石撞擊，而使剛出現的生命型態消失，因此要到後期重轟擊事件(Late Heavy Bombardment: 4100-3800Ma) 結束之後，生命才有可能持續生存下來。因此學者大都認為地球上生命的誕生在始太古代(4000-3600 Ma)。

生命的簡單定義為：能夠生長、繁衍且能因應環境而改變。太古代地球因為水圈及陸地的出現，所以當地球上 C、H、O、N、P 等「生命必需元素」濃度達到一定程度，可以聚合形成有機質，進而形成地球上所有生物的基本單位—DNA(去氧核糖核酸)也就是原始生命出現的初級階段。在這一時期，地球內部地質構造和外部天文環境逐漸穩定，地球上出現了數量較多的原核生物。火山活動使地球表面充斥著一個由水蒸氣、二氧化碳、硫化氫、氯化氫、氟化氫、氨、甲烷等氣體組成的高密度大氣層。隨著時間的推移，其透光性逐漸增強，為海洋

微生物光合作用提供了有利條件，大氣中的二氧化碳被逐漸消耗，氧含量逐漸增多。同時，大量的二氧化碳溶於海洋中以碳酸鹽的形式附著著微生物沉積下來，形成了這一時期特有的古生物化石。

其中格陵蘭陸塊於 38 億年 Issue 群古老岩石中被發現了 ^{12}C 的增值現象。這一發現提示了以光合作用為特徵的生命活動在太古宙早期已開始出現。38 億條帶狀鐵礦的存在，表現光合自養生命活動在這時已經具有一定的規模。古老微生物極難保存成為化石，它們的化石紀錄十分稀少，35 億年前 Apex chert 頂燧石(澳大利亞西北部)所保存的藍藻狀化石是光合生命最早的實體化石紀錄。在地球形成的 46 億年間，大部分的時間生命形態都限於肉眼無法看見的微小生命，只在最後約 10% 的時間裡，才有複雜的生命型態出現。

4. 氧濃度的上升

疊層石(圖 5)是由一些微生物，尤其是藍綠菌(Cyanobacteria)所黏結堆砌而成。太古宙因藍綠菌的出現，是目前地球上最早能行光合作用，吸收二氧化碳並排放氧氣的生物，它快速增長以後，也使地球氧濃度慢慢增加，但一開始應該都是與海水中豐富的二價鐵離子進行氧化作用，形成層狀鐵礦 BIF(圖 6)，目前地球上 80% 以上的鐵礦床，都是在晚太古代(25 億年前)形成。等到地表再也沒有可以被氧化的物質後，氧氣開始釋放到空氣中，產生所謂的「大氧化事件」(Great Oxidation Event; GOE)，代表地球表面環境由還原狀態演變成氧化狀態的一個重要的時間分野，藍綠菌在地球上已存在約 35 億年，是目前以來發現到的最早的光合放氧生物，使得地球表面從無氧的大氣環境變為有氧環境。透過這種巨大的作用的刺激而有了生物多樣性和導致厭氧生物接近滅絕，顯著的改變了在地球上生命形式的組成。



圖 5. 主要由藍綠菌
(Cyanobacteria)所形成的疊
層石



圖 6. 27 億年前所形成層狀鐵礦(Banded Iron Formation)

結論

原始地球在經歷岩漿海、密集隕石轟擊的冥古代(46-40 億年前)，地球內部地質構造和外部天文環境逐漸穩定。太古宙時期，是地球上大量形成岩石的時期，地表火山、岩漿活動仍然劇烈而頻繁，岩石在高溫高壓環境下進行結構重組、重結晶，變質為新岩石、新礦物。因此太古宙是地球歷史上最重要的成礦期。接著在寒冷的冰河時期，迎接元古宙的到來。