



圖1 目前地球上最古老的岩石標本，採自加拿大西北部的40億年阿卡斯塔(Acasta)片麻岩。

進入太古宙的地球

地殼的形成源自於地球冷卻過程中地函物質的分化，迄今最古老的大陸地殼物質紀錄是位在加拿大西北部的阿卡斯塔(Acasta)片麻岩(圖1)，經U-Pb定年分析可回溯至40億年前的太古宙之初，透露地球剛誕生後的6億年內高溫炙熱的岩漿海及熔融表面可能早已存在原始大陸地殼。截至25億年前，至少已形成了50~60%體積的現代大陸地殼，然而在太古宙晚期(3.0~2.5 Ga, Ga=十億年前)大陸地殼演化機制發生了很大的轉變，區隔了太古宙岩石與現代岩石。另外，大陸地殼的增生、體積變化、地殼之間的聚散離合也間接影響至地球水圈與大氣圈，乃至於調節氣候、促進生命演化。了解大陸地殼的起源與成因，有助於我們一窺早期地球的面貌。

目前太古宙的岩石大多保存在古陸核中，屬於太古宙殘餘克拉通(cratons, 古老而穩定的大陸地臺)基底的一部分(圖2)，如西澳大利亞的尤岡(Yilgarn)及皮爾巴拉(Pilbara)克拉通、加拿大蘇必略省(Superior Province)克拉通、非洲南部卡普瓦(Kaapvaal)及辛巴威(Zimbabwe)克拉通與橫跨格陵蘭、蘇格蘭及拉布拉多東海岸地區的北大西洋克拉通等地。

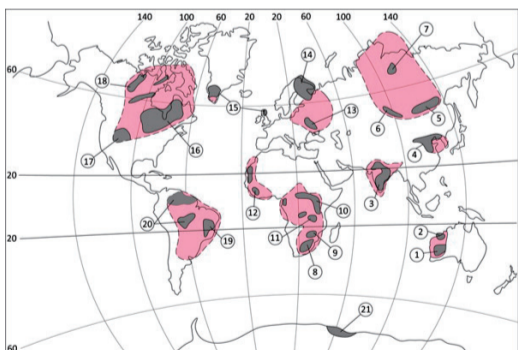


圖2 全球太古宙克拉通(cratons)的分布(灰色區塊)，其中粉紅色區塊一般認為是上伏的太古宙-元古宙之地塊(terraces)。

太古宙的地殼主要可次分成兩大構造單元：1. TTG片麻岩：由複雜變形與高度變質的英雲閃長岩(Tonalite)-奧長花崗岩(Trondhjemite)-花崗閃長岩(Granodiorite)所組成之花崗質片麻岩系列(圖3)夾雜變質沉積岩，是佔據現存太古宙地殼中體積最大的岩石類型(約70~80%)。2. 綠岩帶(greenstone belt)：由經歷多次變形與中低度變質作用階段的厚層(約數公里~30公里)火山—沉積序列。綠岩帶從下而上由火山岩漸變至沉積岩，其火山岩單元可次分成超基性岩群(Ultramafic Group)，包含高鎂質岩石，如科馬提岩、科馬提質玄武岩和拉斑玄武岩；綠岩群(Greenstone Group)，包含少量的超基性岩、拉斑玄武岩、安山岩、鈣鹼系列火山岩、火山碎屑岩和燧石，火山岩類多被沉積岩群所覆蓋。綠岩帶周圍通常伴生片麻岩、花崗岩岩基，在更深處則有TTGs深成岩體、片麻岩及混合岩。

TTG片麻岩

TTGs屬於酸性的高二氧化矽質深成岩，SiO₂含量一般>64% (~70%或更高)，富含Na、Al，其K₂O/Na₂O比值通常<0.5，顯示其低鉀富鈉的成分特徵且相對缺乏鐵鎂質(MgO: 0.2-2.6%)及Ni、Cr元素，而石榴子石是形成TTGs的原岩熔融後殘餘的穩定礦物相，重稀土元素保留在這些不熔的石榴子石中導致TTGs也缺乏這類元素，其礦物種類則由石英、鎢石、斜長石、黑雲母、角閃石等構成。

太古宙大陸地殼起源於巨厚的含水換質玄武岩質地殼的熔融，但對其形成機制有著不同看法，早期的研究認為其形成自中洋脊型玄武岩(MORB)的部分熔融，然而近期的玄武岩高壓熔融實驗研究指出現代MORB並非太古宙大陸地殼的合理來源，TTGs的形成需來自富含大離子親石元素(LILE;如K, Rb, Sr, Cs, Ba, Eu²⁺)的源區，類似於海洋高原玄武岩(oceanic plateau basalts)的環境。「現代」板塊構造運動的高角度隱沒作用約在太古宙晚期才開始，意味著更早期的太古宙地球在地函高地熱梯度的制約下，厚實的海洋地殼因浮力效應而以「平坦的」角度隱沒至海洋高原之下，並在>50公里的深度引發部分熔融產生TTGs岩漿，隨後少

受地函楔的混染TTGs(低MgO)岩漿上升、侵入至綠岩帶下部，形成TTGs深成岩(圖4)。

科馬提岩

科馬提岩屬於超基性的高鎂質噴出岩，MgO含量一般>18% (約介於18~33%)，富含Ni、Cr，其CaO/Al₂O₃比值通常>0.8，且有相對缺乏Na、K、Ti及不相容元素的成分特徵。太古宙的科馬提岩多經過蛇紋石化、綠泥石化等變質作用影響，礦物種類主要由細長的骸狀或樹枝狀橄欖石或單斜輝石斑晶組成近似平行排列的鬚刺結構(spinitex)以及穿插在其間的少量鉻尖晶石、鉻鐵礦和玻璃基質構成。鬚刺結構分布於科馬提岩熔岩流的上部，是標誌科馬提岩的重要岩石特徵(圖5)，暗示其歷經了快速冷凝的過程。

太古宙科馬提岩漿起源於虧損的(depleted)地函、高溫高壓及高比例的部分熔融三大要件。從科馬提岩特殊的化學特徵指出它源自非常高溫的地函(>1600°C)區，有些研究認為可能是由「乾的」高溫地函熱柱減壓熔融產生，另有說法是從科馬提岩中的含水信息推測與隱沒過程有關，或推測太古宙地函深處可能存在一個相對富含水的層圈，助長了地函熱柱熔融作用的進行(圖6)。然而距今發現最古老的科馬提岩存在3.5 Ga的巴伯頓(Barberton)綠岩帶中，科馬提岩大量出現在3.5 Ga~1.5 Ga的地質時代，並在晚太古宙(~2.5 Ga)時被大規模保存下來，卻在太古宙之後成為罕見岩類。雖然現今地球並沒有適當的條件利於科馬提岩形成，但研究科馬提岩可以為我們揭開關於早期地函的熱及物質組成的秘密。

結論

地球在經歷冥古宙(46~40億年前)的內憂—物質分化與外患—隕石轟擊之後，進入太古宙(40~25億年前)這一個岩石大量形成的時代，同時太古宙的指標性岩石—TTGs片麻岩與科馬提岩除了讓科學家拼湊出早期地殼-岩漿-地函之間相互交織的圖像外，還維繫著銅-鎳-鉑-金硫化物等重要金屬的成礦，造就出我們得以享用的自然資源。到了太古宙晚期，「現代」板塊構造運動才逐漸塑造出我們目前所知的地球。



圖3 TTGs片麻岩：從左至右，由複雜變形與高度變質的英雲閃長岩(Tonalite)-奧長花崗岩(Trondhjemite)-花崗閃長岩(Granodiorite)所組成之花崗質片麻岩系列。

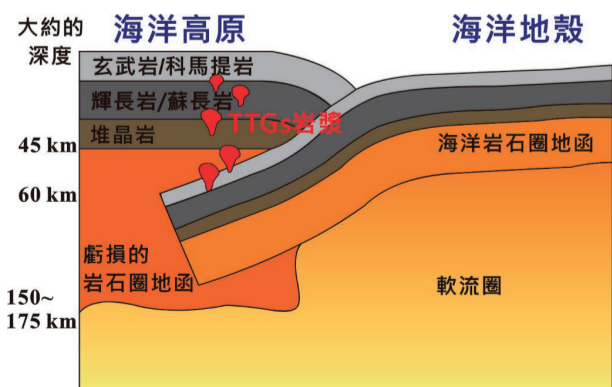


圖4 TTGs岩石成因示意圖。太古宙海洋高原與海洋地殼(oceanic crust or oceanic plateau-like crust)的聚合模型，因為熱、組成性質及密度差異造成海洋地殼隱沒，進而形成TTGs深成岩。



圖5 科馬提岩。鬚刺結構(spinitex)是標誌科馬提岩的重要岩石特徵。

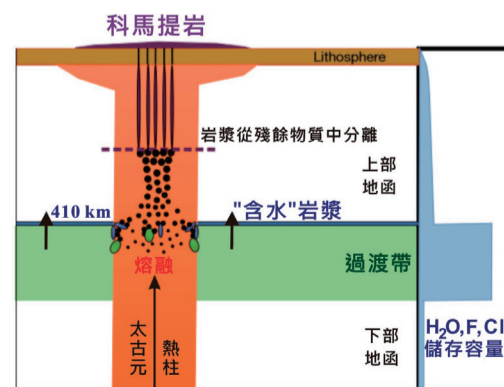


圖6 太古宙地函熱柱上湧通過地函過渡帶，周圍的礦物相變而釋放流體，助長了地函熱柱的熔融作用(圖示中，原有的小黑點變成大黑點)。