

火星地貌大解密

To Decrypt Landforms on Mars

梁勝雄 經濟部中央地質調查所

劉勇君 美國亞利桑那州立大學地球與太空科學研究所

Liang, Shen-Hsiung Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs

Liu, Zac Yung-Chun School of Earth and Space Exploration, Arizona State University

火星從古至今，不管是東方或西方國家，無不對她充滿好奇，隨著科學不斷發展與技術日新月異，以前不了解的謎團一一解開，卻同時產生更多待解的問題。本文將介紹現階段人類是用什麼理論探知火星地貌、火星主要的地貌特徵及其背後的地質科學意義

74

自古以來，人類對於未知的大自然或事物，多充滿恐懼，常常利用想像力，認為應該是有神鬼或是動物的作祟所導致，不管是中國或是西方文化皆然，如地震是因為地底下有巨大的神龜、鯢魚、地牛，或是海神波賽頓(Poseidon)等生氣而產生的現象，對於未知的天體也是用這樣的概念，不論東、西方文化皆以神話故事標示天體，如火星在中國古代稱為「熒惑星」，常常出現一陣子，就又消失無蹤；在西方則稱為「Mars」，為希臘神話的戰神，主要因火紅色常常聯想到戰爭。古代術士常將火星與勃亂、殘賊、疾喪、饑荒及兵戎等惡象相結合。

隨著科學的昌明與觀測工具的進步，人類從最初用肉眼觀察到使用望遠鏡，至1965年第一個成功飛

掠火星的探測器—水手四號(Mariner 4)，甚至近年派遣登陸器如好奇號(Curiosity)登陸火星「直接」探測。我們對於火星越來越了解，古代人認為是「凶兆」的現象，現在的我們能運用科學知識加以解釋。例如「火星常常出現一陣子，就又消失無蹤」的現象，只不過是因為地球與火星繞太陽的軌道不同，兩者間的距離時常在變化，約每隔二年二個月，兩者會例行公事般的接近一次；火星表面充滿褐鐵礦(Limonite，分子式為 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$)，因此讓火星看起來「火紅」一般。雖然目前人類仍然不能「親手」碰觸火星表面，但卻能利用「比較行星學」認識火星，首先，讓我們認識比較行星學是怎樣的一門科學？

「比較行星學」初登板

1959年俄裔美籍科學家伽莫夫(George Gamow, 1904-1968)首次使用「比較行星學(comparative planetology 或 comparative planetary science)」這科學術語。主要意涵為以地球上相關研究與實驗為基礎，分析對比其他星體的化學組成物質、行星表面地貌特性、行星大氣環境差異、行星的物理力場(如重力場等)、

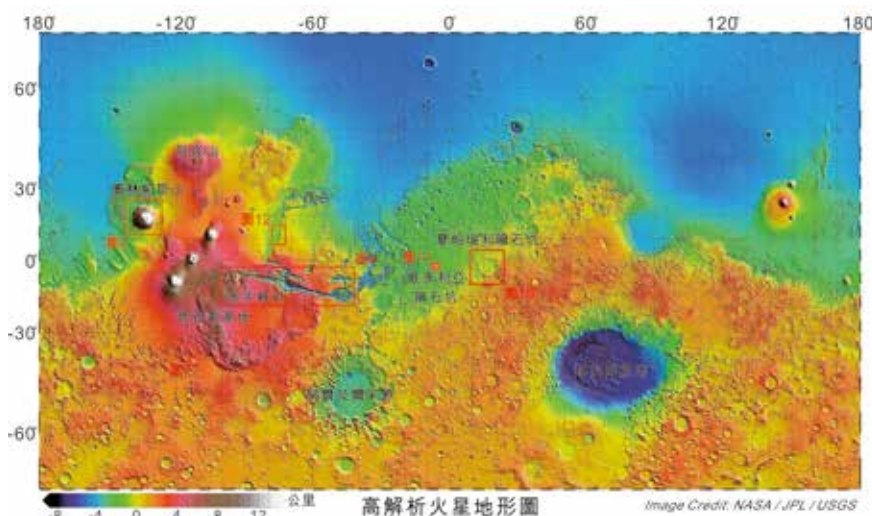


圖1 高解析火星地形圖(圖幅修改自NASA/JPL/USGS)。

行星內部構造及演育歷史等各星體間特質差異的一門學科。多年來, 因星際探測技術不斷突破、探測範圍的擴大, 以及天文科學與其他科學等跨學科相互輔助, 比較行星學得以快速發展。

比較行星學所使用的材料包括自外星體取得的樣本、衛星影像或登陸器取得的大量科學資料、地球科學的研究成果, 以及其他各類型的分析結果, 可是研究別的行星對我們有什麼幫助? 理論上, 我們太陽系的行星「本質上」都是由相同物質所組成, 但是他們現在的外觀與表面成分卻有著明顯的不同。例如: 地球的近鄰—金星與火星, 彼此間大氣環境及表面溫度有著顯著不同; 又如地球存在液態水而其他星球卻沒有…等種種議題, 藉有系統地比較不同行星, 不僅能了解其他行星, 更可以幫助我們更全面地了解地球。

通常我們在認識一個人, 多是由外部特徵開始, 比方高矮胖瘦、穿著打扮, 或其它明顯特徵等。通常憑著穿著打扮能初步了解一個人的個性或職業等, 藉由臉部的痘痘能了解他的內在健康狀況與飲食習慣等。同樣地, 行星的表面地貌特性也反應著行星內部與外部的地質活動及星體地質演育歷史, 主要塑造地貌的地質營力可分為內部營力與外部營力。

內部營力(endogenetic processes), 即憑藉地球內部各種力量所帶來的地形演變過程, 包括火山作用與板塊構造運動, 如同利用痘痘了解人的健康狀況與飲食習慣; 外部營力(exogenetic processes), 則是指各式影響或改變地球表面形態的自然演變過程之地質

作用, 包含侵蝕與堆積作用, 以及外天體的撞擊構造(隕石坑)¹, 如藉由傷疤了解人可能過去受過傷。

我們太陽系有八大行星, 依據行星密度, 區分為類地行星與類木行星。類地行星的質量與體積都比較小, 但平均密度比較大, 且都有固體表面, 組成成分多為岩石與金屬; 類木行星的質量與體積都比較大, 但平均密度比較小, 組成成分多為氣體與冰。除了地球外, 火星是目前已知中, 存在最具壯闊地形與特殊地貌特徵的行星(圖1)。火星的地勢是北低南高, 北半球較為年輕, 有著峽谷、熔岩流、崩塌窪穴等地形遺跡; 南半球為遍布隕石坑的高地地形, 隕石坑數量比起北半球多很多, 兩大半球之分野為位於赤道附近的水手峽谷(拉丁文稱 Valles Marineris), 至於為何會知道北半球比較年輕, 在這裡先賣個關子, 待「撞擊地形」處再進一步說明。和地球一樣, 位於火星的南北極, 有兩大白色冰帽覆蓋。總括火星地貌有撞擊地形(隕石坑)、大氣與液體作用的地形(沙丘及河道…等)、構造活動(裂谷地塹)地形及火山地形等。

本文著重在利用比較行星學的觀念, 逐一介紹火星火山、撞擊、峽谷與河流之地形地貌特徵及地貌特徵之背後有哪些地質科學上的意義。

火山地形

地球上目前已知最高的「活」火山是夏威夷群島毛納基火山(Mauna Kea), 海拔約4,200公尺, 可是由海床的山腳到頂峰高度則達10,200公尺; 最大的火山



圖2 目前已知太陽系最大的火山體—奧林帕斯山衛星影像(影像編修自NASA/NSSDC)。

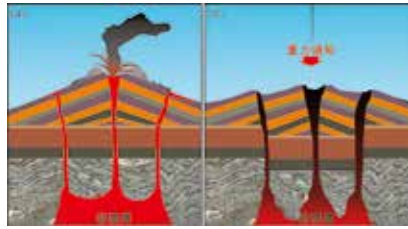


圖3 破火山口地形演化示意圖。原先地底存在岩漿庫，後來岩漿冷卻收縮後，留下空間，上覆火山體受重力作用下陷形成。

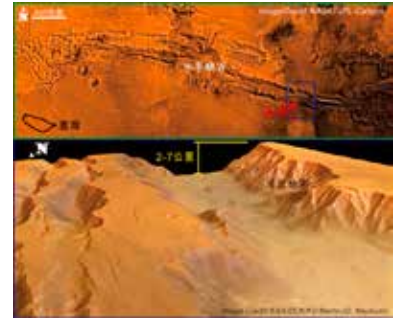


圖4 水手峽谷衛星影像與三維景觀影像(圖幅分別編修於NASA/JPL—Caltech與ESA/DLR/FU Berlin)。

76

則是在2013年發現位於西太平洋海底的塔穆地塊(Tamu Massif)，為一個不活動的玄武岩質之盾狀火山，高約2,000公尺，面積約26萬平方公里。這兩座火山，雖然在地球上為一方之霸，但擺在太陽系上比較，實乃小巫見大巫。

目前已知太陽系最高的火山體是位在火星的奧林帕斯山(拉丁文稱 Olympus Mons)(圖2)。從山腳到山頂高度近26公里，基底直徑約600公里，占地面積約30萬平方公里，足足有十個臺灣島的大小！火山地勢寬展平緩，坡度平均約5度左右，為一個盾狀火山，但山體周圍環繞著4至8公里高的山壁(Olympus Rupes)，這種火山地形特徵相較火星或地球的其他火山來說，較為特殊。

與地球的火山一樣，奧林帕斯山亦有破火山口(caldera)存在，所謂破火山口是指原來的火山口經過爆裂與崩塌等作用再加上侵蝕作用而形成的地形特徵(圖3)。爆裂的原因是有大量氣體和岩漿由火山口噴出，就像開香檳一樣；崩塌則是因火山口底下的岩漿向下回縮，空出空間，導致火山頂缺少支撐而塌毀，形成破火山口地形。破火山口總計有6個，暗示奧林帕斯山可能至少有6次的噴發事件。6個破火山口總長約85公里、寬約70公里，火山口壁高達3公里。

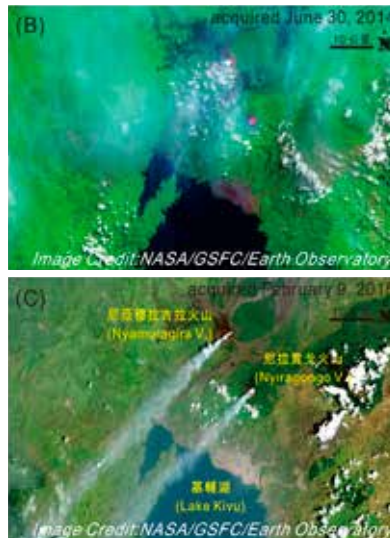
火星上可不只奧林帕斯火山這一個大個頭，在奧林帕斯火山的東北邊有一座阿拔山(Alba mons)火山，高度約6.8公里，但南北長達2,000公里，東西寬達3,000公里，面積達5.7百萬平方公里，地勢更為寬

平，平均坡度只有0.1度左右；位於塔西斯高地(Tharsis Highland)上還有3個大塊頭，由北往南，分別為愛斯克雷斯山(Ascraeus Mons)、帕弗尼斯山(Pavonis Mons)及阿爾西亞山(Arsia Mons)，合稱為塔西斯山群(Tharsis Montes)。這5座火山都比地球上的火山要來的大，熔岩流動的時間與距離也要長許多，這是怎麼一回事？目前較可能的解釋有兩個，因為火星體積較小，重力較低，約只有3.7公尺/平方秒(地球為9.8公尺/平方秒)，相較地球要小很多，所以岩漿能噴的比較高，涵蓋的比較廣；另一可能是形成火山的熱點都集中在同一個位置，但地球有板塊構造運動，如太平洋板塊移動，而形成夏威夷火山鏈，但是火星沒有，故熔岩皆集中在同一地點噴發而導致火星的火山又高又大。

雖然現在我們對奧林帕斯山已經有初步的認識，但很多細部構造及火星的演化歷史，就得藉火山口附近的地質調查工作才能得知，故奧林帕斯山也是人類想探究的地點之一，然而，直到現在都尚未將機器人探測器放上去，原因是這科學議題，沒有「尋找外星生命」來的吸引眾人目光，經費取得較不容易；更重要的因素是目前登陸火星之登陸艇降落火星的方式都是利用火星本身的大氣層進行「空氣煞車」，讓登陸艇能緩速降落而不至於墜毀，這樣的設計是為了妥善應用登陸艇可載之重量。但是因奧林帕斯山太高了，大氣必然十分稀薄，利用現在的科技想登陸山頂，登陸艇必須攜帶燃料，依靠燃料產生的反作用力來減速，才不至於失速損毀，但此舉



圖5 (A)為非洲大陸地形圖，黑色虛線為東非裂谷位置示意，部分地區伴隨火山活動現象。板塊構造學說告訴我們，全球岩石圈由七小板塊及十多個小板塊組合而成，板塊與板塊的邊界則以分離、聚合及轉型斷層的形式接合在一起。非洲東部有著一系列地壘與地塹系統構成的東非裂谷，伴隨地震與火山等地質現象，全長約6,000公里。現今科學家普遍認為此乃非洲板塊正在移離的證據，假以時日(數個百萬年後)，此裂谷終將成為大洋(圖幅編修自NASA//JPL/NIMA)。(B)、(C)為東非裂谷中段的衛星影像，拍攝時間分別在2014年6月與2015年2月。影像捕捉到距離約15公里的尼亞穆拉吉拉火山(Nyamuragira Volcano)與尼拉貢戈火山(Nyiragongo Volcano)，分別噴發之畫面(圖幅編修自NASA/GSFC/Earth Observatory)。



² 分離板塊構造邊界 (divergent tectonic plate boundary)，又稱建設邊界 (constructive margin)。

學的名稱，用來形容非洲東部一連串的渠溝 (trench) 現象；地質學家通常以東非裂谷 (East African Rift) 稱之，為一個分離板塊構造邊界 (divergent tectonic plate boundary)² (圖5)。地質構造包括一系列的張裂谷地 (rift) 與斷層系統，部分地區因為地殼拉薄而伴

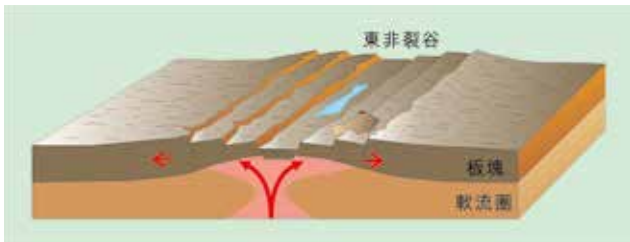


圖6 東非裂谷地質構造示意圖，因板塊受到拉張作用而拉裂，形成地塹。

生火山作用。主要因板塊受到拉張作用而撕裂，形成地塹 (圖6)，如果此作用不斷進行下去，最終將拉裂非洲板塊，形成新的海洋地殼。

最初提出水手峽谷形成機制的理論，約在70年代認為可能是河流侵蝕作用或是熱喀斯特作用 (Thermokarst activity) 造成的地形特徵。熱喀斯特作用是指地球或火星的永凍層因溫度上升而溶解，近而形成大型陷穴。只是後來研究資料顯示在河流作用前，此峽谷應該就已經存在，河流與熱喀斯特作用只是加大、加寬與加深峽谷的範圍。於是有人提出破火山口崩陷的理論，可能是因為地下岩漿逃逸所造成，而岩漿逃逸應該是往應力最小的表面移動。水手峽谷內，應該佈滿火山地形，但現階段觀察卻沒有發現廣布的火山地形及疑似熔岩流動的現象。因此，目前專家學者多認同由田中 (Kenneth L. Tanaka) 博士等人的理論，即是「由張力作用造成的拉裂系統」，與地球東非裂谷的形成機制相似，之後，再因為峭壁的山崩和其他的侵蝕作用使其擴大，造成今日所見之壯闊地貌。

勢必增加從地球發射火箭的負載，近而排擠其他可放置的科學儀器，所以，看來要等未來科技更為發達時，才得以發展出兩全其美的做法，我們才能真正「直接」觀察這太陽系上最高的火山。

裂谷地形

位於火星赤道附近的水手峽谷 (Valles Marineris)，又稱水手號谷，火星探測器水手九號 (Mariner 9) 為其命名來源，東西長達4,000公里，南北縱寬200至600公里，深約2至7公里，為火星上最壯闊的峽谷地形 (圖4)。地球上的峽谷地形中，能與之比擬的只有東非大裂谷 (Great Rift Valley)！東非大裂谷為地理



圖7 火星隕石坑衛星影像(HiRISE)，筆者特別挑出本圖的原因是本圖能觀察到兩隕石坑呈現「細胞分裂」的現象，可能原因是原先為一塊隕石，在進入火星時，一分為二，同時撞上火星後造成這樣的特殊地貌(圖片編修自NASA/JPL/University of Arizona，圖幅編號：ESP_020894_1395)。

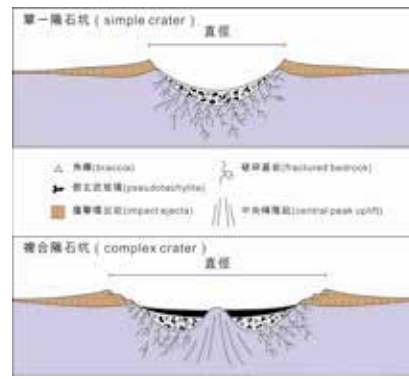


圖8 地球上的隕石坑剖面示意圖，能觀察到隕石坑為碗狀，坑環的內與外坡度呈現不對稱斜率等各種隕石坑特有地質構造現象。

撞擊地形(隕石坑)

撞擊地形(impact geomorphology)是因為小星體，如隕石或是彗星等，受到較大星體(如行星或是衛星)的重力吸引，偏離原先軌道而高速撞擊大星體表面所形成的環狀凹穴，又稱為隕石坑(meteorite crater或meteor crater)(圖7)。通常可以用來辨認地球上的隕石坑特徵條件有下列數點：

1. 隕石坑為碗狀，坑環的內與外坡度呈現不對稱斜率。部分的隕石坑中心有隆起上抬現象，稱為複式隕石坑(complex crater)；若無，則稱為單式隕石坑(simple crater)(圖8)。
2. 部分隕石坑中能發現破裂屑錐(shatter cone)，研究認為破裂屑錐為原來岩體受到瞬間撞擊產生的高壓(2 GPa - 30 GPa)，而從隕石坑頂部輻射狀散開的結構。
3. 地球物理特性，如墨西哥猶加敦半島發現的希克蘇魯伯隕石坑(Chicxulub crater)，其重力異常呈現對稱環狀地形。
4. 部分撞擊坑中能發現假玄武玻璃質(pseudotachylite，或稱假熔岩)，其為岩石受到瞬間高溫與高壓而熔融，產生似玻璃質的黑色物質，通常含有鎳、鉑、銻及鈷等，微量元素比較多。
5. 坑中或是周圍能發現高壓產生的礦物或是壓力變形現象，如鑽石(diamond)、重矽石(stishovite)與柯石英(coesite)等；顯微鏡下可見壓力變形現象，如石英和長石中晶體破裂。

目前都是利用物理現象證明火星上的隕石坑，因

此，只有1、2與3適用。畢竟現階段還沒有辦法直接採集標本，在實驗室進行化學分析或是在顯微鏡下解析。截至2015年3月止，研究資料顯示地球上發現大大小小的隕石坑，總共188個。然而火星表面上的隕石坑大大小小總計有數十萬個，其中有人類命名的約1,000個，多為科學家與地球上城鎮的名稱作為命名。為何數量差異如此龐大？

地球外面有一層薄薄的大氣層保護著，因此大部分的隕石在碰觸地表前，就如同電視情節「啊，有流星！」一般，「快許願」尚未出口就已經消失不見。顯然要夠大顆、夠耐燒的隕石才有機會撞擊地表留下痕跡，此外，因地表外營力相當劇烈，隕石坑容易受到風化與侵蝕作用而磨滅，只有在沙漠或極地才有比較好的保存環境，不然就是近期發生的撞擊事件，才有機會保存。更重要的是需要符合多條上述的隕石坑特徵條件，經專家學者共同認可才能確立，故目前地球表面發現隕石坑的數目不多。火星有大氣，但與地球相比又稀薄很多，火星表面外營力目前觀測結果顯示只有風的吹拂，總總因素相加，造就火星有一個麻花臉。

觀察火星上的隕石坑有什麼作用？用來估算火星地表存在的年紀！比方地質學家想要了解地球的一個地區之地質演化過程，必須知道長、寬及高等定量資訊，而最重要的是必須建立一套時間座標，才能比較，如研究全新世的河階地地質演育過程，最好的辦法就是「取得」岩石標本內特殊物質，如碳十四，經過一連串實驗與數學計算後，得到每一河階地的絕對

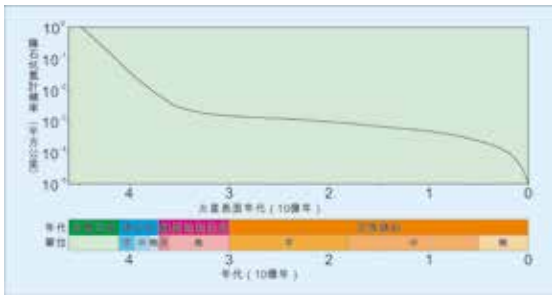


圖9 利用隕石坑數量估算而得到火星地質年代表。此表各階段間的年代控制只是近似值，且赫斯珀利亞紀與亞馬遜紀間的邊界年代也不是那麼確定。

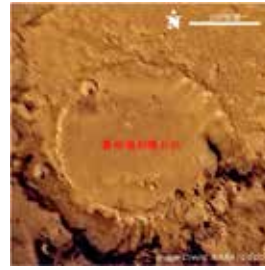


圖10 夏帕瑞利隕石坑衛星影像(圖幅編修自NASA/USGS)。

年代。研究火星的地質演化歷史也一樣，需要知道年代。儘管如此，現階段只有機器人過去火星，就算有取得「適合的標本」，但是定年實驗儀器很笨重，火星上還沒有相關的設備可以使用，怎麼辦？

科學家想到兩種推論的方式，第一種是根據「切割關係定律」，先有火星地表存在，而後才有隕石撞擊，產生隕石坑；大的隕石坑中，有小的隕石坑，表示大的隕石坑比較早生成。同時，大顆的隕石，很少很少，可能很久很久才會發生一次撞擊事件，表示如果火星上的某個區域能發現較大的隕石坑，這個區域的年紀較老；反之，只有小隕石坑的地區則是在較近的時期生成。另一種方式為假設每年都有一顆隕石去撞火星，到了一萬年就有一萬顆，因此就可以去比較每一個區域的隕石坑數量，密度高的地方，年代較老；反之，則較年輕。

利用此兩大推論，人類努力去數火星上的隕石坑數量，得到了每平方公里的隕石坑累計頻率為縱作標；利用隕石得到的絕對年代，我們知道太陽系約形成於45億年前，以45億年至今的時間軸為橫座標，藉此得到火星的地質年代表(圖9)，目前區分為四個階段，分別為前挪亞紀(Pre-Noachian Period)、挪亞紀(Noachian Period)、赫斯珀利亞紀(Hesperian Period)及亞馬遜紀(Amazonian Period)。值得注意的是，此圖中各階段間的年代控制只是近似值，且赫斯珀利亞紀與亞馬遜紀間的邊界年代也不是那麼確定。雖然此圖還是有很多地方有待補足，但卻能提供現階段科學家比對火星演化歷史的時間控制原則，彼此

約定成俗，才有一個討論依據，更能確認火星南半球比北半球要早形成許多。另外，地球與金星則由於強烈的外營力作用，地表早已重塑，無法保留早期原貌，故不能以隕石坑疏密度來建立地質年代表。

地球上已知最大的隕石坑是位於南非的弗里德堡隕石坑(Vredefort crater)，直徑超過250公里，這個大小在火星上卻排不進前十名。火星上直徑大於200公里的隕石坑共計23處，其中最大的一個位於火星赤道附近(中心座標為南緯2.7度，西經343.3度)，直徑超過460公里，臺灣全島南北縱長約400公里，這個隕石坑能將整個臺灣島包下！人類以義大利天文學家夏帕瑞利(Giovanni Virginio Schiaparelli, 1835-1910)為它命名，稱它為夏帕瑞利隕石坑(Schiaparelli crater)(圖10)。近年研究顯示隕石坑內有可能由風、火山或河流形成的沉積地層存在，科學家認為可能因為火星自轉軸角度改變而改變氣候，進而形成層層堆積的沉積物。

因地球的沉積循環演變是由氣候改變(冰期循環)造成，而古氣候變化是因地球軌道傾角改變而變化，約26,000年完成一次循環，這就是著名的米蘭科維奇循環(Milankovich cycles)，故科學家才會認為隕石坑的沉積地層是紀錄火星氣候變化的關鍵證據，這僅是由運行火星外圍的探測器拍攝之影像分析而得到的結論，並不是由火星表面上「直接」觀察的事證。

觀察火星的隕石坑還有一個很重要的原因，火星上仍然有大氣，會有風的作用，長時間吹拂會將火星表面覆蓋上一層厚厚的風積物，將地層露頭掩埋，而

火星上目前沒有液態水，沒辦法像地球一樣，藉由河流切開大地，看到露頭。只好利用隕石撞擊的力量將火星表面「炸」出一個洞，藉此研究火星的露頭。火星過去如果曾經有生命的話，隕石坑也是可能找到生命證據的地方，這也是為什麼我們人類登陸火星的探測車多鎖定隕石坑作為登陸的地點。其

他火星較知名的隕石坑有蓋爾隕石坑(Gale)，為2004年精神號(Spirit)及2012年好奇號(Curiosity)的登陸所在；維多利亞隕石坑(Victoria crater)則是2004年機會號(Opportunity)探測器的登陸地點，機會號也在隕石坑中發現河流沉積構造，不一樣的是，此次有「直接」由火星表面拍攝的照片作為證據(圖11)。

河流地形

河流是地球上塑造地貌的重要作用之一，河流作用包含侵蝕、搬運及堆積。產生的河流地形涵蓋河蝕地形、河積地形，以及河蝕與河積共同作用之地形，河蝕地形如峽谷、瀑布及壺穴等；河積地形為三角洲、平原及沖積扇等；兩種共同作用產生的地形為河階與曲流。河流系統分區通常分為上游集水區，以侵蝕現象為主；中游為搬運區；下游為沉積區，以

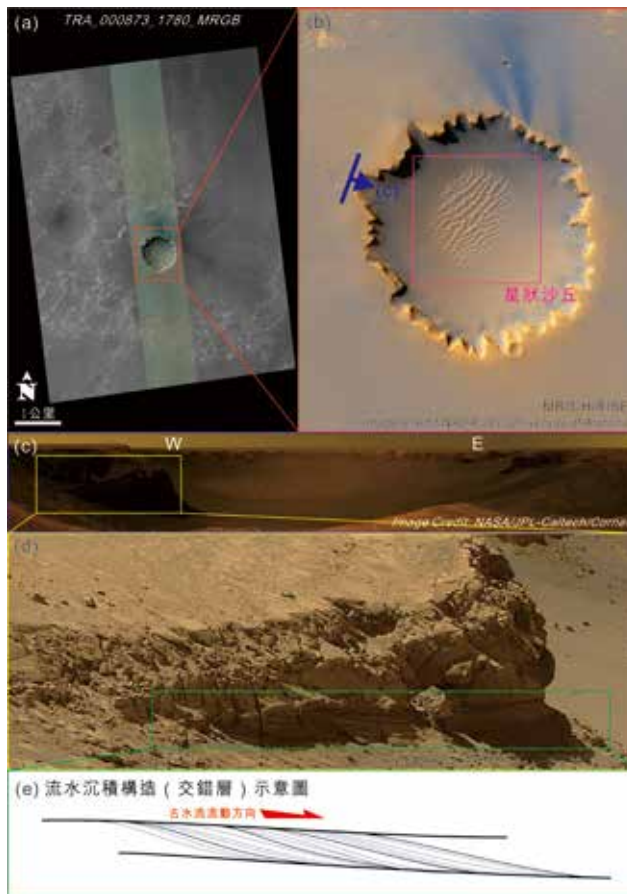


圖11 維多利亞隕石坑衛星影像與機會號拍攝之維多利亞隕石坑照片，能觀察到星狀沙丘與流水(河流)沉積構造(圖幅編修自NASA/JPL/University of Arizona與NASA/JPL—Caltech/Cornell)。

沉積物堆積為主。其他應用如平面地圖上的山谷等高線成V字形，尖端指向上游(地勢較高處)，現在我們也將這觀念應用於火星的殘存河流地形觀測，讓我們來看看火星上的卡西谷(拉丁文稱Kasei Valles)。

卡西谷長度達1,780公里，最寬處超過500公里，早期研究認為是由裂谷拉

張作用後，配合大規模洪水，加上冰河作用所塑造而成的外溢洪道河谷，或稱泛濫河谷(overflow valley)，是由低頻率的特大洪水沖刷侵蝕，使谷壁倒塌而形成的超寬大河谷系統，例如我們能觀察到隕石坑壁被侵蝕而消失的現象(圖12)。地球上研究證實的有北美洲末次冰期冰湖潰堤造成的大洪水及英吉利海峽海床的洪水侵蝕渠道殘跡等。主流派科學家估算要造成火星壯闊且寬廣的泛濫河谷，火星以前的溫度應該很溫暖，且存有大量水流及冰河，這些水哪去了？目前估計的可能位置有三處，一為儲積於南北極冰帽；二為礦化封存於火星表面土壤中，例如表層的褐鐵礦就是含水礦物；最後的可能性是長存於地底下壓力較高處。

最近還有另外一派的研究學者利用地形測計分析技術，將火星上的大型河谷與地球發育良好的河谷

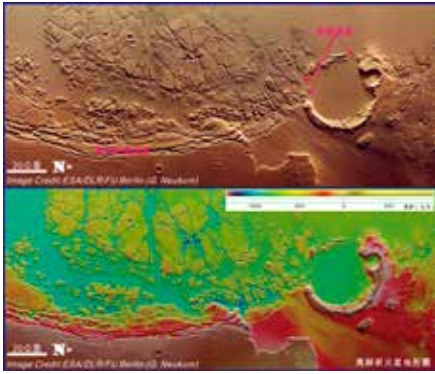


圖12 卡西谷部分區域衛星影像與地形圖，能觀察到隕石坑壁被侵蝕而消失的現象(圖幅編修自ESA/DLR/FU Berlin)。

對比，發現其實火星的大型河谷以及河流分支，都不算是發育良好，所以不需要有大量的水流來形成這些河谷，只需很多小型的水流多次沖積，就可以形成這類型的河谷。由於火星大氣稀薄，液態水無法長時間穩定地保存在地表，大部份時間是結冰狀態，等到地軸改變，某些地方變暖，這些冰河溶解成小型水流，慢慢形成這些河谷，這也意味著火星過去的氣候不需要很暖和。這理論挑戰了原本是主流派的學者，他們認為火星過去大氣比較厚，潮濕暖和的氣候應該持續了好幾千萬年，而這個新理論則認為火星大氣過去沒有很厚，而且氣候多為寒冷的型態，因此不利於孕育生命。

2015年的研究指出火星地表出現隨季節變化的暗黑色坡紋理(recurring slope line, RSL)，在較溫暖的季節擴大範圍，在較寒冷的時節減少或消失。這些坡紋理可能是「鹵水(濃鹽水)」在火星地表附近流動所造成，表示火星上可能含有大量鹽類的「液態水」存在，這發現無疑是令人興奮的消息。興奮之處在於要有液態水才有機會孕育生命，此發現讓人類在探尋地外生物的路程邁出一大步。接下來科學家想知道的事情是這些鹵水哪裡來的？鹵水的化學成分為何？且讓我們拭目以待。

下一個探索的開始

長久以來，人類就夢想著有一天能「親身」抵達火星，有朝一日，甚至能移民火星，但這一切的夢想需要奠基在一系列的基礎研究，舉凡航太科技、生命

科學，乃至本文介紹的比較行星學等研究領域，缺一不可。

現階段的行星地質學領域，科學家們主要是利用每個行星表面的衛星影像來判識不同星球上的地貌特徵，近而推想出可能的地質作用，哪些區域可能適合人類登陸？每每取得新的資料後，科學家們都期待能更進一步發現不同行星表面有哪些自然作用，同時會衍生出更多且更複雜的科學問題。

現代物理學之父愛因斯坦(Albert Einstein, 1879-1955)曾說過：「當我學的越多，我就越意識到我多麼無知。」的確，火星科學研究如愛因斯坦所言，當我們得到越來越多火星表面的細部地貌特徵，卻發現我們對她的了解越少！看起來好像很繁雜，絲毫沒有規律，這卻是行星科學領域迷人之處，永遠讓人有意想不到的驚喜與新的科學發現。

延伸閱讀：

英文部分

1. Greeley, R. (2013) Introduction to Planetary Geomorphology, Cambridge University Press. 252pp.
2. Harvey, A. (2012) Introducing Geomorphology : A Guide to Landforms and Processes, Dunedin Academic Press Ltd., 136pp.
3. Kahn, R. (1989) Comparative planetology and the atmosphere of earth : a report to the Solar System Exploration Division, National Aeronautics and Space Administration. 32pp.
4. Liu, Z. Y. C. and Zimbelman, J. R. (2015) Recent near-surface wind directions inferred from mapping sand ripples on Martian dunes. Icarus, 261, p. 169-181.
5. Neukum, G. and Wise, D. U. (1976) Mars: A Standard Crater Curve and Possible New Time Scale. Science, Vol. 194, no. 4272, p. 1381-1387.

中文部分

6. 何春蓀(2008) 普通地質學三版，國立編譯館主編，五南出版社出版。共750頁。
7. 劉勇君與梁勝雄(2015) 火星任務—解開火星沙丘之謎，科學月刊，第46卷，第11期，第812-815頁。