

火星地帽的變化及能量收支

簡正忠 葉永烜
國立中央大學天文研究所

摘要

火星的極冠目前是水及二氧化碳儲存最多的地方。隨著季節變化，夏季的極區，溫度上升，二氧化碳會昇華到大氣中，直到秋冬季時隨著溫度下降再由大氣中凝結至極冠。由火星全球測量者號 (Mars Global Surveyor) 中的火星軌道雷射高度儀 (Mars Orbiter Laser Altimeter) 觀測所得到的火星地表高度資料涵蓋的時間超過整個火星年，可以描繪出整個火星地形，由地形圖得出火星的地形是南半球地勢高於北半球，高度差約為 6 公里，南半球除了地勢高之外，由於受到比較多的隕石撞擊地質年代也比較老。火星自轉軸傾斜在數十萬年到數百萬年間做 0 度 45 度之間的運動，也影響到日照的強度，進而影響到冰冠的昇華及凝結。另外奧得賽號 (Odyssey) 利用探測船上的中子分光儀 (Neutron Spectrometer) 對火星表面進行探測，探測資料對火星地表及淺層水的分布有很大的助益。

關鍵字：火星，重力場，脫離速度，冰冠，水文循環

一、序言

太陽系的第四顆行星，平均距離太陽約為 1.5AU，火星的直徑大約為地球的 53%，為 6780 公里。重力場為地球的 38%，平均脫離速度為每秒 5.027 公里，低於大氣中的氣體分子速度，所以長久以來氣體分子逐漸逃脫。目前火星的大氣壓力約為 6~10mb，只有地球表面壓力的百分之一，也因為地表壓力如此之小，導致水無法以液態存在於火星表面。不過在地底下壓力比較大的地方還是有可能有液態水的存在。

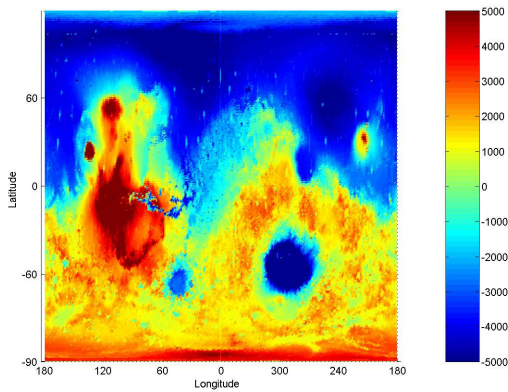
火星自轉一圈為 24 小時 37 分 22.7 秒，跟地球差不多，公轉一圈為 687 個地球日，火星

自轉軸與軌道成 25.2 度，與地球自轉軸傾斜角 23.5 度相當接近，目前火星的近日點為南極的夏天，遠日點則是在北極的夏天。地表的溫度則是介於 -140 ~ 20°C。

火星上水的分布位置及數量一直是科學家很有興趣的課題。目前確定的是南北極的冰冠蘊藏有數量最大的水冰。季節性的冰冠（介於緯度 60° ~ 86°）估計在北半球極區約有 3.1×10^{15} kg，在南半球極區約有 3.3×10^{15} kg (Smith et al., 2001)。所以測量南北極冰冠的高度就提供了季節變化時能夠昇華的量以及冰冠與大氣的交互作用，而這種交互作用也可以讓我們了解到火星過去及現在的水文循環。1997 年九月到達火星軌道的火星

全球測量者號（Mars Global Surveyor），上面搭載了火星軌道雷射高度儀（Mars Orbiter Laser Altimeter），這具高度儀提供了火星地表高度的測量，這些資料也讓我們對火星季節及氣候的演化有新的了解。

(a)



(b)

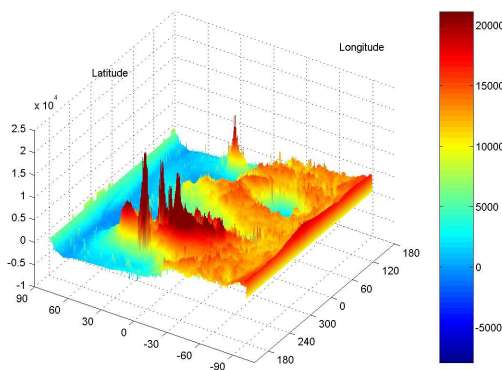


圖 1. 火星軌道雷射高度儀（Mars Orbiter Laser Altimeter）觀測所得到的火星地表高度資料，(a) 火星全球高度圖 (b) 由側面所看到的火星全球高度圖，由圖中可見南半球的地勢高於北半球地勢。

二、火星的地形

由火星全球測量者號（Mars Global Surveyor）中的火星軌道雷射高度儀（Mars Orbiter Laser Altimeter）觀測所得到的火星地表高度資料，火星全球測量者號所觀測的地

形資料涵蓋的時間超過整個火星年，透過這些資料繪製成立體的火星地形圖（圖 1a、b），以及從南北極上空俯視的地形圖（圖 2、3）。由圖 1 可看出火星的地形是南半球地勢高於北半球，高度差約為 6 公里，火星地勢最低的地方在於南半球的海臘斯盆地，高度約為海平面下 8180 公尺，地勢最高的則是在北半球的奧林帕斯火山，高度為 21,287 公尺。南半球除了地勢高之外，地質年代也比較老，而且受到比較多的隕石撞擊。北半球的地質年代則是屬於比較年輕，而且隕石坑比較少，可能是早期受到火山的作用所填平。

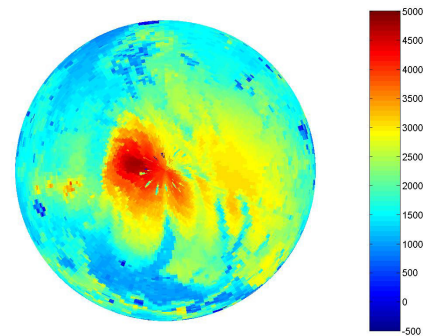


圖 2. 火星北極極冠地形圖，中心點附近黃色區域地勢較高，高度約為-2000m。

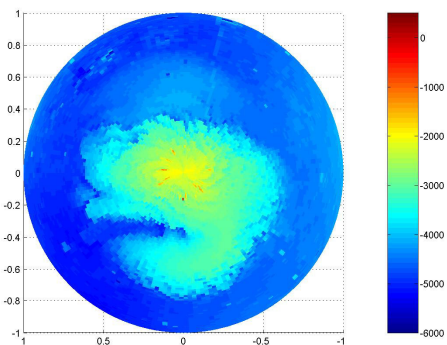


圖 3. 火星南極極冠地形圖，南極最高點不在正南極上，而是在經度 0 度至 90 度的範圍內，圖中的紅色區域即是。

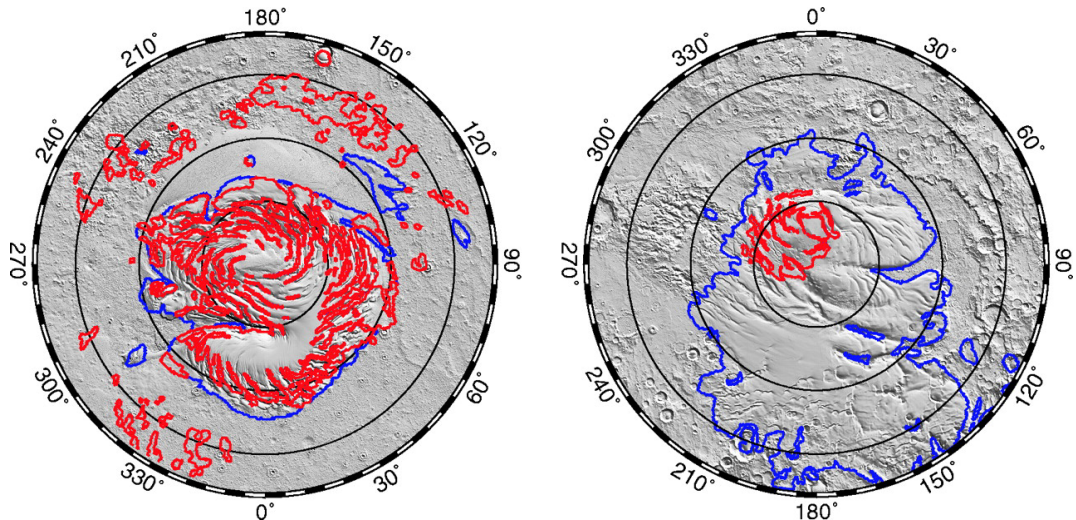


圖 4.左圖為北極地形右圖為南極地形圖 (Smith et al.,2001)，紅色區域表示是夏季時殘餘極冠的範圍，藍色區域表示是極冠延伸最大的範圍。

圖 2 描繪出火星北極極冠的地形圖，中心點附近黃色區域地勢較高，高度約為-2000m，圖 3 是火星南極極冠地形圖，南極最高點不在正南極上，而是在經度 0 度至 90 度的範圍內，圖中的紅色區域即是。當北半球夏季時，由於溫度上升超過二氧化碳的昇華溫度 (150 k)，覆蓋在北極極冠的乾冰也隨之昇華，剩餘的冰冠則是由水冰所結成，不過極區的溫度有時也會超過 205k，這也會使的水冰開始昇華，當北半球開始接近冬季時，水汽也會由空氣中慢慢凝結，剛開始會集中在極區附近，當溫度越來越低時，冰冠也會慢慢的移向低緯度。由於南半球的地勢比較高，相對的溫度及大氣壓力也比較低，因此南極極冠的乾冰在夏季時並不會完全昇華，所以即使在南半球的夏季還是可見乾冰的蹤影。

圖 4 左圖為北極地形右圖為南極地形圖 (Smith et al.,2001)，紅色區域表示是夏季時殘餘極冠的範圍，藍色區域表示是極冠延伸最大的範圍。這種季節性冰冠的組成主要是乾冰，從圖中也可清楚的看出，南極極冠

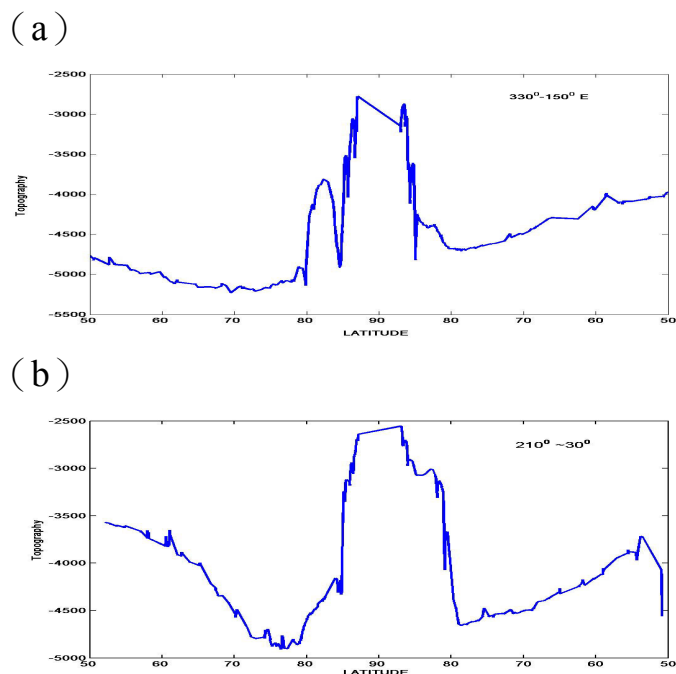


圖 5.由圖中顯示北極冰冠與其他高緯度地區的高度差約有三公里，由於地勢從外圍向極區中心下降，所以水可能受到重力作用順著地勢向極區集中，(a) 3300~1500 剖面 (b) 2100~300 剖面。圖中左側的經度大於右側。

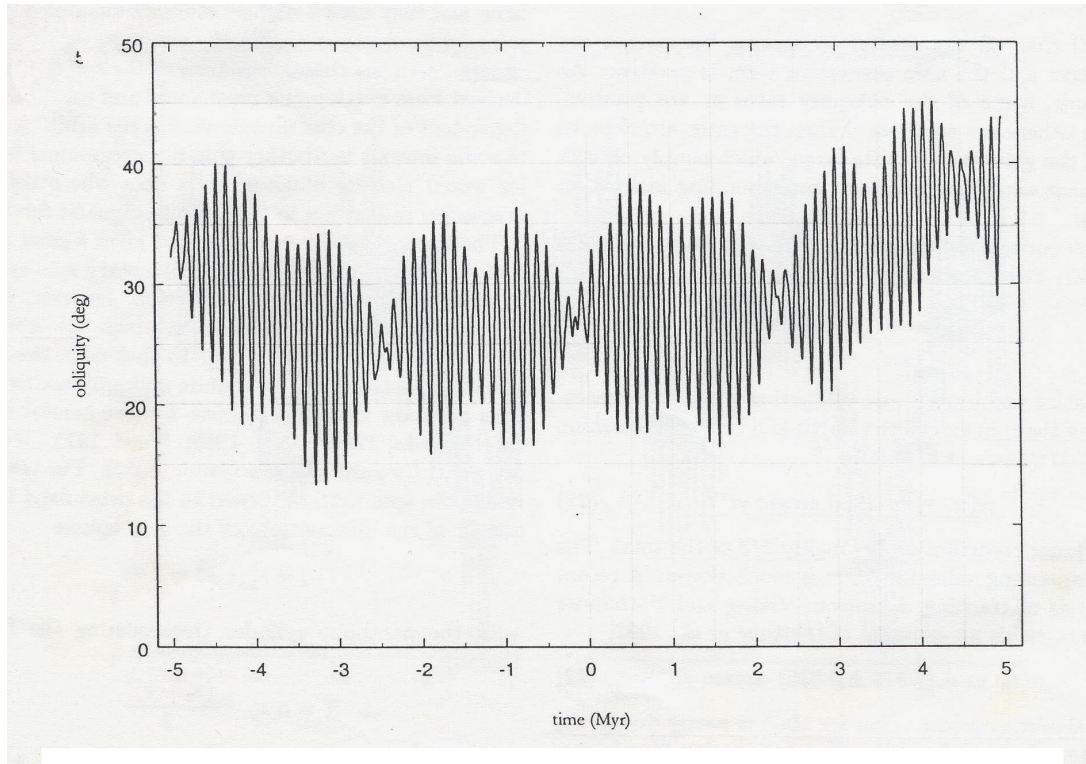


圖 6.火星自轉軸隨時間變化圖，橫軸代表時間，單位是百萬元，中間 0 的位置表示是現在，縱軸的代表自轉軸傾斜角度。

範圍的季節性變化以及延展範圍都是最明顯的。從剖面圖的角度來看，從經度 330 度到 150 度橫越北極極冠的剖面圖（圖 5a）及從經度 210 度到 30 度橫越北極極冠的剖面圖（圖 5b）來看，北極冰冠的高度大約高出 3 公里左右，而且地勢從低緯度向中心高緯度遞減，所以水可能受到重力作用順著地勢向極區集中。

南北極冰冠範圍的大小與日照角度有關，而日照角度與火星自轉軸傾斜角度有關，火星自轉軸傾斜角度會在數十到數百萬年間做 0 度 45 度之間的運動，這樣的運動主要是受到金星重力共振的影響，導致火星自轉軸角度的變化呈現渾沌狀態（圖 6）（Clifford et al. 2000），也使的長時間計算日照在火星上的影響變的困難

自轉軸傾斜角度的影響除了對冰冠的昇華及凝結有很大的影響之外，對火星氣候

的變化也有很大的影響。例如：在火星自轉軸傾斜角度小時，此時極區處於極低的溫度，乾冰可以持續維持在極區的位置，此時的大氣壓力小到無法揚起在火星表面的沙子產生沙塵暴，也減少了沙塵暴的發生。

三、火星表面及地底的溫度變化

火星地表溫度主要由入射能量與輻射出的能量所控制。火星地表及地底的溫度也是影響冰冠是否存在的重要因素。在計算火星地表溫度時假設能量的平衡有以下幾項：

$$I(1 - A) - \sigma T^4 - k \frac{dT}{dz} + L \frac{dm}{dt} = \rho c \frac{dT}{dt} dz$$

由左至右分別是入射能量，輻射能量，熱傳導項，潛熱釋放項及溫度隨時間變化項。 I 是平均的日照量， A 是反照率， ϵ 是發射率， σ 是 Stefan - Boltzmanns 常數， k 是傳導係數， L 是二氧化碳的潛熱（590,000Jkg⁻¹），

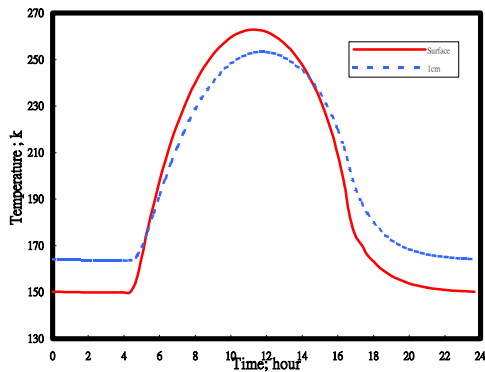


圖 7. 是火星地表及地底下 1 公分的地方在一天內的溫度改變情形，紅色線代表地表溫度，藍色線代表地底下 1 公分的溫度值。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)$$

ρ 是冰的密度， c 是比熱。而在計算地底溫度時，使用的是一維的熱傳播方程式如下：

T 是溫度， k 是傳導係數， ρ 是冰的密度， c 是比熱。利用 Crank – Nicholson 差分法來求出地底各層的溫度值。圖 7 是火星地表及地底下 1 公分的地方在一天內的溫度改變情形。

四、Odyssey HEND (High Energy Neutron Detector) data

正在火星軌道探測的奧得賽號 (Odyssey)，利用探測船上的中子分光儀

圖 9. HEND 針對火星觀測得出宇宙射線能量衰減程度比值所繪出的球面圖 (南半球)，圖中數值越低的部分，表示氫 (H₂) 的含量越

(Neutron Spectrometer) 對火星表面進行探測，將探測所得到的資料繪製成立體及球面的圖 (圖 8、圖 9)。中子分光儀對探測行星上的氫有很大的貢獻，尤其是以能量介於 0.4 到 500 keV 這個波段。由於火星磁場不強而且也只有稀薄的大氣，因此宇宙射線可以進入到火星的地表，地表受到宇宙射線的轟炸之後，伴隨著產生大量中子，這些中子在地底下 1~2 米與其他物質的原子核反應產生伽瑪射線，不同的化學元素有不同的伽瑪射線，所以可以用伽瑪射線來判別火星地表的元素。當宇宙射線撞擊地表及地底產生高能中子時，若地表及地底下有水時，這些高能中子的能量會被水中的氫原子耗損，因此探測船上的中子分光儀探測到能量耗損越多的地方，有水的機率會比較高。

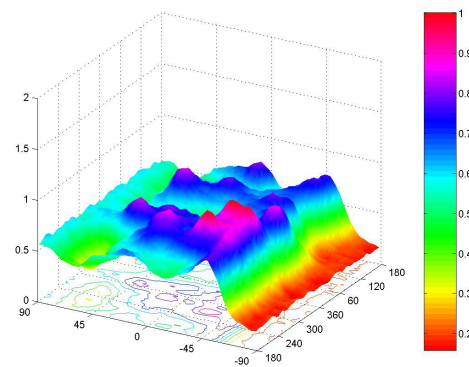


圖 8. HEND 針對火星觀測得出宇宙射線能量衰減程度比值所繪出的立體圖，圖中數值越低的部分，表示氫 (H₂) 的含量越高。

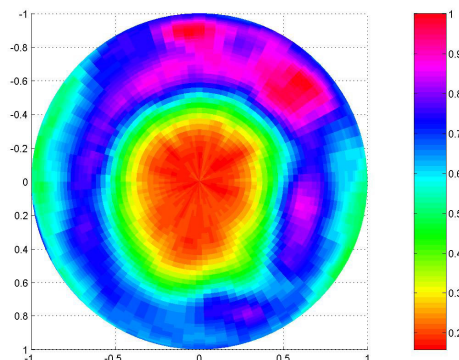


圖 8 顯示數值最低的地方出現在南極附近，接近極區時數值明顯降低，這與南極冰冠以及高緯度地底下有水的推論相吻合。圖 9 則是將資料以球面圖的方式顯現，可以明顯看出在南極區附近數值是最小的。

五、 結論

分析火星極冠的沉澱物對火星地質學上的紀錄及火星的歷史氣候有很大的助益，藉由這些資料可將時間回推到 $10^5 \sim 10^8$ 年。而當火星自轉軸傾斜角度大時，南北極的溫度將會升高，造成永久冰帽的範圍縮小，相反如果自轉軸傾斜角度小時，則冰冠的昇華速度也會降低。

六、 參考文獻

- Bills, B. G. Obliquity - oblateness feedback on Mars, *J. Geophys. Res.*, 104 E12, 30,773 – 30,797, 1999.
- Clifford, S. M., D. Crisp., and D. A. Fisher. The State and Future of Mars Polar Science and Exploration, *Icarus*, 144, 210–242, 2000.
- Larsen, J., and D. J. Dorte, Interior Temperatures of the Northern Polar Cap on Mars, *Icarus*, 144, 456 – 462, 2000.
- Smith, D. E., M. T. Zuber, S. C. Solomon, and R. J. Phillips, The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution, *Science*, 284, 1495 – 1503, 1999.
- Smith, D. E., M. T. Zuber, and G. A. Neumann, Seasonal Variations of Snow Depth on Mars, *Science*, 294, 2141–2146, 2001.
- Zuber, M. T., D. E. Smith, S. C. Solomon, J. B. Abshire, and R. S. Afzal, Observations of the North Polar Region of Mars from the Mars Orbiter Laser Altimeter, *Science*, 282, 2053 – 2060, 1998.