

大氣與海洋—— 談系內行星的演化

劉玲根

行星的演化不完全取決於它所經歷的歲月，星體冷卻的快慢更是另一要件。本文探討太陽系內四個行星的大氣與海洋形成，以及地球為何如此與眾不同。

在今天，金星和火星的大氣十分雷同，而位居二者間的地球大氣，卻截然不同。此外，海洋也只存在於地球表面。究竟是什麼原因呢？簡單來說，各行星間不同的大氣和海洋，是由各自大小不同的質量和衍生的冷卻演化所致。而地球特有的大氣和海洋，則是導因於一次「大撞擊造月」的意外。

問題：地球不一樣嗎？

太陽系的內行星包含有水星、金星、地球和火星。其中水星的生涯較為坎坷，而且也沒有大氣和海洋。

假設在浩瀚的宇宙間，金星、地球和火星是由類似的固態物質（如含水礦物和碳酸鹽

等）、經由類似的過程所匯聚（accreted）而形成的。這個假設是十分合理且極有可能，而且若果真如此，這三個內行星的大氣和海洋應當十分相同或類似。然而，今天金星和火星的大氣是由大於95%的二氧化碳所組成，和由氮及氧組成的地球大氣完全不同；不但大氣的組成不同，質量只有地球80%的金星，其大氣壓力也比地球大出90餘倍。再者，在內行星中，也只有地球表面存在著海洋。地球位居金星和火星之間，而且也不是相隔很遠，為何它們的大氣和海洋會有如此大的差異呢？

在提出本文作者的模型和理論之前，我們先簡單地回顧一下科學文獻中對這一類課題的說法

（通俗的說法，如盤古開天闢地和雨水由龍在雲端灑下等，都不在本文的範疇內）。因為內行星的質量都不是很大，所以它們（水星除外）的大氣不太可能是在行星匯聚成長之後，再由外太空的氣體物質附加形成；它們的大氣應該是源自於組成內行星的固態原始物質。而例外的水星是內行星中質量最小的，本不應有所謂的大氣，但在它極稀薄的大氣中卻含有氬、氖兩種氣體。這是因為水星靠近太陽，它的大氣是由太陽風吹過來（即外加上去的）而形成的。

關於內行星大氣和海洋的來源有許多說法，但其實主要都是針對地球，並且大氣和海洋常同出一源。現在將幾個不同說法簡列如下：

一、地球成長後，它的大氣和海洋均由內部經「放氣」過程累積而成的。

二、地球的大氣和海洋均由一個原始存在的大氣分化而來，而這個原始大氣是在地球匯聚過



圖一：四個太陽系的內行星，由左而右為水星、金星、地球和火星。

程中一起成長的。

三、海洋是在地球早期的時候，由相當於今日海洋總量的一顆「冰月亮」撞擊而成。

四、海洋是由太陽系內的許多像小彗星的「髒雪球」不斷撞擊而成的。

第一和第二種說法的詳細過程，

在科學文獻中說得也不多，甚至海洋是在地球早期或晚期，一次或漸增而形成的說法也莫衷一是。第三種說法，更是形同沒說一樣。而第四種說法，則是當今較流行和較被接受的。不過在這種說法中，太陽系內的髒雪球似乎是長眼睛的，它們專找地球撞擊，而對地球一前一後的金星和火星不感興趣。當然有人認為，火星曾經也擁有過海洋，只不過現在不見了。至於金星呢？那是因為髒雪球只存在於金星以外的太陽系中。

模型和理論

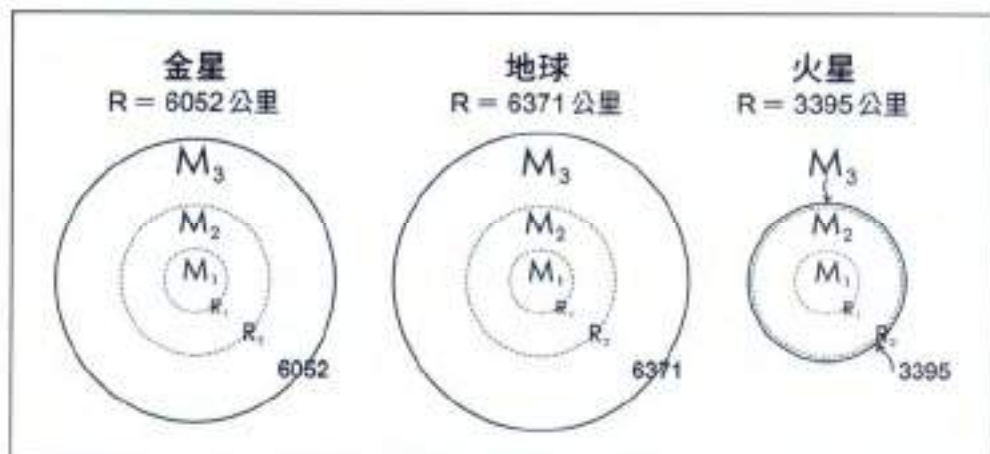
內行星的大氣源自於組成內行星的固態原始含水礦物和碳酸鹽等物質，除非我們認定在組成內行星的固態原始物質中沒有這些物質的存在，否則本文提出的有關於內行星大氣海洋來源的說法是相當有根據的。在匯聚初

期，固態原始物質相互撞擊所產生的壓力和溫度都不會很高，水和二氧化碳都保存在含水礦物和碳酸鹽中，並被埋在成長的行星中心（如圖二中 M_1 ）。筆者曾於1988年為文，推算出被埋在成長中內行星中心的質量，約相當於今天地球表面的總水量（大約 1.4×10^{24} 公克）。當行星再繼續成長時，原始固態物質和成長中的行星撞擊的壓力與溫度都會升高，以至於將原始固態物和成長中行星表面所含的揮發性氣體（如水和二氧化碳）釋放出來。在成長的行星個體還較小的時候（即引力較小），釋放出來的氣體物質（即相當於圖二中 M_2 所含的氣體物質）大多會流失到外太空去。

但依據唐納修（Donahue）1986年的論文，當行星的質量長大到約 10^{26} 公克時（即大到超過圖二中 R_2 的半徑時），成長中

的行星引力就會大到把釋放出來的氣體（氫氣除外）抓住，而形成最原始的行星大氣。換句話說，行星的原始大氣是來自圖二中 M_2 部位所含的揮發性氣體（如水和二氧化碳）。這樣的想法和說法有許多高壓撞擊的實驗結果支持。在實驗室中，科學家將若干含水礦物和碳酸鹽作高壓撞擊實驗，發現撞擊達到高壓高溫後，此類礦物會將水氣和二氧化碳釋放出來。

尚有一種學說，認為行星在匯聚成長到約地球現在半徑的40%時，匯聚撞擊所產生的高溫高壓會將成長中的行星表面物質和新撞擊上來的固態物質全部熔融。也就是說，成長中的行星自此之後，表面會覆蓋上厚厚的一層「岩漿海」。一旦岩漿海形成，撞擊所釋放出來的水幾乎全會熔入其中，而釋放出來的二氧化碳便幾乎全都進入原始大氣



圖二：想像中內行星匯聚成長後的內部結構。 R_1 是撞擊體和成長行星表面物質中的揮發性氣體（如 H_2O 和 CO_2 ）由含水礦物和碳酸鹽釋放出來時的半徑，其內所含的質量為 M_1 。不同的含水礦物和碳酸鹽各有其不同的 R_1 和 M_1 值，但其間相差甚少，姑且忽略之。此時 M_1 的揮發性氣體全保留在含水礦物和碳酸鹽中。由 R_1 成長到 R_2 之間所釋放出來的揮發性氣體全流失到外太空去了，因為 R_1 到 R_2 之間，成長中行星的質量或引力尚無法大到吸住釋放的氣體。當行星長大到 R_2 時，其間的質量（即 $M_1 + M_2$ ）已約大於 10^{26} 公克，此時所有氣體（氫氣除外）都無法逃離成長中行星的引力，而形成最原始的行星大氣。換言之，行星的原始大氣是由 M_2 中釋放出來的氣體所組成的。

中。這樣的推理符合許多高溫高壓實驗觀察的結果。在常壓下，水是不溶入熔岩的，但水在高壓下卻十分容易溶入熔岩。高壓下的熔岩，像海綿似地，會吸收大量的水。但二氧化碳的情況就不同了，二氧化碳在熔岩中的溶解度很小，而且也不隨壓力做較大的改變。

在內行星後半期的成長中，外層會覆蓋上厚厚的一層「岩漿海」。圖二中M₁部位的水幾乎全溶在岩漿海中，而行星本體之外則包覆由M₁部位所釋放的二氧化碳大氣。最後，行星耗盡了它軌道上的固態原始物質而停止生長。此後長成的行星表面開始冷卻固化，而溶在「岩漿海」中的水分，要等到行星內部的矽酸鹽地函完全固化後，才有可能慢慢地溢出行星表面，進入大氣和形成海洋。

金星：二氧化碳大氣

其實，所謂行星的演化，基本上就是指它們冷卻的過程。金星表面的溫度，是太陽系所有行星中最高的，換言之，金星有可能是內行星中，冷卻和演化得最慢的。今天的金星，就是外面裹著一層厚厚的二氧化碳大氣，而且表面絲毫沒有水的痕跡。

金星表面缺水或無水的事實，是一個由來已久的懸案。不過，對此事能提出的解釋不多。

筆者1988年的文章指出，金星表面和內部的溫度甚高，其內部尚圍有大量的熔岩（即未固化的岩漿海）。這意味著金星自匯聚成長至今，其矽酸鹽的地函尚未完全固化。所以，金星的水至今仍儲存在內部的熔岩中。此說在楊（Yung）和德摩（DeMore）1999年所著中，頗表支持。至於金星為何冷卻演化得最慢的原因，很可能是因為它那一層厚厚的二氧化碳大氣。

地球：大撞擊造月

在太陽系中，我們的地球位居金星和火星之間，同時它也是內行星裡最大的。由前面對金星的描述，金星可說是演化得最慢而且可能至今尚未完全固化。前面也說過，行星所謂的演化就是它們的冷卻過程。不過，演化過程自然也包括意外的發生。地球的演化可能就是一個或數個意外下的產物。如果沒有意外發生的話，今天的地球和金星可能十分雷同——沒有海洋，而且裹著一層厚厚的二氧化碳大氣。

地球雖比金星距太陽略遠一些，但差距其實也有限。然而，地球的質量比金星大23%，再加上若沒有意外發生的話，原本的地球理應是被一層厚厚的二氧化碳大氣包裹住的。這樣的前提下，實在沒有太多的理由相信地球是早該完全固化的，甚至相信

固化後釋放出來的水自然就會成為地球的海洋。

地球在剛匯聚成長後的前一億多年裡，大致上應該是和金星的演化差不多的——地表覆蓋著厚厚的岩漿海，外面包著厚厚的二氧化碳大氣。筆者曾推算過，以地球的質量，地表當初足足有110個大氣壓的二氧化碳。就在這一億多年裡，地球的岩漿海尚未固化的時候（地表或已固化），意外發生了。地球突然遭遇到一顆如火星般大小的星球撞擊（圖三）。據二十世紀80年代科學家的電腦模擬，這樣的「大撞擊」一直深入到地函和地核的交界。撞擊後，火星般大小的撞擊體幾乎粉碎而飛出去了，帶著些許地球的物質，慢慢地，這些飛出去的物質就繞著地球匯聚成了月球，而撞擊體的鐵核心則留給了地球。這就是二十世紀有名的「大撞擊造月」學說。

如果月球果真是這樣形成的話，這一大撞擊也應該把溶在地球外層岩漿海裡的水，全都趕入二氧化碳的大氣裡去了。大撞擊一說裡，對揮發性氣體少有著墨。前面也提到過，當行星的質量成長到大於 10^{24} 公克時，除了氫氣之外，整個行星系統是封閉的。也就是說除了氫氣之外，沒有任何其他的氣體可以逃離撞擊中的地球和月球系統，因為地球的質量達到 5.976×10^{27} 公克。

如此說來，在大撞擊後，岩漿海裡釋放出來的水氣和原本大氣裡的二氧化碳都是緊裹著地球的，既不會隨月球跑，也不會流失到外太空去。不過，少部分的水氣和二氧化碳，也極有可能與組成月球的物質作用，而形成含水礦物和碳酸鹽，並保存在月球裡。總括說來，在



圖三：地球在匯聚成長一個多年裡，岩漿海尚未固化的時候，意外遭遇到一顆如火星般大小的星球撞擊，這樣的大撞擊一直深入到地函和地核的交界。

大撞擊之後，地球的大氣已變成由水氣和二氧化碳所組成。

筆者曾於 2004 年為文，描述一個由水 (H_2O) 和二氧化碳 (CO_2) 形成的混合體在地球表面冷卻的過程 (如圖四中所標示的地球位置)，以兩倍於今日地球海水的量 (約 550 巴大氣壓) 和 100 巴的二氧化碳為大氣模型。圖四是將水和二氧化碳兩個相圖重疊的結果，而不是 H_2O-CO_2 的混合體相圖。依圖四所示，此時混合體的溫度與壓力都在水和二氧化碳的臨界溫壓之上 (即超臨界)，混合體只是流體，冷卻並不會發生氣態變液態的過程。

如圖四所示，當地球表面溫度冷卻到約 $450^\circ C$ 時，流體的密度有可能會突然增大並附在地球表面成了最原始的海洋。這樣的海洋是由高溫超臨界的 H_2O-CO_2 流體所組成的。如果這種情況並沒有發生的話，當地球表面溫度

繼續冷卻到約 $300^\circ C$ 時，依杜安 (Duan) 等人所發表的 H_2O-CO_2 混合體相圖來看，此時超臨界的 H_2O-CO_2 流體會分成富含水而少二氧化碳的液體及富含二氧化碳而少水氣的氣體。如此，大勢已明，此時的地球已覆有富含水與少量二氧化碳的海洋和豐富的二氧化碳與少量水的大氣，且大氣壓會急劇下降。

無論何種情況，原始的地球海洋應是高溫 ($300-450^\circ C$) 且富含二氧化碳的水。如此的海洋當然極有可能與地球表面最多的礦物——長石很快地作用，而形成碳酸鹽和黏土礦物等沉澱在海底。同時大氣中的二氧化碳又必須大量溶入海洋，周而復始，很快地，大氣中的二氧化碳都被移到海底去了。

沒有了二氧化碳大氣的地球，當然要比包著一層厚厚二氧化碳大氣的金星快速冷卻下來。

地球原始的大氣在失去二氧化碳之後，僅剩下了殘餘的氮氣和少許水氣。水氣會很快分解成氫和氧，而氫又很快流失到外太空去了。本文對地球很早就孕育出海洋的說法，和地球化學證據顯示地球在約 42 億年前就有了海洋，在年代上是相符的。

不少人認為行星只

要有了海洋 (或只是水或冰) 和大氣，就可能產生生命體，這恐怕只是一個「可能」而已。如上述，地球之所以有海洋，完全是因為大撞擊造月的意外結果。而地球上之所以有生命也應該是另一個意外 (如外物撞擊、閃電擊雷或火山爆發等) 的結果。

火星：消失的海洋

依據前面的描述和推論，如果沒有意外發生的話，像金星一樣，火星應該也包有一層二氧化碳大氣的。但和金星不一樣的是，火星的大氣壓要遠比金星來得小，因為如圖二所示，火星的 M_3 部位很小。就目前的觀察而言，火星的大氣是完全符合這樣的推理的。反過來講，我們也可以揣測，火星在冷卻演化至今的過程中，可能不曾遭遇過太大的意外事件。

溫度是使氣體流失的最大動

力，重力是吸住氣體形成大氣的基本力量，但大氣的組成和多寡更取決於它的來源物質。當然，這只是筆者個人的見解。在文獻中，有不少人認為火星現在的大氣與原始的大氣是十分不同的。不但化學組成不同，以前的火星大氣還要比現在的厚實很多。持這樣說法的人，接下來當然要創出許多不同模型或說法來解說火星大氣的演化和消長。

就冷卻演化而言，火星是應當比金星和地球老上許多，因為火星是最靠外側（或距太陽最遠）和最冷的一顆內行星，以它的大小（其質量僅為金星的13%或地球的11%）和遠離太陽的位置，我們不難想像火星是早就已經固化了的。那麼，在火星岩漿海固化後，釋放出來的水又去到哪裡？因為就我們所知，目前火星的表面可是無水的。2008年7月，美國航太總署的科學家曾經在火星的土壤中找到了水的蹤跡（應該是冰的形態）。火星內部含有水應該是毫無疑問的，但大部分的水應是存在於含水礦物裡面。

前面說過，筆者於1988年就為文，推算出約有相當於今天地球表面總量的水是被埋在火星的內部。問題還是出在為什麼火星表面沒有海洋？這一問題早在二十世紀60、70年代裡就已經吸引了科學家的興趣，有許多人

由地球表面對火星的觀察，發現火星表面分布許多類似地球上山谷或乾枯河谷的地形。經由這些觀察，科學家早已斷定火星表面早期是存在過海洋的。那麼，火星存在過的海洋又去了那裡？最簡單的說法，當然是因為火星的質量太小，它的重力無法吸住揮發的水氣。歲月的流逝，就將火星曾存在過的海洋都蒸發流失到外太空去了。筆者曾推算過，以火星的質量，它的重力僅能吸住較重的氣體如二氧化碳、氬氣和氫氣等，火星是無法吸住水氣的，正如地球的重力是無法吸住氬氣的。若真是如此，火星海洋的形成過程就很值得探究。

火星在匯聚成長後，有許多水是溶在岩漿海中的，要等整個岩漿海固化後（約700~800℃以下），才能將水釋放出來。釋放出來的水也不會全部進入大氣，有不少的水也會和其他物質作用而變成含水礦物保存下來。所以說，火星內部有水，是完全不足為奇的事。

前面已說過，火星在完全固化時的二氧化碳大氣壓不會是很大的（應和今日的差不多）。所以，根據圖四所示的 H_2O 和 CO_2 相圖來看，在火星表面溫度冷卻到100℃之前，所釋放而進入大氣的水氣，全都會流失到外太空去。火星海洋的形成，必須要等到表面溫度降到100℃之下，才

有可能。要能成為海洋，還必須要水由內部的溢出率遠大於水在表面的蒸發率。如果火星表面確實存在過海洋，那個存在過的海洋，大多數都在火星表面溫度降到0℃之前，流失到外太空去了。當然，在表面溫度降到零下之後，有相當的水也可能以冰的形式被保存下來。但大部分的冰也都會昇華進入大氣而消失。美國航太總署在火星土壤中找到水（更應該說是冰）就有可能是這樣倖存的冰吧！

水星：無水也無氣

名不符實地，這一顆最小而且最接近太陽的水星，既無水（海洋）也無氣（大氣）。當然，嚴格說來，水星是有大氣（甚至還有水氣）的。但水星的大氣壓遠比真空管的氣壓還小，我們實在是可以忽略它。但若依唐納修1986年的計算而言（即行星質量長到大於約 10^{26} 公克時，系統是封閉的），無水無氣的水星是不容易理解的，因為水星的質量（ 3.30×10^{23} 公克）並不算太小。

不過，筆者曾計算過，要將 CO_2 吸住形成大氣的最小行星質量為 6.415×10^{23} 公克（即圖二中 $M_1 + M_2$ 的質量），而二氧化碳又是天然氣體中分子量最大和最容易被吸附的氣體。這個標準，約為水星質量的兩倍（或說水星根本就沒有 M_2 ）。如此無水

又無氣的水星就比較容易理解。

晚上，水星的表面溫度固然可以降到 -180°C （低溫有助於氣體的凝聚，甚至液化、固化而保存下來），但白天溫度又升到了和金星差不多（約 420°C ，金星日夜均溫為 470°C ）。此外，還有一些文獻記載，今天的水星有可能經歷過相當坎坷的生涯（一次或多次的大撞擊，以及太靠近太陽的「威脅」）。

至於水星是否存在含水礦物或碳酸鹽？這是一個很難回答的問題，主要肇因在於它可能經歷過相當複雜的演化過程。

月球：有含水礦物

嚴格地說，月球實在不該歸屬內行星之一的。但月球太接近地球了，人類對它的大氣和海洋

總是抱著相當大的興趣。由上節對水星的陳述，我們很容易理解月球應該是沒有大氣和海洋的，因為它的質量遠比水星還小。不過，如水星一樣，月球還是有極稀薄的大氣。

如果月球真由前述的大撞擊意外所產生，那麼月球上極有可能存在著含水礦物和碳酸鹽。美國航太總署於2009年10月以火箭撞擊月球的實驗和於11月發表的結果，證實月球含有水。這樣的實驗結果應該只是證明月球確實存在含水礦物吧！

結語

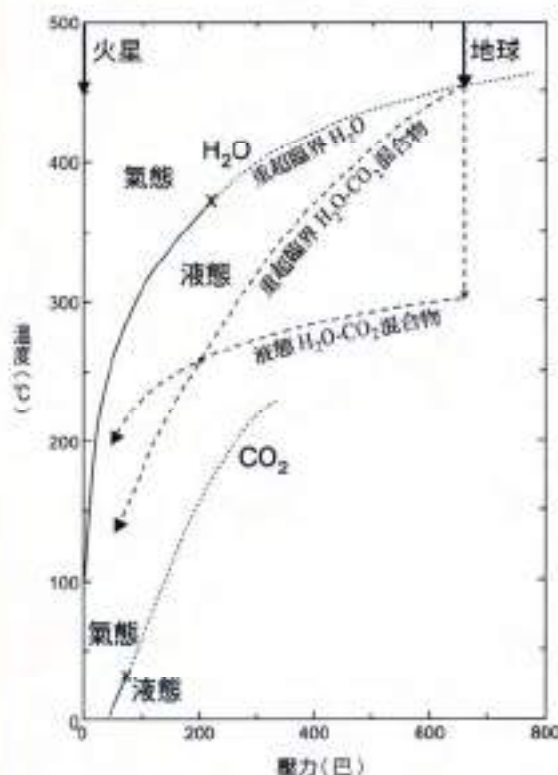
在書寫本文的同時，聯合國在哥本哈根舉行的排碳氣候大會正如火如荼地進行著。各國在維持地球增溫 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 間，唇槍舌劍

下來，不會反其道而行的。各國間的爭論，政治的考量遠大於要拯救人類和地球。不過，呼籲人類要減少對能源和物質的消耗，絕對是正確的。

再者，人類與其期望著有朝一日「移民」月球或火星，不如多加關注和維護我們已有的地球。畢竟，由冷卻演化的角度而言，月球和火星等太陽系其他較外面的行星和它們的衛星都比地球更「老」了。如果人類一定要「築夢」和「追夢」的話，金星或較遠的其他太陽系行星，還比較可能是人類的「明日之星」。不過，在美夢成真之前，人類必須要先有足夠的時間和耐力去等待或遠航〔註〕。●（本文圖片皆由作者提供）

註：本文是作者根據其發表的文章改寫而來。原文標題為Origin and early evolution of the atmospheres and oceans on the terrestrial planets，載於J. H. Denis和P. D. Aldridge所編的Space Exploration Research一書中。

劉玲根：任職中央研究院地球科學研究所（已退休）



地爭論著責任和補救之道。其實，今天地球微幅的升溫，也不見得一定如一些科學家或顧問所主張的，是人類的責任。遠在人類出現之前，地球過去表面的溫度也曾小幅升高或降低過，其調幅還遠比現在的大。就長久而言，地球的演化只會慢慢冷卻

圖四： H_2O 和 CO_2 的氣化溫度隨壓力改變相圖（實線部分）。X標記著兩物的臨界點。連接臨界點的虛線，用來證明在一定壓力下，溫度降到此點時，液體的密度會倍增。地球標示550巴 H_2O 和100巴 CO_2 混合體由高溫冷卻的途徑（長虛線及箭頭，一巴約等於一大氣壓）。這樣的混合體有可能在約 450°C 時，以較重的超臨界 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 液體附在地球表面形成原始海洋，或在約 300°C 時，以富含水而少二氧化碳的液體附在地球表面成為海洋。火星的二氧化碳原始大氣壓是極小（應與今日差不多）且較穩定的。火星冷卻固化後釋出的水氣，都會流失到外太空去。火星可能存在過的海洋，要等表面溫度冷卻到 100°C 之下才會出現。