

# 生命

空氣、岩石和水是早期地球僅有的原料，  
始於第一個生物體必定是以這些原始素材  
建造而成的。最近有一些實驗結果顯示，  
礦物這種岩石的基本成分，  
在形成生命的奇妙過程中，  
可能扮演舉足輕重的角色。

撰文 / 赫森 (Robert M. Hazen) 攝影 / 路易斯 (Robert Lewis) 翻譯 / 儲三陽

**荒**涼的原始地球上，生命是怎麼出現的？沒有人知道，但有一點是確定的：生命起源必然是個化學事件。地球在45億年前形成，最初的5億年間，地表週期性遭受隕石撞擊，如地獄般毫無生機，可是在接下來的幾億年中，卻出現了大量的微生物。這段期間，第一個生物必定是以空氣、水和岩石建造的。

這三種原料中，大氣和海洋一直在生命起源的故事裡被認為是主角，而岩石和組成岩石的礦物，只不過是配角，甚至是道具。現在科學家覺悟到，給它們編派那麼有限的角色，是個錯誤。的確，最近發表的許多精采實驗結果，揭露了礦物才是主角的事實：在形成生命的基本化學反應中，礦物舉足輕重。

生命起源故事的第一幕，必然是形成一批可以自我複製的含碳分子，這是生命演化的第一步。即使只是跨出這一步，也涉及一系列的化學變化，一群有機分子的結構與複雜度在這個過程中逐步提升。太古地球上最豐富的含碳分子是一氧化碳、二氧化碳和甲烷，都是只有一個碳原子的小分子，但在生物的基本組成單元裡，每個分子也許就包含十幾個碳原子，像含有高能量的糖類、可形成細胞膜的脂質及複雜的胺基酸。為執行形成生命的化學任務，這些分子還得再鍵結成長鏈狀的聚合物，以及其他的種類。原始地球的惡劣環境中，強烈的紫外線往往會快速分解剛聚合成的分子，因此要將小分子連結成這些複雜、伸展的結構，也就特別困難。

為使生命戲碼順利上演，就必須保護含碳分子，並給予協助。在衍生生命的化學反應中，礦物至少可以

扮演五種要角，從被動的道具到主動的演員全包了。礦物結構中的微小孔洞可以庇護簡單分子，表面則提供了讓分子聚合、成長的支架。此外，某些礦物的晶體表面可以主動選擇特定分子，這些分子與後來扮演重要生化角色的分子很相似。其他礦物中的金屬離子能催化重要反應，例如將小分子轉化成具複製能力的實體。最近的發現更令人驚訝：礦物溶解在水中後，有些元素會併入生物分子。換句話說，礦物可能不只協助生物分子結合，它們也成為生物的一部分。

### 生命要素的庇護所

1859年達爾文發表《物種起源》一書之後，有大半個世紀，許多科學家都在臆測生命的化學起源為何。有些人頗有遠見，在他們發明的情節中提到岩石和礦物質，但是實驗結果並不怎麼支持這些臆測。

其中最著名的實驗之一，是1953年在美國芝加哥大

過去認為，礦物在生命起源過程只是配角，但  
越來越多證據顯示，礦物很可能是**重要參與者**。

學完成的。當時，年少聰慧的研究生米勒，嘗試在玻璃瓶中模擬地球的原始海洋與大氣；他是1934年諾貝爾化學獎得主游理的學生。米勒把甲烷、氨和其他被視為是早期大氣層中的氣體，加上一些水密封在燒瓶裡，然後在氣體中放電產生火花，模擬史前閃電風暴。結果清水先變成粉紅色，再轉為褐色，此時水中已富含胺基酸及其他重要的有機分子。米勒以這個簡單而精采的實驗，扭轉了生命起源研究的方向，使它

從純粹臆想的哲學遊戲，轉變成精確的實驗科學。媒體趁勢炒作這個結果，預測人工合成的蟲子也許很快就會從試管裡爬出來了。科學界

則比較自制，但是，還是有許多科學家認為，在實驗室創造生命的主要障礙已經搬開了。

然而不久後，這個樂觀想法就給

打消了。米勒也許發現一個方法，可以利用原始地球上的水與氣體製造出生物建材，但這些簡單單位如何結合起來，形成例如蛋白質或DNA這種複雜的分子結構？它們又是在哪裡結合？畢竟，這些複雜分子才是生命的真正元素。

要解開這個謎，米勒和其他研究生命起源的科學家開始提出以岩石作為道具的想法。他們推想，漂浮海水中的有機分子，也許在岩石嶙峋的海岸被沖進潮間帶水池。池水反覆蒸發後，分子濃度愈來愈高，就像湯在熱鍋中逐漸濃稠一樣。

不過最近研究人員已經想到，生命要素也許堆積在更小的容器中。有些岩石（像灰色的火山浮石）會布滿「氣窩」，這是岩石還在熔融態時，內部氣體膨脹而成。許多常見礦物（例如長石）會在風化過程中發展出微小坑洞。早期地球的岩石上，每個小坑洞都可能各自進行分子自我組裝實驗。只要有足夠的時間和坑洞，搞不好分子就會組成最後稱得上「生命」的玩意兒。

這個推測的主要根據是：生命非常脆弱，非岩石保護不能倖存。但是1977年一個驚人的發現，挑戰了傳統的生命脆弱觀點與起源方式。在此之前，大多數科學家都假定，生命是在海面（或接近海面的



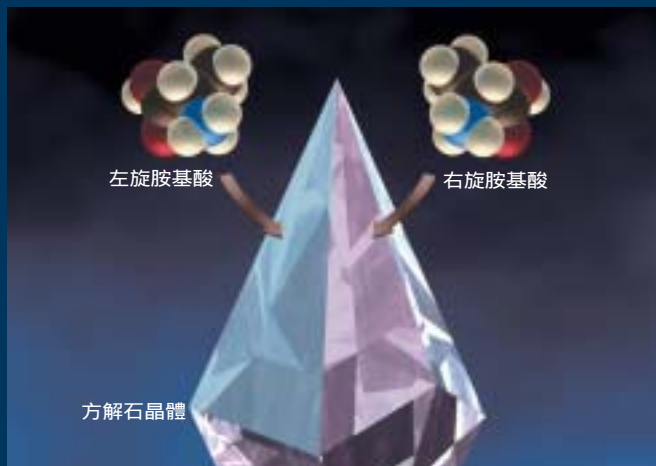
長石：分子鏈成長過程的庇護所

## 礦物晶體的力量

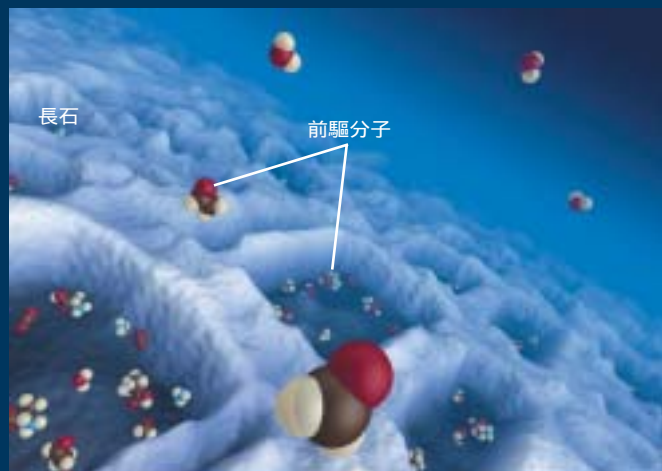
表面看來，沒有任何物質比岩石更沒有生命跡象的了。那麼，岩石及它的礦物成分怎麼會促成生命萌芽？答案在於「化學」。礦物從簡單分子長成有序結構，就是透過化學反應。同樣的，所有生物，細菌也好螭蝠也罷，之所以能生長、生活、生殖，也是因為每個細胞內發生的幾百種化學反應。

40億年前，地球上沒有生物；是化學改變了地球的表面，而不是生物。在那個曠遠的時代，礦物、海洋、大氣是第一個生物體賴以成形的僅有物質。因此，化學反應必定是生命起源的第一步。一系列的化學變化，將空氣、水、礦物中的簡單成分，組裝成一群具有複製能力的含碳分子。

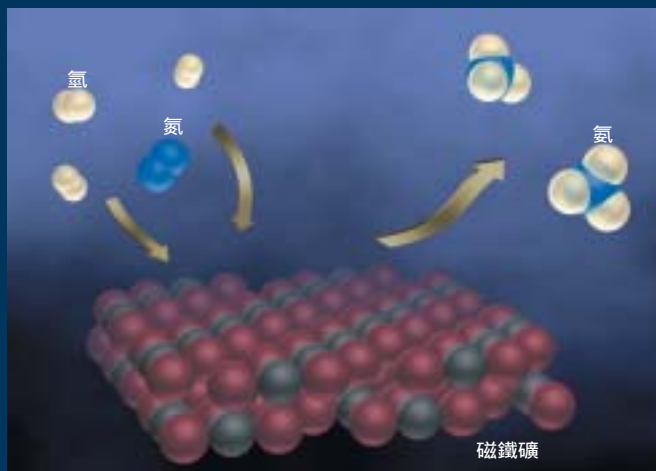
最近有實驗顯示，要不是有礦物協助，這些關鍵變化根本就不可能發生。礦物所扮演的角色包括了：庇護所、鷹架、模板、催化劑，以及反應物。



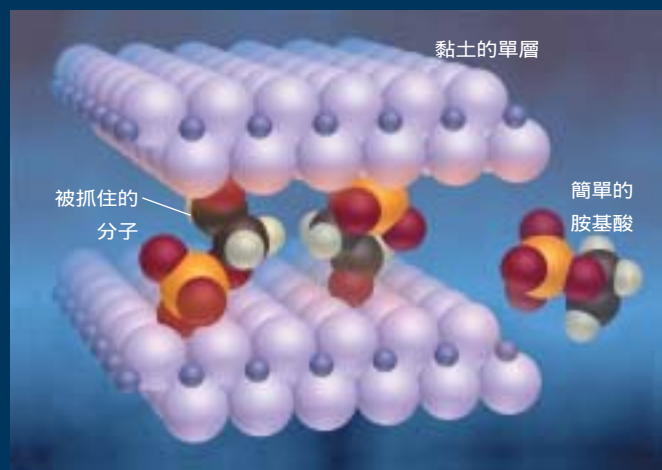
模板：方解石的不同晶面可以分別吸附左旋及右旋胺基酸分子。這個選取過程可以解釋生物只利用左旋胺基酸的事實。



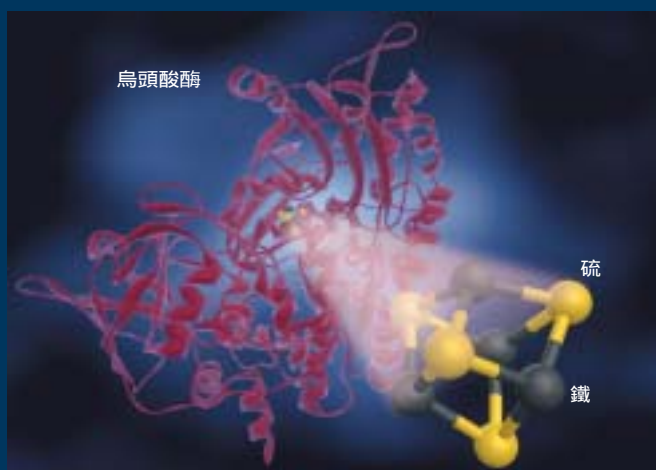
庇護所：長石之類的普通礦石，風化後表面會出現大量小坑。這些小坑可以保護生命分子的前驅物，使之不受致命輻射的破壞。



催化劑：磁鐵礦，一種氧化鐵礦物，可以促成氮和氫重組成氨的反應。氨是生物不可或缺的化合物，它是細胞取得氮的來源。



鷹架：黏土之類的成層礦物，可以將自由的有機分子限制在層間的空間裡。簡單分子因為彼此接近而進一步反應，結合成複雜化合物。



反應物：硫化鐵礦石在高溫高壓下就會溶出鐵和硫。某些生物酵素的活性核心，就是由鐵和硫形成的，如烏頭酸酶。

場所)，靠太陽能推動的化學反應形成。可是，後來深海探測人員在海底火山噴口附近的高熱水域中，首度發現不同以往的生態系，使得傳統生命觀起了變化。這些極端環境沒有陽光潤浴，卻能支持複雜的生物社群。這些黑暗的棲境中，生物需要的能量大部分來自地熱而非陽光。於是有些研究人員開始懷疑：與生命起源相關的有機反應，也許便是在這些深海熱泉附近的高熱、高壓環境中進行。

米勒和他的同事都反對這個熱泉起源假說，部分原因是胺基酸遇熱後會很快分解。不過後來發現，只有不考慮礦物扮演的關鍵角色，這個理由才能成立。礦物也許是生命要素的庇護所，我的實驗室（位於華盛頓卡內基學院地球物理研究所）最近得到可以支持這個點子的證據，由我的同事布蘭德斯提出，他現在任職於阿藍沙斯港的德州大學海洋研究所。當年布蘭德斯還在卡內基學院擔任博士後研究員，就提出「礦物能使脆弱的胺基酸保持完整」的假說。我們在1998年做過一個實驗發現，正如米勒等人的預測，白胺酸在200的高壓水中，幾分鐘就分解了，但是布蘭德斯在水中加入硫化鐵（深海熱泉常見的礦物）後，白胺酸卻可以完整維持幾天，因此有充裕的時間可與其他重要分子發生反應。



### 立足於岩石

即使適當原料已在安全的地方就位了，例如潮間池、礦物表面的微小洞穴或海床熱泉噴流系統裡，但每個分子仍只是懸浮在水中。這些零散分子需要類似鷹架的支撐結構，以便攀附並相互反應。從稀溶液中聚集分子有個簡單方法，可在

一個平坦表面上使分子聚集，遊蕩分子也許會跑到潮間池的水面，或者水面上類似浮油的化合物中。但是對脆弱的分子而言，這種環境具有相當大的潛在威脅，雷雨和紫外線輻射對原始地球的折磨，程度是今天的好幾倍。在這種條件下，分子內的複雜鏈結會很快斷裂。

具有地質學背景的生命起源學者早就認為，礦物表面也許是另一個吸附、組合重要分子的地方。這與礦物容器的想法一樣，半個世紀前就有人提出了。當時有幾位科學家猜測，黏土有些特殊的性質，也許可以吸附有機分子（見84頁圖）。這些地表上到處都有的礦物，潮濕時摸來有滑溜感，因為它們的原子形成平滑的層狀構造，每層表面都帶有電荷，可以吸附並固定有機分子。這些猜測後來都獲得實驗證實。1970年代末，以色列的一個研究小組證明，胺基酸分子可以在黏土表面聚集，並連結成短鏈分子，構造類似具有生化功能的蛋白質。研究人員發現：胺基酸水溶液蒸發濃縮時，要是溶液中含有黏土，連結反應就會發生。其實，這個實驗條件與池底有泥巴的淺水池或潮間池，實在沒什麼不同。

最近，兩個研究小組分別證明，黏土與其他具層狀結構的礦物可以吸附、組合多種不同的有機分子，他們是美國阮塞勒科技學院的費里斯，以及斯克里普斯海洋學研究所的亞赫尼士。過去十年來，阮塞勒

的研究團隊做過一連串精采的實驗，發現黏土可作為組合RNA基本單位的支架。要知道，RNA可是在細胞中將基因指令轉譯成蛋白質的重要分子！

一旦有機分子有了礦物鷹架作為支撐，就可以形成各式各樣的複雜

外。但是，生物體內的胺基酸近乎100%為左旋型，這也毫無例外。單一型式的胺基酸在所有生物體內占有如此奇特的優勢，造成這個結果的天擇事件，也許是生物界最難以解開的謎團。

研究人員為解釋這個奇怪結果，

某些礦物晶面可能具有**篩選及聚集分子**的活性，因此它們注定有重要的生物功能。

分子，但是其中只有少數幾種最後會成為細胞的組件。這意味著當年必然有某種模板，從原始分子中篩選出具有重要生物意義的種類。最近一些實驗再度顯示，礦物在篩選過程中扮演了核心角色。

#### 模板的篩選作用

胺基酸與許多有機分子一樣具有兩種形式，雖然由相同原子組成，結構卻互為鏡像，這個現象稱為對掌性或鏡像異構。但為方便溝通，科學家將這兩個形式分別稱為「左旋」（L型）及「右旋」（D型）。在米勒等人的實驗中，產生的左旋與右旋有機分子各占一半，毫無例

提出過許多理論，尋常的、匪夷所思的都有。有一些天文物理學家認為：地球形成之際就帶有過量的左旋胺基酸，在塵埃與氣體構成的雲裡產生，而太陽系就是由這種塵雲形成。這理論的主要問題在於：經此條件所產生的左旋與右旋分子，兩者間的微小差距應不超過1%，而我們的問題卻是左旋胺基酸獨霸生物界的現象。

相對的理論則是：在地球形成之初，左旋與右旋胺基酸各占一半，然後因為某個特殊的物理環境偏愛左旋，才造成它獨霸生物界的結果。至於這個特殊的物理環境，我認為，礦物晶面是最顯而易見的，因為它們的表面結構互為鏡像（見84頁圖）。2000年春天我專心研究方解石（形成石灰石和大理石的常見礦物），部分原因就是它往往擁有漂亮的成對鏡像晶面。許多軟體動物的殼中，方解石的化學結構與胺基酸形成強固的鍵結。於是我猜

赫森自1976年起，任職於美國華盛頓卡內基學院的地球物理研究所，致力研究礦物在高壓環境中的性質。過去五年中，他設計的許多實驗都是模擬海底熱泉的高壓環境。赫森在美國紐澤西州北部長大，孩提時代就對岩石和礦物產生興趣。他在1975年得到美國哈佛大學地球科學博士學位，到英國劍橋大學研究一年之後，加入卡內基學院。1990年起，他也兼任美國喬治梅森大學的地球科學教授。赫森同時是一位具有職業水準的小喇叭手，發表過許多著作，包括論文與書籍，題材則包括科學、教育、歷史和音樂。



方解石：篩選鏡像分子

方解石晶體，浸入一種常見的胺基酸——天冬胺酸溶液中，裡頭的胺基酸左右兩型各占一半。24小時後取出晶體，用水洗出吸附在特定晶面上的胺基酸分子。經過一次又一次實驗，我們一再觀察到方解石的左旋晶面偏愛左旋胺基酸，反之亦然；在一些例子中，左右兩型的差距可達40%。

有意思的是，表面有細小階梯的方解石晶面具有最大的選擇性。這結果讓我們想到：階梯邊緣也許會迫使左旋、右旋胺基酸在各自的晶面上整齊排列。要是環境條件適當，這些整齊的胺基酸列也許就會化合成類似蛋白質的分子，有些完全由左旋胺基酸構成，也有完全由右旋型構成的。如果蛋白質真的可以這樣形成，我們的實驗結果就更令人興奮了，因為最近有些其他團隊發表的實驗結果顯示，某些蛋白質有自行複製的能力。在地球的上古史中，有複製能力的蛋白質，搞不好就是在方解石晶面上形成的。

左旋與右旋的礦物晶面的數量，在比例上大略相同，因此令左旋胺基酸占有優勢的鏡像異構選擇性，也許並沒有在世界各地同時發生。我們的實驗結果顯示，第一組能自行複製的分子，即今日地球上各色生物的前身，是在特定時間、地點出現的。最後成功發展出來的分

測，它的晶面上也許有某個可建立化學鍵結的地方，只適合一種胺基酸類型。為測驗這個假說，我與卡內基的同事菲利（現任職美國普渡大學）和喬治華盛頓大學的古弗藍

德合作，做了100個以上的實驗。

我們的實驗概念很簡單，但必須在絕對乾淨的環境中進行，免得實驗結果讓遍布環境中的胺基酸所污染。我們將品相良好、拳頭大小的



子，之所以出現在偏好左旋胺基酸的晶面上，可說完全是運氣。

在太古地球上，礦物質可作為分子的庇護所、鷹架，以及選擇、組織早期分子的模板，這是無庸置疑的。但是，我們這些研究生命起源

趣，他在1988年提出了一個理論，綜論有機演化的各個面相，認為礦物扮演的角色除了模板、催化劑外，還是驅動生物分子形成的能量來源。而最主要的礦物，是深海熱泉中含量豐富的鐵和鎳硫化物。他

足以壓碎骨骼，溫度足以消融肌膚。我們大部分實驗都在測試這些原始材料間的反應，先將實驗材料密封在維他命藥丸大小的金質囊中，再將六個金囊放入「約德彈」內，這是一個笨重的鋼製高壓艙，以接近2000個大氣壓的壓力擠壓金囊，並將之加溫到250。

做這些有機合成實驗的主要目的是「固碳」，就是在分子中塞入愈來愈多碳原子，而這正是生命的基本化學反應之一。反應有兩條路徑，視我們使用的礦物而定。我們發現，如果用工業界常見的費雪闕布合成反應來增加碳原子，那麼許多常見礦物都可以用來催化反應，如鐵、銅、鋅的氧化物和硫化物。

透過這個程序，可以用一氧化碳和氫建造鏈狀的有機分子。首先，一氧化碳與氫反應，合成只含一個碳原子的甲烷。再加入更多一氧化碳

## 礦物可能催化了**關鍵性的化學反應**， 幾個與生命演化相關的重要分子，便由此產生。

的科學家都覺得，礦物實際上應該是扮演更為積極的角色，例如形成複雜生物分子時，必須經過一些關鍵的合成步驟，而礦物也許是催化這些步驟的推手。

### 躍上生命演化的舞台

1997年布蘭德斯在卡內基學院主導的實驗，正可說明這個想法。生物反應需要氮分子中的氮元素，但是在原始地球上唯一普遍的含氮化合物只有氮氣。工業上可以在高熱金屬表面通過氮氣與氫氣以合成氨，於是布蘭德斯便推想，也許海底熱泉附近環境與工業製程有類似的。果不其然，我們將氮氣、氮氣與氧化鐵礦石（磁鐵礦）置於高溫高壓的環境中（此為海底熱泉的特徵），結果礦物催化了形成氨的反應（見84頁圖）。

礦物也許催化了生命演化的第一個關鍵步驟，這個觀念源自德國化學家瓦特豪士，他現在是個專利律師。瓦特豪士對生命起源深感興

認為，原始生物體是附著在黃鐵礦（硫鐵化合物）帶有正電荷的表面上；他也認為，這些生物體是從製造黃鐵礦的化學反應中取得能量。這個假說頗為合理，部分理由是：有些代謝酵素（細胞中協助產生能量的催化分子）確是以金屬及硫原子集團作為構造核心。

過去三年來，瓦特豪士的大膽理論影響了我們在卡內基學院的研究方向。我的研究團隊包括地質化學家科迪及岩石學家約德，我們的研究焦點集中在：生物代謝過程是否可以在沒有酵素，只有礦物（特別是氧化物與硫化物）的條件下進行？我們的策略很簡單，與著名的米勒實驗同調，就是將原始地球上已知的材料，包括水、二氧化碳與礦物，放入受到監控的環境中，使它們發生反應。實驗情境模擬典型深海熱泉的高溫高壓環境，這壓力



磁鐵礦：催化生化反應

原子以上的長鏈分子。要是在今天各地的深海熱泉中，簡單的無機分子也可以透過這個反應來形成大型有機分子，那麼在地球出現生物之前，這種反應也一樣可以發生。

要是我們以鎳或鈷的硫化物做實驗，增碳過程主要循羰基化途徑進行，也就是塞入一個羰基（由一個碳原子、一個氧原子組成）。羰基很容易與鎳或鈷原子結合，可是鍵結並不強，因此它還是可以與其他分子結合，甚至「跳船」形成更大的分子。我們做過一系列實驗，觀察到九個碳的壬硫醇增長形成十個碳的癸酸，這個分子與細胞內驅動代謝反應的有機酸很類似。此外，這項實驗使用的反應物質如硫醇、一氧化碳和水，在硫化物豐富的海底熱泉十分常見。我們重複這些簡單的反應步驟，在這兒塞入一個羰基、那兒接上一個羥基，便可合成種類豐富、構造複雜的有機分子。

我們在卡內基學院做過1500個熱液有機合成實驗，對於早期地球上必然出現過的分子，提供了更多證據。此外，這些努力顯示礦物還有其他更複雜的行為，也許對生命的化學性質有重大的意義。過去的生命起源研究者都將礦物當作堅固、不變的東西，是讓有機分子組合的穩定舞台，但是我們卻發現，礦物在高壓熱水中會溶解。透過這樣的

碳和氫，會形成含兩個碳的乙烷，這個程序可以重複進行，每次都讓碳鏈增加一個碳原子。利用這個反應製造含碳分子，化工廠的研究人員便可造出任何碳數的分子。1996

年我們完成第一個有機合成實驗，加上伍茲赫爾海洋研究所的麥科洛姆所作的廣泛研究，兩者都顯示，在某種深海熱泉情境中，相關化學反應在一天之內就可合成含30個碳

過程，礦物中的原子和分子也會成為太古濃湯中的反應物。

### 物質的基本性質

我們第一次發現礦物也可作為反應物，是最近由科迪領導的催化實驗產生的意外結果。正如我們事前所預期，金囊中的簡單分子混合物經過羧基化反應後，產生了十個碳的癸酸，但是在生成物中也發現相當數量的硫、有機硫化物、甲硫醇及其他含硫化合物。這些物質中的硫必然來自硫化鐵礦物。

更驚人的是，鐵也會被釋出，它

底熱泉會溶解、濃縮礦物，海底熱泉附近會長出幾十呎高的巨大硫柱，因為從海底噴出的熱水中含有豐富的礦物，一旦熱水與深海的冷水接觸之後，就會在成長中的柱子上沉澱新的礦物層。然而，這些溶解的礦物在生命起源故事中到底扮演什麼角色，目前還不是很清楚。但是，不論是什麼角色，都會使這個故事更加有趣。

要是我們不再局限於「前生物時期」的化學反應細節，就會覺悟到，生命起源的過程實在是太複雜了，絕對不可能是個單一事件。我

境」 分子種類之多，遠超過構成生命所需。

後來在混沌中理出秩序，是礦物所出的力。礦物首先圈住分子加以濃縮，接下來是篩選並聯結這些分子，因此也許便催化產生第一個有複製能力的分子系統。這樣的系統雖然還沒有組成我們目前所熟悉的生物，不過已經展現出生命的基本性質，具有複製能力的分子系統開始大量使用環境中的資源。一旦有分子因突變而產生略微不同的變種，它們之間針對有限資源的競爭，便會啟動分子之間的自然選擇過程。具有複製能力的分子系統開始演化，不可避免的，會變得更有效率、更加複雜。

我們在卡內基學院的長程研究目標是：證明簡單的化學步驟可以產生有複製能力的分子系統，結果也許是個與所有生物細胞都有關的代謝循環分子。但科學家想要在實驗室裡創造生命還早得很呢！地球上的生命到底是透過哪些化學變化形成？也許我們永遠都不能精確的證明。不過我們可以確定的是，礦物在生命起源過程所扮演的角色，比科學家過去所想像的更複雜、更根本。在探討生命起源的實驗中，要是讓礦物扮演主角，研究人員也許會更接近答案；畢竟，這是科學上最古老的問題。

SA

儲三陽，清華大學化學系教授。

## 礦物在生命起源過程所扮演的角色， 比我們過去想像的更複雜、更具關鍵性。

使金囊中的水溶液呈現出耀目的色彩。礦物溶解之後，鐵會形成紅色及橙色的有機金屬錯合物，這是因為鐵原子受到各種有機分子包圍。我們正在研究這些錯合物的活性，搞不好它們可以當作酵素，催化有機結構的合成反應。

礦物可以作為生物不可或缺的化學成分，這並不令人意外。已知海

們必須假定它是一連串事件的結果，每個事件都不怎麼起眼，但都使早期分子的規則性與複雜度逐步提升。第一步應該是合成基本的生命組成單元；半個世紀來的研究已發現，生命分子在好些地方大量製造出來，在形成我們太陽系的星雲中、海面上、海底熱泉附近。於是，原始的地球陷入了「富人的窘

### 延伸閱讀

**Beginnings of Cellular Life.** Harold J. Morowitz. Yale University Press, 1992.

**Origins of Life: The Central Concepts.** David W. Deamer and Gail R. Fleischaker. Jones and Bartlett, 1994.

**Emergence: From Chaos to Order.** John H. Holland. Helix Books, 1998.

**Biogenesis: Theories of Life's Origin.** Noam Lahav. Oxford University Press, 1999.