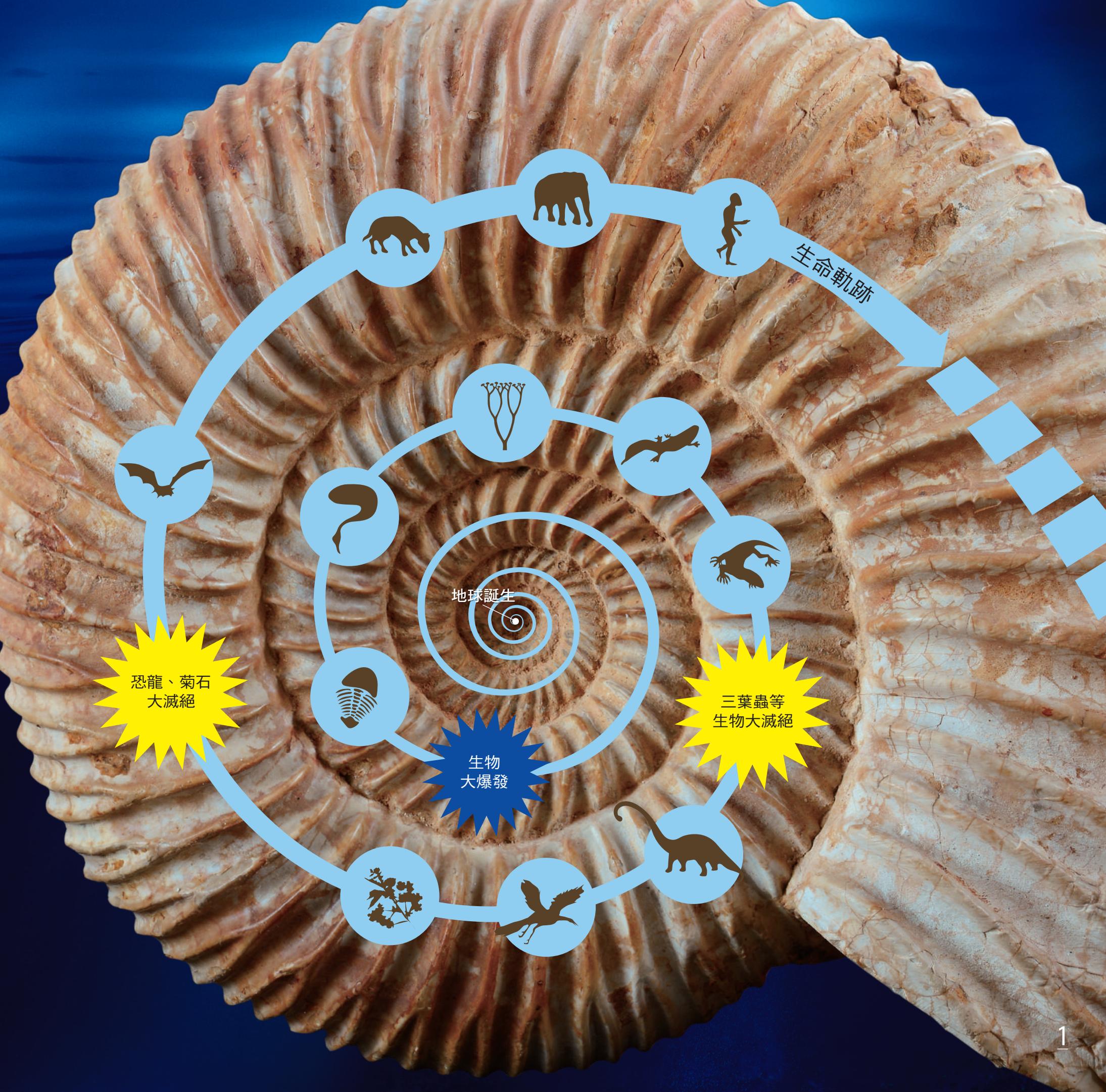


1 地球的歷史

我們所在的地球大約在46億年前就誕生了，但生命在5億年前才蓬勃發展，這意味著地球生命經歷長時間的黑暗期，是不是地球環境尚未演化妥當？過去與現在的地球環境有何差別？科學家又是如何拼湊出地球的過去呢？

地層中的地球生命軌跡
提供了探索歷史的線索。

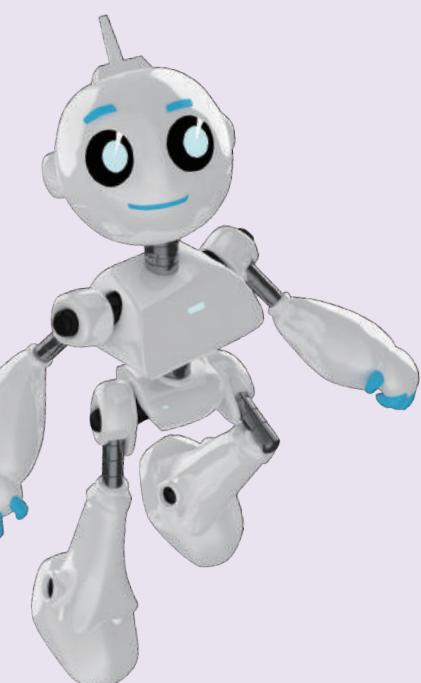


- 1.1 地球的起源
- 1.2 大氣與海洋的演變
- 1.3 探索地球的歷史

[科學不設限] 土衛二可以孕育生命嗎？

46~39 億年前

課程架構

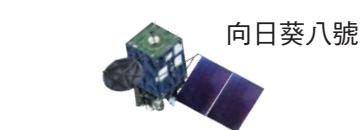
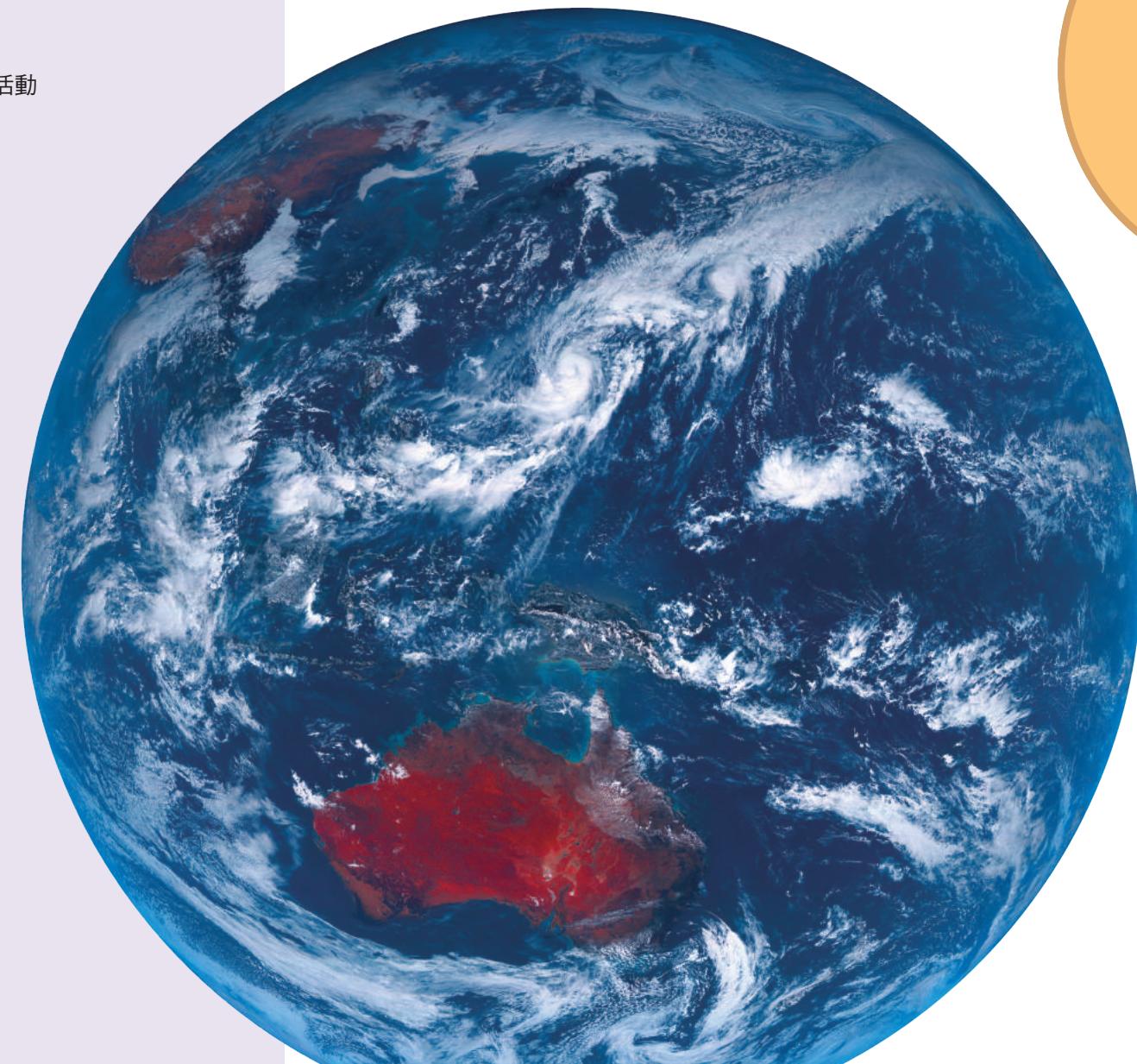


1-1 地球的起源



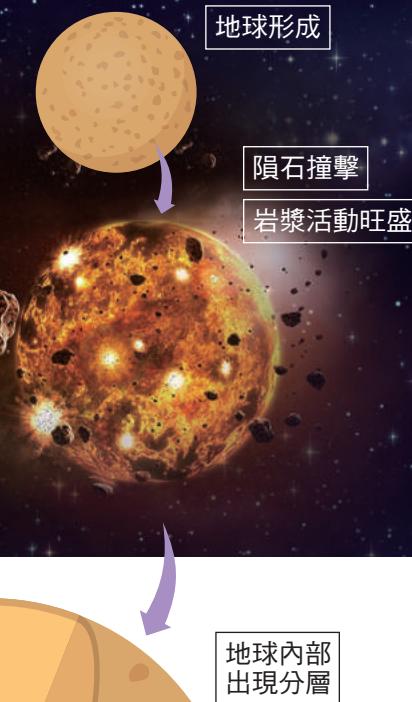
美麗的藍色星球 從太空中觀察，地球是一顆美麗的藍色星球。在整個太陽系裡，地球是唯一在地表擁有大量液態水並且孕育萬千生命的星球。這星球是如何形成的呢？

現今



◆圖 1-1 藍色行星－地球。此幅地球全景影像是由距離地表約 36000 公里高的日本向日葵八號衛星所拍，顏色未經任何修飾，真實地呈現太空所見的地球樣貌（2016/11/5 10:00 所拍攝）。

向日葵八號

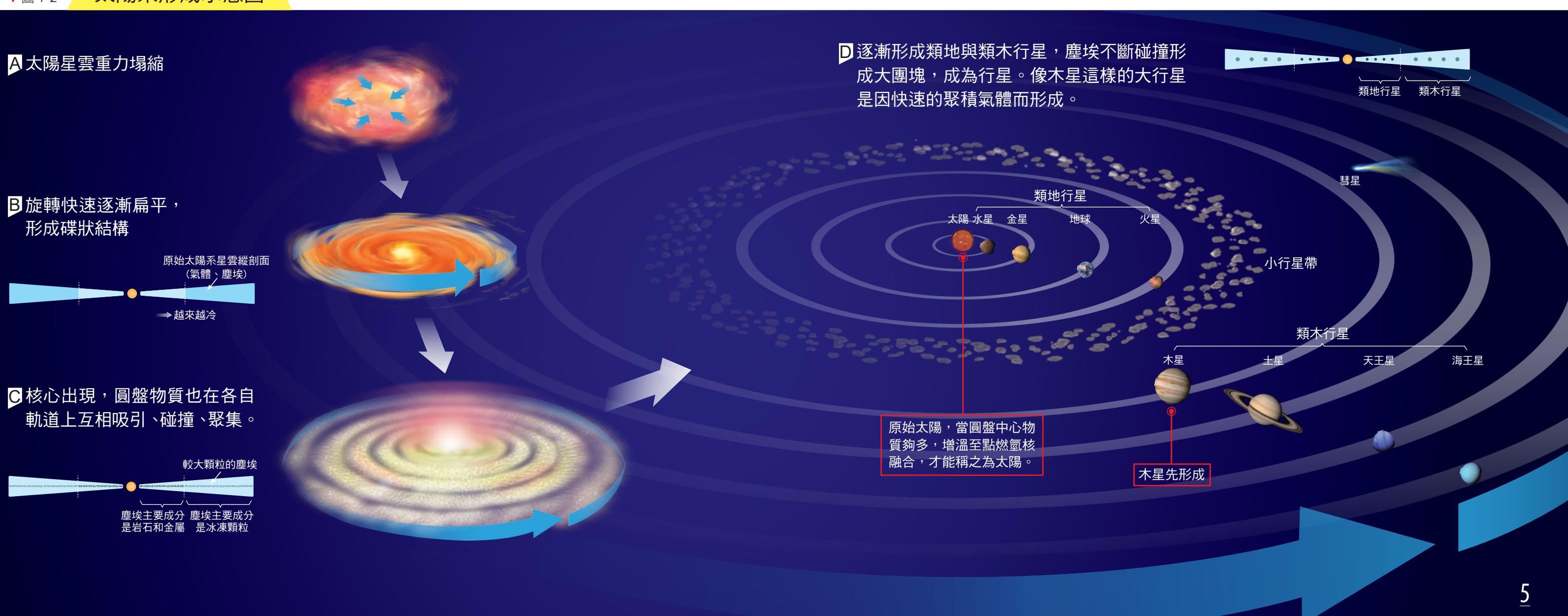


1-1.1 太陽系形成

大約在 46 億年前，太陽系是一團充滿氣體、塵埃的星雲，由於自身重力塌縮使星雲物質開始往中心集中，整個星雲因塌縮而旋轉加速，如同從麵團製作披薩餅皮一般，逐漸變扁為一個圓盤狀，大部分的質量往盤面中心聚集，溫度也越來越高。當中心質量累積使得溫度高到足以進行氫核融合後，便釋出大量的光與熱，太陽就此誕生。

同時，盤面上那些圍繞著原始太陽周圍的氣體、塵埃，彼此間也持續吸引、碰撞為環狀分布。又因為冰或氣體物質無法存在於靠近太陽的高熱環境，只有金屬與岩石類的物質可以，所以靠近太陽處形成的類地行星主要是由金屬和岩質組成；由冰與氣體組成的類木行星則在較外圍形成。類木行星以冰的相互吸附作為起點，逐漸聚集到質量夠大後，再進一步吸附氣體，形成氣體行星；而類地行星則靠著細小塵埃互相吸引、碰撞而變大，就像滾雪球一樣，越堆越大，再彼此碰撞成為更大的個體，最後成為類地行星（圖 1-2），地球就是其中一個。

▼圖 1-2 太陽系形成示意圖





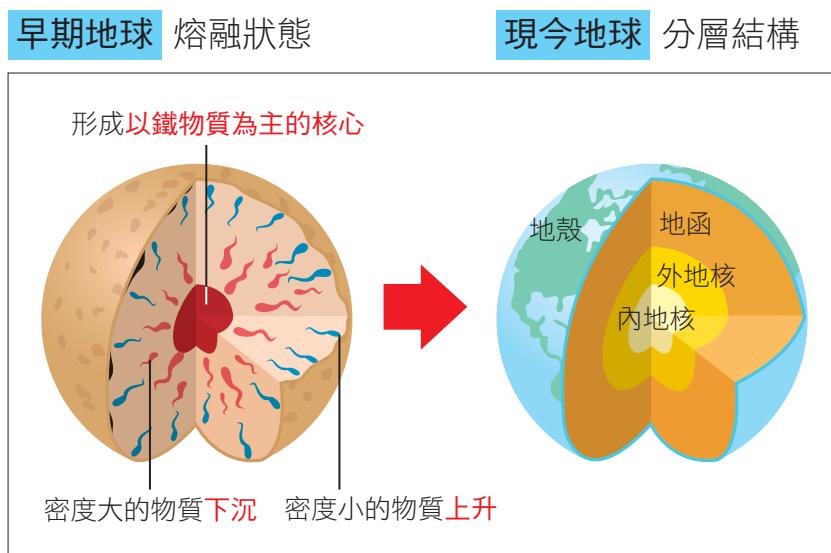
▲圖 1-3 畫家筆下的地球初期環境。

1-1.2 早期地球

地球形成之初，並不像現在擁有適宜的溫度和可居住環境，當時的地球很熱，沒有氧氣或水，絕對不適合生命發展。同時除了自身重力收縮導致溫度增高外，隕石不斷地撞擊與地球內部放射性物質衰變釋出的熱，都使地球呈現熔融狀態。隨著地球逐漸冷卻，熔融物質中密度較大的物質如鐵，會下沉到核心形成地核；同時，較輕的物質如矽氧化物，就分布在表面形成地殼；密度居中的物質形成地函，最後演化出今日所見的分層結構（圖 1-4）。

1-1.3 太陽系早期線索

此外，還是有些無法聚集為球形的團塊，一樣繞著太陽公轉，統稱為太陽系小天體，例如火星與木星之間的小行星帶天體與更外圍的彗星等。這些天體質量小，沒有能力改變自身的形態與化學組成，極可能保存了太陽系早期歷史的資訊，是研究太陽系起源的重要目標。



▲圖 1-4 熔融地球物質分布示意圖。

1-2 大氣與海洋的演變

地球的水從哪裡來？ 近年歐洲太空總署的羅賽塔（Rosetta）計畫登陸並分析彗星的組成物質，發現彗星上也有水冰，但組成元素的同位素比例與地球的水略有不同。那麼地球上這些對生命演化極其重要的水是否來自地球自身？又是如何累積而成的呢？

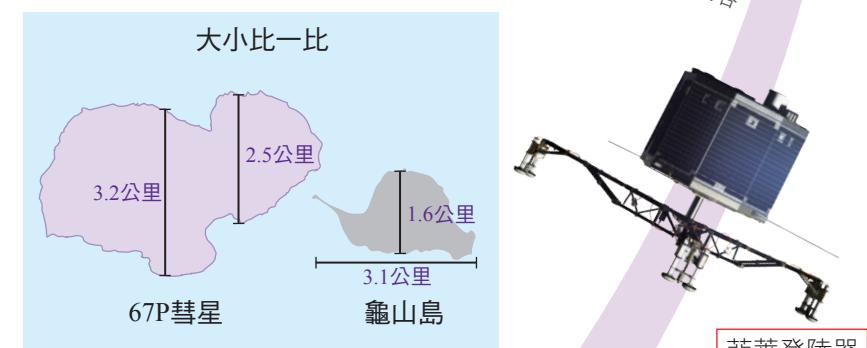
羅賽塔探測器
脫離

歷經 7 小時緩慢降落

1-2.1 大氣與海洋的起源

一般認為地球形成初期，重力聚集軌道上的物質時，也一併聚集了原始的大氣，包括氫、氮、甲烷和氨等太陽星雲氣體的組成。然而這樣的組成與今日大氣明顯不同，究竟今日的大氣是從何而來的呢？

▼圖 1-5 羅賽塔（Rosetta）計畫示意圖。圖中上方為探測器「羅賽塔」及登陸器「菲萊」，於 2004 年發射歷經 10 年飛行後抵達 67P/ 楚留莫夫－格拉希門克彗星（67P/Churyumov-Gerasimenko），進行長達 2 年半（2014～2016 年）的環繞及著陸觀測任務。



67P彗星

登陸點



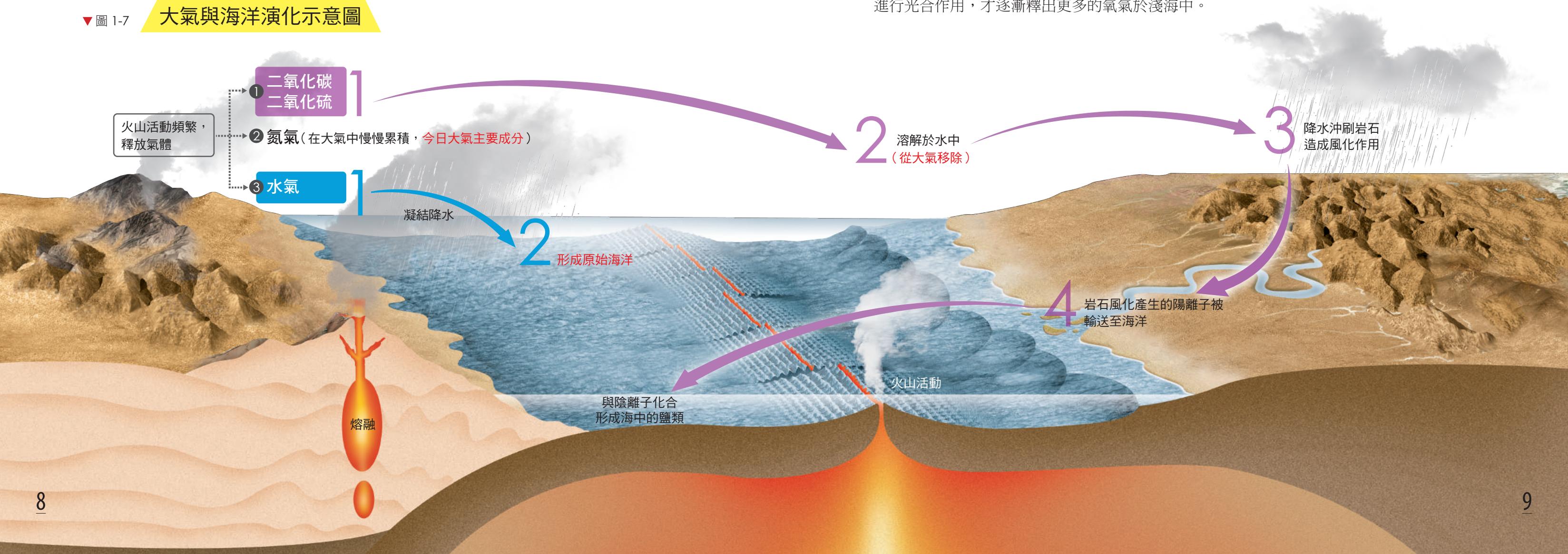
▲圖 1-6 地球形成初期，地表火山活動釋出氣體形成早期的大氣，其中大量的水氣再逐漸凝結降水累積於地面，形成早期的海洋。

由於地球的重力無法有效束縛較輕的氫和氦，加上初期隕石密集撞擊地球使得地表溫度逐漸升高，甲烷和氨等其他氣體容易獲得足夠能量逃離地球，以至於原始星雲氣體成分都未能保留下來。

後來地球內部物質因高溫熔融，頻繁的岩漿噴發和火山活動，把大量的氣體從地球內部釋放出來，包括水氣、二氧化氮、二氧化硫、氮氣和其他少量氣體，這也就是今日大氣的起源（圖 1-6）。

隨著地球逐漸清空軌道，隕石撞擊減緩，地表溫度也慢慢降低，大氣中的水氣得以凝結降水，累積在地表形成了原始海洋及地表各種水體。科學家根據最古老的海洋沉積岩年齡，推估原始海洋起源於約距今 40 億年前。

▼圖 1-7 大氣與海洋演化示意圖



1-2.2 成分的演變

原始海洋起源自大氣中水氣的凝結，性質以淡水為主，然而隨著水循環的作用，加上大氣中的二氧化碳溶解於水中，地表岩石受到沖刷及風化，釋放出陽離子（如 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 等）後，隨著地表逕流搬運至海洋中，與火山釋放的陰離子（如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等）化合成為氯化鈉等各種鹽類，流動、循環，逐漸演化成為今日的海洋（圖 1-7）。

由於大氣中的二氧化碳和二氧化硫較易溶解於水中，難溶於水的氮氣所占比例則隨時間相對提高，成為大氣的主要成分，達到現今 78% 左右的平衡狀態。至於地球最初的氧氣可能來自太陽紫外線照射水氣，分解產生的氧原子互相結合而成；而到了距今約 35 億年前，藍綠菌出現在海洋中並進行光合作用，才逐漸釋出更多的氧氣於淺海中。

當海水中的氧氣增加時，會與從海底火山活動釋放出來的鐵離子化合成為氧化鐵，再混雜其他硫化物及碳酸鹽類礦物成為條帶狀的沉積層，稱為帶狀鐵礦（圖 1-8）。距今約 35 ~ 18 億年前的淺海地層中出現的帶狀鐵礦，可證明當時淺海環境已有充足的氧氣含量；然而自 18 億年前之後，淺海的帶狀鐵礦沉積幾乎消失，相信是因為氧氣逐漸進入深海環境，使海底的鐵離子得以就近氧化。

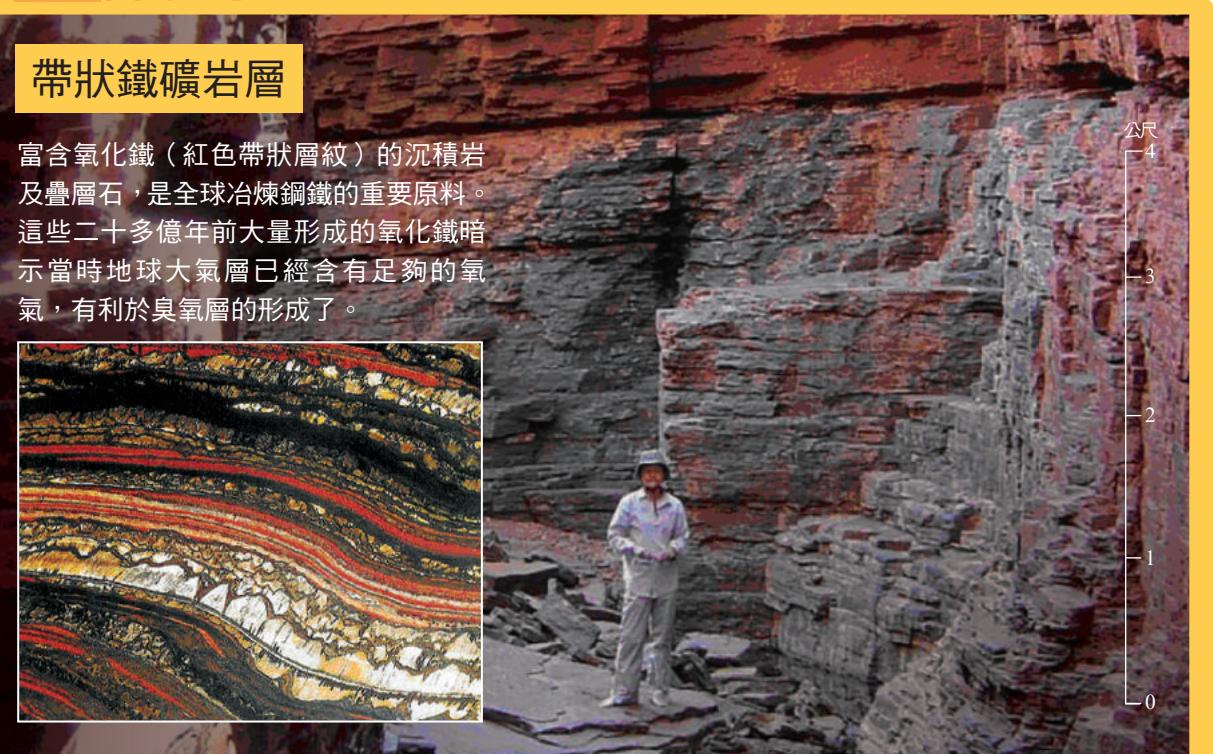
淺海環境的氧氣也會進入大氣累積並逐漸向上擴散，隨著濃度增加，較多的氧分子被紫外線分解成為氧原子，再與鄰近的氧分子化合成為臭氧累積於平流層中，形成陸地環境的防護網，使得到達地表的紫外線強度減弱。

因此當 4 億年前的地層中開始出現陸地生物的化石證據，代表生物已能脫離海水的保護。當陸生動植物的光合作用及呼吸作用使氧氣達成動態平衡，與氮氣形成長期的穩定比例，造就了生物持續滋長繁盛的重要基礎。

▼ 圖 1-8 帶狀鐵礦岩層。為目前冶煉鋼鐵的重要原料來源。



圖片故事



帶狀鐵礦岩層

富含氧化鐵（紅色帶狀層紋）的沉積岩及疊層石，是全球冶煉鋼鐵的重要原料。這些二十多億年前大量形成的氧化鐵顯示當時地球大氣層已經含有足夠的氧氣，有利於臭氧層的形成了。

1-3 探索地球的歷史



人類如何建立地球歷史？人類登上地球舞台的時間大約在距今 260 萬年前，乍看頗為久遠，但若從地球誕生迄今的歲月來看，其實相當短暫。如果地球的 46 億年歷史濃縮為 1 天，人類其實在將近午夜的 23 時 59 分才粉墨登場（圖 1-9）。既然如此，未曾親眼證實地球的起源與演化的人們，又是如何建立地球的歷史呢？



▲ 圖 1-9 將地球 46 億年歷史濃縮為 1 天的示意圖。

1-3.1 化石與相對地質年代

在我們生活的地球表面隨處可見各種自然活動，包括大氣變化、河川流動、潮汐漲落、火山、地震與板塊運動等，科學家們相信支配這些活動的物理或化學作用，從地球誕生後就不曾休止過，現今的各種自然作用與過往的運作也應當相同。

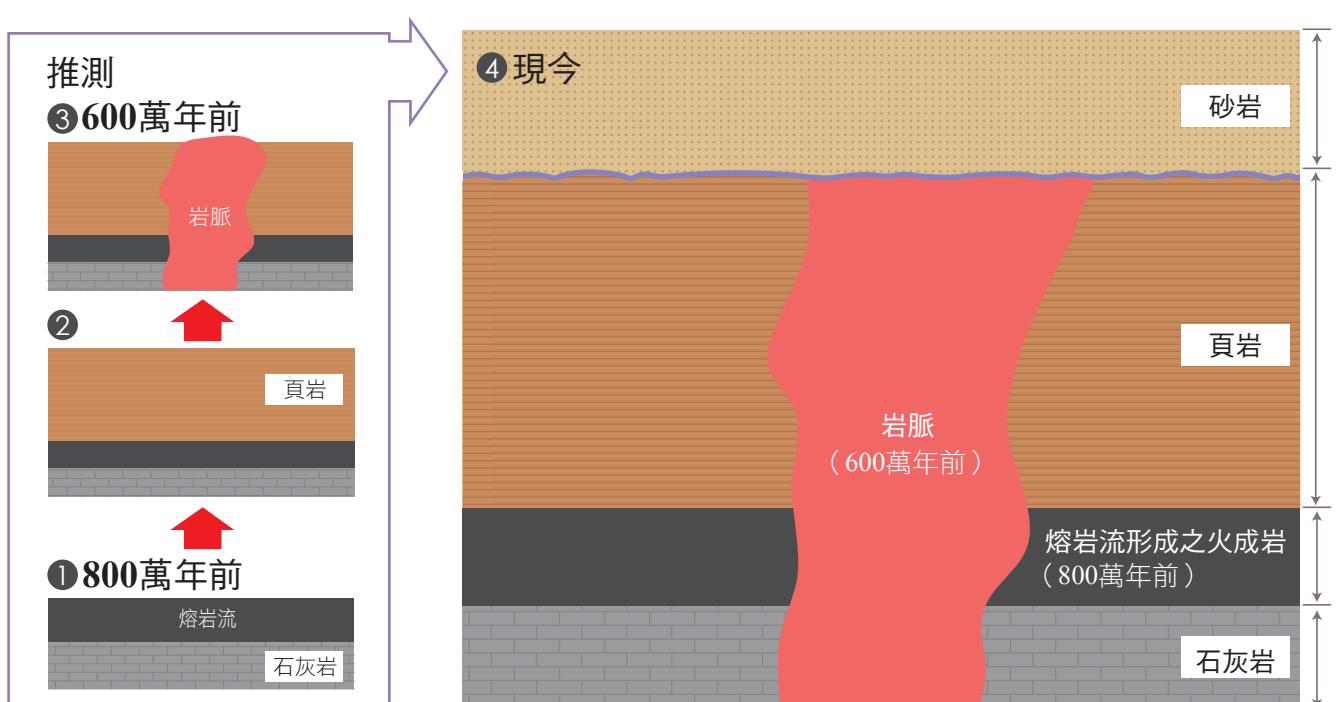
因此地質學之父詹姆斯赫登（James Hutton，1726 ~ 1797，英國蘇格蘭）（圖 1-10）提出了「均變說」，認為觀察現在發生在地球上的事情，可以做為推斷過去的依據，「現在」就是通往「過去」的一把鑰匙。



▲ 圖 1-10 地質學之父－詹姆斯赫登，提出均變說，指出觀察今日的地球活動可用以重建過去的地球歷史。

根據「均變說」的觀點，早期地質學家藉由觀察岩層位置、岩漿侵入、斷層截切岩層等地質特徵，找出了地層演變的過程及脈絡，再根據重要地質事件發生的時間先後，將地球歷史分成許多時期。這樣的分析方式能獲得年代的相對關係，卻無法直接得知發生的時間，因此稱為相對地質年代（圖 1-11）。

到了 18 世紀，地質學家分析古代生物化石，找出了地層中具有年代指標意義的化石，並排列其前後次序。例如三葉蟲及牙形刺化石代表古生代；恐龍、菊石化石代表中生代；大型哺乳類與超微化石代表新生代地層等。這些古代生物通常具備了：演化速度快、生存期限短、分布範圍廣、個體數目多且特徵明顯容易鑑定等條件，稱為**標準化石**。除了可用來廣泛比對世界各地的地層年代外（圖 1-12），也可以根據這些生物首次出現或滅絕的時間點作為劃分相對地質年代界線的依據。



▲ 圖 1-11 利用岩層相對關係判斷年代先後順序。未受擾動的水平地層中，上方為較年輕的岩層，可以推知此地水平岩層年代由老至新依序為石灰岩、熔岩流形成之火成岩、頁岩、砂岩。而岩漿活動年代會晚於被截切的地層沉積年代，可以推知岩脈形成年代介於頁岩之後及砂岩之前。

▼ 圖 1-12

地層對比及年代判讀

不同地點的地層中若埋藏相似的化石群，可作為推估年代及地層對比。



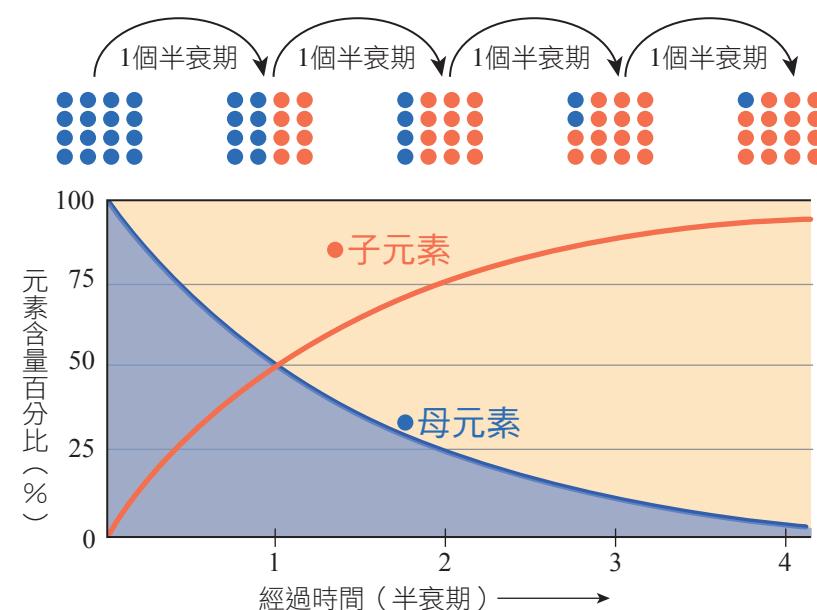
種類	型態	特點	化石或生物復原示意圖
牙形刺	是一種外型類似鰻魚但體型極小的海洋生物留下的部分遺骸化石，多呈淺褐黃或灰白色的尖齒或鋸齒狀。	型態複雜且演化十分迅速。因為屬於浮游性生物且分布廣泛，在少量的岩層標本或岩屑中仍可被採集到，具有劃分地層和對比的重要功能，故成為古生代重要的標準化石。	
超微化石	超微化石一般指直徑小於30微米的極微小的生物化石，須藉由電子顯微鏡才能仔細觀察辨識。	鈣質超微化石因數量多、演化快速、生長範圍廣布全球海洋，於深海岩芯研究等相關領域中，是判定新生代地層和年代對比的重要線索。	



1-3.2 放射性元素定年與絕對地質年代

19世紀末的科學家發現了放射性元素的存在，20世紀初即有科學家運用放射性元素衰變的特性作為定年的工具，藉此方法可以用來測量標本的「絕對地質年代」。

放射性元素定年的原理，主要是利用礦物或岩層中所含的放射性母元素與子元素含量比例的變化來估算年代。具有放射性的母元素藉由原子核衰變，變成穩定的子元素，當母元素衰變到剩下原本含量一半時所需要的時間，就稱為半衰期。每經過一個半衰期，母元素的含量就會減少為原本的一半，子元素的含量則隨著時間逐漸增加（圖 1-13）。



▲圖 1-13 子元素相對母元素含量的比例，隨時間增加而加大。
當母元素含量變為原來的一半所經過的時間，稱為半衰期。

科學家可以利用儀器測定標本中母元素和子元素的含量，計算求出此一標本自生成後經歷過多少個半衰期。但一般而言，若年代超過母元素的 10 個半衰期，就會因為含量太少而很難偵測，以碳 14 的半衰期 5730 年為例，定年的極限大約就在 6 萬年左右。有時定年結果也不一定就是標本真正的形成年代，而是受到成分置換或風化作用影響，使得標本中母元素或子元素的含量與原本只有因衰變而改變的含量不同，導致定年結果偏差；要避免這樣的問題，可以在同一地層中選擇不同標本，或選擇其他定年方法，以求得更加準確的岩石或礦物等標本的絕對地質年代。

你知道嗎 常用於定年的放射性元素及適用地質材料

放射性元素		半衰期 (年)	適用定年範圍 (年)	定年常用之材料
母元素	子元素			
鈾 238	鉛 206	45 億	1000 萬～46 億	鈷石
鉀 40	氰 40	13 億	5 萬～46 億	雲母、角閃石、火山岩
鋨 87	鈸 87	49 億	1000 萬～46 億	雲母、鉀長石
碳 14	氮 14	5,730	100～6 萬	木頭、木炭、骨頭、碳酸鹽類標本

古生物之定年



1-3.3 地質年代表

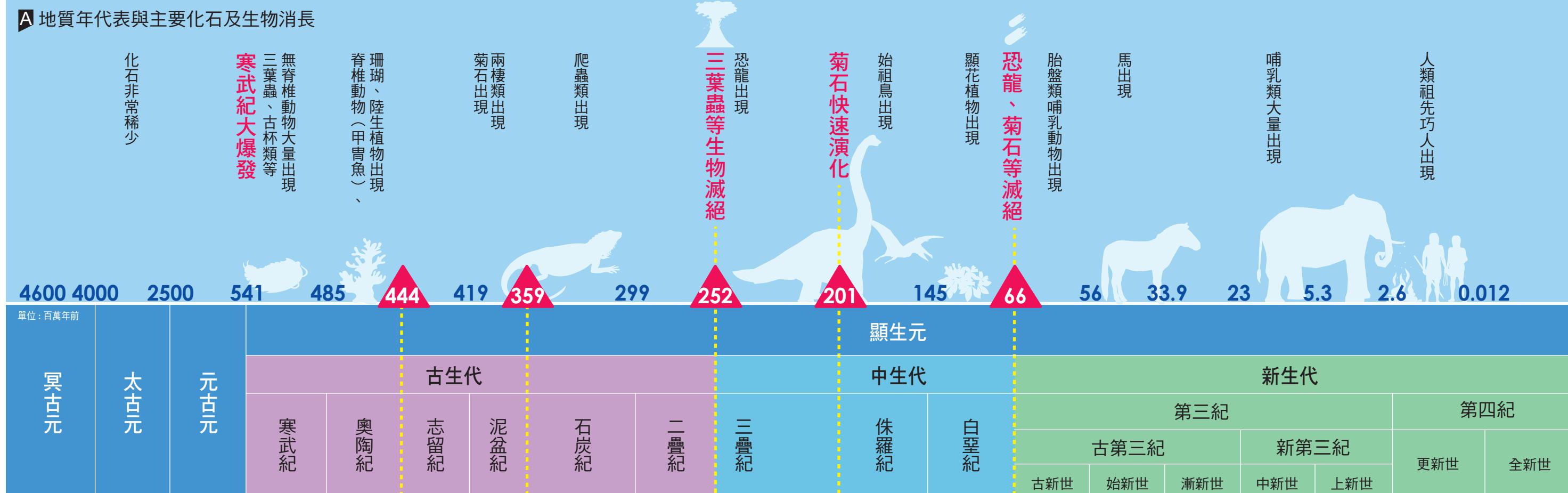
建立世界各地地層的先後關係後，科學家以重要地質事件發生的時間為界，將地球歷史劃分為許多時期，並以「元、代、紀、世、期」代表由大到小的地質年代層次，建立了地質年代表（圖 1-14）。例如可在地層中發現大量有硬殼或外骨骼生物化石證據的年代就是「顯生元」的開始。顯生元之前還有冥古元、太古元和元古元三個時期；顯生元則可分為古生代、

中生代及新生代，各個代又可分為許多紀，例如中生代分為三疊紀、侏羅紀及白堊紀。紀可細分為世、世則可再分成最小的地質年代單位—期。而隨著新證據的發現及定年技術的提升，地質年代表的時間界線也會持續地被修正。

▼圖 1-14 地質年代表

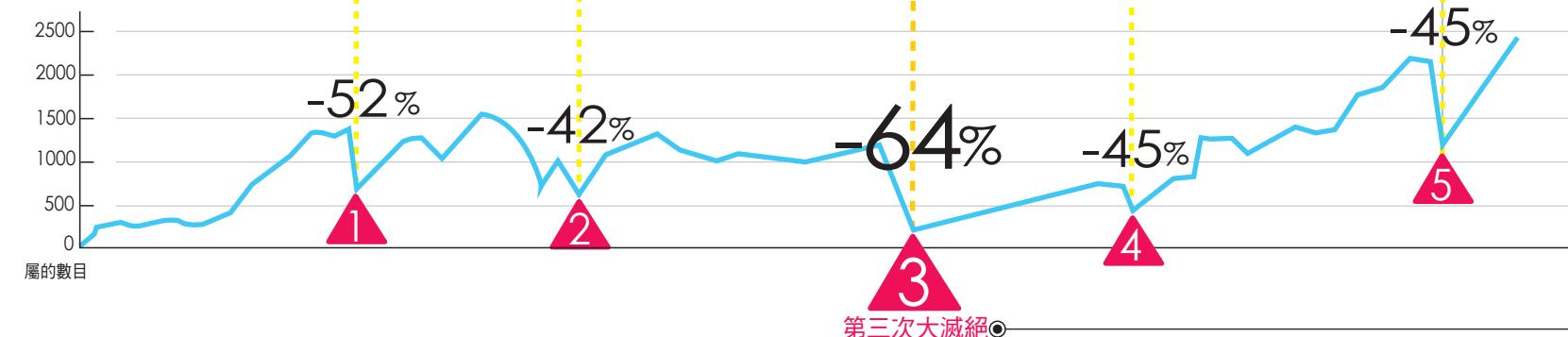
※ 本表參考自 2017 年國際地層委員會

滅絕事件係根據生物大量死亡而定出，如中生代的結束被認為是 6 千 6 百萬年前因隕石撞擊導致氣候變遷使得生物大量死亡。



B 五次大滅絕事件與生物「屬」的數目變化情形

▲為大滅絕事件



規模最大的大滅絕事件

科學家在現今西伯利亞及華南地區的二疊紀末期的地層中發現了數百萬平方公里的火成岩體，認為該次大滅絕原因與地表環境改變及大規模的火山活動有關。造成數萬年的劇烈氣候變動，使得大量的海洋物種及陸生脊椎動物物種滅絕。





EARTH SCIENCE
科學不設限

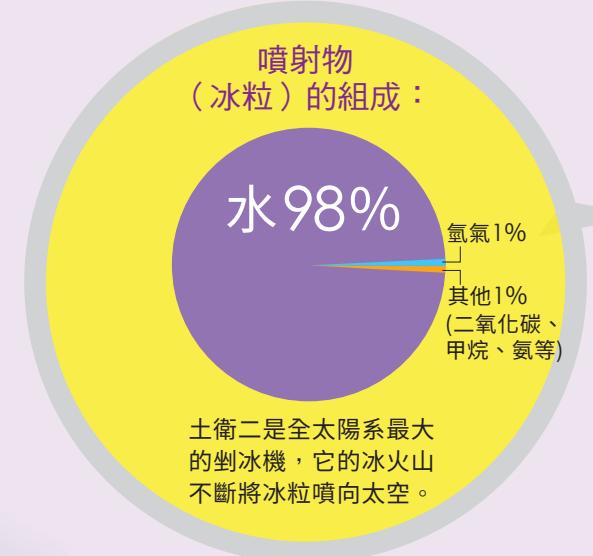
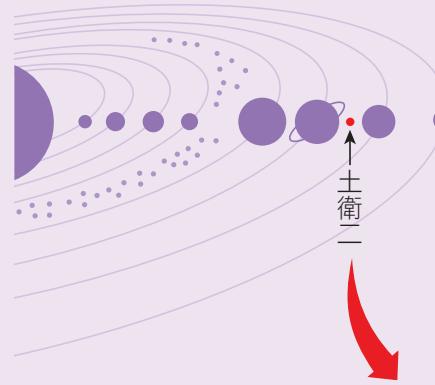
土衛二可以孕育生命嗎？

冰層下的祕密世界

過去我們對土衛二（Enceladus）的認識只知道它是一顆被冰覆蓋的星球，但自從卡西尼號（Cassini）太空船在2004年進入土星軌道觀測後，一連串的新發現讓科學家相信，若要尋找外星生命可能存在地方，土衛二將是首要選擇之一。

故事開始於太空船首次拍攝到土衛二南極附近有像美國黃石公園的老忠實泉一樣的水蒸氣噴發事件，這是表面現象還是來自內部活動？

為了徹底了解噴射物的成分與形成機制，NASA除了拍照監測，還調整卡西尼太空船軌道直接穿越水噴射物抽樣，甚至開啟下一次土星探測的計畫。綜觀卡西尼號太空船十多年來的觀測結果，得知土衛二冰層下有遍及整顆星球的海洋，噴射物的成分98%是水外，1%是氳，其餘的是包括二氧化碳、甲烷和氨在內的其他分子的混合物。最後確認的氳含量被視為關鍵性的發現，科學家藉此推斷：土衛二由岩石構成的核心和冰層下的海洋，彼此間有熱液作用。在地球上，這種海底熱液作用可以讓微生物在海底熱泉區孳生，牠們不需要陽光、也不需要氧氣，會把氳分子和二氧化碳轉換成甲烷，並從中獲得能量維生。不過卡西尼號並沒有找到生命的跡象，只是找到了食物來源。



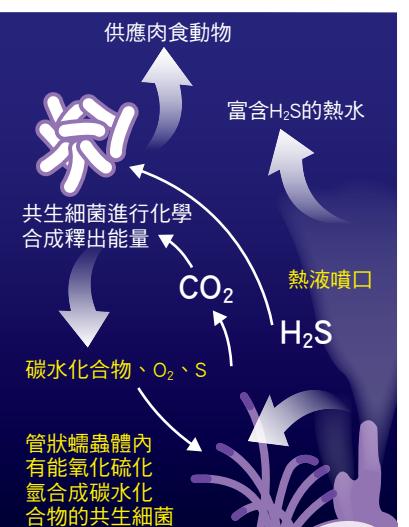
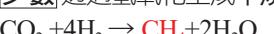
圖解快知識

深海的化學合成產能 深海沒有陽光，熱液噴口的細菌利用化學合成的放熱反應獲得能量、產生食物，取代了綠色植物的光合作用，擔負起養活整個生態系的責任。從地底流出的熱水裡富含一些在被氧化後可以放出能量的分子，包括硫化氳、甲烷、氳氣、小分子有機酸等。不同的物種透過的途徑不同：

多數 硫化氳氧化產生糖

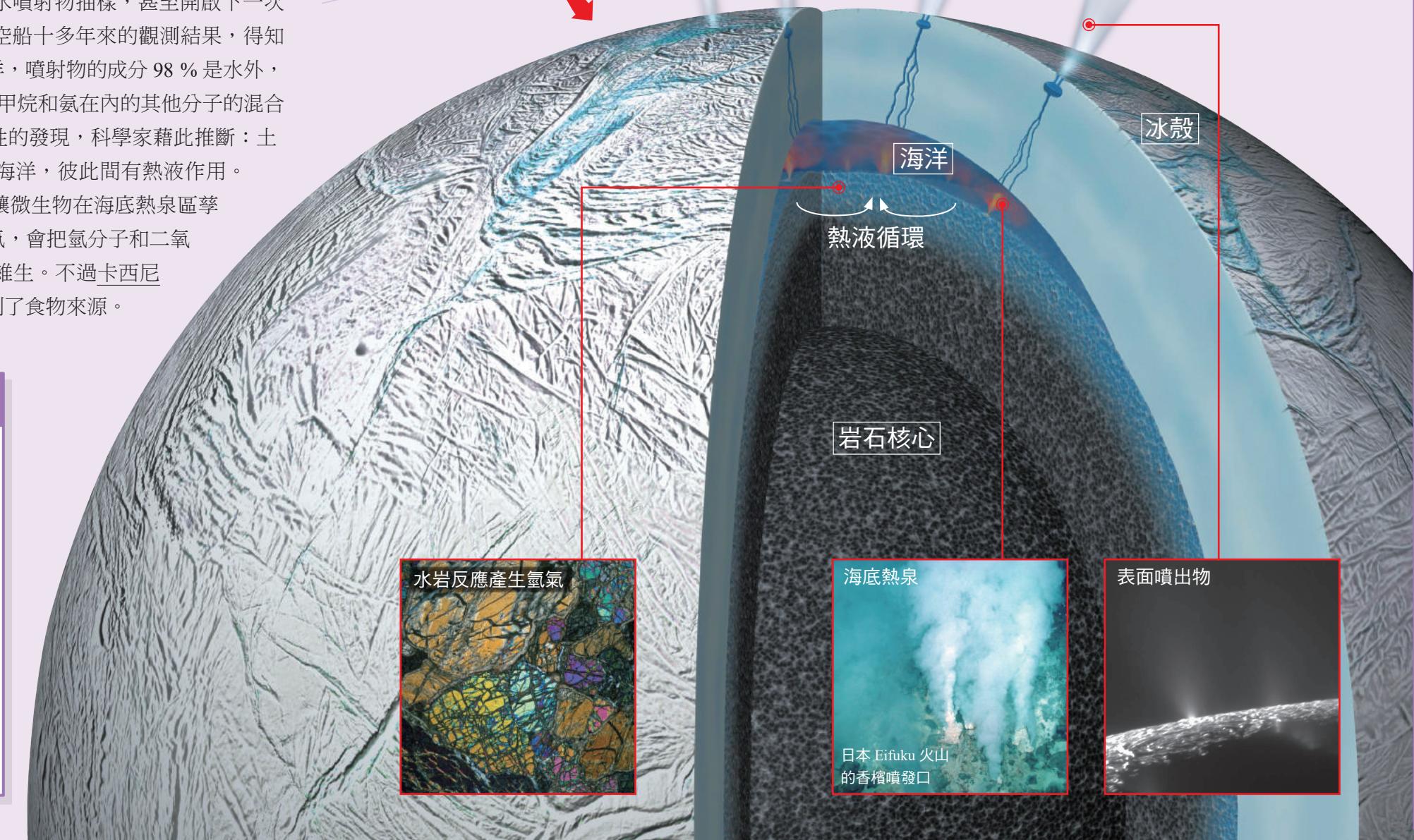
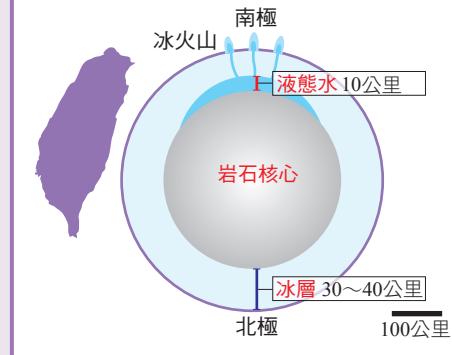


少數 透過氫氧化生成甲烷得到能量



圖解快知識

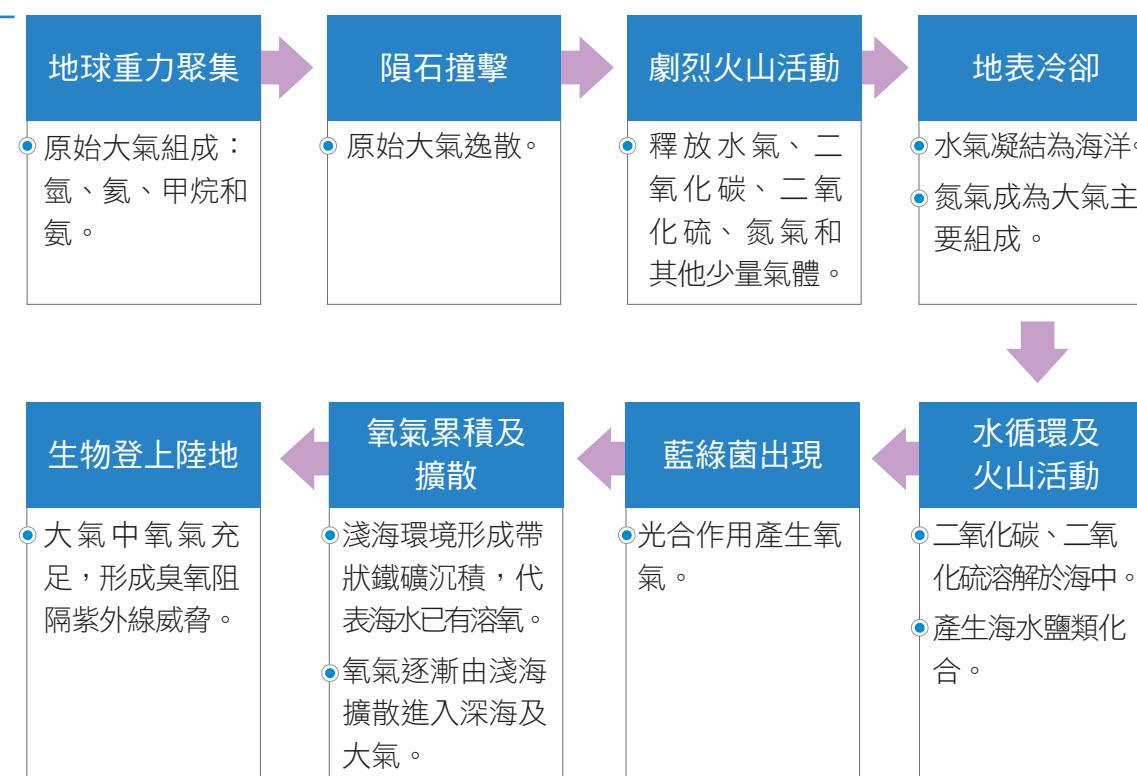
面積比一比 土衛二以被冰覆蓋整個星球表面而聞名，其直徑大小為500公里左右，只比臺灣大一些。



地球的起源

- 太陽系的形成**
1. 星雲：由氣體與塵埃組成。
 2. 重力塌縮：物質往中心集中，旋轉加速、溫度提高。
 3. 太陽：能進行氫核融合、產生光與熱。
 4. 類地行星：細小塵埃互相吸引、碰撞為小團塊，再碰撞成更大的團塊而形成。
 5. 類木行星：以冰相互吸附為起點，逐漸聚集到質量夠大後，再進一步吸附氣體，形成氣體行星。
- 層化的地球**
1. 早期地球的熱來源：重力塌縮聚集、隕石撞擊與放射性元素衰變。
 2. 地球密度分層：較重的物質（密度大）沉入核心、輕者（密度小）分布地表附近。
- 太陽系起源的線索**
- 小行星或者彗星因質量小、自身變化不大，保存著形成時的特徵或組成，能幫助科學家研究太陽系起源。

大氣與海洋的演化



探索地球的歷史

1. 「均變說」認為觀察現在發生在地球上的事情，可以作為推斷過去的依據。

2. 相對及絕對地質年代：

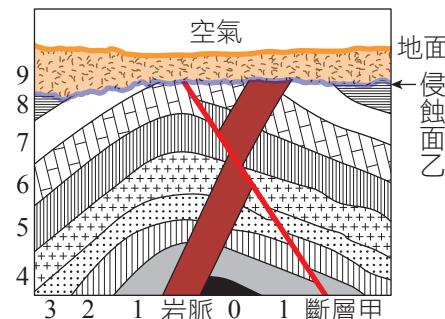
	相對地質年代	絕對地質年代
表示方法	以「元、代、紀、世、期」代表由大到小的年代層次	以數字表示「距今多少年前」
劃分依據	以沉積岩層疊置、岩脈或斷層截切岩層、生物化石等特徵判斷先後順序	以放射性元素定年得知標本年代
可能誤差及修正	地質年代的界線會因為新證據的發現而修正	標本的元素含量可能受到地質變動或風化影響而產生誤差；可選擇保存良好的地質材料或改用其他定年法加以修正

3. 標準化石常具備：演化速度快、生存期限短、分布範圍廣、個體數目多、特徵明顯容易鑑定等條件。

4. 放射性元素定年法的原理：透過分析標本中的放射性母元素與子元素含量比例，並依據母元素的半衰期估算其年代。

基礎題

- () 1. 對於太陽系形成過程的描述，何者正確？ (A) 太陽系是一團高溫、高密度的氣體和塵埃收縮爆炸所形成 (B) 因氣體和塵埃的收縮，中心物質溫度增高到進行氦融合反應才稱為太陽 (C) 平行轉軸的部分收縮較慢，垂直轉軸的部分收縮較快，故在太陽周圍形成扁平狀的盤面 (D) 盤面的氣體局部收縮，形成類木行星。
- () 2. 早期地球猶如一顆火球，呈現熔融狀態，下列何者不是造成如此高溫的原因？ (A) 自身重力塌縮使溫度增高 (B) 隕石撞擊頻繁 (C) 放射性元素衰變產生熱 (D) 太陽猛烈的照射。
- () 3. 若要研究太陽系起源的相關資訊，以下哪一天體是適合的目標？ (A) 月球，沒有板塊運動使老的岩石隱沒 (B) 彗星，自形成後變化不大 (C) 地球，是唯一擁有液態的星球，且有生命發展 (D) 木星，是太陽系最早形成的行星，擁有最古老的訊息。
- () 4. 附圖為某處地質剖面，其中數字 0 ~ 9 表示地層編號，甲、乙表示地質事件編號。有關此處地質事件發生由早到晚的順序何者正確？(應選 2 項) (A) 地層 6 的沉積、地層 0 ~ 8 的褶皺、侵蝕面乙 (B) 岩脈、斷層甲、地層 6 的沉積 (C) 侵蝕面乙、地層 6 的沉積、地層 0 ~ 8 的褶皺 (D) 地層 6 的沉積、斷層甲、岩脈 (E) 地層 6 的沉積、岩脈、斷層甲。
- () 5. 某地沉積岩層中發現一保存良好的木化石後，利用 ^{14}C 定年法進行年代測定，有關定年法的敘述，何者有誤？ (A) 若母元素比例由 100 降至 50，經過時間為 T_1 ；由 50 降至 25，經過時間為 T_2 ，則 $T_2 = 0.5T_1$ (B) 經衰變產生的子元素為 ^{14}N (C) 木化石中的 ^{14}C 含量會隨時間而減少 (D) 若樹木和沉積物同時沉積，當 ^{14}C 的含量變成原來的 12.5% 時，表示該沉積物年代約經過 3 個半衰期。
- () 6. 科學家依據下列何項敘述來推論「地球上的海洋在 40 億年前就已形成」？ (A) 最古老的化石年齡 (B) 最古老的海洋地殼年齡 (C) 最古老的火成岩年齡 (D) 最古老的沉積岩年齡。



素養模擬題

◎ 《侏羅紀世界 (Jurassic World)》是 2015 年上映的一部恐龍冒險電影，假想人類取得恐龍化石的 DNA 片斷加以修復，並複製這些已滅絕的巨獸，運用科幻電影技術加上驚心動魄的劇情，讓不同世代的人們擁有相同的恐龍夢。

雖然現身於電影中的恐龍多是家喻戶曉的類型，但若以真實化石資料及古生物學的知識加以檢視，其中滄龍、翼龍原本就不屬於恐龍，而是類似水生及飛行蜥蜴；主角「帝王暴龍」則是人造混合基因怪獸；其他出現在電影中的數種知名恐龍特徵敘述如下表：

編號	名稱	生存年代 (百萬年前)	特徵	食性
8	伶盜龍 (迅猛龍) <i>Velociraptor</i>	75 ~ 71	高智商、活躍敏捷、研究證實體表長有羽毛。	肉食
	似雞龍 <i>Gallimimus</i>	71 ~ 69	體表長滿羽毛，奔跑敏捷，前肢有三個鋒利指爪，可用來撥土尋找食物。	雜食
1	雷克斯霸王龍 <i>Tyrannosaurus rex</i>	68 ~ 66	最兇猛的掠食動物。	肉食
	迷惑龍 (雷龍) <i>Apatosaurus</i>	152 ~ 151	體型巨大，有長頸及長尾。	植食
	三角龍 <i>Triceratops</i>	68 ~ 66	溫馴，大型頭盾上的長角由實心骨頭組成。	植食
	劍龍 <i>Stegosaurus</i>	155 ~ 150	背上有骨板可調節體溫，尾上有骨刺可作為武器。	植食
	甲龍 <i>Ankylosaurus</i>	68 ~ 66	全身覆蓋硬皮並有尖刺，尾呈錘狀似裝甲恐龍。	植食
	副櫛龍 <i>Parasaurolophus</i>	77 ~ 75	頭蓋上有大型修長冠飾，與中空頭部相連，可共鳴發出聲音，可用四足行走或二足奔跑。	植食

1. 附圖為各種恐龍的外觀示意圖，依據表中所列特徵加以辨認，將編號填入表中。
2. 根據化石證據推測各種恐龍的存活年代如表中資料所示，將其存活年代標示於下圖中。若電影情节以「侏羅紀世界」的真實年代為限（侏羅紀為 201 ~ 145 百萬年前），哪些恐龍不應該在電影中登場呢？