

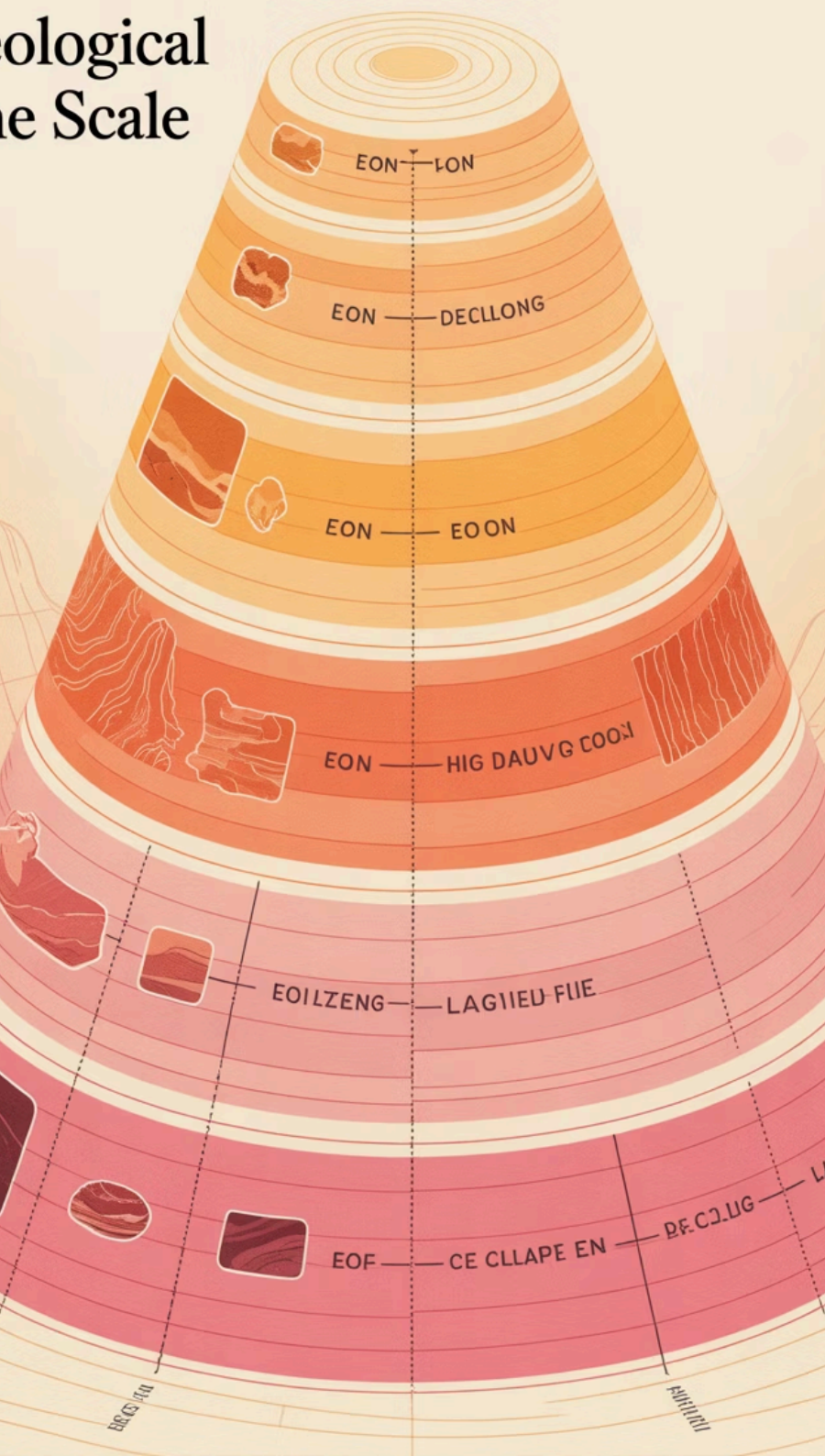
地球演義：穿越46億年的時光之旅

地球，我們賴以生存的家園，擁有著一段極其漫長而動盪的歷史。從宇宙塵埃中凝聚成形，經歷火與水的洗禮，孕育出生命的奇蹟，再到如今人類文明的繁盛，地球的歷史跨越了約46億年的浩瀚時光。

理解這段深邃的過去，不僅是滿足我們對起源的好奇心，更是認識我們當前所處環境、乃至預測未來變遷的關鍵。本報告旨在深入探討地球自形成至今的重大歷史變化，涵蓋其地質構造的演變、氣候的劇烈波動、生命的起源與發展，以及這些宏大系統之間錯綜複雜的相互作用。

 by Nicholas Chang





地質年代表：時間的框架

1

顯生宙 (5.39億年前至今)

可見生命的時代，包括古生代、中生代和新生代，見證了複雜生命的繁盛。

2

元古宙 (25億-5.39億年前)

氧氣、冰雪與複雜性的興起，真核生物出現，經歷雪球地球事件。

3

太古宙 (40億-25億年前)

最早的生命出現，光合作用演化，形成最早的穩定陸塊。

4

冥古宙 (46億-40億年前)

地球形成初期，熔融狀態，經歷月球形成的大碰撞事件。

要理解如此漫長的時間跨度，地質學家建立了一套標準化的時間框架——地質年代表。這個年代表依據地球歷史上發生的重大地質事件和生物演化里程碑，將地球歷史劃分為不同的層級單位。最大的單位是「宙」，往下依次是「代」、「紀」、「世」和「期」。



地質年代的劃分依據

地層記錄

通過研究沉積岩層的疊置關係、岩性變化和不整合面，確定相對年代序列。

化石證據

生物演化的關鍵事件和標誌性物種的出現與滅絕，提供劃分地質時期的重要依據。

同位素定年

利用放射性同位素的衰變規律，測定岩石和礦物的絕對年齡，為地質年代提供數值框架。

國際地層委員會負責維護和更新這個全球標準的年代表，確保全球科學家能使用統一的語言來描述地球的過去。本報告將依循這個時間框架，從地球誕生的冥古宙開始，逐步探索太古宙、元古宙，直至生命繁盛的顯生宙，揭示地球系統如何相互作用，共同譜寫了這部波瀾壯闊的地球史詩。

星塵的誕生：太陽系的形成

分子雲坍縮

約46億年前，一片巨大的分子氫雲受到附近超新星爆發衝擊波的擾動，開始收縮形成太陽星雲。

行星吸積

微小的塵埃顆粒通過靜電引力或碰撞粘連，逐漸聚集成更大的天體，最終形成了包括地球在內的行星。



原恆星形成

物質向中心聚集，碰撞頻繁，動能轉化為熱能，中心區域溫度急劇升高，形成了太陽的前身。

原行星盤形成

未能落入中心的氣體和塵埃，在離心力和引力的平衡下，形成了圍繞原恆星旋轉的盤狀結構。

我們太陽系的起源故事，目前最被廣泛接受的解釋是星雲假說。該假說認為，太陽系誕生於一片巨大、寒冷的分子氫雲的引力坍縮。隨著星雲因引力收縮，其旋轉速度加快，物質不斷向中心聚集，形成了原恆星和圍繞其旋轉的原行星盤。



行星的形成過程



微粒聚集

微米級的塵埃顆粒通過靜電引力或碰撞粘連，逐漸聚集成厘米級的顆粒。



星子形成

克服「米級障礙」後，顆粒進一步聚合成公里級的星子，這是行星形成的關鍵步驟。



行星胚胎

星子通過引力相互吸引、碰撞合併，形成數百至上千公里直徑的行星胚胎。



行星誕生

行星胚胎之間發生更大規模的碰撞和合併，最終形成了我們今天看到的行星。

行星的形成發生在原行星盤中，主要通過吸積過程。原行星盤內的溫度梯度決定了不同區域行星的組成。在靠近太陽的內盤區域，溫度過高，水和甲烷等揮發性物質難以凝結成固態，因此形成的類地行星體積相對較小。而在遠離太陽的「凍結線」之外，溫度足夠低，使得水冰、氨冰和甲烷冰等揮發性物質可以凝結成固體，最終形成了氣態巨行星和冰巨行星。



地獄般的開端：熔融地球

4600

百萬年前

地球形成的大致時間

4500

百萬年前

月球形成的大碰撞事件

1000°C

以上

早期地球表面溫度

180

公里

希克蘇魯伯隕石坑直徑

地球形成的最初數億年被稱為冥古宙，這個名字來源於古希臘神話中的冥界之神哈迪斯，形象地描繪了當時地球如同地獄般的景象。由於星子和行星胚胎不斷碰撞積累的能量、引力壓縮以及放射性元素的衰變生熱，早期地球完全處於熔融狀態，表面覆蓋著岩漿海洋。同時，太陽系早期遺留的大量小行星和彗星對年輕的地球進行了持續而猛烈的轟擊。

大碰撞與月球的暴力起源



忒伊亞撞擊

約45億年前，一顆大小與火星相當的原行星與年輕的地球發生了毀滅性的傾斜碰撞



物質拋射

撞擊將忒伊亞本身以及地球地幔的大量物質拋射到環繞地球的軌道上



月球形成

拋射物質在引力作用下重新聚集、吸積，最終形成了月球

冥古宙最重大的事件之一，是我們月球的形成。目前最被廣泛接受的理論是「大碰撞假說」。該假說得到了多方面證據的支持，包括地月系統的角動量、月球的成分、月球的熔融歷史、揮發性元素的虧損以及同位素證據。大碰撞不僅創造了月球，也對早期地球產生了深遠影響，可能改變了地球的自轉軸傾角和自轉速度。

行星分異：地球的層圈結構



在熾熱的熔融狀態下，地球經歷了關鍵的行星分異過程。密度較大的物質，主要是鐵和鎳，在重力作用下沉入中心，形成了地核；而密度較輕的矽酸鹽物質則上浮，形成了地幔和最初的地殼。這個過程奠定了地球現今的層圈結構，為後來的板塊構造活動和磁場的產生創造了條件。

最初的海洋與大氣

原始大氣的組成

- 水蒸氣 (H_2O)
- 二氧化碳 (CO_2)
- 氮氣 (N_2)
- 甲烷 (CH_4)
- 氨 (NH_3)
- 硫化氫 (H_2S)

這是一個還原性大氣，幾乎不含游離的氧氣



隨著冥古宙時期猛烈的撞擊逐漸減少，地球表面開始冷卻。當溫度降至水的沸點以下時，存在於早期大氣中的大量水蒸氣開始凝結，形成了持續數百萬年的滂沱大雨，最終匯聚成最初的廣闊海洋。

早期大氣的主要來源被認為是地球內部火山活動釋放出的氣體，以及早期撞擊地球的富含水的彗星和小行星。鋯石晶體中包含的礦物包裹體等證據表明，液態水海洋可能早在44億年前就已存在。這些原始的海洋和無氧大氣環境，為接下來的生命起源奠定了基礎。

生命的火花：非生物生成



地球歷史上最深奧的問題之一便是生命如何從無生命物質中誕生。太古宙的地球，在擁有液態水海洋和原始大氣之後，具備了生命起源的基本條件。科學界普遍認為，生命起源是一個自然的化學演化過程，發生在特定的早期地球環境中。

生命起源的主要假說

「原始湯」假說

由奧巴林和霍爾丹提出，認為在早期地球的海洋或「溫暖的小池塘」中，大氣中的無機物在閃電、紫外線等能量作用下，合成了氨基酸等有機小分子。1953年的米勒-尤里實驗為該假說提供了重要的實驗支持。

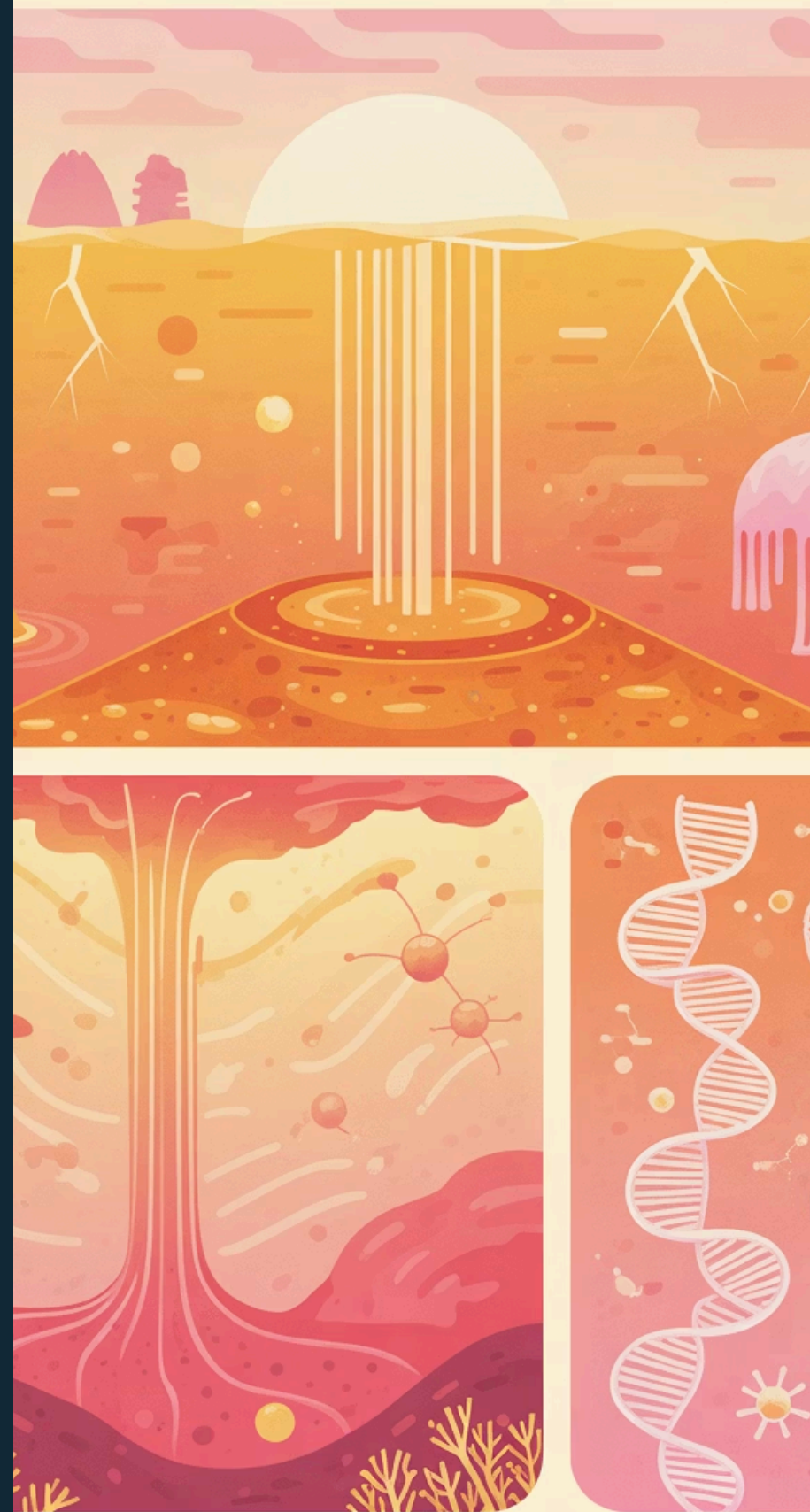
海底熱泉口假說

認為生命起源於深海海底的熱液噴口。這些噴口從地球內部釋放出富含還原性化學物質和礦物質的熱水，與周圍較冷、較氧化的海水混合，產生了持續的化學能梯度。噴口周圍的多孔岩石結構可以提供天然的隔間，濃縮化學物質並促進反應。

RNA世界假說

提出在生命演化的早期階段，RNA而非DNA可能同時扮演了遺傳信息的載體和生命活動的催化劑。這是因為RNA分子不僅能像DNA一樣儲存遺傳信息，而且某些RNA分子具有催化化學反應的能力，解決了「先有雞還是先有蛋」的問題。

這些假說並非完全相互排斥，可能生命的起源涉及了不同環境和機制的組合。所有現存地球生物都擁有共同的生化特徵，這強烈暗示它們都源自一個共同的祖先，被稱為「最後普遍共同祖先」。需要強調的是，LUCA並非第一個生命，而是所有現存生命譜系匯聚到的那個祖先。



最早的生命證據



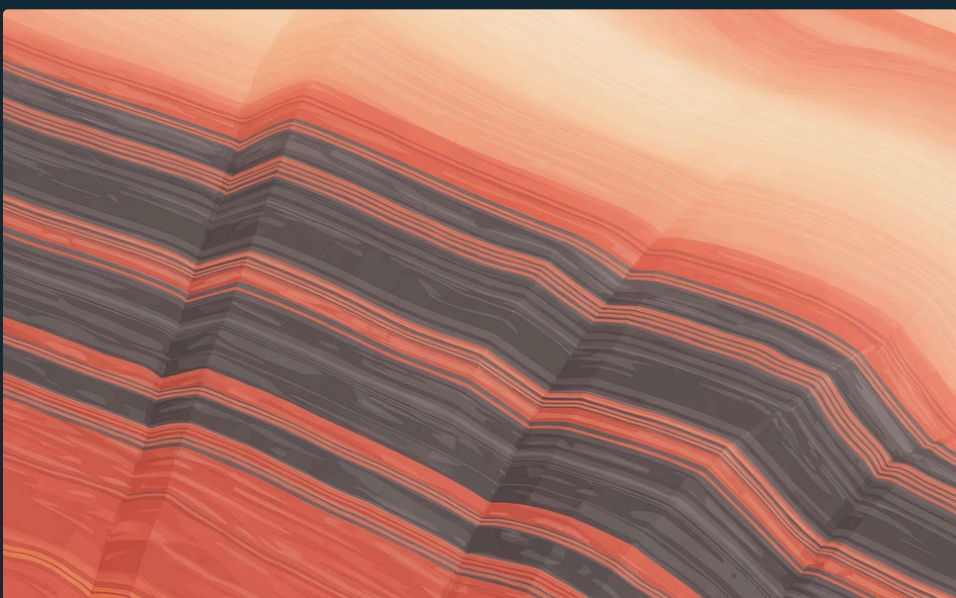
疊層石

由微生物席（主要是藍細菌）的活動形成的層狀沉積構造。這些微生物通過粘液捕獲沉積物顆粒，並向上生長以獲取陽光，日積月累形成了特有的層狀結構。在西澳大利亞等地發現的疊層石化石，有些年代可追溯到35億年前。



微體化石

在古老岩石中發現的、形態上類似於現代微生物的微小結構。2017年發現的加拿大努瓦吉圖克綠岩帶中至少37.7億年前的微生物化石，其形態和化學特徵與現代深海熱泉口的鐵氧化細菌相似，為生命起源提供了迄今最古老的地質證據之一。



條帶狀鐵建造

富含鐵的沉澱物與富含二氧化矽的沉積物交替出現，形成的獨特地質結構。這些形成於太古宙晚期和元古宙早期的沉積物，被認為是早期光合作用生物活動的間接證據，表明當時已有能夠產生氧氣的生物存在。

儘管關於生命起源的具體細節仍有許多未解之謎，但科學界的共識是，生命是早期地球特定物理化學條件下，通過一系列自然發生的化學過程而產生的。理解這一過程需要整合來自化學、地質學、生物學和行星科學等多個領域的證據。儘管直接證據稀少且古老，但通過實驗模擬、地質環境分析、分子生物學推斷和化石記錄，科學家們正在逐步描繪出生命從無到有的可能圖景。

光合作用的黎明



厭氧光合作用

最初演化出的光合作用不產生氧氣，利用的電子供體可能是硫化氫或其他還原性物質



產氧光合作用

由藍細菌完成，利用水作為電子供體，分解水分子釋放出氫離子用於固碳，同時將氧氣作為副產品釋放出來



氧氣積累

初期產生的氧氣被海洋中的還原性物質（如亞鐵離子）消耗，形成條帶狀鐵建造，直到這些「氧氣匯」被填滿

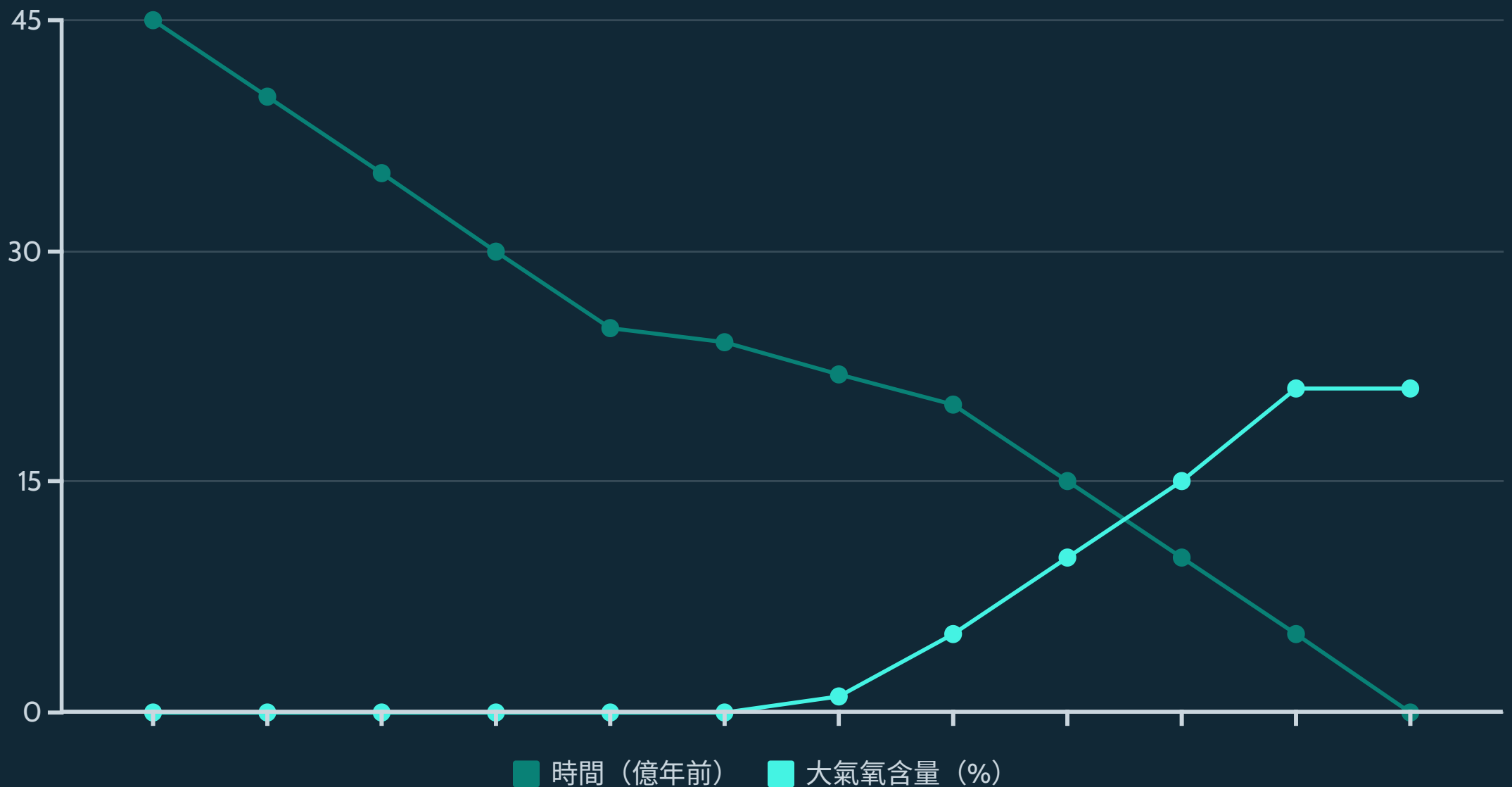


環境改變

氧氣最終開始在大氣中積累，徹底改變了地球的化學環境，為後來的生命演化創造了條件

在太古宙，一個對地球未來產生了革命性影響的生物化學過程演化出來了——光合作用。最具變革意義的是產氧光合作用的演化，這個過程由藍細菌完成。藍細菌利用葉綠素捕捉太陽光能，將水作為電子供體，分解水分子釋放出氫離子用於固碳，同時將氧氣作為副產品釋放出來。這個過程的能量效率遠高於厭氧光合作用，使得藍細菌能夠在更廣泛的環境中繁盛。

大氧化事件：氧氣革命



大約在24億年前，地球大氣經歷了一場革命性的變化，被稱為「大氧化事件」。在此之前，大氣中的游離氧氣含量極低。但在GOE期間，由於藍細菌持續進行產氧光合作用，其產生的氧氣終於超過了地球表面和海洋中還原性物質的消耗能力，導致氧氣開始在大氣中顯著積累。大氣氧含量可能上升到現今水平的1%至10%。



大氧化事件的地質證據



條帶狀鐵建造的消失

隨著海洋表層水體氧化，溶解的亞鐵被耗盡，大規模BIFs的沉積在約18.5億年前基本停止。



陸相紅層的出現

陸地上鐵的氧化物（赤鐵礦）開始形成並保存下來，產生了紅色的沉積岩。



碎屑性礦物的變化

在GOE之前的河流沉積物中常見的易氧化礦物，如黃鐵礦和鈾礦，在GOE之後變得稀少。



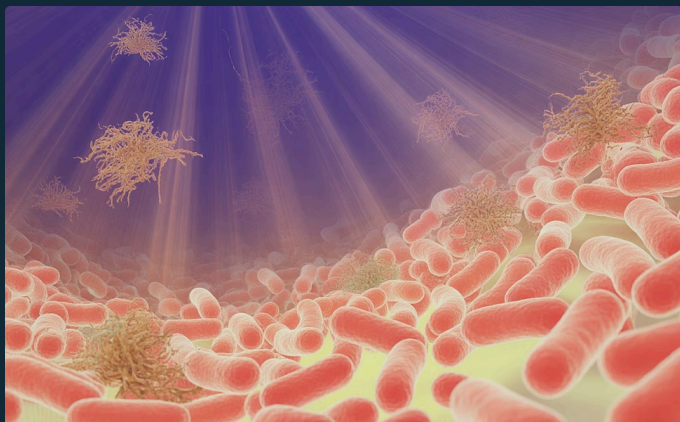
硫同位素分餾的變化

硫同位素的質量非依賴分餾現象在GOE之後消失，這被認為與大氣中缺乏足夠氧氣和臭氧層有關。

大氧化事件的觸發機制可能涉及多種因素的疊加，包括氧氣「匯」的飽和、生物產氧能力的增強、構造活動的影響以及大氣系統的臨界轉變。這次事件對地球及其生命產生了深遠的影響，包括對厭氧生物的毒害、礦物多樣性的增加、臭氧層的形成、氣候劇變（休倫冰期）以及為好氧生物和真核生物的演化創造條件。

sedimentary rock

大氧化事件的後果



首次生物滅絕

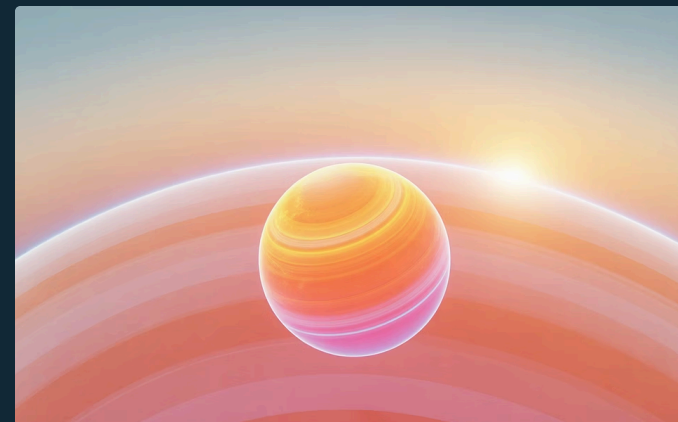
氧氣對於當時占主導地位的厭氧生物來說是劇毒的，GOE可能引發了地球歷史上第一次由生物活動自身導致的大規模滅絕事件。這可以看作是地球上首次全球性的「污染」事件，生物產生的「廢物」（氧氣）改變了環境，淘汰了無法適應的舊生命形式。

GOE及其後續影響，生動地展示了地球系統中生命、大氣、氣候和地質過程之間複雜的相互作用和反饋關係。生物的演化（產氧光合作用）觸發了大氣化學的根本轉變，進而引發了全球氣候的劇變和地質記錄的改變，並最終反過來深刻地影響了生物演化的方向。



休倫冰期

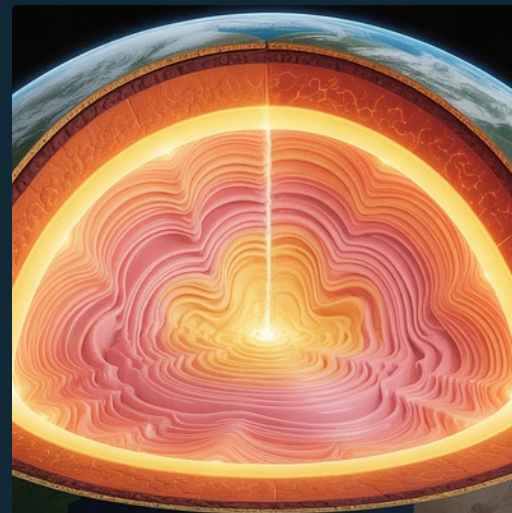
大氣中甲烷（ CH_4 ）是一種比二氧化碳更強效的溫室氣體。氧氣的增加導致甲烷被大量氧化，可能顯著削弱了地球的溫室效應，引發了持續長達3億年之久的全球性大冰期——休倫冰期（約24億-21億年前）。



臭氧層形成

大氣中氧氣含量的增加，最終導致了平流層臭氧層（ O_3 ）的形成。臭氧層能夠吸收大部分有害的太陽紫外線輻射，為日後生命登陸提供了必要的保護。這是生物活動改變地球環境，進而又反過來影響生物演化的重要例子。

板塊構造：地球的引擎



現代板塊構造理論認為，地球的岩石圈被分割成若干個剛性的板塊，這些板塊漂浮在下方塑性較強的軟流圈之上，並相對移動。板塊之間的邊界是地質活動最劇烈的地帶，主要分為三種類型：分離型邊界（如洋中脊）、匯聚型邊界（如俯衝帶和碰撞帶）以及轉換型邊界（如轉換斷層）。

驅動板塊運動的主要動力來源包括地幔對流、洋脊推力、板塊拉力和地幔柱等力的組合。現代風格的板塊構造活動，被認為至少在元古宙時期已經開始運作，甚至可能更早。

超大陸旋迴：大陸的聚合與分離

大陸分散
板塊分離，形成多個獨立的大陸，被海洋隔開

超大陸裂解
由於地幔熱柱活動或岩石圈內部應力的積累，超大陸開始裂解



大陸聚合
板塊碰撞，大陸逐漸拼合在一起

超大陸形成
幾乎所有大陸塊體聚合成一個超大陸

地球歷史上，大陸並非固定不變，而是經歷了多次的聚合與分離，形成了所謂的「超大陸旋迴」。在羅迪尼亞之前，可能還存在更早的超大陸，如約27-24.5億年前的肯諾蘭和約20-15億年前的哥倫比亞。元古宙最重要的超大陸是羅迪尼亞，它大約在11億至10億年前，由當時地球上幾乎所有的大陸塊體通過碰撞拼合而成。

羅迪尼亞超大陸

1100

百萬年前

羅迪尼亞形成時間

750

百萬年前

羅迪尼亞開始裂解

7

主要陸塊

構成羅迪尼亞的大陸數量

300

百萬年

羅迪尼亞存在的時間

古地磁數據表明，羅迪尼亞超大陸的中心可能是北美克拉通（勞倫大陸），整體位於赤道以南的區域。大約從8.5億至7.5億年前開始，羅迪尼亞超大陸開始裂解。裂解過程並非同步發生，而是沿著不同的裂谷帶逐步進行。例如，澳洲、南極東部、印度等陸塊首先分離，隨後北美、波羅的、亞馬遜等陸塊也相繼裂開，形成了新的洋盆。



板塊構造對地球系統的影響

氣候影響

超大陸的聚合與裂解深刻地影響著全球的氣候模式。超大陸內部遠離海洋，氣候變得極度乾燥，形成廣闊的沙漠和半乾旱地區。大陸的分散則改變了洋流和氣流模式，可能導致全球氣候從極端大陸性氣候向更溫和、更多樣化的氣候轉變。

海平面變化

快速的海底擴張時期，洋中脊體積增大，會導致全球海平面上升，淹沒大陸邊緣形成淺海。相反，當海底擴張速率減慢時，海平面會下降，露出更多的陸地面積。這些變化對沿海生態系統和沉積環境產生重大影響。

生物地理隔離

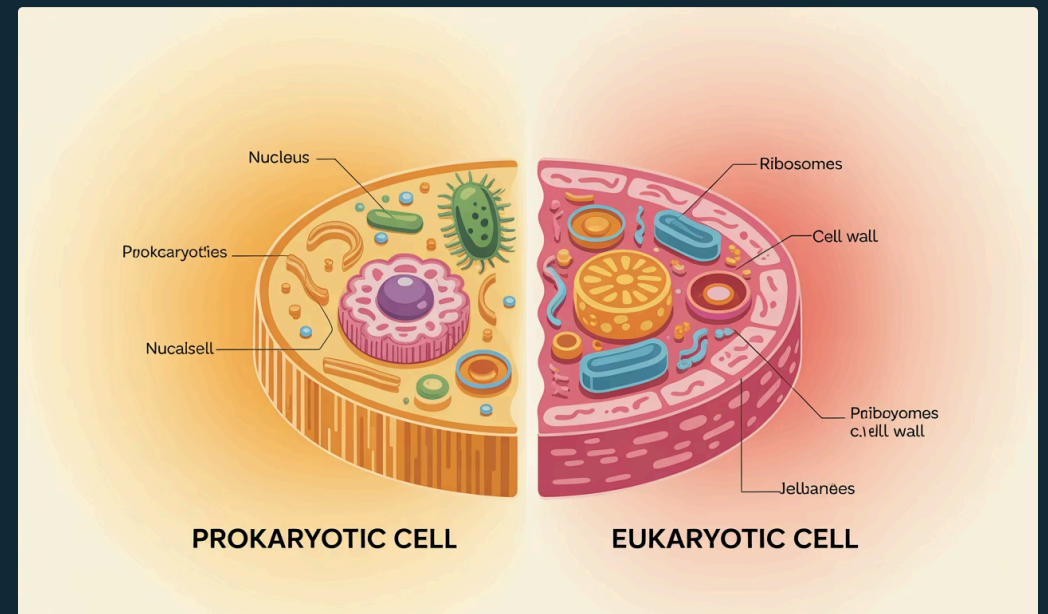
大陸的分裂導致了原本連續分布的陸地生物群被海洋隔開，促進了各地生物的獨立演化（趨異演化），形成了現今不同大陸之間獨特的生物區系。例如，澳大利亞有袋類的獨特性就是大陸隔離的結果。

板塊構造不僅是地球地貌的塑造者，更是地球系統演化的核心驅動力。羅迪尼亞超大陸的裂解，使得大量陸地移動到低緯度熱帶地區，增強的風化作用消耗了大量大氣二氧化碳，加上冰-反照率反饋，被認為是觸發元古宙末期「雪球地球」事件的重要原因。可以說，地球內部板塊的運動，通過改變地表格局，調控著氣候的脈動，並為生命的演化設置了舞台。

真核生物的起源

原核細胞與真核細胞的區別

- 真核細胞擁有由核膜包裹的細胞核
- 真核細胞具有多種膜狀細胞器（如線粒體、葉綠體）
- 真核細胞體積更大，結構更複雜
- 真核細胞具有細胞骨架和內膜系統
- 真核細胞能夠進行有絲分裂和減數分裂



在生命演化的歷程中，一個里程碑式的事件是真核細胞的出現。與結構簡單、缺乏細胞核和膜狀細胞器的原核細胞相比，真核細胞體積更大，結構更複雜，擁有一個由核膜包裹的細胞核來存放遺傳物質，以及多種具有特定功能的膜狀細胞器。

真核細胞的起源，目前最被廣泛接受的理論是內共生學說。該學說認為，真核細胞是通過不同原核生物之間的一系列共生事件演化而來的。其關鍵步驟被認為是：一個古菌宿主細胞吞噬了一個好氧細菌，但並未將其消化，而是與其建立了共生關係。這個被吞噬的好氧細菌逐漸演變成了線粒體，負責為宿主細胞提供能量。

Endosymbiotic theory



內共生學說：細胞器的起源



古菌宿主

一個複雜的古菌（可能是阿斯加德古菌）作為初始宿主細胞



細菌內共生

宿主吞噬了一個好氧細菌但未消化，而是建立了共生關係



線粒體形成

被吞噬的細菌逐漸演變成線粒體，為宿主提供能量

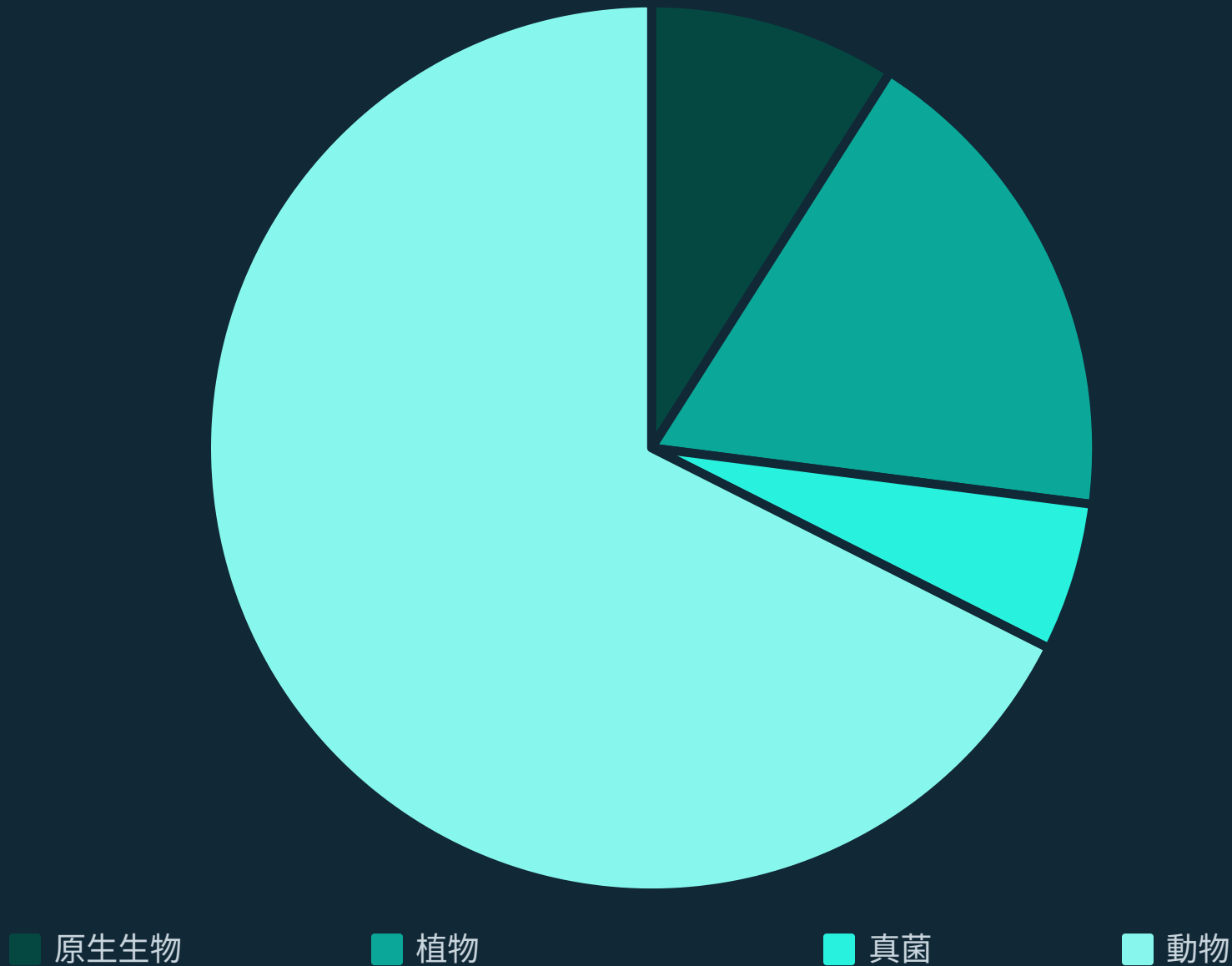


葉綠體獲得

在植物和藻類譜系中，又吞噬了一個藍細菌，演變成葉綠體

真核生物的出現時間與大氧化事件密切相關。GOE使得大氣和淺海中充滿了氧氣，這為有氧呼吸的演化創造了條件。線粒體の有氧呼吸能夠從有機物中釋放出比厭氧代謝多得多的能量。這種能量上的巨大優勢，被認為是支撐真核細胞發展出更大體積、更複雜內部結構以及後來演化出多細胞體制的基礎。

真核生物的早期演化



最早的可靠真核生物化石（如一些大型單細胞藻類）出現在大約18億至16億年前，表明真核細胞可能在GOE之後不久就已起源。近年來的基因組學研究為內共生學說提供了更多支持，並揭示了真核生物宿主細胞的可能來源。研究發現，一類被稱為「阿斯加德古菌」的古菌擁有許多先前被認為是真核生物特有的基因，這表明，真核生物的宿主細胞可能直接演化自這些複雜的古菌。

「無聊的十億年」

1 真核細胞出現

約18億年前，最早的真核生物化石出現

2 「無聊的十億年」

從18億至6億年前，生物演化似乎進入相對緩慢期

3 多細胞生物繁盛

約6億年前，埃迪卡拉生物群出現，標誌著複雜多細胞生物的興起

從最早的真核細胞出現（約1.8 Ga）到大型、複雜多細胞生物（如埃迪卡拉生物群）的繁盛（約0.6 Ga）之間，似乎存在一段長達十億年的相對「平靜」或演化緩慢的時期，有時被稱為「無聊的十億年」。在這段時間裡，真核生物雖然存在，但多樣性和生態重要性似乎有限。其原因可能包括當時環境條件的限制，例如氧氣含量可能在GOE後穩定在一個相對較低的水平，或者海洋中某些關鍵營養元素的缺乏，限制了真核生物的進一步發展。

Boring Billion

showratbiien petwend 1.8 0.8 billion ygo.



雪球地球：全球冰封事件

720

百萬年前

成冰紀開始

635

百萬年前

成冰紀結束

-50

°C

全球平均溫度下降

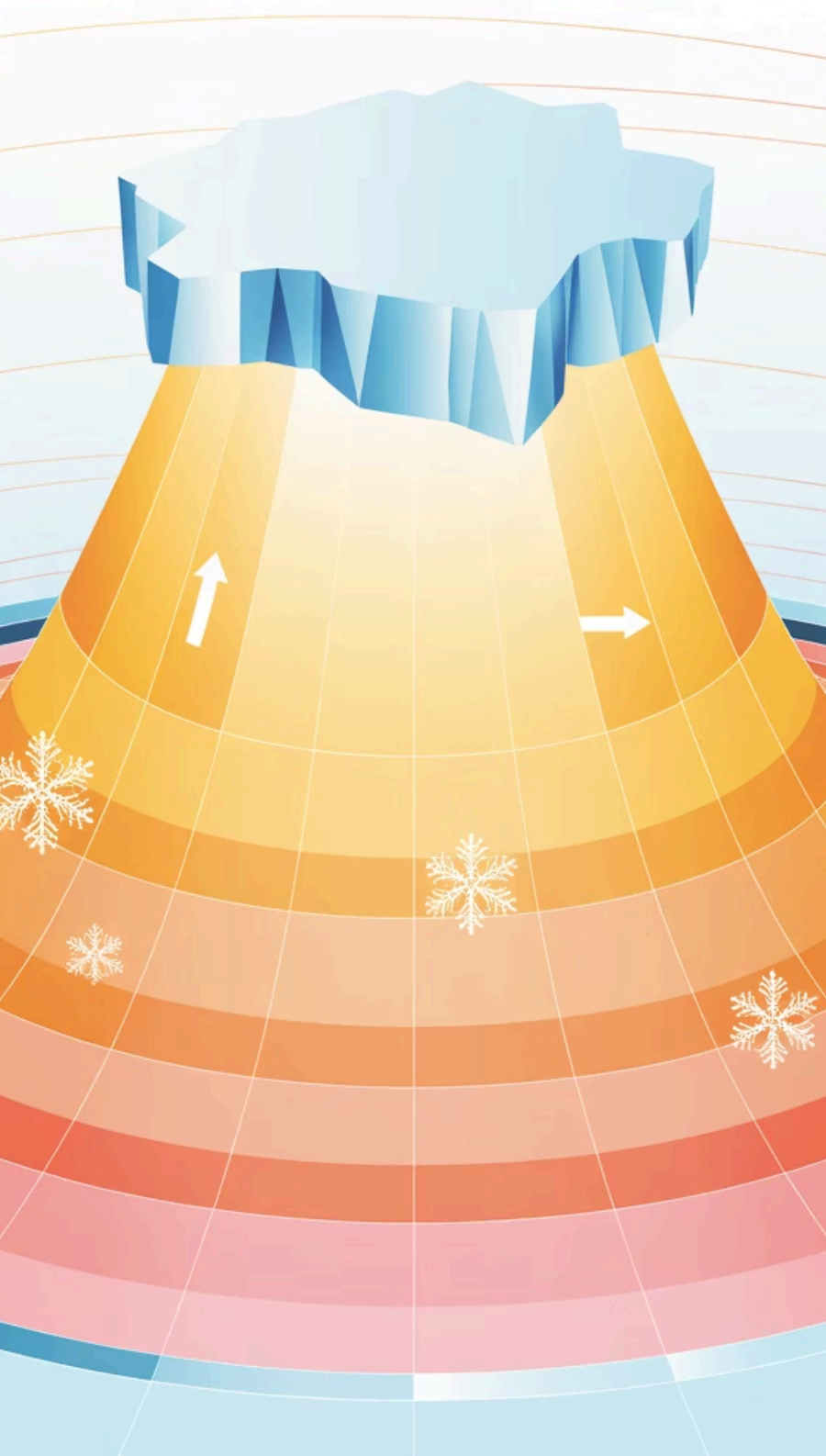
2

主要冰期

斯圖特冰期和馬林諾冰期

元古宙晚期的成冰紀，地球經歷了其歷史上最極端的氣候事件之一——至少兩次全球性或近乎全球性的大冰期，被稱為「雪球地球」。這兩次主要的冰期分別是斯圖特冰期和馬林諾冰期。「雪球地球」假說的主要證據來自於地質記錄，包括在許多當時位於熱帶或亞熱帶地區的岩層中發現的明確的冰川沉積物，以及在全球範圍內，緊隨冰川沉積物之上普遍覆蓋著的一層厚度均一、結構奇特的碳酸鹽岩。

Albedo Feedback Mechanism



雪球地球的成因

羅迪尼亞裂解



超大陸裂解導致大量新的陸地邊緣暴露在低緯度熱帶地區，加劇了化學風化作用

溫室氣體減少



風化作用消耗大氣中的二氧化碳，削弱了溫室效應，加上當時太陽輻射較弱

冰蓋擴張



全球氣溫下降，冰蓋開始從高緯度向低緯度擴張

冰-反照率正反饋



冰蓋擴張增加了地球反射太陽輻射的能力，導致進一步降溫，形成惡性循環

觸發雪球地球事件的原因可能包括多種因素的共同作用。羅迪尼亞超大陸的裂解導致大量新的陸地邊緣暴露在低緯度熱帶地區，加劇了化學風化作用，消耗了大氣中的二氧化碳。當時太陽的輻射強度比現今低約6%。一旦冰蓋開始擴張到中低緯度，地球表面反射太陽輻射的能力就會大大增加，導致地球吸收的太陽能減少，氣溫進一步下降，促使冰蓋進一步擴張，形成一個失控的惡性循環。

雪球地球的終結



火山活動持續

即使在雪球地球時期，火山活動仍在持續，不斷向大氣中釋放二氧化碳



二氧化碳積累

由於風化作用和光合作用幾乎停止，火山噴出的CO₂在大氣中持續積累



溫室效應增強

當CO₂濃度達到極高水平時，強烈的溫室效應足以克服冰雪的高反照率

如此極端的全球冰封狀態是如何結束的呢？主流觀點認為，即使在雪球地球時期，火山活動仍在持續，不斷向大氣中釋放二氧化碳。由於全球被冰雪覆蓋，海洋被冰層隔絕，岩石風化作用幾乎停止，生物的光合作用也大大減弱，這些能夠消耗CO₂的過程都失效了。因此，火山噴出的CO₂會在大氣中持續積累。經過數百萬年，當大氣CO₂濃度達到一個極高的水平時，強烈的溫室效應足以克服冰雪的高反照率，導致全球氣溫快速回升，冰蓋迅速融化。

雪球地球對生命演化的影響

生存壓力與滅絕

全球冰封無疑對當時的生命造成了巨大的生存壓力，可能導致了大規模的滅絕。只有少數能夠適應極端環境的生物才能存活下來，例如在赤道附近可能存在的開放水域或薄冰區中的一些真核生物。

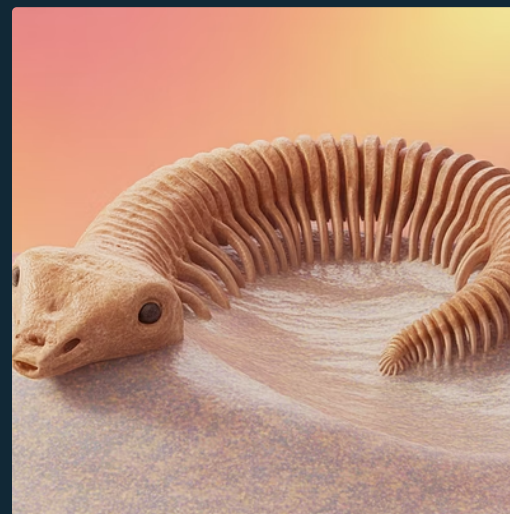
這種極端的環境壓力可能篩選出更具適應性的生命形式，為後來的生物多樣化奠定了基礎。



冰期的結束可能也為生命的演化創造了新的機遇。極端的環境壓力可能篩選出更具適應性的生命形式。冰期結束後，全球變暖、海平面上升、以及冰川融化帶來的大量營養物質湧入海洋，可能刺激了生產力的提高和生物的快速多樣化。許多科學家認為，雪球地球事件的結束，為緊隨其後的埃迪卡拉生物群的出現和繁盛創造了條件。

雪球地球的經歷表明，地球的氣候系統具有進入極端狀態的潛力，並且可以在地質和生物因素的共同作用下發生劇烈的轉變。同時，它也揭示了環境災難在生命演化史上可能扮演的雙重角色——既是毀滅者，也是新生的催化劑。

埃迪卡拉生物群：最早的複雜生命



在最後一次全球性大冰期（馬林諾冰期）結束後，地球進入了元古宙的最後一個紀——埃迪卡拉紀。在這個時期，地球上首次出現了清晰可見的大型、複雜的多細胞生物化石記錄，被統稱為埃迪卡拉生物群。這些化石最初於1946年在澳大利亞南部的埃迪卡拉山區被發現，後來在全球多地都有發現。

埃迪卡拉生物群的化石主要是保存在砂岩或頁岩中的印痕或鑄模，代表的是沒有硬殼或骨骼的軟軀體生物。它們的形態奇特而多樣，與之後寒武紀出現的動物形態差異很大。

埃迪卡拉生物的特徵

形態與結構

常見的有葉狀（如Charnia）、盤狀（如Dickinsonia，可能具有分節結構）、紡錘狀、管狀以及多分枝的形態。許多生物體現出獨特的「絨縫狀」或分形結構。體型從幾厘米到超過一米不等，是地球上首次出現的宏體生物。

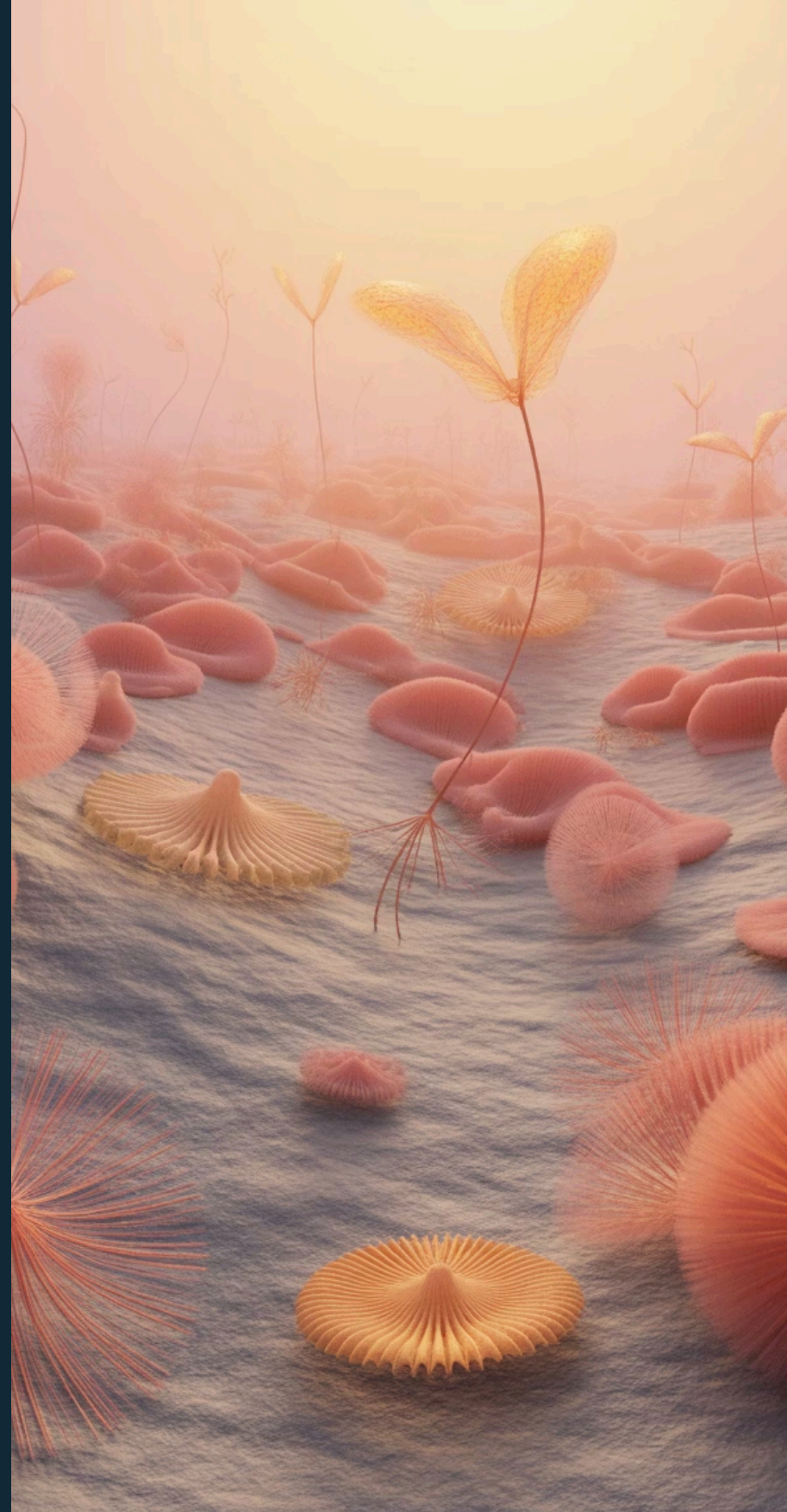
對稱性

除了兩側對稱和輻射對稱外，還存在一些奇特的三輻射對稱（如Tribrachidium）或滑移對稱的生物。這些獨特的對稱性在現代動物中極為罕見，暗示埃迪卡拉生物可能代表了一種獨特的生命實驗。

生活方式

大多數埃迪卡拉生物似乎是底棲固著生活的，附著在海底基質上。它們可能通過體表直接吸收海水中的溶解有機物，或者進行濾食。缺乏明顯的口、肛門、消化道以及運動器官的證據。

關於埃迪卡拉生物群的分類地位，目前仍有許多爭議。一些學者認為它們可能代表了現生動物門的早期成員或幹群。另一些觀點則認為，它們中的大多數可能屬於一個獨立的、已經滅絕的生命分支，與現代動物的關係較遠。貴州瓮安發現的磷酸鹽化保存的微體化石，則提供了動物胚胎和早期細胞分化的證據，表明至少部分後生動物在埃迪卡拉紀早期就已存在。



[illegible]

埃迪卡拉生物群的發現，將複雜多細胞生命的歷史向前推進到了寒武紀之前，填補了從單細胞真核生物到寒武紀動物大爆發之間的空白。



它們代表了生命在宏觀尺度上的第一次大規模「實驗」，探索了多種與現代生物不同的身體構型和組織方式。



這個「神秘花園」的存在，緊隨在雪球地球這一極端環境事件之後，印證了重大環境變革可能為生物演化打開新的窗口，激發出全新的生命形態。



儘管它們中的大多數可能走向了演化的「死胡同」，但它們的存在為理解早期動物演化的複雜性和多樣性提供了獨特的視角。

埃迪卡拉生物群在埃迪卡拉紀末期（約5.39億年前）基本上從化石記錄中消失了。其消失的原因可能包括環境變化（如海水氧含量變化）、或者更可能是因為接下來寒武紀動物的興起所帶來的生態競爭和捕食壓力。無論如何，埃迪卡拉生物群的短暫繁盛為我們提供了一個窗口，讓我們得以窺見生命在複雜化道路上的早期嘗試。



顯生宙：可見生命的時代

新生代 (6600萬年前至今)

哺乳動物和鳥類的時代，人類出現

1

2

中生代 (2.52億 - 6600萬年前)

爬行動物的統治時期，恐龍繁盛

古生代 (5.39億 - 2.52億年前)

海洋無脊椎動物繁盛，生命登陸

3

顯生宙，意為「可見的生命」，始於約5.39億年前，一直延續至今。這個宙以其豐富多樣的宏體生物化石記錄而著稱，涵蓋了我們所熟知的絕大多數動物和植物的演化歷史。顯生宙被進一步劃分為三個代：古生代、中生代和新生代。每個代都有其獨特的生物群落和環境特徵，共同構成了地球生命演化的壯麗畫卷。

寒武紀生命大爆發

539

百萬年前
寒武紀開始

20

百萬年
大爆發持續時間

40+

動物門類
在此期間出現

5x

倍增
生物多樣性增長

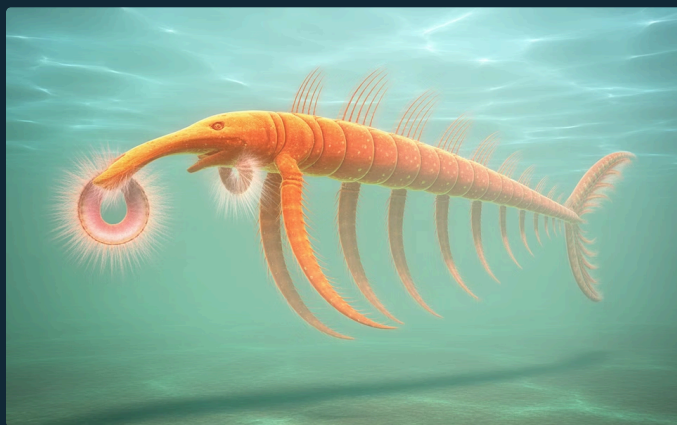
古生代的開端——寒武紀，以一場被稱為「寒武紀生命大爆發」的驚人生物演化事件為標誌。在相對較短的地質時間內，幾乎所有現生動物的主要門類都在化石記錄中突然湧現。這與之前埃迪卡拉紀相對簡單、形態奇特的生物群形成了鮮明對比。寒武紀大爆發的關鍵特徵包括硬體組織的出現、身體結構的複雜化以及生態互動的增加。

寒武紀生物多樣性



三葉蟲

寒武紀最具代表性的生物之一，擁有分節的身體和複眼，是節肢動物的早期代表。它們在海底爬行或游泳，有些可能是掠食者，有些則是濾食者或食腐者。三葉蟲的多樣性和豐富的化石記錄使其成為研究早期動物演化的重要材料。



奇蝦

寒武紀海洋中的頂級掠食者之一，體長可達1米，擁有一對強大的前附肢用於捕獲獵物，以及環狀的口器。奇蝦的發現顛覆了人們對早期動物體型和複雜性的認識，表明寒武紀海洋中已經存在相當複雜的食物網和生態關係。



歐巴賓海蠍

一種形態奇特的寒武紀動物，擁有五隻眼睛和一個前伸的長吻。這種獨特的形態在現代動物中找不到直接對應，展示了寒武紀生命形態的多樣性和實驗性。歐巴賓海蠍的發現強調了早期動物演化的複雜性和多樣性。

著名的寒武紀化石庫，如加拿大的伯吉斯頁岩和中國的澄江生物群，因其對軟軀體結構的精美保存，為我們揭示寒武紀生物多樣性提供了無與倫比的窗口。寒武紀大爆發的原因可能是一個多因素綜合作用的結果，包括環境因素（如氧氣含量達到閾值）、生態因素（如捕食關係引發的「演化軍備競賽」）以及遺傳因素（如調控身體發育的關鍵基因的演化）。

從水到陸：植物的登陸



綠藻祖先

陸地植物起源於生活在淺水區的綠藻



非維管束植物

最早登上陸地的可能是類似於現代苔蘚和地錢的簡單植物



維管束植物

維管組織、根系和葉片的演化使植物能夠真正脫離水體束縛

生命向陸地擴展的偉大征程在古生代中期拉開序幕。最早登上陸地的生命可能是簡單的非維管束植物，類似於現代的苔蘚和地錢，它們可能在奧陶紀或志留紀就在潮濕的岸邊立足。到了志留紀和泥盆紀，植物演化取得了突破性進展：維管束組織的出現使得水分和營養能夠高效運輸，支持植物體向高處生長；根系的演化幫助植物固著並從土壤中吸收水分；葉片的出現增加了光合作用的面積。這些創新使得植物能夠真正脫離水體束縛，在陸地上繁衍，形成了最早的森林。

從水到陸：動物的探險



肉鰭魚類

偶鰭內部具有骨骼支撐，肌肉發達，類似於陸地脊椎動物的四肢雛形



肺的演化

一些魚類演化出了能夠呼吸空氣的肺，適應淺水缺氧環境



過渡形式

如提塔利克魚，展示了魚類和早期四足動物之間的過渡特徵



原始兩棲類

由肉鰭魚類演化而來的最早四足動物，成功登上了陸地

伴隨著植物的登陸，動物也開始向陸地進軍。泥盆紀被譽為「魚類時代」，魚類經歷了空前的多樣化。肉鰭魚類中的一支對於生命登陸具有特殊意義。它們的偶鰭內部具有骨骼支撐，肌肉發達，類似於陸地脊椎動物的四肢雛形；同時，它們中的一些成員還演化出了能夠呼吸空氣的肺。著名的過渡化石，如發現於加拿大北極地區的提塔利克魚，就清晰地展示了魚類和早期四足動物之間的過渡特徵。到晚泥盆世，由肉鰭魚類演化而來的最早的四足動物——原始兩棲類已經成功登上了陸地。

taalik

and fish-like tetrapods



陸地生態系統的協同演化

植物改造環境

植物首先改造了陸地環境，創造了土壤，改變了大氣成分，並提供了食物來源和棲息地

食物網形成

隨著更多生物類群登陸，陸地食物網變得越來越複雜，生態系統日益豐富



節肢動物跟進

節肢動物緊隨植物之後登陸，成為最早的陸生動物，以植物、碎屑或彼此為食

脊椎動物登陸

四足動物從水生環境過渡到陸地，開始適應陸地生活

生命登陸的過程展示了陸地生態系統的協同演化特徵。植物首先改造了陸地環境，創造了土壤，改變了大氣成分，並提供了食物來源和棲息地。隨後，無脊椎動物和脊椎動物才得以跟進，形成了日益複雜的陸地食物網。同時，脊椎動物從魚類到兩棲類的轉變，也生動地詮釋了演化如何利用已有的結構（肉鰭、肺）來應對新的環境挑戰，即外適應在宏觀演化中的重要作用。

盤古大陸的聚合

300

百萬年前
盤古大陸形成

40,000

公里
盤古大陸東西跨度

90%

陸地
聚合於盤古大陸

180

百萬年
盤古大陸存在時間

在石炭紀和二疊紀期間，構成岡瓦納大陸和勞亞大陸的各個板塊持續碰撞、拼合，最終在二疊紀中期形成了地球歷史上最著名的超大陸——盤古大陸。這個巨大的陸塊幾乎囊括了當時地球上所有的陸地面積，從南極一直延伸到北極附近。盤古大陸的形成對全球氣候產生了深遠影響。巨大的陸地內部遠離海洋，氣候變得極度乾燥，形成了廣闊的沙漠和半乾旱地區，季節性溫差也變得非常顯著。



石炭紀的煤炭森林



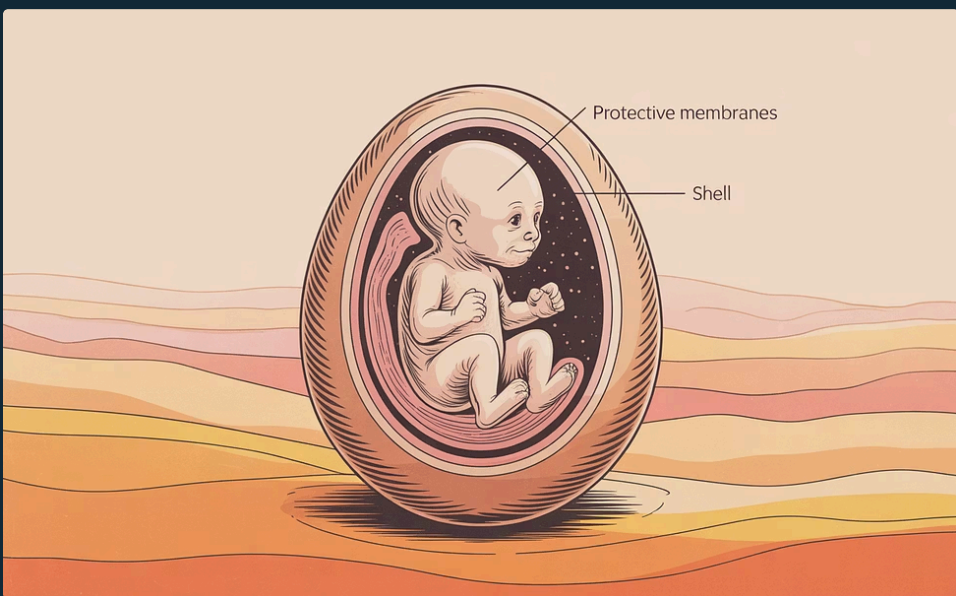
沼澤森林

石炭紀的全球氣候普遍溫暖濕潤，特別是在低緯度地區，形成了廣闊的熱帶沼澤森林。這些森林主要由高大的鱗木、封印木（屬於石松類）、蘆木（楔葉類）以及蕨類和早期的種子蕨構成。這些植物遺體在沼澤環境中被大量掩埋，經過漫長的地質作用形成了今天的主要煤層。



巨型節肢動物

石炭紀的大氣氧氣含量可能遠高於現今水平（可能達到30-35%），這使得陸地上能夠支持體型巨大的節肢動物，如翼展可達70厘米的巨脈蜻蜓和長達2米多的巨型馬陸。這些巨型昆蟲和其他節肢動物在現代已經不復存在，它們的滅絕可能與後來大氣氧含量的下降有關。



羊膜卵的演化

石炭紀見證了一個對生命完全征服陸地至關重要的演化創新——羊膜卵的出現。羊膜卵具有一層或多層保護性的膜和一個硬殼或革質殼，能夠在陸地乾燥環境中保護胚胎髮育，為其提供水分和營養，並處理代謝廢物。這使得產卵不再依賴於水體，羊膜動物能夠徹底擺脫對水生環境的繁殖束縛。

石炭紀緊隨泥盆紀之後，其名稱來源於這個時期形成的廣泛而豐富的煤炭沉積。最早的羊膜動物從兩棲類中演化出來，並在石炭紀晚期分化為兩大支系：蜥形綱（後來演化出大部分爬行動物和鳥類）和合弓綱（後來演化出哺乳動物）。

二疊紀的生態系統

二疊紀陸地生態

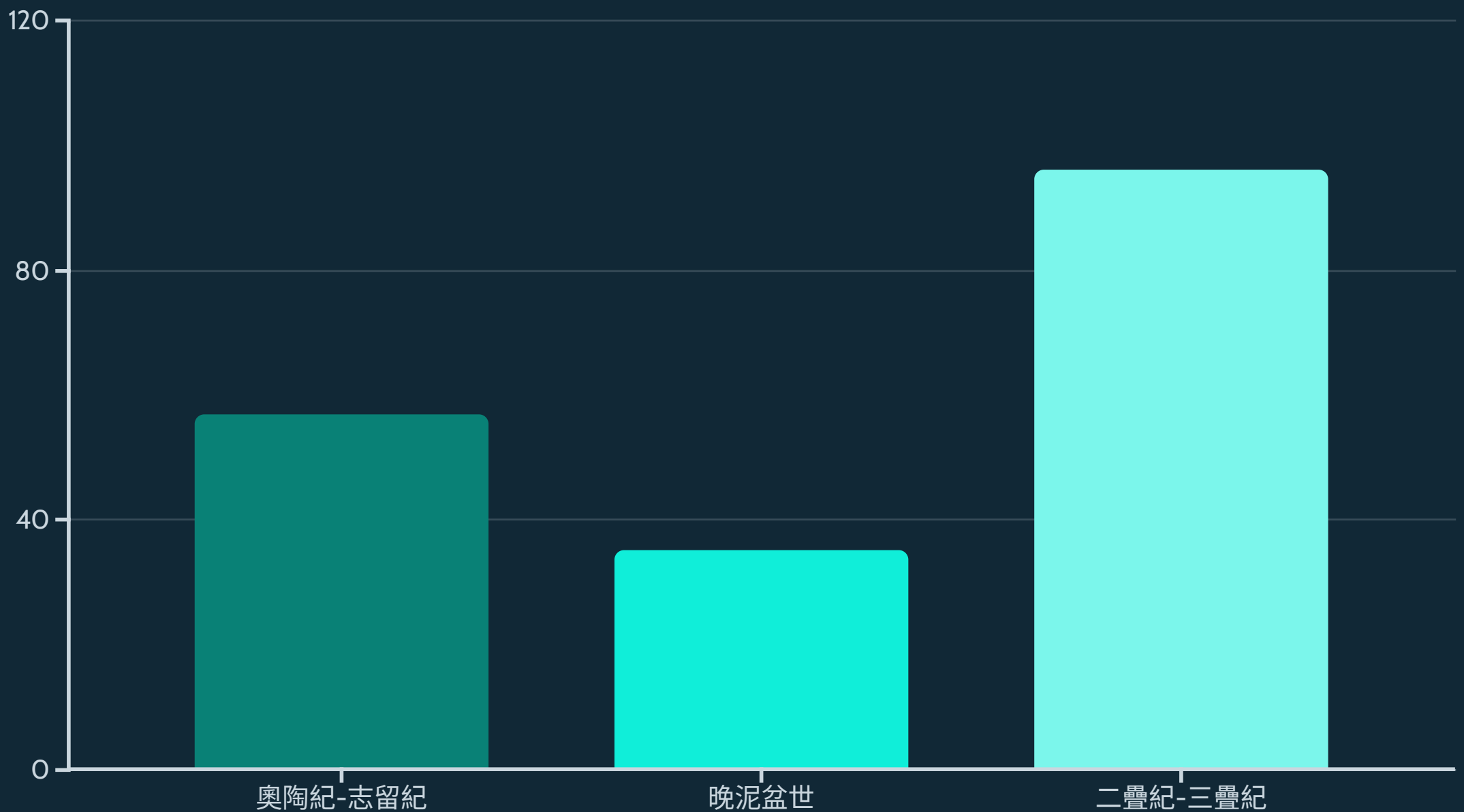
- 合弓綱動物佔據主導地位，如盤龍類和獸孔類
- 爬行動物持續多樣化
- 昆蟲種類豐富
- 裸子植物（如松柏類、蘇鐵類、銀杏類）取代蕨類和石松類
- 極端的大陸性氣候，廣闊的沙漠和半乾旱地區



在二疊紀的陸地生態系統中，合弓綱動物（常被稱為「似哺乳爬行類」）佔據了主導地位。早期的代表如盤龍類（如異齒龍 *Dimetrodon*，背上有帆狀結構），後來則被更接近哺乳動物的獸孔類所取代。爬行動物也繼續多樣化，昆蟲種類豐富。植物方面，能夠適應乾燥環境的裸子植物開始取代石炭紀的蕨類和石松類，成為主要的陸地植被。

盤古大陸的形成過程，清晰地展示了板塊構造如何通過改變大陸的排列和大小來調控全球氣候模式。巨大陸塊的出現導致了海洋環流的改變，並產生了極端的大陸性氣候，影響了生物的分布和適應。而羊膜卵這一生物學上的關鍵創新，則恰好使得羊膜動物能夠抓住盤古大陸形成所帶來的新的陸地環境機遇，成功地開疆拓土，為後來的爬行動物和哺乳動物時代奠定了基礎。

古生代的大滅絕事件



古生代不僅是生命大發展的時代，也經歷了多次嚴峻的環境危機，導致了顯生宙「五大」生物集群滅絕事件中的三次。奧陶紀-志留紀大滅絕（約4.45億 - 4.43億年前）是顯生宙第一次大規模滅絕事件，主要受害者是海洋無脊椎動物。晚泥盆世大滅絕（約3.75億 - 3.60億年前）主要影響的是熱帶淺海的生物，特別是造礁生物幾乎完全消失。二疊紀-三疊紀大滅絕（約2.52億年前）是地球歷史上已知最嚴重的一次生物集群滅絕事件，據估計，高達96%的海洋物種和70%的陸地脊椎動物物種在此事件中消失。



PERMIAN EXTINCTION

二疊紀-三疊紀大滅絕

1

西伯利亞暗色岩

位於現今西伯利亞地區的大規模火山噴發，形成了巨大的西伯利亞暗色岩省

2

全球變暖

火山噴發釋放巨量二氧化碳，同時可能點燃了地下煤層和有機物，導致全球氣溫急劇升高



海洋缺氧與酸化

全球變暖降低了海水溶解氧的能力，同時可能減緩了海洋環流，導致海洋廣泛缺氧



臭氧層破壞與酸雨

火山噴發還可能釋放出大量的含氯、含氟氣體和二氧化硫，導致臭氧層破壞和酸雨

P-T大滅絕的主要原因被認為是位於現今西伯利亞地區的大規模火山噴發，形成了巨大的西伯利亞暗色岩省。這次火山活動在相對短的時間內噴發了數百萬立方公里的熔岩和巨量的火山氣體。其引發的環境災難是多方面的、連鎖性的，包括全球變暖、海洋缺氧與酸化、臭氧層破壞與酸雨等。盤古超大陸的存在可能加劇了這些影響，例如限制了海洋環流，使得缺氧水體更容易擴散。



滅絕事件的演化意義

生態系統重置

大滅絕事件清除了原有的生態主導者，為倖存下來的生物類群提供了巨大的生態機遇，使其得以輻射演化，填補空出的生態位，從而開啟生命演化的新篇章。例如，P-T大滅絕雖然終結了古生代的生命格局，但也為中生代爬行動物（包括恐龍）的崛起鋪平了道路。

選擇性滅絕

滅絕事件往往表現出選擇性，某些生物類群比其他類群更容易受到影響。這種選擇性可能與生物的生理特性、生態習性或地理分布有關。例如，K-Pg滅絕事件中，體型較大的陸地動物幾乎全部滅絕，而體型較小的動物受影響相對較小。

多重壓力因素

大規模的環境災難，無論是氣候變化還是火山活動，往往不是單一因素作用，而是多種壓力因素相互疊加、相互作用，形成連鎖反應，最終導致生態系統的崩潰。這種複雜的因果關係使得滅絕事件的研究極具挑戰性。

這些古生代的大滅絕事件，凸顯了地球生命系統的脆弱性，即使是繁盛一時的生物類群，也可能在短時間內因劇烈的環境變化而消亡。然而，滅絕事件也同時扮演了「創造性破壞」的角色。通過清除原有的生態主導者，它們為倖存下來的生物類群提供了巨大的生態機遇，使其得以輻射演化，填補空出的生態位，從而開啟生命演化的新篇章。



中生代：爬行動物的統治

三疊紀 (2.52億 - 2.01億年前)

P-T大滅絕後生命緩慢復甦，主龍類崛起，最早的恐龍和哺乳動物出現

白堊紀 (1.45億 - 6600萬年前)

恐龍多樣性達到頂峰，被子植物出現並繁盛，K-Pg撞擊導致非鳥恐龍滅絕

1

2

3

侏羅紀 (2.01億 - 1.45億年前)

恐龍繁盛，蜥腳類恐龍達到頂峰，最早的鳥類出現，盤古大陸開始分裂

中生代，意為「中間的生命」，夾在古生代和新生代之間，常被稱為「爬行動物時代」或更通俗地稱為「恐龍時代」。這個時代見證了P-T大滅絕後生命的緩慢復甦、恐龍的崛起與統治、盤古大陸的解體以及另一次重大的滅絕事件。中生代被進一步劃分為三個紀：三疊紀、侏羅紀和白堊紀，每個紀都有其獨特的生物群落和環境特徵。



三疊紀：生命的復甦



生態恢復

二疊紀末期的大滅絕給地球生命帶來了毀滅性的打擊，其後的生態恢復過程異常緩慢而艱難。三疊紀早期，地球生態系統處於一種「災後」狀態。生物多樣性極低，食物鏈簡單，許多古生代的優勢類群或消失或極度衰落。



主龍類崛起

在空出的生態位中，倖存下來的類群開始了新的演化輻射。在陸地上，主龍類（包括鱷類的祖先以及鳥頸類主龍）迅速多樣化，取代了合弓綱成為陸地上的優勢大型動物。最早的恐龍出現在三疊紀晚期，當時它們體型相對較小。



海洋新主人

海洋中，生命恢復同樣緩慢，但新的類群開始出現並繁盛，如菊石在經歷P-T重創後再次多樣化，現代類型的珊瑚開始建造礁石，各種海洋爬行動物也開始適應水生生活，例如魚龍和鰐龍類。



T-J大滅絕

三疊紀末期（約2.01億年前），地球再次經歷了一次顯著的生物集群滅絕事件，即三疊紀-侏羅紀大滅絕。這次事件導致約23%的科和48%的屬消失，對海洋生物和陸地生物都造成了影響。

T-J大滅絕事件的原因尚不完全確定，但強烈懷疑與盤古大陸開始裂解時伴隨的大規模火山活動有關，特別是形成了中大西洋岩漿省的火山噴發。火山活動可能導致了快速的氣候變化（全球變暖）、海平面變化和海洋酸化。T-J大滅絕事件對後來的生命演化格局產生了關鍵影響。它清除了許多與早期恐龍競爭的陸地大型動物，為恐龍在接下來的侏羅紀和白堊紀崛起成為無可爭議的陸地統治者，創造了重要的生態機遇。

恐龍的多樣性



蜥腳類恐龍

長頸、長尾、體型巨大的植食性恐龍，如腕龍、梁龍、雷龍等，在侏羅紀達到頂峰。它們是地球上曾經存在過的最大陸生動物，一些種類的體長可達30米以上，重量超過50噸。蜥腳類恐龍的巨大體型可能是對抗掠食者的一種適應，同時也使它們能夠利用高處的植物資源。



獸腳類恐龍

主要是雙足行走的食肉恐龍，包括侏羅紀的異特龍和白堊紀的暴龍等頂級掠食者，也包括一些小型的、適應不同食性的類群。鳥類就是從一支小型的獸腳類恐龍演化而來的。獸腳類恐龍的特徵包括中空的骨骼、三趾腳和鋒利的爪子。許多獸腳類恐龍被證實擁有羽毛，這為鳥類起源於恐龍的理論提供了有力證據。



鳥臀類恐龍

多樣化的植食性恐龍，包括劍龍、甲龍（有甲恐龍）、角龍（如三角龍）和鴨嘴龍等，在白堊紀尤為繁盛。鳥臀類恐龍的特徵是骨盆結構類似於鳥類（雖然它們與鳥類沒有直接的演化關係），以及特化的牙齒和頷骨，適合處理植物食物。許多鳥臀類恐龍演化出了複雜的防禦結構，如劍龍的背板和尾刺、甲龍的裝甲和三角龍的角和頸盾。

在T-J大滅絕之後，恐龍迅速抓住了生態機遇，在侏羅紀經歷了大規模的輻射演化，體型增大，種類繁多，佔據了從小型食肉動物到巨型植食動物的各種陸地生態位。恐龍的成功可能歸因於它們的多種適應性特徵，如高效的呼吸系統、直立的姿勢、多樣化的食性以及可能的溫血或部分溫血特性。恐龍的統治持續了約1.6億年，直到白堊紀末期的K-Pg滅絕事件。

中生代的空中與海洋

空中霸主：翼龍

翼龍是侏羅紀和白堊紀的天空主宰，它們是與恐龍關係密切的飛行爬行動物，演化出了多種形態和大小。翼龍的翼膜由皮膚和其他組織構成，連接在極度延長的第四指和身體之間。早期的翼龍擁有長尾和牙齒，而後期的翼龍則演化出短尾和無牙喙。最大的翼龍，如風神翼龍，翼展可達10-11米，是已知最大的飛行動物。



海洋中，大型海洋爬行動物繼續繁盛，如魚龍（形似海豚的海洋爬行動物）、蛇頸龍（長頸、小頭、鰭狀四肢的海洋爬行動物）以及白堊紀出現的滄龍（類似於巨大的海蜥蜴）。海洋無脊椎動物中，菊石和箭石非常繁盛，是重要的標準化石。現代類型的浮游生物（如有孔蟲、鈣藻）也開始多樣化，為海洋食物網提供了基礎。

除了恐龍之外，中生代的生物界也豐富多彩。空中有翼龍，海洋中有各種海洋爬行動物和豐富的無脊椎動物。陸地植物方面，侏羅紀仍然以裸子植物（蘇鐵、銀杏、松柏類）為主。但在白堊紀，一個重大的變革發生了——被子植物（即開花植物）出現並迅速多樣化，逐漸取代裸子植物成為陸地植被的主導。這對陸地生態系統產生了深遠影響，例如促進了傳粉昆蟲的協同演化。

鳥類與哺乳動物的起源

鳥類的恐龍起源

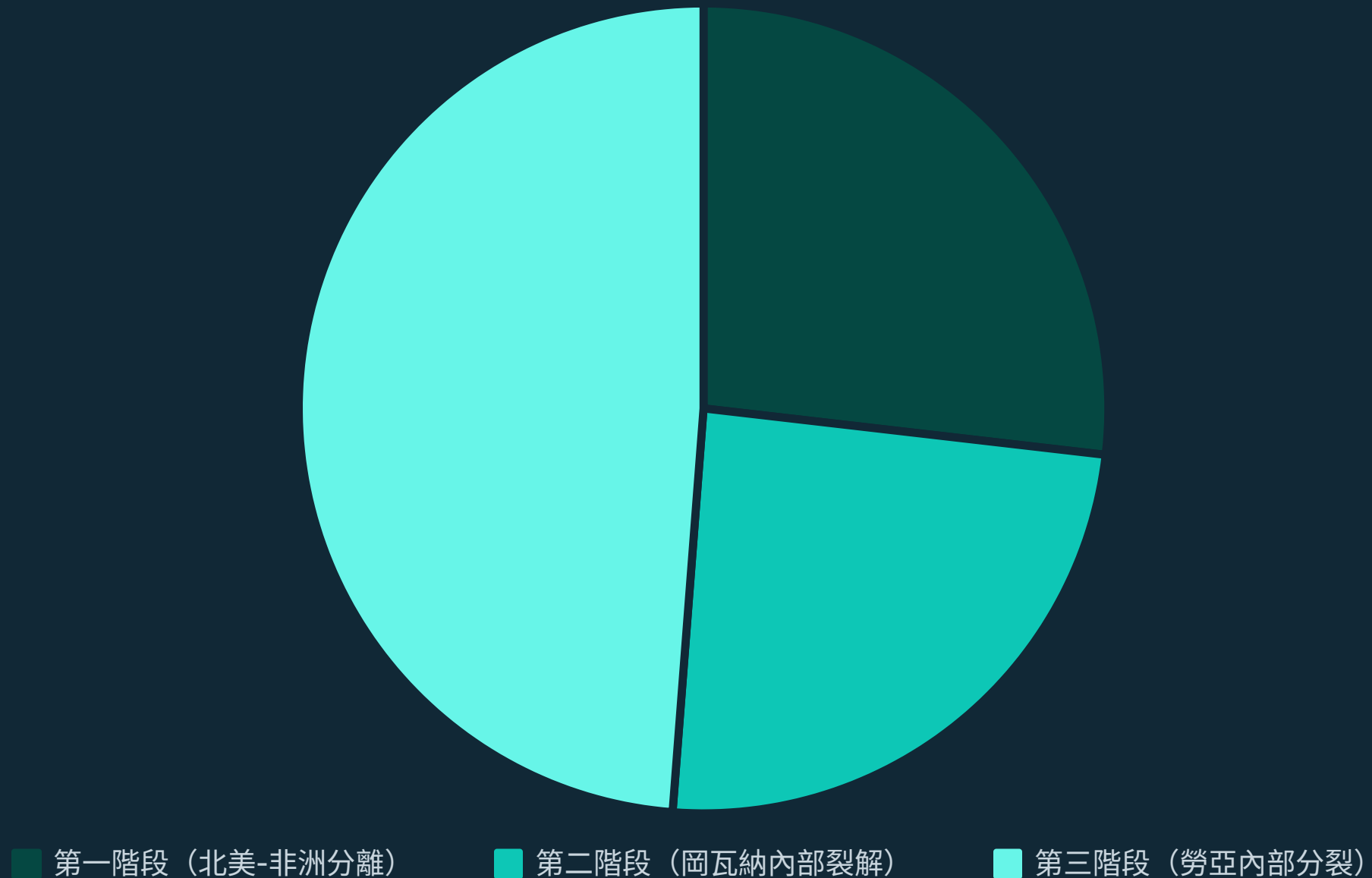
最早的鳥類，如始祖鳥，出現在侏羅紀晚期，它們保留了許多小型獸腳類恐龍的特徵（如牙齒、爪指、長骨尾），但已演化出羽毛和飛行的能力。化石證據清晰地表明，鳥類是從一支小型獸腳類恐龍演化而來的。這一發現是演化生物學中最重要的發現之一，它不僅連接了兩個主要的脊椎動物類群，也為我們理解大型演化轉變的機制提供了寶貴的見解。



哺乳動物雖然起源於三疊紀晚期，但在整個侏羅紀和白堊紀，哺乳動物一直生活在恐龍的陰影之下。它們體型普遍較小（多數不超過老鼠大小），可能主要是夜行性的食蟲或雜食動物。儘管體型和生態位受限，但中生代的哺乳動物也在悄悄地多樣化，演化出了包括現生哺乳動物三大類群（單孔類、有袋類、胎盤類）的早期代表。這些早期哺乳動物的適應性特徵，如夜行性、小型化和靈活的食性，可能是它們在K-Pg滅絕事件中存活下來的關鍵。

在中生代，另外兩個重要的現代脊椎動物類群也已悄然登場：鳥類和哺乳動物。這兩個類群在中生代雖然不是主導力量，但牠們的演化為後來的新生代奠定了基礎。鳥類在白堊紀繼續演化，但直到新生代才迎來大發展。哺乳動物則在K-Pg滅絕事件後，抓住了恐龍消失所留下的生態空位，迅速多樣化並成為陸地生態系統的主導者。

盤古大陸的分裂



在中生代期間，古生代末期形成的盤古超大陸開始並持續解體，這個過程極大地塑造了我們今天所看到的全球大陸分布格局。盤古大陸的分裂大致可以分為三個主要階段：第一階段（三疊紀晚期 - 侏羅紀早期），盤古大陸首先開始沿著大致東西向的裂谷帶分裂，北美洲與非洲之間開始張裂；第二階段（侏羅紀晚期 - 白堊紀），岡瓦納大陸內部開始大規模裂解，南美洲與非洲開始分離，形成了南大西洋；第三階段（白堊紀晚期 - 新生代早期），勞亞大陸內部開始分裂，北美洲與歐亞大陸開始分離，形成了北大西洋。



盤古大陸分裂的影響



地理格局的重塑

盤古大陸的分裂形成了現代大洲和大洋的基本輪廓。新的海洋盆地（如大西洋、印度洋）的形成，改變了全球海水循環和熱量分布模式，對全球氣候產生了深遠影響。



海平面的變化

快速的海底擴張時期，洋中脊體積增大，導致全球海平面上升，淹沒大陸邊緣形成淺海。白堊紀普遍被認為是一個全球性的「溫室」或「暖房」時期，可能與當時高水平的海底擴張速率和火山活動釋放的CO₂有關。



氣候的影響

大陸的分散改變了洋流和氣流模式，可能導致全球氣候從盤古大陸時期的極端大陸性氣候向更溫和、更多樣化的氣候轉變。新形成的海洋通道和山脈改變了全球熱量和水分的分布。

生物地理的隔離

大陸的分裂導致了原本連續分布的陸地生物群被海洋隔開，促進了各地生物的獨立演化（趨異演化），形成了現今不同大陸之間獨特的生物區系，例如澳大利亞有袋類的獨特性。

盤古大陸的解體不僅僅是一個地理位置的變遷，它通過影響氣候、海平面和生物遷徙路徑，深刻地塑造了中生代晚期及之後的地球環境和生命演化歷史。我們今天看到的生物地理分布格局，很大程度上就是盤古大陸分裂所留下的印記。例如，澳大利亞的獨特生物區系（如有袋類的主導地位）就是由於其早期與其他大陸分離，使得其生物群落沿著獨特的演化路徑發展。



中生代的氣候

25

°C

白堊紀全球平均溫度

0

極地冰蓋

中生代大部分時間

200

米

海平面高於現今

4x

CO₂濃度

相比工業革命前

中生代的大部分時間，地球氣候與現今截然不同，總體上處於一個溫暖的「溫室氣候」或「暖房地球」狀態。地質證據表明，當時全球平均溫度顯著高於現代，兩極地區可能沒有永久性的大陸冰蓋，海平面也普遍較高。赤道到兩極的溫度梯度可能比今天要小得多。這種溫暖氣候的成因，可能與當時較高的大氣二氧化碳濃度有關，而高CO₂濃度則可能源於盤古大陸裂解過程中頻繁而廣泛的火山活動，以及較高的海底擴張速率。

K-Pg大滅絕：恐龍時代的終結



希克蘇魯伯撞擊

K-Pg大滅絕的主要原因，被認為是一顆直徑約10-15公里的小行星撞擊了地球，撞擊地點位於現今墨西哥的尤卡坦半島，形成了直徑約180公里的希克蘇魯伯隕石坑。這次撞擊釋放的能量相當於數百萬顆核彈，對全球環境產生了災難性的影響。



界線黏土層

在全球多地的K-Pg界線地層中，都發現了一層富含元素鈹的薄黏土層。鈹在地殼中含量極低，但在隕石中含量很高。這層鈹異常被認為是撞擊體及其蒸發的物質在全球沉降形成的。在界線黏土層中還發現了只有在高壓衝擊下才能形成的礦物，如衝擊石英和斯石英。



撞擊冬天

大量的塵埃、煙灰和硫酸鹽氣溶膠被拋入平流層，遮蔽陽光長達數月甚至數年，導致全球氣溫驟降（「撞擊冬天」），嚴重抑制了植物的光合作用，導致食物鏈崩潰。這可能是非鳥恐龍和其他大型動物滅絕的主要原因。

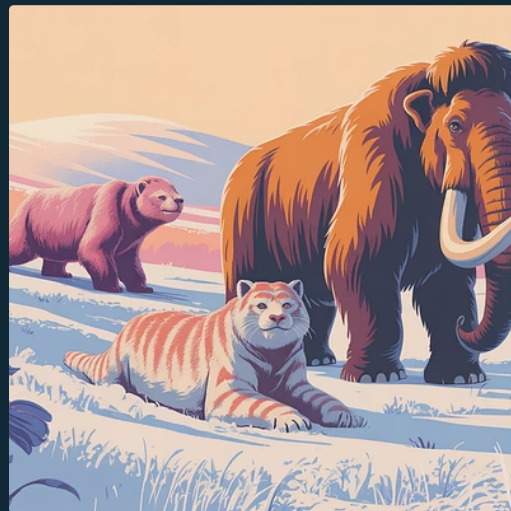
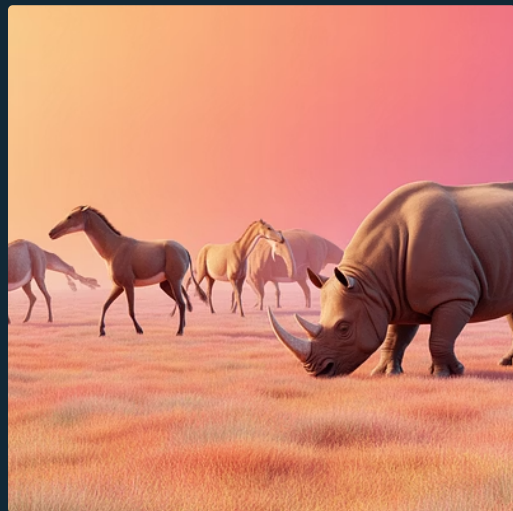
白堊紀-古近紀大滅絕是顯生宙五大滅絕事件中的最後一次，也是最為人所熟知的一次，因為它標誌著非鳥恐龍時代的終結。這次事件導致約17%的科和50%的屬滅絕，除了非鳥恐龍外，翼龍、大型海洋爬行動物、菊石、箭石以及許多浮游生物也完全消失。K-Pg滅絕具有明顯的選擇性，體型較大的陸地動物幾乎全部滅絕，而體型較小的動物（如哺乳動物、鳥類、蜥蜴、蛇、龜、鱷魚）以及淡水生態系統中的生物受影響相對較小。

新生代：哺乳動物的崛起



新生代，意為「新的生命」，是地球地質歷史的最新一個代，始於約6600萬年前的K-Pg大滅絕事件，一直延續至今。這個時代最顯著的特徵是哺乳動物和鳥類的極大繁盛，以及被子植物在全球生態系統中的主導地位，最終還見證了人類的出現和影響。新生代被進一步劃分為古近紀、新近紀和第四紀三個紀，每個紀又包含多個世。

哺乳動物的適應輻射



K-Pg大滅絕事件為新生代的生命演化格局奠定了基礎。隨著非鳥恐龍、翼龍和大型海洋爬行動物等中生代優勢類群的消失，大量的生態位被空了出來。在這次滅絕中倖存下來的哺乳動物，當時大多是體型較小、可能營夜行或穴居生活的生物。然而，正是這些特徵可能幫助它們度過了撞擊帶來的黑暗與寒冷。

滅絕事件之後，哺乳動物抓住了前所未有的生態機遇，在古近紀和新近紀經歷了一場規模宏大的適應輻射。它們的體型迅速增大，形態和生活習性變得極其多樣化，幾乎佔據了所有陸地（以及部分空中和水生）生態系統中的主要角色。現今我們看到的大多數哺乳動物目，如齧齒目、靈長目、食肉目、偶蹄目、奇蹄目、長鼻目、翼手目等等，都在新生代早期快速分化形成。

哺乳動物的多樣化適應

飛行適應

蝙蝠（翼手目）是唯一能夠真正飛行的哺乳動物，它們的前肢演化成了翼，由皮膜連接手指、身體和後肢。蝙蝠的回聲定位能力使它們能夠在黑暗中精確導航和捕獵。飛行使蝙蝠能夠佔據夜間空中捕食者的生態位，避開了與鳥類的直接競爭。

水生適應

鯨豚類的演化是哺乳動物「重返海洋」的最引人注目的例子。化石證據清晰地記錄了它們如何從生活在淡水邊緣的、有蹄的陸生哺乳動物祖先，經過一系列形態和生理的適應性轉變，最終完全適應了海洋生活。其他返回水生環境的哺乳動物還包括海牛、海豹、海獅和海象等。

草原適應

隨著新生代氣候趨於乾冷，草原生態系統在全球範圍內擴張。這驅動了食草哺乳動物的演化，例如馬、羚羊、早期牛科動物等演化出了適於研磨草料的高冠齒和適於在開闊地奔跑的長四肢。這些適應使它們能夠有效利用新的食物資源並逃避掠食者。

新生代哺乳動物的輻射演化，是生物演化史上適應輻射的一個經典案例。它生動地展示了當一個主導類群（非鳥恐龍）因外部災難事件（K-Pg撞擊）而退出歷史舞台後，原本處於邊緣地位的類群（哺乳動物）如何能夠抓住由此產生的生態真空，在相對較短的時間內快速分化，佔據各種新的生活方式和棲息地，從而改變整個生物圈的面貌。



人類的演化歷程



人猿分化

大約在600萬到700萬年前，人族譜系與現存親緣關係最近的黑猩猩和倭黑猩猩的譜系發生了分化

2

雙足直立行走

早在400多萬年前的南方古猿就已經能夠直立行走，這是最早出現的、定義人族的關鍵特徵之一



腦容量增加

從大約250萬年前的能人開始，人屬成員的腦容量呈現出顯著的、加速增長的趨勢



現代人出現

解剖學上的現代人大約在30萬至20萬年前起源於非洲，擁有更大的腦容量、更精巧的工具技術、象徵性思維和語言能力

人類的演化故事，是新生代哺乳動物大輻射背景下的一個獨特篇章。我們所屬的靈長目，其起源可以追溯到新生代早期甚至白堊紀晚期，祖先可能是一些小型的、棲息在樹上的、以昆蟲為食的哺乳動物。靈長類演化出了一些關鍵的適應性特徵，如適於抓握的手腳、相對較大的腦容量、以及依賴視覺（特別是立體視覺）而非嗅覺。



人類演化的關鍵趨勢



雙足直立行走

解放了雙手，為後來使用工具和攜帶物品奠定了基礎



牙齒和頷骨變化

相對於猿類祖先，人族的犬齒逐漸變小，臉部也逐漸變得扁平



腦容量增加

與更複雜的工具製造、社會行為和認知能力的發展相關



工具使用與製造

從能人開始，人族開始系統地製造和使用石器工具

人類的演化並非一個直線進程，而是像一棵茂盛的、不斷分叉又時有枝條枯萎的演化樹。在大部分時間裡，地球上可能同時存在多種不同的人族物種。我們的演化深受環境變化的影響，特別是非洲氣候的波動（如乾濕交替、森林與草原的擴張與收縮）被認為是驅動人族演化的重要選擇壓力。例如，雙足直立行走可能是在從森林向更開闊的稀樹草原環境過渡時演化出來的適應。

新生代的板塊運動

50

百萬年前

印度-歐亞碰撞開始

8848

米

喜馬拉雅山脈最高峰

4500

米

青藏高原平均海拔

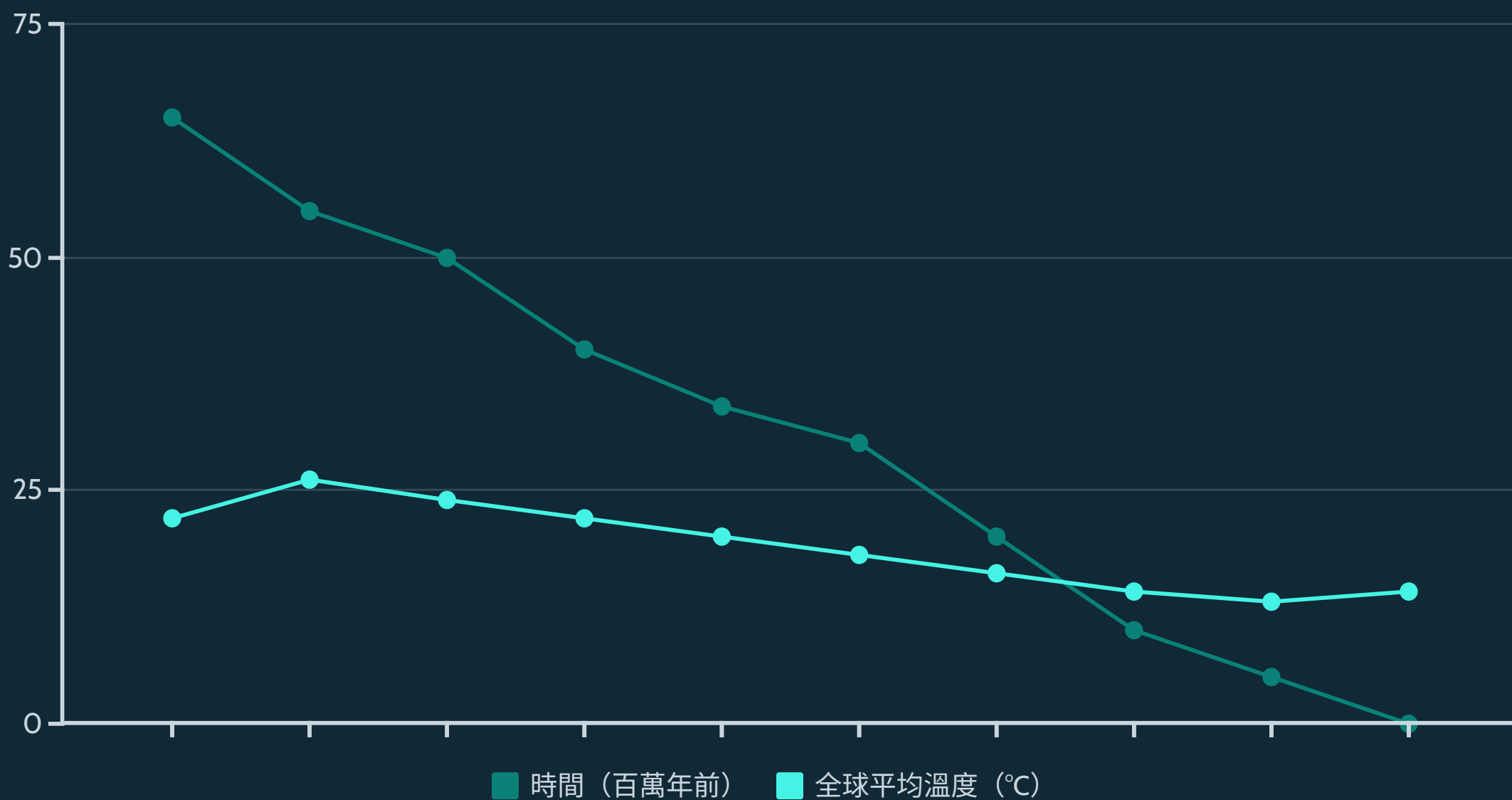
3

百萬年前

巴拿馬地峽形成

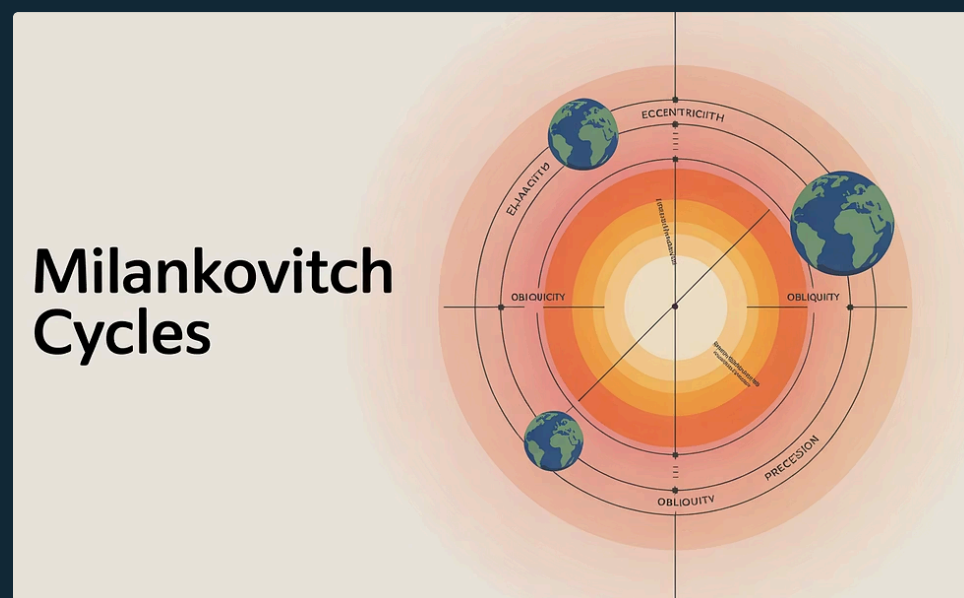
新生代不僅是生命演化的重要時期，也是地球地貌和氣候持續發生顯著變化的時代。板塊構造活動並未停止，大陸繼續漂移，塑造著我們今日熟悉的世界地圖。幾個關鍵的構造事件發生在新生代：印度次大陸在白堊紀從岡瓦納大陸分離後，快速向北漂移，最終在大約5000萬至3500萬年前開始與歐亞大陸發生碰撞。這次規模宏大的陸-陸碰撞導致了地殼的劇烈褶皺、斷裂和抬升，形成了地球上最高、最廣闊的高原——青藏高原，以及雄偉的喜馬拉雅山脈。

新生代氣候變冷趨勢



這些大規模的構造活動，特別是高原和山脈的隆升，對全球氣候產生了深遠的影響，被認為是新生代整體氣候變冷趨勢的主要驅動因素之一。高聳的山脈暴露出大量新鮮的岩石，加速了岩石的化學風化作用。矽酸鹽岩石的風化過程會消耗大氣中的二氧化碳，將其轉化為碳酸鹽沉積在海洋中。大規模的持續風化導致大氣CO₂濃度長期下降，減弱了溫室效應，促使全球氣溫降低。青藏高原的隆升被認為在這方面起到了尤為重要的作用。

第四紀冰期與人類世



米蘭科維奇旋迴

驅動第四紀冰期-間冰期旋迴的主要「節拍器」被認為是地球軌道參數的週期性變化，即米蘭科維奇旋迴。這些變化包括軌道偏心率、地軸傾角和歲差。這些軌道參數的變化，改變了不同緯度和不同季節接收到的太陽輻射量，特別是北半球高緯度地區夏季的日照量被認為是控制大陸冰蓋增長和消融的關鍵因素。



人類世

在最近的幾百年，尤其是自工業革命以來，特別是二戰後的「大加速」，人類活動對地球系統的影響達到了前所未有的規模和速度，以至於許多科學家認為，地球已經進入了一個新的地質時代——人類世。這個概念強調人類已經成為塑造地球地質、氣候和生態系統的主導力量。



古氣候記錄

科學家通過分析多種古氣候代用指標來重建過去的冰期-間冰期歷史，其中最重要的是深海沉積物岩芯和極地冰芯。這些記錄不僅揭示了冰期-間冰期的規律性旋迴，還發現了氣候系統中存在著快速、劇烈的突變事件，表明地球氣候系統在某些臨界點附近可能存在不穩定性。

新生代的最後一個紀元——第四紀，始於約260萬年前，其最顯著的特徵是地球氣候進入了一個以冰期和間冰期反覆交替為標誌的階段。需要強調的是，即使在相對溫暖的間冰期，地球兩極仍然存在巨大的冰蓋，因此從地質學的長尺度來看，我們目前仍然處於一個「冰室氣候」中的一次間冰期（全新世）。第四紀冰期的研究，不僅幫助我們理解地球氣候系統的自然變率和運行機制，也為評估當前人類活動對氣候的影響提供了重要的背景參照。