

探索2.9億年前的「爬蟲木乃伊」： 同步輻射紅外光譜解讀遠古蛋白質密碼

李耀昌

國家同步輻射研究中心科學研究組



國家同步輻射研究中心李耀昌（左）、黃佩瑜（中）和加拿大多倫多大學 Robert R. Reisz（右）。

在美國奧克拉荷馬州的理查斯泉 (Richards Spur) 附近，藏著一系列距今約兩億九千萬年、早二疊紀時期的古老洞穴系統。這裡向來是古生物學家挖掘早期陸生爬行動物化石的寶庫，但這次研究團隊挖到的東西，卻遠遠超出了「骨頭化石」的範疇。

這項研究由加拿大多倫多大學、美國哈佛大學、澳洲核科學與技術組織的中子設施、台灣國家同步輻射研究中心（以下簡稱「國輻中心」）、以及中國吉林大學等跨國研究團隊共同合作完成，發表於《自然》(Nature) 期刊。研究團隊發表了一項驚人發現：一件近乎完整、保存極為精美的大鼻龍 (Captorhinus) 標本（編號 ROMVP 88565），不只留下了骨骼，還保留了三維立體的皮膚、軟骨組織，甚至是原生蛋白質的殘留痕跡。換句話說，這不是一堆石化的骨頭，而是一具貨真價實的「化石木乃伊」[1]。

這隻大鼻龍是一種體型不大、外形類似蜥蜴的早期爬行動物，是目前已知最早演化出「肋骨呼吸」(costal aspiration breathing) 的陸生動物之一。牠的胸腔結構完整保留軟骨性的胸骨、胸骨肋、中間肋骨與烏喙骨 (epicoracoid)，這些構造正是現代爬行動物、鳥類與哺乳動物賴以呼吸的關鍵零件之「原型」。



圖一 大鼻龍埋藏地點示意圖。在極佳的保存條件下，大鼻龍化石呈現完整的三維木乃伊狀態，甚至保留了手臂蜷縮在身下的死前姿態。（此圖由 AI 生成）

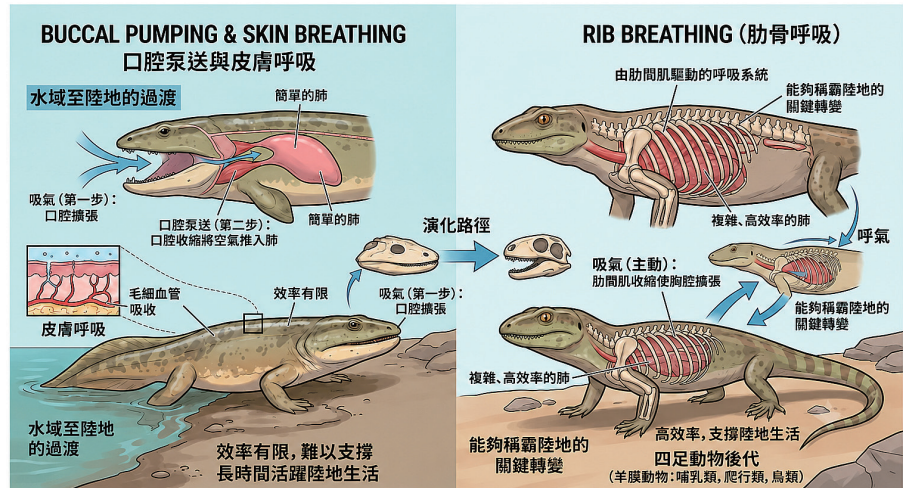
科學家之所以如此興奮，是因為軟組織（皮膚、軟骨、蛋白質）在化石紀錄中極難保存下來。有機分子通常會在數千到數萬年內分解殆盡，能撐過幾億年沉積、擠壓、礦化過程而不完全消失，堪稱奇蹟。而理查斯泉洞穴的特殊環境——富含油苗滲出的碳氫化合物、缺氧的細碳酸鹽泥漿——意外形成一個近乎完美的「天然保鮮庫」，讓這隻動物的遺體在腐敗之前就先被脫水乾燥，進而被緻密的沉積物包覆保存下來。圖一為大鼻龍埋藏地點示意圖。

為什麼呼吸方式的演化如此重要？

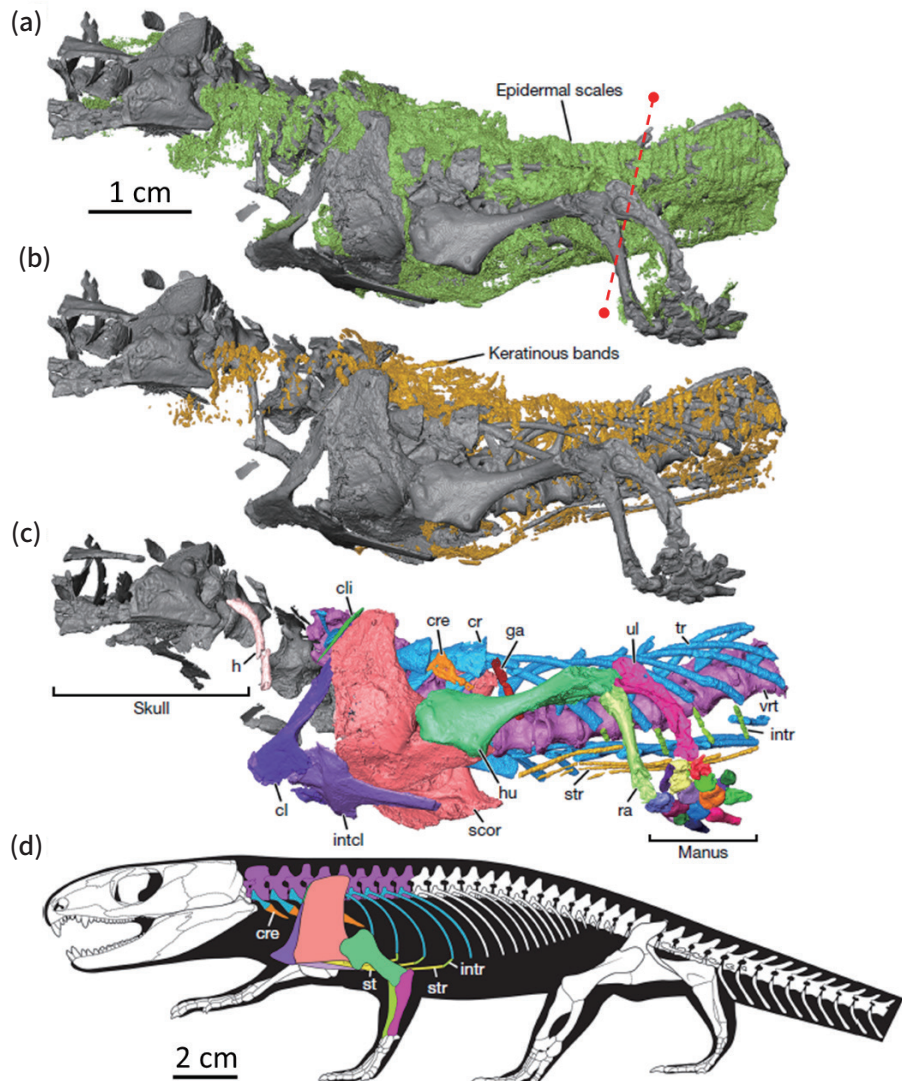
在動物從水域邁向陸地的過程中，「呼吸」是一個決定生死的關卡。兩生類動物或牠們的祖先大多依賴口腔泵送 (buccal pumping) 與皮膚呼吸來換氣，這種方式效率有限，難以支撐長時間活躍的陸地生活。而真正讓四足動物的後代——包括所有現生的哺乳類、爬行類與鳥類（統稱「羊膜動物」，amniotes）——能夠稱霸陸地的關鍵轉變，正是演化出以肋間肌收縮牽動胸腔、驅動吸氣與呼氣的「肋骨呼吸」系統。呼吸方式演化示意圖如圖二。

然而，這個轉變究竟在什麼時候發生、中間經歷了哪些步驟，過去因為缺乏保存軟組織的化石證據，一直是個謎。大鼻龍這件標本的出現，首次讓科學家能夠實際觀察到一副完整連接脊椎、胸骨、肋骨與肩帶的「呼吸機器」雛形，填補了羊膜動物呼吸演化史上遺失已久的一塊拼圖。

要看清楚這具骨骼與軟組織如何精巧地咬合在一起，研究團隊使用澳洲核科學與技術組織的中子電腦斷層掃描技術 (Neutron Computed Tomography, NCT)，藉由中子穿透力強、對氫元素敏感的特性，在不破壞脆弱標本的前提下，把包裹在岩石與皮膚下的軟骨與骨骼結構，一層一層地「數位解剖」出來（如圖三）。但光有形態學上的三維影像還不夠——科學家還想知道：這些看起來像軟骨、像皮膚、像骨頭的組織，在化學成分上是否真的保留了「生物」的痕跡？這正是同步輻射紅外顯微術大顯身手的地方。



圖二 四足動物呼吸演化示意圖。左側展示早期兩生類與其祖先依賴的「皮膚呼吸」與「口腔泵送」；右側則為羊膜動物演化出高效的「肋骨呼吸」系統。（此圖由 AI 生成）



圖三 大鼻龍化石標本之三維中子電腦斷層掃描 (Neutron CT) 與解剖結構重建。本圖展示利用中子電腦斷層掃描技術 (Neutron Computed Tomography) 對木乃伊化大鼻龍化石標本進行的高解析度三維非破壞性數位重建，清晰呈現其保存完好的外皮組織、角質結構與骨骼解剖細節。(a, b) 為皮膚系統的 nCT 分割成像，(b) 為身體下方角質帶 (corneous bands)，(c) 為不含皮膚系統的木乃伊標本 nCT 成像，(d) 為左側觀的骨骼重建圖。

同步輻射紅外顯微術：讓化石「開口說話」的關鍵技術

這項研究中最引人注目的分析工具，是在國輻中心進行的「同步輻射微區全反射式傅立葉轉換紅外光譜顯微術」(SR- μ ATR-FTIR)。這個名字聽起來相當拗口，但原理其實可以用一個簡單的比喻來理解：每一種化學分子，就像有自己專屬的「指紋」。當紅外光照射到樣本表面時，分子中的化學鍵（例如蛋白質中的胺基，或礦物中的磷酸根）會依照特定的頻率吸收光線使得振動的幅度加大，而不同分子鍵吸收的波長各不相同。科學家只要記錄樣本吸收哪些波段的紅外光、吸收強度各是多少，就能反推出這個微小區域裡究竟含有哪些化學成分。

這項技術之所以需要「同步輻射」加持，是因為傳統實驗室裡的紅外光源亮度有限，難以聚焦到微米等級的極小範圍還維持足夠訊號強度。同步輻射設施則是利用電子在儲存環中以接近光速環繞運行時釋放出的電磁輻射，產生極其明亮、方向性極佳的光束。在這項研究中，國輻中心的儲存環以 1.5 GeV 的電子能量、360 毫安培的儲存電流運作，並以「top-up」模式維持穩定光通量，產生涵蓋 4000 至 650 cm^{-1} 波數範圍的紅外光，再導入一台配備 20 微米直徑鍍質探針的紅外顯微鏡中，搭配液態氮冷卻的碲鎢汞 (MCT) 偵測器收集訊號。簡單來說，這套系統能讓科學家把「化學指紋辨識」的解析度，精細到頭髮直徑的五分之一左右，精確對準化石標本上肉眼幾乎無法分辨的微小結構。

研究團隊在其中一件標本 (ROMVP 88301) 的拋光切面上，選定了 15 個分析點位，涵蓋軟骨、兩處肋骨、脊椎骨，以及皮膚與方解石交界處等不同組織類型。每個點位都以微小的鍍質探針輕輕接觸樣本表面，並透過壓力感測器確保接觸均勻，再以每點平均 64 次掃描疊加的方式收集光譜訊號，解析度達到 4 cm^{-1} 。

研究結果相當驚人：在軟骨區域，光譜清楚顯示出蛋白質特有的「醯胺 (amide) 吸收峰」——醯胺 I (約 1650 - 1660 cm^{-1})、醯胺 II (約 1550 - 1565 cm^{-1}) 與醯胺 III (約 1240 - 1275 cm^{-1}) 三組訊號同時出現，這正是蛋白質骨架中肽鍵振動的標誌性特徵。更令人驚訝的是，這些蛋白質訊號不只出現在軟骨，還同時出現在已經骨化的肋骨與皮膚組織中，只是隨著礦化程度不同，訊號強弱有所變化——礦化程度越高的區域（例如骨化完全的肋骨），磷酸根、碳酸根訊號越強，蛋白質訊號則相對減弱；反之，保存較原始的軟骨與皮膚區域則展現出更清晰的蛋白質吸收峰。圖四展示了大鼻龍的肋骨與皮膚組織中的紅外吸收光譜。

除此之外，團隊還在部分軟骨區域偵測到硫酸根訊號，研判可能來自軟骨中常見的軟骨素硫酸鹽 (chondroitin sulfate) 成分，以及在特定波數 (2898 與 2988 cm^{-1}) 出現的雙

峰，顯示樣本中可能還殘留著與矽相關的碳氫化合物殘跡——這或許正是理查斯泉洞穴富含油苗滲出物、進而促成軟組織保存的化學證據之一。

為了確保這些訊號並非分析誤差或表面污染所造成，研究團隊同時搭配了電子微探針分析 (EPMA) 與高解析度 X 光螢光分析 (XRF) 進行交叉驗證。這兩項技術能夠繪製出磷、硫、鈣、鋁、鎂、鈉、鉀、鐵、碳等元素在樣本表面的分布地圖。結果顯示，骨化完整的肋骨含有較高的磷、硫與鋁，而礦化程度較低的鈣質軟骨肋骨則含較高的鎂、鈉、鉀、鋁與碳，證實這兩種組織在化學成分上確實存在系統性差異——換言之，這不是同一種物質因保存狀況不同造成的錯覺，而是軟骨與骨骼原本就是兩種不同的生物組織，各自留下了屬於自己的化學印記。

打破紀錄：比已知最古老的蛋白質證據還早了近一億年

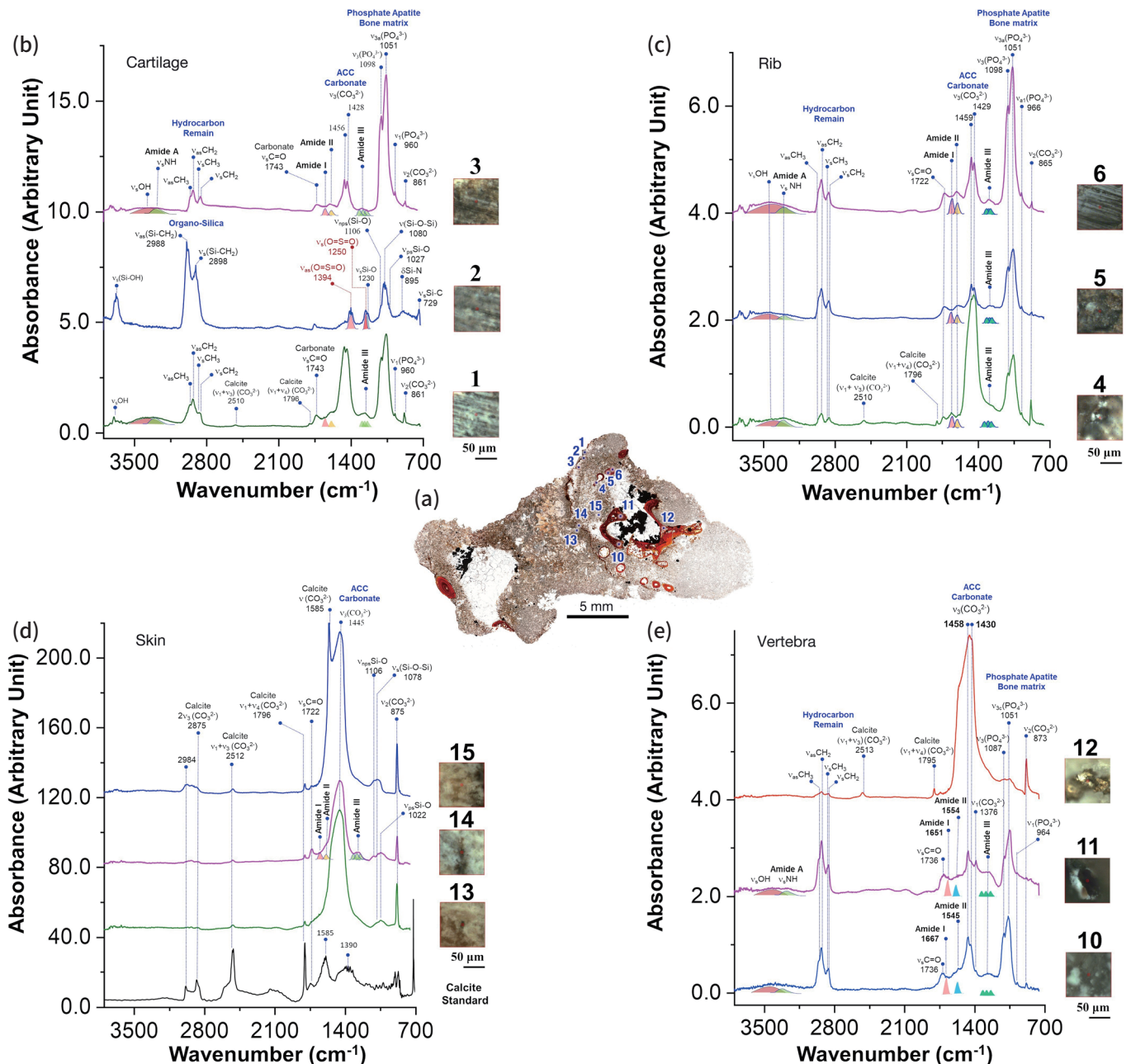
這項發現的科學意義，遠不止於「找到一具保存良好的化石」。在此之前，科學界已知最古老、可信度較高的內源性蛋白質殘留證據，大約來自恐龍時代（中生代）的化石。而大鼻龍生存的年代是早二疊紀，屬於古生代——比先前的紀錄整整往前推進了將近一億年。這意味著過去學界對「軟組織與生物分子能在深時間尺度中保存多久」的認知，可能需要被大幅修正。

研究團隊推測，理查斯泉洞穴之所以能創造這種奇蹟般的保存條件，關鍵在於當地特殊的地質化學環境：富含碳氫化合物的油苗滲出物與礦物質豐富的地下水滲入沉積物，並將動物遺體包裹在缺氧、細緻的碳酸質泥漿中。這樣的環境一方面隔絕了氧氣與微生物的大規模分解作用，另一方面碳氫化合物本身也可能對礦化過程產生特殊影響，進一步延緩蛋白質分子的降解。這也解釋了為何這批化石整體呈現出深淺不一的棕黑色調——那正是碳氫化合物滲透飽和程度不同所留下的痕跡。

一副呼吸器官，牽動整個陸地生命史

有了完整的軟骨、骨骼與胸腔構造證據，研究團隊得以重建大鼻龍的胸廓與肩帶如何相互連接、協同運作。牠的胸骨、胸骨肋、中間肋骨與可靈活轉動的胸肋之間形成精密的關節系統，與現生蜥蜴和鱷蜥 (Sphenodon) 所使用的肋骨呼吸機制高度相似：透過肋間肌牽動肋骨做前外側與後內側旋轉，擴大與縮小胸腔容積，完成吸氣與呼氣。

這項發現讓科學家首次能夠具體指出，羊膜動物祖先所擁有的呼吸器官原型，極可能就是一副以軟骨胸骨為核心、連接肋骨與肩帶的系統。儘管這套系統後來在中生代的恐龍、現生鱷魚、鳥類與哺乳動物身上各自演化出不同



圖四 木乃伊化大鼻龍各區域，包含 (a) 大鼻龍化石切片影像、(b) 軟骨、(c) 皮膚、(d) 肋骨、(e) 脊椎骨的 SR-μATR-FTIR 光譜，證實經天然或成岩作用後，蛋白質殘留訊號仍存在不同的礦化組織中。化石切片位置如圖三 (a) 紅色虛線所示。

的變化型態，但「以肋骨驅動呼吸」這個核心邏輯，或許正是讓羊膜動物得以擺脫皮膚呼吸的限制、真正征服乾燥陸地環境的重要基礎。

結語：同步輻射，照亮化石深處的分子記憶

這項研究最迷人之處，或許在於它展示了古生物學正在從「看骨頭形狀」邁向「讀分子訊號」的新階段。透過同步輻射的紅外顯微術這種原本用於材料科學、藥物分析、半導體檢測的精密光學技術，科學家竟能在一塊近三億年前的化石礦化組織裡，讀出蛋白質分子殘留的化學指紋，進而分辨出軟骨、骨骼與皮膚在顯微尺度下各自訴

說的故事。

當這道來自同步輻射環的明亮紅外光，穿過一塊看似平凡的岩化標本，科學家看見的不再只是石頭的形狀，而是兩億九千萬年前，一隻小小爬行動物用肋骨撐起胸腔、緩緩吸入第一口乾燥空氣的瞬間——那正是陸地生命史上，一次悄然卻深遠的呼吸革命。

參考文獻：

1. R. R. Reisz *et al.*, Nature **653**, 117 (2026).