

# 中子斷層與同步輻射紅外光譜解析二疊紀爬蟲類木乃伊： 揭示羊膜動物呼吸系統的結構

研究團隊：多倫多大學、哈佛大學、澳洲中子散射中心、國家同步輻射研究中心、吉林大學

<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10307-y>

[nature](#) > [articles](#) > article

Article | Published: 08 April 2026

## Mummified early Permian reptile reveals ancient amniote breathing apparatus

[Robert R. Reisz](#) , [Ethan D. Mooney](#) , [Tea Maho](#), [David Mazierski](#), [Xu Chu](#), [Joseph J. Bevitt](#), [Yao-Chang Lee](#), [Pei-Yu Huang](#), [Xiaobo Li](#) & [Jun Chen](#)

[Nature](#) (2026) | [Cite this article](#)

3782 Accesses | 501 Altmetric | [Metrics](#)

本中心 TLS14A1 紅外顯微術團隊與多倫多大學、哈佛大學、澳洲中子散射中心及吉林大學合作之研究成果，發表於《Nature》期刊。研究對象為約 2.86–2.89 億年前( 早二疊紀 )的爬行動物 *Captorhinus aguti* 木乃伊化石。研究結果顯示，早期羊膜動物很可能已具備「肋骨驅動胸腔呼吸」的能力，為過去主要基於骨骼形態的推論提供關鍵支持，並為脊椎動物由水域邁向陸地過程中呼吸系統的演化時序提供重要新觀點。同時，此研究亦將已知軟組織與蛋白質保存的時間紀錄向前推進約一億年。

這些化石發現於美國奧克拉荷馬州的 Richards Spur 獨特洞穴系統，該系統富含石油滲漏的碳氫化合物並存在於缺氧的泥質環境中，有效抑制微生物的分解作用，使得標本得以以三維「木乃伊化」方式保存，包括皮膚、軟骨以及完整的胸廓結構，甚至展現出接近生前姿態的形態，如 Figure 1 所示。此類保存條件極為罕見，使科學家能夠同時分析古生物的形態與分子資訊。

在結構層級，研究團隊利用中子電腦斷層掃描 ( nCT ) 進行非破壞性三維重建，清晰呈現胸腔骨架，包括分節胸骨、多組胸肋骨與中間肋骨，並顯示胸廓與肩帶之間具有高度協調的機械連動關係，如 Figure 2 及 Figure 3 所示。中子三維影像提供了關鍵的形態學證據，支持該生物可透過肋骨擴張胸腔進行呼吸，顯示現代爬行類、鳥類與哺乳類所使用的高效率呼吸機制，可能在早期羊膜動物中即已出現其雛形。

在分子層面，本研究進一步於台灣光源 ( TLS ) 紅外顯微術實驗站，運用同步輻射顯微 ATR-FTIR 光譜 ( SR- $\mu$ ATR-FTIR ) 技術，於骨骼、軟骨與皮膚組織中偵測到與蛋白質結構相關的紅外吸收特徵，如 Figure 4 所示。這些訊號雖然極為微弱，但具有良好的再現性，提供古生物分子保存的直接證據。由於相關分子訊號的濃度極低且空間分布高度不均，傳統紅外光源難以有效解析；而同步輻射紅外光具有高亮度與高訊噪比特性，能在微米尺度上進行高靈敏度偵測，並有效區分內源性生物分子與成岩或環境污染訊號。因此，同步輻射紅外顯微術在本研究中扮演著關鍵角色，建立了由分子層級支持形態推論的證據橋樑。

綜合三維結構與分子分析結果，本研究顯示早期羊膜動物可能已具備多樣化的呼吸策略，並能依環境條件進行調整，反映其在多變的二疊紀環境中具有高度適應能力。此一發現不僅深化我們對呼吸系統演化的理解，也凸顯跨尺度分析技術在古生物研究中的重要性。

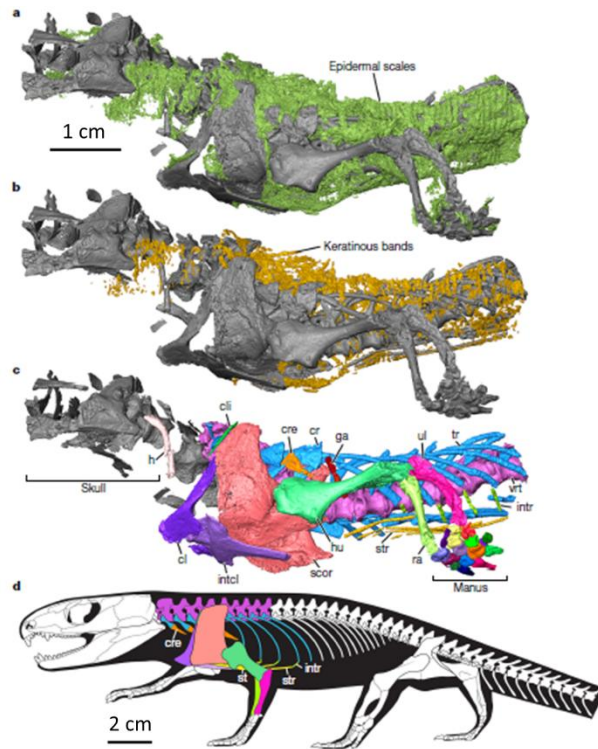
展望未來，台灣光子源 ( TPS ) 新一代紅外光束線將提供更高光子通量、更佳空間解析度，並涵蓋中紅外至遠紅外波段，預期可進一步提升古生物分子偵測與化學影像能力，推動深時生命演化研究由形態解析邁向「結構 - 分子整合」的新階段。

發現木乃伊化石的場景示意圖

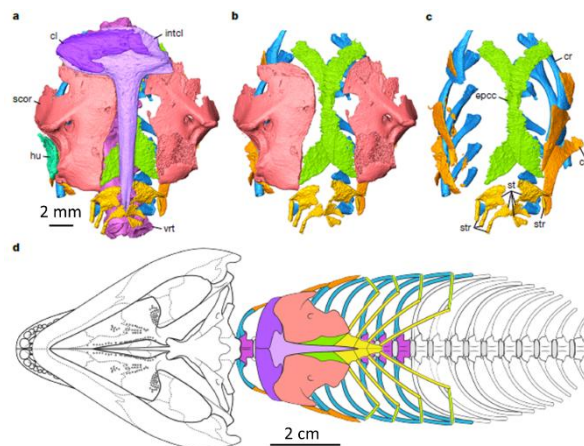


**Figure 1.** 卡普托龍 ( *Captorhinus* ) 發現於俄克拉荷馬州理查茲斯珀附近獨特的洞穴系統中。該遺址晚古生代生物資源極為豐富，擁有已知該時期最多樣化的陸生脊椎動物群落 - 而晚古生代本身就以陸生脊椎動物物種極為豐富而聞名。該遺址獨特的環境條件，包括石油滲漏的碳氫化合物和缺氧的泥漿，不僅保存了這種動物的骨骼，還保存了它的皮膚和軟骨，最終形成了一個三維木乃伊化石，其姿態如同死亡之軀，手臂蜷縮在身下。

### 中子散射斷層影像 ( nCT )

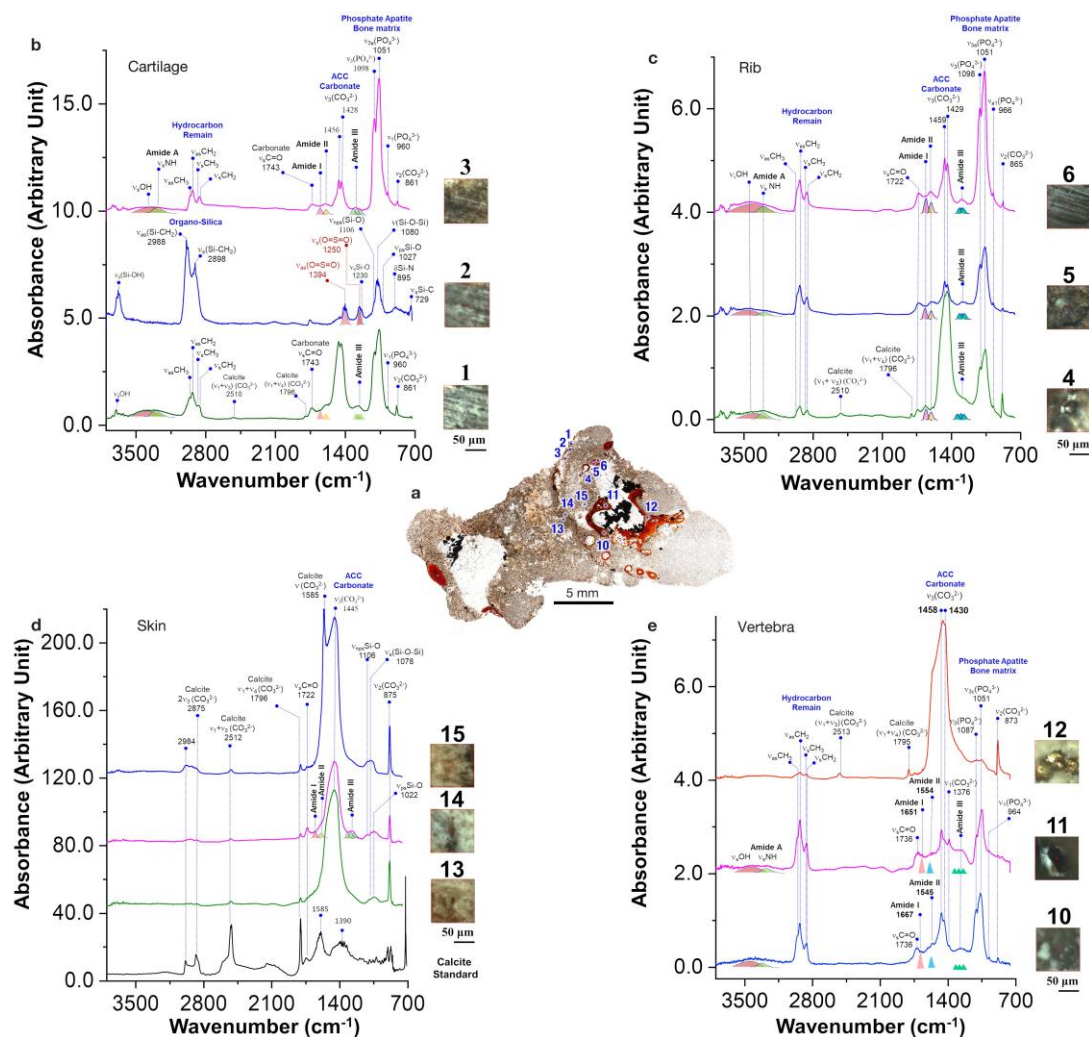


**Figure 2.** a, b · 皮膚系統的 nCT 分割成像，分別顯示：保存最外層三維結構的表皮鱗片覆蓋物 ( a ) · 以及身體下方角質帶 ( corneous bands ) 的分布情況 ( b )。c · 不含皮膚系統の木乃伊標本 nCT 成像，顯示已骨化的關節連接骨骼與鈣化元件。d · 左側觀的骨骼重建圖，標色與圖 a—c 一致。



**Figure 3.** 中子斷層掃描 (nCT) 成像的腹面觀，分別顯示：完整標本 (a)；移除脊椎骨、鎖骨與間鎖骨後的狀態 (b)；以及依序移除肩胛鳥喙骨 (scapulocoracoid) 以顯露鈣化軟骨 (calcified cartilages) 的狀態 (c)。d. 捕食龍腹面觀的骨骼重建圖，其中的頸部與胸部區域標色與圖 a-c 一致。

### 同步輻射顯微 ATR-FTIR 光譜 (SR-μATR-FTIR)



**Figure 4.** 木乃伊化 *Captorhinus* 各區域的 SR-μATR-FTIR 光譜，證實經天然或成岩作用後，蛋白質殘餘留訊號仍存在不同的礦化組織中。