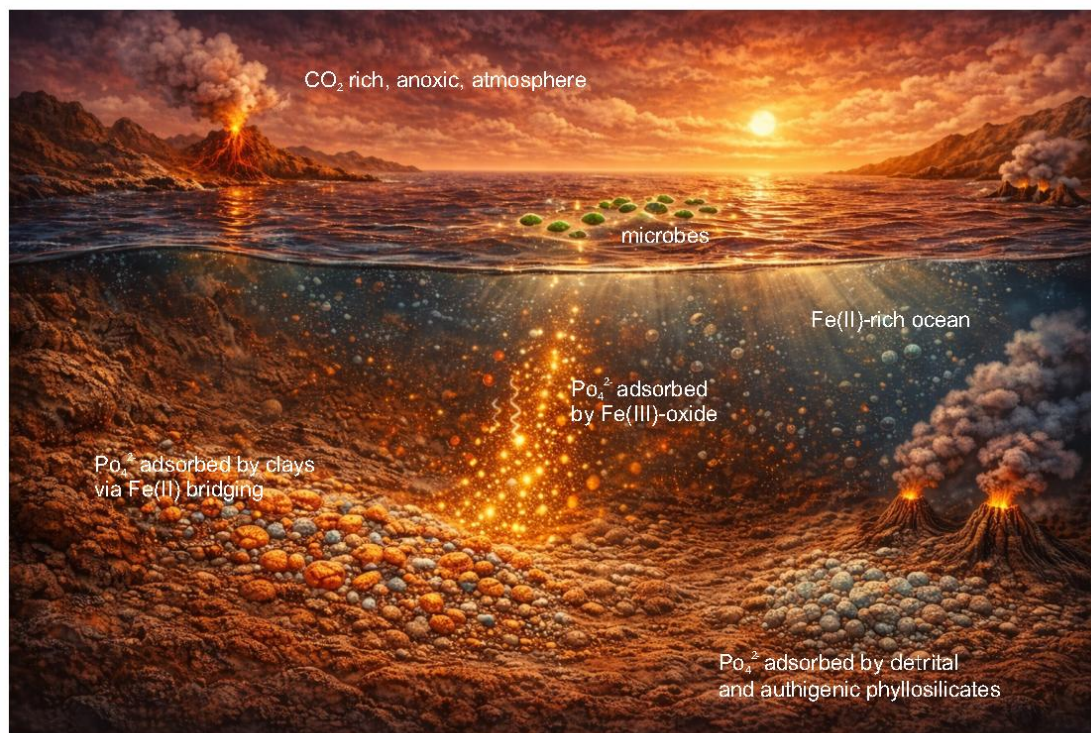


新聞稿

即時發放

港大團隊揭示早期地球磷元素的礦物「隱形陷阱」 或解開大氧化事件延遲之謎

2026 年 3 月 19 日



圖一： 太古宙富鐵海洋中，二價鐵離子(Fe(II))增強的磷酸鹽在層狀矽酸鹽上的吸附作用示意圖，該過程可能限制了海洋生產力，並推遲了大氣氧化。

科學家長久以來致力解釋地球早期歷史中的一個關鍵謎團：產氧光合作用在出現後數億年，大氣中的氧氣濃度才於「大氧化事件」期間開始顯著上升。這種延遲普遍被認為與生命所需的關鍵營養元素——磷的供應受限有關；然而，在太古宙（約 32 億至 25 億年前）富含鐵的海洋中，具體是何種機制影響了磷的生物可利用性，至今仍未完全明朗。

近日，由香港大學（港大）地球及行星科學系莫秀琮基金教授趙國春領導的研究團隊，聯同同系榮休教授孫敏及論文第一作者、博士後研究員崔幸，為此延遲現象提出了新的解釋。該研究與中國科學技術大學郝記華教授團隊合作，首次系統性地揭示，早期地球鐵質海洋中常見的層狀矽酸鹽礦物，可透過一種「二價鐵橋接效應」，有效吸附並移除海水中的溶解磷酸鹽，從而可能限制了早期生命的營養供應，推遲了大氣氧氣的積累。

研究團隊結合實驗與模擬分析，發現包括高嶺石、蒙脫石、綠脫石和利蛇紋石等在內的層狀矽酸鹽礦物，在富含二價鐵離子（Fe²⁺）的早期地球海洋中，其表面能顯著吸附磷酸鹽。此過程依賴 Fe²⁺在礦物表面與磷酸鹽之間形成化學橋接；當礦物顆粒沉降並埋藏於沉積物中，磷元素也隨之從海水中被移除，導致其生物可利用性大幅降低。這項發現為早期地球處於「磷限制」狀態提供了關鍵的化學機制依據，有助解釋當時海洋生產力受限、以及大氣氧含量上升延遲的現象。研究成果已發表在《自然·通訊》（*Nature Communications*）。

磷與早期地球之謎

磷是生命必需元素，也是細胞膜和核酸的重要組成部分。在許多海洋環境中，磷供應受限會影響初級生產力，即生物透過光合作用將無機物轉化為有機物的能力。因此，釐清磷的循環和生物可利用性，有助理解生物圈和地球圈的協同演化。

雖然礦物與溶解磷酸鹽之間的相互作用，在現代磷循環中扮演着關鍵角色，但在太古宙的早期地球，其大氣和海洋化學條件與今截然不同，這些相互作用如何運作，至今仍不清楚。

在早期地球缺氧且偏酸性的風化環境中，三價鐵氧化物的形成有限，因而削弱其作為「磷載體」的功能。近年來，研究焦點逐漸轉向黏土礦物——一種層狀矽酸鹽礦物。這類礦物具有較強的磷吸附能力，可能成為早期海洋中固定磷的替代機制。

「早期地球的海洋中含有較高濃度的溶解態 Fe(II)和二氧化矽(SiO₂)，且幾乎不含硫酸鹽，其表面環境與今天截然不同。」論文第一作者崔幸博士解釋道。高濃度的二氧化矽可能與磷酸鹽爭奪礦物表面的吸附位點，而氧氣的稀缺和低硫酸鹽條件，則有助於鐵維持二價狀態。「這些獨特的水化學條件如何影響黏土礦物對磷的吸附和遷移，是理解早期生命演化受環境限制的重要線索之一。」崔博士說。

研究團隊模擬太古宙河流與海洋的水化學條件，並系統地研究磷酸鹽在常見層狀矽酸鹽礦物表面的吸附行為。結果表明，即使在低至中等濃度的 Fe(II) (20μM 至 0.1mM) 條件下，磷酸鹽在層狀矽酸鹽表面的吸附顯著增強，其效應遠強於其他二價陽離子（如 Ca²⁺、Mg²⁺）。儘管早期海洋中高濃度溶解態二氧化矽會部分抑制了磷酸鹽的吸附，但 Fe(II)的增強作用仍然佔據主導地位。

「通過分子模擬，我們進一步揭示了其背後機制。」崔幸博士說。「Fe(II)可以在礦物表面和磷酸根離子之間形成穩定的橋接複合物，大幅地提高了吸附效率。這種『Fe(II)橋接效應』可能在早期富含鐵水體中普遍存在。」

磷與生命 環境的共同演化

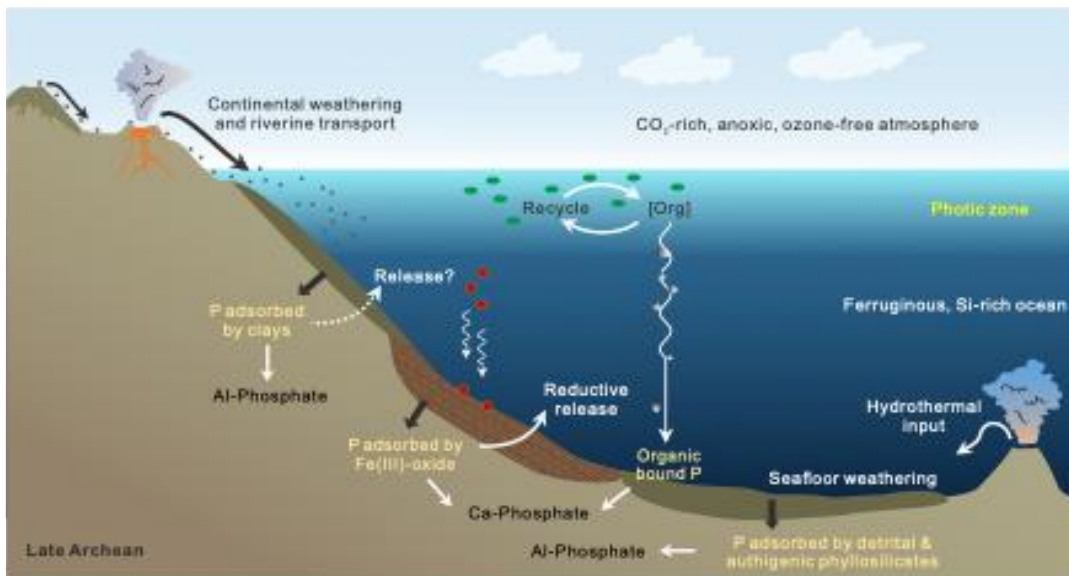
通過將實驗結果與模型相結合，研究團隊重建了早期地球磷循環的新圖景。在中晚太古宙（約 32 億至 25 億年前），隨着大陸的出現和風化作用加劇，河流將大量陸源碎屑黏土礦物輸送到海洋。在富鐵河流中，這些黏土可通過 Fe(II)橋接效應吸附磷，並迅速被埋藏在沿海沉積物中，形成高效的磷「匯」，將其從海水中移除。

與此同時，持續的海底風化雖可為海洋補充營養元素，但在鎂鐵質及超鎂鐵質地殼的海底風化過程中，新形成的層狀矽酸鹽礦物，如利蛇紋石和綠脫石，同樣可以在 Fe(II)的輔助下高效吸附溶解態磷酸鹽，並隨沉積作用迅速被埋藏，從而使早期海洋中生物可利用的磷維持在較低水平。

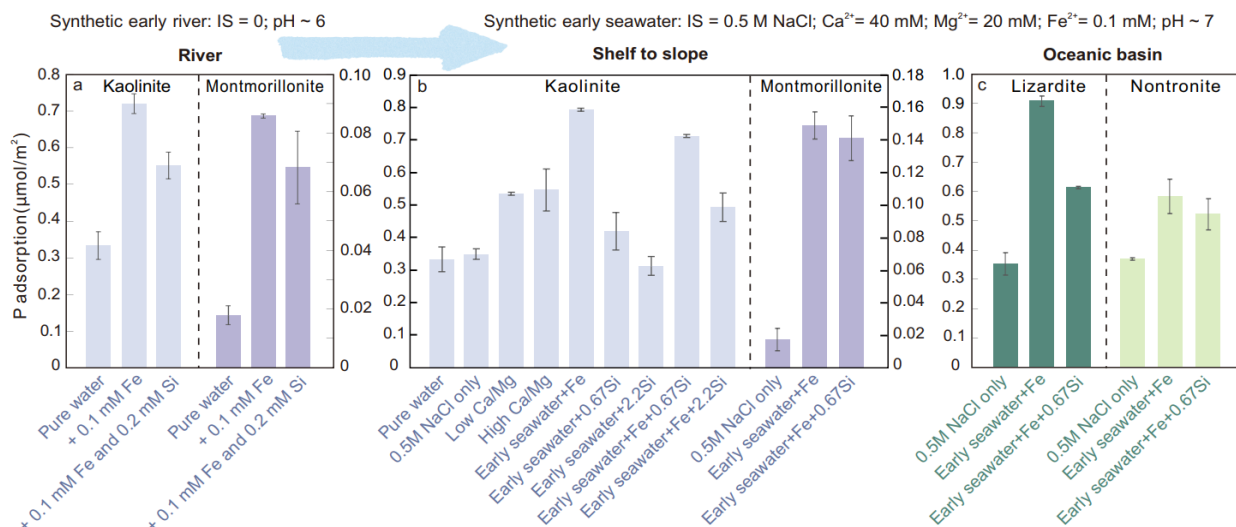
共同通訊作者郝記華教授指出：「我們以蒙特卡羅模擬估計，在晚太古宙，僅由層狀矽酸鹽吸附所造成的磷埋藏通量，就可能與當時河流輸入海洋的總活性磷通量相當。」這意味着，河流輸入的磷幾乎可被同步移除，難以在海洋中累積。「換言之，層狀矽酸鹽吸附作用構成早期地球磷循環中的主要流失途徑。」這種長期的磷受限，可能抑制了海洋生物生產力的增長，因而導致大氧化事件延遲至產氧光合作用出現數億年後才發生。

這項工作將礦物表面化學、水體地球化學和生物地球化學循環緊密連結，揭示在還原性且富含鐵的水體環境中，黏土礦物可能普遍扮演著營養「調節者」。論文通訊作者趙國春教授表示：「它不僅加深了我們對早期地球環境與生物共同演化的理解，也為研究其他天體（如早期火星）的營養循環和潛在宜居性提供了類比框架。」

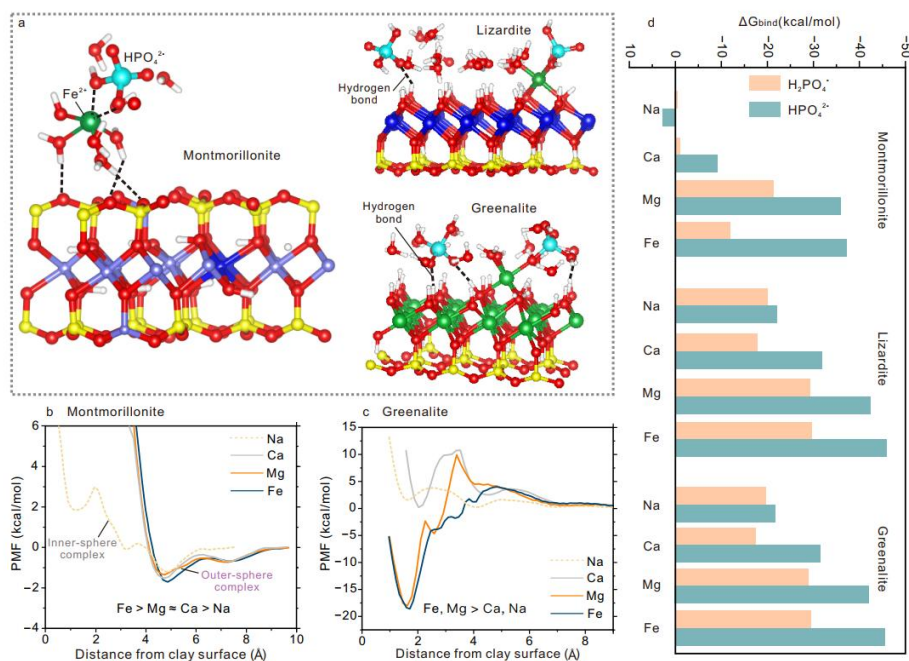
閱讀詳細論文，可參閱以下網址：<https://doi.org/10.1038/s41467-026-69293-4>
 新聞稿內容以英文版本為準。



圖二：早期地球（晚太古宙）磷循環模型示意圖，展示大陸風化與河流輸送過程，以及在鐵質海洋中的磷循環機制，突顯層狀矽酸鹽礦物在磷循環中此前被低估的重要角色。圖片來源：崔幸等（2026，《自然·通訊》）。



圖三：在模擬的早期水體環境中，溶解態正磷酸鹽在常見碎屑與自生層狀矽酸鹽礦物表面的吸附實驗結果。圖片來源：崔幸等（2026，《自然·通訊》）。



圖四：分子模擬結果顯示磷酸鹽吸附於蒙脫石、利蛇紋石及鐵蛇紋石表面，突顯陽離子橋接效應中 Fe(II) 的優越表。圖片來源：崔幸等 (2026, 《自然通訊》)。



圖五：研究團隊合照。左起：港大趙國春教授、崔幸博士及中國科學技術大學郝紀華教授。

傳媒查詢：

香港大學理學院

電話：852-3917 4948 / 3917 5286

電郵：caseyto@hku.hk / cindycst@hku.hk

圖片下載及說明：<https://www.scifac.hku.hk/press>