

井下二氧化碳感測系統建置與應用

doi: 10.30247/STRIDE-C_NEWSLETTER.202508_(2).0001



^{1,2}林立虹、^{1,2}王珮玲、¹連婉吟

1. 國立臺灣大學 地質科學系暨研究所
2. 國立臺灣大學 新碳勘科技研究中心

化學風化作用調控地質時間尺度的碳循環與氣候變遷，於活動造山帶，快速抬升與侵蝕作用供應大量可反應物質，使得化學風化作用的速度大於大河系統達二到三個數量級以上，成為碳循環的熱區。台灣位處於歐亞大陸與菲律賓海板塊交界，即為典型的代表，過去我們透過採集與分析卑南溪河水化學與微生物族群，發現微生物作用媒介的黃鐵礦氧化，是扮演碳酸鹽風化的關鍵角色，發生於可侵蝕材料（例如河岸沉積物）、產

生大量二氧化碳，加劇溫室效應；我們更利用拉曼光譜分析石墨質有機物，發現岩石源有機物質的風化可區分為兩階段，分別於崩塌堆積與海底峽谷傳輸進行，也排放類似黃鐵礦風化產生的二氧化碳通量，可能對全球尺度碳循環產生重要的影響。

過去探討岩石源有機質降解作用，大都基於間接的代用指標測量（例如河水的溶解銻 (rhenium) 或沈積物碳十四含量），推測流域尺度的氧化通量，再利用基於水力或地

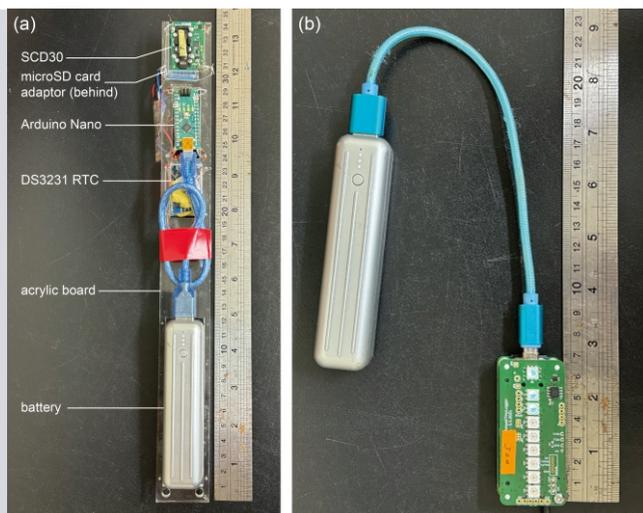
質參數建構的預測模型，放大尺度以獲取全球通量。然而代用指標的分析並不容易去解析發生岩石源有機質氧化作用的精確位置，也無法反應氧化作用的路徑、產生二氧化碳的速率，更不容易探討動力機制扮演的角色為何。體認這樣的知識缺口，過去已有部分研究嘗試利用封閉罩式的循環模式，直接測量地表沈積岩的二氧化碳釋放速率，配合同位素的分析與質量平衡，解析岩石源有機質氧化速率，並探討其與溫度變化的關係。然而活動造山帶的岩石組成中，沈積岩並非唯一的有機質來源，變質岩亦是另一重要組成，內含之有機質受高溫與壓力作用，產生更高成熟度或聚合性 (polymerization) 的形式，其生物之可利用性是否與沈積岩相當，仍多屬未知；變質岩基質的孔隙度十分低，二氧化碳產生與傳輸主要受控於破裂帶的分佈或岩石的結構，與沈積岩孔隙介質的概念迥然不同；深部地下環境可能是低氧或無氧的，有機質的氧化速度與高氧地表環境的速度差異為何？深部地下環境變質岩石的體積遠大於地表環境各類岩石體積總和，其有機質氧化對碳循環的影響為何，亦屬未知。

為了回應部分這些問題，我們設計了井下二氧化碳的感測與採樣系統，運用位於台

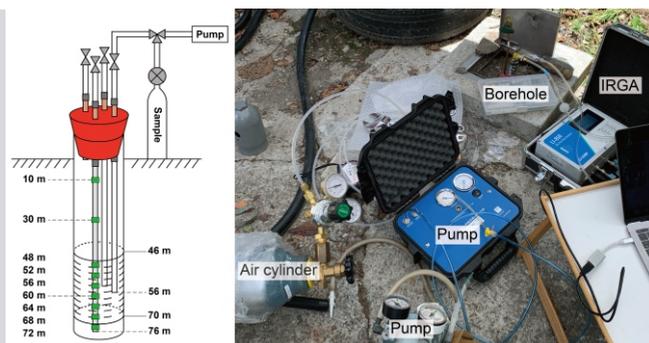
灣東部霧鹿區域的乾井作為測試場域 (圖一)，直接量測地下二氧化碳的排放速率，進而解析岩石源有機質的氧化作用。為了因應井孔大小的限制，我們自行組裝感測系統 (包含紅外線感測、供電、控制、儲存等元件；圖二)，並串連十至十五個感測系統，佈放至井下不同的目標深度，測量由岩層逸散出之二氧化碳累積濃度。我們另外設計閥門控制與井下管路、地表裝置連接，以進行井下空氣置換、主動循環與測量、被動模式測量、大體積樣本採集等工作 (圖三)。

鑽探獲取的岩心顯示，此井孔穿越約七公尺厚的表層崩積層、三十餘公尺厚多裂隙黑色片岩、二十餘公尺厚的破碎黑色片岩 (圖四)、約二十公尺厚的多裂隙黑色片岩，其中開篩段設置於井孔下半段的破碎與多裂隙帶 (46-70公尺)，因此於系統的實地測試中，我們佈放較高密度的感測系統於開篩段，以直接量測岩層逸散氣體累積。

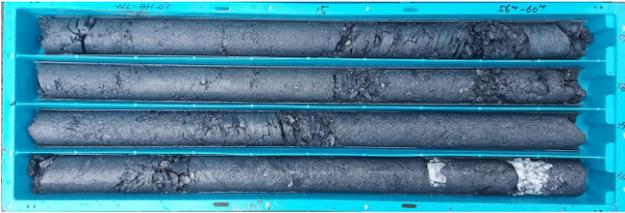
我們的結果顯示，若運用被動模式 (即無氣體循環)，井下不同深度累積二十小時的氣體濃度變化，呈現迥然不同的樣貌，於破碎帶的氣體累積是漸進持續的，呈現弧形的累積曲線；而於多裂隙帶，則多呈現階梯式的遞增；多裂隙帶的累積速率顯著的高於



圖二：二氧化碳感測系統。左圖為自行組裝的感測系統，右圖則是市售感測設備，兩套系統均使用相同型號的二氧化碳紅外線感測器模組，量測範圍為0至40,000 ppm，二者具相同偵測表現，野外測量中將其混合串連並佈放至井下。



圖三：測量佈置示意圖與野外實景。左圖為串連感測系統佈設於井下不同目標深度之示意圖，右圖為野外測量實景。實驗過程中，會先進行井下空氣置換，隨後採用主動循環測量模式或被動測量模式，紀錄二氧化碳自岩層逸散之累積濃度，最後進行大體積樣本採集。



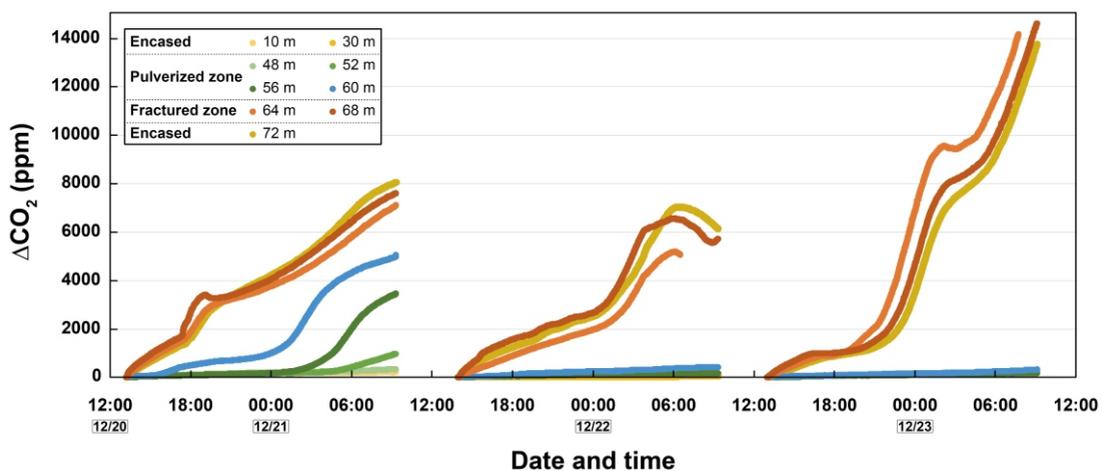
圖四：破碎黑色片岩。岩體由未膠結的細碎顆粒組成，粒徑大小不一，介於粉砂至小礫石之間。

破碎帶的累積速率（圖五）。若運用主動循環的模式，即透過地表氣體光譜儀的內建幫浦驅動，進行封閉罩式的循環達二至三小時，無論那種岩層組構特徵，氣體累積皆呈現漸進持續的累積曲線，如同被動模式般，多裂隙帶的累積速率顯著的高於破碎帶的累積速率，且兩者皆高於對應至被動模式的累積速率。這樣的結果顯示，被動模式的測量，較能反應現地的氣體釋放速率，並有助於解析變質岩層高度不均質或不均向的特徵。主動循環模式的測量，雖然歷時較短，卻可能造成通量的高估，且無法獲取岩層內部的特徵。

我們也透過現地測試，搜集數個一公升體積的氣體樣本，進行同位素分析，透過端

成分設定與質量平衡模型，岩石源有機物氧化作用的貢獻比例，可達整體氣體的 50% 以上；若將被動模式的結果進一步計算，可得通量達 1–300 mgC/m²/d，考慮上述比例，則與地表沈積岩有機質氧化作用貢獻速率相仿。雖然我們測得的井內通量，仍須額外考慮地下氣體傳輸，才可獲取較接近真實的氧化速率，但這些成果仍顯示變質岩的有機質是得以被生物降解，產生大量二氧化碳。特別於活動造山帶，快速抬升與侵蝕作用，得以持續提供大量變質岩至地表或較淺的地下環境，透過微生物作用將『難用』的有機質氧化，並貢獻溫室效應。

這樣感測系統的應用，提供了解析多項岩層氣體的產生與傳輸參數，為未來量化模型奠定良好的基礎。這類型的應用亦可以進一步擴充至其他地下或地表環境的二氧化碳監測與樣本搜集，或搭配其他感測器，提供高時頻的時序測量資料，以建構造山帶的碳循環觀測網。



圖五：被動模式下二氧化碳的累積濃度變化。圖中呈現三次隔夜測量的濃度累積結果，橘紅色曲線代表多裂隙帶的變化，藍綠色曲線則代表破碎帶的濃度變化。

論文來源：

Lien, W.-Y., Chen, R., Tsai, J.-F., Chen, J.-N., Lin, L.-H., and Wang, P.-L. (2025) A novel design for continuous measurement of CO₂ from deep remineralization of petrogenic organic carbon. *Vadose Zone*, e70020.

<https://doi.org/10.1002/vzj2.70020>.