

以微模型實驗探討可溶性氣體在包氣帶中的遷移行為

Yung-Wei Lee, Kai-Xiang Zhan, Qun-Zhan Huang, Shao-Yiu Hsu

土壤孔隙中可溶解氣體在土壤汙染傳輸、地表下碳封存、土壤溫室氣體排放等扮演重要角色。可溶解氣體的傳輸與土壤侷限氣泡 (trapped soil air) 相互影響。土壤中的侷限氣泡阻礙 (impede) 可溶解氣體在孔隙介質中的傳輸；而可溶解氣體在液-氣相間的交換改變氣泡體積與表面積，進而改變可溶解氣體的交換特性與氣泡移棲。雖然過去研究已探討可溶性氣體與侷限氣泡的交互影響，然而土壤中空氣除了侷限氣泡型態外，也包含著與大氣相連的自由空氣 (ie, in vadose zone)。相對於前者，後者處於低含水量。在這兩種土壤空氣型態中，可溶解氣體傳輸行為應不相同。此外，可溶解氣體在這種大含水量變化的傳輸行為仍是目前尚未完全釐清的課題之一。我們透過簡單、複雜孔隙的微模型試驗，量化自由空氣對侷限氣泡的影響。簡單孔隙實驗探討侷限氣泡數量增加對氣體擴散有相關的影響且侷限氣泡大小受到注入速率產生變化。蓮藕狀流道實驗討論侷限氣泡形成以及其大小。複雜孔隙微模型探討有無可溶性氣體下氣泡侷限形成/移動之異同。

1. 研究背景與重要性

土壤孔隙中的可溶解氣體傳輸在多個環境與工程領域中扮演著關鍵角色，例如土壤污染物的遷移、地表下碳封存技術的有效性，以及土壤溫室氣體的釋放等。可溶解氣體的運動受土壤水分含量影響，尤其是在含水量變化劇烈的區域，例如包氣帶 (vadose zone)，其傳輸特性更為複雜。

在土壤孔隙介質中，侷限氣泡 (trapped soil air) 與可溶解氣體的交互作用影響其傳輸機制。這些侷限氣泡會阻礙可溶解氣體的擴散與對流，使得氣體傳輸的有效性降低。然而，可溶解氣體在水-氣相間的交換不僅改變氣泡的體積與表面積，還會影響氣泡的移棲 (migration)，進而改變整體的傳輸行為。雖然許多研究已探討氣泡與可溶解氣體之間的交互作用，但大部分研究集中於飽和土壤中的侷限氣泡，而較少關注包氣帶的自由氣體與侷限氣泡的相互影響。相較於侷限氣泡，自由氣體 (與大氣連通的氣體) 存在於較低含水量的土壤環境中，這可能導致可溶解氣體的傳輸行為有別於高含水量環境。此外，由於包氣帶的含水量變化較大，可溶解氣體的傳輸機制在此區域內的變化仍是一個尚未完全釐清的研究課題。因此，本研究通過微模型 (micromodel) 實驗，探討自由氣體對侷限氣泡的影響，並分析可溶解氣體在不同孔隙結構中的傳輸行為。

2. 研究方法

為了研究可溶解氣體在不同孔隙結構中的遷移行為，我們設計了三種微模型

實驗：(1) 簡單孔隙微模型、(2) 蓮藕狀流道微模型、(3) 複雜孔隙微模型。這些模型用於量化氣泡的形成、移動及其對可溶解氣體擴散的影響。

2.1 簡單孔隙微模型

此實驗主要探討侷限氣泡的數量對氣體擴散的影響。我們透過控制注入速率來改變侷限氣泡的大小，並量測其對氣體傳輸的影響。隨著侷限氣泡數量的增加，氣體的擴散行為是否受阻將是關鍵研究目標之一。

2.2 蓮藕狀流道微模型

此模型的設計旨在模擬多孔隙結構中的侷限氣泡形成機制，特別是氣泡的大小如何受到孔隙幾何結構的影響。由於不同土壤類型的孔隙結構差異甚大，蓮藕狀流道的設計有助於解析不同條件下侷限氣泡的生成與穩定性。

2.3 複雜孔隙微模型

在更接近自然土壤孔隙的複雜微模型中，我們探討了有無可溶性氣體的條件下，氣泡的侷限形成與移動的異同。我們特別關注可溶解氣體如何影響氣泡的遷移行為，並比較不同孔隙結構下的傳輸模式。

3. 實驗結果與分析

透過微模型實驗，我們觀察到以下幾點關鍵現象：

1. 侷限氣泡的數量與可溶解氣體的傳輸效率之間呈負相關

- 當侷限氣泡的數量增加時，可溶解氣體的擴散受到明顯阻礙。這可能是因為氣泡的存在減少了可供氣體擴散的連通水相。

2. 侷限氣泡的大小受注入速率影響

- 在簡單孔隙微模型中，較高的注入速率會產生較小的氣泡，這些氣泡更容易被液相溶解或移動。

3. 蓮藕狀流道結構影響氣泡的形成與穩定性

- 氣泡傾向於在較窄的孔隙中形成並維持較長時間，而較寬的孔隙則使氣泡更容易移動。

4. 複雜孔隙環境下，可溶解氣體改變了氣泡的移棲模式

- 有可溶解氣體存在時，氣泡的體積變化較快，可能導致其較快溶解或遷移。

4. 研究貢獻與未來發展

透過微模型實驗，成功解析了可溶解氣體與土壤侷限氣泡的交互作用，並提供了一些關鍵性的實驗數據與觀察結果。這些發現有助於提升對包氣帶氣體傳輸機制的理解，並可應用於以下領域：

- **土壤污染修復**：理解氣體在包氣帶中的遷移行為，能幫助優化揮發性污染物的修復策略。
- **碳封存技術**：可溶解氣體與氣泡的交互作用可能影響地下二氧化碳封存的穩定性。
- **農業與生態環境**：土壤中的氣體交換影響根系生長與微生物活動，進而影響作物生長與溫室氣體排放。

未來的研究可以進一步探討不同溫度與壓力條件下的氣泡行為，以及更接近天然土壤條件的微模型設計。此外，整合 X-ray CT 或電阻率成像技術 (ERT)，將有助於更精細地觀察氣泡在三維孔隙結構中的動態變化。

5. 結論

本研究透過微模型實驗，探討了可溶解氣體在土壤包氣帶的傳輸行為，並分析了自由氣體與侷限氣泡的影響。我們發現侷限氣泡的數量與可溶解氣體的擴散效率呈負相關，且氣泡的大小與移棲行為受到孔隙結構與可溶解氣體的影響。這些結果對於理解土壤氣體傳輸機制具有重要意義，並可應用於土壤污染修復、碳封存與農業環境管理等領域。