

DOI: 10.53104/xdkxsts.2025.01.02.003

分層土壤中降雨驅動下重金屬遷移行為的層間擴散機制探討

趙天宇¹

1. 山西農業大學，山西 太原，030031

摘要：在長期重金屬污染條件下，分層土壤在垂直方向上表現出明顯差異，不同土層中重金屬逐漸累積。降雨作為主要的外部因素，會改變土壤孔隙中的水流狀態，使溶解態和絡合態重金屬在不同土層之間發生移動。本研究梳理了分層土壤結構和降雨入滲過程對重金屬遷移的影響，說明瞭對流移動、擴散作用、吸附與解吸過程以及指狀流動等多種過程之間的共同作用。通過理論模型分析發現，在降雨後期，濃度差引起的擴散仍然持續推動重金屬向深層土壤移動，並且在不同孔隙結構和降雨條件下，遷移速度和累積深度存在明顯差異。

關鍵字：分層土壤；重金屬遷移；降雨入滲；層間擴散；對流—彌散—吸附模型；優先流

Investigation of the Interlayer Diffusion Mechanism of Heavy Metal Migration Under Rainfall in Layered Soils

ZHAO Tian-yu¹

1. Shanxi Agricultural University, Shanxi 030031, P.R.China

Correspondence to: ZHAO Tian-yu; Email: tyzhaotianyu@outlook.com

Abstract: Layered soils under long-term heavy metal contamination exhibit significant vertical heterogeneity and multi-layer accumulation characteristics. Rainfall, as a primary external driving force, alters the pore water dynamics and promotes the redistribution and migration of dissolved and complexed heavy metals between soil layers. This study systematically reviews the effects of layered soil structures and rainfall infiltration processes on the migration behavior of heavy metals and elucidates the coupled mechanisms involving advection, dispersion, sorption-desorption equilibrium, and finger flow phenomena. The theoretical model analysis demonstrates that diffusion driven by concentration gradients continuously promotes the downward migration of contaminants during the post-rainfall stage and highlights the differences in migration rates and accumulation depths under varying pore structures and rainfall conditions. The results provide a theoretical basis for risk identification, zonal monitoring, and barrier control strategies in contaminated soils and have important implications for agricultural ecological security and groundwater protection.

Key words: layered soil; heavy metal migration; rainfall infiltration; interlayer diffusion; advection-dispersion-sorption model; preferential flow

收稿日期：2025-07-08 返修日期：2025-12-14 錄用日期：2025-12-23 出版日期：2026-01-06

通信作者：tyzhaotianyu@outlook.com

引用格式：趙天宇. 分層土壤中降雨驅動下重金屬遷移行為的層間擴散機制探討[J]. 現代科學探索, 2025, 1(2): 30-36.

引言

近年來，土壤重金屬污染問題愈發突出，工業排放、礦業開發和農業施肥等多重壓力持續向表層土壤輸入鎘、鉛、鋅等污染物。這些重金屬在土壤剖面中的累積與再分配，成為威脅地下水安全和農業生態系統的重要隱患。部分地區由於長期高強度工業排放和無序堆放固體廢棄物，表層土壤的重金屬含量已顯著超出農用地環境標準，污染向下擴散趨勢日益明顯^[1]。與大氣沉降和人為直接擾動不同，降雨過程作為一種持續且週期性的自然動力，對污染物垂直遷移具有決定性影響。

降雨入滲會明顯改變土壤中的含水情況和水流條件。溶解態重金屬會隨著水分的流動，在不同深度的土層之間不斷移動。降雨的強度、持續時間和發生次數，會影響水分流量和重金屬隨水移動的速度。幹濕反復變化，會影響重金屬在土壤固相和水相之間的釋放和再次吸附。隨著水分逐漸向下滲透，表層中濃度較高的污染物會在濃度差的作用下發生擴散，並逐步在下部土層中累積，或通過優先流通道直接進入更深層土壤。有研究指出，強降雨事件可能在短時間內導致深層土壤中污染物快速增加，並形成難以消除的污染積累區域。

分層土壤在垂直方向上的差異較為明顯，不同土層在質地、孔隙結構和有機質含量方面存在較大不同。表層耕作土中有機質和黏土礦物含量較高，具有較強的陽離子交換能力，因此對部分重金屬有較強的吸附作用。中層和下層土壤多由粉砂或砂質材料組成，其滲透性較好，孔隙之間連通性較強，容易形成重金屬快速向下移動的通道。由於不同土層之間孔隙率變化較大，同時水流條件發生改變，在層間介面處常出現局部積水或指狀水流現象，這些條件為重金屬在不同土層之間的擴散提供了動力和通道^[2]。

目前關於分層土壤中重金屬遷移的研究，多集中在重金屬含量變化和隨水流移動的過程，對土層之間擴散過程的研究仍然不足。現有研究中常將土壤視為結構均一的介質，這種處理方式難以反映真實土壤剖面中層次差異與降雨作用共同影響下的遷移過程。在水流條件、化

學環境以及吸附和釋放過程等多種因素共同作用下，重金屬在土壤剖面中的分佈和變化具有明顯的時間和空間差異，這也增加了污染預測和治理工作的難度。

1 分層土壤結構與水動力過程

分層土壤的形成與母質類型、地形條件、氣候變化以及人類活動的長期作用有關，在垂直方向上表現出顆粒組成、孔隙結構和水流特性的明顯差異。表層土壤多為耕作土或受人為影響的土壤，質地以壤土為主，孔隙較多，有機質和黏粒含量較高，因此具有較強的保水能力和陽離子交換能力。中層土壤通常為粉砂或黏土層，結構較為緊密，孔隙較小且分佈不均，水分通過能力較弱。下層多為砂質母質或風化岩層，孔隙之間連通性較差，水分滲透速度明顯降低。這種垂直方向上的差異，決定了土壤對降雨入滲和污染物移動的基本反應方式。

在降雨過程中，表層土壤會迅速吸收水分，並形成較高的含水區，水分在毛細作用下逐漸向下移動。當降雨強度和持續時間超過土壤的入滲能力時，部分水分會沿著較大的孔隙、生物通道或土壤裂隙快速下滲，繞過中層滯水區域，在短時間內形成較大的水流量。這一過程會縮短污染物在土壤中的停留時間，減弱表層土壤的吸附作用，從而增加重金屬向下移動的可能性。

隨著入滲過程繼續，中層土壤較低的滲透能力會使水分在其上方暫時積聚，形成局部滯留區域。在該區域內，溶質濃度逐漸升高，使重金屬更容易與土壤顆粒發生吸附反應，一部分污染物由溶解狀態轉變為吸附狀態。水分滯留時間越長，這種吸附過程越明顯。降雨結束後，殘留水分會繼續緩慢下滲，在剖面中形成相對穩定的含水區，並為後續由濃度差引起的擴散過程提供持續推動力。

在非飽和條件下，不同土層之間孔隙率和滲透能力的差異容易引發指狀水流現象，局部形成狹窄的水流通路，使污染物繞過土壤基質區，快速進入更深層土壤。這類優先通道在強降雨或多次幹濕變化過程中更加明顯，會加重污染物分佈的不均勻性，並增加其在深層土壤

中的累積深度，是重金屬層間擴散的重要水流條件。

土壤中的水分變化還受到降雨和乾旱交替過程的影響。乾燥階段會增強土壤吸水能力，提高初始入滲速度，而濕潤階段則會加強溶質的釋放和重新分佈，推動污染物在不同形態之間發生轉變，並繼續向下移動^[3]。在長期反復作用下，這種交替過程會產生明顯的累積效應。

2 降雨驅動下重金屬遷移機理

降雨不僅為土壤不斷補充水分，還推動了重金屬在土壤剖面中的分階段移動過程。它的影響不僅體現在降雨發生時的短時間水流運輸上，還體現在降雨前後對孔隙水流狀態和化學條件的改變，從而長期影響重金屬的存在形式和在土體中的分佈情況。

在降雨開始階段，表層土壤會迅速吸收水分，並逐漸接近飽和狀態。隨著孔隙水壓力上升，溶解態和絡合態重金屬會隨水分沿垂直方向發生對流移動。降雨強度直接影響水分下滲速度和水流大小。強降雨會形成較大的水流通量，使污染物在短時間內穿過表層的吸附區域，並進入中層或更深的土壤。較大的孔隙和裂隙通道容易形成優先水流，這種水流使土壤中的水分分佈更加不均，也明顯加快了重金屬的移動速度，使一部分污染物繞過滯留區域，在較短時間內直接進入深層土壤。

隨著雨水繼續向下滲透，中層土壤由於滲透能力較弱，水分容易在其上方積聚，使污染物在局部含水區域內不斷集中，濃度逐漸升高。在這一階段，控制遷移的主要過程不再是快速對流，而是吸附、解吸以及重新分配過程。重金屬會在土壤顆粒表面不斷發生吸附與釋放，形成變化中的平衡狀態^[3]。土壤的酸鹼程度、陽離子交換能力以及有機質含量等條件，會明顯影響吸附速度和吸附數量。一部分溶解態污染物被土壤固相吸附後，其可移動比例會降低；而在反復幹濕變化或離子交換作用下，已經吸附的重金屬又可能重新釋放，恢復繼續移動的能力。

在降雨結束之後，水分向下移動的速度明顯減慢。此時，表層與中層之間由於污染物濃

度不同，會形成清晰的濃度差。隨著水流作用減弱，分子擴散逐漸成為主要的遷移方式。重金屬會從濃度較高的區域緩慢向濃度較低的區域擴散。雖然這一過程速度較慢，但持續時間較長，是導致重金屬在深層土壤中長期累積的重要原因。濃度差引起的擴散過程通常可以用菲克第一定律進行描述：

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial z}$$

式中， J 為擴散通量， D 為有效擴散係數， $\partial C/\partial z$ 為濃度梯度。 D 值受土壤孔隙結構、含水率與溫度等因素影響，層間孔隙率突變造成擴散不連續，影響通量連續性。

除了上述主導機制，重金屬在土壤中的遷移形態也在降雨過程中發生變化。水溶態和弱絡合態污染物最易遷移，隨對流與擴散進入深層^[4]；而顆粒結合態和沉澱態在一定條件下可發生解吸或溶解，成為潛在的再釋放源。水溶態和弱絡合態污染物最易遷移，隨對流與擴散進入深層；而顆粒結合態和沉澱態在 pH 下降和鹽分稀釋等條件下可發生解吸或溶解，成為潛在的再釋放源^[5]。

在這一遷移過程中，非飽和區中的指狀水流現象尤為重要。在土壤內部，由於不同位置的水流能力存在差異，降雨入滲時往往不會形成均勻下滲，而是在剖面中出現不規則的指狀水流通道。這些水流通道阻力較小，為污染物提供了更容易通過的路徑。重金屬可以沿著這些通道繞過部分吸附能力較強的土壤區域，直接進入下部土層，從而明顯加快其向下移動的速度，並增加在深層中的累積程度。指狀流並不是穩定存在的，其形成和變化與土壤結構條件、降雨強弱以及降雨前土壤的含水狀態密切相關。在降雨強度較大或土壤經歷多次幹濕變化時，這類水流通道更容易出現，其對重金屬遷移路徑和遷移深度的影響也更加明顯。因此，在建立相關模型時，有必要對指狀流過程進行明確描述，以反映其在污染物遷移中的實際作用^[6]。

3 層間擴散的理論機制模型

層間擴散是分層土壤中重金屬移動的重要

方式。在不同土層之間，由於重金屬濃度存在差異，加上孔隙結構不一致以及水流條件不同，溶解態重金屬會在這些因素共同作用下，持續跨越土層介面向下或向上移動。這一過程通常發生在水流速度較低或降雨結束之後，但其作用時間較長，對重金屬在剖面中的分佈具有持續影響。為了描述這種隨水流和擴散共同發生的遷移過程，研究中常採用對流—擴散方程，即 Advection-Dispersion Equation (ADE)。在實際分析中，多使用其一維形式來刻畫重金屬沿垂直方向的遷移行為，其基本表達形式為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \rho_b \frac{\partial S}{\partial t}$$

其中：

- C 為孔隙水中重金屬濃度 (mg/L)
- D 為總彌散係數，包含機械彌散項 αv 與分子擴散係數 D_m ，即 $D = D_m + \alpha v$
- v 為垂向平均對流速度 (cm/s)
- ρ_b 為土壤體積密度 (g/cm³)
- S 為單位土壤品質吸附態重金屬濃度 (mg/g)
- z 為深度 (cm)
- t 為時間 (s)

ADE 模型認為，溶質在土壤中的移動過程符合 Fick 定律，並假定水分在土體中以連續、均勻的方式流動。這種模型通常適用於水流條件較為穩定、孔隙結構差異不大、且未出現明顯優先水流的理想情況。然而，在垂直方向差異明顯的分層土壤中，這些前提條件往往難以滿足。由於不同土層在結構和水流條件上存在明顯變化，ADE 模型在描述實際遷移路徑和污染物空間分佈時，容易產生一定偏差。

彌散係數 D 的確定需結合實測土壤孔隙率與流速條件，通過穿透曲線反演或室內土柱試驗獲得。彌散長度 α 通常取決於土壤質地與結構變化程度，一般砂壤土中取值為 1 - 10 cm，而黏性土壤則更低。分子擴散係數 D_m 與重金屬種類和孔隙水溫度相關，通常為 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 。

吸附—解吸過程對遷移能力具有強調控作用，常採用 Langmuir 或 Freundlich 等溫吸附模

型建模。Langmuir 模型適用於單層飽和吸附，表達為：

$$S = \frac{K_L C}{1 + a_L C}$$

其中 K_L 為最大吸附容量 (L/g)， a_L 為平衡常數。Freundlich 模型適用於非理想表面吸附，運算式為：

$$S = K_F C^n$$

其中 K_F 、 n 為經驗常數，適合描述非線性吸附行為。二者的選擇應基於等溫吸附實驗結果。

ADE 模型在預測濃度場、評估累積深度方面具備一定準確性，但在實際剖面中，降雨引發的指狀流、裂隙通道、突變孔隙率等會造成流線偏轉與局部富集，模型低估污染物垂向遷移範圍。

為克服 ADE 在非均質條件下的不足，可引入雙孔隙模型 (dual-porosity model) 或雙域模型 (dual-permeability model)，考慮快慢流區之間的溶質交換。雙域模型的形式如下：

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 C_f}{\partial z^2} - v_f \frac{\partial C_f}{\partial z} - \rho_b \frac{\partial S_f}{\partial t} - \lambda (C_f - C_s)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -\lambda (C_s - C_f)$$

其中 C_f 、 C_s 分別為快流域（如指狀流）與慢流域（基質區）中的濃度， λ 為交換係數，反映兩區域間濃度交換速率。該模型通過設定不同的流速和擴散參數，更貼近自然條件下的擴散行為。

指狀流在剖面中分佈隨機，模型中可通過設定高滲透性隨機場或嵌套網格方法加以模擬。數值類比結果顯示，指狀流對總遷移通量貢獻可達 30% 以上，是 ADE 無法捕捉的重要非均質結構效應。

模型參數的設定可基於實地土壤剖面的分層取樣結果，並結合溶質穿透試驗獲取基礎資料。在此基礎上，可通過反演和參數調整方法，對實驗資料進行擬合，從而得到更符合實際情況的遷移參數組合。在不同降雨強度和持續時間條件下開展模型計算，有助於觀察土層介面

區域對遷移過程的回應變化，並判斷哪些區域對水分和污染物移動更加敏感。這些結果可以為污染阻隔位置的選擇以及採樣方案的調整提供直接參考^[7]。

4 環境風險與防控啟示

在分層土壤中，降雨推動的重金屬層間擴散不僅會加快污染物向下移動，還會明顯增加深層土壤和地下水受到污染的風險。在長期反復的降雨和乾旱過程中，表層土壤中積累的污染物會在多次水流作用和擴散作用下，逐步穿過中層阻滯區域，進入下部土壤，部分情況下甚至會到達潛水面。由於深層土壤通常孔隙較少、取樣和處理較為困難，一旦形成穩定的污染累積區，後期治理難度和成本都會明顯提高，所需治理時間也往往遠長於表層污染。

深層重金屬污染在土壤剖面中具有較強的隱蔽性，常規的地表取樣方式很難及時發現其不斷增加的趨勢^[8]。當重金屬在深層含水區內發生重新分佈並不斷聚集時，可能形成持續釋放的污染源，對淺層地下水水質造成長期影響。在向下移動過程中，高濃度的孔隙水污染物往往會沿著裂隙或指狀水流通道進一步加快擴散速度，使污染在空間上的分佈更加不均，這也增加了監測和預警工作的難度。

在農業土壤環境中，降雨引起的層間擴散過程可能導致耕作層以下、作物根系分佈區域內的重金屬含量不斷升高，從而提高農作物吸收污染物以及通過食物鏈積累的風險^[9]。水溶態或弱絡合態的重金屬可以隨著根區水分被植物吸收，並進入地上部分組織，增加農產品超標的潛在隱患。隨著時間推移，這種由降雨引起的擴散和累積過程會逐漸改變土壤原有的生態功能，對微生物數量、群落結構以及土壤酶活性產生影響，從而降低整體土壤品質和健康水準。

在應對這些風險時，防控措施需要從多個層面同時展開。污染源控制是首要環節，應加強對含重金屬廢水、廢渣以及農業投入品使用的管理，儘量減少新的污染物進入土壤^[10]。對於已經受到污染的區域，應結合土壤分層結構開展更為細緻的調查，重點關注中層水分滯留區

域和深層可能出現的污染積累區。通過多深度剖面取樣和孔隙水監測，可以更清楚地識別污染物的遷移路線以及指狀水流通道的位置。

在防止污染繼續擴散的技術措施上，改善表層土壤的理化條件、提高其吸附和固定重金屬的能力，是降低向下遷移風險的重要方式。施加礦物類固化材料或有機改良材料，可以增強重金屬在表層土壤中的穩定性，減少其以溶解狀態存在的比例。在中層或不同土層交界處設置阻隔層或高吸附層，如黏土墊層、膨潤土墊層或生物炭層，有助於攔截向下移動的溶解態污染物。同時，通過調整農田排水方式，分散雨水集中流入，降低短時間內的人滲強度，也可以在一定程度上減弱優先水流的形成。

在風險評估和監測工作中，需要特別關注時間變化和空間差異。針對降雨事件後可能出現的短時間高強度遷移，應在降雨前後適當提高監測頻率，以捕捉污染物快速增加的過程。在長期幹濕反復變化的條件下，還應持續跟蹤土壤中濃度差的變化情況以及孔隙水中溶質的累積過程，為後續修復措施的調整提供可靠的資料支援。

通過多維度防控措施的聯合應用，分層土壤中重金屬層間擴散風險可以在源頭削弱和路徑阻斷兩個層面得到有效管控，降低深層累積和地下水污染概率，為農業生態安全和土壤環境品質的長期保障提供技術保障。

5 結論

在分層土壤中，降雨推動的重金屬遷移過程表現出多種作用同時發生，並且在不同階段具有明顯變化。在降雨入滲過程中，不同土層的孔隙結構、水分變化情況以及化學條件共同影響污染物在垂直剖面中的移動方式和分佈位置。在降雨開始階段，對流作用占主導地位，水分迅速向下流動，推動重金屬快速穿過表層污染區域。隨著水分在中層土壤或土層交界處停留，污染物逐漸集中，形成局部濃度較高的區域，這些區域隨後成為擴散過程的重要來源。在降雨間歇期以及反復的幹濕變化過程中，由濃度差引起的緩慢擴散持續發生，並在較長時間內主導遷移過程，使重金屬逐步在深層土壤

中形成潛在的累積區域。指狀流等非均質水動力路徑在不飽和狀態下增強遷移不確定性，是污染深層突破的重要通道。

理論建模採用對流—彌散—吸附方程（ADE）為基礎框架，融合 Langmuir 與 Freundlich 等溫吸附模型，構建了適應層間結構特徵的遷移類比體系^[11]。模型參數如彌散係數、平均流速、土壤體積密度與最大吸附容量係數需根據實驗測定或田間監測資料進行分層賦值，確保對非均質性的回應能力。類比結果顯示，污染物在中層土壤及不同土層交界位置常出現移動變慢並停留的情況。參數敏感性分析進一步表明，吸附過程的變化速度以及孔隙結構在介面處的突然變化，是影響污染物向下移動深度和累積程度的主要因素。傳統的 ADE 模型在一定程度上可以解釋污染物的整體遷移趨勢，但在存在指狀水流、裂隙滲流以及快慢水流區域相互交換等情況時，其適用範圍明顯受限。在這些

非線性遷移條件下，模型往往難以準確反映真實的遷移路徑和分佈特徵，因此需要通過引入雙重孔隙模型或採用分區參數設定的方法，對模型進行擴展和調整，以提高模擬結果的可靠性和精度。

環境風險評估結果表明，降雨推動的層間擴散過程會加快污染物向深層土壤和潛水層的移動，使污染更加隱蔽，同時顯著提高後續治理所需的時間和成本^[12]。一旦深層污染累積形成，常規修復措施往往難以有效到達污染區域，其釋放的污染物還可能持續進入地下水系統，造成長期影響。在農業生態環境中，重金屬的垂向移動還可能穿過作物根系分佈區域，增加植物吸收污染物的可能性，並提高食物鏈暴露風險。在應對措施上，應加強污染源頭的控制，並結合表層固定技術，同時設置具有較強攔截能力的介面層和合理的排水調控結構，以減少降雨條件下形成的高強度遷移通道。

參考文獻：

- [1] 周國華. 土壤重金屬生物有效性研究進展[J]. 物探與化探, 2014, 38(6): 1097-1106.
- [2] 郭超. 雨水花園集中入滲對土壤和地下水影響的試驗研究[D]. 陝西:西安理工大學, 2019.
- [3] 陳其鮮, 楊琴, 任書生. 拔節期水分虧缺對沙地農田玉米光合特性及物質積累的影響[J]. 水土保持通報, 2015, 35(04): 91-96.
- [4] 陳蘇, 孫麗娜, 晁雷, 等. 不同濃度組合的鎘、鉛在不同污染負荷土壤中的吸附-解吸動力學行為[J]. 應用基礎與工程科學學報, 2007, 15(1): 32-44.
- [5] SEMPLE K T, DOICK K J, WICK L Y, HARMS H. Microbial interactions with organic contaminants in soil: Definitions, processes and measurement[J]. Environmental Pollution, 2007, 153(1): 119-126.
- [6] ALLOWAY B J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability[M]. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2013.
- [7] 鄭順安. 我國典型農田土壤中重金屬的轉化與遷移特徵研究[D]. 浙江: 浙江大學, 2010.
- [8] 陳璐, 文方, 程豔, 等. 鉛鋅尾礦庫周邊土壤重金屬污染特徵及環境風險[J]. 中國環境監測, 2017, 33(1): 82-87.
- [9] 蘇耀明, 陳志良, 雷國建, 等. 多金屬礦區土壤重金屬垂向污染特徵及風險評估[J]. 生態環境學報, 2016, 25(1): 130-134.
- [10] 高永華, 王金, 趙莉, 等. 汙灌區土壤-植物系統中重金屬分佈與遷移轉化特徵研究[J]. 河北農業大學學報, 2006, 29(5): 52-56.
- [11] 李秋華, 夏品華, 吳紅, 等. 用物理-生態集成技術局部控制富營養化[J]. 環境科學, 2012, 33(07): 2303-2308.

[12] 陳棟為, 陳曉宏, 孔蘭. 基於生態足跡法的區域水資源生態承载力計算與評價——以珠海市為例[J]. 生態環境學報, 2009, 18(6): 2224-2229.

版權聲明

© 2025 作者版權所有。本文依據“知識共用署名 4.0 國際授權合約”(CC BY 4.0)以開放獲取方式發佈。該許可允許使用者在任何媒介中自由使用、複製、傳播與改編文章(含商業用途),惟須明確署名原作者及出處,並注明所作修改(如有)。完整協議詳見:<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans>

出版聲明

所有出版物中的陳述、觀點及資料僅代表作者及供稿者個人立場,與 Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員無關。Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員對因內容所提及的任何理念、方法、說明或產品所導致的人身或財產損害概不負責。