

你施的肥料去哪裡了？(2)

磷循環及如何提高磷肥利用效率

文／潘佳辰、黃瑞彰、簡芝楹、施惠淇 圖／黃瑞彰、潘佳辰

磷為作物生長所需之巨量元素 (Major elements)，農業所使用的磷肥主要源自於將磷礦石添加酸、加熱或是研磨後再製成產品，常見的磷肥成品有過磷酸鈣、磷酸一鉀、磷礦石粉等。磷在作物生理的功能扮演重要的角色，例如合成生理生化之能量來源-三磷酸腺苷 (又稱為ATP)、組成遺傳訊息物質-核酸 (DNA或RNA) 的主要原料、合成細胞膜等。考量到磷肥的有效性以及在土壤中的移動，磷肥施用時間點一般建議為基肥時期全量施用。適度的施用磷肥有助於提升開花著果比例以及提升果實糖度；過量施用磷肥則可能會引發新葉出現鋅、銅缺乏徵狀。作物

缺磷時，會在老葉出現紫紅化的現象；溫度較低時亦會影響磷肥吸收的效率，使葉片暫時出現缺磷的現象 (圖一)。作物吸收磷肥的效率受到土壤性質及氣候條件影響，故了解磷在環境中的循環以及如何提升磷肥有效性為妥善管理磷肥的關鍵。

磷肥循環

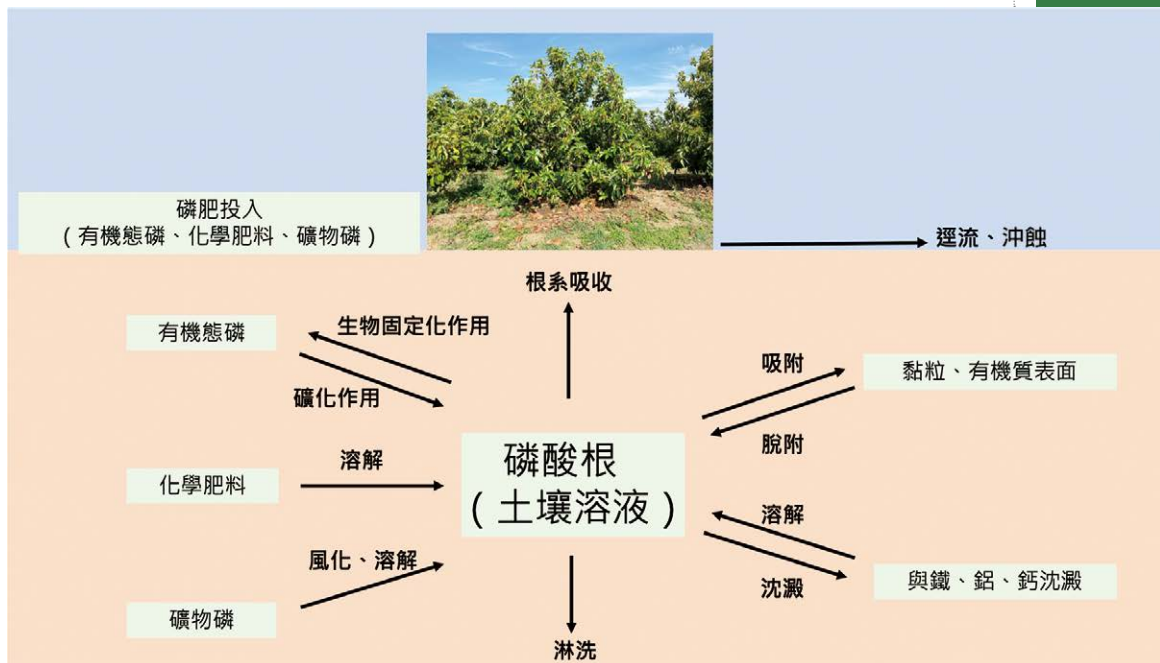
磷肥的循環路徑包括生物固定化與礦化作用 (Immobilization and Mineralization)、風化 (Weathering)、溶解 (Dissolution) 與沈澱 (Precipitation)、吸附與脫附 (Adsorption and Desorption)、吸收 (Uptake)、淋洗 (Leaching)、逕流 (Runoff) 與沖刷 (Erosion)

土壤中的磷肥型態

磷於土壤中多存在於 (1) 礦物結構 (亦稱為礦物磷)、(2) 礦物或有機質表面 (多數為磷酸根，例如 PO_4^{3-})、(3) 微生物或是作物體內 (亦稱為有機態磷)。磷肥亦會因為土壤環境 (酸鹼值、溫度、土壤礦物型態) 而轉換成不同型態，進而影響磷肥的有效性。



圖一、番石榴於溫度較低時出現短暫缺磷現象，葉片徵狀為紫紅化



圖二、磷肥循環示意圖

生物固定化與礦化作用 (Immobilization and Mineralization)

生物固定化作用與礦化作用皆透過微生物進行。當磷肥以無機型態（例如磷酸根， PO_4^{3-} ）進到土壤後（如圖二），微生物吸收磷酸根再轉化為微生物體質的過程稱為生物固定化作用。而當農友將採收後的作物殘體翻耕到土壤中，微生物經分解作物殘體，將原本有機型態磷轉化為無機型態磷再釋出到環境的過程稱為礦化作用。簡而言之，生物固定化作用為將無機型態磷轉換為有機型態磷；礦化作用為將有機型態磷轉換為無機型態磷的過程。

風化 (Weathering)、溶解 (Dissolution) 與沈澱 (Precipitation)

一部分的磷存在於礦物（例如蛇紋石）中，經由風化作用崩解成小顆粒，小顆粒於土壤溶液中逐漸溶解出磷酸根，供作物根系吸收。當土壤溶液含有鐵、鋁、鈣離子時，

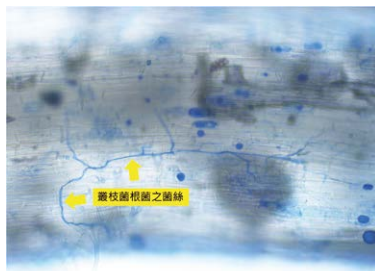
則可能會與磷酸根沈澱，與鐵、鋁、鈣離子沈澱後的磷，則無法被作物根系吸收。

吸附 (Adsorption) 與脫附 (Desorption)

磷酸根離子釋出後，有部分磷酸根會暫時停留在黏土礦物表面稱為吸附；若磷酸根自黏土礦物表面再次進到土壤溶液中時，則稱為脫附作用，不論吸附或是脫附，皆發生於土壤溶液中。

吸收 (Uptake)、淋洗 (Leaching)、逕流 (Runoff) 與沖蝕 (Erosion)

磷肥被根系吸收的方式包括根接觸到磷肥或是磷肥藉由擴散方式移動到根系附近而被作物吸收，隨後再轉化為ATP、核酸或是細胞膜等。未經利用的磷肥可能會因為淋洗由表層土壤移動至深層土壤；表層的磷肥亦會受到大雨造成的逕流或沖蝕而流失。流失後的磷肥若是進到水體當中（湖泊、河川、大海等）可能導致藻類增生，稱為「優養化作用」。當藻類大量繁殖後會消耗水體中的氧氣；而當藻類死



圖三、叢枝菌根菌與作物根系共生，透過菌絲(染色後呈藍色絲狀物)幫助吸收磷肥及水分



圖四、叢枝菌根菌建議與育苗介質充分混合後(左)再育苗(右)

亡及分解後，仍會造成水質惡化，故透過適當的磷肥管理以增加磷肥有效性相當關鍵。

如何提升磷肥有效性

影響磷肥有效性的環境因子包括溫度、有機質及土壤酸鹼值等，其中土壤酸鹼值極易影響磷肥有效性，以下將介紹常見提升磷肥有效性的方法：

調整土壤酸鹼至5.5至7.5

一般而言，酸性土壤以鐵、鋁含量較高；鹼性土壤中以鈣、鎂含量較高，而鐵、鋁、鈣皆容易與磷肥沈澱而降低有效性。一般作物（除鳳梨、茶樹以外）土壤酸鹼值建議調整到5.5至7.5即可有效提升磷肥有效性。土壤酸鹼值低於5.5時建議使用苦土石灰。苦土石灰含有較高的鈣、鎂，施用後可以有效提升土壤酸鹼值，以及補充土壤鈣鎂含量，苦土石灰建議施用量需視土壤酸鹼值而定，約每分地80~120公斤。土壤酸鹼值高於7.5時則建議施用硫磺粉，每分地建議施用量為60~80公斤。不論苦土石灰或是硫磺粉建議施用後可以與土壤充分混合，或是直接施用在土壤表面亦可；果樹作物建議可以施用在距離樹頭40~60公分外的範圍。苦土石灰或是硫磺

粉之施用量及方法建議依據土壤肥力分析報告進行調整。

以雲嘉南地區為例，接近山區之土壤酸鹼值有較高機率低於5.5，建議可以規劃2~3年的提升土壤酸鹼值計畫，藉由改善土壤酸鹼值以提升作物產量及品質。沿海地區或是曾為臺江內海的區域土壤酸鹼值易高於7.5，建議每年施用硫磺粉逐步降低酸鹼值至7.5以下，提升土壤磷及微量元素的有效性。

接種菌根菌及澆灌溶磷菌

許多文獻已證實施用叢枝菌根菌及溶磷菌皆有助於提升磷肥吸收及增加磷肥有效性。叢枝菌根菌與作物根系形成共生（圖三），且會在作物根系內外產生菌絲幫助作物吸收磷肥並促進作物生長；在部分文獻中亦記載叢枝菌根菌有助於作物吸收水分以及協助作物抵抗環境逆境。施用叢枝菌根菌時建議與育苗介質充分混和後再育苗（圖四）。溶磷菌可以藉由分泌有機酸將與鐵、鋁、鈣沈澱的磷釋出



圖五、溶磷菌於培養基中將磷酸三鈣溶解(半透明處)



圖六、施用溶磷菌建議以澆灌方式使菌液滲到作物根圈，提升溶磷菌效果



圖七、香瓜苗接種叢枝菌根菌（左）有助於地上部及根系發展

(圖五)，提升磷肥有效性。施用時建議以澆灌方式 (圖六)，利於溶磷菌滲到根圈附近，建議每7~10天施用一次，共施用2~3次。

臺南區農業改良場針對叢枝菌根菌應用於香瓜苗以及香蕉之相關試驗，結果顯示幼苗時期接種叢枝菌根菌有助於香瓜苗 (圖七) 後續的生長；對於香蕉生長則有助於提升株高、果重及品質。本場於香蕉試驗結果亦發現，酸性土壤狀況下如施用苦土石灰並搭配叢枝菌根菌，其促進香蕉生長之效益高於單獨施用叢枝菌根菌。

施用有機質肥料

有機質肥料經過分解後釋放出磷肥供作物吸收。有機質分解過程中亦會產生有機酸，協助將與鐵、鋁沈澱的磷釋放出來，

進而增加磷肥被吸收的機會。此外，施用有機質肥料後會促進土壤微生物的生長及活性，皆有助於幫助提升磷肥有效性。耕作前建議可以施用粗纖維有機質肥料 (例如蔗渣堆肥、牛糞堆肥及菇包堆肥等) 做為基肥，每分地建議施用量為1,000至1,500公斤，施用時建議可以與土壤充分混合，以達到最佳效果。

結語

磷肥為有限資源，主要透過開採磷礦石後進行加工而製成各項磷肥產品。如能有效的運用，將可提升作物產量及品質。為此，建議農友在當年度耕作或施用基肥前，可以將土壤送至轄區內之農業改良場進行土壤肥力分析診斷，了解土壤酸鹼值及其他各項養分指標，依據作物種類與專家討論後制定土壤改良及施肥策略，使得肥料運用更加有效率。

參考資料：

- ◎吳正宗。2005。認識化學肥料。臺南區農業改良場技術專刊第132號。
- ◎黃瑞彰、江汶錦、林國詞。2012。叢枝菌根菌在洋香瓜育苗介質應用研究。臺南區農業改良場研究彙報第60號。
- ◎Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil.
- ◎Zhang, S., Zhu, Q., de Vries, W., Ros, G. H., Chen, X., Muneer, M. A., Zhang, F. & Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 345, 118531.