

強酸性土壤中鋁對作物的影響

全台耕地總面積中有 65 - 75% 為酸性土壤，其中屬強酸性者 (pH < 5.5) 則占了 28%，強酸性土壤為本省最大宗的問題土壤，其生成除了受到土壤母質的影響外，尚與雨量豐富造成鹽基淋洗以及長期施用化學肥料使土壤漸趨酸化有關。土壤酸化後對果樹等作物會造成營養吸收上的問題進而影響生產品質與產量，因此強酸性土壤的改良是相當重要的。土壤若過度酸化 (pH < 5.5)，除了磷的有效性降低、鹼性離子 (鈣、鎂及鉀等) 及微量元素 (如銅、鋅和硼鉛等) 易流失及有效性降低等缺點外，因為鐵、鋁和錳溶出量過多，因而對作物造成毒害，尤其鋁毒害最為嚴重。

土壤中的鋁

在各種化學元素中，鋁在地殼中的含量僅次於氧及矽，且是含量最豐富的金屬元素 (約 7.8%)。土壤中礦物經風化作用會將鋁釋放出成為鋁離子，鋁離子一般以水合型態存在，然

而它經由水解會產生大量的氫離子而使土壤變酸。不同土壤酸鹼度下鋁會以不同的型態存在，如土壤在 pH 5.5 以下時，三價鋁 (Al³⁺) 及羥基鋁離子 [Al (OH)²⁺ 及 Al (OH)²⁺] 是最主要的物種，而這 2 種鋁型態對植物的根系是有毒害作用的。強酸性土壤在低鋁濃度情況下，對植物根系的伸長有所助益，乃因低濃度的鋁占據根細胞壁上的負電荷使不受到高濃度氫離子的危害；然而當鋁濃度漸次提高時，鋁的水解作用能力強，釋放出更多的氫離子，使得作物根系遭受到傷害，而且高濃度的單體鋁 (Al³⁺) 會使得根部酵素的活性降低，使得對營養要素的吸收能量不足，作物營養不良而生育差，尤其是對作物幼齡期之危害最為嚴重。

鋁對作物的毒害

植物受到鋁毒害時，根系短而粗，並發生扭曲，側根短少，整個根系有時呈珊瑚狀，外面有一層褐色外



(左圖) 強酸性土壤 (pH = 4.7) 種植甘藍因鋁毒害造成營養吸收不良而使植株生長及產量均不佳。
(右圖) 經施用 1 公噸/公頃石灰石粉改良土壤酸鹼度後 (pH = 6.0) 可使植株生長良好並提高產量

膜，植株矮小，植物對其它養分的吸收及利用受影響，尤其是鈣、鎂、磷、鐵、錳等，另外，根細胞壁上的ATP 酶活性會降低，呼吸作用受阻，使吸收養分所需的能量減少。然而每種作物對鋁的耐受性並不同，蔬菜種植在水耕液中含 $100 \mu\text{M AlCl}_3$ (約含毒性鋁 $48.7 \mu\text{M}$) 時即會遭受毒害，以甘藍為例，當種植於強酸性土壤 (pH 4.7)，營養吸收不良，經酸度改良後 (pH 6.0) 植株生長及產量均有所提升。茶樹、咖啡及鳳梨等作物，對鋁的耐受度較高，但同一種作

物不同品種間有時對鋁的耐受度不盡相同，以鳳梨為例，開英種在適合鳳梨生長的強酸性水耕液中不含任何鋁成分時根部生長不良且植株會有黃化現象，然而當水耕液中含有 $100 - 200 \mu\text{M AlCl}_3$ (約含毒性鋁 $48.7 - 75.5 \mu\text{M}$) 時生育良好，即使水耕液中 AlCl_3 濃度高至 $300 \mu\text{M}$ (約含毒性鋁 $90.7 \mu\text{M}$) 時根部仍不會遭受毒害，然而台農 6 號鳳梨在水耕液不含鋁情況下根部生長較緩，在含 $100 - 200 \text{AlCl}_3$ 情形下根部及葉片發育快，但在含 $300 \mu\text{M AlCl}_3$ 時根部發育受阻，營養吸收不佳，使得葉片生長緩慢，由此可知不同作物及品種間對鋁的耐受度均不同。



植物的耐鋁機制

強酸性土壤中鋁毒害是主要限制產量的因子 (Von Uexkull and Mutert,1995)，一般植物的耐鋁機制乃根部分泌鉗合物 (Ligand) 進入原生質或根圈與鋁形成穩定複

(上圖) 最左為開英種鳳梨根部耐鋁性高，以水耕栽植鳳梨，在缺鋁環境下生長過程葉片反而會有黃化現象，左 2 至最右為水耕液含 100 、 200 、 $300 \mu\text{M AlCl}_3$ 之生長情形，可發現鳳梨在高濃度鋁之下仍生育良好，葉片翠綠。(下圖) 開英種的根部生長情形 (左至右為水耕液含 0 、 100 、 200 、 $300 \mu\text{M AlCl}_3$)



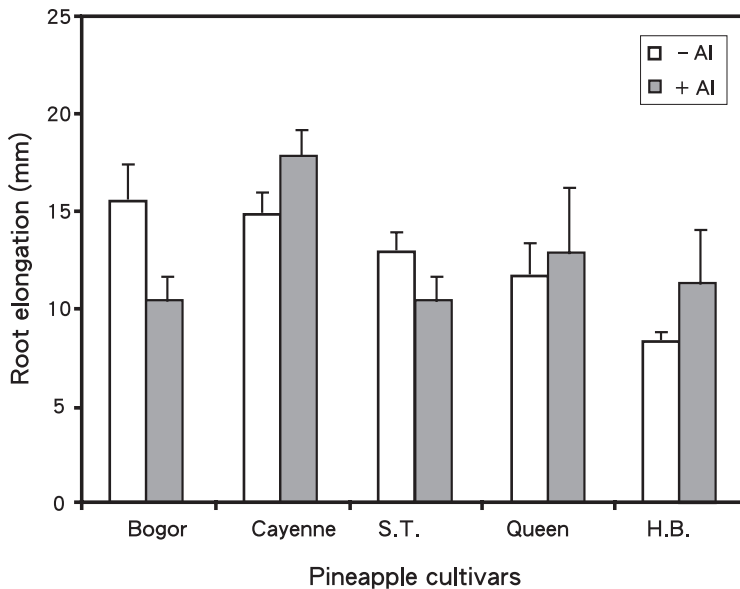
台農 6 號 (蘋果鳳梨) 幼齡期根部不耐鋁，在水耕液 (pH = 4.5) 缺鋁的環境下根系發育不好，葉片生長情形不佳 (左 1)，左 2 (含 100 μM AlCl_3) 及左 3 (含 200 μM AlCl_3) 根系及葉片生長發育良好，然而當水耕液 AlCl_3 濃度高至 300 μM 時植株根生長又受到抑制，導致葉片發育不佳

合物而降低單體鋁的活性；另一機制為鋁在進入細胞後被隔離於液泡中以免除鋁的進一步毒害。在第一個機制當中植物根部所分泌的鉗合物大多為有機酸 (草酸、檸檬酸、酒石酸、蘋果酸等) 與低分子量蛋白質，因此植物會遭受鋁毒害大多因高鋁濃度情況下根部分泌這些鉗合物質的不足，多數遭受到鋁毒害的植物根的表面，常會有胼胝質 (Callose; 1,3- β -glucan) 的產生。根據 Le Van et al. (2004) 研究指出，當鳳梨之開英種及 Soft Touch 品種根部生長於高濃度鋁 (pH = 4.5, 300 μM AlCl_3 或 90.5 μM 無機單體鋁) 時，開英種有較 Soft Touch 根尖 (1mm) 還低的胼胝質濃度，顯示前者對鋁的耐受度是較後者高的。根尖 (1mm) 在蘇木素染色下，顯示水耕液中含 300 μM AlCl_3

情況下鋁會強烈聚積於 Soft Touch 的根尖，而開英種則不明顯，開英種的耐鋁機制乃因根部受到鋁的刺激促使根分泌鉗合物免於受到鋁的毒害。

鋁毒害的防治

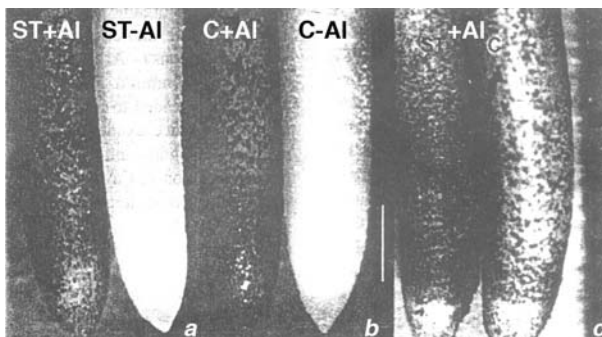
鋁毒害主要發生在 pH = 5.0 以下的強酸性土壤中。作物出現鋁毒害時，植物組織中往往鐵和錳的含量較高，而鈣和鎂的含量較低，對鋁離子敏感的作物，在 pH = 6.0 以下時仍有輕微的毒害。防止作物發生鋁毒害的主要措施便是儘量不要使土壤過度酸化，而最有效的方式便是施用石灰，提高 pH 使鋁離子沉澱，強酸性土壤中的鋁飽和度常高達 70 - 80%，因此目前實驗室中計算土壤石灰需要量，常使用降低土壤鋁飽和度至 10% 的方式，一方面可提高土壤酸鹼度使營



5 個鳳梨品種 (Bogor, Cayenne, Soft Touch, Queen, Honey Bright) 在含有 300 μM 的水耕液 (pH = 4.5) 中種植，當中 Cayenne、Queen 及 Honey Bright 根的伸長度比對照組 (不含鋁) 還高，而 Bogor 及 Soft Touch 根的生長有受抑制情形，(Le Van et al., 2004)

養成分有效性提高，一方面又可降低土壤中的交換性鋁而使鋁毒害不致於限制作物的生長。另外，應多施有機質肥料取代化學肥料，可使鋁與有機酸形成複合物，因為此複合物會比 Al_3 或 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 對植物的毒性要少得多，有機質肥料中以禽畜糞堆肥對於強酸性土壤 pH 值的提升效果會比植物性有機肥 (大豆粕、蓖麻粕等) 還佳，這是因為植物性有機肥中所含的

鹼性陽離子總量不如禽畜糞堆肥，加上分解後較易產生大量的酸性物質，相對地產生的氫離子會較多。有機質肥料分解所時產生的有機酸之中，檸檬酸對減輕鋁毒害最有效，其次為草酸和酒石酸，減輕鋁毒害有較好效果的還有蘋果酸、丙二酸和水楊酸，琥珀酸效果較差；而苯二酸、乙酸、甲酸和乳酸對根系並無保護作用。



以蘇木素染色，(a,b 圖) 鳳梨在含有 300 μM 的水耕液 (pH = 4.5) 中種植 Soft Touch 品種同樣會有鋁聚積現象。(c 圖) Soft Touch 品種鋁會強烈聚積於根尖 (1 mm)，促使形成胼胝質，開英種則較不明顯。ST：Soft Touch, C：開英種，(Le Van et al., 2004)