

鋁對鳳梨根生長及養分吸收的影響

林永鴻¹、陳仁炫²

摘 要

鋁具有生物毒性且常於強酸性土壤中因活性高而抑制作物根系生長。本研究目的乃模擬強酸性土壤中不同鋁濃度對開英種、台農 6 號、台農 13 號及台農 17 號鳳梨根生長及養分吸收的影響。分別將鳳梨栽植於 pH 4.5 含 0、100、200 及 300 μM AlCl_3 的水耕液中四週，測定四個品系的鳳梨於不同鋁濃度下之根的伸長度及根尖鋁聚積情形，並測定養分吸收及根尖分泌的有機酸種類與含量。結果顯示四個品系鳳梨在水耕液含 100 μM AlCl_3 的溶液中，根生長都有促進作用，但在水耕液含 200 μM AlCl_3 情況下，台農 6 號及台農 13 號鳳梨根生長受到抑制，而以台農 13 號較為顯著；在水耕液含 300 μM AlCl_3 情況下則台農 6 號及台農 13 號根部均顯著受到抑制。在水耕液中不含鋁時四個品系的根養分吸收程度差，除了開英種鳳梨養分吸收程度隨著水耕液中鋁濃度的提昇而增加之外，台農 6 號、台農 13 號及台農 17 號鳳梨在水耕液含 200 μM AlCl_3 時養分吸收即受到抑制，其中又以台農 13 號鳳梨較為顯著。當水耕液中 AlCl_3 濃度高達 300 μM 時，台農 6 號鳳梨明顯受到抑制，而台農 13 號鳳梨受到抑制更為嚴重。當水耕液中鋁的濃度增高時，開英種鳳梨根分泌的酒石酸及蘋果酸濃度會增高，而台農 13 號及台農 17 號鳳梨根分泌的蘋果酸濃度會降低，因此，是否此兩種有機酸的分泌與鋁形成螯合物而降低了鋁的毒害值得進一步探討。

關鍵詞：酸性土壤、鋁毒害、根的伸長、根分泌物

前 言

鋁於強酸性土壤(pH<5.5)中因具有毒性而限制了許多作物的生長，進而影響作物生產品質與產量。鋁於地殼中是含量最豐富的金屬，一般在土壤中係以不可溶的型態存在；然而，當土壤 pH 低於 5.0 時，鋁多以可溶性且具生物毒性的 Al^{+3} 型態存在，而抑制作物根的伸長及各種養分的吸收，因此，鋁毒害對農業生產的威脅誠需受到重視^(6,13)。最簡單辨認作物鋁毒害的症狀乃為根生長的抑制^(10,16)。除了根生長受到抑制外，另有研究證實許多作物因

¹ 高雄區農業改良場助理研究員

² 國立中興大學土壤環境科學系教授

受到鋁的毒害而導致生理病症之產生⁽⁹⁾，其徵狀類似營養的缺乏(諸如磷、鈣及鎂)⁽¹²⁾。已知鋁會對植物造成毒害，且許多阻抗機制被推測⁽¹⁷⁾，然而，究竟作物對鋁的阻抗是發生於細胞質內或質外仍未明^(4,6,14)。已有研究證實多種植物種類及生態型(ecotype)改變其能力來抵抗鋁毒害，雖然某些植物耐鋁基因型(genotype)之發展機制已是清楚的，惟耐鋁的細胞及分子背景依然未明。基本上，植物可能的耐鋁機制有(1)鋁被排除以防止進入根尖及根毛 (2) 忍受鋁毒害之機制(類原生質機制)⁽¹⁷⁾，鋁移入細胞及隔離於液泡中⁽¹³⁾。由於忍受機制無法完整解釋不耐鋁作物免除鋁毒害之原生質的功能，因此甚多研究已聚焦於鋁的排除機制之探討⁽¹³⁾。螯合物(ligand)的分泌並進入原生質或根圈中，已被證實為鋁毒害之關鍵阻抗機制之一^(8,15)，此乃因螯合物與鋁形成穩定複合物，因此，降低單體鋁的活性及抑制它通過質膜而被吸收的機會⁽¹⁷⁾；有些植物處於土壤溶液中鋁濃度過高時可能因根分泌之物質中缺乏某些有機酸或蛋白質，而在根部形成胼胝質(callose; 1,3-β-glucan)減輕鋁的毒害⁽¹¹⁾。於台灣，鳳梨(*Ananas comosus* (L.) Merrill)在鮮果消費市場及食品加工業是相當重要的水果，其廣泛栽種於強酸性土壤⁽¹⁾，然而，強酸性土壤中鋁毒害常為主要限制作物生產的因子⁽¹⁸⁾。因此，本研究將探討幾種重要鳳梨品系栽種於模擬土壤環境的強酸性水耕液中，不同鋁的濃度對其根生長及營養要素吸收的影響，並經由根尖有機酸的分泌探討鳳梨耐鋁的潛在機制。

材料與方法

一、試驗材料

開英種、台農 6 號、台農 13 號、台農 17 號，共四個品系鳳梨苗、圓形塑膠栽種盆(內徑 25 cm, 高度 30 cm)、馬達(Giant, JOP-005)、輸送軟管、曝氣石、水耕液之組成採用 Konishi(1985)之修正配方⁽⁷⁾(表 1)。

二、試驗方法

(一)栽種於含不同鋁濃度水耕液中之鳳梨根的生長

選取重量相近(81 ± 8 g)之四個品系鳳梨苗，將苗及根以去離子水清洗乾淨，於 2006 年 1 月 8 日將鳳梨苗種植於圓形塑膠盆，每盆栽植一株，每個品系各種植五盆，以水耕方式種植於高雄區農業改良場網室內。以 0.1 N HCl 調整水耕液 pH 至 4.5，且每週更換養液一次，每盆並以馬達將氣體帶動至輸送軟管及末端曝氣石使氣體均勻供應予根利用。為瞭解水耕液中真正危害根部之毒性鋁的濃度，預先將水耕液注入圓形塑膠栽種盆中，然後每盆分別含 100、200 及 300 μ M AlCl₃，在攪拌均勻後，測定水耕液中無機態單體鋁(Al⁺³)的濃度。待鳳梨的幼根長出後(2006 年 1 月 27 日)，每株選定五個健康的根

表 1. 水耕液中之養分組成

Table 1. The composition of nutrient solution used in the hydroponic solution.

Elements	Chemicals	Concentrations
NH ₄ -N	(NH ₄) ₂ SO ₄	1.10 mM
NO ₃ -N	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	0.35 mM
P	Na ₂ HPO ₄	1.0 mM
K	K ₂ SO ₄	0.51 mM
Ca	CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.35 mM
Mg	MgSO ₄ · 2H ₂ O	1.00 mM
Fe	Fe-EDTA	6.3 μM
B	H ₃ BO ₃	9.3 μM
Mn	MnSO ₄ · H ₂ O	18.0 μM
Zn	ZnSO ₄ · 5H ₂ O	1.5 μM
Cu	CuSO ₄ · 7H ₂ O	0.4 μM
Mo	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.5 μM

以塑膠繩輕輕綁住做為標記，先以塑膠尺(Digi Kanon,EMS-8)量測根的長度，接著以完全不添加氯化鋁(Al₀)、添加氯化鋁 100(Al₁)、200(Al₂)及 300(Al₃)μM 之水耕液進行栽種，每品系每處理各三重複，每盆栽種一株，並予以曝氣，四週後(2006 年 2 月 23 日)復以塑膠尺量測標記之健康根的長度，計算試驗前後根的伸長度，並採取根尖(1 cm)進行鋁含量分析。

(二)鳳梨栽種於含不同鋁濃度之水耕液中對植體營養及根部有機酸含量的影響

選取重量相近(78 ± 9 g)之每品系種苗各二十株，以自來水洗淨後，每品系於前述水耕液中預先種植三週，接著選取三株置入烘箱內(65°C)烘乾，秤量乾重，各品系之其餘十二株如試驗 1 的方式將鳳梨苗分別種植於不含鋁及含鋁(100、200、300 μM AlCl₃)的水耕液中，每處理為六重複。經過四週後，先將每株鳳梨自水耕液中取出，以自來水洗淨後置入烘箱內(65°C)烘乾，秤量乾物重，並進行全株植體營養分析，每品系並取三株測定根的有機酸含量。

三、分析項目及方法

(一)水耕液中毒性鋁(無機態單體鋁)濃度的測定

根據 Alminon 法⁽⁵⁾，在與 aluminon/acetate 緩衝液及 ascorbic acid 混合之後，AlCl₃ 溶液以 0.22 μm 濾膜過濾，混合物在 30 秒反應之後測定 530 nm 吸光值，使用 Al(NO₃)₃ 來配置標準液並製作標準曲線。

(二)植體營養要素分析

秤取植體樣品 0.2 克以硫酸分解後，測定各營養要素。氮以微量擴散法測定，磷以鉬黃法，鈣、鎂、鐵、錳、銅、鋅以原子吸收光譜儀(Shimatzu,AA

6601F)測定，鉀以火焰光度計(Corning,401)測定。

(三)有機酸的分析

依據梁(1996)的測定方法⁽³⁾，選取四個品系健康的根 15 克，以剪刀剪碎，加入 30 mL 沸騰的去離子水，以植體粉碎機打碎後，過濾至 100 mL 定容量瓶中，加去離子水至標線，接著以濾紙(Whatman No.42)過濾後，以高效液相層析儀(Shimatzu,LC10A)測定有機酸(草酸、檸檬酸、蘋果酸及酒石酸等)含量，測定方法如下，以 50 mM 過氯酸(Merck,70-72%)為流動相，流洗速率為 1.0 mL/min,以層析管柱(Shosex,KC-811)將草酸(oxalic acid)、檸檬酸(citric acid)、酒石酸(tartalic acid)、蘋果酸(malic acid)、琥珀酸(succinic acid)等有機酸分離，並以折射指數(refractive index)偵測器(Shimatzu RID-6A)測定各有機酸含量。

(四)統計分析

使用 SAS 統計數據並進行變異數分析，使用最小顯著差異及鄧肯氏試驗來區別處理間的差異，在 $P < 0.05$ 時視為顯著。

結果與討論

一、水耕液中毒性鋁(無機態單體鋁)的含量分析

為了探討鳳梨品系對於鋁濃度的耐受性，必須在加入 AlCl_3 於水耕液之後檢測對根產生生理毒害之單體鋁的濃度，因此，首先分析水耕液中單體鋁的濃度⁽⁵⁾。經以 Aluminon 法檢測添加 100、200 及 300 μM AlCl_3 之水耕液中的單體鋁濃度分別含有 38.9、65.5 及 80.8 μM (表 2)。

表 2. 利用 Aluminon 法測定水耕液中無機單體鋁的含量(μM)
Table 2. Inorganic monomeric aluminum concentration (μM) in the hydroponic solution estimated by aluminon method. (Data are means \pm s.e. , n = 5)

Added Al concentration ^a	Inorganic monmeric Al
0	0
100	38.9 \pm 1.56
200	65.5 \pm 1.35
300	80.8 \pm 1.29

^aAl as AlCl_3 was added to modified nutrient solution, and then the pH was adjusted to 4.5 before determination of inorganic monomeric Al according to the method of Kerven *et al.*(1989).

二、不同鋁濃度對鳳梨根生長及鋁聚積的影響

表 3 為試驗前及水耕液中不同鋁濃度處理四週後根的長度。四個品系的

鳳梨於水耕液中栽種四週後根有明顯伸長情形。圖 1 顯示，四個品系的鳳梨，在 100 μ M AlCl₃ 水耕液處理下，根的伸長度均較無鋁情況佳，但均未達顯著差異。各品系中以開英種的根伸長度較其他三品系根的伸長度大。此時四個品系的鳳梨根尖(1 cm)之鋁的聚積達 40-55 mg/kg FW (圖 1 下)，因此，在低濃度的鋁處理下，不但不會對四品系鳳梨的根造成毒害，且具刺激根生長的作用；當水耕液中 AlCl₃ 濃度提昇至 200 μ M 時，開英種的根仍有伸長情形，但此時其他三個品系的鳳梨根伸長度卻受抑制。以台農 13 號而言，其根伸長度顯著受到抑制，而台農 6 號及台農 17 號鳳梨根的生長只受到些微的抑制(圖 2 上)，此時四個品系鳳梨根尖(1 cm)對鋁的聚積高達 140-150 mg/kg FW(圖 2 下)；圖 3 顯示，當水耕液中 AlCl₃ 濃度高達 300 μ M 時，開英種的根仍然受到鋁的刺激而伸長，然而其他三個品系的根受鋁毒害情形較 200 μ M AlCl₃ 處理更為嚴重，此時台農 6 號及台農 13 號兩品系鳳梨的根之伸長度均顯著受到抑制，此時四個品系鳳梨根尖(1 cm)對鋁的聚積高達 200-250 mg/kg FW(圖 3 下)。

由此可知，開英種栽種於強酸性土壤中，當土壤溶液含高濃度的單體鋁(含無機單體鋁高達 80.8 μ M) 的情況下，對鋁的耐受性佳，根養分吸收應不致發生障礙；而當台農 6 號、台農 13 號及台農 17 號鳳梨栽植於土壤溶液中含無機單體鋁濃度高達 65.5 μ M 時，根生長即開始受到抑制，此時台農 13 號鳳梨即已顯著受到抑制，台農 17 號鳳梨在無機單體鋁濃度高達 80.8 μ M 時，根生長雖受到抑制但未達顯著水準，但此時台農 6 號及台農 13 號鳳梨根伸長度卻顯著受到抑制，對於養分的吸收可能產生嚴重的影響。

表 3. 不同濃度鋁處理前及四週後四個品系的鳳梨根長度測定

Table 3. The root length of four pineapple cultivars before experiment and after treating with treatments of different aluminum concentration for four weeks .

Cultivar	Before treatment (cm)	After four weeks (cm)			
		Al ₀	Al ₁	Al ₂	Al ₃
Cayenne	6.8	14.1	14.7	14.9	15.0
Tainung No.17	5.6	11.5	12.0	11.1	10.3
Tainung No.6	7.0	13.5	13.8	12.2	11.9
Tainung No.13	6.3	12.5	12.9	12.3	11.8

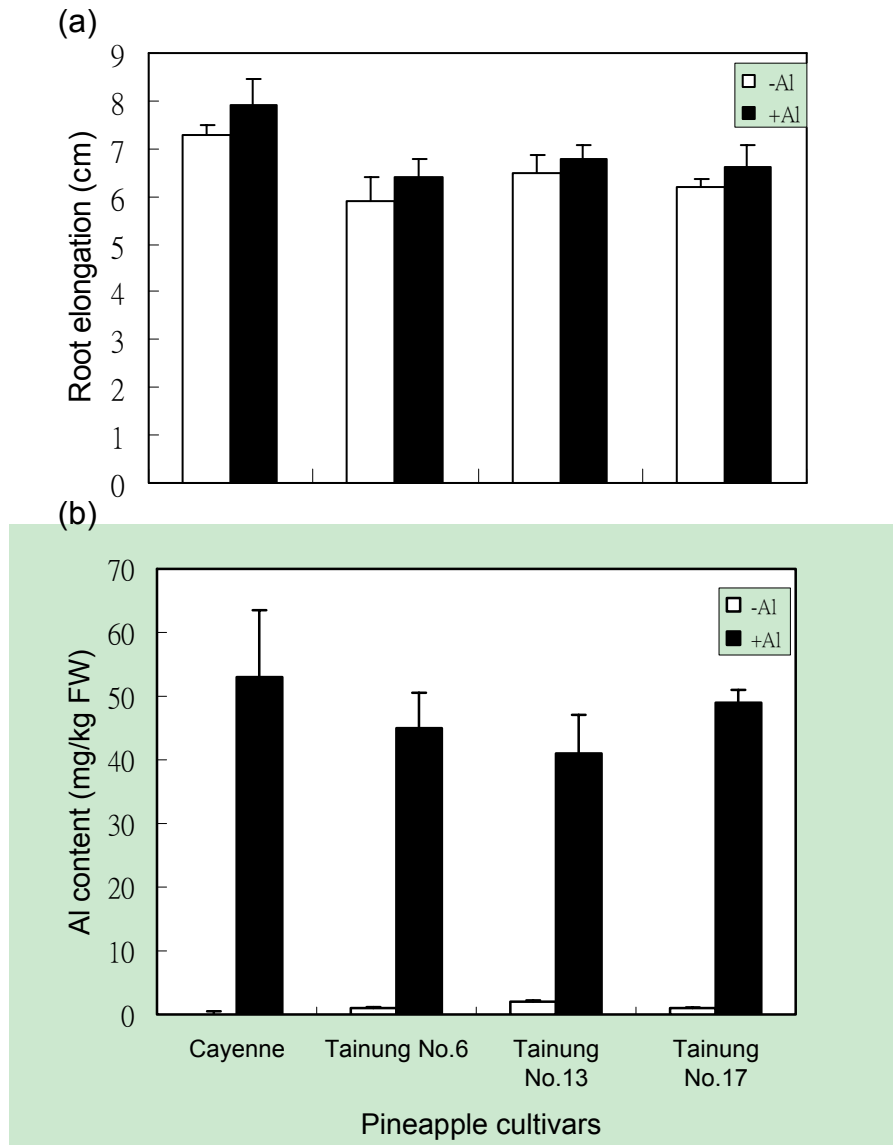


圖 1. 在含 0 及 100 μ M AlCl_3 養液中種植四週後四個鳳梨品系(a)根伸長情形及(b)1 cm 根尖鋁含量。

Fig 1. Effect of AlCl_3 concentration (0, 100 μ M) on (a) root elongation and (b) Al content in 1 cm root apices of four pineapple cultivars after planting in the hydroponic solution for four weeks.

* significant difference at P=0.05.

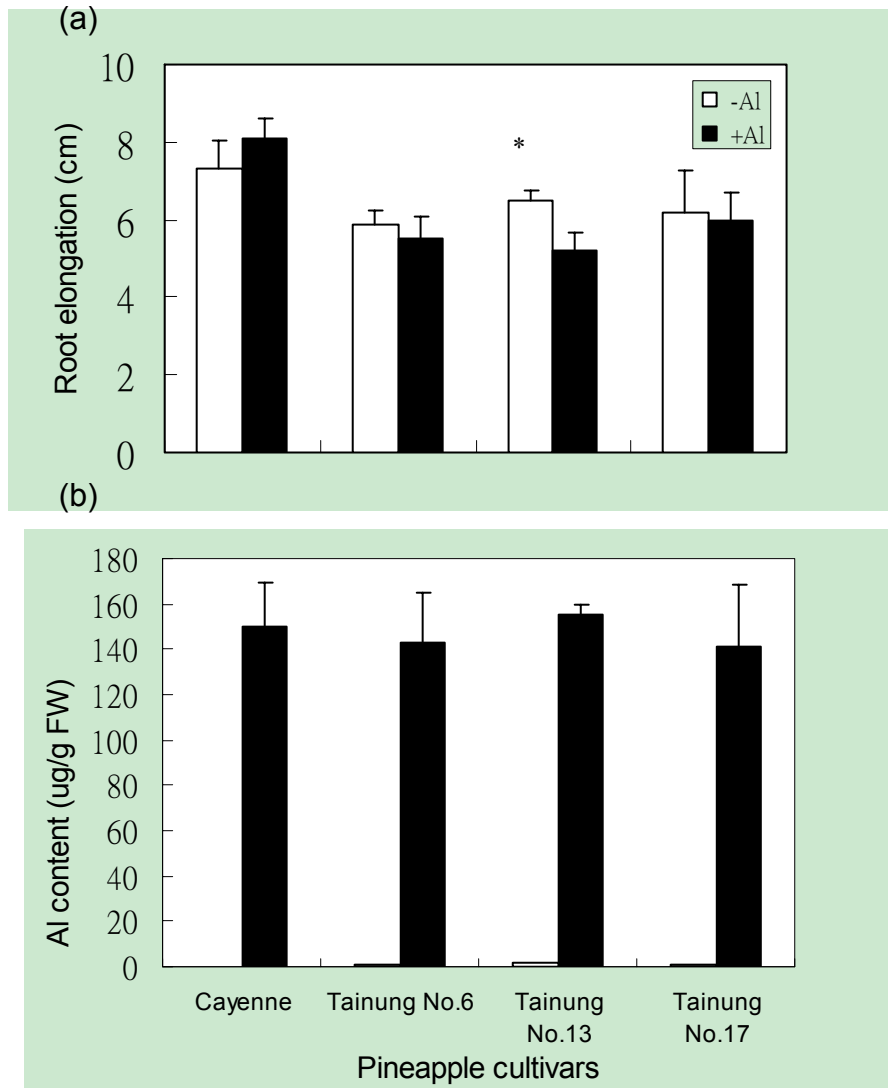


圖 2. 在含 0 及 200 μ M AlCl_3 養液中種植四週後四個鳳梨品系(a)根伸長情形及(b)1 cm 根尖鋁含量。

Fig 2. Effect of AlCl_3 concentration (0, 200 μ M) on (a) root elongation and (b) Al content in 1 cm root apices of four pineapple cultivars after planting in the hydroponic solution for four weeks.

* significant difference at P = 0.05.

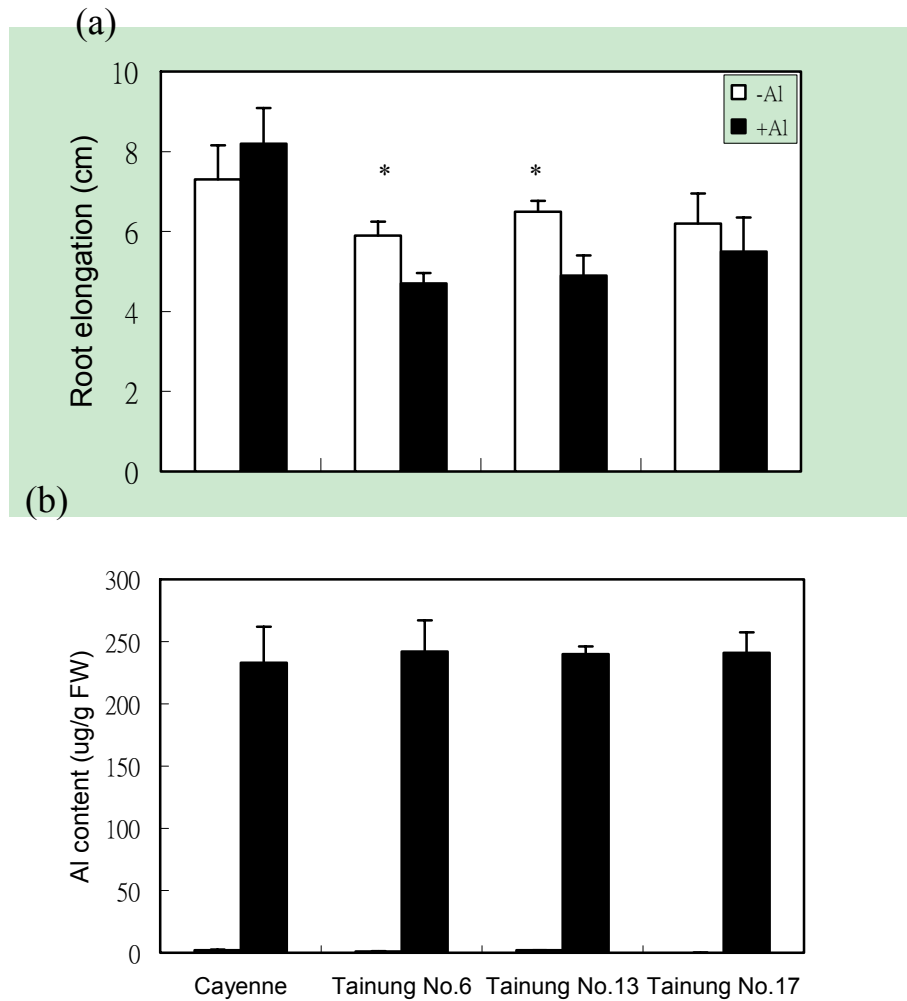


圖 3. 在含(0 及 300 μ M) $AlCl_3$ 養液中種植四週後四個鳳梨品系(a) 根伸長情形及(b)1 cm 根尖鋁含量。

Fig 3. Effect of $AlCl_3$ concentration (0, 300 μ M) on (a) root elongation and (b) Al content in 1 cm root apices of four pineapple cultivars after planting in the hydroponic solution for four weeks.

* significant difference at $P = 0.05$.

三、不同鋁濃度對鳳梨根部養分吸收及有機酸分泌的影響

鳳梨在含不同鋁濃度水耕液中栽種時，根的生長情形示於圖 4。由圖可知，開英種在水耕液中不含鋁情況下，根生長反而不良，可能因而影響養分吸收，使葉片黃化；然而，當水耕液中鋁濃度增高時，根的生長情形極為明

顯變佳，地上部葉片顏色呈現翠綠；台農 6 號及台農 13 號鳳梨在水耕液中含 200 μ M AlCl_3 時，根生長即受到抑制，尤其是台農 13 號鳳梨根受抑制情形最為顯著，而台農 6 號鳳梨在水耕液中含 300 μ M AlCl_3 時，根生長亦顯著受到抑制。由此可知，開英種根的耐鋁性較佳，甚至有需鋁之現象，台農 17 號鳳梨為中度耐鋁品系，而台農 6 號及台農 13 號鳳梨為不耐鋁的品系。

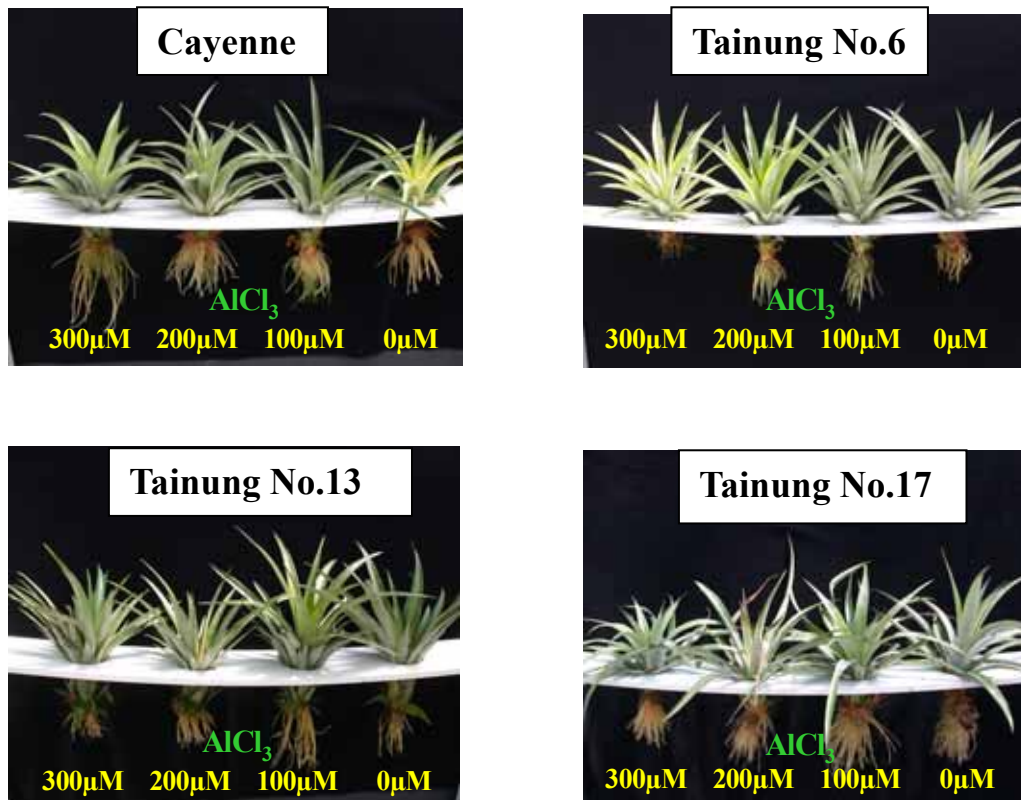


圖 4. 四個品系的鳳梨種植於含 0,100,200,300 μ M AlCl_3 的水耕液中四週後根部生長情形

Fig 4. The root growth of four pineapple cultivars in the hydroponic solution that contained 0, 100, 200 and 300 μ M AlCl_3 for four weeks.

表 4 為四個不同品系鳳梨耐鋁試驗前植體的營養要素濃度：氮濃度 14-16 g/kg，磷濃度 1.0-1.2 g/kg，鉀濃度 19-21 g/kg，鈣濃度 2182-2751 mg/kg，鎂濃度 1198-1687 mg/kg，錳濃度 110-158 mg/kg，鐵濃度 48.5-59.6 mg/kg，銅濃度 5.9-6.7 mg/kg，鋅濃度 27.6-31.3 mg/kg，硼濃度 6.7-7.5 mg/kg，各要素濃度均在充足範圍。在不同鋁濃度處理之水耕液中栽種四週後之營養要素變化列於表 5。各處理之要素濃度均較試驗前提昇，其中開英種植體之氮、

磷、鉀、鈣、鎂、鐵、銅、鋅濃度均以 300 μM AlCl_3 處理為最高；台農 17 號鳳梨大量元素及次量元素濃度均以 100 μM AlCl_3 處理為最高，微量元素除了鐵、錳在不含鋁情況較高外，銅、鋅、硼濃度均以 100 μM AlCl_3 處理為最高，各要素雖以 300 μM AlCl_3 處理為最低，但比不含鋁之處理高；台農 6 號鳳梨除了鐵、錳之外，均以 100 μM AlCl_3 處理為最高，且隨著鋁濃度增加有降低的趨勢，在 200 μM AlCl_3 處理比無鋁情況下營養要素濃度低；台農 13 號鳳梨除了氮及鉀外，各種要素在 100 μM AlCl_3 處理是最高的，在 200 μM AlCl_3 處理開始降低，且較無鋁處理低。表 6 顯示處理前及以不同鋁濃度水耕液栽種後植體乾物重變化情形，四週後乾物重明顯較試驗前提昇。表 7 顯示經栽種四週後各處理植體養分吸收量，開英種各營養要素吸收量有隨鋁濃度增加而提昇的趨勢，顯示隨著鋁濃度的增加有促進養分吸收的情形，當中鉀、鈣、鎂、鐵、鋅均較無鋁處理顯著較高，顯示適當濃度的鋁促進開英種鳳梨之養分吸收；台農 17 號鳳梨在水耕液中 AlCl_3 濃度達 200 μM 時，鈣、鎂吸收量驟減，鐵及銅則在水耕液中 AlCl_3 濃度達 300 μM 時吸收量驟減；台農 6 號鳳梨於水耕液中 AlCl_3 濃度 100 μM 時鎂的吸收量顯著降低，而水耕液中 AlCl_3 濃度達 200 μM 時鉀的吸收量驟降；至於台農 13 號鳳梨，水耕液中 AlCl_3 濃度達 200 μM 時，鉀、鈣、鎂、鐵、錳、銅的吸收量有顯著降低的情形。

將開英種、台農 17 號及台農 13 號三個品系的鳳梨在含鋁及不含鋁水耕液中栽種四週後根分泌的有機酸進行比較，三個品系鳳梨根部均會分泌出酒石酸、蘋果酸及琥珀酸三種有機酸，圖 5 顯示，開英種根分泌的酒石酸濃度隨著鋁濃度的增加而提昇，在 300 μM AlCl_3 處理顯著高於無鋁及 100 μM AlCl_3 處理，而蘋果酸則以 300 μM AlCl_3 處理顯著高於其他處理者，顯示隨著鋁濃度提高，蘋果酸有顯著提昇情形，至於琥珀酸濃度，各處理間則無顯著差異(表 8)；因此，在鳳梨的耐鋁機制中，酒石酸及蘋果酸可能扮演抑制鋁毒害的重要角色。鳳梨雖然適合種植於酸性土壤(pH 4.5-6.0)，但是當土壤因長年雨水沖刷及施肥等因素而過度酸化⁽¹⁾時，鋁的溶出便可能使根部受到毒害，因此，要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，然而石灰的需要量需經過評估並適量施用⁽²⁾；另外，應多施用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 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 對植物的毒性小，有機質肥料中以禽畜糞堆肥對於強酸性土壤 pH 值的提昇效果會比植物性的有機肥(大豆粕、蓖麻粕等)佳，這是因為植物性的有機肥中所含的鹼性陽離子總量不如禽畜糞堆肥多，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。

表 4. 四個品系的鳳梨試驗前植體營養要素濃度

Table 4. The nutrient concentrations of four pineapple cultivars before experiment.

Cultivar	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	B
	----- (g/kg) -----			----- (mg/kg) -----						
Cayenne	14	1.0	19	2343	1355	110	48.5	6.3	29.8	6.8
Tainung No.17	15	1.1	21	2751	1687	158	58.3	6.3	27.6	6.7
Tainung No.6	14	1.2	20	2287	1500	152	53.2	6.7	28.7	7.1
Tainung No.13	16	1.1	19	2182	1198	149	59.6	5.9	31.3	7.5

表 5. 四個品系的鳳梨種植於含 0、100、200 及 300 μ M AlCl₃ 的水耕液中四週後植體營養要素濃度

Table 5. The nutrient concentrations of four pineapple cultivars which planted in the hydroponic solution that contained 0, 100, 200, 300 μ M AlCl₃ for four weeks.

Cultivar	Treatment	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	B
		----- (g/kg) -----			----- (mg/kg) -----						
Cayenne	Al ₀ **	16 ^a	1.2 ^a	20 ^a	3365 ^a	1633 ^a	143 ^a	43.5 ^b	6.8 ^a	38.8 ^b	8.7 ^a
	Al ₁	16 ^a	1.0 ^a	23 ^a	3520 ^a	1690 ^a	166 ^a	58.5 ^b	7.0 ^a	46.3 ^{ab}	9.2 ^a
	Al ₂	17 ^a	1.0 ^a	25 ^a	3490 ^a	1790 ^a	181 ^a	75.0 ^a	6.3 ^a	56.5 ^a	8.2 ^a
	Al ₃	18 ^a	1.3 ^a	26 ^a	3580 ^a	1798 ^a	177 ^a	80.5 ^a	6.5 ^a	52.5 ^a	9.3 ^a
Tainung No.17	Al ₀	18 ^a	1.9 ^a	27 ^a	3080 ^b	1913 ^a	235 ^a	115.0 ^a	6.3 ^{ab}	33.8 ^b	12.0 ^a
	Al ₁	15 ^a	2.1 ^a	29 ^a	3758 ^a	1963 ^a	266 ^a	65.8 ^b	8.1 ^a	52.8 ^a	8.8 ^b
	Al ₂	17 ^a	1.8 ^a	29 ^a	2933 ^b	1533 ^b	233 ^a	93.8 ^a	5.0 ^b	41.5 ^{ab}	10.6 ^{ab}
	Al ₃	14 ^a	1.8 ^a	27 ^a	2618 ^b	1585 ^b	208 ^a	72.5 ^{ab}	5.5 ^b	54.0 ^a	10.8 ^{ab}
Tainung No.6	Al ₀	15 ^a	1.5 ^a	23 ^a	2593 ^{ab}	1575 ^a	220 ^b	73.3 ^a	7.3 ^a	39.8 ^a	14.1 ^a
	Al ₁	15 ^a	1.6 ^a	26 ^a	2873 ^a	1595 ^a	307 ^a	81.5 ^a	7.8 ^a	46.0 ^a	17.3 ^a
	Al ₂	14 ^a	1.5 ^a	22 ^a	2555 ^{ab}	1550 ^a	287 ^a	77.0 ^a	9.3 ^a	55.0 ^a	17.4 ^a
	Al ₃	14 ^a	1.4 ^a	20 ^a	2405 ^b	1459 ^a	238 ^b	71.8 ^a	7.4 ^a	41.3 ^a	15.0 ^a
Tainung No.13	Al ₀	17 ^a	1.1 ^a	19 ^a	2480 ^a	1455 ^{ab}	198 ^{ab}	83.5 ^{ab}	4.5 ^b	43.0 ^a	9.8 ^{ab}
	Al ₁	18 ^a	1.4 ^a	22 ^a	2685 ^a	1600 ^a	245 ^a	112.0 ^a	9.3 ^a	53.5 ^a	13.0 ^a
	Al ₂	17 ^a	1.3 ^a	22 ^a	2225 ^b	1348 ^b	164 ^b	65.9 ^b	5.2 ^b	46.1 ^a	9.6 ^{ab}
	Al ₃	17 ^a	1.3 ^a	20 ^a	2055 ^b	1314 ^b	152 ^b	61.0 ^b	4.3 ^b	42.1 ^a	7.1 ^b

Values within columns followed by the same letter are not significant at P<0.05 (Tukey test).

** Al₀, Al₁, Al₂ and Al₃ indicated that the concentration of AlCl₃ were 0, 100, 200 and 300 μ M in the hydroponic solution, respectively.

表 6. 不同濃度鋁處理前及四週後四個品系的鳳梨植體乾物重

Table 6. The plant dried weight of four pineapple cultivars before experiment and after the treatments of different aluminum concentration for four weeks.

Cultivar	Before treatment (g/ plant)	After four weeks (g/plant)			
		Al ₀	Al ₁	Al ₂	Al ₃
Cayenne	16.3 ± 3.2	23.8 ± 1.9	24.1 ± 0.8	24.7 ± 2.9	25.1 ± 3.4
Tainung No.17	17.2 ± 5.1	25.1 ± 3.0	24.3 ± 3.2	23.8 ± 1.7	23.2 ± 1.2
Tainung No.6	18.6 ± 4.6	24.3 ± 2.8	23.5 ± 4.0	23.1 ± 0.5	22.8 ± 2.5
Tainung No.13	14.8 ± 2.4	19.2 ± 1.1	19.7 ± 2.1	19.3 ± 1.2	20.0 ± 3.1

表 7. 不同濃度鋁處理四週後四個品系鳳梨植株養分之吸收量

Table 7. The amounts of nutrient uptake of four pineapple cultivars after treatment for four weeks.

Cultivar	Treatment	N P K			Ca Mg Mn Fe Cu Zn B						
		----- (g/plant)			----- (mg/plant)						
Cayenne	Al ₀	0.15 ^a	0.01 ^a	0.16 ^b	41.9 ^b	16.8 ^b	1.6 ^a	0.34 ^b	0.06 ^a	0.44 ^b	0.10 ^a
	Al ₁	0.13 ^a	0.01 ^a	0.19 ^b	37.5 ^b	11.7 ^b	1.3 ^a	0.41 ^b	0.06 ^a	0.64 ^{ab}	0.11 ^a
	Al ₂	0.16 ^a	0.01 ^a	0.25 ^{ab}	43.7 ^{ab}	16.3 ^b	1.6 ^a	0.86 ^{ab}	0.03 ^a	0.86 ^a	0.07 ^a
	Al ₃	0.22 ^a	0.02 ^a	0.37 ^a	57.6 ^a	27.4 ^a	2.2 ^a	1.14 ^a	0.08 ^a	0.85 ^a	0.12 ^a
Tainung No.17	Al ₀	0.22 ^a	0.03 ^a	0.37 ^a	39.1 ^a	25.9 ^a	4.1 ^a	2.10 ^a	0.05 ^{ab}	0.36 ^b	0.19 ^a
	Al ₁	0.11 ^a	0.03 ^a	0.34 ^a	44.0 ^a	18.7 ^a	3.7 ^a	1.66 ^a	0.09 ^a	0.81 ^a	0.10 ^a
	Al ₂	0.14 ^a	0.02 ^a	0.32 ^a	27.3 ^b	8.6 ^b	2.7 ^a	1.24 ^{ab}	0.06 ^{ab}	0.45 ^{ab}	0.12 ^a
	Al ₃	0.09 ^a	0.03 ^a	0.35 ^a	28.4 ^b	9.0 ^b	2.6 ^a	0.80 ^b	0.04 ^b	0.79 ^a	0.14 ^a
Tainung No.6	Al ₀	0.14 ^a	0.02 ^a	0.25 ^a	24.9 ^a	16.2 ^a	3.6 ^a	0.99 ^a	0.07 ^a	0.48 ^a	0.23 ^a
	Al ₁	0.09 ^a	0.02 ^a	0.25 ^a	20.2 ^a	8.5 ^b	4.5 ^a	0.91 ^a	0.07 ^a	0.61 ^a	0.29 ^a
	Al ₂	0.06 ^a	0.01 ^a	0.14 ^b	16.5 ^a	7.9 ^b	3.8 ^a	0.79 ^a	0.09 ^a	0.74 ^a	0.27 ^a
	Al ₃	0.08 ^a	0.02 ^a	0.16 ^b	22.5 ^a	7.7 ^b	3.2 ^a	0.75 ^a	0.08 ^a	0.48 ^a	0.23 ^a
Tainung No.13	Al ₀	0.10 ^a	0.01 ^a	0.06 ^b	9.4 ^a	5.8 ^a	2.0 ^a	0.81 ^a	0.01 ^b	0.34 ^a	0.08 ^a
	Al ₁	0.10 ^a	0.01 ^a	0.12 ^a	5.6 ^a	2.5 ^b	2.1 ^a	1.20 ^a	0.07 ^a	0.58 ^a	0.14 ^a
	Al ₂	0.07 ^a	0.01 ^a	0.05 ^b	0.4 ^b	0.4 ^b	0.3 ^c	0.28 ^b	0.02 ^b	0.36 ^a	0.05 ^a
	Al ₃	0.10 ^a	0.01 ^a	0.07 ^{ab}	8.8 ^a	0.5 ^b	0.8 ^b	0.34 ^b	0 ^b	0.38 ^a	0.03 ^a

Values within columns followed by the same letter are not significant at P<0.05 (Tukey test).

**Al₀, Al₁, Al₂, Al₃ indicated that the concentration of AlCl₃ were 0,100,200 and 300μM in the hydroponic solution.

表 8. 不同濃度鋁處理四週後開英種鳳梨根部有機酸含量

Table 8. The concentration of organic acids in the root of pineapple (Cayenne) after treatment for four weeks.

Cultivar	AlCl ₃ (μ M)	Tartaric acid	Malic acid	Succinic acid
		------(mg/kg)-----		
Cayenne	0	17.0 ^{b*}	3.1 ^c	11.0 ^a
	100	17.2 ^b	6.6 ^b	12.5 ^a
	200	19.7 ^{ab}	10.5 ^a	11.6 ^a
	300	21.4 ^a	14.0 ^a	10.8 ^a

Values within columns followed by the same letter are not significant at $P < 0.05$ (Tukey test).

結 論

鳳梨生長在高鋁濃度的環境，不同品系的根會有不同反應，而且鋁的濃度會響不同品系鳳梨的養分吸收；鳳梨的耐鋁除了與有機酸的分泌有關外，或許尚有其他未知的因素，爾後將進一步探討其他機制，以加強對不同品系鳳梨園土壤管理的改進，如此應對鳳梨果實品質與產量的提昇有所助益。

參考文獻

1. 林永鴻、許正一. 2003. 氮、鉀肥施用量對台農十三號鳳梨園土壤化學性質、果實品質與產量的影響. 6:237-244.
2. 陳仁炫、徐仕林. 1994. 強酸性土壤石灰需要量七種測定方法之評估. 中國農業化學會誌. 32:61-74.
3. 梁致遠、顏江河、林鴻淇. 1996. 茶樹免除鋁的營養生理障礙之研究. 中國農業化學會誌. 34:61-69.
4. Delhaize, E., P. R. Ryan. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. Plant Physiol. 107:315-321.
5. Kerven, G. L., D. G. Edwards, C. J. Asher, P. S. Hallman and S. Kokot. 1989. Aluminum determination in soil solution. II. Short-term colorimetric procedures for the measurement of inorganic monomeric aluminum in the presence of organic acid ligands. Aust. J. Soil Res. 27:91-102.
6. Kochian, L. V. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molecular Biol. 46:237-260.
7. Konish, S., S. Miyamoto and T. Taki. 1985. Stimulatory effect of

- aluminum on tea plants grown under low and high phosphorus supply. *Soil Sci. Plant Nutr.* 31:361-368.
8. Larsen, P. B., J. Degenhardt, C. Y. Tai, L. M. Stenzler, S. H. Howell and L.V. Kochain. 1998. Aluminum-resistant arabidopsis mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. *Plant Physiol.* 117:9-18.
 9. Larsen, P. B., L. V. Kochain and S. H. Howell. 1997. Al inhibits both shoot development and root growth in als3, an Al-sensitive arabidopsis mutant. *Plant Physiol.* 114:1207-1214.
 10. Le Van, H., S. Kuraishi and N. Sakurai. 1994. Aluminum-induced rapid root inhibition and changes in cell-wall components of squash seedlings. *Plant Physiol.* 106:971-976.
 11. Le Van, H., T. Masuda. 2004. Physiology and biological studies on aluminum tolerance in pineapple. *Aust. J. Soil Res.* 42:699-707.
 12. Lopez-Bucio, J., M. F. Nieto-Jacobo., V. Ramirez-Rodriquez and L.Herrera- Estrella. 2000. Organic acid metabolism in plants:from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Sci.* 160:1-13.
 13. Matsumoto, H. 2000. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *Internal. Rev. Cytol.* 200:1-46.
 14. Rengel, Z. 1996. Uptake of aluminum by plant cells. *New phytol.*134: 389-406.
 15. Ryan, P. R., E. Delhaize., D. L. Jones. 2001. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molucular Biol.* 52:527-560.
 16. Ryan, P. R., J. M. Ditomoso. and L. V. Kochian. 1993. Aluminum toxicity in roots. An investigation of special sensitivity and the role of the root cap. *J. Exp. Bot.* 44:437-446.
 17. Taylor, G. J. 1991. Current views of the aluminum stress response: The physiological basis of tolerance. In "Current topics in plant biochemistry. Vol.10.
 18. Von Uexkull, H., R. E. Mutert. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant Soil.* 171:1-15.

Effect of Aluminum on Root Growth and Nutrient uptake of Pineapple

Yong-Hong Lin¹ and Jen-Hshuan Chen²

Abstract

Aluminum usually has phytotoxicity and inhibits the root growth in the strongly acidic soils. The purposes of this study were to simulate the influence of aluminum content in hydroponic culture on root growth and nutrient uptake of four cultivars of pineapple (Cayenne, Tainung No.6, Tainung No.13 and Tainung No.17). The pineapples had been planted in the pH 4.5 hydroponic solution containing 0, 100, 200 and 300 μM AlCl_3 , respectively, for four weeks. The root elongation, the content of aluminum accumulation on the root tip, nutrient uptake and the kinds and amount of organic acids in root secretion were determined. The results showed that the root elongation of the four cultivars was improved when they were grown in the solution of 100 μM AlCl_3 , however, the inhibition of root elongation was found for Tainung No.6 and Tainung No.13 as they were planted in the solution containing 200 and 300 μM AlCl_3 , especially for Tainung No.13 cultivar. The nutrition uptake was less inhibited when they were planted in the Al free solution, and uptake increased with the increase of Al concentration for Cayenne cultivar, but inhibited when the Al concentration was 200 μM for other three cultivars, especially for Tainung No. 13. In addition, the nutrient uptake of Tainung No.6 and Tainung No.13 cultivars were significantly inhibited when they grew in the solution containing 300 μM AlCl_3 , and more seriously inhibited was found for Tainung No. 13 cultivar. Results also showed that the contents of tartaric and malic acid in the root secretion increased with increasing Al concentration, however, the content of malic acid was decreased in the root secretion as Al addition increased, therefore, it need to be investigated if the reduction of Al toxicity is related to the chelation of Al with these two organic acids secreted from pipeapple root.

key words: Acid soils, Al toxicity, root elongation, root exudates.

¹Assistant Researcher, Kaohsiung District Agricultural Research and Extension Station.

²Professor, Department of Soil Environmental Science, National Chung Hsing University.