

微生物肥料

菌根菌應用於 經濟果樹之栽培

撰文/王均珮

一、前言

台灣位於熱帶與亞熱帶地區，終年燦爛的陽光，合宜的溫度與最先進的農業栽培技術，造就台灣成為「水果王國」，一年四季都有時令水果生產，種類繁多且多樣化，例如葡萄、香蕉、西瓜、荔枝、鳳梨、芒果、柑橘、草莓、蓮霧、釋迦、番石榴、印度棗、楊桃等，各種水果已發展成為地方特產，繁榮農村經濟。但由於經濟與社會環境的演變，國人生活水準向上提升，除了美味可口之外，在講求自然健康及衛生安全的前提下，健康安全蔬果的生產，便成為符合大眾生活需要的新興產業。然而化學合成肥料之施用與生產，常造成環境污染與耗用不可再生性能源，其生產成本更是因石油價格飆漲而節節升高，在環保意識高漲及能源危機之警訊中，如何利用低環境污染與節省能源之肥料，是農業生產上之重要課題。目前，生物性肥料之開發與應用，已被各國政府與農業專家列為重要之發展計畫。

所謂生物肥料因為常以微生物為資材，又稱微生物肥料。係指經過培養含活性微生物體，如細菌、藻類、真菌等，及包含其休眠孢子之微生物活體以及其代謝產物之特定製劑，施用在種子、幼苗、土壤或分解物上，可增加土壤中的營養元素，或營養元素有效性功效的接種物。這些

自然存在於土壤中能開發成微生物肥料之微生物種類很多，例如能固定空氣中氮素增加土壤肥力之「固氮菌」、能分解有機磷或溶解無機磷之「溶磷菌」、能與植物根部共生幫助植物吸收水分及礦物營養如磷肥的「菌根真菌」，簡稱「菌根菌」等。將這些原已存在於自然界中之微生物資源，經研究試驗後將它們大量培養並回施應用於農作物生產，可以在減少施用化學肥料的情況下，仍維持甚或促進作物的生長與產量。其中菌根菌在地球上之養分循環、土壤穩定與植物健康均扮演著重要的角色，被中外學者認為是非常具有開發潛力之「微生物肥料」。

二、菌根菌簡介

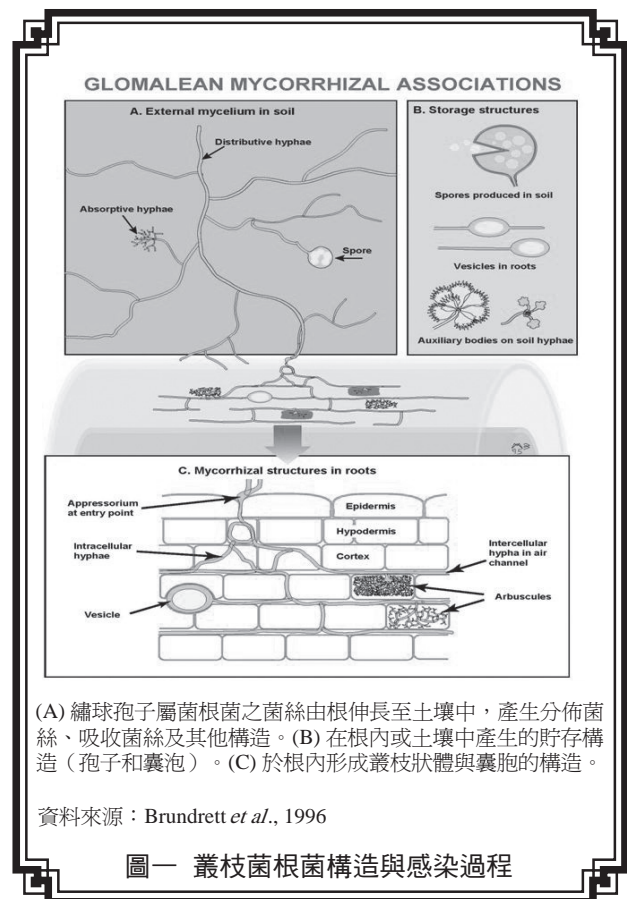
(一) 形態構造與分類

菌根菌是普遍存在於土壤中的有益真菌，當其感染並進入植物根內共同生長，成為互利共生之結合體，該結合體稱為菌根。早在數千萬年前炭武紀時代的古蕨類化石，即已發現菌根之存在，經過長期共同演化，現今地球上約 24 萬種植物能與菌根菌共生，顯花植物佔 83% 以上，其他尚包括苔蘚植物、蕨類植物、裸子植物到被子植物。分佈之地區從極冷之南北極至熱帶赤道，從深谷、平原乃至高山上，從一般陸生植物、耐鹼

植物、耐酸植物、水生植物到旱生植物，都有它與植物共生之芳蹤，可見其分佈之普遍性。

菌根由其形態、構造與解剖上之不同，可分為外生菌根(ectomycorrhizas)、內生菌根(endomycorrhizas)與外內生菌根(ectendomycorrhizas)三大類。其中內生菌根菌依其菌絲有無隔膜及囊胞、叢枝狀體等構造以及宿主種類，又分為叢枝菌根菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)、蘭科菌根菌(orchidaceous mycorrhizal fungi)、水晶蘭科(monotropaceae)菌根菌、楊梅類(arbutoid)菌根菌與杜鵑類(ericoid)菌根菌，其中又以叢枝菌根菌對農作物之生長最具促進效益與應用價值，可開發為微生物肥料推廣應用於農業。內生菌根菌其菌絲能夠穿越宿主根部皮層細胞壁，但並不會穿越細胞膜進至原生質內。以叢枝菌根為例，菌絲穿越皮層細胞壁後，會不斷兩叉分枝，此時宿主細胞原生質膜也不斷隨著菌絲之發展而向原生質內退縮，菌絲越分越細最後如一叢樹枝狀，稱為叢枝狀體(arbuscule)。每一纖細菌絲外都包圍著宿主細胞之原生質膜，擴大了菌根菌與宿主間之交界面，此處是它們交換養分之處所。皮層細胞間蔓延之菌絲或根外菌絲，其中段或末端有時膨漲成囊狀，稱為囊胞(vesicles)，內貯藏有大量油滴等養分，是為貯藏器官。當繡球孢子屬菌根菌之囊狀體貯積愈多營養，形狀愈趨圓形且囊胞壁愈厚，將轉變成大型無性之厚壁孢子(clamydospore)，有的種類孢子較小，直徑20-50 μm ，有的種類孢子較大，直徑約20-1000 μm ，是為繁殖器官。由根內向土壤中伸長蔓延之根外菌絲，有些可長至數公分，其末端常反覆分枝成非常纖細之吸收菌絲(absorptive hyphae)，其主要功能在吸收土中營養；而較粗之菌絲稱為分佈菌絲(distributive hyphae)，其主要功能在連繫根、孢子與吸收菌絲。叢枝菌根菌屬於真菌界接合菌綱中之繡球菌目Glomales，目前

非化石之叢枝菌根菌有七屬，分別為繡球孢子屬(Glomus)、無柄孢子屬(Acaulospora)、大孢子屬(Gigaspora)、內柄孢子屬(Entrophospora)、硬囊實果屬(Sclerocystis)、盾蓋孢子屬(Scutellospora)及翠皮氏屬(Jimtrappea)，總計一百四十餘種。其中農業生產常應用者為繡球孢子屬、無柄孢子屬與大孢子屬。



(二) 菌根菌對作物生長之效益

1. 幫助植物吸收水分與礦物營養並增強耐旱能力

由於菌根菌之菌絲除了在根內蔓延，亦靠分佈菌絲延伸入土壤中8公分甚或更遠，其菌絲末端之吸收菌絲就如同根毛般在土壤中吸收營養，能增加宿主根部有效吸收表面積約60倍，幫助植株吸收水分與礦物營養，如氮、磷、鉀、鈣、

硫、鎂、鋅、銅與鋁等。由於磷、鋅與銅在土壤中擴散性低，且磷在較酸性或偏鹼性之土壤中，常與鋁、鐵或鈣結合成不溶性之化合物，植物不易吸收。故一般植物之根表面土壤營養多被吸收殆盡，此區域稱為營養耗盡區（nutrient depletion zone），植物難再於此區吸收養分，必須由根尖繼續生長至新的區域，方能吸收營養；而菌根植物因為延伸之根外菌絲，可廣增吸收養分之領域，故大幅增加水分與養分之吸收，尤其是對磷肥之吸收，可增加 60 倍不易移動元素之吸收。菌根亦分泌外酵素（exo-enzyme）分解有機質，增加土壤養分之有效性。例如分解經 ^{32}P 放射線標定之落葉，將 ^{32}P 迅速由葉片經菌絲傳送至宿主植物。菌絲吸收得到之水或養分，亦延著分佈菌絲運送回根內，進入叢枝體，在此處與宿主細胞進行養分交換，叢枝體將菌本身用不完的水與養分送出至菌絲外，再由宿主細胞膜主動或被動吸收；而宿主植物葉片光合作用產物經篩管運送至根部，於皮層細胞具叢枝體處主動排出或滲漏至膜外之中間界面，再由叢枝體吸收作為菌根菌之碳素營養來源。因此菌根菌與作物間營互利共生，能幫助植物耐乾旱逆境，並促進生長及產量。

2. 幫助植物增加抗病能力

菌根植物較耐病害，其耐病的生理機制是由於可增進植物對磷肥之吸收，產生酵素、生長素、細胞分裂素和維生素等，促進根系生長，增加宿主植物對病害之承受力。其原因亦可由物理、化學與生物三個觀點來討論，以物理性而言，菌根菌絲生長蔓延於根內細胞、細胞間隙及根外，對於外來線蟲或病原菌而言，是很好之屏障。菌根一般較非菌根木質化，尤其中柱組織更明顯，可將病菌限制於皮層組織。故有報導指出，菌根可阻止 *Fusarium oxysporum* 侵害番茄維管束。以化學性觀點而言，菌根之細胞常受菌根菌影響產生或分泌某些化學物質如精氨酸，該類物質如同植物殺菌素，可減少 *Thielaviopsis*

basicola 厚膜孢子（chlamydospore）之產生，幫助植物抵禦外來病原。叢枝菌根改變根圈分泌物之種類及量，使菌根對病原菌的吸引力減小，玉米與菊花植株菌根化後，根圈濾液會減少根寄生菌 *Phytophthora cinnamoni* 之孢子囊及游走孢子的產生。菌根宿主細胞產生能分解幾丁質的活性物質，除分解叢枝體外，亦可抑制病原真菌。大豆接種叢枝菌根菌，能增加液胞及細胞中之過氧化酶（peroxidase）及組織中植物殺菌素（phytoalexins）之含量。菌根中含多量兒茶酚，可於生物體外實驗中抑制病菌 *Sclerotium rofsii* 之生長。Gianinazzi-Pearson 亦利用細胞免疫化學技術發現含有叢枝體之細胞內有特殊蛋白質，顯示宿主根部被菌根菌感染後，某些增加宿主抵抗力的機制被活化。若以生物性觀點言之，菌根分泌物常誘引根域放線菌棲群之增加，而這些放線菌常為病害之拮抗菌，因而菌根作物對線蟲或根部病害之耐力一般較高。但亦有相反之例子，如大豆菌根產生囊胞，當突破根表面造成傷口時，常增加土壤內病原菌 *Phytophthora* spp. 引起之根部病害。

3. 減輕重金屬之毒害作用

雖然菌根菌有繁茂之根內與根外菌絲，幫助植物吸收礦物營養，然國內外許多研究報導菌根較非菌根吸收較少之重金屬，所以菌根可幫助植物渡過重金屬污染之逆境。叢枝菌根真菌在菌絲內可能有結合重金屬之位點，使重金屬積聚於真菌中。真菌細胞壁分泌的黏液和真菌組織中之聚磷酸與有機酸等，均能結合過量的重金屬元素，減少其向地上部之轉移而達到解毒作用。此外接種叢枝菌根菌後，植物的 Mn 害可明顯得到緩解，植物體內 Mn 的含量顯著降低。其原因是叢枝菌根的形成改變了宿主根系分泌物的數量和組成，進而影響到 Mn 氧化和 Mn 還原細菌的群落組成。

4. 增加植物對鹽分逆境之適應力

許多報告指出菌根植物耐鹽分逆境，因為叢枝菌根菌可促進礦物營養之吸收，增加宿主體內

K^+/Na^+ 比例，可補償鹽分地植株吸收過量 Na^+ 而導致之害。因為過量的 Na^+ 會干擾 Ca^{++} 與 Mg^{++} 之吸收，而過量的 Cl^- 會干擾 NO_3^- 與 PO_4^{3-} 之吸收。

(三) 菌根菌在經濟果樹推廣應用情形

1. 木瓜

木瓜為需用大量磷肥之短期果樹，農民栽種期間，施用之大量化學肥料常易流失，其中磷肥更易被土壤固定，植株無法吸收利用。目前木瓜育苗場多採用穴盤培育種苗，農民可將菌根菌接種源混拌入介質中再行播種，手續簡便。於育苗期中，菌根菌感染幼苗根系，並於根內纏化 (colonization) 形成菌根，其根外菌絲延伸至介質中，可幫助幼苗吸收水分及養分，促進幼苗生長。於穴格中根外菌絲再度感染根系之機會增加，菌根形成率因此可大幅提升。此穴盤育苗接種方式，較之田間接種菌根菌，可提高種苗品質，節省接種源用量，過程簡便，效果良好，並且省工省時，種苗移植本田後不須再行接種菌根菌，極適合應用於木瓜種苗產業。歸納木瓜育苗時接種菌根菌的效益如下：

- (1) 提升種苗品質：木瓜種子於穴盤育苗時，經接菌之木瓜苗感染率為53%，其株高、莖徑、葉片數、地上部鮮重、根鮮重、葉面積皆比未接菌者為優。
- (2) 提高幼苗移植存活率：接種菌根菌之木瓜苗，由於生長發育較健壯，定植於田間存活率達92%，比未接種者85%高，其株高與莖徑也顯著高於未接種者。
- (3) 提早開花及結果：由於接種菌根菌之木瓜植株能夠促進根群發育，增加根部對磷肥等要素之吸收能力，促進植株的生長發育，能夠提早或增加開花數約15~20%，因此木瓜果實之產量因而增加。
- (4) 減少肥料用量：接種菌根菌之木瓜只須施用農民一般慣用施肥之半量，即可獲得較不接菌施全量追肥組之更佳產量。

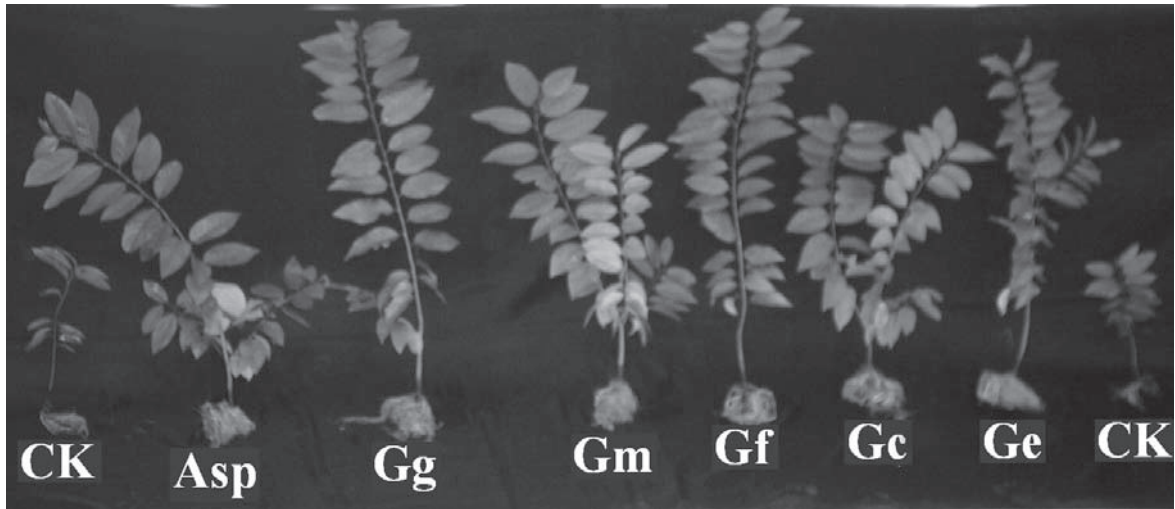
- (5) 節省成本：根據經驗，木瓜定植後大部分均需補植1~2次，浪費不少時間及勞力，亦造成管理上之不便。而木瓜在簡易溫網室內接種菌根菌育苗，根群發育旺盛，苗株生長健壯，移植田間時可提高成活率，減少補植之困擾，每公頃可節省幼苗成本及移植工資新台幣2,479元，更減少補植所造成之植株生長速度不一管理上之不便等困擾，總計每公頃可增加收益至少新台幣5萬元。

2. 釋迦

釋迦是台灣的重要經濟果樹，被視為在加入世界貿易組織後，仍具有競爭力的產業。其產地多集中在台東地區，由於颱風與病害頻繁，每年更新種苗需求量高達二十餘萬苗，使得種苗與補植費用佔栽培成本之比例增高。如能供應果農健壯的種苗，應可降低植株死亡率及栽培成本。本研究室於釋迦之種子播種或幼苗移植時接種叢枝內生菌根菌，發現接菌組之幼苗，其生長狀況，如株高、莖寬、葉片數顯著優於未接菌組（圖二）。本研究室推廣叢枝菌根菌給台東地區農民培育釋迦菌根苗，農民發現植株根群健壯，移植存活率提昇，對逆境之耐力也增加。Azcon-Aguilar (1996) 將 *Glomus* 屬菌根菌接種於釋迦組培苗，也發現能促進幼苗株高、鮮重、葉片數與根長。

3. 番石榴

番石榴原產於中南美洲，本省於二百多年前引進栽培，由於植株適應性強，生長迅速又可長年結果，因此頗受國人喜愛。94年度番石榴納入台灣優質供果園輔導項目之一。本研究室將菌根菌接種於番石榴實生苗，發現兩者間親和性佳，菌根形成率高。幼苗栽植 19 週後，接菌處理組植株生育明顯優於未接菌處理組。在不接菌處理組施用全強度霍格蘭營養液者 (H)，植株生育優於施用半強度營養液 (1/2H) 者。而在接菌處理組無論施用 1/2H 或 H 營養液，植株生育情況無明顯的差異，且植株生育的表現如株高及莖寬，皆優於



圖二 釋迦於播種時接種 *Acaulospora* sp. (Asp)、*Gigaspora* sp. (Gg)、*Glomus mosseae* (Gm)、*G. fasciculatum* (Gf)、*G. clarum* (Gc) 及 *G. etunicatum* (Ge) 九個月後植株生育情形

不接菌施用全強度或半強度營養液組，接種菌根者葉片磷含量均較高。顯見番石榴植株接種菌根菌可幫助吸收礦物營養，在施肥上可節省化學肥料之施用量，取代部分化學肥料。

4. 印度棗

印度棗 (*Zizyphus mauritiana* Lam) 屬於鼠李科 (Rhamnaceae) 棗屬 (*Zizyphus*) 植物。在日據時期台灣即有栽培。經過多年品種選育及栽培技術改進，現已成為台灣南部重要特產。由於長期過度使用化學農藥及肥料等，致土壤理化性質劣化，鹽類的大量累積造成土壤酸化，影響根群的生長。本研究室將叢枝菌根菌接種於印度 (蜜棗) 棗嫁接苗，在栽培 45 天後接種菌根菌處理之菌根感染率約 81~90%，顯示印度棗嫁接苗與六種菌根菌親合性很高。在植株生育表現，有接種菌根菌處理者無論株高、莖寬均優於未接菌對照組，有接種者苗株生長良好，移植存活力提昇。

5. 咖啡

咖啡屬茜草科的常綠喬木，原產於熱帶非洲阿比西尼亞，現在熱帶各地區均有生產。目前的

生產國約有六十餘國，大多是位於南北回歸線間的環狀地帶，稱之為咖啡帶 (Coffee zone 或 Coffee belt)，其適合栽培地點在海拔 300-400 公尺地區，有時也有在海拔 2000-2500 公尺的高地栽培咖啡樹。而台灣正位於前述之咖啡帶，自是適合栽培咖啡樹。在巴西與歐美有研究學者指出，將菌根菌分別接種於咖啡組培苗或種子，發現可促進植株生育、果實增產與節省磷肥之效益。本研究室將叢枝菌根菌接種於咖啡實生苗，於接菌 77 天後以 Gg、Gf 及 Gm 之菌根形成率較高，約為 50%。接種菌根菌植株之株高及莖寬表現皆優於未接菌組，其中接種 Ge、Gm、Gf 及 Gg 表現較佳。將盆栽幼苗接種六種菌根菌，接菌處理者無論施用全強度或半強度肥料量，生育表現皆優於未接菌處理者，顯示接種菌根菌可幫助咖啡植株吸收礦物營養，具節省肥料施用之功效。

6. 柑橘

台灣大學張喜寧教授將柑橘幼苗接種菌根菌，發現 5 種柑橘及根砧接組植株之總乾重均優於未接菌組 (表一)。

表一 五種柑橘或根砧受*Glomus* spp.感染後之相對菌根之依賴度

柑橘及根砧	總乾重 (g)		依賴度%
	菌根	非菌根	
廣東檸檬	4.25	2.83	150
史溫格枳柚	4.11	2.69	153
枳殼	1.71	1.84	95
雜交文旦	8.27	4.51	183
柳橙	4.09	1.67	245

依賴度：(菌根植株總乾重/非菌根植株總乾重) × 100

資料來源：張, 1992

7. 酪梨

在西班牙 Vidal 等發現酪梨之組織培養苗初種植時生長緩慢，可能因為沒有菌根菌共生之緣故，當接種菌根菌 *G. fasciculatum* 後，根系發育健壯，植體內 N、P、K 含量增加，移植存活率由 25% 提昇至 73%，未接菌組植株乾重 1.7g，接菌組表現 8.2g。

8. 葡萄

Singh 等用 5 種菌根菌 *Glomus mosseae*、*G. manihotis*、*G. deserticola*、*Gigaspora gigantia* 與 *Acaulospora laevis*，接種於葡萄組培苗，發現可促進幼苗營養生長、植株乾重、葉面積、葉綠素含量、光合作用率提升 2 倍，葉片內 P、Mg、Zn、Mn 含量增加。雖然有的植株菌根菌感染率不高，但能降低其他根部病原菌的侵害，而大幅提升幼苗之移植存活率。其他甜桃 (*Juglans regia* L)，西番蓮、桃，均有很好的結果。

(四) 作物接種菌根菌時應注意事項

1. 接菌初期 (三星期內) 請少施磷肥。
2. 接菌初期避免施用化學藥劑，尤其是殺菌劑，但依得利不在此限。
3. 十字花科 (甘藍、蘿蔔、白菜等)，莧科 (莧菜)、藜科 (菠菜)、石竹科 (康乃馨) 為非菌根作物，不適用於接種菌根菌。

三、結語

近年來，由於社會大眾對環境污染、食品衛生安全及節省能源等課題之重視，未來農業生產體系中化學合成肥料及農藥之施用量勢必減少，生物肥料將扮演更重要的角色，目前世界各國將其生產推廣與應用列為農業發展重點計畫之一。台灣鄉鎮間亦常有國內外之商品銷售，但品質良莠不齊，農民花了錢卻未必有效。農政機關除應制訂法規來規範合格之微生物肥料，為農民把關節省金錢外，希望能多予支持學界相關研究與推廣計畫，畢竟對的事務值得一步一腳印落實經營。學界亦應致力研究如何提高菌根菌功效，開發適用菌種與接菌方法，將研究結果商品化，讓農民獲得品質優良價格合理之菌根菌接種源，與種苗業結合，使農民可購買到優良之菌根種苗，產官學界一起為優質環境與農業共盡心力。

誌謝

感謝農委會、國科會經費補助，以及農委會種苗繁殖場與相關農會在推廣工作上予以協助，特此致謝。

AgBIO

參考文獻

1. 王均琍。(1998)。紅豆接種叢枝內生菌根菌對乾旱逆境之反應。中華農學會報 新, 181: 92~101。
2. 王均琍。(2002)。叢枝內生菌根菌促進多種蔬果生長並增加產量。豐年, 52 (13) : 54-56。
3. 王均琍、陳昭源。(1998)。叢枝內生菌根菌對木瓜生長及產量之影響。土壤與環境, 1: 61~71。
4. 吳繼光、林素禎。(1998)。囊叢枝內生菌根菌應用技術手冊。農委會農業試驗所, 台中, 台灣。
5. 柯天雄, 邱展台, 王均琍。(1999)。木瓜苗接種菌根菌好處多多。豐年, 50 (12) :49-51。
6. 張喜寧。(1992)。台灣囊叢枝菌根菌之研究與展望。科學農業, 40 (1-2) : 45-52。
7. 程永雄、莊明富、杜金池 (1993)。內生菌根*Glomus clarum*應用在洋香瓜生產上之效益評估。中華農業研究42 (1):74-84。
8. Azcon-Aguilar, C., I.G. Padilla, C.L. Encina, R. Azcon, and J.M. Barea. (1996), Arbuscular mycorrhizal inoculation enhances plant growth and changes root system morphology in micropropagated *Annona cherimola* Mill. *Agronomie* 16:647-652.
9. Brundrett, M., Bougher, N., Grove, T. and Malajczuk, N. (1994), Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Murdoch, WA.
10. Carling, D. E., Roncadori, R. W. and Hussey, R. S. (1996), Interactions of arbuscular mycorrhizae, *Meloidogyne arenaria*, and phosphorus fertilization on peanut. *Mycorrhiza* 6 : 9-13.
11. Dolcet-Sanjuan, R., E. Claveria, A. Camprubi, V. Estaun, and C. Calvet. (1996), Micropropagation of walnut trees (*Juglans regia* L) and response to arbuscular mycorrhizal inoculation. *Agronomie* 16: 639-645.
12. Francis, R. and Read, D. J.(1994), The distributions of mycorrhizal fungi to the determination of plant community structure. In : Robson, A. D., Abbott, L. K. & Malajczuk, N.(eds.), Management of mycorrhizal fungi in agriculture, horticulture and forestry. p. 11-25.
13. Frey, B. A. and H. Schuepp. (1993), Acquisition of nitrogen by external hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Zea mays* L. *New Phytol.* 124 : 221-230.
14. Jeffries, P. and Bares, J. M. (2001), Arbuscular Mycorrhiza – A key component of sustainable plant – soil ecosystem. In : Esser, K. The Mycota – Fungal Association. Springer, Berlin.
15. Mitchell, D.T. (1993), Mycorrhizal associations. In : Jones, D. G.. Exploitation of Microorganisms. Chapman & Hall, London.
16. Srivastava, D., Kapoor, R. and Srivastava, S.K. (1996), Vesicular arbuscular mycorrhiza- an overview. In : Mukerji, K. G. (eds.), Concepts in Mycorrhizal Research. Kluwer Academic Publishers, London.
17. Subramanian, K. S., hanakrishnP. Santan and P. Balasubramanian. 2006. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Scientia Horticulturae* 107 : 245–253
18. Vidal, M.T., C. Azcon-Aguilar, and J.M. Barea, (1992) Mycorrhizal inoculation enhances growth and development of micropropagated plants of avocado. *HortScience* 27:785-787.
19. Wang, C.L. 2006. Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Production of Several Horticultural Seedlings. (Keynote speech) 27th International Horticultural Congress & Exhibition (IHC 2006)(chairperson of session 13). Seoul. Korea.