

國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝學系

碩士論文

Department of Horticulture

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔地區

低需冷性梨樹地上部與根系生長之影響

Effects of soil water status on late season shoot and root

growth of low chill Asian pears in lowland

subtropical Taiwan

蕭元彰

Yuan-Chang Hsiao

指導教授：李國譚 博士

Advisor : Dr. Kuo-Tan Li

中華民國 100 年 1 月

January, 2011

目錄

目錄.....	i
圖目錄.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	v
第一章 總論—前人研究及試驗假說.....	1
一、前言.....	1
二、前人研究.....	3
(一) 臺灣地區之降雨與氣候趨勢.....	3
(二) 土壤缺水對果樹作物生長之影響.....	4
(三) 浸水對土壤環境之影響.....	9
(四) 土壤淹水對果樹作物生長之影響.....	12
(五) 梨樹根系之生長特性.....	23
(六) 秋根對薔薇科落葉果樹生長之影響.....	24
(七) 溫帶地區落葉果樹季節性根部與地上部生長之關係.....	26
(八) 亞熱帶地區常綠果樹季節性根部與地上部生長之關係.....	27
(九) 果樹作物根系與地上部生長之關係.....	27
(十) 果樹作物根系之觀測方法.....	28
三、試驗假說.....	31
四、結論.....	31
參考文獻.....	32
第二章 秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根系生長之影響.....	48
摘要.....	48
一、前言.....	50
二、材料與方法.....	52
三、結果.....	60
四、討論.....	78
參考文獻.....	107
第三章 結論與未來研究方向.....	113
一、結論.....	113
二、未來研究方向.....	114
參考文獻.....	117
附錄.....	119

圖目錄

圖 2. 1. 水分試驗前期各處理植盆之體積土壤含水量變化。	85
圖 2. 2. 水分試驗後期各處理植盆之體積土壤含水量之變化。	86
圖 2. 3. 試驗地區每日最高、最低與平均環境氣溫之變化。	87
圖 2. 4. 水分試驗期間控制組之土壤每日最高溫、最低溫與平均溫度變化。	88
圖 2. 5. 水分試驗期間各處理之土壤與大氣每日平均溫度之變化。	89
圖 2. 6. 土壤水分變化對各處理植盆土壤溶液酸鹼值之影響。	90
圖 2. 7. 土壤水分變化對‘臺農種苗 2 號’梨樹全樹葉面積生長之影響。	91
圖 2. 8. 土壤水分變化對‘臺農種苗 2 號’梨樹全樹葉面積比例之影響。	92
圖 2. 9. 土壤水分變化對‘臺農種苗 2 號’梨樹宿存葉比例之影響。	93
圖 2. 10. 土壤水分變化對‘臺農種苗 2 號’梨樹新葉生長之影響。	94
圖 2. 11. 土壤水分變化對‘臺農種苗 2 號’梨樹有效根系分佈比例之影響。	95
圖 2. 12. 土壤水分變化對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根生長模式之影響。	96
圖 2. 13. 土壤水分變化對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根存活率之影響。	97
圖 2. 14. 土壤水分變化對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根生長模式之影響。	98
圖 2. 15. 土壤水分變化對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根維持白色比率之影響。	99
圖 2. 16. 土壤水分變化對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根存活率之影響。	100
圖 2. 17. 土壤水分變化對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根維持白色比率之影響。	101
圖 2. 18. 土壤水分變化對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根存活率之影響。	102
圖 2. 19. 水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根維持白色比率之相關性。	103
圖 2. 20. 水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根存活率之相關性。	104
圖 2. 21. 水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根維持白色比率之相關性。	105
圖 2. 22. 水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根存活率之相關性。	106

摘要

本研究於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場戶外進行，處理始於2007年10月8日，結束於2008年1月3日，水分試驗期間調查測量植株地上部葉片與根系之生長，探討秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根系生長之影響。本試驗以2年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗為試驗材料，分別進行5種灌溉處理，處理一為控制組 (CK)，該處理之土壤體積含水量 (θ_v) 維持於30%-45%。處理二 (D) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 再給水至 $\theta_v = 45\%$ 。處理三 (D+3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理3日。處理四 (LD+3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v = 25-30\%$ 時行淹水處理3日。處理五 (D+5F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理5日。試驗結果如下，比較水分試驗期間各受試植株地上部葉片之生長可知，乾旱 (D) 與土壤水分劇烈變化 (D+3F, D+5F) 促進植株成熟葉提早脫落。而由水分試驗期間梨樹根系之生長可知，水分試驗前期各受試植株具2至3次之生長高峰，於冬季水分試驗後期根系生長量降低，1月後新生根大量死亡，各受試植株僅保留少數白色與黃色根越冬。比較水分試驗前期梨樹根系生長模式可知，劇烈土壤水分變化降低新生根存活率；CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F 處理於水分試驗前期之新生根總存活率分別為 $89.26 \pm 1.21\%$ 、 $82.95 \pm 2.43\%$ 、 $74.14 \pm 6.14\%$ 、 $92.28 \pm 2.10\%$ 與 $68.08 \pm 4.30\%$ ，各處理間比較達顯著差異水準。比較水分試驗前期與後期各受試植株標定新生根維持白色比率與新生根存活力下降至50%所需之日數可知，CK、D 與 LD+3F 處理之標定新生根存活力高於 D+3F 與 D+5F 處理。分析水分試驗前期植株宿存葉下降比例與標定新生根存活力兩者間之相關性可知，植株宿存葉下降比例與與新生根存活力呈顯著負相關；新生根存活力隨宿存葉比例下降而減少，水分試驗前期新生根維持白色比率、新生根存活率與植株宿存葉下降比例之決定係數分別為 0.5562 與 0.7371。

關鍵字：秋根、新生根、宿存葉、新葉、體積土壤含水量



Abstract

This research was carried out in Horticulture Research and Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University from October 8, 2007 to January 3, 2008. We measured shoot and root growth of low chill Asian pears in lowland subtropical Taiwan to document the effect of soil water status on late season shoot and root growth of potted two-year-old 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Trees were irrigated with five irrigation treatments: Control treatment (CK), plants were maintained at 30-45% soil water content; Drought treatment (D), plants were not watered until soil water content below 20% and then irrigated back to 45%; Drought and 3 three-day Flooding (D+3F), plants were not watered until soil water content below 20% and then flooded for 3 days; Moderate Drought and 3 three-day Flooding (LD+3F), plants were not watered until soil water content to 20-30% and then flooded for 3 days; Drought and five-day Flooding (D+5F), plants were not watered until soil water content below 20% and then flooded for 5 days. Mature leaves after D, D+3F and D+5F treatments defoliated sooner than those subjected to CK and LD+3F. During the early period of the experiment, there were two to three peaks of root growth. In January, the vast majority of the new roots turned dark brown or was invisible, leaving on a small portion of survival white and yellow roots. By comparing the five irrigation treatments during the early period of the experiment, soil moisture fluctuation

significantly decreased new root survival. New root survival (%) for the five irrigation treatments during the early period were: 89.26±1.21% (CK), 82.95±2.43% (D), 74.14±6.14% (D+3F), 92.28±2.10% (LD+3F), and 68.08±4.30% (D+5F). Overall by analyzing the longevity at when 50% of the new white roots turned yellow and at when 50% of the new roots turned dark brown, black or invisible, we found that plants subjected to CK, D and LD+3F had a higher new root survivorship compared to those subjected to D+3F and D+5F. By analyzing the correlation of canopy mature leaf retention (% of DAT0) versus cohort new roots remaining white (%) in DAFR40, we found that there was a high correlation between these two events. The coefficient of determination, r^2 , between new roots remaining white and canopy mature leaf retention (% of DAT0), and between new root survival and canopy mature leaf retention (% of DAT0) were 0.5562 and 0.7371, respectively.

Keywords: Autumn roots, New roots, Volumetric soil water content, Mature leaves,

New leaves.

第一章 總論—前人研究及試驗假說

一、前言

梨 (*Pyrus spp.*) 為薔薇科 (Rosaceae)，梨亞科 (Pomoideae)，梨屬 (*Pyrus*) 多年生落葉喬木，全世界約有 35 個種，野生於亞洲、歐洲及非洲等地，主要集中於地中海、高加索、中亞及中國，為世界主要經濟果樹，栽培分類上可概分成兩大類：東方梨 (oriental pear) 與西洋梨 (common pear; European pear; *Pyrus communis* L.) (廖，1995; Challice, 1974)。西洋梨原產於歐洲，主要種植於歐美地區。東方梨原產於中國，主要種植於亞洲地區，可分為秋子梨 (Ussurian pear; *Pyrus ussuriensis* Max.)、白梨 (White pear; Ya pear; *Pyrus brestchneideri* Rehder) 及砂梨 (Sand pear; Japanese pear; *Pyrus pyrifolia* Nakai; *Pyrus serotina* Rehd.) 三大品系 (康，1997; 櫻井，1944)。其中白梨與秋子梨為中國北方品系，多分佈於黃河以北至東北等冷涼乾燥地區；砂梨為中國南方品系，分佈於淮河以南等溫暖潮濕地區 (康，1997)，而砂梨也為臺灣主要梨之栽培品系 (廖，1995)。

砂梨為臺灣主要經濟果樹之一，根據調查資料顯示，民國 96 年梨收穫面積達 8098 公頃，主要種植區域依序為臺中縣、苗栗縣與新竹縣，合計約佔全臺梨種植面積的 89% (行政院農業委員會，2007)。臺灣地區目前梨主要栽培模式可分成三大類：一是高海拔地區栽培的日本梨、二是平地的橫山梨、第三則是高接梨 (吳，1994)。近年來由於消費水準提高，橫山梨因品質較差而售價偏低，造成平地梨園多改以生產高接梨為主；橫山梨為副之栽培模式 (廖，1995)，佔全臺種植面積約 69% (林和高，2005)。

然而近年來由於高接梨栽培成本過高，加上氣候變遷與國土復育等限制，梨產業競爭力逐漸降低，故選拔品質優良，適合於低海拔栽培生產之低需冷性梨品種，可降低生產成本，提升梨產業競爭力。故行政院農業委員會農業試驗所與臺

中區農業改良場自 1976 年開始，分別以高品質之高需冷性梨與低需冷性之橫山梨進行雜交，以此自後裔中選育出數個適合於低海拔地區栽培之低需冷性梨新品種，例如：臺農一號 (明福梨)、臺種苗農二號 (蜜雪梨)、臺農三號 (玉金香梨)、臺中一號 (福來梨)、臺中二號 (晶圓梨)、臺中三號 (晶翠梨)，目前已陸續技術轉移推廣中 (行政院農業委員會農業試驗所，2007; 臺中區農業改良場，2009)。

臺灣位處東亞溫帶及熱帶季風氣候區，主要水資源為雨水，主要降水期為 2-4 月的春雨、5-6 月的梅雨與夏秋的颱風雨，夏末至初春為臺灣中南部的旱季，年平均雨量約 2500mm (中央氣象局，2003; 陳，1993)。雖臺灣氣候具高溫多雨之特徵，但因中央山脈南北貫穿全島，造成臺灣各河流坡陡且短、水資源涵養能力差，且中、小尺度地區性天氣系統常受氣候帶與複雜地形影響，降雨時間與空間上分佈不均勻，山區常因地形抬升作用並配合部分天氣系統變化，帶來短時間的極端降水 (陳，1993)，相對易造成作物淹水與排水後缺水等現象。

臺灣地區平均年降雨量為全球平均值之 3 倍，但因降水之時間與空間分佈變化大，加上環境破壞、都市化與人口密度上升之影響，不同地區水資源利用極不均勻，一般而言，臺灣北部及東部地區年降水量大於蒸發量，缺水機率較低，中南部因降水量多集中於梅雨季及夏季，乾季長達半年之久，具有潛在性乾旱的特性，若當年梅雨不顯著或侵臺颱風不足，隔年則易缺水 (吳，1996; 臺灣大學全球變遷研究中心，1997; Yu *et al.*, 2002)。目前臺灣地區因氣候變遷與暖化等影響，未來氣候型態將逐漸走向極端化，即溫度上升、乾旱期間變長，降雨日數減少或雨季極端降雨，也易產生暴雨型態，氣象預測難度也升高 (經濟部水利署，2007; 廖等，2009; Liu *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2006)。

目前臺灣地區梨樹生產多以高接梨栽培系統生產果實 (廖，1995)。許多例子顯示，砧木之生長與生理會直接影響接穗的生長、產量與品質 (Lockard and Scineider, 1981; Twiorkoski and Miller, 2007)。水分為作物生長的重要環境因子，土

壤水分狀況會直接影響果樹生長、開花及結實等過程 (Jones *et al.*, 1985; Schaffer *et al.*, 1992)。臺灣氣候環境雖高溫多濕、年降雨量高，但降雨過度集中、土壤水分變化劇烈；低窪排水不良與水田轉作地區於大量降水後常造成土壤淹水現象，果樹為長期作物，栽培時間較長，無法臨時轉作，故探討臺灣低海拔地區栽培梨樹之水分與根部生理有助於了解環境土壤水分變化下梨樹之生長模式。

對大多數果樹而言，淹水與乾旱逆境會影響植物體地上部生長，產生葉片缺水、低氣孔導度、低淨二氧化碳同化率等抑制地上部生長之作用 (Jones *et al.*, 1985; Schaffer *et al.*, 1992)，相關研究大多僅探討單一逆境變化對作物之影響，然而作物於淹水與乾旱交互作用下之生長變化卻尚未明瞭。一般植物體可分成地上部與地下部，過去對作物生理之研究方向大多偏重於地上部之調查，然而植物根系對固定植株與養、水分吸收具有重要作用，但因土壤不可觀測性之限制，給根系生態學之研究帶來一定的困難，故本研究將設計根窗，探討植物體根部於土壤水分變化下之生長，進一步釐清梨樹根部與水分生理之關聯性。

為了解秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹生長之影響，本研究擬利用植盆控制水分，模擬不同程度之土壤水分變化，調查梨樹盆苗地上部與地下部之營養生長，探討並比較不同土壤水分變化下梨樹之生長與生理。

二、前人研究

(一) 臺灣地區之降雨與氣候趨勢

臺灣位處東亞溫帶及熱帶季風氣候區，同時位於大陸與海洋之緩衝區，氣候受大尺度環流之影響。臺灣主要水資源來源為雨水；主要降水期為 2-4 月的春雨、5-6 月的梅雨與夏秋的颱風雨，夏末至初春為臺灣中南部的旱季，年平均雨量約 2500mm (中央氣象局，2003; 陳，1993)。一般而言，臺灣地區降水之時間與空間分佈變化大，北部及東部地區年降水量大於蒸發量，缺水機率較低，中南部因降

水量多集中於梅雨季及夏季，乾季長達半年之久，具潛在性乾旱的特性 (吳，1996; 臺灣大學全球變遷研究中心，1997; Yu *et al.*, 2002)。

近年來臺灣地區因氣候變遷與暖化等影響，未來氣候型態將逐漸走向極端化，即溫度上升、乾旱期間變長，降雨日數減少或雨季極端降雨，也易產生暴雨型態，氣象預測難度也升高 (經濟部水利署，2007; 廖等，2009; Yu *et al.*, 2006)。Liu 等(2009) 利用量化方式以全球降雨氣候計畫 (Global Precipitation Climatology Project; GPCP) 於 1979-2007 年之觀測資料分析全球 17 個氣候區與臺灣地區極端降雨與全球溫度之關係發現，全球溫度每上升 1 度 K，全球前 10%之強降雨增加約 110%，而 30%-60%降雨等級之中、小強度降雨則減少約 20%。而全球溫度每增加 1 度 K，臺灣地區前 10%之強降雨則增加約 140%，而前 10%小雨則減少約 70%。強降雨的增加可能導致淹水，臺灣中、南部春冬兩季之中、小雨為保持土壤濕潤及地下水之關鍵水源，其持續性減少將導致乾旱之威脅。

(二) 土壤缺水對果樹作物生長之影響

1. 土壤缺水影響果樹作物生長之反應

水為植物體的主要組成分，含量佔組織鮮重的 70-90%。水分一般由土壤或栽培介質供應，為根部所吸收，供植物體利用。植物體藉水分進行光合作用、蒸散作用、礦物元素吸收及各種生理之代謝；水不僅是光合作用的原料，植物體內各種代謝作用也多在水溶液中進行。水分同時也是養分吸收和運輸的媒介，植物體也藉由蒸散作用進行土壤養水分之吸收、運輸及體內溫度之調節 (Jones *et al.*, 1985; Kramer, 1983)。

土壤水分依其存在狀態可分為毛細管水 (capillary water)、吸著水 (hygroscopic water) 與重力水 (gravitational water) 三種，惟毛細管水可供根部所吸收利用。土壤缺水 (water deficit) 導致作物乾旱逆境 (drought stress)，然而作物依失水量不同

可分為暫時性凋萎 (temporary wilting) 及永久性凋萎 (permanent wilting) 兩種。土壤於降水後，大量重力水經逕流排出後，土壤於飽和狀態所含之水量稱田間容水量 (field capacity)。土壤於不供應水分的狀態下，土壤水分因植物體根部吸收與蒸發散 (evapotranspiration; E.T.) 作用逐漸減少，當植株蒸散作用耗損之水分大於根部所吸收之水分時，植株會造成暫時性萎凋之現象，暫時性萎凋常見於夏季中午，然而午後根部吸收水量與植物體蒸散作用達到平衡時，植株將逐漸恢復正常之膨壓，土壤水分含量於暫時萎凋點 (temporary wilting point) 之範圍內，只要再供應水分，作物即可恢復正常。但土壤若不予供水，土壤水分持續下降，土壤內供根部吸收之毛管水 (有效水) 耗盡，使得植株根部吸水不足，影響植株水分吸收，葉片開始萎凋，此時若再加水，植株之萎凋狀態仍無法復原，此時之土壤含水量稱永久萎凋點 (permanent wilting point) (Kramer, 1983; Kramer and Boyer, 1995a)。

木本植物對缺水之反應較草本植物敏感，主要因木本植物具樹幹，故具較高的液壓阻力 (hydraulic resistance) (Lakso, 2003)。作物於不同之生長階段，需水量皆不同，然而作物缺水導致乾旱逆境，作物於土壤缺水下會產生許多生理及型態上之調適以抵抗乾旱逆境。作物於缺水狀態下，早期之反應為單葉面積的減少，其次為成熟葉脫落與根系生長量增加，最後氣孔關閉以減少水分消耗 (Hasegawa, 2002)。

2. 土壤缺水對果樹作物水分狀態與光合作用生理之影響

對絕大多數果樹作物而言，乾旱逆境造成植物膨壓、氣孔導度與光合作用率下降為其典型之生理反應 (Lasko, 2003)。然而乾旱對果樹作物水分狀態與光合作用生理特別敏感，果樹作物對乾旱逆境最先出現的生理反應便是氣孔導度的降低與中午莖部水勢下降，主要因失水與減低蒸散作用所造成 (Francisco *et al.*, 2007; Hasegawa, 2002)。

乾旱逆境造成作物失水，土壤缺水同時也會降低植物體水分狀態。植株中午

莖部水勢 (midday stem water potential) 可代表中午缺水逆境下作物整體的水分狀態 (Scholander, 1965)，短期土壤缺水明顯降低植物體中午莖部水勢與水分利用率 (water use efficiency)，然而乾旱逆境下植株水分利用率下降之敏感度亦可作為植株對抗乾旱逆境之指標 (Behboudian *et al.*, 1994; Francisco *et al.*, 2007; Lakso, 2003)。

對多數果樹作物而言，植物體光合作用與氣體交換對缺水逆境特別敏感。一般而言，缺水逆境影響植物體光合作用之途徑有兩個：氣孔的關閉與膜結構的破壞。土壤缺水造成氣孔關閉對植物體光合作用只有輕微的影響，乾旱逆境對光合作用主要之影響為光系統II效率的降低 (Hasegawa, 2002)。果樹作物於短期乾旱逆境下植物體會先關閉氣孔，降低蒸散速率，以保持植物體水分狀態，雖植物體受逆境影響水勢下降，但葉片膜結構不受影響，故光系統II效率 (PS II efficiency) 暫不受輕度缺水所影響。但植物體於中度、嚴重或長期缺水逆境時葉綠體內類囊體膜 (thylakoid membranes) 結構因缺水與高溫受破壞，進而影響光系統II (PS II; P680) 與電子傳遞鍊，此時光系統II效率才會受影響降低；造成葉綠素螢光值 (chlorophyll fluorescence; Fv/Fm) 下降 (Flore and Lakso, 1989; Hasegawa, 2002; Lakso, 2003)，故乾旱逆境下植株葉綠素螢光值下降之敏感度可作為植株對抗乾旱逆境之指標。

土壤早期缺水導致植物體光合作用速率降低主要是因為氣孔關閉所造成；土壤缺水使根部合成離層酸 (abscisic acid; ABA) 能力增加，離層酸向地上部傳導，葉片離層酸上升與細胞分裂素 (cytokinins) 降低造成氣孔關閉 (高, 1994)。

3. 乾旱逆境對薔薇科果樹滲透勢調節之影響

植物體對乾旱逆境的另一個反應，即為溶質累積造成滲透勢的降低，此過程稱滲透勢調節 (osmotic adjustment)；植物體細胞內溶質濃度增加造成溶質濃度淨增，滲透勢調節產生一個更為負值的葉片水分潛勢 (negative leaf water potential)，使得水分流向葉片，維持葉片膨壓，即： $(\Psi_w(-) = \Psi_s(-) + \Psi_p(+))$ ， Ψ_w : total water

potential, Ψ_s : osmotic potential or solute potential, Ψ_p : Turgor or pressure potential)。滲透勢調節可幫助葉片維持膨壓，使氣孔開張，於輕微的水分逆境下仍可持續進行光合作用。山梨糖醇 (Sorbitol) 及甜菜鹼 (betaine) 為薔薇科果樹中 2 種常見的相容性溶質 (compatible solutes)，為植物體細胞質中重要的滲透調節劑，作物受水分逆境時，甜菜鹼與山梨糖醇會在細胞內累積而提高溶質濃度，使得水分仍能流向葉片，進行滲透勢調節 (Gao *et al.*, 2004; Hasegawa, 2002; Lakso, 2003; Wang *et al.*, 1995)。

乾旱逆境會誘導酥梨 (*Pyrus bretschneideri* Rehd. 'Suly') 成熟葉片甜菜鹼累積，且於輕微的水分逆境下葉片甜菜鹼累積量即明顯上升。然而當水分逆境持續發展時，甜菜鹼的累積不會因逆境強度的增加而持續增加累積的量，推測可能與梨本身耐旱性質有關。樹體於乾旱逆境下外施甜菜鹼能促進枝條生長，且外施甜菜鹼對枝條生長之促進於重度缺水逆境時更加明顯 (Gao *et al.*, 2004)。

4. 土壤缺水對果樹作物地上部營養生長之影響

植物體地上部營養生長對缺水特別敏感；植物體地上部生長速率隨中午莖部水勢下降而減少，中午莖部水勢與地上部生長速率呈線性負相關。植物體於缺水初期的反應便是減緩地上部營養生長 (vegetative growth)，尤其是葉片。在乾旱逆境下，減少葉面積的擴大，使樹冠面積縮小以及降低蒸散速率，對植物而言是有利的。乾旱逆境亦可能誘導植株老葉落葉，此過程稱為葉面積調節 (leaf area adjustment) 作用，主要為植物體水分來源受限時，降低全樹葉面積和蒸散作用之機制 (Behboudian and Mills, 1997; Hasegawa, 2002; Lakso, 2003)。

5. 果樹水分狀態與果實發育及品質之關係

缺水易影響果實生長發育與品質；於新世紀梨盆栽試驗中發現，果實發育早期缺水導致成熟果實鈣含量降低、可溶性醣類濃度增加、增加 FSD (flesh spot decay) 發生比率，早期缺水後缺鈣與 FSD 發生之原因，可能為缺水導致蒸散流降低、鈣

無法運移至果實，以及細胞分裂期產生細胞壁較薄弱所致 (Behboudian and Lawes, 1994)。新世紀梨果實於細胞分裂期缺水逆境試驗中發現，早期缺水逆境後若再度灌溉，果實直徑仍會增加，恢復至原來完整灌溉的果徑 (Behboudian et al., 1994)。

6. 土壤缺水對果樹作物根系生長之影響

作物於乾旱環境中汲取水分主要依賴根系之長度與密度 (Buwalda, 1993)。根系為土壤水分的直接吸收利用者，當土壤缺水時，作物根系首先感應並發出信號，使植株對土壤缺水進行反應，同時根系之形態、結構、植物荷爾蒙也產生相對應之變化，影響地上部的生長。多年生果樹對土壤缺水 (water deficit) 格外敏感，主要因缺水導致植物組織內水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 降低所致 (Buwalda, 1993; Jones *et al.*, 1985; Kramer and Boyer, 1995b)。Waring 和 Schlesinger(1985) 則認為一般木本植物之根系無法生長於土壤水勢低於-0.7MPa 之環境。

對絕大多數果樹作物而言，地上部生長對缺水較地下部敏感；於低土壤水勢條件下，作物地上部停止生長，但根系卻繼續伸長，土壤缺水下根系的伸長被認為有利於作物從土壤中尋找、吸收水分，維持作物生長與水分狀態，所以地上部與地下部對乾旱逆境之反應通常認為是作物對乾旱條件之適應性機制 (Buwalda, 1993; Garnier *et al.*, 1986; Hasegawa, 2000; Kramer and Boyer, 1995b)。於乾旱逆境下，作物根系也會產生向水性 (hydrotropism) 以增加水分之搜索與吸收 (Kramer and Boyer, 1995b)。

即使如此，持續乾旱逆境會降低根系產量，於 1 年生蘋果 'Mutsu' 盆苗乾旱試驗可知，土壤水勢下降，植株根乾物重也會逐漸下降，兩者間呈正相關，且根部之呼吸速率也隨植株根系乾物重下降而降低 (Psarras and Merwin, 2000)。

由上可知，適度土壤缺水增加作物根系之生長量，多數作物根系於土壤水勢

低於-50kPa 時，根的伸長速率才會下降 (Buwalda and Lenz, 1992; Richards, 1983)。比較不同供水量 (100%灌水、50%灌水、25%灌水) 對‘Golden Delicious’/ M.9 蘋果樹地上部與地下部生長可知，植株地上部之生物產量 (biomass) 隨土壤水分減少而降低，然而比較根系之生物產量可知，正常灌溉蘋果樹之全樹根部乾物重為 50%灌溉的 95%，為 25%灌溉的 140%，顯示適度缺水會增加根系之生長 (Buwalda and Lenz, 1992)。一般認為土壤缺水誘導根系分佈範圍增加主要是因為根部要尋找水分，而不是增加根的密度 (root length density)；Buwalda (1993) 以 5 年生奇異果植株為樣本，於試驗期間進行土壤灌溉與不灌溉處理，觀測半徑範圍 2.75 公尺，深 1 公尺植株根系之發展，結果顯示正常灌溉植株之根系最遠僅發展至樹幹半徑 2 公尺之範圍，且根系總長度多分佈於半徑 0.5-1.25 公尺處，然而未灌溉植株之根系最遠延長至距植株 2.75 公尺遠，但根系分佈深度仍維持於 1 公尺之範圍，然而缺水奇異果根系向外延伸而非向下延伸也是藤本植物特有的根系發展狀態。葡萄植株於栽培時減少水分供應，地下部對地上部重量之比值增加，細根與白色吸收根增加且也產生較多也較長之側根 (lateral root) (Richards, 1983)。

地下部與地上部之比例 (root : shoot ratio) 通常會反映出地上部枝條對養水份的需求與供應，因此缺水會增加地下部與地上部之比例。地下部與地上部之比例的增加與缺水有關，顯示光同化物分配往根系的比例增加 (Buwalda, 1993; Kramer and Boyer, 1995)，植物體根系生長大約會消耗 1/3 地上部製造的光合產物，推測植物體遭遇缺水逆境下地上部乾物重與根系分佈之原因，主要可能因輕度缺水會刺激植物體根系伸長，因而消耗樹體之光合產物 (Buwalda, 1993)。

(三) 浸水對土壤環境之影響

土壤是由土體、液相與氣相所組成之三相系，三者之比例影響土壤之物理與化學性質。土壤物理性質決定作物根系生長與發育之基本因子、影響作物生產力。優良的土壤物理性質，至少須具備良好排水、通氣之條件，土壤植物才能有好的

生長與生產 (張, 1980; Lyon and Buckman, 1948)。土壤為一個多孔體, 孔隙裏主要貯存水分與空氣, 土壤中各相所佔之容積比率為動態而非固定的; 液相與氣相彼此有顯著反比之關係。降水時, 水分進入土壤將除去同量體積之氣體; 反之水分則因排水、蒸發或植物生長吸收水分等因素被除去。正常通氣良好之土壤應具 10-30% 之孔隙, 而於浸水狀況下, 土壤孔隙常降至 0%, 土壤孔隙為水所填滿 (Grable, 1966)。

大氣中約含 79% 氮 (N_2)、20.4% 氧 (O_2) 及 0.03% 的二氧化碳 (CO_2), 而土壤中由於根及其他生物體的呼吸作用消耗氧氣、釋放二氧化碳, 加之二氧化碳於土壤中之擴散不若空氣中迅速, 因此土壤空氣之二氧化碳濃度約為大氣的 10-100 倍, 氮氣濃度仍維持 79%, 氧氣濃度稍低。一般乾燥土壤中, 1 立方公尺即有 5-24 克氧氣。土壤孔隙為土壤氣體與大氣交換之場所, 由於氧氣與二氧化碳於大氣及土壤分壓的不同, 故引起大氣之氧氣向土壤擴散, 而土壤之二氧化碳則向大氣中擴散, 產生動態平衡 (Kozlowski, 1984)。

1. 淹水對土壤氣體含量變化之影響

淹水逆境直接導致土壤缺氧, 主要發生於瞬間大量降雨、土壤過度黏重、排水不良、天然濕地、地下水位過高、河谷淹水與過量灌溉。氣體之交換主要藉由擴散作用, 土壤浸水使土壤孔隙為水分所填滿, 氣體擴散空間或通路呈不連續性, 以致無法進行正常的氣體擴散。空氣中氧氣的擴散系數為 $0.205 \text{ cm}^2 / \text{sec}$, 於水中僅為 $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{sec}$; 氣體於水中之擴散速率為空氣中的萬分之一, 土壤中剩餘之氧氣則因植株根系及微生物進行呼吸作用而逐漸消耗完, 且土壤微生物行呼吸作用釋放出之二氧化碳亦無法有效擴散至大氣中, 造成土壤中氧氣缺乏, 二氧化碳濃度增加 (Drew and Sisworo, 1977; Kozlowski, 1982; Rowe and Beardsell, 1973)。

當土壤氧氣濃度低於正常值時, 稱低氧 (hypoxia) 狀態, 此情形於短期淹水、

過量灌溉、天然濕地環境或地下水位過高、排水不佳時即可能發生。若土壤經過長時間淹水，低於淹水面土壤深層則完全缺氧，稱無氧 (anoxia) 狀態 (Kozlowski, 1984; Smith *et al.*, 1990)。

於排水不良或淹水時，嫌氣性微生物會取代好氣性微生物進而分解有機質產生甲烷、乙烷、丙烯與乙烯等氣體，植物體根部也會因缺氧產生乙烯 (Kozlowski, 1997)。

2. 淹水對土壤氧化還原電位與植物體土壤養分利用之影響

土壤浸水降低土壤氧化還原電位，易產生土壤還原反應與解離現象，排水良好的土壤其氧化還原電位 (redox potentials) 為 +300mV 以上或更高，於浸水狀況下，土壤氧化還原電位降低至 +300mV 以下或更低 (Kozlowski, 1997)。土壤氧化還原電位降低使其易產生還原反應；例如：硝酸鹽 (NO_3^- ; nitrate)、氧化錳 (MnO; manganic oxide)、氧化鐵 (FeO; Ferric oxide)、硫酸鹽 (SO_4^{2-} ; sulfate) 等物質進行還原反應，造成土壤離子型態改變，如 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 或 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ 等解離現象，土壤離子含量上升，因此於浸水之土壤常有錳、鐵離子量上升，過多之情形，高濃度下常造成植物的離子毒害現象 (Patrick and Mahapatra, 1968)。

土壤浸水造成土壤中營養成分型態之改變而影響其利用性，其中磷酸鐵易解離為磷酸亞鐵而流失，但也造成磷有效性提高，而於短時間內提供植物體利用 (Patrick and Mahapatra, 1968)。短期浸水也會提高鉀 (K)、硫 (S)、鉬 (Mo)、鈉 (Na) 等礦物元素的可利用性 (Rowe and Beardsell, 1973)。

正常情況下土壤所進行之硝化作用 (nitrification) 由 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ，再經由植株根部吸收。於浸水狀況下由於氧化電位變化，使硝酸根離子經由去硝化作用 (denitrification) 由 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$ 逸散，造成損失，且於去硝化過程中亞硝酸根之生成亦有害植物，於浸水土壤中每日經由去硝化作用所逸散之硝酸根可達

20-50ppm (Grable, 1966)。

(四) 土壤淹水對果樹作物生長之影響

1. 淹水影響果樹作物生長之過程與反應

土壤淹水後對作物與環境最大之影響與變化即為缺氧所造成的缺氧逆境 (oxygen deficiency)，但土壤淹水對作物發育所造成之影響並非單純僅由缺氧所造成，尚受其他因子所影響。例如：土壤淹水間接造成土壤產生還原態的有毒物質、土壤中無機離子的流失以及根代謝作用產生有毒物質等逆境與傷害 (Hasegawa, 2002; Schaffer, 1998)。土壤淹水後，植物體於缺氧下會產生許多生理及形態上的調適反應，觀察果樹遭遇淹水逆境之反應，最先受到影響的是光合作用，主要是因為氣孔關閉造成。一般而言，大多數作物於土壤淹水下最早出現之反應便是氣孔導度下降 (Kozlowski, 1982; Kozlowski and Pallardy, 1984)，之後光合作用率與蒸散作用降低、根部與地上部之生長受抑制、葉片萎凋、根吸收離子效率降低，最終造成植株死亡 (Kawase, 1981; Schaffer, 1998; Schaffer, *et al.*, 1992)。Crane 和 Davies(1989) 以兔眼種藍莓 (*Vaccinium ashei* Reade) 植株為例，詳細整合連續淹水處理對植株生長之反應，將植株連續淹水造成之生理現象分成 3 種階段，階段 1 (phase1) 需時 2-5 日，主要造成氣孔導度下降、光合作用效率與量子產率 (quantum yield) 降低、根部水力傳導係數 (root hydraulic conductance) 降低與夏季花芽數減少，階段 2 (phase2) 需時 6-14 日，主要加重階段 1 之症狀並增加落葉率與營養生長終止，階段 3 (phase3) 需時 16-120 日，主要造成莖部水勢下降與果實皺縮，然而連續淹水造成植株死亡需時 46-120 日。

淹水逆境對作物影響程度依物種、樹齡與遭遇之環境因子而有不同 (Kozlowski, 1984)，一般而言，淹水時間越長，對作物損害越大，植株排水後之恢復力越低 (Andersen *et al.*, 1985; Ismail and Noor, 1996; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*,

1992; Smith *et al.*, 1990)。以 1-2 年生杏桃 (*Prunus americana*) 植株而言，土壤淹水會降低植株存活率，持續淹水 10-20 天，植株存活率即下降至 50% 以下 (Hassan *et al.*, 1986)。作物於生長季淹水所受之影響較為嚴重 (Heinicke, 1932; Kozlowski, 1984)。Andersen 等(1984) 以各種梨屬作物為試驗材料於春季 (4 月) 及秋季 (9 月) 進行淹水處理，結果顯示春季淹水處理之氣孔導度降低速率較秋季淹水處理快。Olien(1987) 以 6 年生 ‘Macspur’/M26 蘋果樹為試驗材料，分別春、夏與秋季進行長達 6 週的淹水處理，探討土壤淹水與植株生長之關係，結果顯示夏季與秋季淹水處理之營養生長受抑制程度大於秋季淹水處理。對黃色百香果 (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg) 而言，夏季淹水處理對地上部生長之抑制高於冬季淹水 (阮及鄭, 1986)。3 年生兔眼種藍莓 ‘Woodard’ (*Vaccinium ashei* Reade ‘Woodard’) 植株於夏季高溫下連續淹水 5 日存活率僅剩 67%，然而於春季低溫連續淹水 25 日之植株存活率為 83% (Crane and Davies, 1988a)。3 年生兔眼種藍莓 ‘Tifblue’ (*Vaccinium ashei* Reade ‘Tifblue’) 於春季連續淹水處理 106-117 之植株存活率為 83%，夏季淹水 78-90 日之植株存活率僅剩 33% (Crane and Davies, 1988b)。對於蔓越莓 (Cranberry; *Vaccinium macrocarpan* Ait.) 植株而言，休眠期淹水不會造成植株損傷，但於生長季淹水則會快速造成植株損傷 (Schaffer *et al.*, 1992)。

淹水逆境對植物生理與型態之影響程度可因其他環境因子而有所差異 (Schaffer, 1992)。Hasegawa(2002) 認為環境溫度對淹水逆境的影響程度主要因低溫與植物體休眠時，土壤氧氣消耗量低，故對作物影響力較低，但當環境溫度超過 20°C 時，氧氣消耗量大，氧氣消耗主要由植物體根部與土壤生物呼吸所致，故影響較低溫大。土壤淹水也會造成細菌、真菌、線蟲與疾病之傳播，Crane 和 Davies(1989) 認為對於越橘屬 (*Vaccinium*) 作物而言，淹水逆境造成植株死亡之主要原因為疫病 (*Phytophthora cinnamomi*) 之傳播與抗性，淹水所造成之傷害則為次要。

2. 淹水對果樹作物水分狀態與光合作用生理之影響

高(1994) 認為乾旱與淹水最終結果皆會造成植物體缺水死亡，不過短期淹水時植物缺水的程度不如乾旱時嚴重。一般情況下，短期淹水逆境會影響果樹光合作用率與水分利用率，但並不立即影響植物體水分狀態 (Francisco *et al.*, 2007)，但長期淹水最終仍會影響作物水分狀態，造成失水等生理障害。淹水逆境對植物體水分生理之影響程度可因作物對淹水之敏感性與嫁接砧木種類等因子而有差異 (Kozlowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。Francisco 等(2007) 以柑橘砧木品種 Carrizo 與 Cleopatra 為試驗材料進行連續 9 天淹水或乾旱處理，利用中午莖部水勢 (Midday stem water potential; Ψ_s)、葉片滲透勢 (leaf osmotic potential; $\Psi\pi$)、葉片中午相對水分含量 (Midday relative leaf water content; RWC) 與滲透勢調節 (osmotic adjustment; OA) 等水分生理參數比較兩種砧木於乾旱或淹水逆境之水分狀態，結果顯示對柑橘幼株 Carrizo 與 Cleopatra 而言，短期 (9 天) 淹水逆境並不會影響 Carrizo 與 Cleopatra 柑橘幼樹之水分狀態，水分生理參數與對照組相比無顯著差異。以楊桃 (*Averrhoa carambola* L.) 植株而言，持續淹水須超過 15 日葉片水勢 (leaf water potential) 才會下降，作物才出現失水症狀 (Ismail and Noor, 1996)。

短期淹水逆境雖不會降低植株中午莖部水勢 (midday stem water potential)，但作物之水分利用率 (water use efficiency; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) 仍受淹水逆境所影響，主要是因為光合作用受抑制程度較蒸散作用嚴重所致 (Francisco *et al.*, 2007)。

一般而言短期淹水逆境會降低作物的光合作用率 (photosynthetic rate) 與光化學效率 (PS II efficiency; F_v / F_m) (Childers and White, 1942; Francisco *et al.*, 2007; Ismail and Noor, 1996; Schaffer, *et al.*, 1992)。作物短期淹水造成光合作用速率降低主要是因為氣孔關閉所造成；而根部淹水導致氣孔關閉並非因為葉片缺水，而是因為淹水時根部產生離層酸 (abscisic acid; ABA) 向地上部傳導與細胞分裂素

(cytokinins) 降低所表現之綜合結果所致 (高, 1994; Jackson, 1991)。而光化學效率降低的光化學損害則屬於淹水逆境降低光合作用率的非氣孔因子 (Francisco *et al.*, 2007)。短期淹水影響作物光合作用之原因為氣孔關閉所造成之氣孔性因子, 然而於持續的淹水逆境下, 由非氣孔因子抑制光合作用之能力則會逐漸上升 (Beckman *et al.*, 1992)。

彙整前人之研究可知, 淹水造成作物整體光合作用率降低之原因有: 氣孔導度降低、葉綠素含量降低、光化學效率降低、新生葉片面積減少、葉片提早老化、早期落葉及新葉單葉面積減小等 (Childers and White, 1942; Francisco *et al.*, 2007; Ismail and Noor, 1996; Pezeshki *et al.*, 1996; Save and Serrano, 1986; Schaffer, 1998; Schaffer, *et al.*, 1992)。

3. 淹水對果樹作物地上部營養生長與生殖生長之影響

許多研究顯示, 淹水逆境會影響果樹地上部與根部之營養生長與生化反應, 影響程度依各作物對淹水之敏感度、砧木性狀、樹齡、淹水周期長短、淹水頻率、季節與環境而有不同 (Hassan *et al.*, 1986; Kozłowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。

對多數作物而言, 淹水逆境多會抑制地上部之營養生長, 土壤淹水影響果樹地上部形態之生長與變化一般可歸納出以下幾種特徵:

(1) 植株地上部營養生長受抑制

淹水逆境多會抑制果樹地上部營養生長, 其中包括有: 株高與枝條生長之抑制、節間長度縮短、葉片與枝條之乾物重與鮮重降低、樹幹截面積生長受抑制、葉片生長受抑制.....等等 (DeWitt, 1978; Kozłowski, 1982; 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。地上部莖葉生長量下降與激勃素 (gibberellins; GAs) 合成受

抑制有關 (高, 1994)。對 B17/B2 楊桃 (*Averrhoa carambola* L.) 植株而言, 淹水超過 5 天即會影響植株之單葉與全樹葉面積生長及地上部與葉片之乾物重 (Ismail and Noor, 1996)。黃色百香果 (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg) 實生苗進行淹水處理 4-6 日後, 株高與節間長度明顯受抑制, 葉片與莖之鮮、乾重皆低於正常灌溉者; 與正常灌溉植株相比, 黃色百香果幼株於淹水 20 天後之株高為正常灌溉的 84% (阮及鄭, 1986)。高叢藍莓 (*Vaccinium corymbosum* v. *Bluecrop*) 植株經淹水 4 個月處理後植株地上部營養生長量明顯受抑制 (John and Gough, 1987)。淹水處理之奇異果 (*Actinidia deliciosa* cv. *Hayward*) 植株乾物重與淹水日數成反比, 而地上部之落葉率則隨淹水日數增加而上升 (Smith *et al.*, 1990)。

(2) 葉片生長受抑制、葉片老化加速、植株提早落葉

對淹水敏感之果樹而言, 淹水逆境會抑制葉片展開、葉片生長量降低、加速葉綠素分解、提早葉片老化, 促使植株提早落葉 (Kozlowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992), 例如: 酪梨 (Ploetz and Shaffer, 1989)、桃、榲桲、梨 (Andersen, 1984) 與美洲胡桃 (*Carya illinoensis*) (Wazir *et al.*, 1988)..... 等等。對楊桃植株而言, 隨淹水日數增加, 葉片萎凋率上升, 淹水至第 25 天時植株全樹落葉 (Ismail and Noor, 1996)。一般認為淹水促進葉片提早老化則與細胞分裂素 (cytokinins) 含量降低與地上部乙烯含量增加有關 (高, 1994)。

(3) 葉柄上偏性生長

當葉片近軸端側的葉柄生長速度快於遠軸端側時, 葉片會向下彎曲, 即稱做上偏性 (epinasty)。一般作物於淹水或土壤缺氧之環境下, 根部會累積乙烯前驅物; 氨基環丙烷-1-羧酸 (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid; ACC), 之後利用木質部向地上部傳導 ACC, 造成葉柄上偏性 (高, 1994)。一般而言乙烯 (ethylene) 和高濃度的生長素 (auxins) 會誘發葉柄之上偏性生長。然而許多研究證明乙烯為葉

柄上偏性生長主要因子，而高濃度生長素造成葉片上偏性生長之主因為生長素會促進乙烯形成，故生長素僅間接參與葉柄上偏生長之反應 (Kieber, 2006)。

(4) 莖幹基部肥大皮孔增生

對許多較耐淹水之果樹而言，淹水與過度灌溉會誘導植株莖幹基部或靠近水線上方增生肥大之皮孔 (hypertrophic lenticels)，例如：桃、蘋果、梨、榲桲 (quince) (Andersen et al., 1984; Hook and Brown, 1973)、芒果 (Larson *et al.*, 1993)、楊桃 (carambola) (Schaffer et al., 1992) 與高灌木藍莓 (highbush blueberry) (Abbott and Gough, 1987)。芒果植株土壤缺氧至第 4 天即開始增生肥大皮孔，淹水時間越長，增生之皮孔數越多 (Larson *et al.*, 1993)。皮孔之組成木栓組織，莖幹基部增生肥大皮孔可抗耐淹水逆境之主因推測可能因莖部肥大皮孔可讓氧氣擴散至根圈，使根部能進行呼吸作用所致 (Hook and Scholtens, 1978; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。而芒果植株於水耕環境下添加乙烯與氧氣也可促進肥大皮孔之增生，故推測淹水處理所增生之肥大皮孔主要由乙烯誘導形成 (Larson *et al.*, 1993)。

(5) 地上部不定根之形成

於長時間淹水處理下，許多果樹之莖基部或水線以上會形成不定根 (adventitious root) 以適應或降低淹水逆境，例如：芒果、蘋果與百香果植株 (阮及鄭, 1986; Hook and Brown, 1973; Schaffer, 1998)，不定根結構上具較大之細胞空隙，於長時間淹水之環境下兼具吸收與傳遞氧氣至淹水根部之功效，以減輕根部缺氧 (anoxia) 之狀態 (Kozlowski, 1997)。一般而言，淹水誘導不定根形成通常較容易出現在幼年期之作物，例如：芒果 (Schaffer, 1998)。

(6) 造成落花與落果、抑制生殖生長

一般而言，於土壤浸水與多雨之環境下均會造成植株落花與落果、降低果實

品質，抑制生殖生長 (小林, 1985; Schaffer *et al.*, 1992)。兔眼種藍莓‘Woodard’ (*Vaccinium ashei* Reade ‘Woodard’) 於春季至夏季進行淹水處理後恢復排水，秋季花苞數僅為對照組的 30-70% (Crane and Davies, 1988a)。然而對某些果樹而言，適度淹水處理會抑制營養生長、促進植株開花，例如：楊桃 (Ismail and Noor, 1996) 與蓮霧 (Lin, 1992)。

4. 淹水對果樹作物根系吸收水分與代謝之影響

對許多作物而言，過多的水或淹水 (waterlogging) 會影響根系對水分的吸收、生長與分佈，主要是因為土壤缺氧所造成之缺氧症 (anoxia) (Buwalda, 1993)。土壤浸水降低根部對水之通透性；增加根對水分吸收的阻力，根部由於缺氧，故呼吸速率降低，也相對限制根系對養水分吸收之能力 (Kozlowski, 1984)。Andersen 等(1985) 以 2 年生之杜梨 (*Pyrus betulaefolia* Bunge)、豆梨 (*Pyrus calleryana* Decne)、西洋梨 (*Pyrus communis* L. ‘Old Home’ × ‘Farmingdale 97’)、榲桲 (*Cydonia oblonga* Miller ‘Provence BA 29’)、桃 (*Prunus persica* L. ‘Lovell’) 與褪色柳 (*Salix discolor* Muhl.) 為試驗材料，進行為期約 30 日有氧 (aerobic) 及無氧 (anaerobic) 之養液栽培處理，發現根系長期缺氧會降低根部呼吸速率與氣孔導度，根系缺氧時間越長，根部呼吸速率與氣孔導度則越低。蘋果根系經浸水處理後，葉片中氮、磷、鉀、鈣、鎂等大量元素的含量顯著降低 (Lee *et al.*, 1982)。於根系代謝方面，因淹水造成根系缺氧，故根系也進行無氧呼吸，造成乙醇及乙醛等有毒物質之累積，可能導致根系組織之傷害 (Rowe and Beardsell, 1973)。

5. 淹水對果樹作物根系生長之影響

一般而言，植物體根系對淹水特別敏感 (Buwalda, 1993)。淹水對植物體之影響程度依各作物對淹水之敏感度、樹齡、淹水周期長短、淹水頻率、季節與環境而有不同 (Kozlowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。

許多研究顯示，淹水或低氧均會減低根系之活力、降低根系乾物重、抑制果樹新根生長與伸長，加速新根死亡 (turnover) (Buwalda, 1993; Kozlowski, 1984; Olien, 1987; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。平田(2000b) 認為梨樹根系於土壤氧氣濃度 20%時生長良好，土壤氧氣濃度降低至 10%以下根系生長即受影響。蘋果於土壤氧氣含量 12%以上之環境下可產生龐大偏黃褐色之鬚根系，而土壤氧氣含量下降至 2.5-11%時其鬚根系統減少，根系顏色較深，土壤氧氣濃度下降至 2.5%以下根系則會大量木栓化且死亡 (Childers and White, 1942)。田間土壤短暫的缺氧會大量增加奇異果根系的死亡 (Buwalda, 1993)，奇異果植株淹水 3 日後新根生長量即明顯降低，以奇異果植株水耕供氧中斷試驗顯示，根部之生長與伸長明顯受缺氧抑制 (Smith *et al.*, 1989)。Ismail 和 Noor (1996) 以楊桃幼株為試驗材料，於 9 日之淹水處理下，發現淹水會抑制楊桃幼株根部之生長。與對照組相比，淹水處理 9 日之楊桃全株根部總乾物重約為對照組的 30%。與正常灌溉處理相比，黃色百香果 (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg) 幼株於浸水處理 24 小時後排水，雖處理後根系外觀未受影響，但排水後根系之生長量即低於對照組 (阮及鄭，1986)。粗皮檸檬與酸橙植株連續淹水處理 21 日根系生長即受抑制 (Syvertsen *et al.*, 1983)。

而比較植物體於淹水逆境下地上部與地下部比例可知，根系所受之影響較地上部嚴重。淹水處理之奇異果 (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) 植株乾物重與淹水日數成反比，而地上部與地下部乾物重比 (shoot : root ratio) 及落葉率則隨淹水日數增加而上升 (Smith *et al.*, 1990)。

6. 果樹作物適應淹水逆境之策略

許多耐淹水之作物於淹水狀態下，植物體內荷爾蒙相對含量也會發生明顯之變化，導致植物體出現型態及生理上之變化以適應淹水逆境。一般於淹水逆境下常見之外觀變化有：通氣組織形成、不定根生長及莖幹基部皮孔腫大等，這些外觀形態上之變化均為植物適應缺氧的生存策略 (Kawase, 1981; Schaffer, 1998;

Yamamoto *et al.*, 1995)。

根組織內部移動氧氣的能力通常與其多孔性有關。奇異果對於土壤缺氧逆境極為敏感，主要可能因其根系內部之多孔性相對較其他物種低所造成 (Buwalda, 1993)。一般作物根域於缺氧狀況下多會形成通氣組織 (aerenchyma) 以維持組織之含氧量；奇異果、蓮霧等作物於淹水後也會形成通氣組織以適應缺氧 (Lin, 1992; Smith *et al.*, 1990)，降低缺氧對作物生長之傷害。一般而言，淹水誘導通氣組織形成之機制為：淹水時根部誘導乙烯之生成，根部皮層接受乙烯訊息，誘發細胞死亡，產生多孔性 (Kieber, 2006)。

7. 不同果樹作物對淹水逆境之耐性與敏感度

不同物種、品種之作物與砧木對淹水之敏感性各有差異，以果樹栽培而言，於排水不良、易淹水之地區通常會篩選耐淹水 (flood tolerance) 砧木以抵抗淹水逆境。砧木對淹水逆境之耐受性也因環境變化、樹齡與品種而有不同 (Schaffer *et al.*, 1992)。一般而言，作為篩選砧木耐淹水之指標有：土壤浸水期間植株地上部生長性狀之變化、淹水期間光合作用率與光化學效率變化、土壤浸水期間根系活力變化與土壤浸水期間根部呼吸速率變化之敏感性等等，一般也多整合以上指標將作物對淹水之相對耐受性 (relative tolerant) 評分成 8 種等級：極端耐淹水 (extremely tolerant)、非常耐淹水 (very tolerant)、中度耐淹水 (moderately tolerant)、中度敏感 (moderately sensitive)、敏感 (sensitive)、非常敏感 (very sensitive)、極端敏感 (extremely sensitive) 與最敏感 (most sensitive) (Albrecht *et al.*, 1997; Andersen *et al.*, 1985; Beardsell, 1973; Mahbub *et al.*, 2006; Roberto *et al.*, 1999; Rowe and Hassan *et al.*, 1986; Schaffer *et al.*, 1992)。

(1) 極端耐淹水 (extremely tolerant)

例如：榲桲 (Quince; *Cydonia oblonga* Mill.) (Rowe and Beardsell, 1973) 與杜梨

(Birch-leaved pear; *Pyrus betulaefolia* Bunge) (Andersen *et al.*, 1984; Mahbub *et al.*, 2006)。然而榲桲植株因其抗淹水之特性，故常作用為梨樹栽培之抗淹水砧木 (Schaffer *et al.*, 1992)。

(2) 非常耐淹水 (very tolerant)

Rowe 和 Beardsell(1973) 認為大多數梨屬 (*Pyrus* spp.) 作物均非常耐淹水 (very tolerance)。Andersen 等(1984) 於梨屬作物中細分其對淹水之抗性，分級中屬於非常耐淹水 (very tolerance) 之梨屬作物依序有：豆梨 (*Pyrus calleryana*)、榲桲 ‘Emla C’ (*Pyrus oblonga* ‘Emla C’)、榲桲 ‘Provence BA29’ (*Pyrus oblonga* ‘Provence BA29’)、傅氏梨 (*Pyrus fauriei*) 與西洋梨 ‘Bartlett’ (*Pyrus communis* ‘Bartlett’)。

(3) 中度耐淹水 (moderately tolerant)

Andersen 等(1984) 於梨屬作物中細分其對淹水之抗性，分級中屬於中等耐淹水 (moderately tolerance) 之梨屬作物依序有：日本豆梨 (*Pyrus dimorphophylla* Makino)、秋子梨 (Ussurian pear; *Pyrus ussuriensis* Max.)、砂梨 (Sand pear; *Pyrus pyrifolia* Nakai)、川梨 (*Pyrus pashia*) 與西洋梨 ‘OH × F97’ (*Pyrus communis* ‘OH × F97’)。Schaffer 等(1992) 整合前人之研究認為蘋果砧木 M.1、M.2、M.3、M.6、M.7、M.13、M.14、M.15、M.16、M.26、‘Crab C sldg’ 與 ‘Jonathan sldg’ 屬於中度耐淹水之砧木。Rowe 和 Beardsell(1973) 認為蘋果 (*Malus × domestica* L.)、柑橘屬作物 (*Citrus* spp.)、歐洲李 (common plum; *Prunus domestica* L.) 與櫻桃李 (cherry plum; *Prunus cerasifera* L.) 均屬於中度耐淹水之作物。而藍莓、葡萄、芒果、楊桃與番石榴也被分級為中度耐淹水之作物 (Crane and Davies, 1989; Schaffer *et al.*, 1992)。而李屬 (*Prunus* species) 中的郁李 (*Prunus japonica*)、櫻桃李 ‘S2544-2’ (*Prunus cerasifera* ‘S2544-2’)、櫻桃李 ‘GF8-1’ (*Prunus cerasifera* ‘GF8-1’)、歐洲李 ‘Damas GF 1869’ (*Prunus domestica* ‘Damas GF 1869’) 與歐洲李 ‘Damas de Toulouse’

(*Prunus domestica* 'Damas de Toulouse') 於分級上均屬於中度耐淹水之作物 (Schaffer et al., 1992)。柑橘砧木中的枳殼 (*Trifoliata orange*; *Poncirus trifoliata*) 與粗皮檸檬 (Rough lemon; *Citrus jambhiri*) 於分級上也屬於中度耐淹水之作物 (Schaffer et al., 1992)。

(4) 中度敏感 (moderately sensitive)

蘋果砧木的 M.4、M.9、M.26、M.111、MM.106 品系於分級上屬於中度敏感之砧木 (Schaffer et al., 1992)。李屬中的歐洲李 'Cirule 43' (*Prunus domestica* 'Cirule 43')、歐洲李 'Brompton' (*Prunus domestica* 'Brompton')、歐洲李 'St. Julian A' (*Prunus domestica* 'St. Julian A')、歐洲李 'GF355-2' (*Prunus domestica* 'GF355-2')、櫻桃李 'P34' (*Prunus cerasifera* 'P34')、櫻桃李 'P855' (*Prunus cerasifera* 'P855')、櫻桃李 'P936' (*Prunus cerasifera* 'P936')、櫻桃李 'P938' (*Prunus cerasifera* 'P938') 與 Methley plum 'GF31' (*Prunus cerasifera* × *P. salicina* 'GF31') 於分級上屬於中度敏感之作物 (Schaffer et al., 1992)。柑橘砧木的枳橙 'Carrizo' (*Citrus sinensis* × *Poncirus trifoliata* 'Carrizo')、椪柑 (*Citrus reticulata*) 與甜橙 (*Citrus sinensis*) 於分級上屬於中度敏感之作物 (Schaffer et al., 1992)。而梨屬作物的 *Pyrus amygdaliformes* (Andersen et al., 1984)、中國李 (Chinese plum; Sour peach; *Prunus salicina* Lindl.) (Rowe and Beardsell, 1973)、無花果 (*Ficus carica* L.)、酪梨 (*Persea americana* Mill.)、枇杷 (Loquat; *Eriobotrya japonica*) 與番木瓜 (*Carica papaya* L.) (Schaffer et al., 1992) 於分級上也屬於中度敏感之作物。

(5) 敏感 (sensitive)

蘋果砧木的 M2、M104、MM106、MM109 品系，中國李 (*Prunus salicina*) 的 'S37'、'S300'、'2540'、'S2541' 品系、酸櫻桃 'Stockton Morello' (*Prunus cerasus* 'Stockton Morello')、苦橙 (*Citrus aurantium*) 與萊姆 (*Citrus aurantiifolia*) 於分級

上均屬於對淹水敏感之砧木 (Schaffer *et al.*, 1992)。

(6) 對淹水非常敏感 (very sensitive; extremely sensitive)

蘋果砧木的 M26、M111、M779、M789、M793、‘Northern Spy sdlg’ 品系於分級上屬於對淹水非常敏感之砧木 (Schaffer *et al.*, 1992)。而 Rowe 和 Beardsell(1973) 指出甜櫻桃 (*Prunus avium* L.)、圓葉櫻桃 (St Lucie cherry; Mahaleb cherry; *Prunus mahaleb* L.)、桃 (*Prunus persica* (L.) Batsch) 與山桃 (David’s peach; *Prunus davidiana* L.) 對淹水非常敏感。而杏桃 (Apricot; *Prunus armeniaca* L.) (Rowe and Beardsell, 1973; Rowe and Catlin, 1971) 與奇異果植株 (*Actinidia deliciosa*) (Buwalda, 1993; Smith *et al.*, 1989; Smith *et al.*, 1990) 也屬於對淹水非常敏感之作物。

(7) 極端敏感 (extremely sensitive)

李屬中的山桃‘GF308’ (*Prunus davidiana* ‘GF308’)、桃 (*Prunus persica*)、梅 (*Prunus mume*)、綿毛櫻 (*Prunus tomentosa*) 於李屬作物中屬於對淹水相對極端敏感之植株 (Schaffer *et al.*, 1992)。

(8) 最敏感 (most sensitive)

扁桃 (*Prunus dulcis* Mill.) 與杏桃 (*Prunus armeniaca*) 於李屬作物中屬於對淹水最敏感之作物 (Schaffer *et al.*, 1992)。

(五) 梨樹根系之生長特性

梨屬 (*Pyrus*) 作物為喬木類，根系屬軸根系 (tap root system) 之深根性作物 (Atkinson, 1980; Jackson, 2003)。15 年生亞洲梨 (Asian pear) 根系於土壤中之垂直分佈深度約為 150 公分，90% 以上之根系多集中於土壤下 60 公分內，根系之水平

分佈半徑為 3.5 公尺，90%以上之根系多集中於距主幹 2 公尺內 (平田，2000b)。

40 年生鴨廣梨 (*Pyrus ussuriensis* Maxim. 'Yaguang') 根系之構成以 0-2 公釐粗之鬚根為主(占 87.3%)，根系垂直分佈小於樹高，69.1%的根系集中分佈於 0-30cm 之土層內，88.3%的根系集中分佈於 0-50 公分深的土層中，根系水平分佈大於樹冠，91%的根集中分佈於樹冠內，越近主幹的土壤根系密度越高，樹冠外根系分佈很少 (李等，2007)。

西洋梨根系於土壤中之垂直分佈範圍為 0.6-3.5 公尺，根系多集中於土壤下 60 公分內，52%之根系分佈於 0-20 公分近土表處，根系之水平分佈面積範圍為 7-28 平方公尺，62-80%之根系集中於距主幹 1 平方公尺內，90%之根系分佈於距主幹 4 平方公尺之範圍內 (Atkinson, 1980)。

梨樹植株根系分佈之深度與範圍依砧木、物種、品種、土壤性狀、整枝與栽培系統而有不同 (平田，2000b; Atkinson, 1980)。

觀察日本地區 9 年生，主枝長 2.9 公尺、棚架式整枝 (trellis training) 之長十郎 (*Pyrus pyrifolia* Nakai 'Chojuro') 梨樹根系分佈範圍可知，棚架式整枝梨樹之根系於土壤內之垂直分佈為 120 公分，90%以上之根系集中於土壤下 60 公分內，分佈深度較淺，根系水平分佈半徑達 3.5 公尺，分佈密度隨主幹距離而遞減。然而於開心自然型 (open central leader training) 整枝系統下，根系於土壤內之垂直分佈達 150 公分，90%以上之根系集中於土壤下 90 公分內，根系垂直分佈較深，水平分佈範圍為 2.5 公尺 (平田，2000b)。

(六) 秋根對薔薇科落葉果樹生長之影響

梨樹於溫帶地區的日本，秋根之數量相對少於春根，但秋根之生長與維持對植株隔年春季早期展葉、徒長枝之生長與隔年果實細胞分裂期營養之供應具重要之生長意義。在日本溫帶地區，秋根於 9-10 月間少量生產 1-2 次，大多數秋季生長之新生根於 10 至 11 月間木栓化，而少數之新生根則維持白色根之狀態越冬，於隔年 3 月轉色木栓化，相較於隔年 5 至 6 月春季長出的新生根壽命較長，一般春根之壽命約 10 至 20 日，更新速率較秋根快 (平田，2000b; 林，1960)。Christina

和 Eissenstat(1996) 於美國賓州中部觀察 20 年生 'Red Delicious'/'M.26' 蘋果樹 10 月至隔年 6 月植株根系之生長可知蘋果根系於初秋 (10 月) 果實採收後具 1 次小量生長期，超過 30% 之秋根壽命達 200 日以上，然而春季萌芽期產生的春根壽命較短，新生根於晚春時大量更新。

當其他大氣環境與土壤條件不為限制因子時，植物體地上部之生長、發育與根部之生長、延長與老化幾乎與地溫相關，於 10-30°C 之範圍內，土溫越高，根系延長範圍越廣，相對死亡 (mortality) 速率也會上升，主要因為溫度升高、促進根系呼吸速率上升 (溫度係數 Q_{10} 上升)、加速碳水化合物與醣分之消耗，造成根系提早老化更新，一般認為木本植物之根於土溫 5-35°C 範圍內才能生長，而以 15-30°C 最適宜 (Cox *et al.*, 2000; Marshall and Waring, 1985; Pregitzer *et al.*, 2000; Richards, 1983; Woodham and Alexander, 1966)。然而觀測 1 年生梨樹根系於土溫 10-40°C 下生長可知，根系生長量隨溫度上升而增加，至 25°C 以上時根系生長量則隨溫度上升而降低，於 40°C 時幾乎停止生長 (林, 1960)。根系之分佈受土溫影響。田間栽培之蘋果根群於春季時分佈於近地表處，因該處於春季溫度最高，冬季少數有活力之根系則繼續深入土中，以避開寒冷的地表 (Rogers, 1939)。梨樹秋季新根之壽命與溫度有關，於土溫低 (20°C) 的時候，新生根組織較多汁、壽命較長。於土溫高 (>30°C) 的時候，新生根木栓化的速度較快、壽命較短 (平田, 2000b; 林, 1960)。

秋根之生長與二十世紀梨黑斑病 (*Alternaria kikuchiana* Tanaka) 之預防有關。樹齡 10 年以上之二十世紀梨樹勢較弱，幼葉與小果易受黑斑病之影響，若秋根之生長良好，樹體可充分儲蓄養分，隔年春季展葉與果實發育速率較快，果實較快脫離幼果期，可減輕黑斑病之威脅 (林, 1960)。

對梨樹而言，秋根生長程度、樹體營養狀況及施肥之效果均有關連。果園於秋季前土壤肥效持續的情況下，秋根大多會伸長，而於沒有施肥的年份，秋根的

成長是有限的。秋季施肥促進秋根生長，也增加隔年越冬之吸收根，可促使植株持續吸收與儲蓄養分，供給隔年地上部之發育與生長 (林，1960)。

於園藝栽培而言，秋根於秋季禮肥之施用與隔年早期展葉及徒長枝之生長具相關連之意義。一般於梨樹栽培上認為，禮肥的量越多越好，然而秋季過度施氮肥會造成地上部延長生長，對於養分之儲存有負面之影響，特別是較弱的樹體，而秋、冬季結霜也易造成葉片凍傷與枝枯病 (*Phomopsis fukushii*) 等傷害 (林，1960)。然而秋季施氮肥過量也易使二十世紀梨出現黑班病 (林，1960)。

(七) 溫帶地區落葉果樹季節性根部與地上部生長之關係

於溫帶地區栽培之落葉果樹，地上部枝條與根之生長期相近或重疊，例如：西洋梨 (Head, 1968)、二十世紀梨 (林，1960)、幸水梨 (平田，2000b)、長十郎梨 (平田，2000b)、桃 (Cockroft and Olsson, 1972)、蘋果 (橫田，2000)、奇異果 (Buwalda and Hutton, 1988) 與葡萄 (Freeman and Smart, 1976)..... 等等。

於英國溫帶地區觀察 3 年生西洋梨 'Conference' 之枝條與根部季節性生長可知，植株地上部枝條生長與根部之生長期相近 (Head, 1968)。一般而言，溫帶地區梨樹枝條之伸長通常於果實快速發育時期停止 (Chalmers *et al.*, 1984)，於收穫時期再重新開始小量生長 (Caspari *et al.*, 1994)，冬季休眠，具四季變化。日本鳥取地區之二十世紀梨 (*Pyrus pyrifolia* 'Nijisseiki')，根系生長較地上部早約 1 個月，根系之生長速率隨地上部生長而增加，至 6 月中旬新梢停止伸長、果實快速發育期時停止，根部於 9 月中旬果實採收後再小量生長 (林，1960)。

於紐西蘭北島地區觀察 6 年生獼猴桃 (*Actinidia deliciosa*) 植株根部與枝條之季節性生長可知，獼猴桃之根部生長較地上部早約 10-14 日，地上部於 60 天內快速生長後即停止，而根部之相對生長速率則隨地上部生長而增加，地上部停止生長 1 個月後根部之生長勢才逐漸下降 (Buwalda and Hutton, 1988)。

於紐約州觀察葡萄根部與枝條之季節性生長可知，根部之生長周期自春天開始，生長速率隨溫度上升而增加，至仲夏達最大生長速率，之後出現2次的生長高峰，分別是：頂芽停止生長與果實採收後兩時期 (Freeman and Smart, 1976)。然而與其他落葉果樹不同的是，葡萄春季根部之生長約於萌芽(budburst)後10週開始，其它落葉果樹，例如：梨、蘋果、獼猴桃之發育即由根部或同時打破休眠 (平田, 2000a; 林, 1960; Buwalda, 1988; Christina and Eissenstat, 1996; Richards, 1983)。

(八) 亞熱帶地區常綠果樹季節性根部與地上部生長之關係

於亞熱帶地區栽培之常綠果樹，地上部枝條與根部之生長期幾乎錯開，地上部枝條與根系間呈間歇性生長之模式。

於佛羅里達地區觀察甜橙‘Valencia’枝條與根部之季節性生長可知，植株地上部枝條與根部之生長期幾乎錯開，地上部與根部呈交錯且間歇性之生長模式 (Bevington and Castle, 1985)。

於佛羅里達南部地區觀察兩種芒果‘Keitt’與‘Julie’植株季節性地上部與根部之生長模式可知，兩种植株之地上部枝條與根部之生長模式完全不同，根部雖呈間歇性生長之模式，但地上部生長有時與根部之生長重疊或交錯，兩者間呈不規則之生長模式 (Willis and Marler, 1993)。

(九) 果樹作物根系與地上部生長之關係

根系生長與地上部光合產物之供應相關；根部全依賴葉片製造供應碳水化合物，而地上部也全依賴根部供應礦物元素與水分，兩者間相互平衡與協調。而地上部成熟葉 (供源器官; source) 之數量與功率與根系 (儲池; 儲耗器官; sink) 之維持，彼此間相互影響 (Richards, 1983; Buwalda, 1993)。

根系之生長與發育受植株葉果比 (Leaf : Fruit ratio) 之影響。Buwalda (1993) 奇異果植株葉果比與地下部生長調查可知，植株地上部葉果比上升，根系所分配之養分越多，根生長量也上升。

(十) 果樹作物根系之觀測方法

一般作物根系之生長監測可分成破壞性 (destructiveness) 監測與非破壞性 (non-destructiveness) 監測 2 類。歸納常見的根系生長監測方式有以下 6 種：挖掘法、剖面窗法、根窗、土柱法、土壤剖面法、微根窗與透地雷達技術 (Atkinson, 1980; Bai *et al.*, 2005; Bohm, 1979; Brown and Upchurch, 1987; Buwalda, 1993; Caldwell and Virginia, 1991; Hruska, 1999)。

1. 破壞性監測

(1) 挖掘法 (excavation)

挖掘法為過去傳統根系研究主要之技術，主要利用土壤挖掘之方式將作物根系挖掘出土面，藉以分析研究植物體根系結構於土壤內之分布，主要可觀測果樹作物整體主要根系 (>5mm diameter) 之結構 (Atkinson, 1980)。但挖掘法因需花費大量之人力，且田間挖掘常造成鄰近作物根系之損壞 (Atkinson, 1980)，對其根系傷害極大。Dudney (1972) 統計挖掘法約有 22-37% 的根系被保留於土壤內或因清理時耗損而無法被測量。一般而言，挖掘法於每次測量時需將植株之根系挖出，常造成根系損傷，故通常無法進行連續性之監測，限制根系研究之內容與範圍 (Atkinson, 1980)。

(2) 土柱法 (soil core; Auger method) 與土壤剖面法 (monolith method)

土柱法與土壤剖面法類似，主要差異點為土壤取樣之體積量。土柱法主要於觀測植株周遭，於不同距離或位置採集抽樣一定體積之土壤，之後將採集之土壤

塊以不同之垂直距離分層採樣觀測土壤內根系之數量、顏色、根長度密度 (root length density; RLD)、根生物產量 (root biomass)、根系大小與重量，屬於破壞性監測，而土柱法採樣之土壤體積多小於 1000 立方公分($<1000\text{cm}^3$)，而土壤剖面法獲得之土壤體積較土柱法多，為 1000-5000 立方公分，相對植物體所受之傷害較大 (Bohm, 1979; Buwalda, 1993)。

2. 非破壞性監測

(1) 根窗 (rhizotron) 與剖面窗法 (profile wall method)

根窗法利用根系生長箱自根系生長處附近製作一面透明的窗口，通常以塑膠板或玻璃為材料，以觀察植株根系之生長。根窗法多應用於容器栽培，利用透明的根系生長箱，直接觀察介質中植株根系之生長，但因介質容器大小之限制，根窗法多使用於小型植株根系之觀測 (James *et al.*, 1985; Richardson-Calfee *et al.*, 2010)。而根窗也有應用於田間或森林作物，原理相似，也稱剖面窗法，通常於田間進行，於預先挖掘於地下之根室觀測根系生長，但花費之成本與人力極高 (Bohm, 1979; USDA, 2007)。

(2) 微根窗 (minirhizotron)

Bates(1937) 認為過去根系生長之研究多以挖掘法 (excavation) 做為根系觀測之技術，但因挖掘法為破壞性監測 (destructiveness) 且無法對同一根系進行連續性之監測，故提出非破壞性 (non-destructiveness) 且可於多個時間段內原位重複觀測根系之方法，即為微根窗 (minirhizotron) 之概念。Brown 和 Upchurch (1987) 對微根窗之定義為：微根窗系統是由多組分組成的，在土壤中真實的或通過圖像記錄一般難以接近的植物根系生長狀況。一般微根窗之基本構造是由微根窗管 (minirhizotron tube)、照相機 (camera) 或攝影機 (video camera)、標定手柄 (indexing handle)、控制器 (control box) 與電腦 (computer) 等儀器所組成 (Brown

and Upchurch, 1987; Caldwell and Virginia, 1991; Johnson *et al.*, 2001; Vamerali *et al.*, 1999)。一般微根窗技術多應用於田間果園試驗 (Li *et al.*, 2003)、森林生態 (Pritchard, 2008)、草地生態 (Krift and Berendse, 2002)、沙漠植物生態與農業生態系統等植物根系之研究 (Bai *et al.*, 2005; Taylor, 1987)。而微根窗與其它傳統破壞性根系觀測主要之差異為，微根窗可於短時間內連續監測單一根系之動態生長如：根系之壽命與更新 (root lifespan and turnover) (Cheng *et al.*, 1991; Li *et al.*, 2003)、根生長周期與單位時間新根產量 (new roots production) (Li *et al.*, 2003)。相對於利用植盆所設計之根窗系統，微根窗主要於田間操作，未受盆器控制限制根系生長，較符合田間作物之生長狀態。

(3) 透地雷達技術 (ground-penetrating radar; GPR)

透地雷達 (ground-penetration radar) 技術即以雷達波為波源之物理探勘法。操作原理即利用無線電與微波能穿透底土的能力，向地下發射雷達波，再依照回波的資料進行分析，藉以推測地面下主探測目標物的狀況。雷達波穿透距離從數公分到數公尺，取決於訊號頻率介質的電磁特性 (Rosemary, 2001)。透地雷達技術先前主要應用於淺質地層調查、古蹟探查、礦藏探勘、工程探查、環境污染調查、冰層探勘、地下水位深度觀測等方面 (Milan and Haeni, 1991; Rosemary, 2001; Wikipedia, 2010)，近年也運用到農業與林業之研究。而目前為止，透地雷達技術主要應用於森林系統中喬木類直徑5公分以上根系分佈之探測，例如：Hruska等 (1999) 使用透地雷達繪製無柄花櫟 (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) 根系的三維分佈、Stokes等(2002) 以透地雷達觀測都市內奧地利松 (*Pinus nigra* Arn.) 與瑞典花楸 (*Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.) 根系之構造與分佈、Butnor等(2001；2003) 應用於觀測森林系統內植物根系之生物產量。

三、試驗假說

植物生活史中幾乎所有生長與發育皆受水分影響，而環境逆境中以乾旱逆境限制植物生長和作物產量最高 (Boyer, 1982; Hsiao, 1973; 1993; Lakso, 2003)。土壤淹水導致土壤缺氧，土壤缺氧可能使作物根部與地上部生長受抑制，最終造成植株死亡 (Schaffer, 1998)。果樹作物短期土壤缺水會消耗樹體累積之碳水化合物，增加作物根系生長量以尋找水分 (Buwalda, 1993; Buwalda and Lenz, 1992)，然而土壤淹水或低氧均會減低根系活力、抑制果樹新根生長，加速新根死亡 (Kozlowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。砂梨為中度耐淹水作物，短期淹水應對植株影響有限，但植株根系仍會受損，作物須消耗地上部碳水化合物以維持根系正常運作 (Andersen *et al.*, 1984; Buwalda, 1993; Schaffer *et al.*, 1992)。故假設：梨樹於土壤水分變化劇烈之環境，樹體地上部與根系所受之影響較單獨由乾旱或淹水所造成之逆境嚴重。

四、結論

乾旱或淹水逆境均會影響作物生長，但仍未有試驗仔細評估其對地上部與根系生長之影響。本論文第二章—土壤水分變化對秋季蜜雪梨樹植株根系生長之影響，主要於露天環境透過盆栽試驗控制土壤水分，利用根窗觀察各受試植株地上部與根系於不同土壤水分變化之生長狀態。期望以此論文能了解環境土壤水分變化下梨樹根系與地上部之生長模式。

參考文獻

小林章. 1985. 多雨による土壤浸水と果實の生産・品質 p. 87-96. 刊於：小林章編著. 果樹風土論. 養賢堂. 東京.

中央氣象局. 2003. 中華民國臺灣氣候圖集.

<<http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/cd/cd06clmp/index.htm>>.

平田尚美. 2000a. 年間の生育過程. p. 29-34. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科 4 ナシ. 農山漁村文化協會. 東京.

平田尚美. 2000b. 各部の形態と生長. p. 35-44. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科 4 ナシ. 農山漁村文化協會. 東京.

行政院農業委員會. 2007. 民國 96 年農業統計年報.

<http://www.coa.gov.tw/htmlarea_file/web_articles/coa/9918/096.xls>.

行政院農業委員會農業試驗所. 2007. 新育成品種.

<<http://www.tari.gov.tw/taric/modules/tinycontent/>>.

阮素芬、鄭正勇. 1986. 浸水對百香果幼株生長與型態之影響. 中國園藝 32(1):34-42.

李錦、宋秀紅、孫愛芹、薛玉花. 2007. 鴨廣梨根系觀察. 河北果樹 4:10-11.

吳明哲. 1994. 本省梨產業因應加入 GATT 之道. 臺灣經濟果樹栽培技術及應用研討會專集. 臺中區農業改良場編印. p. 315-324.

吳明進. 1996. 氣候變遷對臺灣氣候之影響. 氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研討會論文集. 國立臺灣大學全球變遷中心編印. p. 1-19.

林月金、高德錚. 2005. 臺灣梨產業分析. 梨栽培管理技術研討會專輯. 臺中區農業改良場編印. P.12-46.

林真二. 1960. 果樹栽培生理新書 梨. 朝倉書店. 東京. 日本.

高景輝. 1994. 植物荷爾蒙生理. 華香園出版社. 臺北. 臺灣.

張仲民. 1980. 土壤化育與形態學. 國立編譯館. 臺北. 臺灣.

康有德. 1997. 梨. p. 455-458. 刊於:康有德等編著. 園藝概論. 啟英文化出版社. 臺北.

陳幼麟. 1993. 臺灣區域氣候之研究. 國立臺灣大學大氣科學系碩士論文. 臺北.

經濟部水利署. 2007. 由全球暖化看臺灣水文環境之影響與衝擊.

<<http://www.wcis.itri.org.tw/Upload/QUARTC/000603/2%E6%94%BF%E7%AD%96%E9%A0%BB%E9%81%93-%E7%94%B1%E5%85%A8%E7%90%83%E6%9A%96%E5%8C%96%E7%9C%8B%E5%8F%B0%E7%81%A3%E6%B0%B4%E6%96%87%E7%92%B0%E5%A2%83%E4%B9%8B%E5%BD%B1%E9%9F%BF%E8%88%87%E8%A1%9D%E6%93%8A.pdf>>.

廖珩毅、李佳容、何興亞、陳憲宗、王毓麒、游保杉. 2009. 國內外水資源因應氣候變遷調適策略研析. 氣候變遷論叢 2:67-79.

廖萬正. 1995. 梨. p. 169-175. 刊於:農業委員會臺灣農家要覽增修訂再版策劃委員會編著. 臺灣農家要覽 農作篇(二). 財團法人豐年社. 臺北.

臺灣大學全球變遷研究中心. 1997. 全球環境變遷導論.

<<http://140.115.123.30/gis/globalc/index.htm#CHAP16>>.

臺中區農業改良場. 2009. 梨新品種栽培方法介紹.

<<http://tdares.coa.gov.tw/view.php?catid=1289>>.

横田清. 2000. 各部の形態と發育過程. p. 43-49. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科 2 リンゴ. 農山漁村文化協會. 東京.

櫻井芳次郎. 1944. 梨. p.463-469. 櫻井芳次郎編著. 臺灣農家便覽. 臺灣總督府農業試驗所. 臺中.

Abbott, J.D. and R.E. Gough. 1987. Prolonged flooding effects on anatomy of highbush blueberry. *HortScience* 22:622-625.

Albrecht, G., S. Biemelt, and S. Baumgartner. 1997. Accumulation of fructans following oxygen deficiency stress in related plant species with different flooding tolerances. *New Phytol.* 136:137-144.

Andersen, P.C., P.B. Lombard, and M.N. Westwood. 1984. Leaf conductance, growth, and survival of willow and deciduous tree species under flooded soil conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109:132-138.

Andersen, P.C., J.M. Montano, and P.B. Lombard. 1985. Root anaerobiosis, root respiration, and leaf conductance of peach, willow, quince and several pear species. *HortScience* 20(2):248-250.

Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Hort. Rev.* 2:424-490.

Bai, W.M., W.X. Cheng, and L.H. Li. 2005. Applications of minirhizotron techniques to root ecology research. *Acta Ecol. Sinica.* 25:3076-3081.

- Bates G.H. 1937. A device for the observation of root growth in the soil. *Nature* 139:966-967.
- Beckman, T.G., R.L. Perry, and J.A. Flore. 1992. Short-term flooding affects gas exchange characteristics of containerized sour cherry trees. *Hortscience* 27(12):1297-1301.
- Behboudian, M.H. and G.S. Lawes. 1994. Fruit quality in “Nijisseiki” Asian pear under deficit irrigation: physical attributes, sugar and mineral content, and development of flesh spot decay. *NZ. J. Crop Hort. Sci.* 22:393-400.
- Behboudian, M.H., G.S. Lawes, and K.M. Griffiths. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehb.). *Scientia Hort.* 60:89-99.
- Behboudian, M.H. and T.M. Mills. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hort. Rev.* 21:105-131.
- Bevington, K.B. and W.S. Castle. 1985. Annual root growth pattern of young citrus trees in relation to shoot growth, soil temperature, and soil water content. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110(6):840-845.
- Bohm, W. 1979. *Methods of studying root systems (Ecological Studies, V. 33)*. Berlin Heidelberg New York:Springer-Verlag.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218:443-448.
- Brown, D.A. and D.R. Upchurch, 1987. Minirhizotrons: a summary of methods and instruments in current use, p. 15-30. In: H.M. Taylor (eds.). *Minirhizotron*

observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics.
Amer. Soc. Agron. Press. Madison, WI.

Butnor, J.R., J.A. Doolittle, K.H. Johnsen, L. Samuelson, T. Stokes, and L. Kress. 2003.
Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems.
Soil Sci. Soc. Amer. J. 67:1607-1615.

Butnor, J.R., J.A. Dolittle, L. Kress, S. Cohen, and K.H. Johnsen. 2001. Use of
ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree
Physiol.* 21:1269-1278.

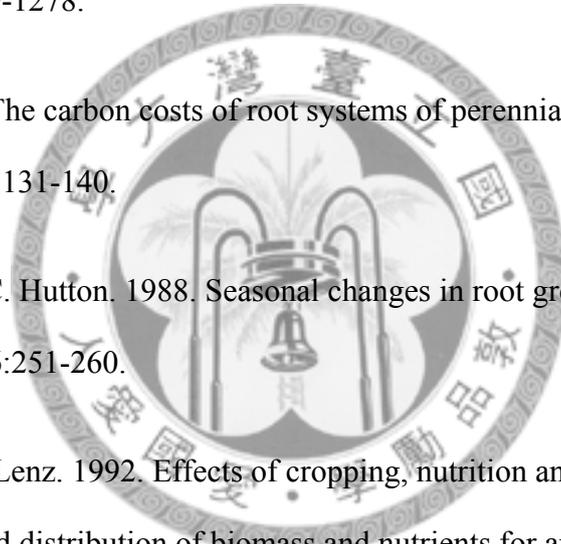
Buwalda, J.G. 1993. The carbon costs of root systems of perennial fruit crops. *Environ.
Expt. Bot.* 33(1):131-140.

Buwalda J.G. and R.C. Hutton. 1988. Seasonal changes in root growth of kiwifruit.
Scientia Hort. 36:251-260.

Buwalda, J.G. and F. Lenz. 1992. Effects of cropping, nutrition and water supply on
accumulation and distribution of biomass and nutrients for apple trees on 'M9' root
systems. *Physiol. Plant.* 84:21-28.

Caldwell, M.M. and R.A. Virginia. 1991. Root systems, p. 367-398. In: R.W. Pearcy, J.
Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel (eds.). *Plant physiological ecology:
Field methods and instrumentations.* Chapman and Hall Press, London, Ind.

Caspari, H.W., M.H. Behboudian, and D.J. Chalmers. 1994. Water use, growth, and fruit
yield of 'Hosui' Asian pears under deficit irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*
119(3):383-388.



Challice, J.S. 1974. Rosaceae chemotaxonomy and the origins of the Pomoideae. *Bot. J. Linn. Soc.* 69:239-259.

Chalmers, D.J., P.D. Mitchell, and P.H. Jerie. 1984. The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation. *Acta Hort.* 146:143-149.

Cheng, W., D.C. Coleman, and J.E. Box. 1991. Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agr. Ecol. Environ.* 34:261-267.

Childers, N.F., and D.G. White. 1942. Influence of submersion of the roots on transpiration, apparent photosynthesis, and respiration of young apple trees. *Plant Physiol.* 17:603-618.

Christina E.W. and D.M. Eissenstat. 1996. Fine root production and mortality in apple over winter. *Hortscience* 31:603 (abstr.).

Cockroft, B. and K.A. Olsson. 1972. Pattern of new root production in peach trees under irrigation. *Austral. J. Agr. Res.* 23(6):1021-1025.

Cox P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall, and I.J. Totterdell. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408:184-187.

Crane, J.H. and F.S. Davies. 1988a. Flooding duration and seasonal effects on growth and development of young rabbiteye blueberry plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113:180-184.

Crane, J.H. and F.S. Davies. 1988b. Periodic and seasonal flooding effects on survival, growth and stomatal conductance of young rabbiteye blueberry plants. *J. Amer.*

Soc. Fort. Sci. 113:488-493.

Crane, J.H. and F.S. Davies. 1989. Flooding responses of *Vaccinium* species.

HortScience 24:203-210.

DeWitt, M.C.J. 1978. Morphology and function of roots and shoots growth of crop plants under oxygen deficiency, p.333-350. In: D.D. Hook and R.M.M. Crawford (eds.). Plant life in anaerobic environments. Ann. Arbor. Sci. Press, Ann. Arbor., MI.

Drew, M.C. and E.J. Sisworo. 1977. Early effects of flooding on nitrogen deficiency and leaf chlorosis in barley. *New Phytol.* 79:567.

Dudney, P.J. 1973. On the estimation of root biomass in a growth pattern experiment on apples. Rpt. East Malling Res. Sta. for 1971. p.66-67.

Flore, J.A. and A.N. Lakso. 1989. Regulation of photosynthesis in fruit crops. *Hort Rev.* 11:111-157.

Francisco, G.S., P.S. James, G. Vicente, B. Pablo, and G.P.P. Juan. 2007. Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. *Physiol. Plant.* 130:532-542.

Freeman, B.M. and R.E. Smart. 1976. A root observation laboratory for studies with grape vines. *Amer. J. Enol. Viticult.* 27:36-39.

Gao, X.P., J.Y. Yan, E.K. Liu, Y.Y. Shen, Y.F. Lu, and D.P. Zhang. 2004. Water stress induces in pear leaves the rise of betaine level that is associated with drought tolerance in pear. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 79(1):114-118.

Garnier, E., A. Berger, and S. Rambal. 1986. Water balance and the pattern of water uptake in a peach orchard. *Agr. Water Mgt.* 11:145-158.

Grable, A.R. 1966. Soil aeration and plant growth. *Advan. Agron.* 18:57-106.

Hassan, M.M., A.T. Salem, and M.A. Fayek. 1986. Response of apricot seedlings to waterlogging. *Scientia Hort.* 29:125-130.

Hasegawa, P.M. 2002. Stress physiology, p. 591-623. In: L. Taiz and E. Zeiger (eds.). *Plant physiology*. 3th ed. Sinauer Assoc. Press, Massachusetts, Ind.

Hassan, M.M., A.T. Salem, and M.A. Fayek. 1986. Response of apricot seedling lines to waterlogging. *Scientia Hort.* 29:125-130.

Head, G.C. 1968. Seasonal changes in the amounts of white unsubsized root on pear trees on quince rootstock. *Hort. Sci.* 43:49-58.

Heinicke, A.J. 1932. The effect of submerging the roots of apple trees at different seasons of the year. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 29:205-207.

Hook, D.D. and C.L. Brown. 1973. Root adaptations and relative flood tolerance of five hardwood species. *For. Sci.* 19:225-229.

Hook D.D. and J.R. Scholtens. 1978. Adaptations and flood tolerance of tree species, p. 47-128. In: D.D. Hook and R.M.M. Crawford (eds.). *Plant life in anaerobic environments*. Ann Arbor Sci. press, Ann Arbor, MI.

Hruska, J., J. Cermak, and S. Sustek. 1999. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree physiol.* 19:125-130.

Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24:519-570.

Hsiao, T.C. 1993. Growth and productivity of crops in relation to water status. *Acta Hort.* 335:137-148.

Ismail, M.R. and K.M. Noor. 1996. Growth, water relations and physiological processes of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) plants under root growth restriction. *Scientia Hort.* 66:51-58.

Jackson, J.E. 2003. Apple and pear root systems: induction, development, structure and function, p. 84-116. In: J.E. Jackson (ed.). *Biology of apples and pears*. Cambridge Univ. Press, United Kingdom.

Jackson, M.B. 1991. Regulation of water relationships in flooded plants by ABA from leaves roots and xylem sap, p. 217-226. In: *Abscisic acid, physiology and biochemistry*. W.J. Davies and H.G. Jones (eds). Bits Sci. press, UK.

James, B.R., R.J. Bartlett, and J.F. Amadon. 1985. A root observation and sampling chamber (rhizotron) for pot studies. *Plant and soil* 85:291-293.

John, D.A. and R.E. Gough. 1987. Growth and survival of the highbush blueberry in response to root zone flooding. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112(4):603-608.

Johnson, M.G., D.T. Tingey, and D.L. Phillips. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environ. Expt. Bot.* 45:263-289.

Jones, H.G., A.N. Lakso, and J.P. Syvertsen. 1985. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees. *Hort. Rev.* 7:301-344.

Kawase, M. 1981. Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging.

HortScience 16:8-12.

Kieber, J. 2006. Ethylene, p. 571-591. In: L. Taiz and E. Zeiger (eds.). Plant physiology (4th). Sinauer Associates press, Sunderland, Ind.

Kozlowski, T.T. 1982. Water supply and tree growth. Part II . Flooding. For. Abstr. 43:145-161.

Kozlowski, T.T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree physiology monograph no.1. Heron, Victoria.

Kozlowski, T.T. 1984. Responses of woody plants to flooding, p. 129-163. In: T.T. Kozlowski (ed.). Flooding and plant growth. Academic press, New York.

Kozlowski, T.T. and S.G. Pallardy. 1984. Effect of flooding on water, carbohydrate, and mineral relations, p. 165-193. In: T.T. Kozlowski (ed.). Flooding and plant growth. Academic press, New York.

Kramer, P.J. 1983. Soil and water, p. 57-83. In: P.J. Kramer (ed.). Water relations of plants. Academic press, New York.

Kramer, P.J. and J.S. Boyer. 1995a. Soil and water, p. 84-114. In: P.J. Kramer and J.S. Boyer (eds.). Water relations of plants and soils. Academic press, New York.

Kramer, P.J. and J.S. Boyer. 1995b. Roots and roots systems, p. 115-165. In: P.J. Kramer and J.S. Boyer (eds.). Water relations of plants and soils. Academic press, New York.

Krft, T.A.J.V.D. and F. Berendse. 2002. Root life spans of four grass species from habitats differing in nutrient availability. Functional Ecol. 16:198-203.

Lakso, A.N. 2003. Water relations of apples. P. 167-194. In: Apples: botany, production and uses. D.C. Ferree and I.A. Warrington (eds.), CAB International, Wallingford, Oxon, UK.

Larson, K.D., B. Schaffer, and F.S. Davies. 1993. Floodwater oxygen content, ethylene production and lenticel hypertrophy in flooded mango (*Mangifera indica* L.) trees. J. Expt. Bot. 44(260):665-671.

Lee, C.H., A. Sugiura, and T. Tomana. 1982. Effect of flooding on the growth and some physiological changes of young apple rootstocks. J. Jpn. Soc. Hort. 510(3):270-277.

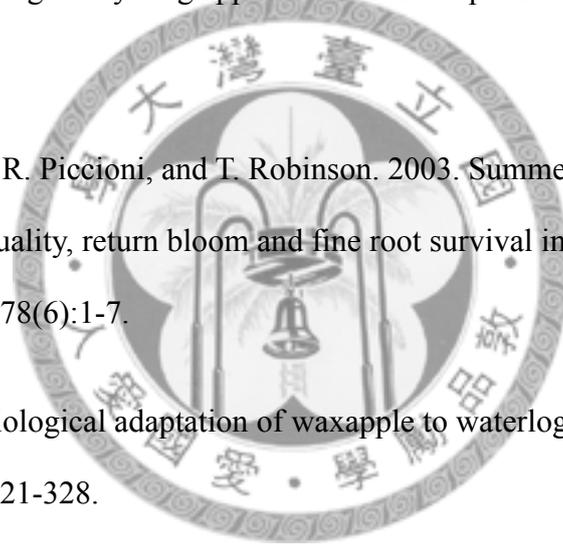
Li, K.T., A.N. Lakso, R. Piccioni, and T. Robinson. 2003. Summer pruning effects on fruit size, fruit quality, return bloom and fine root survival in apple trees. J. Hort. Sci. Biotechnol. 78(6):1-7.

Lin, C.H. 1992. Physiological adaptation of waxapple to waterlogging. Plant Cell Environ. 15(3):321-328.

Liu, C.H., C. Fu, C.J. Shiu, J.P. Chen, and F. Wu. 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes. Geophys. Res. Lett., 36, L17702, doi:1029/2009GL040218.

Lockard, R.G. and G.W. Schneider. 1981. Stock and scion growth relationships and the dwarfing mechanism in apple. Hort. Rev. 3:315-375.

Lyon, T.L. and H.O. Buckman. 1948. The nature and properties of soils. 4th ed. New York.



- Mahbub, R., K. Banno, and M. Kakegawa. 2006. Differential flooding tolerance of some dwarfing pear rootstock clones selected from the progenies of *Pyrus betulaefolia* and *P. calleryana*. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75(4):297-305.
- Marshall, J.D. and R.H. Waring. 1985. Predicting fine root production and turnover by monitoring root starch and soil temperature. *Can. J. For. Res.* 15:791-800.
- Milan, B. and F.P. Haeni. 1991. Application of ground-penetrating- radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water* 29(3):375-386.
- Olien, W.C. 1987. Effect of seasonal soil waterlogging on vegetative growth and fruiting of apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112:209-214.
- Patrick, W.H., Jr., and I.C. Mahapatra. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Adv. Agron.* 20:323-359.
- Pezeshki, S.R., J.H. Pardue, and R.D. Delanue. 1996. Leaf gas exchange and growth of flood-tolerant and flood-sensitive tree species under low soil redox conditions. *Tree Physiol.* 16:453-458.
- Pregitzer, K.S., J.S. King, A.J. Burton, and S. Brown. 2000. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytol.* 147:105-115.
- Pritchard, S.G., A.E. Strand, M.L. McCormack, M.A. Davis, A.C. Finzi, R.B. Jackson, R. Matamala, H.H. Rogers, and R. Oren. 2008. Fine root dynamics in a loblolly pine forest are influenced by free-air-CO₂-enrichment: a six-year-minirhizotron study. *Global Change Biol.* 14:588-602.
- Psarras, G. and I.A. Merwin. 2000. Water stress affects rhizosphere respiration rates and

root morphology of young 'Mutsu' apple trees on M.9 and MM.111 rootstocks. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 125(5):588-595.

Richards, D. 1983. The grape root system. Hort. Rev. 5:127-168.

Ploetz, R.C. and B. Schaffer. 1989. Effect of flooding and Phytophthora root rot on net gas exchange and growth of avocado. Phytopathology 79:204-208.

Roberto, N.E., B. Schaffer, J.B. Fisher, A.M. Colls, and J.H. Crane. 1999. Influence of flooding on Net CO₂ assimilation, growth and stem anatomy of *Annona* species. Ann. Bot. 84:771-780.

Rogers, W.S. 1939. Root studies. VIII. Apple root growth in relation to rootstock, soil, seasonal and climatic factors. J. Pomol. Hort. Sci. 17:99-130.

Rogers, W.S. and G.C. Head. 1969. Factors affecting the distribution and growth of roots of perennial woody species, p. 280-295. In: W.J. Whittington (ed.). Root growth. Butterworths, London.

Richardson-Calfee, L.E. and J.R. Harris. 2010. Patterns of root production and mortality during transplant establishment of landscape-sized sugar maple. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 135:203-211.

Rosemary, K. 2001. Ground penetrating radar for environment applications. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 29:229-255.

Rowe, R.N. and P.B. Catlin. 1971. Differential sensitivity to waterlogging and cyanogenesis by peach, apricot and plum roots. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 96:305-308.

- Rowe, R.N. and D.V. Beardsell. 1973. Waterlogging of fruit trees. Hort. Abstr. 43:533-548.
- Save, R. and L. Serrano. 1986. Some physiological and growth responses of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. Physiol. Plant. 5:301-309.
- Schaffer, B., P.C. Andersen, and R.C. Ploetz. 1992. Responses of fruit crops to flooding. Hort. Rev. 13:257-313.
- Schaffer, B. 1998. Flooding responses and water-use efficiency of subtropical and tropical fruit trees in an environmentally-sensitive wetland. Ann. Bot. 81:475-481.
- Scholander, P., H. Hammel, E.Y. Bradstreet, and E. Hemmingsen. 1965. Sap pressure in vascular plants. Science 37:247-274.
- Smith, G.S., J.G. Buwalda, T.G.A. Green, and C.J. Clark. 1989. Effect of oxygen supply and temperature at the root on the physiology of kiwifruit vines. New Phytol. 113:431-437.
- Smith, G.S., M.J. Judd, S.A. Miller, and J.G. Buwalda. 1990. Recovery of kiwifruit vines from transient waterlogging of the root system. New Phytol. 115(2):325-333.
- Stokes, A., T. Fourcaud, J. Hruska, J. Cermak, N. Nadyezhdina, V. Nadyezhdin, and L. Praus. 2002. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground penetrating radar. J. Arboriculture 28(1):2-10.
- Syvertsen, J.P., R.M. Zablutowicz, and M.L. Smith. 1983. Soil temperature and flooding effects on two species of citrus. I. Plant growth and hydraulic conductivity. Plant

and soil 72:3-12.

Taylor, H.M. 1987. Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. Amer. Soc. Agron., Madison, WI.

Tworkoski, T. and T. Miller. 2007. Rootstock effect on growth of apple scions with different growth habits. Scientia Hort. 111:335-343.

USDA. 2007. About the rhizotron.

< <http://nrs.fs.fed.us/research/facilities/rhizotron/about/>>.

Vamerali, T., A. Ganis, and S. Bona. 1999. An approach to minirhizotron root image analysis. Plant and soil 217:183-193.

Wang, Z., B. Quebedeaux, and G.W. Stutte. 1995. Osmotic adjustment: effect of water stress on carbohydrates in leaves, stems and roots of apple. Austral. J. Plant Physiol. 22:747-754.

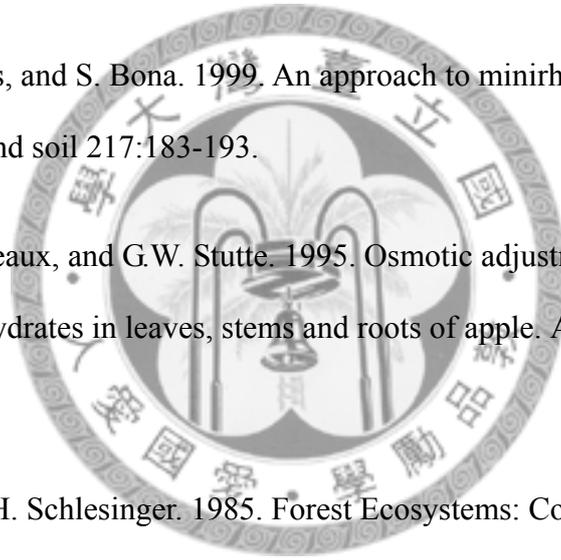
Waring, R.H. and W.H. Schlesinger. 1985. Forest Ecosystems: Concepts and Management. Academic press, Orlando, FL.

Wazir, F.K., M.W. Smith, and S.W. Akers. 1988. Effect of flooding on phosphorous levels in pecan seedlings. HortScience 23:595-597.

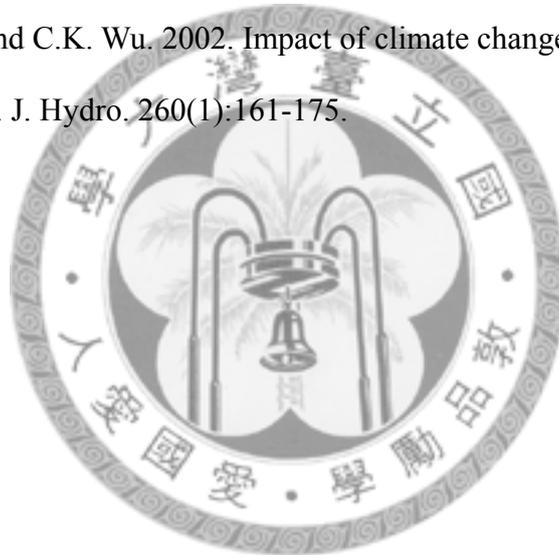
Willis L.E. and T.E. Marler. 1993. Root and shoot growth patterns of 'Julie' and 'Keitt' mango trees. Acta Hort. 341:264-270.

Wikipedia. 2010. Ground-penetrating radar.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ground-penetrating_radar>.



- Woodham, R.C. and D.McE. Alexander. 1966. The effect of root temperature on development of small fruiting sultana vines. *Vitis* 5:345-350.
- Yamamoto, F., T. Sakata, and K. Terazawa. 1995. Physiological, morphological and anatomical responses of *Fraxinus mandshurica* seedling to flooding. *Tree Physiol.* 15:713-719.
- Yu, P.S., T.C. Yang, and C.C. Kuo. 2006. Evaluating long-term trends in annual and seasonal precipitation in Taiwan. *Water resource Mgt.* 20:1007-1023.
- Yu, P.S., T.C. Yang, and C.K. Wu. 2002. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. *J. Hydro.* 260(1):161-175.



第二章 秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔 地區低需冷性梨樹地上部與根系生長之影響

摘要

本研究於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場戶外進行，處理始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 3 日，水分試驗期間調查測量植株地上部葉片與根系之生長，探討秋季土壤水分變化對臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根系生長之影響。本試驗以 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗為試驗材料，分別進行 5 種灌溉處理，處理一為控制組 (CK)，該處理之土壤體積含水量 (θ_v) 維持於 30%-45%。處理二 (D) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 再給水至 $\theta_v = 45\%$ 。處理三 (D+3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 3 日。處理四 (LD+3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v = 25-30\%$ 時行淹水處理 3 日。處理五 (D+5F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 5 日。試驗結果如下，比較水分試驗期間各受試植株地上部葉片之生長可知，乾旱 (D) 與土壤水分劇烈變化 (D + 3F, D + 5F) 促進植株成熟葉提早脫落。而由水分試驗期間梨樹根系之生長可知，水分試驗前期各受試植株具 2 至 3 次之生長高峰，於冬季水分試驗後期根系生長量降低，1 月後新生根大量死亡，各受試植株僅保留少數白色與黃色根越冬。比較水分試驗前期梨樹根系生長模式可知，劇烈土壤水分變化降低新生根存活率；CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於水分試驗前期之新生根總存活率分別為 $89.26 \pm 1.21\%$ 、 $82.95 \pm 2.43\%$ 、 $74.14 \pm 6.14\%$ 、 $92.28 \pm 2.10\%$ 與 $68.08 \pm 4.30\%$ ，各處理間比較達顯著差異水準。比較水分試驗前期與後期各受試植株標定新生根維持白色比率與新生根存活力下降至 50% 所需之日數可知，CK、D 與 LD + 3F 處理之標定新生根存活力高於 D + 3F 與 D + 5F 處理。分析水分試驗

前期植株宿存葉下降比例與標定新生根存活率兩者間之相關性可知，植株宿存葉下降比例與與新生根存活率呈顯著負相關；新生根存活率隨宿存葉比例下降而減少，水分試驗前期新生根維持白色比率、新生根存活率與植株宿存葉下降比例之決定係數分別為 0.5562 與 0.7371。



關鍵字：秋根、新生根、宿存葉、新葉、體積土壤含水量

一、前言

砂梨為臺灣栽培面積最大之落葉果樹，主要種植區域依序為臺中縣、苗栗縣與新竹縣，合計佔全臺梨種植面積的 89%，主要生產系統為平地的高接梨系統(行政院農業委員會，2007; 廖，1995)。近年來由於高接梨栽培成本過高，加上氣候變遷與國土復育等限制，梨產業競爭力逐漸降低，故選拔品質優良，適合於低海拔栽培生產之低需冷性梨品種，可降低生產成本，提升梨產業競爭力。故行政院農業委員會農業試驗所與臺中區農業改良場自 1976 年開始，分別以高品質之高需冷性梨與低需冷性之橫山梨進行雜交，以此自後裔中選育出數個適合於低海拔地區栽培之低需冷性梨新品種，例如：臺農一號(明福梨)、臺種苗農二號(蜜雪梨)、臺農三號(玉金香梨)、臺中一號(福來梨)、臺中二號(晶圓梨)、臺中三號(晶翠梨)，目前已陸續技術轉移推廣中(行政院農業委員會農業試驗所，2007; 臺中區農業改良場，2009)。

臺灣本島介於北緯 21° 50' 至 25° 20' 間，於天文氣候帶之劃分處於熱帶和亞熱帶之間，作物生長受日射與低溫之限制較少，雨量則因受太平洋副熱帶高壓帶移動之影響而有明顯乾、濕季之區別。臺灣地區主要之水資源為雨水，年平均雨量約 2500mm；降水期為 2-4 月的春雨、5-6 月的梅雨與夏秋的颱風雨(中央氣象局，2003)。臺灣地區之氣候環境雖高溫多濕，但因中央山脈南北貫穿全島，造成河流坡陡且短、水資源涵養能力低，若當季梅雨不顯著或侵臺颱風過少，則容易造成缺水(吳，1996; 臺灣大學全球變遷研究中心，1997; Yu *et al.*, 2002)。臺灣地區之降雨常受氣候帶與複雜地形之影響，山區常因地形抬升作用並配合部分天氣系統帶來短時間的極端降水(陳，1993)，相對造成土壤淹水或過濕之現象。近年來臺灣地區之氣候環境明顯受全球氣候混亂(global climate disruption)影響，氣候型態逐漸走向極端化。臺灣本島地區因熱島效應與人為開發造成地表植被變化影響，氣溫上升速率為 1.0-1.4°C/百年，遠高於全球平均值(0.6°C/百年)(許等，1999)。

Liu 等(2009) 分析全球 17 個氣候區與臺灣地區極端降雨與全球溫度之關係發現，全球溫度每上升 1 度 K，臺灣地區前 10 %之強降雨則增加約 140 %，而前 10 %之小強度降雨則減少約 70 %。強降雨的增加可能導致淹水，中、小雨為保持土壤濕潤及地下水之關鍵水源，其持續性減少也將導致乾旱威脅。

水分為作物生長的主要環境因子，土壤水分狀況直接影響果樹生長、開花及結實等過程，而水分的可利用性也為世界農業生產主要的環境限制因子之一 (Hsiao, 1973 ; 1993; Jones *et al.*, 1985; Kramer, 1983; Schaffer *et al.*, 1992)。

Boyer(1982) 認為環境逆境中以乾旱逆境影響最大，指出乾旱限制植物生長和作物產量較其他單一環境因素來得嚴重。另一方面淹水導致土壤缺氧，作物於缺氧下可能產生生理及形態上的調適反應，長期可能使作物根部與地上部生長受抑制，最終造成植株死亡 (Schaffer, 1998)。然而對大多數果樹而言，乾旱與淹水逆境均會影響植物體地上部生長，產生葉片缺水、低氣孔導度、低淨二氧化碳同化率等抑制地上部生長之作用 (Francisco *et al.*, 2007; Jones *et al.*, 1985; Schaffer *et al.*, 1992)。根系對乾旱與淹水等土壤水分逆境相當敏感，常造成新根生長抑制與死亡 (Buwalda, 1993)。

對絕大多數溫帶地區栽培之落葉果樹而言，植物體地上部與根部之生長隨四季溫度變化而有季節性規律，地上部枝條與根系之生長期相近或重疊，例如：西洋梨 (Head, 1968)、二十世紀梨 (林, 1960)、幸水梨 (平田, 2000)、長十郎梨 (平田, 2000)、桃 (Cockroft and Olsson, 1972)、蘋果 (橫田, 2000)、奇異果 (Buwalda and Hutton, 1988) 與葡萄 (Freeman and Smart, 1976).....等等。然而臺灣亞熱帶低海拔地區秋、冬季之環境氣候不若溫帶地區規律，且臺灣平地多利用低需冷性落葉果樹栽培以避免低溫不足之問題，目前尚無研究提及秋、冬季亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根部之生長模式。

對溫帶地區生長之落葉果樹而言，秋根之數量相對少於春根，但秋根之生長

與維持對植株隔年春季早期展葉、徒長枝之生長與隔年果實細胞分裂期營養之供應具重要之生長意義 (林, 1960), 臺灣地區秋季常因颱風等強降雨之影響土壤水分變化劇烈, 相對易造成作物淹水與排水後缺水等現象。目前尚無研究提及土壤水分變化對梨樹秋季根系生長之影響。

一般研究大多僅探討單一逆境變化對作物生長之影響, 然而作物於土壤水分變化下之生長模式仍未明瞭。一般作物生理之研究方向多偏重於地上部之調查, 然而植物根系對固定植株與養、水分吸收具重要作用, 但因土壤不可觀測性之限制, 給根系生態學之研究帶來一定的困難。

果樹作物短期土壤缺水會消耗樹體累積之碳水化合物, 增加作物根系生長量以尋找水分 (Buwalda, 1993; Buwalda and Lenz, 1992), 然而土壤淹水或低氧均會減低根系活力、抑制果樹新根生長, 加速新根死亡 (Kozlowski, 1984; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。砂梨為中度耐淹水作物, 短期淹水應對植株影響有限, 但植株根系仍可能會受損, 作物須消耗地上部碳水化合物以維持根系正常運作 (Andersen *et al.*, 1984; Buwalda, 1993; Schaffer *et al.*, 1992)。故假設: 梨樹於土壤水分變化劇烈之環境, 樹體地上部與根系所受之影響較單獨由乾旱或淹水所造成之逆境嚴重。

為了解秋季臺灣低海拔地區土壤水分變化對低需冷性梨樹生長之影響, 本試驗擬以蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 為植物材料, 利用植盆設計根窗並進行水分控制與根系觀測, 觀察比較梨樹於不同土壤水分變化下地上部與根系之生長, 探討秋季亞熱帶低海拔地區土壤水分變化下低需冷性梨樹地上部與根系之生長模式。

二、材料與方法

(一) 試驗地點與植物材料

本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場 (25.00'N, 121.32'E) 露天進行。試驗區之海拔高度約 20 公尺，水分試驗期間 (2007/10/8~2008/1/1, DAT0~DAT85) 之環境氣溫可參考圖 2.3。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。受試植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升，上部直徑 35 公分，下部直徑 28 公分，高度 44 公分，厚 0.2 公分，聚丙烯 (Polypropylene, PP) 材質之圓形黃色塑膠桶 (如圖附 5)，塑膠桶底層置 5 公分高之墊材；材質為長 3 公分，寬 2 公分，聚苯乙烯 (Polystyrene, PS) 材質之保麗龍包裝填充物，以促進栽培容器底部之排水與通氣。植盆間之行株距為 100 公分。土壤栽培介質為體積比：砂粒 (sand) 40%、粉粒 (silt) 40%、黏粒 (clay) 20%，土壤酸鹼值 6.00 ± 0.017 ，於七星山系西側 (25.12'N, 121.53'E; elevation 164 m) 採集之黃壤土 (Yellow soils)，土壤之田間容水量 (Field capacity) 為 45%vol。試驗植株於休眠期定植，定植後植株統一修剪至 70 公分高。試驗前植株每週灌溉 2~3 次，降雨時則不灌溉。試驗前施肥與病蟲害管理按一般田間管理模式進行。

(二) 試驗方法

為模擬長期土壤水分變化對梨樹根部生長之影響，故將受試植株定植於植盆內以便控制土壤水分變化。水分試驗自 2007/10/8 開始，結束於 2008/1/1，共計 85 日，分 5 種灌溉處理，處理一為控制組 (CK)，該處理之土壤體積含水量 (θ_v) 維持於 30%~45%。處理二 (D) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 再給水至 $\theta_v = 45\%$ 。處理三 (D + 3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 3 日。處理四 (LD + 3F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v = 25 \sim 30\%$ 時行淹水處理 3 日。處理五 (D + 5F) 之植株於灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 5 日。於水分試驗期間各處理皆重覆以上之灌溉模式，短期 (DAT0~DAT10) 土壤體積含水量之日變化可參考圖附 2。受試植株進行淹水處理時以樹幹基部 5 公分完全浸

沒於水中為準。水分試驗期間植盆口以長 90 公分，寬 65 公分，厚 0.06 公釐，PE 材質之透明塑膠布包覆以防止外界環境降水干擾試驗進行 (如圖附 6)。處理進行至 2008 年 1 月 1 日為止，試驗期間進行植株地上部 (shoot growth) 與地下部 (root growth) 生長之觀測與分析。本試驗採用完全隨機設計 (complete randomized design, CRD)，各處理以 1 植株為 1 重覆，計 5 重覆。水分試驗期間植盆內體積土壤含水量、土壤溫度與環境大氣溫度之變化可參考圖 2.3、2.4 與圖附 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5。

(三) 環境因子之監控與記錄

1. 土壤水分含量之測定

水分試驗期間土壤水分含量以體積法 (θ_v) 測定 (Rundel and Jarrell, 1991)。本試驗利用時域反射計 (TDR, time domain reflectometer, SM200, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) (如圖附 7) 探針置於植盆中央，沒入土壤表層 5 公分之深度，監測各處理間體積土壤含水量 (volumetric soil water content, θ_v , $m^3 \cdot m^{-3}$) 之變化，每隔 1 小時以數據記錄器 (DL2e, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) 記錄之。

2. 土壤溫度之測定

水分試驗期間各處理植盆之土壤溫度變化以熱敏電阻 (thermistor) 監測 (Ehleringer, 1991)，每隔 30 分鐘以數據記錄器 (DL2e, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) 記錄水分試驗期間土表下 15 公分之土壤溫度變化。

3. 環境氣溫之測定

水分試驗期間試驗地區之環境氣溫變化以臺灣大學氣象觀測坪 (25.00°N, 121.32°E; elevation 14 m) 所監測之資料為準，記錄水分試驗期間每分鐘環境氣溫之變化。

4. 土壤溶液酸鹼值之測定

水分試驗末期各受試植盆土壤樣本之酸鹼值以電極法 (行政院環境保護署環境檢驗所, 2008) 測定。各植盆於水分試驗末期 (2007/12/24, DAT77), 以直徑 2 公分, 長 60 公分之土壤取樣器採集離樹幹圓周 10~15 公分, 土表下 5~30 公分處, 鮮重約 100 克之土壤樣本。土壤樣本於 40±5°C 下持續乾燥至恆重後, 以孔徑 0.84mm 之篩網過篩處理並秤取 20±0.2 克之乾燥土壤, 以 20mL 之試劑水 (去離子水) 混合攪拌約 5 分鐘後靜置 1 小時, 使混合液之固體沉澱後, 取其上清液, 以酸鹼度計 (6173R standard benchtop pH meter, Jenco Inc., California, USA) 測量其水相層之酸鹼值, 並記錄溫度 (行政院環境保護署環境檢驗所, 2008)。

(四) 植株生長之調查

1. 水分試驗期間植株全樹葉面積之調查

水分試驗期間 (2007/10/8~2008/1/1, DAT0~DAT85) 各受試植株全樹葉面積 (Canopy total leaf area) 之估算為自水分處理當日起逐周記錄各受試植株全樹所有完全展開葉之葉面積, 記錄單位時間植株全樹葉面積之變化, 觀測至所有處理之植株地上部全樹落葉當日 (2008/2/11, DAT126) 為止。因秋季梨樹葉面積之組成為成熟葉或老葉, 且植株葉片數較少, 故植株全樹葉面積之統計以全株葉片數為主。水分試驗期間於試驗區相鄰之預備植株中逢機取老葉與成熟葉共 200 片, 以葉面積儀 (LI-3100, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) 得單片成熟葉之平均葉面積 (成熟葉葉面積 = 70.84 cm²) 後再乘以全樹植株之完全展開葉片數即可估算全樹葉面積。

2. 水分試驗期間植株全樹葉面積比例之估算

水分試驗期間 (2007/10/8~2008/1/1, DAT0~DAT85) 各受試植株全樹葉面積比例 [(Canopy total leaf area (% of DAT0))] 變化之估算即自水分處理當日

(2007/10/8, DAT0) 起逐周記錄各受試植株全樹所有完全展開葉之葉面積，以 DAT0 所觀測之全樹葉面積為 100%，換算水分試驗期間單位時間植株全樹葉面積比例之變化，觀測至所有處理之植株地上部全樹落葉當日 (2008/2/11, DAT126) 為止。

3. 水分試驗期間植株宿存葉比例之估算

因本試驗跨越秋季與冬季，故植株全樹葉面積之組成多為已展開之成熟葉與老葉。季節、氣溫、環境變化與水分逆境皆會影響梨樹之休眠與落葉 (Arora *et al.*, 2003; Jackson, 2003)，故於水分試驗當日 (2007/10/8, DAT0) 起標定記錄各受試植株全樹之宿存成熟葉，觀察土壤水分變化對植株宿存葉落葉之影響。各處理間植株全樹宿存葉之落葉率【Canopy mature leaf defoliation (% of DAT0)】以植株宿存葉比例【Canopy mature leaf retention (% of DAT0)】表示。水分試驗期間各受試植株宿存葉比例之估算即自水分處理當日起標定各受試植株全樹成熟展開葉之數量，以避免未來觀測上與後續生長之新葉重覆，之後逐周記錄各受試植株所標定之成熟葉片數，以 DAT0 所觀測之全樹宿存葉面積為 100%，換算為植株宿存葉比例。觀測結束於所有處理之植株宿存葉全樹落葉當日 (2008/2/11, DAT126)。

4. 水分試驗期間植株全樹新葉面積之估算

水分試驗期間各受試植株新葉生長量之估算即自水分處理當日起逐周記錄各受試植株於水分處理後所生長出之新葉葉片數；新葉之記錄以完全展開葉為準，新葉葉片數乘以單片成熟葉之平均葉面積 (成熟葉葉面積 = 70.84 cm²) 即可估算全樹新葉葉面積。觀測結束於植株地上部完全休眠當日 (2008/2/11, DAT126)。

5. 根系生長箱之觀測與分析

受試植株根系生長之監測由植株盆器東側長 18 公分，寬 14 公分之根窗 (rhizotron) 記錄之，根窗設計參考 (Busch *et al.*, 2006)。根窗由一長 25 公分，寬

20 公分，厚度 0.2 公分，聚氯乙稀 (Polyvinylchloride; PVC) 材質之透明塑膠軟墊製成，根窗外覆一長 29 公分，寬 30 公分，厚度 0.25 公分，聚氯乙稀 (Polyvinylchloride, PVC) 材質之黑色不透明軟墊以避免光照，影響根系分佈，每一根窗由格線劃分為長、寬各 1 公分之記錄單位，共計 252 格 (如圖附 5)。水分試驗期間各受試植株根系生長之估算即自試驗當日 (2007/10/8, DAT0) 起逐周觀測記錄各小格內現有及所有根系之生長及顏色變化，進行根系生長之觀測與分析。若預計觀測日期適逢淹水處理則根系生長之觀測則順延至處理結束當日進行。

(1) 水分試驗期間植株有效根系分佈比例之估算

因植株根系之生長、老化至外表皮層木栓化可由根部表面外觀自白色轉變成黃色、咖啡色與黑色判定；其中白色根活性最高、黃色根活性下降，完全木栓化之根系 (咖啡色或黑色) 幾乎沒有活性 (林, 1960; Atkinson, 1980; Buwalda, 1993)，故水分試驗期間各受試植株具活性根系分佈之消長即以有效根系分佈比例【effective root distribution (% of DAT0)】表示。有效根系分佈比例之估算即分別於水分試驗當日 (2007/10/8, DAT0)、水分處理後 (Days after treatment; DAT) 10、15、24、29、36、43、50、57、64、71、78、85、91、98、105、112、119 及 126 日觀測記錄各受試植株根窗格線內各記錄單位現有之白色及黃色根數目總和。新生根生活史中顏色之變化可參考圖附 9。有效根系分佈比例之估算參考以下公式。

有效根系分佈比例【effective root distribution (% of DAT0)】

= $\left[\frac{(R_x - R_0)}{R_0} \right] \times 100 (\%)$ ，其中：

R_0 ：試驗當日 (2007/10/8, DAT0) 於根窗內所觀測之植株黃色與白色根數目總和。

R_x ：分別為 DAT10、15、24、29、36、43、50、57、64、71、78、85、91、98、105、112、119 及 126 日於根窗內所觀測之白色與黃色根數目總和。

(2) 水分試驗期間植株根部生長模式之估算

水分試驗期間各受試植株根部生長模式 (Root growth pattern) 之估算以水分處理後新生根總生產量 (New roots production) 與新生根總死亡量 (New roots mortality) 表示，因本試驗歷經秋季與冬季，環境氣候變化可能影響梨樹根部之生長，故將根部生活史分成 2 階段記錄：水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19, DAT0~DAT42) 與水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1, DAT43~DAT85)。水分試驗前期新生根總生產量自 DAT10 (2007/10/18) 時開始記錄，水分試驗後期新生根總生產量則於 DAT50 (2007/11/27) 時開始記錄。

水分試驗前期新生根總生產量之記錄即於水分試驗當日 (2007/10/8, DAT0) 起標定根窗範圍內所有白色根之數量，以避免觀測上與後續生產之新生根重覆，之後於試驗期間每 7 日觀測記錄並累加根窗範圍內後續生長出之所有新生根之數量。若於預計觀測日期適逢淹水處理則根部測量順延至處理結束當日進行。水分試驗前期新生根總死亡量則記錄水分試驗前期期間所生產新生根之死亡量。水分試驗前期新生根總生產量之記錄日為 DAT 10、15、24、29、36 與 43 日。

水分試驗後期新生根總生產量之記錄即於 DAT43 時標定記錄根窗範圍內所有白色根之數量，以避免觀測上與後續生產之新生根重覆，之後於水分試驗期間每 7 日觀測記錄並累加根窗範圍內後續生長出所有新生根之數量，若於預計觀測日期適逢淹水處理則根部測量順延至處理結束當日進行。水分試驗後期新生根總死亡量則記錄水分試驗後期期間所生產新生根之死亡量。水分試驗後期新生根總生產量之記錄日為 DAT50、57、64、71、78 與 85 日。根部生長模式之測量與分析方式可參考 (Li *et al.*, 2003)。

(3) 水分試驗期間植株根部存活力之估算

根部存活力 (Root survivorship) 之估算以新生根維持白色比率 (New roots

remaining white) 與新生根存活率 (Root survival) 表示 (Li *et al.*, 2003)，因本試驗歷經秋季與冬季，新生根之存活力可能因環境氣候變化而有不同，故將根部生活史分 2 階段記錄：水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19, DAT0~DAT42) 與水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1, DAT43~DAT85)。水分試驗前期新生根存活力之估算即自 DAT10 (2007/10/18) 時開始記錄，記錄結束於 DAT50 (2007/11/27)。水分試驗後期新生根存活力之估算則於 DAT43 (2007/11/20) 時開始記錄，觀測結束於 DAT85 (2008/1/1)。

水分試驗期間新生根存活力之估算即於記錄日 (Record date) 當天起標定記錄根窗範圍內所有生長狀態一致之新生白色根 (cohort new root)，之後於水分試驗期間逐周觀測記錄標定根之新生根維持白色比率與新生根存活率，若於預計觀測日期適逢淹水處理則根部測量順延至處理結束當日進行。新生根維持白色比率與新生根存活率之測量與分析可參考 Li 等(2003) 觀測蘋果樹新生根存活力之方法；將根部之生長與老化過程分成 4 種程度之顏色：白色 (white)、黃色 (yellow)、褐色 (brown)、黑色 (black) 及消失 (disappearance) (如圖附 9)。水分試驗期間新生根維持白色比率之估算即以根部皮層 (cortex) 於單位時間由白色轉成黃色所需之時間為準。新生根存活率之估算即以根部皮層於單位時間由白色轉成褐色、黑色或消失所需之時間為準 (Li *et al.*, 2003)。

(五) 試驗設計與統計分析

本試驗採用完全隨機設計 (Complete randomized design, CRD)，各處理中每受試植株為 1 試驗單位，每處理重複於 1 植株，共計 5 重複。植株地上部葉片及根系生長之變化以 SigmaPlot 10.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 進行繪圖並顯示標準差 (standard error)。

統計方面以變方分析 (Analysis of variance, ANOVA) 測驗其顯著性，以鄧氏新

多變域測驗法 (Duncan's New Multiple Range Test) (Duncan, 1955) 分析 5 種處理間有無顯著差異 ($P = 0.05$)。統計軟體為 Costat 6.2 (CoHort Software, Monterey, CA, USA)。

另外，因水分試驗期間植株宿存葉比例、標定新生根維持白色比率與標定新生根存活率所估算之觀測值為百分率資料，且觀測值介於 0~100% 間，故原始數據採角度轉換 (angular transformation) 後進行統計；即 X 為觀測值，則其角度轉換後之觀測值為 $Y = \sin^{-1} \sqrt{X}$ (沈，2004)。

三、結果

(一) 水分試驗期間各處理植盆體積土壤含水量之變化

因水分試驗歷經秋季與冬季，土壤濕度易受環境氣象與植株生長所影響，故將體積土壤含水量分兩時期探討：水分試驗前期 (Experimental early period) 與水分試驗後期 (Experimental late period)。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 因環境與植物體之蒸發散量 (evapotranspiration) 大，故水分試驗前期單位時間體積土壤含水量變化較後期劇烈。結果顯示，水分試驗前期 D 處理共進行 6 次乾旱與 5 次灌溉之循環、D+3F 處理共進行 3 次乾旱與 3 次淹水之循環、LD+3F 處理共進行 4 次輕微乾旱與 4 次淹水之循環、D+5F 處理則進行 3 次乾旱與 2 次淹水之循環 (圖 2.1)。

相較於水分試驗前期，因水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) 跨越秋冬兩季，土壤溫度 (圖 2.4) 與環境溫度 (圖 2.3) 偏低，植株地上部與地下部逐漸進入休眠，蒸發散量下降，故水分試驗後期單位時間體積土壤含水量變化較前期緩和。結果顯示，水分試驗後期 D 處理共進行 3 次乾旱與 2 次灌溉之循環、D+3F 處理共進行 1 次乾旱與 1 次淹水之循環、LD+3F 處理共進行 1 次輕微乾旱與 1 次淹水之循環、D+5F 處理共進行 1 次乾旱與 2 次淹水之循環 (圖

2.2)。

比較各試驗處理於水分試驗前期與後期進行灌溉、乾旱與淹水之頻率可知，相對於試驗後期，試驗前期之體積土壤含水量變化頻率較為頻繁；與水分試驗後期相比，D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於水分試驗前期之乾旱、灌溉與淹水頻率分別為後期的 2、3、4 與 1.7 倍。

(二) 水分試驗期間環境氣溫之變化

水分試驗期間環境氣溫之測定採用臺灣大學氣象觀測坪所監測之資料，分析水分試驗期間環境氣溫 (Air temperature) 之變化。

結果顯示，水分試驗期間氣象觀測坪所監測之平均氣溫為 20.7°C，水分試驗期間平均高溫為 23.38°C，平均低溫為 18.73°C (圖 2.3)。因本試驗歷經秋季與冬季，故將水分試驗時間分 2 階段記錄：水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 與水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85)。水分試驗前期為秋季，環境溫度偏高，平均氣溫為 22.37°C，高溫平均為 24.85°C，低溫平均為 20.54°C，日夜溫差為 4.31°C (圖 2.3)。與水分試驗前期相比，因水分試驗後期為冬季，故環境溫度偏低，平均氣溫為 19.03°C，高溫平均為 21.90°C，低溫平均為 16.91°C，日夜溫差為 5°C (圖 2.3)。

綜觀水分試驗前期與後期之環境氣溫變化可知，水分試驗前期之日間溫度偏高；日間高溫超過 27°C 之日數為 17 天，佔水分試驗前期約 40%，夜間低溫低於 20°C 之日數為 12 天，佔試驗前期約 28%。相較於水分試驗前期，水分試驗後期之環境氣溫偏低；日間高溫超過 27°C 之日數僅 3 天，佔水分試驗後期約 7%，夜間低溫低於 20°C 之日數為 42 天，佔試驗後期約 98%。

觀察各受試植株於水分試驗結束 (2008/1/1; DAT85) 後至所有受試植株地上

部完全休眠期間 (2008/1/2~2008/2/11; DAT86~DAT126) 之氣溫變化可知，結果顯示，DAT86 至 DAT126 期間之平均氣溫為 15.78°C，高溫平均為 18.85°C，低溫平均為 13.68°C，日夜溫差為 5.17°C (圖 2.3)。

(三) 水分試驗期間各處理植盆土壤溫度之變化

水分試驗期間各處理植盆土壤溫度之測定採熱敏電阻 (thermistors) 所監測之資料，分析比較水分試驗期間各處理植盆間土壤溫度 (Soil temperature; S.T.) 之變化。比較水分試驗期間各處理植盆土壤溫度之變化可知，土壤溫度不因乾旱或淹水處理而有顯著差異，故水分試驗期間土壤溫度趨勢之分析以 CK 處理所量測之數據代表水分試驗期間之土壤溫度。

結果顯示，水分試驗期間 CK 處理之土壤平均溫度為 21.77°C，高溫平均為 27.48°C，低溫平均為 18.71°C (圖 2.4)。因試驗期間跨越秋冬季節，故將試驗時間分為水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 與水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85)。水分試驗前期為秋季，環境氣溫偏高；CK 處理之土壤平均溫度為 23.61°C，高溫平均為 29.18°C，低溫平均為 20.56°C，日夜溫差為 8.62°C (圖 2.4)。與水分試驗前期相比，因水分試驗後期為冬季，故土壤溫度偏低；CK 處理之土壤平均溫度為 19.92°C，高溫平均為 25.78°C，低溫平均為 16.87°C，日夜溫差為 8.91°C (圖 2.4)。

綜觀 CK 處理於水分試驗前期與後期之土壤溫度變化可知，水分試驗前期之土壤溫度偏高；水分試驗前期日平均高溫超過 27°C 之日數為 22 天，佔試驗前期約 51%，日平均低溫低於 20°C 之日數為 10 天，佔試驗前期約 23% (圖 2.4)。相較於水分試驗前期，水分試驗後期之土壤溫度偏低，高溫變化較少；水分試驗後期日平均高溫超過 27°C 之日數為 18 天，佔試驗後期約 42%，日平均低溫低於 20°C 之日數為 42 天，佔試驗後期約 98% (圖 2.4)。

比較水分試驗期間 CK 處理之土壤溫度與環境氣溫變化可知，土壤溫度高於環境氣溫 (圖 2.5)。水分試驗期間氣象觀測坪所監測之平均氣溫為 20.7°C，CK 處理之土壤平均溫度為 21.77°C；土壤平均溫度高於氣溫 1.07°C，且水分試驗期間土壤之日間高溫可達 40°C 以上。比較水分試驗期間 CK 處理之土壤與大氣之每日平均最高溫可知，水分試驗期間每日平均環境氣溫最高不超過 35°C (圖 2.5)。相對於環境氣溫，水分試驗期間 CK 處理之土壤溫度每日平均最高溫超過 35°C 之日數則多達 16 天。而相較於土壤與大氣日溫變化之劇烈，土壤與大氣間夜溫之變化則無明顯之差異。

比較水分試驗前期 CK 處理之土壤溫度與環境氣溫變化可知，水分試驗前期氣象觀測坪所監測之平均氣溫為 22.37°C，CK 處理之土壤平均溫度為 23.61°C；土壤平均溫度高於氣溫 1.24°C。而水分試驗後期土壤平均溫度高於氣溫 0.89°C；相較於水分試驗前期，水分試驗後期土壤溫度與大氣溫度差異較前期緩和。

(四) 土壤水分變化對土壤溶液酸鹼值之影響

為了解高頻率淹水對土壤溶液酸鹼值之影響，故於水分試驗結束前 (DAT77) 取樣分析各處理植盆之土壤溶液酸鹼值 (pH)，結果顯示淹水處理降低土壤溶液之酸鹼值，各處理之土壤樣本於水溫 25°C 下，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之土壤溶液酸鹼值分別為：5.92±0.025、5.99±0.012、5.67±0.022、5.71±0.014 與 5.78±0.074，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0018$) (圖 2.6)。

(五) 土壤水分變化對梨樹全樹葉面積與葉面積比例之影響

水分試驗期間各受試植株全樹葉面積之生長變化以單位時間全樹葉面積 (Canopy total leaf area) 與全樹葉面積比例【Canopy total leaf area rate (% of DAT0)】變化表示。試驗自 2007 年 10 月 08 日 (DAT0) 開始，結束於 2008 年 1 月 1 日 (DAT85)，試驗結束後，各受試植株皆於 2008 年 2 月 11 日 (DAT126) 全樹落葉；

地上部進入休眠。

結果顯示，於水分處理首日 (DAT0)，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之植株全樹葉面積分別為：4859.62±1100.33、4533.76±826.13、4887.96±837.59、4080.38±476.58 與 5525.52±1282.38 平方公分；各試驗植株於 DAT0 之全樹平均葉面積維持於 4777.45±397.80 (67±5.61 片葉) 平方公分 (圖 2.7)。

觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 各受試植株全樹葉面積之變化可知，水分試驗前期各處理間比較觀測之數據皆未達顯著差異水準。於 DAT42，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之植株全樹葉面積分別為：4377.91±865.70 (61.80±12.22 片葉)、3003.62±463.77 (42.40±6.55 片葉)、3513.66±507.19 (49.60±7.16 片葉)、3513.66±315.70 (49.60±4.46 片葉) 與 4363.74±461.60 (61.60±6.52 片葉) 平方公分，與 DAT0 相比分別減少 481.71 (6.86 片葉)、1530.14 (21.59 片葉)、1370.34 (19.39 片葉)、566.72 (8.00 片葉) 與 1161.78 (16.40 片葉) 平方公分。綜觀水分試驗前期各處理之植株全樹葉面積與全樹葉面積比例變化可知，與 DAT0 相比，各受試植株於 DAT42 之全樹平均葉面積為 3754.52±561.90 平方公分 (53±7.93 片葉)，平均葉面積減少約 1023 平方公分 (14 片葉)，換算成全樹葉面積比例則平均下降約 16.83%。CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT0 至 DAT42 之全樹葉面積比例各減少：8.71%、32.04%、24.25%、12.20% 與 6.94%。水分試驗前期各受試植株全樹葉面積因成熟葉提早落葉與新梢萌芽生長呈現小幅波動之消長 (圖 2.9 與圖 2.10)。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) 各受試植株全樹葉面積與全樹葉面積比例之變化可知，水分試驗後期適逢秋冬轉換之際，植株宿存之成熟葉與水分試驗前期所開展之新葉因冬季低溫 (圖 2.3) 而逐漸脫落。

綜觀水分試驗期間各受試植株全樹葉面積比例與宿存葉比例變化可知，不論

是水分試驗前期抑或是水分試驗後期，各處理於每次測量之全樹葉面積比例變化均較宿存葉比例緩和，主要是因為宿存葉脫落 (圖 2.9) 與新葉生長 (圖 2.10) 相互消長抵銷所致。比較水分試驗期間各處理植株之全樹葉面積比例與宿存葉比例下降至 50% 所需之日數可知，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之全樹葉面積比例下降至 50% 所需之時間依序為：77.99±5.61、52.35±2.92、62.61±7.91、63.20±2.50 與 74.68±12.48 日。相較於 CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之宿存葉比例下降至 50% 所需之日數則依序延長約：13.43、4、24.79、6.34 與 27.77 日。由全樹葉面積比例與宿存葉比例下降至 50% 所需日數比較可知，除 D 與 LD+3F 處理之新葉生長量較少外，其餘處理之新葉生長量則較多，尤以 D + 3F 與 D + 5F 處理之新葉生長量明顯高過其它處理。而與水分試驗前期相比，水分試驗後期之全樹葉面積比例下降趨勢較為明顯 (圖 2.8)。

觀測水分試驗結束 (DAT85) 後至所有受試植株地上部完全休眠期間 (2008/1/2~2008/2/11; DAT86~DAT126) 之全樹葉面積與葉面積比例變化可知，各受試植株於試驗結束當日不論全樹葉面積多寡，葉片全數於水分處理後 119 或 126 日全樹落葉；地上部進入休眠 (圖 2.7 與圖 2.8)。

(六) 土壤水分變化對梨樹植株宿存葉比例之影響

水分試驗期間各受試植株成熟葉之保留狀態以單位時間植株宿存葉比例【Canopy mature leaf retention (% of DAT0)】表示。試驗自 2007 年 10 月 08 日開始，結束於 2008 年 1 月 1 日，各受試植株之宿存葉於 2008 年 2 月 4 日 (DAT119) 全數脫落，地上部於 2008 年 2 月 11 日 (DAT126) 進入休眠。

結果顯示，觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 各受試植株宿存葉比例變化可知，乾旱 (D) 與劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 促進植株成熟葉提早落葉，由水分試驗前期各受試植株宿存葉比例變化可知，CK 與

LD + 3F 處理之植株宿存葉比例於水分試驗前期維持於 78% 以上，然而 D、D + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT42 之植株宿存葉比例皆低於 60%，植株宿存葉比例下降幅度較 CK 與 LD + 3F 處理明顯。比較各受試植株於 DAT0 至 DAT42 之植株宿存葉比例變化可知，與 DAT0 相比，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT42 之植株宿存葉比例分別減少 20.3%、40.43%、55.35%、21.57% 與 40.84%。CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT42 之植株宿存葉比例分別為： $79.70 \pm 2.23\%$ 、 $59.57 \pm 2.97\%$ 、 $44.65 \pm 2.81\%$ 、 $78.43 \pm 1.95\%$ 與 $59.16 \pm 3.28\%$ ，處理間達顯著差異水準 ($P < 0.0001$) (圖 2.9)。

觀測水分處理後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) 各受試植株宿存葉比例趨勢變化可知，與水分試驗前期相比，水分試驗後期之植株宿存葉比例下降趨勢較水分試驗前期明顯 (圖 2.9)。

比較水分試驗期間各處理植株宿存葉比例下降至 50% 所需日數可知，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之植株宿存葉比例下降至 50% 所需之時間依序為： 64.57 ± 1.83 、 48.35 ± 1.67 、 37.83 ± 1.97 、 56.86 ± 1.02 與 46.91 ± 2.27 日 (圖 2.9)，故乾旱與劇烈土壤水分變化促進成熟葉提早落葉。水分試驗期間各處理植株宿存葉比例趨勢變化可區分出 2 類群組：CK、LD + 3F 與 D、D + 3F 與 D + 5F，前者於水分試驗期間宿存葉落葉較少，後者於水分試驗期間之宿存葉落葉較多 (圖 2.9)。

觀察水分試驗結束 (DAT85) 後至所有受試植株地上部完全休眠期間 (2008/1/2~2008/2/11; DAT86~DAT126) 之植株宿存葉比例變化可知，各受試植株於試驗結束當日不論宿存葉保留多寡，植株之成熟葉均於水分處理後 112 或 119 日脫落。

(七) 土壤水分變化對梨樹新葉生長之影響

水分試驗期間各受試植株新葉之生長變化以單位時間全樹新葉葉面積

(Canopy new leaf area) 表示。試驗自 2007 年 10 月 08 日 (DAT0) 開始，結束於 2008 年 1 月 1 日 (DAT85)。各受試植株於水分試驗期間 (DAT0~DAT85) 所長出之新葉，皆於 2008 年 2 月 11 日 (DAT126) 全數脫落，地上部進入休眠。現就水分試驗期間各處理受試植株新葉生長之變化，探討不同灌溉處理對梨樹新葉生長之影響，結果顯示：

(A) CK 處理 (控制組； $\theta_v = 30\% \sim 45\%$)：

以 CK 處理而言，受試植株多於試驗後 14 日 (2007/10/22; DAT14) 長出新葉；全樹新葉葉面積為 99.176 ± 61.76 平方公分 (1.4 ± 0.87 片葉) (圖 2.10)。觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) CK 處理之新葉生長可知，與 DAT14 相比，水分試驗後 42 日 (DAT42) CK 處理之全樹新葉葉面積為 495.88 ± 228.45 平方公分 (7 ± 3.22 片葉)，新葉生長量低。比較水分處理後 42 日 (DAT42) CK 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，CK 處理之全樹葉面積比例為 $91.29 \pm 6.08\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $79.70 \pm 2.23\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.1 倍，故水分試驗前期 CK 處理之全樹葉面積組成以成熟之宿存葉為主。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) CK 處理之新葉生長可知，CK 處理之新葉於水分試驗後期生長量緩慢上升；觀測 DAT49 至 DAT84 之全樹新葉葉面積可發現其由 510.05 ± 223.34 平方公分 (7.2 ± 3.15 片葉) 增加至 1246.78 ± 451.71 平方公分 (17.6 ± 6.38 片葉) (圖 2.10)。比較水分處理後 84 日 (DAT84) CK 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，CK 處理之全樹葉面積比例為 $46.78 \pm 8.54\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $20.56 \pm 2.65\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 1.3 倍，故水分試驗後期 CK 處理之全樹葉面積組成以宿存葉與新葉為主，新葉所佔之比例較高。

觀測水分試驗結束後至植株地上部休眠之新葉生長變化可知，CK 處理之全樹

新葉葉面積自 DAT84 之後分 2 梯次下降，於 DAT91 時下降至 665.90 ± 437.61 平方公分 (9.4 ± 6.18 片葉)，於 DAT112 時下降至 269.19 ± 142.39 平方公分 (3.8 ± 2.01 片葉)，新葉於 DAT119 時全數落葉，地上部進入休眠 (圖 2.10)。

(B) D 處理 (乾旱處理；植株灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 再給水至 $\theta_v = 45\%$)：

以 D 處理而言，受試植株多於試驗後 7 日 (2007/10/15; DAT7) 長出新葉；全樹新葉葉面積為 495.88 ± 266 平方公分 (7 ± 3.75 片葉) (圖 2.10)。觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) D 處理之新葉生長可知，於水分試驗前期 D 處理之新葉生長具 1 次明顯之消長變化；由 DAT7、DAT14 與 DAT21 所觀察之全樹新葉葉面積可發現其由 495.88 ± 266 平方公分 (7 ± 3.75 片葉) 增加至 793.41 ± 271.05 平方公分 (11.2 ± 3.83 片葉)，隨後下降至 524.22 ± 222.44 平方公分 (7.4 ± 3.14 片葉) (圖 2.10)。然而於水分試驗前期後半段 (DAT21~DAT42) 時，D 處理之全樹新葉葉面積緩慢下降至 340.03 ± 147.58 平方公分 (4.8 ± 2.08 片葉) (圖 2.10)。水分試驗前期造成 D 處理新葉生長變化劇烈之主因為多次乾旱處理 (圖附 1-2) 與高溫 (圖 2.3) 所造成。比較水分處理後 42 日 (DAT42) D 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D 處理之全樹葉面積比例為 $67.96 \pm 6.18\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $59.57 \pm 2.97\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.1 倍，故水分試驗前期 D 處理之全樹葉面積組成以成熟之宿存葉為主。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) D 處理之新葉生長可知，水分試驗後期 D 處理之全樹新葉葉面積無明顯之生長；與 DAT42 相比，D 處理之全樹新葉葉面積於 DAT84 時為 240.86 ± 160.92 平方公分 (3.4 ± 2.27 片葉)，與 DAT42 時全樹新葉葉面積的 340.03 ± 147.58 平方公分 (4.8 ± 2.08 片葉) 相比無明顯增加之現象 (圖 2.10)。比較水分處理後 84 日 (DAT84) D 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D 處理之全樹葉面積比例為 $14.47 \pm 4.78\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $9.33 \pm 2.14\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.55 倍，故水分試驗

後期 D 處理之全樹葉面積組成以宿存葉與新葉為主，宿存葉所佔之比例稍高。

觀測水分試驗結束後至植株地上部休眠之新葉生長變化可知，D 處理之全樹新葉葉面積自 DAT84 之後緩慢下降，於 DAT112 時下降至 141.68 ± 86.76 平方公分 (2 ± 1.22 片葉)，於 DAT126 時全數落葉，地上部進入休眠 (圖 2.10)。

(C) D + 3F 處理 (植株灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 3 日)：

以 D + 3F 處理而言，受試植株多於試驗後 7 日 (2007/10/15; DAT7) 長出新葉；全樹新葉葉面積為 311.70 ± 142.74 平方公分 (4.4 ± 2.01 片葉) (圖 2.10)。觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) D + 3F 處理之新葉生長可知，水分試驗前期 D + 3F 之新葉生長量上升；觀測 DAT7 至 DAT42 之全樹新葉葉面積變化可知，D + 3F 處理之全樹新葉葉面積由 311.70 ± 142.74 平方公分 (4.4 ± 2.01 片葉) 增加至 1275.12 ± 479.41 平方公分 (18 ± 6.77 片葉) (圖 2.10)。比較水分處理後 42 日 (DAT42) D + 3F 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D + 3F 處理之全樹葉面積比例為 $75.75 \pm 11.30\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $44.65 \pm 2.81\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.7 倍，故水分試驗前期 D + 3F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉與新葉為主，宿存葉所佔之比例稍高。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) D + 3F 處理之新葉生長可知，水分試驗後期 D+3F 處理之全樹新葉葉面積無明顯之增長，於試驗最終時大量掉葉；觀測 D + 3F 於 DAT77 之全樹新葉葉面積為 1615.15 ± 718.04 平方公分 (22.8 ± 10.14 片葉)，與 DAT42 相比，DAT77 之新葉生長量僅增加 340.03 平方公分 (4.8 片葉)，自 DAT77 後全樹新葉葉面積即大幅下降，直至地上部休眠該日為止，水分處理後 84 日 (DAT84)，D + 3F 處理之新葉葉面積為 1105.10 ± 314.90 平方公分 (15.6 ± 4.45 片葉)。比較水分處理後 84 日 (DAT84) D + 3F 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D + 3F 處理之全樹葉面積比例為 $33.29 \pm 9.98\%$ (圖 2.8)，

宿存葉比例為 $7.25 \pm 1.36\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 3.6 倍，故水分試驗後期 D + 3F 處理之全樹葉面積組成以新葉為主。

觀察水分試驗結束後至植株地上部休眠之新葉生長變化可知，D + 3F 處理之全樹新葉葉面積自 DAT84 之後快速下降，於 DAT112 時下降至 113.34 ± 72.93 平方公分 (1.6 ± 1.03 片葉)，於 DAT126 時全數落葉，地上部進入休眠 (圖 2.10)。

(D) LD + 3F 處理 (灌溉後停止供水至 $\theta_v = 25 \sim 30\%$ 時行淹水處理 3 日)：

以 LD + 3F 處理而言，受試植株多於試驗後 7 日 (2007/10/15; DAT7) 長出新葉；全樹新葉葉面積為 226.69 ± 175.53 平方公分 (3.2 ± 2.48 片葉) (圖 2.10)。觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) LD + 3F 處理之新葉生長可知，與 DAT7 相比，LD + 3F 處理於 DAT42 之全樹新葉面積為 297.53 ± 145.87 平方公分 (4.2 ± 2.06 片葉)，全樹新葉葉面積無明顯之生長，水分試驗前期 LD + 3F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉為主。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) LD + 3F 處理之新葉生長可知，該處理之全樹新葉葉面積於 DAT49 上升至 665.90 ± 99.18 平方公分 (9.4 ± 1.4 片葉) 後，新葉面積即逐漸下降至水分試驗結束該日 (DAT84)；LD + 3F 處理於 DAT84 之全樹新葉葉面積為 226.69 ± 117.28 平方公分 (3.2 ± 1.66 片葉)。比較水分處理後 84 日 (DAT84) LD + 3F 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，LD + 3F 處理之全樹葉面積比例為 $20.36 \pm 4.06\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $13.20 \pm 2.20\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.5 倍。故水分試驗後期 LD + 3F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉與新葉為主，宿存葉所佔之比例較高。

觀察水分試驗結束後至植株地上部休眠之新葉生長變化可知，LD + 3F 處理之全樹新葉葉面積自 DAT84 之後緩慢下降，於 DAT105 時下降至 56.67 ± 56.67 平方公分 (0.8 ± 0.8 片葉)，於 DAT119 時全數落葉，地上部進入休眠 (圖 2.10)。

(E) D + 5F 處理 (灌溉後停止供水至 $\theta_v < 20\%$ 時行淹水處理 5 日)：

以 D + 5F 處理而言，受試植株多於試驗後 7 日 (2007/10/15; DAT7) 長出新葉；全樹新葉葉面積為 340.03 ± 150.94 平方公分 (4.8 ± 2.13 片葉) (圖 2.10)。觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) D + 5F 處理之新葉生長可知，水分試驗前期 D + 5F 之全樹新葉葉面積持續生長；觀測 DAT7 至 DAT42 之全樹新葉葉面積變化可知，D + 5F 全樹新葉葉面積由 340.03 ± 150.94 平方公分 (4.8 ± 2.13 片葉) 增加至 1190.11 ± 474.36 平方公分 (16.8 ± 6.70 片葉)。比較水分處理後 42 日 (DAT42) D + 5F 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D + 5F 處理之全樹葉面積比例為 $93.06 \pm 17.41\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $59.16 \pm 3.28\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 0.6 倍；故水分試驗前期 D + 5F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉與新葉為主，宿存葉所佔之比例稍高。

觀測水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) D + 5F 處理之新葉生長可知，水分試驗後期 D + 5F 處理之全樹新葉葉面積有再生長之現象；觀測 D + 5F 於 DAT42 至 DAT63 可知其全樹新葉葉面積由 1190.11 ± 474.36 平方公分 (16.8 ± 6.70 片葉) 上升至 2096.86 ± 529.45 平方公分 (29.6 ± 7.47 片葉)；與 DAT42 相比，D + 5F 處理於 DAT63 之全樹新葉葉面積增加約 906.75 平方公分 (12.8 片葉) (圖 2.10)。水分處理後 84 日 (DAT84)，D + 5F 處理之新葉葉面積為 2054.36 ± 391.23 平方公分 (29 ± 5.52 片葉)，比較水分處理後 84 日 (DAT84) D + 5F 處理之全樹葉面積比例與宿存葉比例可知，D + 5F 處理之全樹葉面積比例為 $54.94 \pm 14.31\%$ (圖 2.8)，宿存葉比例為 $7.71 \pm 2.49\%$ (圖 2.9)，全樹新葉葉面積為宿存葉面積的 6.1 倍。故水分試驗後期 D + 5F 處理之全樹葉面積組成以新葉為主。

觀察水分試驗結束後至植株地上部休眠之新葉生長變化可知，D + 5F 處理之全樹新葉葉面積維持至 DAT98 之後大幅下降，於 DAT119 時全樹新葉葉面積僅剩 226.69 ± 108.36 平方公分 (3.2 ± 1.53 片葉)，於 DAT126 時該處理之受試植株皆全數

落葉，地上部開始休眠 (圖 2.10)。

綜觀比較水分試驗期間各灌溉處理之全樹新葉葉面積生長可知，D + 3F 與 D + 5F 處理之新葉生長量較高，CK、D 與 LD + 3F 處理之新葉生長量較低。不論何種處理，水分試驗前期全樹葉面積之組成多以宿存葉為主，而水分試驗後期除 D 與 LD + 3F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉為主外，CK、D + 3F 與 D + 5F 處理之全樹葉面積組成皆以水分試驗期間所長出之新葉為主。所有受試植株皆於水分試驗結束 (DAT85) 後停止生長新葉，新葉與宿存葉皆於 DAT126 時全數脫落，進入休眠。

(八) 土壤水分變化對梨樹具活性根系分佈消長之影響

水分試驗期間各受試植株具活性根系分佈之消長以有效根系分佈比例【effective root distribution (% of DAT0)】表示。試驗自 2007 年 10 月 8 日開始，結束於 2008 年 1 月 1 日，記錄單位時間各受試植株白色與黃色根系總和，若於觀測日期適逢淹水處理則根系生長之調查順延至處理結束當日進行。

結果顯示，觀測水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 各受試植株有效根系分佈之生長趨勢可知，水分試驗前期各處理之新生根具 2-3 次之生長高峰。

由水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) 各處理有效根系分佈比例變化可知，水分試驗後期各受試植株所量測之有效根系分佈比例呈現 3 種不同之趨勢。CK 與 D 處理於水分試驗後期之有效根系分佈比例無明顯之變化，與 DAT43 相比，CK 與 D 處理於 DAT85 之有效根系分佈比例為 $140.67 \pm 24.81\%$ 與 $83.98 \pm 37.56\%$ ，分別增加 4.66% 與減少 14.37%。D + 3F 與 D + 5F 處理於水分試驗後期之有效根系分佈比例則隨試驗時間增加而減少，與 DAT43 相比，D + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT85 之有效根系分佈比例為 $54.99 \pm 24.00\%$ 與 $83.83 \pm 39.20\%$ ，分別減

少 76.55%與 52.85%。然而 LD + 3F 處理於水分試驗後期之有效根系分佈比例則於 DAT64 至 DAT85 期間上升，與 DAT43 相比，LD + 3F 處理於 DAT85 之有效根系分佈比例為 $346.95 \pm 125.97\%$ ，增加 107.81%。

綜觀水分試驗期間各處理之有效根系分佈比例變化可知，水分試驗前期各受試植株之有效根系分佈比例具 2-3 次之生長高峰。水分試驗後期除 LD + 3F 處理之有效根系分佈量持續增加外，D + 3F 與 D + 5F 處理之有效根系分佈比例則隨試驗時間增加而遞減，而 CK 與 D 處理之有效根系分佈比例則於 DAT85 之後下降（如圖附 4-1、4-2、4-3、4-4 與 4-5）。

觀察各受試植株於水分試驗結束 (DAT85) 後至所有受試植株地上部完全休眠期間 (2008/1/2~2008/2/11; DAT86~DAT126) 之植株有效根系分佈比例可知，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT91 之有效根系分佈比例分別為： $90.80 \pm 28.45\%$ 、 $39.08 \pm 27.97\%$ 、 $33.69 \pm 26.12\%$ 、 $310.05 \pm 119.26\%$ 與 $70.67 \pm 32.72\%$ ，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0195$) (圖 2.11)。而 CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT98 之有效根系分佈比例分別為： $51.24 \pm 26.07\%$ 、 $20.66 \pm 19.91\%$ 、 $33.69 \pm 26.12\%$ 、 $310.05 \pm 119.26\%$ 與 $70.67 \pm 32.72\%$ ，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0119$) (圖 2.11)。比較 DAT85 至 DAT98 之有效根系分佈比例可知，與 DAT85 相比，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT98 之有效根系分佈比例分別下降： 89.43% 、 63.32% 、 21.30% 、 36.90% 與 13.16% 。各處理之植株有效根系分佈比例皆於 DAT85 至 DAT98 降低。所有受試植株之有效根系於 DAT85 以後開始褐化，僅保留少數根系持續維持至隔年春季。

觀測各受試植株於 DAT105 至 DAT126 之有效根系分佈比例可知，雖各受試植株地上部皆於 DAT126 時全樹落葉，但各受試植株於 DAT105 至 DAT126 之有效根系分佈比例均無明顯之消長，各處理有效根系之分佈仍維持於 DAT105 之狀態。CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT105 之有效根系分佈比例分別為：

48.57±27.15%、5.66±5.15%、27.98±25.46%、284.10±126.43%與 37.90±5.65%，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0205$) (圖 2.11)。CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於 DAT126 之有效根系分佈比例分別為：36.38±31.34%、5.66±5.15%、27.98±25.46%、287.17±129.34%與 37.90±5.65%，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0189$) (圖 2.11)。

(九) 土壤水分變化對水分試驗前期梨樹新生根生長模式之影響

水分試驗期間各處理植株根部之生長模式以新生根總生產量 (Total new roots observed) 與新生根總死亡量 (Total new roots mortality) 表示。本試驗將根部生活史分成 2 階段記錄：水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19) 與水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1)。

水分試驗前期各處理植株新生根總生產量之估算自水分處理後第 10 天開始記錄；累計水分處理後 10 至 43 日各受試植株所生產之新生根數量即為水分試驗前期新生根總生產量，新生根總死亡量則記錄水分試驗前期期間所生產新生根之總死亡量。結果顯示，CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之水分試驗前期新生根總生產量分別為 36.80±7.38、33.80±8.25、34.60±3.23、43.00±8.47 與 20.80±1.39，新生根總死亡量分別為 4.0±0.95、6.40±2.50、9.00±2.41、2.80±0.58 與 6.60±0.87 (圖 2.12)。

然而水分試驗前期各處理植株之新生根於之總生產量 ($P = 0.2154$) 與總死亡量 ($P = 0.1206$) 雖未達顯著差異水準 (圖 2.12)，但仍可見 LD + 3F 處理之新生根總生產量最高，D + 5F 處理之新生根總生產量最低。然而分析水分試驗前期新生根總存活率可知 CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理於水分試驗前期之新生根總存活率分別為 89.26±1.21%、82.95±2.43%、74.14±6.14%、92.28±2.10%與 68.08±4.30%，各處理間比較達顯著差異水準 ($P = 0.0007$) (圖 2.13)。而於水分試驗

前期觀測新生根總生產量可知，各處理多於水分處理後 10、24 與 43 日大量生產新生根，其餘觀測時間之新生根生產量較少 (data not shown)。

(十) 土壤水分變化對水分試驗後期梨樹新生根生長模式之影響

水分試驗後期各處理植株新生根生長模式之估算自水分處理後第 50 天開始記錄；累計水分處理後 50 至 85 日各受試植株所生產之新生根數量即為水分試驗後期新生根總生產量，新生根總死亡量則記錄水分試驗後期期間所生產新生根之總死亡量。

結果顯示，水分試驗後期 LD + 3F 處理之新生根總生產量明顯高於其他處理，而 CK、D、D + 3F 與 D + 5F 處理於水分試驗後期新生根總生產量極低。CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F 處理之水分試驗後期新生根總生產量分別為 7.20 ± 3.28 、 3.80 ± 2.48 、 5.20 ± 2.50 、 27.20 ± 9.64 與 11.40 ± 2.80 ，處理間達顯著差異水準 ($P = 0.0216$) (圖 2.14)。然而於水分試驗後期觀測新生根總生產量可發現，僅 LD + 3F 處理集中於水分處理後 71、78 與 85 日大量生產新生根外，其餘處理於水分試驗後期之新生根生產時間較為分散且新生根生產量低 (data not shown)。與水分試驗前期相比，各處理於水分試驗後期之新生根總生產量與總死亡量極低，水分試驗後期新生根存活率達 100%。

(十一) 土壤水分變化對水分試驗前期梨樹標定新生根存活力之影響

水分試驗前期新生根存活力 (Root survivorship) 之估算自水分處理後第 10 天開始；記錄各受試植株標定新生根於水分處理後 10 日至 50 日 (2007/10/18~2007/11/27; DAFR0~DAFR40) 之標定新生根維持白色比率 (Cohort new roots remaining white) 與標定新生根存活率 (Cohort new root survival) 變化；以此代表各處理於水分試驗前期新生根之存活力。結果顯示，比較水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/20; DAT0~DAT42) 各受試植株標定新生根維持白色比率與標定新生根

存活率下降至 50%所需日數可知。D、D + 3F 與 D + 5F 處理於第 1 次標定新生根記錄後 (DAFR) 標定新生根維持白色比率下降至 50%分別需 32.83 ± 2.15 、 15.19 ± 2.37 與 17.32 ± 2.75 日 (圖 2.15)，而 CK 與 D + 3F 處理於 DAFR40 之標定新生根維持白色比率分別為 $72.98 \pm 5.33\%$ 與 $55.22 \pm 5.25\%$ (圖 2.15)；水分試驗前期 CK 與 LD + 3F 處理之新生根仍有超過 50%的標定新生根維持白色具活力之狀態。而觀測水分試驗前期各處理於第 1 次標定新生根記錄後 (DAFR) 標定新生根存活率下降至 50%所需之時間可知，D + 3F 與 D + 5F 處理之標定新生根存活率下降至 50%分別需 29.50 ± 2.14 與 36.90 ± 2.77 日 (圖 2.16)。而 CK、D 與 LD+3F 處理於 DAFR40 之標定新生根存活率分別為 $80.02 \pm 1.92\%$ 、 $65.42 \pm 2.98\%$ 與 $77.36 \pm 3.22\%$ (圖 2.15)；水分試驗前期 CK、D 與 LD + 3F 處理之標定新生根仍有超過 65%的標定新生根存活。

綜觀比較水分試驗前期各處理標定新生根之存活力可知，乾旱與劇烈土壤水分變化降低新生根之存活力，且劇烈土壤水分變化影響根系生長較乾旱逆境嚴重，各處理間植株標定新生根維持白色比率與標定新生根存活率之趨勢變化可分成 2 類群組探討：CK、D、LD + 3F 與 D + 3F、D + 5F。於水分試驗前期 CK 與 LD + 3F 處理之標定新生根維持白色比率與標定新生根存活率皆超過 50%。D 處理之標定新生根維持白色比率於 DAFR 32.83 ± 2.15 下降至 50%，標定新生根存活率於 DAFR40 仍維持於 50%以上。D + 3F 與 D + 5F 處理之標定新生根維持白色比率與標定新生根存活率則分別於 DAFR 15.19 ± 2.37 、DAFR 17.32 ± 2.75 與 DAFR 29.50 ± 2.14 、DAFR 36.90 ± 2.77 下降至 50%。故水分試驗前期 CK 與 LD + 3F 處理之新生根存活力較 D 處理高，而 D 處理之新生根存活力又高於 D + 3F 與 D + 5F 處理。

(十二) 土壤水分變化對水分試驗後期梨樹標定新生根存活力之影響

水分試驗後期新生根存活力之估算自水分處理後第 43 天開始；記錄各受試植

株標定新生根於水分處理後 43 日至 85 日 (2007/11/20~2008/1/1; DAFR0~DAFR42) 之新生根維持白色比率與新生根存活率變化；代表各處理於水分試驗後期新生根之存活力。

結果顯示，以水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT42~DAT85) 各受試植株於第 1 次標定新生根記錄後 (DAFR) 新生根存活率下降至 50%所需之時間可知，D + 3F 與 D + 5F 處理之新生根存活率下降至 50%分別需 34.02 ± 2.97 與 37.80 ± 1.31 日 (圖 2.18)。而 CK、D 與 LD+3F 處理於 DAFR42 之新生根存活率分別為 $87.99 \pm 1.65\%$ 、 $80.92 \pm 3.02\%$ 、 $83.42 \pm 2.41\%$ (圖 2.18)；水分試驗後期 CK、D 與 LD + 3F 處理之新生根仍有超過 80%的標定新生根存活。

綜觀比較水分試驗後期各處理標定新生根維持白色比率與新生根存活力可知，水分試驗後期 CK、D、LD+3F 處理與 D + 3F、D + 5F 處理之新生根維持白色比率與新生存活率分別呈現 2 種不同之趨勢。於水分試驗後期 CK、D 與 LD + 3F 處理之新生根維持白色比率與新生根存活率皆超過 50%。而 D + 3F 與 D + 5F 處理之新生根維持白色比率與新生根存活率則分別於 DAFR 27.07 ± 2.13 、DAFR 28.70 ± 2.57 與 DAFR 35.86 ± 2.97 、DAFR 37.80 ± 1.31 下降至 50%。故水分試驗後期 CK、D 與 LD + 3F 處理之新生根存活力高於 D + 3F 與 D + 5F 處理。

比較各處理於水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/20) 與後期 (2007/11/27~2008/1/1) 之新生根存活力可知，相較於水分試驗前期，水分試驗後期之新生根維持白色比率與新生根存活率下降趨勢較水分試驗前期緩和且一致。比較兩時期各處理之新生根維持白色比率與新生根存活率下降至 50%所需日數可知，相較於水分試驗前期，水分試驗後期 D + 3F 與 D + 5F 處理之新生根維持白色比率下降至 50%所需之時間平均延長 12 日，且水分試驗後期 D 處理於 DAFR42 之新生根維持白色比率為 $72.98 \pm 2.76\%$ ；新生根維持白色比率超過 50%。而比較水分試驗前期 D + 3F 與 D + 5F 處理之新生根存活率下降至 50%所需之時間可知，水分試驗後期 D

+ 3F 與 D + 5F 處理之新生根存活率下降至 50%所需之時間各延長至 4.52 與 2.87 日，且其他處理於 DAFR42 之平均新生根存活率高於水分試驗前期約 10%。

(十三) 水分試驗期間植株宿存葉比例變化對新生根存活力之影響

水分試驗期間植株地上部葉片對根部生長之影響以植株宿存葉下降比例與標定新生根存活力（新生根維持白色比率與新生根存活率）兩者間之相關性表示。因水分試驗跨越秋冬兩季，故將根部生活史分成 2 階段記錄：水分試驗前期（2007/10/8~2007/11/19）與水分試驗後期（2007/11/20~2008/1/1）。

結果顯示，對水分試驗前期而言，植株宿存葉下降比例與與新生根存活力呈顯著負相關；新生根存活力隨宿存葉比例下降而減少。因此於水分試驗前期，新生根維持白色比率 ($r^2 = 0.5562$) (圖 2.19) 與新生根存活率 ($r^2 = 0.7371$) (圖 2.20) 隨宿存葉比例下降而減少。

相對於水分試驗前期，水分試驗後期之植株宿存葉下降比例與新生根存活力之相關性則較低；其中水分試驗後期之新生根維持白色比率與新生根存活率之決定係數 (coefficient of determination, r^2) 分別為 0.3057 (圖 2.21) 與 0.3812 (圖 2.22)。

四、討論

(一) 秋季亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根系之生長

調查秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部葉片之生長可知，秋季臺灣低海拔地區之物候環境因高溫與土壤水分劇烈變化等影響，頂梢於秋、冬季仍未停止生長休眠，且秋季臺灣低海拔地區因環境氣溫變化較大，植株之葉片通常於寒流低溫後脫落，然而蜜雪梨樹因打破休眠所需之低溫時數較少，植株休眠芽通常於秋季短暫低溫後感應高溫，於脫落之老葉上方打破休眠、開花並抽梢，故水分試驗期間植株新葉仍持續少量生長至 12 月下旬 (圖 2.10)，然而個受試植株

於秋末冬初期間所長出之新葉皆於1月上旬感應低溫後逐漸脫落休眠，而於冬季長出之新芽與幼葉也因寒流低溫而凍傷壞死，植株全樹葉面積於11月中旬以後逐漸減少，各受試植株於隔年2月上旬全樹落葉，進入休眠(圖2.7)。一般而言溫帶地區因四季規律且秋、冬季溫度較低，高需冷性落葉果樹之地上部則隨秋季低溫逐漸進入生理休眠 (Faust *et al.*, 1997; Head, 1968; Jackson, 2003; Saure, 1985)，不若秋、冬季臺灣亞熱帶低海拔地區栽培之低需冷性梨樹，地上部仍因植株需冷性低、物候環境與低溫不足等影響而持續生長。

觀測秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系之生長可知，梨樹('Mixue'/ Lindley's pear) 新生根於秋季10至11月間具2次明顯之生長高峰(圖2.11)。觀測梨樹植株於秋、冬季新生根之生產模式可知，於水分試驗期間(10-12月)84%之新生根於10至11月間生產(圖2.12)，而冬季11月下旬至1月間所生產之新生根僅佔水分試驗期間新生根總生產量的16%(圖2.14)。梨樹新生根於1月後停止生產，而85%以上於水分試驗期間所生產之新生根皆於冬季1月期間木栓化，少數新生根則以白色與黃色之狀態越冬(圖2.11)。

由日本鳥取縣地區二十世紀、幸水與長十郎等高需冷性品種梨樹秋季根部之生長可知，溫帶地區梨樹新生根於9至10月間少量生產1至2次，然而大多數於秋季生長之新生根則於10至11月間木栓化，少數新生根則維持白色具活性之狀態越冬，於隔年3月轉色木栓化(平田，2000b; 林，1960)。Christina 和 Eissenstat(1996) 於美國賓州中部觀察20年生'Red Delicious'/'M.26'蘋果樹10月至隔年6月植株根系之生長發現，秋季蘋果新生根於10月果實採收後少量生長1次，超過30%於秋季生長之新生根壽命達200日以上；於翌年春季3-4月轉色木栓化。與秋根相比，溫帶地區蘋果植株於春季萌芽期所生產之春根壽命較短，大多數春季新生根皆於60天內更新。

試驗結果顯示，秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系生長模式與秋

季溫帶地區生長之高需冷性品種梨與蘋果相似 (平田 2000; 林, 1960; Christina and Eissenstat, 1996; Head, 1968), 然而秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹新生根於冬季休眠前大量木栓化之時間較溫帶地區高需冷性品種梨樹晚約 1 至 2 個月, 推測與作物品種及環境溫度變化有關。

日本及美國等溫帶地區栽培之蘋果與梨果實多於秋季 9 至 10 月間採收, 秋季新生根於採收後通常有 1-2 次小型之生長高峰 (平田, 2000; 林, 1960; Christina and Eissenstat, 1996)。一般而言, 植物體根系生長對地上部葉片光合產物運移、果實生長等變化相當敏感, 植物體供源 (source) 與儲池 (sink) 器官之比例影響根系之生長 (Atkinson, 1980; Buwalda, 1993; Buwalda and Lenz, 1992)。然而本試驗之梨樹為 2 年生幼樹, 植株本身尚無法進行商業生產, 故於水分試驗期間將樹上生長之果實拔除以減少植株養分消耗與影響植株之營養生長, 然而梨樹之秋季新生根仍於 10 至 11 月間具 2 次之生長高峰, 故推測梨樹新生根於秋季之生長可能與植株休眠前根系之維持有關。

(二) 土壤水分變化對秋季亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹葉片生長之影響

本試驗結果顯示, 相較於乾旱逆境, 劇烈土壤水分變化加速成熟葉提早脫落 (圖 2.9) 與刺激新梢萌芽 (圖 2.10)。觀察水分試驗期間各處理植株宿存葉比例之變化可知, 乾旱處理 (D) 與乾旱後淹水(D + 3F, D + 5F) 處理之地上部所呈現之趨勢相似 (圖 2.9), 故推測植株地上部早期落葉主要受乾旱逆境之影響。乾旱逆境誘導植株老葉落葉, 此過程稱為葉面積調節 (leaf area adjustment) 作用, 主要為植物體水分來源受限時, 降低全樹葉面積和蒸散作用之機制 (Behboudian and Mills, 1997; Hasegawa, 2002; Lakso, 2003)。

本試驗跨越秋季與冬季, 植株全樹葉面積之組成多為已開展之成熟葉與老葉, 土壤水分逆境易造成植株落葉 (Behboudian and Mills, 1997; Hasegawa, 2002;

Kozlowski, 1984; Lakso, 2003; Schaffer, 1998; Schaffer *et al.*, 1992)。於熱帶地區，75%之落葉樹多於早季落葉；植株生長勢的減緩，主要認為與乾旱及葉片水分潛勢有關 (Arora *et al.*, 2003)。冬季落葉果樹芽體休眠之離層酸 (abscisic acid; ABA) 主要於老葉合成，之後運移至芽及生長點，誘導芽體休眠；葉片主要於葉柄形成離層 (abscission layer)，而終於脫落 (Arora *et al.*, 2003; Faust *et al.*, 1997; Jackson, 2003; Saure, 1985)。

落葉果樹秋季提早落葉易造成離層酸 (abscisic acid; ABA) 累積不足，無法供當年夏季已分化完全之芽體休眠至隔年春季再萌芽；然而土壤水分劇烈變化刺激低需冷性梨樹新梢萌芽之主因推測因乾旱逆境造成植株提早落葉，進而降低休眠芽離層酸的累積，芽體易因休眠條件不足而提早打破芽體休眠，使植株提早萌芽、開花與生長 (Arora *et al.*, 2003; Faust *et al.*, 1997; Jackson, 2003; Saure, 1985)。

然而觀測水分試驗期間各受試植株全樹葉面積與新葉生長變化可知，秋季土壤水分變化對全樹葉面積與葉面積比例變化影響較小，植株全樹葉面積與葉面積比例主要受環境氣候變化與溫度之影響。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19; DAT0~DAT42) 各受試植株全樹葉面積與葉面積比例僅呈現小幅波動之消長，主因為水分處理後植株宿存葉提早脫落，而低需冷性梨樹常因秋季高溫、環境氣溫變化與植株早期落葉使部分休眠芽提早打破休眠所致。

水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1; DAT43~DAT85) 適逢秋冬轉換之際，土壤水分變化較少，各處理植株主要因低溫休眠而落葉，而冬季寒流也造成新葉壞疽等影響。

(三) 土壤水分變化對秋季亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系生長之影響

臺灣低海拔地區秋季梨樹盆苗新生根之生長多集中於 10 月與 11 月 (圖 2.12)，各受試植株之新生根總生產量於 12 月降低 (圖 2.14)，於隔年 1 月各受試植

株之新生根則停止生產 (圖 2.11)。本試驗結果顯示，劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 降低水分試驗前期新生根存活率。與正常灌溉處理相比，劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 之新生根存活率分別降低 15% 與 21% (圖 2.13)。適度土壤缺水增加作物根系之生長量，Buwalda 和 Lenz(1992) 比較不同土壤供水量對 'Golden Delicious' / M.9 蘋果樹地上部與地下部之生長可知，植株地上部之生物產量 (biomass) 隨土壤水分減少而降低，然而比較根系之生物產量可知，正常灌溉蘋果樹之全樹根部乾物重為 50% 灌溉的 95%，為 25% 灌溉的 140%，顯示適度缺水增加根系之生長。然而試驗結果顯示，秋季輕微土壤水分變化 (LD + 3F) 不影響水分試驗前期新生根之存活率與總生長量，水分試驗前期植株之新生根存活率及生產量與正常灌溉相比無顯著差異 (圖 2.12、圖 2.13)。

水分試驗後期進入冬季，各受試植株之新生根總生產量減少，僅輕微土壤水分變化 (LD+3F) 處理之新生根生長量於水分試驗後期大量生長，故相較於正常灌溉處理，輕微土壤水分變化可提高冬季上旬新生根之生長量 (圖 2.14)。

於秋季水分試驗期間各受試植株之新生根總生產量多於 DAT10 與 DAT42 兩時期大量生產，故個別標定各受試植株於 DAT10 與 DAT42 所生長之新生根觀察土壤水分變化對水分試驗前期與後期新生根存活力之影響。本試驗結果顯示，土壤水分變化影響梨樹新生根之存活力 (survivorship)。與正常灌溉處理相比，乾旱處理與劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 均會降低新生根之存活力。與乾旱處理相比，劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 處理植株之新生根存活力較低 (圖 2.16)，對梨樹而言，劇烈土壤水分變化對根系之影響較乾旱處理嚴重。

由水分試驗前期各受試植株標定新生根維持白色比率與標定新生根存活率下降至 50% 以下所需日數可知，與正常灌溉處理相比，乾旱與劇烈土壤水分變化均會降低新生根活力；劇烈土壤水分變化 (D + 3F, D + 5F) 植株之標定新生根超過 50% 於記錄後 20 天 (DAFR20) 內轉色 (圖 2.15)，於記錄後 30 至 40 天內木栓化 (圖

2.15) 乾旱處理植株之標定新生根 50% 以上於記錄後 32.82 ± 2.15 日轉色 (圖 2.15)，但標定新生根木栓化比率劇烈土壤水分高，於記錄日內標定新生根之存活率仍超過 50% (圖 2.16)。

然而與正常灌溉處理相比，輕微乾旱後淹水 (LD + 3F) 處理之植株標定新生根存活力無顯著差異，而水份試驗期間乾旱處理之標定新生根維持白色比率 (圖 2.14) 與新生根存活率 (圖 2.16) 均較正常灌溉處理與輕微土壤水分變化 (LD + 3F) 處理低，故推測對梨樹根系而言，乾旱逆境較淹水逆境敏感。適度土壤缺水增加作物根系之生長量，多數作物根系於土壤水勢低於 -50kPa 時，根的伸長速率才會下降 (Buwalda and Lenz, 1992; Richards, 1983)。持續乾旱逆境會降低根系產量，於 1 年生蘋果 'Mutsu' 盆苗乾旱試驗可知，土壤水勢下降，植株根乾物重也會逐漸下降，兩者間呈正相關，且根部之呼吸速率也隨植株根系乾物重下降而降低 (Psarras and Merwin, 2000)。

水分試驗後期植株標定新生根存活力趨勢與水分試驗前期相似，然而相較於水分試驗前期，水分試驗後期植株之標定新生根轉色與木栓化比例較低 (圖 2.17, 與 2.18)。水分試驗後期植株新生根存活力較前期高之原因，推測可能因冬季低溫、植株休眠前落葉與土壤水分變化頻率降低所致。冬季低溫降低新生根代謝與更新，進而延長根系壽命且梨樹地上部因低溫逐漸進入休眠，然而水分試驗後期之新生根產量較少，樹體養分可充分供應較少量根系所致，許多研究報告也曾提及，低溫相對降低作物新生根之產量與更新速率 (Buwalda, 1993; Gill and Jackson, 2000; Roger, 1939)。

(四) 秋季土壤水分變化對植株宿存葉比例與新生根存活力之影響

由水分試驗前期各受試植株宿存葉比例與新生根存活力之相關性可知，成熟葉提早落葉降低新生根存活力；秋季新生根維持白色比率與新生根存活率隨宿存

葉比例下降而減少 (圖 2.19 與圖 2.20)，根系生長對地上部葉片光合產物之變化相當敏感 (Atkinson, 1980; Buwalda, 1993; Buwalda and Lenz, 1992)。

(五) 冬季土壤水分變化對植株宿存葉比例與新生根存活力之影響

觀測冬季各受試植株宿存葉比例與新生根存活力之相關性可知，冬季植株宿存葉與新生根存活力相關性較低；水分試驗後期植株宿存葉比例對植物體新生根存活力之影響較小，主要因冬季宿存葉多為黃化之老葉，光合作用能力降低，故老葉脫落對植株根系影響較小 (圖 2.21 與圖 2.22)。

(六) 土壤水分變化對土壤溶液酸鹼值之影響

土壤酸鹼值 (soil pH) 對各類礦物元素之溶解度及作物根部吸收礦物元素之有效性具密切關係 (Lucas and Davis, 1961)，淹水處理易造成土壤鹽基流失滲漏，進而降低土壤之酸鹼度 (Patrick and Mahapatra, 1968; Schaffer *et al.*, 2006)。一般建議適合梨樹栽培之土壤酸鹼值為 5.5~6.5 之微酸性土壤 (Jackson, 2003)。本試驗結果顯示，高頻率之淹水會降低土壤酸鹼值，可能間接影響作物根部對土壤礦物營養之吸收，長期仍可能造成作物營養元素缺乏等生理障害，但本試驗中高頻率淹水處理之土壤 pH 雖有下降，但仍未下降至 pH 4.5~5.5 危害作物生長之酸性土壤。然而各處理土壤樣本之酸鹼值經統計後雖有顯著之差異，但土壤分類上仍歸類於 pH 5.5~6.5 之微酸性土壤。

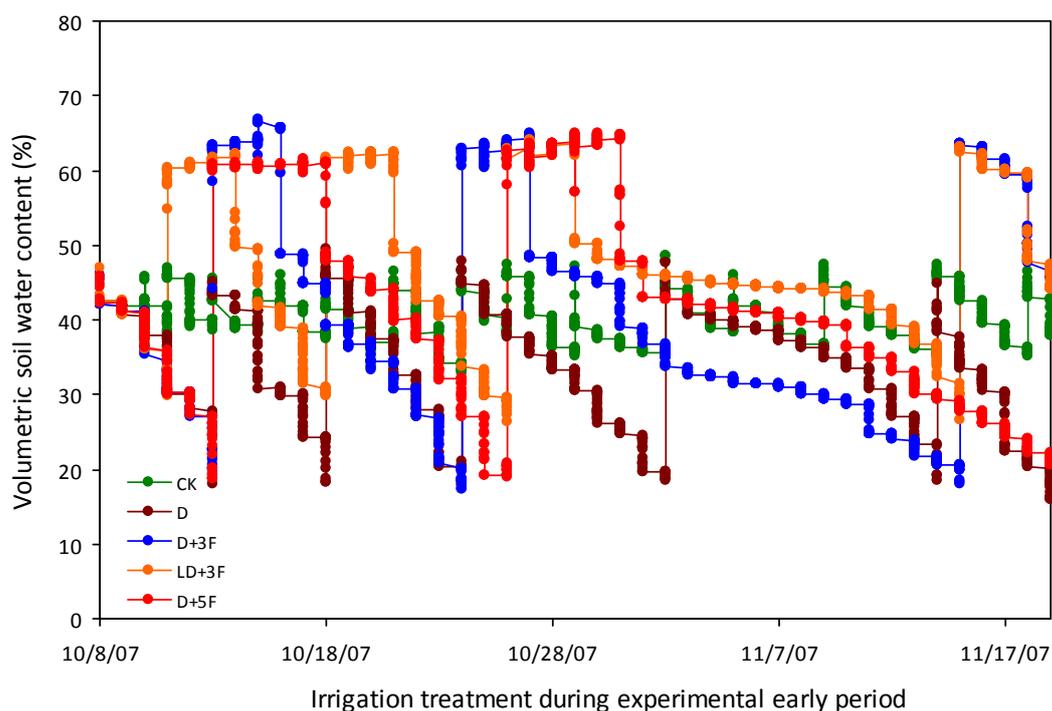


圖 2.1. 水分試驗前期各處理 (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) 植盆之體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2007 年 11 月 19 日。

Fig. 2.1. Irrigation treatments (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental early period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental early period (2007/10/8~2007/11/19) was measured from 8 October 2007 until 19 November 2007.

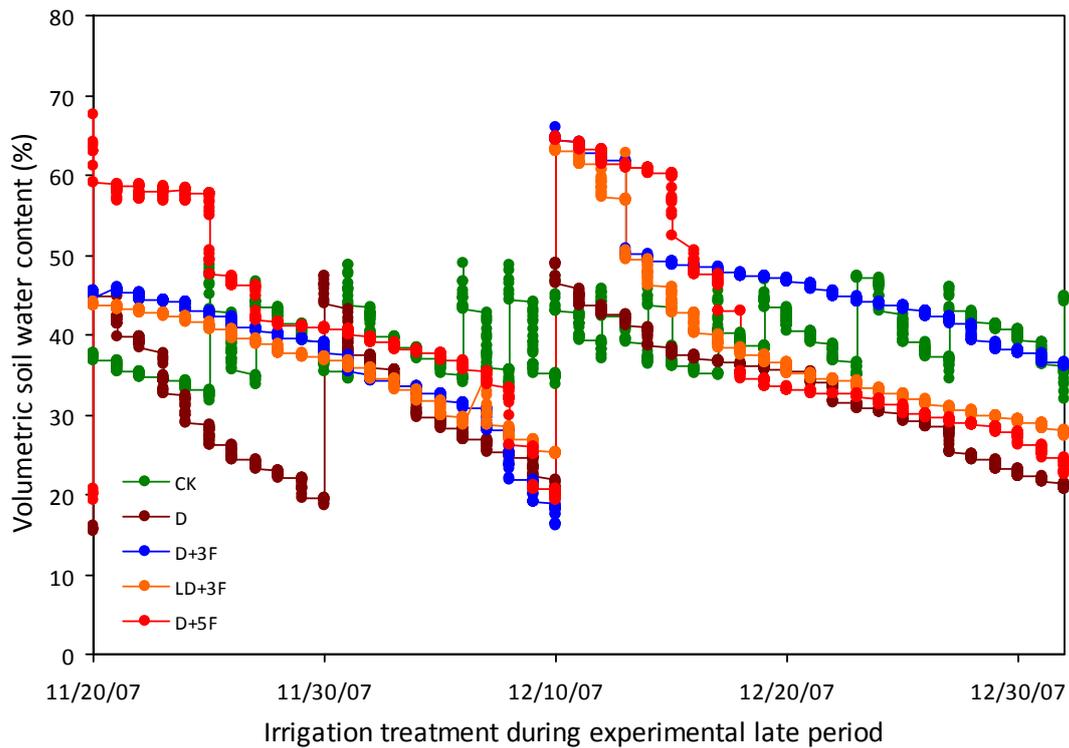


圖 2.2. 水分試驗後期各處理 (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) 植盆之體積土壤含水量 (%vol) 之變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗後期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 11 月 20 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Fig. 2.2. Irrigation treatments (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental late period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental late period (2007/11/20~2008/1/1) was measured from 20 November 2007 until 1st January 2008.

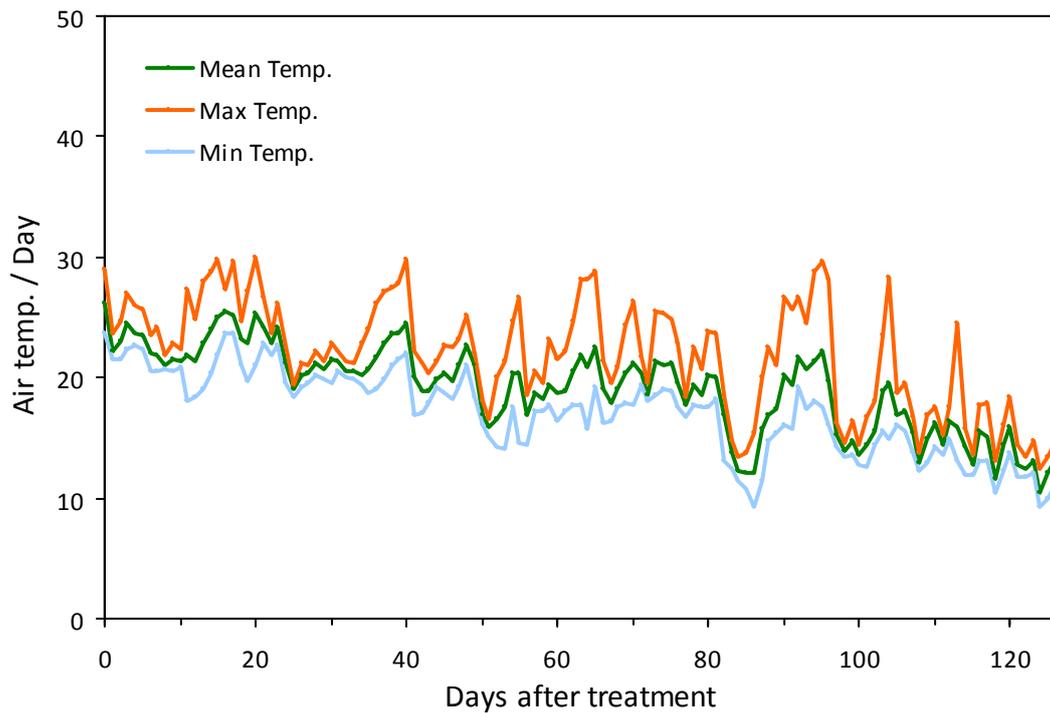


圖 2.3. 試驗地區每日最高、最低與平均環境氣溫 (°C) 之變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗期間環境氣溫之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。

Fig. 2.3. Average of maximum, minimum and mean temperatures of the experiment orchard in Taipei. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Primary minutely data were recorded with an on-site weather station between 10 Oct. 2007 and 11 Feb. 2008.

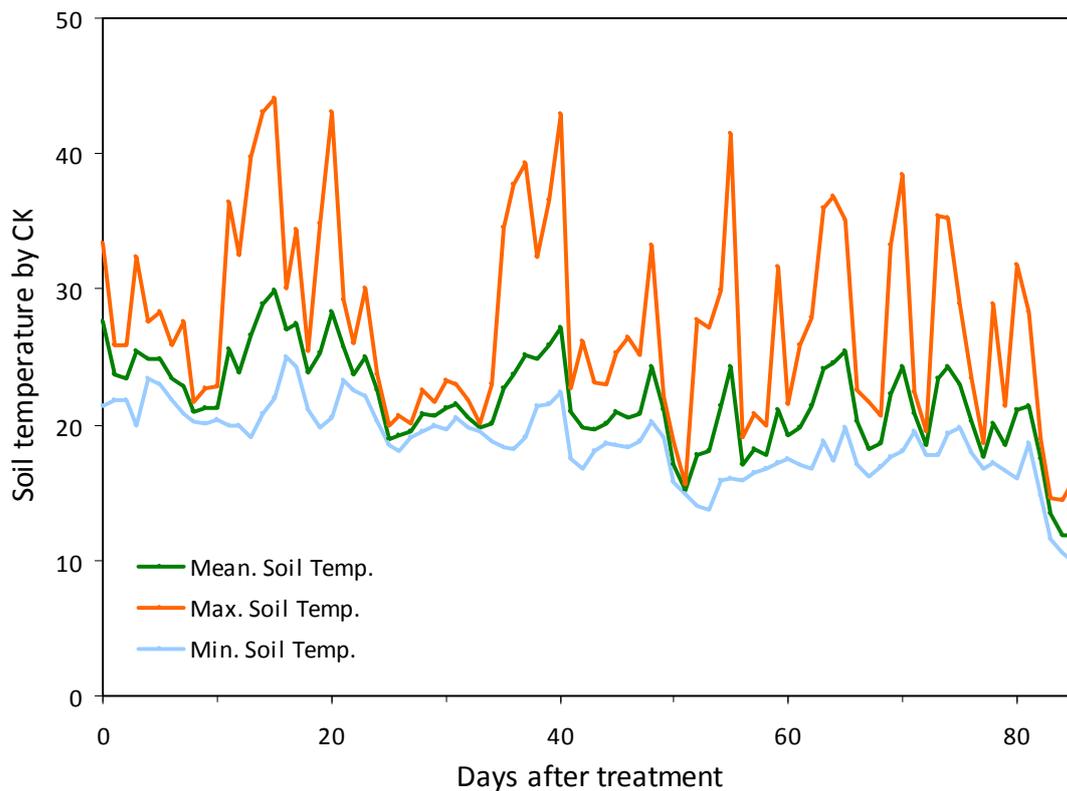


圖 2.4. 水分試驗期間控制組 (CK) 之土壤每日最高溫、最低溫與平均溫度 (°C) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗期間各處理土壤溫度之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Fig. 2.4. Irrigation treatments affected on the variation of CK soil temperature (°C) during experimental period. Average of control (CK) treatment soil maximum, minimum and mean temperatures of the experiment orchard in Taipei. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Soil temperature during experimental period was measured from 8 October 2007 until 1 January 2008.

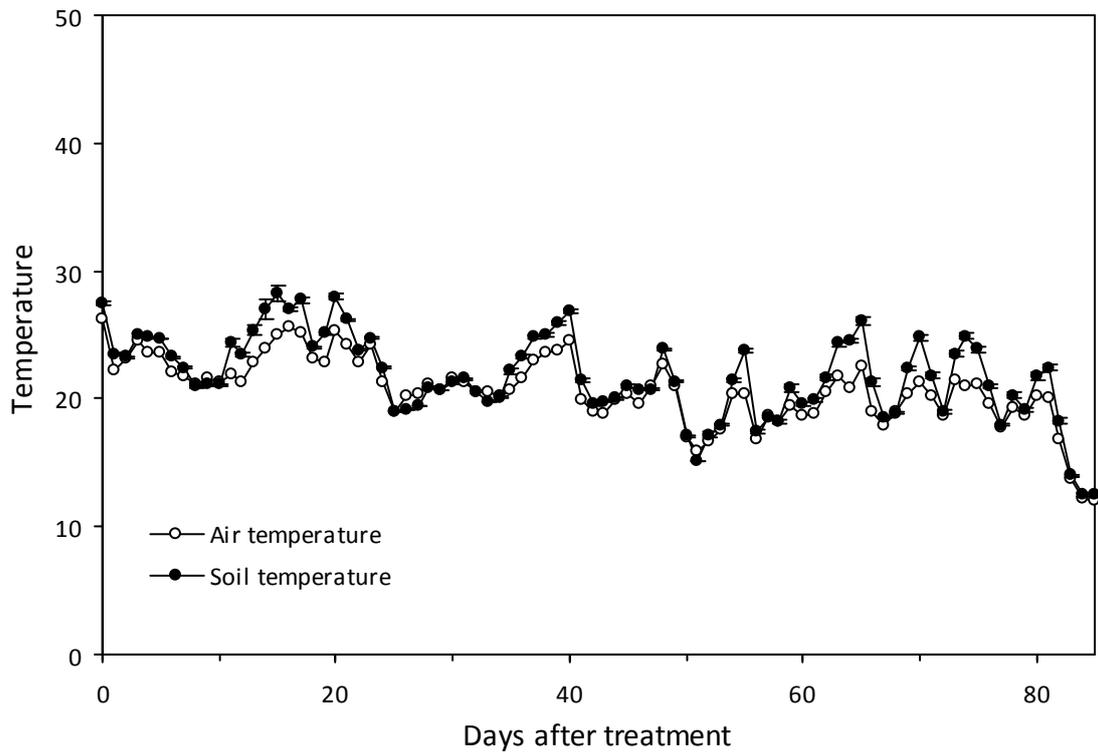


圖 2.5. 水分試驗期間各處理之土壤與大氣每日平均溫度 (°C) 之變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗期間各處理土壤溫度之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。土壤日均溫之每一記錄點表示各處理受試植盆於水分試驗期間所記錄之土壤日均溫 (n = 5) 變化。垂直誤差線代表標準差。

Fig. 2.5. Average of the soil and air temperature of the experiment orchard in Taipei. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Soil temperature during experimental period was measured from 8 October 2007 until 1 January 2008.

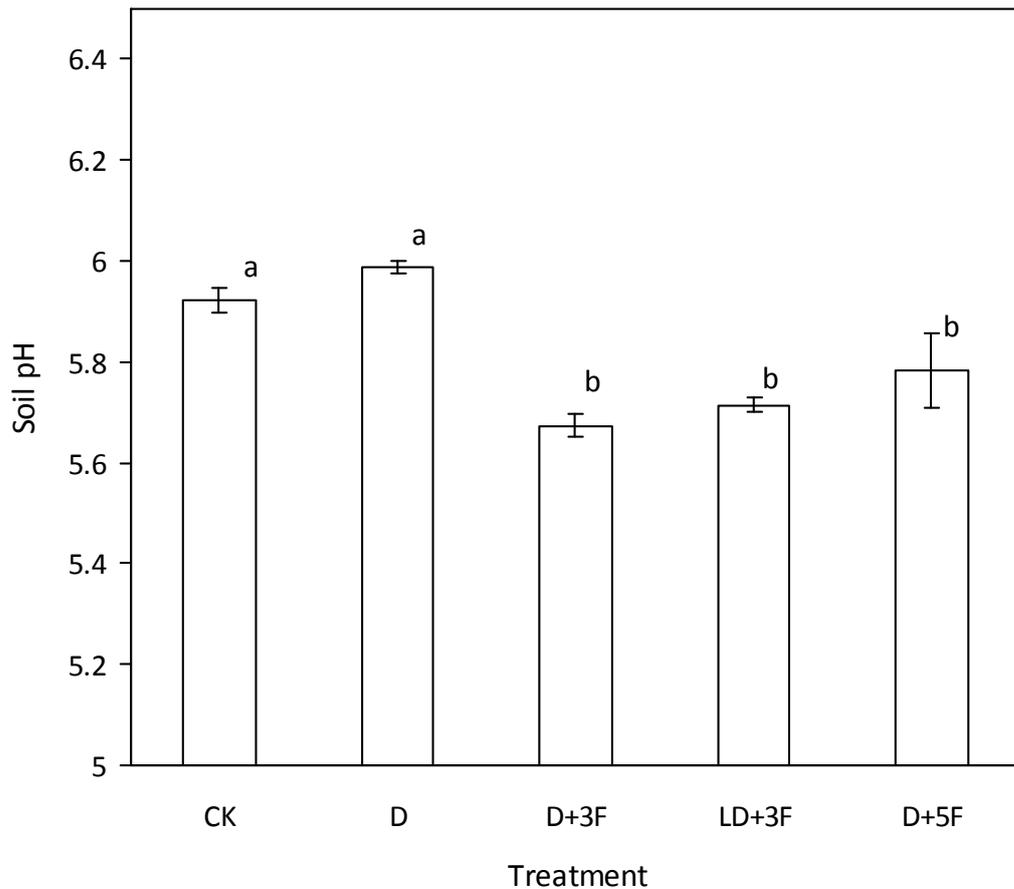


圖 2.6. 土壤水分變化對各處理植盆土壤溶液酸鹼值 (pH) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗結束前各處理土壤溶液酸鹼值之取樣時間為：2007/12/24。數據表示各受試植盆於水分試驗結束前所記錄之平均 (n = 5) 土壤溶液酸鹼值。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。不同標示之符號 (a, b)，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.6. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on soil pH in 'Tainung No.2' potted pear trees. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Soil pH was measured from 2007/12/24. Data represents the average (n = 5) values of soil pH recorded from 5 test pots during the end of the experiment. Vertical bars represent standard errors. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan's multiple range test. Different letters (a, b) indicate significant treatment differences at $P < 0.05$.

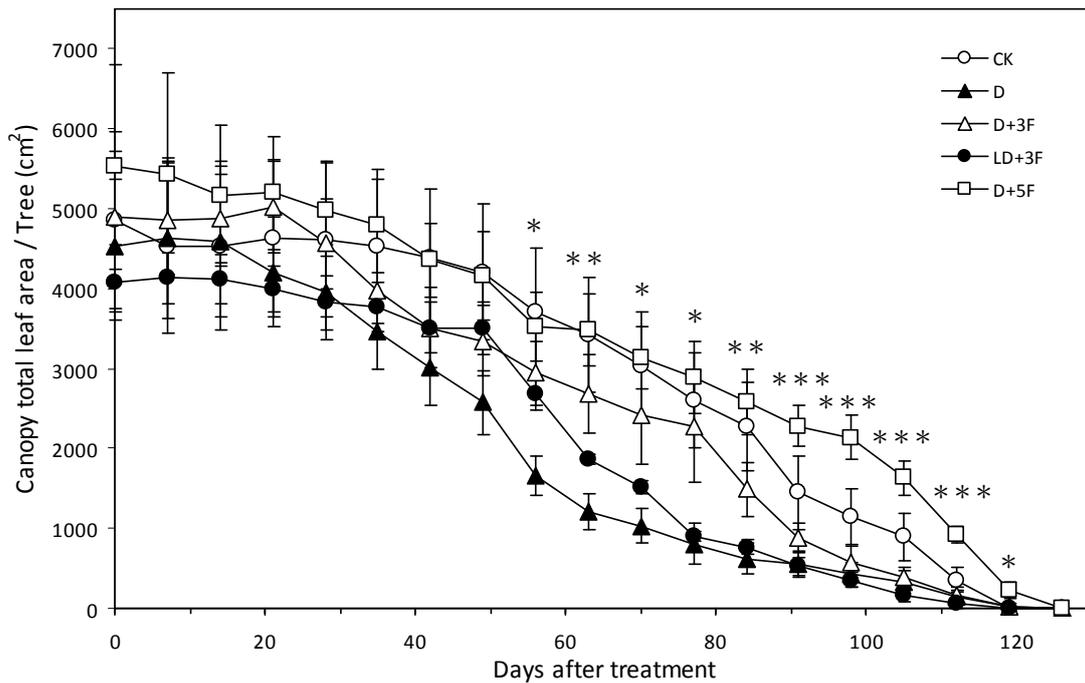


圖 2.7. 土壤水分變化 (CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F) 對‘臺農種苗 2 號’梨樹全樹葉面積生長 (cm²) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。梨樹全樹葉面積之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗期間所記錄之平均 (n=5) 全樹葉面積。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* 與 ** 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.7. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on canopy total leaf area development (cm²) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Canopy total leaf area was measured from 8 October 2007 until 11 February 2008. Each point represents the average (n = 5) values of the canopy total leaf area recorded from 5 test trees during experimental period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

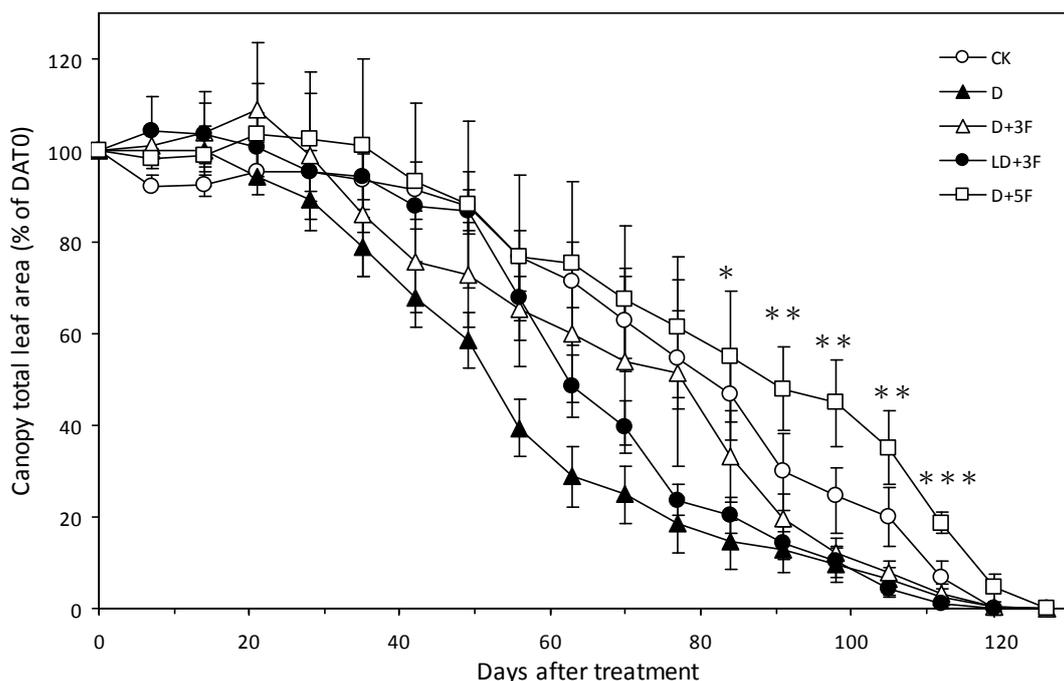


圖 2.8. 土壤水分變化 (CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F) 對‘臺農種苗 2 號’梨樹全樹葉面積比例 (% of DAT0) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。梨樹全樹葉面積比例 (% of DAT0) 之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗期間所記錄之平均 (n=5) 全樹葉面積比例 (% of DAT0)。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* * 與 * * * 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.8. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on canopy total leaf area (% of DAT0) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Canopy total leaf area rate was measured from 8 October 2007 until 11 February 2008. Each point represents the average (n = 5) values of the canopy total leaf area (% of DAT0) recorded from 5 test trees during experimental period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

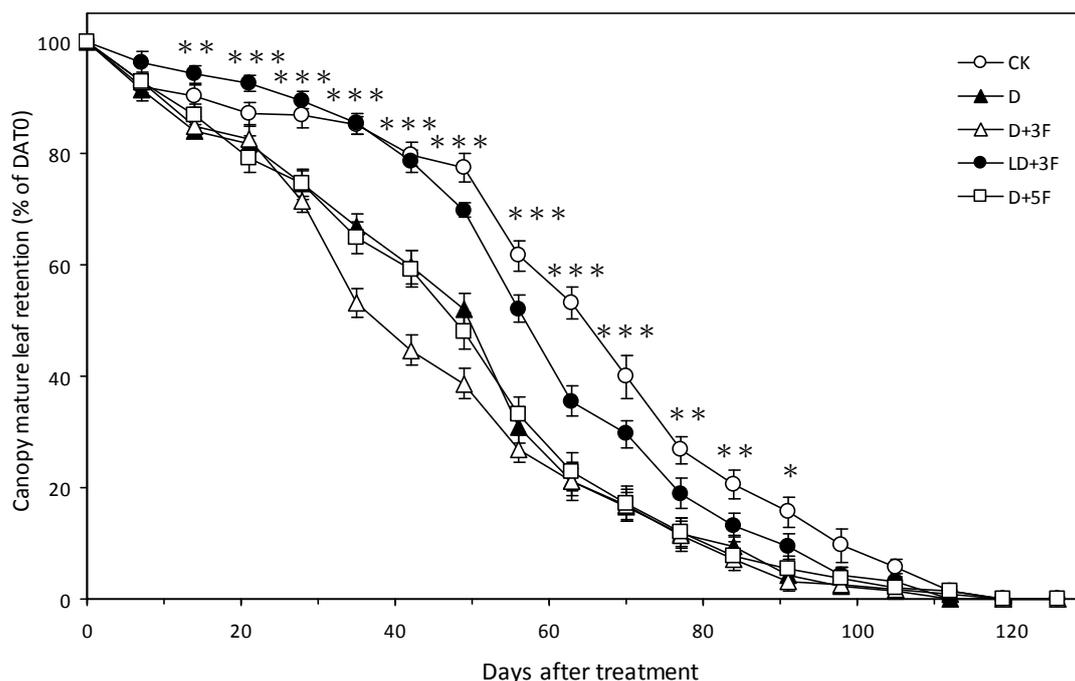


圖 2.9. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對‘臺農種苗 2 號’梨樹宿存葉比例 (% of DAT0) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.3’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。梨樹宿存葉比例 (% of DAT0) 之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗期間所記錄之平均 (n = 5) 宿存葉比例。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* * 與 * * * 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.9. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on canopy mature leaf retention (% of DAT0) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Canopy mature leaf retention (% of DAT0) was measured from 8 October 2007 until 11 February 2008. Each point represents the average (n = 5) values of total number of mature leaves recorded from 5 test trees during experimental period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

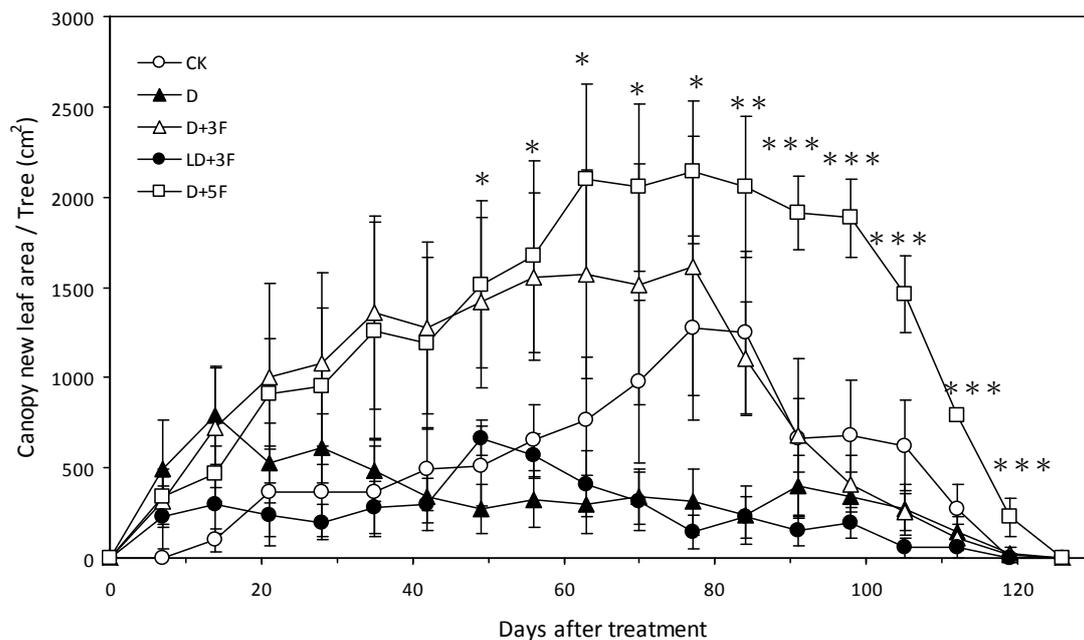


圖 2.10. 土壤水分變化 (CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F) 對‘臺農種苗 2 號’梨樹新葉生長 (cm²) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.3’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗期間所記錄之平均 (n=5) 新葉葉面積。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* 與 ** 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.10. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on canopy new leaf area development (cm²) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Canopy new leaf area development was measured from 8 October 2007 until 11 February 2008. Each point represents the average (n = 5) values of the canopy new leaf area recorded from 5 test trees during experimental period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

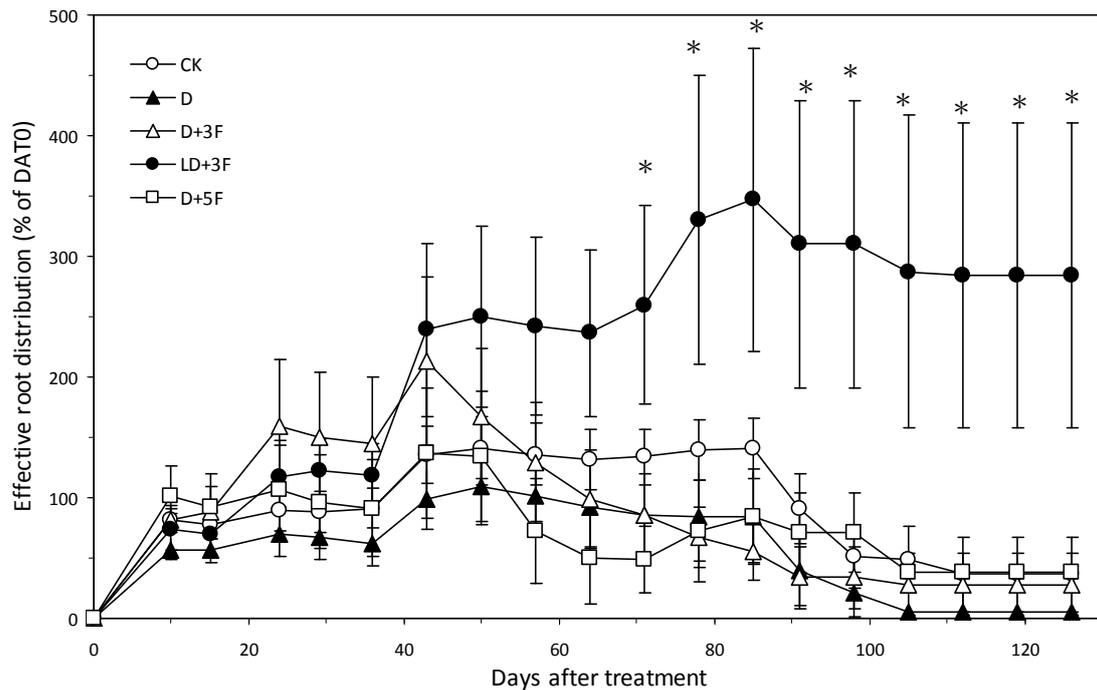


圖 2.11. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對‘臺農種苗 2 號’梨樹有效根系分佈比例 (% of DAT0) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。有效根系分佈比例 (% of DAT0) 之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗期間所記錄之平均 (n = 5) 有效根系 (白色根 + 黃色根) 分佈之比例。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.11. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on effective root distribution (% of DAT0) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Effective root distribution (% of DAT0) was measured from 8 October 2007 until 11 February 2008. Each point represents the average (n = 5) values of total number of white and yellow roots recorded from 5 test trees during experimental period. Vertical bars represent standard errors. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). * represent significant differences between treatments at $P < 0.05$.

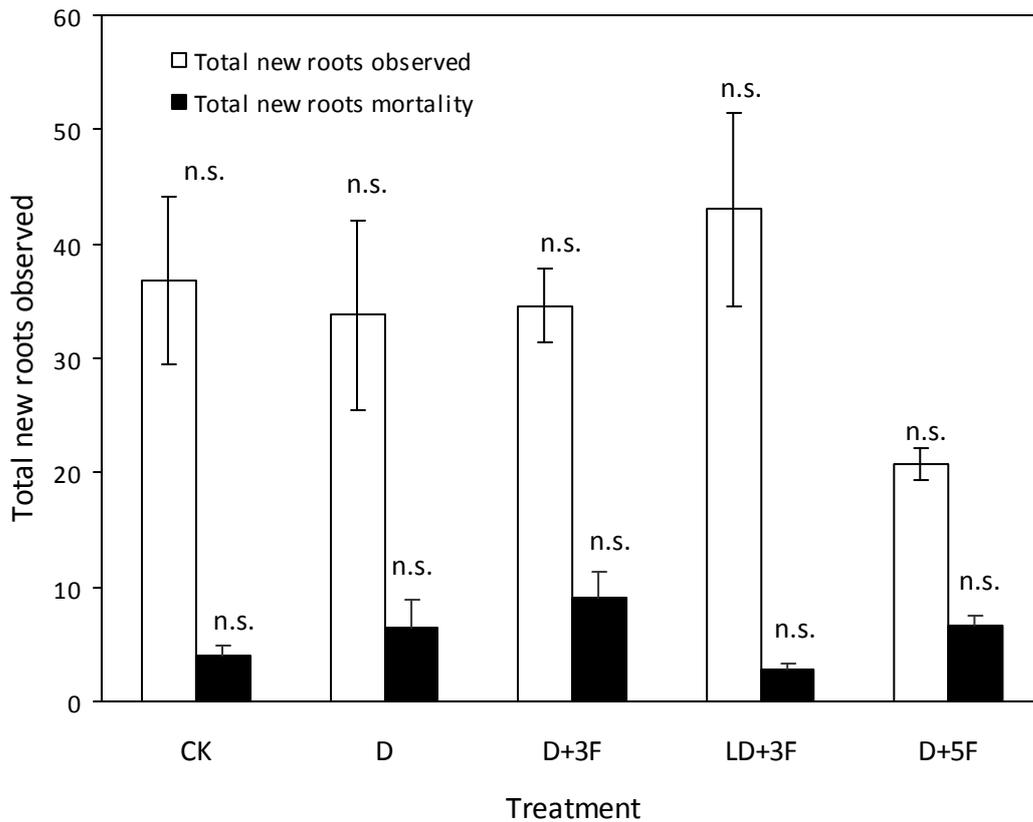


圖 2.12. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根生長模式之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19) 各處理新生根總累積生產量、死亡量之觀測時間為：10/8, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13 與 11/20。各數據表示 5 受試植株於水分試驗前期所記錄之平均 ($n = 5$) 值。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。不同標示之符號 (a, b, c)，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。若各處理所估算之均值未達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，註記之符號 (n.s.) 則相同。

Fig. 2.12. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on root growth pattern in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental early period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Total new roots cumulative increment and total new roots mortality during experimental early period (2007/10/8~2007/11/19) were measured from 10/8, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13 and 11/20. Data represents the average ($n = 5$) values from 5 test trees during experimental early period. Vertical bars represent standard errors. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Different letters (a, b, c) indicate significant treatment differences at $P < 0.05$. Means followed by the same letters (n.s.) are not significantly different at $P < 0.05$.

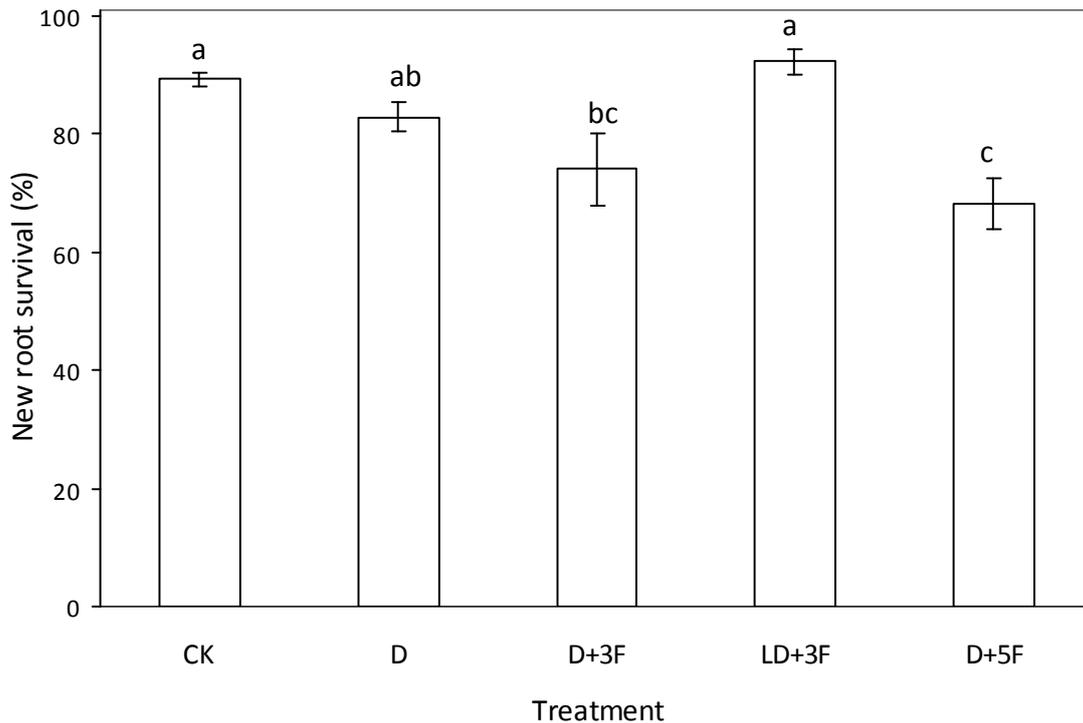


圖 2.13. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根存活率之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19) 各處理新生根存活率之觀測時間為：10/8, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13 與 11/20。各數據表示 5 受試植株於水分試驗前期所記錄之平均 (n = 5) 值。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。不同標示之符號 (a, b, c)，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。若各處理所估算之均值未達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，註記之符號 (n.s.) 則相同。

Fig. 2.13. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on new root survival (%) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental early period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. New root survivorship (%) during experimental early period (2007/10/8~2007/11/19) were measured from 10/8, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13 and 11/20. Data represents the average (n = 5) values from 5 test trees during experimental early period. Vertical bars represent standard errors. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Different letters (a, b, c) indicate significant treatment differences at $P < 0.05$. Means followed by the same letters (n.s.) are not significantly different at $P < 0.05$.

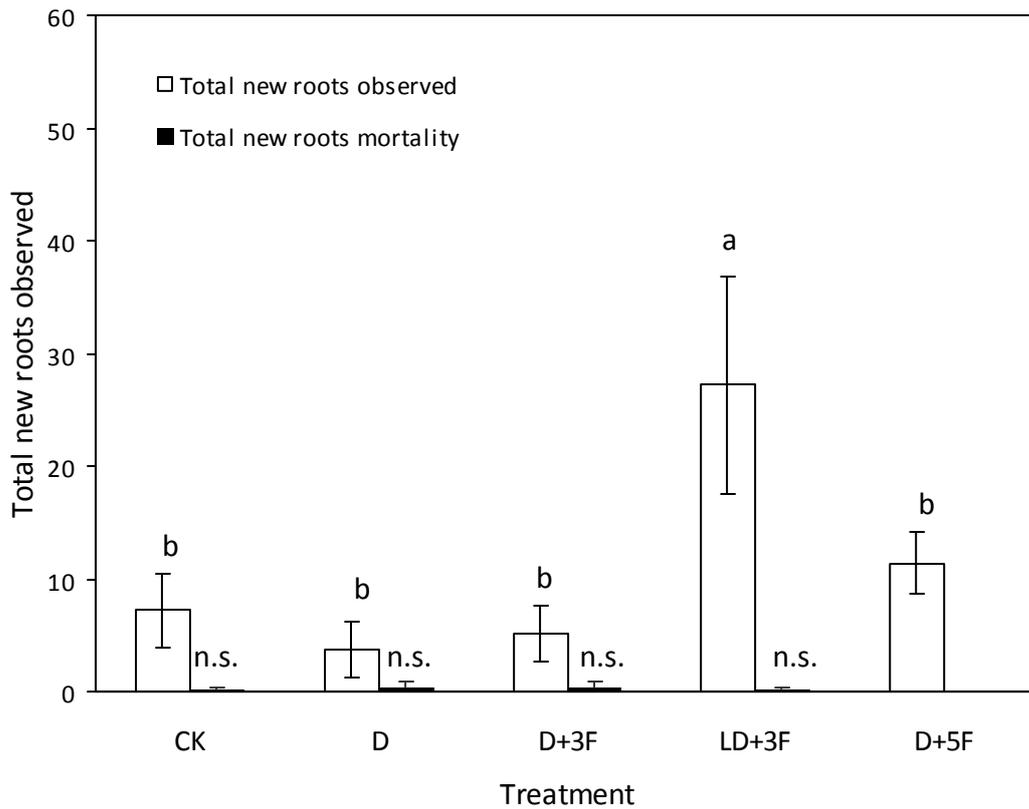


圖 2. 14. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹新生根生長模式之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1) 各處理新生根總累積生產量與死亡量之觀測時間為：11/27、12/4、12/11、12/18、12/25 與 2008/1/1 日。各數據表示 5 受試植株於水分試驗前期所記錄之平均 (n = 5) 值。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。不同標示之符號 (a, b)，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。若各處理所估算之均值未達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，註記之符號 (n.s.) 則相同。

Fig. 2.14. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on root growth pattern in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental late period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Total new roots cumulative increment and total new roots mortality during experimental late period (2007/11/20~2008/1/1) were measured from 11/27, 12/4, 12/11, 12/18, 12/25 and 2008/1/1. Data represents the average (n = 5) values from 5 test trees during experimental late period. Vertical bars represent standard errors. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Different letters (a, b) indicate significant treatment differences at $P < 0.05$. Means followed by the same letters (n.s.) are not significantly different at $P < 0.05$.

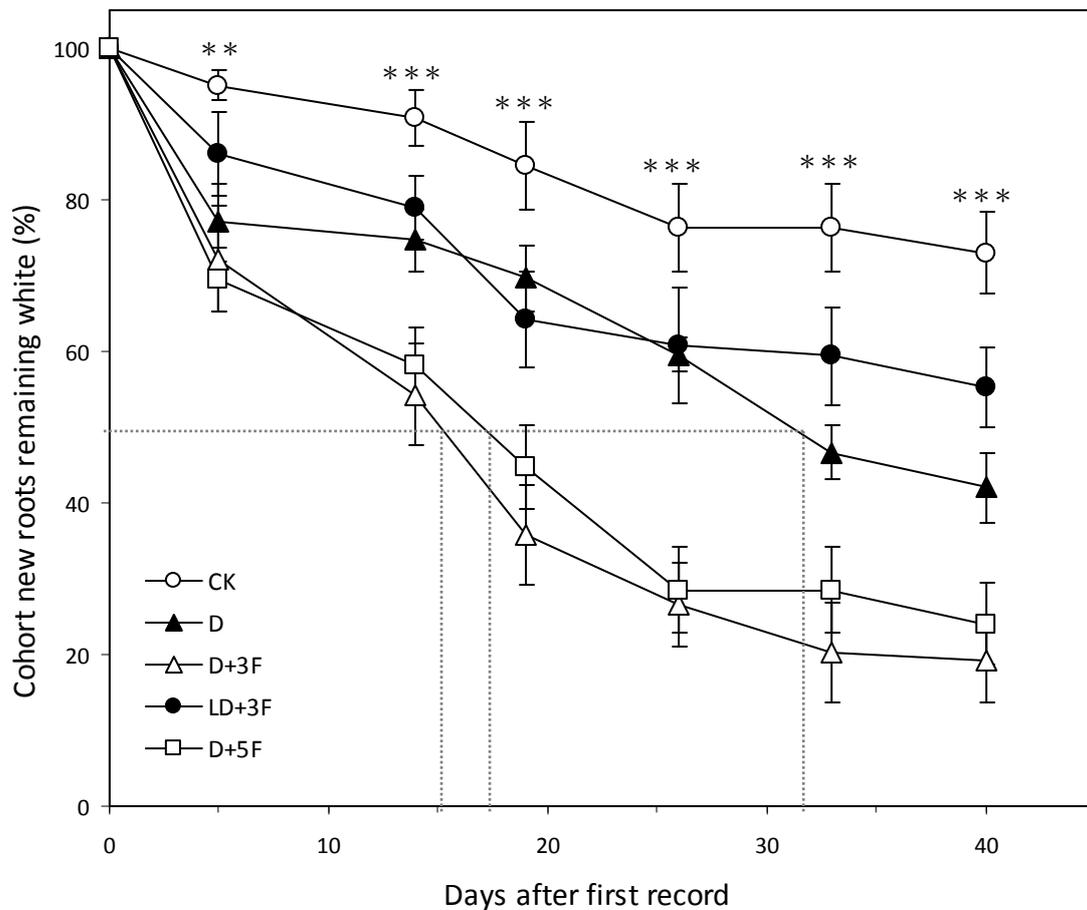


圖 2.15. 土壤水分變化 (CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F) 對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根維持白色比率 (%) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19) 各處理標定新生根維持白色比率之測量時間為：10/18、10/23、11/1、11/6、11/13、11/20 與 11/27 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗前期所記錄之平均 (n=5) 標定新生根維持白色比率。垂直誤差線代表標準差。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* 與 ** 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.15. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on cohort new roots remaining white (%) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental early period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Cohort new roots remaining white (%) during experimental late period (2007/10/8~2007/11/19) was measured from 10/18, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13, 11/20 and 11/27. Each point represents the average (n = 5) values of total number of cohort new roots recorded from 5 test trees during experimental early period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

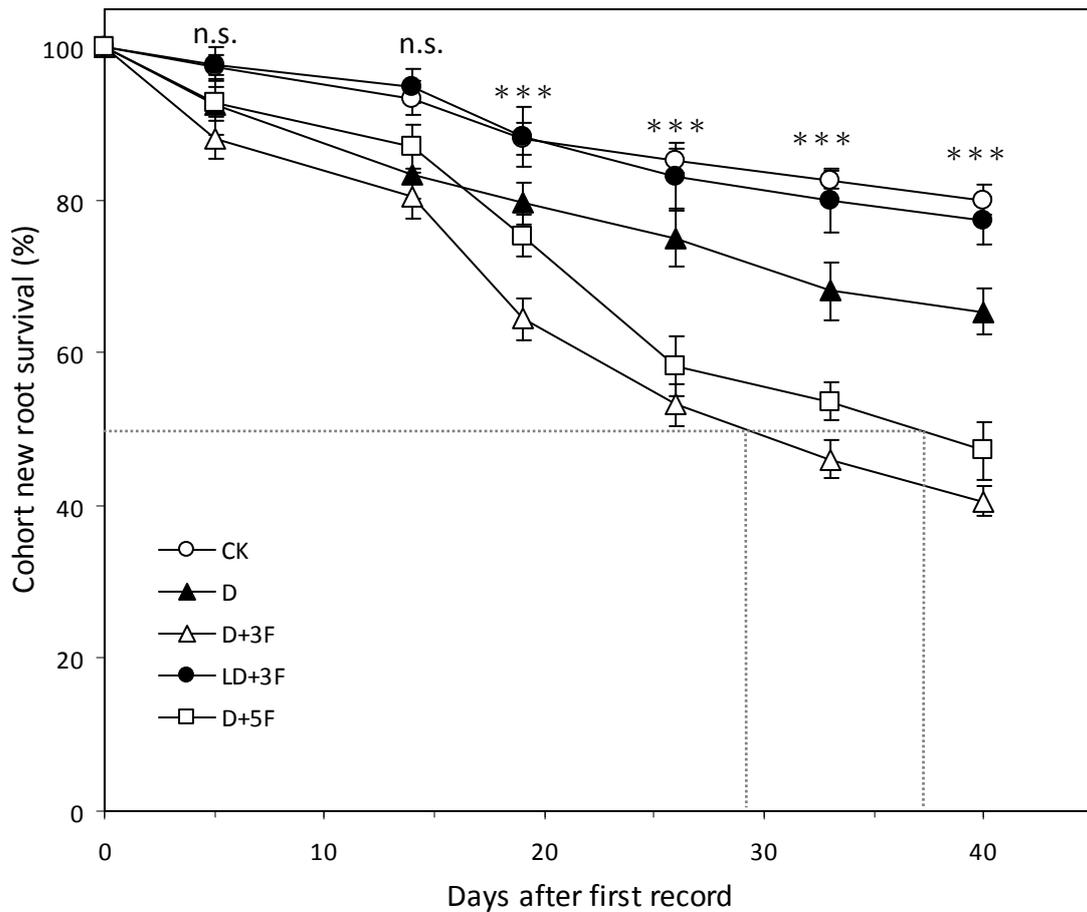


圖 2.16. 土壤水分變化 (CK、D、D+3F、LD+3F 與 D+5F) 對水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根存活率 (新生根由白色轉成黑色或無法辨識前之時間) (%) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗前期 (2007/10/8~2007/11/19) 各處理標定新生根存活率之測量時間為：10/18、10/23、11/1、11/6、11/13、11/20 與 11/27 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗前期所記錄之平均 (n=5) 標定新生根存活率。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* 與 *** 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。若各處理所估算之均值未達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，註記之符號 (n.s.) 則相同。

Fig. 2.16. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on cohort new root survival (longevity of new roots before turning black or invisible) (%) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental early period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Cohort new root survival (%) during experimental early period (2007/10/8~2007/11/19) was measured from 10/18, 10/23, 11/1, 11/6, 11/13, 11/20 and 11/27. Each point represents the average (n = 5) values of total number of cohort new roots recorded from 5 test trees during experimental early period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$. Means followed by the same letters (n.s.) are not significantly different at $P < 0.05$.

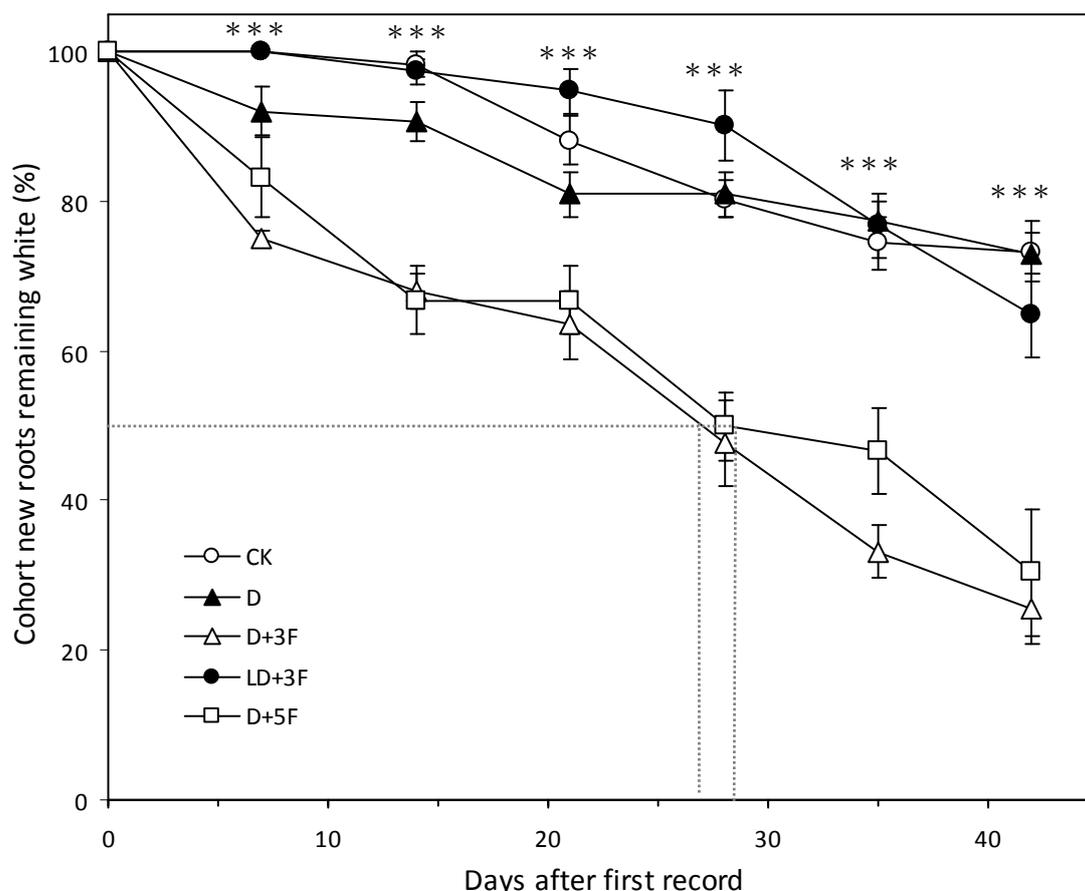


圖 2.17. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根維持白色比率 (%) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1) 各處理標定新生根維持白色比率之測量時間為：11/20、11/27、12/4、12/11、12/18、12/25 與 2008/1/1 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗後期所記錄之平均 (n = 5) 標定新生根維持白色比率。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P < 0.05$ 之顯著差異水準。* * 與 * * * 符號則代表各處理間均值達 $P < 0.01$ 與 $P < 0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.17. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on cohort new roots remaining white (%) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental late period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Cohort new roots remaining white (%) during experimental late period (2007/11/20~2008/1/1) was measured from 11/20, 11/27, 12/4, 12/11, 12/18, 12/25 and 2008/1/1. Each point represents the average (n = 5) values of total number of cohort new roots recorded from 5 test trees during experimental late period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P < 0.05$ (n = 25). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

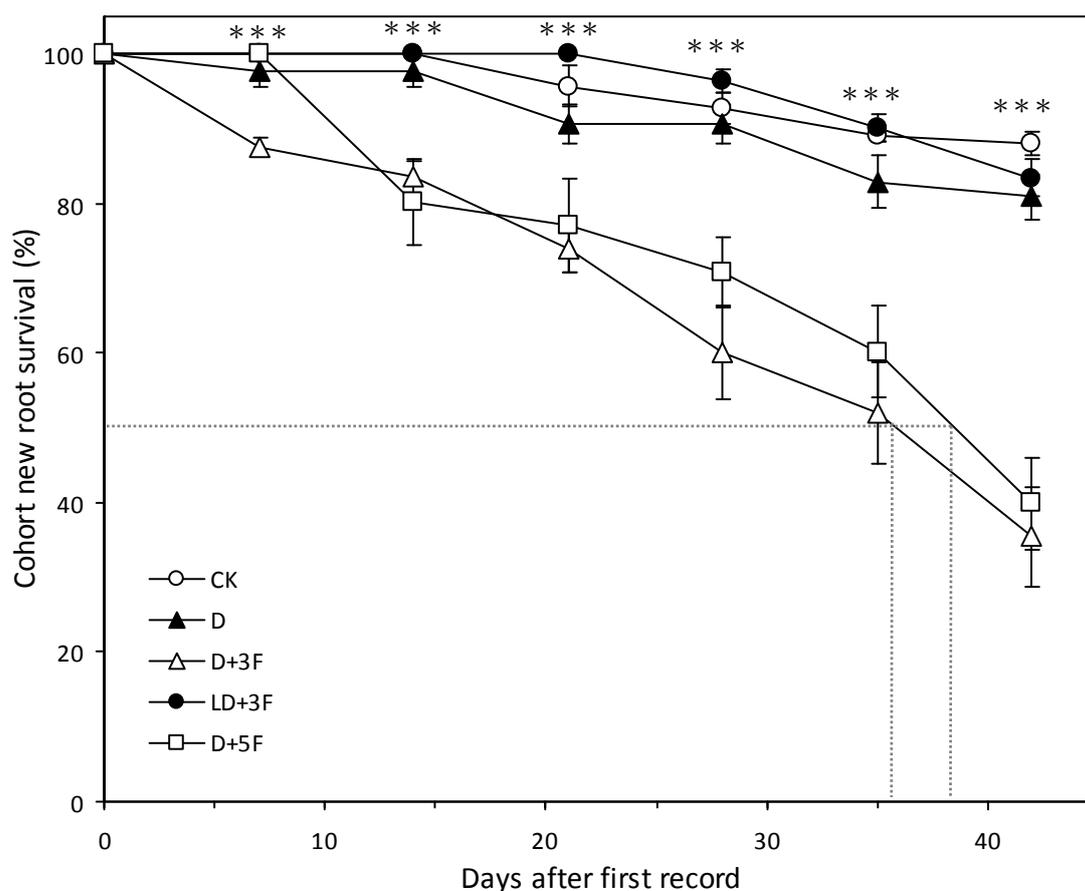


圖 2.18. 土壤水分變化 (CK、D、D + 3F、LD + 3F 與 D + 5F) 對水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹標定新生根存活率 (新生根由白色轉成黑色或無法辨識前之時間) (%) 之影響。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。25 受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. ‘Tainung No.2’) 裸根苗。試驗植株於 2007 年 2 月 8 日定植於體積 56 公升之塑膠桶，於 2007 年 10 月 8 日開始進行試驗。水分試驗後期 (2007/11/20~2008/1/1) 各處理標定新生根存活率之測量時間為：11/20、11/27、12/4、12/11、12/18、12/25 與 2008/1/1 日。每一記錄點表示 5 受試植株於水分試驗後期所記錄之平均 ($n=5$) 標定新生根存活率。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。各處理均值間之比較採鄧氏新多變域測驗法。若測量當天各處理所估算之均值達 $P<0.05$ 之顯著差異水準，則註記 * 符號，代表各處理間均值達 $P<0.05$ 之顯著差異水準。* 與 ** 符號則代表各處理間均值達 $P<0.01$ 與 $P<0.001$ 之顯著差異水準。

Fig. 2.18. Effects of soil water fluctuation (CK, D, D + 3F, LD + 3F and D + 5F) on cohort new roots survival (longevity of new roots before turning black or invisible) (%) in ‘Tainung No.2’ potted pear trees during experimental late period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Twenty-five 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees were grown in 56 liter containers filled with yellow soil on 8 February 2007 and treated on 8 October 2007. Cohort new root survival (%) during experimental late period (2007/11/20~2008/1/1) was measured from 11/20, 11/27, 12/4, 12/11, 12/18, 12/25 and 2008/1/1. Each point represents the average ($n=5$) values of total number of cohort new roots recorded from 5 test trees during experimental late period. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol. Comparison tests on treatment means were separated using Duncan’s multiple range test. Asterisks denote significant difference among the five treatments at $P<0.05$ ($n=25$). *, ** and *** represent significant differences between treatments at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$.

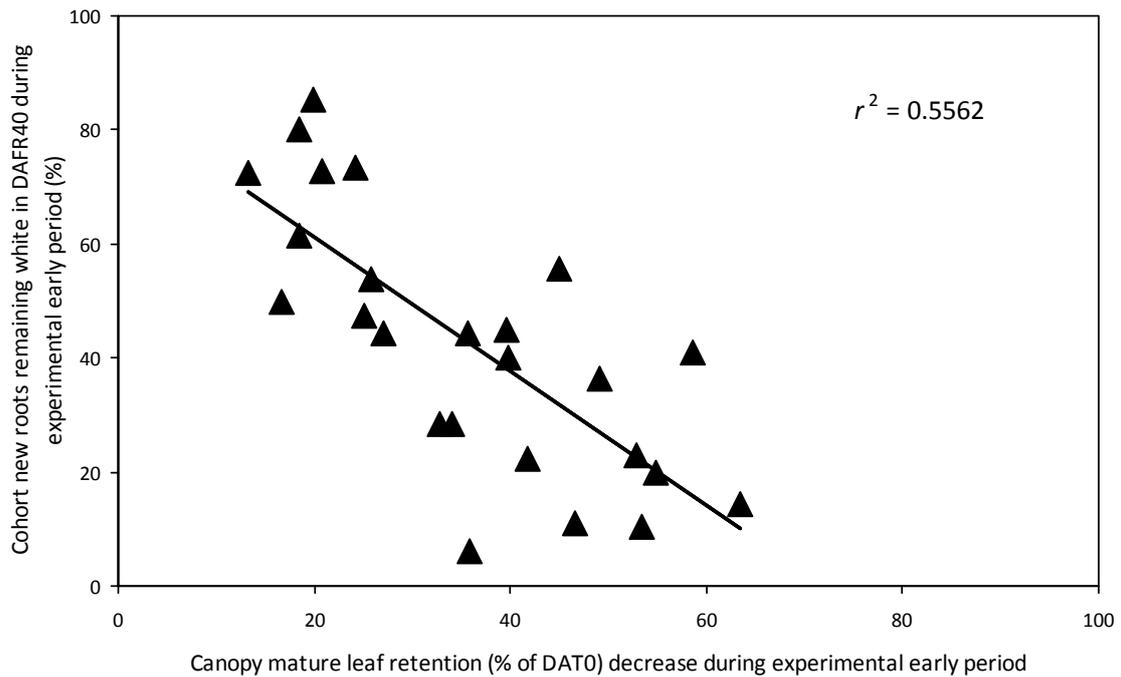


圖 2.19. 水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根維持白色比率之相關性。簡單線性迴歸模型為：水分試驗前期各處理植株於 DAFR40 之標定新生根維持白色比率 = -1.1746 (水分試驗前期各受試植株於 DAFR40 之宿存葉下降比例) + 84.64, $r^2 = 0.5562$, $P < 0.0001$ 。

Fig. 2.19. Relationship between canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease and cohort new roots remaining white (%) in DAFR40 during experimental early period on 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees. The simple linear regression model is: Cohort new roots remaining white (%) in DAFR40 during experimental early period = -1.1746 [canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease during experimental early period] + 84.64, $r^2 = 0.5562$, $P < 0.0001$.

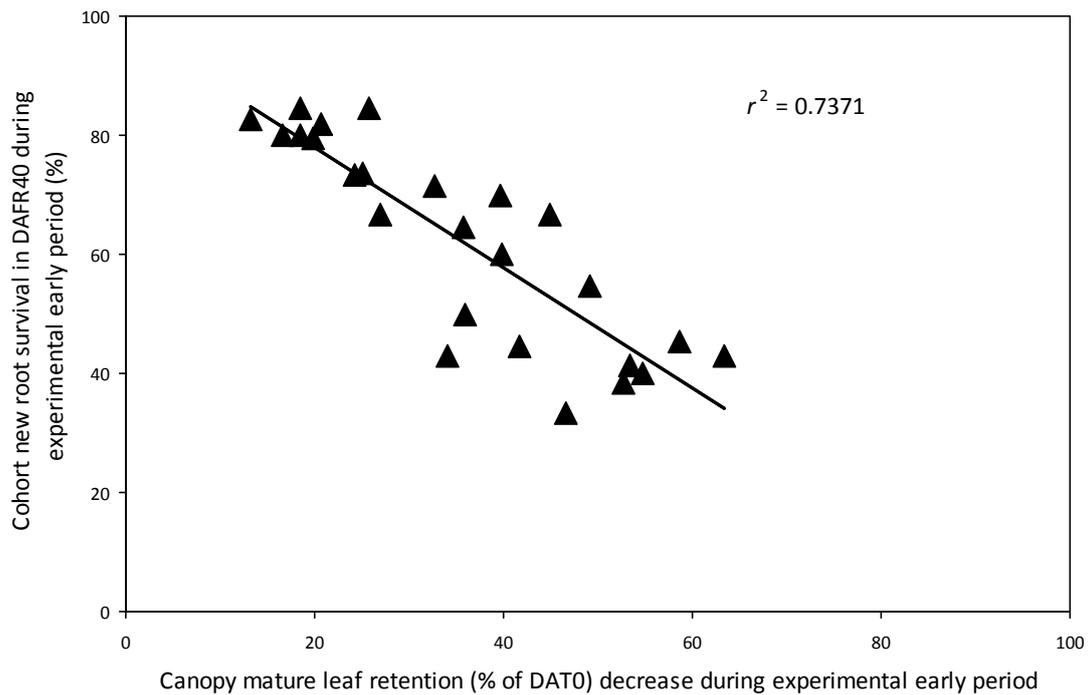


圖 2.20. 水分試驗前期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根存活率之相關性。簡單線性迴歸模型為：水分試驗前期各處理植株於 DAFR40 之標定新生根存活率 = -1.0123 (水分試驗前期各受試植株於 DAFR40 之宿存葉下降比例) + 98.252, $r^2 = 0.7371$, $P < 0.0001$ 。

Fig. 2.20. Relationship between canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease and cohort new roots survival (%) in DAFR40 during experimental early period on 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees. The simple linear regression model is: Cohort new roots survival (%) in DAFR40 during experimental early period = -1.1746 [canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease during experimental early period] + 84.64, $r^2 = 0.5562$, $P < 0.0001$.

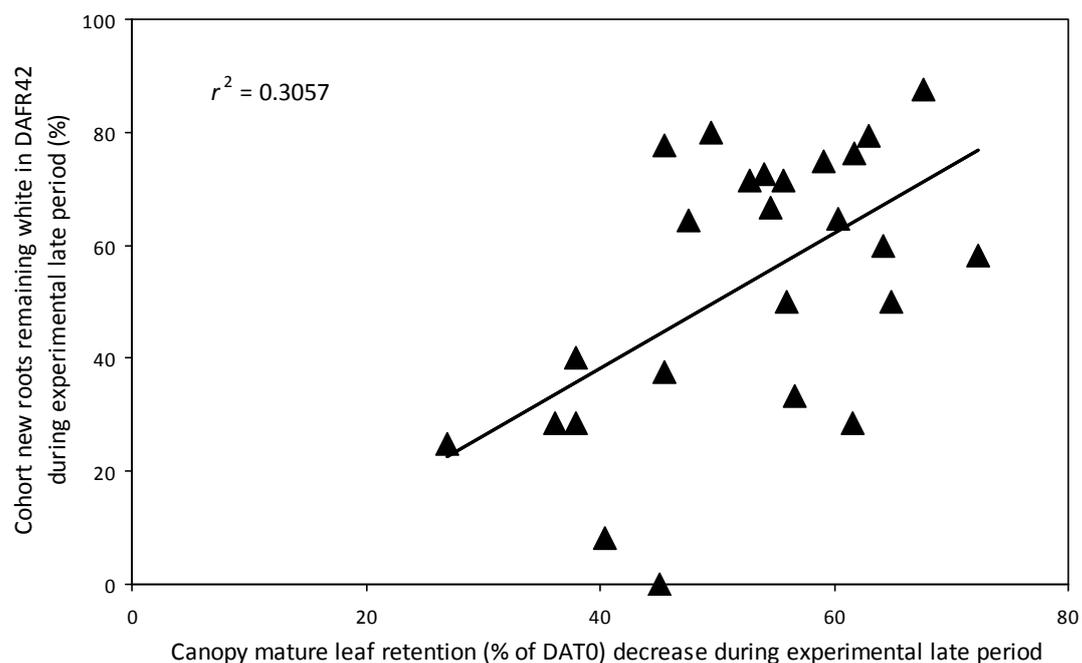


圖 2.21. 水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根維持白色比率之相關性。簡單線性迴歸模型為：水分試驗後期各處理植株於 DAFR42 之標定新生根維持白色比率 = 1.1928 (水分試驗後期各受試植株於 DAFR42 之宿存葉下降比例) - 9.4332, $r^2 = 0.3057$, $P = 0.0042$ 。

Fig. 2.21. Relationship between canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease and cohort new roots remaining white (%) in DAFR42 during experimental late period on 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees. The simple linear regression model is: Cohort new roots remaining white (%) in DAFR42 during experimental late period = 1.1928 [canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease during experimental late period] - 9.4332, $r^2 = 0.3057$, $P = 0.0042$.

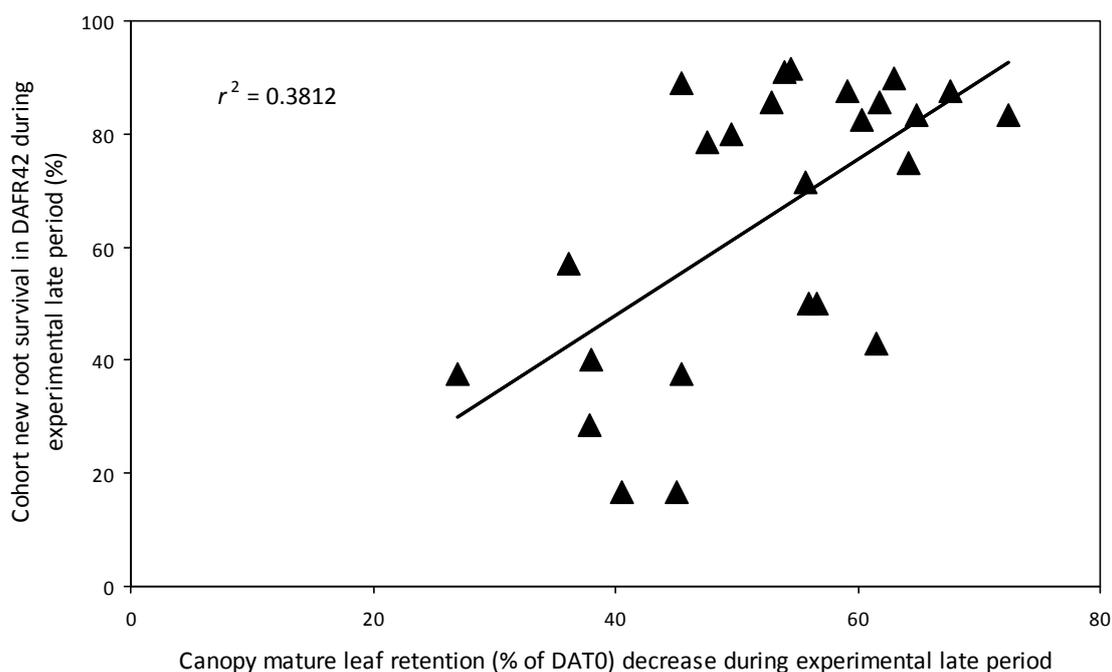


圖 2.22. 水分試驗後期‘臺農種苗 2 號’梨樹植株宿存葉下降比例與標定新生根存活率之相關性。簡單線性迴歸模型為：水分試驗後期各處理植株於 DAFR42 之標定新生根存活率 = 1.3809 (水分試驗後期各受試植株於 DAFR42 之宿存葉下降比例) - 7.2156, $r^2 = 0.3812$, $P = 0.001$ 。

Fig. 2.22. Relationship between canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease and cohort new roots survival (%) in DAFR42 during experimental late period on 2 year old ‘Tainung No.2’/Lindley’s pear trees. The simple linear regression model is: Cohort new roots survival (%) in DAFR42 during experimental late period = 1.3809【canopy mature leaf retention (% of DAT0) decrease during experimental late period】 - 7.2156, $r^2 = 0.3812$, $P = 0.001$.

參考文獻

中央氣象局. 2003. 中華民國臺灣氣候圖集.

<<http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/cd/cd06clmp/index.htm>>.

平田尚美. 2000. 各部の形態と生長. p. 35-44. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科
4 ナシ. 農山漁村文化協會. 東京.

行政院農業委員會. 2007. 民國 96 年農業統計年報.

<http://www.coa.gov.tw/htmlarea_file/web_articles/coa/9918/096.xls>.

行政院農業委員會農業試驗所. 2007. 新育成品種.

<<http://www.tari.gov.tw/taric/modules/tinycontent/>>.

行政院環境保護署環境檢驗所. 2007. 土壤酸鹼值(pH 值)測定方法—電極法.

<http://www.niea.gov.tw/analysis/method/m_n_1.asp?m_niea=S410.62C>.

沈明來. 2004. 試驗設計學. 九州圖書. 臺北. 臺灣.

吳明進. 1996. 氣候變遷對臺灣氣候之影響. 氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研
討會論文集. 國立臺灣大學全球變遷中心編印. p. 1-19.

林真二. 1960. 果樹栽培生理新書 梨. 朝倉書店. 東京. 日本.

陳幼麟. 1993. 臺灣區域氣候之研究. 國立臺灣大學大氣科學系碩士論文. 臺北.

許晃雄、陳正達、柯文雄、鄒冶華. 1999. 臺灣環境變遷與全球氣候變遷衝擊之評
析-氣候. 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 (NSC
88-2621-Z-002-020).

廖萬正. 1995. 梨. p. 169-175. 刊於：農業委員會臺灣農家要覽增修訂再版策劃委員

會編著. 臺灣農家要覽 農作篇(二). 財團法人豐年社. 臺北.

臺灣大學全球變遷研究中心. 1997. 全球環境變遷導論.

<<http://140.115.123.30/gis/globalc/index.htm#CHAP16>>

臺中區農業改良場. 2009. 梨新品種栽培方法介紹.

<<http://tdares.coa.gov.tw/view.php?catid=1289>>.

橫田清. 2000. 各部の形態と發育過程. p. 43-49. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科 2 リソゴ. 農山漁村文化協會. 東京.

Andersen, P.C., P.B. Lombard, and M.N. Westwood. 1984. Leaf conductance, growth, and survival of willow and deciduous tree species under flooded soil conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109:132-138.

Arora, R., L.J. Rowland, and K. Tanino. 2003. Induction and release of bud dormancy in woody perennials: A science comes of age. *HortScience* 38(5):911-921.

Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Hort. Rev.* 2:424-490.

Behboudian, M.H. and T.M. Mills. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hort. Rev.* 21:105-131.

Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218:443-448.

Busch, J., I.A. Mendelssohn, B. Lorenzen, H. Brix and S.L. Miao. 2006. A rhizotron to study root growth under flooded conditions tested with two wetland Cyperaceae. *Flora* 201:429-439.

Buwalda, J.G. 1993. The carbon costs of root systems of perennial fruit crops. *Environ. Expt. Bot.* 33(1):131-140.

- Buwalda, J.G. and F. Lenz. 1992. Effects of cropping, nutrition and water supply on accumulation and distribution of biomass and nutrients for apple trees on 'M9' root systems. *Physiol. Plant.* 84:21-28.
- Buwalda J.G. and R.C. Hutton. 1988. Seasonal changes in root growth of kiwifruit. *Scientia Hort.* 36:251-260.
- Christina E.W. and D.M. Eissenstat. 1996. Fine root production and mortality in apple over winter. *Hortscience* 31:603 (abstr.).
- Cockroft, B. and K.A. Olsson. 1972. Pattern of new root production in peach trees under irrigation. *Austral. J. Agr. Res.* 23(6):1021-1025.
- Duncan, D.B. 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics* 11:1-42.
- Ehleringer, J.R. 1991. Temperature and energy budgets, p. 117-135. In: R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel (eds.). *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentations*. Chapman and Hall Press, London, Ind.
- Faust, M., A. Erez, L.J. Rowland, S.Y. Wang, and H.A. Norman. 1997. Bud dormancy in perennial fruit trees: Physiological basis for dormancy induction, maintenance and release. *HortScience* 32:623-629.
- Francisco, G.S., P.S. James, G. Vicente, B. Pablo, and G.P.P. Juan. 2007. Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. *Physiol. Plant.* 130:532-542.
- Freeman, B.M. and R.E. Smart. 1976. A root observation laboratory for studies with grape vines. *Amer. J. Enol. Viticult.* 27:36-39.
- Gill, R.A. and R.B. Jackson. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial

- ecosystems. *New Phytol.* 147:13-31.
- Hasegawa, P.M. 2002. Stress physiology, p. 591-623. In: L. Taiz and E. Zeiger (eds.). *Plant physiology*. 3th ed. Sinauer Assoc. Press, Massachusetts, Ind.
- Head, G.C. 1968. Seasonal changes in the amounts of white unsubsized root on pear trees on quince rootstock. *Hort. Sci.* 43:49-58.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24:519-570.
- Hsiao, T.C. 1993. Growth and productivity of crops in relation to water status. *Acta Hort.* 335:137-148.
- Jackson, J.E. 2003. *Biology of apples and pears*. Cambridge Univ., UK.
- Jones, H.G., A.N. Lakso, and J.P. Syvertsen. 1985. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees. *Hort. Rev.* 7:301-344.
- Kozlowski, T.T. 1984. Responses of woody plants to flooding, p. 129-163. In: T.T. Kozlowski (ed.). *Flooding and plant growth*. Academic press, New York.
- Kramer, P.J. 1983. Soil and water, p. 57-83. In: P.J. Kramer (ed.). *Water relations of plants*. Academic press, New York.
- Lakso, A.N. 2003. Water relations of apples. P. 167-194. In: *Apples: botany, production and uses*. D.C. Ferree and I.A. Warrington (eds.), CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Li, K.T., A.N. Lakso, R. Piccioni and T. Robinson. 2003. Summer pruning effects on fruit size, fruit quality, return bloom and fine root survival in apple trees. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 78(6):755-761.
- Liu, C.H., C. Fu, C.J. Shiu, J.P. Chen, and F. Wu. 2009. Temperature dependence of

global precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17702,
doi:1029/2009GL040218.

Lucas, R.E. and J.F. Davis. 1961. Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients. *Soil Sci.* 92:171-182.

Patrick, W.H. and I.C. Mahapatra. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogging soils. *Adv. Agron.* 20:323-359.

Psarras, G. and I.A. Merwin. 2000. Water stress affects rhizosphere respiration rates and root morphology of young 'Mutsu' apple trees on M.9 and MM.111 rootstocks. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125(5):588-595.

Richards, D. 1983. The grape root system. *Hort. Rev.* 5:127-168.

Roger, W.S. 1939. Root studies VIII. Apple root growth in relation to rootstock, soil, seasonal and climatic factors. *J. Pomol. Hort. Sci.* 17:99-130.

Rundel, P.W. and W.M. Jarrell. 1991. Water in the environment, p. 29-56. In: R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel (eds.). *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentations*. Chapman and Hall Press, London, Ind.

Saure, M.C. 1985. Dormancy release in deciduous fruit trees. *Hort. Rev.* 7:239-300.

Schaffer, B. 1998. Flooding responses and water-use efficiency of subtropical and tropical fruit trees in an environmentally-sensitive wetland. *Ann. Bot.* 81:475-481.

Schaffer, B., F.S. Davies and J.H. Crane. 2006. Responses of subtropical and tropical fruit trees to flooding in calcareous soil. *HortScience* 41(3):549-555.

Schaffer, B., P.C. Andersen, and R.C. Ploetz. 1992. Responses of fruit crops to flooding.

Hort. Rev. 13:257-313.

Yu, P.S., T.C. Yang, and C.K. Wu. 2002. Impact of climate change on water resources in

southern Taiwan. J. Hydro. 260(1):161-175.



第三章 結論與未來研究方向

一、結論

臺灣亞熱帶低海拔地區秋、冬季之環境氣候不若溫帶地區規律，且臺灣平地多利用低需冷性落葉果樹栽培以避免低溫不足之問題，目前尚無研究提及秋、冬季亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根部之生長模式。對落葉果樹而言，秋根之生長與維持對植株隔年春季早期展葉、徒長枝之生長與隔年果實細胞分裂期營養之供應具重要之生長意義，臺灣地區秋季常因颱風等強降雨之影響土壤水分變化劇烈，相對易造成作物淹水與排水後缺水等現象，然而土壤水分變化對梨樹秋季根系生長之影響未經詳細評估。

臺灣低海拔地區因秋季降水與冬季環境溫度偏高，頂梢於秋、冬季仍持需生長，且秋季臺灣低海拔地區因環境氣溫變化較大，植株之葉片通常於寒流低溫後脫落，而低需冷性梨樹因打破休眠所需之低溫時數較少，植株休眠芽通常於秋季短暫低溫後感應高溫，於脫落之老葉上方打破休眠、開花並抽梢，故秋季植株新葉仍持續少量生長至 12 月下旬；秋季臺灣亞熱帶低海拔地區栽培之低需冷性梨樹，地上部仍因植株需冷性低、物候環境與低溫不足等影響而新葉持續生長。然而植株於秋末冬初期間所生長之新葉皆於 1 月上旬感應低溫後逐漸脫落休眠，而冬季生長之新芽與幼葉也因寒流及低溫而凍傷壞死，植株全樹葉面積於 11 月中旬以後逐漸減少，各受試植株於隔年 2 月上旬全樹落葉，進入休眠。秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹新生根於秋季 10 至 11 月間具 2 次明顯之生長高峰，新生根於 1 月後停止生產，而 85% 以上於水分試驗期間所生產之新生根皆於冬季 1 月期間木栓化，少數新生根則以白色與黃色之狀態越冬。秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系生長模式與秋季溫帶地區生長之高需冷性品種梨與蘋果相似，然而秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹新生根於冬季休眠前大量木栓化之時間較溫帶地區高需冷性品種梨樹晚約 1 至 2 個月，推測與作物品種及環境

溫度變化有關。

於秋季土壤水分變化前期各受試植株全樹葉片之生長可知，水分試驗前期全樹葉片組成以成熟葉為主，成熟葉受乾旱與劇烈土壤水分變化而提早脫落，然而因低需冷性梨樹休眠性低，秋季溫度變化與成熟葉提早落葉促進新葉生長，水分試驗前期全樹葉面積變化較水分試驗後期緩和。水分試驗後期除 D 與 LD + 3F 處理之全樹葉面積組成以宿存葉為主外，CK、D + 3F 與 D + 5F 處理之全樹葉面積組成皆以水分試驗期間所長出之新葉為主。然而不論是水分試驗前期抑或是水分試驗後期，全樹葉面積比例變化均較宿存葉比例緩和，主要是因為宿存葉脫落與新葉生長相互消長抵銷所致。所有受試植株皆於水分試驗結束 (DAT85) 後停止生長新葉，新葉與宿存葉皆於 DAT126 時全數脫落，進入休眠。秋季臺灣低海拔地區乾旱與土壤水分變化促進低需冷性梨樹成熟葉提早落葉。

而由秋季土壤水分變化對各受試植株根系之生長可知，乾旱與劇烈土壤水分變化降低新生根存活力，然而各處理於水分試驗前期新生根生產量無顯著差異。而水分試驗後期因植株進入休眠，各處理新生根之生產量較低，惟 LD + 3F 處理之新生根於水分試驗後期大量生產新生根。而由土壤試驗前期植株宿存葉下降比率對新生根存活力之影響可知，新生根存活力隨宿存葉比例下降而減少，植物體供源 (source) 與儲池 (sink) 器官之比例影響根系之生長。

二、未來研究方向

(一) 臺灣低海拔地區低需冷性梨樹季節性地上部與根系之生長模式

調查秋、冬季臺灣低海拔地區低需冷性梨樹地上部與根部之生長可知，秋季臺灣地區之梨樹因物種與物候環境不同，植株休眠芽通常於秋季短暫低溫後感應高溫，於脫落之老葉上方打破休眠、開花並抽梢，故水分試驗期間植株新葉仍持

續少量生長至 12 月下旬。一般而言溫帶地區因四季規律且秋、冬季溫度較低，高需冷性落葉果樹之地上部則隨秋季低溫逐漸進入生理休眠 (Faust *et al.*, 1997; Head, 1968; Jackson, 2003; Saure, 1985)，不若秋、冬季臺灣亞熱帶低海拔地區栽培之低需冷性梨樹，地上部仍因植株需冷性低、物候環境與低溫不足等影響而持續生長。

另一方面，由秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系之生長可知，梨樹 ('Mixue'/Lindley's pear) 新生根於秋季 10 至 11 月間具 2 次明顯之生長高峰。觀測梨樹植株於秋、冬季新生根之生產模式可知，秋季新生根多於 10 至 11 月間生產，於 1 月後停止生產，超過 85% 以上之秋季新生根皆於冬季 1 月期間木栓化，其餘新生根則以白色與黃色之狀態越冬。根據試驗結果可知，秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹根系生長模式與秋季溫帶地區生長之高需冷性品種梨與蘋果相似 (平田 2000; 林, 1960; Christina and Eissenstat, 1996; Head, 1968)，然而秋季臺灣亞熱帶低海拔地區低需冷性梨樹新生根於冬季休眠前大量木栓化之時間較溫帶地區高需冷性品種梨樹晚約 1 至 2 個月，推測與作物品種及環境溫度變化有關。

對梨樹等多年生果樹而言，樹體全年季節性營養與生長勢管理相當重要，臺灣位處亞熱帶季風氣候區，生育環境不同於溫帶地區，且栽培之梨樹品種多為低需冷性梨樹，休眠性與栽培生理不同於高需冷性之品種，然而亞熱帶地區栽培溫帶落葉果樹之地上部與根部生理，參考內容多為溫帶地區之植物栽培資訊，因此探究適合臺灣地區的落葉果樹生理生長模式，應可提升未來臺灣地區低海拔梨樹栽培之管理。

(二) 不同季節土壤水分變化對低需冷性梨樹生長之影響

臺灣氣候環境雖高溫多濕、年降雨量高，但降雨過度集中，且受氣候帶與複雜地形之影響，山區常因地形抬升作用並配合部分天氣系統帶來短時間的極端降

水 (陳, 1993), 常造成土壤淹水或過濕之現象。且近年來臺灣地區之氣候環境明顯受全球氣候混亂 (global climate disruption) 影響, 氣候型態逐漸走向極端化, 本島地區因熱島效應與人為開發造成地表植被變化影響, 氣溫上升速率為 1.0-1.4°C/百年, 遠高於全球平均值 (0.6°C/百年) (許等, 1999)。Liu 等(2009) 分析全球 17 個氣候區與臺灣地區極端降雨與全球溫度之關係發現, 全球溫度每上升 1 度 K, 臺灣地區前 10% 之強降雨則增加約 140%, 而前 10% 之小強度降雨則減少約 70%。強降雨的增加可能導致淹水, 中、小雨為保持土壤濕潤及地下水之關鍵水源, 其持續性減少也將導致乾旱威脅。目前臺灣地區梨樹生產多以高接梨栽培系統生產果實 (廖, 1995)。許多例子顯示, 砧木之生長與生理會直接影響接穗的生長、產量與品質 (Lockard and Scneider, 1981; Twiorkoski and Miller, 2007)。水分為作物生長的重要環境因子, 土壤水分狀況會直接影響果樹生長、開花及結實等過程 (Jones et al., 1985; Schaffer et al., 1992)。一般而言, 梨樹於不同時期之需水量與樹體管理方式皆不同, 土壤水分變化對植株之影響也因季節與環境變化而有差異, 故探討臺灣低海拔地區栽培梨樹之水分與根部生理有助於評估並了解不同季節環境土壤水分變化下梨樹之生長模式。

參考文獻

- 平田尚美. 2000. 各部の形態と生長. p. 35-44. 刊於：農文協編著. 果樹園藝大百科
4 ナシ. 農山漁村文化協會. 東京.
- 林真二. 1960. 果樹栽培生理新書 梨. 朝倉書店. 東京. 日本.
- 陳幼麟. 1993. 臺灣區域氣候之研究. 國立臺灣大學大氣科學系碩士論文. 臺北.
- 許晃雄、陳正達、柯文雄、鄒冶華. 1999. 臺灣環境變遷與全球氣候變遷衝擊之評
析-氣候. 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 (NSC
88-2621-Z-002-020).
- 廖萬正. 1995. 梨. p. 169-175. 刊於：農業委員會臺灣農家要覽增修訂再版策劃委員
會編著. 臺灣農家要覽 農作篇(二). 財團法人豐年社. 臺北.
- Christina E.W. and D.M. Eissenstat. 1996. Fine root production and mortality in apple
over winter. Hortscience 31:603 (abstr.).
- Faust, M., A. Erez, L.J. Rowland, S.Y. Wang, and H.A. Norman. 1997. Bud dormancy
in perennial fruit trees: Physiological basis for dormancy induction, maintenance
and release. HortScience 32:623-629.
- Head, G.C. 1968. Seasonal changes in the amounts of white unsubsized root on pear
trees on quince rootstock. Hort. Sci. 43:49-58.
- Jackson, J.E. 2003. Biology of apples and pears. Cambridge Univ., UK.
- Jones, H.G., A.N. Lakso, and J.P. Syvertsen. 1985. Physiological control of water status
in temperate and subtropical fruit trees. Hort. Rev. 7:301-344.

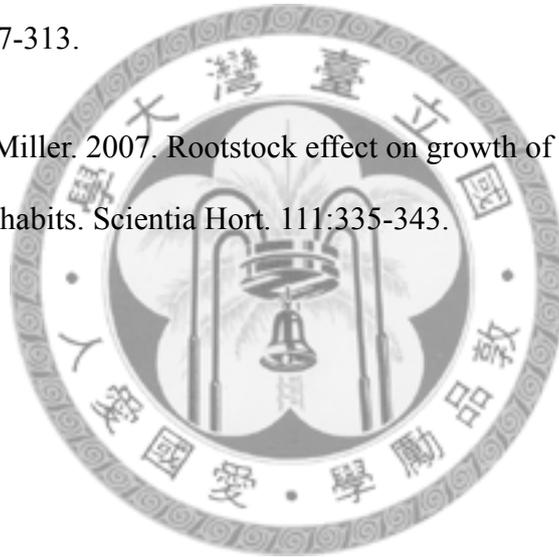
Liu, C.H., C. Fu, C.J. Shiu, J.P. Chen, and F. Wu. 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17702, doi:1029/2009GL040218.

Lockard, R.G. and G.W. Schneider. 1981. Stock and scion growth relationships and the dwarfing mechanism in apple. *Hort. Rev.* 3:315-375.

Saure, M.C. 1985. Dormancy release in deciduous fruit trees. *Hort. Rev.* 7:239-300.

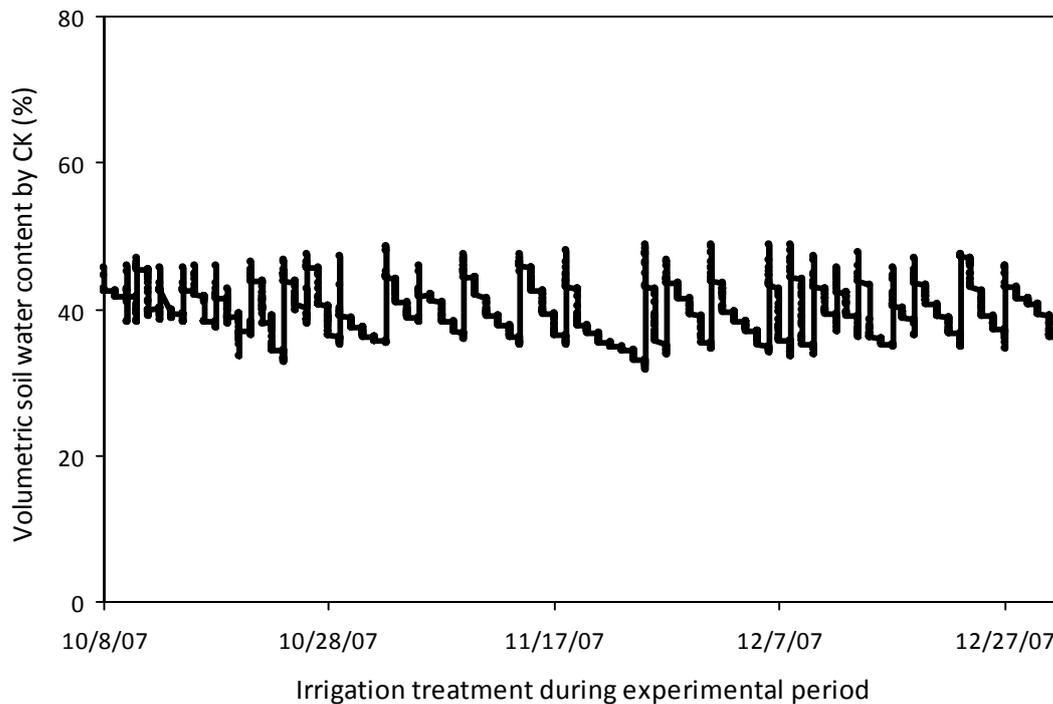
Schaffer, B., P.C. Andersen, and R.C. Ploetz. 1992. Responses of fruit crops to flooding. *Hort. Rev.* 13:257-313.

Twirkoski, T. and T. Miller. 2007. Rootstock effect on growth of apple scions with different growth habits. *Scientia Hort.* 111:335-343.



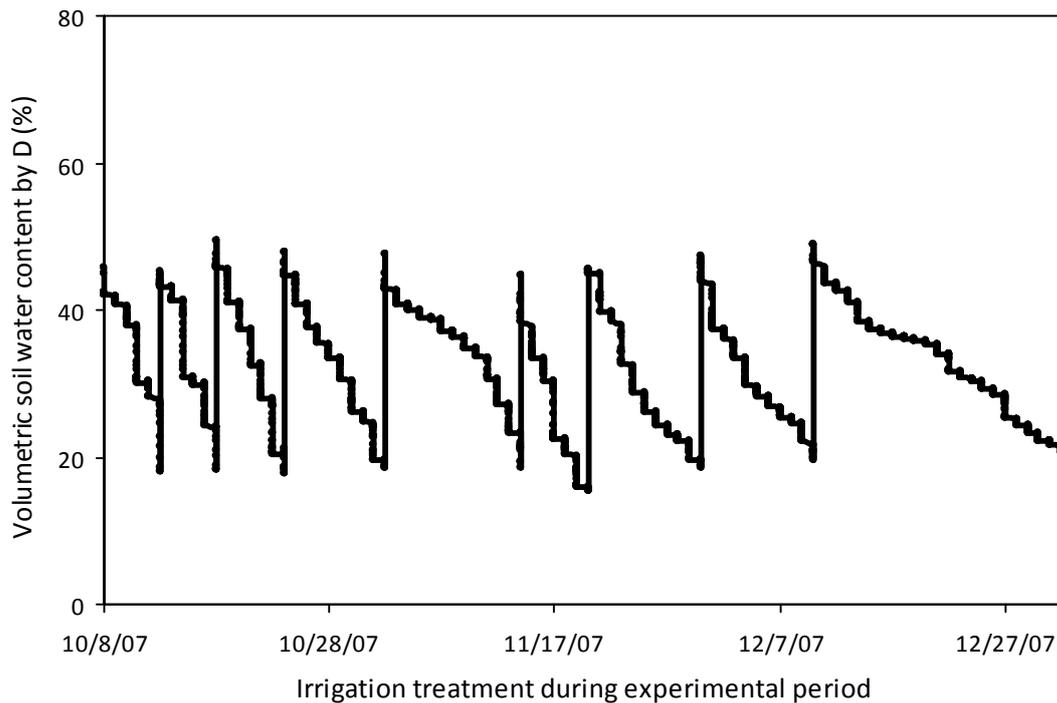
附錄

附錄一、水分試驗期間各處理植盆體積土壤含水量變化



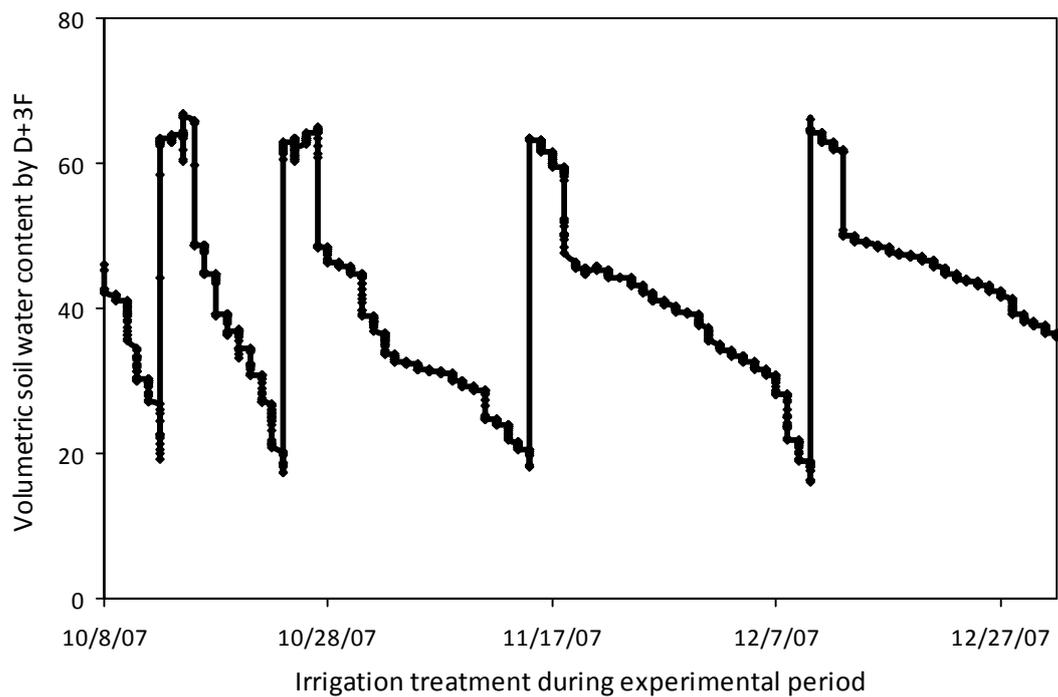
圖附 1-1. 水分試驗期間控制組 (CK) 處理之植盆體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Appendix 1-1. Control irrigation treatment (CK) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental period (2007/10/8~2008/1/1) was measured from 8 October 2007 until 1st January 2008.



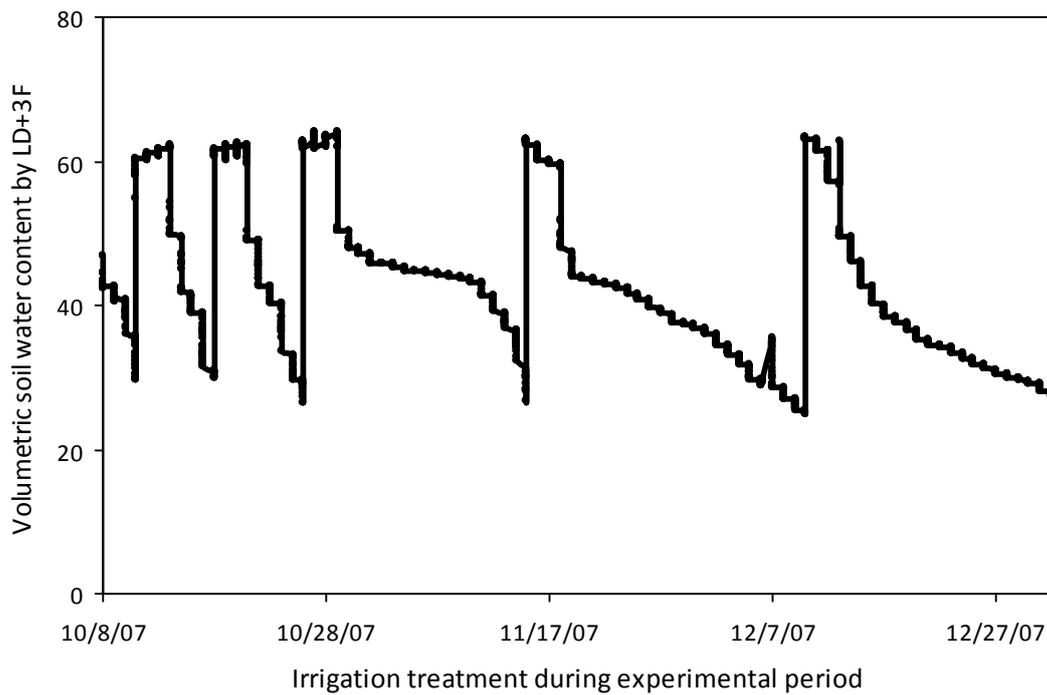
圖附 1-2. 水分試驗期間乾旱 (D) 處理之植盆體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Appendix 1-2. Drought irrigation treatment (D) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental period (2007/10/8~2008/1/1) was measured from 8 October 2007 until 1st January 2008.



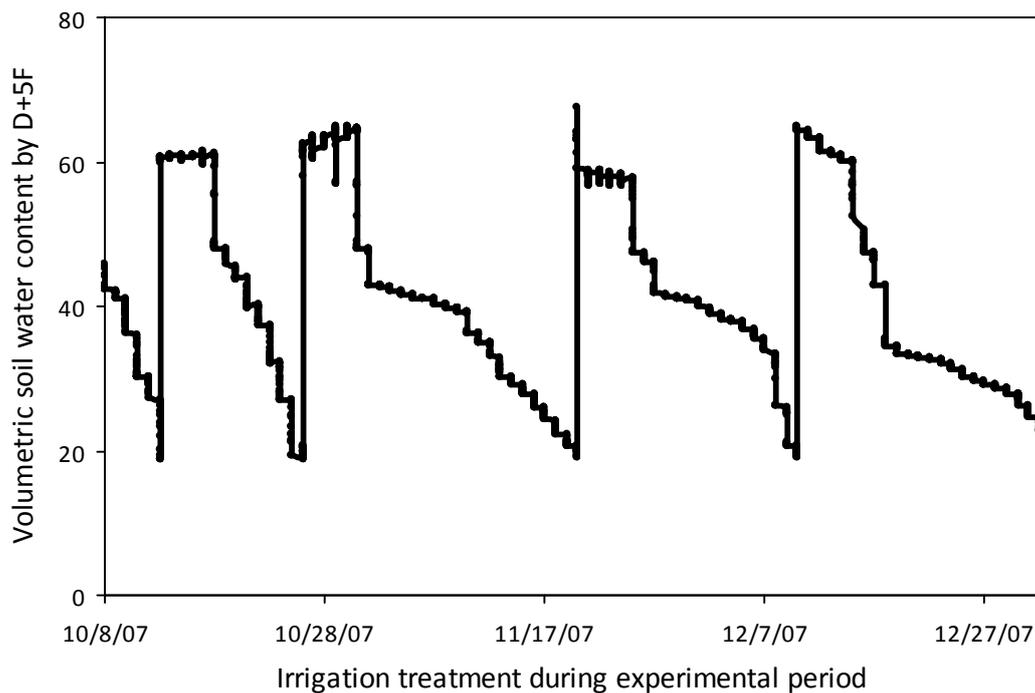
圖附 1-3. 水分試驗期間乾旱後淹水 3 日 (D + 3F) 處理之植盆體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Appendix 1-3. Drought and flooding 3 days irrigation treatment (D + 3F) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental period (2007/10/8~2008/1/1) was measured from 8 October 2007 until 1st January 2008.



圖附 1-4. 水分試驗期間輕微乾旱後淹水 3 日 (LD + 3F) 處理之植盆體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

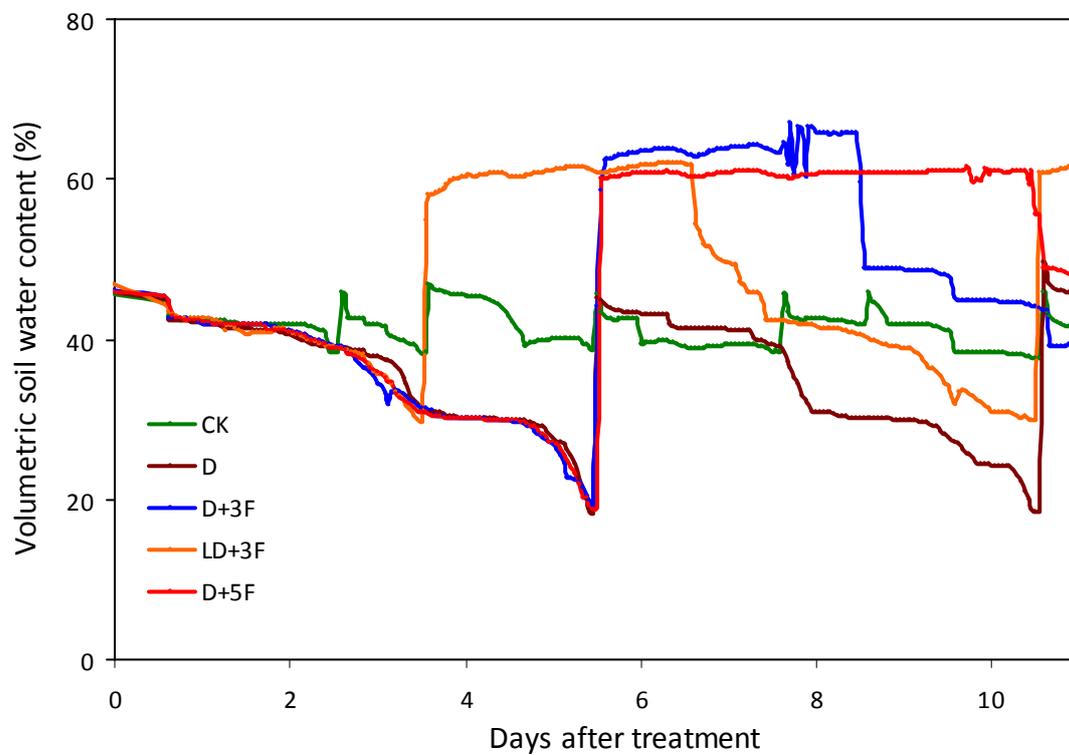
Appendix 1-4. Moderate drought and flooding 3 days irrigation treatment (LD + 3F) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental period (2007/10/8~2008/1/1) was measured from 8 October 2007 until 1st January 2008.



圖附 1-5. 水分試驗期間乾旱後淹水 5 日 (D + 5F) 處理之植盆體積土壤含水量 (%vol) 變化。本試驗於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場園藝分場露天進行。水分試驗前期各處理體積土壤含水量之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 1 月 1 日。

Appendix 1-5. Moderate drought and flooding 5days irrigation treatment (LD + 3F) affected on the variation of volumetric soil water content (%vol) during experimental period. The experiment was carried out in the field, situated in Horticulture Research, Experimental Farm, College of Bio-Resources and Agriculture of National Taiwan University. Volumetric soil water content during experimental period (2007/10/8~2008/1/1) was measured from 8 October 2007 until 1st January 2008.

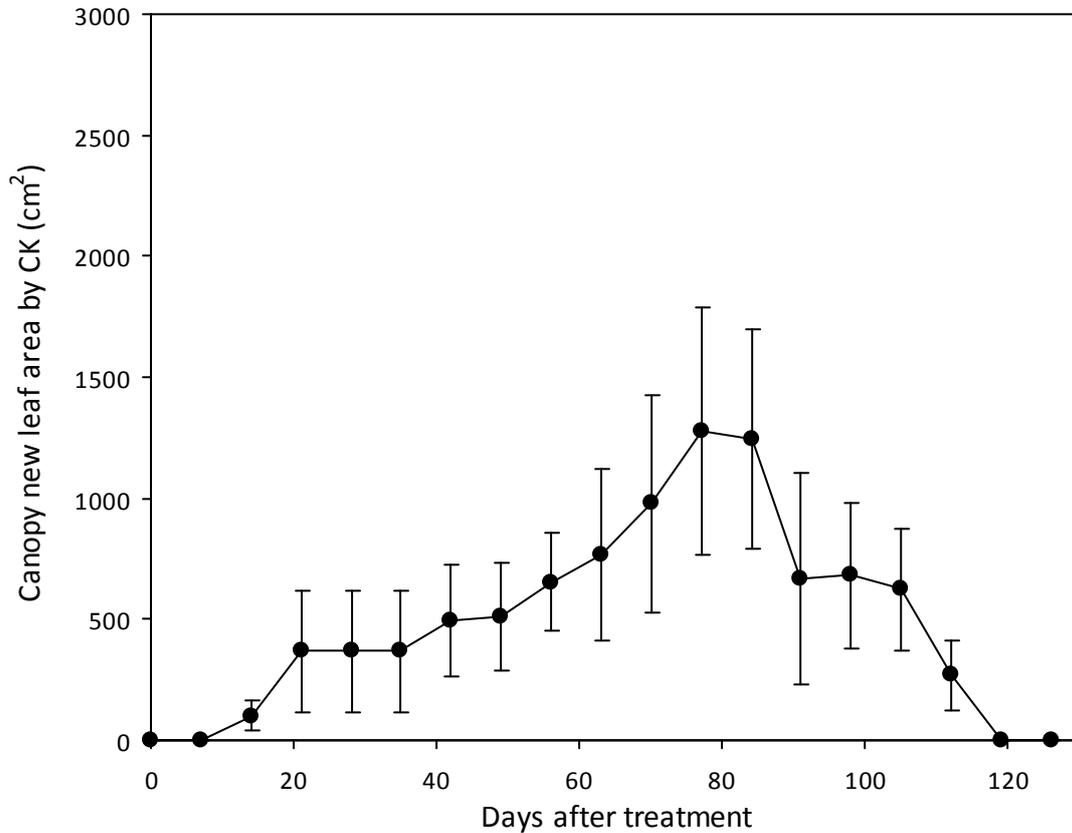
附錄二、各試驗短期土壤體積含水量變化示意圖



圖附 2. 短期水分試驗土壤體積含水量之變化。

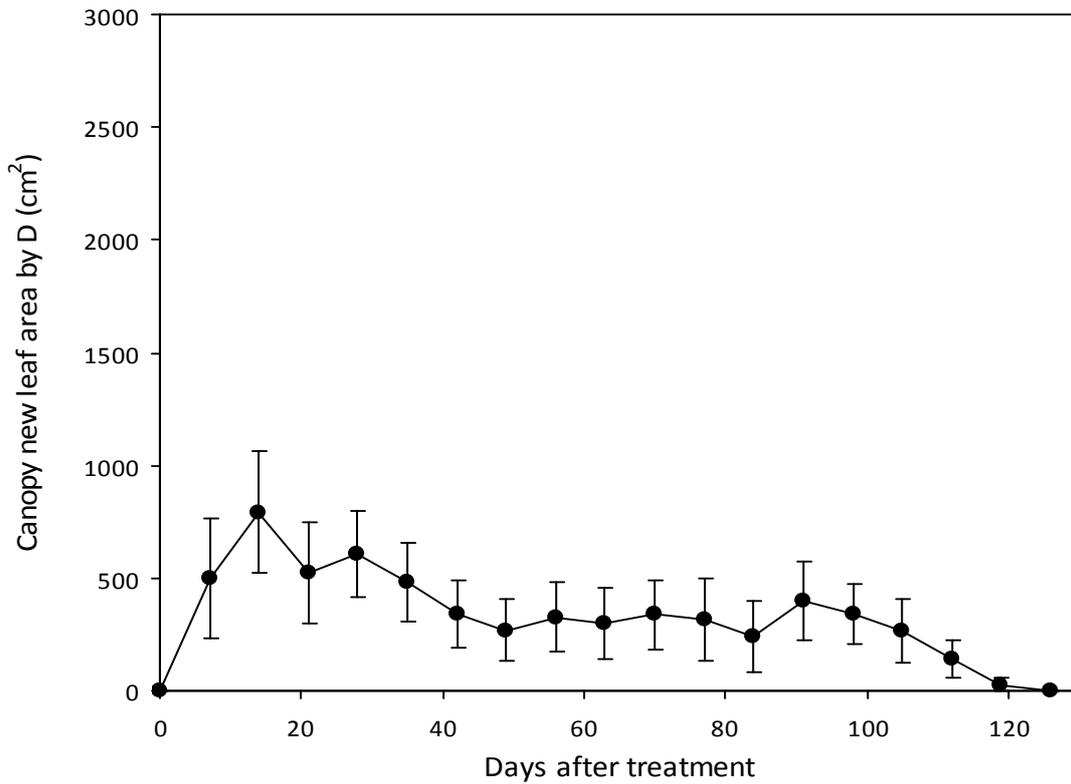
Appendix 2. The curve represents changes of volumetric soil water content (%) by short experimental design.

附錄三、土壤水分變化對各處理植株新葉生長之影響



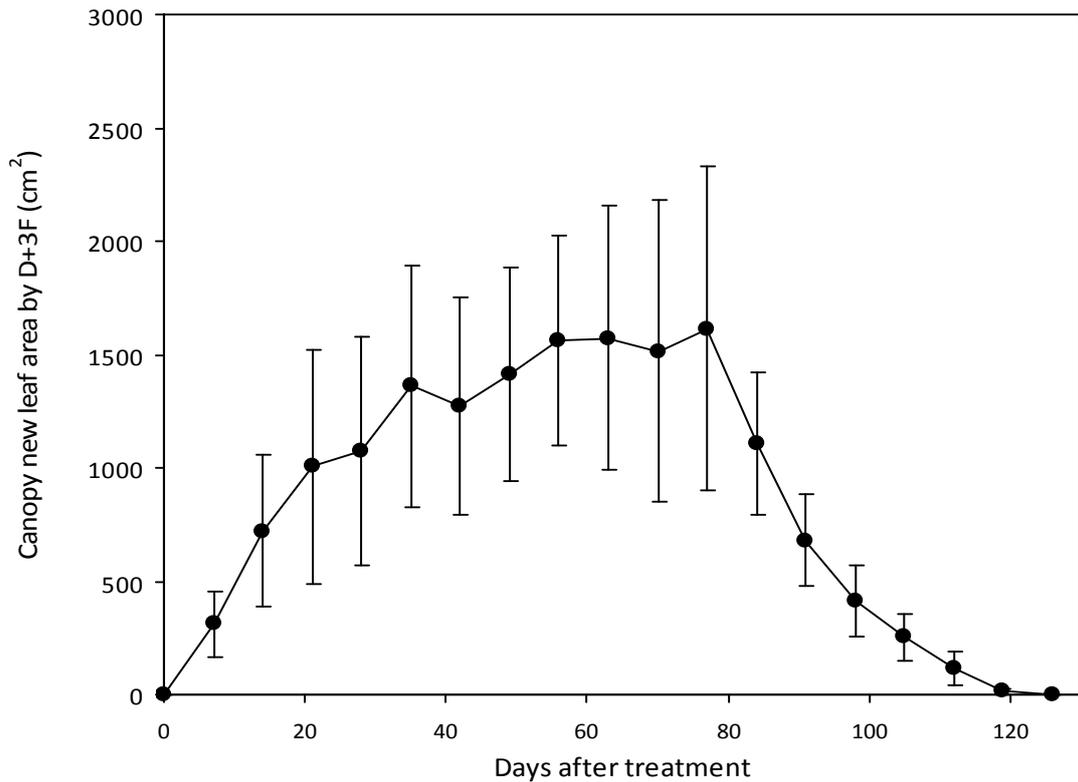
圖附 3-1. 水分試驗至植株休眠期間控制組 (CK) 處理之植株新葉生長變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 3-1. Time curves of control treatment canopy new leaf area development (cm²) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of tree canopy new leaves recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



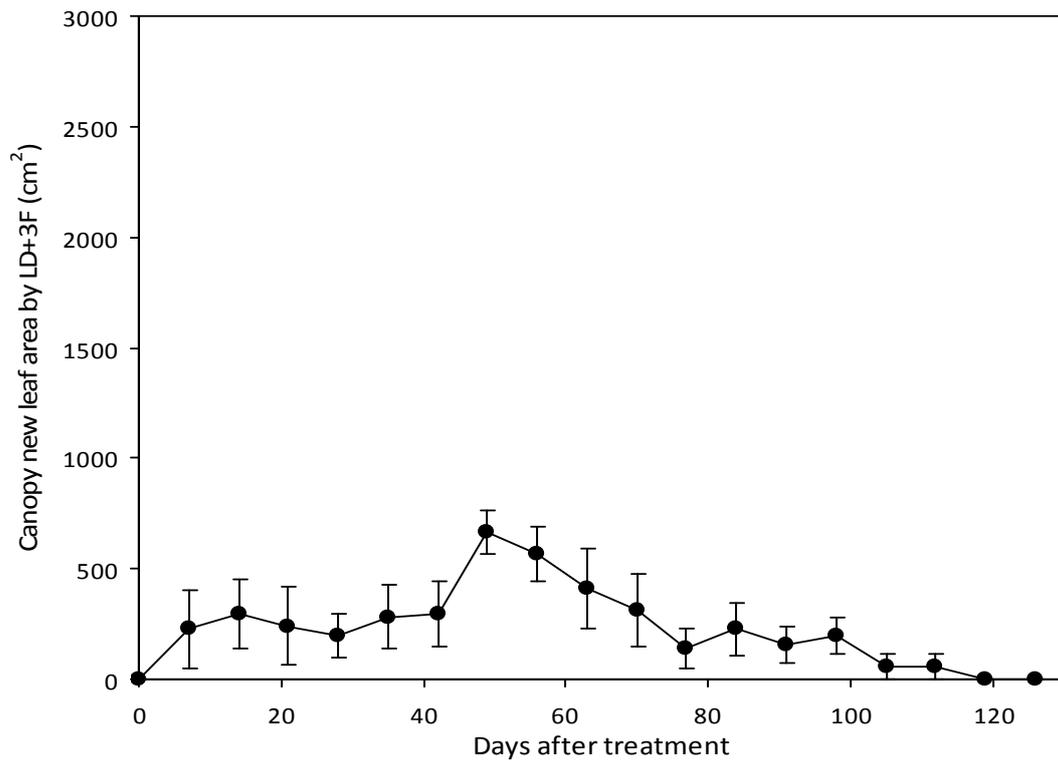
圖附 3-2. 水分試驗至植株休眠期間乾旱 (D) 處理之植株新葉生長變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 3-2. Time curves of drought treatment canopy new leaf area development (cm²) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of tree canopy new leaves recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



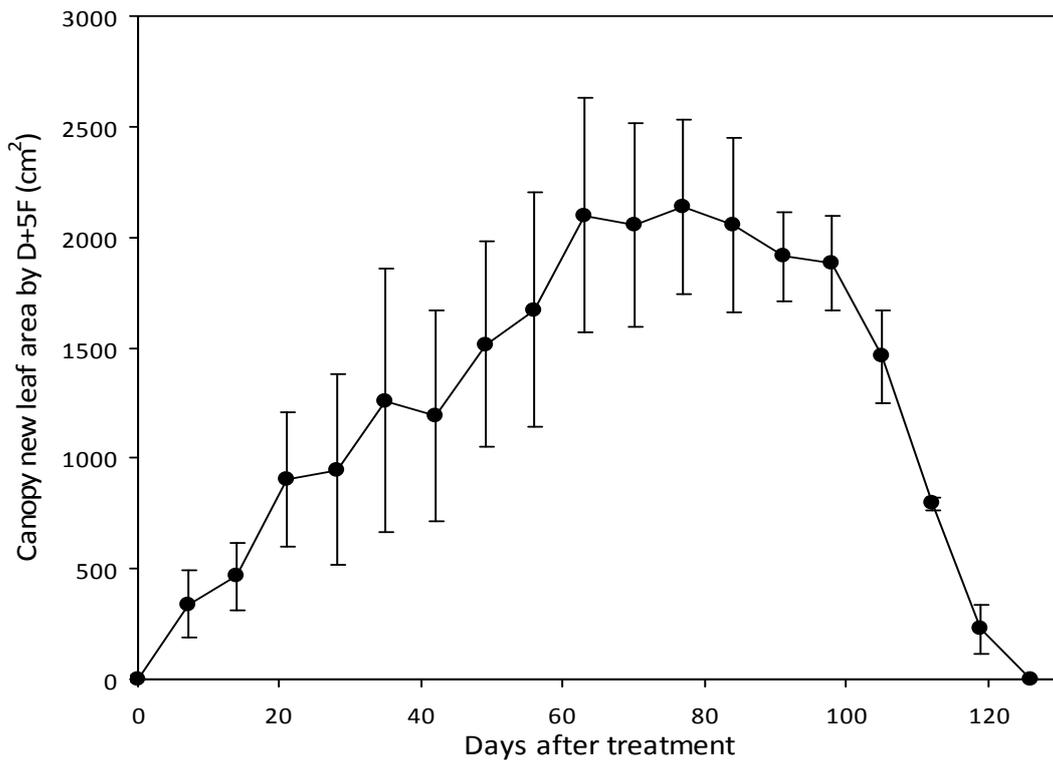
圖附 3-3. 水分試驗至植株休眠期間乾旱後淹水 3 日 (D + 3F) 處理之植株新葉生長變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 3-3. Time curves of drought and flooding 3 days irrigation treatment (D + 3F) canopy new leaf area development (cm²) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of tree canopy new leaves recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



圖附 3-4. 水分試驗至植株休眠期間輕微乾旱後淹水 3 日 (LD + 3F) 處理之植株新葉生長變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

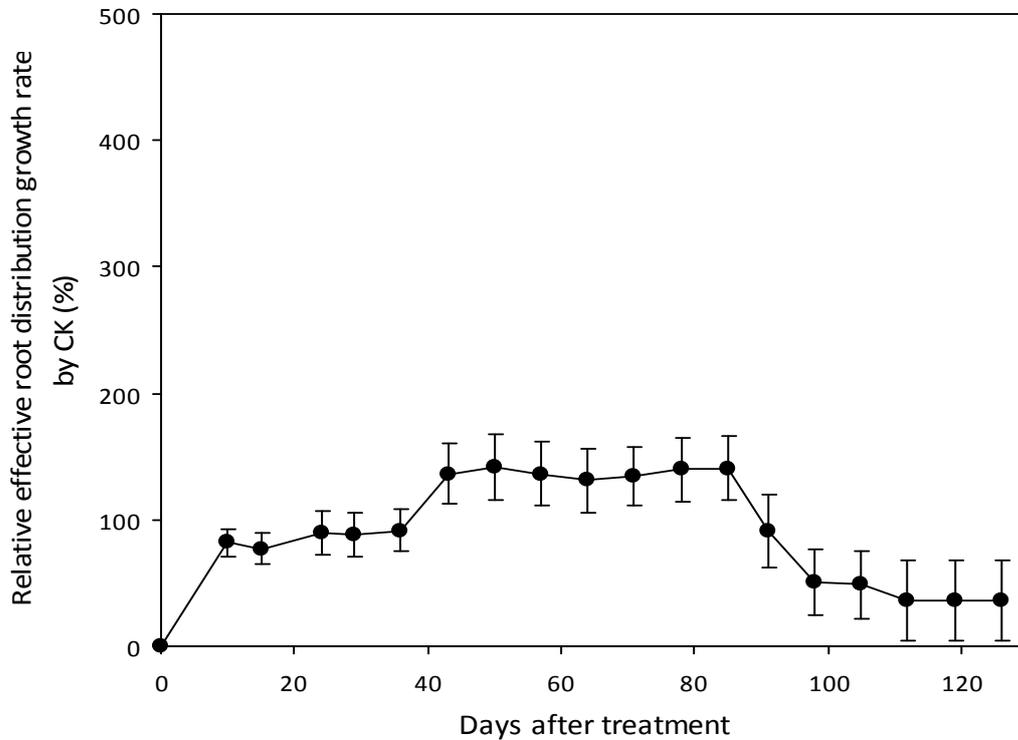
Appendix 3-4. Time curves of moderate drought and flooding 3 days irrigation treatment (LD + 3F) canopy new leaf area development (cm²) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of tree canopy new leaves recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



圖附 3-5. 水分試驗至植株休眠期間乾旱後淹水 5 日 (D + 5F) 處理之植株新葉生長變化。受試植株為 2 年生，嫁接於鳥梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹新葉生長之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

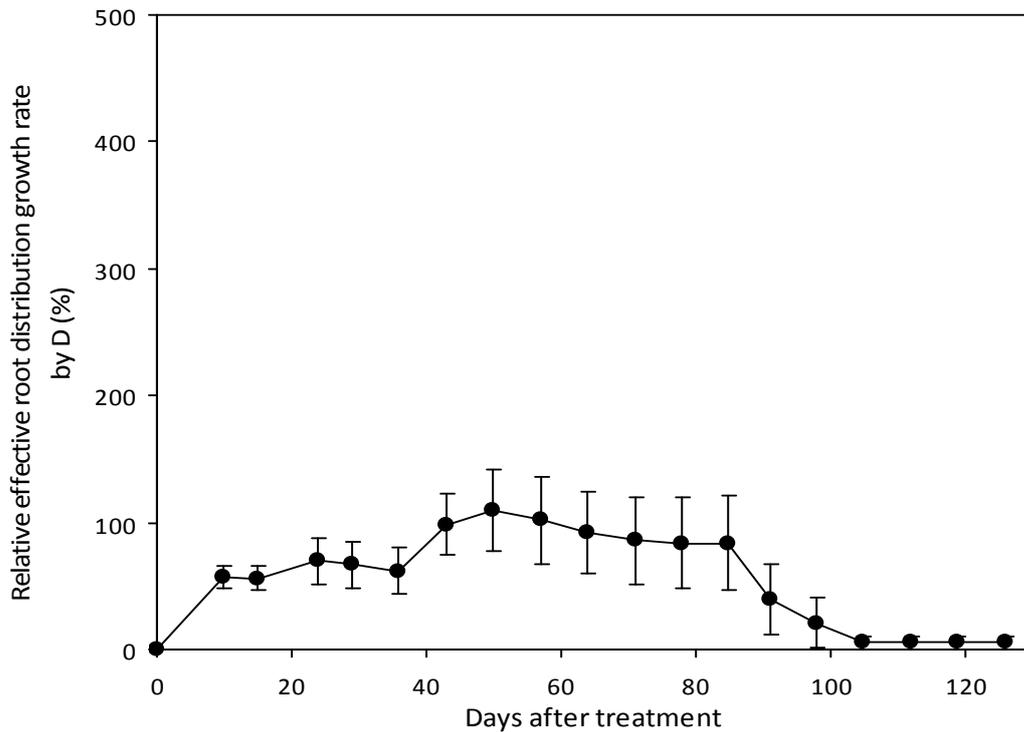
Appendix 3-5. Time curves of drought and flooding 5 days irrigation treatment (D + 5F) canopy new leaf area development (cm²) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of tree canopy new leaves recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.

附錄四、土壤水分變化對各處理植株有效根系分佈比例之影響



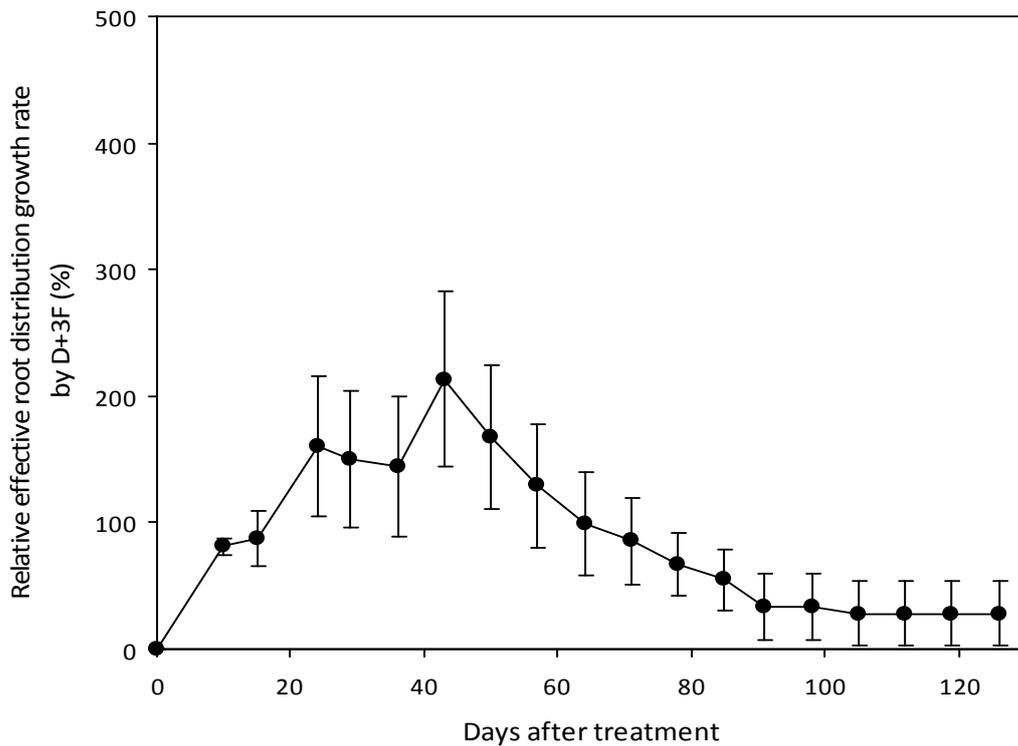
圖附 4-1. 水分試驗至植株休眠期間控制組 (CK) 處理之植株有效根系分佈比例之變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹有效根系分佈比例之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 4-1. Time curves of control treatment effective root distribution (% of DAT0) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of effective root distribution (% of DAT0) recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



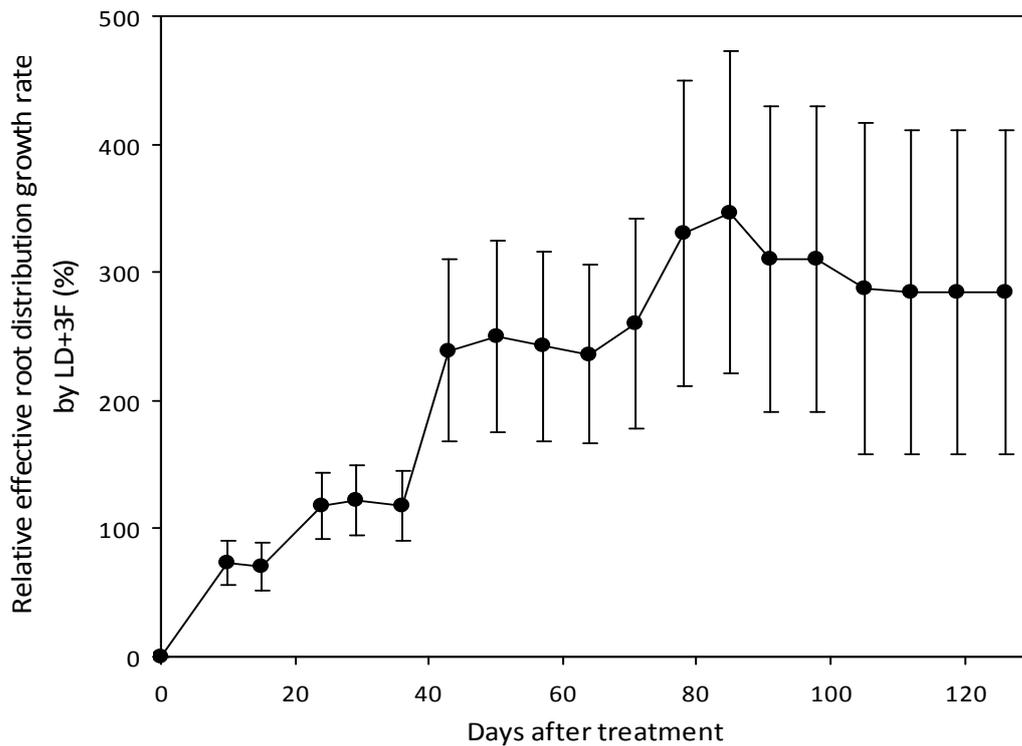
圖附 4-2. 水分試驗至植株休眠期間乾旱 (D) 處理之植株有效根系分佈比例之變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹有效根系分佈比例之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 4-2. Time curves of drought treatment effective root distribution (% of DAT0) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of effective root distribution (% of DAT0) recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



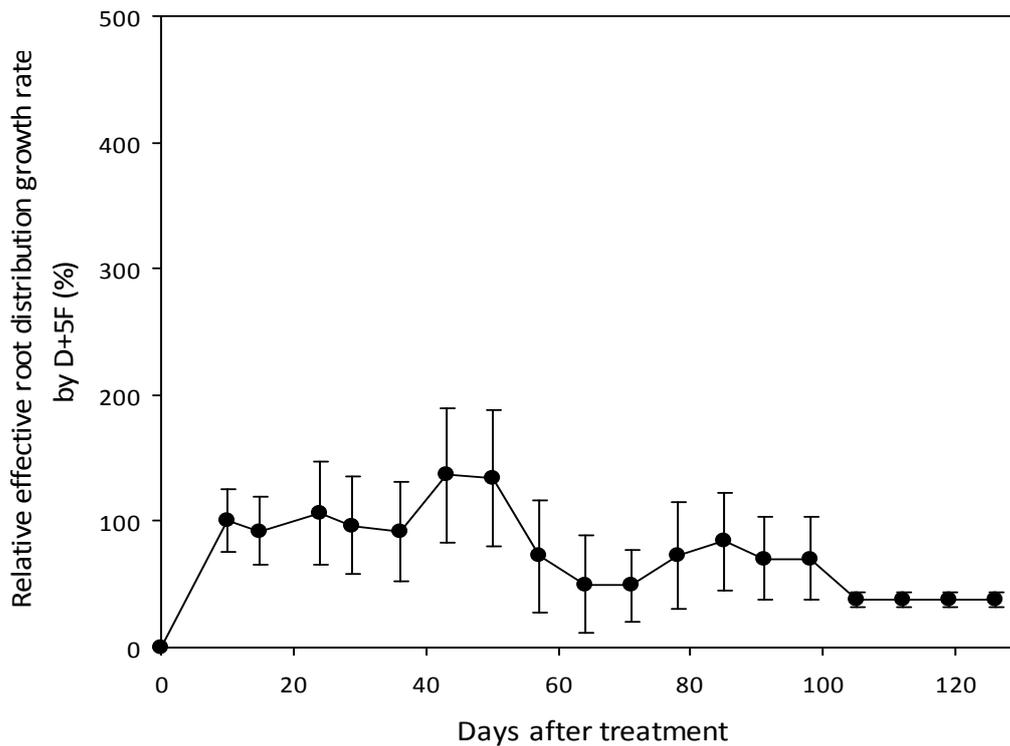
圖附 4-3. 水分試驗至植株休眠期間乾旱後淹水 3 日 (D + 3F) 處理之植株有效根系分佈比例之變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹有效根系分佈比例之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 4-3. Time curves of drought and flooding 3 days (D + 3F) treatment effective root distribution (% of DAT0) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of effective root distribution (% of DAT0) recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



圖附 4-4. 水分試驗至植株休眠期間輕微乾旱後淹水 3 日 (LD + 3F) 處理之植株有效根系分佈比例之變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹有效根系分佈比例之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 4-4. Time curves of moderate drought and flooding 3 days (LD + 3F) treatment effective root distribution (% of DAT0) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of effective root distribution (% of DAT0) recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.



圖附 4-5. 水分試驗至植株休眠期間乾旱後淹水 5 日 (D + 5F) 處理之植株有效根系分佈比例之變化。受試植株為 2 年生，嫁接於烏梨 (*Pyrus lindleyi* Rehder) 實生苗之蜜雪梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2') 裸根苗。梨樹有效根系分佈比例之測量開始於 2007 年 10 月 8 日，結束於 2008 年 2 月 11 日。垂直誤差線代表標準差，若誤差線無法被顯示則代表標準差比記錄點小。

Appendix 4-5. Time curves of drought and flooding 5 days (D + 5F) treatment effective root distribution (% of DAT0) of 2 year old potted 'Tainung No.2'/Lindley's pear trees. Data represent average values of relative effective root distribution (% of DAT0) recorded from five test trees on 8 October 2007 and ended on 11 February 2008. Vertical bars represent standard errors. Bars not visible indicate standard errors smaller than the symbol.

附錄五、試驗用植盆與根窗之設計



圖附 5. 根窗之設計。

Appendix 5. Rhizotron.

附錄六、水分試驗期間防止環境降水干擾水分控制之方式



圖附 6. 水分試驗期間植盆口以透明塑膠布包覆以防止外界降水干擾。

Appendix 6. The plastic bag covers on the pot to prevent the precipitation.

附錄七、植盆體積土壤含水量之監測儀器



圖附 7. 時域反射計。

Appendix 7. The sensor time domain reflectometer (TDR, SM200, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) used to record the volumetric soil water content in each experimental pot.

附錄八、根系監測之記錄方式

Measurement : Root photo observation

Plant material : *Pyrus pyrifolia* Nakai cv. 'Tainung No.2' on *P. lindleyi* rootstock

Tree old : 2-year old potted tree

Container number :

Treatment :

Root window size : $14 \times 18\text{cm}^2$

Location : NTU, Taipei

Date :

Weather :

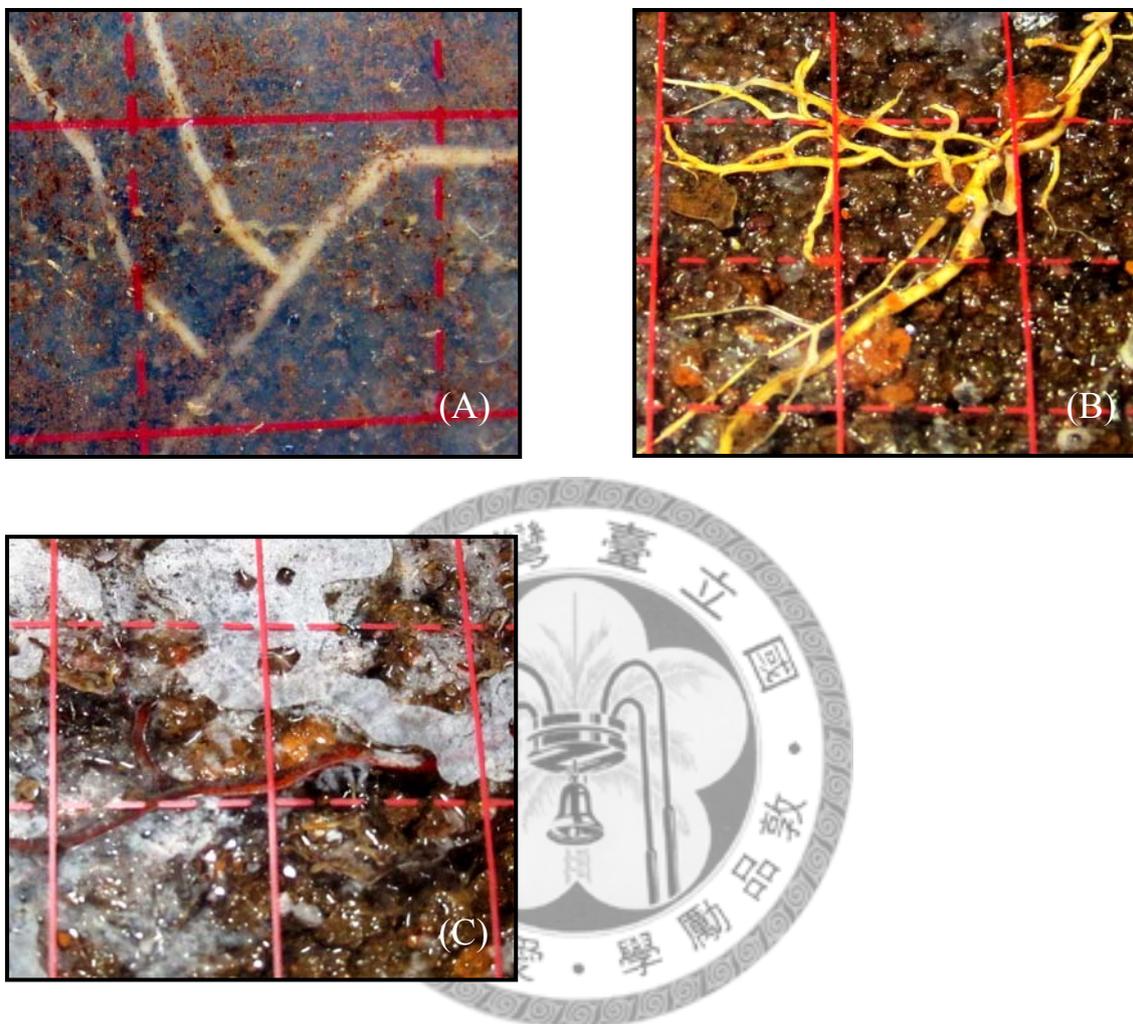
Root color identification : W = white, Y = yellow, B = brown, D = disappear

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1															1
2															2
3															3
4															4
5															5
6															6
7															7
8															8
9															9
10															10
11															11
12															12
13															13
14															14
15															15
16															16
17															17
18															18
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	

圖附 8. 根系生長監測記錄方式。

Appendix 8. Root growth observed data.

附錄九、梨樹新生根之生活史



圖附 9. '臺農種苗 2 號' 梨樹新生根生活史之顏色變化。(A) 白色新生根，(B) 黃色老化根，(C) 深褐色木栓化根。

Appendix 9. Root cortex color change in 'Tainung No.2' pears. (A) White new roots. (B) Yellow old roots. (C) Brown suberization roots.