

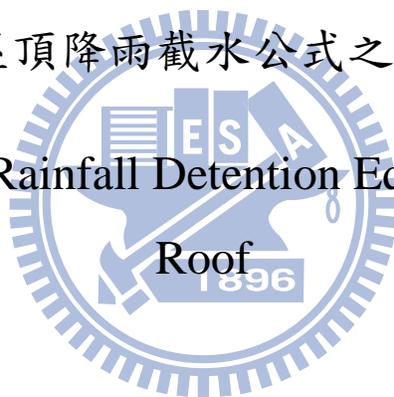
國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

碩士論文

綠屋頂降雨截水公式之建立

Development of Rainfall Detention Equations for Green
Roof



研 究 生：廖科智

指 導 教 授：高正忠

中華民國一百零一年一月

綠屋頂降雨截水公式之建立

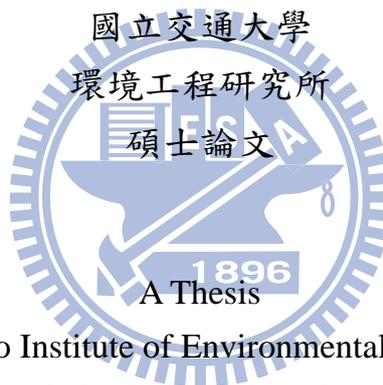
**Development of Rainfall Detention Equations for
Green Roof**

研究生：廖科智

Student : Ke-Zhi Liao

指導教授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao



Submitted to Institute of Environmental Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Environmental Engineering
January, 2012
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年一月

摘要

由於綠屋頂之植物及土壤介質均可截留雨水，因而可降低逕流減少雨水系統負載。唯目前國內外尚未有適當方法可供推估綠屋頂截水能力，故本研究收集及參考目前國內外已建立之截水公式，並依據實驗結果及相關理論建立出適合台灣環境之綠屋頂截水公式，供評估台灣綠屋頂在不同條件下降雨截水效益。本研究亦探討不同降雨型式、介質厚度、介質特性與植栽等因子於綠屋頂截水能力之影響，分析綠屋頂在降雨期間介質含水率及其底部滲漏與表面逕流隨時間變化之情況，且為了有效率模擬綠屋頂之截水能力，本研究除了改善先前座台，亦重新建立一 30cm*30cm 實驗小座台，利於截水實驗時更換不同介質、厚度及植物等設置條件。此外，由於預期研究期間自然降雨事件數量有限，亦改善之前建置之降雨模擬器模擬不同降雨強度，於截水實驗搭配小實驗座台，以便於針對不同截水因子分析綠屋頂截水能力並驗證所收集及建立公式之適用性。所建立之含水差異係數法及含水率推估法於驗證組驗證結果之 R 平方值分別為 0.9118 及 0.8655，誤差分別在 1.2%-48.4% 及 0.1%-46.7% 間，推估自然雨準確性最佳可達為 2.7% 及 40.7%。而所收集方法以迴歸統計法結果最佳，R 平方值為 0.9244，誤差在 0.5%-22% 間，推估自然雨準確性在 15.8%-69.7% 之間。

關鍵字：綠屋頂、綠屋頂截水模式、綠屋頂實驗座台、降雨模擬器、永續環境系統分析

Abstract

Green roofs can reduce both the runoff from rainfall events and the loading on storm sewers, because their plants and soil media can retain precipitation. However, a proper method for estimating the detention capability of a green roof is so far not available. Therefore, this study reviewed various rainfall detention equations and developed several equations for evaluating the detention capability under different conditions. This study investigated the effects of several essential factors such as rainfall intensity, soil depth and water content in soil, on the rainfall detention capability. For effectively analyzing the performance of a green roof, other than improving previous experiment platforms, this study also designed a 30cm*30cm experimental platform and improved the previous rainfall simulator for the new platform to simulate different rainfall events. Data measured from the experimental platforms are used to calibrate and verify the parameters of various rainfall detention equations. The verification results show that the R-squared values for the water content deviation coefficient equation and the moisture estimation equation are 0.9118 and 0.8655, respectively. And the differences between measured and equation estimated valued range between 1.2%-48.4% and 0.1%-46.7%, respectively, and the differences for real rainfall events range between 2.7% and 40.7%. For other evaluated equations, the regression equation performs the best. Its R-squared value is 0.9244, and the difference from measured values is about 0.5%-22%, while the differences for real rainfall events range between 15.8% and 69.7%.

Keywords: green roof, rainfall detention equation, green roof experimental platform, rainfall simulator, sustainable environmental systems analysis.

致謝

本論文經多位人士協助、指教與修定，終於於 2012 年一月定稿完成。非常感謝指導教授高正忠老師於求學期間對我的教誨，不論是在研究上不厭其煩得協助以及生活處事方面教導把握及自我管理時間之重要性。也非常感謝林志高教授、陳鶴文教授及陳維燁教授於口試時給我的指導及建議，使本論文更加完整及嚴謹，學生受益匪淺，對此深表感激。

感謝交大土木所單信瑜教授及其實驗室同學以及黃安斌教授及其學生古景宇同學，於本論文相關之土木方面理論給予指導及幫助，解決研究遇到之瓶頸。感謝實驗室學長姐子欽、宥禔、坤哥、冠華、京澄、展帆及雅如幫助我解決研究上及生活上所遇到的困難，讓我研究過程得以順利；同屆好友岳奇及心怡，在研究期間互相扶持及加油打氣；學弟妹們維祐、彥宏、嘉仁、廷涵及佩樺，在我趕論文期間的幫忙，以及貼心協助訂便當及飲料。感謝本所所有協助過我的同仁、學長姐、同屆同學及學弟妹。感謝在我沒有動力做研究時，給予我衝勁一同玩樂的死黨們，讓我的碩士班生活增添更多色彩。

另外感謝錫鎰基金會、林昌慶先生及林志成先生於研究期間專業相關知識之提供，感謝廠商陳志勝先生提供儀器使用上之協助及其餘廠商對於本研究之幫忙。感謝以上諸位的幫忙與指教，讓我的論文能更加順利完成。

最後要感謝我爸爸、媽媽及妹妹，因為有你們在我背後做支柱，故在我求學期間可以無憂無慮，專心於研究上；感謝爺爺奶奶、外公外婆、叔叔姑姑、表弟表妹及其他親戚，在我研究期間的關懷及教誨。僅將此論文獻給所有人。

廖科智 謹誌於交大

民國一百零一年一月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	x
參數符號說明表.....	xii
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 論文內容.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 綠屋頂簡介.....	5
2.2 綠屋頂截水影響因子與分析.....	6
2.3 綠屋頂截水機制與公式.....	7
2.4 綠屋頂實驗方式.....	8
第三章 研究流程與方法.....	10
3.1 研究流程.....	10
3.2 綠屋頂截水公式收集與機制.....	12
3.3 綠屋頂截水因子.....	14
3.3.1 降雨形式.....	14
3.3.2 介質厚度.....	14
3.3.3 介質特性.....	15
3.3.4 植栽.....	17

3.4 綠屋頂截水公式之建立.....	17
3.4.1 截水公式之建立.....	17
3.4.2 影響蒸散因子.....	24
3.4.3 排水板對截水之影響.....	26
3.5 實驗座台改善與設計.....	27
3.5.1 既有實驗座台缺點及改善.....	28
3.5.2 小型實驗座台建置及與既有座台比對.....	29
3.5.3 降雨模擬器.....	31
3.6 針對不同截水因子進行截水實驗及公式驗證.....	32
3.6.1 截水實驗.....	32
3.6.2 公式驗證.....	32
第四章 結果與討論.....	33
4.1 介質含水率監測設備之校正.....	33
4.2 綠屋頂截水因子分析.....	33
4.2.1 降雨強度.....	34
4.2.2 介質厚度.....	37
4.2.3 介質特性.....	40
4.2.4 植栽.....	42
4.2.5 排水板.....	45
4.2.6 尖峰逕流減量.....	47
4.3 大小座台比對及降雨模擬器均勻性與再現性分析.....	48
4.4 SWCC 實驗.....	52
4.5 綠屋頂截水公式驗證.....	56
第五章 結論及建議.....	64
5.1 結論.....	64
5.2 建議.....	66

參考文獻.....	67
附錄 A.....	71
A.1 θ_s 決定方法	71
A.2 SWCC 曲線.....	72
A.3 截水實驗	73
A.4 TDR 校正	76
A.5 降雨模擬器均勻性及再現性.....	79
附錄 B	82
附錄 C	94

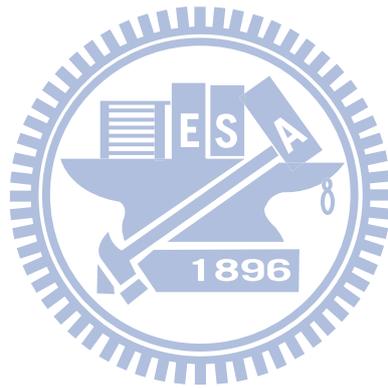


圖目錄

圖 2.1 實驗座台	9
圖 3.1 研究流程圖	11
圖 3.2 綠屋頂截水機制	14
圖 3.3 SWCC 曲線實驗	22
圖 3.4 排水板	27
圖 3.5 90cm *90cm 培養箱	28
圖 3.6 30cm *30cm 培養箱	29
圖 3.7 小型實驗做台設計圖	30
圖 3.8 小型實驗座台	30
圖 3.9 側插設計	30
圖 3.10 降雨模擬器	31
圖 3.11 噴頭	31
圖 4.1 TDR 電壓值與含水率之關係圖	33
圖 4.2 不同降雨強度下載水實驗結果	35
圖 4.3 A、B 及 C 三點位置圖	36
圖 4.4 不同降雨而其餘因子(介質 1、7cm、圓葉景天)不變下之出流水 圖	36
圖 4.5 不同降雨而其餘因子(介質 1、12cm、越橘葉蔓榕)不變下之截水 圖	36
圖 4.6 不同介質厚度下載水實驗結果	39
圖 4.7 不同介質下載水實驗結果	41
圖 4.8 不同介質而其餘因子皆相同下之截水量圖	42
圖 4.9 有無植栽下載水實驗結果	44

圖 4.10 不同雨量下排水板截水實驗實際及推估之出流水比較圖 .	45
.....	45
圖 4.11 蓄水杯頂端溢流孔	46
圖 4.12 有無排水板表面逕流比較圖	46
圖 4.13 排水板截水量隨雨量變化圖	46
圖 4.14 有排水板在不同雨量下之尖峰逕流減量比例	48
圖 4.15 大小座台比較圖	49
圖 4.16 SWCC 曲線.....	52
圖 4.17 實測值與 Φ index 法推估值之比較	57
圖 4.18 實測值與含水差異係數法推估值之比較	58
圖 4.19 實測值與含水率推估法推估值之比較	59
圖 4.20 實測值與 SWCC-Darcy 法推估值之比較	60
圖 4.21 實測值與 S&J 法推估值之比較	61
圖 4.22 實測值與回歸統計法推估值之比較	61
圖 4.23 實測值與經驗式法推估值之比較	63
圖 A.1 實驗儀器組	73
圖 A.2 陶瓷透水板	73
圖 A.3 降雨模擬器所需設備之組裝	74
圖 A.4 小實驗槽蓋子	75
圖 A.5 小實驗槽出流水設備	75
圖 A.6 擋雨遮蔽物	75
圖 A.7 土壤取樣器	77
圖 A.8 有體積刻度之桶子	77
圖 A.9 TDR 電壓值與含水率關係圖	77
圖 A.10 塑膠罐	80
圖 B.1 不同降雨而其餘因子不變下之出流水圖	88

圖 B.2 不同降雨而其餘因子不變下之截水圖	90
圖 B.3 不同介質而其餘因子皆相同下之截水量圖	92
圖 C.1 自然雨降雨量與出流水比較圖	94

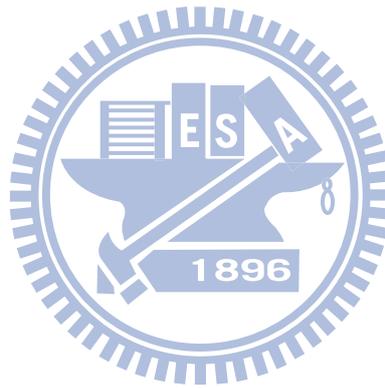


表目錄

表 2.1 綠屋頂優缺點	5
表 3.1 建築物構造之活載重	15
表 3.2 綠屋頂介質考量因子	16
表 3.3 一般表面之近似粗糙度值	26
表 4.1 不同雨量下載水實驗之雨量及截水增加比例	37
表 4.2 不同介質厚度下載水實驗之截水量/厚度增幅比	38
表 4.3 尖峰逕流減量	47
表 4.4 降雨模擬器噴頭 010 均勻性及再現性分析比較表	51
表 4.5 降雨模擬器降雨強度表	51
表 4.6 驗證組之實際與推估出流水量-以雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組	53
表 4.7 自然雨之實際與推估出流水量-以雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組	55
表 A.1 降雨模擬器噴頭 J050 均勻性及再現性分析比較表	80
表 A.2 降雨模擬器噴頭 015 均勻性及再現性分析比較表	81
表 B.1 無排水板截水實驗結果	82
表 B.2 不同雨量下載水實驗之雨量及截水增加比例	84
表 B.3 不同介質厚度下載水實驗之截水/厚度增幅比	86
表 B.4 有排水板截水實驗結果	93
表 C.1 驗證組之實際與推估出流水量-以雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組	95
表 C.2 自然雨之實際與推估出流水量-以雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組	98

表 C.3 雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組之實際與推
估出流量99

表 C.4 雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組之
實際與推估出流量102



參數符號說明表

符號	說明	單位
ΔSW	基質層含水變化量	mm
PP	降雨	mm
RO	表面逕流	mm
DP	底部滲漏	mm
AP	植物所吸收水份	mm
ET	蒸散	mm
DB	排水板截留水量	mm
t	時間間隔	m
θ_i	初始含水率	%
θ_s	飽和含水率	%
PP_p	降雨形式	-
K_s	飽和水力傳導係數	mm/s
n	孔隙率	%
g_s	粒徑分佈	-
PP_m	降雨間隔 m 之降雨量	mm
M	降雨間隔數	-
Φ	參數	-
Δt	降雨間隔時間	m
f_{out}	RO+DP	mm
EP_m	$PP_m - ET_m - DP_m$	mm
ET_m	降雨間隔 m 之蒸散量	mm
DP_m	降雨間隔 m 之排水板截留量	mm

α	係數(式 3.4)	-
$\theta_{i,m}$	降雨間隔 m 之初始含水率	%
D	介質厚度	cm
f_0	初始入滲率	inch/hr
f_c	最終入滲率	inch/hr
k	Shape factor(式 3.8)	-
θ_f	最終含水率	%
γ	係數(式 3.9)	-
q	面積流率	m/s
κ	滲漏係數	m ²
ρ_w	水之密度	kg/m ³
g	重力加速度	m/s ²
μ	水力動黏滯係數	kg/m/s
dh/dl	The unit change in hydraulic head per unit length of flow.	m/m
K	水力傳導係數	m/s
F(t)	雨水滲漏入介質之累積深度	inch
Ψ	Suction head	inch
h_0	積水深度	inch
Δt	介質中孔隙率和初始含水率之差值	%
f(t)	介質入滲率	inch/day
β	係數(式 3.13)	-
a	係數(式 3.14)	-
c	係數(式 3.14)	-
λ	係數(式 3.16)	-

S	介質厚度	cm
RR	截水量	mm
a	係數(式 3.18)	-
b	係數(式 3.18)	-
c	係數(式 3.18)	-
E_r	蒸散率	mm/day
R_n	淨輻射量	W/m^2
E_a	蒸散率	mm/day
B	$0.102 u_2 / [\ln(z_2/z_0)]^2$ (式 3.21)	-
u_2	在高度 z_2 所量測的風速	m
z_2	高度	cm
z_0	一般表面之近似粗糙度值	cm
e_{as}	$611 \exp[17.27T/(237.3+T)]$ (式 3.21)	-
T	大氣溫度	$^{\circ}C$
e_a	$R_h * e_{as}$ (式 3.21)	-
R_h	相對濕度	%
E	蒸散率	mm/day
Δ	$4098 e_{as} / (237.3+T)^2$ (式 3.22)	-
ω	常數(式 3.22)	-
τ	常數(式 3.23)	-
DP_{DB}	排水板出流水比例	%

第一章 前言

1.1 研究緣起

隨著都市化之腳步，綠地逐漸減少，取而代之的是柏油路面以及水泥建築等不透水鋪面，由於綠屋頂可增加綠覆面及具有截留雨水、降溫節能及降低溫室效應等效益(FLL, 2002; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal and Bengtsson, 2005; Getter *et al.*, 2007; Hien *et al.*, 2007; Berndtsson *et al.*, 2009; Hilten *et al.*, 2008)，因而在國外如德國、瑞士、美國、瑞典及日本等國家，綠屋頂已相當普遍 (Berndtsson *et al.*, 2009)。綠屋頂在國內也正逐漸受到重視，唯仍處於剛起步階段，實際建置案例雖已漸多，例如吳興國小、松山工農及信義行政大樓(錫瑠基金會，98年)及台北市花博會等建置綠屋頂，但仍屬少數，也因而針對綠屋頂在台灣之效益，國內只有少數相關研究(謝，94年；許，95年；蘇，98年)，然而在一個城市大量推廣綠屋頂前有必要建立相關效益評估工具與模式，以期能協助研擬相關政策及支援決策分析。本研究群李(99年)因而曾針對薄層綠屋頂之截水能力進行分析，期望了解綠屋頂之截水能力，並評估其降低都市雨水逕流之能力，該研究已建置二個實驗座台及相關監測設備，且已監測了9場雨之數據，並建立了初步公式推估綠屋頂之截水總量，唯該公式仍不太實用。由於等自然雨曠日費時，故其實驗方式也仍需改善，故本研究延續該研究，進一步建立數個實用公式以估算國內建置薄層綠屋頂之雨水截留能力，並建立更好之實驗設備，讓研究順利進行。

國外雖已有一些研究探討綠屋頂之截水能力，例如 Van Woert *et al.* (2005)及 Getter *et al.*(2007)等針對不同降雨強度、介質深度、坡度進行研究，唯這些研究是針對特定綠屋頂，並沒有發展出可供評估綠屋頂截水能力之模式。Mentens *et al.* (2006)以多場雨綠屋頂截水監測資料迴歸出綠屋頂截水公式，雖然 R^2 有 0.77，唯此公式考量因子只有降雨及基質厚度，且

可能不太適用於台灣，Hilten *et al.* (2008)採用 HYDRUS-1D 模式模擬綠屋頂截水能力，唯該模式過於複雜，雖可能適合供模擬單一綠屋頂在單場雨下之截水詳細機制，但並不適合用於評估一般綠屋頂截水能力或供相關政策評估用，且由於國外綠屋頂及環境特性與國內不盡相同，故國外相關成果不見得適用於國內，She and Pang (2010)利用達西公式、Green Ampt 模式、SWMM RUNOFF 模式及蒸散公式等組一個模式來模擬綠屋頂截水及屋頂逕流情況。而國內相關研究很少，除了李(99年)之外，海洋大學亦進行相關研究中(廖，99年)，唯並未提供截水公式，本研究因而發展數個實用之公式來模擬綠屋頂在台灣環境條件下之截水能力，雖然國內外尚沒有適當公式可供使用，但綠屋頂截水機制基本上頗類似土壤中之入滲(infiltration)現象，唯土壤層厚，而綠屋頂培養介質一般不到 20cm，故機制雖類似，但並無法直接使用入滲公式；綠屋頂截水能力與滲漏(percolation)機制較類似，唯目前亦無適當之滲漏公式可直接用於薄層綠屋頂，本研究因而依實驗結果及相關理論機制發展出數個實用公式供評估綠屋頂截水能力。

綠屋頂主要分成密集式(intensive)及薄層式(extensive) (FLL, 2002)，密集式綠屋頂如空中花園，土壤層較深(20cm 以上)，唯其建置與維護成本均較高，且其較重非一般屋頂所能承受，故如同李(99年)之研究，本研究亦主要針對薄層綠屋頂進行分析。綠屋頂截留雨水之能力主要是由土壤介質、植物貯留及排水板貯水，因而可降低雨水逕流，基本上，會影響綠屋頂截留雨水能力因子包含降雨型式、介質特性、坡度、深度、植栽等(Van Woert *et al.*, 2005; Mentens *et al.*, 2006; Carter and Jackson, 2006; Getter *et al.*, 2007)，例如 Getter *et al.* (2007) 曾以不同降雨強度及不同坡度分析雨水截留效益，其結果顯示坡度越陡，雨水截留越少；降雨越強，雨水截流比例亦越少，其他研究亦類似，所得結果大多是依特定場所分析，並沒有發展

出一個模式供使用。本研究因而將分析這些因子對綠屋頂截水能力之影響，並探討其理論，建立數個實用之公式。

雖然國外已有一些研究曾分析綠屋頂截水能力，如 Moran *et al.*(2005)、Van Woert *et al.* (2005)、Villarreal and Bengtsson (2005)、Getter *et al.*(2007)、Berndtsson *et al.*(2009)及 Hilten *et al.*(2008)等均曾在屋頂建實場實驗，雖這亦是一個可行的研究方式，但不易針對不同截水因子作有效率變動，因而李(99年)陸續建置了1m*1m及90cm*90cm二個實驗座台，比較有無綠屋頂之截水效益，唯由於介質仍頗重(大於60kg)，不易經常更換介質及不同介質厚度進行實驗，故本研究設計小型實驗座台，以更有效率完成不同因子之截水試驗。此外，由於自然雨次數有限且無法預期，故本研究使用降雨模擬器，以模擬不同降雨型式對綠屋頂截水效益之影響，亦設計建置出更適當之實驗設備組，以利於更有效率驗證所發展之綠屋頂截水公式。

1.2 研究目的

本研究之目的主要在於建立適當綠屋頂截水公式，以評估台灣綠屋頂在不同條件下之降雨截水效益，作為台灣推廣綠屋頂相關決策之依據。同時，亦設計綠屋頂實驗座台，用以加速分析不同影響因子及設置條件下綠屋頂降雨截水能力。主要研究目的可分為下列幾項：

1. 發展適合台灣綠屋頂之截水公式：由於台灣如降雨強度、土壤性質、植栽、屋頂型式等條件與國外不同，故國外所發展之截水公式不見得適用於國內，因此本研究建立適用於台灣綠屋頂之截水公式，並以綠屋頂截水實驗之結果進行驗證。
2. 探討綠屋頂不同因子對截水能力之影響：由於綠屋頂之截水能力受降雨型式、介質特性、深度、植栽等因子所影響，故本研究分析不同因子對於綠屋頂雨水截流之影響情況。

3. 改善先前人工降雨模擬器與綠屋頂實驗座台：為有效分析綠屋頂之截水能力，本研究改善先前人工降雨模擬器與綠屋頂實驗座台，並設計一 30cm*30cm 小型實驗座台，以更有效率模擬不同降雨型式及分析不同影響因子下綠屋頂雨水截水能力之變化情況。

1.3 論文內容

本論文後續章節，第二章為文獻回顧，回顧國內外綠屋頂相關研究成果以及已發展之綠屋頂截水與逕流公式與模式。第三章說明本研究流程與方法，其中包含研究流程、截水公式之收集與建立、綠屋頂截水因子、降雨模擬器與小型實驗座台設計與建置、截水實驗及公式驗證等研究方法說明。第四章則針對綠屋頂截水實驗結果進行分析及探討，並進行截水公式之驗證。第五章說明本研究成果及建議。



第二章 文獻回顧

綠屋頂因有截水、降溫及節能等效益，在國外已有相當程度之發展。雖然國外亦有綠屋頂截水效益研究，唯國外影響因子與國內不同，研究成果不見得適用於國內，又國內對於此研究亦甚少，故綠屋頂於國內大量推廣前，有必要建立適合評估國內綠屋頂截水效益之公式。以下分為綠屋頂簡介、截水影響因子、綠屋頂截水機制及模式與公式及實驗方式等四大部分回顧國內外相關文獻。

2.1 綠屋頂簡介

表 2.1 為李(99 年)所整理之綠屋頂優缺點。雖然綠屋頂優點不少，但受限於人力時間，本研究主要延續李(99 年)之研究，建立數個適用於評估台灣綠屋頂截水能力之公式。以下回顧國內外發展綠屋頂之情形。

表 2.1 綠屋頂優缺點

優點：
1.截留雨水減輕雨水系統的負荷。
2.藉由遮蔽太陽光曝曬及減少每天建築物溫度波動幅度，保護底部屋頂。並保持建築物夏天室內涼爽。
3.減緩都市熱島效應。
4.吸收空氣污染物、收集粉塵微粒及貯存碳。
5.減少傳遞噪音。
6.提供棲息地給鳥類及其他小動物。
7.讓建築擁有較多的綠地及開放性空間，使其更為美觀，提升生活的品質。
8.減少機械力危害屋頂防水層的風險。
9.藉由吸引人的綠化建築物來增加價值。
缺點：
1.綠屋頂滲漏水會夾帶污染物流出。
2.植物不夠密時，黑色的土壤反而會增強輻射。
3.荷重或植物可能造成屋頂漏水。
4.綠屋頂的雜草葉子可能造成水管堵塞。

摘自李(99 年)

目前國內綠屋頂發展尚處於起步階段，實際建置案例雖已漸多，例如吳興國小、松山工農及信義行政大樓等(錫瑠基金會，98年)，唯相關研究仍數少數，謝(94年)、許(95年)、蘇(98年)及 Fang(2008)等探討屋頂植栽對於建築物降溫效果之影響，皆是屬於熱方面之研究，對綠屋頂截水方面研究甚少，本研究群李(99年)曾針對不同降雨及介質深度進行綠屋頂截水能力之研究及實驗，其建立了實驗座台及相關設備，且已取得了數場降雨實測資料，唯其雖有嘗試建立公式，但不太成功。廖朝軒教授(99年)研究群亦曾從事類似之研究，針對不同降雨強度、坡度、介質厚度(無植被、10cm、20cm)、植物及介質等進行逕流試驗，唯目前均尚未建立適當公式可供推估綠屋頂的截水能力，本研究因而延續李(99年)之研究，試著發展出適合評估國內綠屋頂降雨截水能力之公式。

雖然綠屋頂在國內剛起步，但在德國、瑞士、美國、瑞典及日本等國家，綠屋頂已相當普遍 (Berndtsson *et al.*, 2009)。Dunnett and Kingsbury (2008)指出德國近年來綠屋頂發展已是世界領導先驅，國家也立法補助研究；瑞士亦訂定法令規定國家行政機構必須有自然環境及景觀，亦規定新建建築物必須綠化；在日本(日經 BP 社，2006年)許多建築亦有綠屋頂之設計，例如東京都立川市昭和紀念公園及埼玉縣秩父市歷史文化傳承館等。

國外綠屋頂發展已有一段歷史，故相關研究也較多，例如 Takatura *et al.* (2000)進行綠屋頂熱效益分析，並以實驗驗證所建立之模式，Hien *et al.* (2007)研究熱帶氣候有無綠屋頂下屋頂溫度差異，有關截水部分，亦已有一些研究，將在 2.3 節中詳細說明之。

2.2 綠屋頂截水影響因子與分析

為了瞭解綠屋頂截水情況，有必要分析影響截水之因子，如 Hilten *et al.* (2008)曾分析降雨、含水率、逕流、蒸散、基質特性及結構等因子，而 Jerrett

et al. (2006)亦分析降雨及蒸散等因子，而 Van Woert *et al.* (2005)則分析不同厚度，而 Villarreal and Bengtsson (2005)及 Getter *et al.* (2007)均分析不同綠屋頂斜度，而 Wolf and Lundholm (2008) 則指出不同植物會影響介質之含水率，而李(99年)亦曾收集國內外文獻，整理出可能影響截水之因子，主要包括降雨量、降雨時間、介質含水率、蒸散、介質厚度、斜度、特性(如水力傳導係數、孔隙率、密度及粒徑分佈等)、植栽及排水板等，且針對一種植被、不同降雨及不同介質厚度進行截水實驗，唯其只針對部分因子作分析，且實驗數據不太足夠，故本研究延續其研究，加入不同介質、植栽及排水板等影響因子進行截水實驗，另外亦利用降雨模擬器模擬不同強度之降雨。廖等(99年)亦曾進行類似研究，針對不同降雨強度、坡度、介質厚度、植物及介質等進行逕流試驗，結果顯示綠屋頂能有效減少逕流量及洪峰發生時間，另亦有針對不同介質厚度、介質、排水板及植栽進行蒸發散試驗。

2.3 綠屋頂截水機制與公式

根據李(99年)曾針對綠屋頂截水機制整理一張圖，本研究稍作修改，加入介質入滲(Infiltration)及植物吸收(Absorption)，如圖 3.2 所示，截水機制主要有入滲、植物吸收、滲漏及排水板蓄水等，唯其所建立之公式並不太實用，故本研究試著建立其他更適合於國內綠屋頂之公式。而李(99年)亦收集了些許國外評估截水能力之模式及方法，包括如 VanWoert *et al.* (2005)、Mentens *et al.* (2006)及 Getter *et al.* (2007)利用 ANOVA 統計迴歸方法、Villarreal and Bengtsson (2005)利用水文歷線法、Getter *et al.* (2007)利用 CN 法及 Hilten *et al.* (2008)利用 HYDRUS-1D 模式推估等，唯因統計迴歸方法針對不同地區會產生不同公式，水文歷線法亦隨著不同場降雨會有不同歷線，而本研究主要為建立可供一般性評估及規劃用之公式，故均不太合適，CN 法主要用於暴雨逕流，機制不同且國內並沒有建立詳細之 CN

值資料庫，而 HYDRUS-1D 等模式雖然詳細，但過於複雜，必須針對不同綠屋頂建立不同模式及輸入資料，亦不符合本研究需求，故本研究另外探討其他公式，此部分詳細說明請參照 3.2 節。

Schwartz and Zhang (2003)提到之 Darcy 公式可用來表達綠屋頂之截水機制，唯 Darcy 公式所需要之參數並不容易建立；Terstriep and Stall (1974)採用 Horton 公式推估入滲(Infiltration)，Chow *et al.* (1988)指出 Horton 公式是從 Darcy 公式所推導出來的；Schwartz and Zhang (2003)亦提到可用以推估入滲之 Green-Ampt 公式，唯綠屋頂之截水機制與入滲不盡相同，不能直接應用在本研究，但 Horton 形式公式仍值得參考，本研究仍採用類似形式公式建立一個綠屋頂截水公式；She and Pang (2010) 則依達西公式、Green Ampt 模式、SWMM RUNOFF 模式及蒸散公式等組一個模式來模擬綠屋頂截水情況，由於綠屋頂機制與地表下土壤不太相同，故該研究建議一個 Field capacity 公式來改善模式，本研究亦將實驗數據套入此模式，驗證此模式之準確性，詳細說明請參見 3.2 節及 3.4.1 節。

2.4 綠屋頂實驗方式

為了驗證所發展之公式，有必要實驗採集數據，唯若採用實場測試反而不易進行多種因子之調整與實測，故李(99年)曾建立二個特別設計過之座台(分別為 1m*1m 及 90cm* 90cm)進行截水實驗，該座台如圖 2.1 所示。但採用李(99年)之座台研究不同介質厚度對於截水效益之影響時介質頗重，故本研究以珍珠板製作培養槽及設計 30cm* 30cm 小型實驗座台，以更有效率進行截水實驗。



圖 2.1 實驗座台

由於自然雨難以預測及次數有限，對於研究上為一大阻礙，故本研究將採用降雨模擬器進行截水實驗，降雨模擬器有頗多不同種類，價格亦差異頗大。Blanquies *et al.* (2003) 參考 Norton Ladder Type 降雨模擬器原理設計出範圍 1m*3.56m、雨珠 1mm-7mm 及雨量小於 50mm/hr 之降雨模擬器，符合加州當地常見雨量大小，此設計有四個噴嘴，為了不互相影響，各自距離 99cm，由此推想該研究噴嘴可能為四個並排，每個噴嘴範圍約 1m x 1m，由於本研究範圍不大，模擬雨量亦不大，且多噴嘴齊用可能會互相干擾而不見得均勻性高，故本研究未採用此方式。Kukul and Sur (2004) 所設計之降雨模擬器分為兩部份，供水單元及噴射氣流單元，利用噴射氣流將水帶至噴嘴產生降雨，類似消防水柱，唯安裝上對於本研究座台不太方便，故不適合用於本研究。廖等(99 年)亦針對綠屋頂截水研究設計一個室內用之降雨模擬器，利用定壓抽水馬達及調節水閥創造降雨強度 20 mm/hr -80mm/hr 之不同降雨，降雨面積範圍 1m x 1m，此雨量大小符合國內常見自然雨大小。本研究群亦曾參考廖等(99 年)研究建立一個降雨模擬器，唯雨量大小皆是較大雨量，且不均勻，故本研究將改善之，以符合台灣常見雨量大小利於進行研究。

第三章 研究流程與方法

為了有效評估國內綠屋頂降雨截水能力，本研究收集及參考國內外已建立之截水公式，並依據實驗結果及相關理論建立出適合國內環境之綠屋頂截水公式。本研究亦改善之前設計之綠屋頂實驗座台，並針對不同截水因子，分析綠屋頂之截水能力。本章首先針對本研究流程作概要介紹，接著一一說明截水公式之建立、影響綠屋頂之截水因子、實驗座台改善與設計、截水實驗及模式驗證等主要工作項目。

3.1 研究流程

本研究之研究流程如圖 3.1 所示，包括資料收集、截水公式之建立、截水影響因子、實驗座台改善與設計、截水實驗及公式驗證等工作項目，以下概要說明之，之後各節將針對各個項目詳細說明。

1. 資料收集：主要收集國內外綠屋頂研究及發展，包括綠屋頂的優缺點、截水公式、截水影響因子、截水實驗方法等相關文獻，並收集吳興國小及信義行政大樓等綠屋頂實際建置案例相關資料。
2. 綠屋頂截水公式收集與機制：國外雖已有一些研究探討綠屋頂的截水能力，唯這些研究是針對特定綠屋頂進行研究，且國外考量因子與國內亦不相同，因而尚沒有適當公式可供評估國內綠屋頂截水能力，本研究因而依相關理論機制發展出數個公式供評估綠屋頂截水能力。
3. 綠屋頂截水因子：依據國內外文獻指出，綠屋頂截水能力會受許多因子影響，例如降雨型式、介質特性、深度、植栽等，故本研究分析這些因子對綠屋頂截水能力的影響，並探討其理論，作為發展模式主要考量因子。

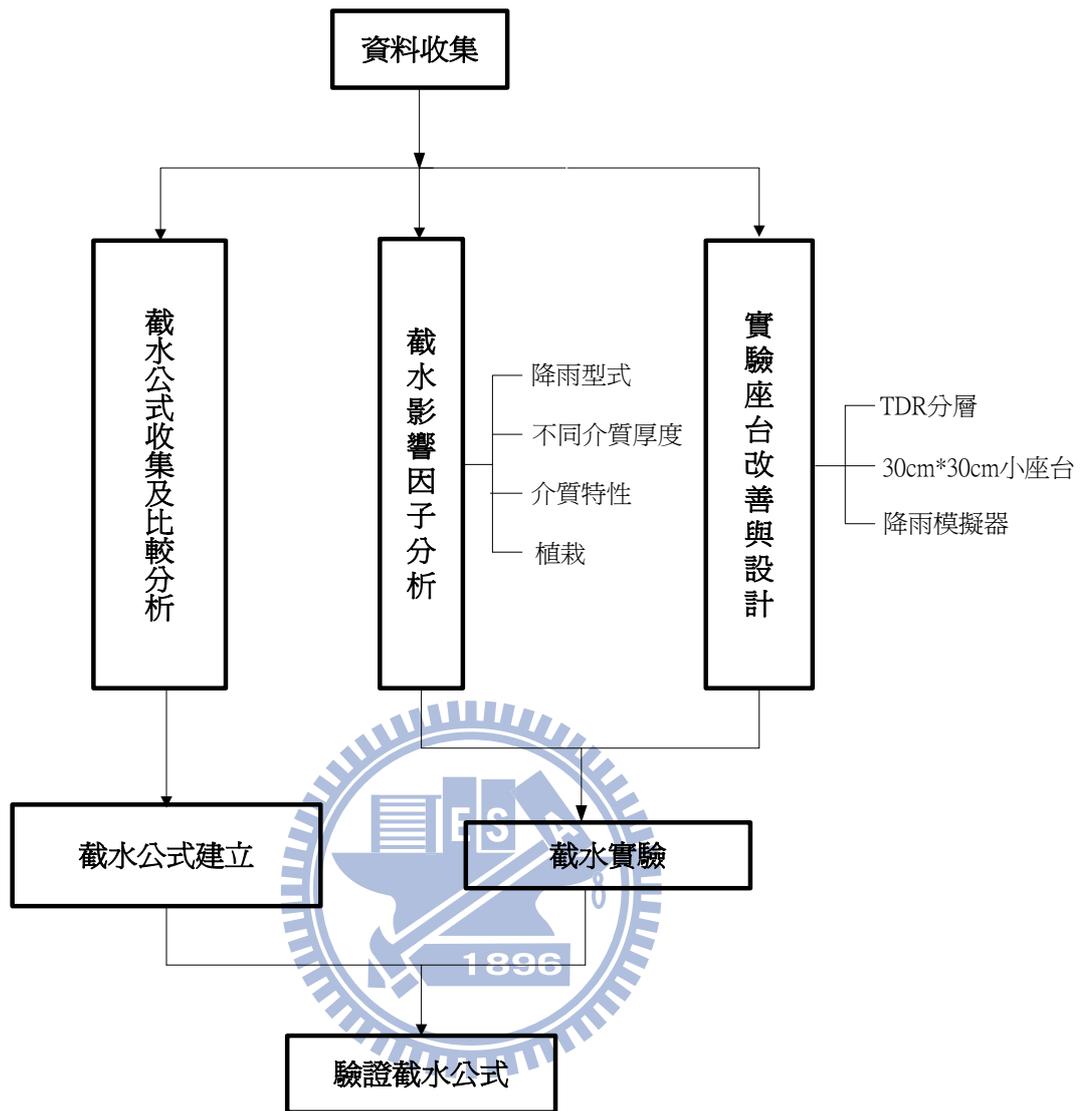


圖 3.1 研究流程圖

4. 綠屋頂截水公式之建立：本研究根據綠屋頂截水相關理論機制及截水因子，參考相關研究及公式，建立出數個公式，並經由實驗數據及實際數據來驗證模式的可行性。
5. 實驗座台改善與設計：雖然之前李(99 年)所建立的座台已比真實綠屋頂便於進行本研究，但由於經費有限，設備不足，之前座台無法分層監測實驗數據，本研究因而作介質分層含水率監測以更準確的模擬分析綠屋頂截水情況。由於舊座台不易針對不同因子變化進行所須之較大量實驗需求，故本研究設計小型實驗座台，以利更有效率完成不同

因子之截水試驗。此外，由於自然雨次數有限且無法預期，影響研究進度，故本研究亦利用降雨模擬器，以更有效率模擬不同降雨型式對綠屋頂截水效益之影響。

6. 針對不同截水因子進行截水實驗及模式驗證：本研究以實驗座台進行不同降雨型式、介質特性、深度、植栽等不同截水因子之截水實驗，並依據實測結果代入所建立之模式，驗證模式之準確性。

3.2 綠屋頂截水公式收集與機制

推動綠屋頂有必要建立一個適用之公式用以推估綠屋頂截水效益，以提昇相關決策及規劃之效率。然而目前國內外鮮少有適用綠屋頂截水模式之研究，李(99年)曾收集了 1.ANOVA 統計迴歸方法(VanWoert *et al.*, 2005; Mentens *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007); 2.水文歷線(Villarreal and Bengtsson, 2005); 3.Curve Number(CN)(Getter *et al.*, 2007); 及 4.HYDRUS-1D (Hilten *et al.*, 2008)等方式推估截水量。迴歸方法若能找到適當公式與因子仍然是一個可行的方式，李(99年)亦是採用半經驗公式之方式建立公式；而 CN 法較適用暴雨逕流，用於綠屋頂，其機制上並不太一樣，故未採用；HYDRUS-1D 是頗複雜之模式，用於綠屋頂並不實用。另外本研究亦以實驗數據驗證 She and Pang (2010)所建立之模式。李(99年)依理論及植栽與非植栽組建立數個公式推估綠屋頂截水能力，唯那些公式仍不太實用，所考量之因子亦不足，加上實驗設備不完善及數據不太多，故本研究進一步改善實驗設備及收集更多數據，發展出更實用之公式。

截水機制可依常用之 Darcy 公式(Schwartz and Zhang, 2003)來表達，唯由於要以該公式來推估，必須知道水頭壓力差，這部分由於綠屋頂一般只有 10cm 左右之基質層，難以用儀器測量，故本研究改用 SWCC 曲線推估(Fredlund *et al.*, 1997)，本研究針對各基質進行實驗建立其 SWCC 曲線，並利用 Darcy 公式分析綠屋頂截水情況。另有常用於推估入滲(Infiltration)

的 Green-Ampt(Schwartz and Zhang, 2003)及 Horton 公式(Terstriep and Stall, 1974)，唯綠屋頂的截水機制與入滲並不相同，故 Green-Ampt 公式亦不太適用，而 Horton 公式雖然亦不適用，但其公式型式值得參考，故本研究亦探討類似公式用以推估截水能力的可行性。

本研究建立之公式主要根據式 3.1 所列的截水公式及圖 3.1 的綠屋頂截水機制圖(李, 99 年)，式 3.1 之左式為一個時段內介質中含水率之變化。綠屋頂截水機制主要受降雨量(PP)及其歷線所影響，雨水進入介質後一部分被介質吸收增加其含水量(ΔSW)，或是被植物所吸收及截留(AP)，水亦會由下方滲漏出去(DP)；而如果基層含水率已達飽和或水來不及滲漏，則會產生表面逕流(RO)，此外，而由於風、溫差或太陽輻射等影響，水分也會蒸散回大氣中(ET)，而綠屋頂之排水板若有蓄水功能，亦會截掉一部分雨水(DB)。本研究依據此機制，並參考收集之模式、公式，探討其理論參數，發展出適用於台灣環境之截水公式。

$$\Delta SW = (PP - RO - DP - AP - ET - DB) \quad (3.1)$$

其中

ΔSW ：基層含水變化量(change in soil water content)；

PP：降雨(precipitation)；

RO：表面逕流(surface runoff)；

DP：底部滲漏(deep percolation)；

AP：植物吸收(the volume of water intercepted and absorbed by the plant)；

ET：蒸散(evapotranspiration)；及

DB：排水版截留(retention capability of a drainage board)。

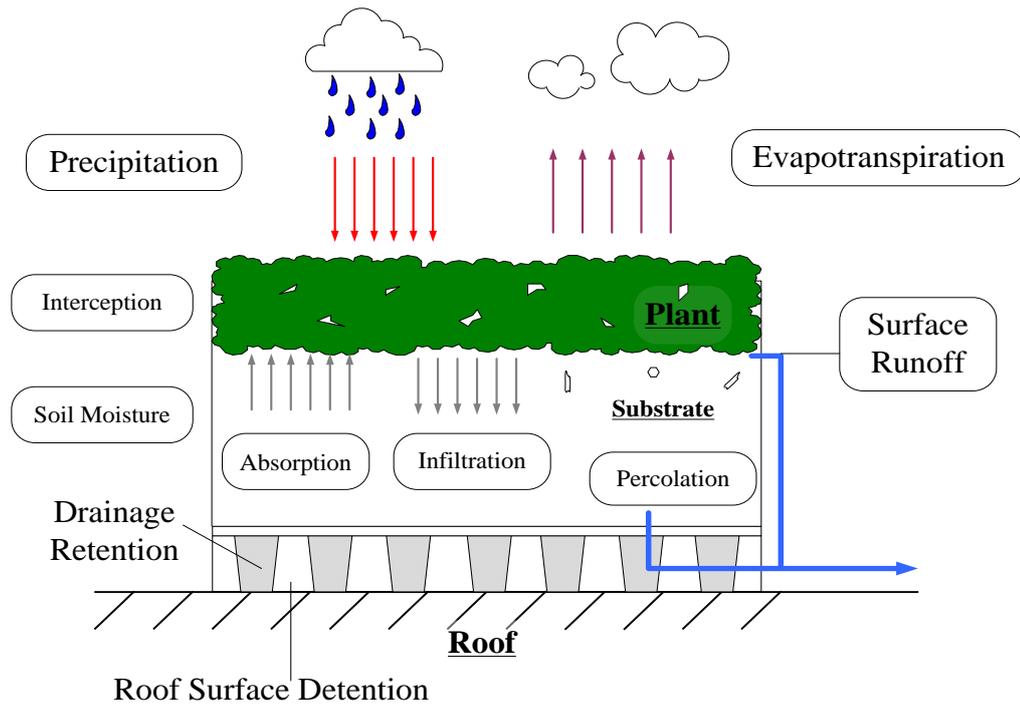


圖 3.2 綠屋頂截水機制

3.3 綠屋頂截水因子

綠屋頂截水能力會受許多因子影響，例如降雨型式、介質厚度、介質特性、屋頂坡度、植栽等，以下針對本研究分析之因子詳細說明之。

1. 降雨型式：根據 VanWoert *et al.*(2005)、Getter *et al.* (2007)研究指出降雨強度越大，綠屋頂所能截留的雨水越少，故本研究針對台灣自然雨進行研究，亦利用降雨模擬器模擬 20、36、48、54、64 及 70mm/hr 等不同降雨強度下綠屋頂之截水能力。
2. 介質厚度：根據 VanWoert *et al.*(2005)研究指出，介質厚度越厚，所截留之雨水越多，唯一般屋頂承重量(如表 3.1)約 $200\sim 500\text{kg/m}^2$ (建築技術規則，99 年)，而當介質厚度若太厚會過重，使屋頂無法負荷，故較常見之綠屋頂以薄層(extensive)為主，本研究主要針對薄層式綠屋頂，分 7cm、10cm 及 12cm 分析其截水能力，另外由於實場綠屋頂建置時會放入排水板，故為使分析情況能更接近實場情況，本研究亦會加入排水板進行截水實驗。

表 3.1 建築物構造之活載重(建築技術規則 建築構造編----第十七條)

樓地版用途類別	載重(公斤/平方公尺)
一、住宅、旅館客房、病房。	200
二、教室。	250
三、辦公室、商店、餐廳、圖書閱覽室、醫院手術室及固定座位之集會堂、電影院、戲院、歌廳與演藝場等。	300
四、博物館、健身房、保齡球館、太平間、市場及無固定座位之集會堂、電影院、戲院歌廳與演藝場等。	400
五、百貨商場、拍賣商場、舞廳、夜總會、運動場及看台、操練場、工作場、車庫、臨街看台、太平樓梯與公共走廊。	500
六、倉庫、書庫。	600
七、走廊、樓梯之活載重應與室載重相同，但供公眾使用人數眾多者如教室、集會堂之公共走廊、樓梯每平方公尺不得少於 400 公斤。	
八、屋頂露台之活載重得較室載重每平方公尺減少 50 公斤，但供公眾使用人數眾多，每平方公尺不得少於 300 公斤。	

3. 介質特性：介質特性受許多因子所影響，表 3.2 所列为綠屋頂介質可考量之特性因子，本研究主要利用李(99 年)所配之介質及由桃園縣大溪高中所提供之陶粒(三奕科技股份有限公司，100 年)混合培養土之介質進行截水實驗。

表 3.2 綠屋頂介質考量因子

類別	因子	考量原因
截水	滲透性* (水力傳導係數 K)	雨水在介質中停留之時間會受滲透性的影響。 ³
	保水力* (最大含水率)	1. 為提供植物生長所需之水份，介質需有一定之保水力。 ³ 2. 綠屋頂之截水能力與保水力相關。 ³
	孔隙率	1. 孔隙大將使水份不易保留於介質中。 ² 2. 孔隙小則不易排水，易造成植物根部腐爛。 ²
	粒徑*	1. 土壤顆粒越細，可能因降低孔隙率減少含水能力。 ³ 2. 土壤顆粒越細，表面積越大，故能吸收和保持大量的養分。 ³
植物生長	離子交換能力	1. 反映土壤化學活動程度，影響土壤的肥沃度。 ¹ 2. 常視為保肥力指標。 ¹
	通氣性*	由於植物根部需要氧氣供應呼吸作用，因此，介質的通氣性會影響旱作植物之生長情況。 ^{1,3}
	pH 值*	太酸太鹼易使土壤中養份無效化。 ^{1,3}
	有機物含量*	1. 改善介質物理特性：改良土壤團粒結構，使土壤鬆軟及穩定土壤，以促進通氣及排水。 ^{1,3} 2. 緩慢釋放植物所需營養元素，吸附及交換植物營養元素。 ^{1,3} 3. 增加介質緩衝能力，使土壤之酸鹼反應緩和。 ^{1,3} 4. 可能導致流出水質較差。 5. 在潮濕的地方，若有機物含量較高會產生兩個問題：(1) 因分解使體積減少；(2) 分解產生黏液阻礙排水及積水，導致衛生問題及增加負荷，故不宜超過 10-20%。 ⁴
	可溶性鹽類*	1. 可溶性鹽類可供植物攝取養分生長。 ³ 2. 過多的鹽類可能會造成植物的藥害。 ⁴
	營養鹽含量*	1. 供植物攝取養分生長。 ^{1,3} 2. 營養鹽不平衡或過量將造成營養元素間吸收的拮抗作用。 ^{1,3} 3. 可能導致流出水質較差。
其他	密度	密度過高將導致屋頂負荷過重，宜採用輕質介質(如 pumice, volcanic rock, scoria 等)。 ³
	本土性	宜找本土當地容易取得的介質。 ⁵
	凍結抵抗*	除了高山區(非綠屋頂推廣區域)，台灣無此問題。 ³

¹楊(93年)；²林(99年)；³FLL(2002)；⁴Friedrich(2005)；⁵Luckett(2009)；

*FLL 所列規範

4. 植栽：根據 Wolf and Lundholm(2008)研究指出，不同之植物會影響綠屋頂之截水能力，然而景天類植物對氣候適應力強，不需時常維護(錫瑠基金會，98 年)，故本研究主要以圓葉景天及亦不需時常維護之越橘葉蔓榕為植栽進行截水實驗，以比較其截水能力之差別。

3.4 綠屋頂截水公式之建立

本研究根據上兩節之綠屋頂截水機制及截水因子，建立出數個公式，並根據實驗數據驗證所建立及收集公式之適用性。以下將說明本研究建立及收集之公式。

3.4.1 截水公式之建立

公式 3.1 中，ET 獨立由影響蒸散因子推估，請參見 3.4.2 節，而 DB 排水板對截水之影響亦獨立分析，請參見 3.4.3 節。依據式 3.1，可知截水量是降雨形式、降雨期間、介質含水率、植物吸收、介質水力傳導係數、介質孔隙率、介質粒徑分佈等參數之函數，可以下式表示：

$$\Delta SW = f(PP, t, \theta_i, \theta_s, AP, PP_p, K_s, n, g_s) \quad (3.2)$$

其中

ΔSW ：t 時間內截水量，同 3.1 式之介質含水變化量

t：降雨期間(precipitation time period)；

θ_i ：介質初始含水率(initial water content)；

θ_s ：介質飽和含水率(saturated water content)；

PP_p ：降雨形式(precipitation pattern)；

K_s ：介質水力傳導係數(conductivity)；

n：介質孔隙率(porosity)；及

g_s ：介質粒徑分佈(diameter distribution of grains)。

本研究依據式 3.2，並參考所收集之相關截水公式文獻，依其理論基礎，嘗試且修正文獻之截水公式，發展出適用於國內綠屋頂之截水公式，以下將一一說明。

1. Φ - index法

經參考相關文獻後，本研究首先採用 Φ - index法(Chow *et al.*,1988)，此公式主要是用來推估降雨之逕流量，公式如下列。

$$RO = \sum_{m=1}^M (PP_m - \Phi \Delta t) \quad (3.3)$$

其中

PP_m : 降雨間隔 m 之降雨量(observed rainfall during time interval m) ;

M : 降雨間隔數(the number of intervals of rainfall that actually contribute to direct runoff) ;

Φ : 參數(the index to be determined) ; 及

Δt : 降雨之間隔時間(interval duration of rainfall) 。

此公式基本上假設土壤貯留(或入滲)雨水量與時間成正比且呈線性關係，是一個很簡單之公式，本研究以 $f_{out}=RO+DP$ 來取代 RO 。Villarreal and Bengtsson (2005)採用此公式計算出 Φ 值，唯由其結果顯示，不同降雨(3.7mm-18.00mm 間)及不同坡度(2°、5°、8°)均會有不同 Φ 值(0.066-0.286 間)，但並沒有提供如何依不同因子推估 Φ 值的方法或公式。本研究以率定組數據代入求出平均 Φ 值，再以驗證組及自然雨進行驗證。

2. 含水差異係數法

唯由於同 Villarreal and Bengtsson (2005)之研究， Φ 值差異很大，並不是一個定值，不太實用，故本研究修正此公式，如下式。

$$f_{\text{out}} = \sum_{m=1}^M ([EP_m - \alpha(\theta_s - \theta_{i,m})\Delta t]) \quad (3.4)$$

其中

$$f_{\text{out}} = RO + DP ;$$

$$EP_m = PP_m - ET_m - DB_m ;$$

α : 係數 ;

θ_s : 飽和含水率，以附錄 A.1 方法決定之；及

$\theta_{i,m}$: 每一降雨間隔之初始含水率，本研究以率定過之 TDR 監測，
每分鐘記錄一筆監測值。

由於介質厚度會顯著影響綠屋頂截水能力，故本研究將式 3.4 以下列三個不同方式加入厚度因子 D 推估截水能力。

(1)

$$f_{\text{out}} = \sum_{m=1}^M ([EP_m - \alpha D(\theta_s - \theta_{i,m})\Delta t]) \quad (3.5)$$

(2)

$$f_{\text{out}} = \sum_{m=1}^M ([EP_m - \alpha(\theta_s - \theta_{i,m})\Delta t]) - \beta D \quad (3.6)$$

(3)

$$f_{\text{out}} = \frac{\sum_{m=1}^M ([EP_m - \alpha(\theta_s - \theta_{i,m})\Delta t])}{\beta D} \quad (3.7)$$

3. 含水率推估法

本研究亦參考 Horton(Terstriep and Stall, 1974)所建議用以推估入滲之公式，該公式如下列。

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3.8)$$

其中

f_0 : 初始入滲率(initial infiltration rate) ;

f_c : 最終入滲率(final constant infiltration rate) ;

k : a shape factor, selected as $k = 2$; 及

t : 降雨時間(time from start of rainfall) 。

綠屋頂之截水機制雖與入滲類似，但不盡相同，該公式不能直接適用，但類似之公式可能適用於本研究，本研究因而依據初始含水率與飽和含水率之差建立下列公式。

$$\theta_f = \theta_s - (\theta_s - \theta_i)e^{-\gamma \Delta t} \quad (3.9)$$

其中

θ_f : 最終含水率 ;

θ_s : 飽和含水率 ;

θ_i : 初始含水率 ;

γ : 係數 ;

且

$\Delta SW = (\theta_f - \theta_i)D$;

$f_{out} = PP - ET - DB - \Delta SW$; 及

D : 介質厚度 。

本研究亦以率定組實驗數據決定式中 γ 值，再以驗證組實驗數據及自然雨數據驗證此公式之適用性。

4. SWCC-Darcy 法

Darcy 公式(Schwartz and Zhang, 2003)如式 3.10 所示，可用以表達綠屋頂之截水機制，唯須知道介質層之水頭壓力梯度($\frac{dh}{dl}$)，由於薄層式綠屋頂之介質層只有 10cm 左右，儀器難以量測，故本研究以 SWCC 曲線推估

(Fredlund *et al.*, 1997)，實際實驗 SWCC 曲線情況如圖 3.4 所示，SWCC 曲線實驗原理為利用不同水頭高度差產生不同壓力，來瞭解介質 suction head 與壓力間的關係(請參見附錄 A.2)。

取得 SWCC 曲線後，再依分層監測介質含水率推估出介質之水頭壓力差，最後再將驗證組及自然雨數據帶入式 3.10，驗證 SWCC-Darcy 法之準確性。

$$q = -\frac{\kappa\rho_w g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (3.10)$$

其中

q ：面積流率(the rate of flow per unit area)；

κ ：滲透係數(the intrinsic permeability)；

ρ_w ：水之密度(the density of water)；

g ：重力加速度(the acceleration due to gravity)；

μ ：水之動黏滯係數(the dynamic viscosity of water)；

$\frac{dh}{dl}$ ：水頭壓力梯度(the unit change in hydraulic head per unit length of flow)；及

K ：水力傳導係數(hydraulic conductivity = $\frac{\kappa\rho_w g}{\mu}$)。



圖 3.3 SWCC 曲線實驗

5. S&P 法

She and Pang (2010) 主要利用 Green Ampt 模式及 Darcy 公式等建立出綠屋頂截水模式，如下各式。本研究利用率定組實驗數據迴歸出模式中所需之係數，並將驗證組及自然雨數據帶入驗證此模式之準確性，而其中 suction head 以 SWCC 曲線推估。

$$F(t) - (\Psi - h_0)\Delta\theta \{ \ln[F(t) + (\Psi - h_0)\Delta\theta] - \ln[(\Psi - h_0)\Delta\theta] \} = Kt \quad (3.11)$$

$$f(t) = K \left[\frac{(\Psi - h_0)\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (3.12)$$

$$F(t + \Delta t) = F(t) - \beta q(t + \Delta t)\Delta t \quad (3.13)$$

$$q(t) = c \frac{F(t - \Delta t)^a}{\Delta t} \quad (3.14)$$

$$q(t + \Delta t) = K \frac{D + h_0(t)}{D} \quad (3.15)$$

$$q(t + \Delta t) = q(t)e^{-\lambda} \quad (3.16)$$

其中

$F(t)$: 雨水滲漏入介質之累積深度(the cumulative depth of rain water infiltrated into the medium at time t) ;

Ψ : suction head ;

h_0 : 積水深度(depth of ponding) ;

$\Delta\theta$: 介質中孔隙率和初始含水率之差值(difference of the porosity and initial moisture content of the medium) ;

K : 飽和水力傳導係數(saturated conductivity) ;

$f(t)$: 介質入滲率(the infiltration rate of the medium at time t) ;

q : 水流出介質之速率(flow rate that drained through the medium) ;

D : 介質厚度 ; 及

β 、 a 、 c 及 λ : 係數。

6. 迴歸統計法

Mentens *et al.*(2006)收集多場綠屋頂截水監測資料，迴歸出綠屋頂截水公式，如下式。由於此公式之降雨量為年總雨量，而本研究為推估一場雨之出流水值，故本研究以 $f_{out}=RO+DP$ 來取代 RO 及利用率定組實驗數據重新迴歸此公式之係數，並帶入驗證組實驗數據及自然雨數據驗證此公式之準確性。

$$RO = 693 - 1.15 * P + 0.001 * P^2 - 0.8 * S \quad (3.17)$$

其中

RO : 逕流量(runoff) ;

P : 降雨量(rainfall) ; 及

S : 介質層厚度(the depth of the substrate layer) 。

7. 經驗式

本研究亦利用李(99年)之經驗式,如式 3.18,而此公式為推估截水量,故本研究帶入率定組數據迴歸出式中之係數,並以驗證組及自然雨數據求出截水量後,再以降雨量減去截水量進而求得出流水量。另外本研究將此公式改為直接推估出流水量,如式 3.19,以率定組重新迴歸式中之係數,並以驗證組及自然雨數據與實測值比對,驗證公式之準確性。

$$RR = a * K_s * T + b * (\theta_s - \theta_i) + c * \Delta L \quad (3.18)$$

$$f_{out} = a * K_s * T + b * (\theta_s - \theta_i) + c * \Delta L \quad (3.19)$$

其中

RR：截水量(Rainfall retention)；

K_s ：飽和水力傳導係數；

T：降雨時間；

θ_s ：飽和含水率；

θ_i ：初始含水率；及

a、b 及 c：係數。



3.4.2 影響蒸散因子

蒸散包涵由介質表面及植物氣孔之蒸發,其影響因子有太陽輻射、大氣壓力、環境濕度、環境溫度、風速、介質含水率及植物等因素。依據式 3.1 可將各項實測及推估值帶入即可推估蒸散量,唯必須等監測結束才能得知蒸散量,無法隨時推估,故本研究收集參考已發展之公式,選擇較適當之公式推估蒸散量,以下介紹目前所收集之公式。

1. Energy Balance (EB)法

Chow et al. (1988)列舉了一些估算蒸散的方法，本研究選擇其中二個方法，第一個方法的公式如下式所示。

$$E_r = 0.0353 \times R_n \quad (3.20)$$

其中

E_r ：蒸散率(evaporation rate)；及

R_n ：淨輻射量(net radiation)。

2. Aerodynamic (AD) 法

$$E_a = B(e_{as} - e_a) \quad (3.21)$$

其中

$$B = 0.102u_2 / [\ln(\frac{z_2}{z_0})]^2 ;$$

u_2 ：在高度 z_2 所量測的風速；

z_0 ：一般表面之近似粗糙度值，見表 3.3；

$$e_{as} = 611 \exp\left(\frac{17.27T}{(237.3+T)}\right) ;$$

T ：大氣溫度；

$e_a = R_h * e_{as}$ ；及

R_h ：相對濕度。

表 3.3 一般表面之近似粗糙度值

Surface	Roughness height z_0 (cm)
Ice, mud flats	0.001
Water	0.01 - 0.06
Grass (up to 10 cm high)	0.1 - 2.0
Grass (10 - 50 cm high)	2 - 5
Vegetation (1 - 2 m high)	20
Trees (10 - 15 m high)	40 - 70

3. Energy balance and Aerodynamic (EB-AD)法

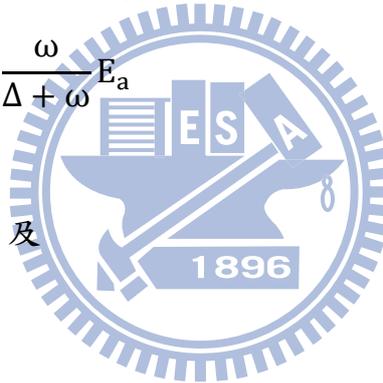
此法合併前二個方法，公式如下式所示。

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \omega} E_r + \frac{\omega}{\Delta + \omega} E_a \quad (3.22)$$

其中

$$\Delta = \frac{4098e_{as}}{(237.3+T)^2}; \text{ 及}$$

$$\omega = 66.8。$$



4. Priest-Taylor (PT) 法

依 Chow et al. (1988)之說明， Priestand Taylor 發現上式的第二項約為第一項之 30%，故將其修改為下式。

$$E = \tau \frac{\Delta}{\Delta + \omega} E_r \quad (3.23)$$

其中

$$\tau = 1.3。$$

3.4.3 排水板對截水之影響

由於時間有限，本研究只嘗試介質厚度 10cm 搭配排水板進行實驗。本研究所使用排水板如圖 3.4 所示，其內之蓄水杯內部高度約為 3.4cm、容積約為 48.36 cm³，集水面積約為 14.22cm²，一塊排水板共有 25 個蓄水

杯，故總體積約為 $1,209\text{cm}^3$ ，截水面積約為 355.5cm^2 ，而排水板總面積約為 870.25cm^2 ，故蓄水杯截水面積約佔排水板的 40.86% ，而排水板扣除小排水孔後之總集水面積約為 865.45cm^2 ，故總集水面積佔整個排水板面積的 99.45% ，故推估加入排水板實驗之出流量在蓄水杯未滿前介於無排水板出流水乘上 $(1-40.86\%)$ 及 $(1-99.45\%)$ 之間，而當雨量較小時，排水板出流水比例會接近 $(1-99.45\%)$ ，隨著雨變大，會愈來愈接近 $(1-40.86\%)$ ，而當蓄水杯滿時會超過 $(1-40.86\%)$ ，故本研究假設有排水板之出流水依照此原則，依據雨量及出流水比例建立一個線性方程式，如下式，故所算出之排水板出流水比例乘上無排水板之出流水，即可估算加入排水板後綠屋頂之出流量。

$$DP_{DB} \% = 0.0117 * PP - 0.2289 \quad (3.24)$$

其中

DP_{DB} ：排水板出流水比例；及

PP：降雨量。



圖 3.4 排水板

3.5 實驗座台改善與設計

在屋頂建立綠屋頂實場進行實驗，雖是一個可行方式，但不易針對不同截水因子作有效率之變動，故本研究延續採用李(99年)所建置之兩實驗

座台進行截水能力研究，然而由於介質頗重，不易經常更換，故本研究設計一 30cm*30cm 小型實驗座台，以更有效率完成不同因子之截水試驗。以下針對李(99 年)所建置實驗座台之缺點及改善、小型實驗座台建置及與既有座台截水情況比對及降雨模擬器一一說明之。

1. 既有實驗座台缺點及改善

由於經費有限，設備不足，之前座台沒有足夠土壤含水率監測儀器 (TDR)，分層監測介質中不同深度與空間分佈之含水情況，導致監測結果之代表性可能不佳，目前已取得更多儀器，進行介質分層及空間分佈含水率監測實驗，以更準確掌握綠屋頂截水情況。李(99 年)亦設計了以珍珠板組成之 90cm *90cm 培養箱，如圖 3.5 所示，目的是為了於實驗期間同時培養其他介質厚度之植栽，於一種介質厚度實驗結束後方便直接更換下一種介質厚度進行實驗，但由於實驗座台有高度，介質亦重，故更換介質時相當費力，亦不易在有限之研究期間取得足夠量之數據，故本研究設計 30cm x 30cm 小型實驗座台及將 90cm*90cm 培養箱修改成 9 格 30cm*30cm 之培養箱，如圖 3.6 所示，以利更有效率進行截水實驗。



圖 3.5 90cm *90cm 培養箱



圖 3.6 30cm *30cm 培養箱

2. 小型實驗座台建置及與既有座台比對

本研究設計一個 30cm*30cm 之小型實驗座台，此大小主要是配合常用之排水板大小設計，如圖 3.4 所示。由於土壤含水率監測探針(TDR EC-5)，周圍半徑 3cm 內如有金屬，會干擾監測值之準確性，故此小型實驗座台主要將改為以壓克力材質製作。設計圖及實際樣式如圖 3.7 及圖 3.8 所示，其下以角鋼架設支撐，利用降雨模擬器模擬降雨，並以水桶接表面逕流及滲漏水，水桶置於電子秤上，同步監測水量隨時間之變化，而可移動板將依據不同介質深度實驗更換。

由於 TDR 探針在既有座台使用時需要挖土才能放入，不甚方便，故新座台探針將以橫插的方式插入土中測其含水率，故在實驗槽旁打孔以利探針進入，為了確保不會由孔的位置漏水出來，將利用橡皮塞穿孔使 TDR 之線穿過並堵住座台旁之孔，如圖 3.9 所示。然而此實驗槽較小，其截水情況不知是否會因縮小而改變，故將與既有座台在天然雨情況下，介質含水率及出流水變化情況做比較，其結果參照 4.3 節。

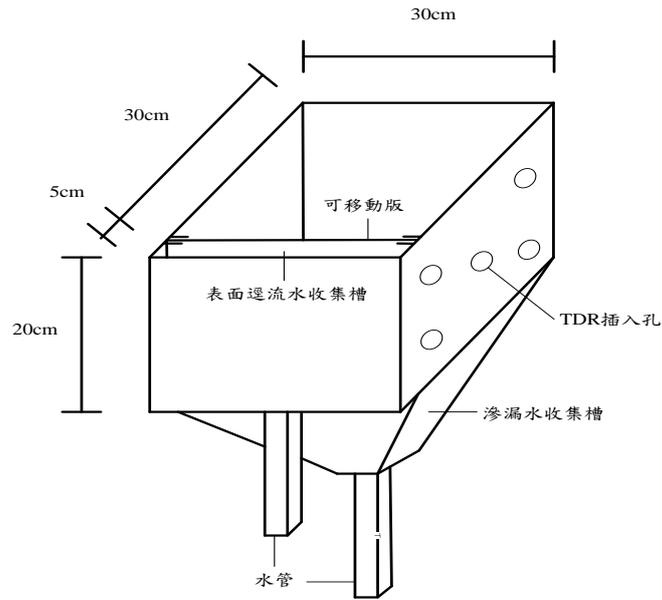


圖 3.7 小型實驗做台設計圖

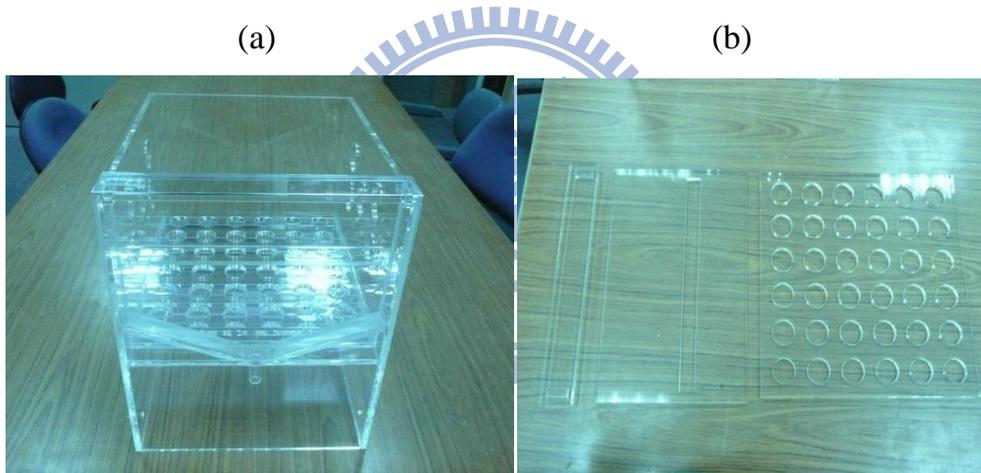


圖 3.8 小型實驗座台(a)小實驗槽體(b)蓋子、可移動板及支撐板



圖 3.9 側插設計

3. 降雨模擬器

本研究雖會監測自然雨，分析綠屋頂截水情形，唯自然雨於研究時間內數量有限，且一個事件期間時間不一、雨量大小不穩定，故本實驗利用降雨模擬器搭配小型實驗座台進行實驗，以能有效率及準確地完成截水實驗及公式驗證。圖 3.10 為降雨模擬器，主要原理是由高壓抽水馬達將水抽至降雨模擬器頂端特殊設計之噴頭(圖 3.11)，藉由不同噴頭之設計及孔徑差異產生不同強度之降雨，亦可藉由調整抽水壓力及噴頭與實驗座台間的高度差來控制降雨強度，而四側的塑膠布主要是將風影響降雨均勻度減至最低。然而先前初步測試降雨模擬器，發現均勻性不佳，而經由跟換馬達後，雖然無法達到 1m*1m 大座台範圍皆均勻，但其所均勻涵蓋範圍符合 30cm*30cm 小座台之範圍，而其均勻性分析結果參照 4.3 節。



圖 3.10 降雨模擬器



圖 3.11 噴頭(由左至右為 015、010 及 J050)

3.6 針對不同截水因子進行截水實驗及公式驗證

3.6.1 截水實驗

綠屋頂截水能力受許多因子所影響，本研究以降雨型式、介質厚度、介質特性及植栽等四個因子進行截水實驗。各場截水實驗皆為 100 分鐘，前 60 分鐘以固定強度進行降雨，而後 40 分鐘觀察降雨結束後之變化，詳細實驗內容請參見附錄 A.3。以下分別說明四個因子之實驗內容。

1. 降雨型式：本研究除了分析天然降雨情況下綠屋頂的截水能力外，亦將利用降雨模擬器模擬 20、36、48、54、64 及 70mm/hr 等不同降雨強度，以建立更多針對各種不同降雨強度與分佈數據驗證所建立之截水公式。
2. 介質厚度：李(99 年)分析 5cm 及 10cm 二種厚度，但可用之數據並不多，故本研究分析 7、10 及 12cm 等三種不同厚度及加入排水板在不同降雨強度下載水情況，進而比較其截水能力及用以建立及驗證所發展之公式。
3. 介質特性：本研究以李(99 年)所配之介質（泥炭土:椰纖:氯化石:粗砂=3:3:2:2）為介質 1 及第二種介質（陶粒:培養土=7:3）為介質 2 進行截水試驗，分析不同介質對綠屋頂截水能力之影響。所測量出之數據亦將帶入所建立及收集之公式，並驗證之。
4. 植栽：本研究除了比較有無植栽綠屋頂截水能力之差別外，亦使用圓葉景天及越橘葉蔓榕兩種植物，用以比較不同植栽之截水能力。

3.6.2 公式驗證

將上節截水實驗之結果分為率定組及驗證組，各公式所需推估之係數以率定組實驗數據迴歸而得，再以驗證組及自然雨數據探討各公式之適用性。

第四章 結果與討論

本章主要針對儀器校正、第三章所述之截水實驗及公式建立之驗證結果，進行分析及討論。首先為含水率監測設備校正，接著綠屋頂截水因子之截水實驗，最後根據實驗結果進行所建立公式之驗證，以下一一介紹之。

4.1 介質含水率監測設備之校正

為了使每支 TDR 所測出數據一致，針對每支 TDR 進行校正實驗(請參見附錄 A.4)，繪出電壓值與含水率之關係圖，範例如圖 4.1 所示(其餘請參見附錄 A.4)，將各 TDR 所測得之電壓值帶入校正後所得之線性方程式進而得到含水率值，使每支 TDR 所測出電壓質轉換成介質含水率。由於 Data Logger 插不同數量的 TDR 時會輸出不同電壓，故測試時必須以監測時所插上的數量情形校正，以免所得結果不適用。

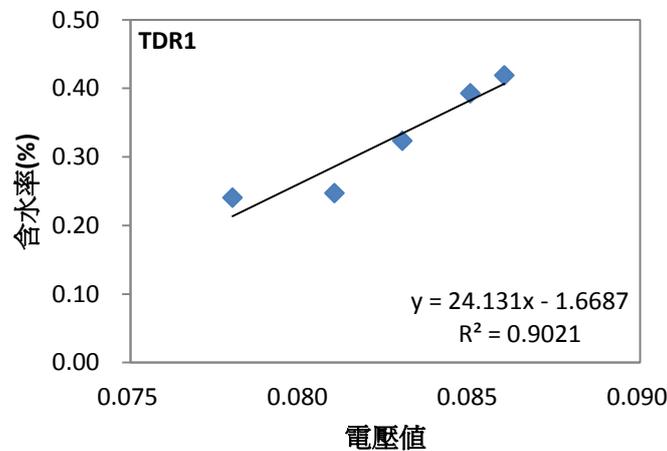


圖 4.1 TDR 電壓值與含水率之關係圖

4.2 綠屋頂截水因子分析

本節將根據前一章之四種不同截水因子及加入排水板進行截水實驗，並根據所得之結果，進行比較分析，說明不同因子對綠屋頂截水之影響。以下主要討論較具代表性的結果，其他結果請參見附錄 B。

1. 降雨強度

圖 4.2 不同降雨強度(54mm/hr 及 36mm/hr)及其他因子(介質 1、厚度 10cm、圓葉景天)皆不變下載水實驗的結果，其中 A、B 及 C 三點位置如圖 4.3 所示，1 代表上層，2 則代表下層。由 A 點之結果來看，降雨強度為 54mm/hr 之上層含水率從降雨開始後第 3 分鐘至第 11 分鐘內，含水率由 29.25% 升至 40.65%；下層含水率從第 3 分鐘至第 14 分鐘內，由 34.17% 升至 47.15%，相較於 36mm/hr 上層含水率從第 5 分鐘至第 22 分鐘內，由 27.82% 升至 42.08%；下層含水率從第 5 分鐘至第 33 分鐘內，由 29.45% 升至 41.84% 上升時間來的早、情況也越陡，B 及 C 點情況也相似。而 54mm/hr 產生之表面逕流及底部滲漏分別為 4.25mm 及 26.66mm，相較於 36mm/hr 之表面逕流及底部滲漏，2.69mm 及 11.88mm 來的多，而由圖 4.4 亦可發現當降雨強度不同而其他因子不變下，隨著雨勢變大，出流水亦隨之變大，其中又以 54mm 以上，出流水變大趨勢更為明顯，其餘實驗結果情況亦相似(請參見附錄 B)。圖 4.5 為降雨強度不同而其他因子不變下之截水量，可以發現當雨量在 48mm 以下時，隨著降雨量之增加，截水量隨之增加，但當降雨量達 48mm 以上，其截水量不再隨降雨量增加而增加，而是維持在約 25mm-30mm 之間，其餘實驗結果亦類似(請參見附錄 B)。表 4.1 為不同雨量而其餘因子(厚度 7cm、介質 1、圓葉景天)相同下載水實驗之雨量及截水增加比例，可以看出雨量由 20mm 增至 36mm 增加 1.80 倍，而截水量由 6.38mm 增至 18.99mm 增加 2.98 倍，有倍增趨勢；雨量由 36mm 增至 48mm 增加 1.33 倍，而截水量由 18.99mm 增至 26.81mm 增加 1.41 倍，約為等比例增加；雨量 48mm 以上，截水增幅比在 0.78 至 0.92 間，截水量逐漸減少，其餘結果亦有類似趨勢(請參見附錄 B)。故雨量在 36mm 以下，截水量隨雨量增幅比例較大，雨量 36-48mm 間為等比例增加，而雨量大於 48mm，截水效益會隨著雨量增大而減低，主要原因是當基質含水未飽和時，截水量會較大，而雨量大時，基質含水易趨於飽和，故截水量漸小。

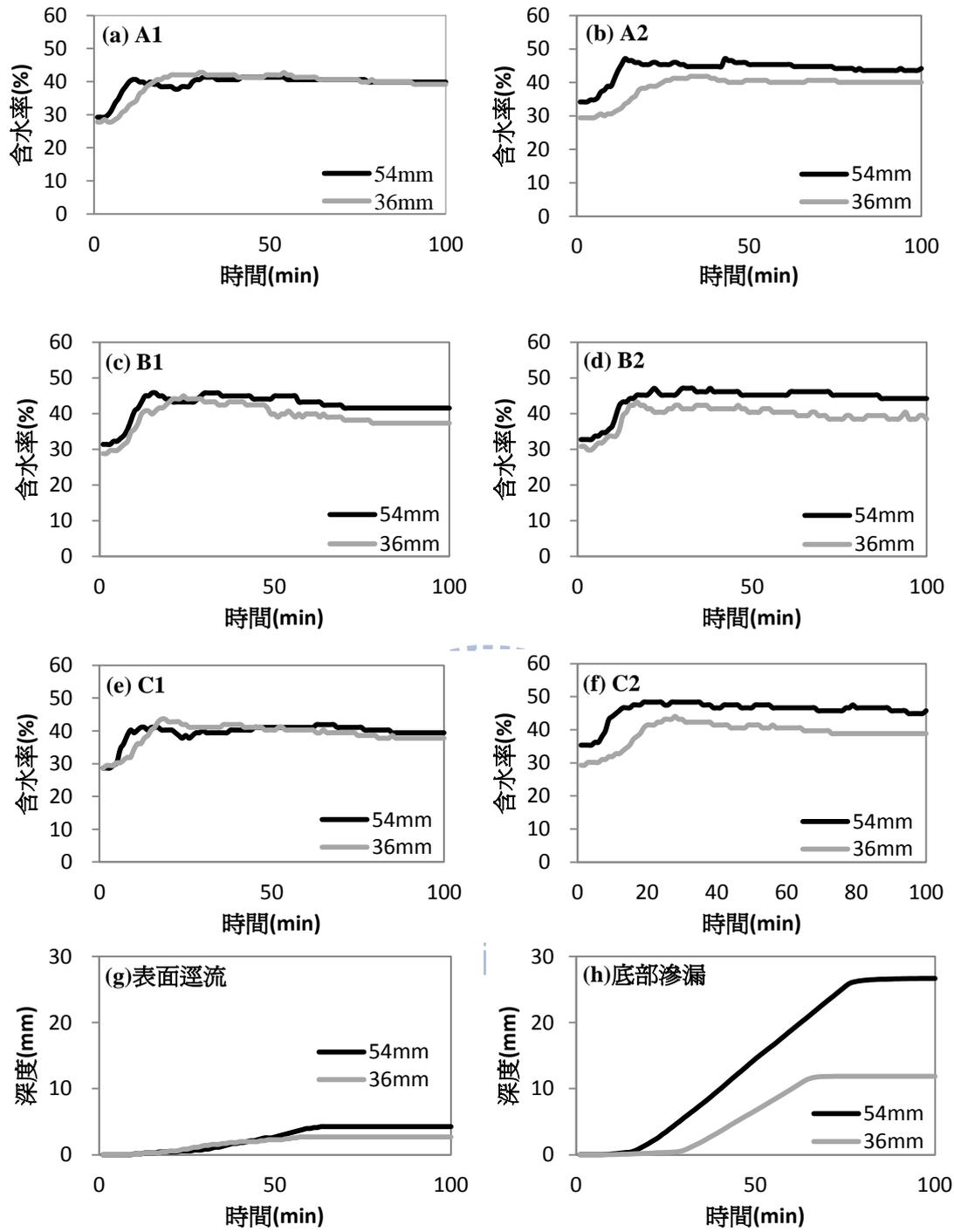


圖 4.2 不同降雨強度下載水實驗結果(a)A 點上層含水率(b)A 點下層含水率
(c)B 點上層含水率(d)B 點下層含水率(e)C 點上層含水率(f)C 點下層
含水率(g)表面逕流深度(h)底部滲漏深度



圖 4.3 A、B 及 C 三點位置圖

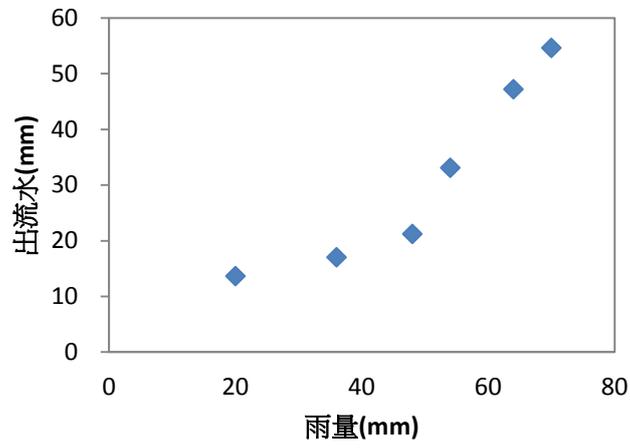


圖 4.4 不同降雨而其餘因子(介質 1、7cm、圓葉景天)不變下之出流水圖

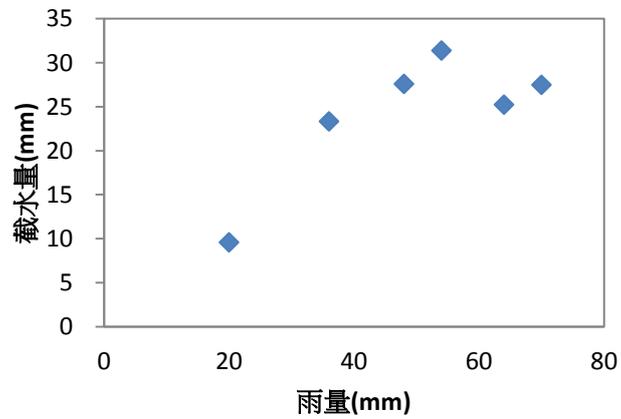


圖 4.5 不同降雨而其餘因子(介質 1、12cm、越橘葉蔓榕)不變下之截水圖

表 4.1 不同雨量下載水實驗之雨量及截水增加比例

厚度/介質/植物	降雨量 (mm)	雨量增加比例	截水量 (mm)	截水增加比例
7cm/1/景天	20	-	6.38	-
	36	1.80	18.99	2.98
	48	1.33	26.81	1.41
	54	1.13	20.92	0.78
	64	1.19	16.81	0.80
	70	1.09	15.39	0.92

2. 介質厚度

圖 4.6 為不同介質厚度(12cm 及 7cm)而其餘因子(雨量 70mm、介質 1、圓葉景天)不變下載水實驗結果，A 點結果顯示 12cm 介質之下層含水率從開始下雨後第 3 分鐘至第 24 分鐘，由 31.22% 升至 47.74%，21 分鐘內含水率上升 16.52%；而 7cm 之下層含水率則從第 2 分鐘至第 14 分鐘，由 28.85 升至 43.61，12 分鐘內含水率上升 14.76%，12cm 介質下層含水率上升趨勢較 7cm 介質平緩，而 B、C 兩點之情況亦相似，故介質厚度越厚，當水開始入滲至下層時，含水率變化趨勢相較平緩。由出流水結果顯示，12cm 介質表面逕流為 6.65mm 較 7cm 介質的 8.63mm 少，而 12cm 介質之底部滲漏為 37.16 亦較 7cm 介質的 45.98mm 少，其餘實驗結果(請參見附錄 B)大致上顯示在不同厚度而其餘因子皆不變下，介質越厚出流水越少，與預期情況相符，唯其中幾筆數據未符合此規律，推估原因為介質初始含水率高低、植物覆蓋率及植物高度等因子亦會影響出流水之多寡。

表 4.2 為不同介質厚度而其餘因子(雨量 54mm、介質 1、圓葉景天)皆相同下之截水/厚度增幅比，增幅比為截水量增加比例除以介質增加比例，故當增幅比大於 1 時表示當介質厚度增加時，截水量增加比例較大；當增幅比趨近於 1 時表示截水量隨介質厚度增加比例增加；而當增幅比小於 1 時表示截水量增加的比例較介質厚度增加的比例小，介質厚度由 7cm 增至

10cm 增加 1.43 倍，而截水量由 20.92mm 增至 23.09mm 增加 1.1 倍，增幅比為 0.77；而介質厚度由 10cm 增至 12cm 增加 1.2 倍，截水量則由 23.09mm 增至 29.56mm 增加 1.28 倍，增幅比為 1.07。當介質厚度 7cm 增至 10cm 及 10cm 增至 12cm 之增幅比分別小於 0.7 及 0.83 時，表示當介質厚度增加，截水量並未成比例增加。而由其餘實驗結果(請參見附錄 B)可發現當降雨量在 36mm 以下時，介質厚度 7cm 增至 10cm 及 10cm 增至 12cm 之增幅比大致分別在 0.7-1 及 0.83-1 間；雨量為 48mm 時，介質厚度由 7cm 增至 10cm 之增幅比小於 0.7；雨量為 54mm 及 64mm 時，介質厚度由 10cm 增為 12cm 之增幅比接近及小於 0.83，而當雨量為 70mm 時反而接近及大於 1，故截水量並未隨介質厚度等比例增加，推估原因可能為截水機制並非各層介質均相同或是充填時不同層介質之壓密程度不同等所導致。

表 4.2 不同介質厚度下載水實驗之截水量/厚度增幅比

雨量/介質/植物	介質厚度 (cm)	厚度增加比例	截水量 (mm)	截水增加比例	增幅比
54mm/1/景天	7	-	20.92	-	-
	10	1.43	23.09	1.1	0.77
	12	1.2	29.56	1.28	1.07

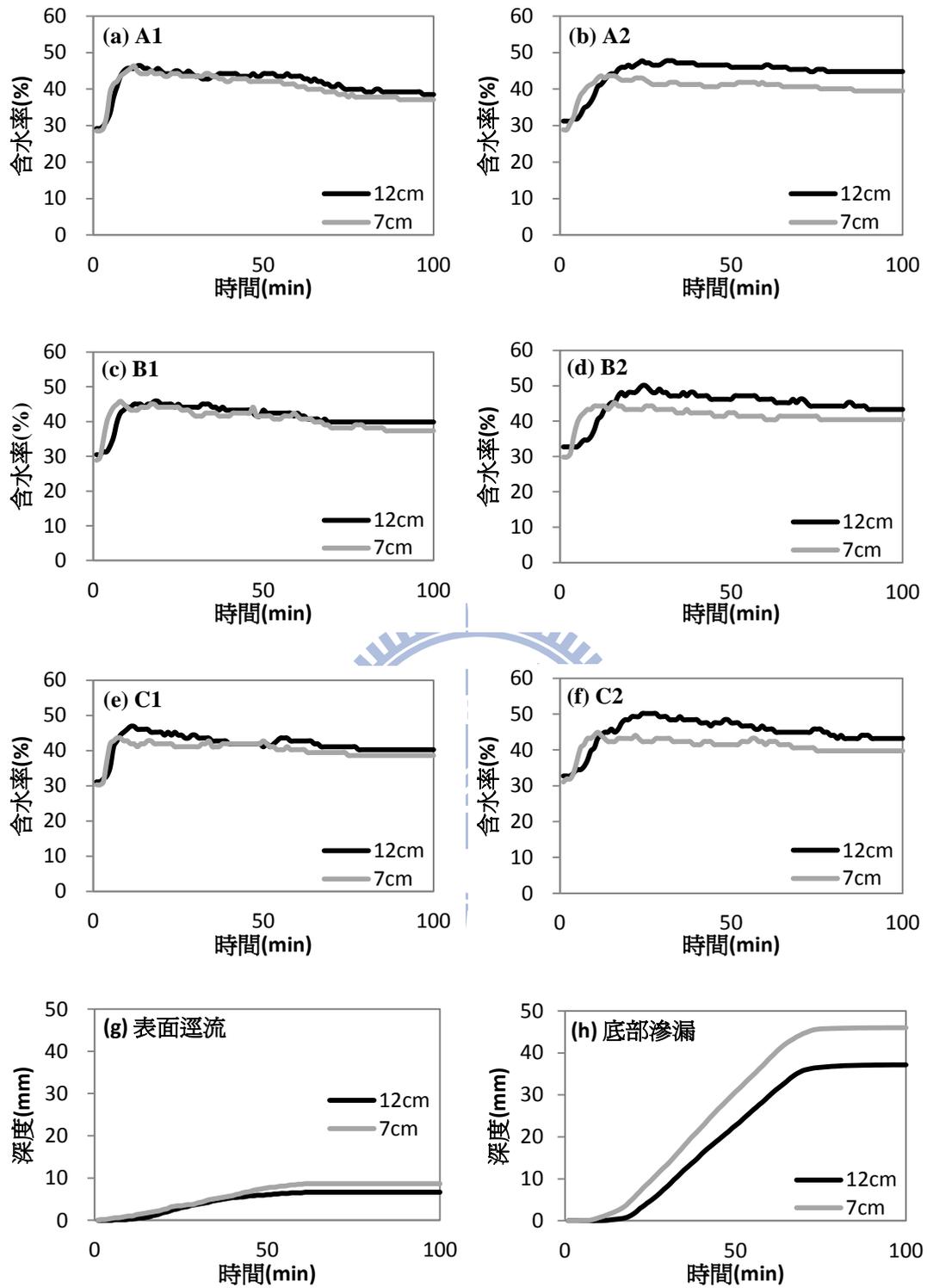


圖 4.6 不同介質厚度下截水實驗結果(a)A 點上層含水率(b)A 點下層含水率
(c)B 點上層含水率(d)B 點下層含水率(e)C 點上層含水率(f)C 點下層
含水率(g)表面逕流深度(h)底部滲漏深度

3. 介質特性

圖 4.7 為不同介質而其餘因子(雨量 70mm、介質厚度 10cm、圓葉景天)不變下之截水實驗結果。由 A 點結果可以發現介質 2 上層含水率從開始下雨後第 3 分鐘至第 6 分鐘，由 29.25% 升至 39.23%，3 分鐘內含水率上升 9.98%；介質 1 則從第 3 分鐘至第 19 分鐘，含水率由 27.82% 上升至 41.36%，16 分鐘內含水率上升 13.54%。介質 2 A 點下層含水率從第 4 分鐘至第 10 分鐘，由 28.26% 升至 38.89%，6 分鐘內上升 10.63%；介質 1 則從第 8 分鐘至第 20 分鐘，含水率由 27.08% 升至 40.07%，12 分鐘內上升 12.99%，介質 1 之上層含水率上升趨勢較介質 2 平緩，介質 1 之下層含水率上升趨勢亦較介質 2 平緩且發生時間較晚，B 及 C 點情況類似。由出流水結果，介質 1 表面逕流有 8.49mm 較介質 2 的 5.52mm 多，而介質 1 從降雨後第 11 分鐘開始底部滲漏才有明顯上升，介質 2 則從第 5 分鐘就有明顯底部滲漏產生，且介質 1 最後底部滲漏 47.7mm 較介質 2 的 48.66mm 少。圖 4.8 為不同介質而其餘因子皆相同下截水量圖，由圖可看出介質 2 之截水量皆低於介質 1，推估原因為介質 2 使用顆粒較大之陶粒，而介質 1 皆使用顆粒較細之介質，故介質 2 之孔隙率(0.71)較介質 1(0.66)大，且介質 1 亦有使用椰纖及氣化石等增加保水力之介質，故介質 1 之截水力會較介質 2 好，另外由其餘結果(請參見附錄 B)可發現有時介質 2 之截水量會高於介質 1，推估原因可能為實驗前充填介質時，不同壓密程度亦會影響介質之截水量，故綠屋頂截水情況會因介質特性及密度而不同。

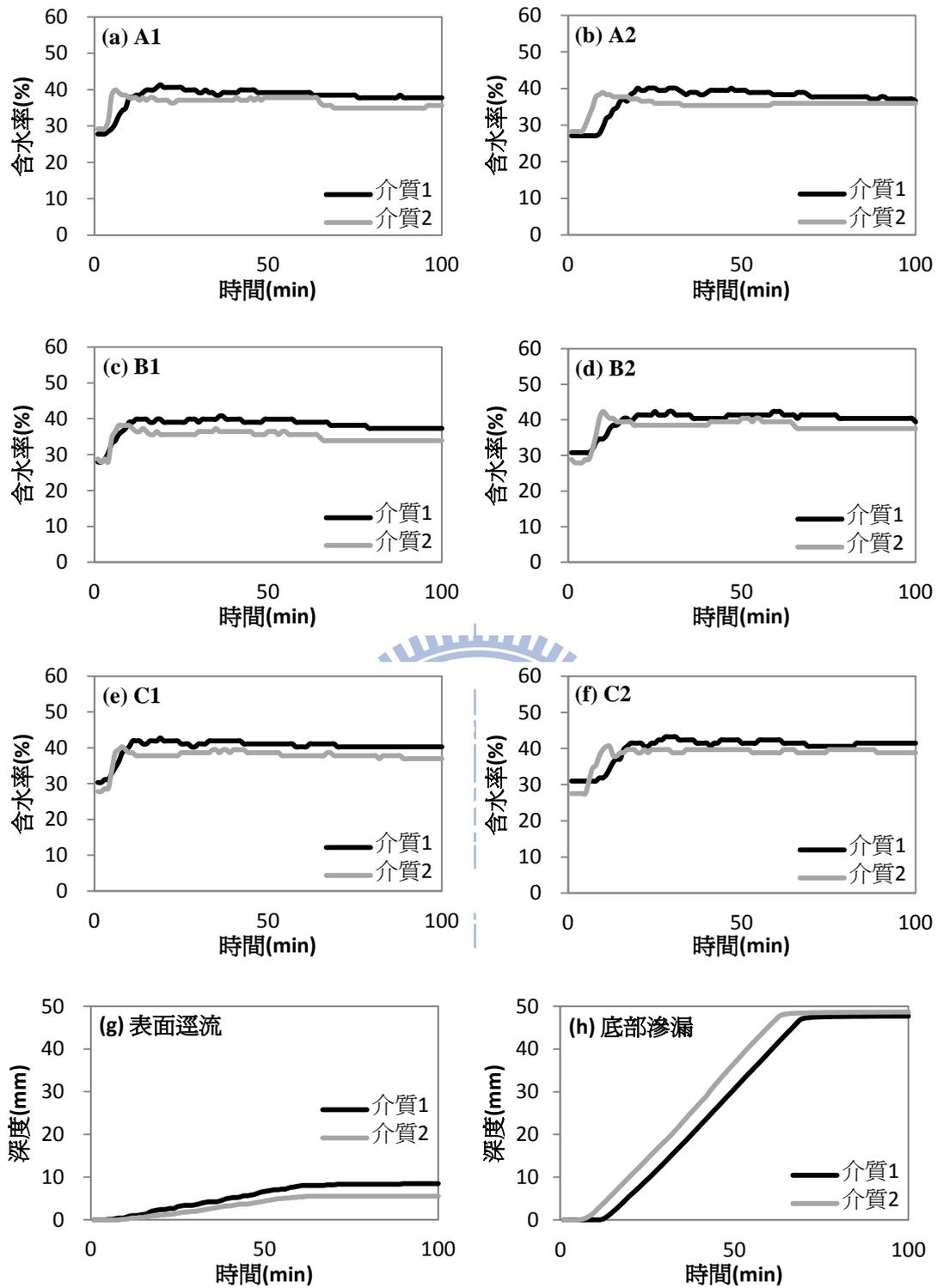


圖 4.7 不同介質下載水實驗結果(a)A 點上層含水率(b)A 點下層含水率(c)B 點上層含水率(d)B 點下層含水率(e)C 點上層含水率(f)C 點下層含水率(g)表面逕流深度(h)底部滲漏深度

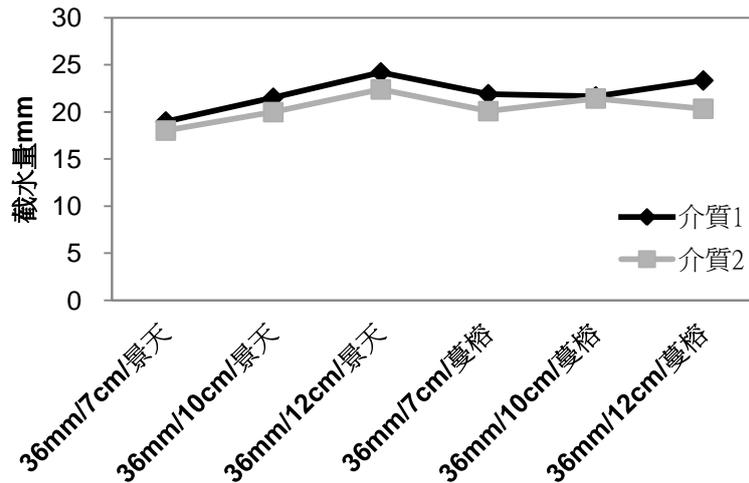


圖 4.8 不同介質而其餘因子皆相同下之截水量圖

4. 植栽

圖 4.9 為無植栽、圓葉景天及越橘葉蔓榕而其餘因子(雨量 54mm、介質 1、厚度 10cm) 不變下之截水實驗結果，無植栽之上層 A 及 B 點含水率於降雨後第 2 分鐘開始上升，C 點第 1 分鐘後開始上升，而下層含水率 A 及 C 點於第 2 分鐘後開始上升，B 點第 3 分鐘開始上升；有植栽之上層含水率皆於第 3 分鐘後開始上升，而下層含水率雖亦於第 3 分鐘後開始上升，但上升趨勢較上層平緩。由出流水結果，無植栽之表面逕流於第 2 分鐘開始產生，較圓葉景天的第 10 分鐘及越橘葉蔓榕的第 13 分鐘發生來的早，且無植栽表面逕流深度為 5.52mm 較圓葉景天的 4.25mm 及越橘葉蔓榕的 2.26mm 來的多，而無植栽底部滲漏於第 3 分鐘後開始產生，較圓葉景天的第 8 分鐘及越橘葉蔓榕的 12 分鐘發生的早，且無植栽底部滲漏深度為 27.94mm，較圓葉景天的 26.66mm 及越橘葉蔓榕的 22.06mm 來的多。故有植栽之綠屋頂能減少表面逕流及底部滲漏，即可截留較多雨水，並可延遲出流水之發生。而由其餘實驗結果(請參見附錄 B)在不同植物而其餘因子皆不變下，可大致上發現以越橘葉蔓榕為植栽之實驗，表面逕流較圓葉景天來的少，推估原因為圓葉景天覆蓋率雖較好，但其植物高度較高，當下雨時，雨滴匯集於葉面上，會產生較多的表面逕流，而越橘葉蔓榕雖覆

蓋率沒有圓葉景天好，但其植物高度較低，匍匐生長於介質表面，故表面逕流較少；而在底部滲漏方面，可以發現越橘葉蔓榕在雨量 48mm 以下及介質厚度 10cm 以上產生之底部滲漏較圓葉景天多，而雨量 48mm 以上，底部滲漏反而較圓葉景天少，推估原因為較小雨時，圓葉景天較高之覆蓋率截留了較多雨水，而當較大雨時，葉面無法負荷過量之雨水，而越橘葉蔓榕為匍匐於介質表面，故相較下可累積較多雨水，而產生較少底部滲漏。



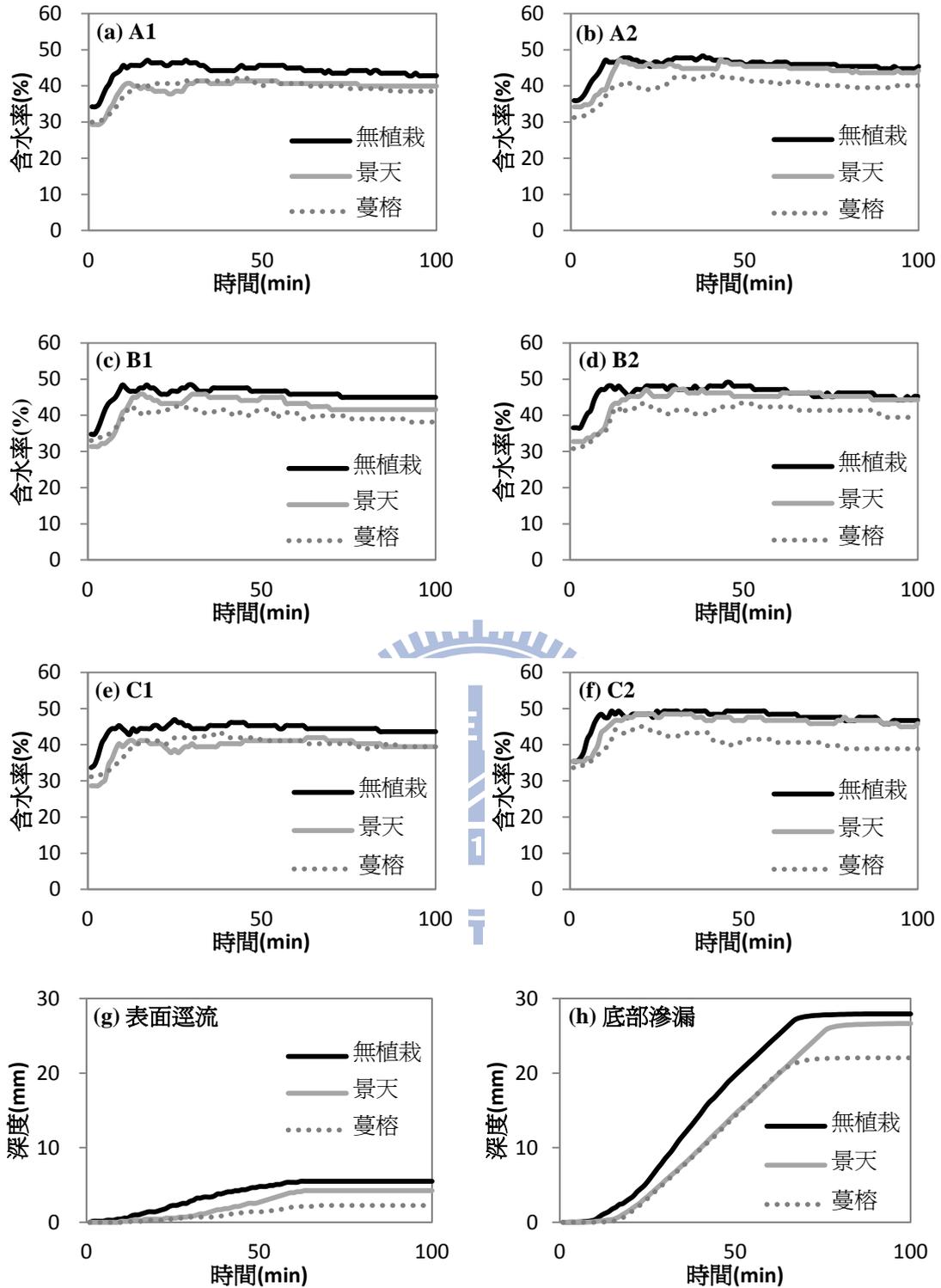


圖 4.9 有無植栽下載水實驗結果(a)A 點上層含水率(b)A 點下層含水率(c)B 點上層含水率(d)B 點下層含水率(e)C 點上層含水率(f)C 點下層含水率(g)表面逕流深度(h)底部滲漏深度

5. 排水板

圖 4.10 為不同雨量下，有排水板之截水實驗出流水實際值及無排水板實驗之出流水乘上式 3.24 推估之出流水比例後所推估出之出水量比較圖，可以發現推估趨勢與實際值略為一致，而推估值皆較實際值略低，雨量 54mm 以上略為明顯，主要原因為排水板蓄水杯滿後即不具有集水能力，水會由杯頂之溢流孔流出，如圖 4.11 所示，而雨量較小時，集水效果較好，大部分進蓄水杯，而本研究使用之排水板所能截水之有效深度約為 1.4cm (1209cm^3 除以 870.25cm^2)，故當降雨量為 20mm 及 36mm 時，幾乎所有出流水皆被基質及排水板截留。另外由圖 4.12 可發現有無排水板之截水實驗之表面逕流量差不多 ($R^2=0.8195$)，故排水板對綠屋頂之表面逕流沒有太大之影響，而對底部滲漏之影響較大，主要是因蓄水杯可容納更多的水，且蓄水杯有溢流孔，故較不會影響表面逕流。當降雨量相同時，底部滲漏皆差異不大，而底部滲漏隨著雨量增大而增大，主要是因當雨量不大時，雨水主要蓄在蓄水杯中，而當雨量較大時，蓄水杯滿後水由溢流孔流出產生底部滲漏。排水板截水量為有無排水板底部滲漏之差值，圖 4.13 為各降雨量下排水板平均截水量隨雨量變化圖，可以看出排水板截水量在雨量 48mm 以上會隨著降雨量增大而增加，而當雨量在 48mm 以下截水量會趨於一致。

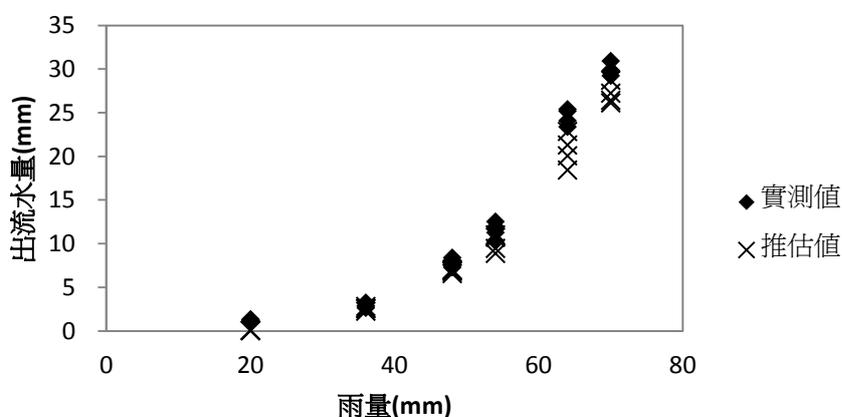


圖 4.10 不同雨量下排水板截水實驗實際及推估之出流水比較圖



圖 4.11 蓄水杯頂端溢流孔

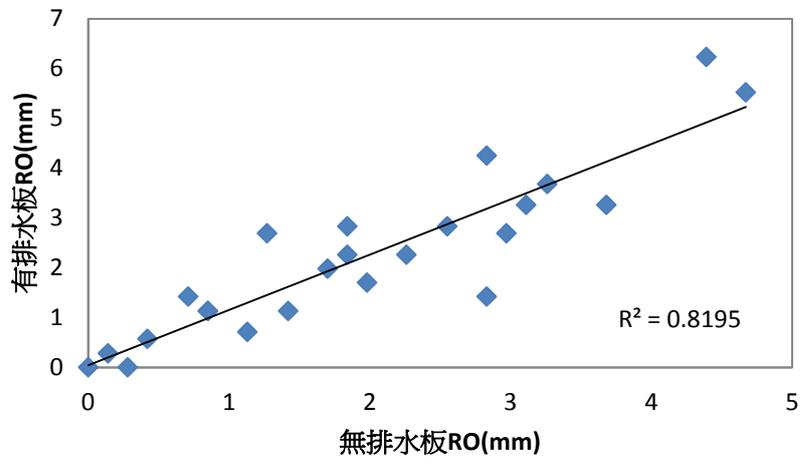


圖 4.12 有無排水板表面逕流比較圖

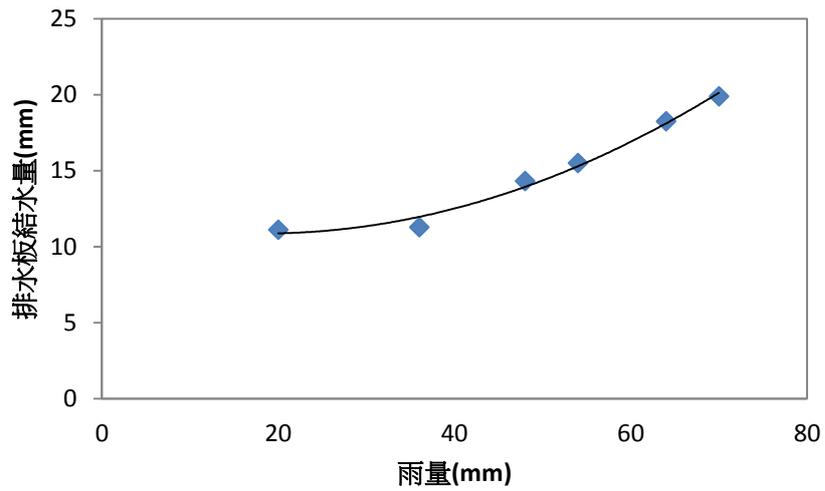


圖 4.13 排水板截水量隨雨量變化圖

6. 尖峰逕流減量

綠屋頂於截水方面之效益除了能節流雨水及延遲出流水時間外，亦可以降低雨水下水道尖峰流量之值，故可減輕雨水下水道之負荷。表 4.3 為本研究實驗及自然雨之綠屋頂尖峰逕流減量(Peak flow reduction)值，可以看出在無排水板之尖峰逕流減量約為 7%-75%之間，加入排水板後，其效益增至 48%-87%。而之尖峰逕流減之效益大致上隨著雨量的增大而降低，其中以加入排水板之實驗最為明顯，如圖 4.14 所示。本研究尖峰逕流減量計算方法為，取每分鐘最大之降雨量與每分鐘最大之出流量之差值除以每分鐘最大之降雨量，並換算成百分比，推估本研究所計算出之值會較實際進入雨水系統大，原因為實驗出流水是直接由下方桶子收集，並未經地表匯流才進入雨水下水道，地表匯流後的量會較小，且表 4.3 所列的值是以分鐘計算，與一般雨水下水道是以秒計算不同。

表 4.3 尖峰逕流減量

無 排 水 板	雨量(mm)	70	64	54	48	36	20		
	平均尖峰逕流 減量比例(%)	24.1	28.3	45.0	29.4	41.1	7.0		
	自然雨雨量 (mm)	85.2	70.9	46.7	57.9	40.3	35.3	26.4	13.2
	自然雨 尖峰逕流減量 比例(%)	46.1	20.7	43.4	75.0	72.4	68.0	72.4	40.8
有 排 水 板	雨量(mm)	70	64	54	48	36	20		
	平均尖峰逕流 減量比例(%)	48.7	51.4	70.6	72.5	83.3	86.8		

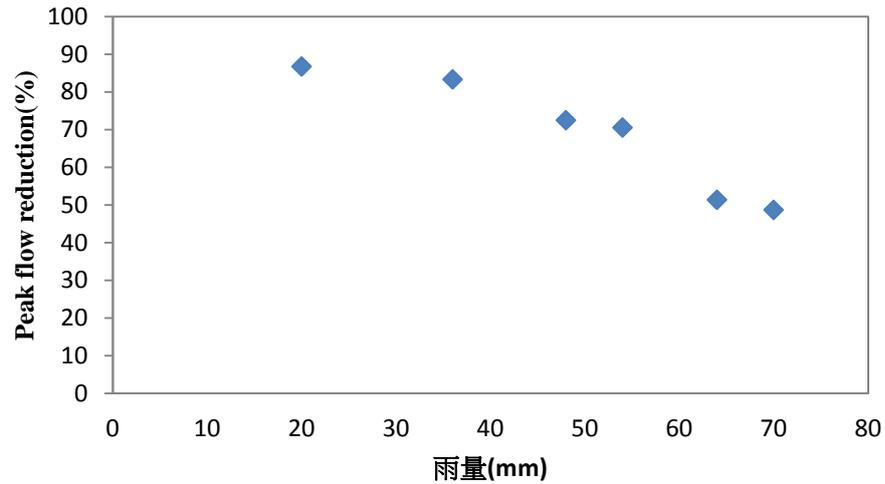


圖 4.14 有排水板在不同雨量下之尖峰逕流減量比例

4.3 大小座台比對及降雨模擬器均勻性與再現性分析

本節比對大小座台所得結果及分析降雨模擬器之均勻性。以下分別說明之。

1. 大小座台比對

本研究設計 30cm*30cm 之小型實驗座台在正式使用前，先與之前所設計的大型實驗座台比較，且依據自然雨比較大小實驗座台的量測結果差異，以介質含水率、表面逕流及底部滲漏變化情況來分析利用小實驗座台取代大實驗座台進行截水實驗之可行性。圖 4.15 為大小座台比較圖，由結果可發現介質含水率及出流水之變化趨勢頗一致，故本研究採用小實驗座台進行截水實驗，提昇實驗之效率。

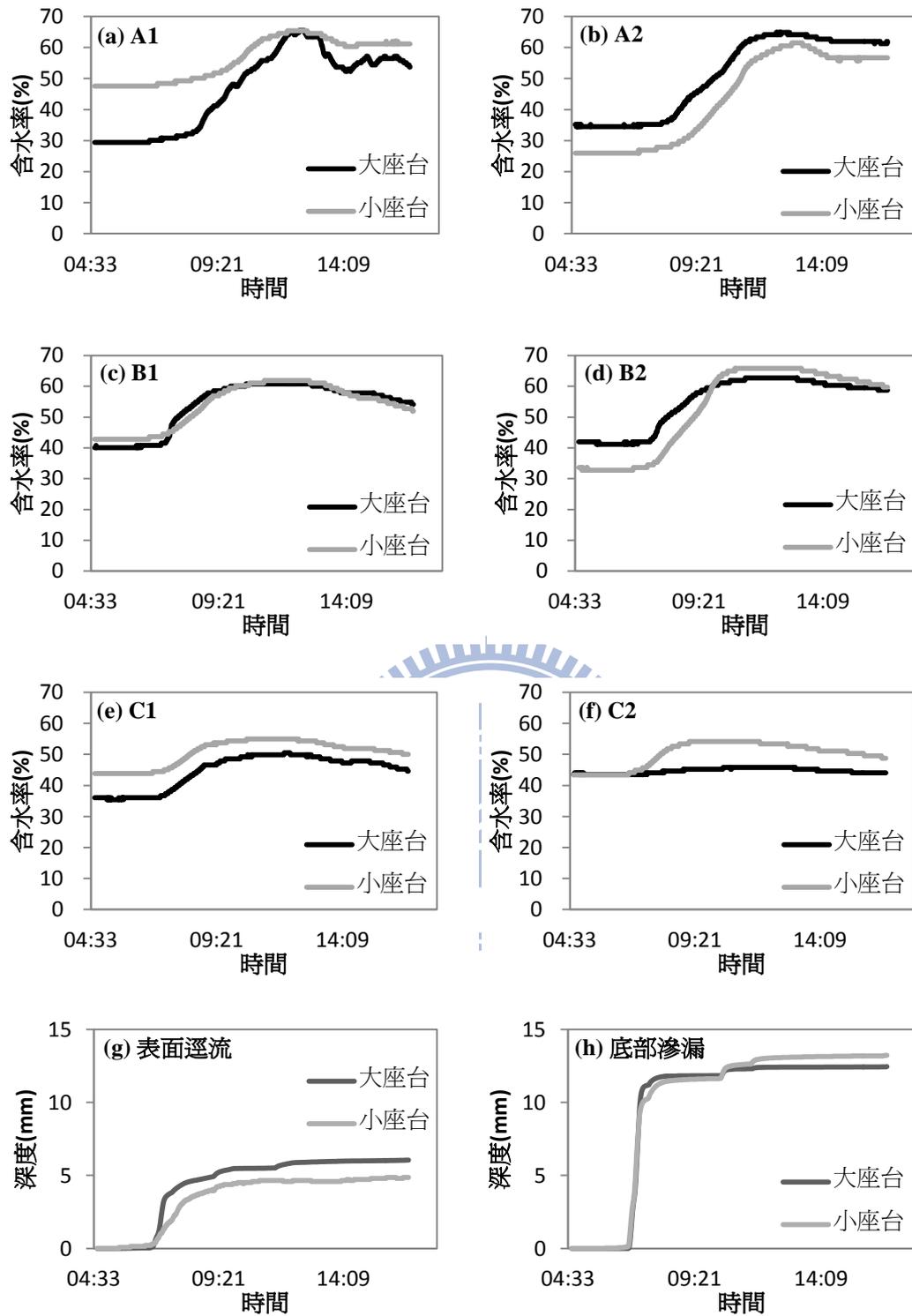


圖 4.15 大小座台比較圖(a)A 點上層含水率(b)A 點下層含水率(c)B 點上層含水率(d)B 點下層含水率(e)C 點上層含水率(f)C 點下層含水率(g)表面逕流深度(h)底部滲漏深度

2. 降雨模擬器均勻性及再現性分析

實驗座台範圍之降雨有必要均勻，以避免實驗上不必要的誤差，故本研究對降雨模擬器進行均勻性及再現性分析。表 4.4 為噴頭 010、壓力 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 在相同情況下作兩次實驗所得之結果，每格所代表實際長寬皆為 10cm ，灰底部份為誤差值 10% 以內之降雨量，由兩次實驗比較，灰底部份相似且平均雨量為 $47.62\text{mm}/\text{hr}$ 及 $48.06\text{mm}/\text{hr}$ ，故此噴頭對於 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 小座台而言，均勻性及再現性良好，唯對於 $90\text{cm}\times 90\text{cm}$ 範圍，均勻性並不佳，故不太適用於大座台使用，其他噴頭亦有類似結果(請參見附錄 A.5)。表 4.5 為不同壓力、不同噴頭及不同噴頭高度下，降雨模擬器所產生適用於 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 小座台之平均雨量，本研究為了實驗方便，固定壓力變數為 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ ，藉由更換噴頭及噴頭高度調整降雨量，而選定 20 、 36 、 48 、 54 、 64 及 $70\text{mm}/\text{hr}$ 等六種降雨強度進行截水實驗。



表 4.4 降雨模擬器噴頭 010 均勻性及再現性分析比較表(單位 mm/hr)

5.48	6.57	7.67	9.86	12.05	13.15	10.96	7.67	7.67	5.48	5.48
5.48	7.67	10.96	13.15	18.63	19.72	16.44	16.44	12.05	9.86	5.48
8.77	9.86	16.44	23.01	38.35	36.16	32.87	31.78	19.72	16.44	8.77
10.96	16.44	27.39	32.87	46.02	46.02	43.83	36.16	38.35	21.91	16.44
13.15	24.11	32.87	47.11	49.31	48.21	50.40	47.11	39.44	21.91	10.96
10.96	24.11	35.06	46.02	48.21	50.40	48.21	46.02	36.16	21.91	10.96
13.15	21.91	36.16	46.02	47.11	49.31	50.40	46.02	38.35	21.91	10.96
10.96	18.63	38.35	47.11	49.31	48.21	47.11	46.02	39.44	27.39	8.77
6.57	12.05	23.01	36.16	42.73	47.11	46.02	36.16	23.01	16.44	8.77
5.48	7.67	13.15	21.91	27.39	32.87	32.87	21.91	18.63	8.77	5.48
3.29	5.48	8.77	10.96	13.15	16.44	20.82	12.05	9.86	5.48	3.29

5.48	5.48	7.67	7.67	12.05	13.15	9.86	7.67	7.67	5.48	5.48
7.67	10.96	10.96	18.63	21.91	17.53	15.34	12.05	9.86	9.86	6.57
8.77	12.05	20.82	25.20	26.30	27.39	26.30	20.82	16.44	12.05	6.57
8.77	16.44	21.91	46.02	47.11	49.31	40.54	38.35	21.91	14.24	7.67
10.96	21.91	31.78	46.02	49.31	50.40	49.31	42.73	23.01	16.44	9.86
12.05	21.91	24.11	46.02	48.21	50.40	50.40	48.21	32.87	21.91	8.77
10.96	24.11	39.44	46.02	47.11	50.40	49.31	46.02	31.78	20.82	9.86
9.86	21.91	31.78	44.92	48.21	49.31	48.21	46.02	32.87	20.82	9.86
7.67	14.24	21.91	32.87	38.35	46.02	42.73	28.49	19.72	16.44	9.86
5.48	8.77	17.53	21.91	23.01	24.11	23.01	18.63	17.53	8.77	5.48
3.29	5.48	8.77	13.15	16.44	16.44	17.53	10.96	8.77	5.48	5.48

表 4.5 降雨模擬器降雨強度表

壓力	噴頭	J050	010	015
	高度			
2.0 Kg/cm ²	250 cm	20.79 mm/hr	48.14 mm/hr	54.34 mm/hr
	190 cm	28.87 mm/hr	56.61 mm/hr	66.58 mm/hr
	160 cm	36.37 mm/hr	64.57 mm/hr	70.31 mm/hr
2.5 Kg/cm ²	250 cm	25.11 mm/hr	50.40 mm/hr	58.98 mm/hr
	190 cm	34.56 mm/hr	58.45 mm/hr	69.49 mm/hr
	160 cm	39.45 mm/hr	67.73 mm/hr	74.50 mm/hr

誤差±1.0 mm/hr

4.4 SWCC 實驗

Darcy 公式之水頭壓力差，本研究採用 SWCC 曲線推估，本研究針對不同介質進行 SWCC 實驗，圖 4.16 為本研究所使用之兩種介質實驗所得之 SWCC 曲線，故 TDR 所測出之含水率經由 SWCC 曲線可以得到水頭壓力差。

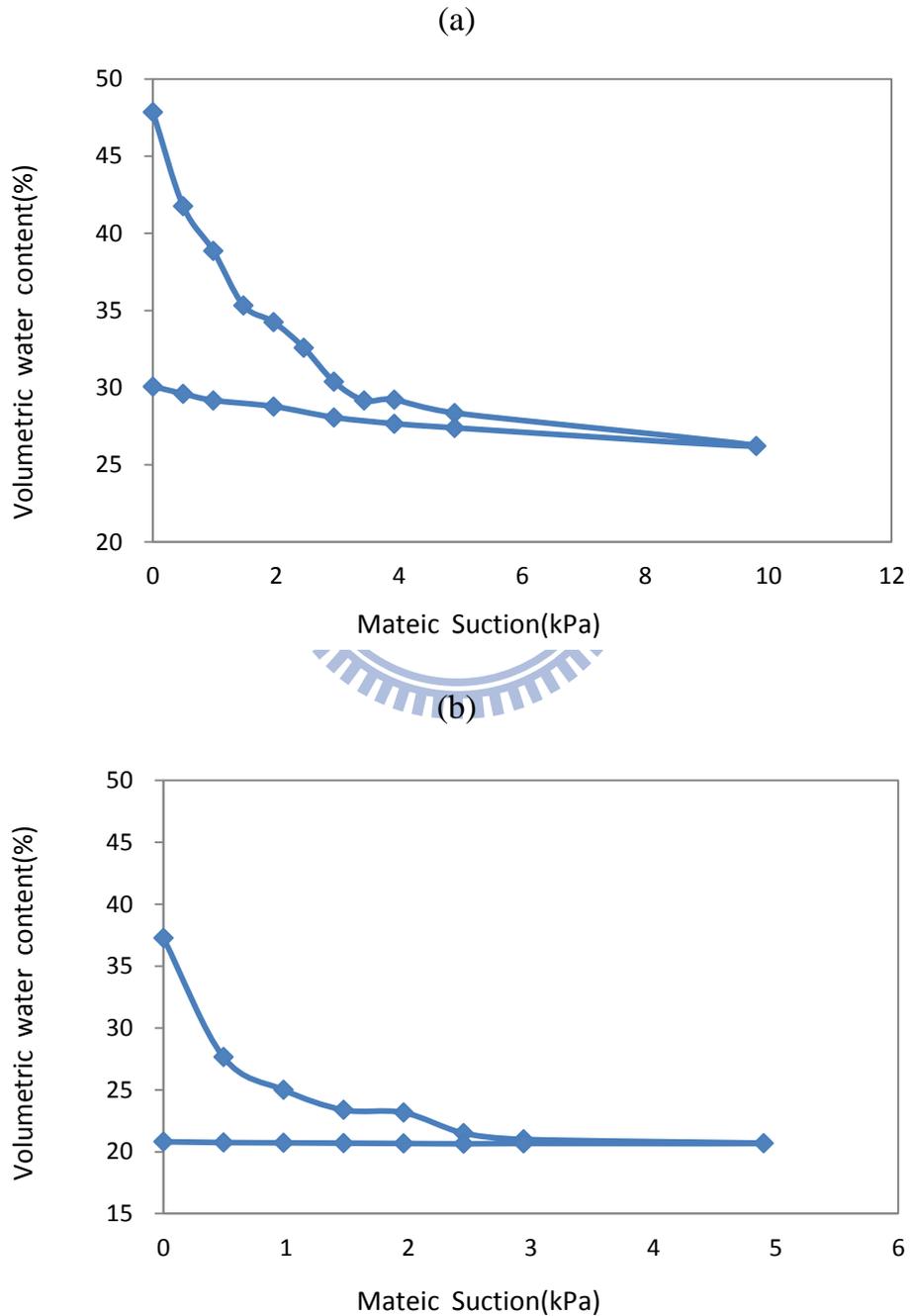


圖 4.16 SWCC 曲線(a)介質 1 (b)介質 2

表 4.6 驗證組之實際與推估出流量-以雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	54	1	7	圓葉景天	33.02	36.32 (10.0%)	39.64 (19.8%)	38.90 (17.6%)	37.56 (13.5%)	38.10 (15.4%)	24.00 (27.3%)	29.60 (10.5%)	46.32 (40.0%)	22.10 (33.2%)	20.48 (38.0%)
B	54	1	10	圓葉景天	30.89	36.32 (17.6%)	39.20 (26.8%)	35.23 (14.0%)	27.82 (10.0%)	31.29 (1.3%)	15.65 (49.3%)	28.20 (8.8%)	45.39 (46.9%)	22.42 (27.5%)	18.42 (40.4%)
C	54	1	12	圓葉景天	24.42	36.32 (48.7%)	35.44 (45.0%)	31.92 (30.6%)	23.03 (5.8%)	26.74 (9.5%)	17.85 (26.9%)	27.26 (11.6%)	44.46 (81.9%)	21.47 (12.1%)	13.81 (43.5%)
D	54	1	7	越橘葉蔓榕	29.96	36.32 (21.2%)	42.03 (40.3%)	39.56 (32.1%)	38.86 (29.7%)	38.10 (27.2%)	18.15 (39.4%)	29.60 (1.2%)	46.89 (56.5%)	24.17 (19.3%)	20.82 (30.5%)
E	54	1	10	越橘葉蔓榕	24.32	36.32 (49.3%)	33.89 (39.3%)	34.21 (40.6%)	26.40 (8.5%)	31.29 (28.6%)	25.32 (4.1%)	28.20 (15.9%)	45.35 (86.5%)	22.27 (8.4%)	9.26 (61.9%)
F	54	1	12	越橘葉蔓榕	22.60	36.32 (60.7%)	35.44 (56.8%)	31.92 (41.2%)	23.03 (1.9%)	26.74 (18.3%)	27.97 (23.8%)	27.26 (20.6%)	44.26 (98.8%)	20.75 (8.2%)	20.25 (10.4%)
G	54	2	7	圓葉景天	29.32	36.32 (23.9%)	41.29 (40.6%)	39.36 (34.1%)	38.46 (31.0%)	38.10 (30.0%)	21.31 (27.3%)	29.60 (0.8%)	46.66 (58.9%)	23.33 (20.5%)	7.70 (73.8%)
H	54	2	10	圓葉景天	30.10	36.32 (20.7%)	44.87 (48.9%)	36.33 (20.6%)	29.33 (2.7%)	31.29 (3.9%)	12.05 (60.0%)	28.20 (6.4%)	45.86 (52.2%)	24.08 (20.1%)	9.87 (67.2%)
I	54	2	12	圓葉景天	26.76	36.32 (35.7%)	33.06 (23.5%)	31.54 (17.8%)	22.59 (15.6%)	26.74 (0.1%)	23.86 (10.8%)	27.26 (1.8%)	44.44 (66.0%)	21.42 (20.0%)	16.46 (38.5%)
J	54	2	7	越橘葉蔓榕	25.97	36.32 (39.9%)	38.34 (47.7%)	38.54 (48.4%)	36.85 (41.9%)	38.10 (46.7%)	26.24 (1.1%)	29.60 (14.0%)	46.37 (78.6%)	22.28 (14.2%)	18.18 (30.0%)
K	54	2	10	越橘葉蔓榕	25.18	36.32 (44.3%)	36.27 (44.1%)	34.67 (37.7%)	27.03 (7.4%)	31.29 (24.3%)	23.21 (7.8%)	28.20 (12.0%)	45.37 (80.2%)	22.35 (11.3%)	23.17 (8.0%)
L	54	2	12	越橘葉蔓榕	24.66	36.32 (47.3%)	38.04 (54.3%)	32.34 (31.2%)	23.51 (4.6%)	26.74 (8.5%)	15.71 (36.3%)	27.26 (10.6%)	44.70 (81.3%)	22.35 (9.4%)	12.36 (49.9%)

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC- Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
M	70	1	7	圓葉景天	54.61	52.52 (3.8%)	57.02 (4.4%)	55.28 (1.2%)	51.75 (5.2%)	54.30 (0.6%)	21.87 (60.0%)	54.04 (1.1%)	62.40 (14.3%)	22.39 (59.0%)	8.43 (84.6%)
N	70	1	10	圓葉景天	52.39	52.52 (0.3%)	47.90 (8.6%)	49.82 (4.9%)	35.28 (32.7%)	47.49 (9.4%)	28.82 (45.0%)	52.64 (0.5%)	60.96 (16.4%)	20.86 (60.2%)	11.93 (77.2%)
O	70	1	12	圓葉景天	43.81	52.52 (19.9%)	53.71 (22.6%)	48.29 (10.2%)	31.30 (28.6%)	42.94 (2.0%)	13.16 (70.0%)	51.70 (18.0%)	60.38 (37.8%)	21.19 (51.6%)	10.73 (75.5%)
P	70	1	7	越橘葉蔓榕	49.46	52.52 (6.2%)	61.64 (24.6%)	56.56 (14.3%)	54.27 (9.7%)	54.30 (9.8%)	11.32 (77.1%)	54.04 (9.3%)	63.00 (27.4%)	24.56 (50.4%)	7.32 (85.2%)
Q	70	1	10	越橘葉蔓榕	48.46	52.52 (8.4%)	57.56 (18.8%)	51.69 (6.7%)	37.86 (21.9%)	47.49 (2.0%)	16.35 (66.3%)	52.64 (8.6%)	61.31 (26.5%)	22.10 (54.4%)	6.46 (86.7%)
R	70	1	12	越橘葉蔓榕	42.51	52.52 (23.6%)	54.57 (28.4%)	48.43 (13.9%)	31.45 (26.0%)	42.94 (1.0%)	13.85 (47.4%)	51.70 (21.6%)	60.89 (43.3%)	23.02 (45.8%)	9.14 (78.5%)
S	70	2	7	圓葉景天	58.31	52.52 (3.1%)	58.15 (0.3%)	55.59 (4.7%)	52.37 (10.2%)	47.49 (12.4%)	31.68 (41.5%)	54.04 (7.3%)	62.88 (7.8%)	24.10 (58.7%)	18.46 (65.9%)
T	70	2	10	圓葉景天	54.18	52.52 (6.9%)	43.62 (19.5%)	48.99 (9.6%)	34.14 (37.0%)	42.94 (12.6%)	23.67 (51.8%)	52.64 (2.9%)	60.84 (12.3%)	20.43 (62.3%)	9.26 (81.2%)
U	70	2	12	圓葉景天	49.15	52.52 (9.9%)	49.45 (0.6%)	47.60 (3.2%)	30.51 (37.9%)	54.30 (6.9%)	19.88 (65.9%)	51.70 (5.2%)	60.57 (23.2%)	21.88 (55.5%)	19.35 (66.8%)
V	70	2	7	越橘葉蔓榕	52.45	52.52 (0.1%)	61.16 (16.6%)	56.43 (7.6%)	54.01 (3.0%)	54.30 (3.5%)	12.85 (75.5%)	54.04 (3.0%)	63.01 (20.1%)	24.60 (53.1%)	10.24 (80.5%)
W	70	2	10	越橘葉蔓榕	47.54	52.52 (10.5%)	55.64 (17.0%)	51.32 (8.0%)	37.35 (21.4%)	47.49 (0.1%)	21.64 (54.5%)	52.64 (10.7%)	61.45 (29.3%)	22.61 (52.4%)	6.02 (87.3%)
X	70	2	12	越橘葉蔓榕	46.57	52.52 (12.8%)	54.78 (17.6%)	48.46 (4.1%)	31.49 (32.4%)	42.94 (7.8%)	13.48 (71.1%)	51.70 (11.0%)	60.68 (30.3%)	22.28 (52.2%)	12.68 (72.8%)

表 4.7 自然雨之實際與推估出流量-以雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	35.25	1	5	圓葉景天	9.26	-120.79 (1404%)	21.52 (132.4%)	21.99 (137.5%)	26.81 (189.6%)	511.97 (5429%)	27.59 (198.0%)	15.71 (69.7%)	29.68 (220.6%)	27.27 (195.5%)	17920.40 (193425%)
B	40.28	1	5	圓葉景天	22.03	-159.18 (822.6%)	62.94 (158.7%)	41.09 (86.5%)	71.59 (225.0%)	1926.52 (8645%)	35.45 (60.9%)	18.22 (17.3%)	34.54 (56.8%)	26.64 (20.9%)	45.82 (108.0%)
C	26.36	1	10	圓葉景天	8.77	-99.85 (1239%)	-100.48 (1246%)	-14.06 (260.3%)	-18.35 (309.2%)	886.41 (10007%)	79.65 (808.2%)	11.56 (31.8%)	18.01 (105.3%)	23.32 (165.9%)	102.23 (1066%)
D	57.92	1	10	圓葉景天	27.90	-183.90 (759.1%)	-149.64 (636.4%)	1.90 (93.2%)	-21.33 (176.5%)	5856.90 (20892%)	151.84 (444.2%)	33.18 (18.9%)	50.57 (81.2%)	26.91 (3.6%)	199.60 (615.4%)
E	43.65	1	10	圓葉景天	22.99	-82.56 (459.1%)	-41.63 (281.1%)	11.26 (51.0%)	2.91 (87.3%)	439.82 (1813%)	43.75 (90.3%)	18.17 (21.0%)	35.60 (54.9%)	24.42 (6.2%)	8.51 (63.0%)
F	70.87	1	10	圓葉景天	64.45	-16.66 (125.8%)	173.21 (168.8%)	74.74 (16.0%)	69.01 (7.1%)	103.19 (60.1%)	72.31 (12.2%)	54.28 (15.8%)	66.22 (2.8%)	36.61 (43.2%)	43.26 (32.9%)
G	85.16	1	10	圓葉景天	68.02	25.47 (62.6%)	88.33 (29.9%)	69.87 (2.7%)	50.94 (25.1%)	40.35 (40.7%)	16.56 (75.7%)	85.81 (26.2%)	78.27 (15.1%)	28.56 (58.0%)	324.89 (377.6%)

4.5 綠屋頂截水公式驗證

本節根據前一章本研究收集及建立之公式，帶入率定組實驗數據推估所需係數，並以驗證組實驗數據及自然雨數據求出推估值與實測數據做比較分析，進行公式之驗證。各公式所需推估之係數，本研究分別以 3 組(雨量 70mm、54mm 及 36mm)及 4 組(雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm) 實驗數據為率定組決定之，再將其餘驗證組實驗數據及自然雨數據驗證公式之適用性。Hien *et al*(2007)研究指出，降雨量 1.27cm 時綠屋頂可以完全截留雨水，而本研究蒐集到之自然雨數據，降雨量為 15.25mm 時亦無出流量(請參見附錄 C)，而本研究截水實驗所採用最小雨量為 20mm/hr，故小於 20mm 以下的降雨事件不納入率定及驗證。以四組率定組率定公式所需係數時，由於考慮不同因子數據較充足，率定結果應較三組率定組具代表性，故以下將就四組率定組率定之公式並以兩組驗證組驗證之結果進行討論(其餘率定及驗證結果請參見附錄 C)，驗證組及自然雨實際監測與推估之出流量，如表 4.6 及表 4.7 所示。

1. Φ - index法

本研究由率定組所求得之 Φ 值約在 0.08-0.27 間，本研究取平均值 0.175 進行驗證組出流量之推估。圖 4.17 為驗證組實測值與推估值之比較圖，結果可看出推估之出流量會隨降雨量增加而增大，故此法能反應出當降雨量改變時，綠屋頂出流量之改變。而推估值雖與實測值之變化趨勢略為一致($R^2 = 0.8976$)，但此法僅考量降雨強度，故當降雨強度相同(54mm 及 70mm)而其餘因子不同時，推估出之出流量皆相同(52.52mm 及 36.32mm)，而自然雨部份，除編號 G 外，其餘此法推估出之出流量皆為負值，差異頗大，推估原因為自然雨在降雨期間降雨量不規律，故未必適合由率定組所求得之 Φ 值，故未來有必要收集更多不同因子下自然雨數據，並依據不同因子推估更適當之 Φ 值。

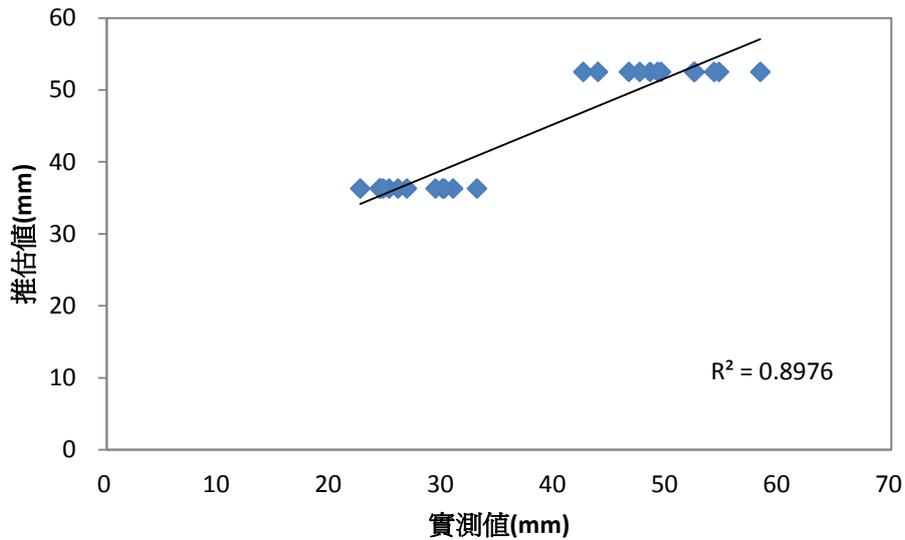


圖 4.17 實測值與 Φ index 法推估值之比較

2. 含水差異係數法

圖 4.18 為驗證組帶入式 3.5、式 3.6 及式 3.7 之推估值與實測值比較圖，其變化趨勢以式 3.6 較為相似 ($R^2 = 0.9118$)，除了式 3.5 之 F 及 L 外，其餘推估結果與實測值誤差皆在 45% 內，降雨強度為 70mm 時，式 3.6 所推估之值誤差皆在 15% 以內。而自然雨除了式 3.5 之編號 G、式 3.6 之編號 E、F 及 G 及式 3.7 之編號 F 及 G 推估值與實際值差異在 51% 內，其餘推估結果有負值且差異皆頗大，推估原因為一場自然雨之降雨量分佈不均，故含水率之變動亦大，故未來此公式有必要考量更多不同截水因子。

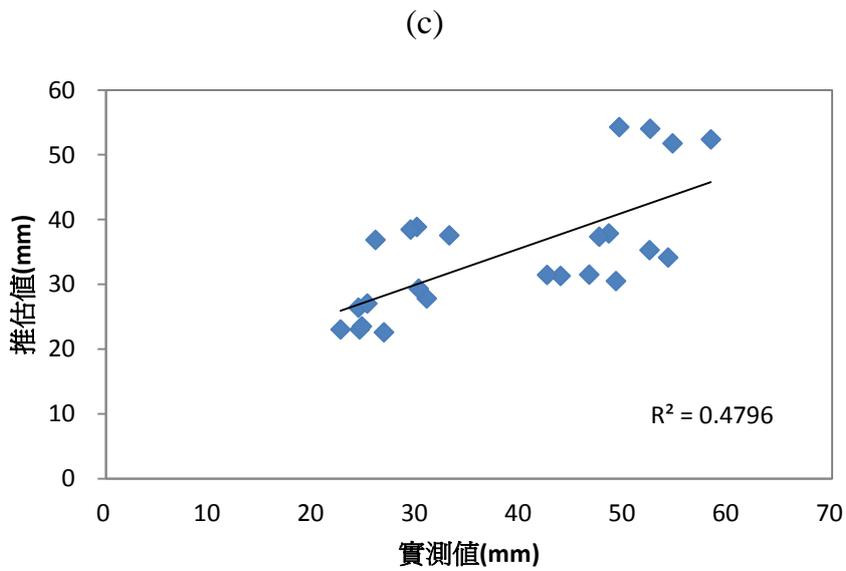
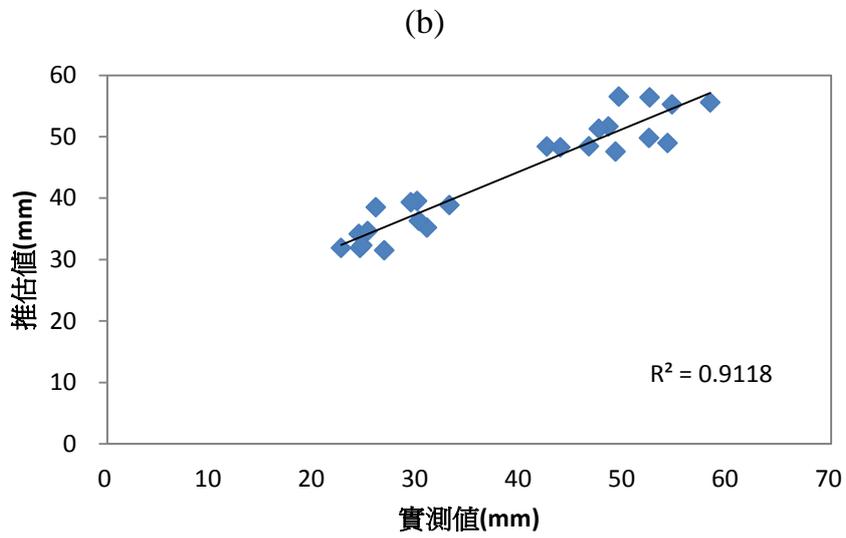
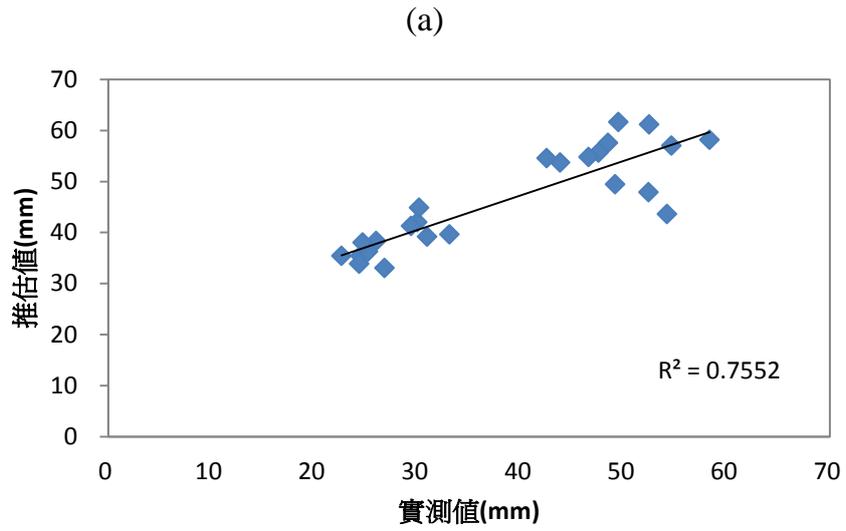


圖 4.18 實測值與含水差異係數法推估值之比較(a)式 3.5(b)式 3.6(c)式 3.7

3. 含水率推估法

圖 4.19 為驗證組實測值與推估值之比較圖，其變化趨勢大致相似($R^2=0.8655$)，推估值與實測值差異皆在 47% 以內，除編號 J 外，推估值與實際值差異皆在 30% 以內，而在雨量 70mm 時，差異皆在 13% 以內。由於在模擬降雨初期含水率上升較快，係數 γ 值較高(約 0.03~0.06)，當介質接近飽和含水率變化較小時，係數 γ 值較低(約 0~0.015)，而當降雨停止後含水率下降，係數 γ 值為負值，故本研究將係數 γ 值分為兩個值，降雨期間(約 0.012~0.025，取平均約為 0.0185)及降雨結束後(約 -0.003~ -0.013，取平均約為 -0.008)，故當以降雨時之平均 γ 值來推估出流量時，會高估降雨中後期變化較小之含水率，而造成低估出流量之情況。自然雨除了編號 G 差異為 40.7%，編號 F 誤差雖有 60.1%，但其推估出流量卻大於降雨量，不太合理，而其餘推估值皆偏大。由截水實驗結果可知在降雨期間 γ 值會隨著不同時間含水率之變化而改變，而含水率雖在降雨初期會隨著降雨的不同而變化，但當介質趨近飽和時含水率就不隨降雨而變動，故未來有必要分析降雨強度與 γ 值之關係。

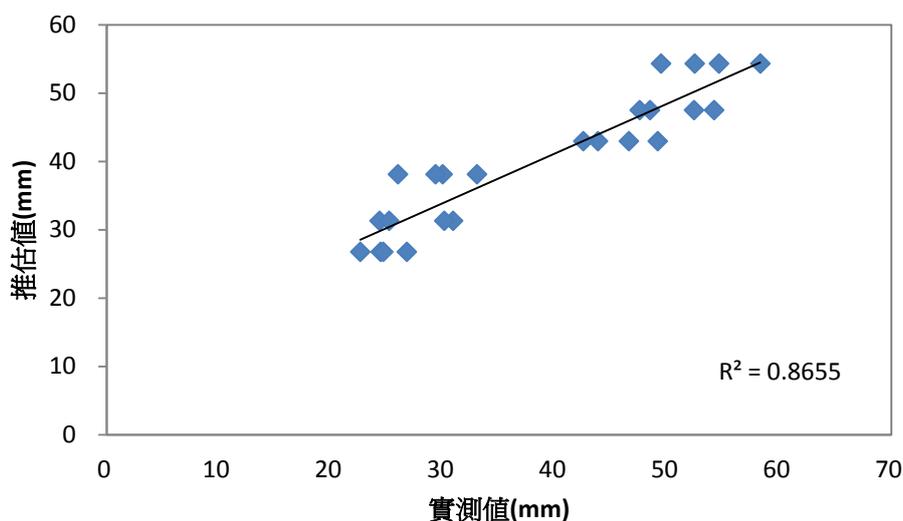


圖 4.19 實測值與含水率推估法推估值之比較

4. SWCC-Darcy 法

圖 4.20 為驗證組實測值與推估值之比較圖，推估能力不佳，推估值與實測值之差異為 8.0% 至 87.3%，而其推估結果數值明顯較實際值小，而自然雨除了編號 E 及 F 推估值與實際值差異在 63% 以內，其餘推估之出流量差異皆頗大，推估原因為在降雨期間，介質之含水率並非一直保持飽和，不宜使用飽和時之 K 值，故後續研究中有必要進一步探討更適當之 K 值。

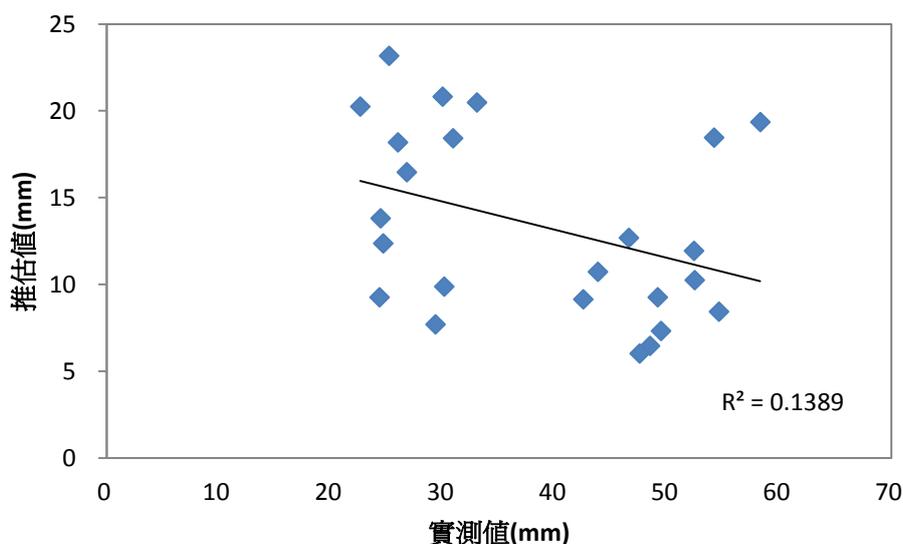


圖 4.20 實測值與 SWCC-Darcy 法推估值之比較

5. S&P 法

圖 4.21 為驗證組實測值與推估值之比較圖，其變化趨勢亦不佳，推估值與實際值差異皆在 77.1% 以內，降雨強度 54mm 時差異皆在 60% 以內，自然雨部分除了編號 B 及 F 差異在 61% 以內，其餘之推估值誤差亦偏大，推估原因可能為模式中需要迴歸之係數眾多，而率定組各場雨係數迴歸之結果差異頗大，故所模擬出之出流水結果，與實際觀測值差距仍頗顯著。

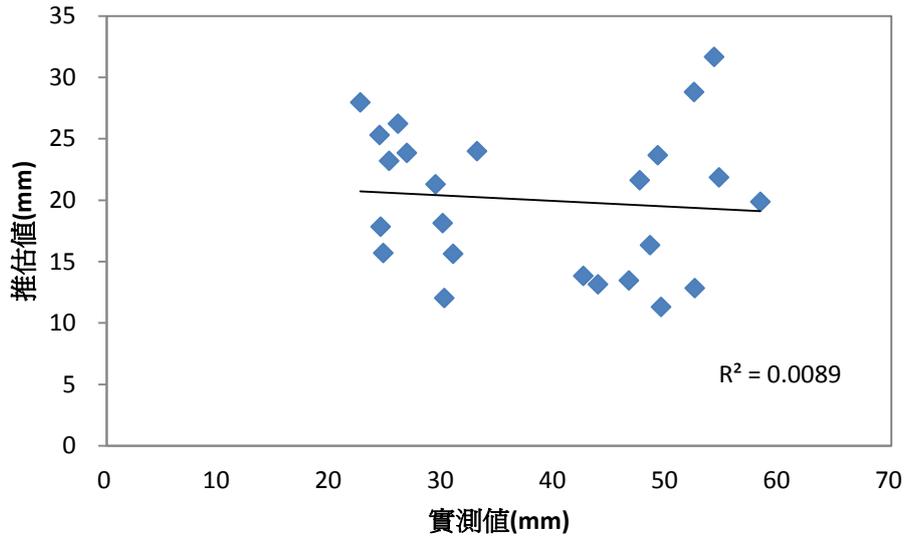


圖 4.21 實測值與 S&J 法推估值之比較

6. 迴歸統計法

式 4.1 為本研究以率定組數據依式 3.17 重新迴歸係數後之公式。圖 4.22 為驗證組實測值與推估值之比較圖，其結果顯示變化趨勢大致相似($R^2 = 0.9244$)，而推估值與實測值之差異皆在 22% 以內，而自然雨推估值與實測值差異皆在 70% 以內，而除了編號 A 外，其餘推估值與實際值差異皆在 32% 以內。

$$RO = 22.7 - 0.117 * P + 0.0114 * P^2 - 1.883 * S \quad (4.1)$$

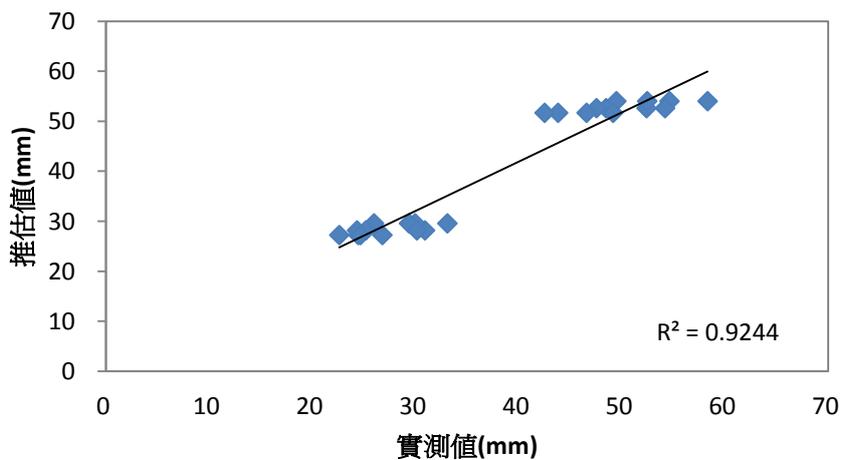


圖 4.22 實測值與回歸統計法推估值之比較

7. 經驗式

本研究由率定組迴歸式 3.18 之係數 a、b 及 c 分別為 98.179、16.008 及 0.459，而式 3.19 之係數 a、b 及 c 分別為 3261.692、- 57.385 及 - 0.437。圖 4.23 為驗證組實測值與推估值之比較圖，其結果顯示式 3.18 之變化趨勢大致相似($R^2=0.9286$)，而式 3.19 之變化趨勢不佳。式 3.18 之推估值於雨量 54mm 時，與實測值差異在 40%-99%之間，在雨量 70mm 時，差異在 7%-44%之間，而推估值皆明顯較實測值大；式 3.19 之推估值於雨量 54mm 時，與實測值差異在 8%-34%之間，在雨量 70mm 時，差異在 50%-63%之間，而推估值皆明顯較實測值小。而自然雨方面，式 3.18 除了編號 A、C 及 D 推估值與實測值差異較大外，其餘差異皆在 56.8%以內；式 3.19 除了編號 A 及 C 外，其餘差異皆在 58%以內。



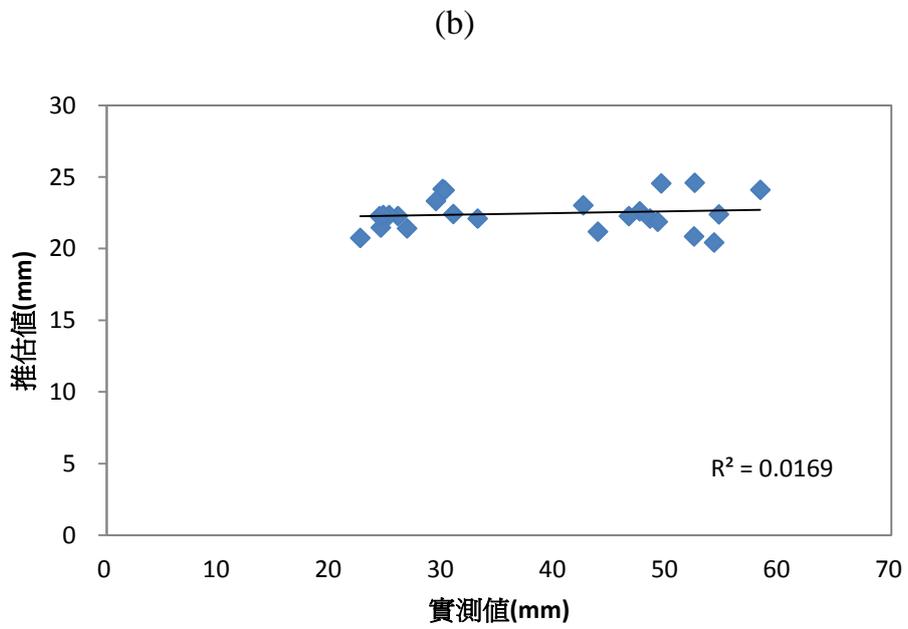
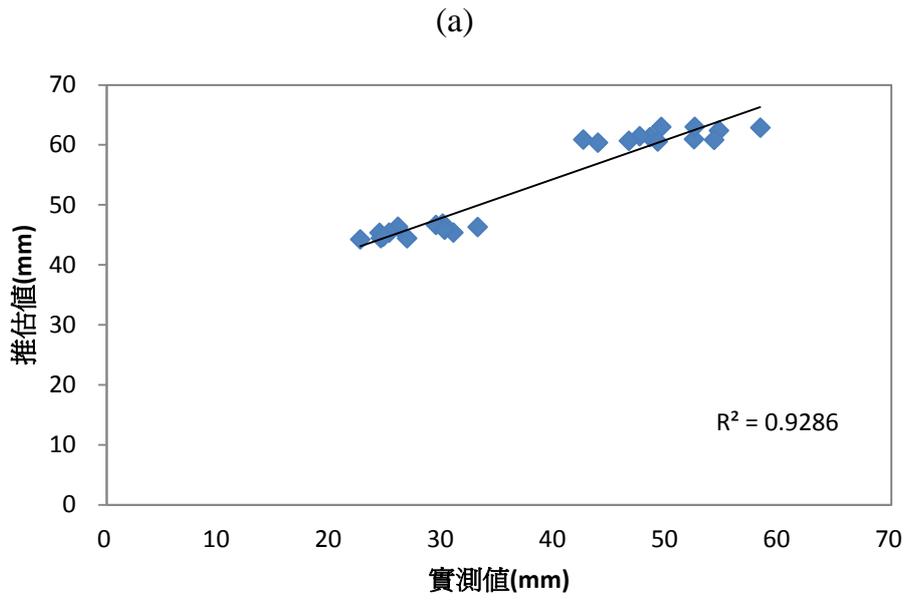


圖 4.23 實測值與經驗式法推估值之比較(a)式 3.18(b)式 3.19

第五章 結論及建議

本研究主要依據綠屋頂截水相關理論，建立適用於評估台灣綠屋頂截水效益之公式。並分析影響綠屋頂截水之因子及根據截水實驗及自然雨結果，驗證所建立及收集公式之適用性。以下總結研究之成果及結論，並對於本研究遭遇之問題及值得探討之細節提供可改善之建議，以供後續研究參考。

5.1 結論

本研究延續李(99年)之研究，改善既有實驗座台及降雨模擬器，並設計一 30cm*30cm 小型實驗座台，利用降雨模擬器搭配小型實驗座台，進行不同綠屋頂截水因子下之截水實驗，最後依據實驗及自然雨結果驗證所建立及收集之綠屋頂截水公式，以下分別說明本研究之結論：

1. 小型實驗座台及降雨模擬器：為了更有效率針對不同截水因子進行截水實驗，本研究設計一 30cm*30cm 之小型實驗座台，搭配培養箱預先以兩種介質及三種厚度培養兩種植栽，以利於實驗時快速更換不同截水因子，並利用降雨模擬器模擬不同強度之降雨，加速實驗之進行。由於小型實驗座台截水情況不知是否因縮小而改變，故先依據自然雨實驗數據比較其與既有座台介質含水率及出流水變化差異，結果變化趨勢頗為相似。而利用降雨模擬器取代自然雨，其均勻性及再現性頗為重要，故本研究亦針對不同噴頭進行均勻性及再現性分析，其結果對於 30cm*30cm 小型實驗座台而言，均勻性及再現性良好。
2. 截水實驗：本研究利用降雨模擬器搭配小型實驗座台進行截水實驗，其結果顯示，當降雨強度不同而其餘因子不變下，截水量於雨量 36mm 以下增幅比例較大，於雨量 36mm-48mm 間約為等比例上升，而於雨量 48mm 以上截水量約維持在 25mm 至 30mm 間，主要原因是雨量較大時截水能力趨於飽和。

在不同介質厚度而其餘因子不變下，介質由 7cm 增至 10cm 增加 1.43 倍，截水量增幅比例在 0.9 至 1.35 間，而由 10cm 增至 12cm，截水增幅比例在 0.95 至 1.35 間，故截水量並未隨介質厚度等比例增加，推估原因為不同介質層之截水機制及充填時壓密程度等未必相同。

在不同介質而其餘因子不變下，介質 2 使用陶粒，故孔隙率為 0.71 較介質 1 之 0.66 大，且介質 1 使用椰纖及氣化石等介質增加保水力，另外於充填介質時，不同之壓密程度亦會影響水流之通過與否，故介質截水量會受不同介質特性(如孔隙率與密度等)影響。

在不同植栽而其餘因子不變下，由於圓葉景天覆蓋率較越橘葉蔓榕好且植物高度較高，故雨水會匯集於葉面上造成較多表面逕流，而在雨量 48mm 以下圓葉景天因較高覆蓋率截留較多雨水，在雨量 48mm 以上葉面無法負荷過多雨水，越橘葉蔓榕為匍匐生長於介質表面而截留較多雨水，故不同植物、高度、生長形式、根系及覆蓋率等皆會影響綠屋頂之截水能力。

有排水板時在雨量 48mm 以下，截水量趨近於 11mm，而雨量在 48mm 以上，截水量會隨雨量增大而增加，截水量會依依排水板之蓄水量及形式而改變。而綠屋頂對於尖峰逕流減量之效益，由截水實驗及自然雨結果可發現，綠屋頂(含排水板)減少尖峰流量之效益約 48%-87% 之間，唯尖峰逕流減量效益隨著雨量增大而降低。

3. 綠屋頂截水公式：本研究依據綠屋頂截水相關理論及研究，建立了含水差異係數法等三個公式及含水率推估法，其由截水實驗驗證組數據之驗證結果，含水係數差異法及含水率推估法 R 平方值分別為 0.9118 及 0.8655，而誤差分別在 1.2%-48.4% 及 0.1%-46.7% 間，於自然雨推估準確性最好分別為 2.7% 及 40.7%。另外收集相關研究之 Φ -index 法、SWCC-Darcy 法、S&P 法、迴歸統計法及經驗式等五個公式，以率定組實驗結果重新迴歸式所需係數，並以驗證組結果驗證公式之合適

性，而其中以迴歸統計法結果最佳，其 R 平方值為 0.9244，誤差在 0.5%-22% 間，於自然雨推估誤差在 15.8%-69.7% 之間。

5.2 建議

本研究截水實驗僅針對 6 種雨量、2 種介質、3 種厚度及 2 種植栽進行實驗，未來研究可以再加入不同坡度、更多介質及不同植栽及植栽覆蓋率等因子進行實驗，詳細分析介質及植栽特性等對於綠屋頂截水之影響，亦可進行蒸散之實驗，並建立適用於推估綠屋頂蒸散及植物影響之公式。

目前實場綠屋頂建置時，排水板扮演相當重要之角色，不僅可以增加截水量，亦能蓄水並提供植物生長所需，本研究雖有考慮排水板之影響，唯僅針對 1 種排水板進行研究，故未來可嘗試收集更多不同排水板進行分析比較其中特性之差異，及對於綠屋頂截水效益之影響。

目前降雨模擬器所模擬之雨量最小為 20mm/hr，與實際自然雨相比，並不算小，且自然雨其降雨量分佈不均，故未來可以再嘗試不同噴頭及變頻式馬達，以模擬更大範圍雨量且雨量可隨時間改變，使模擬出雨量更接近自然雨進行實驗，驗證時亦能提高公式之準確性。

本研究為將所收集之文獻提及之型式值得參考之公式，依據相關截水理論加以修改，建立出本研究所嘗試推估綠屋頂截水效益之公式，唯礙於研究時間，無法將所有影響綠屋頂截水之因子皆考慮進入公式，僅考慮降雨、介質厚度及含水率，又降雨模擬器所模擬之降雨仍偏大且每分鐘降雨量皆一樣，而實際自然雨之降雨量分佈不均且延時不定，故未來可以加以分析降雨歷線，將公式再加入降雨延時、不同介質特性、坡度、植物吸收及蒸散等因子，使公式更加完善抑或成為模式。

參考文獻

謝維芳，(94 年)，「不同植栽對建築物隔熱效果影響之研究」，國立中興大學園藝學系研究所，台中。

許瑞銘，(95 年)，「屋頂綠化熱效益之研究」，朝陽科技大學建築及都市設計研究所，台中。

蘇榮宗，(98 年)，「屋頂植草覆土層熱效應之研究」，國立高雄大學都市發展與建築研究所，高雄。

李京澄，(99 年)，「綠屋頂之降雨截水能力分析」，國立交通大學環境工程研究所，新竹。

廖朝軒，(99 年)，「屋頂綠化與雨水再利用」，都市新田園綠屋頂、綠牆推廣講座資料，台北。

林昌慶，(99 年)，植物及介質討論，新竹。

日經 BP 社，(2006)，「屋上綠化 2」，日本。

楊秋忠，(93 年)，「土壤與肥料」，台中。

錫瑠環境綠化基金會，(98 年)，「你也能有綠屋頂」，台北。

營建署，(99 年)，建築技術規則，

<http://www.cpami.gov.tw/law/law/lawe-2/b-rule.htm>

(accessed on 2010/10/14)。

三奕科技股份有限公司，(100 年)，陶粒，

<http://www.arch-world.com.tw/Company/78602.html>

(accessed on 2012/01/02)。

Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., and Jinno, K. (2009). "Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs" *Ecological Engineering*, 35(3), pp. 369-380.

- Blanquies, J., Scharff, M., and Hallock, B. (2003). "The Design and Construction of A Rainfall Simulator." *Internation Erosion Control Association, 34th Annual Conference and Expo*, Las Vegas.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Carter, T., and Jackson, C.R. (2006). "Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales." *Landscape and Urban Planning*, 80(1-2), pp.84-94.
- Dunnett, N., and Kingsbury, N. (2008). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press, Inc. Oregon, U.S.A.
- Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., and Wilson, G.W. (1997). "Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties." *Proceedings of the 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro, 22–25 April 1997*, Vol. 1, pp. 13–23.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2002). *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*. FLL, Bonn.
- Friedrich, C.R. (2005). "Principles for selecting the proper components for a green roof growing media." *Proceedings of the Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Washington, DC, USA.
- Fang, C.F. (2008). "Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops." *Energy and Buildings*, 40, pp.1048-1052.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., and Andresen, J.A. (2007). "Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention." *Ecological Engineering*, 31(4), pp. 225-231.

- Hargreaves, G., and Samani, Z. (1985). "Reference crop evapotranspiration and temperature." *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), pp.96-99.
- Hien, W.N., Yok, T.P., and Yu, C. (2007). "Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate." *Building and Environment*, 42(1), pp. 25-54.
- Hilten R.N., Lawrence T.M., and Tollner E.W. (2008). "Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D." *Journal of Hydrology*, 358(3-4), pp. 288-293.
- Jarrett, A., Hunt, W., and Berghage, R., (2006). "Annual and individual-storm green roof stormwater response models." *Proceedings of 2006 ASABE Annual International Meeting*, Portland, Oregon, USA.
- Kukul, S.S., and Sur, H.S. (2004). "A simple and Portable Rainfall Simulator for Erosion Studies." *Agricultural Engineering*, 85, pp.55-57.
- Luckett, K. (2009). *Green Roof Construction and Maintenance*. McGraw-Hill, USA.
- Moran, A., Hunt B., and Smith J. (2005). " Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina." *Proceeding of 3rd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, DC. The Cardinal Group, Toronto, Canada.
- Mentens, J., Raes, D., and Hermy, M. (2006). "Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?." *Landscape and Urban Planning*, 77(3), pp. 217-226.
- Schwartz, F.W. and Zhang, H. (2003). *Fundamentals of Ground Water*. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.

- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., and Sejna, M., (2005). *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1*. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
- She, N., and Pang, J. (2010). “Physically Based Green Roof Model.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), pp. 458-464.
- Terstriep, M.L., and Stall, J.B. (1974). *The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS*. Illinois State Water Survey, Urbana, IL, USA.
- Takatura, T., Kitade, S., and Goto, E. (2000). “Cooling effect of greenery cover over a building” *Energy and Buildings*, 31(1), pp.1-6.
- Van Woert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., and Xiao, L. (2005). “Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth.” *Journal of Environmental Quality*, 34(3), pp. 1036-1044.
- Villarreal, E.L. and Bengtsson, L. (2005). “Response of a Sedum green-roof to individual rain events.” *Ecological Engineering*, 25(1), pp. 1-7.
- Wolf, D. and Lundholm, J.T. (2008). “Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability.” *Ecological Engineering*, 33(2), pp. 179-186.

附錄 A

A.1 θ_s 決定方法

1. FLL 法：依據 FLL(2002)所建議之方法將介質樣品泡至水中 24 小時，而後拿出靜置使之水滴出兩小時後稱重，並將其烘乾後再稱重，利用下式計算介質之最大含水率。

$$WK_{\max} = \frac{(m_{wk} - m_f) \times 100}{V} \quad (A.1)$$

其中

WK_{\max} ：最大含水率

m_{wk} ：最大含水率時介質重

m_f ：烘乾後之介質重

V ：所取介質樣品之體積

2. 實測推估法：依據實驗所監測到介質所有含水率數值，取其最大值，假設最大值趨近飽和含水率，唯此方法需要長時間監測，並不實用，但可將以此方法所得數值與前一方法作比對。
3. 孔隙率：雖然因介質特性及物理特性等關係，介質孔隙不全能填滿水，但為 θ_s 之極限值，本研究亦將嘗試用孔隙率取代之可行性。此外，亦常用壓力鍋試驗測試介質之飽和含水率，首先將飽和之介質秤重，置於壓力鍋內，而後分段加壓使介質孔隙中水分排出，並於每段加壓後將介質秤重，直至介質重量維持穩定不隨加壓而變化時，將介質烘乾秤重，故飽和含水率等於介質飽和時重量減去加壓後介質重，在除以介質體積。

A.2 SWCC 曲線

以下將介紹 SWCC 曲線實驗之步驟

1. 利用特殊設計之土樣容器、滴定管、滴定管夾及矽膠管組成 SWCC 實驗儀器組，如圖 A.1 所示。
2. 將陶瓷透水板(如圖 A.2)泡水 1 天使之飽和，並將土樣容器稱重，而後將烘乾土樣裝入後再稱重。
3. 將矽膠管及滴定管內填滿水，並將小氣泡完全去掉，調整滴定管內水柱，使之高於土樣容器許多，等水從土樣容器頂端冒出即達飽和。
4. 控制水柱液面維持在土樣容器中心點，等液面穩定不再變化即達穩定後將容器稱重，利用式 A.2 計算出壓力 0 時之含水率。
5. 而後調整水柱液面低於容器中心點，計算液面與中心點之高度差即為壓力值(公分水柱)，並換算為千帕單位(kpa)，而當液面達穩定後將容器稱重，亦利用式 A.2 計算出此時壓力之含水率。
6. 重複步驟 5，即可得到壓力與含水率間的關係，並繪圖及為 SWCC 曲線。

$$\theta = \frac{W_t - W_s}{W_t - W_i} * 100\% \quad (\text{A. 2})$$

其中

θ : 含水率

W_t : 濕土樣+儀器重

W_s : 乾土樣+儀器重

W_i : 儀器重



圖 A.1 實驗儀器組



圖 A.2 陶瓷透水板

A.3 截水實驗

以下將就截水實驗之內容，詳細說明截水實驗之步驟。

1. 將降雨模擬器架起並組裝完成所需設備(水箱、馬達、水管及調壓閥等，如圖 A.3)，並依據實驗所需雨量選定噴頭安裝。

2. 依據實驗需求介質高度選定可移動板安裝，並將槽頂蓋子蓋上以防雨水進入影響出流水結果，如圖 A.4。
3. 選定實驗所需之事先培養好之介質及植物並置於小實驗槽內，將槽移至降雨模擬器下符合降雨均勻之範圍。
4. 依序由槽邊孔以側插方式插入 TDR，並檢查橡皮塞是否與孔密合，且由電腦觀察 TDR 所測得之電壓值是否正常(依一般情況下含水率約為 30%，而電壓值以 TDR9 為例，約為 0.104 左右，其餘請參見附錄 A.4)，等待 5 分鐘左右使 TDR 達穩定，即為初始含水率。
5. 同時將收集表面逕流及底部滲漏之設備安裝完畢(如圖 A.5)。
6. 由於開起馬達後至調節完實驗所需壓力間，會有不穩定之雨水降下，故於開起馬達前以遮蔽物將槽上方完全遮住(如圖 A.6)。
7. 一切就緒後即可開啟馬達及調整好壓力，待雨量達穩定後將遮蔽物拿開並開始計時 60min，途中須注意水桶之水量，過低時儘快補充，避免水位低於進水口而抽到空氣影響降雨，造成實驗之誤差。
8. 時間到後再以遮蔽物將槽上方遮住，並將馬達關閉，而後靜置 40min 待出流水達穩定後，將 TDR 及出流水數據收集後即可進行下一場截水實驗。
9. 將 TDR 拔出，且將介質及植物移出，重複步驟 2-9。



圖 A.3 降雨模擬器所需設備之組裝



圖 A.4 小實驗槽蓋子



圖 A.5 小實驗槽出流水設備



圖 A.6 擋雨遮蔽物

A.4 TDR 校正

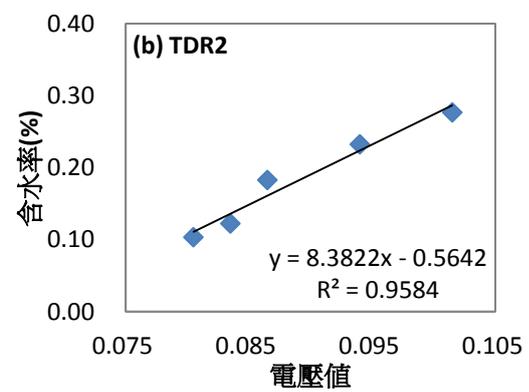
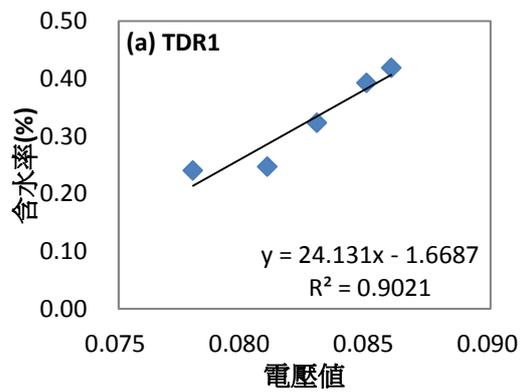
1. 首先利用土壤取樣器(如圖 A.7)取 100ml 介質樣品三份作為對照組並分別稱重，取平均後乘以 40 而得 4L 實驗介質需要取多少重量。
2. 而後以 5 號篩網將大顆粒篩掉，並置於有體積刻度之桶子中，如圖 A.8，調整體積至 4L(由於本實驗土樣密度關係到校正之準確性，故實驗過程中密度之控制相當重要)。
3. 將要校正之 TDR 埋入土樣中，等待 5 分鐘 TDR 測得電壓值達穩定後拿出，將土樣重新攪拌完全後再將 TDR 埋入等待五分鐘電壓值穩定，以土壤取樣器取兩個樣品後稱重。
4. 而後加入 100ml-200ml 水並將土樣重新攪拌完全後，調整體積至 3.8L(4L-200ml，後續一樣皆減 200ml)。
5. 重複步驟 3 及 4 四次後，將共 10 個土樣加上 3 個對照組於 110°C 烘箱中烘乾 1 天後稱重。
6. 以烘乾前重量減去烘乾後重量得含水率，而烘乾後土樣重量除以 100 得乾密度，10 個實驗土樣之密度必須符合對照組密度誤差 $\pm 25\%$ 。
7. 最後將步驟 3 所測得兩點之 TDR 電壓值及含水率取平均後繪製關係圖而得線性方程式，結果如圖 A.9 所示。

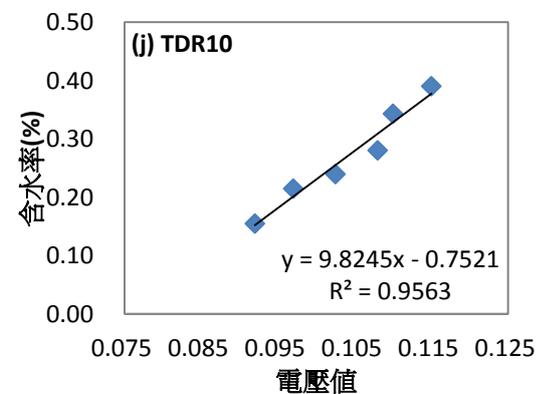
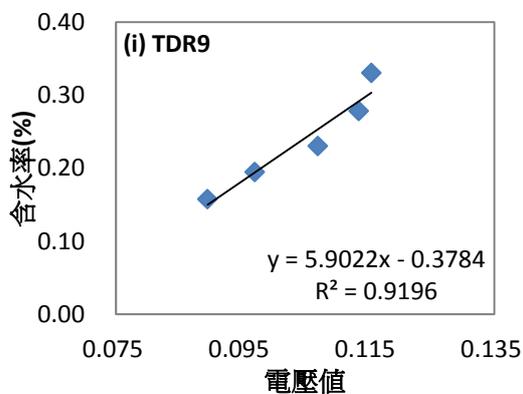
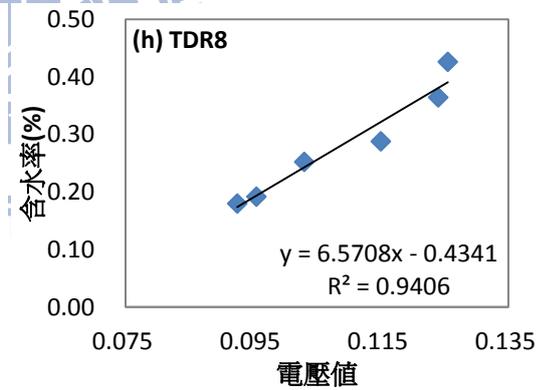
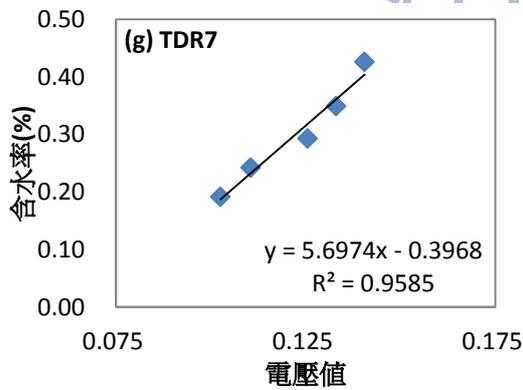
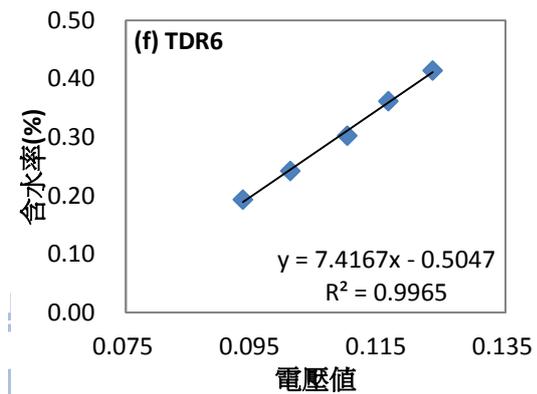
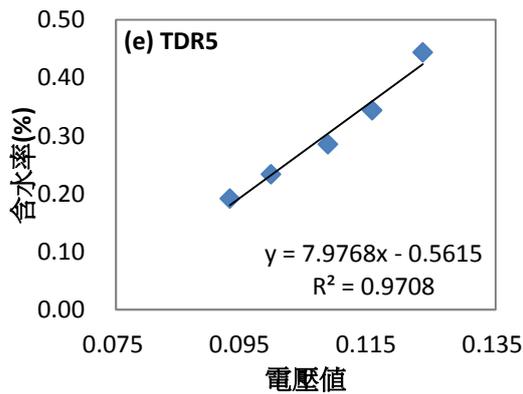
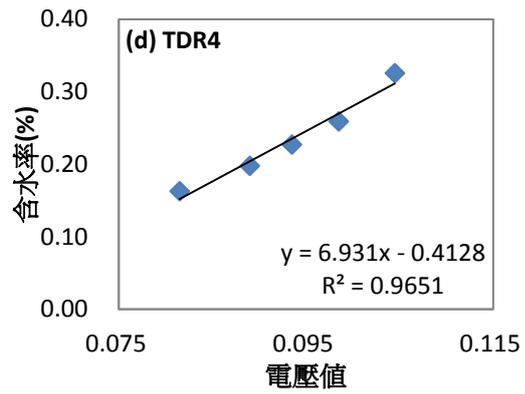
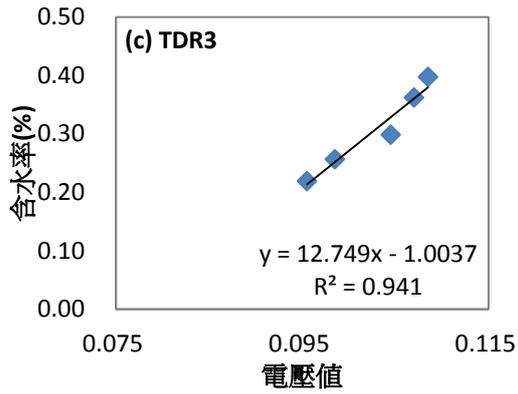


圖 A.7 土壤取樣器



圖 A.8 有體積刻度之桶子





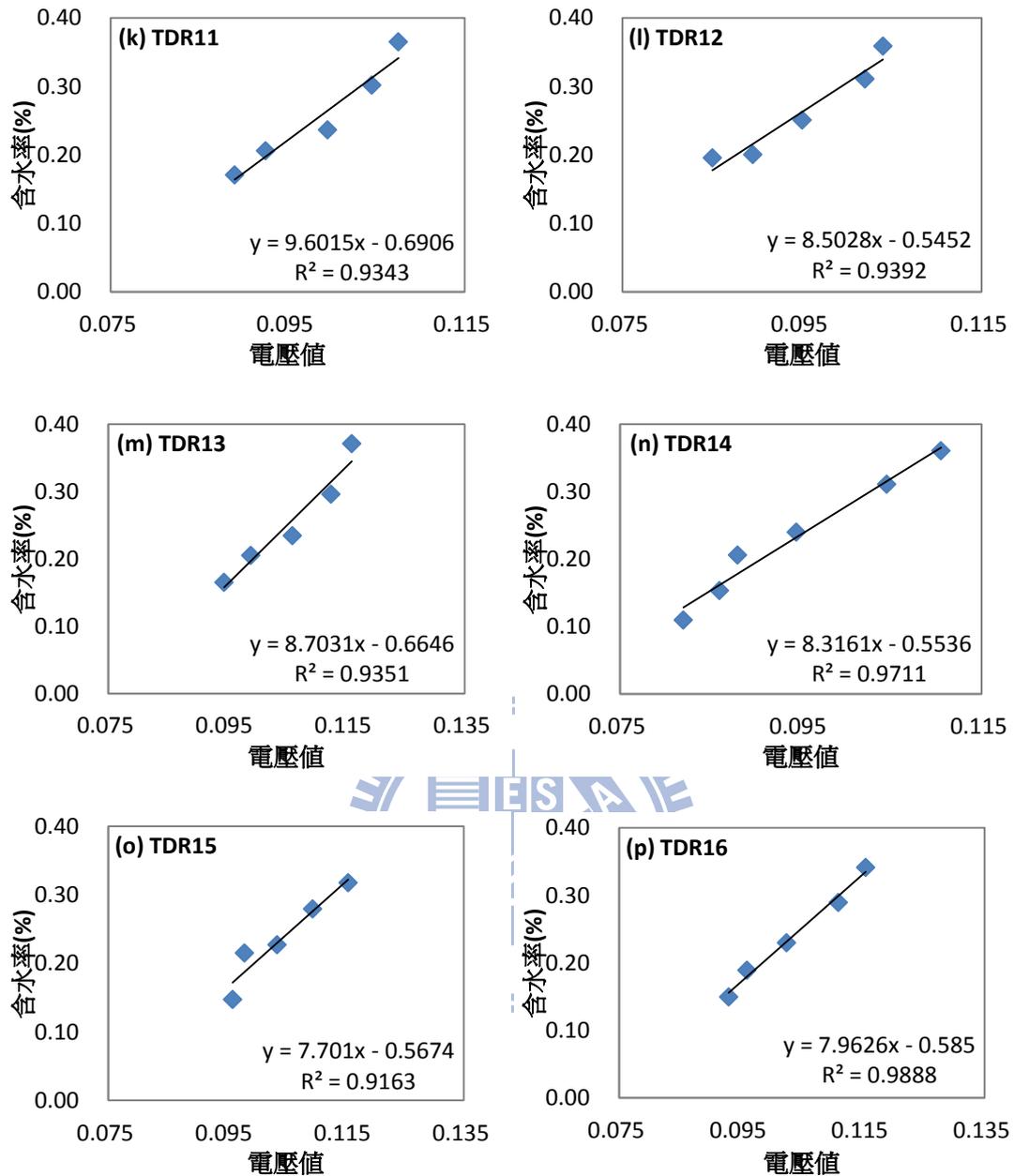


圖 A.9 TDR 電壓值與含水率關係圖(a)TDR1 (b)TDR2 (c)TDR3 (d)TDR4
 (e)TDR5 (f)TDR6 (g)TDR7 (h)TDR8 (i)TDR9 (j)TDR10
 (k)TDR11 (l)TDR12 (m)TDR13 (n)TDR14 (o)TDR15 (p)TDR16

A.5 降雨模擬器均勻性及再現性

本研究設計一約 110cm*110cm 方形盆，內置 11*11 個直徑 10cm 之塑膠罐，如圖 A.10 所示，至於降雨模擬器內，用來接降雨模擬器產生降雨

之雨水以計算各點之降雨量，並以相同噴頭、噴頭高度及壓力重複幾次實驗，來驗證降雨模擬器之均勻性及再現性。



圖 A.10 塑膠罐

表 A.1 降雨模擬器噴頭 J050 均勻性及再現性分析比較表 (單位 mm/hr)

9.13	16.44	21.91	25.57	25.57	25.57	25.57	21.91	14.61	10.96	5.48
9.13	18.26	27.39	18.26	36.52	36.52	36.52	32.87	23.74	18.26	10.96
14.61	25.57	34.70	38.35	38.35	38.35	36.52	36.52	29.22	21.91	12.78
14.61	25.57	36.52	38.35	42.00	42.00	40.18	40.18	32.87	25.57	18.26
20.09	31.04	38.35	40.18	40.18	42.00	40.18	40.18	32.87	25.57	16.44
18.26	29.22	34.70	40.18	42.00	42.00	40.18	40.18	34.70	25.57	16.44
18.26	27.39	32.87	36.52	40.18	40.18	40.18	36.52	29.22	21.91	10.96
10.96	18.26	25.57	32.87	34.70	36.52	32.87	29.22	25.57	18.26	10.96
7.30	14.61	18.26	25.57	27.39	27.39	25.57	21.91	18.26	10.96	7.30
3.65	7.30	10.96	16.44	18.26	21.91	16.44	14.61	14.61	7.30	3.65
1.83	3.65	5.48	9.13	9.13	10.96	9.13	7.30	5.48	3.65	1.83

5.92	8.88	17.77	23.69	29.61	29.61	29.61	26.65	17.77	11.85	5.92
8.88	17.77	26.65	32.57	38.50	38.50	35.54	35.54	26.65	20.73	11.85
14.81	23.69	39.09	38.50	41.46	41.46	41.46	38.50	32.57	23.69	14.81
17.77	29.61	38.50	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	35.54	26.65	17.77
17.77	26.65	35.54	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	38.50	29.61	17.77
17.77	23.69	35.54	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	35.54	26.65	17.77
14.81	23.69	29.61	35.54	35.54	41.46	38.50	35.54	29.61	20.73	11.85
5.92	17.77	20.73	29.61	32.57	32.57	29.61	26.65	23.69	16.58	8.88
5.92	11.85	14.81	22.51	20.73	23.69	20.73	17.77	14.81	8.88	5.92
2.96	5.92	8.88	14.81	14.81	17.77	15.40	14.81	14.81	5.92	4.74
1.78	2.96	5.92	8.88	8.88	8.88	8.88	5.92	5.92	2.96	1.78

表 A.2 降雨模擬器噴頭 015 均勻性及再現性分析比較表 (單位 mm/hr)

21.91	31.78	38.35	43.83	47.11	43.83	43.83	55.88	38.35	31.78	20.82
27.39	36.16	43.83	47.11	53.69	54.78	53.69	54.78	47.11	38.35	21.91
32.87	43.83	44.92	52.59	63.55	63.55	56.98	54.78	49.31	41.64	29.58
35.06	44.92	54.78	63.55	65.74	64.65	64.65	63.55	54.78	43.83	32.87
42.73	49.31	56.98	66.84	69.03	66.84	66.84	64.65	63.55	48.21	32.87
43.83	54.78	63.55	67.93	70.12	70.12	67.93	63.55	58.07	44.92	35.06
43.83	54.78	63.55	66.84	69.03	67.93	65.74	63.55	53.69	43.83	32.87
41.64	54.78	63.55	64.65	64.65	65.74	63.55	63.55	43.83	41.64	30.68
32.87	46.02	54.78	63.55	63.55	63.55	54.78	50.40	44.92	32.87	30.68
31.78	36.16	43.83	53.69	54.78	53.69	46.02	42.73	33.97	28.49	19.72
21.91	31.78	33.97	44.92	43.83	43.83	43.83	33.97	30.68	24.11	16.44

19.72	19.72	32.87	48.21	49.31	44.92	43.83	36.16	32.87	30.68	21.91
20.82	32.87	48.21	51.50	51.50	53.69	58.07	58.07	55.88	43.83	23.01
25.20	41.64	48.21	54.78	55.88	60.26	58.07	61.36	54.78	48.21	23.01
32.87	48.21	51.50	60.26	65.74	64.65	63.55	64.65	60.26	54.78	36.16
43.83	54.78	60.26	67.93	67.93	65.74	64.65	66.84	63.55	54.78	38.35
43.83	54.78	61.36	69.03	70.12	69.03	70.12	67.93	60.26	51.50	32.87
38.35	55.88	64.65	70.12	69.03	70.12	65.74	63.55	60.26	49.31	36.16
36.16	53.69	60.26	69.03	70.12	70.12	67.93	65.74	64.65	43.83	32.87
32.87	43.83	58.07	66.84	66.84	67.93	63.55	61.36	52.59	41.64	32.87
20.82	38.35	41.64	49.31	47.11	43.83	43.83	43.83	32.87	32.87	16.44
20.82	20.82	30.68	38.35	38.35	43.83	43.83	38.35	21.91	21.91	16.44

附錄 B

表 B.1 無排水板截水實驗結果

PP	RO	DP	RO+DP	θ_i	厚度	介質	植物
20	0.28	13.34	13.62	0.329	7	1	圓葉景天
20	0.57	10.96	11.53	0.337	10	1	圓葉景天
20	0.71	10.00	10.71	0.314	12	1	圓葉景天
20	0.00	13.08	13.08	0.344	7	1	越橘葉蔓榕
20	0.00	11.24	11.24	0.306	10	1	越橘葉蔓榕
20	0.14	10.26	10.40	0.349	12	1	越橘葉蔓榕
20	0.00	12.54	12.54	0.326	7	2	圓葉景天
20	0.28	12.38	12.66	0.332	10	2	圓葉景天
20	0.14	9.92	10.06	0.302	12	2	圓葉景天
20	0.00	14.20	14.20	0.362	7	2	越橘葉蔓榕
20	0.00	13.78	13.78	0.303	10	2	越橘葉蔓榕
20	0.00	12.54	12.54	0.282	12	2	越橘葉蔓榕
36	3.25	13.76	17.01	0.299	7	1	圓葉景天
36	2.69	11.80	14.49	0.291	10	1	圓葉景天
36	2.26	9.54	11.80	0.316	12	1	圓葉景天
36	0.99	13.12	14.11	0.286	7	1	越橘葉蔓榕
36	1.13	13.22	14.35	0.325	10	1	越橘葉蔓榕
36	1.56	11.10	12.66	0.303	12	1	越橘葉蔓榕
36	1.84	16.14	17.98	0.302	7	2	圓葉景天
36	1.42	14.60	16.02	0.312	10	2	圓葉景天
36	1.13	12.48	13.61	0.278	12	2	圓葉景天
36	0.99	14.92	15.91	0.339	7	2	越橘葉蔓榕
36	1.13	13.44	14.57	0.326	10	2	越橘葉蔓榕
36	1.84	13.82	15.66	0.354	12	2	越橘葉蔓榕
48	1.27	19.92	21.19	0.321	7	1	圓葉景天
48	1.98	20.48	22.46	0.350	10	1	圓葉景天
48	0.85	16.88	17.73	0.333	12	1	圓葉景天
48	0.71	20.02	20.73	0.301	7	1	越橘葉蔓榕
48	2.26	21.14	23.40	0.348	10	1	越橘葉蔓榕
48	1.84	18.56	20.40	0.312	12	1	越橘葉蔓榕
48	0.85	21.72	22.57	0.340	7	2	圓葉景天
48	1.13	19.76	20.89	0.334	10	2	圓葉景天

(續)

48	0.99	18.24	19.23	0.308	12	2	圓葉景天
48	0.42	20.66	21.08	0.291	7	2	越橘葉蔓榕
48	0.71	20.80	21.51	0.341	10	2	越橘葉蔓榕
48	1.56	19.00	20.56	0.313	12	2	越橘葉蔓榕
54	5.38	27.70	33.08	0.290	7	1	圓葉景天
54	4.25	26.66	30.91	0.319	10	1	圓葉景天
54	2.40	22.04	24.44	0.318	12	1	圓葉景天
54	3.40	26.56	29.96	0.326	7	1	越橘葉蔓榕
54	2.26	22.06	24.32	0.316	10	1	越橘葉蔓榕
54	2.26	20.34	22.60	0.305	12	1	越橘葉蔓榕
54	3.40	25.96	29.36	0.312	7	2	圓葉景天
54	2.83	27.30	30.13	0.348	10	2	圓葉景天
54	1.84	24.94	26.78	0.317	12	2	圓葉景天
54	2.55	23.42	25.97	0.294	7	2	越橘葉蔓榕
54	1.70	23.48	25.18	0.318	10	2	越橘葉蔓榕
54	1.42	23.24	24.66	0.333	12	2	越橘葉蔓榕
64	2.55	44.64	47.19	0.313	7	1	圓葉景天
64	3.26	40.98	44.24	0.340	10	1	圓葉景天
64	4.10	37.56	41.66	0.292	12	1	圓葉景天
64	2.69	36.80	39.49	0.331	7	1	越橘葉蔓榕
64	2.83	35.46	38.29	0.316	10	1	越橘葉蔓榕
64	3.11	35.64	38.75	0.363	12	1	越橘葉蔓榕
64	2.12	43.24	45.36	0.304	7	2	圓葉景天
64	1.42	43.96	45.38	0.336	10	2	圓葉景天
64	3.11	40.94	44.05	0.311	12	2	圓葉景天
64	3.11	40.98	44.09	0.337	7	2	越橘葉蔓榕
64	2.69	38.60	41.29	0.302	10	2	越橘葉蔓榕
64	2.83	38.94	41.77	0.336	12	2	越橘葉蔓榕
70	8.63	45.98	54.61	0.296	7	1	圓葉景天
70	6.23	46.16	52.39	0.292	10	1	圓葉景天
70	6.65	37.16	43.81	0.313	12	1	圓葉景天
70	3.96	45.50	49.46	0.333	7	1	越橘葉蔓榕
70	3.68	44.78	48.46	0.313	10	1	越橘葉蔓榕
70	4.25	38.26	42.51	0.345	12	1	越橘葉蔓榕
70	4.25	54.06	58.31	0.325	7	2	圓葉景天
70	5.52	48.66	54.18	0.284	10	2	圓葉景天
70	4.39	44.76	49.15	0.325	12	2	圓葉景天
70	4.53	47.92	52.45	0.334	7	2	越橘葉蔓榕
70	3.26	44.28	47.54	0.322	10	2	越橘葉蔓榕
70	4.81	41.76	46.57	0.332	12	2	越橘葉蔓榕

表 B.2 不同雨量下截水實驗之雨量及截水增加比例

厚度/介質/植物	降雨量 (mm)	雨量增加比例	截水量 (mm)	截水增加比例
7cm/1/景天	20	-	6.38	-
	36	1.80	18.99	2.98
	48	1.33	26.81	1.41
	54	1.13	20.92	0.78
	64	1.19	16.81	0.80
	70	1.09	15.39	0.92
10cm/1/景天	20	-	8.47	-
	36	1.80	21.51	2.54
	48	1.33	25.54	1.19
	54	1.13	23.09	0.90
	64	1.19	19.76	0.86
	70	1.09	17.61	0.89
12cm/1/景天	20	-	9.29	-
	36	1.80	24.20	2.60
	48	1.33	30.27	1.25
	54	1.13	29.56	0.98
	64	1.19	22.34	0.76
	70	1.09	26.19	1.17
7cm/1/蔓榕	20	-	6.92	-
	36	1.80	21.89	3.16
	48	1.33	27.27	1.25
	54	1.13	24.04	0.88
	64	1.19	24.51	1.02
	70	1.09	20.54	0.84
10cm/1/蔓榕	20	-	8.76	-
	36	1.80	21.65	2.47
	48	1.33	24.60	1.14
	54	1.13	29.68	1.21
	64	1.19	25.71	0.87
	70	1.09	21.54	0.84
12ccm/1/蔓榕	20	-	9.60	-
	36	1.80	23.34	2.43
	48	1.33	27.60	1.18
	54	1.13	31.40	1.14
	64	1.19	25.25	0.80
	70	1.09	27.49	1.09

(續)

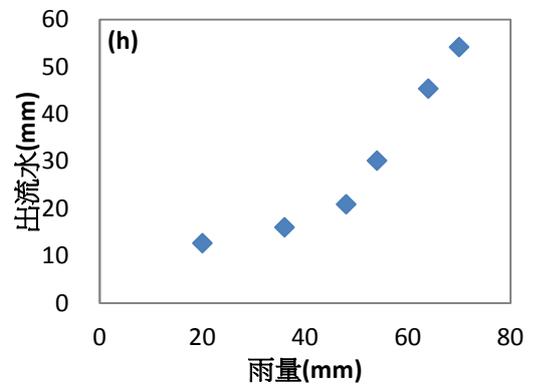
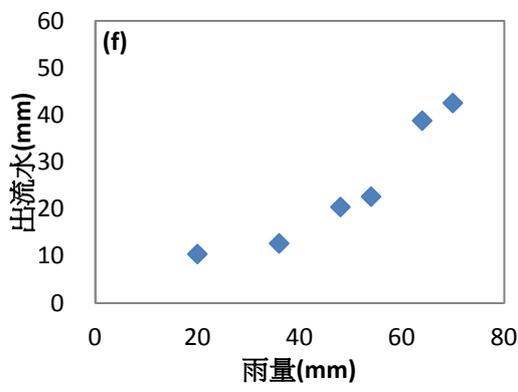
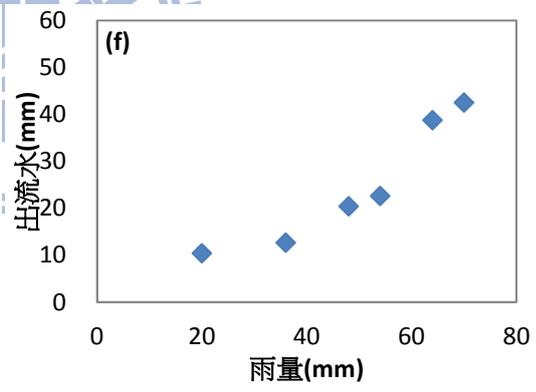
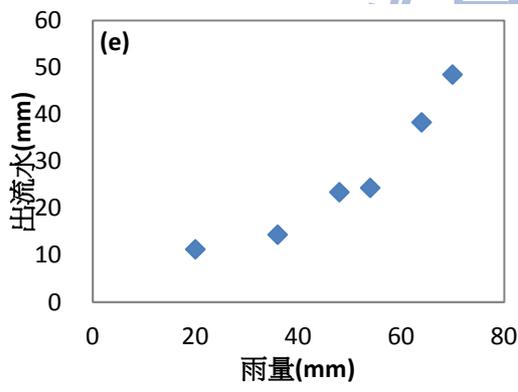
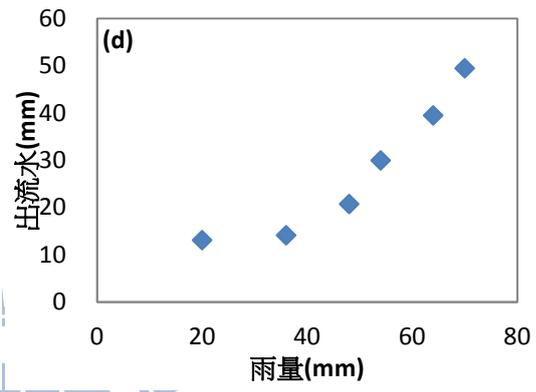
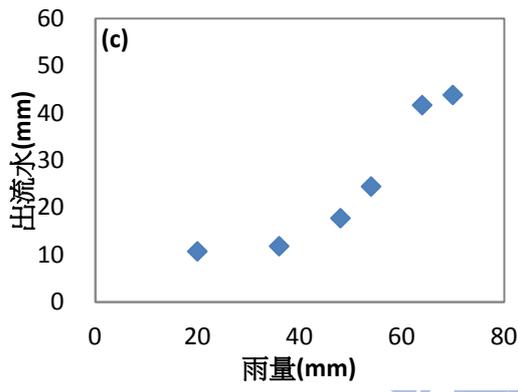
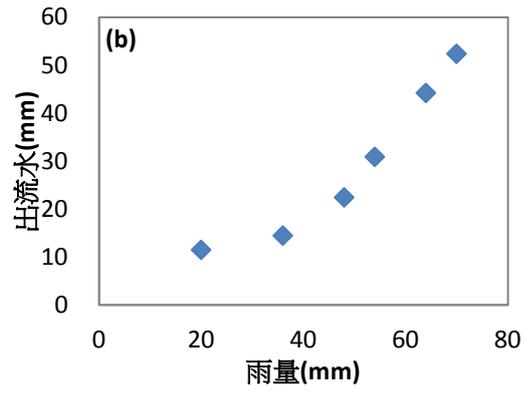
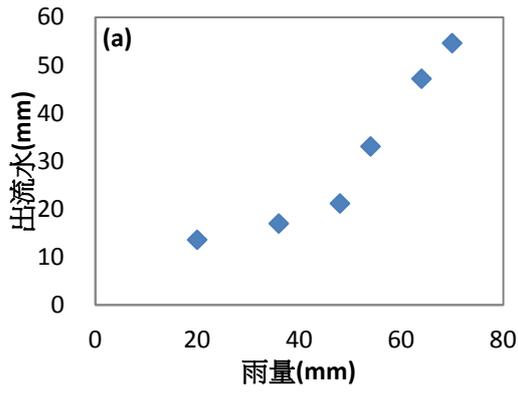
7cm/2/景天	20	-	7.46	-
	36	1.80	18.02	2.42
	48	1.33	25.43	1.41
	54	1.13	24.64	0.97
	64	1.19	18.64	0.76
	70	1.09	11.69	0.63
10cm/2/景天	20	-	7.34	-
	36	1.80	19.98	2.72
	48	1.33	27.11	1.36
	54	1.13	23.87	0.88
	64	1.19	18.62	0.78
	70	1.09	15.82	0.85
12cm/2/景天	20	-	9.94	-
	36	1.80	22.39	2.25
	48	1.33	28.77	1.28
	54	1.13	27.22	0.95
	64	1.19	19.95	0.73
	70	1.09	20.85	1.05
7cm/2/蔓榕	20	-	5.80	-
	36	1.80	20.09	3.46
	48	1.33	26.92	1.34
	54	1.13	28.03	1.04
	64	1.19	19.91	0.71
	70	1.09	17.55	0.88
10cm/2/蔓榕	20	-	6.22	-
	36	1.80	21.43	3.44
	48	1.33	26.49	1.24
	54	1.13	28.82	1.09
	64	1.19	22.71	0.79
	70	1.09	22.46	0.99
12cm/2/蔓榕	20	-	7.46	-
	36	1.80	20.34	2.73
	48	1.33	27.44	1.35
	54	1.13	29.34	1.07
	64	1.19	22.23	0.76
	70	1.09	23.43	1.05

表 B.3 不同介質厚度下載水實驗之截水/厚度增幅比

雨量/介質/植物	介質厚度 (cm)	厚度增加 比例	截水量 (mm)	截水增加 比例	增幅比
20mm/1/景天	7	-	6.38	-	-
	10	1.43	8.47	1.33	0.93
	12	1.2	9.29	1.1	0.92
20mm/1/蔓榕	7	-	6.92	-	-
	10	1.43	8.76	1.27	0.89
	12	1.2	9.6	1.1	0.92
20mm/2/景天	7	-	7.46	-	-
	10	1.43	7.34	0.98	0.69
	12	1.2	9.94	1.35	1.13
20mm/2/蔓榕	7	-	5.8	-	-
	10	1.43	6.22	1.07	0.75
	12	1.2	7.46	1.2	1.00
36mm/1/景天	7	-	18.99	-	-
	10	1.43	21.51	1.13	0.79
	12	1.2	24.2	1.13	0.94
36mm/1/蔓榕	7	-	21.89	-	-
	10	1.43	21.65	0.99	0.69
	12	1.2	23.34	1.08	0.90
36mm/2/景天	7	-	18.02	-	-
	10	1.43	19.98	1.11	0.78
	12	1.2	22.39	1.12	0.93
36mm/2/蔓榕	7	-	20.09	-	-
	10	1.43	21.43	1.07	0.75
	12	1.2	20.34	0.95	0.79
48mm/1/景天	7	-	26.81	-	-
	10	1.43	25.54	0.95	0.66
	12	1.2	30.27	1.19	0.99
48mm/1/蔓榕	7	-	27.27	-	-
	10	1.43	24.6	0.9	0.63
	12	1.2	27.6	1.12	0.93
48mm/2/景天	7	-	25.43	-	-
	10	1.43	27.11	1.07	0.75
	12	1.2	28.77	1.06	0.88

(續)

48mm/2/ 蔓榕	7	-	26.92	-	-
	10	1.43	26.49	0.98	0.69
	12	1.2	27.44	1.04	0.87
54m/1/ 景天	7	-	20.92	-	-
	10	1.43	23.09	1.1	0.77
	12	1.2	29.56	1.28	1.07
54mm/1/ 蔓榕	7	-	24.04	-	-
	10	1.43	29.68	1.23	0.86
	12	1.2	31.4	1.06	0.88
54mm/2/ 景天	7	-	24.64	-	-
	10	1.43	23.87	0.97	0.68
	12	1.2	27.22	1.14	0.95
54mm/2/ 蔓榕	7	-	28.03	-	-
	10	1.43	28.82	1.03	0.72
	12	1.2	29.34	1.02	0.85
64mm/1/ 景天	7	-	16.81	-	-
	10	1.43	19.76	1.18	0.83
	12	1.2	22.34	1.13	0.94
64mm/1/ 蔓榕	7	-	24.51	-	-
	10	1.43	25.71	1.05	0.73
	12	1.2	25.25	0.98	0.82
64mm/2/ 景天	7	-	18.64	-	-
	10	1.43	18.62	1	0.70
	12	1.2	19.95	1.07	0.89
64mm/2/ 蔓榕	7	-	19.91	-	-
	10	1.43	22.71	1.14	0.80
	12	1.2	22.23	0.98	0.82
70mm/1/ 景天	7	-	15.39	-	-
	10	1.43	17.61	1.14	0.80
	12	1.2	26.19	1.49	1.24
70mm/1/ 蔓榕	7	-	20.54	-	-
	10	1.43	21.54	1.05	0.73
	12	1.2	27.49	1.28	1.07
70mm/2/ 景天	7	-	11.69	-	-
	10	1.43	15.82	1.35	0.94
	12	1.2	20.85	1.32	1.10
70mm/2/ 蔓榕	7	-	17.55	-	-
	10	1.43	22.46	1.28	0.90
	12	1.2	23.43	1.04	0.87



(續)

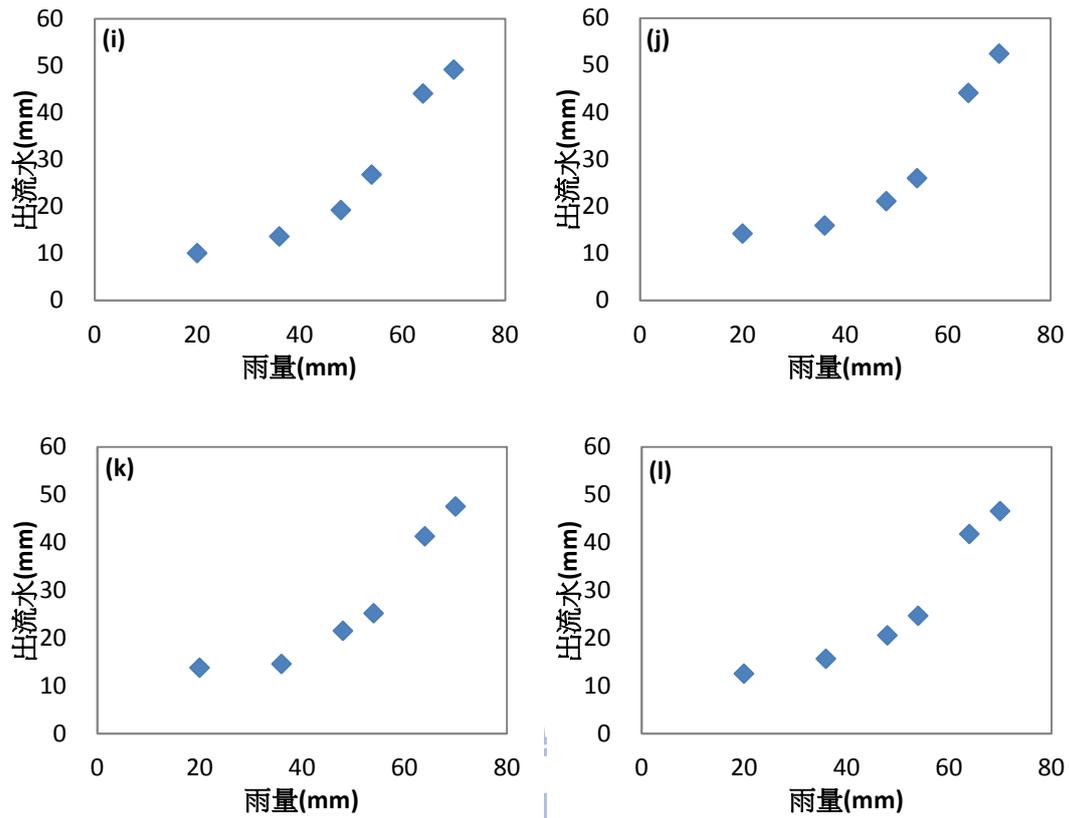
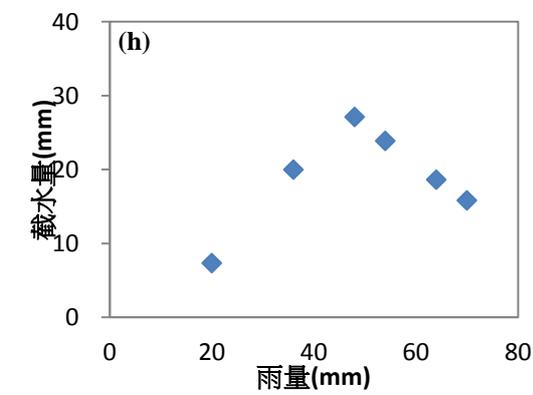
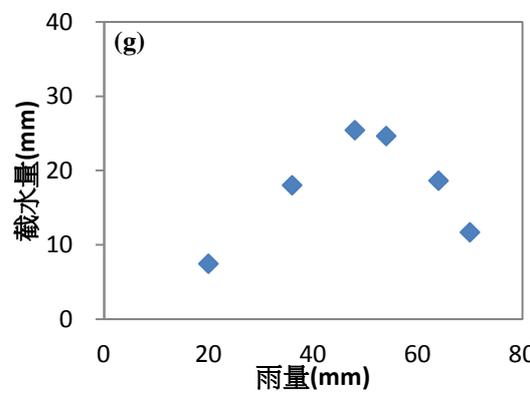
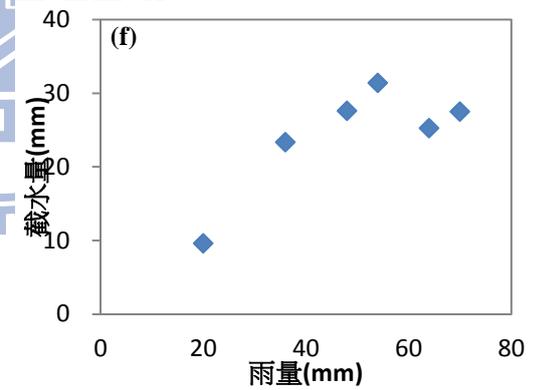
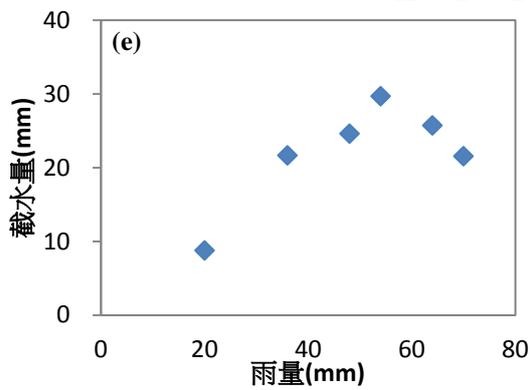
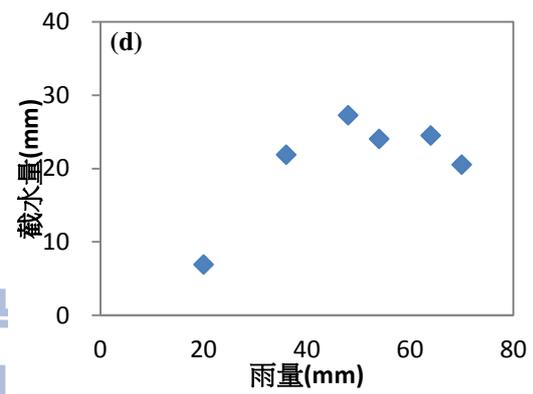
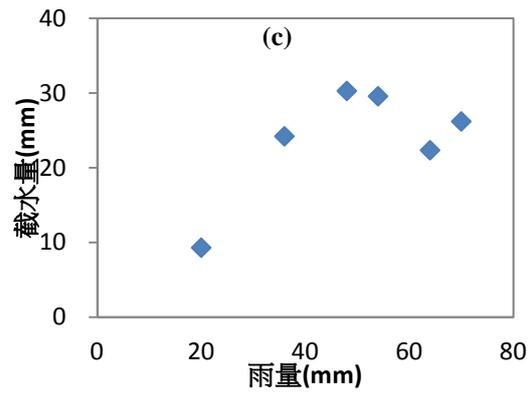
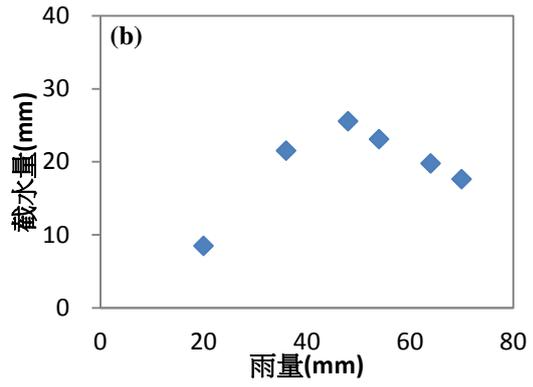
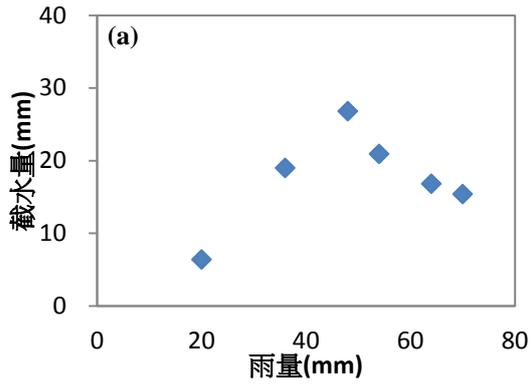


圖 B.1 不同降雨而其餘因子不變下之出流水圖 (a)介質 1、7cm、圓葉景天 (b)介質 1、10cm、圓葉景天 (c)介質 1、12cm、圓葉景天 (d)介質 1、7cm、越橘葉蔓榕 (e)介質 1、10cm、越橘葉蔓榕 (f)介質 1、12cm、越橘葉蔓榕 (g)介質 2、7cm、圓葉景天 (h)介質 2、10cm、圓葉景天 (i)介質 2、12cm、圓葉景天 (j)介質 2、7cm、越橘葉蔓榕 (k)介質 2、10cm、越橘葉蔓榕 (l)介質 2、12cm、越橘葉蔓榕



(續)

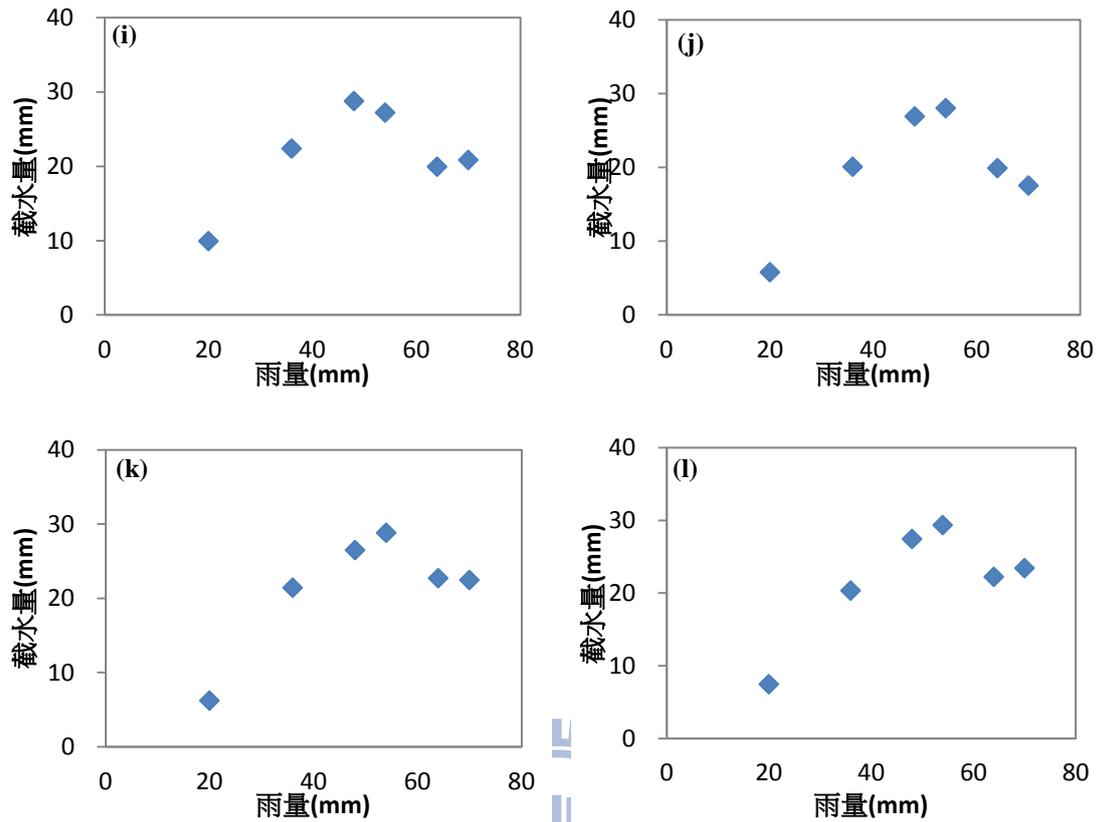


圖 B.2 不同降雨而其餘因子不變下之截水圖 (a)介質 1、7cm、圓葉景天 (b) 介質 1、10cm、圓葉景天 (c)介質 1、12cm、圓葉景天 (d)介質 1、7cm、越橘葉蔓榕 (e)介質 1、10cm、越橘葉蔓榕 (f)介質 1、12cm、越橘葉蔓榕 (g)介質 2、7cm、圓葉景天 (h)介質 2、10cm、圓葉景天 (i)介質 2、12cm、圓葉景天 (j)介質 2、7cm、越橘葉蔓榕 (k) 介質 2、10cm、越橘葉蔓榕 (l)介質 2、12cm、越橘葉蔓榕

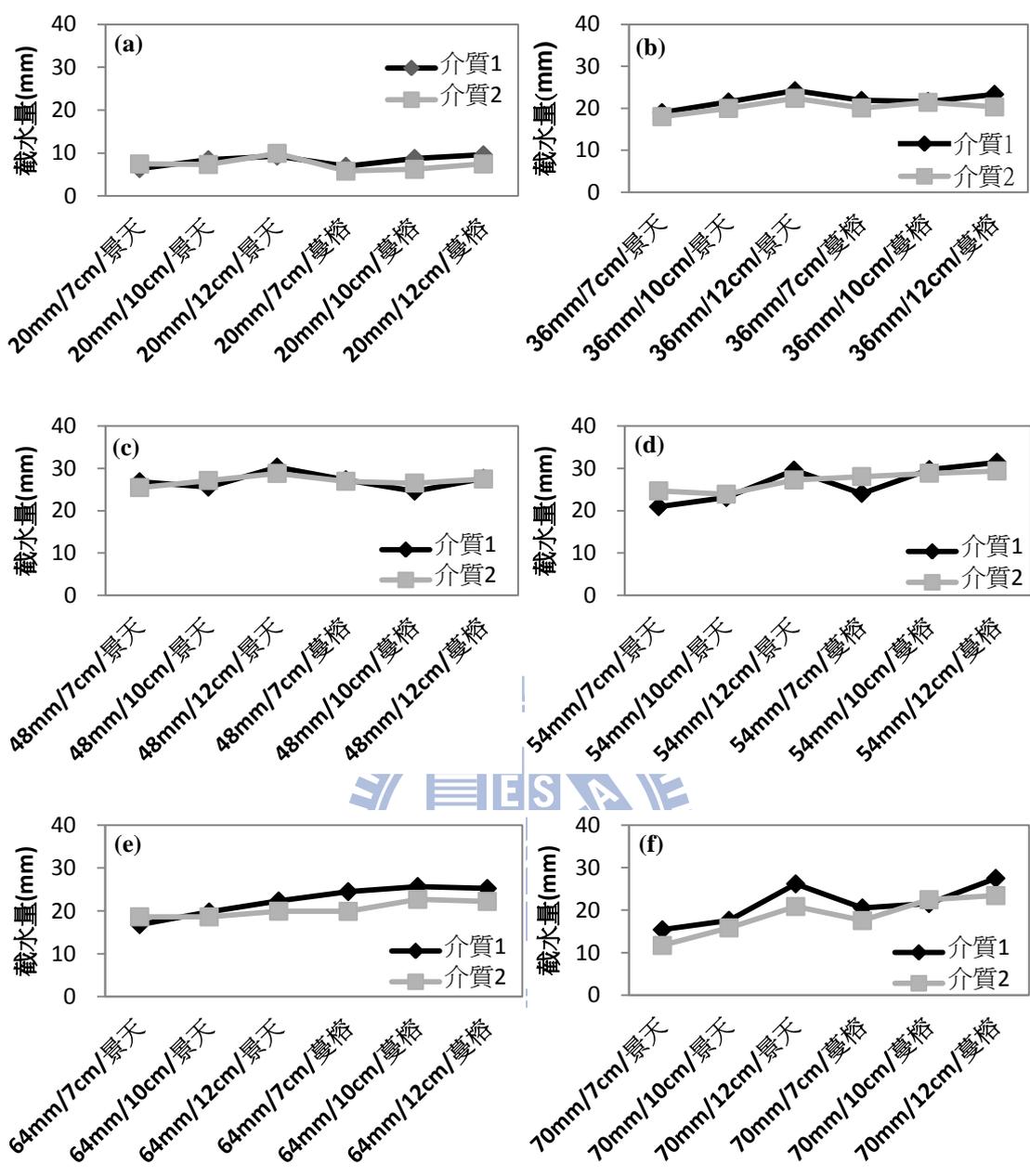


圖 B.3 不同介質而其餘因子皆相同下之截水量圖(a)雨量 20mm (b)雨量 36mm (c)雨量 48mm (d)雨量 54mm (e)雨量 64mm (f)雨量 70mm

表 B.4 有排水板截水實驗結果

有排水板					無排水板		排水板 截水量	平均排水板 截水量
雨量	表面 逕流	底部 滲漏	介 質	植物	表面 逕流	底部 滲漏		
70	4.39	26.54	1	景天	6.23	46.16	19.62	19.88
70	3.26	25.98	1	蔓榕	3.68	44.78	18.80	
70	4.67	25.10	2	景天	5.52	48.66	23.56	
70	3.11	26.74	2	蔓榕	3.26	44.28	17.54	
64	3.68	21.72	1	景天	3.26	40.98	19.26	18.24
64	2.55	20.84	1	蔓榕	2.83	35.46	14.62	
64	2.83	22.36	2	景天	1.42	43.96	21.60	
64	2.97	21.12	2	蔓榕	2.69	38.60	17.48	
54	2.83	9.70	1	景天	4.25	26.66	16.96	15.49
54	1.84	9.44	1	蔓榕	2.26	22.06	12.62	
54	1.84	10.08	2	景天	2.83	27.30	17.22	
54	1.98	8.32	2	蔓榕	1.70	23.48	15.16	
48	1.70	5.94	1	景天	1.98	20.48	14.54	14.305
48	2.26	6.14	1	蔓榕	2.26	21.14	15.00	
48	1.42	5.88	2	景天	1.13	19.76	13.88	
48	1.13	7.00	2	蔓榕	0.71	20.80	13.80	
36	1.27	1.98	1	景天	2.69	11.80	9.82	11.27
36	0.85	1.80	1	蔓榕	1.13	13.22	11.42	
36	0.71	2.16	2	景天	1.42	14.60	12.44	
36	0.85	2.04	2	蔓榕	1.13	13.44	11.40	
20	0.42	0.92	1	景天	0.57	10.96	10.04	11.1
20	0.28	0.92	1	蔓榕	0.00	11.24	10.32	
20	0.14	1.10	2	景天	0.28	12.38	11.28	
20	0.00	1.02	2	蔓榕	0.00	13.78	12.76	

附錄 C

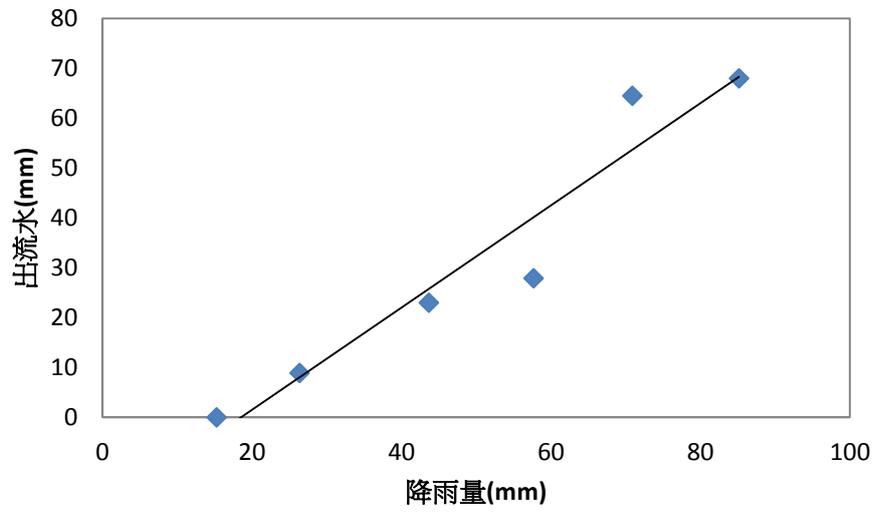


圖 C.1 自然雨降雨量與出流水比較圖

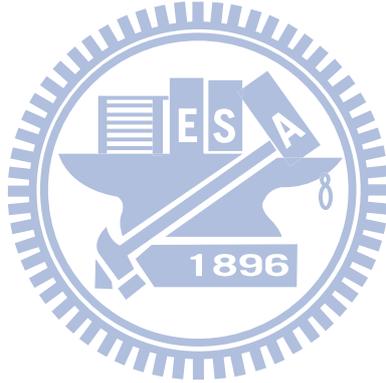


表 C.1 驗證組之實際與推估出流水量-以雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	20	1	7	圓葉景天	13.62	-2.65 (119.5%)	2.23 (83.6%)	1.67 (87.7%)	1.90 (86.1%)	3.97 (70.9%)	24.93 (83.0%)	18.18 (33.5%)	13.83 (1.52%)	35.37 (159.7%)	13.77 (1.1%)
B	20	1	10	圓葉景天	11.53	-2.65 (123.0%)	-1.31 (111.4%)	-2.73 (123.7%)	3.51 (69.6%)	-2.93 (125.4%)	23.13 (100.6%)	15.07 (30.7%)	10.67 (7.5%)	32.64 (183.1%)	7.74 (32.8%)
C	20	1	12	圓葉景天	10.71	-2.65 (124.8%)	-8.92 (183.3%)	-6.94 (164.8%)	1.68 (84.4%)	-7.52 (170.3%)	27.75 (159.2%)	12.99 (21.3%)	8.96 (16.3%)	27.76 (159.3%)	9.34 (12.8%)
D	20	1	7	越橘葉蔓榕	13.08	-2.65 (120.3%)	5.21 (60.2%)	2.65 (79.4%)	5.14 (60.7%)	3.97 (69.7%)	22.31 (70.5%)	18.18 (39.0%)	13.63 (4.2%)	36.92 (182.3%)	10.99 (16.0%)
E	20	1	10	越橘葉蔓榕	11.24	-2.65 (123.6%)	-8.41 (174.8%)	-4.37 (138.9%)	-0.30 (102.6%)	-2.93 (126.0%)	28.07 (149.8%)	15.07 (34.0%)	11.09 (1.3%)	29.38 (161.4%)	8.99 (20.0%)
F	20	1	12	越橘葉蔓榕	10.40	-2.65 (125.5%)	-5.70 (154.8%)	-6.32 (160.8%)	2.88 (72.4%)	-7.52 (172.3%)	24.56 (136.2%)	12.99 (24.9%)	8.47 (18.5%)	31.43 (202.2%)	11.31 (8.7%)
G	20	2	7	圓葉景天	12.54	-2.65 (121.2%)	2.05 (83.7%)	1.61 (87.2%)	1.69 (86.5%)	3.97 (68.3%)	24.60 (96.1%)	18.18 (45.0%)	13.87 (10.6%)	35.03 (179.4%)	20.36 (62.4%)
H	20	2	10	圓葉景天	12.66	-2.65 (121.0%)	-2.44 (119.3%)	-3.00 (123.7%)	2.90 (77.1%)	-2.93 (123.1%)	23.76 (87.7%)	15.07 (19.0%)	10.74 (15.2%)	32.08 (153.3%)	6.30 (50.2%)
I	20	2	12	圓葉景天	10.06	-2.65 (126.4%)	-14.21 (241.3%)	-7.96 (179.1%)	-0.29 (102.9%)	-7.52 (174.8%)	29.20 (190.2%)	12.99 (29.1%)	9.12 (9.3%)	26.52 (163.7%)	23.21 (130.6%)
J	20	2	7	越橘葉蔓榕	14.20	-2.65 (118.7%)	6.97 (50.9%)	3.23 (77.2%)	7.07 (50.2%)	3.97 (72.0%)	13.56 (4.5%)	18.18 (28.0%)	13.38 (5.8%)	38.82 (173.4%)	8.07 (43.2%)
K	20	2	10	越橘葉蔓榕	13.78	-2.65 (119.3%)	-8.84 (164.2%)	-4.47 (132.5%)	-0.53 (103.8%)	-2.93 (121.2%)	28.19 (104.6%)	15.07 (9.3%)	11.15 (19.1%)	28.99 (110.4%)	12.26 (11.0%)
L	20	2	12	越橘葉蔓榕	12.54	-2.65 (121.2%)	-24.87 (298.3%)	-10.01 (179.8%)	-4.26 (133.9%)	-7.52 (160.0%)	32.73 (161.0%)	12.99 (3.6%)	9.40 (25.1%)	24.44 (94.9%)	31.16 (148.5%)

編號	降雨強度(mm)	基質種類	基質厚度(cm)	植栽種類	實測值(mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	48	1	7	圓葉景天	21.19	24.49 (15.5%)	31.28 (47.6%)	30.01 (41.6%)	32.88 (55.1%)	31.11 (46.8%)	24.68 (16.4%)	24.37 (15.0%)	41.94 (97.9%)	34.50 (62.8%)	14.64 (30.9%)
B	48	1	10	圓葉景天	22.46	24.49 (9.0%)	32.77 (48.9%)	26.67 (18.7%)	27.65 (23.1%)	24.21 (7.8%)	11.78 (49.5%)	21.25 (5.4%)	38.49 (71.4%)	33.96 (51.2%)	6.15 (72.6%)
C	48	1	12	圓葉景天	17.73	24.49 (38.1%)	20.40 (15.1%)	21.31 (20.2%)	19.57 (10.4%)	19.62 (10.7%)	25.71 (45.0%)	19.18 (8.2%)	36.69 (106.9%)	29.81 (68.1%)	10.56 (40.5%)
D	48	1	7	越橘葉蔓榕	20.73	24.49 (18.1%)	25.03 (20.8%)	27.95 (34.9%)	26.05 (25.7%)	31.11 (50.1%)	28.00 (35.1%)	24.37 (17.6%)	42.22 (103.7%)	32.44 (56.5%)	16.09 (22.4%)
E	48	1	10	越橘葉蔓榕	23.40	24.49 (4.6%)	28.10 (20.8%)	25.59 (9.4%)	25.15 (7.5%)	24.21 (3.5%)	16.84 (28.0%)	21.25 (9.2%)	38.52 (64.6%)	33.76 (44.3%)	15.91 (32.0%)
F	48	1	12	越橘葉蔓榕	20.40	24.49 (20.0%)	17.76 (12.9%)	20.81 (2.0%)	18.59 (8.9%)	19.62 (3.8%)	27.29 (33.8%)	19.18 (6.0%)	36.98 (81.3%)	27.59 (35.2%)	12.08 (40.8%)
G	48	2	7	圓葉景天	22.57	13.29 (41.1%)	35.73 (58.3%)	31.48 (39.5%)	37.75 (67.2%)	19.50 (13.6%)	12.00 (46.8%)	24.37 (8.0%)	41.68 (84.7%)	36.50 (61.7%)	14.23 (37.0%)
H	48	2	10	圓葉景天	20.89	13.29 (36.4%)	29.29 (40.2%)	25.87 (23.8%)	25.79 (23.4%)	12.42 (40.5%)	22.54 (7.9%)	21.25 (1.7%)	38.71 (85.3%)	32.32 (54.7%)	5.65 (73.0%)
I	48	2	12	圓葉景天	19.23	13.29 (30.9%)	18.16 (5.6%)	20.88 (8.6%)	18.74 (2.7%)	7.71 (59.9%)	27.58 (43.4%)	19.18 (0.3%)	37.04 (92.6%)	27.12 (41.0%)	12.53 (34.8%)
J	48	2	7	越橘葉蔓榕	21.08	13.29 (37.0%)	27.28 (29.4%)	28.69 (36.1%)	28.51 (35.2%)	19.50 (7.5%)	28.15 (33.5%)	24.37 (15.6%)	42.35 (100.9%)	31.40 (48.9%)	14.29 (32.2%)
K	48	2	10	越橘葉蔓榕	21.51	13.29 (38.2%)	29.22 (35.9%)	25.85 (20.2%)	25.75 (19.7%)	12.42 (42.3%)	23.67 (10.0%)	21.25 (1.2%)	38.61 (79.5%)	33.08 (53.8%)	11.55 (46.3%)
L	48	2	12	越橘葉蔓榕	20.56	13.29 (35.4%)	21.89 (6.5%)	21.60 (5.1%)	20.13 (2.1%)	7.71 (62.5%)	26.41 (28.5%)	19.18 (6.7%)	36.98 (79.9%)	27.63 (34.4%)	15.28 (25.7%)

編號	降雨強度(mm)	基質種類	基質厚度(cm)	植栽種類	實測值(mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	64	1	7	圓葉景天	47.19	41.49 (12.1%)	48.35 (2.5%)	46.37 (1.7%)	51.10 (8.3%)	47.70 (1.1%)	24.48 (48.1%)	42.94 (9.0%)	58.06 (23.0%)	33.65 (28.7%)	9.62 (79.6%)
B	64	1	10	圓葉景天	44.24	41.49 (6.2%)	49.56 (12.0%)	42.85 (3.1%)	40.01 (9.6%)	40.62 (8.2%)	11.66 (73.7%)	39.82 (10.0%)	54.62 (23.5%)	32.95 (25.5%)	3.51 (92.1%)
C	64	1	12	圓葉景天	41.66	41.49 (0.4%)	31.65 (24.0%)	36.40 (12.6%)	27.75 (33.4%)	35.91 (13.8%)	28.58 (31.4%)	37.75 (9.4%)	53.26 (27.8%)	25.47 (38.9%)	13.84 (66.8%)
D	64	1	7	越橘葉蔓榕	39.49	41.49 (5.1%)	51.27 (29.8%)	47.33 (19.9%)	54.30 (37.5%)	47.70 (20.8%)	20.84 (47.2%)	42.94 (8.7%)	57.79 (46.4%)	35.65 (9.7%)	6.95 (82.4%)
E	64	1	10	越橘葉蔓榕	38.29	41.49 (8.4%)	45.23 (18.1%)	41.85 (9.3%)	37.69 (1.6%)	40.62 (6.1%)	22.68 (40.8%)	39.82 (4.0%)	54.96 (43.5%)	30.40 (20.6%)	13.59 (64.5%)
F	64	1	12	越橘葉蔓榕	38.75	41.49 (7.1%)	49.14 (26.8%)	39.77 (2.6%)	34.26 (11.6%)	35.91 (7.4%)	12.29 (68.3%)	37.75 (2.6%)	52.28 (34.9%)	32.89 (15.1%)	2.07 (94.7%)
G	64	2	7	圓葉景天	45.36	40.42 (10.9%)	44.29 (2.4%)	45.03 (0.7%)	46.66 (2.9%)	40.14 (11.5%)	22.14 (51.2%)	42.94 (5.3%)	58.17 (28.2%)	32.80 (27.7%)	14.41 (68.3%)
H	64	2	10	圓葉景天	45.38	40.42 (8.3%)	45.84 (1.0%)	41.99 (7.5%)	38.02 (16.2%)	35.55 (19.3%)	26.97 (38.8%)	39.82 (12.2%)	54.69 (20.5%)	32.46 (28.5%)	13.46 (69.5%)
I	64	2	12	圓葉景天	44.05	40.42 (9.8%)	33.17 (24.7%)	36.69 (16.7%)	28.32 (35.7%)	47.04 (5.0%)	26.29 (41.3%)	37.75 (14.3%)	53.00 (20.3%)	27.48 (37.6%)	0.37 (99.2%)
J	64	2	7	越橘葉蔓榕	44.09	40.42 (8.3%)	51.24 (16.2%)	47.32 (7.3%)	54.26 (23.1%)	47.04 (6.7%)	19.73 (55.3%)	42.94 (2.6%)	57.72 (30.9%)	36.18 (17.9%)	11.88 (73.1%)
K	64	2	10	越橘葉蔓榕	41.29	40.42 (2.1%)	39.71 (3.8%)	40.58 (1.7%)	34.74 (15.9%)	40.14 (2.8%)	26.08 (36.9%)	39.82 (3.6%)	55.15 (33.6%)	28.95 (29.9%)	12.97 (68.6%)
L	64	2	12	越橘葉蔓榕	41.77	40.42 (3.2%)	44.75 (7.1%)	38.92 (6.8%)	32.63 (21.9%)	35.55 (14.9%)	15.88 (62.0%)	37.75 (9.6%)	52.65 (26.0%)	30.12 (27.9%)	4.78 (88.6%)

表 C.2 自然雨之實際與推估出流量-以雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	35.25	1	5	圓葉景天	9.26	-165.14 (1883%)	17.41 (88.0%)	18.10 (95.5%)	14.38 (55.3%)	706.48 (7529%)	36.07 (289.5%)	19.47 (110.3%)	30.60 (230.5%)	41.63 (349.6%)	12188.67 (131527%)
B	40.28	1	5	圓葉景天	22.03	-215.88 (1080%)	69.73 (216.5%)	44.98 (104.2%)	123.18 (459.2%)	3028.44 (13647%)	47.47 (115.5%)	21.39 (2.9%)	35.79 (62.5%)	40.47 (83.7%)	45.82 (108.0%)
C	26.36	1	10	圓葉景天	8.77	-135.78 (1648%)	-138.43 (1678.5%)	-29.51 (436.5%)	-68.60 (882.2%)	1204.97 (13640%)	99.99 (1040%)	13.53 (54.3%)	17.06 (94.6%)	32.36 (269.0%)	102.23 (1066%)
D	57.92	1	10	圓葉景天	27.90	-252.66 (1006%)	-211.75 (859.0%)	-22.18 (179.5%)	-101.23 (462.8%)	9798.86 (35021%)	194.88 (598.5%)	31.48 (12.8%)	47.76 (71.2%)	38.92 (39.5%)	199.60 (615.4%)
E	43.65	1	10	圓葉景天	22.99	-118.49 (615.4%)	-67.15 (392.1%)	0.25 (98.9%)	-26.78 (216.5%)	565.10 (2358%)	53.55 (132.9%)	18.10 (21.3%)	34.09 (48.3%)	34.37 (49.5%)	8.51 (63.0%)
F	70.87	1	10	圓葉景天	64.45	-41.57 (164.5%)	203.83 (216.3%)	83.77 (30.0%)	124.09 (92.5%)	111.39 (72.8%)	85.28 (32.3%)	51.15 (20.6%)	58.36 (9.5%)	56.71 (12.0%)	43.26 (32.9%)
G	85.16	1	10	圓葉景天	68.02	8.48 (87.5%)	89.28 (31.3%)	68.30 (0.4%)	65.74 (3.4%)	39.89 (41.4%)	15.84 (76.7%)	81.18 (19.3%)	74.60 (9.7%)	41.96 (38.3%)	324.89 (377.5%)

表 C.3 雨量 70mm、54mm 及 36mm 三組實驗結果為率定組之實際與推估出流量

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	36	1	7	圓葉景天	17.01	13.29 (21.8%)	16.82 (1.1%)	17.20 (1.1%)	17.40 (2.3%)	19.50 (14.8%)	26.86 (58.2%)	17.62 (3.6%)	30.25 (77.8%)	32.21 (89.3%)	9.19 (45.9%)
B	36	1	10	圓葉景天	14.49	13.29 (8.7%)	7.72 (49.7%)	11.66 (19.5%)	11.71 (19.2%)	12.42 (14.6%)	28.79 (97.9%)	14.50 (0.1%)	27.30 (88.4%)	27.81 (91.9%)	9.60 (34.0%)
C	36	1	12	圓葉景天	11.80	13.29 (12.8%)	11.75 (0.4%)	9.96 (15.6%)	13.36 (13.2%)	7.71 (34.6%)	23.38 (98.5%)	12.43 (5.3%)	24.92 (111.2%)	28.03 (137.6%)	7.11 (39.6%)
D	36	1	7	越橘葉蔓榕	14.11	13.29 (5.8%)	15.18 (7.5%)	16.66 (18.1%)	15.60 (10.6%)	19.50 (38.2%)	28.74 (103.6%)	17.62 (24.8%)	30.42 (115.6%)	30.88 (118.9%)	13.69 (3.0%)
E	36	1	10	越橘葉蔓榕	14.35	13.29 (7.4%)	10.75 (25.1%)	12.36 (13.9%)	13.33 (7.1%)	12.4 (13.5%)	26.04 (81.4%)	14.50 (1.0%)	26.84 (87.0%)	31.33 (118.3%)	15.13 (5.4%)
F	36	1	12	越橘葉蔓榕	12.66	13.29 (5.0%)	2.27 (82.1%)	8.13 (35.7%)	9.83 (22.3%)	7.71 (39.1%)	28.74 (127.1%)	12.43 (1.8%)	25.11 (98.4%)	26.61 (110.2%)	17.28 (36.6%)
G	36	2	7	圓葉景天	17.98	13.29 (26.0%)	19.46 (8.3%)	18.08 (0.5%)	20.29 (12.9%)	19.50 (8.5%)	23.84 (32.8%)	17.62 (2.0%)	30.20 (68.0%)	32.56 (81.1%)	15.30 (14.8%)
H	36	2	10	圓葉景天	16.02	13.29 (17.0%)	12.29 (23.3%)	12.71 (20.6%)	14.16 (11.6%)	12.42 (22.4%)	25.78 (61.1%)	14.50 (9.5%)	27.02 (68.6%)	29.98 (87.1%)	9.12 (43.0%)
I	36	2	12	圓葉景天	13.61	13.29 (2.3%)	-3.59 (126.4%)	7.01 (48.5%)	7.65 (43.8%)	7.71 (43.3%)	31.82 (134.0%)	12.43 (8.7%)	25.46 (87.1%)	23.96 (76.1%)	19.23 (41.4%)
J	36	2	7	越橘葉蔓榕	15.91	13.29 (16.5%)	21.32 (34.0%)	18.69 (17.5%)	22.32 (40.3%)	19.50 (22.5%)	23.18 (45.7%)	17.62 (10.7%)	29.70 (86.6%)	36.39 (128.7%)	16.30 (2.5%)
K	36	2	10	越橘葉蔓榕	14.57	13.29 (8.8%)	12.67 (13.1%)	12.80 (12.2%)	14.36 (1.5%)	12.42 (14.8%)	26.10 (79.1%)	14.50 (0.5%)	26.82 (84.1%)	31.45 (115.8%)	8.51 (41.6%)
L	36	2	12	越橘葉蔓榕	15.66	13.29 (15.2%)	14.35 (8.4%)	10.46 (33.2%)	14.33 (8.5%)	7.71 (50.8%)	14.35 (8.4%)	12.43 (20.7%)	24.41 (55.8%)	31.95 (104.0%)	8.82 (43.7%)

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	54	1	7	圓葉景天	33.08	31.29 (5.2%)	35.34 (6.8%)	35.38 (6.9%)	37.16 (12.3%)	37.50 (13.6%)	26.18 (20.7%)	30.05 (9.2%)	48.36 (46.2%)	31.34 (5.3%)	20.48 (38.0%)
B	54	1	10	圓葉景天	30.91	31.29 (1.3%)	34.77 (12.5%)	31.75 (2.7%)	29.98 (3.0%)	30.42 (1.5%)	17.11 (44.6%)	26.94 (12.9%)	44.92 (45.3%)	30.70 (0.7%)	18.42 (40.4%)
C	54	1	12	圓葉景天	24.44	31.29 (28.1%)	29.88 (22.3%)	27.98 (14.5%)	24.60 (0.7%)	25.71 (5.3%)	19.58 (19.8%)	24.86 (1.7%)	42.91 (75.6%)	28.16 (15.2%)	13.81 (43.5%)
D	54	1	7	越橘葉蔓榕	29.96	31.29 (4.4%)	38.44 (28.3%)	36.40 (21.5%)	40.55 (35.3%)	37.50 (25.2%)	20.65 (31.1%)	30.05 (0.3%)	47.86 (59.8%)	35.12 (17.2%)	20.82 (30.5%)
E	54	1	10	越橘葉蔓榕	24.32	31.29 (28.6%)	27.87 (14.6%)	30.15 (24.0%)	26.29 (8.1%)	30.42 (25.1%)	27.19 (11.8%)	26.94 (10.7%)	44.96 (84.8%)	30.43 (25.1%)	9.26 (61.9%)
F	54	1	12	越橘葉蔓榕	22.60	31.29 (38.4%)	29.88 (32.2%)	27.98 (23.8%)	24.60 (8.8%)	25.71 (13.7%)	29.07 (28.6%)	24.86 (10.0%)	43.08 (90.6%)	26.83 (18.7%)	20.25 (10.4%)
G	54	2	7	圓葉景天	29.36	31.29 (6.7%)	37.48 (27.7%)	36.08 (22.9%)	39.49 (34.5%)	37.50 (27.9%)	24.27 (17.2%)	30.05 (2.4%)	48.07 (63.7%)	33.59 (14.4%)	7.70 (73.8%)
H	54	2	10	圓葉景天	30.13	31.29 (3.9%)	42.13 (39.8%)	33.45 (11.0%)	33.93 (12.6%)	30.42 (1.1%)	12.57 (58.2%)	26.94 (10.6%)	44.52 (47.8%)	33.75 (12.0%)	9.87 (67.2%)
I	54	2	12	圓葉景天	26.78	31.29 (16.9%)	26.80 (0.1%)	27.39 (2.3%)	23.45 (12.4%)	25.71 (3.9%)	26.15 (2.3%)	24.86 (7.2%)	42.92 (60.3%)	28.05 (4.7%)	16.46 (38.5%)
J	54	2	7	越橘葉蔓榕	25.97	31.29 (20.5%)	33.66 (29.6%)	34.82 (34.1%)	35.31 (36.0%)	37.50 (44.4%)	27.78 (7.0%)	30.05 (15.7%)	48.32 (86.1%)	31.66 (21.9%)	18.18 (30.0%)
K	54	2	10	越橘葉蔓榕	25.18	31.29 (24.3%)	30.97 (23.0%)	30.87 (22.6%)	27.95 (11.0%)	30.42 (20.8%)	25.65 (1.9%)	26.94 (7.0%)	44.94 (78.5%)	30.57 (21.4%)	23.17 (8.0%)
L	54	2	12	越橘葉蔓榕	24.66	31.29 (26.9%)	33.27 (34.9%)	28.64 (16.1%)	25.86 (4.9%)	25.71 (4.3%)	16.97 (31.2%)	24.86 (0.8%)	42.69 (73.2%)	29.76 (20.7%)	12.36 (49.9%)

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	70	1	7	圓葉景天	54.61	47.49 (13.0%)	53.13 (2.7%)	51.97 (4.8%)	56.16 (2.8%)	53.70 (1.7%)	24.66 (54.8%)	52.72 (3.5%)	64.29 (17.7%)	31.87 (41.6%)	8.43 (84.6%)
B	70	1	10	圓葉景天	52.39	47.49 (9.4%)	41.28 (21.2%)	45.55 (13.0%)	36.84 (29.7%)	46.62 (11.0%)	29.51 (43.7%)	49.61 (5.3%)	61.30 (17.0%)	27.84 (46.9%)	11.93 (77.2%)
C	70	1	12	圓葉景天	43.81	47.49 (8.4%)	48.84 (11.5%)	44.55 (1.7%)	35.64 (18.6%)	41.91 (4.4%)	13.40 (69.4%)	47.53 (8.5%)	58.98 (34.6%)	27.63 (36.9%)	10.73 (75.5%)
D	70	1	7	越橘葉蔓榕	49.46	47.49 (4.0%)	59.13 (19.5%)	53.95 (9.1%)	62.72 (26.8%)	53.70 (8.6%)	12.05 (75.6%)	52.72 (6.6%)	63.77 (28.9%)	35.83 (27.6%)	7.32 (85.2%)
E	70	1	10	越橘葉蔓榕	48.46	47.49 (2.0%)	53.83 (11.1%)	48.45 (0.0%)	43.56 (10.1%)	46.62 (3.8%)	17.12 (64.7%)	49.61 (2.4%)	61.00 (25.9%)	30.12 (37.8%)	6.46 (86.7%)
F	70	1	12	越橘葉蔓榕	42.51	47.49 (11.7%)	49.95 (17.5%)	44.77 (5.3%)	36.06 (15.2%)	41.91 (1.4%)	14.65 (65.5%)	47.53 (11.8%)	58.53 (37.7%)	31.00 (27.1%)	9.14 (78.5%)
G	70	2	7	圓葉景天	58.31	47.49 (12.4%)	54.61 (6.3%)	52.45 (10.0%)	57.77 (0.9%)	53.70 (7.9%)	23.22 (60.2%)	52.72 (9.6%)	63.88 (9.6%)	35.01 (40.0%)	19.35 (66.8%)
H	70	2	10	圓葉景天	54.18	47.49 (3.4%)	35.73 (34.1%)	44.27 (18.3%)	33.86 (37.5%)	46.62 (14.0%)	31.49 (41.9%)	49.61 (8.4%)	61.40 (13.3%)	27.06 (50.1%)	18.46 (65.9%)
I	70	2	12	圓葉景天	49.15	47.49 (18.6%)	43.30 (11.9%)	43.49 (11.5%)	33.59 (31.7%)	41.91 (14.7%)	26.07 (47.0%)	47.53 (3.3%)	58.81 (19.7%)	28.90 (41.2%)	9.26 (81.2%)
J	70	2	7	越橘葉蔓榕	52.45	47.49 (9.5%)	58.52 (11.6%)	53.74 (2.5%)	62.05 (18.3%)	53.70 (2.4%)	14.22 (72.9%)	52.72 (0.5%)	63.76 (21.6%)	35.92 (31.5%)	10.24 (80.5%)
K	70	2	10	越橘葉蔓榕	47.54	47.49 (0.1%)	51.34 (8.0%)	47.88 (0.7%)	42.22 (11.2%)	46.62 (1.9%)	24.37 (48.7%)	49.61 (4.4%)	60.87 (28.1%)	31.05 (34.7%)	6.02 (87.3%)
L	70	2	12	越橘葉蔓榕	46.57	47.49 (2.0%)	50.23 (7.8%)	44.82 (3.8%)	36.16 (22.4%)	41.91 (10.0%)	14.08 (69.8%)	47.53 (2.1%)	58.71 (26.1%)	29.63 (36.4%)	12.68 (72.8%)

表 C.4 雨量 64mm、48mm、36mm 及 20mm 四組實驗結果為率定組之實際與推估出流水量

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	20	1	7	圓葉景天	13.62	2.38 (82.5%)	6.33 (53.6%)	5.09 (62.6%)	9.36 (31.3%)	4.56 (66.5%)	22.41 (64.5%)	13.72 (0.7%)	12.93 (5.1%)	24.30 (78.4%)	13.77 (1.1%)
B	20	1	10	圓葉景天	11.53	2.38 (79.4%)	3.60 (68.8%)	0.92 (92.0%)	7.39 (35.9%)	-2.08 (118.1%)	20.43 (77.2%)	12.32 (6.9%)	11.69 (1.4%)	23.47 (103.7%)	7.74 (32.8%)
C	20	1	12	圓葉景天	10.71	2.38 (77.8%)	-2.26 (121.1%)	-2.67 (125.0%)	5.68 (47.0%)	-6.51 (160.8%)	26.54 (147.9%)	11.38 (6.3%)	10.40 (2.9%)	21.26 (98.5%)	9.34 (12.8%)
D	20	1	7	越橘葉蔓榕	13.08	2.38 (81.8%)	8.61 (34.1%)	5.72 (56.3%)	10.61 (18.9%)	4.56 (65.1%)	19.20 (46.8%)	13.72 (4.9%)	13.17 (0.7%)	25.15 (92.3%)	10.99 (16.0%)
E	20	1	10	越橘葉蔓榕	11.24	2.38 (78.8%)	-1.87 (116.6%)	-0.13 (101.2%)	5.93 (47.3%)	-2.08 (118.5%)	26.89 (139.2%)	12.32 (9.6%)	11.19 (0.4%)	21.70 (93.1%)	8.99 (20.0%)
F	20	1	12	越橘葉蔓榕	10.40	2.38 (77.1%)	0.22 (97.9%)	-2.27 (121.9%)	6.14 (41.0%)	-6.51 (162.6%)	22.40 (115.4%)	11.38 (9.4%)	10.96 (5.3%)	23.26 (123.6%)	11.31 (8.7%)
G	20	2	7	圓葉景天	12.54	2.38 (81.0%)	6.18 (50.7%)	5.05 (59.7%)	9.28 (26.0%)	4.56 (63.6%)	22.03 (75.7%)	13.72 (9.4%)	12.88 (2.7%)	24.12 (92.3%)	20.36 (62.4%)
H	20	2	10	圓葉景天	12.66	2.38 (81.2%)	2.73 (78.5%)	0.75 (0.75%)	7.15 (43.5%)	-2.08 (116.4%)	21.77 (71.9%)	12.32 (2.7%)	11.60 (8.4%)	23.17 (83.0%)	6.30 (50.2%)
I	20	2	12	圓葉景天	10.06	2.38 (76.3%)	-6.33 (163.0%)	-3.33 (94.0%)	4.92 (51.1%)	-6.51 (164.7%)	28.58 (184.0%)	11.38 (13.1%)	10.21 (1.5%)	20.58 (104.6%)	23.21 (130.6%)
J	20	2	7	越橘葉蔓榕	14.20	2.38 (83.2%)	9.97 (29.8%)	6.10 (133.1%)	11.34 (20.1%)	4.56 (67.9%)	12.73 (10.4%)	13.72 (3.4%)	13.46 (5.2%)	26.19 (84.4%)	8.07 (43.2%)
K	20	2	10	越橘葉蔓榕	13.78	2.38 (82.7%)	-2.20 (116.0%)	-0.20 (101.4%)	5.84 (57.6%)	-2.08 (115.1%)	27.05 (96.3%)	12.32 (10.6%)	11.13 (19.2%)	21.49 (55.9%)	12.26 (11.0%)
L	20	2	12	越橘葉蔓榕	12.54	2.38 (81.0%)	-14.53 (215.9%)	-4.65 (137.1%)	3.40 (72.9%)	-6.51 (151.9%)	33.94 (170.7%)	11.38 (9.2%)	9.89 (21.1%)	19.45 (55.1%)	31.16 (148.5%)

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	36	1	7	圓葉景天	17.01	18.32 (7.9%)	21.24 (24.9%)	20.79 (22.2%)	22.21 (30.6%)	20.10 (18.4%)	24.98 (47.1%)	15.08 (11.3%)	28.45 (67.2%)	22.39 (59.0%)	22.57 (32.7%)
B	36	1	10	圓葉景天	14.49	18.32 (25.9%)	14.24 (1.8%)	15.89 (9.6%)	15.37 (6.1%)	13.29 (8.7%)	27.75 (90.7%)	13.68 (5.6%)	26.95 (86.0%)	20.86 (60.2%)	20.84 (43.8%)
C	36	1	12	圓葉景天	11.80	18.32 (55.5%)	17.34 (46.9%)	13.91 (17.8%)	14.19 (20.2%)	8.74 (25.8%)	21.49 (82.4%)	12.75 (8.0%)	26.44 (124.1%)	21.19 (51.6%)	21.41 (81.4%)
D	36	1	7	越橘葉蔓榕	14.11	18.32 (29.8%)	19.97 (41.5%)	20.44 (44.9%)	21.52 (52.5%)	20.10 (42.4%)	27.64 (95.9%)	15.08 (6.9%)	28.25 (100.2%)	24.56 (50.4%)	21.85 (54.9%)
E	36	1	10	越橘葉蔓榕	14.35	18.32 (27.6%)	16.56 (15.4%)	16.34 (13.8%)	15.99 (11.4%)	13.29 (7.4%)	23.64 (64.7%)	13.68 (4.7%)	27.49 (91.5%)	22.10 (54.4%)	22.76 (58.6%)
F	36	1	12	越橘葉蔓榕	12.66	18.32 (44.7%)	10.04 (20.7%)	12.73 (0.6%)	12.84 (1.4%)	8.74 (30.9%)	27.52 (117.4%)	12.75 (0.7%)	26.22 (107.2%)	23.02 (45.8%)	20.63 (63.0%)
G	36	2	7	圓葉景天	17.98	18.32 (2.0%)	23.27 (29.4%)	21.35 (18.8%)	23.32 (29.7%)	20.10 (11.9%)	21.11 (17.5%)	15.08 (16.1%)	28.50 (58.5%)	24.10 (58.7%)	22.77 (26.6%)
H	36	2	10	圓葉景天	16.02	18.32 (14.5%)	17.75 (10.8%)	16.57 (3.4%)	16.31 (1.8%)	13.29 (17.0%)	23.46 (46.6%)	13.68 (14.6%)	27.28 (70.3%)	20.43 (62.3%)	22.02 (37.5%)
I	36	2	12	圓葉景天	13.61	18.32 (34.7%)	5.53 (59.4%)	12.00 (11.8%)	12.00 (11.8%)	8.74 (35.7%)	32.30 (137.5%)	12.75 (6.3%)	25.82 (89.7%)	21.88 (55.5%)	19.18 (41.0%)
J	36	2	7	越橘葉蔓榕	15.91	18.32 (15.1%)	24.70 (55.3%)	21.75 (36.7%)	24.10 (51.5%)	20.10 (26.3%)	20.04 (26.0%)	15.08 (5.2%)	29.09 (82.8%)	24.60 (53.1%)	24.86 (56.2%)
K	36	2	10	越橘葉蔓榕	14.57	18.32 (25.7%)	18.04 (23.8%)	16.62 (14.1%)	16.38 (12.4%)	13.29 (8.8%)	23.78 (63.2%)	13.68 (6.1%)	27.51 (88.8%)	22.61 (52.4%)	22.83 (56.7%)
L	36	2	12	越橘葉蔓榕	15.66	18.32 (17.0%)	19.33 (23.5%)	14.23 (9.1%)	14.56 (7.0%)	8.74 (44.2%)	13.83 (11.7%)	12.75 (18.6%)	27.03 (72.6%)	22.28 (52.2%)	23.54 (50.3%)

編號	降雨強度 (mm)	基質種類	基質厚度 (cm)	植栽種類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC-Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	48	1	7	圓葉景天	21.19	29.52 (39.3%)	35.13 (65.8%)	33.31 (57.2%)	33.33 (57.3%)	31.70 (49.6%)	22.02 (3.9%)	23.23 (9.6%)	40.80 (92.5%)	22.39 (59.0%)	23.83 (12.4%)
B	48	1	10	圓葉景天	22.46	29.52 (31.4%)	36.28 (61.5%)	29.83 (32.8%)	25.11 (11.8%)	25.06 (11.6%)	11.24 (49.9%)	21.83 (2.8%)	39.89 (77.6%)	20.86 (60.2%)	24.20 (7.7%)
C	48	1	12	圓葉景天	17.73	29.52 (66.5%)	26.76 (50.9%)	25.49 (43.8%)	19.59 (10.5%)	20.63 (16.4%)	23.33 (31.6%)	20.90 (17.9%)	38.71 (118.3%)	21.19 (51.6%)	22.37 (26.2%)
D	48	1	7	越橘葉蔓榕	20.73	29.52 (42.4%)	30.32 (46.3%)	31.98 (54.3%)	30.71 (48.2%)	31.70 (52.9%)	26.61 (28.4%)	23.23 (12.1%)	40.48 (95.3%)	24.56 (50.4%)	22.70 (9.5%)
E	48	1	10	越橘葉蔓榕	23.40	29.52 (26.1%)	32.69 (39.7%)	29.13 (24.5%)	24.15 (3.2%)	25.06 (7.1%)	14.90 (36.4%)	21.83 (6.7%)	39.86 (70.3%)	22.10 (54.4%)	24.09 (2.9%)
F	48	1	12	越橘葉蔓榕	20.40	29.52 (44.7%)	24.72 (21.2%)	25.16 (23.3%)	19.22 (5.8%)	20.63 (1.1%)	25.66 (25.8%)	20.90 (2.4%)	38.37 (88.1%)	23.02 (45.8%)	21.16 (3.7%)
G	48	2	7	圓葉景天	22.57	29.52 (30.8%)	38.56 (70.8%)	34.26 (51.8%)	35.20 (55.9%)	20.10 (10.9%)	11.25 (50.2%)	23.23 (2.9%)	41.10 (82.1%)	24.10 (58.7%)	24.92 (10.4%)
H	48	2	10	圓葉景天	20.89	29.52 (41.3%)	33.60 (60.8%)	29.31 (40.3%)	24.39 (16.8%)	13.29 (36.4%)	18.80 (10.0%)	21.83 (4.5%)	39.64 (89.7%)	20.43 (62.3%)	23.30 (11.5%)
I	48	2	12	圓葉景天	19.23	29.52 (53.5%)	25.03 (30.2%)	25.21 (31.1%)	19.27 (50.1%)	8.74 (54.5%)	25.92 (34.8%)	20.90 (8.7%)	38.30 (99.2%)	21.88 (55.5%)	20.91 (8.7%)
J	48	2	7	越橘葉蔓榕	21.08	29.52 (40.0%)	32.05 (52.0%)	32.46 (54.0%)	31.65 (50.1%)	20.10 (4.7%)	26.76 (26.9%)	23.23 (10.2%)	40.33 (91.3%)	24.60 (53.1%)	22.14 (5.0%)
K	48	2	10	越橘葉蔓榕	21.51	29.52 (37.3%)	33.54 (56.0%)	29.30 (36.2%)	24.38 (13.3%)	13.29 (38.2%)	20.64 (4.1%)	21.83 (1.5%)	39.76 (84.8%)	22.61 (52.4%)	23.72 (10.3%)
L	48	2	12	越橘葉蔓榕	20.56	29.52 (43.6%)	27.90 (35.7%)	25.67 (24.9%)	19.81 (3.7%)	8.74 (57.5%)	24.44 (18.9%)	20.90 (1.7%)	38.38 (86.7%)	22.28 (52.2%)	21.19 (3.1%)

編號	降雨強度 (mm)	基質 種類	基質 厚度 (cm)	植栽種 類	實測值 (mm)	推估值(mm)									
						Φ index 法	含水差異係數法			含水率推估法	S&J 法	回歸統計法	經驗式		SWCC- Darcy 法
							式 3.5	式 3.6	式 3.7				式 3.18	式 3.19	
A	64	1	7	圓葉景 天	47.19	46.52 (1.4%)	51.96 (10.1%)	49.54 (5.0%)	47.23 (0.1%)	48.30 (2.4%)	21.57 (54.3%)	43.60 (7.6%)	56.67 (20.1%)	23.37 (50.5%)	9.62 (79.6%)
B	64	1	10	圓葉景 天	44.24	46.52 (5.2%)	52.88 (19.6%)	45.94 (3.9%)	34.68 (21.6%)	41.49 (6.2%)	11.02 (75.1%)	42.20 (4.6%)	55.74 (26.0%)	23.65 (46.5%)	3.51 (92.1%)
C	64	1	12	圓葉景 天	41.66	46.52 (11.7%)	39.10 (6.2%)	40.90 (1.8%)	26.76 (35.8%)	36.94 (11.3%)	27.28 (34.5%)	41.26 (1.0%)	54.05 (29.7%)	20.01 (52.0%)	13.84 (66.8%)
D	64	1	7	越橘葉 蔓榕	39.49	46.52 (17.8%)	54.21 (37.3%)	50.16 (27.0%)	48.45 (22.7%)	48.30 (22.3%)	17.69 (55.2%)	43.60 (10.4%)	56.97 (44.3%)	24.45 (38.1%)	6.95 (82.4%)
E	64	1	10	越橘葉 蔓榕	38.29	46.52 (21.5%)	49.55 (29.4%)	45.30 (18.3%)	33.79 (11.7%)	41.49 (8.3%)	20.48 (46.5%)	42.20 (10.2%)	55.35 (44.5%)	22.26 (41.9%)	13.59 (64.5%)
F	64	1	12	越橘葉 蔓榕	38.75	46.52 (20.0%)	52.56 (35.6%)	43.07 (11.1%)	29.25 (24.5%)	36.94 (4.7%)	11.64 (70.0%)	41.26 (6.5%)	55.18 (42.4%)	24.06 (37.9%)	2.07 (94.7%)
G	64	2	7	圓葉景 天	45.36	46.52 (2.5%)	48.83 (7.6%)	48.68 (7.3%)	45.52 (0.3%)	40.99 (9.7%)	19.05 (58.0%)	43.60 (3.9%)	56.54 (24.6%)	22.90 (49.5%)	14.41 (68.2%)
H	64	2	10	圓葉景 天	45.38	46.52 (5.6%)	50.02 (10.2%)	45.39 (0.0%)	33.92 (25.2%)	36.56 (17.0%)	25.08 (43.1%)	42.20 (7.0%)	55.66 (22.7%)	23.38 (48.5%)	13.46 (69.5%)
I	64	2	12	圓葉景 天	44.05	46.52 (3.8%)	40.27 (8.6%)	41.09 (6.7%)	26.98 (38.8%)	47.63 (6.3%)	24.10 (46.2%)	41.26 (6.3%)	54.35 (23.4%)	21.10 (52.1%)	0.37 (99.2%)
J	64	2	7	越橘葉 蔓榕	44.09	46.52 (5.5%)	54.18 (22.9%)	50.15 (13.7%)	48.44 (9.8%)	47.63 (8.0%)	16.53 (62.5%)	43.60 (1.1%)	57.05 (29.4%)	24.75 (43.9%)	11.88 (73.1%)
K	64	2	10	越橘葉 蔓榕	41.29	46.52 (12.7%)	45.31 (9.7%)	44.48 (7.7%)	32.66 (20.9%)	40.99 (0.7%)	23.89 (42.1%)	42.20 (2.2%)	55.13 (33.5%)	21.46 (48.0%)	12.97 (68.6%)
L	64	2	12	越橘葉 蔓榕	41.77	46.52 (11.4%)	49.19 (17.8%)	42.53 (1.8%)	28.63 (31.5%)	36.56 (12.5%)	15.00 (64.1%)	41.26 (1.2%)	54.76 (31.1%)	22.54 (46.0%)	4.78 (88.6%)