

國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

碩士論文

綠屋頂之降雨截水能力分析

Rainfall Retention Analysis for Green Roof



研 究 生：李京澄

指 導 教 授：高正忠

中華民國九十九年七月

綠屋頂之降雨截水能力分析

Rainfall Retention Analysis for Green Roof

研 究 生：李京澄

Student：Jing-Cheng Li

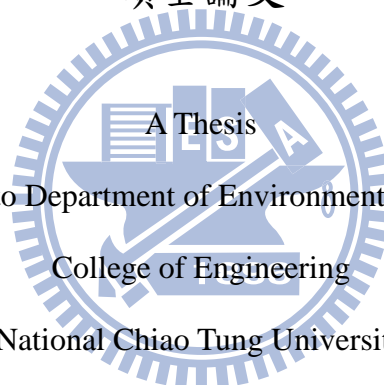
指導教授：高正忠

Advisor：Jehng-Jung Kao

國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文



Submitted to Department of Environment Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environment Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

摘要

為改善都市水泥化及綠地不足等問題，國際上正積極推廣綠屋頂，國內亦正在起步中，由於綠屋頂的植物及土壤基質均可截留雨水，因而可降低逕流減少洪峰及雨水系統的負載。然而綠屋頂之截水能力會因不同的設置條件而有所差異，唯目前尚未有適當的方法可供推估國內綠屋頂的截水能力。本研究因而探討不同降雨與基質厚度下綠屋頂的截水能力，且為了有效率的模擬綠屋頂之截水能力，本研究設計了一套特殊的綠屋頂實驗座台，以期分析不同環境及設置條件下綠屋頂之降雨截水功能，實驗座台除了鋪設植物及基質，並針對逕流及滲漏水設計收集槽及適用的流量測量器，監測綠屋頂在降雨期間之底部滲漏與表面逕流隨時間之變化，且依據相關理論及實驗數據建立一些公式供推估綠屋頂降雨截水效益。依據研究所得結果，以所設計的實驗座台進行實驗，將所收集數據代入所建立的截水公式預測研究期間所收集的十九場降雨的截水總量，在有植栽組最好的 R 平方值為 0.662，在無植栽組最好的 R 平方值為 0.899，相信所建立的公式可有效預測綠屋頂截水能力。

關鍵字：綠屋頂、雨水截水、綠屋頂實驗座台、截水公式、永續環境系統分析

Abstract

To alleviate the problems of urbanized built environment and limited green space, green roofs are frequently promoted in many countries. In Taiwan, developing green roofs has also recently attracted attention from the government. The plants and soil media of green roofs can retain precipitation, and thus both the runoff from rainfall events and the loading to storm sewers can be reduced. However, a proper method for estimating the rainfall retention capabilities of domestic green roofs is so far not available. Therefore, this study was initiated to assess the rainfall retention capabilities for different rainfall events and soil media depths. For effectively analyzing the performance of a green roof, this study designed two special platforms for implementing experiments under different conditions. Each platform is equipped with several collection tanks and electronic scales for continuously monitoring the percolating flow and runoff from the platform. According to related theories, several semi-empirical equations were proposed to estimate the total retention of each rainfall event. The coefficients of the equations were determined based on the data collected for nineteen rainfall events from the platforms. The total amounts of rainfall retention for all observed events were estimated by the proposed equations, and the best R-squared values are 0.662 and 0.899 for the sets with and without plants, respectively. The proposed equations are expected to effectively predict the total retention of an extensive green roof for a rainfall event.

Keywords: green roof, rainfall retention, green roof platform, retention equation, sustainable environmental systems analysis.

致謝

歷經兩年，第一本論文終於在 2010 年七月完成了。

首先非常感謝指導教授高正忠老師在研究上的指導以及在為人處世上對我的啟發，讓我了解到做事情應該要有的積極態度。也非常感謝林志高教授以及林明德教授在口試期間對我的教導，讓學生受益匪淺，在此深表感激。

接著我要感謝實驗室的學長姐子欽、宥禔、坤哥、冠華、笠偉、皮皮、仕強、旻韓以及彥瑋，感謝您們幫助我解決研究上以及生活上的問題，讓我的研究過程得以順利。在求學期間也很感謝同窗好友展帆以及雅如，很開心跟您們一起學習、打球以及玩樂。另外感謝可愛的學弟妹科智、岳奇以及心怡在我實驗期間上的幫忙。

另外，在研究實驗期間，也得到許多人的幫助，交大環工所所辦鍾小姐、黃小姐以及陳小姐，黃老師研究群、葉老師研究群、林老師研究群、陳老師研究群以及蔡老師研究群，靖宜學姊、珣儀學長、彥均，交大土木所培旻學長、韋恩以及王凱，交大建研所聖軒，海大河工系廖老師、依雯以及恩浩，台大生工系范老師、吳大哥，緯成陳大哥及康大哥，松喬周大哥及陳大哥，竹軒園林昌慶先生及林志成建築師，集廣賴大哥，感謝以上諸位的幫忙及指教，讓我在學習上獲益良多。

最重要我要感謝我的家人爸爸、媽媽、哥哥及姐姐，因為您們的支持讓我可以無後顧之憂的求學，因為您們的鼓勵讓我繼續努力向前。最後我也要謝謝我可愛的女友騏瑩，感謝妳在我研究期間的包容、鼓勵及關懷，讓我的生活更快樂。僅將此論文獻給所有人。

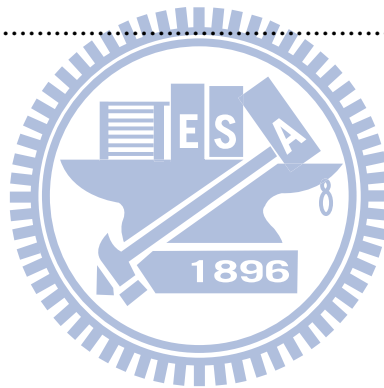
李京澄 謹誌於交大

民國九十九年七月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	x
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文內容.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 綠屋頂之優缺點.....	4
2.2 國內外綠屋頂發展.....	5
2.2.1 國外綠屋頂發展.....	5
2.2.2 國內綠屋頂發展.....	6
2.3 綠屋頂實驗方式.....	7
2.4 綠屋頂截水相關因子.....	8
2.5 綠屋頂截水與逕流模式.....	9
第三章 研究流程與方法.....	12
3.1 研究流程.....	12
3.2 本土環境因子分析.....	14
3.3 綠屋頂截水因子.....	17
3.4 針對不同影響因子進行截水實驗.....	18
3.5 實驗座台設計與建置.....	19

3.6 綠屋頂截水推估公式之建立.....	25
3.7 截水實驗.....	28
第四章 結果討論.....	30
4.1 實驗結果.....	30
4.2 綠屋頂截水因子分析.....	32
4.3 綠屋頂滲漏水總量推估公式係數推估及比對.....	38
第五章 結論與建議.....	43
5.1 結論.....	43
5.2 建議.....	44
參考文獻.....	46
附錄 A.....	49



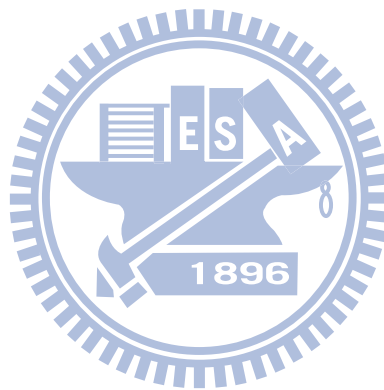
圖目錄

圖 2.1	綠屋頂實驗模場.....	8
圖 3.1	研究流程圖.....	13
圖 3.2	新竹 2004~2008 年時雨量五年平均小時數	15
圖 3.3	新竹 2004~2008 年日雨量五年平均天數	15
圖 3.4	綠屋頂實驗座台.....	20
圖 3.5	實驗槽.....	21
圖 3.6	實驗槽底部.....	21
圖 3.7	斜度架.....	21
圖 3.8	水桶.....	22
圖 3.9	電子秤.....	22
圖 3.10	土壤水分偵測設備.....	24
圖 3.11	簡易氣象站.....	24
圖 3.12	綠屋頂截水模式影響因子考量圖.....	26
圖 4.1	三場降雨事件有無植栽之水量比較.....	33
圖 4.2	有植栽組 5cm 及 10cm 基質最終含水比較.....	34
圖 4.3	不同降雨事件下累積雨量所相對應的截水率	35
圖 4.4	實際 RR 與公式 4.1 推估 RR 之比較.....	39
圖 4.5	實際 RR 與公式 4.2 推估 RR 之比較.....	39
圖 4.6	實際 RR 與公式 4.3 推估 RR 之比較.....	40
圖 4.7	實際 RR 與公式 4.4 推估 RR 之比較.....	41
圖 4.8	實際 RR 與公式 4.5 推估 RR 之比較.....	41
圖 4.9	實際 RR 與公式 4.6 推估 RR 之比較.....	42
附圖 A.1.1	2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 19:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	49

附圖 A.1.2	2009-12-29 21:00 ~ 2009-12-30 20:00 降雨及滲漏水累積變化 圖 5 cm 基質-未植栽.....	50
附圖 A.1.3	2010-01-02 11:30 ~ 2010-01-03 20:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	51
附圖 A.1.4	2010-01-11 20:00 ~ 2010-01-12 21:00 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	52
附圖 A.1.5	2010-03-08 14:00 ~ 2010-03-09 23:00 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	53
附圖 A.1.6	2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 16:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	54
附圖 A.1.7	2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-09 10:00 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	55
附圖 A.1.8	2010-05-06 23:30 ~ 2010-05-08 08:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	56
附圖 A.1.9	2010-05-23 00:30 ~ 2010-05-24 09:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	57
附圖 A.1.10	2010-05-29 00:30 ~ 2010-05-30 09:30 降雨及滲漏水累積變化 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽...	58
附圖 A.2.1	2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 19:30 基質層之含水率變化 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	59
附圖 A.2.2	2009-12-29 21:00 ~ 2009-12-30 20:00 基質層之含水率變化 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	60
附圖 A.2.3	2010-01-02 11:30 ~ 2010-01-03 14:30 基質層之含水率變化 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	61
附圖 A.2.4	2010-01-11 20:00 ~ 2010-01-12 21:00 基質層之含水率變化 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	62

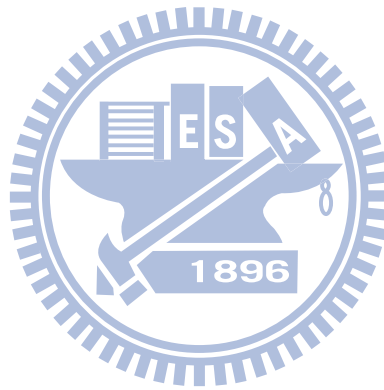
附圖 A.2.5	2010-03-08 14:00 ~ 2010-03-09 23:00 基質層之含水率變化 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽	63
附圖 A.2.6	2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 15:30 基質層之含水率變化 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	64
附圖 A.2.7	2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-09 10:00 基質層之含水率變化 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	65
附圖 A.2.8	2010-05-06 23:00 ~ 2010-05-08 08:00 基質層之含水率變化 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	66
附圖 A.2.9	2010-05-23 00:30 ~ 2010-05-24 09:30 基質層之含水率變化 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	67
附圖 A.2.10	2010-05-29 00:30 ~ 2010-05-30 09:30 基質層之含水率變化 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽	68
附圖 A.3.1	2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 14:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	69
附圖 A.3.2	2009-12-29 20:01 ~ 2009-12-30 20:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	70
附圖 A.3.3	2010-01-02 11:00 ~ 2010-01-03 14:22 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	71
附圖 A.3.4	2010-01-11 19:48 ~ 2010-01-12 21:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	72
附圖 A.3.5	2010-03-08 13:30 ~ 2010-03-09 23:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	73
附圖 A.3.6	2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 16:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	74
附圖 A.3.7	2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-08 10:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	75

附圖 A.3.8	2010-05-06 23:00 ~ 2010-05-08 08:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	76
附圖 A.3.9	2010-05-23 00:00 ~ 2010-05-24 09:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	77
附圖 A.3.10	2010-05-29 00:00 ~ 2010-05-30 09:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓.....	78
附圖 A.4.1	基質特性實驗 (a)透水試驗； (b)篩分析	79



表目錄

表 2.1	綠屋頂截水模式及分析方法比較表.....	11
表 3.1	建築物構造之活載重.....	17
表 3.2	逕流及滲漏水流量監測方法比較.....	23
表 4.1	實驗結果-有植栽	36
表 4.2	實驗結果-無植栽	37



第一章 前言

1.1 研究緣起

由於都市化，建築數量及密度增加迅速，絕大部分建築為不透水水泥鋪面，當雨水下到這些不透水面，不但不能補注地下水，且會直接逕流到河川或排水系統，提昇河川之洪峰，造成排水系統的負荷及增加淹水機率 (Getter *et al.*, 2007; Hilten *et al.*, 2008)，因而有必要尋求改善之道，而在國外一些國家已頗普遍的綠屋頂，例如德國、瑞士、日本等 (Berndtsson *et al.*, 2008)，是一個值得推廣的方案。

綠屋頂是指在建築物屋頂植栽。由於綠屋頂之土壤、植物及其保水設施均具有含水能力，故已有一些文獻指出或研究綠屋頂具有截留雨水的效果 (FLL, 2002; Moran *et al.*, 2005; Jarrett *et al.*, 2006; Villarreal, 2007; Getter *et al.*, 2007; Hilten *et al.*, 2008; Berndtsson *et al.*, 2008) 例如 Villarreal (2007) 曾比較未設置綠屋頂及有設置綠屋頂之雨水截留情況，其結果顯示綠屋頂可降低洪峰，且延長雨水逕流的時間，因而有助於改善都市逕流問題，值得評估在國內發展綠屋頂的截水效益。

由於綠屋頂之截水能力會受到降雨、基質深度、坡度、植被等因子所影響，Van Woert *et al.* (2005) 曾分析 2.5、4.0 及 6.0 cm 的基質深度分別會有 5 mm、8 mm 及 12 mm 的雨水截留能力，且分析不同坡度的影響，結果顯示 2%-4.0 cm 及 6.5%-4 cm 的基質對降雨量在 1.27 mm-10.08 mm 之間平均約可截留雨水 65-70%，而有植栽的綠屋頂於對 1.27 mm、4.06 mm 及 10.08 mm 的雨分別可截留雨水約 96.2%、82.9% 及 52.4%，可看出不同的基質深度、坡度及降雨分別有不同的截留能力，唯國內的特性不同，例如基質及降雨等均與國外不同，因而有必要分析國內綠屋頂不同因子下截留雨水能力。

綠屋頂截水研究一般有二種方式，第一種是以實場方式進行分析 (Moran *et al.*, 2005; Jarrett *et al.*, 2006; Villarreal, 2007; Hilten *et al.*, 2008)，實場雖可以反應真實的水力變化情況，但由於實場之建置時間長及成本高，且不易針對不同的影響因子迅速改變實場，因此，反而不容易用以建立所擬發展的模式；第二種方式是以小型模擬場進行分析，例如 Getter *et al.* (2007) 以 2.44m x 2.44m 實驗台分析不同坡度對雨水截留的影響，唯此實驗台沒有設計收集表面逕流的部分，並且文獻中所提到的最大坡度實驗不到 15°，對於坡度的選擇範圍較不大，經搜查相關文獻，目前尚未看到合適的綠屋頂截水實驗設施，故本研究設計一套綠屋頂實驗座台，並選擇一個較適合的逕流及滲漏水的量測方法，用以模擬分析不同設置因子下綠屋頂之雨水截水能力。

國內由於綠屋頂發展仍屬起步階段，相關研究仍甚少，而在國外，雖然已有文獻進行綠屋頂水力模式之分析與探討，已發展如 AGRR、SGRR、ANOVA、ANCOVA、HYDRUS-1D 等模式 (Jarrett *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007; Wolf and Lundholm, 2008; Hilten *et al.*, 2008)，然而因考量因子或參數會因地域不同而不同，如台灣氣候、降雨強度、基質性質、植栽、屋頂型式等環境條件與國外並不相同，故國外之模式與相關參數不見得適用於國內，本研究因而進行實驗分析國內綠屋頂之截水情況，依實驗所得的結果發展一個公式推估截水的總量，以供進行評估台灣綠屋頂的降雨截水效益。

1.2 研究目的

本研究的重點主要在於發展適當公式，評估綠屋頂之截水能力。同時亦設計綠屋頂實驗座台，並探討適當的量水設備，以期可有效地分析不同環境及設置條件下綠屋頂之降雨截水功能。主要研究目的可分為下列幾項：

1. 分析綠屋頂降雨截水能力：由於台灣地區大部分建築為不透水水泥鋪面，雨水會直接逕流到河川或排水系統，增加排水系統的負荷及淹水機率，而綠屋頂是一個可減少逕流的可行方案，唯目前國內相關研究甚少，因而進行本研究分析綠屋頂之截水能力，以評估其降低逕流的效益。
2. 設計綠屋頂實驗座台，以有效模擬各因子對綠屋頂逕流與滲漏之影響：綠屋頂之截水能力會受到降雨、基質深度、坡度、植被等因子所影響，因而有必要分析綠屋頂不同因子下載留雨水的能力。由於在相關文獻中，並未有合適之綠屋頂截水實驗設施，故本研究設計一套綠屋頂實驗座台，用以模擬分析不同設置因子下綠屋頂之雨水截水能力，並探討合適之逕流及滲漏水量測方法。
3. 發展公式以供推估截水量：由於台灣如降雨強度、基質性質、植栽、屋頂型式等之環境條件，與國外並不相同，故國外之模式與相關參數不見得適用於國內，故本研究依實驗分析之截水結果發展一個公式供推估截水的量。

1.3 論文內容

本論文之後續章節，於第二章進行文獻回顧，回顧目前國際上對於綠屋頂雨水截留之相關研究成果。第三章說明本研究採行之研究流程與方法，其中包含本土環境因子分析、截水影響因子、實驗座台之設計與製作、針對不同影響因子進行截水實驗及建立截水公式。第四章則以綠屋頂降雨截水之實驗結果進行分析及探討，並與所建立的截水公式比對。第五章總結本研究目前的成果及提供後續研究建議。

第二章 文獻回顧

綠屋頂有數種不同的效益，因而已在國外德國、美國及日本等國家大力推廣中，其中一個主要效益是可截留雨水減緩排水系統的負荷及淹水機率，然而綠屋頂的雨水截水能力會受到一些因子所影響，在不同的因子下，綠屋頂有多大的截水能力值得探究。本章首先介紹綠屋頂的優缺點，接著於後續章節中回顧國內外綠屋頂研究及發展、綠屋頂實驗方式、綠屋頂截水與逕流模式及相關因子，並以目前收集到之國內外相關研究進行回顧：

2.1 綠屋頂之優缺點

由所收集到的文獻，可看出綠屋頂有不少優點，唯亦有少數缺點，以下整理及分別說明其優點及缺點。

優點：

1. 截留雨水減少雨水系統的負載。(FLL, 2002; Villarreal and Bengtsson, 2005; Moran *et al.*, 2005; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal, 2007; Mentens *et al.*, 2006; Jarrett *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007; Berndtsson *et al.*, 2008; Hilten *et al.*, 2008)。
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。(FLL, 2002; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal and Bengtsson, 2005)。
3. 減緩都市熱島效應。(FLL, 2002; Villarreal and Bengtsson, 2005; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal, 2007; Getter *et al.*, 2007; Berndtsson *et al.*, 2008; Wolf and Lundholm, 2008)。
4. 吸收空氣污染物、收集粉塵微粒及貯存碳。(FLL, 2002; Villarreal and Bengtsson, 2005; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal, 2006; Jarrett *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007)。
5. 減少傳遞噪音。(FLL, 2002; Jarrett *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007)。

6. 提供棲息地給鳥類及其他小動物。(Villarreal and Bengtsson, 2005; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal, 2007)。
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。(FLL, 2002; Van Woert *et al.*, 2005; Getter *et al.*, 2007; Berndtsson *et al.*, 2008)。
8. 減少機械力危害屋頂防水層的風險。(FLL, 2002)。
9. 藉由吸引人的綠化建築物來增加價值。(FLL, 2002)。

缺點：

1. 綠屋頂滲漏水會夾帶污染物流出。(Berndtsson *et al.*, 2008)。
2. 植物不夠密時，黑色的土壤反而會增強輻射。(Hien *et al.*, 2007)。
3. 荷重或植物可能造成屋頂漏水。(FLL, 2002; 錫瑠綠化基金會，98 年 a)。
4. 綠屋頂的雜草葉子可能造成水管堵塞。(錫瑠綠化基金會，98 年 a)。

2.2 國內外綠屋頂發展

綠屋頂在國外發展已經有一段時間，但在國內的發展尚處於起步階段，本節主要介紹國內外文獻中有關綠屋頂研究及發展，由於國外的綠屋頂發展較早，故以下首先介紹國外的研究，然後才說明國內的發展。

2.2.1 國外綠屋頂發展

依據 Rodriguez (2006)中指出對於綠屋頂的發展歷史最早可以想到西元前七世紀的巴比倫的空中花園，之後像是在 Scandinavia 利用從草地割來的草覆蓋在屋頂當做防水隔絕層，最後市場上開始有便宜、輕質及有效的替代品出現，直到 1970 年之前綠屋頂被視為奢侈的提供住家的舒適度，在 1970 年一位德國風景建築師教授 Hans Luz 提出綠屋頂是用來改善城市環境的論點，在 1977 年德國建立了一個景觀建設組織 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL)開始從

事一些正式的綠屋頂研究及應用，之後許多國家例如美國、日本、瑞典及英國等都非常重視綠屋頂(Berndtsson *et al.*, 2008)，可見綠屋頂發展已有一段歷史了，值得探究。

Takebayashi and Moriyama (2007) 研究中指出由於綠屋頂的輻射反射較低使得表面會有很高的幅射，但是它的熱通量還是很低，因為大量的熱都蒸散掉了。Hien *et al.* (2007) 研究中指出綠屋頂與裸露的屋頂相比會有較低的表面溫度，從這了解到綠屋頂具有減緩高溫的功效。

2003 年東京六本木完成了一個屋上水田，此屋上水田占地面積約 100 m²，每年約有 60 kg 的稻米產量(日經 BP 社，2006)，而在溫哥華菲爾蒙水岸飯店的屋頂花園每年大約生產價值 16,000 美元的水果、蔬菜和蜂蜜(國家地理雜誌，2009)，由此了解到使用在綠屋頂的植栽也可以與食物結合，增加更多的效益。

California Academy of Sciences 屋頂上的綠屋頂是由 Rana Creek 設計的可生物降解的托盤 BioTray 所組成的，此托盤是由樹木的邊材及椰子殼所組成的，具有改變底部形狀的特性可以將植物安置在具有斜度的屋頂防止其滑落(California Academy of Sciences, 2009)，在綠屋頂的建置材料上可見其創新，類似此設計還可以再多研究不同的材料設計。

2.2.2 國內綠屋頂發展

國內綠屋頂目前尚未積極推動，至今仍有許多的發展空間，而目前台北市錫瑠綠化基金會推行了一些綠屋頂的實例，包括台北市吳興國小、信義國中、台北社教館、信義區公所、成功市場及松山工農等，藉由一些實際的例子推行綠屋頂，另外台大園藝系也進行研究綠屋頂介質與植物之關係(張等，98 年)，更有廠商參與發展綠屋頂的相關設施如排水板、不織布等(錫瑠綠化基金會，98 年 b)，台灣也開始漸漸有綠屋頂的活動，在這方面可以再多進行多方向不同的研究。

許(95 年)研究中研究數據指出人工鋪面之表面溫度明顯高於具有綠化之羅漢松、馬纓丹、變葉木、台北草等植栽層表面，而屋頂綠化可降低裸露混凝土平屋頂表面溫度 9.4~11.5℃，另外屋頂綠化可降低裸露平屋頂上方 30 cm 周圍空氣溫度 1.3~1.8℃，可見綠屋頂具有降低溫度的功效，值得推廣應用。

在推動綠屋頂之前，有必要先評估其效益，以作為政策推動之依據，本研究因而首先針對截水效益進行研究，唯目前較少國內學者進行綠屋頂對於截水效益的研究，廖等(98 年)雖亦正進行類似研究，但亦在起步中，尚未見有研究成果發表，本研究因而將針對這方面進行相關研究。

2.3 綠屋頂實驗方式

綠屋頂實驗方式一般有實場及模場兩種，實場較可以反映真實情況，但實場之建置時間長及成本高，且不易針對不同的影響因子迅速改變實場；第二種方式是以小型模擬場進行分析，本節主要說明文獻中研究者對於綠屋頂截水的實驗方式，以下一一說明之。

Moran *et al.* (2005) 的實驗方式為分別在 WCC 及 B&J 等兩地設置綠屋頂，面積各為 70 m² 及 130 m²，在 WCC 的監測方式為利用溢流堰的方式收集逕流水然後用其潛水式壓力計的方式監測水位的變化，而在 B&J 的監測方式也是利用堰的方式但監測水位變化的儀器是使用 bubbler flow meter。Jarrett *et al.* (2006) 的實驗方式為建置六塊 4.4 m² 的實驗場所，然後將結果加入模擬，最後得到其模式。Hilten *et al.* (2008) 的實驗方式為設置 100 塊 60×60×10 cm 的實驗區塊，然後使用潛水式壓力計測量其滲出水的量，另外也收集土壤的溫度及含水率，以及監測空氣溫度及幅射，由這些方式可以知道實驗場所用到的面積都占滿大的，對於建置起來較不易。

Villarreal and Bengtsson (2005) 的實驗方式為有一實驗模場面積為 0.80 m × 1.93 m，W/L=0.41，然後利用人工雨模擬真實的及設計的降雨，

接著以一分鐘的間隔量測其逕流水體積，實驗設計四種斜度(2°、5°、8°、14°)以及實驗土中初始濕度分別為乾及濕兩種，接著將得到之數據利用線性模式分析最後產生一個 unit hydrograph。Van Woert *et al.* (2005) 的實驗方式為如圖 2.1 所示在一面積為 2.44×2.44 m 的模場分成三部分，實驗分兩部分進行分別為不同基質表面及不同斜度，然後用雨量計量測滲出水的量。Wolf and Lundholm (2008) 的實驗方式為將 14 種植物分別植栽在 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的罐子，然後測量其加水後重量的改變得知其不同植物對於水分流失的關係。然其這些模場設計並不完全，像是 Van Woert *et al.* (2005) 中的實驗模場，並未有設計收集逕流水，因此本研究在國內參考各種相關設置，像是海洋大學的實驗座台(廖等，98 年)及台灣大學的降雨模擬器(范等，98 年)，藉由觀摩這些設置再依本研究的需求設計及建置本研究的實驗座台。

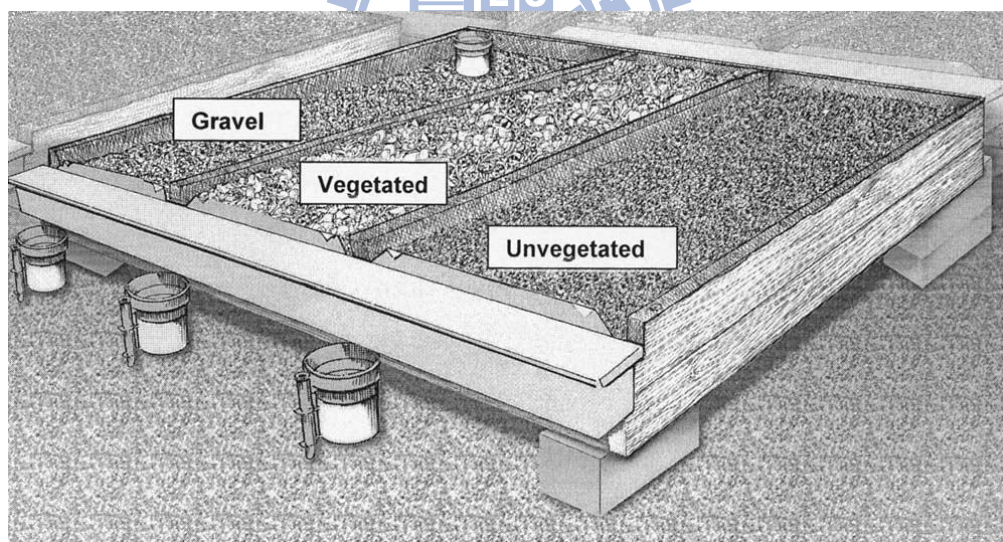


圖 2.1 綠屋頂實驗模場(Van Woert *et al.*, 2005)

2.4 綠屋頂截水相關因子

綠屋頂截水能力會受到一些因子所影響，如 Hilten *et al.* (2008) 曾以降雨、含水率、逕流水的通量、蒸散、基質特性及結構等因子採用 HYDRUS-1D (Simuek *et al.*, 2005) 模式模擬綠屋頂截水能力，而 Villarreal and Bengtsson

(2005)曾分析降雨的歷線，不同型式的降雨歷線亦會有不同的截水結果；而 Jerrett *et al.* (2006)則亦考慮了降雨量及蒸散量等因子探討綠屋頂的截水能力，而 Van Woert *et al.* (2005)則亦分析不同厚度的影響，Villarreal and Bengtsson (2005)及 Getter *et al.* (2007)均分析了不同斜度的影響，Wolf and Lundholm (2008)進一步指出不同的植物種類會造成土壤中不同水量損失。其他如氣溫及風等因子雖並不會直接影響截水量，但會間接影響蒸散量，下方的排水板若有蓄水功能，亦會影響截水能力，故總結影響綠屋頂截水能力的因子主要有降雨量、降雨延時歷線、基質含水率、蒸散、基質特性、基質厚度、斜度、植栽及排水板等因子，但由於本研究受限人力與時間，不太可能分析所有因子，故主要以基質厚度、降雨及部分基質特性(如透水係數)進行分析，針對這些因子進行實驗及建立綠屋頂截水公式。

2.5 綠屋頂截水與逕流模式

進行綠屋頂效益分析及相關決策，若能有一個適當的綠屋頂截水模式，可改善分析與決策的品質及輔助綠屋頂設置規劃。目前國內的綠屋頂相關研究較少探討綠屋頂截水模式，國外亦只有少數相關研究，本研究整理如表 2.1 國外在分析綠屋頂截水能力所採用之模式或方法，以下分六部分分別說明迴歸分析、水文歷線法、AGRR、係數法、SGRR 及綠屋頂截水模式。

1. 迴歸分析：ANOVA 是一個統計迴歸分析方法，它用來了解數據之間的關聯性及差異性，不同研究中考量不同的變數，例如 Hilten *et al.* (2008)以模擬的滲出水量與實際的滲出水量為變數，推導出兩者之間的差異性，由於單以統計方法會受到數據所影響，沒有考量水力特性，且該迴歸式忽略了一些截水因子。
2. 水文歷線法：Villarreal and Bengtsson (2005) 則以線性規劃推估單位面積之水文歷線，用以預測尖峰流量及滲出水的量，主要參數為雨量。

雖然雨量為影響截水能力的主要環境因子，但並非綠屋頂截水能力所需考量的唯一因子，相關設置及生長因子亦均會顯著影響截水能力。

3. AGRR：AGRR (Jerrett *et al.*, 2006)是用來計算一年中綠屋頂之總流出水的量，所需要知道的參數為每日降雨量及每日蒸散量，由於本研究重點主要針對一個事件，且由於台灣地區之乾旱季明顯，所以於決策時，僅考量年總流出水量會有誤導的情況，故該方法不太適用於本研究。
4. 係數法：Curve Number 法是美國用以評估水土保持或非點源污染常用的方法，主要用以評估集水區的逕流量，例如(Getter *et al.*, 2007)決定綠屋頂的 CN 值，此值代表逕流程度，範圍是 0~100，0 代表沒有滲出水，100 代表所有降雨皆為滲出水，唯不同因子會有不同的 CN 值，如何決定其相關性，仍有待研究，尤其是薄層屋頂的特性與集水區土壤與植被的特性均不相同。
5. SGRR：SGRR (Jerrett *et al.*, 2006)則是以 Modified Puls Reservoir Routing Model (HYDROGRAPH ROUTING)來分析在一段時間內滲出水的速率及滲出水的量，它所需要考慮的參數為一場雨的分佈圖、每日蒸散量及距離上一場雨的間隔時間。
6. 綠屋頂截水模式：Hiltner *et al.* (2008)曾以 HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2005)預測綠屋頂滲漏水，參數包括逕流水的通量、土壤的特性及土壤的結構等，但在文獻中作者指出此法比較適用於低雨量的情況，在高雨量的情況下對於滲漏水則會有高估的情形。

由於以上參考文獻中的方法及模式，並不完全適用於推估國內的綠屋頂截水能力，因此本研究試著發展適當公式供分析綠屋頂的截水能力。

表 2.1 綠屋頂截水模式及分析方法比較表

Model & 方法	文獻	Input 參數	Output 值
ANOVA	Van Woert <i>et al.</i> , 2005	Mean percent retention, rain event	Data were analyzed as mean percent retention per rain event
	Mentens <i>et al.</i> , 2006		Normalize the data
	Getter <i>et al.</i> , 2007	Roof slope, rainfall	Mean percent retention per rain event was analyzed
	Hilten <i>et al.</i> , 2008		If simulated runoff values differed significantly from observed runoff.
Hydrograph	Villarreal and Bengtsson, 2005	Rains, unit hydrograph	Peak flows and runoff volumes
AGRR	Jarrett <i>et al.</i> , 2006	Daily rainfall depths, daily ET	Annual roof runoff
Curve number	Getter <i>et al.</i> , 2007	Actual retention, potential retention, actual runoff, total rainfall	Curve number
SGRR	Jarrett <i>et al.</i> , 2006	A storm hyetograph, a reliable estimate of daily evapotranspiration, the month of the storm and the number of days since the last rain	Runoff rate and volume on a routing interval basis
HYDRUS-1D	Hilten <i>et al.</i> , 2008	Surface moisture fluxes (evapotranspiration and rainfall), soil properties (field capacity, wilting point, density and sand silt clay fractions), soil texture	Runoff

第三章 研究流程與方法

為了分析綠屋頂之降雨截水能力，本研究設計了一套綠屋頂實驗座台，並探討適當的量水設備，以分析不同環境及設置條件下綠屋頂之降雨截水功能。依實驗所得的結果，試著發展一個綠屋頂截水評估公式。本章首先對本研究流程作一簡單介紹，之後針對本土環境因子分析、影響綠屋頂的截水因子、實驗座台設計與建置、綠屋頂截水公式建立等主要工作項目一一詳細說明之。

3.1 研究流程

本研究之流程如圖 3.1 所示，包括資料收集、本土環境因子分析、綠屋頂截水因子、實驗座台設計與建置、綠屋頂截水推估公式之建立、實驗模擬等工作項目，以下先簡要說明之，之後將針對個別項目再進一步詳細說明之。

1. 資料收集：主要收集國內外綠屋頂的建置及應用、綠屋頂的優缺點、影響綠屋頂截水的因子、綠屋頂截水實驗的方法及國外綠屋頂截水模式與公式等相關文獻，另外也實地訪查國內綠屋頂的案例，收集相關資訊。
2. 本土環境因子分析：台灣的环境情況跟國外會有不一樣的地方，例如降雨、建築型態等，因此本研究首先分析台灣的降雨及建築型式等具本土特性的影響因子，以供分析綠屋頂截水能力時參考。
3. 綠屋頂截水因子：依據過去文獻，綠屋頂截水能力會受許多影響因子，例如基層特性、基質厚度、綠屋頂斜度、土壤含水率、降雨及植栽選擇等，因此，本研究將探討各因子在台灣之情況及合適範圍，以做為實驗設計及建立推估公式之依據。

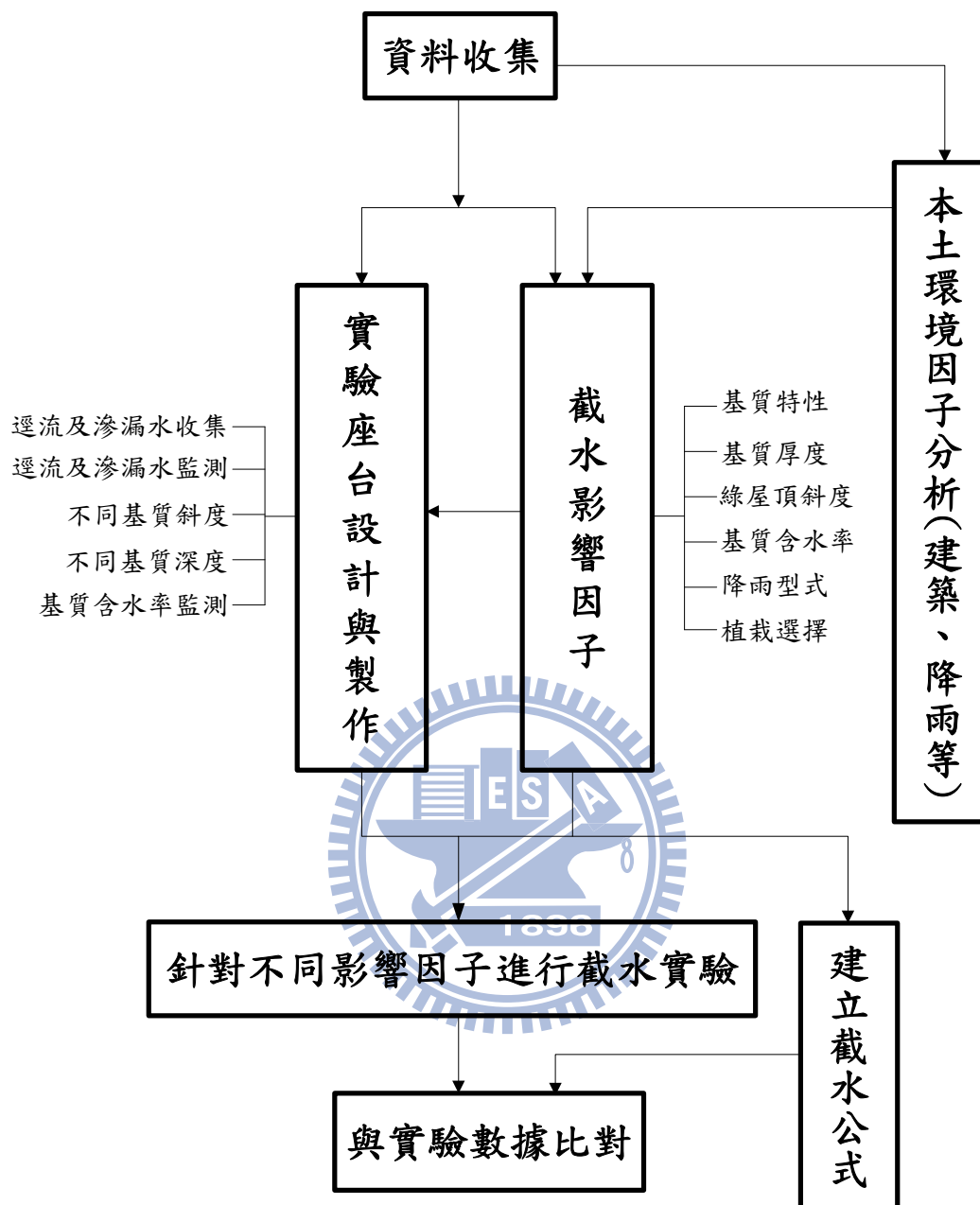


圖 3.1 研究流程圖

4. 實驗座台設計與建置：由於目前國內外尚未有適合本研究的實驗座台可供使用，尤其本研究所建立的公式，需要便於模擬各種不同條件，故本研究設計了一套綠屋頂實驗座台，以利於進行研究。該座台包括介質及植栽置放實驗槽，並選擇及建立一個較適合的逕流及滲流水的量測方法，用以模擬分析不同設置因子下綠屋頂之雨水截水能力。
5. 以不同因子進行截水實驗：本研究以綠屋頂實驗座台針對不同因子進行截水實驗，針對的因子主要包括基質厚度及降雨，本研究以多場自然降雨事件之所得結果建立截水推估公式。
6. 綠屋頂截水推估公式之建立：國外雖然已有文獻進行綠屋頂水力模式之分析與探討，然而因考量因子或參數會因地域不同而不同，故國外之模式與相關參數不見得適用於國內，本研究因而進行實驗分析國內綠屋頂之截水情況，依實驗所得的結果發展綠屋頂截水推估公式，並與實驗數據比對。

3.2 本土環境因子分析

由於本土環境與國外有所不同，例如降雨及建築型態等，對於綠屋頂的截水能力會有不同的影響，因此本研究首先對本土環境進行分析，了解這些因子對台灣綠屋頂截水能力之影響情況，以下分別說明。

1. 降雨強度：綠屋頂截水國外文獻由於在不同區域進行，雨量分佈不同，較小的在 1.27mm-10.08mm 間的降雨事件(Van Woert *et al.*, 2005)，較大的在 12.7mm-79.3mm 間(Hiltner *et al.*, 2008)，而圖 3.2 及圖 3.3 所示為新竹的 2004~2008 年時雨量五年平均小時數分佈，最大時雨量為 83.5 mm，大部分集中在 0~20 mm 之間，而日雨量最大為 203.5 mm，大部分集中在 0~60 mm 之間。可以發現國內降雨量明顯較這些研究較

大，唯因本研究主要針對 15 公分(150mm)以下的薄層綠屋頂進行研究，故其截水能力亦不可能太大。

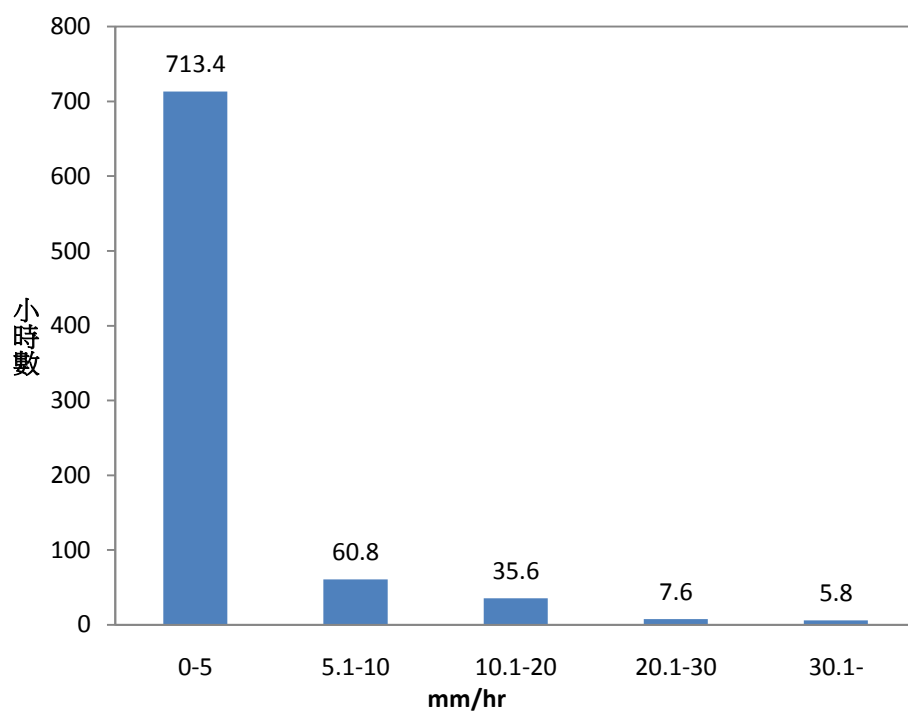


圖 3.2 新竹 2004~2008 年時雨量五年平均小時數

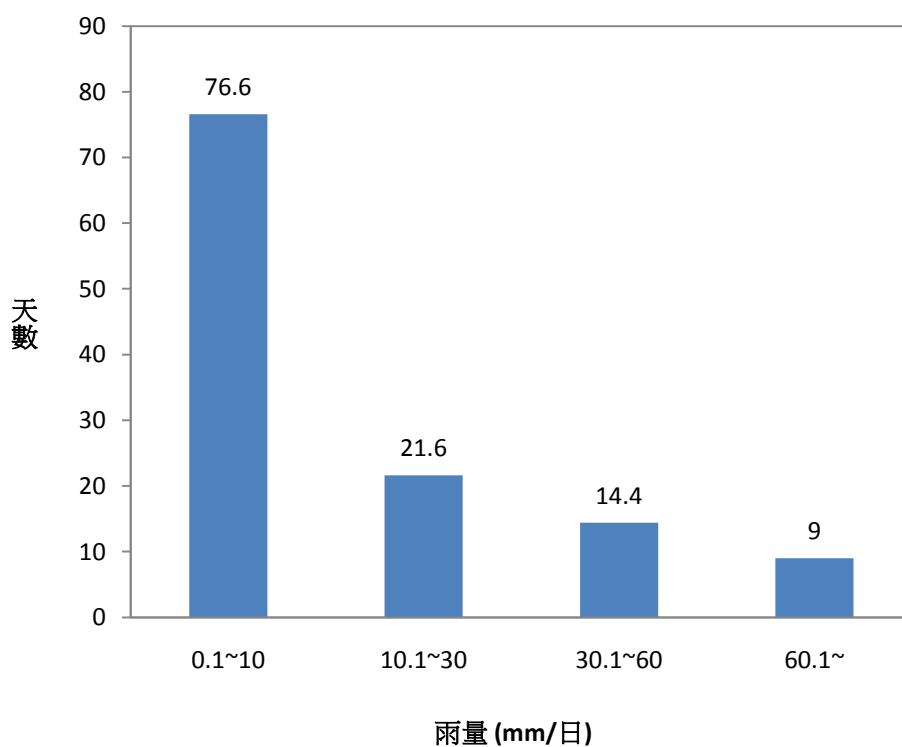


圖 3.3 新竹 2004~2008 年日雨量五年平均天數

2. 降雨頻率：根據圖 3.3 有降雨的天數大概佔了 1/3 年，亦即約有 2/3 沒下雨。
3. 建築型態：台灣的屋頂，建築型態主要有兩種型式，一種佔較多數的平屋頂，而另一種為斜屋頂，斜屋頂中有不少是鐵皮屋，且斜度頗大，傳統平房磚瓦式建築亦有斜屋頂，但已少見了。
4. 屋頂載重：不同的建築用途，會有不同的載重，依據表 3.1 列出了一些國內建築載重規範(建築技術規則, 98 年)。由於國內的施工品質經常會有問題，且一般綠屋頂通常不會再對屋頂補強承重能力，因而為了安全起見，不宜太重，故本研究只研究至多 10 公分厚的薄層綠屋頂，以免過重。
5. 氣候：臺灣主要以通過嘉義與花蓮的北迴歸線，南北劃分為兩個氣候區，北部為副熱帶季風氣候，南部為熱帶季風氣候，不同地區氣候適栽的植物不同，加上會有颱風暴雨，故會影響適栽的綠屋頂植物。
6. 植物：大部分國外在綠屋頂上使用的植物為景天科類或草本類，因其較耐旱及易維護等，而台灣目前較常看到的綠屋頂植栽是景天科、草本及地被植物等(錫瑠綠化基金會，98 年)。

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。	

3.3 綠屋頂截水因子

綠屋頂的截水能力會受到許多因子的影響，例如降雨、基質厚度、綠屋頂斜度及植物種類與生長覆蓋情形等，不同因子在不同狀況下均會讓綠屋頂會有不同的截水能力，以下一一分別說明之。

1. 基質特性：基質特性不同時會影響截水能力，例如顆粒間的孔隙度不同會有不同的含水力，相對的會影響到綠屋頂截水能力。本研究在基質的選擇上採用錫瑠環境綠化基金會(錫瑠綠化基金會，97 年；錫瑠綠化基金會，98 年 a)之建議，以泥炭土：椰纖：氣化石：粗砂：有基壤土=3：3：2：2：5 之混合比例作為基質，另外類似 Getter *et al.* (2007) 的研究，也會對基質做透水及粒徑等分析。。
2. 基質厚度：依照不同的建築物，有不同的載重，在重量選擇上要有所考慮，因此須考量到基質厚度的選用，基質厚度的改變對於綠屋頂的

截水能力也會產生不同的影響(Van Woert *et al.*, 2007)，本研究將進行不同基質厚度的實驗，探討不同基質厚度對於綠屋頂截水能力的影響。

3. 綠屋頂斜度：綠屋頂斜度的不同會造成不同的截水能力(Van Woert *et al.*, 2007)，另外台灣的建築物屋頂有些是斜的，後續研究者也將進行不同斜度的綠屋頂實驗，用來分析探討不同斜度下綠屋頂的截水能力。
4. 基質含水率：基質中的含水率的多寡會影響到截水的能力，Villarreal and Bengtsson (2005) 文獻中即指出乾土的情況下，具有截水與延遲的功能，而濕土只有延遲的功能。本研究將會設置土壤水分儀 (TDR) 監測基質中水分的含量，以期知道各個時間基質含水情形。
5. 降雨：不同的降雨量，對於綠屋頂的截水能力會有不同的影響(Van Woert *et al.*, 2007)，本研究將針對不同的天然降雨進行實驗，分析不同降雨量下的截水能力。
6. 植物選擇：Wolf and Lundholm (2008)文獻中指出不同的植物種類會造成土壤中不同水量損失，另外本土的氣候平均每年約有 2/3 日期未下雨，因此本研究在這部分選定耐旱類的景天科當做研究用的植栽，由於時間與人力的限制，本研究只採用景天科植物進行研究，不同植物的截水研究，留待後續研究者進行。

3.4 針對不同影響因子進行截水實驗

如前一節所述，綠屋頂之截水能力受到多個因子影響，但由於研究時間與人力之限制，無法完全針對各因子逐一進行實驗分析，因此，本研究以基質厚度及降雨等二因子進行實驗。以下分別說明二項因子之實驗內容。

1. 基質厚度：由於不同基質厚度會影響截水能力，而一般薄綠屋頂為小於 15cm (Getter *et al.*, 2009)，另外考慮植物的生長需要一些深度的基質，故在本研究中，擬分別以 5 及 10 cm 等二種基質厚度，實測在不同降雨下之逕流及滲漏水量。
2. 降雨：本研究分析天然降雨情況下綠屋頂的截水能力，並將研究期間 2009-12-27 至 2010-05-29 所收集的十場降雨再細分成十九場降雨，細分之依據為停止降雨達一小時以上即為另一場降雨事件，之後依所測得的降雨事件分析綠屋頂截水能力與所建立的截水公式比對。

3.5 實驗座台設計與建置

以實場方式進行綠屋頂截水研究雖可以反應真實的水力變化情況，但由於實場之建置時間長及成本高，且不易針對不同的影響因子迅速改變，尤其是本研究擬發展的公式需要較多實驗數據驗證，故實場反而不太適用。本研究因而擬以模擬場方式進行分析。經搜查相關文獻，雖亦有一些模擬場(Getter *et al.*, 2007)，但並不符合本研究的需求，因為其實驗模擬場沒有設計收集表面逕流的部分，並且文獻中所提到的最大坡度實驗不到 15°，對於坡度的選擇範圍較不大，故本研究自行設計一套綠屋頂實驗座台，座台設計如圖 3.4 所示，該座台所用的儀器設備主要可分為五大部分：實驗槽、斜度架、逕流及滲漏水收集與量測設備、基質含水率監測設備及簡易氣象站，以下分別詳細說明。



圖 3.4 綠屋頂實驗座台

1. 實驗槽：為了將表面逕流水及底部滲漏水分離收集，並且易於置換基質，本研究設計了一個基質及植栽置放實驗槽，如圖 3.5 所示，材質為不銹鋼可防止其風吹日曬造成生鏽，在兩旁設計有提環利於搬運，面積為 $90 \times 90 \text{ cm}^2$ ，可以將寶銳公司所設計之 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 蓄排水板置放於實驗槽配合使用；高度為 40 cm，足夠應用於實驗 15 cm 以下之薄基質，實驗槽設計一塊沖孔板，可當做排水板利於排水，也可將蓄排水板放於沖孔板上進行實驗，在實驗槽的後端的圍板可以拆卸，以利於預先在外培育的植物可以從該處放入。實驗槽底部如圖 3.6 所示，設計斜度以利於滲漏水流向收集孔，由於將進行 5 cm 及 10 cm 等不同

基質厚度實驗，所設立的逕流水收集孔擋水插板可以依不同厚度替換。



圖 3.5 實驗槽



圖 3.6 實驗槽底部

2. 斜度架：此裝置如圖 3.7，主要可以讓後續研究者用於模擬不同斜度 10° 、 20° 及 30° 綠屋頂。另外由於斜度改變，會造成基質及植栽置放槽的圍板擋到降雨改變了有效降雨面積，因此會將基質及植栽置放槽的後端圍板拆掉，讓有效降雨面積維持一樣。雖然也有油壓設備可供進行不同斜度的試驗，但設計及操作上均會較複雜，且成本較高，故本研究採用固定式的架子。

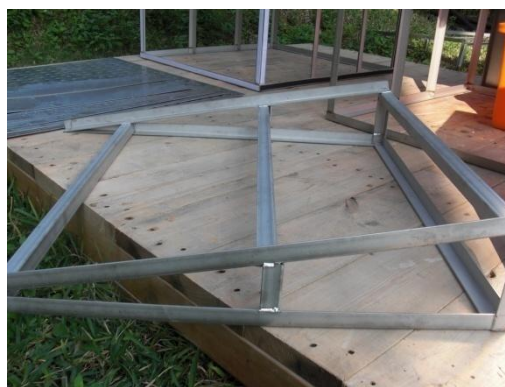


圖 3.7 斜度架

3. 逕流及滲漏水收集與量測設備：本研究因需要連續監測逕流水及滲漏水的量，首先設計收集設備，如圖 3.8 所示，原是以圖右方 $40 \times 40 \times 65$

(cm^3) 附觀景窗之水桶量測，唯後來採用自動量測重量的方式，故改為搭配一個 90 公升的一般水桶，分別收集逕流及滲漏水。

接著探討了不同流量的監測方法，在實際設計之前，首先評估各種不同方法的適用性，表 3.2 比較各種不同方法的優缺點，最後如圖 3.9 所示選擇電子台秤連續監測水桶收集到逕流及滲漏水後重量的改變，然後推算隨著時間的變化所收集到的逕流及滲漏水的量，用來分析綠屋頂的截水能力。水中雜質的部分則將另行分析所佔的量及密度，以便針對所監測的數據調整。電子台秤亦連接電腦，自動記錄所監測的數據。



圖 3.8 水桶



圖 3.9 電子秤

表 3.2 逕流及滲漏水流量監測方法比較

名稱	原理或方法	優點	缺點	價格比較
重量監測法	使用電子秤連續量取水桶的重量改變，並以電腦直接記錄數據，推算收集水量的變化。	可連續監測，準確度 ± 0.012 mm 也足夠。	需要換算體積及重量間之關係，會受風的波動影響，週圍需要圍起來。	約 3 萬元
人工即時讀取	使用有透明刻度之不銹鋼水桶，人員連續在旁監測水位變化。	較便宜。	需要人力連續現場監測。雨天及冬天在室外作業均頗不方便。	約 2 萬元
潛水壓力式探針 Submersible Pressure Transducer	壓力式探針潛在水裡，偵測水位改變造成壓力的變化。	可連續監測。	探針需要水位高於探針可開始偵測，一般為 1~2 cm，使得一開始收集的水無法量測，且價格也稍高。	約 7 萬元
超音波探測 Ultrasonic Water Level Sensor	超音波探測器架於水面上，偵測水面反射音波的時間。	可連續監測。	超音波探測器需要架於水面上一定的高度一般要有 30 cm，對於實驗設備需要再多設計成較高的高度，且價格高。	約 10 萬元
微波法 Microwave Level Transmitter	藉由探針所發出的微波在不同的介質中速度不同以至於反射回探針的時間不同，了解水位的化。	可連續監測。	準確度不夠，10 cm 以內水位會有 ± 10 mm 的誤差，超過 10 cm 水位也會有 ± 3 mm 誤差價格貴。	約 14 萬元
影像辨識法	使用攝影機照射有刻度透明視窗的桶子，再經過影像辨識技術，了解水位的變化。	可連續監測。	需較高解析度且較貴的攝影機及以定時拍攝器拍攝，但需要一定的拍攝距離，夜間也需要有光線，本研究的模場在距離上不易架設，因此未採用。	>4 萬元

4. 基質含水率監測設備：設備如圖 3.10，為了有效的知道基質在任何期間的含水情形，本研究在基質中放入 1~3 支土壤水分偵測探針 (TDR EC-5、EC-10, DECAGON DEVICES)及用 Campbell Scientific CR1000 的記錄器收集研究期間基質中含水率的資料。

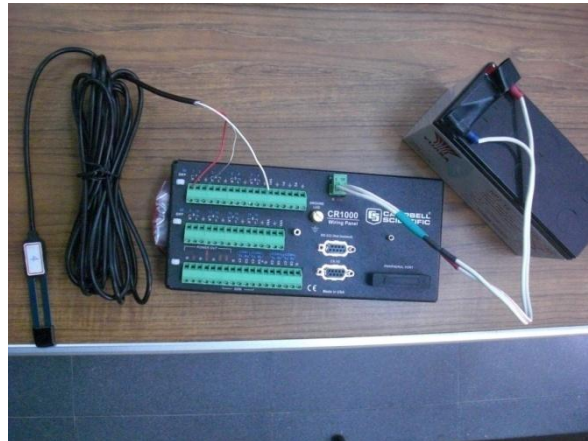


圖 3.10 土壤水分偵測設備

5. 簡易氣象站：如圖 3.11 所示為本研究所使用的簡易氣象站設備，用來監測雨量及一些天氣因子，如風速、氣壓、氣溫等。



圖 3.11 簡易氣象站

3.6 綠屋頂截水推估公式之建立

進行綠屋頂效益分析及相關決策，有必要建立一個公式推估綠屋頂截水能力，以改善分析與決策的品質及輔助綠屋頂設置規劃。目前國內的綠屋頂相關研究較少探討綠屋頂截水模式，國外亦只有少數相關研究，包括採用 ANOVA 法來做迴歸分析 (Van Woert *et al.*, 2005; Mentens *et al.*, 2006; Getter *et al.*, 2007; Hilten *et al.*, 2008)。Villarreal and Bengtsson. (2005)則用 Hydrograph 預測尖峰流量及逕流量，Jarrett *et al.* (2006)採用了 AGRR 及 SGRR 模式分別預測年逕流量及逕流速度與逕流量，Getter *et al.* (2007)使用 Curve number 法以 CN 值推估，以上這些方法採用類似非點源污染分析時常用以推估暴雨逕流的類似方法，雖然在機制上與綠屋頂頗為接近，但事實上仍頗不同，暴雨降在土地上，會入滲進入地下，但綠屋頂雖也會滲入土壤，但會被屋頂防水層所阻隔，無法再滲入，故並不相同。此外，Hilten *et al.* (2008)則使用了 HYDRUS-1D 模式模擬預測逕流，唯該模式頗複雜，實用性較差。由於國外之綠屋頂降雨截流模式不一定符合台灣之環境特性，因此有必要發展本土之截水推估公式。

綠屋頂之截水機制基本上如圖 3.12 所示，其中包含降雨、蒸散、表面逕流、滲漏水及基質含水等，而此水平衡可以 3.1 式來表示。降雨(I)將會增加基質含水量(ΔSW)，而蒸散(ET)、逕流(R)及滲漏水(P)則會減少基質之水份，因此 R、P 及 ET 在公式中為負號。此外，在綠屋頂截水機制中，植物對於基質水份之吸收及排水板蓄水杯之水份蒸散，則皆包含於基質含水量變化中(ΔSW)。

$$I - ET - R - P \pm \Delta SW = 0 \quad (3.1)$$

I : precipitation

ET : evapotranspiration

R : surface runoff

P : deep percolation

ΔSW : change is soil water content

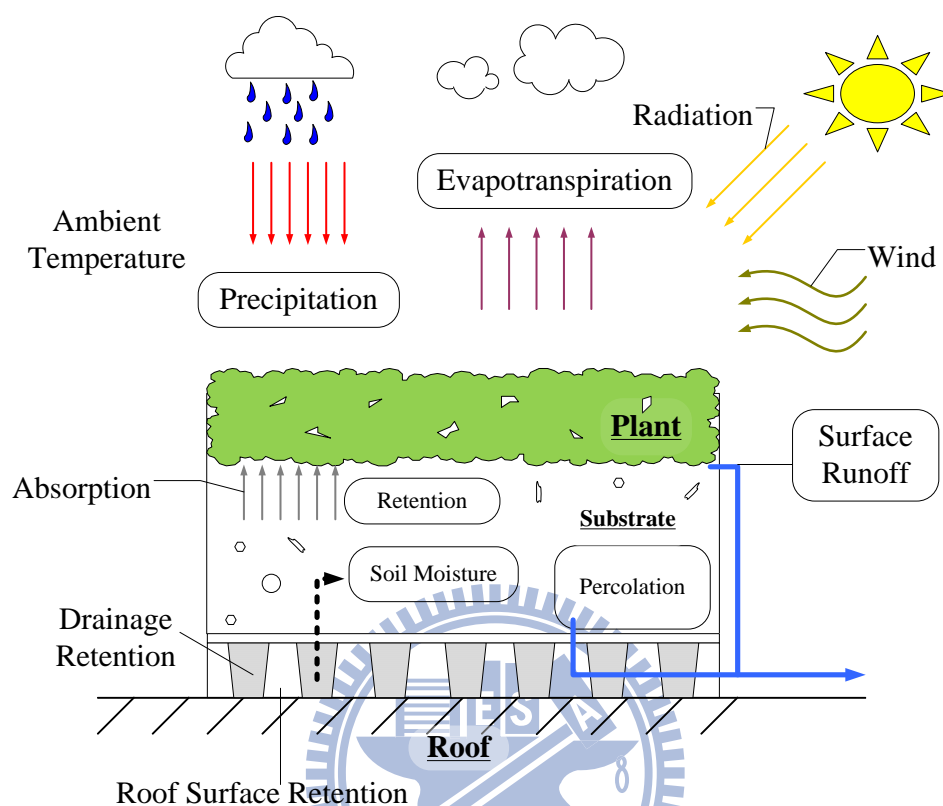


圖 3.12 綠屋頂截水模式影響因子考量圖

本研究以公式 3.1 為依據來發展適合台灣環境特性之截水推估公式，然而由於蒸散機制不易測量，且預期降雨期間蒸散量不大，故本研究先考量降雨、表面逕流、滲漏水及基質含水等機制，以迴歸分析方式發展一個截水量(I-P-R)推估之經驗公式。由於透水係數越大滲漏速度越快，因而將飽和透水係數(K_s)納入式中。降雨時間則是影響滲漏水量之主因。而基質起始含水率(θ_i)及基質厚度(ΔL)會影響到可截水量，進而影響到滲漏水量，因此也納入考量。另外，基質最大含水率(θ_{max})則代表基質的最大含水能力，也決定了綠屋頂之最大可含水量。而由於 θ_{max} 之值不易由實驗直接求得，因此本研究以降雨量(I)減去滲漏水量(P)、再減去逕流量(R)、然後加上基質起始含水(θ_i)以求得 θ_{max} 。接著比對 θ_{max} 與 TDR 實際量測到的

基質最終含水率的誤差，然後在誤差為 20% 以內的選擇其最大的 $I-P-R+\theta_i$ 值當作 θ_{\max} 。故基於上述因子，本研究建立公式 3.2 到 3.4 三個迴歸經驗公式推估截水量。公式 3.2 將 K_s 及 T 合併相乘得到透水量，另外將 θ_{\max} 扣除 θ_i 得到基質含水率差值，建立一個線性推估公式；公式 3.3 也是建立線性推估公式，不過未考慮 K_s ；公式 3.4 為建立一個指數型的非線性推估公式，公式中的係數將在第四章依實測數據推估之。

$$RR = a \times K_s \times T + b \times (\theta_{\max} - \theta_i) + c \times \Delta L \quad (3.2)$$

其中

RR: 截水量 (Rainfaill retention)，為 $I-ET-P-R$ ，由於本研究忽略 ET ，故為 $I-P-R$ ，亦即 ΔSW ；

I：降雨量(cm)；

P：滲漏水量(cm)

R：逕流量(cm)

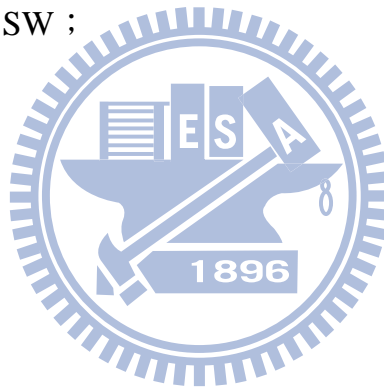
K_s ：飽和透水係數(cm/sec)

T：降雨時間(hr)

θ_{\max} ：基質最大含水率

θ_i ：基質起始含水率

ΔL ：基質厚度(cm)



$$RR = a \times T + b \times \theta_i + c \times \Delta L + d \times \theta_{\max} \quad (3.3)$$

$$RR = e^{a \times K_s + b \times T + c \times \theta_i + d \times \theta_{\max} + e \times \Delta L} \quad (3.4)$$

3.7 截水實驗

為了收集所需要的數據本研究進行綠屋頂截水實驗，主要可分為前置作業及模擬作業兩部分。在前置作業中，主要將進行下列項目：

1. 植栽培育：用育苗盆先進行植物培育到滿盆。
2. 基質特性測定：測定密度、孔隙度、透水及粒徑分佈。

在實驗作業方面，主要針對 5cm 及 10cm 二種厚度基質及不同的降雨事件進行實驗。由於天然降雨較無法明確掌握發生時間，因此，如氣象預報未來將會降雨，則本研究會將設備調整為全日自動監測。實驗作業步驟如下：

1. 儀器校正：進行 TDR 的電壓值與含水率關係的校正，以及進行磅秤的校正。
2. 實驗槽架設：實驗槽架設在戶外，直接暴露在天然降雨下。
3. 儀器設備架設：包括磅秤、數據接收器、及小型氣象站等。
4. 雨量量測：降雨以自行設置的小型氣象站量測。
5. 資料處理：將收集到的滲漏水量、逕流量、土壤含水率及氣象站量測的雨量進行整理比較。其中，也先將有誤差較大之數據進行排除，在分析截水能力時不予考慮。在實驗中，綠屋頂之截流量可以兩種方式來獲得，一是以降雨量(I)扣除滲漏水量(P)及扣除逕流量(R)來計算，由於三個數據都是實測值，若實測數據沒有錯誤，這是較準確的值；另一為以起始含水率(θ_i)及基質最終含水率(θ_e)之差來獲得，當

兩種方法所計算之截流量之誤差過大時則代表量測上可能有問題，除了儀器本身的誤差，其他可能原因為：(1) 由於含水率測點少，可能因不均勻而有差異；(2) 蒸散量並非很小，這對於長時間的降雨影響會較顯著；(3) 目前假設滲漏水中的土壤雜質少，但也有可能是因雜質流出較多。當二者所計算的截水量差異超過 30% 時，或截留水量為負時亦不合理，本研究將這些異常數據排除。

6. 依據所得結果以迴歸方式求各公式的係數值，並比對結果。



第四章 結果與討論

本章主要說明依前一章描述的研究流程與方法所得之結果，針對綠屋頂分析其截水能力，首先進行實驗結果的說明，然後分析不同因子下綠屋頂的截水能力，最後依據所得結果及所建立的綠屋頂截水總量推估公式求取公式的係數值。以下一一說明之。

4.1 實驗結果

本節主要依綠屋頂在不同影響因子下所得到的實驗結果，包含十場雨的降雨量、滲漏水及逕流量及基質含水率進行說明，並將實驗結果及相關天氣數據與基質特性實驗結果繪圖置於附錄 A 中，以下一一說明實驗結果。

1. 降雨：研究期間為 2009-12-27 至 2010-05-29，在排除異常數據後共收集了十場降雨，最小降雨量為 6.5 mm，最大降雨量為 101 mm，各場降雨圖如附錄 A 中附圖 A.1.1-附圖 A.1.10 所示。
2. 滲漏水：相關結果如附圖 A.1.1-附圖 A.1.10 所示。在 5 cm 基質中，以滲漏水量與降雨量相比，最大滲漏水比例為 2010-01-02 無植栽組的 74.8%；最小滲漏水比例為 2009-12-29 的 0%。在 10 cm 基質中，最大滲漏水比例為 2010-05-29 有植栽組的 83.1%；最小滲漏水比例為 2010-04-06 有植栽的 33.4%，唯由於滲漏水量會受降雨、基質厚度、起始含水率等所影響，無法只以量或比例來估算，故本研究試著發展一個公式推估之。
3. 逕流水：相關結果如附圖 A.1.1-附圖 A.1.10 所示，在 5 cm 基質組中，以逕流量與降雨量相比，最大逕流水比例為 2010-03-08 無植栽組的 5.3%，最小逕流量為 0 cm，如 2009-12-27、2009-12-29、2010-01-11 有無植栽組及 2010-01-02 無植栽組的結果。在 10 cm 基

質組中，最大逕流水比例為 2010-05-29 無植栽的 27.8%，最小逕流量為 0 cm，如 2010-04-06、2010-04-08、2010-05-07、2010-05-29 有植栽組。在 5 cm 基質很少有逕流水，主要是由於基質薄，讓水很容易通過，故沒有逕流水；而在 10 cm 基質無植栽組皆有逕流水，而有植栽組的僅有 2010-05-23 有逕流水，雖然無植物組雨水較易滲透至基質中，但植物可將水留滯於基質表面，讓雨水有時間可滲入基質中，故逕流多發生於無植物組中。

4. 基質含水率：監測結果如附圖 A.2.1-附圖 A.2.10 所示，降雨前後基質含水率($\Delta \theta$)變化最大的為 2010-03-08 無植栽組的 37%，起始基質含水率(θ_i)為 30%。最小為 2009-12-29、2010-01-11 及 2010-04-06 無植栽的 3%， θ_i 分別為 41%、40%及 42%。起始基質含水率會影響基質可再含水的量，進而影響截水能力。當起始含水率愈高，則截水能力會較差，反之而較好，例如 2010-04-08 降雨量為 57.92 mm 無植栽的 θ_i 為 42%而 $\Delta \theta$ 為 7%，2010-05-07 降雨量為 43.92 mm 無植栽的 θ_i 為 33%而 $\Delta \theta$ 為 17%，最終含水率差不多，但是較低的起始含水率截水較好。
5. 天氣因子：所收集的數據如附圖 A.3.1-附圖 A.3.10 所示，在降雨期間濕度相當的高以及氣溫偏低，在此將其蒸發假設為 0，所以在公式上未考慮蒸發因子。
6. 基質特性：本研究所使用的基質，其透水係數 (K) 在 0.008-0.012 cm/sec 間，相對孔隙率 (n) 為 0.62-0.76 間，而在本研究中所建立的經驗公式，透水係數(K)的值，選擇採用中間值 0.01cm/sec。而粒徑分佈大約為 0.08-7.5 mm，相關實驗結果如附圖 A.4.1 所示。

4.2 綠屋頂截水因子分析

為了解綠屋頂在不同因子下的截水能力，本節主要針對前一章節所得各不同因子下的結果，依照有無植栽、不同厚度及不同降雨量三因子分別分析綠屋頂截水能力受到不同因子的影響，相關結果請參見表 4.1 及表 4.2 以及附圖。另外在分析前，本研究藉由比較 $(\theta_e - \theta_i)$ 及(I-P-R)所算出之截水量，將選擇誤差較小之數據再進一步分析。在有植栽組將會採用的數據共有 7 筆；在無植栽組將會採用的數據則有 5 筆。以下以所獲得之測量數據，一一探討影響綠屋頂之相關因子。

1. 有無植栽：以表 4.1 及表 4.2 之結果比較植栽對於綠屋頂截水能力之影響。比較結果可以參考圖 4.1，由圖中可以發現有植栽組的截水量(I-P-R)或是基質最終含水量(I-P-R+ θ_i)會大於無植栽組，例如在 2010-01-11 20:18 的降雨事件，從圖 4.1 發現有植栽組的截水量稍微小於無植栽組，但從表 4.1 及表 4.2 可以知道有植栽組的基質起始含水率(θ_i)較大，因此在基質總含水量方面有植栽組高於無植栽組，而在 2010-05-29 04:22 的降雨事件，從表 4.1 及表 4.2 可以發現有植栽組的基質起始含水率(θ_i)大於無植栽組，但從圖 4.1 可看出截留水量(I-P-R)在有植栽組仍大於無植栽組，可見有植栽組的截水能力會高於無植栽組。由此可知道有植栽組的截水能力會高於無植栽組。

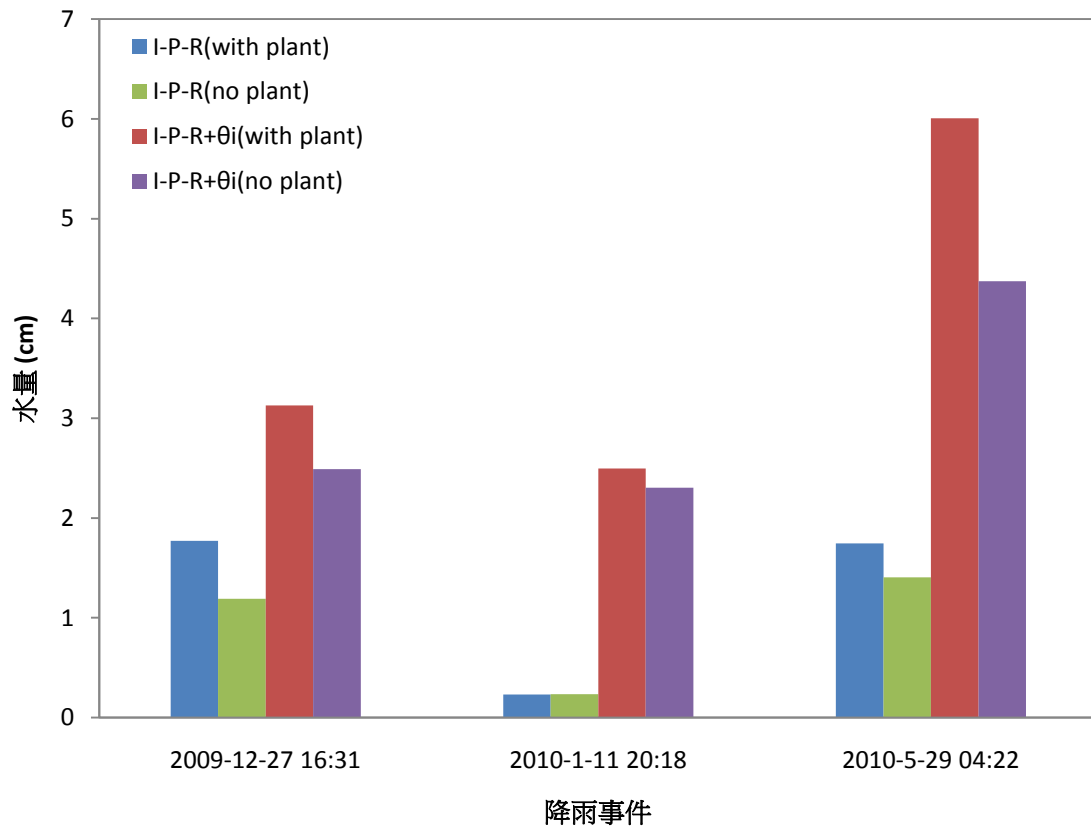


圖 4.1 三場降雨事件有無植栽之水量比較

- 不同厚度：在此討論有植栽組部分，比較結果如圖 4.2，從圖中可以看出降雨量(I)在 0-3cm 之間，10cm 基質的基質最終含水量($I-P-R+\theta_i$)皆大於 5cm 基質，可見基質越厚則截水能力越好。例如比較 2009-12-27 16:31 基質 5cm 與 2010-04-08 17:18 基質 10cm 兩場降雨事件，從表 4.1 中可以得知 10cm 基質的基質起始含水率(θ_i)比 5cm 基質高，兩場的降雨量差不多，雖然 10cm 基質的起始含水率比較高，但是看其基質最終含水，如圖 4.2 所示，基質 10cm 的最終含水高於基質 5cm，由此可知基質越厚其截水能力會越好。

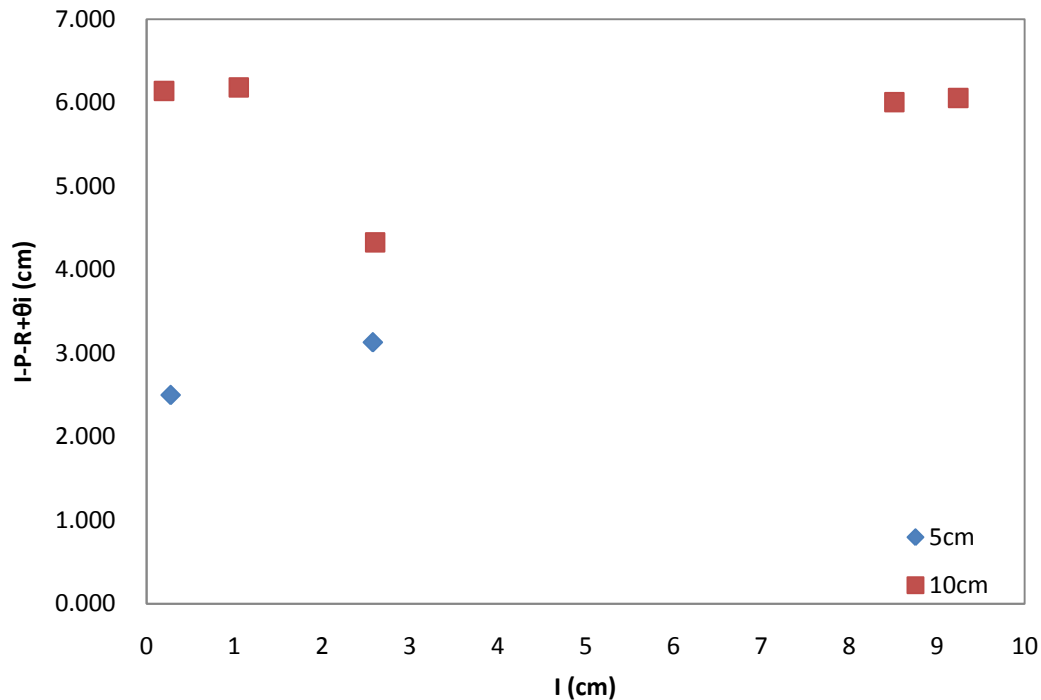


圖 4.2 有植栽組 5cm 及 10cm 基質最終含水比較

- 不同降雨量：在此討論有植栽組基質 5cm 及 10cm 以及無植栽組基質 5cm 部分，由圖 4.3 可以發現降雨量(I)越大，各別所能夠截留的量(I-P-R)占降雨量(I)的比例會越小，例如有植栽組基質 10cm，降雨量(I)小於 1cm 的有一場雨，累積雨量為 0.2cm，累積截水量(RR=I-P-R)為 0.071cm 占了降雨量(I)的 35.5%，而降雨量(I)大於 1cm 的有四場雨，累積雨量為 21.413cm，累積截水量(RR)為 4.245cm 占了降雨量(I)的 19.8%，由此可知降雨量(I)越大，會降低其綠屋頂的截水能力，造成截水量(I-P-R)占降雨量(I)的比例下降。

由以上研究結果，在有植栽時的總滲漏水率較低且逕流水也較少，因為植物會有阻擋的作用，而有植栽組的截水率也較高；而較厚的基質層也會有較大的截水率，因為會有較多的土壤孔隙，但是逕流水比例會較大，因為基質厚較不易讓水順利通過，而形成逕流水；另外起始含水率低的話，也可以有較大的截水率，而降雨越大所造成的截水率越低，主要是因為與有限的土壤的含水能力有關。

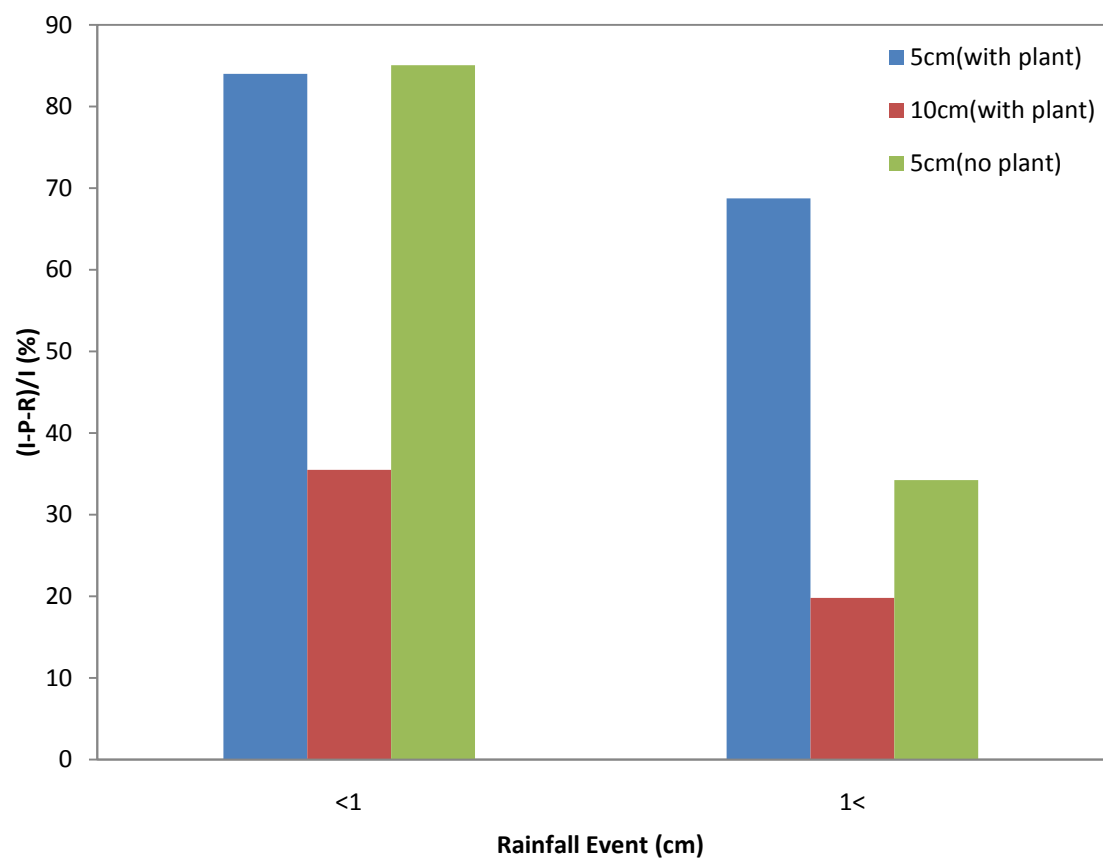


圖 4.3 不同降雨事件下累積雨量所相對應的截水率



表 4.1 實驗結果-有植栽

降雨起始	降雨結束	基質 (cm)	θ_i (%)		θ_e (%)		θ_r (%)		T (hr)	I (cm)	P (cm)	R (cm)	截水量 (I-P-R cm)	基質最終含水(I-P-R+ θ_i)			基質含水差($\theta_e-\theta_i$)			I-P-R 與 $\theta_e-\theta_i$ 之誤差 (%)	採用
			tdr3	tdr4	tdr3	tdr4	tdr3	tdr4						tdr3 (cm)	tdr4 (cm)	ave.	tdr3 (%)	tdr4 (%)	ave. (cm)		
2009-12-27 16:31	2009-12-28 00:46	5		27.2		59			8.25	2.58	0.81	0	1.771		3.13	0.63	0	31.86	1.593	10.05	是
2009-12-28 02:40	2009-12-28 04:18	5		59		59			1.63	0.48	0.01	0	0.47		3.42	0.68	0	0	0	100.00	否
2009-12-28 06:13	2009-12-28 07:13	5		60.7		60.7			1	0.43	0	0	0.422		3.46	0.69	0	0	0	100.00	否
2009-12-29 22:26	2009-12-30 05:39	5		57.4		62.4			7.22	1.48	0	0	1.475		4.35	0.87	0	4.95	0.2475	83.22	否
2010-1-2 17:33	2010-1-3 07:01	5	33.4	39.6	43.2	55.8			13.5	3.53	0.84	0	2.682	4.35	4.66	0.90	9.77	16.19	0.649	75.80	否
2010-1-11 20:18	2010-1-11 22:39	5	40.8	49.9	43.2	57.4			2.35	0.28	0.04	0	0.231	2.27	2.72	0.50	2.42	7.54	0.249	-7.79	是
2010-1-12 00:29	2010-1-12 02:31	5	43.2	55.8	43.2	57.4			2.03	0.2	0.13	0	0.068	2.23	2.86	0.51	0	1.58	0.0395	41.91	否
2010-3-8 19:44	2010-3-8 21:23	5	36.4	32.5	38.5	34.4			1.65	0.23	0	0	0.225	2.04	1.85	0.39	2.14	1.86	0.1	55.56	否
2010-3-8 23:15	2010-3-9 11:27	5	40.8	36.4	59	57.4	59	57.4	12.2	3.58	2.02	0.06	1.495	3.53	3.31	0.68	18.23	21.03	0.9815	34.35	否
2010-4-6 17:59	2010-4-7 02:35	10	34.4	32.5	43.2	39.6			8.6	2.59	0.82	0	1.765	5.20	5.02	0.51	8.82	7.11	0.7965	54.87	否
2010-4-8 03:55	2010-4-8 07:36	10	39.6	36.4	44.5	39.6			3.68	2.14	0	0	2.137	6.10	5.78	0.59	4.83	3.26	0.4045	81.07	否
2010-4-8 13:16	2010-4-8 15:42	10	43.2	39.6	44.5	40.8			2.43	0.9	0.09	0	0.809	5.13	4.77	0.50	1.26	1.15	0.1205	85.11	否
2010-4-8 17:18	2010-4-9 00:26	10	44.5	39.6	45.8	40.8			7.13	2.6	2.48	0	0.122	4.57	4.09	0.43	1.3	1.15	0.1225	-0.41	是
2010-5-7 08:20	2010-5-7 17:34	10	32.5	32.5	43.2	44.5			9.23	4.32	2.16	0	2.157	5.41	5.41	0.54	10.68	11.94	1.131	47.57	否
2010-5-23 08:53	2010-5-23 21:31	10	38.5	37.4	62.4	59	65.8	65.8	12.6	9.24	6.79	0.19	2.259	6.11	6.00	0.61	23.84	21.59	2.2715	-0.55	是
2010-5-29 04:22	2010-5-29 09:44	10	43.2	42	62.4	60.7			5.37	8.52	6.77	0	1.747	6.07	5.95	0.60	19.15	18.69	1.892	-8.30	是
2010-5-29 14:44	2010-5-29 15:52	10	62.4	60.7	62.4	60.7			1.13	0.25	0.14	0	0.113	6.35	6.18	0.63	0	0	0	100.00	否
2010-5-29 17:40	2010-5-29 18:56	10	62.4	59	62.4	60.7			1.27	0.2	0.13	0	0.071	6.31	5.97	0.61	0	1.65	0.0825	-16.20	是
2010-5-29 23:34	2010-5-30 05:07	10	60.7	60.7	62.4	60.7			5.55	1.05	0.93	0	0.117	6.18	6.18	0.62	1.69	0	0.0845	27.78	是

註：(1) θ_i 為降雨開始前土壤含水；(2) θ_e 為降雨結束土壤含水；(3) θ_r 為有逕流出現土壤含水；(4)I為降雨；(5)P為滲漏水；(6)R為逕流水

表 4.2 實驗結果-無植栽

降雨起始	降雨結束	基質 (cm)	θ_i (%)		θ_e (%)		θ_r (%)		T (hr)	I (cm)	P (cm)	R (cm)	截水量 (I-P-R cm)	基質最終含水(I-P-R+ θ_i)			基質含水差($\theta_e-\theta_i$)			I-P-R 與 $\theta_e-\theta_i$ 之誤差 (%)	採 用
			tdr1	tdr2	tdr1	tdr2	tdr1	tdr2						tdr1 (cm)	tdr2 (cm)	ave.	tdr1 (%)	tdr2 (%)	ave. (cm)		
2009-12-27 16:31	2009-12-28 00:46	5	24.86	27.16	36.38	49.87			8.25	2.576	1.385	0	1.191	2.43	3.79	0.62	11.52	22.71	0.85575	28.15	是
2009-12-28 02:40	2009-12-28 04:18	5	36.38	49.87	36.38	49.87			1.63	0.476	0.372	0	0.104	1.92	4.42	0.63	0	0	0	100.00	否
2009-12-28 06:13	2009-12-28 07:13	5	36.38	51.31	36.38	49.87			1	0.425	0.334	0	0.091	1.91	4.48	0.64	0	-1.44	-0.036	139.56	否
2009-12-29 22:26	2009-12-30 05:39	5	36.38	45.77	38.52	49.87			7.22	1.475	0.567	0	0.908	2.73	5.02	0.77	2.14	4.1	0.156	82.82	否
2010-1-2 17:33	2010-1-3 07:01	5	29.25	30.02	40.79	48.47	40.79	51.31	13.5	3.525	2.568	0.058	0.899	2.36	3.86	0.62	11.54	18.45	0.74975	16.60	是
2010-1-11 20:18	2010-1-11 22:39	5	39.64	43.21	43.21	49.87			2.35	0.275	0.041	0	0.234	2.22	4.38	0.66	3.57	6.66	0.25575	-9.29	是
2010-1-12 00:29	2010-1-12 02:31	5	41.98	48.47	41.98	49.87			2.03	0.2	0.134	0	0.066	2.17	4.59	0.68	0	1.4	0.035	46.97	否
2010-3-8 19:44	2010-3-8 21:23	5	31.66	28.52	35.37	38.52			1.65	0.225	0	0	0.225	1.81	3.23	0.50	3.71	10	0.34275	-52.33	否
2010-3-8 23:15	2010-3-9 11:27	5	41.98	40.79	81.14	54.29	87.46	54.29	12.2	3.578	2.784	0.108	0.686	2.79	4.82	0.76	39.16	13.5	1.3165	-91.91	否
2010-4-6 17:59	2010-4-7 02:35	10	45.77	39.64	49.87	41.98	51.31	44.47	8.6	2.586	1.384	0.629	0.573	5.15	9.11	0.71	4.1	2.34	0.322	43.80	否
2010-4-8 03:55	2010-4-8 07:36	10	45.77	37.43	49.87	41.98	51.31	43.21	3.68	2.137	1.247	0.036	0.854	5.43	9.17	0.73	4.1	4.55	0.4325	49.36	否
2010-4-8 13:16	2010-4-8 15:42	10	51.31	41.98	52.78	43.21	51.31	41.98	2.43	0.901	0.617	0.228	0.056	5.19	9.39	0.73	1.47	1.23	0.135	-141.07	否
2010-4-8 17:18	2010-4-9 00:26	10	52.78	43.21	52.78	41.98	52.78	43.21	7.13	2.604	1.799	0.818	-0.013	5.27	9.59	0.74	0	-1.23	-0.0615	-373.08	否
2010-5-7 08:20	2010-5-7 17:34	10	35.37	30.02	54.29	43.21	60.67	43.21	9.23	4.315	1.894	0.625	1.796	5.33	8.34	0.68	18.92	13.19	1.6055	10.61	是
2010-5-23 08:53	2010-5-23 21:31	10	25.38	26.53	47.1	41.98	49.87	49.87	12.6	9.243	5.253	0.512	3.478	6.02	8.67	0.73	21.72	15.45	1.8585	46.56	否
2010-5-29 04:22	2010-5-29 09:44	10	28.52	30.82	47.1	43.21	28.52	43.21	5.37	8.516	5.419	1.692	1.405	4.26	7.34	0.58	18.58	12.39	1.5485	-10.21	是
2010-5-29 14:44	2010-5-29 15:52	10	45.77	40.79	47.1	41.98	47.1	43.21	1.13	0.25	0.065	0.121	0.064	4.64	8.72	0.67	1.33	1.19	0.126	-96.87	否
2010-5-29 17:40	2010-5-29 18:56	10	45.77	41.98	47.1	41.98	47.1	43.21	1.27	0.2	0.045	0.126	0.029	4.61	8.80	0.67	1.33	0	0.0665	-129.31	否
2010-5-29 23:34	2010-5-30 05:07	10	45.77	41.98	47.1	41.98	45.77	41.98	5.55	1.05	0.449	0.569	0.032	4.61	8.81	0.67	1.33	0	0.0665	-107.81	否

4.3 綠屋頂滲漏水總量推估公式係數推估及比對

本節主要針對前一章節所建立出的三個綠屋頂截水推估公式分別針對有植栽組及無植栽組進行係數的推估及公式的比對，在係數值的推估方面，主要是利用 SPSS 12.0 軟體進行迴歸分析，進而得到其相對係數值，以下說明分析所得結果。

有植栽組部分，公式 3.2 所分析出的係數值分別為 $a=13.0119$ 、 $b=1.8369$ 及 $c=-0.0103$ ，因此得到公式 4.1，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.4，而此公式的 R 平方值為 0.63965；公式 3.3 所分析出的係數值分別為 $a=0.1305$ 、 $b=-2.3872$ 、 $c=0.0236$ 及 $d=1.7769$ ，因此得到公式 4.2，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.5，而此公式的 R 平方值為 0.65518；公式 3.4 所分析出的係數值分別為 $a=81151.3710$ 、 $b=0.1011$ 、 $c=-3.5443$ 、 $d=-1175.2927$ 及 $e=0.0379$ ，因此得到公式 4.3，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.6，而此公式的 R 平方值為 0.66245。由於公式 4.3 的 R 平方值最高，因此公式 4.3 當作有植栽組的截水推估公式。

$$RR = 13.0119 \times K_s \times T + 1.8369 \times (\theta_{\max} - \theta_i) + (-0.0103) \times \Delta L \quad (4.1)$$

$$RR = 0.1305 \times T + (-2.3872) \times \theta_i + 0.0236 \times \Delta L + 1.7769 \times \theta_{\max} \quad (4.2)$$

$$RR = e^{81151.371 \times K_s} \times e^{0.1011 \times T} \times e^{(-3.5443) \times \theta_i} \times e^{(-1175.2927) \times \theta_{\max}} \\ \times e^{0.0379 \times \Delta L} \quad (4.3)$$

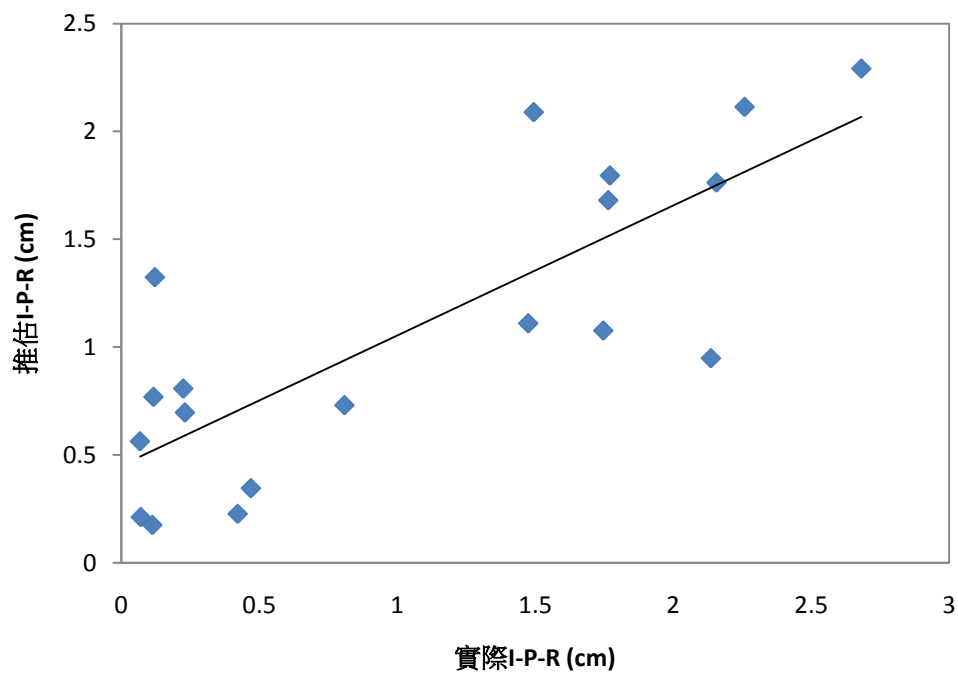


圖 4.4 實際 RR 與公式 4.1 推估 RR 之比較

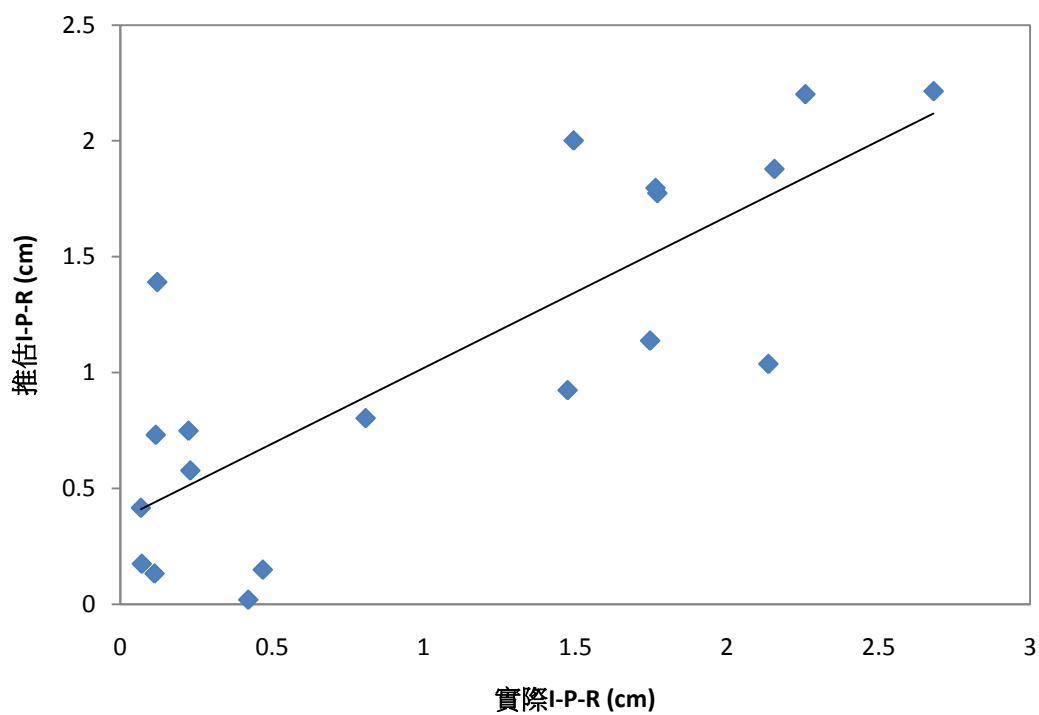


圖 4.5 實際 RR 與公式 4.2 推估 RR 之比較

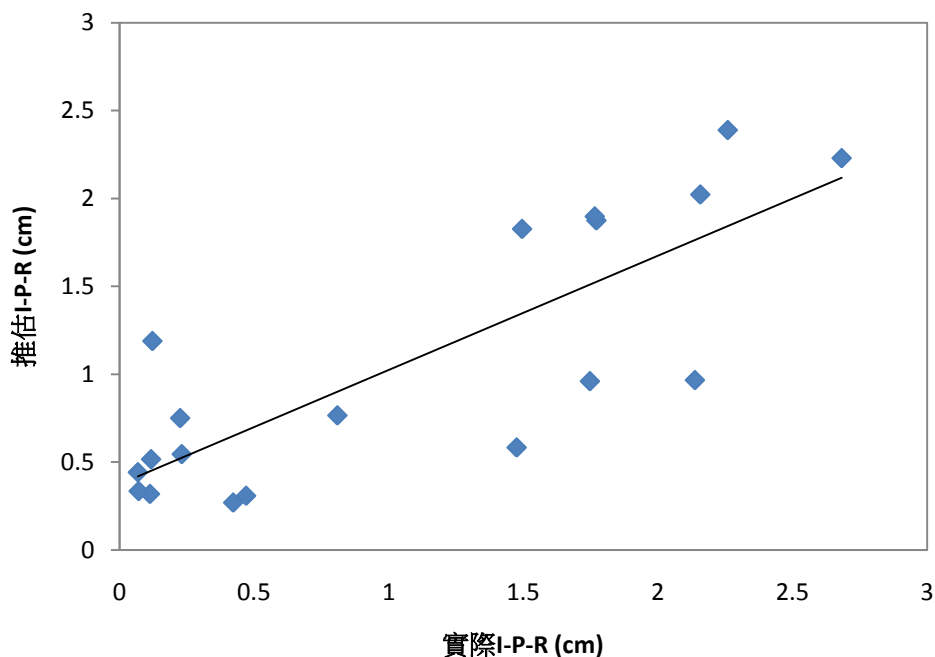


圖 4.6 實際 RR 與公式 4.3 推估 RR 之比較

無植栽組部分，公式 3.2 所分析出的係數值分別為 $a=10.8833$ 、 $b=0.6354$ 及 $c=-0.0148$ ，因此得到公式 4.4，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.7，而此公式的 R 平方值為 0.4407；公式 3.3 所分析出的係數值分別為 $a=0.0721$ 、 $b=-7.2642$ 、 $c=0.0959$ 及 $d=3.1096$ ，因此得到公式 4.5，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.8，而此公式的 R 平方值為 0.73514；公式 3.4 所分析出的係數值分別為 $a=-59912.2881$ 、 $b=0.0799$ 、 $c=-8.8137$ 、 $d=789.4726$ 及 $e=0.167$ ，因此得到公式 4.6，繪製實際截水量(RR)與推估截水量(RR)比較圖 4.9，而此公式的 R 平方值為 0.89908。由於公式 4.6 的 R 平方值最高，因此公式 4.6 當作無植栽組的截水推估公式。

$$RR = 10.8833 \times K_s \times T + 0.6354 \times (\theta_{\max} - \theta_i) + (-0.0148) \times \Delta L \quad (4.4)$$

$$RR = 0.0721 \times T + (-7.2642) \times \theta_i + 0.0959 \times \Delta L + 3.1096 \times \theta_{\max} \quad (4.5)$$

$$RR = e^{(-59912.2881) \times K_s} \times e^{0.0799 \times T} \times e^{(-8.8137) \times \theta_i} \times e^{789.4726 \times \theta_{\max}} \times e^{0.167 \times \Delta L} \quad (4.6)$$

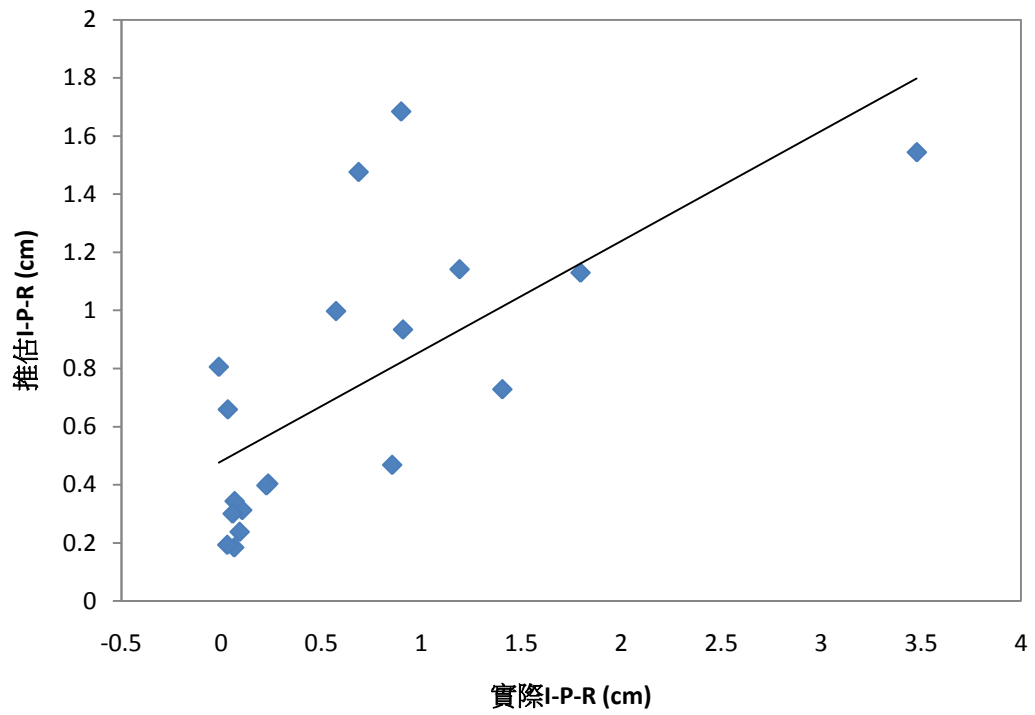


圖 4.7 實際 RR 與公式 4.4 推估 RR 之比較

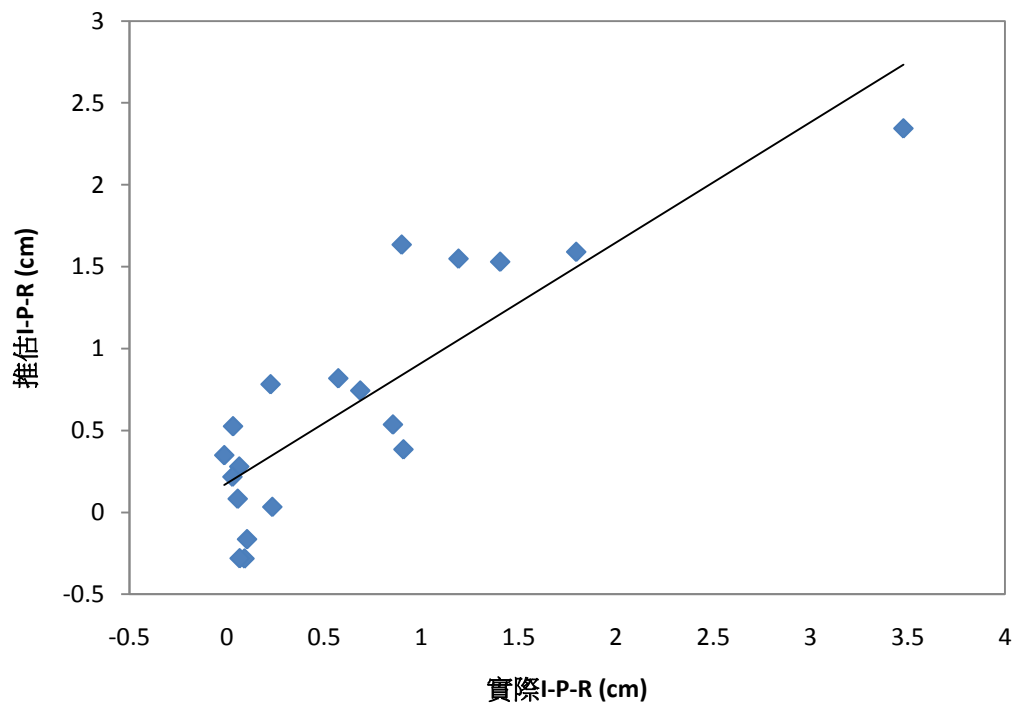


圖 4.8 實際 RR 與公式 4.5 推估 RR 之比較

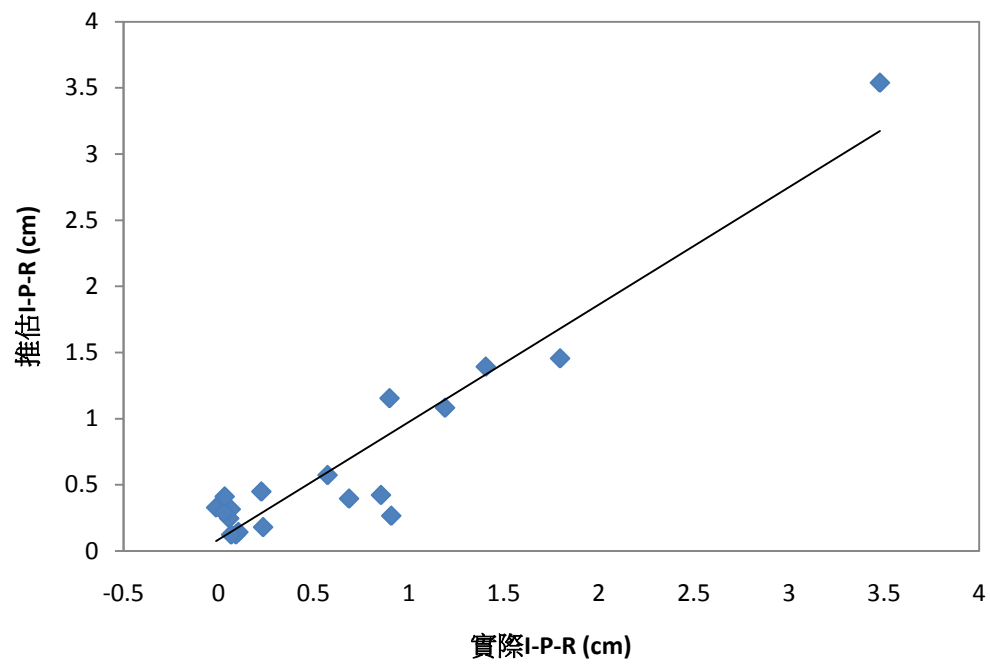


圖 4.9 實際 RR 與公式 4.6 推估 RR 之比較



第五章 結論與建議

本研究主要是建立本土綠屋頂截水推估公式，用以分析綠屋頂之截水能力，本研究亦建立實驗座台分析綠屋頂截水能力與各因子的關係並據以比對所發展的公式，且用以評估綠屋頂截水效益。以下總結本研究的成果及結論，並對於值得探討的方向及問題或是可改善的地方提供建議，以供未來後續研究參考。

5.1 結論

本研究依據研究目的設計一綠屋頂實驗座台，並將其放置在戶外利用天然降雨進行不同影響因子的實驗，最後依據所得數據建立綠屋頂截水推估公式，用以分析綠屋頂的截水能力，以下分別說明本研究結論：

1. 綠屋頂實驗座台設計與建置：藉由實驗座台可有效模擬與分析不同影響因子下綠屋頂之截水能力，但由於目前文獻中並無適當之實驗座台可供使用，本研究因而參考各種相關設置(含海洋大學正設置的一個座台)設計綠屋頂實驗座台，此實驗座台可將逕流水及滲漏水分開收集，而為了要收集逕流水及滲漏水，並監測水量隨時間的變化，以及在準確度、預算及環境等因素考量下，本研究比較各種方法後，建立一套重量監測法，重量監測法的優點可以連續監測，準確度高，價格亦合理，以利於實驗收集監測逕流水及滲漏水的水量。且實驗座台可調整基質厚度及斜度，便於提供分析截水公式所需的數據。
2. 建立綠屋頂截水推估公式：本研究利用綠屋頂座台在天然降雨下，針對兩種不同的基質厚度及不同的降雨事件，分別收集表面逕流水及滲漏水，接著利用所收集到的數據分別針對有植栽組與無植栽組及考量飽和水力傳導係數、降雨時間、基質起始含水率、基質最大含水率及基質厚度等因子各建立三個半經驗公式推估截水量，且分別選有植栽

組的公式 4.3 及無植栽組公式 4.6 作為推估公式，因二個公式的 R 平方值在各組最高，分別為 0.66245 及 0.89908。

3. 分析綠屋頂降雨截水能力：依據本研究實驗收集到的數據，將數據經過整理後分析其綠屋頂的截水能力，並繪製一些相關圖表，由圖表結果可以知道未種植物及有種植物都有相當的截水能力，有植栽組由於植物亦能截流及保存一些水份，故總截水能力較無植栽組高，在不同狀況下大約在 20.51%-84% 間(相對於無植栽組的 16.50%-85.09%間)，截水能力隨降雨量等因子不同而不同，即使有植栽組的基質起始含水(θ_i)較高，但是其截水量還是會高於無植栽組，或是有植栽組的基質起始含水(θ_i)較高，造成截水量較少，可是最終含水量在有植栽組還是較高，因為植物也會有截水及吸收水份的效果，而且較不會有逕流水；由圖 4.3 發現在不同的降雨事件下，累積降雨量越大所造成的截水的比例會較低，主要是因為基質的含水能力有限，因而針對較大雨量的截水率較低。

5.2 建議

本研究所設計的綠屋頂實驗座台，如有一內槽與其搭配對於置換不同深度的基質會較其方便，目前已有設計一不鏽鋼內槽，但是有些問題需要改善，內槽與擋水插板不密合會造成漏水，因而會高估逕流水，內槽的孔洞與底下的沖孔板孔洞位置不合，有可能會影響排水，而且價格較貴，對於日後要多做幾組較不方便，另外座台為不鏽鋼材質，金屬容器會影響到 TDR 的準確度，對於在淺基質時較無法置放 TDR。實驗座台兩旁的提環可以加裝鏈條以利於抬放。

本研究所推估的公式僅針對總量來推估，並未對時序來推估，尚無法分析降低尖峰負荷流量，未來可針對每個時間間隔來推估水量，較易了解

水量隨著時間的變化。總量公式也仍然需要以更多數據驗證之，包括不同因子下是否適用或需要修正，例如本研究並未針對斜度與基質的改變實驗，公式目前所考慮的因子並不多，未來可以再多做不同影響因子情況下水量的變化，在建置公式上才可以考慮多一點的參數。

在研究期間自然雨的降雨次數並不多，而且用自然降雨並不能完全控制降雨的量，無法針對同一降雨量其他因子的影響進行實驗，未來可將人工降雨模擬器製作好，可加快實驗的進行。

TDR 目前只有置放在中間然後分兩層，未來研究在同一水平面上可再多放幾支，除了不同分層的基質含水率變化，在同一平面上的含水率變化分佈也可以清楚的記錄下來。

此外，在 19 場降雨事件中，發現有截水量為負的情形，如 2010-04-08 17:18 的 -0.013，這是頗不合理的情形，目前可能想到的原因如下：(1) 雨量計不精確；(2) 部分稱重儀有問題；(3) 忽略蒸散量可能並不小不能忽略；(4) 逕流水桶或滲漏水桶中有較多 Soil 或其他雜質，導致增加重量；(5) TDR 擺放不對或空間代表性不佳造成量測有誤差；(6) 其他儀器的數據有問題。有必要再詳細檢討所有儀器的誤差是否可接受及整個流程是否有什麼地方會造成此誤差。

目前的截水公式針對植栽組及無植栽組分別建立，未來宜合併為一，以增加其實用性。此外，本研究所建立的是半經驗公式，而要應用 Darcy 公式建立真正的理論公式，需要有水壓梯度，但由於薄層綠屋頂很難量測其水壓，測量及建置 SWCC (soil water characteristic curve) 曲線雖有方法可用以推估水壓梯度，但需要不少時間，並不實用，未來有必要再探討其他更適用的公式。

參考文獻

日經 BP 社，(2006)，「屋上綠化 2」，日本。

范正成教授研究群，(98 年)，降雨模擬器觀摩與請教討論，國立台灣大學。

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，碩士論文。

張育森、賴允慧、侯炳丞，(98 年)，「綠屋頂介質與植物之關係」，「節能減碳綠工法~綠屋頂及綠牆交流討論及推廣展示活動資料」，17-24 頁。
國家地理雜誌，(98 年)，「打造空中花園」，海峽文化事業股份有限公司，台北。

廖朝軒教授研究群，(98 年)，綠屋頂實驗座台討論，國立海洋大學。

錫瑠基金會，(97 年)，「綠屋頂推廣交流討論會資料」，錫瑠環境綠化基金會，台北。

錫瑠基金會，(98 年 a)，「你也能有綠屋頂」，錫瑠環境綠化基金會，台北。

錫瑠基金會，(98 年 b)，「節能減碳綠工法~綠屋頂及綠牆交流討論及推廣展示活動資料」，錫瑠環境綠化基金會，台北。

營建署，(98 年)，建築技術規則，

<http://w3.cpami.gov.tw/law/law/lawe-2/b-rule.htm>

(accessed on 2009/12/17)

Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., and Jinno, K. (2008). "First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events." *Hydrology Research*, 39(3), pp. 171-179.

California academy of sciences. (2009). The Living Roof.

http://www.calacademy.org/academy/building/the_living_roof/ (accessed on 2009/12/15).

- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) (2002). *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Bonn.
- 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.
- 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.
- Hiltner, 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." 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon.
- Moran, A., Hunt, B., and Smith, J. (2005). "Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina." 3rd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC.
- 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.

Rodriguez, R. (2009). The History of Green Roof Technology.

http://www.ifenergy.com/50226711/the_history_of_green_roof_technology.php (accessed on 2009/12/15).

Takebayashi, H. and Moriyama, M. (2007). "Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island." *Building and Environment*, 42(8), pp. 2971-2979.

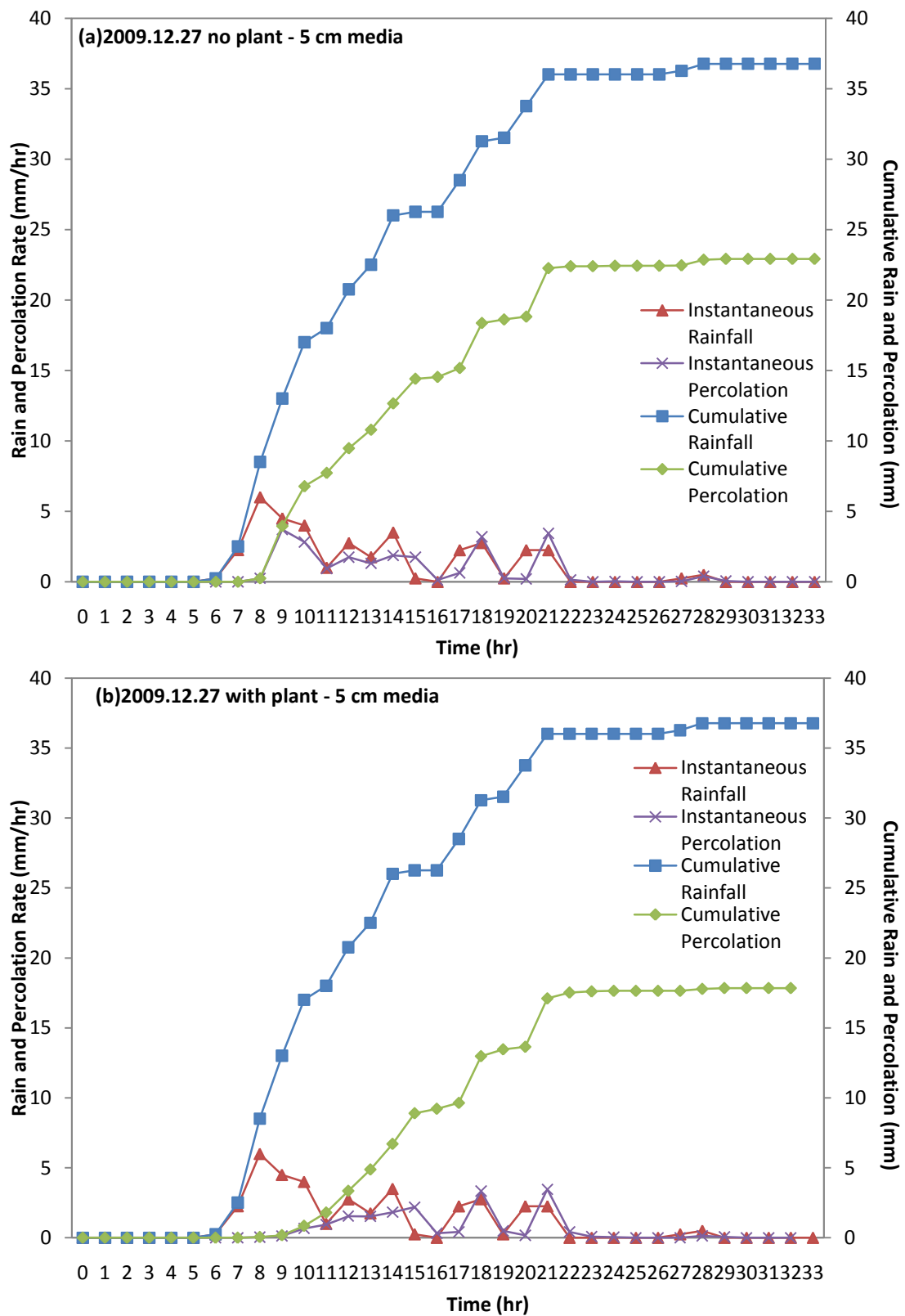
Van Woert N.D., Rowe D.B., Andresen J.A., Rugh C.L., Thomas F. R., and Lan X. (2005). "Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth." *Journal of Environmental Quality*, 34(3), pp. 1036-1044.

Villarreal, E.L. and Bengtsson.L. (2005). "Response of a Sedum green-roof to individual rain events." *Ecological Engineering*, 25(1), pp. 1-7.

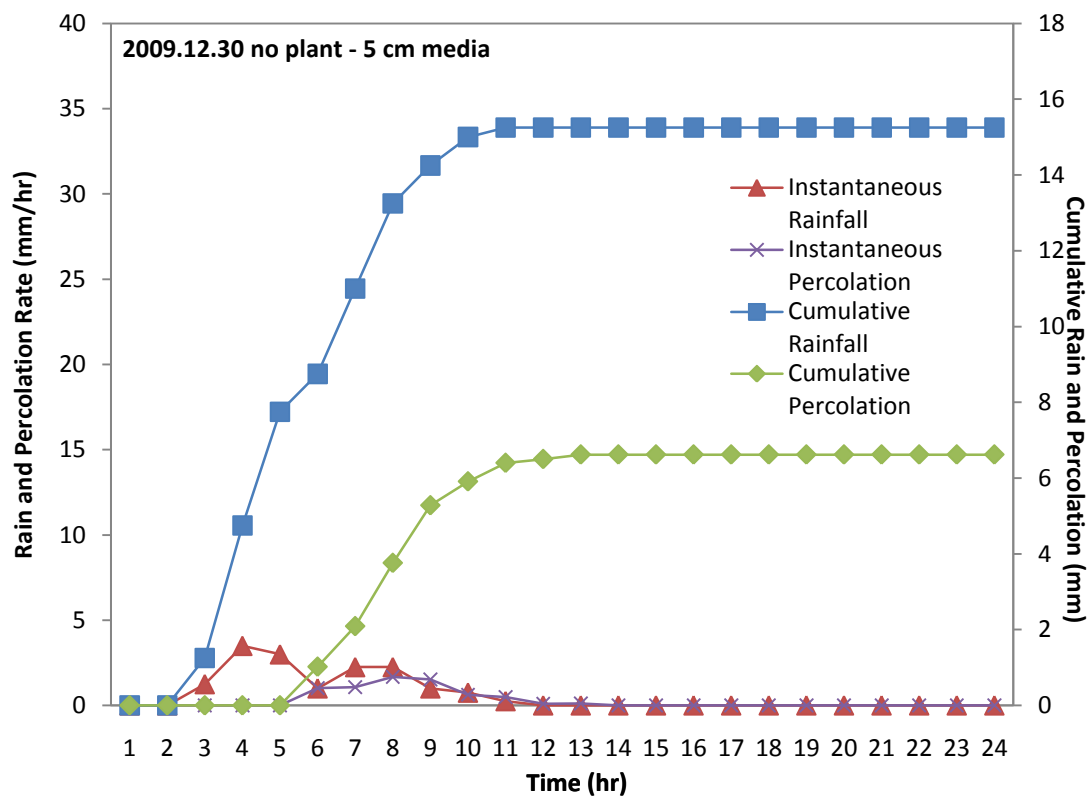
Villarreal, E.L. (2007). "Runoff detention effect of a sedum green-roof." *Nordic Hydrology*, 38(1), pp. 99-105.

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

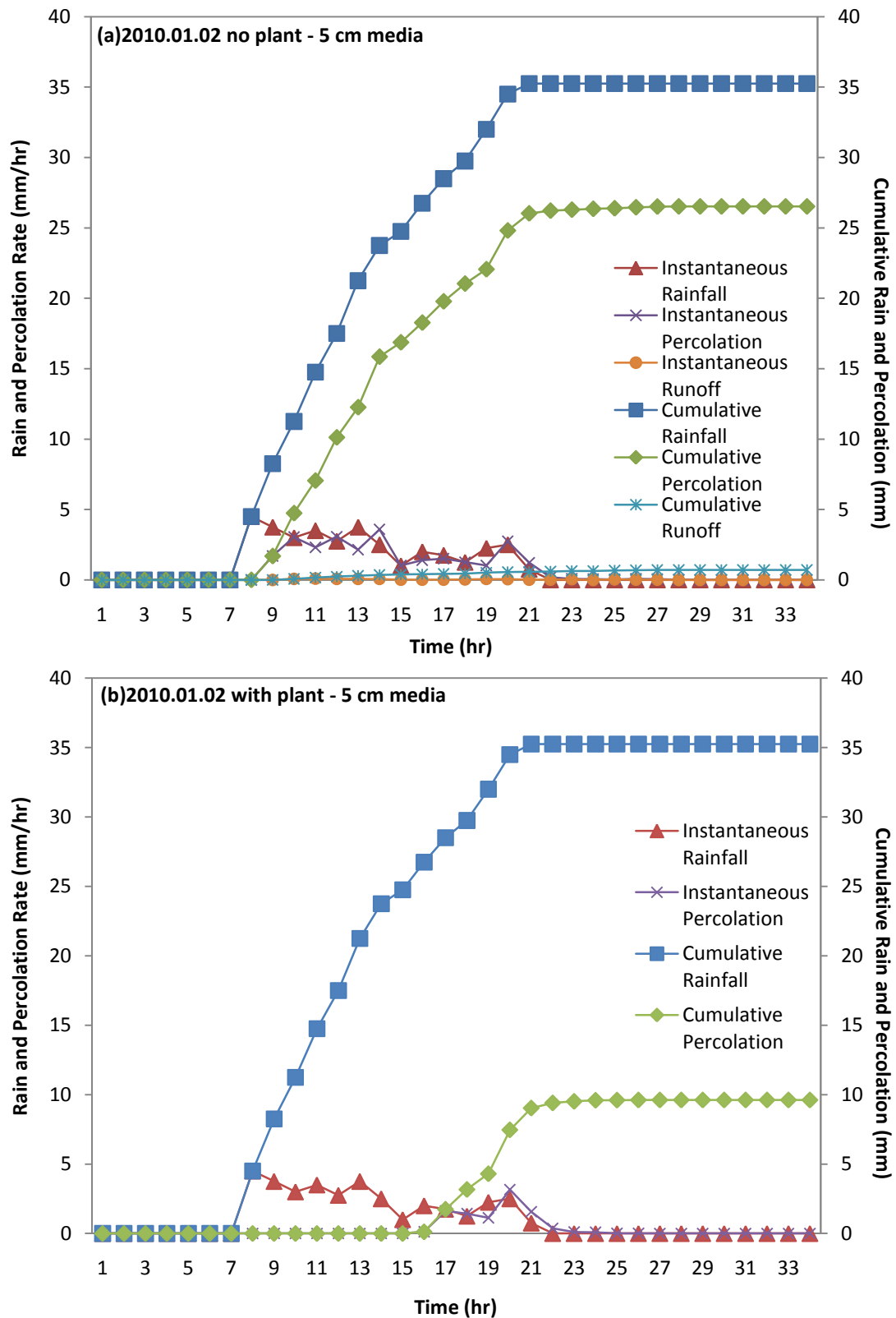


附圖 A.1.1 2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 19:30 降雨及滲漏水累積變化圖
(a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。

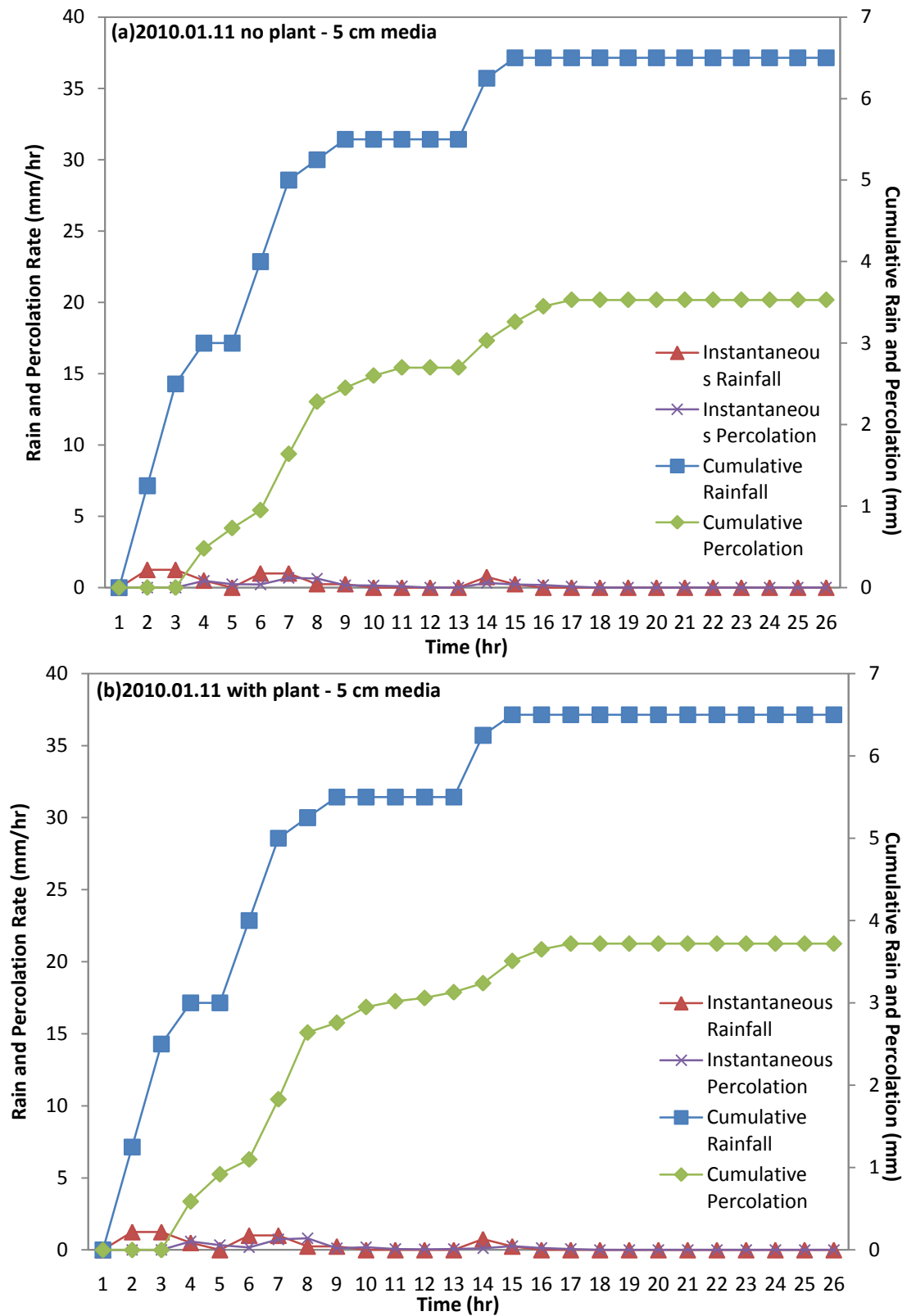


附圖 A.1.2 2009-12-29 21:00 ~ 2009-12-30 20:00 降雨及滲漏水累積變化圖
5 cm 基質-未植栽。

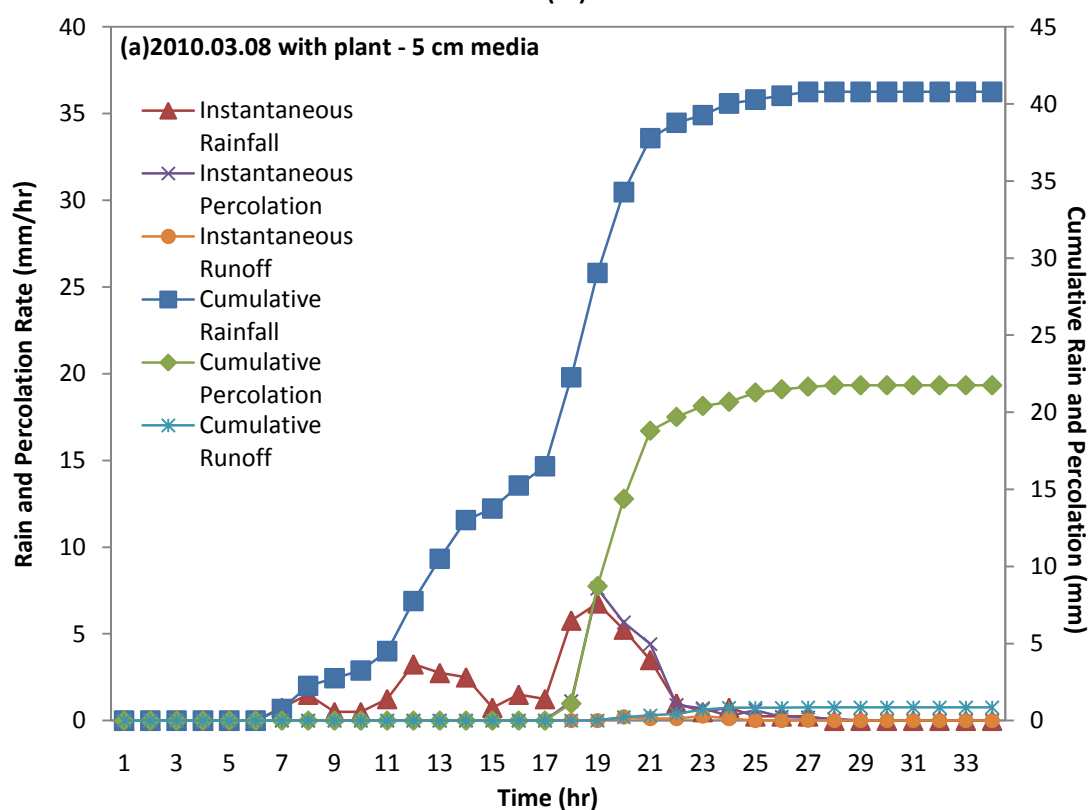
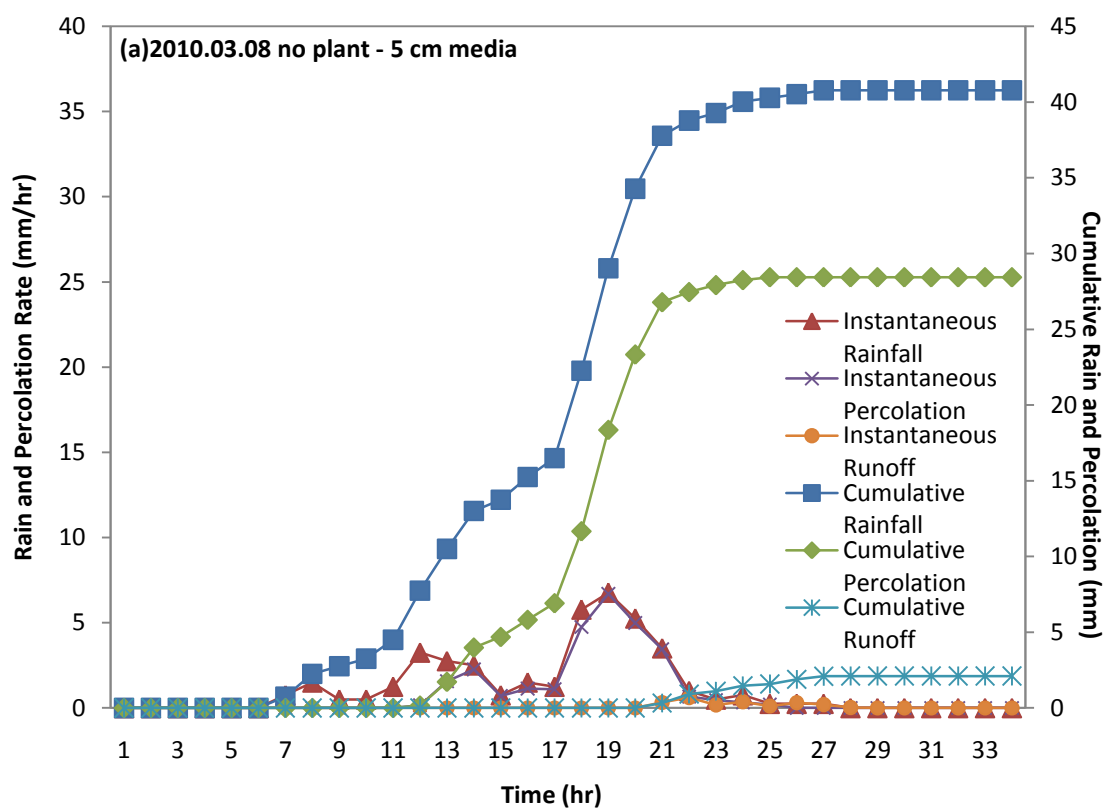




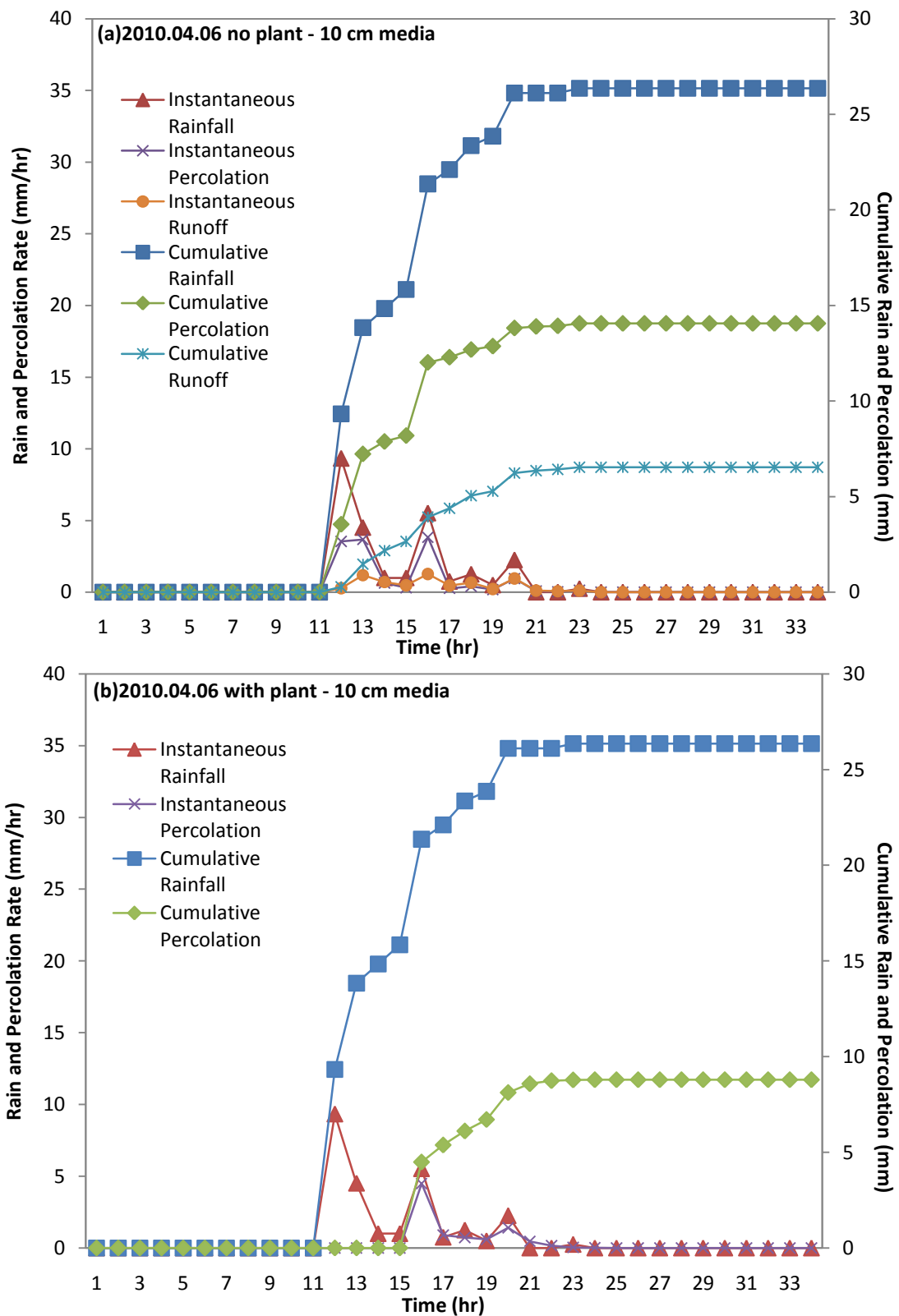
附圖 A.1.3 2010-01-02 11:30 ~ 2010-01-03 20:30 降雨及滲漏水累積變化圖
(a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



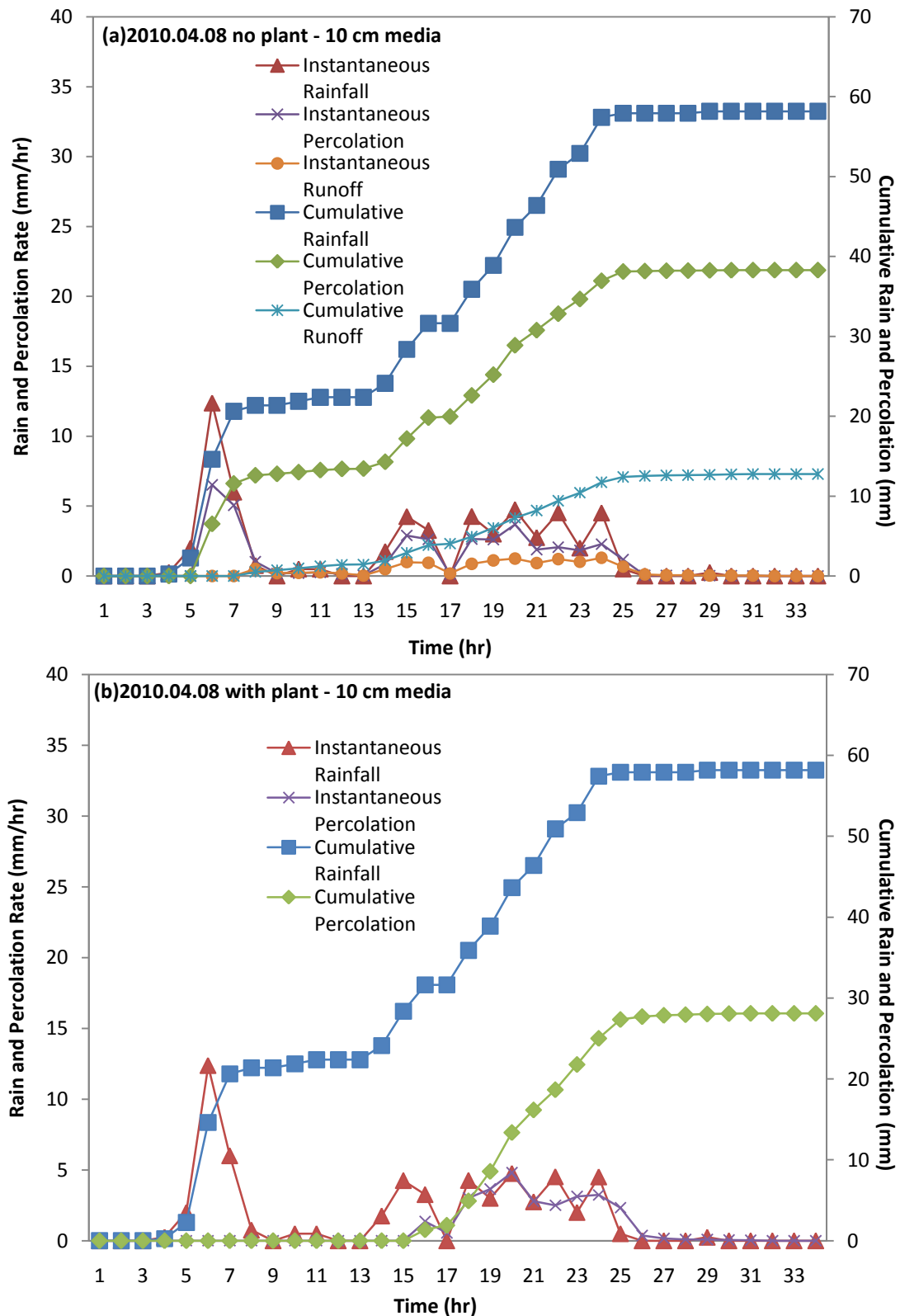
附圖 A.1.4 2010-01-11 20:00 ~ 2010-01-12 21:00 降雨及滲漏水累積變化圖
 (a) 5 cm 基質-未植栽； (b) 5 cm 基質-有植栽。



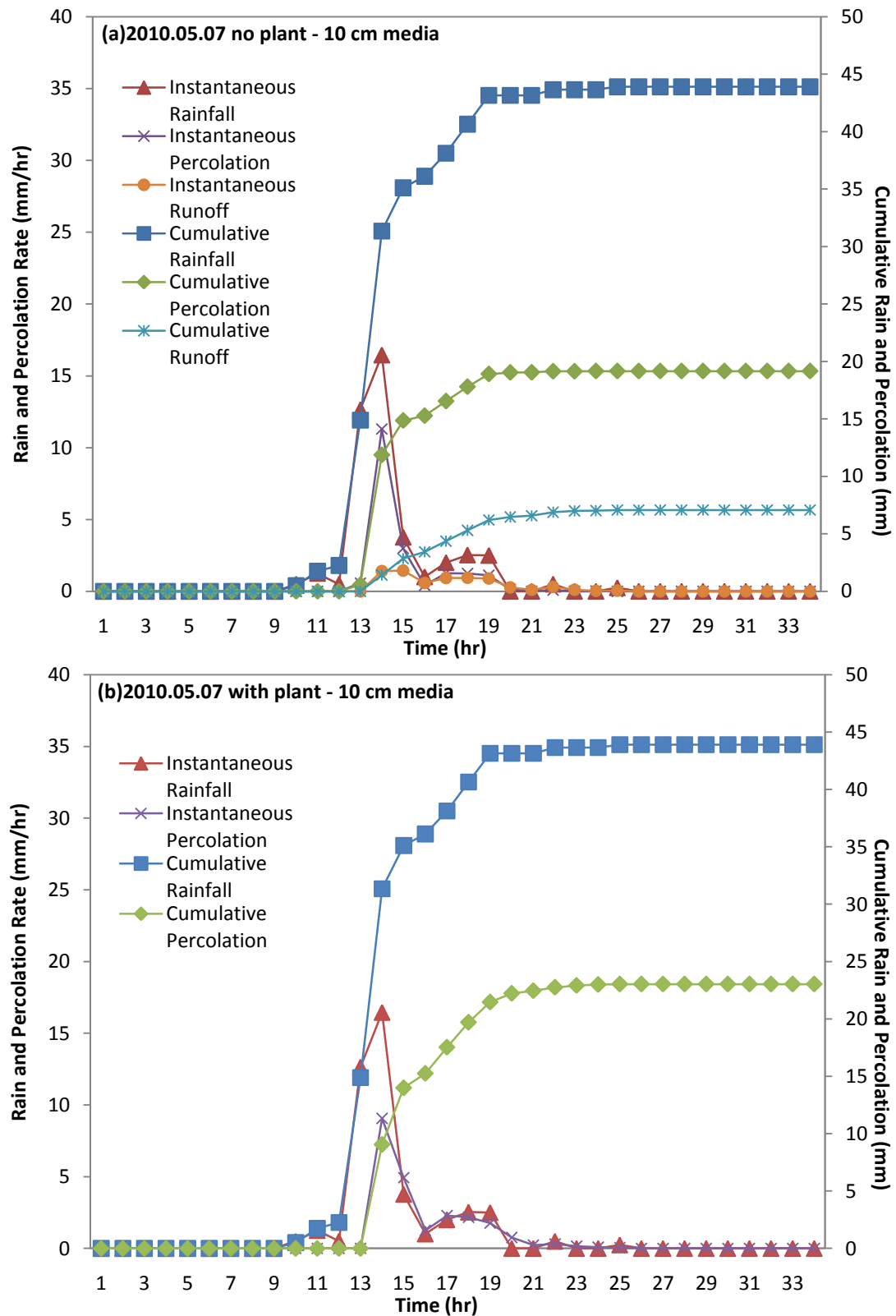
附圖 A.1.5 2010-03-08 14:00 ~ 2010-03-09 23:00 降雨及滲漏水累積變化圖
 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



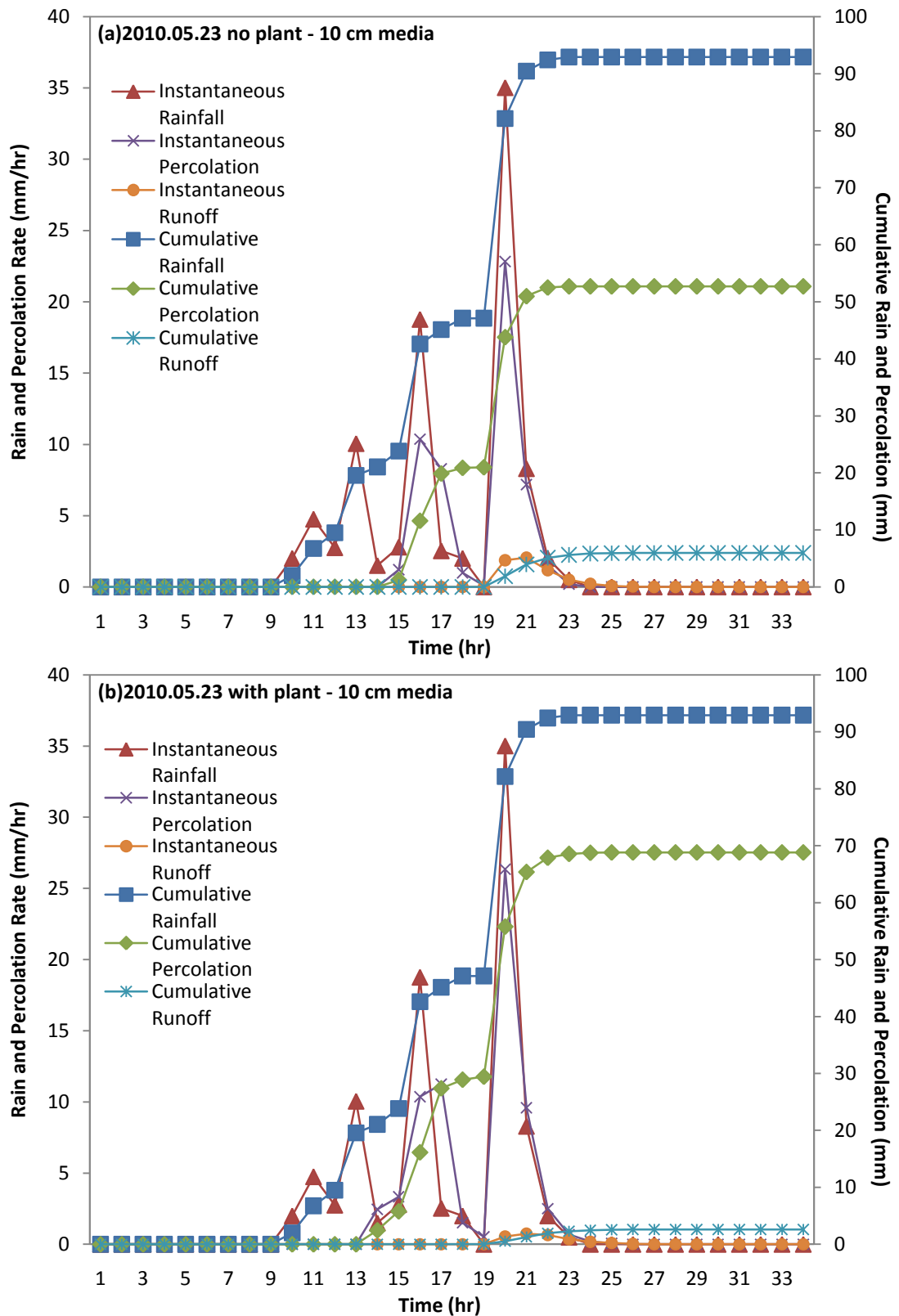
附圖 A.1.6 2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 16:30 降雨及滲漏水累積變化圖
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



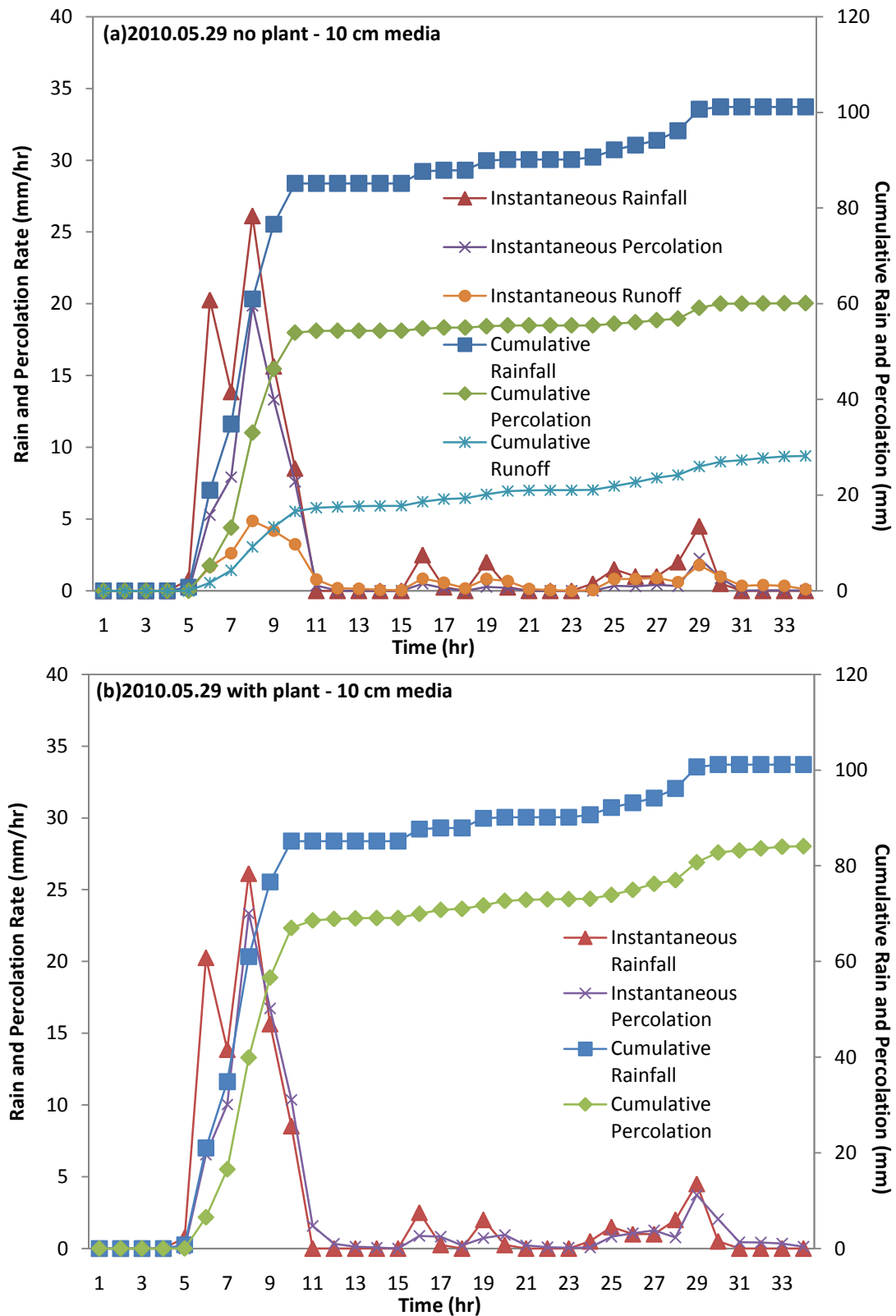
附圖 A.1.7 2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-09 10:00 降雨及滲漏水累積變化圖
(a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



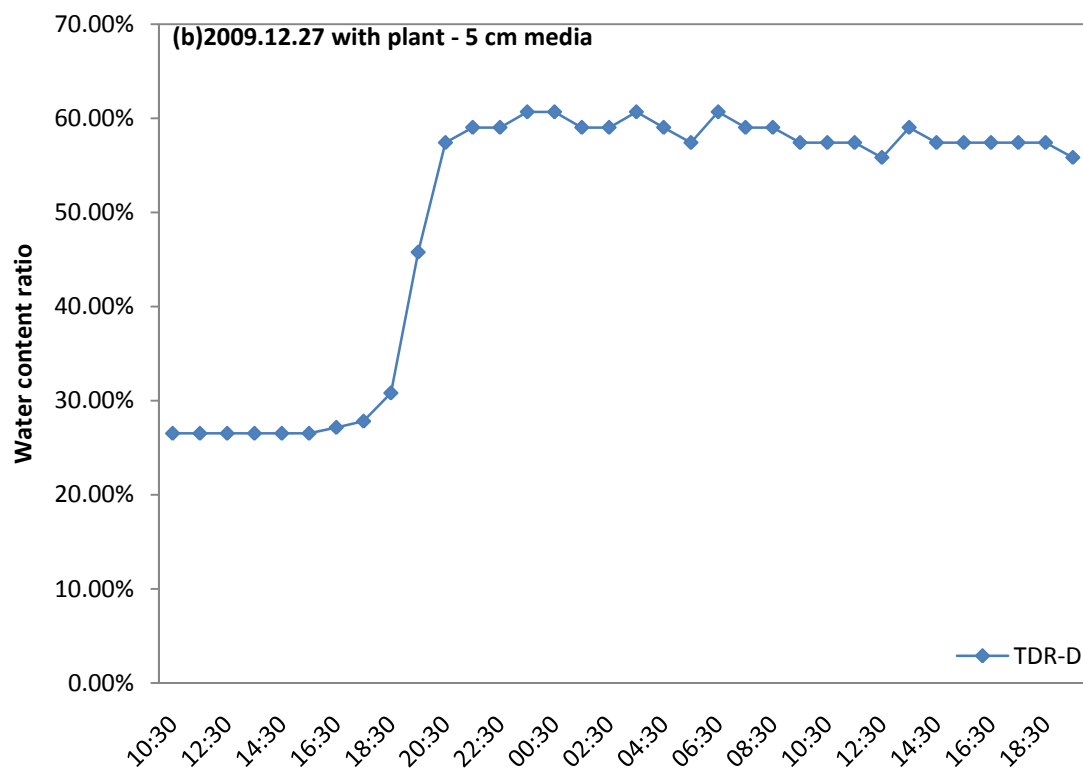
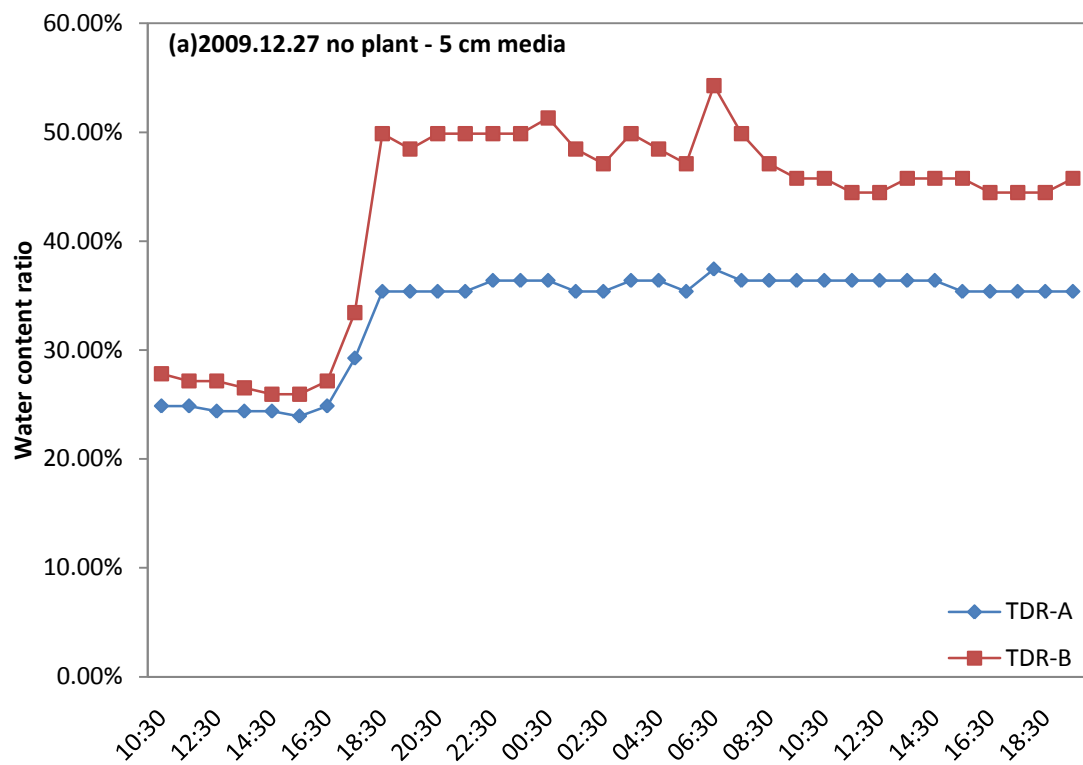
附圖 A.1.8 2010-05-06 23:30 ~ 2010-05-08 08:30 降雨及滲漏水累積變化圖
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



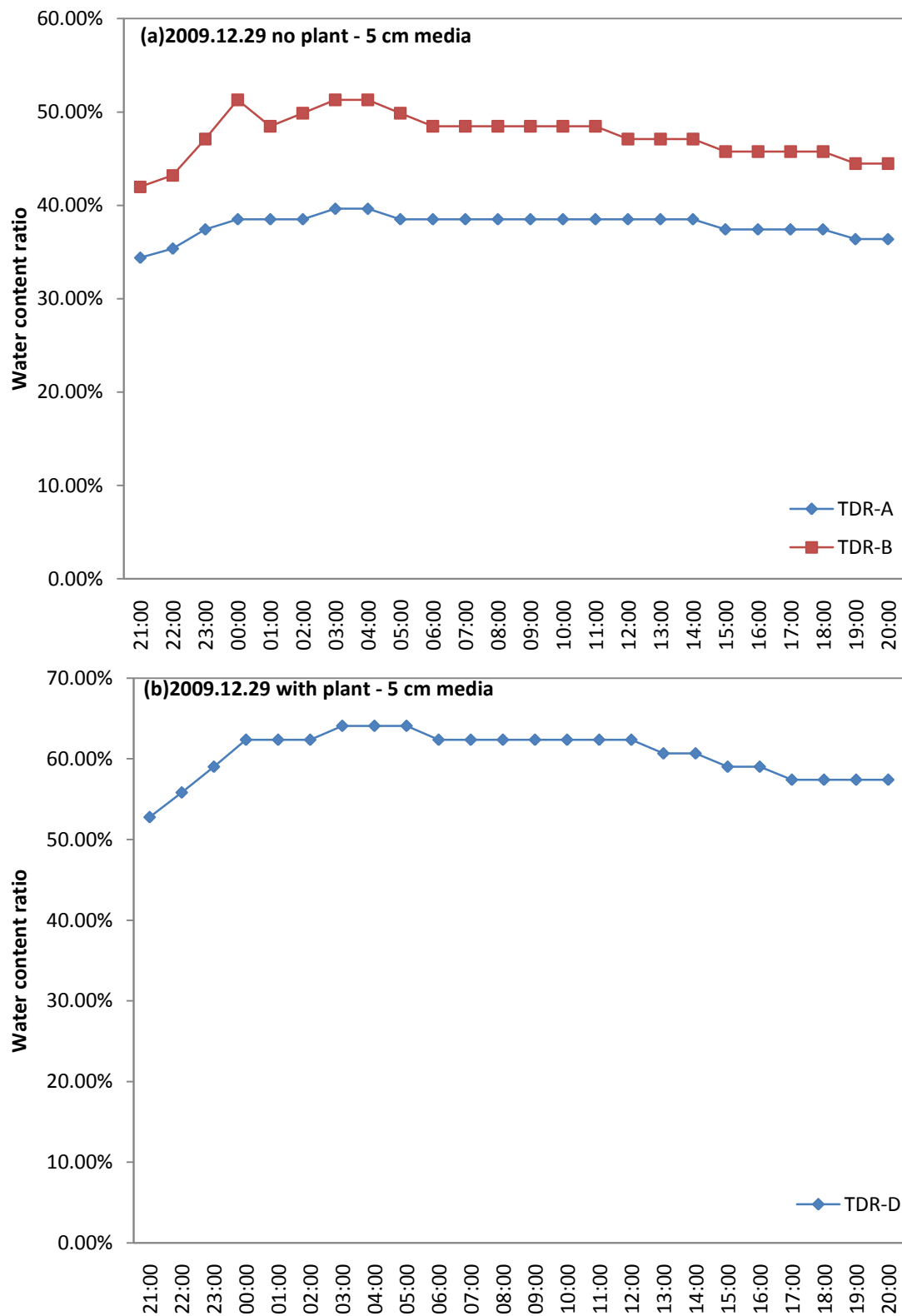
附圖 A.1.9 2010-05-23 00:30 ~ 2010-05-24 09:30 降雨及滲漏水累積變化圖
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



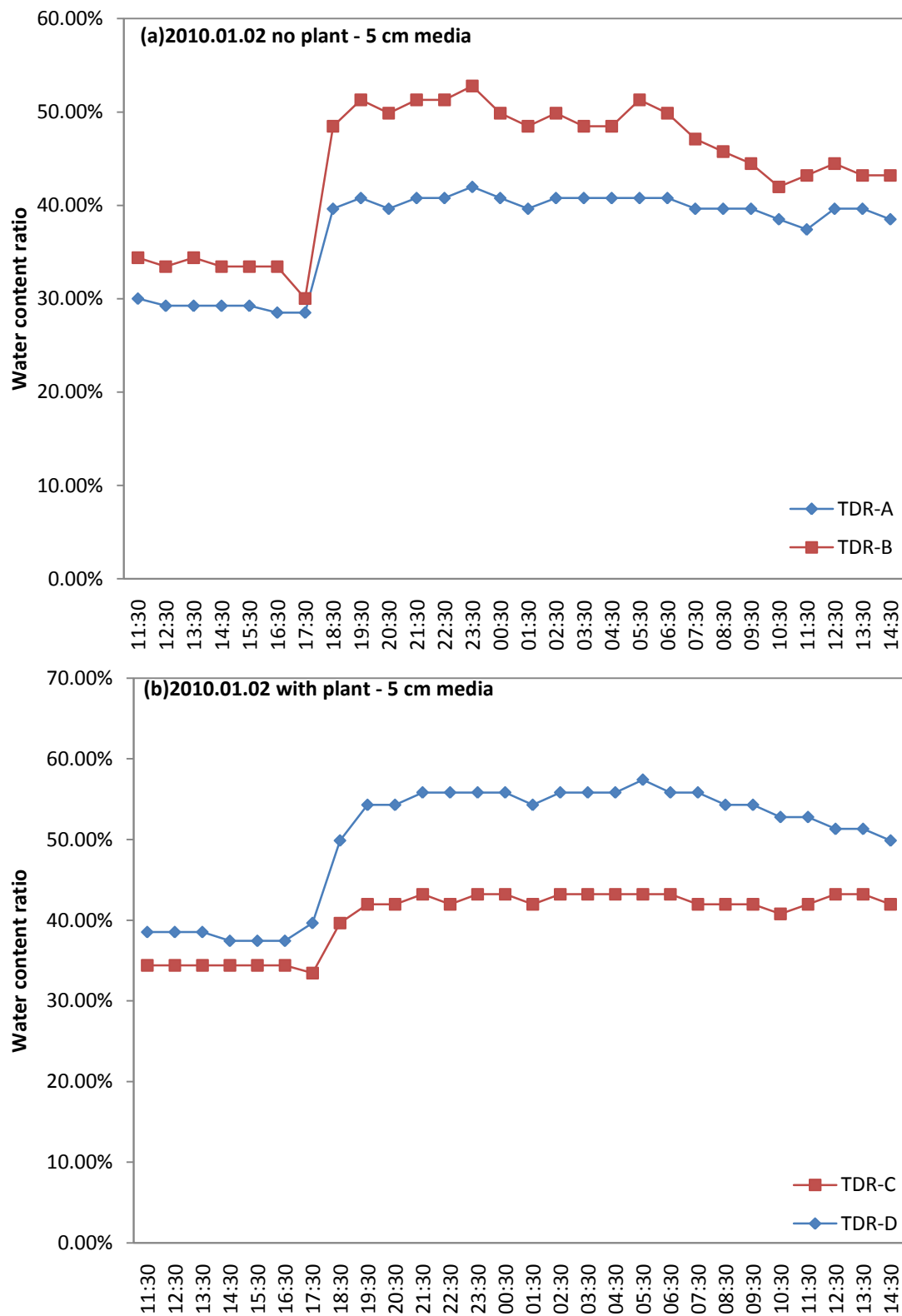
附圖 A.1.10 2010-05-29 00:30 ~ 2010-05-30 09:30 降雨及滲漏水累積變化
 圖 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



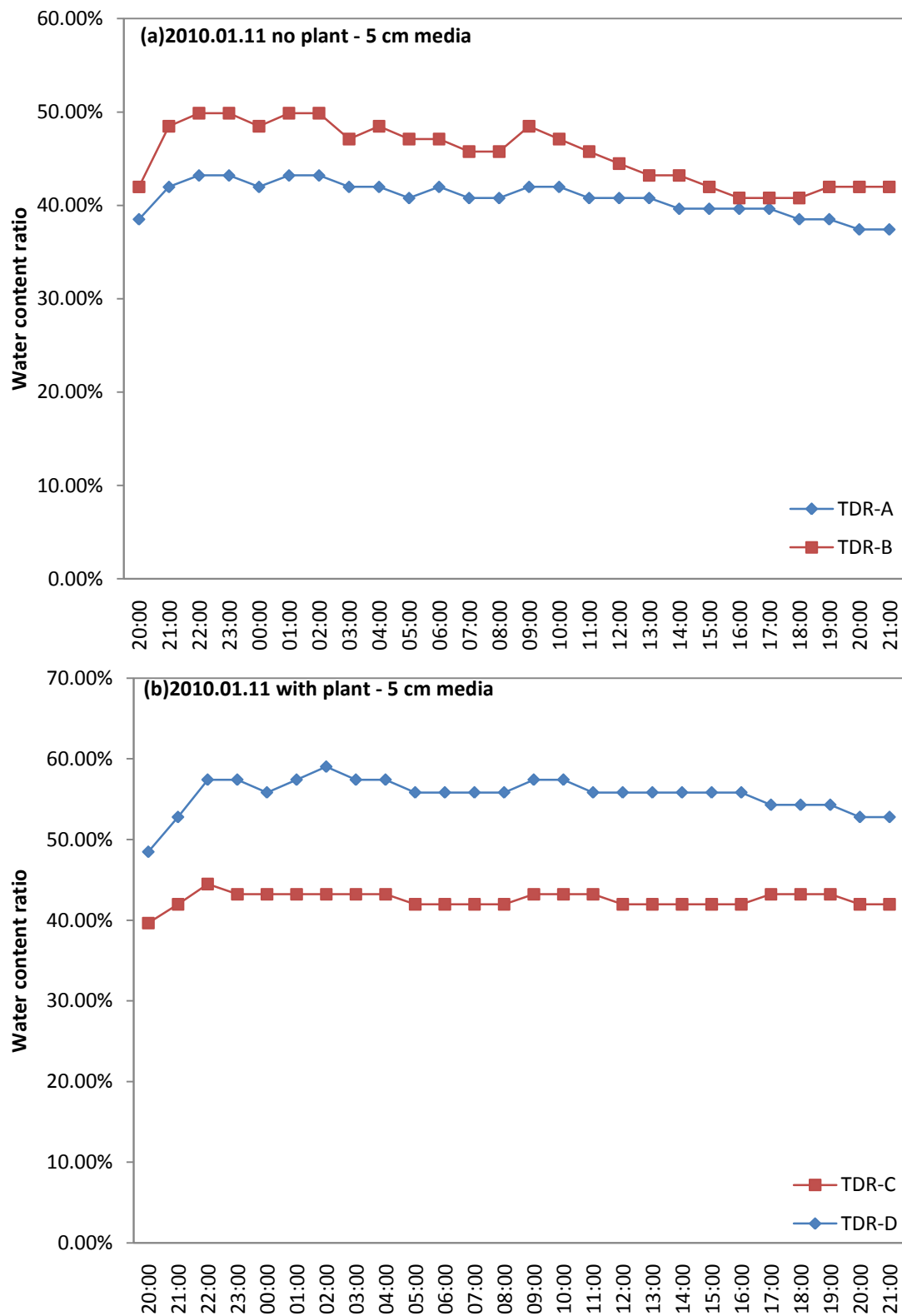
附圖 A.2.1 2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 19:30 基質層之含水率變化
(a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



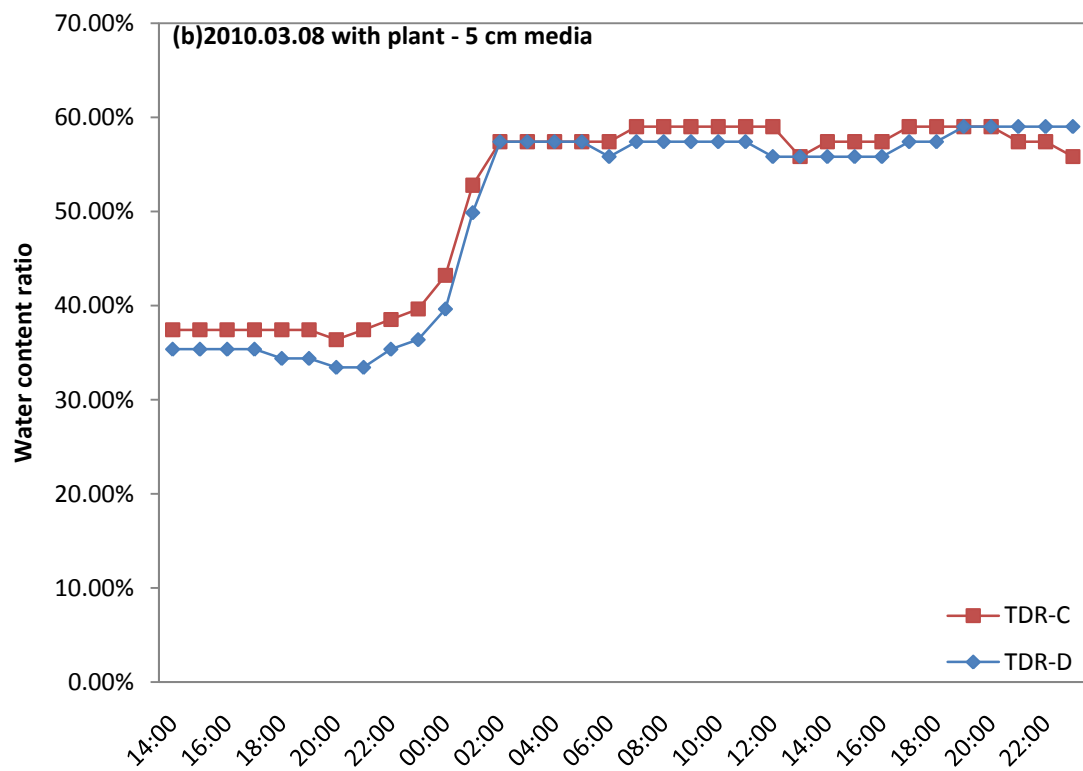
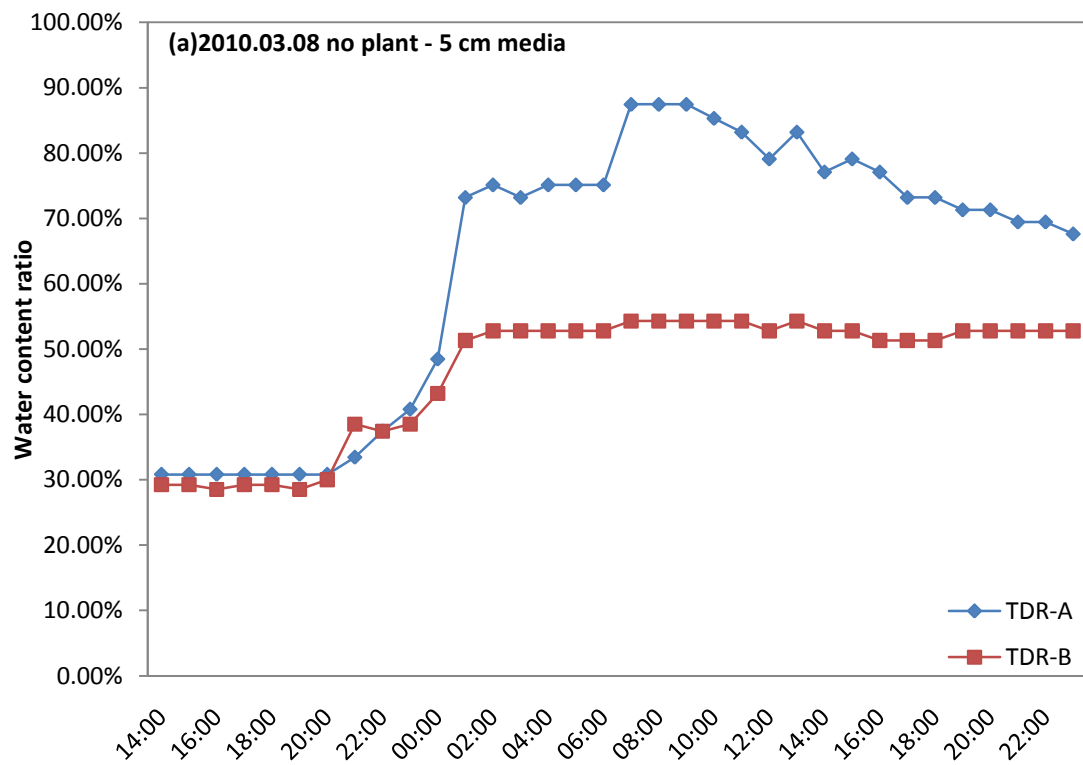
附圖 A.2.2 2009-12-29 21:00 ~ 2009-12-30 20:00 基質層之含水率變化
 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



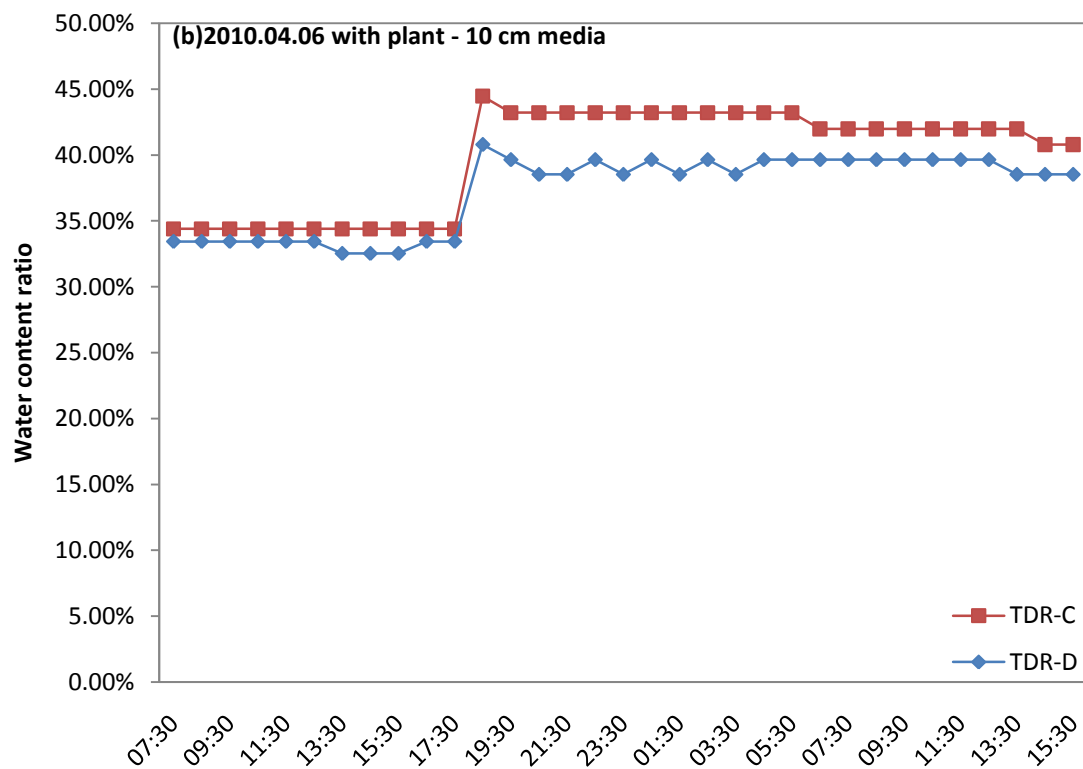
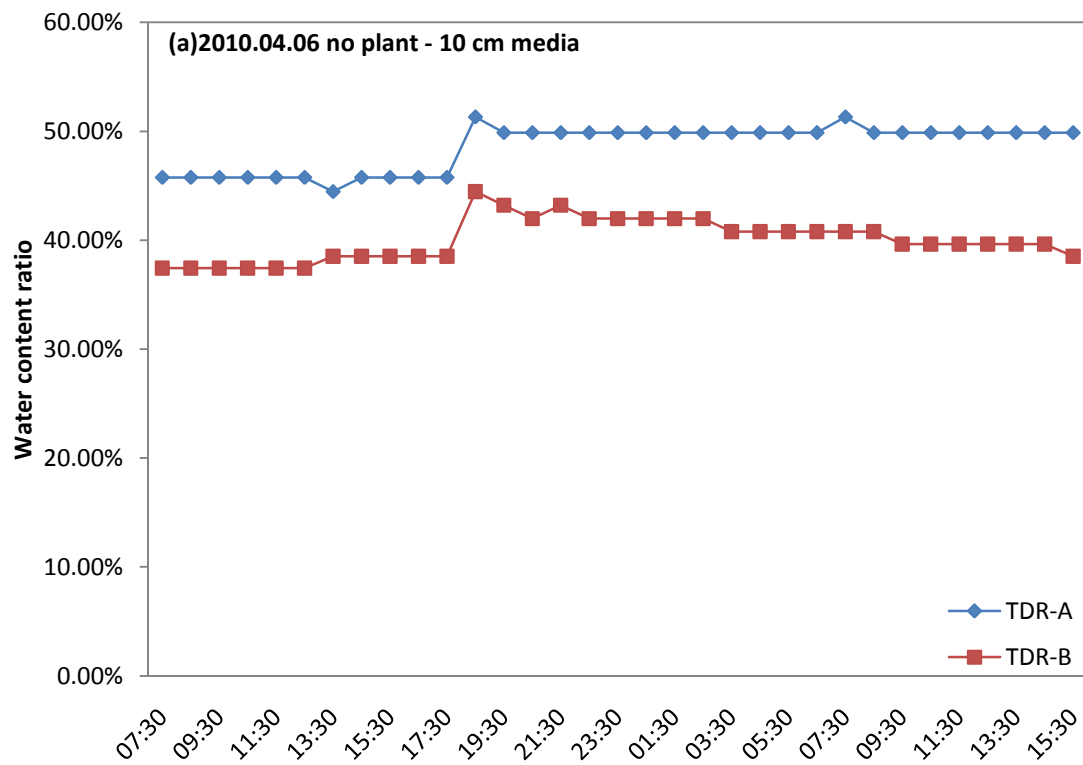
附圖 A.2.3 2010-01-02 11:30 ~ 2010-01-03 14:30 基質層之含水率變化
 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



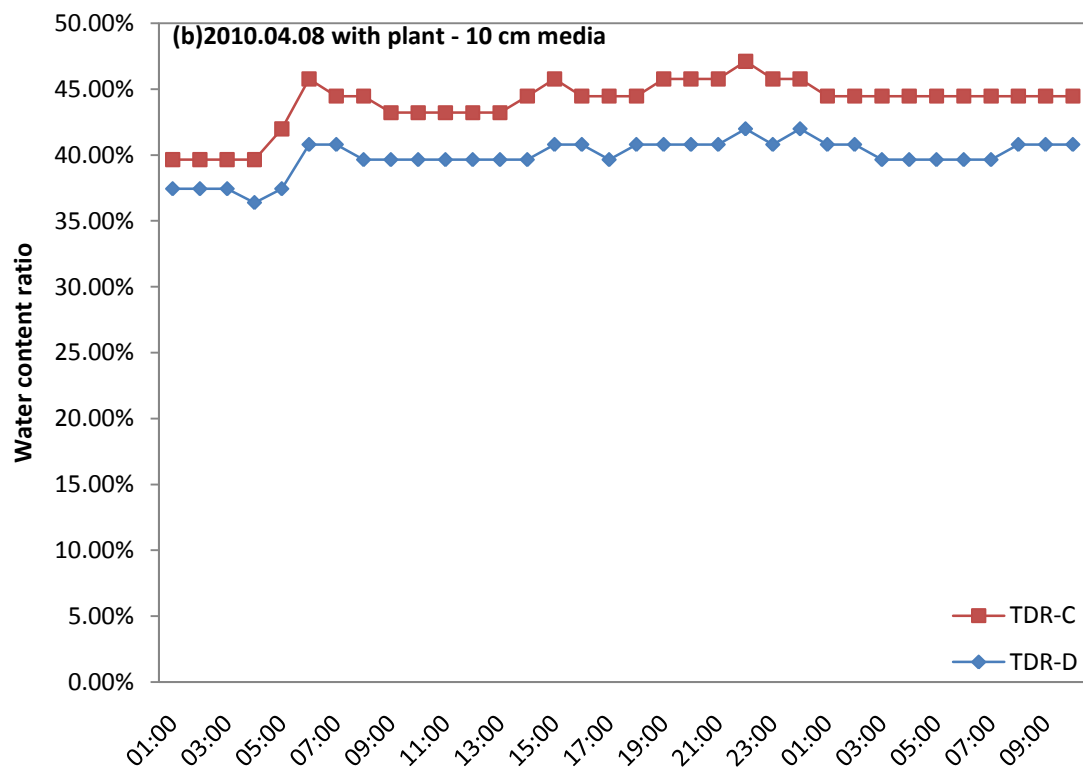
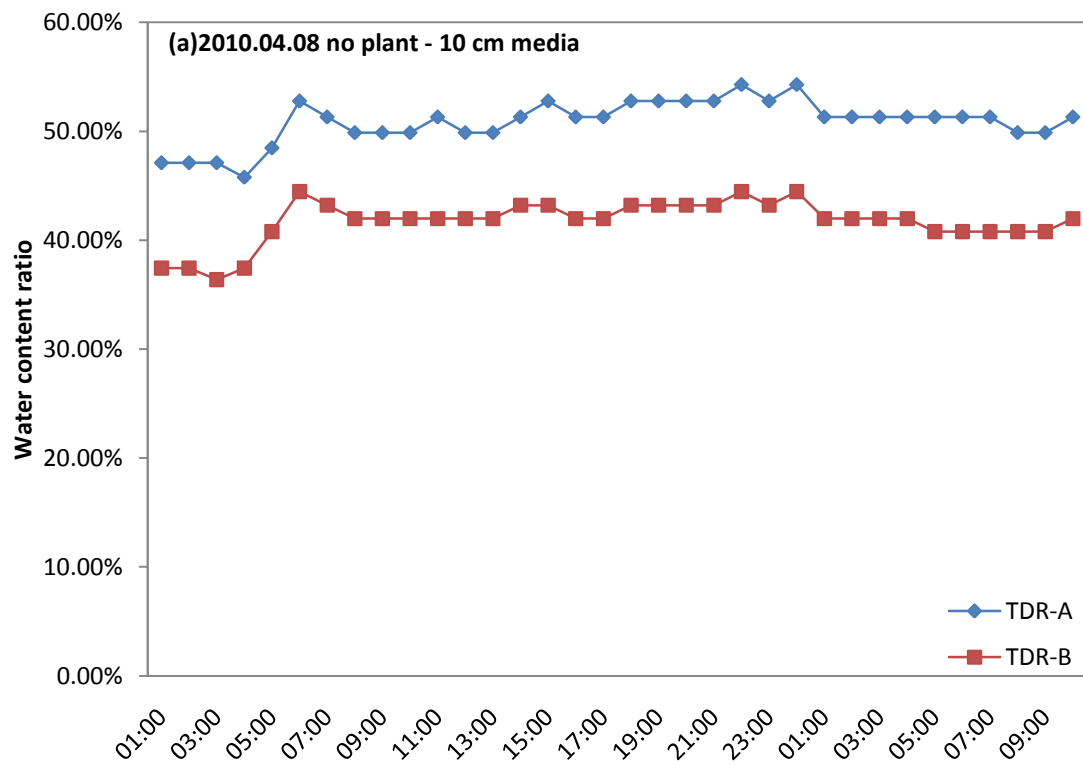
附圖 A.2.4 2010-01-11 20:00 ~ 2010-01-12 21:00 基質層之含水率變化
 (a)5 cm 基質-未植栽； (b)5 cm 基質-有植栽。



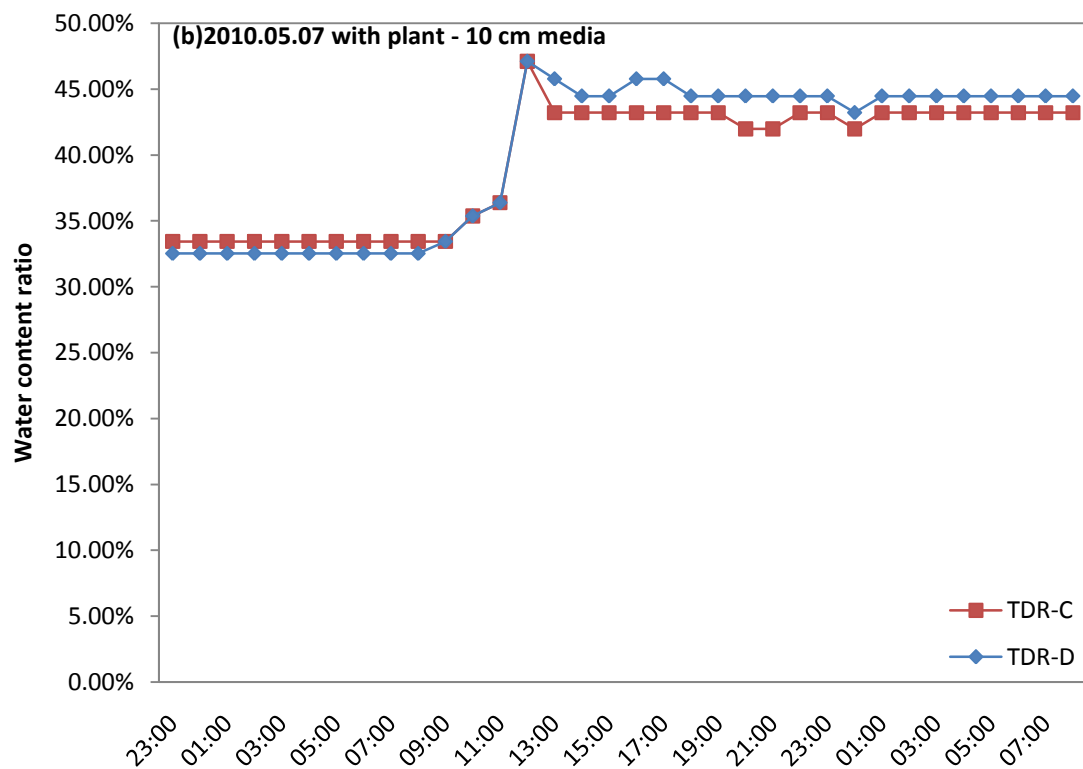
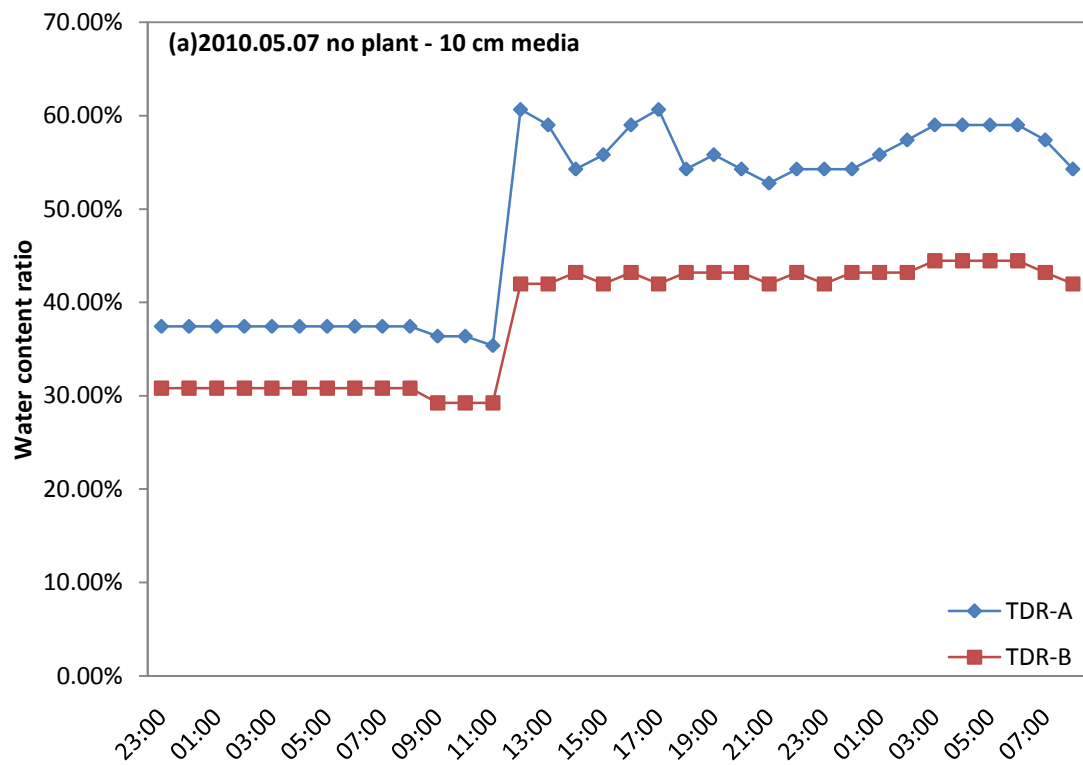
附圖 A.2.5 2010-03-08 14:00 ~ 2010-03-09 23:00 基質層之含水率變化
 (a) 5 cm 基質-未植栽； (b) 5 cm 基質-有植栽。



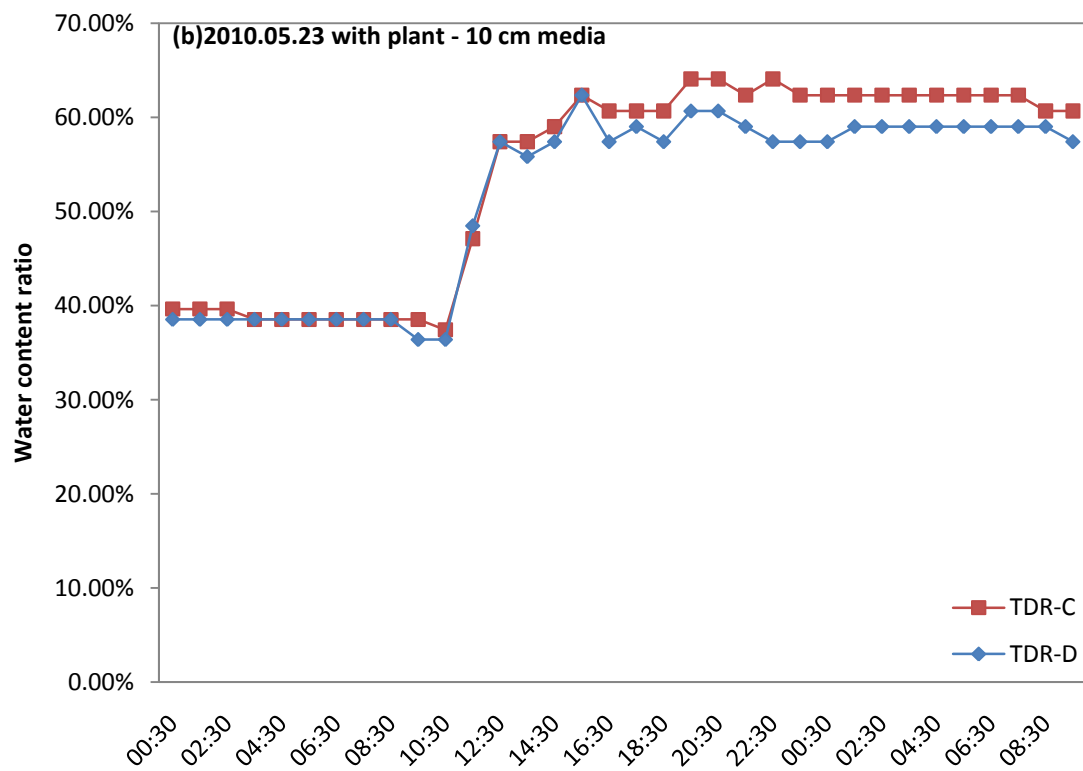
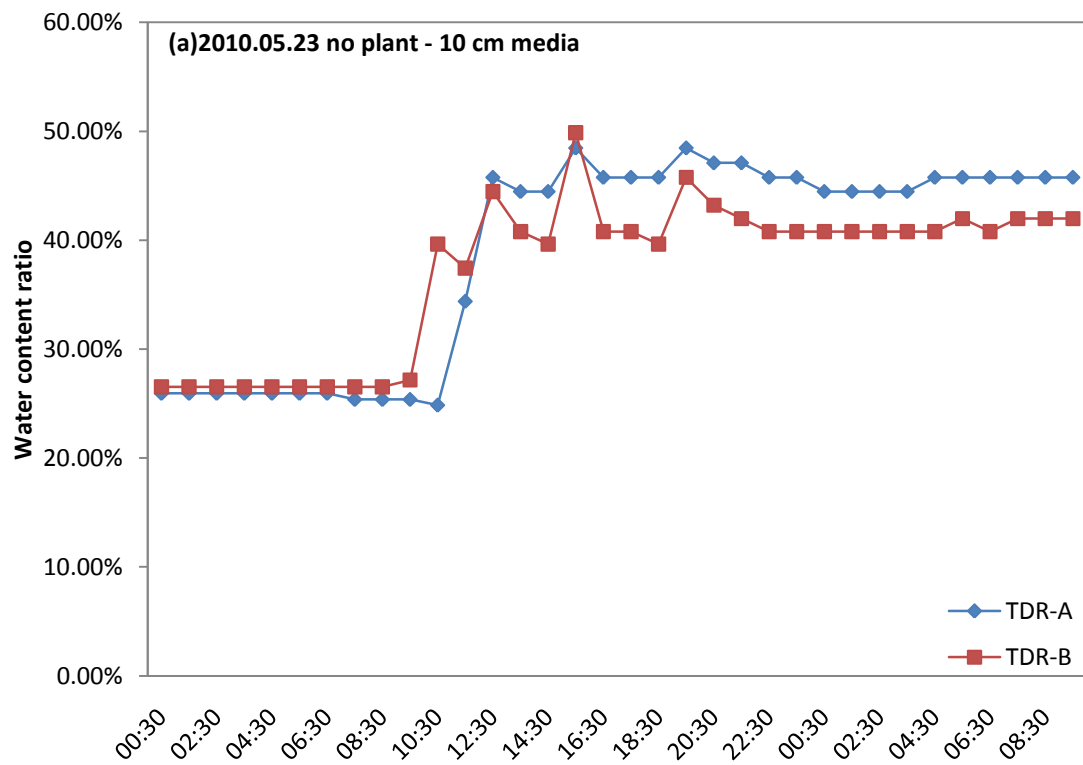
附圖 A.2.6 2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 15:30 基質層之含水率變化
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



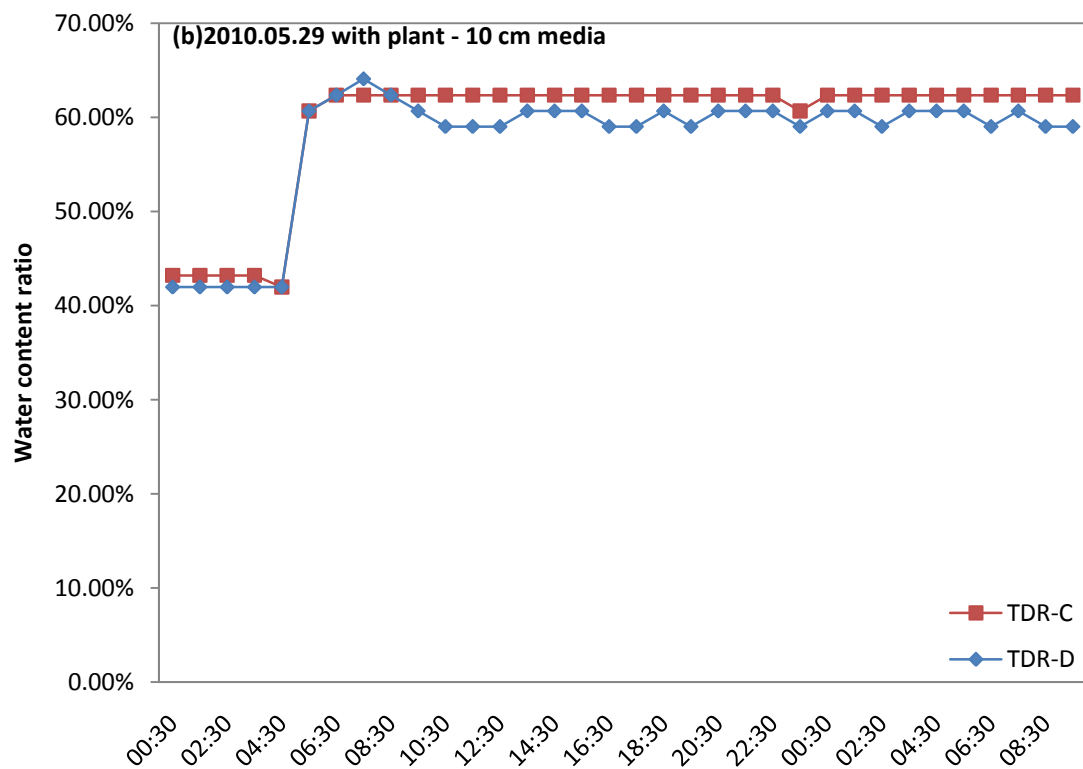
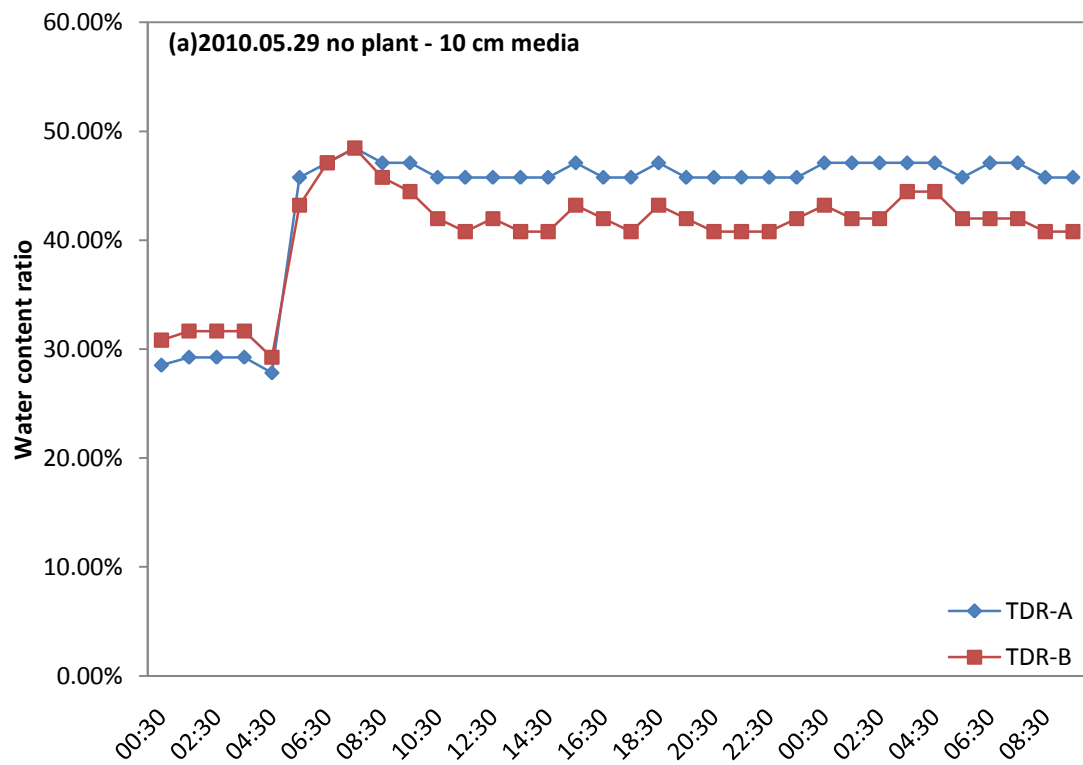
附圖 A.2.7 2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-09 10:00 基質層之含水率變化
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



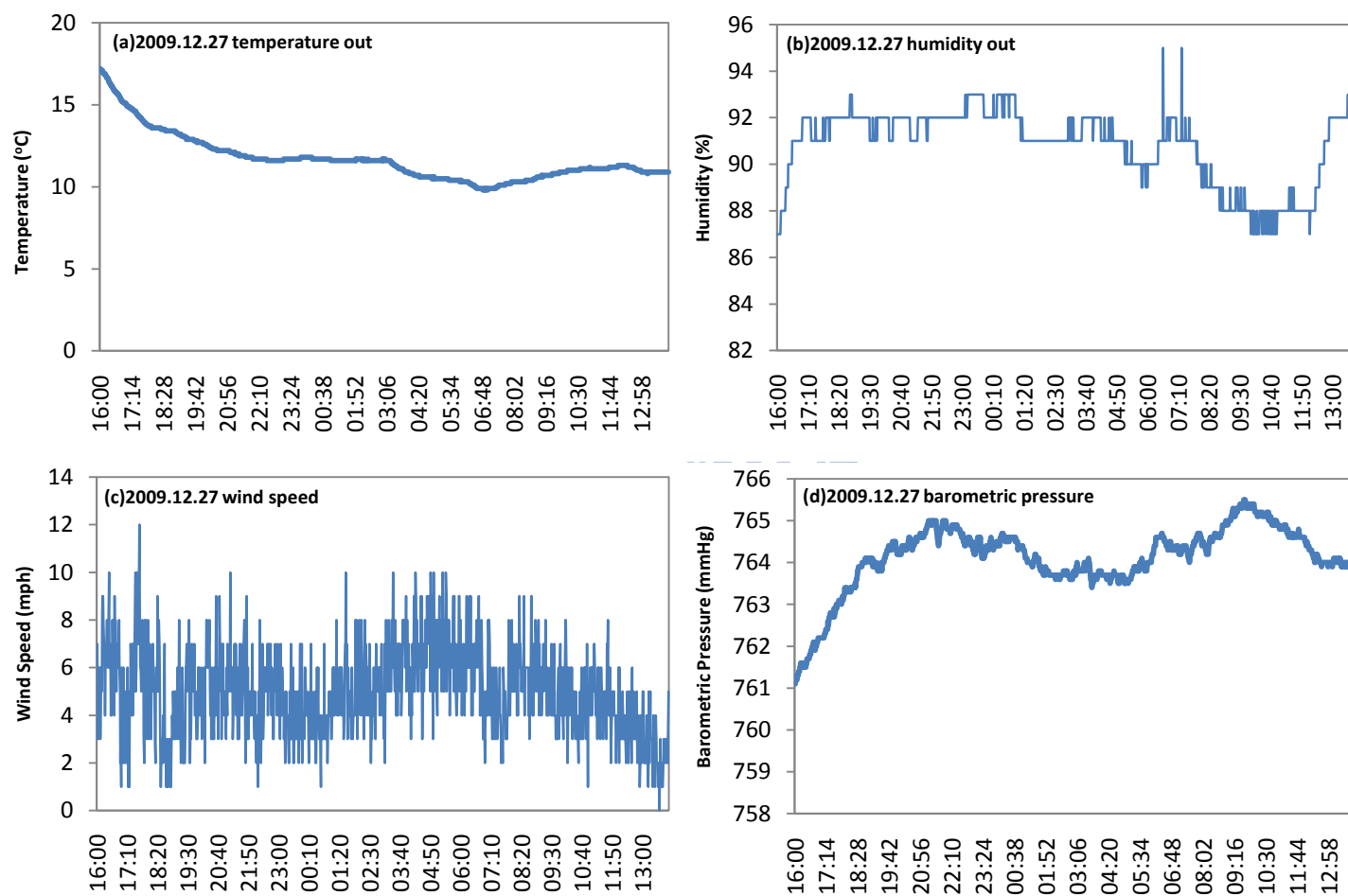
附圖 A.2.8 2010-05-06 23:00 ~ 2010-05-08 08:00 基質層之含水率變化
 (a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



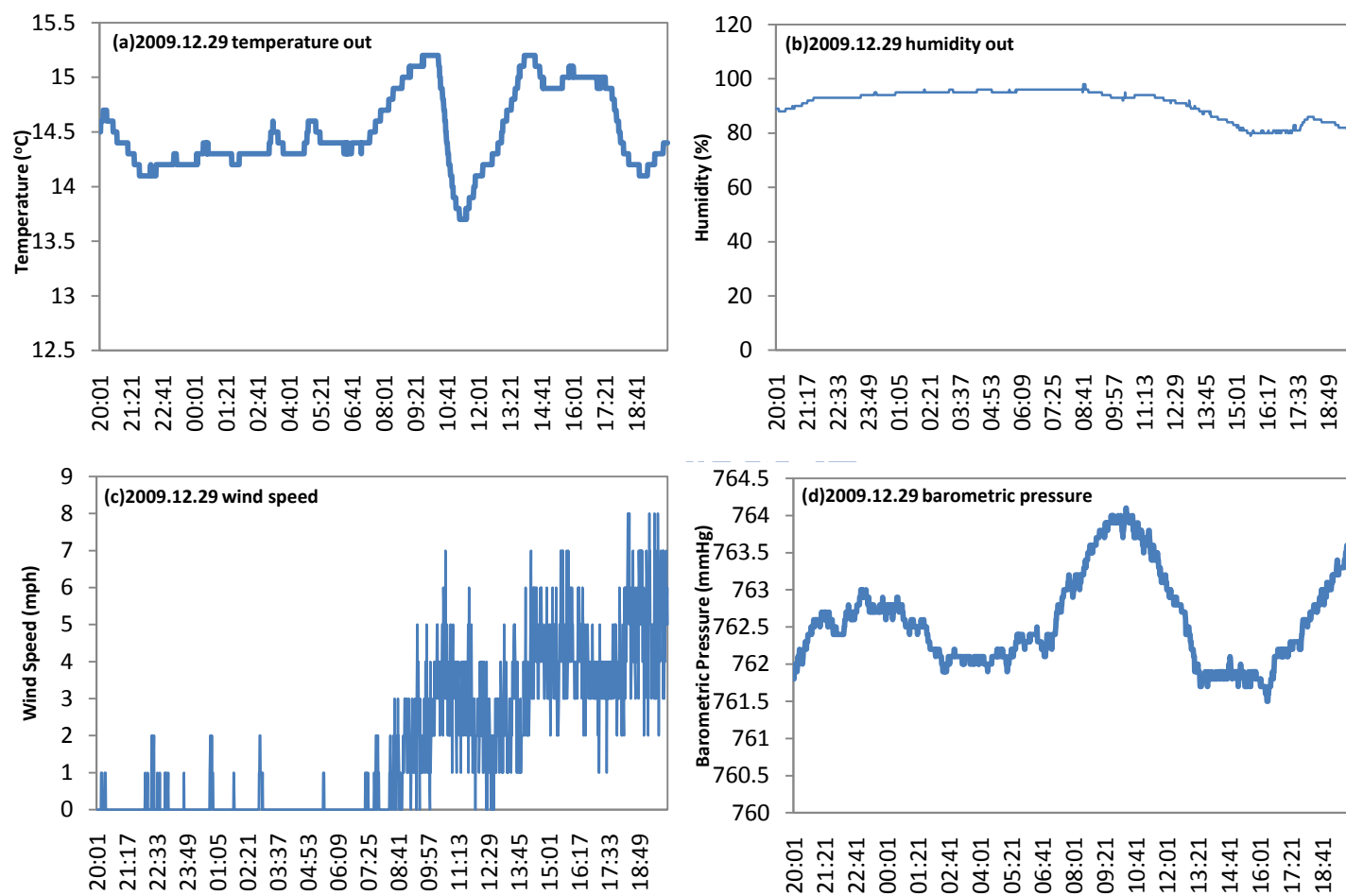
附圖 A.2.9 2010-05-23 00:30 ~ 2010-05-24 09:30 基質層之含水率變化
(a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



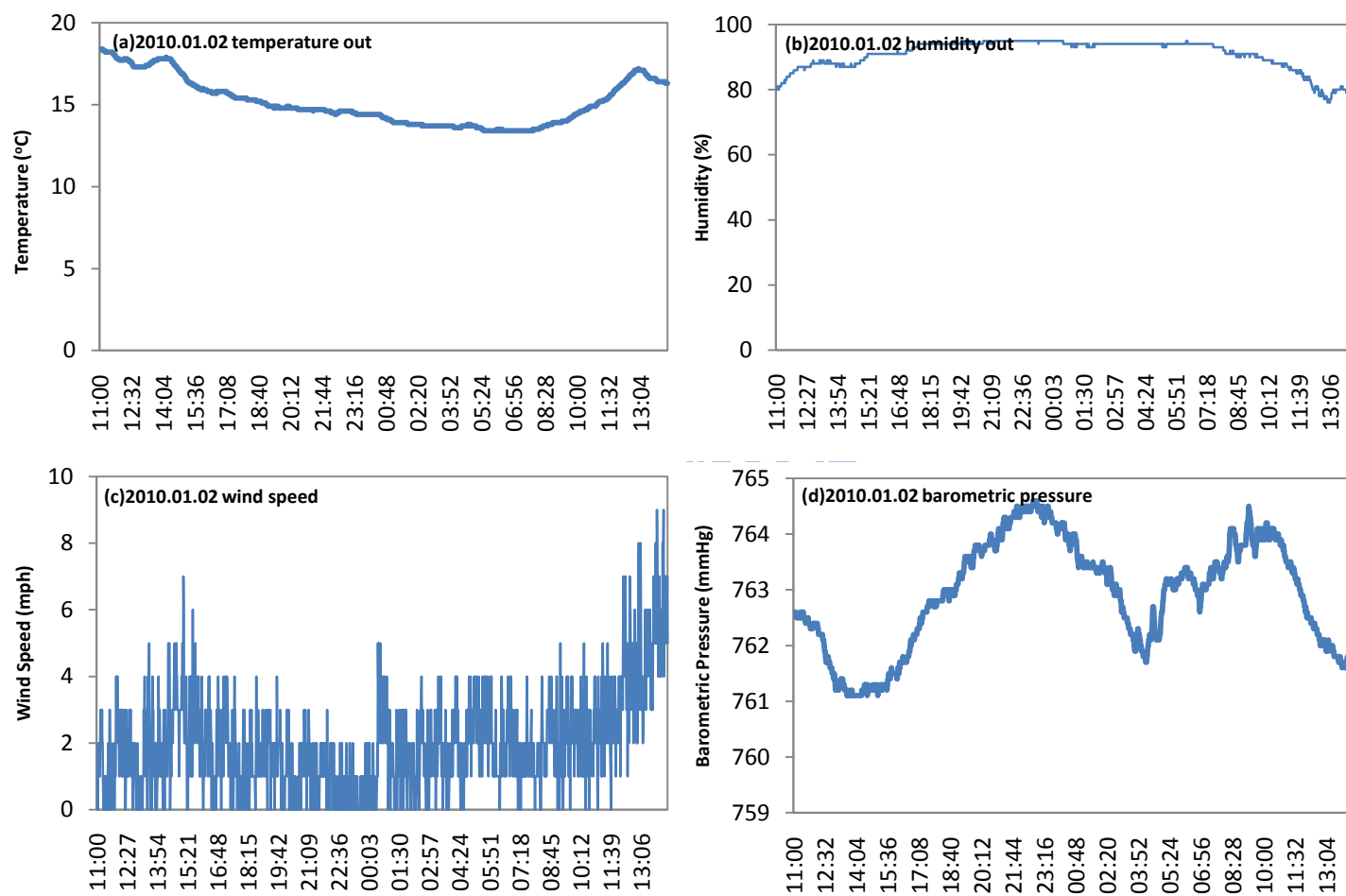
附圖 A.2.10 2010-05-29 00:30 ~ 2010-05-30 09:30 基質層之含水率變化
(a)10 cm 基質-未植栽； (b)10 cm 基質-有植栽。



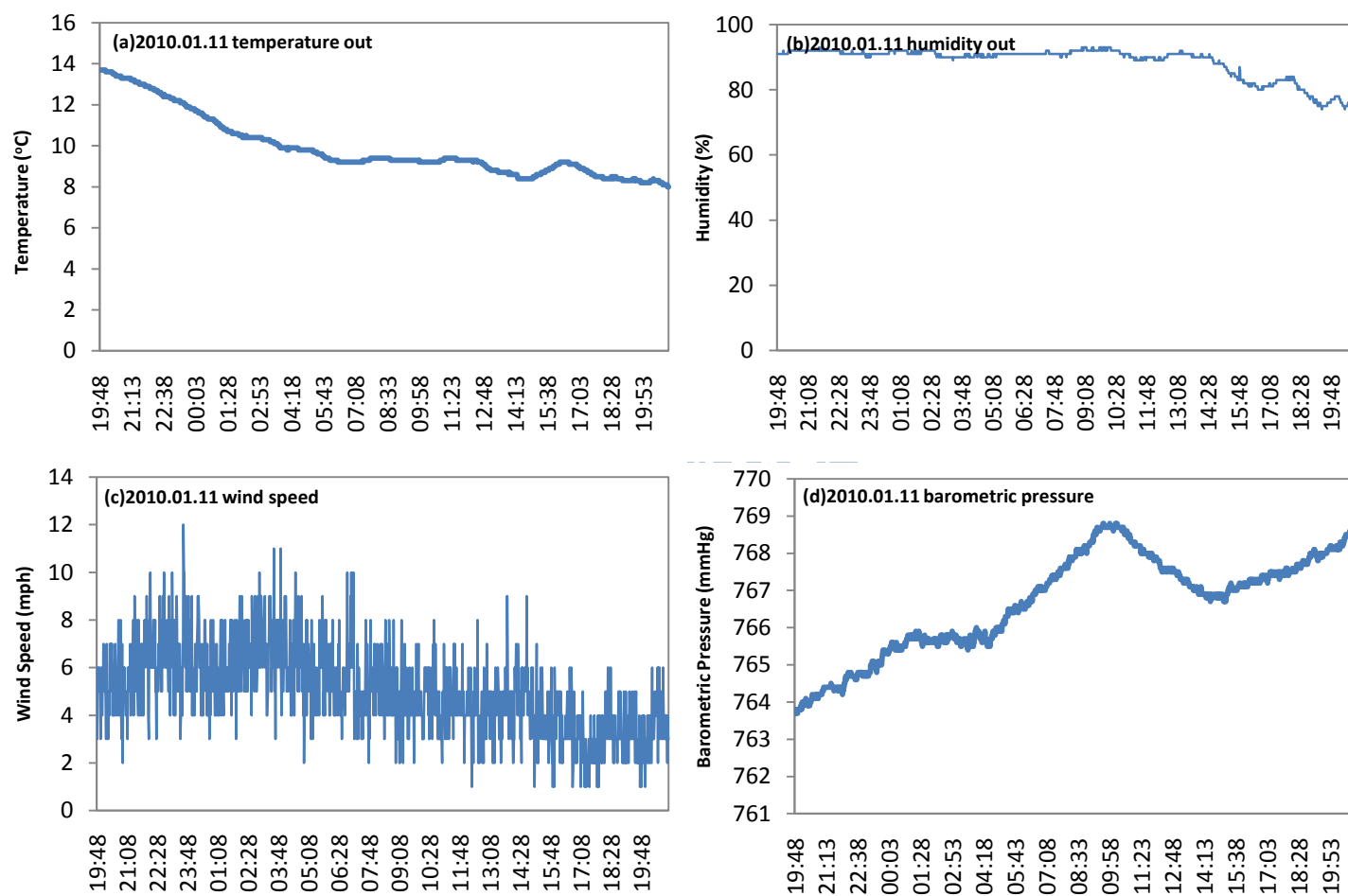
附圖 A.3.1 2009-12-27 10:30 ~ 2009-12-28 14:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



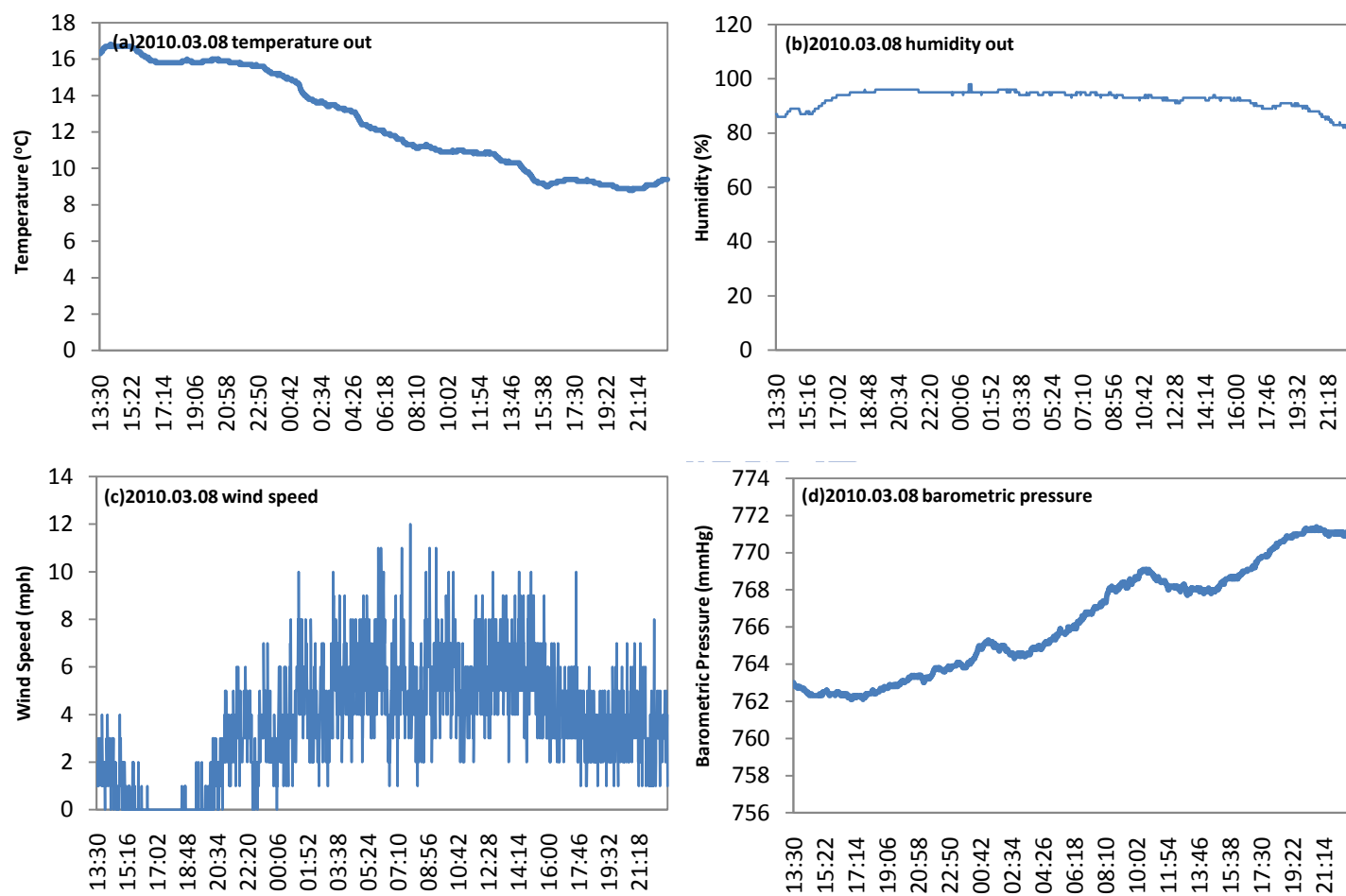
附圖 A.3.2 2009-12-29 20:01 ~ 2009-12-30 20:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



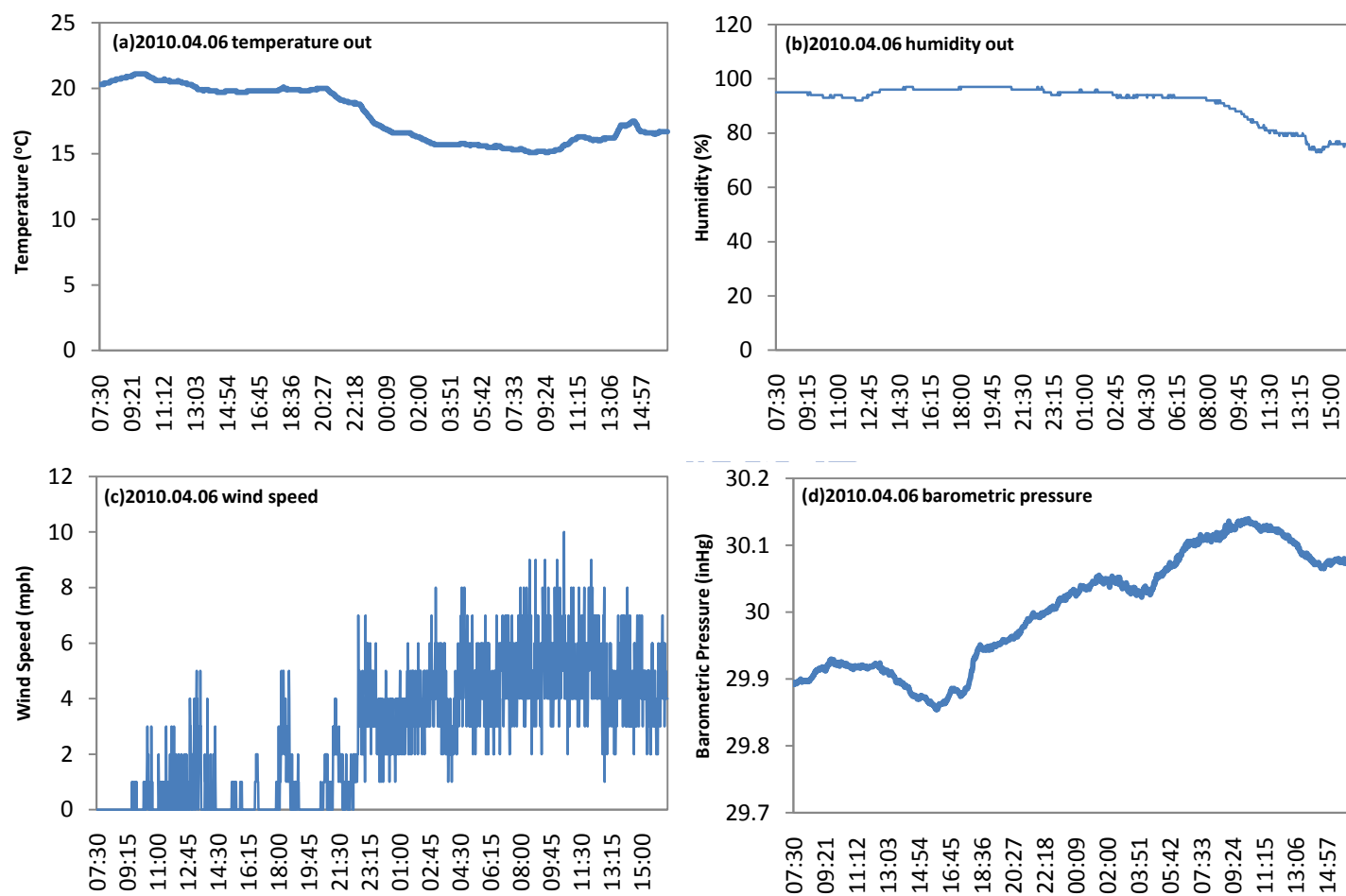
附圖 A.3.3 2010-01-02 11:00 ~ 2010-01-03 14:22 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



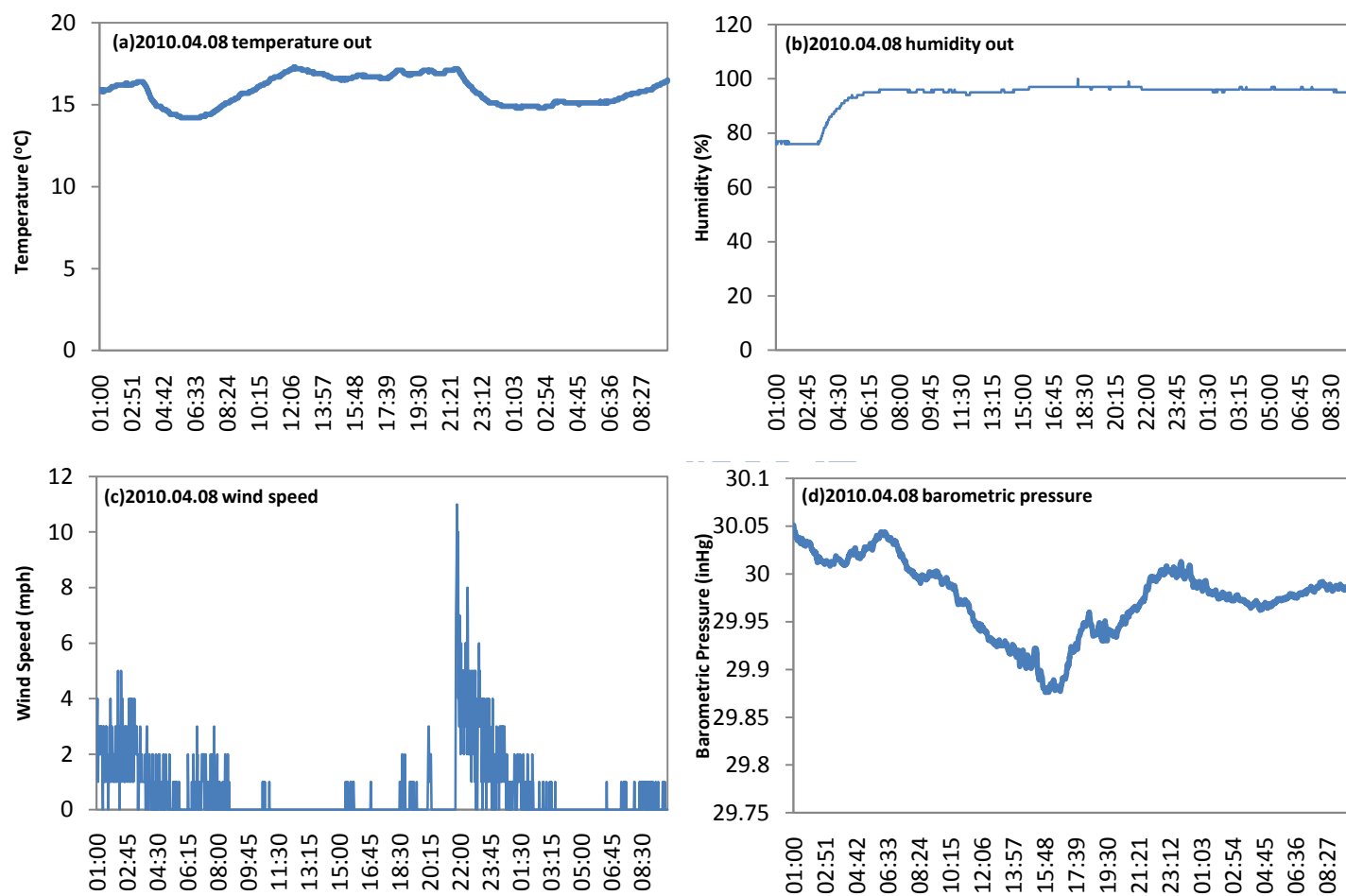
附圖 A.3.4 2010-01-11 19:48 ~ 2010-01-12 21:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



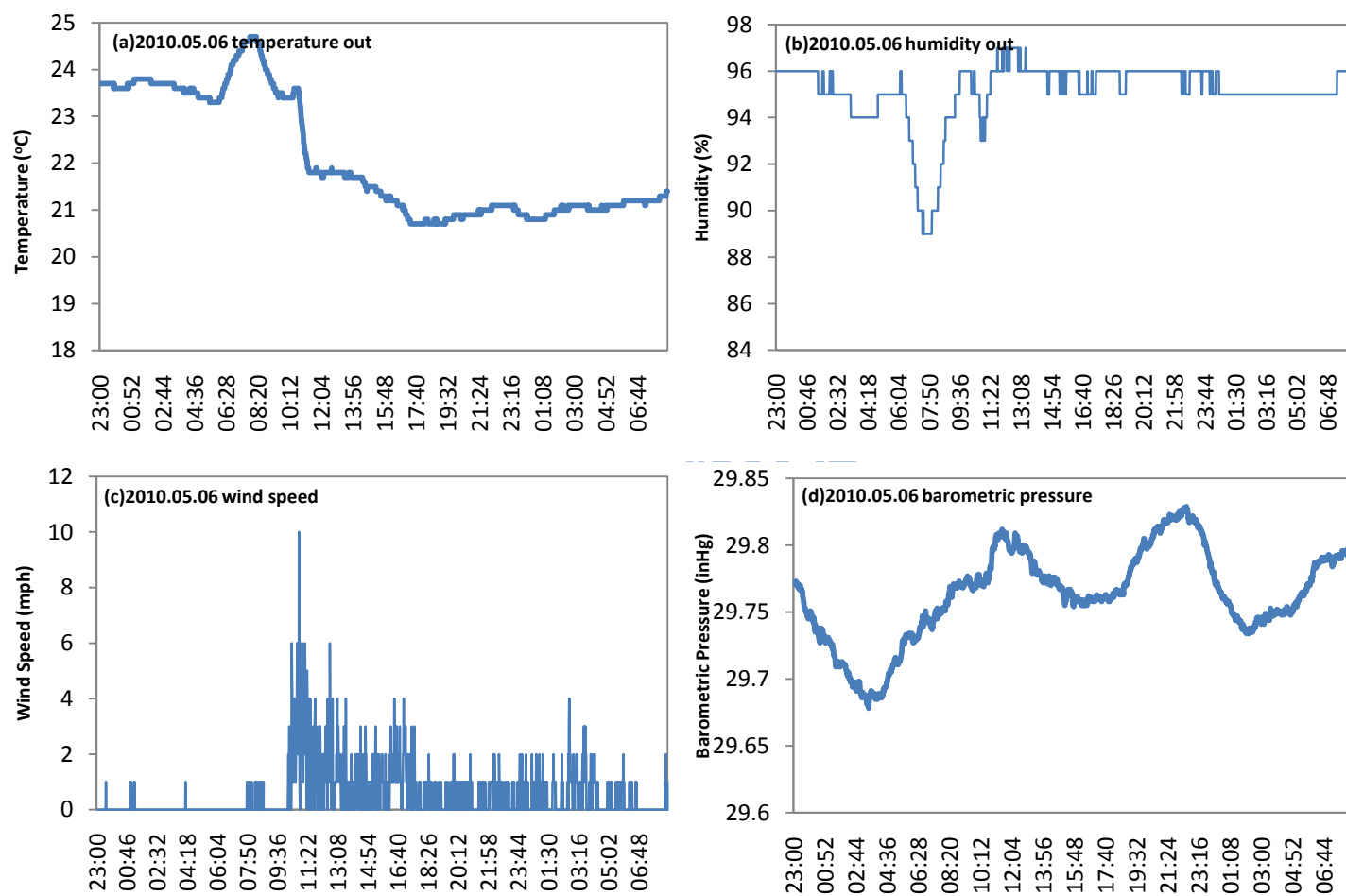
附圖 A.3.5 2010-03-08 13:30 ~ 2010-03-09 23:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



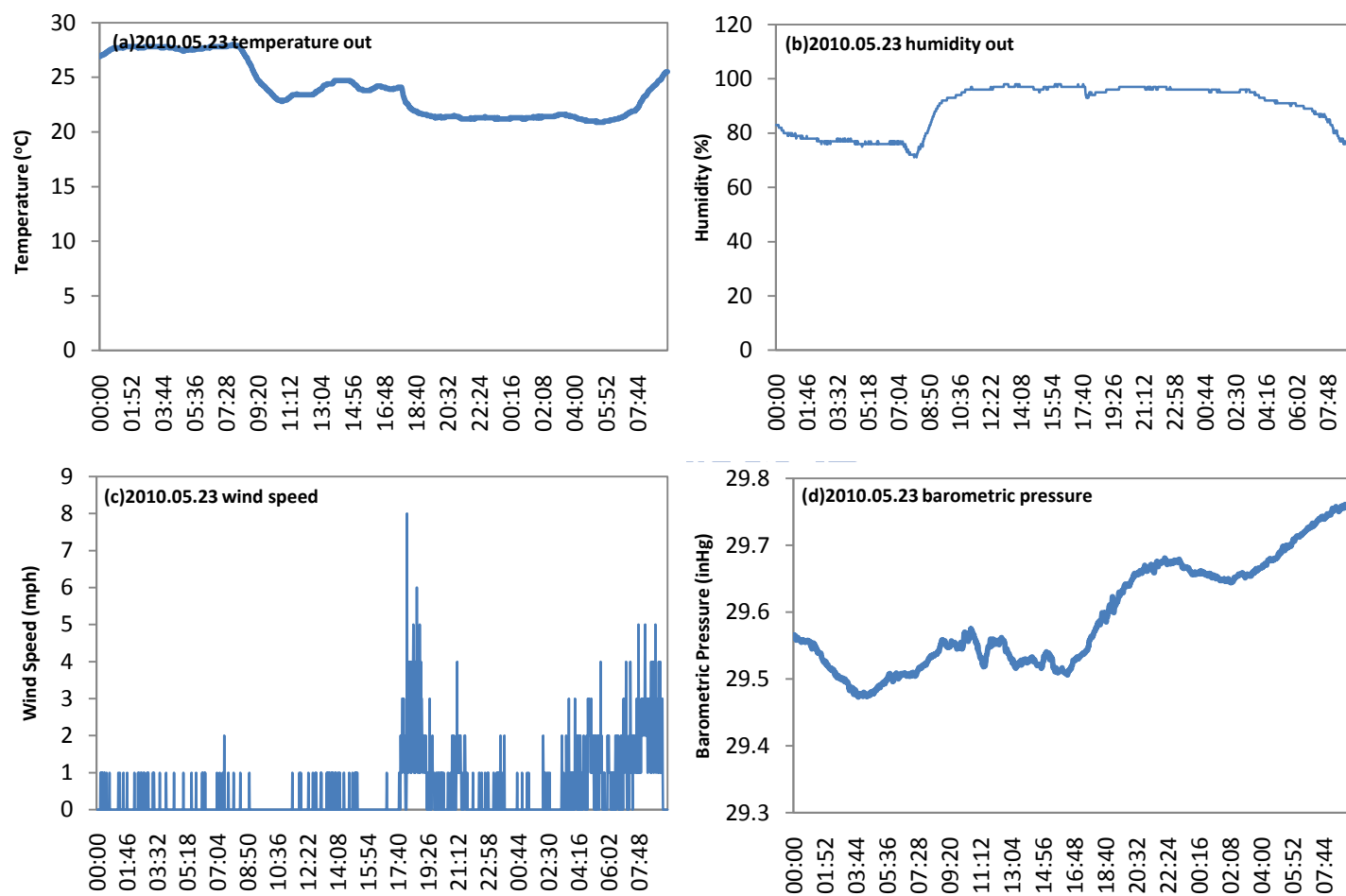
附圖 A.3.6 2010-04-06 07:30 ~ 2010-04-07 16:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



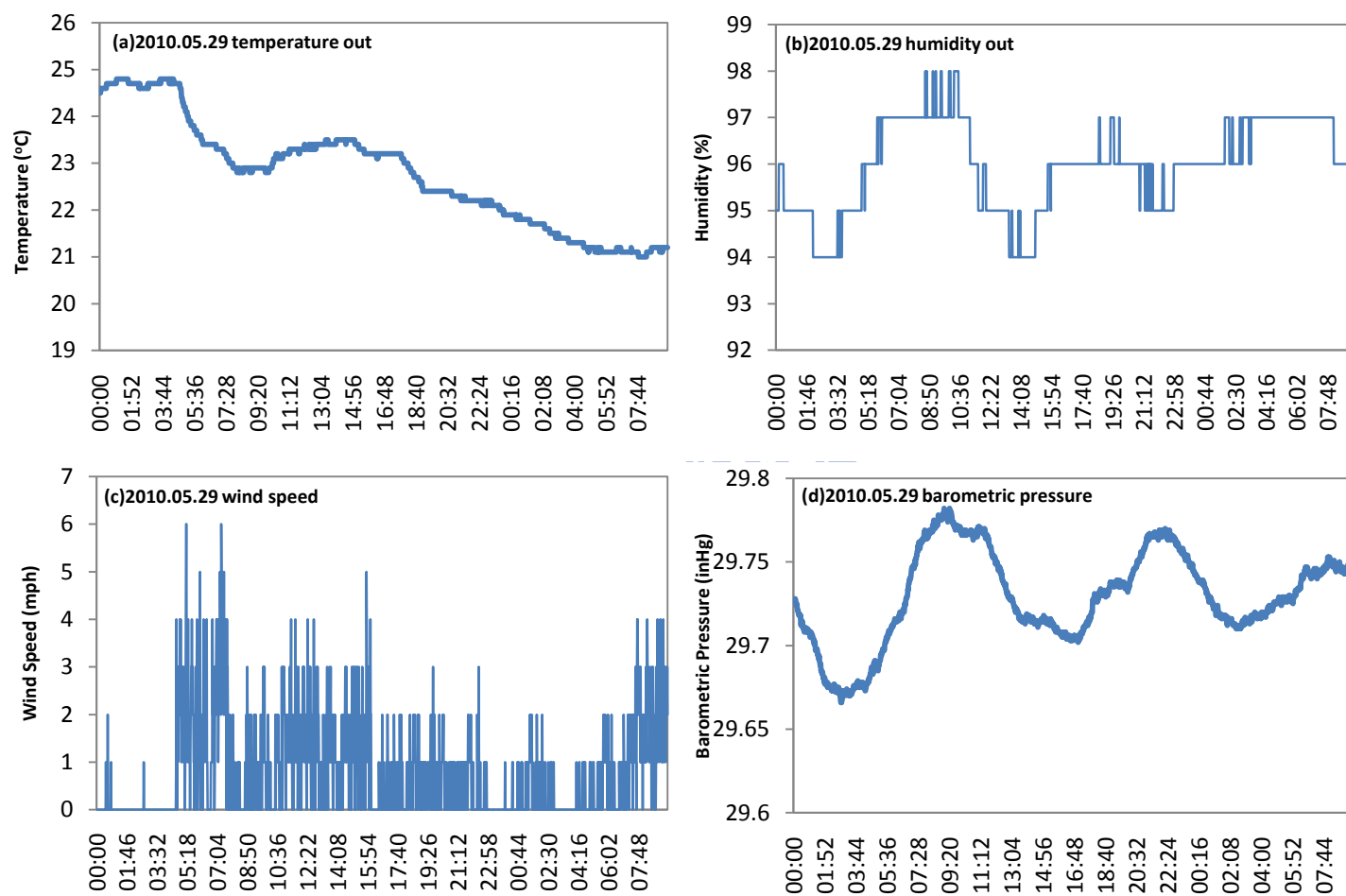
附圖 A.3.7 2010-04-08 01:00 ~ 2010-04-08 10:00 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



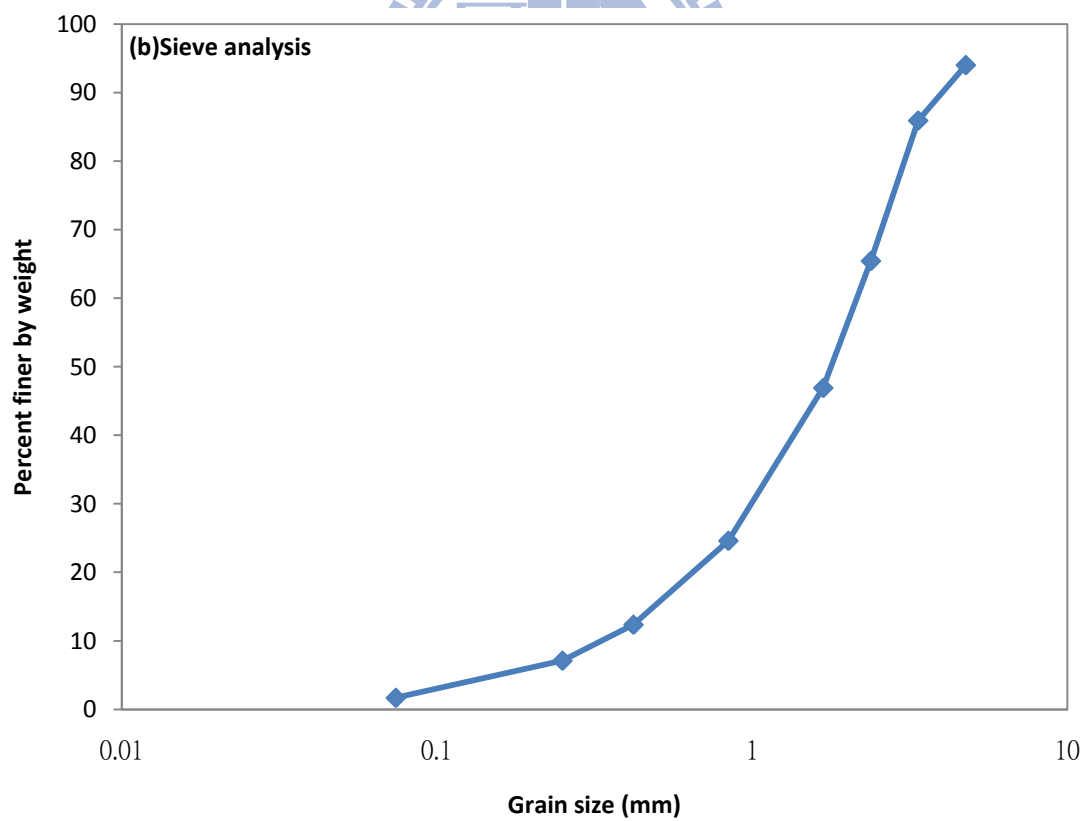
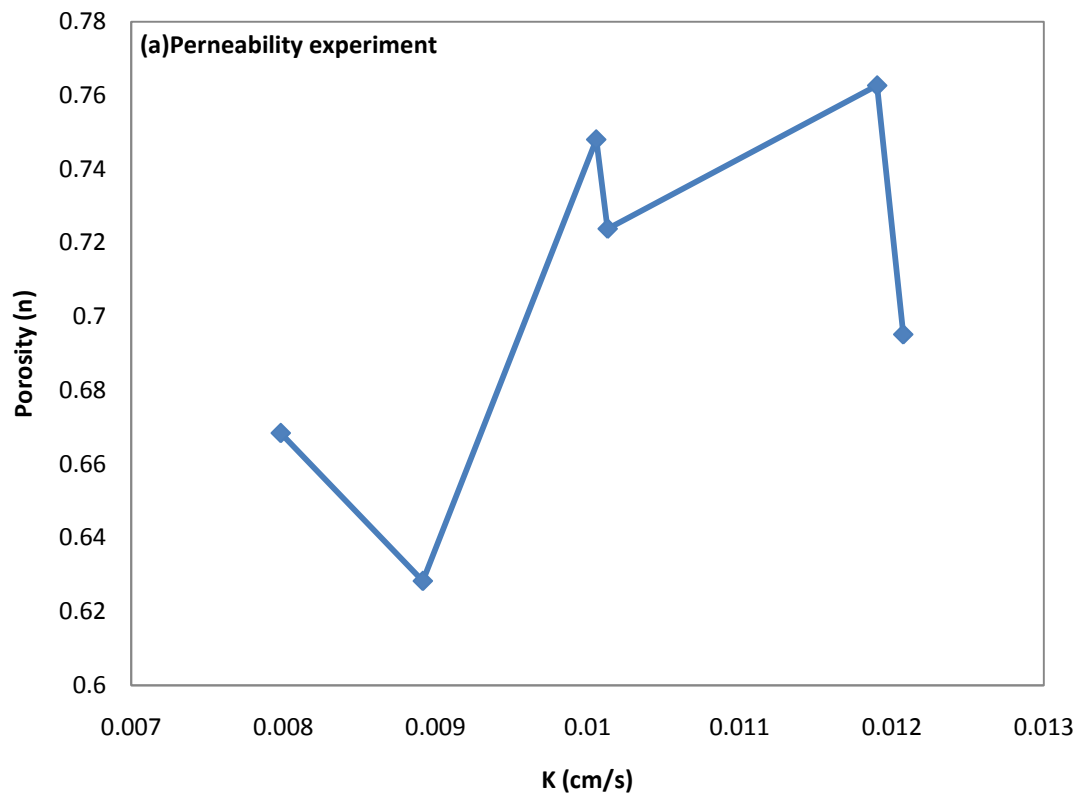
附圖 A.3.8 2010-05-06 23:00 ~ 2010-05-08 08:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



附圖 A.3.9 2010-05-23 00:00 ~ 2010-05-24 09:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



附圖 A.3.10 2010-05-29 00:00 ~ 2010-05-30 09:30 氣象監測 (a)溫度； (b)溼度； (c)風速； (d)氣壓。



附圖 A.4.1 基質特性實驗 (a)透水試驗； (b)篩分析。