

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

綠屋頂降雨截水能力分析與模式發展 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 99-2221-E-009-039-
執行期間：99年08月01日至100年07月31日
執行單位：國立交通大學環境工程研究所

計畫主持人：高正忠

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：廖科智
博士班研究生-兼任助理人員：黃宥禎
博士後研究：潘子欽

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中華民國 100 年 10 月 24 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

成果報告 期中進度報告

綠屋頂降雨截水能力分析與模式發展

Green Roof Rainfall Detention Analysis and Model Development

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 99-2221-E-009-039

執行期間：99年 08月 01日至100年 07月 31日

計畫主持人：高正忠

共同主持人：

計畫參與人員：潘子欽、廖科智、黃宥禎

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

中華民國一百年七月三十一日

摘要:

為改善都市水泥化及綠地不足等問題，綠屋頂在國內外正逐步推廣中。綠屋頂植物及基質均可截留雨水，因而可降低逕流減少洪峰及雨水下水道負載。唯目前尚無適當方法可供推估國內綠屋頂截水能力，本研究因而探討不同條件下綠屋頂的截水能力。為了有效率分析不同設置條件下之截水功能，本研究共設計三套特殊的實驗座台，以利於快速調整影響因子。座台亦以秤重設備監測底部滲漏與表面逕流量。此外，由於天然降雨頗難掌控，亦發展適用的降雨模擬器，以增進研究效率，主要藉由調整壓力、噴頭種類及噴頭高度，可模擬出 21 至 75 mm/hr 間之 18 種降雨強度。本研究分析不同降雨、兩種植物、不同基質厚度及種類之截水能力，並以所收集之數據代入經驗式、 Φ index 法、含水差異係數法、含水率推估法、S&J 法及 SWCC-Darcy 法等六種截水公式中，比較各截水公式預測截水總量之準確度，結果顯示經驗式及 Φ index 法之推估值與實測值相近；含水差異係數法最大差異為 78.8%；含水率推估法最大差異雖為 58.2，但平均誤差為 21%；S&J 及 SWCC-Darcy 法可能分別因決定係數較多及非飽和情況下 K 值呈非線性變化，結果均不佳。其中以經驗式、 Φ index 及含水率推估三個方法的結果差異在可接受範圍內，唯其通用性仍有待更多研究驗證之。

關鍵詞：綠屋頂、雨水截水、綠屋頂實驗座台、降雨模擬器、綠屋頂截水公式、永續環境系統分析。

Abstract:

Urbanization increases the area of impervious surfaces and the probability of flooding. Green roof (GR) is a potential technology to alleviate these problems. The plants and substrates of green roofs can retain precipitation, and both the runoff from rainfall events and the loading on storm sewers can be thus reduced. The rainfall detention capability of a GR is affected by various environmental and GR installation factors. This study was therefore initiated to develop a method for estimating the detention capability. For effectively monitoring the reduction of surface runoff and percolated water by a GR under various environmental and installation conditions, three special GR platforms with monitoring equipments and a rainfall simulator are designed. Based on the results from a series of simulations, six methods, i.e. a regressive equation, the Φ index method, a method based on water content difference (WCD), a method based on estimated water content (EWC), the method proposed by She and Joseph (2011), and a method based on SWCC, are assessed. The results of the regressive equation and the Φ index method are closed to the monitored data. The maximal difference between the WCD results and monitored data is 78.8%. The average difference between the WCD results and monitored data is 21%, although the maximal difference is 58.2%. Since the S&J method may require additional data for calibrating its parameters and the SWCC-based method uses the saturated conductivity that may not be appropriate for a GR, the results obtained by both methods are significantly different from the monitored data. The results obtained by the regressive equation, the Φ index method, and the WCD method are acceptable, although their general applicability have to be examined for various other conditions.

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

一、前言

隨著都市化的腳步，綠地逐漸減少，由於綠屋頂可增加綠覆面及具有截留雨水、降溫節能等效益(FLL, 2002; Van Woert *et al.*, 2005; Villarreal and Bengtsson, 2005; Getter *et al.*, 2007; Hien *et al.*, 2007; Berndtsson *et al.*, 2008; 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.*, 2008)。然而在國內大量推廣綠屋頂前有必要建立相關的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。

在國外雖已有一些研究以屋頂建實場分析綠屋頂截水能力，如 Moran *et al.*(2005)、Van Woert *et al.* (2005)、Villarreal and Bengtsson (2006)、Getter *et al.*(2007)、Berndtsson *et al.*(2008) 及 Hilten *et al.*(2008)等，但此方式不易針對不同截水因子作有效率的變動，故本研究發展三個綠屋頂實驗座台，以便針對不同因子進行較多截水試驗。此外，由於自然雨次數有限且無法預期，故本研究參考並修改廖朝軒教授研究群(賴，99年)所建置的一個降雨模擬器，以模擬不同降雨型式對綠屋頂截水效益之影響。

關於綠屋頂截水能力分析之研究，Van Woert *et al.* (2005)及 Getter *et al.* (2007)等曾針對不同降雨強度、介質深度、坡度進行研究，唯這些研究是針對特定綠屋頂進行研究，並沒有發展出可供評估綠屋頂截水能力的方法，而 Hilten *et al.* (2008)雖採用 HYDRUS-1D 模式模擬綠屋頂的截水能力，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的截水詳細機制，但並不適合用於評估一般綠屋頂的截水能力或供相關政策評估用。本研究因而探討比較數個實用的公式估算綠屋頂在台灣的環境條件下之截水能力。

二、實驗座台及降雨模擬器設計及建置

以實場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，亦不易增設必要的量測裝置。故本研究自行設計三座綠屋頂實驗座台，座台設計如圖 1 所示，該座台所用的儀器設備主要可分為實驗槽及監測設備等二大部分，以下分別說明。

1. 實驗槽

為了將表面逕流及滲出水分離收集，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 1(a)所示，材質為不銹鋼以防止生鏽，在兩旁設計有提環利於搬運，第一座為面積為 1m x 1m，由於須要加設一座比較沒有植物只有基質下的情形，加上國內的門框不易讓一米的座台通過，故第二座改為 90cm x 90 cm，且可以配合寶銳公司所設計之 30 cm x 30 cm 蓄排水板，二座的高度均為 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 1(b)所示，設計斜度以利於滲出水流向收集孔，為了亦可適用進行不同基質厚度實驗，所設計的逕流水收集孔擋水插板可以依不同厚度替換。

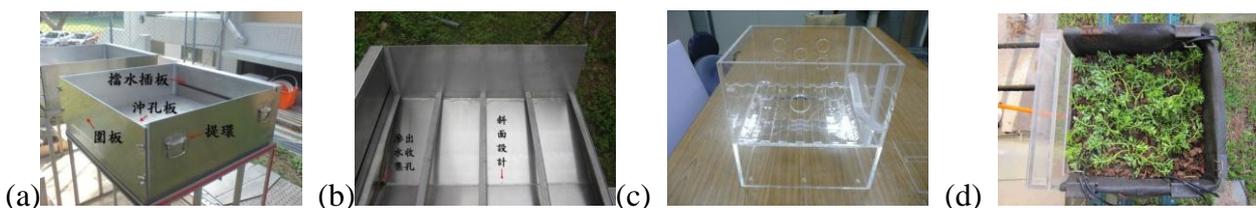


圖 1. (a)實驗槽；(b)實驗槽底部；(c)壓克力小槽；(d)壓克力小槽配置

之後由於不銹鋼座台重量較大且介質頗重，不易經常更換，故本研究亦配合排水板大小設計第三座尺寸為 30cm x 30cm 之小型實驗座台，如圖 1(c)及(d)所示。為了便於製作及

搬運，故此小型實驗座台改為以較厚壓克力材質製作。由於 TDR 探針在前二個座台使用時需要挖土才能放入，不甚方便，故小座台改為在側壁開洞，以利探針以橫插的方式插入土中測其含水率，放入再以橡木栓塞住。

為比較不銹鋼大槽及壓克力小槽在監測上是否有顯著差異，因此，本研究以數場天然雨比較兩槽於逕流、滲流及土壤含水率之差異。以 2011 年 5 月 5 日之降雨為例，圖 3 選取上下層各一支 TDR 之結果，由圖中可以看出，由監測之結果可看出大、小槽之土壤含水率變化趨勢一致，差異不大，其間的差異間隔主要是因各點含水率在一開始並不相同所造成。

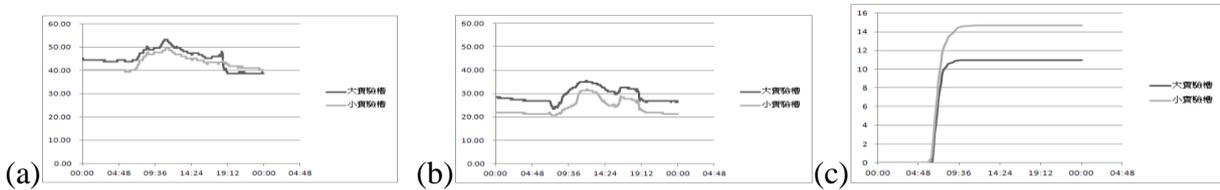


圖 3 大、小實驗槽土壤含水率比較圖: (a) 上層; (b) 下層; (c) 底部滲出水。

2. 監測設備

本研究以不同收集桶連續監測逕流水及滲出水的量，在流量的監測方法上，首先評估各種不同方法的適用性，比較各種不同方法的優缺點後，發現(a) 潛水壓力式探針需要水位達 1~2 公分才能測量，故會忽略一開始之收集量且價格昂貴；(b) 超音波探測需位於水面上 30 公分，會使座台高度太高且價格亦高；(c) 微波法因價格昂貴且準確度不夠有 ± 1 cm 之誤差；(d) 影像辨識法需要有較高解析度之攝影機及充足之光線，並不易架設在所設計之座台。最後本研究選擇電子台秤連續監測桶中所收集到逕流及滲出水後重量的改變，然後推算隨著時間的變化所收集到的逕流及滲出水的量。電子台秤則連接電腦，自動記錄所監測的數據。為了監測介質在不同時間的含水情形，本研究於各實驗槽介質中，分層放入數支土壤水分偵測探針及用 Campbell Scientific CR1000 記錄器收集監測數據。亦建置一套氣象站監測雨量及一些天氣因子，如風速、氣壓、氣溫等。



圖 4 (a) 降雨模擬器；(b) 模擬均勻度

由於自然雨於研究時間內數量有限，且降雨事件期間長短不一、雨量大小亦不穩定，故本實驗亦採用降雨模擬器來模擬不同強度之降雨，以期能有效率完成截水實驗。圖 4(a) 為之前參考廖朝軒教授研究群(賴，99 年)所建立的降雨模擬器，主要原理是以高壓抽水馬達將水抽至降雨模擬器頂端噴頭，亦可藉由調整抽水壓力及調整噴頭高度來控制降雨強度，而四側的塑膠布主要是將風影響降雨均勻度減至最低，本研究更改噴頭及調整不同噴頭高度產生不同強度之降雨，圖 4(b) 為平均 54 mm/hr 降雨之雨量分佈，中間適合放入小座台區域的均勻度不錯，與不同壓力的再現性也很好，雖愈外圍的均勻度愈差，但對實驗沒有影響。目前該模擬器可模擬之雨量如表 1 所示，最大雨量約為 74.5 mm/hr，最小雨量 20.79 mm/hr。若希望模擬其他雨量，亦可調整高度及壓力。

由於基質含水率會影響水頭高度及 suction head，因此本研究以 Tempe pressure cell 實測 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) 建立水壓及基質含水率之關係及求取飽和含水率。

表 1 降雨模擬器可模擬之雨量

馬達壓力	噴頭高度	噴頭型號		
		J050	010	015
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

註:若希望模擬其他雨量，亦可調整高度及壓力。

三、截水公式比較及驗證

為探討適合用於推估綠屋頂截水能力之公式，本研究比較六種截水公式，並以所監測之降雨強度、逕流量、滲流量、基質含水率等歷線資料分析比較各公式推估綠屋頂截水能力之準確性。以下分別說明之。

1. 經驗式

本研究群依各綠屋頂影響因子建立下列迴歸公式(李, 99 年)分析滲出水量與各因子之關係。

$$DP = a \times Ks \times T + b \times (\theta_s - \theta_i) + c \times \Delta L \quad (1)$$

其中 DP 為滲出水量(cm); Ks 為飽和透水係數 (cm/sec); T 為降雨時間(hr); $PP_{t, i}$ 為總降雨量 (cm); θ_i 為基質起始含水率; θ_s 為基質飽和含水率; ΔL 基質厚度(cm); 及 a, b, 及 c 為迴歸所得係數。

2. Φ index 法

Φ -index 法(Chow *et al.*, 1988)主要是用來推估降雨的逕流量，公式如下列：

$$RO = \sum_{m=1}^M (PP_m - \Phi \cdot \Delta t) \quad (2)$$

其中，RO (cm)為逕流量； PP_m 為在 m 時間內所降下之雨量；M 為降雨期間所劃分之時間區間數量； Φ 為待推求之係數； Δt 為降雨時間區間之長度。此公式假設基質貯留(或入滲)雨水的量與時間成正比且呈線性關係，是一個很簡單的公式，此公式應用於綠屋頂時，以 $Q_{out} = RO + DP$ 來取代 RO。Villarreal and Bengtsson (2005)採用此公式計算出 Φ 值，並定義 Abstraction 為一場降雨事件結束後，降雨入滲綠屋頂被截流的量，唯由其結果顯示，不同的降雨 (3.7mm-18.00mm 間) 及不同坡度均會有不同的 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。本研究以實測數據代入求出 Φ 值，比較各場雨 Φ 值之差異，再試著推導不同降雨型式與影響因子與 Φ 值之間的關係。

3. 含水差異係數法

由於預期前一方法所得結果可能會類似 Villarreal and Bengtsson (2005)之研究而得到差異很大 Φ 值，不是一個定值，故本研究修正此公式，新公式如下列：

$$Q_{out} = \sum_{m=1}^M [EP_m - \alpha(\theta_s - \theta_{i,m}) \cdot \Delta T] \quad (3)$$

其中， $EP_m = PP_m - ET_m - AP_m - DB_m$ ； D_m 為 m 時間內之蒸散量； AP_m 為植物於 m 時間內之吸收量； DB_m 為於 m 時間內進入排水板蓄水杯之水量； α 為係數，依實驗結果推估； θ_s 為飽

和含水率； $\theta_{i,m}$ 為第 m 降雨間隔之初始含水率。在本研究中，飽和含水率假設為基質所測得 SWCC 中之最大含水率。

4. 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(Infiltration)的公式，該公式如下列：

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (4)$$

其中， f_0 為初始入滲率； f_c 為最終入滲率； k 為參數； t 為降雨時間。綠屋頂的截水機制雖與土壤入滲有類似的部分，但底層狀況差異很大，故該公式不能直接適用，但類似的公式預期亦可能適用於本研究，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：

$$\theta_{f,m} = \theta_s - (\theta_s - \theta_{i,m}) \cdot e^{-\beta \cdot \Delta t} \quad (5)$$

其中， $\theta_{f,m}$ 為第 m 降雨間隔之最終含水率； β 為係數。將依實驗結果驗證，再建立依一些參數因子推估的公式。此外，綠屋頂之截水量(ΔSW)與降雨前後之基質內含水率及基質厚度 (SD)有關，故可由下列二式推估出 f_{out} 。

$$\Delta SW_m = (\theta_{f,m} - \theta_{i,m}) SD \quad (6)$$

$$Q_{out} = PP - ET - AT - DB - \Delta SW \quad (7)$$

本研究以降雨模擬器，將降雨維持穩定的量，並同時監測基質含水率，並以實驗結果繪製出降雨時間與基質含水率的關係圖。並據以求得各時段的 $\theta_{f,m}$ 、 $\theta_{i,m}$ 值，因 θ_s 及 t 為已知，故可分別求得下雨及未下雨時之 β 值，並供後續以公式 8 及 9 進行滲出水量之推估。

5. S&J 法

She and Joseph (2011) 依據 Green-Ampt Equations (公式 8, 9) 及 Darcy's law (公式 10) 建立綠屋頂截水模式。其中， $F(t)$ 為雨水累積滲入量； $f(t)$ 為雨水於時間 t 之滲入量； ψ 為 suction head； h_0 為 depth of ponding； K 為 saturated conductivity。此計算方法有考量當降雨強度大於雨水滲入基質之速度時產生逕流之情況。由於 suction head 不易直接量測，故本研究依據基質特性，建立 SWCC 推估之。

$$F(t) - (\psi - h_0) \Delta \theta \{ \ln [F(t) + (\psi - h_0) \Delta \theta] - \ln [(\psi - h_0) \Delta \theta] \} = K_t \quad (8)$$

$$f(t) = K \left[\frac{(\psi - h_0) \cdot \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (9)$$

$$q(t + \Delta t) = K \frac{SD + h_0(t)}{SD} \quad (10)$$

6. SWCC-Darcy 法

Darcy's law 如式(11)所示，由於綠屋頂基質厚度僅有 10 公分，其水力坡降(dh/dl)並不容易求得，故本研究將 TDR 分兩層放置，以量測基質上、下兩層之含水量，接著再藉由先前所建立之 SWCC 曲線，由含水量推估出水頭壓力。而水力坡降之計算，可以由公式(12)來計算，其中 $p_{u,m}$ 及 $p_{d,m}$ 分別為在 m 時間中，基質上層及下層之水頭壓力，而 Δl 則為 $p_{u,m}$ 及 $p_{d,m}$ 兩點間之距離。而總滲流量，則可以公式(13)求得。

$$DP = K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (11)$$

$$\frac{dh}{dl} = \frac{p_{u,m} - p_{d,m}}{\Delta l} \quad (12)$$

$$Q_{out,m} = K \cdot \frac{(p_{u,m} - p_{d,m})}{\Delta l} \quad \text{當 } Q_{out,m} < 0 \text{ 時, } Q_{out,m} = 0 \quad (13)$$

$$Q_{out} = \sum_m Q_{out,m} \quad (14)$$

四、結果與討論

本研究以降雨模擬器模擬各降雨強度下，不同基質厚度及不同植物綠屋頂之截水情況。每場模擬降雨之監測進行 100 分鐘，前 60 分鐘以固定強度進行降雨，而後 40 分鐘則觀察降雨後之變化。關於各模式所需決定之係數，本研究先以 7 場率定組之模擬降雨，分別計算出各場雨之係數後，再取平均作為各公式中之代表係數，然後再以 3 場驗證組之降雨探討各公式之適宜性。實際監測與推估之出流水如表 1 所列，表中括號之數據代表各方法推估值與實測值之差異比例。

表 1. 截水公式結果

降雨強度	基質		植物種類	實測值	出流量(滲出水及逕流總合)(mm)						
	厚度	種類			經驗式	Φ index 法	含水差異係數法	含水率推估法	S&J 法	SWCC-Darcy 法	
率定組	36	10	M1	P1	14.6	17.7 (21.5%)	16.3 (11.6%)	3.1 (-78.8%)	10.9 (-25.3%)	52.6 (260%)	9.6 (-34.2%)
	54	10	M1	P2	33.5	30.4 (2.4%)	34.3 (33.4%)	44.7 (-13.7%)	28.9 (-58.2%)	14.0 (2.4%)	2.41 (-92.8%)
	54	10	M1	P1	30.9	33.3 (7.7%)	34.3 (11.0%)	35.4 (14.6%)	28.9 (-6.5%)	25.9 (-16.2%)	18.4 (-40.5%)
	70	7	M1	P1	54.6	51.6 (-5.5%)	50.5 (-7.5%)	43.1 (-21.1%)	52.7 (-3.5%)	37.8 (-30.8%)	8.4 (-84.6%)
	70	10	M1	P1	56.2	51.9 (-7.6%)	50.5 (-10.1%)	35.7 (-36.5%)	45.1 (-19.8%)	55.1 (-2.0%)	11.9 (-78.8%)
	70	10	M2	P1	54.2	52.6 (-2.9%)	50.5 (-6.8%)	28.5 (-47.4%)	45.1 (-16.8%)	63.5 (17.2%)	18.5 (-65.9%)
	70	12	M1	P1	43.8	50.3 (14.8%)	50.5 (15.3%)	52.7 (20.3%)	40.1 (-8.4%)	20.3 (-53.7%)	10.7 (-75.6%)
驗證組	54	10	M2	P1	30.1	30.7 (1.99%)	34.3 (14.0%)	45.5 (51.2%)	41.5 (37.9%)	11.3 (-62.5%)	15.7 (-47.8%)
	70	10	M1	P1	51.3	49.8 (-2.92%)	50.5 (-1.4%)	51.1 (-0.2%)	45.1 (-11.9%)	19.5 (-61.9%)	19.0 (-62.9%)
	70	12	M1	P0	51.2	52.1 (1.76%)	50.5 (-1.37%)	49.3 (-3.71%)	40.1 (-21.7%)	31.2 (-39.1%)	23.3 (-54.5%)

M1: 泥炭土:椰纖:氯化石:粗砂=3:3:2:2; M2: 陶粒:培養土=7:3; P0: 為沒有植物; P0:為無植物; P1: 圓葉景天; P2: 越橘葉蔓蓉; K1 為採用實驗所獲得之 Ks; K2 由迴歸建立 K 值。

依實測值所迴歸之經驗公式如 15 式所示，在率定組中，各場雨之實測值與所推估值的差異，除了降雨強度 36mm 基質厚度 10cm 外，其他結果之差異皆在 10% 以內，且當降雨強度增加時，推估值亦能與實測值有相似之變化趨勢。在驗證組中，對於模擬降雨之情況，推估值及實測值之差距小於 3%，結果佳。

在 Φ index 法中，在率定組中，模擬值之出流量隨降雨量增加而增大，而所模擬值亦與實測值接近，例如，當基質厚度 10cm 在降雨強度 36mm、54mm 及 70mm 下，實測值與推估值之差距分別為 11.6%、11.0% 及 -10.1%，差異並不大，且實測值與推估值之變化趨勢略為一致，故 Φ index 法可反應在雨量改變時，綠屋頂之出流水變化，在驗證組中，亦呈現同樣趨勢。唯由於此方法僅考量降雨強度，並未考量基質之厚度，故在降雨量相同而基質厚度不同時，所模擬之出流量皆相同，針對不同厚度有必要在取得更多數據時再推估適當的 Φ 值。

含水差異係數法中，除了降雨量 36mm 及 70mm 在基質厚度 10cm 外，其他推估值與實測值之差異皆小於 37%，其中，降雨強度 54mm 基質厚度之推估值與實測值最為接近為 -13.7%。由於本方法亦未考量基質之厚度，故當降雨強度 70mm 基質厚 12cm 之率定組於實驗時之初始含水率值較高時，此方法未考量較厚基質可以容納較多水，反而會推估較高之出流量， α 係數有必要依據較多不同厚度的數據推估之。在驗證組的結果中，雖然降雨量 54mm 之推估與實測值之差異較大，但在降雨量 70mm 下差距則可達 -0.2% 及 -3.71%。

以含水率推估法所模擬之出流量，與實測值之趨勢約略相近，但值偏低，在降雨強度 70mm 的情況下，有較佳之推估結果，差異約為 3%~20%。由於在降雨模擬初期含水率快速增加時，係數 β 值較高，而當含水率變化較小時，係數 β 值較低。故當以整場雨之 β 平均值來推估出水量時，會使得中後期含水量變化較小時之含水率 ($\theta_{f,m} - \theta_{i,m}$) 被高估，進而造成出流量被低估的情況。以驗證組來看，推估與實測之最小差距可達 -11.9%。

在 S&J 之方法中，以降雨強度 54mm 越橘葉蔓蓉之推估值與監測值最接近，為 2.4%。然而，由於模式中需要迴歸之係數眾多，且在係數各場雨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。在驗證組之差異亦大，有兩場雨之差異大於 60%。

SWCC-Darcy 法結果如表 1 所列，在率定組中推估值與實測值之差距為 -34.2% 至 -92.8% 間，而驗證組為 -47.8% 至 -62.9% 間，所推估之數值明顯較小，此是因為在降雨期間基質之含水率並非一直保持飽和，故不宜用飽和狀態的 K 值，於後續研究中宜進一步探求更適當之 K 值。

五、結論

本研究主要貢獻與成果有下列三點：

- A. **發展綠屋頂實驗座台**：為分析綠屋頂之截水能力，需要以適當的實驗設施監測綠屋頂於降雨時之逕流、滲漏、含水率變化等情況。雖然國外曾有研究以實場進行分析，但因此方式不易針對不同截水因子進行調整，故本研究發展一套綠屋頂實驗座台組，其中包含二座不鏽鋼大實驗槽及一座 30 cm x 30 cm 之壓克力小實驗槽，此三座實驗槽皆可依綠屋頂之基質厚度及斜度進行調整，並可分別收集綠屋頂之表面逕流及底部滲流，以加速研究之進行。
- B. **設計監測設備及降雨模擬器**：由於天然雨之降雨時間不易掌握，且逕流及滲漏之水量變化大，故需要建立一套穩定、可連續監測及準確度高之監測設備。本研究群曾比較潛水壓力式探針、超音波探測等六種量測方法之優缺點，最後採用重量監測法進行量測，並

依據此法之需求建立監測設備。此外，由於天然雨在降雨強度及時間長度上不易掌握，因此，本研究亦設計一套降雨模擬器，以加速取得本研究所須的數據。此模擬器可藉由調整壓力、噴頭種類及噴頭高度，可模擬出 21 至 75 mm/hr 間之 18 種降雨強度（若希望模擬其他雨量，亦可調整高度及壓力），有效改善研究效率與期程。

- C. **建立及分析綠屋頂截水公式**：本研究建立與分析六種不同綠屋頂截水公式之推估值與實測值的差異，以比較各公式之適宜性。依據分析結果經驗式在率定組與驗證組與實測值之差異分別為 2.4-21.5% 及 1.76-2.92% 間，結果不錯，唯該公式的維度頗高，仍有待更多數據驗證其實用性。 Φ index 法在率定組及驗證組差異分別為 6.8-33.4% 及 1.4-14% 間，結果亦佳，唯針對不同厚度仍有待取得更多數據後率定出較適用的參數值。含水差異係數法在率定及驗證組的差異分別在 13.7-78.8% 間及 0.2-51.2% 間，雖有差異很小的結果，但亦有頗顯著差異的結果， α 係數之決定仍有待後續研究改善之。含水率推估法在率定組及驗證組之差異分別為在 3.5-58.2% 及 11.9-37.9% 間，平均誤差為 21%，結果不算差。S&J 法在率定組及驗證組之差異分別為 2-260% 及 39.1-62.5% 間，結果不算好，唯其所需參數較多，可能需要較多數據方能得到較好的結果。至於 SWCC-Darcy 法主要依 saturated conductivity 推估，在率定組及驗證組的差異分別為 34.2-92.8% 及 47.8-62.9%，結果不佳，主要原因可能是由於降雨過程，基質並非一直維持飽和，導致推估結果有差異。經驗式、 Φ index 及含水率推估三個方法的結果都在可接受的範圍，唯是否適合用在更多不同狀況，仍有待未來的研究進一步驗證之。

參考文獻

- 李京澄，(99 年)，「綠屋頂之降雨截水能力分析」，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，新竹。
- 賴芝亭，99 年，屋頂綠化對雨洪削減效益及水文平衡模式之建立，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，基隆。
- 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.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2002). *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*. FLL, 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.
- 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.
- 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
- 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, Illinois.
- 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.

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利：已獲得 申請中 無（實驗組可能申請專利,處理中）

技轉：已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

綠屋頂由於具有截留雨水、隔熱降低建築物耗能、減少溫室氣體排放、減緩熱島效應、增進都市生態等優點，國內外因而正在積極推動中。綠屋頂截水功能可減少雨水之直接逕流，有助於減緩雨水下水道之負荷。唯綠屋頂之截水能力會隨著地方特性不同而有所差異，不宜直接採用國外數據，故有必要進行本土綠屋頂截水研究。本研究因而針對綠屋頂截水能力研究需求建立特別的實驗座台實測研究所需要的數據，並用以率定數個不同公式與模式的參數，精心設計的實驗座台組可供類似研究參考使用，所建立的公式則可供規劃綠屋頂及相關政策之重要依據。國內目前很少有類似的研究，即使國際上目前也還沒有建立通用的公式或模式，本研究的成果預期可改善國內在此領域的技術發展。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/20

國科會補助計畫	計畫名稱: 綠屋頂降雨截水能力分析與模式發展
	計畫主持人: 高正忠
	計畫編號: 99-2221-E-009-039- 學門領域: 環境工程
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：高正忠		計畫編號：99-2221-E-009-039-					
計畫名稱：綠屋頂降雨截水能力分析與模式發展							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	1	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	1	1	100%	人次	
		博士生	1	1	50%		
		博士後研究員	1	1	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p style="text-align: center;">其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	無
---	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

綠屋頂由於具有截留雨水、隔熱降低建築物耗能、減少溫室氣體排放、減緩熱島效應、增進都市生態等優點，國內外因而正在積極推動中。綠屋頂截水功能可減少雨水之直接逕流，有助於減緩雨水下水道之負荷。唯綠屋頂之截水能力會隨著地方特性不同而有所差異，不宜直接採用國外數據，故有必要進行本土綠屋頂截水研究。本研究因而針對綠屋頂截水能力研究需求建立特別的實驗座台實測研究所需要的數據，並用以率定數個不同公式與模式的參數，精心設計的實驗座台組可供類似研究參考使用，所建立的公式則可供規劃綠屋頂及相關政策之重要依據。國內目前很少有類似的研究，即使國際上目前也還沒有建立通用的公式或模式，本研究的成果預期可改善國內在此領域的技術發展。