

實驗室尺度人工降雨機設計與率定

陳昱霖⁽¹⁾ 王咏潔^{(2)*}

摘要

國土計畫法等法條陸續公告施行，再加上近年極端降雨的議題，山坡地保育議題再次受到關注，為於實驗室進行人工強降雨沖蝕試驗，研析集水區坡面土壤流失狀況，建置一台可靠且穩定之人工降雨模擬機為首要課題。現況下委外建置一部人工降雨模擬機之費用要價不低，且會根據不同之實驗目的、硬體構造及性能而有異。因此，如何在預算下，自製一部預算內、性能精確且穩定的人工降雨機，為本篇之首要課題。本篇藉由參考前人研製之人工降雨模擬機構造及特性數據，組裝符合實驗需求之人工降雨機，並以前人研製之人工降雨機性能為標準，參考率定本機所需之降雨強度、降雨均勻度指數、雨滴粒徑及落下末速度等參數，所測本機性能數據除皆能符合前人率定標準，且也符合強降雨人工沖蝕實驗所需之降雨強度，達到自製一部費用合理、性能精確且穩定人工降雨機的目標。

(**關鍵詞**：土壤沖蝕、人工降雨機、參數率定、降雨強度、降雨均勻指數)

Design and calibration of a laboratory-scale rainfall simulator

Yu-Lin Chen⁽¹⁾ *Yung-Chieh Wang*⁽²⁾

Graduate student⁽¹⁾, Associate Professor⁽²⁾ Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taiwan R.O.C.

ABSTRACT

Due to the announcement and implementation of Spatial Planning Act and other acts, and the more frequent extreme rainfall events, the issue of hillslope conservation has once attracted the attention again. To evaluate soil erosion on slopes in watersheds by rainfall erosion experiments in the laboratory, constructing a rainfall simulator of laboratory-scale, which is capable to produce high-intensity rainfalls, is an essential issue. However, under current situation, the cost of constructing a rainfall simulator from manufacturer is expensive, and the apparatus is expected to be tailored according

¹ 國立中興大學水土保持學系 碩士生

¹ 國立中興大學水土保持學系 副教授(通訊作者 email:wangyc@nchu.edu.tw)

to different experimental purposes, hardware structure, and its performance. Therefore, how to make a rainfall simulator of laboratory-scale with reasonable cost, good performance and stability under the limited budget is the primary goal of this study. In this study, by referring to the structure and characteristic data of rainfall simulators developed in previous studies, a laboratory-scale rainfall simulator that fits the tilting erosion flume size and experiment purpose had been designed and constructed. The performance of the rainfall simulator satisfies the standards as set in the previous studies in terms of rainfall intensity and spatial uniformity, and the rain drop size distribution, and terminal velocity. Consequently, the goal of this study is achieved by constructing a rainfall simulator that produces rainfall events of designed intensities with acceptable performance and stability at a reasonable cost.

(Keywords : Soil erosion, Rainfall simulator, Parameter calibration, Rainfall intensity, Rainfall uniformity index)

前言

近年隨著國土計畫法公告上路，山坡地保育議題再度受到關注，而數十年來學界對於集水區坡面土砂流失已有初步掌握，但隨著短延時、強降雨之極端降雨逐漸常態化，不僅使集水區土砂流失更加嚴峻，對於了解坡面土砂流失狀況也越來越無法掌握，需要持續精進。

現況下，為了得知坡面土砂沖蝕的定量狀況，試驗方式分為現地監測、田間人工降雨沖蝕試驗及實驗室人工降雨沖蝕試驗。現地監測，Schumm 首次於 1956 年使用木樁 (wooden stakes) 打入地表作為基準，長時間量測地表物質與木樁的相對高程變化，間接得知邊坡地表土壤高程變化量，現為避免打樁過程樁頭擾動地表物質，與改善木樁腐蝕問題，已改為使用金屬針 (沖蝕針)，並常於現地設置雨量筒收集當地累積雨量，藉由長時間收集現地沖蝕針資料與雨量，迴歸統計累積降雨量與土壤沖蝕量的關係，進而推估當地未來邊坡土壤沖蝕趨勢(如何幸娟等人，

2012)。

田間人工降雨沖蝕試驗為在自然坡面上架設田間人工降雨模擬機，並於坡面沖蝕試驗區下游處設置沖蝕土壤收集桶，利用田間人工降雨機模擬特定降雨強度及降雨延時，而非等待自然降雨，范正成與謝宏元(1991)指出此種方法，將使試驗過程更加省時省力並具有可控性，但須克服人工降雨機之裝置、搬運及操作等問題。而此種試驗數據搭配坡面面積及年降雨狀況，即可得到現地坡面土壤沖蝕狀況(如范正成等人，1996；Abudi et al., 2012)。

實驗室人工降雨沖蝕試驗則將現地或相同種類土壤運回實驗室，藉由模擬現地環境或特徵狀況(土表坡度、夯實度、植生分布等)，並憑藉人工降雨模擬機提供特定降雨狀況，了解該種土壤在不同降雨強度及降雨延時下的土壤沖蝕量，再加上集水區(坡面)面積及年降雨狀況，也可推估該集水區(坡面)土壤沖蝕趨勢與土壤沖蝕量(如 Aksoy et al., 2012；Lora et al., 2016)。

三者方法相比，「現地監測」優點為現地監測的土壤沖蝕量最符合現地邊坡真實的土壤沖蝕量，但缺點為監測資料取得耗時、方法無可控性、所得土壤沖蝕量實際上為土壤受地震滑移、重力崩落、風蝕、動植物及降雨等因素綜合影響的結果。「田間人工降雨沖蝕試驗」優點為實驗土壤最接近自然坡面狀態，可得知坡面土壤在任一降雨條件下的沖蝕狀況，但缺點為人工降雨機運送架設費力、試驗土地借用難度高及現地坡度大不利人工降雨模擬機架設。「實驗室人工降雨沖蝕試驗」，優點為實驗資料取得便利、可得知特定土壤種類在任一降雨條件下的土壤沖蝕狀況，而缺點為實驗土壤會受到許多實驗籌備方法影響，致使與現地土壤（土壤總體密度、土中礫石及植生根系分佈）有異而影響實驗數據。

現況下，考量區域特性及土壤種類分佈情況，只有少數針對特定水庫集水區設置「沖蝕針現地監測」及「田間人工降雨沖蝕試驗」，其餘大部分仍採用「實驗室人工降雨沖蝕試驗」方法推估土壤沖蝕量。因此除了參照前人方法得到相對可靠的實驗土壤材料外，建置一部人工降雨模擬機提供符合天然降雨狀況，為大部分土壤沖蝕試驗最根本的實驗設備，也為本文章的課題。

Akosy et al. (2012) 指出人工降雨模擬器已被廣泛做為一種研究工具，用於水文地貌學的現場和實驗室實驗，包括逕流、入滲和沖蝕以及流域內的沉積、養分和污染物擴散研究。人工降雨模擬機為藉由機械設計，準確而精確地模擬天然降雨，包含降雨強度、雨滴粒徑及落下末速度等，減少試驗受天然降雨不穩定及不可預測的影響。而人工降雨模擬器具有的理想特性，Clarke 和 Walsh

(2007) 指出應包括穩定精確且可調的降雨強度、降雨分佈均勻、粒徑分佈與終端速度接近天然降雨。

人工降雨機的型式，Akosy et al.(2012) 以水滴噴出前有無加壓來區分：「非加壓噴頭（滴落型式）」與「加壓噴頭」。前者水滴主要受重力作用而墜落，為使水滴達到終端速度，通常需將出水口配置於 10 公尺高處，否則將使水滴末速度遠小於終端速度造成擊打動能不足，因此要找到合適的實驗場域非常困難；後者「加壓噴頭」則透過增加水滴噴出初速，與落下過程中的重力作用，使水滴以接近終端速度擊打地表，滿足人工降雨模擬器該有的特性，進而降低實驗場域垂直高度的門檻，此外加壓噴頭也使噴灑範圍較廣泛，較常用於大面積實驗中。

林凱等人(2013)也提出目前國際上人工降雨模擬機的型式，以機械構造分為四種：懸線式、噴頭式、針頭式及管網式。范正成與謝宏元(1991)指出噴頭式人工降雨機可施用於大面積實驗土槽，為目前廣泛使用於田間人工降雨模擬機的型式。且根據范正成和謝宏元(1991)提出人工降雨模擬機主要結構包括：

1. 雨滴形成器及噴灑系統：能控制雨滴粒徑分佈，降雨之強度及雨滴之速度。
2. 支架：固定降雨設備，並且提供一高度差使雨滴能達終端速度。
3. 供水系統：供應人工降雨所需之水，

包括水源（如水槽、水車等）、加壓設備及水管等。

4. 動力系統：通常指電力系統，主要在供給整個系統所需之動力。
5. 控制器：控制人工降雨機之操作。

本篇文章也將以此來設計人工降雨模擬機。此外 Akosy et al. (2012) 依實驗室試驗需求，整理篩選前人研製的人工降雨模擬機數據，數據摘要如下：

1. 雨滴落高：1.2 公尺至 4.5 公尺。
2. 降雨強度：15mm/hr 至 178mm/hr 之間。
3. 中值雨滴粒徑：1.2mm 至 3.1mm 之間。
4. CuC 降雨均勻度指數：82%至 97%之間。

本篇將以實驗室尺度建立精確、穩定且可用的人工降雨模擬機，量測人工降雨模擬機之降雨落高、降雨強度、雨滴粒徑及 CuC 降雨均勻度指數等，並以前人研製之人工降雨模擬機數據，作為本篇建立之人工降雨模擬機指標。

研究材料與方法

一. 人工降雨機構造

本次人工降雨模擬機構造參考前人研製之人工降雨模擬機結構，本機（詳圖 1）包含加壓噴頭、PVC 水管、支架、抽水馬達、蓄水水桶、流量調節組、電源開關箱等，詳細規格及功能如下：

1. 噴頭：美國 SPRAYING SYSTEMS-50WSQ 一顆，模擬天然降雨水滴，噴頭距地約 2.9 公尺。
2. PVC 水管：1 英吋水管與 4 分管，串接各構造，使水流通順並達到預期效果。
3. 抽水馬達：大川抽水馬達（TP325 1HP），提供噴頭加壓水流。
4. 蓄水水桶：實驗場地水管水量不穩定，無法提供足夠水量供加壓馬達使用，因此使用普力桶於實驗前蓄足量用水，供實驗使用。
5. 流量調節組：因馬達水量不可調，因此於鄰近馬達出水端處設置分流管，並利用三組不同尺寸與開度之球型閥，使人工降雨模擬機達到三種不同降雨強度。

6. 電流開關箱：馬達串接 220V 電源及
漏電斷路器，作為整台人工降雨模擬

機的啟閉裝置。

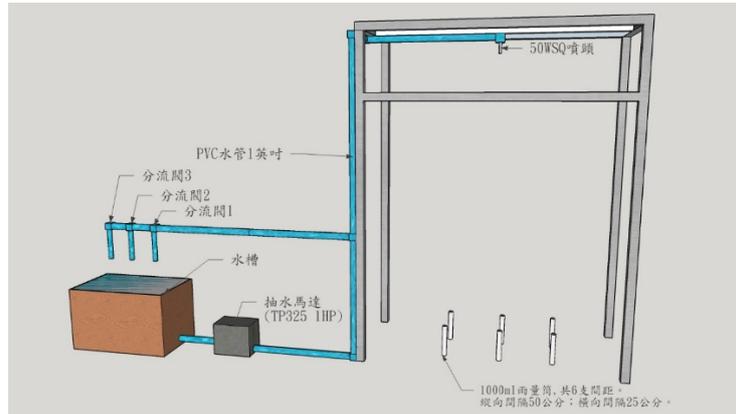


圖 1 人工降雨模擬機構造示意圖

Figure 1 The structure of the Rainfall simulator.



圖 2 人工降雨模擬機-馬達分流管連接情形

Figure 2 laboratory-scale rainfall simulator -
Pump links with pipes.

二. 人工降雨機率定

1. 平均降雨強度：

本實驗參照中央氣象局「歷年整點水量排序」擷取前 30 名最低降水量為 2008 年卡
玫基颱風時北寮站 140mm，及「台灣 60 分
鐘降水量排序」表擷取前 30 名最低為 2006
年 6 月梅雨鋒面高雄站 117mm，且參考范正
成與謝宏元（1991）、Akosy et al.（2012）篩

選出前人研製人工降雨模擬機降雨強度交集
為 76mm/hr 至 127mm/hr 之間，因此本人工
降雨模擬機之設計降雨強度也設計於這區間。

Lora et al.（2016）為量測 2 公尺×2 公尺
之場域降雨情形，每水平及垂直 50 公分擺設
一支高 12 公分、直徑 8.72 公分之雨量筒，採
梅花方式均勻放置，並於降雨實驗後量測雨
量筒總重，評估降雨強度及雨滴空間分佈。

而本實驗量測降雨降度方式，考量未來
進行土壤沖蝕試驗之土槽尺寸為長 75 公分；
寬 25 公分，降雨量應均勻分布於土槽上，因
此於人工降雨模擬機噴頭下方擺放 6 支雨量
筒，每支縱向間隔 50 公分；橫向間隔 25 公
分（如圖 3 所示），並透過流量調節組中三種
不同尺寸與開度之球型閥，嘗試不同組合之
降雨強度，考量往後人工降雨沖蝕試驗之每
次降雨時間設定為 5 分鐘收集一次土壤沖蝕
量，因此在嘗試不同球型閥配置時，也於每 5
分鐘降雨後量測雨量筒之水位，量測三重複

取平均得到各組合之平均降雨強度。

依照 Miller (1987) 提出為提供所需之降雨強度，人工降雨模擬機應提供穩定之降雨量。因此依照各組三次之降雨量標準偏差做篩選，選出穩定之降雨強度組合。



圖 3 降雨強度測試雨量筒擺放

Figure 3 rain gauge distribution.

2. 雨滴空間分佈-降雨均勻度指數 (Christiansen coefficient, CuC):

前人為增加人工降雨模擬機之雨滴空間分佈，會於降雨噴頭前裝設旋轉機構，透過讓降雨噴頭旋轉 (Abudi, 2012)，促使噴出之雨滴均勻分佈，達到與天然降雨同樣之情況。為了解人工降雨模擬機之雨滴分佈，通常使用 Christiansen coefficient, CuC 指數評估：

$$Cu = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - M|}{nM}$$

(R_i 為各別雨量筒之雨量； M 為雨量筒之平均雨量)

CuC 指數雨量筒的擺置通常以 3X3 型式

且等距離擺設，但同樣考量試驗未來土槽為狹長型，若能確保噴頭雨滴能均勻分佈於試驗土槽上，應為理想之人工降雨模擬機，因此本篇 CuC 指數實驗，仍與量測平均降雨強度相同之雨量筒排法量測。

3. 雨滴粒徑：

此分析係以色斑法率定人工降雨模擬機產生之雨滴粒徑分佈，操作步驟如下：

- A. 於數張濾紙上均勻塗抹染色之滑石粉。
- B. 於降雨過程中快速曝露及抽換染色濾紙，使雨滴印於濾紙上成為滴痕，每種降雨強度三重複。
- C. 晾乾濾紙。
- D. 以人工量測每張濾紙各點滴痕之直徑，並依照直徑大小統計滴數。
- E. 濾紙滴痕直徑與實際雨滴直徑關係，採三組前人回歸得到的關係式： $(d$ ：實際雨滴直徑、 D ：濾紙滴痕直徑)
 - I. $d = 0.356D^{0.712}$ -竇葆璋、周佩準《雨滴的觀測和計算方法》
 - II. $d = 0.334 (10D)^{0.712}$ -陳振宇等人《噴霧霧滴濾紙率定法研究初探》
 - III. $d = 0.295 (10D)^{0.756}$ -徐向舟等人《雨滴粒徑的測量方法及其改進研究》
- F. 所得人工降雨模擬機之平均中值粒徑 D_{50} 。

4. 雨滴終端速度：

雨滴落下之末速利用不同降雨強度之噴頭壓力、雨滴粒徑 D_{50} 、雨滴落高及原廠噴頭壓力流量表，計算不同降雨強度之各別實際落下末速度與理論終端速度，末速度採用matlab 程式計算，公式如下：

水滴的靜合力 (F_n) 與水滴隨時間變化的線性動量相同：

$$F_n = \frac{d}{dt}(mv) \quad (m: \text{水滴單顆質量})$$

因此：

$$F_n = m\dot{v}$$

而重力 (F_g) 對水滴的影響：

$$F_g = mg \quad (g: \text{地球重力加速度})$$

而水滴下降過程，空氣對水滴的阻力 (F_d)：

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_\alpha v^2 A$$

C_d ：總拖曳係數。

ρ_α ：空氣密度 ($\frac{1.161\text{kg}}{\text{m}^3}$)。

v ：當下落下速率。

A ：通過截面積。

運用牛頓第二定理：

$$F_n = F_d - F_g$$

$$m\dot{v} = \frac{1}{2} C_d \rho_\alpha v^2 A - mg$$

等號兩側同除以水滴單顆質量 m ：

$$\dot{v} = \frac{1}{2m} C_d \rho_\alpha v^2 A - g$$

假設一係數 $r = \frac{1}{2} C_d \rho_\alpha A$ 代入上式，等式變為：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{r}{m} v^2 - g$$

將等號右式提出 $-\frac{r}{m}$ ：

$$\frac{dv}{dt} = -\left(\frac{mg}{r} - v^2\right) \frac{r}{m}$$

假設一係數 $\omega^2 = \frac{mg}{r}$ 與一係數 $\alpha = \frac{r}{m}$ ：

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha(\omega^2 - v^2)$$

$$\int \frac{dv}{\omega^2 - v^2} = \int -\alpha dt \quad \text{---(1)}$$

等號左式：

$$\frac{1}{(\omega + v)(\omega - v)} = \frac{A}{(\omega + v)} + \frac{B}{(\omega - v)}$$

其中 $A = \frac{1}{2\omega}$ 、 $B = \frac{1}{2\omega}$ ，因此(1)式變為：

$$\int \frac{1}{2\omega} \left(\frac{1}{\omega + v} \right) + \frac{1}{2\omega} \left(\frac{1}{\omega - v} \right) dv = -\alpha dt.$$

計算積分：

$$\frac{1}{2\omega} (\ln|\omega + v| - \ln|\omega - v|) = -a dt + C.$$

C ：為積分常數。

$$v(t) = \frac{\sqrt{\frac{gm}{\frac{1}{2}C_d\rho_a A}} (Ae^{-2\sqrt{\frac{1}{g^2}C_d\rho_a A} \frac{t}{m}} - 1)}{1 + Ae^{-2\sqrt{\frac{1}{g^2}C_d\rho_a A} \frac{t}{m}}}$$

使用對數性質：

$$\ln \left| \frac{\omega+v}{\omega-v} \right| = -2a\omega t + \tilde{C}.$$

使用自然對數：

$$\frac{\omega + v}{\omega - v} = e^{-2a\omega t + \tilde{C}}.$$

簡化右式：

$$\frac{\omega + v}{\omega - v} = Ae^{-2a\omega t}.$$

解算 v ，並假設 B 等於左式：

$$\frac{\omega + v}{\omega - v} = B.$$

$$\omega + v = B\omega - Bv$$

$$v + Bv = B\omega - \omega$$

$$v = \frac{\omega(B + 1)}{B + 1}.$$

代入原式：

當時間 t 趨近於無限大：

$$v(t) = \frac{\sqrt{gm}}{\sqrt{\frac{1}{2}C_d\rho_a A}}$$

結果分析與討論

一. 平均降雨強度：

本機配置之合理且穩定降雨強度為 75mm/hr、85mm/hr 及 100mm/hr(詳如表一)；三者雖在前人已發表人工降雨模擬機之降雨強度範圍內，但本機最低之降雨強度 75mm/hr 仍屬於高強度降雨，致使本機只能用於短延時、高強度降雨之土壤沖蝕研究，若後續人工降雨試驗所需降雨強度較低，仍需要依靠更換馬達或流量調節組提高本機之泛用性。

二. 雨滴空間分佈-降雨均勻度指數 (Christiansen coefficient, CuC)：

范正成與謝宏元(1991)篩選出的三組人工降雨機數據降雨均勻度指數最高為 88%，而 Abudi et al. (2012) 及 Akosy et al. (2012) 整理前人發表的人工降雨模擬機，降雨均勻度指數皆在 80% 以上，因此本篇 CuC 降雨均勻度指數不管採用 80% 或 88% 為標準，本機配置之 75mm/hr、85mm/hr 及 100mm/hr 三種不同降雨強度之 CuC 指數皆在 92% 以上，本

機三種降雨強度雨滴分布符合人工降雨機之均勻度要求。

三. 雨滴粒徑與落下末速度：

雖然目前有許多高精度技術可以量得人工降雨模擬機之雨滴粒徑與落下末速度，但考量儀器取得方便性、技術門檻及時間彈性，本機之雨滴粒徑量測仍採用色斑法，而雨滴落下末速度採用間接方式計算而得，經計算雨滴實際末速度與理論終端速度之比值，皆可高於 86% 以上(詳如表二)。

採用間接方式計算雨滴落下末速度，可能導致所得之雨滴粒徑及落下末速度不夠準確，但本機之噴頭距地高約 2.9 公尺，高於大部分前人發表之噴頭高度，尚屬可達到人工降雨模擬機之功效。

探討 75mm/hr 與 100mm/hr 之間誤差產生原因，可能為 75mm/h 之雨滴噴出壓力不足，雖然落下高度有 2.9 米，但因初速不足，未來若要達到終端速度，可以從加高噴頭高度，增加落下距離；或是安裝加壓幫浦，增加雨滴噴出壓力與初速，兩種方式改善。

四. 人工降雨設備整理比較：

收集彙整前人研製符合各自實驗需求之人工降雨模擬機數據，彙整如表三，由表格彙整比較，在符合學者各自實驗需求下，本篇人工降雨機優勢為雨滴落高最高(2.9m)、降雨均勻度最高(93%以上)及成本最低(約 5 萬元台幣)；而劣勢為降雨強度泛用性不廣及降雨面積小。

表一 本機人工降雨機設計平均降雨強度

Table 1 The average intensity of the rainfall simulator.

| 單噴頭-抽水馬達-2/3 進水量 | | | | | |
|--------------------------|----------|--------|-------|--------|--------|
| 球閥配置組合：4 分球型閥全開+2 分全開球型閥 | | | | | |
| 組數 | 單次平均降雨強度 | 平均降雨強度 | 標準偏差 | 相對標準偏差 | CuC |
| 1 | 73.456 | 74.380 | 0.973 | 1.31% | 95.35% |
| 2 | 74.288 | | | | 93.66% |
| 3 | 75.396 | | | | 94.49% |
| 球閥配置組合：4 分球型閥全開 | | | | | |
| 組數 | 單次降雨強度 | 平均降雨強度 | 標準偏差 | 相對標準偏差 | CuC |
| 1 | 84.913 | 85.098 | 0.244 | 0.29% | 93.58% |
| 2 | 85.006 | | | | 93.26% |
| 3 | 85.375 | | | | 93.72% |
| 球閥配置組合：4 分球型閥關一點 | | | | | |
| 組數 | 單次降雨強度 | 平均降雨強度 | 標準偏差 | 相對標準偏差 | CuC |

| | | | | | |
|---|---------|--------|-------|-------|--------|
| 1 | 99.143 | 99.759 | 0.912 | 0.91% | 93.49% |
| 2 | 100.806 | | | | 93.14% |
| 3 | 99.328 | | | | 92.47% |

表二 本機人工降雨機設計雨滴粒徑及終端速度計算

Table 2 The rain drop and final velocity of the rain simulator.

| | | 粒徑公式 A | 粒徑公式 B | 粒徑公式 C |
|----------|--------------------|----------|---------|---------|
| 75mm/hr | 中值粒徑 D_{50} (mm) | 2.382 | 2.313 | 2.232 |
| | 噴出壓力 | 8.24psi | | |
| | 噴出初速 (m/s) | 5.059821 | | |
| | 實際末速 (m/s) | 6.447 | 6.401 | 6.340 |
| | 理論終端速度 (m/s) | 7.414 | 7.306 | 7.176 |
| | 實際末速/理論終端速度 (%) | 86.96% | 87.62% | 88.35% |
| 100mm/hr | 粒徑 | 2.000 | 1.923 | 1.798 |
| | 噴出壓力 | 17psi | | |
| | 噴出初速 (m/s) | 6.777326 | | |
| | 實際末速 (m/s) | 6.787 | 6.661 | 6.441 |
| | 理論終端速度 (m/s) | 6.793 | 6.661 | 6.441 |
| | 實際末速/理論終端速度 (%) | 99.91% | 100.00% | 100.00% |

表三 現有人工降雨機特性彙整

Table 3 Summary of characteristics of rain simulator.

| 類別 研製年份 | 雨滴 落高 | 降雨強度 (mm/hr) | 降雨均勻度 指數 | 中值雨 滴粒徑 | 建造 成本 | 用途 | 降雨面積 (長×寬) |
|--------------------------|----------|-----------------|-------------|------------|--------------|----------|------------------|
| Meyer et al. (1958) | 2.4 m | 63.5-127 | 88% | 2.25mm | 40,000 美金 | 田間 實驗 | 5.5m × 4.6m |
| Shelton et al. (1985) | 2.7 m | 76-168 | 66%-84% | 2.4mm | 20,000 美金 | 田間 實驗 | 6.0m × 6.0m |
| Fan et al. (1987) | 2.4 m | 2-127 | 88% | 2.25mm | 80,000 美金 | 田間 實驗 | 11m × 3.0m |
| de Lima et al. (2011) | 2.2 m | 99 | N/A | N/A | N/A | 實驗 室 | 1.0m × 6.0m |
| Aksoy et al. (2012) | 2.43 m | 45-105 | 82-89 | 2.19-3.13 | N/A | 實驗 室 | 1.36m × 6.5m |
| 本篇降雨機 | 2.9 m | 75、100 | 93%-94.5% | 2.309mm | 50,000 台幣 | 實驗 室 | 0.75m × 0.25m |

結論

為進行實驗室人工降雨土壤沖蝕試驗，需於室內架設人工降雨模擬機提供實驗降雨，模擬室外天然不同降雨狀況（不同的降雨強度與降雨時延組合），因此本篇參考多篇國內外學者發表人工降雨模擬機之裝設目的、硬體構造及性能，研製適合本實驗場地之人工降雨模擬機。

市面上雖有廠商提供訂做人工降雨模擬機之服務，但造價不低，在扣除人工降雨模擬機訂做費用後，實驗室通常已無其他多餘經費用於土壤沖蝕試驗本身。因此如何以預算內價格製作一台穩定且符合需求之人工降雨模擬機，為每一間土壤沖蝕實驗室建立之

課題。

本篇研製之人工降雨模擬機雖然降雨面積不大，但以能達到實驗需求下，本機材料成本低於台幣 5 萬元之經費，組出一台「三種降雨強度」、「降雨均勻度 CuC 指數皆在 92% 以上」、「雨滴粒徑及落下末速與天然降雨相當」之人工降雨模擬機，實屬非常理想之實驗設備。惟，往後如果可藉由高精度儀器，如：高速攝影機、一維雨滴譜儀或二維雨滴譜儀等，實際量測人工降雨模擬機之雨滴粒徑分佈及落下末速度，則可以更進一步確認本台人工降雨模擬機之效能。

雖然本機有降雨面積小及降雨強度泛用性不高等劣勢，但因本機採用之材料及工具屬於一般生活水電常見材料，且組裝簡單，

往後可以藉由增加噴頭數量、更換抽水馬達，或是 PVC 水管，擴充降雨面積及增加降雨強度泛用性，改善本機現有劣勢。

致謝

本研究承蒙行政院農業委員會水土保持局 SWCB-107-042 - 計畫補助，謹致謝忱。

參考文獻

1. 何幸娟, 林伯勳, 冀樹勇, 尹孝元, 施美琴, & 羅文俊. (2012). 神木集水區土壤沖蝕特性.
2. 林俐玲, & 林文英. (2008). 土壤流失推估模式之應用與探討.
3. 林凱, 姜靜, 李雄威, & 李行之. (2013). 人工模擬降雨機裝置的研究與製作. 山西建築, 39 (35), 58-59.
4. 范正成, & 吳明峰. (1996). 臺灣地區田間人工降雨機之研製, 操作, 率定及分析. 中華水土保持學報, 27 (1), 1-13.
5. 范正成, & 謝宏元. (1991). 田間人工降雨機之回顧, 研究及比較. 中華水土保持學報, 22 (1), 9-20.
6. 徐向舟, 張紅武, & 朱明東. (2004). 雨滴粒徑的測量方法及其改進研究. 中國水土保持, vol.02.
7. 張偉裕, 陳台琦, & 林沛練. (2003). 納莉颱風時期二維雨滴譜儀之雨滴粒徑分及雷達降水估計. 大氣科學, 31 (3), 261-284.
8. 陳盈臻. (2013). 臺灣北部鋒面強降水個案之雨滴粒徑觀測比較研究. 國立中央大學碩士論文.
9. 陳振宇, 葉全民, 趙美香, 霍文平, & 武永卿. (1996). 噴霧霧滴濾紙率定法研究初探. 山西農業大學學報, 16 (4), 422-425.
10. 竇葆璋, & 周佩華. (1982). 雨滴的觀測和計算方法. 水土保持通報, 2 (1), 44-47.
11. Abudi, I., Carmi, G., & Berliner, P. (2012). Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*, 454, 76-81.
12. Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S. B., & Eris, E. (2012). A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Catena*, 98, 63-72.
13. Clarke, M. A., & Walsh, R. P. (2007). A portable rainfall simulator for field assessment of splash and slopewash in remote locations. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32 (13), 2052-2069.
14. Lora, M., Camporese, M., & Salandin, P. (2016). Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *Catena*, 140, 77-89.

15. Miller, W. P. (1987). A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Science Society of America Journal*, 51(3), 832-834. drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, 67(5), 597-646.
16. Schumm, S. A. (1956). Evolution of

109 年 5 月 12 日收稿

109 年 6 月 3 日修改

109 年 6 月 30 日接受

水土保持學報 50 (4): 2561–2574 (2020)

Journal of Soil and Water Conservation, 50 (4): 2561–2574 (2020)