

CLIGEN 氣候生成模式對台灣北部地區 有效降雨模擬之適用性研究

A Study on the Adaptability of the Climate Generator
Model of CLIGEN to the Simulation of the Effective
Rainfall Events in Northern Taiwan

醒吾技術學院
觀光事業管理系
副教授

楊文仁

Wen-Jen Yang

國立台灣大學
生物環境系統工程系
教授

范正成*

Jen-Chen Fan

國立台灣大學
生物環境系統工程系
碩士班研究生

楊智翔

Chih-Hsiang Yang

行政院農業委員會
水土保持局
技士

黃效禹

Hsiao-Yu Huang

摘 要

CLIGEN 氣候生成模式可利用連續日之氣象資料，合成產生出與降雨相關之參數，可用以輸入評估土壤沖蝕之模式，如 WEPP 模式、RUSLE 公式等，由於整套模式在美國發展至成熟階段，對於其他地區之適用性尚屬未知階段，因此本研究針對台灣北部地區土壤沖蝕有效降雨事件進行模擬，將其結果與 1975 至 2000 年的歷史資料進行比對，驗證之參數分別為，年平均降雨量、月降雨分布、降雨強度、標準偏差、降雨事件機率及降雨沖蝕指數等。結果顯示在降雨量、降雨月分布及降雨事件機率上模擬結果良好，但在標準偏差、降雨強度及降雨沖蝕指數部分，有偏低之現象；由於 CLIGEN 模式建構於大陸性氣候的氣象資料庫之上，其模擬結果以低中強度降雨居多，而台灣地區屬海島型季風氣候，常受隨颱風來之高強度暴雨影響，因此造成此一誤差現象之發生。

關鍵詞：氣候生成模式，CLIGEN，有效降雨，土壤沖蝕，降雨沖蝕指數。

ABSTRACT

Using the climate generator model of CLIGEN, continuous daily climate data can be used to generate the parameters related to rainfall. These parameters can be used in the equations for evaluating soil erosion, such as the WEPP and the RUSLE models. The CLIGEN model has been developed to a mature stage in the continent of the United State,

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，jcfan@ntu.edu.tw

however, the adaptability of the model in the other areas is still unknown. Therefore, in this study, the effective rainfall events for soil erosion in northern Taiwan were simulated and compared with the historic data from 1975 to 2000. Parameters verified in this study were annual mean rainfall amount, monthly rainfall distribution, rainfall intensity, standard deviation, probability of rainfall event and rainfall erosivity. The results showed that the simulations of rainfall amount, monthly rainfall distribution and the probability of rainfall were good; however, standard deviation, rainfall intensity and rainfall erosivity were underestimated. The reasons for this may be because the CLIGEN model was established by using the continental climate data, which mainly consisted of the rainfalls with medium and low intensity. However, the Taiwan island is in a monsoon area, accordingly, the rainfall intensities are frequently very high because of typhoons.

Keywords: Climate generator model, CLIGEN, Effective rainfall, Soil erosion, Rainfall erosivity index.

一、前言

自 18 世紀工業革命以來，大量的溫室氣體排放進入大氣之中，進而加強溫室效應，造成全球暖化。氣溫之改變，將會造成海平面上升、降雨量改變等現象，對自然及生態產生嚴重的威脅，因此如何評估氣候變遷之衝擊及制定其調適策略成為近代極重要的課題之一。

CLIGEN 氣候生成模式(CLIimate GEnerator Model)是由美國農業部(USDA)農業研究室(ARS)所研發，它能根據歷史觀測資料的統計特性，諸如月平均降雨量及月均溫等，生成模擬出連續每日的降雨量、氣溫、風速及日照等資料，與其他氣候生成模式不同的是 CLIGEN 模式針對一場獨立降雨所模擬的特性，包括到達尖峰時間、尖峰降雨強度及降雨延時等，這些參數在估算土壤沖蝕的方式中，如 WEPP 模式(Water Erosion Prediction Project)、RUSLE 公式(Revised Universal Soil Loss Equation)，是相當重要的。

本研究期能以 CLIGEN 模式作為未來模擬相關參數之工具，但由於整套模式是以美國中部及南部的氣候資料所建構，並且在美國本土發展至成熟的階段，由於其地區之氣候特性與世界其他地方存在著不同程度之差異，因此對於美國本土以外地區之適用性，目前尚處於未知的階段；在非洲烏干達(Elliot and Arnold, 2001)及大陸

(史婉麗等人，2006)等地，曾模擬驗證 CLIGEN 模式在其地區之適用性，結果顯示 CLIGEN 模擬之年平均雨量、月平均雨量與歷史觀測值並無顯著之差異，但相關研究區域之氣候型態與台灣海島型季風氣候也有所不同，因此本研究擬收集整理中央氣象局基隆、宜蘭及台北站之雨量資料，做為 CLIGEN 模式之輸入項以進行模擬，並根據歷史資料統計結果，針對年平均降雨量、月降雨分布、標準偏差及降雨事件機率等參數來進行初步之適用性驗證，接著利用 CLIGEN 模式之輸出項估算出年降雨沖蝕指數，與盧昭堯(2005)所修訂之年降雨沖蝕指數進行比較，找出模式推估值與實際值之間的關係，以期在未來評估氣候變遷對土壤沖蝕量之衝擊時，能應用此一模式作為氣候資料合成之用。

二、文獻回顧

Wischmeier and Smith(1958)所提出之通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)為目前最為廣泛使用於估算土壤沖蝕量之方法。其公式如下。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \dots\dots\dots (1)$$

其中

A：單位面積土壤流失量(ton/acre)

R：降雨逕流因子(foot-tonf·inch/acre·hr)

- K：土壤可蝕性因子(ton · acre · hr/100acre · foot-tonf · inch)
- L：坡長因子(the slope length factor)
- S：坡度因子(the slope steepness factor)
- C：覆蓋與管理因子(the cover and management factor)
- P：水土保持措施因子(the support practice factor)

上述 USLE 公式，為一經驗公式，在使用上有其限制，根據實驗結果發現，估計土壤流失最準確的是對中等質地土壤，坡長大於 5m 小於 122m，坡度在 3%~18% 之間，降雨強度則在 3in/hr 以下，並且是一致耕作處理。離開這個範圍越遠，估算結果之誤差也就越大。此一公式經 Renard 等人(1997)進一步修正後，提出了修正版之通用土壤流失公式(RUSLE)。在各項因子中，降雨逕流因子(the Rainfall and Runoff factor)或稱降雨沖蝕指數(Rainfall Erosivity, R-Index)與降雨特性之相關性極高，此因子可具體量化降雨及逕流對土壤造成沖蝕之影響程度。

Wischmeier and Smith (1958)由實測之土壤沖蝕數據發現，土壤沖蝕量和降雨總動能 E(Total Kinetic Energy of Rainfall)與該場降雨之最大連續 30 分鐘降雨強度 I_{30} (the Maximum 30-minute rainfall intensity)之乘積呈正相關，並將該乘積定義為降雨沖蝕指數，如下式所示。

$$R = E \times I_{30} \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中

- R：降雨沖蝕指數(foot-tonf · inch/acre · hr)
- E：降雨總動能(foot-tonf/acre)
- I_{30} ：最大連續 30 分鐘降雨強度(inch/hr)

Wischmeier and Smith (1978)曾收集全美地區的雨量資料記錄，並以美國華盛頓地區之降雨動能與降雨強度關係式，去計算並繪製全美之等降雨沖蝕指數圖。然而降雨沖蝕指數受到區域氣候特性之影響會有所不同，因此國內學者紛紛投入台灣地區降雨沖蝕指數之研究，其中使用雨量紀錄年限較長，時間也較接近現況的為盧光輝(1999)及盧昭堯(2005)之研究；而楊文仁、范正成(2006)則針對氣候變遷對台灣地區降雨沖蝕指數

之影響進行研究。

盧光輝(1999)，蒐集全台灣各測站近 20 年(1977~1994)之降雨紀錄，進行降雨沖蝕指數之修訂。研究中使用 ULSE 公式中所推導之降雨動能公式，其結果發現以較長統計年數計算出的降雨沖蝕指數應能提供更準確及應用性高的土壤流失評估。而盧昭堯等人(2005)，則以染色濾紙法實測雨滴之粒徑分布，修正 USLE 降雨動能公式，再依據歷年有效降雨紀錄進行年降雨沖蝕指數之修訂。其研究與盧光輝教授最大不同點在於，所使用之降雨動能公式為依據實驗結果所推估之迴歸公式，雖兩者所推估之年降雨沖蝕指數變化一致，但盧昭堯(2005)所修訂之年平均降雨沖蝕指數較高，據其研判，此乃因採用不同之降雨動能公式所致。

綜合台灣地區主要相關的降雨沖蝕指數研究(盧光輝，1999；盧昭堯等人，2005)，大都依據過去的降雨歷史記錄，以及現地實際觀測的降雨特性資料，來進行降雨沖蝕指數之計算及修訂；惟以不同的資料統計年數去計算分析，所得到的降雨沖蝕指數有變異性，在國外相關的土壤沖蝕研究也提出類似的結論(Baffaut et al., 1996)，代表現況 R 指數的修訂基準年限，有待進一步的確認。而目前台灣地區降雨沖蝕指數之修訂，均以過去歷史的雨量資料為基礎，於未來氣候變遷下，台灣地區之降雨沖蝕指數之變化則仍屬未知；在土壤流失量的推估上均屬於短期性的推估，缺乏長遠性如未來 30 年或 50 年之推估，無法作為因應氣候變遷，相關策略的研擬與措施之參考。有鑑於此，楊文仁、范正成(2006)利用兩種預設情境模擬未來台灣降雨沖蝕指數之變化。首先在 GISS 平衡試驗當中，以現況為 1 倍 CO_2 濃度之氣候條件，模擬 CO_2 濃度為 2 倍時，降雨沖蝕指數之變化，結果顯示基隆、宜蘭、新竹、花蓮及嘉義等地之 R 指數增加，而高雄及台東地區之 R 指數為減少；另外在 HADCM3 漸變試驗中，短、中、長期之模擬結果皆顯示，R 指數在各地均有增加的趨勢。

楊文仁、范正成(2006)之研究，採用童慶斌等人(2002)所研擬之氣象合成模式進行降雨量之

模擬，此一雨量資料之模擬生成方式，對於台灣北部地區有效降雨事件之模擬可獲致不錯的結果，惟此方式所生成之雨量資料，係以日為單位，無法得知有效降雨事件其他之重要特性，例如連續最大三十分鐘降雨強度。緣此，本研究擬針對土壤沖蝕研究領域常採用的 CLIGEN 氣候生成模式進行模擬驗證。

在 CLIGEN 模式驗證的部分，Elliot and Arnold (2001)，在非洲烏干達以兩個站點 20 年的日雨量資料作為 CLIGEN 模式之輸入項，針對降雨量、降雨延時、有效降雨機率及標準偏差等參數進行模擬比較之工作，最後在年雨量、月雨量及分布、降雨事件機率及降雨延時等參數，模擬結果與歷史觀測值無顯著之差異，而在標準偏差部分，在兩個站點的結果皆顯示，模擬值小於實際值，尤其在高程較高之站點 Buginyanya (高程為 2030m)，每月份的模擬值皆遠小於實際值，據其研判，由於 CLIGEN 模式為根據美國本土中部及南部地區之氣候資料所建立，而其地形高程皆較低，因此 CLIGEN 模式在模擬高程較高的地形之雨量變異情形仍有改善之空間。

史婉麗等人(2006)以安塞氣候站 1986~2003 年之日雨量資料，驗證 CLIGEN 模式在黃土高原地區之適用性，其研究針對降雨量及降雨事件機率進行驗證，結果顯示降雨量標準偏差模擬結果小於實際之標準偏差，說明了 CLIGEN 模式對該地區暴雨及特別乾旱的情形模擬欠佳，而對中等強度降雨發生機率的模擬偏高，但在模擬降雨量及月分布情形上表現良好；在降雨事件機率驗證部分，CLIGEN 模擬值略小於實際值，但以分布趨勢而言，模擬結果一致，並且在標準偏差部分也無顯著差異，顯示 CLIGEN 模式在模擬降雨事件機率之表現是較為良好的。

雖已有上述二位學者驗證 CLIGEN 模式在美國本土以外地區之適用性，但其研究區域皆屬大陸性氣候，與台灣海島型季風氣候有所不同；且研究資料使用年限皆過短，較無法客觀的代表一時期之氣候；再者，其研究主要為針對降雨量部分進行模擬驗證，並無針對土壤沖蝕有效降雨事件進行研究，因此本研究擬利用 25 年之歷史

資料，驗證 CLIGEN 模式模擬台灣北部地區土壤沖蝕有效降雨事件之適用性。

CLIGEN 模式主要的價值在於能產生為估算土壤沖蝕量所需之參數，Yu(2002)即提出以 CLIGEN 模式輸出項來估算降雨沖蝕指數之方法，並且利用美國 76 個站點用來建立降雨沖蝕指數歷史值與程式模擬值的關係式如(3)式，並且使用 89 個測站來驗證，結果顯示雖然兩者呈現高度相關，但程式模擬值高出歷史值許多，據研判應為 CLIGEN 模式在模擬暴雨雨型上與真實情況有所不同所致，而驗證部分之模式效率(E_c)達到 0.92，顯示所建構之關係式能準確模擬各地區之年降雨沖蝕指數。

$$R_{his} = 0.576R_{gen} \dots\dots\dots (3)$$

其中 R_{his} 為歷史觀測之年降雨沖蝕指數； R_{gen} 為程式模擬之年降雨沖蝕指數。

三、研究方法

3.1 研究區域分析

本研究共選取之基隆、宜蘭及新竹三個氣候測站，測站基本資料如表 1 所示，根據 1975 年至 2000 年之雨量記錄，得知基隆、宜蘭及新竹地區 26 年之平均年雨量依序為 3783mm、2777mm 及 1780mm，年濕天天數依序為 205 天、204 天及 130 天，平均降雨強度則為 1.83mm/hr、1.80mm/hr 及 1.99mm/hr，而月平均降雨分布如圖 1 所示。

由上述資料可以發現，雖然三個研究站點皆位於台灣北部地區，但在降雨量、降雨強度及降雨型態上都有所不同，其中基隆與宜蘭因處於台灣東北角，冬季時皆受東北季風影響，同時期之雨量就較處於西北部之新竹來的豐沛，而在 5、6 月，雨量主要受西南季風影響，宜蘭因處於東

表 1 研究站點基本資料

| 站名 | 海拔高度 | 經度 | 緯度 |
|----|-------|----------|---------|
| 基隆 | 26.7m | 121°43'E | 25°08'N |
| 宜蘭 | 7.2m | 121°44'E | 24°45'N |
| 新竹 | 34m | 120°58'E | 24°48'N |

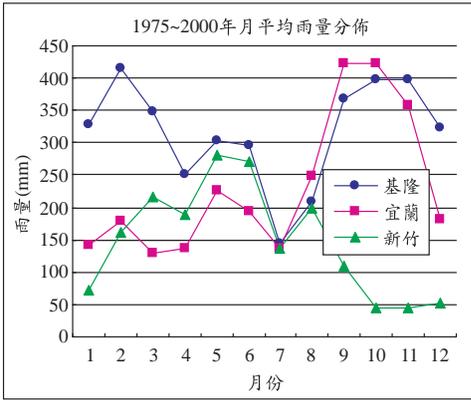


圖 1 26 年月平均雨量分布

部，水氣被中央山脈阻隔，降雨量較少。本研究擬以基隆代表東北角未受中央山脈阻隔地帶、宜蘭代表東北角受中央山脈阻隔地帶、新竹則為西北部地區代表，來評估 CLGEN 模式於台灣北部地區之適用性。

3.2 CLIGEN 模式

CLIGEN 模式是美國農業部研發為產生 WEPP 模式輸入項的模式，它可利用長期觀測之氣候資料生成 WEPP 模式所需之參數，用以估算土壤沖蝕量。由於 CLIGEN 是使用美國本土之氣候資料所建置，因此在台灣地區之適用性仍有待驗證。

在 CLIGEN 模式中，降雨的分布是根據二階馬可夫鏈(2nd order Markov Chain)，需計算前一日無降雨而今日降雨之機率 P(W/D)及前一日降雨而今日無降雨之機率 P(D/W)以確定季節之轉換。在降雨量模擬的部分，有降雨與無降雨的日子是分開計算，先以降雨機率判別出該天有無降雨，在進行降雨量之模擬，降雨量之模擬根據(4)式，其中 x 為標準常態隨機變數、 X 為原始變量、 u 為均值、 s 為標準偏差、 g 則為偏態係數，將歷史資料之統計特性帶入(4)式即可得出模擬之降雨量。

$$x = \frac{6}{g} \left\{ \frac{\left[\frac{g(X-u)}{s} + 1 \right]}{3} - 1 \right\} + \frac{g}{6} \dots\dots\dots(4)$$

在降雨延時模擬的部分則是依據(5)式，其中， D 為延時(小時)、 rl 是無因次單位，等同於最大 30 分鐘降雨體積與總降雨體積之比。

$$D = \frac{9.21}{-2\ln(1-rl)} \dots\dots\dots(5)$$

3.3 降雨沖蝕指數之推估

CLIGEN 模式針對每一濕天生成四項與雨量相關的參數，分別為降雨量 $P(\text{mm})$ 、降雨延時 $D(\text{hr})$ 、到達尖峰時間與降雨延時之比值 t_p 及尖峰降雨強度與平均降雨強度之比值 i_p ，因此 t_p 與 i_p 皆為無因次參數，分別代表正規化後的到達尖峰時間及尖峰降雨強度。

模式中使用雙指數函數來描述正規化後之降雨強度型態，如(6)式所示。

$$i(t) = \begin{cases} i_p e^{b(t-t_p)} & 0 < t < t_p \\ i_p e^{-d(t-t_p)} & t_p < t < 1 \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

其中 b 與 d 為降雨型態之參數，此一降雨強度型態內含兩個假設，分別為：

1. 暴雨之初始降雨強度與結束前降雨強度相同。
2. (6)式之降雨強度曲線中，從 0 到 t_p 之範圍內，其曲線下的面積相等於 t_p ，即為(7)式所示。

$$t_p = i_p \int_0^{t_p} e^{b(t-t_p)} dt \dots\dots\dots(7)$$

根據上述兩項假設，將(6)式轉化為(8)式，其中 b 為一參數滿足(9)式。

$$i(t) = \begin{cases} i_p e^{b(t-t_p)} & 0 < t < t_p \\ i_p e^{-bt_p(t-t_p)/(1-t_p)} & t_p < t < 1 \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

$$i_p (1 - e^{-bt_p}) - bt_p = 0 \dots\dots\dots(9)$$

Yu (2002)建議以一新的參數 B 來代替 $b \times t_p$ ，而 B 滿足(10)式，因此可利用任一 i_p 計算出任一間隔時間(Δt)內之尖峰降雨強度如(11)式，在將其反正規化處理，即為最大 30 分鐘降雨強度，如(12)式所示；在降雨動能部分，本研究擬採用盧昭堯(2005)以染色濾紙法實測雨滴之粒徑

表 3 26 年平均降雨量分析

| 單位：mm | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 327.6 | 326.4 | 142.5 | 147.7 | 71.1 | 73.2 |
| Feb | 416.1 | 395.9 | 178.8 | 167.9 | 162.3 | 151.7 |
| Mar | 347.8 | 362.2 | 130.3 | 131.7 | 216.8 | 209.4 |
| Apr | 251.1 | 254.9 | 136.6 | 140.3 | 189.6 | 187.7 |
| May | 304.4 | 306.8 | 225.0 | 223.0 | 281.4 | 265.7 |
| June | 296.0 | 283.4 | 193.7 | 191.9 | 271.9 | 263.6 |
| July | 144.7 | 128.1 | 135.8 | 128.6 | 137.6 | 125.0 |
| Aug | 209.6 | 207.6 | 249.4 | 256.0 | 199.7 | 214.7 |
| Sep | 367.5 | 328.1 | 422.5 | 394.2 | 108.5 | 89.1 |
| Oct | 397.4 | 388.8 | 423.9 | 398.6 | 44.1 | 45.3 |
| Nov | 397.0 | 388.4 | 357.1 | 363.9 | 44.7 | 46.7 |
| Dec | 323.6 | 318.9 | 181.5 | 180.7 | 52.3 | 51.2 |
| 年平均 | 3782.7 | 3689.4 | 2777.1 | 2724.4 | 1779.9 | 1723.3 |
| 誤差 | 2.5% | | 1.9% | | 3.2% | |
| 斜率 | 0.971 | | 0.933 | | 0.968 | |
| 截距 | 1.315 | | 11.100 | | -0.013 | |
| R ² | 0.971 | | 0.992 | | 0.988 | |

表 2 降雨動能經驗公式(盧昭堯，2005)

| 地區 | E = a + b × logI | |
|----|------------------|--------|
| | a | b |
| 基隆 | 836.32 | 323.08 |
| 宜蘭 | 781.58 | 267.22 |
| 新竹 | 830.16 | 274.65 |

分布修訂之基隆、宜蘭及新竹地區之降雨動能公式計算如表 2，最後根據 Wischmeier and Smith (1958)之定義，累加一年中每場有效降雨事件的最大 30 分鐘降雨強度乘上降雨動能的乘積，即得到年降雨沖蝕指數。

$$i_p(1 - e^{-B}) - B = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$i_{\Delta t} = \frac{i_p}{B\Delta t} (1 - e^{-B\Delta t}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$I_{30} = \frac{2Pi_p}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{2D}} \right) \quad \dots\dots\dots(12)$$

四、結果與討論

根據基隆、宜蘭及新竹三個氣象站之日雨量

資料，輸入 CLIGEN 模式，將其產生之輸出項如降雨量、標準偏差、降雨機率及降雨沖蝕指數等，與各氣象站及盧昭堯(2005)所提供之歷史資料作比對驗證之工作，分別詳述如下。

4.1 降雨量及降雨事件特性之分析及驗證

CLIGEN 模式降雨量及月分布趨勢模擬之結果如表 3 所示，發現在年平均降雨量的模擬上，程式模擬值與歷史觀測值之誤差相當小，約在 1.9%~3.2% 之間；接著以歷史值為 X 座標、模擬值為 Y 座標，作線性迴歸分析，以了解其雨量大小及雨量分布的趨勢，迴歸結果斜率在 0.933~0.971 之間，截距介於 -0.013~11.1，判定係數 R² 在 0.971~0.992 之間，結果顯示在月平均降雨量方面，各月模擬之降雨量結果有略為低估的現象，尤以九月份特別嚴重，三個站點的平均誤差達到 11.8%，但整體而言模擬值與歷史值並無顯著之差異；而分布趨勢之模擬結果亦相當良好，證明 CLIGEN 模式能準確的模擬年降雨量、月降雨量及其月分布趨勢。

標準偏差之模擬結果如表 4 所示，同樣以歷

表 4 26 年平均標準偏差分析

| 單位：mm | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 14.41 | 13.08 | 8.30 | 6.90 | 5.61 | 3.82 |
| Feb | 18.00 | 16.50 | 8.91 | 7.82 | 9.79 | 8.27 |
| Mar | 15.54 | 14.25 | 7.09 | 6.05 | 12.90 | 10.29 |
| Apr | 14.46 | 12.51 | 8.77 | 7.22 | 12.20 | 10.07 |
| May | 18.57 | 15.17 | 13.72 | 11.62 | 21.71 | 13.93 |
| June | 21.29 | 15.45 | 13.69 | 11.65 | 21.08 | 15.44 |
| July | 14.49 | 8.71 | 13.18 | 8.02 | 14.59 | 8.73 |
| Aug | 18.36 | 11.78 | 19.31 | 14.08 | 16.64 | 11.97 |
| Sep | 26.12 | 19.35 | 28.90 | 22.53 | 11.18 | 6.18 |
| Oct | 26.88 | 20.35 | 28.35 | 20.76 | 4.73 | 3.04 |
| Nov | 21.08 | 17.48 | 22.39 | 18.36 | 5.27 | 3.36 |
| Dec | 16.51 | 13.12 | 11.47 | 9.03 | 5.16 | 3.03 |
| 斜率 | 0.663 | | 0.735 | | 0.700 | |
| 截距 | 2.342 | | 0.735 | | -0.041 | |
| R ² | 0.749 | | 0.971 | | 0.935 | |

表 5 26 年平均降雨強度分析

| | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|----------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 1.18 | 1.58 | 0.88 | 0.87 | 0.79 | 0.33 |
| Feb | 1.42 | 1.50 | 0.95 | 0.81 | 1.26 | 0.53 |
| Mar | 1.25 | 1.63 | 0.90 | 0.66 | 1.58 | 0.54 |
| Apr | 1.48 | 1.75 | 1.29 | 0.64 | 2.08 | 0.58 |
| May | 1.84 | 1.74 | 1.69 | 0.68 | 2.71 | 0.82 |
| June | 2.87 | 1.73 | 2.12 | 0.96 | 3.47 | 0.97 |
| July | 3.61 | 2.53 | 3.32 | 1.50 | 4.48 | 0.96 |
| Aug | 3.86 | 2.49 | 3.96 | 1.41 | 4.19 | 0.82 |
| Sep | 3.68 | 2.51 | 4.22 | 1.35 | 2.38 | 0.64 |
| Oct | 2.74 | 2.11 | 2.70 | 0.99 | 1.12 | 0.60 |
| Nov | 1.90 | 2.00 | 1.87 | 0.83 | 1.03 | 0.46 |
| Dec | 1.37 | 1.77 | 1.07 | 0.87 | 0.93 | 0.40 |
| 斜率 | 0.334 | | 0.217 | | 0.149 | |
| 截距 | 1.188 | | 0.513 | | 0.313 | |
| R ² | 0.819 | | 0.780 | | 0.843 | |

史值為 X 座標、模擬值為 Y 座標，作線性迴歸分析，結果斜率在 0.663~0.735 之間，截距介於 -0.041~2.342，R² 則介於 0.723~0.967 之間，說明了雖然 CLIGEN 模式能良好的模擬標準偏差月分布趨勢的變化，但模擬值小於歷史值，表示 CLIGEN 模式所模擬之雨量變異為較小的，此一情形在七月到九月特別明顯，此時節正逢颱風盛行之季節，導致暴雨較多，而 CLIGEN 模式模擬之降雨多為中低強度降雨，因此 CLIGEN 模式模

擬暴雨情形的能力仍有待增進。

降雨強度之模擬如表 5 所示，斜率介於 0.149~0.334，截距在 0.313~1.188 之間，R² 則介於 0.780~0.843 之間，顯示模擬之降雨強度皆遠小於實際值，此一結果與上述標準偏差之模擬結果相似，在颱風盛行之七月到九月，模擬偏差較大，說明雖然在總雨量的模擬結果良好，但模擬的降雨型態與真實情況差距頗大，此點可能造成在降雨沖蝕指數模擬方面之誤差。

在降雨機率模擬的部分，分為前一日降雨且今日也降雨之機率 $P(W/W)$ 及前一日不降雨且今日降雨之機率 $P(W/D)$ 兩種，結果如表 6、表 7，顯示 CLIGEN 模式在條件降雨機率之模擬結果大致良好，模擬值與觀測值之關係直線的斜率， $P(W/W)$ 之斜率介於 0.863~0.908 之間，截距在 -0.036~0.096， R^2 則在 0.758~0.933 之間，而 $P(W/D)$ 之斜率介於 0.999~1.030 之間，截距介於 -0.011~-0.001， R^2 在 0.950~0.978 之間，顯示模擬值與觀測值相當接近，且呈現高度的相關性，證明 CLIGEN 模式能準確的模擬降雨事件之機率。

4.2 降雨沖蝕指數之分析及驗證

利用 CLIGEN 模式產生之降雨量、到達尖峰時間、尖峰降雨強度及降雨延時等參數，根據 Yu(2002)所提出之估算降雨沖蝕指數的方法，依照(10)、(11)及(12)式，計算出最大 30 分鐘降雨強度，而降雨動能則依照表 2(盧昭堯，2005)進行計算，最後依照定義，將一年中每場有效降雨的最大 30 分鐘降雨強度與降雨動能之乘積累加，即得到該年之年降雨沖蝕指數，模擬結果與歷史值比較如表 8，可清楚的看出 CLIGEN 模式所模擬的降雨沖蝕指數皆小於歷史值，歷史值與模擬值間存在一倍數關係，由前述結果得知，

CLIGEN 模式模擬之雨量變異較小，據研判，由於 CLIGEN 是以美國本土的氣象資料庫所建置之模式，其內建的雨型為大陸型氣候之型態，降雨多是中低強度且延時較長之雨場，與台灣地區雷陣雨較多，且受颱風影響常有暴雨之情形有所不同，而一場延時短、雨量多之降雨的降雨沖蝕指數會遠大於相等雨量但延時較長之降雨，這樣的情形在新竹地區尤為明顯，新竹的年降雨量為 1780mm，CLIGEN 所模擬之降雨延時較長、強度較小，部分皆不為有效降雨，而在真實情況中，新竹地區之雨量受隨颱風而來之暴雨影響很大，因此造成模擬之降雨沖蝕指數遠小於歷史值之結果。

五、結論與建議

本研究主要目的為驗證 CLIGEN 模式於台灣北部地區之適用性，期能以 CLIGEN 模式應用於氣候變遷衝擊評估之中，本文所得之結論及後續研究之建議摘要敘述如下。

在降雨量及降雨事件特性模擬部分，結果顯示 CLIGEN 模式在降雨量之模擬上有輕微低估之現象，但在趨勢變化模擬結果表現良好；標準偏差、降雨強度及降雨沖蝕指數之模擬結果差異較大，經本研究發現，CLIGEN 模式模擬之降雨

表 6 26 年平均 $P(W/W)$ 分析

| | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|-------|--------|------|-------|------|-------|------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 0.80 | 0.82 | 0.75 | 0.78 | 0.59 | 0.60 |
| Feb | 0.84 | 0.81 | 0.79 | 0.76 | 0.71 | 0.67 |
| Mar | 0.81 | 0.82 | 0.75 | 0.75 | 0.72 | 0.70 |
| Apr | 0.73 | 0.73 | 0.65 | 0.65 | 0.63 | 0.59 |
| May | 0.72 | 0.71 | 0.75 | 0.74 | 0.66 | 0.66 |
| June | 0.70 | 0.67 | 0.71 | 0.66 | 0.65 | 0.64 |
| July | 0.58 | 0.59 | 0.62 | 0.66 | 0.51 | 0.53 |
| Aug | 0.66 | 0.66 | 0.64 | 0.66 | 0.59 | 0.63 |
| Sep | 0.70 | 0.65 | 0.74 | 0.68 | 0.56 | 0.49 |
| Oct | 0.72 | 0.72 | 0.75 | 0.74 | 0.48 | 0.48 |
| Nov | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.82 | 0.49 | 0.48 |
| Dec | 0.77 | 0.79 | 0.75 | 0.76 | 0.55 | 0.61 |
| 斜率 | 1.046 | | 0.863 | | 0.908 | |
| 截距 | -0.036 | | 0.096 | | 0.050 | |
| R^2 | 0.933 | | 0.758 | | 0.832 | |

備註：前一日降雨且今日也降雨之機率 $P(W/W)$ 。

表 7 26 年平均 P(W/D)分析

| | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|---------------------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 0.44 | 0.40 | 0.40 | 0.37 | 0.25 | 0.26 |
| Feb | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.40 | 0.29 | 0.28 |
| Mar | 0.44 | 0.45 | 0.42 | 0.44 | 0.34 | 0.34 |
| Apr | 0.37 | 0.38 | 0.42 | 0.43 | 0.33 | 0.35 |
| May | 0.43 | 0.46 | 0.46 | 0.49 | 0.26 | 0.26 |
| June | 0.28 | 0.29 | 0.28 | 0.30 | 0.22 | 0.22 |
| July | 0.17 | 0.15 | 0.17 | 0.14 | 0.17 | 0.15 |
| Aug | 0.19 | 0.20 | 0.26 | 0.27 | 0.22 | 0.23 |
| Sep | 0.30 | 0.29 | 0.28 | 0.29 | 0.19 | 0.19 |
| Oct | 0.35 | 0.34 | 0.40 | 0.38 | 0.12 | 0.13 |
| Nov | 0.39 | 0.40 | 0.42 | 0.40 | 0.15 | 0.17 |
| Dec | 0.40 | 0.38 | 0.39 | 0.37 | 0.16 | 0.15 |
| 斜率 | 0.999 | | 1.026 | | 1.030 | |
| 截距 | -0.001 | | -0.011 | | -0.005 | |
| R ² | 0.950 | | 0.956 | | 0.978 | |
| 備註：P(W/D)為前一日不降雨且今天降雨之機率。 | | | | | | |

表 8 26 年年平均 R 指數分析

| 單位： 100ft-tons.in/ac.hr.month(yr) | 基隆 | | 宜蘭 | | 新竹 | |
|---|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|------|
| | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 | 歷史值 | 模擬值 |
| Jan | 26.0 | 31.4 | 9.3 | 8.6 | 3.9 | 0.9 |
| Feb | 36.8 | 31.7 | 9.9 | 7.4 | 19.1 | 3.6 |
| Mar | 32.9 | 36.1 | 7.1 | 4.5 | 35.4 | 4.9 |
| Apr | 34.9 | 31.0 | 13.6 | 4.8 | 40.0 | 4.2 |
| May | 60.3 | 38.0 | 37.2 | 10.3 | 113.6 | 6.2 |
| June | 115.5 | 29.9 | 50.6 | 13.7 | 110.1 | 8.8 |
| July | 66.5 | 18.8 | 47.4 | 11.2 | 73.2 | 5.5 |
| Aug | 87.3 | 29.4 | 94.9 | 21.0 | 74.8 | 7.2 |
| Sep | 185.1 | 50.5 | 241.1 | 31.6 | 27.7 | 2.4 |
| Oct | 185.3 | 56.6 | 194.2 | 25.0 | 5.6 | 0.9 |
| Nov | 68.6 | 51.4 | 78.9 | 18.8 | 4.5 | 1.1 |
| Dec | 36.3 | 34.7 | 23.9 | 10.3 | 10.5 | 0.8 |
| 年平均 | 935.5 | 439.4 | 808.1 | 167.4 | 518.4 | 46.5 |
| 迴歸式 | $R_{his}=2.13R_{gen}$ | | $R_{his}=4.83R_{gen}$ | | $R_{his}=11.2R_{gen}$ | |
| 備註：R _{his} 為歷史觀測之年降雨沖蝕指數；R _{gen} 為程式模擬之年降雨沖蝕指數。 | | | | | | |

多為中低強度之降雨，與台灣地區多為高強度暴雨之降雨型態有所不同，因此造成模擬值小於歷史值之情形；降雨事件機率模擬結果與歷史值差異極小，月份趨勢變化也呈現高度之相關性。

模擬降雨沖蝕指數的結果，不論在年平均及月平均方面，都存在著極大的差異，但 25 年平均降雨沖蝕指數之間仍存在一倍數關係，值得注意的是，此一關係式目前仍處於測試及研究的階段，不確定性極高，因此本文僅提供一個相關研

究的方向及可能達成的目標，希冀未來能使其更為完整且更具可信度。

由於歷史降雨沖蝕指數資料取得不易，因此本研究採用盧昭堯(2005)所提供之 1975~2000 年的資料，但在全球氣候變遷衝擊評估之研究上，通常皆採用 1991~1990 年之資料代表現況，因此往後宜以 1991~1990 年為基礎，研究 CLIGEN 模式於台灣地區之適用性，以便與其他相關研究在同一基準上作比較。

參考文獻

1. 史婉麗、楊勤科、穆婉紅(2006), 隨機氣候生成器在黃土高原的適用性檢驗, 中國水土保持科學, 4(2): 18-23。
2. 吳志剛、楊道昌、游保杉(2002), 氣候變遷對高屏河流域水資源衝擊探討, 第十一屆水利工程研討會, p81-83, 台北市。
3. 吳明進(2001), 台灣環境變遷與全球氣候變遷衝擊之評析-子計畫-台灣環境變遷與全球氣候變遷衝擊之評估-氣候變遷(三)-Part II-水資源國科會專題報告研究計畫成果報告 NSC-89-2621-Z-002-037。
4. 吳藝昀(2004), 台灣地區降雨沖蝕指數之修訂, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
5. 童慶斌(2003), 氣候變遷與環境生態講義, 台灣大學生物環境系統工程學系, 第三章。
6. 童慶斌、吳明進、張斐章、李明旭、柳文成、謝龍生(2002), 氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建置-氣候、水文、生態部分(一), 行政院環境保護署專題研究計畫報告, EPA-91-TA11-03-A100。
7. 張光輝(2004), CLIGEN 天氣發生器在黃河流域的適應性研究, 中國水土保持學報, 18(1): 175-178。
8. 楊文仁、范正成、張于漢(2005), 台灣北部地區最大三十分鐘降雨強度之分析及預測, 農業工程學報, 51(3):48-57。
9. 盧昭堯等人(1997), 台北地區降雨特性及其與土壤沖蝕性關係之研究, 國科會專題研究計畫報告, NSC-86-2621-P-005-009。
10. 盧光輝(1999), 降雨沖蝕指數之修訂, 中華水土保持學報, 30(2):87-94。
11. 盧昭堯、蘇志強、吳藝芸(2005), 台灣地區年降雨沖蝕指數圖之修訂, 中華水土保持學報, 36(2):159-172。
12. Arnoldus, H. M. J. 1980. An approximation of rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In Assessment of Erosion, 127-132. M. De Boodt and D Gabriels, eds. New York, N.Y.: John Wiley and Sons.
13. Arnold, C. D., and W. J. Elloit. 1996. CLIGEN weather generator predictions of seasonal wet and dry spells in Uganda. Trans. ASAE 39(3): 969-972.
14. Elloit, W. J., and C. D. Arnold. 2001. Validation of the weather generator CLIGEN with precipitation data from Uganda. Trans. ASAE 44(1): 53-58.
15. Brown, L. C. and G. R. Foster. 1987. Storm erosivity using idealized intensity distribution. Transaction of the ASAE 30(2):379-386.
16. Chen, S. C., M. C. Wu, S. Marshall, H. H. M. Juang, and J. O. Roads, 2002: 2xCO₂ Eastern Asia Regional Responses in the RSM/CCM3 Modeling System. Global and Planetary Change. A Special Issue, 782, 1-9.
17. IPCC, WGI, 2001. Climate Change 2001-The Scientific Basis: Contribution of Working Group I, to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson. 2001, Cambridge University Press, Cambridge, 2001, 881pp.
18. Nearing, A. M. 2001. Potential changes in rainfall erosivity in the U. S. with climate change during the 21st century. J. Soil and Water Conserv. 56(3):229-232.
19. Plumb, R.A. and J. D. Mahlman, 1986, The zonally averaged transport characteristics of the GFDL general circulation/transport model, Journal of the atmospheric science, (44), p. 298-327
20. Yu, B. 2002, Using CLIGEN to generate RUSLE climate inputs. Transactions of the ASAE, Vol. 45(4): 993 1001.

收稿日期：民國 96 年 3 月 19 日
修正日期：民國 96 年 7 月 25 日
接受日期：民國 96 年 7 月 27 日