

應用 TRIGRS 分析集水區中尺寸坡地入滲與穩定性

馮正一⁽¹⁾、劉怡安⁽²⁾、張育瑄^{*(3)}

摘要

本研究選定苗栗大湖鄉南湖溪中尺寸集水區為主要研究區位，利用 TRIGRS 程式模擬降雨入滲並分析坡地安全性。以敏督利颱風雨量及不同解析度之數值高程地形(DEM)模擬不同參數因子變化下之坡地安全性，配合既有的調查資料作比較，驗證程式模擬結果的情形，藉此在有限的野外調查資料下，估算合理化資料、參數，瞭解各影響參數因子與坡地穩定性之對應性。

(關鍵字：TRIGRS、入滲、穩定性)

Application of TRIGRS to Analyze Slope Infiltration and stability in Medium Size Watershed

Zheng-yi Feng

Associate professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University,
Taichung402, Taiwan, ROC

Yi-an Liou

Senior student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University,
Taichung402, Taiwan, ROC

Yu-hsuan Chang

Doctoral graduate student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing
University, Taichung402, Taiwan, ROC(Corresponding Author)

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 副教授

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系 學士生

⁽³⁾ 國立中興大學水土保持學系 博士生，*通訊作者

E-mail:rainboy7492@gmail.com

ABSTRACT

This research chooses the medium size watershed, Nan-hu Creek watershed in the Miao-li Hsan, as the study area. TRIGRS program is applied to simulate rainfall, infiltration and analyze stability. Using the rainfall records of Typhoon Mindulle and digital elevation models (DEM) of various resolutions, parametric study for the influencing factors is performed. Compared with a few investigation data, the outcomes of simulation are evaluated. Under limited field records, reasonable parameters and information are estimated to understand the correlation of the influencing factors and slopeland safety.

(Keywords: TRIGRS, infiltration, stability)

前言

由於人口快速的成長、土地大量的開墾、以及林木資源的過度砍伐，造成了森林的減少，加以石化能源大量的使用、自然生態逐漸失去平衡，導致全球氣候快速變遷。使得氣溫、雨量之變化更趨兩極化、旱澇並現的現象頻仍，再加上台灣脆弱的地質條件、地震頻繁的地理特性，開始使得原先於暴雨季節前呈現蟄伏狀態的山崩、地滑、土石流等自然災害，提早於春天的梅雨季節隨著萬物甦醒，對民眾造成生命財產的威脅和損失的程度及範圍更勝以往。

隨著防災意識的逐漸抬頭，事前的防災與減災成為目前的首要課題，再加上台灣降雨強度不穩定與降雨時空常分布不均，使得現今坡地災害的規模與以往已不可同日而語，由於坡地災害破壞的能力與發生的時間、地點之不確定性，更使得對災害事前之研判、相關風險上的評估與研發不同的災害評估方法逐漸為人們所重視，以便於提升防災救災的能力、加強對於災害的應變能力，

用以降低或避免不必要的生命喪失或財產上的損失。

故本研究選定於七二水災時曾造成下游嚴重災害的苗栗大湖鄉南湖溪集水區為本研究試區。以 TRIGRS 程式(Baum, et al., 2002)模擬進行中尺寸集水區坡地的入滲與穩定分析，分析各參數對邊坡入滲與穩定性的影響，進而作為將來崩塌地潛勢分析之參考依據。

相關文獻

鄭錦桐人等(2009)對於石門水庫集水區之土砂災害監測及評估技術上有提及可用 TRIGRS 模式模擬單場降雨之入滲並配合無限邊坡理論，以模擬石門水庫集水區邊坡的穩定性，用以預測集水區崩塌之分布情況。

陳建元(2005)針對象神颱風連續降雨所誘發位於龍潭堵隧道附近之田寮地滑，經由鑽探、雨量站、田野調查得取土壤特性、水力傳導度、時雨量等 TRIGRS 模式所需輸入資訊，透過 GIS 空間分析功能予以標準化，

以滿足 TRIGRS 模式之邊坡由同質等向性土壤所構成的假設，結合降雨強度與超額孔隙水壓的變化，使之更了解降雨入浸誘導地滑之機制，進行崩塌地潛勢分析。並建議可以結合 GIS 空間分析功能，將二維邊坡穩定性分析拓展至三維，以彌補二維邊坡穩定分析之不足。

吳佳郡(2006)以桃芝颱風為降雨資料，選定埔里通往仁愛鄉之投 71 線道路為研究區位，利用 TRIGRS 模式進行邊坡穩定分析與各參數因子對其邊坡穩定有何影響，並配合蒙特卡羅法以機率值克服參數因子的不確定性，用以假設 TRIGRS 模式所需輸入參數之數值，並以是否會崩塌的機率取代傳統以單一數值安全係數。另以過剩剪力模式套至三維邊坡穩定分析，以解決 TRIGRS 模式網格間互相獨立與邊坡破壞後剩餘的剪力不會傳遞給周圍網格所造成的邊坡穩定分析上的誤差。且以統計學觀點利用極值雨量分析方法，估算出不同的回歸年限最大降雨量與其機率為何，用以預測將來可能遭遇到的最大降雨量，進行邊坡之風險評估。

研究區域概況

南湖溪集水區位於大湖鄉為後龍溪流域之支流，其地質主要有南庄層、錦水頁岩層、卓蘭層及沖積層等地層，其土壤大部分是由壤土及零星的極細砂土、粘壤土、砂土所組成。南湖溪又因土砂淤積、河道狹窄，曾在 2004 年敏督利颱風造成南湖溪下游嚴重淹水。圖 1 為南湖區集水區之區位圖。

研究方法

針對主要研究地區苗栗大湖鄉南湖溪，進行文獻蒐集及資料整理，將所蒐集的資料加以研析，以地理資訊系統(GIS)以數位化型式蒐集空間資料，利用 TRIGRS 程式模擬降雨、逕流、入滲，並利用 40×40m、10×10m 與 5×5m 之數值地形分析模擬研究區位，進而分析參數因子與坡地穩定性後再利用套疊分析各種圖層，展示其資料，進而評估參數因子與坡地穩定性之關係。

一、TRIGRS 程式理論簡介

TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model) 中譯為「暫態降雨之入滲及以網格為基礎之區域斜坡穩定模式」。此模式可用於計算降雨入滲之暫態孔隙水壓之變化和區域邊坡安全係數之變化。

TRIGRS 係由 FORTRAN 程式撰寫而成的，讀取資料型態為文字檔，需配合地理資訊系統(Geographic Information System)擷取 TRIGRS 所需的輸入參數資料，本研究採用 ESRI ARCGIS9.X GIS 軟體進行分析。其輸入的參數資料主要有 DEM、坡度、土壤深度、每小時降雨資料、地下水位深度、水力傳導度、土體單位重等參數因子。在此模式中分析研究區位時，需考慮研究所需之精確度將此研究區域以固定大小之網格呈現之，且網格間彼此獨立、不互相影響。藉由各網格上不同的初始入滲率、坡度、水力傳導度等參數，隨著降雨時間變化而呈現不同之孔隙水壓與安全係數，用此分析模擬研究區域之入滲與邊坡穩定性之情況。

TRIGRS 利用初始入滲率、水力傳導度、坡度與水流流向，再配合降雨資料、水力擴

散度等資料，計算降雨造成的入滲暫態孔隙水壓之變化。該模式假設每網格可入滲的土壤組成為均質均向且接近於飽和的土壤，在計算逕流時假設每個網格同時產生逕流現象，忽略實際上溪流對逕流的影響，並預期在暴雨時期蒸發散量很小，忽略蒸發散所損失的量。TRIGRS 之分析依據建立在 Iverson (2000)拓展理查(Richard)方程式之線性解而

來，可用於計算入滲均勻且可無限土壤入滲之穩態情況(圖2)與入滲達某一極限入滲率不均勻之暫態情況(圖3)，例如現地為岩盤上之崩積土入滲的研究。典型輸入降雨與垂直地面的水力傳導度變化分布圖、壓力水頭變化分佈，如圖4所示，圖5為一般坡地之降雨入滲情形示意。

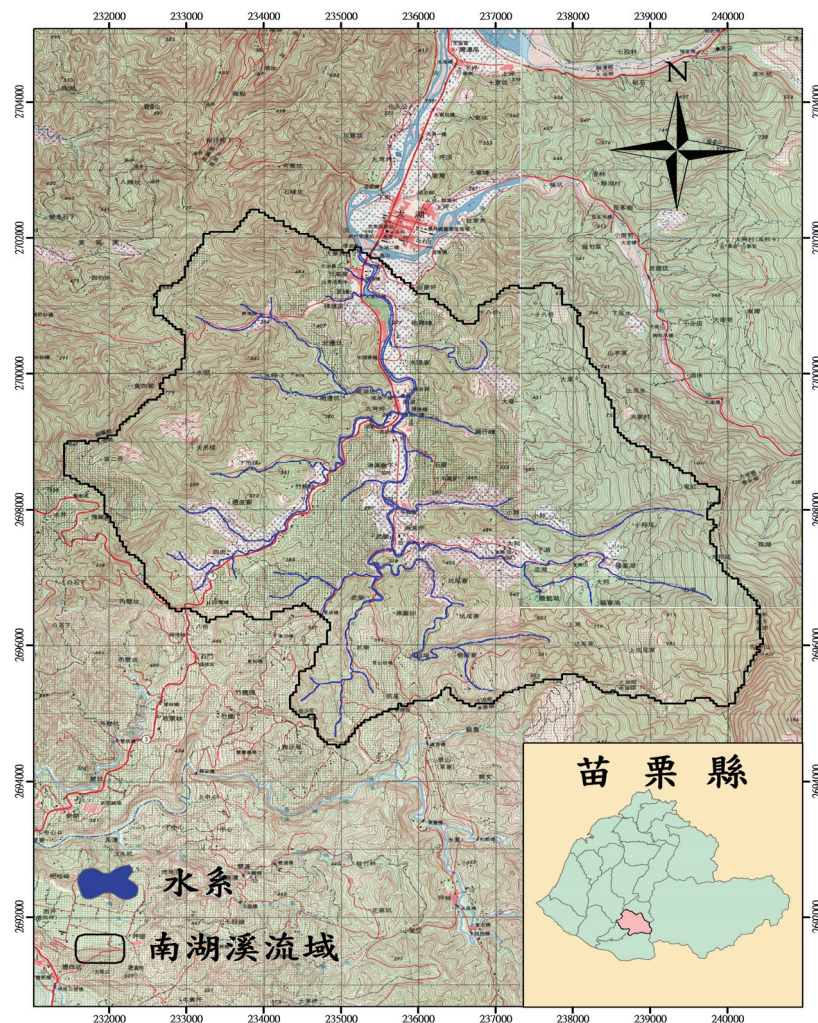


圖1 為南湖區集水區之區位圖

Figure1 Location of Nan-hu Creek watershed

TRIGRS 程式安全係數之計算係土壤本身的凝聚力與不飽和土壤之基質吸力(Matrix suction)結合為總凝聚力 C 值及其摩擦角 ψ 值之觀念，主要建立於無限邊坡安全係數，如公式(1)，其中 $\phi(Z,t)$ 為壓力水頭隨深度與時間的變化、 α 為坡面角度、 γ_s 為土壤單位重、 γ_w 為水單位重。其計算安全係數公式如下：

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c - \phi(Z, t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

一般而言，安全係數則會隨著凝聚力與摩擦角 ψ 值越大，安全係數越大；地下水位愈高安全係數則越小。

二、分析步驟

依照各地的氣候、母岩、生物、土壤化育等條件的不同，故相對於各地的土壤性質差異也不小，單論砂土的水力傳導度就可能有 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ m/sec 或更大之差異，甚至在同一地點的土壤性質，亦會隨著時間而有所變化。取得分析參數最直接的方法是將現地土壤進行相關的土壤物理試驗，但亦會因土體受擾動或人為因素，而使土壤參數變異性大，故實際要準確得知該地的土壤性質並不容易。本研究在缺少詳細鑽探資料與試驗下，參數的選取主要是依土壤分布圖與參考前人的研究，合理評估研究區位的資料與參數，討論各因子的影響性。

(一) 地形資料處理

利用 ARCGIS 的空間分析模組(Spatial Analyst) 與 水文分析模組 (Archydro Analyst)，依地形、水系建立研究集水區範

圍，再將研究區位的 DEM 資訊處理成 TRIGRS 模式所需的流向、坡度圖層。再應用 3D 分析模組(3D Analyst)與 GIS 轉檔工具(Conversion Tools)，輸出 TRIGRS 所需輸入的文字資料輸入檔。

(二) 降雨資料

民國 93 年 7 月敏督利颱風(國際命名：MINDULLE)為最典型由颱風外圍環流引進的強烈西南氣流，其所帶來的災情更甚該颱風的直接侵襲所造成的災害，隨著引進強烈西南氣流降雨，造成連續 4~5 天相當劇烈的雨勢，中部山區累積雨量高達 1,700 毫米，以致中南部地區因連日豪雨造成多處山洪爆發、淹水及土石流災情。(中央氣象局網站 2008)

本研究模擬敏督利颱風對南湖流域之影響。降雨資料則是選取鄰近南湖流域的雨量站，分別為三義、大湖、公館、南湖、和興與新開等 6 個雨量站，利用 GIS 針對每小時雨量利用內插法求得各網格之雨量，作為後續分析之用，如圖 6 所示，以 93 年 7 月 3 日 9 時之時雨量為例繪製成等雨量線。

(三) 參數因子之選用

TRIGRS 所需輸入的文字檔參數資料主要有 DEM、坡度與每小時降雨資料，已在前節多所描述；另需輸入參數之選取，例如：土壤深度、凝聚力、地下水位深度、水力傳導度、土體單位重等其他參數因子，將在此節予以論述。

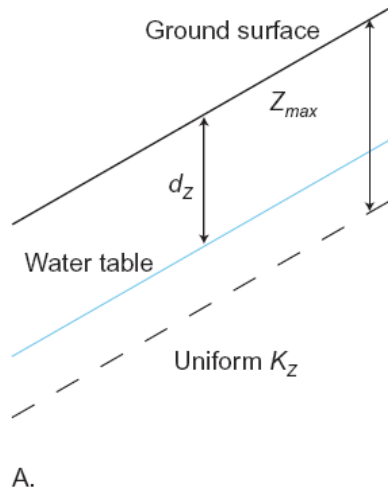


圖 2 土壤均勻且可無限入滲之穩定情形(Baum, et al.2002)

Figure2 Steady state infiltration of uniform soil and infinite-depth(Baum, et al.2002)

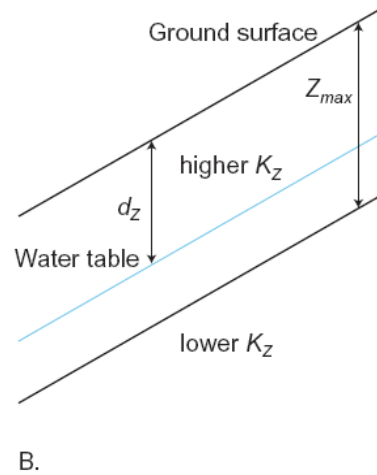


圖 3 土壤不均勻之暫態情況(Baum, et al.2002)

Figure3 Transient infiltration of non-uniform soil and finite-depth(Baum, et al.2002)

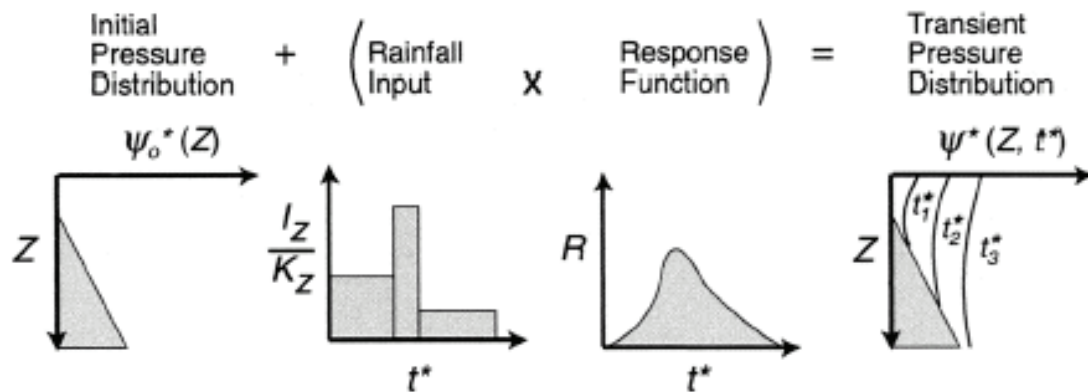


圖 4、降雨輸入值與垂直地面的水力傳導度變化分布圖、壓力水頭變化分布圖(摘自 Iverson , 2000)

Figure4 Schematic of rainfall input and pressure head response (after Iverson , 2000)

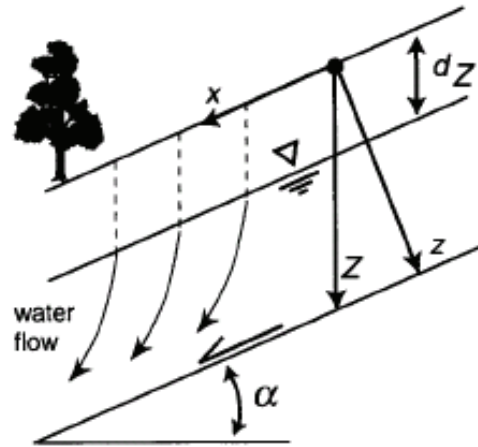


圖 5、坡地之降雨入滲示意圖(摘自 Iverson, 2000)

Figure5 Schematic of rainfall-infiltration on slope (after Iverson , 2000)

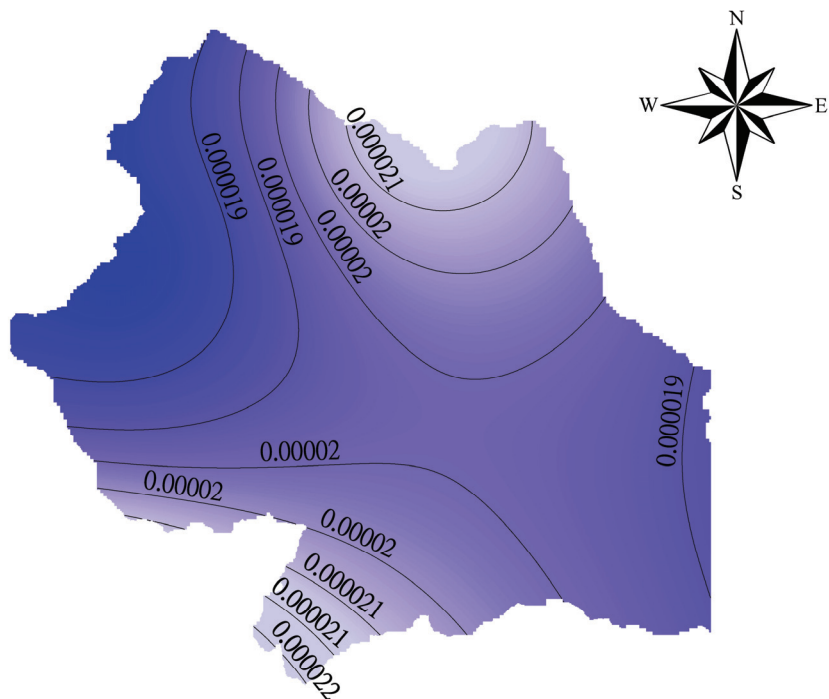


圖 6 為敏督利颱風後(93 年 7 月 3 日 9 時)之等雨量線圖(單位 m/s)

Figure6 Isohyets of Typhoon Mindulle at am9:00 on 1997/07/03 (unit:m/s)

由於土壤參數取得不易，隨著空間與時間之變異其參數因子亦會有很大的差異。故本研究之參數因子選取參考為吳佳郡(2006)文獻，如表 1 所示，採用凝聚力為 24 KPa、摩擦角為 32°、土體單位重為 19 KN/m³。由於 TRIGRS 假設其入滲的土壤成為同質、等向、近乎飽和的土壤，故本研究假設其入滲率與水力傳導度相同、水力擴散度則參照吳佳郡(2006)文獻通常為水力傳導度的 10~400 倍，故假設其水力擴散度為水力傳導度的 100 倍。水力傳導度主要參照廖美瑩(2006)所選定 Rawls, Brakensiek and Miller(1983)利用格林-安普入滲公式取樣分析全美國約 5000 個水平層土壤樣本，對不同種類土壤分析所求得水力傳導係數，如表 2 所示。本研究為了比較入滲參數變化之差異性，另參照陳朝龍(2002)研究選取廖朝軒(2000)在山洪潛勢區減災及防治措施規劃中所使用的入滲率，與格林-安普入滲公式參數 Rawls, Brakensiek and Miller(1983)相互比較對於安全係數有何影響，如表 3 所示。

關於現地的土層厚度與地下水位實際情況，因沒有實際鑽探與觀測井等地質、水文資料，故在缺少詳細的現地實測數值下，本研究改變土層厚度與地下水位之數值，進行其對安全性有何影響之探討。

結果分析與探討

一、坡度與土層厚度變化之關連性

依 TRIGRS 程式安全係數之計算公式可得知安全係數會隨著土層深度愈深，數值變

得越小、越趨危險。故先利用試驗區位 DEM10×10 網格，在敏督利颱風 7 月 5 日 24 時點的安全係數分布圖，將其地下水位假設固定為地面下 2m，且由於本試區主要是在河川上游，其覆土深度不如平地可達十幾二十公尺，故分別模擬土層在 4m、6m 與 7m 之安全係數變化之情況，探討其與坡度大小的關連性。圖 7 為土層 4m、地下水位 2m 安全係數分布圖。圖 8 為土層 6m、地下水位 2m 安全係數分布圖。圖 9 為土層 7m、地下水位 2m 安全係數分布圖。

透過 ESRI ArcScene 套疊 DEM10×10 與安全係數的分佈圖，可知在坡度比較大的點位的安全係數數值變化量比坡度較小的點位越趨明顯、越不穩定。

通常在坡度較陡處，覆土深度會相對較薄，坡度較緩處，覆土深度通常會比較厚。但由於在欠缺詳細的土壤資訊下，本研究將整個試區覆土深度先設為相同數值，未來如有更詳盡的覆土深度資料，當能再一次依本研究之方法，進行更符合實際情況的分析。

二、地下水位變化之差異性

於 TRIGRS 程式安全係數之計算公式，可知該坡地穩定性會隨著地下水位之上升，造成壓力水頭增加，而越趨危險。一般地下水位在地表面安全係數為最小，且安全係數會隨著地下水位下降而增大。本試區在參考 Rawls, et al.(1983)研究所得的水力傳導度之情況下，固定覆土深度為 6 公尺、土壤離散化分層為 10 層計算下，分別將地下水位設定為 0 m、2 m、3 m 與 4 m，計算在敏督利颱風

表1 分析所採參數值

Table1 Input parameters for analysis

參數因子	凝聚力	摩擦角	土體 單位重	入滲率	水力 擴散度	水力 傳導度
本研究採用值	24 KPa	32°	19 KN/m ³	同水力擴散度	水力傳導度的 100倍	選用廖美瑩(2006) 及陳朝龍(2002)

表 2 格林-安普(Green-Ampt)入滲公式參數表 (廖美瑩，2006)

Table2 Input parameters of Green-Ampt infiltration equation

土壤類別	水力傳導係數 (K_s) (mm/h)	土壤類別	水力傳導係數 (K_s) (mm/h)
砂土	117.8	粘質壤土	1.0
壤質砂土	29.9	粉質粘壤土	1.0
砂質壤土	10.9	砂質粘土	0.6
壤土	3.4	粉質粘土	0.5
粉質壤土	6.5	粘土	0.3
砂質粘壤土	1.5	-	-

表 3 入滲率參考表 (陳朝龍，2002)

Table3 Input parameters of infiltration rate

土壤類別	入滲率 (K_s) (in/hr)	土壤類別	入滲率 (K_s) (in/hr)
砂土	8.27	粘質壤土	0.09
壤質砂土	2.41	粉質粘壤土	0.06
砂質壤土	1.02	砂質粘土	0.05
壤土	0.52	粉質粘土	0.04
粉質壤土	0.27	粘土	0.02
砂質粘壤土	0.17	-	-

7 月 5 日 24 時點的安全係數分布圖有何差異。地下水位 0 m 代表地下水位在地表面，而地下水位 2 m 則是代表地下水位在地表下 2m，以此類推。

並依上述參數條件設定下，由不同水位設定之安全係數差異值百分比分布圖，如圖 10、圖 11 與圖 12 得知在本案例大部分的研究區域的安全係數都沒有改變，只有在南湖溪中間某特定河段與其上游之特定邊坡的安全係數有產生變化。而將安全係數分布圖與安全係數差異百分比分布圖兩相比較，在此南湖溪中間某特定河段大多安全係數為 3 以上，故就此推測該地下游安全係數應不會因為地下水位的變化而有太大的邊坡不穩定之跡象發生。但其上游之特定邊坡安全係數數值較小，則該地安全係數很有可能隨著地下水位的變化而有邊坡不穩定之跡象產生。

三、土壤離散化分層變化之差異性

在本研究區位所設定土壤的水力傳導度依照格林-安普入滲公式參數的條件下，且覆土厚度為 6 公尺、地下水位 2 公尺，改變土壤離散化(discretized)分層 nzs 數值，分別設定為 5、15、20 次層，計算該區在敏督利颱風 7 月 5 日 24 時點的安全係數分布圖有何變化。

依不同土壤離散化分層(nzs)數值，由其安全係數分布圖相互比較可知，土壤離散化分層(nzs)數值在上述參數設定條件下，安全係數並無明顯變化發生。藉此推測在覆土厚度不深情形下，進行往後其他研究時可將土壤離散化分層 nzs 數值設為 5，即可達到所需的精度。

四、入滲參數變化之差異性

在本研究區位所設定覆土厚度為 6 公尺、地下水位 2 公尺、土壤離散化分層 nzs=10，分別比較 Rawls, Brakensiek and Miller(1983)與廖朝軒(2000)之入滲率，計算該區在敏督利颱風 7 月 5 日 24 個小時降雨的安全係數分布圖之變化，而廖朝軒(2000)使用之入滲率數值普遍比 Rawls, Brakensiek and Miller(1983)的數值大。圖 13 為使用 Rawls, Brakensiek and Miller(1983)入滲係數的安全係數分布圖。圖 14 為參考廖朝軒(2000)入滲係數的安全係數分布圖。

由圖 15 的安全係數分布圖與部分航照套疊圖可得知假設的入滲率數值較大時，其研究區域之安全係數會趨於降低。而由圖 16 亦可得知 TRIGRS 程式運算出安全係數在 1 以下的區位，並非位於建築物、河道或農田的區域，而是分布在河段之河岸兩側或是在較高的邊坡上。

五、分析網格大小不同的差異性

此項分析目的主要是分析網格大小不同對現地安全係數有何影響，並藉由不同網格大小的安全係數分布圖，選定某特定的網格大小可於程式運算的最短時間內，達到所需研究之精度。

由於此項試驗 DEM 5×5、DEM 10×10、DEM 40×40 之資料來源有所差異，故某些區域安全係數會有所差異，建議可以使用相同的 DEM 來源資料內插進行分析比較，以減少誤差的出現，但是大致來說，以 DEM 10×10 的網格所運算出的安全係數，大致與 DEM

5×5 相符，所以就本試驗欲達之精度，以 經濟的網格大小。
DEM 10×10 的網格運算，即可達成目的之最

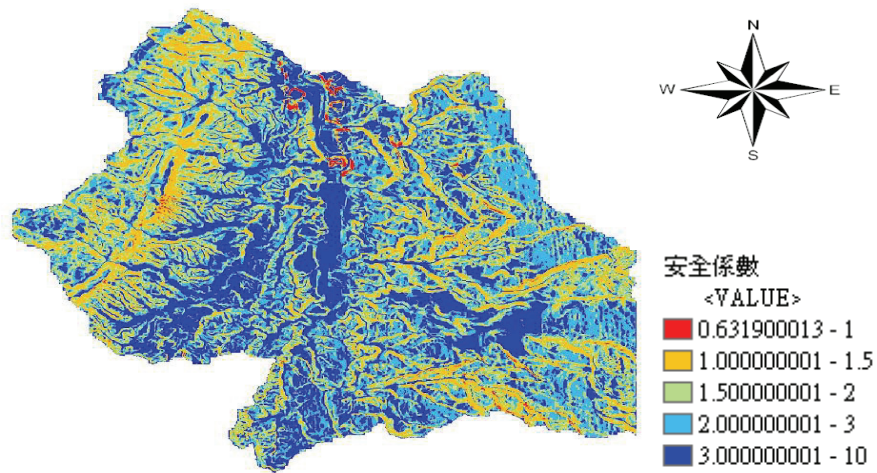


圖 7、土層為 4m，地下水位為 2m 之安全係數分布圖

Figure7 Calculated factor of safety for the soil depth of 4m and ground water table of 2m

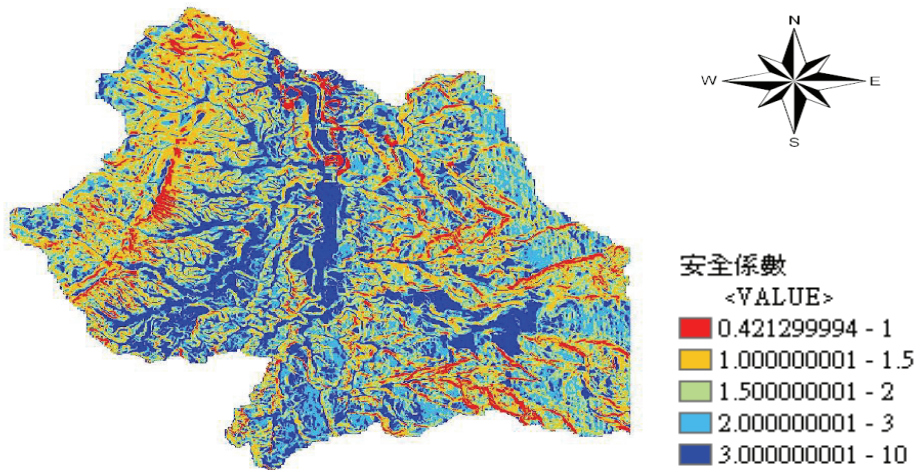


圖 8、土層為 6m，地下水位為 2m 之安全係數分布圖

Figure8 Calculated factor of safety for the soil depth of 6m and ground water table of 2m

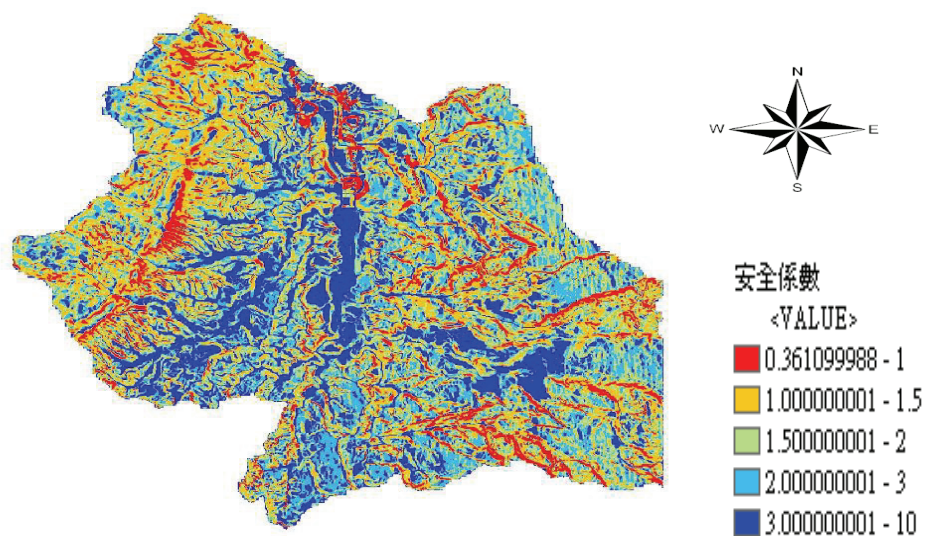


圖 9、土層為 7m，地下水位為 2m 之安全係數分布圖
Figure9 Calculated factor of safety for the soil depth of 7m and ground water table of 2m

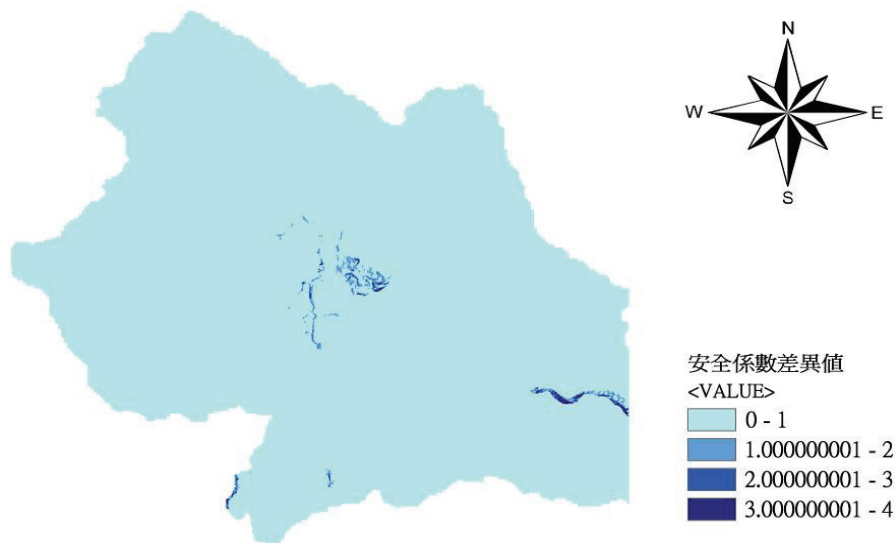


圖 10 地下水位 2m 與地下水位 0m 之安全係數差異值百分比分布圖
Figure10 The percentage of variation in factor of safety when groundwater table at 2m and 0m

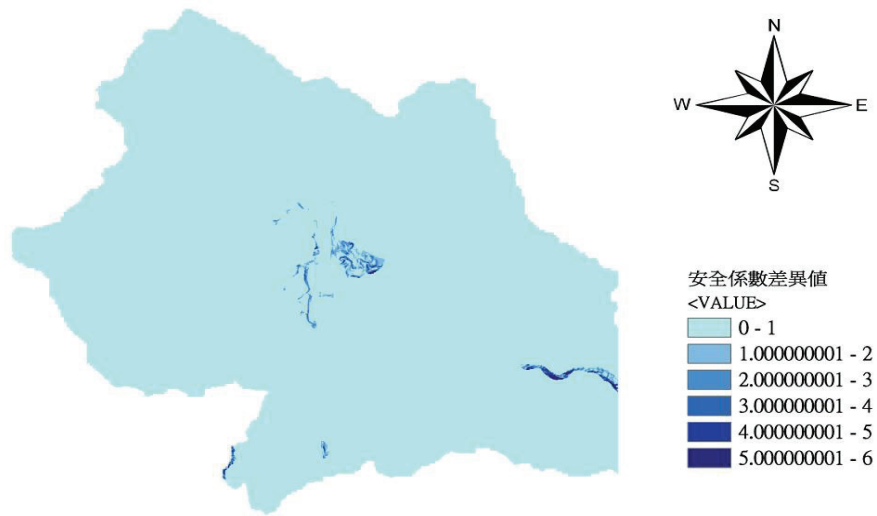


圖 11 地下水位 3m 與地下水位 0m 之安全係數差異值百分比分布圖

Figure11 The percentage of variation in factor of safety when ground watertable at 3m and 0m

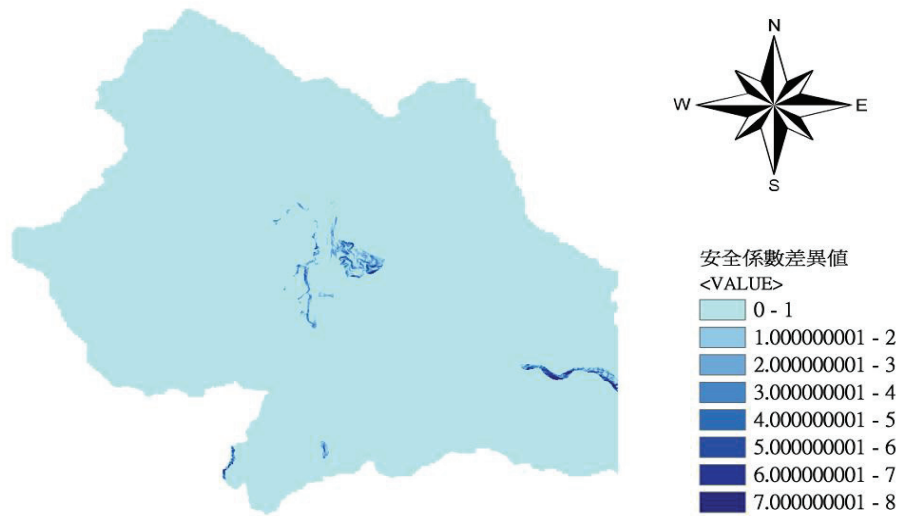


圖 12 地下水位 4m 與地下水位 0m 之安全係數差異值百分比分布圖

Figure12 The percentage of variation in factor of safety when ground water table at 4m and 0m

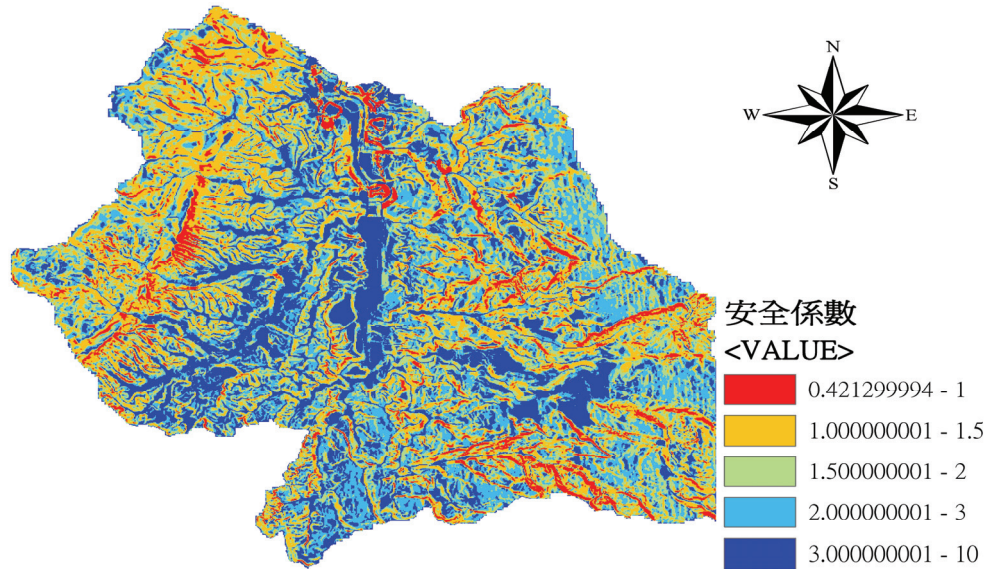


圖 13 使用 Rawls, et al.(1983)入滲參數的安全係數分布圖
 Figure13 Factor of safety by using the infiltration parameters of Rawls, et al. (1983)

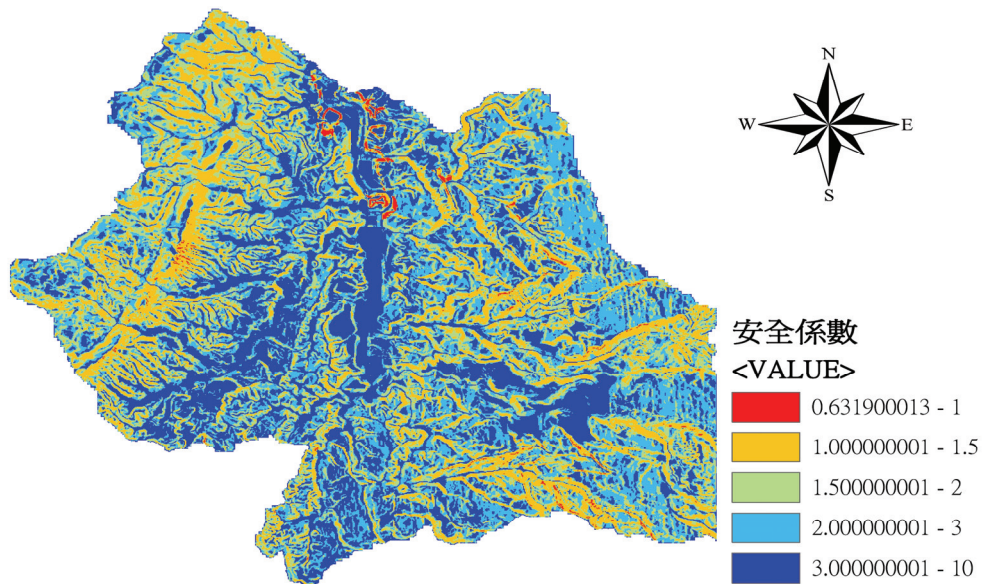


圖 14 使用廖朝軒(2000)入滲參數的安全係數分布圖
 Figure14 Factor of safety by using the infiltration parameters of Liao(1983)

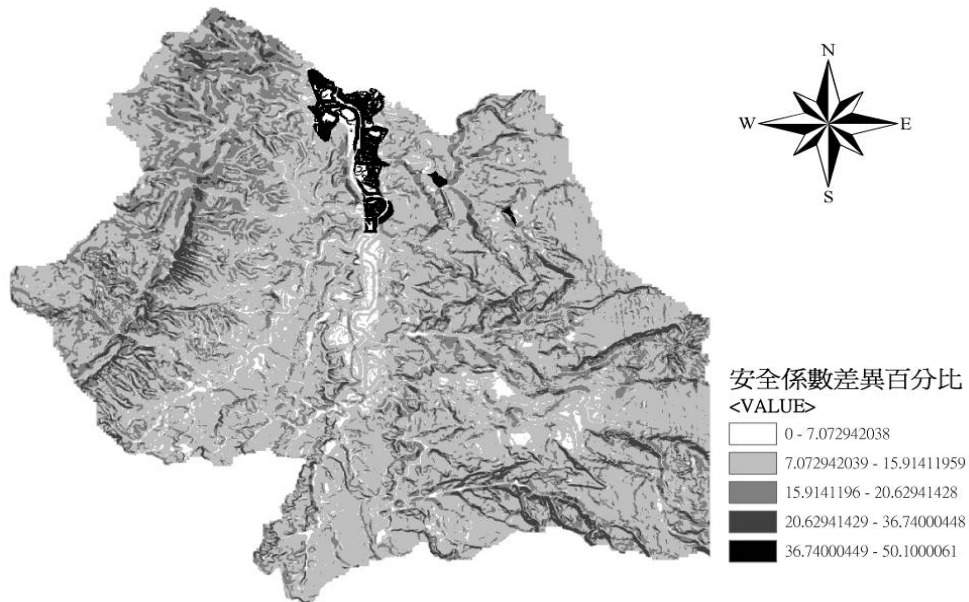


圖 15 入滲率變化的安全係數差異百分比分布圖

Figure15 The percentage of variation in factor of safety changed by infiltration rate

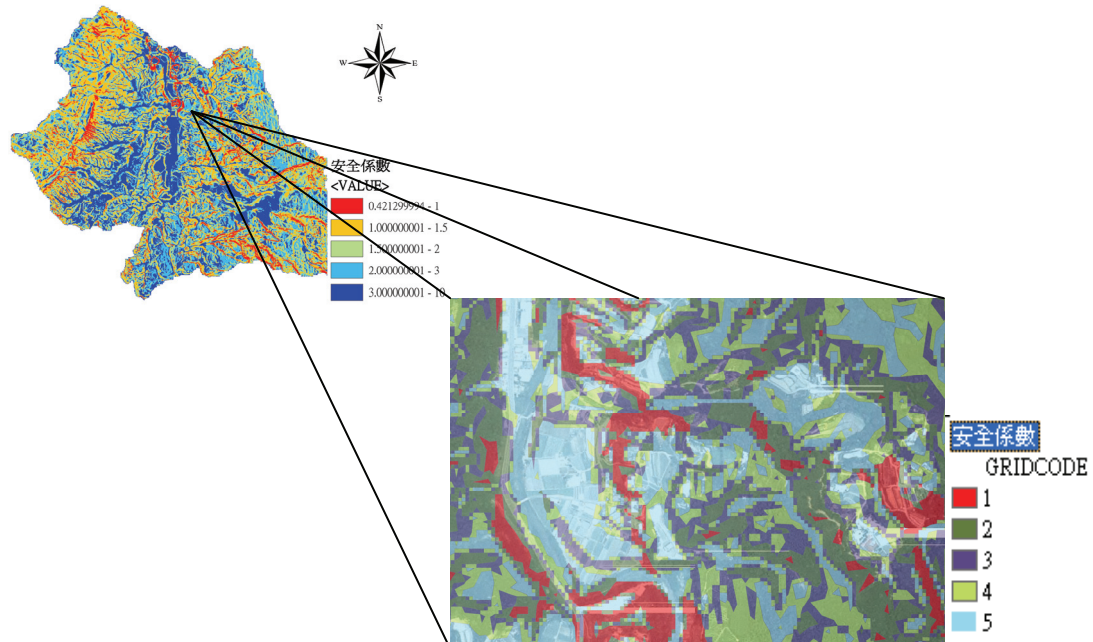


圖 16 使用 Rawls, et al.(1983)入滲參數的安全係數分布與部分航照套疊圖

Figure16 Overlapping the aero photo and factor of safety by using the infiltration parameters of Rawls, et al. (1983)

結論與建議

本研究應用 TRIGRS 程式對苗栗南湖溪中尺寸集水區流域，進行入滲、逕流模擬以求得安全係數，並利用不同參數因子之變化，或不同降雨時空之變化情形的輸入資料，將其計算之結果進行「坡度與土層厚度變化之關連性」、「地下水位變化之差異性」、「土壤離散化分層變化之差異性」、「入滲參數變化之差異性」與「分析網格大小不同的差異性」等參數研究之分析。本研究獲得的結論如下：

1. 利用 TRIGRS 程式安全係數之計算公式，安全係數會隨著土層深度愈深，數值變得越小。
2. 依 TRIGRS 程式安全係數之計算公式，坡地穩定性會隨著地下水位之上升，造成壓力水頭增加，而越趨危險。但在本研究之分析案例此現象並不明顯，推測可能為水力傳導度偏小導致入滲水量不多，故安全係數變化不大。
3. 依「土壤離散化分層變化之差異性」分析結果，不同土壤離散化(discretized)分層 nzs 數值，可推測在覆土厚度不深情形下，其土壤離散化分層(nzs)數值 5~20 所計算之結果並無明顯的差異，故建議覆土深度在 6 公尺以下，可採用土壤離散化分層 nzs=5 之設定。
4. 藉由入滲率差異分析，可知假設的入滲率數值較大時，其研究區域之安全係數會趨於降低，且入滲率差異所造成的邊坡穩定性之影響，在下游河道沿岸更趨顯著。
5. 對於網格尺寸的選用，由分析成果之比較，

以 DEM 精度 10×10m 網格進行計算為最適宜且計算時間經濟之網格大小。

誌謝

本研究得以順利進行，必須感謝國科會計畫(NSC 96- 2815-C-005-048-B)的經費補助。

參考文獻

1. Baum, R.L., Savage, W.Z., Godt, J.W. (2002) TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. USGS Open-file Report 02-424. . .
2. Iverson, R.M. (2000) Landslide triggering by rain infiltration, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.36, NO.7, pp.1897-1910
3. Chen Chien-Yuan, Chen Tien-Chien, Yu Fan-Chieh, Lin Sheng-Chi (2005) Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide, Environmental Geology, Volume 48, Numbers 4-5, pp. 466-479.
4. 鄭錦銅、林柏勳、蕭震洋、梁惠儀、許振崑、冀樹勇、連榮吉、林柏壽、張州男 (2009) 石門水庫集水區之土砂災害監測及評估技術，土木水利，民國 98 年 4 月。
5. 吳佳郡 (2006)，降雨誘發山崩之潛感分析初探，暨南國際大學土木工程學系碩士論文。
6. 廖美瑩 (2006)，不同透水鋪面基層對入滲影響之研究，中國科技大學土木與防災應用科技研究所碩士論文。
7. 陳朝龍 (2002)，山坡地生態土地利用適宜

馮正一、劉怡安、張育瑄：應用TRIGRS分析集水區中尺寸坡地入滲與穩定性

性規劃--以汐止市為例，中國文化大學地
學研究所碩士論文。

8. 氣象局網站 <http://www.cwb.gov.tw/> 參
看日期 2008.1.30

98年05月12日 收稿

98年05月18日 修改

98年06月01日 接受