

出國報告（出國類別：考察）

坡地地質敏感區劃設與危險度評估 作業方法研究

服務機關：經濟部中央地質調查所

姓名職稱：紀技正宗吉

派赴國家：義大利

出國期間：94年6月25日至94年7月24日

報告日期：94年10月19日

行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：坡地地質敏感區劃設與危險度評估作業方法研究		
出國人姓名	職稱	服務單位
紀宗吉	技正	經濟部中央地質調查所
出國期間：94年6月25日至94年7月24日		報告繳交日期：94年10月19日
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整（本文必須具備「目的」、「過程」、「心得」、「建議事項」） <input type="checkbox"/> 3.內容充實完備 <input type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> ←不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> ↑以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> →內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> ↓電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> °未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9.其他處理意見及方式：	
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 2.退回補正，原因：_____ <input type="checkbox"/> 3.其他處理意見：	

「坡地地質敏感區劃設與危險度評估作業方法研究」

赴義大利出國考察報告

摘要

台灣島因其獨特之地質條件（如位居活動板塊邊界、地震頻繁、岩性破碎及構造複雜）及地理特性（高溫多雨及地形陡峻），又因土地高度開發，帶來日益嚴重之地質災害。為因應未來地質法及國土計畫法有關地質敏感區之認定及公告需要，經濟部中央地質調查所自民國 91 年起即辦理都會區周緣坡地之環境地質基本資料調查建置、研訂地質災害敏感區劃設等相關計畫。義大利國科會水文地質防災研究中心長期致力於山崩災害調查評估等相關研究，成效斐然。尤以山崩敏感區災害危險評估方法與技術發展，在國際上甚為先進，對於我國未來地質災害敏感區劃設與危險度評估，有值得參考借鏡與學習之處。因此藉由此次參訪義大利國科會，並以台灣之案例共同研究，以實地了解研究方法與學習操作過程。本次考察主要對象為義大利國科會水文地質防災研究中心地貌研究組 (Geomorphological group) Dr. Fausto Guzzetti 等。考察內容包括（1）山崩目錄圖編製方法，（2）山崩航照判釋方法，（3）航照地質判釋方法，（4）山崩敏感區危險度評估原理，（5）“Stone” 程式用於落石災害危險評估，（6）台灣山崩敏感圖案例試作等。

目錄

摘要

壹、考察目的	1
貳、考察對象與行程	2
參、考察過程與發現	4
3.1 山崩目錄圖編製方法	4
3.2 山崩航照判釋方法	6
3.3 航照地質判釋方法	12
3.4 山崩敏感區危險度評估原理	15
3.5 “Stone” 程式用於落石災害危險評估	19
3.6 台灣山崩敏感圖案例試作	23
肆、心得與建議	29
伍、參考文獻	31
陸、誌謝	32

壹、考察目的

台灣島因其獨特之地質條件（如位居活動板塊邊界、地震頻繁、岩性破碎及構造複雜）及地理特性（高溫多雨及地形陡峻），又因土地高度開發，帶來之災害因而更加嚴重。根據張石角教授調查(1994)台灣過去 20 年之重大山崩災害共 251 件，傷亡人數高達 495 人，房屋毀損 1382 間。其中較嚴重者有民國 40 年的草嶺大崩山造成死傷逾百人的重大傷亡、民國 71 年西仕颱風造成五股泰山地區發生山崩、土石流的重大災情，民國 79 年歐菲莉颱風導致花蓮銅門土石流災害。到近年來，則以民國 85 年賀伯颱風引發中部地區嚴重崩塌與土石流的慘劇。民國 88 年 9 月 21 日集集大地震造成中部災區山崩達 21900 處，民國 89、90 年相繼發生豪雨及風災，中部災區及花蓮暴發 135 條土石流，二百餘人死亡。

依地質法之定義，地質災害包括自然或人為引發之地震、火山、斷層活動、山崩、地滑、土石流、地層下陷、海岸變遷或其他地質作用所造成之災害。地質法草案第九條則規定主管機關得將有發生地質災害之虞之地區，公告為地質敏感區，必要時並得會同相關目的事業主管機關依相關法令規定採取防治措施。地質敏感區之認定標準及公告程序，由中央主管機關定之。

為因應未來地質法有關地質敏感區之認定及公告之需要，經濟部中央地質調查所自民國 91 年起即辦理都會區周緣坡地之環境地質基本資料調查建置、研訂地質災害敏感區劃設相關規範及進行地質災害敏感區之劃設等相關計畫。

義大利國科會水文地質防災研究中心(Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica)長期致力於山崩災害調查評估等相關研究，研究成果經常發表於國際性刊物，成效斐然。其中尤以山崩敏感區災害危險評估方法與技術發展，在國際上甚為先進，對於我國未來地質災害敏感區劃設與危險度評估，有值得參考借鏡與學習之處。因此藉由此次參訪義大利國科會，並以台灣之案例共同研究，以實地了解研究所用方法與學習操作過程。

貳、考察對象與行程

本次行程主要考察義大利國科會水文地質防災研究中心 (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica) 地貌研究組 (Geomorphological group) Dr. Fausto Guzzetti Mr. 、Mauro Cardinali Miss 、Paola Reichenbach 、Francesca Ardizzowe 等人。主要考察日程及內容詳如下表 1。

表 1 主要考察日程及內容

日 期	行 程 內 容
6 月 25 日 (星期六)	往程：台北-義大利佩魯嘉
6 月 26 日 (星期日)	往程：台北-義大利佩魯嘉
6 月 27 日 (星期一)	上午：與 Guzzetti, F.、Cardinali, M.、Reichenbach, P.、Ardizzowe, F.等討論未來四週參訪學習行程，其中包括：Cardinali, M.介紹義大利山崩目錄圖，及 Reichenbach, P.、Ardizzowe, F.對 GIS 資料處理的簡短介紹。 下午：對 Cardinali, M.、Reichenbach, P.、Ardizzowe, F.等介紹台灣中部地區山崩與地質資料，及討論未來研究試作區域。
6 月 28 日 (星期二)	上午：與 Cardinali, M.、Reichenbach, P.討論研究區，最後確定以溪頭北勢溪為研究試作範圍。 下午：進行台灣研究試作區分析資料處理。
6 月 29 日 (星期三)	上午：進行台灣研究試作區分析資料處理。 下午：針對義大利山崩目錄圖之編製方式進行了解。
6 月 30 日 (星期四)	義大利 Tiber 河上游集水區山崩敏感圖製作方法討論。
7 月 1 日 (星期五)	義大利 Tiber 河上游集水區航照地質圖與山崩目錄圖製作方法討論。
7 月 2 日 (星期六)	資料整理
7 月 3 日 (星期日)	資料整理
7 月 4 日 (星期一)	上午：與 Reichenbach, P.利用 arc info grid 功能，進行研究試作區之 dtm 編修，生產集水區數值圖。 下午：與 Cardinali, M.就集水區航照印製 index map，進行航照山崩判釋圈繪討論。
7 月 5 日 (星期二)	義大利中部溫布利亞地區野外土石流考察。
7 月 6 日 (星期三)	與 Cardinali, M.討論航照判釋技巧及標示方法。

7 月 7 日 (星期四)	研習 arcinfo 軟體操作與數值地形處理，集水區相關圖層製作。
7 月 8 日 (星期五)	與 Guzzetti, F.討論落石” stone” 程式模擬原理及操作。
7 月 9 日 (星期六)	資料整理。
7 月 10 日 (星期日)	資料整理。
7 月 11 日 (星期一)	與 Guzzetti, F.討論山崩敏感區危險度評估原理、方法。
7 月 12 日 (星期二)	上午：與 Guzzetti, F.進行台灣研究試作區資料分析討論。 下午：與 Cardinali, M.進行溪頭北勢溪流流域山崩地質航照判釋。
7 月 13 日 (星期三)	與 Cardinali, M.進行溪頭北勢溪流流域山崩地質航照判釋。
7 月 14 日 (星期四)	與 Cardinali, M.進行溪頭北勢溪流流域山崩地質航照判釋。
7 月 15 日 (星期五)	上午：研習落石” Stone” 程式原理與操作。 下午：與 Cardinali, M.進行溪頭北勢溪流流域山崩地質航照判釋。
7 月 16 日 (星期六)	資料整理。
7 月 17 日 (星期日)	資料整理。
7 月 18 日 (星期一)	進行台灣研究試作區資料 GIS 處理。
7 月 19 日 (星期二)	與 Reichenbach, P.、Ardizzowe, F.進行資料統計處理。
7 月 20 日 (星期三)	上午：進行 Stone 落石災害危險分析。 下午：進行溪頭北勢溪流流域山崩地質航照判釋成果轉繪。
7 月 21 日 (星期四)	進行台灣研究試作區山崩敏感圖電腦分析。
7 月 22 日 (星期五)	進行成果討論與資料整理、成果圖印製。
7 月 23 日 (星期六)	返程：義大利佩魯嘉-台北
7 月 24 日 (星期日)	返程：義大利佩魯嘉-台北

參、考察內容與發現

3.1 山崩目錄圖編製方法

山崩目錄圖 (landslide inventory map) 的主要功能乃提供山崩危險評估分析之統計樣本，它載明山崩的位置、發生的時間，以及山崩的類型。山崩目錄圖可以根據不同的目的、方法、範圍、比例尺、航照及資料種類等編製。小比例尺的山崩目錄圖 (小於 1:200,000) 資料通常來自過去所出版之期刊、技術或科學報告，或透過專家訪問，也可以運用小比例尺航照或衛星影像判釋獲得。中比例尺度之山崩目錄圖 (1:25,000 to 1:200,000)，則經由有系統的小比例尺航照判釋及歷史記錄野外查核。大比例尺度之山崩目錄圖 (大於 1:25,000) 通常含蓋較小範圍，航照判釋的比例尺大於 1:20,000，同時配合大量的野外調查工作。

山崩災害目錄圖則是標示過去受到山崩災害的地區，也是透過文獻、期刊、報告的收集整理而成，通常藉以展示全國性範圍的小比例尺的山崩圖件。

山崩地貌圖 (Geomorphological inventory maps) 的編製 (圖 1A)，乃經由系統性二組以上的航照判釋及的野外查核，可能含蓋許多次的山崩事件，因此它所呈現的是一種長期性的山崩所累加的結果。除了依據山崩運動類型有詳細分類 (墜落、滑動、流動、複合型) 外，也依據滑動深度 (shallow、deep-seated)、年代 (recent、old、very old)、活動度 (active、dormant、inactive、stabilized) 加以分類。

事件性山崩目錄圖 (Event inventory maps) 表示一次單一事件如颱風、地震所造成之山崩分布圖 (圖 1B)。

多時性山崩目錄圖 (Multi-temporal inventory maps) 系利用多組不同時間之航照判釋所得到的山崩分布 (圖 1C)。

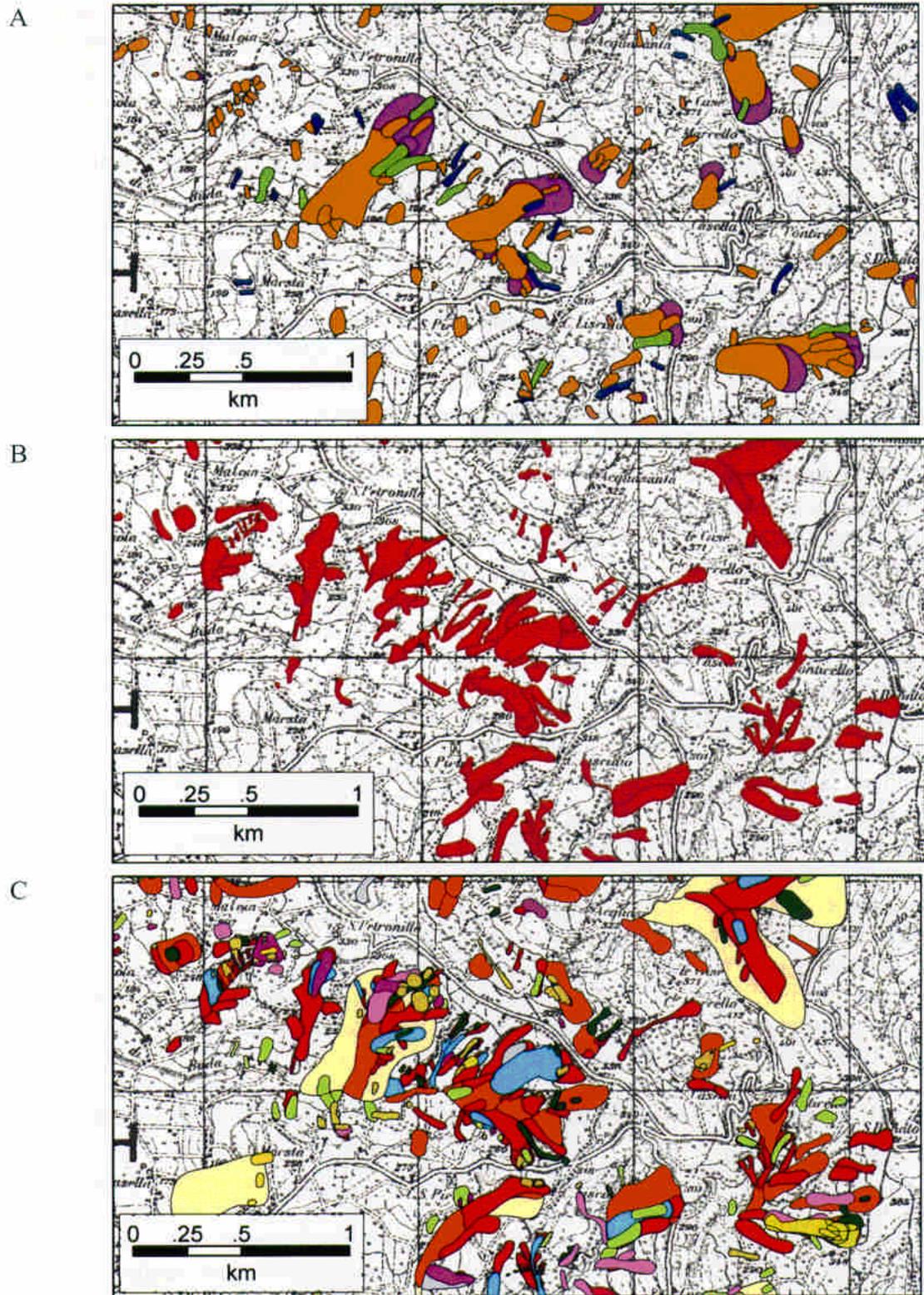


圖 1 義大利中部 Umbria region 山崩目錄圖，A)山崩地貌圖，顏色表示不同山崩類型。B)事件性山崩目錄圖，表示由某次降雨事件所造成山崩。C)多時性山崩目錄圖，顏色表示不同時間航照所調查山崩。

3.2 山崩航照判勢方法

航照判釋是山崩調查最有效且經濟的工具，它能在較短的時間內從事大面積的調查工作，具有高度的時效性，尤其在大規模事件發生之後，可以迅速取得資料，作為防救災資訊。山崩航照判勢原理乃根據山崩發生後，由於地形地貌變化出現崩塌特徵，航空照片上呈色調光亮之長條型裸露區域（圖 2）；或在地形上常出現馬蹄狀之崩崖、滑動體、側翼及趾部等地貌特徵（圖 3）。

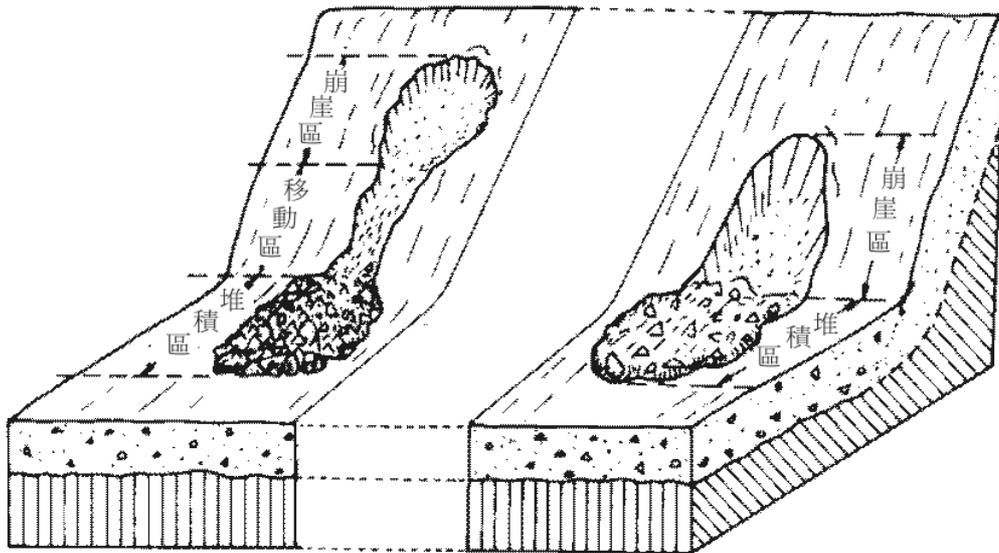


圖 2 淺層岩屑滑動山崩示意圖

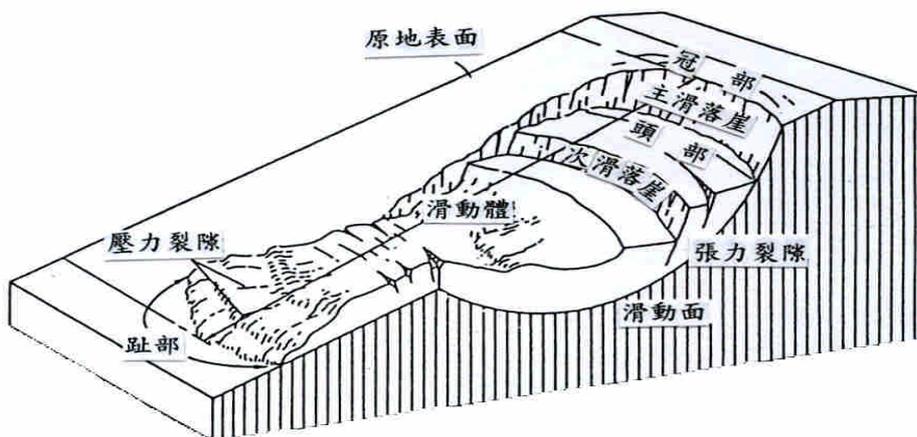


圖 3 深層岩體滑動山崩示意圖

航照判釋所需之設備與材料

- (1) 鏡面式立體鏡 (mirror stereoscope) 或高倍立體鏡 (圖 4、5) ,
- (2) 燈光桌 (light table) ,
- (3) 立體微尺 (stereo micrometer) ,
- (4) 航空照片 (air photos) (最重要的項目) ,
- (5) 地形圖 (topographic base map) ,
- (6) 透明膠片 (transparency) ,
- (7) 描圖紙 (tracing paper) ,
- (9) 其他相關文具, 如: 油性筆、剪刀、彩色與一般鉛筆、橡皮擦等。

航照判釋作業

- (1) 全區航照索引圖製作 (圖 6)。
- (2) 安排詳細判釋之次序。
- (3) 立體對詳細判釋。
 - (i) 將透明膠片覆在一條航線上隔張照片上, 以膠帶固定之, 並標示框標、航線編號、照片編號、與指北標示。
 - (ii) 依序取一個航照立體對放在立體鏡下, 打開照明。
 - (iii) 調整航照位置, 使在立體鏡下呈現最佳立體條件, 以膠帶固定之。
 - (iv) 可依研判之需要加上放大鏡或移開放大鏡。
 - (v) 仔細檢視航照的基本特質, 如: 形狀 (shape)、大小 (size)、型態 (pattern)、陰影 (shadows)、色調 (gray tone and color tone)、組織 (texture)、與位置等。以便判定需求之分析主題項目, 如: 地貌、水文特徵、色調、植生周遭環境, 及崩塌、土石流等地形特徵。
 - (vi) 將立體鏡下觀察所得之各個主題項目, 以油性筆繪於航照上的透明膠片上, 並依慣例選用適當顏色之油性筆來註記。
- (4) 將判釋成果轉繪於 1/5,000 之地形底圖上。



圖 4 航照判釋雙人用高倍立體鏡



圖 5 筆者與 Mr. Cardinali, M.共同進行航照判釋作業情形

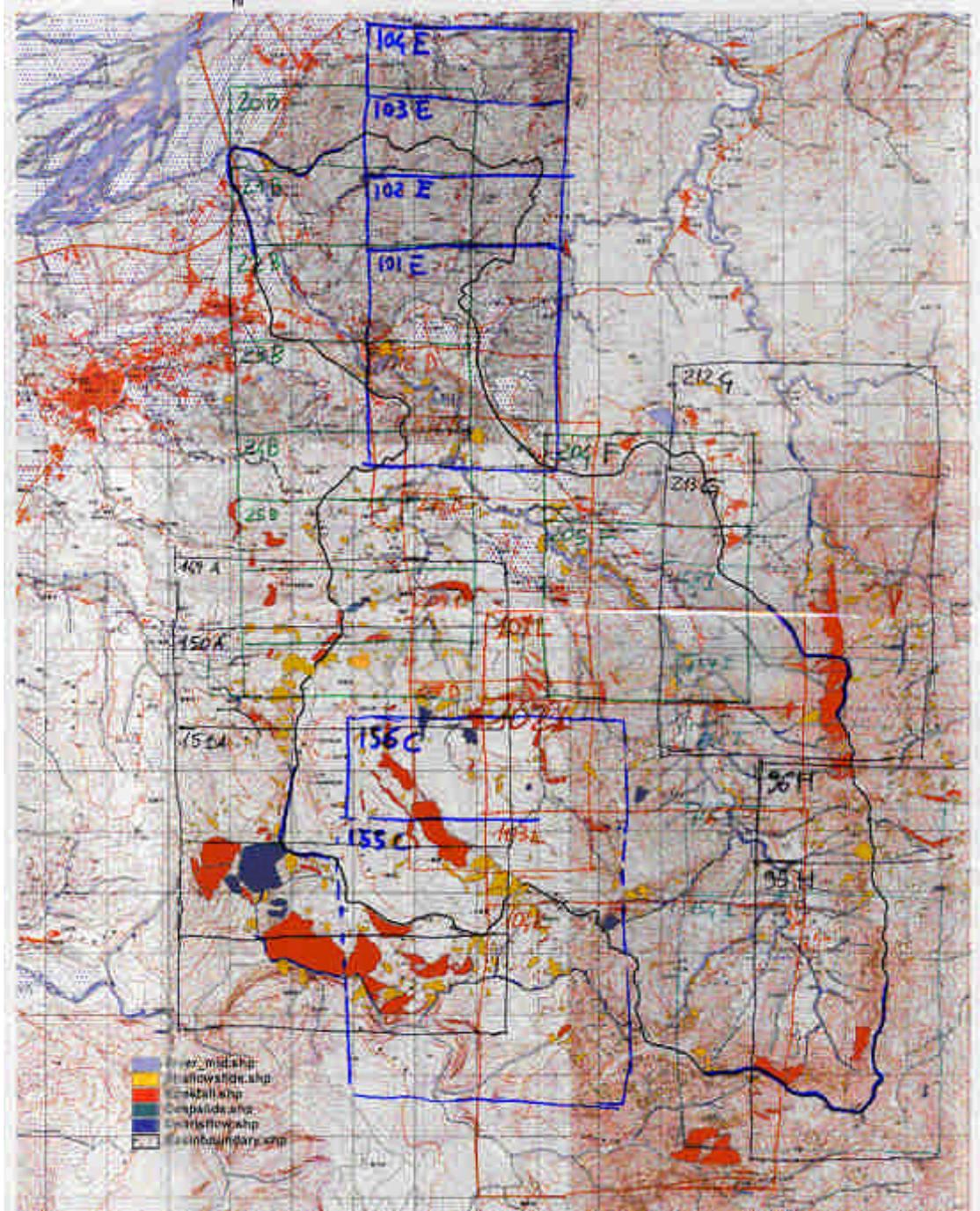


圖 6 溪頭北勢溪流域全區航照索引圖

本次以台灣中部溪頭北勢河流域航照 26 張（攝於桃芝颱風之後）進行山崩航照判釋，山崩地貌分為土石流、沖積扇、淺層岩屑崩滑、深層岩體滑動、落石崖等，如圖 7 所示，山崩年代簡略分為三期，「現代」山崩 (recent) 為航照上可見為新鮮裸露，無植生覆蓋之崩場地；「舊」山崩 (old) 為航照上已有植生覆蓋之崩場地，但崩塌特徵仍完好可辨者；「非常舊」山崩 (very old) 為崩場地形已有侵蝕或後期山崩發育現象者。圖 8 為將山崩航照判釋結果轉繪於航照正射影像圖成果。

<i>Type</i>		<i>Landslide</i>		
		<i>recent</i>	<i>Age old</i>	<i>very old</i>
debris flow	source area			
	transport area			
	deposition area			
shallow slide				
deep-seated landslide				
rock fall				
alluvial fan				

圖 7 山崩航照判釋各類山崩地貌標示圖例



圖 8 北勢河流域山崩航照判釋轉繪成果圖

3.3 航照地質判釋方法

地質因素包括岩性、地層位態、岩石強弱、構造等為山崩敏感區危險度評估之重要評估因素。航照地質判釋使判釋者能經由航空照片的研究及分析而獲得地質資料。有些地區的地質狀況常清楚的表現在地形上，由照片影像上可以十分肯定地辨認地質現象。在露頭不良，表土甚厚的低起伏地區，如仔細分析地文 (physiography) 及形態 (morphology) 仍能提供構造及岩性的一些線索。航照判釋要能成功的完成，對於露頭、地形、水系、植物及墾植等相互關聯的要素必需特別注意。這些要素則以色調 (tone)、組織 (texture)、型態 (pattern)、坡度 (slope)、形狀 (shape) 等表現於航空照片上 (林朝宗，1988)。雖然航照地質是一種獨立的地質資料來源，但絕非取代野外調查的方法，照片判釋與野外調查必須密切配合。

地層判釋

在照片上判釋地質構造的目的在標示指準層 (key horizon) 的位態、分佈、連續性或不連續性，並藉這些資料推斷地質構造關係。通常抗蝕性強、造成山脊之岩層，如砂岩與石英岩、及某些地區的石灰岩等，均為良好的指準層。但是任何可以被追蹤整個調查地區且具有獨特的照片特性，例如強烈對比的顏色及照片色調、典型的植物、特殊的土地利用、顯著的弱抗蝕性而造成低起伏地形、或具特殊的水系型態等的岩層均可做為良好的指準層。

地層位態由地層之走向及傾斜決定之。沉積岩在照片上常呈現由不同抗蝕性的岩層、不同的照片色調、或不同的植物生長所構成的條帶狀構造，岩層位態極易決定。在水平或近乎水平的岩層，岩層的露頭及界線通常平行或次平行於地形等高線而形成封閉的環狀型態。垂直岩層露頭線的位置完全由岩層的走向決定，與地形起伏無關。岩層間之接觸線為平行於走向的直線，不因通過不同的地形而偏折。傾斜岩層之露頭線型態由地形起伏及岩層之走向與傾斜來決定，傾角愈陡，走向對於岩層露頭線型態的影響變得比地形起伏更為顯著。當地形面為水平時，型態完全由走向控制，露頭線完全順其走向方向延展。如果地形面不呈水

平，岩層露頭線的型態為岩層走向、傾斜、及地形坡度三者相互影響的結果，露頭線的延展不再與真正走向方向一致，而是順偽走向 (apparent strike) 方向延展。真走向與偽走向間的方向偏差隨著地形坡度變陡而增大。當地形面與岩層層面一致時，常造成走向山脊及豚背嶺或單面山，岩層的走向及傾角很容易決定。當由傾斜岩層形成之豚背嶺被強烈切蝕時，常形成熨斗形地形面 (flatiron) (圖 9)。

單斜地層通常呈現平行至次平行水系與格子狀水系結合的水系型態，偶而亦出現局部的樹枝狀水系。當溪谷或其他地形低窪地區與地層走向以近乎垂直的角度相交時，岩層露頭的型態呈 V 字形；而岩層橫過嶺線時亦呈一 V 字形，但 V 的尖端指向相反的方向。V 字的尖端指向上游或下游視岩層的傾斜方向與角度和谷底地形坡度的方向與角度間的關係而定。傾角平緩的地層 V 字較為狹長；反之則較短。河谷或嶺線的寬度則為決定 V 字尖端的尖銳程度。如果河谷的方向與岩層走向垂直，則 V 字呈對稱的形狀；當河谷斜切岩層時，形成不對稱的 V 字。

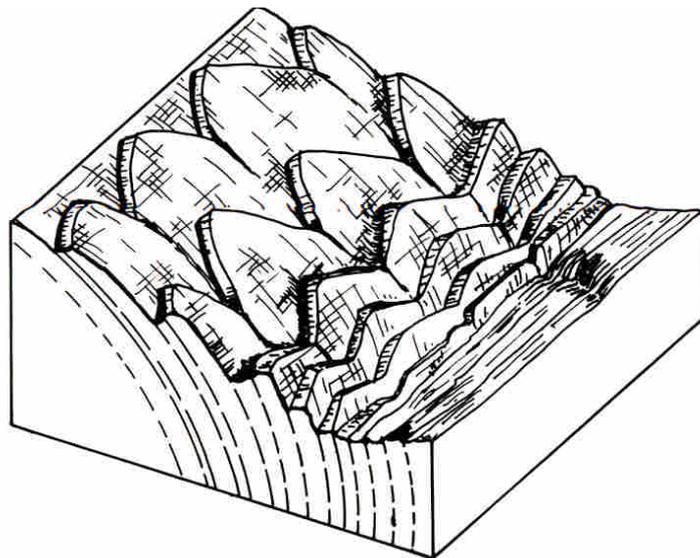


圖 9 熨斗狀地形示意圖

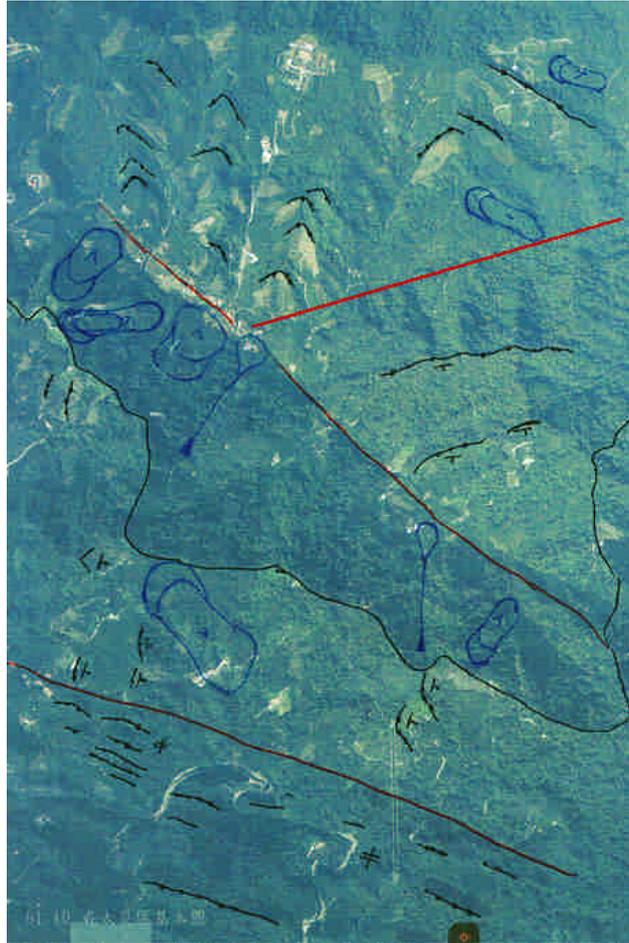


圖 10 溪頭北勢溪航照判釋由地層 V 字型之變化分區結果

- + Stratificazione prevalentemente orizzontale
Mostly horizontal bedding
- + Stratificazione meno inclinata dei versanti a franapoggio
Bedding on average less steep than the local dip-slope
- + Stratificazione inclinata approssimativamente come i versanti a franapoggio
Bedding on average steep as the local dip-slope
- + Stratificazione poco più inclinata dei versanti a franapoggio
Bedding on average slightly steeper than the local dip-slope
- + Stratificazione molto più inclinata dei versanti a franapoggio
Bedding on average steeper than the local dip-slope
- + Stratificazione prevalentemente verticale
Mostly vertical bedding
- ~ Stratificazione caotica
Chaotic bedding
- # Stratificazione massiva
Massive bedding

圖 11 航照判釋時所使用之構造線圖例

3.4 山崩敏感區危險度評估原理

所謂山崩危險度評估 (landslide hazard assessment) 乃是預測某一地區在未來某一段時間內可能發生山崩事件的機率。山崩危險度評估的方法目前雖然有許多不同的方法，但評估所採用的因子大同小異，整體來說，包括地質（岩性、構造）、地形、水文、植生狀態、土地利用等因素。

山崩危險度評估的方法有直接與間接二種，前者乃由專家根據過去所發生的山崩，預測未來可能發生的地區；後者又可分為啓發式與統計方法，在啓發式中，因子的評分與權重主要依據是對山崩發生機制的了解與經驗，具有主觀價值判斷。統計式則藉由統計方法找出每一個因子與山崩發生的關係，在目前許多不同的統計方法中，其中又以多變量統計方法最為廣範使用。

以義大利中部台伯河集水區流域山崩危險圖 (Landslide hazard map of the Upper Tiber River Basin, Italy) 為例 (圖 12)，統計的方式為多變量判別分析法 (discriminant)，統計分析之山崩數量超過 17,000 個。敏感區的劃分，首先將 Tiber River 集水區流域依照山脊分水嶺劃分不同的子集水區，每一子集水區由其水系可分為兩斜坡單元 (slope unit)，總共可以劃分 16,000 斜坡單元，這些斜坡單元再進一步依照岩性劃分 28,600 個水文、地形、岩性一致的地形單元 (terrain unit) (圖 13)。

以 ArcGIS 軟體將每一個地形單元從不同的山崩因子主題圖層得到一組參數值，總計有 124 種山崩因子，其中地形因子有 17 項包括面積、坡度、坡向等，主要是從 DTM 所產生；岩性地質因子有 21 項，從集水區內 35 種岩性單位中依據岩石強弱的組成重新劃分；與地層位態相關因子 5 項、地層位態與坡度、坡向之關係 6 項；土地利用情形分為 10 項；另外地形單元之形貌 8 項、岩性與地層位態關係情形 31 項、土地利用與地層位態之關係 6 項。124 種山崩因子經 SPSS 統計程式分析結果，有 41 項因子 (圖 14) 與山崩發生潛勢相關性較高，用來作為預測山崩發生潛勢，SDFC 值越高者表是對山崩 (正值) 或穩定 (負值) 影響越

高。以坡度因子為例，SDFC 值高達 0.962，表示坡度對山崩發生潛勢有極高的影響性。

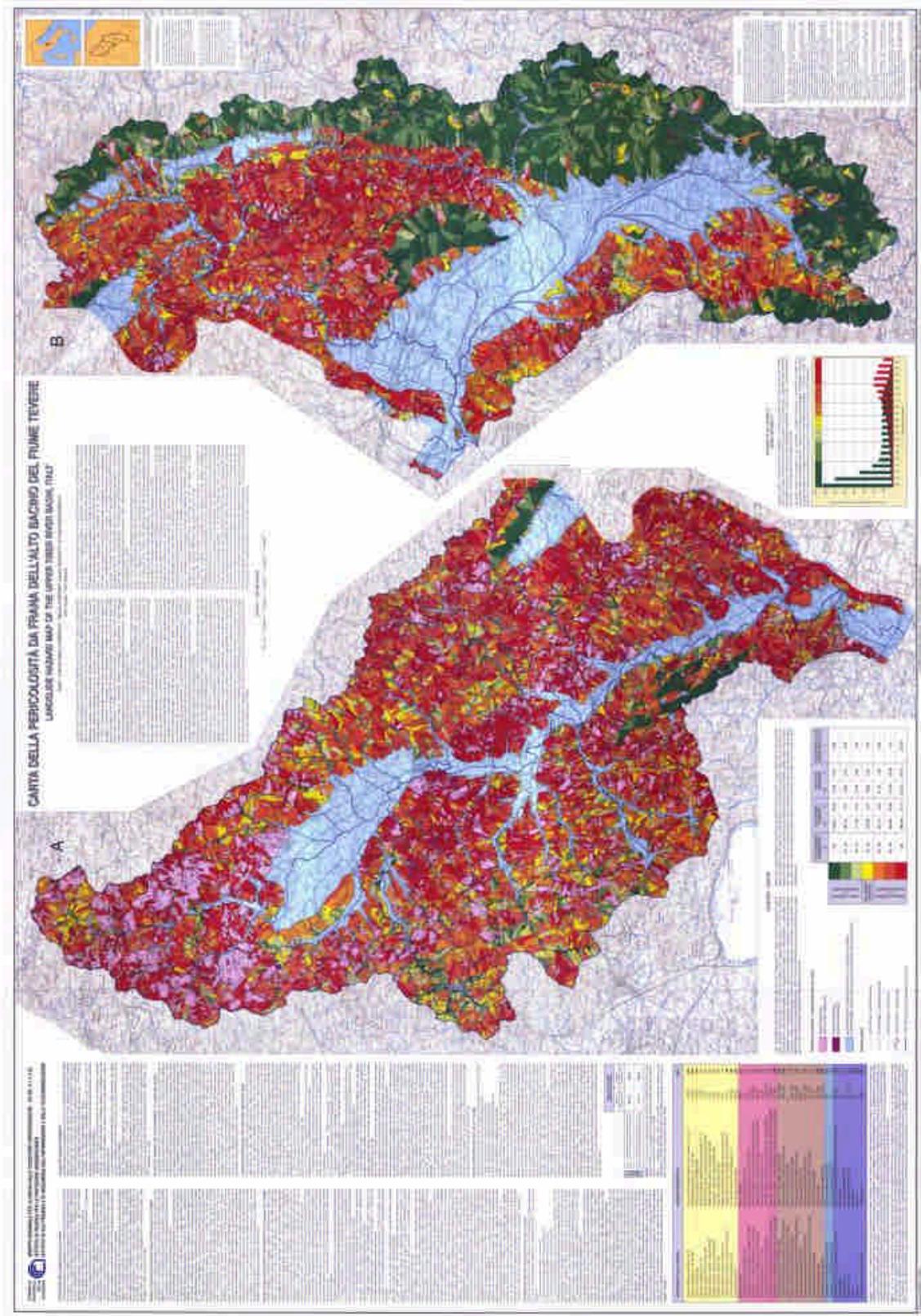


圖 12 義大利中部台伯河集水區流域山崩危險圖

預測山崩發生機率依下列程式計算結果分為 7 等級，機率值 0.45 以下表示較為穩定，0.55 以上表示山崩潛勢越高（圖 15）。評估結果正確率為 76.3%，整體評估結果屬於尚可接受範圍。

$$P=B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_4 + \dots + B_nX_n$$

P=presence/absence of landslide

X=variable of each terrain unit

B=coefficients by statistics

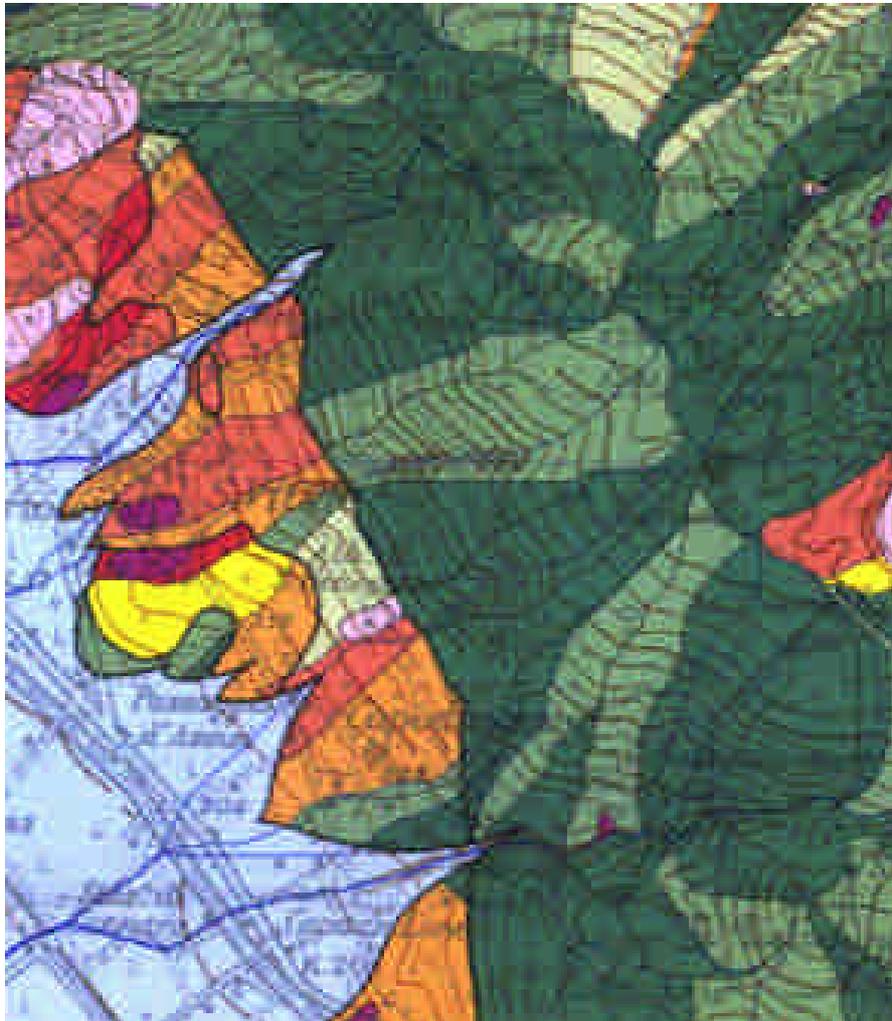


圖 13 義大利中部台伯河集水區流域地形單元劃分圖

VARIABLES DESCRIPTION		SDFC
Coarse to fine grained alluvial and fan deposits (2, 2b, 3)	CPOAF	-470
Well-bedded limestone (31, 33, 34, 36)	CCALS	-245
Thick and massive sandstone (22)	CTTM	-.042
Thick and massive sandstone and calcarenite (14, 15)	CTUM	.020
Stratified pelitic layers, minor arenaceous levels (19)	CTTP	.040
Massive peridotite, gabbros and basalt (28, 29)	CLIM	.060
Calcareous, marly and clayey turbidites (26)	CLIPL	.062
Clays with chaotic structure (25)	CTTC	.063
Argillite and siltstone locally with chaotic structure (27)	CLIC	.116
Chaotic mixture of clay and exotic rock elements (12)	CTUC	.192
Fine-grained lake and fluvial deposits (6, 7)	CPOSA	.195
Very old (ancient) landslides	PALEO	.259
Massive structure	MASS	-.067
Bedding dipping less than 5°	IO_5	.024
Bedding dipping away the slope free face	FRA_P	.037
Interaction between fluvial-lake deposits and bedding attitude	CPOREG	.054
Interaction between the Ligurian Complex and bedding attitude	CLIFRA	.059
Bedding dipping between 15° and 35°	I15_35	.060
Interaction between siltstone and sandstone and bedding attitude	CTUPLTRA	.069
Interaction between Umbria Terrigenous Complex and bedding attitude	CTUTRA	.135
Interaction between Tuscan Terrigenous Complex and bedding attitude	CTTTRA	.148
Terrain-unit mean slope angle squared	SLO_ANG2	-.772
Standard deviation of terrain-unit slope angle	ANG_STD	-.245
Index of terrain-unit micro-relief	R	-.138
Convex-concave profile down slope	COV_COC	-.072
Standard deviation of terrain-unit length	LEN_STD	-.056
Concave profile down slope	CONV	.021
Concave-convex profile down slope	COC_COV	.029
Standard deviation of terrain-unit elevation	ELV_STD	.041
Terrain unit mean elevation	ELV_M	.128
Terrain-unit area	SLO_ARE	.296
Terrain-unit mean slope angle	SLO_ANG	.962
Terrain-unit aspect facing S-SW	TR3	-.045
Terrain-unit aspect facing N-NE	TR1	.067
Interaction between forested area and Carbonate Complex	CCABO	-.193
Urban area	AE	.047
Area free of vegetation cover	AN	.051
Olive groves and vineyards	CACOLPV	.072
Forested area	BO	.156
Pasture	PA	.203
Cultivated area	SASS	.224

圖 14 義大利中部台伯河集水區流域山崩危險圖預測評估因子

	CLASSI DI PROBABILITÀ PROBABILITY CLASS	LINEA TERRITORIALE TERRAIN LIMITS		AREA IN FRANA LANDSLIDE AREA		AREA IN FRANA NELLA CLASSE LANDSLIDE AREA IN THE CLASS
		km ²	%	km ²	%	%
STABILITÀ CRESCENTE ↑ INCREASING STABILITY	< 20	1246.81	30.43	10.33	2.48	0.63
	20 - 35	287.45	7.01	10.88	2.61	3.78
	35 - 45	171.82	4.19	12.59	3.02	7.33
NON CLASSIFICATO UNCLASSIFIED	45 - 55	219.98	5.37	18.38	3.94	7.45
INSTABILITÀ CRESCENTE ↓ INCREASING INSTABILITY	55 - 65	337.15	8.23	31.23	7.50	9.26
	65 - 80	845.86	20.84	112.48	27.02	13.3
	> 80	988.94	24.13	222.31	53.41	22.48

圖 15 義大利中部台伯河集水區流域山崩危險預測評估山崩發生機率結果

3.5 “Stone” 程式用於落石災害危險評估

有關落石災害的研究，大多運用電腦程式進行落石運動軌跡、運動力學的模擬。表 2 中為近 30 年來國外許多研究報告所發表之落石電腦模擬程式，大多屬於 2-D 程式，只能作單一斜坡剖面的模擬。而 ” STONE” 落石電腦模擬程式為義大利 CNR 2002 年所開發少數之 3-D 程式（圖 16），具有簡單、易操作及大面積快速計算的優點，適合作為區域性評估之用。

表 2 近 30 年間國外研究報告所發表之落石電腦模擬程式一覽表

Table 1
Main characteristics of some of computer programs proposed in literature to simulate fall of a boulder along a slope and to compute rock-fall trajectories

Year	Author(s)	Program name	Dimensions	Approach	Probabilistic
1976	Piteau and Clayton	Computer Rockfall Model	2-D	Lumped mass	Partly
1982-86	Bozzolo and Pamini	SASS—MASSI	2-D	Hybrid	Yes
1985	Bassato et al.	Rotolamento Salto Massi	2-D	Lumped mass	No
1987	Descouedres and Zimmermann	Ebolul	3-D	Rigid body	No
1989-91	Pfeiffer and Bowen	CRSP	2-D	Hybrid	Yes
1990	Pfeiffer et al.	—	2-D	Rigid body	No
1990	Kobayashi et al.	—	2-D	Rigid body	No
1991-95	Azzoni et al.	CADMA	2-D	Hybrid	Yes
1991	Scioldo	Rotomap	3-D	Lumped mass	No
1998	Stevens	RocFall	2-D	Hybrid	Yes
1999	Paronuzzi and Artini	Mobyrock	2-D	Lumped mass	Yes
2000	Jones et al.	CRSP 4.0	2-D	Hybrid	Yes
2002	This work	STONE	3-D	Lumped mass	Yes

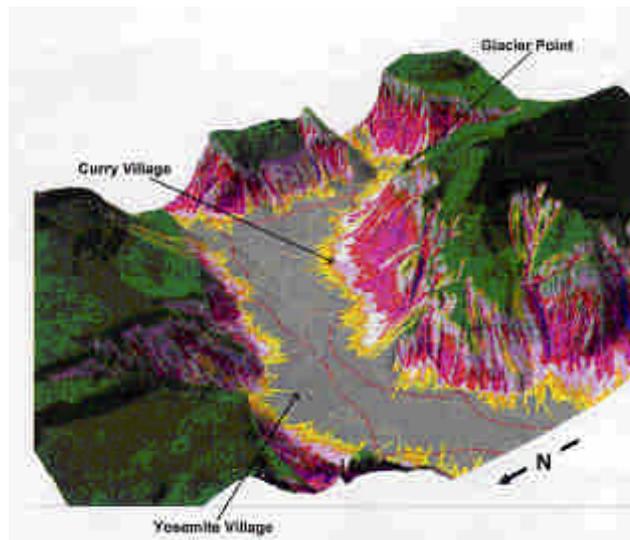


圖 16 義大利 CNR 所開發之 3-D 落石電腦模擬程式結果示意圖

” STONE” 落石程式乃由 ANSI C 語言撰寫，主要利用現有建置之 GIS 主題圖層如地質圖層、落石發生區圖層，配合 DTM 資料，作區域性落石災害潛勢評估。程式模擬所需參數如下表 3，地質圖層中根據不同岩性分別給予滾動摩擦系數、切線及法線反彈折減系數，連同 DTM 圖層與落石發生區圖層一併轉為網格 (raster)。經 ” STONE” 落石程式模擬結果，可以得到每一網格被落石所達到的次數、速度及高度 (圖 17)，次數愈多、速度愈快、高度愈高，它的災害危險潛勢便愈高。圖 18 為模擬台灣溪頭北勢溪集水區落石災害潛勢結果，落石發生區中之每一個 cell 設定投出 10 次落石，模擬所用資料為 92 年中央地質調查所都會區及周緣坡地整合整合性環境地質資料庫建置計畫生產之 10X10 DTM、岩性組合分布圖及落石圖層。

” STONE” 落石程式輸出格式為 GIS 網格檔，因此模擬結果可以套疊建物結構、或道路數值圖層，迅速得到具有落石災害危險的地區，達到事先預警的目的。圖 19 為模擬台灣中部地區並套疊道路圖層之落石災害潛勢圖分布情形，所得結果可以作為道路落石風險評估之參考。

表 3 STONE 程式模擬時所需參數表

Table 2
Initial and control parameters used by program STONE

Field	Value(s)	Explanation
Elevation matrix file (DTM)	vcmdtm.2.asc	File containing digital terrain model.
Start/stop matrix file	vcm-start.asc	File containing start and stop cells
Vertical elasticity matrix file	restit-verti.asc	File containing normal restitution coefficients
Horizontal elasticity matrix file	restit-horiz.asc	File containing tangential restitution coefficients
Friction matrix file ($\tan(\beta)$)	friction.asc	File containing dynamic friction coefficients
Start velocity (gunshot)	2.0	Initial velocity of boulder, in m s^{-1}
Min velocity (stop below)	1.0	Lower velocity threshold, in m s^{-1}
Fly/roll transition thresholds: dist. and velocity	3.0, 5.0	Minimum span (in metres) of parabola and minimum velocity threshold, in m s^{-1} , for transition from free-falling to rolling
Fly internal tabulation	2.0	Maximum distance, in metres, along ballistic (free fall) segment from two successive points
Roll internal tabulation	2.0	Maximum distance, in metres, along rolling segment from two successive points
Output tabulation (dist. among points)	3.0	Minimum distance between successive points along rock-fall trajectory in 2- and 3-D output files
Path array size	10000	Maximum number of points in single rock-fall trajectory
Generate 3-D vector files (μ Station)	0	Flag to decide if 3-D vector files, in ASCII format, will be generated 0 = no, 1 = yes
Generate 2-D vector files (ArcInfo)	1	Flag to decide if 2-D vector files, in ASCII format, will be generated 0 = no, 1 = yes
Stochastic flag	1	Flag to turn on or off (0) stochastic modelling. Number is used as seed for random number generator
Stochastic ranges (%) angle, vrest, hrest, frict	3, 5, 5, 6	Percentage of horizontal angle (0–45°), vertical and normal energy restitution coefficients (0–100), and dynamic friction angle (0–100) used to compute range of values from which to draw randomly figures to be used in computation

Values are stored in stones.par file.

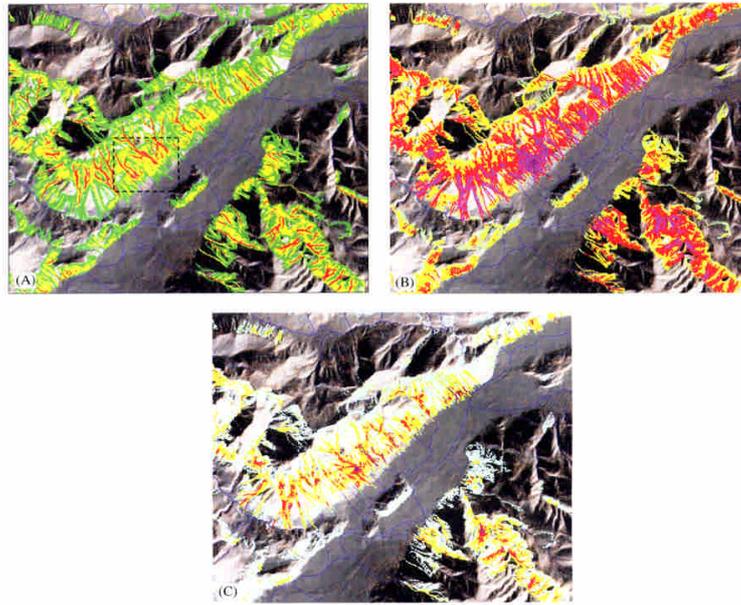


圖 17 STONE 程式模擬每一網格被落石所達到的次數(A)、速度(B)及高度(C)值

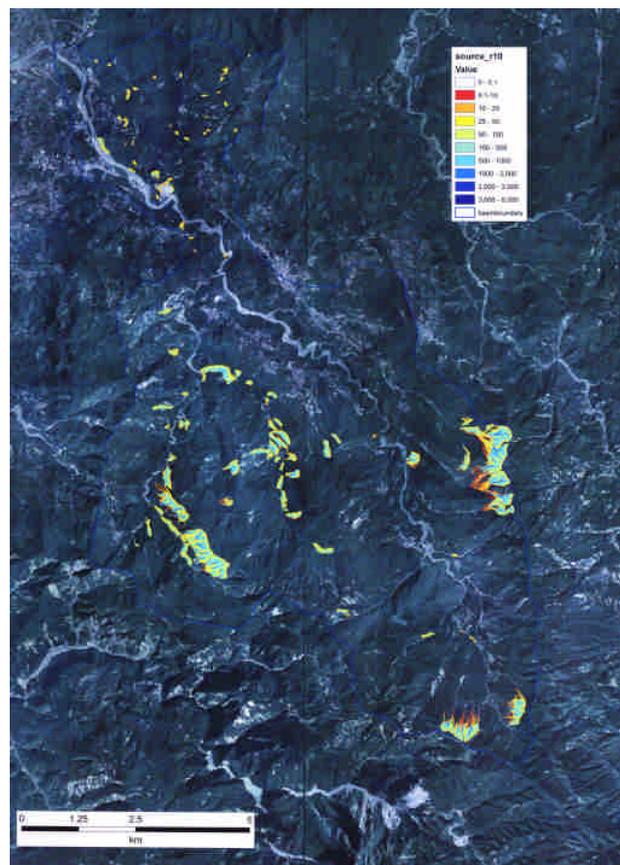


圖 18 STONE 程式模擬台灣溪頭北勢溪集水區落石災害潛勢成果圖

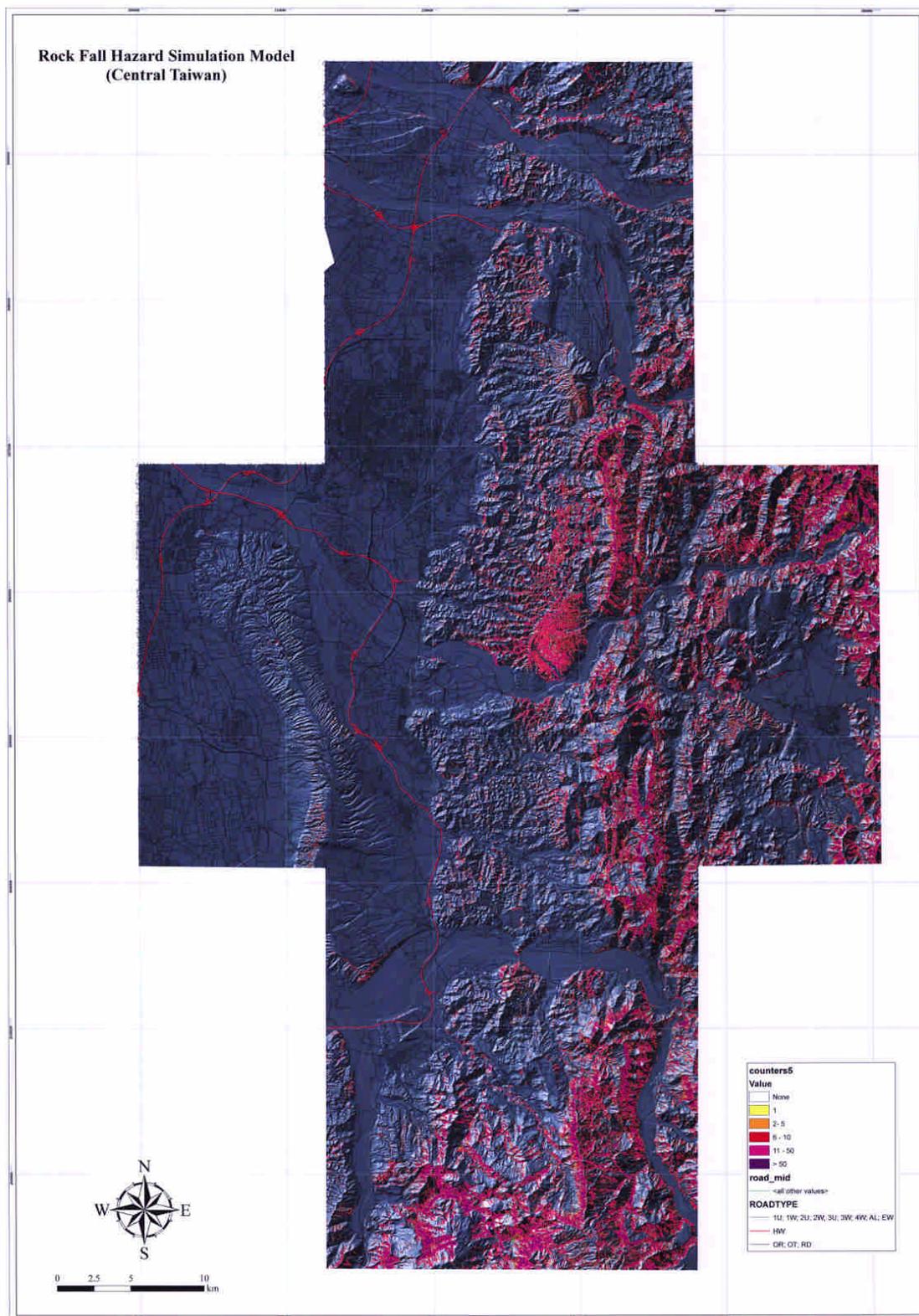


圖 19 STONE 程式模擬台灣中部地區並套疊道路圖層之落石災害潛勢成果圖

3.6 台灣山崩敏感圖案例試作

由於山崩敏感區危險評估是以一個完整的集水區為單元，因此經討論結果，選定台灣中部溪頭北勢河流域較為適合。溪頭北勢溪集水區位於南投縣南方，隸屬南投縣鹿谷鄉。北勢溪為濁水溪支流，發源自溪頭森林遊樂區上游源頭，沿途再匯入鳳凰山西麓以及樟空倫山東麓支流，流經竹山地區後匯入東埔蚋溪，東埔蚋溪流經竹山的初鄉橋和延平橋後，於木屐寮附近匯入濁水河流域。

北勢溪集水區地形上為一三面環山之大型谷地，東面為鳳凰山脈，南面為嶺頭山脈，西南面為內樹皮山脈，西面為樟空倫山脈，整體地勢高程由南向北遞減。集水區中央沖積谷地以溪頭一帶最為寬廣，呈堆積地形。向北，北勢溪河道漸窄亦逐漸加深，河道向下侵蝕快速。集水區內主要聚落多分佈於北勢溪東岸，背倚南北走向之鳳凰山脈山麓。區域內最高之標高約為 2100 公尺，最低標高約為 800 公尺，其位置概圖如圖 20 所示。

本區山崩分布如圖 21 所示，山崩類型為淺層之岩屑崩滑，主要分布於北勢溪二岸階地陡崖與集水區西側。敏感區劃分採原始斜坡單元 (slope unit)，由 10 x 10m DTM 處理的到水系圖 (圖 22) 與分水嶺線圖 (圖 23)，二者在合併而得 (圖 24)。

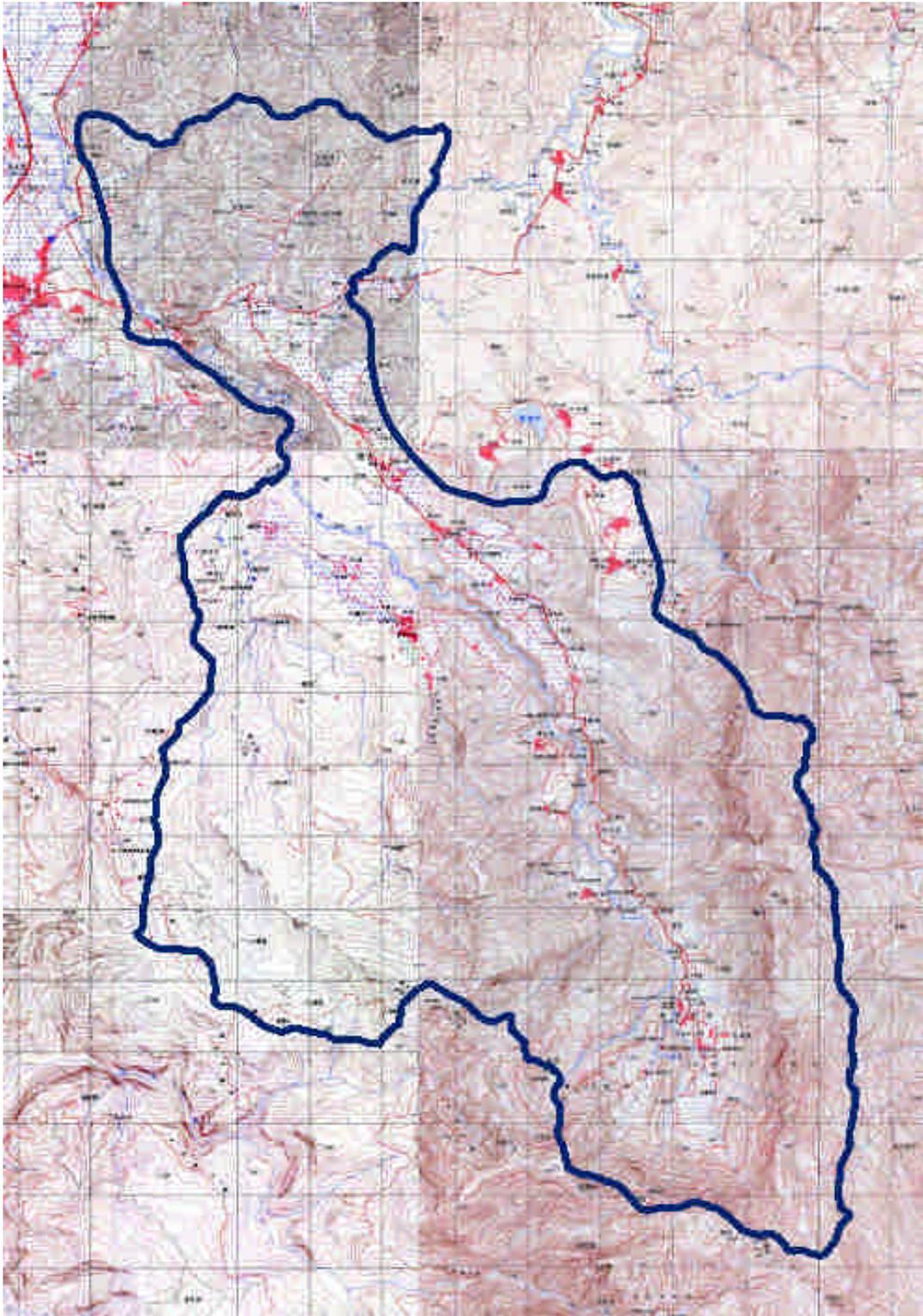


圖 20 溪頭北勢溪集水區位置圖

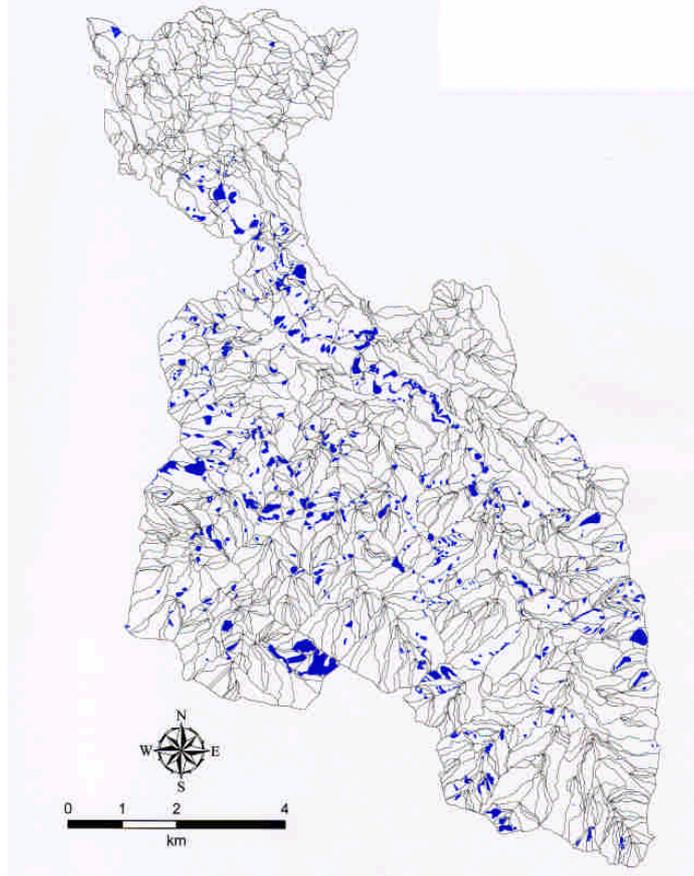


圖 21 溪頭北勢溪集水區山崩分布圖

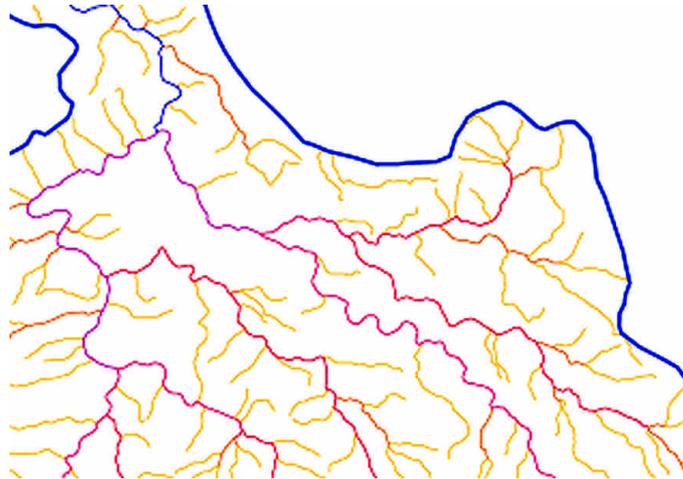


圖 22 溪頭北勢溪集水區水系圖

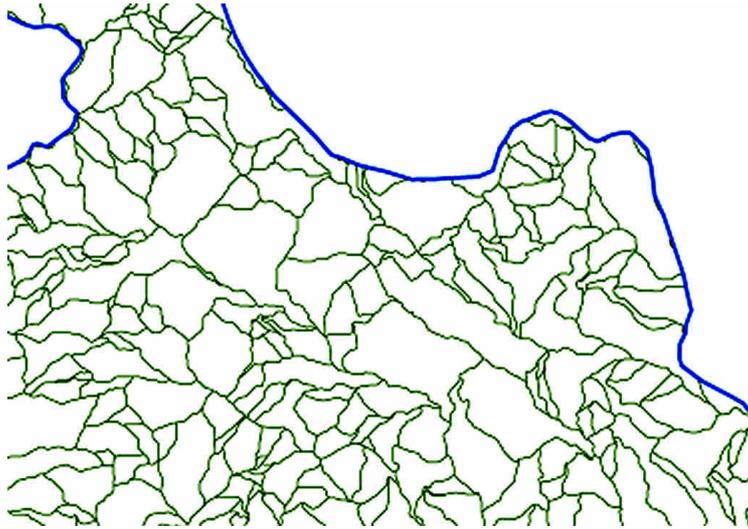


圖 23 溪頭北勢溪集水區分水嶺線圖

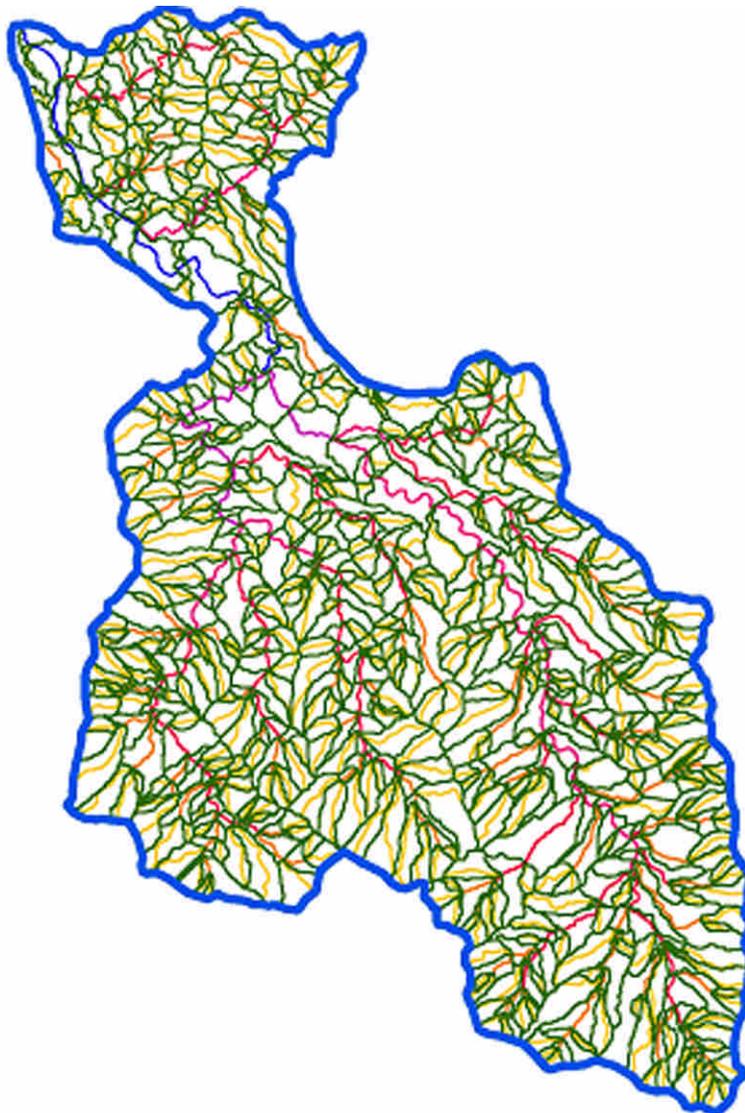


圖 24 溪頭北勢溪集水區敏感區地形單元劃分圖

本研究山崩因子分包括地形因子 21 項（表 4）、岩性因子 8 項及斷層距離因子 3 大類，經統計結果有 16 項因子與山崩潛勢相關性較高（表 5），其中地形因子 12 項、岩性 3 項、斷層 1 項。北勢溪集水區山崩敏感區危險分級如圖 25 所示，評估結果分爲 5 級，綠色表是山崩危險度低，紅色表示山崩危險度高。

表 4 溪頭北勢溪集水區山崩地形因子

Variable description	Variable
Terrain-unit drainage channel magnitude	MAGN
Terrain-unit drainage channel order	ORDER
Terrain-unit drainage channel length	LINK_LEN
Drainage basins total area upstream the terrain unit	AREAT_C
Terrain-unit area	SLO_ARE
Index of terrain unit micro-relief	R
Terrain-unit mean elevation	ELV_M
Terrain-unit mean slope angle	SLO_ANG
Terrain-unit mean slope angle squared	SLO_ANG2
Terrain-unit mean slope angle standard deviation	ANG_STD
Drainage channel mean slope	LNK_ANG
Terrain-unit mean length	SLO_LEN
Standard deviation of terrain-unit length	LEN_STD
Terrain-unit slope (lower portion)	ANGLE1
Terrain-unit slope (intermediate portion)	ANGLE2
Terrain-unit slope (upper portion)	ANGLE3
Concave profile down slope	CONV
Concave-convex profile down slope	COV_COC
Terrain unit aspect facing N-NE	TR1
Terrain unit aspect facing S-SE	TR2
Terrain unit aspect facing S-SW	TR3

表 5 溪頭北勢溪集水區山崩危險度評估因子與 SDFC 值

Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients

	Function
	1
AREAT_K	.437
SLO_ARE	.380
ELV_M	-.675
ANG_STD	.156
LNK_ANG	.241
ANGLE1	.343
ANGLE2	.558
CONV	.142
COC_COV	.239
IRR	.144
CC	.155
TR2	.215
ALLUVIAL	-.233
SAND_MUDST	-.608
SAND_SHALE	-.135
FAULT_B	-.080

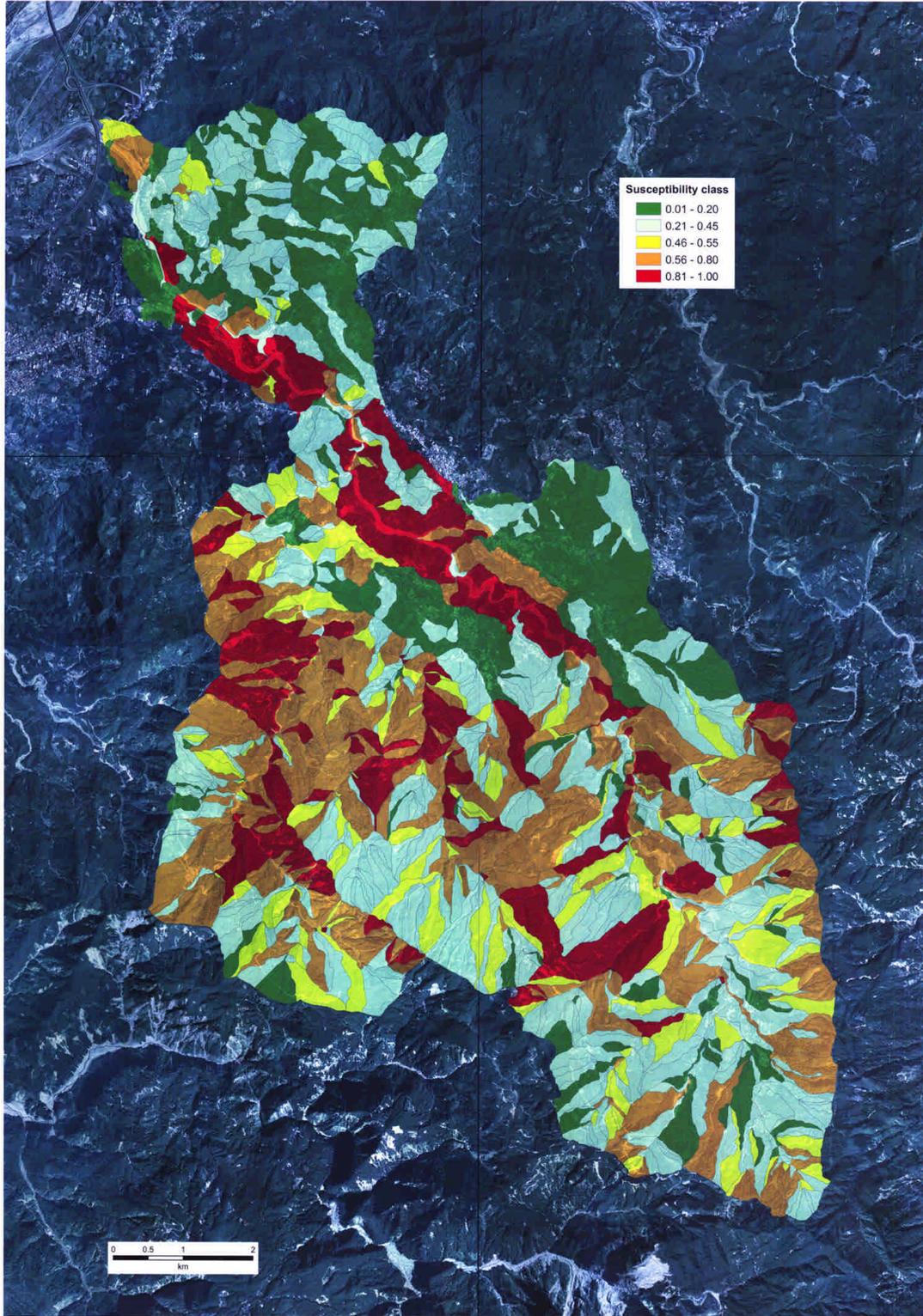


圖 25 溪頭北勢溪集水區山崩敏感區危險分級結果

肆、心得與建議

僅將本次義大利坡地地質敏感區劃設與危險度評估作業方法研究考察心得與建議列點說明如下：

1. 山崩目錄圖乃展現不同種類山崩調查的結果，它的範圍可以從單一的集水區乃至全國地區，端視其目的與用途而定。小比例尺的山崩目錄圖其山崩資料可以來自文獻資料、專家查訪、期刊報告及衛星影像資料收集；大比例尺的山崩目錄圖需要大比例尺的航照判釋與野外調查。山崩目錄圖它主要提供山崩敏感區危險評估的基本資料，同時可以呈現不同地區之山崩特性、歷史災害資料等，極具有教育的功能。我國目前尚未編製有系統性、不同主題功能的山崩目錄圖；相較日本從事編製全國地滑山崩目錄圖已數十年，至目前已完成全國半數地區，實值得我們借鏡。近年來中央地質調查所已積極進行全國山崩調查，未來似可仿效義大利、日本等國家，有系統編製具主題功能的全國性山崩目錄圖，以落實防災應用功能。
2. 航空照片與高精度衛星影像為大面積快速且經濟的調查工具，行政院農委會農林航測所每年均有新航照的拍攝，歷年航照檔案堪稱齊全；另我國已發射運作之福衛二號具有便宜快速的優點，已為大家所使用。善用航照判釋技術有助於區域性山崩調查與地質因子的取得，航照判釋需要有經驗之專家進行判釋，以目前來看，國內航照判釋能力人才極為不足，影像判釋專業教育環境尚待建立。因此在專業人力不足之情況下，現有資料調查的品質與速度上將受到影響。改善之道，則未來國內相關單位應加速專業人才之養成教育與訓練。
3. 義大利山崩敏感區的劃定方法 (terrain unit)，採用整體斜坡單元的觀念，具有地理上的實質意義。運用 GIS 電腦化功能，資料處理方便快捷。我國自 91 年起辦理地質災害敏感區的劃定，目前仍以人工套疊圈繪方式產生，未來可朝向電腦化自動方式進行，避免人為的偏差。

4. 山崩敏感區危險評估的正確與否與山崩因子有極大關係，因子的選擇應具有山崩物理上的意義。義大利以多變量統計分析中的鑑別分析法，統計多達 124 項山崩因子，除了一般比較常用的地形與土地利用因子外，也加入大量地質相關因子，如岩性強弱的組合、岩體的構造、層理與坡度的關係等，有助於評估的正確性，此與我國辦理之敏感區劃設分析有異曲同工之處。
5. 義大利國科會有二組專門從事航照判釋人員，長期以來對山崩及地質進行判釋工作，經驗豐富。此次有機會和他們共同參予判釋、討論，實獲益匪淺，有助於未來國內之山崩調查工作。
6. 本次出國考察心得交流座談會於 94 年 8 月 9 日在經濟部中央地質調查所舉辦，承蒙國立台灣大學、國立中央大學、國立師範大學、台北市立師院師生共同熱烈參與討論，完成技術交流的目的。

伍、參考文獻

1. 林朝宗 (1988) 遙測影像判釋在構造地質研究的應用，中國文化大學出版部印行，95 頁。
2. 經濟部中央地質調查所 (2003) 都會區及周緣坡地整合性環境地質資料庫建置計畫-坡地環境地質災害調查研究 (2/5) 中部地區。
3. Bunce, C.M., Cruden, D.M. and Morgenstern, N.R. (1997) Assessment of the hazard from rock fall on a highway? Canadian Geotechnical Journal, 34:344-356.
4. Cardinali, M., Antonini, G., Reichenbach, P. and Guzzetti, F. (2001) "Photo-geological and landslide inventory map for the Upper Tiber River basin" . CNR-GNDCI Pub. N. 2154, map at 1:100,000 scale.
5. Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (2002a) "Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin" . CNR-GNDCI Pub. N. 2116, map at 1:100,000 scale.
6. Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1995) "GIS technology in mapping landslide hazard" . In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Ac. Pub., Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
7. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. and Agliardi, F. (2002a) "STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls" . Computers & Geosciences, 28:9, 1079-1093.
8. Guzzetti, F., Reichenbach, P. and Ghigi, S. (2004a) Rockfall hazard and risk assessment in the Nera River Valley, Umbria Region, central Italy? Environmental Management, (in press).

陸、誌謝

本次義大利出國考察感謝經濟部中央地質調查所推薦，經濟部聯合技術協助訓練進修實施計畫補助，經濟部國際合作處羅特研究員協助至義大利國科會水文地質防災研究中心一個月研習訓練，承蒙 Dr. Fausto GuzzettiMr. 安排與接待，Mr. Mauro Cardinali 等人給予指導，及使這次之研習獲得許多寶貴經驗與技能。國立台灣大學、國立中央大學、國立師範大學、台北市立師院師生共同熱烈參與回國心得交流，提供意見，在此一併致謝。