

石門水庫上游白石溪集水區蝕溝產砂量推估之研究

Quantification of Gully Erosion in Baishi watershed of

Shihmen Reservoir

國立台灣大學
土木工程學系
碩士
李昶谷
Chang - Kuo Lee

國立台灣大學
土木工程學系
博士候選人
蔡宗賢
Zong - Xian Tsai

國立台灣大學
土木工程學系
教授
李鴻源
Hong - Yuan Lee

國立台灣大學
土木工程學系
博士候選人
陳毅青
Yi - Chin Chen

國立台灣大學
水工試驗所
專案計畫助理研究員
邱昱嘉*
Yu - Jia Chiu

摘要

蝕溝係土壤沖蝕作用初期在坡面上切割所形成之深溝，且為坡面土壤強烈沖蝕作用之表徵與地形夷平過程之濫觴。蝕溝形成後即會因下切、橫向與溯源沖蝕而擴張，造成大量的地表沖刷。本研究使用全站儀，進行石門水庫集水區內白石溪流域內四條蝕溝變化地形測量，並結合航空攝影圖估算研究區域內的蝕溝數量及其規模，再分析白石溪流域蝕溝沖蝕產砂的總量。

蝕溝測量的結果顯示蝕溝產砂狀態依照其發育程度的不同，可分為產砂型蝕溝以及穩定型蝕溝，產砂型蝕溝發育期較為年輕，其平均單位面積產砂量為 $0.2758\text{m}^3/\text{m}^2$ ；穩定型蝕溝發展成熟，產砂量較少，平均單位面積產砂量為 $0.0108\text{m}^3/\text{m}^2$ 。由航照圖判釋集水區共 120 條蝕溝，其中，面型蝕溝 41 條與線型蝕溝 79 條。因此，2006 年 7 月至 12 月，集水區蝕溝產砂總量推估為 $27,744\text{m}^3$ 。假設產砂量與研究期間內累積降雨量為一線性正比例關係，則集水區內蝕溝沖蝕產砂量為每年 176,280 噸，相較於崩塌地產砂量每年

1,023,480 噸，以及土壤沖蝕量每年 30,960 噸，蝕溝產砂量佔集水區總產砂比 14%，為一不可忽略之產砂來源。

關鍵詞：蝕溝沖蝕，全測站，白石溪集水區，產砂量

ABSTRACT

Gully is a landform with narrow channel cutting by runoff on hillslope. Gully landform indicates rapid soil erosion and initiation of denudation process on hillslope. After gullies are formed, a large quantity of sediment is produced by the incision, lateral erosion and head-cutting. This study aims to estimate the sediment yield due to gully erosion in the Baishi watershed of Shihmen Reservoir. We measured the morphology change of gullies by using Pulse Laser Total Stations, and interpreted the gullies from aerial photographs. Then, sediment yield from gully erosion was estimated in the watershed.

The results show that gullies can be categorized into two types, active gully and stable gully, based on its sediment yield. Active gully, which is in the initial stage of gully evolution, has an average sediment yield of $0.2758\text{m}^3/\text{m}^2$. In contrast, stable gully, which is highly-developed, has with a smaller sediment yield of $0.0108\text{m}^3/\text{m}^2$ relatively. There are 120 gullies interpreted from aerial photographs, which 41 are polygon shapes and 79 are line shapes. The total sediment yield from gully erosion in the Baishi Watershed is $27,744\text{m}^3$ during July to December in 2006. The annual sediment yield from gully erosion is $176,280\text{t yr}^{-1}$ based on the assumption of linear ratio of sediment yield with accumulated rainfall. The gully erosion contributes 14% of annual sediment in the watershed, comparing with the landslide erosion of $1,023,480\text{t yr}^{-1}$ and soil erosion of $30,960\text{t yr}^{-1}$. Gully erosion is a significant source of sediment yield in the watershed.

Keyword: Gully erosion, Total Station, Baishi watershed, Sediment yield.

一、緒論

1.1 研究動機

集水區產砂現象造成之泥砂淤積已是水庫普遍面臨的問題，臺灣的水庫

集水區因地質條件不佳，山區土質鬆軟，加上地震、颱風等天災常導致嚴重侵蝕，產生的泥砂問題對下游河床水質與地形有相當大的影響，甚至影響到水工構造物的功能與安全。如何正確推估集水區內坡地沖蝕量是相當重要的議題，許多研究主要著重在分析土壤沖蝕與地表氣候、土壤、地形及土地利用等條件之關係 (如 Williams et al., 1996; Poesen et al., 1996a; Nearing, 2001; Toy, 2002)，並主要集中在小規模，約 1 平方公尺的「紋溝間沖蝕」(Interrill erosion)或長度範圍在 11~198 公尺、寬度在 2~46 公尺的「紋溝沖蝕」(Rill erosion)等較大場區尺度上的土壤沖蝕或是紋溝間-紋溝彼此之間的沖蝕行為研究(Brakensiek et al., 1979; Risse et al., 1993)。相對而言，著眼在處理更大空間尺度的「蝕溝沖蝕」(Gully erosion)的研究則相對較於缺乏。此外，過去國內在探討集水區之泥砂生產時，著重於表土沖蝕這種非點源泥砂問題(如賴益成，1998；歐陽元淳，2003；邱昱嘉，2003)，以及點源侵蝕的崩塌地產砂 (如趙倬群，2004；蔡宗賢，2005)，對於集中逕流所造成的蝕溝沖蝕的研究則非常少見。

蝕溝沖蝕是地表經由集中逕流沖蝕的一種線狀特徵(Poesen, 1993)。在裸露的坡面或具有集中水流的凹型坡面上，常因極端暴雨對土壤的沖擊以及坡面上的集中逕流對表土產生下切及側向侵蝕作用，隨著土體沖蝕嚴重，紋溝沖蝕便開始產生，而到了水體有對紋溝土體更嚴重的下切作用時，形成具有固定或比較固定的溝道或溝床的土壤沖蝕作用，蝕溝沖蝕便開始產生 (Toy et al., 2002)。

量化蝕溝產砂量是一項很大的挑戰，現地測量為常見估算蝕溝侵蝕量的方式(e.g. Vandaele and Poesen, 1995; Vandekerckhove et al., 2001; Nachtergaele et al., 2001a,b; James et al., 2007)，最早先使用手工測量(Ireland, 1939)，費時費力且受地形起伏有不易到達現地進行量測的限制。較為先進的現場蝕溝產砂量測量包括了直接沖刷體積測量(如 Auzet, 1995)、沖蝕釘測量(如 Vandekerckhove, 2001)、經緯儀測量(如 Nyssen et al., 2006b)等，到近年也有採用的全球定位系統(Global Positioning System, GPS)對蝕溝進行即時動態測量(Real Time Kinematic, RTK)(游智敏等，2004)，該方法省時而且定位精準度高，在惡劣的天氣狀態下仍有良好的穩定性，但施測人員仍需克服地形

可達性的限制。全站儀(Total station)則相當適合在地形起伏大的區域做測量，受到地形阻礙時更可更換測站來完成全坡面的施測，具有高精度(測點間距 0.075-0.275 平方公尺，準確度達 0.05 公尺(Chappell et al., 2003)以及快速測量的優點且不需要太多的人力就可以完成監測(Keaton and Degraff, 1996)。

隨著遙測量測技術的發展，使得遠距大規模的蝕溝的測量變的可行(e.g. Thomas et al., 1986; Derosé et al., 1998; Nachtergaele and Poesen, 1999; Hapke, 2005; Ghimire et al., 2006; Gunatilaka, 2007; Menéndez-Duarte et al., 2007)，常用的方法包括藉由不同時相的大比例尺(1/5,000 ~ 1/40,000)的航空相片，並且利用數值高程模型(Digital Elevation Models, DEM)技術生成不同時間段的立體影像圖，來研究侵蝕速率與侵蝕量(如 Seginer, 1966; Prosser and Aberneathy, 1996; Burkard and Kostaschuk, 1997; DeRose, 1998; Betts et al., 2003; Ries and Marzolff, 2003; Kasai et al., 2009)，遙測方法之限制為易受地表植被覆蓋阻擋造成其測量上的限制以及精細度不足，在細部的推估上可能會產生誤差。

許多研究利用蝕溝沖蝕模式模擬產砂 (e.g. Favis-Mortlock, 1998; Sidorchuk 1998, 1999; Kirkby and Bull, 2000; Nachtergaele et al., 2001a, b; Torri and Borselli, 2003; Huang and Gallichand, 2006)。但是在計算進入蝕溝溝頭集水區域的流量時，常利用合理化公式 (Vanwalleghe et al., 2005), Soil Conservation Service (SCS) 法 (Capra et al., 2005) 或降雨-逕流的經驗公式 (Sidorchuk et al., 2003)，受限於不足的水文資訊可供率定及驗證，難以準確地估算進入蝕溝溝頭集水面積的流量，也因此對於後續水流對溝體沖蝕的計算更是很難突破。

近年有研究指出在集水區等級的空間尺度下，蝕溝沖蝕代表一個重要的產砂來源(Poesen, 2003; Poesen and Hooke, 1997)，Osterkamp and Toy (1997) 提出，在逕流場區尺度下，主要為面蝕(Surface erosion)與紋溝沖蝕主導試驗區之沖蝕行為，然而範圍一旦超過一臨界範圍(約 1 到 10 公頃)時，蝕溝沖蝕就變成一個非常重要、甚至是主導之產砂機制。Poesen 等人(1996b)也提出，研究區域面積範圍在 2.6 到 10 公頃之間，蝕溝沖蝕所占總產砂量的比例範圍大概在 33%-85%。Poesen 及 Hooke (1997) 在其研究也發現，除了片蝕

和紋溝沖蝕外，蝕溝沖蝕和渠道沖蝕同樣會產生，也為一不能忽略之因素。Wasson (2002) 以在澳洲西北的 Lake Argyle 水庫中以碳、氮、銫 137、磁力方法和鋁同位素比例做為土壤追蹤劑，發現庫區內 80% 的泥砂來自於蝕溝和渠道沖蝕。

1.2 研究目的

蝕溝沖蝕雖然在集水區扮演著相當重要的角色，但目前對於其產砂之機制瞭解有限，在探討集水區尺度的泥砂產量時，蝕溝產砂的量化更是極具挑戰以及困難。本研究嘗試以全站儀針對白石溪集水區之四條蝕溝進行觀測，探討不同類型蝕溝對於產砂的貢獻，配合航拍圖判釋蝕溝規模以及數量，估算其在雨季期間蝕溝沖蝕的總量，藉以了解蝕溝在集水區佔整體泥砂來源的比例，提供水庫管理者集水區泥砂治理的參考。

二、研究區簡介

本研究以石門水庫上游白石溪集水區為研究區(圖 1)，位於東經 $121^{\circ}11'$ - $121^{\circ}17'$ ，北緯 $24^{\circ}27' \sim 24^{\circ}37'$ 之間；集水面積約為 120 平方公里。地勢起伏自海拔 826 至 3,529 公尺之間，主要山脈向東北蜿蜒延伸。地質狀況複雜，大部分斷層、褶皺、裂縫沿東北方向遍佈於集水區內，地質破碎以及複雜的岩石組成，主要地層與岩性為巴陵層的硬頁岩與板岩、北寮層的塊狀砂岩夾頁岩、木山層的砂頁岩互層、大寮層的頁岩夾砂岩、石底層之塊狀砂岩與打鹿頁岩的粉砂岩及頁岩。

白石溪集水區屬於亞熱帶季風型氣候，主要降雨集中在五月中旬到七月中旬的梅雨季以及七月中旬到八月因熱帶性低氣壓所形成的颱風季節期間，年平均降雨量為 2,200-2,800 釐米。2004 年 8 月艾利颱風侵襲北台灣，在白石溪雨量站測到最高日降雨量達 1,263 釐米以及累積雨量達 1,603 釐米，引發境內多處山崩、土石流與邊坡沖蝕。造成集水區多處土砂災害，以及下游水庫大量淤積，因此，釐清此區域泥砂來源將對泥砂治理有相當大的指標性意義。

三、研究方法

本研究以全站式光波測距經緯儀量測四條蝕溝於雨季期間(2006 年 7~12

月)體積的變化，結合航拍圖判釋的蝕溝數量，估算整體集水區內蝕溝產砂量，主要流程如圖 2 所示。

3.1 蝕溝選定

在蝕溝選定上，利用航拍圖上的蝕溝與現地所見進行比對，現地蝕溝場址考量要點包含蝕溝溝體無植物遮蔽、附近觀測點通視良好、觀測距離在儀器測距範圍之內。此外，為了能真實呈現蝕溝產砂量在時間以及空間上的變化，避免選擇該地點可能是受到治理的蝕溝。本研究共量測四條蝕溝(圖 3)，兩條在白石溪集水區內；兩條在白石溪集水區內秀巒檢哨站下游約兩公里處(屬於玉峰集水區)。

3.1.1 測量方法

本研究使用日本 TOPCON 公司出產的雷射全測站儀(型號為 GPT-3005LN)，至現地可達之處進行蝕溝坡面測量，儀器以脈衝式光波測距，特點為具有免稜鏡觀測功能，適合在地形起伏變化大、範圍遼闊的集水區內進行現場的測量工作。免稜鏡最大測距為 1,200 公尺，測量精度為 $(\pm 3\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D)$ ， D 為測量距離(公尺)，測角精度為 $5''$ 。蝕溝第一次施測時間為 2006 年 7 月 2 日至 8 月 6 日，第二次量測時間為 2006 年 12 月 2 日至 12 月 21 日。

3.1.2 蝕溝表面數值高程建立與體積估算

為了計算蝕溝體積變遷，必須將蝕溝表面所測得之離散點，進行對應高程的插值處理。本研究採用自然鄰域插值法(Natural Neighbor)，進行溝面高程的內插。其基本原理是對於一組徐昇氏(Thiessen)多邊形，當在資料集中加入一個新的資料點(目標)時，就會修改這些徐昇氏多邊形，而使用鄰點的權重平均值來決定待插點的權重，待插點的權重和目標徐昇氏多邊形成比例。自然鄰點插值法在資料點凸起的位置並不外推等值線，對於現地施測時誤打到草或樹木等奇異點，可避免對整體坡面土體測點的數值造成不必要的內插。離散點經內插轉換成數值網格後，比較降雨前後之蝕溝坡面數值網格，則可計算出蝕溝於該段時間內體積變化量。

3.1.3 泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)

蝕溝沖蝕後，部分的產砂量將會由溝體往下游移動，而蝕溝淨產砂量除

以溝體沖刷總量，代表泥砂由土體表面分離後，離開蝕溝溝體範圍的比例稱為泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)，可用來推估可能進入河道的泥砂量，表示如下式：

$$SDR_{\text{溝體}} = \frac{\text{蝕溝淨產砂量}}{\text{蝕溝沖刷總量}} = \frac{\text{沖刷總量} - \text{堆積總量}}{\text{沖刷總量}} \quad (1)$$

3.2 集水區內蝕溝數量的推估

為估算集水區內蝕溝產砂總量，需瞭解集水區內蝕溝數量以及規模。本研究取得 2004 年艾利颱風後石門水庫上游集水區 0.5 公尺網格解析度的航空攝影圖，以及水平精度為 5 公尺的數值高程模型，根據其成因、規模和地形外貌，並結合航照圖上之影像特徵作為判釋蝕溝的依據。從航照圖以及三維化地景立體模型可以判釋蝕溝之位置、數目及規模。

航照圖上判釋蝕溝原則，從坡面上沿著局部坡面走向找出具有線性特徵的地貌為重要判釋原則之一。此外，包括地形外貌、蝕溝成因、集水面積及蝕溝規模也是蝕溝的判釋原則(Foster, 1985; Nachtergaele et al., 2002a; 水土保持手冊，2005)，敘述如下。

(a) 地形外貌

航照圖上可依據蝕溝之地形外貌進行判釋，判釋準則如表1，裸露和部分裸露面的蝕溝在航拍圖上可由其邊界的差異，定出植生與土體表面的界線，進而進行蝕溝面積的估算。這類蝕溝判釋的結果，將以多邊形(Polygon)資料的格式儲存。對於沒有裸露表面的蝕溝，由於無法計算其蝕溝面積，僅能給予其侵蝕長度作簡單的定義及數化。惟此類蝕溝因為植生覆蓋，無法由航拍圖上窺見其地表狀態，另以其他準則進行判釋，如表2所示，這類蝕溝數化的結果，將以線形(line)資料表示。

(b) 蝕溝成因

蝕溝形成原因可分為集中逕流與小型崩塌，集中逕流沖蝕為蝕溝沖蝕的主要原因之一，利用ArcGIS 9.0之水文模組 (Hydrology)，輸入白石溪集水區之DEM網格資料，分別進行流向 (Flow Direction)與集流面積 (Flow Accumulation) 分析，得到該集水區坡面上河系圖。小型崩塌的特徵在於蝕溝的源頭為小規模崩塌地，而此崩塌地之平均寬度小於20公尺，同時線性特徵符合蝕溝之判釋原則者，則此「崩塌—蝕溝」之線性特徵定義

為蝕溝。

(c) 蝕溝規模

本研究參考由中華水土保持學會於2005年所編印的「水土保持手冊」中之坑溝整治章節所建議，定義於航照圖中裸露面之線性特徵之平均寬度為20公尺以下者為蝕溝，若超過此一溝寬標準則應為更大尺度的野溪或河道沖刷，在本研究不列為蝕溝沖蝕考量範圍。此外，參考北區水資源局於2000年委託和新工程顧問股份有限公司所執行的「石門水庫集水區第三階段治理規劃」報告書中建議，定義長寬比大於1：10之線性特徵為蝕溝，若長寬比小於此值者則可能為小型局部崩塌，將不列入蝕溝考量範圍。

(d) 集水面積

集水面積定義為在坡面上，水流會匯入溝體且於蝕溝末端排出的坡面集流面積。參考中華水土保持學會於2005年所編印的「水土保持手冊」中之坑溝整治章節所建議，定義集水面積小於20公頃之線性特徵為蝕溝，集水面積大於20公頃者則視為更大空間尺度的野溪或河道沖刷，不屬於蝕溝之研究範圍。另外在集水區內，山谷地是集中水流的地形，在航照圖會呈現與蝕溝類似的特徵(線性特徵、集中逕流等)，透過三維地形圖判釋出之山谷地，將不列入蝕溝研究範圍內。

四、研究結果

4.1 蝕溝特徵與產砂量

本研究量測的四條蝕溝之基本資訊、量測結果與產砂量如表 3 所記錄，描述如下：

(a) 蝕溝1 (秀巒檢哨站前)

蝕溝1位於秀巒檢哨站前，由航拍圖上研判，該蝕溝水平投影長度約為170公尺。但由於現場植生繁盛，加以水流阻擋，無法均勻觀測蝕溝全貌，測量部分僅有該蝕溝中下段約70公尺。蝕溝1測點分佈平面圖如圖4。溝面的侵蝕與堆積示意圖如圖5，沖刷體積為130立方公尺；堆積體積為124立方公尺。總產砂量6立方公尺，蝕溝溝面表面積為1,387平方公尺，單位面積產砂量為0.0043(立方公尺/平方公尺)。溝體本身產砂量的遞移率SDR=5%。

主要的侵蝕部分來自於溝底，圖3(a)中央紅圈處為最主要的侵蝕部分。主要的堆積部分來自溝頭處，可能因為該處植生濃密，雷射點無法直接測達地表面點而打在植生之上所產生的測量誤差。整體而言，此蝕溝呈現一個穩定的狀態，沖蝕情形不明顯，應屬穩定型蝕溝。

(b) 蝕溝2 (田埔崩塌地上)

蝕溝2位於田埔聚落上游0.5公里、秀巒部落下游2公里處，為崩塌面上新生之集中逕流沖蝕溝。由第二次測量發現，蝕溝溝頭有刷深現象，亦有溯源侵蝕的狀況產生。於第二次量測時，於溝頭處蝕溝範圍有些許擴大，沖刷體積量為24立方公尺；堆積體積量為2立方公尺(圖5)；蝕溝的總產砂量22立方公尺，表面積107平方公尺(前期蝕溝表面積97加上新增溝頭表面積10)，單位面積產砂量為0.21(立方公尺/平方公尺)。溝頭的產砂量為2立方公尺，溝頭表面積為10平方公尺，溝頭的單位面積產砂量為0.20立方公尺/平方公尺，僅略小於蝕溝整體單位面積產砂量。蝕溝本身產砂量遞移率SDR=92%。

蝕溝裸露面為岩層出露，沖刷量甚少，甚至形成輕微堆積。但也因為此處的表土抗沖蝕能力與溝腳處有極大差異的影響，造成坡腳處有很深的刷深量。

(c) 蝕溝3 (田埔崩塌地旁)

蝕溝3位於田埔聚落上游0.5公里、秀巒部落下游2公里處，為一獨立蝕溝。沖刷量為255立方公尺；堆積量為204立方公尺(圖5)。總產砂量51立方公尺，蝕溝溝面表面積為3,000平方公尺，單位面積產砂量為0.0170(立方公尺/平方公尺)。蝕溝本身產砂量的遞移率SDR=20%

蝕溝沖刷大多發生在蝕溝溝測邊緣，溝底多為淤積狀態，這與一般對於蝕溝溝底刷深的現象不同。因為在第二次量測時，溝底已長出些許植生，使得雷射光束容易被雜草遮蔽，無法測得真正的溝底表面高程，造成測量誤差。但若以土壤沖蝕的觀點來看，溝底的植生有助於溝底表面的穩定，造成部分土砂淤積亦屬合理之現象。

(d) 蝕溝4 (秀巒大崩塌地崩塌面上)

蝕溝4位於2004年艾利颱風侵襲後所造成的秀巒大崩塌面上，為崩塌

面上集中逕流沖蝕產生的蝕溝，沖刷量為346立方公尺；堆積量為7立方公尺(圖5)。總產砂量339立方公尺，蝕溝溝面表面積為992平方公尺，單位面積產砂量為0.34(立方公尺/平方公尺)。蝕溝本身產砂量的遞移率SDR=98%。

本蝕溝沖刷部分大多集中在溝底，有非常明顯的集中逕流沖蝕特徵。相較於蝕溝1與蝕溝3，本蝕溝溝面上並無植生保護；相較於蝕溝2，本蝕溝溝底表土層厚度充足，尚未有岩層面裸露。因此本蝕溝沖蝕狀況發展完整，且有著所有現場測量蝕溝中最大的單位面積產砂量。

4.2 蝕溝判釋結果

由航照圖判釋結果顯示，在白石溪集水區內共 120 條蝕溝，符合面型蝕溝判釋原則的共有 41 條，坡度介於在 20 ~ 50 度之間，平均坡度為 35 度，最小坡度為 8 度，最大坡度值為 51。寬度介於在 1 ~ 15 公尺之間，平均寬度為 7.8 公尺，最大與最小寬度為 15.8 公尺與 3.4 公尺。集水面積介於 1 ~ 10 公頃間，平均面積為 6.11 公頃，最大與最小面積為 17.50 公頃與 0.34 公頃。另外，符合線形蝕溝判釋原則的蝕溝共有 79 條。判釋的結果如圖 6。

4.3 白石溪集水區蝕溝產砂量推估

蝕溝 2 和蝕溝 4 屬於產砂型蝕溝，其特徵為蝕溝發育期年輕，多為雛型期或擴展期之蝕溝，溝面缺乏植生保護，因此單位面積產砂量較高，土壤沖蝕情形遍佈溝壁與溝底。單位面積產砂量蝕溝 2 為 0.21 立方公尺/平方公尺，蝕溝 4 為 0.34 立方公尺/平方公尺。產砂型蝕溝平均單位面積產砂量為 0.28 立方公尺/平方公尺。

蝕溝 1 和蝕溝 3 則屬於穩定型蝕溝，這類蝕溝由於溝體已沖刷至心土或底部岩層，並且植生在穩定土層上逐漸生長形成保護層，而使得此類蝕溝單位面積產砂量較低，沖刷往往是局部性區域的，而其他部分則因植物生長而越趨穩固，甚至會有小部分堆積。蝕溝 1 單位面積產砂量為 0.0043 立方公尺/平方公尺，蝕溝 3 為 0.0170 立方公尺/平方公尺。穩定型蝕溝平均單位面積產砂量為 0.01 立方公尺/平方公尺。

面型蝕溝資料共 42 條，以及僅具有「長度」參數(即於航拍圖上僅具有線狀侵蝕特徵，而無裸露面者)的蝕溝資料共 79 條。考慮現場測量蝕溝溝面

資料以及航拍圖數化所得的蝕溝資料，並以現地探勘經驗作為輔助，就測量資料與航拍數化資料的相似性而言，航拍圖上的「裸露面蝕溝」具有與現場測量的「產砂型蝕溝」相似之缺乏植物覆蓋保護特徵。若蝕溝溝面土壤呈現穩定狀態，在沖刷量減少的情況下植生應該日漸復育。因此研判「裸露面蝕溝」應仍屬「活動中」狀態，產砂狀態則以現場「產砂型蝕溝」之平均單位面積產砂量估算之。反之，航拍圖上判釋的「無裸露面蝕溝」由於具備植生覆蓋完整之特徵，蝕溝發展狀況應與現場量測的「穩定型」蝕溝相似，故假設其產砂狀態與「穩定型」蝕溝相同，產砂量以現場測量「穩定型」蝕溝的平均單位面積產砂量估算之；並且假設溝寬發展狀況與「裸露面蝕溝」相同，採用「裸露面蝕溝」的平均溝寬 7.8 公尺作為「無裸露面蝕溝」的平均溝寬。產砂型蝕溝平均單位面積產砂量為 0.28 立方公尺/平方公尺，蝕溝總面積為 90,515 平方公尺，調查期間(2006 年 7 月至 12 月)產砂量為 25,344 立方公尺。穩定型蝕溝平均單位面積產砂量為 0.01 立方公尺/平方公尺，蝕溝總長度為 30,690 公尺，溝寬假設為 7.8 公尺(裸露蝕溝平均溝寬)，蝕溝總面積為 239,995 平方公尺，調查期間產砂量為 2,400 立方公尺。綜合上述，本次調查期間(2006 年 7 月至 12 月)蝕溝產砂總量約 27,744 立方公尺。

假設蝕溝產砂量與降雨量成一線性等比例關係，2006 年 1 月到 6 月的累積降雨量為 1,574 公釐，7 月到 12 月累積降雨量為 888 公釐。推估 2006 年 1 月到 6 月的蝕溝產砂總量為 49,177 立方公尺，2006 年度蝕溝總產砂量為 76,921 立方公尺；考慮土體密度以 2.32 公噸/立方公尺計算，得到蝕溝沖蝕年產砂量約為 178,456 噸。

五、討論

5.1 蝕溝侵蝕行為

蝕溝 1 和蝕溝 3 現場蝕溝表面狀況皆有局部植物生長覆蓋。在測量的結果中不難發現植物生長對於蝕溝表面沖蝕/堆積的影響。蝕溝 1 中，施測溝頂部分由於有植生覆蓋，加上此處不為真實蝕溝溝頭處(此蝕溝僅有中下部份測量資料)，沖蝕情況不明顯，反而因為測點的分佈，以及植物生長的影響，在測量上出現了局部最大堆積量。此蝕溝沖蝕部分集中在測量中段處，估計可能由小規模的土石剝落所產生，溝底也呈現沖蝕傾向，不過並不明顯。

蝕溝3則呈現與蝕溝1相左的沖蝕情況，為溝底淤積、溝側沖刷。這是因為蝕溝3溝底尚未侵蝕到岩層，使得溝底仍有些微表土層有利植物生長。比對前後期植生狀況，可以看出在溝底植物生長情況良好，即使在測量時盡力避開植物的影響，但是溝底仍呈現局部堆積的傾向；溝側雖然也有植物生長，但因為可觀測面積(與觀測角度、位置有關)較大，能夠避開植物的干擾，而得到較為真實的沖刷情形。

蝕溝2和蝕溝4為崩塌地上新生的淺溝，植物覆蓋率低，加上沖蝕尚未深及底岩，土砂材料來源較多，因此產砂量也較大。本研究在測量期間清楚地記錄了蝕溝2在溝頭發展上的溯源侵蝕現象，溝頭溯源侵蝕的水平投影面積為7.24平方公尺，與原始水平投影面積55.17平方公尺比較多出了13%的水平面積。溝頭產砂率0.20立方公尺/平方公尺，僅略低整體平均蝕溝產砂量0.21立方公尺/平方公尺一些。此外，本蝕溝的侵蝕行為亦顯現出地質對於溝體侵蝕的影響。由於蝕溝中段有明顯較為堅硬的岩層裸露，因此中間岩層部分侵蝕率低，甚至有輕微堆積；但是下游端土層由於受到中段堅硬地質的影響，而呈現了類似蝕溝溝頭侵蝕的結果，最大局部刷深量有1.9公尺。蝕溝4則呈現了大量的溝底及溝壁沖刷，尤其是沿著溝底的連線刷深狀況更為明顯。

由蝕溝的平均單位面積產砂量(淨沖蝕量/溝面表面積)以及蝕溝本身產砂量遞移率可以看出，平均單位面積產砂量與遞移率存在正相關關係，表示對特定蝕溝而言，蝕溝淨產砂量與溝道輸送土壤的能力有關。蝕溝1和蝕溝3溝面有部份植生覆蓋，使得水流流速受到植物影響而變慢，降低水流挾砂能力，使得部份泥砂沉降在溝體內部，而無法排出溝體、進入河道。蝕溝2和蝕溝4則因為水流侵蝕能量強，大部份溝體產砂皆隨著水流流出溝體，因此有著高的平均單位面積產砂量以及高的泥砂遞移率。

由上述討論可知，各別蝕溝的產砂量差異與其溝底土層厚度(產砂來源)、溝面植物覆蓋程度(影響水流侵蝕能力)有關。在分類上研究者應以不同「發育時期」區隔之(如雛形期、擴展期、復原期、安定期)。在產砂的貢獻上，年輕的蝕溝(雛形期、擴展期)容易造成較大的產砂來源，而穩定的蝕溝(復原期、安定期)產砂量相對少很多。以本研究結果來看，產砂的差異量介於0.0043-0.3418(m^3/m^2)，相差約79倍。若將蝕溝1與蝕溝3歸納為穩定型蝕溝，

平均單位面積產砂為 $0.01(\text{m}^3/\text{m}^2)$ ，蝕溝2與蝕溝4歸納為產砂型蝕溝，平均單位面積產砂量為 $0.28(\text{m}^3/\text{m}^2)$ ，則產砂型蝕溝單位面積產砂量約為穩定型蝕溝之28倍。

蝕溝的發展狀態，可以概分為兩部份——活動中(active)與穩定(stable)狀態(Kosov et al., 1978)。本研究測量了四條獨立的蝕溝，其各別產砂比較如表3所示。根據現場蝕溝調查資料，依其發育程度、植生覆蓋與否以及產砂狀態，可將該四條蝕溝粗分為兩類型：「產砂型蝕溝」和「穩定型蝕溝」。活動狀態中的蝕溝大概只佔整個生命週期的5%，但是卻包含了超過90%的長度發展、60%的面積、以及35%的體積發展(Kosov et al., 1978)。在計算蝕溝產砂量時，應考慮蝕溝發展的階段，因為各階段產砂差異能力相差甚鉅。對於短期蝕溝產砂量的推估，宜選擇較為年輕的蝕溝做為研究對象，其短期產砂貢獻量遠大於穩定型蝕溝。對於長期蝕溝產砂量的估算，則應另外考量蝕溝發展的時間尺度。

5.2 誤差討論

本研究目的為進行水庫集水區內蝕溝產砂量的估算研究。在研究過程中做了諸多假設，以利進行集水區內蝕溝總產砂量的推估，也因此無可避免地產生了估算上的誤差。其所造成之總產砂量估算的誤差來源如下：

- (a) 待測蝕溝的選擇：待測蝕溝的選擇，理論上應該選擇具有沖蝕代表性的蝕溝，並且進行蝕溝整體(含溝頭、溝壁、溝道以及溝腳沖積扇)的測量，方能釐清整體蝕溝的產砂量，以及各細部堆積/沖蝕的行為。本研究因為集水區內植生繁盛、道路蜿蜒等因素的影響，在測量角度、距離的要求上，不容易在集水區內找到適合測量整體溝貌的蝕溝，無法對於蝕溝侵蝕的三大主軸：溯源侵蝕、橫向侵蝕、溝道侵蝕進行所有面向的估算，例如溝頭溯源侵蝕(蝕溝2)產砂量佔總產砂量的11%，具有相當程度的影響，因此待測蝕溝的選擇，應考慮集水區內能完整施測的蝕溝為佳。
- (b) 蝕溝發育：產砂量與蝕溝發育期有明顯的關係，因此在選擇施測的蝕溝時，應考量研究目的與時間尺度，選擇適合發育期的蝕溝。
- (c) 蝕溝數目的估算：本研究利用航空攝影圖判釋集水區內蝕溝數目，然

而集水區內植生覆蓋濃密，在植生底下的土壤沖蝕行為不易在航拍圖上察覺與判釋，可能造成蝕溝數量上以及規模上的低估。

- (d) 蝕溝產砂量的估算：在研究中由實際測量資料發現，不同時期的蝕溝單位面積產砂量差異甚大；依照現場植生覆蓋、表土侵蝕狀況(有無侵蝕到岩層)以及單位面積產砂量資料，將測量蝕溝粗分為兩類：「產砂型蝕溝」與「穩定型蝕溝」。此分類方法準則仍有改進的空間，因為本研究測量樣本數不足，無法更精細地區分各發育期蝕溝產砂量；但就單位面積產砂量的比較而言，產砂型蝕溝單位面積產砂量約為穩定型蝕溝的28倍，兩者在產砂量的貢獻上，有明顯的差異，應分類討論。
- (e) 年蝕溝沖蝕量：蝕溝的發生是表土分離的結果，蝕溝的溝道是物質轉移的媒介，土顆粒的分離和搬運是水流強度的函數(Foster,1983)，而自然情況下水流強度與降雨有關。由於臺灣集水區內蝕溝侵蝕量與降雨強度的關係尚未被建立，本研究假設產砂量與研究期間內累積雨量呈線性正比例關係，推估出2006年蝕溝侵蝕產砂總量約為76,921立方公尺。倘若能長期觀測蝕溝變化建立臺灣集水區蝕溝產砂量-雨量的關係公式，將使得蝕溝產砂量的推估更為準確。

5.3 蝕溝侵蝕產砂量貢獻

對於白石溪集水區土壤沖蝕量的推估，本研究蝕溝產砂量初估為 $14.87 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，相當於 $178,456 \text{ t yr}^{-1}$ 。另外根據趙倬群(2004)以崩塌頻率-面積關係配合崩塌深度參數推估白石溪集水區內單位面積年崩塌侵蝕速率為 $116.17 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，相當於 $1,394,040 \text{ t yr}^{-1}$ ，若僅考慮崩塌實際進入河道之崩塌土砂(崩塌至河道遞移率=73%)，則為 $1,023,480 \text{ t yr}^{-1}$ 。Chiu et al. (2011)以放射性核種鉍-137於土壤深度之分佈推估之土壤沖蝕率為 $2.58 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，相當於 $30,960 \text{ t yr}^{-1}$ 。考量不同泥砂來源比例，蝕溝產砂量為14%，崩塌地為83%，土壤沖蝕為3%，如圖7，從各泥砂來源的比較可以發現，崩塌地仍為泥砂產量的大宗，但蝕溝產砂量亦佔有不可忽略的貢獻。

將本區域蝕溝產砂量結果與其它地區比較，Wu et al. (2008)以RTK觀測中國東北方黑龍江省內集水區的四條蝕溝，蝕溝規模大約在 $0.02 \sim 0.57$ 公頃，皆屬於活動時期蝕溝，該集水區內蝕溝密度為 4.2 m ha^{-1} ，採土方密度為 $1,270$

kg m^{-3} ，得到蝕溝產砂量約為 $10.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ；Deroose et al. (1998)針對紐西蘭的Mangatu以及Te Weraroa子集水區(面積為 4 km^2)內共十一條蝕溝，利用不同時期DEM相減計算蝕溝產砂量，採土方密度 $2,000 \text{ kg m}^{-3}$ ，得到在活動時期以及穩定時期蝕溝產砂量分別為 $2480 \pm 80 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以及 $1550 \pm 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，所得結果超出世界標準值許多(Milliman and Syvitski, 1992; Walling and Webb, 1996)，Deroose et al. (1998)認為蝕溝產砂量會隨著規模越大而有更高的產砂量，所測量的十一條蝕溝規模約為 $0.6 \sim 23.6$ 公頃，且其中兩條蝕溝面積更高達 $17.1 \sim 23.6$ 公頃，其他蝕溝規模大多亦高於1公頃以上。比較兩篇文章結果可以發現集水區內蝕溝規模以及密度是決定兩者產砂差異性大的主因，雖然兩者量測的蝕溝皆屬於活動時期，但在Wu et al. (2008)文章中，該集水區內多小規模蝕溝，而在Mangatu 以及 Te Weraroa子集水區因其面積小(蝕溝密度高)以及大多屬於大規模蝕溝，比較發現Wu et al. (2008)所測量到的活動型蝕溝產砂量遠小於Deroose et al. (1998)所得到的結果。

而在本研究中，白石溪集水區內的蝕溝密度約為 3.5 m ha^{-1} ，所測量的蝕溝規模與Wu et al. (2008)較為相近，比較可發現兩地區的蝕溝產砂量差異不大，惟白石溪集水區平均年降雨量約為 $2,200 \sim 2,800 \text{ mm}$ ，比Wu et al. (2008) 所記錄的在研究區域的年平均雨量 534 mm 高出約4~5倍，雖然在白石溪集水區蝕溝密度較少，但較大的降雨量使得白石溪集水區的蝕溝有較大的產砂量。而Deroose et al. (1998)提到該研究區域內平均雨量約為 $1,000 \sim 3,000 \text{ mm}$ ，雖然與白石溪集水區的雨量紀錄最大值差異不大，但該區蝕溝密度高且規模大，因此在蝕溝產砂量遠高於白石溪集水區所量測到的蝕溝產砂量。可以推論，降雨量多寡、蝕溝密度、與規模分布是決定該區域蝕溝產砂量多寡的主要原因。

六、結論

本研究以全站儀對集水區內四條蝕溝進行侵蝕產砂研究，並以2004年艾利颱風後0.5公尺精度航空攝影圖判釋集水區內蝕溝特性，最後結合上述成果，對於集水區內蝕溝產砂量進行估算。結論如下：

- (a) 蝕溝產砂量與現地坡面上植生復育、蝕溝發展期有關。無植物覆蓋及發育初期之產砂型蝕溝單位面積產砂量分別為 $0.21 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 以及 0.34

m^2/m^3 ；溝面植生逐漸覆育、或是溝體已刷深至岩層之蝕溝，單位面積產砂量小，實測結果為 $0.0043 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 以及 $0.0170 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。產砂型蝕溝之產砂量約為穩定型蝕溝產砂量之28倍。

- (b) 蝕溝2於研究期間發現有向上溯源侵蝕之行為，上溯面積為原始面積(水平投影)的13%，溝頭產砂量為 2.41m^3 ，佔該蝕溝總產砂量的11%。
- (c) 白石溪集水區共有120條蝕溝，其中41條屬於面型蝕溝，79條為線型蝕溝，並利用單位面積產砂量與蝕溝面積推估研究區間內蝕溝產砂量，得白石溪集水區在2006年7月到12月間蝕溝產砂量約為 $27,744 \text{ m}^3$ 。
- (d) 推估2006年整年度蝕溝總產砂量為 $176,280 \text{ t}$ ，與趙倬群(2004)推估崩塌產砂量 $1,023,480 \text{ t}$ ，以及與Chiu et al. (2011)所推估土壤沖蝕量 $30,960 \text{ t}$ ，發現蝕溝產砂量佔總產砂的14%，顯示蝕溝侵蝕對集水區總產砂量仍為一不可忽略之泥砂來源。

參考文獻

1. Auzet, A.V., Boiffin, J., and Ludwig, B., "Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface rate," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 20, pp. 759-767, 1995.
2. Betts, H.D., Trustrum, N.A., and Derosé, R.C., "Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, No. 10, pp. 1043-1058, 2003.
3. Brakensiek, D.L., Osborn, H.B., and Rawls, W.J., *Field Manual for Research in Agricultural Hydrology*, USDA Agricultural Handbook 224, U.S. Government Printing Office, Washionton, DC, 1979.
4. Burkard, M.B., and Kostaschuk, R.A., "Patterns and controls of gully growth along the shoreline of Lake Huron," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 22, pp. 901-911, 1997.
5. Capra, A., Mazzara, L.M., and Scicolone, B., "Application of the EGEM Model to Predict Ephemeral Gully Erosion in Sicily, Italy," *Catena*, Vol.

- 59, pp. 133-146, 2005.
6. Chappell, A., Heritage, G.L., Fuller, I., Large, ARG., and Milan, D., "Spatial and temporal river channel change: geostatistical analysis of ground survey elevation data," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, pp. 349-370, 2003.
 7. Chiu, Y.J., Chang, K.T., Chen, Y.C., Chao, J.H., and Lee, H.Y., "Estimation of soil erosion rates in a subtropical mountain watershed using ¹³⁷Cs radionuclide," *Natural Hazards*, Vol. 59, No. 11, pp. 271-284, 2011.
 8. Derosé, R.C., Gomez, B., Marden, M., and Trustrum, N., "Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, pp. 1045-1053, 1998.
 9. Favis-Mortlock, D., Guerra, T., and Boardman, J., "A Self-Organizing Systems Approach to Hillslope Rill Initiation and Growth; Model Development and Validation [M]," IAHS publication, 249, pp. 53-61, 1998.
 10. Foster, G., and Lane, L., Erosion by concentrated flow in farm fields. In : Li , R.M. , Lagasse , P.F. (Eds.) . Proceedings of the D.B. Simons Symposium on Erosion and Sedimentation, pp. 9.65-9.82, Colorado State University, Fort Collins, 1983 ,
 11. Foster, G.R., "Understanding ephemeral gully erosion," pp. 1-21, 1985.
 12. Ghimire, S.K., Higaki, D., and Bhattarai, T.P., "Gully Erosion in the Siwalik Hills, Nepal: Estimation of Sediment Production from Active Ephemeral Gullies," *Earth Surface Process and Landforms*, Vol. 31, pp. 155-165, 2006.
 13. Gunatilaka, A., "Role of basin-wide landslides in the formation of extensive alluvial gemstone deposits in Sri Lanka," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 696, No. 32, pp. 1863-1873, 2007.
 14. Hapke, C.J., "Estimation of regional material yield from coastal landslides

- based on historical digital terrain modeling,” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 30, No. 699, pp. 679-697, 2005.
15. Huang, M.B., and Gallichand, J., “Use of the SHAW Model to Assess Soil Water Recovery after Apple Trees in the Gully Region of the Loess Plateau, China,” *Agricultural Water Management*, Vol. 85, No. 1-2, pp. 67-76, 2006.
 16. Ireland, H.A., “Principles of gully erosion in the piedmont of South Carolina,” Washington : United States of Agriculture, 1939.
 17. James, L.A., Watson, D.G., and Hansen, W.F., “Using LiDAR Data to Map Gullies and Headwater Streams under Forest Canopy: South Carolina, USA,” *Catena*, Vol. 71, pp. 132-144, 2007.
 18. Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., and Fujisawa, K., “LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan,” *Geomorphology*, Vol. 13, pp. 57-69, 2009.
 19. Keaton, J.R., and Degraff, J.V., Surface observation and geologic mapping, In : Turner, A.K., and Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247, pp. 178-230, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, 1996.
 20. Kirkby, M.J., and Bull, L.J., “Some Factors Controlling Gully Growth in Fine-Grained Sediment: A Model Applied in Southeast Spain,” *Catena*, Vol. 40, pp. 127-146, 2000.
 21. Kosov, B.F., Nikol'skaya, I.I., and Zorina, Ye.F., Eksperimental'nyye issledovaniya ovragoobrazovaniya. In: Makkaveev, N.I. (Ed.), Eksperimental'naya Geomorfologiya, Vol. 3, pp. 113-140, Izd. Mosk. Univ, Moskva, 1978.
 22. Menéndez-Duarte, R., Marquínez, J., Fernández-Menéndez S., and Santos, R., “Incised Channels and Gully Erosion in Northern Iberian Peninsula Controls and Geomorphic Setting,” *Catena*, Vol. 71, pp. 267-278, 2007.

23. Nachtergaele, J., and Poesen, J., "Assessment of Soil Losses by Ephemeral Gully Erosion Using High-Altitude (Stereo) Aerial Photographs," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 24, pp. 693-706, 1999.
24. Nachtergaele, J., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Oostwoud Wijdenes, D., and Roxo, M., "Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean Environments," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 26, pp. 17-30, 2001a.
25. Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L., and Govers, G., "The Value of a Physically Based Model versus an Empirical Approach in the Prediction of Ephemeral Gully Erosion for Loess-Derived Soils," *Geomorphology*, Vol. 40, pp. 237-252, 2001b.
26. Nachtergaele, J., Poesen, J., Sidorchuk, A., and Torri, D., "Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels," *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 10, pp. 1935-1953, 2002a.
27. Nearing, M.A., "Potential changes in rainfall erosivity in the US with climate change during the 21(st) century," *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 56, No. 3, pp. 220-232, 2001.
28. Nyssen, J., Poesen, J., Veyret-Picot, M., Moeyersons, J., Mitiku, H., Deckers, J., Dewit, J., Naudts, J., Kassa, T., Govers, G., "Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from Northern Ethiopia," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 31, pp. 167-185, 2006b.
29. Osterkamp, W.R., and Toy, T.J., "Geomorphic considerations for erosion prediction," *Environmental Geology*, Vol. 29, pp. 152-157, 1997.
30. Poesen, J., Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Ed.), Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills, pp. 221-239, Elsevier, Amsterdam, 1993.
31. Poesen, J., Boardman, J., Wilcox, B., and Valentin, C., "Water erosion

- monitoring and experimentation for global change studies,” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 51, No. 5, pp. 386-390, 1996a.
32. Poesen, J., and Hooke, J.M., “Erosion, flooding and channel management in Mediterranean Environments of southern Europe,” *Progress in Physical Geography*, Vol. 21, No. 2, pp. 157-199, 1997.
 33. Poesen, J., Nachtergale, J., Vertstraeten, G., and Valentin, C., “Gully erosion and environmental change. Importance and research needs,” *Catena*, Vol. 50 No. 2-4, pp. 91-134, 2003.
 34. Poesen, J., Vandaele, K., and van Wesemael, B., “Contribution of gully erosion to sediment production in cultivated lands and rangelands,” *IAHS Publications*, Vol. 236, pp. 251-266, 1996b.
 35. Prosser, I.P., and Abernethy, B., “Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds,” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2289-2298, 1996.
 36. Ries J. B., and Marzolff I., “Monitoring of gully erosion in the central Ebro Basin by large scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp,” *Catena*, Vol. 50, pp. 309-328, 2003.
 37. Risse, L.M., Nearing, M.A., Nicks, A.D., and Laflen, J.M., “Error assessment in the Universal Soil Loss Equation,” *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 57, No. 3, pp. 825-833, 1993.
 38. Seginer, I., “Gully development and sediment yield,” *Journal of Hydrology*, Vol. 4, pp. 236-253, 1966.
 39. Sidorchuk, A., A Dynamic Model of Gully Erosion. In book Modelling Soil Erosion by Water, edited by John Boardman & David Favis-Mortlock, NATO ASI Series, Series 1 : Global Environmental Change, Vol. 55, pp. 451-460, 1998.
 40. Sidorchuk, A., “Dynamic and Static Models of Gully Erosion,” *Catena*, Vol. 37, pp. 401-414, 1999.
 41. Sidorchuk, A., Märker, M., Moretti, S., and Rodolfi, G., “Gully Erosion

- Modelling and Landscape Response in the Mbuluzi River Catchment of Swaziland,” *Catena*, Vol. 50, pp. 507-525, 2003.
42. Thomas, A.W., Welch, R., and Jordan, T.R., “Quantifying Concentrated-Flow Erosion on Cropland with Aerial Photogrammetry,” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 4, pp. 249-252, 1986.
 43. Torri, D., and Borselli, L., “Equation for High-Rate Gully Erosion,” *Catena*, Vol. 50, pp. 449-467, 2003.
 44. Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K.G., Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control, Wiley press, New York, 2002.
 45. Vandaele, K., and Poesen, J., “Spatial and Temporal Patterns of Soil Erosion Rates in an Agricultural Catchment, Central Belgium,” *Catena*, Vol. 25, pp. 226-313, 1995.
 46. Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud Wijdenes, D., Gyssels, G., “Short-Term Bank Gully Retreat Rates in Mediterranean Environments,” *Catena*, Vol. 44, pp. 133-161, 2001.
 47. Vanwalleghe, T., Poesen, J., Van Den Eeckhaut, M., Nachtergaele, J., and Deckers, J., “Reconstruction Rainfall and Land-Use Conditions Leading to the Development of Old Gullies,” *The Holocene*, Vol. 15, No. 3, pp. 378-386, 2005.
 48. Wasson, R.J., Caitcheon, G., Murray, A.S., McCulloch, M., and Quade, J., “Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, northwestern Australia,” *Environmental Management*, Vol. 29, No. 5, pp. 634-646, 2002.
 49. Williams, J., Nearing, M., Nicks, A., Skidmore, E., Valentin, C., King, K., and Savabi, R., “Using soil erosion models for global change studies,” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 51, No. 5, pp. 381-385, 1996.
 50. Wu, Y., Zhong, Q., Zhang, Y., Liu, B., Cheng, H., Wang, Y., “Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China,” *Geomorphology*, Vol. 101, pp. 683-691,

2008.

51. 邱昱嘉，「應用 HSPF 模式與銨-137 技術於集水區產砂量之研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，2003。
52. 游智敏、伍永秋、劉寶元，「利用 GPS 進行切溝侵蝕監測研究」，水土保持學報，10：91-94，2004。
53. 行政院農業委員會水土保持局，「水土保持手冊」，行政院農業委員會水土保持局、中華水土保持學會編，2005。
54. 趙偉群，「石門水庫集水區崩塌土砂產量推估之研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，2004。
55. 歐陽元淳，「水庫集水區土壤沖蝕之研究—以石門、翡翠水庫為例」，台灣大學地理環境資源研究所碩士論文，2003。
56. 蔡宗賢，「水庫集水區暴雨時期崩塌土砂量推估之研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，2005。
57. 賴益成，「集水區泥砂遞移率推估之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文，1998。

謝辭

本研究感謝北區水資源局-「數位式集水區泥砂產量來源之推估研究」計畫經費支持現地測量以及提供白石溪集水區航拍圖、地表高程資料，以利進行蝕溝判釋。另外由衷感謝台大土木系游景雲教授給予本研究諸多寶貴的意見以及協助修正文章。

表1 航照圖上依據蝕溝地形外貌的判釋準則

地形外貌	定義	航照圖上的特徵
完全裸露面	此類蝕溝因溝體沖蝕劇烈，而使得溝體表面沒有植物生長，於航照圖上往往具有較高色調的影像，同時蝕溝與周圍植生的邊界明顯，較容易定出蝕溝沖蝕邊界。	1. 具有色調較亮的裸露面表面，與邊界上的植生有明顯的分界線。 2. 具有明顯之集中逕流排水路線。
部份裸露面	溝體部份區域因為溝壁上的植被向溝體延伸或生長，或被周圍植被的陰影遮蓋，以及因為攝影角度上的死角而在航照圖上呈現部份裸露面的蝕溝。	1. 部份溝體具有色調較亮的裸露面和明顯的邊界，其他部份則被植生所遮蓋而呈現較暗的影像。 2. 溝體上的陰影部份與周圍之植生色調不一致。 3. 溝底與溝壁上有植被生長以致溝體上的色調較暗。 4. 沿著溝體上具有植生被沖毀的痕跡，色調比蝕溝邊界上的植生為黑暗。 5. 具有明顯的線狀集中逕流排水路線。
沒有裸露面	具有明顯的線狀地景，然而因為溝體上長滿植被，周圍植生完全覆蓋或因為攝影角度上的死角而在航照圖上其整個溝體沒有裸露面的表面，呈現黑暗或較暗的色調。	1. 溝體幾乎沒有裸露面的表面。 2. 溝體上的陰影與周圍之植生具有明顯的色彩邊界。 3. 溝底與溝壁上有植被生長以致溝體上的色調較暗。 4. 沿著溝體上具有植生被沖毀的痕跡，色調比蝕溝邊界上的植生較為黑暗。 5. 具有明顯的線狀集中逕流排水路線。

表2 沒有裸露面蝕溝的判釋準則

(1)由2007年初陶林數值測量公司所數化白石溪集水區2公尺DEM，找出具有集中排水路線的線狀地景。 (2)依循排水線平行坡面走向，且在坡面上形成明顯切割的線狀地景(包括部份裸露和無裸露面的線狀沖蝕地形)。 (3)符合上述原則以及集水面積小於20公頃限制者，扣除道路、山谷、溪溝等水系資料，即判釋為線(line)資料蝕溝。
--

表 3 蝕溝測量記錄與產砂量估算

蝕溝編號	Gully 1 (白石) 秀巒檢哨站前	Gully 2 (玉峰) 田埔村落上游	Gully 3 (玉峰) 田埔村落上游	Gully 4 (白石) 秀巒檢哨站前
座標位置 (TWD97)	N:2723364 E:278974 Z:836	N:2725321 E:277734 Z:957	N:2725318 E:277653 Z:953	N:2723548 E:279165 Z:826
溝長(m)	68.59	20.45	118.92	75
平均寬度(m)	12.78	3.07	12.38	9.46
平均坡度(°)	36	44.63	39.62	39.62
集水面積(ha)	9.46	14.62	1.28	9.89
溝體狀況	植生復育良好	崩塌面上淺溝	植生逐漸復育	崩塌面上蝕溝
發育期*	復原期	離型期	擴展期至 復原期	離型期至 擴展期
測點數	前：1,050 後：1,656	前：4,825 後：1,130	前：1,123 後：717	前：1,285 後：1,402
測量部份	蝕溝中下部	蝕溝全部	蝕溝全部	蝕溝中下部
沖刷體積 (m ³)	130.39	24.23	254.63	345.86
堆積體積 (m ³)	124.18	1.72	203.65	6.75
總產砂量 (m ³)	6.21	22.51	50.98	339.11
溝體表面積 (m ²)	1387.72	107.29	2999.18	992.15
單位面積產砂量 (m ³ /m ²)	0.0043	0.2098	0.0170	0.3418
產砂型態	穩定型蝕溝	產砂型蝕溝	穩定型蝕溝	產砂型蝕溝

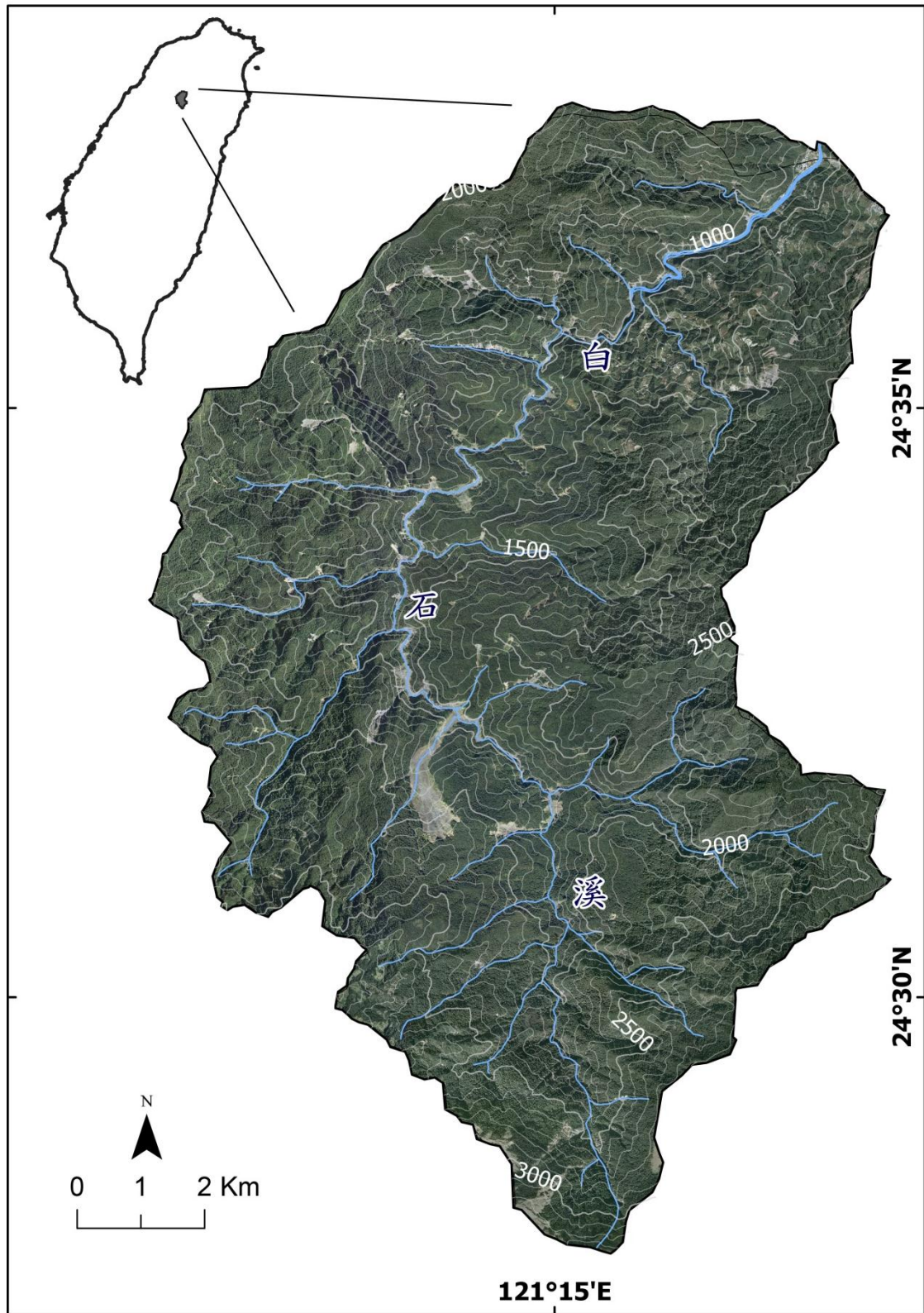


圖 1 白石溪集水區

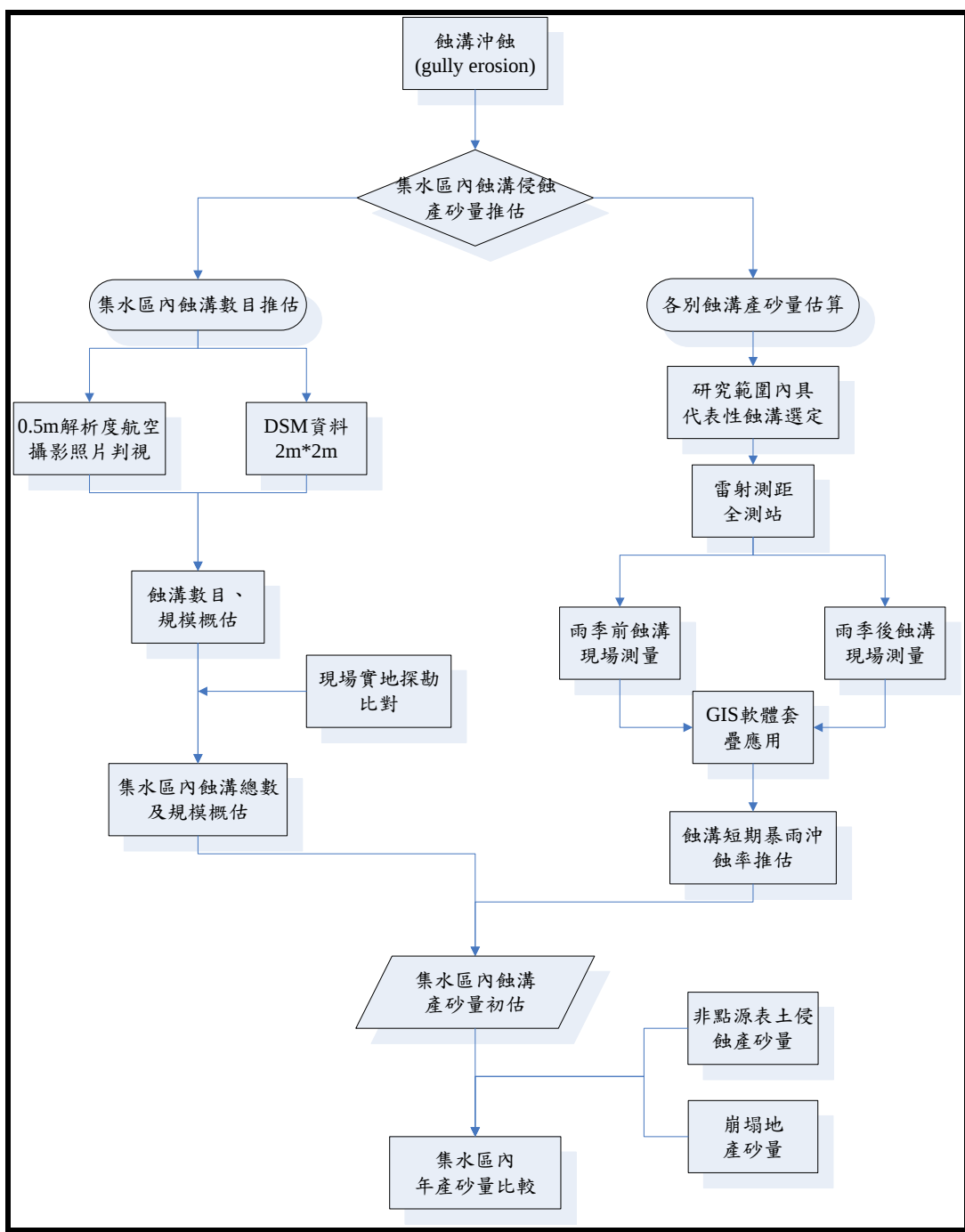


圖2 集水區內蝕溝產砂量推估步驟流程圖

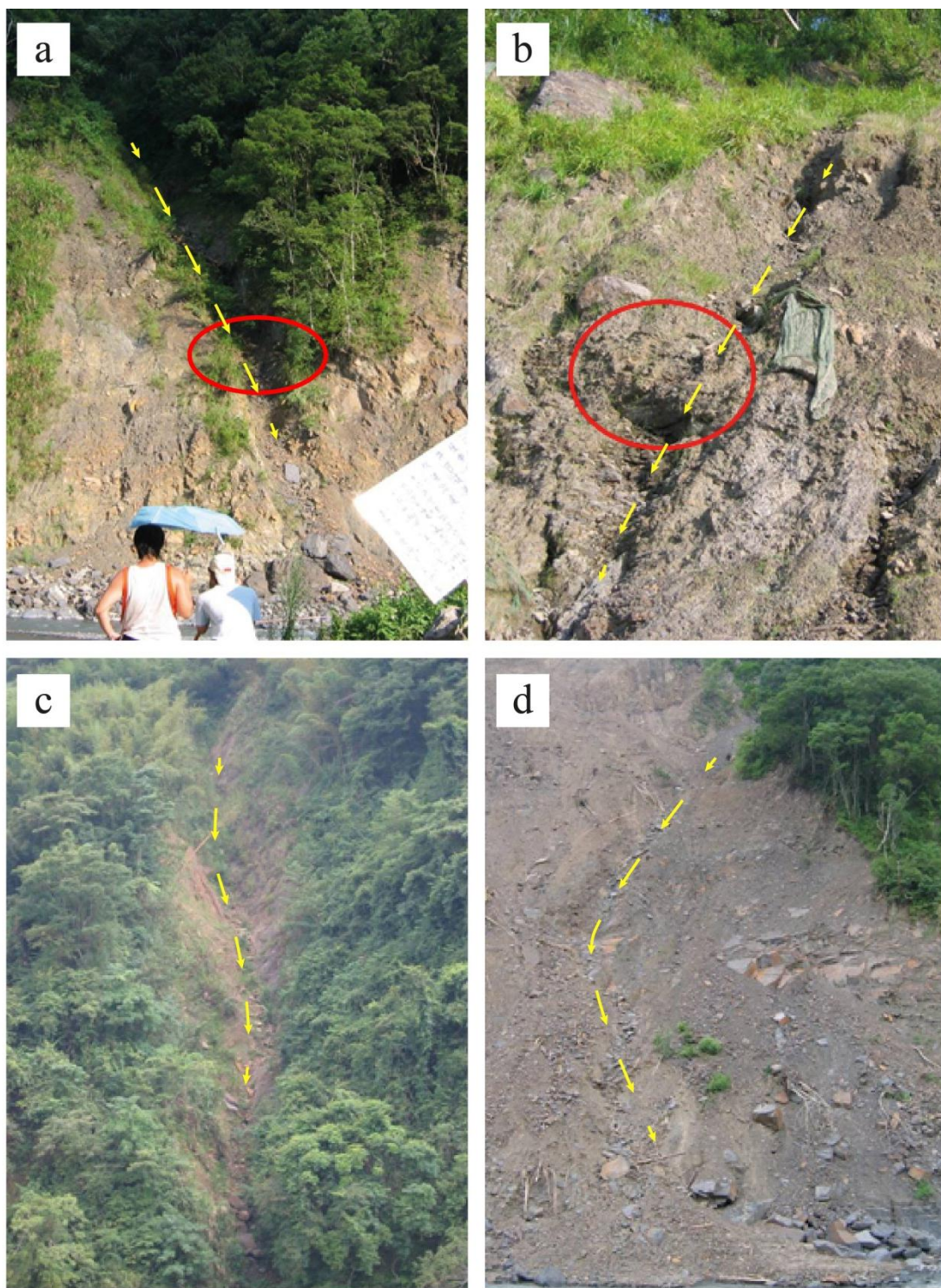


圖 3 選定的四條蝕溝現地照片。a-d 分別為蝕溝 1-4 之現場照片，拍攝時間為 2006/7-8，黃色箭頭標示蝕溝位置與水流方向。

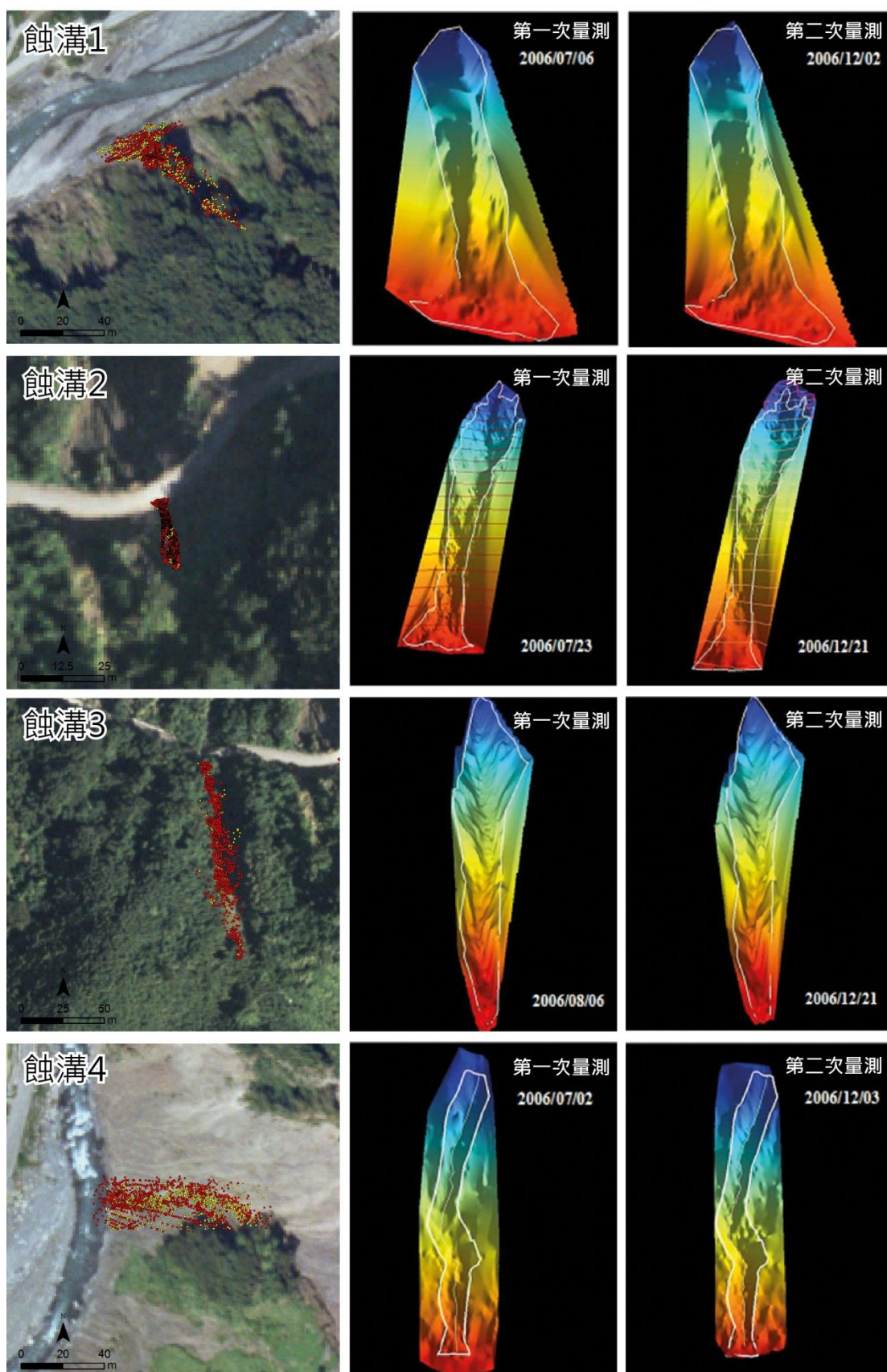


圖 4 蝕溝測量之測點分布與三維立體圖

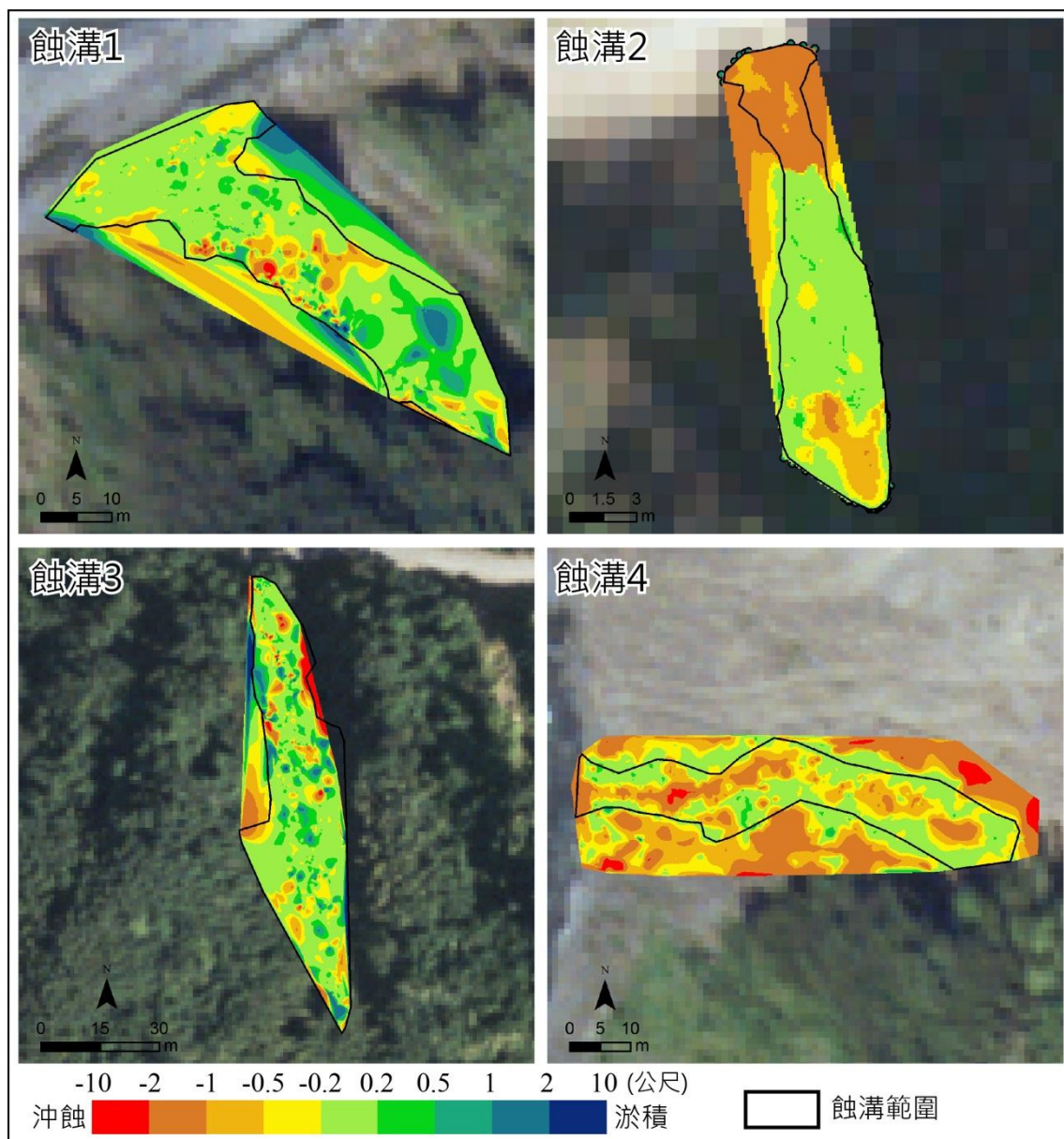


圖 5 蝕溝沖蝕與淤積

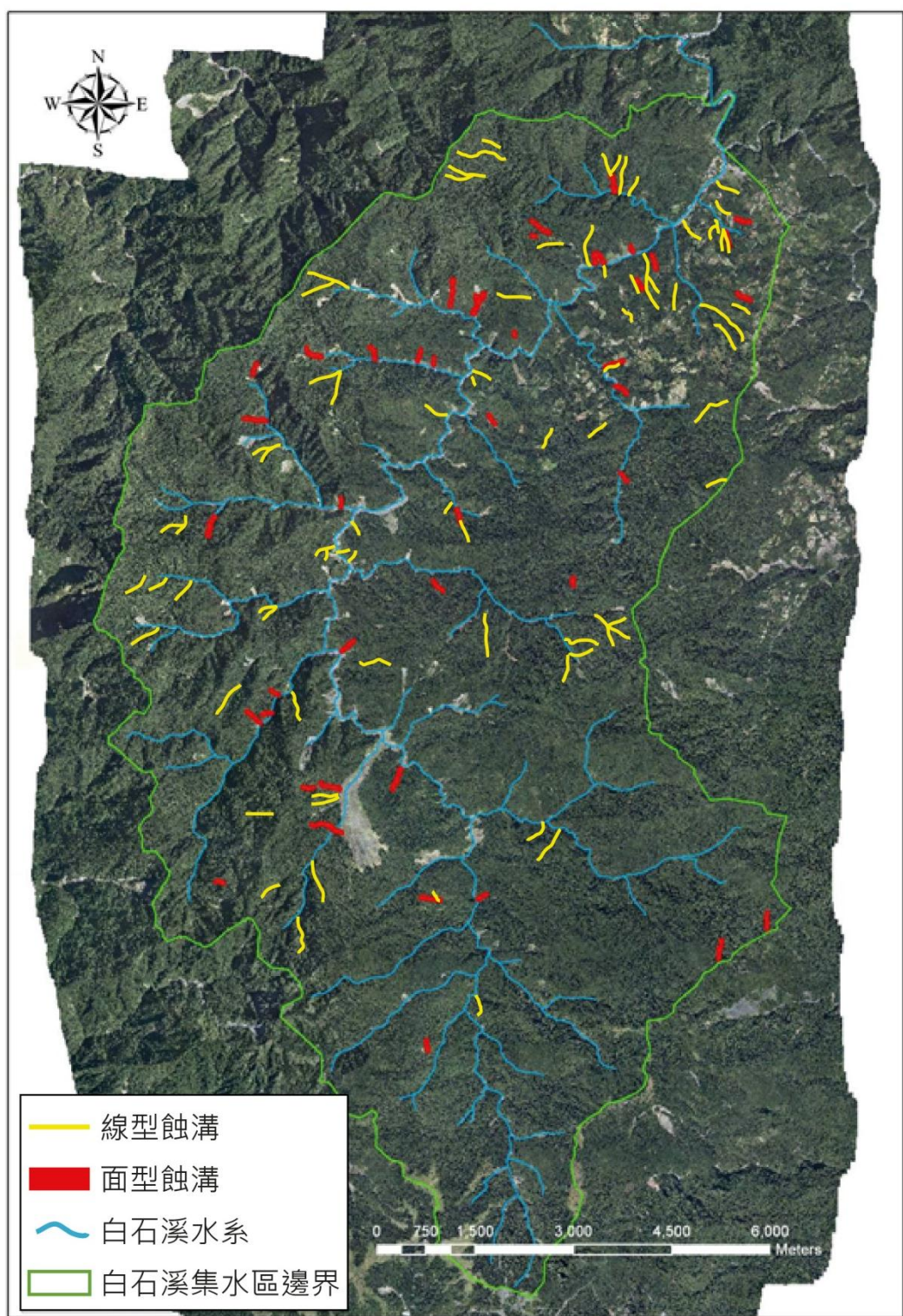


圖 6 白石溪集水區之線型與面型蝕溝



圖 7 白石溪集水區產砂量示意圖