

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣東部縱谷斷層的活動性研究—古地震與構造地形研究—
應用非均衡地形的河流水力侵蝕模型反映活動構造之研究
研究成果報告(精簡版)

計畫類別：整合型

計畫編號：NSC 96-2119-M-041-002-

執行期間：96年08月01日至97年07月31日

執行單位：嘉南藥理科技大學觀光事業管理系

計畫主持人：陳彥傑

計畫參與人員：此計畫無其他參與人員：

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年08月13日

台灣東部縱谷斷層的活動性研究－古地震與構造地形研究－
應用非均衡地形的河流水力侵蝕模型反映活動構造之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96 - 2119 - M - 041 - 002 -

執行期間：2007 年 08 月 01 日至 2008 年 07 月 31 日

計畫主持人：陳彥傑

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學觀光事業管理系

中 華 民 國 97 年 07 月 31 日

中文摘要

台灣西南部麓山帶地殼變動速率活躍，本計劃在分析台灣西南部泥岩地區二仁溪流域的5公尺高解析度DEM過程中，發現高解析度的DEM需先經過「處理」，以去除軟體在自動萃取河流水系時，可能會造成干擾的橋樑、公路與高速公路等人文地物，才能繼續進一步分析。利用河流蜿蜒度指標分析的結果顯示，河流在流經龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜附近時，蜿蜒度會增高的現象，顯示這些構造線存在某種程度的活動性。河流水力侵蝕模型分析的結果顯示，位於活動構造線下盤的水系S-A關係圖呈現系統性下凹的型態，而流經活動構造線與其上盤的水系S-A關係圖則呈現系統性上凸~直線的型態。此結果顯示，在以侵蝕營力為主的後均衡泥岩地形區，活動構造線的抬升營力會使其局部呈現出前均衡~均衡地形。

關鍵詞：泥岩、數值地形模型、河流蜿蜒度、河流水力侵蝕模型、均衡地形。

Abstract

The foothill belt of southwestern Taiwan is characterized by its relatively fast crust deformation. While analyzing the DEM of 5 meter high resolution of the Erjen basin in the mudstone area in southwestern Taiwan, we found that the DEM should be “modified” to erase the man-made landscape such as bride, road, and highway. Then the software will be able to generate the river drainage automatically and correctly. The result of sinuosity analysis shows that sinuosity will increase while river running across the Lungchuan fault, Gutingkeng fault, and Gutingkeng anticline. This means that these structure lines contain certain activity. The result of analysis of Stream-power incision model shows that S-A plots of the drainage located in the footwall of the structure lines have concave form systematically. But S-A plots of the drainage running across the structure lines and hangwall have convex to straight form. This means that in the mudstone area, typically the post-steady state topography mainly causing by erosion process, uplift process of activity structure lines will also let it locally appear pre-steady-state to steady-state topography.

Keywords: Mudstone, DEM, Sinuosity, Stream-power incision model, Steady-state topography.

前言

台灣西南部麓山帶是台灣除了東部花東縱谷之外，地殼變動速率最為活躍的區域。而台灣西南部麓山帶又可大致分為：嘉南構造區與高屏構造區二大部份。從地殼變形監測結果顯示，嘉南構造區與高屏構造區的地表應變速率有很大差異。嘉南構造區是以一系列疊瓦狀逆衝斷層與褶皺構成的構造地塊，且逆衝斷層主要朝西活動；高屏構造區的西側構造雖是由逆衝斷層與褶皺所構成，但此褶皺帶主要朝向西南活動，此一特徵與其西側嘉南地塊的活動特性有所差異。台灣西南部麓山帶地下構造相當複雜，可歸納出下列的型式：a.相當數目的斷層隱伏在地下，岩層重複堆疊且先中新世地層參與變形；b.最西緣的逆衝斷層為反向逆斷層，形成三角帶（Triangle zone）的構造；c.正斷層可能重新活動為逆斷層或走向斷層；及d.地表淺處受到變形的岩層相對為年輕及塑性。

地下斷層演化及地表構造活動與集水盆地及地形(特別是河階地)的發育有相當的相關性。從次集水盆地的構造尺度而言，不同的斷層運動及地下構造型態、位置的不同，會直接影響到集水盆地及第四紀地形的發育。地形發育的特徵不僅能反應岩層位態與岩性等較小時空尺度的差異，由地殼變動所產生之較大時空尺度的構造運動，也能藉由分析地表地形的變動程度而加以系統化的描述(Bloom, 1991)。構造地形學(morphotectonic)便是針對探討構造運動對地形所造成的變化，將地形分析的方法應用到構造活動的分析上，並利用定量的構造地形指標來描述地表形貌的變動。

過去對台灣40公尺解析度的數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)，已有過許多深入的構造地形指標研究，包括河流蜿蜒度(Sinuosity)，面積坡降關係(S-A plot in bedrock incision model)，面積高度積分(Hypsometric Integral)，碎形維度的非均向性，以及地形起伏等(Keller and Pinter, 1996; Sung et al., 1998; Chen et al., 2003, 2006; 陳彥傑, et al. 2005, 2007)。這些地形指標中，除了面積坡降關係是直接由河流侵蝕作用(process)導出的河流形態(form)關係外，其餘皆嘗試由形態反推作用的過程，因此在解釋與應用上皆面臨許多不確定因素待解決。尤其地形的形態是綜合地質、氣候與人為諸多作用的結果，若無法濾除干擾因素很難將地形計測指標應用到活動構造的解釋上。本計劃結合地下地質構造分析與地表變形量測，並考慮氣候變遷與人為活動等因素，來探討地形變動(透過地形計測指標)與活動構造的關係。由於DEM的解析度越來越高，許多原本在40公尺解析度無法探討的問題以及所產生的誤差，將可在目前五公尺以下解析度的DEM深入探討，並獲得突破。

研究目的

集水盆地的面積坡降關係推導自河流水力侵蝕模型(stream-power incision model)。河流水力侵蝕模型一般是以一整個大尺度地形區為研究對象，分析其內各主要河流集水盆地的S-A關係，並據此來解析該地形區地形的均衡特性。然而若將分析尺度聚焦到活動構造的尺度而言，則位於某一活動構造所影響範圍內的次集水盆地，其S-A關係應亦能反映在活動構造的影響之下，該次集水盆地所在的地形是否呈現均衡？若不呈現均衡，則是否亦會出現如Chen et al.(2006)的研究中所發現的上凸與下凹的S-A型態？而這些非直線的S-A型態與活動構造的活動度之間又是怎樣的關係？這些都是本計劃所欲探討的問題。

本計劃配合總計畫目標，選擇台灣西南部前陸地區的活動構造位置，利用高解析度

DEM，分析活動構造沿線附近次集水盆地的S-A型態，並套疊相關的地質、地物與影像資料(包括地質圖及航遙測影像)，以分析影響次集水盆地S-A型態的因子(包括構造及岩性)。

文獻探討

基岩河道(bedrock channel)的高度通常決定了山脈地形的坡度與稜線的高度。當地形達到均衡的條件下(Flint, 1974; Willgoose et al., 1990; Tarboton et al., 1991)，基岩河道中河床高程不隨時間改變($dz/dt = 0$)，此即均衡河道剖面(steady-state channel profile)。利用河流水力侵蝕模型來描述(Howard and Kerby, 1983; Anderson, 1994; Howard, 1994; Howard et al., 1994; Whipple and Tucker, 1999; Whipple et al., 2000)，則其方程式如下：

$$dz/dt = U - E = U - KA^m S^n ,$$

當 $dz/dt = 0$ 時， $U - KA^m S^n = 0$ ，則

$$S = (U/K)^{1/n} A^{-m/n} , \quad (式1)$$

令 $\theta = m/n$ ， $k_s = (U/K)^{1/n}$ ，則

$$S = k_s A^{-\theta} , \quad \Rightarrow \quad \log(S) = -\theta \times \log(A) + \log(k_s) , \quad (式2)$$

其中U為基盤岩層抬升率，E為河流的下切侵蝕率，K為同時反應岩層抗蝕強度、河流侵蝕能力與河道幾何的有因次侵蝕係數(dimensional coefficient)，A為「河段上游(upstream)集水盆地面積」，S為「河段坡度」，m與n為正值常數(positive constants)，指數 θ 為均衡河道縱剖面下凹程度指標(the concavity index)，而參數 k_s 則為均衡河道縱剖面陡峭程度指標(the steepness index)。可是在成長中的山脈，基盤岩層的抬升率大於河流的下切侵蝕率，亦即其基岩河道的河床高程隨時間的變化應為正值($dz/dt > 0$)，此時稱之為前均衡山脈(pre-steady-state mountain range)；相反的，在崩塌中的山脈，基盤岩層的抬升率小於河流的下切侵蝕率，亦即其基岩河道的河床高程隨時間的變化應為負值($dz/dt < 0$)，此時稱之為後均衡山脈(post-steady-state mountain range)。其方程式如下：

$$dz/dt > 0 \Rightarrow S < k_s A^{-\theta} , \quad \Rightarrow \quad \log(S) < -\theta \times \log(A) + \log(k_s) , \quad (式3)$$

$$dz/dt < 0 \Rightarrow S > k_s A^{-\theta} , \quad \Rightarrow \quad \log(S) > -\theta \times \log(A) + \log(k_s) . \quad (式4)$$

利用S-A(Slope-Area)的雙對數坐標圖(log-log plot)來圖解以上三個方程式(圖1)，若式2的圖解為圖中的直線，其斜率為 $-\theta$ ，則式3與式4之解的位置分別落在此直線下方與上方的區域。

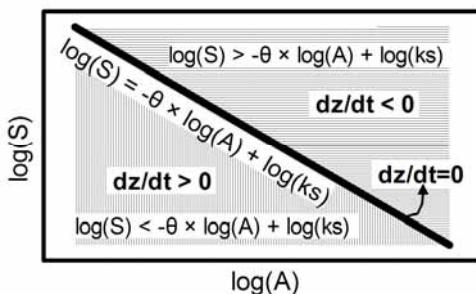


圖 1 前均衡($dz/dt > 0$)、均衡($dz/dt = 0$)與後均衡($dz/dt < 0$)地形的河流水力侵蝕模型 S-A 關係圖圖解。

臺灣造山帶源自約五百萬年前呂宋島弧(Luzon arc)與中國大陸邊緣「斜向」碰撞(Seno, 1977; Ho, 1986; Teng, 1987, 1990)，由於碰撞的時序是由北向南進行，因此臺灣山脈的形成亦是由北部先抬升然後逐漸向南發展，其擴展速率大約是90km/Ma(Suppe, 1981)。利

用此時空對等(time-space equivalence)關係，由臺灣南端為起點向北檢視，山脈的高度不斷上升，約在120~290km(相當於1.33~3.22Ma)之區段的中央山脈，造山所造成的物質增加率與剝蝕所造成的物質流失率達到平衡，即處於「均衡山脈(steady-state range)」的狀態。而由於沖繩海槽(Okinawa trough)的弧後擴張，使得造山的作用在臺灣北部已減弱或甚至停止(Lee, 1986; Teng et al., 2001; Teng, 1996)，而南部的碰撞才剛開始(Stark and Hovius, 1998; Suppe, 1984, 1987)。因此，位於臺灣南部(約0~120km，相當於0~1.33Ma)的山脈應屬於抬升大於剝蝕的「成長山脈(growing range)」狀態(Stark and Hovius, 1998)，而北部(約290~370km，相當於3.22~4.11Ma)的山脈則屬於剝蝕大於抬升的「崩塌山脈(decaying range)」狀態(Teng et al., 2001; Teng, 1996)。

長期以來，中央山脈東部被認為是利用河流水力侵蝕模型來研究均衡地形的良好範例之一(Hovius et al., 2000; Stark and Stark, 2001; Willett and Brandon, 2002; Whipple, 2001; Willett et al., 2001; Chen, 2004)，而在非均衡地形的河流水力侵蝕模型方面，Chen et al. (2006)在其研究中指出，大武山山脈與雪山山脈北部，其S-A圖分別呈現系統性上凸與下凹的型態(圖2)，應是反應了非均衡地形的定性模型。

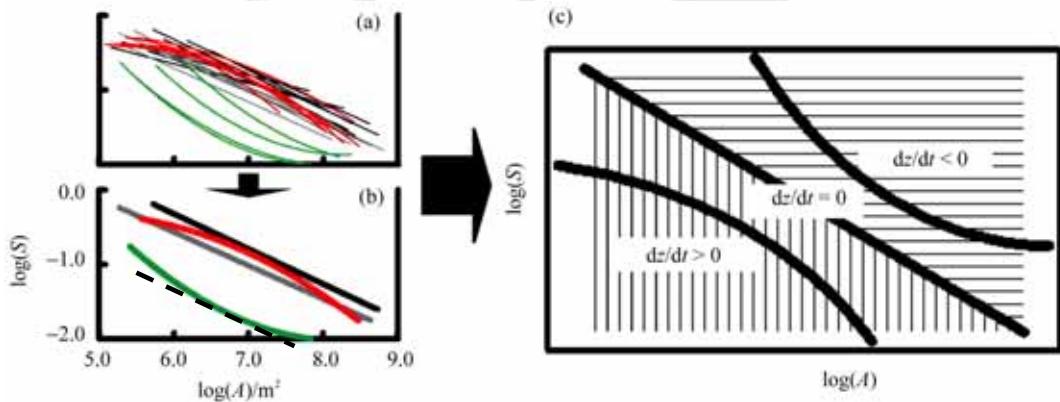


圖2 臺灣造山帶各集水盆地的(a)S-A圖分布與(b)平均S-A圖示意圖(黑色與灰色直線分別代表均衡的中央山脈東、西側集水盆地，紅色上凸曲線代表前均衡的大武山山脈，綠色下凹曲線代表後均衡的雪山山脈北部，黑色虛線為平行於其它S-A直線所作的切線，以及(c)三種均衡山脈地形的河流水力侵蝕經驗模型)。

研究方法

先以1997年1/5000相片基本圖(1997年地形)，將台灣西南部泥岩地區二仁溪流域5公尺高解析度DEM(2006年地形)中，可能影響水系萃取的南部第二高速公路「移除」，再萃取包含所有乾溝在內的二仁溪流域基岩河道水系，然後沿著所選定的數條活動構造線沿線(旗山斷層、龍船斷層、古亭坑斷層、古亭坑背斜)，分析該活動構造線所有經過的次集水盆地。分析的過程從上游向下游分為通過活動構造線前的次集水盆地與通過活動構造線後的次集水盆地，然後分析活動構造線二側一系列次集水盆地的S-A型態。若屬於非直線型態的S-A關係圖，則以簡單以二次多項式擬合(polynomial fitting)，以大致定義其曲線程度，並利用此曲線程度比對活動構造線的活動性以及相關的地質地形影響因子。

結果與討論（含結論與建議）

1. 河流蜿蜒度分析：

由於5公尺DEM的解析度甚高，其所反應的地表型態現象，除自然地形之外，亦將大幅涵蓋人造建物等人文地物，例如：在利用五公尺DEM進行河流水系與集水盆地自動萃取時，橋樑、公路與高速公路等人文地物，常會被軟體誤認為天然屏障而萃取出錯誤的河流水系。因此，在進行自然地形的地形計測指標研究時，需注意研究結果中所反應的人文地物部分，或在進行地形計測指標分析前，先對五公尺DEM進行若干程度的修正，以使研究結果能真正反應自然的地形特徵以及所欲探討的構造地形特性。

利用原始五公尺DEM所萃取出來的二仁溪流域水系型態如圖3所示，除了中上游區域的水系型態尚稱合理之外，下游部分支流由於有第二高速公路的通過，水系變成沿著高速公路而流的形態，而許多地勢較平坦的惡地區與人為開墾地，水系則成為平行的形態。二仁溪流域中上游有旗山斷層、龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜等大構造線通過，由於利用原始5公尺DEM所萃取出來的二仁溪中上游水系型態尚稱合理，因此本計畫初步先將河流蜿蜒度的資料與構造線進行疊圖分析(圖4)。除了位於二仁溪流域邊緣的旗山斷層之外，都可發現河流在流經快速抬升的構造線附近時，蜿蜒度會增高的現象(Chen et al.,2003)，此一初步疊圖分析的結果，顯示龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜存在某種程度的活動性。

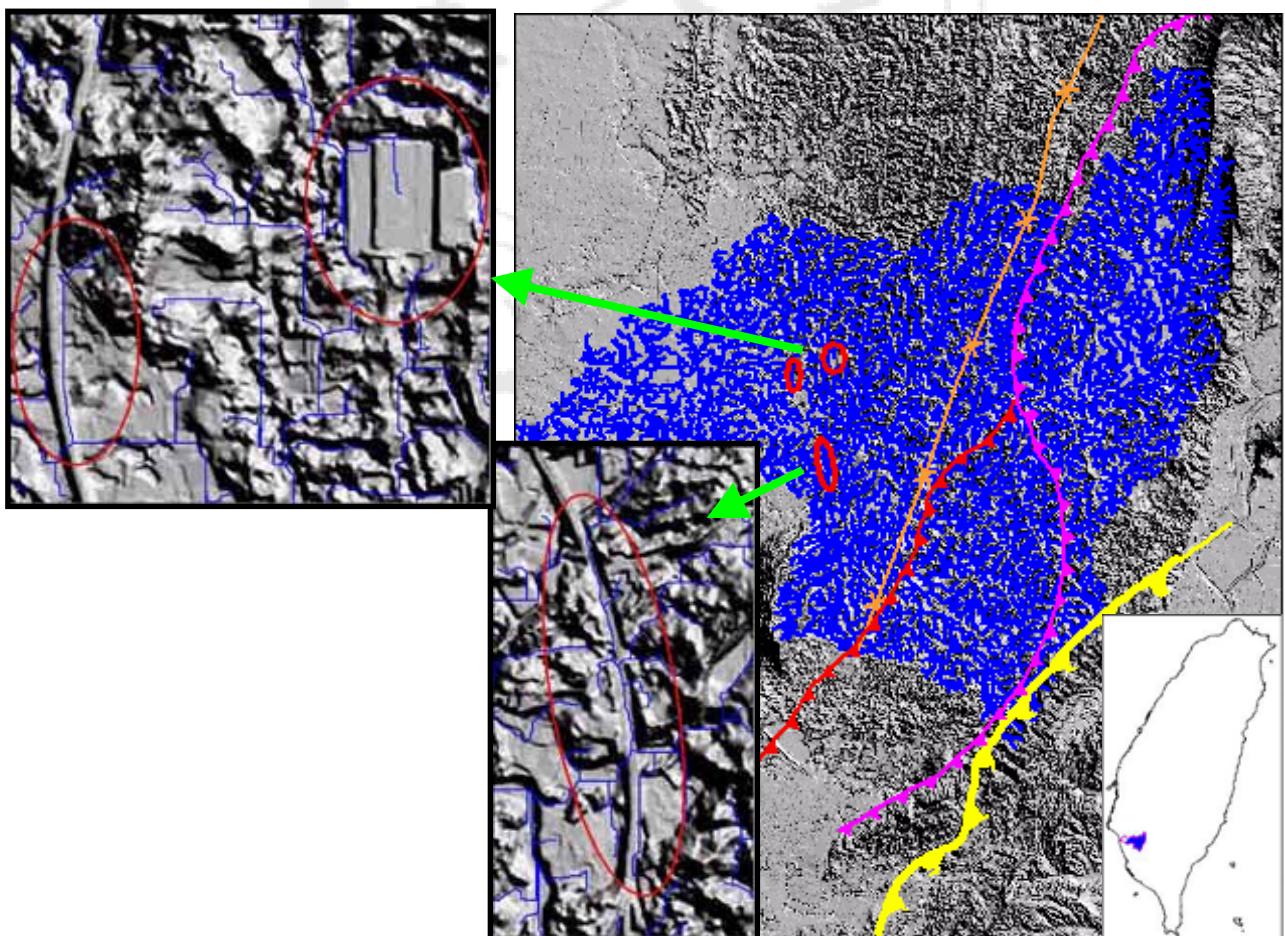


圖 3 二仁溪流域 5m 解析度 DEM 中的南部第二高速公路影響河流水系的萃取圖。構造線由東向西依序為旗山斷層、龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜。

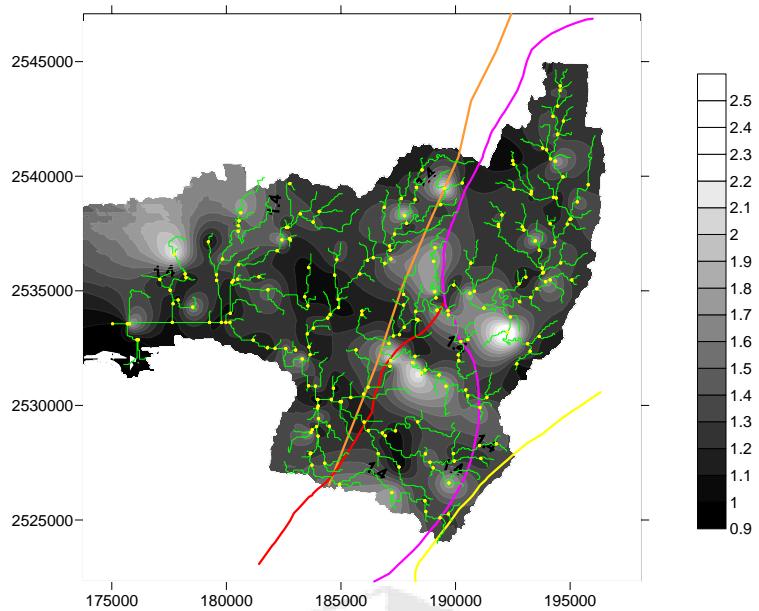


圖 4 二仁溪流域河流蜿蜒度等值線分布與構造線的疊圖分析。構造線由東向西依序為旗山斷層、龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜。

2.S-A關係圖分析：

圖5中一系列黃色四邊形框為南部第二高速公路被「移除」的區域，移除的方法是萃取1997年1/5000相片基本圖上，同樣一系列區域的等高線資訊，將其製作成DEM，再取代2006年台灣西南部泥岩地區高解析度DEM中的同樣一系列區域。

依據河流水力侵蝕模型的原理，所選取用以分析S-A關係的水系如圖6所示。就水系的位置分佈上，水系I~II與V位於構造線的下盤，而III~IV與VI~VIII則流經構造線。水系I~IV皆可向上游再細分出四條性質略有不同的次水系，而水系VI則包含有二條性質相當接近的次水系(圖5)，水系I~VIII的S-A關係圖分析結果如圖6所示。從圖6中可明顯看出，水系I~II與V的S-A關係圖在以二次多項式擬合後呈現系統性下凹的型態，而水系III~IV的S-A關係圖則呈現系統性上凸~直線的型態，至於水系VI~VIII的S-A關係圖則呈現直線的型態。上凸與下凹型態的S-A關係圖分別反應了前均衡與後均衡的非均衡地形，而呈現直線型態的S-A關係圖則反應均衡的地形。因此，在台灣西南部泥岩地區，旺盛的向下侵蝕營力使得地形呈現出崩塌(decaying)的後均衡地形，而局部地區在活動構造的向上抬升營力影響下，地形呈現出均衡或甚至成長(growing)的前均衡地形。

3.結論：

應用河流水力侵蝕模型時需考慮到基岩河道的問題，而在台灣西南部地區，正出露著一片廣大的基底泥岩層，是台灣造山帶應用河流水力侵蝕模型最佳的區域。

旗山斷層、龍船斷層、古亭坑斷層與古亭坑背斜為分布在台灣西南部泥岩地區的重要活動構造線，本計劃初步以河流蜿蜒度與S-A關係圖分析的結果皆顯示，這些構造線不僅存在著某種程度的活動性，還影響到原本應以侵蝕為主的後均衡泥岩地形區，出現均衡甚至前均衡的地形。此一結果亦說明了同樣是應用河流水力侵蝕模型，當對象在討論整個造山帶地體的演育時，考慮的是板塊尺度的應力，而當著眼於小區域的地形演育時，區域性的活動構造線將扮演相當重要的角色。

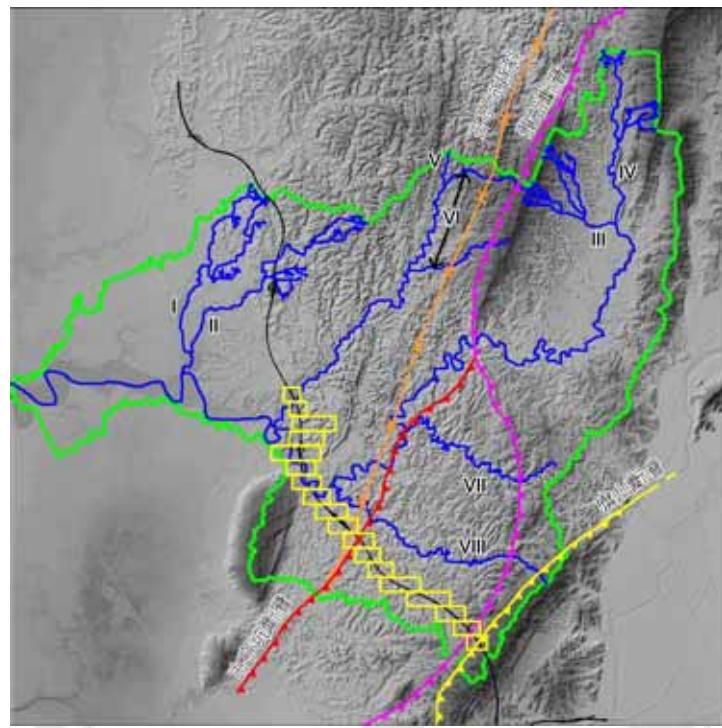


圖 5 台灣西南部泥岩地區重要活動構造線與 S-A 水系分布圖。一系列黃色四邊形框為南部第二高速公路被「移除」的區域。

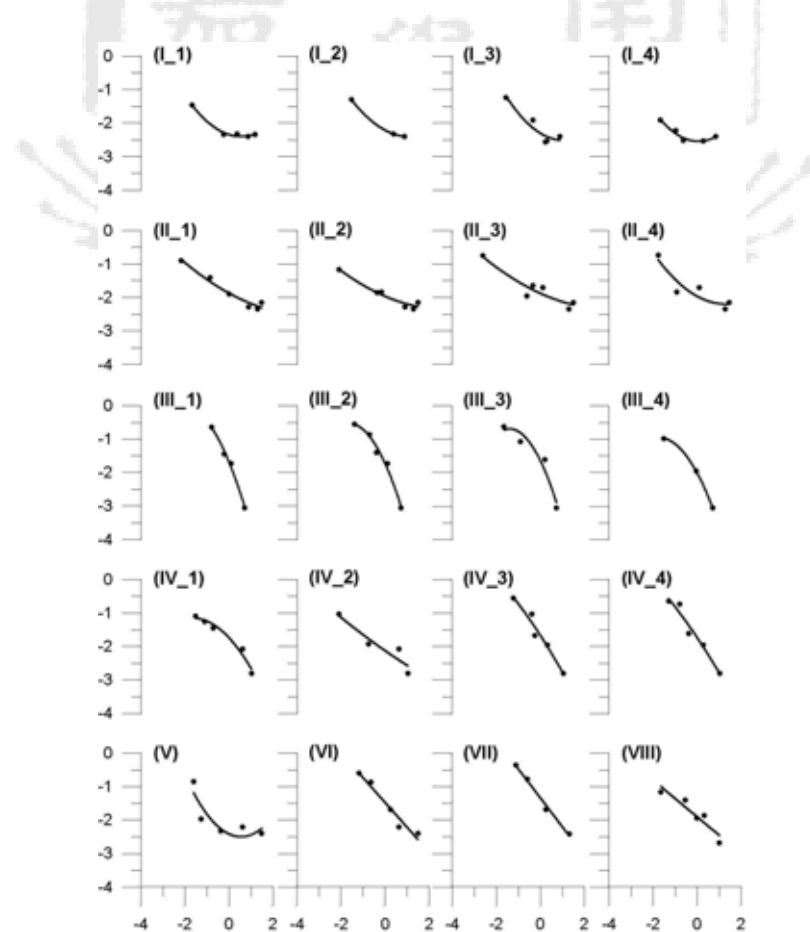


圖 6 台灣西南部泥岩地區 S-A 關係分析結果圖。關係圖的橫軸為 $\text{Log}(A)$ ，縱軸為 $\text{Log}(S)$ 。

參考文獻

- 陳彥傑, et al. (2005). 面積尺度與空間分佈對流域面積高度積分及其地質意義的影響, 地理學報, 第 39 期,p.53-69. (TSSCI)
- 陳彥傑, et al. (2007). 309 古坑強震震央附近的河流坡降指標與流域面積高度積分特徵回顧, 斗中學報, 第 2 期, p.79-84.
- Bloom, A.L. (1991) Geomorphology: A systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms, 2nd Ed., Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Keller, E.A. and Pinter, N. (1996) Active Tectonics: Earthquake, Uplift, and Landscape, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Sung, Q.C., Chen, Y.C. and Chao, P.C. (1998) Spatial variation of fractal parameters and its geological implications, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v.9, no.4, p.655-672.
- Chen, Y.C., et al. (2006). Stream-power incision model in non-steady-state mountain ranges: An empirical approach. *Chinese Science Bulletin*, Vol.51, No.22, 2789-2794.
- Chen, Y.C., Sung, Q.C. and Cheng, K.Y. (2003) Along-Strike Variations of Morphotectonic Features in the Western Foothills of Taiwan : Tectonic Implications Based on Stream-Gradient and Hypsometric Analysis, *Geomorphology*, v.56, p.109-137.
- Flint J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research*, 1974, 10: 969—973
- Willgoose G R, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. A model of river basin evolution. *Eos (Transaction, American Geophysical Union)*, 1990, 71: 1806—1807
- Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 1991, 5: 81—100
- Howard A D, Kerby G. Channel changes in badlands. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 739—752
- Anderson R S. The growth and decay of the Santa Cruz Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 20161—20180
- Howard A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 1994, 30: 2261—2285
- Howard A D, Seidl M A, Dietrich W E. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 13971—13986
- Whipple K X, Tucker G E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 17661—17674
- Whipple K X, Hancock G S, Anderson R A. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112: 490—503
- Seno T. The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate. *Tectonophysics*, 1977, 42: 209—206
- Ho C S. A synthesis of the geologic evolution of Taiwan. *Tectonophysics*, 1986, 125: 1—16
- Teng L S. Stratigraphy records of the late Cenozoic Penglai orogeny of Taiwan. *Acta Geol Taiwan*, 1987, 25: 205—224
- Teng L S. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 1990, 183: 57—76
- Suppe J. Mechanics of mountain-building and metamorphism in Taiwan. *Mem Geol Soc China*, 1981, 4: 67—90

- Lee C T. Methods of stress analysis and paleostress changes in northern Taiwan due to arc-continent collision. Taipei: Ph.D thesis, Institute of Geosciences, National Taiwan University, 1986. 370
- Teng L S, Lee C T, Peng C H, et al. Origin and geological evolution of the Taipei Basin northern Taiwan. *Western Pacific Earth Sciences*, 2001, 1: 115—142
- Teng L S. Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. *Geology*, 1996, 24: 945—952
- Stark C P, Hovius N. Evolution of a mountain belt toward steady state: analysis of the Central Range, Taiwan. *EOS (Transactions of the American Geophysical Union)*, 1998, 79: 357
- Suppe J. Kinematics of arc-continent collision, Flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Mem Geol Soc China*, 1984, 6: 21—33
- Suppe J. The active mountain belt, in *The Anatomy of Mountain Ranges*, In: Schaer S P, Rodgers J. eds. New Jersey: Princeton University Press, 1987, 277—293
- Hovius N, Stark C P, Chu H T, et al. Supply and Removal of Sediment in a Landslide-Dominated Mountain Belt: Central Range, Taiwan. *The Journal of Geology*, 2000, 108: 73—89
- Stark C P, Stark G J. A Channelization Model of Landscape Evolution. *American Journal of Science*, 2001, 301: 486—512
- Willett S D, Brandon M T. On steady states in mountain belts. *Geology*, 2002, 30(2): 175—178
- Whipple K X. Fluvial Landscape Response Time: How Plausible is Steady-State Denudation? *American Journal of Science*, 2001, 301: 313—325
- Willett S D, Slingerland R, Hovius N. Uplift, Shortening, and Steady-State Topography in Active Mountain Belts. *American Journal of Science*, 2001, 301: 455—485
- Chen Y C. Morphotectonic Features of Taiwan Mountain Belt Based on Hypsometric Integral, Topographic Fractals and SL Index. Tainan: Ph.D thesis, Institute of Earth Sciences, National Cheng Kung University, 2004. 129

計畫成果自評

本計劃欲應用河流水力侵蝕模型，並將分析尺度聚焦到活動構造的尺度，執行的結果發現活動構造對集水盆地的影響，確實能反應在S-A關係圖中，未來在進一步分析河流水力侵蝕模型的相關參數後，應能應用於偵測活動構造的演育時間與相對抬升率，對構造地形學有一定的學術價值，其結果亦十分適合在學術期刊發表。