地理學報　第四十四期：39-53 (2006)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (44) : 39-53 (2006)

從地形系統觀點探討泥火山地景的敏感性

Landscape Sensitivity of Mud Volcanoes

A Geomorphic System Approach

宋國城*　　陳　力**

Quo-Cheng Sung　　Lie Chen

Abstract

Mud volcano is a relatively simple and small geomorphic system in terms of spatial and temporal scale. The source of material and energy of eruption of mud volcanoes are of endogenic processes. Landscapes of mud volcanoes, such as mud cone, mud shield, mud marr, mud basin, and mud hole, are the products of interactions between endogenic processes and exogenic processes. Landscapes of mud volcanoes vary spatially and temporally with their sensitivity and recovery ability. Take for examples mud volcanoes along the Chihshan Fault, southwestern Taiwan., The landscape of a mud volcano varies with its occurrence relative to the trace of Chihshan Fault, because the fault activity supports the recovery ability of the landscape. And the size, degree of activity and the surroundings of mud volcanoes determine the erosivity of the landscape of mud volcanoes. The recovery process is constructive to the mud volcano system, while the erosive process is destructive to the system. This study attempts to incorporate the above two processes to conceptually assess the landscape sensitivity of mud volcanoes along the Chihshan Fault. However, workable assessment of landscape sensitivity remains to be established because many system variables are yet to be measured and evaluated.

* 清雲科技大學土木工程系教授
Professor, Department of Civil Engineering, Ching-Yun University.
** 國立高雄師範大學地理系碩士
Master, Department of Geography, National Kaohsiung Normal University.

Keywords: mud volcano, geomorphic system, landscape sensitivity, landscape recovery.

摘　要

泥火山是一種時空尺度較為單純短小的地形系統。泥火山的物質與能量均源自地下深處，屬內營力作用；泥火山受內營力與外營力的交互作用形成錐狀、盾狀、盆狀、池狀與噴泥洞等不同的地景。泥火山地景在空間與時間上的特性是隨其敏感性和回復能力而有所不同。以臺灣西南部旗山斷層沿線的泥火山群為例，泥火山隨其出露位置與旗山斷層的關係而有不同的地景，因為斷層的作用決定泥火山地景的回復能力。而泥火山的規模、活動程度與環境背景決定泥火山地景被侵蝕的程度。回復力對泥火山系統是建設性的，侵蝕力則是破壞性的。本研究嘗試將上述兩種作用力加總形成評估泥火山地景的敏感性指標。因為尚有許多系統變數無法具體量測，因此欲建立一個可操作的泥火山地景敏感性評估指標仍待努力。

關鍵字：泥火山、地形系統、地景敏感性、地景回復力

前　言

地形系統 (geomorphic system) 是一種由作用 (process) 和形貌 (form) 發生交互影響而形成複雜地景的結構。要維持這種系統需依賴物質和能量的輸入、傳輸和輸出 (Chorley *et al*., 1984)。集水盆地是最常被用來說明地形系統的例子，不過它的系統大而複雜，而且由許多的子系統組成。相較之下泥火山就比較單純而且空間尺度較小適合做直接的觀察與操作。假設把泥火山看成一個地形系統，則每一座泥火山都是此地形系統中作用與形貌 (process and form) 下的產物。泥火山是地表下的天然氣或火山氣體沿著地下裂縫上湧，沿途混合泥砂與地下水，形成泥漿，並被帶至地表堆積 (王鑫等，1988)。泥火山活動區主要分佈在聚合的板塊邊界或隱沒帶的褶皺和擠壓環境 (Kopf and Deyhle, 2002)，顯示板塊的擠壓構造是泥火山的壓力來源之一，加上有厚層的泥岩物質，就足以構成泥火山系統物質和能量的來源。斷層或構造裂隙構成物質的傳輸通道。泥火山噴出後在地表堆積，且經風化、侵蝕或人為干擾後形成錐狀、盾狀、盆狀、池狀或洞狀的不同泥火山型態，構成一個完整的地形系統。泥火山的空間規模小則數十公分 (例如噴泥洞)，大則數十公尺 (例如養女湖)；噴發時間可以是連續的小噴發 (例如烏山頂泥火山)，到一、二年一次的間歇性大噴發 (例如屏東萬丹鯉魚山)。這種時空尺度很適合研究生作觀察、量測，並探討地形系統的運作。

地形系統需要用一些參數來描述其中的物質和能量的流動與地貌形態。單位時間泥火山的噴出物 (包括氣體和泥漿) 是自變數；泥火山的形狀、尺寸大小等參數是依變數。地形系統的輸入與輸出的變化令系統產生結構與形態的變化。輸入 (作用的大小) 的變動引發形態變化反應的速度快慢稱作系統的舒緩時間 (relaxation time) (Melton, 1958)。作用能量的突然改變導致形態上的逐漸調整，如此地景

(landscape) 的反應快慢程度可用敏感度 (sensitivity) 來度量 (Brunsden and Thornes, 1979)。另一個重要的觀念就是地形復原 (Wolman and Gerson, 1978)。所謂地形復原是指一次獨立的作用所產生的形態變化，讓它回復原狀所需的時間。復原率高的地形對於事件的作用經常調整，而復原率低的地形則保留了異常事件作用的痕跡。地形系統是由一個敏感度和復原度各不相同的子系統組成的一個巢狀層系。整個系統的輸入 (作用) 隨時間而變，其結果是在任何特定時間上地景的每一部份對當時的作用表現出不同程度的調整。泥火山的噴發作用隨空間的分布而有不同，噴發行為有週期性的反覆，所形成的泥火山形態有其時空分佈的特性與變化，是探討地形系統的一個絕佳範例。

臺灣陸地上的泥火山的分布依其密集性與地質特性分成四大活動區 (Shih, 1967；王鑫等, 1988)：1. 古亭坑背斜活動區，2. 旗山斷層活動區，3. 高屏海岸平原活動區 4. 海岸山脈西南段活動區。其中以旗山斷層活動區的泥火山最活躍，所造成的地景也最為壯觀，已經成為國內首座自然景觀保留區。該區目前被民間旅遊業利用頻繁，然而在缺乏環境保護觀念之導遊錯誤的解說下，遭受極嚴重的破壞 (照片 1)。目前烏山頂泥火山自然保留區的管理政策不明，所設立的解說牌內容也多有謬誤，民眾往往學習到錯誤的觀念，誤導了社會大眾。本研究從地形系統的觀點探討泥火山地景的敏感度與其復原能力，嘗試提出泥火山地景的敏感度評估指標。除了在學術上做為地形系統的探討範例外，尚可供擬定泥火山地景觀保育政策的參考。



照片 1　假日的泥火山，遊客如織

泥火山系統

如同河流系統一樣，泥火山系統也是透過物質與能量的輸入、傳輸與輸出來維持系統的運作。所不同的是泥火山系統是經由地下產生的高壓氣體帶動泥漿物質的流動，而河流系統則由水來傳輸物質。

(一) 系統輸入

泥火山的物質與能量的輸入均源自地下深處，屬內營力作用 (endogenic processes)。泥火山的生成有下列條件：1. 地底下儲有高壓氣體；2. 岩層有裂隙，可供氣體和流體流至地面；3. 岩層中有膠結鬆散，易被帶動的泥質物 (Shih, 1967)。臺灣西南部的泥火山的噴出物包含固體、液體，分別源自於古

亭坑泥岩 (Shih, 1967) 及其地層的封存水 (詹博舜，2001)，甚或更深處的黏土礦物的脫水 (葉高華，2003)；而氣體的來源則混合熱源性的甲烷與生物性的甲烷 (Yang, *et al*., 2004; You, *et al*., 2004)。Yusifov and Rabinowitz (2004) 認為構造的擠壓力和過重的沉積壓力，是泥火山形成的主要控制因素。上新世的厚層古亭坑泥岩因為上覆沉積岩層的荷重不同，使泥岩層向上衝移形成封閉的泥丘，而在此泥丘內的氣體為一個高壓帶，若有裂隙產生或遭受侵蝕作用切割，因壓力劇減而快速上衝形成泥貫入體或泥火山 (曾可欣，2002)。Lou and Vasseur (1996) 卻認為地底深處的原油分餾過程中，會增加孔隙壓力達到靜岩壓的 2 至 3 倍，才是泥火山噴發的壓力來源。

(二) 系統傳輸

Aslan (2001) 認為斷層可能提供了一個通道給泥漿穿越上覆的地層到達地表面。泥火山的泥漿可能先儲存於地下泥漿庫 (張宏武，2001)，泥漿庫的深度可從泥漿的溫度推估。當氣體的壓力累積超過臨界值時便帶動泥漿經由斷層或背斜所產生的裂隙噴發至地表。臺灣本島受激烈的造山作用影響，斷層與褶皺遍佈全島，泥火山多半分布在背斜或是斷層造成的裂隙帶，旗山斷層所造成的破裂帶提供地底下甲烷氣層逸出的通道 (黃偉倫，1995)。此外，臺灣西南部海域的泥貫入體與泥火山分布是呈東北、西南的線性排列，咸信和臺灣西南部陸上泥火山的脈絡相連 (陳國峰等，2005)，主要是受到斷層走向的控制，斷層切穿上覆的蓋層提供裂隙，讓高壓的泥漿上升 (張成華，1992)。

(三) 系統輸出

泥火山的物質與能量的輸出受外營力作用的控制。地表的風化、侵蝕、搬運與堆積作用將泥火山物質輸出到系統之外，泥岩地區盛行的表層龜裂、回脹剝落與雨溝侵蝕，同樣作用於泥火山地形上。由於泥火山系統的規模較小，人為干擾已經變成影響系統輸出的重要因素。例如：遊客攀爬或是使用俗稱「怪手」的重機具破壞錐狀泥火山、人工導流泥漿也會改變泥火山的外形、人為阻塞噴泥口會改變泥火山噴發的行為。

泥火山形態

Shih (1967) 根據泥火山的外貌受噴發泥漿黏稠度的影響分成五種類型：1. 噴泥錐 (mud cone) －泥漿黏稠度最高，常形成高數公尺的錐狀土丘，噴泥口直徑約數十公分，邊坡陡峻，常大於 20 度，例如烏山頂的泥火山；2. 噴泥盾 (mud shield) －噴泥口的直徑 50 公分以上，由於邊坡介於 5 度至 20 度之間，不像噴泥錐那種急陡的邊坡，所以外形像個盾狀丘，例如新養女湖泥火山；3. 噴泥盆 (mud marr) －噴泥口的直徑 50 公分至 2 公尺之間，邊坡非常平緩，約在 5 度以下，外形就像是裝滿水的臉盆，例如小滾水泥火山區的月世界泥火山；4. 噴泥池 (mud basin) －噴泥口不大，但所噴出的泥漿非常稀，常在窪地處形成直徑十公尺以上的泥池，例如大滾水泥火山；5. 噴泥洞 (mud hole) －噴泥口多在 30 公分以下，常出現在稻田、溝渠、山坡上、樹根下的洞穴。

但是泥火山的外形，並非只和噴泥漿的性質有關。Hovland (2003) 認為泥火山的流體由地底上升時，浮力較大 (含水、含氣量較多) 的部份上升速度較快，所以同一個泥火山通道的泥漿上升至地表，

會形成各種形貌的泥火山。例如烏山頂泥火山自然保留區的噴泥錐、噴泥池、噴泥洞等。浮力較大的部份形成噴泥池、噴泥洞；而浮力較小的泥漿則形成噴泥盾、噴泥錐 (趙鴻樁，2004)。實際觀測泥火山時也可以發現噴發頻率越高、噴發量越大的泥火山越不容易讓泥漿乾涸而堆高成噴泥錐。因此影響泥火山外型的因素其實並不單純。

泥火山的作用與形態的關係

本研究以旗山斷層活動區的泥火山為例來說明泥火山的作用 (物質與能量的流動) 與泥火山形態的關係。本區的泥火山活動主要受旗山斷層的影響 (宋國城等，2004)。本研究調查發現，旗山斷層沿線北從南勢湖，南至深水村共有 22 個活動泥火山，在深水村一處磚窯場附近，另有 2 座已停止噴發之泥火山 (圖 1)。分佈在旗山斷層上盤者是以噴泥盆、噴泥盾、噴泥池為主；分佈在斷層下盤者則是以噴泥錐為主。旗山斷層上下盤的泥火山外形差異與其出露的地層有關：上盤的底岩為烏山層砂岩，因旗山斷層向東傾斜 60°，上盤的泥漿從地底泥漿庫上升時會不斷夾雜圍岩 (砂岩) 碎屑，泥的比例會變少，所以形成的泥火山大部份為盆狀、盾狀外形；下盤的泥漿從地底泥漿庫上升時，只會夾雜少許古亭坑泥岩中的薄層砂岩，泥的比例損失較少，所以形成的泥火山大部份為邊坡較陡的錐狀外形。旗山斷層上盤泥火山泥漿的平均含水比為 0.69，下盤為 0.56。上盤泥火山泥漿含水量明顯高於下盤的泥火山，這影響到泥漿乾涸後對泥火山外形的影響。含水量低的泥火山比較黏稠，泥漿不易被水所帶走，留在原處乾涸的機會比較大，比較容易堆高形成錐形。而含水量高的泥漿則形成較低平的盆形、或池形。不過裂隙出露的地理位置也是影響泥火山外形的重要因素。例如：含水量相近的泥漿流出在烏山頂泥火山自然保留區的平坦地形上形成錐狀泥火山、出露在地形低窪處便形成盆狀或池狀泥火山、而出露在山壑的陡坡上則形成噴泥洞。

由於泥火山的噴發作用主要是由高壓氣體的流動而產生，因此氣體的噴發量決定所帶動的泥漿量的多寡。陳力 (2005) 對泥火山的噴發行為錄影慢速觀察，根據噴出氣泡的頻率與大小估計氣體的噴出量，並依照泥火山的噴發強度 (單位時間的氣體流量) 分區分類 (圖 2)。旗山斷層活動區北端的南勢湖泥火山分區屬於微量噴發，旗山斷層活動區中段的千秋寮泥火山分區屬於活躍噴發，烏山頂泥火山區屬於少量噴發。從空間上的分布來看 (圖 2)，在研究區中央附近的泥火山區 (千秋寮、烏山頂) 噴發活動是比較活躍的，在南北兩端泥火山區的噴發活動則比較沉靜。就泥火山的規模而言，也是以位於千秋寮和烏山頂泥火山區的較大。可以想像在斷層轉彎處附近的泥火山的氣體壓力是比較大的。這可從旗山斷層的活動性質說明之。旗山斷層雖以逆衝性質為主，但在旗山以南的區段為右移斷層(宋國城，2003)；在近期的 GPS 速度場顯示跨旗山斷層有右移的錯動分量，近 3 年來平均為每年 7mm (沈里俊，2003)。且在烏山頂附近斷層走向發生 S 形轉折，因此在旗山斷層轉折處所受到的擠壓將高於旗山斷層其他區段。

此外，泥火山的外形與其噴發頻率也有關。噴發量雖大，若為間歇性噴發 (如屏東萬丹的鯉魚山)，則很難維持其固有的形態。噴發量雖小，但持續性的噴發則可造就一個穩定的泥火山地景 (如旗山斷層活動區)。陳力 (2005) 利用錄影慢速觀察泥火山持續性噴發行為，發現出露在旗山斷層上盤者，其平均噴發頻率為 92 (泡泡／分鐘)，下盤的平均噴發頻率為 32 (泡泡／分鐘)，顯示出旗山斷層上盤泥火

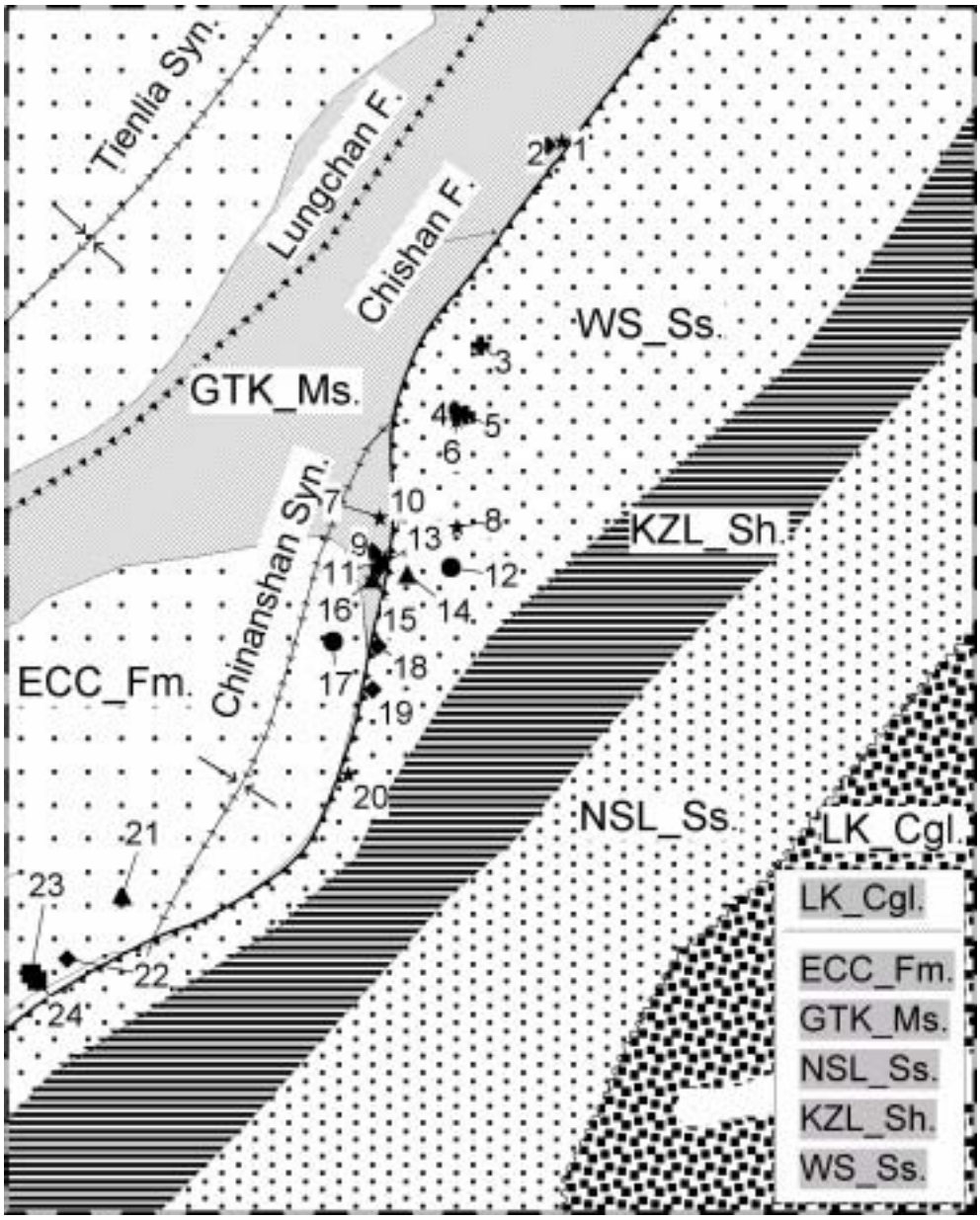


圖 1　旗山斷層與泥火山的分佈。旗山斷層係由晚中新世的烏山層 (WS_Ss.) 逆衝到上新更新世的古亭坑泥岩 (GTK_Ms) 之上。此區的泥火山主要是沿著旗山斷層沿線所分布。▲ 為噴泥錐；● 為噴泥盆；◆ 為噴泥池；╋為噴泥盾；★ 為噴泥洞；▒ 為停止噴發泥火山。

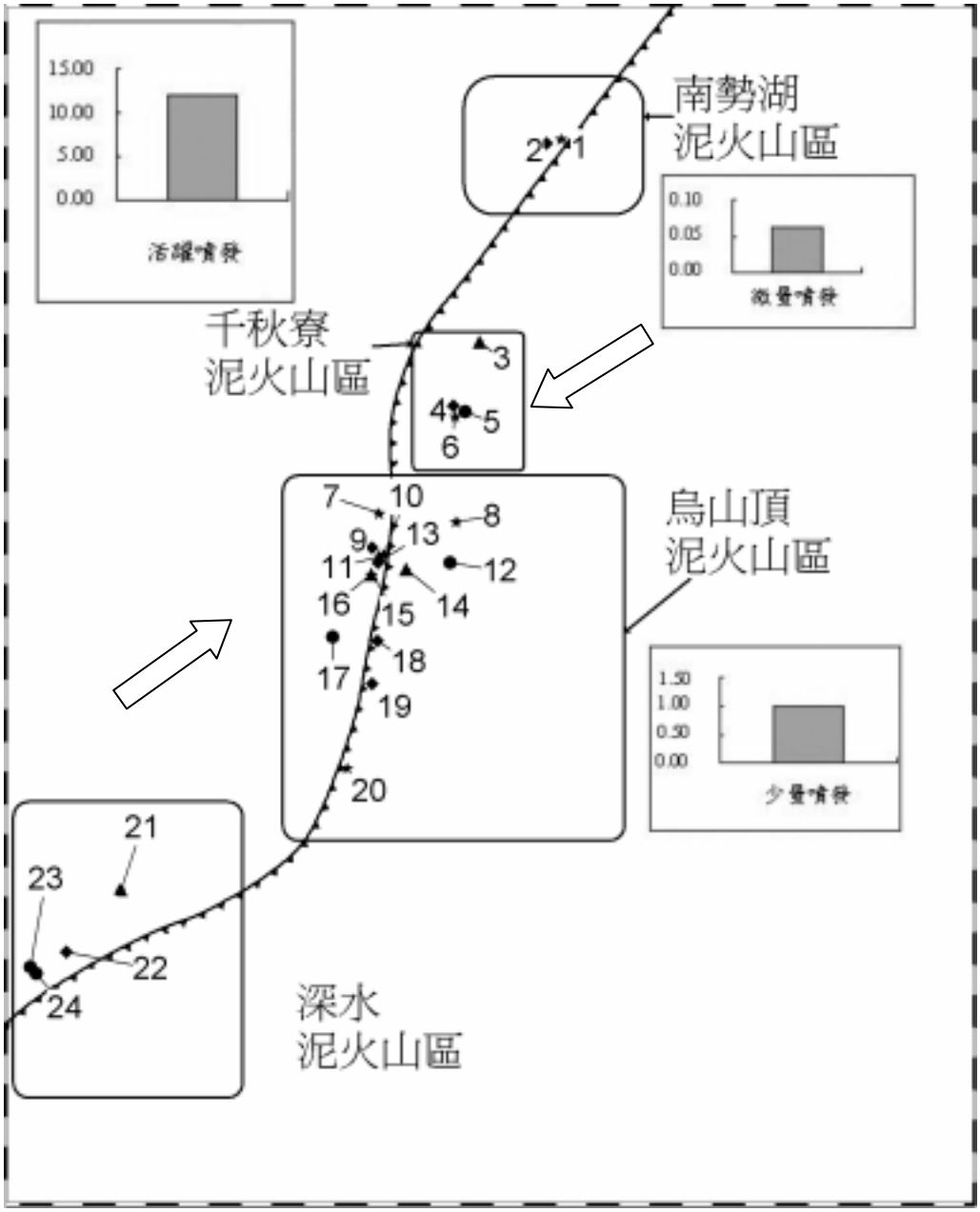


圖 2　依照泥火山噴發強度分區分類，南勢湖泥火山區氣體噴發量的平均值約為 0.06 立方公尺 / 分鐘，屬於微量噴發。千秋寮泥火山區氣體噴發量的平均值約為 12 立方公尺 / 分鐘，屬於活躍噴發。烏山頂泥火山區氣體噴發量的平均值約為 1 立方公尺 / 分鐘，屬於少量噴發。空心箭頭表示壓縮應力。

山的噴發頻率遠比下盤高。上盤噴發頻率高於 100 (泡泡／分鐘) 的泥火山有 4 個，最低為 12.68 (泡泡／分鐘)；下盤噴發頻率高於 100 (泡泡／分鐘) 的泥火山僅有 1 個，最低為 4.48 (泡泡／分鐘)。噴發頻率低者，泥漿流動不易，容易附著在泥火山口附近堆積；而噴發頻率高者，其泥漿持續流動，反而容易被帶走。因此含水量相同，一樣黏稠的泥火山噴發頻率低者易形成錐狀 (如烏山頂泥火山自然保留區錐狀泥火山)，而頻率高者則易形成盾狀 (如養女湖和新養女湖)。

泥火山系統的敏感性

地形系統在空間與時間上的特性是隨著系統的干擾而調整其反應 (Thomas, 2001)。強固的地景 (robust landscapes) 抵制得了干擾的因素，而敏感的地景則不斷的受干擾以至於處於過度狀態 (transient forms)。一個系統的敏感度從時間的向度來看可定義為系統舒緩的時間與干擾作用的重現時間之比值 (Harvey, 2001)。引申之，敏感系統的比值大於 1，因地景舒緩的時間長，而干擾作用不斷的發生，以致地景處於變動的狀態；反之，不敏感系統的比值小於 1，地景舒緩期短，恢復快，或是干擾作用罕見。一個系統的敏感度也可從空間的向度上定義為系統改變的傾向及其承受干擾的能力 (Brunsden, 2001)，可借用地景穩定度 (landscape stablity) 的概念，以穩定指數 (stability index) 表示干擾力的大小與改變的門檻高低之比值 (Brunsden, 2001)。泥火山系統本身改變的力量源自於內營力 (地殼活動、噴出物的來源)，干擾力量來自於地表作用或人為的影響。泥火山外形的改變可能是在系統作用下產生的外部反應，而此「作用與反應」的過程可能是受地形的敏感性控制，也就是說地形作用可能因超越閾值 (地形穩定度) 而產生外部調整的反應。活動穩定的泥火山，其外形受到極端的事件影響突然改變 (例如受外力影響而崩塌)，但其效力隨著時間而降低，若無進一步的事件發生，泥火山將回復到原來的形狀。但是隨著泥火山的規模、噴發行為與物理性質之不同，受到相同事件的影響 (例如暴雨侵蝕)，其受破壞的程度不一，回復程度也不一；若是小規模噴發的噴泥洞受到相同事件影響就有可能從此消失不見。這表示各泥火山因受其內營力 (噴發物的性質、出露位置、噴發活動等) 條件與外營力 (侵蝕速率、人為破壞、環境背景) 影響不一，而有著各種不同的形貌及其變動特性。

泥火山地景的敏感性指標

影響泥火山地景的因素很多，本研究最終目的為訂定一個可以操作的敏感性評估指標以應用在地景保育政策之參考。從泥火山系統的敏感度與回復能力來看，我們可以分成三方面來探討。首先是來自於泥火山內部的營力，可視為對於泥火山形態回復的能力，噴發的強度、噴發的頻率與泥漿的性質影響泥火山的自癒能力；其次為加諸於泥火山外部的營力，而外營力相對而言就是屬於干擾 (侵蝕) 的力量，包含了下雨造成的淋蝕作用、地表逕流的沖刷作用、風夾帶砂石微粒的磨蝕作用、被倒塌的自然植被擊中、颱風後的土石坍塌或土石流擊毀、人為踐踏或丟擲石頭的破壞作用、人為的土地開發破壞；而泥火山的環境背景為第三個重要考量，泥火山的背景包含了泥火山出露地點的坡度是否平坦、所在位置是否有經常的地表逕流通過 (位於河谷內)、是否為交通便利易受人為破壞等。

綜言之，泥火山地景是內營力 (回復力) 與外營力 (侵蝕力) 作用下呈現的均衡狀態。在外營力持

續作用下，其內營力無以為繼時 (如間歇性噴發)，泥火山可能消減體積、改變外貌、甚至於消失 (例如深水泥火山 no.23, 24) (照片 2)，這是極為敏感的泥火山。有時內營力的回復力量大於地表的侵蝕力量，泥火山則變大、長高 (例如烏山頂泥火山 no.11) (照片 3a, 3b)。本研究觀察期間 (2005 年 2 月間) 曾發現此泥火山錐的高度達到約六公尺時噴泥口即阻塞，改由周邊噴發新泥火山，直到錐頂崩落高度降低後才又重新噴發，而週邊的新泥火山也隨之夭折 (照片 3c)。因此六公尺似乎是此泥火山錐的高度閾值。但亦有內營力大於外營力，因為出露位置的地形條件侷限而處於不變的狀態 (例如 no.12 泥火山雖有大噴發量，但是噴泥口侷限在樹根下，體積一直無法長大，仍維持噴泥洞的外形)，此為極為穩定的泥火山。本研究發現人為的破壞力已經成為干擾泥火山系統的一個重要的外營力 (例如深水苗圃辦公室前的錐狀泥火山 no.17)，因一再地被怪手破壞而呈生長停滯的狀態 (照片 4)。亦可發現因噴發量少，加上稍有外力侵蝕，即可造成地景的改變 (南勢湖 no.1 泥火山) (照片 5a, 5b)，此為敏感的火山。而 3 號、14 號泥火山縱使有很大的人為破壞，但可藉由大量的噴發泥漿迅速回復原貌 (照片 6a, 6b)，因此較為穩定。



照片 2　深水村已休眠的泥火山



照片 3a



照片 3b

照片 3　烏山頂錐狀泥火山 (no.11) 日據時期 (3a) 與現況 (3b) 之比較，2005 年 2 月在其西側新增數個噴泥口 (3c)。



照片 3c　前景為烏山頂新噴泥口



照片 4　深水苗圃被怪手破壞的泥火山



照片 5a



照片 5b

照片 5　1 號泥火山的地景是屬於極敏感的，由於位於果園旁的小溪內，常受到灌溉水的影響。其外型在噴發量大時，呈現出盾狀 (左圖)；噴發量小、溪溝水量多時則為盆狀 (右圖)。



照片 6a



照片 6b

照片 6　14 號泥火山在 2004.10.22 道路拓寬施工，將廢土傾倒在泥火山上 (左圖)，但泥火山活動並未平息，強大的泥漿壓力將上覆的砂石撐開，噴發口重新冒出地表 (右圖)。

欲建立泥火山地景敏感性的評估指標須先解決如何量測代表系統回復力與侵蝕力參數的方法。現階段泥火山的噴發強度僅以氣體通量表示之，實則影響外形的主要因素為泥漿的通量 (輸入系統的物質)，這是目前的研究尚無法量測的。被地表作用或人為力量搬走的泥漿量 (系統輸出的物質) 也無法量測。影響背景環境的因數 (例如地形坡度、易達性等) 如何適當的加以權重，尚無定論。陳力 (2005) 以近三年內泥火山的地景變化與噴發活動作定性之論述。並將系統受到的破壞力分級列為負分，回復力分級列為正分，最後加總為泥火山地景的敏感性指標，負分越高者越敏感 (表 1)。依據該研究所分析的泥火山地景敏感性試算結果可知 (表 2)，知名度較高的泥火山，例如位於烏山頂泥火山自然保留區的大型的泥火山錐 (no.11) 和養女湖 (no.3) 等的指標均為正分，被評估為較不敏感的泥火山，此意謂著他們的自癒能力頗強，或者規模夠大不容易被破壞；而指標被評為負分者皆為知名度較小的泥火山，反而極為敏感。然而此評估指標所選擇的參數與其權重尚待商榷。例如：回復力僅考慮泥火山氣體的噴發量與噴發頻率 (週期)，而非泥漿的流出量與流出速率；侵蝕力方面並未考慮暴雨沖刷的作用；而環境因素所考慮的參數則很難定量。此評估指標最引發爭議的就是各參數的分級以及其權重之設定。因此就評估泥火山地景的敏感性而言，一個可操作的評估指標仍有待建立。

然而，若從時間的向度來看，泥火山的噴發頻率 (週期) 或可視為系統舒緩的時間，而暴雨的頻率可視為干擾作用的重現時間，兩者之比值即為 Harvey (2001) 所定義之地景敏感度。此為純粹考量自然作用而忽略了人為干擾與環境因素。若從空間的向度來看 (Brunsden, 2001)，則泥火山地景承受干擾的能力或形態改變的閾值成為評估的指標。在此向度中，泥火山地景的形態，泥漿的性質與流量，自然作用力 (如暴雨) 的頻率與規模，人為力的大小 (如徒手或用機具) 等成為操作的參數，藉由這些參數的觀測，建立形態改變的閾值則成為未來研究的重點。

結論與建議

本研究從地形系統的觀點探討地形作用與泥火山外形之間的交互作用所發展的動態均衡狀態。泥火山地景的敏感性評估可根據泥火山地形的回復力 (內營力) 與侵蝕力 (外營力) 兩者相互抗衡的概念，選取可觀察的變項賦以分級加權加總而成。變項的選取與變項間的權重關係尚待作深入的探討，其解決之道或可透過專家諮詢法 (Delphi method) 來集體決定各參數之權重，或是對於旗山斷層沿線的泥火山進行形貌變化的監測，由某段時間內各參數變化量的相對幅度來決定權重等。不過，本研究建議泥火山地景的敏感度可分別從時間的向度與空間的向度著手，選擇可以觀測的變數，建立系統的閾值為首要。現階段可量測的變項非常有限，且無法連續的紀錄，因此尚無法建立一個可供操作的敏感性評估指標。本研究也建議可利用 3D 光達 (Lidar) 掃描系統定期對泥火山地景掃描，並做地形的差異比對，可提供泥火山地形系統的輸入、輸出的定量分析與形態的計量變化，或可建立可操作的泥火山地景敏感性評估的指標。

謝　辭

本研究獲行政院農委會的資助，與高雄縣政府農業局生態保育課的大力支持才得以完成，僅此誌

謝。作者也感謝審查者所提供的意見讓本文的主題與討論焦點更明確。

表 1　泥火山地景的敏感性評估指標

回復力

泥火山噴發量	級分
活躍噴發	3
少量噴發	2
微量噴發	1
無噴發	0
泥火山噴發活動的週期	級分
1 分鐘內	3
1 小時	2
數天－數月	1
現在已無噴發	0
噴發泥漿的黏稠度	級分
含水比＜50%	3
含水比介於 50%-65%	2
含水比介於 66%-80%	1
含水比＞81%	0

侵蝕力

地形背景	級分
位於有水的河流中	-3
位於無水的河流中	-2
位於陡坡	-1
位於平地	0
泥火山的規模大小	級分
直徑 2m 以下的噴泥洞、噴泥盆，或是噴泥錐些微凸起於地表	-3
直徑 2-10m 噴泥盆，或噴泥錐高 1m 以下	-2
直徑 10-20m 噴泥盆，或噴泥錐高 1-2m	-1
直徑 30m 以上噴泥盾，或噴泥錐高 2m 以上	0
遊客量	級分
在旅行團規劃之旅遊行程內	-3
有在教學野外實察、或個別遊客走訪	-2
僅當地人知道	-1
當地人亦很少人知道	0
易達性	級分
有 3m 以上寬的馬路可達，並且有停車場	-3
有 3m 以下寬的馬路、或登山步道可達	-2
道路旁 50m 以內可達	-1
道路旁 50m 以外可達	0
土地使用	級分
已遭到人為開發的破壞、並且無法自然復原	-3
已遭到人為開發的破壞、可以自然復原	-2
受到週遭土地使用的影響	-1
無影響	0

資料來源：陳力 (2005)。

表 2　旗山斷層沿線泥火山地景敏感性指標試算表

編號	泥火山區	地理位置特徵	噴泥口外型分類	泥火山噴發量	泥火山噴發活動的週期	噴發泥漿的黏稠度	背景地形	泥火山的規模大小	遊客量	易達性	土地使用	總分
1	南勢	水果園內溪溝	噴泥盆	1	3	2	-3	-3	-1	-2	-1	-4
2		竹林下	噴泥盆	1	2	2	-2	-3	0	-1	-1	-2
3	千秋寮	山谷中平臺 (養女湖)	噴泥盾	3	3	2	0	0	-2	-2	-2	2
4		半山腰平臺 (新養女湖)	噴泥錐	3	3	3	-1	0	-3	-3	-2	0
5		半山腰平臺 (新養女湖)	噴泥盾	3	3	2	-1	0	-3	-3	-3	-2
6		新養女湖上方路旁	噴泥洞	1	2	0	0	-3	-2	-3	-2	-7
7	烏山頂	烏山頂北方道路旁	噴泥錐	1	3	2	-2	-2	-1	-3	-2	-4
8		烏山頂旁的小路旁溪谷	噴泥洞	1	1	無資料	-2	-3	0	-1	0	-4
9		烏山頂自然保留區平臺上	噴泥錐	1	3	1	0	-2	-3	-3	0	-3
10		烏山頂自然保留區平臺上	噴泥洞	1	3	1	0	-3	-3	-3	0	-4
11		烏山頂自然保留區平臺上	噴泥錐	2	2	3	0	0	-3	-3	0	1
12		烏山頂旁的小路旁竹林下	噴泥洞	3	3	2	-1	-3	-1	-3	0	0
13		烏山頂自然保留區平臺上	噴泥錐	2	3	2	0	0	-3	-3	0	1
14		烏山頂東方產業道路旁	噴泥盆	2	3	2	0	-1	0	-1	-2	3
15		烏山頂南方小徑	噴泥錐	1	3	2	0	-2	-3	-3	0	-2
16		烏山頂南方小徑	噴泥池	1	3	0	-1	-3	-1	-3	0	-4
17		深水苗圃辦公室旁	噴泥錐	2	3	3	0	-1	-2	-3	-2	0
18		深水苗圃旁山坡上	噴泥洞	1	3	0	0	-2	-2	-1	0	-1
19		高師大燕巢校區科技大樓旁小丘	噴泥池	3	3	0	0	-1	-2	-2	-2	-1
20		高師大燕巢校區男生宿舍前	噴泥池	2	3	0	0	-2	-2	-3	-3	-5
21	深水	深水溪旁山頂	噴泥錐	1	1	3	-1	-3	0	0	0	1
22		深水溪旁山頂	噴泥錐	1	1	無資料	-1	-2	0	0	0	-1
23		深水溪旁山頂	無活動	0	0	無資料	0	0	0	0	0	0
24		深水溪旁山頂	無活動	0	0	無資料	0	0	0	0	0	0

資料來源：陳力 (2005)。

引用文獻

王鑫、徐美玲、楊建夫 (1988) 臺灣泥火山景觀，臺灣省立博物館年刊，31: 31-49。

宋國城 (2003) 有關旗山斷層的一些新觀察，九十二年度中國地球物理學會年會暨學術研討會論文摘要，430-431。

宋國城、陳力、陳彥傑 (2004) 有關旗山斷層的一些新觀察，**地質**，23 (3): 31-40。

沈里俊 (2003) **利用 GPS 衛星測量在高雄屏東地區地殼變形觀測之研究**，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。

張成華 (1992) **臺灣西南部海域之泥貫入體研究**，國立臺灣大學海洋學研究所碩士論文。

張宏武 (2001) **臺灣西南泥岩之電阻率構造**，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

陳力 (2005) **旗山斷層沿線泥火山產狀與噴發活動的研究**，國立高雄師範大學地理學系碩士論文。

陳國峰、李德貴、劉家瑄 (2005) 南海岩芯 MD012396 之磁學研究，**第十一屆臺灣地區地球物理學術研討會暨蔡義本教授榮退專題研討會**，490-492。

曾可欣 (2002) **臺灣西南部陸上及海域之構造演化**，國立臺灣師範大學地球科學研究所碩士論文。

黃偉倫 (1995) **臺灣西南部海域泥貫入體之分布與陸上諸背斜之關係及其對沈積環境之影響**，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。

葉高華 (2003) **由流體地球化學探討臺灣泥火山的成因**，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。

詹博舜 (2001) **由穩定氫氧同位素探討臺灣西南活動構造帶泉水之來源**，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。

趙鴻椿 (2004) **臺灣地區泥火山氣體成分分析及其對全球甲烷來源的可能影響**，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。

Aslan, A., Warne, A. G., White, W. A., Guevara , E. H., Smyth, R. C., Raney, J. A. and Gibeaut, J. C. (2001) Mud volcanoes of the Orinoco Delta, Eastern Venezuela, *Geomorphology*, 41: 323-336.

Brunsden, D. (2001) A critical assessment of the sensitivity concept in geomporphology, *Catena*, 42: 99-213.

Brunsden, D. and Thornes, J. B. (1979) Landscape sensitivity and change, *Instituteof British Geography, Transaction*, 4: 463-484.

Chorley, R. J., Schumm, S. A. and Sudgen, D. E. (1984) *Geomorphology*, New York, London: Methuen.

Harvey, A. M. (2001) Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England, *Catena*, 42: 225-250.

Hovland, M. (2003) Geomorphological, geophysical, and geochemical evidence of fluid flow through the seabed, *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79: 287-291.

Kopf, A. and Deyhle, A. (2002) Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling, *Chemical Geology*, 192: 195- 210.

Lou, X. and Vasseur, G. (1996) Geoprocessuring mechanism of organic matter cracking: numerical modeling, *American Association of Petroleum Geology, Bulletin*, 80: 856-874.

Melton, M. A. (1958) Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents, *Journal of Geology*, 66: 442-60.

Shih, T. T. (1967) A survey of the active mud volcanoes in Taiwan and a study of their types and character of the mud, *Petroleum Geology, Taiwan*, 5: 259-311.

Thomas, M. F. (2001) Landscape sensitivity in time and space — an introduction, *Catena*, 42: 83-98.

Wolman, M. G. and Gerson, R. (1978) Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology, *Earth Surface Processes and Landform*, 3: 189-208.

Yang, T. F., Yeh, G. H., Wang, C. C., Lan, T. F., Lee, H. F., Chen, C. H., Walia, V. and Sung, C. C. (2004) Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan, *Environmental Geology*, 46: 1003-1011.

You, C. F., Gieskes, J. M., Lee, T., Yui, T. F. and Chen, H. W. (2004) Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism, *Applied Geochemistry*, 19: 695-707.

Yusifov, M. and Rabinowitz, P. D. (2004) Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan, *Marine and Petroleum Geology*, 21: 965-975.

95 年 1 月 3 日　收稿
95 年 5 月 25 日　修正
95 年 6 月 22 日　接受