

## 集水區土砂脈衝現象之研究

蔡真珍<sup>[1]\*</sup> 林昭遠<sup>[2]</sup>

**摘要** 集水區土砂災害可視為一脈衝現象，當土砂能量集中輸出時，系統所產生之振盪作用，通常危害人類社會甚鉅，歷史之土砂災害事件在在顯示土砂防治工作之重要性與困難度。本研究回顧國外脈衝相關文獻並以台灣案例為分析樣區，瞭解自然界存在之脈衝現象及脈衝能量之破壞力與平衡作用，另配合系統生態學理論及其生態能量分析方法建置脈衝生態模型，探討自然災害在系統組成及能量流動中之交互作用，並模擬颱風豪雨時之崩塌事件，所產生之土砂脈衝型態。由翡翠水庫集水區案例分析可知，土砂脈衝現象除了與自然外部脈衝能量（雨量）有關外，亦與系統內部可供應能量（土砂量）有關；另透過系統模擬，分析結果顯示低頻率之脈衝能量高，系統產生較大之振盪，相對易造成災害事件。在集水區土砂治理計畫中建議考量可分次釋放土砂能量之整治措施，避免能量累積效應，並可使集水區生態系統維持較佳之自我組織之能力。

**關鍵詞**：系統生態學、土砂脈衝、生態模型、集水區治理。

## A Study on Pulsing Sediment for Watersheds

Chen-Chen Tsai<sup>[1]\*</sup> Chao-Yuan Lin<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** The centralized output of sediment energy in watersheds can be regarded as the oscillation of pulsing energy to the system and it has catastrophic impact on humans. This paper presents the pulsing phenomenon existing in the nature to interpret destructive power as well as the balance of pulsing energy. Meanwhile, this study discussed the interaction of the system constitution and energy flow in natural hazards by establishing a pulsing eco-model based on the system ecology approach. The magnitude of pulsing sediment has a close relationship between the concentrated rainfall and the available materials of sediment from the case study of Feitsui reservoir watershed. The results of simulation showed that a higher magnitude pulsing occurs less frequently but causes hazards more easily. To prevent hazardous pulsing sediment, the effect of energy accumulation should be considered in sediment mitigation, and thereby enables the watershed ecosystem with a better function of self-organization.

**Key Words:** system ecology, pulsing sediment, eco-model, watershed mitigation.

---

[1] 行政院農業委員會林業試驗所

Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Taipei, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

\* Corresponding Author. E-mail address : jtsai@tfri.gov.tw

## 一、前言

台灣全島山巒綿亙，溪谷縱橫，鬼斧神工之地景變化及氣候特色，為豐富自然資源之搖籃，因此享有福爾摩沙之令譽。然而美麗寶島，卻是由頻繁的造山運動所形成，在坡陡流急、地質破碎及豪雨集中之地文、水文特性，亦形成土石流、山崩及洪水等天然事件，威脅人民生命財產之安全。如何維護自然環境及考量經濟發展，供需平衡之課題，亦為二十世紀自然資源永續經營與管理所探討之核心；在自然災害管理層面，生態資源之永續生產理當不容忽視。

生態學者認為自然災害，即為自然脈衝能量 (natures pulse)，中等振幅之脈衝能量對自然生態環境有正面之功效，謂為能量津貼 (Odum et al., 1995)，環境系統接受外界之脈衝能量後，透過自我組織作用，經重組、調節、回復為穩態，對自然資源之永續生產有一定之助益。適度之人為介入、參與自然環境之復育工作，可縮短復育、演替時期；惟仍需考量系統可能因構造物、自然環境及脈衝能量間之交互作用，造成另一種非預期之脈衝型態。

儘管生態工程之理念被強調應用於集水區之災害整治或河溪復育工作，惟現階段仍以工程技術直接處理土砂問題，生態系統之學理依據相對探討較少。本研究係應用系統生態學之理論基礎，由脈衝相關文獻及實例分析，瞭解自然界所存之土砂脈衝現象；另以集水區為一系統尺度，繪製能量系統圖，並建置土砂脈衝生態模型，探討土砂脈衝能量之振幅與週期特性，據此建議以生態系統觀點進行系統性之整治，以發揮集水區生態系統應有之功能與結構為目標，提高集水區之彈性與抗性之效，進而達減災之效。

## 二、脈衝理論

### 1. 脈衝之定義與現象

「脈衝」為一振盪現象之描述，有如脈搏跳動般，非恆為常數，會受到外部能量供給系統之特性，而有所波動，以非線性動力平衡之方式維持系統之營運。系統在發展過程中能達某一層級之穩態且能維持長時穩定，惟取決於可用資源。穩態的概念廣為人所接受，但在近幾年的研究指出，波動 (fluctuations) 在自然界全部系統中可能是本身就存在的一種特質，就如同

經濟之漲跌、起伏現象，脈衝動力可能顯示出系統裡真實的自然。Odum (1996) 定義「脈衝」為存量與流量之消長現象，藉由消退至再成長所形成之循環；意即生產量受到快速、驟升之消費作用及物質之循環而逐漸增加。

20 世紀末是脈衝理論蓬勃發展的時期，揭櫫水域生態、陸域生態、化學、氣象、地質及經濟等各領域，許多科學家紛紛發現其間存有相類似之動力平衡特性，透過統計資料之時間序列分析或透過其振盪之結構特性觀察出脈衝現象，如表 1 為國外在水域、陸域生態方面之相關脈衝研究。

有關台灣集水區之土砂脈衝現象及相關論述，則以土砂積蓄效應導致零存整付之觀念闡述，如 2004 年艾利颱風重創石門水庫事件，桃園縣政府委託中興大學林昭遠研究「桃園縣水土保持工作對石門水庫集水區之影響報告」中，指出土地崩塌能量逐年累積易發生零存整付現象；此即為集水區土砂能量集中釋出所產生之典型脈衝現象。

### 2. 脈衝能量系統之研究

脈衝現象係為非線性動力平衡之過程，亦是系統之自我組織作用，生態學家 Odum et al. (1995)，則以系統及生態能量之觀點，分析研究尺度內之系統能流特性，配合生態模型之建置與動態模擬，由所觀察之系統其能量流動行為，完整地提出脈衝的動力行為存在於自然界的每個角落，能涵蓋各領域所發現之脈衝現象；Odum 指出系統在不同的能量階層接收不同的脈衝動力，彼此交互作用，透過自我組織，使系統能朝穩定且永續性的發展。

#### (1) 脈衝之能量階層特性

脈衝動力對人類系統的衝擊程度，則視發生脈衝所在之能量階層大小，若其能量階層大於人類所處之階層，則易對人類系統產生強大之破壞力；一般而言，該系統之替換時間愈長，單位時間之能流較小，因此需以較之長時間累積脈衝能量；例如太陽光之替換時間單位為日；颱風之替換時間為季；人類之替換時間為百年；單位日能流為陽光高於颱風，因人類之能量階層高於季節性颱風；因此颱風之發生，對人類系統之威脅性較低；反之，百年性週期之地震，則較具摧毀性之破壞力。陽光之脈衝現象，因尺度小，在人類系統中，猶如雜訊般，影響程度甚微，不易被察覺。另能量階層的概念與增大尺度間之關係，參

考圖 1；若比較一焦耳之煤礦（能量階層較低）及電力（能量階層較高），由於電力能量階層高、能量集中，在系統中之能量密度低，且能儲存之能流量高，所作之功亦較大，因此脈衝發生時之振幅大，即對系統之作用力大。

## (2) 脈衝能量之破壞力與平衡作用

針對脈衝能量對系統產生之破壞行為，Odum (1991) 則認為破壞在某個尺度中看似有利的，但對較大之系統而言可能是有害的。在系統裡，破壞經常是由內部單元 (inter-unit) 所控制。破壞係可能出自於抗衡競爭，或者受到較高層級之組織來控制競爭。例如，生態系統裡的兩個物種、經濟裡的兩種相似產業、世界裡的兩個國家，經系統之組織成為競爭或者合作，即為熱力學之競合作用，如同能量生產與消費之模式。

圖 2 可適用於說明一般系統中任何能量層級之破壞及其自我組織作用。以系統之資產  $Q$  為例，包括兩種破壞途徑，一為熱力學第二定律中之耗損，係由物質循環所引起；另一破壞路徑係受到額外之能量來源  $D$  所驅動，當有用的能量被供給至破壞過程，有用能量則以某種型式做功，自發性地自我組織作用，產生瞬時之自催化

破壞，並轉換至  $ST$  儲存。

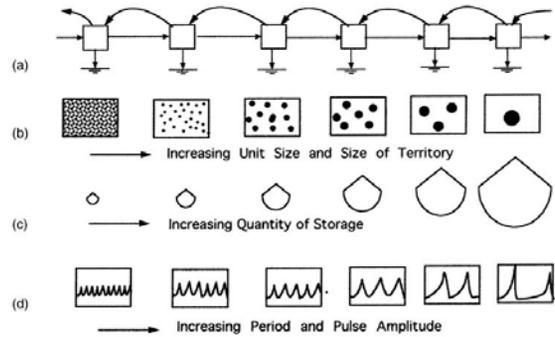


圖 1 能量階層的概念與增大尺度間之關係 (Odum, H.T. and Odum, B., 2003)

**Fig.1 Summary of the concept of energy hierarchy and the relationships with increasing scale. (a) Network aggregated as an energy transformation chain; (b) size of centers and their territories; (c) quantity stored and turnover time; (d) period of pulses and time between pulses.**

表 1 脈衝現象之相關研究

Table 1 Previous studies of pulsing.

領域	作者/年代	脈衝現象
水域生態	Odum, 1980 Mitsch and Gosselink, 1993	水文事件的脈衝現象如潮汐、季節性的水位線消長或每年的洪水量等不同尺度的脈衝能量對溼地、沼澤地、洪水平原之生態結構功能有著助益。
	Hensel et al., 1998	位於瑞士及法國邊境的 Rhone 三角洲分布著廣泛的“自然”區域，係由洪水脈衝事件形成大量之泥砂，能填補三角洲自然流失之高程。
	Day et al., 1995	提出脈衝事件對於生態系統之永續的重要性，並以地中海及墨西哥海灣為例，說明地球作用導致的海平面的上昇能因洪水所帶來的大量泥砂予以平衡、緩和其影響。
陸域生態	Bigger, 1976	透過熱帶昆蟲族群量之長時間序列分析，發現昆蟲族群量在熱帶農作物中，有著週期性的循環爆增。
	Morris, 1963 Clark et al., 1978	在很多地區均可發現，雲杉木的害蟲 (Spruce-budworm) 約每 30~70 年爆發，每次約持續 15 年；這是陸域生態系統研究中，最佳記載之一。

Odum, 1971  
Leach and Givnish, 1996  
Swetnam and Betancourt, 1990

森林野火具有週期性, 不同地區有著不一樣的時間期距。透過火災促進養分循環至土壤, 助於森林生態系統的演替更新, 是永續性的重要驅動力。

### 三、材料與方法

#### 1. 試區概述

考量相關資料之完整性、長期性, 本研究選擇福山試驗林 1 號集水區作為模型分析之樣區, 另由於翡翠水庫集水區自建壩以來, 相關統計調查資料相當完善, 因此亦選擇此樣區作為集水區常見脈衝現象之說明。研究樣區之介紹茲簡述如下 (地理位置參圖 3)。

##### (1) 福山試驗區

福山森林試驗區位於臺北縣烏來鄉與宜蘭縣員山鄉交界, 隸屬林業試驗所福山分所管轄, 總面積 00 約 1100 公頃, 涵蓋蘭陽溪支流粗坑溪與南勢溪上游哈盆溪之集水區, 海拔高 400 ~ 1,400 公尺, 為雪山山脈北段支稜, 山地坡度陡峭。境內主要林相為亞熱帶混生常綠落葉林 (樟栲林)。根據福山氣象站 1993 年至 2006 年之統計資料顯示, 因受到東北季風的影響, 氣溫較低, 年平均溫度約為 18.2 °C, 年平均日射量達 3650MJ/m<sup>2</sup>, 月平均最大風速可達 36.8m/s; 夏季受到西南氣流的緣故, 暖熱潮濕, 常有對流雨發生, 平均每年受到 1.1 個颱風侵襲。由於冬、夏季雨量皆高, 年雨量約為 3660 mm, 降雨日數達 223 天, 屬於溫暖重濕的夏熱型氣候。本研究之樣區為福山試驗林境山之 1 號集水區, 屬哈盆溪流域, 位於哈盆保留區北方, 面積約 38 公頃, 海拔高在 700~1000 公尺之間。

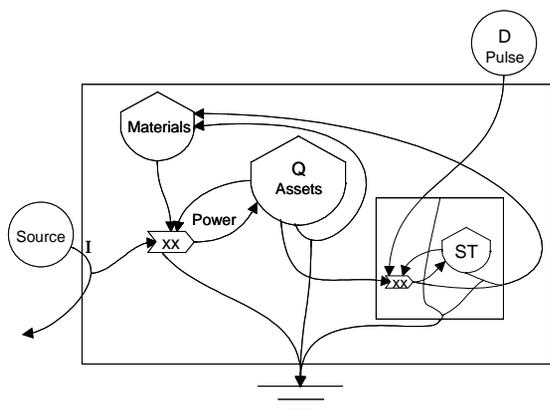


圖 2 破壞之脈衝能量系統圖 (Odum, 1991)

Fig.2 Energy systems diagram for pulsing model of destruction

##### (2) 翡翠水庫集水區

翡翠水庫位於新店溪之支流北勢溪, 範圍包括臺北縣之石碇鄉、坪林鄉及新店市部份面積計 14.52 平方公里, 其中蓄水域面積 10.24 平方公里。集水區面積為 303 平方公里, 境內有魚逮魚堀溪、金瓜寮溪和石碇子溪等河川匯流, 在龜山橋附近與南勢溪匯集成新店溪; 設有翡翠、九芎根、十三股、坪林、碧湖、太平等六個雨量站, 依翡翠水庫管理局水庫操作年報之統計資料, 自民國 77 年至 95 年期間, 歷年平均雨量為 3843 公厘, 最大年降雨量達 5736.8 公厘 (民國 87 年), 最低則為 2440.6 公厘 (民國 92 年)。

#### 2. 能量分析方法及系統生態模型建置

##### (1) 生態能量分析

本研究係應用 H. T. Odum 以系統及生態能量理論為基礎所發展之系統生態學, 透過其所創之能量系統語言圖例 (表 2), 可直接轉換為微分方程式, 進一步分析儲存 (Q) 之改變率, 能量系統語言圖例所代表之數學意義示如圖 4。

生態能量原理, 係依循熱力學兩大定律:

- 熱力學第一定律 (能量守恆定律): 能量可由一種形式被轉變為另一種形式, 但其總量不變; 即生態系統之進、出流量必需相等。
- 熱力學第二定律 (熵/能趨疲定律): 即為 Entropy Law; 能量由一種形式轉變為另一種形式的轉換過程中, 會有一部份形成不具潛能之熱形式, 又稱熱流失; 此觀念在生態能量中, 亦有學者稱為能量稅 (energy tax)。

由於熱力學的二個定律並不足以解釋生物現象, 物理系統會朝向破壞系統的組織與秩序發展, 但生命系統的進化則朝向功能性的複雜化發展。Odum and Pinkerton (1955) 進一步延伸 Alfred J. Lotka (1925) 所提出「最大能量原則

(maximum energy principle)」引介至生態系統中，認為生態系統能存活係由於最大能量的流動，其能完成於低能量效率中，提供低能趨疲能量的來源，以維持生態系統的秩序，因此生態系

自我組織作用於系統之演替過程中，由可用能量及物質，發展生態系統結構、功能以及多樣性。自然界中，任一物種在天擇壓力下，為確保物種生存與繁衍，透過回饋路徑 (feedback loop) 或回饋控制 (feedback control) 之機制，則能改變能量之流動，此回饋之設計又稱自我催化 (autocatalytic) 作用，即系統利用潛在能量驅動一回饋催化路徑而得到更多的能量轉換。生態系統中，生命與非生命組成間之交互轉換機制，即來自其自我組織能力 (Odum, 1971)。例如某地區或系統遭到破壞(如森林大火)，透過自我組織作用則能使系統有機會得以自然重建、復育 (Odum, H.T. et al., 1993; Jansson, A.-M. and Jansson, B.-O., 1994.)。

(2) 系統生態模型建置

系統生態模型透過宏觀之簡易模型，配合一組能量循環圖例 (energy circuit diagram)，加以描繪一系統能量流動之動態變化行為，分析系統模擬結果可應用於政策衝擊評估。系統生態模型之特色乃是以能量觀點為基礎，從較宏觀的角度簡化系統模型、分析系統行為，改善了系統動態模型其構件間實質流動所不能表達具涵能量 (embodied energy)、缺少熱消散 (heat sinks)、以及外部資源流入以乘數控制缺少資源本質特性與貢獻之意義等缺失。此外，由於系統生態模型之建構屬自我催化性 (autocatalytic)，系統內之組成會透過自我組織作用彼此調適，故參數之校估係以系統趨於穩定之觀點，各組成流入等於流出之穩定狀態 (steady state) 下估算參數值。經電腦程式之設計，並配合相關參數值之輸入，即可進行系統模型之 5 基本分析測試。相關電腦程式設計軟體包括 MS EXCEL、BASIC、DYNAMO、STELLA、FORTRAN、CSMP、POWERSIM、SIMSCRIPT 或 VENSIM 等；本研究採用 STELLA 5.0 軟體進行程式編撰，建置系統生態模型，即可動態分析模擬集水區土砂脈衝能量之特性。由於自然系

統之能量流動方式以「最大功率原則」及其系統本身之「自我組織作用」而能維持生態系統的秩序，提供生命所需之能量。

統極為複雜，系統變數間彼此交互作用且隨著時間呈動態變化，屬非線性動力 5 系統；配合電腦快速運算功能，則可模擬、預測一系統中各元素在時間序列下之變動過程，或各元素間彼此關係改變後對整個系統之影響程序。

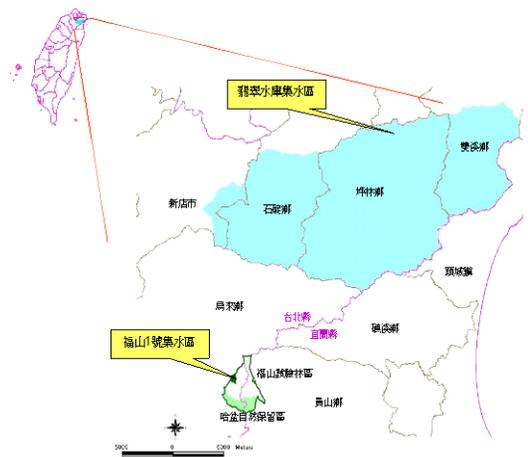


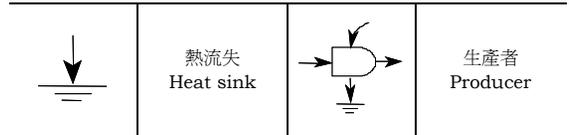
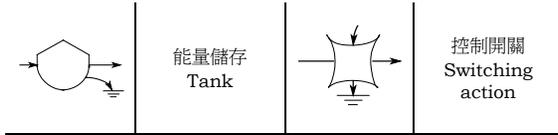
圖 3 研究區域位置

Fig.3 Locations of the Study Area.

表 2 能量系統語言圖例 (Odum, 1983)

Table 2 Symbols of the energy systems language.

圖例說明		圖例說明	
→	能量迴路 Energy circuit		交互作用 Interaction
○→	來源 Source		消費者 Consumer



### 四、結果與討論

#### 1. 翡翠水庫土砂脈衝現象

由水庫淤砂量可知集水區土砂運移之狀態，一般而言，集水區之土壤沖蝕或崩場所解離之土石，經雨水攜帶、運移至下游，最後沈澱、堆積於庫區，即停止搬運工作。由於雨量為水庫淤砂量之脈衝動能來源，需有足夠之雨量動能方可挾帶土砂運移至庫區沈積，否則雨水僅能入滲，不足以產生地表逕流輸送泥砂，為表達雨量之脈衝情形，本研究將分析年度中連續五個月累積最大降雨量視為豐水期之累積雨量 (表 3)，並假設該雨量可促進集水區之土砂釋出，由泥砂淤積量 (表 4) 進一步作關聯性之分析比較 (圖 5)。

由圖 5 可知，水庫淤砂呈現循環消長之脈衝型態，由於 85 年的賀伯颱風帶來豐沛之日雨量，因此在當年度呈現極端之爆發型脈衝，水庫淤積量高達 3476 千立方公尺；民國 81 年~92 年期間之淤砂量脈衝隨著豐水期雨量脈衝之強度而有明顯之對應關係，泥砂淤積量隨著雨量大小呈現波動，惟在 85 年之淤砂量驟昇，乃受到賀伯颱風當日降下九百多公釐之極端降雨事件所影響；民國 73 年~80 年期間之淤砂量與豐水期雨量之相關性不大，推測為建壩初期，集水區土砂受到其他擾動因素較多，非僅以雨量之單一因素所能反應。在 93 年~95 年期間，前兩年之泥砂量輸出與豐沛雨量之對應性不高，95 年雨量較低、但淤砂量卻有上升之趨勢，可能來自前兩年所堆積未搬運至庫區。

集水區土砂之剝離與泥砂之搬運特性，受到集水區整體系統之能流狀態所影響，所產出之泥砂受到外

力驅動後，其輸送機制可分為「搬運限制」及「供給限制」，可由泥砂脈衝能量與豪雨能量間之對應關係瞭解其輸送機制，如 93 年、94 年可能為「搬運限制」；87 年之豐水期雨量高於前年之雨量，但泥砂淤積量明顯偏低，推測在 85 年賀伯颱風時已有大量之土砂能量釋放，因此未產出大量之泥砂量，可能為「供給限制」之現象。

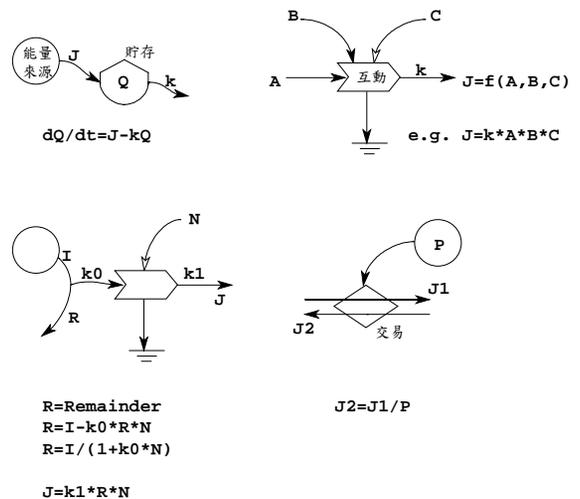


圖 4 能量圖例與數學意義 (修改自黃書禮, 2002)

Fig.4 Energy legend and mathematical significance.

表 3 翡翠水庫歷年之降雨資料 (修改自台北翡翠水庫管理局, 2006)

Table 3 Mean monthly rainfall of Feitsui reservoir

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	豐水期累積降雨量(mm)
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	--------------

77	185	90	293.4	228.4	277.7	306.4	79.2	203.9	1157	968.1	144.1	170.3	2714.2
78	196	129	144.4	198	322.5	84.9	516.6	222.9	777.3	273.2	401.9	266.2	2191.9
79	494.2	236.5	152.4	465.9	283.2	533.5	183.5	775.7	688.4	192.7	307.7	93.6	2373.8
80	322.6	144	143.7	108	113.1	265.8	132.5	251	705.4	439.2	263.9	127.2	1793.9
81	187.8	469.9	200.7	215.4	229.4	226.9	56.7	644	587	353.4	383.1	151.2	1868
82	265.6	128.3	209.3	295.5	123.9	258.1	61.8	139.5	133	312.7	319.1	193.8	966.1
83	135.4	276.1	224.1	109.2	234.7	275.8	192.7	524.2	344.1	699.8	141.5	377.6	2036.6
84	220.7	290.4	163.9	123.2	247.8	182.4	233	179.1	252.2	233.2	273.5	118.2	1171
85	135.2	196.3	155.4	283.6	270.3	129.4	698.5	251.6	567.1	557.6	722.6	50.6	2797.4
86	134.3	285.8	173.6	127.9	221.1	495.9	187.1	884.4	254.6	196.6	67	201.3	1589.7
87	189.2	415.5	224.4	263.5	511.5	272.6	161.9	371	694	1817	451.9	364.3	3495.6
88	169.9	76.8	183.7	66.2	245.3	373.5	250	184.2	328.2	394.9	232.6	382.2	1530.8
89	241.4	544.5	169	363.7	147.4	365.5	326	633.1	262.4	679.8	951	515.9	2266.8
90	355.5	165.4	170.4	234.4	356.4	559.4	237.5	195.7	2116	346.5	120.8	276.1	3455.3
91	126.2	102	115.2	58.9	131.4	197.5	582	214.5	285.1	237.4	209.8	252	1528.8
92	96.1	55.3	130.4	188.3	139.8	410.1	36.5	200.2	405.1	246.5	453.4	72.1	1341.7
93	130.2	220.5	279.2	143	444.1	149.2	309.8	878.7	719.6	499.9	188	513	2799.2
94	168.8	438	286.2	58.9	725.2	242.6	517.6	832.6	599.8	497.3	197.5	208.1	2917.8
95	373.2	193.1	223.1	228.8	432	275.5	296.3	315.1	673.4	113.1	219.4	396.7	1992.3

表 4 翡翠水庫歷年淤砂資料 (修改自台北翡翠水庫管理局, 2006)

Table 4 Annual sediment of Feitsui reservoir

期別	起迄年月	間隔(年)	總淤積量 (1000m <sup>3</sup> )	累計淤積 (1000m <sup>3</sup> )	平均淤積 (1000m <sup>3</sup> )
1	73.07-78.03	4.75	5972	5972	1257
2	78.04-78.12	0.75	1021	6993	1361
3	79.01-79.12	1	970	7963	970
4	80.01-80.12	1	981	8944	981
5	81.01-81.12	1	964	9908	964
6	82.01-82.12	1	405	10313	406
7	83.01-83.12	1	889	11202	889
8	84.01-84.12	1	486	11688	486
9	85.01-85.12	1	3476	15165	3476
10	86.01-86.12	1	777	15942	777
11	87.01-87.12	1	1377	17319	1377
12	88.01-88.01	1	484	17804	484
13	89.01-89.12	1	840	18644	840
14	90.01-90.12	1	1354	19998	1354
15	91.01-91.12	1	467	20463	467
16	92.01-92.12	1	214	20679	214
17	93.01-93.12	1	373	21053	373
18	94.01-94.12	1	351	21404	351
19	95.01-95.12	1	674	22079	674

## 2. 集水區生態能量系統及能流分析

集水區為水文之基本地形單元，以山嶺線為範圍，匯流地表逕流水至集水區出口，區外之地表水或地下水皆不會流入該區域內，可視為一封閉區域 (Chow et al., 1988; Nemeč, 1964; Anderson and Burt, 1985)；因此假設主要之能量或物質流動皆在此範圍內循環；集水區主要之能量來源係由太陽能為基礎，始產生水文循環現象 (圖 6)，另因水文與地形之作用，以致於驅動土砂移動，產生物質流動。本研究將集水區視為一封閉系統，能量流動、傳輸行為僅在集水區之系統內。流入集水區之自然可再生能量為太陽、風、雨等，在集水區產生降雨、蒸發散及逕流等

水文現象，與植被生物、營養物質、可用土壤及土壤內之水份等組成份交互作用，除了生物生長外，亦有土壤流失等現象，在颱風之能量集中流入系統後，更有土石崩落產生等能量傳輸現象，其能量來源及耗損說明如表 5。

為瞭解集水區基本之能量流動特性，本文以福山森林集水區為例，應用能量系統語言圖例繪製如圖 7，能量分析說明如下：颱風及降雨之水份由 k31 進入土體，另一部份經 k32 流路成為直接逕流，由於植被生物量能減緩地表逕流，因此其交互作用為相除效應，產生實際地表逕流量，亦為土壤沖蝕之外營力。颱風之能量在短時間集中流入系統，經常有土石崩落產生

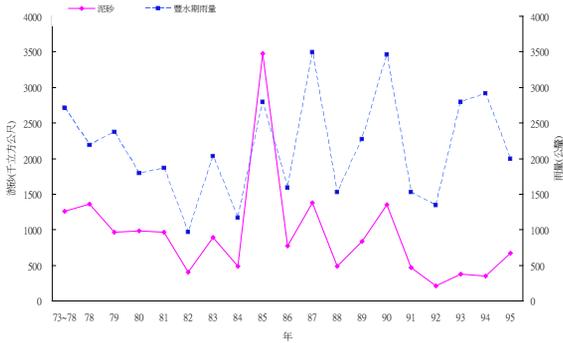


圖 5 翡翠水庫淤沙量與豐水期雨量之脈衝型態

Table 5 The pulsing patterns with sediment and rainfall in wet season of Feitsui reservoir

等能量傳導現象；尤其在植被覆蓋良好之坡地系統，如海棉體般大量吸收外界投入之能量，一旦超過土體之平衡穩定，遂產生大規模之崩塌，因此紅色之「控制開關」符號表示颱風投入能量至集水區系統，當能量積蓄至 G1 時發生崩塌，G2 為脈衝發生後之平衡能量。

經蒐集現地調查數據，進行相關參數校估 (表 6、表 7) 建系統生態模型，分析長期之系統演替趨勢。相關調查報告指出，福山森林試驗區並無明顯之崩塌現象，主要之土砂生產來源其泥砂來源包括坡面沖蝕、河道之崩塌、沖蝕等；為簡化系統之複雜性，本文僅

針對坡面之土壤沖蝕現象進行模擬，由於沒有大規模崩塌之現象，因此不考慮 G1, G2 等能量累積之特性及水文、地文條件隨著時間變動而影響系統之土砂生產特性，並以碧利斯颱風為自然脈衝事件，據此分別模擬 500 年期間系統在無自然脈衝事件及颱風脈衝事件下之生物量、土壤量、營養鹽等系統變量之發展趨勢，並比較不同脈衝週期、強度之變化。在此假設碧利斯颱風之脈衝強度為一單位的能量，且其發生週期與其能量成倍數關係，即若每隔 5 年發生一次風災，則其脈衝強度為五個單位能量；另於系統模擬時輸入之參數表示為 pulse (x, y, z)，意即 pulse (脈衝單位能量，脈衝初次發生年，脈衝發生週期)。

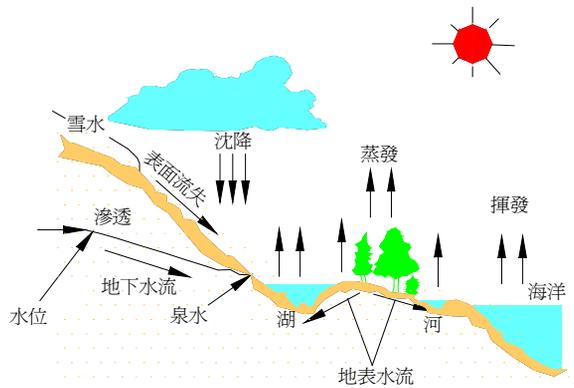


圖 6 集水區水文循環圖 (重繪自 Todd, 1959)  
Fig.6 Hydrological cycle in a watershed.

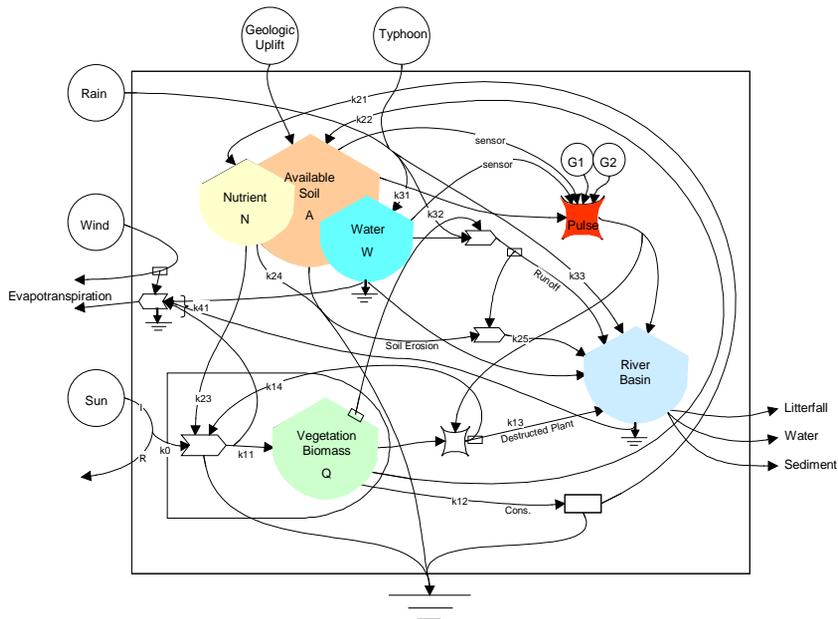


圖 7 森林集水區能量系統圖

Fig.7 Energy system diagram of forest watershed.

表 5 集水區組成份之能量來源與損失

Table 5 Energy source and loss in watershed

主要之組成份	能量來源 (流入之能量)	能量損失 (流出之能量)
植被生物量	初級生長量係由陽光、雨水與營養物質之交互作用後所產生。 崩塌產生之孔隙作用使植物生物量增加。	植物之枯枝落葉。 土石崩塌所引起之植物毀損。
營養物質	枯枝落葉經微生物分解後所形成之養份。	因土壤沖蝕，造成養份流失。
可用土壤量	地殼抬昇作用，促進土壤風化。 植被作用，促進土壤之化育。	降雨產生之地表水逕流造成土壤流失。土石崩塌使可用土壤量減低。
土壤水份	降雨。	蒸發作用。可用土壤量減低，則土壤水份亦隨之降低。
流域	降雨輸入之水量。植物毀損之殘株。土砂運移之土砂量。	蒸發作用。透過水體流動將植物殘株及土砂運移至系統外。

分析結果顯示，福山森林集水區系統在沒有自然脈衝力外之影響下，生物量 (Q)、土壤 (M)、營養鹽 (N) 在系統發展初期迅速增加，但生物量在 250 年後則趨於平穩，符合一般生態系統理論之現象。若考慮地殼抬昇對土壤之累積效應，土壤量明顯隨著時間增加而持續上升，但林木成長至成熟期，養份吸收趨於平衡，能量僅使用於生物量之維持；如圖 8 所呈現，生物量 (Q)、土壤 (M)、營養鹽 (N) 之總量 (縱座標) 隨著時間 (橫座標) 呈現收支平衡之穩態。若系統每 1 年發生 1 次碧利斯颱風的強度，則生物量 (Q)、土壤 (M)、營養鹽 (N) 皆降低 (圖 9)，另颱風時之土壤流失，導致 M、N 之斜率則較緩；Q 的斜率與未發生颱風時相近，推測可能由颱風損壞之枝條落葉產生營養鹽提供植物額外之養分補充，因此颱風雖造成生物量降低，但對其成長速率影響不大。若模擬每 5 年發生一次颱風脈衝，並假設碧利斯颱風之雨量為脈衝之單位能量強度，且颱風雨量強度隨著發生期距之增加，形成倍數之成長，其結果示如圖 10，系統在每次颱風事件後可自我回復。

另比較在 0、1、5、10、50 等五種脈衝發生期距下，系統生物量 Q 之成長趨勢 (圖 11)，可知 50 年週期之脈衝事件，對系統之衝擊甚大，生物量在脈衝發生前之累積量高於其他脈衝事件；雖然 50 年週期之脈衝事件造成系統大幅度之振盪，但系統之自我組織及養份回饋作用，使之能在下一波脈衝事件前恢復生產力，能有足夠之自我復育力且提供足夠之料源永續振盪，不致破壞系統之整體功能結構。

表 6 能量流動分析

Table 6 Analysis of energy flow in study area

	系統輸入	代號	數值	單位
	自然可再生能源			
1	太陽能源	I	1.64E+09	Mj
2	未使用能量(unused)	R	1.64E+08	Mj
3	風	D	16	m/s
4	雨	P	400	cm
	碧利絲颱風雨量	T	51.2	cm
5	地殼抬昇量	G	4.21 E9	g
	系統儲存及變量			
	總面積	A	379800	m <sup>2</sup>
6	森林生物量	Q	1.10E+10	g
7	土壤(深度 1m)	M	4.18E+11	g
8	土壤養份	N	4.53E+08	g
9	土壤水	W	7.60E+10	g

表 7 系統流量與參數值校估

Table 7 Calibration of the pathway coefficients for the computer simulation

流量	估算式	數值	單位	參數值
10 輸入太陽能源	$K0 \cdot R \cdot N =$	1.48E+09	Mj	$k0 = 1.99E-08$
11 初級生產量	$k11 \cdot R \cdot N =$	5.47E+08	g	$k11 = 7.35E-09$
12 蒸發散量	$k41 \cdot R \cdot N \cdot D \cdot W =$	3.15E+11	g	$k41 = 3.49E-18$
13 枯枝落葉	$k12 \cdot Q =$	1.44E+08	g	$k12 = 1.31E-02$
14 颱風毀損之枝條落葉	$k13 \cdot Q =$	5.24E+07	g	$k13 = 4.77E-03$
15 土壤沖蝕量	$k25 \cdot Pr =$	2.25E+05	g	$k25 = 7.39E-07$
16 颱風造成之土壤流失	$M \cdot f =$	1.73E+07	g	$f = 4.15E-05$
17 枯枝落葉分解成營養鹽	$k21 \cdot Q =$	4.92E+06	g	$k21 = 4.47E-04$
18 土壤沖蝕所流失之養份	$k24 \cdot M =$	6.74E+03	g	$k24 = 3\%$
19 林地土壤生成量	$k22 \cdot Q =$	1.18E+07	g	$k22 = 1.08E-03$
20 營養鹽輸出至生物量	$k23 \cdot Q =$	4.92E+06	g	$k23 = 6.62E-11$

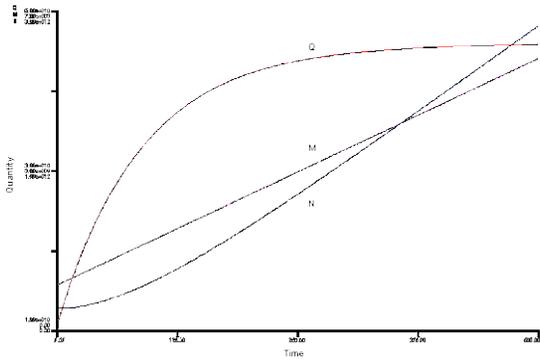


圖 8 系統成長趨勢模擬—無自然脈衝事件

Fig.8 Simulation result of pulsing model. (without pulsing)

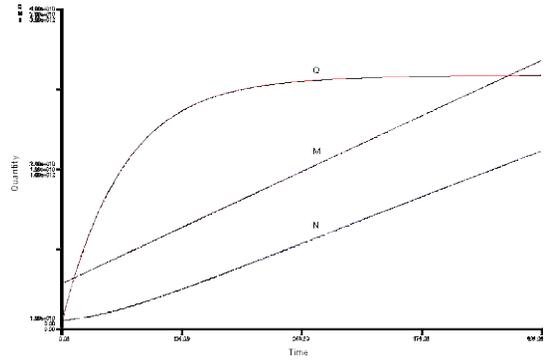


圖 9 系統成長趨勢模擬—1年週期之颱風脈衝

Fig.9 Simulation result of pulsing model. (pulse frequency 1- year)

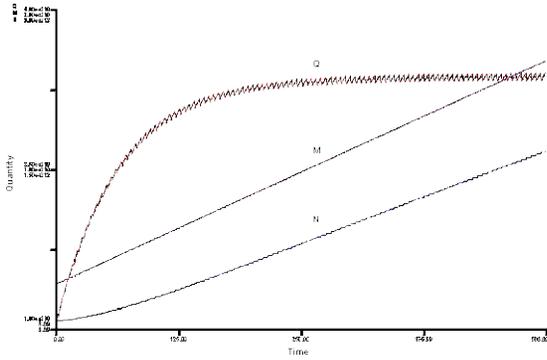


圖 10 系統成長趨勢模擬—5年週期之颱風脈衝

Fig.10 Simulation result of pulsing model. (pulse frequency 5- year)

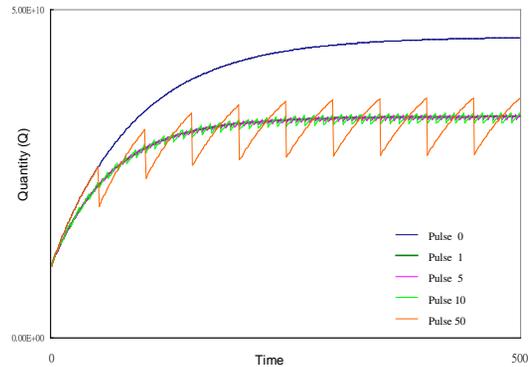


圖 11 系統成長趨勢模擬—比較不同颱風脈衝週期

Fig.11 Pulsing patterns in the simulation results of different pulse frequency.

## 五、結 論

自然環境問題，往往是由較大尺度之系統，受到外界因子干擾所引起系統內部元素之變化，所衍生之問題，有必要由整體觀點窺系統全貌與系統之因果反應關係，方能對問題之處理有較佳之因應措施。由於真實自然有如極度複雜之開放性系統，瞬息萬變且牽一髮而動全身，透過各學科所探究之系統之屬性，應有助於深入瞭解內部關聯性課題。本研究即以生態領域之能量觀點探討土砂脈衝現象，透過能量系統圖及生態模型之建構，瞭解集水區系統之整體屬性。

研究結果顯示系統受到自然外力之脈衝能量愈大，瞬時產生之振盪愈大，而系統藉著自我組織作用，可在短時間回復原本之生產力；當脈衝能量愈大，恢

復時間相對較長；雖其破壞能量較大，但只要確保系統之能量回饋機制，在系統之自催化作用下，即能從破壞能量中獲得可用能量，成為修復能力、自我組織能力，使系統恢復原有之生產力。另由翡翠水庫土砂釋出案例可知土砂脈衝現象除了與自然外部脈衝能量(雨量)有關外，亦與系統內部可供應能量(土砂量)有關，因此在集水區土砂治理計畫中，建議考量土砂積蓄效應，避免零存整付產生高脈衝能量。

## 參考文獻

1. 台北翡翠水庫管理局 (2006), 「翡翠水庫操作年報」. (Taipei Feitsui Reservoir Administration (2006). *Annual operation report of Feitsui reservoir*. (in

- Chinese))
2. 桃園縣政府 (2004), 「桃園縣水土保持工作對石門水庫集水區之影響報告」, 國立中興大學水土保持學系. (Taoyuan County Government (2004). *The effect report on soil and water conservation tasks of Taoyuan county*, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University. (in Chinese))
  3. 黃書禮 (2002), 「生態系統理論在區域研究之應用」, 都市與計劃, 29(2), 187-215. (Huang, S.L. (2002). "Ecosystem theories for regional studies." *Journal of City and Planning*, 29(2), 187-215. (in Chinese))
  4. Bigger, M. (1976). "Oscillations of tropical insect populations." *Nature*, 259, 207-209.
  5. Clark, W.C., Jones, D.D. and Holling, C.S. (1978). "Patches, movements, and population dynamics in ecological systems: A terrestrial perspective." In J.H. Steele (ed.), *spatial pattern in plankton communities*. Plenum Press, New York, 358-432.
  6. Day, J. W., JR., Pont, D., Hensel, P. F. and Ibanez, C. (1995). "Impacts of sea-level rise on deltas in the gulf of Mexico and the Mediterranean: the importance of pulsing events to sustainability." *Estuaries*, 18(4), 636-647.
  7. Hensel, P. F., Day, J. W., JR., Pont, D. and Day, J. N. (1998). "Short-term sedimentation dynamics in the Rhone river delta, France: the importance of riverine pulsing." *Estuaries*, 21(1), 52-65.
  8. Jansson, A.M. and Jansson, B.O. (1994). "Ecosystem properties as a basis for sustainability. In: Investing in natural capital - The ecological economics approach to sustainability." edited by A. Jansson et al. Washington, D.C.: Island Press., 74-91.
  9. Leach, M.K. and Givnish, T.J. (1996). "Ecological determinants of species loss in remnant prairies." *Science*, 273, 1555-1558.
  10. Lotka, A. J. (1925). *Elements of physical biology*. Baltimore, MD.: Williams and Wilkins, 460.
  11. Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G. (1993). "Wetlands." *Van Nostrand Reinhold*, New York, 722.
  12. Morris R.F. (1963). "The dynamics of epidemics spruce budworm populations." *Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 31, 1-332.
  13. Odum, H.T. and Pinkerton, R.C. (1955). "Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems." *Am. Scientist*, 43(2), 331-343.
  14. Odum, E. P. (1980). "The status of three ecosystem-level hypotheses regarding salt marsh estuaries: Tidal subsidy, outwelling and detritus based food chains." In V. S. Kennedy (ed.), *Estuarine Perspectives*. Academic Press, New York, 485-495.
  15. Odum, H.T. (1971). *Environment, Power and Society*, John Wiley, NY, 336.
  16. Odum, H.T. (1983). *Systems Ecology*, Wiley, NY, 644.
  17. Odum, H.T. (1991). "Destruction and power in general systems." In *Proceedings of the 35th Annual Meeting of the International Society for Systems Science*, Vol. I, Ostersund, Sweden, S.C. Holmberg and K. Samuelson, eds, 211-218.
  18. Odum, H.T., Odum, E.C. and Brown, M.T. (1993). "Environment and society in Florida- The three E's of Florida: Energy." *Ecology, and Economics*. Gainesville, Florida: Center for Environmental Policy, University of Florida.
  19. Odum, H.T. (1996). "Environmental Accounting." *Emergy and Decision Making*, John Wiley, NY, 370.
  20. Odum, H.T. and Odum, B. (2003). "Concepts and methods of ecological engineering." *Ecological Engineering*, 20, 339-361.
  21. Odum, W. E., Odum, E. P. and Odum, H. T. (1995). "Nature's pulsing paradigm." *Estuaries*, 18(4), 547-555.
  22. Swetnam, T. W. and Betancourt, J.L. (1990). "Fire-Southern oscillation relations in the southwestern United States." *Science*, 249, 1017-1020.
  23. Todd, D.K. (1959). *Ground Water Hydrology*, Wiley and Sons, Inc. New York. 335.
- 
- 2010 年 11 月 29 日 收稿  
2011 年 02 月 15 日 修正  
2011 年 03 月 02 日 接受
- (本文開放討論至 2011 年 09 月 30 日)