

認識韌性(resilience)的意義

◎林業試驗所森林經營組·謝漢欽(mickey@tfri.gov.tw)、潘巍中

前言

在全球變遷與永續發展的熱門課題下，為解決氣候變遷以及各類廣域尺度之災害，許多跨領域的研究正進行中。韌性(resilience)即為其中一個受到廣泛討論的詞彙。本文透過文獻回顧方式，深入淺出地介紹這個詞彙的真實學術意義，並從中加以釐清，期望使得不同領域間溝通時可以取得較一致性的內涵，企能提供學術研究上的參酌。

韌性定義的起源

Holling早於1973年介紹了生態學中一個新的且非平衡態的生態系統韌性觀(ecological resilience)，起源於對不同實證研究、數學模型以及受經營生態系統們的相關經驗。他定義生態系統韌性，可當作衡量系統與其吸收變遷或干擾並維持族群或系統狀態變數關係之間的恆定性。他表示即使是自然、未受干擾的生態系統也常常在容易變遷(change)的狀態下，展示出它們常常具備多穩定態的特性(multistability)，當系統有兩個或以上系統變數傾向維持在吸引力領域(domain of attraction)。在這些不同的吸引區域內，系統的狀態可能會有高度的不穩定，處於時常變動，有韌性的特質。後來由Walker等人於2004年定義為系統在經歷變動時吸收干擾後並重新組織，實際上可以維持其原本的結構、功能、辨識性及其反饋的能力。

韌性系統與複雜系統

韌性的發展過程擁有豐富的歷史，有時其意義會被廣泛的延伸。其中，韌性與適應性循環(adaptive cycle)的主體說法，是一個隱喻社會系統和社會一生態系統面向的概念。Gunderson與Holling於2002年指出的韌性是由「共治理論(panarchy)」或是在介於巢狀適應性循環之相互作用。儘管這些有趣的想法，但並非本文要探討的主題，有關原理已由國內學著夏禹九等所介紹，如感興趣可參酌該等中文著作(主要著作為2014年國家教育研究主編，五南圖書出版社《永續發展教育系列叢書1》〈自然保育第四章〉夏禹九著-生態系統，P71~89)。

在現有的複雜系統(complex system)之各種理論方法中，基本上是由Ilya Prigogine等於1989年所提出。其中，耗散結構(dissipative structure)理論指出在一個開放的、自我組織的系統會藉由確保其內部狀態遠離熱力學的平衡，通過與周圍環境進行交換，來保持其自身的系統結構秩序。這些耗散結構理論上會在與其環境間相互交換物質、能量與資訊而存在、以及發生的波動或擾動持續被吸收在動態系統給定的框架之中時保持平衡。由於耗散結構理論方法特性，因此很適合研究於社會-生態系統中結構變化的動態與持久性。然而，有學者指出任何非平衡的系統結構可能會在變遷時超出臨界點(threshold)，而被驅動進入一個嶄新的區域中。這時候，在經歷了不穩定與高的熵值(entropy)的階段之後，系統可能會以新

的特徵結構發展出一個不同的穩定領域。

韌性的動態系統觀

有關動態系統中吸子(attarctor)、或稱為吸引力領域、吸引力盆地(basins of attraction)乃是韌性的核心概念。其本質在解釋了一個動態系統之一部分關鍵性變數組成之狀態空間中(state space)，在這裡系統狀態，是指任何具有明確定義其特定條件的狀態，並在其重覆出現時仍然可以看出與以往狀態相互辨識兩者是一致的；或是以更精確的詞彙來形容，在系統的所有變數中於給定時間範圍中的選取關鍵變數之一組組合變數。當狀態空間中含有一個吸子其系統狀態趨於朝此吸子移動，也因此在此狀態空間中在沒有強烈外部擾動(perturbation)狀況下，系統傾向停留在狀態空間中的某一個動態位置，而不超出其所在的吸引力盆地範圍內。如果系統的狀態隨時間改變，則其狀態隨時間演替的過程可以被解釋為定義出一條系統的軌跡(trajjectory)線或稱之為軌道，從一個起始的狀態演變成當前的狀態，乃至另一個未來的狀態，其狀態可能、但不一定會到達一個最終的階段。這個系統的軌跡可以在一個由數個主要系統變數所定義出的抽象狀態空間下表達出來。這系統演替的不同階段可以以點的形式表現在此狀態空間中。圖2表示了僅有兩個系統變數 X_1 和 X_2 構成的狀態空間平面，其動態系統經演替所顯示出的軌跡。

系統演替的軌跡傾向隨著時間演進而移動，或是保持在一個系統的吸引子區域範圍內；其可能是一個點或處於穩定的狀態、或是一個穩定的封閉軌道(一個封閉的循環圈)、或是一個「奇異(混沌)」的吸子、或是一個末端開放，

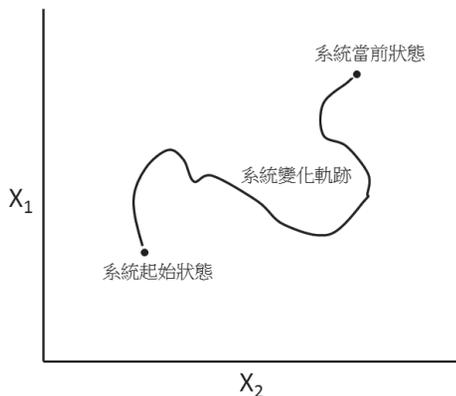


圖2 描述一個擁有兩個變數 X_1 和 X_2 的動態系統，在狀態空間中演替的軌跡。(潘巍中 作圖提供)

永遠不會抵達一個穩定終點的軌跡，或是在系統擁有更多的狀態變數時，展現出更為複雜的幾何形狀。一般吸子描述了一個系統行為的特徵及應該停留之處，如果吸子為一個固定的點，則系統會傾向演替至一個穩定狀態或動態的平衡，並在之後能維持在領域範圍內。

假定現實中所有的系統都常時永久暴露在擾動下，其狀態常常會被從穩定狀態中被推移開來，並不斷的試圖回到該穩定狀態中。當吸子為一條軌跡時，受到擾動影響的系統狀態會傾向順著其軌跡移動，但永遠不會到達恆定狀態；此時如果吸子為一個封閉的循環圈，其可能會周性的變化，或順著狀態空間上一條開放的軌跡移動；在這些案例中，鄰近軌跡的狀態會傾向往軌跡路線上移動前進，而非固定的點。

韌性系統的非線性觀點

如果一個系統中僅存一個吸子，在適當的時機下其狀態最終會停止於該處；這樣的系統被稱為全局性穩定(globally stable)。但，若系統的變數之間包含非線性的關係，尤其在所有的社會—生態系統，經常具有超過一個吸子同時存在，也因此可能發生系統狀態從一個吸子領域或吸引力盆地的影響範圍中轉移到另一個的驚奇意外(surprise)情形發生。

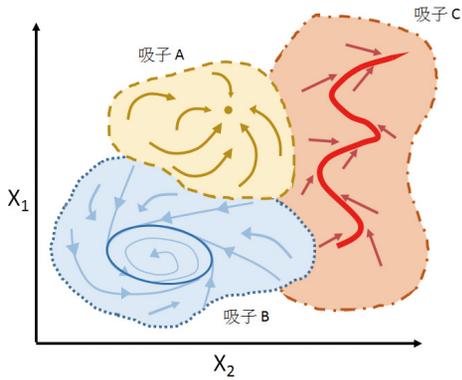


圖3 三個不同的吸子在雙變數(X_1 、 X_2)構成的狀態空間中，並以虛線表示出各個吸子的範圍。(潘巍中作圖提供)

圖3顯示了一個含有三個盆地的系統，其中一個包含了穩定的狀態點(吸子A)，一個穩定的循環圈(吸子B)以及一條穩定的軌跡(吸子C)。整個圖包括所有的吸引子盆地，也包含將其區分開來的邊界，同時也描述了該系統中所包含的穩定性的地景(stability landscape)；穩定性的地景為整個系統結構的一部分，取決於系統參數的數值，其可能是固定的或是緩慢變化的因子。在一個擁有多個吸子的動態系統中，某些關鍵參數的持續變化可能導致系統中穩定性地景不連續的改變，如圖4這些在動態系統中呈現的不連續性，早在Tu 1994年和Butenin, 1965年指出在動態系統及災變理論(catastrophe theory)之災變的數學原理中，稱之為分岔(bifurcations)。

韌性系統的累積效應

在任何的動態系統中，動態系統多穩定態的特性暗示了系統的行為可能會發生使系統外部的觀察者驚訝的描述性的變遷，一系列逐漸累積的小型擾動，其每個個別的擾動皆為可逆的，但最終仍然推動系統狀態越過當前所在的吸引力盆地的邊界，翻轉到另一個能為可能我們並不期望的領域中，並傾向留存於其中。這恰恰是許多有經營的生態系統所表現出來的行為，這些突然的轉移(shifts)

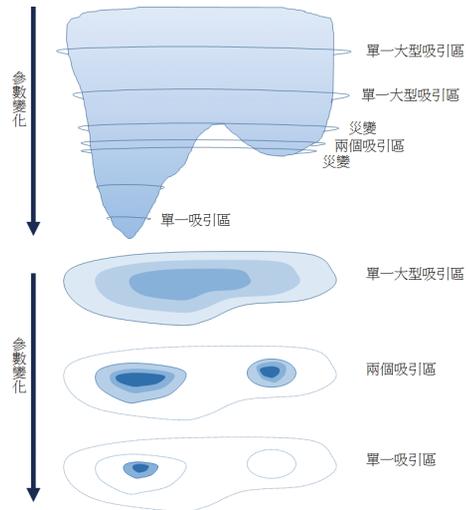


圖4 吸子的定性變化：系統參數的持續變化可能會造成吸子收縮、分裂或消失。上圖為一個三維表示的立體形狀，下圖為其從上方往下的三個不同的深度切面。(潘巍中作圖提供)

的行為發生是在缺乏結構改變的系統中。Holling於1986年呈現了數個案例，當吸引力領域的大小與形狀可能因為原本假定為常態的系統參數一些未被察覺的演變而轉移。通常被長期經營或由系統內部決定的相關的變數過程所影響；因此，穩定性的領域自身為了反應變遷，因而導致一些緩慢的變數擴展、收縮或者消失，這足以導致系統韌性的損失，類似如圖4中所描述的分岔變化。

韌性的多尺度與三個層次

穩定性的觀念通常被聚焦於靠近平衡點或軌跡的系統行為上，而且可以透過系統在遭受到擾動後，恢復到平衡點或軌跡的速度來測量；這實質上與Pimm於1984年所定義的韌性概念以及所定義的工程韌性相同。其相當另一個眾所皆知的數學概念稱為局部穩定性。韌性可以在不同尺度下運行，注意其可能在某些尺度減低，但在其他更高的尺度上則顯出增進現象。

此時動態系統可以區分出三個等級的穩定性：第一種稱為局部穩定性或稱之為工程

韌性，表示為在一個給定的吸引力領域中，系統鄰近吸引子時其軌跡的行為；第二種等級是指系統在一個穩定性的地景中，其系統狀態在不同的吸引力領域間變遷的狀況，此時動態系統仍保持在同一個領域中的能力被稱為生態系韌性；第三種等級包括了穩定性地景自身的變遷，這屬於動態系統結構穩定性(structure stability)領域，系統在其動態方程的擾動下，仍保持軌跡拓撲關係的能力，這乃是穩定性地景的定性特徵之一。可說明系統結構的不穩定性，將是表示為將原始系統轉移為另一個系統的可能率。

應該注意的是，就穩定性地景而言，韌性意味著一個多穩定態存在的系統在面對擾動時，於給定的吸引力領域中維持其狀態變量的能力，相較於領域範圍中數值是否是穩定性與恆常性，我們應該更關心韌性狀態變量的韌性的維持能力。

將韌性應用於社會—生態系統?

此處的所稱的社會—生態系統(social-ecological system)定義乃是指永續發展研究的系統分析單元，當作一個社會的或人類次系統及生態或生物物理的次系統兩者互相關聯或互動。此社會-生態系統，可給定一任何尺度從地方社區涉及本身周邊的環境到由全部人類、包括人類圈與生態圈所組成的全球系統。Schellnhuber於1998年第一位標本系統，作為一個大眾指稱的全球尺度的「地球系統(Earth System)」，很快地這個詞為多數國際全球環境變遷多個研究計畫所採用。

將韌性作為生態系統中所發展出來的觀念，其同樣可以適用於社會系統與社會-生態

系統的領域中。Adger曾經簡單定義了社會韌性(social resilience)為一種團體或社群透過其社會、政治與環境的變遷結果以處理外在壓力與干擾的能力。並提出韌性的概念不能不經批判，在毫無調整下，由生態系統轉移至社會系統中，且若使用其概念於社會系統以及社會-生態系統上，並不能真正表示社會和生態系統之間在行為和結構上沒有本質上的區別。但要合理的使用韌性的概念只需要假設系統的狀態空間包含了超過一個吸引力盆地，即便是某些社會學家可能並不接受將此一動態系統的觀念應用在社會系統上。

將韌性拓展的限制

當韌性的觀念自多穩定態的想法中脫鉤時，如要區別其與結構穩定性、甚至與局部性穩定或適應能力(adaptive capacity)之間的差異將非常困難;這是近年來重新定義韌性的風險。將適應能力或自我組織的性質放入韌性中，有時也會提到將脆弱度(vulnerability)當作韌性的對立觀念或反義詞。然而，這只會使定義更加不明確，顯然一個具備韌性的系統確實比不具備韌性的系統有著較少的脆弱度;但這個關係並不必然有其對稱性的。韌性的觀念非常清楚地與脆弱度定義中的反應能力成分有所關連，因此其與脆弱度彼此對立的關聯會更加低一些。一個更基本的差異是韌性如前面所討論的，適用於保持系統的行為，藉由能停留在其系統狀態所給定的領域之中；而脆弱度的概念是指可能在一個單獨領域之外發生的變遷。脆弱度的對立觀念將會是系統在對抗擾動時維持其自身結構的能力，即便對韌性的意涵已有所克服其差異；如能採用穩健性(robustness)卻是一個很好的替代詞。⊗