

關鍵性轉變的早期預警信號

◎林業試驗所集水區經營組·胡元璋 (why64@tfri.gov.tw)

◎林務局森林育樂組·林香歷

前言

從自然生態系到金融市場，甚至複雜的天氣系統，都暗藏著可能使之成為截然不同樣貌的關鍵轉變點(critical transition point)。例如在醫學上，有氣喘或癲癇發作的自發性系統失靈；在全球金融上，有眾所關注的市場崩壞；在地球的生態系統上，有海洋循環或氣候突然轉變，而發生在牧場、魚類族群，或是野生動物族群的毀滅性轉變，還可能威脅到生態系服務。因此目前各領域皆致力於發現早期預警信號的存在，希望在系統接近關鍵門檻(critical threshold)時，可以即時並廣泛地作出預測。

在一定範圍的複雜系統中，突發性的變化間其實存在著關連性，在模式上，這種轉變的關鍵門檻常與轉折(bifurcation)相對應，尤其是毀滅性轉折(catastrophic bifurcation)，一旦超過該門檻，正反饋作用就會透過具有方向性的改變，將系統推向一個截然不同的狀態。要預測這種轉變十分困難，因為在到達關鍵門檻之前，系統的狀態可能只是一點一點地緩慢變化，且越複雜的系統，關鍵門檻的出現通常越不明確。有趣的是，它們還是會在大尺度的樣態中顯現特定徵兆，乍看之下，它可能像是因過度收穫而崩壞的作物族群一樣，而古代氣候的轉變也可由類似的信號來判斷。

本文將試著從系統接近關鍵轉變點所表現的一般性質切入，來闡明早期預警信號的存在，進而推論系統發生改變的過程。

關鍵性減慢及其徵兆

所謂關鍵性減慢(critical slowing down)，是指系統自動恢復平衡的速率，在通過某一個不可逆的臨界點之後，會發生減慢的現象。它是一個系統是否趨近關鍵門檻的重要指標，與動態系統理論中的現象有關，目前被認為是小自細胞信號通路，大至生態和氣候的大範圍自然系統中，可以在暗示點(tipping point)掌握轉變精髓的模式。如圖1a所示，當小擾動發生時，系統會產生恢復機制，但頻率太高或強度太強的擾動會使系統朝著毀滅性轉折點逐漸改變，越接近轉折點，恢復速率越慢，到達該點時恢復速率為0，於是系統發生改變。值得一提的是，不同模式的分析結果都顯示此種減慢開始於距離轉折點很遠的地方。

關鍵性減慢最明確的含意是，在小擾動發生之後的恢復速率可以作為一個系統有多接近轉折點的指標。對大部分的自然系統來說，以系統性的尺度來測試恢復速率是不可行的，而幾乎所有的現實系統都永久地遭受自然擾動的干擾，當接近轉折點時，在變動模式中的某些特徵便會出現，進而發生改變。同時，減慢會導致擾動結果形式的自相關增加(圖1b)，因為減慢造成系統內部的改變速率變慢，使得系統在任何特定時間的狀態變得與之前越來越相似，又稱為系統的"記憶"。此外，關鍵性減慢的另一個結果是波動型式變化的增加，當特徵值接近0而擾動並未衰退，且累積的效應增加狀態變異時，它將會再次顯現，

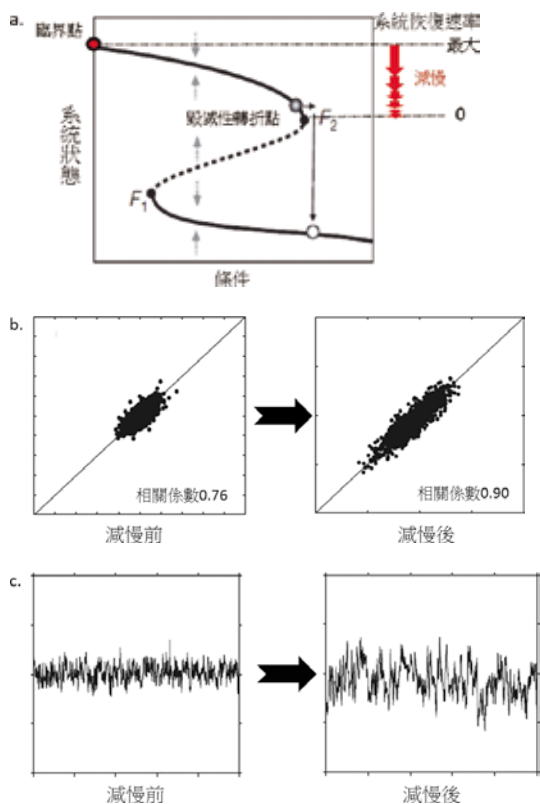


圖1 關鍵性減慢—a.恢復速率變慢, b.自相關增加, c.系統內變異增加(修改自Scheffer, 2009)。

也就是說，關鍵性減慢會降低系統追蹤波動的能力，使變異產生相對擴大的效應(圖1c)。

轉變前的歪斜和閃爍

除了自相關和變異增加之外，在毀滅性轉折出現之前，波動的不對稱性(asymmetry)也會增加。不對稱性又稱為歪斜(skewness)，並非由關鍵性減慢所造成，而是像一個不穩定的盆地一樣，兩端會有吸引者使系統接近盆地邊緣(圖2)，在不穩定點的附近，改變速率較慢，因此，系統將有相對較長的時間停留在不穩定點附近，而非穩定平衡的另一

邊。歪斜不只在系統接近毀滅性轉折時會出現，當系統被增強的擾動振幅所引發而接近盆地邊緣時也會出現。

在毀滅性轉點附近可以看到的另一個現象是閃爍(flickering)，它會發生在隨機性的外力足以將系統在兩個輪流作用的吸引者之間來回移動時，就像系統在轉折之前進入雙平衡區域一樣(圖3)。這種現象也被認為是一種早期預警，因為如果潛在的緩慢變化一直持續下去，系統可能會由輪流平衡的狀態，永久轉變到只有一種平衡的穩定狀態。閃爍已顯現在湖泊優養化和營養鍵的模式中，且特定的氣候轉變和癲癇發作也可以經由閃爍預知。在試驗統計上，當變異和歪曲增加時，可以觀察到閃爍會有像雙峰般的狀態頻率分布。

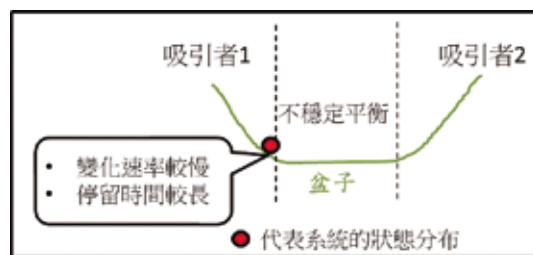


圖2 轉變前的歪斜。(胡元璋 製)

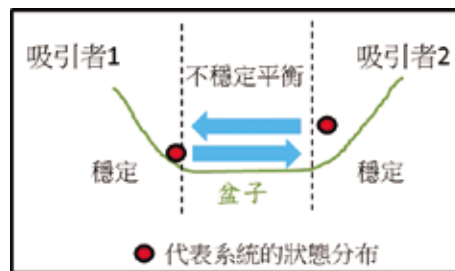


圖3 轉變前的閃爍。(胡元璋 製)

循環和混亂系統中的指標

從早期預警信號的觀點來看，在循環和混亂系統中的關鍵性轉變研究較不充分。此一轉變與不同層級的轉折有關連，有些轉折會標示穩定、循環和混亂體系之間的轉變，例如霍普夫轉折(Hopf bifurcation, 圖4)，它能標示從穩定系統到振動系統的轉變，在接近轉折點時，系統會因擾動而產生長時間的振動，直到恢復穩定為止。

另一個轉折是非區域轉折(non-local bifurcation)，當內部的振動將系統帶至一個輪流的吸引子的盆子的邊緣時，它就會發生。在盆子邊緣的衝突發生之前，系統動態會以一種獨特的方式改變。例如當系統停留在盆地邊緣附近的時間較長時，因該處的改變速率較慢，振動會拉長，自相關會增加，最後出現鎖定在成對振動之間的現象，如同閃爍一樣。而變異的增加和閃爍會發生在癲癇發作前，是一種與神經細胞內產生激動的固定期有關的現象。

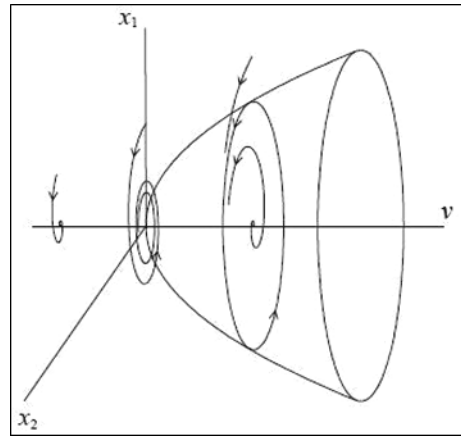


圖4 霍普夫轉折(摘自<http://www.intechopen.com>)。

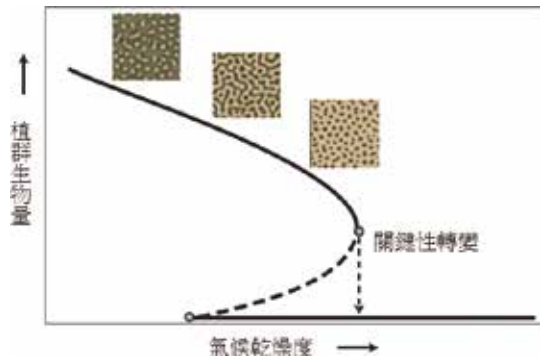


圖5 沙漠化的關鍵性轉變(修改自Scheffer, 2009)。

早期預警信號的空間型式

除了時間上的早期預警信號之外，還有出現在關鍵性轉變之前的特定空間型式。許多系統都可以視為由無數個成對的單元所組成，而每個單元都有採取與其相連結單元相同狀態的傾向。例如在金融市場中，個體對特定議題的態度會受到同儕的影響，而在一個破碎的地景中，物種在生育地的持續與否，取決於發生再定殖的鄰近塊集中是否有相同的物種出現。在這樣的系統中，形相轉變會經常發生，就像在磁性強的物質中個體小分子會影響彼

此的旋轉那樣。例如大小相同的塊集在接近系統轉變時，空間連貫性會有增加的趨勢，這是單元間的交叉關連(或共振)增加所致。

在特定層級的空間系統中，會有獨特的轉變指標，例如在受到地區性干擾影響的系統中(如草食性動物覓食的植群)，在接近關鍵性轉變時，會因為大的參數範圍消失，而出現相同規模的冪次結構(power law structure)。在擁有自體組織調節(self-organized regulation)的系統中，關鍵性轉變會經由特定的空間結構發出信號，例如沙漠植群，當關鍵性轉變接近不毛

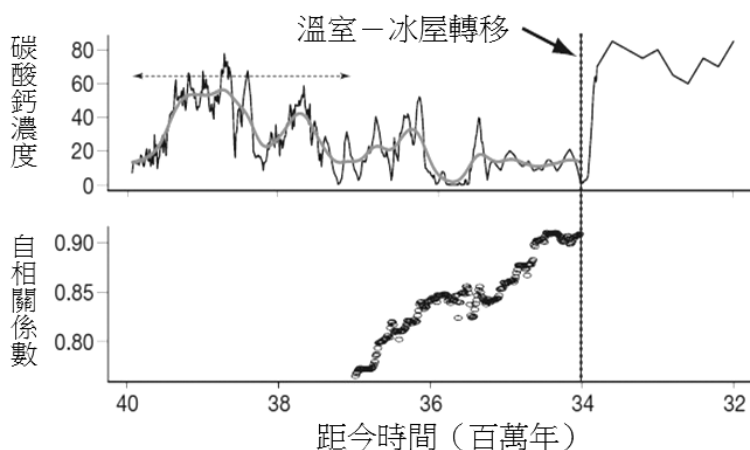


圖6 地球的溫室-冰屋轉移(修改自Scheffer, 2009)。

狀態時，會因為對稱破裂(symmetry-breaking)的不穩定性，使植群具有固定型的特徵(如點狀分布)，可視為一種早期預警信號(圖5)。

總之，在解釋空間型式時，必須先知道系統包含了哪些層級，雖然不同的層級間會有類似的早期預警信號，但並不適用於所有的空間型式。

真實系統中的轉變前兆

1. 氣候

大約在3千4百萬年前，地球突然從已經持續了數百萬年的熱帶狀態中，轉變成較冷的狀態，導致南極洲結冰，稱為溫室-冰屋轉移(greenhouse-icehouse transition)(圖6)。要重建這種動態的不確定性很高，且很難揭露其潛在機制，然而轉移的正反饋作用所造成的自體改變，已被視為一種關鍵性轉變。因此，重建這種轉變之前的氣候動態，是尋找早期預警信號的方法。

最近的研究顯示，在楊朱事件(Younger

Dryas cold period)突然結束之前，曾發生閃爍。楊朱事件又叫新仙女木事件，是指距今12,800年至11,500年前的一段冰河期，在此之前地球一直處於溫度逐漸升高的間冰期中，由於突然發生了楊朱事件而導致全球氣溫驟降，北極冰川的物種大舉南侵。雖然這個寒冷事件的前半期相當穩定，但後半期則以寒冷和溫暖氣候間的快速交替為主，且最終結束於一個相對溫暖而穩定狀態。在檢視了較長的時間尺度之後，可將增加的更新世(Pleistocene)氣候變異視為一種信號，而該信號也顯示地球會從冰河-間冰期振動，轉變到中緯度北半球永久冰河期的穩定狀態。

2. 生態系

在生態學上，關鍵性轉變已成為研究的焦點之一。交替吸引者的存在已於湖泊的實驗中得到證實，也有大規模的研究指出，被關鍵性門檻所區隔的交替穩定狀態也發生在牧場和海洋生態系中。在乾燥地區，自體組織會在某些條件下具有獨特的空間分布，而從不毛狀

態中恢復成植生狀態，比保有最後塊集需要更多的降雨，因此，以點狀植群為特徵的規則分布型是接近沙漠化門檻的信號。

早期預警信號也出現在魚類資源被利用的不穩定性中，有研究顯示，收穫會導致魚類族群的波動增加，這是因為結果族群(resulting population)中的內部生長速率增加所致，當年齡較大的魚類較容易被捕捉時，年輕的魚類會有較高的成長速率，進而使族群從一個穩定狀態轉變到一個循環或混亂狀態。

3.其他

此外在不同領域中也存有早期預警信號，例如在氣喘和癲癇發作前會出現神經細胞間的交替式閃爍，而金融市場中的轉變會有選擇權價格的具體關連性增加等等。

未來展望

綜上所述，類似的早期預警信號會出現在不同的系統中，例如閃爍可能在冰河期結束及湖泊轉變成混濁狀態之前出現；自體組織型式會在沙漠植群即將發生轉變時發出信號；自相關增加會在生態系和氣候轉變之前出現；波動變異增加可能是漁類資源減少的前導性指標。在這些複雜的系統中，有些被瞭解得較多，有些則尚待進一步的證實。

在簡單的模式中，早期預警信號的理論基礎堪稱完備，從精密的模式中所得到的結果也顯示相同的信號會在高度複雜的系統中出現，但仍需進行更多的研究，以瞭解在複雜、混亂，和隨機擾動的空間中，如何使這些信號更為健全。在真實系統中，資料型式的探知具有挑戰性，且可能會導致錯誤否定(false negative)

和錯誤肯定(false positive)兩種結果。錯誤否定是指在系統突然轉變之前無法探知早期預警信號，這是由於沒有逐漸接近門檻所致，它可能在距離轉折點的某處被罕見的極端事件所引發，朝向另一個穩定狀態而去；錯誤否定的第二層級可能是因統計上選取的困難所致，例如自相關增加可能需要較長的時間序列才能探知；如果擾動的外部體系隨著時間改變，就可能會扭曲或抵消預警信號，屬錯誤否定的第三個層級。錯誤肯定是指早期預警信號的出現並未發生接近轉折的結果，這可能是機率、系統內部，或擾動的外部體系混淆的結果。

因此，未來努力的方向如下：(1)提升時間序列的過濾技術，以增加指標敏感度並避免錯誤肯定；(2)降低量測干擾，以精確測定自相關是否增加；(3)找出可及早偵測的信號，以採取行動避免轉變或做好準備；(4)增進對空間上早期預警信號的瞭解，以縮短因應的前置時間。⊗