

福壽螺、螢火蟲幼蟲與水生植物共生互制 之灰色控制模擬分析

陳鈞華⁽¹⁾、宋建明⁽²⁾、蔡瀚德⁽³⁾、徐貴新⁽⁴⁾、甘俊二⁽⁵⁾

⁽¹⁾屏東科技大學土木工程系副教授、水利技師

⁽²⁾屏東科技大學土木所博士班

⁽³⁾屏東科技大學土木所碩士班

⁽⁴⁾東南科技大學環境管理系副教授兼研發處處長、水利技師

⁽⁵⁾七星農田水利研究發展基金會董事長、水利技師

摘 要

本研究利用灰色之控制來模擬福壽螺、螢火蟲幼蟲與水生植物共生互制之食物鏈關係，研究中以馬爾柯夫模型進行模擬探討，模擬情境 1：要完全消滅研究區域之水生植物，福壽螺對水生植物的比為 59:1。模擬情境 2：要完全消滅研究區域之福壽螺，螢火蟲幼蟲對福壽螺的比值為 38:1。本研究所利用防治之對象為台灣外來種螺類-福壽螺，螢火蟲幼蟲釋放之激素對福壽螺而言為一種致命毒液，在此模型中未考慮到氣候和時間之動態變遷問題，但後續研究者可依此模型粗略評估出生物相生相剋的相對性數量，以達未來規劃氣候、時間之動態實驗時參考依據。

關鍵詞：濕地、福壽螺、螢火蟲幼蟲、馬爾柯夫模型

一、前言

物競天擇為生物與環境互動之結果，生物無優劣，端視能否適應環境而生存及能對環境中質能條件之利用。生物生存活動也會改變環境，如製造出生物本身無法利用的廢物產物，累積過多會危害自身。故生物都需要與其它生物合作，以相互利用彼此之產物作為生存所需之反應物。能配合此機制之生物，將會存活，反之則被淘汰。生物此合作機制是以同類生物競爭為基礎，視誰比較能與其他生物合作無間。

人工智慧生物也在其生存環境中彼此競爭，視誰最善用環境中資源，從而產生分工合作之團隊，以連結所有棲位之生命體，直接或間接形成更有效率、效能之體系。

如在自然生態濕地中，水生植物、螢火蟲幼蟲以及福壽螺，可以形成生態食物鏈關係，這種關係主要表現在：由於營養值（氮、磷）大量增加，導致濕地中水生植物大量繁殖，而螢火蟲幼蟲和福壽螺又都以

水生植物為生，所以要消除漂浮在濕地中的大量水生植物，只有向濕地中投入大量螺類，我們正是基於這一考慮進行研究的。

由於人類對於土地的過度開發與使用，導致螢火蟲在內的許多生物失去棲息的環境；而農藥大量的使用造成螢火蟲及其食物的傷亡，也傷害了環境和其他動植物；又因外來生物的大舉入侵，使原生生

物遭受競爭及捕食，導致螢火蟲受到間接即直接的影響，因此本研究探討螢火蟲吃福壽螺；福壽螺吃水生植物，但如有優養化會造成螢火蟲幼蟲無法生存，而自然防治是生物防治的一部份，運用自然界的天敵，防治破壞農作物的害蟲。人類在運用天敵防治害蟲，在中國即有『以蟲治蟲』的記載與觀念。

二、文獻回顧

夏威夷自 1890 年開始從事天敵引進 Classical Biological Control 典型的生物防治工作，迄 1988 年止共引進天敵 849 次，以防治害蟲、雜草等有害生物。其中總共引進 681 種，防治夏威夷的害蟲。而在 681 種裡的 254 種 (37.3%) 已在夏威夷立足。而台灣與夏威夷地質均為火山島嶼，其害蟲容易由外遷移進入，所以適合從事典型的生物防治。台灣近百年來生物防治工作，1909 年自紐西蘭引進澳洲瓢蟲防治吹綿介殼蟲，同年自紐西蘭引進瓢蟲防治球粉介殼蟲，歷年來自國外引進天敵計有 44 種成功者佔總引進數的 11.4%。

無煙的森林火災是對嚴重的森林病蟲最佳的比喻。本世紀 80 年代，由於一種外來害蟲引起的“無煙大火”在中國廣東林區蔓延成災。松突圓蚧 (*Hemiberlesia pitysophila*) 屬於蚧總科 (Coccoidea)，生長在日本的沖繩群島和先島群島，以及臺灣本島。80 年代初經由香港、澳門侵入廣東沿海地區，迅猛擴散，形成嚴重災害。1983

年松林受害面積 $11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，1986 年約 $31 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，1987 年增加到 $40 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，枯死松林面積約 $8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。到 1990 年年底，馬尾松林枯死達 $7118 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ， $13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。在廣東及中國南方各省的松林資源面臨著巨大威脅。

70 年代末，一種叫美國白蛾的害蟲傳入中國。美國白蛾 (*Hyphant ria cunea*) 屬於鱗翅目 (Lepidoptera) 燈蛾科 (Arctiidae) 秋幕毛蟲屬 (*Hyphant ria*)，又稱為秋幕毛蟲 (Fall web worm)。生長北美洲，1945 年傳入日本。1958 年在南朝鮮發現，1979 年入侵中國遼寧省之邊境丹東、新金等地擴散成災。20 年間，該蟲向北擴展 700Km，平均每年 35 Km。在遼寧省的調查，該蟲可危害果樹，林木和農作物等 100 多種植物。在果園密集的地方以及遊覽區，此蟲造成損失驚人，樹葉被吃得精光，嚴重威脅養蠶業、林業和城市綠化。外來種病原微生物，可讓生產帶來巨大的災害，甘薯黑斑病是甘薯的一種主要病害，其病原

菌為甘薯長喙殼菌 (*Ceratocystis fimbriata*)，屬於子囊菌亞門。該病 1937 年由日本傳入中國遼寧省，之後病區不斷擴大，到 1980 年已蔓延到中國 26 個省市、自治區，引起爛焮和死苗，造成產量上的巨大損失。而且甘薯黑斑病菌能刺激甘薯產生甘薯黑斑酮(ipomea-marone)和甘薯黑斑黴二酮(ipomeanine)等對人、動物是有毒的物質，人食後引起頭暈，牛食後會引起氣喘病，甚至死亡。用病薯作發酵原料時，病菌的代謝產物能抑制酵母菌和糖化黴的活性，延緩發酵，釀酒時酒精產量低，品質差。若將近半世紀此病給中國帶來的經濟損失加以計算，將是一筆可觀的數字。

在 1897 年，日本制定了《傳染病防治法》。這部法律明確了中央政府和地方政府在預防疾病上的職責。根據這項法律，有害生物防治的主要原則是：中央政府負責制定中的有害生物防治計畫。地方政府在所有組織中必須有一個衛生組，負責提供殺蟲劑和殺蟲設備。對於那些不能由市民開展的有害生物防治工作，由它們來執

行。衛生組必須為市民有害生物防治活動提供技術指導，有害生物防治活動就是行政管理下的技術活動。1955 年，日本內閣會議上決定開展“消滅蚊蠅運動”，在全國範圍內均開展了此項活動。與此同時，隨著快速城市化，蚊蠅孳生地被徹底清理，與醫學重要性密切相關的有害生物密度顯著下降。在登革熱流行的國家，這些有害生物防治系統和公眾參與的防治活動看起來非常奏效。目前有害生物防治系統在 1999 年制定了《傳染病防治和傳染病人醫學保健法》。在這個法律中，有害生物防治中行政管理地位削弱了，地方政府有更多自主權，可以根據當地的形勢和需要來制定自己的有害生物的防治計畫。目前，地方中負責有害生物防治的人員主動與公眾協商，制定防治方案，原則上私人住宅有害生物防治活動不是由這些人開展，但是有些特殊的防治狀況，如黃蜂窩的去除以及那些不能由公眾來解決的，衛生中心要承擔防治責任，或根據情況由 PCO 來完成。

三、材料與方法

3.1 研究區域調查

3.1.1 地理位置

本研究區域位於台灣省屏東縣九如鄉玉泉村一處，湧泉溪流旁之流域，如圖 1 所示。



圖 1 地理位置圖



圖 2 研究區溪流旁之側流入流口



圖 3 研究區湧泉地出水源頭



圖 4 研究地區夏季之水生植物景象

3.2 生態模型表

設 X_1 為福壽螺數量； X_2 為螢火蟲幼蟲數量； X_3 為水生植物數量，則濕地中水生植物防治系統如圖 4 所示。即

$$x(k+1) = Ax(k) \quad (1)$$

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & a_{22} & \otimes_{23} \\ +a_{31} & \otimes_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \text{福壽螺生長關係} \\ \rightarrow \text{螢火蟲幼蟲生長關係} \\ \rightarrow \text{水生植物生長關係} \end{array} \quad (3)$$

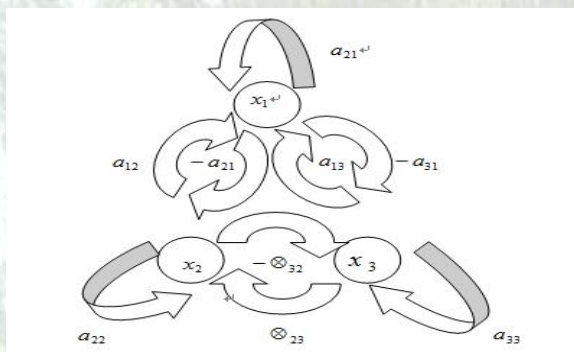


圖 4 濕地中水生植物防治系統

由圖 4 為一馬爾柯夫模型，根據此灰色模糊防治模型可對此系統作定量之分析。

3.3 福壽螺與水生植物的最佳比例

假如分析在第 k 階段徹底消除水生植物，其福壽螺與水生植物的最佳比例模式如下方程。假設福壽螺與水生植物之比為 $\lambda(k)$ ， k 表示第 k 階段，如有 $\lambda(0) = \frac{x_1(0)}{x_3(0)}$ ，

根據該模型，則

第 1 階段關係為 $x(1) = Ax(0)$

$$\begin{bmatrix} x_1(1) \\ x_2(1) \\ x_3(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & a_{22} & \otimes_{13} \\ -a_{31} & -\otimes_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$x_1(1) = a_{11}x_1(0) + a_{12}x_2(0) + a_{13}x_3(0) \quad (5)$$

$$x_2(1) = -a_{21}x_1(0) + a_{22}x_2(0) + \otimes_{23}x_3(0) \quad (6)$$

$$x_3(1) = -a_{31}x_1(0) - \otimes_{32}x_2(0) + a_{33}x_3(0) \quad (7)$$

第 2 階段關係為 $x(2) = A^2x(0)$

$$\begin{bmatrix} x_1(2) \\ x_2(2) \\ x_3(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & a_{22} & \otimes_{23} \\ -a_{31} & -\otimes_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}a_{11} - a_{12}a_{21} - a_{13}a_{31} & a_{11}a_{12} + a_{12}a_{22} - a_{13}\otimes_{32} \\ -a_{11}a_{21} - a_{22}a_{21} - a_{31}\otimes_{23} & -a_{21}a_{12} + a_{22}x_2(0) + \otimes_{23}\otimes_{32} \\ -a_{31}a_{11} + a_{21}\otimes_{32} - a_{31}a_{33} & -a_{31}a_{12} - a_{22}\otimes_{32} - a_{33}\otimes_{32} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}a_{13} + a_{12}\otimes_{23} + a_{13}a_{33} \\ -a_{21}a_{13} + a_{22}\otimes_{23} + a_{33}\otimes_{23} \\ -a_{31}a_{13} - \otimes_{23}\otimes_{32} + a_{33}a_{33}\otimes_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

福壽螺

$$x_1(2) = (a_{11}^2 - a_{12}a_{21} - a_{13}a_{31})x_1(0) + (a_{11}a_{12} + a_{12}a_{22} + a_{13}\otimes_{32})x_2(0) + (a_{11}a_{13} + a_{12}\otimes_{23} + a_{13}a_{33})x_3(0) \quad (9)$$

螢火蟲幼蟲

$$x_2(2) = -(a_{11}a_{21} + a_{22}a_{21} + a_{31}\otimes_{23})x_1(0) + (-a_{21}a_{12} + a_{22}^2 - \otimes_{23}\otimes_{32})x_2(0) + (-a_{21}a_{13} + a_{22}\otimes_{23} + a_{33}\otimes_{23})x_3(0) \quad (10)$$

水生植物

$$x_3(2) = -(a_{31}a_{11} - a_{21}\otimes_{32} + a_{31}a_{33})x_1(0) + (-a_{31}a_{12} - a_{22}\otimes_{32} - a_{33}\otimes_{32})x_2(0) + (-a_{31}a_{13} - \otimes_{32}\otimes_{23} + a_{33}^2)x_3(0) \quad (11)$$

由於螢火蟲幼蟲對水生植物影響甚微，為簡化起見，不妨認為 $\otimes_{32} = 0$ ，式(11)變為

$$x_3(2) = -(a_{31}a_{11} + a_{31}a_{33})x_1(0) - a_{31}a_{12}x_2(0) + (-a_{31}a_{13} + a_{33}^2)x_3(0) \quad (12)$$

該模型即為水生植物防治系統模型。

若考慮第二階段完全消滅水生植物，即令 $x_3(2) = 0$ ，也即福壽螺與水生植物之

$$\text{比 } \lambda(0) \text{ 為 } \lambda(0) = \frac{x_1(0)}{x_3(0)} \quad (13)$$

將 $\lambda(0)$ 代入式(2)中，即

$$0 = -(a_{31}a_{11} + a_{31}a_{33})\lambda(0)x_3(0) - a_{31}a_{12}x_2(0) + (-a_{31}a_{13} + a_{33}^2)x_3(0) \quad (14)$$

解得

$$\lambda(0) = \frac{a_{33}^2 - a_{31}a_{13}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} - \frac{a_{31}a_{12}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} \cdot \frac{x_2(0)}{x_3(0)} \quad (15)$$

$\lambda_1^{(0)}$ 為螢火蟲幼蟲與水生植物之比，即

$$\lambda_1^{(0)} = \frac{x_2(0)}{x_3(0)}, \quad x_2(0) = \lambda_1^{(0)}x_3(0)。$$

將 $x_2(0)$ 代入式(15)，得到實際的福壽螺與水生植物之比 λ^* ，過程如下。

$$\lambda(0) = \frac{\text{福壽螺群}}{\text{水生植物}} = \frac{x_1(0)}{x_3(0)} = \frac{a_{33}^2 - a_{31}a_{13}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} - \frac{a_{31}a_{12}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} \cdot \frac{\lambda_1^{(0)} \cdot x_3(0)}{x_3(0)} = \frac{a_{33}^2 - a_{31}a_{13}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} - \frac{a_{31}a_{12}\lambda_1^{(0)}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} \quad (16)$$

四、結果與討論

4.1 福壽螺群與水生植物比例討論

假設有一等式為：

$$\frac{1}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} (a_{33}^2 - a_{31}a_{13} - a_{31}a_{13}\lambda_1^{(0)}) < \lambda^{(0)} < \frac{a_{33}^2 - a_{31}a_{13}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})} \quad (17)$$

如果把 $\lambda^{(0)}$ 視為最佳比例，可 $\lambda^{(0)} = \lambda^*$ ，則將 $\lambda^{(0)} = \lambda^*$ 代入上面不等式即可。式中的 $\lambda_1^{(0)}$ 是螢火蟲幼蟲與水生植物比，而 λ^* 才是我們要找的福壽螺群與水生植物之比。 λ^* 在兩個多項式之間，決定他的有諸多因素，如 a_{31} 、 a_{11} 、 a_{33} 、 a_{13} 等，它們的每一項變化都會影響 λ^* 值得大小。

4.2 福壽螺、螢火蟲幼蟲及水生植物探討

由公式(17) $\lambda^* = \frac{a_{33}^2 - a_{31}a_{13}}{a_{31}(a_{11} + a_{33})}$ 時，可分析福壽螺和

水生植物的最佳比例。可看出：

(1) a_{33} 是水生植物前一段對後一段的影響，他代表了自身群體的繁殖能力； a_{11} 表示福壽螺自我繁殖能力，如用 μ 表示這兩者繁殖能力之比，即福壽螺與水生植物繁殖比，記為 $\mu = \frac{a_{11}}{a_{33}}$ 便有

$$\lambda^* = \frac{a_{33} - a_{31}a_{13}}{a_{31}(\mu + 1)} = \frac{a_{33}}{a_{31}(\mu + 1)} - \frac{a_{31}a_{13}}{a_{31}(\mu + 1)} \quad (18)$$

以式(18)可以看出，如果 μ 越大，福壽螺與水生植物的比 λ^* 就越小，說明福

壽螺的發展速度快於水生植物。

(2) 在 μ 一定時，若水生植物群體發展能力較強，即 a_{33} 越大，則 λ^* 越大。

(3) 在 μ 一定，即 a_{33} 一定時，若福壽螺能力強，及福壽螺吃水生植物的能力大 (a_{31} 大)，則 λ^* 小。

(4) 假設水生植物本身繁殖能力為 30 (假設值)，即 $a_{33} = 30$ ，福壽螺與水生植物繁殖能力比 μ 為 0.7，福壽螺消滅水生植物能力係數 $a_{31} = 0.3$ (也就是說 10 隻福壽螺只有 3 隻吃水生植物)，則

$$\lambda^* = \frac{a_{33}}{a_{31}(\mu + 1)} = \frac{30}{0.3(0.7 + 1)} \approx 59 \quad (19)$$

如要完全消滅研究區域之水生植物，福壽螺對水生植物的比為 59:1。

(5) 假設福壽螺本身繁殖能力為 30 (假設值)，即 $a_{11} = 30$ ，螢火蟲幼蟲影響福壽螺繁殖能力比值 μ 為 0.6，螢火蟲幼蟲釋放之毒液激素消滅福壽螺能力係數 $a_{21} = 0.5$ (也就是說 10 隻螢火蟲幼蟲釋放毒液激素可消滅 5 隻福壽螺)，則

$$\lambda^* = \frac{a_{11}}{a_{21}(\mu + 1)} = \frac{30}{0.5(0.6 + 1)} \approx 38 \quad (20)$$

如要完全消滅研究區域之福壽螺，螢火蟲幼蟲對福壽螺的比值為 38:1。

五、結論與建議

1. 這說明要完全消滅水生植物，福壽螺與水生植物的最佳比為 111:1。這是一個比較大的數值，說明要消除水生植物，必須投入大量螺類。如重量上考慮，濕地水生植物量約為 4500t，要想完全消除濕地中水生植物，必須確保護濕地內螺量為 50 萬噸左右。
2. 在模擬之最佳比例中得知在第二階段之前，即第一階段時對於水生植物之防治未能立即見效，依此模擬模式可知生物防治至少要在第二階段、才會見到成效。
3. 生物防治系統基本結構應是福壽螺吃水生植物，即 a_{31} 是存在而且是不可忽視的。此外，螢火蟲幼蟲為福壽螺提供足夠的飼料，即 a_{12} 也是不可忽視的。
4. 在研究這一過程中沒有考慮進去，所以有關這一課題還有待進一步探討及研究。

參考文獻

1. 陸慶光，1997，論生物防治在生物多樣性保護中的重要意義，生物多樣性，5 (3)，第 224~230 頁。
2. 周明浩、楊維芳、孫俊(譯)，2003，日本城市有害生物防治的過去現在及未來。
3. 劉春光，邱金泉，王雯等，2004，富營養化湖泊治理中的生物操縱理論，農業環境科學學報，23 (1)，第 198~201 頁。
4. 李傳紅，謝貽發，劉正文，2007，魚類對淺水湖泊生態系統及其富營養化的影響，安徽農業科學學報，36(9)，第 3679~3681 頁。

收稿：100 年 5 月 4 日
修改：100 年 5 月 7 日
接受：100 年 5 月 11 日