

外來種福壽螺(*Pomacea canaliculata*)

對人工溼地水生植物之攝食偏好： 生物控管方法對防治外來種之探討

Feeding Preference of Exotic Snails *Pomacea canaliculata* on Macrophytes in Constructed Wetland: Implications for Biological Control of Invasive Species

國立臺灣大學生物環境系統工程學系
碩士生

王姿婷

Tzu-Ting Wang

國立臺灣大學生物環境系統工程學系
助理教授

任秀慧*

Rita S.W. Yam

摘 要

近年來，人工溼地在台灣各地廣泛興建，為補償因人類利益開發而消失或惡化的自然溼地，以及其提供的多項生態系統功能如淨化水質、防洪蓄水、調節氣候、提供野生生物棲地及人類休憩場所等。然而，因人工溼地因承接鄰近社區的生活污水及河川流域的入流水，這成為了外來種福壽螺(*Ampullariidae: Pomacea canaliculata*)入侵人工溼地的主要途徑，目前福壽螺已普遍入侵台灣人工溼地，並大量攝食其中水生植物，大幅降低人工溼地的去污效能，嚴重影響其中生物多樣性及生態系統服務。

本研究假設福壽螺對不同種類水生植物具有攝食偏好，而攝食不同水生植物後會影響福壽螺的成長反應(生物量及殼長)。本實驗選取三種人工溼地常見的水生植物，分別為空心菜(*Ipomoea aquatica*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、蘆葦(*Phragmites australis*)，依據福壽螺對不同水生植物的攝食量評估其攝食偏好，並分析攝食不同植物後的成長參數，從而確定有效控制福壽螺拓殖的水生植物種類。本實驗依據福壽螺的攝食量及成長率(生物量及殼長成長量)，證實空心菜為福壽螺攝食偏好最高的水生植物。此外，福壽螺對老蘆葦和菖蒲的攝食偏好同樣偏低，其成長率(包括乾重成長率、殼長成長率、生物量及殼長變化)顯著緩慢。最後我們比較線性迴歸結果，確定攝食菖蒲福壽螺的成長率為三種實驗水生植物中最低。因攝食菖蒲最不利於福

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系助理教授，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，ritayam@ntu.edu.tw

壽螺成長，菖蒲對控制福壽螺入侵人工溼地實在具有潛在的重要性。

本研究未來將進一步探討不同種類的水生植物化學和物理性質，配合本研究結果作分析比對，以了解福壽螺攝食不同種類水生植物的原因。我們將繼續探討藉上行生物控管方法防治福壽螺拓殖，在未來建置同時兼具去污效能及控制福壽螺拓殖的人工溼地，建立植物群集種植及管理的參考標準。

關鍵詞：人工溼地，福壽螺，水生植物，攝食偏好，生物控管。

ABSTRACT

Constructed wetlands are widely developed in Taiwan to compensate the lost and degraded natural wetlands due to human impacts and simulate the natural wetlands to provide many different ecosystem services such as water purification, climate regulations, wildlife habitat, and human recreation. However, biological invasion has become a serious threat in constructed wetland ecosystems because of their relatively low habitat stability and complexity. Nowadays, exotic apple snails (Ampullariidae: *Pomacea canaliculata*) have invaded most of the constructed wetlands in Taiwan and caused serious problems to the ecosystem including lowering the wastewater purification efficiency by extensively feeding on the macrophytes, competing with the native gastropods, and causing visual impacts due to their over-dominance in the constructed wetland habitats.

In this study, we hypothesized that apple snails had different food preference on different macrophyte species and produced different growth responses correspondingly. We conducted laboratory feeding experiment to study the growth responses of apple snails upon feeding on 3 common wetland macrophytes including *Ipomoea aquatica*, *Acorus calamus*, and *Phragmites australis*. Results from ANOVA and Tukey Test showed that *I. aquatica* supported the highest growth rate of snails in terms of shell length and biomass increment. *Pomacea canaliculata* demonstrated significantly lower feeding preference on *A. calamus* and *P. australis*. However, results from regression analysis indicated that snails feeding on *A. calamus* showed the lowest growth rates. We therefore suggested that *A. calamus* would have the potential importance in controlling the establishment of *P. canaliculata* to the constructed wetlands.

Our future work will involve analysis of the chemical and physical properties of macrophyte leaves to assess the relationship between food quality and food preferences of the apple snails. Our results could therefore provide implications for macrophyte planting in constructed wetlands as biological control measure of the invasive snails based on the bottom-up biomanipulative approach instead of applying traditional methods such as using pesticides or labor-intensive physical removal.

Keywords: constructed wetlands, apple snails, macrophytes, feeding preference, biomanipulation.

一、前言

1.1 人工溼地

溼地是世界上具有最高生產力的生態系統之一，其不但支持豐富的生物多樣性更提供多項不同的生態服務，包括減緩洪水衝擊、調節氣候、供應水源及食物、地下水補注防止地層下陷以及污水淨化的功能(Barbier *et al.* 1997)。然而，因近年來人類過度開發及破壞自然溼地，世界各地的自然溼地不僅日益劣化，更嚴重減少。因此，以模擬自然溼地為目標的人工溼地在各地廣為建立，補償因人類利益開發而破壞的自然溼地，以及其提供的多項生態系統服務(MA 2005a; 黃科溥等 2013)。

目前常見的人工溼地依其水文及環境特性分為兩大類型，包括表面流溼地系統(Free Water Surface, FWS)和地下流溼地系統(Subsurface Flow, SSF)。FWS 表面為流動的淺水層，底部則為不透水土壤並種植高密度的挺水植物。FWS 人工溼地為大型水生植物、土壤及其中的微生物所組成的廢水處理系統，藉著人為操作溼地中的各項參數和環境，不同的物理(如過濾、沉澱)、化學(如離子交換、氧化還原)、生物(如植物吸收、微生物分解)過程有效去除水體中的污染物(Kivaisi 2001; Haberl *et al.* 2003)。當污水進入 FWS 人工溼地，大型的懸浮固體會被水生植物的根莖攔截而流在土壤層中，剩餘物質如氮、磷、重金屬等，則被溼地內的植物交換吸收或微生物分解去除(Haberl *et al.* 2003)。在 FWS 人工溼地中水生植物往往扮演著十分重要的角色，溼地微生物的代謝作用可有效去除水中營養鹽。在好氧狀態下，硝化菌進行硝化作用將氨氧化成硝酸鹽，而在厭氧狀態下，脫硝菌進行脫氮作用將其還原成氮氣(Brix 1987; Tanner 1996; Brix 1997)。此外，水生植物的植株表面能增加水中微生物的附著表面面積，所以種植水生植物不僅能達到都市綠地補償，提供候鳥棲息地，保護土層表面免受侵蝕，更能增加微生物對水質淨化的效果，提高去污效率。

人工溼地為人工建造或改造的生態系統，棲

地複雜度普遍較自然溼地低，生物多樣性亦相對較低。在穩定性偏低的人工溼地，外來種包括布袋蓮(*Eichhornia crassipes*)、福壽螺(*Pomacea canaliculata*)、吳郭魚(*Oreochromis mossambicus*)等的入侵成為人工溼地普遍存在的威脅。這些外來種競爭能力頑強又缺乏天敵，入侵人工溼地後容易大量繁殖，對生態系統內其他生物造成威脅，導致人工溼地的生物多樣性降低，並影響其生態功能。此外，因入流污水持續的注入，導致人工溼地生態環境較一般自然溼地受到較多的干擾，水生植物在吸收污水污染物後，會呈成長不良或枯萎現象，須以人為方式定期移除枯萎植物，移除方法為割掉地表植株，而水生植物的地下莖仍會留在土中繼續成長。因人工溼地植群演替的速度主要受到人為管理影響，加上人工溼地土壤含水量較高易導致土壤缺氧，所以草本水生植物在人工溼地中成為長期的優勢種。目前，國外已有不少文獻記載外來種福壽螺(Ampullariidae: *Pomacea canaliculata*)大量攝食人工溼地的水生植物，不僅大幅降低人工溼地的去污效能更會改變溼地中的植物群集，削弱人工溼地的生態系統服務和功能(Carlsson *et al.* 2004; Carlsson and Lacoursière 2005)，故解決福壽螺入侵溼地生態系統的問題實在刻不容緩。

1.2 福壽螺造成的影響及目前使用的防治方法

近年來，人工溼地在台灣各地廣泛興建，在各大河川高灘地陸續建立及規劃多功能的 FWS 人工溼地，然而，因人工溼地因承接鄰近社區的生活污水及河川流域的入流水，這成為了福壽螺入侵的主要途徑，目前福壽螺已普遍入侵台灣人工溼地，故福壽螺的防治實為人工溼地管理與維護的一大挑戰。

福壽螺的原產地為南美洲，於 1980 年代為供人食用引入台灣，但卻因為螺肉的口感不為國人所喜愛而被商人大量棄養(Naylor 1996)。然而，因為福壽螺為雜食性，對環境適應性良好且繁殖力極強，故可在短時間內遍布河川、溝渠、農田等淡水水域(林金樹 1986; Cowie 2002)。目前福壽螺已危害了大量的農田，多種水生經濟作

物因福壽螺的大量掠食，使農民損失慘重，耗費的社會成本不計其數(Naylor 1996)。陳威廷(2004)提出若我們不採取任何措施防治福壽螺，農地每年每公頃平均損失約新台幣 23,161 元，平均損失率約為 10.80%，造成農業經濟極大的損失。此外，台灣人工溼地環境特性(包括水淺、流速慢、水位穩定、水質養分偏高及水生植物茂密等)正是適合福壽螺成長的棲地。因福壽螺的大量繁殖造成台灣原生螺類及植物的生態壓力，破壞生態系統的平衡，我們必須發展有效且安全的防治福壽螺方法。

我們歸納前人針對福壽螺防治方法的研究結果，目前針對福壽螺問題的解決方式主要分成化學、物理及生物防治方法三個大類型(Cowie 2002；葉芳伶等 2010)：

1.2.1 化學防治方法

三苯錫(Tri(phenyl)stannyl acetate)為台灣農民最初所使用的殺螺劑，但因其對水生生物具劇毒性且會導致人類畸胎，所以自 1999 年起全面停用。目前常用的合法殺螺劑包括 70%耐克螺可濕性粉劑、6%聚乙醛(metaldehyde)粒劑、80%聚乙醛粉劑等。化學藥劑雖能有效殺滅福壽螺，但因使用殺螺劑可能使得福壽螺產生抗藥性與溼地中的藥物殘留，會直接毒害水中其他生物(如淡水魚類)，或是經由食物鏈累積至較高營養階層的掠食者(如水鳥)造成致命的威脅，因而對溼地生態系統造成嚴重影響(葉芳伶等 2010)。

1.2.2 物理防治方法

物理防治方法主要為設置障礙物以防止福壽螺進入溼地，例如在入流口及出水口設置攔網防止福壽螺流入溼地中，或是直接移除福壽螺如撿拾福壽螺及壓碎其卵塊。物理防治方法耗費金錢及人力，僅能暫時減少福壽螺的數量，效果有限，無法從根本改善福壽螺入侵的問題(廖君達 2000)。

1.2.3 生物防治方法

(1)下行操控(top-down control)

目前生物防治方法主要是以下行操控的原理控制外來種生物的數量，下行操控的原理為藉增加或減少食物網中營養階層較高的掠食者，以

其捕食作用控制低階消費者或生產者的豐度，從而操控生態系統的結構和群集的動態平衡(Hairston *et al.* 1960)。前人在生態系統內放入鯉魚(*Cyprinus carpio*)捕食福壽螺以控制福壽螺的數量，但因鯉魚僅能攝食體型較小的福壽螺(殼長小於 10mm)，效果不佳(Wong *et al.* 2009)。此外，台灣農民利用魚類防治，如放入青魚(*Mylopharyngodon piceus*)，但青魚必須成長在深水區域，故不適合在溼地環境生長，青魚亦會大量攝食生態系統裡的水生植物，反而衍生出更多的問題。農民亦有利用鴨子防治福壽螺，然而鴨子的活動卻破壞溼地水生植物的幼苗。因此，以下行操控方法防治福壽螺應用性有限，且往往因為加入外來種而破壞生態系統平衡(廖君達 2003)。

(2)上行操控(bottom-up control)

上行操控是指藉改變食物網中的初級生產者(如植物或藻類)的種類及數量，以改變對其主要消費者的營養供應，從而限制消費者的數量。目前，台灣人工溼地維護及管理的知識仍相當缺乏，「上行操控」方法並未有應用於控制入侵種或優勢種的問題上。然而，歐美各地雖已有不少研究針對「上行操控」方法進行優勢種控制及生物多樣性管理(Hansson *et al.* 1988)，但因歐美人工溼地位處溫帶，沒有福壽螺滋生的問題，故目前未有任何文獻探討上行操控方法對福壽螺防治的效果。

1.3 研究目的

無論是物理、化學或是生物防治福壽螺的方法皆存有不同的缺點，目前尚未發展出可以完善解決福壽螺入侵人工溼地的方法。儘管有研究顯示福壽螺對不同的水生植物有明顯攝食偏好，但目前量化福壽螺攝食偏好研究仍相當少(e.g. Carlsson *et al.* 2004; Carlsson and Brönmark 2006; Wong *et al.* 2010)。此外，有部分研究在探討福壽螺成長反應時，使用非溼地自然成長或人為種植的食用蔬果作為福壽螺的食物來源如萵苣(Tamburi and Martin 2011)，所以實驗結果未能代表人工溼地福壽螺的實際成長率。

本研究假設福壽螺對不同種類水生植物具

有不同攝食偏好，並在攝食不同水生植物後會影響福壽螺的成長情況包括生物量及殼長(Qiu and Kwong 2009)。本研究挑選三種台灣人工溼地常見的水生植物包括空心菜、菖蒲及蘆葦，進行福壽螺攝食偏好實驗，並探討以下兩個問題：

- (1) 福壽螺是否對不同種類的水生植物具有不同攝食偏好？如是，福壽螺對不同實驗植物攝食偏好如何？
- (2) 福壽螺攝食不同種類的水生植物，是否會影響其成長？福壽螺的生物量及殼長等形態參數是否因而呈現明顯差異？

藉由本研究之實驗結果，不僅可以提高我們對福壽螺生態特性及其對溼地植物攝食偏好的了解，在營造及管理人工溼地時，藉由種植不利福壽螺成長的水生植物，以上行操控方法控制福壽螺快速拓殖及降低其成為優勢種之可能性，從而減輕對溼地生態系統的衝擊。

二、材料與方法

2.1 野外採集

本研究於2011年8-9月在台灣新北市打鳥埤表面流人工溼地(DN；圖 1)採集實驗所需的福壽螺及三種溼地常見的水生植物包括空心菜(*Ipomoea aquatica*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、蘆葦(*Phragmites australis*)以進行攝食偏好實驗。其中，蘆葦為多年生的草本植物，不同成長階段的蘆葦會同時存在於人工溼地，而前人研究結果亦顯示蘆葦的老葉與嫩葉其葉片品質及營養成分



圖 1 打鳥埤人工溼地實地照片

顯著不同(Eid *et al.* 2010)，因此本實驗分別探討福壽螺對蘆葦的嫩葉與老葉的攝食偏好。本研究選擇以葉片作為攝食實驗的實驗項目，因福壽螺為水棲的軟體動物，其活動範圍為水中及底層軟土表面並攝食水生植物的葉片為主，許多前人研究(如 Fratini *et al.* 2004)也可知道腹足綱(Gastropoda)動物以植物葉片為其主要食物來源。此外，本實驗所選用的菖蒲為地下根莖的水生植物，故僅有葉片可供福壽螺攝食，所以亦排除福壽螺攝食菖蒲根莖的可能。另外，由前人文獻(如 Eid *et al.* 2010)可知水生植物的葉片為其營養成分較高的器官，本研究為上行調控對控制外來種福壽螺成長的研究初探，故先選用營養價值較高的葉片進行攝食實驗，由研究結果亦可得知福壽螺會因食物的營養成分不同而產生攝食偏好。實驗期間，我們從 DN 溼地採集 350 隻福壽螺(包括 100 隻大小不同的個體和 250 隻殼長 20-30 mm 的個體)及三種實驗用水生植物的葉片，樣品運送回實驗室後，葉片先清洗乾淨擦乾後，儲存在封口袋內並保存於 4°C 的冰箱中，每兩星期採集一次葉片而保存時間亦不超過兩星期，以維持葉片的品質。福壽螺以兩個不同方法處理，其中 100 隻不同大小的螺用作建立形貌參數與生物量關係，而 250 隻殼長 20-30 mm 的螺則先飼養在 25°C 實驗室環境中兩天，讓其在成長實驗前先適應環境，同時觀察福壽螺行為並將行為異常的個體排除以免影響實驗結果。

2.2 實驗設計

本實驗依水生植物的種類分為四組進行，每一組實驗包含六個相同的塑膠魚缸(30 × 20 × 20 cm)。魚缸內注入脫氯自來水約 3600c.c. (水高 6 公分)，再放入九隻福壽螺(體長 20-30 mm)，以及已量度面積且超過福壽螺 2 天攝食量的水生植物，魚缸上裝有透氣蓋子以防止福壽螺爬出(圖 2A-2B)。隔天更換脫氯自來水及新鮮的水生植物，取出剩餘的植物並量度福壽螺攝食的植物面積，每隔六天清洗魚缸並量度福壽螺的殼長(與螺軸平行的最大距離) (± 1 mm)及帶殼濕重(± 0.1 g)，實驗時間共為 30 天。

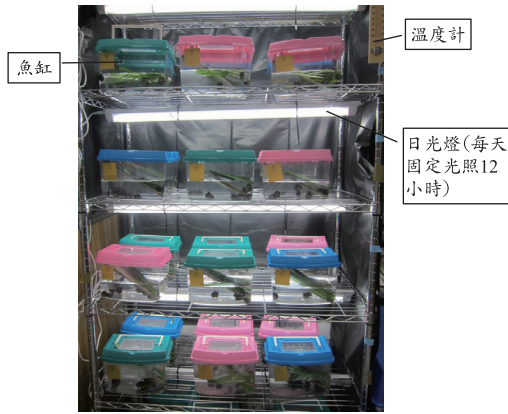


圖 2A 實驗整體裝置圖，每層有六個魚缸，一層放置一種水生植物。魚缸內含有九隻福壽螺、脫氯自來水及適量水生植物



圖 2B 個別實驗魚缸配置側視圖

2.3 福壽螺攝食實驗

2.3.1 前置實驗-分別建立福壽螺的形貌參數與生物量(biomass)關係

生態系統中，生物量為能量流動的關鍵變數 (Saint-Germain *et al.* 2007)，本研究藉福壽螺的去殼乾重代表其生物量。由於量度福壽螺生物量(去殼乾重)需要烘乾實驗個體，所以實驗期間我們無法量測出福壽螺每天的生物量，因此必須先建立福壽螺的四個形貌參數包括 1. 殼口寬(mm)、

2. 殼長(mm)、3. 體長(mm)、4. 帶殼濕重(g)與生物量(g)的線性迴歸關係，以利實驗期間量測福壽螺的殼口寬、殼長、體長及帶殼濕重換算其生物量。實驗方法為隨機選取不同大小的福壽螺共 100 隻，分別測量每一隻福壽螺的殼口寬、殼長、帶殼濕重、去殼濕重及體長，將福壽螺全數烘乾並測量其生物量，並以上述四個形貌參數分別與生物量建立線性迴歸關係，結果顯示殼長及帶殼濕重兩個形貌參數與生物量具有最高解釋度(殼長與生物量 $r^2 = 0.94$ ，帶殼濕重與生物量 $r^2 = 0.92$ ；表 1)。

2.3.2 福壽螺攝食不同水生植物的成長狀況

本研究參考前人進行福壽螺攝食實驗的結果 (Sharfstein and Steinma 2001)，本實驗時間設定為 30 天，實驗期間每隔約六天量測一次實驗福壽螺個別的帶殼濕重及殼長，共量測五次。我們以前置實驗所建立的帶殼濕重-去殼乾重(生物量)迴歸關係，計算福壽螺攝食每一種植物的乾重成長率(mg day^{-1})以及殼長增長數據計算殼長成長率(mm day^{-1})，故乾重成長率及殼長成長率分別為福壽螺平均一天的乾重及殼長變化 (Qiu and Kwong 2009)。

實驗結束後，我們先度量福壽螺的最後殼長作為累積殼長成長變化，再將所有福壽螺去殼及烘乾(60°C ，72 小時)，並量度其最後乾重作為福壽螺生物量累積成長變化的數據。我們利用線性迴歸分析福壽螺殼長及生物量變化與時間變化的關係，以 2-way ANOVA 探討福壽螺攝食不同水生植物是否呈現不同的殼長和生物量變化，再應用 Tukey Test 確定其攝食偏好。最後，本實驗比較福壽螺殼長和生物量變化兩項成長參數的結果，以了解福壽螺攝食不同水生植物後的成長

表 1 福壽螺四個形貌參數與去殼乾重迴歸關係

	與去殼乾重的迴歸方程式	N	R ²	P-value
對數轉換殼長	$y = 3.1634x - 1.7333$	110	0.942	3.99E-66***
帶殼濕重	$y = 0.0736x + 0.0481$	110	0.9172	4.5E-58***
體長	$y = 0.3429x - 0.3138$	110	0.5535	6.44E-20***
殼口寬	$y = 0.4638x - 0.3468$	110	0.673	5.42E-27***

* $P < .05$ ，** $P < .01$ ，*** $P < .001$ ，NS：無顯著性差異

表 2 福壽螺四個成長參數的 ANOVA 分析

變源	F 乾重成長率	F 殼長成長率	F 生物量	F 累積殼長
魚缸	0.8264 ^{NS}	0.5803 ^{NS}	40.2960 ^{***}	255.7833 ^{***}
水生植物	7.7118 ^{***}	8.2719 ^{***}	1.07976 ^{NS}	60.4110 ^{***}
交互作用	2.4322 ^{**}	2.2870 ^{**}	87.6401 ^{***}	198.5913 ^{***}
Tukey Test	空心菜=嫩蘆葦=菖蒲>老蘆葦	空心菜=嫩蘆葦=菖蒲>老蘆葦	空心菜=嫩蘆葦=蘆葦=菖蒲	空心菜>嫩蘆葦>蘆葦=菖蒲

* P < .05, ** P < .01, *** P < .001, NS: 無顯著性差異

狀況。本篇研究的統計分析皆利用 Minitab 16.0 及 SPSS 16 軟體進行。

三、結果與討論

3.1 前置實驗-四組福壽螺形貌參數與生物量的關係

本研究先以福壽螺殼口寬、殼長、體長及帶殼濕重四個形貌參數(自變數)與去殼乾重(反應變數)，個別建立線性迴歸關係(表 1)。結果顯示帶殼濕重-去殼乾重($R^2 = 0.92$, $P < 0.001$; 表 1)、 $\log(\text{殼長}) - \log(\text{去殼乾重})$ ($R^2 = 0.94$, $P < 0.001$; 表 1)兩組迴歸關係的決定係數皆大於 0.9，比較體長-去殼乾重及殼口寬-去殼乾重兩組迴歸關係的決定係數高出 30%(殼口寬: $R^2 = 0.67$, $P < 0.001$; 體長: $R^2 = 0.55$, $P < 0.001$; 表 1)。因此由本實驗選取殼長作為實驗期間換算去殼乾重的形貌參數(迴歸方程式 $y = 0.0736x + 0.0481$; 表 1)。

3.2 福壽螺對不同水生植物的攝食情形及成長反應

3.2.1 實驗結果可信性檢定

本實驗中攝食同一種水生植物福壽螺的乾重成長率和殼長成長率在不同魚缸間的差異不顯著(2-way ANOVA 魚缸×成長率; $P > 0.05$; 表 2)。因此，我們確定本實驗福壽螺成長率之差異皆為攝食不同水生植物造成並非來自個別魚缸之差異。

3.2.2 福壽螺的乾重成長率及殼長成長率

福壽螺攝食不同種水生植物後，乾重成長率呈顯著差異(2-way ANOVA 魚缸×乾重成長率: $P < 0.001$; 表 2)，而其攝食偏好的順序為空心菜=嫩蘆葦=菖蒲>老蘆葦 (Tukey Test; $P < 0.001$;

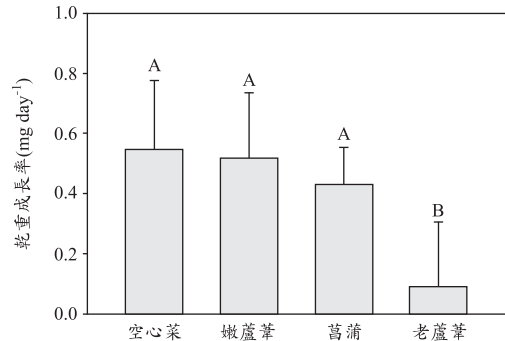


圖 3 福壽螺攝食不同水生植物後的乾重成長率。每筆數據為攝食同一種水生植物的六組實驗複本的乾重成長率平均值+標準差。

表 2)。福壽螺攝食空心菜及嫩蘆葦的乾重成長率相當接近($0.5461 \text{ mg day}^{-1}$ 、 $0.5195 \text{ mg day}^{-1}$)，兩者分別是攝食菖蒲及老蘆葦福壽螺乾重成長率($0.4301 \text{ mg day}^{-1}$ 、 $0.0881 \text{ mg day}^{-1}$)的 1.2-1.3 倍及 5-7 倍(圖 3)，攝食老蘆葦的福壽螺成長速度明顯較緩慢。

福壽螺攝食不同種水生植物之殼長成長率雖然呈現顯著性差異(2-way ANOVA 魚缸×殼長成長率: $P < 0.001$; 表 2)，但主要差異來自攝食老蘆葦福壽螺的殼長成長率($0.0018 \text{ mm day}^{-1}$)是攝食空心菜($0.1349 \text{ mm day}^{-1}$)、嫩蘆葦($0.1257 \text{ mm day}^{-1}$)及菖蒲($0.0106 \text{ mm day}^{-1}$)的 0.01-0.17 倍(圖 4)。根據殼長成長率的結果，福壽螺的攝食偏好順序為空心菜=嫩蘆葦=菖蒲>老蘆葦 (Tukey Test; $P < 0.001$; 表 2)。

3.3 福壽螺攝食不同水生植物後的生物量變化

本研究顯示福壽螺的累積生物量雖然在 30

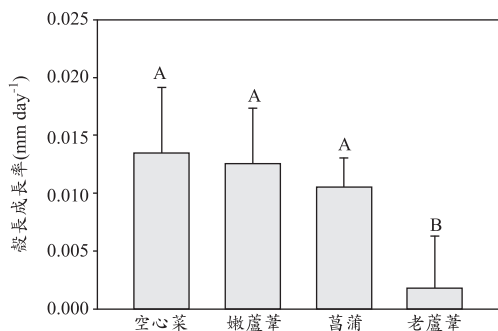


圖 4 福壽螺攝食不同水生植物的殼長成長率。每筆數據為攝食同一種水生植物的六組實驗複本的殼長成長率平均值+標準差

天內沒有顯著的大幅增加，但攝食空心菜和嫩蘆葦福壽螺的生物量有呈現隨實驗時間而緩慢增加的趨勢，而攝食空心菜的福壽螺，所呈現的累積生物量更明顯高於攝食嫩蘆葦的福壽螺 (圖 5)。此外，實驗第 30 天攝食不同水生植物的福壽螺，總累積生物量存在顯著性差異(2-way ANOVA 魚缸×累積生物量； $P < 0.001$ ；表 2)，證實攝食不同種類的水生植物會影響福壽螺的成長，因而影響福壽螺的總累積生物量。

從前人研究得知，福壽螺對攝食水生植物的偏好及其成長率與所攝食之水生植物的物理特性及化學成分相關，不同水生植物之可食性 (palatability) 會因葉片韌度-表面結構及營養成分 (如氮、磷含量及碳/氮比) 而變化，而其中食物品質主要為葉片營養成分所控制 (例如 Grantham *et al.* 1993)。Wong *et al.* (2010) 測試福壽螺對 21 種淡水水生植物的攝食率，福壽螺對具有高氮含量及低碳/氮比的水生植物包括莧菜 (*Amaranthus gangeticus*)、竹仔葉 (*Commelina diffusa*)、空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 具較高攝食偏好，攝食率最高為其他種類水生植物的 20 倍。Sharfstein and Steinma (2001) 研究福壽螺攝食三種水生藻類後的成長率及存活率，顯示福壽螺在攝食具高磷和葉綠素含量及低碳/氮比的水生藻類如 *Utricularia* sp.，所呈現的存活率可高達 100%，而其濕重 (0.36g) 及體長的增加量 (2.15 mm) 亦較高，然而攝食葉綠素含量較低的底棲藻類 (metaphyton) 存

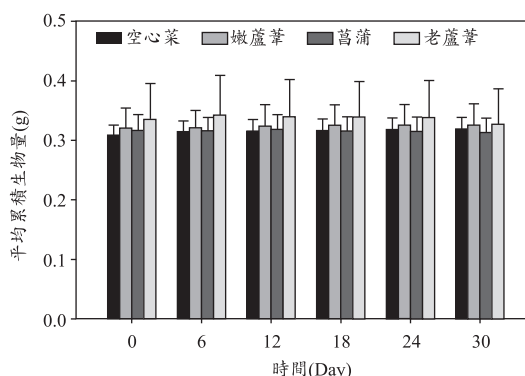


圖 5 福壽螺攝食不同水生植物的生物量對時間的變化圖。(A)空心菜；(B)老蘆葦；(C)菖蒲；(D)嫩蘆葦。每筆數據為攝食同一種水生植物的六組實驗複本的累積乾重平均值+標準差

活率較低 (82.5%)，而濕重 (0.15g) 及體長增加量 (0.6 mm) 也較不明顯，所呈現的成長率為攝食水生藻類的 20-40%。本研究結果指出福壽螺對空心菜較蘆葦呈現顯著攝食偏好，因空心菜相較於蘆葦含較高的養分，包括磷 (空心菜= 0.65%，蘆葦= 0.22%) 和氮 (空心菜= 6.5%，蘆葦= 2.4%) 成分，低的碳/氮比 (空心菜= 7.5，蘆葦= 21.1) (Wong *et al.* 2010)。因此，本實驗結果與前人研究呈現相似趨勢，確定決定福壽螺攝食偏好的主要原因為水生植物的營養成分，這亦反映在本實驗中攝食空心菜的福壽螺明顯具有較高的乾重成長率及殼長成長率。

3.4 福壽螺攝食不同水生植物後的殼長變化

攝食不同水生植物的福壽螺殼長變化有顯著性差異 (2-way ANOVA 魚缸×累積殼長； $P < 0.001$ ；表 2)，呈現不同的殼長增加量，所以我們可證實攝食不同水生植物的福壽螺呈現不同的成長反應。

福壽螺攝食空心菜和嫩蘆葦後，其殼長隨時間呈緩慢增加的趨勢，然而攝食菖蒲和老蘆葦的福壽螺殼長並沒有呈現明顯的時間變化 (圖 6)。根據福壽螺殼長變化的分析結果，福壽螺對不同種類水生植物的攝食偏好為空心菜>嫩蘆葦>老蘆葦=菖蒲 (Tukey Test； $P < 0.001$ ；表 2)。

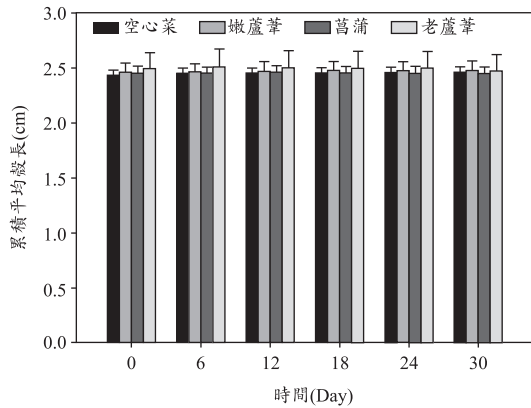


圖 6 福壽螺攝食不同水生植物的平均累積殼長對時間的變化圖。(A)空心菜；(B)老蘆葦；(C)菖蒲；(D)嫩蘆葦。每筆數據為攝食同一種水生植物的六組實驗複本的累積殼長平均值+標準差

3.5 福壽螺成長的時間變化

3.5.1 福壽螺平均累積生物量的時間變化

福壽螺在攝食四種水生植物後，生物量與時間變化的迴歸關係皆為顯著($P < 0.05$ ；表 3)，確定生物量會隨著時間變化。其中，福壽螺攝食空心菜後，生物量的時間變化最大(迴歸斜率係數= 0.0032 ； $P < 0.05$ ；表 3)，表示攝食空心菜的福壽螺生物量增長速度最快，成長率最高，平均乾重成長率約為 $0.5333 \text{ mg day}^{-1}$ 。攝食菖蒲的福壽螺

生物量的時間變化為四組實驗中最不明顯(迴歸斜率係數= $-0.0013 \approx 0$ ； $P < 0.05$ ；表 3)，表示攝食菖蒲的福壽螺生物量變化最不明顯，成長最緩慢。

此外，根據統計分析結果顯示，不同種類水生植物實驗組的迴歸截距參數接近，確定四種不同攝食實驗開始時，福壽螺的生物量相近，實驗結果所顯示福壽螺的生物量變化為攝食不同植物而產生的成長反應。

3.5.2 福壽螺平均累積殼長的時間變化

攝食空心菜福壽螺殼長的時間變化迴歸斜率係數為四組攝食實驗中最大(迴歸斜率係數= 0.0050 ；表 4)，表示攝食空心菜的福壽螺殼長增長速度及成長率亦最高。其平均殼長成長率可達 $0.8333 \text{ mm day}^{-1}$ ；老蘆葦實驗組的迴歸斜率係數為四組實驗結果中的最小(迴歸斜率係數= -0.0036 ；表 4)，顯示攝食老蘆葦的福壽螺的累積殼長時間變化較不明顯。

攝食空心菜、嫩蘆葦及菖蒲福壽螺的平均累積殼長對時間變化具有顯著性差異($P < 0.01$ ；表 4)，然而老蘆葦實驗組卻不具顯著差異($P > 0.05$ ；表 4)，我們判斷原因為老蘆葦的營養成分較低(Eid *et al.* 2010)，以及福壽螺對其攝食率亦較低，使攝食老蘆葦的福壽螺平均累積殼長變化對時間的變化不明顯。

表 3 福壽螺平均生物量的時間變化迴歸數據

Indicator	Constant	Habit variables	Coefficient	T
平均生物量變化	0.2651	空心菜	0.0032	3.8456*
	0.2723	嫩蘆葦	0.0010	2.9172*
	0.2765	菖蒲	-0.0013	-4.2800*
	0.2813	老蘆葦	-0.0009	-3.5324*

* $P < .05$, ** $P < .01$, *** $P < .001$, NS：無顯著性差異

表 4 福壽螺平均累積殼長的時間變化迴歸數據

Indicator	Constant	Habit variables	Coefficient	T
平均累積殼長變化	2.4345	空心菜	0.0050	5.1133**
	2.4613	嫩蘆葦	0.0028	6.7028**
	2.4578	菖蒲	-0.0014	-2.1838*
	2.5079	老蘆葦	-0.0036	-1.3813 ^{NS}

* $P < .05$, ** $P < .01$, *** $P < .001$, NS：無顯著性差異

整體而言，攝食空心菜的福壽螺在累積生物量及累積殼長皆隨著時間增加快速，而攝食其他水生植物福壽螺的成長率明顯較低，而不同成長參數包括生物量及殼長更呈現不一致的趨勢。

目前我們生物量及殼長變化的分析結果顯示空心菜為福壽螺的最佳攝食偏好的溼地水生植物，與前人研究中化學分析的結果吻合(e.g. Wong *et al.* 2010)。由於台灣尚無相關福壽螺對不同水生植物攝食偏好的實驗，本研究依據前人所進行攝食實驗相關方法(Sharfstein and Steinma 2001)，進行福壽螺攝食人工溼地水生植物及成長反應之初步評估，所以實驗時間設定為一個月。未來我們將延長攝食實驗時間，進一步探討福壽螺在攝食不同種類的水生植物的長時期成長變化。

四、結論與建議

4.1 結論

本實驗依據福壽螺攝食量及成長率(生物量及殼長增長量)，證實空心菜為福壽螺攝食偏好最高的水生植物。福壽螺對老蘆葦和菖蒲的攝食偏好同樣偏低，其成長率(包括乾重成長率、殼長成長率、生物量及殼長變化)顯著緩慢。最後我們比較線性迴歸結果，確定攝食菖蒲福壽螺的成長率為三種實驗水生植物中最低。因攝食菖蒲最不利於福壽螺成長，菖蒲對控制福壽螺入侵人工溼地實在具有潛在的重要性。我們初步判斷水生植物的營養成分是主要導致福壽螺產生攝食偏好及成長反映差異之原因。

4.2 未來的工作與貢獻

無論福壽螺的累積生物量變化、累積殼長變化、平均乾重成長率及平均殼長成長率的結果，都顯示福壽螺對空心菜具有明顯較高的攝食偏好且呈現快速成長的情況。然而，由於空心菜具有高度累積銅(Cu)、鉻(Cd)、鉛(Pb)等重金屬的去污能力，其浮水性能減少水中藻類的過度繁殖，使空心菜為現今台灣人工溼地廣泛種植的水生植物之一，然而空心菜是否為設計人工溼地水生植物群集的必然選擇，值得我們日後做更進一步

的深入分析。本研究未來將進一步探討不同種類的水生植物化學和物理性質，如氮、磷、鈣、銅、蛋白質、碳水化合物、酚、纖維素、木質素等成分的含量及葉片的韌性等，配合本研究結果作分析比對，以全面了解福壽螺攝食不同種類水生植物的原因。

依據目前結果，本研究建議菖蒲為有效控制福壽螺成長的人工溼地水生植物，然而本篇論文為建立同時兼具去污功能及控制福壽螺拓殖的人工溼地植物群集的種植及管理參考標準的研究初探，未來工作將利用本研究的實驗結果，針對福壽螺食物資源選擇進行野外操作實驗，探討福壽螺在人工溼地環境中的攝食偏好，以驗證本研究的結果。本方法應用於人工溼地管理的實際效果為我們未來的重要工作，待野外實驗完成後，我們將可為實務單位提供完整的人工溼地管理建議。

謝 誌

感謝行政院國科會提供本研究經費(NSC100-2815-C-002-158-B、NSC101-2923-B-002-001-MY3)及新北市政府高灘地工程管理處提供新海橋人工溼地及打鳥埤人工溼地之通行證。此外，感謝生態保育及復育研究室全體人員野外人工溼地採集及室內實驗的協助。

參考文獻

1. Brix, H. (1987). "Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants: the root-zone method." Water Science Technology **19**: 107-118.
2. Barbier, E. B., M. Acreman, and D. Knowler (1997). "Economic Valuation of Wetlands – A Guide for Policy Makers." Ramsar Convention Ramsar Convention Bureau Gland, Switzerland.
3. Brix, H. (1997). "Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?" Water Science Technology **35**: 11-17.
4. Cowie, R. H. (2002). Apple snails (Ampullariidae) as agricultural pests: their biology, impacts and

- management. Molluscs as crop pests (ed. by G.M. Barker). Wallingford, UK, CAB-International: 145-192.
5. Carlsson, N. O. L., C. Brönmark, and L.-A. Hansson (2004). "Invading herbivory: the golden apple snail alters ecosystem functioning in Asian wetlands." Ecology **85**: 1575-1580.
 6. Carlsson, N. O. L. and J. O. Lacoursière (2005). "Herbivory on aquatic vascular plants by the introduced golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) in Lao PDR." Biological Invasions **7**:233-241.
 7. Carlsson, N. O. L. and C. Brönmark (2006). "Size-dependent effects of an invasive herbivorous snail (*Pomacea canaliculata*) on macrophytes and periphyton in Asian wetlands." Freshwater Biology **51**: 695-704.
 8. Eid, E. M., K. H. Shaltout, Y. M. Al-Sodany, K. Soetaert, and K. Jensen (2010). "Modeling growth, carbon allocation and nutrient budgets of *Phragmites australis* in Lake Burullus, Egypt." Wetlands **30**: 240-251.
 9. Fratini, S., V. Vigiani, M. Vannini, and S. Cannicci (2004). "*Terebralia palustris* (Gastropoda; Potamididae) in a Kenyan mangal: size structure, distribution and impact on the consumption of leaf litter." Marine Biology **144**: 1173-1182.
 10. Grantham, Ö. K., D. L. Moorhead, and M. R. Willig (1993). "Feeding preference of an aquatic gastropod, *Marisa cornuarietis*: effects of pre-exposure." Journal of the North American Benthological Society **12**: 431-437.
 11. Hairston, N. G., F. E. Smith, and L. B. Slobodkin (1960). "Community structure, population control, and competition." The American Naturalist **94**: 421-425.
 12. Hansson, L.-A., H. Annadotter, E. Bergman, S. F. Hamrin, E. Jeppesen, T. Kairesalo, E. Luokkanen, P.-Å. Nilsson, M. Søndergaard, and J. Strand (1998). "Biomaniipulation as an application of food-chain theory: constraints, synthesis, and recommendations for temperate lakes." Ecosystems **1**: 558-574.
 13. Haberl, R., S. Grego, G. Langergraber, R. H. Kadlec, A.-R. Cicalini, S. M. Dias, S. Aubert, A. Gerth, H. Thomas, and A. Hebner (2003). "Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants." Journal of Soils Sediments **3**: 109-124.
 14. Kivaisi, A. K. (2001). "The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review." Ecological Engineering **16**: 545-560.
 15. Millennium Ecosystem Assessment (MA) (2005a). "Ecosystems and Their Services." Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment, URL: <http://www.maweb.org/documents/document.300.aspx.pdf>.
 16. Naylor, R. (1996). "Invasions in agriculture: assessing the cost of the golden apple snail in Asia." Ambio **25**: 443-448.
 17. Qiu, J.-W. and K.-L. Kwong (2009). "Effects of macrophytes on feeding and life-history traits of the invasive apple snail *Pomacea canaliculata*." Freshwater Biology **54**: 1720-1730.
 18. Sharfstein, B. and A. D. Steinman (2001). "Growth and survival of the Florida apple snail (*Pomacea paludosa*) fed 3 naturally occurring macrophyte assemblages." Journal of the North American Benthological Society **20**: 84-95.
 19. Saint-Germain, M., C. M. Buddle, M. Larrivée, A. Mercado, T. Motchula, E. Reichert, T. E. Sackett, Z. Sylvain, and A. Webb (2007). "Should biomass be considered more frequently as a currency in terrestrial arthropod community analyses?" Journal of Applied Ecology **44**: 330-339.
 20. Tanner, C. C. (1996). "Plants for constructed wetland treatment systems - A comparison of

- the growth and nutrient uptake of eight emergent species.” Ecological Engineering **7**: 59-83.
21. Tamburi, N. E. and P. R. Martín (2011). “Effects of food availability on reproductive output, offspring quality and reproductive efficiency in the apple snail *Pomacea canaliculata*.” Biological Invasions **13**: 2351-2360.
 22. Wong, P. K., K. L. Kwong, and J.-W. Qiu (2009). “Complex interactions among fish, snails and macrophytes: implications for biological control of an invasive snail.” Biological Invasions **11**: 2223-2232.
 23. Wong, P. K., Y. A. N. Liang, N. Y. Liu, and J.-W. Qiu (2010). “Palatability of macrophytes to the invasive freshwater snail *Pomacea canaliculata*: differential effects of multiple plant traits.” Freshwater Biology **55**: 2023-2031.
 24. 林金樹(1986)。「福壽螺生態觀察。」台中區農業改良場研究彙報 **13**: 59-66。
 25. 廖君達(2000)。「中部地區近年來重要疾病蟲害發生與管理對策。」台中區農業技術專刊 **158**。台中區農業技術專刊。
 26. 廖君達(2003)。「青魚在福壽螺生物防治上的應用。」農政與農情 **133**: 76-78.
 27. 陳威廷(2004)。「有害生物對臺灣農業生態環境影響之經濟分析－以福壽螺、果實蠅為例。」國立台灣大學農業經濟學研究所碩士論文。
 28. 葉芳伶、賴珮瑄和黃大駿(2010)。「臺灣各地區福壽螺(*Pomacea canaliculata*)抗藥性初步探討。」貝類學報 **34**: 49-62。
 29. 黃科溥、任秀慧、林幸助和卞文俊(2013)。「探討生態系統服務評估能否反映人工溼地棲地品質與生物多樣性之重要性。」農業工程學報 **59**: 32-49。

收稿日期：民國 102 年 6 月 5 日

修正日期：民國 102 年 7 月 23 日

接受日期：民國 102 年 8 月 14 日