

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

人工漁礁區之建置與人工漁礁資源管理研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2416-H-343-003-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：南華大學環境管理研究所

計畫主持人：陳中獎

計畫參與人員：許澤宇；蘇俞龍；陳依兌

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 30 日

人工漁礁區之建置與人工漁礁資源管理研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92 - 2416 - H - 343 - 003 -

執行期間： 92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：陳中獎

共同主持人：-

計畫參與人員：許澤宇、蘇俞龍、陳依兌

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：南華大學環境管理研究所

中 華 民 國 93 年 9 月 30 日

壹、摘要

我國四面環海，但由於漁民過度捕撈，且近岸和沿海地區生態環境受污染的負面影響之下，漁業資源已逐漸出現枯竭現象。而由過去研究及實務經驗得知，人工魚礁之投放為一良好之水域漁產資源復育方式，然而，我國在過去雖已投放許多人工魚礁，對漁業資源的永續發展有部分改善，但由於人工魚礁在投放過後，並未有進行有效積極管理，因而人工魚礁的壽命比先進國家短少許多，殊為可惜。

在現行應用漁業管理於人工魚礁之方式之一即為將原本屬於公共財之人工魚礁轉成私有財的方式來經營，因此本研究擬就當魚礁為私有財之情況討論廠商之最適撈捕模式 (Artificial Reef Harvesting Model, 簡稱 ARH 模式)，以獲得最大之經濟效益。由於魚礁區之生態系統有其特性存在，其具有一定長度時間之生命週期，之後則會因為發生沉陷而消失；此外，若當魚礁區之使用方式為私有財之情況，則其又因具可滲透性之邊界而產生一非封閉性之生態系統。因此本文所提出之 ARH 模式嘗試加入 Buechner (1987) 及 Stamps *et al.* (1987) 所提出之魚群動態遷徙模式以修正傳統漁業管理所討論之獨立且封閉之開放撈捕 (Open access) 系統，也因此本文所提出之 ARH 模式更能符合魚礁區之特性。在求解方面，本研究利用最適控制理論推得控制函數之特殊形式，進而將原屬於動態最佳化的問題簡化為普通的函數極值問題。最後並針對參數之敏感性加以分析以提出在不同之參數條件中所應相應之撈捕對策。

研究結果顯示，在利率較高、或人工魚礁之保護區面積較大、或人工魚礁之保護區週長較小 (即形狀較偏方正或圓形)、或目標物種移動速度較慢 (如龍蝦相對於魚來說)、或單位魚價較高、或單位撈捕漁船之操作成本較低之情況下，應派遣更多之漁船進入人工魚礁撈捕，始可獲得較大之利潤；至於撈捕之時機則是愈早越好。唯前述撈捕策略之擬定尚應滿足利潤率大於未受限之邊界所造成之生物族群損失率與實質成長率之比值 (即 $\frac{\lambda}{r_0}$) 之前提，否則不能直接斷言參數與變數 (即派遣之漁船數量 U 及派遣漁船出海之時機 τ) 間之關係。

關鍵詞: 人工魚礁，漁業管理，最適控制，撈捕策略

Abstract

In this paper, if fishery resources are seen as a private ownership, we attempt to analyze the cost benefit of an ARs construction through the proposed artificial reefs harvesting model to accomplish the optimal harvesting strategies. Since an ARs ecosystem has its characteristic existence, it will be buried and scoured later due to its finite service life; and when the ARs is deemed to the private goods, it would be a non-closed ecosystem because of its permeable boundary. For this reason, this study incorporates with the population dispersal dynamics (Buechner, 1987; Stamps *et al.*, 1987) into the conventional open access fishery management model to conform to the characteristic of practical application in ARs. An optimal number of fishing boats and the timing to dispatch the boats (i.e., control variables U and τ) at steady state are obtained by using optimal control theory with the Most Rapid Approach Paths (MRAP). Then we transform the optimal control problem into static optimization problem. Sensitivity analyses on the effects of environmental parameters on optimal harvesting strategies are analyzed.

The results reveal that the fishery firm will dispatch more fishing boats as early as possible to achieve the maximization of profit in case of the following situations: discount rate is increased, area of ARs is expanded, target species move less mobile, the price per unit catch increases, and operation cost is decreased. This harvesting strategy is also constrained by the rule that the profit rate (i.e., $1-b$) must be greater than the ratio of population loss rate to intrinsic growth rate (i.e., $\frac{\lambda}{r_0}$). In brief, the effect of permeable boundary in ARs ecosystem has been considered and incorporated in our model presented in this paper. The major contribution of this

paper is our focus on open populations of mobile, long-lived species, boundary type and geometrical configuration of an ARs ecosystem that plays an increasingly crucial role in determining the potential equilibrium population size.

Keywords: artificial reefs, fishery management, optimal control, harvesting policy

貳、前言

根據研究調查指出[Hughes, 1994; Hinrichsen, 1997]全球水產資源之枯竭已為一不爭之事實；台灣在過去幾年，由於缺乏有效資源管理，漁民濫捕，因而導致漁業資源快速枯竭。為了解決此一問題，傳統上文獻乃針對漁業資源切入，探討漁業資源的最適捕撈量，乃是考慮漁業資源成長為一給定的自然率，而忽略科技進步所帶來的效果。

實際上，以人為方式改善海域之漁場環境，提高海域漁業資源量，透過人類科技進步，利用人為方式，改善漁業資源的生長速度，在諸多改善漁場環境之方法中，以營造海洋牧場所能獲得增值水產資源的效果最為顯著與長久。而建設海洋牧場的根基與最簡便的方式即為投放人工魚礁，根據研究，人工魚礁之投放會影響增加該區域聚魚之效果[Bohnsack and Sutherland, 1985; Bohnsack, 1989, 1990; Collins *et al.*, 1991]。此外，魚礁的洞穴結構及表面附著生物造成孔隙，是底棲魚、貝、介類及仔稚魚棲息避敵之場所。而藻類之附著面積若越大，越易吸引浮游生物及小魚覓食，再吸引大魚在礁區附近圍繞。所以，雖然人工魚礁與天然礁的生物相組成非常相似，但對體積類似的天然礁而言，人工魚礁之魚群量及生物質量往往超出很多 [Moseley, 1961]。

然而雖然利用人工魚礁可以提高漁業產量，但是，如果沒有適當的管理，反而會引起過渡捕撈；誠如 Buchanan(1974)、Liao 及 Cupka (1979) 所說，人工魚礁區比天然礁區更容易發生過漁之情況；另外，根據菲律賓過往的經驗，在在都顯示了在開放自由捕魚形式下投放人工魚礁確會導致資源過度捕撈（香港人工魚礁計畫，2002）。因此，本文擬針對人工魚礁之設置，發展一符合人工魚礁生態系統之撈捕模式，以達到兼顧生態保育及最大經濟效益之漁業資源開發的目的。

參、研究目的

本研究將以我國魚礁的設置為切入點，並在人工魚礁為漁公司所擁有之假設前提下，在獲取最大經濟效益目標下，探討人工魚礁區的最佳撈捕時機與數量。詳細言之，本研究之主要研究目的包含：

- 一、建構一符合人工魚礁生態之撈捕模式。
- 二、探討在有限之人工魚礁壽命下，漁公司最佳撈捕策略(包含出海時機與出海至人工魚礁區撈捕之漁船數量)之性質。
- 三、在最佳撈捕策略下，參數變動(如利率變化、撈捕成本、漁獲單價、目標魚獲種類或人工魚礁區之形狀因子等)對最佳解(即撈捕時機與進行撈捕之漁船數量)之影響。

本研究並將進一步分析設置人工魚礁後之形狀因子，並說明其對撈捕策略之影響。

肆、研究方法

一、問題陳述

假設人工魚礁設置地點以及人工魚礁本身是屬於公共財，由政府負責設置，再制訂管理辦法，由民眾參與經營使用。今假設投放人工魚礁之區域可視為一海洋保護區(Marine protected area, 簡稱 MPA)，於該區域內禁止捕撈，若政府制定一辦法為該 MPA 可以在某一前提下撈補，唯該撈補權利僅限於由政府所許可撈補之漁公司所有，則對於漁公司來說，其經營上所需決定的是：什麼時候應該派遣漁船出海至 MPA 撈補，即進入人工魚礁魚場撈捕之「最佳時刻」為何？另外，所應派遣進入 MPA 撈補之漁船數量為何？當決定出上述二項決策變數之後，對船家而言將可得到最大之經濟效益。

二、模式假設

1.對一個獨立封閉而開放撈捕(Open access)的漁場來說,若以整個漁場的資源蘊藏量為考量,而非其中任一個體,通常是以 Logistic 模型為依據,來探討某時期內漁場資源的成長情形,此即著名的 Gordon – Schaefer 模式(1954, 1957)。然本研究中,所關心的是設置之人工魚礁漁場,對整個海洋來說,雖可以視為獨立而封閉之系統,然對人工魚礁漁場來說,該漁場之劃定並非是以固定之設施圈養¹,對魚群來說,所劃定人工魚礁區域之邊界魚群可自由移動(Emigration or Immigration),因此並不能視該漁場為一「封閉」之系統,Pulliam(1988)曾針對該類系統提出生物族群之成長動態模式(Source- Sink dynamics),於該模式中當魚群遷徙離開保護區域(Refuge)(即本文之人工魚礁區)之際,則該魚群將會永久消失死亡(Permanent loss),此乃由於對該系統來說,魚群遷徙游動移出保護區,則假設會面臨撈捕而導致死亡(Total fishing mortality)[Acosta, 2002]。因此,本文之魚群數量 $x(t)$ 自然增長除滿足 Logistic 方程式外,尚須滿足前述之 Source- Sink 動態模式,即考量因魚群移動出人工魚礁區所導致之族群損失 λ , 另外我們也考慮了因撈捕所導致之魚群數量損失 $h(u, x)$, 所以單位時間之魚群增減量可如(1)式表示。

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x) - h(u, x) \quad (1)$$

其中(r.h.s 第一項) $f(x)$ 代表魚量在 MPA 系統內之自然增損量,可表示如下:

$$f(x) = r(x)x - \lambda(D, \rho)x \quad (2)$$

上式之 $r(x)$ 可以 $r(x) = b(x) - m(x)$ 代表族群之淨成長率[Hanley *et al.*, 1997], 其中 b 代表某一族群之出生率, m 為該族群之自然死亡率, 該二者皆與族群之數量 x 成比例; 至於對 $r(x)$ 之表示, 本文採用最簡單且可能是最為有用之案例為當 $r(x) = r_0 \left[1 - \frac{x}{K} \right]$ [Hanley *et al.*, 1997], 參數 r_0 , 即一般所稱之實質成長率 (intrinsic growth rate); 另外, K 通常稱之為環境之負載能力或飽和度[郝道猛, 1992], 我們假設其與人工魚礁區設置之邊界條件(ρ) 有關, 因此 $K = K(\rho)$ 。

而在處理因魚群移動出人工魚礁區所導致之族群損失 λ 時, 我們採用 Buechner (1987) 及 Stamps *et al.* (1987) 所提出之方程式, 其認為空間中生物族群損失率(λ)與受限滲透率²(ρ) 及族群擴散係數 (D) 有關, 詳(3)式, 其中族群擴散係數 D 乃與物種之移動速率成正比[Turchin, 1998], 亦即不同魚種由於其游泳能力(速度)的不同, 因此 D 值會有所差別³。

$$\lambda = (D+1)^\rho, D > 0 \ \& \ \rho > 0 \quad (3)$$

至於在受限滲透率(或稱 MPA 之邊界條件) ρ 方面, 根據 Stamps *et al.* (1987) 及 Okubo(1980)之研究指出, 對具遷徙性之物種⁴來說, ρ 值可以保護區之週長(P)與面積(A)之比值來表示, 因此, 整合上述論點, (2)式可改寫如(4)式所示。

$$f(x) = \left\{ r_0 \left[1 - \frac{x}{K(\rho)} \right] - (D+1)^\rho \right\} x \quad (4)$$

對(1)式之 r.h.s 第二項單位時間之總撈捕量 $h(u, x)$, 我們假設其與單位時間出海撈捕之漁船數量 $u(t)$ ⁵ 及該漁場之魚量 $x(t)$ 成正比, i.e., $h(u, x) \propto u(t)x(t)$, 等號成立之際, 我們引

¹ 所謂固定之設施指的是該漁場具有如箱網(Cage net)養殖般之受限邊界, 如漁場之邊界以網目加以與外界隔離, 該類漁場才可視為封閉系統(因對魚群而言, 無法自由於該邊界移入或移出)。

² 亦可稱之為所討論區域之邊界條件(Boundary condition)[Acosta, 2002]。

³ 本文為簡化問題, 因此假設 D 為一常數。

⁴ Acosta (2002)指出, 於 MPA 中所討論之魚種為長期棲息於該區域之物種(Long-lived species)而非迴游性之魚種, 因此, 若 MPA 內禁止撈捕之際, MPA 內魚量之損失主要來自魚群游出 MPA 所導致之撈捕損失, 而非於 MPA 內自然成長所導致之死亡。

⁵ $u(t)$ 視為連續變量, 對於非整數之部分, 可視為僅在部分時間內撈捕。

入一參數 q , q 代表每單位漁船單位時間之撈捕率 , 亦稱為撈捕係數 (Coefficient of harvesting) , 一般是假設為常數 (Schaefer, 1954; Clark, 1990)。所以單位時間之總撈捕量 $h(u, x)$ 可如(5)式表示。

$$h(u, x) = qu(t)x(t) \quad (5)$$

2. 由於人工魚礁之設置 , 初期該漁場之魚群數量很小⁶ , 因此在時間 $0 \leq t \leq \tau$ 之內漁公司之撈捕策略為不進入該區域捕魚 , 待魚群數量成長到某一程度時 (即 $t > \tau$ 之後) , 始進入該區域捕魚 , 而其派遣進入該區域捕魚之漁船數量 $u(t)$ 應保持常數 U ⁷ , 另外撈捕期間 ($t > \tau$) 之魚群數量保持在一穩定之保育數量 x_c 。

$$\begin{cases} x(0) = \frac{K}{s} , s \gg 1 \\ x(t) \geq x_c , t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

$$u(t) = \begin{cases} 0 , 0 \leq t \leq \tau \\ U , t > \tau \end{cases} \quad (7)$$

因此 , 上述之 τ 及 U 即為本研究待定之決策變數。

3. 假設所撈捕之魚量其出售單價為 p , 每艘漁船出海捕魚單位時間所需之費用為 c , 折現 (Discount) 因子為 δ , 則對漁公司而言 , 單位時間之獲利為 R , 因此若經過 Δt 之時間則利潤可為 :

$$R\Delta t = (ph - cu)\Delta t \quad (8)$$

三、模式建構

根據前述之假設 1~3 可知 , 若為求得社會之「長期」最大效益 , 則可以歸納建構本文之目標函數為使得漁公司有最大之經濟效益 , 如(9)所示 :

$$\text{Max}_{u(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [ph(u(t), x(t)) - cu(t)] dt = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [pq(x)x(t) - c]u(t) dt \quad (9)$$

唯人工魚礁之設置仍有其壽命存在⁸ , 假設其壽命為 T_L 年 , 由圖一可知在第一階段 (即自投礁後魚礁發展至魚礁發生沉陷前) 之時間為 T , 則可以由修正(9)式之積分上限得到第一階段之人工魚礁資源最適撈捕模式 (Artificial Reefs Harvesting Model) 如(p1)所示。

$$\text{ARH Model} \left\{ \begin{array}{l} \text{Max}_{u(t)} \int_0^T e^{-\delta t} [pq(x)x(t) - c]u(t) dt \\ \text{s.t.} \\ \dot{x}(t) = f(x) - h(u, x) = \left\{ r_0 \left[1 - \frac{x(t)}{K(\rho)} \right] - \lambda(\rho) \right\} x(t) - q(x)u(t)x(t) \\ x(0) = \frac{K}{s} , s \gg 1 \\ x(t) \geq x_c , t > \tau \\ u(t) = 0 , 0 \leq t \leq \tau \\ u(t) = U , t > \tau \\ \lambda(\rho) = (D+1)^\rho \\ T > \tau \end{array} \right. \quad (p1)$$

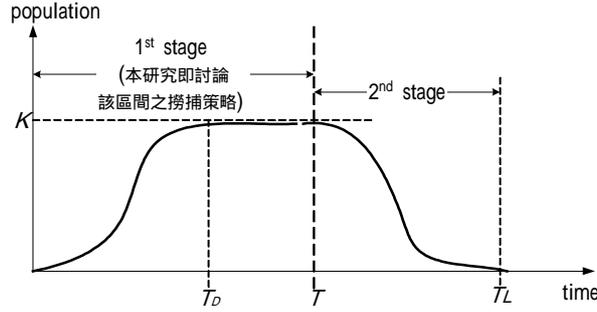
求解(p1)之 ARH 模式 , 可得到 U^* 及 τ^* , 即漁公司所應派遣進入該 MPA 漁場之漁船數

⁶ 根據 Turner (1970) 之研究 , 魚礁自投礁後至發展完成為止須 4~5 年的時間。

⁷ 對(5)式特殊規定之合理性可以變分法加以證明求得 [Mesterton-Gibbons, 1989; Clark, 1990]。

⁸ 人工魚礁縱使有良好之管理及設計 , 最後仍然會發生沉陷而逐漸消失。

量及最佳進入捕魚時間。



圖一 人工魚礁生命週期內之生物族群數量與時間之關係圖

四、模式求解

由(p1)可解得生物族群數量函數 $x(t)$ 如下：

$$x(t) = \begin{cases} \frac{K}{\frac{r_0}{r_0 - \lambda} + \left(s - \frac{r_0}{r_0 - \lambda}\right) e^{-(r_0 - \lambda)t}}, & 0 \leq t \leq \tau \\ K \left(1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0}\right) = x^*, & t > \tau \end{cases} \quad (10)$$

由(10)式，可利用 $x(t)$ 在 $t = \tau$ 時之連續性解得：

$$\tau = \frac{1}{r_0 - \lambda} \ln \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 q U} \quad (11)$$

亦即 $u(t)$ 中的兩個參數 τ 、 U 中只有一個是獨立的，以下取 U 獨立變數，則由(11)式可決定出：

$$\tau(U) = \frac{1}{r_0 - \lambda} \ln \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 q U} \quad (12)$$

將(7)式及(10)式代入(p1)之目標函數，則可得到以 U 為函數之第一階段 ARH 模式之目標函數 $F(U)$ ，表示如下：

$$F(U) = \int_0^{\tau} e^{-\delta t} [pqx(t) - c] u(t) dt = \frac{-pqKU}{\delta} \left(1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b\right) (e^{-\delta \tau} - e^{-\delta \tau(U)}) \quad (13)$$

$$b \equiv \frac{c}{pqK} \quad (14)$$

式(14)中， b 的意義為費用與價格比的下限，因此時魚場之魚量取最大值 K ，顯然 $b < 1$ ，否則單位時間下每單位漁船之成本高於其捕魚之利潤，漁船將不會出海。因此由(13)式可知，第一階段之 ARH 模式中撈捕效益 $F(U)$ 為正值的條件是： $1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b > 0$ ；i.e.,

$$0 < U < \frac{r_0(1-b) - \lambda}{q} \quad (15)$$

則利用微分法求出在條件(15)式下 $F(U)$ 有最大值之 U^* ，；i.e.,

$$F'(U) = \frac{dF(U)}{dU} = 0 \quad (16)$$

由(16)化減可得：

$$e^{-\delta \tau} \left[\frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] = e^{-\delta \tau(U)} \left[-1 + \delta U(\tau)' + \frac{\lambda}{r_0} - \frac{\delta U \lambda}{r_0}(\tau)' + \frac{2qU}{r_0} - \frac{\delta q U^2}{r_0}(\tau)' + b - \delta U b(\tau)' \right] \quad (17)$$

又(17)式中 $[\tau(U)]'$ 可利用(12)式求得，即：

$$(\tau)' = \frac{d\tau(U)}{dU} = -\frac{1}{U(r_0 - qU - \lambda)} \quad (18)$$

將(18)式代入(17)式並可進一步化簡如(19)式所示：

$$e^{-\delta\tau} \left(\frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) = \left\{ \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 q U} \right\}^{\frac{\delta}{r_0 - \lambda}} \left[\left(\frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) + \frac{\delta}{r_0 - \lambda - qU} \left(\frac{\lambda}{r_0} + \frac{qU}{r_0} + b - 1 \right) \right] \quad (19)$$

透過數值分析的方法可解得(19)式之 U ，此時 U 為 r_0 、 λ 、 b 、 q 、 δ 之函數；而在滿足條件(15)式之情況下可得決策變數 U 之最佳解 U^* ，因此 U^* 可以(20)式表示，即：

$$\begin{cases} U^* = U^*(r_0, \lambda, b, q, \delta) \\ 0 < U^* < \frac{r_0(1-b) - \lambda}{q} \end{cases} \quad (20)$$

再將 U^* 代回(12)式即可得漁公司之漁船開始要進入 MPA 撈捕之最佳時間 $\tau^*(U^*)$ 。

伍、結果與討論

在進行敏感度分析之前，我們先討論模式假設 2 中所給定 $u(t)$ 之形式是否合理；事實上，本文雖就 $u(t)$ 給了特定的形式，而如此規定之合理性可以變分法或最適控制理論加以證明求得。茲利用最適控制理論推導線性捕魚模式下之最適魚群庫存量之控制如下。

回想 ARH 模式，其目標函數為使得漁公司之利潤為最大，限制式為魚群之成長受限於自然成長函數 $f(x)$ 及人為撈捕函數 $h(u, x)$ ，控制變數為漁船之數量 $u(t)$ ，因此該模式可如下所示：

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{u(t)} \int_0^T e^{-\delta t} [pqx(t) - c] u(t) dt \\ & \text{s.t.} \\ & \dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = f(x) - h(u, x) = f(x) - qu(t)x(t) \\ & 0 \leq u(t) \leq U \end{aligned} \quad (p2)$$

其中 U 表示漁公司之最大可出海捕魚之漁船數量。因此對(p2)言，Hamiltonian 可表示為：

$$H = [e^{-\delta t} (pqx(t) - c) - \varphi(t)x(t)]u(t) + \varphi(t)f(x) \quad (21)$$

(21)式中， $\varphi(t)$ 為一外加之未知函數，稱為 adjoint 變數。假如 $u(t)$ 為最適之控制而 $x(t)$ 為其相對應之反應函數，則由最大化之定理(Maximum principle)可知，必存在 adjoint 變數 $\varphi(t)$ 並在所有之時間 $t, 0 \leq t \leq T$ ，滿足以下之方程式：

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (22)$$

$$H[x(t), t, u(t); \varphi(t)] \equiv \max_{u \in U_t} H[x(t), t, u(t); \varphi(t)] \quad (23)$$

(22)~(23)式為最適控制之必要條件。

經過化簡可推得：

$$f'(x) + \frac{cf(x)}{x(pqx - c)} = \delta \quad (24)$$

此外 $u(t)$ 之控制若不是 singular 控制⁹的話則必定滿足 $u(t)=0$ 或 $u(t)=U$ 。而為了較快達到均衡狀態¹⁰，則必滿足下式之形式。

$$u(t) = \begin{cases} U, & \text{when } x(t) > x^* \\ 0, & \text{when } x(t) < x^* \end{cases} \quad (25)$$

(25)式即前述之模式假設 2 中所給定之 $u(t)$ 特定形式。此外，(24)式將在下述之推論中用來解析 ARH 模式之參數敏感性分析。參數敏感性分析方面，本研究將著重於了解投放魚礁後，在魚礁發生沉陷前之第一階段之時間內參數 δ 、 $\lambda(P,A)$ 對決策變數 U 、 τ 之影響。茲分述如下：

利用(24)式可推得：；i.e.,

$$\frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \lambda - qU) - cr_0} - (r_0 - \lambda - 2qU + \delta) = 0 \quad (26)$$

令 $\frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \lambda - qU) - cr_0} = f(U, \delta, r_0, \lambda, q, p, c, K)$; $(r_0 - \lambda - 2qU + \delta) = g(U, \delta, r_0, \lambda, q, p, c, K)$ 則(26)式可改寫如下之形式：

$$f(U, \delta, r, \lambda, q, p, c, K) - g(U, \delta, r, \lambda, q, p, c, K) = 0 \quad (27)$$

將(27)式對其決策變數 U 及參數 δ 全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_\delta - g_\delta)d\delta = 0 \quad (28)$$

因此，利率變化對漁公司派遣出海至 MPA 撈捕之漁船數之影響可以下式表示，即：

$$\frac{dU}{d\delta} = -\frac{(f_\delta - g_\delta)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_\delta + g_\delta}{f_U - g_U} \quad (29)$$

分別計算(29)式中之 f_δ 、 f_U 、 g_δ 及 g_U 如下：

$$f_\delta = 0 \quad (30)$$

$$f_U = -\frac{cqr_0(-pqKr_0 + pqK\lambda + cr_0)}{(-pqKr_0 + pqK\lambda + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (31)$$

$$g_\delta = 1 \quad (32)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (33)$$

其中(31)式可再化簡如下：

$$f_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - \lambda]}{(-pqKr_0 + pqK\lambda + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (34)$$

因此(29)式中， $-f_\delta + g_\delta > 0$ ； $f_U - g_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - \lambda]}{(\Lambda)^2} + 2q$ ，其正負情況如下：

(i) 若 $(1-b)r_0 - \lambda > 0$ ，則 $f_U - g_U > 0$

(ii) 若 $(1-b)r_0 - \lambda < 0$ ，則 $f_U - g_U$ 之正負符號尚需參考其他參數方能決定。

由(i)、(ii)之討論可知：

【推論一】當在滿足 $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$ 之情況下， $\frac{dU}{d\delta} > 0$

上述推論中之 $1-b = \frac{pqK - c}{pqK}$ 為單位漁船之利潤率。

⁹ i.e., $u(t) = U^* = \frac{f(x^*)}{qx^*}$

¹⁰ 即 MRAP(Most rapid approach path)的問題，請參閱 Kamien and Schwartz(1991, pp.97-100)。

另外在此同時，參數 δ 對決策變數 τ 之影響可藉由分析 $\frac{d\tau}{dU}$ 而得；由(18)式可知，
 $(\tau)' = \frac{d\tau(U)}{dU} = -\frac{1}{U(r-qU-\lambda)}$ ，又由(10)式知，當 $t > \tau$ 時漁公司進入 MPA 捕魚，則此時魚
 群數量應控制在 x^* ，又 $x^* = K\left(1 - \frac{\lambda}{r} - \frac{qU}{r}\right) > 0$ ，其中 $K > 0$ ，所以可推得：

$$r - \lambda - qU > 0 \quad (35)$$

因此將(41)式代回(18)式可得 $\tau' < 0$ 。

亦即漁公司進入 MPA 撈捕之時刻 τ 為 U 之減函數，所以：

【推論二】當在滿足 $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$ 之情況下， $\frac{d\tau}{d\delta} < 0$

同理，本研究將各參數之改變對決策變數之影響推論整理如表一所示：

由利率 δ 的變化對決策變數 U 的影響可發現兩者之變化方向是同向的，亦即在利率較高的地方，此時出海捕魚之漁船要增加才會有較大之利潤，且此時出海捕魚之時機相對利率低的地方應提早才會有較大之利潤；反之，則應減少出海捕魚之漁船數量；在實務之應用上，可思索目前在台灣的利率較日本為高，因此，同樣投資人工魚礁於該二地區，站在經營的角度來說，在台灣應該派遣較多之漁船進入該區域捕魚且派遣之時間應提前，才可獲得更多的利潤。

表一 參數敏感性分析摘要表

數 變	參 數								參考方 程 式
	δ	λ	ρ	A	P	D	P	c	
U	+	-	-	+	-	-	+	-	(18) (35)
τ	-	+	+	-	+	+	-	+	(29)

註：“+”：對參數而言，決策變數為一增函數，反之為減函數

雖然上述之推論符合常理之判斷，然值得一提的是，上述之情況有其成立之前提條件存在，亦即上述之推論需在滿足 $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$ 之前提下，此處之 $1-b$ 事實上為單位漁船潛在之最大利潤率，該利潤率應該要大於「未受限之邊界所造成之生物族群損失率」 λ 與「魚群之實質成長率」 r_0 之比值，而該比值是可經由量測而得。若非在滿足 $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$ 之前提下，

則不盡然能獲得上述可視為常理之推論，此乃因 $\frac{dU}{d\delta}$ 或 $\frac{d\tau}{d\delta}$ 之值尚需參考其他參數之大小。

而在人工魚礁之面積 A 的大小對決策變數 U 的影響可發現兩者之變化方向亦是同向的，亦即若所經營之人工魚礁面積較大，則漁公司出海捕魚之漁船數量要增加才會有較大之利潤，此乃因在其他參數不變之情況下，面積愈大，則魚群較不易因未受限之邊界造成損失；此外，若在魚礁區面積相同之情況下，不同之魚礁區形狀將會形成不同大小之邊界週長，週長 P 愈大者表示其魚礁區之形狀越狹長， P 愈小則形狀越趨近於方形或圓形，由表一可知，當在其他參數不變之情況下，週長愈長(即形狀越狹長)，則漁公司出海捕魚之漁船數量要減少才會有較大之利潤(i.e. $\frac{dU}{dP} < 0$)，此乃因形狀越狹長，則較易造成魚群之遷徙(擴散)損失；這項結果也告訴我們，在劃定人工魚礁之範圍時，在相同之面積下，建議採用週長較大之保護區形狀設計，如圓形的邊界，是較有利的。

此外，人工魚礁區內所討論之生物族群種類亦是一項應考慮的因素，由表一可知，當

在其他參數不變之情況下，由於族群種類之不同則會有不同之族群擴散係數 D (而該值與物種之移動能力(速度)有關)，此時 D 之變化方向與決策變數 U 是反向的關係；換言之，對移動速度較快之物種來說 (D 較大)，漁公司出海捕魚之漁船數量要減少 (i.e., $\frac{dU}{dD} < 0$)，另外

對出海捕魚之時間則應往後延後 (i.e., $\frac{d\tau}{dD} > 0$)，才會有較大之利潤。舉例來說，若人工魚礁區所撈捕之對象物種為龍蝦等無脊椎生物的話，則其撈捕策略應與目標物種為魚類有所不同，因為魚類的游泳速度 (D) 當較龍蝦為快。

在撈捕物種(如魚群)之單位售價 p 方面，其與出海進行撈捕之漁船數量 U 之變化方向係同向之關係，亦即當單位售價較高時，則應投入更多之漁船進行撈捕；又若單位漁船之操作成本提高時，則投入人工魚礁進行撈捕之漁船數量應該減少，因此時參數 c 與決策變數 U 之變化關係係為反向 (i.e., $\frac{dU}{dc} < 0$)，且應較晚再進入該魚場捕魚。

事實上，上述之所有推論皆需在滿足 $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$ 之前提下始能適用，否則參數之變化方向對決策變數 U 及 τ 之影響尚需參考其他參數之大小方能決定。因此在撈捕策略之擬定上 $\frac{\lambda}{r_0}$ 即為一策略施行之重要門檻。誠如 Schonewald-Cox 及 Bayless (1986) 所言，當保護區(即此處之魚礁區)之面積大小受限後，對於開放性會移動且長期居住之族群而言，保護區邊界的形狀及其幾何配置對於決定潛在族群之大小的平衡扮演一日漸重要的角色。

陸、計畫成果自評

- 一、由於在 MPA 內(即人工魚礁)族群之建立及維持為棲息地之分佈 [Acosta, 1999; McClanahan and Arthur, 2001; Paddock and Estes, 2000]、邊界之幾何形狀 [Buechner, 1987; Stamps *et al.*, 1987] 的複雜函數，因此本研究所提出之 ARH 模式係結合生物族群之動態擴散模式與傳統之資源管理模式。
- 二、本研究在求解第一階段未發生沉陷前之 ARH 模式乃利用最適控制之快速達到族群平衡之控制路徑方式，即一般所稱之 MRAP (Most rapid approach path) 來給定決策變數之特定形式，將原來之控制變數-漁船之出海數量 $u(t)$ 轉成一與時間無關之常函數 U ，以簡化求解之過程。
- 三、本研究在參數敏感度之討論上，提出單位漁船作業之潛在利潤率應大於 $\frac{\lambda}{r_0}$ 之門檻值始有常理所言之撈捕策略(如利率較高的地方，出海捕魚之漁船數目要較多)。此亦即在人工魚礁區域之撈捕策略應同時考量目標物種之實質成長率以及未受限之邊界對生態系統之影響。

柒、參考文獻

1. 郝道猛，1992，生態學概論，徐氏基金會出版。
2. Acosta, C. A., 1999. Benthic dispersal of Caribbean spiny lobsters among insular habitats: implications for the conservation of exploited marine species. *Conservation Biology*, 13: 603-612.
3. Acosta, C.A., 2002. Spatially explicit dispersal dynamics and equilibrium population sizes in marine harvest refuges, *ICES Journal of Marine Science*, 59: 458-468.
4. Bohnsack, J. A., and Sutherland, D. L., 1985. Artificial reef research: a review with recommendations for future priorities. *Bulletin of Marine Science*, 37: 11-39.
5. Bohnsack, J.A., 1989. Are high densities of fishes at artificial reefs the result of habitat

- limitation or behavioral preference?. *Bulletin of Marine Science*, 44: 631-645.
6. Bohnsack, J. A., 1990. Habitat structure and the design of artificial reefs. In *Habitat Structure: The Physical Arrangement of Objects in Space*, Ed. by S. S. Bell, E. D. McCoy, and H. R. Mushinsky, Chapman and Hall, London, pp. 412-426.
 7. Buchanan, C. C., 1974. Comparative studies of the sport fishery over artificial and natural habitats off MurrellsInlet, S.C. Pp. 34-38 in L. Colunga and R. Stone , eds. *Proceedings: artificial reef conference*, Texas A&M Univ. TAMU-SG-74-103.
 8. Buechner, M., 1987. Conservation in insular parks: simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries, *Biological Conservation*, 41:57-76.
 9. Clark, C.W., 1990. *Mathematical Bioeconomics : The Optimal management of renewable resources*, 2nd ed., Wiley, New York.
 10. Collins, K.J., Jensen. A.C., and Lockwood, A.P.M., 1991. Artificial reef project - Poole Bay programme. *Prog. Underwater Sci.*, 16: 75-84.
 11. Gordon, H. S., 1954. The economic theory of a common property resource: the fishery. *Journal of Political Economy*, 62: 124-142.
 12. Hanley, N., Shogren J. F. and White B., 1997. *Environmental economics: in theory and practice*, Hampshire, Macmillan.
 13. Hinrichsen, D., 1997. Coral reefs in crisis. *BioScience*, 47: 554-558.
 14. Hughes, TP, 1994: Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science* 265: 1547 – 1551.
 15. Kamien, M. I. and Schwartz, N. L., 1991. *Dynamic optimization: the calculus of variations and optimal control in economics and management*. Amsterdam; North-Holland, New York.
 16. Liao, D. S. and D. M. Cupka, 1979. Economic impacts and fishing success of offshore sport fishing over artificial reefs and natural habitats in South Carolina. *South Carolina Marine Resources Center, Tech. Rep.* 38:1-27.
 17. McClanahan, T. R., and Arthur, R., 2001. The effect of marine reserves and habitat on populations of East African coral reef fishes. *Ecological Applications*, 11: 559–569.
 18. Mesterton-Gibbons, M., 1989. *A concrete approach to mathematical modeling*. Addison-Wesley publishing company, Inc.
 19. Moseley, L., 1961. The use of car bodies as fishing devices. *Ohio Department of Natural Resources, Division of Wildlife, Tech. Rep.* 7pp.
 20. Okubo, A., 1980. *Diffusion and ecological problems: mathematical models*. Biomathematics, Vol. 10. Springer, Berlin.
 21. Paddock, M. J., and Estes, J. A., 2000. Kelp forest fish populations in marine reserves and adjacent exploited areas of central California. *Ecological Applications*, 10: 855–870.
 22. Pulliam, H. R., 1988. Sources, sinks, and population regulation. *American Naturalist*, 132: 652–661.
 23. Schaefer, M. B., 1957. Some considerations of population dynamics and economics in relation to the management of commercial marine fisheries. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 14: 669-681.
 24. Schonewald-Cox, C. M., and Bayless, J. W., 1986. The boundary model: a geographical analysis of design and conservation of nature reserves. *Biological Conservation*, 38: 305–322.
 25. Stamps, J.A., Buechner, M., and Krishnan, V.V., 1987. The effects of edge permeability and habitat geometry on emigration from patches of habitat, *American Naturalist*, 129: 533-552.
 26. Turner, C. H., 1970. Artificial reefs. *Ency. Mar. Resource*, Ed. by Frank E. Firth.