

# 人工魚礁資源最適撈捕模式之研究

陳中獎\* 許澤宇\*

\*南華大學環境管理研究所

## 摘要

我國四面環海，原本漁業資源充裕，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，它可以非常有效的吸引並聚集大量魚群，可藉改變水流為魚類提供理想的覓食機會。因此，人工魚礁區之建置對漁業資源枯竭問題當有顯著性改善。然而，我國在過去已投放許多人工魚礁，雖然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。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 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。

**關鍵詞：**人工魚礁；漁業管理；最適控制；撈捕策略。

**Keywords:** artificial reefs; fishery management; optimal control; harvesting policy.

---

\* 連絡作者: 許澤宇

連絡地址: 屏東市民學路 42 號

E-mail: [cheyue0502@yahoo.com.tw](mailto:cheyue0502@yahoo.com.tw)

# The Optimal Harvesting Model in Artificial Reefs Ecosystem

Chung-Chiang Chen<sup>\*</sup> and Che-Yu Hsui<sup>\*</sup>

*\*Graduate Institute of Environmental Management  
Nanhua University, Dalin, Chiayi 622, Taiwan R.O.C.*

## Abstract

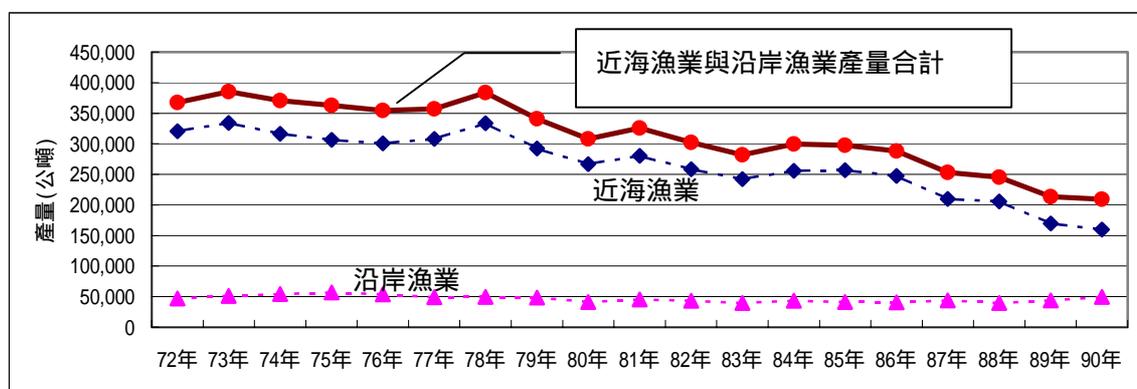
The over-harvest of fishery resources has led to exhaustion of fishery stock around the island. Moreover, the environmental pollution along the coastal line also aggravated the resources exhaustion. Based on empirical study by experimental research and practical programs we find that the artificial reefs (ARs) can attract the fishery stocks as a fishery habitat or can change the water flow to improve the environment for fishery. In this case, the construction of artificial reefs in the sea is an effective way to restore the fishery stocks and improve the fisherman's income. It also provides a new opportunity for us to re-examine the fishery management implemented in Taiwan and to analyze the cost-benefit of the ARs construction. However, most constructions of ARs in Taiwan were not taken care of and the service life was much shorter than that in Western countries.

Therefore, we discussed the optimal harvest strategy in ARs with maximizing profit in the viewpoint of fishery firm. Though ARs ecosystem have finite life cycle, and will be buried with scouring later. In addition, when the ARs were deemed to be private goods, it would be an unclosed ecosystem because of its permeable boundary. For this reason, the study incorporated 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. Besides, the special case of control variables was obtained by using optimal control theory and led to a simplicity form of common optimal problem. This paper also had the analyses of harvesting strategies with variable environment finally.

**Keywords:** artificial reefs; fishery management; optimal control; harvesting policy.

## 壹、緒論

根據研究調查指出(Wilkinson, 1992; Richmond, 1993; Grigg, 1994; 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（圖一）。為了解決此一問題，傳統上文獻乃針對漁業資源（再生性資源（renewable resources））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。



圖一 民國 72 年至 90 年沿近海漁業產量統計圖

資料來源：行政院農委會漁業署漁業年報資料，2003。

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; Ambrose and Swarbrick, 1989; DeMartini *et al.*, 1989; Bohnsack, *et al.*, 1991; Collins *et al.*, 1991)。日本及歐洲已有報告指出，人工魚礁附著大型海藻可提高該魚礁聚魚及生產力效果，並已有試驗嘗試製作適合大型海藻附著及生長之人工魚礁，即藻礁，如礁體內放置自然取得之岩石或竹子等對於藻類附著效果顯著(Lok *et al.*,

1998; Heaps, *et al.*, 1997; Seaman and Sprague, 1991; O'Leary *et al.*, 2001)。另外，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。

(Anonymous, 1968; 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，反而會引起過度捕撈；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管理模式，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。

## 貳、問題陳述及模式假設

### 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。

以下將分述該問題之假設及模式建構。

## 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<sup>1</sup>(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<sup>2</sup>，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  $\lambda$ ，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。

---

<sup>1</sup> Gordon 模式(1954)通常亦稱為 Gordon – Schaefer 模式係因為其中表示族群成長之 logistic 函數為漁業生物學家 M. Schaefer (1957)所廣泛使用(Clark, 1990, p.25)。

<sup>2</sup> 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，該類漁場才可視做封閉系統(因對魚群而言，無法自由於該邊界移入或移出)。

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

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 (birth rate)  $m$  為該族群之自然死亡率 (mortality rate)，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  $r(x) = r_0 \left[ 1 - \frac{x}{K} \right]$  (Verhulst, 1838; 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<sup>3</sup>(Environmental carrying capacity)或飽和度<sup>4</sup>(Saturation level)，我們假設其與人工魚礁區設置之邊界條件 $(\rho)$ <sup>5</sup>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  $\lambda$  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 $(\lambda)$ 與受限滲透率<sup>6</sup>(conditional permeability,  $\rho$ ) 及族群擴散係數 ( $D$ ) 有關(如(3)式所示)，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<sup>7</sup>。

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

<sup>3</sup> 在某種情形下，一生態系內某種生物個體的種數會受環境的改變或增加或減少，這種能力稱之為「負載能力」(Carrying capacity)。若環境變好時，則負載能力會一直增加到某一點，此後即不再增加，這點稱之為「飽和點」。(郝道猛，1992，p370)

<sup>4</sup> 任一族群可能達到的最大密度稱為「飽和點」(Saturation point)。(郝道猛，1992，p370)

<sup>5</sup> 根據 Stamps *et al.* (1987)及 Okubo(1980)之研究，邊界條件  $\rho$  值為保護區之週長( $P$ )與面積( $A$ )之函數，i.e.,  $\rho = \rho(P, A)$

<sup>6</sup> 亦可稱之為所討論區域之邊界條件(Boundary condition)(Acosta, 2002)。

<sup>7</sup> 本文為簡化問題，因此假設  $D$  為一常數。

至於在受限滲透率(或稱 MPA 之邊界條件) $\rho$  方面，根據 Stamps *et al.* (1987) 及 Okubo(1980)之研究指出，對具遷徙性之物種(Nomadic species<sup>8</sup>)來說， $\rho$  值可以保護區之週長( $P$ )與面積( $A$ )之比值來表示，即  $\rho(P, A) = \frac{P}{A}$ ，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  $u(t)$ <sup>9</sup>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<sup>10</sup>，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(即時間  $t > \tau$  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  $U$ <sup>11</sup>，另外撈捕期間( $t > \tau$ )之魚群數量保持在一穩定之保育數量  $x_c$ ，詳如(6)、(7)式所示。

<sup>8</sup> 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。

<sup>9</sup>  $u(t)$  視為連續變量，對於非整數之部分，可視做僅在部分時間內撈捕。

<sup>10</sup> 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。

<sup>11</sup> 對(5)式特殊規定之合理性可以變分法(Calculus of variation)加以證明求得(Mesterton-Gibbons, 1989; Clark, 1990)。

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

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

因此，上述之  $\tau$  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  $\delta$ ，則對漁公司而言，單位時間之獲利為  $R$ ，則  $R$  可以表示如： $R = ph - cu$ ，因此若經過  $\Delta t$  之時間，則利潤可改寫為：

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

### 參、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：

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

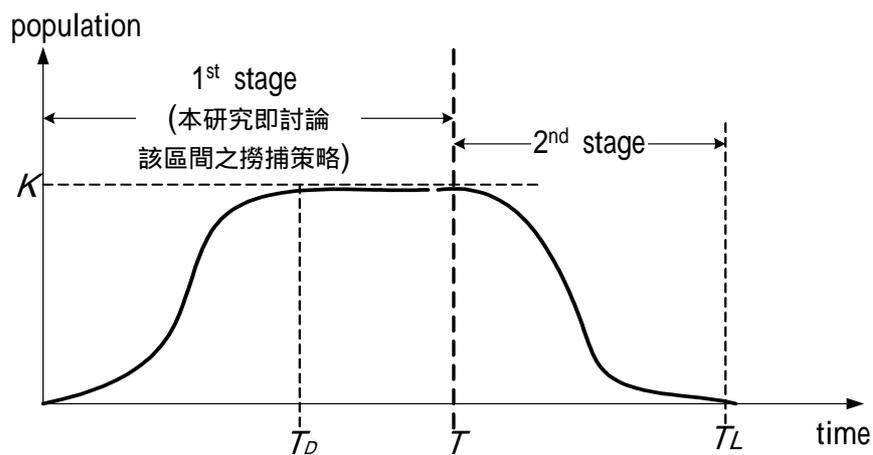
唯人工魚礁之設置仍有其壽命存在<sup>12</sup>，假設其壽命為  $T_L$  年，由圖一可知在第一階段(即自投礁後魚礁發展至魚礁發生沉陷前)之時間為  $T$ ，則可以由修正(9)式之積分上限得到第一階段之人工魚礁資源最適撈捕模式(Artificial Reefs Harvesting Model, 簡稱 ARHM)如(p1)所示。

求解(p1)之 ARH 模式，可得到  $U^*$  及  $\tau^*$ ，即漁公司所應派遣進入該 MPA 漁場之漁船數量及最佳進入捕魚時間。

<sup>12</sup> 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。

ARH Model

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



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

## 肆、模式求解

由(p1)之  $\dot{x}$  及  $x(t)$  之初始條件可解得  $0 \leq t \leq \tau$  時之  $x(t)$  如下<sup>13</sup>：

<sup>13</sup> 該微分方程稱之為 Bernoulli 方程式，可利用變數變換法先化簡成為一階之線性微分方程式，再引用積分因子即可求得。

$$x(t) = \frac{K}{\frac{r_0}{r_0 - \lambda} + \left(s - \frac{r_0}{r_0 - \lambda}\right) e^{-(r_0 - \lambda)t}}, \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (10)$$

其求解過程，詳述如下所示。

至於當  $t > \tau$  時，由(7)式知， $u(t) = U$ ，另外，此時  $x(t)$  所保持之常數量  $x^*$  可視為保育觀點下之魚群保育量 (i.e. (6) 式)，則該常數量

<sup>14</sup>  $x^*$  (或  $x_c$ ) 可以令  $\dot{x} = 0$  計算求得，即：

$$x^* = K \left( 1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} \right) \quad (11)$$

因此，整合(10)式及(11)式，可得  $x(t)$  之關係式如下所示。 i.e.,

$$x(t) = \begin{cases} \frac{K}{\frac{r_0}{r_0 - \lambda} + \left(s - \frac{r_0}{r_0 - \lambda}\right) e^{-(r_0 - \lambda)t}}, & 0 \leq t \leq \tau \\ K \left( 1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} \right) = x^* & , t > \tau \end{cases} \quad (12)$$

由(12)式，可利用  $x(t)$  在  $t = \tau$  時之連續性解得：

$$\tau = \frac{1}{r_0 - \lambda} \ln \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 qU} \quad (13)$$

亦即  $u(t)$  中的兩個參數  $\tau$ 、 $U$  中只有一個是獨立的，以下取  $U$  獨立變數，則由(13)式可決定出：

$$\tau(U) = \frac{1}{r_0 - \lambda} \ln \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 qU} \quad (14)$$

<sup>14</sup>詳 clark(1990)。

將(7)式及(12)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：

$$\begin{aligned}
 F(U) &= \int_0^T e^{-\delta t} [pqx(t) - c] u(t) dt \\
 &= \int_0^{\tau} e^{-\delta t} [\dots] (u(t) = 0) dt + \int_{\tau}^T e^{-\delta t} [pqx(t) - c] (u(t) = U) dt \\
 &= \int_{\tau}^T e^{-\delta t} \left[ pqK \left( 1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} \right) - c \right] U dt \quad (15) \\
 &= \frac{-pqKU}{\delta} \left( 1 - \frac{\lambda}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b \right) (e^{-\delta T} - e^{-\delta \tau(U)})
 \end{aligned}$$

$$b \equiv \frac{c}{pqK} \quad (16)$$

式(16)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(15)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.,

$$0 < U < \frac{r_0(1-b) - \lambda}{q} \quad (17)$$

則利用微分法求出在條件(17)式下  $F(U)$  有最大值之  $U^*$  (亦即漁公司派遣出海至人工魚礁區進行撈捕之漁船數量)，其計算過程推導如下：

將(15)式展開並對  $U$  微分，且令之為零，以求得  $U^*$ ，因此

$$\begin{aligned}
F'(U) &= \frac{dF(U)}{dU} \\
&= \frac{pqK}{\delta} \left\{ \begin{aligned} &e^{-\delta T} \left[ \frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] - \\ &e^{-\delta \tau(U)} \left[ -1 + \delta U(\tau)' + \frac{\lambda}{r_0} - \frac{\delta U \lambda}{r_0}(\tau)' + \frac{2qU}{r_0} - \frac{\delta q U^2}{r_0}(\tau)' + b - \delta U b(\tau)' \right] \end{aligned} \right\} = 0 \quad (18)
\end{aligned}$$

由(18)可得：

$$\begin{aligned}
&e^{-\delta T} \left[ \frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] - \\
&e^{-\delta \tau(U)} \left[ -1 + \delta U(\tau)' + \frac{\lambda}{r_0} - \frac{\delta U \lambda}{r_0}(\tau)' + \frac{2qU}{r_0} - \frac{\delta q U^2}{r_0}(\tau)' + b - \delta U b(\tau)' \right] = 0 \quad (19)
\end{aligned}$$

又(19)式中  $[\tau(U)]'$  可利用(14)式求得，即：

$$\begin{aligned}
(\tau)' &= \frac{d\tau(U)}{dU} = \frac{1}{r_0 - \lambda} \left[ \ln \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 qU} \right]' \\
&= -\frac{1}{U(r_0 - qU - \lambda)} \quad (20)
\end{aligned}$$

將(20)式代入(19)式並化簡可得：

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

亦可進一步化簡如(21)式所示：

$$\begin{aligned}
&e^{-\delta T} \left( \frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) \\
&= \left\{ \frac{(r_0 - qU - \lambda)[s(r_0 - \lambda) - r_0]}{r_0 qU} \right\}^{-\frac{\delta}{r_0 - \lambda}} \left[ \left( \frac{\lambda}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) + \frac{\delta}{r_0 - \lambda - qU} \left( \frac{\lambda}{r_0} + \frac{qU}{r_0} + b - 1 \right) \right] \quad (21)
\end{aligned}$$

透過數值分析的方法可解得(21)式之  $U$ ，此時  $U$  為  $r_0$ 、 $\lambda$ 、 $b$ 、 $q$ 、 $\delta$  之函數；而在滿足條件(17)式之情況下可得決策變數  $U$  之最佳解

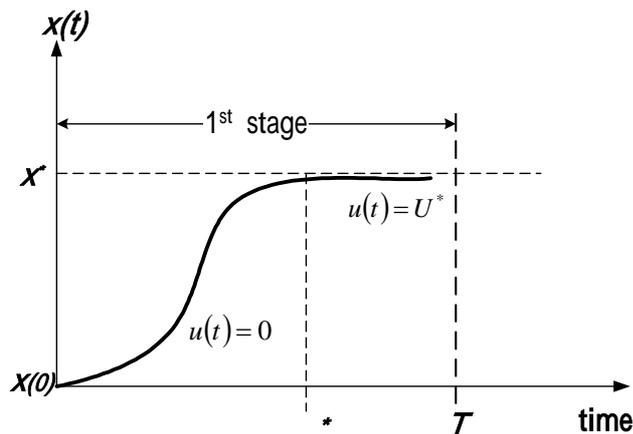
$U^*$ ，因此  $U^*$  可以(22)式表示，即：

$$\begin{cases} U^* = U^*(r_0, \lambda, b, q, \delta) \\ 0 < U^* < \frac{r_0(1-b) - \lambda}{q} \end{cases} \quad (22)$$

再將  $U^*$  代回(14)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、參數敏感度分析及討論

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，如圖二，而如此規定之合理性可以變分法 (Calculus of variation) 或最適控制 (Optimal control) 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。



圖二 由最優的  $u(t)$  控制的  $x(t)$

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：

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

其中  $U$  表示漁公司之最大可出海捕魚之漁船數量<sup>15</sup>。

Hamiltonian 可表示為：

$$\begin{aligned} H &= e^{-\delta t} (pq x(t) - c) u(t) + \varphi [f(x) - qu(t)x(t)] \\ &= [e^{-\delta t} (pq x(t) - c) - \varphi qx(t)] u(t) + \varphi(t) f(x) \end{aligned} \tag{23}$$

(23) 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：

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \tag{24}$$

$$H[x(t), t, u(t); \varphi(t)] \equiv \max_{u \in U_t} H[x(t), t, u(t); \varphi(t)] \tag{25}$$

(24)~(25) 式為最適控制之必要條件 (Necessary condition)，其中 (24) 式之微分方程式又稱為 adjoint 方程式或稱為 Costate 條件 (Hanley *et.al.*, 1997, p.185)；至於 (25) 式之  $U_t$  為一給定之區間

---

<sup>15</sup> 即(21d)式。

(Interval), 稱為控制函數之集合(Control set)。而由(25)式可知, 在每一給定之時間  $t$ , 最適控制之  $u(t)$  值必使得 Hamiltonian 之表示式有最大值(此時  $u(t)$  需滿足控制之限制, 即  $u(t) \in U_t$ ); 假若最適控制  $u(t)$  發生在  $U_t$  之內(i.e., 未受控制函數之限制式所限), 則(25)式意味著滿足:

$$\sigma(t) = \frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (26)$$

(26)式為極值之一階條件(first-order condition), 亦稱為  $u(t)$  之 singular 控制(singular control), 其中  $\sigma(t)$  又稱為 Switching 函數(Switching function)。

則顯而易見的  $u(t)$  必定滿足(27) 式。即:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{whenever } \sigma(t) < 0 \\ U, & \text{whenever } \sigma(t) > 0 \end{cases} \quad (27)$$

由最大化定理, 確保所推得之  $u(t)$  可使得 Hamiltonian, 即(23)式有最大值。所以由(23)及(26)式可推得

$$\varphi = e^{-\delta t} \left( P - \frac{c}{qx} \right) \quad (28)$$

故

$$\frac{d\varphi}{dt} = e^{-\delta t} \left[ -\delta \left( p - \frac{c}{qx} \right) + \frac{c}{qx^2} \frac{dx}{dt} \right] \quad (29)$$

由 adjoint 方程式(i.e., (24)式)可得到

$$\frac{d\varphi}{dt} = -e^{-\delta t} pqu + \varphi qu - \varphi f'(x) \quad (30)$$

將(28)式代入(30)式以消去  $\varphi$ , 可得

$$\frac{d\varphi}{dt} = -e^{-\delta t} pqu + e^{-\delta t} \left( p - \frac{c}{qx} \right) (qu - f'(x)) \quad (31)$$

則由(30)式等於(31)式並配合(p2)之第一個限制式可化簡消去控制變數  $u$ ，並推得

$$f'(x) + \frac{cf(x)}{x(pqx - c)} = \delta \quad (32)$$

又由(27)式知， $u(t)$ 之控制若不是 singular 控制<sup>16</sup>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<sup>17</sup>，則必滿足下(33)式之形式。

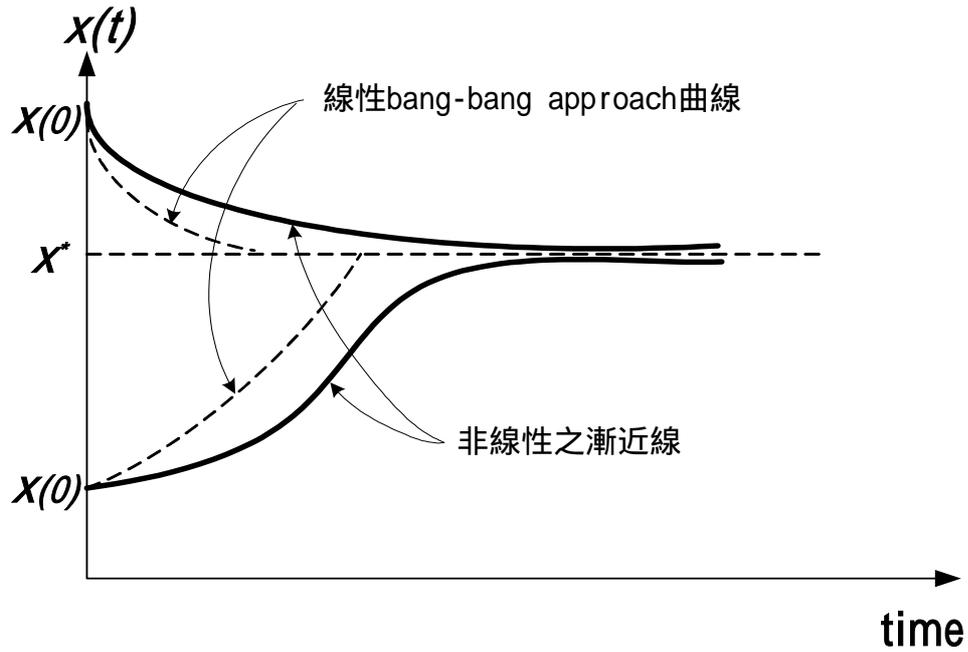
$$u(t) = \begin{cases} U, & \text{when } x(t) > x^* \\ 0, & \text{when } x(t) < x^* \end{cases} \quad (33)$$

(33)式即前述之模式假設 2 中所給定之  $u(t)$  特定形式。此外，(32)式將在下述之推論中用來解析 ARH 模式之參數敏感性分析。至於非線性之捕魚模式亦可推得如此之控制，詳請參見 Mesterton-Gibbons, 1989, p. 119 及 Clark, 1990, 第 2 及第 4 章，茲將線性及非線性捕魚模式下之最佳魚群庫存曲線(Optimal stock paths)  $x(t)$  繪圖如圖三所示。由該圖可清楚發現，當初使狀態魚群之數量小於均衡時之魚群數量(即  $x(0) < x^*$ )，則最適之捕魚策略為不出海捕魚，然當魚群之數量達均衡解( $x^*$ )時，則以最大之出海漁船數量  $U$  進行撈捕，如此將使(p2)之目標函數有最大值。

---

<sup>16</sup> i.e.,  $u(t) = U^* = \frac{f(x^*)}{qx^*}$

<sup>17</sup> 即 MRAP(Most rapid approach path)的問題，請參閱 Kamien and Schwartz(1991, pp.97-100)。



圖三 於線性及非線性捕魚模式下之最佳魚群庫存曲線 (Optimal stock paths)  $x(t)$ :圖示為當  $x(0) > x^*$  及  $x(0) < x^*$  之二可能狀況

資料來源：Clark(1990)

而在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  $\delta$ 、 $\lambda(P, A)$  對決策變數  $U$ 、 $\tau$  之影響。茲分述如下：

第一階段之  $\frac{dU}{d\delta}$  及  $\frac{d\tau}{d\delta}$ ：

利用(32)式可推得：

$$\frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \lambda - qU) - cr_0} - (r_0 - \lambda - 2qU + \delta) = 0 \quad (34)$$

$$\text{令 } \frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \lambda - qU) - cr_0} = f(U, \delta, r_0, \lambda, q, p, c, K) ; (r_0 - \lambda - 2qU + \delta) = g(U, \delta, r_0, \lambda, q, p, c, K)$$

則(34)式可改寫如下之形式：

$$f(U, \delta, r, \lambda, q, p, c, K) - g(U, \delta, r, \lambda, q, p, c, K) = 0 \quad (35)$$

將(35)式對其決策變數  $U$  及參數  $\delta$  全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_\delta - g_\delta)d\delta = 0 \quad (36)$$

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：

$$\frac{dU}{d\delta} = -\frac{(f_\delta - g_\delta)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_\delta + g_\delta}{f_U - g_U} \quad (37)$$

分別計算(37)式中之  $f_\delta$ 、 $f_U$ 、 $g_\delta$  及  $g_U$  如下：

$$f_\delta = 0 \quad (38)$$

$$f_U = -\frac{cqr_0(-pqKr_0 + pqK\lambda + cr_0)}{(-pqKr_0 + pqK\lambda + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (39)$$

$$g_\delta = 1 \quad (40)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (41)$$

其中(39)式可再化簡如下：

$$\begin{aligned} f_U &= \frac{-cqr_0(-pqK)\left(r_0 - \lambda - \frac{c}{pqK}r_0\right)}{(-pqKr_0 + pqK\lambda + pq^2KU + cr_0)^2} \\ &= \frac{cpq^2r_0K(r_0 - \lambda - br_0)}{(\dots)^2} = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - \lambda]}{(\dots)^2} \end{aligned} \quad (42)$$

因此(37)式中， $-f_\delta + g_\delta > 0$ ； $f_U - g_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - \lambda]}{(\dots)^2} + 2q$ ，

其正負情況討論如下：

(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之

大小方能決定。

由 (i)、(ii) 之討論可知：

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

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

另外在此同時，參數  $\delta$  對決策變數  $\tau$  之影響可藉由分析  $\frac{d\tau}{dU}$  而

得<sup>18</sup>；由 (20) 式可知， $(\tau)' = \frac{d\tau(U)}{dU} = -\frac{1}{U(r-qU-\lambda)}$ ，又由 (12) 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：

$$r - \lambda - qU > 0 \quad (43)$$

因此將 (43) 式代回 (20) 式可得  $\tau' < 0$ 。

亦即漁公司進入 MPA 撈捕之時刻  $\tau$  為  $U$  之減函數，所以：

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

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  $\delta$  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

<sup>18</sup> 因為  $\frac{d\tau}{d\delta} = \frac{d\tau}{dU} \times \frac{dU}{d\delta}$

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

變數	參數								參考方程式
	$\delta$	$\lambda$	$\rho$	$A$	$P$	$D$	$p$	$c$	
$U$	+	-	-	+	-	-	+	-	(20) (37)
$\tau$	-	+	+	-	+	+	-	+	(43)

註：“+”：對參數而言，決策變數為一增函數  
“-”：對參數而言，決策變數為一減函數

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」 $\lambda$  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方能決定。

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会有較大之利潤，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会有較大之利潤(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，是較為有利的。

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,  $\frac{d\tau}{dD} > 0$  )，才会有較大之利潤。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  $\tau$  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、結論

傳統上在處理漁業管理之問題，都將魚場視為一密閉系統 (Closing system)，不論是在大洋 (Sea) 中所談的開放可隨意撈捕 (Open access) 的系統或陸地上屬於私有財的養殖戶魚池，所討論的對象皆在此密閉系統內。唯魚礁資源在管理方式介入之際，常需將魚礁區域劃定一明顯之周界以與其他海洋資源有所區隔，一般來說即將投放魚礁之區域視為一海洋保護區 (MPA) 而有不同之應用，因此所劃定管理的

區域則因魚礁之特性<sup>19</sup>而形成一未密閉之系統，此乃由於其存在具可滲透之邊界(Permeable boundary)所致(Buechner, 1987; Stamps *et al.*, 1987)，而該因子亦為決定 MPA 內潛在族群大小的一重要角色(Schonewald-Cox 及 Bayless, 1986)。因此本研究將此項邊界條件的影響納入 ARH 模式之考量中，以符合魚礁區域管理之實務。

茲將本研究結果摘要列述如下：

1. 最佳之出海漁船數量及時機應為  $r_0$ 、 $D$ 、 $P$ 、 $A$ 、 $c$ 、 $p$ 、 $K$ 、 $q$ 、 $\delta$  的函數；
2. 由於人工魚礁具有可滲透之邊界，因此在撈捕策略之擬定上皆應滿足  $1-b > \frac{\lambda}{r_0}$  始可決定出參數對決策變數  $U$  及  $\tau$  之變化方向；否則，不能直接斷言參數與變數間之關係，因其尚需參考其他參數之大小方能決定。
3. 在參數敏感度之分析方面，可發現在利率較高、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、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。

事實上本文的目標雖為站在廠商(漁公司)的立場以決定出最佳之出海至魚礁區捕魚之漁船數量及時機，亦可稍加修正後適用於政府

---

<sup>19</sup> 亦即魚群僅聚集在魚礁周圍。

之決策，亦即在配額制(Sole ownership)之管理措施下，以核發執照的方式何時，以及可以允許多少船進入該區域捕魚。

至於本研究之貢獻可分述如下三點：

1. 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。
2. 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。
3. 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。

## 致謝

本文承蒙行政院國家科學委員會(計畫編號: NSC 92-2416-H-343-003)補助經費，特此致謝。

## 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. Ambrose, R.F., and Swarbrick, S.A., 1989. Comparison of fish assemblages on artificial and natural reefs off the coast of southern California. *Bulletin of Marine Science*, 44: 718-733.
5. Anonymous., 1968. These lobsters prefer artificial reef as home. *Comm. Fish. Rev.* 30(3): 18-19.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Bohnsack, J. A., Johnson, D. L., and Ambrose, R. F., 1991. Ecology of artificial reef habitats and fishes. In *Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*, Academic Press Inc, New York, pp. 61-107.
10. 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.
11. Buechner, M., 1987. Conservation in insular parks: simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries, *Biological Conservation*, 41:57-76.

12. Clark, C.W., 1990. *Mathematical Bioeconomics : The Optimal management of renewable resources*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York.
13. Collins, K.J., Jensen. A.C., and Lockwood, A.P.M., 1991. Artificial reef project - Poole Bay programme. *Prog. Underwater Sci.*, 16: 75-84.
14. DeMartini. E.E., Roberts, D.A., and Anderson. T.W., 1989. Contrasting patterns of fish density and abundance at an artificial rock reef and a cobble-bottom kelp forest. *Bulletin of Marine Science*, 44: 881-892.
15. Grigg, R. W., 1994. The international coral reef initiative: conservation and effective management of marine resources. *Coral Reefs*, 13: 197-198.
16. Gordon, H. S., 1954. The economic theory of a common property resource: the fishery. *Journal of Political Economy*, 62: 124-142.
17. Hanley, N., Shogren J. F. and White B., 1997. *Environmental economics: in theory and practice*, Hampshire, Macmillan.
18. Heaps, L.M., Picken, G.B. & Ray, S., 1997. Site Selection and environmental criteria - a case study. In *European Artificial Reef Research. Proceedings of the first EARRN conference. March 1996 Ancona, Italy*, ed. A.C. Jensen, pp. 123-140. Southampton Oceanography Centre, Southampton.
19. Hinrichsen, D., 1997. Coral reefs in crisis. *BioScience*, 47: 554-558.
20. Hughes, TP, 1994: Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science* 265: 1547 – 1551.
21. 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.
22. 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.
23. Lok, A., Metin, C., Ulas, A. & Tokac, A., 1998. The comparison of the effects on fish compositions of artificial reef in the two designs off Dalyankoy (Izmir, Turkey): preliminary result. In *European Artificial Reef Research Network (EARRN) Final Report & Recommendations June 1998*.
24. 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.

25. Mesterton-Gibbons, M., 1989. A concrete approach to mathematical modeling. Addison- Wesley publishing company, Inc.
26. Moseley, L., 1961. The use of car bodies as fishing devices. Ohio Department of Natural Resources, Division of Wildlife, Tech. Rep.7pp.
27. Okubo, A., 1980. Diffusion and ecological problems: mathematical models. Biomathematics, Vol. 10. Springer, Berlin.
28. O'Leary, E., Hubbard, T. and O'Leary, D., Artificial Reefs Feasibility Study , prepared for the marine institute, Coastal Resources Center National University of Ireland Cork, ISSN 1393 4643, 2001.
29. 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.
30. Pulliam, H. R., 1988. Sources, sinks, and population regulation. American Naturalist, 132: 652–661.
31. Richmond, R. H., 1993. Coral reefs: present problems and future concerns resulting from anthropogenic disturbance. American Zoologist, 33: 524-536.
32. 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.
33. Schaefer, M. B., 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. Bulletin of the Inter- American Tropical Tuna Commission, 1: 25-26.
34. 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.
35. Seaman, W. Jr. & Sprague, L.C., 1991. Artificial habitat practices in aquatic systems. In Seaman, W. Jr. & Sprague, L.C. (eds.) Artificial habitats for marine and freshwater fisheries. Academic Press, New York. Pp 1-29.
36. 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.
37. Turner, C. H., 1970. Artificial reefs. Ency. Mar. Resource, Ed. by Frank E. Firth.
38. Verhulst, P. F., 1838. Notice sur la loi que la population suit dans son

accroissement. *Correspondance Mathematique et Physique*, 10:113-121.

39. Wilkinson, C. R., 1992. Coral reefs of the world are facing widespread devastation: can we prevent this through sustainable management practices? *Proceedings of the 7th International Coral Reef Symposium, Guam*, 1: pp. 11-21.