

南華大學  
環境管理研究所

碩士論文



研究生：許澤宇

指導教授：陳中獎 博士

中華民國九十三年七月



# 南華大學碩士班研究生

## 準碩士推薦書

本校環境管理研究所研究生 許澤宇 在碩士班修業 2 年，已經完成本所規定之修業課程及論文研究之訓練。

(1) 在修業課程方面 許澤宇 君已修滿 39 學分，其中必修科目：

研究方法、環境規劃與管理、管理理論、環境經濟學

成績及格（請查閱碩士班歷年成績）。

(2) 在論文研究方面：許澤宇 君在學已完成下列 3 篇論文。

論文名稱	擬發表之 期刊名稱	擬(已)發表 年 月	證明 文件	備註
An Approach to Design Spatial Configuration of Artificial Reef Ecosystem	Ecological Engineering		接受函	附件一
人工魚礁永續資源管理之研究	2003 年台灣環境資源永續發展研討會	Dec 19 2003	論文集摘要影本	附件二
人工魚礁資源最適撈捕模式之研究	環境與管理研究	2004 年 6 月	接受函	附件三

本人認為 許澤宇 君已具備南華大學環境管理研究所碩士養成教育以及訓練水準，並符合本校碩士學位考試申請資格，特推薦其論文初稿，名稱：

人工魚礁資源最適撈捕模式之研究

以參加碩士資格考試及論文口試。

指導教授：陳中獎 簽章

中 華 民 國 93 年 6 月

論文題目：人工魚礁資源最適撈捕模式之研究

研究生：許澤宇

指導教授：陳中獎 博士

## 論文摘要內容

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。

而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  $\frac{I}{r_0}$ ）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  $t$ ）間之關係。

關鍵詞：人工魚礁，漁業管理，最適控制，撈捕策略

Graduate Institute of Environmental Management, Nan Hua University

Title of thesis: The Study of Optimal Harvesting Strategy in Artificial Reefs Ecosystem

Name of student: Che- Yu Hsui

Advisor: P.H.D. Chung-Chiang Chen

## **Abstract**

The over-harvesting of fishery resources has led to exhaustion of fishery stock around the island. Moreover, the environmental pollution along the coastal line also aggravated the environmental deterioration and consequent resource depletion. Past empirical studies by experimental researches and practical programs find that the artificial reefs (ARs) as a fishery habitat that can change the water flow to improve the environment for fishery. In this case, the construction of ARs in the sea is an effective way to restore the fishery stocks and improve fishermen's income. As most constructed ARs in Taiwan were not taken care of, the service life was much shorter than that in developed countries.

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  $t$ ) 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.,  $\frac{I}{r_0}$ ). 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

# 目錄

論文摘要內容 .....	i
Abstract.....	iii
目錄 .....	v
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	viii
第一章 緒論 .....	1
第一節 研究動機與問題背景 .....	1
第二節 研究目的 .....	3
第三節 研究方法與範圍 .....	4
第四節 研究架構 .....	4
第二章 文獻回顧與人工魚礁現況分析 .....	6
第一節 漁業管理之方法 .....	6
第二節 國內外人工魚礁現況概述 .....	9
第三節 現有之人工魚礁管理方式概述 .....	17
第三章 模式建構 .....	21
第一節 問題陳述 .....	21
第二節 符號說明與模式假設 .....	21
第三節 模式建構 .....	27
第四章 模式求解與參數敏感性分析 .....	29
第一節 模式求解 .....	29
第二節 敏感度分析 .....	34

第三節 討論.....	45
第五章 結論與建議 .....	49
第一節 主要研究結果.....	49
第二節 主要貢獻 .....	50
第三節 後續研究方向.....	51
參考文獻 .....	55
一、中文部分.....	55
二、英文部分.....	55
三、網站部分.....	60
附錄 .....	61
附錄一 美國關於人工魚礁管理之相關法規 .....	61
附錄二 台灣關於人工魚礁管理之相關法規 .....	65

## 圖目錄

圖 1.1 民國 72 年至 90 年沿近海漁業產量統計圖 .....	1
圖 1.2 研究架構流程圖 .....	5
圖 2.1 台灣人工魚礁分布圖(75 年~82 年).....	11
圖 2.2 香港之海岸公園及漁業保護區分布位置圖 .....	13
圖 2.3 香港印洲塘海岸公園、海下灣海岸公園人工魚礁位置圖 .....	14
圖 2.4 美國南卡羅來納(South Carolina)州人工魚礁分布圖 .....	15
圖 2.5 歐洲人工魚礁分布圖 .....	16
圖 3.1 未進行撈補之際人工魚礁生命週期內之生物族群數量與時間之關係 圖 .....	28
圖 4.1 由最優的 $u(t)$ 控制的 $x(t)$ .....	35
圖 4.2 於線性及非線性捕魚模式下之最佳魚群庫存曲線(Optimal stock paths) $x(t)$ .....	38
圖 4.1 興達港區漁會人工魚礁設置地點相關位置圖 .....	48
圖 5.1 政府立場考量下人工魚礁之經營方式 .....	52
圖 5.2 不同魚種之移動損失率 ( $I$ ) 與 MSA 之邊界條件 ( $r$ ) 之關係圖 .....	53

## 表目錄

表 2.1 漁業資源之管理方法及其效果.....	8
表 2.2 漁業管理工具之比較 .....	9
表 4.1 參數敏感性分析摘要表 .....	45

# 第一章 緒論

## 第一節 研究動機與問題背景

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；台灣雖然四面環海，然在過去幾年，由於缺乏有效資源管理，漁民濫捕，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（圖 1.1）。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。

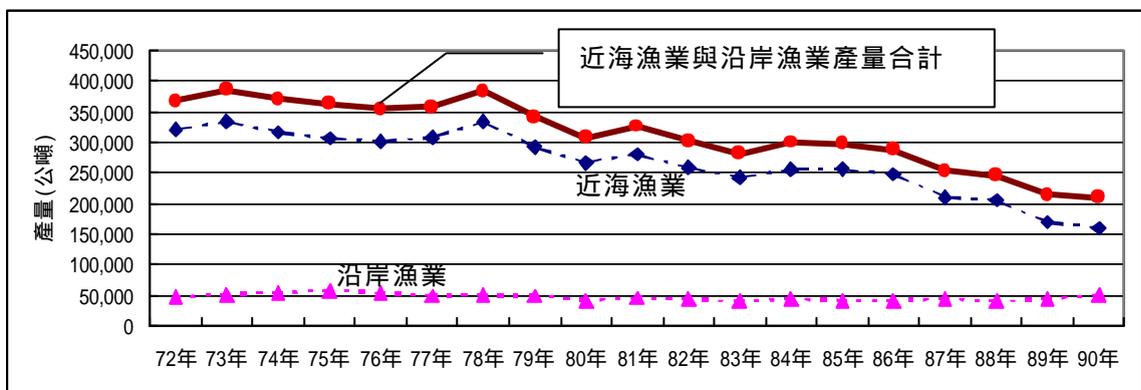


圖 1.1 民國 72 年至 90 年沿近海漁業產量統計圖

資料來源：行政院農委會漁業署漁業年報資料，2002。

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; 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)。

由此可知，人工魚礁之投放確為一良好之水域漁產資源復育方式，因此，人工魚礁之建置對漁業資源枯竭問題實有相當顯著之改善。然而，我國在過去已投放許多人工魚礁<sup>1</sup>，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<sup>2</sup>，殊為可惜。

由於人工魚礁可以設置地區大都屬於近海或沿海地區，由政府管轄，民間非經過許可，無法自行設置；然為增進產量培育魚類資源，由政府機關大力投

---

<sup>1</sup> 台灣省漁業局自六十三年起至九十年止，共計於台灣地區沿近海域設置人工魚礁區七十九處，製作投放各型人工魚礁十六萬六千三百七十二座 (朱承天, 2001)。

<sup>2</sup> 鄭等 (1992) 將台灣投放人工魚礁之情況作了全盤之研究，據該研究指出在民國 75-80 年間，全台已投放人工魚礁有 42 處，已做調查之魚礁已有 27 處，調查的魚礁中有 17 處發現沙埋現象，有 3 處語焉不詳，僅有屏東、台東、澎湖、新竹南寮魚礁區等 5 處魚礁區現況良好。綜觀之，在台灣西部砂質之海域，投放人工魚礁，雖有良好之集魚效果。然而在五年內人工魚礁區遭 砂埋沈陷者少則 1/10，多則全部埋沒。另外，在國外的經驗方面，根據 Turner (1970) 之研究，人工魚礁若有好的管理，則其壽命可長達 20 年。

資所設置之人工魚礁，才不過是近數十年前才興起的事(Sheehy,1981;Chang and shao,1988;Nakamae, 1988)。因此，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。人工魚礁應設置多大產量，台灣沿海地區應設置多少人工魚礁，才符合經濟規模，並讓大多數漁民享用，可以說是政府應優先考慮的問題。其次，雖然利用人工魚礁可以提高漁業產量，但是，亦有些研究發現有負面的效果，如 Buchanan(1974)發現，若較高之漁獲努力使用於人工魚礁區，其單位努力漁獲量會隨著時間降低；亦即，人工魚礁如果沒有適當的管理，反而會引起過度捕撈；誠如 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。茲詳述如下。

## 第二節 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捕撈時機與數量。詳細言之，本研究之主要研究目的包含：

1. 建構一符合人工魚礁生態之撈捕模式。
2. 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。
3. 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。

### 第三節 研究方法與範圍

本研究所討論的對象為人工魚礁生態系統之最適撈補策略，該撈補策略擬就當魚礁為私有財之情況針對擁有人工魚礁撈補權之廠商(即漁公司)來討論其撈捕時機及派遣出海撈補之漁船數量，以獲得最大之經濟效益。由於人工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<sup>3</sup>。因此本文所提出之人工魚礁撈補模式(Artificial Reef Harvesting Model, 簡稱 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(Optimal control theory)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。

### 第四節 研究架構

本研究擬透過對人工魚礁生態系統特性之了解，建構一以漁公司為立場，

---

<sup>3</sup> 該特性與傳統之漁業管理所談的系統有很大的不同，因為傳統之漁業管理所討論的系統屬於密閉系統，魚群

目標為撈捕經濟效益最大之人工魚礁撈捕模式(詳第三章), 在第四章中, 本研究嘗試利用 MRAP(Most rapid approach path)的方法(詳 Kamien and Schwartz, 1991)簡化原屬動態之決策變數並得出最佳解之形式; 隨後並針對參數之變化影響最佳解之性質予以計算。第五章中則討論了前述參數敏感度分析中, 最適之撈捕策略, 最後總結本研究之貢獻及說明未來之研究方向於第六章中。詳細之研究架構流程圖請參閱圖 1.2 所示。

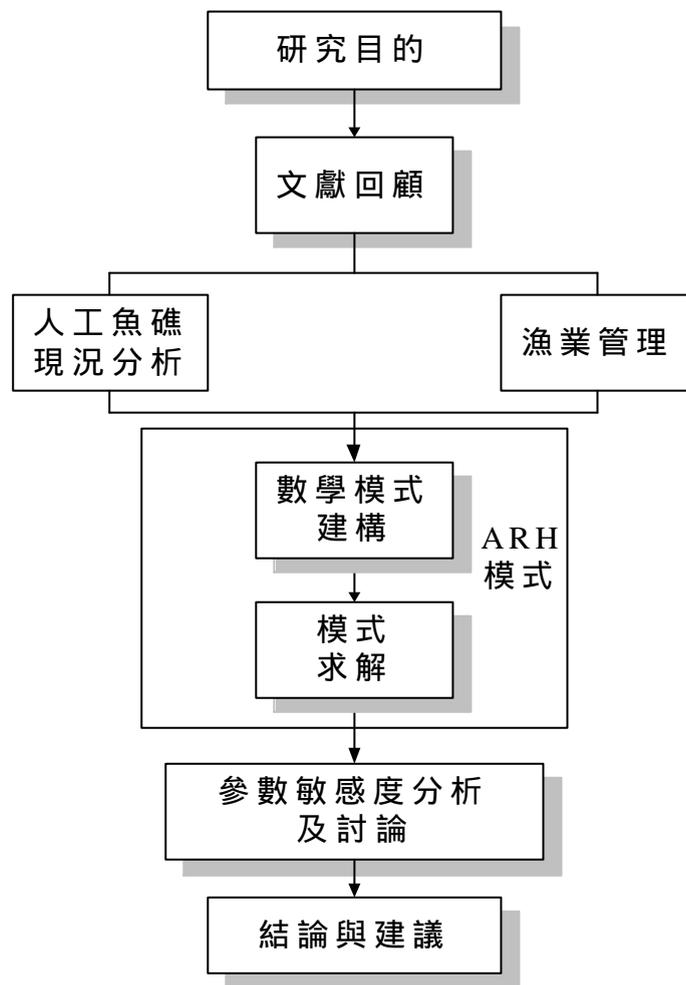


圖 1.2 研究架構流程圖

並不會離開該系統; 然人工魚礁生態系統內之魚群則可能因遷徙而進出該系統。

## 第二章 文獻回顧與人工魚礁現況分析

### 第一節 漁業管理之方法

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。據菲律賓過往的經驗，顯示在開放自由捕魚形式下投放人工魚礁確能導致資源過度捕撈（香港人工魚礁計畫，2002）。漁業管理係指「為適當從事漁業生產活動所採取之任何措施」。漁業管理之最終目的即為透過管理之措施以保護（或培育）水產資源，藉以達到「永續」增加漁業所得之最終目的。此一議題之基本想法可朝兩方面進行，一為如何增加漁業所得，亦即增加漁業資源的成長，二為如何達到永續經營，亦即藉由適當的管理，不要過渡捕撈，以減少資源的快速枯竭。如果以漁業資源管理為分析基準，其管理措施可區分為控制輸出(Output)觀點之管理及控制輸入(Input)觀點之管理；其區分之概念即前者允許「任何人」皆可自由利用漁業資源，亦即允許自由加入（Open access），故通常根據「最大持續生產量」（Maximum sustainable yield, MSY）訂出「總可捕獲量」（Total allowable catch, TAC），亦即其漁業管理之措施係採總量管制為原則，以控制 Output 為主要觀點，在未達 TAC 之前，開放自由競爭，達 TAC 之後則全面禁漁，該管理觀點係目前歐美國家所慣用之漁業管理方式；至於後者僅允許「特定人」可以利用漁業資源，亦即在 Input 上即已限制加入（Limited entry），故其漁業管理之觀點採漁業「許可制度」，藉此控制漁獲努力量，另外由於其一開始就限制漁船作業總艘數，但並未限制其個別漁業配額，此為現行控制 Input 觀點之管理特點，亦是亞洲國家較常使用之漁業管理措施。

以上的管理方式都為對漁業資源運用過程對生態所產生的負面加以考量，如果考量生態衝擊，則漁獲觀點之限制：又可依漁獲之質（Quality）及量（Quantity）加以管理，在漁獲質方面之管理為「漁獲體長之限制」，亦即撈補 50 公噸的大魚和撈補 50 公噸的小魚其在生態上之意義是不同的。而在漁獲量方面之管理則為「漁獲努力量<sup>4</sup>之限制（或削減）」及「漁具、漁法之限制」。依上述永續漁業管理之觀點，可依管理方法之屬性將現行漁業管理之措施區分為總量管制、限制加入及技術控制（如表 2.1）。

Gordon(1954) 最先針對漁業資源的運用提出討論，並創立模式提出 MSY(Maximum sustainable yield)理論。後來，許多學者依據此一理論提出各種不同漁業管理方式，依其特性作比較與考量，大致可分三種漁業管理方案：課稅制（Tax measure）、漁業許可制度／執照（Fishing license）、以及配額制（Sole ownership）。

如上所述，傳統上所使用的管理工具，無非利用課稅方式，或管制方式，規定使用者付費或按照政府所擬定的現實限量標準進行捕撈，只考慮經濟層面，並未考慮社會上或生態上的影響。因此，如何制訂適當的管理策略，顯得必要。一般來說，人工魚礁是由政府設置，因此，人工魚礁可以視為一種公共財，政府在制訂漁業管理策略時，除了要考慮經濟效益之外，同時也應將社會的需求納入考慮。

---

<sup>4</sup> 漁獲努力量(Fishing Effort)有二定義：一為「名目漁獲努力量」(Nominal Fishing Effort)，係指投入於漁業開發上所有人力與物力之總和，通常以貨幣或實體為計量單位；另外則為「有效漁獲努力量」(Effective Fishing Effort)，意指魚類之死亡係因撈補所引起的實際捕撈漁獲量，或稱之為「漁獲死亡量」(Fishing Mortality)。通常一區域之魚群數量推估，皆是以此漁獲量來衡量，表示平均魚群數量被漁獲之比例。該二名詞都是用來測量漁獲數量的大小，但前者嘗試將引起漁業活動之因子量化，後者則欲討論漁業所帶來之衝擊（陳清春、莊慶達，2001：46）。

表 2.1 漁業資源之管理方法及其效果

管理方法/內容			增加或維持 資源量	提高及維持 商品價格	削減漁 業成本
漁具、漁法					
總量管制	漁獲量	總漁獲量 (TAC)		-	-
		個別配額 (IQ、ITQ)			
限制加入	漁獲努力 量	艘數		-	
		漁船規模、馬力		-	
		漁具規模		-	
		出漁天數		-	
		作業時間			
技術性控制	漁獲體長	網目規格			
		體長限制		-	-
	漁期、漁 場	漁期限制			
		漁場規劃		-	-

註：1.效果大小：（大），（中），（小）

2.資料來源：日本水產廳（2000）

「不同的管理方式有不同的施行效果，通常漁業國家大都採混合式之管理，很少有國家只用上述之中的單一管理制度(詳表 2.2)，來對其漁業做管理。而且在主要的漁業管理制度下，為彌補某些管理上的不足，再一定的範圍內亦會建立一些限制，如『禁漁期』、『禁漁區』及『漁具限制』等，這些均是漁民較容易接受採用的間接管理方式，但是此方法對於水產生物資源的影響，很

難加以評估。所以大多作為漁業管理的輔助工具。檢視這些國家對外部行為的解決方法，可看出不同的方式有不同程度的效果，以及隱藏著施行上不同的困難」（陳清春、莊慶達，2001：305）。

表 2.2 漁業管理工具之比較

管理工具	管理工具的比較		
	性質	干預策略	施行國家
✓ 限制採捕漁獲量制度			
總配額制	限制漁獲量	行政管制	冰島、美國、澳洲、紐西蘭、加拿大等。
個別配額制	限制漁獲量	行政管制	英國、澳洲、日本、南韓、台灣等。
✓ 執照制度	限制努力量	行政管制	
✓ 財政方式的管理制度			
使用費	限制努力量	經濟誘因	泰國、馬來西亞。
漁業稅	限制漁獲量	經濟誘因	菲律賓等。
津貼	限制努力量	經濟誘因	台灣、南韓等。
✓ 財產權制度			
使用權、漁業權	限制漁獲量及努力量	行政管制	日本、南韓、台灣等。
各別可轉讓配額	限制漁獲量及努力量	行政管制及經濟誘因	紐西蘭、加拿大等。
✓ 間接方式的管理制度	限制漁獲量	行政管制	一般國家

資料來源：陳清春、莊慶達（2001：305）

## 第二節 國內外人工魚礁現況概述

人工魚礁的歷史源遠流長，在晉朝的古籍《爾雅》一書中就有我國漁民“投樹枝壘石塊於海中誘集魚類，然後聚而捕之”的記載。這是人工魚礁的原始形

式。近代人工魚礁建設逐漸發展成一種產業，一般傾向認為始於日本。二次大戰前的規模較小，後來由於遠洋漁業發展急速，沿海漁業因而停滯不前。日本政府乃開始大力推行人工魚礁計畫，包括投石、爆破岩礁、投放水泥礁及廢船等。從 1952 年起，正式實施五年計畫，擬定政策，大量構築水泥礁體，在 1952 1961 年間共投資十四億八千多萬日圓。1962 1970 年間投資八十九億五千多萬日圓(邵，1979)。到 1976 年，由於世界各國企圖將經濟水域擴張為二百海浬，日本更急於對其沿海漁場擬定長期開發整備計畫，準備從 1976 年起的七年中投資二千億日圓，從事魚礁漁場、增殖場、養殖漁場的設置以及漁場環境的維護措施。其中每年均投資數十億於水泥魚礁之構築和投放方面。此外，日本並於 1975 年頒佈了《沿岸漁場整修開發法》，使人工魚礁的建設以法律的形式確定下來，保障了產業的持久發展。

近 20 多年來世界各地諸多沿海國家都投放了人工魚礁，在亞洲有中國、臺灣、日本、韓國、馬來西亞、新加坡、印度尼西亞、菲律賓、泰國、印度；歐洲有英國、法國、義大利、德國、葡萄牙、荷蘭、芬蘭、羅馬尼亞、波蘭、俄國、土耳其、希臘；美洲有美國、墨西哥、加拿大；大洋洲有澳大利亞等。可見，在近海敷設人工魚礁的做法在世界沿海國家中已相當普遍。這種趨勢的形成，與 70 年代以來國際海洋管理體制的變化和人們對海洋生態環境的保護意識不斷加強有密切關係。

由此可知，設置人工魚礁改善漁場環境培育資源，已是國際上傳統漁業國家，所採行積極有效的手段。茲將台灣、香港、美國及歐洲之人工魚礁發展概況說明如後。

### 一、國內人工魚礁概況

根據文獻之記載(邵廣昭, 1979), 台灣人工魚礁最早見於屏東、林邊一帶, 係光復初期當地縣政府在林邊外海設了 358 個空心水泥礁, 結果該區延繩釣及一支釣漁獲增加甚多。民國五十九年農復會亦曾在苗栗外海, 後龍、泊地一帶投放少數人工魚礁, 據當地水產股報告, 魚類有顯著增加現象。民國六十二年由於近沿海漁業資源日益減少, 遠洋漁業發展受限, 政府乃在加速農村經建計畫中, 增列設置魚礁、培育資源之工作。

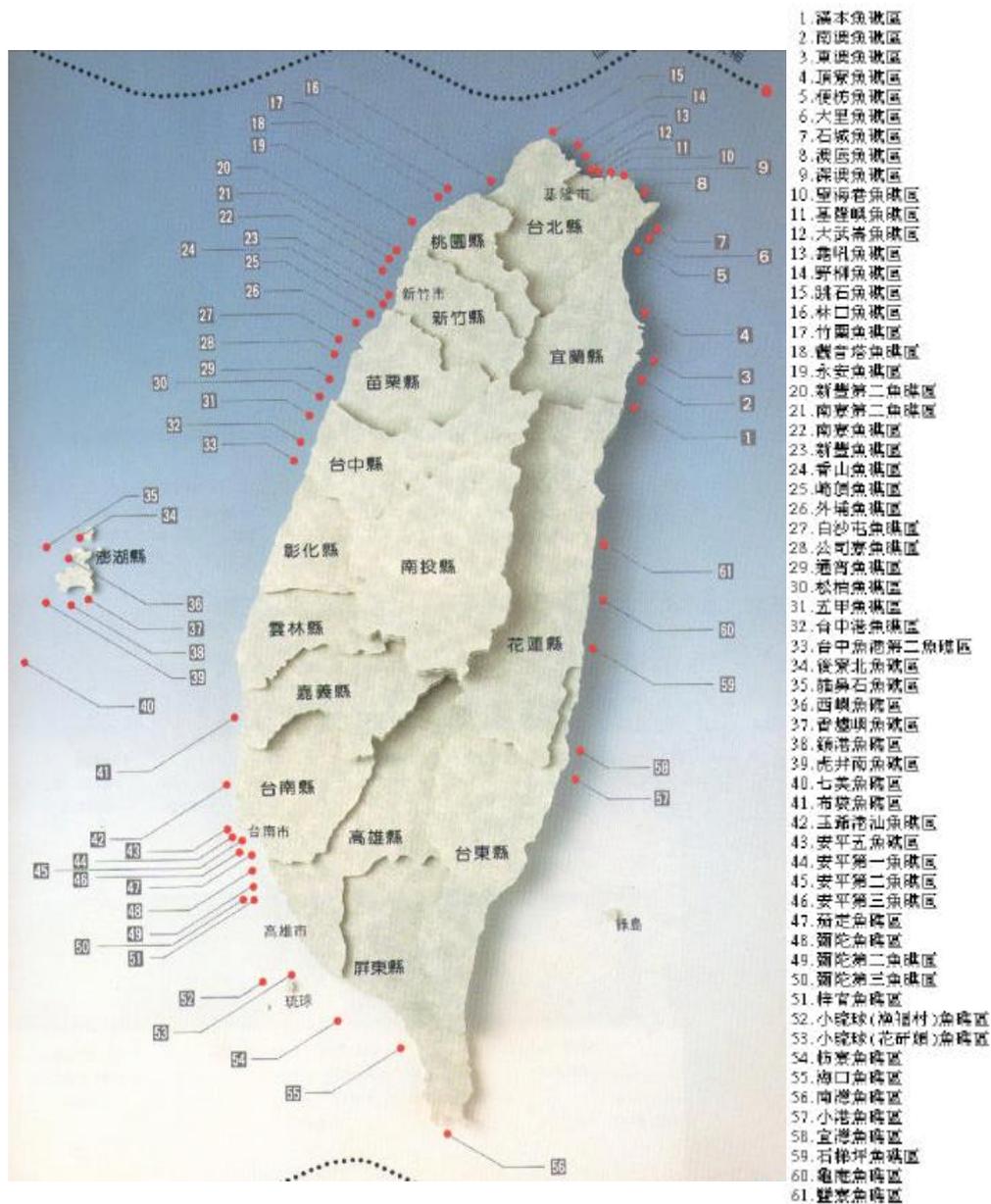


圖 2.1 台灣人工魚礁分布圖(75 年~82 年)

資料來源：台灣沿岸漁業及漁場環境資料庫

計畫執行初期從六十二年七月至次年六月，漁業局委託私立中國文化學院負責地點勘察工作，是為魚礁工作有試驗調查性質的開始。從六十三年八月起，魚礁規模日益擴大。中央研究院動物研究所接受農復會委託，負責投放地點之勘察與效果調查的工作；藉完整與科學化的調查，客觀評估魚礁投放的經濟效益，期使本省設置魚礁的工作能正確推動。投放過的各種礁體包括廢胎、廢車、汽油桶、浮竹筏、廢船、廢電線桿、廢軍艦及鋼筋混凝土礁等。投放地點也遍及沿海縣市十八個不同的地區(詳圖 2.1)。迄民國 90 年為止之統計資料(朱承天, 2001), 於台灣地區沿近海域共計設置人工魚礁區 79 處, 製作投放各型人工魚礁十六萬六千三百七十二座, 對漁場的更新改造、防止漁場老化及提高沿近海域之基礎生產力, 確已發揮明顯助益。

### 二、香港人工魚礁概況

根據調查指出，香港的漁業資源已到了過量開發的地步(ERM, 1998)。高價魚愈來愈少，現存的多是體型較小而價格較低的魚。在現時的捕撈壓力下，重建香港漁業是一項重大的挑戰。因此香港漁農自然護理署(Agriculture, Fisheries and Conservation Department(AFCD))於 1995 年 7 月宣佈撥款港幣一億零八佰萬元，進行為期五年的人工魚礁計畫(Wilson *et. al.*, 2002)，旨在增強香港漁業的繁衍和促進香港海洋生物的多樣化，而專責推行這個計畫的人工魚礁科亦於 1996 年 6 月成立。合計該計畫連同其他設置項目共投放 168,700 立方米的舊船、混凝土、礦石和輪胎人工魚礁。因為人工魚礁已被公認有促進大量不同種類的海洋生物的繁殖和成長能力。因此，透過人工魚礁之設置以促進漁業資源是一個極佳的方法，尤其適用於增加岩岸魚類，因牠們多受到香港四周海床平坦、生態環境的限制而影響其數量和種類。AFCD 的人工魚

礁計畫是分兩期實施的。第一期計畫是在現有的海岸公園範圍內設置人工魚礁，而第二期的計畫，則在海岸公園範圍以外的地點設置。

第一期計畫已經在 1998 年初開始，20 艘經過小心處理的舊船已沉放於海下灣及印洲塘兩個海岸公園內作為人工魚礁。在同年七月至九月期間，在上述兩個海岸公園的八處地點設置了 216 座輪胎魚礁。於 1999 年九月在印洲塘海岸公園的兩處地點敷設了 131 座混凝土魚礁組件包括球狀魚礁和 8 座礮石魚礁。第一期的計畫亦告完成。

在海下灣及印洲塘兩個海岸公園內開設人工魚礁區不久，已有充分的證據顯示它們已開始達到預期的目標。所有設置好的人工魚礁表面都長滿大量的無脊椎動物，品種包括藤壺、貝類、管蟲、苔蘚和被囊等。多種高價魚的幼魚已建立顯著的社群，包括六種鯛魚及三種細鱗/頭鱸魚。此外有少量的石斑幼苗和大條的魚經已在若干人工魚礁定居。在香港人工魚礁區內已有超過 130 種魚類出沒的記錄(Wilson *et. al.*, 2002)。

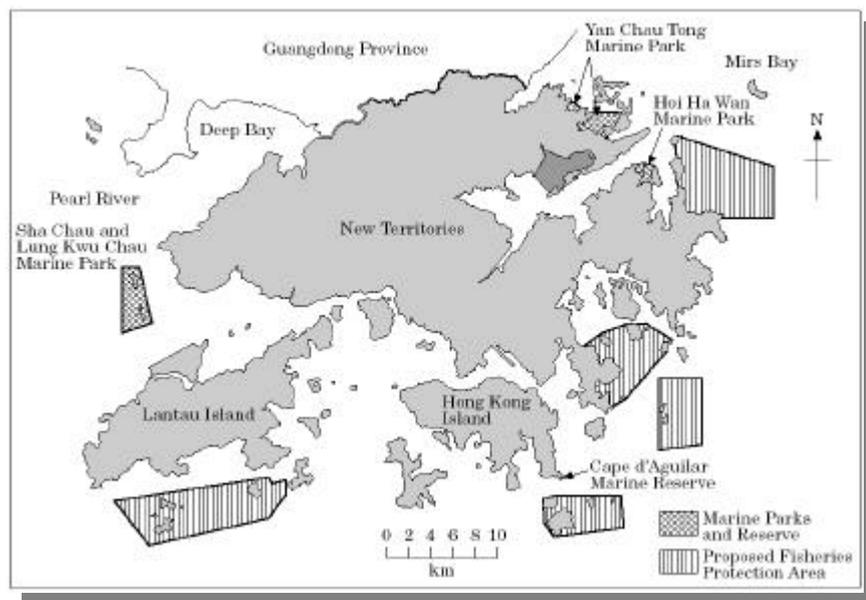


圖 2.2 香港之海岸公園及漁業保護區分布位置圖  
資料來源: Wilson *et.al.*, 2002

另外，AFCD 亦針對第二期設置人工魚礁的地點及管理策略進行為期一年的「人工魚礁敷設研究」業已完成，並就研究所得的建議進行了廣泛的諮詢。其結論為建議在外牛尾海及大灘海的水域設置人工魚礁並劃定為禁止捕魚區。魚礁之設置工作已於 2001 年九月展開，預計於 2003 年中完成。有關香港之海岸公園及漁業保護區分布位置圖詳圖 2.2~圖 2.3 所示

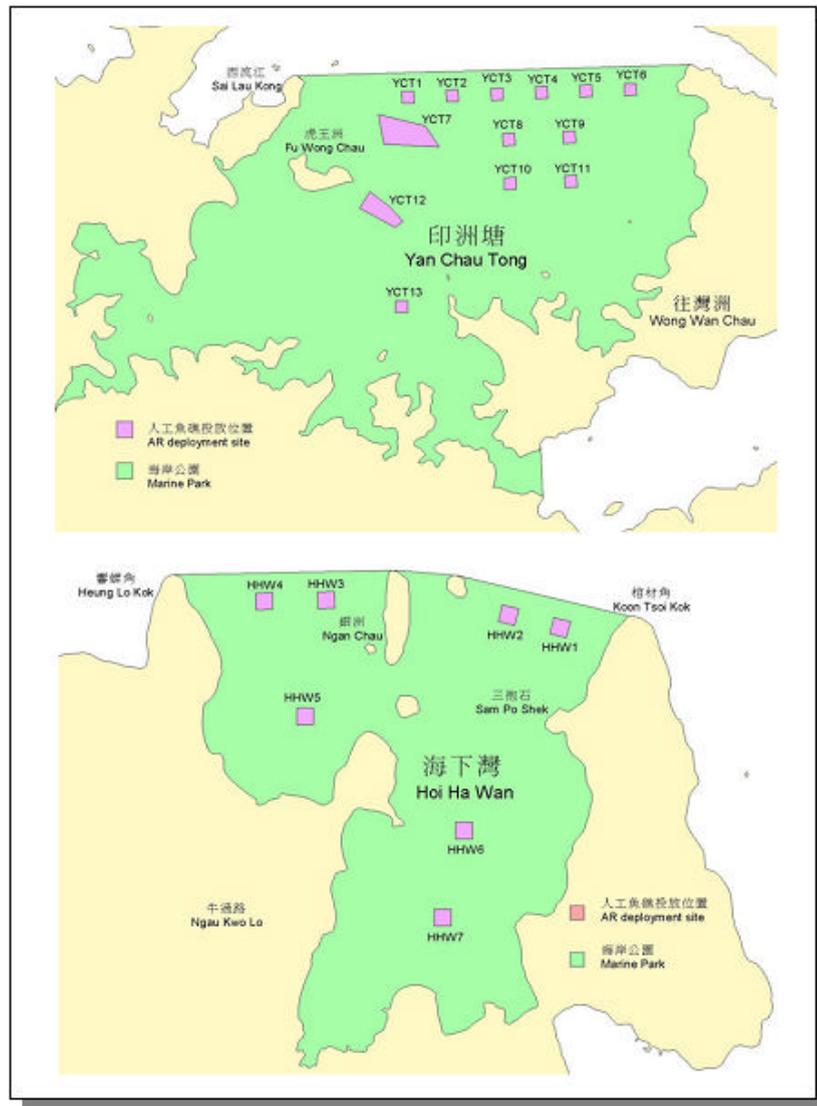


圖 2.3 香港印洲塘海岸公園、海下灣海岸公園人工魚礁位置圖

資料來源：香港人工魚礁計畫，<http://www.afcd.gov.hk/fisheries/fish.htm>

### 三、美國及歐洲人工魚礁概況

美國的人工魚礁的歷史也可以追溯到 1860 年，人們利用砍下的樹木投入水中來誘集一些魚類。此後 1916 年到 50 年代，民間的一些釣魚協會或俱樂部亦不斷自力斥資在其沿岸投放各種魚礁來增進遊釣事業。直到 1955 年起，才有許多地方性漁會組織設置較小型的魚礁來增進當地的漁產量，由於他們缺乏州和聯邦政府的技術協助，多半都半途而廢，無法得到最大的效果。因此政府當局才開始正式從事人工魚礁的有關研究，其中 Randall(1963)、Stone(1974)及 Turner(1970)等人作過許多試驗研究，皆證實人工魚礁確有增進漁業資源的功效。因此在近十年來許多州的政府才開始有設置魚礁的計畫，並正式向國會提出議案，將人工魚礁設置計畫列入立法，有計畫地大規模推動。



圖 2.4 美國南卡羅來納(South Carolina)州人工魚礁分布圖

資料來源:<http://www.dnr.state.sc.us/marine/pub/seascience/reefloc.html>

以南卡羅來納州(South Carolina state)來說，1973 年的人工魚礁計畫是海  
人工魚礁最適撈捕模式之研究

洋資源處之漁業管理計畫之一，至 1996 年已沿著南卡羅海岸建設有 38 處人工魚礁(詳圖 2.4 所示)，其位於水深 9-110 呎，並且從近岸設至遠離海岸 35 英哩之離岸；至於所設置之人工魚礁大小規模小至個別單獨之礁體投放大至可到一堆為 1 平方英哩之面積大小。在投放之場址選擇上，則皆投放於平坦之砂質底床，並考量使用者進入之方便性，該投放人工魚礁之區域大抵皆利用浮標明確標示出該特定區域以避免可能之衝突發生。

至於歐洲之人工魚礁則肇始於 1960 年代後期摩洛哥(Monaco)為保育之目的而投放(Allemand et al., 2000)，迄今，歐洲已投放超過 150 處之人工魚礁(詳圖 2.5 所示)(Jensen, 2002)。另外廣為人知之歐盟人工魚礁研究計畫發起則為芬蘭、法國、希臘、義大利、葡萄牙、西班牙、紐西蘭及英國等八個國家(Jensen et al., 2000)，對歐盟投放人工魚礁之國家來說，其優點為即為成立研究團隊並以合作的方式換取經驗(Jensen, 2002)，這點或許是其他地區國家所應仿效的。

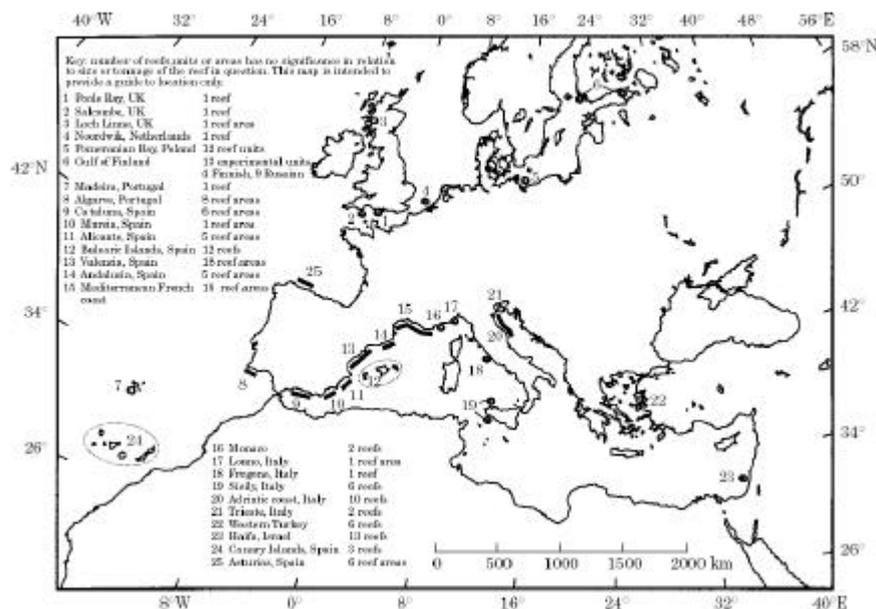


圖 2.5 歐洲人工魚礁分布圖

資料來源：Jensen, A., 2002

### 第三節 現有之人工魚礁管理方式概述

根據歐洲人工魚礁研究工作團隊的報告(European Artificial Reef Research Network (EARRN) AIR3-CT94-2144, 1997)，其建議之人工魚礁區之管理可分為以下三點：

1. 利用傳統之管理模式(如限定區域、撈捕魚種或漁法)來控制捕魚；
2. 以核發捕魚執照(透過扣稅或分發配額的方式)始能於魚礁區捕魚之方式控制撈捕；
3. 政府可以以資源開發之方式提供魚礁區之財產權給某些人並收取適當的費用(亦即將原本為公共財之魚礁區轉成私有財的方式來經營管理)。

事實上，前述之管理方式可簡單區分為兩類，即一為以金錢為衡量之管制方式，如方案 2、3；另一則為非金錢之控制方式，亦即本章第一節中所述為彌補某些管理上的不足，在一定的範圍內所建立的一些限制；換言之，該管理方式均是漁民較容易接受採用的間接管理方式。

此外，根據香港人工魚礁計畫研究報告，其建議之人工魚礁區之管理方式則較為具體，可區分為以下三方案：

1. 劃定不可撈捕之海洋特別保護區(Marine Special Area, 簡稱 MSA)，而於 MSA 內完全禁止捕魚(No-take MSA)，該方案之實施與以下方案 2、3 比較可使得漁獲之存量能有明顯之復育效果；
2. 在 MSA 內劃定限制撈捕之區域(Limited Access Zones, 簡稱 LAZs)，至於 LAZs 僅開放給擁有捕魚執照的漁民使用；

3. 在 MSA 內包含可撈捕之魚礁區 (fishable reefs) 及 LAZs。

事實上，以香港之人工魚礁計畫來說，第一期計畫的人工魚礁設置於海岸公園內，而其所採行之管理方式係以上述之方案 2 為主，亦即在海岸公園內捕魚須領有執照，這執照只發給在附近生活的漁民，在投放人工魚礁前，經已與各持有執照的人達成自願性質的協議，不在人工魚礁範圍捕魚(簡言之，在海岸公園內雖投放有人工魚礁，但投放魚礁之區域內禁止捕魚，僅能於魚礁區之外捕魚，且僅開放給領有執照的漁民使用)。至於第二期人工魚礁區的管理，則計畫會將外牛尾海及大灘海的人工魚礁區劃成為未來的漁業保護區的一部份，並以「禁捕區」形式來管理。

不可諱言，人工魚礁之管理已為人工魚礁研究課題中重要的一環<sup>5</sup>(Baine, 2001)，在世界之潮流趨勢下，大部分先進國家皆已體察人工魚礁管理之重要性，並頒布相關管理辦法及配套法規(如附錄一)，以落實人工魚礁之管理；反觀國內，目前僅在漁業署之漁政管理工作手冊上登載相關之管理方式(詳附錄二)，遑論進一步之施行與落實。

以該管理手冊第五章：漁業資源保育與管理，第一節第三項第二款及第三款之規定，可發現目前現階段之管理措施其可行性及配套措施不足。茲摘錄該二款如下：

「二、限制事項：使用網具類之漁船不得進入礁區作業。」

「三、管理措施之執行：由管理機關執行礁區之巡邏任務，維持礁區正常使用，並依漁業法及有關公告事項，取締非法捕魚等行為。如礁區位於專用漁業權範圍內時，亦得輔導該區漁會或漁業生產合作社執行管理措施。」

---

<sup>5</sup> 根據 Baine(2001)的研究指出，目前人工魚礁之研究重點應著重在人工魚礁之設計、人工魚礁之選址及人工魚礁之管理三方面。

然「為防範各型拖網漁船進入沿岸三海浬內作業，早自民國 79 年起，相關單位即陸續製作 2.6m 十字型水泥礁，投放於各縣、市政府選定之海域上。然以台南至高雄沿海之勘驗，傳統保護礁由於易沈陷致成效不彰。另外，雙拖漁船<sup>6</sup>和流刺網漁船<sup>7</sup>之非法漁撈方式，在保護礁無法發生功能之情況下對魚礁區造成極大之破壞，復育魚群更不如預期中之理想」(財團法人漁業技術服務社，2000)。該項事實說明了法規執行面上之可行性所內涵之隱憂：即管理機關是否有足夠之人力及資金投入礁區之巡邏？抑僅是規劃面可行然執行面卻可能面臨抓襟見肘之窘向。其次，雖然在魚礁之投放設置上有考慮設置保護礁以為因應拖網漁船之非法漁撈方式，然魚礁區之規劃佈置卻可能因缺乏全盤之考量，僅依地區性之需求，而非考量魚礁區之全程水產經營而至成效不彰

此外，該管理手冊第四款亦明定成效評估之方式，亦即需由管理機關定期進行礁區之漁業資源調查及投放魚礁之成效評估；唯根據鄭等(1992)對台灣投放人工魚礁之情況所作之全盤調查研究指出，在民國 75-80 年間，全台已投放人工魚礁有 42 處，已做調查之魚礁僅有 27 處，調查的魚礁中有 17 處發現沙埋現象，有 3 處語焉不詳，僅有屏東、台東、澎湖、新竹南寮魚礁區等 5 處魚礁區現況良好。另外，李玲玲(1999)亦曾指出，雖有上述數據，但目前台灣在保育區與人工魚礁對維護漁業資源具體成效上仍缺乏該些之量化資料，其中人工魚礁效益之評估部分，雖有多篇個別調查研究報告，但調查方法與結果表現方式不一，無法確實比較評估。

<sup>6</sup> 此處之雙拖漁船係指中小型拖網船，其定義為：「使用動力漁船一艘或二艘按照單船拖網或雙船拖網漁法作業者」。(行政院農業委員會漁業署，中華民國臺灣地區漁業年報統計項目定義，2002)。

<sup>7</sup> 係指刺網漁業(包括流刺網)，其定義為：「使用動力漁船將網橫遮水流，以待魚群刺上漁網而捕獲之作業」。(行政院農業委員會漁業署，中華民國臺灣地區漁業年報項目定義，2002)。

綜觀之，在台灣西部砂質之海域，投放人工魚礁，雖有良好之集魚效果，然而在五年內人工魚礁區遭 砂埋沈陷者少則十分之一，多則全部埋沒(鄭等，1992)；因此不論是上述所言之非法漁撈所導致之礁區滅亡或設計選址上所導致之魚礁沉陷，台灣之人工魚礁整體而論其服務壽命與國外的經驗相比較上<sup>8</sup>，實有著相當大之差距。此外，根據 Buchanan(1974)的研究發現，若較高之漁獲努力使用於人工魚礁區，其單位努力漁獲量會隨著時間降低；亦即，人工魚礁如果沒有適當的管理，反而會引起過渡捕撈；Liao 及 Cupka ( 1979 )的研究亦指出，人工魚礁區比天然礁區更容易發生過漁之情況。因此，如何有效提昇人工魚礁之服務壽命，以提供較大之經濟效益，實為在人工魚礁研究領域上刻不容緩之課題。

---

<sup>8</sup> 人工魚礁若有好的管理，則其壽命可長達 20 年(Turner, 1970)。

## 第三章 模式建構

### 第一節 問題陳述

如同前章所述，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，即政府可以以資源開發之方式提供魚礁區之財產權給某些人並收取適當的費用(亦即將原本為公共財之魚礁區轉成私有財的方式來經營管理)；換言之，即將該 MPA 之撈補權利開放給民間競標，然標得該撈補權利之漁公司，在 MPA 撈補之際尚需符合政府保育之目標，亦即在進入 MPA 撈捕後，該漁場內之魚群數量應至少維持一常數保育量( $x_c$ )不變。因此，本研究擬就漁公司之立場<sup>9</sup>，對漁公司而言，於管理該 MPA 之際，其所需決定的是：什麼時候應該開放其所屬之漁船出海至 MPA 撈補，即進入撈補之「最佳時刻」為何？另外，所應進入 MPA 撈補之漁船數量為何？當決定出進入於 MPA 撈補之「最佳時刻」及出海之「最佳漁船數量」後，對漁公司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。

### 第二節 符號說明與模式假設

茲將本模式所使用到的符號及模式之假設分述如後：

---

<sup>9</sup> 本文所討論者，係漁公司之營運管理，即討論何時派遣漁船出海捕魚及派出多少漁船，事實上，此部份本文並未涉及該漁公司之最佳投資策略，即未討論漁公司標的政府 MPA 之成本，關於漁業資源之撈補最佳投資策略進一步可參閱 Clark(1990)第四章。

## 一、 符號說明

參數部分：

$A$ ：保護區(亦即投放人工魚礁之區域)之面積

$B$ ：代表某一族群之出生率 ( birth rate ) ， 與族群之數量  $x$  成比例

$c$ ：每艘漁船出海捕魚單位時間所需之費用

$D$ ：族群擴散係數，根據研究，該值乃與物種之移動速率成正比，亦即不同魚種由於其游泳能力(速度)的不同，因此  $D$  值會有所不同

$K$ ：環境之負載能力( Environmental carrying capacity ) 或飽和度( Saturation level )，我們假設其與人工魚礁區設置之邊界條件  $r$  有關，因此  $K = K(r)$

$m$ ：該族群之自然死亡率 ( mortality rate ) ， 與族群之數量  $x$  成比例

$P$ ：保護區(亦即投放人工魚礁之區域)之週長

$p$ ：所撈捕之魚量其出售單價

$q$ ：每艘漁船單位時間之撈捕率

$h$ ：  $h(u, x) = qu(t)x(t)$ ，單位時間之總撈捕量

$b$ ：  $b \equiv \frac{c}{pqK}$ ，亦即費用與價格比的下限

$R$ ：單位時間漁公司之獲利

$r$ ：  $r(x) = B(x) - m(x)$ ，魚群之淨成長率

$r_0$ ：實質成長率(Intrinsic growth rate)

$T$  : 在第一階段，即自投礁後魚礁發展至魚礁開始要發生沉陷之時間

$T_D$  : 在未有撈補之際，魚群數量成長至環境負載能力  $K$  之時間點

$T_L$  : 人工魚礁之設置壽命

$x$  : 魚群之數量

$x_c$  : 法定魚群保育數量，本文假設即為  $x^*$ ，即魚群族群保持平衡時之數量，

$$\text{此時 } \frac{dx}{dt} = 0$$

$I$  : 由於未受限之邊界所造成之生物族群損失率，根據研究，該值與受限滲透率 (conditional permeability,  $r$ ) 及族群擴散係數 ( $D$ ) 有關，因此可以表示為  $I = I(D, r)$

$r$  : 受限滲透率，或稱保護區之邊界條件，根據研究，對具遷徙性之物種 (Nomadic species) 來說， $r$  值可以保護區之週長 ( $P$ ) 與面積 ( $A$ ) 之比值來

$$\text{表示，即 } r(P, A) = \frac{P}{A}$$

$f$  :  $f(x) = r(x)x - I(D, r)x$ ，在投放人工魚礁之區域內單位時間之魚群自然增損量

$d$  : 折現因子 (Discount rate)

決策變數：

$u$  : 出海進入 MPA 撈捕之漁船數量；至於  $U$  為漁公司之最大可出海進入 MPA 撈捕之漁船數量， $U^*$  為漁公司之最佳出海進入 MPA 撈捕之漁船數量

$t$  : 開放漁公司之漁船進入 MPA 撈捕之時間點；至於  $t^*$  則為開放漁公司之

## 漁船進入 MPA 撈捕之最佳時間點

## 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>10</sup>(1954, 1957)。然本文中，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>11</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  $I$ ，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 系統內單位時間之自然增損量，可

<sup>10</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>11</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)。

表示如(2)式，詳述如下：

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

上式((2)式)中之  $r(x)$  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>12</sup> (Environmental carrying capacity) 或飽和度<sup>13</sup> (Saturation level)，我們假設其與人工魚礁區設置之面積大小 ( $A$ ) 有關，因此  $K = K(A)$ 。

而在處理因魚群移動出人工魚礁區所導致之族群損失  $I$  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 ( $I$ ) 與受限滲透率<sup>14</sup> (conditional permeability,  $r$ ) 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>15</sup>。

$$I = (D+1)^r, D > 0 \text{ 且 } r > 0 \quad (3)$$

至於在受限滲透率(或稱 MPA 之邊界條件)  $r$  方面，根據 Stamps *et al.* (1987)

<sup>12</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>13</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>14</sup> 亦可稱之為所討論區域之邊界條件(Boundary condition)(Acosta, 2002)。

<sup>15</sup> 本文為簡化問題，因此假設  $D$  為一常數。

及 Okubo(1980)之研究指出，對具遷徙性之物種(Nomadic species<sup>16</sup>)來說， $r$  值可以保護區之週長( $P$ )與面積( $A$ )之比值來表示，亦即  $r$  為  $P$  及  $A$  之函數，表示如下：

$$r(P, A) = \frac{P}{A} \quad (4)$$

因此，整合上述論點，(2)式可修正如(5)所示。

$$f(x) = r(x)x - I(D, r)x = \left\{ r_0 \left[ 1 - \frac{x}{K(A)} \right] - (D+1)^r \right\} x \quad (5)$$

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>17</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(6)式表示。

$$h(u, x) = qu(t)x(t) \quad (6)$$

2.由於人工魚礁之設置，初期該漁場之魚群數量很小<sup>18</sup>，因此在時間  $0 \leq t \leq t$  之內，漁公司不打算讓其所屬漁船進入該區域捕魚；唯當時間  $t > t$  之後，始進入該區域捕魚，且進入捕魚之漁船數量  $u(t)$  應維持漁公司之最大可出海漁船數量  $U$ <sup>19</sup>。然該區域之魚量在  $t > t$  (撈捕期間)之後需至少維持一定之法定魚群保育數

<sup>16</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>17</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>18</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>19</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)，詳下一章之討論。

量<sup>20</sup>  $x_c$  (此要求係圖 3.1 之第一階段之時間內), 因此上述之描述可以表示如(7)、(8)兩式。

$$\begin{cases} x(0) = \frac{K}{s}, & s \gg 1 \\ x(t) \geq x_c, & t > t \end{cases} \quad (7)$$

$$u(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t \\ U, & t > t \end{cases} \quad (8)$$

因此, 當漁公司決定可以開始至 MPA 撈捕之後, 會出海至 MPA 捕魚者係漁公司之最大可出海漁船數量。其中  $t$  及  $U$  為待定之決策變數。

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  $d$ , 則對漁公司而言, 單位時間之獲利為  $R$ , 則  $R$  可以表示如(9):

$$R = ph - cu \quad (9)$$

若經過  $\Delta t$  之時間, 則利潤可表示如(10)所示。

$$R\Delta t = (ph - cu)\Delta t \quad (10)$$

### 第三節 模式建構

根據前節之假設 1~3 可知, 若為求得漁公司之「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(11)所示:

$$\text{Max}_{u(t)} \int_0^{\infty} e^{-dt} [ph(u(t), x(t)) - cu(t)] dt = \int_0^{\infty} e^{-dt} [pq(x)x(t) - c]u(t) dt \quad (11)$$

唯人工魚礁之設置仍有其壽命存在<sup>21</sup>, 假設其壽命為  $T_L$  年, 由圖 3.2 可知在

<sup>20</sup> 在此假設  $x_c$  為使得  $\frac{dx}{dt} = 0$  魚群數量發生平衡時之  $x^*$ 。

<sup>21</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。

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(11)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)如下(p1)。

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

求解上述 ARH 模式，可得到  $U^*$  及  $t^*$ ，即漁公司在經營 MPA 漁場之際所應進入撈捕之漁船數量及最佳進入捕魚時間；另外，該模式亦可透過在不同之佈礁邊界條件( $r$ )中，漁公司所應對應之撈捕策略，詳第四章所述。

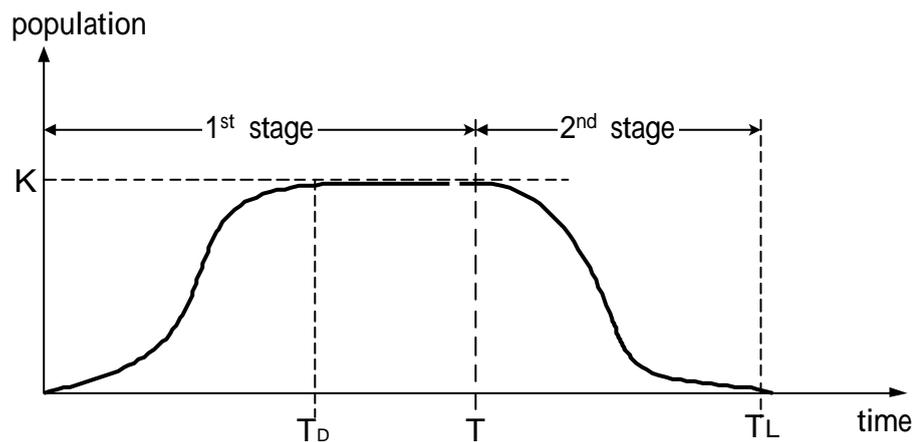


圖 3.1 未進行撈捕之際人工魚礁生命週期內之生物族群數量與時間之關係圖

## 第四章 模式求解與參數敏感性分析

本章將分述求解前章所建構之 ARH 模式及進行參數敏感性分析。在模式求解部分，本研究利用最適控制(Optimal control)理論，給了  $u(t)$  特定的形式<sup>22</sup>，因此 ARH 模式之求解從原來之動態最佳化之問題轉變成為普通極值的問題，其求解過程詳 4.1 節所述；而在參數敏感性分析方面，本研究主要針對參數  $d$  (折現因子)及參數  $I$  (未受限之邊界所造成之生物族群損失率)進行分析，詳本章第二節及第三節之討論。

### 第一節 模式求解

由(p1)之  $\dot{x}$  及  $x(t)$  之初始條件式可解得  $0 \leq t \leq t$  時之  $x(t)$  如下：

$$x(t) = \frac{K}{\frac{r_0}{r_0 - I} + \left( s - \frac{r_0}{r_0 - I} \right) e^{-(r_0 - I)t}}, \quad 0 \leq t \leq t \quad (12)$$

其求解過程，詳述如下所示。

由於  $\frac{dx}{dt} = r_0 x - \frac{r_0 x^2}{K} - Ix - q(x)u(t)x(t) = r_0 x - \frac{r_0 x^2}{K} - Ix$ ， $\because u(t) = 0$ ，上式經整理可得：

$$\frac{dx}{dt} + (I - r_0)x = \left( -\frac{r_0}{K} \right) x^2, \quad 0 \leq t \leq t \quad (13)$$

此即具有下列形式之方程式：

$$\frac{dx}{dt} + P(t)x = Q(t)x^n, \quad n \neq 0 \quad (14)$$

該微分方程稱之為 Bernoulli 方程式，其求解方式為利用變數變換法先將

<sup>22</sup> 推論詳 4.2 節所述。

(14)式化簡成為一階之線性微方方程式，再引用積分因子可求得其通解如下：

$$z = x^{1-n} = e^{(n-1)\int P(t)dt} \left[ c_1 - (n-1)\int Q(t)e^{-(n-1)\int P(t)dt} dt \right] \quad (15)$$

則由(13)式配合(14)式可知， $P(t) = I - r_0$ ， $Q(t) = \frac{-r_0}{K}$ ， $n = 2$ ；因此由(15)式可

求得(13)式之通解為： $z = x^{-1} = e^{(1-r_0)t} \left[ -1\int e^{-(1-r_0)t} \left( \frac{-r_0}{K} \right) dt + c_1 \right] = \frac{r_0}{K(r_0 - I)} + c_1 e^{(1-r_0)t}$ ，故：

$$x(t) = \frac{1}{\frac{r_0}{K(r_0 - I)} + c_1 e^{(1-r_0)t}}, \quad 0 \leq t \leq t \quad (16)$$

又由(p1)(或(7)式)知 $x(0) = \frac{K}{s}$ ， $s \gg 1$ 帶入(16)式，可求得積分常數

$$c_1 = \frac{s - \frac{r_0}{K}}{\frac{r_0}{K} - I}，將 c_1 代入(16)式，即可化簡得(12)式。$$

至於當 $t > t$ 時，由(p1)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，則該常數量<sup>23</sup> $x^*$ (或 $x_c$ )可以令(p1)之 $\dot{x} = 0$ 計算求得，茲推導如下：

令 $\dot{x}$ 為零，則 $\frac{dx}{dt} = 0 = r_0 x^* - I x^* - \frac{r_0 x^{*2}}{K} - q U x^*$ ，化減可得：

$$x^* = K \left( 1 - \frac{I}{r_0} - \frac{qU}{r_0} \right) \quad (17)$$

因此，整合(12)式及(17)式，可得 $x(t)$ 之關係式如下所示。i.e.,

<sup>23</sup>詳 clark(1990)。

$$x(t) = \begin{cases} \frac{K}{\frac{r_0}{r_0-1} + \left(s - \frac{r_0}{r_0-1}\right) e^{-(r_0-1)t}}, & 0 \leq t \leq t \\ K \left(1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0}\right) = x^* & , t > t \end{cases} \quad (18)$$

由(18)式，可利用  $x(t)$  在  $t=t$  時之連續性寫出

$$\frac{1}{\frac{r_0}{r_0-1} + \left(s - \frac{r_0}{r_0-1}\right) e^{-(r_0-1)t}} = 1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0} \quad (19)$$

由(19)式可解得：

$$t = \frac{1}{r_0-1} \ln \frac{(r_0 - qU - 1)[s(r_0 - 1) - r_0]}{r_0 qU} \quad (20)$$

亦即  $u(t)$  中的兩個參數  $t$ 、 $U$  中只有一個是獨立的，以下取  $U$  獨立變數，則

由(20)式可決定出：

$$t(U) = \frac{1}{r_0-1} \ln \frac{(r_0 - qU - 1)[s(r_0 - 1) - r_0]}{r_0 qU} \quad (21)$$

將(8)式及(18)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：

$$\begin{aligned} F(U) &= \int_0^T e^{-dt} [pqx(t) - c] u(t) dt \\ &= \int_0^t e^{-dt} [\dots] (u(t) = 0) dt + \int_t^T e^{-dt} [pqx(t) - c] (u(t) = U) dt \\ &= \int_t^T e^{-dt} \left[ pqK \left(1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0}\right) - c \right] U dt \\ &= \frac{-pqKU}{d} \left(1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b\right) (e^{-dT} - e^{-dt(U)}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$b \equiv \frac{c}{pqK} \quad (23)$$

式(23)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 $K$ (詳言之， $b$ 表示單位時間每單位漁船出海所需之費用與單位時間每單位漁船在撈捕最大庫存魚量( $K$ )所賺的錢之比值)，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(22)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： $1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b > 0$  i.e.,

$$0 < U < \frac{r_0(1-b)-1}{q} \quad (24)$$

則利用微分法求出在條件(24)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(22)式展開如下：

$$\begin{aligned} F(U) &= \frac{-pqKU}{d} \left( 1 - \frac{1}{r_0} - \frac{qU}{r_0} - b \right) (e^{-dT} - e^{-dt(U)}) \\ &= \left[ \frac{-pqKUe^{-dT}}{d} + \frac{pqKU1e^{-dT}}{d r_0} + \frac{pq^2KU^2e^{-dT}}{d r_0} + \frac{pqKUbe^{-dT}}{d} \right] + \\ &\quad \left[ \frac{pqKUe^{-dt(U)}}{d} - \frac{pqKU1e^{-dt(U)}}{d r_0} - \frac{pq^2KU^2e^{-dt(U)}}{d r_0} - \frac{pqKUbe^{-dt(U)}}{d} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

將(25)式對 $U$ 微分，並令之為零，以求得 $U^*$ ，因此

$$\begin{aligned} F'(U) &= \frac{dF(U)}{dU} \\ &= \frac{pqK}{d} \left\{ \begin{aligned} &e^{-dT} \left[ \frac{1}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] - \\ &e^{-dt(U)} \left[ -1 + dU(t) + \frac{1}{r_0} - \frac{dU1}{r_0}(t) + \frac{2qU}{r_0} - \frac{dqU^2}{r_0}(t) + b - dUb(t) \right] \end{aligned} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

由(26)式可得：

$$e^{-d\tau} \left[ \frac{\mathbf{1}}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] - e^{-d t(U)} \left[ -1 + dU(t) + \frac{\mathbf{1}}{r_0} - \frac{dU\mathbf{1}}{r_0}(t) + \frac{2qU}{r_0} - \frac{dqU^2}{r_0}(t) + b - dUb(t) \right] = 0 \quad (27)$$

又(27)式中  $[t(U)]'$  求解如下：

$$\text{由(21)式知： } t(U) = \frac{1}{r_0 - \mathbf{1}} \ln \frac{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]}{r_0 qU}, \text{ 則}$$

$$\begin{aligned} (t)' &= \frac{dt(U)}{dU} = \frac{1}{r_0 - \mathbf{1}} \left[ \ln \frac{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]}{r_0 qU} \right]' \\ &= \frac{1}{r_0 - \mathbf{1}} \frac{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]}{r_0 qU} \left[ \frac{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]}{r_0 qU} \right]' \\ &= \frac{1}{r_0 - \mathbf{1}} \frac{\mathbf{1} - r_0}{U(r_0 - qU - \mathbf{1})} \\ &= -\frac{1}{U(r_0 - qU - \mathbf{1})} \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]}{r_0 qU} \right]' \\ &= \frac{-q[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]r_0 qU - r_0 q \{(r_0 - qU - \mathbf{1})[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0]\}}{(r_0 qU)^2} \\ &= \frac{rq[s(r_0 - \mathbf{1}) - r_0] [-qU - (r_0 - qU - \mathbf{1})]}{(r_0 qU)^2} \end{aligned} \quad (29)$$

將(28)式代入(27)式並化簡可得：

$$e^{-d\tau} \left[ \frac{\mathbf{1}}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right] - e^{-d t(U)} \left\{ \left( \frac{\mathbf{1}}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) + \frac{d}{r_0 - \mathbf{1} - qU} \left( \frac{\mathbf{1}}{r_0} + \frac{qU}{r_0} + b - 1 \right) \right\} = 0 \quad (30)$$

i.e.,

$$e^{-dT} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) = e^{-dt(U)} \left[ \left( \frac{1}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) + \frac{d}{r_0 - 1 - qU} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{qU}{r_0} + b - 1 \right) \right] \quad (31)$$

$$\text{其中 } e^{-dt(U)} = e^{-\frac{d}{r_0 - 1} \ln \frac{(r_0 - qU - 1)[s(r_0 - 1) - r_0]}{r_0 q U}} = \left\{ \frac{(r_0 - qU - 1)[s(r_0 - 1) - r_0]}{r_0 q U} \right\}^{-\frac{d}{r_0 - 1}}, \text{ 因此(31)}$$

式可化簡如(32)式：

$$e^{-dT} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) = \left\{ \frac{(r_0 - qU - 1)[s(r_0 - 1) - r_0]}{r_0 q U} \right\}^{-\frac{d}{r_0 - 1}} \left[ \left( \frac{1}{r_0} + \frac{2qU}{r_0} + b - 1 \right) + \frac{d}{r_0 - 1 - qU} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{qU}{r_0} + b - 1 \right) \right] \quad (32)$$

透過數值分析的方法可解得(32)式之  $U$ ，此時  $U$  為  $r_0$ 、 $1$ 、 $b$ 、 $q$ 、 $d$  之函數；而在滿足條件(24)式之情況下可得決策變數  $U$  之最佳解  $U^*$ ，因此  $U^*$  可以(33)式表示，即：

$$\begin{cases} U^* = U^*(r_0, 1, b, q, d) \\ 0 < U^* < \frac{r_0(1-b) - 1}{q} \end{cases} \quad (33)$$

再將  $U^*$  代回(21)式即可得漁公司之漁船開始要進入 MPA 撈捕之最佳時間  $t^*(U^*)$ 。

## 第二節 敏感度分析

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 4.1 (i.e., 式(8))，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。

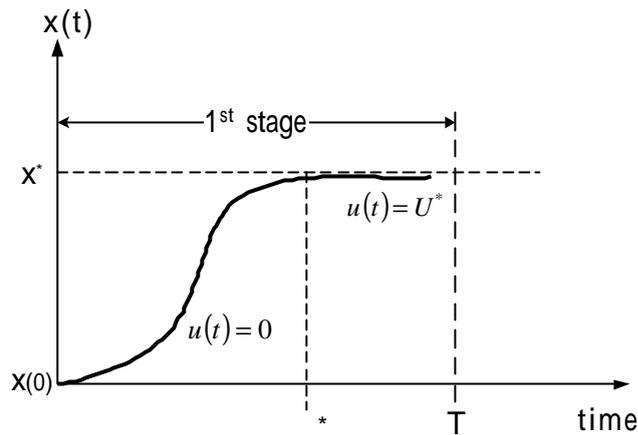


圖 4.1 由最優的  $u(t)$  控制的  $x(t)$

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：

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

其中  $U$  表示漁公司之最大可出海捕魚之漁船數量<sup>24</sup>。Hamiltonian 可表示為：

$$\begin{aligned} H &= e^{-dt} (pqx(t) - c)u(t) + \mathbf{j} [f(x) - qu(t)x(t)] \\ &= [e^{-dt} (pqx(t) - c) - \mathbf{j} qx(t)]u(t) + \mathbf{j}(t)f(x) \end{aligned} \quad (34)$$

(34) 式中， $\mathbf{j}(t)$  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  $\mathbf{j}(t)$  並在所有之時間  $t, 0 \leq t \leq T$ ，滿足以下之方程式：

$$\frac{d\mathbf{j}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (35)$$

$$H[x(t), t, u(t); \mathbf{j}(t)] \equiv \max_{u \in U_t} H[x(t), t, u(t); \mathbf{j}(t)] \quad (36)$$

(35)~(36)式為最適控制之必要條件(Necessary condition)，其中(35)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(36)式之  $U_t$  為一給定之區間(Interval)，稱為控制函數之集合(Control set)。而由(36)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(36)式意味著滿足：

$$\mathbf{s}(t) = \frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (37)$$

(37)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  $\mathbf{s}(t)$  又稱為 Switching 函數(Switching function)。

則顯而易見的  $u(t)$  必定滿足(38)式。即：

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{當 } \mathbf{s}(t) < 0 \\ U, & \text{當 } \mathbf{s}(t) > 0 \end{cases} \quad (38)$$

由最大化定理，確保所推得之  $u(t)$  可使得 Hamiltonian，即(34)式有最大值。

所以由(34)式及(37)式可推得

$$\mathbf{j} = e^{-dt} \left( P - \frac{c}{qx} \right) \quad (39)$$

故

$$\frac{d\mathbf{j}}{dt} = e^{-dt} \left[ -d \left( p - \frac{c}{qx} \right) + \frac{c}{qx^2} \frac{dx}{dt} \right] \quad (40)$$

<sup>24</sup> 即(33)式。

由 adjoint 方程式(i.e., (35)式)可得到

$$\frac{dj}{dt} = -e^{-dt} pqu + jqu - jf'(x) \quad (41)$$

將(39)式代入(41)式以消去  $j$  , 可得

$$\frac{dj}{dt} = -e^{-dt} pqu + e^{-dt} \left( p - \frac{c}{qx} \right) (qu - f'(x)) \quad (42)$$

則由(41)式等於(42)式並配合 (p2)之  $\dot{x}$  可化簡消去控制變數  $u$  , 並推得

$$f'(x) + \frac{cf(x)}{x(pqx - c)} = d \quad (43)$$

又由(38)式知 ,  $u(t)$ 之控制若不是 singular 控制<sup>25</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>26</sup> , 則必滿足下式 :

$$u(t) = \begin{cases} U, & \text{當 } x(t) > x^* \\ 0, & \text{當 } x(t) < x^* \end{cases} \quad (44)$$

(44)式即前述之模式假設 2 中所給定之  $u(t)$  特定形式。此外 , 前述之(43)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 4.2 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)

<sup>25</sup> i.e.,  $u(t) = U^* = \frac{f(x^*)}{qx^*}$

<sup>26</sup> 即 MRAP (Most rapid approach path) 的問題 , 請參閱 Kamien and Schwartz (1991, pp.97-100)。

之目標函數有最大值。

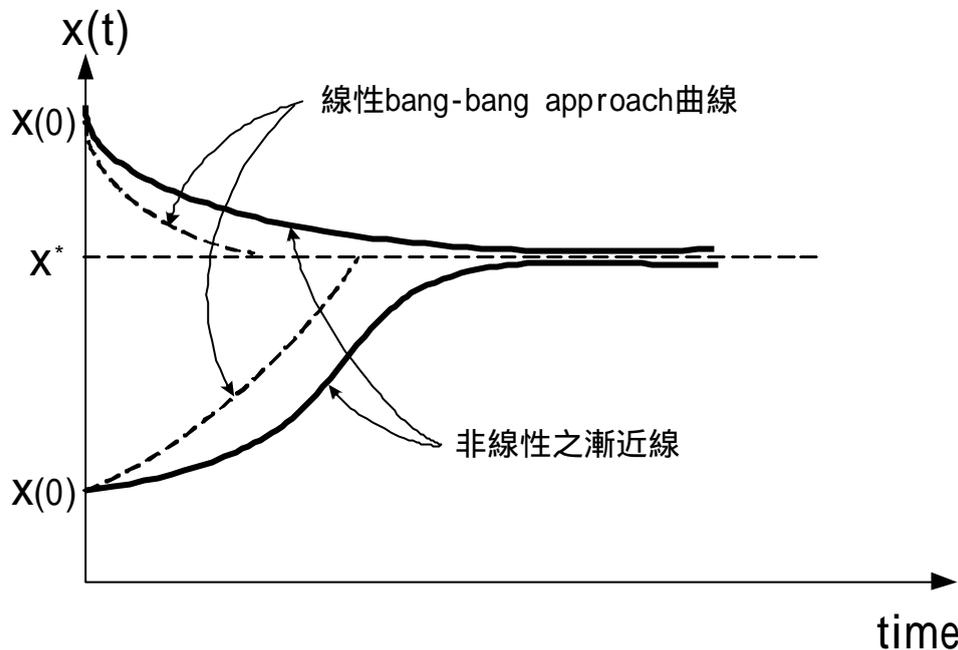


圖 4.2 於線性及非線性捕魚模式下之最佳魚群庫存曲線 (Optimal stock paths)  $x(t)$

註：1.圖示為當  $x(0) > x^*$  及  $x(0) < x^*$  之二可能狀況

2.資料來源：Clark(1990)

而在參數敏感性分析方面，我們將著重於了解投放魚礁後，在魚礁發生沉陷前之第一階段(圖 3.1)時間內參數  $d$ 、 $I(P,A)$  對決策變數  $U$ 、 $t$  之影響。

一、第一階段之  $\frac{dU}{dd}$  及  $\frac{dt}{dd}$ ：

由 (43) 式， $f'(x) + \frac{cf(x)}{x(pqx-c)} = d$ ，其中  $f(x)$  以 (5) 式代入，即

$f(x) = \left[ r_0 \left( 1 - \frac{x}{K} \right) - I \right] x$ ，因此  $f'(x) = r_0 - I - \frac{2r_0}{K}x$ ，至於  $x$ ，我們將以平衡時之魚群數

量  $x^*$  (i.e.,  $x^* = \left( \frac{r_0 - I - qU}{r_0} \right) K$ ) 代入<sup>27</sup>，化簡(43)式可得：

<sup>27</sup> 此乃因此處所討論者乃參數折現率  $d$  之改變對出海漁船數量  $U$  (在  $t \geq t$ ) 之影響。事實上，在前述之最適控制討論可結論出最適控制之曲線應如圖 4.2 所示，至於本文所述之魚礁系統在初始狀態其魚群數量趨近於零

$$\frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \mathbf{1} - qU) - cr_0} - (r_0 - \mathbf{1} - 2qU + \mathbf{d}) = 0 \quad (45)$$

$$\text{令 } \frac{cqUr_0}{pqK(r_0 - \mathbf{1} - qU) - cr_0} = f(U, \mathbf{d}, r_0, \mathbf{1}, q, p, c, K) ; (r_0 - \mathbf{1} - 2qU + \mathbf{d}) = g(U, \mathbf{d}, r_0, \mathbf{1}, q, p, c, K)$$

則(45)式可改寫如下之形式：

$$f(U, \mathbf{d}, r, \mathbf{1}, q, p, c, K) - g(U, \mathbf{d}, r, \mathbf{1}, q, p, c, K) = 0 \quad (46)$$

將(46)式對其決策變數  $U$  及參數  $\mathbf{d}$  全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_d - g_d)d\mathbf{d} = 0 \quad (47)$$

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：

$$\frac{dU}{d\mathbf{d}} = -\frac{(f_d - g_d)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_d + g_d}{f_U - g_U} \quad (48)$$

分別計算(48)式中之  $f_d$ 、 $f_U$ 、 $g_d$  及  $g_U$  如下：

$$f_d = 0 \quad (49)$$

$$f_U = -\frac{cqr_0(-pqKr_0 + pqK\mathbf{1} + cr_0)}{(-pqKr_0 + pqK\mathbf{1} + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (50)$$

$$g_d = 1 \quad (51)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (52)$$

(50)式可再化簡如下：

---

(詳(7)式)，因此在  $t < \mathbf{t}$  之前，其最適之控制應為  $u(t) = 0$ ，而在  $t \geq \mathbf{t}$  之後，漁公司將以漁船數  $U$  出海捕魚，且魚群數量將控制在  $x^*$ 。

$$f_U = \frac{-cqr_0(-pqK)\left(r_0 - 1 - \frac{c}{pqK}r_0\right)}{\left(-pqKr_0 + pqK1 + pq^2KU + cr_0\right)^2} \quad (53)$$

$$= \frac{cpq^2r_0K(r_0 - 1 - br_0)}{(\dots)^2} = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - 1]}{(\dots)^2}$$

因此(48)式中， $-f_d + g_d > 0$ ； $f_U - g_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - 1]}{(\dots)^2} + 2q$ ，其正負情況討

論如下：

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

(ii) 若  $(1-b)r_0 - 1 < 0$ ，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：

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

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  $d$  對決策變數  $t$  之影響可藉由分析  $\frac{dt}{dU}$  而得<sup>28</sup>；由(28)

式可知， $(t)' = \frac{dt(U)}{dU} = -\frac{1}{U(r-qU-1)}$ ，又由(18)式知，當  $t > t$  時漁公司進入 MPA

捕魚，則此時魚群數量應控制在  $x^*$ ，又  $x^* = K\left(1 - \frac{1}{r} - \frac{qU}{r}\right) > 0$ ，其中  $K > 0$ ，所以可

推得：

$$r - 1 - qU > 0 \quad (54)$$

因此將(54)式代回(28)式可得  $t' < 0$ 。

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

【推論二】當在滿足  $1-b > \frac{I}{r_0}$  之情況下， $\frac{dt}{dI} < 0$

二、1<sup>st</sup> 階段之  $\frac{dU}{dI}$  及  $\frac{dt}{dI}$

同前述之推理，將(46)式對其決策變數  $U$  及參數  $I$  全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_I - g_I)dI = 0 \quad (55)$$

因此，未受限之邊界所造成之魚群損失率  $I$  之改變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：

$$\frac{dU}{dI} = -\frac{(f_I - g_I)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_I + g_I}{f_U - g_U} \quad (56)$$

分別計算(56)式中之  $f_I$ 、 $f_U$ 、 $g_I$  及  $g_U$  如下：

$$f_I = \frac{cq^2Ur_0pK}{[pqK(r_0 - I - qU) - cr_0]^2} > 0 \quad (57)$$

$$f_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - I]}{(-pqKr_0 + pqKI + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (58)$$

$$g_I = -1 \quad (59)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (60)$$

因此(56)式中， $-f_I + g_I < 0$ ； $f_U - g_U > 0$ ，在滿足  $(1-b)r_0 - I > 0$  之情況，否則

<sup>28</sup> 因為  $\frac{dt}{dI} = \frac{dt}{dU} \times \frac{dU}{dI}$

$f_U - g_U$  之正負符號無法決定(因尚需參考其他參數之大小方能決定)。因此可得下述推論：

$$\text{【推論三】 當在滿足 } 1-b > \frac{I}{r_0} \text{ 之情況下， } \frac{dU}{dI} < 0$$

同前述推論二之推理過程，可知：

$$\text{【推論四】 當在滿足 } 1-b > \frac{I}{r_0} \text{ 之情況下， } \frac{dt}{dI} > 0$$

至於在投放人工魚礁所劃定之 MPA 區域之邊界條件，即前述之受限滲透率  $r$ (詳(4)式)之改變對漁公司所派遣出海至 MPA 撈捕之漁船數之影響，可推論如下，由於：

$$\frac{dU}{dr} = \frac{dU}{dI} \times \frac{dI}{dr} \quad (61)$$

又由(3)式知： $I = (D+1)^r$ ，故

$$\frac{dI}{dr} = (D+1)^r \ln(D+1) > 0 \quad (62)$$

因此亦可得下述之推論：

$$\text{【推論五】 當在滿足 } 1-b > \frac{I}{r_0} \text{ 之情況下， } \frac{dU}{dr} < 0$$

$$\text{【推論六】 當在滿足 } 1-b > \frac{I}{r_0} \text{ 之情況下， } \frac{dt}{dr} > 0$$

推論五亦可由  $\frac{dU}{dr} = -\frac{(f_r - g_r)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_r + g_r}{f_U - g_U}$  得到，其中由於環境之負載能力  $K$  假

設與人工魚礁區設置之面積大小( $A$ )有關，因此  $K = K(A)$ ，又由(4)式知

$r = r(P, A) = \frac{P}{A}$  ; 故其中之  $f_r = \frac{\partial f}{\partial K} \frac{dK}{dA} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial I} \frac{dI}{dr}$  , 假設  $\frac{dK}{dA} > 0$  , 則  $f_r > 0$ 。

另外，藉由關係式(3)式及(4)式，可推得推論五、六之推廣，即：

$$\text{【推論七】 當在滿足 } 1-b > \frac{1}{r_0} \text{ 之情況下，} \begin{cases} \frac{dU}{dA} > 0 \\ \frac{dU}{dP} < 0 \\ \frac{dU}{dD} < 0 \end{cases}$$

$$\text{【推論八】 當在滿足 } 1-b > \frac{1}{r_0} \text{ 之情況下，} \begin{cases} \frac{dt}{dA} < 0 \\ \frac{dt}{dP} > 0 \\ \frac{dU}{dD} > 0 \end{cases}$$

三、1<sup>st</sup> 階段之  $\frac{dU}{dp}$  及  $\frac{dt}{dp}$

同前述之推理，將(46)式對其決策變數  $U$  及參數  $p$  全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_p - g_p)dp = 0 \quad (63)$$

因此，所撈捕之魚量其出售單價  $p$  之改變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：

$$\frac{dU}{dp} = -\frac{(f_p - g_p)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_p + g_p}{f_U - g_U} \quad (64)$$

分別計算(64)式中之  $f_p$ 、 $f_U$ 、 $g_p$  及  $g_U$  如下：

$$f_p = \frac{-cq^2Ur_0K(r_0 - 1 - qU)}{[pqK(r_0 - 1 - qU) - cr_0]^2} < 0 \quad (65)$$

$$f_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - 1]}{(-pqKr_0 + pqKl + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (66)$$

$$g_p = 0 \quad (67)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (68)$$

因此(64)式中， $-f_p + g_p > 0$ ； $f_U - g_U > 0$ ，在滿足 $(1-b)r_0 - 1 > 0$ 之情況，否則 $f_U - g_U$ 之正負符號無法決定(因尚需參考其他參數之大小方能決定)。因此可得下述推論：

【推論九】當在滿足 $1-b > \frac{1}{r_0}$ 之情況下， $\frac{dU}{dp} > 0$

同前述推論二之推理過程，可知：

【推論十】當在滿足 $1-b > \frac{1}{r_0}$ 之情況下， $\frac{dt}{dp} < 0$

#### 四、1<sup>st</sup> 階段之 $\frac{dU}{dc}$ 及 $\frac{dt}{dc}$

仿前述之推理過程，將(46)式對其決策變數 $U$ 及參數 $c$ 全微分，可得：

$$(f_U - g_U)dU + (f_c - g_c)dc = 0 \quad (69)$$

因此，單位時間每艘漁船出海捕魚所須之費用 $c$ 之改變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：

$$\frac{dU}{dc} = -\frac{(f_c - g_c)}{(f_U - g_U)} = \frac{-f_c + g_c}{f_U - g_U} \quad (70)$$

分別計算(70)式中之 $f_c$ 、 $f_U$ 、 $g_c$ 及 $g_U$ 如下：

$$f_c = \frac{q^2Ur_0pK(r_0 - 1 - qU)}{[-pqK(r_0 - 1 - qU) + cr_0]^2} > 0 \quad (71)$$

$$f_U = \frac{cpq^2r_0K[(1-b)r_0 - I]}{(-pqKr_0 + pqKI + pq^2KU + cr_0)^2} \quad (72)$$

$$g_c = 0 \quad (73)$$

$$g_U = -2q < 0 \quad (74)$$

因此(70)式中， $-f_c + g_c < 0$ ； $f_U - g_U > 0$ ，在滿足 $(1-b)r_0 - I > 0$ 之情況，否則 $f_U - g_U$ 之正負符號無法決定(因尚需參考其他參數之大小方能決定)。因此可得下述推論：

【推論十一】當在滿足 $1-b > \frac{I}{r_0}$ 之情況下， $\frac{dU}{dc} < 0$

同前述推論二之推理過程，可知：

【推論十二】當在滿足 $1-b > \frac{I}{r_0}$ 之情況下， $\frac{dt}{dc} > 0$

### 第三節 討論

茲將上節之參數敏感性分析推論一~推論十二整理列述於表 4.1 所示，由利率  $d$  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。

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  $1-b > \frac{I}{r_0}$  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」 $I$  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  $1-b > \frac{I}{r_0}$  之前提下，則不盡然能獲得上述可視為常理之推論，此乃因  $\frac{dU}{dd}$  或  $\frac{dt}{dd}$  之值尚需參考其他參數之大小方能決定。此外由  $1-b > \frac{I}{r_0}$  式亦可發現，若在  $r_0$  不變之前提下， $I$  愈高，則單位漁船潛在之最大利潤率則應越高才會有「利率愈高則出海捕魚之漁船數量增加」如此之結論出現；換個角度思考，在傳統之漁業管理中，即是將  $I$  視為零之特殊形式下所求得之解答，亦即傳統上利潤率只要大於零，則必存在前述之推理。

表 4.1 參數敏感性分析摘要表

變數	參數								參考方
	$d$	$I$	$r$	$A$	$P$	$D$	$p$	$c$	程式
$U$	+	-	-	+	-	-	+	-	(20a) (40) (46) (48)
$t$	-	+	+	-	+	+	-	+	(53) (56) (62)

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

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，則船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不小之邊界週長，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，由推論 7、8 可知，當在其他參數不變之情況下，週長愈長(即形狀越狹長)，則船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。事實上，以目前台灣的做法，確實是有朝這個方向在施行，如圖 4.1 即為興達港區漁會委託財團法人漁業技術服務社所設計之投放人工魚礁區域，皆為圓形之邊界組成。

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，由推論 7、8 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)，船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.,  $\frac{dt}{dD} > 0$ )，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。

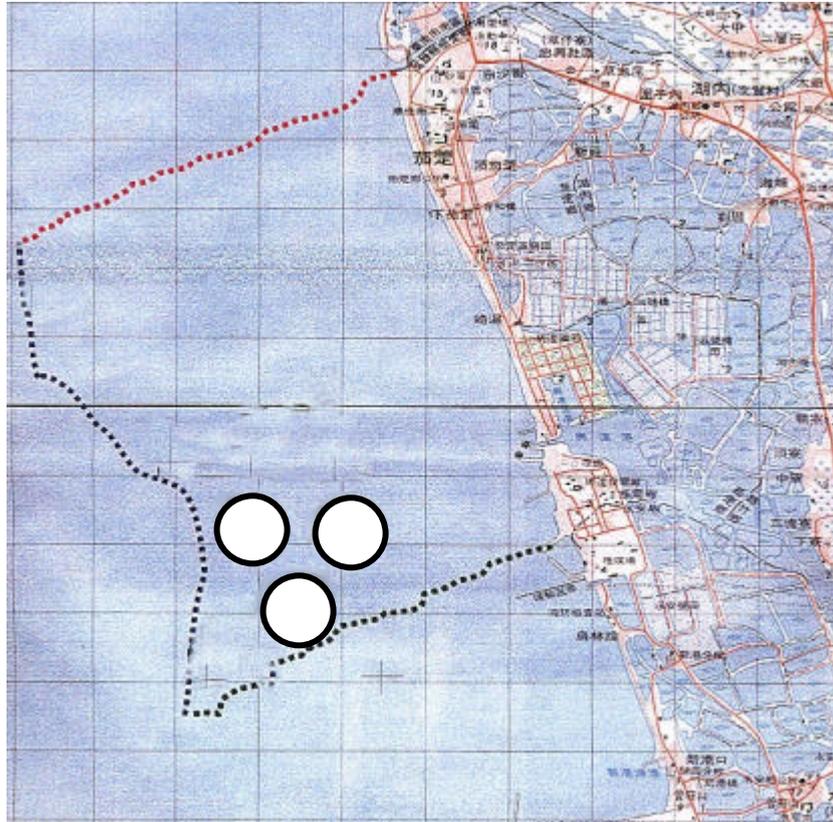


圖 4.1 興達港區漁會人工魚礁設置地點相關位置圖

註：1.資料來源：興達港區漁會專用漁業權區人工魚礁設置計畫規劃研究(2000)

2.圖例說明：-----計畫區域範圍      ○ 投放人工魚礁區域

事實上，上述之所有推論皆需在滿足  $1-b > \frac{I}{r_0}$  之前提下始能適用，否則參數

之變化方向對決策變數  $U$  及  $t$  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  $\frac{I}{r_0}$  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。

## 第五章 結論與建議

### 第一節 主要研究結果

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>29</sup>而形成一未密閉(Non-closed system)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 and 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  $r_0$ 、 $D$ 、 $P$ 、 $A$ 、 $c$ 、 $p$ 、 $K$ 、 $q$ 、 $d$  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  $1-b > \frac{I}{r_0}$  始可決定出參數對決策變數  $U$  及  $t$  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

<sup>29</sup> 亦即魚群僅聚集在魚礁周圍。

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。

## 第二節 主要貢獻

茲將本研究之貢獻分述如後：

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(即考量未受限之邊界所造成之生物族群損失率  $I$  之影響)與傳統之資源管理模式以符合實務上之應用，該觀點亦與傳統之漁業管理模式僅討論密閉之 Open access 系統有所區別。
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  $u(t)$  轉換為一與時間無關之常函數  $U$ ，以簡化求解之過程。事實上，該決策變

數之特殊形式亦符合實務上之考量，因對於漁公司而言，當其決定派遣出海進行撈補之漁船數量之後，一般來說該值應不為時間之函數，即若漁公司有  $U$  艘船，則其派遣漁船數量應會維持該值而不隨時間而有所變動。

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  $\frac{1}{r_0}$  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。

### 第三節 後續研究方向

#### 一、政府立場

1. 人工魚礁設置後應如何劃分其用途始可獲得最大之社會福利，依香港農漁保護署的做法，其將魚礁區劃分有三種方式，即在海洋特別保護區(MSA)內完全不可撈捕、或在 MSA 內劃定限制撈捕之區域(LAZs)，而 LAZs 僅開放給擁有捕魚執照的漁民使用、或在 MSA 內包含可撈捕之魚礁區(fishable reefs，簡稱 FRs) 及 LAZs；該三方案孰優孰劣，以及其相對應之管理經營都需進一步加以探討。茲將該部分所涉及之研究方向繪如圖 5.1(a)~圖 5.1(c)所示。
2. 以圖 5.1(a)言，若人工魚礁之經營改以執照制度，則政府應核發多少執照、開放時間點又如何？
3. 以圖 5.1(b)言，若 MSA 內完全不可撈捕，此即前述問題(即圖 5.1(a))之特例，亦即此時所核發之執照數目為零；在此狀況，漁民僅能撈補 MSA 以外

之區域，則站在政府的立場來說，如何在政治經濟等因素之考量下，設計人工魚礁投放區域之面積及形狀，以決定出適當之  $I$  值，以得到最大之社會福利<sup>30</sup>；事實上魚礁區之政策擬定與魚群之移動損失率  $I$  有相當大的關係，由圖 5.2 可清楚看出甚至在保育魚種之選定上與 MSA 之形狀或面積都有極大之關係，因此，後續之研究應站在保育之觀點，思考如何結合保育對象物種及政經因素之考量下，以決定出最佳人工魚礁投放區域之面積及形狀。

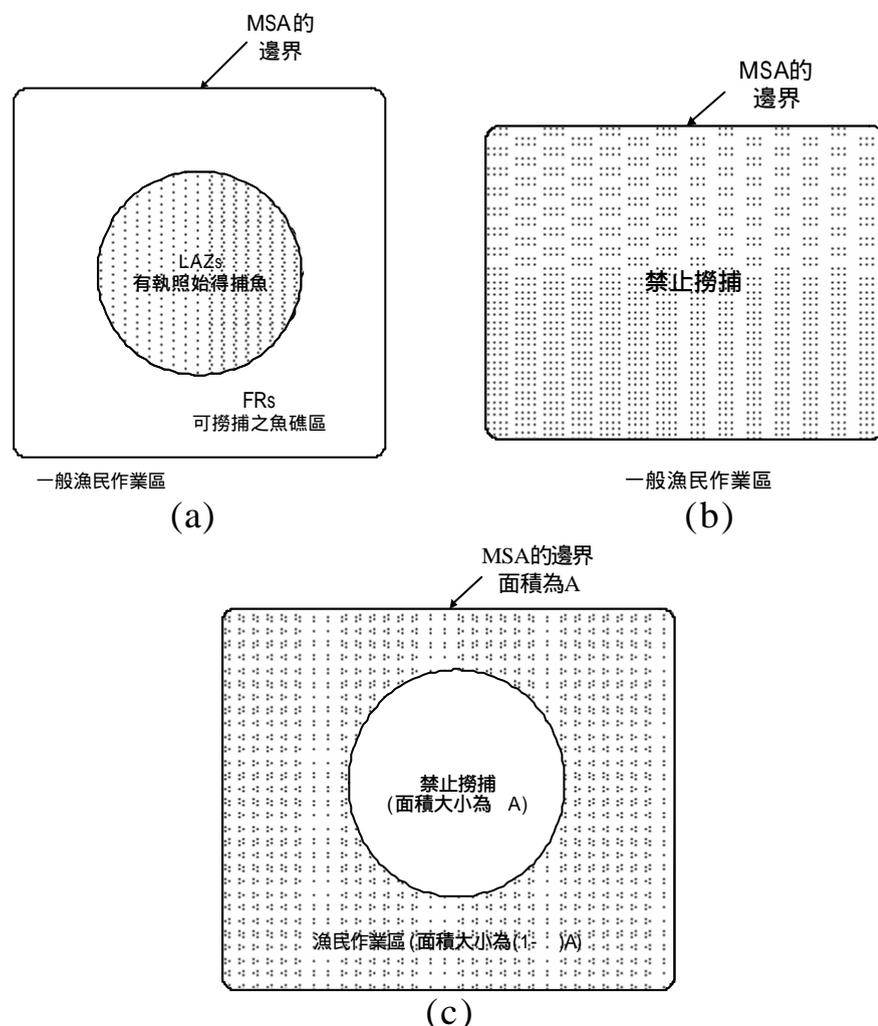


圖 5.1 政府立場考量下人工魚礁之經營方式

資料來源：本研究繪製

<sup>30</sup> 此時之考量為魚礁區之設計如何在生態保育與經濟目標中取得折衷。

4. 以圖 5.1(c)言，若政府總投資之魚礁面積為  $A$ ，其中  $a\%$  面積之人工魚礁禁止撈捕，剩餘之面積(即  $(1-a)A$ )開放給漁民使用，則政策之制定<sup>31</sup>應如何，始可得最大之社會福利。茲嘗試建構其數學模式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max}_{u(t), A, a} \int_0^T e^{-dt} \{ [pqx(t) - c]u(t) - I(A) \} dt \\ \text{s.t.} \\ \dot{x}(t) = f(x) - h(u, x) = \left\{ r_0 \left[ 1 - \frac{x(t)}{(1-a)K} \right] + I(r) \right\} x(t) - q u(t)x(t) \\ x(0) = \frac{K}{s}, \quad s \gg 1 \\ I(r) = (D+1)^r \\ r = \frac{P}{aA} \end{array} \right.$$

其中  $I(A)$  為政府投資魚礁之金額，為魚礁面積  $A$  之函數。另外，該模式之決策變數為捕魚之漁船數量  $u(t)$ 、政府投資開發魚礁區之面積  $A$  及於 MSA 中禁止撈捕之面積比例  $a$ 。唯最適控制之問題若存在兩個以上之變數其解析將顯得更加複雜，因此留待為後續之研究重點。

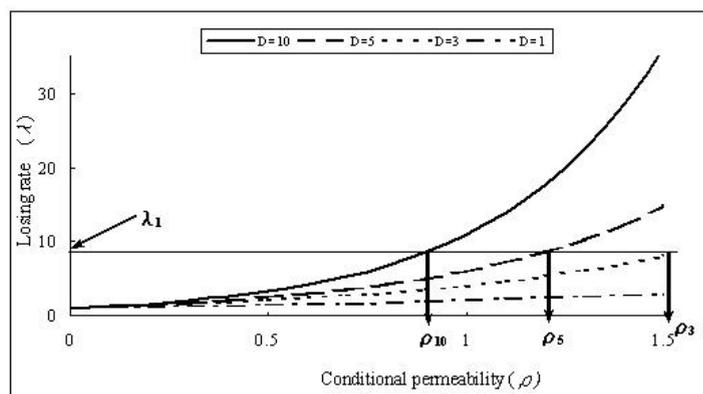


圖 5.2 不同魚種之移動損失率( $I$ )與 MSA 之邊界條件( $r$ )之關係圖

註: 1.D 代表不同魚種; 2.參考方程式: (3)式

<sup>31</sup> 如是否應限制進入魚礁區捕魚之漁船數量、政府投資開發魚礁區之面積應該多大、或禁止撈捕之比例  $a$  應該多大等問題。

## 二、漁公司立場

1. 若承包人工魚礁之經營權，應考慮需投資多少漁船，其投資策略應如何與後續之經營管理配合，始可獲得最大之利潤。
2. 在漁公司承攬人工魚礁之經營權後，若撈捕後之魚量未達政府所規定之保育目標尚需受罰，則漁公司之經營策略為何始可獲得最大之利潤。

## 參考文獻

### 一、中文部分

1. 邵廣昭，1979，「化滄海為良田的人工魚礁」，科學月刊 114 期。
2. 郝道猛，1992，*生態學概論*，徐氏基金會出版。
3. 鄭火元、歐錫祺、江進榮、劉春成，1992，「執行本省沿岸魚礁計畫之回顧」，中國水產。
4. 日本水產廳，2000，*水產基本政策檢討會資料集*，297 頁。
5. 興達港區漁會專用漁業權區人工魚礁設置計畫規劃研究，財團法人漁業技術顧問社，2000 年。
6. 陳清春、莊慶達，2001，*漁業經濟學*，華泰文化事業公司出版。
7. 朱承天，2001，「漁業要聞」，漁業推廣第 176 期，農委會漁業署出版品。

### 二、英文部分

1. 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.
2. Acosta, C.A. (2002), "Spatially explicit dispersal dynamics and equilibrium population sizes in marine harvest refuges". *ICES Journal of Marine Science*, 59: 458-468.
3. Allemand, D., Debernardi, E., and Seaman, W.Jr. (2000), Artificial reefs in the Principality of Monaco: protection and enhancement of coastal zones. In : *Artificial Reefs in European Seas*, pp. 151-166. Ed. by A.C. Jensen, K.J. Collins, and A.P.M. Lockwood. Kluwer.
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”, *Commercial Fisheries Review*, 30(3): 18-19.
  6. Baine, M. (2001), “Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance”. *Ocean & Coastal Management*, 44: 241-259.
  7. 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.
  8. 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.
  9. 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.
  10. 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.
  11. 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.
  12. Buechner, M. (1987), “Conservation in insular parks: simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries”. *Biological Conservation*, 41:57-76.
  13. Chang, K. H. and K. T. Shao. (1988), The sea farming project in Taiwan. *ACTA Oceanogr. Taiwanica* 19: 53-59. Chang, K.H., W.L. Wu and C. Lin (1972). Study on Digestive System and Food Contents of Decapterus Kurroides aka-adsis ABE and Decapterus russelli RUPPELL in the Waters of TAIWAN. *Journal of the Fisheries Society of Taiwan*, 1(1): 10-20.
  14. Clark, C.W. (1990), *Mathematical Bioeconomics : The Optimal management of renewable*

- resources*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York.
15. Collins, K.J., Jensen, A.C., and Lockwood, A.P.M. (1991), “Artificial reef project - Poole Bay”. *Progress in Underwater Science* **16**: 75-84.
  16. 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.
  17. ERM. (1998), Fisheries resources and fishing operations in Hong Kong waters. Final Report to the Hong Kong SAR Government, Agriculture and Fisheries Department. Environmental Resources Management Consultants, Hong Kong Ltd.
  18. Grigg, R.W. (1994), “The international coral reef initiative: conservation and effective management of marine resources”. *Coral Reefs*, 13: 197-198.
  19. Gordon, H.S. (1954), “The economic theory of a common property resource: the fishery”. *Journal of Political Economy*, 62: 124-142.
  20. Hanley, N., Shogren, J. F. and White, B. (1997), *Environmental economics: in theory and practice*, Hampshire, Macmillan.
  21. Heaps, L.M., Picken, G.B. and 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.
  22. Hinrichsen, D. (1997), “Coral reefs in crisis”. *BioScience*, 47: 554-558.
  23. Hughes, T.P. (1994), “Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef”. *Science*, 265: 1547 – 1551.
  24. Jensen, A.C. (2002). “Artificial reefs of Europe: perspective and future”. *ICES Journal of Marine Science*, 59: S3-S13.
  25. Jensen, A.C., Collins, K.J., and Lockwood, A.P.M. (2000), *Artificial Reefs in European Seas*.

- Kluwer.
26. 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.
  27. Liao, D.S. and Cupka, D.M. (1979), Economic impacts and fishing success of offshore sport fishing over artificial reefs and natural habitats in South Carolina. South Carolina Marine Resources Center, Technology Report, 38:1-27.
  28. Lok, A., Metin, C., Ulas, A. and 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 and Recommendations.
  29. 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.
  30. Mesterton-Gibbons, M. (1989), *A concrete approach to mathematical modeling*. Addison-Wesley publishing company.
  31. Moseley, L. (1961). The use of car bodies as fishing devices. Ohio Department of Natural Resources, Division of Wildlife, Technology Report, 7pp.
  32. Nakamae, A. (1988). “Present states of the artificial reef and the 3rd coastal fishing ground development project”. *Fisheries Engineering*, 25(1): 1-6.
  33. Okubo, A. (1980), “Diffusion and ecological problems: mathematical models”. *Biomathematics*, Vol. 10. Springer, Berlin.
  34. O’Leary, E., Hubbard, T. and O’Leary, D. (2001), Artificial Reefs Feasibility Study, prepared for the marine institute, Coastal Resources Center National University of Ireland Cork.
  35. 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.
  36. Pulliam, H.R. (1988), “Sources, sinks, and population regulation”. *American Naturalist*, 132:

- 652–661.
37. Randall, J.E. (1963), “An analysis of the fish populations of Artificial and natural reefs in the Virgin Islands”. *Caribbean Journal of Science*, 3: 31-47.
  38. Richmond, R.H. (1993), “Coral reefs: present problems and future concerns resulting from anthropogenic disturbance”. *American Zoologist*, 33: 524-536.
  39. 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.
  40. 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.
  41. 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.
  42. Seaman, W.Jr. and Sprague, L.C. (1991), Artificial habitat practices in aquatic systems. In Seaman, W.Jr. and Sprague, L.C. (Eds.) *Artificial habitats for marine and freshwater fisheries*. Academic Press, New York. Pp 1-29.
  43. Sheehy, D.J. (1981), Artificial reef programs in Japan and Taiwan. 184 -198 in D.Y. Aska, Ed. *Artificial reefs: conference proceedings*. Florida Sea Grant Report 41.
  44. 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.
  45. Stone, R.B. (1974), Artificial reefs and costal fishery resources, 10<sup>th</sup> space Congress, Cocoa Beach, Florida.
  46. Turchin, P. (1998), *Quantitative analysis of movement*, Sinauer Press, NY.
  47. Turner, C. H. (1970), *Artificial reefs*. *Ency. Mar. Resource*, Ed. by Frank E. Firth.

48. Verhulst, P.F. (1838), Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondance Mathematique et Physique*, 10: 113-121.
49. Wilson, K.D.P., Leung, A.W.Y., and Kennish, R. (2002), "Restoration of Hong Kong fisheries through deployment of artificial reefs in marine protected areas". *ICES Journal of Marine Science*, 59: S157-S163.
50. 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.

### 三、網站部分

1. 李玲玲，1999，永續台灣的願景與策略研究計畫-自然保育組成果摘要，  
<http://www.gcc.ntu.edu.tw/foresight/info-exchange/information/natu-sum.htm>。
2. 香港人工魚礁計畫，2002，<http://www.afcd.gov.hk/fisheries/fish.htm>。
3. 行政院農委會漁業署漁業年報資料，2002。<http://www.fa.gov.tw/tfb7c1.htm>。
4. 行政院農業委員會漁業署，中華民國臺灣地區漁業年報統計項目定義，2002。  
<http://www.fa.gov.tw/tfb7c1.htm>
5. 行政院農委會漁業署漁政管理工作手冊，2003，<http://www.fa.gov.tw/fshadm/famanu/fam5c.htm>
6. 台灣沿岸漁業及漁場環境資料庫，2003，<http://f408a.fd.ntou.edu.tw/areef/index.html>。
7. 美國法令，2003，<http://caselaw.lp.findlaw.com/cascode/uscodes/33/chapters/35/toc.html>。
8. Marine Artificial Reefs, 2003, <http://www.dnr.state.sc.us/marine/pub/seascience/artreef.html>
9. Whitmarsh, D., Helen Pickering and Antony C. Jensen, Report of the results of EARRN workshop 3: Socio-economic and legal aspects of artificial reefs, July 1997,  
<http://www.soc.soton.ac.uk/soes/research/groups/EARRN/>

## 附錄

### 附錄一 美國關於人工魚礁管理之相關法規

- [United States Code](#)
  - [TITLE 33 - NAVIGATION AND NAVIGABLE WATERS](#)
    - [CHAPTER 35 - ARTIFICIAL REEFS](#)

---

*U.S. Code as of: 01/05/99*

#### **Section 2105. Definitions**

- (1) The term ''artificial reef'' means a structure which is constructed or placed in waters covered under this chapter for the purpose of enhancing fishery resources and commercial and recreational fishing opportunities.

#### **Section 2104. Permits for construction and management of artificial reefs**

(a) Secretarial action on permits

In issuing a permit for artificial reefs under section 403 of this title, section 1344 of this title, or section 1333(e) of title 43, the Secretary of the Army (hereinafter in this section referred to as the ''Secretary'') shall -

- (1) consult with and consider the views of appropriate Federal agencies, States, local governments, and other interested parties;

- (2) ensure that the provisions for siting, constructing, monitoring, and managing the artificial reef are consistent with the criteria and standards established under this chapter;
  - (3) ensure that the chapter to the artificial reef construction material is unambiguous, and that responsibility for maintenance and the financial ability to assume liability for future damages are clearly established; and
  - (4) consider the plan developed under section 2103 of this title and notify the Secretary of Commerce of any need to deviate from that plan.
- (b) Terms and conditions of permits
- (1) Each permit issued by the Secretary subject to this section shall specify the design and location for construction of the artificial reef and the types and quantities of materials that may be used in constructing such artificial reef. In addition, each such permit shall specify such terms and conditions for the construction, operation, maintenance, monitoring, and managing the use of the artificial reef as are necessary for compliance with all applicable provisions of law and as are necessary to ensure the protection of the environment and human safety and property.
  - (2) Before issuing a permit under section 1342 of this title for any activity relating to the siting, design, construction, operation, maintenance, monitoring, or managing of an artificial reef, the Administrator of the Environmental Protection Agency shall consult with the Secretary to

ensure that such permit is consistent with any permit issued by the Secretary subject to this section.

(c) Liability of permittee

- (1) A person to whom a permit is issued in accordance with subsection (a) of this section and any insurer of that person shall not be liable for damages caused by activities required to be undertaken under any terms and conditions of the permit, if the permittee is in compliance with such terms and conditions.
- (2) A person to whom a permit is issued in accordance with subsection (a) of this section and any insurer of that person shall be liable, to the extent determined under applicable law, for damages to which paragraph (1) does not apply.
- (3) The Secretary may not issue a permit subject to this section to a person unless that person demonstrates to the Secretary the financial ability to assume liability for all damages that may arise with respect to an artificial reef and for which such permittee may be liable.
- (4) Any person who has transferred title to artificial reef construction materials to a person to whom a permit is issued in accordance with subsection (a) of this section shall not be liable for damages arising from the use of such materials in an artificial reef, if such materials meet applicable requirements of the plan published under section 2103

of this title and are not otherwise defective at the time title is transferred.

(d) Liability of the United States

Nothing in this chapter creates any liability on the part of the United States.

(e) Civil penalty

Any person who, after notice and an opportunity for a hearing, is found to have violated any provision of a permit issued in accordance with subsection (a) of this section shall be liable to the United States for a civil penalty, not to exceed \$10,000 for each violation. The amount of the civil penalty shall be assessed by the Secretary by written notice. In determining the amount of such penalty, the Secretary shall take into account the nature, circumstances, extent, and gravity of the violation. The Secretary may compromise, modify, or remit with or without conditions, any civil penalty which is subject to imposition or which has been imposed under this section. If any person fails to pay an assessment of a civil penalty after it has become final, the Secretary may refer the matter to the Attorney General for collection.

## 附錄二 台灣關於人工魚礁管理之相關法規

資料來源：農委會漁業署漁政管理工作手冊

### 第五章：漁業資源保育與管理

#### 第一節 人工魚礁區與保護礁區之申請設置與管理

##### 壹、礁區之申請設置

###### 一、設置地點之選定：

主管機關就所轄水域綜合漁業及漁業以外之規劃利用情形與當地漁民及區漁會意見，初步選定擬設置礁區地點。

###### 二、選定地點之調查評估：

由主管機關就選定地點，委託學術試驗研究單位，就設置礁區之條件進行調查評估，並作成報告。

###### 三、核定設置與公告：

縣（市）主管機關依前項調查評估報告。

##### 貳、魚礁投放

由主管機關或具有專用漁業權之漁會或漁業生產合作社編列預算辦理魚礁製作，並投放於所轄已公告之礁區範圍內。

##### 參、礁區之管理

###### 一、管理機關：

由管轄該礁區地點之直轄市或縣（市）主管機關負責，但該礁區跨越二縣（市）以上或管轄不明時，則由省主管機關逕行管理或指定機關管理之。如礁區跨越二省（市）以上，則由中央主管機關指定機關管理之。

二、限制事項：

使用網具類之漁船不得進入礁區作業。

三、管理措施之執行：

由管理機關執行礁區之巡邏任務，維持礁區正常使用，並依漁業法及有關公告事項，取締非法捕魚等行為。如礁區位於專用漁業權範圍內時，亦得輔導該區漁會或漁業生產合作社執行管理措施。

四、成效評估：

由管理機關定期進行礁區之漁業資源調查及投放魚礁之成效評估。必要時亦得委託學術研究單位為之，並以其結果作為持續管理之參考。

五、礁區廢止：

由原核定公告之主管機關公告廢止之。