

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Institute of Oceanography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

台灣東部沿海密毛龍蝦之脫殼成長研究

Growth and molting of captive pronghorn spiny lobster,

*Panulirus penicillatus*, in the eastern coast of Taiwan



黃盈瑋

Ying-Wei Huang

指導教授：孫志陸 博士

Advisor: Chi-Lu Sun, Ph.D.

中華民國 98 年 7 月

July, 2009

## 誌謝

首先感謝恩師 孫志陸博士兩年來的悉心指導與不厭其煩的教誨，使我學習到做研究該有的態度與待人處事的道理，並且在忙於研究與國內外會議之際對本論文逐字詳閱及斧正，以及師母 葉素然女士於課業及生活上的關懷與照料，本論文才得以順利完成，在此獻上最由衷的感激。

承蒙中央研究院生物多樣性研究中心 邵廣昭博士、臺灣大學海洋研究所 戴昌鳳博士及海洋大學環境生物與漁業科學學系 倪怡訓博士、莊守正博士，於百忙之中撥冗對本論文詳加審閱並惠賜寶貴意見，使本論文臻於完善，在此獻上最深之謝忱。

研究期間，感謝中央研究院宜蘭臨海研究站以及李佳鐸先生的協助，使得研究得以順利進行。感謝學長偉全、楠傑、以杰、振德、政南、文沛、郁凱、倉名，學姐陳卉、惠平、麗華與淑芳在研究上給予多方協助，尤其感謝以杰學長，在研究上給予指點與協助，在國外鑽研研究之餘逐字校閱本論文。同學文聲及維章以及學妹筱筠在課業上的相互切磋及生活上的照應與關心皆是支持我完成本論文的動力，因為你們讓我的研究生生涯更加充實與歡樂。還有知心好友珮華、雅淳、怡君、宜佳等給予的關懷與支持，陪我跨越重重難關，在此獻上誠摯的謝意。

最後感謝求學路上一直支持我的父母，二十幾年來對我無怨無悔的付出與栽培，以及哥哥不時的關心與打氣，是我精神上的重要支柱，使我能無後顧之憂地完成學業。

謹將此論文獻給所有關心及愛護我的人

並與他們分享論文完成時的喜悅。

## 摘要

甲殼類的成長研究比魚類較為複雜，因為其成長依賴脫殼活動，且缺少可用來估計年齡的硬組織。為瞭解台灣東部沿海密毛龍蝦族群之脫殼與成長，本研究利用蓄養方式來進行研究，實驗期間(2007年9月至2009年3月)記錄其脫殼成長量、脫殼間期、水溫及斷足再生率等資料。實驗總樣本數為133隻，其中雄蝦65隻，頭胸甲長(CL)範圍:42.4 - 112.1 mm;雌蝦68隻，頭胸甲長範圍:40 - 92.8 mm。研究結果顯示，密毛龍蝦終年都有脫殼活動發生，主要脫殼活動集中在夏季，共使用156筆脫殼成長量及130筆脫殼間期資料，主要分佈在頭胸甲長40 - 70 mm;平均脫殼增加量為 $0.68 \pm 0.51$  mm (mean  $\pm$  standard deviation);脫殼增加量不隨著水溫變動及龍蝦體型大小而受影響;脫殼間期(IP)與CL之關係為:雌性: $IP = 66.019 + 0.945 \times CL$ ; 雄性: $IP = 50.467 + 1.2709 \times CL$ 。脫殼間期會隨著水溫之升高而縮短，隨著體型之增加而延長;脫殼後其斷失步足再生長度比率為 $0.80 \pm 0.18$ ，斷足再生長度比率在雌雄間沒有顯著差異，但與龍蝦體型大小有關，斷失步足不影響其脫殼增加量。本研究分別利用三種成長模式(von Bertalanffy growth equation (VBGE)、脫殼成長模式及隨機脫殼成長模式)描述台灣東部沿海密毛龍蝦之脫殼成長。所估得VBGE參數如下，雌蝦 $CL_{\infty} = 87.68$  (mm),  $k = 0.137$  ( $\text{yr}^{-1}$ );雄蝦 $CL_{\infty} = 86.04$  (mm),  $k = 0.207$  ( $\text{yr}^{-1}$ )。脫殼成長模式結果顯示雄蝦較雌蝦成長快速，推測雌雄別最大平均頭胸甲長約為75及90 mm。利用隨機脫殼成長模式，考慮龍蝦個體間脫殼成長之變異，預測其成長軌跡及未確定性，其結果顯示密毛龍蝦個體間成長變異很大。本研究結果與其他研究相比，結果顯示本研究密毛龍蝦之成長較其他研究來的緩慢。本研究建議利用隨機脫殼成長模式來描述台灣東部沿海密毛龍蝦之脫殼與成長，結果可進一步用來建立龍蝦年齡-體長表(Age - length - key)，作為資源評估模式輸入資訊，以期能達到保護及資源永續利用的目標。

關鍵字：密毛龍蝦、甲殼類、脫殼、成長、台灣東部沿海

## Abstract

Growth study of crustacean is more complex compared to that of fish, because crustacean grows only after molting and they don't have any hard parts for aging (such as otolith, spines, vertebrae and scales) for aging. The objective of this study was to quantify the growth of spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in the eastern coast of Taiwan by rearing them in a laboratory. A total of 133 lobsters (65 females, ranging from 42.4 to 112.1 mm, CL; and 68 males 40 to 92.8 mm CL) were reared from September 2007 to March 2009, and 156 molt increments (MI) and 130 intermolt periods (IP) were recorded (mainly from lobsters of 40-70 mm CL). Results showed that molting occurred throughout the year with a peak in summer. No significant relationship was found between MI and CL or water temperature, and the mean MI was  $0.68 \pm 0.51$  (S.D.) mm. However, the IP was affected by the size of lobster. The relationship between IP and CL was  $IP = 66.019 + 0.945 \times CL$  for females and  $IP = 50.467 + 1.2709 \times CL$  for males. The mean limb regeneration ratio was  $0.8 \pm 0.18$ . The limb regeneration ratio was independent of sex, but dependent on the size of lobster, and there was no effect of losing limb on molt increment. Three growth models (von Bertalanffy growth equation (VBGE), molt-process growth model, and stochastic molt-process growth model) were used to describe the growth of *P. penicillatus*. The estimated VBGE parameters were  $CL_{\infty} = 87.68$  mm,  $k = 0.137$  yr<sup>-1</sup> for females and  $CL_{\infty} = 86.04$  mm,  $k = 0.207$  yr<sup>-1</sup> for males. The results of molt-process growth model indicated that males were growing faster and attaining a larger size than females. Using the stochastic molt-process growth model to account for the variation in growth, the results suggested that there was a high variability in size-at-age between individuals. Compared to other studies, the results suggested that *P. penicillatus* grow slower in this study. This study suggests that using stochastic molt-process growth model for modeling the molt and growth of spiny lobster *P. penicillatus* in the eastern coast of Taiwan. Furthermore, the recommended model can use to develop the important age-length key (with uncertainty) as input for the stock assessment.

Key word: *Panulirus penicillatus*; spiny lobster; molt; growth; Taiwan

# 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	i
前言.....	1
一、密毛龍蝦的分類及分布.....	1
二、龍蝦生活史.....	1
三、甲殼類脫殼成長過程.....	2
四、龍蝦成長研究之方法回顧.....	2
五、台灣東部海域龍蝦的漁業概況.....	3
六、文獻回顧.....	3
七、研究動機與目的.....	4
材料方法.....	5
一、龍蝦樣本收集.....	5
二、蓄養環境及脫殼資料收集.....	5
三、資料處理與分析.....	6
(一) 體重與頭胸甲長之關係.....	6
(二) 脫殼增加量與頭胸甲長之關係.....	7
(三) 脫殼間期與頭胸甲長之關係.....	7
(四) 脫殼間期與水溫之關係.....	8
(五) 斷失步足再生長度之分析.....	8
四、成長模式.....	8
(一) von Bertalanffy growth equation (VBGE)成長方程式參數估計.....	8
(二) 脫殼成長模式(Molt-process growth model).....	9
(三) 隨機脫殼成長模式(Stochastic molt-process growth model).....	9
結果.....	12
一、蓄養實驗結果.....	12
(一) 脫殼活動.....	12
(二) 蓄養過程中死亡.....	12
(三) 體重與頭胸甲長之關係.....	12
(四) 脫殼增加量與頭胸甲長之關係.....	12
(五) 脫殼間期與頭胸甲長之關係.....	13
(六) 脫殼間期與水溫之關係.....	13
(六) 斷失步足再生長度之分析.....	14
二、成長模式.....	14
(一) von Bertalanffy growth equation (VBGE)成長方程式參數估計.....	14
(二) 脫殼成長模式(Molt-process growth model).....	14
(三) 隨機脫殼成長模式(Stochastic molt-process growth model).....	15
討論.....	16
一、蓄養實驗的優缺點.....	16
二、脫殼成長.....	16

三、斷足再生.....	17
四、三種成長模式之比較.....	17
五、與前人研究結果比較.....	19
結論.....	20
參考文獻.....	21
圖.....	29
表.....	56
Appendix.....	58



## 圖目錄

Figure 1. The external appearance of <i>Panulirus penicillatus</i> . CL denotes the standard measurement of length (carapace length) for lobster.....	29
Figure 2. Determination of sex of spiny lobsters based on the characteristic of the fifth pair walking legs. Female (a), the end of fifth pair of walking legs are claw-shaped; Male (b) the end of fifth pair of walking legs are similar to other walking legs (hook-shaped).....	30
Figure 3. Schematized life cycle of <i>Panulirus penicillatus</i> .....	31
Figure 4. Annual fisheries production of the spiny lobsters in terms of weight (metric ton).....	32
Figure 5. Length-frequency distribution of the spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> , in this study.....	33
Figure 6. Plastic pipe as artificial shelter for the tagged lobster (a), and lobster feeds on the provided diet (b) in the experiment. Each lobster is tagged in the bottom of the antenna for identification.....	34
Figure 7. Diagram of the definitions of the molt increment ( <i>MI</i> ) and intermolt period ( <i>IP</i> ) in this study.....	35
Figure 8. Regeneration ratio is measuring the length of the regeneration propodus after a molt and the opposite limbs of the missing limbs. (From Holthuis, 1991).....	36
Figure 9. Flowchart of the molt-process growth model. $CL_i$ is the carapace length before molted; <i>IP</i> is the intermolt period; <i>MI</i> is molt increment; $CL_{i+1}$ is the grown carapace length after molted.....	37
Figure 10. Flowchart of stochastic molt-process growth model. $CL_1$ is the initial carapace length; <i>R</i> is a random number from a uniform distribution with range between 0 and 1; <i>MP</i> is the molt probability; <i>MI</i> is the molt increment; $CL_2$ is the grown carapace length after molted.....	38
Figure 11. Ecdysis process of <i>Panulirus penicillatus</i> . (a) The ecdysial sutures occurred; (b) The progressive lifting of the old carapace; (c) Lobster has raised the thorax off	

of the substratum; (d) The old carapace has lifted about 90° from its original position; (e) The new abdominal segments are freed; (f) Lobster gives one sudden flexion and extension of the abdomen freeing itself completely from the old skeleton.....	39
Figure 12. Death frequency distribution of the spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> , in this study.....	40
Figure 13. Relationship between body weight and carapace length of spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> (sex combined).....	41
Figure 14. Scatter plots of molt increment and carapace length for female (a) and male (b) spiny lobsters, <i>Panulirus penicillatus</i> .....	42
Figure 15. Relationship between intermolt period and carapace length for female (a) and male (b) spiny lobsters, <i>Panulirus penicillatus</i> .....	43
Figure 16. Relationships between the intermolt period and water temperature by two different size groups for the spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> .....	44
Figure 17. von Bertalanffy growth curves for female (dashed line) and male (solid line) based on the Munro's (1982) method for the spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> . The initial size-at-age is 10 mm CL - 250 days.....	45
Figure 18. Predicted growth trajectory based on the molt-process growth model for female (grey line) and male (black line) spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> .....	46
Figure 19. Relationships between probability of molting and number of days-at-large among three classes for female spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> . Squares = observed values; Curves = predicted values.....	47
Figure 20. Relationships between probability of molting and number of days-at-large among three classes for male spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> . Squares = observed values; Curves = predicted values.....	48
Figure 21. Growth trajectories of female (a) and male (b) lobsters that generated from 100 simulation runs by the stochastic molt-process growth model. Different colors denote the independent runs. ....	49



Figure 22. Median (dashed line) and 95% confidence intervals (solid lines) of growth trajectories of female (a) and male (b) lobsters that generated from 100 simulation runs by the stochastic molt-process growth model..... 50

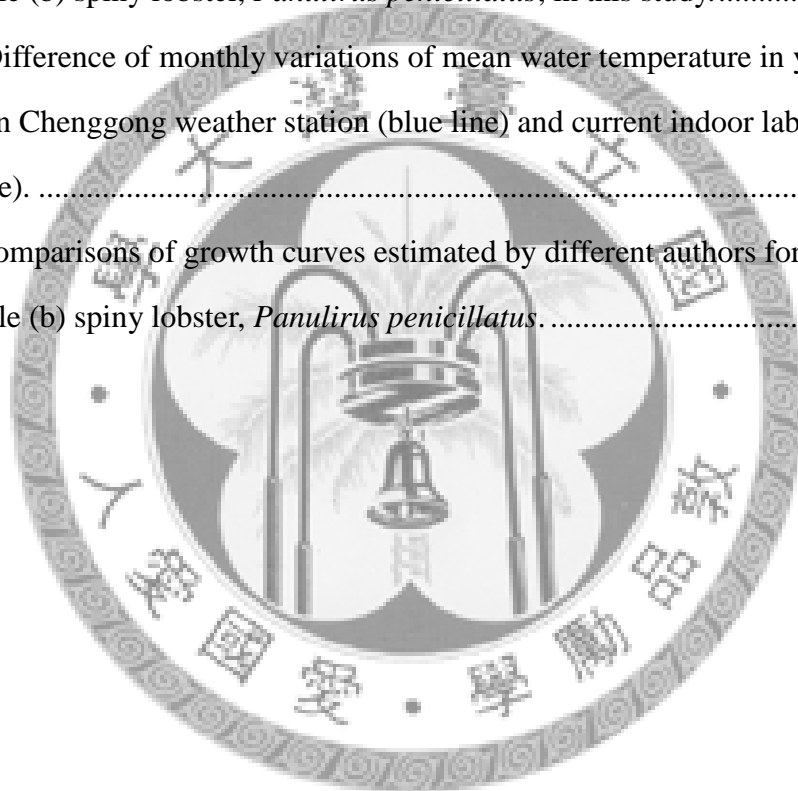
Figure 23. Molt-frequency distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in year 2008 of the present rearing study..... 51

Figure 24. The photo of molting failure individual of the present rearing study.. ..... 52

Figure 25. Comparisons of growth curves estimated by 3 growth models for female (a) and male (b) spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in this study..... 53

Figure 26. Difference of monthly variations of mean water temperature in year 2008 between Chenggong weather station (blue line) and current indoor laboratory study (red line). ..... 54

Figure 27. Comparisons of growth curves estimated by different authors for female (a) and male (b) spiny lobster, *Panulirus penicillatus*..... 55



## 表目錄

Table 1. Input information required for different methods in modeling the growth of spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> . .....	56
Table 2. Summary estimates of the parameters of von Bertalanffy growth function for the spiny lobster, <i>Panulirus penicillatus</i> , among various studies.....	57



## Appendix

Figure A1. Distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus* in the world. (From Phillips and Melville-Smith, 2006) ..... 58

Figure A2. Habitat specialization of the spiny lobster. (From Lipcius and Eggleston, 2000)..... 59



# 前言

## 一、密毛龍蝦的分類及分布

密毛龍蝦 *Panulirus penicillatus* (Olivier, 1791) (Fig. 1), 其英文俗名為 Pronghorn spiny lobster, 在台灣俗稱大頭蝦、厚殼蝦、咾咕蝦、紋身龍蝦。在分類上屬於節肢動物門(Phylum Arthropoda), 甲殼上綱(Super Class Crustacea), 十足目(Order Decapoda), 龍蝦總科(Superfamily Palinuroidea), 龍蝦科(Family Palinuridae), 龍蝦屬(Genus *Panulirus*)。龍蝦的頭胸甲略呈圓筒狀, 鰓區稍微膨大, 體橫切面為半圓形, 眼部有突起, 具有眼上角, 略微超過或約為兩倍眼高。頭胸甲及步足尖端有明顯黃色剛毛, 第一觸角柄具白色縱條紋, 第二觸角外基底膜狀部為藍色, 步足具顯眼的白色縱條紋。背部沒有條紋, 腹部散佈有微小的淺色斑點, 僅第一腹節關節具大白色斑點, 腹肢和尾扇未鈣化部分為黑色(陳, 1992)。具有兩條很長成鋸齒狀的觸鬚和五對粗壯的步足, 前三對顎足無螯且大小相近, 下身具有四對附肢, 但已無游泳的作用, 而雌蝦將附肢用來抱卵、育幼之用。雌蝦的第五對步足呈鉗狀, 而雄蝦呈螯狀, 可以此做為分辨雌雄之外部特徵之一(Fig. 2)。密毛龍蝦體色有藍色、褐綠色及深紅色等, 在台灣以褐綠色、深紅褐色較為常見。

密毛龍蝦分布於印度-太平洋區域的熱帶及亞熱帶地區, 自非洲東岸、紅海、澳洲、日本, 甚至遠達墨西哥及加拉巴哥群島等(Galapagos Islands)都有分布(Holthuis, 1991; Coutures and Chauvet, 2002) (Fig. A1), 是龍蝦屬中分布最廣泛的一種。密毛龍蝦棲息於迎風面受浪花打擊的珊瑚礁區及露出地面的大型礁岩區(Coutures and Chauvet, 2002; Matsuda et al., 2006), 棲息深度為4~5公尺(Lipcius and Eggleston, 2000) (Fig. A2)。通常攝食小的無脊椎動物(例如: 螃蟹、海膽等), 記錄最大體長約40 cm, 成蝦平均體長約30 cm, 通常雄蝦體型比雌蝦大(Fischer and Bianchi, 1984)。

## 二、龍蝦生活史

龍蝦生活史主要可分成五個階段(Fig. 3): 卵(Eggs), 葉狀幼體(Phyllosoma), 後期蝦苗(Puerulus), 稚蝦(Juvenile)以及成蝦(Adult)。卵孵化成葉狀幼體後, 會花

幾個月的時間往大洋浮游，經歷一系列的脫殼成長而增大體型。之後葉狀幼體會回到大陸棚區，進行最後階段的變態脫變為後期蝦苗。後期蝦苗會游回沿岸並沉降，等待脫殼後經過數天至數星期的時間脫變為底棲稚蝦階段。稚蝦通常棲息於較淺礁區，較大稚蝦及成蝦則喜好於離岸較深的水域。當成蝦達性成熟時，會進行生殖活動(Lipcius and Eggleston, 2000)。

### 三、甲殼類脫殼成長過程

甲殼類的成長是一階梯型(不連續)的成長，每一次的成長藉由脫殼(molting 或 ecdysis)來完成。根據外部形態特徵、生理特徵、甲殼的改變等，龍蝦脫殼過程簡易分為五個階段(Waddy et al., 1995; Wahle and Fogarty, 2006)：(1) 剛脫殼完，此一階段(約 24 - 48 小時)撐大新甲殼並在新甲殼上增生許多內皮層(Endocuticle)。(2) 此一階段結束於最後一層內皮層增生完畢。(3) 此一階段，經由作用在內皮層上化學變化，龍蝦的新甲殼達到其最硬，此新甲殼之甲殼長(Carapace length, CL)與先前舊殼 CL 之差異為脫殼增加量(Molt increment, MI)，之後龍蝦進入其脫殼間期(Intermolt period, IP)，脫殼間期為一段延長的時間，結束於龍蝦為進行下一次脫殼活動，身體開始產生生理變化；(4) 此階段又稱脫殼先期，龍蝦的內皮層與舊甲殼分離，未來新甲殼最外層的部分開始生成，此外藉由去礦化作用(Demineralization)，龍蝦部分的舊甲殼會明顯變軟，脫皮縫(Ecdysial sutures)在此階段出現；(5) 水會被吸收進甲殼內，殼內部水壓導致脫皮縫破裂，之後龍蝦身體蜷曲呈一倒 V 字型，龍蝦由連接頭胸甲及腹部的外骨骼接縫處離開舊甲殼，完成整個脫殼過程，其過程約為 10-20 分鐘。

### 四、龍蝦成長研究之方法回顧

由上述脫殼活動可知龍蝦的成長曲線呈階梯狀，且其在脫完殼後缺少可用來估計的年齡形質，因此研究龍蝦的成長主要藉由脫殼間期及脫殼增加量等變量來描述其成長。研究龍蝦成長的方法主要有以下幾種：

- (一) 蓄養試驗：觀察蓄養的龍蝦，記錄其 MI 和 IP 來推估成長參數，此外可藉由試驗設計探討不同因子(例如：餌料、光照、空間等)對成長的影響(Plaut and Fishelson, 1991; Castro et al., 2003; Kulmiye and Mavuti, 2005)。

- (二) 標識放流再捕獲法：可獲得龍蝦的 MI 及 IP 等相關資訊，之後推估其成長，此外亦可獲得龍蝦的分佈與遷徙等相關資訊(Punt et al., 1997; Ehrhardt, 2008; Montgomery et al., 2009)。
- (三) 體長頻度分析法：藉由體長頻度分佈推估年級群數及其平均體長，估計成長，此方法亦可用來估計死亡率(Munro, 1988; Arellano, 1989; Coutures and Chauvet, 2002)。
- (四) 測量  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  放射性同位素比例：藉龍蝦甲殼的放射性同位素比例推估 IP (Le Foll et al., 1989; Reyss et al., 1996; Verdoit et al., 1999)。
- (五) 間接的年齡指標，褐脂質(Lipofuscin)：褐脂質與年齡有關係，因此藉由量化腦內褐脂質含量估計龍蝦的年齡(Sheehy et al., 1998; Maxwell et al., 2007; Matthews et al., 2009)。

## 五、台灣東部海域龍蝦的漁業概況

在台灣，龍蝦的捕獲方式主要是以夜間潛水、刺網及陷阱網。台灣東北部、東部、南部(例如：恆春)及外島沿岸都有產，但以台灣東部產量較多，台灣東部龍蝦終年皆有漁獲，又以夏季產量較高。根據中華民國漁業年報顯示，近十年台灣龍蝦產量自 1999 年的 30 公噸有逐年遞減的趨勢，但在 2003 年卻上升至 217 公噸，之後又逐漸下滑至 2007 年的 7 公噸(Fig. 4)。整體而言，產量是逐年遞減的，將漁業年報之龍蝦漁獲量與台東龍蝦大盤商漁獲量資料進行初步比較，結果發現其產量相差甚異，推測漁業年報資料有待商榷，因此需要對此龍蝦漁業進一步的了解與掌握。

## 六、文獻回顧

由於龍蝦為高經濟價值的漁獲物，一般而言棲地離岸近、棲息水深淺、易被捕獲，因此全世界有相當多關於龍蝦的研究。有關密毛龍蝦的成長研究方面，有 Ebert and Ford (1986)在南太平洋之 Marshall Islands 使用標識放流再捕獲法估計成長及自然死亡率等參數；Munro (1988)在南太平洋之 Tonga 及 Arellano (1989)於 Philippines 是以體長頻度分析法，估計成長與自然死亡率等參數；Plaut and

Fishelson(1991)於 Red Sea 觀測蓄養情形下龍蝦的成長；Coutures and Chauvet (2002)以體長頻度分析法結合野外幼體測量及實驗室幼體蓄養，地點位於南太平洋之 New Caledonia; Matsuda *et al.* (2006)在日本的 Amami Ohshima Island 藉由實驗室幼體蓄養，觀察龍蝦早期生活史；Hearn and Murillo (2008)在東太平洋海域的 Galapagos Marine Reserve 使用標識放流再捕獲法推估成長及自然死亡率等參數。

在台灣，龍蝦之相關研究有：關於龍蝦生物學研究(何, 1986; 黃等, 1988; 何等, 1993; Jong, 1993; Chang *et al.*, 2007); 關於籠具、底刺網等漁具漁獲性能之研究(林, 1981; 鄭, 1985; 陳, 1986)，關於最小適捕體長之討論(Jong, 2000)；關於龍蝦生理學的研究(黃, 1998; 吳, 2006; 胡, 2008)，有關龍蝦成長研究方面多著重於影響龍蝦成長之試驗及提升養殖經濟效益之研究(鄭, 1978; 葉等, 1980; 鐘與林, 1981<sup>(a)(b)</sup>; 何與陳, 1990; 張, 2006)，然而鮮有推估野生族群成長之研究，僅有陳(2005)利用體長頻度分析法估計龍蝦的成長參數。

## 七、研究動機與目的

龍蝦為高經濟價值漁獲物，其成長緩慢，蓄養不易，因此野生龍蝦為市場主要來源。台灣多種龍蝦中，以密毛龍蝦最為常見且具有高度經濟價值，然而有關密毛龍蝦的研究相當缺乏，僅有初步養殖試驗研究(鄭, 1978; 何與陳, 1990)，利用體長頻度資料估計其成長參數(陳, 2005)及生殖生物學研究(Chang *et al.*, 2007)，本研究延續陳(2005)及 Chang *et al.* (2007)對於台東沿海密毛龍蝦之探討，在考慮實驗的執行可行性及資料可信度之後，藉由蓄養實驗來觀察密毛龍蝦的成長，建立成長模式模擬龍蝦之不連續脫殼成長過程，進一步推估台東沿海密毛龍蝦族群之成長，作為資源評估及漁業管理之基本參數，以期能達到保護及資源永續經營的目標。

## 材料方法

### 一、龍蝦樣本收集

本研究於 2007 年 9 月、2008 年 4 月及 2008 年 7 月至台東縣成功鎮龍蝦大盤商處隨機收集較有活力、健康的龍蝦，隨即送至中研院宜蘭臨海研究站(位於礁溪)蓄養。於 2007 年 9 月至 2009 年 3 月進行密毛龍蝦之蓄養實驗。測量頭胸甲長時，使用電子游標尺(Digital vernier calipers)量測龍蝦前額角下方凹槽中線至頭胸甲後緣之直線距離(Fig. 1)，精確至 0.01 mm。體重(Body weight)是用 SK-1000WP 之電子秤，上置一塑膠桶子，先予以歸零後再放入龍蝦，讀出之克數為龍蝦之全重(測量前會先將水甩掉再量測)，精確至 0.5 g。以外部形態(第五對步足是否有小螯，如 Fig. 2 所示)辨識性別並記錄。本研究中總樣本數為 133 隻，其中雄蝦 65 隻，頭胸甲長範圍：42.4 - 112.1 mm CL；雌蝦 68 隻，頭胸甲長範圍：40 - 92.8 mm CL (Fig. 5)。樣本分配是以野外龍蝦族群頭胸甲長組成為依據(陳, 2005; Chang et al., 2007)。

### 二、蓄養環境及脫殼資料收集

- (一) 蓄養池的水為循環再過濾的海水，其溫度隨著氣溫變化；光照設定為 12 小時黑暗及 12 小時光亮(Gonzalez-Gurriaran et al., 1995; Crear et al., 2003)。
- (二) 每個蓄養缸(44 × 45 × 42 cm)內蓄養一到三隻不等的龍蝦(依體型而異)及兩個蓄養池(200 × 200 × 106 cm)內各自蓄養 15 隻龍蝦(> 70 mm CL)並給予遮蔽物(例如：塑膠水管或水泥隔板，如 Fig. 6a 所示)。
- (三) 在實驗開始前先將龍蝦蓄養在上述的環境內一星期使其適應，之後每一隻龍蝦以黃色、綠色及紅色等尼龍線綁在其觸鬚的基部(Fig. 6a)，用以簡易分辨每一隻龍蝦個體測量並記錄其頭胸甲長大小、體重並開始進行實驗(Plaut and Fishelson, 1991; Kulmiye and Mavuti, 2005)。
- (四) 依據 Plaut and Fishelson (1991)指出在其預備試驗，密毛龍蝦一週餵食兩次與一天餵食一次，龍蝦的成長並無差異，因此本研究密毛龍蝦每個星期餵食兩次足量的餌料，所餵食的餌料有冷凍的魚類、蝦類、貝類或小管等(龍蝦攝食



情況如 Fig. 6b 所示)，在餵食完 24 時後，將蓄養缸(池)內的餌料清除，蓄養缸(池)則一周清理一次。

(五) 每天檢查並記錄水溫(每日水溫固定於早上十點測量)及蓄養缸(池)中的龍蝦是否有脫殼、死亡或斷肢發生。如有脫殼活動發生，則記錄其脫殼增加量(MI)、脫殼間期(IP)及斷足再生長度，本研究 MI 定義為脫殼後所增加的長度及 IP 定義為兩次脫殼中間所經歷的時間，如 Fig. 7 所示。

(六) 部分所蓄養的龍蝦因漁民捕抓過程或蓄養時有斷失步足的情況，斷失步足會在脫殼後再生。由於步足全長不易量測，本研究量測其相對步足長度(Propodus)，其測量方法如 Fig. 8 所示。

### 三、資料處理與分析

在成長研究中，短時間內的大量測量可能造成的測量誤差在成長估計中扮演著重要的角色。因此本研究將樣本依頭胸甲長大小分成三組(40 - 60、60 - 80 及大於 80 mm CL)，各組挑 10 隻重複測量頭胸甲長五次，將所得的測量誤差量化，結果得知三組的測量誤差約 0.1 mm CL，因此將脫殼增加量小於 0.1 mm CL 的資料刪除，脫殼增加量  $\geq 0.1$  mm CL 者才列入之後的計算。刪除的資料中亦包含蓄養下的龍蝦有可能因為蓄養壓力及缺乏所需的鈣質而產生脫殼後頭胸甲無增長的情形(Little, 1972)的資料，這一部分資料不列入脫殼增加量的計算，但仍列入做為脫殼間期的資料。

#### (一) 體重與頭胸甲長之關係

利用迴歸分析法分別求出雌雄別密毛龍蝦之體重與頭胸甲長關係式：

$$W = a_1 \times CL^{b_1} \quad (1)$$

其中  $W$ ：體重(Weight，單位：g)；

$CL$ ：頭胸甲長(Carapace length，單位：mm)；

$a_1$  和  $b_1$ ：係數；

之後利用 likelihood ratio test 檢定密毛龍蝦雌雄間體重與頭胸甲長之關係式是否有顯著差異，若無顯著差異，則將雌雄資料合併處理。

## (二) 脫殼增加量與頭胸甲長之關係

關於龍蝦脫殼增加量與脫殼前之頭胸甲長(Premolt carapace length，之後簡稱為頭胸甲長)之關係有相當多種模式被用來描述其關係(Wahle and Fogarty, 2006)，本研究嘗試多種模式後，發現以簡單線性迴歸來描述最為恰當，摒除過多複雜之計算及考量。本研究利用簡單線性迴歸分別描述雌雄別密毛龍蝦之脫殼增加量與頭胸甲長之關係式：

$$MI = a_2 + b_2 \times CL_t \quad (2)$$

其中  $MI$ ：脫殼增加量(單位：mm)；

$CL_t$ ：頭胸甲長(單位：mm)；

$a_2$  和  $b_2$ ：係數；

## (三) 脫殼間期與頭胸甲長之關係

關於脫殼間期與頭胸甲長之關係，亦有相當多種模式可表達(Wahle and Fogarty, 2006)，但是經過不同模式的套適發現以簡單線性迴歸來描述最為適當，摒除過多複雜之計算及考量，本研究利用簡單線性迴歸來描述雌雄別密毛龍蝦之脫殼間期與頭胸甲長之關係式：

$$IP = a_3 + b_3 \times CL_t \quad (3)$$

其中  $IP$ ：脫殼間期(單位：天數)；

$CL_t$ ：頭胸甲長(單位：mm)；

$a_3$  和  $b_3$ ：係數；

利用變積分析檢定密毛龍蝦雌雄間脫殼間期與頭胸甲長之關係式是否有顯著差異，若無顯著差異，則將雌雄資料合併處理。

#### (四) 脫殼間期與水溫之關係

利用變異數分析(The Analysis of Variance, ANOVA)檢定脫殼間期是否受水溫所影響，水溫為脫殼間期內的平均水溫，計算公式如下：

$$\bar{T} = \frac{\sum_{d=1}^{IP} Temp_d}{IP} \quad (4)$$

其中  $\bar{T}$ ：脫殼間期內的平均水溫(單位：°C)；

$Temp_d$ ：第  $d$  天的水溫(單位：°C)；

$IP$ ：脫殼間期(單位：天數)。

#### (五) 斷失步足再生長度之分析

本研究量測龍蝦斷失步足之相對步足長度以及脫殼後所再生的斷失步足之再生長度(如 Fig. 8 所示)。斷足再生長度比值計算如下：

$$\text{Regeneration ratio} = \frac{\text{length of the regenerating limb}}{\text{length of the opposite intact limb}} \quad (5)$$

利用 two-way ANOVA 檢驗雌雄間及不同體型間(以性成熟頭胸甲長約 60 mm CL 做分界)之斷足再生長度比值有無顯著差異(Plaut and Fishelson, 1991)。此外，利用 t-test 檢定龍蝦斷足與否是否影響其脫殼增加量之多寡。

### 四、成長模式

#### (一) von Bertalanffy growth equation (VBGE)成長方程式參數估計

VBGE 廣泛被用來描述物種的成長，也常應用在龍蝦的成長上(Kulmiye and Mavuti, 2005; Frisch, 2007)。

$$CL_t = CL_{\infty}(1 - e^{-k(t-t_0)}) \quad (6)$$

其中  $CL_t$ ：為  $t$  時間之頭胸甲長， $CL_{\infty}$ ：最大平均頭胸甲長， $k$ ：成長係數(Brody growth coefficient, Ricker, 1975)， $t_0$ ：為頭胸甲長為零時之理論年齡。本研究利用 Munro (1982)方法進行 VBGE 參數值估計。其做法為將該生物可能的  $CL_{\infty}$ 值代入下式 (Eq. 7)，之後求解一  $CL_{\infty}$ 值，使其利用下式所得  $k$  值之變異係數為最小：

$$k = \frac{\ln[(CL_{\infty} - CL_m) - \ln(CL_{\infty} - CL_r)]}{IP} \quad (7)$$

其中  $CL_m$ ：脫殼前頭胸甲長(單位：mm)；

$CL_r$ ：脫殼後頭胸甲長(單位：mm)；

$IP$ ：脫殼間期(單位：天數)。

## (二) 脫殼成長模式(Molt-process growth model)

為模擬甲殼類不連續之脫殼成長過程，本研究建立脫殼成長模式來描述末毛龍蝦之脫殼成長，建立體型隨時間增加的成長關係。依據密毛龍蝦的生活史(Fig. 3)，從卵到卵孵化平均約 30 天(Plaut, 1993)，卵孵化經葉狀幼體形成蝦苗約 7 - 8 個月的大洋浮游期(Johnson, 1971; Matsuda et al., 2006)，密毛龍蝦著床時頭胸甲長約 10 mm (Coutures and Chauvet, 2002)。因此將模式之初始頭胸甲長-年齡(size-at-age)假設為 10 mm CL - 250 天，此外參考相關龍蝦物種之年齡查定研究(Sheehy et al., 1998; Maxwell et al., 2007)，假設密毛龍蝦平均最大年齡為 30 歲，詳細的脫殼成長模式流程如下(Fig. 9)：

- (1) 將 10 mm CL( $CL_1$ )帶入已知的脫殼間期與頭胸甲長(Eq. 3)之關係式內，可得到  $IP_1$  天；
- (2) 經過  $IP_1$  天後龍蝦脫殼成長，將  $CL_1$  帶入已知脫殼增加量與頭胸甲長(Eq. 2)之關係式，可得到脫殼增加量( $MI_1$ )；
- (3)  $MI_1 + CL_1 = CL_2$ ，將  $CL_1$  的值以  $CL_2$  代替，並重複步驟 1-3，直至年齡達平均最大年齡 30 歲止。
- (4) 繪圖描述密毛龍蝦的成長趨勢。

## (三) 隨機脫殼成長模式(Stochastic molt-process growth model)

### (1) 模式模擬過程

由於上述的 VBGE 及脫殼成長模式未考慮個體在成長上的差異，然而龍蝦的生活史過程複雜，因此個體間之頭胸甲長-年齡存在很大的變異(Phillips et al., 1992; Wahle and Fogarty, 2006)。因此本研究利用 Monte Carlo 模擬方法，考慮個體間脫殼成長的變異，建立龍蝦體型隨時間增加的不連續脫殼成長關係及其未確定性

(Uncertainty)。模式之初始頭胸甲長-年齡與平均最大年齡設定與上述脫殼成長模式相同，詳細的隨機脫殼成長模式流程如下(Fig. 10) (Chen and Kennelly, 1999)：

1. 模式開始模擬前，設定初始頭胸甲長-年齡( $CL_1$ , 10 mm CL - 250 days)，並假設該龍蝦剛脫完殼，因此脫殼後到目前時間點的累計天數(Days-at-large,  $DAL$ )為零天。
2. 利用脫殼機率( $MP$ )與  $DAL$  之關係，計算該  $DAL$  下之脫殼機率(詳細計算方式請見“(2) 脫殼機率與時間之關係”)。
3. 從 0~1 的 uniform distribution 隨機選取一個亂數值( $R$ )。若  $R < MP$ ，則脫殼活動發生，脫殼後頭胸甲長為  $CL_2 = CL_1 + MI$ ；若  $R > MP$ ，則脫殼活動沒有發生，則  $DAL$  以 30 天為單位累加( $DAL = DAL + 30$ )，重複步驟 2 及 3 直到  $R < MP$ ，脫殼活動發生。
4. 將  $CL_2$  帶入  $CL_1$ ，重複步驟 1 到 3，直到平均最大年齡 30 歲止。
5. 重複模擬步驟(1)到(4)100 次，分別代表不同個體之成長趨勢，並描繪其頭胸甲長-年齡關係之 95% 信賴區間。

## (2) 脫殼機率與時間之關係

由於不同體型大小的龍蝦其脫殼機率通常不一樣(McLAY, 1985)，因此本研究將龍蝦依頭胸甲長分成三個不同體型大小的群組(40 - 60、60 - 80 及大於 80 mm CL)，分別計算其脫殼機率。

$$MP_i = \frac{N_{m,i}}{N_{m,i} + N_{n,i}} \quad (8)$$

其中  $MP_i$ ：有脫殼個體在  $i$  群組所佔的比例； $N_{m,i}$ ：在特定時間內， $i$  群組內有脫殼的個體數； $N_{n,i}$ ：在特定時間內， $i$  群組內沒有脫殼的個體數。之後計算每增加 30 天龍蝦之脫殼機率，再以邏輯曲線描述脫殼機率與  $DAL$  之關係，邏輯曲線方程式如下：

$$MP_i = \frac{1}{1 + \exp(\alpha_i + \beta_i \times DAL_i)} \quad (9)$$

其中  $MP_i$ ：在一段時間內( $DAL$ )， $i$  群組的龍蝦之脫殼機率， $DAL_i$  為  $i$  群組的龍蝦從上一次脫殼完後到某一時間點的累計天數(Days-at-large)， $\alpha_i$  及  $\beta_i$  為  $i$  群組內之邏

輯曲線參數，之後利用非線性最小平方法 (Non-linear least squares method)進行參數估計。

### (3) 脫殼增加量與頭胸甲長關係之未確定性

在  $MI$  與  $CL$  關係方面，為了考慮個體間之變異，本研究利用 Bootstrap 方法 (Efron and Tibshirani, 1993)，對  $MI$  與  $CL$  資料進行再抽樣(Re-sampling)，重複估計  $MI$  與  $CL$  關係之參數( $a_2$  及  $b_2$ )100 次，因此在隨機脫殼成長模式 100 次重複模擬過程中，分別使用 100 組  $MI$  與  $CL$  關係之參數值來描述不同個體間脫殼增加量之變異。



## 結果

### 一、蓄養實驗結果

#### (一) 脫殼活動

本研究以錄影方式觀察龍蝦脫殼活動，發現龍蝦脫殼活動大多在夜間進行。其最後一階段脫殼過程如 Fig. 11 所示，參考前言“三、甲殼類脫殼成長過程”：(a) 可以明顯觀察到脫皮縫；(b) 龍蝦已找到適當的位置並開始推擠頭胸甲殼；(c) 龍蝦眼睛已經脫離舊頭胸甲殼；(d) 龍蝦眼睛已露出甲殼外，舊頭胸甲殼與地面呈 90 度角；(e) 龍蝦嘗試脫離舊甲殼；(f) 突然一躍，完全躍出舊甲殼。

#### (二) 蓄養過程中死亡

本研究自實驗開始至結束共死亡 107 隻龍蝦，其中因脫殼而死亡者有 34 隻，不明原因死亡者有 73 隻(其中包含未經脫殼活動就死亡者 33 隻龍蝦)，其月別變化如 Fig. 12 所示。

#### (三) 體重與頭胸甲長之關係

本研究所蓄養的 133 隻密毛龍蝦中，有記錄到體重的雌性樣本數為 55 隻，雄性樣本數為 48 隻。利用迴歸分析法分別求出雌性及雄性之體重與頭胸甲長關係式如下：

$$\text{雌性：} W = 1.3 \times 10^{-3} CL^{2.9097} \quad (r^2 = 0.9895)$$

$$\text{雄性：} W = 1.4 \times 10^{-3} CL^{2.8847} \quad (r^2 = 0.9899)$$

likelihood ratio test 結果顯示雌雄間無顯著差異存在( $P > 0.05$ )，因此將雌雄樣本合併，以迴歸分析法求得合併後之關係式(Fig. 13)：

$$W = 1.4 \times 10^{-3} CL^{2.8845} \quad (r^2 = 0.9887)$$

#### (四) 脫殼增加量與頭胸甲長之關係

實驗期間共有 45 隻龍蝦經歷一次脫殼，29 隻龍蝦經歷兩次脫殼，20 隻龍蝦三次脫殼，8 隻龍蝦經歷四次脫殼，8 隻龍蝦經歷五次脫殼，1 隻龍蝦經歷六次脫

殼。扣除脫殼增加量小於 0.1 mm CL 之後，脫殼增加量的樣本數為 156 筆，其中雌蝦為 92 筆，雄蝦為 64 筆。雌雄別脫殼增加量與頭胸甲長之散布圖如 Fig. 14 所示，利用迴歸分析法分別求出雌性及雄性之脫殼增加量與頭胸甲長之關係式如下：

$$\text{雌性： } MI = -0.0032 \times CL + 0.7652 \quad (r = -0.06)$$

$$\text{雄性： } MI = 0.0022 \times CL + 0.6655 \quad (r = 0.06)$$

雌雄別之脫殼增加量與頭胸甲長沒有顯著的線性關係存在( $P > 0.05$ )，即脫殼增加量不隨著頭胸甲長增加而增加。平均脫殼增加量為  $0.68 \pm 0.51$  (Standard deviation) mm。

#### (五) 脫殼間期與頭胸甲長之關係

樣本數中有記錄到脫殼間期的總樣本數為 130 筆，其中雌蝦為 79 筆，雄蝦為 51 筆脫殼間期。利用迴歸分析法求出雌性及雄性密毛龍蝦之脫殼間期與頭胸甲長大小之關係式如下(Fig. 15)：

$$\text{雌性： } IP = 0.945 \times CL + 66.019 \quad (r = 0.28)$$

$$\text{雄性： } IP = 1.2709 \times CL + 50.476 \quad (r = 0.27)$$

結果顯示，雌雄別之脫殼間期與頭胸甲長有顯著的線性關係存在( $P < 0.05$ )，變積分析結果顯示雌雄別之脫殼間期與頭胸甲長關係沒有差異( $P > 0.05$ )，因此將雌雄樣本合併，以迴歸分析法求得合併後之關係式。

$$IP = 1.0864 \times CL + 59.393 \quad (r = 0.27)$$

#### (六) 脫殼間期與水溫之關係

由上述檢定可知性別不會影響脫殼間期，因此將雌雄資料合併利用變異數分析檢定脫殼間期與水溫之間是否有相關性。結果顯示，脫殼間期會受到水溫高低的影響( $F = 13.4, P < 0.05$ )。從 Fig. 16 中，依體型大小分成兩個頭胸甲長範圍分別



為：40 - 60 mm CL、大於 60 mm CL(因大於 80 mm CL 的樣本數太少，並未獨立出來)，可發現隨著水溫增高脫殼間期越短，體型大者受水溫影響較體型小者顯著。

$$40 - 60 \text{ mm CL} : IP = 500.57 - 13.732 \times T \quad (r = 0.26)$$

$$> 60 \text{ mm CL} : IP = 199.04 - 3.6184 \times T \quad (r = 0.59)$$

#### (六) 斷失步足再生長度之分析

斷失步足的龍蝦在脫殼後其斷足再生長度比率為  $0.80 \pm 0.18$  (range = 0.00 - 0.99,  $n = 75$ )。雌雄間之斷足再生長度比率沒有顯著差異( $F = 0.3295, P > 0.05$ )，然而不同體型之龍蝦其斷足再生長度比率有顯著差異，體型較小者龍蝦其再生長度比率較大( $F = 0.0065, P < 0.05$ )。此外，斷失步足與否並不影響脫殼增加量的多寡( $t = 0.35, P > 0.05$ )。

## 二、成長模式

### (一) von Bertalanffy growth equation (VBGE) 成長方程式參數估計

利用 Munro (1982) 的方法所求的雌雄別成長參數為：

$$\text{雌性} : CL_{\infty} = 87.68 \text{ (mm)}, k = 0.137 \text{ (yr}^{-1}\text{)}$$

$$\text{雄性} : CL_{\infty} = 86.04 \text{ (mm)}, k = 0.207 \text{ (yr}^{-1}\text{)}$$

本研究利用假設的初始頭胸甲長-年齡(10 mm CL - 250 days)，所得的 VBGE 成長曲線如 Fig. 17 所示。

### (二) 脫殼成長模式(Molt-process growth model)

利用上述 MI 和 CL 之參數( $a_2, b_2$ )及 IP 和 CL 之參數( $a_3, b_3$ )，當初始頭胸甲長-年齡假設為 10 mm CL - 250 天時，所推估之雌雄別頭胸甲長-年齡關係如 Fig. 18 所示。雄蝦成長較雌蝦大，且推測雄蝦最大平均頭胸甲長約 90 mm，雌蝦最大平均頭胸甲長約 75 mm。

(三) 隨機脫殼成長模式(Stochastic molt-process growth model)

以非線性最小平方法估計雌雄別、不同體型群組別之脫殼機率與 *DAL* 關係其參數結果如下：

(1) 雌性(Fig. 19)

$$40 - 60 \text{ mm CL} : \alpha_1 = 0.0820 ; \beta_1 = 33.8356 \quad (n = 37)$$

$$60 - 80 \text{ mm CL} : \alpha_2 = 0.0878 ; \beta_2 = 55.9600 \quad (n = 13)$$

$$> 80 \text{ mm CL} : \alpha_3 = 0.1213 ; \beta_3 = 51.8060 \quad (n = 6)$$

(2) 雄性(Fig. 20)

$$40 - 60 \text{ mm CL} : \alpha_1 = 0.0760 ; \beta_1 = 35.6800 \quad (n = 25)$$

$$60 - 80 \text{ mm CL} : \alpha_2 = 0.1522 ; \beta_2 = 48.0770 \quad (n = 14)$$

$$> 80 \text{ mm CL} : \alpha_3 = 0.1360 ; \beta_3 = 54.4760 \quad (n = 12)$$

利用隨機脫殼成長模式考慮個體間成長之變異，經模擬 100 次所得雌雄別頭胸甲長-年齡關係如 Fig. 21 所示，中位數及 95% 信賴區間如 Fig. 22 所示。從圖中可看出，雄蝦的成長率大於雌蝦，其雄蝦最大頭胸甲長中位數約為 130 mm，雌蝦最大頭胸甲長中位數約為 100 mm，且 95% 信賴區間範圍也很廣，顯示個體成長變異很大。

## 討論

### 一、蓄養實驗的優缺點

以蓄養方式進行成長推估，其缺點為實驗室環境與野外環境的差異(例如：物理因子，食物等)，通常認為實驗開始後所得前幾次的脫殼資料較為可信(Wahle and Fogarty, 2006)。與蓄養實驗相比，標識放流再捕獲的方法，亦會經由捕獲，標識等因素而影響其成長(Brown and Caputi, 1985; Hunt and Lyons, 1986; Phillips et al., 1992)。儘管蓄養實驗有這樣的問題存在，但是其可得到脫殼增加量及脫殼間期等資料，標識放流法所得到的脫殼增加量資料則往往有觀察誤差，且無法直接估計龍蝦的脫殼間期，因此利用脫殼機率(Molt probability)來取代脫殼間期的估計。此外，蓄養實驗可進一步進行試驗設計，探討不同因子對龍蝦成長，生殖等生物過程的影響。總結來說，對於龍蝦自然族群成長的描述，蓄養方法所得結果仍具可信性，本研究的前提假設為本實驗之蓄養環境與野外接近，因此利用實驗觀察結果來推估台灣東部沿海密毛龍蝦之成長。此外，本研究進一步考慮個體之變異，利用隨機脫殼成長模式模擬台灣東部沿海密毛龍蝦成長的未確定性。

### 二、脫殼成長

龍蝦生活史很複雜，因此造成不同個體間年齡-體長有很大的變異，有研究指出水溫(Lipcius and Eggleston, 2000)、族群密度(DeMartini et al., 2003)、食物(Kanciruk, 1980)及遮蔽所(Polovina, 1989)都會影響龍蝦的成長。一般來說，生長在暖水域的龍蝦其成長較冷水域的龍蝦快(Lipcius and Eggleston, 2000)，成長率會隨著水溫的增加而增加，通常是因為脫殼間期的縮短(Hartnoll, 1982; Montgomery et al., 2009)。本實驗共蓄養 133 隻龍蝦，其中雄蝦 65 隻，雌蝦 68 隻。使用 156 筆脫殼增加量，平均脫殼增加量為  $0.68 \pm 0.51$  mm；以及 130 筆脫殼間期，平均脫殼間期： $118.87 \pm 42.68$  天。本研究結果顯示，密毛龍蝦終年都有脫殼活動發生，主要發生在夏季(Fig. 23)，脫殼增加量不隨體型及性別而有差異，可能是大體型(> 80 mm CL)樣本數較少造成估計誤差；且脫殼間期不受性別影響，隨體型增加而增加，隨水溫的升高而縮短，體型越大者受水溫影響越顯著，可能是小體型龍蝦脫殼間期較短，因此受水溫影響較不明顯。本研究結果可發現，密毛龍蝦的脫殼增加量

變異很大，相同的情形在 Plaut and Fishelson(1991)之實驗也有觀察到。而本研究選擇用簡單線性關係來描述脫殼增加量、脫殼間期與頭胸甲長之關係，是因為其他模式並沒有得到比較好的結果。

本實驗過程中，推測造成龍蝦死亡的因素有：殘食、細菌感染(例如：爛尾)、水溫過高、脫殼困難(Fig. 24)、脫殼後死亡(定義為脫殼後一個禮拜內死亡)等。從 Fig. 12 中可觀察到，08 年五到八月的死亡率較高，推測龍蝦可能受到畜養缸空間限制，因此無法像在野外環境可自由活動至較適宜的水溫，且水溫升高可能造成病菌的孳生，而導致在這些月份有較高的死亡率。其中脫殼困難及脫殼後死亡稱為脫殼死亡併發症(Molt death syndrome)。此種併發症主要出現在養殖試驗中，引發此併發症的原因包括，在脫殼過程中或完成脫殼後其生理上壓力的增加、新舊甲殼之間黏住以至於無法完成脫殼過程、感染和病變使龍蝦產生過度主動防禦、鈣質在甲殼上不正常堆積也可能造成死亡或是調節鈣質的代謝機能失衡等(Shields et al., 2006)。維持良好的水質、提供足夠的營養、移除受感染的殘骸以及將受感染的個體隔離可避免在養殖試驗過程中引發此併發症(Evans et al., 2000)。

### 三、斷足再生

Brown and Caputi (1985)的研究指出斷足再生會減緩龍蝦的成長率(意即斷足再生會造成脫殼增加量的減少或是脫殼間期的延長)，Brouwer et al. (2006)的研究結果指出 *J. lalandii* 斷足再生三隻步足以上，成長明顯減緩(脫殼增加量減少與脫殼間期延長)以及死亡率提升。然而本研究結果指出小體型龍蝦之斷失步足再生比率較大體型高，且斷足與否並不影響脫殼增加量。綜合以上結果，推論蓄養情況下的密毛龍蝦耗費在斷足再生的能量並不影響脫殼成長的結果，與 Plaut and Fishelson (1991)在紅海針對密毛龍蝦之蓄養實驗有相同的結果。推測可能的原因是在蓄養環境下有充足的食物，不像在野外需要獵食，因此斷足情形並不影響成長。

### 四、三種成長模式之比較

本研究使用 VBGE、脫殼成長模式及隨機脫殼成長模式等三種不同的成長模式來描述台灣東部沿海密毛龍蝦的成長情形(Fig. 25)，不同模式所需要的輸入參數如 Table 1，其中以 VBGE、脫殼成長模式所需的參數較少，隨機脫殼成長模式所

需的參數較多，VBGE 的優點為可直接與資源評估模式結合使用，缺點為連續曲線，沒有考慮到龍蝦階梯型的脫殼成長，而使用脫殼增加量、脫殼間期與頭胸甲長之關係為基礎的脫殼成長模式，由於蓄養下的龍蝦可能因為蓄養壓力及缺乏所需的鈣質而產生脫殼後頭胸甲長無增長的情形(Little, 1972)，且模式未考慮個體間變異的未確定性，因此較不周全。隨機脫殼成長模式利用 Monte Carlo 法考慮龍蝦個體間脫殼間期的變異，且利用再抽樣方法考慮個體間脫殼增加量的變異，因此考慮到其成長的未確定性，描繪出龍蝦可能的成長型式，這一部分結果可進一步用來推估龍蝦年齡-體長表(包含其標準差)(Age - length - key)，作為資源評估模式輸入資訊。

VBGE 推測雌蝦極限頭胸甲長為 87.68 mm，雄蝦極限頭胸甲長為 86.04 mm；脫殼成長模式推估雌蝦平均最大頭胸甲長為 75 mm，雄蝦平均最大頭胸甲長 90 mm；隨機脫殼成長模式推估雌蝦最大頭胸甲長中位數約為 100 mm，雄蝦最大頭胸甲長中位數約為 130 mm。由於 VBGE 及脫殼成長模式都是利用實驗觀測資料為基底，進而推測成長趨勢，皆未考慮到個體成長之變異，因此其推估的平均雌雄別極限頭胸甲長較為接近，而隨機脫殼成長模式考慮個體成長之變異，其所得最大頭胸甲長中位數與陳(2005)所收集到台東沿海密毛龍蝦最大樣本頭胸甲長(雌蝦為 115.9 mm CL；雄蝦為 131.6 mm CL)相當接近，因此本研究認為考慮個體成長之變異較能反應出野外族群之成長情形。此外，VBGE 雌雄別的成长曲線與脫殼成長模式及隨機脫殼成長模式所描繪之成長曲線相當不同(Fig. 25)，在約 50 mm CL 以前，VBGE 成長曲線顯示成長較快且雌雄間已有成長速率之差異，但脫殼成長模式及隨機脫殼成長模式則顯示雌雄間成長速率相似。在約 50 mm 之後，VBGE 成長曲線顯示雌雄成長漸趨於一致，而脫殼成長模式及隨機脫殼成長模式則顯示雌雄間成長速率有明顯差異。龍蝦與其他的甲殼類一樣，在性成熟前成長快速，達到性成熟後成長速率趨緩(Hearn and Murillo, 2008)。而 Chang et al. (2007)的研究指出，台東沿海的密毛龍蝦雌蝦生理上性成熟頭胸甲長為： $56.46 \pm 0.56$  mm CL，因此推測性成熟後雌蝦會將部分能量移轉進行生殖活動導致成長率降低。

## 五、與前人研究結果比較

本研究利用 Munro (1982)法，所得 VBGE 成長參數為：雌性  $CL_{\infty} = 87.68 \text{ mm}$ ， $k = 0.137 \text{ yr}^{-1}$ ；雄性  $CL_{\infty} = 86.04 \text{ mm}$ ， $k = 0.207 \text{ yr}^{-1}$ 。與陳(2005)在台東沿海利用體長資料所估得成長參數：雌性： $CL_{\infty} = 104.7 \text{ mm}$ ， $k = 0.259 \text{ yr}^{-1}$ ；雄性： $CL_{\infty} = 135.2 \text{ mm}$ ， $k = 0.192 \text{ yr}^{-1}$ 有明顯的不同，推測其可能是因為：

- (一) 陳(2005)利用體長頻度分佈法，本研究則是以脫殼增加量與脫殼間期利用 Munro (1982)法求取 VBGE 參數，該方法適用於體長範圍不夠廣的資料 (例如：標識放流再捕獲及蓄養資料等)推估成長參數，但會受到樣本頭胸甲長範圍之影響，因此使用不同的方法所估計的成長參數可能會有所誤差。
- (二) 由於實驗蓄養的龍蝦是從台東縣成功鎮收集而得，並送至中研院宜蘭臨海研究站蓄養。以 2008 年為例：從 Fig. 26 中可知，成功測站水溫(資料來源：中央氣象局)與實驗水溫月均溫趨勢大致相似，但五月至十二月水溫有明顯差異，最高甚至相差到  $2.71^{\circ}\text{C}$ (九月)，因此推測地區不同的水溫差異造成成長率不同，以至於推估所得成長參數之不同。

將本研究 VBGE 結果與其他地區的密毛龍蝦成長研究之 VBGE 參數結果相比較(Table 2)，發現不同研究結果相差甚大。此外，將隨機脫殼成長模式與其他地區密毛龍蝦之成長曲線相比(Fig. 27)，隨機脫殼成長模式已考慮個體成長之變異，而前人研究都是以 VBGE 成長模式呈現密毛龍蝦之平均成長趨勢，可看出本地的密毛龍蝦相對於其他地區的成長速率明顯緩慢，推測原因如下：

- (一) 龍蝦的成長率在不同的系群、個體間以及地區等，會因為食物、水溫、低溶氧量與族群密度等因子的不同而產生很大的變異。很可能因為上述因子與自然環境中不同而影響其成長(脫殼增加量與脫殼間期)，造成龍蝦成長的緩慢。
- (二) 本研究地點與前人研究地點之採樣方式不同影響樣本頭胸甲長範圍(例如：利用底刺網、籠具以及潛水採集樣本，其樣本頭胸甲長範圍即有可能不同)及估計方法的不同導致推估的結果不同。
- (三) 實驗過程中的觀測誤差(Observational error)以及模式誤差(Model error)。

整體來說，本研究與 Plaut and Fishelson(1991)皆是以蓄養密毛龍蝦推估成長參數，所得結果也較相近，且成長速率較體長頻度法或標識放流再捕獲法所得結果來得小。

## 結論

- 一、本研究於 2007 年 9 月至 2009 年 3 月進行密毛龍蝦之蓄養實驗。實驗總樣本數為 133 隻，其中雄蝦 65 隻，頭胸甲長(CL)範圍：42.4 - 112.1 mm；雌蝦 68 隻，頭胸甲長範圍：40 - 92.8 mm。其中有記錄到體重的雌性樣本數為 55 隻，雄性樣本數為 48 隻，且雌雄間體長體重關係沒有顯著差異存在。
- 二、密毛龍蝦終年都有脫殼活動發生，主要脫殼活動集中在夏季，共使用 156 筆脫殼成長量及 130 筆脫殼間期資料，主要分佈在頭胸甲長 40 - 70 mm；平均脫殼增加量為  $0.68 \pm 0.51(\text{S.D.})$  mm；水溫變動與龍蝦體型大小其脫殼增加量皆不變；脫殼間期會隨著水溫之升高而縮短，隨著體型之增加而延長；脫殼後其斷失步足再生長度比率為  $0.80 \pm 0.18$ ，斷足再生長度比率在雌雄間沒有顯著差異，但與龍蝦體型大小有關，斷失步足不影響其脫殼增加量。
- 三、利用 Munro (1982)的方法所求的雌雄別 VBGE 成長參數為：雌性： $CL_{\infty} = 87.68$  (mm)， $k = 0.137$  ( $\text{yr}^{-1}$ )；雄性： $CL_{\infty} = 86.04$  (mm)， $k = 0.207$  ( $\text{yr}^{-1}$ )；脫殼成長模式推估雌蝦平均最大頭胸甲長為 75 mm，雄蝦平均最大頭胸甲長 90 mm；隨機脫殼成長模式推估雌蝦最大頭胸甲長中位數約為 100 mm，雄蝦最大頭胸甲長中位數約為 130 mm。
- 四、本研究與 Plaut and Fishelson(1991)皆是以蓄養密毛龍蝦推估成長參數，所得結果也較相近，且成長速率較體長頻度法或標識放流再捕獲法所得結果來得小。
- 五、本研究建議利用隨機脫殼成長模式來描述台灣東部沿海密毛龍蝦之脫殼與成長，結果可進一步用來推估龍蝦年齡-體長表，作為資源評估模式輸入資訊，以期達到保育及永續利用該資源的目標。

## 參考文獻

- Arellano, R.V., 1989. Estimation of growth parameters in *Panulirus penicillatus* using a Wetherall plot and comparisons with other lobsters. *Fishbyte* 7, 3-15.
- Brouwer, S.L., Groeneveld, J.C., Blows, B., 2006. The effects of appendage loss on growth of South African west coast rock lobster *Jasus lalandii*. *Fish. Res.*, 236-242.
- Brown, R.S., Caputi, N., 1985. Factors affecting the growth of undersize western rock lobster, *Panulirus cygnus* George, returned by fishermen to the sea. *Fish. Bull.* 83, 567-574.
- Castro, M., Encarnacao, P., Henriques, P., 2003. Increment at molt for the Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) from the south coast of Portugal. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 1159-1164.
- Chang, Y.J., Sun, C.L., Chen, Y., Yeh, S.Z., Chiang, W.C., 2007. Reproductive biology of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in the southeastern coastal waters off Taiwan. *Mar. Biol.* 151, 553-564.
- Chen, Y., Kennelly, S.J., 1999. Growth of spanner crabs, *Ranina ranina*, off the east coast of Australia. *Mar. Freshw. Res.* 50, 319-325.
- Coutures, E., Chauvet, C., 2002. Growth and minimum suitable catch size of spiny lobsters, *Panulirus penicillatus* (Olivier, 1791) and *Panulirus longipes bispinosus* Borradaile, 1899 (Decapoda, Palinuridae) in the southern lagoon of New Caledonia. *Crustaceana* 74, 1189-1199
- Crear, B.J., Hart, P.R., Thomas, C.W., 2003. The effect of photoperiod on growth, survival, colour and activity of juvenile southern rock lobster, *Jasus edwardsii*. *Aquac. Res.* 34, 439-444.



DeMartini, E.E., DiNardo, G.T., Williams, H.A., 2003. Temporal changes in population density, fecundity, and egg size of the Hawaiian spiny lobster (*Panulirus marginatus*) at Necker Bank, Northwestern Hawaiian Islands. *Fish. Bull.* 101, 22-31.

Ebert, T.A., Ford, R.F., 1986. Population ecology and fishery potential of the spiny lobster *Panulirus penicillatus* at Enewetak Atoll, Marshall-Islands. *Bull. Mar. Sci.* 38, 56-67.

Efron, B., Tibshirani, R.J., 1993. An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall, New York, USA.

Ehrhardt, N.M., 2008. Estimating growth of the Florida spiny lobster, *Panulirus argus*, from molt frequency and size increment data derived from tag and recapture experiments. *Fish. Res.* 93, 332-337.

Evans, L.H., Jones, J.B., Brock, J.A., 2000. Diseases of spiny lobster. In: Phillips, B.F., Kittaka, J. (Eds.), *Spiny lobsters: Fisheries and culture*. Fishing News Books, Malden, pp. 586-600.

Fischer, W., Bianchi, G., 1984. FAO Species identification sheets for fishery purposes, Western Indian Ocean. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Frisch, A.J., 2007. Growth and reproduction of the painted spiny lobster (*Panulirus versicolor*) on the Great Barrier Reef (Australia). *Fish. Res.* 85, 61-67.

Gonzalez-Gurriaran, E., Freire, J., Parapar, J., Sampedro, M.P., 1995. Growth at molt and molting seasonality of the spider crab, *Maja squinado* (Herbst) (decapoda, majidae) in experimental conditions - implications for juvenile life-history. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 189, 183-203.

Gulland, J.A., Holt, S.J., 1959. Estimation of growth parameters for data at unequal time intervals. *ICES J. Mar. Sci.* 25, 47-49.

- Hartnoll, R.G., 1982. Growth. In: Bliss, D.E. (Ed.), *The Biology of Crustacea*. Academic Press, New York pp. 111-196.
- Hearn, A., Murillo, Y.C., 2008. Life history of the red spiny lobster, *Panulirus penicillatus* (Decapoda : Palinuridae), in the Galapagos Marine Reserve, Ecuador. *Pac. Sci.* 62, 191-204.
- Holthuis, L.B., 1991. Marine lobsters of the world. An annotated and illustrated catalogue of species of interest to fisheries known to date. *FAO Fish. Synop.* 13, 1-292.
- Hunt, J.H., Lyons, W.G., 1986. Factors affecting growth and maturation of spiny lobsters, *Panulirus argus*, in the Florida Keys. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43, 2243-2247.
- Johnson, M.W., 1971. The phyllosoma larvae of slipper lobsters from the Hawaiian Islands and Adjacent areas (Decapoda, Scyllaridae). *Crustac. Int. J. Crustac. Res.* 20, 77-103.
- Jong, K.-J., 1993. Growth of the Spiny Lobster *Panulirus homarus* (Linnaeus, 1758), Depending on Sex and Influenced by Reproduction (Decapoda, Palinuridae). *Crustaceana* 64, 18-23.
- Jong, K.-J., 2000. Suitability of minimum legal fishing size of lobsters in Taiwan. *J. Fish. Soc. Taiwan* 27, 1-6.
- Kancirik, P., 1980. Ecology of juvenile and adult Palinuridae (Spiny lobsters). In: Cobb, J.S., Phillips, B.F. (Eds.), *The Biology and Management of Lobsters*. Academic Press, New York, pp. 59-96.
- Kulmiye, A.J., Mavuti, K.M., 2005. Growth and moulting of captive *Panulirus homarus homarus* in Kenya, western Indian Ocean. *N. Z. J. Mar. Freshw. Res.* 39, 539-549.

Lefoll, D., Brichet, E., Reyss, J.L., Lalou, C., Latrouite, D., 1989. Age-determination of the spider crab *Maja squinado* and the European lobster *Homarus gammarus* by  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  chronology: possible extension to other crustaceans. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 46, 720-724.

Lipcius, R.N., Eggleston, D.B., 2000. Ecology and fishery biology of spiny lobster. In: Phillips, B.F., Kittaka, J. (Eds.), Spiny lobsters: fisheries and culture. Fishing News Books, Malden, pp. 1-41.

Little, E.J., 1972. Tagging of spiny lobsters (*Panulirus argus*) in the Florida Keys 1967-1969. Fla. Dep. Nat. Resour. 31, 1-23.

Matsuda, H., Takenouchi, T., Goldstein, J.S., 2006. The complete larval development of the Pronghorn spiny lobster *Panulirus penicillatus* (Decapoda : Palinuridae) in culture. J. Crust. Biol. 26, 579-600.

Matthews, T.R., Maxwell, K.E., Bertelsen, R.D., Derby, C.D., 2009. Use of neurolipofuscin to determine age structure and growth rates of Caribbean spiny lobster *Panulirus argus* in Florida, United States. N. Z. J. Mar. Freshw. Res. 43, 125-137.

Maxwell, K.E., Matthews, T.R., Sheehy, M.R.J., Bertelsen, R.D., Derby, C.D., 2007. Neurolipofuscin is a measure of age in *Panulirus argus*, the Caribbean spiny lobster, in Florida. Biol. Bull. 213, 55-66.

McLay, C.L., 1985. Moulting and growth in *Pagurus traversi* and *P. novizealandiae* (Decapoda: Anomura: Paguridae): the effects of neighbours. N. Z. J. Mar. Freshw. Res. 19, 327-337.

Montgomery, S.S., Liggins, G.W., Craig, J.R., McLeod, J.R., 2009. Growth of the spiny lobster *Jasus verreauxi* (Decapoda: Palinuridae) off the east coast of Australia. N. Z. J. Mar. Freshw. Res. 43, 113-123.

- Munro, J.L., 1982. Estimation of the parameters of the von Bertalanffy growth equation from recapture data at variable time intervals. *ICES J. Mar. Sci.* 40, 199-200.
- Munro, J.L., 1988. Growth and mortality rates and state of exploitation of spiny lobsters in Tonga. South Pacific Commission, Workshop on Pacific Inshore Fishery Resources, New Caledonia, pp. 1-34.
- Phillips, B.F., Melville-Smith, R., 2006. *Panulirus* Species. In: Phillips, B.F. (Ed.), Lobsters: biology, management, aquaculture, and fisheries. Blackwell Publishing pp. 359-384.
- Phillips, B.F., Palmer, M.J., Cruz, R., Trendall, J.T., 1992. Estimating growth of the spiny lobsters *Panulirus cygnus*, *P. argus* and *P. ornatus*. *Mar. Freshw. Res.* 43, 1177-1188.
- Plaut, I., 1993. Sexual maturity, reproductive season and fecundity of the spiny lobster *Panulirus penicillatus* from the Gulf of Eilat (Aqaba), Red Sea. *Mar. Freshw. Res.* 44, 527-535.
- Plaut, I., Fishelson, L., 1991. Population structure and growth in captivity of the spiny lobster *Panulirus penicillatus* from Dahab, Gulf of Aqaba, Red Sea. *Mar. Biol.* 111, 467-472.
- Polovina, J.J., 1989. Density dependence in spiny lobster, *Panulirus marginatus*, in the northwestern Hawaiian Islands. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46, 660-665.
- Prescott, J., 1988. Tropical spiny lobster: an overview of their biology, the sheries and the economics with reference to the double spined rock lobster *P. penicillatus*. South Pacific Commission, Workshop on Pacific Inshore Fishery Resources, New Caledonia, pp. 1-36.
- Punt, A.E., Kennedy, R.B., Frusher, S.D., 1997. Estimating the size-transition matrix for Tasmanian rock lobster, *Jasus edwardsii*. *Mar. Freshw. Res.* 48, 981-992.

Reyss, J.L., Schmidt, S., Latrouite, D., Floris, S., 1996. Age determination of crustacean carapaces using  $\text{Th}^{228}/\text{Ra}^{228}$  measurements by ultra low level gamma spectrometry. *Appl. Radiat. Isot.* 47, 1049-1053.

Ricker, W.E., 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bull. Fish. Res. Board. Canada*, Ottawa

Sheehy, M., Caputi, N., Chubb, C., Belchier, M., 1998. Use of lipofuscin for resolving cohorts of western rock lobster (*Panulirus cygnus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 925-936.

Shields, J.D., Stephens, F.J., Jones, B., 2006. Pathogens, parasites and other symbionts. In: Phillips, B.F. (Ed.), *Lobsters: biology, management, aquaculture and fisheries*. Blackwell Publishing, pp. 146-204.

Verdoit, M., Pelletier, D., Talidec, C., 1999. A growth model that incorporates individual variability for the Norway lobster population (*Nephrops norvegicus*, L. 1758) from the bay of Biscay. *ICES J. Mar. Sci.* 56, 734-745.

Waddy, S.L., Aiken, D.E., Kleijn, D.P.V.D., 1995. Control of growth and reproduction. In: Factor, J.R. (Ed.), *Biology of the lobster, Homarus americanus*. Academic Press, New York, pp. 217-266.

Wahle, R.A., Fogarty, M.J., 2006. Growth and development: Understanding and modelling growth variability in lobsters. In: Phillips, B.F. (Ed.), *Lobsters: biology, management, aquaculture and fisheries*. Blackwell Publishing, pp. 1-44.

何平合，1986。台灣北部沿海日本龍蝦生物學之研究。國立台灣海洋大學漁業研究所碩士論文。56 頁。

何源興、陳益男，1990。以花枝頭投飼龍蝦之成長比較。台灣省水產試驗所試驗報告,49, 227-234。

何權宏、陳朝金、鄭肇雄，1993。日本龍蝦之生態與保育。中國水產 485 期。

- 林俊辰，1981。龍蝦底刺網漁具物理特性及其漁獲性能之研究。台灣省水產試驗所試驗報告, 33, 145-166。
- 吳協峻，2006。葡聚多醣體與藻酸鈉對斷溝龍蝦非特異性免疫反應之影響。國立臺灣海洋大學水產養殖研究所碩士論文。71 頁。
- 胡文聰，2008。波紋龍蝦的巨球蛋白分子選殖及注射溶藻弧菌的表現。國立臺灣海洋大學水產養殖研究所碩士論文。66 頁。
- 陳天任，1992。台灣產龍蝦類之分類及分佈研究。國立臺灣海洋大學漁業研究所博士論文。268 頁。
- 陳旺卿，1986。龍蝦籠具網目選擇作用之水槽實驗。國立臺灣海洋大學漁業研究所碩士論文。
- 陳郁凱，2005。以台東沿海密毛龍蝦之體長資料估計其年齡、成長與死亡率以及單位加入生產量分析。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。83 頁。
- 黃之暘，1998。日本龍蝦在不同溫度與鹽度下離子調節、氮排泄、酸鹼平衡及暴露在空氣中血淋巴化學組成之研究。國立臺灣海洋大學水產養殖研究所碩士論文。120 頁。
- 黃榮富、陳永樹、翁焱、何平合、游祥平，1988。台灣北部沿海長腳龍蝦之生物學研究。台灣水產學會刊, 15, 1-10。
- 葉光薰、林忠仙、鍾國仁，1980。海水鹽度與眼柄切除對龍蝦(*Panulirus japonicus*)成長影響試驗。台灣省水產試驗所試驗報告, 32, 637-643。
- 鄭師師，1978。龍蝦養殖試驗。台灣省水產試驗所試驗報告, 30, 539-544。
- 鄭肇雄，1985。龍蝦底刺網之漁獲作用— $\phi$  縮結與纏絡效果之水槽試驗。國立臺灣海洋大學漁業科學研究所碩士論文。65 頁。
- 鍾國仁、林忠仙，1981a。單双眼柄切促進刺龍蝦(*Panulirus japonicus*)成長之效果。台灣省水產試驗所試驗報告, 33, 707-709。

鍾國仁、林忠仙，1981b。空間對日本龍蝦(*Panulirus japonicus*)成長的影響。台灣省水產試驗所試驗報告，33, 703-705。

張憲宗，2006。飼料中不同蛋白質及蝦頭粉含量對日本龍蝦成長之研究。國立臺灣大學漁業科學研究所碩士論文。88 頁。



圖

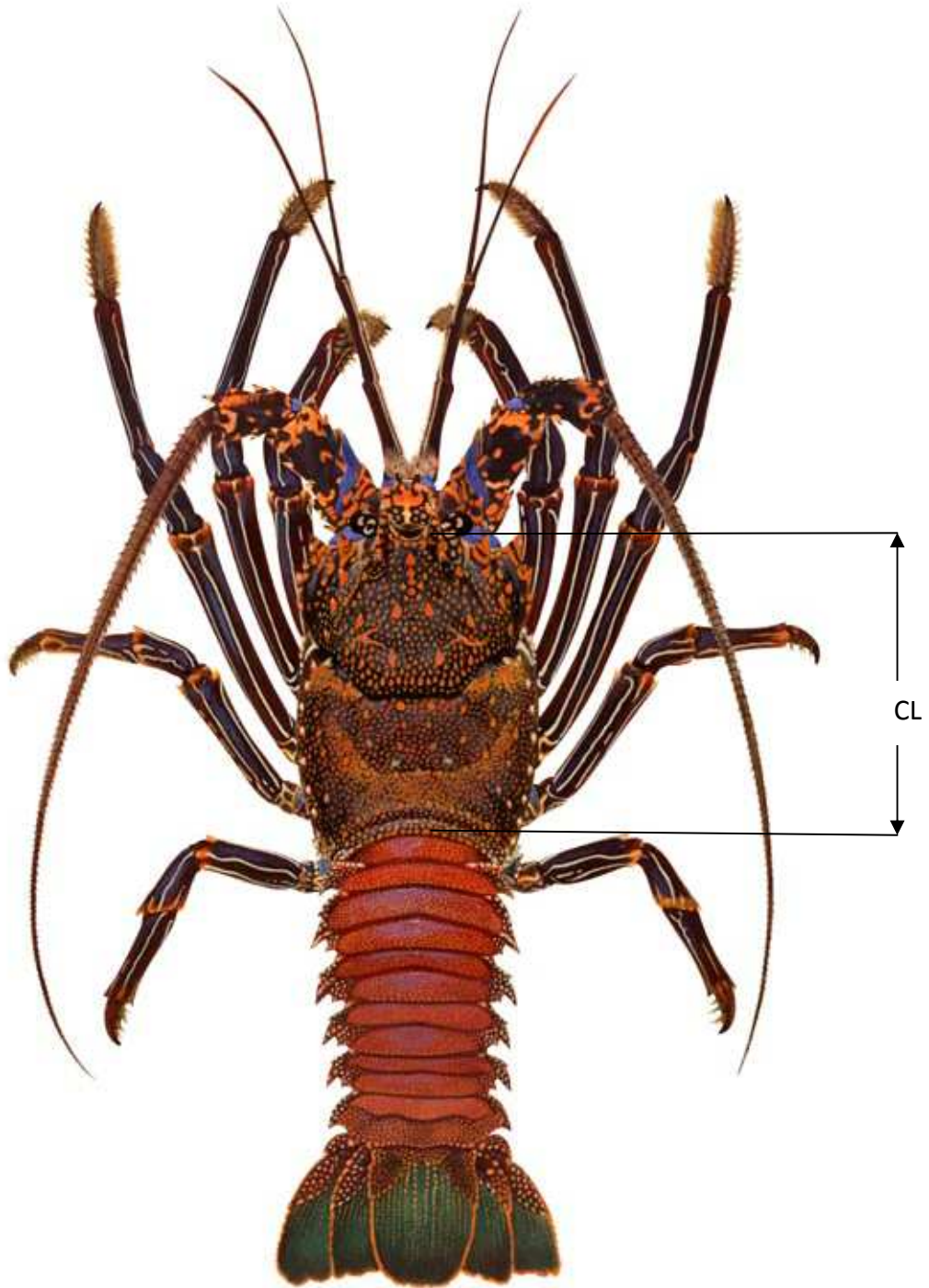


Figure 1. The external appearance of *Panulirus penicillatus*. CL denotes the standard measurement of length (carapace length) for lobster.



(a) Female



(b) Male



Figure 2. Determination of sex of spiny lobsters based on the characteristic of the fifth pair walking legs. Female (a), the end of fifth pair of walking legs are claw-shaped; Male (b) the end of fifth pair of walking legs are similar to other walking legs (hook-shaped).

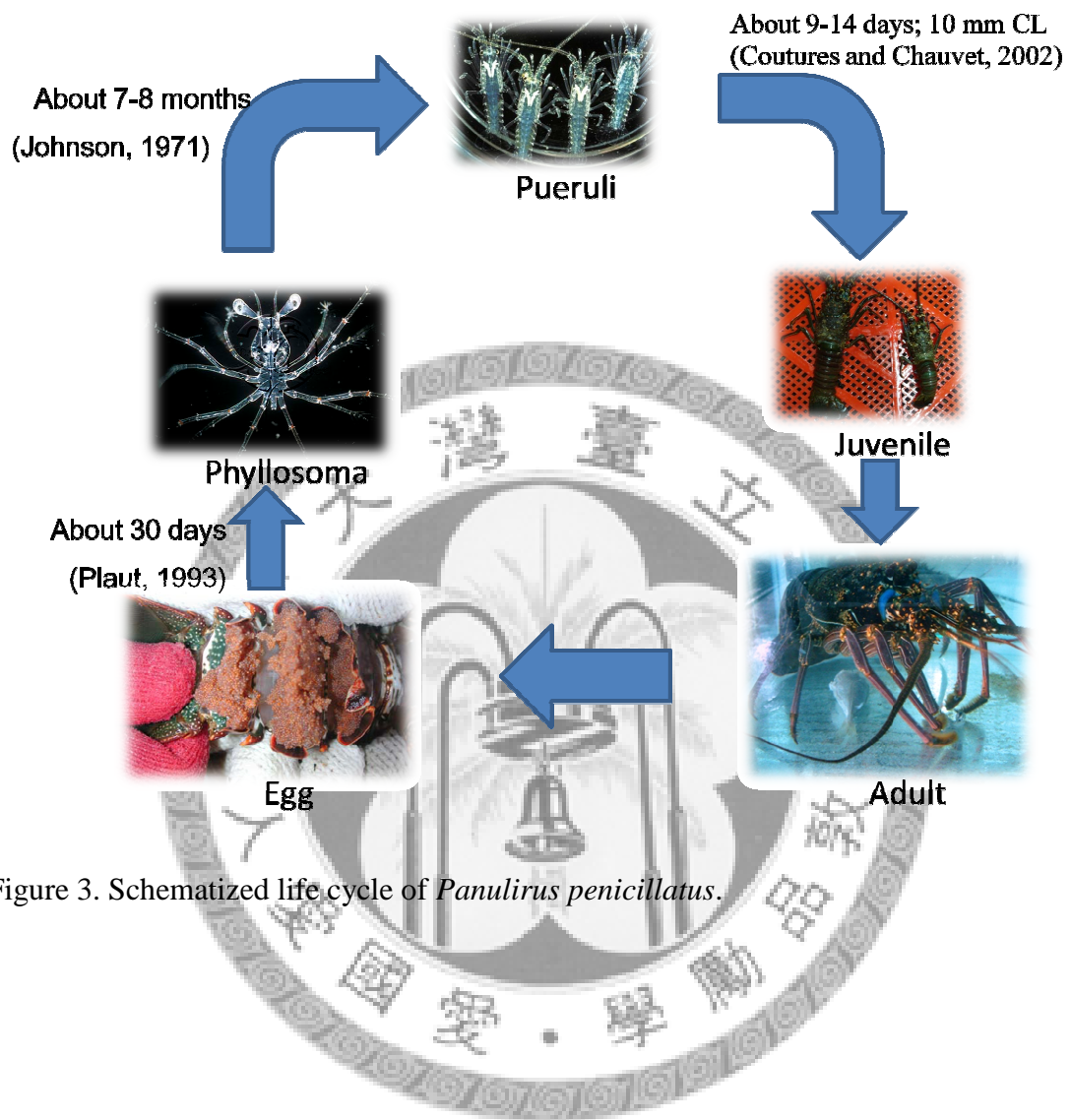


Figure 3. Schematized life cycle of *Panulirus penicillatus*.

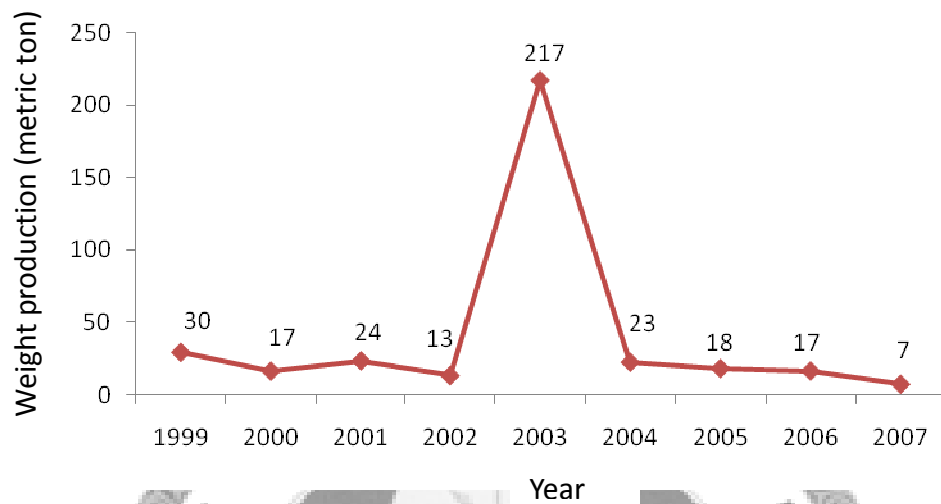
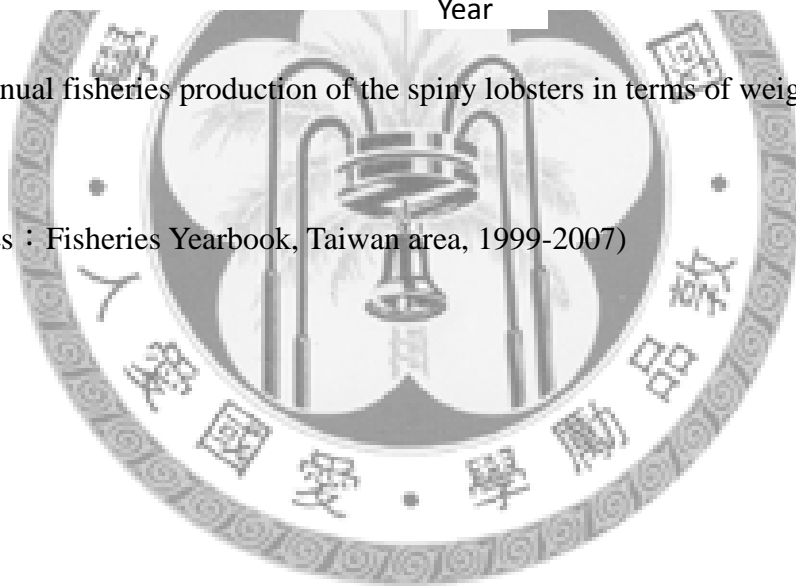


Figure 4. Annual fisheries production of the spiny lobsters in terms of weight (metric ton).

(Data sources : Fisheries Yearbook, Taiwan area, 1999-2007)



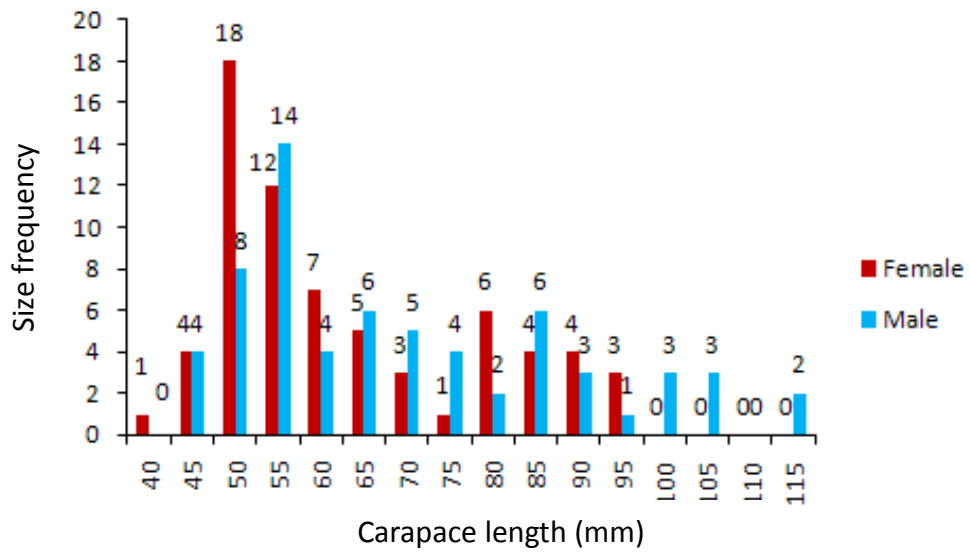
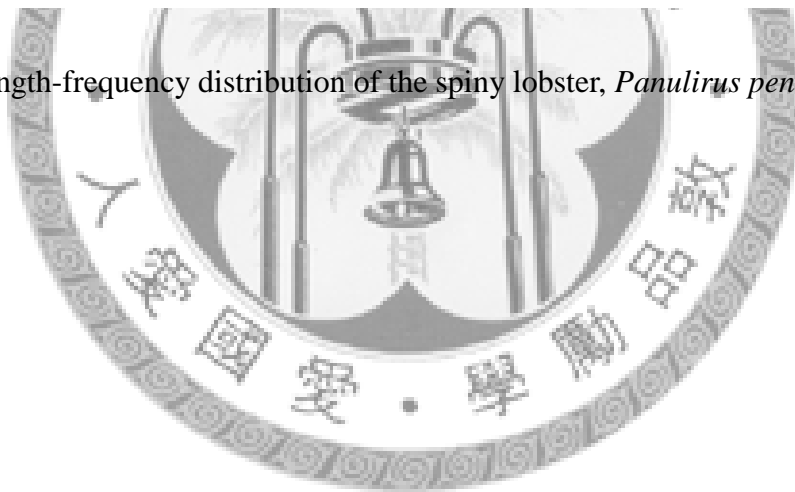


Figure 5. Length-frequency distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in this study.



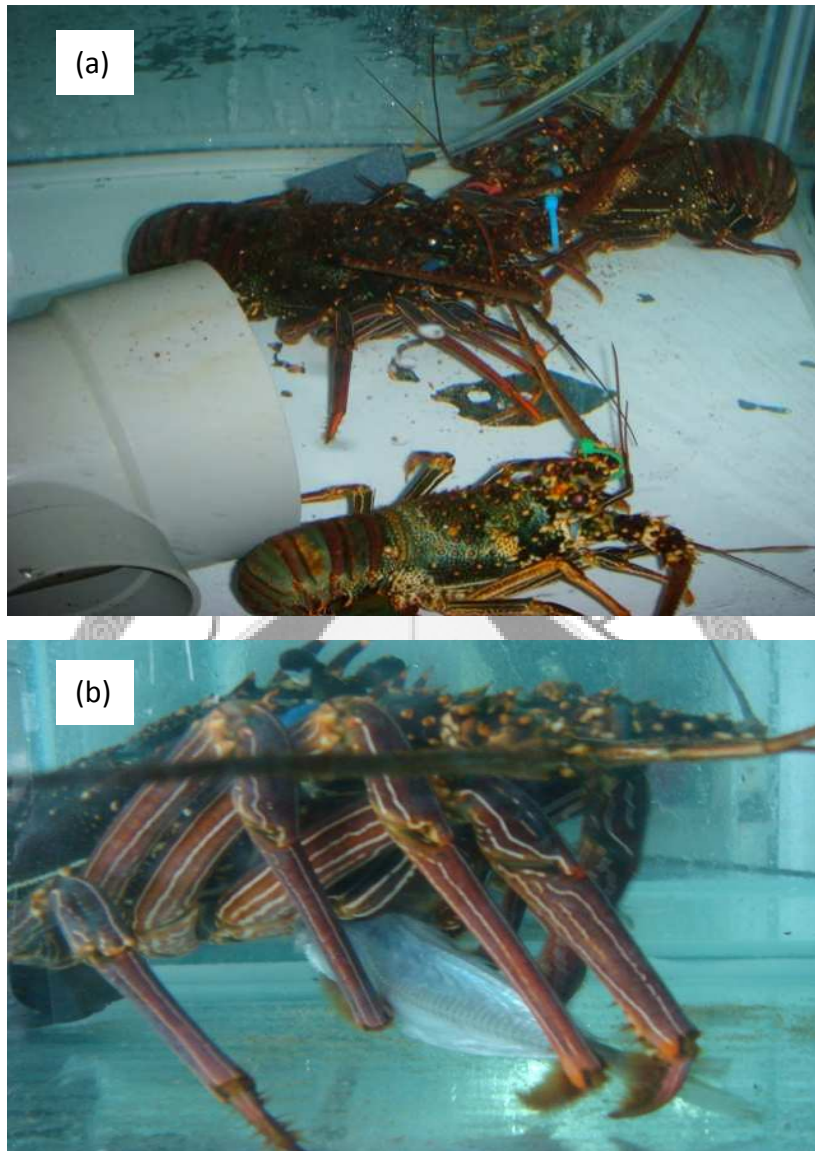


Figure 6. Plastic pipe as artificial shelter for the tagged lobster (a), and lobster feeds on the provided diet (b) in the experiment. Each lobster is tagged in the bottom of the antenna for identification.

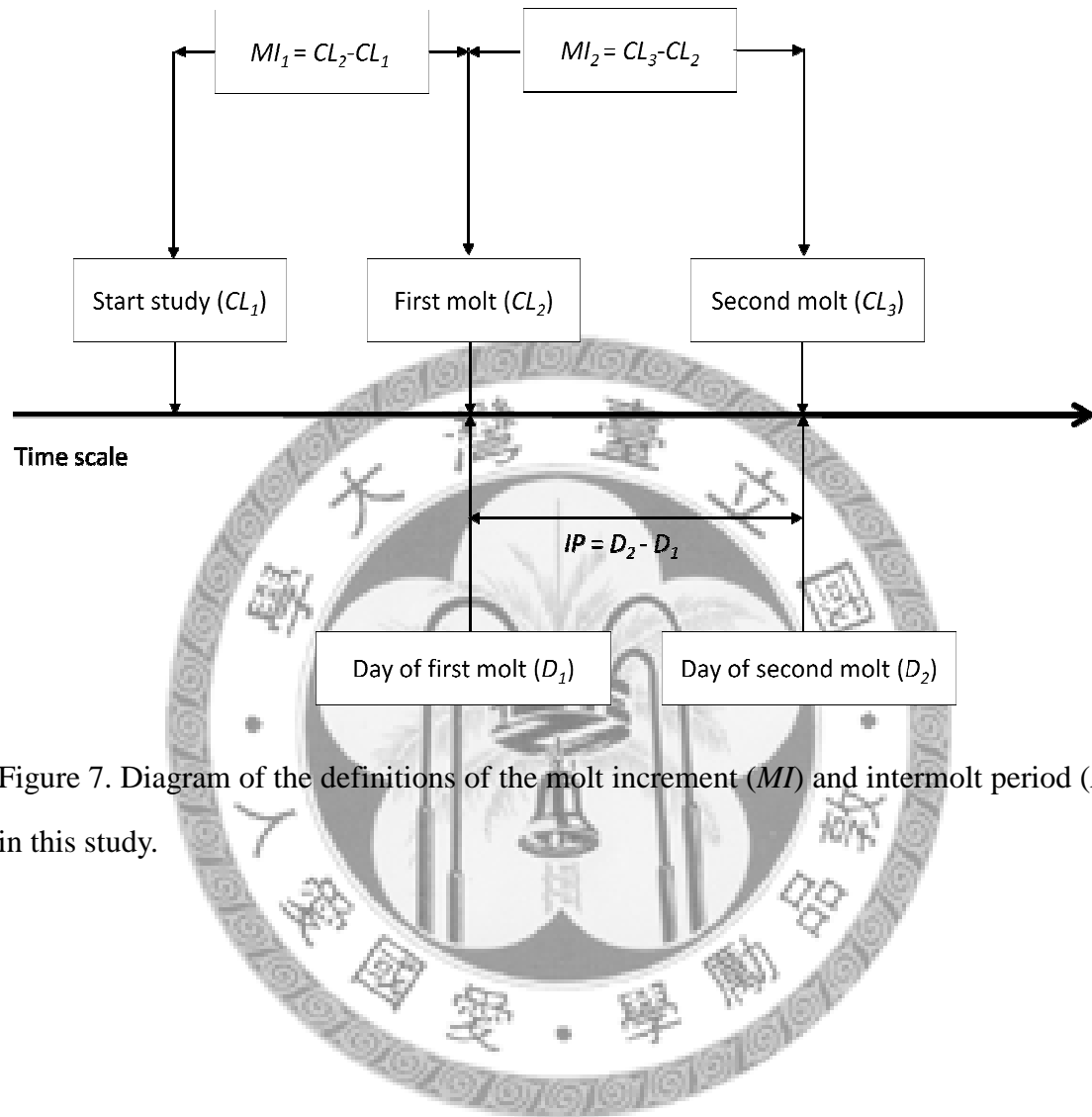


Figure 7. Diagram of the definitions of the molt increment (*MI*) and intermolt period (*IP*) in this study.

Length of the propodus

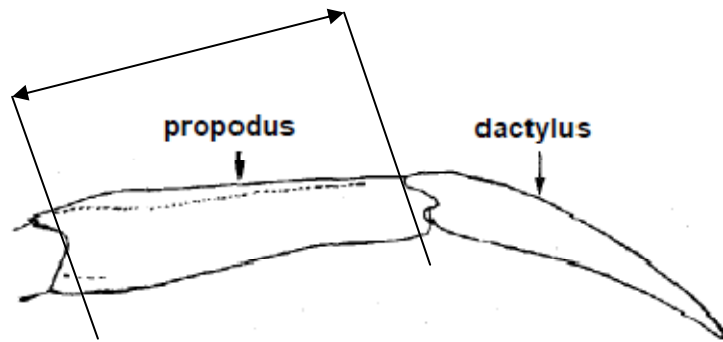
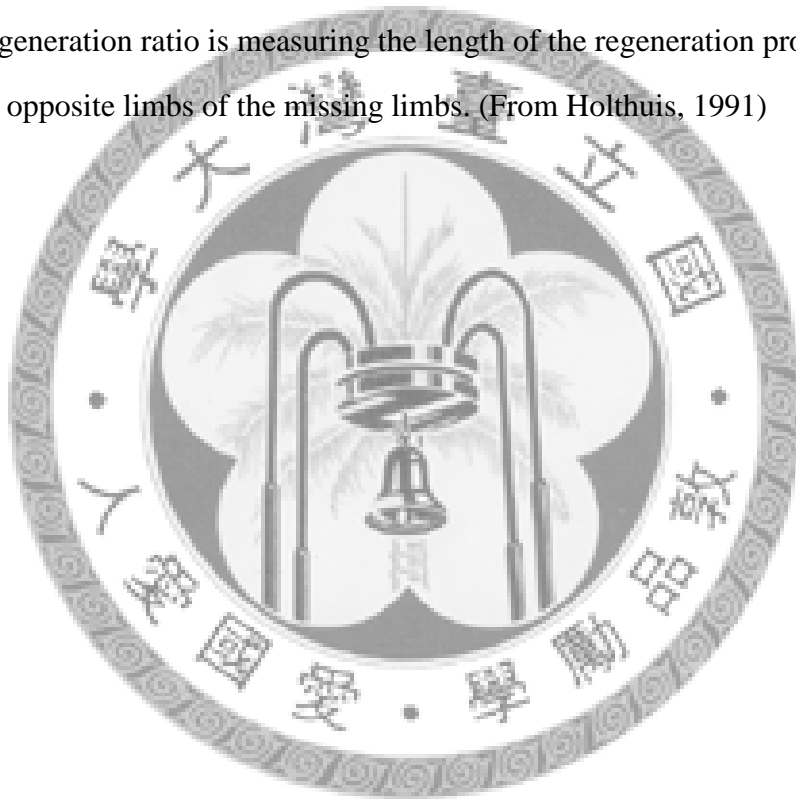


Figure 8. Regeneration ratio is measuring the length of the regeneration propodus after a molt and the opposite limbs of the missing limbs. (From Holthuis, 1991)



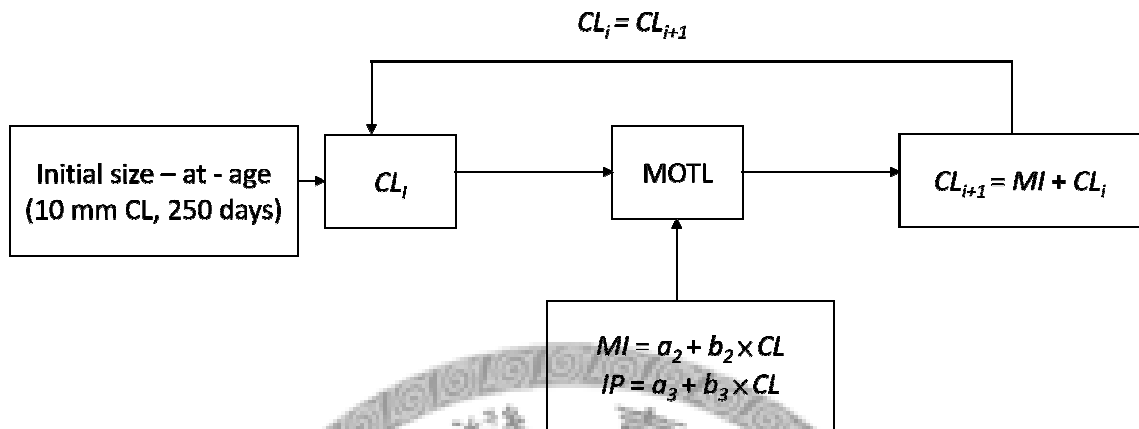


Figure 9. Flowchart of the molt-process growth model.  $CL_i$  is the carapace length before molted;  $IP$  is the intermolt period;  $MI$  is molt increment;  $CL_{i+1}$  is the grown carapace length after molted.





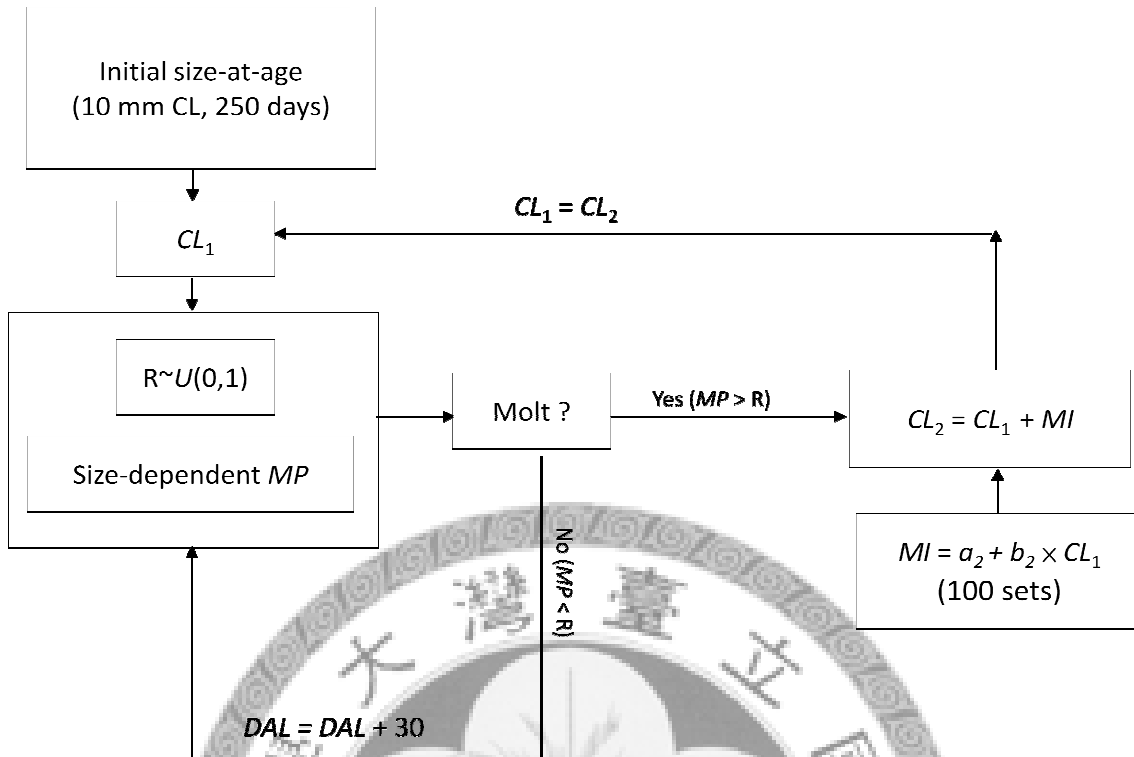


Figure 10. Flowchart of stochastic molt-process growth model.  $CL_1$  is the initial carapace length;  $R$  is a random number from a uniform distribution with range between 0 and 1;  $MP$  is the molt probability;  $MI$  is the molt increment;  $CL_2$  is the grown carapace length after molted.

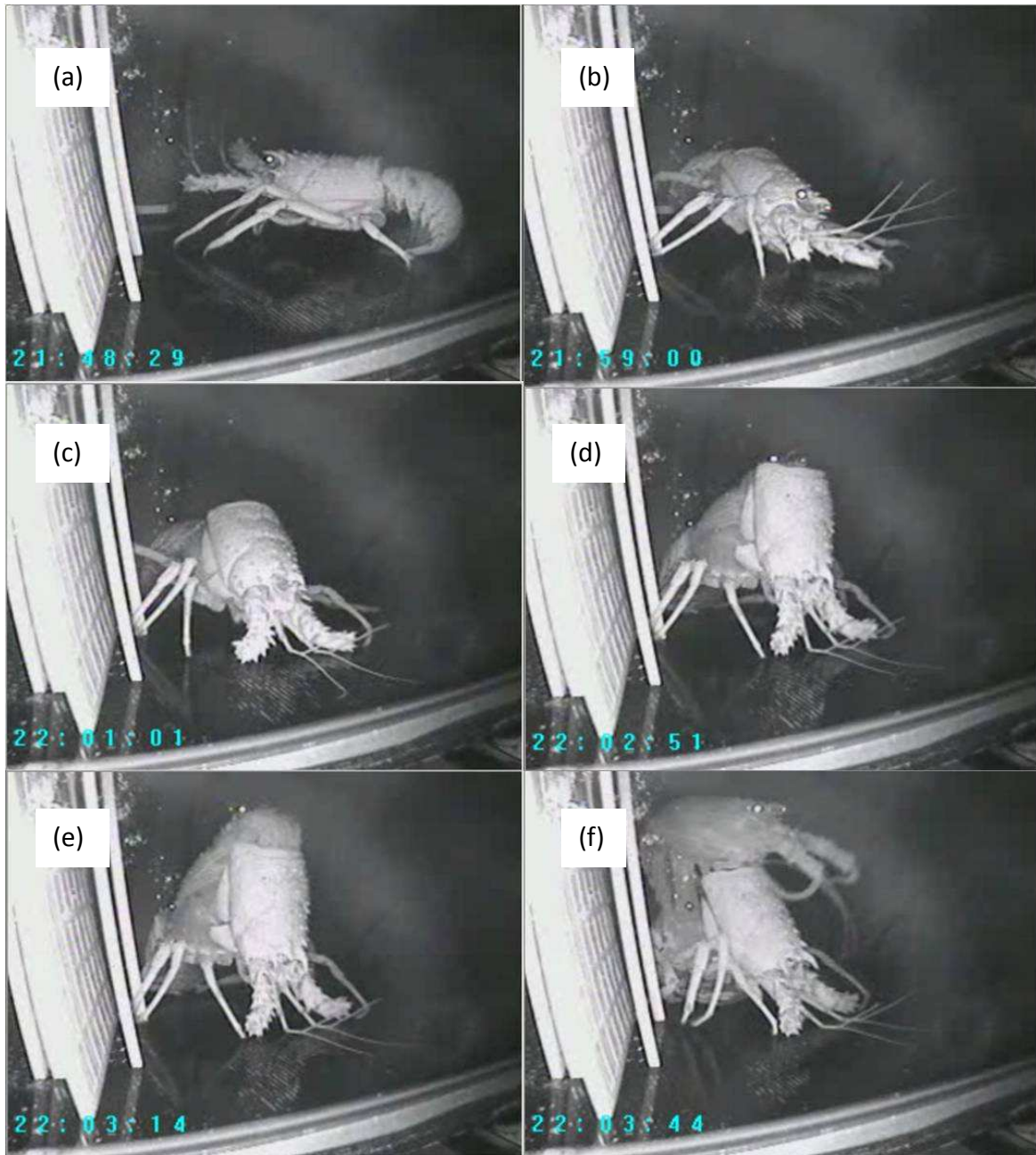


Figure 11. Ecdysis process of *Panulirus penicillatus*. (a) The ecdysial sutures occurred; (b) The progressive lifting of the old carapace; (c) Lobster has raised the thorax off of the substratum; (d) The old carapace has lifted about 90° from its original position; (e) The new abdominal segments are freed; (f) Lobster gives one sudden flexion and extension of the abdomen freeing itself completely from the old skeleton.

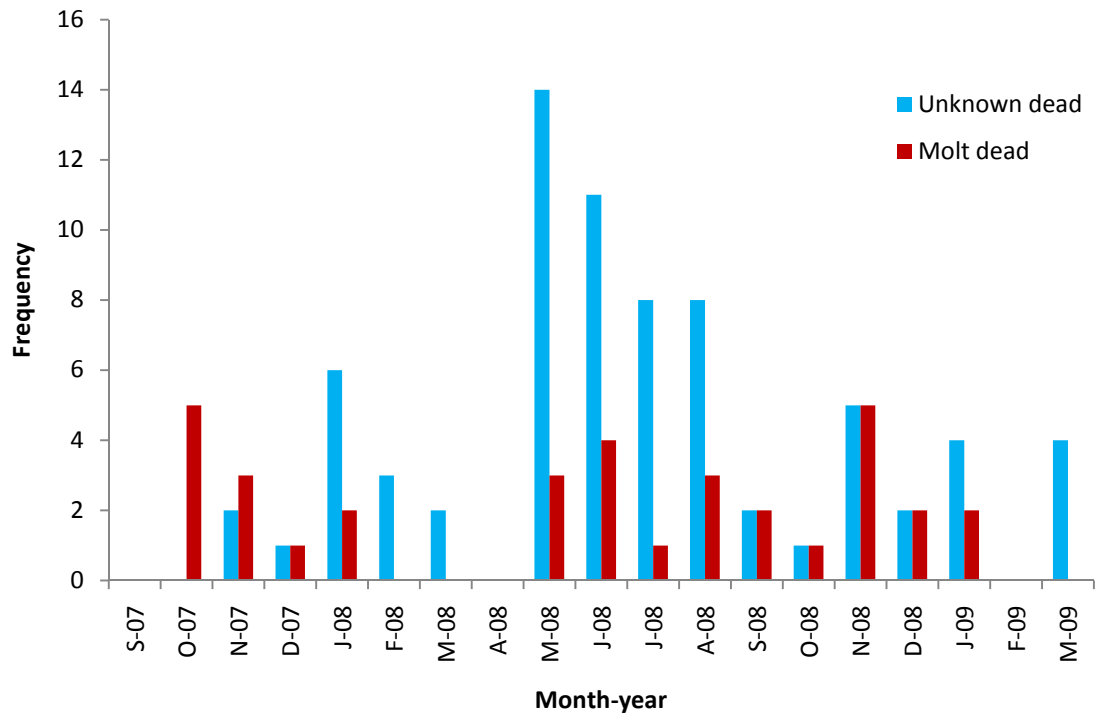
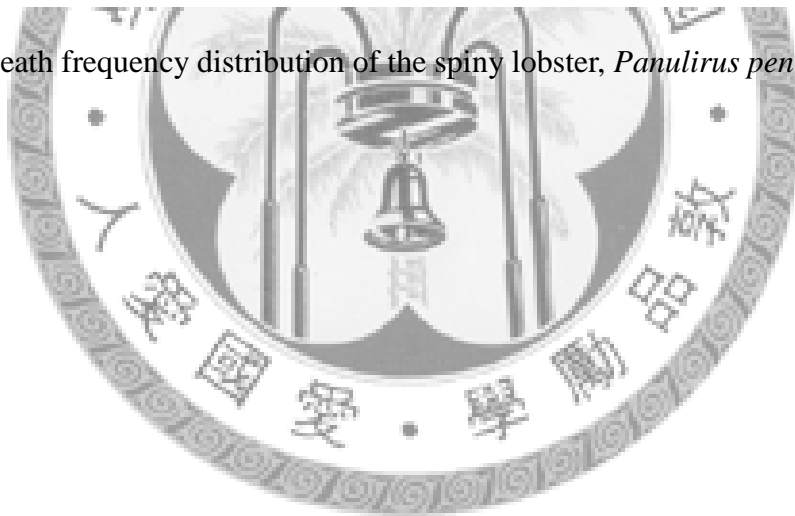


Figure 12. Death frequency distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in this study.



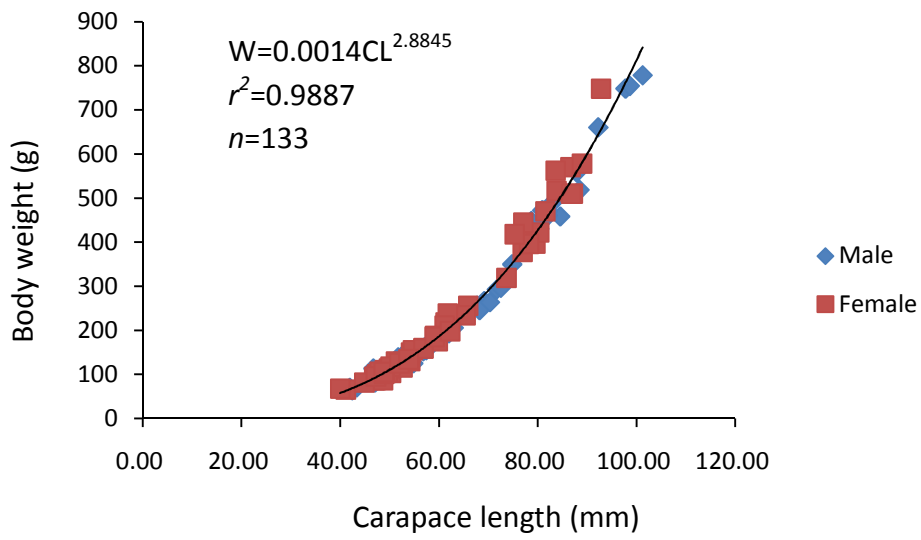


Figure 13. Relationship between body weight and carapace length of spiny lobster, *Panulirus penicillatus* (sex combined).



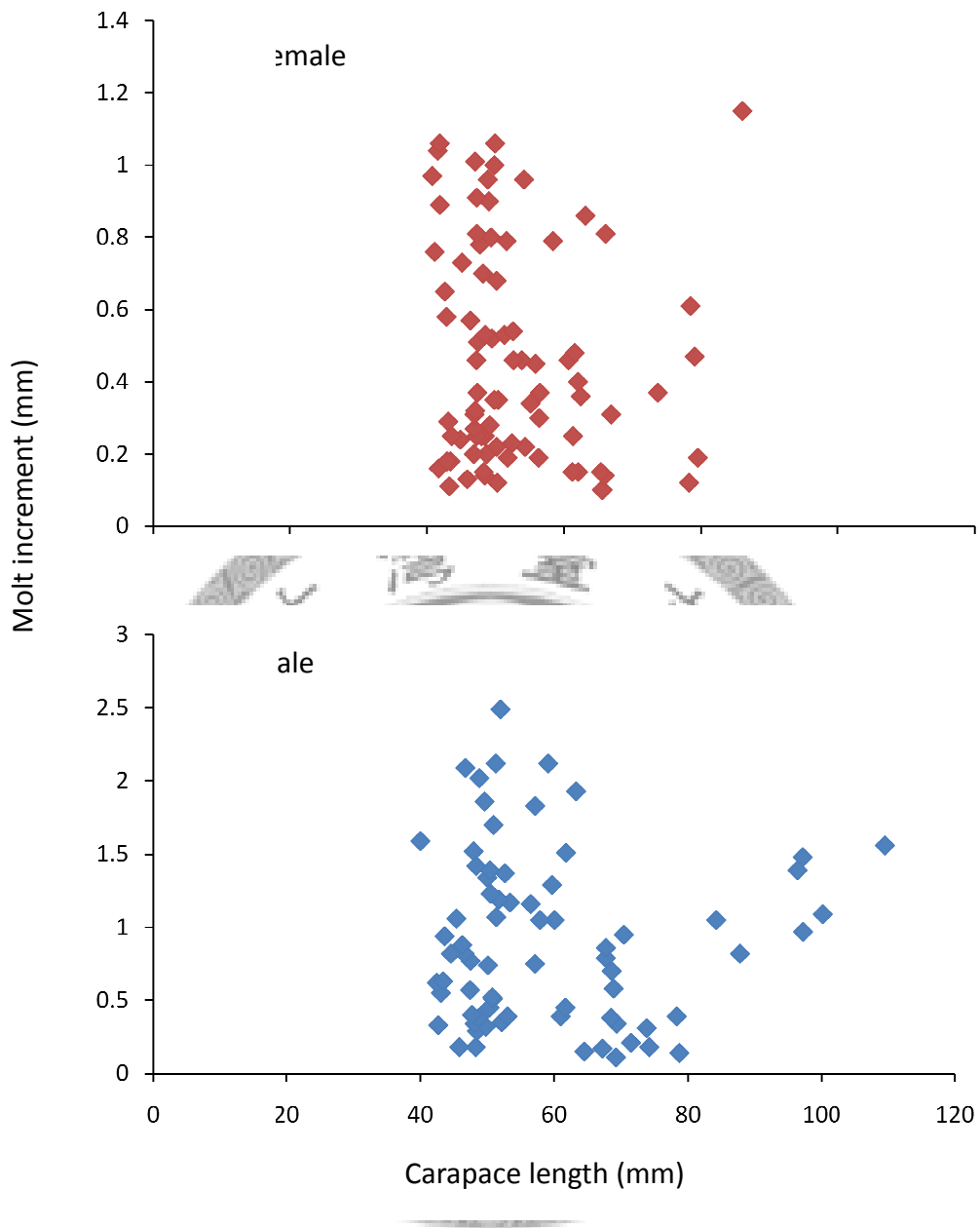


Figure 14. Scatter plots of molt increment and carapace length for female (a) and male (b) spiny lobsters, *Panulirus penicillatus*.

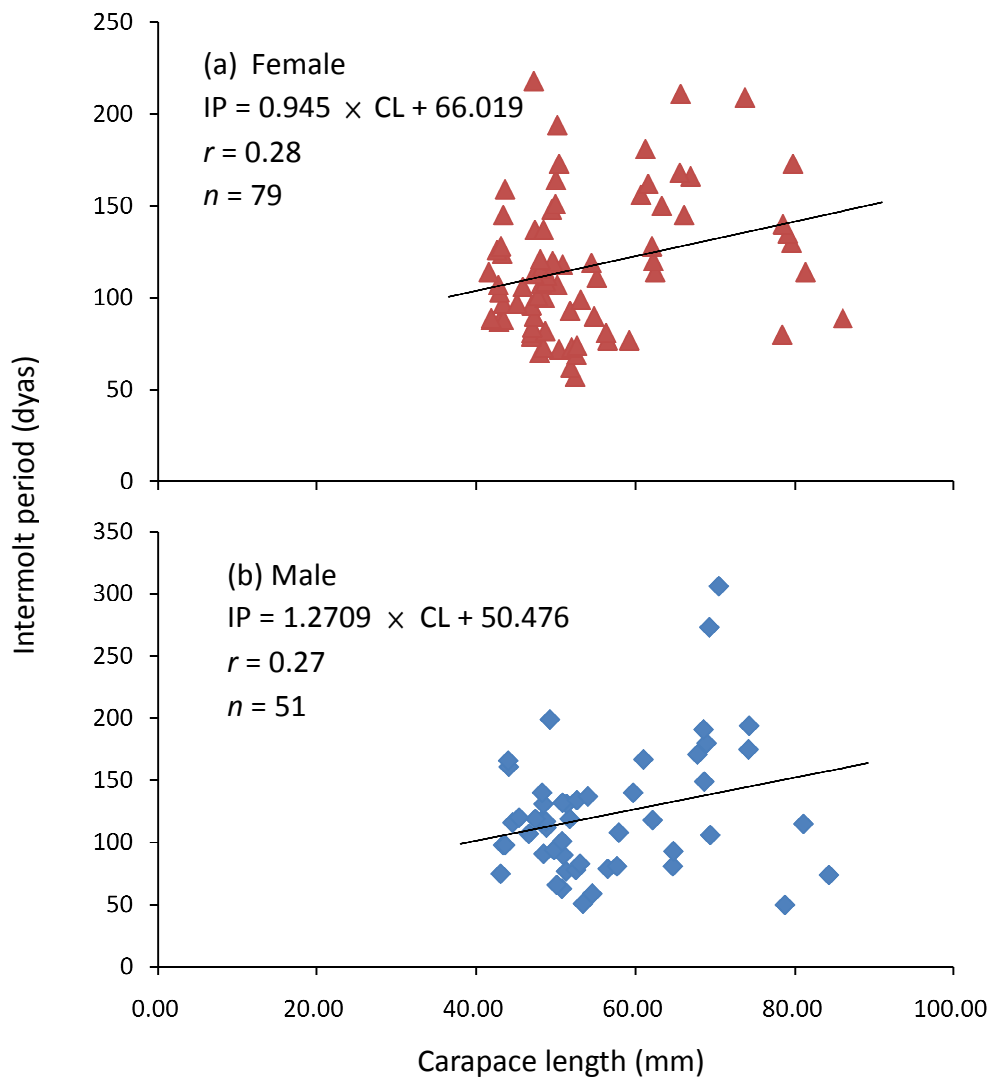


Figure 15. Relationship between intermolt period and carapace length for female (a) and male (b) spiny lobsters, *Panulirus penicillatus*.

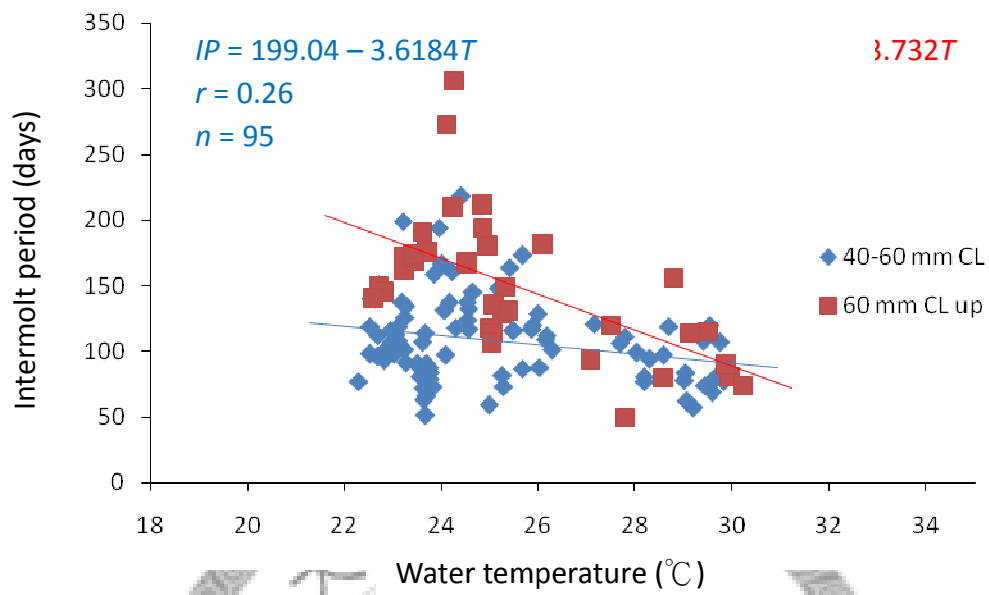
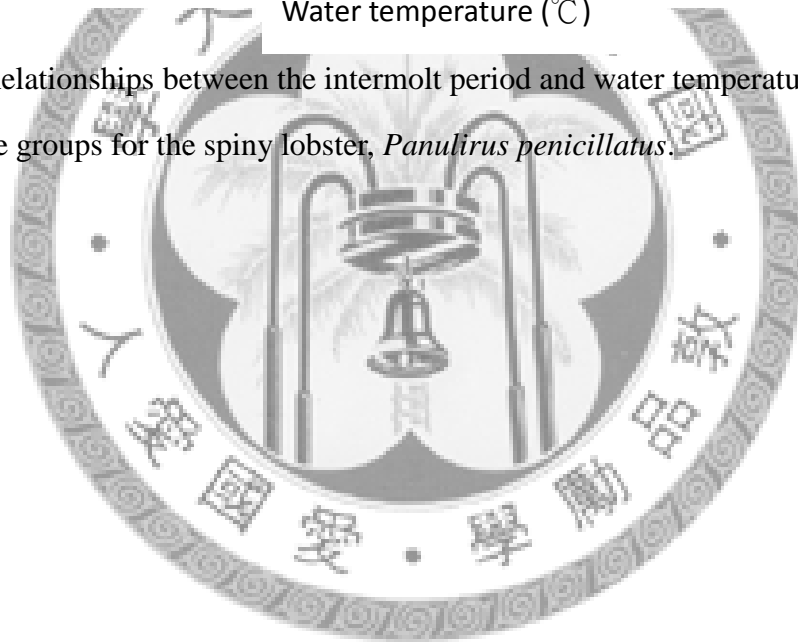


Figure 16. Relationships between the intermolt period and water temperature by two different size groups for the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*.



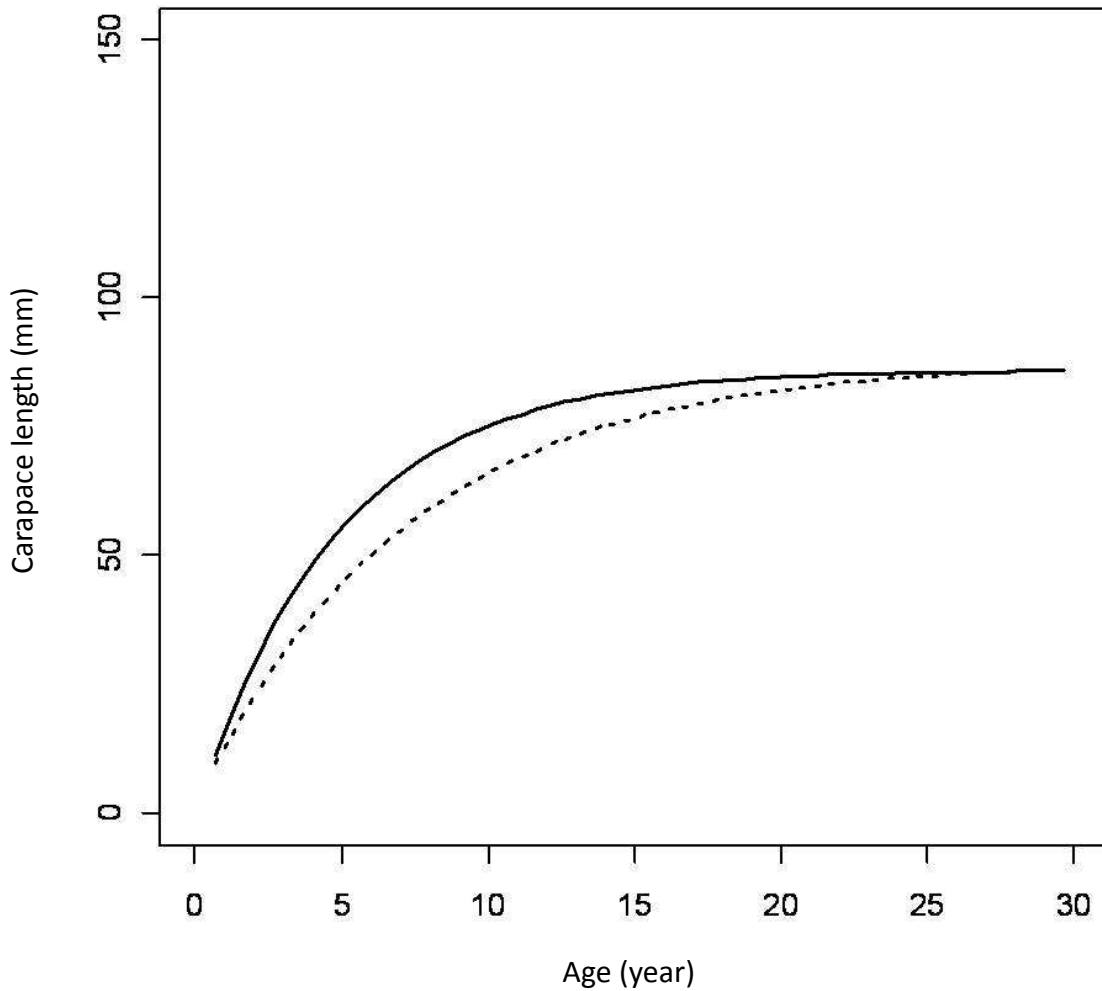


Figure 17. von Bertalanffy growth curves for female (dashed line) and male (solid line) based on the Munro's (1982) method for the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*. The initial size-at-age is 10 mm CL - 250 days.



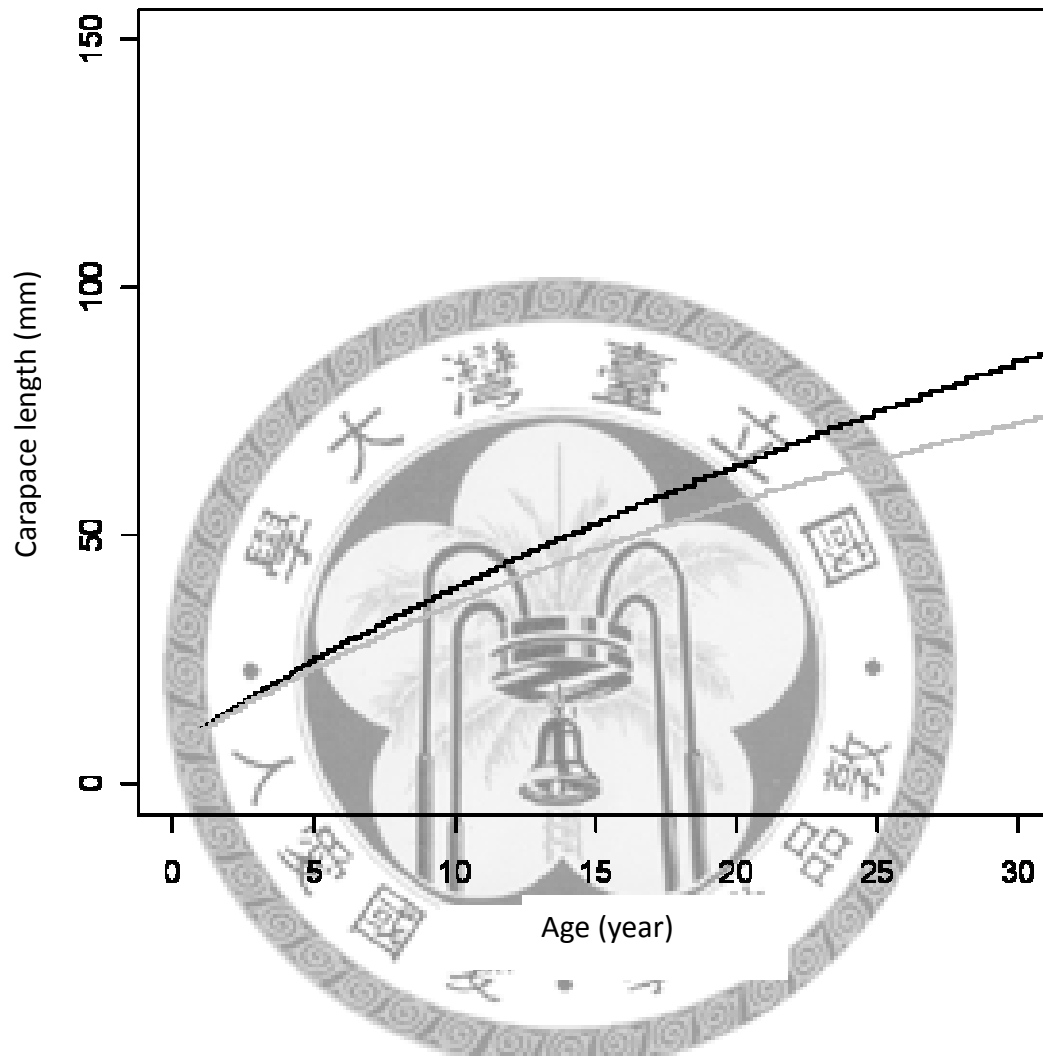


Figure 18. Predicted growth trajectory based on the molt-process growth model for female (grey line) and male (black line) spiny lobster, *Panulirus penicillatus*.

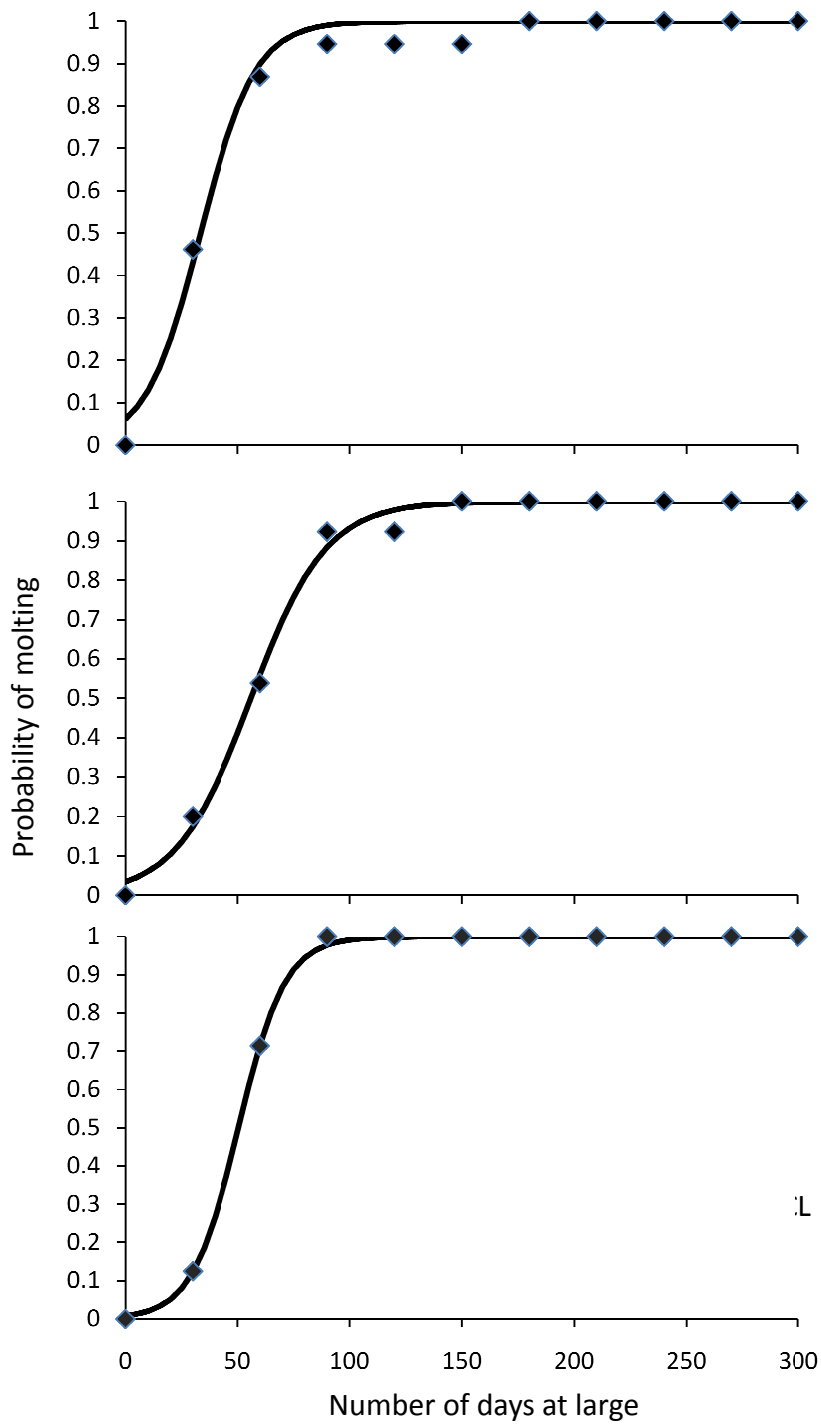


Figure 19. Relationships between probability of molting and number of days-at-large among three classes for female spiny lobster, *Panulirus penicillatus*. Squares = observed values; Curves = predicted values.

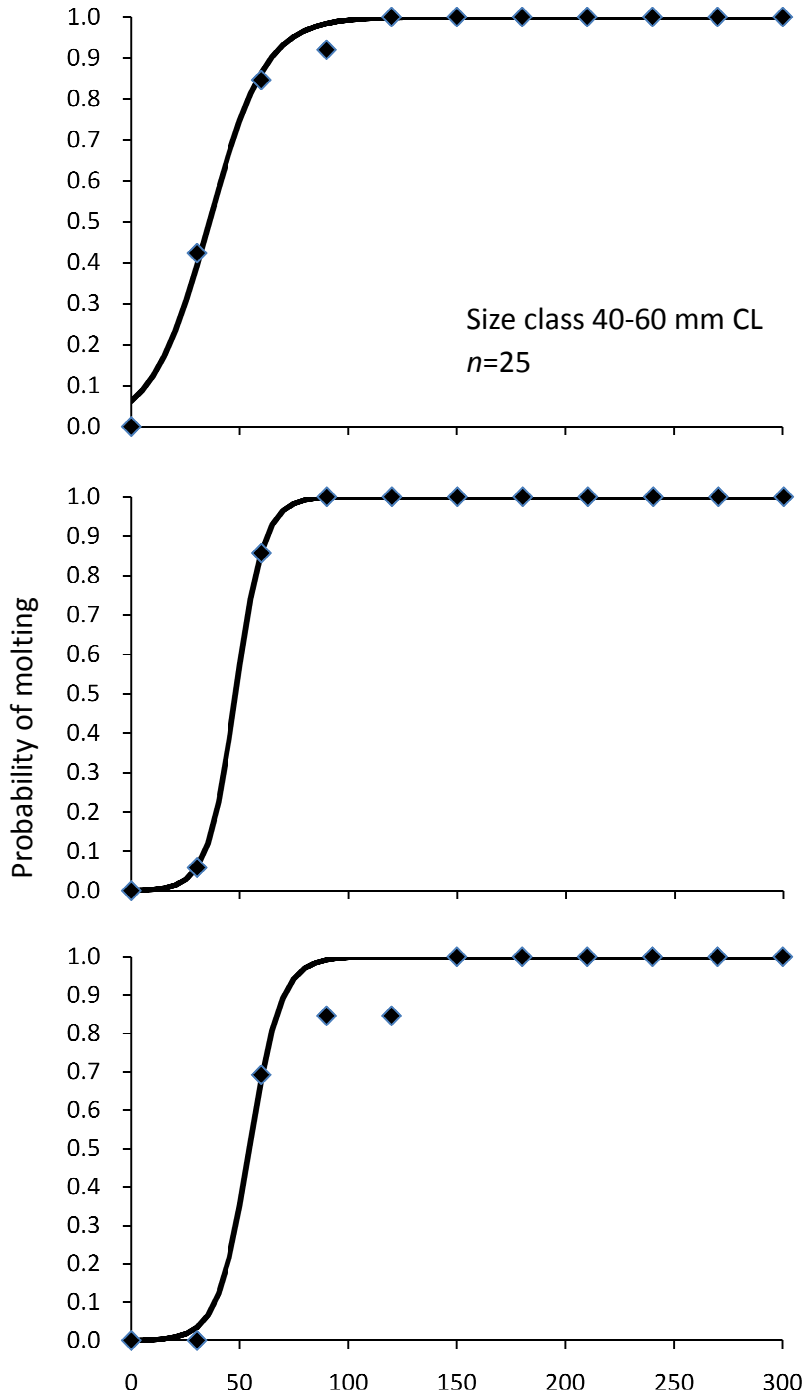


Figure 20. Relationships between probability of molting and number of days-at-large among three classes for male spiny lobster, *Panulirus penicillatus*. Squares = observed values; Curves = predicted values.

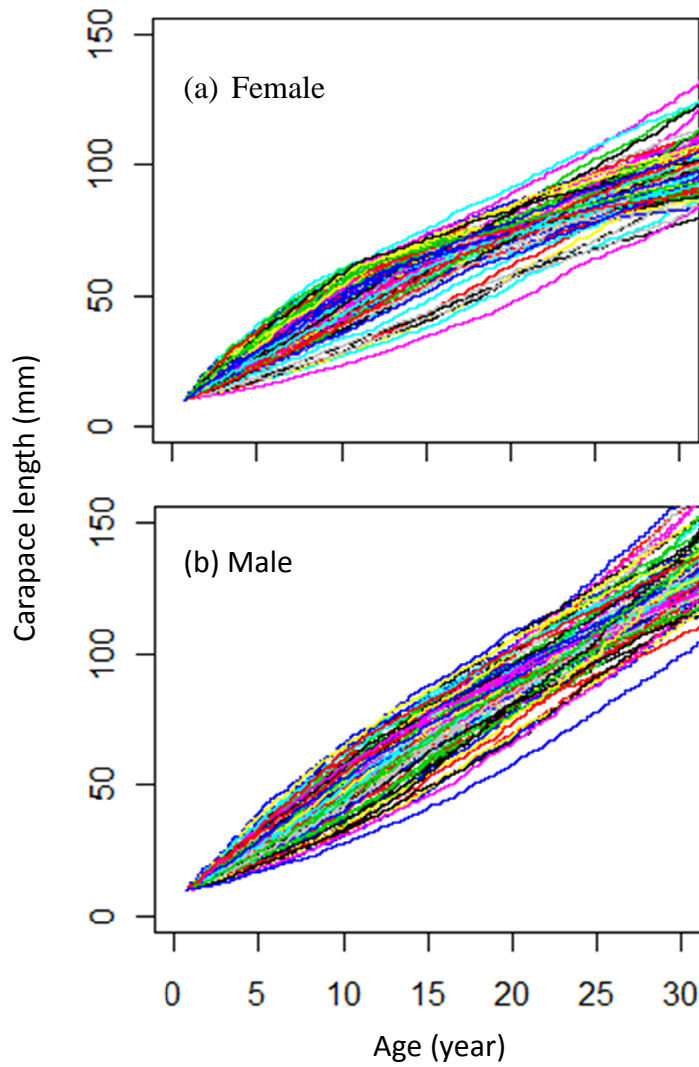


Figure 21. Growth trajectories of female (a) and male (b) lobsters that generated from 100 simulation runs by the stochastic molt-process growth model. Different colors denote the independent runs.

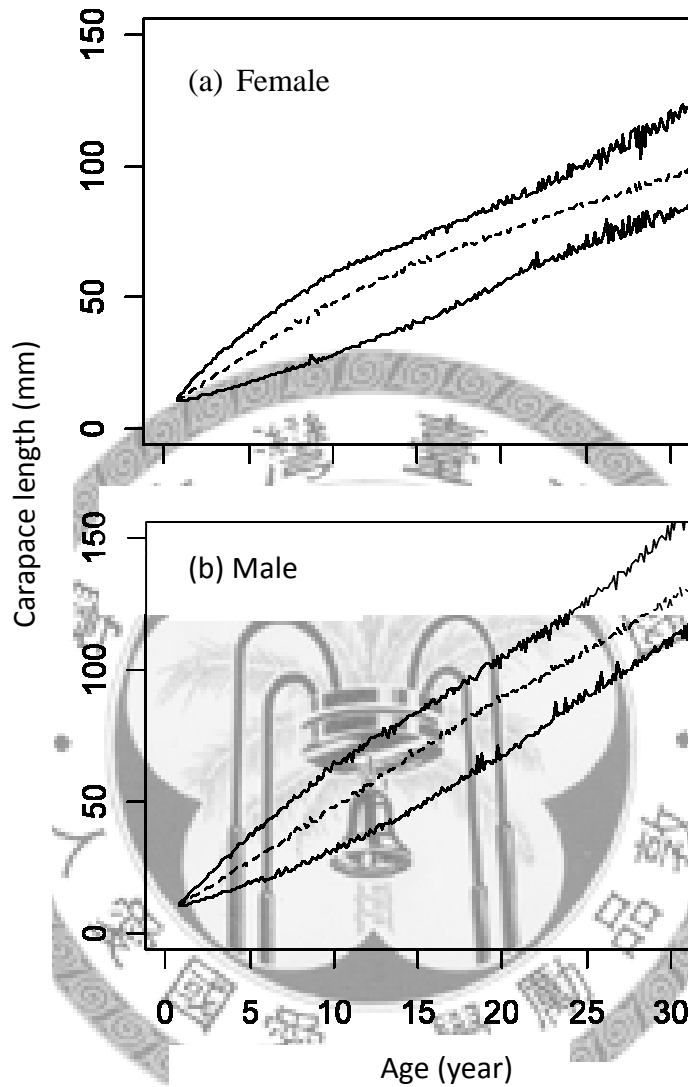


Figure 22. Median (dashed line) and 95% confidence intervals (solid lines) of growth trajectories of female (a) and male (b) lobsters that generated from 100 simulation runs by the stochastic molt-process growth model.

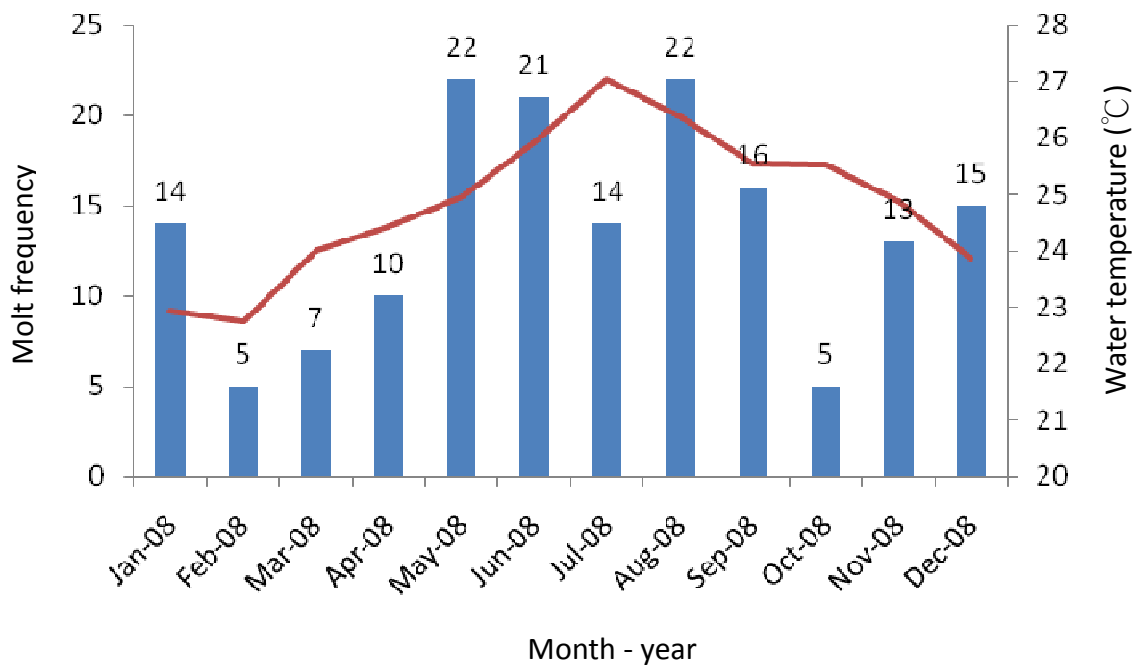


Figure 23. Molt-frequency distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in year 2008 of the present rearing study.

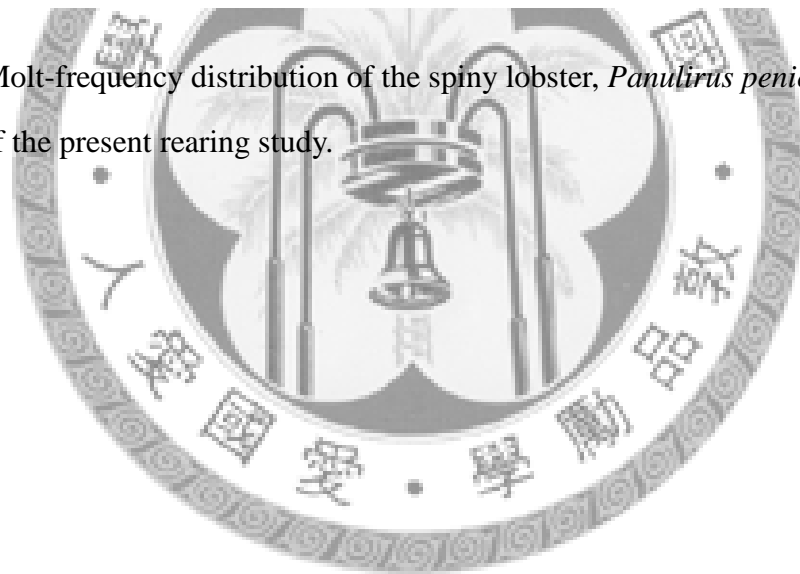




Figure 24. The photo of molting failure individual of the present rearing study.



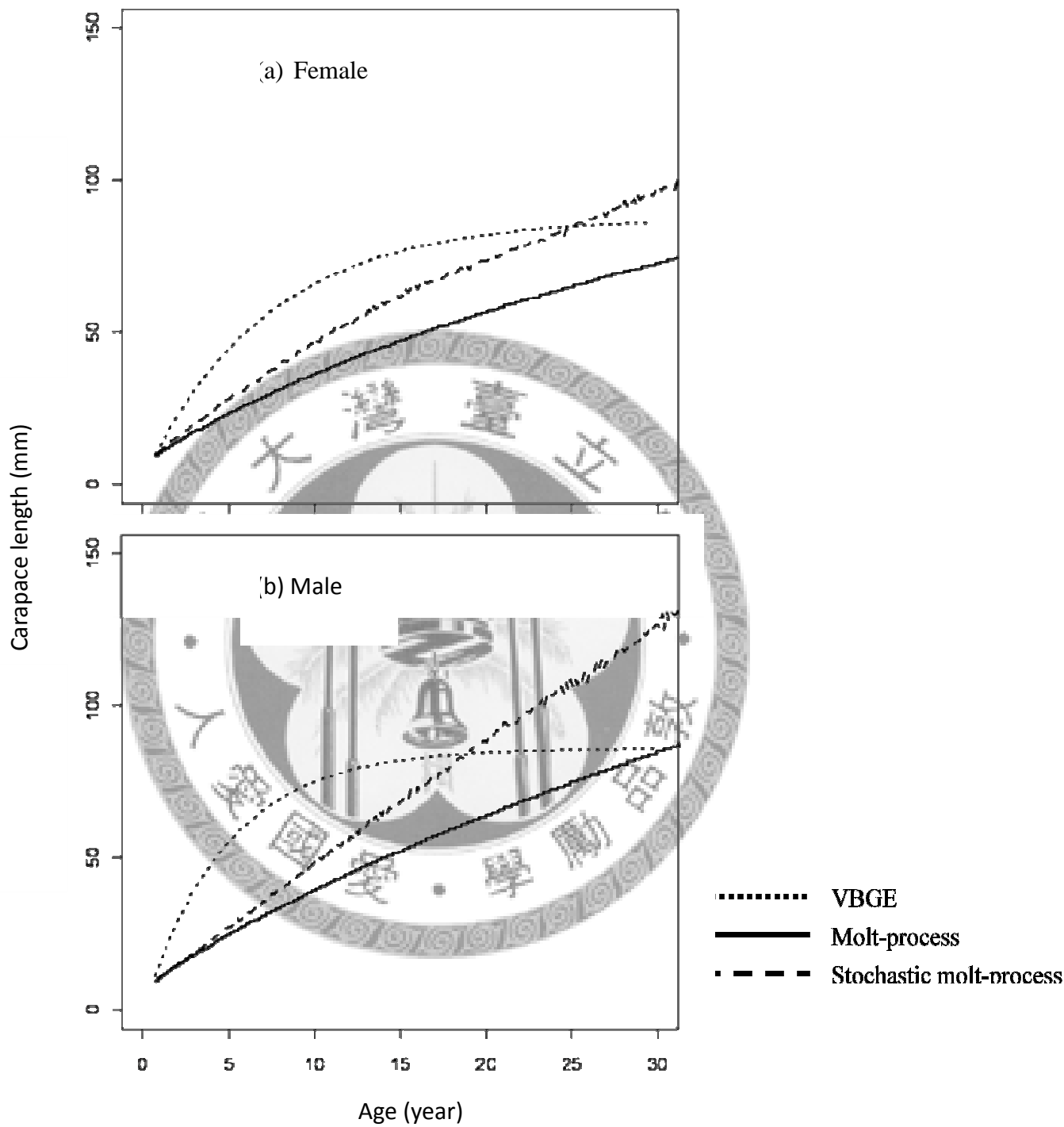


Figure 25. Comparisons of growth curves estimated by 3 growth models for female (a) and male (b) spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, in this study.



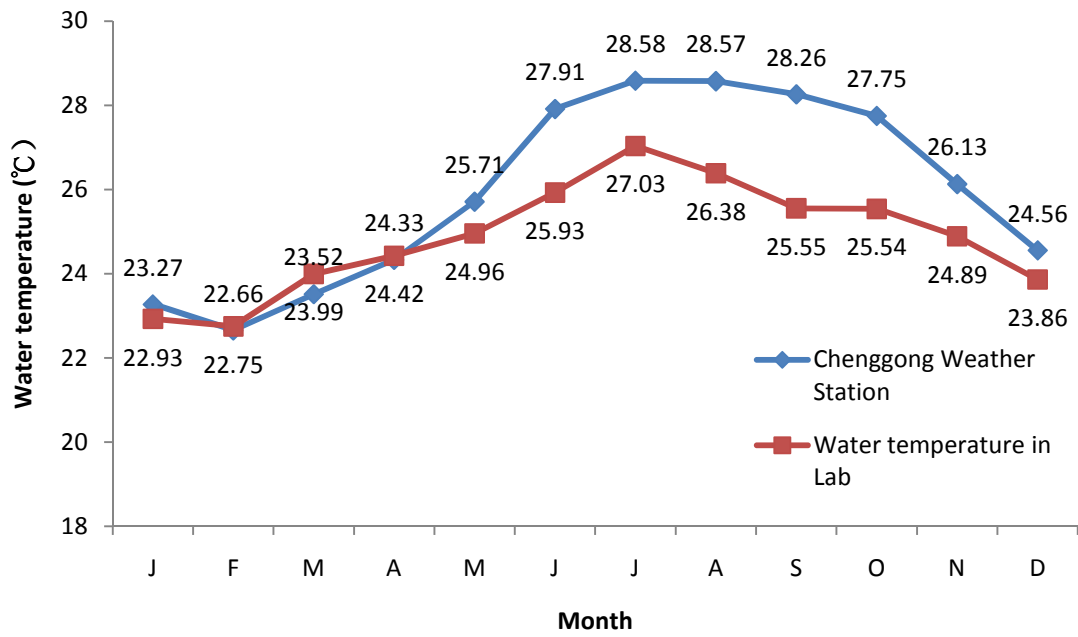
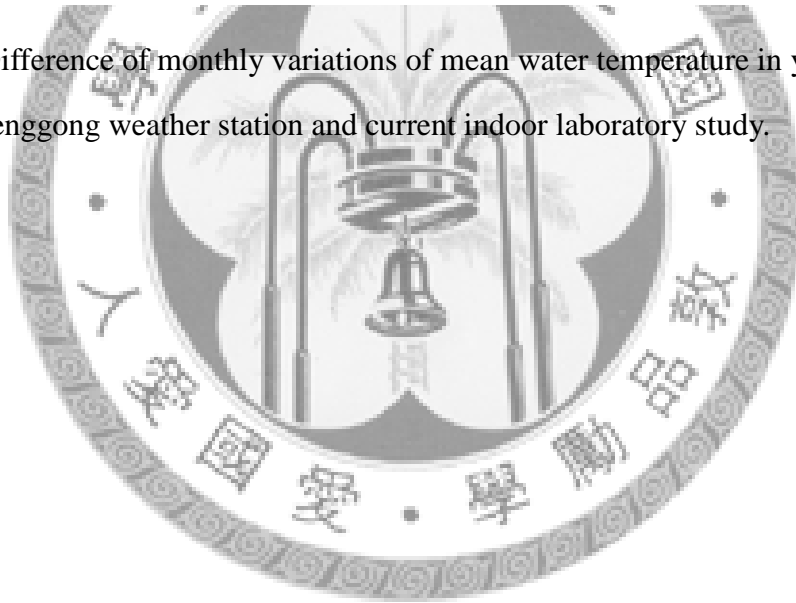


Figure 26. Difference of monthly variations of mean water temperature in year 2008 between Chenggong weather station and current indoor laboratory study.



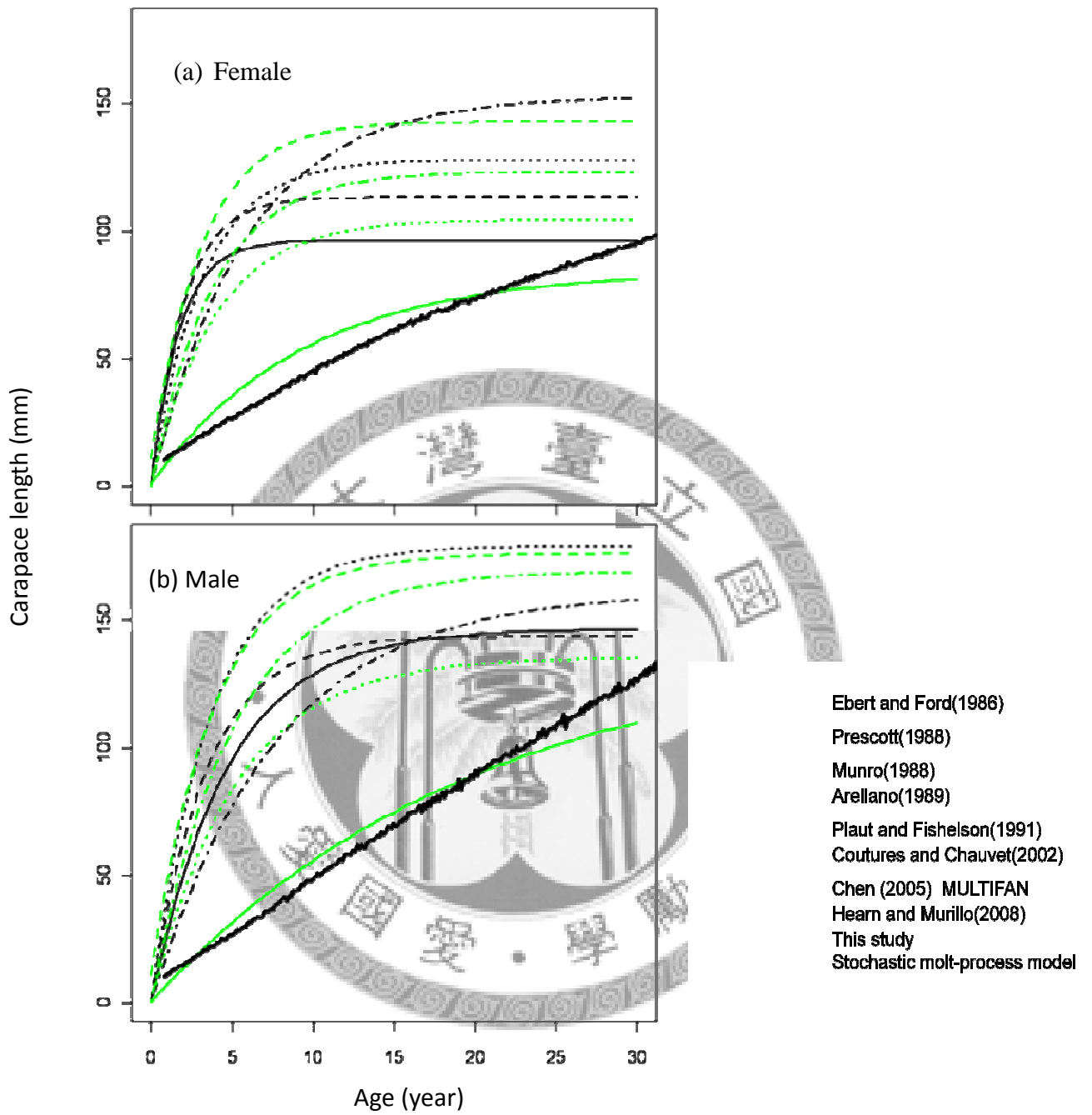


Figure 27. Comparisons of growth curves estimated by different authors for female (a) and male (b) spiny lobster, *Panulirus penicillatus*.

表

Table 1. Input information required for different methods in modeling the growth of spiny lobster, *Panulirus penicillatus*.

	Growth model		
	VBGE (Munro,1982)	Molt-process growth model	Stochastic molt-process growth model
Molt increment	+	+	+
Intermolt period	+	+	+
Initial size at age	+	+	+
Uncertainty of Molt increment or intermolt period	—	—	+

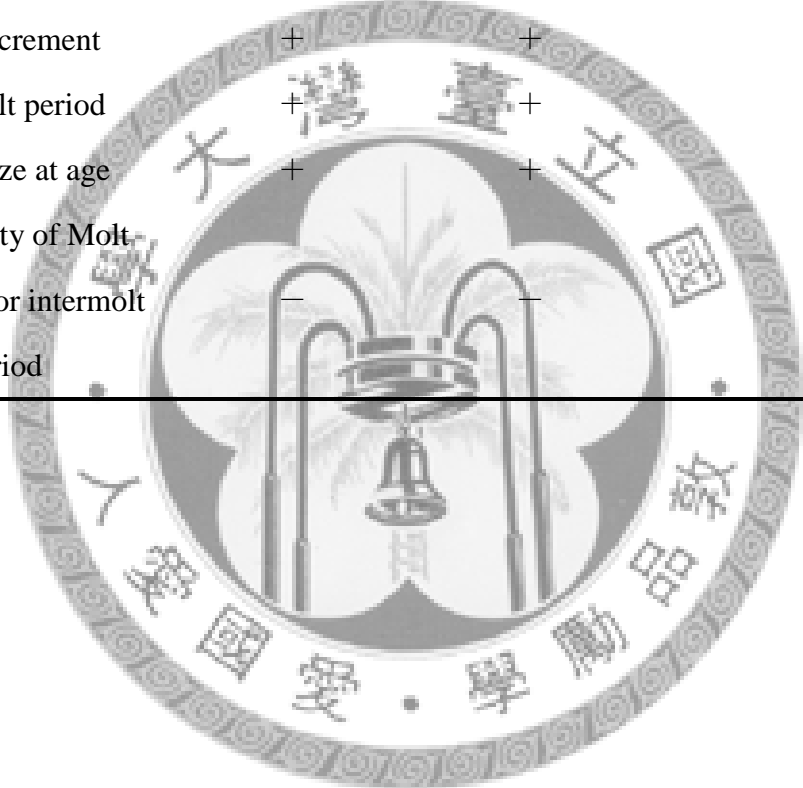


Table 2. Summary estimates of the parameters of von Bertalanffy growth function for the spiny lobster, *Panulirus penicillatus*, among various studies.

<b>Author</b>	<b>Method</b>	<b>Area</b>	<b><math>CL_{\infty}</math></b>	<b><math>k</math></b>
Ebert and Ford(1986)	Tag-recapture	Enewetak Atoll, Marshall Islands	M = 146.5 F = 96.5	$k = 0.211$ $k = 0.58$
Prescott(1988)	Tag-recapture	Solomon Islands	M = 143.9 F = 113.4	$k = 0.294$ $k = 0.499$
Plaut and Fishelson(1991)	Reared in captivity	the Gulf of Aqaba, Red Sea	M = 141.3 F = 84.7	$k = 0.05$ $k = 0.106$
Coutures and Chauvet(2002)	Statistical method and field observation	New Caledonia	M = 176 F = 143	$k = 0.26$ $k = 0.32$
Chen(2005)	MULTIFAN	southeastern Taiwan	M = 135.6 F = 104.7	$k = 0.192$ $k = 0.259$
Hearn and Murillo(2008)	Tag-recapture	Galapagos Marine Reserve	M = 169.1 F = 123.4	$k = 0.201$ $k = 0.264$
This study	Reared in captivity	eastern Taiwan	M = 86.04 F = 87.68	$k = 0.207$ $k = 0.137$

## Appendix

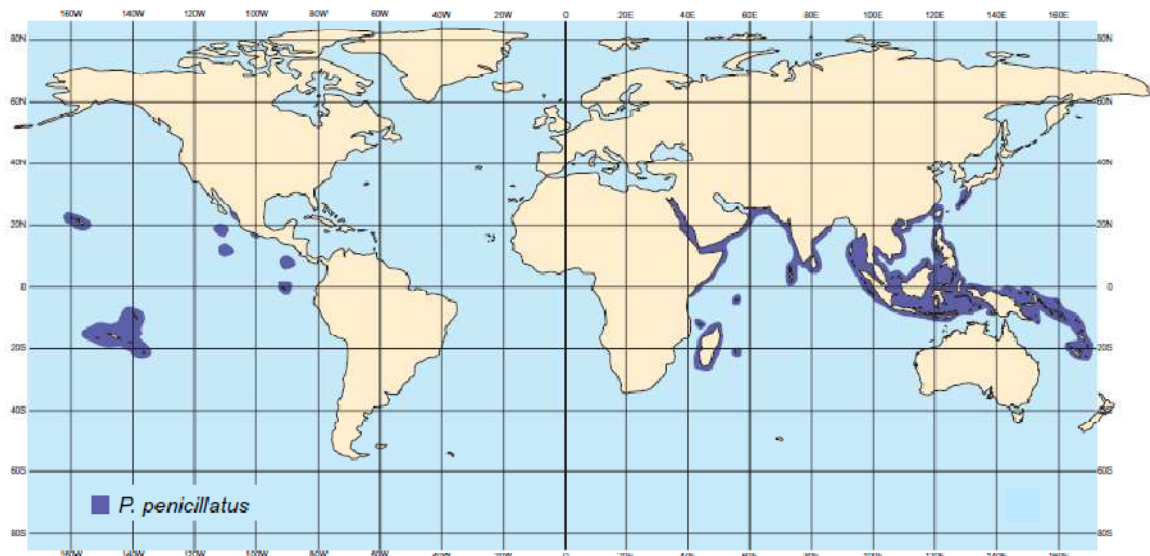
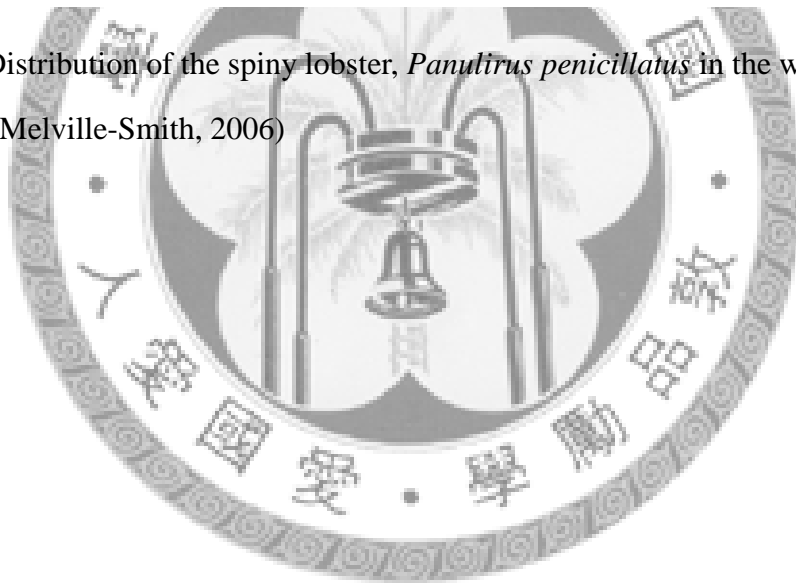


Figure A1. Distribution of the spiny lobster, *Panulirus penicillatus* in the world. (From Phillips and Melville-Smith, 2006)



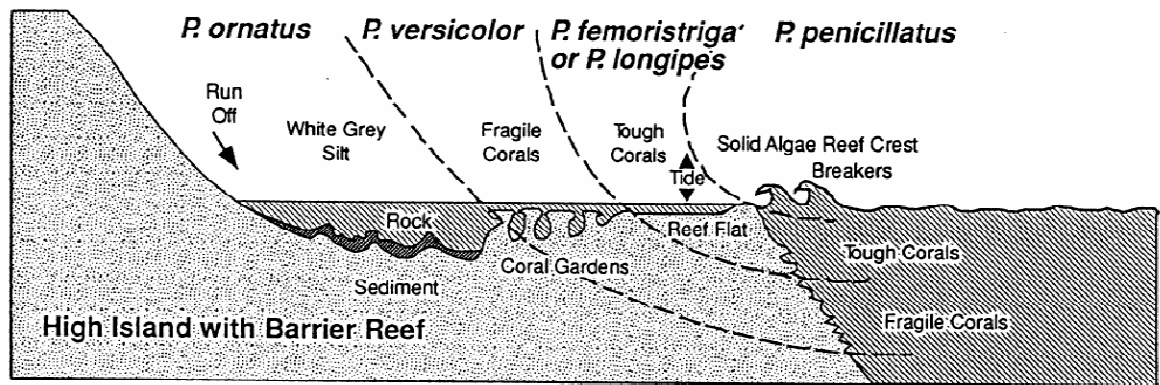


Figure A2. Habitat specialization of the spiny lobster. (From Lipcius and Eggleston, 2000)

