

國立臺灣海洋大學

海洋環境與生態研究所

碩士學位論文

指導教授：周文臣 博士

東沙島小瀉湖海草床碳化學的四季變化  
及其調控機制

Carbon chemistry in the seagrass  
meadow of the inner lagoon of  
Dongsha Island: Seasonal variation and  
controlling processes

研究生：楊長暢 撰

中華民國 109 年 6 月

東沙島小瀉湖海草床碳化學的四季變化及其調  
控機制

Carbon chemistry in the seagrass meadow of the  
inner lagoon of Dongsha Island: Seasonal variation  
and controlling processes

研究生：楊長暢

Student : Chang-Chang Yang

指導教授：周文臣

Advisor : Wen-Chen Chou

國立臺灣海洋大學  
海洋環境與生態研究所  
碩士論文

A Thesis (Dissertation)  
Submitted to the Institute of Marine Environmental and Ecology  
College of Ocean Science and Resource  
National Taiwan Ocean University  
in partial fulfillment of the requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Institute of Marine Environmental and Ecology  
June 2020  
Keelung, Taiwan, Republic of China

中華民國 109 年 6 月

## 致謝

漫長的碩士生涯，轉眼間兩年過去來到了尾聲，從剛畢業的懵懂大學生一腳踏入海洋研究的領域，說不緊張是假的，不過比起緊張，更讓我印象深刻的是過程中的體驗，讓我接觸到了許許多多不曾接觸過的事物，例如學習深潛、搭乘舊海研和新海研出海採樣、獨自去國外出差、搭軍機去東沙採樣，甚至是獨自帶隊去東沙採樣等等，透過這些經驗的汲取，每一次都讓我成長許多，從當初什麼事都得依靠學長姐，到後來我能夠獨當一面，還能換我帶領著團隊，這些過程都會牢牢記在我人生的階段中，沒有經歷過這些或許我到現在還是一個只能整天依賴人的小學弟樣吧！

不過真正值得開心的，是我能夠加入環態所這個大家庭，在這裡各個老師不論是生物組還是化學組，年輕還是年長，本國人還是外國人，大家都像朋友一樣親切，能夠一起出去玩和一起分享各領域裡的經驗，讓大家能像家人一樣互相交流與幫助，這種環境的感覺真的令人覺得非常溫馨。當然在這裡我必須感謝前助理榮蔚和穎萱以及前技術員凱元，在我學業及實驗上給予我非常大的幫助，雖然我可能還是常常出槌，但學長姐們依舊會耐心地指導我該如何去做改善，還有已經畢業的學長們，冠杰、家軒、義庠和愷哲，在我碩一人生地不熟的時候帶我認識基隆，認識海大，認識環態所，許多好吃和好玩的回憶都是與你們一起，以及和我一起打拼兩年的同學們，靖婷、依蓉、子傑和宇恩，常常一起抱怨課業上或實驗上的大小事，有困難時還是互相幫忙、義氣相挺，相扶相持的走到畢業的階段。最後最必須要感謝的是我的指導老師周文臣教授，雖然我的腦袋不太靈光，理解事情可能需要比較長的時間，但還是非常耐心又溫柔的指導我，並且時不時會與我分享課業以外的事，讓我增廣見聞或者審視自己的人生態度，在周老師這樣細心又用心的指導下，才讓我能夠走到碩士生涯的最後，師恩大德此生不忘！

最後的最後，恭喜我終於畢業了！但這也代表著求學生涯正式結束，未來的難題只會越來越多、越來越沉重也越來越現實，我不會忘記我在這裡學習到的人生態度以及做事的方法，期望我面對未來的種種關卡和挑戰，能扛住責任充滿自信的勇往直前！

楊長暢 謹致

中華民國一〇九年七月二十二日星期三

## 摘要

海草床是地球上生產力最高的生態系統之一，在海洋中扮演著非常重要的角色，雖然它僅佔海洋面積約 0.1%，卻佔約 10% 的海洋總固碳量。同時海草床高基礎生產力的特性，能提高週遭海水的 pH 值及碳酸鈣飽和度 ( $\Omega$ )，並降低海水的二氧化碳分壓 ( $p\text{CO}_2$ )，因此被認為具有減緩海洋酸化及吸收大氣二氧化碳的潛力。然而，近年來的觀測結果顯示，海草床的 pH 值以及  $p\text{CO}_2$  呈現大幅度的日夜和季節性變化：在日間及高生產力的季節，海草床的 pH 值的確會較鄰近海域為高（減緩海洋酸化），同時  $p\text{CO}_2$  也較大氣為低（吸收大氣二氧化碳）；但在夜間及生產力低的季節，海草床的 pH 值就會變得比鄰近海域更低（加速海洋酸化），同時  $p\text{CO}_2$  也會比大氣更高（向大氣釋放二氧化碳）。上述的研究結果表明，海草床吸收大氣二氧化碳和緩衝海洋酸化的能力，呈現大幅度的時間變化，故其確切角色仍有待更深入的研究。本研究在 105 年至 108 年在東沙島小瀉湖海草床的調查結果，發現一個非常獨特的現象：在一年四季裡無論是白天還是夜晚，東沙島小瀉湖海草床的 pH 值皆顯著高於鄰近海域海水，同時  $p\text{CO}_2$  也顯著較大氣為低。換言之，東沙島小瀉湖一年四季的白天和夜晚皆維持著吸收大氣二氧化碳及緩衝海洋酸化的狀態。此外，108 年夏、秋及 109 年冬季北岸、小瀉湖及南岸海草床沉積物孔隙水的分析資料顯示了小瀉湖孔隙水 DIC, TA 和  $\text{Ca}^{2+}$  的高值。這些高值顯示，沉積物中有機質有氧化反應及其所驅動的碳酸鈣溶解反應，以及有機質的無氧代謝作用可能都對小瀉湖孔隙水的碳化學特性有顯著的影響。綜合以上資料，本研究認為東沙島小瀉湖海草床水體及孔隙水的碳化學特性，與其特殊的水體動力環境有關：由於小瀉湖內的水體與外洋水交換受限，造成海草碎屑不易向外洋輸出，經年累月的被累積在沉積物中，使沉積物有機質含量相當高。而海草茂密的地下莖可以輸送大量的氧氣至沉積物中，因此促成小瀉湖沉積物中有機質有氧化反應的活躍。有機質有氧化作用會釋放大量的二氧化碳，降低沉積物孔隙水之  $\Omega$  值，因此促成了碳酸鹽的溶解，進而釋放 TA 和 DIC 到孔隙水中。此外，當氧氣耗盡或是在氧氣無法到達的深部沉積物中，有機質會進一步進行無氧代謝作用，此過程亦會釋放 DIC 及 TA，成為小瀉湖孔隙水中高 DIC 及 TA 的另一重要來源。在潮流及擴散作用的影響下，孔隙水中高 TA 及 DIC 會逐漸向上覆的水體中釋放，其中 DIC 會被海草旺盛的光合作用再吸收利用，但光合作用並不會消耗 TA，加上小瀉湖半封閉的水體環境使得 TA 得以累積在水體中，進而驅動了 pH 的上升及  $p\text{CO}_2$  的下降。上述過程共同塑造了小瀉湖海草床獨特的大氣二氧化碳吸收及緩衝海洋酸化的能力。

關鍵詞:東沙島、瀉湖、海草床、碳化學、孔隙水、海洋酸化、二氧化碳

## Abstract

The high productivity of seagrass meadows can consume a large amount of dissolved inorganic carbon (DIC), which can drive the pH and calcium carbonate saturation ( $\Omega$ ) of seawater increase, and the partial pressure of  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) decrease. Therefore, seagrass meadows are generally considered to have the potential to buffer ocean acidification (OA) and to absorb atmospheric  $\text{CO}_2$ . However, recent observations have shown large diel and seasonal variabilities of seawater pH and  $p\text{CO}_2$  in seagrass meadows: the high pH and low  $p\text{CO}_2$  values, which would alleviate OA and atmospheric  $\text{CO}_2$  absorption, were observed during daytime/growing season owing to DIC uptake, while the low pH and high  $p\text{CO}_2$  values, which would aggravate OA and atmospheric  $\text{CO}_2$  absorption, occurred during nighttime/decay season due to DIC release. As a result, the potential of seagrass meadows in OA buffering and atmospheric  $\text{CO}_2$  absorption still needs further study. Unlike most seagrass meadows, where seawater carbonate chemistry shows strong diel variations, the present study found a unique diel pattern with extremely high pH and  $\Omega$  and low  $p\text{CO}_2$  across a diurnal cycle within the seagrass meadows of the inner lagoon of Dongsha Island in the South China Sea, and this distinct diel pattern repeatedly occurred in all seasons. In other words, the inner lagoon of Dongsha Island may maintain the status of absorbing atmospheric  $\text{CO}_2$  and buffering OA across a diurnal cycle all year round. Based on the data collected in the water column and pore water, we proposed that the unique diel pattern in carbonate chemistry in the seagrass meadows of the inner lagoon of Dongsha Island is caused by its restricted hydrodynamic environment. Due to the limited water exchange between the inner lagoon and the adjacent open ocean, the seagrass debris is easily accumulated in the sediments, which makes the sedimentary organic carbon content is quite high. The dense rhizome of seagrass may transport a large amount of oxygen to the sediments, thus stimulating the aerobic metabolism of organic matters. The aerobic metabolism of organic matters may release a large amount of  $\text{CO}_2$ , which may reduce  $\Omega$  and thus promote the dissolution of carbonate, which may release total alkalinity (TA) and DIC into the pore water. In addition, when oxygen is depleted and/or in deeper anoxic zone, organic matters may undergo anaerobic metabolism, which may also release DIC and TA into the pore water. Under the influence of tidal current and diffusion, high TA and DIC in the pore water may gradually be released into the overlying water column. The released DIC would be re-absorbed by the strong productivity of seagrasses, which cannot consume TA, and thus TA would be accumulated in the overlying water column. The accumulated TA in turn drives the increase in pH and the decrease in  $p\text{CO}_2$ . The above processes have jointly shaped the unique potential of the seagrass meadow of the inner lagoon in absorbing atmospheric  $\text{CO}_2$  and buffering OA.

Keywords: Dongsha Island, Lagoon, Seagrass meadow, Carbon chemistry, Pore water, Ocean acidification, Carbon dioxide