

國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所

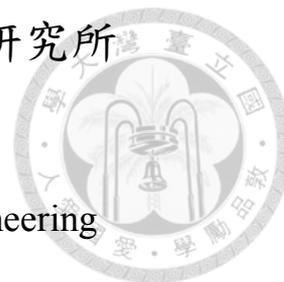
碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



風場對養殖池的曝氧研究

Wind Effects on Oxygen Transfer in Aquaculture Pond

陳 昇

Sheng Chen

指導教授：張文亮 博士

Advisor: Wen-Lian Chang, Ph.D.

中華民國 102 年 6 月

June, 2013

## 謝 誌



研究所兩年時間很快地過去了，從以前念海洋學院到現在的農學院，學習背景的改变，的確是一番新的挑战。但幸運的是遇到了很多人的幫忙，才能讓我的論文得以順利完成。很感謝口試委員張尊國老師、張倉榮老師、李玲玲老師和游少斌老師在論文研究上給予的指導與建議，點出學生思考時的盲點，提供更多面向的思維。

感謝這兩年來研究室大家的陪伴與幫忙，感謝栢岡學長，常給予碩論結構上的建議，當論文千頭萬緒時，總能給我一個較踏實的方向；感謝瑞君學姊，每次跟您聊天、討論都會得到新奇有趣的資訊，還有感謝您常常提供蔬菜、水果給研究室補充體力；感謝雅婷學姊，跟妳出差時都會玩的好嗨，而且在您身上學到很多野外辨認植物的知識；感謝宛亭，在碩論時的打氣與建議真的幫助很多，以及謝謝妳常常取悅研究室的人，讓大家都開心；感謝大樹，雖然說你叫我不寫進去，但我還是要感謝你的幫忙，跟你討論的過程中總會發現到自己思緒的盲點，而且你的建議也很有建設性；感謝王彤，出差時真的太謝謝有你這個地培啦；感謝瑞亭，當我在忙碌時總能及時地協助，讓我得以專心完成重要的事情；感謝錦蓮，謝謝你幫了我好多忙，以及在論文最爆炸時，對研究生們無微不至的照顧，話說，你每次脫線的反應總會讓人大笑；還要謝謝研究室已經畢業學長姐們的教導，有了您們的建議，論文這條路讓我走得更有方向；更要謝謝研究室的大家長河馬教授-張文亮老師，在論文上的建議與指導。

實驗的完成有賴於柯德義叔叔、林碧亮叔叔以及愛鄰基金會的大力相助，感謝您們的協助，東石的實驗才能夠順利完成；感謝柏寰，當我說要去東石出差時，你義無反顧的幫忙；感謝泰祥，給了我論文和分析上很多建議；感謝珈綺和朗傑，跟你們的討論總是可以天馬行空的發想。感謝一直不斷幫著我的好友-信宏，不管我何時需要協助，你總是兩肋插刀的幫忙。最後，我要特別感謝我的家人-爸爸、媽媽還有哥哥，因為有了您們，讓我有著持續前進的動力，當我為

論文焦慮不已時，您們的建議總讓我心情舒緩不少；雖然有時候打來的電話，話雖然不多，但我知道您們是很替我加油的，謝謝您們。

這篇論文能夠完成需要很多人的幫助，若沒有大家，這篇論文可能也沒辦法在這裡吧！雖然一己之力有限，但希望這篇論文能夠在未來幫助某些人，成為他們研究上的墊腳石。

陳昇 謹致

June. 2013

## 摘要

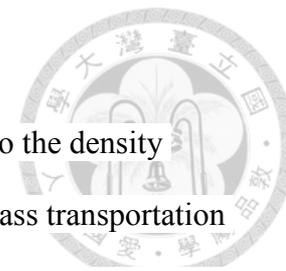
養殖魚塭在一般的環境當中會因太陽的照射產生分層現象，造成水體的密度改變，阻隔水層間的物質傳輸。以養殖業者角度來說，密度的層化會造成溶氧上混合的限制，使其無法傳輸至底層水體，也會使有效養殖區降低。因此養殖業者會使用曝氣設備破除水體分層現象，提供水體擾動的機會。然而，水體的混合不一定要透過曝氣設備，可以藉由自然風產生風趨流使水體混合。

本研究以現地實驗連續監測 24 小時無養魚無曝氣、無養魚有曝氣以及有養魚有曝氣的溶氧與溫度。研究結果發現無養魚無曝氣的魚池在白天會產生分層現象，但到下午 6 時至下午 10 時這段時間受到風的影響使得水體發生擾動，將表水層的溶氧傳輸至底部溶氧並快速混合。以 250 公分的水深來說，溶氧傳輸係數  $K_L a_{20}$  可達 0.156/hr。在無養魚有曝氣池中，因曝氣設備將水體混合並穩定增加溶氧，影響夜晚溶氧降低的主因來自於浮游生物與藻類的呼吸作用，溶氧傳輸係數  $K_L a_{20}$  的分層變化幾乎一致，整體的溶氧傳輸係數為 -0.046~0.052/hr。在有養魚有曝氣池中，因魚類的對氧的消耗量大，需要曝氣設備穩定的供氧，整體的溶氧傳輸係數  $K_L a_{20}$  較前者來的變化大(-0.034~-0.252/hr)，但在分層上的改變差異很小。

透過室內實驗探討風對於水體混合與氧氣傳輸的效率，實驗結果發現隨著風速增加，溶氧傳輸係數也越大。從風速造成的溶氧傳輸倍數來看，在風速 0.28-2.93m/s ( $U_{10}$ : 0.46~4.83 m/s) 時，就能在 DO 0-2mg/L 產生均勻的混合。但若要在 DO 2-4mg/L 的區間產生均勻的混合，風速須增至 2.93-3.66m/s ( $U_{10}$ : 4.83~6.04 m/s)。溶氧的區間越接近飽和溶氧區，風對水體的溶氧傳輸效果會降低，如需達到更均勻的混合，風速須提升。溶氧傳輸係數產生變化不只出現在表水層，水深 50 與 100 公分也有明顯增加的現象。從室內實驗可了解風所造成水體的擾動最少可以到達水深 100 公分。

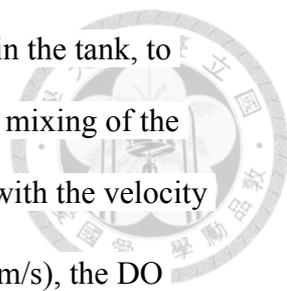
關鍵字:層化作用、風趨流、溶氧傳輸係數

## Abstract



In general, the separation in the fish ponds may occurred due to the density inversion caused by the solar radiation, which the interrupted the mass transportation between different layer of the water in the fish ponds. For the fishery, the limitation of the oxygen dissolution emerged once the water layers of density inversion were taken place, which decreased the efficiency of pond fishery. Therefore, the aeration system is equipped to promote the water circulation and to avoid the density inversion in the fishery. However, the aeration system the way, the wind-based mixing is another prospective way out.

In the research site, this study monitored dissolved oxygen and temperature continuously in 24 hours in 3 different states of fish ponds, no fish and unexposed oxygen pond, no fish and exposed oxygen pond, exposed oxygen fish pond. The results showed that there has the stratification in the no fish and unexposed oxygen pond in the daytime. However, the disturbance of the water body affected by the wind occurs at 18:00 to 22:00, and makes the dissolved oxygen mix from the surface to the bottom of the water body rapidly. At 250 cm depth, the oxygen transfer coefficient  $K_L a_{20}$  ' is up to 0.156/hr. In the no fish and exposed oxygen pond, the oxygen exposure devices blended the water and the dissolved oxygen increase steadily. The reason of the dissolved oxygen reduction in the night is the respiration of the plankton and algae.  $K_L a_{20}$  ' (oxygen transfer coefficient) is almost the same in different layer of water body, and the overall  $K_L a_{20}$  ' is  $-0.046 \sim 0.052/\text{hr}$ . In the exposed oxygen fish pond, there need the oxygen exposure devices because of the big oxygen consumption of fish. The change of the overall  $K_L a_{20}$  ' ( $-0.034 \sim -0.252/\text{hr}$ ) is large than the former pond, but the change is small in the different layer of water body.



The other part of the study conducted in the defined condition in the tank, to evaluate the efficiency of oxygen transportation and the wind-based mixing of the water layers. The oxygen transfer coefficient in the pond increased with the velocity of the wind. When the velocity reach 0.28-2.93 m/s ( $U_{10}$ : 4.83~6.04 m/s), the DO concentration interval 0-2 mg/L was evenly mixed; while the DO concentration interval 2-4 mg/L evenly mixed, the velocity of the wind should be set at 2.93-3.66 m/s ( $U_{10}$ : 4.83~6.04 m/s). When the oxygen concentration reached saturation, thus, the efficiency of the wind-base mixing decreased. The elevated velocity of wind is needed to gain DO of the system more even. The phenomenon is consistent in the surface water layer and in the shallow water layer (50-100 cm). The wind-based mixing is proved to be effective in mixing the DO concentration in the water tank to the extent of 100 cm deep.

Key words: stratification, wind driven flow, oxygen transfer coefficient

## 符號說明



- $\frac{dc}{dy}$  : 垂直於截面積處的濃度坡降
- $\frac{dc}{dy}$  : 氣體穿過物質的氣體分壓坡降
- $N_A$  : 單位時間內的質通量
- $N_g$  : 氣體穿過氣膜的質通量
- $N_L$  : 氣體穿過液膜的質通量
- $N_e$  : 氣體穿過液相的質通量
- $A$  : 發生傳輸作用的截面積( $m^2$ )
- $C$  : 液體中氧氣濃度( $mg/m^3$ )
- $C_A$  : A 物質在液相中的濃度( $mg/m^3$ )
- $C_s$  : 氣體的飽和溶氧( $mg/m^3$ )
- $D_{AB}$  : A 物質進入 B 物質的傳輸係數( $m^2/hr$ )
- $D_g$  : 氣體穿透氣膜的傳輸係數( $m^2/hr$ )
- $D_L$  : 氣體穿透液膜的傳輸係數( $m^2/hr$ )
- $D_e$  : 氣體在液相中的渦流傳輸係數( $m^2/hr$ )
- $K_L$  : 液相層傳輸係數( $m/hr$ )
- $K_g$  : 氣相層傳輸係數( $m/hr$ )
- $K_L a$  : 總氧傳輸係數( $hr^{-1}$ )
- $K_L a_{20}'$  : 經深度校正後  $20^\circ C$  下氧氣傳輸係數( $hr^{-1}$ )

- $V$  : 液體體積( $m^3$ )
- $t$  : 時間(hr)
- $T$  : 溫度( $^{\circ}C$ )
- $\theta$  : 溫度校正係數
- $\lambda$  : 深度校正係數
- $U_z$  : 高度  $Z$  公尺的風速(m/s)
- $U_{10}$  : 高度為 10 公尺的風速(m/s)
- $Z$  : 高度(m)

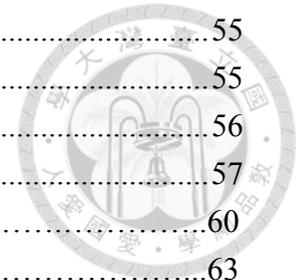


# 目錄



摘要.....	I
Abstract.....	II
符號說明.....	IV
1.1 前言.....	1
1.1.1 嘉義縣東石鄉.....	1
1.1.2 七星鱸魚養殖.....	3
1.2 文獻回顧.....	5
1.2.1 水深對養殖的影響.....	5
1.2.2 溫度與溶氧的層化作用.....	6
1.2.3 風對水體擾動的影響.....	7
1.3 研究目的.....	9
第二章理論與方法.....	10
2.1 水體層化效應(Stratification).....	10
2.2 風趨流(Wind driven flow).....	11
2.3 氣體傳輸方程式.....	12
2.3.1 $K_L a$ 校正係數.....	17
第三章材料與方法.....	18
3.1 現地實驗.....	18
3.1.1 現地背景資料.....	18
3.1.2 實驗地本身的養殖模式.....	18
3.1.3 實驗魚塭現場資料.....	21
3.1.4 實驗器材.....	22
3.1.5 實驗方法.....	23
3.2 室內溶氧傳輸試驗.....	25
3.2.1 試驗器材.....	25
3.2.2 試驗原理.....	26
第四章結果與討論.....	29
4.1 現地實驗.....	29
4.1.1 現地背景資料.....	29
4.1.2 現地採樣.....	34
4.1.3 溶氧傳輸係數( $K_L a_{20}$ )比較.....	41
4.2 室內溶氧傳輸試驗.....	47
4.2.1 室內實驗溶氧傳輸係數( $K_L a_{20}$ )之比較.....	51

第五章結論與建議.....	55
5.1 結論.....	55
5.2 建議.....	56
參考文獻.....	57
附錄 A 現地實驗.....	60
附錄 B 溶氧傳輸試驗.....	63
附錄 C 塭港氣象站資料.....	66



## 圖目錄

圖 2.1 層化作用造成的分層水體.....	10
圖 2.2 水面風浪與風趨流示意圖(資料來源:環境流體力學-朱佳仁).....	11
圖 2.3 層化水體受風擾動示意圖(資料來源:環境流體力學-朱佳仁).....	11
圖 3.1 現地實驗空照位置圖.....	21
圖 3.2 現場魚塭圖.....	22
圖 3.3 熱電阻式風速儀.....	23
圖 3.4 綜合水質分析儀.....	23
圖 3.5 現地實驗架設示意圖.....	24
圖 3.6 現地實驗現場架設圖.....	25
圖 3.7 溶氧傳輸試驗架設示意圖.....	28
圖 3.8 溶氧傳輸試驗實際架設圖.....	28
圖 4.1 2011 年 9 月逐時平均日照時數.....	29
圖 4.2 2011 年 9 月逐時平均氣溫.....	30
圖 4.3 2012 年 9 月逐時平均風速.....	31
圖 4.4 2012 年 9 月四時段風花圖.....	32
圖 4.5 無養魚無曝氣分層水溫圖.....	34
圖 4.6 無養魚無曝氣分層溶氧圖.....	35
圖 4.7 無養魚有曝氣分層水溫圖.....	37
圖 4.8 無養魚有曝氣分層溶氧圖.....	37
圖 4.9 有養魚有曝氣分層水溫圖.....	39
圖 4.10 有養魚有曝氣分層溶氧圖.....	39
圖 4.11 風速 $0.28\pm 0.20\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗.....	47
圖 4.12 風速 $0.28\pm 0.20\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗水溫.....	47
圖 4.13 風速 $2.93\pm 0.57\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗.....	48
圖 4.14 風速 $2.93\pm 0.57\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗水溫.....	49
圖 4.15 風速 $3.66\pm 0.50\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗.....	49
圖 4.16 風速 $3.66\pm 0.50\text{m/s}$ 溶氧傳輸試驗水溫.....	50

## 表目錄



表 4.1	無養魚無曝氣四階段的 $K_L a_{20}'$ .....	41
表 4.2	無養魚無曝氣、無養魚有曝氣與有養魚有曝氣不同時段 $K_L a_{20}'$ .....	46
表 4.3	DO 0-2mg/L 不同風速對不同水深的 $K_L a_{20}'$ .....	51
表 4.4	DO 0-2 mg/L 不同風速區間對水深 $K_L a_{20}'$ 增加速率 .....	51
表 4.5	DO 2-4mg/L 不同風速對不同水深的 $K_L a_{20}'$ .....	52
表 4.6	DO 2-4mg/L 不同風速區間對水深 $K_L a_{20}'$ 增加速率 .....	52
表 4.7	DO 4-6mg/L 不同風速對不同水深的 $K_L a_{20}'$ .....	52
表 4.8	DO 4-6mg/L 不同風速區間對水深 $K_L a_{20}'$ 增加速率 .....	53
表 4.9	室內試驗風速轉換至 $U_{10}$ .....	54



## 第一章緒論

### 1.1 前言

台灣養殖產業從 1661 年的粗放養殖開始深根，到 1970 年人工繁殖技術蓬勃發展，如今逐漸轉型走向永續經營以及環境和諧共存共榮為目標的養殖方式。台灣近海及沿岸地區淺海面積達四萬公頃，海埔新生地三萬公頃，再加上地處亞熱帶氣候，天候與環境條件適合養殖漁業的發展，從民國 41 年到 76 年間，漁業產量年平均成長率達 7.7%，居農林漁牧業四項產業之冠(蘇 & 劉, 2004)。養殖產業以台灣西南沿海地帶最為興盛，根據行政院主計處 99 年統計資料可知，嘉義縣從事水產養殖有 5298 家佔台灣 17.2%，是全縣市之冠，其中又以東石鄉為主要的養殖地區，全鄉合計共有 2457 家。

東石鄉的產業主要以養殖漁業為主，據行政院 99 年主計處統計資料得知，東石鄉佔嘉義縣的魚塭養殖面積 39.72%，而東石鄉從事一級產業人口，佔全鄉總就業人口約 82%，臺灣地區之一級產業人口佔全省總就業人口約 23%，東石鄉在一級產業人口比重遠高於臺灣省的比例，不難看出養殖漁業在東石鄉扮演多重要的地位。

#### 1.1.1 嘉義縣東石鄉

嘉義縣東石鄉位於嘉南平原西部沿海，海岸線長約 14 公里，地質屬於沖積平原，面積約 82 平方公里，全鄉共有 23 村，人口數約為 3 萬人左右。

根據台糖東石農場雨量觀測資料得知，嘉義地區的年降雨量為 1442mm，年蒸發量為 1826mm(嘉義縣政府, 2005)；在一年當中，6 月至 8 月降雨量大於蒸發量，八月至隔年五月則蒸發量大於降雨量，因此大部分的時間水量是不足以當地使用，水源的來源需仰賴地下水體的使用(經濟部水利處水利規劃試驗所, 2008)。但由於沿海養殖漁業的興盛，超抽大量地下水體，造成當地發生地層下陷、海水



倒灌，並造成當地許多建築崩塌與毀損。根據水資源局在 1998 年的資料指出東石鄉的地下水安全出水量為每年 4300 萬  $m^3$ ，以及 2000 年成功大學調查發現東石鄉地下水的使用卻達到每年 8300 萬  $m^3$ ，直到 2011 年高雄第一科技大學調查東石鄉地下水使用量降為每年 1493 萬  $m^3$  (姜, 2011)。因當地地下水體曾經嚴重超抽，產生的地層下陷災害是不可逆行的結果。由於當地的地勢較為低窪，東石鄉較貼近臨海地區，因此當地層下陷發生時，使得當地的位置位於海平面以下，若沒有外圍的臨海堤防，海水會湧入東石地區。因此當地一旦降雨，容易造成水災；若當日又遇到海水滿潮，則會造成東石鄉內部的水抽不去，外部的海水又會湧進來，造成更大的災害；另外養殖業者會在降雨時將大量的水排除，減少魚塢的水漫淹造成魚類的損失，因此魚塢排水、當地降雨再加上海水的倒灌，導致東石地區只要下雨就容易發生水災。

東石鄉當地魚塢操作模式為池深約 200 公分，水深則控制在 80~120 公分，因此養殖水體容易隨著大環境而發生變異。對養殖漁業來說，如當地發生降雨時，海堤會關閉排水閘門，避免外在海水湧入，降低水災造成的災害；另一方面，卻造成當地養殖業者無法抽取海水，補充被雨水稀釋掉的養殖水體鹽度，容易造成養殖魚類的死亡。一般而言，魚類對於鹽度的容忍極限約 5ppt，如鹽度快速變化則會造成魚類壓迫，甚至造成魚體的死亡。

因此透過加深魚塢池深至 400 公分，平均水深控制在 250 公分的深水魚塢，增加的水體量可以降低遇雨時水質產生大量的改變，蓄存的水體能緩慢補助當地的淺層地下水，並增加水體的入滲時間，減少降雨大量排水時的造成周邊環境的破壞。

### 1.1.2 七星鱸魚養殖

鱸魚(*Lateolabrax japonicus*)，中文名為日本真鱸，俗稱七星鱸、花鱸，屬輻鰭魚綱(Actinopterygii)、鱸形目(Perciforms)、花鱸科(Lateolabracidae)、花鱸屬(*Lateolabrax*)。七星鱸魚為近海性魚類，早年分布於西太平洋，現在主要分布區域主要是在中國黃海、東海、韓國及日本等沿岸海域至南中國海；台灣則分布於北部及西部海域。七星鱸魚養殖地由早期台灣北部埤圳池塘迅速傳輸至中南部區域，尤其以雲林、嘉義地區為主要產地；但因七星鱸魚本身對環境突然改變的抵抗力較差，很容易造成魚群的死亡，導致集約式七星鱸魚養殖場較難經營(陳, 2005)。

七星鱸魚生活水域為中下層水域，喜歡群棲於具有軟泥質的岩礁或礫石區，不喜棲於汙濁的水中。本身為強肉食性，性情兇猛卻易受驚嚇，在養殖環境裡對鹽度與溫度的變化具有相當的適應力，屬於廣溫性、廣鹽性的魚類；但對氧氣的需求卻很高，離水面只要短時間即可造成傷害致死，因此養殖七星鱸魚水中的溶氧要保持在 4mg/L 以上，養殖的建議水深建議在 1 公尺以上，能經常保持 1.5 公尺左右較為適合。

對於養殖地的要求，七星鱸魚對水質要求很高，本身喜愛清潔之水，故池水本身不宜混濁或施加肥料過多，酸鹼值以中性或微鹼性較為適合，溫度的控制最好約在 20~25°C (Shen *et al.*, 2008)，如果長期處於 30°C 以上之水域，魚群易感染疾病死亡；對七星鱸魚的幼魚而言，其溫度上下生存界限分別為 35.5°C 和 3.5°C，最適合成長的水溫界限為 23~28°C。因此魚塭養殖水溫最好不低於 10°C，如長時間在高水溫下飼養，易感染疾病，而且死亡率也會增高。因此七星鱸魚是一種相當耐寒的溫水性魚類。一般攝食水溫在 12~32°C 之間，但以 20~25°C 時攝餌率最為旺盛，若高於 28°C 或低於 15°C 攝餌率較差，雖然水溫低時仍然會攝食，但成長速度會降低(蘇 and 劉, 2004)。

一般適合的養殖密度為每公頃 40000~80000 尾，一般而言，七星鱸雌魚需要 3 年以上才會成熟，雄魚 2 年，因此一般魚塭或埤圳池塘約 2~3 年才會清池一次。



### 1.1.3 水質上的管理:

魚塭的水質管理對養殖漁業來說是一項很重要的議題，由於生物進行生化反應與體態增長率明顯受到溫度的影響，而且生物的生存主要依賴水體間的溶氧，因此在探討水質管理時，水溫與溶氧是最為重視的兩大因素(Boyd *et al.*, 1978)。養殖的過程中常因投料過多、生物排泄而產生大量有機質，如溶氧不足將會使水質呈現厭氧態，不只養殖池中生物難以生長，水體亦會產生惡臭味，甚至產生甲烷、硫化氫以及氨(Gebhart and Summerfelt, 1976)。水體溶氧如果不足，水中微生物會還原高氧化態的離子；以硫化物而言，水中異營性細菌分解出的硫化物，在低溶氧的環境會被還原成硫化氫，以梭魚(*Esox lucius L.*)而言，卵及魚苗如需正常生長，硫化氫濃度必須低於 0.006mg/L(Adelman and Smith, 1970)



## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 水深對養殖的影響

水體的深淺影響著魚類生存的環境，因此養殖魚塭水深的設計會影響養殖魚類的生活型態。水深對魚類的死亡率有很大的影響，對養殖吳郭魚(*Oreochromis mossambicus*)而言，魚塭的深度與溫度很明顯地影響吳郭魚的存活率，當水深只有 50 公分時，死亡率高達 41.5%，當水深控制在 200 公分時，死亡率剩下 21~27%，而當水深到達 300 公分時，死亡率大幅地降低(El-Sayed *et al.*, 1996)。

因此水深的控制是養殖魚類時重要的考量因素，當水深越深，魚的生存空間越大，提供水體的溫度緩衝區域也就越多，可避免受到環境變化而產生水體改變，但水深的增加亦會使得周邊沉水性植物的入侵；如水體越淺，一日的溫度變化易隨大環境變異而產生大幅改變，因此適當的水深選擇成為了養殖上的關鍵。雖然魚類本身會躲避過高或低溫的環境區域，但當養殖池水發生溫度變化現象時，會導致適合魚類生活的區域降低，以生長於熱帶的白莓鱸(*Pomoxis annularis*)而言，其適合的水溫為 30°C，但表層水體的溫度會受太陽照射上升至 34°C，使得魚群適合的生長區域減少(Gebhart and Summerfelt, 1975)。絕大部分的養殖魚種都沒有辦法忍受溫度變化過大的水體，若是短時間內溫度變化迅速，不論是由高至低還是由低至高，只要範圍超過 5°C 以上，都有可能造成魚類的緊迫或瞬間休克甚至死亡(Boyd, 1982)。因此理想水深應介於 0.75~2 公尺間，通常一般的魚塭深度為 0.8~1.2m，如溫度變化很大或溫度遽降太快處，深度最少要 1m，以防止因溫度變化的太快而傷害到魚類(曾, 1983)。以中國養殖吳郭魚(*O. mossambicus*)而言，為飼養和過冬上的需要，建議養殖水深在 2~2.5 公尺才能有效養殖，降低魚群的死亡(Zhong, 1991)。

不過在水深 1 公尺的水體中，表層水的溶氧會較底層高，甚至會出現表面水體溶氧過飽和，但底層水體溶氧卻為零的現象發生。溶氧分層現象對魚的生長及疾病的產生均有負面的影響(劉, 2001)。若水溶氧量低於 3.0mg/l 會對大部份魚類

有害，所以溶氧量一般最好能維持在 5.0mg/L 以上，以利魚類生長。如果水域中溶氧量缺乏，則魚類呼吸率增快，水體中含有的有毒物質對魚類的滲透也就更大，以致於加深魚的毒含量(李, 1987)。



### 1.2.2 溫度與溶氧的層化作用

在天然環境下，湖泊、海洋受太陽產生溫度差，水體的熱分層現象 (thermal stratification) 與去分層現象 (destratification) 皆會普遍的發生，因此對魚塢這樣的靜止水體也不例外。一般而言，水體層化作用最明顯的時間約為，下午 3 時至 6 時最為明顯；由於夜晚的冷卻作用，上下水體溫度逐漸接近一致，因此去分層現象主要發生在日落以後(林, 1994)。

水體的溫度分層現象與溶氧的濃度變化有著密切的關係，溫度的改變造成水體的密度改變，分層密度的阻隔使水體混合不易，造成溶氧層化產生；這樣的作用常發生在夏季，水深大於 10 公尺的靜止水體，一般而言，日夜溫差所造成的變溫層較淺，溫度變化較小；季節溫差所造成的變溫層較深，溫度變化較大(朱, 2003)。

當層化現象發生時，水體的移動會受到密度分層而無法完全混合，並抑制水體在垂直方向上的流動與質量的傳輸，氧氣很難藉由傳輸或對流的方式進行移動，導致表層溶氧無法完全混合至底層，使得表水層發生溶氧過飽和，而均溫層溶氧近乎為零。底部因缺氧使得細菌進行還原反應，將高氧化態的物質還原，會使水環境成厭氣狀況而發生臭味，溶氧的不足將直接影響到水體自淨能力，當溶氧低於 0.11mg/L 時，則硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ )及亞硝酸鹽( $\text{NO}_2^-$ )耗盡，而將硫酸根( $\text{SO}_4^-$ )還原，並產生氨、磷酸鹽與矽酸鹽積聚在缺氧水域的傾向，使水質水質惡化(黃, 2003)。

### 1.2.3 風對水體擾動的影響

靜止水體的混合不像河川的擾動一樣，可透過河底產生的紊流加速水體完全混合，因此在湖泊學(Limnology)曾針對於湖泊、水庫這樣靜止水體發現到說風能透過震盪與混合兩種作用產生混合(Wetzel, 2001)。由於風作用在表水層的時間足夠，能夠產生內波(Internal wave)和內蕩漾波(Internal Seiche)使得水體產生震盪，進而使水體混合，另一個則是風帶動表層水的運動，使水體逐漸被混合，但對較小的靜止水體魚塢而言，面積與深度的尺度都不像湖泊一樣，因此震盪的效應較不明顯，但風對水體的擾動仍是影響很大，當湖泊與水庫具有很強的熱分層時，水體表面的溶氧傳輸與分布效果會與風速的擺盪有著敏感性的變化(Yu *et al.*, 1984)。

當風吹過水體表面時，會造成表水體的移動，會使得對氣體的吸收效率會增加兩倍，風造成的波浪可以提高 10 倍吸收效率(Imhoff and Fair, 1956)。風的吹拂會造成水體表面的擾動，使得氧氣更容易傳輸到表層水體，而且隨著風速與水面的移動增加，對於氧氣的對流與溶氧傳輸係數都會增加許多(Meyer and Brune, 1982)。風速對於氧氣的傳遞有很強的關係，風速在 0.45m/至 1m/s 之間，對溶氧傳輸係數並沒有很明顯的正相關(Boyd and Teichert-Coddington, 1992)，建議風速要在 1m/s 才會有所正相關；而當風速於 3m/s 時，水面產生重力波，傳輸係數隨風速急速增加，當風速約在 6-7m/s 時，氧的傳輸係數與風速呈現正比狀態(朱, 2001)。

但水體受風所產生的混合效果亦會受到當天晝夜循環的影響，早上水體吸收太陽輻射，造成密度改變，密度上的分層使得水體無法輕易的混合；晚上則因無太陽的照射，溫度與密度的差異下降使得水體較能混合完全，水體混合層在日出時隨即逐漸上升，直到日落後，水體混合層範圍才會逐漸變深，(Brainerd and Gregg, 1995)觀察到以實驗當地下午 4 時後開始，混合層範圍逐漸深入池底，直到隔天上午 4 時混合層深度達到最深，並開始逐漸縮小至上午 9 時，在上午 9

時混合層逐漸達到最小，直到下午四點以後又開始混合變深，每天不斷的循環，這樣的現象會受到季節性的影響而有些微改變。

熱分層現象主要發生在溫度較高的夏季，以北半球而言，從3月至9月熱分層現象幾乎常常會出現。水體混合的垂直循環現象發生在下午8時至10時之間，夏天時混合的程度甚至還能至0.7~1公尺，若要發生完全性的垂直混合只有發生在很大的風才會發生。小於1m/s的風速在日落後仍可以大幅影響混合的深度；另外，水體表面平均溫度在30°C，底層與表層水溫度差小於0.1°C時，風速在0.85~1.4m/s是足夠影響到水底表層以下200公分(Chang and Ouyang, 1988)。

綜合上述說法，可了解到當日落後，太陽輻射量逐漸下降，使得水體剖面溫度逐漸趨於一致，水體的運作不再受到密度分層而阻隔水體運動，因此，風的作用逐漸成為夜晚時推動水體運動的主要動力源。

### 1.3 研究目的

有鑑於自然風對養殖魚塭產生影響的研究不多，因此希望透過本次的研究探討風對魚塭養殖水體的影響，如能透過自然風增加溶氧的傳輸量，同時破壞水面邊界層及攪拌、混合水體之功用，可提供當地的養殖業者做養殖設計上的考量，進而了解到水體是該如何管理。

因此本篇研究是探討當地深水養殖魚塭的使用狀況，了解溶氧與溫度隨著不同深度有何影響，並透過周邊環境風速探討水體的混合機制是否能帶動深水養殖魚塭，並增加氧氣的傳輸，因此研究方向可分為下列兩點：

1. 以東石鄉當地養殖戶柯德義先生之深水養殖魚塭當作研究魚塭，探討水深 250 公分魚塭的變化與影響因子。
2. 藉由室內試驗驗證風速是否達到擾動水體，進而增加溶氧的傳輸之功能。

## 第二章理論與方法



### 2.1 水體層化效應(Stratification)

對大部分的靜止水體來說，水體中主要的熱量來自照射於水面上的太陽輻射，而大部分的太陽輻射能會被上層的水體所吸收，因此上層水體的溫度較高，密度較小，越深層的水體所能接受到的太陽輻射量較少，因此溫度較低，密度較高，產生密度上的分層現象，此現象稱之為層化現象(Stratification)。因此若將水體溫度以剖面來看，熱能逐漸遞減並往底層傳遞形成溫度分層，其分層狀態可分成三層，位於上層水體溫度變化較快的表水層(Epilimnion)，以及下層水體溫度變化較低的均溫層(Hypolimnion)，位於兩水層間的水體會產生溫度變化量極大的水層，稱之為變溫層(Metalimnion)，分層水體示意圖可參考圖 2.1。

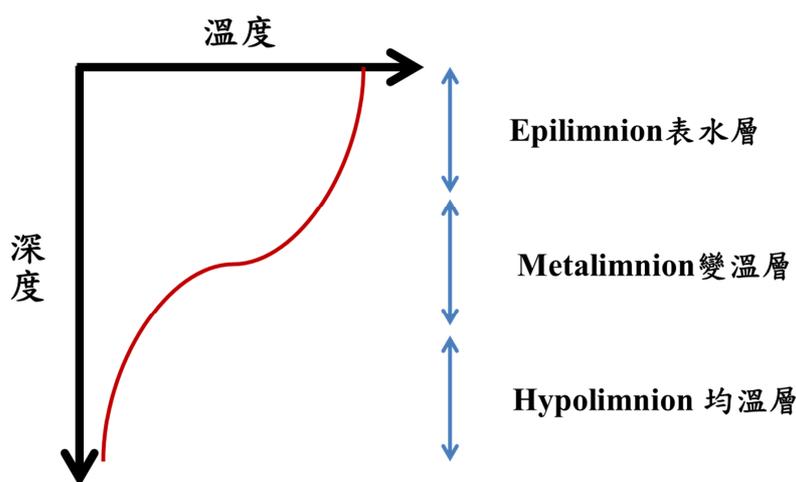


圖 2.1 層化作用造成的分層水體

夏季太陽輻射強烈而且連續，分層作用明顯，當水體發生分層時，造成密度的差異性，使得水體的移動發生困難，進而降低物質之傳輸。含有高溶氧的表層水無法進入低溶氧的底層水，造成底層水體產生厭氧，而富含營養鹽的底層水也無法向上傳輸至表層水體。



## 2.2 風趨流(Wind driven flow)

就流動型態來說，湖泊與河川最大的差異性來自於水深與紊流來源的不同，對大部分靜止水體來說，像是湖泊與水庫等大型靜止水體，水體的擾動主要是來自於風造成的混合，其混合的機制不像河川可以透過底部的紊流造成水體快速擾動，使得水體產生垂直方向的混合，因此對於靜止水體來說，風所造成的影響便成了水體混合的主要機制。其混合機制可參考下列示意圖，圖 2.2。

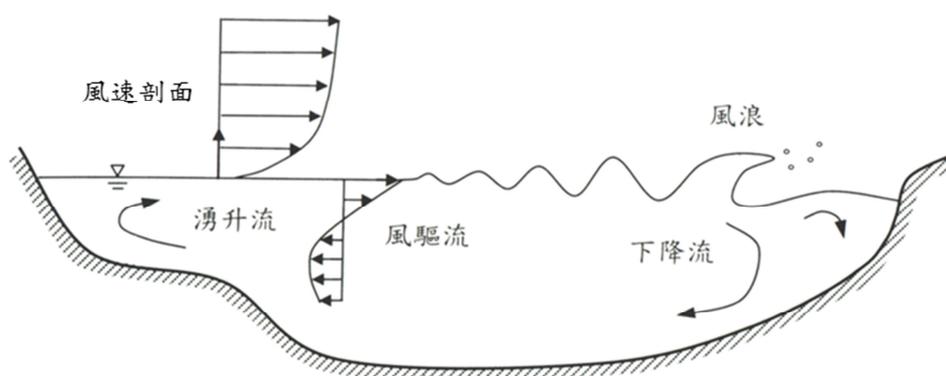


圖 2.2 水面風浪與風趨流示意圖(資料來源:環境流體力學-朱佳仁)

當層化現象發生時，水體中物質的傳輸會受密度的分層將變得窒礙難行，而風的作用卻能增加水體的混合，因此對於靜止水體而言，溫度與風速成為主要影響靜止水體的混合重要關鍵。

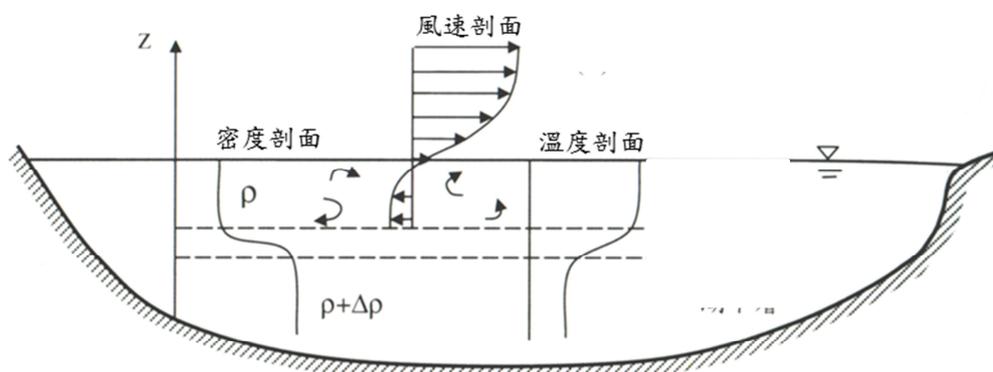


圖 2.3 層化水體受風擾動示意圖(資料來源:環境流體力學-朱佳仁)

### 2.3 氣體傳輸方程式

氧氣進入水體的傳輸過程可利用斐克第一定理來做解釋(Rogers, 1989)，斐克的第一定理(Fick's law)於 1855 年 Fick 提出，認為水體中的氣體傳輸，主要是透過質量傳輸(mass transfer)，因此氣體傳輸量會正比於氣體在介質的濃度梯度。單位時間內通過垂直於傳輸方向的單位截面積，傳輸物質的通量(diffusion flux)會與該截面的濃度梯度(concentration gradient)呈現正比的線性關係，即式(2.1)：

$$\overline{N}_A = -D_{AB} \nabla C_A \quad (2.1)$$

$\overline{N}_A$ ：單位截面積，單位時間內物質 A 的傳輸通量(mg/hr m<sup>2</sup>)

-：傳輸方向為濃度梯度的反方向

$D_{AB}$ ：A 物質進入 B 物質的係數(m<sup>2</sup>/hr)

$\nabla C_A$ ：A 物質進入 B 物質的濃度梯度(mg/m<sup>2</sup>)

對氧氣經由傳輸方式傳輸至水體中的過程，假設空氣中的氧氣濃度是固定的，並不隨著 x 與 z 方向而有所改變，因此氧氣傳送至水體的過程可簡化為一維質量傳輸，把濃度梯度簡化成對 y 方向的濃度變化，並將氣液界面的面積併入到方程式中，算出單位時間內氣體傳輸的總質量，氣體與液體間的質量傳輸關係和傳輸速率可表達如式(2.2)：

$$N_A = \overline{N}_A \cdot A = -D_{AB} A \cdot \left( \frac{dc}{dy} \right) \quad (2.2)$$

$N_A$ ：單位時間內 A 物質的傳輸量(mg/hr)

$\left( \frac{dc}{dy} \right)$ ：垂直於截面積的濃度坡降

$A$ ：傳輸作用發生處的截面積( $m^2$ )

Lewis 及 Whiteman 於 1924 年提出的雙膜理論(Two Film Theory)，則將氧氣的傳輸過程做進一步的解釋，氧氣的質量傳輸可以分成四個連續階段，第一為氣體分子由氣相傳輸到界面，第二是從介面通過氣膜，第三階段則是傳輸至液膜，第四則為氣體傳輸到液體中(Lewis & Whitman, 1924)。

雙膜理論中的假設：

1. 氣、液體接觸並作相對運動時，接觸界面的兩側，存在著氣體與液體的邊界層，即是所謂的「氣膜」與「液膜」。
2. 在氣膜和液膜內的相對運動速度屬層流，而在氣相與液相為紊流態。
3. 氧氣的傳輸主要是透過氣膜、液膜進行分子傳輸以及膜外的對流傳輸來完成。
4. 對難溶於水的氧來說，分子傳輸阻力大於對流傳輸，因此質傳的阻力就集中在液膜上。
5. 當氣膜中存在氧的分壓梯度時，液膜中同樣也存在氧的濃度梯度，形成氧轉移的動力。
6. 在氣膜中氧分子的傳送動力很小，氣相與交界面之間的氧分壓差值相對地很低。

因此可認為氣液交界面處的溶解氧濃度相當於在氧分壓條件下的飽和溶解氧濃度值，當氧氣轉移過程中的質傳推動力，可說是氣液交界面上的飽和溶氧的濃度值與液相溶氧濃度值的差異。

氣體溶質分子由氣相傳送至液相之阻力，主要集中在氣液相交界面，氣相與液相之間的薄膜層界面上。氣體分子在不具濃度差的氣相中，利用對流傳送至氣膜邊緣，在以傳輸方式傳過具阻力的氣膜到達交界面，因此再依照斐克傳輸方程式，傳輸速率會與氣膜的濃度梯度及界面大小成正比關係，將各處的質通量表示成下式：

$$N_g = -D_g A \left( \frac{dp}{dy} \right)_g \quad (2.3)$$

$$N_L = -D_L A \left( \frac{dp}{dy} \right)_L \quad (2.4)$$

$$N_e = -D_e A \left( \frac{dp}{dy} \right)_e \quad (2.5)$$



$N_g$ 、 $N_L$ 、 $N_e$ ：分別為單位時間內氣體穿過氣膜、液膜、液相的質通量(mg/hr)

$D_g$ 、 $D_L$ ：分別為氣體穿過氣膜、液膜之傳輸係數(m<sup>2</sup>/hr)

$D_e$ ：氣體在液相中之渦流傳輸係數(m<sup>2</sup>/hr)

$A$ ：傳輸作用的截面積(m<sup>2</sup>)

$\left( \frac{dp}{dy} \right)_g$ ：氣體穿過氣膜之氣體分壓坡降

$\left( \frac{dp}{dy} \right)_L$ ：氣體穿過液膜之濃度坡降

$\left( \frac{dp}{dy} \right)_e$ ：氣體穿過液相之濃度坡降

在上述傳輸傳輸方程式中，除了氣、液膜等分子傳輸氣體質傳驅動力外，還有液相中的渦流傳輸，分別以  $D_g$ 、 $D_L$ 、 $D_e$  代表其在氣相、水相、以及渦流的質傳係數；假設平衡發生在氣液交界面處，氣體通過氣膜、液膜及液相的質通量相等，液相濃度是均勻分布，並將可寫成式(2.6):

$$N = -D_g A \left( \frac{dp}{dy} \right)_g = -D_L A \left( \frac{dp}{dy} \right)_L = -D_e A \left( \frac{dp}{dy} \right)_e \quad (2.6)$$

假設液膜阻力控制氧氣傳輸速率時，傳輸過程限制主要來自於液膜，因此可將式(2.6)再寫成式(2.7):

$$N = -D_L A \left( \frac{dp}{dy} \right)_L \quad (2.7)$$

氧氣的分壓差造成濃度的差異，因此壓力項(P)更改成濃度項(C)，又因為液膜本身的厚度非常的微小，很難被偵測機器所測到，因此我們定義其液膜厚度為 $Y_L$ ，其y方向的濃度改變即為在液膜隨著後的改變，因此可將式(2.7)在重新寫成式(2.8):

$$N = K_L A (C_S - C) \quad (2.8)$$

$N$ ：單位時間內的傳輸質量(mg/hr)

$K_L$ ：液相層係數( $K_L = \frac{D_L}{Y_L}$ )

$Y_L$ ：液相層厚度(m)

$C_S$ ：飽和溶氧(mg/m<sup>3</sup>)

$C$ ：液相中的溶氧(mg/m<sup>3</sup>)

氧氣溶入水中可視為一階反應，液相主體的體積為 $V$ ，並將上式除以體積 $V$ ，即能算出單位內濃度的變化量，參考式(2.9):

$$\frac{1}{V} N = \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} = \frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_S - C) = K_L a (C_S - C) \quad (2.9)$$



$K_L \frac{A}{V} = K_L a$  : 總溶氧傳輸係數

$\frac{dC}{dt}$  : 氧氣傳輸速率( $\frac{mg / m^3}{hr}$ )

$t$  : 時間(hr)

$K_L$  : 氧分子在液膜傳輸係數(m/hr)

$A$  : 氣液交界面的面積( $m^2$ )

$V$  : 液體體積( $m^3$ )

$C_s$  : 飽和溶氧濃度( $mg/m^3$ )

$C$  : 液體中溶氧濃度( $mg/m^3$ )

在將式(2.7)取不定積分後，可得到式(2.10)：

$$\int \frac{1}{(C_s - C)} dC = \int K_L a \cdot dt$$
$$-\ln |(C_s - C)| = K_L a \cdot t \quad (2.10)$$

$C_s$  : 飽和溶氧濃度( $mg/m^3$ )

$C$  : 偵測到的溶氧濃度( $mg/m^3$ )

$t$  : 時間(hr)

利用式(2.10)以 $-\ln |(C_s - C)|$ 對 $t$ 繪圖，即可利用迴歸方式計算溶氧傳輸係數

$K_L a$ ，並由 $K_L a$ 來評估溶氧傳輸效率的探討。



### 2.3.1 $K_L a$ 校正係數

#### 2.3.1.1 溫度校正係數( $\theta$ )

溫度的增加會產生較小驅動力( $C_s - C$ )，濃度梯度的減少使得溶氧分子傳輸速度變慢，因此氧氣溶解度性降低，也使得氧氣傳輸率降低。因此當液體黏度和表面張力減少時，氧氣的傳輸率隨著溫度的增加而增加，這些影響抵銷較小的驅動力使得  $K_L a$  增加(Vogelaar *et al.*, 2000)；目前以美國土木工程學會(ASCE)研究指出溫度校正係數  $\theta = 1.024$  為主，該值廣泛用於溶氧傳輸係數之溫度校正。

$$K_L a_{(T)} = K_L a_{(20)} \theta^{T-20} \quad (2.11)$$

$K_L a_{(T)}$ ：溫度 T 的  $K_L a$

$K_L a_{(20)}$ ：20°C 下的  $K_L a$

$T$ ：溫度(°C)

#### 2.3.1.2 深度校正係數 $\lambda$

由於氣體在水體傳輸時，氣體到達不同深度的效果並不相同，水深會影響到氧氣傳輸係數的變化，因此須針對不同水深進行修正。曾有學者針對不同深度，實驗出各深度的溶氧傳輸係數修正值  $\lambda$  (Tang and Meng, 2007)。本研究採用其修正係數作為深度修正之依據。

$$K_L a_{(20)}' = \lambda K_L a_{(20)} \quad (2.12)$$

$K_L a_{(20)}'$ ：修正深度後之  $K_L a_{(20)}$

$K_L a_{(20)}$ ：20°C 下的  $K_L a$

$\lambda$ ：水深 0.5 公尺 0.97；水深 1 公尺 0.94；水深 2.5 公尺 0.86



## 第三章材料與方法

### 3.1 現地實驗

#### 3.1.1 現地背景資料

嘉義縣東石鄉位於台灣西南部沿海地區，當地氣溫受海洋調節，當地年平均氣溫為攝氏 22.5°C，年平均雨量 1706.7 毫米，日照平均時數約為 2064 小時，全鄉土地總面積 8261 公頃，其中養殖面積佔了 44%。

當地屬於地層下陷區，每當下起大雨時，容易造成當地淹水。當地產業大部分以養殖漁業為主，每當下雨時，養殖業者為預防水體變化過大，造成魚塭漫淹產生養殖漁獲的流失，當地養殖業者會將排水閘門開啟，排出大量水體。但東石鄉本身地勢低窪，水體排出本身就不是一件容易的事，若漁戶再將當地養殖用水的排出，便會使得水災更為嚴重，甚至重創當地周邊設施。

#### 3.1.2 實驗地本身的養殖模式

實驗地點位於嘉義縣東石鄉福爾摩沙養殖場，所有權人為柯德義先生，柯德義先生對於養殖有 20 幾年的經驗，並提供自身養殖魚塭供為實驗魚塭，魚塭本身的養殖方式可在下列做詳細的介紹：

#### 養殖池的設計理念

柯德義先生將深水養殖魚塭的深度更改為 400 公分，養殖時平均深度為 250 公分。此設計的概念可應用於臨時降雨，可將多餘的雨水蓄存於養殖魚塭內，並提供補助淺層地下水的水源，也因水體較一般養殖業者來的深，大量水體提供了水質變化的緩衝，降低外在水體臨時增加所造成的災害。另外深水養殖也提供了魚群活動空間，增加養殖的數量。

### 整合性養殖：

整合性養殖與一般的粗放養殖不同的地方：粗放養殖在單一池內飼養的魚量不多，魚具有足夠的活動空間，魚產生排泄物因魚池自淨作用產生水體淨化，故終年不用換水，因此池水的鹽度、酸鹼值、透明度及滲透壓穩定，這是最原始的放養方式；粗放養殖並無太多養殖管理，因此對於生產者而言經濟效益差、收成有限，很少有人選擇粗放式養殖。然而以密集式養殖則是飼養大量魚類以提高單池的經濟效益，最常遇到的問題是病蟲害，病蟲害通常因高密度養殖、換水率不高、水質不乾淨所引起，一旦感染細菌、病毒或外寄生蟲（如：魚蝨）時，整池魚會受傷造成損失或全部死亡，因此有些養殖業者會施予抗生素或其他的藥物，甚至使用非合法藥物進行控制病蟲害。整合性養殖則是希望透過有效的管理，訴求對環境破壞影響較低的養殖方式，減少養殖密度，其飼養密度為粗放養殖至一般集約式養殖之間，並透過生態系的建立，將養殖中產生的廢棄物轉為另一魚種的食物來源，達到養殖的平衡，追求物質從搖籃至墳墓資源上的有效利用。利用養殖魚類的整合養殖，維持生態食物鏈，不像集約漁業大量養殖單一物種，產生的廢棄物無法成為下一層食物鏈的進行，亦產生不必要的成本支出，也增加了其他有害環境物質的使用，像是使用孔雀綠(Malachite green)作為殺蟲劑和殺菌劑，因為孔雀綠及其代謝物（還原型孔雀綠、無色隱性孔雀綠）均為脂溶性化合物，在魚體內和環境中殘留時間長，並有致突變、致畸和致癌的危險性。因此整合性養殖則是透過養殖源頭的生物防治，將適當的生態鏈建立，透過食物鏈的作用，減少不必要的加藥量。

以下為養殖時生物鏈的選用，七星鱸魚為養殖系統中的高級消費者。

### 水空心菜(*Ipomoea aquatica*)：

藉由水空心菜吸收水中多餘的營養鹽以及魚類排泄物所產生的氮化物，以達淨化水質的果效。



**草魚(*Ctenopharyngodon idella*) :**

草魚本身就以食草而得名，主要以水生維管束植物和絲狀藻類為食物，基本上大多數的水生植物都可適時，因此可以透過養殖草魚，防止護坡草皮生長進入魚塢。

**烏鰡(*Mylopharyngodon piceus*) :**

由於烏溜有攝食淡水螺貝之生態習性，可以減少水螺會攝取池水及其土壤的豐富養份及礦物質，並做為清除養殖池內傳播疾病之螺貝類。

**大頭鯪(*Aristichthys nobilis*) :**

大頭鯪主要攝食水體中動物性浮游生物，並吃掉過多的藻類，不使藻類繁殖過多，維持水質的穩定。

**鰻魚(*Anguilla japonica*) :**

鰻魚為肉食性動物，小魚、魚卵都會攝食，因此養在養殖池中，可以抑制其他魚種的生長，便於控制養殖目標魚類的生產。

因此柯德義先生的養殖模式是透過加深池深與水深，儲存突發而來的水體，延長水體入滲時間，增加養殖魚類的活動空間，並提升水質的緩衝能力，即能減少抽取地下水，減緩地層下陷量。周邊種植南美蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)增加綠化和護坡的功效，免遭下雨衝垮周邊的土堤。透過整合性養殖減少養殖的用藥，增添水生植物的栽種，達到水質淨化，增加溶氧等好處，透過魚類混種養殖，控制各魚種的密度，以調控生態食物鏈，達到穩定的水環境生態系，生產無毒、安全、優質的農漁產品。

### 3.1.3 實驗魚塭現場資料

實驗魚塭位於東經 120 度 09 分 22 秒、北緯 23 度 28 分 10 秒，實驗魚塭面積約 4 甲地(38800m<sup>2</sup>)長約 100 公尺，寬約 38 公尺，平均深度為 250 公分，經清除底泥、殺菌、整池、曬池完一個月後，再灌水入魚塭，並經兩周待水體性質穩定，期間無放養任何養殖魚類，分成無曝氣與曝氣兩種情況進行實驗，實驗時間為 2012 年 9 月 5 日至 9 月 8 日四天；另一實驗則為 2013 年 1 月 23 日至 24 日進行有養魚有曝氣監測二天，這 6 天實驗過程天氣型態穩定並無降雨產生干擾。

塭港氣象站，位於東經 120 度 07 分 46 秒、北緯 23 度 28 分 06 秒，經濟部水利署於塭港南岸海堤上設立之氣象站，為近海水文監測系統氣象站之一，其設置目的為掌握台灣環島近海水文情勢，收集近海水文資料，以作為海岸救災防災業務之重要參考資訊；氣象站每日逐時紀錄風速、風向、雨量、日照、濕度與氣溫資料，由於實驗調查之魚塭距離氣象站約 2 公里，因此可以藉由觀測之資料了解實驗區域周邊環境之變化，以探討環境造成實驗影響之依據。



圖 3.1 現地實驗空照位置圖



圖 3.2 現場魚塢圖

### 3.1.4 實驗器材

綜合水質分析儀(WTW Multi 3430 Multiparameter Meter)，參考圖 3.4

TetraCon 925 溶氧感測器

溶氧偵測範圍 0~20mg/L

精度 0.01mg/L

誤差範圍 $\pm 0.5\%$ 閱讀數值

溫度偵測範圍 5~105°C

精度 0.1 精度

誤差範圍 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

熱電阻式風速儀(Anemometer Delta Ohm HD2103.2) ，參考圖 3.3

熱絲探頭(Hot wire probe,AP471 S4)

風速偵測範圍 0.1~5m/s

精度 0.01m/s

誤差範圍：風速在 0~0.99m/s， $\pm 0.05\text{m/s}$ ；

風速在 1~5m/s， $\pm 0.15\text{m/s}$



圖 3.3 熱電阻式風速儀



圖 3.4 綜合水質分析儀

### 3.1.5. 實驗方法

實驗方式分為無養魚無曝氣與無養魚有曝氣水體兩種，以及有養魚有曝氣一種，量測魚塭溶氧與溫度隨深度的一日剖面變化；量測地點為魚塭正中央，深度約 250 公分。實驗方法是先將溶氧感測器黏貼於棍子上，其黏貼間隔為水面下 3 公分、100 公分以及 250 公分，共計三個溶氧感測器。

黏貼好後，將棍子固定於水池中央，使其不易移動免得感測深度偏移，造成量測位置改變，實驗架設示意圖以及現場設置情形可參考圖 3.5 和圖 3.6。紀錄方式為每 60 分鐘紀錄一筆資料，連續監測 24 小時，監測時間為下午 2 時至隔天下午 2 時。

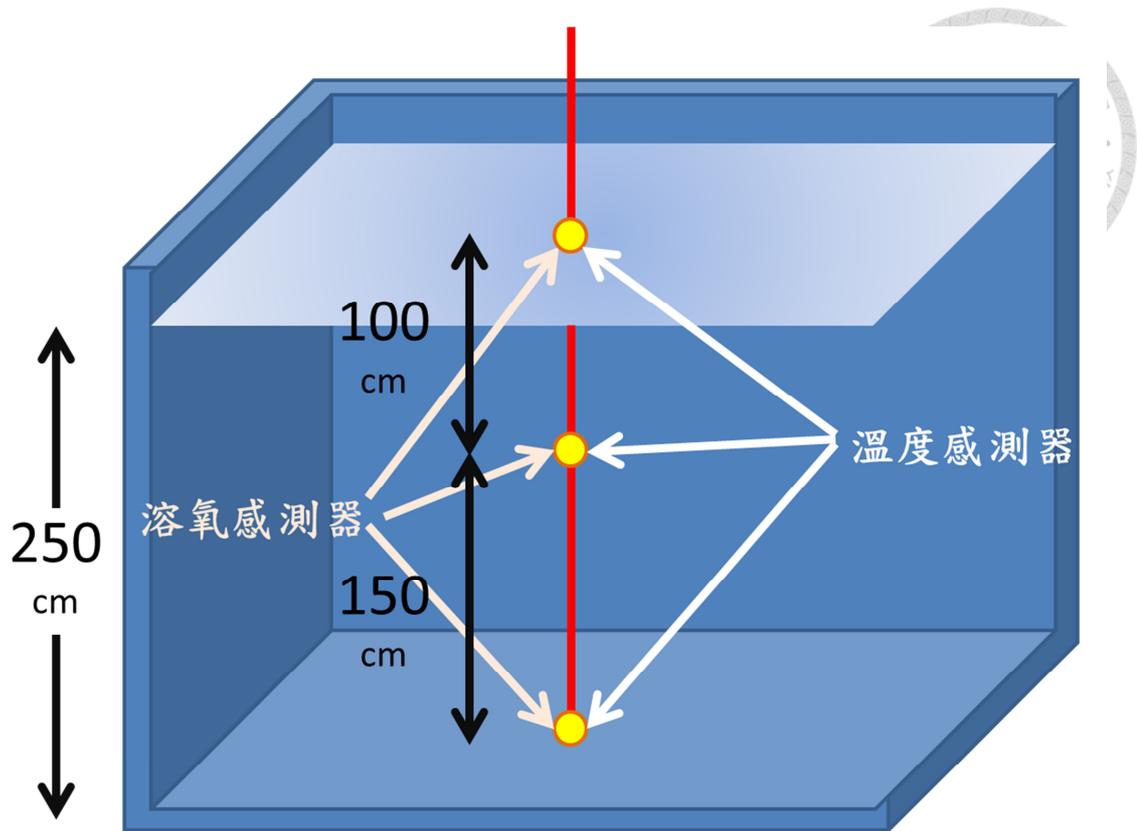


圖 3.5 現地實驗架設示意圖



3.6a. 黏貼溶氧感測器在不同深度



3.6b. 架設感測器於魚塢正中央



3.6c 牽電線以便紀錄水質參數



3.6d 儀器架設完畢

圖 3.6 現地實驗現場架設圖

### 3.2 室內溶氧傳輸試驗

為了解風場對於水體混合的影響，以及了解風場對於溶氧的傳輸作用，因此透過溶氧試驗了解到風速在 0~4m/s 溶氧的傳輸狀態，藉以了解現場實驗風場對於水體的影響。試驗方法採用美國土木工程學會(ASCE)與美國環保署發展出的氧氣傳輸速率測定方法。此方法以廣泛用於各種曝氣機制的評定，其測定方法主要是在清水中利用亞硫酸鈉進行脫氧，在以擬測定的裝置進行曝氣，以求得該裝置的氧氣傳輸係數  $K_L a$  值(ASCE Standard, 1992)。

#### 3.2.1 試驗器材

綜合水質分析儀(WTW Multi 3430 Multiparameter Meter)

TetraCon 925 溶氧感測器

溶氧偵測範圍 0~20mg/L

精度 0.01mg/L

誤差範圍±0.5%閱讀數值

溫度偵測範圍 5~105°C

精度 0.1 精度

誤差範圍±0.2°C。

熱電阻式風速儀(Anemometer Delta Ohm HD2103.2)

熱絲探頭(Hot wire probe, AP471 S4)

風速偵測範圍 0.1~5m/s

精度 0.01m/s

誤差範圍：風速在 0~0.99m/s，±0.05m/s；

風速在 1~5m/s，±0.15m/s



亞硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )：Merk 公司製造

圓形水槽(半徑 1.16 公尺，高度 1.14 公尺，體積約 1.2 立方公尺)

### 3.2.2 試驗原理

#### 1. 氧氣的傳輸：

當水體無外力作用時，氧氣傳輸會從水體表面開始，逐漸傳遞到水體的底部，產生由表層到底層產生高濃度至低濃度的變化，因此本試驗一開始必須將水體的溶氧完全脫除，並偵測吹過水體表面的風速，並藉由溶氧感測器偵測水體氧氣的傳輸情形，計算出溶氧傳輸係數( $K_L a$ )，因為水體中的溶氧很難完全的脫除，所以風扇開啟時間設定為分層溶氧值均低於 0.2mg/L 時開啟。

#### 2. 祛氧原理



亞硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )會與水中溶氧反應生成硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )，進而脫除水中的溶氧，當水體中溶氧開始大於零時，即表示水中亞硫酸鈉反應完全，使得溶氧開始逐漸傳輸至水中，理論上每去除 1.0mg/L 氧需耗用 7.88mg/L 亞硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )，但一般實際需添加高於理論值的過量亞硫酸鈉，以確保水中溶氧可完全脫除，故試驗過程中添加藥量比理論量多 100%(葉, 2011)。

### 3.2.3 試驗方法：

1. 將圓形水槽預清洗，確保試驗過程中無其他雜質，並減少塑膠桶邊緣可能產生的生物膜，造成試驗的誤差。
2. 將風扇放置約兩公尺遠，使風的作用面足以涵蓋住水槽的面積。
3. 架設熱電阻式風速儀於水面上約 30 公分，並偵測風場產生之風速。
4. 將 wtw 溶氧感測器黏貼於棍子上，確保感測器在試驗的過程中保持著一樣的距離，其黏貼間隔為水面下 3 公分、50 公分以及 100 公分，水深 114 公分，共計安裝三個溶氧感測器。將已黏貼之溶氧感測器固定於圓形水槽正中央。
5. 將 200g 的亞硫酸鈉調配成亞硫酸鈉水溶液，放入有水管的儲存桶備用，當自來水以水管注入圓形水槽中時，將自來水管與亞硫酸鈉溶液水管捆在一起同時注入水槽當中，利用自來水流出的強烈水柱確保水體完全混合亞硫酸鈉。
6. 待水槽裝滿後，讀取溶氧感測器數值，當水體溶氧低至 0.2mg/L 即開啟風扇，並控制風扇所形成的風速。
7. 溶氧感測器、熱電阻式風速儀每 12 小時紀錄一次分層水體溶氧與溫度以及風速資料，監測時間為 12 天，共計 288 小時。
8. 開啟不同風速重複進行上述方法，以得到不同風速對水體溶氧傳輸之試驗。



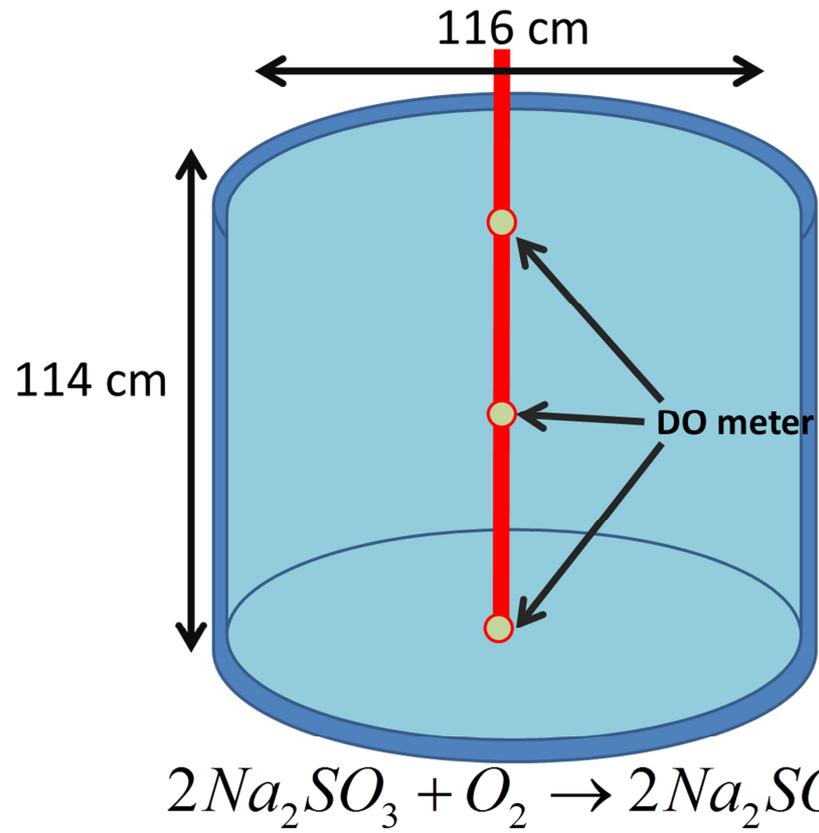


圖 3.7 溶氧傳輸試驗架設示意圖



圖 3.8 溶氧傳輸試驗實際架設圖



## 第四章結果與討論

### 4.1 現地實驗

#### 4.1.1 現地背景資料

##### 4.1.1.1 塭港氣象站

經濟部水利署於塭港漁港南岸設有塭港氣象站，每日逐時記錄當地風速、日照時數與氣溫。因此為瞭解當地實驗月份時的環境特性，將以 2012 年紀錄到的環境資料當作探討之依據。為考慮一日環境之變化，故將當月同一時段進行平均和標準差，藉以了解環境參數之日變化。

實驗日期為 2012 年 9 月，採用資料為塭港氣象站紀錄 2012 年 9 月之風速、日照時數與氣溫，但因氣象站在當月份日照時數與氣溫偵測儀器損壞，並沒辦法提供現地探討之依據，因此日照時數與氣溫資料以 2011 年 9 月份進行探討環境日變化趨勢。

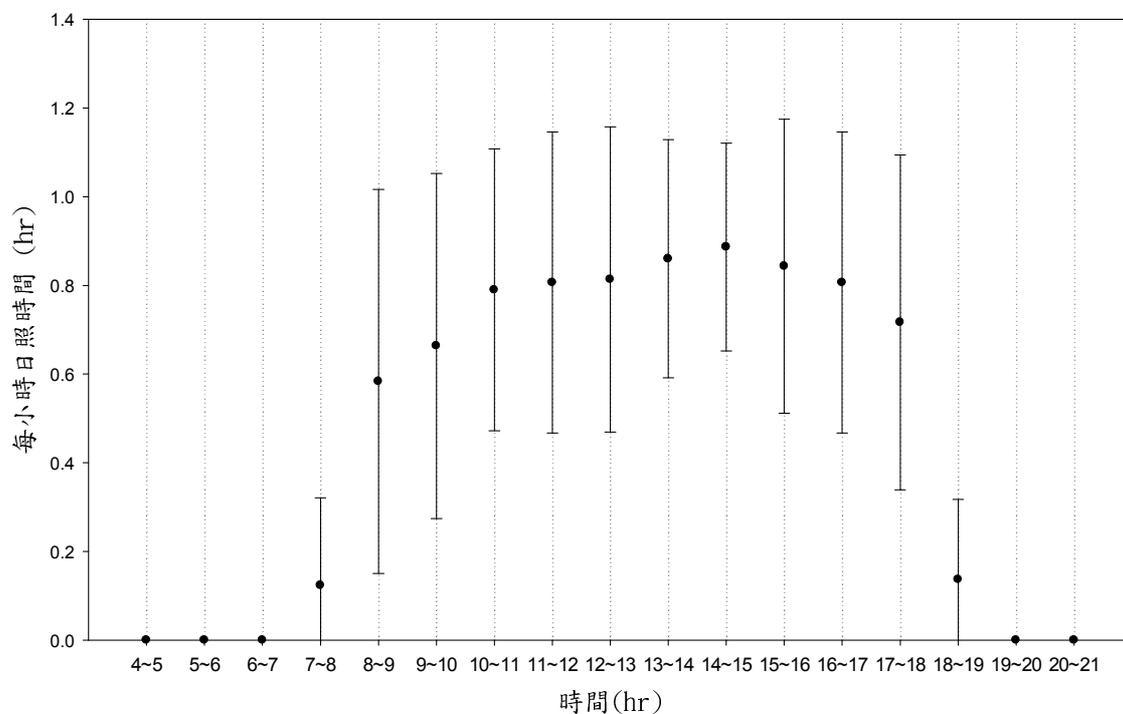


圖 4.1 2011 年 9 月逐時平均日照時數

從圖 4.1 逐時平均日照圖中得知，太陽的照射量從上午 7 時開始至

下午 7 時結束，並在下午 1 時至 3 時光照時數達到最大；此段時間太陽熱輻射穩定照射在當地環境，並加熱當地水體、空氣與土地，從圖 4.2 逐時平均氣溫可發現空氣溫度的確從上午 7 時開始上升，並在下午 1 時至 3 時氣溫達到最高約 29°C。因此可推知，當地的溫度改變隨著太陽照射而改變，並隨著一日變化而穩定循環擺盪。太陽照射時間為上午 7 時至下午 7 時，氣溫亦從上午 7 時開始升高，空氣溫度受太陽影響最大為下午 1 時至 3 時，太陽雖在下午 7 時不再照射，但從圖 4.2 得知，氣溫持續下降至隔天上午 7 時，直到太陽開始照射為止。

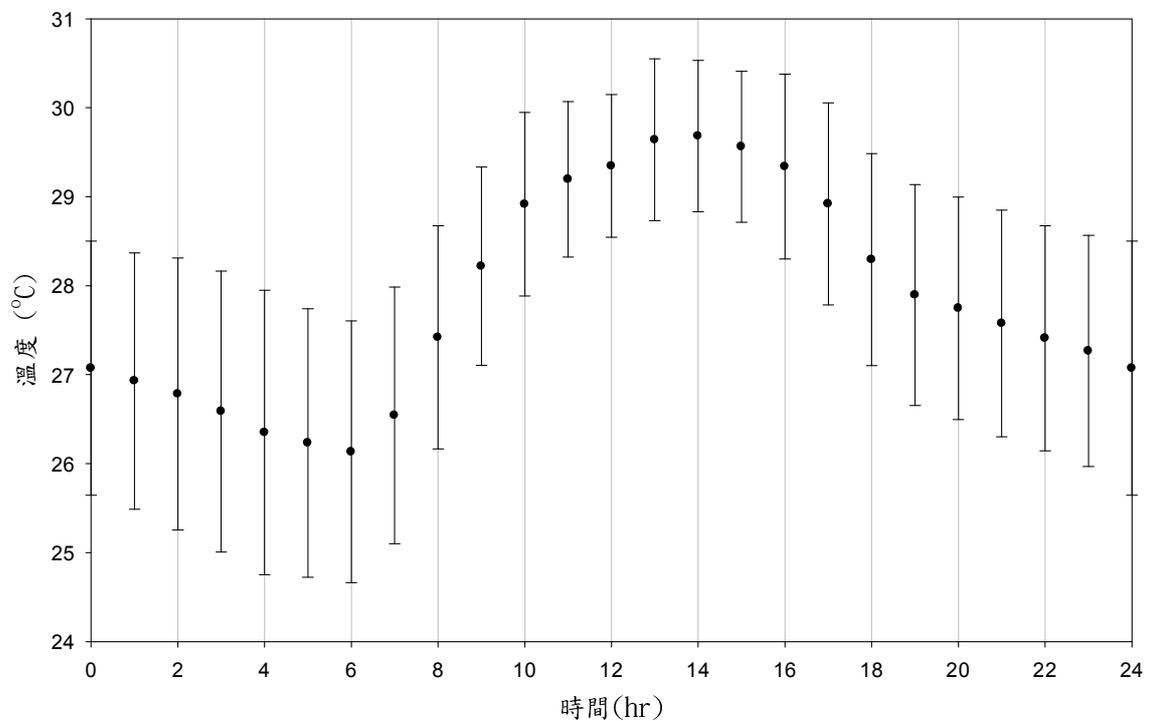


圖 4.2 2011 年 9 月逐時平均氣溫

當地的風速資料則參考塭港氣象站 2012 年 9 月實測數據，逐時平均風速可以參考圖 4.3，發現當地風速主要約在 2.5m/s 左右，直到上午 8 時，風速逐漸開始上升，上升至下午 2-3 時風速達到最大約 5.4m/s，並從此時開始風速逐漸變慢，直到下午 11 時回復到 2.5m/s 左右。

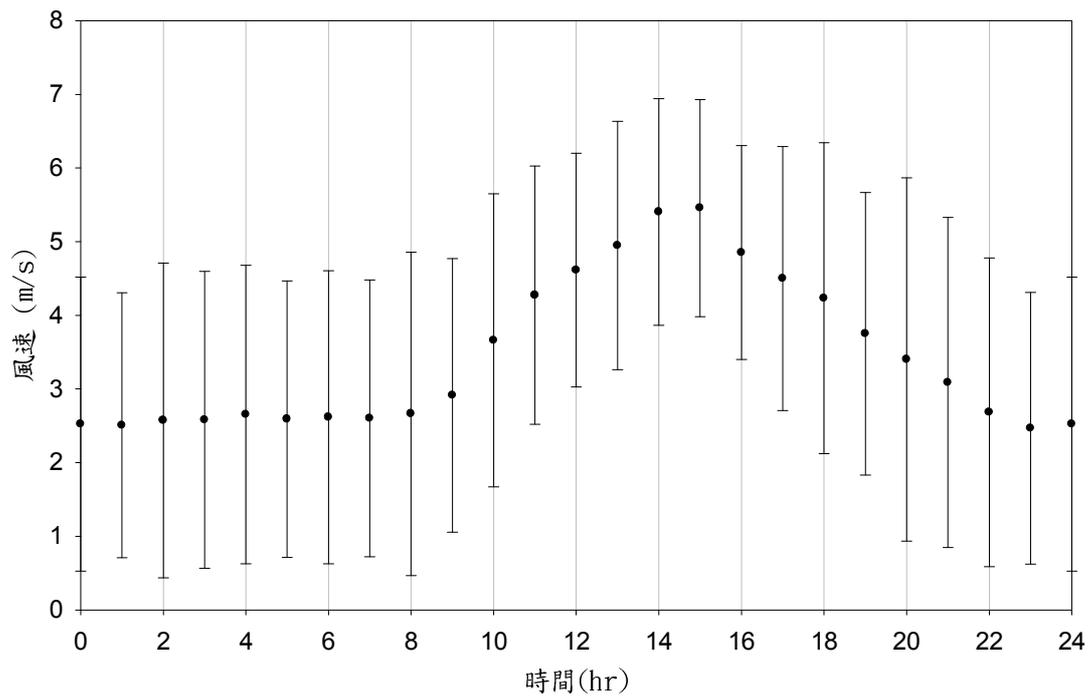
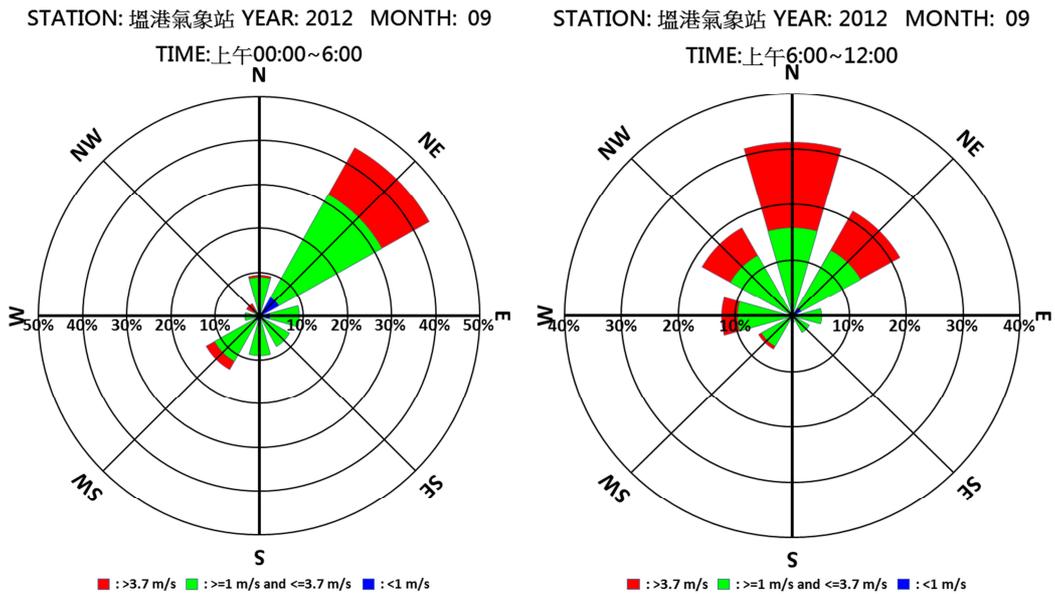


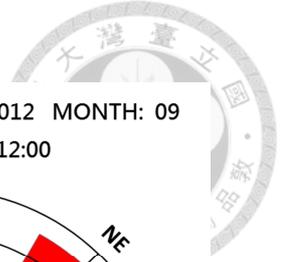
圖 4.3 2012 年 9 月逐時平均風速

風的性質除了速度的大小，另一個則是風吹的方向，統計塭港氣象站 2012 年 9 月逐時風向資料，統計時間間段為上午 0 時至 6 時、上午 6 時至 12 時、上午 12 時至下午 6 時以及下午 6 時至上午 0 時，風向可參考圖 4.4；

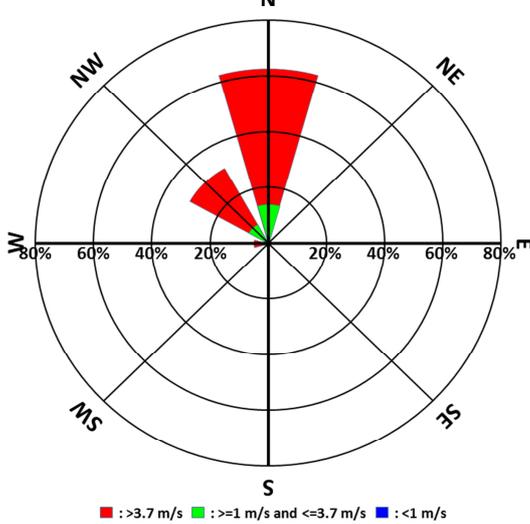


4.4a. 上午 0 時至 6 時

4.4b. 上午 6 時至 12 時

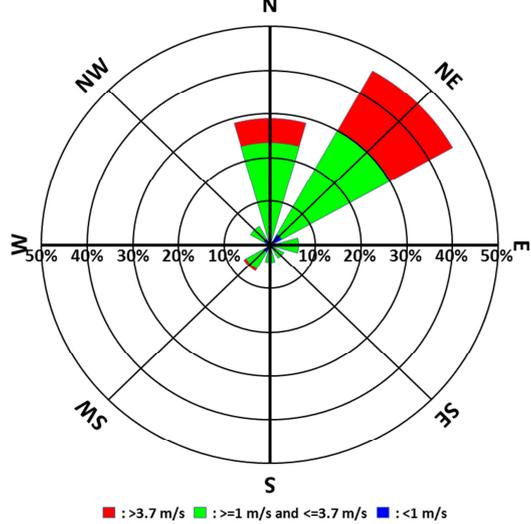


STATION: 塹港氣象站 YEAR: 2012 MONTH: 09  
TIME: 上午12:00~下午06:00



4.4c. 上午 12 時至下午 6 時

STATION: 塹港氣象站 YEAR: 2012 MONTH: 09  
TIME: 下午06:00~12:00



4.4d. 下午 6 時至上午 0 時

圖 4.4 2012 年 9 月四時段風花圖

上午 0 時至 6 時的風主要為東北風，風速區間主要為 1m/s~3.7m/s 佔約 26%；上午 6 時至 12 時當地風向從東北風至西北風均有，但主要風向為北風；上午 12 時至下午 6 時則風速開始增快，大於 3.7m/s 的風速佔約 50%，表示此刻不只風速快、風的來源主要來自北方；下午 6 時至上午 0 時，方向逐漸轉變成東北風為主，風速明顯較上一時段為慢，1m/s~3.7m/s 佔約 50%。因此從風花圖得知當地的風向主要為東北風與北風，而且北風發生的機率主要為上午 6 時至下午 6 時，而東北風則發生在下午 6 時至隔天上午 6 時；由於東石鄉位於沿海地區，晝夜的改變易伴隨著海陸風的變化，因此可知道當地的海風方向為北風，晚上則為陸風來自於東北方。

綜合上述三種參數的探討，可以推知當地的環境機制為上午 7 時太陽逐漸開始照射陸地，地表因吸收太陽輻射熱，空氣溫度漸漸開始攀升，使得氣壓下降，此刻海上氣壓大過陸地，風從海上逐漸吹向陸地形成海風，當地的海風來自於北方，而海風約從上午 9 時至 10 時開始；直到下午 2-3 時，太陽光照時數增加，



氣溫達到最高，造成氣壓差也越大，此刻海風最強，從風花圖的頻率知道此刻風速遠大於 3.7m/s；直到下午 6 時至 7 時，太陽光照消失，氣溫逐漸下降，陸地的氣壓逐漸大於海上，此刻的風逐漸從陸地吹向海洋，形成陸風，風的方向主要來自於東北方；然而隨著夜間陸地輻射冷卻，陸地溫度較海洋下降快速，造成上午 0 時至 6 時之間，陸風吹向較為穩定，小於 3.7m/s 的風為多數。

由於東石鄉屬於西部沿海地區，晝夜受海陸風影響，一般而言海陸風影響的範圍約 20~25 公里，而實驗調查地點距離海港約 2 公里處，因此可推論，調查之魚塭會受海陸風產生影響。



### 4.1.2 現地採樣

在實際調查當地養殖魚塭水深後，發現周邊魚塭水深  $110 \pm 63$  公分，很少超過 200 公分深的魚塭，在這調查魚塭中以柯德義先生的魚塭而言最深，深度約為 250 公分。

實驗調查時間為 2012 年 9 月 5 日至 9 月 6 日，魚塭操作型態為無養魚無曝氣，2012 年 9 月 7 日至 9 月 8 日，魚塭操作型態為無養魚有曝氣，以及 2013 年 1 月 23 日至 24 日有養魚有曝氣進行實驗調查。根據中央氣象局報告，實驗當日天氣穩定並無下雨紀錄，水體未經自然降雨影響，調查日期前後無颱風來臨，因此並無降雨造成表層水體密度改變，以及氣壓差造成水體翻騰，使得實驗產生誤差。

#### 4.1.2.1 無養魚無曝氣

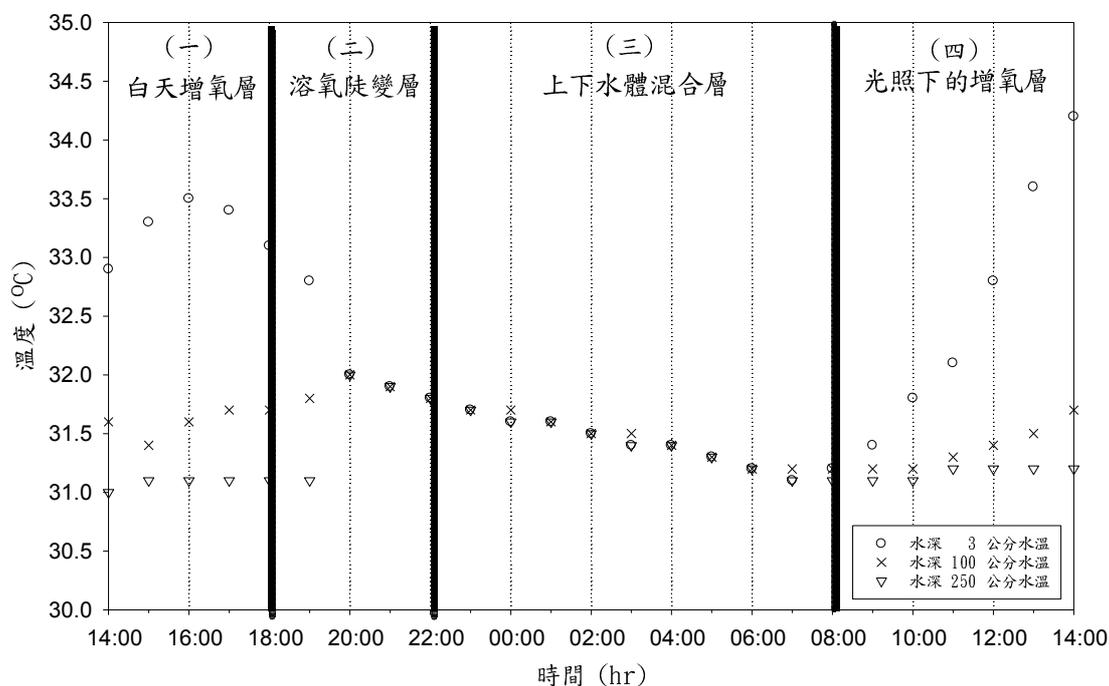


圖 4.5 無養魚無曝氣分層水溫圖

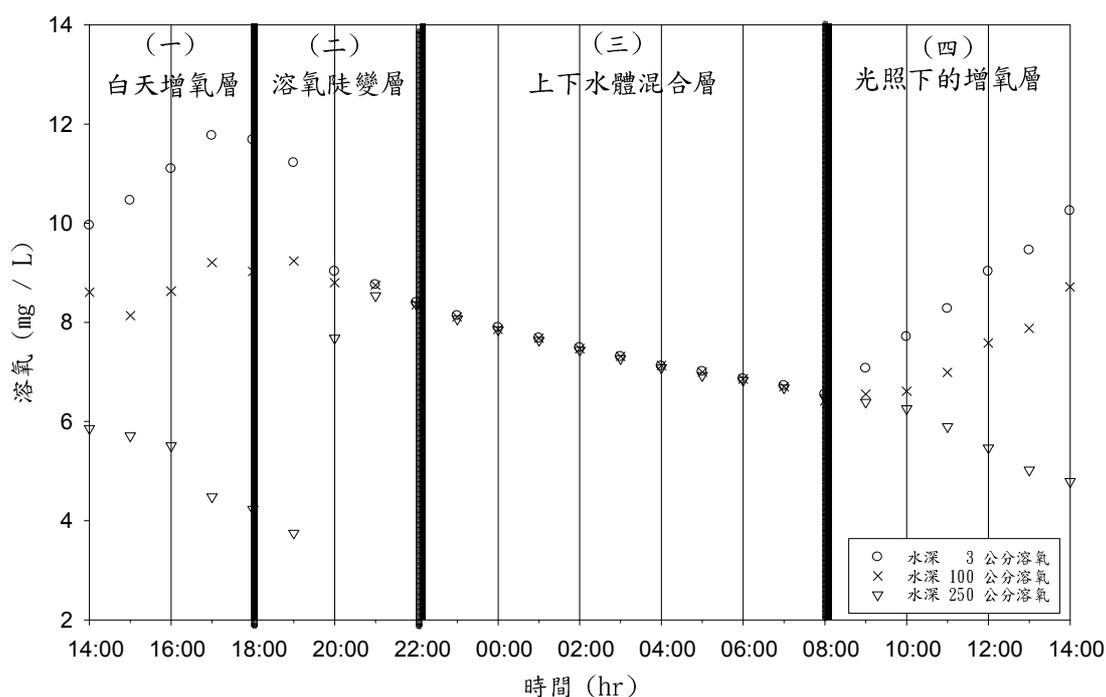


圖 4.6 無養魚無曝氣分層溶氧圖

從圖 4.5 中的溫度剖面資料可看到，水體在有日光照射時，上下層水體溫度差異有明顯的分層現象，而分層最明顯的時間是下午 4 時，上下層水體溫度差 2.31°C。從下午 4 時開始，原本水溫震盪不大的水深 100 公分，溫度開始上升，而水深 3 公分的水溫則開始逐漸下降，原本水體溫度分層現象逐漸消失，表示表層水體已開始被擾動。直到下午 7 時，分層水溫逐漸發生改變，底層的溫度明顯開始爬升，表層的溫度則快速下降，到下午 8 點時，水溫幾乎已趨於一致，直到隔天上午 7 點時，水體又逐漸受太陽輻射加熱產生分層。參考中央氣象局公布實驗當日的日出日落時間，日出時間為上午 5:43 分，而日落時間則為下午 6:12，即可發現到日落約前一小時，亦即下午 5 時左右，受到太陽西下影響，深度 3 公分水溫有明顯下降，直到日落時間下午 6:12 過後，不同水深的溫度均開始產生變化，深度 3 公分水溫快速的下降，而水深 100、250 公分的水溫在兩小時之內，開始快速爬升，直到下午 8 時，分層水溫達到一致，晚上

因無太陽輻射的照射，水體逐漸開始放熱，並至隔天上午 5:43 日出，水體在約略一小時後產生水體的分層，這樣的現象又開始持續循環下去。

以溶氧而言，受到太陽的照射，水體的溶氧也產生分層上的改變。下午 2 時至下午 6 時，溶氧分層差異隨著時間而變大，在下午 6 時左右分層作用最為明顯，上下水層溶氧相差約 7.56mg/L。下午 7 時分層溶氧逐漸發生改變，水深 250 公分的溶氧開始爬升，水深 3 公分的溶氧則開始下降；到下午 8 時，分層溶氧幾乎已趨於一致，直到隔天上午 7 時，溶氧繼續產生分層，從圖 4.6 可發現分層的現象每天持續地循環。表層水會因風的擾動翻騰造成水體表面積增加，使得氣體較易傳輸至水中，以及表層水體具有浮游生物與藻類，白天進行光合作用使得溶氧偏高。底層水體則因魚塭底部具有些微的底泥，以及下層水體的微生物，產生耗氧呼吸作用和降解物質，故底層水體溶氧會較表層水體不足。又因水體受熱不均勻，造成分層密度差的改變，使得水體移動較為困難，若參考中央氣象局的日出日落時間，日落時間則為下午 6:12，意即在下午 6 點過後，太陽輻射不再對水體進行加熱，各水層的溫度逐漸趨於一致，使得密度也接近相同，水中物質的傳輸可較無阻力的移動，因此在下午 7 點分層溶氧開始改變，直到下午 8 點分層水體中的溶氧幾乎無差異；隔天日出時間為上午 5:43，水體開始吸收太陽輻射產生熱分層，又再次阻隔溶氧混合。



### 4.1.2.2 無養魚有曝氣

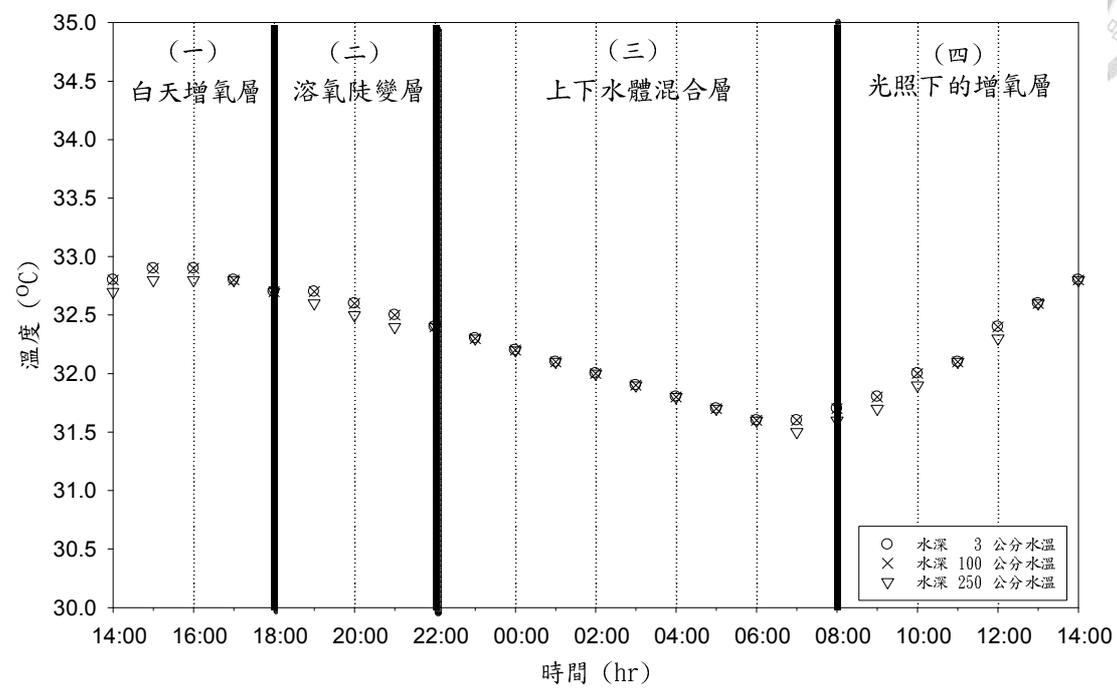


圖 4.7 無養魚有曝氣分層水溫圖

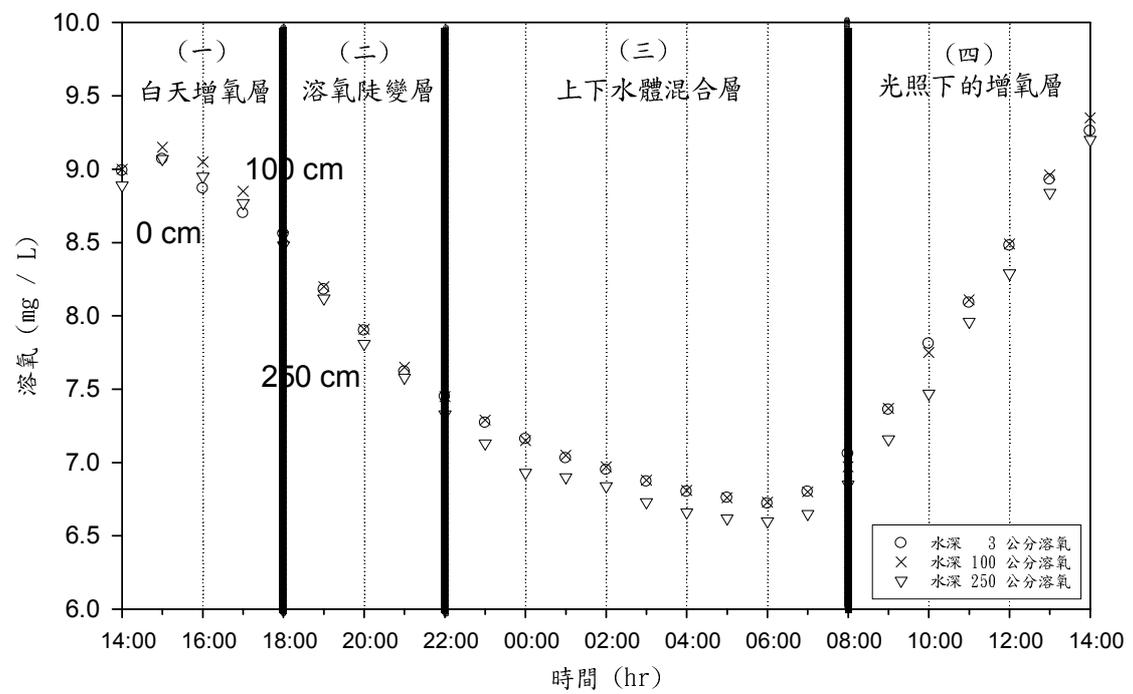


圖 4.8 無養魚有曝氣分層溶氧圖



在無養魚有曝氣水體中，水溫的變化可參考圖 4.7，水體經由曝氣設備的混合，不同水深下的水溫，幾乎沒有過大的改變，分層溫度差異大約 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；在中央氣象局公告上午 5:43 分的日出時間，與下午 6:12 的日落時間，分層的水溫也無改變，產生影響的是整體水溫的變化。整體水溫的極值發生在下午 3 時，並不是日落時間，推知下午 2 時至 3 時的太陽輻射量最強，使得表層水體吸收大量太陽熱輻射，並藉由曝氣設備混合，使得水體在約下午 3 點左右時，水溫達到極大；隔天早上日出時間為上午 5:43，太陽輻射開始照射在表層水體，表層水體溫度開始上升，並藉由曝氣設備混合至整個魚塢；太陽輻射的吸收與水體混合過程約需一段時間，因此水溫發生最低時間約為上午 7 時左右。

以溶氧而言，水體的溶氧分層剖面可參考圖 4.8，曝氣設備除了將水體擾動破除水體的熱分層現象，使水體無密度差異性外，並產生動能讓水體發生翻攪，加速物質的流動，使得表層水體與底層水體獲得混合。另外，曝氣設備另一功能則是提供氧氣的補足，在水體中產生氣泡、翻騰，增加空氣與水的接觸面積，加速氧氣傳輸至水體的量，以維持水體中溶氧的穩定。

因此在無養魚有曝氣水體中，任何時段的分層溫度與溶氧，都是接近一致，改變的只有一日之中溶氧與溫度的震幅，溶氧為  $7.8 \pm 0.9 \text{mg/L}$ ，溫度則是  $32.3 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 。在曝氣裝置的作用下，不只將水體的層化現象完全破除，使得密度分層現象消失，更增加氧氣穩定傳入水體的量。



### 4.1.2.3 有養魚有曝氣

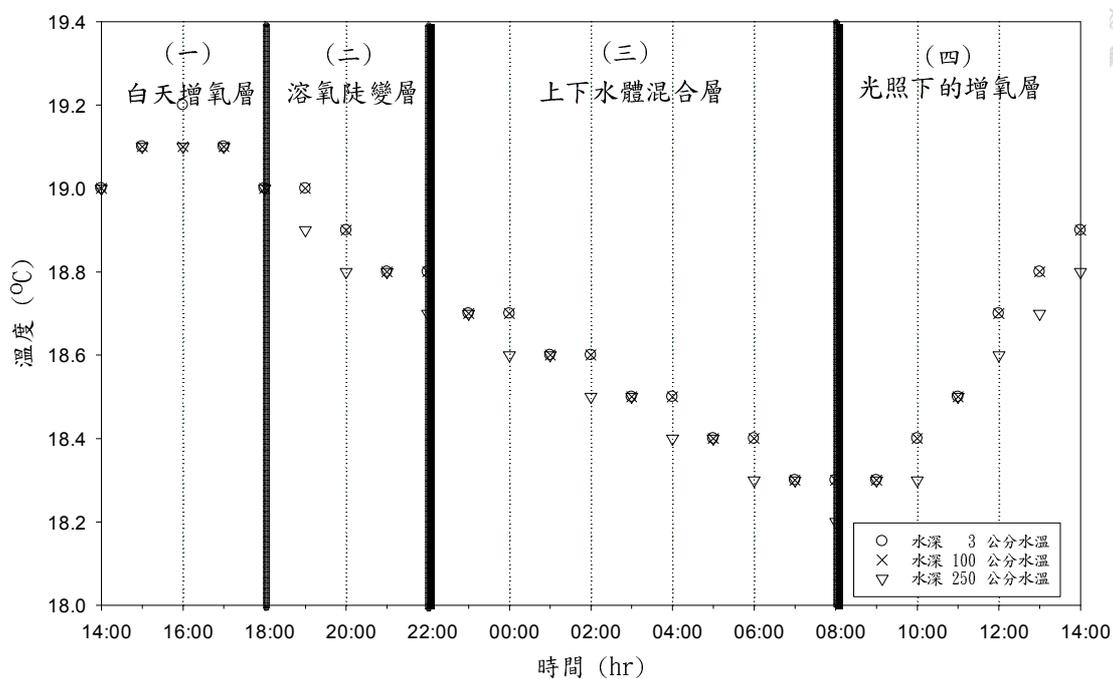


圖 4.9 有養魚有曝氣分層水溫圖

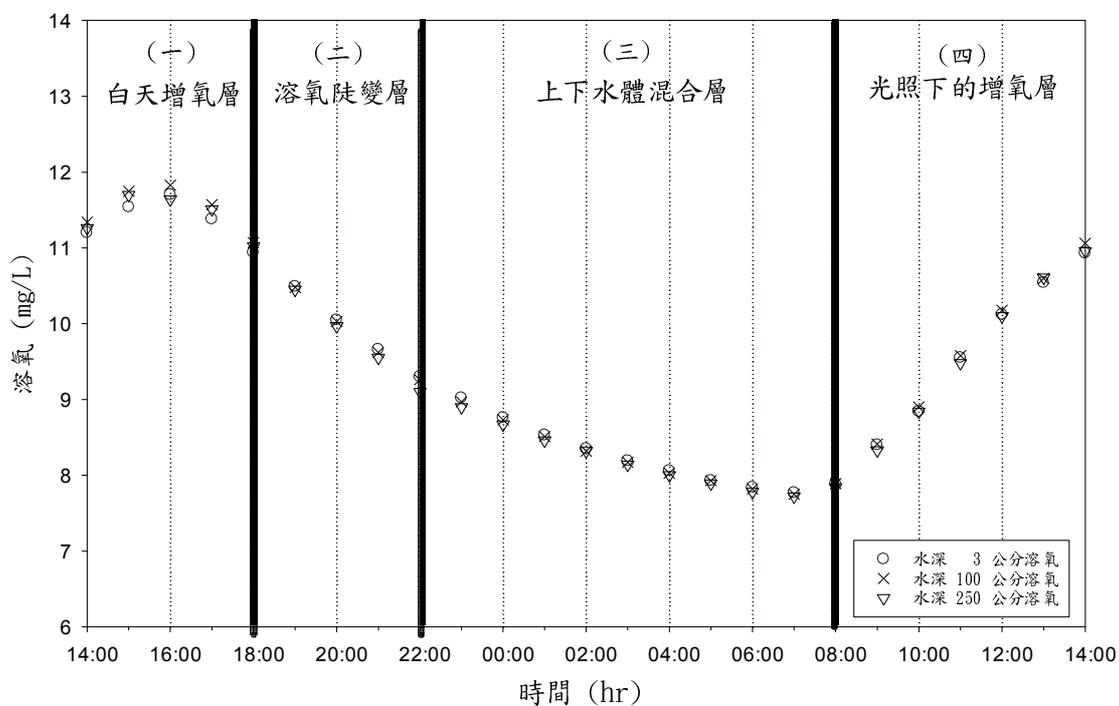


圖 4.10 有養魚有曝氣分層溶氧圖

在有養魚有曝氣水體中，分層水溫剖面可參考圖 4.9，透過曝氣設備的擾動



可以加快水體的混合，因此水體並無分層現象。在有養殖魚類的環境下，溫度的改變亦無太大的改變，不同水層的溫度變異最大約 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，這樣的溫度較不會對魚類產生生存上的緊迫，整體的水溫變化隨著環境變化而有所震盪，溫度震幅約為 $1^{\circ}\text{C}$ 。

對溶氧來說，由於曝氣設備增加水體的含氧量，因此並未發生因養殖魚類使得水體溶氧發生急劇下降的情形。但仍可以發現到，水體的溶氧變化是為過飽和狀態，表示水中的浮游生物與藻類在白天時扮演重要的傳輸溶氧的機制，使得一日的最低溶氧都能在 $7\text{mg/L}$ 以上，但一日溶氧的變化則是隨著日照時間而有所增減。

從上述三次實驗可以了解到，在無曝氣水體中，白天吸收太陽輻射產生熱分層現象，但在晚上水體則發生混合的作用，使得水體在下午6時至下午10時，產生水體大量的混合，並從下午6時持續作用直到隔天上午8時。由於實驗當地屬於沿海地區，常年受到海洋的調節，海風往往較內陸地區來得大，在海風的作用之下，水體的溫度會冷卻的較為快速，因此我們可以合理的推測，風的影響是造成水體混合的主因。

至於水體的混合為何發生在下午6時，尚須考慮到白天時，太陽對水體產生分層現象，密度的分層使得風的作用並沒有辦法對水體產生翻騰，但風的影響卻持續作用在水體表面，直到下午太陽西下，表層水體降溫後，水體的密度分層消失，風的作用即開始翻擾整個水體，因此可以了解到影響水體混合的條件有溫度與風兩項因子。



### 4.1.3 溶氧傳輸係數( $K_L a_{20}'$ )比較

水體的翻擾，伴隨氧氣的傳輸，因此利用溶氧傳輸係數 $K_L a$ 了解氧氣在水體中傳輸的情形，並藉由溫度與深度校正係數使 $K_L a_{20}'$ 便於探討。然而計算過程中，發現偵測到的溶氧值可發現到水體溶氧已經為過飽和，因為水體中除了藻類以外尚有其他浮游生物會製造氧氣，使得水體超過飽和濃度，因此在計算上，不能使用水溫來單獨推估水體的溶氧，故我們將水體的飽和溶氧訂為 12mg/L 做為計算溶氧傳輸係數 $K_L a_{20}'$ 的依據，從溶氧傳輸係數來看，針對無養魚無曝氣可以將水體分成四個階段來進行討論：

#### 無養魚無曝氣

表 4.1 無養魚無曝氣四階段的 $K_L a_{20}'$  (單位: 1/hr)

$K_L a_{20}'$	一	二	三	四
	下午 2 時至 下午 6 時	下午 6 時至 下午 10 時	下午 10 時至 隔天上午 8 時	上午 8 時至 下午 2 時
3 公分	0.419	-0.465	-0.030	0.117
水深 100 公分	0.042	-0.040	-0.029	0.045
250 公分	-0.043	0.156	-0.026	-0.032

#### 一. 白天增氧層

從下午 2 時至下午 6 時，水體分層溫度隨著日照而產生分層，從 $K_L a_{20}'$ 來看，水深 3 公分、100 公分分別為 0.416/hr 與 0.042/hr，氧氣隨著時間而不斷傳輸進入水體，尤其在水深 3 公分，氧的傳輸更是遠遠超過水深 100 公分的水體，推論是水體中藻類與浮游生物吸收太陽光後進行光合作用產生氧氣，使得表層水體增氧速度增快，當水深在 250 公分時， $K_L a_{20}'$ 為-0.043/hr，表示此時段的氧氣是逐漸被消耗掉，氧氣的增加量低於氧氣的消耗量。

## 二. 溶氧陡變層：

從下午 6 時至下午 10 時，分層水體的溶氧在此時刻會出現快速的改變， $K_L a_{20}$ ' 值除了水深 250 公分為正值以外，其他兩個水深分別都為負值，意即表示水深 250 公分處氧氣的傳輸量增加，但水深 3 公分與 100 公分的水體的氧氣量是減少的，尤其在表層水體氧氣的減少量是十分快速， $K_L a_{20}$ ' 可到  $-0.465/\text{hr}$ 。

## 三. 上下水體混合層

下午 10 時至隔天上午 8 時，水體產生混合使得在不同水深下的溶氧快速被混合均勻，此刻水體因無陽光的照射，水中的藻類與浮游生物進行呼吸作用，消耗水體中的溶氧，而且更可以發現到此刻的分層溶氧傳輸係數是  $-0.026 \sim -0.0030/\text{hr}$ ，變化性不大，表示此刻的水體被完全混合，水中的耗氧速率是穩定的消耗氧氣，又因為此刻尚未將養殖魚類放入，表示說此消耗溶氧的速率是來自於水體的藻類與浮游生物。

## 四. 光照下的增氧層

上午 8 時至下午 2 時，在日光的照射下，水體吸收太陽輻射後，水體產生溫度上的差異，並產生分層現象，水中的藻類與浮游生物也因為光照產生光合作用，將氧氣傳輸至表層水體，水深 3 公分與 50 公分的溶氧傳輸係數分別為  $0.117/\text{hr}$  與  $0.045/\text{hr}$ ，然而水深 250 公分的傳輸係數卻為  $-0.032/\text{hr}$ ，持續維持夜間時的氧氣消耗速率，上層的溶氧因分層現象無法將溶氧傳輸至底層水體。

整理上述資料可以了解到，水深 3 公分的水體，因受到水體中的微生物與藻類進行光合作用使得在白天光照下，水體會產生高於水體能夠吸收的飽和溶氧，以下午 2 點至下午 6 點來說，溶氧傳輸係數可達  $0.419/\text{hr}$ ，增氧速度快速，至

下午 6 點至下午 10 點，水體因外在力量的混合使得氧氣傳輸至各層水體，此刻的數值為負值，耗氧速率遠高於第一階段的氧氣增加率。

水深 100 公分的水體，白天時濃度增加的非常顯然，白天溶氧部分因藻類進行呼吸作用增加氧氣，以及來自上層溶氧的傳輸，造成此層的溶氧補助，而晚上水體因有浮游生物則進行呼吸作用，此層是整體水體傳輸的中間層，使得溶氧傳輸至水深 250 公分，雖然水深 3 公分是主要傳輸因素。

水體 250 公分的溶氧傳輸係數，除了在第一階段的溶氧陡變層可以到達 0.156/hr 以外，表示此層的溶氧傳輸時間主要發生在第一階段的時間，若從溶氧傳輸係數正負值來看，可以發現到此分層的水體除了在第一階段外，全部都是負值，水體的氧氣傳輸量是負值，底層水體持續進行耗氧。

### **有養魚無曝氣、無養魚有曝氣與有養魚有曝氣三者比較**

三者的  $K_L a_{20}$  比較值整理於表 4-2，第一階段為下午 2 時至下午 6 時，對於無養魚無曝氣的水體而言，此刻為分層現象逐漸消失的時段，從分層的溶氧傳輸係數知道，水深 3 公分的水體受到太陽光照射的影響，水體中的微生物與浮游生物進行光合作用，將氧氣傳輸進入到水體中，造成此刻的傳輸係數值明顯大過不同水層的係數。而水深 250 公分的水體因為氧氣難以傳輸進入，底層的微生物持續進行氧化作用，逐漸消耗掉水中的溶氧。在無養魚有曝氣的水體中，可以發現到傳輸係數值約略在 -0.023~-0.028/hr，由於透過曝氣裝置將水體擾動並增加氧氣加入水體，此刻的溶氧係數是接近一致；水體中的微生物進行氧化作用，將水體的有機質降解，降解的過程需要消耗氧氣，這時段的溶氧係數均為負值，表示水體中的氧氣是逐漸被消耗。但在有養魚有曝氣的水體，雖然水體藉由機械能的曝氣裝置將水體擾動，並將氧氣傳輸進入水體，因為此刻水體有養殖魚類，使得此刻耗氧速度是快的，從傳輸係數來看，數值約

略為-0.088 與-0.118/hr，幾乎是一致性的改變，但氧氣的消耗量明顯比無養魚有曝氣水體來得快速。

第二階段為下午 6 時至下午 10 時，是無養魚無曝氣的溶氧陡變層，可以發現到水體 3 公分的傳輸係數遠低於其他兩個水深的數值，此刻的表面水體因為受到風的作用之下，表面的溶氧快速傳輸至較低水層，甚至在水深 250 公分位置的水體還出現了正值，表示此刻的水體溶氧有增加的趨勢。在觀察無養魚有曝氣以及有養魚有曝氣的水體可以發現其分層的傳輸係數值差異性並不高，主要來自曝氣設備造成的水體混合所致，只是在於有養魚的水體，因為額外有魚類進行呼吸作用，此刻氧氣的消耗量明顯大於其他兩者也大過上一時段。

第三階段為下午 10 時至隔天上午 8 時，為無養魚無曝氣的上下水體混合層，因無太陽光的照射，水體中的微生物與浮游生物進行呼吸作用，造成此刻的溶氧傳輸係數為負值，又因透過風的吹拂使得水體產生混合，此刻的分層傳輸係數值是接近一致的，約-0.026~-0.030/hr。然而在無養魚有曝氣的水體中，透過曝氣裝置將氧氣傳輸進去抵銷了部分水體微生物與浮游生物的耗氧量，因此整體的傳輸係數值雖然是負值，但氧氣的消耗量明顯低於無養魚無曝氣的水體。但對有養魚有曝氣的水體來說，卻發現到其傳輸係數值幾乎與無養魚無曝氣的水體耗氧速率是接近一致的，表示透過曝氣設備將夜間的環境改善成一般水體的夜間狀態，曝氣設備運作得十分洽當，剛好抵銷了魚類的氧氣消耗量。

第四階段為上午 8 時至下午 2 時，此刻為無養魚無曝氣的光照下增溫層，也就是產生水體的溫度分層。從傳輸係數來看，表層的係數值開始轉為正值，表示水深 3 公分的水體中的浮游生物與藻類在接受到陽光後，又開始逐漸產生氧氣，增加氧氣的傳輸量；而水深 100 公分的水體也開始從負值轉成正值，但因此層的水體陽光照射量不像表層水體來的

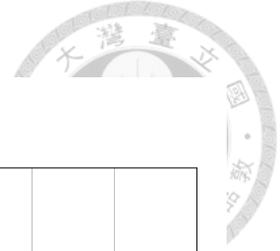


多，因此氧氣增加的速率是緩慢的，此水層的溶氧亦開始逐漸增加；以水深 250 公分的水體來說，氧氣的消耗率則是固定，溶氧傳輸係數的數值除了在下午下午 6 時至下午 10 時溶氧陡變層外，其餘的三階段，溶氧的傳輸係數值是接近一致，持續消耗水體中氧氣。對無養魚有曝氣來說，此階段的傳輸係數值均為正值，除了曝氣設備的穩定供氧外，水體中的藻類也開始吸收太陽光進行光合作用，將氧氣傳輸進入水體，因此至下午 2 時，整體的氧氣量是增加的。以有養魚有曝氣來說，白天溶氧傳輸係數可達 0.196~0.218/hr，表示說水中的浮游生物與藻類提供了氧氣的傳輸，可是卻未在夜間產生過多的呼吸作用。

表 4-2 無養魚無曝氣、無養魚有曝氣與有養魚有曝氣不同時段  $K_L a_{20}$ ' (單位: 1/hr)

$K_L a_{20}$ '	白天增氧層			溶氧陡變層			上下水體混合層			光照下的增氧層		
	下午 2 時至下午 6 時			下午 6 時至下午 10 時			下午 10 時至隔天上午 8 時			上午 8 時至下午 2 時		
	3cm	100cm	250cm	3cm	100cm	250cm	3cm	100cm	250cm	3cm	100cm	250cm
無養魚 無曝氣 DO <sub>0</sub> (mg/L)	0.419	0.042	-0.043	-0.465	-0.040	0.156	-0.030	-0.029	-0.026	0.117	0.045	-0.032
無養魚 有曝氣 DO <sub>0</sub> (mg/L)	-0.028	-0.028	-0.023	-0.052	-0.048	-0.046	-0.008	-0.009	-0.007	0.070	0.070	0.063
養魚有曝氣 DO <sub>0</sub> (mg/L)	-0.088	-0.118	-0.093	-0.237	-0.252	-0.233	-0.043	-0.040	-0.034	0.218	0.213	0.196
	11.20	11.34	11.26	10.94	11.07	11.02	9.30	9.26	9.10	7.89	7.89	7.84

## 4.2 室內溶氧傳輸試驗



Wind velocity=0.28 ± 0.20 m/s

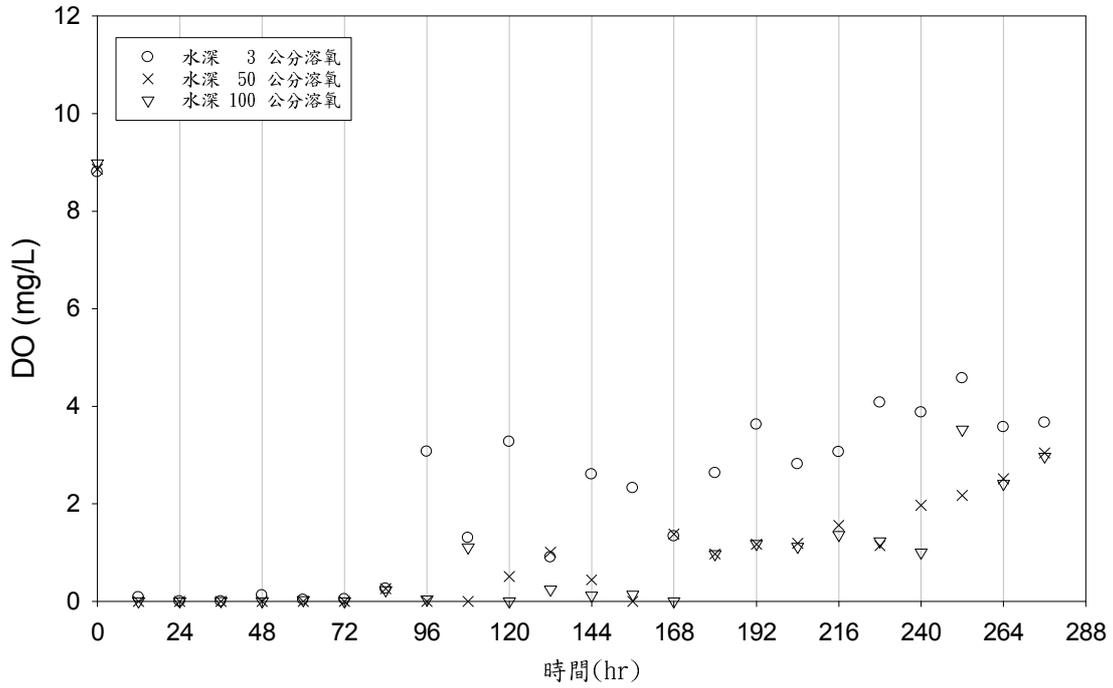


圖 4.11 風速 0.28±0.20m/s 溶氧傳輸試驗

Wind velocity=0.28 ± 0.20 m/s

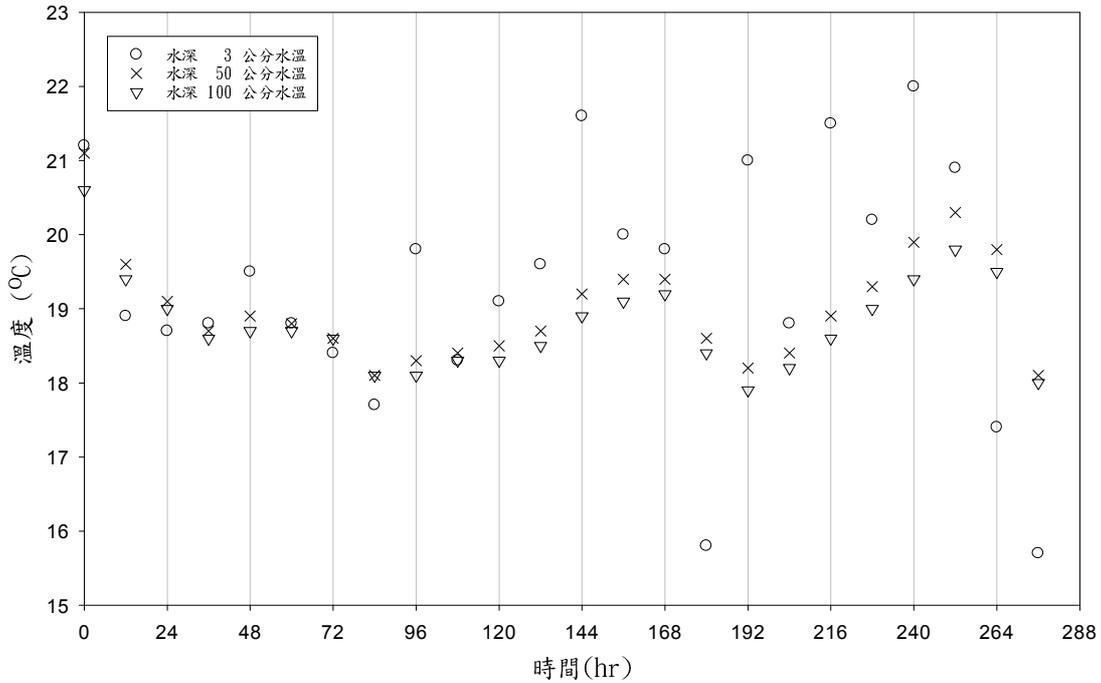


圖 4.12 風速 0.28±0.20m/s 溶氧傳輸試驗水溫

溶氧實驗中，控制的是不同風速對於溶氧傳輸係數的影響，共分三次控制風速進行實驗，第一次實驗控制風速為 0m/s，受到的是周圍的自然風，偵測到的風速為  $0.28 \pm 0.20$  m/s，表層水體藉由氣液界面，將氧氣傳輸進入水體，因此表面水體的溶氧變化較水深 50 公分與 100 公分的溶氧來得變化劇烈；從圖 4.13 可看出，水槽在祛除完溶氧後，水深 50 公分與 100 公分的溶氧從原來的 0mg/L，開始有些許的震盪，但過了不久溶氧又消失了，推測水體中的祛氧劑-亞硫酸鈉尚未作用完畢，以至於溶氧偵測到後又逐漸消失，水深 50 公分與 100 公分的水體溶氧有明顯變化發生在溶氧歸零後的第七天，表示說在無外在風的吹拂下，僅靠氧氣從表面水體的自然傳輸，共需 7 天才能將水體的亞硫酸鈉完全消耗掉。

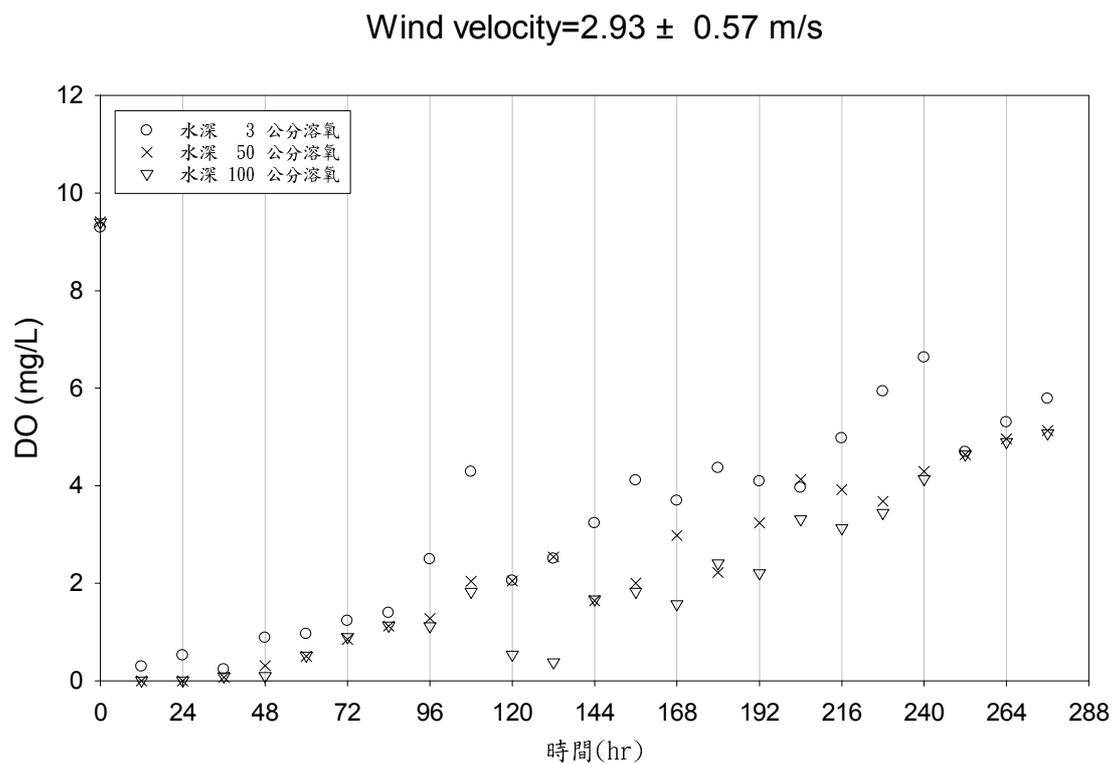


圖 4.13 風速  $2.93 \pm 0.57$  m/s 溶氧傳輸試驗

Wind velocity=2.93 ± 0.57 m/s

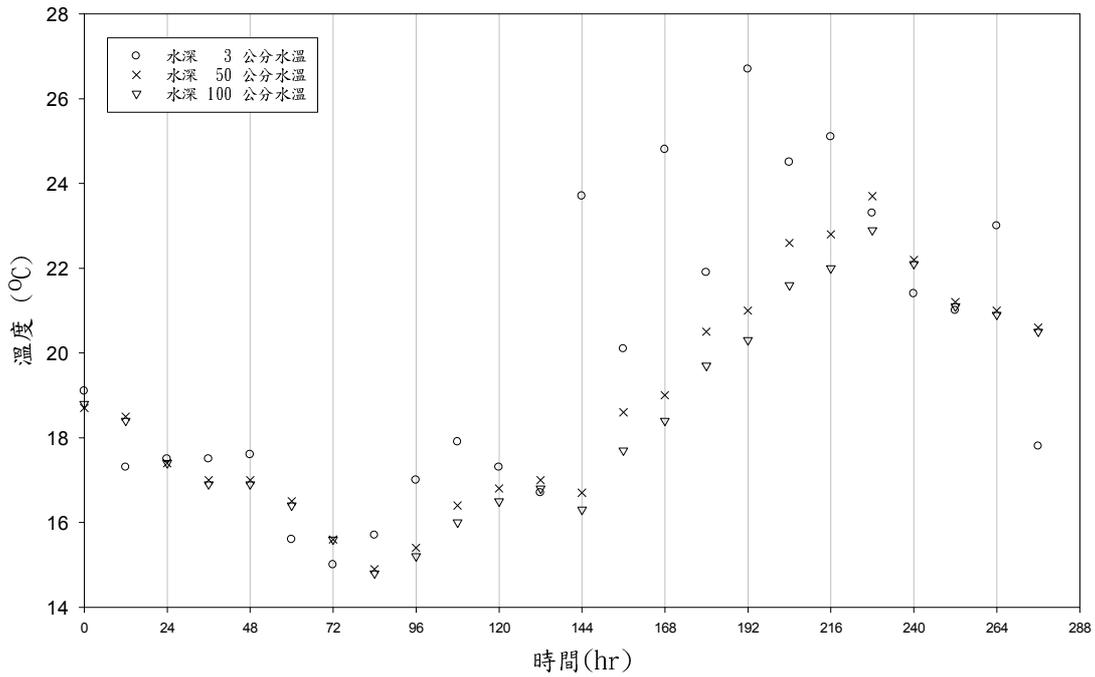


圖 4.14 風速 2.93±0.57m/s 溶氧傳輸試驗水溫

第二次溶氧實驗，控制風速為 2.93±0.57m/s，水槽中的氧氣經過 8 小時完全祛除後，再約略 24 小時，即可發現到水深在 50 公分與 100 公分的溶氧值明顯上升，表示說在同樣的亞硫酸鈉劑量下，透過風的擾動，24 小時後即消耗完畢。

Wind velocity=3.66 ± 0.50 m/s

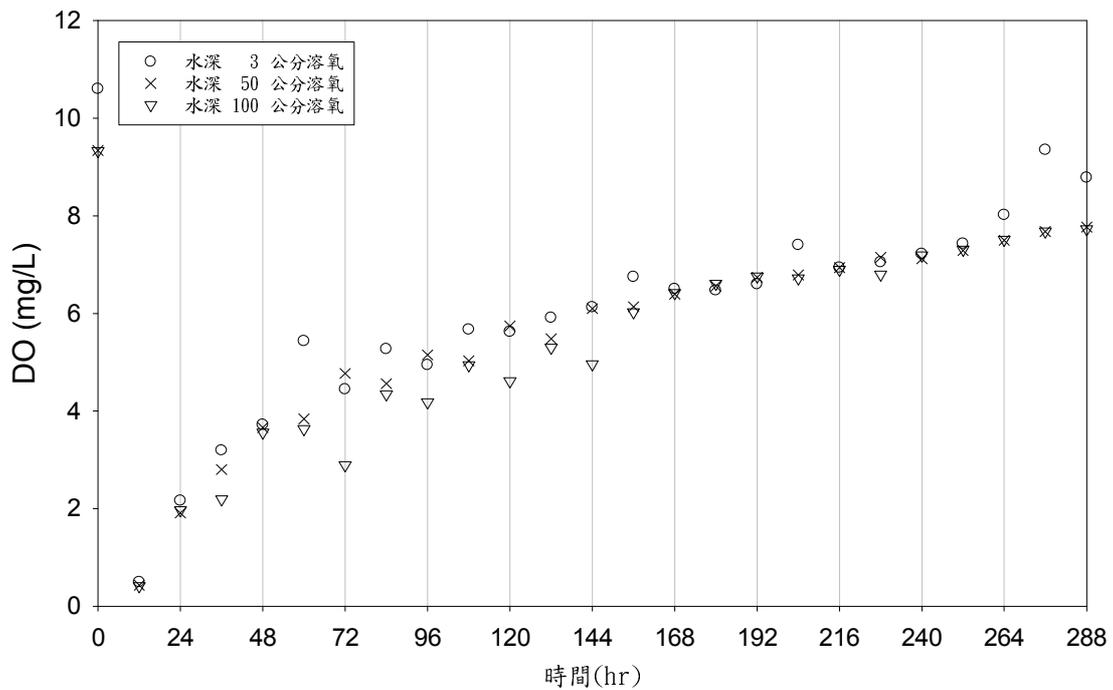


圖 4.15 風速 3.66±0.50m/s 溶氧傳輸試驗

Wind velocity=3.66 ± 0.50 m/s

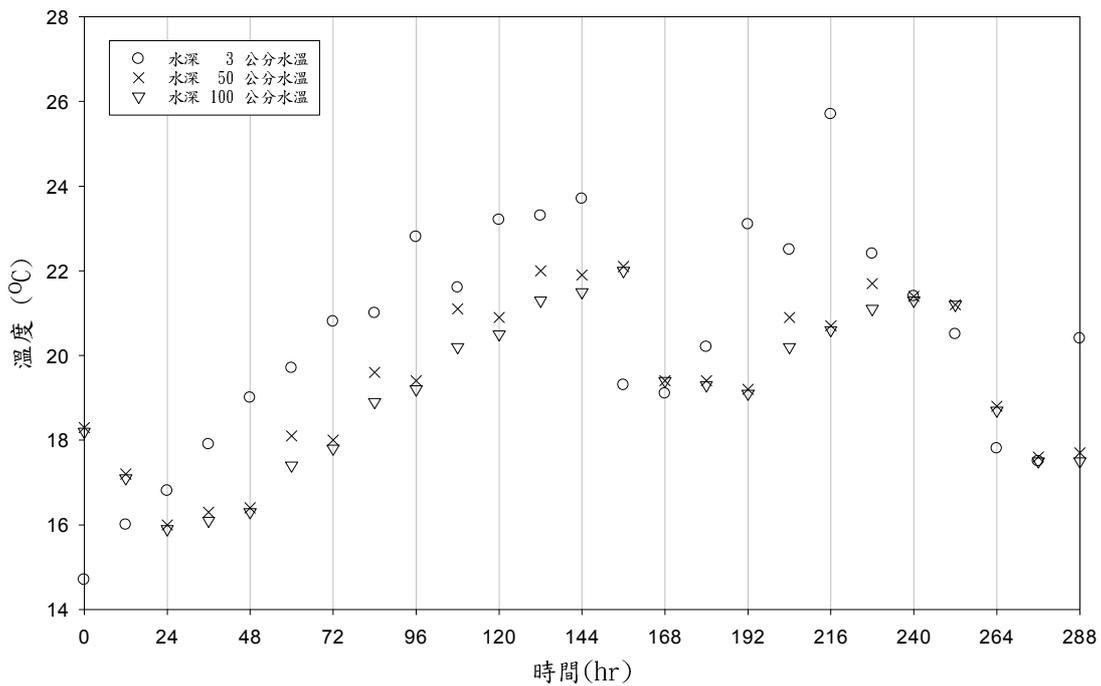


圖 4.16 風速 3.66±0.50m/s 溶氧傳輸試驗水溫

第三次溶氧實驗，偵測風速為 3.66±0.50m/s，水槽中消耗至 0.2mg/l 時，風扇即開啟，可參考圖 4.15 發現在三種水深下的溶氧傳輸速度很快。意即單位時間內水體氧氣增加的效率比亞硫酸鈉消耗氧氣還多，表示說在 3.66±0.50m/s 的風速下，風對於水體混合的效果是很明顯的，並沒有經過太多的延遲時間，水體的混合與增氧效果，都是十分快速。

從這三個實驗了解到，風會造成水體的擾動，增加氣液界面的擾動與混合的機會，使空氣中的氧氣更容易傳輸至水體，在同樣的祛氧劑條件下，隨著控制風速的不同，水體中的溶氧上升趨勢也都不同，為了解三種風速的作用下，水體氧氣的傳輸效果，可藉由  $K_L a_{20}$  ' 值進行了解。



#### 4.2.1 室內實驗溶氧傳輸係數( $K_L a_{20}'$ )之比較

從表 4.3 可發現到隨著風速的增加，溶氧傳輸係數也就越大，為探討分層水體的溶氧傳輸，因此以分區溶氧進行討論：

#### DO 0-2mg/L

表 4.3 DO 0-2mg/L 不同風速對不同水深的  $K_L a_{20}'$  (單位: 1/hr)

	DO 0-2 (1/hr)	3 公分	50 公分	100 公分
風 速 m/s	0.28	0.0022	0.0008	0.0006
	2.93	0.0047	0.0017	0.0014
	3.66	0.0237	0.0220	0.0202

表 4.4 DO 0-2mg/L 不同風速區間對水深  $K_L a_{20}'$  增加速率

	DO 0-2	3 公分	50 公分	100 公分
風	0.28~2.93	2.13	2.11	2.46
速	2.93~3.66	5.00	13.04	14.11

隨著風速的增加，傳輸能力也越快，而且可以發現到分層水體的溶氧係數增加比例可發現到，風速從 0.28 上升至 2.93m/s 時，溶氧傳輸係數增加的幅度約 2.11~2.46 倍，顯示分層水體的氧氣增加速度接近一致，但以底層水體的增加速度略快一些，可證明，水體的擾動可以增加至水深 100 公分處。當風速從 2.93m/s 上升至 3.66m/s 時，傳輸係數增加倍數約 5.00~14.11 倍，顯示水深 50 公分的中層水體增加速度為最快 14.11 倍，其次為水深 100 公分的底部為 13.04 倍，顯示當水體的風速到達 3.66m/s 以上時，水體的氧氣傳輸作用的確有增快，但是主要的影響範圍卻轉為中下層水體，推測為上層水體的溶氧快速增氧，風速造成的混合將水體進行翻騰，導致上層的水體快速被帶入中下層水體，因此會以中層的傳氧速度會比上層水體來得再快速 2.8 倍。

## DO 2-4mg/L

表 4.5 DO 2-4mg/L 不同風速對不同水深的  $K_L a_{20}'$  (單位: 1/hr)

	DO2-4	3 公分	50 公分	100 公分
	0.28	0.0042	0.0029	0.0034
風速	2.93	0.0049	0.0047	0.0042
	3.66	0.0194	0.0104	0.0090

表 4.6 DO 2-4mg/L 不同風速區間對水深  $K_L a_{20}'$  增加速率

	DO 2-4	3 公分	50 公分	100 公分
風速	0.28~2.93	1.16	1.64	1.25
	2.93~3.66	3.95	2.21	2.13

在風速 0.28m/s 上升至 2.93m/s 期間，分層水體的溶氧傳輸效果從表層遞減至下層水體，主要是表面是透過風的擾動使得增氧速度大於中下層水體，又因中下層的水體尚需時間進行傳輸，因此中層的傳輸效果又會比下層來的更快些。當風速從 2.93 上升至 3.66m/s，可發現到中下層水體的溶氧傳輸效果是接近一致的，傳輸效果為 2.13~2.21 倍，表示在此風速下，就能使中下層水體傳輸的效果接近一致。但以表層水體來說則是因為水體的快速擾動，使得傳氧的效果又會比中下層水體來的更快。

## DO 4-6mg/L

表 4.7 DO 4-6mg/L 不同風速對不同水深的  $K_L a_{20}'$  (單位: 1/hr)

	DO4-6	3 公分	50 公分	100 公分
	-	-	-	-
風速	2.93	0.0021	0.0025	0.0042
	3.66	0.0058	0.0074	0.0072

表 4.8 DO 4-6mg/L 不同風速區間對水深  $K_L a_{20}$ ' 增加速率

	DO 4-6	3 公分	50 公分	100 公分
風速	0.28~2.93	-	-	-
	2.93~3.66	2.71	2.93	1.70



由於風速 0.28m/s 對於氧氣的傳輸緩慢，在實驗的兩週內，分層水體的溶氧無法到達 4-6mg/L，難以回復至接近自然水體的飽和溶氧，在此將探討風速從 2.93 上升至 3.66m/s 的溶氧傳輸係數改變。從表 4.7 與表 4.8 中觀察到，當風速增快時表面造成的擾動變大，因此中上層的水體溶氧傳輸效果最好，但因為此溶氧區間為接近飽和溶氧區，水深 100 公分的下層水體傳輸效果變差，表示說隨著水體中的溶氧越接近飽和溶氧，其氧氣增加速度會變慢，然而表層水溶氧增加速度的提高是來自水體表面受風影響造成的表面混合，導致溶氧傳輸係數明顯會大於下層水體。

從上述內容可以得到以下的結論，隨著風速越大，溶氧傳輸係數( $K_L a_{20}$ ' )也就越大，計算兩者風速間  $K_L a_{20}$ ' 的比值，可以發現風的擾動可以造成水深 100 公分的擾動。但接下來會隨著溶氧越接近飽和溶氧，其傳輸速率會開始變慢；從風速造成的溶氧傳輸倍數來看，在風速 0.28-2.93m/s 時，就能在 DO 0-2mg/L 產生均勻的混合。但若要在 DO 2-4mg/L 的區間產生均勻的混合，風速須增至 2.93-3.66m/s。溶氧的區間越接近飽和溶氧區，風對水體的溶氧傳輸效果會降低，如需達到更均勻的混合，風速須提升。風造成的擾動增加溶氧量，在水體溶氧低於 4mg/L 以下的水體是很有趣的，如果水體越淺，風帶來的曝氣效率也就越好。

## 小結

從塭港氣象站資料得知，當地因屬於沿海地區，海陸風的確會對當地產生影響，風造成影響最大的時間為下午0時至下午6時，此刻形成的海風來自於北方；風速頻率約50%會超過3.7m/s。若從無養魚無曝氣的溫度與溶氧剖面圖，可發現到水體發生的混合出現在下午6時至下午8時，因此可以推論現地發生情形為：白天因為密度的分層作用，使得水體擾動不易，但表層的水體仍是持續被風所擾動。直至太陽剛消失時，分層的水溫逐漸下降，密度逐漸趨於一致，周邊風對水體的作用逐漸明顯，使水體因風而產生混合，因此可以發現到溫度剖面快速變化，分層的溶氧也逐漸趨於一致。

又根據室內試驗結果可得知，風是足以影響至水深100公分處，但因室內試驗偵測風的高度與氣象站提供風速之高度並不相同，因此透過將風速資料正規化(normalization)至高度10公尺的方程式(Arya, 2001)，重新計算室內實驗對於野外實驗之風速。

$$\frac{U_z}{U_{10}} = \left(\frac{Z}{10}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$U_z$ ：高度  $Z$  公尺的風速(m/s)

$U_{10}$ ：高度為 10 公尺的風速(m/s)

$Z$ ：高度(m)

表 4.9 室內試驗風速轉換至  $U_{10}$

原始風速(m/s)	0.28	2.93	3.66
$U_{10}$ (m/s)	0.46	4.83	6.04

因此從室內實驗可得知， $U_{10}$  風速 0.46-4.83m/s 時，就能在 DO 0-2mg/L 產生均勻的混合。但若要在 DO 2-4mg/L 的區間產生均勻的混合， $U_{10}$  風速須增至 4.83-6.04m/s。以塭港氣象站監測風速資料得知，周邊風速可以到達 5.5m/s，表示說對當地而言，足以影響水深 100 公分左右的魚塭，若魚塭的溶氧低於 4mg/L 更能夠有效地增加氧氣傳輸量。

## 第五章結論與建議



### 5.1 結論

1. 從現地實驗可了解到對於靜止水體而言，會受太陽光照產生水體分層現象，亦使得溶氧發生層化，但可透過夜間自然風的吹拂，增加分層水體的混合，將表層溶氧傳輸至底層水體。
2. 底層水體在自然環境中，是持續的進行耗氧呼吸作用並降解底層的有機質，溶氧的增加主要來自於下午6時至下午10時的溶氧陡變層。
3. 養殖漁業者藉由曝氧設備的使用可以將水體進行混合，破除溫度產生的密度分層，加速物質傳輸的速度，並增加氧氣穩定傳輸至水體的量。
4. 針對當地養殖漁業者柯德義先生的養殖方法，透過深層曝氧擾動約2.5公尺的水體，並調控飼料量，使得夜間的氧氣消耗速率幾乎與無養魚無曝氣水體中浮游生物消耗速率是接近一致，溶氧控制穩定，水體環境較不易產生大幅改變，養殖效果也較好。
5. 透過室內實驗可了解到，隨著風速的增快，溶氧傳輸係數 $K_L a_{20}$ '值也越大，而且從不同水深來看，其變化的值不只出現在表水層，水深50與100公分也是增加的，因此可了解到風所造成水體的擾動，最少可以到達水深100公分處。
6. 風造成的擾動增加的溶氧量，在水體溶氧低於4ppm以下的水體是有效的，而且水體越淺，風帶來的曝氣效率也就越好。

## 5.2 建議

1. 自然水體能透過風的擾動，將表層的溶氧傳輸至底部水層，成為底部水層氧氣的來源。若底部水體消耗氧氣量超過，風帶來的補助量不足，會造成底層缺氧，使物質進行還原反應，進而產生惡臭味，造成底層水體環境不適合水棲生物生存，對於喜好棲息底層的魚來說，有很嚴重的影響性。
2. 根據田間實驗，在無養魚無曝氣的水體中，水深 250 公分的水體為 4.23mg/L，如果有養殖魚類，其溶氧值就會降低，溶氧傳輸效果會隨周邊風速而快速增加，但因本論文室內試驗與田間實驗在範圍上有差距，需待更進一步的研究。

## 參考文獻



1. 朱佳仁，2001， 工程流體力學， 科技圖書出版社。
2. 朱佳仁，2003， 環境流體力學， 科技圖書出版。
3. 李龍雄，1987， 水產養殖學， 前程出版社。
4. 姜炫宇，2011， 地下水井抽水量推估之研究-以嘉義縣鹿草鄉、朴子市、義竹鄉、太保市、東石鄉及布袋鎮為例， 國立高雄第一科技大學碩士論文。
5. 林尚祺，1994， 養殖池溫度變異模擬. 國立台灣大學碩士論文。
6. 陳乃瑜，2005， 台灣鱸魚養殖產業經濟分析，國立臺灣海洋大學碩士論文。
7. 曾文陽，1983， 魚類養殖學 (3 版 ed.)，徐氏基金會出版社。.
8. 黃春蘭，2003， 水質學 (初版.)，藝軒圖書出版社。.
9. 葉明燦，2011， 散氣式曝氣系統氧傳輸效率之探討—以膜片式細氣泡散氣盤為例，國立中央大學碩士論文。.
10. 經濟部水利處水利規劃試驗所，2008， 嘉義沿海地區綜合治水規劃 (荷苞嶼排水以南至八掌溪)。
11. 劉文御，2001， 水產養殖環境學: 水質、底質、循環用水、魚蝦病控制，藝軒圖書出版社。.
12. 蘇偉成 和 劉富光，2004， 台灣水產養殖的永續經營. *Freshwater Aquaculture in Taiwan*, Vol.1, pp 42–49。
13. 嘉義縣政府，2005， 鰲鼓溼地環境現況調查分析報告。.
14. Adelman, I. R., and Smith, L. L. (1970). Effect of Hydrogen Sulfide on Northern Pike Eggs and Sac Fry. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol.99, No.3, pp.501–509.
15. Arya, S. P. S. (2001). *Introduction to micrometeorology* (2nd ed.). San Diego: Academic Press.

- 
16. ASCE Standard. (1992). *Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water*. American Society of Civil Engineers.
  17. Boyd, C. E. (1982). Water quality management for pond fish culture., pp318.
  18. Boyd, Claude E., Romaine, R. P., and Johnston, E. (1978). Predicting Early Morning Dissolved Oxygen Concentrations in Channel Catfish Ponds. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol.107,No.3,pp 484–492.
  19. Boyd, Claude E., and Teichert-Coddington, D. (1992). Relationship between wind speed and reaeration in small aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering*, Vol.11,No.2, pp121–131.
  20. Brainerd, K. E., and Gregg, M. C. (1995). Surface mixed and mixing layer depths. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol.42,No.9, pp1521–1543.
  21. Chang, W. Y. B., and Ouyang, H. (1988). Dynamics of dissolved oxygen and vertical circulation in fish ponds. *Aquaculture*, Vol.74,No.4,pp 263–276.
  22. El-Sayed, A.-F. M., El-Ghobashy, A., and Al-Amoudi, M. (1996). Effects of pond depth and water temperature on the growth, mortality and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture Research*, Vol.27,No.9, pp681–687.
  23. Gebhart, G. E., and Summerfelt, R. C. (1976). Effects of Destratification on Depth Distribution of Fish. *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol.102,No.6, pp1215–1228.
  24. Glen E. Gebhart, and Summerfelt, R. C. (1975). Factors affecting the vertical distribution of white crappie (*Pomoxis annularis*) in two Oklahoma reservoirs. *Proceedings of the Annual Conference of the Southeastern Association of Game*

and Fish Commissions, Vol.28,pp 355–366.



25. Imhoff, K., and Fair, G. M. (1956). *Sewage treatment* (2nd ed.). New York: John Wiley.
26. Lewis, W. K., and Whitman, W. G. (1924). Principles of Gas Absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.16,No.12,pp 1215–1220.
27. Meyer, D. I., and Brune, D. E. (1982). Computer modeling of the diurnal oxygen levels in a stillwater aquaculture pond. *Aquacultural Engineering*, Vol.1,No.4,pp 245–261.
28. Rogers, G. L. (1989). Aeration and circulation for effective aquaculture pond management. *Aquacultural Engineering*, Vol.8,No.5,pp 349–355.
29. Shen, Q., Xu, S., Wang, D., and Yan, X. (2008). Effects of water temperature on metabolizability of starved *Lateolabrax japonicus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, Vol.15,No.3.
30. Tang, L., and Meng, G. (2007). Influence of water depths on volumetric oxygen transfer coefficient in aeration. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, Vol.35,No.6,pp 760–763.
31. Vogelaar, J. C. T., Klapwijk, A., van Lier, J. B., and Rulkens, W. H. (2000). Temperature effects on the oxygen transfer rate between 20 and 55°C. *Water Research*, Vol.34,No.3, pp1037–1041.
32. Wetzel, R. G. (2001). *Limnology*. San Diego : Academic Press.
33. Yu, S. L., Hamrick, J. M., and Lee, D. (1984). Wind Effects on Air-Water Oxygen Transfer in a Lake. *Water Science and Technology*, Vol.2,pp 357–367.
34. Zhong, L. (1991). *Pond fisheries in China*. Oxford ; New York: International Academic Publishers.

## 附錄 A 現地實驗



日期:2012 年 9 月 05~06 日

魚塭形式:無養魚無曝氣

時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分
14:00	9.96	8.61	5.86	32.9	31.6	31.0
15:00	10.46	8.14	5.71	33.3	31.4	31.1
16:00	11.10	8.63	5.51	33.5	31.6	31.1
17:00	11.77	9.21	4.48	33.4	31.7	31.1
18:00	11.68	9.03	4.23	33.1	31.7	31.1
19:00	11.22	9.24	3.75	32.8	31.8	31.1
20:00	9.03	8.80	7.68	32.0	32.0	32.0
21:00	8.76	8.75	8.54	31.9	31.9	31.9
22:00	8.40	8.36	8.36	31.8	31.8	31.8
23:00	8.14	8.11	8.07	31.7	31.7	31.7
00:00	7.90	7.86	7.85	31.6	31.7	31.6
01:00	7.68	7.68	7.64	31.6	31.6	31.6
02:00	7.49	7.47	7.44	31.5	31.5	31.5
03:00	7.31	7.31	7.27	31.4	31.5	31.4
04:00	7.12	7.13	7.08	31.4	31.4	31.4
05:00	7.01	7.00	6.93	31.3	31.3	31.3
06:00	6.86	6.86	6.83	31.2	31.2	31.2
07:00	6.72	6.70	6.68	31.1	31.2	31.1
08:00	6.55	6.42	6.48	31.2	31.2	31.1
09:00	7.07	6.55	6.39	31.4	31.2	31.1
10:00	7.71	6.61	6.26	31.8	31.2	31.1
11:00	8.28	6.99	5.90	32.1	31.3	31.2
12:00	9.03	7.58	5.47	32.8	31.4	31.2
13:00	9.46	7.88	5.02	33.6	31.5	31.2
14:00	10.25	8.72	4.79	34.2	31.7	31.2

## 附錄 A 現地實驗



日期:2012 年 9 月 07~08 日

魚塭形式:無養魚有曝氣

時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分
14:00	7.24	7.24	7.25	32.8	32.8	32.7
15:00	7.23	7.23	7.24	32.9	32.9	32.8
16:00	7.23	7.23	7.24	32.9	32.9	32.8
17:00	7.24	7.24	7.24	32.8	32.8	32.8
18:00	7.25	7.25	7.25	32.7	32.7	32.7
19:00	7.25	7.25	7.26	32.7	32.7	32.6
20:00	7.26	7.26	7.27	32.6	32.6	32.5
21:00	7.27	7.27	7.28	32.5	32.5	32.4
22:00	7.28	7.28	7.28	32.4	32.4	32.4
23:00	7.29	7.29	7.29	32.3	32.3	32.3
00:00	7.30	7.30	7.30	32.2	32.2	32.2
01:00	7.31	7.31	7.31	32.1	32.1	32.1
02:00	7.32	7.32	7.32	32.0	32.0	32.0
03:00	7.33	7.33	7.33	31.9	31.9	31.9
04:00	7.34	7.34	7.34	31.8	31.8	31.8
05:00	7.35	7.35	7.35	31.7	31.7	31.7
06:00	7.36	7.36	7.36	31.6	31.6	31.6
07:00	7.36	7.36	7.37	31.6	31.6	31.5
08:00	7.35	7.35	7.36	31.7	31.7	31.6
09:00	7.34	7.34	7.35	31.8	31.8	31.7
10:00	7.32	7.32	7.33	32.0	32.0	31.9
11:00	7.31	7.31	7.31	32.1	32.1	32.1
12:00	7.28	7.28	7.29	32.4	32.4	32.3
13:00	7.26	7.26	7.26	32.6	32.6	32.6
14:00	7.24	7.24	7.24	32.8	32.8	32.8

## 附錄 A 現地實驗

日期:2013 年 1 月 23~24 日

魚塭形式:有養魚有曝氣



時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分
14:00	11.20	11.34	11.26	19.0	19.0	19.0
15:00	11.54	11.75	11.70	19.1	19.1	19.1
16:00	11.70	11.83	11.64	19.2	19.1	19.1
17:00	11.38	11.57	11.51	19.1	19.1	19.1
18:00	10.94	11.07	11.02	19.0	19.0	19.0
19:00	10.49	10.48	10.45	19.0	19.0	18.9
20:00	10.05	10.03	9.97	18.9	18.9	18.8
21:00	9.66	9.62	9.55	18.8	18.8	18.8
22:00	9.30	9.26	9.10	18.8	18.8	18.7
23:00	9.02	8.97	8.90	18.7	18.7	18.7
00:00	8.76	8.73	8.67	18.7	18.7	18.6
01:00	8.53	8.51	8.46	18.6	18.6	18.6
02:00	8.35	8.32	8.32	18.6	18.6	18.5
03:00	8.19	8.17	8.14	18.5	18.5	18.5
04:00	8.06	8.03	8.00	18.5	18.5	18.4
05:00	7.93	7.93	7.89	18.4	18.4	18.4
06:00	7.84	7.82	7.78	18.4	18.4	18.3
07:00	7.77	7.75	7.72	18.3	18.3	18.3
08:00	7.89	7.89	7.84	18.3	18.3	18.2
09:00	8.40	8.41	8.33	18.3	18.3	18.3
10:00	8.84	8.90	8.84	18.4	18.4	18.3
11:00	9.55	9.58	9.48	18.5	18.5	18.5
12:00	10.12	10.18	10.10	18.7	18.7	18.6
13:00	10.54	10.60	10.61	18.8	18.8	18.7
14:00	10.93	11.06	10.96	18.9	18.9	18.8

## 附錄 B 溶氧傳輸試驗



風速：0.28 ±0.20 m/s

時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 50 公分	水深 100 公分	水深 0 公分	水深 50 公分	水深 100 公分
0	8.80	8.86	8.98	21.2	21.1	20.6
12	0.08	0.00	0.00	18.9	19.6	19.4
24	0.00	0.00	0.00	18.7	19.1	19.0
36	0.00	0.00	0.01	18.8	18.7	18.6
48	0.12	0.00	0.00	19.5	18.9	18.7
60	0.03	0.00	0.03	18.8	18.8	18.7
72	0.04	0.00	0.00	18.4	18.6	18.6
84	0.26	0.26	0.23	17.7	18.1	18.1
96	3.07	0.00	0.04	19.8	18.3	18.1
108	1.30	0.00	1.11	18.3	18.4	18.3
120	3.27	0.51	0.00	19.1	18.5	18.3
132	0.90	1.01	0.24	19.6	18.7	18.5
144	2.60	0.44	0.12	21.6	19.2	18.9
156	2.32	0.00	0.14	20.0	19.4	19.1
168	1.33	1.38	0.00	19.8	19.4	19.2
180	2.63	0.97	0.97	15.8	18.6	18.4
192	3.62	1.17	1.18	21.0	18.2	17.9
204	2.81	1.19	1.12	18.8	18.4	18.2
216	3.06	1.56	1.36	21.5	18.9	18.6
228	4.07	1.14	1.23	20.2	19.3	19.0
240	3.87	1.97	1.00	22.0	19.9	19.4
252	4.57	2.17	3.52	20.9	20.3	19.8
264	3.57	2.51	2.41	17.4	19.8	19.5
276	3.66	3.04	2.97	15.7	18.1	18.0
288	3.55	3.54	3.55	16.9	17.2	17.1

## 附錄 B 溶氧傳輸試驗



風速：2.93 ±0.57 m/s

時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分	水深 0 公分	水深 100 公分	水深 250 公分
14:00	9.29	9.41	9.40	19.1	18.7	18.8
15:00	0.29	0.00	0.01	17.3	18.5	18.4
16:00	0.52	0.00	0.01	17.5	17.4	17.4
17:00	0.23	0.07	0.09	17.5	17.0	16.9
18:00	0.88	0.31	0.10	17.6	17.0	16.9
19:00	0.96	0.50	0.52	15.6	16.5	16.4
20:00	1.23	0.85	0.90	15.0	15.6	15.6
21:00	1.39	1.12	1.13	15.7	14.9	14.8
22:00	2.49	1.28	1.12	17.0	15.4	15.2
23:00	4.28	2.04	1.83	17.9	16.4	16.0
0:00	2.05	2.05	0.54	17.3	16.8	16.5
1:00	2.50	2.54	0.38	16.7	17.0	16.8
2:00	3.23	1.64	1.67	23.7	16.7	16.3
3:00	4.11	2.00	1.83	20.1	18.6	17.7
4:00	3.69	2.98	1.57	24.8	19.0	18.4
5:00	4.36	2.22	2.41	21.9	20.5	19.7
6:00	4.09	3.24	2.21	26.7	21.0	20.3
7:00	3.96	4.13	3.31	24.5	22.6	21.6
8:00	4.97	3.92	3.13	25.1	22.8	22.0
9:00	5.93	3.68	3.44	23.3	23.7	22.9
10:00	6.63	4.29	4.14	21.4	22.2	22.1
11:00	4.69	4.64	4.64	21.0	21.2	21.1
12:00	5.30	4.96	4.90	23.0	21.0	20.9
13:00	5.78	5.13	5.07	17.8	20.6	20.5
14:00	5.97	5.53	5.53	16.4	18.4	18.3

## 附錄 B 溶氧傳輸試驗



風速：3.66 ±0.50 m/s

時間 (hr)	溶氧(mg/L)			溫度(°C)		
	水深 0 公分	水深 50 公分	水深 100 公分	水深 0 公分	水深 50 公分	水深 100 公分
0	10.60	9.34	9.33	14.7	18.3	18.2
12	0.49	0.43	0.41	16.0	17.2	17.1
24	2.16	1.91	1.97	16.8	16.0	15.9
36	3.19	2.80	2.19	17.9	16.3	16.1
48	3.72	3.66	3.56	19.0	16.4	16.3
60	5.43	3.84	3.63	19.7	18.1	17.4
72	4.44	4.77	2.89	20.8	18.0	17.8
84	5.27	4.56	4.34	21.0	19.6	18.9
96	4.94	5.15	4.18	22.8	19.4	19.2
108	5.67	5.03	4.94	21.6	21.1	20.2
120	5.62	5.74	4.61	23.2	20.9	20.5
132	5.91	5.48	5.30	23.3	22.0	21.3
144	6.13	6.10	4.96	23.7	21.9	21.5
156	6.75	6.14	6.03	19.3	22.1	22.0
168	6.50	6.40	6.42	19.1	19.4	19.4
180	6.47	6.56	6.61	20.2	19.4	19.3
192	6.60	6.74	6.76	23.1	19.2	19.1
204	7.40	6.79	6.72	22.5	20.9	20.2
216	6.94	6.94	6.90	25.7	20.7	20.6
228	7.05	7.15	6.80	22.4	21.7	21.1
240	7.22	7.12	7.19	21.4	21.4	21.3
252	7.43	7.29	7.31	20.5	21.2	21.2
264	8.02	7.50	7.51	17.8	18.8	18.7
276	9.35	7.68	7.68	17.5	17.6	17.5
288	8.78	7.77	7.73	20.4	17.7	17.5

附錄C 塭港氣象站資料-2011年 9月平均日照時數資料

時間	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
日期	9/1	27.4	27.2	27.1	26.5	26.6	26.8	26.6	26.8	27.3	27.9	28.9	29.3	29.5	30.4	30.2	30.1	30.4	29.9	29.4	29.4	28.9	28.8	28.3	28.0
	9/2	27.9	27.7	27.4	26.9	26.7	26.7	26.4	26.8	26.9	28.0	29.3	28.9	28.9	28.9	29.3	29.6	29.8	28.7	29.0	28.5	28.1	27.7	27.6	27.8
	9/3	27.9	27.9	27.7	26.9	27.0	25.8	25.9	27.2	27.9	28.0	29.2	29.1	29.7	30.4	30.4	30.5	30.3	29.8	29.3	28.5	28.3	28.3	27.9	27.8
	9/4	28.0	27.8	27.7	27.4	27.3	27.2	27.2	27.7	28.1	29.1	29.8	30.0	29.7	29.5	29.9	29.9	30.3	29.4	28.8	28.6	28.5	28.5	28.3	28.2
	9/5	27.9	27.7	27.7	27.5	27.5	27.4	27.4	27.4	27.6	28.1	28.7	29.9	29.2	29.6	30.2	30.1	30.3	30.0	29.6	29.1	29.0	28.0	27.8	27.7
	9/6	27.6	27.3	26.7	26.4	26.7	26.7	26.9	27.0	27.2	27.5	28.2	28.7	28.7	28.6	28.5	28.8	28.3	28.0	27.8	27.9	27.9	28.0	28.0	27.8
	9/7	27.9	27.7	27.2	27.1	26.9	27.1	26.8	27.1	28.5	27.7	28.0	28.5	28.9	29.2	29.3	29.2	29.0	28.8	28.5	28.3	28.3	28.4	28.3	27.8
	9/8	27.9	28.0	28.3	28.2	27.4	27.1	26.9	27.4	27.7	27.6	26.6	27.2	27.7	28.9	29.6	29.8	29.2	28.9	28.4	28.2	28.1	28.0	28.0	27.8
	9/9	27.5	27.6	27.7	27.5	27.4	27.2	27.0	27.6	27.9	28.9	29.5	30.3	30.4	30.2	30.6	29.7	29.6	29.0	28.6	28.5	28.7	28.2	28.2	28.2
	9/10	27.9	27.6	27.6	27.8	26.9	26.7	27.0	27.5	28.5	29.4	28.8	28.8	29.1	29.3	29.2	29.5	29.7	29.8	29.1	28.9	28.8	28.8	28.5	28.3
	9/11	28.0	28.0	28.0	28.1	28.1	28.1	27.7	27.9	28.4	29.1	28.9	29.0	29.0	29.5	29.9	30.6	30.6	30.9	28.6	28.1	28.5	28.8	28.6	28.3
	9/12	28.2	28.1	28.0	27.8	27.7	27.0	26.6	27.5	28.7	30.3	30.8	29.5	30.0	31.0	30.4	29.9	29.0	28.7	28.4	27.1	27.2	27.8	27.8	27.6
	9/13	27.3	27.1	26.1	26.3	26.2	26.3	26.5	26.7	28.0	28.1	28.7	29.1	28.8	28.9	28.7	28.7	29.2	29.8	30.4	29.3	29.0	28.6	28.4	28.3
	9/14	27.9	28.1	28.3	28.1	28.2	27.9	27.8	27.8	28.7	29.2	29.2	29.3	29.3	29.3	29.4	29.5	29.8	29.7	29.4	29.6	28.1	27.9	28.2	28.6
	9/15	28.7	28.5	28.2	28.4	28.4	28.0	28.1	28.3	29.0	29.8	30.1	30.2	29.9	29.9	29.9	30.3	30.0	29.9	29.7	29.3	28.7	28.1	28.1	28.2
	9/16	28.5	28.3	28.2	28.1	27.8	27.0	26.8	27.3	28.8	28.5	28.9	29.1	29.6	30.7	30.5	30.8	30.6	29.9	29.1	28.7	28.8	28.9	28.4	28.0
	9/17	27.4	27.1	27.5	26.9	26.2	26.5	26.4	27.5	28.2	29.2	29.4	29.5	30.3	31.0	31.4	30.5	30.3	29.6	28.6	28.3	28.2	28.3	28.2	28.1
	9/18	-	27.5	27.5	27.1	26.6	26.6	26.1	26.5	27.5	29.3	31.0	31.3	30.8	30.8	31.3	31.3	31.0	30.5	29.4	29.3	29.2	29.1	28.2	28.2
	9/19	28.9	28.0	27.8	27.7	26.2	25.8	25.6	25.7	26.9	28.4	29.2	29.8	29.6	31.0	30.0	30.3	29.6	28.7	27.5	26.8	26.4	26.0	25.8	25.3
	9/20	24.9	24.5	24.2	24.0	23.5	23.6	23.9	24.7	25.9	27.4	28.2	28.0	29.3	30.3	30.2	29.6	29.4	28.9	27.5	26.9	27.1	27.2	27.1	26.5
	9/21	25.8	25.3	24.8	24.4	24.0	24.5	24.3	24.5	25.6	26.5	28.0	29.0	29.0	29.3	28.9	28.4	27.8	26.8	25.8	25.4	25.1	24.8	24.4	24.3
	9/22	23.9	23.5	23.3	22.9	22.7	22.5	22.4	22.9	24.8	26.0	27.5	28.5	28.9	29.2	28.8	29.0	28.2	27.5	26.2	25.5	25.1	24.7	24.4	24.2
	9/23	23.9	23.6	23.6	23.4	23.0	22.9	22.9	23.2	24.5	26.1	27.8	28.8	29.5	29.5	29.2	28.2	27.6	26.4	25.7	25.4	25.1	24.9	24.7	24.4
	9/24	24.1	24.1	23.6	23.4	23.3	23.3	23.4	23.8	24.8	26.5	28.1	28.2	27.5	28.1	28.4	27.4	26.6	26.3	26.0	25.7	25.6	25.5	25.3	25.3
	9/25	25.2	25.2	25.1	25.0	24.9	25.1	24.8	25.1	26.4	27.5	29.2	29.5	29.7	29.5	30.1	29.3	29.1	28.8	28.1	27.3	27.1	27.0	26.9	26.6
	9/26	26.4	26.3	26.1	25.9	25.8	25.9	25.9	26.3	27.6	28.3	29.0	29.1	29.7	29.9	29.4	29.3	29.1	29.0	27.8	27.2	27.1	26.7	26.7	26.5
	9/27	26.3	26.1	25.8	25.6	25.6	25.6	25.6	25.9	26.8	28.0	29.3	30.1	29.9	30.6	30.2	29.5	29.3	28.5	27.7	27.6	27.7	27.3	27.4	27.6
	9/28	26.9	27.0	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.6	28.1	28.5	28.5	28.5	28.3	27.2	27.5	28.3	27.6	27.5	27.4	27.2	27.2	27.0	27.0	27.2
	9/29	27.0	27.1	27.1	27.0	26.8	26.5	26.0	26.9	27.4	27.5	27.5	27.9	28.4	28.6	29.2	29.6	29.8	29.4	28.9	28.9	29.4	28.9	28.7	28.3
	9/30	27.9	28.0	28.0	28.0	27.7	27.7	27.5	27.7	28.9	30.2	31.2	30.8	31.1	29.9	29.9	29.2	28.7	28.5	28.1	27.4	27.2	27.1	27.1	27.1
平均日照時數	27.07	26.93	26.78	26.59	26.35	26.23	26.13	26.54	27.42	28.22	28.92	29.20	29.35	29.64	29.68	29.56	29.34	28.92	28.29	27.90	27.75	27.58	27.41	27.27	
標準差	1.43	1.44	1.53	1.58	1.60	1.51	1.47	1.44	1.25	1.11	1.03	0.87	0.80	0.91	0.85	0.85	1.04	1.14	1.19	1.24	1.25	1.27	1.27	1.30	

資料來源:經濟部水利署-塭港氣象站

### 附錄C 塭港氣象站資料-2011年 9月逐時氣溫資料

時間	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
日期	9/1	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.1	0.4	0.9	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/2	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.7	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/3	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.0	-	-	-
	9/4	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0	-	-	-
	9/5	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	0.9	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	-	-	-
	9/6	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/7	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/8	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/9	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/10	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/11	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	0.9	0.9	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/12	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/13	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.9	1.0	0.8	1.0	1.0	0.7	0.9	0.5	0.0	0.0	-	-	-
	9/14	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.9	0.8	0.9	0.8	0.5	0.1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/15	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.0	-	-	-
	9/16	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.0	0.0	-	-	-
	9/17	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.0	0.0	-	-	-
	9/18	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/19	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	-	-	-
	9/20	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.4	0.6	0.4	0.2	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/21	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	-	-	-
	9/22	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.0	-	-	-
	9/23	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/24	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.3	0.0	0.3	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/25	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.9	1.0	0.7	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/26	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	-	-	-
	9/27	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	-	-	-
	9/28	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
	9/29	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.2	0.4	0.9	0.1	0.0	0.0	-	-	-
	9/30	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	1.0	0.8	0.4	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0	-	-	-
平均氣溫	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.12	0.58	0.66	0.79	0.81	0.81	0.86	0.89	0.84	0.81	0.72	0.14	0.00	0.00	-	-	-	
標準差	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.20	0.43	0.39	0.32	0.34	0.34	0.27	0.23	0.33	0.34	0.38	0.18	0.00	0.00	-	-	-	

資料來源:經濟部水利署-塭港氣象站

### 附錄C 塭港氣象站資料-2012年 9月逐時風速資料

時間	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
日期	9/1	1.7	1.7	2.3	2.3	0.9	1.8	1.5	2.0	0.9	2.2	3.4	4.7	4.7	5.6	5.8	5.8	4.2	2.3	1.2	3.2	3.2	2.4	1.8	1.0
	9/2	1.8	1.9	2.2	1.5	1.8	1.5	1.2	1.1	1.1	1.4	2.0	2.8	4.2	4.7	5.5	7.0	5.1	3.0	2.8	4.3	3.2	2.8	3.1	2.4
	9/3	2.3	3.0	2.0	1.9	1.2	1.5	1.7	1.7	1.6	1.8	2.1	2.6	3.0	3.6	4.0	5.3	3.8	1.7	2.1	2.0	1.5	2.6	2.2	1.7
	9/4	1.2	1.6	0.8	0.7	1.4	1.4	2.1	1.7	2.8	2.7	3.6	4.4	5.1	5.5	6.0	5.4	4.7	4.5	4.2	3.7	2.4	1.7	2.6	2.7
	9/5	2.4	2.5	2.5	2.2	1.6	1.2	1.0	1.0	0.9	1.6	3.2	3.6	3.6	4.1	4.4	4.9	4.8	5.4	3.7	2.4	1.8	1.4	0.8	0.3
	9/6	0.5	1.4	1.2	1.9	1.7	2.8	2.1	2.2	2.2	2.0	2.6	3.5	4.0	3.4	3.7	3.2	3.6	4.0	3.3	3.1	2.0	1.8	2.3	1.5
	9/7	1.3	2.4	5.0	5.1	4.1	4.4	3.2	3.5	3.3	4.4	3.1	3.7	4.5	3.6	4.3	3.4	2.4	2.3	2.1	1.5	0.4	2.1	2.2	1.0
	9/8	3.5	2.2	2.1	2.3	2.1	2.8	2.5	1.8	1.3	1.4	2.8	3.5	4.9	4.5	4.4	5.3	5.6	5.4	3.7	1.7	1.2	2.3	0.6	1.7
	9/9	2.8	2.2	3.0	3.2	2.9	2.7	3.4	2.2	0.8	1.2	2.7	3.5	3.8	3.8	3.5	3.7	3.9	3.9	3.9	2.9	2.0	1.9	0.7	0.9
	9/10	1.1	2.1	2.7	3.7	4.1	4.1	4.5	2.8	0.6	1.4	2.8	3.1	3.9	4.6	5.0	4.9	4.9	4.5	3.2	3.6	2.5	2.7	2.9	1.9
	9/11	1.6	0.9	0.8	1.3	2.0	2.5	2.4	2.6	3.0	3.8	3.5	2.7	3.1	2.6	4.2	4.3	3.8	2.9	3.1	3.3	2.5	0.9	0.2	0.7
	9/12	2.5	3.0	2.1	1.6	1.4	2.0	3.0	2.4	2.0	-	2.7	2.5	3.5	5.2	4.9	4.8	3.8	2.6	2.2	1.7	0.6	2.0	2.1	2.5
	9/13	2.4	3.0	3.2	3.5	2.1	1.4	2.0	1.5	1.1	1.8	2.1	3.6	3.3	3.3	4.2	4.3	4.6	3.6	3.9	2.8	2.9	2.1	2.7	2.6
	9/14	1.4	1.7	2.2	3.0	2.8	2.1	3.0	2.3	1.1	2.6	3.7	6.4	5.9	6.9	6.9	7.7	7.9	7.6	8.7	5.0	8.9	6.2	6.7	5.7
	9/15	4.9	5.6	4.4	3.8	3.4	4.0	4.2	4.2	6.2	4.8	6.8	6.7	7.6	8.2	7.7	8.0	-	7.7	9.0	8.5	8.6	8.3	6.9	6.3
	9/16	6.9	5.5	6.1	6.0	6.0	5.5	6.2	4.2	6.6	6.3	7.7	7.2	6.1	6.4	6.8	6.2	6.2	5.5	4.3	5.1	4.9	4.8	3.2	3.6
	9/17	2.2	1.9	2.9	1.9	1.3	1.8	1.7	3.6	3.9	5.5	4.4	4.3	5.6	6.0	5.6	5.4	5.7	4.8	2.9	2.0	2.1	2.3	1.8	1.7
	9/18	1.7	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.3	1.6	1.9	2.3	2.8	3.1	3.6	3.9	4.5	3.6	4.9	2.8	2.7	2.4	1.6	1.1	1.2
	9/19	1.3	1.6	1.5	0.7	1.3	1.4	0.6	1.0	1.2	1.2	2.4	2.4	3.7	3.1	3.0	3.3	2.4	2.3	3.4	4.5	3.6	3.0	2.1	2.1
	9/20	1.4	2.1	1.3	1.6	1.5	1.7	1.2	2.6	2.3	3.5	3.6	2.7	2.8	4.0	5.2	4.7	5.4	3.4	4.4	3.4	4.4	1.7	2.5	4.0
	9/21	2.7	1.5	1.7	1.6	2.8	1.6	1.5	2.0	2.8	2.7	2.6	4.6	4.6	4.3	5.1	5.5	3.8	3.9	2.2	1.6	1.6	1.2	1.5	1.3
	9/22	1.6	1.2	1.1	0.8	0.8	0.4	1.0	1.4	1.4	2.3	1.5	3.9	5.1	4.9	4.6	5.4	4.5	3.3	4.1	1.9	1.6	1.3	0.4	0.3
	9/23	1.3	0.2	0.6	0.3	1.8	0.9	1.1	1.1	2.3	2.7	3.5	3.7	4.9	5.5	4.9	5.2	4.9	3.6	3.5	3.1	2.9	2.7	2.0	1.8
	9/24	1.5	1.6	0.9	2.5	3.1	2.1	1.3	1.3	1.8	1.5	3.8	4.9	4.5	4.8	7.5	6.4	5.5	6.2	5.8	5.5	4.7	3.9	2.4	1.9
	9/25	0.8	2.1	1.7	1.8	2.5	2.5	1.8	2.1	2.3	1.9	2.3	4.3	5.1	5.7	5.8	5.5	4.5	5.4	5.3	4.9	4.6	2.9	2.7	2.1
	9/26	2.7	1.6	1.3	1.0	0.8	1.5	1.7	2.4	1.8	1.9	2.7	4.1	4.9	5.9	6.4	6.8	5.3	4.0	3.6	3.3	1.8	1.7	1.3	2.1
	9/27	2.1	1.5	0.5	0.7		1.4	1.5	1.8	2.0	1.6	5.0	4.9	3.3	2.3	6.8	5.3	5.3	5.3	6.5	6.4	5.6	6.5	6.3	6.3
	9/28	6.9	7.1	8.8	8.5	8.8	8.4	9.4	10.4	10.1	8.4	11.0	10.7	10.7	10.4	10.5	10.1	9.7	9.7	10.1	9.3	11.1	10.7	9.5	7.8
	9/29	9.4	8.3	9.0	7.9	8.4	7.7	7.3	6.3	7.3	6.9	6.4	6.3	-	6.4	6.3	6.6	5.6	5.9	6.5	5.7	4.5	5.0	3.6	2.3
	9/30	1.8	2.3	1.8	3.1	3.3	3.6	2.9	3.5	3.6	3.1	3.5	4.1	4.3	5.5	5.2	4.8	5.2	5.4	4.5	3.4	2.5	2.1	2.3	2.6
平均風速	2.52	2.51	2.57	2.58	2.65	2.59	2.62	2.60	2.66	2.91	3.66	4.27	4.61	4.95	5.40	5.46	4.85	4.50	4.23	3.75	3.40	3.09	2.68	2.47	
標準差	2.00	1.80	2.14	2.02	2.03	1.88	1.99	1.88	2.20	1.86	1.99	1.75	1.59	1.69	1.54	1.47	1.45	1.79	2.11	1.92	2.47	2.24	2.10	1.84	

資料來源:經濟部水利署-塭港氣象站