

應用自然水體資源之生物能源開發研究

陳鴻烈⁽¹⁾ 蔡大偉⁽²⁾ 阮明勳⁽³⁾

摘要

生物能源為目前世界上最重要的再生能源之一，其中藻類具有高能源轉換係數與高單位產量的優點，為重要能源作物。本研究目的在於運用台灣優養化之自然水體，使用生態工程的方法培養藻類，以同時達到改善水資源品質及發展生物能源之效果。實驗透過光化生物反應器進行模擬，以自然水體為介質，研究藻類培養實驗。結果顯示反應器具有改善水質之功能，分別削減氮(70.25%)、磷(79.74%)，並增加水中溶氧(76.19%)；同時證明使用自然水體亦可達培養藻類的效果，目前實驗數據顯示藻類平均生物量為 0.0628 g/l。另外，實驗中亦發現藻類將 CO₂ 作為重要碳源，未來具有發展節能減碳效果之潛力。

(**關鍵詞**：自然資源再利用、生物能源、藻類生物反應器)

The Study of Bioenergy from Natural Water Resource

Paris Honglay Chen

Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, 402 Taichung, Taiwan

David D-W. Tsai, Albert R. Rameshprabu

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, 402 Taichung, Taiwan

ABSTRACT

Biofuel is one of the most important renewable energies in the world. And algae is a prime energy crop which have high energy conversion factors and bioproductivity. In this study, we tried to utilize the natural water resource to improve water quality and develop bioenergy by ecological engineering method. We developed the photoreactors to grow algae by using natural water as substrate. The results showed that the reactor had good performance on water quality improvement

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系教授

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

⁽³⁾ 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

and algae growth. After comparing the influent and effluent, the reduction rates of nitrogen and phosphorus were 70.25 % and 79.74 %, respectively. And the increasing ratios of dissolved oxygen were 76.19 %. The algae biomass was 0.0628 g/l. Furthermore, we also found CO₂ was another important carbon source of algae growth. It could be the key for energy conservation and carbon reduction.

(**Keywords:** Natural resource utilization, bioenergy, photoreactor)

前言

在水土保持研究中，水資源保護為中心議題之一，而台灣自然水體多數因汙染造成優養化，本研究希望透過生態工程的方法，提升水體品質，並藉由資源再利用，將藻類轉換為新資源 — 再生能源。

隨著能源儲量漸漸減少，尋求乾淨以及再生性能源為許多國家目前非常重視的課題。生質能源具有取之不盡、用之不竭的特性，而且可以降低空氣中 CO₂ 的濃度，減少溫室氣體，是值得開發的能源技術。

藻類生物能源為非常重要的再生能源之一，本研究之目的主要在研究藻類生長，於實驗室模擬自然水體養殖藻類，做為生質能源的原料，因此以鄰近校區之河川自然水體作為養殖所需之介質，進行藻類物種觀察、環境監測與生長分析。

文獻探討

Oswald 教授於 1963 年在 U.C. Berkeley 開創使用生態工程方法進行廢水處理，其於 Richmond field station 所設計的藻類生物處理設施 High Rate Pond (HRP) 可有效降低有機汙染物 (BOD 減量效率為 90 % 以上)、無機營養鹽 (氮、磷減量效率為 80 % 以上)，並

且可高效率的培養藻類，營造高溶氧環境，其含氧量可達一般狀態的 3-4 倍 (Oswald et al., 1953a、1953b、1988 ; Picot et al., 1991 ; Nurdogan et al., 1995 ; Garcia et al., 2000)。HRP 具有簡單、經濟、高效率的特性，且不易受日夜變化之影響 (Garcia et al., 2006)，至今仍為十分重要的生態工法之一。

HRP 應用範圍十分廣泛，例如 Mulbry et al. (2008) 以 HRP 處理畜牧廢棄物，可回收氮營養鹽 60-90 %，磷 70-100 %。

藻類具有高營養價值，可作為飼料或是緩效性肥料 (Wilkie et al., 2002)，其肥料效果與商業性有機肥相當，作物質量與營養無顯著差別 (Mulbry et al., 2005、2006)。此外，藻類具有高單位產量的特性，可達一般農作物 2.5-10 倍單位產量 (Oswald, 1962)，因此相當適合做為生物能源作物。

研究方法

本研究設計光化生物反應器來模擬自然環境狀態，進行藻類培養。光源部分以日光燈為光照來源，並且使用自然水體 (綠川河水) 為培養介質，進行混合式藻類物種之培養。

運轉方式採用實驗室常用之 CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) 設置，使反應器可充分混合，以達到最大藻類生產量。光源則使用日光燈 (fluorescent light)，以 24

hrs 多方光照方式設置。此外，實驗中採用三重複方式，亦即設置 3 個反應單位，分別為 P1、P2、P3，每個單位為 4000 ml。培養介質輸入是採用分批添加 (batch feed) 的方式，每日輸入與輸出 400 ml，亦即介質停留時間為 10 日。光化生物反應器設置如圖 1 所示。另外，將綠川河水輸入前，先使用 0.45 μm 濾紙過濾，濾除水中雜質，只留下可運用的溶解營養鹽。



圖 1 光化生物反應器設置

Figure 1. Photobioreactor set up.

藻類物種每週藉由顯微鏡觀察其外型特徵，進行物種分析。而反應器內生長環境生化分析測量參數則包括光強度、水溫、藻類物種，水溶相水質指標包括酸鹼值(pH)、溶氧(DO)、化學需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸鹽氮(NO₃⁻-N)、亞硝酸鹽氮(NO₂⁻-N)、凱氏氮(TKN)、總氮(TN)、總磷(TP)，而 total 類(水溶相與顆粒固相)水質指標則有沈積固體物(settleable solid)、總懸浮固體物(TSS)、總固定性固體物(FSS)、總揮發性固體物(VSS)等，其中除了沈積固體物採每日測量外，其

他參數均為每週一次的測量頻率，所有參數及其量測方法整理如表 1。

表 1 生長環境生化分析參數

Table 1 Biochemical parameters measurement.

測量參數	使用儀器或測量方法
光強度	LI-COR光度計LI-250
水溫	實驗室溫度計
沈積固體物	分液漏斗、量筒
藻類物種	顯微鏡
酸鹼值	Method 423 (Standard Methods)
溶氧	Method 421B (Standard Methods)
COD	Method 508B (Standard Methods)
氨氮	Method 417D (Standard Methods)
硝酸鹽氮	Method 418A (Standard Methods)
亞硝酸鹽氮	Method 419 (Standard Methods)
凱氏氮	Method 420A (Standard Methods)
總磷	Method 424D (Standard Methods)
總懸浮固體物	Method 209 (Standard Methods)
總固定性固體物	Method 209 (Standard Methods)
總揮發性固體物	Method 209 (Standard Methods)

藻類生物量一般常採用葉綠素 a、細胞計數、VSS 來評估 (Oswald et al., 1953a; Travieso et al., 2006)。由於反應器中藻類為最主要生物，因此我們可以 VSS 來代表生物量，再配合環境生化參數變化情形，以得知反應器中藻類生長狀態與環境關係。

結果與討論

反應器在持續運作下，透過每週的物種鑑定，初步結果顯示反應器內主要物種包括 *Chlorella*、*Scenedesmus*、*Oedogonium*、*Oscillatoria*、*Anabaena*、*Lyngbya*、*Phytoconis*、*Phormidium*、*Coccochloris* 等。

環境生化參數測量包括培養介質與反應器中水質參數，藉此了解藻類生長與水中環境之交互影響。各參數之變化情形如圖 2~12，而各參數之平均值與範圍則如表 2。

反應器水溫與光強度為藻類生長重要因子，在本實驗中設為控制因子之一，盡量保持在穩定的狀態 (圖 2、圖 3)，實驗中水溫約為 30 °C，光強度則維持在 27.5 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{per } \mu\text{A}$ 。

藻類生長對水中 pH 值之影響如圖 4，反應器出流水的 pH 平均值 10.47 明顯高於培養介質的 6.97，由原來中性水體轉變為鹼性，推測主要原因為藻類生長會產生大量代謝物，再加上藻類死亡分解後，均會釋放大量的氨氮(Oswald et al., 1953a)，造成水體酸鹼度上升至 10 以上(Oswald et al., 1957)。

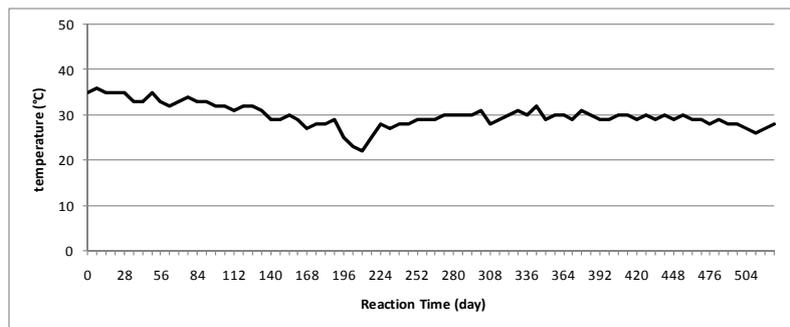


圖 2 反應器溫度變化

Figure 2. Temperature variation in the reactor.

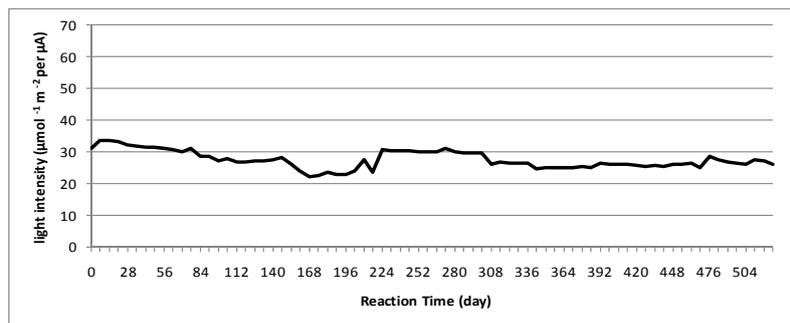


圖 3 反應器光度變化

Figure 3. Light intensity variation in the reactor.

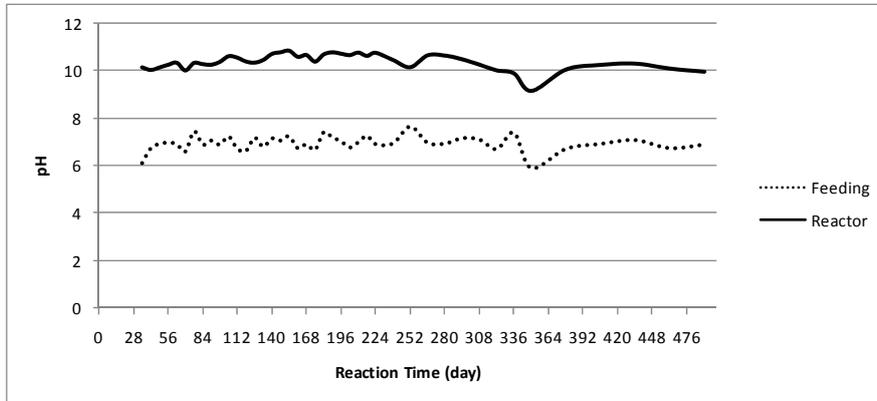


圖 4 進流水與反應器出流水 pH 變化

Figure 4. pH variation of feeding and reactor effluent.

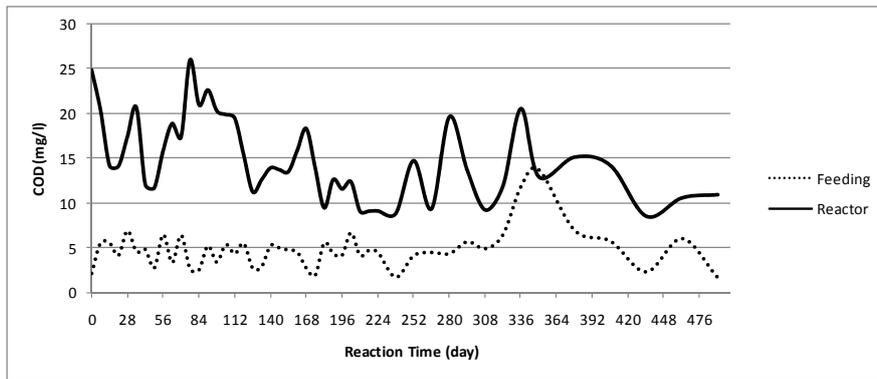


圖 5 進流水與反應器出流水化學需氧量(COD)變化

Figure 5. COD variation of feeding and reactor effluent.

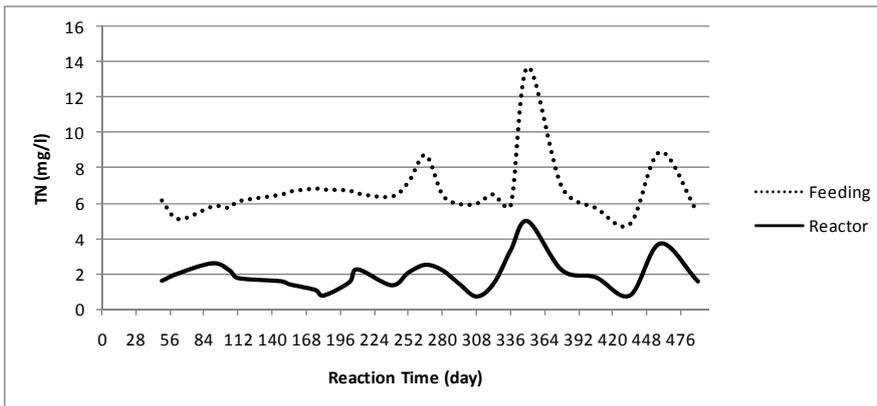


圖 6 進流水與反應器出流水總氮(TN)變化

Figure 6. TN variation of feeding and reactor effluent.

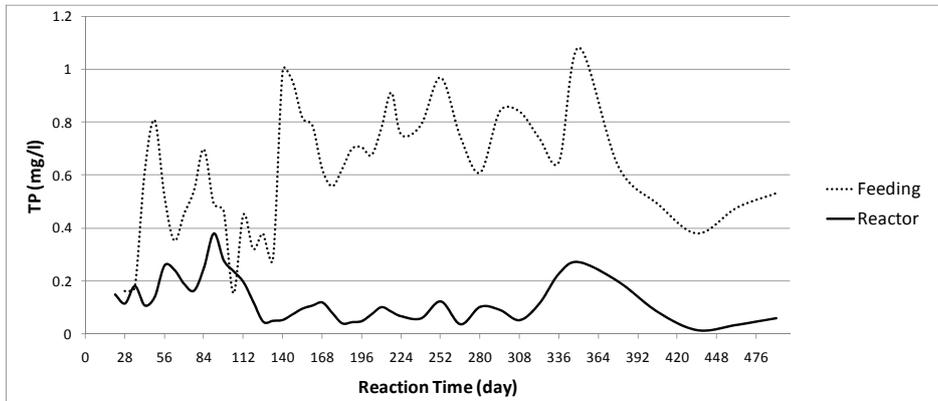


圖 7 進流水與反應器出流水總磷(TP)變化
Figure 7. TP variation of feeding and reactor effluent.

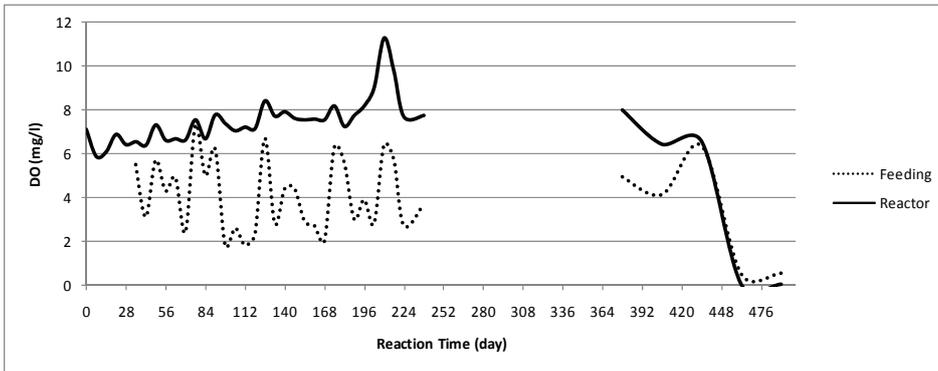


圖 8 進流水與反應器出流水溶氧(DO)變化
Figure 8. DO variation of feeding and reactor effluent.

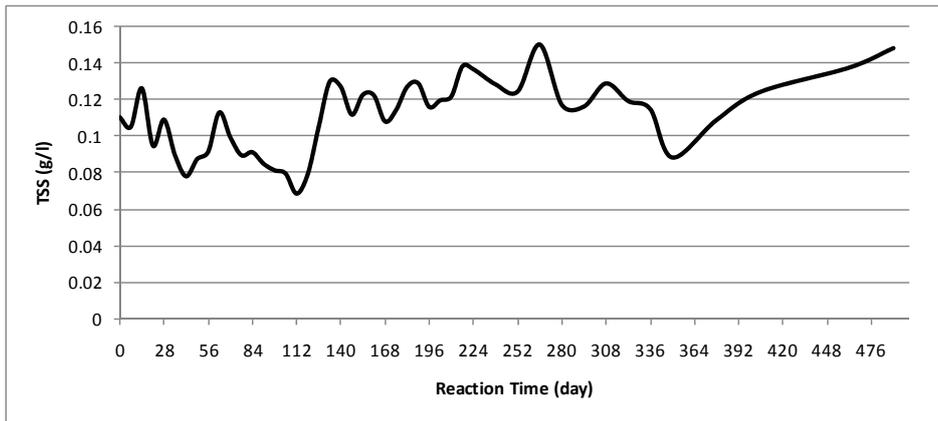


圖 9 進流水與反應器出流水總懸浮固體物(TSS)變化
Figure 9. TSS variation of feeding and reactor effluent.

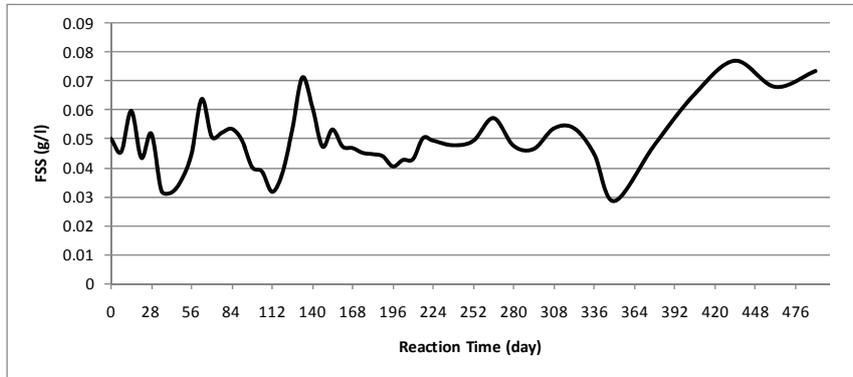


圖 10 進流水與反應器出流水總固定性固體物(FSS)變化

Figure 10. FSS variation of feeding and reactor effluent.

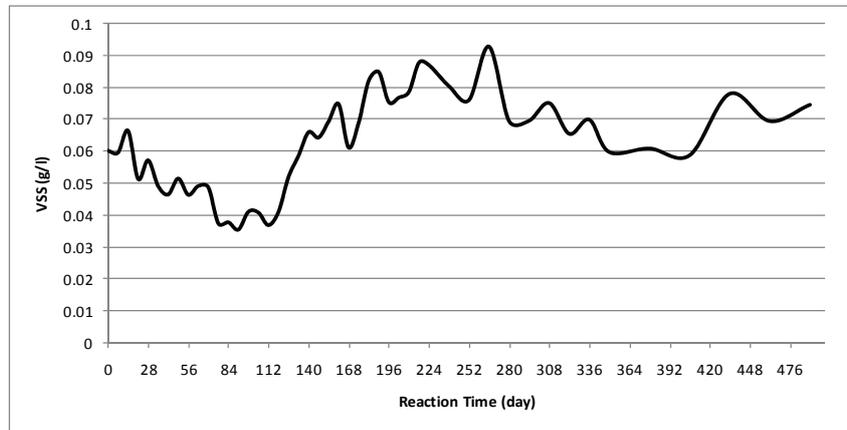


圖 11 進流水與反應器出流水總揮發性固體物(VSS)變化

Figure 11. VSS variation of feeding and reactor effluent.

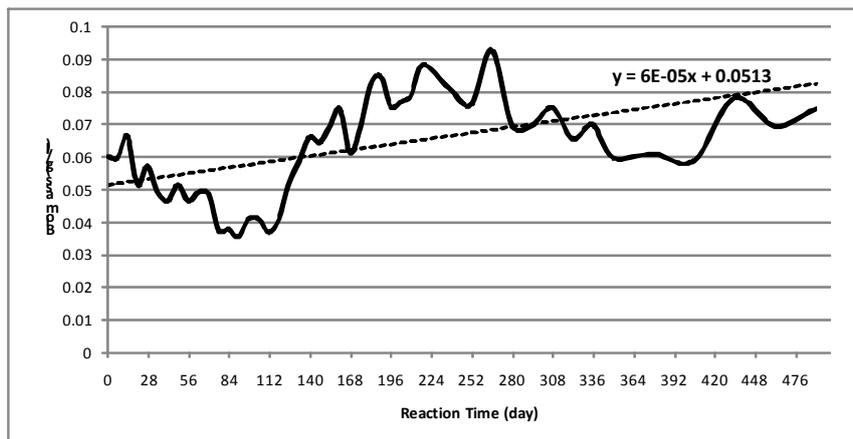


圖 12 反應器生物量變化

Figure 12. Biomass trend in the reactor.

表 2 環境參數之變化範圍與平均值

Table 2. Ranges and means of biochemical parameters.

Parameter	Feeding		Reactor	
	Range	Mean	Range	Mean
Temperature	–	–	22-36 °C	30 °C
Light Intensity ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ per μA)	–	–	22.11-33.50	27.49
pH	5.93-7.68	6.97	9.18-10.88	10.41
COD (mg/l)	1.69-16.52	4.90	6.83-28.25	14.74

表 2 環境參數之變化範圍與平均值 (續)

Table 2. Ranges and means of biochemical parameters. (continued)

Parameter	Feeding		Reactor	
	Range	Mean	Range	Mean
TN (mg/l)	4.844-13.687	6.719	0.630-5.106	1.999
TP (mg/l)	0.154-1.082	0.617	0.001-0.408	0.125
DO (mg/l)	1.8-7.3	4.2	5.7-12	7.4
TSS (g/l)	–	–	0.0403-0.1793	0.1114
FSS (g/l)	–	–	0.0137-0.0951	0.0494
VSS (g/l)	–	–	0.0235-0.1028	0.0628

COD 變化如圖 5，圖中顯示反應器出流水的 COD 明顯上升，由進流水平均值 4.90 上升至 14.74 mg/l，約有 300 % 的升幅，表示經過反應器藻類的培養，形成一個主要由藻類與細菌所組成的簡單生態系，依據共生理論，有機物大量增加(Oswald et al., 1953b)，也使得 COD 含量隨之增加。

氮營養鹽為藻類生長必要營養之一，氨氮即為藻類合成蛋白質主要的氮來源(Oswald et al., 1957)，因此藉由總氮的變化可了解藻類變化趨勢(圖 6)。由圖中可明顯看出總氮含量經反應器後有明顯下降的趨勢，平均值由原來的 6.719 降為 1.999 mg/l，下降約 70.25 %，相較於 Oswald et al. (1957)

高效率藻類反應器處理效能 60-80 % 來看，為合理的效率。此結果顯示出透過藻類培養，大量吸收利用水體中氮化合物，使得總氮含量顯著下降，證明透過生態工程來培養藻類，為一處理氮、磷很好的方式(Oswald, 1988)。

磷營養鹽為一般淡水水體藻類生長之限制因子，因此為藻類培養的關鍵因子，可使用磷含量來決定藻類的生物量(Lau et al., 2002)。研究中進流水與反應器出流水中總磷含量變化如圖 7，平均值由進流水的 0.617 降到出流水的 0.125 mg/l，約有 79.74 % 的總磷因被藻類吸收利用而削減。

圖 8 為反應器處理前後之溶氧變化，出

流水平均值 7.4 mg/l 顯然高於進流水的 4.2 mg/l，主要因為藻類進行光合作用時吸收 CO₂，CO₂ 接受氫離子後轉為 CH₂O，而 H₂O 則在提供氫離子後轉化為氧氣 (Oswald et al., 1953a)。因實驗採用 24 hr 光照，致使水中溶氧明顯上升，平均約為 76.19 % 的增幅。圖中有 3 個月的缺值，是因儀器損壞送修，無法進行量測。

本實驗透過水體中固體物量測作為反應器中生物量直接量測的指標，相關項目包括總懸浮固體物(TSS)、總固定性固體物(FSS)與總揮發性固體物(VSS)，其變化量分別如圖 9~11。三者間的關係為 TSS = FSS + VSS，由於藻類為反應器中最優勢物種，因此可將 VSS 視為藻類生物量。圖 11 中顯示實驗初始約 5 個月的時間為培養期，藻類生物量變化較大，之後漸趨穩定，接近最大生物量。

由反應器處理前後的水體環境生化參數分析，可明顯得知藻類生長對環境參數的影響，不但可獲得具有高經濟效益之藻類，同時可達成降低水體污染物的高效能。各參數

之影響整理為表 3。Oswald et al. (1957) 指出當反應器中氮源非限制因子時，生產藻類生物量約為總氮濃度 10 倍，依據此學說，本研究生物量估計值為 0.0672 g/l，非常接近實測值 0.0628 g/l，因此可推測本實驗藻類生長限制因子非為氮營養鹽。至於磷，約佔藻類乾重之 1.5 % (Oswald et al., 1957)，因此推估 0.617 mg/l 總磷濃度可生長 0.0411 g/l 的藻類，小於實驗值 0.0628 g/l，代表磷在本實驗之生物量比例約為 1 %。另外，BOD 與藻類生物量的關係大致為對數關係 (Oswald et al., 1957)，本實驗數據顯示 COD 偏低，因 COD 量測包含 BOD，故表示培養介質中 BOD 含量明顯不足以支撐藻類生長，主要因為本實驗培養介質是採用自然水體，BOD 已被稀釋。另外，實驗結果亦指出，反應器有其他碳源，推測 CO₂ 可能為另一重要的碳來源。

反應器中生物量變化情形如圖 12，由圖中可看出生物量有漸增的趨勢。在反應器持續運轉下，各項生物反應漸趨穩定狀態，使得藻類生物量整體而言，仍是上升的趨勢。

表 3 藻類生長對環境參數之影響

Table 3. Effect of algae growth to environmental parameters.

Parameter	Feeding	Reactor	Effect (%)
pH	6.90	10.47	-
COD	4.90 mg/l	14.74 mg/l	300
TN	6.719 mg/l	1.999 mg/l	-70.25
TP	0.617 mg/l	0.125 mg/l	-79.74
DO	4.2 mg/l	7.4 mg/l	+76.19
VSS	-	0.0628 g/l	-

結論與建議

本研究嘗試使用自然水體作為培養介質，於實驗室培養藻類，以藻類作為生質能源之能源作物。研究結果顯示藻類反應器不但具有改善水質之功能，分別削減氮(70.25%)、磷(79.74%)，並增加水中溶氧(76.19%)。此外，證明本實驗模擬自然環境，使用自然水體可大量培養藻類，水中 COD 明顯提升(300%)，藻類生物量為 0.0628 g/l。同時研究中發現 CO₂ 可能為藻類生長另一重要碳源，此效果對未來節能減碳非常重要，本團隊未來將進行更深入的探討。

謝 誌

本研究承蒙發展國際一流大學及頂尖研究中心計畫之贊助，特此致謝。

參考文獻

1. García, J., B.F. Green, T. Lundquist, R. Mujeriego, M. Hernández-Mariné and W.J. Oswald (2006), "Long Term Diurnal Variations in Contaminant Removal in High Rate Ponds Treating Urban Wastewater", *Bioresource Technology*, Vol.97, 1709-1715.
2. García, J., R. Mujeriego and M. Hernández-Mariné (2000), "High Rate Algal Pond Operating Strategies for Urban Wastewater Nitrogen Removal", *J. Appl. Phycol.*, Vol.12, 331-339.
3. Lau, S.S.S. and S.N. Lane (2002), "Biological and Chemical Factors Influencing Shallow Lake Eutrophication: A Long-term Study", *The Science of the Total Environment*, Vol.288, 167-181.
4. Mulbry, W., E. Kebede-Westhead, C. Pizarro and L.J. Sikora (2005), "Recycling of Manure Nutrients: Use of Algal Biomass from Dairy Manure Treatment as a Slow Release Fertilizer", *Bioresour. Technol.*, Vol.96, 451-458.
5. Mulbry, W., S. Kondrad and P. Pizarro (2006), "Biofertilizers from Algal Treatment of Dairy and Swine Manure Effluents: Characterization of Algal Biomass as Slow Release Fertilizer", *J. Vegetable Sci.*, Vol.12, 107-125.
6. Mulbry, W., S. Kondrad, C. Pizarro and E. Kebede-Westhead (2008), "Treatment of Dairy Manure Effluent Using Freshwater Algae: Algal Productivity and Recovery of Manure Nutrients Using Pilot-scale Algal Turf Scrubbers", *Bioresource Technology*, Vol.99, 8137-8142.
7. Nurdogan, Y. and W.J. Oswald (1995), "Enhanced Nutrient Removal in High Rate Ponds", *Water Sci. Technol.*, Vol.31, 33-44.
8. Oswald, W.J. (1962), "The Coming Industry of Controlled Photosynthesis", *American Journal of Public Health*, Vol.52, 235-242.
9. Oswald, W.J. (1988), "Microalgae and Wastewater Treatment", Borowitzka and Borowitzka Ed. Cambridge University Press, U.K.
10. Oswald, W.J., H.B. Gotaas and H.F. Ludwig (1953a), "Algae Symbiosis in

- Oxidation Ponds II. Growth Characteristics of *Chlorella pyrenoidosa* Cultured in Sewage”, *Sewage and Industrial Wastes*, Vol.25, 26-37.
11. Oswald, W.J., H.B. Gotaas and H.F. Ludwig (1953b), “Algae Symbiosis in Oxidation Ponds III. Photosynthetic Oxygenation”, *Sewage and Industrial Wastes*, Vol.25, 692-705.
 12. Oswald, W.J. and H.B. Gotaas (1957), “Photosynthesis in Sewage Treatment”, *American Society of Civil Engineers*, No.5, 73-105.
 13. Picot, B., H. El Halouani, C. Casellas, S. Moersidik and J. Bontoux (1991), “Nutrient Removal by High Rate Pond System in a Mediterranean Climate”, *Water Sci. Technol.*, Vol.23, 1535-1541.
 14. Travieso, L., F. Benítez, E. Sánchez, R. Borja, A. Martín and M.F. Colmenarejo (2006), “Batch Mixed Culture of *Chlorella Vulgaris* Using Settled and Diluted Piggery Waste”, *Ecological Engineering*, Vol.28, 158-165.
 15. Wilkie, A.C. and W. Mulbry (2002), “Recovery of Dairy Manure Nutrients by Benthic Freshwater Algae”, *Bioresour. Technol.*, Vol.84, 81-91.

98年03月23日收稿

98年04月15日修改

98年05月11日接受