

金瓜寮溪附生藻類去除水中磷含量之研究

Study of Phosphorus Removal by Periphyton in Jinguailiao Creek

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士生

王之佑

Chih-yu Wang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張文亮*

Wen-lian Chang

中央研究院生物多樣性中心&
國立台灣大學生態與演化
生物學研究所

吳俊宗

Jiunn-tzong Wu

摘 要

附生藻類具有高適應性，可附著在水域任何物體的表面上。即使群落組成容易受到流況、溫度、光照、營養鹽等條件影響而發生改變，附生藻類仍能繼續在原棲地生存繁衍。近年來，許多研究人員利用附生藻類進行水質改善的實驗，並提出令人注目的研究報告。國內水庫優養化現象日益嚴重，然而目前僅有少數人工濕地生態工法應用於集水區溪流之水質淨化。磷為藻類重要營養元素之一，本研究目的即利用藻類生長箱實驗，分析附生藻類將水中磷濃度降低的可行性和極限。實驗在半封閉狀態下，以批次方式進行，即在實驗開始後便不再添加任何營養鹽。實驗初始正磷酸鹽濃度為 4~136 $\mu\text{g/L}$ ，總磷濃度為 27~168 $\mu\text{g/L}$ 。實驗結果顯示，當初始的正磷酸鹽濃度在 35 $\mu\text{g/L}$ 以上，附生藻類族群以細絲型綠藻佔優勢。平均之藻乾重生產量為 0.05~0.16 $\text{g/m}^2\text{-day}$ ，其有機質含量為 41.83~71.27 %。在此情況下，藻類可使水中磷酸鹽降低至 1~2 $\mu\text{g/L}$ ，總磷濃度亦不超過 10 $\mu\text{g/L}$ 。整體實驗中，水體總磷去除百分比最高為 95.17 %。由以上結果可知附生藻類具有降低營養鹽濃度至貧養程度的能力，如在集水區溪流施用附生藻，可有效降低水庫優養化的發生。

關鍵詞：附生藻類，磷，去除率，溪流。

ABSTRACT

With high adaptability, periphyton could adhere to any surface in the water. Although periphytic microcommunities are subject to various environmental factors, including current, temperature, light intensity, and nutrient, the flora remains thriving at habitat. Researches have been done on the algae-water treatment experiment with significant results in recent years. Eutrophication in water reservoir has become more and

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，wenlian@ntu.edu.tw

more severe in Taiwan. However, only few artificial wetlands have been built to clean up stream water in the watershed. Phosphorus is one of the most important nutrients to algae. The purpose of this study was to determine the degree of phosphorus removal by the periphyton incubated in a growth chamber. The experiment was conducted under semi-enclosed conditions with no further addition of nutrients except initial addition. The onset of initial phosphate concentration ranged from 4 to 136 $\mu\text{g/L}$, with total phosphorus concentration between 27 and 168 $\mu\text{g/L}$. After an incubation of 26 days, periphyton community was dominated by filamentous green algae when the initial phosphate concentration was higher than 35 $\mu\text{g/L}$. The biomass production of periphyton had been as high as 0.05–0.16 g dry weight/ $\text{m}^2\text{-day}$, with ash free dry weight ranging from 41.83% to 71.27%. Under such conditions, phosphate concentration in each culture was reduced to 1–2 $\mu\text{g/L}$, with total phosphorus concentration lower than 10 $\mu\text{g/L}$. As a result, the maximum phosphorus removal efficiency has been up to 95.17%. The present study shows that periphyton can remarkably reduce the phosphorus in river water and thus is able to prevent water reservoirs from eutrophication when it is applied in the watershed.

Keywords: Periphyton, Phosphorus, Removal rate, River.

一、前言

在淡水環境中，碳、氮、磷為三種最主要的污染元素。一般的環境工程係針對人類活動所產生的各種污染來加以整治，而目前發展最為蓬勃的即是生態工程之一的「人工溼地整治法」。透過生態系的穩定運作，水體中過多的營養鹽被植物吸收去除。然而，在一個低污染的環境下，人工溼地必須要栽種適當的水生植物才能夠將水質改善，否則在發揮淨化功能前，植物體便因為營養不足而死亡。此外，上述環境下生存的水生植物，其營養來源仍有待商榷，若多數養分係由土壤提供，即使能將地表營養鹽輸入量降低，但仍無法直接改善水環境中水質的狀況。

在自然界中，分布最為廣泛的大部分屬於生態系中較低階的物種，藻類即是其中之一。無論生存環境怎麼變化，藻類都有辦法生存，所以在水中、土壤、空氣、甚至是生物體中都可以發現到它的存在。根據上述可知，應用藻類之生態工程設計有其發展之必要性與優勢性。

1.1 水庫與優養化

水庫的優養化主要是因為營養鹽大量的增加，造成藻類大量繁殖。一般而言，影響水域藻

類生長之主要因素包括營養鹽供給、日照強度、溫度變化等，其中營養鹽如碳、氮、磷等為最重要的關鍵因子。碳元素可由空氣中的二氧化碳取得，氮元素亦可透過藍綠藻或其他生物的固氮作用從大氣中獲取。在控制及改善水庫優養化狀況時，不可能限制空氣中元素進入水體，因此，唯一較可能操控的即是依靠水體傳遞的「磷元素」。

目前世界上普遍使用的水庫優養化評估方法有多種，較常被用的如世界經濟合作發展組織(OECD)判定標準、Carlson 判定標準、美國環境保護署判定標準和卡爾森優養指數等四種；其使用的參數主要為水中透明度、葉綠素 a 及總磷等(中華民國行政院環境保護署，2004)。總磷是營養鹽中被選擇作為評估的主要參數，而水中磷也為水庫優養化控制的指標性營養鹽。此營養鹽之最佳處理方式即在污染源頭，即以阻斷或是在進入水庫體前的溪流裡加以攔截。

1.2 附生藻類

Periphyton 是生長於水中各種物體表面上的聚合微小生物體，藻類為其中之一種。不論是小型溪流或是大型河川中，附生藻類幾乎能在所有陽光照射得到的地方生長(Allan, 1995)，因此在淺湖、池塘、溪流與河川等水域環境裡，藻類均

是生物族群中重要的組成因子。目前國內相關研究大多將其翻譯為附生藻類或著生性藻類(王, 2001; 鄭, 2002)。淡水環境下主要的藻種為: 羽狀矽藻、綠藻、藍綠藻, 然而其他藻種也是可能會出現(Sze, 2000)。

附生藻類依據棲息環境能細分為: 砂附生性屬(epipelic)、石附生性屬(epilithic)和植棲性屬(epiphytic)。如同之前所提, 附生藻類由多種藻類群聚組成, 其群落各物種彼此間存在著競爭和合作, 並隨著環境變化而消長演替, 情形甚為複雜。

1.3 附生藻類與水中磷

附生藻類的群落對於溪流生態系中營養鹽的吸收與循環有著顯著的影響(Mulholland *et al.*, 1994)。水域底層與植物表面的附生藻類對於自然界中磷的循環有以下五種影響(Dodds, 2003): 首先, 透過附生藻類生長、繁殖與死亡的過程, 可將水體中營養鹽轉移進入沉積物中; 其次, 流動環境下的底層水流受到附生藻類的阻礙, 導致流速降低, 使得所含磷之沉積物無法隨著擾動底床的水流, 返回水環境; 第三, 當沉積物溶解或是植物體衰老腐敗, 釋出的含磷化物遭到附生藻類攔截, 使營養鹽無法返回水體; 第四, 附生藻類透過光合作用, 使水質呈現微鹼性, 可營造出適合磷酸鈣、磷酸鎂等化合物沉澱的生化條件; 最後, 附生藻類可攔截水體中懸浮微粒, 間接降低水體中磷的含量。

相較於擴散作用, 平流傳輸(advective transport)顯著的影響附生藻類從水環境中取得營養鹽, 或是攔截從沉積物釋出的磷。在附生藻類密集生長的環境下, 流速在附生藻類表面到底部的短短距離內便可降至靜止的程度, 水流便無法產生足夠剪應力以帶出沉積物中的磷。群落中的細絲藻類發揮過濾功能, 將水體中的懸浮微粒攔截, 之後隨著生物體死亡而帶入沉積物。

水中磷的攝取速率可受到下列三項因素影響: 生物量、溫度、水流傳輸。一般而言, 磷的吸收與生物量成正比關係, 然而受到自我遮蔽效應影響, 使得附生藻類底部無法獲得足夠光線, 而成長速率受到抑制。另外, 螺類及水生昆蟲等

底棲生物的覓食, 或是水流沖刷機制亦影響藻類生物量的增加。第二, 溫度因子可控制附生藻類的新陳代謝, 進而影響磷的攝取。然而兩者之間明確的關係無法定義出來, 主要是因為附生藻類群落的組成隨著溫度而改變, 所呈現出來的結果也不易推論出明確關係式。然而大體來說, 在適合的溫度範圍下, 附生藻類的新陳代謝速率與環境溫度成正比。第三, 在低濃度營養鹽的環境下, 附生藻類可透過水流傳遞以獲取足夠養分, 然而在濕地等靜水流域裡, 由於物質依靠擴散作用來移動, 越高的濃度梯度傳輸越快, 所以欲獲得等量之物質, 水體營養鹽濃度要越高, 即半飽和常數(half saturation constant)相對而言較高。

在地球生物化學方面, 附生藻類對於長期沉積物的儲存現象有著密切的關係。附生藻類顯著影響金屬磷酸鹽的沉澱, 以及鈣、鎂磷酸鹽的共沉澱作用。因為光合作用的關係, 它能让底層表面保持好氧狀況, 使得金屬磷酸鹽不易因酸化而析出, 避免磷物質釋放進入水體。此外, 酸鹼度提高後, 有利於磷酸鈣、磷酸鎂的沉澱, 及降低磷灰石的水解。

1.4 附生藻類應用於移除水中磷之相關研究

過去學者對於附生藻類吸取營養鹽的機制與效果, 進行許多的研究調查, 例如在溼地、溪流、貧養水質和農業廢水等, 均會有許多相關的研究報告。栽培附生藻類最早相關紀錄為俄國學者提出之生物式淨化器(bioeliminators)。之後其他的研究學者延續此想法, 使用附生藻類進行飲用水前處理(Vymazal, 1988)。

附生藻類淨化系統持續受到相關研究學者注目, 並持續被研究。生態水質淨化系統(ecological water treatment system)是利用附生藻類生長於垂直的塑膠網, 吸收水中營養鹽, 再透過刮食性魚類將藻類移除, 由食物鏈觀念切入, 以進行水質淨化(Drenner *et al.*, 1997; Rectenwald and Drenner, 2000)。

另一種系統是藻床淨水系統(algal turf scrubber system), 史密森尼海洋系統實驗室(Smithsonian's Marine Systems Laboratory)過去曾利用該系統進

行多項生態試驗，應用於實驗室用水的品質控制 (Adey and Loveland, 1998)。此外，近幾年其他學者沿用同樣概念，應用於民生污水第三級處理或是畜牧業廢水進行研究，實驗結果顯示它較傳統之生態處理法更加有效率，同時刮除下來的藻類亦能作為良好的土壤營養劑 (Craggs *et al.* 1996; Wilkie and Mulbry, 2002)。

台灣地區水庫優養化狀況嚴重，治理措施除了對於集水區土地利用要嚴加管理外，仍須配合生態工程的整治以改善水質狀況，才能提供乾淨的飲用水與延長水庫使用年限。根據前人研究發現，藻床淨水系統的處理效能高於傳統植物淨化設計，例如翡翠水庫目前採用較常見的生態淨化工程包括草溝、人工溼地和人工浮島三種系統。本篇研究目的即應用溪流型附生藻類淨化水質的概念，調查翡翠水庫集水區溪流：金瓜寮溪中附生藻類對去除磷之最低極限濃度，以及應用於生態工程之可能性。

二、材料與方法

2.1 附生藻類生長箱

本研究主要參考藻床淨水系統 (Adey and Loveland, 1998; Kebede-Westhead *et al.*, 2003)，設置附生藻類生長箱，以進行室內實驗。藻床淨水系統主要由下列三項元素構成：堅固的硬體結構，提供藻類生長以及回收；持續性波浪運動，形成紊流場，以增加水體與藻類細胞間代謝物的交換；充足光源，提供附生藻類進行光合作用。另外依設置目的，決定刮食性生物的控制與否，避免低估營養鹽移除效率。

在上述的實驗設計中，採用聚乙烯網供藻類附著。此介質可在野外環境先讓藻類附著，之後再移植到室內進行試驗，本試驗採用較方便回收藻類的較大孔徑之網子，除較為耐用外，也較不會累積泥沙而有利於藻類生長。

2.2 藻類來源

本試驗選擇翡翠水庫上游支流之金瓜寮溪作為研究背景，藻類採樣地點在該溪流上游段 (317,325mE, 2752,592mN)。採樣點之水理、水質

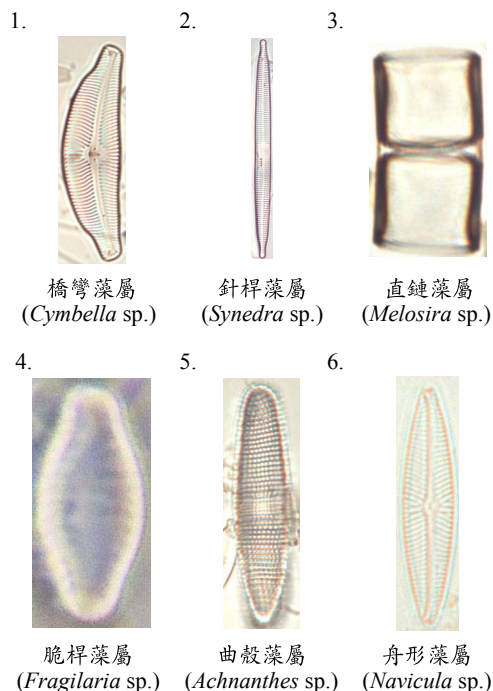


圖 1 於藻類生長箱中出現優勢矽藻之性態

於 2006 年 4 月 4 日進行之調查結果顯示，平均水深：17cm，平均流速：17cm/sec，平均酸鹼值：7.84，平均電導度：90.9 μ S/cm，平均水溫：21 $^{\circ}$ C，平均濁度：4.5NTU，平均硝酸氮濃度：0.4mg/L，平均正磷酸鹽濃度：7 μ g/L。利用聚乙烯塑膠網固定於底床石頭表面上，擺設地點盡量選擇光照充足，動態水流區域。經過 7 天置養後，將塑膠網及現場水樣取回，移至室內培養、馴化。現場帶回之金瓜寮溪附生藻類之物種透過顯微鏡進行辨認，多屬於矽藻門 (Bacillariophyta)。

2.3 實驗設計

為探討附生藻類在不同磷濃度下之淨化效果與極限，本試驗進行的時間從 2005 年 11 月 11 日至 12 月 7 日止，一共 26 天。根據四種磷供給量，三重複的原則下，依照完全隨機設計 (completely randomized design) 進行實驗擺設。完全隨機設計之條件為：試驗材料為同質且在相同環境下進行試驗、試驗材料性質不明、各處理隨機排列 (沈, 2004)。

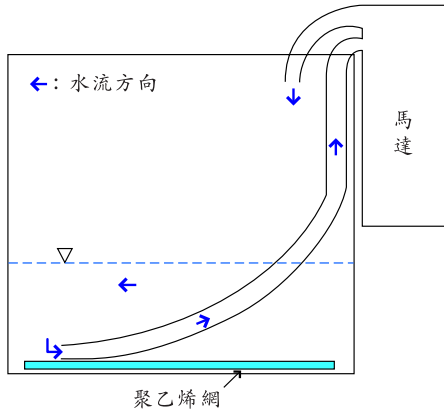


圖 2 藻類生長箱側視圖

單一附生藻類生長箱的組成包括：玻璃缸，24.7cm×15.5cm×23.6 cm；外掛式抽水馬達，流量 5.56~13.36 CMD；聚乙烯塑膠網，孔徑 2×2mm，面積 24.4cm×15.3 cm；36W 緊密型日光燈具，照度 462.96 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{-sec}$ (圖 2)。試驗時，以三個玻璃缸為一個單位放置於塑膠箱中，於外層塑膠箱中放入 10 公升水，隔水控溫，使各玻璃缸水溫一致，並方便測量溫度(圖 3)。光照時間透過時間控制器控制，每日照明時間固定為 12 小時(6:00~18:00)。最後以黑色塑膠布將試驗區隔離，降低外界干擾。

本試驗為半封閉狀態，營養鹽除了一開始給予外，試驗過程中不再添加任何養分。試驗水樣採自金瓜寮溪之溪流原水，經添加無水磷酸二氫鉀溶液，調整出四種不同的磷濃度水樣各 13 公升。正磷酸鹽濃度為 4、35、83、136 $\mu\text{g}/\text{L}$ ，總磷濃度為 27、70、112、168 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。為增加藻類繁殖效率，將馴養藻類自塑膠網上刮下，製成藻類濃縮液，各加 100 毫升於上述四種水樣。試驗開始時，於各生長箱放置全新塑膠網，並分別加入 4L 水樣，於靜置 24 小時後，之後用馬達控制水流於 5.56 CMD，試驗進行間維持流水狀態。

2.4 水質與藻類磷元素分析方法

試驗結束後，採用大型微藻回收法(macro-recovery) (Adey *et al.*, 1993)，將塑膠網取出，利用塑膠刷括除附著之藻類，再透過孔徑 1 毫米之

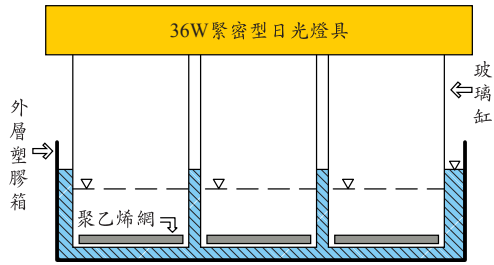


圖 3 藻類生長箱試驗組正視圖

濾網進行重力過濾後，將留於網上的附生藻類以蒸餾水稀釋定量至 50 毫升，取出其中 10 毫升作為藻種辨識使用。剩餘 40 毫升藻類送入烤箱中，以 70°C 烘乾取得乾重數據。之後以高溫爐加熱至 550°C，並維持該溫度 1.5 小時；隨後，取殘留之灰粉秤重，將灰化前之乾重量與灰粉重相減，即得有機物重量。藻類有機物之百分比則可由有機物重除以乾重求得之。計算單位面積生產量時，以各生長箱內藻類實際附著之聚乙烯網線面積 (0.017 平方公尺) 為運算依據。

藻類磷元素分析方法如下：將灰化之粉狀殘留物加入 50 毫升之 1.0N 鹽酸，以震盪機震盪 16 小時，以溶解出樣本中的磷。將上述溶液放入離心機，以 2000 rev/min 之轉速離心 5 分鐘。取出上層澄清液並依照水樣總磷分析方法進行分析 (Porrello *et al.*, 2003)。藻類含磷量則由上述分析結果換算成磷元素重量後，除以藻類乾重並以百分比表示。

水樣分析分別在試驗開始與結束進行，分析方法依照環保署環境檢驗所公告之水中磷檢測方法進行檢測。為求得各生長箱中磷的總量變化，各生長箱分別標定初始水位 4 公升，於每周利用蒸餾水補足蒸發散失的水量。最後取樣時亦先行調整水位後才採樣，以確保水量和濃度，據以作為計算各生長箱磷去除率之依據。

2.5 藻類組成分析

利用顯微鏡進行藻種鑑定和辨識。辨識用之定性片製作方式如下：取出適量藻類水樣，以離心機 3500 g 離心 8 分鐘，去除上層澄清液後，將樣本自下層之濃縮藻類中取出，移置於微量離心

表 1 不同磷供給量下，經過 26 天試驗，藻類生長箱中出現之藻種、出現頻度百分比(%)與群落種歧異度值(Shannon Index)

類別	種 名	四種磷供給量之藻種頻度百分比(%)			
		極低	低	中	高
藍綠藻	<i>Aphanothece</i> sp.	29.8	11.6	19.6	18.0
	<i>Dactylococcopsis</i> sp.			0.6	0.6
	<i>Microcystis</i> sp.				15.8
	<i>Myxosarcina gelatinosa</i> Emoto et Yoneda	10.5			
	<i>Scytonema</i> sp.	0.2			0.8
	<i>Symploca</i> sp.	39.3	4.4	3.4	3.3
	<i>Xenococcus acervatus</i> Setch. et Gard. v. <i>disperses</i> Emoto et Hirose	9.1	22.3		
矽藻	<i>Achnanthes minutissima</i> Kuetzing		0.7		0.8
	<i>Cymbella silesiaca</i> Bleisch		0.2		
	<i>Cymbella tumida</i> (Breb.) Van Heurck	0.2			
	<i>Cymbella turgidula</i> Grunow			0.1	
	<i>Fragilaria construens</i> (Ehr.) Grunow	1.8	0.2	0.1	
	<i>Melosira variance</i> C. A. Agardh	0.2			
	<i>Navicula impexa</i> Hustedt	4.5		51.8	12.4
	<i>Synedra ulna</i> (Nitz.) Ehrenberg		0.7	0.1	
綠藻	<i>Chaetophora</i> sp.	1.3	32.3	2.1	38.2
	<i>Gloeocystis</i> sp.		0.9	17.4	7.1
	<i>Oedogonium</i> sp.	0.2	25.1	4.3	1.9
	<i>Pediastrum duplex</i> v. <i>asperum</i> (A. Br.) Hansgirg.	2.9			
	<i>Pediastrum tetras</i> (Ehr.) Ralfs		0.9		0.8
	<i>Spirogyra</i> sp.		0.7	0.3	0.2
群落種歧異度值 (Shannon Index)		1.60	1.65	1.37	1.77

註：磷供給量之高低參見方法。實驗期間，水溫多維持於 20 至 25°C 之間。

管中，滴入一至二滴 GF-3 (甘油：福馬林=98：2)溶液，放入烘乾機中以 40°C 烘乾約兩到三天，直到水分完全蒸發。取少量混合藻類之 GF-3 溶液至載玻片上，均勻塗抹開，以封片膠封片製成永久玻片。在顯微鏡下隨機挑選約 200 隻藻類進行種類辨識，並紀錄各藻種出現之百分率頻度。根據 Shannon Index 計算群落種歧異度值如下列公式(1)：

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \times \ln(P_i) \dots\dots\dots(1)$$

式中 H 為 Shannon Index， P_i 為藻種出現頻度。各藻種所佔體積依照文獻中各藻種平均體積乘上其出現次數求得(胡等，1980; Hiroyuki and Takaaki, 1997)。

2.6 統計分析

本試驗中，試驗材料為同質，各處理隨機排列，符合完全隨機設計要求，實驗結果也依此進行統計分析。數據採用單項變方分析法(One-way ANOVA)，以鄧氏新多變域分析法(Duncan's new multiple range test)對於處理均值進行比較，顯著水準訂為 95%信賴區間，使用的軟體為 SAS 8.02 版。

三、結果與討論

3.1 附生藻類中藻類種類組成

本試驗中利用顯微鏡進行藻種辨識，所有學名如表 1 所列。本試驗中所辨識出的藻類以藍綠藻(Cyanobacteria)、矽藻(Bacillariophyta)及綠藻(Chlorophyta)三種藻門的藻類為主，其中優勢矽

表 2 不同磷供給量下，經過 26 天試驗，藻類生長箱中各藻門藻類體積百分比(%)

門名	磷供給量			
	極低	低	中	高
藍綠藻	15.2	0.0	0.1	1.7
矽藻	16.7	0.2	10.0	1.2
綠藻	68.0	99.8	89.9	97.1

註：磷供給量之高低參見方法。實驗期間，水溫多維持於 20 至 25°C 之間。

藻之性態如圖 1 所示。各處理組中，除了中等磷供給量的處理組外，其餘三組的群落歧異度 (Shannon Index) 值相差不大(表 1)。中等磷供給量處理組的群落歧異度值較低，主要係因矽藻 *Navicula impexa* Hustedt 的大量出現使然。

由於各藻種型態不一，雖然在紀錄上之細胞數相近，卻因為個體的體型從單細胞到管狀體都有，差異變化很大，在生長箱中所佔空間便出現顯著差別。若將各藻種依藻門歸類，以體積百分比做比較時，結果顯示除了極低磷供給量組外，其他三種磷供給組的綠藻體積都佔 90% 或以上，顯示該藻門在本次實驗中佔絕對優勢(表 2)。

本實驗在實驗室滋長的藻種組成與野外有明顯的不同。根據現場觀察，所有藻類都僅僅在石頭表面形成一層薄膜，而生長箱中則出現肉眼可見的細絲綠藻。在野外環境中，刮食性魚類、螺類和水生昆蟲覓食，使得附生藻類，如細絲綠藻等的生長量受到限制。根據前人實驗發現，附生藻類的有機質生產量在含有螺的渠道中約為不含螺之渠道的十分之一 (Mulholland *et al.*, 1994)，顯示螺明顯地影響附生藻類的生長。此外，在溫度方面，綠藻主要生長於夏季水溫較高的時期，而在 3~10°C 環境下，矽藻能有最佳的生長狀況 (Blum, 1956; Hynes, 1970)。本研究在金瓜寮溪進行藻種培養時係於秋天，加上該溪段屬於急流地區，水溫較低，相較於室內生長箱溫度多維持於 20°C-25°C，顯然實驗室之溫度環境比野外環境適合於綠藻的繁殖。另外，當細絲綠藻生長到一定密度後，便會對於底層產生遮蔽效應，降低光照與營養鹽的供給。綜合以上，可略知細

絲綠藻於本實驗中形成優勢物種的原因。

3.2 藻類生產量

添加磷於金瓜寮溪之水樣時，對藻類生長有促進作用，表 3 為四種磷供給量對藻類生產量的實驗結果。如表所示，乾重與有機物的平均生產量為 0.05~0.157 g/m²-day 及 0.02~0.1 g/m²-day，添加的磷量愈高，藻類乾重與有機物的平均生產量都顯著增高，極低磷供給量處理組與其他三組達 95% 的顯著差異；而低、中、高三種磷供給量間無明顯差異存在。Adey 等人 (1993) 曾在潔淨水體中以類似本研究之開放式藻類生長箱進行實驗，其結果顯示，藻類之乾重生產量隨著各種不同條件而變化，但生產量平均達 18.69 g/m²-day，此數值為本研究結果約 100 倍以上，因此，本研究之生長箱內的營養鹽利用應已達一定極限。

在本試驗中，有機物重量百分比為 41.83~71.27%，經單向變方分析顯示，其結果與前述的情形相似(表 3)。根據各藻門藻類體積百分比之數據顯示，極低磷供給組的綠藻體積比為最低，而矽藻所佔體積較大，因此，灰粉中有較多無法燃燒之矽殼留存其中。前人曾針對藻類氮含量進行分析，認為藻類蛋白質含量較少會導致有機質所佔重量百分比相對較低 (Wilkie and Mulbry, 2002)。本研究雖未對氮含量進行分析，然而上述現象亦可能存在於本研究之實驗組中，即在極低磷濃度供應組下，藻類所含蛋白質低於其他三種濃度。

3.3 藻類磷含量分析

在不同的磷供給量下，附生藻類所含磷的重量百分比經過統計分析顯示，四種磷供給試驗組之藻類磷含量均介於 0.07~0.08% (表 3)，未達 95% 的顯著差異程度，代表四個處理組間呈現一致的結果。前人對於藻類組成元素的分析發現，隨著溫度、流速、水體元素組成比例及營養鹽濃度、藻種組成等因子的改變，藻類之磷含量會有些差異。然而，當水環境中氮含量為磷的 50 倍以上，且溶解態反應磷 (soluble reactive phosphorus) 之濃度為 1.4 µg/L 時，藻類內的磷含量最低可到

表 3 利用單向變方分析，對於不同磷供給量下，26 天後藻類生物量之均值比較。處理均值以鄧氏新多變域分析法進行比較，顯著水準訂為 95%信賴區間。各試驗組之間是否達明顯差異由數值上標之英文字母判斷，不同字母代表試驗組間具有明顯差異，相同字母則代表試驗組間呈現相同結果。表中數據為平均值 ± 一個標準差

項目	磷供給量			
	極低	低	中	高
藻類乾重(g/m ² -day)	0.05±0.01 ^a	0.12±0.01 ^b	0.16±0.03 ^b	0.16±0.03 ^b
藻類有機物重(g/m ² -day)	0.02±0.01 ^a	0.08±0.01 ^b	0.11±0.02 ^b	0.11±0.03 ^b
藻類有機物百分比(%)	41.83±9.60 ^a	71.27±6.09 ^b	69.70±6.24 ^b	67.90±4.11 ^b
藻類含磷量(%)	0.08±0.01 ^a	0.08±0.00 ^a	0.07±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a

註：磷供給量之高低參見方法。實驗期間，水溫多維持於 20 至 25°C 之間。

0.06% (Stelzer and Lamberti, 2001)，此結果和本研究接近。

試驗末期，水中營養鹽的含量隨時間逐漸使用殆盡，在試驗結束時，所有附生藻類都處於缺乏養分的環境下，與上述前人研究結果類似。因此，四種磷濃度供給組的藻類含磷百分比無差異性存在，主要是受到營養鹽限制的半封閉條件所控制。

3.5 磷去除率

在經過 26 天的室內培養後，藻類對水中磷的去除效果極為顯著。由結果可知(圖 4)，在實驗末期，各生長箱之水中磷含量與初始所添加的磷量並無相關，不論初始添加的磷量高低，在末期各組之水中正磷酸鹽濃度均降至 2 μg/L 以下，而總磷濃度亦低於 10 μg/L。據此，水中正磷酸鹽的移除率在各組磷供給量下都接近 100%；在總磷方面，除了極低磷供給組外，其餘三者都在 92%以上。

附生藻類生物量多寡可直接影響水中磷的吸收量(Dodds, 2003)。如 3.2 節所述，極低磷供給組之藻類生物量明顯低於其他三種磷供給組。因此，其對懸浮微粒的過濾效果隨之降低，使得水中總磷的殘留量比較高。

正磷酸鹽為藻類可直接吸收的型態，添加後容易被藻類吸收利用，在實驗末期之濃度幾乎接近於零。另一方面，本試驗證實，各試驗組之總磷濃度可於培養後降低至 12μg/L 以下，此數值

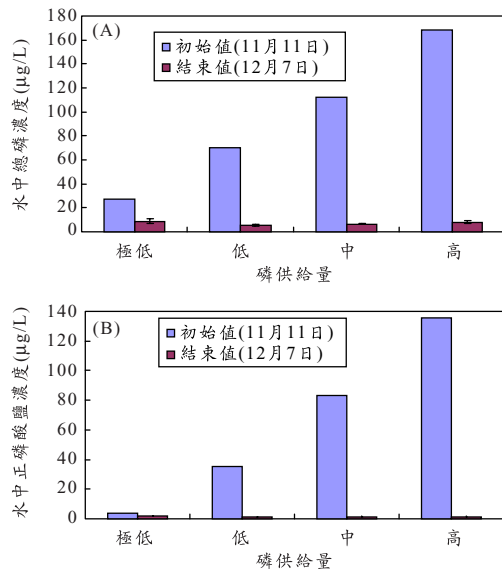


圖 4 不同磷供給量下，培養 26 天後水中(A)總磷濃度、(B)正磷酸鹽濃度變化。試驗為半封閉狀態，營養鹽除了一開始給予的水樣外，過程中不再添加任何養分。初始調配四種水樣再分別裝入重複試驗之藻類生長箱。表中磷濃度初始值為分析上述四種水樣，且未進行重複分析，故初始值無標準偏差值。磷供給量之高低參見方法。

註：磷供給量之高低參見方法。實驗期間，水溫多維持於 20 至 25°C 之間。

已符合 Carlson 優養化單一指數所判定之貧養水域範圍(Carlson, 1977)。因此，在本研究條件下，附生藻類可有效去除總磷，使水質達到貧養的效果。

四、結 論

根據本篇研究可以獲得以下結論：

1. 附生藻類可將水中正磷酸鹽完全去除，總磷的濃度亦可降低至貧養水域標準以下，顯示在營養鹽去除率有良好表現，可應用於水庫週邊生態工程，以改善或延緩水庫優養化現象的發生。
2. 在初始營養鹽過低的半封閉環境下，附生藻類生長狀況較差，對於營養鹽去除率反不如在較高營養鹽濃度之環境下。不過，在自然之溪流環境下，屬於開放的流動水域，縱然營養鹽濃度較低，但是因為藻類所需物質係持續不斷地提供，上述磷去除率較差的情況不太會發生在自然環境中。
3. 在實驗室半封閉環境下，當有足夠營養鹽提供時，各藻種間會彼此競爭，而由細絲型綠藻形成優勢。然而，不同磷濃度之添加組在最後都處於營養鹽受限的環境，所以總生物量雖有差異，但是各組之藻類磷含量並無明顯差異，顯示磷在所試驗之溪流中可能為限制營養鹽。水中磷的存在量會影響滋長的生物量，但是不會影響生物質量的磷含量。
4. 水庫優養化現象在國內多處水庫都發生，其關鍵營養鹽為磷。本研究經由附生藻類實驗證實它可在低磷濃度之環境下仍有很好的去除效果，此情形合乎國內許多集水區的情況，因而值得推薦。前人研究亦確認附生藻類對於一般民生、畜牧廢水等的淨化成效比傳統植物處理法好，且其土地面積需求較低，然而目前國內對於此方面的研究較不足，本研究之初步試驗結果，可提供作為國內生態工程一種新的思考方向。

參考文獻

1. 王騰崇，大鵬灣竹片上附生藻類生產力之時空變化，第二章，3-4 頁，國立中興大學植物學研究所碩士論文，2001。
2. 中華民國行政院環境保護署，環境水質監測年報-水庫水質篇，第一章，壹-2~5 頁，2004。
3. 沈明來，試驗設計學，第三版，第六章，91-103 頁，九州圖書文物有限公司，台北市，2004。
4. 胡鴻鈞、李堯英、魏印心、朱蕙忠、陳嘉佑、施之新，中國淡水藻類，1-525 頁，上海科學技術出版社，上海市，1981。
5. 鄭雅鈺，南仁山溪流著生性藻類物種組成、生長量與速率之研究，第一章，1-4 頁，國立高雄師範大學生物科學研究所碩士論文，2002。
6. Adey, W.H. and Loveland, K., Dynamic Aquaria: Building Living Ecosystems, 2nd ed, Chapter 11, pp.157-170, Academic press, San Diego, California, 1998.
7. Adey, W.H., Lockett, C., and Jensen, K., "Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production," *Restoration Ecology*, Vol.1, No.1, pp. 29-39, 1993.
8. Allan, J.D., Stream Ecology Structure and Function of Running Waters, Chapter 4, pp.84-99, Chapman & Hall, London, 1995.
9. Blum, J.L., "The ecology of river algae," *Botanical Review* Vol.22, pp.291-341, 1956.
10. Carlson, R.E., "A trophic state index for lakes," *Limnology and Oceanography*, Vol.22, No.2, pp.361-369, 1977.
11. Craggs, R.J., Adey, W.H., Jessup, B.K., and Oswald, W.J., "A controlled stream mesocosm for tertiary treatment of sewage," *Ecological Engineering*, Vol.6, pp. 149-169, 1996.
12. Dodds, W.K., "The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems," *Journal of Phycology*, Vol.39, pp.840-849, 2003
13. Drenner, R.W., Day, D.J., Basham, S.J., Smith, J.D., and Jensen, S.I., "Ecological Water Treatment System for Removal of Phosphorus and Nitrogen from Polluted Water," *Ecological Applications*, Vol.7, No.2, pp. 381-390, 1997.
14. Hiroyuki H., Takaaki Y., Illustrations of the Japanese fresh-water algae, pp.1-933, Uchida-

- Rokakuho, Tokyo, 1977.
15. Hynes, H.B.N., The Ecology of Running Waters, Chapter 4, pp.53-77, University of Toronto Press, Toronto, 1970.
 16. Kebede-Westhead, E., Pizarro, C., and Mulbry, W.W., "Production and nutrient removal by periphyton grown under different loading rates of anaerobically digested flushed dairy," *Journal of Phycology*, Vol.39, pp.1275-1282, 2003.
 17. Mulholland, P.J., Steinman, A.D., Marzolf, E.R., Hart, D.R., and DeAngelis, D.L., "Effect of periphyton biomass on hydraulic characteristics and nutrient cycling in streams," *Oecologia*, Vol.98, pp.40-47, 1994.
 18. Porrello, S., Lenzi, M., Tomassetti, P., Persia, E., Finioia, M.G., and Mercatali, I., "Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system II. Nitrogen and phosphorus content in macroalgae and sediment," *Aquaculture*, Vol.219, pp.531-544, 2003.
 19. Recteneald, L.L. and Drenner, R.W., "Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system," *Environmental Science Technology*, Vol.34, No.3, pp.522-526, 2000.
 20. Stelzer, R.S. and Lamberti, G. A., "Effects of N:P ratio and total nutrient concentration on stream periphyton community structure, biomass, and elemental," *Limnology and oceanography*, Vol.46, No.2, pp.356-367, 2001.
 21. Sze, P., A Biology of the Algae, 3rd ed. Chapter 8, pp.213-224, WCB/McGraw-Hill, Boston, 2000.
 22. Vymazal, J., "The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams," *Hydrobiologia*, Vol.166, No.3, pp.225-237, 1988.
 23. Wilkie, A.C. and Mulbry, W.W., "Recovery of dairy manure nutrients by benthic freshwater algae," *Bioresource Technology*, Vol.84, No.1, pp.81-91, 2002.

收稿日期：民國 95 年 5 月 15 日

修正日期：民國 95 年 7 月 21 日

接受日期：民國 95 年 7 月 25 日