

## 武陵地區溪流石附生藻類生產力及營養限制

葉峻銘<sup>1</sup>，林幸助<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>國立中興大學生命科學系；<sup>2</sup>通訊作者 E-mail: [hjlin@dragon.nchu.edu.tw](mailto:hjlin@dragon.nchu.edu.tw)

**[摘要]** 水中某種營養缺乏或過多時，常會使藻類生產力產生營養限制。本實驗利用新近發展微溶氧電極量測武陵地區溪流石附生藻類生產力，並探討是否受到營養限制。結果顯示，一、四月附生藻類生產力以七家灣溪中游的觀魚台及高山溪測站最高，分別為 0.22 及 0.14  $\mu\text{mol} [\text{O}_2] \text{mg}[\text{Chl } a]^{-1} \text{s}^{-1}$ ，附生藻類生產力最低則為受農業汙水嚴重影響之有勝溪測站及七家灣溪下游的繁殖場測站。七、十一月之附生藻類生產力以桃山西溪測站最高(0.27 及 0.23  $\mu\text{mol} [\text{O}_2] \text{mg}[\text{Chl } a]^{-1} \text{s}^{-1}$ )。藻類群集組成以藍綠菌為優勢，相對豐度平均佔 58%。本研究揭示單靠水中氮磷莫耳比(N:P ratio)，並無法推測藻類是否有營養限制情形；而且藻種組成與營養限制的發生有密切相關，氮限制易發生於絲狀藍綠菌相對豐度較高的測站。台灣櫻花鉤吻鮭棲息的七家灣溪，石附生藻類仍處於氮限制狀況，因此應致力於控制農業肥料與人為汙水的輸入，以避免藻華，水質惡化。

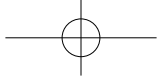
**關鍵字：**氮、藍綠菌、微溶氧電極、台灣櫻花鉤吻鮭、農業肥料

## Productivity and Nutrient Limitation of Epilithic Algae in Wuling Streams

Chung-Ming Yeh<sup>1</sup> and Hsing-Juh Lin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Life Sciences, National Chung Hsing University; <sup>2</sup>Corresponding author E-mail: [hjlin@dragon.nchu.edu.tw](mailto:hjlin@dragon.nchu.edu.tw)

**ABSTRACT** Absence or redundancy of a certain nutrient in the water often limits the productivity of epilithic algae. In this study, productivity of epilithic algae was measured by a recently developed microelectrode, and the nutrient limitation in Wuling streams was also examined. The highest productivity occurred at the Fish Observation Deck in the midstream of Cijiawan Stream and Kaoshan Stream in January and April, reaching 0.22 and 0.14  $\mu\text{mol} [\text{O}_2] \text{mg}[\text{Chl } a]^{-1} \text{s}^{-1}$ , respectively. The lowest productivity was observed in Yusheng Stream, which was seriously polluted by agriculture wastewater, and at the Reproduction Field in the downstream of Cijiawan Stream. In July and November, the highest productivity was observed in Taoshan West Stream (0.27 and 0.23  $\mu\text{mol} [\text{O}_2] \text{mg}[\text{Chl } a]^{-1} \text{s}^{-1}$ ). Cyanobacteria was the dominant algal community, comprising 58% of the total abundance. Our results suggest that algal nutrient limitation couldn't be simply predicted by nitrogen: phosphorus (N:P) molar ratio in the water. Occurrence of nutrient limitation was influenced by algal community composition. N limitation occurred at the site dominated by filamentous cyanobacteria. In conclusion, the growth of epilithic algae was mainly N limited in Cijiawan Stream, which is the only habitat of *Oncorhynchus masou formosanus*. Therefore, inputs of fertilizers and sewage pollutant should be monitored and prohibited in order to maintain water quality and



avoid algal bloom, which may lead to deterioration of the stream water.

**Keywords:** nitrogen, cyanobacteria, microelectrode, *Oncorhynchus masou formosanus*, fertilizer

## 前言

附生藻類是溪流生態系統中主要的初級生產者(Hansson 1992)，供水棲昆蟲攝食(Lamberti *et al.* 1989)，而水棲昆蟲也是台灣櫻花鉤吻鮭(*Oncorhynchus masou formosanus*)重要的食物來源(楊 2008)。附生藻類的生長與群集組成，受到許多環境因子影響，如水溫(Phinney and McIntire 1965)、光(Lowe *et al.* 1986, Lange *et al.* 2011)、營養鹽(Peterson *et al.* 1983, Stelzer and Lamberti 2001)、水棲昆蟲(Rosemond 1993)、流速(Wellnitz and Poff 2006)等。而在武陵地區仍有農業活動的進行，使得肥料輸入的營養對於附生藻類的影響更需重視。營養為附生藻類生長所需(Borchardt 1996)，包含氮(N)、磷(P)及矽藻所需的矽(Si)，但過多的營養輸入也會改變溪流生態系統的結構與功能(Tilman *et al.* 2001)。

當水中相對缺乏藻類生長所需營養物質時，使藻類的生產力受到限制，即為藻類的營養限制(Nutrient limitation) (Dodds *et al.* 2002)；限制附生藻類生長的營養包括碳(C)、N、P，而在一些低濃度矽酸鹽的湖泊中則為Si，但前人研究中最常被討論的還是N限制與P限制。Redfield (1958) 對海洋浮游藻類的研究發現，藻類細胞內 C:N:P 的莫耳比值(Redfield molar ratio)達到 106:16:1 時(以細胞碳量為基準)，藻類會達到最大代謝速率。若是其中一種營養未達此比例，則會成為藻類的限制營養。當水中 N:P 莫耳比大於 20 時，即有可能出現 P 限制，若水中 N:P 莫耳比小於 10，則可能產生 N 限制(Borchardt 1996)。

溪流附生藻類營養限制的研究結果，部分符合水中 Redfield Ratio 的推測(Pringle *et al.* 1986)。然而，有研究針對水中 Redfield Ratio 與營養限制情形進行探討，發現附生藻類的營養限制不一定受水中 N:P 莫耳比影響

(Luttenton and Lowe 2006)。Tank and Dodds (2003)認為附生藻類的營養限制可能與其複雜的群集組成有關。由以上可知，溪流附生藻類營養限制與水中營養鹽含量及 N:P 莫耳比有密切關係，但較少有研究著墨在藻類群集組成與營養限制的發生。瞭解溪流的附生藻類受何種營養限制，可致力於限制此類營養的輸入，避免產生藻華而影響水質。

本研究利用新近發展的微溶氧電極(microelectrode)來量測附生藻類的生產力。微溶氧電極為尖端直徑 90-100  $\mu\text{m}$  的微電極，可偵測到微量的溶氧變化( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )。而微溶氧電極則可於短時間內直接偵測到附生藻類受營養刺激後，氧氣產生速率的改變。文獻中多以附生藻類生物量變化來探討營養限制(Tank and Dodds 2003, Ludwig *et al.* 2008)，但此類研究較容易受到水棲昆蟲或是流速的干擾。近年來則有研究利用藻類產生氧氣速率來作為初級生產力指標(McMinn and Ashworth 1998, Larkum *et al.* 2003)，因此本研究目的是利用微溶氧電極探討：1. 七家灣溪石附生藻生產力的時空變化；2. 石附生藻類是否有營養限制？3. 藻類組成是否影響營養限制的發生？

## 材料與方法

### 一、棲地描述

武陵地區海拔約一千八百公尺，年均溫約 15°C。桃山西溪(#2)、高山溪(#8)是人為活動干擾較少的測站；觀魚台測站(#4)則受到七家灣溪中游沿岸農業活動輸入高營養鹽汗水的影響(官等 2010)，繁殖場測站(#5)位於高山溪與七家灣溪匯流口，營養鹽濃度受到高山溪稀釋而低於觀魚台測站。有勝溪測站(#9)因上游有密集的農業活動，使水中營養鹽含量高，是受人為干擾頻繁及優養化嚴重的溪流(Yu and Lin 2009)。

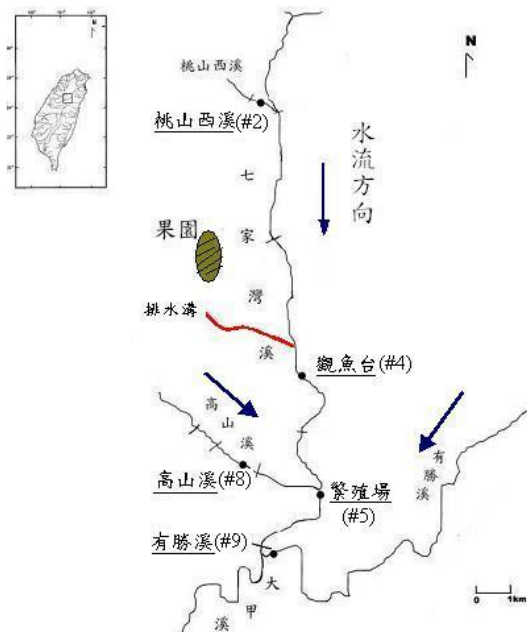
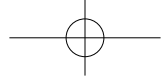


圖 1. 七家灣溪各測站位置圖

## 二、實驗時間與地點

本研究於 2010 年一、二(冬)、四(春)、七(夏)及十一(秋)月在武陵地區七家灣流域進行實驗。採樣地點分別設置於桃山西溪(#2)、觀魚台(#4)、高山溪(#8)、繁殖場(#5)及有勝溪(#9)的瀨區(圖 1)。二月僅於觀魚台(#4)及高山溪(#8)進行採樣。十一月採樣於颱風干擾後第三個禮拜進行，期間仍陸續有降雨情形。

環境因子測量進行三重複測量，以流速計(Flowtracker Handheld ADV, Sontek/YSI, USA)測量石頭所在位置的流速及水深。以綜合水質儀(600XLM, YSI, USA)測量水溫、pH、水中導電度及水中溶氧濃度。以濁度計(2020e TURBIDIMETER, LaMotte, USA)測量水中濁度。利用球面樹冠覆蓋密度計(Spherical Densimeter Model-A, CSP, USA)於採樣溪段中央，面對上下游及左右兩岸，測量樹冠所佔球面樹冠覆蓋密度計的百分比，即為覆蓋度。水中營養鹽則以不透光褐色瓶採溪水後，保存於-20°C 冰箱中攜回實驗室分析。

## 三、營養限制實驗

於測站隨機採集 12 顆長有附生藻類的石頭(直徑約 10-30 cm)及 70 公升溪水，將此石

頭放在加入溪水的夾鏈袋中，並隨即返回室內進行營養鹽添加實驗。實驗分為控制組及分別添加 N 及 P 的兩個實驗組，各三重複。實驗進行利用長寬高分別為 25 cm×20 cm×14 cm 的壓克力水缸，注入 5 公升的溪水，再將石頭連同附生藻類放置於水缸中，並測量水溫。以複金屬燈(Metal Halide Lamps 1500 W, VENTURE, USA)照射附生藻類，啟動光合作用，將附生藻類所受光度控制在 750~850  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。分別於營養鹽添加前及後五分鐘時，測量一次附生藻類的氧氣產生量(即附生藻類生產量)，以檢視營養鹽添加前後是否有顯著提升，來判斷營養限制情形。測量時間是由先驅實驗所決定。因為先驅實驗中發現若附生藻類有營養限制，則添加氮或磷鹽後約兩分鐘，附生藻類氧氣產生量即有提升。此外，微溶氧電極測量的方法，是以測量附生藻類氧氣擴散邊界層的濃度變化梯度去計算，而擴散邊界層的產生到穩定的時間，會受到生物量的影響，也就是生物量越高，形成時間越長。武陵地區附生藻類擴散邊界層形成時間約三分鐘，因此本實驗以五分鐘為測量時間。

附生藻類生產量除以單位面積的葉綠素  $a$ (Chl  $a$ )濃度標準化後，即可得附生藻類生產力。附生藻類氧氣產生量藉由微溶氧電極(OX-100, UNISENSE, DENMARK)，量測附生藻擴散邊界層(Diffusing Boundary Layer, DBL)溶氧濃度變化來計算。並根據 Jørgensen and Revsbech (1985)的方法，以下列公式計算出附生藻類的氧氣產生量：

$$J = D \times \Delta[\text{O}_2] / Z_0$$

其中 J 為氧氣產生量( $\mu\text{mol} [\text{O}_2] \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )。D 為水中氧氣擴散常數( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )。 $\Delta[\text{O}_2]$ 為擴散邊界層中底層至表面氧氣濃度的變化量( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )。Z<sub>0</sub>為擴散邊界層厚度( $\mu\text{m}$ )。

## 四、樣本分析

附生藻類生物量以 Chl  $a$  濃度表示。將進行完營養鹽添加實驗的石頭，用牙刷刮取定面積的附生藻後，根據 Parsons *et al.* (1984)的方

表 1. 各測站於一(Jan.)、二(Feb.)、四(Apr.)、七(Jul.)及十一月(Nov.)各項環境因子資料

月份	測站	水溫(°C)	導電度(μS/cm)	流速(m/s)	覆蓋度(%)	DIN(mg/L)	DIP(mg/L)	N/P
Jan.	#2	8.04±0.00	186.00±0.00	0.40±0.18	48.7	0.71±0.03	0.02±0.00	45.13±11.03
	#4	8.04±0.00	262.00±0.00	0.41±0.06	14.1	2.76±0.23	0.02±0.00	137.94±3.12
	#8	5.46±0.01	222.33±0.33	0.49±0.10	77.5	0.44±0.07	0.02±0.00	27.60±4.54
	#5	10.11±0.00	249.00±0.58	0.87±0.23	38.8	1.67±0.20	0.02±0.00	66.14±8.17
	#9	11.24±0.00	333.00±0.00	0.52±0.11	39.8	4.62±0.48	0.01±0.00	444.34±71.09
Feb.	#4	9.73±0.01	255.00±0.58	0.28±0.10	12.8	2.33±0.02	0.03±0.00	89.50±5.36
	#8	8.25±0.01	224.00±0.58	0.26±0.06	78.1	0.54±0.08	0.03±0.00	20.01±4.70
Apr.	#2	10.32±0.03	190.00±0.00	0.70±0.29	48.4	0.59±0.16	0.01±0.00	56.06±18.85
	#4	11.86±0.00	236.67±0.33	0.29±0.09	16.7	1.74±0.37	0.02±0.00	81.26±33.31
	#8	11.61±0.00	243.67±0.33	0.60±0.06	73.7	0.90±0.05	0.03±0.00	33.67±0.39
	#5	12.23±0.00	246.33±0.33	0.77±0.18	42.7	1.36±0.05	0.03±0.00	55.34±2.87
	#9	14.40±0.00	391.67±0.33	0.48±0.24	50.3	6.43±1.02	0.01±0.00	933.97±296.38
Jul.	#2	13.67±0.00	213.00±1.00	0.83±0.14	51.3	0.56±0.05	0.01±0.00	45.15±3.49
	#4	14.21±0.00	281.67±0.33	0.66±0.06	14.1	2.47±0.05	0.01±0.00	168.60±8.91
	#8	14.00±0.00	243.33±0.33	0.66±0.07	91.2	0.74±0.04	0.01±0.00	63.74±3.56
	#5	14.53±0.00	237.00±0.58	0.63±0.11	39.8	1.73±0.03	0.02±0.00	93.36±5.66
	#9	15.67±0.00	373.33±0.33	0.50±0.15	50.3	5.90±0.50	0.01±0.00	469.77±46.47
Nov.	#2	11.20±0.00	167.7±0.30	0.73±0.06	51.8	0.66±0.25	0.01±0.00	46.04±19.93
	#4	12.50±0.00	241.00±0.00	0.67±0.14	12.8	1.93±0.51	0.02±0.00	86.60±23.89
	#8	11.40±0.00	195.33±0.03	0.72±0.09	81.0	0.77±0.09	0.02±0.00	33.56±5.12
	#5	10.20±0.00	216.00±0.00	0.66±0.15	33.3	1.70±0.04	0.03±0.00	62.67±2.10
	#9	9.90±0.00	263.00±0.00	0.41±0.05	46.1	6.05±0.11	0.01±0.00	515.82±25.03

數值以 Mean±SE 表示(n=3)；桃山西溪(#2)、觀魚台(#4)、繁殖場(#5)、高山溪(#8)、有勝溪(#9)；DIN 表示溶解性無機氮(Dissolved inorganic nitrogen)，DIP 表示溶解性無機磷(Dissolved inorganic phosphate)，N/P 表示溶解性氮磷濃度比值

液萃取 Chl *a*。剩餘藻液添加 10% 的福馬林保存，進行藻種組成分析，藉由生物體積估算藻種組成的相對豐度。每片藻玻片計數三百個藻細胞，每樣點兩重複(Oemke and Burton 1986)。藻類則以形態區分為四大類，分別為絲狀綠藻(Filamentous chlorophytes)、矽藻(Diatoms)、絲狀藍綠菌(Filamentous cyanobacteria)及球狀藍綠菌(Coccoid cyanobacteria)，藻種分類主要參考 Cox(1996)、于(2008)及蘇(2009)。

實驗組分別添加硝酸鈉(NaNO<sub>3</sub>)作為氮鹽(N)，添加磷酸二氫鉀(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)作磷酸鹽(P)，添加濃度及添加量為 N: 6.6 g L<sup>-1</sup>，5 mL 及 P: 32 mg L<sup>-1</sup>，5 mL。有勝溪測站水中營養鹽含量高於其他測站許多，在添加實驗中營養鹽濃度則比其他測站高，分別添加 N: 17.8 g L<sup>-1</sup>，5 mL 及 P: 56 mg L<sup>-1</sup>，5 mL。添加營養鹽後，目標水缸內營養鹽濃度提升至 N: 6.6 mg L<sup>-1</sup>，P: 0.032 mg L<sup>-1</sup>，有勝溪測站水缸內營養鹽濃度則提升至 N: 17.8 mg L<sup>-1</sup>，P: 0.056 mg L<sup>-1</sup>。

水中溶解性無機氮(Dissolved inorganic nitrogen, DIN)為 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度總和，濃度的測量以離子層析儀(Ions Chromatography, Dionex, USA)進行分析。水中溶解態無機磷(Dissolved inorganic phosphorus, DIP)分析方法使用抗壞血酸磷鉬比色法(Murphy and Riley 1962)，以分光光度計(U2001, HITACHI, JAPAN)於波長 880 nm 測定 PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> 濃度。

## 五、統計分析

生物因子於測站(n=5)及季節(n=5)間差異以 Two-way ANOVA 進行雙向變方分析，使用 SAS (ver. 9.1)軟體分析。於資料分析前檢驗各變數是否屬於常態分佈，不屬於常態分佈則將資料進行轉換(Clarke and Warwick 2001)。

附生藻類生產力在添加營養鹽前後是否有顯著差異，以 Paired *t*-test 進行分析。生物因子及藻類相對豐度與環境因子的相關分析則利用皮爾森相關分析(Pearson correlation)，使用 SPSS 12.0 統計軟體進行分析。

## 結果

### 一、環境因子

各測站環境因子資料如表 1，水溫結果呈現夏季(13.67-15.67°C)高於冬季(5.46-11.24°C)。流速較快的測站為#2 與#5 測站(0.40-0.87 m s<sup>-1</sup>)。受農業汙水嚴重影響的#9 測站，水中 DIN 濃度為各測站最高(4.62-6.43 mg L<sup>-1</sup>)，受沿岸農業活動影響的#4 測站水中 DIN 濃度則次之(1.74-2.76 mg L<sup>-1</sup>)，人為活動影響較少的#2 及#8 測站，水中 DIN 濃度則較低(0.56-0.71 mg L<sup>-1</sup> 及 0.44-0.9 mg L<sup>-1</sup>)。七家灣溪各測站水中 DIP 濃度不高，介於 0.007-0.03 mg L<sup>-1</sup>。各測站水中 N:P 莫耳比皆高於 20，#9 測站水中 N:P 莫耳比可達到 400 以上。

表 2. 附生藻 Chl *a* 濃度及生產力與季節及測站雙向變方分析結果

	Chl <i>a</i>			生產力				
	變數	自由度	均方	F 值	p 值	自由度	均方	F 值
測站	4	1.689	16.90	<0.0001	4	0.901	17.50	<0.0001
季節	4	0.789	7.90	<0.0001	4	0.462	8.96	<0.0001
交互作用	13	0.170	17.00	0.086	13	0.213	414.00	0.0001

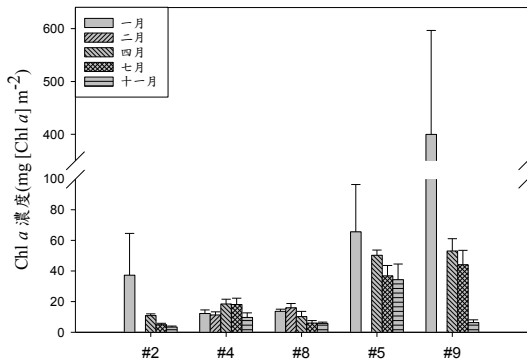


圖 2. 各測站不同月份附生藻類 Chl *a* 濃度，以 mean±SE 表示(n=3)，橫軸為各測站代號

### 二、附生藻 Chl *a* 濃度

附生藻類 Chl *a* 濃度於測站( $p < 0.0001$ )與季節( $p < 0.0001$ )間有顯著差異(表 2)。受農業汙水影響的#9 測站，附生藻類 Chl *a* 濃度高於

其他測站(圖 2)，一月之#9 測站附生藻 Chl *a* 濃度高達 400 mg [chl *a*] m<sup>-2</sup>。人為干擾少的#8 與#2 測站年平均附生藻類 Chl *a* 濃度較低，分別為 10.33 及 14.09 mg [chl *a*] m<sup>-2</sup>。除#4 測站外，附生藻類 Chl *a* 濃度於冬季較高，十一月採樣因陸續有降雨情形，各測站附生藻類 Chl *a* 濃度降至最低，平均 Chl *a* 濃度僅 11.89 mg [chl *a*] m<sup>-2</sup>。而附生藻類 Chl *a* 濃度與水中 DIN 濃度( $p = 0.002$ )及水中 N:P 莫耳比( $p = 0.006$ )有顯著正相關(表 3)，顯示附生藻 Chl *a* 濃度隨水中 DIN 濃度增加而提升。

表 3. 生物因子與環境因子相關分析結果(n=75)

	附生藻 Chl <i>a</i> 濃度		附生藻生產力	
	r	p value	r	p value
水溫	0.007	n.s.	0.125	n.s.
覆蓋度	-0.057	n.s.	-0.117	n.s.
流速	-0.039	n.s.	0.169	n.s.
DIN	0.356	0.002**	-0.212	n.s.
DIP	0.065	n.s.	0.011	n.s.
N:P Ratio	0.348	0.006*	-0.236	n.s.

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s.= none-significant.

### 三、附生藻類生產力

附生藻類生產力於測站及季節間有顯著交互作用( $p = 0.0001$ ，表 2)。七及十一月#2 測站附生藻類生產力為各測站最高(圖 3)，分別

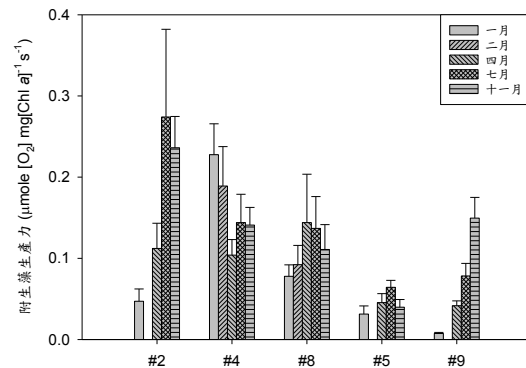


圖 3. 各測站不同月份附生藻生產力，以 mean±SE 表示(n=3)，橫軸為各測站代號

達 0.27 及 0.24 μmole [O<sub>2</sub>] mg[Chl *a*]<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>。#4 測站附生藻類生產力於一月為各測站最高，達 0.22 μmole [O<sub>2</sub>] mg[Chl *a*]<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>。#9 及#5 測站為附生藻生產力較低的兩測站，平均附生藻類

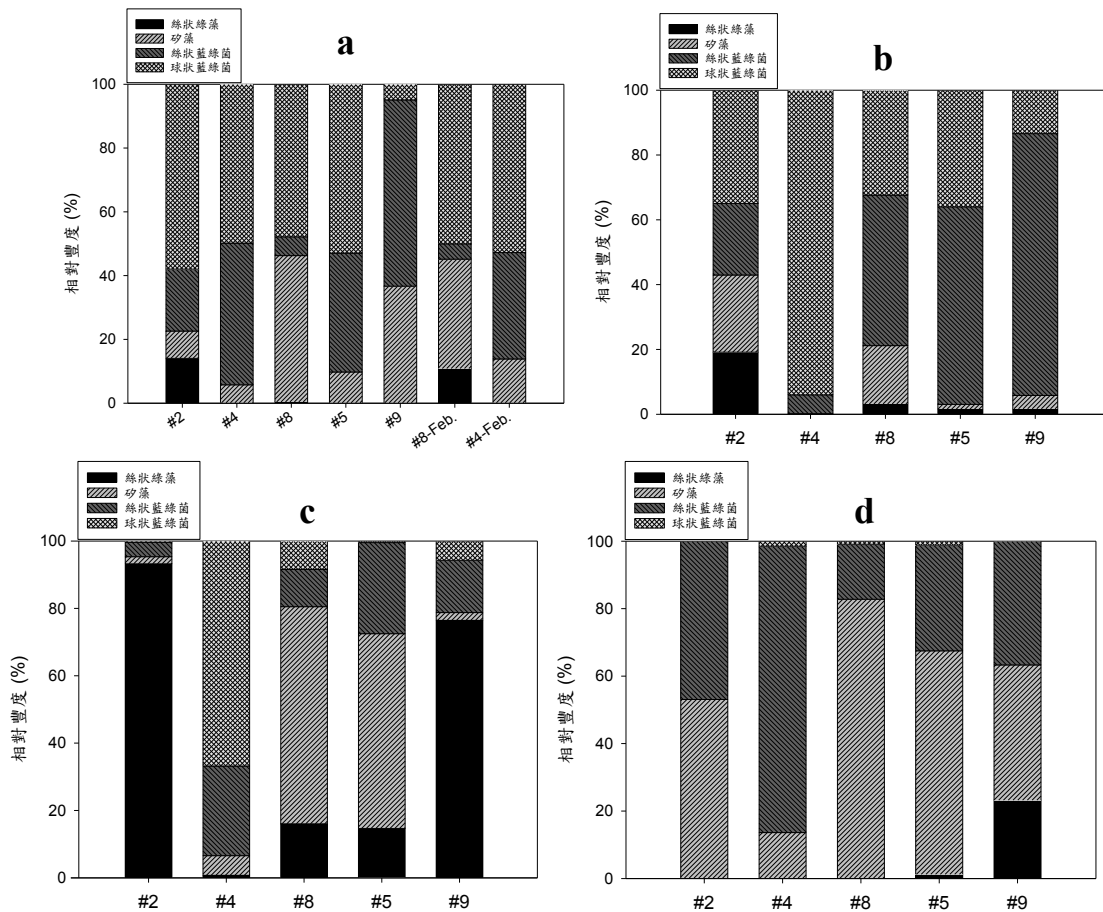


圖 4. 各測站不同月份附生藻群集組成結果；(a) 一、二月 (b) 四月 (c) 七月 (d) 十一月；橫軸為各測站代號

表 4. 藻類群集組成與環境因子相關分析結果

	絲狀綠藻		矽藻		球狀藍綠菌		絲狀藍綠菌	
	相關係數	p 值	相關係數	p 值	相關係數	p 值	相關係數	p 值
水溫 (°C)	0.174	n.s.	0.025	n.s.	-0.307	0.030*	0.100	n.s.
導電度 (μS/cm)	0.133	n.s.	-0.303	0.032*	-0.107	n.s.	0.276	n.s.
覆蓋度 (%)	0.093	n.s.	0.450	0.001**	-0.323	0.022*	-0.233	n.s.
流速 (m/s)	-0.027	n.s.	0.267	n.s.	-0.285	0.045*	0.066	n.s.
DIN (mg/L)	0.063	n.s.	-0.200	n.s.	-0.192	n.s.	0.347	0.014*
DIP (mg/L)	-0.153	n.s.	0.118	n.s.	0.187	n.s.	-0.144	n.s.

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s.= none-significant.

生產力分別為 0.04 及 0.03  $\mu\text{mole} [\text{O}_2] \text{mg}[\text{Chl } a]^{-1} \text{s}^{-1}$ ，除#4 測站外附生藻類生產力季節變化呈現冬季較低的趨勢，#4 測站則於冬季有較高附生藻類生產力。相關分析結果顯示(表 3)，附生藻類生產力與環境因子並沒有顯著的相關性。

#### 四、藻種組成

七家灣溪各測站附生藻類群集組成以藍綠菌為優勢(圖 4)，主要以絲狀藍綠菌的顫藻 (*Oscillatoria* spp.)及球狀藍綠菌的 *Chroococcus* spp.兩屬的藍綠菌組成，平均佔相對豐度 58%。絲狀藍綠菌相對豐度與水中 DIN 濃度有顯著正相關( $p=0.014$ , 表 4)。球狀藍綠菌相

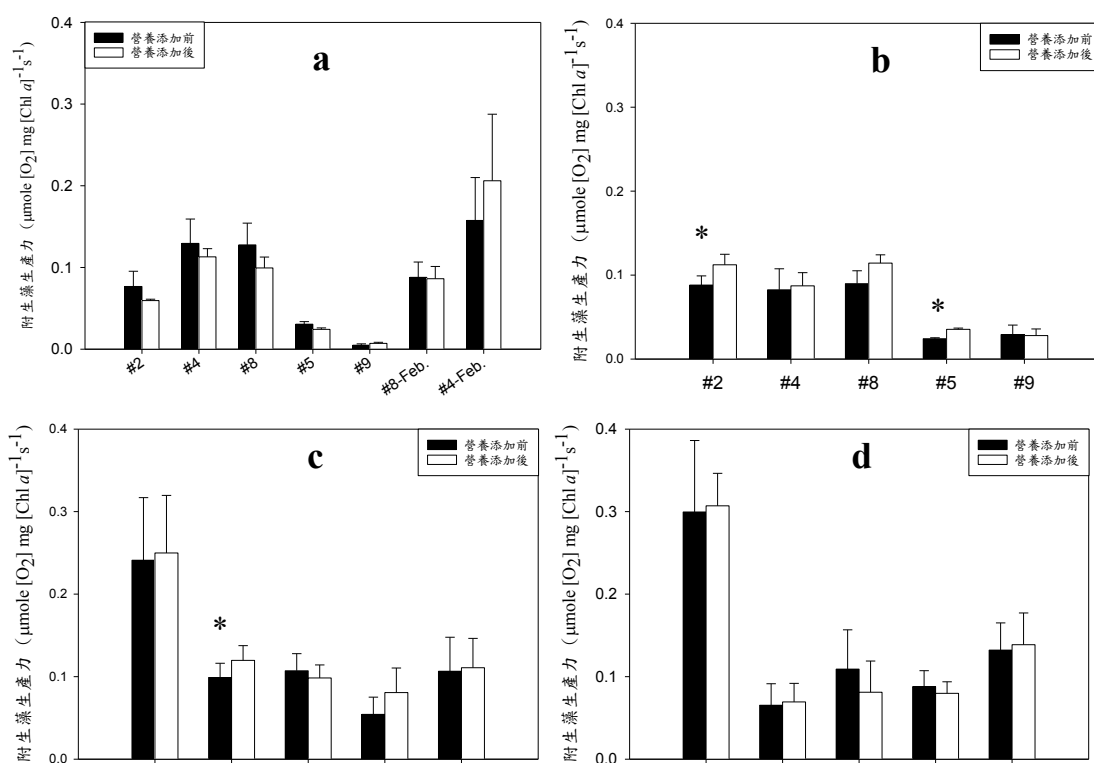


圖 5. 各月份不同測站氮鹽添加前後附生藻生產力變化；以  $\text{mean} \pm \text{SE}$  表示 ( $n=3$ ) 橫軸為各測站代號 (a) 一、二月 (b) 四月 (c) 七月 (d) 十一月 ■: 未添加營養鹽 □: 添加營養鹽後五分鐘；(Paired  $t$ -test, \*  $p < 0.05$  達顯著水準)

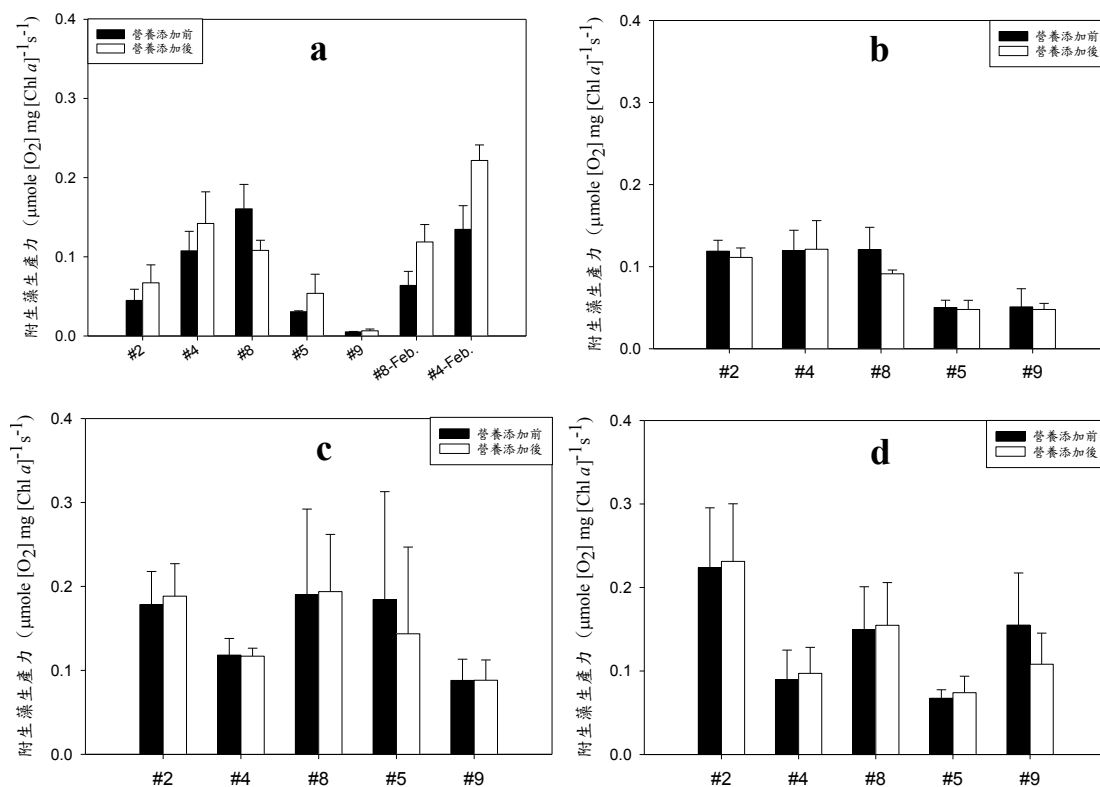
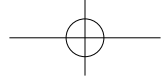


圖 6. 各月份不同測站磷酸鹽添加前後附生藻生產力變化；以  $\text{mean} \pm \text{SE}$  表示 ( $n=3$ ) 橫軸為各測站代號 (a) 一、二月 (b) 四月 (c) 七月 (d) 十一月 ■: 未添加營養鹽 □: 添加營養鹽後五分鐘



葉峻銘，林幸助

對豐度則與水溫( $p=0.03$ )、流速( $p=0.045$ )及覆蓋度( $p=0.022$ )有顯著負相關。絲狀綠藻主要以剛毛藻(*Cladophora* spp.)組成，夏季(七月)絲狀綠藻則大量生長在#2 與#9 測站(圖 4c)，所佔相對豐度分別為 93%及 76%。矽藻則於#8 測站有較高的相對豐度(圖 4)，而矽藻相對豐度與覆蓋度有顯著正相關( $p=0.001$ )，與水中導電度有顯著負相關( $p=0.032$ ，表 4)，十一月之附生藻類群集組成以絲狀藍綠菌與矽藻為主(圖 4d)。

### 五、附生藻的營養限制

營養鹽添加實驗結果顯示(圖 5)，N 限制發生於四月#2 及#5 測站( $p=0.024$  及  $p=0.014$ )，七月#4 測站( $p=0.04$ )，但是各測站並未有 P 限制情形出現(圖 6)。因此，七家灣溪石附生藻類以 N 限制為主，常發生於春季與夏季，主要在#2、#4 及#5 測站。此外，受農業汙水嚴重影響的#9 測站，則於實驗中皆未出現任何營養限制情形。

## 討論

### 一、七家灣河流域優養化程度

若依 Dodds *et al.* (1998)以營養鹽濃度區分溪流優養化程度，當水體總氮(TN)濃度大於  $0.7 \text{ mg L}^{-1}$  為中度優養化，TN 濃度大於  $1.5 \text{ mg L}^{-1}$  則為重度優養化。雖然本實驗營養鹽分析以 DIN 呈現，並未分析總氮(TN)，但#9 夏季 DIN 濃度即高達  $5.9 \text{ mg L}^{-1}$ (表 1)，屬於優養化嚴重的溪流。桃山西溪(#2)及高山溪(#8)測站 DIN 濃度大約  $0.44\text{-}0.90 \text{ mg L}^{-1}$ 之間，則大致屬於寡養的溪流。而各測站中磷酸鹽含量並不多，大部分測站 DIP 濃度皆低於  $0.025 \text{ mg L}^{-1}$ (表 1)，推測水體總磷濃度(TP)應屬寡養水質。

### 二、附生藻類 Chl *a* 濃度與生產力

本研究結果顯示，各測站附生藻類 Chl *a* 濃度大致呈現冬天高，夏、秋較低(圖 2)。在

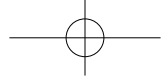
穩定的溪流環境中，附生藻類生物量大多在春季或夏末時達到最大量(Biggs 1996)。各測站流速於夏季時皆可達到  $0.60\text{-}0.83 \text{ m s}^{-1}$ (表 1)，而武陵地區溪流流速大於  $0.70 \text{ m s}^{-1}$ 時，則會影響附生藻類的生物量(林等 2009)。而十一月採樣則是受到颱風帶來大量降雨的影響，使各測站附生藻類 Chl *a* 濃度大量減少(圖 2)。#9 測站附生藻類 Chl *a* 濃度平均則為各測站最高(圖 2)，濱岸的農業活動排入大量農業肥料使附生藻類大量增生，許多溪流附生藻類大量增生皆由農業活動(Kemp and Dodds 2001)或人為汙水(Chambers *et al.* 2000)導致。

前人研究指出水溫增加使附生藻類生產力提升(DeNicola 1996)，本實驗之附生藻類生產力雖與水溫沒有顯著相關性，但除#4 測站外，附生藻生產力大致呈現冬季較低的趨勢(圖 3)。附生藻類生產力主要受到附生藻類生物量的影響，#5 及#9 測站為平均附生藻類生產力最低的兩個測站，而兩測站有大量的平均附生藻類 Chl *a* 濃度(圖 2)，使附生藻類僅有表層得以接受到足夠光源行光合作用，而下層附生藻類則無法接受到充足光源，因而降低單位生物量之附生藻類生產力，此即為藻類的自我遮蔽(Self-shading)效應(Hill and Boston 1991)。

### 三、附生藻類群集組成

本實驗溪流石附生藻類組成以藍綠菌為優勢(圖 4)。但 Downing *et al.* (2001)認為藍綠菌的生物量主要受到水中 TN 及 TP 的濃度所影響。本實驗中，藍綠菌的優勢可能受到營養鹽濃度增加所致，因相較于(2008)在 2003-2004 年在七家灣河流域所進行實驗發現，附生藻群集組成中矽藻佔附生藻類總數量 85%以上，而當時七家灣溪水中  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  濃度平均僅有  $0.7 \text{ mg L}^{-1}$ ；而本實驗中#4 及#5 測站即使在水中 DIN 濃度最低的四月，水中  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  濃度平均分別達  $1.74$  及  $1.36 \text{ mg L}^{-1}$ (表 1)，高於 2003-2004 年之濃度。且相關分析結果顯示絲狀藍綠菌與水中 DIN 濃度有顯





著的正相關(表 4)，推測七家灣溪附生藻類群集組成轉以藍綠菌為優勢可能受到水中 DIN 增加所致。

#### 四、營養限制

營養限制實驗結果顯示，附生藻類 N 限制主要發生於#2、#4 及#5 測站(圖 5)。若以水中 N:P 莫耳比大於 20 為 P 限制，小於 10 為 N 限制為判斷標準(Borchardt 1996)，本實驗各測站水中 N:P 莫耳比皆高於 20(表 1)，七家灣溪各測站應當皆為 P 限制，但實驗結果卻以 N 限制居多。有些研究發現附生藻類的生長與水中 N:P 莫耳比無關，主要受到 N 營養鹽濃度所影響(Stelzer and Lamberti 2001, Tank and Dodds 2003)。因附生藻類吸收營養鹽速率的不同，且水中 N:P 莫耳比與藻細胞內的 N:P 莫耳比並不相同(Guildford and Hecky 2000)。因此，在本實驗中水中 N:P 莫耳比並不能忠實反映營養限制的發生，使 Redfield ratio 僅能當作推測營養限制發生的工具。附生藻類營養限制的發生與否，還須以營養添加實驗來檢驗。

本實驗與溫(2005)於七家灣溪進行的營養限制實驗結果相同的是#2 與#5 測站皆有出現 N 限制情形，#9 測站則同樣無營養限制。而在寡營養鹽地區，營養鹽刺激附生藻類生產力的效能會比優養化的地區來的大(O'Brien *et al.* 2007)。因此#9 測站農業活動產生的高濃度  $\text{NO}_3^-$ ，可能導致此處附生藻類並不缺乏營養鹽。而本實驗與溫 (2005) 結果皆顯示七家灣溪各測站水中 N:P 莫耳比相當高，但仍有 N 限制發生，而 Francoeur *et al.* (1999) 實驗中水中 N:P 莫耳比達到 400，仍會發生 N 限制，與本實驗結果相似。

有研究認為附生藻類的營養限制應與其種類群集組成有關(Dodds *et al.* 2002, Tank and Dodds 2003)。從本實驗結果中發現，發生 N 限制的測站大多以絲狀藍綠菌為優勢(圖 4、圖 5)，而藍綠菌生存於營養充足的環境(Paerl and Millie 1996, Downing *et al.* 2001)，絲狀藍綠菌的固氮能力(Cushing and Allan

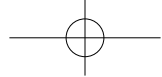
2001)及本實驗結果中與水中 DIN 濃度有顯著正相關，更加顯示其對 N 源的高需求量。但在  $\text{NO}_3^-$  濃度充足的環境中，藍綠菌的固氮作用是會被抑制的，因為固氮作用是非常耗能的過程，所以藍綠菌會選擇直接利用水中的 N 鹽(Kemp and Dodds 2002, Scott *et al.* 2009)。在藍綠菌為優勢的測站中，附生藻類群集中的藍綠菌可能與其他藻種競爭 N 源，而使藻類群集產生 N 限制。

#### 五、武陵溪流的經營與管理

實驗結果顯示 N 鹽為限制七家灣溪附生藻類生長的主要營養鹽，並非 P 鹽。因此，首要之務仍是減少 N 鹽輸入七家灣溪中。河川優養化為許多河川及溪流經營管理的共同課題。進行長期的水質監測(Almasri and Kuluarachchi 2004)及建立沿岸緩衝區(Anbumozhi *et al.* 2005) 皆可控制及減少 N 源輸入溪流中。濱岸植被的建立亦可提高溪流的覆蓋度，則可利用光限制抑制附生藻類生長(Mosisch *et al.* 2001)。因此七家灣溪的經營與管理，須持續進行藻類與水質的長期監測，建立濱岸的緩衝區及恢復植被覆蓋度，以及控制農業汗水的產生及高濃度 N 源經由渠道的輸入，以預防藻華及水質的惡化。

#### 結論

七家灣溪附生藻類生產力季節變化為夏、秋高於冬、春兩季。附生藻類群集組成以藍綠菌為優勢，相對豐度平均佔 58%。七家灣溪流域以水中 N:P 莫耳比並無法適當推測營養限制的發生。除了有勝溪外，七家灣溪各測站皆有營養限制發生，受農業汗水影響的有勝溪測站則因水中營養鹽濃度充足，並無營養限制情形。附生藻類群集組成可能影響營養限制的發生，N 限制則易發生於絲狀藍綠菌相對豐度較高的測站，而七家灣溪各測站附生藻類的生長主要受到 N 鹽的限制。



## 誌謝

本研究經費由雪霸國家公園管理處委託計畫「武陵地區生態系長期監測與研究」補助。感謝武陵工作站的協助。

## 引用文獻

- 于淑芬。2008。武陵地區水生昆蟲對石附生藻類影響之研究。國立中興大學生命科學系博士論文，共 97 頁。
- 官文惠、劉柄伸、詹晏權、張吉正、瀨宥蒼、吳宏彬、張滋芳、江宛樺。2010。武陵地區生態系長期監測與研究，第三章 水質研究。內政部營建署雪霸國家公園管理處，共 50 頁。
- 林幸助、黃秋平、林資沁、吳姿儀、林良瑾。2009。98 年度武陵地區長期生態研究，第一章 藻類研究與資料整合。內政部營建署雪霸國家公園管理處，共 23 頁。
- 楊宜勳。2008。台灣櫻花鉤吻鮭胃內含物組成與食餌特性。國立臺灣海洋大學水產養殖學系碩士論文，共 75 頁。
- 溫珮珍。2005。武陵地區水溫與營養鹽添加對溪流淺流區石附生藻類之影響。國立中興大學生命科學系碩士論文，共 75 頁。
- 蘇美如。2009。武陵地區溪流潭、流及瀨之石附生矽藻生物量及群集結構分析。國立中興大學生命科學系碩士論文，共 100 頁。
- Almasri MN and JJ Kaluarachchi. 2004. Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds. *Journal of Hydrology* 295:225-245.
- Anbumozhi V, J Radhakrishnan, and E Yamaji. 2005. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations. *Ecological Engineering* 24:517-523.
- Biggs BJB. 1996. Patterns in benthic algae of streams. pp. 31-51. In *Stevenson RJ, ML Bothwell, and RL Lowe. (eds.), Algal ecology*, Academic press, San Diego.
- Borchardt MA. 1996. Nutrients. pp. 184-218. In *Stevenson RJ, ML Bothwell, and RL Lowe. (eds.), Algal ecology*, Academic press, San Diego.
- Chambers PA, AR Dale, GJ Scrimgeour, and ML Bothwell. 2000. Nutrient enrichment of northern rivers in response to pulp mill and municipal discharges. *Journal of aquatic ecosystem stress and recover*. 8:53-66.
- Clarke KR and RM Warwick. 2001. *Change In Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth Marine Laboratory, UK.
- Cox EJ 1996. *Identification of freshwater diatoms from live material*. Chapman&Hall, London, UK.
- Cushing CE and JD Allan. 2001. *Streams: Their ecology and life*. Academic press, San Diego.
- DeNicola DM. 1996. Periphyton responses to temperature at different ecological levels. pp. 150-176. In *Stevenson RJ, ML Bothwell, and RL Lowe. (eds.), Algal ecology*, Academic press, San Diego.
- Dodds WK, JR Jones, and EB Welch. 1998. Suggested classification of stream trophic states: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Research* 32:1455-1462.
- Dodds WK, VH Smith, and K Lohman. 2002. Nitrogen and Phosphorus relationships to benthic algal biomass in temperate streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 59:865-874.
- Downing JA, SB Watson, and E. McCauley. 2001. Predicting cyanobacteria dominance in lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 58:1905-1908.
- Francoeur SN, BJB Biggs, RA Smith, and RL Lowe. 1999. Nutrient limitation of algal biomass accrual in streams: Seasonal patterns and a comparison of methods. *Journal of the North American Benthological Society* 18:242-260.
- Guildford SJ and RE Hecky. 2000. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lake and ocean: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography* 45:1213-1223.
- Hansson LA. 1992. Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnology and Oceanography* 37:322-328.
- Hill WR and HL Boston. 1991. Community development alters photosynthesis-irradiance relations in stream periphyton. *Limnology and Oceanography* 36:1375-1389.
- Jørgensen BB and NP Revsbech. 1985. The diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediments and detritus. *Limnology and Oceanography* 30:111-122.
- Kemp MJ and WK Dodds. 2001. Spatial and temporal patterns of nitrogen concentrations in pristine and agriculturally-influenced prairie streams. *Biogeochemistry*. 53:125-141.
- Kemp MJ and WK Dodds. 2002. The influence of ammonium, nitrate, and dissolved oxygen concentrations on uptake, nitrification, and denitrification rates associated with prairie stream substrata. *Limnology and Oceanography*

- 47:1380-1393.
- Lamberti GA, SV Gregory, LR Ashkenas, AD Steinman, and CD McIntire. 1989. Productive capacity of periphyton as a determinant of plant-herbivore interactions in streams. *Ecology* 70:1840-1856.
- Larkum AWD, E-MW Koch, and M Köhl. 2003. Diffusive boundary layers and photosynthesis of the epilithic algal community of coral reefs. *Marine Biology* 142:1073-1082.
- Lange K, A Liess, JJ Piggott, CR Townsend, and CD Matthaei. 2011. Light, nutrients, and grazing interact to determine stream diatom community composition and functional group structure. *Freshwater Biology* 56:264-278.
- Lowe RL, SW Golladay, and JR Webster. 1986. Periphyton response to nutrient manipulation in streams draining clearcut and forested watersheds. *Journal of the North American Benthological Society* 5:221-229.
- Ludwig A, M Matlock, BE Haggard, B, M Matlock, and E Cummings. 2008. Identification and evaluation of nutrient limitation on periphyton growth in headwater streams in Pawnee Nation, Oklahoma. *Ecological Engineering* 32:178-186.
- Luttenton MR and RL Lowe. 2006. Response of a lentic periphyton community to nutrient enrichment at low N:P ratios. *Journal of Phycology* 42:1007-1015.
- McMinn A and C Ashworth. 1998. The use of oxygen microelectrodes to determine the net production by an Antarctic sea ice algal community. *Antarctic Science* 10:39-44.
- Mosich TD, SE Bunn, and PM Davies. 2001. The relative importance of shading and nutrients on algal production in subtropical streams. *Freshwater Biology* 46:1269-1278.
- Murphy J and JP Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in nature water. *Analytica Chemica Acta* 27:31-36.
- O'Brien JM, WK Dodds, KC Wilson, JN Murdock, and J Eichmiller. 2007. The saturation of N cycling in Central Plains streams: <sup>15</sup>N experiments across a broad gradient of nitrate concentrations. *Biogeochemistry* 84:31-49.
- Oemke MP and TM Burton. 1986. Diatom colonization dynamics in a lotic system. *Hydrobiologia* 139:153-166.
- Paerl HW and DF Millie. 1996. Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia* 35:160-167.
- Parsons TR, Y Maita, and CM Lalli. 1984. Fluorometric determination of chlorophyllus, pp. 14-17. *In A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. 1st edition.* Pergamon press Inc, NY.
- Peterson BJ, JE Hobbie, and TL Corliss. 1983. A continuous-flow periphyton bioassay: Tests of nutrient limitation in Tundra stream. *Limnology and Oceanography* 28:583-591.
- Phinney HK and CD McIntire. 1965. Effect of temperature on metabolism of periphyton communities developed in laboratory streams. *Limnology and Oceanography* 10:341-344.
- Pringle CM, P Paaby-Hansen, PD Vaux, and CR Goldman. 1986. In situ nutrient assays of periphyton growth in a lowland Costa Rican stream. *Hydrobiologia* 134:207-213.
- Redfield AC. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* 46:205-221.
- Rosemond AD. 1993. Top-down and bottom-up control of stream periphyton: Effects of nutrients and herbivores. *Ecology* 74:1264-1280.
- Scott JT, DA Lang, RS King, and RD Doyle. 2009. Nitrogen fixation and phosphatase activity in periphyton growing on nutrient diffusing substrata: Evidence for differential nutrient limitation in stream periphyton. *Journal of the North American Benthological Society* 28:57-68.
- Stelzer RS and GA Lamberti. 2001. Effects of N:P ratio and total nutrient concentration on stream periphyton community structure, biomass, and elemental composition. *Limnology and Oceanography* 46:356-367.
- Tank JL and WK Dodds. 2003. Nutrient limitation of epilithic and epixylic biofilms in ten North American streams. *Freshwater Biology* 48:1031-1049.
- Tilman D, J Fargione, B Wolff, C D'Antonio, A Dobson, R Howarth, D Schindler, WH Schlesinger, D Simberloff, and D Swackhamer. 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292:281-284.
- Wellnitz T and NL Poff. 2006. Herbivory, current velocity and algal regrowth: How dose periphyton grow when the grazers have gone? *Freshwater Biology* 51:2114-2123.
- Yu SF and HJ Lin. 2009. Effects of agriculture on the abundance and community structure of epilithic algae in mountain streams of subtropical Taiwan. *Botanical Studies* 50:73-87.