

應用藻床於水中磷減少之研究 —以金瓜寮溪為例

王之佑 張文亮*

國立台灣大學生物環境系統工程學系

摘 要

台灣地區生態工程之型態多屬於淨化高污染水質之人工濕地，然而附生性藻類所能應用之層面則更可延伸至低污染環境如水庫集水區的淨化工程。本研究目的即透過翡翠水庫集水區內金瓜寮溪附生藻類及棲地主要組成因子調查，了解應用藻床淨水技術於野外溪流之合適地點。進行現場調查時，沿金瓜寮溪設置 28 個採樣點，經過 12 日培養將附生藻類取回，分析藻類生物量與磷元素含量，並同時進行水質分析與棲地物理因子調查。根據各採樣點水質與物理環境共 22 個項目調查所得數據，配合 4 種藻類生物量資料，進行主成分分析，取得金瓜寮溪流域的 2 個主成分因子：鹽分因子、營養因子，解釋變異量為 48.1%。由第 1、2 主成分得點圖分析，第 1-13 號採樣點為低鹽分區域，第 14-28 號採樣點為高鹽分區域；第 4、6、14 採樣點為高營養因子區域，其中第 4 採樣點為主要點源污染，最適合施用藻床淨水技術，將溪水淨化，以延緩翡翠水庫優養現象的發生。

關鍵詞：藻床；附生藻類；溪流；主成分分析；生態工程

* 通訊作者

Study of Phosphorus Removal from Water Using Algal Turf in Jingualiao Creek

Chih-Yu Wang and Wen-Lian Chang*

Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University

Abstract

Artificial wetlands are the most common ecological engineering constructions for highly polluted wastewater treatment in Taiwan. However, periphyton treatment system could serve wider ranges to low contaminated water in reservoir watershed. The purpose of this study was to investigate and determine the principal controlling factors of Jingualiao Creek habitat and identify the proper sites to apply algal turf. The field research was conducted at Jingualiao Creek in Feitsui Reservoir Watershed. After incubated for twelve days, 28 periphyton communities were removed from artificial substrate, then they were analyzed for biomass and algal phosphorus content. Water analysis and surveying of habitat physical characteristics were conducted on site. Twenty-two environmental variables and four algae biomass variables were combined into a data matrix for the principal component analysis. The first two components of principal component analysis (PCA) explained 48.1% of the variation in the data set, which were extracted as salinity factor and nutrient factor. With the scatter plot of the first two principal components, the fourth, sixth, and fourteenth sampling site were classified as high nutrient areas. The result suggests that the fourth sample site was the most suitable place to apply algal turf because of its high pollution loading. Using this technique, stream water could be purified, and thus prevent eutrophication in water reservoir.

Key words: algal turf; periphyton; stream; principle component analysis; ecological engineering

* Corresponding author.



一、前 言

河川自淨功能為自然界重要調節機能之一，依靠生態系統中穩定而健全的食物網及能源循環，使水域環境維持正常的運作。然而，人為汙染透過點源或非點源的方式輸入溪流中，嚴重影響到水域環境本身對於營養鹽的承載量。許多溪流在無法負荷的狀況下，過多的氮與磷便引發「藻華現象」，成為世界各地同樣面臨的環境問題^(10, 12, 21)。

台灣地區目前在河川水質淨化方面所採用的生態工程類型以種植大型水生植物的人工濕地為主，所處理的水質皆屬於高污染狀態，淨化成效依各場址的環境與設計而有所不同，然而入流濃度太低則非此型態之生態工程所能處理。前述整治對象與水庫集水區內溪流型態不同，同樣的生態工程勢必需要加以改良，以應用於上游溪流環境。

(一) 溪流環境中的附生藻類

附生藻類(Periphyton)為溪流中主要生產者，如同過濾器般將通過其細胞表面水體中的營養鹽吸收、儲存，以供給該生物群落繁衍活動所需之能源，故附生藻類對於溪流生態系中營養鹽之循環具有顯著影響⁽²⁸⁾。如同大多數生物，附生藻類在適合的環境中快速繁衍、生長，遭遇逆境時，亦可觀察到生長量受限的情形，然而最大的差異點在於，附生藻類透過物種組成的改變，使其在各種環境條件下皆能生存，即使面臨乾旱的壓力，仍可利用孢子休眠，於適當時機再次繁衍，為自然界中具有極高適應力之生物。

溪流環境中影響附生藻類生長狀況

的因子包括：日照、水溫、流速、營養鹽、生物刮食。其中流動水域中附生藻類受到流速因子所影響，使其與其他環境中的藻類產生不同表現。藻類的細胞主要由碳、氮、磷三種元素以 106:16:1 之比例所組成⁽³⁰⁾，當營養鹽供應不足時或是比例偏差過大時，藻類生物量將受到限制，然而此現象可由物理環境來改善。在靜止水域中，營養鹽依靠擴散作用來傳遞，當環境養分濃度偏低時，附生藻類所能吸收到的養分便受到限制；相對在流動環境中，透過水流的傳遞，便可克服上述的狀況，因此當養分供給滿足最低需求時，流速便有助於藻類的生長⁽¹⁸⁾。

溪流中營養鹽被附生藻類吸收可以透過兩種方式來增加營養鹽的循環速率：第一，營養鹽被吸收後，隨著附生藻類固定於某河段，便提高該營養鹽在該河段內部循環的機會，並降低養分向下游傳遞的速率⁽²⁷⁾；第二，已淨化之水體抵達下游時，由於提供養分不足，因此下游段生物群落內部營養鹽循環的機會隨之提高⁽⁴¹⁾。附生藻類所吸收之營養鹽，透過其他消費者的使用，如：溪魚、水生昆蟲、螺類等，該營養鹽即隨著消費者於食物網循環，透過鳥類等食物鍊較高階的動物捕食溪魚、水生昆蟲等途徑，將養分帶離水域環境。

(二) 附生藻類於水質淨化上的應用

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⁽⁹⁾、河流⁽¹⁹⁾、農牧業廢水⁽²²⁾、民生廢水⁽⁸⁾等，均曾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⁽⁴⁾。

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^(11, 35)。

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⁽³⁾。此外，近幾年其他學者沿用同樣概念，針對畜牧業廢水進行研究，實驗結果顯示它較傳統之陸生植物淨化法更能有效移除廢水中的氮與磷含量，同時刮除下來的藻類亦能作為良好的飼料，以生產更高品質之牛乳^(21, 23)。

對於重金屬污染的廢水，由於部份的藻類對於吸收重金屬離子具有忍耐力，因此也用來吸收水體中過多的鋅、錳等重金屬，達到淨化水質的目的⁽⁵⁾。

(三)研究目的

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，以提供乾淨的飲用水與延長水庫使用年限。根據金瓜寮溪附生藻類室內實驗結果顯示(投稿於農業工程學報，審稿中)，微量磷環境下，藻類可將水中總磷含量降低至 10 µg/L 以下，在淨化水質方面具有明顯成效。

本研究針對翡翠水庫集水區內之溪流：金瓜寮溪，進行全河段附生藻類、棲地物理環境及水質調查，主要研究目的如下：第一，分析金瓜寮溪附生藻類

與棲地環境，探討該流域的主要組成因子；第二，判斷金瓜寮溪附生藻類適合生長環境，以選擇藻床淨水技術施行地點。

二、材料與方法

(一)試驗區簡介

金瓜寮溪位於北緯 24 度 54 分，東經 121 度 40 分，為北勢溪主要支流之一，發源於雪山山脈的紀州寮山，自海拔 600 公尺下降至 200 公尺，於黃樺皮寮匯入北勢溪主流後進入翡翠水庫。總流域面積約 24.2 平方公里，溪長 15.2 公里，年平均流量為 1.99 立方公尺/每秒。金瓜寮溪之溪流級序為第四級⁽²⁾，全溪段都可見到大石或巨石露出水面，河道蜿蜒現象十分強烈，而溪床開闊度在金瓜寮溪與北勢溪匯流口(以下簡稱匯流口)上游 4.6 公里處產生明顯變化，自該處上游段多屬於 V 字形山谷地形，下游段溪床則是明顯開闊。

本次調查範圍內，溪流沿岸除原生混合林外，土地多以種植茶業為主。人口則集中於匯流口上游 3.2 公里處，該地區小型污水處理場即設置於上述聚落下游。由於金瓜寮溪地區自然遊憩資源豐富，間有兩處休閒農場，配合政府機關沿溪設置的自行車道與觀魚步道，許多民眾即透過北宜快速道路坪林交流道抵達該地區進行休閒活動。

(二)野外棲地調查

本試驗於野外之設站與佈點受限於車輛抵達之便利性及人員下切溪谷之可行性，故選擇主河道沿線佈置 28 個採樣點(圖 1)。2006 年 3 月 29 日進行現場佈



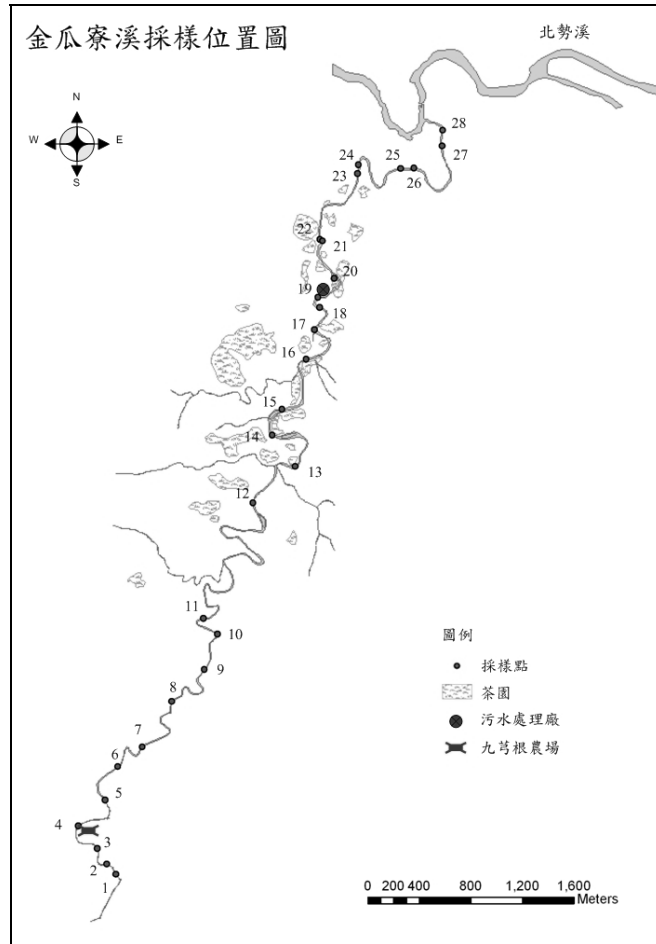


圖 1 金瓜寮溪水質、物理因子、生物資料調查之 28 個採樣點分布圖

Fig. 1. Jingualiao Creek, showing 28 sample sites selected for study on water chemistry, physical characteristic, and biology.

置，經過 12 日培養期，於 4 月 10 日將藻類採樣裝置取回實驗室後，進行藻類生物量分析。野外藻類生長過程中，於 4 月 4 日巡查各採樣點狀況，並同時進行水質採樣及棲地物理因子調查。

調查自然環境中的附生藻類，廣為使用的方式係於調查現場隨機挑選溪床底部石塊，利用毛刷等物品將附著其上之附生藻類刮除並收集，再帶回實驗室進行後續分析^(7, 15, 17)。本研究中採樣方法

係利用藻類附著網固定於採樣點隨機挑選之溪中石頭，經過 12 日培養，讓石頭上附生藻類蔓生至附著網上，隨後再將該網帶回實驗室進行分析。藻類附著網由聚乙烯製成，孔徑為 2 × 2 mm，面積為 6 × 6 公分，利用較小面積以避免單一採樣區的流速、光照等環境因子變動過大，同時方便採樣工作之進行。選擇適當卵石後，將藻類附著網以橡膠彈性線材(橡皮筋)固定，放置於採樣點。於培養

期結束後，至現場取回藻類附著網時，利用溪水沖洗附著網上非藻類物質後，再將該網裝入附有封口鏈之塑膠袋後，密封帶回實驗室分析。

(三)藻類生物量分析方法

附生藻類收集方式，係將附生藻類採樣網從金瓜寮溪取回實驗室後，立即將附生藻類以塑膠刷刮下，配合蒸餾水沖洗，將含有附生藻類之棕色液體倒入蒸發皿，以進行藻類生物量分析。將盛有附生藻類液體之蒸發皿以打好透氣孔洞之錫箔紙包覆後送入烘箱中，以 75°C 烘乾，至少 48 小時後取出秤重，此數據扣除蒸發皿重量後即為藻類乾重。完成第一步測量後，將盛有乾燥藻類之蒸發皿送入高溫爐，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，即得有機質重量^(4, 34)。

藻類所含磷元素分析方法如下：於盛有藻類灰粉之蒸發皿內加入 100 毫升之 1.0 N 鹽酸並以錫箔紙包覆後，送進烘箱以 80°C 加熱 30 分鐘，溶解出樣本中的磷，此時該溶液即為藻類磷元素萃取液⁽²⁶⁾。

藻類磷吸收量由上述萃取液以水質檢測中的總磷檢測法進行分析，換算出藻類樣本所含磷元素重量。藻類磷含量百分比則由藻類磷吸收量除以藻類乾重後以百分比表示。藻類生物量中，藻類乾重、藻類有機質重和藻類磷吸收量三種項目皆以單位面積-單位時間來表示。將原始藻類生產量數據除以培養期(12 日)以及藻類於附著網上實際附著面積(0.00162 平方公尺)，即可求得。

(四)水質分析與棲地物理因子調查

棲地環境之物理或水質因子的改變，對於附生藻類所具有影響程度不一，故隨著不同條件之變化，附生藻類生存之主控性因子隨環境而改變^(6, 16, 37)。由於金瓜寮溪當地未曾進行附生性藻類之生態調查，因此本研究中選擇對於藻類具有影響之水質與物理因子項目進行分析。

野外調查水質分析項目包括：酸鹼度、電導度、水溫、濁度、溶氧、碳酸根、碳酸氫根、硝酸鹽氮、氨氮、總凱氏氮、正磷酸鹽、總磷、氯鹽、硫酸鹽、溶解態鈣離子、溶解態鎂離子、溶解態鈉離子、溶解態鉀離子。上述分析項目依照環境檢驗所公告之檢驗方法進行檢測。有機氮濃度由總凱氏氮扣除氨氮求得，而總磷扣除正磷酸鹽求得之數據雖包含聚磷酸鹽，在此統稱為有機磷。

金瓜寮溪棲地物理因子調查項目包括：水深、流速、樹冠遮蔽度、繁殖用石頭表面積。設置附生藻類採樣裝置時，首先量測選用石頭之表面積，綁上藻類附著網並放置於採樣點，隨後測定採樣裝置所在位置之水深及流速。樹冠遮蔽度傳統上使用冠層覆蓋密度計(densio-meter)測量，本研究中改採數位相機進行調查。配合水平測量尺，自採樣裝置上方朝天頂拍攝，拍攝時以指南針固定方位，令影像長軸平行於東西向，短軸平行於南北向，使影像包含範圍：東西向為 138.6°天頂角，南北向為 105.4°天頂角。取得之影像利用辨識軟體，判定影像範圍內樹冠遮蔽面積百分比，即為樹冠遮蔽度。



(五)主成分分析

由於各環境因子對於研究標的影響程度隨時間與空間而變化，因此運用主成分分析，將原始資料統整以進行討論的方式廣泛運用於棲地生態調查中⁽³²⁾。金瓜寮溪附生藻類棲地特性可利用主成分分析，了解該環境的主要組成因子，以判別藻床淨水技術適合設置之地點。本研究中各變項測量單位不同時，需將原始資料轉換成標準化數據，並使用相關矩陣進行運算⁽²⁰⁾。

三、結果與討論

(一)棲地環境主成分分析結果

附生藻類於野外培養 12 日後，將分析所得生物量數據配合棲地物理與水質因子之調查資料，進行主成分分析。進行水庫、湖泊等靜水環境優養化評估時，水中葉綠素 A 含量經常與物理因子及水質數據合併進行主成分分析，以了解各採樣點的內在控制因子^(29, 30)。資料矩陣由 28 個採樣點之棲地物理因子 4 種、棲地水質因子 18 種，以及 4 種生物因子，共 26 個變數組成 28 × 26 之資料矩陣。

根據標準化數據作出相關矩陣後，進而求得特徵值、解釋百分比、累積解釋百分比。第 1 與第 2 主成分解釋總變異量為 48.1%，根據各變項與主成分之負荷(表 1)，以進行各主成分之命名。

第 1 主成分解釋總變異的 35.7%，其中藻類有機質重、樹冠遮蔽度、酸鹼度、電導度、水溫、碳酸根、碳酸氫根、有機氮、正磷酸鹽、氯鹽及溶解態離子中的鈣、鎂、鈉、鉀等 14 個變項達顯著相關。電導度及其他大部分變項顯示出

第 1 主成分與水中離子濃度多寡有較高關連，而酸鹼度和水溫對於水環境中的化學反應亦具有顯著影響⁽³⁸⁾。這些變項顯示出融解的鹽分隨著上游至下游方向產生漸進式的變化⁽³¹⁾。雖然樹冠遮蔽度與水質無顯著相關，然而在分析原始數據後，可以發現當樹冠遮蔽度逐漸降低時，上述多項水質變項之濃度皆有上升的趨勢，且與電導度相關係數為 -0.7，因此在金瓜寮溪環境中，樹冠遮蔽度之變化趨勢與水質變項具有相關性。藻類有機質重受到體內所含蛋白質多寡所影響⁽⁴⁵⁾，而形成該物質所需之主要營養鹽即為含氮物質，如有機氮、硝酸氮、氨氮等溶解於水中之養分，因此藻類有機質重與水質具有相關性。根據上述說明，將第 1 主成分命名為「鹽分因子」。

第 2 主成分解釋總變異的 12.4%，主要變項包括藻類磷吸收量、藻類乾重、藻類有機質重、流速、有機磷，其負荷量分別為：0.86、0.66、0.66、0.65、0.50。金瓜寮溪 28 個採樣點中，無機氮與無機磷的比值均超過 20，顯示磷的供給量不足，限制附生藻類生產量，進而影響其對於水中磷之吸收量^(33, 39)。在上述營養鹽濃度偏低的狀況下，流動水體能持續而快速將較高濃度的養分帶入細胞周圍，有利於附生藻類獲取生長所需之物質，以提高生產量⁽²³⁾。磷為重要營養元素之一，在各種形態中只有正磷酸鹽可直接吸收，因此原始環境中經常成為藻類生長的限制因子，然而藻類在無可選擇時，便生成磷酸酶(phosphatase)分解有機磷，獲得生長所需磷元素⁽²⁾。二氧化碳為光合作用所需之重要物質，然而透過碳酸酐(carbonic anhydrase)的轉換，碳酸氫根亦可以供給藻類使用^(44, 40)。藻類磷吸收量、藻類乾重和藻類有機質重等三種生物因

表 1 金瓜寮溪化學、物理、生物資料由第 1 和第 2 主成分解釋變異量百分比，以及各變項與主成分間相關係數^a

Table 1. Percentage of total variance in the chemical, physical, and biological data for Jingualiao Creek sampling, explained by principal components (PC) 1 and 2 and correlation coefficients between PC 1 and PC 2 and the chemical, physical, and biological variables^a

| Variable | PC 1 | PC 2 |
|-------------------------------|---------|--------|
| Algae drymass | 0.418 | 0.660* |
| Algae organism | 0.539* | 0.659* |
| Algae P-uptake | 0.324 | 0.865* |
| Algae P-content (% drymass) | -0.352 | 0.283 |
| Water depth | 0.212 | -0.386 |
| Water velocity | 0.011 | 0.649* |
| Stone surface area | -0.088 | 0.160 |
| Canopy | -0.687* | -0.199 |
| pH | 0.935* | -0.060 |
| EC | 0.915* | -0.204 |
| Water temperature | 0.967* | -0.078 |
| Turbidity | 0.057 | 0.155 |
| DO | -0.402 | 0.128 |
| CO ₃ ²⁻ | 0.821* | -0.278 |
| HCO ₃ ⁻ | -0.582* | 0.447 |
| NO ₃ ⁻ | 0.065 | 0.235 |
| Organic N | 0.506* | 0.252 |
| PO ₄ ³⁻ | -0.829* | 0.161 |
| Organic P | -0.008 | 0.499* |
| Cl ⁻ | 0.936* | -0.032 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.016 | 0.148 |
| NH ₄ ⁺ | -0.445 | -0.275 |
| Ca ²⁺ | 0.520* | 0.068 |
| Mg ²⁺ | 0.847* | 0.038 |
| Na ⁺ | 0.763* | -0.116 |
| K ⁺ | 0.808* | -0.111 |
| Eigenvalue | 9.289 | 3.228 |
| Cumulative variance explained | 35.7% | 48.1% |

^a r value, n = 28, p < 0.01*

子，在環境營養鹽供給充足時，皆能有更好的表現，因此將第 2 主成分命名為「營養因子」。

光線之供給對於附生藻類具有顯著性影響，然而本研究中濁度因子在主成

分分析結果中並未出現。根據原始數據，現場 28 個採樣點之濁度平均值為 4.5 NTU，可知上述結果主要是受到金瓜寮溪當地水質清澈影響，因此濁度在該地區屬於不顯著因子。

(二)棲地環境主成分得點圖分析

將標準化原始數據帶入求得第 1 及第 2 主成分得點，繪製出採樣點得點圖(圖 2)。由得點圖中可以将採樣點依照鹽份及營養高低區分成四大區塊。應用解釋變異量最高的前兩個主成分所繪製出的主成分得點圖，無論在湖泊優養化程度的判別，或是棲地類型的區分均可達到良好的成效^(13, 43)。

根據鹽分因子大致可以将整個調查區分成 1~13 號和 14~28 號採樣點兩部份，由於該主成分與離子濃度相關，顯示出水質逐漸劣化趨勢。上述結果與現場調查相符合：13 號採樣點以上流域人煙稀少，僅於 4~6 號採樣點有小型聚落存在，然而自 14 號採樣點開始之下游區域人為活動頻繁，因此提高點源及非點源污染之輸入。

附生藻類的生長量以及對於水中磷

的吸收可由第 2 主成分來表示，因此位於高營養區的第 4、6、14 號採樣點即為藻床淨水系統適合設置之地點。4 號採樣點在藻類磷吸收量、流速、有機磷等第二主成分顯著相關變項量測到偏高的數值，使其成為本調查中營養因子得分最高之採樣點。該位置為金瓜寮流域最大休閒農場，除了飼養香魚，週末假日常可見許多遊客至該處用餐、烤肉、戲水、露營。4 號採樣點正設置於該點源污染排放口之下游，大量營養鹽進入溪流中導致水質惡化，溪床上藻類生長的厚度較金瓜寮溪其他採樣點更高，顯示養分提供十分充足，且流速達 55 cm/s，為附生藻類調查中流速最高的採樣點。綜合以上因子，造成 4 號採樣點的營養因子得分遠超過其他採樣點。

14 號採樣點在藻類磷吸收量、藻類乾重、藻類有機質重等三種生物量上皆測量到相當高之數據，且流速亦高於平

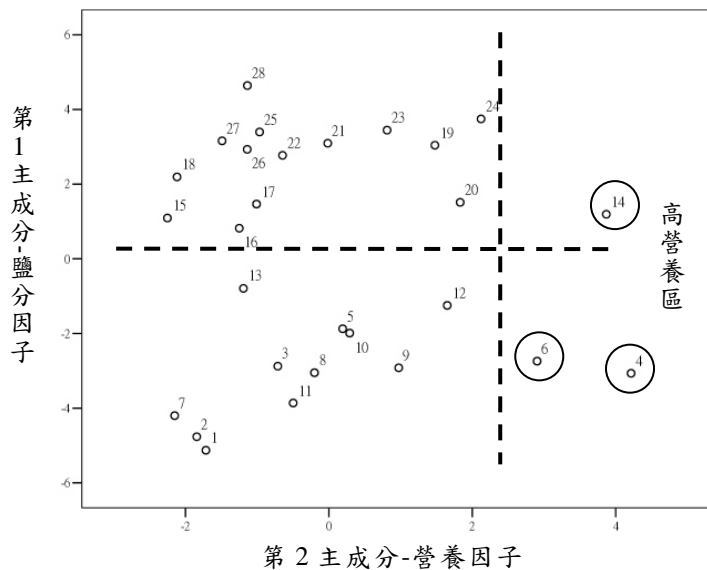


圖 2 金瓜寮溪棲地資料第 1、2 主成分得點圖

Fig. 2. Location of the sampling sites in the plane defined by principal component 1 and 2 for Jingualiao Creek habitat data.

均值，使其營養因子得分偏高。金瓜寮溪地區主要經濟活動為種植茶業，茶園沿道路及溪流兩側分布(圖 1)。肥料三要素中，氮肥對茶樹的增產效應極為顯著，對產量和品質均有良好的促進作用⁽¹⁾。由溪流兩岸茶園非點源所造成的有機氮與硝酸氮污染，使得藻類快速繁殖，造成 14 號採樣點之營養因子得分僅次於 4 號採樣點。

金瓜寮溪地區人口主要集中於兩處，6 號採樣點即位於上游聚落之下游，受到當地居民直接排出之廢水影響，水中有機磷濃度提高，並造成藻類磷吸收量提升，且該處所測得之水流速度為 28 cm/s，係 28 個採樣點中較高的數據。綜合以上影響，使得 6 號採樣點營養因子得分偏高。

根據上述說明，顯示金瓜寮河流域主要污染來自於休閒農場及上游居民聚落的點源排放，以及溪流兩岸茶園施肥所造成的非點源污染。

四、結論與建議

根據本篇研究可以獲得以下結論：將金瓜寮溪附生藻類之棲地環境調查結果進行之主成分分析，共獲得鹽分、營養等 2 個主成分；根據第 1、2 主成分得點圖分析，第 4、6、14 採樣點為高營養因子區域，其中又以第 4 採樣點：九芎根香魚休閒農場的營養因子得分最高，為金瓜寮河流域設置藻床淨水系統之最佳位置。

本研究建議，若想對九芎根香魚休閒農場和上游居民聚落的點源污染，以及 14 號採樣點的非點源污染進行水質改善工程，建議施用藻床淨水技術，將溪水磷含量淨化至貧養等級，以延緩翡翠

水庫優養現象發生。

五、致 謝

本文承蒙行政院環境保護署經費支援方得以圓滿完成(計畫名稱：翡翠水庫生態工法水質改善計畫統包工程)，在此謹表謝意。感謝吳明裕技師、石栢岡、蕭友晉同學於野外調查時所給予的協助，使本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 李淑美、陳右人，2002，氮肥對茶樹生育及品質之影響，中華農學會報 3: 184-200。
2. 蔡佩芬，2003，缺磷誘導石蓴(*Ulva lactuca* L.) (Ulvales, Chlorophyta) 酸性磷酸分解酵素之研究，國立中山大學，海洋生物研究所。
3. Adey, W. H. and K. Loveland. 1998. *Dynamic Aquaria: Building Living Ecosystems*. 2nd ed. Academic Press, San Diego, California.
4. Aspila, K. I., H. Agemian, and A. S. Y. Chau. 1976. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analysis* 101: 187-197.
5. Bender, J., J. P. Gould, Y. Vatcharapijarn, J. S. Young, and P. Philips. 1994. Removal of zinc and manganese from contaminated water with cyanobacteria mats. *Water Environment Research* 66: 679-683.
6. Biggs, B. J. F., and P. Gerbeaux. 1993. Periphyton development in



- relation to macro-scale (geology) and micro-scale (velocity) limiters in two gravel-bed rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 27: 39-53.
7. Biggs, B., and S. Stokseth. 1996. Hydraulic habitat suitability for periphyton in rivers, *Regulated Rivers: Research & Management* 12: 251-261.
 8. Craggs, R. J., W. H. Adey, B. K. Jessup, and W. J. Oswald. 1996. A controlled stream mesocosm for tertiary treatment of sewage. *Ecological Engineering* 6: 149-169.
 9. DeBusk, T. A., K. A. Grace, F. E. Dierberg, S. D. Jackson, M. J. Chimney, and B. Gu. 2004. An investigation of the limits of phosphorus removal in wetlands: a mesocosm study of a shallow periphyton-dominated treatment system. *Ecological Engineering* 23: 1-14.
 10. Dodds, W. K., and E. B. Welch. 2000. Establishing nutrient criteria in streams. *Journal of the North American Benthological Society* 19(1): 186-196.
 11. Drenner, R. W., D. J. Day, S. J. Basham, J. D. Smith, and S. I. Jensen. 1997. Ecological Water Treatment System for Removal of Phosphorus and Nitrogen from Polluted Water. *Ecological Applications* 7(2): 381-390.
 12. Elósegui, A., X. Arana, A. Basaguren, and J. Pozo. 1995. Self-purification processes along a medium-sized stream. *Environmental Management* 19(6): 931-939.
 13. Fleituch T, A. Starzecka, and T. Bednarz. 2001. Spatial trends in sediment structure, bacteria, and periphyton communities across a freshwater ecotone. *Hydrobiologia* 464: 165-174.
 14. Graham, L. E., and L. W. Wilcox. 2000. *Algae*. New Jersey: Prentice Hall.
 15. Griffith, M. B., B. H. Hill, A. T. Herlihy, and P. R. Kaufmann. 2002. Multivariate analysis of periphyton assemblages in relation to environmental gradients in Colorado Rocky Mountain streams. *Journal of Phycology* 38: 83-95.
 16. Hill, W. R., and A. W. Knight. 1988. Nutrient and light limitation of algae in two northern California stream. *Journal of Phycology* 24: 125-132.
 17. Hill, W. R., P. J. Mulholland, and E. R. Marzolf. 2001. Stream ecosystem responses to forest leaf emergence in spring. *Ecology* 82(8): 2306-2319.
 18. Horner, R. R., and E. B. Welch. 1981. Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38: 449-457.
 19. Jarvie, H. P., C. Neal, A. Warwick, J. White, M. Neal, H. D. Wickham, L. K. Hill, and M. C. Andrews. 2002. Phosphorus uptake into algal biofilms



- in a lowland chalk river. *The Science of the Total Environment* 282-283: 353-373.
20. Johnson, R. A., and D. W. Wichern. 2002. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall.
 21. Jordan, T. E., and D. E. Weller. 1996. Human contributions to terrestrial nitrogen flux. *Bioscience* 46: 655-664.
 22. Kebede-Westhead, E., C. Pizarro, and W. W. Mulbry. 2004. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: elemental composition of algal biomass at different manure loading rates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(24): 7293-7296.
 23. Lock, M. A., and P. H. John. 1979. The effect of flow patterns on uptake of phosphorus by river periphyton. *Limnology and Oceanography* 24(2): 376-383.
 24. Mulbry, W. W., and A. C. Wilkie. 2001. Growth of benthic freshwater algae on dairy manures. *Journal of Applied Phycology* 13: 301-306.
 25. Mulbry, W., E. K. Westhead, C. Pizarro, L. Sikora. 2005. Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer. *Bioresource Technology* 96: 451-458.
 26. Mulholland, P. J., and A.D. Rosemond. 1992. Periphyton response to longitudinal nutrient depletion in a woodland stream: evidence of upstream-downstream linkage. *Journal of the North American Benthological Society* 11(4): 405-419.
 27. Mulholland, P. J., J. D. Newbold, J. W. Elwood, L. A. Ferren, and J. R. Webster. 1985. Phosphorus spiralling in a woodland stream: seasonal variations. *Ecology* 66(3): 1012-1023.
 28. Mulholland, P. J., A. D. Steinman, E. R. Marzolf, D. R. Hart, and D. L. DeAngelis. 1994. Effect of periphyton biomass on hydraulic characteristics and nutrient cycling in streams. *Oecologia* 98: 40-47.
 29. Parinet B, A. Lhote, and B. Legube. 2004. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. *Ecological Modeling* 178(3-4): 295-311.
 30. Perkins R G., and G. J. C. Underwood. 2000. Gradients of chlorophyll a and water chemistry along an eutrophic reservoir with determination of the limiting nutrient by in situ nutrient addition. *Water Research* 34(3): 713-724.
 31. Perona E, and P. Mateo. 2006. Benthic cyanobacterial assemblages as indicators of nutrient enrichment regimes in a Spanish river. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* 34(1-2): 67-72.
 32. Perona E, I. Bonilla, and P. Mateo. 1999. Spatial and temporal changes in water quality in a Spanish river.



- Science of the Total Environment 241: 75-90.
33. Peterson, B. J., L. Deegan, J. Helfrich, J. E. Hobbie, M. Hullar, B. Moller, T. E. Ford, A. Hershey, A. Hiltner, G. Kipphut, M. A. Lock, D. M. Fiebig, V. McKinley, M. C. Miller, J. R. Vestal, R. Ventullo, and G. Volk. 1993. Biological Responses of a Tundra River to Fertilization. *Ecology* 74(3): 653-672.
 34. Porrello, S., M. Lenzi, P. Tomassetti, E. Persia, M. G. Finioia, and I. Mercatali. 2003. Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system II. Nitrogen and phosphorus content in macroalgae and sediment. *Aquaculture* 219: 531-544.
 35. Rectenwald, L. L. and R. W. Drenner. 2000. Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system. *Environmental Science Technology* 34(3): 522-526.
 36. Redfield, A. C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* 46: 205-221.
 37. Round, F. E. 1981. *The ecology of algae*. New York: Cambridge University Press.
 38. Sawyer, C. N., P. L. McCarty, and G. F. Parkin. 2003. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill.
 39. Schanz F., and H. Juon. 1983. Two different methods of evaluating nutrients limitations of periphyton bioassays using water from the River Rhine and eight of its tributaries. *Hydrobiologia* 102: 187-195.
 40. Schippers, P., J. E. Vermaat, J. de Klein, and W. M. Mooij. 2004. The effect of atmospheric carbon dioxide elevation on plant growth in freshwater ecosystems. *Ecosystems* 7(1): 63-74.
 41. Stevenson, R. J., M. L. Bothwell, and R. L. Lowe, ed. 1996. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. California: Academic Press.
 42. Strahler, A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union* 38: 913-920.
 43. Vinocur A, and F. Unrein. 2000. Typology of lentic water bodies at Potter Peninsula (King George Island, Antarctica) based on physical-chemical characteristics and phytoplankton communities. *Polar Biology* 23(12): 858-870.
 44. Vymazal, J. 1988. The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams. *Hydrobiologia* 166(3): 225-237.
 45. Wilkie, A. C. and W. W. Mulbry, 2002. Recovery of dairy manure nutrients by benthic freshwater algae. *Bioresource Technology* 84(1): 81-91.

