



不同營養態的高山湖泊水體混合深度與 透光度季節動態變化

Difference in Seasonal Variation of Underwater Light Availability and Mixing Depth between Two Mountain Lakes with Contrasting Trophic States

中央研究院
生物多樣性研究中心
研究助理

林浩之

Hao-Chi Lin

中國醫藥大學
生物科技系
副教授

蔡正偉

Jeng-Wei Tsai

國立聯合大學
土木與防災工程學系
教授暨研發長

柳文成

Wen-Cheng Liu

中央研究院
生物多樣性研究中心
研究員

湯森林

Sen-Lin Tang

中央研究院
生物多樣性研究中心
研究員

邱志郁*

Chih-Yu Chiu

摘 要

湖泊水體的透光程度會影響藻類的光合作用與生物量，透光帶(Z_{eu})與沙奇盤透明度(SDT)為量化透光度的重要參數。本研究欲釐清影響高山地區不同營養態湖泊水下透光度與水體混合深度(Z_{mix})動態變化的主要控制因子。從 2015 年 1 月至 2017 年 10 月每月調查翠峰湖與鴛鴦湖的 Z_{eu} 、SDT、水深與 Z_{mix} 。另外，每月收集表層湖水樣本，量測葉綠素 a (Chl. a)、溶解性有機碳(DOC)。自 2015 至 2017 間的研究結果顯示：翠峰湖的藻類濃度主要受透光能力影響，尤其是春季(3 至 5 月)有明顯的藻華造成透光帶降低；鴛鴦湖的透光能力則是受地表逕流所輸入的 DOC 影響，尤其是颱風季(7 至 10 月)DOC 濃度增加 > 120%，造成夏、秋季 SDT 降低($p < 0.05$)。翠峰湖屬中營養態湖泊(Mesotrophic Lake)，故春季容易藻華，造成 $Z_{eu} < Z_{mix}$ ， Z_{eu} 可能限制水體 Z_{mix} 中的代謝量；鴛鴦湖屬寡營養態湖泊(Oligotrophic lake)全年藻類濃度低，

*通訊作者，中央研究院生物多樣性研究中心研究員，11529 台北市南港區研究院路二段 128 號，bochiu@gate.sinica.edu.tw

故代謝量可能不受 Z_{eu} 的限制。本研究有助於釐清亞熱帶不同營養態高山湖泊的透光性、水體混合深度、藻類與有機碳的關係並建構複回歸模型。

關鍵詞：透光層，沙奇透明度，營養態，水體混合深度。

ABSTRACT

Underwater light availability plays an important role in mediating the productivity of the autotrophic organism in the lentic ecosystem. Euphotic zone (Z_{eu}) and Secchi disc transparency (SDT) are important parameters to classify the lakes trophic states. To clarify the relationships among underwater light availability (Z_{eu} and SDT), water quality (algae and dissolved organic carbon concentration), and different trophic states in subtropical mountain lakes, we investigated the Z_{eu} , SDT, water depth, and mixing depth (Z_{mix}) in two mountain lakes, Tsui-Fong Lake (TFL) and Yuan-Yang Lake (YYL), during January 2015 to October 2017. The epilimnion water samples was collected to analyze the chlorophyll *a* (Chl. *a*), and dissolved organic carbon (DOC) concentration. Results showed that the light availability was the key factor controlling the Chl. *a* concentration in TFL. Seasonally, algal blooms caused the Z_{eu} decreased during spring (March to May) in TFL. Contrary, surface loading of DOC is the key factor for light availability in YYL, particularly in typhoon season (July to October), DOC concentration increased over 120% and thus decreased the SDT. TFL is a Mesotrophic Lake. Hence, algal blooms in spring made the Z_{eu} shrinking to the level less than the Z_{mix} . Z_{eu} might limit the algal productivity as Z_{eu} was less than Z_{mix} . By comparison, YYL is an Oligotrophic lake. Year-round algal concentration is low in YYL in order that Z_{eu} might not control algal productivity. This study clarified the relationships between light availability, Chl. *a*, and DOC and established the multiple regression model.

Keywords: Euphotic zone, Secchi disc transparency, Trophic state, Mixing depth.

一、前言

水體內的葉綠素、營養鹽濃度及水體透明度為淡水生態系生產量的關鍵因子(Cole *et al.* 2011; Hanson *et al.* 2003; Karlsson *et al.* 2009)。19世紀至今分辨透明度仍使用沙奇盤(Secchi disc)量測水體的透明度，欲藉由水體的透光性簡易判別藻類、營養鹽多寡及湖泊的營養態(Trophic state)(如表 1)，也稱作沙奇盤透明度(Secchi disc transparency, SDT)。然而，沙奇盤透明度對湖內藻類生物量及初級生產力的影響可能因地而異，有待進一步探討(Håkanson and Boulion, 2001)。Carlson (1980)發現沙奇盤透明度與葉綠素、營養

鹽具有良好的指數型及線性關係。藻類主要攝取營養鹽，進而增加生物量(Schindler, 1977)。水面的藻類越多，光線越不容易穿透至水底，甚至減

表 1 不同營養態水體中營養鹽、葉綠素 *a* 及沙奇盤深度(節錄自 Nürnberg, 1996)。

Trophic level	Secchi disc (m)	Chlorophyll <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Total-P ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Total-N ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Oligotrophic	>4	< 3.5	< 10	< 350
Mesotrophic	4 - 2	3.5 - 9.0	10 - 30	350 - 650
Eutrophic	2 - 1	9.1 - 25	31 - 100	651 - 1200
Hypertrophic	< 1	> 25	> 100	> 1200

少底棲水草的生物量(Chambers and Klaff, 1995)。經全球各地長期監測下，20 世紀末才建構出水體營養態與沙奇盤透明度的關係，並建立區標準區分湖泊的營養態(見表 1)。2001 年美國明尼蘇達聖保羅都會區(TCMA)利用衛星影像監測該州 600 多個淺水湖泊的沙奇盤透明度及葉綠素 a ，利用模式預測近乎與實測值相同(Stadelmann *et al.*, 2001)。於 1980 至 2012 年的長期監測顯示出：湖泊整體透光度逐年降低，水溫卻逐年上升 $0.92\% \text{ yr}^{-1}$ 的趨勢，與目前全球暖化的升溫幅度相當(Rose *et al.* 2016)。

湖水垂直的物質傳輸主要仰賴湖水的垂直混合作用(Vertical mixing)，例如藻類、營養鹽、溶氧等藉垂直混合由底水層(Hypolimnion)傳輸至表水層(Epilimnion) (Dodds, 2002)。水體表面層又稱水體混合深度(Mixing depth, Z_{mix})。其中水體中自營藻類大多分佈於透光帶(Euphotic zone, Z_{eu})內，藉以獲取光源進行光合作用(Grobbelaar and Stegmann, 1976)，因此，需得知水體混合深度及透光帶的範圍以確切得知水體的光合作用有效生產量與生物量分布(Thornton *et al.*, 1990)。當透光帶小於水體混合深度($Z_{\text{eu}} < Z_{\text{mix}}$)，此時營養鹽並非限制藻類的生產力、生物量，而是由透光帶範圍限制(Thornton *et al.*, 1990; Grobbelaar, 1990)。Karlsson 等人(2009)指出因底泥中富含營養，所以水體中光的有效性(underwater light availability)為影響水深較淺湖泊的生態系代謝、藻類及魚類的生產量的主要因子。經降雨帶入的陸源可溶性有機質(dissolved organic material, DOM)中含有有色可溶性有機物(colored dissolved matter, CDOM)可吸收部分的特定波長入射光導致光的有效性降低(Morris and Hargreaves, 1997; Zang *et al.*, 2007)進一步影響湖泊的代謝量(Stæhr and Sand-Jensen, 2007)。

目前湖泊相關研究多以歐美溫帶為研究對象。另一方面，亞熱帶高山湖泊因座落於海拔 1,500 m 以上，故溫度較低的環境造成與溫帶湖泊具有相似的水體特性，例如水溫、水質及生態系代謝之變化(Solomon *et al.* 2013)。然而，每年夏秋季有颱風擾動影響湖泊整體的 CO_2 通量與

湖泊代謝量，使得台灣的高山湖泊具備獨特的生態系(Jones *et al.* 2009; Tsai *et al.* 2011)。台灣高山湖泊以寡營養鹽的淺水湖泊為主(陳鎮東和王冰潔, 1998)。柳文成和鄭為元等人於 2010 與 2012 年量測鴛鴦湖的沙奇盤透明度，發現沙奇盤透明度的倒數較合適成為光衰減係數(light attenuation coefficient, K_d)的替代參數(Liu *et al.* 2010)。

然而，目前台灣高山湖泊地區尚缺乏長期的水質與透光度監測資料。本研究便是針對不同營養態湖泊水體透明度與透光帶之差異進行探討，以利釐清光量與水質的關係與影響，進一步比較不同營養態間反應有何不同。主要的研究議題如下：(1)調查台灣高山不同營養態湖泊內藻類、可溶性有機物及水體的透明度，有利釐清不同營養態間水體透明度與藻類、有機碳間之關係與季節間差異。(2)調查透光帶與水體混合深度的時序資料，藉由是否透光帶小於水體混合深度($Z_{\text{eu}} < Z_{\text{mix}}$)，比較湖內藻類是否易受到水下光量的限制。

二、材料與方法

2.1 研究樣區

翠峰湖(Tsui-Fong Lake)位於太平山國家公園境內(北緯 $24^{\circ}51'52''$ ，東經 $121^{\circ}60'69''$)，海拔高度約 1,840 m (圖 1)，乾季呈現葫蘆狀或形成一大一小的兩個湖(總面積最小約 8 ha)，豐水期為台灣面積最大的高山湖泊，最大可達 25 ha(陳鎮東和王冰潔 1998)。翠峰湖森林生態保育區包括其四周集水區(面積約 160 ha)。湖四周為檜木次生林，集水區植被多以紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)、台灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)組成的次生林，另有台灣杜鵑(*Rhododendron formosanum* Heiml)、鼠麴草(*Gnaphalium affine*)等植物(毛俊傑 *et al.* 2006)。湖水乾季水表面呈淺綠色，年雨量約 2,200 至 4,500 mm。翠峰湖四周無明顯出入水口，東側有頁岩滲水層，湖水不易蓄滿。故水位變化大，豐水期 9 至 11 月時，最大水深達 14 m，枯水期最低至 2.9 m。年平均水深則約 4.7 m，湖水表面 pH 值平均約 5.9 (Tsai *et al.* 2016)。依照 Tsai *et al.*

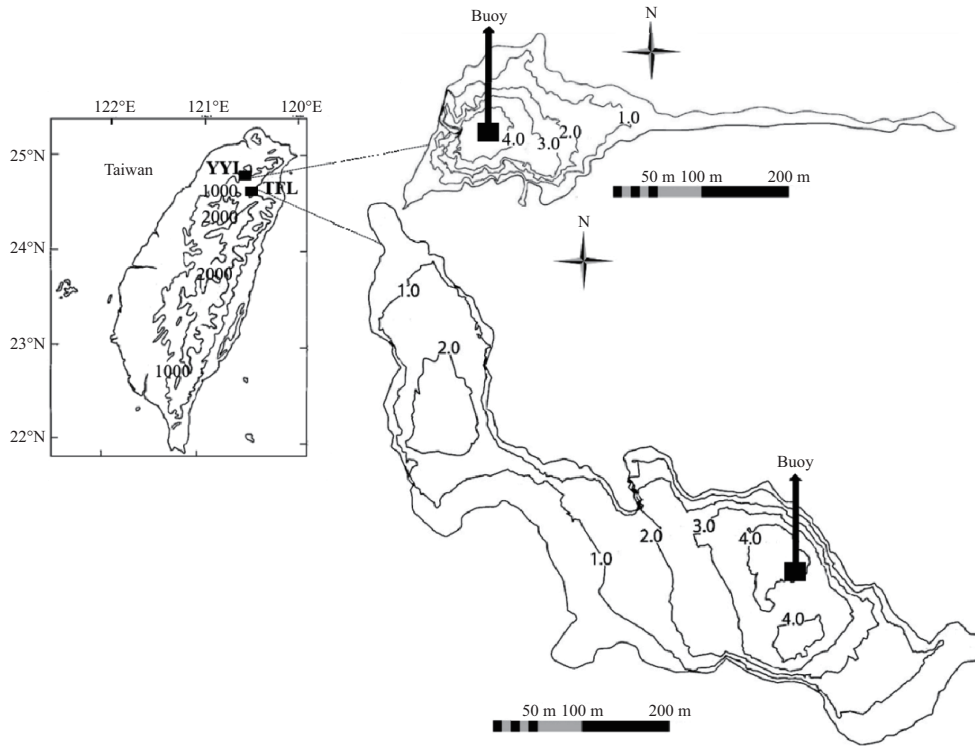


圖 1 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)的位置及地形圖。

2016 水質與湖泊代謝的監測結果，翠峰湖歸類為中營養湖泊(mesotrophic lake) (表 1)。

鴛鴦湖(Yuang-Yang Lake, YYL)位於宜蘭縣棲蘭山的鴛鴦湖自然保留區內(北緯 24°57'68"，東經 121°40'22")，海拔高度約 1,730 m，湖泊面積約 3.6 ha，淺水沼澤地為 2.2 ha，為東西向狹長且呈湯匙狀的湖泊。湖邊四面環山，植被多為主要以紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)、台灣扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)、台灣杜鵑(*Rhododendron formosanum* Heiml)組成的珍貴檜木原生林。湖泊水邊以東亞黑三稜(*Sparganium fallax*)、水毛花(*Schoenoplectus mucronatus* subsp. *robustus*)等水生植物為優勢物種，並在此密集地生長。年均氣溫介於-5 到 25°C 之間。年雨量約 1,900 至 3,500 mm，颱風季 7 至 10 月湖水可獲大量補注，共有 6 處入水口可見地表徑流至湖中，出水口僅 1 處。鴛鴦湖最深處約 4.5 m，即便豪雨兩天內水位上升 2 m 後回復(Tsai *et al.*, 2008,

2011)。湖水呈深褐色，為森林土壤中有豐富的腐質物質所致，水表面 pH 值平均約 5.4 (Wu and Chang, 1996; Tsai *et al.* 2008)。依照 Tsai *et al.* 2008 水質、湖泊代謝的監測結果，鴛鴦湖歸類為寡營養湖泊(Oligotrophic lake) (表 1)。

2.2 水質化學分析

本研究於 2015 年 1 月 1 日至 2017 年 10 月 10 日進行，每月至宜蘭太平山翠峰湖及棲蘭山鴛鴦湖於湖最深處(圖 1)量測沙奇盤深度、透光帶深度及水體混合深度。另外水深(water depth)資料使用 15 m 的塑膠麻繩一端綁上 1 kg 的砝碼，將砝碼垂直置入水中，重複 3 次並紀錄麻繩位置取其平均值。水樣(葉綠素 *a*、可溶性有機碳、水色)利用攜帶式手動幫浦(Hand Vacuum pump, One Lincoln Way, MO, USA)及塑膠過濾漏斗(Filter Holders with Receiver, NALGENE®, NY, USA)過濾樣本，以酸洗過的 100 ml 塑膠瓶保存。

2.2.1 葉綠素 *a* (Chlorophyll *a*, Chl. *a*)

以 GF/F 玻璃纖維紙(Whatman 47 mm GF/F)過濾湖水 200 ml，將濾紙放入 25 ml 包覆鋁箔紙的塑膠瓶中。裝瓶完成後立即放入冰桶中，共重複三次。樣本帶回實驗室後，以 -20°C 的冰箱中存放。分析時每樣本使用 65°C 的甲醇 20 ml 萃取濾紙上的物質 30 分鐘後冰浴至常溫待測。量測時將萃取液樣本置入石英比色管中，以葉綠素螢光儀(10-AU-005-CE, Turner design, CA, USA)進行測定測量葉綠素 *a* 濃度($\mu\text{g L}^{-1}$)。

2.2.2 可溶性有機碳(Dissolved organic carbon, DOC)

以 GF/F 玻璃纖維濾紙過濾湖水 200 ml，將濾液置入 40 ml 的用石蠟封口膜(Parafilm)密封的透明玻璃瓶中(Vial glass, K60958A-912)，並重複三次。帶回實驗室以 4°C 冷藏。分析樣本使用濕式氧化析儀(O. I. TOC analyzer 1030W/1088, Xylem, TX, USA)。樣本導入過硫酸鹽將樣本內的有機碳氧化成 CO_2 ，再經儀器內的紅外線氣體偵測儀(Infrared Gas Analyzer, IRGA)偵測 CO_2 濃度(mg L^{-1})。

2.2.3 水色(Water color, WC)

以 GF/F 玻璃纖維濾紙過濾湖水 200 ml，將濾液置入已酸洗過的 100 ml 塑膠瓶中，並重複三次。樣本帶回實驗室後，以 -20°C 的冰箱中存放。量測時將水樣放入 5 cm 的石英比色管內，以分光光度計(U-3900, HITACHI, JP)測量 440 nm 波長吸光值(OD_{440})，一個樣本量測三次。依照公式(1)將 α_{440} 得出(Cuthbert, 1992; Thurman, 1983)。

$$\alpha_{440} = \frac{2.303(\text{OD}_{440})}{0.05} \dots\dots\dots(1)$$

2.4 水體透明度(Sacchi disc Transparency, SDT)

透明度(Transparency)為光線能夠穿透水的程度，使用沙奇盤量測水面與可見之深度即為沙奇透明度(SDT)。本研究依照環境衛生署水庫水質監測採樣技術手冊內的方式，於浮標監測站旁每月量測沙奇盤深度使用直徑 25 cm 黑色與白色扇形相間的塑膠圓盤，以穩固的棉繩固定於塑膠

圓盤上。量測時將沙奇盤垂直沉入水中，直至看不見為止標記其水深，重複 3 次以平均值為沙奇盤透明度。欲不影響能見度，量測天氣盡量避免陰天及暴雨之天氣狀況，量測時間範圍於白天 9 點至 15 點鐘。量測者不能戴墨鏡，近視者需矯正至正常視力。

2.5 透光帶(Euphotic zone, Z_{eu})與水體混合深度(Mixing depth, Z_{mix})

我們計算透光帶和水體混合深度的比值以分析光有效量對水表面藻類的貢獻程度(Thornton *et al.*, 1987)。兩者的量測及換算方式如下：

透光帶為到達水面 1%光合作用有效輻射(Photosynthesis Active Radiation, PAR)之深度(Klaff, 2001)。水下光量使用 Li-Cor 水下光量計(LI-192SA Underwater Quantum Sensor and the 2009S Lowering Frame, LI-COR, USA)及 LI-250A 即時測值顯示器(LI-250A, LI-COR, USA)量測。每月於兩個湖泊浮標站旁(如圖 1)，量測水面 0、0.5、1、2、3.5 m 的光量測值。依照比爾定律(Beer-Lambert law)使用 Thornton 等人(1987)指數回歸($R^2 > 0.90$)得出公式(2)。 I_0 為野外 0 m 水面光量測值的 1%。 α 、 β 為指數型回歸之係數， e 為自然指數， Z_{eu} 為透光帶。換算後 Z_{eu} 為公式(3)。將 I_0 代入公式(3)。即可得出透光帶的深度(Z_{eu})。

$$I_0 = \alpha \cdot e^{\beta \cdot Z_{eu}} \dots\dots\dots(2)$$

$$Z_{eu} = [\ln(I_0 / \alpha) / \beta] \dots\dots\dots(3)$$

我們利用翠峰湖與鴛鴦湖浮標監測站旁外掛 6 支水體垂直水溫串(Templine; Apprise Technologies, Duluth, MN, USA)。浮標站(buoy, 圖 1)以重錘砝碼與粗棉繩繫至大浮筒底部，使浮筒自然漂浮於水面。將水溫串放繫於浮標站上。深度分別於湖水面下 0、0.25、0.5、1.0、2.0 及 3.5 m 處。儀器每小時量測一筆水溫，所獲得的資料暫存於資料紀錄器中(CR1000, Campbell Scientific, Utah, USA)。因水體混合深度為水表面溫度梯度超過 1°C m^{-1} 時，可定義為湖水已產生

分層現象(Stæhr and Sand-Jensen, 2007)。如公式(4)， $^{\circ}\text{C}_{(0\text{m})}$ 為當下的水面溫度， $^{\circ}\text{C}_{(Z_{\text{mix m}})}$ 為水體混合深度的溫度。每支溫度計的水溫資料與 0 m 水溫資料與其他深度(0.25、0.5、1.0、2.0 及 3.5 m)的水溫資料進行差法換算，得出水體混合深度，藉此了解湖水的分層強度。

$$^{\circ}\text{C}_{(0\text{m})} - ^{\circ}\text{C}_{(Z_{\text{mix m}})} = 1(^{\circ}\text{C m}^{-1}) \dots\dots\dots(4)$$

2.6 統計分析

本研究將每月量測的 Z_{eu} 、STD、Chl. *a*、DOC 區分為春(3 至 5 月)、夏(6 至 8 月)、秋(9 至 11 月)、冬(12 至 2 月)後算出平均(mean)與標準偏差(standard deviation)。使用 R 軟體(R-3.3.3 version, R Development Core Team (2017), Austria)進行兩因子變異數分析(Two-way ANOVA)比較翠峰湖與鴛鴦湖(TFL、YYL)與季節間之變異數差異。各因子的相關性使用皮爾森相關分析(Pearson correlation)得出 Z_{eu} 、 Z_{mix} 、STD、Chl. *a*、水深(WD)、DOC 及 WC 間之相關性。光能力參數(Z_{eu} 、STD)利用簡單線性回歸(simple linear regression)分析與各因子間(Chl. *a*、水深(WD)、DOC)的直線關係。欲了解沙奇盤深度、透光帶與多因子(Z_{mix} 、Chl. *a*、水深(WD)、DOC 及 WC)的關聯性，使用逐步性複回歸模型(Stepwise multiple-regression model)進行分析。

三、結果與討論

3.1 不同營養態湖泊透明度及透光帶

翠峰湖春季的水深 3 m，秋冬季(11 至 2 月)最高可上升至 10 至 12 m。SDT 範圍約 0.5 至 1.2 m，透光度變動範圍約 1 至 5 m。鴛鴦湖水深在 4.2 至 4.9 m 間變動，SDT 約介於 0.5 至 2 m，透光帶範圍介於 2 至 4 m(圖 2)。翠峰湖具較高的水深及 Z_{eu} 變動而鴛鴦湖水深變動小，鴛鴦湖的 SDT 變動幅度比翠峰湖高。翠峰湖為藻類較多的封閉湖泊，並無明顯的出水口，秋季颱風季節過後(11 月)需經過 4 至 6 個月由 11.5 m 下降至 3.2 m；鴛鴦湖具有明顯出水口至下游的石門水庫，當颱風夾帶豪雨使水位上升，僅一兩日內可回歸

原本水位(Tsai *et al.* 2011)。翠峰湖水位變化受到颱風暴雨事件影響，颱風暴雨雨勢越強，湖泊豐水期則持續越久；鴛鴦湖水位視短期內降雨量多寡而定。

季節尺度下，翠峰湖季節間 SDT 並無統計上的顯著差異(圖 3)。然而，透光帶於春、冬季間具顯著差異($p = 0.04$)。翠峰湖春季 Chl. *a* 平均為 $64.71 \mu\text{g L}^{-1}$ ；冬季 Chl. *a* 平均為 $25.12 \mu\text{g L}^{-1}$ (圖 4)。翠峰湖春季因藻華使藻類與營養鹽濃度暴增，營養態由中營養湖轉換成過營養湖(Hypertrophic lake)(Tsai *et al.* 2016)，故造成翠峰湖透光帶具有顯著季節性差異(表 1、圖 4)。另一方面，鴛鴦湖的 STD 在夏、冬與秋、冬間具極顯著的差異($p < 0.001$)，翠峰湖與鴛鴦湖 DOM 雖有相似的季節變動，但鴛鴦湖內 DOM 濃度較翠峰湖平均高 1.2 至 1.5 倍(圖 4)。翠峰湖與鴛鴦湖春季 DOM 增加至夏季的 1.5 至 2 倍(圖 4)，翠峰湖春季由 2.5 mg-C L^{-1} 上升至 5 mg-C L^{-1} ，秋季則回復至春季的 DOM 濃度(約 4 mg-C L^{-1})，冬季最低(2 mg-C L^{-1})。颱風季節間豪雨沖刷周圍原始林集水區，將森林土壤內豐富的有色可溶性有機物質釋放至湖水中(Tsai *et al.* 2008)，尤以鴛鴦湖較為明顯。換言之，因翠峰湖所環繞的次生林輸入的 DOM 較少，故水體透明度季節間並沒有差異(圖 3、4)。以年尺度來看，鴛鴦湖和翠峰湖 SDT 2015 年平均比 2016、2017 年高 0.2 至 0.4 m(圖 2)。因太平山 2014 年雨量較近 5 年平均年雨量少 1000 mm(參照中央氣象局太平山 92 班林地之氣象站資料，<http://www.cwb.gov.tw>)，故造成 2015 年 1 至 6 月水位較低(圖 2)。翠峰湖與鴛鴦湖的水位變動主要由降雨事件影響(Tsai *et al.* 2011；Tsai *et al.* 2016)。降雨較少導致 2015 年上半年 DOM 輸入較少，進一步造成 2015 年翠峰湖與鴛鴦湖 SDT 增加(圖 2)。季節與年尺度下，翠峰湖與鴛鴦湖可能主要受降雨過後徑流輸入大量可溶性物質導致 SDT 降低。

3.2 不同營養態湖泊間藻類、可溶性有機物與透光度的關係

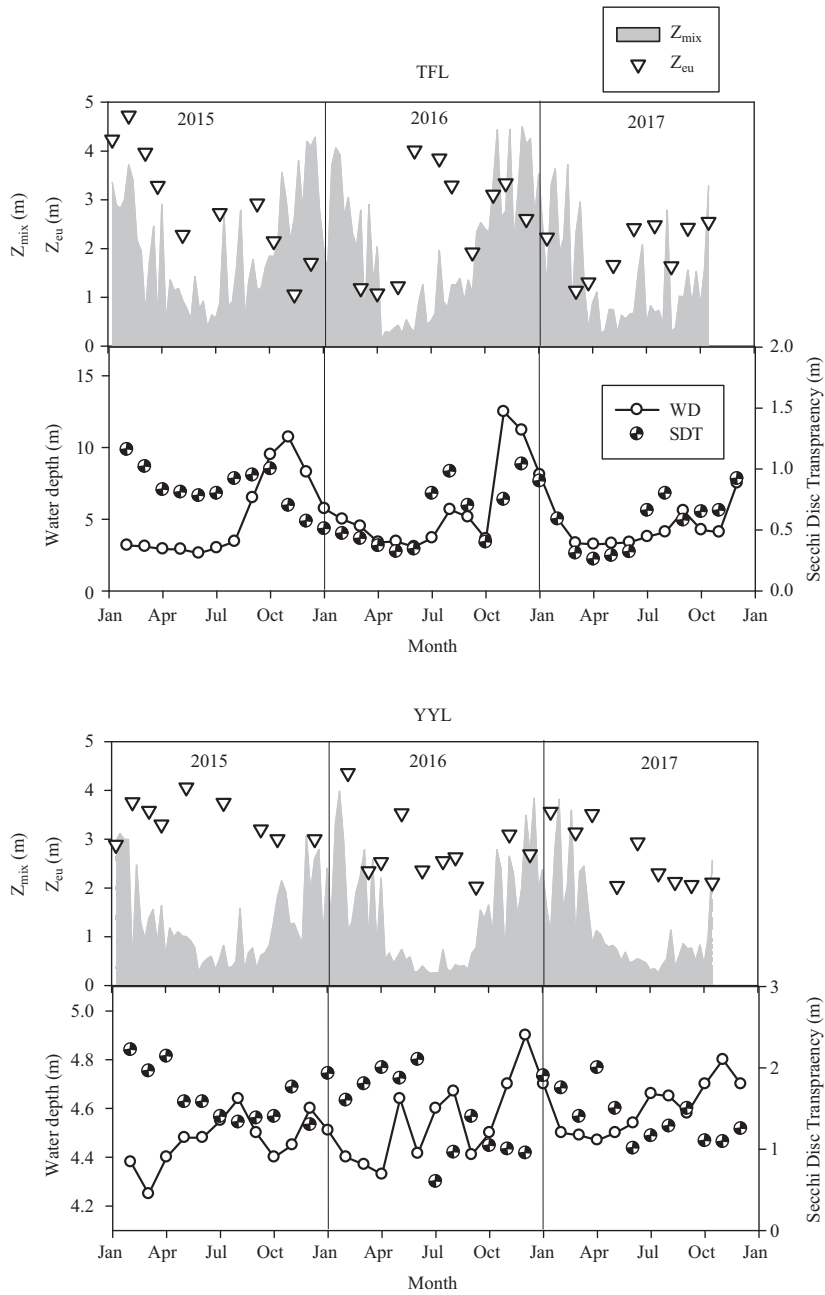


圖 2 2015 至 2017 年鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)沙奇透明度(SDT)、透光帶(Z_{eu})、每日平均水體混合深度(Z_{mix})及水深之季節動態變化。

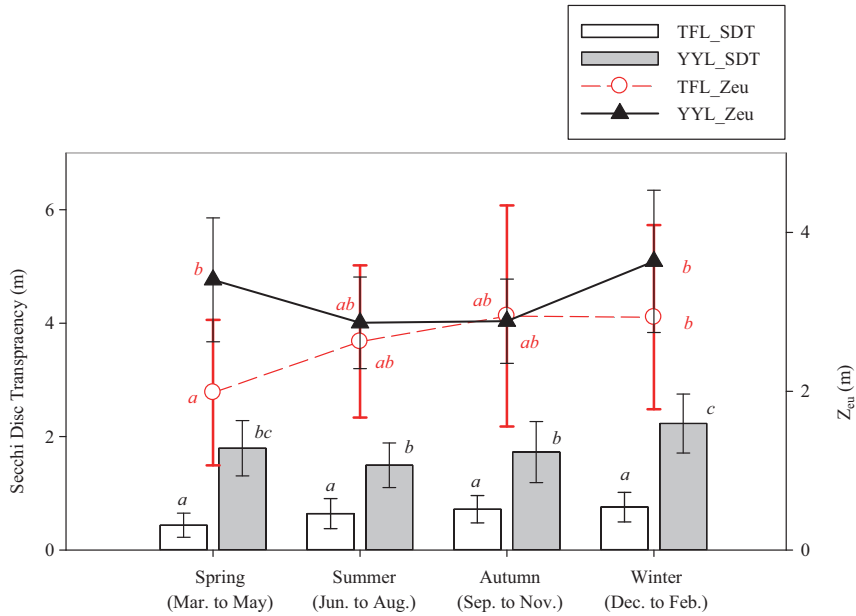


圖 3 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)沙奇透明度(SDT)、透光帶(Z_{eu})平均值(\pm 標準偏差)季節差異。

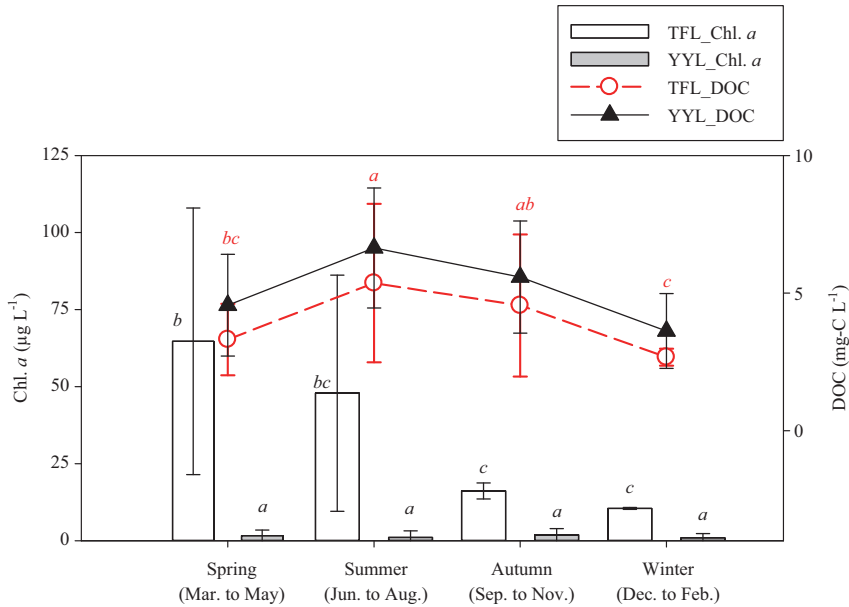


圖 4 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)水表面 Chl. *a* 和 DOC 平均值(標準偏差)季節差異。

翠峰湖與鴛鴦湖 SDT 與水質、水物理因子具不同關聯性(表 2)。依照表 2 的皮爾森相關分析結果，翠峰湖 SDT 與 Chl. *a* 具有高度相關性

($r = -0.83, p < 0.001$)。鴛鴦湖 SDT 與 DOM($r = -0.82, p < 0.001$)、水色($r = -0.76, p < 0.001$)、水深($r = -0.62, p < 0.001$)皆具有相關性。翠峰湖與鴛

表 2 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)水下光能力(SDT、 Z_{eu})、水體物理(Z_{mix} 、water depth)及水質因子(Chl. *a*、DOC、WC)之皮爾森相關分析。

Location		Z_{eu}	Z_{mix}	Chl. <i>a</i>	DOC	WD	WC
TFL	SDT	0.80***	-0.02	-0.83***	0.23	0.33	-0.26
	Z_{eu}		0.41*	-0.70***	0.038	0.07	-0.41*
	Z_{mix}			-0.12	0.053	-0.28	-0.20
	Chl. <i>a</i>				-0.16	-0.47**	0.26
	DOC					0.15	0.23
	WD						0.26
YYL	SDT	0.54**	0.25	0.062	-0.82***	-0.62***	-0.76***
	Z_{eu}		-0.001	0.27	-0.61**	-0.46*	-0.48*
	Z_{mix}			-0.21	0.06	0.34	0.14
	Chl. <i>a</i>				-0.43*	-0.33	-0.38*
	DOC					0.72***	0.96***
	WD						0.71***

* Shows the statistical significance at p -value ≤ 0.05 ; ** shows the statistical significance at p -value ≤ 0.01 ; *** shows the statistical significance at p -value ≤ 0.001 . WD is water depth (m).

鴛鴦湖的 DOM 輸入主要以降雨輸入(外源)及颱風攪動底泥(內源)為主(Tsai *et al.* 2008、2016)。由圖 5 可知，鴛鴦湖 SDT 受湖泊 DOM 的輸入影響。SDT 與水深($r = 0.58, p < 0.01$)、DOC($r = 0.81, p < 0.001$)具有良好的相關性。另外，當鴛鴦湖水深提高代表輸入大量的 DOM；水色也極顯著地上升($r = 0.71, p < 0.001$)(表 2)。鴛鴦湖水色與 SDT 具極顯著相關($r = -0.76, p < 0.001$)，其中水色與 DOM 相關性最高($r = 0.96, p < 0.001$)，水深次之($r = 0.71, p < 0.001$)。鴛鴦湖水色變動因湖內輸入大量可溶性有機物輸入影響。另一方面，翠峰湖水色僅與透光帶具相關性($r = -0.41, p < 0.05$)。因翠峰湖水體的 DOC 濃度變動較低，故造成 SDT 與水色並無顯著性的關係(圖 4)。翠峰湖 SDT 與 Chl. *a* 雖具有良好的指數性關係($r = 0.79, p < 0.001$)(圖 5)，但季節間 SDT 無差異(圖 3)。

翠峰湖透光帶與 Chl. *a* ($r = -0.70, p < 0.001$)、水色($r = -0.41, p < 0.05$)有負相關，水體混合深度($r = 0.41, p < 0.05$)有正相關；鴛鴦湖透光帶與 DOC ($r = -0.61, p < 0.01$)、水色($r = -0.46, p < 0.05$)、水深($r = -0.48, p < 0.05$)有關(表 2)。TFL

受春季藻華影響使得透光帶降低，但鴛鴦湖季節間的透光帶無差異(圖 3、4)，可見因為水面產生大量藻類導致遮蔽光量，使季節間透光帶具顯著差異(圖 3、4)。使用逐步複回歸分析發現透光帶與 STD 具類似的結果(表 3)，僅使用 1 至 2 個參數可換算成透光帶(TFL $r = 0.77, p < 0.001$ ；YYL $r = 0.69, p = 0.002$)。STD 與參數的關係性更佳(TFL $r = 0.84, p < 0.001$ ；YYL $r = 0.88, p < 0.001$)。然而，翠峰湖與鴛鴦湖間複回歸參數仍有差異，翠峰湖主要以 Chl. *a* 為參數；鴛鴦湖參數為 DOM (表 3)。

3.3 不同營養態湖泊間透光帶與水體混合深度的消長

整體而言，秋冬季不分層主要由秋季反轉(fall overturn)影響秋冬季翠峰湖與鴛鴦湖水體不分層的狀況(圖 2)。亞熱帶秋冬季的降溫造成水表面密度增加，湖水密度增加而下沉後擠壓底層湖水形成湖內對流(Klaff, 2001)。另外，颱風擾動也造成湖水面受強風的剪力形成湖內對流(wind-induced turbulence)及豪雨輸入(inflow

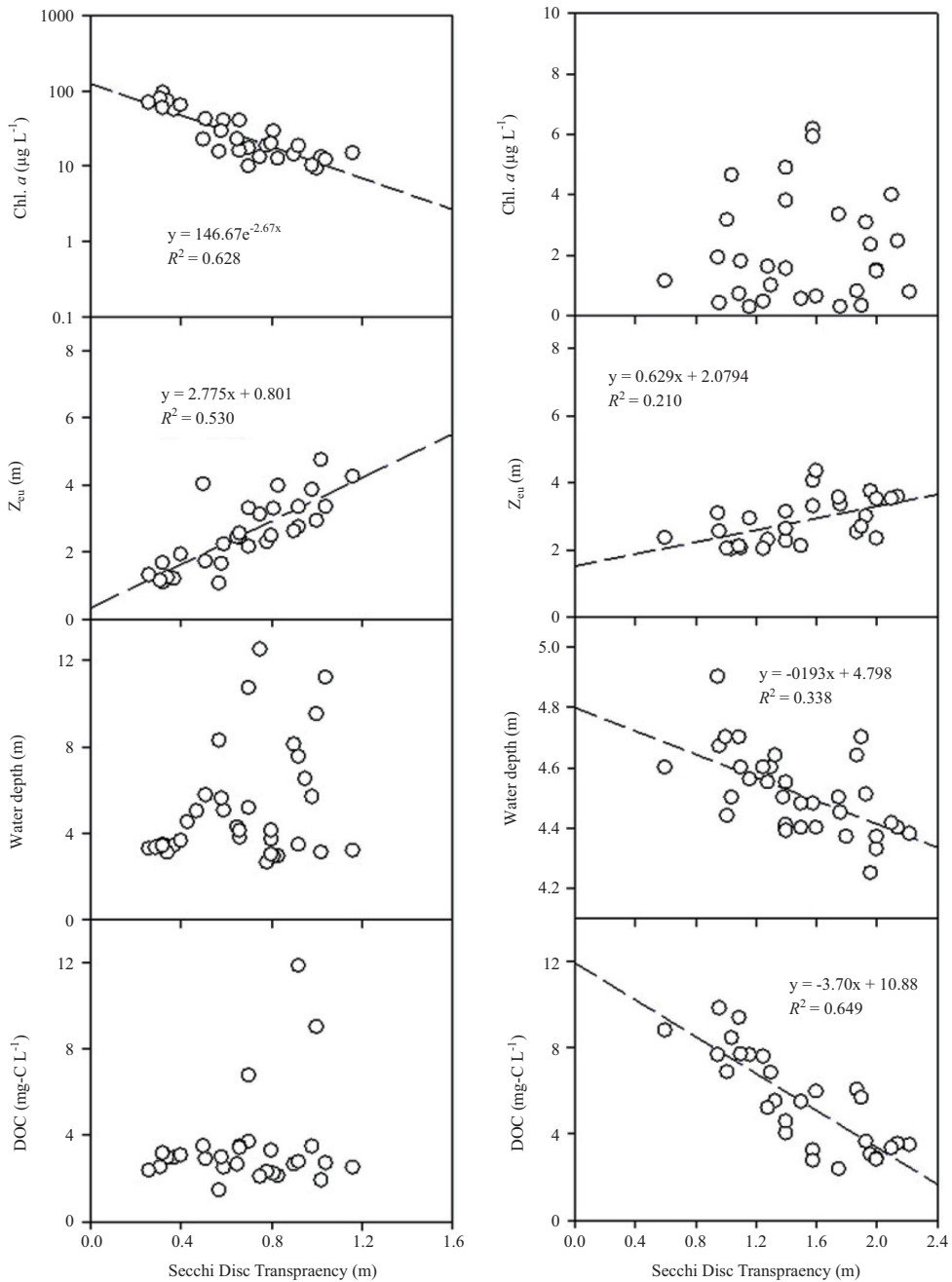


圖 5 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)沙奇透明度(SDT)、透光帶(Z_{eu})、水質(DOC、Chl. a)、水深的關係。

intrusion)形成水體不分層，進而增加水體混合深度(Kimura *et al.*, 2017)。水體混合深度多寡也影響藻類、營養鹽及溶氧之傳輸範圍(Dodds, 2002)。

每月實地採樣調查的結果發現翠峰湖與鴛鴦湖冬季皆有透光層小於水體混合深度($Z_{eu} < Z_{mix}$)之情況(圖 2)。鴛鴦湖除 12 月外，水體混合深度中的自營生物受光的限制(圖 2)。翠峰湖夏

表 3 鴛鴦湖(YYL)和翠峰湖(TFL)水下光能力參數(Z_{eu} 、STD)與水文及水質參數(Chl. a , DOC, water depth, Z_{mix})的複迴歸分析。

	Variable	Multiple Regression function	r^2	F	p	n
TFL	Z_{eu}	$3.13 - 0.0284 \text{ Chl. } a + 0.13 Z_{mix}$	0.60	25.78	<0.001	30
	STD	$0.944 - 0.0087 \text{ Chl. } a$	0.70	60.27	<0.001	32
YYL	Z_{eu}	$3.86 - 0.179 \text{ DOC}$	0.47	12.15	0.002	30
	STD	$6.35 - 0.183 \text{ DOC} + 0.13 Z_{mix}$	0.78	31.14	<0.001	32

秋季水體混合深度平均約 0.8 m，颱風期間可上升 1 至 3 m；鴛鴦湖水體混合深度平均約 0.5 m 可上升 0.5 至 2 m(圖 2)。然而，翠峰湖中的浮游藻類近半年的時間受到光的限制，因為 10 月持續至隔年 4 月期間 $Z_{eu} < Z_{mix}$ (圖 2)。因春季翠峰湖的透光帶明顯較低($p = 0.039$, 圖 3)與秋冬季水體不分層的影響，故表層湖泊代謝量容易受透光帶限制，例如丹麥的中營養湖泊在透光帶深度以下的湖泊代謝量(GPP, $\text{mmol O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)約下降 25%；過營養湖甚至下降 80% (Obrador *et al.* 2014)。翠峰湖全年雖含豐富的藻類及營養鹽，總氮全年平均約 $570 \mu\text{g-N L}^{-1}$ ；總磷約 $30 \mu\text{g-P L}^{-1}$ (Tsai *et al.* 2016)，但 $Z_{eu} < Z_{mix}$ 之情況無法支持水體混合深度內整體藻類進行光合作用，進一步影響湖泊的生物生產量與代謝量(Grobbelaar, 1990; Obrador *et al.* 2014)。本研究中湖泊代謝主要使用 Odum model 計算湖泊生態系的生產量(Odum, 1956)。雖然公式中氧氣傳輸速率有考量水體混合深度(Dodds, 2002)，但依照本研究的成果，翠峰湖超過半年(10 月至 4 月)受到透光帶的限制這可能造成翠峰湖的湖泊代謝被低估。本研究對台灣寡營養及中營養湖泊水下透光度有初步的差異比較。日後可探討翠峰湖水體不分層之情況下，水體混合深度與透光帶的溶氧時序變化，以利改善模式推算的結果。

翠峰湖為藻類濃度較高的水體，因春季藻華間使透光帶降低，另外秋末至春初(10 至 4 月)水體不分層，故造成水體混合深度內藻類會受到光量的限制(圖 2)。鴛鴦湖的藻類雖然整年可接收足夠的光源(圖 2)，但藻類濃度低主要受湖內營

養鹽的限制(Tsai *et al.* 2008)。欲了解翠峰湖與鴛鴦湖水體混合深度內是否長期維持足夠光量之狀態，可使用高頻度螢光水質儀(例如 C3™ Submersible Fluorometer, Turner designs, CA, USA)量測水體 Chl. a 與有色可溶性有機物濃度後，利用本研所得出的複迴歸公式換算成高頻度的透光帶與 STD(表 3)。搭配營養鹽、光量、雨量等氣象與水質參數進行比較，可更完整解釋水下光能力與水質的關係(Tsai *et al.* 2008、2016)。

四、結 論

配合每月實地採樣調查結果，整體歸結如下：季節尺度來看，主要影響透明度為可溶性有機碳，藻類濃度次之。年尺度下則發現較乾旱的年份，因沉降與有機碳的輸入較少，故影響隔年颱風季前(1 至 6 月)的水體透明度。

亞熱帶不同營養態的高山湖泊透明度具受不同因子影響。中營養態的翠峰湖雖湖內藻類濃度影響水體透明度(STD)，但季節間水體透明度無顯著差異。另外，於 10 月至隔年 4 月水體混合深度內的藻類容易受到透光帶過淺的影響，春季翠峰湖主要受藻華影響。秋冬季則受到水體不分層的影響，使透光帶低於水體混合深度($Z_{eu} < Z_{mix}$)。

寡營養態的鴛鴦湖受豪雨過後的地表逕流輸入可溶性有機物，沉降間接地影響水體的透明度。其中於颱風季水體透明度較低，也印證水體透明度受豪雨帶來的地表逕流影響。鴛鴦湖的透光帶低於水體混合深度的情況較為罕見，湖內

藻類不容易受到水下光量的限制。

五、致 謝

感謝中央研究院主題計畫(AS-103-TP-B15)與科技部計畫(MOST 106-2621-M-239-001)提供經費補助。另外感謝江立勤等人協助 2015 年例行野外採樣、化學分析、資料整理，及美國威斯康辛大學 Jordan Reed 協助以聲納測繪翠峰湖及鴛鴦湖湖底地形圖。最後感謝國網中心林芳邦博士及周秀美協助將野外資料保存至網路資料庫 (<http://ecogrid.nchc.org.tw:8088/lake0/index.jsp>)。

六、參考文獻

1. Carlson, R. E., "More complications in the chlorophyll-Secchi disk relationship," *Limnology and Oceanography*, 25(2), pp. 379-382, 1980.
2. Chambers, P. A. and Kaiff, J., "Depth distribution and biomass of submersed aquatic macrophyte communities in relation to Secchi depth," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(4), pp. 701-709, 1985.
3. Cole, J. J., Pace, M. L., Carpenter, S. R. and Kitchell, J. F., "Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations," *Limnology and Oceanography*, 45(8), pp. 1718-1730, 2000.
4. Cole, J. J., Carpenter, S. R., Kitchell, J., Pace, M. L., Solomon, C. T. and Weidel, B., "Strong evidence for terrestrial support of zooplankton in small lakes based on stable isotopes of carbon, nitrogen, and hydrogen," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(5), pp. 1975-1980, 2011.
5. Cuthbert, I. D. and Giorgio, P., "Toward a standard method of measuring color in freshwater," *Limnology and Oceanography*, 37, pp. 1319-1326, 1992.
6. Dodds, W. K., *Freshwater ecology: concepts and environmental applications*. Academic press, pp. 103-105, 2002.
7. Grobbelaar, J. U. and Stegmann, P., "Biological assessment of the euphotic zone in a turbid man-made lake," *Hydrobiologia*, 48(3), pp. 263-266, 1976.
8. Grobbelaar, J. U., "Modelling phytoplankton productivity in turbid waters with small euphotic to mixing depth ratios," *Journal of Plankton Research*, 12(5), pp. 923-931, 1990.
9. Håkanson, L. and Boulion, V. V., "Regularities in primary production, Secchi depth and fish yield and a new system to define trophic and humic state indices for lake ecosystems," *International Review of Hydrobiology*, 86(1), pp. 23-62, 2001.
10. Hanson, P. C., Bade, D. L., Carpenter, S. R. and Kratz, T. K., "Lake metabolism: Relationships with dissolved organic carbon and phosphorus," *Limnology and Oceanography*, 48: pp. 1112-1119, 2003.
11. Jones, S. E., Kratz, T. K., Chiu, C. Y. and McMahon, K. D., "Influence of typhoons on annual CO₂ flux from a subtropical, humic lake," *Global Change Biology*, 15(1), pp. 243-254, 2009.
12. Karlsson, J., Byström, P., Ask, J., Ask, P., Persson, L. and Jansson, M., "Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems," *Nature*, 460(7254), pp. 506-509, 2009.
13. Rose, K. C., Winslow, L. A., Read, J. S. and Hansen, G. J., "Climate-induced warming of lakes can be either amplified or suppressed by trends in water clarity," *Limnology and Oceanography Letters*, 1(1), pp. 44-53, 2016.
14. Kimura, N., Liu, W. C., Tsai, J. W., Chiu, C. Y., Kratz, T. K. and Tai, A., "Contribution of extreme meteorological forcing to vertical mixing in a small, shallow subtropical lake," *Journal of Limnology*, 76(1), pp. 116-128, 2017.
15. Klaff, J., *Limnology: Inland water ecosystem*,

- McGill University, USA. pp. 146-163, 2001.
16. Liu, W. C., Wu, R. S., Wu, E. M. Y., Chang, Y. P. and Chen, W. B., "Using water quality variables to predict light attenuation coefficient: case study in Shihmen Reservoir," *Paddy and Water Environment*, 8(3), pp. 267-275, 2010.
 17. Nürnberg, G. K., "Trophic state of clear and colored, soft-and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish" *Lake and Reservoir Management*, 12(4), pp. 432-447, 1996.
 18. Odum, H. T., "Primary production in flowing waters," *Limnology and Oceanography*, 1: pp. 102-117, 1956.
 19. Obrador, B., Stæhr, P. A. and Christensen, J. P., "Vertical patterns of metabolism in three contrasting stratified lakes," *Limnology and Oceanography*, 59(4), pp. 1228-1240, 2014.
 20. Schindler, D. W., "Evolution of phosphorus limitation in lakes," *Science*, 195(4275), pp. 260-262, 1977.
 21. Smith, V. H., "Light and nutrient effects on the relative biomass of blue-green algae in Lake Phytoplankton," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43(1), pp. 148-153, 1986.
 22. Stadelmann, T. H., Brezonik, P. L. and Kloiber, S., "Seasonal patterns of chlorophyll a and Secchi disk transparency in lakes of East-Central Minnesota: Implications for design of ground-and satellite-based monitoring programs," *Lake and Reservoir Management*, 17(4), pp. 299-314, 2001.
 23. Stæhr, P. A. and Jensen, K. S., "Temporal dynamics and regulation of Lake Metabolism," *Limnology and Oceanography*, 52(1), 2007.
 24. Solomon, C. T., Bruesewitz, D. A., Richardson, D. C., Rose, K. C., Van de Bogert, M. C., Hanson, P. C. and Chiu, C. Y., "Ecosystem respiration: drivers of daily variability and background respiration in lakes around the globe," *Limnology and Oceanography*, 58(3), pp. 849-866, 2013.
 25. Thornton, J. A., "A review of some unique aspects of the limnology of shallow southern African man-made lakes," *GeoJournal*, 14, pp. 339-352, 1987.
 26. Thurman, E. M., "Determination of aquatic humic substances in natural waters," *U. S. Geol. Surv. Pap. Hydrol. Sci.*, W2262, pp. 47-52, 1983.
 27. Tsai, J.W., Kratz, T. K., Hanson, P. C., Wu, J. T., Chang, W. Y. B., Arzberger, P.W., Lin, B.S., Chao, Y. L., Lin, F. P., Chou, H. M. and Chiu, C. Y., "Seasonal dynamics, typhoons and the regulation of Lake Metabolism in a subtropical humic lake," *Freshwater Biology*, 53, pp. 1929-1941, 2008.
 28. Tsai, J. W., Kratz, T. K., Hanson, P.C., Kimura, N., Liu, W. C., Lin, F. P., Chou, H. M., Wu, J. T. and Chiu, C. Y., "Metabolic changes and the resistance and resilience of a subtropical heterotrophic lake to typhoon disturbance," *Can J Fish Aquat Sci.*, 68, pp.768-780, 2011.
 29. Tsai, J. W., Kratz, T. K., Rusak, J. A., Shih, W. Y., Liu, W. C., Tang, S. L. and Chiu, C. Y., "Absence of winter and spring monsoons cause water level changes and rapid shifts in metabolism in a subtropical lake," *Inland Waters*, 6(3), pp. 436-448, 2016.
 30. Wu, J. T. and Chang, S. C., "Relation of the diatom assemblages in the surface sediments to the pH values of an alpine lake in Taiwan," *Archiv für Hydrobiologie*, 137, pp. 551-563, 1996.
 31. 毛俊傑、陳子英、阮忠信：「翠峰湖生物相與棲地之調查研究」，行政院農委會林務局保育研究，第 94-10 號，2006。
 32. 行政院環境保護署水質採樣指引：「河川、湖泊及水庫水質採樣通則」，行政院環保署，2015。

33. 柳文成、張傳恩：「應用多變量統計分析評估高山湖泊水質」，台灣水利。59(2)，pp. 75-86，2011。
34. 陳鎮東、王冰潔。臺灣的湖泊與水庫，渤海堂文化公司，1997。
35. 鄭為元、吳仲英、柳文成、邱志郁：「應用水質變數建立亞熱帶高山鴛鴦湖水體光衰減模式」，台灣水利，60(2)，pp. 63-73，2012。

收稿日期：民國 107 年 1 月 15 日

修正日期：民國 107 年 2 月 1 日

接受日期：民國 107 年 2 月 6 日