

知識天地

「所謂伊人，在水一方」——高山湖泊生態

邱志郁研究員 (生物多樣性研究中心)

涓涓源水

即使旱魃荼毒大地，環抱森林的溪流，依舊吐放涓涓深情。

款款相思，是森林向溪流傾訴衷曲。

潺潺細語，是源自於土壤的矜持和包容。

森林經由枯枝落葉，不斷供應有機物到土壤中，維持了土壤的結構機能，讓土壤不至於劣化。原始森林在地面上具備良好的植被保護，土壤不易遭受雨水侵蝕。土壤的孔隙也完整健全，不至於被迅速填補阻塞。這些極其自然而不起眼的特性，卻扮演重要的功能。

台灣高海拔山區的森林和森林地表的深厚腐植層，堪稱是台灣的珍貴資產。彷彿是綿延不絕的超大型厚實毛毯，覆蓋在台灣背脊上。深厚的腐植層具備強大的吸水能力，配合著森林土壤所具備的大量孔隙，足以迅速吸納降雨，緩衝暴雨山洪的危險。地表的雨水透過土壤孔隙，能夠順暢地往土壤內部滲透，挹注到地下水層，或是沿著坡面徐徐釋放到溪流中，以致於乾旱時節，溪谷中還能保有涓涓細流。

無形的綠色水庫，數萬年前即已存在於台灣的高山上，滋養台灣的過去和未來。

高海拔山區溫度較低，低溫限制了微生物的分解作用，造成高山土壤有機物累積的現象。我們藉由核磁共振儀分析土壤腐植質，證實高山腐植質的化學官能基組成具備較高的易分解成份。土壤有機質的組成特性和分解的程度息息相關，易分解成份隨著有機質的顆粒變小而減少¹⁾。大體上而言，高山土壤腐植化的程度是低於平地的土壤。

微地形環境的差異所造成土壤含水量的差異，也影響了土壤有機物的累積狀態。在山坳底部所形成的高山湖泊沼澤，浸水的土壤缺乏氧氣，阻礙了有機物分解，易於堆積形成深厚的腐植層²⁾。未被充分分解的有機物碎屑和水溶性有機物，被帶入湖泊水體，也關係到湖泊生態。

脈脈春水

鴛鴦湖自然保留區位於台灣北部的棲蘭山，擁有台灣少數僅存的原始檜木林。屬於石門水庫上游源頭的鴛鴦湖，地形環境是完整而獨立的集水區(海拔高度介於1,670至2,432公尺之間)。無論是針對生態系模式或是湖泊水文的研究範疇，具備極其珍貴的學術價值。此外，在台灣幾處未受干擾的高山湖泊當中，鴛鴦湖堪稱是交通方便的地點。周昌弘院士於1996年向農委會建議，並獲得資助在當地設置鴛鴦湖研究工作站。本中心承繼經營，得以延續長期生態研究工作不墜。正因為該工作站可有效支援周邊的各項研究，包括例行調查採樣，維護湖水監測系統、氣象站等諸項設施的日常運作，使得底下介紹的諸項湖泊代謝的研究工作得以順利推展。

所謂湖泊代謝，是將湖泊生態系視同為一個生物體，探討湖泊生質能量形成(光合作用)和消耗(呼吸作用)的過程中，物質、能量、養分間的動態平衡關係。具體而言，水中生物的呼吸作用，會造成夜間湖水溶氧量下降，可用於估算生態系整體的呼吸作用量。至於白天，除了原本的呼吸作用持續進行之外，更由於初級生產者(藻類、水草)的光合作用積極貢獻水中溶氧，造成湖水溶氧量升高。假設白天和夜間呼吸量相等，湖泊總初級生產力和呼吸量之間的差值，就相當於湖泊淨生產力。換言之，根據湖泊水中溶氧量晝夜的變化，得以求出湖泊生態系每天的總初級生產力、呼吸作用量、淨生產力。

簡而言之，當湖泊生態系整體的總初級生產力大於呼吸作用量時，淨生產力為正值，表示湖泊藉由光合作用所累積的生質能量不但足以供應湖泊各種生物消耗，且還有剩餘足以輸出。在能量的利用屬性上，此類湖泊是自營性湖泊，水體溶氧較高。

反之，當淨生產力呈現負值時，表示光合作用所累積的生質能量，低於湖泊各種生物所實際消耗的生質能量。不足的生質能量，就是由環繞湖泊周邊陸域的水流所攜入的有機物供應。在能量的利用屬性上，此類湖泊是異營性湖泊，水體溶氧較低。

2004年我們在鴛鴦湖中央安裝研究用的浮筒，搭載監測湖泊代謝的儀器和無線數位傳輸系統(圖一)。透過無線電發報器和電腦網路，可由遠端的研究室進行遙控和接收數據，並予以計算和建構於資料庫。經由這些系統，我們可以即時並持續地監測湖泊水文的晝夜、季節性變化。有助於克服研究人員無法在現場觀測的限制，能夠有效地監測颱風

等重大氣象條件變動下瞬間的水文變化。

欲建立湖泊代謝模式，必須對於湖泊的本質和運作的機能有基本的瞭解。

透過高解析度的這套監測系統，我們得以了解湖泊的季節變化和極端氣候對於湖泊水體擾動的過程，以及湖泊生態承受這些作用所造成的反應。

湖泊在溫暖無風雨的天候狀態下，受到太陽輻射的作用，湖泊水體會呈現溫度分層的現象，尤其在夏季最為明顯。表層水接觸太陽輻射，受熱膨脹密度變小，溫熱變輕的湖水滯留在表層，底層水則維持低溫。於是水體的溫度隨著深度往下遞減，密度則往下增加。水體的溫度和密度呈現穩定的梯度分布現象，阻礙了水體的上下移動，連帶限制了氧氣往底層的供應和養分往表層的輸送，以致於影響到水中生物的生長和分布。進入秋冬之後，這種水體溫度分層的現象才開始被打破。一方面是日輻射變小，一方面是氣溫變低。表層水受到氣溫冷卻，密度變大而下沉，產生了對流作用，使得湖泊水體有了上下混合的現象。秋冬時節水體的混合現象，是構成溫帶湖泊生態系最為劇烈的擾動作用。

台灣的高山湖泊，具備類似溫帶的氣候條件，卻又具有溫帶湖泊所欠缺的一項劇烈擾動作用——夏季的颱風和暴雨。這項特質，配合了我們建立的高解析度的監測系統，引發過去湖泊生態研究上所未有的創新議題和試煉。

泱泱天水

鴛鴦湖面積雖小(3.6公頃)，深度也只有四公尺，卻在湖泊研究上有一項讓國外學者驚豔的特性。颱風所帶來的豪雨，可在一兩天內讓湖水水位上升達兩公尺，隨後在兩三天內回復原有水位(圖二)。相較於國外的湖泊可能需要耗費數十年、數百年才讓湖水全面更新，鴛鴦湖卻每年可更新好幾回。颱風造成湖水劇烈的擾動，乃至於生態系的更新作用，讓鴛鴦湖生態系的研究更加具備吸引力。

鴛鴦湖的淨生產力在初夏和仲秋達到最高，但在颱風季節顯著下降。颱風大量的降雨，對於湖泊水文循環造成巨大的干擾作用，干擾的強弱也對於湖泊生產力及代謝平衡構成不同程度的影響效果。強烈颱風的大量雨水，形成劇烈的沖洗作用，帶出湖泊原本的營養鹽和微生物相，相當於造成湖泊全面更新的現象，降低了湖泊的淨生產力³⁾。颱風對於湖泊生態系所構成強烈的更新作用，類似火災對於草原生態系所構成植被和營養鹽循環更新的機制。

當今全球暖化對於環境造成的影響，日益受到關切。降雨量增加、颱風暴雨對於水域生態的衝擊，乃至於湖泊水體CO₂排放量的變化，亟待建立模式加以評估。我們根據鴛鴦湖水體的CO₂濃度和高解析度的水文和氣象資料，透過水文模式加以模擬，研判升高的年降雨量和颱風的數量，會促進上下水層的相互作用，進而提升表水層的CO₂濃度，釋放更多的CO₂到大氣中⁴⁾。

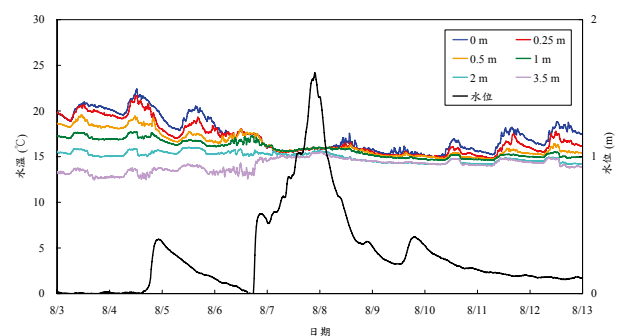
湖水在颱風的劇烈擾動後，微生物群落的分布又起了怎樣的變化？細菌的群落複雜而多樣，傳統上都認為在經歷干擾作用時反應難以預期。藉由分子生物技術類似於指紋比對的功能，我們得以追蹤特定細菌群落在時間和空間上的變化。表水層和底水層的細菌群落，在經過颱風擾動混合後，均遵循一致的規律，各自回復原本的群落組成型態⁵⁾。上下水層在經過擾動之後，群落組成的差異隨著擾動的規模、頻率而有所不同。輕度颱風所造成的影響較為短暫，強烈颱風則影響較為持久。相對於夏季颱風的劇烈擾動，冬季降溫的混合擾動作用較為和緩漸進，此時的細菌群落和夏季有明顯的不同，上下水層間細菌群落的變動程度也較小⁶⁾。

盈盈秋水

2009年我們獲得本院資助，在太平山的翠峰湖架設一套



圖一 藉由搭載監測儀器和無線數位傳輸系統的浮筒，可有效監測氣象變動下瞬間的水文變化。



圖二 2009年莫拉克颱風雖未直襲台灣北部，大量降雨仍使得鴛鴦湖水位迅速升降。各個深度的水溫在颱風期間趨於一致，說明了湖水劇烈混合的現象。

和鴛鴦湖相同的觀測系統。從此，我們得以更具系統地跨樣區比較高山湖泊生態。

鴛鴦湖和翠峰湖都是高山湖泊，海拔高度和氣候條件近似，但是環繞湖泊的森林生態條件卻有所不同。

翠峰湖周邊是經歷砍伐後，於1968年重新種植的人工檜木林。林木現今蔚然可觀，地表堆積的腐植層和土壤層次的化育狀態卻尚屬淺薄。土壤體質的優劣與否，具體也表現在森林對於水源的涵養功能上——即使持續乾旱不雨，鴛鴦湖湖畔隱入枯朽倒木和草澤間的幾處進水口，淙淙流水依稀可辨；環繞翠峰湖湖畔所有裸露的進水口則是完全乾涸。

鴛鴦湖周邊是檜木原始林，森林底部堆積深厚的腐植層，雨水不斷地洗出有機質，甚至將未分解完全的有機物碎屑帶入湖泊水體。

森林本質條件的不同，造成湖泊水質相當大的差異——鴛鴦湖陸源有機物的含量較高，氮磷等營養要素含量較低。這些特性，造成鴛鴦湖的水色偏暗、藻類含量較低的現象。

鴛鴦湖水體的生質能量，不單僅是由藻類所貢獻，周圍環繞的森林也供應了大量的有機物到水體中。就能量的利用屬性而言，湖泊生態系的生質能量來源既然尚還由外界供應，就是屬於異營性的湖泊³⁾。

翠峰湖的觀測時間尚短，但就現有湖泊水文調查結果研判，翠峰湖藻類光合作用所貢獻的生質能量，大於水生動物、微生物消耗量。淨生產力呈現正值，是屬於自營性的湖泊。

鴛鴦湖湖水偏暗，帶微量的腐植成份，這是高山原始森林滲出溪流水的真正面貌。(請注意，原始森林地表有良好的覆蓋，滲出的水流，帶微量的有機質，卻不帶泥沙啊!)水中的有機物，是水生生物生質能量的來源。縱使此等有機物的含量甚低，在水中被微生物分解時仍需消耗氧氣。若是針對此環節，論異營性高山湖泊沼澤的機能，除了滯洪、涵養水源和保育生物資源之外，也具備一般溼地所普遍具備的淨化機能——提供水生生物分解水中有機物、吸收營養元素的環境。

可能有讀者質疑：「囉哩囉唆扯了一大堆，卻還沒交代為什麼定了一個奇怪的標題？」我在圖三附上了拙作〈湖之戀〉⁷⁾，忝為《詩經·秦風·蒹葭》「所謂伊人」註解難圓的傾慕。至於故事所描寫的情節，並不是哲學家觀魚的憂鬱狂想，也不是被國科會拒絕補助的研究室主持人，對著水族箱生悶氣。「在水一方」令人難以捉摸的特性，豈不就正是費盡心思追尋，躊躇拼湊卻始終無法盡窺全貌的高山湖泊生態？

〈致謝〉本項研究工作，是由本院、聯合大學、中國醫藥大學、國家高速網路與計算中心、國科會、美國國家科學基金會、威斯康欣大學、加州大學等研究機構共同參與推動。感謝鴛鴦湖自然保留區的主管機構——「行政院退除役官兵輔導委員會森林開發處」、翠峰湖的主管機構——「林務局羅東管理處太平山工作站」長年在調查研究上所提供各項協助。

文獻

- 1) Geoderma 117, 129-141 (2003).
- 2) Geoderma 96, 19-30 (2000).
- 3) Freshwater Biology 53, 1929-1941 (2008).
- 4) Global Change Biology 15, 243-254 (2009).
- 5) Limnology and Oceanography 53, 1319-1326 (2008).
- 6) Environmental Microbiology 12, 455-466 (2010).
- 7) 秋水詩刊 136, 67 (2008).



圖三 宜蘭縣太平山翠峰湖，車輛可直接到達。早年伐木、放養魚類，對於湖泊生態造成了重大衝擊。