

不需測試水質的水草施肥方法～估計指數

估計指數 —— 是什麼？

估計指數是一個可以在任何水族缸中添加水草營養的簡單方法，而且不需要水質測試工具。簡單的說，水族愛好者很頻繁地添加肥料以預防任何營養的耗盡（水草缺素），同時每個星期也進行大量換水來防止營養的累積（水草抑制）。用這樣的方法，我們能夠在一個星期內很輕易地將營養濃度維持一個相當接近的大約數值或者稱為「估計指數（Estimative Index）」，既不會太高也不會太低，況且也不需要使用水質測試工具，因為這樣就已經極度精確了，況且在大多數的情況下會比水質測試工具還要精準。每星期換水的運用，這是大多數水族愛好者已經習慣也很熟悉的作法。我做過了很多的實驗，不論是在一個星期或三個星期的期間內，使用了非常強的照明（在燈源下方 8 公分測得 $450 \text{ mmole/m}^2\text{sec}$ ），而且種植了包括許多成長很快速的有莖水草。由這些實驗我獲得了一個假設性的「最大吸收**速率**」。這個速率對於設定水草營養所需的上限而言很重要。一旦知道了這個吸收速率，那麼水族愛好者就算在任何不同的照明強度下，也很有信心其水族缸中的營養不會因此而耗盡。這種吸收或施肥的「速率」才是真正重要的，而非去維持一個穩定的「剩餘」濃度。一個穩定的營養濃度範圍才是水草健康的成長所最需要的。這個營養濃度範圍的概念，其實受到來自世界各地使用不同自來水水質的許多朋友們的觀察結果之支持，同樣的，在 2005 年第 7 與 8 期的 Barr Report 也回顧了相關的研究。這個水草吸收上限的範圍經過證實其實是相當寬廣的。透過一般的 50% 換水量，水族缸的營養濃度累積最高將達每週所添加劑量的兩倍濃度。所以如果您想要將硝酸（ NO_3 ）維持 10-20 ppm 的濃度，這個方法很方便而且也不需要使用到水質測試工具（參考下面圖一與例子）。同樣的，濃度範圍也可以套用到以其他的養分上，而較窄小的濃度範圍可藉由將肥料稀釋於水中的方式來達成。

營養的最大吸收速率其實也是會變化的，但我所提出的建議只是個原則，不同的水草種類與不同的設缸條件可能會消耗掉更多的營養，而水草在這些速率下並**不會**出現缺乏的症狀。水族愛好者不需侷限於每週 50% 的換水量，換水量的比例可以提高，例如 75%，如此以 75% 換水量讓水族缸重新來過的作法，就像是在製作一



個標準溶液以提供水質測試工具的測量與校對使用。加強換水頻率也是可行的，對於每週換水 50%較沒信心的水族愛好者而言，要達成這樣的目標應該是相當容易的。

水草能夠攝取超過成長所需的份量，這稱之為「超量攝取 (luxury uptake)」。另一個議題是水草或許亟需要某一種營養，所以吸收速率在前幾週可能會非常的快，之後才會減緩下來，這就稱之為「激增攝取 (surge uptake)」。

這是在強光與強二氧化碳 (CO₂) 下，每一日 (24 小時) 水草對一些營養的典型吸收速率：

NO ₃	1 - 4 ppm
NH ₄	0.1 - 0.6 ppm (不要投與銨！ 會導致暴藻。)
PO ₄	0.2 - 0.6 ppm

硝酸 (NO₃) 1-4 ppm

銨 (NH₄) 0.1-0.6 ppm (不要投與銨！會導致藻類滋生。)

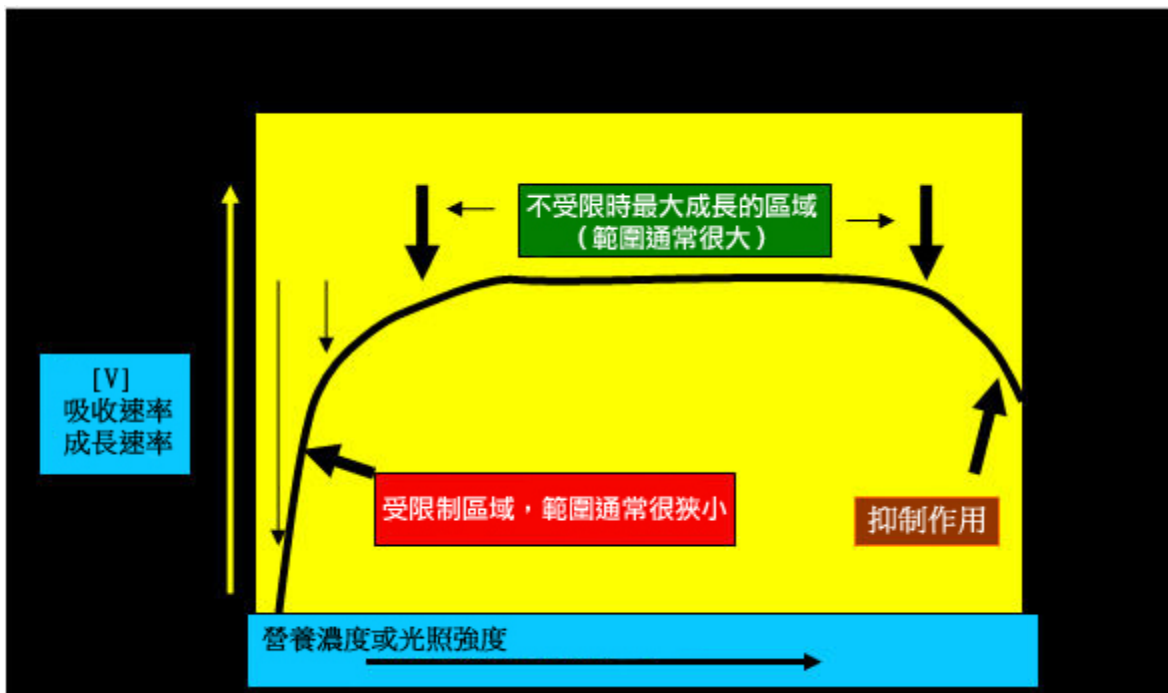
磷酸 (PO₄) 0.2-0.6 ppm

這些吸收速率並不是假設如果我們投與較少劑量的話就會出現水草的缺肥症狀，但是添加**更多**的量也不會對水草的成長有進一步的幫助。這一點是水族愛好者要有所瞭解的。基本上，我們的水草就算在很強的照明下，也極不可能需要更多的量。添加足夠的營養以防止任何元素的缺乏才是我們的目標，而不是去瞭解水草精確的吸收以及成長的需求。

附註：本文中所提的這些濃度範圍與測試是使用 Hach 或 Lamotte 水質測試工具，而且事先經過標準溶液的檢驗。大多數愛好者等級的便宜水質測試工具通常並不準確，況且反而會為水族愛好者帶來許多困擾。有

些水質測試工具還是可以用的，但最好能利用已知的標準溶液來做檢驗，如此一來我們就知道準確度了，而這也是在研究科學時會做的事。不要假設水質測試工具是準確的，這會造成很多的挫折、困惑以及粗劣的園藝栽培，這也是我會建議這種施肥觀念的主要原因之一。

追求精確其實是不需要的，因為水草處於不出現缺乏症狀的標準營養濃度以上，直到因為營養濃度過高而產生問題之前，這個營養濃度的範圍是非常寬廣的（Barr Report 第 5、7、8 期）（請參考圖二）。現今我使用了比 lamotte 或 Hach 等水質測試工具更精準的測試方式，我用的是一種多參數比色分析的分光光度計，其精確度更勝過之前 100 倍，準確的範圍很大，也可自行測試，而且使用了空白與自動的校正方式。這是個對使用者非常友善的儀器，而且是專門用來解答特殊問題時使用的，並不是拿來監控一般水族愛好者平時的「日常管理」用的，不過就算水族愛好者要這麼做也無妨。



圖二

我真的不知道在一個種滿水草的水族缸中，硝酸 (NO_3) 和磷酸 (PO_4) 要高到什麼程度才會造成水草的問題或者引發藻類。硝酸 (NO_3) 濃度超過 40 ppm 會造成魚類健康的問題。磷酸 (PO_4) 在 5-10 ppm 的非



常高濃度下會影響到鹼性 (KH)。

很顯然的，這些濃度都已經遠遠超過了水草的需求，這個訊息提供水族愛好者一個非常寬廣的施肥目標範圍，範圍大到甚至得以偏離原訂目標的兩倍劑量。

在想要水族缸中正確的測量照明強度是非常昂貴的，我自己使用的光合作用有效能量 (PAR, Photosynthetically Active Radiation) 儀表，所測量到的單位是 $\text{mmole/m}^2\text{sec}$ 。照明強度水草缸中最大的未知變數之一，瓦特／加侖 (w/gal) 或瓦特／公升 (w/L) 的算法無法告訴我們太多的訊息，但如果水族愛好者能維持良好的二氧化碳 (CO_2) 與營養濃度，要套用這類粗略的指引也是可以的。如果水族愛好者有意願，施肥的方式也可以利用自動給肥機。不過一個良好的日常管理其實是相當容易的，水族愛好者可以日後再加以修改其日常管理模式，變成了添加「夠用就好」的劑量，然後進一步根據個別水族缸的需求把肥料增加到最大劑量。本方法有個很重要的觀點，那就是要了解過量的營養並不會導致藻類滋生；從過去到現在的許多水族作者仍舊有過量的營養會滋生藻類的看法，可是他們其實並不曾在一個水草成長健康的水族缸中進行過嚴苛的測試來求證。瞭解到「過量」的磷酸 (PO_4)、硝酸 (NO_3) 和鐵肥 (Fe) 並不會造成藻類滋生以後，讓我們大大地鬆了一口氣。

過量的營養會滋生藻類多年以來都只是個假設，不過並不是正確的。低濃度的銨 (NH_4^+) 才是引起藻類滋生的主要成因，而非「過量」的營養。這就是為什麼在一個使用二氧化碳 (CO_2) 且中至強光照的水族缸中，就算加入了越來越多的魚也無法提供水草足夠的氮元素，況且還是無法避免藻類滋生的發生。其實不需要太多的銨 (NH_4) 就能造成滋生藻類了。如果我們是利用硝酸鉀 (KNO_3) 來添加硝酸 (NO_3) 就不會出現任何的藻類滋生；但是如果我們添加了甚至只是二十分之一劑量的銨 (NH_4)，就會導致大量藻類滋生。這個實驗可以一再的被人反覆進行，並且都會得到相同的結果。添加硝酸 (NO_3) 並不會滋生藻類，我們可以自己來求證看看。

除了銨 (NH_4) 與尿素是例外，高濃度的磷酸 (PO_4)、鉀 (K)、以及相當大範圍的硝酸 (NO_3) (大約 20-30 ppm) 和鐵質 (Fe) 能夠在水族缸中維持不出現任何負面的影響，甚至在非常強的光照下也是如此 (例如 5.5



瓦特/加侖，水深 30 公分，使用鏡面反射罩，U型燈管，距燈源 8 公分處為 450 mmole，大部份的水草之光飽和點大約在 600 mmole/m²sec，這個數據至少是一些於二氧化碳（CO₂）不受限的條件下測得的，其他的水草品種之範圍可能不同）。

我之所以會選擇強光照射的原因，就是想縮短產生藻類滋生的時間，也藉此避免水草與藻類彼此間對光線的競爭。這就好像以高速來「試駕」一部新車一樣。如果藻類的發生是因為較高的營養濃度所致，那麼在光照、二氧化碳（CO₂）與營養都不受限制的情況下，應該就會滋生藻類才對。當光照強度減弱至光補償點（light compensation point）時，我們就可以假設水草對於營養的吸收會變少，所以要維持「穩定範圍」的營養濃度之問題就較少。這層關係想要加以切割是很不容易的，當水草成長速率減慢（例如在弱光下）的時候，我們需要花更多的時間才能注意到水草在成長上的差異，以及降低一個系統內緊迫對於成長比值。同樣的，水草在強光下的吸收速率相當的高，這降低了水質測試工具在分析時的可能錯誤；在一個使用普通螢光燈管 1.5-2 瓦特/加侖（w/gal）的水草缸中，水草需要花更多的時間才能將 5 ppm 的硝酸（NO₃）清除。高品質的水質測試工具，例如 Lamotte，也可以用來增加實驗結果的精確度。這些水質測試工具事先都要經過一系列的標準溶液來確認其精確度。藉著這樣的方法，我便可以在測試我的構想更具信心。如果要測試的是無二氧化碳（CO₂）的水草缸，這可能就要會花更多的時間、更昂貴的水質測試工具以及方法。除此以外，許多營養在我還沒來得及加以測量以前就已經消耗殆盡了。

把從強光與高濃度二氧化碳（CO₂）的環境中所獲取的知識運用到無二氧化碳（CO₂）的水草缸上，同樣的也可以讓我們在一個無二氧化碳（CO₂）水草缸中對於水草的營養吸收速率的關係做出相當好的預測。吸收速率會因為較弱的光照與較低的二氧化碳（CO₂）濃度而降低。在一個無二氧化碳（CO₂）的水草缸中，我大致上認為水草對於營養的吸收速率約只有 1/6，但魚隻的飼養量會影響到這個速率。基本上，在無二氧化碳（CO₂）環境下的水草成長速率，會比在二氧化碳（CO₂）豐富環境下的水草之成長速率降低 6-10 倍。

這個施肥方法特別是為了二氧化碳（CO₂）豐富且強光的系統所設計的，但是對於低光照與低二氧化碳（CO₂），或者使用 SeaChem Flourish Excel 來提供豐富碳元素，或是海水與其他需要相當份量營養的水族



缸而言，這個方法其實更好用。我建議使用 30 ppm 的二氧化碳 (CO₂) 濃度，但對於一個 2 瓦特/加侖 (w/gal) 的水族缸而言，15-20 ppm 的二氧化碳 (CO₂) 濃度也是足夠的；不過對於許多使用 U 型燈管且有反射罩的水族缸而言，二氧化碳 (CO₂) 的濃度就必須提高一點，最理想是在光合作用期間將二氧化碳 (CO₂) 維持在 20-30 ppm 的範圍。這個數值的發現是利用在測試期間保持固定的營養濃度與光照強度，然後持續增加二氧化碳 (CO₂) 濃度直到水草的成長不再受益為止所獲得的。根據針對三種水生雜草的研究發現，水草不論在何種光照強度下，碳固定能力在二氧化碳 (CO₂) 濃度高至約為 30 ppm 時達到最高點。不論光照的強度是如何設置的，這三種成長非常快速的水生野草之最高二氧化碳 (CO₂) 濃度均約為 30 ppm，我們可以假設這是更高的二氧化碳 (CO₂) 需求，因為生長在水族缸中的水草所獲得的光照強度比起在太陽光下實在減弱很多，成長也較緩慢。或許有一些水草的需求可能會超出某一些變數，但這發生的機會非常的小，在我所栽培過將近 300 種的沈水淡水水生植物當中，至今為止尚未發現任何可以支持的證據。二氧化碳 (CO₂) 的濃度足夠供給水草**不受限的成長**，就如同磷酸 (PO₄)、硝酸 (NO₃) 與微量元素。所以就某種意義來說，我們對二氧化碳 (CO₂) 的添加是過量的，因為二氧化碳 (CO₂) 的濃度是比較容易達成的目標，也容易測量。添加更多的二氧化碳 (CO₂) 並不會傷害到水草，但二氧化碳 (CO₂) 的添加量會因魚類的健康與溶氧量的問題而受到限制。

雖然很多人已經討論過了水草營養的重要性，其實有更多的水草新手卻是二氧化碳 (CO₂) 濃度過低的受害者，就連水草專家們也常被逮到不時的試著要去維持一個良好的二氧化碳 (CO₂) 濃度。如果沒有穩定的二氧化碳 (CO₂) 濃度或 Seachem Flourish Excel，任何營養的日常添加也是無法有出色表現的。

使用自來水

自來水很便宜，而且換水所需的時間比做水質測試所消耗的時間來得少（海水可能是個例外，鹽類的混合可要花很多錢的）。換水的成本也比水質測試工具來得便宜，何況如果是在水草缸中測量硝酸 (NO₃)、鐵質 (Fe) 和磷酸 (PO₄) 時，這些評估營養濃度的方法很不可靠。比起在水質測試時要做標準溶液來測試，換水就簡單多了，而且也不需要具備太多的化學方面的知識。水草往往會因為不準確的水質測試工具而蒙受營養的匱乏。很多人覺得自來水不適合栽培水草，這是不正確的。還有很多舊觀點仍然主張自來水中過量的磷酸 (PO₄) 會

導致藻類的滋生，許多水族愛好者已經很清楚的指出這個看法顯然是個錯誤。既然自來水中含有養分，我們就不需要再投與那麼大的劑量，這其實是一件好事！為何要把一些東西給拿掉，然後又再添加回去？

水質很硬嗎？

很好，那我們就不需要在水族缸中再添加任何的蘇打或總硬度（GH）增高劑。將總硬度增加到 3-5 dGH 足以應付一個強光水族缸在一個星期內所需的濃度。我們也可以使用 SeaChem Equilibrium 或者將氯化鈣（CaCl₂）（或者硫酸鈣（CaSO₄），雖然較不容易溶解於水）與硫酸鎂（MgSO₄）以 4：1 的比例來增加總硬度。我們可以在每星期換水後直接添加 1 度（dGH）而不用去理會水質的總硬度（GH），換水頻率如果比較少，添加的量就稍微減少。

水草喜歡軟水嗎？事實不然，不論是我自己或其他有經驗的水族愛好者，都沒有發現人水草是倚賴軟水的，雖然在約三百多種水草當中可能會有一些例外，我們可以很有把握的說水草偏愛較硬的水，況且也有研究證明這是真的（Bowes 1985）（T. Barr 與 C. Christianson 觀察到美國佛州與巴西的清澈硬水之泉水）。有些水草，或許有五、六種，的確比較偏好軟水，但這是因為碳酸硬度（KH）的關係；而只要水中有足夠的鈣（Ca）與鎂（Mg），總硬度（GH）的關聯就比較小。所以如果還有疑惑或者有興趣的話，我們可以將總硬度（GH）的劑量略為提升，來試試看是否會造成任何的問題。

另外一方面來說，碳酸硬度（KH）在 5-6 度（dKH）時的确會影響到這些特殊的水草（大部分其實是不受影響的）。碳酸硬度（KH）要低到什麼程度才會影響水草的健康，其實並沒有真正的最低下限，但是碳酸硬度（KH）過低會造成二氧化碳（CO₂）在測量時的困難。不過還是有辦法的。儘管如此，任何的水草都可以栽培在碳酸硬度（KH）5 度（dKH）以及總硬度（GH）5-10 度（dGH）或者更低的環境中。這種水質並不被認為是「軟水」，事實上這是個理想的水質。因此除非想要栽培一些特殊的水草品種，否則的話並沒有必要使用例如逆滲透水、蒸餾水或者以活性碳去過濾自來水，但只要水中有還有足夠總硬度（GH）以及碳酸硬度（KH）來讓我們測定二氧化碳（CO₂），這樣的作法對水草來說是無害的。

換水：使用水管與水桶的少量換水方式、或者自己動手做的園藝水管連接到水龍頭的排水與加水系統。管徑較粗的排水管在大型水族缸上的使用很方便。經過設計過的配管系統也可以讓換水變得很方便。如果水族缸距離水龍頭很遠，其實也只需要一條很長的水管。至於配管系統與自動換水系統的設計，在網路上就很容易找到相關的訊息。

問題點

#1 劑量

如果將許多變數都納入考慮，施肥劑量就會變得很難處理。常聽到的建議是「買個水質測試工具」，然後測試看看營養濃度為何。

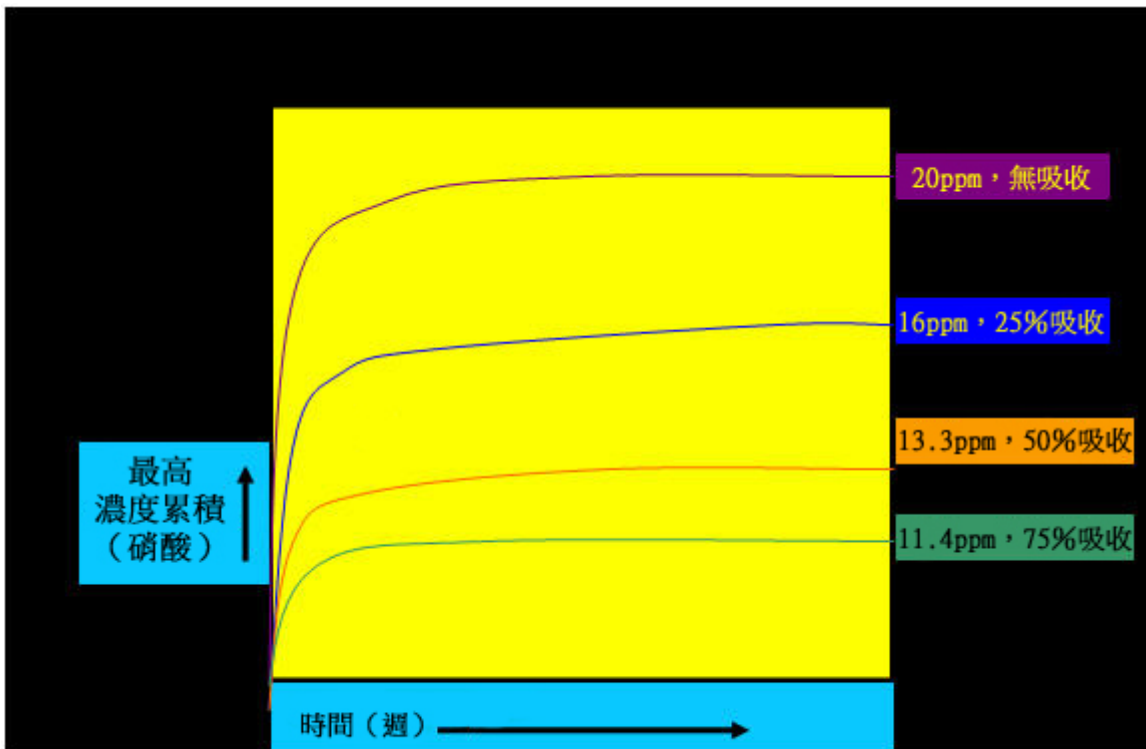
這是在將近十年前的建議：http://www.sfaaps.com/reference/barr_02_01.shtml

對於二氧化碳（CO₂）和總硬度（GH）的測量來說，水質測試工具是很好用的（但是想要用這個方法的話必須一再確認才行），不過對於其他的營養如硝酸（NO₃）、鉀（K）、磷酸（PO₄）、和以鐵質（Fe）為代表的微量元素來說，水質測試工具可就問題很多了。在大部分的時候，可憐的水族愛好者從一個營養追逐到另一個營養的，每個星期總要事倍功半很小心翼翼的測量水質，有時甚至一個星期要檢驗好幾次，就是想找出哪裏出了問題。大體而言，有很多水族愛好者就算做了那麼多水質測試也從未發現是哪裡出了問題。

其實有 95%的情況是因為二氧化碳（CO₂）濃度過低所致，而這個問題與平日的營養劑量並無關聯。只要簡單的來個大量換水就可以把所有的變數都排除了，然後將已知的營養劑量再添加回水族缸中，如此一來每一個星期水族缸就得以很有效率地再次重新來過一次。就算我們有幾天時間不在家，也不必擔心營養會因此消耗殆盡，因為我所建議的營養濃度是針對強光的水族缸設計的，而且我們也瞭解了如果二氧化碳（CO₂）濃度

足夠的話，就不必害怕這樣的營養濃度在水中會孳生藻類。我們知道了這些觀點以後，靠著這種非常簡單且很有彈性的方法，就可以在水族缸中把任何營養都維持在一個都相當穩定的濃度，而且也不需任何水質測試工具。我們能夠靠著每星期的提示來推測施肥的劑量，然後重複操作就可以了。在Chuck Gadd網頁上的施肥劑量計算機對於不擅於化學，以及很想瞭解到底哪一種營養應該添加多少劑量的水族愛好者來說是很有用的。請參閱：
http://www.csd.net/~cgadd/aqua/art_plant_aquacalc.htm

施肥的劑量與每星期的 50%換水量並非是一成不變的。這個方法也可以用在每個月只換水一次或者每兩星期換水一次的水族缸上，但每星期 50%的換水比較能得到一致的結果，不過一個運作良好的水族缸也能夠較長的時間不必換水。水族愛好者能夠根據自己的經驗累積，注意到水草的健康狀態，並且根據個別水族缸的需求來稍微減少劑量。一旦施肥方法上手了以後，水族愛好者就能進一步的調整每個水族缸的需求。



圖一

這個例子是每星期在水族缸中投與 10 ppm的硝酸 (NO_3)，並假設水草與細菌的吸收比率為 0、25、50、



75%的情況下，最高的累積濃度將達每週施肥劑量的兩倍。這是以數學模式來顯示濃度範圍的，所以估計指數（EI）的使用者並不需要水質測試工具，因為已經有一個非常精準的測試證實了這些曲線和範圍的準確性，並且與觀察模式和測試模式都相吻合。

所以這逐漸獲得一個非常接近於穩定的營養濃度，而非僅僅只是在「推測」而已。

#2 測試

水質測試對大部分的人來說是個很大的議題。水質測試工具的價格和一個過濾器一樣貴，有些甚至更昂貴。有些人買得起很不錯的Lamott/Hach水質測試工具，但大部分的人並不能，或者也不想在這上面投資個300美元。較便宜的水質測試工具並不提供鉀（K）的測試；硝酸（NO₃）的測試工具是很有問題的，而且比色的判讀對便宜的水質測試工具來說是很困難的。有些人是色盲的，很多人不曾想做水質測試，也不覺得有必要做測試。不論我怎麼勸說，就是無法說服有些水族愛好者去做水質測試！多年以來我也是這類的愛好者之一。我到今天也還是一樣，只不過現在我更加的堅定，而且也很清楚這是怎麼一回事！從過去艱苦的日子中所做的許多水質測試，我現在知道了水草的吸收速率。一旦搞混了施肥的劑量，我也會每個星期大量的換水，所以我每個星期都會讓水族缸重新來過一次。我有個相當簡單的方法來避免許多單調乏味的苦工，尤其是鐵質（Fe）與硝酸（NO₃）的測試。此處的主要議題是將營養濃度維持在相當的範圍內。重點分成兩個：一者為硝酸（NO₃）、磷酸（PO₄）和鉀（K），即所謂的巨量營養；以及以鐵質（Fe）為代表的營養混合之微量元素。其實有許多特殊的水質測試工具和度量器很適合檢驗微量金屬與硼（B），但實際上並沒有任何水族愛好者真的實際去測量這些元素。所以大家都只是在推測大概的微量，即使是依據水質測試來施肥的最忠誠擁護者也是一樣的！

使用茶匙（乾燥粉末）和毫升測定（液肥溶液），我們就能夠做得很精確了。

有一個可能更好問題是，營養的濃度要精準到怎樣的程度才能確保最好的水草成長而不滋生藻類？



靠著「估計指數」，使用茶匙與液肥就能夠將濃度微調到很準確了。請注意，如果要追求更進一步的精確性，可以將這些營養以公克測量後溶解於蒸餾水中，然後將濃縮的營養液以毫升的方式添加至水族缸中，而非直接使用乾燥的粉末。但是對使用者來說，這樣做其實無法使水草更加健康並促進成長，這兩點正是我要協助改善日常管理的主要原因：

± 5 ppm 的二氧化碳 (CO₂) (在 20-30 ppm 的範圍內)。

± 1 ppm 的硝酸 (NO₃) 是很合理的。

± 2 ppm 的鉀離子 (K) 是很合理的。

± 0.2 ppm 的磷酸 (PO₄) 是很合理的 (?)。

± 0.1 ppm 的鐵 (Fe) 是合理的 (?)。

二氧化碳 (CO₂) 範圍 25-35 ppm

硝酸 (NO₃) 範圍 5-30 ppm

鉀離子 (K) 範圍 10-30 ppm

磷酸 (PO₄) 範圍 1.0-3.0 ppm

鐵質 (Fe) 0.2-0.5 ppm或更高 (?)

總硬度 (GH) 範圍 3 度 (dGH) ~50 ppm或更高

附註：

磷酸 (PO₄) 和鐵質 (Fe) 這兩種營養在未先確定其他營養的濃度前，很難評估其濃度。如果硝酸 (NO₃)、鉀 (K)、二氧化碳 (CO₂) 的狀況都很良好，我們也可以在很大的範圍內添加相當劑量的磷酸 (PO₄) 與鐵質 (Fe)。我曾經每星期固定添加幾乎 3 ppm 的磷酸 (PO₄)，水草的反應很驚人。

只要能維持高濃度的磷酸 (PO₄)，綠斑藻甚至在強光下的水榕葉片上從來就不曾是個問題。我最近把重



點放在微量元素上。很多人多年來始終是 0.1 ppm 殘餘鐵質 (Fe) 的堅定支持者，這是當時由窮人的肥料滴液 (PMDD) 發展而來的結果。那麼，這個殘餘量告訴了我們什麼？這是否能告訴我們適合水草的濃度為何？夠不夠呢？如果劑量更高會滋生藻類嗎？

設立一個測試

根據我自己的經驗來看，我能說高濃度的微量元素 (鐵質) 絕不會造成藻類出現。在做出這個結論之前，我重複檢驗過了其他的營養。只有少數的水族愛好者肯好好的看一下這個對照的觀點，然而似乎卻沒有任何一個水族廠商願意參考。水族愛好者為了要獲得關於某種營養的結論，這個營養就必需獨立出來探討，而我們也必需只能對從屬的變數來做測試。利用估計指數來做的話，這是相當容易的；基本上水族愛好者每週都會製造出一個適當營養濃度的參考溶液，並且很密切的加以推測直到另外一次換水為止。這提供了一個很有力又簡單容易的工具和方法，得以讓水族愛好者不需花費太多功夫就能擁有一個控制得更好的環境。水草在某個程度時將不再吸收更多的微量元素，磷酸 (PO_4) 也是同樣的情形。增加更多的營養將不再促進水草的更進一步成長。有很多水草會吸收過量的營養，例如磷酸 (PO_4) 和硝酸 (NO_3)，這通常稱為營養的「超量攝取」。我們要很小心一件事，不要假設水草的吸收就等於成長與需求。

這應該就是濃度範圍的上限所在。沒有必要浪費昂貴的微量營養。水族愛好者先前如果有藻類的問題，可以試試看先添加磷酸 (PO_4)，然後搭配增加更多的微量元素。這麼做既使在光照非常強的水族缸也是很有效的。自從以前參考過 Karl Schoeler 建議的 0.7 ppm 以來，我一直都在大量添加微量元素，而且我覺得如果水族缸狀況不錯，那麼再增加一點會更好，因為許多的建議濃度似乎都還不是最高點。Karen Randall 過去曾經建議一些水族愛好者提高二氧化碳 (CO_2) 濃度，而非一般建議的 10-15 ppm，可是直到最近聽從這個建議的人少之又少。雖然我過去做過許多次的測試，想試著去找出水質測試工具與吸收速率的一些關連性，但是我現在越來越少將焦點放在測試的觀點，而是越發著重於我認為對微量元素來說更好的方法。我仍然和大部分的水族愛好者在爭辯微量元素的劑量問題。由於過去和藻類間有過太多對抗的經驗，我從來就不怕暴藻，況且我也進一步的做研究，在淡水與海水中培養出誘發藻類的環境。沒有幾個水族愛好者願意利用滋生藻類來毀掉自己的



水族缸，然後去釐清藻類真正存在的原因。藻類滋生的原因是我們需要加以理解的地方，而這個步驟必須是能夠重複實現的，以確認其結果並不是單一的個案，並且其他地方的研究人員也都能夠重複這個結果。我們往往在藻類出現了以後才去作水質測試，而錯過了真正導致藻類萌發的原因。所以知道如何一再重複地誘發藻類滋生，才是了解我們水族缸中藻類萌發的關鍵所在。

估計的角色

水族愛好者只需在已知的水量中添加固定劑量的微量元素即可（在水族缸中，每日每公升所添加的毫升數）。假如在水族缸裡的水草比較少，光照強度較弱，那麼我們就可以減低施肥的頻率，而非劑量。類似的情形也能夠運用到巨量營養上。以這樣的方式，基本上我們每次在施肥時就是在製作一個「參考溶液」，而且直到每星期最後一天的大量換水為止，我們假設水草在兩次施肥之間的吸收量是固定的。如果我們的水族缸之水草密度不高或者光照較弱（每加侖兩瓦或以下，且使用一般的日光燈管），甚至可以一星期只施肥一次。了解自來水中成分，並且打電話詢問自來水公司查出水中的磷酸（ PO_4 ）、硝酸（ NO_3 ）、鉀（K）和鐵（Fe）的濃度，我們就可以用自來水來換水，況且利用Chuck網站所提供的肥料計算機來查出在水族缸裡所需的營養濃度，而不需要用到水質測試工具。甚至我們有幾天不在家也沒問題（請參考上述的增減量）。水中營養的效力會有些變化，但是如果水質很接近於中間值，其結果也還是很接近的。所以想像一個水族缸除了二氧化碳（ CO_2 ）〔（酸鹼值（pH）和碳酸硬度（KH）〕以外不做任何的水質測試，就算有也只是偶爾，所有的水草成長狀況良好也不需要去作推測，這聽起來不錯吧？這是必然的成果。這種不滋生藻類的水族缸是很普遍的，十年前的情況卻不然。

水族愛好者多年來嚐試了底床施肥的方式，成功與失敗的結果都有。在底床裡的營養最後消耗殆盡以後，水草就開始受苦了。當然我們可以每一年翻缸然後全部重新來過一次，也可以再補強底床裡的養分；但是通常我們只能等待，直到水族缸裡出了狀況才會有所行動，而不是始終保持水中相當的營養濃度。有些飼養密度高且中低光量的水族缸就能夠供應水草的需求，而能夠較長時間不用添加巨量營養，但終究還是得施肥，只不過施肥的次數很少，便足夠維持在這樣光照強度與二氧化碳（ CO_2 ）濃度下的水草需求，但是藻類還是完全沒受到限制。所有試圖利用換水來清理藻類的人都知道這是行不通的。另一個問題是很多人在大量換水時，通常不



添加巨量與微量營養。這些人往往並不清楚自來水有哪些成分。如果自來水中含有豐富的磷酸 (PO_4) 和硝酸 (NO_3)，就像美國與歐洲的許多地方一樣，那麼人們每週在大量換水時，同時也添加了營養與二氧化碳 (CO_2)。大家覺得很奇怪為何我的水草在每週換水時都好好的，當他們測試我的水質時發現磷酸 (PO_4) 的濃度很高，我還添加了硝酸鉀 (KNO_3) 與大量的微量元素；強光與高劑量微量元素的添加，不但讓水草的健康與成長大幅的改善，也沒有任何的藻類。有些施肥的方法建議在初設缸的時候利用先基肥的方式，過了幾個月的期間後再開始慢慢的供給水草液肥。長期而言，任何的施肥方法終究會變成在水體中添加肥料，除非於底床內再塞入根肥，或者翻缸之後重新施肥。底床內的營養成分極不容易測量，但是水體中的營養就容易測量多了，而水中給肥量也可以很固定，提供水草更穩定的營養濃度。

我們能夠將這個方法擴展至其他的微量元素與磷酸 (PO_4) 上，甚至碳酸硬度 (KH) 和總硬度 (GH)。我們也能憑自己的感覺來試一試對水草成長「最好」的方法，然後去實驗看看。每一個星期的適量換水是個非常好的方式，能夠防止營養累積、任何「劑量」錯誤或者「實驗」錯誤的發生。高品質的水質測試工具並不便宜，而有很多人對於是否要作水質測試的態度太過於反覆無常，或者根本就不想特地去作水質測試。本方法使用了硝酸鉀 (KNO_3)、磷酸氫一鉀 (KH_2PO_4) 和混合微量元素，我們能夠運用各種微量元素的變化組合來找出自己的習慣作法。磷酸氫一鉀 (KH_2PO_4) (也可以用灌腸液來取代，這些是磷酸鈉鹽類) 和硝酸鉀 (KNO_3) 非常便宜，微量元素也相當便宜，除非我們的水族缸非常大，市面上也買得到便宜的混合微量元素。本方法的好處是全世界都買得到這些肥料，價格低廉而且成份都相同；況且也不是什麼有品牌的水族產品，所以又更便宜了。所以當我建議新加坡的某位吳先生投與 1/4 茶匙或者 1.67 公克的硝酸鉀 (KNO_3) 時，他就能夠投與和我在這裡一模一樣的劑量，但是吳先生卻未必能夠買得到我所喜歡品牌的相同水族產品。所以這個方法能夠在世界各地使用，而非只侷限於美國。

水族缸範例

一個**強光**且**低養殖密度**水族缸的日常管理範例：

水量 80 公升 (相當於 20 加侖)



照明 5.5 瓦/加侖 (w/gal) (相當於 1.375 瓦/公升) – 兩支 55 瓦燈管 (5000K/8800K)

二氧化碳 (CO₂) 25-30 ppm, 我晚上的時候會關掉二氧化碳 (CO₂)

圓桶過濾器

底砂 7-10 公分深 (SeaChem Fluorite或任何多孔性且富含鐵質的底砂均可)

日常施肥範例

1/4 茶匙的硝酸鉀 (KNO₃) 每一個星期 3 - 4 次 (每兩天一次)

1/16 - 1/32 茶匙的磷酸氫一鉀 (KH₂PO₄) 每一星期 3 - 4 次 (每兩天一次)

微量元素在停加巨量營養那幾日添加, 所以是每一個星期 3 次, 每一次 5 毫升

每次換水後可以添加 1/8 茶匙的SeaChem Equilibrium

所以水族愛好者實際上只添加了三樣東西：在換水當日與之後的每隔一日添加硝酸鉀 (KNO₃) 和磷酸氫一鉀 (KH₂PO₄)，在不添加巨量營養的日子裡則添加微量元素。一直到下一個星期來到，換水 50-70%，把巨量營養再添加回來，第二天再添加微量元素，依此循環。我們可以慢慢的降低總量，直到我們注意到水草的成長有所變化，藉以來調整水族缸的個別需求，然而既使添加了超過水草的需求量，我們也只不過是浪費了一些巨量與微量營養。我們應該給每一次的日常管理異動有三個星期的觀察時間，之後才再做另一個變動。這樣做會花一些時間，但是很值得。這不會造成藻類滋生，除非我們忽略了一些東西，亦即二氧化碳 (CO₂) 或者硝酸鉀 (KNO₃) 劑量過低，這兩個因素佔了所有藻類問題的 95%。假如我們專注於水草的需求，那麼藻類便不再成長。我希望這對於終止水族園藝家所面臨的許多挫折有所幫助，所以水族愛好者能因此專注於造景和水草栽培，而不是在尋求如何殺死藻類。水族愛好者不需要謹守每星期換水 50% 的日常管理方式，這樣的管理方式在投與劑量的兩倍時會趨於穩定，所以任何元素都不會超出目標範圍兩倍以上的過度劑量。

舉例

假定我們在一個水族缸內每個星期投與 10 ppm 的硝酸 (NO_3)，假設我們每個星期換水 50%，利用計算的方式，我們會發現：

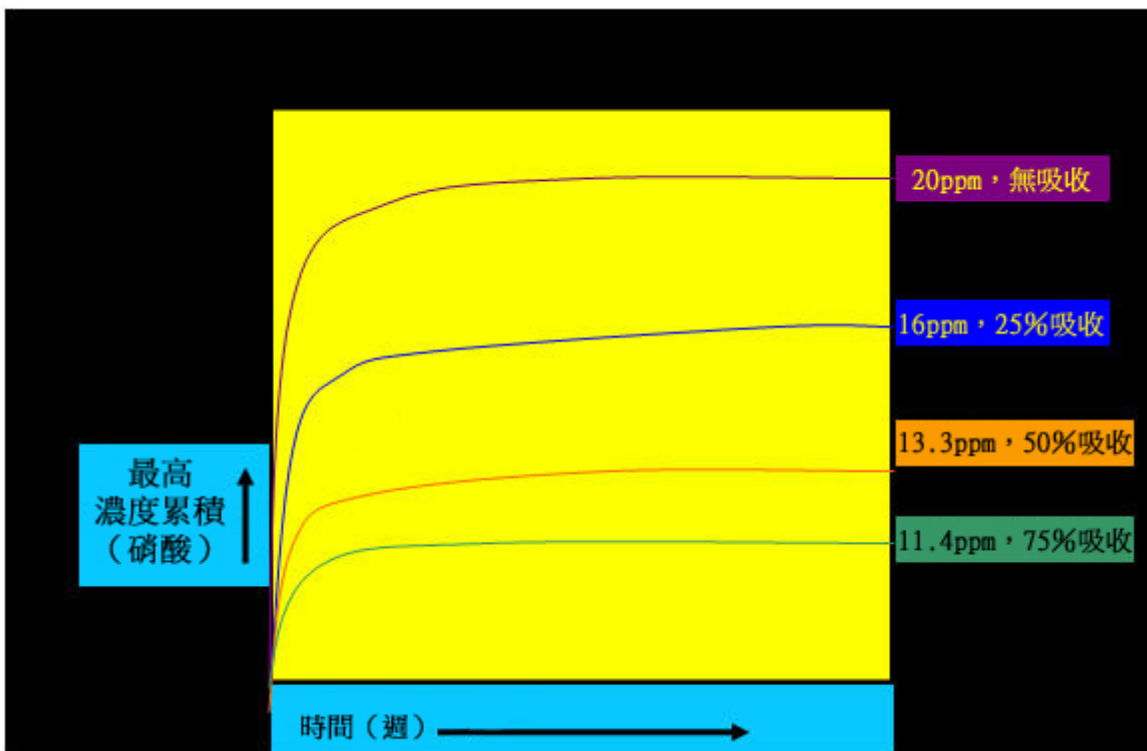
如果我們假設硝酸 (NO_3) **完全**沒被用掉，那麼我們能夠累積的最高濃度為 20 ppm。

如果我們假設硝酸 (NO_3) 被用掉 25%，那麼我們能夠累積的最高的濃度為 16 ppm。

如果我們假設硝酸 (NO_3) 被用掉 50%，那麼我們能夠累積的最高的濃度為 13.3 ppm。

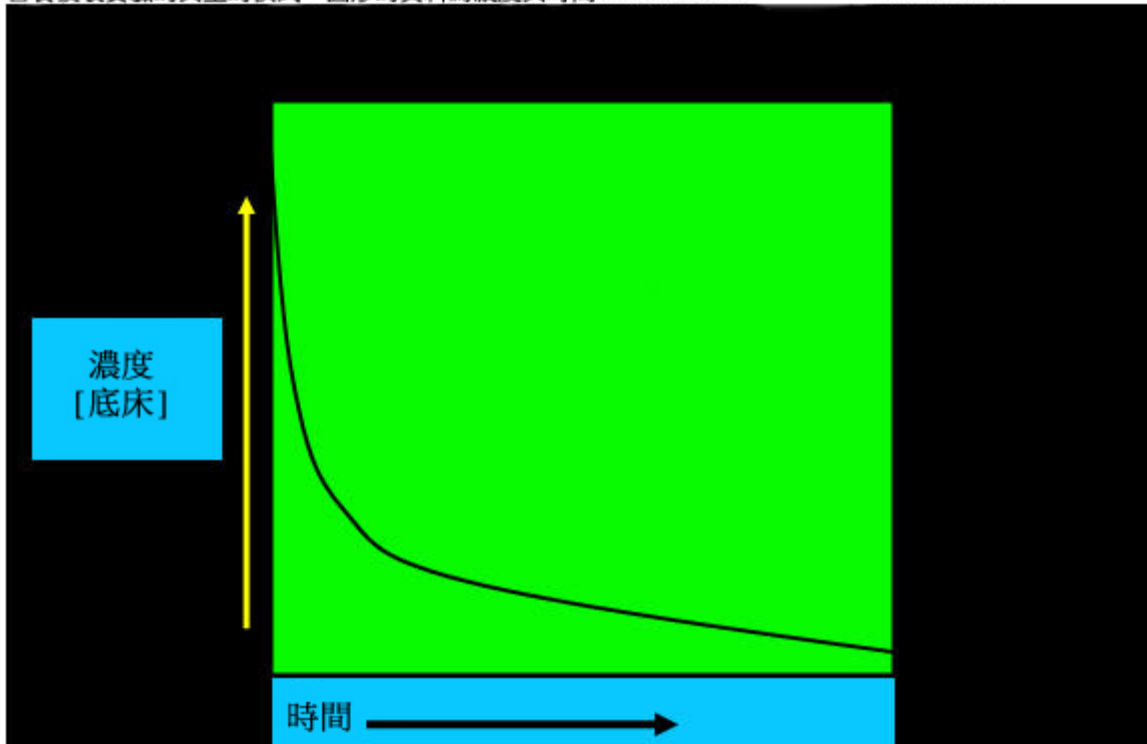
如果我們假設硝酸 (NO_3) 被用掉 75%，那麼我們能夠累積的最高的濃度為 11.4 ppm。

每星期吸收 25% 的累積濃度並不是 15 ppm，因為前一週的累積濃度也要算進來。



圖一

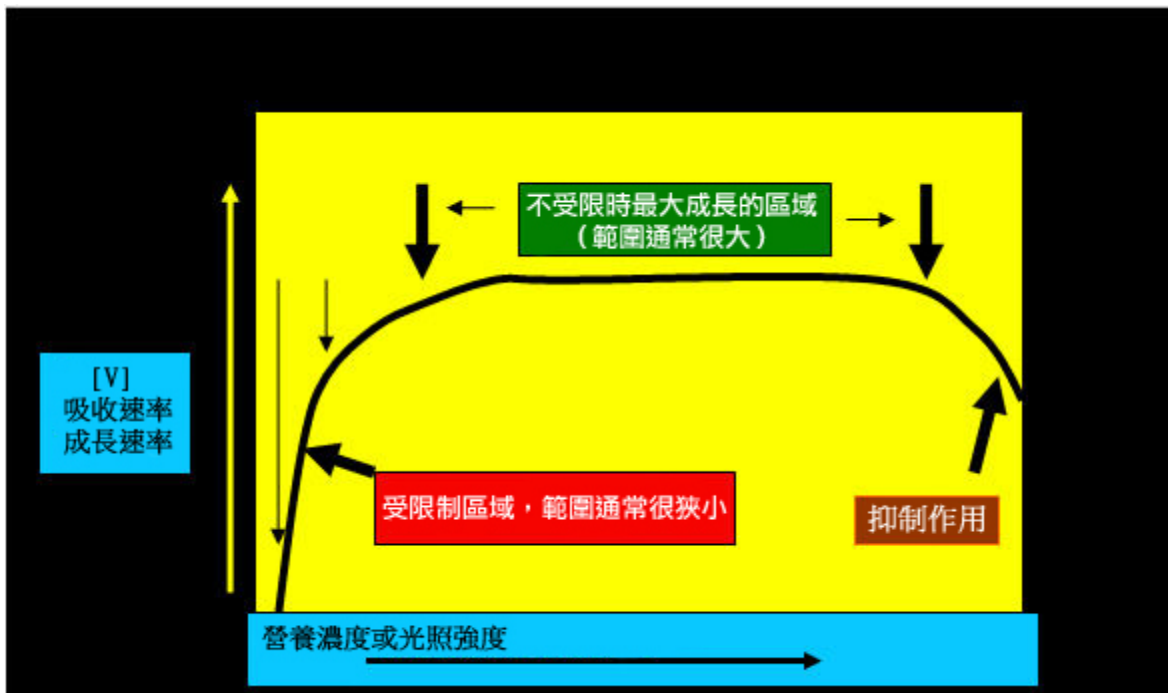
營養吸收實驗的典型的模式，圖形的資料為濃度與時間。



圖三

- 吸收實驗的類型：問題：細胞會隨著時間而飽和，所以吸收速率在低濃度時是被低估的。吸收的多寡與光照有很大的關係，在水族愛好者間，照明強度的測量是非常欠缺的；況且對於研究員在野外而言也是個挑戰，因為光照隨著時間、季節、月份、每日、每分、每秒而改變（烏雲、光點等等）。
- 培養基吸收營養與同化作用變成有機物質，這兩者是有差別的，尤其是氮素 [硝酸 (NO_3^-)] 和 [銨 (NH_4^+)] 和氨基酸。這視儲存無機離子的能力、酵素作用的速率，以及細胞需求而定。
- 細胞能夠藉著吸收激增的能力 (V_m) 來改變並適應長期的低營養濃度狀態。
- 兩種基本模式：馬諾模式 (Monod Model)：以外在濃度為基礎，可能會低估範圍，但仍舊與生物學相關連；杜魯普模式 (Droop Model)：以內部濃度為基礎，通常較為重要也容易測量，因為內部濃度比暫時性的外在濃度高。外在濃度同時也是個等級的問題：微小的藻類能夠感覺到微量到以微升 (μL) 容量範圍的營養，而我們通常所測量的單位卻是毫升 (mL)。我們換個角度來看，以大象與老鼠的模式來比較，兩者都是草食性動物：但是我們所測量的只有大等級的植物質量（例如樹木），但並沒有測量少量而生命週期短的草本植物，這是老鼠足以賴以維生的，而大象如果只吃這些草類卻可能會餓死的。有些水草因為表面積與體積的比例，其吸收能力較其他種類為強。

- 聚藻 (Myriophyllum) 與水榕 (Anubias) 比較起來有較高的表面積與體積比值，如此高的表面積對體積之比值使得聚藻從水中吸收營養時，比水榕更具有競爭能力。但是水榕在面對這個缺點時，以成長較緩慢和能夠忍受較低照明來彌補。添加過量的營養與二氧化碳 (CO₂) 同時讓這兩種水草都成長得很好而不必競爭養分。



圖二

這是個眾多自養生物成長和吸收的典型的廣義模式。基於上面的圖二，從園藝學的觀點來看，提供不受限的環境（綠色方塊~即良好的目標範圍）能提高水草的產量，因為濃度的目標範圍很寬廣，而且在此範圍內的水草成長速率也比較高。對大部分的園藝家而言，長時間持續維持一個固定的濃度很困難也不切實際，但是維持一個可用的範圍就很容易達成。限制水草的營養，在探討個別品種的差異與反應時是有用的，但是這對於一個穩定的栽培而言絕非是個好方法。在抑制作用發生之前，不受限的營養與光照強度必需達到相當高的程度。從水草的角度來看，許多營養的抑制濃度在哪其實並不是很清楚，更何況這也和動物（例如魚類和無脊椎動物）的致死濃度息息相關。這個濃度範圍提供了一個很大的可用範圍，相當容易就能夠達成，並且提供在水草栽培上的穩定濃度。限制的作法其實範圍是很窄小的，而且從實際面來看，很不容易提供一個穩定的濃度範圍，況



且從初始與維持劑量來看，也很難不發生錯誤。由於光照會促進水草的吸收速率，所以只要光照強度超過了補償點的較低光照強度下，此時的低營養濃度比較不會出錯。一般來說，在接近光補償點的低光照強度下，不受限營養的濃度範圍也較低。根據 Van 等人 1986 年針對三種水草以及在 Tropica 針對鹿角苔所做的研究，都發現相同的結果。由園藝的角度來看這兩個研究，不受限的營養範圍在低光照強度下，是個比較好且穩定的栽培方式，水草也更強壯。

最後的結果是水草明顯成長和降低藻類出現，利用簡單的方法就能讓水草愛好者擁有一個濃度範圍寬廣的日常施肥方式，而且水草也能健康成長。高營養濃度和相當低的光照強度就能提供明顯的水草成長，但很多書籍與文章的建議卻不一樣。我們所能做的，就是去試驗，並且自己體驗看看是否真的如此。從學理角度的建議並不支持那些書籍與文章的論點，實際上的實驗結果也是如此。

一旦使用了以後，估計指數 (EI) 是個非常容易去做也非常便宜的方法。這是個很單純的步驟，基本上只有二氧化碳 (CO₂) 的相關問題會影響到水草與水族缸，而且除了二氧化碳 (CO₂) 以外，估計指數很有效的排除了所有營養問題。

附加文獻：

Bowes G. 1991. Growth in elevated CO₂: photosynthetic responses mediated through rubisco. *Plant, Cell and Environment*, 14: 795-806 (invited review)

Madsen TV, Maberly SC, Bowes G. 1996. Photosynthetic acclimation of submersed angiosperms to CO₂ and HCO₃⁻. *Aquatic Botany*, 53: 15-30

Additional reading:

Canfield, D.E., Jr., K.A. Langeland, M.J. Maceina, W.T. Haller, J.V. Shireman, and J.R. Jones. 1983. Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40:1713-1718.

Canfield, D.E., Jr., J.V. Shireman, and J.R. Jones. 1984. Assessing the trophic status of lakes with



aquatic macrophytes. pp. 446-451. Proceedings of the Third Annual Conference of the North American Lake Management Society. October. Knoxville, Tennessee. EPA 440/5-84-001.

Canfield, D.E. Jr., and M.V. Hoyer. 1988. Influence of nutrient enrichment and light availability on the abundance of aquatic macrophytes in Florida streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45:1467-1472.

Canfield, D.E. Jr., E. Philips, and C.M. Duarte. 1989. Factors influencing the abundance of blue-green algae in Florida lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46:1232-1237.

Agusti, S., C.M. Duarte, and D.E. Canfield Jr. 1990. Phytoplankton abundance in Florida lakes: Evidence for the frequent lack of nutrient limitation. *Limnology and Oceanography* 35:181-188

Bachmann, R. W., M. V. Hoyer, and D. E. Canfield Jr. 2000. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka, Florida. *Hydrobiologia* 418: 217-227.

Bachmann, R.W., M.V. Hoyer and D.E. Canfield, Jr. 2004. Aquatic plants and nutrients in Florida lakes. *Aquatics*: 26(3)4-11

Bachmann, R. W. 2001. The limiting factor concept: What stops growth? *Lakeline* 21(1):26-28.

Van, T. K., W. T. Haller and G. Bowes. 1976. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants. *Plant Physiol.* 58:761-768.

我想向 Neil Frank , Karen Randall , Paul Sears , Kevin Conlin , 丹麥 Tropica 的 Claus , 以及尤其是 Steve Dixon , 還有三藩市港區水草協會 (SFBAAPS) 的草友們 , 對於他們多年來的投入估計指數的發展與理解致以謝意。對付許多藻類的問題是大家當時共同努力的成果。

Copyright Tom Barr 2005

Traditional Chinese Translation by Erich L.T. Sia 2006