

# 台灣不容缺席的研究議題 —氣候變遷下氮的生物地質化學循環

文、圖 ■ 薛銘童 ■ 國立中興大學環境工程學系研究助理

許博行 ■ 國立中興大學森林學系兼任教授

劉瓊霖 ■ 國立中興大學森林學系副教授（通訊作者）

## 一、緒言

全球氣候變遷為當前最受矚目的環境議題，此因近數十年來，科學界的研究結果，使得人類開始意識到自工業革命以來，化石燃料的大量使用以及森林等綠色植被因糧食或居住的需求受到破壞，導致大氣二氧化碳濃度急遽上升所引起的全球暖化效應。此一議題在全球媒體強力的報導之下，已成為各國政府無法忽視的問題了。然而，大氣二氧化碳濃度增加僅是造成氣候變遷的其中一個原因。根據目前的科學研究顯示，造成全球環境變遷及氣候暖化等問題的來源有三：（一）大氣二氧化碳濃度增加；（二）氮的生物地質化學循環改變以及（三）土地利用／土地覆蓋的改變。這當中，氮的生物地質化學循環改變是當前台灣政府及科學界較少重視的領域！

被譽為環境科學諾貝爾獎的泰勒環境成就獎（Tyler Prize for Environmental Achievement），在2008年頒給了美國維吉尼亞大學的James N. Galloway及史丹佛大學的Harold A. Mooney兩位教授。在兩位得獎者當中，Galloway教授是以在全球氮循環的卓越研究而得獎。他歸納整理了許多學者在生物地質

化學循環、大氣環境化學、森林、土壤、水文…等領域對於活性氮的研究，並提出了「Nitrogen Cascade」的概念，透過量化以闡明人為生產肥料及燃燒化石燃料的過程所產生的活性氮（Reactive Nitrogen，包含 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{NH}_4^+$ 等無機態氮與尿素、胺及蛋白質等有機態氮）在進入大氣、水域及生物圈後，對土壤、水域及生物所產生的影響。此一概念描述了地區性的人為活動所生產的活性氮對全球生物地質化學循環所產生的影響及其複雜的程度是遠超過目前科學研究所了解的，不僅包括數十年前的酸雨、湖泊酸化、優養化等問題，在溫室效應、臭氧層、生物多樣性、海洋死域（Dead Zone）等問題上，都與環境中活性氮有著顯著且密切的關係。

二氧化碳以及活性氮所引發的環境問題，與重金屬污染、硫化物排放或是引起臭氧層破洞的氟氯碳化物等問題，有著本質上的不同。其中最大的差異在於前者與人類維生所必須之糧食及能源有著密不可分的關係，而這也是碳與氮的減量一直無法取得重大進展的緣故。本文試就當前活性氮對生態



環境與生物多樣性影響的相關研究作一簡單的文獻回顧，並歸納整理台灣過去相關的研究，期能拋磚引玉。

## 二、氮的生物地質化學循環變遷

Vitousek (1994) 曾以全球尺度的觀點深入綜述包括大氣二氧化碳濃度增加、氮的生物地質化學變遷以及土地利用／土地覆蓋的改變等三個廣為探討的全球環境變遷議題與人口增加、人類活動及其對全球氣候變遷與生物多樣性損失的關係，明確的指出這些變遷正在進行中，而且是人類所造成的。在這當中氮的生物地質化學變遷對氣候變遷及生物多樣性的影響，雖不若人類活動引起的二氧化碳濃度增加與土地利用／土地覆蓋改變來得直接，但因人類發展集約農業與Haber-Bosch固氮法的發明，人為固定的氮量（包含以Haber-Bosch法生產的氮肥、固氮作物、燃燒化石燃料等）在1980年代已經超越了包含陸域（約100 Tg， $1\text{Tg}=10^{12}\text{g}$ ）、海域（約5~20 Tg）及閃電（約10 Tg）等自然界的固氮量，並且以驚人的速度增加中（Kinzig and Socolow, 1994；Vitousek, 1994）（圖1、2）。在2008年5月的Science期刊中，Galloway等學者呼籲在關注二氧化碳所造成的問題同時，科學界與政府決策部門應重視氮循環的改變（Galloway *et al.* 2008）。因人類正以空前的速度與方式改變全球氮循環，例如由於新興國家的快速發展，糧食與能源的需求大增，許多國家大幅提升肉類、豆類、肥料及生質燃料之產能以供應之，也因此生產了許多活性氮，這些活性氮不但

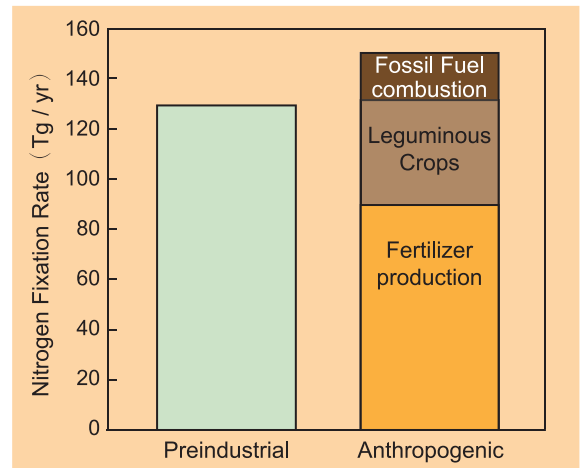


圖1 人為（右）與非人為來源（左）之固氮量（Kinzig and Socolow 1994）。

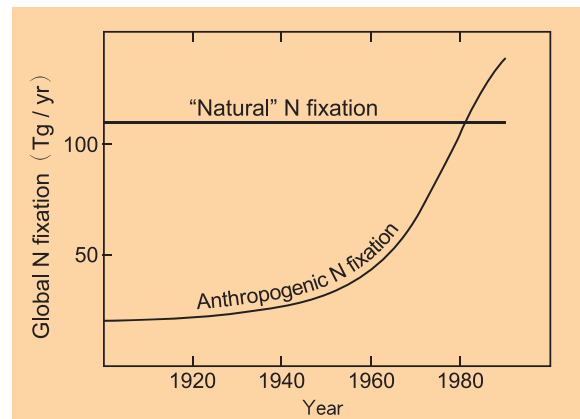


圖2 假設自然界固氮量沒有受到土地利用及氮沉降增加影響下，與20世紀人類固氮量增加情形比較（Vitousek 1994）。

造成了地區性地下水污染、大氣中氮與懸浮微粒的排放以及氮沉降的增加，更透過頻繁的國際商業貿易行為，使得活性氮的移動性及排放量超過了水文及大氣傳輸的影響範圍。

在生物地質化學循環中，氮循環最大的特色是大量儲存於大氣層中的 $\text{N}_2$ ，以及透過閃電或生物固氮作用生成而進入大氣、生物、土壤及水域等較小儲藏庫的各式活性氮。

目前因人類活動，使得原本不具活性的 $N_2$ ，透過工業固氮、栽植大量固氮作物、燃燒化石與生質燃料，大量並且快速的進入各個較小的儲藏庫中。如此的改變，使得原本扮演平衡機制的微生物脫氮作用（將活性氮轉變成 $N_2$ ）與地質沈積作用來不及將過多的活性氮自各個較小的儲藏庫中移除。這些移動性極高的活性氮透過大氣對流、水文及人類貿易行為，讓地區性發生的氮循環，擴大成區域性甚至全球性的影響（Vitousek, 1994）。

### 三、活性氮對生態環境的影響

根據許多研究結果發現，人類因在食物及能源的需要上，生產肥料、栽種固氮作物及燃燒化石與生質燃料所製造生產的大量活性氮，固然為人類的生活帶來了許多益處，但這些人為生產的活性氮，在進入環境後，已造成了大氣懸浮微粒與溫室氣體— $N_2O$ 的排放增加、土壤及河流湖泊的酸化、河流湖泊及海水優養化、陸域及水域物種組成改變及多樣性減少等生態環境問題，並進一步嚴重威脅到人類的健康（Kinzig and Socolow, 1994；Vitousek, 1994；Vitousek, 1997；Galloway, 1998；Galloway *et al.*, 2003；Phoenix *et al.*, 2006；Galloway *et al.*, 2008；Stevens *et al.*, 2008）。

以Galloway為首的許多學者曾提出（Galloway, 1998；Galloway *et al.*, 2003），活性氮對全球生態環境及人類健康的影響具有多重連鎖反應的特性，此一特性會稱被為氮瀑流（Nitrogen Cascade）主要是由於活性氮一旦進入環境中，將引發有如瀑流般的一連串事件，

如圖3所示：從能源生產的角度來看，藉由燃燒化石燃料產生能源會生成 $NO_x$ 排放進入大氣，在這過程裡，一個氮原子以 $NO_x$ 的形式進入大氣後，依次會增加臭氧的濃度，降低大氣能見度及增加空氣中懸浮微粒的濃度，最後增加沉降的酸度；以沉降形式進入陸域生態系統後，同一氮原子會繼續造成土壤酸化（如果鹽基陽離子因此從生態系流失的話），降低生物多樣性，增加或降低生態系生產力；當此氮原子進入水域生態系後，會增加地表水酸度及海岸的優養化；如果此一氮原子隨後轉變成 $N_2O$ 的形式並逸散進入大氣後，則會增加溫室暖化效應的潛在可能性並降低平流層的臭氧濃度。在活性氮的移動過程中，除非該活性氮進入一個蓄積潛勢（Accumulation Potential）高的系統中（如森林或草原），或是在脫氮作用潛勢大的系統中還原成氮分子回到大氣中（參考表1），才能減緩或停止此一瀑流（Cascade）的進行。

### 四、活性氮對生物多樣性的影響

氮是有機生命體內許多重要分子的組成分之一，舉凡蛋白質、核酸、部分賀爾蒙（如IAA、細胞分裂素）、葉綠體與血紅素等分子的組成都需要氮的參與，氮的供應更是影響陸域及海域初級生產力的限制因子（Molles, 2002）。然而，由於氮的生物地質化學循環改變，許多生態系的氮沉降速率大幅增加，目前多數地區的平均氮沉降速率已超過 $10\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 。對植群生產力受到可利用態氮供應限制的溫帶地區而言，高氮沉降

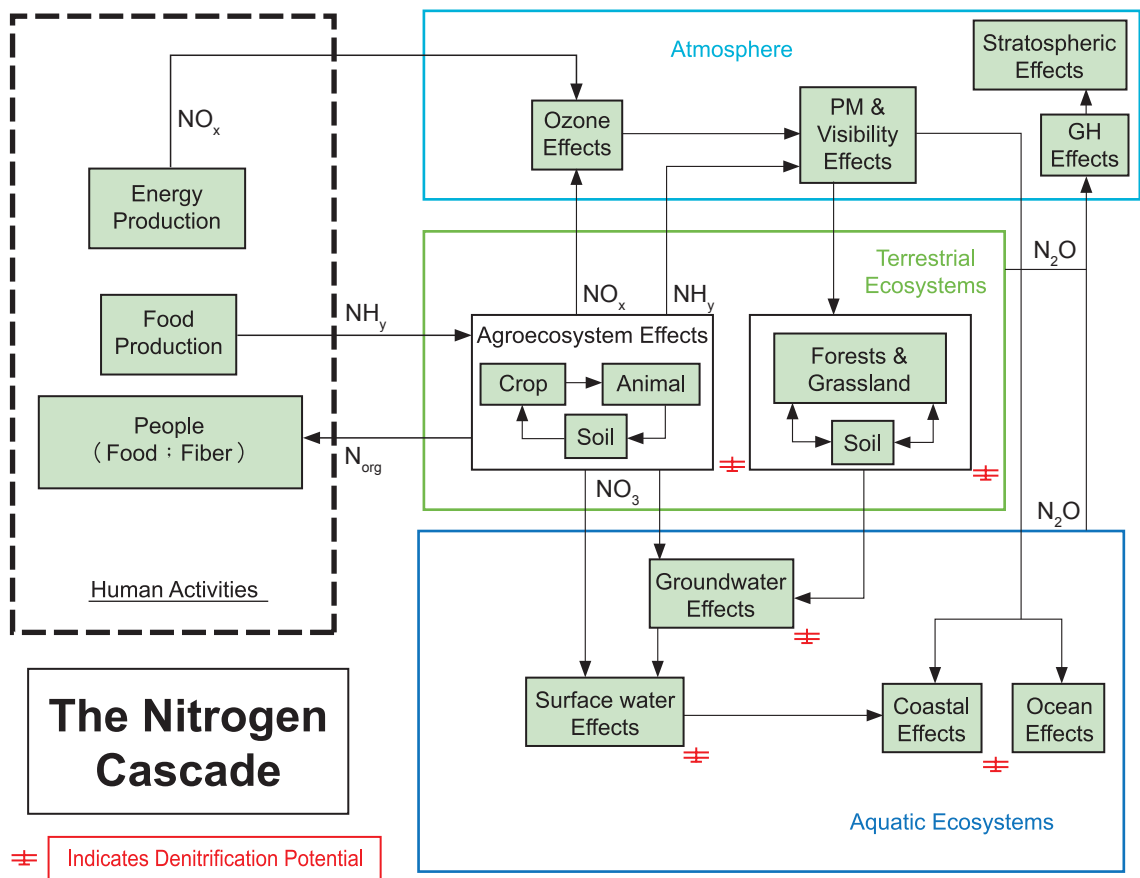


圖3 氮瀑流：顯示一個氮原子自非活性態轉變為活性態後，能在不同的系統產生一連串的反應。

GH：溫室效應；PM：懸浮微粒（Galloway *et al.* 2003）。

雖然可提高植群生產力，但通常伴隨著植群多樣性的降低，例如Stevens等（2008）在英國境內選擇68個涵蓋不同程度氮沉降（5~35 kg N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）的草原生態系進行草原植群物種豐富度統計分析（該試驗亦同時分析包括硫沉降、土壤pH、土壤氮含量、溫度、降雨…等共20個化學、物理及人為影響因子），結果發現草原物種豐富度與氮沉降量呈線性關係：每增加2.5 kg N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>的沉降量，就會使得4平方公尺取樣面積內的植物數量減少

一種，並且減少的通常是適應低肥力環境的種類；又如Tilman（1987）於美國明尼蘇達州的大型施肥控制實驗發現，隨著氮肥的施用量增加，會促進樣區內植群生物量的增加，並同時使得植群物種豐富度下降。另一方面，雖然在海域方面的相關研究目前還很缺乏，但是Diaz與Rosenberg（2008）於Science期刊發表的報告指出，由於農業施肥及工業燃燒化石燃料所流失或排放的氮和磷等營養物質進入海岸之後，變成海藻群的營養來源，



表1 不同系統對氮瀑流的反應特性

系統	蓄積潛勢	移轉潛勢	脫氮潛勢	氮瀑流下游所連結的系統	潛在性影響
大氣圈	低	非常高	無	除地下水外全部的系統	人類及生態系健康、氣候變遷
農業系統	低至中	非常高	低至中	全部的系統	人類及生態系健康、氣候變遷
森林	高	中、部分地區為高	低	全部的系統	生物多樣性、淨初生產、死亡率地下水
草地	高	中、部分地區為高	低	全部的系統	生物多樣性、淨初生產、死亡率地下水
地下水	中	中	中	地表水、大氣圈	人類及生態系健康、氣候變遷
濕地、溪流 湖泊、河川	低	非常高	中至高	大氣圈、海洋沿岸地區	生物多樣性、生態結構、魚類
海洋沿岸地區	低至中	中	高	大氣圈	生物多樣性、生態結構、魚類 有害的藻華

當這些微小的植物死亡沉到底層之後，又變成細菌的養分來源，在細菌分解的過程中需要消耗水中溶氧，如此造成長期低氧的水域將嚴重威脅到食物鏈頂端的魚類等海洋生物的存活，進一步會造成海洋生物無法生存的死域（Dead Zone）。

根據Phoenix等學者就34個當前最亟需保育的生物多樣性熱點（Biodiversity Hotspot；以該地區植群物種多樣性為選定指標）的相關研究發現，以全球化學傳輸模式（Global Chemistry Transport Model）來估算1990年代中期及2050年氮沉降速率及分布（Phoenix *et al.*, 2006），結果顯示在1990年代中期，這些生物多樣性熱點的平均氮沉降速率（ $5.3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）高出全球陸域平均值（ $3.5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）的50%，並且到了2050年還會再倍增（ $11.8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）。這顯示對於孕育全球生物多樣性最高的熱帶及亞熱帶地區而言，

當中的多數區域早在1990年便已受到高氮沉降的影響。在陸域系統中，許多研究結果顯示這些地區的植群生產力往往是受限於其他的資源（例如磷），而非是氮的供應。此因這些地區的土壤常存在缺磷及陽離子的情況，加上相對於溫帶地區更加旺盛的生物固氮作用，造成這些生態系統處於含氮量相對豐富的狀況。僅就理論上來說，這些系統對額外輸入的氮的反應應與溫帶系統有很大的不同，並且會導致氮快速流失到空氣或是水中、土壤陽離子耗竭以及碳吸存能力的降低。但是有關這些生態系統的反應、轉移入生物社會結構的影響以及生物多樣性流失的資料目前仍然相當缺乏，並且未來在都市與集約農業發展下，大幅增加活性氮的需求所帶來的氮沉降、酸沉降與水質優養化等環境問題，勢必將導致全球生物多樣性受到嚴重的威脅（Galloway *et al.*, 2008）。




## 五、結語

台灣位處亞熱帶地區，由於地理位置及島內多樣的地形地貌，孕育了相當高的生物多樣性。在今年7月，由林務局及國科會生物處分別自2002及2005年起補助中央研究院生物多樣性研究中心所執行的「建置台灣物種名錄計畫」，發表了台灣第一本官方物種名錄，共登錄了5萬多種生物，以台灣僅佔全球土地面積萬分之2.5，物種數量卻達全球的2.5%來看，這個比例是所有國家平均值的100倍；若就台灣海域的海洋生物來看，更是平均值的400倍，物種數達全球的1/10！然而，值得注意的是，在前文所提及的幾個研究報告中，如Diaz與Rosenberg（2008）針對全球海洋死域的研究報導指出目前全球405個死域當中兩個位於台灣沿海；另外，Phoenix等學者的模式估算結果亦顯示，到了2050年，台灣所處的東南亞地區為全球氮沉降最高的地區之一！

目前國際上在氮的生物地質化學循環、高氮沉降對於生態系結構及生物多樣性等方面的影響，僅歐洲及北美等溫帶地區國家有較為完整且深入的試驗研究，這些研究成果顯示，高氮沉降在氮素供應受到限制的溫帶地區，雖然可以提高生態系的生產力，在生物多樣性上卻是一大威脅；而在初級生產力限制因子不同的熱帶及亞熱帶地區，則是極度缺乏相關的田野研究資料。

台灣位處熱帶及亞熱帶交界，為此地區國家中少數躋身已開發之列的國家，過去在國科會的支持下，曾就幾個重要的生態系（福山、關刀溪、南仁山及塔塔加）進行了為期

數年的「台灣地區長期生態研究網」之大型整合性計畫，當中包含了重要的基礎養分循環研究。其中福山與關刀溪在過去已經針對試驗區觀測到的高氮沉降現象做了初步的報導，林試所所轄的蓮華池試驗林亦發表了類似的研究報告。除此之外，由地形地貌及氣候來看，全島在東西不到150公里的寬度內，海拔由海平面上升至近4,000公尺的高山的地形，使得台灣在36,000平方公里的面積內竟涵蓋熱帶、亞熱帶及溫帶等不同氣候型態：以柯本氣候分類，可分成6種；若以桑士偉氣候分類，更可分成7種！再者，台灣發達的農業以及高密度的機動車輛，加上開發中的中國所排放的活性氮，此些近程和長程的污染，使得台灣幾乎全島都籠罩在酸雨的威脅之中。

上述條件顯示台灣在氮的生物地質化學循環改變的研究及其衍生的活性氮減量議題上，已初步具備了研究所需相關的軟硬體設備及經驗，更因位處於一個同時具備不同氣候區及豐富生物多樣性的海島上，可以進行氮沉降對不同氣候區之生態系影響的比較試驗，因此台灣在此議題上的研究，實不容缺席！



（圖片／高遠文化攝影／曾珮瑩）