

從生物及地球化學看溫室氣體

前言

空氣中絕大多數微量氣體的源與匯均受到生物及地球化學（生地化）的控制，溫室氣體也不例外。地球大氣中的溫室氣體主要包括二氧化碳（CO₂）、水蒸氣（H₂O）、甲烷（CH₄）、氧化亞氮（N₂O）、臭氧（O₃）及氟氯碳化物，其中只有水蒸氣是不受生地化的控制，它主要是隨蒸發及降水而增減，其他溫室氣體都受到生地化控制，也受到人類活動的影響，因而產生人類活動引起的溫室效應。

溫室氣體的種類與影響

氟氯碳化物的生地化機制最簡單，除了氯化甲烷（CH₃Cl）主要是來自海洋的生化源外，其他的氟氯碳化物都是人類工業活動的產物，例如CF₂Cl₂常用作冷媒。大部分氟氯碳化物都很穩定，只有在臭氧層（15~35公里高度）以上受強烈的陽光紫外線照射才會分解，其在大氣中的生命期也因此較長，有的長達百年甚至上萬年。因此，即使是極小的排放量也會因為長時期的累積而產生較大的溫室效應。含氫原子的氟氯碳化物之生命期通常較短，因為其氫原子在低層大氣中（即對流層，約0~15公里高度）會被強氧化劑OH氧化為水蒸氣。

臭氧（O₃）是常被人們忽視的溫室氣體，主要是因為O₃有其他更重要的作用，例如平流



劉紹臣／中央研究院環境變遷研究中心主任

層（15~50公里高度）的O₃能吸收大部分有害的陽光紫外線，因而臭氧洞成為人們非常關心的問題；而都會區的O₃則是主要的空氣污染物，對人體及植物都有害。事實上，O₃能吸收9.3微米的紅外線，無論在平流層或對流層都會產生相當大的溫室效應。平流層的臭氧源主要來自氧氣的光分解，其主要的匯則是氮氧化物、氫氧化物、氯氧化物等催化的光化反應，而臭氧洞就是因為人類排放的氯化物所引起的。對流層的臭氧源則是氮氧化物及碳氢化物在陽光照射下產生的，汽車及工廠排放出大量氮氧化物及碳氢化物，會使整個對流層的臭氧增加，其引起的溫室效應是氧化亞氮（N₂O）的三倍。

甲烷（CH₄）約有50%的源來自溼地及水稻田，另有20%來自反芻動物（如人飼養的牛羊），上述兩個源都是在缺氧環境內的生物排放到空氣中的。氧化亞氮（N₂O）則主要源自土壤及海水中生物的去硝化作用（denitrification），所以其產生率會隨土壤內的硝酸鹽（即氮肥）之增加而上升。CH₄的匯是在對流層內被強氧化劑OH氧化，此氧化作用使CH₄在大氣中約有十年的生命期，N₂O主要的匯是在臭氧層上方被陽光紫外線分解，其生命期約一百年，所以N₂O的溫室效應可長達一百年，而CH₄的效應在十年左右就會隨甲烷的源而變動。

在工業革命之前，空氣中 CH₄ 的含量只有約 0.7ppm（百萬分之一密度比），現在已經增加到 1.75ppm，增加的原因主要是人為源的增加，包括石化燃料、反芻動物、水稻、垃圾掩埋場及生質燃燒；在二百年間增加了一倍半，增加速率是各種溫室氣體中最快的，但 1992 年後增加速率有明顯降低的趨勢，原因不詳。N₂O 在空氣中的含量在工業革命之前約有 0.27ppm，現在已增加到 0.315ppm，主要的人為源是農業用化學氮肥的增加，工業排放的氮氧化物也會在空氣中氧化成硝酸鹽後沉降到土壤內成為氮肥。

二氧化碳的影響

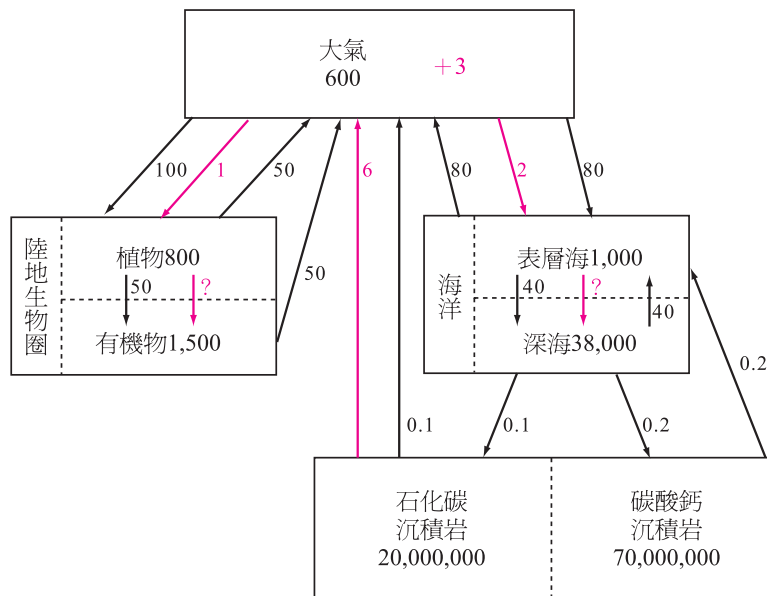
受到人類活動影響最重要的溫室氣體是二氧化碳（CO₂），其生地化機制也是最複雜的，而這就是本文討論的重點。

在工業革命以前（大約 1750 年）大氣中二氧化碳的含量約為 280ppm，到了 2000 年已經增加至 370ppm，250 年期間，累積增加量約 90ppm，這麼高的 CO₂ 在過去四十萬年的地球

大氣裡從未發生過，這麼快的增加速度在過去二萬年也沒有發生過，也就是說自然的變化不大可能是目前 CO₂ 增加之原因。

大氣中 CO₂ 的增加量大約是人類排放量的一半，剩下的一半，部分進到深海，部分進到陸地的生物圈（主要是植物及土壤內的有機物），此過程詳見圖 1。其中石化碳庫藏量雖然極大，但並不表示石化燃料可供開採數百萬年，因為絕大部分是無法經濟開採的沉積岩內小量的碳。

圖 1 是把全球碳庫及碳通量以大氣中的 CO₂ 為重點，用最簡化的方式表示出來，黑色部分代表工業革命前自然碳循環，當時大氣 CO₂ 只有 280ppm 即 6000 億噸碳，紅色部分代表 1990~1999 的十年間每年平均人為 CO₂ 排放的影響，每年石化燃料的燃燒約排放 60 億噸碳的 CO₂ 到大氣中，其中約二分之一留在大氣中，使大氣中 CO₂ 每年增加約 0.5%，10 億噸碳進入陸地上的植物或土壤內的有機物內，剩下的 20 億噸碳則溶入海洋中。



▲圖 1 全球主要碳庫（長方形）及碳通量（箭頭），碳庫內數字是庫藏量，單位為十億噸碳，箭頭旁數字為通量，單位是每年十億噸碳，黑色箭頭代表自然碳循環，紅色部分則代表 1990~1999 年間平均人為 CO₂ 排放的影響，大氣內的 + 3 表示其庫藏量在 1990~1999 年間每年增加 30 億噸碳。

二氧化碳生化對京都議定書的意義

圖 1 顯示的數字對《京都議定書》的內容有重要的意義，因為《京都議定書》只包括已開發國家，而美國反對的主要理由之一，是此議定書應該包括開發中國家的 CO₂ 排放大國，如中國及印度，尤其是中國目前的排放量已經很接近美國，是世界第二位。但這觀點忽略了圖 1 所示的一項事實，即排放到大氣的 CO₂ 在大氣中的停留期（相當生命期）接近 100 年，因此目前大氣 CO₂ 增加量 90ppm 是過去大約 100 年的累積排放結果，由於開發中國家 100 年前 CO₂ 排放量很小，所以已開發國家要對 90ppm 的增加量負主要的責任。

CO₂ 在大氣中的停留期是了解整個 CO₂ 問題的重要關鍵，停留期若是很短，排放量的變化在很短的時間就會反映在大氣的庫藏量上，停留期若長達一百年，則 CO₂ 排放量須累積一百年才會被大量輸送到其他的庫，很顯然 CO₂ 的溫室效應會隨停留期增長而增大。停留期是如何決定的？大氣中的 CO₂ 停留期到底是多長？要回答這些問題需要先了解圖 1 的主要機制。

生物對二氧化碳量的影響

圖 1 顯示大氣中的 CO₂ 每年約有 1000 億噸碳被陸地植物吸收，其中約一半即 500 億噸碳，在一年內由植物用為生長的能量後，再呼出到大氣中；另外一半則變為植物的實體如枝葉，再轉化為土壤中的有機物，有機物經過微生物消化，最後被氧化成 CO₂ 回到大氣。在以上的過程中，可看出 CO₂ 在有機物內的停留期大約 30 年，在植物的停留期應是 8 年。這裡我們可以注意到在植物的停留期不等於植物的生命期，其生命期應較接近 16 年，即由植物轉化成有機物的週期。

地球環境對二氧化碳量的影響

大氣與海洋的相互作用，主要受到化學及物理機制的控制，CO₂ 在水中的溶解度相當高，溶於水後產生碳酸並形成化學平衡狀態，其最終的結局是變成碳酸鈣沉澱到沉積岩內，地球大氣中本應有如金星及火星那麼多的 CO₂，就是因為地球有海水將 CO₂ 轉化為岩石內之碳酸鈣，才会有現在以氮氣及氧氣為主的大氣，金星及火星沒有液態水，因此 CO₂ 停留在大氣中或凍在極區。

表層海水因為陽光的照射，溫度比深海海水高，其間有逆溫層（平均約在 100 公尺深度）相隔，因此密度較低的表層海水與深海海水的對流極慢，每年的交換量只有約 400 億噸碳，也就是說表層海中的 CO₂ 可停留 25 年才被傳輸到深海，而深海中的 CO₂ 可停留近一千年才回到表層海，也就是說在討論一、兩百年後的氣候變化問題中，深海可被視為 CO₂ 最終的匯。

結語

大氣的 CO₂ 與表層海水的交換速率相當快，7.5 年內大氣的 CO₂ 就可以完全溶入表層海水，這表示大氣的 CO₂ 在 7.5 年左右就可以與表層海水的 CO₂ 取得平衡；同理，大氣的 CO₂ 在 6 年左右就可以與陸地植物基本上完成互換。因此在討論百年左右的氣候變化問題時，我們可以把大氣及表層海水，加上陸地的植物及有機物的四個碳庫，看成處在生化平衡狀態下的一個大系統。這個系統主要的匯，是每年 400 億噸碳往深海的通量，這個系統的 CO₂ 庫藏量為四碳庫之和，即約 39000 億噸碳。因此，其 CO₂ 停留期為 97.5 年，這就是前面的結論「已開發國家應對大氣中 90ppm 的增加量負主要責任」的理論根據。

海洋的 CO₂ 的最終匯是進到沉積岩內，沉積的方式大致有兩種，一是以碳酸鈣的結晶沉澱，一是經過海洋生物以有機碳或元素碳的形式沉澱。以上兩種匯都很慢，估計總和只有大

約每年三億噸碳，因此現在人類燃燒石化碳而排放到大氣中的 CO₂，約需 14 萬年才能回到沉積岩內，這也是要使人類引發的溫室效應完全消失所需的時間。

好書推薦



恆持剎那

證嚴法師留影

作者簡介

阮義忠，1950 年生於臺灣省宜蘭縣頭城鎮的木匠人家。1975 年至 1981 年擔任《家庭月刊》攝影，並負責攝影報導專欄。1981 年至 1987 年為電視公司製作紀錄片兩百多部，1988 年開始於臺北藝術大學任教，1992 年創立《攝影家》雜誌。

個人創作包括論著《當代攝影大師》、《當代攝影新銳》、《攝影美學七問》，以及攝影集《北埔》、《八尺門》、《人與土地》、《臺北謠言》、《四季》、《手的秘密》、《有名人物無名氏》、《正方形的鄉愁》、《失落的優雅》等。自 1999 年起，為佛教慈濟基金會製作志工列傳及紀錄片。其攝影論著及創辦之雜誌被認為是兩岸華人攝影教育之啟蒙。

內容精華

從事攝影創作已有三十多年的阮義忠，大半時間是在臺灣這塊土地上尋找人性的真善美。

921 大地震後，他開始去記錄慈濟「希望工程」在災區所援建的五十所學校，進而知道臺灣有這麼一大群好人天天在無私付出，而且在付出的同時還會感恩。對藝術家來說，付出心力就是留下作品；對慈濟人而言，所有的付出卻是要讓他人生活的更好。漸漸地，他的觀念有了很大的改變，從往昔只求個人藝術成就被肯定，轉而樂於以個人專業來披露慈濟志工的事蹟。

本書是他與妻子袁瑤瑤女士，長期跟隨證嚴法師行腳，用鏡頭與文字，勾勒證嚴法師在各地辛勤奔走的身影。

證嚴上人的行儀是身教，加上《靜思語》的言教，「恆持剎那」，保護初發的那一念善心，是上人對弟子的詢詢教誨，同時也與攝影「化剎那為永恆」的精髓相通，故成為這本攝影集很貼切的書名。

