減降農作生產排放溫室氣體對策之淺見

楊純明*

行政院農業委員會農業試驗所作物組

摘要

氣候的快速變遷現象近年來已成為眾所矚目的全球性議題，其形成原因普遍被歸諸於自 19 世紀工業革命兩百年以來，大氣中各種溫室氣體持續蓄積的結果。不僅因此增強了地球的溫室效應，也造成全球的溫暖化趨勢。農業的生產過程中會釋出若干溫室氣體至大氣中，促使氣候的不穩定或更劇烈的變化，反過來說農業生產也會受到氣候變化與變遷的影響，兩者互為因果。為期人類糧食的穩定供應，生活空間的長久維持，乃至於大地萬物的生生不息，吾人應當關切溫室氣體排放與氣候變遷問題，並積極謀求因應對策、規劃適當調整方向。如此，才有機會減降溫室氣體排放量，減輕對農業(農作物)生產的負面衝擊，復兼顧環境保護、生態維護和糧食生產。農業生產相關的最主要溫室氣體為二氧化碳、甲烷及氧化亞氮等三種，以土壤釋出的氧化亞氮、富含有機質土壤栽培期間逸釋的氧化亞氮與甲烷、反芻動物發酵排放的甲烷、動物糞便管理過程產生的甲烷與氧化亞氮、以及操作農業使用能源產生的二氧化碳與甲烷等為最大宗，透過不同技術、經營管理措施及系統性方法與策略，吾人能夠減少這些溫室氣體的排放量，進而達到逐年減降目標。而二氧化碳、甲烷及氧化亞氮亦為農作生產排放的主要溫室氣體，本文將試予探討其等排放源及減降對策，期以助益於國內農業之永續發展。

* 通信作者, cmyang@ wufeng.tari.gov.tw

作物、環境與生物資訊 5:297-305 (2008)

Crop, Environment & Bioinformatics 5:297-305 (2008)

189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

關鍵詞：溫室氣體、氣候變遷、全球溫暖化、農作生產、排放量減降對策。

Strategies and Practices Leading to the Mitigation of Greenhouse Gases Emissions during Crops Production

Chwen-Ming Yang*

Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

ABSTRACT

Accelerating of climate change has become an important global issue recently and has been attributed to mainly the result of long term accumulation of vast greenhouse gases (GHGs) since industrial revolution commenced in the late nineteenth century. It causes not only the strengthening of greenhouse effect but the moving force of global warming trend. GHGs may also be released to atmosphere during the processes of agricultural production and contribute to the deterioration of the effect. On the other hand, climate change exerts confounding impacts on agricultural production too. As GHGs emissions are resulted from human activities for meeting food demand of growing population, anyone who lives in the global village should consider playing an active role in mitigating problems evolving from GHGs emissions and climate change. With effective strategies and practices to reduce GHGs emissions and the negative effects on agricultural/crops production, it then be possibly keeping goals of environmental protection, ecological preservation and food production maintaining in the same time in the future. The main GHGs emitted from agricultural/crops production are carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O).

This paper will try to explore the possible ways to mitigate these three GHGs emissions with the mind to in favor of sustaining local agriculture development.

Key words: Greenhouse gas, Climate change, Global warming, Crops production, Mitigation strategy.

前言

近年來由於天氣變化無常，極端天氣發生頻率升高，且氣候規律難以預測(料)，促使氣候的快速變遷現象成為眾所矚目的全球性議題。其實氣候與環境一樣，在地球形成後即不斷的變化與變遷，惟其改變速率概以千、萬年甚或百萬年計。然自 19 世紀工業革命迄今的兩百年以來，由於大量石化燃料被消耗，加上人造化學品的產製、人類各樣活動的釋放、天然與人為的災變、以及太陽光輻射的變動等因素，使得大氣中累積各種溫室效應氣體(greenhouse effective gases, 或簡稱溫室氣體，greenhouse gases; GHG)。這些溫室氣體持續的蓄積遂增強了地球的溫室效應(greenhouse effect)，不僅促成全球溫暖化現象(global warming)，也改變了氣象的常態運轉與演變，從而加速全球的氣候變遷(climate change)。氣候的快速變遷影響層面廣大而深遠，涵蓋的層面包括環境、生態、氣候、地質、海洋、生物多樣性、經濟發展、社會安全、政治議題等面向，十分複雜且多元。固然目前仍存在許多不確定與未知部分，需要更多的研究才能釐清氣候變遷對各方的衝擊，但已確知氣候變遷將反饋影響環境與生態，亦將造成地物地貌的改變，密切關係各行各業的運作與發展。地表上的物種，無論生物或非生物，凡無法及無能適應變遷情境者，均將遭受鉅變甚至滅絕，人類也不例外。

由此可知，氣候變遷當然會影響農業的運作與操作，農、林、漁、牧皆然，反過來說農業生產也會影響氣候的變化與變遷。農業的生產過程或操作歷程中，將會釋出若干溫室氣體至大氣中，造成氣候的不穩定或更劇烈的變化。為期人類糧食的穩定供應，生活空間的長久維持，乃至於大地萬物的生生不息，吾人應當關切溫室氣體排放與氣候變遷問題，並積極謀求因應對策、規劃適當調整方向(Lin and Yang 1998)。如此，才有機會減降溫室氣體排放量，減輕對農業(農作物)生產的負面衝擊，兼顧環境保護、生態維護和糧食生產。

大氣之中充滿了各類天然與人為製造的溫室氣體，如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF_6)、…等(Detweiler and Hall 1988)，而《京都議定書》規定至 2010 年所有工業化國家排放的 CO_2、N_2O、CH_4、HFCs、PFCs、SF_6 等 6 種溫室氣體數量，前三項須比 1990 年水準減少 5.2%，未開發國家則無減排義務。農業生產相關的最主要溫室氣體為 CO_2、CH_4、N_2O 等三種(Bouwmam 1990)，在大氣層中持續而大量累積的結果，這些溫室氣體將攫住入射的長波光輻射及原應散發回太空的地表輻射熱，擾亂了進出地球的能量平衡，進而增強了大氣圈內的溫室效應，長期下來於是導致地球的溫暖化。目前，增強的溫室效應被多數科學家認定為引發快速氣候變遷的禍首，舉凡產生溫室氣體的各種產業，乃至於社會大眾，都應當誠實面對並齊心解決人類共同面臨的難題。

溫室氣體的減量是國際性議題

全球溫室氣體的減量需要透過國際溝通、合作，才能形成共識、謀求解決之道。自 1990 年代起，國際間陸續形成共識研擬出聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC, 1992)和<京都議定書>(Kyoto Protocol, 1997)，提供世界各國協商平台與執行架構。聯合國氣候變化綱要公約自 1994 年起生效，迄今已有超過 180 個國家承諾遵守其效力，共同致力於限制大氣溫室氣體的排放量，以避免人為因素破壞氣候系

統。該綱要公約規定，凡簽署的會員國皆必須提出國家級溫室氣體減量清單(national greenhouse gas inventories)，估計該國溫室氣體的排放源(emission sources)及積儲容量(sink capacity)，並同意遵守國際減量協議。藉由提供準確的減量清單，可以增進各簽約國對不同排放源及積儲容量相對重要性與空間分佈的瞭解。列於<京都議定書>附錄一(Annex 1)名單的已開發國家(developed countries)，每年更必須提供國家清單報告書(National Inventory Report; NIR)，詳列自基礎年(1990 年)起至目前的完整與最新溫室氣體排放源及積儲資訊。現今附錄一名單國家已提供 1994 年起的國家清單報告書，而且自 1996 年起各國每年均提出當年度的報告書。惟各國報告書的品質、資料內容及透明度不一，僅有部分國家詳實公佈其評估方法，仍有極大改進空間。

農業(作)生產排放的溫室氣體

農業部門(agricultural sector)主要製造了人類活動衍生溫室氣體中的 CO_2 (carbon dioxide)約 25%、CH_4 (methane)約 50-65%及 N_2O (nitrous oxide)約 70-90%排放量，同時也廣泛影響氨氣(ammonia; NH_3)、氧化氮(nitric oxide; NO)與氧化碳(carbon oxide; CO)的排放(Duxbury 1994)。其中，以(1)土壤釋出的氧化亞氮、(2)富含有機質土壤栽培期間逸釋的氧化亞氮與甲烷、(3)反芻動物發酵排放的甲烷、(4)動物糞便管理過程產生的甲烷與氧化亞氮、以及(5)操作農業使用能源產生的二氧化碳與甲烷等為溫室氣體的最大宗。透過不同技術、經營管理措施及系統性方法與策略，吾人能夠減少這些溫室氣體的排放量，也可以達成減量目的。

由農業部門衍生的溫室氣體排放量，據估計解釋了 1/5 人類活動(human activities)每年增加氣候變遷的光驅動力(radiative forcing amounts)，加上土地利用(land use)有關的生質量燃燒(biomass burning)及土壤裂解(soil degradation)的排放量，則可能提高至 1/3 光驅動力。顯見減少農業運作所排放的溫室氣體非常重要，世界各工業大國體認此一嚴重性，莫不積極研發減降技術與措施、研擬減降策略與政策，期以控制溫室氣體的排放，進而達到逐年減降目標。

二氧化碳(CO_2)

二氧化碳係由兩個氧原子及一個碳原子鍵結成的氣體化合物，目前大氣層中的平均濃度約 387 ppm，在不同月份由於北半球植物生長狀況的變異而有輕微波動；通常於北半球春季及夏季期間，因植物旺盛生長(active growth of plants)的需求而降低，秋冬季節則因植物的休眠(dormant)、老化(decay)或死亡(die)而上升。由於容許可見光穿透卻大量吸收近紅外光及紅外光，CO_2 乃重要的溫室氣體之一，常被當作溫室氣體換算的基準。此氣體亦為植物行光合作用(photosynthesis)所需要的材料，合成轉化成醣類(sugars)，可經過呼吸作用(respiration)消耗而回復，或作為生物合(構)成澱粉(starch)、纖維素(cellulose)、蛋白質(proteins)及多種有機化合物(organic compounds)等多分子糖類(polysaccharides)產物的粗原料，提供植物生長發育需求。CO_2 也可經由動物、真菌及微生物等呼吸直接或間接的產生，因此成為碳循環過程中最主要的化合物型態。在石化能源(fossil fuels)、生質能源(bio-fuels)燃燒過程或其他化學反應中也可生成 CO_2，而火山爆發、溫泉(hot springs)、熱泉(geysers)等地質散熱現象(geothermal processes)及地殼岩石裂解、碳酸化物溶解同時，皆有 CO_2 的逸釋。

甲烷(CH_4)

甲烷係由四個氫原子及一個碳原子鍵結成的氣體化合物，為最簡單的烷類(alkane)分子及最主要的天然油氣(natural gas)組成分，當混合氧氣燃燒時將會產生 CO_2 及水。由於相對量多且具有燃燒乾淨的特性，CH_4 可作為優良燃料，惟必須自產地以罐裝或管線運輸，成本較高。CH_4 為主要溫室氣體之

一，因吸熱效率頗高，對溫室效應影響潛力甚大(其吸收輻射之潛勢為二氧化碳的 30 倍; Kimura *et al.* 1991, Wang *et al.* 1976)。大氣層中的 CH_4 最終將和氧分子結合而氧化，生成 CO_2 及水，其在大氣層的半衰期約 7 年。

氧化亞氮(N_2O)

氧化亞氮又稱笑氣(laughing gas)係由二個氮原子及一個氧原子鍵結成的氣體化合物，在室溫下為無色不可燃氣體，然具有香甜氣味(sweet odor and taste)聞後令人舒暢、心情愉快。又具有麻醉與止痛效果，常被使用於外科與牙科手術。而其促進引擎動力輸出的特殊效果，則常被當作賽車添加劑。一如 CO_2 與 CH_4，N_2O 亦為對光輻射反應活潑的溫室氣體，也具有相當的溫室效應影響潛力。對全球暖化趨勢的貢獻度而言，以農地排放至大氣中的 N_2O 為最主要，在自然狀況下土壤經過微生物驅動的硝化作用(nitrification)及去硝化作用(denitrification)過程釋出 N_2O，此一過程會因為添加氮源(nitrogen inputs)至土壤而促進排放量。影響 N_2O 排放的原因為施用氮肥、土壤有機氮的礦物化(mineralisation of organic N)、土壤水分含量(降水)與溫度變化等，具有時空變異(Skiba and Smith 2000)，所以各地區可能會有極大變異與差異。現行人類活動增加的農地 N_2O 排放量，多因為施用氮肥及廄肥(動物性堆肥)之故。在<京都議定書>附錄一名單國家中，約有 60%的 N_2O 排放量係由各種農業活動產生。

減降農業(作)生產排放溫室氣體之對策

如今已有充足的證據顯示，農業(作)操作將會增加溫室氣體的排放量，由生物圈(biosphere)擴及至大氣圈(atmosphere)。尤其近百年來為了提高糧食生產來餵養快速的人口增長，土地利用方式與型式有顯著改變，甚至超限使用，因此溫室氣體通量大幅上升(Follett *et al.* 2005)。各種有利於食物供應的作為，包括燃燒生質量、栽培農作物、豢養牲畜(特別是反芻動物)、擴增農地面積及大量使用氮肥等，亦同時產生催增溫室氣體的負面作用。

農業部門若採行適當措施(技術)減少溫室氣體排放量，依照 Cole *et al.* (1997)之研究結果，每年約有減少 1.15-3.3 Gt 碳當量(carbon equivalents)的潛力，其中減少 CO_2 排放量約 32%，減少 CH_4 排放量約 16%，減少 N_2O 排放量約 10%，另藉由生產生質能源可減少排放量約 42%。然而，因為各個地區採用不同的經營管理及減量措施，環境條件亦不相同，時空差異下各地區之間的減量效果差別甚大。各種減量措施的接受度，端視其能貢獻於農田永續生產的能力及帶給農民的生產效益而定，諸如減少農地耕犛(reduced tillage)、不耕犛(no-till)、策略性投施肥料(strategic fertilization)、慎選肥料施用時間點(fertilizer application timing)等均是可行對策。此外，這些溫室氣體減量措施對氣候變遷的可能作用，也是常被列入實施考量的重要課題，值得密切關注(Kroeze *et al.* 1999)。

廣義農業(作)操作對溫室效應的最大衝擊係排放大量的 CH_4 與 N_2O，約占人類活動 CH_4 排放總量的 50-65%、N_2O 排放總量的 70-90%，而土地利用的改變，則以釋出大量的 CO_2 成為溫室效應的最大禍害(Kroeze *et al.* 1999)。以 Freibauer (2001)的模式研究案例，指出 1995 年歐洲地區農業運作分別排放 0.84±0.19 Tg N_2O、8.1±2.0 Tg CH_4 及 39±25 Tg CO_2，合計可換算為 470±80 Tg CO_2 當量(CO_2-equivalents)或全球 11%的溫室氣體排放量。由於排放量及排放比例甚高，因此農業(作)減降措施的研擬與實施成效非常重要，有關單位應依照地區特殊情境設法提供資料與因應對策作為政策制定參考。

二氧化碳減降對策

全球農作物栽培面積約有 17 億公頃，這些農地蓄存了約 170 Pg 的碳源，相當於地表土層碳蓄積量的 11.3%。在過去 150 年中因

為農業而開發土地所經年累積的 CO_2 排放量，相當於燃燒石化能源產生的 CO_2 總量，惟目前及可預見的未來將以石化能源產生的 CO_2 為最大宗。

土壤係地表主要的碳積儲(carbon sink)，儲存大約 1,500 Pg 的碳源，相當於陸生植物碳蓄積量的 3 倍(Schlesinger 1997)。農地土壤表土層 1 公尺內約含有 170 Pg 的碳(Cole *et al.* 1996)，CO_2 的排放現象十分明顯，尤其當土地利用發生改變時更加顯著。例如當原生的生態系(native ecosystems)被轉換為農業用途時，土壤即可測得大量 CO_2 釋出。

綜合以往的人類活動歷程，估計約有 50 Pg 的碳以 CO_2 型式由儲存於農耕土壤的有機碳釋放至大氣中。關於農地的碳積儲有以下幾點必須注意: (1)土壤的碳積儲具有一定容量，(2)必須持續採行適當的管理措施來維持土壤蓄積的碳源，以及(3)估算土壤碳平衡與碳積儲時應當考量投入石化能源造成的 CO_2 排放(Paustian *et al.* 2000)，當主客觀條件發生改變時，土壤的碳積儲容量即可能遭受破壞。一般溫帶地區的農業並不會產生 CO_2 淨通量(net fluxes)的大幅變動，因為光合作用的碳固定與生質量分解的碳釋放幾乎維持在一穩定平衡狀態(Sauerbeck 1993)。在一常態性運作的農業(耕)系統，土壤碳素終將維持一定平衡，除非耕作與土壤管理發生顯著改變(Sauerbeck 1993)。

經由改良的經營管理措施，吾人可以重建農地的碳積儲(carbon sink)並減少 CO_2 排放量。針對土地利用及操作農業的 CO_2 減降措施與對策，可分從(1)降低現有排放源(emission sources)的排放量及(2)提高與強化碳積儲容量(sink capacity)兩方面著手(Follett 1993, Paustian *et al.* 2000)。前者如降低土壤呼吸的碳逸釋及減緩土壤有機質的分解速率，兩種措施均可以減少土壤的 CO_2 排放量。針對後者，如何能提高農地的碳積儲容量？前述減少耕犛作法，或採行不耕犛、保護(守)性耕犛(conservation tillage)，或加添有機物質(如腐質質、有機質肥料)，或提高作物的水分與氮素利用效率，依照《京都議定書》內容均屬於能夠增進土壤 CO_2 儲存量的有效措施。其中，減少農地耕犛幅度與強度，將可減輕土壤物理性翻攪擾動，提高土壤團塊的穩定性，增進大、小團塊結構中穩固的土壤有機質(recalcitrant soil organic matter)比例。施用廄肥(發酵之動物糞便)，則無助於農地碳蓄積，碳排放量相當於碳儲存量。在半乾旱農地(semiarid lands)實施灌溉，由於促進地上植(作)物的生長，將有利於保存碳源於增長的植體，但是碳的淨存量則必須扣除灌溉過程消耗能源排放的 CO_2 及沉降於土層的碳酸鈣。將多餘農地轉換為自然生態系統以提升碳截取量(carbon sequestration)，利用持續廢(休)耕農地原作物的再生長/栽植多年生作物(如牧草、綠肥等)，在農地上栽種生質能源植物以替代部分石化能源功能，抑或採用改良式作物輪作及施肥等措施，都兼具有降低排放量及提升碳積儲容量效果(Follett 1993, Ogle *et al.* 2005, Paustian *et al.* 1997, 2000, Sauerbeck 2001, Schlesinger 2000, Smith 2004)。在相對比較上，以減少農地耕犛來增加土壤截取碳的能力所耗費的成本較低，栽植人工林或生質能源植物則相對耗費較高的成本(McCarl and Schneider 2001)，對我國較不適用。

北歐陸地廣大的泥炭土生態系，在湛水狀態下因為含有較低氧氣濃度，故具有截取大氣中碳與氮的能力，雖然成為碳的有效積儲，卻也釋放出大量的 CH_4 (Kasimir-Klemedtsson *et al.* 1997)。此種狀況可利用排水及栽種植物容許氧氣進入土壤來崩解泥炭土中的有機質，以減少 CH_4 的排放，但是將提高 CO_2 及 N_2O 釋出的風險。美國東南部地區由於氣候溫暖潮濕，植物具有較高生質量生產力，能夠藉由旺盛的光合作用固定大氣中的 CO_2。在長期耕犛及土壤風化腐蝕的農地，保護(守)性耕犛及不耕犛皆為重新截取土壤有機碳(soil organic carbon; SOC)的有效措施。對於不耕犛的農地，土表若再覆蓋植

物，將可增加土壤有機碳的截取容量(Franzluebbers 2005)。在農地上栽植需氮作物，若施以適量的無機氮肥，亦將有助於提高土壤有機碳的截取容量，若改長期施用動物性堆肥，則可進一步提升有機碳的積儲效果。栽培農作物的農地若改種植牧草，或旱地牧草地採行牲畜放牧，也可增加有機碳的蓄積。

又以加拿大東部地區之試驗結果為例，作物耕作制度的改變亦有助於減少溫室氣體排放量，如玉米連作田量測之溫室氣體排放量高於混合作物輪作田區(如玉米-玉米-大豆-小麥-紅苜蓿)，經濟收益則較低(Meyer-Aurich *et al.* 2006)。採用保護(守)性耕犛措施可減少溫室氣體排放量，主要原因在於投入較少石化能源及作業成本，農地排放量本身並無顯著差異。研究也顯示，輪作降低的溫室氣體排放量大於減少耕犛帶來的減量效果，而其減量的經濟效益不如輪作收穫物本身的收益(Meyer-Aurich 2006)。另外，森林系統可提供抵消(offset)或穩定(stabilize)溫室氣體排放量的多元途徑，諸如減少森林砍伐(保存碳源)、擴大人工造林(提高碳積儲容量)、生產生質能源(抵消石化能源燃燒消耗)(Dixon *et al.* 1993, Sauerbeck 2001)，因此以農地造林亦為一途。

依照各地區特性選用合適的農地保護(持)技術(appropriate conservation technologies)才能夠截取土壤有機碳並減少 N_2O 排放量，考量因素有下列六項: (1)碳截取或溫室氣體減量速率，(2)不同減降措施所需成本，(3)減降措施對農地生產者或經營者操作便利性，(4)採用減降措施後帶來的可能衝擊，(5)實施減降措施對土壤、水源與空氣品質的附帶效益，以及(6)各種政策的效率(efficiency)與效能(effectiveness) (Follett *et al.* 2005)。進步的保護(持)技術能同時助益於環境保護(environmental protection)、糧食安全(food security)及農業永續(agricultural sustainability)。

甲烷減降對策

除了反芻動物(ruminant animals)及生質量燃燒(biomass burning)之外，水稻田(rice paddies)係全球 CH_4 的重要排放源之一(Duxbury 1994)，但對於<京都議定書>附錄一名單的大多數國家而言，CH_4 屬於相對微量的溫室氣體。利用改變飼料配方，可以減少反芻動物的 CH_4 排放量(Duxbury 1994)，嚴禁農地殘留物的燃燒，則可以避免人為 CH_4 甲烷的產生。Huang *et al.* (1998)針為國內水稻田 CH_4 減降對策研究指出，水稻田區施用銨態氮肥之 CH_4 釋出量低於施用硝酸態氮肥田區，且以二期稻作之結果較明顯，品種之間的差異則不顯著。再從提高土壤氧化速率可以降低 CH_4 排放量立場，以間歇性斷水及鬆土措施來減輕稻田還原狀態程度，對 CH_4 減量應有正面功效。又若水稻品種具有較低之 CH_4 傳輸速率者，亦可減少該品種稻株之 CH_4 釋放量。

氧化亞氮減降對策

生物圈釋出至大氣圈的 N_2O 約有 70%係由土壤排放(Bouwman 1990)，因此人類活動造成土壤氮循環的變化確實是大氣中 N_2O 濃度升高的主因，尤其以土地利用的改變為主要(Houghton and Skole 1990)。例如將林地(forests)及草地(grasslands)轉換成農耕用地(croplands)將會加速碳與氮素循環，因此將促進土壤的 N_2O 排放量，所幸全球目前僅熱帶地區(tropical areas)尚有此一情境發生。此外，全球氣候變遷將因為對土壤溫度與水分含量的影響，直接影響土壤氮素循環，又因為提高大氣層的氮沉降，而使得 N_2O 的排放量增加。若以施用無機氮肥、動物廄肥及生物性氮固定等方式大量輸入氮源，將更使得土壤 N_2O 的排放量逐年增加，量測時間愈長則排放量就愈高(Bouwman 1996)。然由於無法完全估測環境中的氮素流動(如動物糞便釋出的氨氣、土壤流失的硝酸態氮及生物性氮素固定等)，農業操作排放出的 N_2O 量可能被明顯低估(Duxbury 1994)。在未來的人類活動中，操作農業造成的溫室氣體排放量比例將逐漸降低，而減量對象將針對 CH_4 及

N_2O，因為 CO_2 的排放係複雜熱帶伐林的社會政治議題，不易解決。

針對全球農地 N_2O 排放量的評估，顯示土壤儲存的氮素來源甚廣，包括各種可能來源釋出的 NzO 量、土壤原有氮源的排放、近期大氣的氮沉降、以往施肥的氮殘餘、前作植體殘留物的氮源、次土壤含水層 N_2O 的釋放、最近的氮肥施用量、以及生物性固氮作用等(Mosier 1994)。目前尚不易準確的評估個別排放量，惟均間接相關於食物的生產與消耗，據估計每年由農地直接排放總量約 2-3 Tg 的氮源，約占地表總釋出量的 20-30% (Mosier 1994)。這些組成分極易受到控制溫室氣體通量的物理性與生物性因子影響，使得 N_2O 排放量出現相當大的變異(Mosier *et al*. 1996)。舉凡能夠增進氮素利用效率之經營管理措施，皆可以直接減少 N_2O 的排放量，諸如(1)調節灌溉頻率、時間與用量、(2)採用多次分施方式或緩效性劑型供應適量氮肥、(3)提供作物所需的足量氮肥、及(4)施用硝化作用抑制劑(nitrification inhibitors)減緩硝酸鹽的生成與流失等，惜以上措施未必能減少 N_2O 的間接釋出(Mosier 1994)。

利用不耕犛、保護(守)性耕犛及傳統耕犛等不同方式，實施所謂'交替式土壤管理措施(alternative soil management practices)'，將具有減少 N_2O 排放的效果(Mummey *et al*. 1998)。然而，當農地由傳統式耕犛改換為不耕犛作業初期，會出現 N_2O 排放量高於傳統耕犛作業田區的現象，較乾燥田區表現尤其明顯。反之，若將農作物栽培田區改換為牧草地、林地時，則可減少 N_2O 的排放量。農地表土層無機態氮(銨加上硝酸態氮)、土壤容水孔隙空間及土溫等土壤因子，皆可能影響 N_2O 之排放量(Conen *et al*. 2000)。

農作生產之溫室氣體減降對策歸納

綜合上述，大致可歸納 CO_2 的排放源主要為土壤呼吸、有機質裂解、泥炭土逸釋、林地/生質量燃燒及能源使用等五大類，減降對策從「降低排放源之排放量」方向，可採行措施包括降低土壤呼吸碳逸釋、減緩土壤有機質分解速率、妥善農地廢棄物處理及嚴禁殘留物焚燒(如稻藁)等作法；從「提高碳積儲容量」方向，則包括促進農田碳截取能力(如不耕犛、低耕犛、保守性耕犛等)、提高生質能源使用比例、栽植生質能源植物、廢(休)耕地栽植多年生植物(如牧草、綠肥)、添加土壤有機物(如植體殘留物、有機質肥料、腐植質)、提高作物水分與氮素利用效率及採用改良式栽培管理(如輪作、 施肥、耕作制度調整)等作法。

農作生產的 CH_4 排放源主要來自水田栽培、廢棄物分解及能源使用等三大類，減降對策可包括嚴禁農地殘留物燃燒、改進水田栽培管理、多施銨態氮肥少用硝酸態氮肥、提高土壤氧化速率以降低 CH_4 排放量、採行間歇性斷水及鬆土措施減輕稻田還原程度及使用具有較低 CH_4 傳輸速率之水稻品種等作法。

在 N_2O 的排放源方面，可歸納為旱作栽培、施用無機氮肥、堆(廄)肥分解及生物性氮固定等四大類，而可行的減降對策則包括實施水旱田輪作、減緩有機氮肥分解速率、將農耕地轉換成林地或草地、實施所謂「交替式土壤管理措施」(即交替使用不耕犛、低耕犛、保守性耕犛或傳統耕犛)、改(增)進氮肥利用效率(如調節灌溉頻率、時間與用量)、採用多次分施方式或緩效性劑型供應適量氮肥、合理化施用氮肥/精準施肥、以及施用氧化/硝化作用抑制劑減緩硝酸鹽生成與流失等作法。

此外，在農作生產操作及銷售過程中，尚有許多減少溫室氣體產生的機會，例如政府可以補貼方式獎(鼓)勵農民減量效果，採行以肥料施用量多寡課稅，建立食品減碳或溫室氣體減量認證標章標示制度，以及建構溫室氣體減降對策/措施資料庫、減量會計帳追蹤考核體系、地產地銷流通管道等。

減降對策需要各方支持與配合

一般關於溫室氣體減量措施的建議均十分廣泛籠統，泰半針對單一氣體種類，而且以控

制排放源為出發點，並假定農民或生產者都有配合意願與能力(Oenema *et al*. 2001)。事實上，溫室氣體之間具有連鎖/共鳴反應，可行的減量措施應當能夠同時提高食物鏈中的碳、氮與水分利用效率，而非僅限於抑(控)制單一溫室氣體排放量為目的。再者，此種鏈結性作法(chain-oriented measures)亦應當相容於提升資源利用效能的環保政策，有效果(effective)也有效率(efficient)，透過教育訓練使得農民或生產者有意願及能力實施減量措施。任何減降措施或對策不僅需要農業操作者(農民、生產者、糧商等)的參與，政府相對應政策的配合，以及廣大消費大眾的支持，亦需要試驗數據的證明與驗證才具實用價值。由於任一環節都有潛在的複雜度及多方交感，需要考量其包容性，在政策擬定上更必須顧及各方立場，以凝聚相互可接受的焦點，如此才能夠務實地執行。

結語

欲解決氣候快速變遷問題並非易事，需要世界各國齊心共同努力，更需要地球村全體居民拋棄私欲與成見協力達成。國內欲減少溫室氣體排放量以降低溫室效應，首先必須平衡社會共識、經濟發展與環境保護的輕重，評定產業的優先次序，俾能夠擬訂有效的減降準則、對策。農業(作)生產與溫室氣體減降關係相對較為單純，只要透過禁止林地濫伐、嚴限農作殘留物燃燒、正確施用肥料、以及改進田間栽培管理等措施，即可有效控制與減降溫室氣體排放量。而處於氣候快速變遷的新農業環境中，欲持續正常農業(作)生產，則需要進一步研發新科技來提高農業(作)的調適能力與生產力，同時加強宣導和教育訓練來提升農場經營管理。最後，仍需適當農業政策的強力推動，加上產(企)業界的全力配合執行，才能將溫室氣體的減降真正落實於農業乃至於社會各層面。

引用文獻

Lin CY, CM Yang (1998) Effects of Climate Change on Crop Production. Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung Hsien, Taiwan ROC. 212pp.

Huang SN, RM Liu, CW Lin (1998) Emission and mitigation of methane from paddy soil in Southern Taiwan. National Science Council Project Report. Project No. NSC-EPA-Z-067F-001. EPA, Taipei.

Bouwman AF (1990) Soils and the Greenhouse Effect: The present status and future trends concerning the effect of soils and their cover on the fluxes of greenhouse gas. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 596pp.

Bouwman AF (1996) Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 46:53-70.

Cole V, C Cerri, K Minami, A Mosier, N Rosenberg, D Sauerbeck, J Dumanski, J Duxbury, J.Freney, R Gupta, O Heinemeyer, T Kolchugina, J Lee, K Paustian, D Powlson, N Sampson, H Tiessen, M Van Noordwijk, and Q Zhao (1996) Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. p.745–771. *In:* Climate Change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific–technical analyses. IPCC Working Group II. RT Watson *et al.* (eds.) Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Cole CV, J Duxbury, J Freney, O Heinemeyer, KMinami, A Mosier, K Paustian, N Rosenberg, N Sampson, D Sauerbeck, Q Zhao (1997) Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 49: 221–228.

Conen F, KE Dobbie, KA Smith (2000) Predicting N_2O emissions from agricultural land through related soil parameters. Global Change Biol. 6:417-426.

Detweiler RP, CAS Hall (1988) Tropical forest and the global carbon cycle. Science 239:42-47.

Dixon RK, KJ Andrasko, FG Sussman, MA Lavinson, MC Trexler, TS Vinson (1993) Forest sector carbon offset projects: Near-term opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. Water Air Soil Pollut. 70(1-4): 561-577.

Duxbury JM (1994) The significance of agricultural sources of greenhouse gases. Fert. Res. 38: 151-163.

Follett RF (1993) Global climate change, U.S.

agriculture and carbon dioxide. J. Prod. Agric. 6:181-190.

Follett RF, SR Shafer, MD Jawson, AJ Franzluebbers (2005) Research and implementation needs to mitigate greenhouse gas emissions from agriculture in the USA Soil Till. Res. 83:159-166.

Franzluebbers AJ (2005) Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. Soil Till. Res. 83:120-147.

Freibauer A (2001) Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 60:301–315.

Houghton RA, DL Skole (1990) Carbon. p.393-408. *In:* The Earth as Transformed by Human Action. B.L. Turner, W.C. Clark, R.W. Kates, J.F. Richards, J.T. Mathews, and W.B. Meyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Kasimir-Klemedtsson A, L Klemedtsson, K Berglund, P Martikainen, J Silvola, O Oenema (1997) Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. Soil Use Manage. 13:245-250.

Kimura M, H Murakami, H Wada (1991) CO2, H2, and CH4 production in rice rhizosphere. Soil Sci. Plant Nutr. 37:55-60.

Kroeze C, A Mosier, L Bouwman (1999) Closing the global N_2O budget: a retrospective analysis 1500 - 1994. Global Biogeochem. Cycles 13:1-8.

McCarl BA, UA Schneider (2001) Climate change: Greenhouse gas mitigation in U.S. agriculture and forestry. Science 294:2481-2482.

Meyer-Aurich A, A Weersink, K Janovicek, B Deen (2006) Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada. Agric. Ecosyst.Environ. 117:119-127.

Mosier AR (1994) Nitrous oxide emissions from agricultural soils. Fert. Res. 37:191-200.

Mosier AR, JM Duxbury, JR Freney, O Heinemeyer, K Minami (1996) Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. Plant Soil 181:95-108.

Mummey DL, JL Smith, G Bluhm (1998) Assessment of alternative soil management practices on N_2O emissions from US agriculture. Agric. Ecosyst. Environ. 70:79-87.

Oenema O, G Velthof, P Kuikman (2001) Technical and policy aspects of strategies to decrease greenhouse gas emissions from agriculture Nutr. Cycl. Agroecosyst. 60(1-3):301-315.

Ogle SM, FJ Breidt, K Paustian (2005) Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry 72:87–121.

Paustian K, HP Collins, EA Paul (1997) Management controls on soil carbon. p.15–49. *In:* Soil organic matter in temperate agroecosystems. E.A. Paul et al. (ed.) CRC Press, New York.

Paustian K, J Six, ET Elliott, HW Hunt (2000) Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. Biogeochemistry 48:147-163.

Sauerbeck DR (1993) CO_2-emissions from agriculture: sources and mitigation potentials. Water Air Soil Pollu. 70: 381-388.

Sauerbeck DR (2001) CO_2 emissions and C sequestration by agriculture – perspectives and limitations. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 60:253–266.

Schlesinger WH (1997) Biogeochemistry: An analysis of global change. Academic Press, San Diego, CA.

Schlesinger WH (2000) Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. Agric. Ecosyst. Environ. 82(1-3): 121-127.

Skiba U, KA Smith (2000) The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. Chemosp. Global Sci. Change 2:379-386.

Smith P (2004). Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context. Eur. J. Agron. 20:229–236.

Wang WC, YL Yung, AA Lacis, T Mo, JE Hansen (1976) Green house effects due to man-made perturbations of trace gases. Science 194:685-690.

－編輯：楊純明