

國立臺灣大學生物資源暨農學院農藝學系

碩士論文

Department of Agronomy

College of Bio-resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



氣候智慧型稻麥輪作之建立

Establishment of Climate-smart Rice-Wheat Rotation

Cropping system

陳泓如

Hung-Ju Chen

指導教授：盧虎生 博士

Advisor: Huu-Sheng Lur, Ph.D.

中華民國 104 年 7 月

July, 2015

國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

氣候智慧型稻麥輪作之建立

Establishment of Climate-smart Rice-Wheat Rotation
Cropping System

本論文係陳泓如君（R02621103）在國立臺灣大學農藝
學系暨研究所完成之碩士學位論文，於民國 104 年 7 月 10
日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

盧慶生

（指導教授）

朱鈞

陳泓如

羅正亨

鄭智聲

致謝

感謝我的家人，無論是在精神上或實驗過程中無限的支持。終於在兩年之後，完成了這篇論文。

謝謝盧虎生老師給予我一個極具挑戰的題目，讓我自由發揮，並且在研究過程中指引方向及給我無數的訓練，使我成長許多。

謝謝口試委員-朱鈞老師、陳宗禮老師、羅正宗分場長及鄭智馨老師的建議，讓我的論文更加完善，並且增加我對於實驗的方向有更多不同的想法。

謝謝林訓仕學長及吳以健學長帶著我在各個田間走跳，並且協助我試驗設計、取樣及與農民溝通。謝謝大雅農民張景洲先生兩年來無私的提供試驗材料並且分享田間栽培經驗，謝謝其他各地曾經被我叨擾的農民。

謝謝黃文達老師在計畫報告時總是會提供我試驗的方向，謝謝農試所陳琦玲博士協助土壤樣品分析與 DNDC 模式修正，謝謝台大森林系鄭智馨老師提供諸多實驗儀器。謝謝林順福老師、高景輝老師及許志聖博士為我的人生方向指點明燈。謝謝志祐學長及陳韋廷教導我田間抽氣試驗。

謝謝我最重要的實驗夥伴、鄰居與好朋友-顏任祥，在這兩年中我們一起經歷了無數困難，無論是實驗或者是人生都一起學習與成長。謝謝書華、吳睿璇、范澤昀、林盈廷還有其他實驗室同仁的協助，有你們在實驗室的日子很開心。謝謝雪玉姐、藝瑋學姐、顏維萱及其他系上夥伴的陪伴與幫忙，因為有你們讓我在這兩年沮喪的時候有支柱，孤單的時候有陪伴。謝謝我的網友們，讓我在電動中盡情的舒壓，也謝謝我的高中同學們，給我勇氣與希望。謝謝這兩年支持我的其他朋友們。

謝謝有大家的存在，讓不堅強的自己，可以順利完成這個論文。

僅以此論文，獻給我愛的家人及在天上的阿嬤-呂邱淑釵。

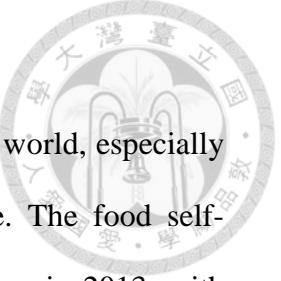
摘要

在氣候變遷下，全球糧食生產皆可能受到巨大衝擊，而台灣糧食自給率僅有33%，過度依賴各種進口穀類使台灣糧食安全受到威脅。其中，農業佔全球10%溫室氣體排放量，為減緩農業所造成之環境衝擊及增加台灣糧食自給率，稻麥輪作為一個可行的栽培模式之一，但在台灣稻麥輪作的環境衝擊並不清楚，因此本試驗利用生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)技術，對整體稻麥輪作系統進行生命週期熱點分析及評估，並利用兼具"調適(Adaptation)"與"減輕(Mitigation)"的氣候智慧型農業(Climate Smart Agriculture)概念進行改善，以期建立本土氣候智慧型稻麥輪作栽培系統。

本試驗選用台中區農業改良場與台中大雅為試驗地點，進行一年三作之 稻-稻-麥 輪作栽培之生命週期分析，其中分析的系統邊界包含整地、育苗、灌溉、田間操作及收穫後加工等，最終以單位面積及單位重量白米與小麥穀粒評估各式環境衝擊，如溫室效應潛勢、優養化及酸化等。結果顯示，主要的環境衝擊皆來自於田間釋放，其總差異可高達50%，以每期作而言，碳足跡介於3~53 tg CO₂ eq /ha；以單位糧食生產而言(單位：kg CO₂ eq / kg white rice；單位：kg CO₂ eq / kg wheat grain)，稻麥輪作生產過程中的碳足跡介於1.3~10，雖然田間排放為主要熱點，但可藉由不同農業操作進行改善，以本試驗結果而言，肥料管理為最有效之方法，而其他整地調整與二期休耕等操作雖然在本試驗評估中沒有一致的效果，但在其他長期研究中仍有一定程度的改善。因此低整地、精準施肥的稻麥輪作為台灣可發展的氣候智慧型稻麥輪作系統。

關鍵字：稻麥輪作、氣候智慧型、生命週期評估、DNDC、碳足跡

Abstract



Food security is an important issue for all countries around the world, especially when food production has been challenged under climate change. The food self-sufficiency ratio of Taiwan is around only 33 % weighted by energy in 2013, with importing excessive cereal grains as a serious threat to Taiwan. Also, there is about 10 % artificially greenhouse gas emission generating from agriculture production. Therefore, it is suggested to mitigate the environmental impacts from agriculture production system and increase the degree of food self-sufficiency ratio of Taiwan. Rice-wheat rotation is a possible innovative cropping system for Taiwan, which integrate with the upland-lowland rotation, wheat production and labor saving. In the present study the analysis of environmental impacts of rice-wheat rotation system was performed by the tool of life cycle assessment and hot spots of the impacts for the cropping system were determined. This study is aim to establish a local climate-smart cropping system which is high yield, high quality, energy saving, food production and eco-friendly.

In the study, a two-year rice-wheat rotation experiments at TDARES (Taichung District Agriculture Research and Extension Station) and Daya (Taichung) since 2012 winter was conducted. The system boundary of life cycle assessment consisted of production of farm inputs (such as fertilizer, pesticide and seed), tillage, irrigation, farming practice and post-harvesting, and used the function unit as kg grain and per hectare in evaluating the environment impacts from crop production. In this study we selected energy consumption, global warming potential, acidification, and eutrophication as environmental impact items to evaluate rice-wheat system. According to the research results, the main environment impact came from field emission and the variation was up to 50 %. In each crop, the GWP (Global warming potential) was 3~53

tg CO₂ eq /ha and 1.3~10 kg CO₂ eq/ kg grain. Although field emission was the main hot-spot, it still could be improved by modified fertilizer management. In this study, fertilizer adjustment was the most effective way to mitigate the field emission, while other adjusted strategies such as tillage and second crop period fallow didn't show consistent mitigation effects. But there is still some positive effect of non-tillage and changing crop residue retention ratio has been confirmed in several long-term field research.

In all, minimum tillage and suitable fertilizer management seemed to be the suitable practice for establishing climate-smart rice-wheat rotation system.

Keyword: Rice-Wheat rotation, Life cycle assessment (LCA), Climate-smart agriculture, Denitrification Decomposition (DNDC), Carbon footprint

目錄



致謝.....	I
摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
縮寫字簡表.....	X
壹、 試驗背景與目的	1
貳、 前人研究	3
一、 氣候變遷與糧食生產之風險	3
二、 粮食生產所造成之環境衝擊	3
三、 改善糧食生產對環境衝擊的可能方法	6
四、 台灣水稻小麥生產現況	8
五、 稻麥輪作的發展	10
六、 台灣水稻生產之環境衝擊	10
參、 試驗推論	12
肆、 材料方法	13
一、 試驗地區	13
二、 生命週期評估之方法	14



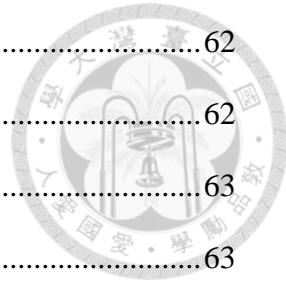
三、調查項目	19
四、田間排放之系統模擬 (DNDC)	22
五、田間溫室氣體採樣及分析	27
伍、結果	30
一、試驗田區土壤及氣象資料	30
二、水稻與小麥之植株分配比及碳氮比	30
三、試驗田區之栽培曆	34
四、試驗模擬產量與實際產量之比較	37
五、DNDC 模擬田間溫室氣體排放	37
六、稻麥輪作之生命週期評估	43
七、改善操作之稻麥輪作生命週期	60
陸、討論	66
一、DNDC 模擬情況	66
二、大雅與台中場稻麥輪作之環境衝擊差異	67
三、台灣稻麥輪作與其他耕作系統之比較	68
四、改善稻麥輪作之可能操作	69
五、台灣一年兩作稻麥輪作之可行性	71
六、其他田間栽培現況	72
柒、總結與未來展望	73
捌、文獻	74

圖 目 錄



圖 1 氧化亞氮在土壤中的形成路徑.....	4
圖 2 生命週期評估之基本架構與應用.....	15
圖 3 本試驗稻麥輪作之生命週期範圍.....	16
圖 4 DNDC 的六個次模型之示意圖	17
圖 5 土壤取樣示意圖，土壤為採取淺色部分之剖面.....	21
圖 6 氣體採樣罩設計圖與實際田間情況.....	29
圖 7 大雅 2012 年 11 月至 2013 年 11 月之氣象資料.....	32
圖 8 大雅 2013 年 11 月至 2015 年 3 月之氣象資料.....	32
圖 9 台中區農業改良場 2012 年 11 月至 2014 年 3 月之氣象資料.....	33
圖 10 台中區農業改良場 2012 年 11 月至 2014 年 3 月之氣象資料.....	33
圖 11 台中場稻麥輪作試驗田之甲烷模擬與田間實測之比較.....	41
圖 12 台中場稻麥輪作試驗田之氧化亞氮模擬與田間實測之比較.....	42
圖 13 大雅地區稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬.....	44
圖 14 大雅地區稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬.....	45
圖 15 台中場稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬.....	46
圖 16 台中場稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬.....	47
圖 17 台中大雅及台中區農業改良場各期作田間溫室氣體排放比較圖.....	50
圖 18 台中大雅與台中區農業改良場稻麥輪作碳足跡與產量之比較圖.....	50
圖 19 大雅地區各期作單位面積之環境衝擊.....	53
圖 20 大雅地區各期作單位產量之環境衝擊.....	54
圖 21 大雅地區各期作之環境衝擊分配百分比.....	55
圖 22 台中場各期作單位面積之環境衝擊.....	57
圖 23 台中場各期作單位產量之環境衝擊.....	58
圖 24 台中場各期作之環境衝擊分配百分比.....	59

圖 25 大雅小麥肥料改善操作之模擬比較圖	62
圖 26 台中場小麥肥料改善操作之模擬比較圖	62
圖 27 大雅植物殘株殘留之模擬比較圖	63
圖 28 台中場植物殘株殘留之模擬比較圖	63
圖 29 大雅稻麥輪作試驗田二期休耕之模擬比較圖	65





表目錄

表 1 本稻麥輪作試驗所種植之水稻與小麥品種.....	13
表 2 本試驗各參數之特徵化參數對照表.....	19
表 3 大雅稻麥輪作試驗田二期水稻灌水記錄.....	26
表 4 氣相層析儀 (GC-Aligent 7890A) 色譜配置與分析條件	29
表 5 本試驗稻麥輪作試驗田區土壤資料.....	31
表 6 本試驗稻麥輪作各期作肥料三要素之用量.....	34
表 7 水稻與小麥植株地上部生質量分配比(乾重).....	35
表 8 水稻與小麥地上部植株碳氮比.....	36
表 9 DNDC 模擬產量與實際產量比較	37
附表 一 大雅稻麥輪作試驗田之栽培曆	79
附表 二 台中場稻麥輪作試驗田之栽培曆	81

縮寫字簡表



AC	Acidification
CSA	Climate-smart agriculture
DNDC	Denitrification Decomposition
EP	Eutrophication
EU	Energy use
GWP	Global warming potential
LCA	Life cycle assessment
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change



壹、 試驗背景與目的

水稻與小麥為台灣最主要的糧食作物，根據農委會 102 年的糧食供需統計，台灣人民每人之白米消費量為 45 公斤，麵粉為 44 公斤。惟目前台灣糧食自給率僅 33 %，小麥主要仰賴進口，年進口量約 130 萬公噸，與水稻年生產量相當。在氣候變遷下，糧食安全的問題日趨明顯，近年來農政單位積極推廣休耕地轉作雜糧等相關政策，以減輕未來糧食缺乏之風險，在地生產的思維也逐漸提升，2014 小麥栽培面積已達 400 公頃，有很大的發展潛力。

目前台灣有 26 萬公頃水稻田，多半屬於兩期連作的栽培制度，冬季多種植綠肥或休耕，依據研究室前人研究顯示小麥適合在台灣中南部之冬季低濕度環境，且小麥可以與水稻共用農業機械，因此小麥的種植可以與水稻種植合併，發展稻麥輪作生產模式。

近年來，許多科學家為了因應氣候變遷，提出了「氣候智慧型農業(Climate-Smart Agriculture)」之概念，氣候智慧型農業兼具「調適(adaptation)」及「減輕(mitigation)」氣候變遷之功效。由前人研究顯示，農業生產也會造成環境衝擊，農業排放溫室氣體總量占人為溫室氣體排放約 10~12 %，因此未來的栽培系統不僅是要兼顧糧食安全，也需要降低糧食生產造成之環境衝擊。目前已經有諸多研究對糧食生產系統進行生命週期評估，再藉由熱點分析對栽培系統進行改善，台灣目前有對水稻生產系統進行生命週期評估，結果顯示二期水稻造成的環境衝擊較一期水稻高，建議二期水稻轉作旱作，以降低糧食生產過程中造成之環境衝擊。

在氣候智慧型農業的概念下，稻麥輪作的水旱田輪作系統具有提升糧食自給率、維持地力、減少農業生產之溫室氣排放、生態平衡及控制病蟲草害等潛在優勢。因此本試驗主要目標為對稻麥輪作進行生命週期評估，整合糧食生產之栽培與加工，再藉此改善稻麥輪作之生產制度。台灣目前稻麥輪作為採用稻-稻-麥之一年三作之稻麥輪作系統，因此本試驗將會對一年三作之稻麥輪作進行評估與提

供改善方針，但由於一年三作之稻麥輪作在栽培時辰上較為緊迫，小麥栽培期易受氣候延遲，一期水稻種植時間受到壓迫，因此也將評估水稻-綠肥-麥之一稻一麥生產系統，該系統之靈活度較佳，期許未來能推廣一稻一麥之栽培系統，將小麥取代二期水稻之栽培系統，維持農民收益，並緩解台灣稻米生產過剩且雜糧大量進口之問題。

因此本試驗之目的為利用生命週期評估技術，並採用氣候智慧型農業的概念建立台灣本土兼顧糧食自給、糧食品質及環境親和型的稻麥輪作系統，供農民參考使用。

貳、 前人研究



一、氣候變遷與糧食生產之風險

氣候變遷的影響日趨明顯，主要的糧食生產區溫度大多是增加的，從 1980 年代以來，以歐洲的溫度漲幅最為嚴重，作物生長季最高溫提升約 $0.8\text{--}1^\circ\text{C}$ ，美洲及亞洲也都上升 $0.4\text{--}0.6^\circ\text{C}$ ，雖然在高緯度地區，無霜期增長能延長作物生長而增加產量，但對於熱帶及亞熱帶地區將會使作物受到熱逆境脅迫。

將溫度提升的現象再放到全球的思考下，熱平衡的改變會改變降雨帶的分布，造成旱澇不均的問題，同時極端氣候事件如極端溫度事件 (extreme temperature event)或是極端降雨事件 (extreme precipitation event)的發生頻度皆較以往明顯的提高，未來作物栽培的風險將會提高(IPCC, 2007; Lobell and Gourdji, 2012; Smith et al., 2003)。

也有諸多研究報告指出氣候變遷下對糧食生產的影響，像是 (Ortiz, et al., 2008)預測未來印度平原的環境，印度河-恆河平原 (Indo-Gangetic Plain)為世界上重要的小麥生產區，但目前的適種區域 (ME1, mega-environment1)在未來 50 年內將會大幅縮減，約 50% 的區域將改變成較不適宜的環境(ME5)，糧食減產的無法避免。氣候變遷下，由於氣溫、雨量及二氧化碳濃度改變下，病蟲草害的分布也會受到改變 (Gornall et al., 2010; Hatfield et al., 2011)，可以想見未來糧食生產的挑戰是多元且繁複的，另一個不可忽視的因子是全球人口持續增加，食物的消費量也將大幅提升(Lipper, et al., 2014)，因此農藝學家必須開發相對應的栽培策略方針或者品種去適應未來氣候變遷下的環境，解決糧食安全 (food security)的問題。

二、糧食生產所造成之環境衝擊

穀類作物 (水稻、小麥及玉米)提供人類 60 % 能量來源，其總種植面積約占

全部耕作面積的 36 %。解決糧食問題有兩個方法：一為增加耕地面積、二為增加單位面積產量。開發可耕地會影響生物棲息地及生物多樣性，而增加單位面積產量的最佳範例即為綠色革命，藉由高產量品種、高化學肥料投入、高農藥投入等方式大幅提升糧食生產，但集約農業卻也同時造成了諸多環境問題，如土壤地力減少、氮素和殺蟲劑的淋洗及溫室氣體的排放 (Matson, 1998)。

溫室氣體的排放即是造成氣候變遷的最主要因子，研究顯示，在 2005 年農業排放約 50~60 億噸二氧化碳當量的溫室氣體，約佔 10 % 至 12 % 的全球人為溫室氣體排放，農業主要排放的溫室氣體為甲烷 (CH_4) 與氧化亞氮 (N_2O)。其中有 60 % 的氧化亞氮及 50 % 的甲烷是由農業產生 (IPCC, 2007; Tubiello et al., 2013)。若沒有其他政策介入，預估農業的溫室氣體排放在 2030 年將會再增加 30 % 至 60 %。

農業溫室氣體主要有三種：二氧化碳、甲烷及氧化亞氮，其排放有諸多來源，如田間有機質分解、耕犁時燃燒柴油及運送田間資材皆會造成二氧化碳排放；而主要的甲烷排放來自於水稻栽培時淹水造成的土壤無氧狀態及畜牧業（後續不討論此項）；氧化亞氮主要來自土壤管理，在土壤半通氣狀態，在無法完全進行硝化作用亦無法完全進行脫氮作用的情況下會大量釋放 (Smith et al., 2003)(圖 1)。

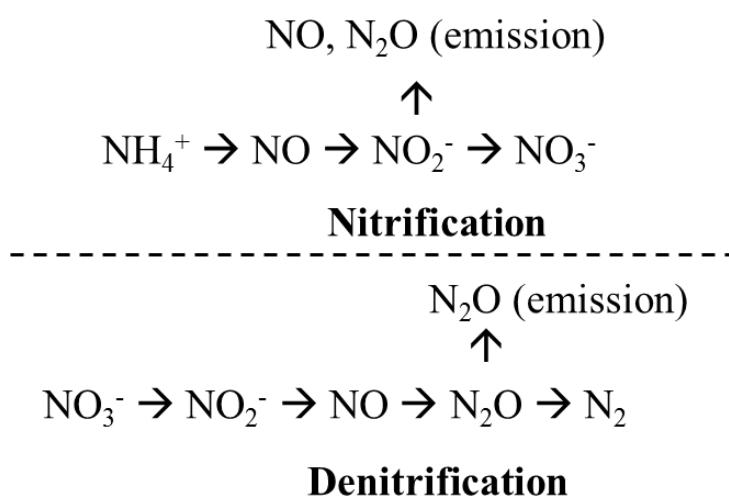


圖 1 氧化亞氮在土壤中的形成路徑。在有氧環境下，土壤中的氮會轉換成硝酸態氮，反之在缺氧環境下則會行脫氮作用。



Linquist 等人(2012)整理水稻、小麥及玉米的溫室氣體排放的資料，由於水田的湛水狀態會有顯著的甲烷排放，而旱田主要的溫室氣體為氧化亞氮，因此可以將水旱田分開來討論如下：

1. 水田

水稻栽培中，約有 90% 的水稻田有(短暫)淹水的情況，淹灌的情況下會造成甲烷的排放 (Wassmann, et al., 2004)。水田的淹水來源可以分為灌溉、看天田及深水稻三種，惟水田的淹水時間長短其水量多寡皆有差異，造成甲烷排放的趨勢也不盡相同。控制甲烷的排放因子主要有水分管理、有機質投入，影響較小的因子則為土壤質地、氣候、耕作管理及水稻品種。

Ortiz-Monasterio 等人(2010)整理 EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research)的資料，主要的甲烷排放熱點來自於中國、越南、印度西北及菲律賓等灌溉區域，而像泰國東部、南緬甸、東印度地區有較多看天田，其甲烷的排放量較一般灌溉田少。同時，水田不僅只於排放甲烷，許多研究顯示水田亦會排放氧化亞氮 (Yan et al., 2003)，主要的排放時間來自土壤乾溼交替時期，曬田 (mid-season drainage) 會增加氧化亞氮排放，所以間歇性灌水或曬田不一定可以降低水稻生產過程中的溫室氣體排放，由其是田間肥料施放過多，大幅增加氧化亞氮排放的情況，因此適當的肥料施用與水分管理為水田的種要操作方針。

2. 旱田

小麥和玉米為主要的旱田作物，旱田主要的溫室氣體排放為氧化亞氮及二氧化碳，氧化亞氮主要來自於化肥施用，且一單位的氧化亞氮是 310 倍的二氧化碳當量，是田間溫室氣體中影響最敏感的氣體；而二氧化碳來自於土壤碳庫的分解，由其是土壤翻動會增加土壤有機質分解及土壤風化。因此精準施肥及減少土壤耕

犁次數為減緩旱田溫室氣體排放的重要指標。



3. 氣候智慧型農業 (Climate-Smart Agriculture, CSA)

在前述的情況下，同時要兼顧糧食生產與其造成的環境衝擊，氣候智慧型農業為一個可行之方法。氣候智慧型農業是建構在永續農業 (Conservation Agriculture, CA)的概念上，建立兼具調適 (adaptation)及減緩 (mitigation)氣候變遷等兩大特點的農業生產系統。氣候智慧型為一個動態的生產系統，持續的採用此概念，隨著不同環境對生產系統進行改良，相對於一般的商業操作，可以明顯提高生產系統的回復力及降低糧食安全的風險 (Lipper, et al., 2014)。

依據 FAO 定義 CSA 有三個主要的目標：(1)持續增加農業生產力、增加收入、糧食安全及發展；(2)將氣候變遷的調適力及回復力的層級從農場放大至國家層級；(3)減少農業生產的溫室氣體排放，但並不要求一定要達到三個目標，最主要目標還是糧食安全與農業經濟成長 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013)。

CSA 強調利用生態系統維持生產力、回復力及調適力，可以採用的方法有減少耕犁、使用優良品種、增進水及養分利用效率，在增進土壤品質下，可以藉由調整碳循環、氧氣循環及植物營養循環而增加生產環境的回復力，亦即降低食物不足之風險，後續將介紹可以應用在糧食生產之有潛力調適方式。

三、改善糧食生產對環境衝擊的可能方法

目前已經有諸多研究對水旱田作物栽培過程中，影響溫室氣體排放的田間管理方法。例如：不整地栽培 (zero-tillage)可以保持土壤通透性及減少燃料使用而減少二氧化碳排放；作物殘株保留 (crop residue retention)可以增加土壤的碳庫及減少旱田甲烷的排放，但若在水田保留前期植物殘株則會因為碳源增加而增加甲烷排放；間歇性灌水則會透過增加土壤氧氣通透性而減緩水田甲烷排放。以下將

列舉有潛力的栽培管理；



1. 輪作

輪作最早記載於漢朝時期，迄今已經進行了上千年，前人研究顯示輪作 (rotation)的產量不僅會高於單一作物連作 (continuous monoculture)，亦會高於預期產量，顯示有輪作效應 (rotation effect)存在，但有很多原因無法明確解釋 (Bullock, 1992)。透過水旱田輪作具有改變土壤性質，可以減緩水田連作的壓實及增加土壤通氣性；對於病蟲草害也有抑制的效果，主要為改變寄主及耕作方式去打破病蟲草的生長循環。另外作物輪作可以增加農民的種植作物種類，同時分散種植單一作物的風險，進行稻麥輪作對於台灣更有增加糧食自給率的優點。

2. 低整地及不整地栽培(non-tillage)

零耕犁 (non-tillage)為永續農業最主要的目標，一般來說干擾土壤的比例約莫在 20~25% 之間，減少耕犁最主要的目標為降低土壤干擾、耕犁耗用的能量及生產成本，以維持土壤地力及增加農民收益。零耕犁搭配長期的植物殘株覆蓋可以增加土壤團粒；且由於土面有阻礙物，可減少雨水直接侵蝕土壤而造成的土壤流失，並且減緩土壤水分散失，增加水分利用效率(Verhulst et al., 2010)。

但雜草生長為少數永續農業的缺點之一，通常零耕犁會搭配除草劑的使用，但究顯示若經過良好的控制，零耕犁的田區雜草族群可以大幅降低。(Arshad, et al., 1998)。

3. 灌溉

已知水分管理與水田甲烷有顯著關係，雖然透過間歇性灌水及曬田提高土壤

含氧量可以有效降低甲烷排放，合宜的曬田可以有效降低甲烷排放高的田間，但對於田間本身甲烷排放低的地區會有增加其他溫室氣體排放的風險。前人研究亦顯示在土壤接近飽和水分 (near-saturated)的情況下，相較於長期淹水反而會造成更大量的氧化亞氮生成(Aulakh et al., 2000)。因此藉由水分調整水田溫室氣體排放需要先評估當地的甲烷排放情況，再進行調整。

4. 直播(direct seedling)及栽培品種改良

稻麥輪作中，小麥屬於撒播栽培，而水稻屬於移植(transplanting)，前人研究顯示，水稻直播栽培可以有效降低甲烷排放，雖然詳細的因子還尚未釐清，但推測是水稻根部生長較佳，改善土壤表層的狀態，而減少水田甲烷排放。挑選植株通氣組織較明顯及較早熟的品種，增加土壤通氣及減少水田湛水的期間，亦可以有效降低甲烷排放。

另外，挑選高產及氮肥利用效率的品種，提升氮肥利用效率及降低單位糧食生產的環境衝擊也是可行的方式。

四、台灣水稻小麥生產現況

1. 水稻產量

台灣水稻年產量約 130 萬公噸，但由於台灣人飲食習慣改變且水稻種植的單位面積產量逐年升高，水稻的產量大於需求，其中水稻公糧收購佔全部產量約 35%，因此近年來公糧過剩且品質良莠不齊成為必須解決的問題。

台灣農民常為了追求高產量而投入高氮肥，過量肥料會影響作物生長並且造成環境的汙染，亦是需要面對的課題。

2. 小麥進口

依據農委會統計，2013 年台灣的糧食自給率僅 33%（以熱量評估），主要進口的糧食有玉米、大豆、小麥，年進口量分別為 400 萬噸、230 萬噸及 140 萬噸，其中將小麥進口量換算，台灣人均一年麵粉消費量為 36 公斤。主食之中卻僅有水稻的產量足夠自給自足，小麥進口量與水稻的生產量相當，可以發現台灣在生產水稻與小麥的比重懸殊。

3. 小麥復耕

台灣最早栽培小麥的記錄可以追溯至日治時期，後來在日本政府與國民政府推廣之下，台灣小麥的種植高峰約在民國 50 年左右，種植面積達到兩萬五千公頃左右，產量約 5 萬公噸，而至美援時期開始推廣美國小麥，然而台灣小麥不敵市場競爭而開始減產，後來又歷經台灣菸酒公賣局契作及保價收購時期，小麥種植面積一路回升到五千公頃左右，最後公賣局停止保價收購，小麥種植面積銳減，僅剩部分農民種植小麥供給金門酒廠釀酒的酒麴使用。

2007 年，糧價上漲引發糧食危機，導致麵粉價格從每公斤 15 元漲價至每公斤 25 元，喜願小麥施明煌遂從 2007 年開始在台灣各地契作小麥，種植面積逐年增加，後續也有其他家麵粉廠加入與農民契作，截至 2014 年小麥的耕作面積約有 400 公頃。目前台灣僅有種植單一小麥品種-台中選二號 (TCS2)，期待未來有更多品種，提供市場不同的需求。

同時近年來，農政單位積極推廣休耕地轉作雜糧等政策，除了活化休耕地之外也兼顧糧食安全，以減輕未來糧食缺乏之風險。小麥由於可以與水稻共用農業機械，易於與現行耕作制度配合，為推廣稻麥輪作之優勢。

4. 台灣小麥品質

本研究室於 2011~2013 進行兩年期的台灣小麥品質與環境之研究，選取台灣北、中、南、東共 14 處小麥田，研究結果顯示與台灣小麥品質最相關的因子為

濕度，台灣小麥充實期濕度皆超過 80%，高濕度會造成千粒種下降、麵筋指數下降及降落植降低，濕度超過 88% 則蛋白質含量下降。綜合分析結果為台灣最適合小麥的高品質栽培地區為具有溫暖 (溫度大於 19°C)、低濕度 (相對溼度小於 86%) 及高日射量 (9 MJ/m^2) 的環境，即台灣中南部的栽培地區為小麥的高品質產區(陳, 2013)，因此本研究選在台中大雅及台中區農業改良場進行稻麥輪作之評估。

五、稻麥輪作的發展

全球的稻麥輪作主要種植地區在南亞的印度河-恆河平原(印度、巴基斯坦及孟加拉)及中國長江流域附近(江蘇、安徽、湖北等省分)，種植的面積合計約有兩千四百萬至兩千七百萬公頃，佔該地區約 40% 的水稻及小麥總種植面積，供給全世界 8% 人口(Wassmann et al., 2004)。多數的區域採用一稻一麥的耕作方式，在較南邊的區域會進行兩稻一麥的輪作方式，由於稻麥輪作區域人口稠密，為了供給龐大的人口，稻麥輪作為集約式管理，長期的集約栽培造成環境的生產力下降，不當的水分管理及肥料施用造成土壤品質下降為主要原因，進而減少產量 (Saharawat et al., 2010; Subash et al., 2014)。因此稻麥輪作的環境親和栽培有其必要性，減少種植時對環境造成的破壞，進行永續的發展。

六、台灣水稻生產之環境衝擊

糧食作物生產為一個複雜且與環境高度連結的過程，研究室前人使用生命週期評估的方法對台灣水稻生產過程進行評估，針對水稻從生產開始到製成產品(白米)的過程中進行評估。

生命週期評估的衝擊包含溫室效應潛勢(Global Warming Potential, GWP)(即為俗稱的碳足跡，carbon footprint)、優養化潛勢 (Eutrophication, EP)、酸化 (Acidification, AC) 及能源使用 (Energy Use, EU)，主要是將整個生命週期所調查的環境衝擊進行分類與加權，最後可以找出整個生產過程中，造成最大環境衝擊

的階段，該階段稱為「熱點」，也就是可以從這些熱點進行生產過程的改善。

生命週期評估應用於糧食生產已經有諸多研究，例如美國小麥每生產一公斤，約排放 0.3 公斤二氧化碳，但義大利生產每公斤水稻卻會排放約 3 公斤的二氧化碳(Blengini and Busto, 2009; Meisterling et al., 2009)，其中的差異主要來自於種植環境及栽培方式不同。

本研究在新屋兩期水稻田進行試驗之結果顯示(吳等人, 2013)；一期水稻所生產的白米每公斤約排放 0.71 公斤當量的二氧化碳；但二期水稻卻會排放 1.8 公斤當量的二氧化碳，平均而言台灣每生產一公斤的白米會造成 1.18 公斤的二氧化碳。換成單位面積評估，則台灣每公頃會排放 7.8 噸的二氧化碳當量，相較於日本僅 6.3 噸(Hokazono and Hayashi, 2012)。

而在從整理進行熱點分析，顯示水稻生產過程中，主要的環境衝擊來自於田間栽培階段，而其中又以肥料管理作為重要，肥料的施用直接影響田間溫室氣體排放，肥料的製作過程也間接影響整體的環境衝擊，因此合理施肥不僅可以減少糧食生產所造成的環境衝擊亦可以減少生產過程的成本。

綜合兩年的結果顯示，台灣二期水稻的環境衝擊較一期水稻高，而前人研究顯示旱作普遍的環境衝擊較水田少，因此推薦將二期水稻轉作旱作，可以有效降低糧食生產所造成之環境衝擊。

因此本試驗希望結合水稻田輪作，降低糧食生產的環境衝擊，唯目前對於台灣稻麥輪作所造成之環境衝擊仍不清楚，因此本研究將會進行台灣稻麥輪作之環境衝擊的評估，並且提出環境親和的栽培分針，以建立兼顧糧食自給、糧食品質、環境保護的優良稻麥輪作系統。

參、 試驗推論



氣候變遷下，糧食安全與溫室效應的調適為重要之課題，已知糧食生產會造成環境衝擊，因此以永續發展為前提，兼具糧食自給、品質與環境親和的氣候智慧型耕作系統有其發展必要。國際上已有諸多研究對各種糧食生產之環境衝擊進行評估並提出改善的方針。本研究室於 99 及 100 年已在桃園新屋對台灣兩期水稻進行生命週期評估，發現生產二期水稻所造成的環境衝擊較高，因此建議二期水稻轉作，同時本研究室亦於 100 年及 101 年調查兩年兩期作的小麥品質，建構台灣小麥品質地圖，結果顯示台灣中南部為小麥之高產優質產區。綜合上述結果，在台灣結合水稻與小麥栽培為可能的方法，但目前對於稻麥輪作所產生的環境衝擊並不清楚。

因此本試驗在台中大雅及台中區農業改良場進行兩年七期作之稻麥輪作試驗，記錄栽培操作及收集其他相關生育參數，利用 DNDC 模擬田間溫室氣體排放情況，並且盤查在稻麥輪作系統中所使用之資材與能源耗用，最後進行整體台灣稻麥輪作生命週期評估。

藉由生命週期評估結果，台灣稻麥輪作主要的環境衝擊主要來自田間栽培階段，因此再進一步利用 DNDC 模式去模擬各種不同可能的操作，包含肥料用量、整地及二期休耕等進行評估。

綜合以上調查及評估結果，期望提出低環境衝擊稻麥輪作之栽培方針，做為未來建立台灣本土兼顧糧食自給、糧食品質、環境保護的優良稻麥輪作系統之依據。

肆、 材料方法



一、試驗地區

本試驗主要評估一年三作-稻稻麥輪作之環境衝擊，地點分別為台中區農業改良場($24^{\circ}00'66''$ N, $120^{\circ}52'99''$ E)及台中大雅張景洲先生($24^{\circ}24'17''$ N, $120^{\circ}65'00''$ E)之田區，共兩樣區，試驗田區本已長期進行稻麥輪作系統，採用慣行栽培，種植之水稻及小麥如表 1，栽培操作詳見栽培曆。

表 1 本稻麥輪作試驗所種植之水稻與小麥品種。

地點	年度	期作	作物	品種
大雅	101	冬裡作	小麥	台中選 2 號
	102	第一期	水稻	台梗糯 3 號
	102	第二期	水稻	台南 11 號
	102	冬裡作	小麥	台中選 2 號
	103	第一期	水稻	台中在來 1 號
	103	第二期	水稻	台梗 16 號
	103	冬裡作	小麥	台中選二號
台中場	101	冬裡作	小麥	台中選 2 號
	102	第一期	水稻	台梗 9 號/台中 194 號
	102	第二期	水稻	台梗 9 號/台中 194 號
	102	冬裡作	小麥	台中選 2 號
	103	第一期	水稻	越光
	103	第二期	水稻	越光
	103	冬裡作	小麥	台中選 2 號
	104	第一期	水稻	台中秈 10 號

二、生命週期評估之方法

本試驗採用生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)之方法，對整體稻麥輪作之糧食生產過程中所造成之環境衝擊進行整體調查與熱點分析。



1. ISO14040

依據「ISO14040 環境管理—生命週期評估—原則與架構」，生命週期評估係說明產品從原物料取得至生產、使用、生命終結之處理、回收再利用及最終處置(亦即搖籃至墳墓)，整個產品生命週期中的環境考量面與潛在環境衝擊。另外，為了方便生產者或製造商評估其產品本身在生產的過程中造成之環境衝擊，所以亦有一種生命週期評估是僅評估至商品出貨的階段，這種方法為一般通稱為「搖籃至大門」，在農業的應用上面，可以讓生產者去確認在生產過程中所造成的環境衝擊。

以紅酒生產過程為範例，標準的生命週期涵蓋葡萄的種植、農業資材的投入、收穫後加工、包裝與運輸、販售端點、使用者使用過程到最後紅酒廢棄物的處理，此即為搖籃至墳墓型的生命週期。而搖籃至大門型的生命週期則是從葡萄週期至收穫後加工，主要關心農產品生產過程所造成的環境衝擊，後續的銷售與使用部分則不為生產者所關心之部分(Greenhut et al., 2013)。由於本試驗主要目的為評估糧食作物生產過程中所造成之環境效應並建立環境親和型的稻麥輪作系統，所以本試驗係採用後述的方法，因此後續的食品製程在此不多做討論。

生命週期的主要的評估流程可分為四個階段：目的與範疇界定(Goal and Scope Definition)、盤查分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)、衝擊分析(Life cycle Impact Assessment, LCIA)及生命週期闡釋(Life Cycle Interpretation)，而評估的過程中各階段流程可互相修改，見圖 2。

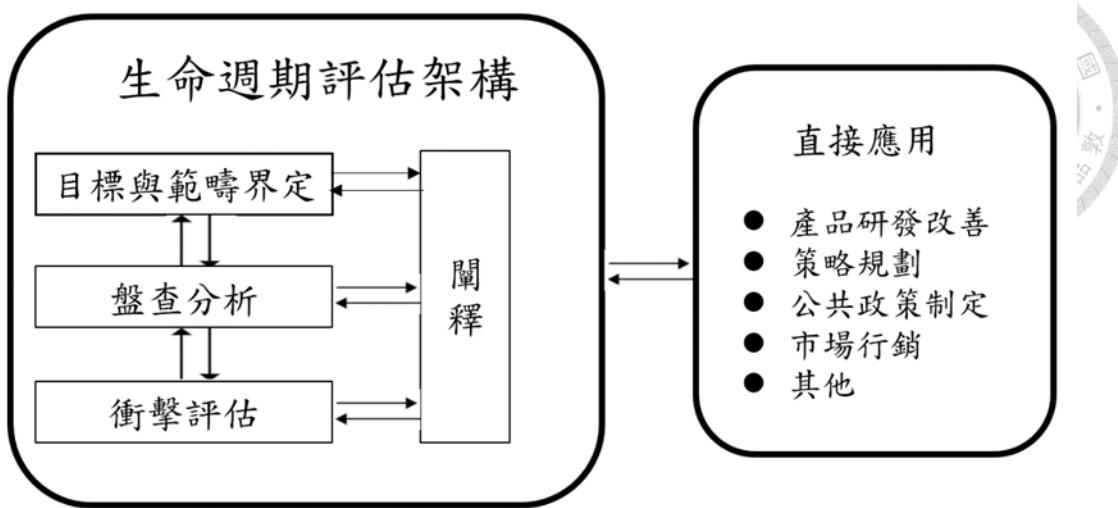


圖 2 生命週期評估之基本架構與應用(修改自 ISO 14040, 2006)。

2. 生命週期範圍界定

本試驗所進行稻麥輪作之生命週期評估依據諸多糧食生產生命週期評估後，修改成適合本試驗使用的系統邊界，試驗主要依據以下的系統邊界(圖 3)。系統邊界簡述如下，首先為農業資材如肥料、農藥到農機具的生產過程相關能源投入；再者為水稻小麥生產過程中的田間操作中所使用的燃料或電力的耗用；最後記錄還有收穫後的乾燥、脫殼及精白等收穫後加工過程及糧食作物在田間生長時期田間所排放的溫室氣體。評估的時間界限以一期作為單位，開始於整地或播種直至收穫當天。同時為了比較不同糧食生產過程中所造成的環境衝擊，最後的功能單位(functional unit)以一公斤的白米與一公斤小麥穀粒表示。

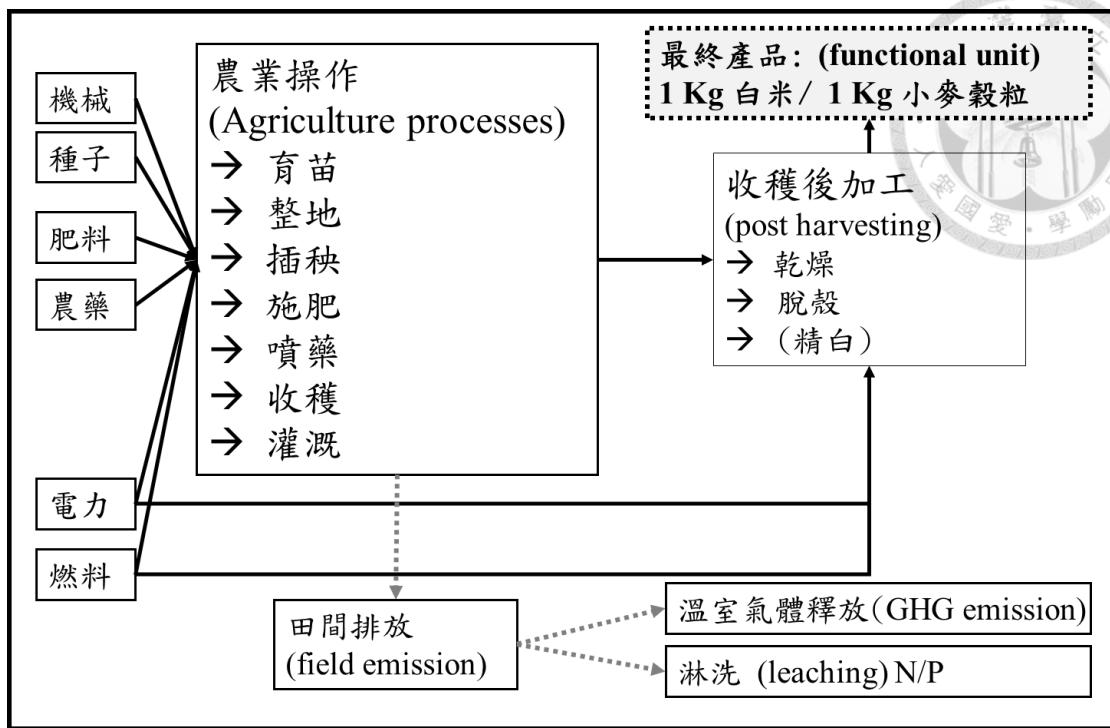


圖 3 本試驗稻麥輪作之生命週期範圍。

3. 生命週期盤查

藉由上述的系統邊界，本試驗進行的生命週期盤查主要由下列兩種方法蒐集而來。

(1)DNDC

DeNitrification DeComposition(DNDC)為一種應用於模擬田間溫室氣體排放之作物模式，由美國 New Hampshire 李長生(Chang-Sheng Li)教授開發，針對土壤-植物-大氣中的碳循環及氮循環進行模擬，DNDC 目前已經被廣泛應用在許多國家，得到驗證並應用(Cai et al., 2003; Fumoto et al., 2007; Katayanagi et al., 2012; Li et al., 1997)，台灣目前主要有農試所的姚銘輝博士(姚, et al., 2006)及陳琦玲博士(Chen et al., 2013)在進行 DNDC 模式的驗證。本試驗使用的版本為 DNDC 9.5，

並且由李長生教授於 2014 年五月份來台灣協助修改後之版本。模式主要結合六個次模型，包含土壤氣候(Soil Climate)、作物生長(Plant Growth)、分解作用(Decomposition)、脫氮作用(Denitrification)、硝化作用(Nitrification)及發酵作用(Fermentation)(Li et al., 1994)(圖 4)。DNDC 所輸入之資料包含氣象、土壤特性及其他作物生長栽培資料，後述將會詳細列出本試驗模擬所使用之參數，且由於台灣小麥田目前尚未進行驗證，因此後續將有田間溫室氣體通量量測，進行模式之初步驗證。

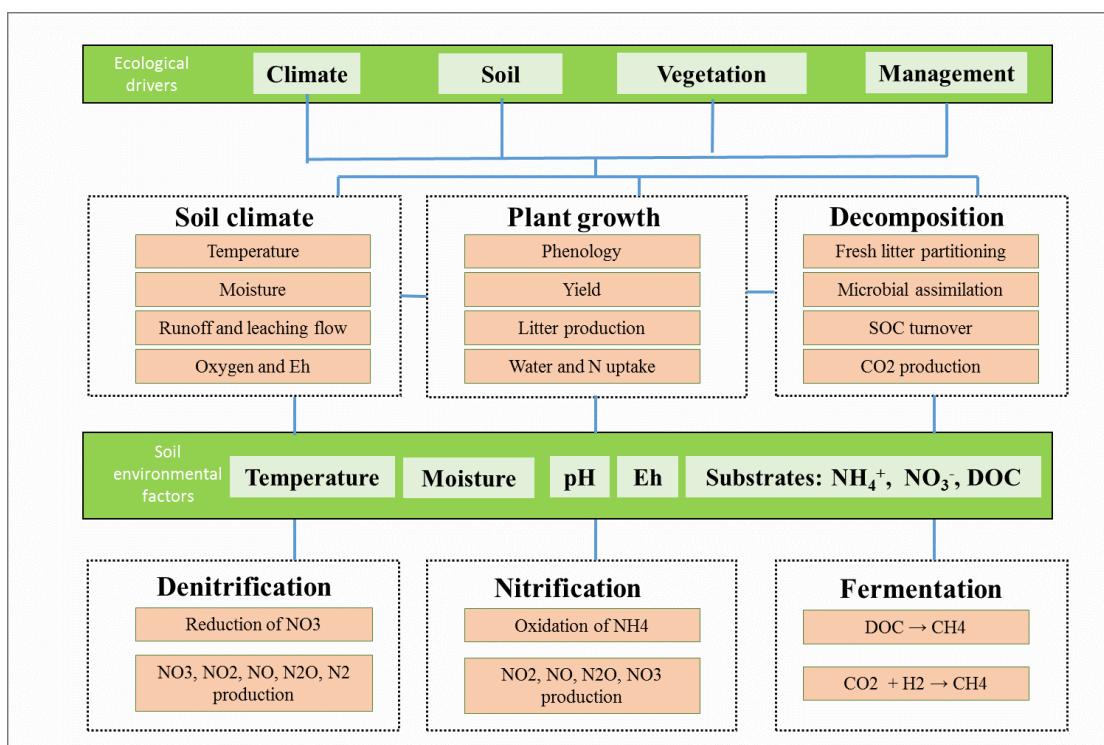


圖 4 DNDC 的六個次模型之示意圖。(摘錄自 Li et al. (1994))

(2)SimaPro

SimaPro 軟體(PRe Consultants, the Netherlands)為荷蘭 Leiden 大學於 1990 年代開發出來，SimaPro 內建多種資料庫及評估標準，且可以提供大多數工業化產品的生命週期盤查資料，為目前最廣泛應用於生命週期評估之軟體。本試驗使用的版本為 SimaPro 7.0，其評估方法使用由 Leiden 大學所建立之 CML 2 baseline 2000 v 2.5/ World 1995，由台灣經濟研究院提供軟體使用。

使用 SimaPro 調查之資料包含下列：肥料(氮、磷、鉀肥)、燃油(汽油、柴油)、電力及農機具之製造與維修等之生命週期盤查資料。

4. 生命週期衝擊評估

本試驗主要針對的環境衝擊有溫室效應潛勢(Global warming potential, GWP, 以 CO_2 為當量)、酸化潛勢(Acidification, AC, 以 SO_2 為當量)、優養化潛勢(Eutrophication, EU, 以 PO_4 為當量)、能量消耗(Energy, 以 MJ 為單位)(Brentrup et al., 2004)。所以將生命週期範圍內的各項因子經由生命週期盤查後，會再經過分類及特徵化，以方便後面進行整體的生命週期評估及熱點分析。

(1)分類 (classification)

由生命週期盤查的項目會有造成不同環境衝擊的因子，分類即為將資料分門別類至各種不同的環境衝擊，舉例來說， N_2O 會造成溫室效應，同時 N_2O 屬於 NO_x 也會造成環境酸化及優養化，但 N_2O 在不同環境衝擊內的貢獻不一致，所以需要後續的特徵化，再進行資料統整。

(2)特徵化 (characterization)

特徵化即是將調查出來的項目經由換算，歸類成不同的環境衝擊潛值，供後續進行分析與比較，下表為列出作物生產過程中會造成的環境衝擊項目及特徵化的參數。(Kasmaprapruet et al., 2009; 王等人, 2009)



表 2 本試驗各參數之特徵化參數對照表。

Impact category	Contributing elements	characterization factors	Unit
GWP	CO ₂	1	g CO ₂ -eq
	CH ₄	25	
	N ₂ O	310	
AC	NO _x	0.7	g SO ₂ -eq
	NH ₃	1.89	
	NO ₃	1	
EP	NO _x	0.1	g PO ₄ -eq
	NH ₃	0.35	
	NO ₃	0.42	
	P	3.06	
Energy use	energy consumption	1	MJ

三、調查項目

1. 產量

每一塊試驗田取五點進行坪割，中間取一點，其餘為平分四塊各取其中心點，並進行每平方公尺穗數、每穗粒數、稔實率、千粒重、收穫指數及產量調查。

2. DNDC 作物基本生育資料建立

為配合 DNDC 所需之參數設定，在作物收穫後收集植株之地上部，乾燥後，進行下列兩項分析。



(1)植株地上部生質量分配比

植株乾燥後，取部分坪割樣品，並將莖、葉、穀粒人工分開剝除，秤重，計算其分配比例。所造

(2)植株碳氮比分析

將分割後的植株取部分樣品，進行磨粉(Mill Feeder 3170, Perten and 鱷魚牌豪華型粉碎機，台灣)，將樣品細磨後，使用 40 mesh 之篩網過濾，再分別秤重(5~7mg)後以錫囊 (5mm tin capsule, ElementalMicroanalysis, UK) 妥善包埋細磨過後的均質樣品，利用元素分析儀 (2400 Series II, Perkin Elmer, Massachusetts, USA) 分析樣品之碳氮濃度。

3. 土壤

土壤取樣時間為每次作物收穫後，取收穫樣點內無植株覆蓋之 15cm 表土。並進行以下的分析與調查 (圖 5)。

(1)土壤物理性質：

由農試所台灣土壤資源與農地土地覆蓋圖資瀏覽查詢資訊系統查詢試驗地點之土壤物理性質。

(http://taiwanoil.tari.gov.tw/Web.Net2008/index_1/main1-1.aspx)



(2) 土壤有效性氮：

本試驗在農委會農業試驗所農業化學組進行。土壤取樣後，儘速秤取鮮土 20 公克，以 100 mL 之 2 N KCl 震盪萃取 1 小時，並且以 42 號濾紙過濾，最後以農業自動分析儀進行分析，計算土壤樣品之硝酸態氮及銨態氮含量。

(3) 土壤全碳、全氮及碳氮比分析：

本試驗在台灣大學森林暨環境資源學系進行。土樣去除植株根部殘株後，進行風乾，並且將土壤過篩後進行球磨 2 分鐘，(MM 400, RETSCH instrument, Haan, Germany)，細磨後取約 25 mg 之土樣以元素分析儀 (2400 Series II, Perkin Elmer, Massachusetts, USA)，分析土壤碳與氮含量。

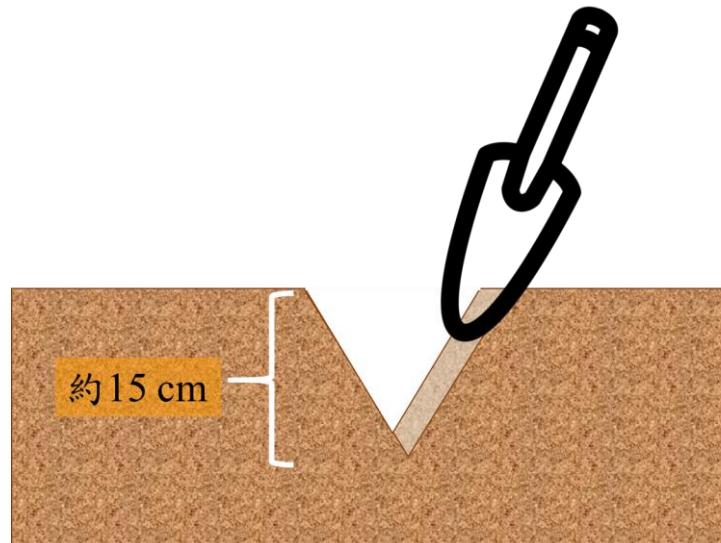


圖 5 土壤取樣示意圖，土壤為採取淺色部分之剖面。

4. 氣象

使用氣象局及大氣研究資料庫 (<https://dbar.ttfri.narl.org.tw/Default.aspx>)，所提供之資料，包含每日最高溫、最低溫、降雨量、相對溼度與日射量。台中場之稻麥輪作試驗田使用台中農業改良場所屬之氣象站資料；大雅之試驗田則使用大氣研究資料庫中台中局屬測站的氣象資料。其中為了增加氣象資料之精細度，於2014大雅之冬裡作小麥田架設田間溫度濕度連續記錄器 (U23, HOBO Pro v2, USA)及溫度照度連續記錄器 (UA-002-64, HOBO Pendant, USA)作為輔助。HOBO之架設方法依照本實驗室前人所建立之方法 (陳, 2013)。

5. 栽培曆

栽培曆由台中場林訓仕先生及大雅農民張景洲先生協助記錄。主要收集資料有每期作之整地類型與時間、種植與收穫時間、農藥與肥料之用量與施用時間及灌排水時間。

四、田間排放之系統模擬 (DNDC)

1. 輸入之參數設定

DNDC 模式主要由三類主要參數設定進行評估，分別是氣象、土壤及作物栽培及生長資料。主要操作方法可以參照 DNDC 模式使用說明書 (<http://www.dndc.sr.unh.edu/>)，以下為本研究所使用之主要參數依據，其餘參數以預設值進行操作。

(1) 氣象資料

依據前人所發表的中高粱小麥輪作田之雨水資料，雨水中的氮含量資料設定

為 1.6 mg N/L (溫和張, 2008)；大氣中的二氧化碳及二氫碳的年增率則由 <http://co2now.org/> 網站所提供，由於模擬起始年度為 2012 年，大氣的二氧化碳濃度設定為 393 ppm，濃度年增率為 2.7 ppm。勾選記錄每日模擬結果，以利後續整理不同期作之排放結果。

大雅氣象資料選擇包含最高溫、最低溫、降雨量、風速、日射量及濕度之形式；台中場的氣象資料選擇最高溫、最低溫、降雨量與日射量之形式。

(2) 土壤資料

土壤使用類別中，稻麥輪作田屬於 (2)Rice paddy field 類別。土壤質地則是依照田間土壤性質調查資料輸入。大雅試驗田屬於(8) clay loam；台中場試驗田屬於(6)sandy clay loam。土壤有機碳及初始土壤無機氮含量依據土壤性質測定輸入。由於試驗田區皆位於平地，坡度與雨水收集指標皆使用預設值。

(3) 作物栽培及生長資料

本次稻麥輪作試驗僅有單一一種耕作方式，為一年三作之稻稻麥輪作，由於 DNDC 模式是以一年為單位，且模擬開始並沒有植物種植的記錄，因此雖然試驗調查為 2012 年年底開始，模擬的時間設定為 2012 年開始，前面一二期作使用 2013 年調查之栽培曆進行日期微調後，模擬成 2012 年之操作，所以總共模擬的年份設為四年。其中又可以分為下列幾部分進行操作。

I、作物生長參數

作物最大生質量(Max biomass production)以平均產量乘以 0.4(此為平均植株含碳量)除以 0.8(由於實際生產過程中並無法百分之百達到最大產量)去進行估算。植株的分配與碳氮比以實際收集之資料去進行輸入；累積積溫則是由實際種植日

期去計算其積溫，DNDC 之積溫設定為實際溫度 (°C) 累計而成；由於水稻田常會有藻類生成，故將固氮係數設定成 1.05；水稻之需水量設定為 500，小麥之需水量設定為 300；最適溫度水稻設定為 25°C，小麥則是 22°C (Farooq et al., 2011; 吳, 2009)。



II、整地

土壤整地的部分，可以依照不同整地程度進行選擇，水稻栽培中有分粗整地及細整地，故依據實際田間調查將粗整地的設定為(4) ploughing with moldboard (20 cm)；細整地為(3) ploughing with disk or chisel (10 cm)；小麥田則會淺耕將種子稍微打入田內，設定為(2) ploughing slighting (5 cm)。

III、肥料

肥料施用的部分，目前的試驗田區皆屬於慣行栽培，使用化肥，惟 DNDC 模式目前仍僅只於氮肥的操作設定，故依照台灣人肥料常用的形式，可以分成銨態氮 (Ammonium bicarbonate)；硝酸態氮 (Nitrate) 及混合型態 (NH₄NH₃/ Ammonium)。若施用的氮肥為單質肥料 (如：尿素、硫酸銨)，則可以直接將之分類，但若為複合肥，且未特別註明氮肥的形式，則以 Ammonium (NH₄NH₃) 表示。肥料的施用深度則依據田間操作設定，水稻基肥會搭配粗整地一起進行，故施用深度設為 5 cm；小麥基肥也會搭配淺耕，施用深度設定為 2 cm；其餘施肥由於為灑施，施肥深度設為 0 cm。

IV、灌溉

在 DNDC 設定中，灌溉 (irrigation) 之定義為土壤並未超過一日以上的淹水狀態稱之，故在本次的稻麥輪作試驗中，僅有小麥種植期的灌水屬於此，而水稻

的栽培曆中雖記載單日灌水（當日進水與停水），但因為水稻栽培並不會排水，所以屬於後述的淹灌。

台灣的水稻田屬於淹灌(flooding)，依照灌溉的性質選取持續淹水 (conventional flooding/ 10 cm/ C)或間歇性灌水(marginal flooding/ -5~5cm/ M)。下面以 2014 年大雅試驗田二期水稻做為範例(表 3)，若為長期未停水之狀態，則使用持續淹水的模式，但若像 8 月 27 日只單灌一天，因為水稻田並不會排水，且通常田間會過幾天水位才消散，故使用三天間歇灌水模式，以模擬水位下降的情況(即假設水為三天後才完全下降)。如 9 月 1 日至 9 月 17 日由於中間灌水密集，相距約三四天，所以使用連續的間歇性灌水去設定。其他期作的灌水方法也是依照此方法去進行模式的參數輸入。

2. 產量校正

由於 DNDC 仍屬於作物模式，雖然產量預測並非其主要目標，但為了確認模式在模擬植物生長的情況是否符合現實，故仍須比較實際產量與現實產量之差異。

3. 減緩稻麥輪作環境衝擊模擬

依據前人研究，減緩農業生產所排放之溫室氣體主要的策略為提高氮肥利用效率及調整灌溉模式。台灣水稻栽培系統中主要的熱點為長期浸水時的甲烷排放，已知間歇性灌水可以有效控制甲烷排放，且台灣農民現以多採用間歇性灌水，因此本研究主要著重於二期水稻收穫前至一期水稻前期之肥料及灌溉策略調整。由初步模擬結果，發現小麥的氮肥供給大於需求，尤其是種植初期的肥料投入，因此後續將進行三種不同部分的減緩措施(1)小麥種植期的半量肥料及無基肥處理；(2)二期作休耕；(3)作物殘株是否打入田裡等綜合處理進行模擬，以建立環境親和型稻麥輪作栽培模式。

表 3 大雅稻麥輪作試驗田二期水稻灌水記錄。左側進水與停水時間為實際操作之記錄，而右側的類別及設定時間為 DNDC 設定之內容。類別 C 為持續灌水 (continuous flooding) 而類別 M 則為間歇性灌水 (marginal flooding)。



大雅 2014二期水稻灌水記錄

進水	停水	類別 (C/M)	設定時間
7月27日	8月20日	C	7/27~8/20
8月27日	8月27日	M	8/27~8/29
9月1日	9月2日	M	9/1~9/18
9月6日	9月7日		
9月11日	9月12日		
9月17日	9月17日		
9月22日	9月22日	M	9/22~9/23
9月27日	9月28日	M	9/27~10/5
10月2日	10月2日		
10月7日	10月7日	M	10/7~10/14
10月12日	10月12日		
10月18日	10月19日	M	10/18~10/21
10月26日	10月26日	M	10/26~10/28
11月2日	11月2日	M	11/2~11/4
11月8日	11月8日	M	11/8~11/10

五、田間溫室氣體採樣及分析



1. 田間氣體採樣

量測的溫室氣體為甲烷 (CH_4) 與氧化亞氮 (N_2O)，使用靜態封閉罩法(static closed chamber method) 收集田間氣體樣品(Sapkota et al., 2014; 孫和賴, 1998)。

溫室氣體之採樣箱為長 50 公分、寬 50 公分及高 100 公分之透明壓克力箱，上方孔洞放置矽膠塞，裝有溫度計，側邊的孔洞為抽取採樣罩內部氣體之用，箱內置有兩個電腦風扇，幫助採樣罩內之空氣混和均勻(圖 6)。採樣時使用針頭抽取罩內之氣體，將氣體打入空氣採樣袋，將氣體攜回實驗室測量，於抽氣兩日內完成。抽氣時間為第 0 分鐘、第 30 分鐘及第 60 分鐘。

溫室氣體取樣時間為 2014/12/30 開始第一次抽氣，取樣頻率為每 10~20 天取樣一次，共取樣 14 次。由於田間溫室氣體排放會隨著時間而變化(Sander and Wassmann, 2014)，故固定樣區取樣之時間，大雅之麥田採集時間為早上 10 時開始進行，而台中場之麥田採樣時間為下午 2 時開始進行。

2. 溫室氣體排放通量計算

將田間收集回來之氣體，利用氣相層析儀(Gas chromatography) (7890A, Aligent, California, USA) 分析採樣袋內 CH_4 及 N_2O 的濃度，其中， CH_4 及 N_2O 氣體濃度分別以火焰離子偵測器 (flame ionization detector, GC 899, China) 及電子捕捉偵測器 (electron capture detector, Star 3600cx, Varian) 量測。氣相層析儀分析條件如表 4 所示。

田間溫室氣體通量計算公式如下(蕭聖哲, 2014):

$$F = \frac{V_{chamber}}{MW_{cor}} \times \frac{b}{10^9} \times MW \times \frac{10^6}{A} \times 2$$

$$MW_{cor} = 22.4 \times \frac{273 + T}{273}$$



F：土壤 CH_4 或 N_2O 通量 ($\mu\text{g C or N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。以正值表示氣體自土壤釋放至大氣，負值表示土壤吸收氣體；

$V_{chamber}$ ：採樣罩體積 (250 L)；

MW_{cor} ：溫度修正下理想氣體每莫耳體積 (L mole^{-1})，以公式?計算；

b：採樣罩第 0 分鐘至第 30 分鐘與第 30 分鐘至第 60 分鐘內的 CH_4 或 N_2O 濃度變化($\Delta \text{ppb, 30 min}$)，而後的兩倍為將此通量換算成每小時的通量；

MW ： N_2O 中每莫耳氮的重量 (=28)； CH_4 中每莫耳碳的重量 (=12)；

A：採樣罩之底面積 (0.25 m^2)；

T：採樣罩溫度 ($^{\circ}\text{C}$)。

最後將氣體通量換算成每日每公頃所釋放之溫室氣體通量，並與 DNDC 模擬之溫室氣體排放進行比較。

表 4 氣相層析儀 (GC-Aligent 7890A) 色譜配置與分析條件。

GAS	N ₂ O	CH ₄
detector	Eletron capture detector (ECD)	flame ionization detector (FID)
temperature	350 °C	350 °C
Column	AB-PLOT Q 30 m x 0.53 mm x 30.0 μ m Flow: 6 mL min ⁻¹ pressure: 5.7 psi	AB-PLOT Q 30 m x 0.53 mm x 30.0 μ m HP-PLOT U 30 m x 0.53 mm x 30.0 μ m Flow: 6 mL min ⁻¹ pressure: 5.7 psi
Makeup gas	CH ₄ (10%) and Ar (90%): 2 mL min ⁻¹	N ₂ : 2 mL min ⁻¹
the flame of fuel gas	N.A.	H ₂ : 30 mL min ⁻¹ Air: 400 mL ⁻¹
Carrier gas	99.9999% N2 Flow: 2 mL min ⁻¹	99.9999% N2 Flow: 2 mL min ⁻¹
Oven temperature	35 °C	35 °C
Inlet	temperature: 100 °C Pressure: 5.7 psi Split ration: 0.5:1	temperature: 100 °C Pressure: 5.7 psi Split ration: 0.5:1

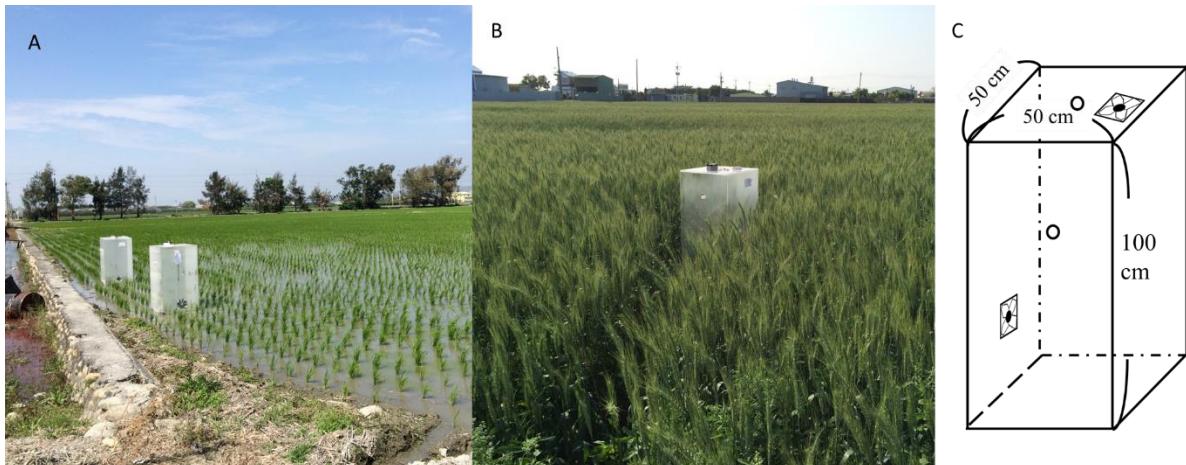


圖 6 氣體採樣罩設計圖與實際田間情況。(A)為氣體收集壓克力箱在水田實際之情況；(B)為氣體收集箱在麥田之實際情況；(C)為氣體收集箱之設計圖，箱子上方跟測邊各有一個孔，上方的孔為放置溫度計，測邊的孔為抽氣使用，內置兩個電腦風扇，幫助氣體混勻。



伍、 結果

一、試驗田區土壤及氣象資料

試驗田土壤性質簡述如下：大雅試驗田區屬於陳厝寮系的黏質壤土；土壤 pH 值介於 5~5.5；收穫後土壤中銨態氮含量介於 0.4~0.8 ppm；硝酸態氮含量介於 3.5~5 ppm；土壤碳氮比約 10~15。台中場試驗田區屬於彰化二林系的砂質壤土；土壤 pH 值介於 7.7~7.9；收穫後土壤中銨態氮含量 0.3~0.7 ppm；硝酸態氮含量為 1.1~1.5 ppm；土壤碳氮比為 10~30。(詳見表 5)

圖 7、圖 8、圖 9、圖 10 為大雅及台中場兩年七作之氣象資料，兩地區溫度差異不大，一年中主要降雨在一期水稻，惟三年冬季差異較大，2013 年冬季降雨過多而 2014 年冬天幾乎無降雨記錄且小麥抽穗期溫度偏高。

二、水稻與小麥之植株分配比及碳氮比

植株分配比與碳氮比資料應用於 DNDC 模式之參數，但植株根部難以精確取樣，因此僅探討作物地上部之分配，植株根部則使用軟體預設參數。水稻的植株乾重分配比與小麥有明顯不同，水稻之莖占整體植株比例為 10~15%，其中秈稻較梗稻為低；葉部比例約為 30~35%；穗(穀粒)的比例佔 50~55%。小麥(台中選 2 號)的植株部分，莖的比例約占 42%；葉的比例為 23%，而穗的比例約為 36%。

而植株碳氮比的部分，小麥整體碳氮比皆較水稻為低。水稻之穗碳氮比約為 50 (僅台中在來 1 號之碳氮比約為 30)，莖的碳氮比約為 100~140 左右，而葉部碳氮比為 35~70 之間。小麥的穗碳氮比約為 18，莖部之碳氮比為 66，而葉部碳氮比為 33。(表 8)

表 5 本試驗稻麥輪作試驗田區土壤資料。

大雅		台中場
土系	陳厝寮系(Cce)黏質壤土	彰化二林系(Eh)砂質壤土
soil texture	氧化物土 oxisols	弱育土 Inceptisols
採樣時間	2014/04/03	2014/04/10
bulk density	1.02±0.06	1.1±0.09
採樣時間	2014/11/11	2014/11/19
bulk density	1.05±0.06	1.14±0.12
採樣時間	2013/3/26	2013/3/13
NH ₄ -N μg/ml	0.41	0.33
NO ₃ -N μg/ml	3.23	1.48
pH	5.05±0.26	7.94±0.17
Total C (% dw)	2.30±0.14	1.34±0.15
Total N (% dw)	0.16±0.08	0.04±0.02
C/N ratio	14.38	33.50
採樣時間	2014/11/11	2014/11/19
NH ₄ -N μg/ml	0.89	0.72
NO ₃ -N μg/ml	4.27	1.14
pH	5.61±0.14	7.74±0.37
Total C (% dw)	2.32±0.18	1.99±0.27
Total N (% dw)	0.23±0.01	0.22±0.03
C/N ratio	10.09	9.05

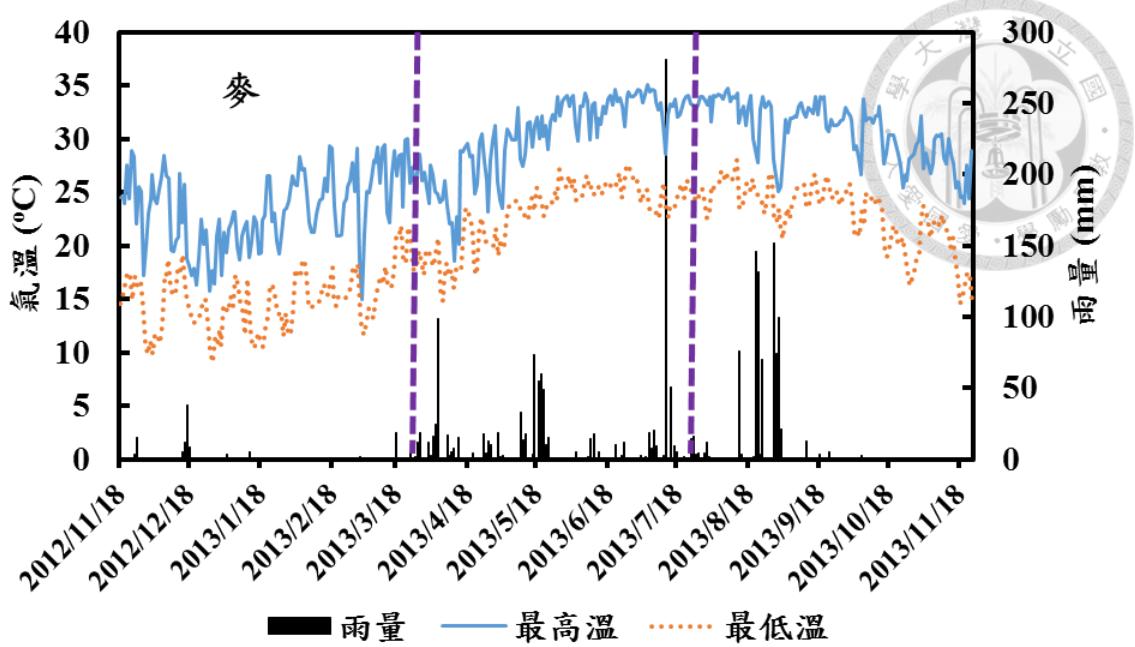


圖 7 大雅 2012 年 11 月至 2013 年 11 月之氣象資料。(2012 冬裡作小麥至 2013 二期水稻收穫)

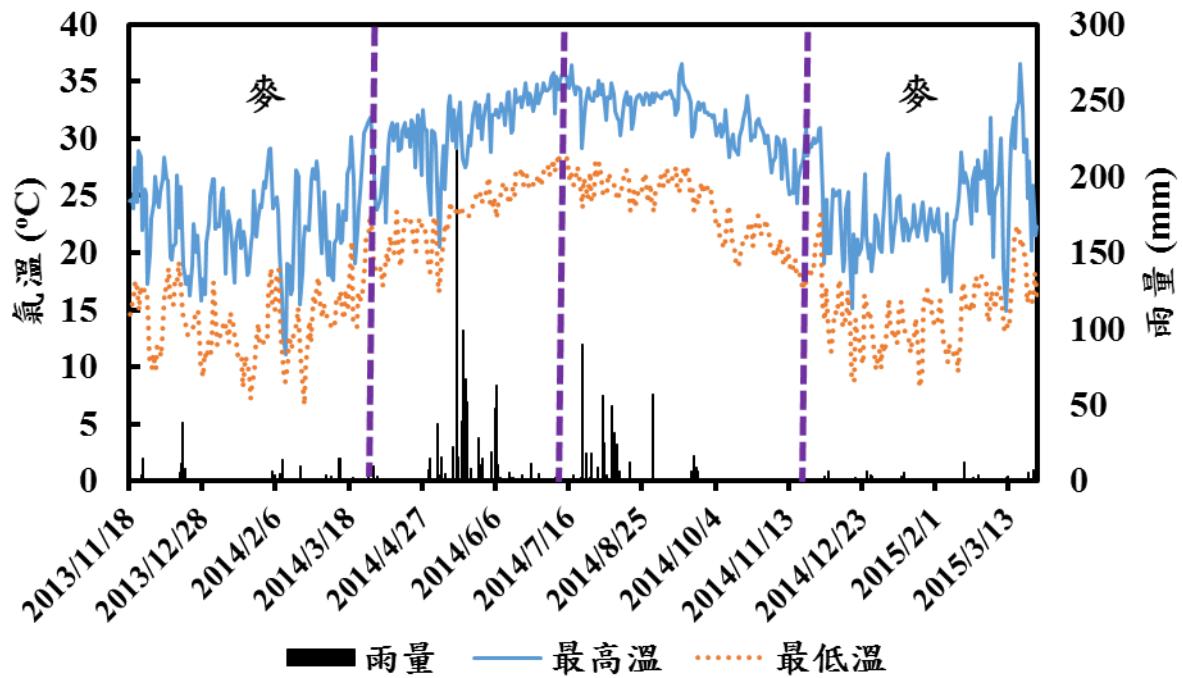


圖 8 大雅 2013 年 11 月至 2015 年 3 月之氣象資料。(2013 冬裡作小麥至 2014 二期冬裡作收穫)

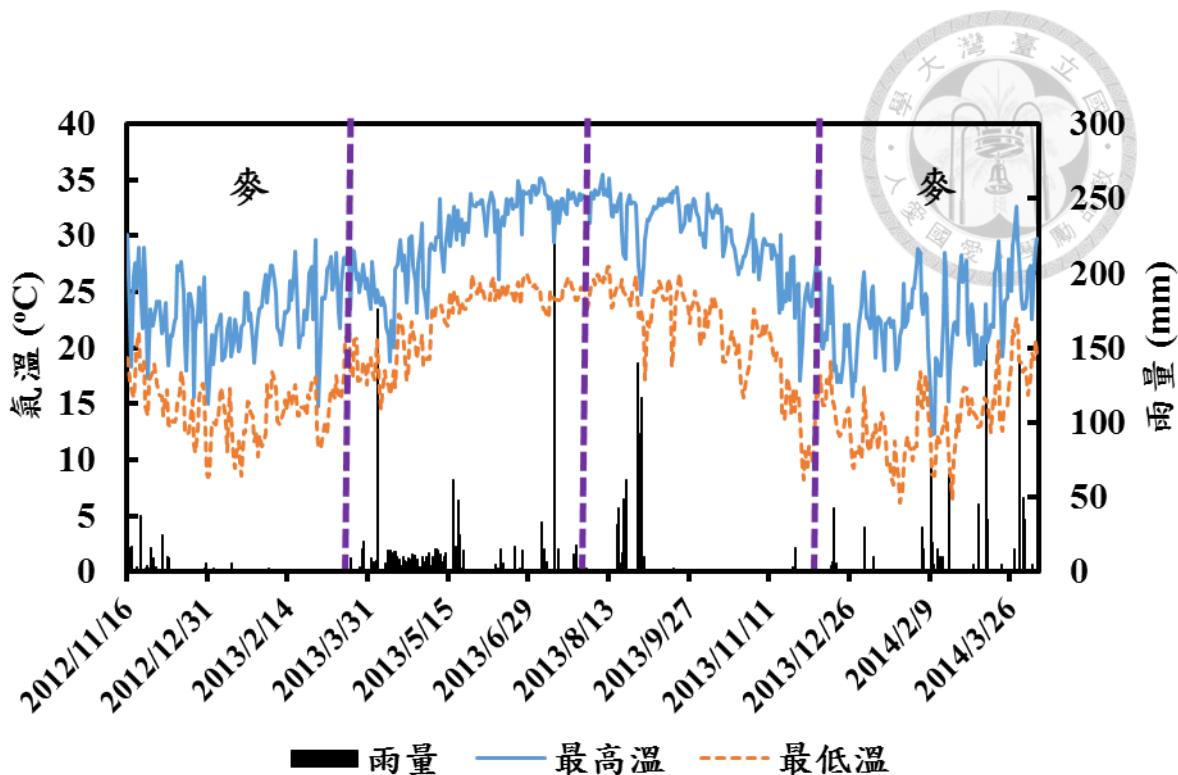


圖 9 台中區農業改良場 2012 年 11 月至 2014 年 3 月之氣象資料。(2012 冬裡作小麥至 2013 冬裡作小麥收穫)

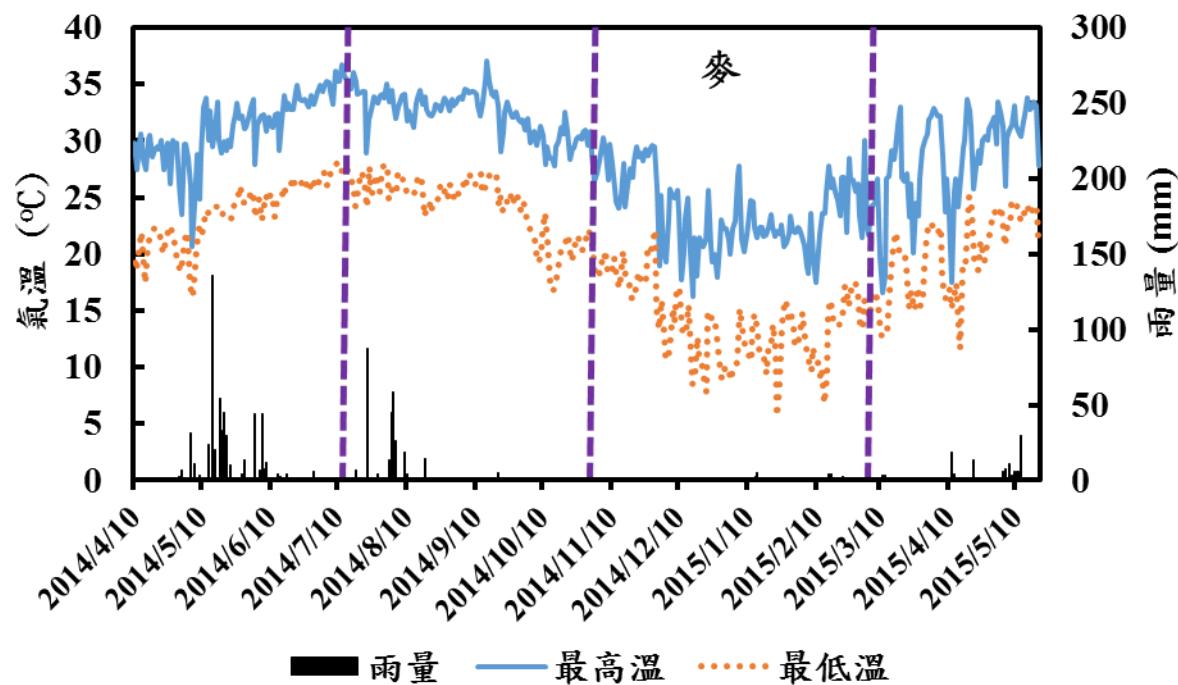


圖 10 台中區農業改良場 2012 年 11 月至 2014 年 3 月之氣象資料。(2014 一期水稻種植至 2015 一期水稻前期)

三、試驗田區之栽培曆



栽培曆為本試驗之重要資料，兩塊試驗田皆採用慣型栽培(附表一及附表二)，小麥種植時間約在十一月中旬後，施用基肥及兩次追肥，平均一個期作灌水三次，收穫時間受春天之雨季及氣溫影響，2014 春天年因為溫度較低且雨量多，較一般晚半個月收穫(四月中)，2014 年冬天氣溫偏高且鮮少降雨，使得 2014 冬裡作小麥抽穗時間提前，產量稍低，但品質優良；第一期水稻種植時間緊接連在小麥收穫之後，多採用中早熟品種，避免影響二期水稻種植時間，施肥三到四次，初期淹灌後直至曬田轉間歇性灌水；二期水稻與一般慣型栽培無明顯差異，惟入秋之天氣會影響小麥之栽培時辰。

肥料的用量在這兩試驗田有明顯差異，大雅田區的肥料用量較台中場為多，大雅水稻單期作肥料用量約每公頃 200 公斤氮肥、130 公斤鉀肥及 100 公斤磷肥；台中場水稻單期作肥料用量約每公頃 150 公斤、80 公斤鉀肥及 70 公斤磷肥。而小麥之施肥量雖然大雅田區也較高，但差距不如水稻明顯，大雅小麥每期作約施用 160 公斤氮肥、130 公斤鉀肥及 100 公斤磷肥；台中場小麥則約施用 130 公斤氮肥、80 公斤鉀肥及 80 公斤磷肥。

表 6 本試驗稻麥輪作各期作肥料三要素之用量。

大雅		2012	2013	2013	2013	2014	2014	2014
	小麥	稻作 I	稻作 II	小麥	稻作 I	稻作 II	小麥	
	N	171	203	225.5	159	146	232	146
	P	132	148	149.5	120	130	155	145
	K	108	132	145.5	96	126	150	190
台中場		2012	2013	2013	2013	2014	2014	2014
	小麥	稻作 I	稻作 II	小麥	稻作 I	稻作 II	小麥	
	N	132	168	144	156	90	88	126
	P	72	51	52.5	80	72	82	88
	K	78	54	45	90	48	68	72

表 7 水稻與小麥植株地上部生質量分配比(乾重)



%	莖	葉	穗
越光	0.12±0.02	0.32±0.08	0.56±0.09
台梗9號	0.16±0.02	0.29±0.01	0.55±0.02
台南11號	0.16±0.01	0.28±0.02	0.56±0.02
台中仙糯1號	0.12±0.02	0.33±0.03	0.55±0.03
台中194	0.15±0.02	0.35±0.02	0.50±0.03
台中在來1號	0.08±0.03	0.39±0.02	0.53±0.04
小麥(台中選2號)	0.42±0.02	0.23±0.03	0.36±0.02



表 8 水稻與小麥地上部植株碳氮比。(n=5)。

品種	穗			莖			葉		
	C	N	C/N ratio	C	N	C/N ratio	C	N	C/N ratio
越光	38.20±1.94	0.83±0.12	46.16	37.25±1.44	0.28±0.26	134.82	36.76±2.07	0.97±0.79	37.99
台梗 9 號	40.68±1.94	0.77±0.12	53.04	37.78±2.29	0.39±0.15	97.58	35.95±2.07	0.48±0.79	74.43
台南 11 號	40.33±1.47	0.81±0.05	49.66	37.73±2.42	0.41±0.24	93.15	37.09±	0.72±0.41	51.51
台中私糯 1 號	39.28±2.63	0.98±0.29	40.01	37.65±3.10	0.27±0.19	139.43	38.73±	0.83±0.22	46.85
台中 194	38.46±2.1	0.77±0.1	49.76	36.58±2.15	0.28±0.14	128.79	36.93±3.22	0.90±0.13	41.18
台中在來 1 號	39.43±1.11	1.40±0.08	28.26	36.58±1.79	0.26±0.13	141.61	36.32±2.02	1.03±0.17	35.12
小麥	37.20±2.03	2.03±0.27	18.33	39.76±0.74	0.60±0.17	66.27	40.62±0.64	1.22±0.38	33.30

四、試驗模擬產量與實際產量之比較



比較大雅及台中場之模擬與實際產量(表 9)，模擬產量皆高於實際產量，其中大雅地區的模擬產量較接近實際產量。其中，實際產量與模擬產量差異最大的為 2013 年冬裡作小麥，當年度因為冬季雨多且台中場本身因為土壤質地較為致密，小麥植株整體生長勢較大雅為弱，因此其差距最大。但依照說明書之使用方法，同一品種作物的參數需有相同設定，不過仍需注意台中場本身跟大雅即有產量上之差異，且由於台中場在小麥種植期間會有鳥害的問題，雖然可以用鳥網覆蓋之區域補足產量資料，但實際情況下鳥害發生的頻度三年皆不一致，因此無法準確比較實際產量與模擬產量。

表 9 DNDC 模擬產量與實際產量比較。

大雅	2012	2013	2013	2013	2014	2014	2014
	小麥	水稻 I	水稻 II	小麥	水稻 I	水稻 II	小麥
品種	TCS2	TKW3	TN11	TCS2	TNS1	TK16	TCS2
模擬結果	2399.51	2514.84	2434.91	2372.84	2212.54	2437.45	2268.46
實際	2400	2320	2160	2050	2480	2520	1800
台中場	2012	2013	2013	2013	2014	2014	2014
	小麥	水稻 I	水稻 II	小麥	水稻 I	水稻 II	小麥
品種	TCS2	TK9	TK9	TCS2	Koshihikari	Koshihikari	TCS2
模擬結果	2268.78	2430.17	2412.09	1724.38	2004.62	1911.13	1823.55
實際	1600	2200	1320	800	1380	1650	1680

五、DNDC 模擬田間溫室氣體排放

1. 田間排放與模擬之比較

本試驗使用 DNDC 模式進行模擬，此版本之模式已於 2014 年在農試所進行台灣水稻生長與田間排放之模擬校正，但因為缺乏稻麥輪作相關驗證，經短期的

田間溫室氣體排放實測，對比 DNDC 模式模擬田間溫室氣體排放的趨勢是相近的

(

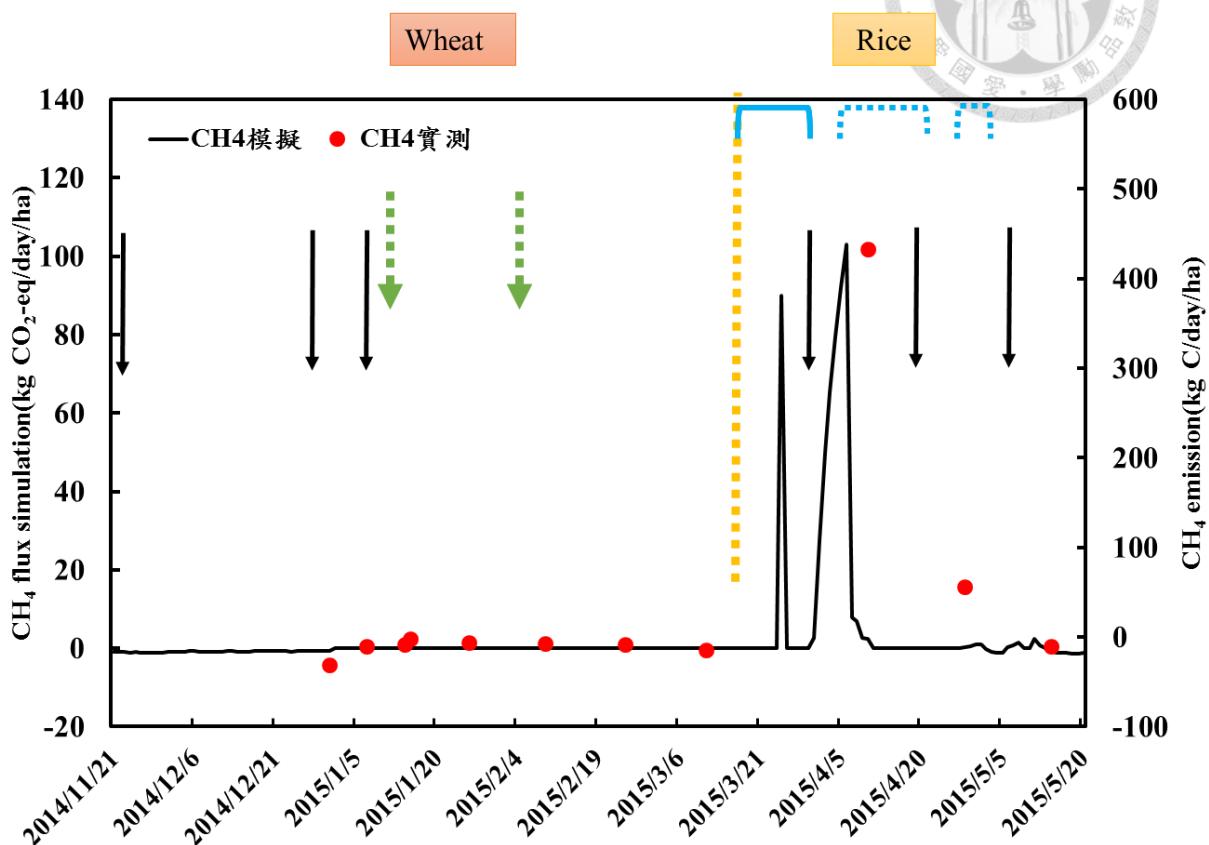


圖 11 台中場稻麥輪作試驗田之甲烷模擬與田間實測之比較。本圖起始時間為小麥播種。黑色實線為 DNDC 模擬之甲烷數值；紅點為甲烷實測值；黑色箭頭代表施肥；綠色虛線箭頭代表小麥灌水時間；藍色實線區間代表持續灌水；藍色虛線代表間歇性灌水時期。

及

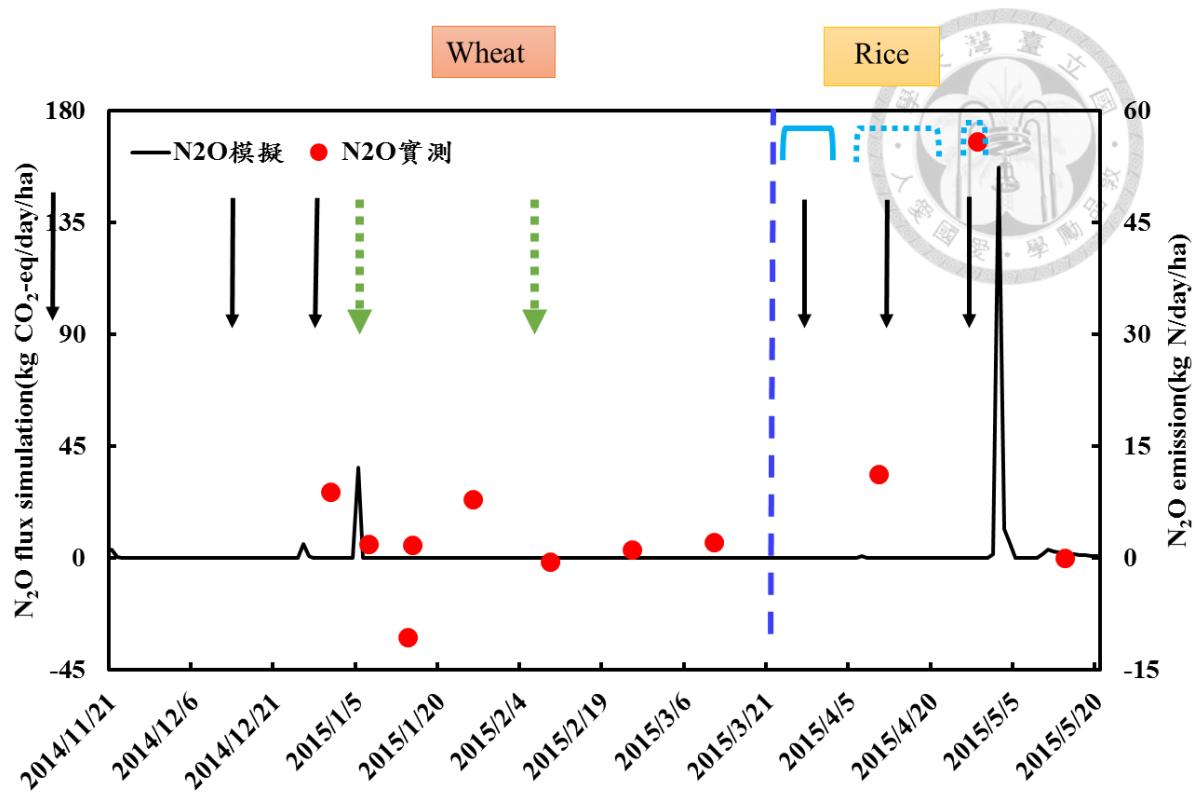


圖 12), 代表 DNDC 為可應用於模擬稻麥輪作之田間溫室氣體排放, 但其溫室氣體排放量仍有數倍之差異, 後續仍需要更多實測值去進行修正, 才能準確評估田間排放溫室氣體的含量。

2. 兩年七期作之溫室氣體排放模擬

綜合兩年七期作之模擬結果, 大雅稻麥輪作試驗田的溫室氣體排放量較台中場稻麥輪作試驗田為高, 大部分的溫室氣體排放高峰位於種植初期一個半月內。

二氧化碳排放主要來自於植體殘株打入田間, 土壤內微生物分解而產生二氧化碳排放, 主要排放時間為前期收穫後至下一作種植初期, (如圖 13、圖 14、圖 15、圖 16), 無論大雅還是台中場, 皆可以看到此排放情況。

甲烷的排放則是隨著水分管理而有差異, 在水稻種植期間互有消長, 大雅試驗田的甲烷排放量較台中場為高, 其中在小麥種植期, 田間甲烷為負排放, 代表

旱田有減緩甲烷排放之潛力。

大雅地區的氧化亞氮排放主要集中於小麥種植初期，在水稻種植期有零星氧化亞氮排放；而台中場的氧化亞氮排放主要位在水稻種植期間，隨著灌水時期變化。由於氧化亞氮的溫室效應潛勢極高，因此在台中場的水稻種植期間，如何控制氧化亞氮的排放是後續建構氣候智慧型稻麥輪作之重點。



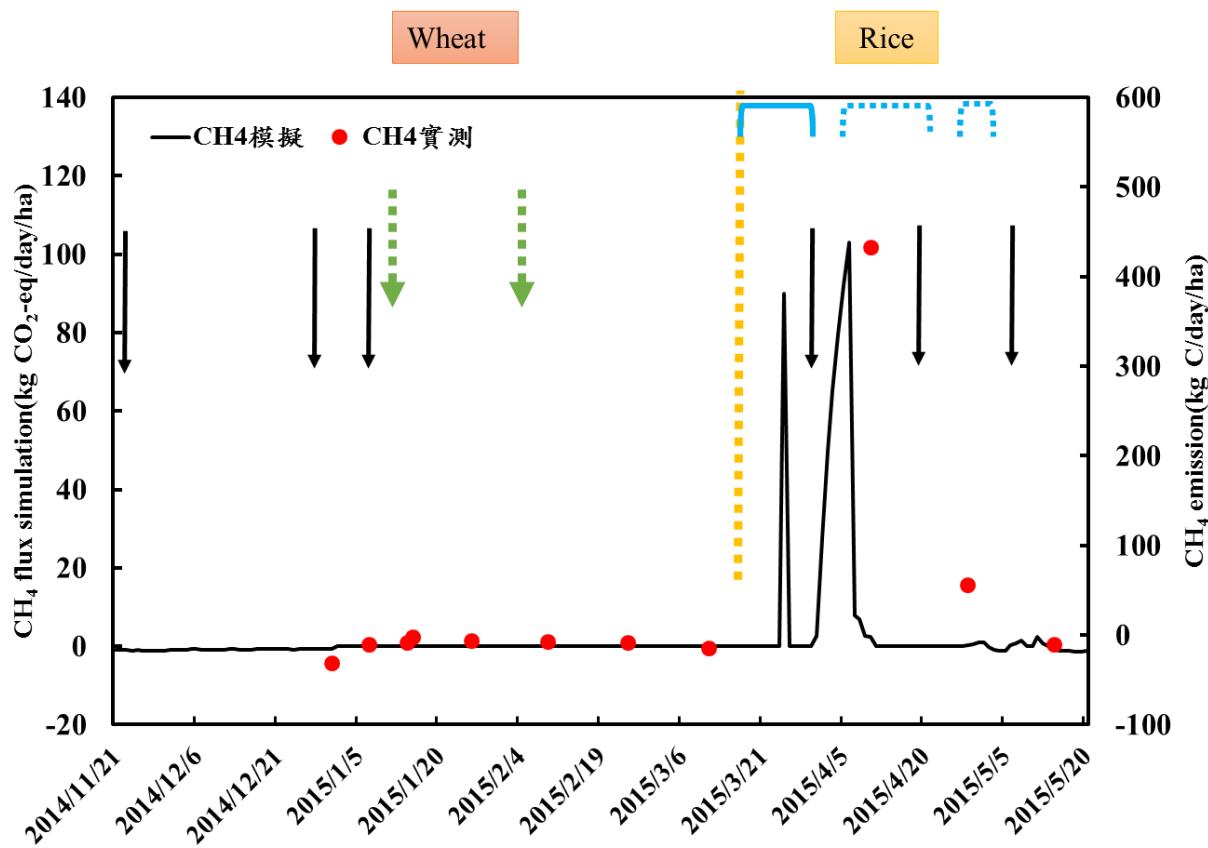


圖 11 台中場稻麥輪作試驗田之甲烷模擬與田間實測之比較。本圖起始時間為小麥播種。黑色實線為 DNDC 模擬之甲烷數值；紅點為甲烷實測值；黑色箭頭代表施肥；綠色虛線箭頭代表小麥灌水時間；藍色實線區間代表持續灌水；藍色虛線代表間歇性灌水時期。

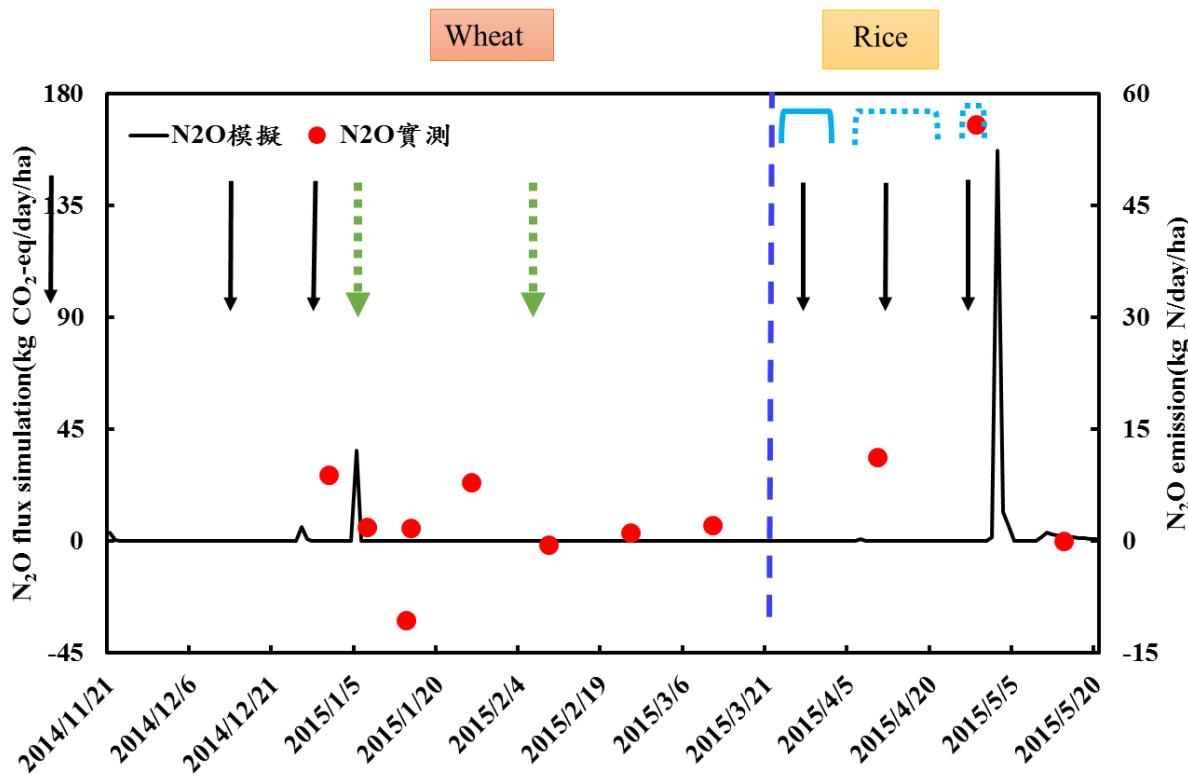


圖 12 台中場稻麥輪作試驗田之氧化亞氮模擬與田間實測之比較，本圖起始時間為小麥播種。黑色實線為 DNDC 模擬之甲烷數值；紅點為甲烷實測值；黑色箭頭代表施肥；綠色虛線箭頭代表小麥灌水時間；藍色實線區間代表持續灌水；藍色虛線代表間歇性灌水時期。

六、稻麥輪作之生命週期評估

經生命週期盤查，先分別敘述各種生命週期盤查資料，後再進行整體稻麥輪作之生命週期評估。



1. 生命週期盤查資料

生命週期盤查資料之結果簡述如下，主要可以分成田間排放、肥料製造、田間操作及收穫後加工。

(1) 田間排放

整體田間溫室氣體排放過程如上段所述，但就整體田間碳足跡而言，台中場整體稻麥輪作田間溫室氣體排放變異幅度較小，但大雅地區變化量大，兩地區各期作差異可將近十倍，除了大雅 2013 年冬裡作小麥之單位面積田間碳足跡高達 50 噸二氧化碳當量外，其餘期作的田間碳足跡約為 3 噸~15 噸二氧化碳當量。再分項來看，大雅 2013 年冬裡作小麥主要碳足跡來自於氧化亞氮的排放，約貢獻整體田間 70% 碳足跡；其餘期作的氧化亞氮貢獻較不明顯，主要碳足跡是來自於二氧化碳的排放；另外，在少數期作中，有些微甲烷減量之趨勢。(錯誤！找不到參照來源。)

優養化及酸化之環境衝擊沒有固定的變化趨勢，主要影響的因子有 NO_3^- 、 NH_3 、 NO 及 N_2O 影響，在無機氮的變化過程中，有很多不同型態， NH_3 及 NO_x 影響較大，所以有些期作氧化亞氮排放較少，卻會造成比較大的優氧化及酸化之環境衝擊。

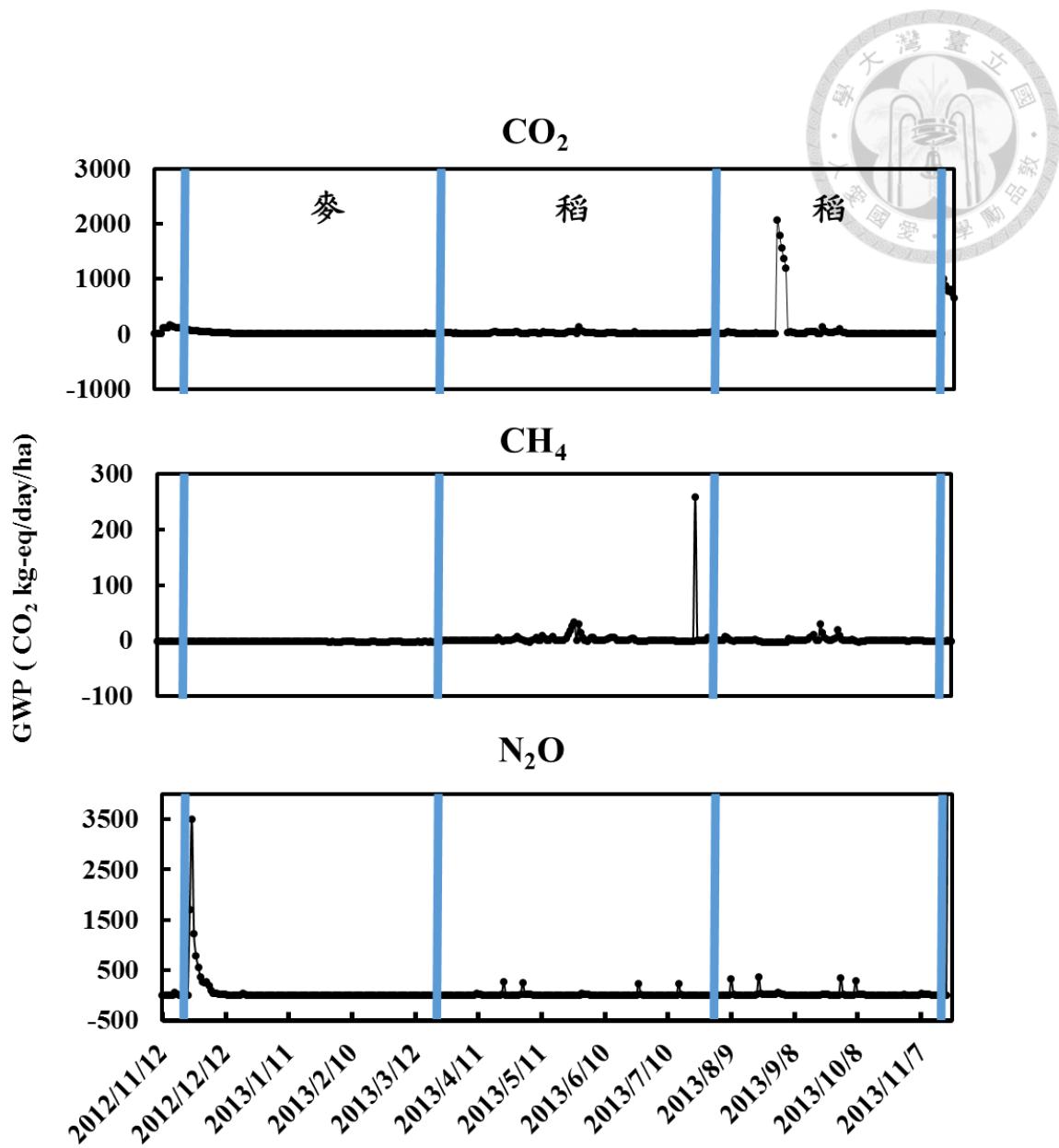


圖 13 大雅地區稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬。2012 年冬裏作小麥至 2013 年二期水稻。由上到下分別為二氧化碳、甲烷及氧化亞氮之排放模擬。

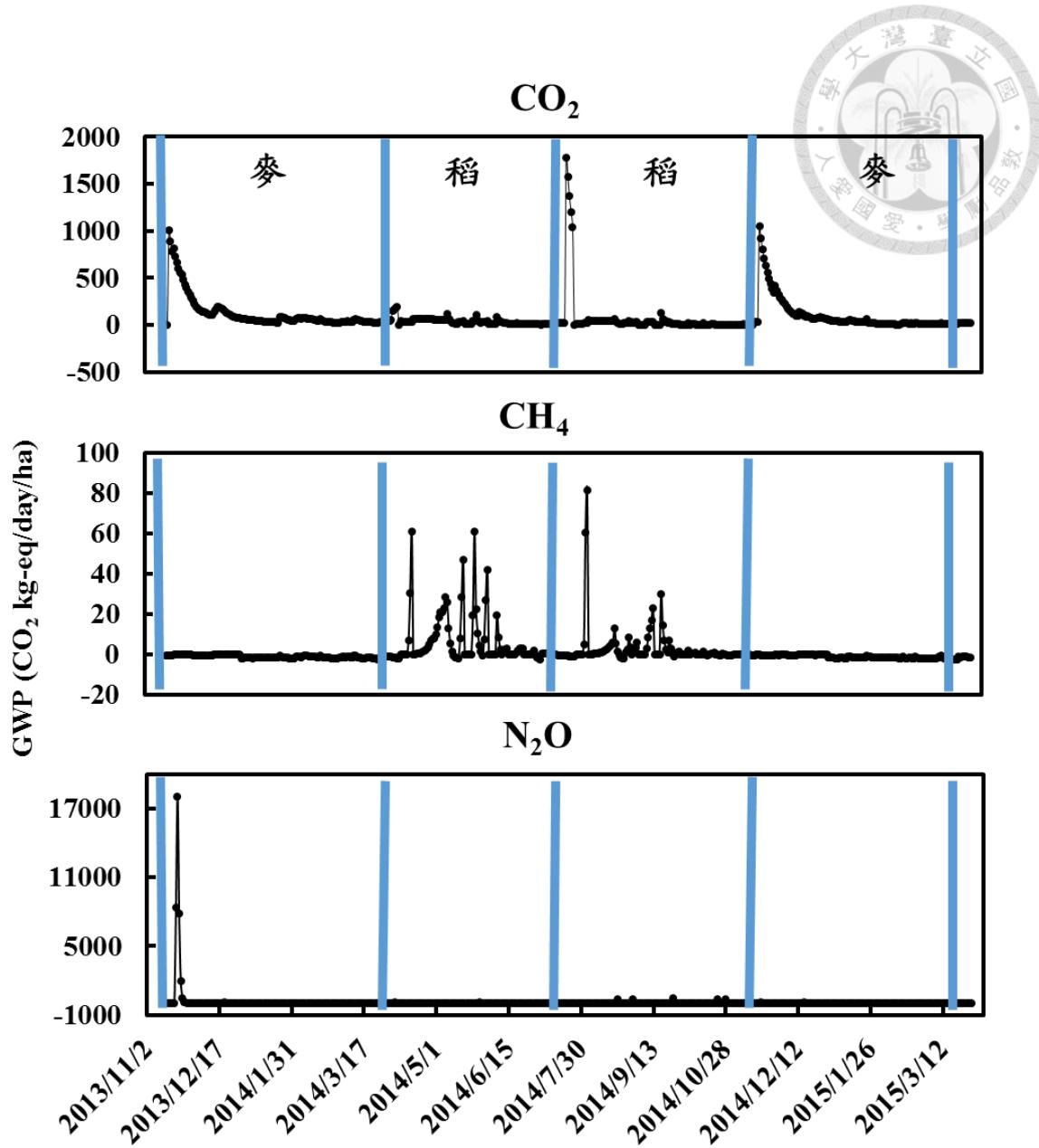


圖 14 大雅地區稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬。2013 年冬裡作小麥至 2014 年冬裏作小麥。由上到下分別為二氧化氮、甲烷及氧化亞氮之排放模擬。藍線為各期作之開始日期。

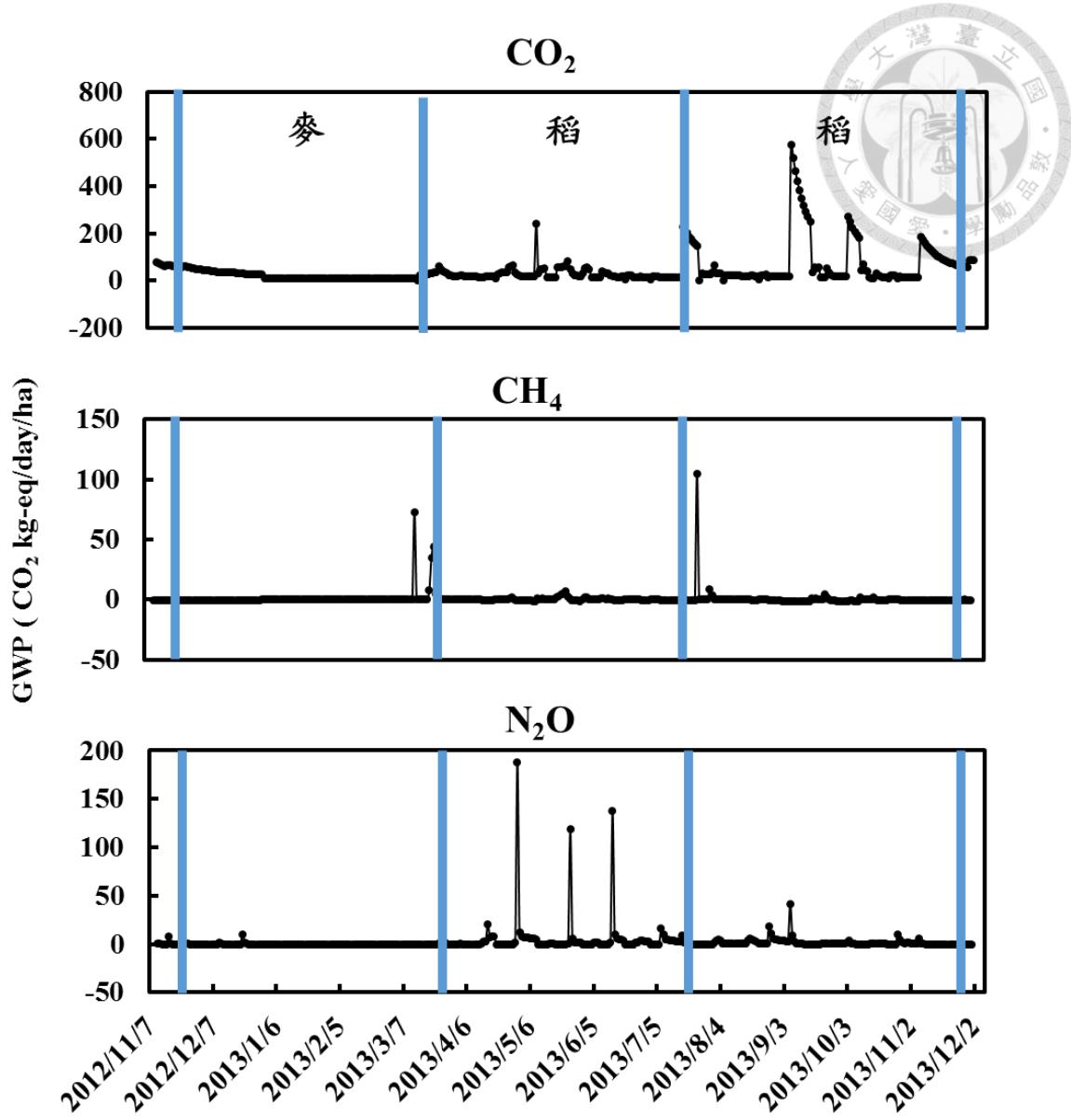


圖 15 台中場稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬。2012 年冬裏作小麥至 2013 年二期水稻。由上到下分別為二氧化碳、甲烷及氧化亞氮之排放模擬。藍線為各期作之開始日期。

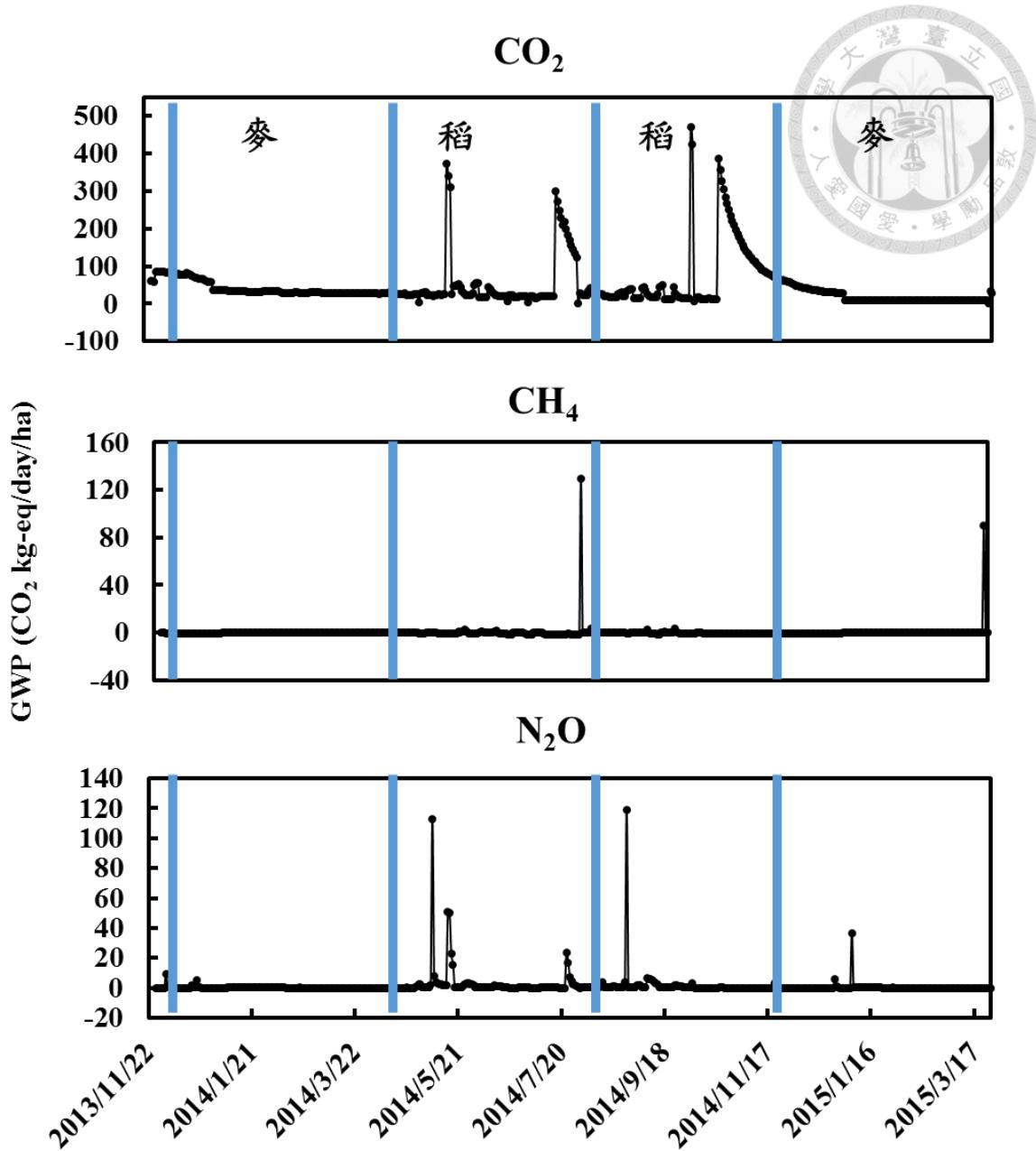


圖 16 台中場稻麥輪作田間溫室氣體排放模擬。2013 年冬裏作小麥至 2014 年冬裏作小麥。由上到下分別為二氧化碳、甲烷及氧化亞氮之排放模擬。藍線為各期作之開始日期。



(2)肥料製造

依據 SimaPro 資料調查結果，每公斤重量氮肥生產過程會排放 4 公斤二氧化碳(溫室效應潛勢)、優養化潛勢(磷酸根當量)為 0.00254 公斤、酸化潛勢(硫酸根當量)為 0.00871 公斤及耗能 48.36 MJ；每公斤重量磷肥生產過程會排放 1.6 公斤二氧化碳、優養化潛勢為 0.0118、酸化潛勢為 0.0448 及耗能 13.97 MJ；每公斤鉀肥稱產過程會排放 0.71 公斤二氧化碳、優養化潛勢為 0.000766、酸化潛勢為 0.0448 及耗能 8.77 MJ。

(3)機械操作

機械操作主要可以分成下列四種，依據使用機械不同，分別進行盤點，而由於每年農業機械實際應用之田區大小及使用年限差異大，因此機器的維修與製造則不屬於本次盤查內容。

I、整地

整地使用曳引機，依據潘瀅如(2008)、謝華偉(2007)與吳以健(未發表)之調查結果，水田兩次整地(粗整地及細整地)估算為每公頃耗油 75 公升，而小麥播種之淺耕估算每公頃耗油約 25 公升。

II、插秧、播種

插秧所使用的插秧機，以久保田牌的動力插秧機為例，平均插秧時間一分地約 25 分鐘，再依據謝華偉等人(2007)對農業機械之使用調查，插秧機每小時耗油約兩公升，因此插秧一公頃面積約耗油 8 公升。



III、收穫

依據潘瀅如(2008)之盤查，兩期水稻平均耗油 37 公升，因此估算每次收穫大概消耗 18 公升油料，由於小麥與水稻收穫使用相同機械，且植株構造上並沒有大幅差異，因此小麥及水稻收穫皆以此數值進行估算。

IV、施肥與噴藥

依據本研究室之盤查，用背負式噴灑機平均噴灑 400 公斤的肥料會消耗一公升汽油，而稀釋後的農藥噴灑 1000 公升會消耗一公升汽油，因此將期作之肥料及農藥用量統整後，再估算油料使用量。

(4)收穫後加工

收穫後加工主要有烘乾及碾米，而小麥因為用穀粒去作評估，因此沒有磨粉等後續製程進行評估。

I、乾燥

乾燥的部分，假設使用三久牌 New Pro-120，假設鮮穀水分 24%，烘乾至 14% 之乾穀，需消耗 10% 的水分。本機型處理量從 2800 公斤至 12000 公斤，因此假設一次進量約 8000 公斤，依據三久牌公司之資料，該機型的最大耗油量為 14.5 公升柴油/小時，耗電功率為 6.35 kW。由於本機型減乾率約為 0.6~1% 左右，因此估算一次烘乾約 13 小時，總共耗油量為 188.5 公升級耗電 82.55 度。再將乾穀量換算成單位公噸白米乾燥需消耗 1023 MJ 及排放 91 公斤二氧化碳。

II、碾米



依據本研究室於 2009 年後龍碾米廠之訪查，碾米廠每月用電約兩萬元，總加工之白米量估計為每年 700 噸，換算用電量及製造之白米量，每噸白米約排放 41 公斤二氧化碳及耗能 232 MJ。

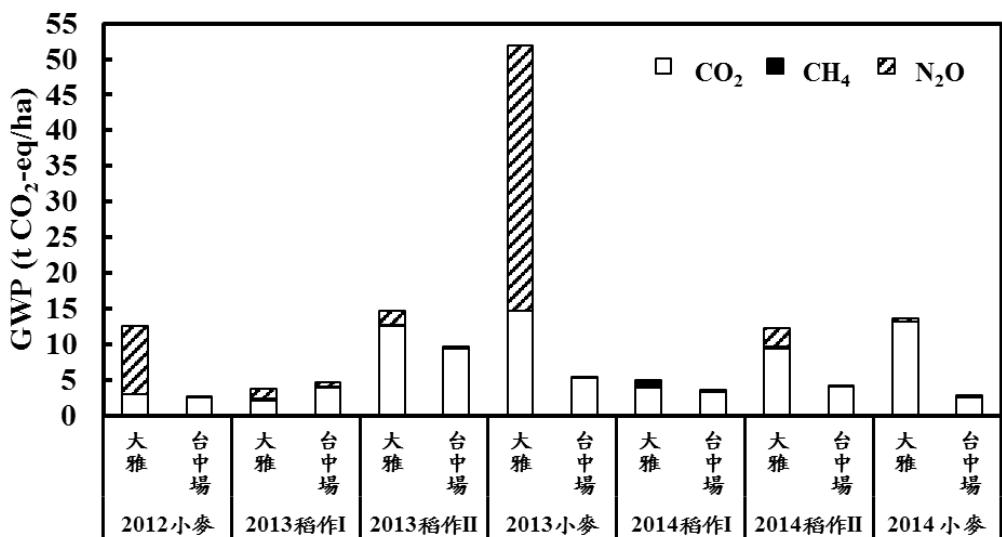


圖 17 台中大雅及台中區農業改良場各期作田間溫室氣體排放比較圖。

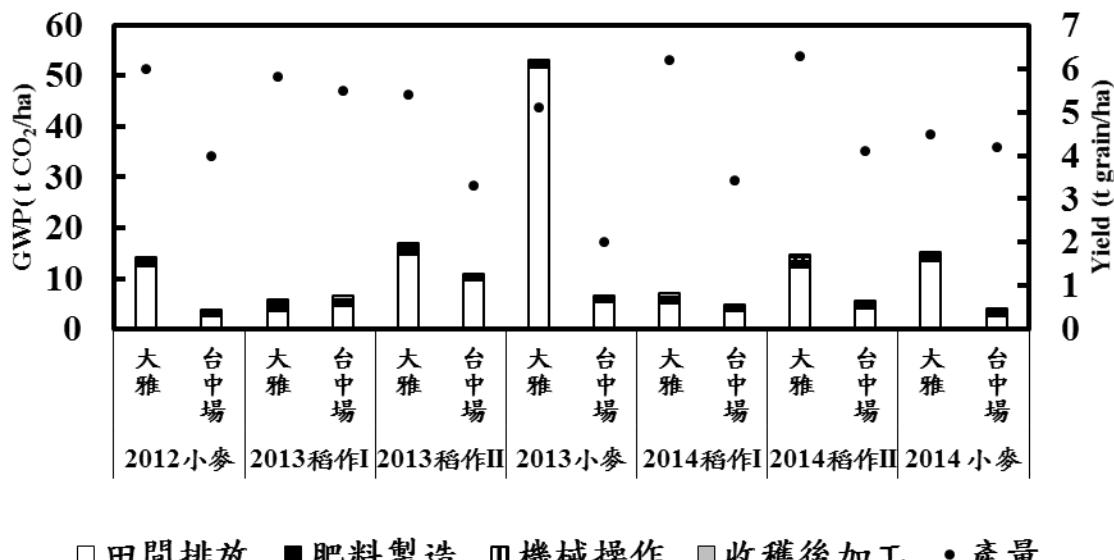


圖 18 台中大雅與台中區農業改良場稻麥輪作碳足跡與產量之比較圖。

2. 整體環境衝擊評估



整體環境衝擊評估可以分兩種形式來呈現，一種為單位面積所造成之環境衝擊，另一種則為生產單位糧食所造成之環境衝擊，由圖 18 可以看到每期作的碳足跡與產量並沒有直接關係，大雅單期作物產量較高，但也伴隨著較高的環境衝擊，因此後續將分項說明生命週期評估之結果

(1) 大雅

I、 碳足跡

由圖 19 可以看到大雅單期作單位面積碳足跡落在五千多到五萬多公斤二氧化碳當量，最主要的為田間排放的溫室氣體，田間排放的變異幅度較大，但最少貢獻 50 % 的環境衝擊，在水稻生產過程中所造成的環境衝擊相對穩定，兩年四期作中以二期水稻碳足跡較高；但在小麥的三期作則相對變異量較大。

肥料製造雖然為第二大的熱點，但就盤查之結果，實際值並沒有很顯著的差別，每公頃排放約介於 800~1200 公斤二氧化碳當量；田間機械操作的部分，小麥種植過程中因為少了粗整地及細整地，所以在田間機械的部分其碳足跡較少，分別約是 400 與 550 公斤二氧化碳當量；收穫後加工主要與產量有關，小麥只有烘乾，因此每公頃約落在 50~70 公斤二氧化碳當量，而水稻還需要碾米，其碳足跡則是 500~650 公斤二氧化碳當量。

以生產單位重量糧食而言，七期作之碳足跡依序分別為 2.3、1.4、4.2、10.3、1.4、2.8 及 3.3。(圖 19、圖 20、圖 21)



II、優養化

優養化主要是田間排放的貢獻最大，但變異的幅度較無規律可見，主要影響的因子為銨態氮釋放，所以在 2013 冬裡作小麥，因為大幅的無機氮以氧化亞氮的形式釋出，因此相對而言 2013 冬裡作小麥之優養化潛勢較低。除了 2014 年小麥單期作釋放 280 公斤磷酸根當量，其餘期作的優養化潛勢落在 10~60 磷酸根當量。(圖 19、圖 20、圖 21)

III、酸化

由於酸化及優養化在盤查的資料內的項目相似，但加權權重互有差異，因此各期作的酸化潛勢趨勢與優養化不同，且變異幅度較小，單位面積排放 100~200 公斤硫酸根當量(除了 2014 小麥釋放 684 公斤硫酸根當量)，但主要貢獻的因子同為田間排放。(圖 19、圖 20、圖 21)

IV、能源耗用

肥料生產過程為主要的能源消耗熱點，在單位面積的耗能上較沒有顯著差異，但單位面積產量即會影響單位糧食生產所耗用的能量，在大雅地區試驗田中，平均生產一公斤穀物約消耗 3~5 MJ。(圖 19、圖 20、圖 21)

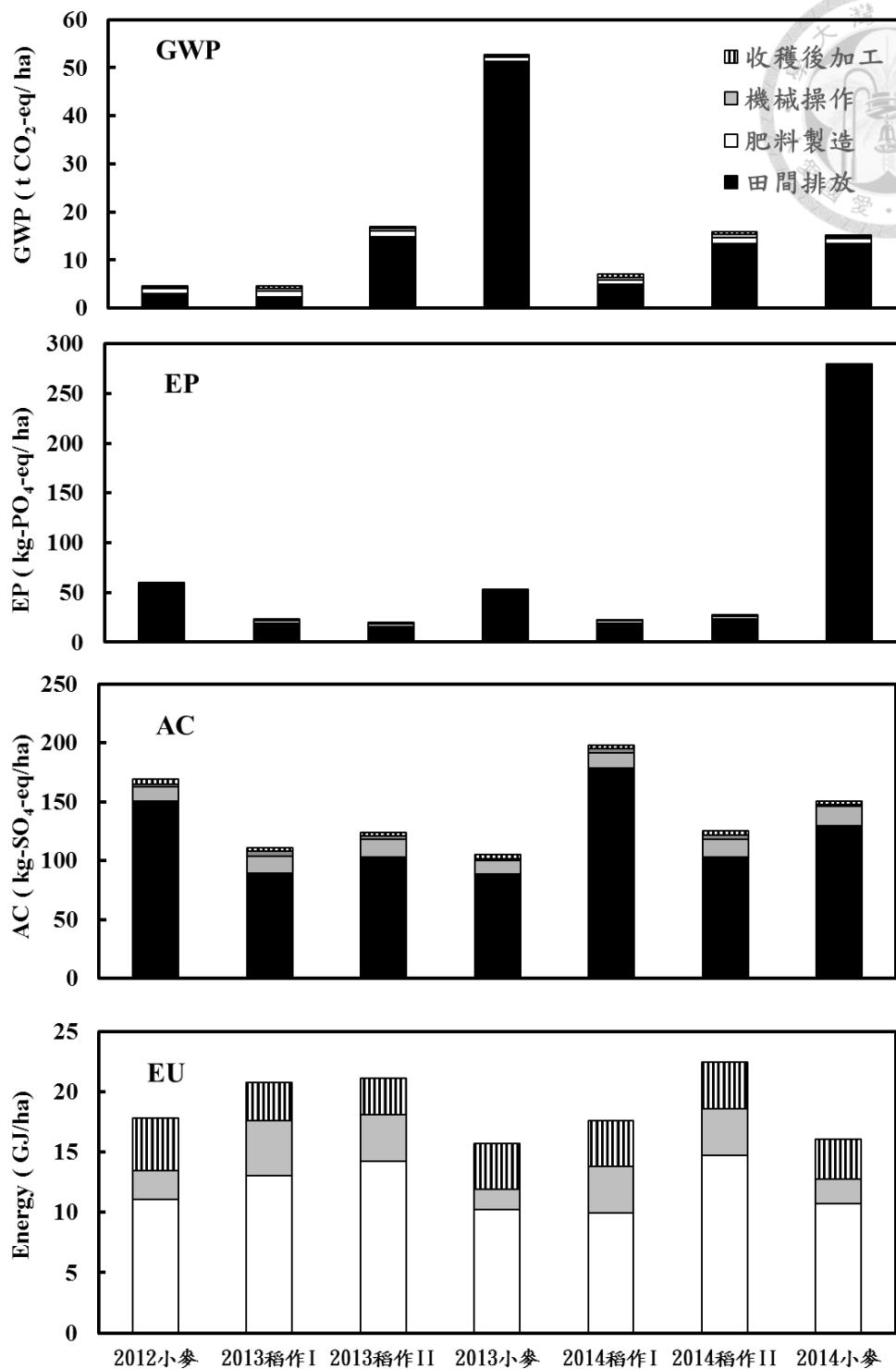


圖 19 大雅地區各期作單位面積之環境衝擊。由上而下分別是溫室效應潛勢 (GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

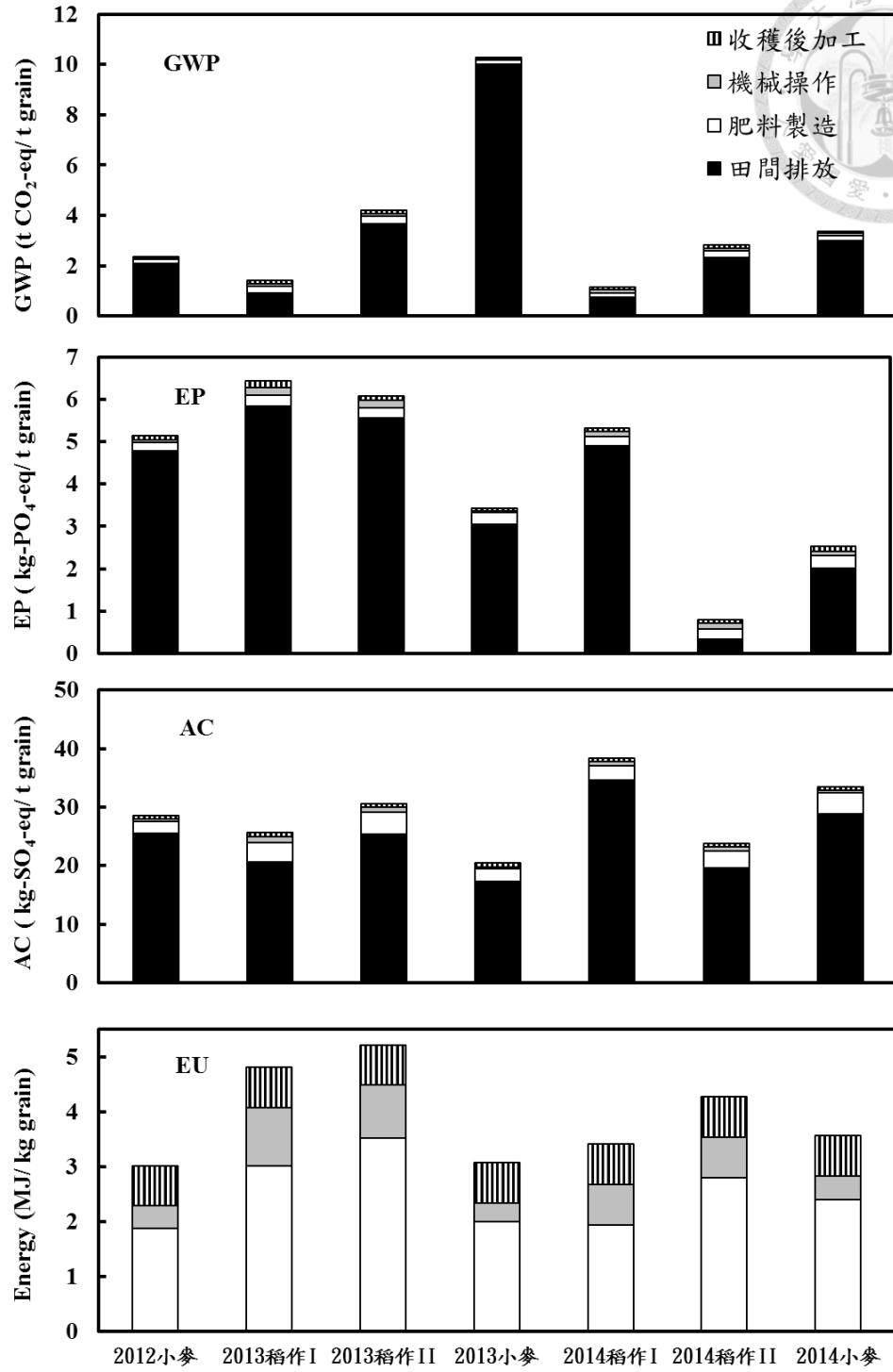


圖 20 大雅地區各期作單位產量之環境衝擊。由上而下分別是溫室效應潛勢(GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

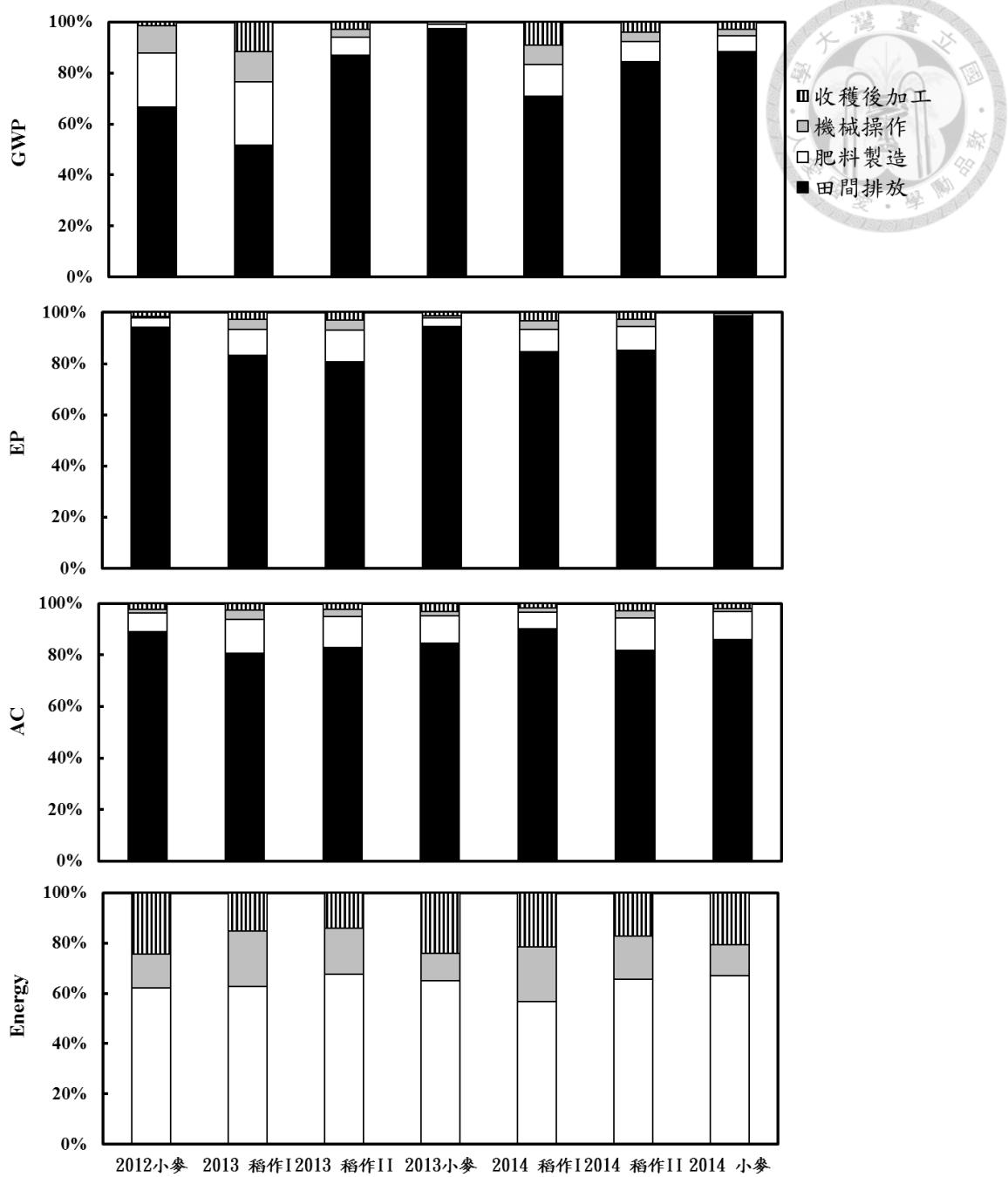


圖 21 大雅地區各期作之環境衝擊分配百分比。由上而下分別是溫室效應潛勢(GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

(2) 台中場



I、碳足跡

台中場整體稻麥輪作之碳足跡較大雅地區少，單位面積單期作排放量約3.5~12 噸二氧化碳當量，最高排放量僅約大雅地區四分之一，主要田間碳足跡來自於二氧化碳的釋放，不似大雅有明顯的氧化亞氮釋放。台中場生產每公斤穀物會釋放0.9~4.5 公斤二氧化碳當量，生產過程中造成最大環境衝擊的碳足跡排放也僅約大雅生產的一半。(圖 22、圖 23、圖 24)

II、優養化

台中場在生產糧食過程中，平均生產單位糧食所造成的優養化衝擊較大雅地區少，為1~10 公斤磷酸根當量，另外優養化衝擊在各期作沒有明顯變化趨勢。(圖 22、圖 23、圖 24)

III、酸化

台中場單位面積酸化也沒有明顯趨勢，但每公頃單期作酸化衝擊落在22~165 公斤硫酸根當量，相對於大雅的釋放的酸化衝擊仍少。生產每噸糧食平均製造15~50 公斤硫酸根當量的環境衝擊。(圖 22、圖 23、圖 24)

IV、能源耗用

在台中場生產之糧食平均每公斤消耗4~8 MJ，較大雅地區稍高，主要原因為台中場之單位面積產量較大雅地區低，但兩者都屬於慣型操作，除了肥料用量較少之外，其他機械操作並沒有明顯差異，因此台中場生產單位糧食耗能較多。

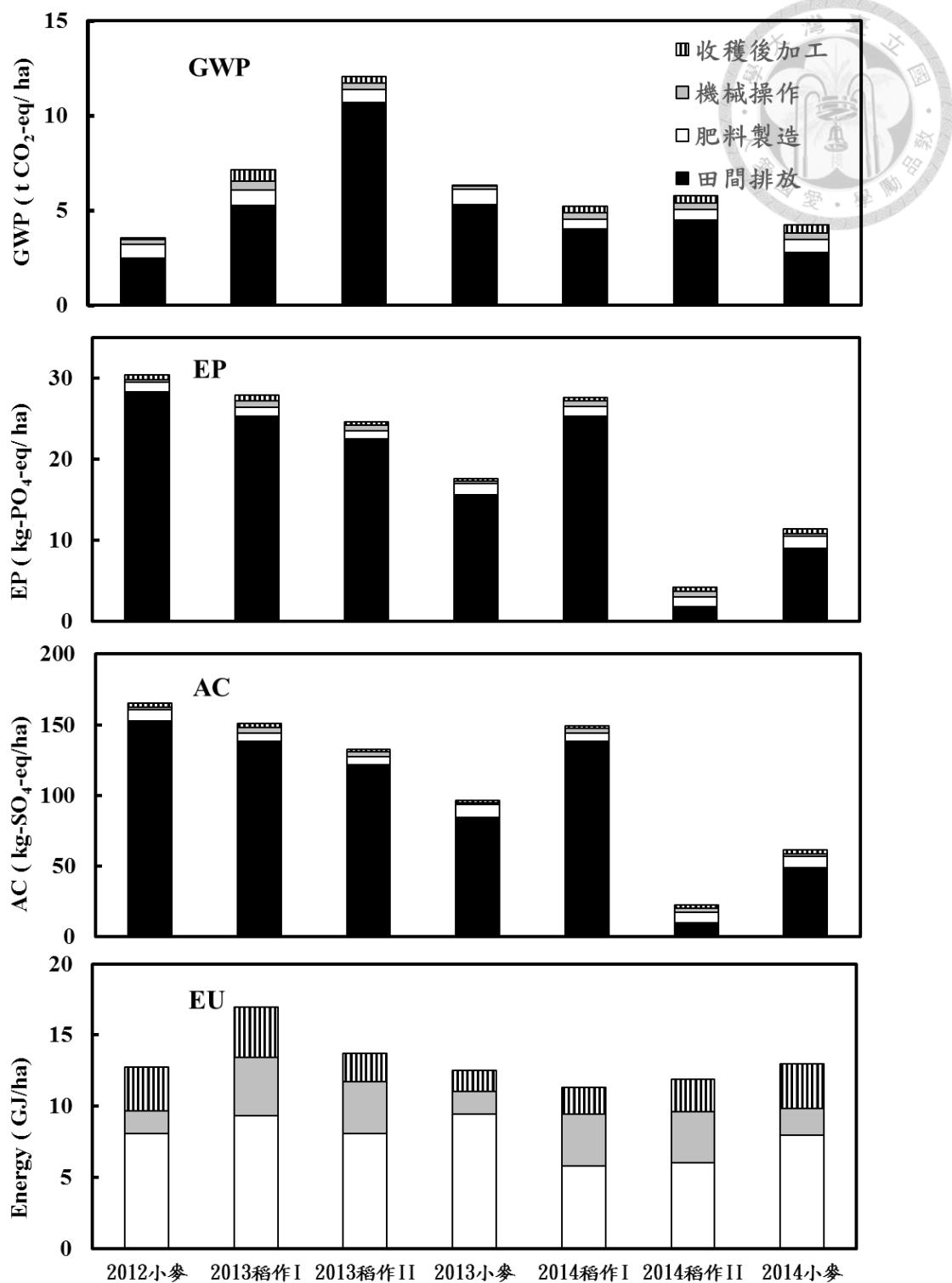


圖 22 台中場各期作單位面積之環境衝擊。由上而下分別是溫室效應潛勢(GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

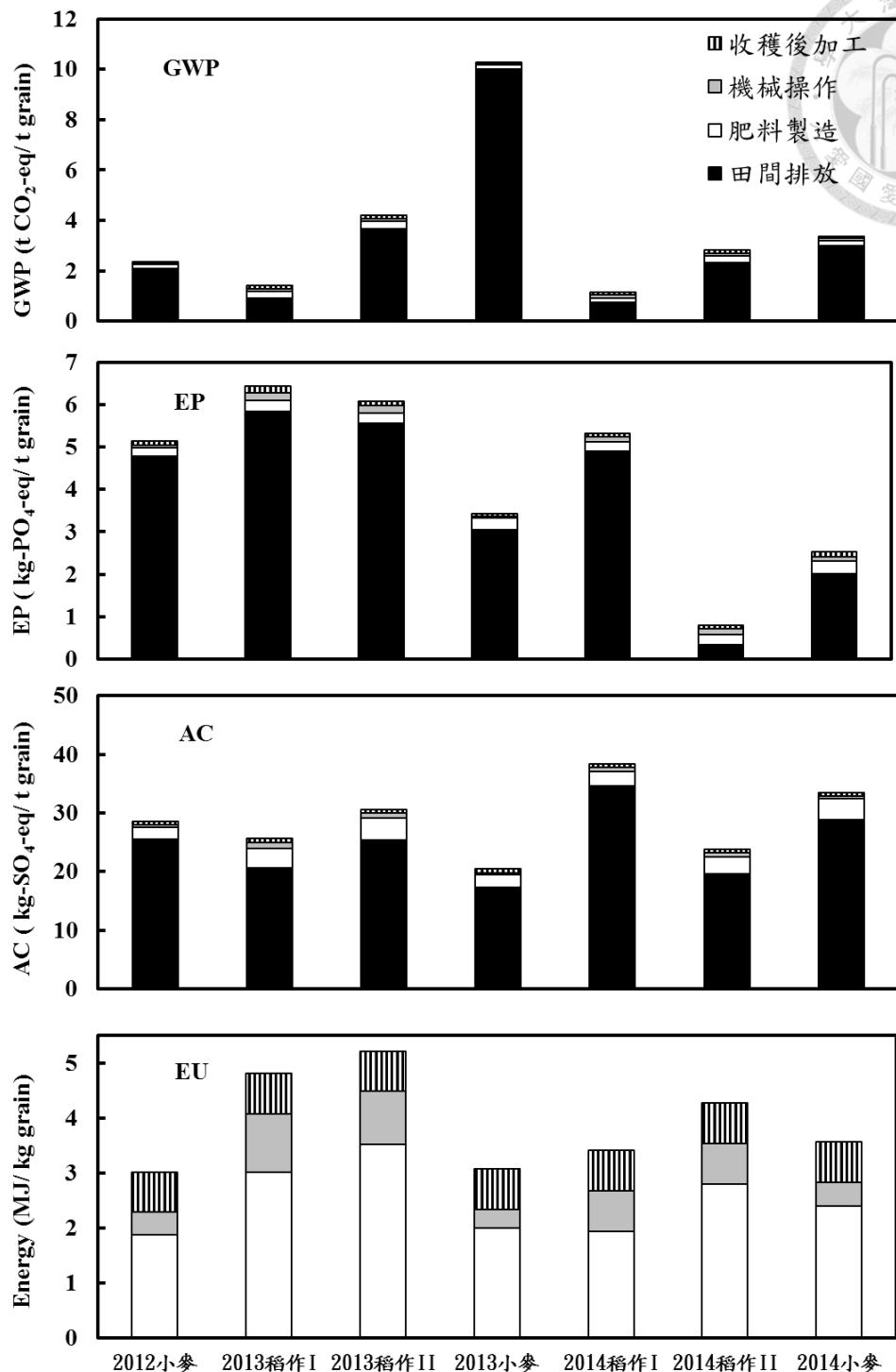


圖 23 台中場各期作單位產量之環境衝擊。由上而下分別是溫室效應潛勢(GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

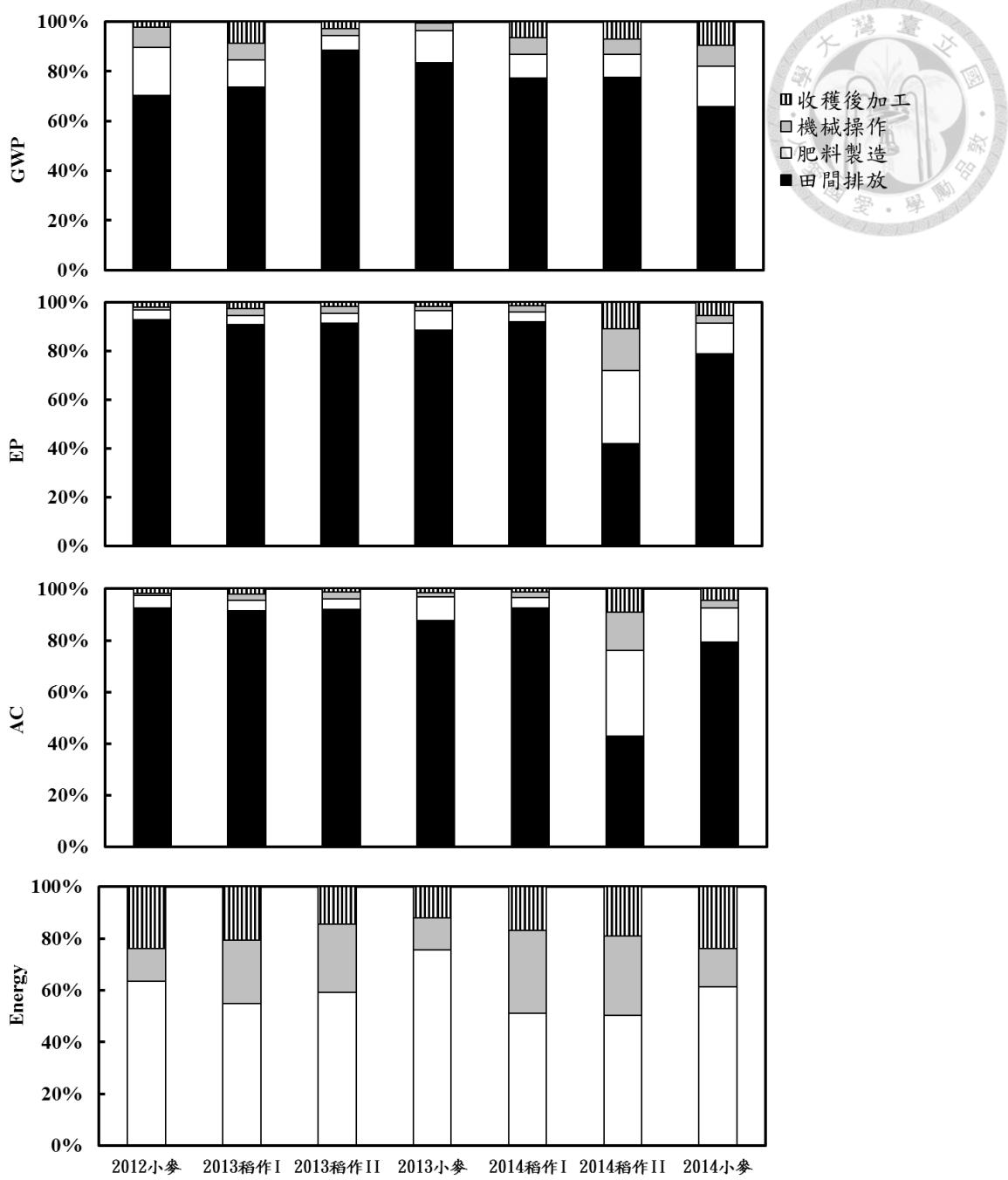


圖 24 台中場各期作之環境衝擊分配百分比。由上而下分別是溫室效應潛勢(GWP)、優養化潛勢(EP)、酸化潛勢(AC)及能源耗用(EU)。

七、改善操作之稻麥輪作生命週期



已知田間排放為整個糧食生產過程中最重要的熱點，為了建構氣候智慧型稻麥輪作系統，因此利用 DNDC 模擬不同操作對於田間溫室氣體釋放之影響。主要分成三種操作：(1)減少肥料施用；(2)前期殘株移除；(3)二期休耕。

1. 減少肥料施用

減少肥料施用最主要是減少氧化亞氮之排放，氮肥施用改變會影響土壤中氮循環，因此改變操作除了影響小麥當期作，亦會影響到後面的水稻生育期田間溫室氣體排放，不過影響幅度較小，大概為 10% 以內。(圖 25 圖 26)

(1) 小麥種植期無基肥

由於 2013 年大雅冬裡作小麥種植初期有大量的氧化亞氮排放，推測小麥播種時期的栽培操作為決定小麥種植所造成環境衝擊的關鍵時期，且 DNDC 模式顯示小麥種植初期的氮肥投入過多，因此模擬小麥種植時期減少施用基肥。結果顯示：減少基肥施用對大雅有較顯著的結果，主要為減少氧化亞氮的排放，在大量排放的期作可以有效減少 30~40 % 氧化亞氮排放，連帶整個期作可以減少 20~30% 的溫室氣體排放，但同樣的改善操作在台中場並沒有同樣的顯著效果，主要原因是氧化亞氮並非主要貢獻者，雖然可以減少 80~90 % 的氧化亞氮排放，但對於整體小麥種植期間排放並無顯著改變，只有在環境優氧化及酸化潛勢上有 80% 的減量趨勢。

(2) 小麥種植期半量肥料

小麥半量肥料處理影響整體小麥栽培期環境衝擊較無基肥處理小，在大雅地

區小麥栽培期，大概可以減少 10~15 %的整體環境衝擊，其中主要為減少百分 20~25 %的氧化亞氮排放。不過仍需注意的地方是，減少肥料施用在台中場並不是一定可以減少小麥種植時的環境衝擊，因為改變土壤中的碳氮比會連帶改變土壤中碳循環，在土壤中無機氮較少的地區可能反而導致土壤中的碳庫分解，而增加二氧化碳的排放。

2. 前期作物殘株移除

由整體稻麥輪作評估發現，二氧化碳的排放仍為田間環境衝擊之重要因子，而二氧化碳的排放主要集中於前期作物收穫後，翻打入土內供微生物分解而釋放，因此調整前期作物殘株之去留，評估其對整體環境衝擊之影響。移除作物殘株主要減少二氧化碳及水稻生育時期的甲烷排放，但因碳庫減少，會加速氮分解，兩地區各期作優養化潛勢及酸化潛勢皆呈顯增加的趨勢(3 %~10 %)。(圖 27、圖 28)

(1)二期水稻殘株移除

移除二期水稻殘株主要可以少量減少二氧化碳的分解，伴隨著氧化亞氮排放增加。在大雅地區移除二期水稻殘株對各期作甲烷排放量沒有顯著改善(僅降低約 0~7 %)，但在台中場可以有效減少甲烷排放約 50 %，平均減少小麥整期作碳足跡 40%。

(2)小麥殘株移除

小麥殘株移除之設計主要是觀察到一期水稻初期實測有甲烷排放高峰，且田間會有發酵的情況產生，因此模擬小麥殘株之去留對環境衝擊之影響，模擬顯示移除小麥殘株可以減少 10 %~25% 的碳足跡，在台中場減少幅度較為明顯，最多可以減少 50% 甲烷排放。

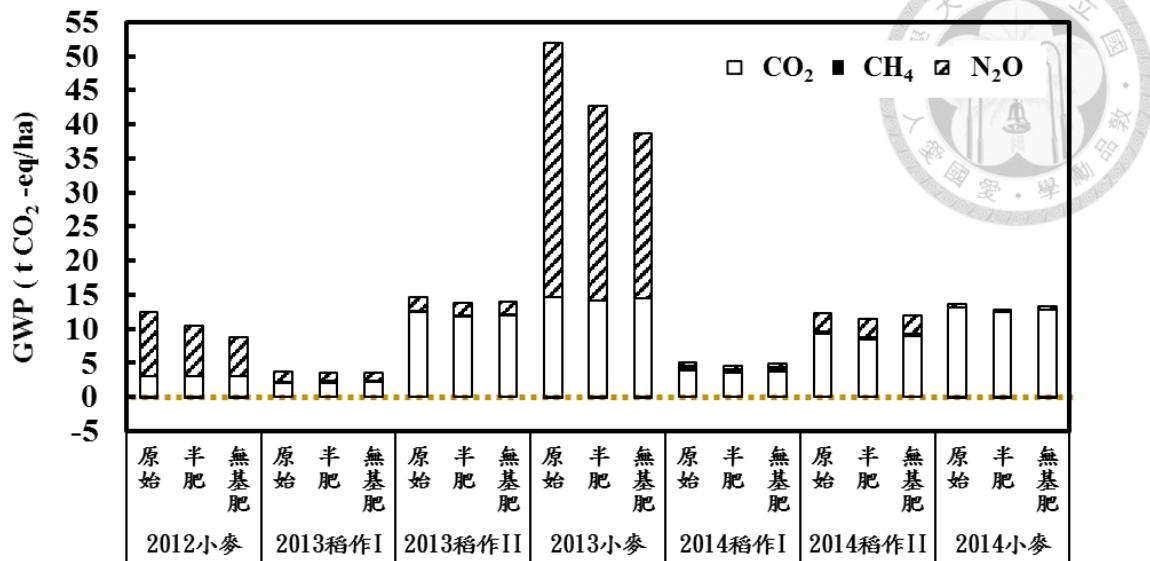


圖 25 大雅小麥肥料改善操作之模擬比較圖。「原始」為本試驗慣行栽培；「半肥」為小麥之肥料用量全部減半；「無基肥」為小麥種植期減少施用基肥，其他次追肥皆照原本處理。

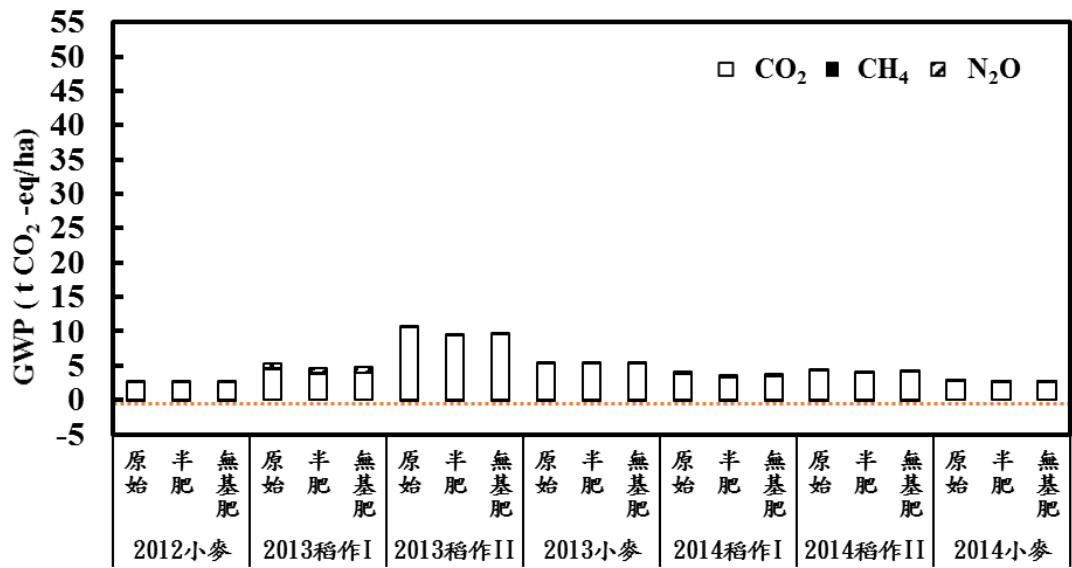


圖 26 台中場小麥肥料改善操作之模擬比較圖。「原始」為本試驗慣行栽培；「半肥」為小麥之肥料用量全部減半；「無基肥」為小麥種植期減少施用基肥，其他次追肥皆照原本處理。

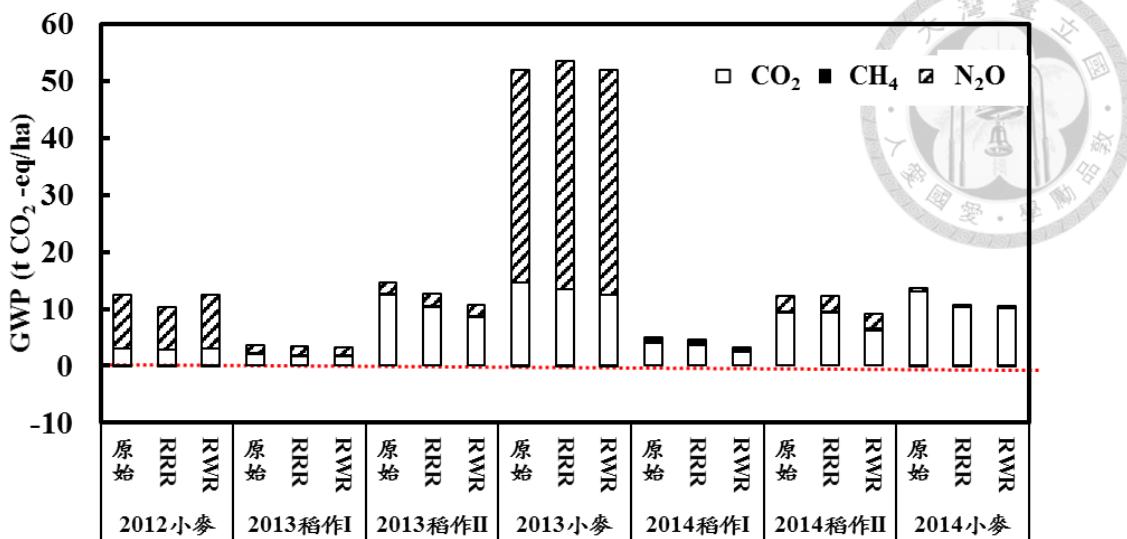


圖 27 大雅植物殘株殘留之模擬比較圖。「原始」為本試驗慣行栽培；「RRR」為二期水稻殘株移除 (remove rice residue)；「RWR」為小麥殘株移除 (remove wheat residue)。

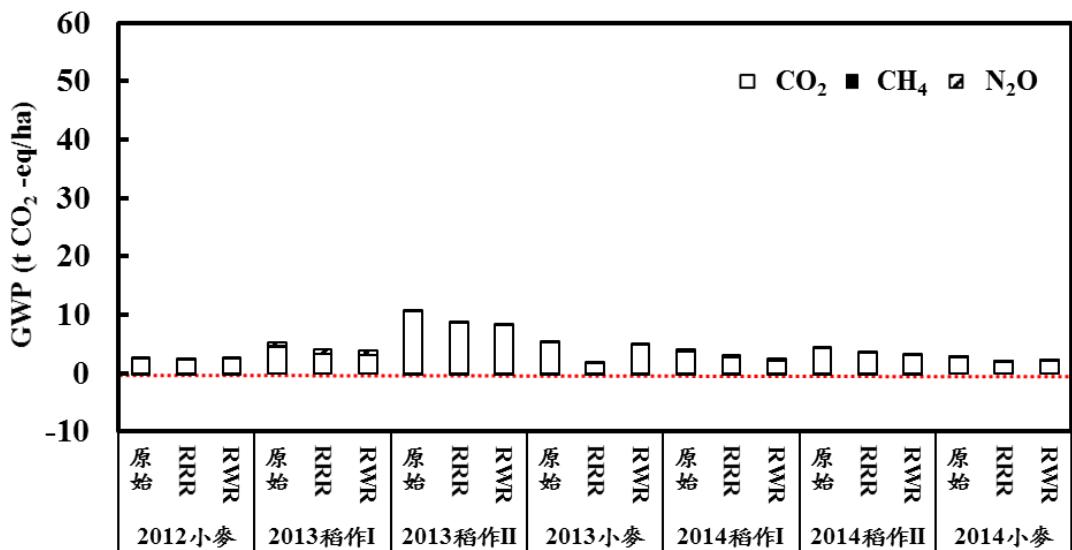


圖 28 台中場植物殘株殘留之模擬比較圖。「原始」為本試驗慣行栽培；「RRR」為二期水稻殘株移除 (remove rice residue)；「RWR」為小麥殘株移除 (remove wheat residue)。

3. 二期水稻休耕

由於前人研究顯示二期水稻造成之環境衝擊較大，而想要以種植小麥(旱作)取代水田，因此本試驗模擬二期水稻休耕之情況，由於 DNDC 模擬之限制，因此僅模擬 2013 年及 2014 年二期水稻休耕之情況。

結果顯示，二期水稻休耕主要影響的是休耕期間及小麥種植期的二氧化碳的排放(來自於前期殘株分解)，但是在休耕期間田間仍會排放溫室氣體，約莫是一半至六成的排放量，主要為減少二氧化碳及甲烷排放，在優氧化及酸化的環境衝擊部分則會有 80~90% 的減量。(圖 29)

二期作休耕雖然可以減少兩期作的二氧化碳排放，但同時也會增加小麥種植期間氧化亞氮之排放，像在 2013 年田間有殘留過多硝酸態氮而導致小麥種植初期排放大量氧化亞氮，因此二期作休耕並沒有辦法減少 2013 年小麥的環境衝擊，但是若以二氧化碳排放為主的 2014 年小麥，則可以降低百分之 60 左右的環境衝擊。

另外，已知氧化亞氮的釋放主要來自於田間土壤乾濕交替時期，在沒有二期水稻的情況下，乾燥的土壤遇上小麥播種的灌水，氧化亞氮的排放更為提升。一般而言，小麥播種、基肥與灌水會在同一天完成，因此推測 2013 年冬裡作小麥初期的大量排放的原因為灌水與施肥同一天，土壤水分劇變與提供大量氮源，所以亦進行灌水時間調整及基肥調整，發現預先灌水，避開同天施用基肥僅些微減量，但減少施用基肥仍有百分之 10~20 的改善效果，因此減少施用基肥為目前最有效的方法之一。



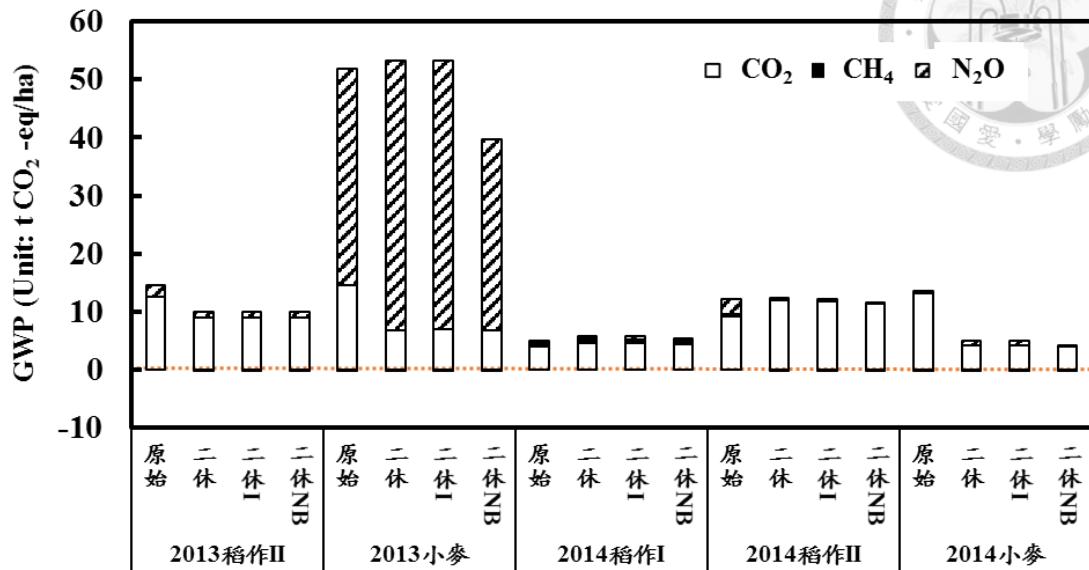


圖 29 大雅稻麥輪作試驗田二期休耕之模擬比較圖。「原始」為本試驗慣行栽培；「二休」為二期作休耕，但小麥種植時間往前挪十天，其餘皆維持原本之栽培方式；「二休 I」為二期作休耕，小麥播種前十天預先灌水一次；「二休 NB」為二期作休耕，小麥播種前十天預先灌水一次，且不施用小麥基肥。

陸、 討論



一、DNDC 模擬情況

1. 田間溫室氣體模擬之差異

比對實際田間抽氣情況與 DNDC 模擬之結果，實際抽氣的趨勢雖然相近，但排放量換算之碳足跡仍有十倍左右之差異，推測可能是人為操作過程中擾動土壤，造成土壤中氣體大量釋放，而增加了田間氣體排放。另亦需注意的因子為本試驗使用的 GC 灵敏度較差，再配合人為操作計算濃度，因此其中可能有諸多誤差並非實際田間產生，因此未來還待有更準確的田間氣體監測資料作為輔助，本次的結果僅能確認整體模擬結果與前人實測田間溫室氣體排放結果趨勢相近 (Ma et al., 2013; 柯和賴, 2005)，主要排放都集中在前期，甲烷主要在水田釋放，在旱田期間會有零星減量效果，氧化亞氮主要是旱田期間排放，在水田期間有零星小排放，因此應用 DNDC 於模擬台灣之稻麥輪作溫室氣體排放為可行之方法，但仍需要長期之觀測資料才能使模式更貼近實際情況。

2. 產量模擬

產量模擬的用途為使植株的生長與養分吸收與實際情況相符，但本次模擬雖然已經蒐集了植株碳氮比及植株分配比，模擬情況仍與實際產量還有部分差異，其中小麥之產量差異最大，主要原因為小麥濕害及鳥害無法模擬，鳥害與濕害會造成 50~70 % 以上的減產；水稻產量差異也有些來自於病害的發生，因此未來產量設定還需要更精確之模擬，或者是一些逆境設定，才可以更準確預測生長情況。

二、大雅與台中場稻麥輪作之環境衝擊差異



1. 地區間差異

兩地區在溫室效應、酸化、優養化之表現皆不一致，大雅在糧食生產過程中普遍較台中場來的高，從(Ma et al., 2013; 張 et al., 2013)等人在稻麥輪作田區之試驗結果顯示肥料使用差異及土壤性質(土壤質地、土壤 pH 值、土壤容重)確實會影響，土壤質地的差別可以改變到 50 % 的溫室效應衝擊，在黏質壤土的環境下，氧化亞氮排放較多，而二氧化碳排放較少，且同時土壤 pH 值會影響氧化亞氮釋放，pH 值越高，氧化亞氮釋放減少；土壤容重(bulk density)越大，則溫室氣體排放越小。

另外肥料施用，也會顯著影響溫室氣體排放，氮肥的影響為最重要的部分，大雅地區施用肥料量較台中場高，過多的肥料會使氮素進行脫氮或硝化作用，提高溫室氣體排放，像 2013 年冬裡作小麥氧化亞氮排放量高，主要來自於田間有過多的銨態氮，供給過多反應物，使得當期作小麥為本試驗在模擬糧食生場過程中對環境衝擊最大的一個期作。因此推測兩地區溫室氣體排放表現情況不同主要原因為肥料施用與土壤性質等差異構成。

2. 年度間差異

在小麥的生產過程中，其溫室氣體排放變異較水稻為高，主要是近年來氣候變遷下，冬季溫度忽冷忽熱，且降雨事件分布有明顯差異(2013 年偏冷且過多雨量、2014 年過熱及過於乾燥)，由張, et al. (2013)等人之研究顯示，降雨量提升 10% 會增加氧化亞氮的排放，推測是該狀態土壤介於脫氮作用及硝化作用之間，因此排放量大幅增加；而在小麥生長季節溫度升高，氧化亞氮的排放也會減少，這可以解釋大部分本試驗在模擬三年冬裡作小麥中所產生之差異。

三、台灣稻麥輪作與其他耕作系統之比較



1. 台灣稻麥輪作與國外稻麥輪作之環境衝擊比較

目前多數研究僅對於稻麥輪作的田間溫室氣體排放進行調查，Ma, et al. (2013)等人在中國江蘇對不同肥料管理的稻麥輪作田(一稻一麥)進行盤查，整年度的田間溫室效應為 5.7~9.7 噸二氧化碳當量(生產每公斤穀粒會排放 0.4~0.75 公斤二氧化碳當量)；另外也有 Lv 等人(2010)在中國江蘇亦對稻麥輪作田的溫室氣體排放進行評估，整年度的田間溫室效應為 6.49 噸二氧化碳當量。

而在本試驗中，台中場整年度的稻麥輪作所造成的環境衝擊(碳足跡)為 15~25 噸二氧化碳當量，而在大雅則是排放 36~76 噸二氧化碳當量；換算成生產單位糧食，大雅地區平均生產每公斤穀物排放 2.5~5 公斤二氧化碳當量，而台中場為 1.6~3.2 公斤二氧化碳當量。相較於中國稻麥輪作生產，無論是單位面積溫室氣體排放或者是生產單位糧食，台灣稻麥輪作所造成的環境衝擊皆較高，不過若以一年三期與一年兩期來計算，台中場的單位面積溫室氣體排放並未與中國相距太遠。

2. 台灣稻麥輪作與國外水稻、小麥生產之環境衝擊比較

國外有諸多研究對於小麥及水稻的生產過程進行生命週期評估，以生產模式最接近台灣的日本為例，Hokazono 等人 (2012)對日本慣型、環境有善及有機栽培水稻進行生命週期評估，結果顯示日本每公頃水田釋放 6.3~7 噸二氧化碳當量、49~90 公斤硝酸根當量、33~36 公斤磷酸根當量及消耗 2.1~2.3 GJ。換算成生產每公斤水稻則會釋放 1.2~2.5 公斤二氧化碳當量，與台灣稻麥輪作生產所造成之環境衝擊相近。

Wang 等人(2014)對中國的玉米小麥輪作進行生命週期評估，在玉米小麥輪

作系統中，生產每公斤穀物產生 6.8 公斤二氧化碳當量，而 Meisterling 等人 (2009) 亦對於美國生產的有機及慣型小麥進行評估，結果顯示生產每公斤有機小麥及慣型小麥所產生之碳足跡分別為 0.238 及 0.283 公斤二氧化碳當量，但是當在美國境內運輸兩千公里時，生產每公斤小麥的碳足跡會再增加 0.14 公斤二氧化碳當量，因此雖然台灣本土稻麥輪作生產所造成的環境衝擊較美國生產為高，但若考慮稻從海外運輸所造成的碳足跡，台灣小麥仍具有在地生產之優勢。

3. 台灣稻麥輪作與兩期水稻連作之比較

本研究室先前已在桃園新屋對台灣兩年期水稻栽培進行評估，結果顯示，台灣一期水稻生產每公斤白米約排放 0.71 公斤二氧化碳當量而二期作則是 1.8 公斤二氧化碳當量(吳, 2013)，而在本試驗中，大雅一期作生產一公斤白米平均排放 1.3 公斤二氧化碳當量，二期作則是 3.5 公斤二氧化碳當量；在台中場一期作生產一公斤白米為 1.7 公斤二氧化碳當量，二期作則為 3.2 公斤二氧化碳當量，上述結果有符合前人研究二期水稻環境衝擊較大之結論。但大雅在生產每公斤小麥穀粒平均會產生 5.3 公斤二氧化碳，而在台中場則是 1.7 公斤二氧化碳，表示在台灣生產小麥並不一定會減少糧食生產之環境衝擊，因此需要對小麥栽培進行改良，才能真正達到氣候智慧型的耕作系統。

四、改善稻麥輪作之可能操作

由上述模擬結果，雖然在這兩年七期作的模擬過程中，小麥的種植過程中所造成之環境衝擊並不一定低於二期水稻，但其變異幅度大，代表若能有效調整栽培方式，仍可以建構環境親和的小麥栽培系統。前人整理五種在稻麥輪作系統可能的溫室效應調適方法；(1) 調整有機質投入、(2)增加氮肥利用效率、(3)調整水分管理、(4)品種改良及(5)增加土壤有機碳(Wassmann et al., 2004)。

傳統稻麥輪作區長年在收穫後燃燒稻草或麥桿，主要是為了方便下期作栽培，

且因為減少土壤碳氮比，降低氮在土壤中固定作用，但若不燒稻草，則會直接影響土壤中的碳庫，特別是會影響甲烷的排放，但由於溫度會改變甲烷排放，因此目前還需要更多研究探討田間殘株對溫室氣體減量之應用。

氮肥的利用效率僅約 20~60 %，在田間會有多重形式流失，如氨的揮發($\text{NH}_3 \uparrow$)、脫氮作用(N_2 、 NO 、 $\text{N}_2\text{O} \uparrow$)、硝化作用(NO 、 $\text{N}_2\text{O} \uparrow$)等，所以氮肥利用效率不僅是排放氧化亞氮增加溫室效應，同時其他相關的氮排放也會造成其他環境衝擊。調控氧化亞氮排放的方式主要是控制硝化作用與脫氮作用的平衡及限制為生物氮在土壤中的轉換。IPCC 預設氧化亞氮從氮肥流失率為 1.25 %，但前人研究顯示氧化亞氮的可以達到 6.8 % 的氮肥(Aulakh et al., 2001)。目前已知在肥料外裹覆硝化抑制劑可以有效減少氧化亞氮生成，不過由於成本仍然過高，不被農民所採用，因此目前也有很多研究的精準施肥(site-specific nutrient management, SSNM)，是在台灣推廣較為可行的一個方法，針對土壤、環境及作物作一個整合的調整，在(Ma, et al., 2013)等人的研究結果，精準施肥可以有效降低約 16% 的溫室效應及維持產量，但 Wang 等人(2014)發現肥料與前期作物殘株有明顯的交互效應，減量肥料與保持殘株可以維持產量，並減少溫室氣體排放，達到最佳的組合效果。就 2014 冬裡作小麥之觀察，肥料減少施用雖然會減少小麥穀粒蛋白質含量，但對產量沒有顯著差異，且同時若能透過肥料減少施用而增加台灣小麥蛋白質含量多樣性，也可以增加台灣小麥之用途(如：低蛋白用於釀酒；高蛋白用於糕餅業)。

另外，前人研究也顯示減少耕犁會減少二氧化碳排放(除了田間排放還有機械操作)，不過就在兩年模擬情況下，在兩地區皆僅有第一年小麥栽培不整地會有溫室氣體排放減量之效果，後續土壤累積過多殘株，在第二年的模擬結果上並沒有溫室氣體減量之效果(持平)，推測是模擬時間不夠長，所以短期內還看不出趨勢，未來還需要更長期的試驗才能確定小麥不整地栽培對於台灣稻麥輪作之應用性。

水分管理的部分，由於此兩試驗田皆有採用間歇性灌水，在水田水分管理上

並無明顯問題，模擬過程中也沒有大量排放高峰，需注意的為避免土壤全乾的情況，因為當下次降雨或灌水則會有氧化亞氮大量釋出，因此適當的維持田間土壤水分為中要目標。

配合本試驗模擬之結果，推薦台灣稻麥輪作可能操作組合如下：水稻採慣型栽培，栽培中間落實間歇灌水，且避免硝酸態氮及銨態氮的肥料不平衡施用搭配小麥不施用基肥為最有效之組合方法。

五、台灣一年兩作稻麥輪作之可行性

本試驗所合作的大雅農戶為原先即長期採用稻麥輪作之農民，該農民有自己的育苗場及收穫機，所以小麥收穫及一期水稻插秧，皆有自身操作的能力，但對於其他如果零星農民想要投入一年三作稻麥輪作，易因氣候而延遲小麥收穫，延後一期水稻種植時間，但代耕業者不一定能配合，成為稻麥輪作之困難點。

因此本試驗擬延伸到未來一年兩作的稻麥輪作栽培模式(二期水稻休耕)，目前在台中場三作之稻麥輪作模擬結果，小麥生產的環境衝擊較二期水稻為低，且產量也與二期水稻並無明顯差距，同時小麥最多僅需要淺耕讓種子與土壤接觸而不似水稻需要粗整地及細整地(整平)，可以節省工時與成本，且目前小麥收購價約為每公斤 30 元，不論經濟或環境親和等面向，稻麥輪作皆有其發展性。

另外有一種可能的推廣模式為跳脫目前的栽培期作概念，將一期水稻種植時間從四五月~八九月配合小麥十月~三月的種植期間，也可以將農忙時期分開，減少在收穫期的壓力，惟目前皆沒有直接可使用的品種，水稻的部分則可能需考慮水稻抽穗期遇上台灣七八月的颱風季，提升水稻種植之風險，而小麥的品種部分雖然已有諸多品系試驗，但目前仍未有大規模的區域試驗，尚未可以有直接利用之品種，且農民初期可能無法良好掌握小麥生育情況，仍需考慮到農民收益成面，因此在推廣一年兩作稻麥輪作前仍需要一年三作稻麥輪作之輔助系統，以方便農民轉型，達到推廣一年兩作稻麥輪作栽培模式。

另外，在微調種植期間的稻麥輪作下糧食生產所造成的環境衝擊尚無法有明確預測，主要是應用的品種不同，在生育參數上有不同特性，以現有參數帶入預測有失準確度，未來若有預備品種供參考，可再進一步進行模擬預測，並提供環境親和的栽培建議。



六、其他田間栽培現況

目前台灣小麥的種植區域，仍以中南部海岸為最佳種植區域，主要原因為濕度較低，而台灣北部與東部因為濕度太高，植株生長勢較差，連帶影響產量與品質。同時，小麥種植期，農民通常僅在初期灌水，但大雅農民張景洲先生在小麥充實期灌水一至兩次，可以有效延長穀粒充實期，增加產量，提供充足水分使細胞分裂與生長，雖然在模擬田間溫室氣體排放過程中此灌水記錄並沒有影響田間溫室氣體排放，但卻有實際增加產量之效果，此與澳洲農部與美國 Nebraska 在推廣生產高產量小麥之方針相似，應將此水分管理知識推廣給農民，提升產量後也可更加強農民種植意願，以建立高產、高品質及環境親和的稻麥輪作系統。

柒、 總結與未來展望



本試驗目的為建立台灣本土氣候智慧型稻麥輪作栽培系統，經過兩年七期作的調查與生命週期評估結果，台灣稻麥輪作整體的環境衝擊較國外為大，而稻麥輪作整體環境衝擊的主要熱點為田間排放影響，而田間排放有諸多影響因子，如農業操作、土壤性質、氣候、作物等。其中二期水稻與前人研究相似，其較一期水稻生產所造成之環境衝擊為高，而小麥在三期作之間則變異較大，單期作最高及最低環境衝擊皆在小麥種植期，代表小麥栽培有改善空間。而後以 DNDC 模式模擬不同組合操作可能會調適的環境衝擊，調整施肥型態仍為目前最簡單也最有效之調適方法，可以有效減少一至兩成的碳足跡；調整植株殘株殘留的比例短期主要可以減少二氧化碳的排放，但與整地的效應一樣，都是屬於要長期操作才能更確定影響整體排放之情況，因為像是土壤碳庫的改變及土壤性質改變都非一兩年內可以表現的。不過已經有諸多研究關於長期田間操作對土壤影響，因此未來發展低整地、精準施肥的稻麥輪作仍具有兼顧糧食安全及氣候變遷調適的能力。

目前台灣有採行稻麥輪作之地區主要是一年三作，不過未來推廣一年兩作的稻麥輪作若僅照目前模擬情況，二期水稻休耕，一期水稻的種植時間仍被限縮，因此有人提出育成稻麥輪作專用的水稻品種的想法，約五月插秧至九月收穫，這樣可以避免水稻、小麥兩個期作互相擠壓，不乏為未來可利用的一種方法。

稻麥輪作具有諸多優點，期望本試驗提出環境親和的方針可以在實際田間應用，以便建立未來台灣本土的氣候智慧型稻麥輪作系統。

捌、 文獻



王明新,夏訓鋒,劉建國,柴育紅,雷春生.2009.太湖地區高產水稻生命週期評價.

農業環境科學學報.28(2) : 420-424.

吳以健,楊志維,盧虎生.2013.稻作環境親和栽培之環境影響評估.臺中區農業改良場特刊 119:85-98.

吳以健.2009.溫度環境與水稻穀粒產量及品質之相關性.碩士論文.國立台灣大學農藝學系.台北,台灣.

姚銘輝,陳守泓,陳述.2006.台灣水稻田溫室氣體排放之估算研究.台灣農業研究.55(4) : 280-293.

柯光瑞.2005.台灣北部現行耕作制度對農田土壤溫室氣體(CO₂、CH₄、N₂O)釋出之影響.碩士論文.國立台灣大學農業化學系.台北,台灣.

孫志鴻,賴朝明.1998.畜牧溫室氣體測定講習會論文暨講義集。國立臺灣大學農化系.台北,台灣.

張嘯林,潘曉健,熊正琴,王金陽,楊波,劉英烈,劉平麗.2013.應用 DNDC 模型分析管理措施對稻麥輪作系統 CH₄ 和 N₂O 綜合溫室效應的影響.應用生態學報.24(3) : 690-696.

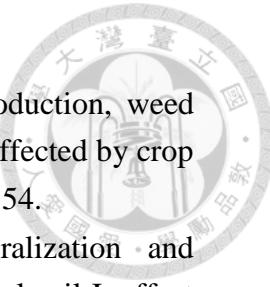
陳筱鈞.2013.台灣不同栽培區氣象因子與小麥品質之相關性研究.碩士論文.國立台灣大學農藝學系.台北,台灣.

溫清光,張智華.2008.台灣農業非點源汙染.農業非點源污染研討會論文集.行政院農業委員會農業試驗所,中華土壤肥料學會.23-40.

潘瀅如.2008.台灣地區稻米生產之生命週期評估.碩士論文.國立台北大學自然資源與環境管理研究所.台北,台灣.

蕭聖哲.2014.不同土地利用型態與模擬增加氮沉降對溪頭地區土壤溫室氣體通量之影響.碩士論文.國立台灣大學森林環境暨資源學系.台北,台灣.

謝華偉,蔡岳峻,謝清祿.2007.台灣主要汽油類農業機械耗油量調查分析.農業機



- Arshad, M.A., K.S. Gill and R.C. Izaurralde.** 1998. Wheat production, weed population and soil properties subsequent to 20 years of sod as affected by crop rotation and tillage. *Journal of Sustainable Agriculture* 12: 131-154.
- Aulakh, M.S., T.S. Khera and J.W. Doran.** 2000. Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil I. effect of nitrate and ammoniacal nitrogen. *Biology and Fertility of soils* 31: 162-167.
- Aulakh, M.S., T.S. Khera, J.W. Doran and K.F. Bronson.** 2001. Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure. *Biology and Fertility of Soils* 34: 375-389.
- Blengini, G.A. and M. Busto.** 2009. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). *Journal of environmental management* 90: 1512-1522.
- Brentrup, F., J. Küsters, H. Kuhlmann and J. Lammel.** 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. *European Journal of Agronomy* 20: 247-264.
- Bullock, D.G.** 1992. Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences* 11: 309-326.
- Cai, Z., T. Sawamoto, C. Li, G. Kang, J. Boonjawat, A. Mosier, et al.** 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4), 1107.
- Chen, C.L., C.H. Cheng, C.Y. Liao, T.Y. Ho, P.Y. Wu, J.L. Tsai, et al.** 2013. Impact of fertilization on greenhouse gases emission and its mitigation. *Strategic Approach to Integrate Practical Technologies for Climate-Smart Crop Production*. Taiwan Agricultural Research Institute (TARI)/Food and Fertilizer Technology Center (FFTC), Taichung, Taiwan
- Farooq, M., H. Bramley, J.A. Palta and K.H.M. Siddique.** 2011. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30: 491-507.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Executive Summary *In: Climate-Smart Agriculture Sourcebook 2013*.FAO, Rome.
- Fumoto, T., K. Kobayashi, C. Li, K. Yagi and T. Hasegawa.** 2007. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology* 14: 382-402.
- Gornall, J., R. Betts, E. Burke, R. Clark, J. Camp, K. Willett, et al.** 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*

Biological Science 365: 2973-2989.

Greenhut, R.F., R. Dufour, A.M. Kendall, E.B. Strong and K.L. Steenwerth.

2013. Life cycle assessment in agricultural systems.24.

Hatfield, J.L., K.J. Boote, B.A. Kimball, L.H. Ziska, R.C. Izaurralde, D. Ort, et al.

2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. Agronomy Journal 103: 351.

Hokazono, S. and K. Hayashi. 2012. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: a comparison among three rice production systems in Japan. Journal of Cleaner Production 28: 101-112.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Geneva, Switzerland.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kasmaprapruet, S., W. Paengjuntuek, P. Saikhwan and H. Phungrassami. 2009. Life cycle assessment of milled rice production: case study in Thailand. European Journal of Scientific Research 30: 195-203.

Katayanagi, N., Y. Furukawa, T. Fumoto and Y. Hosen. 2012. Validation of the DNDC-Rice model by using CH₄ and N₂O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management. Soil Science and Plant Nutrition 58: 360-372.

Li, C., S. Frolking, G.J. Crocker, P.R. Grace, J. Klír, M. Körchens, et al. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. Geoderma 81: 45-60.

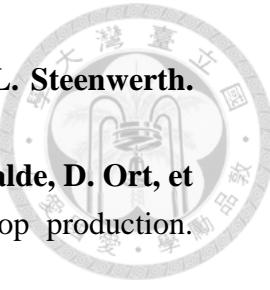
Li, C., S. Frolking and R. Harriss. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. Global biogeochemical cycles 8: 237-254.

Linquist, B., K.J. Groenigen, M.A. Adviento-Borbe, C. Pittelkow and C. Kessel. 2012. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. Global Change Biology 18: 194-209.

Lipper, L., P. Thornton, B.M. Campbell, T. Baedeker, A. Braimoh, M. Bwalya, et al. 2014. Climate-smart agriculture for food security. Nature Climate Change 4: 1068-1072. doi:10.1038/nclimate2437.

Lobell, D.B. and S.M. Gourdji. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. Plant physiology 160: 1686-1697.

Lv, Y., S.Z. Gu and D.M. Guo. 2010. Valuing environmental externalities from rice-wheat farming in the lower reaches of the Yangtze River. Ecological



Economics 69: 1436-1442.

Ma, Y.C., X.W. Kong, B. Yang, X.L. Zhang, X.Y. Yan, J.C. Yang, et al. 2013.

Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice–wheat rotations with integrated soil–crop system management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 209-219.

Matson, P.A. 1998. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer Management. *Science* 280: 112-115.

Meisterling, K., C. Samaras and V. Schweizer. 2009. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *Journal of Cleaner Production* 17: 222-230.

Ortiz-Monasterio, I., R. Wassmann, B. Govaerts, Y. Hosen, N. Katayanagi and N. Verhulst. 2010. Greenhouse gas mitigation in the main cereal systems: rice, wheat, and maize. In: M. P. Reynolds, editor *Climate Change and Crop Production*. pp. 151-176.

Ortiz, R., K.D. Sayre, B. Govaerts, R. Gupta, G.V. Subbarao, T. Ban, et al. 2008. Climate change: can wheat beat the heat? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126: 46-58.

Saharawat, Y.S., B. Singh, R.K. Malik, J.K. Ladha, M. Gathala, M.L. Jat, et al. 2010. Evaluation of alternative tillage and crop establishment methods in a rice–wheat rotation in North Western IGP. *Field Crops Research* 116: 260-267.

Sander, B.O. and R. Wassmann. 2014. Common practices for manual greenhouse gas sampling in rice production: a literature study on sampling modalities of the closed chamber method. *Greenhouse Gas Measurement and Management* 4: 1-13.

Sapkota, T., M. Rai, L. Singh, M. Gathala, M. Jat, J. Sutaliya, et al. 2014. Greenhouse gas measurement from smallholder production systems: guidelines for static chamber method. CIMMYT, New Delhi, India.

Smith, K., T. Ball, F. Conen, K. Dobbie, J. Massheder and A. Rey. 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* 54: 779-791.

Subash, N., B. Gangwar, S. Singh, A.K. Koshal and V. Kumar. 2014. Long-term yield variability and detection of site-specific climate-smart nutrient management practices for rice–wheat systems: an empirical approach. *The Journal of Agricultural Science* 152: 575-601.

Tubiello, F.N., M. Salvatore, S. Rossi, A. Ferrara, N. Fitton and P. Smith. 2013. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters* 8: 015009.

Verhulst, N., B. Govaerts, E. Verachtert, A. Castellanos-Navarrete, M.

Mezzalama, P. Wall, et al. 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. In: R. Lal and B. A. Stewart, editors, Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality CRC Press, Boca Raton. p. 137-208.

Wang, C., X. Li, T. Gong and H. Zhang. 2014. Life cycle assessment of wheat-maize rotation system emphasizing high crop yield and high resource use efficiency in Quzhou County. *Journal of Cleaner Production* 68: 56-63.

Wassmann, R., H. Neue, J. Ladha and M. Aulakh. 2004. Mitigating greenhouse gas emissions from rice-wheat cropping systems in Asia. *Tropical Agriculture in Transition—Opportunities for Mitigating Greenhouse Gas Emissions?* Springer. p. 65-90.

Yan, X., H. Akimoto and T. Ohara. 2003. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia. *Global Change Biology* 9: 1080-1096.



附表一 大雅稻麥輪作試驗田之栽培曆

	2012 冬裡作	2013 一期	2013 二期	2013 冬裡作	2014 一期	2014 二期	2014 冬裡作
整地	11/18 淺耕	3/26 粗整 3/28 細整	7/25 粗整 7/27 細整	11/20 淺耕	4/3 粗整 4/5 細整	7/14 粗整 7/19 細整	11/17 淺耕
播種/插秧	11 月 18 日	3 月 30 日	7 月 29 日	11 月 20 日	4 月 7 日	7 月 25 日	11 月 17 日
收穫	3 月 25 日	7 月 23 日	11 月 19 日	4 月 4 日	7 月 13 日	11 月 15 日	3 月 28 日
基肥	11/18 39 號複合肥/400 kg	3/28 39 號複合肥/400 kg	7/26 39 號複合肥/400 kg	11/20 39 號複合肥/400 kg	4/5 39 號複合肥/400 kg	7/18 39 號複合肥/400 kg	11/16 39 號複合肥/350 kg
一追	12/3 硫酸銨/300 kg	4/10 硫酸銨/ 300 kg	8/8 硫酸銨/ 280kg	12/5 硫酸銨/300 kg	4/17 5 號複合肥/400 kg	8/5 硫酸銨/300kg	12/1 寶效 4 號/400 kg
二追	12/20 43 號複合肥/400 kg	4/22 5 號複合肥/300 kg	8/16 5 號複合肥/400 kg	12/20 特 43 號複合肥/ 320 kg		8/18 5 號複合肥/380 kg	12/16 特 43 號複合肥/400 kg
穗肥		5/26 43 號複合肥/400 kg	9/19 43 複合肥/250 kg		5/28 43 號複合肥/120 kg	9/9 43 號複合肥/300 kg	



附表 一大雅稻麥輪作試驗田之栽培曆(續)

	2012 冬裡作	2013 一期	2013 二期	2013 冬裡作	2014 一期	2014 二期	2014 冬裡作				
病蟲害防治	12/25 本達隆溶液 2 L	3/30 丁拉免速隆 30 kg 3/31 耐克螺粉劑 0.5 kg 5/10 加保扶 1.3 L 依普座水懸劑 0.8 L 三賽唑 0.4 L 6/24 撲滅松乳劑 1.2 L 加保利 0.8 kg	50% 撲滅松乳劑 1 L 20% 芬化利水基乳劑 0.6 L 16% 可尼丁水性粒劑 0.5 L 12% 依普座水懸劑 0.7 L	12/25 本達隆溶液 3 L 氟氯比乳劑 3 L 2/20 百克敏乳劑 0.4 L	6/5 50% 撲滅松乳劑 0.8 L 0.8 L 12% 依普座水懸劑 6/20 德芬諾乳劑 0.5 L 12% 依普座水懸劑 0.6 L 16% 益達胺溶液 0.5 L	8/25 6% 撲殺熱粒劑 30 kg 9/20 依普座水懸劑 0.6 L 撲滅松乳劑 0.8 L 芬化利乳劑 0.4 L 10/12 依普座水懸劑 0.6 L 賽達安水溶性粒劑	12/24 本達隆溶液 0.3L 氟氯比乳劑 0.1L 2/13 百克敏 0.4 L				
灌水時間	3/1	3/26~4/9 4/13~1/21 4/24~4/30 5/7~5/9 5/15~5/17 5/19~5/22 5/25~5/26	6/3~6/4 6/8~6/9 6/13~6/14 6/18~6/19 6/23~6/24 7/1~7/2	8/1~8/7 8/11~8/15 5/18~8/20 9/5~9/7 9/11~9/12 9/17~9/18	9/25~9/26 10/2~10/3 10/12~10/13 10/18~10/19 10/25~10/26 11/2~11/3	11/20 12/18 1/25	4/9~5/8 5/16~5/17 5/21~5/21 5/25~5/26 5/31~5/31 6/4~6/5	6/8~6/8 6/12~6/13 6/17~6/25 6/30~7/1 7/6~7/6 7/9~7/9	7/27~8/20 8/27~8/27 9/1~9/2 9/6~9/7 9/11~9/12 9/17~9/17 9/22~9/22	9/27~9/28 10/2~10/2 10/7~10/7 10/12~10/12 10/18~10/19 10/26~10/26 11/2~11/8	11/29 12/14 1/25



附表 二 台中場稻麥輪作試驗田之栽培曆

	2012 冬裡作	2013 一期	2013 二期	2013 冬裡作	2014 一期	2014 二期	2014 冬裡作	2015 一期
整地	11/16 淺耕	3/15 粗整 3/22 細整	7/26 粗整 8/5 細整	12 月 2 日	4/14 粗整 4/16 細整	8/1 細整	11/21 淺耕	3/26 粗整 3/30 細整
播種/ 插秧	11 月 19 日	3 月 25 日	8 月 8 日	12 月 2 日	4 月 19 日	8 月 4 日	11 月 21 日	3 月 31 日
收穫	3 月 12 日	7 月 18 日	11 月 28 日	4 月 10 日	7 月 15 日	10 月 23 日	3 月 25 日	
基肥	11/16 39 號複合肥 /400 kg	3/21 39 號複合肥/ 200 kg	7/29 39 號複合肥/ 250 kg	12/2 39 號複合肥/ 400 kg	4/16 39 號複合肥/ 400 kg	8/1 39 號複合肥/ 400 kg	11/21 39 號複合肥/ 400 kg	3/30 39 號複合肥/ 400 kg
一追	12/10 硫酸銨/200 kg	4/5 硫酸銨/ 200 kg	8/26 硫酸銨/ 200 kg		4/29 硫酸銨/ 200 kg	8/18 1 號複合肥/ 200 kg	12/26 5 號複合肥/ 200 kg	4/9 硫酸銨/200 kg
二追	12/20 硫酸銨/200 kg 氯化鉀/ 50kg	4/16 1 號複合肥/ 300 kg	9/6 1 號複合肥/ 150 kg	12/25 尿素/ 200 kg				4/29 5 號複合肥/200 kg
穗肥		6/3 硫酸銨/ 200 kg	10/4 硫酸銨/ 200 kg				1/5 尿素 100kg	6/1 5 號複合肥/200 kg



附表二 台中場稻麥輪作試驗田之栽培曆(續)

	2012 冬裡作	2013 一期	2013 二期	2013 冬裡作	2014 一期	2014 二期	2014 冬裡作	2015 一期
病蟲害防治	<p>11/20 施得圃 2.5L 12/27 4.64%加保扶水懸劑 1.2L 1/4 10%賽速安 0.2L</p> <p>3/27 3.63%全期除 25kg 4/1 丁基拉草 30kg 4/8 百速隆 0.35L 4/29 芬普尼 20 kg 5/17 穗旺 1L 鍾四環 微素 1L 賽洛寧 0.5L 菲克利 0.7L 5/31 穗 旺 1L 鍾四環微素 1L 賽洛寧 0.5L 菲克 利 0.7L 6/17 穗旺 1L 賽洛寧 0.5L 菲克 利 0.7L 布芬淨 0.8L</p>	<p>8/1 苦茶粕 100 kg 丁基拉草 30 kg 9/9 芬普尼 20 kg 9/23 12/25 本達隆溶液 3 L 氟氯比乳劑 3 L 0.7L 10/18 穗旺 1L 菲克利 0.7L 布芬 淨 0.8L 芬化利 0.4L</p>		<p>4/22 全期除 25 kg 4/29 芬普尼 20 kg 5/12 賽洛寧 0.5 L 0.4 L</p>	<p>8/1 苦茶粕 100 kg 丁基 拉草 30 kg 8/7 百速隆 0.35L 芬普尼 20 kg</p>			<p>4/2 全期除 25kg 5/1 芬普尼 20 kg 5/14 賽洛寧 0.5L 培丹 0.8 L</p>
灌水時間	<p>11/20 12/4 1/10 2/7</p> <p>3/14~3/23 3/28~4/13 4/20~4/28 5/10~5/23 5/31~6/3 6/6~6/12 6/20~6/26 7/2~7/6</p>	<p>7/25~7/31 8/5~8/9 8/12~8/16 8/22~8/26 9/16~9/22 10/9~10/15 10/22~10/25</p>	<p>11/20 12/18 1/25</p>		<p>4/15~4/19 4/22~4/25 4/30~5/4 5/19~5/23 5/31~6/5 6/6~6/10 6/20~6/26 7/2~7/7</p>	<p>7/31~8/6 8/8~8/10 8/14~8/17 8/19~8/21 8/22~8/25 8/28~8/31</p>	<p>9/1~9/7 9/15~9/17 9/19~9/23 10/6~10/8</p>	<p>1/15 2/16 1/26</p>