

專 論

臺灣稻作水足跡分析

The Water Footprints of Rice in Taiwan

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士候選人

姚 佩 萱

Pei-Hsuan Yao

東南科技大學
觀光與生態旅遊系
副教授

徐 貴 新

Guey-Shin Shyu

環球科技大學
環境資源管理所
助理教授

鄭 百 佑

Bai-You Cheng

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

張 元 馨

Yuan-Hsin Chang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張 尊 國*

Tsun-Kuo Chang

摘 要

為確保糧食安全存量需耗用大量水資源種植水稻，然用傳統的用水標的來說明水資源分配並無法讓消費大眾瞭解用於糧食生產之水資源價值。作物水足跡由藍色水足跡(灌溉用水)、綠色水足跡(土壤水分蒸發散)與灰色水足跡(肥料施用所涉及之水污染稀釋量)所組成，包含完整生長期內之作物需水量與水資源衝擊。本研究引進水足跡概念為分析工具量化臺灣各區域因自然環境與灌溉管理不同，造成水資源使用量之差異，發現臺灣地區 30 年間平均生產 1 公噸稻穀之水足跡為 5,938 m³，遠高於 2000-2004 年間全球生產水稻水足跡平均值 1,325 m³/ton。而臺灣稻作之水足跡中的藍色水足跡為 4,784 m³/ton 佔 80.6%，為水稻生產之主要用水，其次為綠色水足跡 904 m³/ton 佔 15.2%，灰色水足跡則是 250 m³/ton 佔 4.2%。若以期作別來看，一期稻水足跡為 4,754 m³/ton，二期稻水足跡為 7,122 m³/ton，主要受生長期間氣候、產量及休耕因素影響。以上成果將可提供農政與水資源管理之參考。

關鍵詞：水足跡，水稻，灌溉。

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號，tknchang@ntu.edu.tw

ABSTRACT

A large amount of freshwater resource is needed in rice cultivation to maintain food security. However, there is little awareness about the worth of water pay, especially on water-intensive goods. Furthermore, the traditional production-sector-based indicators of water use, which focus on the water withdrawals in the domestic, agricultural and industrial sectors, do not address the sufficient estimation of agricultural water use. To focus on this lack, the water footprint is applied in this study to make a more authentic estimation. The water footprint of a crop is calculated within entire growth period, and it consists of three components: the blue water footprint (consumptive use of irrigation water), the green water footprint (consumptive use of rainwater stored in soil) and the grey water footprint (volume of polluted water associated with the application of fertilizers). In this study, the water footprint concept was used as a tool to quantify the sum of the water use of Taiwanese cultured rice. The national average water footprint of rice is 5,938 m³/ton during 1980 to 2009, with the blue water footprint of 4,784m³/ton (80.6%), the green water footprint of 904 m³/ton (15.2%), and the grey water footprint of 250 m³/ton (4.2%), which is higher than the global average water footprint of rice (1,325 m³/ton) during 2000 to 2004. Meanwhile, the water footprint of first crop rice is 4,754 m³/ton and that of second crop rice is 7,122 m³/ton. The difference between crop seasons results from the weather, productions and fallow. The result above could offer useful information for agriculture policy and water resource management.

Keywords: Water footprint, Rice, Irrigation.

一、前 言

近年來全球氣候變化日趨劇烈，極端氣候如熱浪、乾旱、暴雨、颱風等所造成的災害頻傳，氣象災害發生的強度及頻率均遠比過去增加許多。其中，極端降雨事件強度、次數的增加，不僅改變水文循環，亦會增加水質、水量供應的不確定性，對於水資源供給面造成更大的衝擊和挑戰，使水資源管理的困難度大幅提高，導致某些國家及地區之水資源日益短缺。在此趨勢下，揭露水資源使用訊息成為未來必須進行的一項工作，水足跡(water footprint)做為一種水資源消耗的衡量指標便順勢而生。

水足跡以水資源消費為基礎，有三個主要組成，包含：用來衡量水資源消耗的綠色水足跡(green water footprint)、反映水資源利用情況的藍色水足跡(blue water footprint)，及從水質角度評

估人類活動對水環境污染之情況的灰色水足跡(grey water footprint) (Chapagain and Hoekstra, 2004)。目前國際間已有諸多水足跡應用案例，舉凡單項農、工、商產品(Chapagain *et al.*, 2006; Chapagain and Hoekstra, 2007; Chapagain and Orr, 2008)或產業用水評比，抑或是量化評比世界各國之水足跡(Chapagain and Hoekstra, 2004)、國際貿易對水資源衝擊(Hoekstra and Hung, 2005)，亦有學者探討生質能、生質燃料之水足跡(Gerbens-Leenes *et al.*, 2009)。水足跡有助於國家或企業鑑別其水資源需求、評估水資源依賴情形以及營運相關的水污染排放對水環境的影響等，並針對水足跡估算結果來擬定節水策略、提升水資源使用效率及達到水資源利用最佳化，妥善運用可有效協助管理者改善水資源短缺、分配不均等相關問題。

根據經濟部水利署(以下簡稱水利署)各標的

用水量統計報告(水利署, 2011), 2009 年臺灣地區約降下 896 億 m^3 雨量, 但實際用於供應農業、工業與民生之總用水量僅 190.6 億 m^3 , 突顯出臺灣水資源取用不易之情形。目前臺灣地區的水權分配中, 農業用水約占總用水量之 70%, 其中又以稻作生產灌溉占其 80% 為大宗, 而隨人口成長與產業發展的需要, 每逢枯水期須配合政策實行休耕, 以降低農業用水的需求量, 並適時調撥為民生與工業用水。雖然農業在生產時所耗用水量的比例偏高, 但該用水量並非僅供給作物生長所需而已, 其兼具調節氣候與區域性水分、養分涵養之功能(吳與許, 1995), 面對生活用水和工業用水的競爭, 農業用水需更有效率地運用。

由於水稻生產向來是臺灣地區水資源使用量最龐大之單項產品, 且臺灣農田水利灌溉事業發達、灌溉用水資料完整, 故本研究以水足跡做為衡量指標, 以本土灌溉資料估算臺灣水稻之水足跡。水稻生產受氣候、土壤、耕種方式及灌溉管理操作等因素影響, 使得各國水稻水足跡差異甚大(Chapagain and Hoekstra, 2011)。水足跡概念需對應至虛擬水 virtual water, 亦即農工商產品從生產至送抵消費者手中所需消耗的直接與間接淡水資源量, 故水稻產品的水足跡一般應包括田間作物生長、產品加工、運輸等過程中所消耗的總水資源量, 但 Ridoutt 等(2009)研究結果顯示, 以產品生命週期來看農產品的水足跡, 主要組成部分為農業生產階段(95%以上), 因此, 本研究僅計算臺灣稻作生產田間尺度之藍色、綠色與灰色水足跡之部分, 並據此探討臺灣各區域水稻耕作水資源使用量之差異。

二、研究方法與材料

2.1 研究範圍

臺灣地處熱帶、亞熱帶交界, 氣候溫暖濕潤, 雨量豐沛且全年平均氣溫在 $20^{\circ}C$ 以上, 是水稻的良好生長環境, 國內稻作通常每年分兩期栽培。基於優良的栽培環境以及政府政策獎勵和推廣, 目前稻作成為臺灣最主要農作物, 種植面積與產值皆為農作物之首, 且因人均耕地面積狹小故單位面積產量較高, 2000 至 2009 年間稻穀平

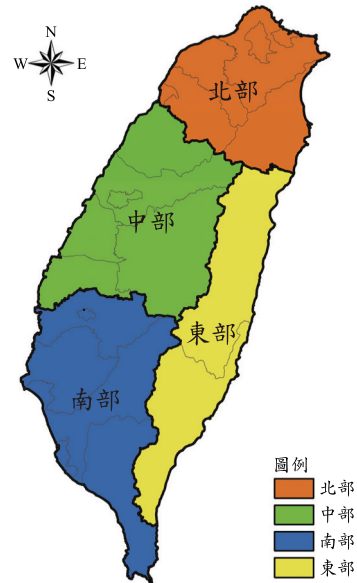


圖 1 臺灣本島研究分區範圍圖

均產量為 5.74 ton/ha, 高於同時期全球平均 4.06 ton/ha (聯合國糧農組織統計資料庫, 2011), 可知臺灣為典型集約稻作農業。本研究以臺灣本島區域為研究設定範圍, 並以水稻為研究對象, 計算臺灣稻作之水足跡。

由於行政院農業委員會(以下簡稱農委會)農業統計資料係以縣市分區, 農業用水量統計報告中灌溉用水量資料則是以水利會做為分區依據, 而部分水利會轄區橫跨縣市, 資料上空間尺度不一致, 為統一分析基準, 本研究將臺灣本島劃分成北區、中區、南部和東部共四區(見圖 1), 計算各分區 2005 至 2009 年間兩期稻作水足跡。其中北部分區有: 臺北市、新北市、基隆市、桃園縣、新竹縣、新竹市及宜蘭縣等縣市, 區內包含瑠公、七星、北基、桃園、石門、新竹、宜蘭等水利會; 中部分區為: 苗栗縣、臺中市、彰化縣、南投縣及雲林縣等縣市, 區內包含苗栗、臺中、彰化、南投、雲林等水利會; 南部分區涵蓋: 嘉義縣、嘉義市、臺南市、高雄市及屏東縣等縣市, 區內包含嘉南、高雄、屏東等水利會; 東部分區則是: 花蓮縣和臺東縣, 區內包含花蓮、臺東等水利會。

2.2 研究材料

本研究資料來源係根據農委會提供之農業統計年報(1970-2010)、水利署公佈之農業用水量統計報告(1991-2010)、大氣研究資料庫(Data Bank for Atmospheric Research, DBAR, 1997)之氣象與測站資料及國內外相關文獻，蒐集 1980 至 2009 年間臺灣地區稻作之氣象資料、氮肥施用量、各期作種植面積、作物產量及灌溉用水記錄等相關農業統計資料、地下水污染管制標準與河川水體水質標準，並以 CROPWAT8.0 模式(FAO, 2009)估算水稻生長期間的作物蒸發散量及有效雨量，來計算臺灣兩期稻作生產之水足跡。

2.3 研究方法

2.3.1 藍色水足跡

藍水泛指為人類活動所取用之地表水或地下水，亦是一種消耗性使用指標。作物生長期間消耗的藍色水足跡通常以灌溉用水量計算之，目前農業灌溉用水相關的記錄資料多是取水量而非實際消耗量。本研究之灌溉用水量係採用農業用水量統計報告(水利署，1991-2010)中各水利會之兩期稻作實際灌溉用水量，並據此估算藍色水足跡，計算方式如式(1)所示。

$$WF_{rice,blue} = \frac{IR}{Y} \dots\dots\dots(1)$$

式中 $WF_{rice,blue}$ 為稻作藍色水足跡(m^3/ton)， IR 為期作灌溉用水量(m^3)， Y 為作物產量(ton)。

2.3.2 綠色水足跡

綠水是指降到地面的雨水，入滲且蓄存在土壤含水層中以蒸發散的形式由植被所利用的土壤水分，綠水是農作物和森林生長過程中被吸收的有效雨量。將製程綠水量除以總產量即為製程綠色水足跡。在本研究中水稻之綠色水足跡是取有效雨量及作物需水量(又稱作物蒸發散量)兩者中較小值計算之，計算方式如式(2)所示：

$$WF_{rice,green} = \frac{\min(ET_{c,tot}, P_{eff,tot}) \times A}{Y} \times 10 \dots\dots(2)$$

式中為 $WF_{rice,green}$ 為稻作綠色水足跡(m^3/ton)，

$ET_{c,tot}$ 為期作物蒸發散量($mm/period$)， $P_{eff,tot}$ 為期作有效雨量($mm/period$)， A 為作物種植面積(ha)，在此係指田間種植稻株且實施管理不含田埂之面積， Y 為作物產量(ton)。根據國內外文獻可發現，水足跡相關研究在計算參考作物蒸發散量時多以 CROPWAT 模式做為計算工具，因此本研究係以作物需水量法亦使用 CROPWAT 模式 8.0 版計算參考作物蒸發散量。

2.3.3 灰色水足跡

灰水則是指生產過程中淡水資源受污染程度的指標，亦即吸收或淨化生產過程中產生的污染負荷，並使污染物濃度符合承受水體現有環境水質標準所需的水量。水稻生長過程中為使作物生產量能快速增加，一般會施用氮、磷、鉀等肥料、農藥及除草劑等化學合成產品，以提高產量與增加利潤，各種污染物都有其淨化所需水量，為避免重複計算，用於作物生產的灰色水足跡僅需計算使各種污染物符合其水質標準之最大水量。考慮到資料的可獲得性和代表性，本研究鎖定氮肥為計算水稻灰色水足跡之計算標的，計算方式如式(3)：

$$WF_{rice,gray} = \frac{\alpha \times AR \times A}{Y(C_{max} - C_{nat})} \times 1000 \dots\dots\dots(3)$$

式中 $WF_{rice,gray}$ 為稻作灰色水足跡(m^3/ton)， α 為淋洗係數(leaching factor, %)， AR 為單位面積的氮肥施用量(kg/ha)， A 為作物種植面積(ha)， Y 為作物產量(ton)， C_{max} 為水體最大可承受濃度(mg/L)，本研究採用河川水體水質標準， C_{nat} 為承受水體的自然背景濃度(mg/L)，本研究假設為零。

2.3.4 水足跡

綜合前述綠色、藍色及灰色水足跡之計算方式，加總得本研究水稻水足跡，計算式如式(4)：

$$WF = WF_{rice,blue} + WF_{rice,green} + WF_{rice,gray} \dots\dots(4)$$

2.4 水足跡試算範例

以 2005-2009 年臺灣各分區各期作水稻水足跡為例，計算所需參數有 8 項，其中各期作物蒸發散量($ET_{c,tot}$)與有效雨量($P_{eff,tot}$)是使用

表 1 2005-2009 年臺灣各分區兩期水稻綠色、藍色、灰色水足跡

期作別	地區	蒸發散量 ET _{c,tot} (mm/period)	有效雨量 P _{eff,tot} (mm/period)	灌溉用 水量 IR (10 ⁶ m ³)	淋洗 係數 α (%)	氮肥 施用量 AR (kg/ha)	水體最大 可承受 濃度 C _{max} (mg/L)	作物 產量 Y (ton)	作物 種植面積 A (ha)	綠色 水足跡 WF _{rice,green} (m ³ /ton)	藍色 水足跡 WF _{rice,blue} (m ³ /ton)	灰色 水足跡 WF _{rice,gray} (m ³ /ton)	水足跡 WF (m ³ /ton)
一期作	北部	462.1	564.4	1,037.8	10	120	10	121,050	20,673.2	789	8,574	205	9,568
	中部	486.8	468.4	1,837.7	10	140	10	519,973	78,730.4	709	3,534	212	4,455
	南部	450.9	115.8	493.0	10	140	10	276,316	41,158.5	172	1,784	209	2,165
	東部	492.9	339.0	487.2	10	140	10	72,999	13,293.9	617	6,675	255	7,547
二期作	北部	630.6	561.3	815.2	10	110	10	34,786	8,289.9	1,338	23,435	262	25,035
	中部	679.4	505.3	2,355.2	10	120	10	268,534	57,749.1	1,087	8,771	258	10,116
	南部	678.0	634.0	568.1	10	120	10	126,606	27,298.9	1,367	4,487	259	6,113
	東部	628.9	570.1	405.3	10	120	10	64,533	12,847.9	1,135	6,281	239	7,655
平均		563.7	469.8	999.9	10	126	10	185,600	32,505.2	902	7,943	237	9,082

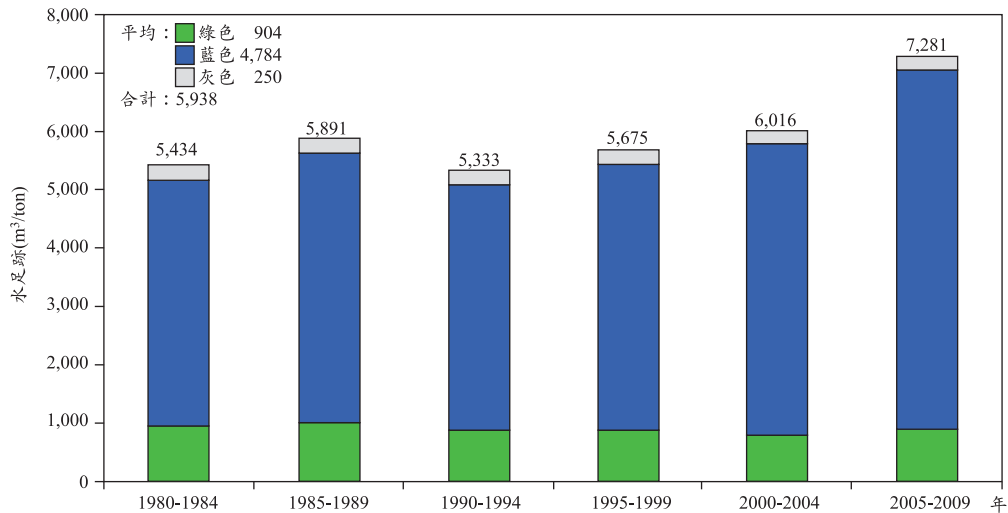


圖 2 臺灣水稻水足跡變化圖

CROPWAT模式計算所得；水稻之灌溉用水量 (IR)係採用國內農業用水量統計報告(水利署，2006-2010)中實際灌溉用水量資料；淋洗係數(α)係參考國外研究假設為 10% (Chapagain *et al.*, 2006; Aldaya and Hoekstra, 2010)；單位面積的氮肥施用量(AR)係採用「作物施肥手冊」一書(羅，2005)之推薦用量最大值；水體最大可承受濃度(C_{max})為國內環保署公佈之地下水污染管制標準及飲用水水質標準對硝酸鹽氮之管制值；作物產量(Y)與作物種植面積(A)為國內農業統計年報(農委會，2006-2010)之實際統計資料，根據上述參

數加以計算可得 2005-2009 年平均各分區各期作之綠色、藍色與灰色水足跡(WF_{rice,green}、WF_{rice,blue}及WF_{rice,gray})，如表1 所示。

三、結果與討論

3.1 臺灣水稻水足跡變化

因臺灣氣候條件適宜，每年可有兩期水稻栽培，但為求與國際文獻相比較，在此取五年平均為分析之時間尺度，並以臺灣本島作為空間單元，分析臺灣 1980 至 2009 年間水稻水足跡，研究結果如圖 2 所示。歷年平均生產 1 公噸稻穀之

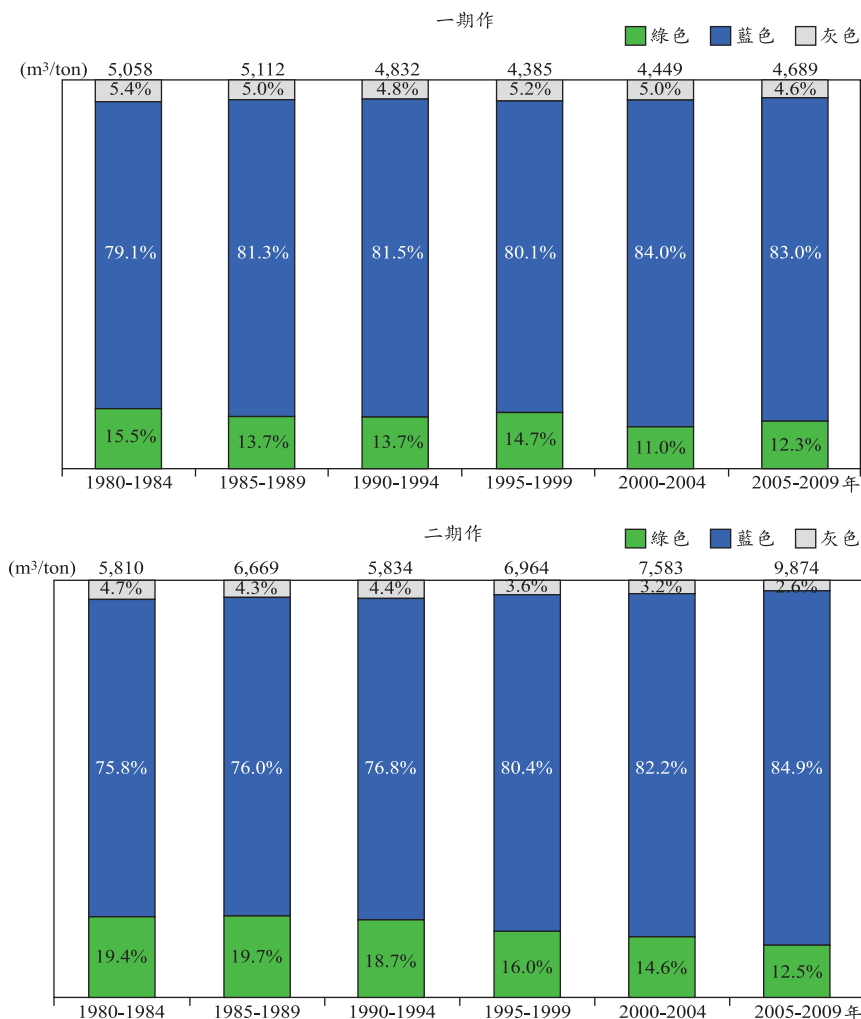


圖 3 臺灣水稻一、二期作水足跡組成百分比

水足跡為 5,938 m³，其中藍色水足跡為 4,784 m³/ton，為水稻生產的主要來源，其次綠色水足跡為 904 m³/ton，灰色水足跡則是 250 m³/ton。近年水稻水足跡增加快速，2005-2009 年較 2000-2004 年平均增加了 1,265 m³/ton，分析其主要原因係水稻種植面積與產量逐年減少，灌溉用水量未等比例減少之故，推測造成原因可能是休耕農田所在之灌溉小組未減少供水量。根據農業統計年報(農委會，2006-2010)與農業用水量統計報告(水利署，2006-2010)資料顯示，2005-2009 年水稻之種植面積與產量分別比 2000-2004 年平均減少 3.77 萬公頃和 21.82 萬公噸，灌溉用水量

卻增加 0.93 億 m³。

臺灣水稻一、二期作之綠色、藍色及灰色水足跡三者變化分別如圖 3 所示。由圖上可看出，臺灣水稻生產使用水資源主要來源為藍水(灌溉用水量)，約佔水稻水足跡組成 76%~85%，無論是一期作或二期作，藍色水足跡所佔比例均逐漸增加，主要係因部分水稻田休耕使種植面積與產量逐年減少的同時，為供給灌區內其它未休耕田之用水，農田水利會並未減少供水量，因而灌溉用水量並未等比例減少之故。而綠色水足跡因氣候及休耕補償制度等因素致使耕種面積與產量減少，其所佔比例亦逐漸降低，尤其是二期稻作

表 2 臺灣各分區兩期水稻水足跡

期作別	類別	水足跡 (m ³ /ton)				
		北部	中部	南部	東部	全臺
一期作	綠色	789	709	172	617	578
	藍色	8,574	3,534	1,784	6,675	3,893
	灰色	205	212	209	255	217
	總計	9,568	4,455	2,165	7,547	4,689
二期作	綠色	1,338	1,087	1,367	1,135	1,236
	藍色	23,435	8,771	4,487	6,281	8,381
	灰色	262	258	259	239	258
	總計	25,035	10,116	6,113	7,655	9,874
平均	總計	17,302	7,285	4,139	7,601	7,282

較為明顯，2005-2009 年平均較 1980-1985 年減少約 7%。灰色水足跡因本研究係採用作物施肥手冊之氮素推薦用量，並無明顯之變化，但依據封(2001)對臺灣地區作物施肥現況之調查與分析，研究結果發現農民實際稻作施肥量遠高於推薦量，尤以氮肥與鉀肥超用情形較嚴重，本研究之灰色水足跡應有低估之現象。而臺灣近年受到物價上漲使得稻作生產成本增加與政府積極推動合理化施肥等因素影響，施肥量較早期減少許多，因此，若能以實際氮肥施用量計算之臺灣歷年灰色水足跡變化應呈遞減趨勢。

3.2 臺灣各區域水稻水足跡之比較

本研究計算臺灣各區域兩期作水稻綠色、藍色及灰色水足跡結果如表 2 所示，比較四個區域可知，南部水稻水足跡最小，一期作平均為 2,165 m³/ton，二期作平均為 6,113 m³/ton，而北部水稻水足跡較大，一期作平均 9,568 m³/ton，二期作平均為 25,035 m³/ton，由表中可看出臺灣南北水稻水足跡相差達四倍之多，且各區二期作之水足跡皆高於一期作。

單就水足跡此水資源消耗指標分析各區域稻作水資源使用情形，北部水稻水足跡最大(17,302 m³/ton)，表示北部地區種植水稻使用水資源量較其他分區高出許多，東部地區居次(7,601 m³/ton)，中部地區(7,285 m³/ton)略小於東部，南部地區最小(4,139 m³/ton)，僅為北部水稻水足跡的四分之一。因此各區水稻水足跡相較之下，南

部區域稻作水資源使用效率為最佳，北部則較差，尤以藍色水足跡代表之灌溉用水量差異最為明顯(見表 2)。推測其原因應與休耕農田所在之灌溉小組是否提供水量有關，藍色水足跡計算公式為灌溉用水量除以作物產量，現行休耕制度為農民自行申請登記，因此同一灌區內有零星休耕，但為了供給未休耕農地，水利會並未減少供水。

北部地區休耕田多屬一年二期作之水稻田，因此水稻種植面積與產量減少，但灌溉用水量並未因灌區中有休耕田而等比例減少，致使藍色水足跡增加；南部地區為輪灌制度，休耕田若屬輪灌區中不供水時期，因無使用灌溉水故不會增加水足跡。因此若需休耕，建議可進行區域性統一休耕，節省下之水資源可供給這些北部區域民生、工業等其他用途使用。東部區域水稻水足跡僅次於北部，但該區人口及產業均較北部少，由 2009 年各縣市資料(中華民國統計資訊網，2011)來看，東部地區縣市人口合計為 57.35 萬而北部為 1,023.23 萬人，北部地區人口數約為東部之 17 倍，若以營運中工廠、公司及商業現有家數來比較，則東部縣市合計家數為 3.79 萬而北部為 67.09 萬家，東部地區用水需求量較北部小，因此降低該區水稻水足跡後餘下之水資源可用價值遠不及北部區域。

分析臺灣各分區一、二期作水稻水足跡之差異，發現除東部分區外，三種類別水足跡二期作均較一期作大，甚至有三倍之差。主要有兩個因

表 3 臺灣兩期作水稻水足跡

期作別	類別	水足跡 (m ³ /ton)						
		1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	平均
一期作	綠色	783	699	664	645	488	578	643
	藍色	4,002	4,158	3,936	3,511	3,739	3,893	3,873
	灰色	274	255	232	230	221	217	238
	總計	5,058	5,112	4,832	4,385	4,449	4,689	4,754
二期作	綠色	1,128	1,311	1,092	1,113	1,108	1,236	1,165
	藍色	4,407	5,068	4,483	5,599	6,230	8,381	5,695
	灰色	275	290	260	251	245	258	263
	總計	5,810	6,669	5,834	6,964	7,583	9,874	7,122

素，一是由於二期稻作生長期介於夏初至秋冬，此期間氣溫較高且有將近 5 個月是雨季，蒸發散量及有效雨量均比一期作大，由其是南部區域差異最為明顯(見表 3)。

另一方面是二期作生長季常受颱風、豪雨、寒害、東北季風等天然災害影響使得產量偏低，但二期作灌溉用水量與一期作相較之下卻未明顯減少，甚至因二期作生長季降雨量較一期作多而有增加的情形。根據農業統計年報(農委會，2006-2010)與農業用水量統計報告(水利署，2006-2010)資料，分析 2005-2009 年間一、二期作各區平均稻穀產量與稻作灌溉用水量差異，發現北部二期稻作較一期稻作產量減少 1.7 ton/ha，灌溉用水量二期作平均比一期作減少 2.23 億 m³；中部產量減少 2.0 ton/ha，灌溉用水量卻增加 5.17 億 m³；南部產量減少 2.1 ton/ha，灌溉用水量增加 0.75 億 m³；東部減少 0.5 ton/ha，灌溉用水則是減少 0.82 億 m³。由此可發現東部一、二期作水稻水足跡差異不大之因，應是東部二期稻作較一期稻作產量減少幅度較小，二期作灌溉用水量比起一期作亦有減少之故，中、南部分區二期作產量比一期作減少，但用水量增加，因此二期作水稻水足跡較一期作大。

3.3 水稻水足跡期作別之差異

進一步分析臺灣不同期作水稻水足跡，一期作平均生產 1 公噸稻穀之水足跡為 4,754 m³，二期作平均稻穀之水足跡則是 7,122 m³/ton (見表 3)，其中一期作於 1995-1999 年期間水足跡最

小，平均為 4,385 m³/ton，1985-1989 年期間水足跡較大，平均為 5,112 m³/ton；而二期作於 1980-1985 年期間水足跡最小，平均為 5,810 m³/ton，而二期作水足跡較大是在 2005-2009 年期間，平均為 9,874 m³/ton。

根據本研究計算結果顯示臺灣一期作水稻水足跡較二期作小，如表 3 所示，顯示臺灣種植二期稻作水資源消耗量較一期稻作高，分析其原因發現主要有兩個因素，一方面是由於二期稻作生育期為每年 7、8 月至年底或隔年元月，此期間氣溫較高且 5 至 10 月為臺灣豐水期，蒸發散量及有效雨量均比一期作大，因此綠色水足跡高於一期作；另一方面是該時期常受颱風、豪雨、寒害等自然災害影響，使得二期作產量偏低，二期稻作平均之產量通常較一期稻作低約 1 ton/ha (吳與許，1995)，但二期作灌溉用水量卻未明顯減少。依據農業統計年報(行政院農業委員會，2006-2010)與農業用水量統計報告(水利署，2006-2010)資料顯示，2005-2009 年二期作單位面積產量平均較一期作減少 1.78 ton/ha，灌溉用水量二期作平均卻比一期作增加 2.88 億 m³，因此二期作藍色水足跡亦高於一期作。

由表 3 可看出一、二期作水稻水足跡之差值有逐年增加的趨勢，1980-1985 年間二期作水稻水足跡較一期作多 752 m³/ton，至 2005-2009 年間二期作大於一期作 5,185 m³/ton，可見在 1980 到 2009 期間二期稻作之水足跡比一期稻作有大幅度增加的趨勢。分析其主要原因係政府自 1984 年起推行稻田休耕、輪作或轉作其他特用作物等

表 4 臺灣與國外水稻水足跡之比較

水足跡 (m ³ /ton)	臺灣 ^a		湖南 ^b		印尼 ^c	全球平均 ^d
	一期作	二期作	單季稻	雙季稻		
綠色	643	1,165	573	543	2,527	632
藍色	3,873	5,695	508	475	735	584
灰色	238	263	287	326	212	109
合計	4,754	7,122	1,368	1,344	3,473	1,325

註：a. 本研究計算 (1980-2009 年資料)

b. 何等，2010

c. Bulsink *et al.*, 2009，產量係以糙米計算，糙米產量係數為 0.65

d. Chapagain and Hoekstra, 2011，未計入滲漏量

多項政策，使得水稻種植面積與產量逐年減少，且二期作休耕面積較一期作多，因此二期作水稻水足跡受到休耕農田仍舊有給水之干擾較大，二期稻作灌溉用水量減少幅度不及一期作。從稻作休耕面積與灌溉用水量之變化來看，1984 年一期稻作休耕面積與灌溉用水量分別為 1,325 公頃與 59.88 億 m³，二期稻作則是 4,416 公頃及 58.34 億 m³，二期作較一期作多休耕 3,091 公頃，用水量因此減少 1.54 億 m³；至 2009 年一期稻作休耕面積與灌溉用水量分別是 9.45 萬公頃及 40.19 億 m³，二期稻作則是休耕 11.75 萬公頃，比一期作多休耕 2.30 萬公頃，二期作灌溉用水量卻增為 44.69 億 m³，較一期作增加 1.50 億 m³，顯示二期作休耕面積較一期作多，灌溉用水量並未減少，因此一、二期作水稻水足跡之差值逐年增加，且二期作水足跡比一期作有大幅增加之趨勢。

3.4 臺灣水稻水足跡與國外之比較

國際上雖已有諸多研究估算水稻水足跡，但農作物水足跡受作物所在地區之氣候、土壤、耕種方式、灌溉管理操作等各項因素影響，使得各國水稻水足跡差異甚大，臺灣與國外水稻水足跡之比較可整理如表 4。

3.4.1 臺灣水稻水足跡與印尼之差異

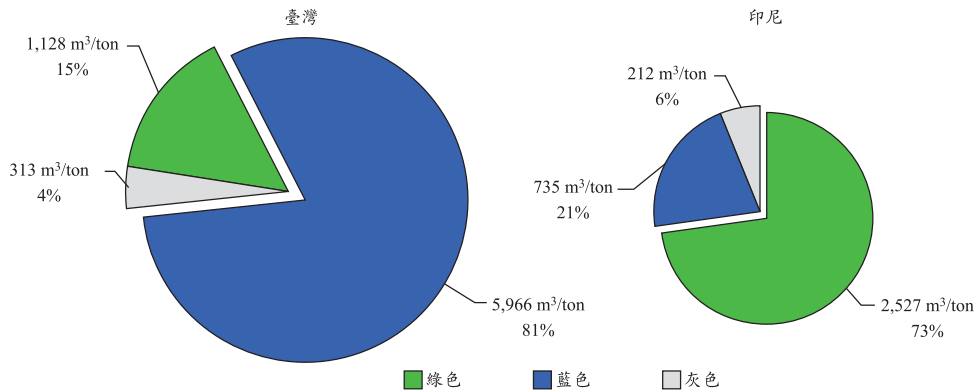
Bulsink 等(2009)計算 2000 至 2004 年間印尼之水稻水足跡平均為 3,473 m³/ton (以糙米計)，而臺灣約為其之兩倍。其中印尼之綠色水足跡為 2,527 m³/ton，藍色水足跡則是 735 m³/ton，灰色水足跡為 212 m³/ton。由於印尼地處熱帶，赤道

橫貫全境，全年高溫多雨，作物蒸發散量及降雨量大，水稻水足跡組成以綠色水足跡為主佔 73%，藍色水足跡佔 21%次之。反觀臺灣位於亞熱帶區域，作物蒸發散量較小，因此水稻綠色水足跡較印尼小，而臺灣水稻多為灌溉稻，常見灌溉栽培方式為湛水型式灌溉，水稻生長期間常需要大量水資源以維持一定的湛水深，因此藍色水足跡較印尼大，臺灣水稻 80%為藍色水足跡，僅 16%為綠色水足跡，如圖 4 所示。無論是總水足跡量值或藍、綠水組成，兩國差異甚大，應是耕種環境及氣候不同所致，且臺灣水稻水足跡較印尼高是灌溉用水量較大之故。

3.4.2 臺灣與中國湖南省水稻水足跡之差異

分析臺灣與中國湖南省兩地區水稻水足跡組成可發現，何等(2010)計算湖南省水稻水足跡發現綠水是湖南水稻生產之主要用水，1960 至 2008 年間分別佔水稻水足跡組成之 47%~52%，而本研究分析臺灣水稻水足跡結果發現臺灣水稻是以藍水(灌溉用水)為主要組成，平均佔水稻水足跡組成的 80.6%。

湖南水稻依生長季節可分為早稻、中稻及晚稻，將早、晚稻相加作為雙季稻之水足跡，中稻則代表單季稻之水足跡，該研究結果顯示湖南雙季稻(1,344.3 m³/ton)水足跡比單季稻(1,367.6 m³/ton)小，從有效利用水資源與保障糧食安全觀點來看更具優勢，因此該研究建議增加湖南雙季稻種植面積；臺灣稻作通常每年分兩季栽培，本研究計算發現一期稻作水足跡(4,754 m³/ton)比二期稻作(7,122 m³/ton)小，且二期稻作平均之產量



資料來源：本研究；Bulsink *et al.*, 2009

圖 4 臺灣與印尼水稻水足跡組成百分比

通常較一期稻作低約 1 ton/ha，若單就水資源與生產效率觀點來看，在不缺水之情況下，未來臺灣休耕農地要復耕推薦復耕一期稻作。其中臺灣與中國湖南省水稻水足跡大小差異甚大係因湖南省之藍色水足跡僅以水稻生長期間所需灌溉量計算，而本研究計算臺灣水稻藍色水足跡時，則是考量整地用水量、水稻灌溉需水量、田間滲漏量與輸水損失等灌溉管理操作因素之實際灌溉用水量進行計算，因此臺灣水稻水足跡較中國湖南省高。

從時間變化來看，湖南省與臺灣水稻水足跡均呈現增加趨勢，造成之因素卻大不相同，湖南係因水稻種植面積、單位面積需水量增大以及化學肥料與農藥施用量增加造成污染稀釋所需水量增加之故；臺灣則是因為政府推動休耕、轉(輪)作導致水稻種植面積與產量逐年減少，但休耕農田所在之灌溉小組未減少供水量有關，因此灌溉用水量未等比例減少之故，以節省水資源觀點作考量，建議可以灌溉小組或工作站為單元，規劃區域性統一休耕。

比較灰色水足跡之變化情形，湖南省因化學肥料與農藥施用量增加導致灰色水足跡逐漸增大，本研究計算之灰色水足跡雖無明顯之變動，但臺灣近年因稻作生產成本增加與政府推動合理化施肥政策，農民施肥量較過去減少許多，若以實際施肥資料計算水稻灰色水足跡應是遞減之趨勢。

3.4.3 臺灣水稻水足跡與全球平均之比較

Chapagain 與 Hoekstra 於 2004 年曾初步計算水稻相關產品水足跡，但未考慮稻作生長過程中田間灌溉排水操作作用水以及作物生產過程之灰色水足跡，因此在 2011 年用更高的空間解析度與各地實際灌溉資料估算全球 2000-2004 年間各國水稻綠色、藍色及灰色水足跡，並將滲漏量從水足跡中切割出來，該研究結果顯示 2000-2004 年間全球生產水稻水足跡平均為 1,325 m³/ton，其中綠色水足跡為 632 m³/ton，藍色水足跡為 584 m³/ton，灰色水足跡是 109 m³/ton，而水稻生產過程中之滲漏量為 1,025 m³/ton。

Chapagain 與 Hoekstra (2011)主要稻米生產國之水稻水足跡(表 4)與本研究計算臺灣水稻水足跡相比較發現，臺灣水稻水足跡明顯較高，推測其原因一方面與各國氣候(濕潤或乾燥)、水稻耕種方式(降雨低地稻、陸稻、灌溉稻或深水稻)、灌溉管理方式、地形條件(大陸型或海島型)有關。目前全球灌溉稻約佔全球稻作面積之 55%，降雨低地稻與陸稻則是佔 38%，而臺灣幾乎全為灌溉稻，栽培期間常維持一定湛水深度，與陸稻、看天田低地稻主要利用雨水作為水源相較之下，需耗用大量灌溉用水量，因此本研究計算之臺灣水稻水足跡會較 Chapagain 與 Hoekstra (2011)計算全球生產水稻水足跡平均高。此外，臺灣屬海島型國家，與大陸型國家不同之處在於大陸型國家國土面積寬廣，河川或渠道上游田區

之灌溉餘水可能可供下游田區重複使用，可節省灌溉用水量，甚至回歸到河川供其它用途利用，但臺灣國土面積狹小，河川長度較短，上游灌溉取水後一路流至下游田區可能已靠近河口，被重複利用之可能性較小。另一方面是將該研究報告將滲漏量從水足跡中分割出來，本研究計算臺灣水稻水足跡時未將滲漏量從水足跡內分割出來。

Chapagain 與 Hoekstra (2011)將滲漏量獨立出來不列入水足跡計算之理由係認為水足跡代表流域中水資源實際損耗不再被利用之部分，而滲漏量可補助地下水並可被重複使用，因此不納入計算。本研究計算臺灣水稻水足跡時未將滲漏量從水足跡內切割出來，主要係因本研究認為水足跡為生產與消費過程中直接或間接用水量的總和，雖滲漏之水資源量進入地下水後可能再一次供作其他用途被重複使用，但在水稻生產過程中亦是實際需要使用之部分，因此本研究並未將其從水足跡中區分出來，若考慮滲漏量部分之水資源有重複計算之虞，應考量其重複使用次數按比例分配之，又因水足跡概念在國內尚未成熟發展，相關用水資料取得不易，建議待國內水足跡概念更加成熟、數據更加豐富後，再做一步之分析。

四、結論與建議

本研究使用水足跡作為衡量指標，估算臺灣水稻水足跡，臺灣農業灌溉用水統計資料相當完善，以此估算臺灣水稻水足跡較符合國內實際情形。本研究計算 1980 至 2009 年間平均生產 1 公噸稻穀之水足跡為 5,938 m³，遠高於 2000-2004 年間全球生產水稻水足跡 1,325 m³/ton，而臺灣水稻水足跡中藍色水足跡為 4,784 m³/ton (80.6%)，為臺灣水稻生產之主要用水，其次為綠色水足跡 904 m³/ton (15.2%)，灰色水足跡則是 250 m³/ton (4.2%)。另以期作別來看，一期稻水足跡較二期稻小，一期作平均生產 1 公噸稻穀之水足跡為 4,754 m³，二期作稻穀平均之水足跡則是 7,122 m³/ton，分析臺灣各期作、各區域稻作生產水資源使用量之差異，以期作別來看，一期稻水足跡較二期稻小，一期作平均生產 1 公噸稻穀之水足

跡為 4,689 m³，二期作稻穀平均之水足跡則是 9,874 m³/ton；以區域別來看，南部水稻水足跡最小，一期作平均為 2,165 m³/ton，二期作平均為 6,113 m³/ton，而北部水稻水足跡較大，一期作平均 9,568 m³/ton，二期作平均為 25,035 m³/ton。探究其原因可能是休耕農田所在之灌溉小組亦有給水，在同一給水路中有部分農田休耕，部分農田種值水稻，為供給灌區內其它未休耕田之用水，農田水利會並未減少供水量。

研究過程中亦發現，現行水足跡計算公式對於海島型國家集約農業不利，舉例來說，臺灣不同於大陸型國家有寬廣面積國土，河川或渠道上游田區之灌溉餘水可能可供下游田區重複使用，可節省灌溉用水量，甚至回歸到河川供其它用途利用，但臺灣國土面積狹小，河川長度較短，上游灌溉取水後一路流至下游田區可能已靠近河口，被重複利用之可能性較小。另一方面是關於滲漏量的計算尚在研修中，本研究計算臺灣水稻水足跡時未將滲漏量從水足跡內分割出來，致使臺灣水稻水足跡高於各國。

水稻為臺灣最主要之農作物，兼具維繫糧食安全、農村經濟發展、涵養地下水、調節微氣候、生態保育、社會安定與文化傳承等多項功能，雖就水足跡此水資源消耗指標來看，本研究估算出臺灣水稻水足跡高於國外，為確保國內糧食安全及產業之永續發展，仍應適度維持於國內發展。而對於暫時性休耕之農業水、土資源，仍須進行日常維護管理，以維持水利設施功能及農地生產力，確保國內糧食可滿足國人需求。水資源豐沛不代表能滿足供水需求，而水資源過剩之區域不代表餘下之水資源可供給其它用途，若該區域無其他產業用水需求，降低水足跡餘下之水資源於該地區亦無所用，因此政府若要進行水資源政策研擬時，除考慮水資源多寡外，尚可納入經濟成本、產業需求、土地、生態價值及社會等其他因素一併考量會更為合理。

參考文獻

1. 大氣研究資料庫(DBAR)，1997。
2. 中華民國統計資訊網，2011。

3. 行政院農業委員會，農業統計年報(原稱「臺灣農業年報」，自 1999 年後改名為農業統計年報)，1970-2010。
4. 何浩、黃晶、淮賀舉、童文杰，2010，「湖南省水稻水足跡計算及其變化特征分析」，中國農學通報，第 26 卷，第 4 期，294-298 頁。
5. 吳富春、許銘熙，1995，「水稻田生態與環境」，農業工程學報，第 41 卷，第 4 期，13-19 頁。
6. 封賜彥，2001，「台灣地區施肥現況之調查與分析」，國立中興大學土壤環境科學系碩士論文。
7. 經濟部水利署，臺灣地區民國九十八年各標的用水量統計報告，2011。
8. 經濟部水利署，臺灣地區農業用水量統計報告，1991-2010。
9. 經濟部水利署，臺灣水文年報，1980-2010。
10. 聯合國糧農組織統計資料庫(FAOSTAT)，2011。
11. 羅秋雄，2005，「作物施肥手冊」，中華肥料協會，16-20 頁。
12. Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2010, The water needed for Italians to eat pasta and pizza, *Agricultural Systems*, vol. 103(6), pp. 351-360.
13. Bulsink, F., Hoekstra, A.Y., and Booiij, M.J., 2009, The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products, *Value of Water Research Report Series No. 37*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
14. Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., 2004, Water Footprints of Nations, *Value of Water Research Report Series No. 16*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
15. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G. and Gautam, R., 2006, The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries, *Ecological Economics*, vol. 60, pp. 186-203.
16. Chapagain, A.K., and Hoekstra, A.Y., 2007, The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands, *Ecological Economics*, vol. 64, pp. 109-118.
17. Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., 2011, The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives, *Ecological Economics*, vol. 70(4), pp.749-758.
18. Chapagain, A.K., and Orr, S., 2008, An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp. 1219-1228.
19. FAO, 2009, CROPWAT 8.0 model, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
20. Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y. and Van der Meer, T.H., 2009, The water footprint of bioenergy, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, pp. 10219-10223.
21. Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q., 2005, Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade, *Global Environmental Change*, vol. 15, pp. 45-56.
22. Ridoutt, B.G., Eady, S.J., Sellahewac, J., Simons, L. and Bektash, R., 2009, Water footprinting at the product brand level: Case study and future challenges, *Journal of Cleaner Production*, vol. 17(13), pp. 1228-1235.

收稿日期：民國 101 年 9 月 26 日
 修正日期：民國 101 年 11 月 19 日
 接受日期：民國 101 年 12 月 4 日