

# 水足跡概念介紹暨臺灣水稻水足跡分析

## The Water Footprints of Rice in Taiwan

臺灣大學生物環境系統工程學系

教授

張尊國

Tsun-Kuo Chang

### 摘 要

水足跡是一個用水的指標，指出消費者或生產者直接與間接的水總使用量。個人、社區（國家）或者企業的水足跡定義為用來生產貨物和提供服務所需消耗淡水的總量。水足跡由三個部分組成：藍色，綠色和灰色的水足跡。水足跡概念與虛擬水概念密切相關，但是水足跡具地理上明確指標，不僅顯示水的使用量和污染量，而且指示位置。不過，水足跡不提供產品實耗水量與當時水資源壓力或者環境影響關聯的資訊。本文介紹這些概念並利用水足跡來分析台灣稻米之水足跡。

關鍵字：水足跡，虛擬水，稻米。

### Abstract

The water footprint is an indicator of water use that includes both direct and indirect water use of a consumer or producer. The water footprint of an individual, community or business is defined as the total volume of freshwater that is used to produce the goods and services consumed by the individual or community or produced by the business. A water footprint consists of three components: the blue, green and grey water footprint. The water footprint is a geographically explicit indicator, not only showing volumes of water use and pollution, but also the locations. However, the water footprint does not provide information on how the embedded water is contributing to water stress or environmental impacts. The water footprint concept is closely linked to the virtual water concept. Virtual water is defined as total volume of water required to produce a commodity. This paper introduced the concept and computation of water footprint analysis for rice production in Taiwan.

Keywords: water footprint, virtual water, rice production.

## 一、前言

水是萬物賴以維生的要素，而人體內 70% 為水分。地球上覆蓋有大面積的海洋，卻僅有 1% 淡水資源可直接為人類所利用，然而隨著人口增加、社會經濟發展、水資源配用需求增加以及對水質安全的要求，使得有限的淡水資源出現供需不平衡的現象，相對來說淡水資源在使用上也變得日益稀有。2002 年聯合國更宣告「擁有乾淨無虞的用水，是基本人權之一」，儼然進入「藍金（水）時代」。隨著產業結構之變遷與人口密度增加，農業用水與民生用水、工業用水之間的競合，是世界各國政府均困擾的難題，為此，確實掌握供需，方能提出妥善的水資源規劃與分配政策，藉由強化水資源的有效管理與調配以達水資源永續經營。

地球自然資源有限，而人口持續增加以及社會經濟發展，人類對於土地、水等自然資源的耗用增加、對環境的影響加劇，學者們紛紛提出各式的度量指標，如生態足跡（Ecological footprint）、碳足跡（Carbon footprint）等，來描繪人類對自然資源的影響，同時希望能喚起大眾關注。「生態足跡（Ecological footprint）」一詞首次出現於 1990 年代末，探討的是提供人類產品或服務所需利用到的土地面積，亦即人類活動、消費所需耗用的土地面積。碳足跡（Carbon footprint）代表每個個體從事各項活動所產生之溫室氣體量，並以二氧化碳當量重量（以公斤或公噸表示）為單位。同樣地，提供人類各式農、工產品或服務亦需利用水資源來達成，荷蘭學者 A.Y. Hoeksta 於 2002 年所提出水足跡（Water footprint）概念，有助於在水資源管理上分別對個人、生產企業與政府產生重大之啟發作用。由於水資源匱乏以及無節制的水資源使用情形，促使「水足跡」的觀念於最近幾年已經漸漸被企業、政策制定者及民眾所關切。而水足跡為了要評估製造業及服務業總淡水量使用的情形，已經漸漸從一個提倡的手段演變成可量測的數據了。本文將介紹水足跡之概念以及國際上現有的相關應用研究案例，最後並針對臺灣水稻生產估算其水足跡。

## 二、水足跡概念及研究案例介紹

### 2.1 虛擬水與水足跡概念

英國倫敦大學的 J.A. Allan 教授於 1993 年提出「虛擬水（virtual water）」以及虛擬水貿易（virtual water trade 用於中東地區水資源衝擊分析，其核心概念為估算提供商品或服務所需耗用的水量，包含了直接與間接用水，不僅是產品最終所包含的實際物理水量，同時還包含該產品各階段製程必須使用的水量，亦即涵蓋生產、加工與運送過程，簡單來說是考量產品對生產地水資源的耗用與環境衝擊，具有公平正義原則之價值。

Hoeksta 與 Hung 於 2002 年將虛擬水的概念發展為水足跡（Water footprint），簡單來說，水足跡的概念與生態足跡相似，改土地面積為淡水資源來描述。無論是生態足跡或水足跡，其探討的角度可以為個體、企業體，甚至是以國家為單元（Hoeksta, 2007）。水足跡包含內部與外部水足跡，以國家來說，內部水足跡為國內自行生產產品

所需使用的水量，而外部水足跡則是國民使用產自他國的產品或服務。換句話說，產品的虛擬水等同於該產品的產品水足跡。Chapagain and Hoekstra (2004)統計 1997 至 2001 年間全球各產品之平均虛擬水量如表一所示。作物虛擬水量必須考量作物生長期間所需水量，而牲畜虛擬水量則包含有餵養、飲水以及清洗畜舍等服務所需水量，至於，工業產品的虛擬水量則必須考量各生產階段抽取、耗用的水資源量。顯而易見地，肉類食品因仰賴飼料作物，水足跡較作物食品大。

表一 各產品之虛擬水量一覽表（全球平均）（Chapagain and Hoekstra, 2004）

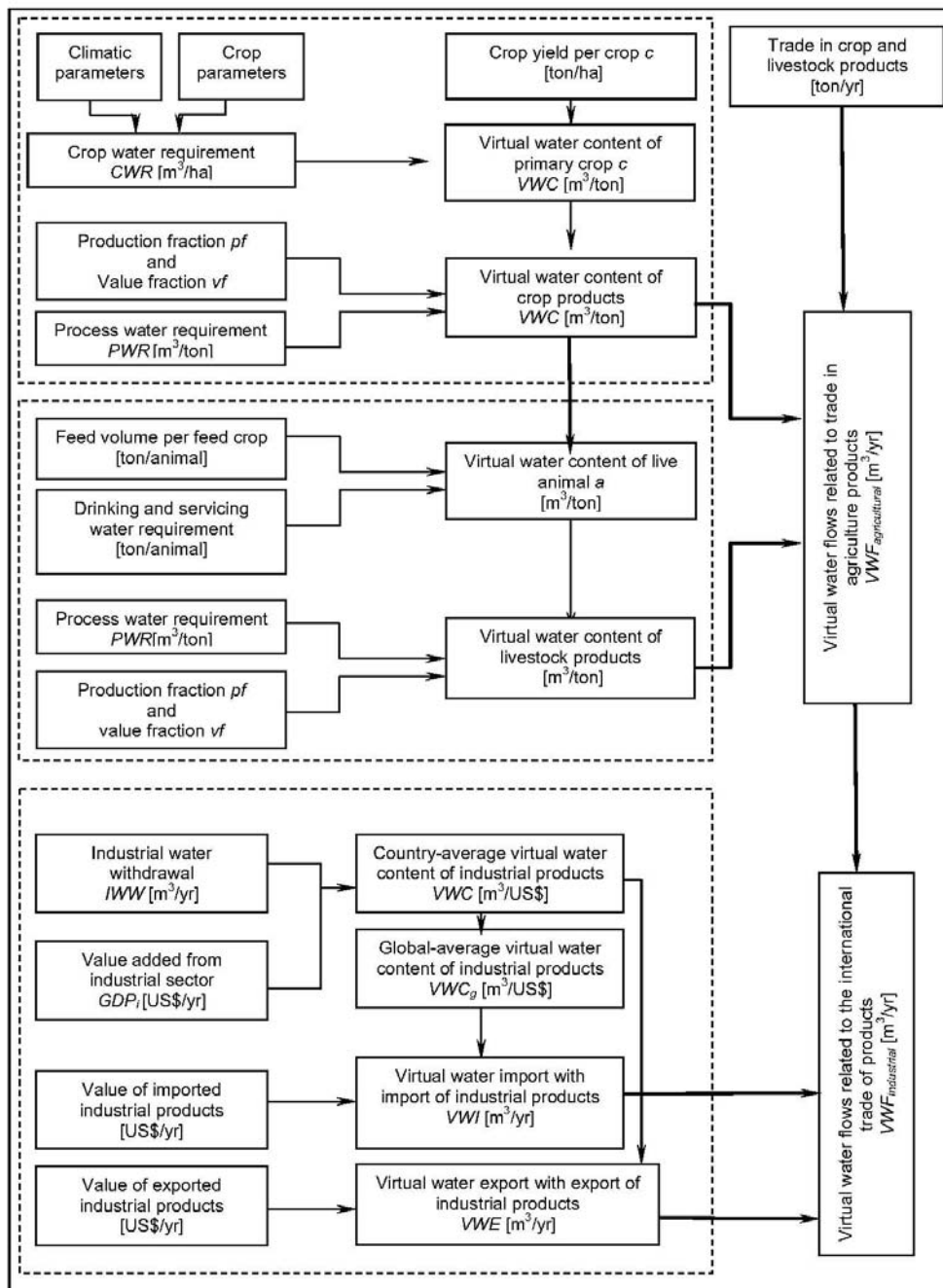
產品	虛擬水量 (L)	產品	虛擬水量 (L)
1 杯啤酒 (250mL)	75	1 顆蛋 (40g)	135
1 杯紅酒 (125mL)	120	1 顆蘋果 (100g)	70
1 杯牛奶 (200mL)	200	1 顆蕃茄 (70g)	13
1 杯咖啡 (125mL)	140	1 顆柳橙 (100g)	50
1 杯茶 (250mL)	35	1 顆馬鈴薯 (100g)	25
1 杯蘋果汁 (200mL)	190	1 個漢堡 (150g)	2400
1 杯柳橙汁 (200mL)	170	1 片麵包 (30g)	40
1 件棉製 T 恤(中等尺寸, 500g)	4100	1 片麵包 (30g) 加起士 (10g)	90
1 雙皮鞋 (牛皮製)	8000	1 包馬鈴薯片 (200g)	185
1 張 A4 紙 (80 g/m <sup>2</sup> )	10	1 個微晶片 (2g)	32

有別於傳統以用水標的來區分或描述水資源使用，於 2002 年提出之「水足跡」係以水資源消費為基礎，此概念發展至今日可再區分為藍色水足跡、綠色水足跡與灰色水足跡。首先將水資源區分為藍水 (blue water)、綠水 (green water)、灰水 (gray water)，其中，藍水泛指地表水與地下水，綠水則是因降雨入滲且蓄存在土壤層中的水分，而灰水則為受污染的水。實際運用上，藍水對環境影響最鉅，綠水與作物生長息息相關，而灰水則是與污染有關。灰色水足跡為稀釋或淨化受污染水源並使之可符合水質標準所需付出的水資源代價。Chapagain and Hoekstra (2004)以學理計算作物生長期間內需水量並以此發展成綠色水足跡。Chapagain et al. (2006)將水足跡概念延伸至棉花田污染衝擊，也就是目前所說的灰色水足跡。

## 2.2 水足跡計算方法

一個國家的水足跡 (WEP) 相當於生產國內民眾消費的產品與服務所需耗用的直接與間接用水量，係由內部水足跡 (internal water footprint, IWFP) 與外部水足跡 (external water footprint, EWFP) 所組成。內部水足跡 (IWFP) 代表生產國內民眾消費的產品與服務所耗用之國內水資源，為國內經濟使用的本國水資源量 (包含農業用水、民生用水與工業用水) 扣除生產出口產品使用的虛擬水量 (VWE<sub>dom</sub>)。實際上完整的農業用水量必須包含有效降雨量、灌溉用水量。Chapagain and Hoekstra (2004)

將農業用水 (AWU) 簡化定義為作物生長所需的蒸發散水量，而民生用水 (AWW) 與工業用水 (IWW) 則是為民生與工業用途所抽取水量。外部水足跡 (EWFP) 不僅是國民使用進口品背後所代表擬水量 (VWI)，同時也包含因加工出口品所需而進口的物料，簡言之，將 VWI 減去輸出之加工品虛擬水量 ( $VWE_{re-export}$ ) 即為外部水足跡 (EWFP)。一個國家的水足跡 (WEP) 可以透過將總水足跡除以國民人數進行標準化，以便於國語國間之評比討論。虛擬水貿易的研究發展著重於農產品 (作物與牲畜) 與工業製品的水足跡探討，圖一為考量進出口貿易時之水足跡完整計算流程。



圖一 水足跡計算流程 (Chapagain and Hoekstra, 2004)

一個國家的農業水足跡為所有國內生產作物需水量總和，而作物需水量 (crop water requirement, consumptive use) 之定義為在土壤水分供給不匱乏情形下，作物生長期間內所需蒸散與附近土壤或水田水面蒸發水分之總和，又稱為蒸發散量 (evapotranspiration)。作物蒸散量的計算係將作物係數 (kc) 乘上參考作物蒸散量 (ET<sub>0</sub>)，而參考作物蒸散量 (ET<sub>0</sub>) 則依循國際灌溉排水委員會 (ICID) 與聯合國糧食與農業組織 (FAO) 所頒布驗證之 Penman-Monteith 方程式來推求。以作物需水量進行水足跡估算，將會高估真實作物需水量，但低估灌溉損失與排水需求的影響。

Hoeksta and Hung (2002) 亦不諱言地表示：當前估算作物水足跡是假設作物於最佳生長條件下生長 (作物需水量)，係理想狀態，並無法反應真實現象，同時也未考慮水分損失，若能掌握各作物確實需水量將能得到較佳較真實的數據。完整的作物水足跡計算必須考量作物需水量、降雨量以及灌溉水量。由下而上，檢視作物需水量，然而理論與實際情形仍有出入。受氣候條件、土壤因子和農耕技術的影響，即便是相同的作物，其虛擬水量會有地域性差異。

### 2.3 各國水足跡運用案例

全球水足跡大小為 7450 Gm<sup>3</sup>/yr，平均為 1240 m<sup>3</sup>/cap/yr。未考慮人口數，僅就用水總量來看，印度有著全世界最大的水足跡 (987 Gm<sup>3</sup>/yr)。基於可比性，將各國之總水足跡除以其人口數進行標準化，如表二。由於美國民眾的飲食消費型態使得美國水足跡為國際之冠 (2480 m<sup>3</sup>/cap/yr)，緊接著為南歐國家，而相對來說，中國大陸民眾則有較低 (700 m<sup>3</sup>/cap/yr) 的水足跡 (Chapagain and Hoekstra, 2004)。Hoekstra and Chapagain (2007a) 歸納造成各國水足跡大小差異的四項主要因子為：消費水平 (國民收入)、消費型態 (食肉多寡)、氣候 (作物生長條件) 以及農耕技術 (用水效率)。

除了各國之水足跡外，Chapagain and Hoekstra (2004) 亦統計 1997 至 2001 年間全球水稻總產量為 593,173,644 ton/yr，而總消耗水量為 1,358,732 Mm<sup>3</sup>/yr (佔作物生產水的 21%)，亦即生產水稻之世界平均虛擬水量為 2,291 m<sup>3</sup>/ton。此外，一公斤稻穀約可製成 0.67 公斤之市售食用米，也就是說，平均生產一公斤市售食用米需要耗用 3420 公升之水 (表三)。水稻田蒸發散量隨著土壤型態 (組成) 和地下水位而變，特別注意的是 Chapagain and Hoekstra (2004) 係假設水稻於黏壤土上依循最佳條件生長，除考量氣象條件之作物蒸發散量外，並加上田間滲漏量 300mm，屬於綠色水足跡，但並未考慮到稻作生長所需的田間 (灌溉排水) 操作、管理。Bulsink et al. (2009) 計算印尼 2000 至 2004 年之平均水稻水足跡為 3,473 m<sup>3</sup>/ton，其中綠色水足跡為 2,527 m<sup>3</sup>/ton，藍色水足跡 735 m<sup>3</sup>/ton，灰色水足跡 212 m<sup>3</sup>/ton (僅考慮氮肥污染)。

Hoeksta and Hung (2002) 指出 1995 年全球農業用水 (灌溉用抽水) 約 2500 G m<sup>3</sup>，若一併考量有效降雨量則作物耗用的水量為 5400 G m<sup>3</sup>/yr，而國際上與農產品有關之虛擬水貿易量為 695 G m<sup>3</sup>/yr (1995 至 1999 年)。水資源匱乏的國家須仰賴大量水資源進口，從全球尺度並考量用水效率來研析，藉由向高用水效率國家輸入 (進口) 作物可減低自身國內用水量 (Hoekstra and Hung, 2005)，例如：墨西哥向美國進口穀類可為全球虛擬水量節省 8.5 Gm<sup>3</sup>/yr (Chapagain and Hoekstra, 2004)、摩洛哥向荷蘭進口

產品也為自身省下 640 Mm<sup>3</sup>/yr (Hoekstra and Chapagain, 2007b)。Chapagain and Hoekstra (2004)統計 1997-2001 年各貿易國農產品、畜牧品及工業產品國際貿易虛擬水流量(表四)，曾提及臺灣是農產品相關之虛擬水進口國，但僅表示貿易資料參考聯合國發展之 PC-TAS，未詳列計算方法與數據。然而，Hoekstra and Chapagain (2007b)也提醒，農產品國際貿易並非僅耗用大量水資源，亦涉及土地、勞工、農耕技術、關稅等面向。可以確信的是，在不久的將來，提升糧食自給率 (food self-sufficiency) 將與生產外銷產品發生水資源使用的衝突。

目前已有諸多研究探討特定作物水足跡，如荷蘭棉花 (Chapagain et al., 2007)、茶、咖啡 (Chapagain and Hoekstra, 2007) 以及西班牙的蕃茄 (Chapagain and Orr, 2008)，另外亦有學者結合生命週期 (LCA) 來評估產業水足跡。大陸學者 (Liu and Savenije, 2008) 更結合飲食熱量綜合評估各食品水足跡影響。此外，新興之生質能源、生質燃料的水足跡近日也有學者 (Gerbens-Leenes et al., 2009a; Gerbens-Leenes et al., 2009b) 進行探討。

水足跡對於企業在鑑別水資源需求、評估水資源依賴情形、和營運直接相關的水排放量以及價值鏈等是有利而且成為重要的手段時，只有水足跡的妥善運用才能有效協助企業排除水相關的風險，針對量測的結果擬定相對應的策略，推動資源保存及效能提升等相關的行動，許多公司已經開始針對這些進一步地評估，以作為其水資源管理策略的一部份。因此水足跡分析適時提供了有用的資訊，主要為企業鑑別其價值鏈及水源 (雨水或河水) 在生產中的那一個階段具有最大用水量和排放量。一旦水足跡揭露了水資源需求的總量及位置，企業就可以開始評估其相關的風險。

表二 各國各標的之人口標準化水足跡 (僅摘錄部分) (Chapagain and Hoekstra, 2004)

國家	總水足跡 (m <sup>3</sup> /cap/yr)	各消費用水之水足跡 (m <sup>3</sup> /cap/yr)					
		民生用水		農產品消費		工業產品消費	
		內部水足跡	外部水足跡	內部水足跡	外部水足跡	內部水足跡	外部水足跡
加拿大	2049	279	986	252	366	166	
中國	702	26	565	40	65	6	
法國	1875	105	814	517	257	182	
德國	1545	66	434	604	228	213	
印度	980	38	907	14	19	2	
義大利	2332	138	829	1039	176	151	
日本	1153	136	165	614	108	129	
荷蘭	1223	28	31	586	161	417	
泰國	2223	30	1987	144	20	41	
英國	1245	38	218	592	114	284	
美國	2483	217	1192	267	609	197	

表三 各國各產品水足跡 (單位: m<sup>3</sup>/ton) (Chapagain and Hoekstra, 2004)

產品	美國	大陸	印度	俄羅斯	印尼	澳洲	巴西	日本	墨西哥	義大利	荷蘭	世界平均
稻穀	1275	1321	2850	2401	2150	1022	3082	1221	2182	1679		2291
糙米	1656	1716	3702	3118	2793	1327	4003	1586	2834	2180		2975
米	1903	1972	4254	3584	3209	1525	4600	1822	3257	2506		3419
小麥	849	690	1654	2375		1588	1616	734	1066	2421	619	1334
玉蜀黍	489	801	1937	1397	1285	744	1180	1493	1744	530	408	909
大豆	1869	2617	4124	3933	2030	2106	1076	2326	3177	1506		1789
甘蔗	103	117	159		164	141	155	120	171			175
棉花	2535	1419	8264		4453	1887	2777		2127			3644
棉布	5733	3210	18694		10072	4268	6281		4812			8242
大麥	702	848	1966	2359		1425	1373	697	2120	1822	718	1388
高粱	782	863	4053	2382		1081	1609		1212	582		2853
椰子		749	2255		2071		1590		1954			2545
黍	2143	1863	3269	2892		1951		3100	4534			4596
咖啡(原豆)	4864	6290	12180		17665		13972		28119			17373
咖啡(烘焙)	5790	7488	14500		21030		16633		33475			20682
茶葉		11110	7002	3002	9474		6592	4940				9205
牛肉	13193	12560	16482	21028	14818	17112	16961	11019	37762	21167	11681	15497
豬肉	3946	2211	4397	6947	3938	5909	4818	4962	6559	6377	3790	4856
山羊肉	3082	3994	5187	5290	4543	3839	4175	2560	10252	4180	2791	4043
綿羊肉	5977	5202	6692	7621	5956	6947	6267	3571	16878	7572	5298	6143
雞肉	2389	3652	7736	5763	5549	2914	3913	2977	5013	2198	2222	3918
雞蛋	1510	3550	7531	4919	5400	1844	3337	1884	4277	1389	1404	3340
牛奶	695	1000	1369	1345	1143	915	1001	812	2382	861	641	990
奶粉	3234	4648	6368	6253	5317	4255	4654	3774	11077	4005	2982	4602
起士	3457	4963	6793	6671	5675	4544	4969	4032	11805	4278	3190	4914
牛皮	14190	13513	17710	22575	15929	18384	18222	11864	40482	22724	12572	16656

表四 1997-2001年各貿易國農產品、畜牧品及工業產品國際貿易虛擬水流量（僅摘錄部分）（Chapagain and Hoekstra, 2004）

國家	粗虛擬水流量 (M m <sup>3</sup> /yr)						淨進口虛擬水 (M m <sup>3</sup> /yr)					
	農產品		畜牧品		工業產品		農產品	畜牧品	工業產品	加總		加總
	出口	進口	出口	進口	出口	進口				出口	進口	
加拿大	48321	16190	17424	4952	29573	14289	32132	-12472	-15284	35430	-59888	
中國	17429	36260	5640	15247	49909	11632	18831	9608	-38277	63139	-9839	
法國	43410	40577	13222	11829	21873	19761	-2833	-1393	-2112	72166	-6338	
德國	27630	59751	17432	16062	25416	29757	32121	-1370	4341	105570	35092	
香港	304	8773	380	18790			8469	18410		27563	26878	
印度	32411	13941	3406	343	6748	2945	-18470	-3063	-3803	17228	-25337	
義大利	12920	47164	14912	28295	10402	13498	34244	13383	3096	88957	50723	
日本	954	59015	955	20328	4605	18883	58061	19374	14279	98227	91714	
荷蘭	34529	48607	15146	7852	7885	12293	14078	-7294	4408	68753	11192	
新加坡	4852	7238	364	1825		7934	2386	1461	7934	16997	11781	
臺灣	329	11708	3559	3535			11380	-24		15243	11355	
泰國	38429	9761	2856	1761	1655	3596	-28668	-1096	1941	42940	-27823	
英國	8773	33742	3786	10163	5113	20321	24968	6378	15208	64226	46554	
美國	134623	73129	35484	32919	59195	69763	-61495	-2564	10568	229303	-53491	



### 三、臺灣水稻水足跡初探

臺灣地區年降雨量豐沛（約 2500mm），但因降雨分佈之時空間分佈不均以及陡峭地形，使得水資源利用率極低，每逢枯水季三大標的（民生、工業與農業）用水之間有競爭。農業用水包含有灌溉、養殖與畜牧用水，為臺灣主要用水標的（70%），其中又以灌溉為大宗。水利法第十八條明文規定用水標的順序，其中農業用水為第二序位，僅在民生用水之後，實際上，農業用水之轉移調用時有所聞，民國 93 年北部地區即有大面積停灌。依據「台灣地區民國九十四年農業用水量統計報告」，民國 94 年農業用水量總計有 12,881 Mm<sup>3</sup>，相較民國 72 年之 15,932 Mm<sup>3</sup>，減少 16%。

前文提及水足跡可區分為藍水、綠水與灰水三種組成，國際間多以作物需水量（綠水）探討作物水足跡，而灌溉用水實屬於藍水。本研究由實際灌溉水量進行研析，以水足跡之觀點討論臺灣灌溉用水量及灌溉效率。以農委會公布之各縣市稻穀產量、糙米產量以及收穫面積，分別計算出單位面積之稻穀與糙米產量，另搭配單位面積灌溉用水量，由各水利會提供之期作灌溉水量與期作種植面積而換算藍色水足跡，綠色水足跡以農委會 1997 年研究之水稻需水量為基準進行試算，滲漏量則以水利局推估之各土壤質地每日滲漏量乘以 120 天之水稻生長日數。由於部分水利會轄區橫跨縣市，為統一分析基準，以北部、中部、南部和東部進行探討。經試算後得知臺灣地區民國 94 年之一期作水稻藍色水足跡為 3650 m<sup>3</sup>/ton，而綠色水足跡為 2432 m<sup>3</sup>/ton（表五）。

表五 臺灣各地區水稻水足跡

期別	區域	藍色水足跡 (m <sup>3</sup> /ton)				綠色水足跡 (m <sup>3</sup> /ton)			
		89 年	90 年	93 年	94 年	89 年	90 年	93 年	94 年
一期作	北部	3258	3702	7947	5679	2506	2760	2387	2573
	中部	2877	3720	3429	3197	2322	2421	2245	2426
	南部	2596	2294	4174	2445	1907	2146	1856	1993
	東部	13155	10011	9186	5491	3534	3710	3008	3148
	全台	3465	3855	4373	4102	2370	2550	2259	2432
二期作	北部	4827	4448	6145	6668	4873	4774	4203	4392
	中部	3259	4108	4272	3904	3540	3832	3376	4221
	南部	2076	2598	2561	3196	3619	4273	2976	3510
	東部	10713	10606	10177	4645	4461	4385	3810	3933
	全台	5777	6107	6802	6135	3899	4217	3445	4089

目前僅印尼有學者研究其水稻耕作所需的藍色、綠色水足跡，但當地水稻多種植於濕地，因此不需仰賴大量灌溉水。Chapagain and Hoekstra (2004)僅估算作物生長的綠色水足跡，但曾提及水稻生長的藍綠色水足跡比隨著生長地點的氣象條件而異，中國普遍會施行灌溉，而印度則鮮少會特別施灌。又由於滲漏量與有效雨量受氣候條件與土壤環境因子實質上會因地而異，於本研究中並未進行精算，另外需要考慮肥料、農藥施用之灰色水足跡，也有待相關數據掌握後方能評估。

## 四、結論

引進水足跡概念，將有助於釐清水資源實際使用狀況，無論是一個國家內部，甚至是國與國之間，水資源的供需平衡之重要性不斷提升，除了號召節能減碳，國民用水觀念也值得被審慎檢視。今日食品消費者尚未察覺食品產業對於水資源甚至是環境整體的衝擊，但已有國家發覺外銷產品與國內糧食對於自身水資源的競合並進一步採取行動。本文介紹水足跡概念，期盼日後能有更多臺灣民眾主要之消費產品、貿易或是國家整體之水足跡研究。水稻生產向來是台灣地區水資源使用量最龐大之單項產品，本文收集相關資料所做之水足跡估算其結果有待更進一步之確認。近年來由於水足跡的觀念與做法開始熱絡與成熟，與其相關的研究亦逐漸增加且評估的方法也漸趨完整，因此許多國家與企業公司已經開始針對這些進一步地評估，擬定相對應的策略，推動資源保存及效能提升等相關的行動，並對外界提出政策的承諾，達到水管理的策略目標。

## 參考文獻 (僅摘錄部分)

- Bulsink, F., Hoekstra, A.Y. and Booij, M.J., The Water Footprint of Indonesian Provinces Related to the Consumption of Crop Products, Value of Water Research Report Series, Vol. 37, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2009.
- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., Water Footprints of Nations, Value of Water Research Report Series, Vol. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2004.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G. and Gautam, R. "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, 2006.
- Chapagain, A.K., and Hoekstra, A.Y. "The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands," *Ecological Economics*, Vol. 64, pp. 109-118, 2007.
- Chapagain, A.K., and Orr, S. "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, 2008.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y. and Van der Meer, T.H. "The water footprint of bioenergy," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, pp. 10219-10223, 2009a.
- Gerbens-Leenes, P.W. Hoekstra, A.Y. and Van der Meer, Th. "The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply," *Ecological Economics*, Vol. 68, pp. 1052-1060, 2009b.
- Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, Value of Water Research Report Series, Vol. 11, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2002.
- Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. "Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade," *Global Environmental Change*, Vol. 15, pp. 45-56, 2005.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. "Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern," *Water Resources Management*, Vol. 21, pp. 35-48, 2007a.

Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. "The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities," Ecological Economics, Vol. 64, pp. 143-151, 2007b.

Hoekstra, A.Y. "Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis," Ecological Economics, Vol. 68, pp. 1963-1974, 2009.

Liu, J. and Savenije, H.H.G. "Food consumption patterns and their effect on water requirement in China," Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 12, pp. 887-898, 2008.

施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，灌溉排水原理，中央圖書出版社，1993。

陳清田、張煜權、陳焜耀、甘俊二，「合理灌溉營運用水計畫之研究」，農業工程學報，第43期，28-35頁，1997。

行政院農業委員會，灌溉排水營運管理，2002。

經濟部水利署，臺灣地區民國九十四年度農業用水量統計報告，2005。

經濟部水利署，臺灣地區民國九十三年度農業用水量統計報告，2004。

經濟部水利署，臺灣地區民國九十年度農業用水量統計報告，2001。

經濟部水利署，臺灣地區民國八十九年度農業用水量統計報告，2000。

農田水利會聯合會，民國九十四年水利會資料輯，2005。