

# 水稻節水栽培的效益

撰文/陳宗禮·謝嘉如·符耀中·野田佳宏

## 前言

水為地球上各種經濟活動之泉源，估計全球可用的逕流量約 14,000 億立方公尺，佔全球總降水量 113,000 億立方公尺的 12.4%，這些逕流量為地球上可供人類直接利用的淡水，但這些水資源並非取之不盡，用之不竭。全世界水資源利用以農業用水占最大量，占整體用水量的 65-75%，其他則為工業用水、民生用水與流失量等，其中農業用水又以灌溉為最大宗，約占總用水的 65-70%。

近年來氣候快速變遷，由於天氣與氣候的不穩定，形成極端與災害性天氣的機率增加，尤其是降水(雨)與溫度變化型態迥異往常，造成農業生產所依賴水資源短缺、淹水及面臨乾旱的風險增加。隨著經濟發展，工商業繁榮，工業區林立，工業用水量倍數成長；加上國民生活水準提升，自來水普及，人口集中都市化，舒適生活環境的要求及人口快速成長，導致民生用水也日益增加。再加上環保意識抬頭，開發新水源不易，水資源利用的競爭增加，引發水資源的分配應用問題。在有限的水資源下，由於水分的供應與分配需考量許多不同因素，而農業灌溉用水因耗水量大，往往會受到限制而被移用，使得灌溉用水減少，潛在影響農業及糧食生產。

臺灣由於降雨時間和空間分布不均，雨量多集中在五月至十月，約佔 75%，且高山多於平地，東岸多於西岸，使得水資源利用及調配困難。根據以往國內各相關單位的統計，農業用水量一直都是各標的用水占最大宗者，約占全國總用水量的七成。但近年農業用水的比例也有逐漸減少的趨勢，其中灌

溉用水從 1980 年的 159.1 億立方公尺減少至 2013 年的 119.5 億立方公尺，共降低 25% 的灌溉用水量。生活用水則從 1980 年的 14.66 億立方公尺增加至 2013 年的 31.80 億立方公尺，共增加兩倍(表一)。隨著社會快速變遷及進步，目前各標的用水間，在枯水季已有相當敏銳之競爭，再加上因應氣候變遷旱象連連等因素，因此占用水量之冠的農業用水已成為其他標的之爭取對象。臺灣地區農業用水以灌溉用水占最多，占總農業用水量的 90%；而灌溉用水又以灌溉水稻為主，約占總用水量的 65%。臺灣地區由於經濟結構改變，農業生產對全國經濟成長的貢獻較其他產業低，又鑒於新水源開發成本高，農業本身限於經費而無力再開發水資源供應未來農業的需求，但為滿足未來農業用水需求，故除合理維護農業用水外，應配合節約用水措施，加強農業用水之節流。因此，許多學者探討節水灌溉的可能性，透過節水灌溉，以最低限度的用水量獲得最大農業生產與收益，提升作物的有效水分利用。

## 水與稻的生產

水稻是需水量最大的重要糧食作物，高於其他穀類作物用水量的二至三倍。全世界水稻的栽培面積約有 1.6 億公頃，其中 54% 為灌溉栽培稻，24% 為看天栽培稻，9% 為深水栽培稻，13% 為陸稻。稻作依照栽培的形式以水田栽培方式佔大多數，若依稻田的供水方式又以灌溉栽培稻佔最多。全世界的水稻生產量有 75% 皆來自於湛水栽培，因此全球水資源利用以灌溉水稻的耗水量為最大，尤其是亞

**表一 臺灣地區各標的用水量統計**

單位：億立方公尺

年度	1980	1990	2000	2005	2010	2013
農業用水	159.10	135.53	130.12	128.81	122.05	119.51
灌溉	137.08	103.32	114.79	111.37	110.88	108.67
畜牧	21.21	30.93	14.19	1.11	0.74	0.70
養殖	0.81	1.28	1.14	16.33	10.43	10.13
生活用水	14.66	24.93	37.25	35.32	32.64	31.80
工業用水	14.67	15.25	17.40	15.44	16.03	16.39
總用水量	188.43	175.71	184.77	179.50	170.71	167.78

資料來源：經濟部水利署，2015。

洲。亞洲的水稻生產佔全球水稻生產的 90-95%，目前亞洲所有稻作的 64% 為灌溉水稻。臺灣栽培的稻亦採用灌溉方式，因此通稱為水稻。

稻生產栽培時，田區中水的主要來源包括灌溉、內向滲流、降水(雨)及虹吸升流，而田區中的水主要以逕流、溢流、外向滲流、深層滲漏、蒸散作用、蒸發作用等形式離開。其中經由逕流、溢流、外向滲流、深層滲漏和蒸發作用離開的水，是不能被作物吸收利用的水，稱為無效水，只有透過蒸散作用所流失的水，才能真正被植物利用，稱之為有效水。

一般稻田所用的水從供水至形成水稻產量，大致經過三個階段。第一階段為輸水、配水、分水等，把水輸入田間，將供水來源的水轉化為保留在土壤中的水分。第二階段為透過作物根部的吸收，將土壤中的水分吸入作物體內，轉化為作物水。第三階段為吸入作物體內的水，經由輸導作用輸送至作物體各部位，在主要的器官進行光合作用，產生乾物質累積，作物體內的水最後經由氣孔溢失於大氣中，水由根部吸入流經作物體，最後逸失於大氣的過程稱為蒸散作用。

上述三個階段皆會有大量的水分損失，即為

無效水，包含 16-18% 灌溉水的蒸發與 50-72% 灌溉水的逕流、滲流及滲漏，真正為水稻所利用的水分只佔灌溉水的 10-12%。因此湛水灌溉的水稻，生育期中因逕流、滲漏和滲流的損失而導致用水量相當大，若灌溉水深度增加，水田下滲的水量亦會增加，當雨量過多而超過田埂高度時，則會以逕流的方式流失，因而產生過多的無效水。水分滲漏和滲流程度亦因土壤性質而異，黏質土壤的滲漏及滲流量約佔進水量 25-50%，而砂質土壤則佔進水量的 50-85%。水稻生產即因逕流、滲漏和滲流情況嚴重，使水稻的水分利用效率比其他作物低，導致水分生產力較低，因此水稻節水栽培技術的發展主要以減少逕流、滲漏及滲流為主，期望能改善農業水資源利用的情況，減少無效水的損失，降低農業灌溉用水量。

### 水稻節水栽培法

由上一節水在田區中的流向以及有效水、無效水的分析得知，真正可供稻株利用於產生乾物質的水為保留在土壤中的有效水，因此水稻節水栽培技術即以提高有效水的利用，減少無效水的損失為主。目前已發表許多水稻節水栽培技術，包

括淹水與非淹水交替系統 (alternately submerged-nonsubmerged systems)、強化稻栽培系統 (system of rice intensification, SRI)、通氣栽培技術 (aerobic rice system)、土壤飽和水分栽培技術 (saturated soil culture)、生殖期湛水栽培技術 (permanent flood from panicle initiation to harvest)、間歇灌溉技術 (intermittent irrigation)、乾濕輪灌技術 (alternative wetting/drying irrigation, AWD)、非淹灌覆蓋栽培技術 (non-flooded mulching cultivation) 等。

土壤飽和水分栽培技術 / 生殖期湛水栽培技術是指將稻田灌溉時水深控制在 2-5 公分的深度，或僅保持在溼潤狀態 (saturated)，以減少湛水狀況下所產生的靜水壓，使深層滲漏及外橫向滲流減少，與全生育期湛水栽培比較，可減少一部分的灌溉水。

淹水與非淹水交替系統 / 乾濕輪灌技術 / 間歇灌溉技術應用於水稻湛水栽培地區，在水稻生育期間，平常灌溉湛水 3-5 公分，於數天後土面水分逐漸消失，再進行淹灌水深 3-5 公分，以此循環進行栽培管理。這種型式的節水栽培主要是根據土壤水分是否達到低限，若達到最低限度就進行供水，判斷土壤水分是否達到低限，可利用土壤水分計，以是否達到田間含水量 -0.03 MPa (15-20 公分土深) 為標準；國際稻米研究所 (IRRI) 為改善土壤水分是否達到低限的監測方法，提出利用 PVC 水管的簡易性水位觀測方法，其方法是利用一般 PVC 材質的圓型中空管柱 (外周直徑 16.5 cm、厚度 3.7 mm、長度 30 cm)，以電鑽打 260 個直徑 0.5 mm 的小洞，小洞分布於水管 2/3 縱長的部分，各洞中心之間距離 2 cm，加工後的水管稱之為田間水位觀測管。將田間觀測管埋設於水田狀態的土壤中，埋入深度 30 cm，使觀測管頂端與土壤表面維持同一水平，並將管內的土壤挖掉，讓田間土壤水分可以滲入，以判斷田間土壤水位的高低，水位愈接近土表，土壤水分愈多，水位愈接近底部，土壤水分愈少，土壤水分是否達到低限，依土壤特性而異，利用監測水管內水位高低來決定灌水的時機。

強化稻栽培系統 (SRI) 包括提早插秧時間 (約 2-4 葉齡) 以維護秧苗生長潛勢、採單本植、提高秧苗之株距、使用人工或機械除草、加強土壤之有機質、水分管理方式為每日或間歇性灌水，以保持土壤適當的水分但不長期浸水。通氣栽培是將水稻栽種於沒有湛水、非泥濘或非飽和水分狀態的土壤 (維持土層 15 cm 深之水分張力於 30 kPa)，甚至是乾燥土壤之田地，也就是土壤仍具有通氣之能力。此栽培法如同栽培玉米或小麥所進行的旱作栽培，僅需非常少的水量。

非淹灌覆蓋栽培係於水稻田地表面覆蓋塑膠膜，再進行打孔以利播種或秧苗移植，或是於插秧後再用麥稈覆蓋於地表。分別在分蘖中期、孕穗期、開花期、早期穀粒充實期或視田間情況進行灌溉。由於地表有覆蓋所以地熱、水分及肥料不易流失散去，可有效改善提昇寒冷地區栽種水稻之產量，且大幅節省灌溉用水、除草費用，地面溫度提昇也促使水稻較早成熟。

### 水稻節水栽培的效益

農業為生產事業，從事農業生產技術改善的目的之一為提升其生產效益，以節水栽培技術而言，最直接的效益評估為節省用水量多寡，若以單位投入之生產資源的產出效益表示，則可以水分利用效率表示。稻的生產栽培主要以獲取稻穀產量為目標，產量的表現為直接評估其效益的重點，若以單位投入之水量所產出的稻穀產量，則可以水分生產力代表節水栽培的效益，水稻的水分生產力 (water productivity) 為獲得的稻穀產量與水分投入量 (water input) 的比值：水分生產力 = 稻穀產量 / 水分投入量。由於水稻產出除需要應用水資源外，亦依賴所投入的肥料量，尤其是氮肥的使用量，因此有些研究以氮肥利用效率評估其效益，主要著眼點為減少水量是否有助於防止氮肥的流失。一般都認為水田是釋放溫室氣體甲烷的主要來源之一，因此有些節水栽培研究的試驗同時評估對甲烷排放量的影響，作為水稻節水栽培之效益。

淹水與非淹水交替系統 / 乾濕輪灌技術 / 間歇灌溉技術，與傳統湛水栽培比較，可節省水分將近 15-30%。利用停灌及復灌兩種作業交替方式來實施田間灌溉，兼具有減少灌溉水量及增加土壤水分消耗量效果，可以充分的使用土壤中可利用的水分。國際稻米研究所研發之乾濕交替灌溉方法，其灌溉量以達湛水 1-2 cm 為準，停灌時間（可能 1-10 天或以上）則以田面無餘水為基準，然後再重新灌水。乾濕交替式的水稻栽培法可以減少灌溉水的施用，並且提高稻株水分利用效率。至於是否會造成水稻的減產，端視土壤水分管理的良瘠而定，即持續維持土壤水分含量於造成稻株生長負面效應的臨界值以上，不至於干擾稻株正常生育。其次對缺水高度敏感的幼穗分化至抽穗期，必須保持適度的土壤含水量，至抽穗後再恢復交替式灌溉。水稻直播搭配不同程度的乾濕交替式節水處理，產量較傳統慣行湛水栽培高 3-17%，且消耗的水量減少 19%，並且能提升 25-48% 的水分生產力。

臺灣曾以土面下 10 公分之水分潛勢是否降至 -1.5 MPa 作為供水依據之節水栽培，比較七個水稻及陸稻品種的生育表現及節水效益，試驗三期作中，節水栽培的產量構成要素不比湛水栽培差，其中以南陸 1 號及臺農選 1 號兩個陸稻品種表現較佳，節水栽培三期作中分別節省 26%、38%、44% 的灌溉用水。節水栽培水分生產力平均為 0.32 g kg<sup>-1</sup>，湛水栽培水分生產力平均為 0.29 g kg<sup>-1</sup>，節水栽培顯著提高稻水分生產力；陸稻品種生長期短，較適應節水栽培。另外也以田間水位觀測管判斷土壤水分是否達到低限的節水試驗，結果顯示，兩年四期作的節水栽培，分別節省 1%、21%、29%、24% 的灌溉水量，節水及慣行湛水栽培的稻穀產量無顯著差異，節水栽培水分生產力平均為 0.257 g kg<sup>-1</sup>，湛水栽培水分生產力平均為 0.254 g kg<sup>-1</sup>；氮素利用效率以氮素用量 120 kg ha<sup>-1</sup> 最高，節水栽培為 38.36 kg kg<sup>-1</sup>，湛水栽培為 34.55 kg kg<sup>-1</sup>，但隨著氮素施用量愈高而下降。追蹤田區甲烷釋放量，甲烷排放較大

時期為一期作後期至二期作前期，全季的甲烷排放量一期作比二期作少，二期作湛水栽培甲烷排放量為 6.64-23.27 g m<sup>-2</sup>，節水栽培甲烷排放量為 6.00-15.31 g m<sup>-2</sup>。水田甲烷排放量主要受土壤溫度及田間水分多寡決定，追蹤田區水位與甲烷排放量的關係，資料呈現觀測管地表下水位低於 20 cm (<20 cm) 時顯著抑制甲烷排放，觀測管水位低於土表下 20 cm (<20 cm) 時幾乎沒有產生甲烷，且土壤的含水量越高，甲烷的釋放量越高。故可以推論節水栽培對水稻生產有其正面的影響。

SRI 在全球各地的試驗顯示，與傳統栽培方法相比，SRI 增加產量 50-100%、減少灌溉用水約為 25-50%、降低生產成本約 10-20%、提高稻米碾製率 15%，減少破碎米粒、減少化學肥料使用量，由於根部系統發展狀況良好且土壤通氣情形較佳，抗病蟲害亦較佳。

通氣栽培於菲律賓試驗，對耐乾旱之水稻品種，每公頃可收穫 4-6 噸以上，但所得之產量低，品質與食味差，仍無法取代適用於實行湛水栽培的水稻栽種區域。相對於灌溉式栽培，通氣式栽培水稻之灌水量減少 50%、水分生產力超過 60%。

## 展望

由於世界人口激增加及全球氣候變遷，有效水資源貧乏不足已成為全世界共同關注之重要問題，尤以如何有效使用農業用水，並能生產足夠之糧食以供應人類之需求為首要。臺灣地區水資源貧乏，近年來社會經濟情勢蛻變，對水之需求快速增加，致各水標的間之競用日益激烈，而新水源或新興水資源開發方式，又遭遇環境生態保護及經濟成本問題，困難重重，逐漸無法滿足新興產業對水之需求，進而可能影響國家總體經濟之發展。因此，在開源無力之情況下，需從節流以及有效運用有限資源中著手。

由於稻田所用的水從供水到形成有經濟價值的稻穀產量有三個階段，第一階段為將水輸入田間，第二階段為稻株吸收保留在土壤中的水分，轉成保

留在植株體內的水，第三階段為利用作物體內的水，提供稻株進行輸導作用、光合作用、呼吸作用與蒸散作用等，除維持基本新陳代謝維持生命外，主要產生乾物質提供生長，分配轉化為具有經濟價值的產物。水稻節水栽培的效益可從產量表現、節省水量多寡、水分利用效率、水分生產力、氮肥利用效率、甲烷排放量等不同觀點評估，在產量、品質降低至可接受的範圍內，節水栽培對各項環境資源的投入皆具有正面的效益。

考慮從供水到形成經濟價值產物的過程，不同地區因氣候、地下水位及土壤條件不同，節水栽培的效益也有所差異，因此節水栽培技術的選擇可因地制宜。除此之外，為適當執行水稻節水栽培技術，尚需了解在不同生育時期，水稻對水分的不同需求及不同缺水程度對產量造成的差異，亦須思考如何提升輸供水效率，如何有效監測、控制及維持土壤有效水分，才可綜合評估節水栽培的可行性，擬出適合的節水栽培技術與策略。

AgBIO

陳宗禮 國立中興大學 農藝學系 教授  
謝嘉如 國際合作發展基金會 駐尼加拉瓜技術團 農藝技師  
符耀中 國立中興大學 農藝學系 前碩士班研究生  
野田佳宏 日本岐阜縣農業技術中心 作物部 研究員

#### 參考文獻

1. 謝嘉如 (2009) 節水栽培對水稻生育及產量之影響。國立中興大學農藝學系碩士論文。臺中，臺灣。
2. 楊純明 (2010) 因應氣候變遷水資源短缺情境下之水稻田灌溉策略-論通氣式及乾濕交替式水稻栽培策略。作物、環境與生物資訊 7:212-220。
3. 符耀中。(2013) 節水栽培對水稻水分生產力及氮素利用效率的影響。國立中興大學農藝學系碩士論文。臺中，臺灣。
4. 野田佳宏。(2013) 水稻節水栽培的水分管理與甲烷排放。國立中興大學農藝學系碩士論文。臺中，臺灣。
5. 經濟部水利署 (2015) From <http://wuss.wra.gov.tw/annuals.aspx>。
6. Bouman, B. A. M., R. M. Lampayan and T. P. Tuong. (2007) *Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity*. Los Baños. International Rice Research Institute. pp. 45-47.
7. Farooq, M., N. Kobayashi, A. Wahid, O. Ito and S. M. A. Basra. (2009) *Strategies for producing more rice with less water*. Adv. Agron. 101:351-388.
8. Qadir, M., T. M. Boers, S. Schubert, A. Ghafoor, and G. Murtaza. (2003) *Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities*. Agric. Water Manage. 62:165-185.
9. Ye, Y., X. Liang, Y. Liu, J. Gu, R. Guo and L. Li. (2013) *Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use*. Field Crops Res. 144:212-224.