農業生產節水技術與系統研發

艾 群

國立嘉義大學生物機電工程學系教授

摘　要

由於全球暖化造成氣候變遷，台灣受限於天然地理條件，存在降雨的時空分布不均、豐枯水期之雨量懸殊、河流短促蓄水率差等問題，即將顯現缺水問題。而農業用水又是總用水量之四分之三，因此如何節省農業用水，是解決台灣水資源的方法之一。本文最主要是針對農業用水中最大宗的灌溉用水技術問題討論，探討以色列與美國加州農業節水技術，建議台灣未來在農業節水方面可以努力的方向。

一、引　言

全球自 1906 到 2005 年上升攝氏 0.74 度；且 20 世紀下半葉的上升幅度是平均值的 2 倍，人類有 90%的可能性是造成暖化的元凶，海面上升，1961 到 2009 年，海面每年上升 1.8 公釐；1993 到 2009 年加速為每年 3.1 公釐，而專家預計在 2100 年時將比 1990 年高出 38 公分至 56 公分。海平面上升的主要原因是海水體積膨脹，格陵蘭及南極洲冰川溶化的影響較小。自 1970 年代起，乾旱範圍擴大、持續更久且情形更嚴重；南北美東部、北歐、北亞、中亞降雨「大幅」增加，但非洲南部、南亞部分地區降雨減少。台灣受限於天然地理條件，自古即存在「降雨的時空分布不均」、「豐枯水期之雨量懸殊」、「河流短促蓄水率差」等問題。氣候變 遷的趨勢下，上述問題勢必更加嚴峻，尤其對「看天吃飯」的農業來說，更是一大挑戰。

臺灣氣候分析與預測，年雨量並無顯著變化，但降雨時數明顯減少，尤其是小雨（每小時累積雨量低於 5 毫米）次數大幅減少，導致平均降雨強度增加 20%。南部雨季變短乾季卻拉長。各地全年下雨天數都減少，降雨日 20 世紀初減少 31 天、到 20 世紀末已減少 98 天，連續不下雨天數逐漸變長，尤其南部雨季越來越短，乾季逐漸變長。台灣夜間空氣相對濕度也有下降趨勢，全年相對濕度超過 90%的發生時數，從 500 小時降到 200 小時，尤其都會區高濕度發生機率更明顯減少。濕度及霧的減少對植物衝擊相當嚴重，尤其是乾旱季節（如南台灣冬、春季），但國內目前對此沒有任何評估。

所謂農業用水，其內涵包括灌溉用水、養殖用水及畜牧用水等三項。早期之農業用水係以水稻灌溉為主，惟現在由於農業生產結構大幅改變，旱作栽培、養殖漁業及畜牧業快速成長，在用水量方面亦佔有相當之比率，故不能以水稻灌溉用水即代表整個農業用水。由水利署統計 97 年水資源供給概況，年總供水量 180 億 m^3，地面水 121 億 m^3，地下水 58 億 m^3。每年水資源需求概況為年計畫利用總水量 180 億 m^3，農業用水量 130 億 m^3，生活用水量 34 億 m^3，工業用水量 16 億 m^3， 97 年水資源概況為全島年降雨量 1,089 億 m^3，年蒸發 253.68 億 m^3，年逕流量 784.82 億 m^3，年滲透量 50.50 億 m^3 (水利署統計資料,2010)。農業用水佔總用水量 71%，而灌溉用水又約佔農業用水之 70%，水田佔可耕地 52%，稻米產值為農作物總產值之 21%，台灣地區民國 88 至 97 年平均水資源利用結構可見圖 1。

臺灣四面環海，氣候溫暖潮溼，年平均降雨量約 2,467 公釐，雖為世界平均值 973 公釐的 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年可分配雨量僅約 4,074 噸，不及世界平均值 21,796 噸的五分之一，顯示臺灣為水資源匱乏地區（圖 2）。此外，德國 Kassel 大學環境系統研究中心依據 1961～1995 年全球水文數據，

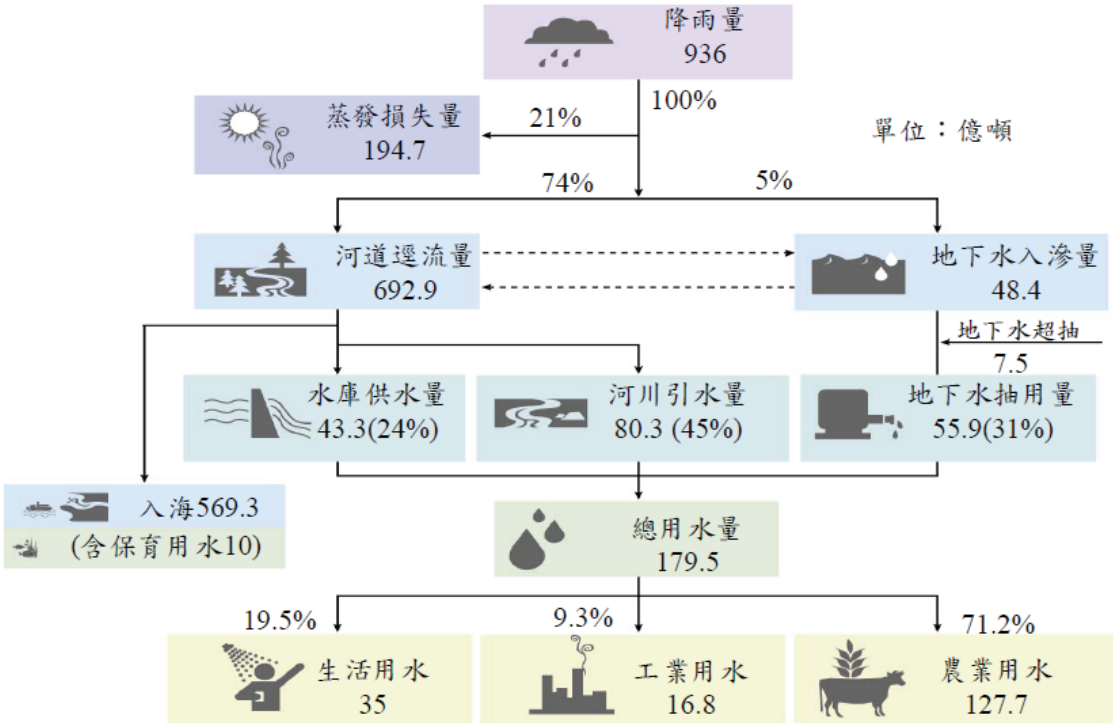


圖1. 台灣地區民國**88**至**97**年平均水資源利用結構(水利署統計資料, 2010)



圖2. 各國降雨量及每人分配雨量比較(水利署統計資料, 2010)

所作之統計顯示，台灣為世界第 19 位缺水國家，因此枯旱時的缺水情況可能成為常態。且因地狹人稠，每人每年所分配雨量僅及世界平均值之七分之一，且雨量在時間及空間上之分佈極不均勻，五月至十月之雨量即佔全年之 78%，枯水期長達六個月，再加上河川坡陡流急、腹地狹隘，逕流量被攔蓄利用的僅有 177.54 億立方公尺，約佔年總逕流量之 18%，其餘均奔流入海。台灣目前現有大小水庫約 40 座，密度相當高，為庫容均不大，水庫總容量約 22.43 億立方公尺，有效容量為 20.51 億立方公尺。因此如何蓄水貯水增加可使用水量為一大課題。

台灣地形狹長，東西最寬處不過 150 公里，而標高 1,000 公尺以上的山區即占 32%，100~1,000 公尺的坡地也達 31%，使得河川皆坡陡流急，降雨後迅速逕流入海，甚難蓄存，雖已闢建多座水庫，惟總容量有限，不易穩定供水。台灣年總用水量約 180 億噸，由水庫供水量約 43 億噸，目前水庫有效容量僅 19 億噸，佔全年用水量的 11%，遠低於鄰國日本水庫 36%（圖 3），若氣象水文情況不佳，即顯現缺水危機。

在台灣如此缺水的狀況下，農業用水約佔總用水量 71%，且灌溉用水又約佔了農業用水的 70%左右，因此如何節約農業用水就成了解決台灣缺水問題的一大方案了。

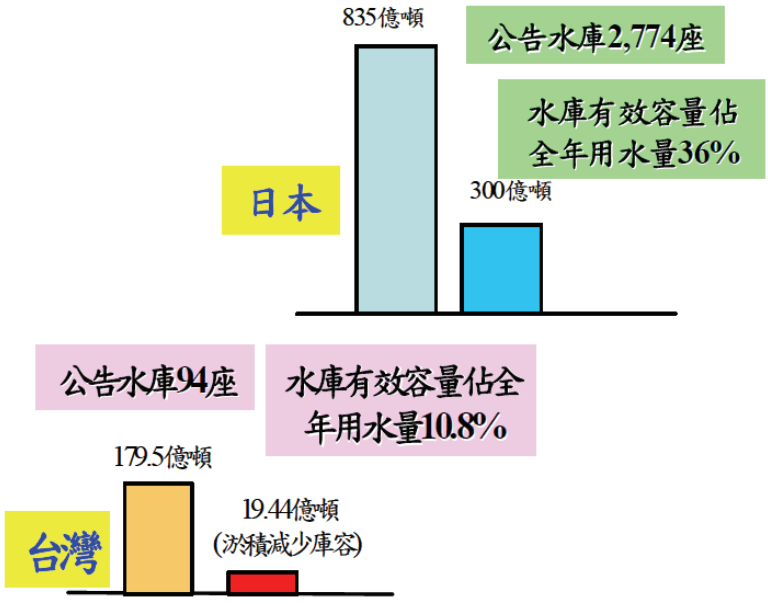


圖3. 台灣及日本水庫運用概況(水利署統計資料, 2010)

二、 技術回顧與目前現況

水是農業的基本，農業是人類定居、生產文化的[開始。人類知道使用水，用水來「灌溉」作物，或自高處築「塘」蓄水，以「渠道」輸水至低處，用「溝」將過剩的積水排走，用「井」去補充缺雨時期的灌溉水等技術，無論在東、西方都是一個生產的必需技術。

隨著時代的變遷，這些技術會進步。例如傳統的水淹灌溉，可以改進為溝灌、滴灌、噴灌與地下管路灌溉。傳統的水塘蓄水可以加深成「埤」或是擴大成「水庫」。傳統的渠道也可由較小的「水陂」改成大條的輸水「幹線」，而且聯結攔水堰、沉砂池、分水門、渡槽、虹吸管，到輸水的分、支線形成一個完整的供水網脈。傳統的排水溝也可以配合「暗管」、「暗渠」、「排水門」、「攔潮閘」與「堤防」等形成一個完整的排水系統。傳統的水井，也可以挖得更深，鑿得更大，改用金屬井管，使用抽水馬達以增加揚程與抽水量。

目前，台灣地區總耕地面積約有 87 萬公頃，其中有灌溉設施，屬農田水利會灌溉轄區內之農地約有 37 萬公頃，其餘 50 萬公頃之農地幾乎均無可靠之灌溉水源，在此一用水困難情形下，如何節省農業用水、提高水資源利用效率及解決乾旱時期作物灌溉問題，同時達到灌溉自動化目標，則成為政府有關部門長期努力之目的。

台灣地區作物向來以水稻為主，米為主要糧食作物，農田灌溉也以水田為主要對象，旱作物除甘蔗、蔬菜及少數特種作物外，少有灌溉。近十餘年來，由於國人飲食習慣改變，國內稻米消費量逐年減少，自民國 65 年起即發生生產過剩現象，與此同時，隨著國人消費型態及生活習慣的改變，國內對花卉、蔬菜、水果及雜糧之需求量卻相對增加，農業經營內容與型態隨之轉變，乃趨向精緻化、設施化、自動化、技術化及企業化，旱作栽培漸受重視，旱作管路灌溉方式的採用也逐漸普遍。

許多學者從不同學科和角度對節水農業的定義進行了闡述，但是對農業節水內涵的理解卻是基本一致的。農業節水是指充分利用自然降水和高效利用灌溉水的農業。在農業生產過程中的全面節水，既包括灌溉農業，又包括旱作農業；既包括工程節水，又包括農藝節水和管理節水。農業節水的核心是在有限的水資源條件下，採用先進的工程技術、適宜的農業技術和用水管理之政策與技術等綜合措施，充分提高農業水的利用效率和生產效益。農業節水的目的是在使農業供水量不變甚至減少的情況下，逐步擴大灌溉面積，增加農作物產量，提高經濟效益 ，促進農民增收，最終實現農業持續穩定發展。(董克宝，2007)

目前農業用水灌溉技術如下：

1) 低壓管道輸水灌溉技術：低壓管道輸水灌溉技術，是利用低壓輸水管道代替輸水渠，將水送到田間的技術措施。低壓管道輸水灌溉具有省水、節能、省地、省工、省時、便於管理、投資較低等優點，與噴、微灌相比，田間水利用率較低。為減少輸、配水過程水量的損失，現新建灌區都實行管道化輸水。

2) 噴灌技術：噴灌是利用一套專門設備，使水產生一定壓力，然後將壓力水射到空中，形成細小水滴，降落到地面濕潤土壤的灌水方式。噴灌具有灌水均勻、用水少、適應性強、省地、省工、增產、增效的特點。但投資高，耗能大，其噴灑效果受風影響大。

3) 微灌技術:微灌是通過管道系統與潛水器，按作物的需水要求，將水輸送到根部土層表面或土層的灌水方法。類型有滴灌、微噴灌和淹灌等。微灌具有省水、省工、增產、增效、投資低及便於和其他農業措施相結合的優點。

4) 改進地面灌水技術：傳統灌水方法定額大，均勻度差，田間水利用低，因此，需要改進地面灌水技術，改進地面溝規格，採用先進的灌水技術。

5) 精準灌溉節水技術：為了充分利用灌至作物根系活動層內的水分所採用的農業措施，稱為為農業綜合節水技術。在工程節水技術的基礎上，發展綜合農業節水技術，達到節水、高產、高效是當前研究的一個重點。我國注重綜合節水技術的研究已久，以期達到節水、優質、低耗的目標。

6) 雨水彙集利用技術：台灣降雨量每年約900億噸水，然而可使用大約只有20億噸水，雨水彙集利用技術，是在乾旱半乾旱丘陵地區，將較大強度降水所產生地表徑流彙集起來，並在最需要的時候供給作物利用的技術。這是一項古老而具有潛力的技術。我國對雨水彙集利用源遠流長，取得許多成功的經驗。但雨水的引導彙集、儲存和高效利用上缺乏系統化研究，可以結合生態與休閒觀光來設計雨水彙集的設施。

7) 節水灌溉管理技術：是根據作物的需水規律控制、調配水源，最大限度滿足作物對水的需求，實現區域效益最佳的農田水分調控管理技術。這項技術包括土壤商情監測、高效灌溉制度的制訂、綜合效益最佳等灌區配水技術。節水高效灌溉管理制度是灌溉管理技術的基礎，它是根據作物的需水規律，把有限水量在作物生育期內進行最優分配，達到高產高效的目的。我國對主要作物需水量和需水規律，已正進行系統研究，但對非充分灌溉還缺乏系統研究，滿足不了節水農業快速發展的需要。（劉學珍，2009）

對於有關農業節水，此處先舉國外為例參考，在這方面，以色列的經驗值得借鑒。以色列 60 %的土地年均降水量只有 300 公釐，一些地方不足 150 公釐。在這樣不利的環境中，以色列憑藉發達的水利灌溉系統，農業高度發達，農產品產量驚人，大量出口。以色列 60%以上的國土處乾旱與半乾旱狀態，水資源嚴重匱乏。但由於長期致力於發展水技術特別是農業節水技術，最大限度地利用水資源，自建國以來，以農業生產增長了 12 倍，而農業用水量只增長了 3.3 倍，以色列先進的灌溉技術對以色列的農業發展發揮了重要作用。（駐以色列經商參處，2010）

●以色列的水資源管理

以色列水利法規定，以境內所有水資源都歸國家所有，必須專門用於滿足居民需要及國家發展需要。以水利委員會負責全國水資源的管理，包括制定水利政策、分配用水配額、制定用水計劃與水資源發展規劃，以及防止污染、開發廢水、研製海水淡化設備、保護土壤和排污等工作。以水利委員會每年將 70%的用水配額分配給農業生產者，然後再根據總降水量，分配剩餘的配額。為鼓勵節水，以水利委員會規定農業生產者按其用水量佔其用水配額的百分比繳納費用。

●以色列之農業用水技術簡介

以農業用水技術在國際上處於領先低位，農業節水能力很強。例如，由於使用了低壓管路灌溉方法，以色列單位面積土地的耗水量已下降了 50%-70%。

現在，以色列境內的灌溉土地都使用了這種灌溉方法。此外，許多田間作物都使用處理後的廢水灌溉，通過使用迴圈水，不僅節約了水資源，同時有利於生態環境。以色列用於農業生產的處理後廢水約為 2.3 億立方公尺，且該數字還在不斷增長。以色列水利委員會希望實現到 2010 年，三分之一的農業用水為處理後廢水的目標，以減少可飲用水在農業生產中的使用比例。

(一) 低壓管路灌溉技術(Low pressure pipeline irrigation technology)

以色列在灌溉領域具有廣泛的經驗，並以此為基礎開發出了一系列新的灌溉技術，這些技術現在已成功地進入國際市場。以色列滴灌設備生產商每年都會推出 5-10 種新產品。以色列生產的灌溉設備約有 80%用於出口。以色列的灌溉設備生產商可根據客戶的特殊要求定制產品。來自海外的客戶只要向其提供土壤和農作物類型的田間數據，就可以獲得水質要求、適於此種用水的過濾器的選擇、能防止殘餘物堆積和堵塞的合適的化肥推薦、最佳的灌溉方法以及其他客戶需要的資訊等一系列的專業諮詢。

(二) 滴灌技術(Drip irrigation technology)



以色列的滴灌技術處於國際領先地位。其滴灌設備每小時可供水 1 公升-20 公升不等，最高水利用率可達 95%，非常適用於精準農業種植。例如，無土栽培使用的低流量滴灌噴頭，在溫室中進行精準種植往往需要消耗大量的水，而為溫室應用而設計的滴灌系統，則使用了低流量噴頭，每小時供水僅 200 毫升。這種方法灌溉的一個獨特之處在於水分可以在培養基中均勻擴散，減少了水分的散失。

以色列 80%的灌溉土地都使用了水肥灌溉的方法，使灌溉與施肥同時進行，一次完成。以色列開發了針對廢水灌溉的滴灌頭，它能控制水的流量，並且能防止堵塞。以色列生產的滴灌管線中安裝了過濾筒，它是一種塑膠的多齒元件，當水流經過濾筒時，會產生渦流，可以拋掉其中的塵粒，以防止狹窄的滴頭出口受堵。

滴灌系統主要由首部樞紐、管路和滴頭三部分組成。

- **首部樞紐**：包括水泵(及動力機)、化肥罐篩檢程式、控制與測量儀錶等。其作用是抽水、施肥、過濾，以一定的壓力將一定數量的水送入幹管。
- **管路**：包括幹管、支管、毛管以及必要的調節設備(如壓力錶、閘閥、流量調節器 等)。其作用是將加壓水均勻地輸送到滴頭。
- **滴頭**：其作用是使水流經過微小的孔道，形成能量損失，減小其壓力，使它以點滴的方式滴人土壤中。滴頭通常放在土壤表面，亦可以淺埋保護。

(三) 埋藏式灌溉技術(Buried irrigation technology)



以色列從滴灌技術中又派生出一個新的灌溉方法，就是把管線埋藏在地下 50 釐米深處的埋藏式灌溉，這種灌溉方式可以保持地表乾燥，即使是灌溉時也不影響田間作業。在這種埋藏式滴灌系統中使用了一種叫塔普蘭（Tarplan）的材料，它可以阻止滴頭附近的根須的生長，從而使滴灌系統免於被細小的根須穿透。當水閥關掉，停止灌溉時，滴灌系統的氣門會打開，使管線內充入空氣，防止外來的塵土被吸入滴灌頭。以色列還開發了多種滴灌頭，如管線滴頭、可調和非可調固定滴頭，以及預先鑄入滴灌管壁的集中式滴頭等。

(四) 噴灑式灌溉技術(Spray Irrigation Technology)

採用這種方法，可以讓每棵樹都擁有一個獨自的噴灑器為其灌溉。以色列還開發了一系列主要用於果園和溫室灌溉的噴灑器附屬產品。使用噴灑式灌溉的耗水量大約在每小時 30-300 公升之間，這種灌溉方式可以使水的有效利用率達 85%。

(五) 散佈式灌溉技術(Distribution irrigation technology)



散佈器主要是為田間作物的灌溉所設計的，因為這種灌溉方式適合於大區域灌溉的要求。使用散佈器可以使水的利用率達到 70%-80%（傳統的開放式灌溉，水的利用率只有約 40%）。

(六) 灌溉系統的操作(Irrigation system)

以色列所有的灌溉方式都可以採用電腦控制完成自動化灌溉系統。電腦化操作可完成實時控制，也可執行一系列操作程式，完成監視工作，且能長時間工作，精密、可靠、節省人力。在灌溉過程中，如果系統記錄下水肥施用量與要求相比有一定偏差，系統會自動地關閉灌溉裝置，電腦系統還允許操作者預先設定程式，有間隔地進行灌溉。這些系統中有可以幫助收集灌溉資訊的感測器，如埋在地下的濕度感測器，負責收集土壤濕度資訊。還有一種感測器，它能通過檢測植物的莖和果實的直徑變化，來決定對植物的灌溉間隔，這種感測器直接和電腦相聯，當需要灌溉時，它會自動打開灌溉系統進行操作。

另外舉美國加州為例，水是農業的命脈"在加州被理解和體現的最為透徹，其是加州農業得以成功和持續的根本。加州水資源匱乏，且地域分佈不均勻。農業用水主要來源於北部高山積雪融化後的"北水南調"渠道引水、自然降水和開采地下水。但是積雪融水和自然降水總量有限，開採地下水不僅投資大，而且帶來地下水位下降等系列的負效應，傳統的灌溉技術不僅浪費水源，而且加重了鹽鹼危害程度，因而改進灌溉技術，發展農業綜合節水技術，提高單位水資源的利用率和效益，顯得非常重要。加州 90%的種植農田具備灌溉條件，其中69%為地表重力灌溉，18%為噴灌，12%為滴灌，不到 1%為地下灌。綜合節水技術被廣泛應用於不同的灌溉模式中。地表重力灌溉被應用在各種種植模式中，節水技術主要在以下四個方面得以體現：一是因土壤作物灌溉制度和定額的確定；二是利用鐳射技術平整土地；三是栽培種植輪作；四是灌溉後排水的回收迴圈利用和對鹽漬化影響的處理。田間裝備灌溉（噴、滴和地下灌）被廣泛應用於經濟作物的種植中，提高節水效益主要考慮以下方面：一是裝備、用

水花費與產出收益間的合理比價；二是植物營養需求、農產品品質改善驅動下的水、肥一體化灌施；三是在嚴重乾旱區域（降水在 200mm 以下，蒸降比在 5 以上）重點實施補充灌溉；四是完全電腦監控下的精確灌溉；五是降低田間灌溉設備成本的安裝佈局或設備改造。現代化的灌溉裝備和綜合節水技術，加上行之有效的管理，極大地促進了加州旱作節水農業的發展。據統計，1995 年加州農業的用水量僅相當且略低於 1967 年的用水量水準，但其種植業總產卻比 1967 年高出 67%。

美國加州農業發達而水資源相對貧乏，為解決這一矛盾，加州採取了各種節水工程技術措施，可以說世界先進節水灌溉技術在加州都得到了較好應用。以下就加州節水灌溉的一些主要措施作一介紹。

(一) 地面灌水技術

地面灌水技術在美國農業灌溉中占主導地位，60%以上的農業灌溉採用這種灌水技術，其方法主要有溝灌、畦灌。美國的溝灌與畦灌是經過技術改良的，它融合著現代最新技術成果與科研成就，所以傳統的灌溉方法在美國仍然具有較高的科技意涵。

(二) 溝灌

溝灌是美國地面灌溉的主體，約占地面灌溉的 70%以上，主要應用於果樹和棉花、花生、蔬菜等行棵型種植作物。對果樹而言，根據行距的不同，一般兩行果樹之間開 3～5 個灌水溝，大田作物則根據其種植特點布置灌水溝。與溝灌相配套的灌水器材主要有：

1. 多口門給水栓，這種給水栓露出地面 30～40 cm，給水栓周圍均勻設置若幹個小閘門出水口，每個出水口出水量不大，分別對應一個灌水溝，這種給水栓最多設有 8 個口門，同時可給 8 條灌水溝灌水。
2. 多出口輸水管，這種管多是鋁合金管，在鋁合金管上與灌水溝的間距對等布設小閘門，每個小閘門對應一個灌水溝，灌溉時可根據供水量或需要，開啟一個或多個口門進行灌溉，亦可進行輪灌。這種管屬地面移動管，作物耕種時收起來，種植完後將管擺放在地頭，直至收割期。
3. 虹吸管，這種管就是普遍的橡膠管或軟塑料管。水是通過防滲渠道送到田間，通過節制閘將水位提高，使水位高出田面，利用虹吸原理，一溝一管將水送到田間。
4. 脈沖溝灌發生器(又叫間歇灌溉)。水流通過管道時，脈沖發生器根據指令，左右放水，水流流量一般較大，在灌水溝中快速向前推進，間隔一

段時間後，再進行第二次、第三次沖灌，直至達到灌水要求，利用這一技術較常規溝灌可節水 25%～30%，畦長也可增加。

5. 尾水利用技術，由於流量較大時，溝灌水流向前推進的速度很快，短時間內就可灌到地頭，而這時田間灌水量還沒達到灌水要求，為此要持續一段時間，這樣水就會源源不斷從地頭流出，為利用這些尾水，美國因此而采取尾水回收利用技術，就是在地頭挖一集水溝，把尾水收集起來，利用低揚程泵重新將水送進管道，循環利用。

(三) 畦灌

在美國畦灌主要應用於大田密植作物如小麥等，畦寬度 10 m 左右，畦長 200 m 左右，灌溉時采取大流量快速推進方式，每一畦配套一個給水栓，一次灌一畦，畦田規格根據農場、作物、水源情況確定，同時畦田都經過嚴格的激光平整。因此，美國的畦灌還是相當省水的。這種灌水方式，主要分布在水源相對豐富的河流兩岸，或地下水豐富的地區。

美國的地面灌水技術無論是溝灌或畦灌，其田間大部分都是採用管道輸水，水通過管道直送溝、畦，即使在自流灌區也是如此，因此，輸水過程的水損失相當少。田間通過雷射平整、脈沖灌水、尾水回收利用等技術，灌水均勻度很高，水流均勻入滲，從而提高灌水效率。輸水防滲、田間改造加之相應的配套設備，構成美國地面灌溉節水的三個核心內容。

(四) 噴灌



美國的噴灌形式多種多樣，時針式、滾移式、平移式、卷盤式、支架式都有。支架式從微噴、小噴灌到噴灌呈系列化。滾移式、時針式、平移式、卷盤式與世界各地的形式沒有大的區別，使用範圍上有所側重，草皮養植場以平移式為主，大田作物則多用時針式、平移式或卷盤式。

支架式噴灌即固定式或半固定式噴灌，固定式噴灌與我們常說的概念一致，就是常年不動，從支架到噴頭常年放置野外，這種固定式與相應的耕作機構相配套，不會對耕作造成影響。在畦灌支撐桿與輸水管道的聯接

上，以及噴頭管材、管件設計上，美國都有獨到之處。半固定式與我們習慣概念不完全一樣，準確的稱謂應為“季節性固定噴灌”。就是耕種時收起來，耕種結束後再放置到田間，直到收割期。小噴灌在美國隨處可見，主要用於低矮密植作物，如蔬菜、草莓等。小噴灌是介於微灌和噴灌之間的一種形式，投資省、適用性強。微灌在美國主要用於果樹和環境綠化。

(五) 滴灌

滴灌也是美國應用較多的一種節水灌溉技術，主要應用於葡萄。葡萄園採用的都是滴灌技術，滴灌可提高葡萄產量、改善葡萄品質，從而進一步提高葡萄酒的品質，所以滴灌技術倍受農場主和葡萄酒商的青睞。針對滴灌技術易堵塞的弱點，美國對水質過濾處理極其嚴格，一般採取 3～4 級過濾。壓力可補償式滴頭的研製與應用是滴灌在美國能得以快速發展的一個主要原因。

另外，加州地區早期的「用水移轉」為彼此農田間灌溉用水的移用，直至西元 1987~1993 年共 6 年的期間，加州地區發生史上最嚴重的旱災，各地區缺水問題頻傳，加州水資源機構為因應各用水標的供水需求，於西元 1991 年規劃了許多短期(1 年或低於 1 年)用水轉換辦法。該年加州水資源部門(Department of Water Resources，DRW)亦創立了「乾旱水銀行」，購買灌區之農業用水移轉至特定缺水集水區、農田及周圍的使用者利用，直至西元 1992□1994 年，加州「乾旱水銀行」的規模漸漸發展為地區性用水移轉。

三、 台灣的農業用水與節水技術

農業用水佔全國年總用水量 71%，將協調行政院農業委員會研議農業節水技術，如加強灌溉管路管理、節水型水稻與耕作時期調整等，並輔以農業生產政策之檢討，以增加供水穩定度。例如桃園（15 公頃）及嘉南（585 公頃）地區推廣省水管路灌溉，每年即可節約 3 百萬噸水量，成效良好(水利署，2009)。

農業用水量的 70%用於種植業灌溉，其餘用於林業、牧業、漁業以及農村人畜飲水等。儘管農業用水所占比重近年來明顯下降，但農業仍是我國第一用水大戶，發展高效節水型農業已是各國的基本戰略。

未來可以努力發展的農業節水技術，建議如下：

(一) 農業用水優化配置技術：農業用水水源包括降水、地表水、地下水、土壤水以及經過處理符合水質標準的回歸水、再生水等。通過工程措施與非工程措施，優化配置多種水源，是實現計畫用水、節約用水和提高農業用水

效率的基本要求。並大力推廣各種農業用水工程設施控制與調度方法，高效使用地表水，合理開採地下水。逐步推行農業用水總量控制與定額管理。加快制定各地區不同降水年型農業用水總量指標和不同灌水方法條件下不同作物灌溉用水定額，合理調整農、林、牧、漁各業用水比例。發展土壤品質、旱情監測預測技術，加強大尺度土壤水分時空變異規律研究和土壤品質與旱情指標體系研究；積極研究和開發土壤品質、旱情監測儀器設備。

(二) 高效輸配水技術：農業用水輸配水過程中的水量損失所占比重很大，提高輸水效率是農業節水的主要內容。因地制宜應用管道防滲技術，對輸水損失大、輸水效率低的支渠及其以上管道優先防滲；尤其對台灣管路約有 30% 的滲漏。發展管道輸水技術，改造較小流量管道時優先採用低壓管道輸配水技術；在高揚程提水灌區和有發展自壓管道輸水條件的灌區，優先發展自壓式管道輸水系統。加強不同氣候和土質條件下管道防滲新材料、新工藝、新施工設備的研究；加強管道防滲防漲技術的研究和產品開發。積極發展渠系動態配水技術，發展和應用即時灌溉預報技術；加強灌區用水管理技術的研究與應用，提倡動態計畫用水管理。鼓勵研究、開發與推廣精度高、造價低、適用性強、操作簡便、便於管理和維護的小型量水設備。

(三) 田間灌水技術：田間灌水既是提高灌溉水利用率的最後環節，又是引水、輸水和配水的基礎，改進田間灌水技術是農業節水的重點。改進地面灌水技術，推廣小畦灌溉、細流溝灌、波湧灌溉；合理確定溝畦規格和地面自然坡降，縮小地塊；推廣高精度平整土地技術，鼓勵使用鐳射平整土地；科學控制入畦（溝）流量、水頭、灌水定額等灌水要素，並淘汰無畦漫灌。積極鼓勵在經濟作物種植區、城郊農業區規模經營的地區應用噴灌技術；優先推廣輕小型成套噴灌技術與設備；在山丘區或有自壓條件的地區，鼓勵發展自壓噴灌技術；積極研究和開發低成本、低能耗、使用方便的噴灌設備。在果樹種植、設施農業、高效農業、創匯農業中大力推廣微噴灌與滴灌技術；提倡微灌技術與地膜覆蓋、水肥同步供給等農藝技術有機結合；鼓勵在山坡地利用地面自然坡降發展自壓微噴灌、滴灌、小管出流等微灌技術；鼓勵結合雨水集蓄利用工程，發展和應用低水頭重力式微灌技術；積極研究和開發低成本、低能耗、多用途的微灌設備。

(四) 鼓勵應用精準控制灌溉技術，提倡適時適量灌溉；加強農作物水分生理特性和需水規律研究；積極研究作物生長與土壤水分、土壤養分、空氣濕度、大氣溫度等環境因素的關係。提倡在作物需水臨界期及重要生長發育時期

灌“關鍵水”技術；鼓勵試驗研究作物水分生產函數；研究作物的經濟灌溉定額和最優灌溉制度；加強非充分灌溉和調虧灌溉節水增產機理研究；研究和運用控制性分根交替灌溉技術。

(五) 生物節水與農藝節水技術：生物措施和農藝措施可提高水分利用率和水分生產率，節約灌溉用水量，是農業主要節水措施。提倡灌溉與施肥在時間、數量和使用方式上合理配合，以水調肥、水肥共濟，提高水分和肥料利用率。提倡深耕、深鬆等蓄水保持技術和生物養地技術。改善土壤結構，提高土壤的蓄水、保水、供水能力，增加自然降水的利用率，降低灌溉用水量。重視深耕機具的研究、開發和產業化。在土質較輕、地面坡度較大或降水量較少的地區，積極推廣保護性耕作技術。加強保護性耕作技術中稻桿殘莖覆蓋處理、機械化生物耕作、化學除草劑施用三個關鍵技術的研究；加強適用於不同地區的保護性耕作機具的研製與產業化。發展和應用蒸發抑制技術。提倡在作物需水高峰期對作物葉面噴施抗旱劑；鼓勵具有代謝、成膜和反射作用的抗旱節水技術產品的研究和產業化。推廣抗(耐)旱、高產、優質農作物品種，加快發展抗(耐)旱節水農作物品種選育的分子生物學技術，選育抗旱、耐旱、水分高效利用型新品種。鼓勵使用種衣劑和保水劑進行拌種。加強低成本、多功能保水拌種劑、經濟作物和草場專用保水劑產品和設備的研究與開發。

(六) 降水和回歸水利用技術：提高降水利用率和回歸水重複利用率可直接減少灌溉用水量，是農業節水的最基本內容。推廣降水滯蓄利用技術，積極發展不同作物、不同降水條件下田間水管理技術，並廣建沈砂生態池，推廣協調作物耗水和天然降水的灌溉制度與灌水技術；在旱作農業區，推廣以滯蓄天然降水為主要目的的土地平整技術和改進耕作技術；在水稻種植區，積極推廣水稻淺灌深蓄技術；在乾旱半乾旱地區以及保水能力差的山丘區，推廣魚鱗坑、水準溝等集雨保水技術。推廣灌溉回歸水利用技術，積極發展灌排統一管理技術；在無鹽鹼威脅地區，杜絕無效退泄和低效排水的灌溉水管理技術。大力發展雨水集蓄利用技術。推廣設施農業和庭院集雨技術；推廣工程設施標準化；研究和應用雨水集蓄利用中水質保護技術；積極開發環保型、高效低價雨水彙集、保存、防滲新材料。以日本為例，日本年平均降雨量約為 1,700mm，僅為臺灣年平均降雨量的三分之二，戰後日本為了提高降雨有效利用率，採行將水田湛水深提高至 250mm 的做法，以增進水田的貯留水量；此項技術不僅可提高稻米品質，亦可解決灌溉水量不足的缺水問題。目前臺灣地區水田的湛水深約為 60mm，若能仿

照日本，設法提高湛水深至 250mm，則相當於增加 190mm 之貯留水量；此外，此貯留空間亦可作為滯洪之用，於洪泛時期降低淹水風險，截留之水量則透過地下水補注及水平滲流的方式，回歸供其他標的使用，亦即以「水田即水庫」的構想開發新興水資源。目前台灣已有研究團隊針對雲林地區農業回歸水進行一系列之研究，初步估計，僅雲林縣開發新興農業回歸水的供水能力，已足可支應六輕 2 倍以上的需求，甚至到了非灌期，亦可從農業用水的源頭，直接供應工業所需之用水，下游工業區之用水可確保無虞。

(七) 養殖業節水技術：發展養殖業節水技術，提高牧草灌溉、畜禽飲水、畜禽養殖場舍沖洗、畜禽降溫、水產養殖等養殖業用水效率，是農業節水的一個重要方面。加快發展抗(耐)旱節水優良牧草品種選育技術，選育適合當地自然條件的野生牧草或馴化栽培的人工牧草優良品種；選育深根系、直立小面積葉片、對乾旱缺水的環境具有較強適應性和抵抗能力的優質耐旱牧草。發展和推廣適合天然草地和旱作人工草地的節水抗旱型優良牧草栽培技術，建立與光照資源、水資源特別是降水資源相適應的種植結構和種植制度；合理搭配豆科、禾本科等不同牧草種類，發展和推廣禾本科—豆科、牧草—飼料立體種植或草田輪作技術。大力推廣人工草場的節水灌溉技術，推廣草地節水灌溉制度；因地制宜發展草地灌溉管道防滲襯砌和管道輸水灌溉技術；鼓勵在適宜條件下發展草地噴灌技術；改進草地地面灌水技術；發展草地灌溉用水管理技術；加強牧草需水規律、灌溉制度和灌水方法與技術試驗研究。淘汰草地無畦漫灌技術。發展草原節水耕作技術。提倡應用草原免耕直播技術；發展人工補播和人工種植技術；重視增強草地土壤蓄水保肥能力；大力發展牧區灌溉飼草料基地。發展集約化節水型養殖技術，提倡家畜集中供水與綜合利用；推廣“新型”環保畜禽舍、節水型降溫技術和飲水設備；推廣具有防滲和淨化效果的水質處理結構、磚石結構等集雨技術設施；鼓勵研製節水型、多種動力、構造簡單、使用方便、供水保證率高的自動給水設備。促進節水、高效的工廠化水產養殖設施的研究和推廣使用，逐步淘汰水槽長流供水技術。推廣養殖廢水處理及重複利用技術，推廣養殖廢水厭氧處理後的再利用技術及深度處理和消毒後用於圈舍沖洗的迴圈利用技術；提倡分質供水和多級利用；改變傳統水沖清糞和水泡糞為乾清糞方式；研究和開發低耗能、高效的養殖廢水處理設施。發展畜產品、水產品加工節水技術。鼓勵研究和開發多功能、低成本、節水、環保型加工工藝和技術裝備。

(八) 村鎮節水技術：針對村鎮居民用水分散、農產品加工工藝簡單、村鎮用水效率低、村鎮供水設施簡陋、安全飲用水源不足等特點，發展村鎮節水技術。發展和推廣村鎮集中供水技術。積極推行計畫用水，發展飲用水源開發利用與保護技術。開採地下水應封閉不良含水層，防控苦鹹水、汙廢水等劣質水侵入水源；鼓勵水源保護林草地建設。推行集中供水，積極發展村鎮供水管網優化設計技術。鼓勵研究開發並推廣村鎮家用水錶和節水型用水設施，缺水地區要逐步開展村鎮家庭用水分戶計量。發展村鎮飲用水處理與水質監測技術，水質不達標地區提倡飲用水源集中處理；建立水質檢測制度；鼓勵開發並推廣適宜村鎮管理條件的簡易監測設備和可攜式監測設備。

(九) 發展精緻灌溉：精緻灌溉是針對植物體本身對水份需求量做精準的灌溉，植物體與介質等由於蒸散作用(evapotranspiration, ET)損失了多少水，在下次灌溉時便應加以補充。灌溉管理運用感測技術，許多感測器可用來偵測土壤中含水狀態以了解供應面，偵測空氣的蒸氣壓差以了解植物體的可能失水程度(需求面)，甚至直接量測植物體在缺水或補水過程中的反應，如此可以節省許多無謂的灌溉水量（林平等）。

(十) 發展植物工廠在地生產蔬菜：目前北部食用之蔬菜，大都為南部生產再輸送至北部，以生產蔬菜的植物工廠而言，其用水量是傳統土耕蔬菜種植的10%左右，若是能以在地生產在地銷售經營植物工廠，除了用水量減少之外，甚至還會減少目前南菜北送運輸產生的碳排放。

(十一)建立灌溉與水質建控自動化系統：針對各地氣候、土壤、地形、水源、灌溉系統與作物生產等資訊，結合雲端技術、機電工程、無限感測網路(WSN)、植物本體感測器、土壤品質感測器等等先進科技，建立一套全台適用的灌溉與水質建控自動化系統。

四、結　語

有鑑於氣候變遷，再加上台灣豐沽水期不穩定，因此如何在取水、存水、輸水上更有效率的使用在農業生產上，是一個很嚴肅的課題。必須產、官、學界一起努力，並結合機電工程、無線網路感測技術(WSN)、人工光源、再生能源等先進科技，期使佔全年總用水 70%的農業用水能逐年降低，並移轉給生活與工業用水使用。

參考文獻

1. 水利署統計,2010 http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22921&ctNode=5401&comefrom=lp#5401)
2. 林平、方煒。植物體感测在自動灌溉管理的應用。
3. 駐以色列經商參處，2010， http://big5.ec.com.cn/gate/big5/ccn.mofcom.gov.cn/spbg/show.php?id=9749&ids=
4. 董克宝, 何俊仕,2007, 淺析現代節水農業。安徽農業科學。2007,35(16) :4937-4938。
5. 劉學珍，2009，現代節水農業技術淺析。楊淩職業技術學院學報，第八卷第二期。P42-45。
6. California agriculture and water-saving irrigation and Its Implications, 2006（http://www.hi138.com）
7. Dennis Wichelns, Laurie Houston, David Cone, Qiming Zhu, James E. Wilen,1996, Farmers describe irrigation costs, benefits: Labor costs may offset water savings of sprinkler systems, California Agriculture 50(1):11-18.