

因地制宜：美國多元的農業用水政策

國立臺灣大學生物環境系統工程學系 胡明哲教授 編譯

摘要

本篇報告整合美國農業部經濟研究局、佛羅里達州農業和消費者服務部、及密西根州農業部的相關資料與報告，介紹美國農業灌溉用水情況，討論美國農業灌溉用水的空間分布、灌溉用水量的趨勢、各類作物的灌溉面積、灌溉水源、農作物的灌溉方式，並討論美國佛羅里達州與密西根州農業灌溉用水狀況。「美國佛羅里達州農業灌溉用水」報告中提及疫情影響了農產品市場的供應鏈、價格、營收、消費量，故其農作物生產的農業用水的時間與空間需求也造成改變，台灣針對疫情、或其他的自然、大規模災害，分析農業生產、農業供需系統、農業用水等不確定性，可能造成風險的評估與規劃也極為重要。報告中也分析美國不同區域農業用水在時間、空間、作物、灌溉方式的需求變化，政府及決策單位也需針對臺灣未來氣候變遷、人口變化、國土規劃、農業生產等變化，模擬可能的情境，規劃因應調適策略。

關鍵詞：灌溉用水量(Irrigation water demand)、空間分布(Spatial analysis)、灌溉面積(Irrigation area)、灌溉水源(Irrigation water sources)、風險評估(Risk analysis)

因地制宜：美國多元的農業用水政策

壹、前言

本篇報告整合美國農業部（United States Department of Agriculture, USDA）經濟研究局（Economic research service, ERS）、佛羅里達州農業和消費者服務部（Florida Department of Agriculture and Consumer Services, FDACS）、及密西根州農業部（Michigan Department of Agriculture）的相關資料與報告[1-3]，介紹美國農業灌溉用水。

貳、文獻回顧

一、美國農業灌溉用水

農業是美國地下水和地表水的主要用戶，2015 年灌溉占美國淡水總用水量的 42%。農業灌溉水量可以提供乾旱地區的作物生產和在生長季降水不足時補充濕潤地區的土壤水分，灌溉提高了農業部門的生產及收益，根據 2017 年美國農業普查資料，利用灌溉的農場生產佔美國作物銷售總值的 54% 以上，灌溉土地佔收穫的農田的不到 20%，灌溉作物生產有助於美國許多地區的當地農村經濟，並為美國的牲畜、食品加工、運輸和能源部門做出貢獻。

（一）美國農業灌溉用水的空間分布

根據 2017 年美國農業普查報告，美國灌溉農田總面積為 5,800 萬英畝。大部分灌溉土地集中在美國西部，許多作物的生產都需要灌溉，灌溉在美國東南部也很常見，特別是沿阿肯色州、路易斯安那州和田納西州的密西西比河谷以及喬治亞州南部和佛羅里達州中部，灌溉地點取決於區域種植模式、當地氣候條件以及地表和地下水資源的可用性。

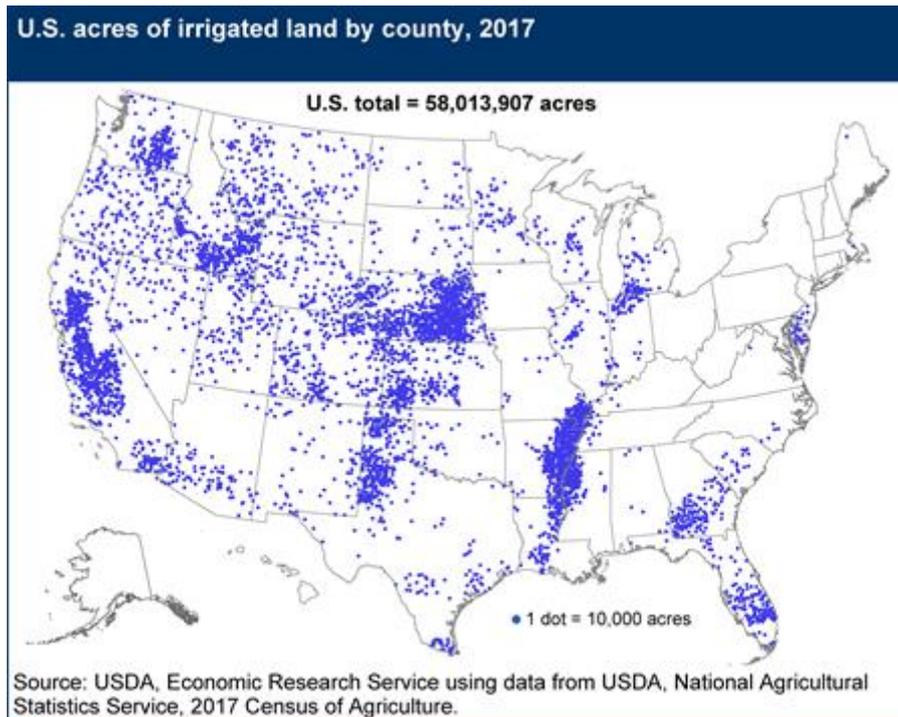


圖 1、美國灌溉農田面積空間分布

資料來源：美國農業部經濟研究局的農業灌溉水需求報告 [1]

內布拉斯加州是美國所有州中灌溉土地最多的州，灌溉農田面積為 860 萬英畝，美國灌溉農田的 14.8%，內布拉斯加州豐富的地下水資源可供灌溉，因為該州的大部分地區都位於高平原(Ogallala)含水層之上，加利福尼亞州排名第二，擁有 780 萬英畝，美國灌溉農田的 13.5%；阿肯色州、德克薩斯州和愛達荷州在 2017 年灌溉農田總面積排名前 5 位，2017 年灌溉面積排名前 20 位的州約佔所有灌溉土地的 90%。

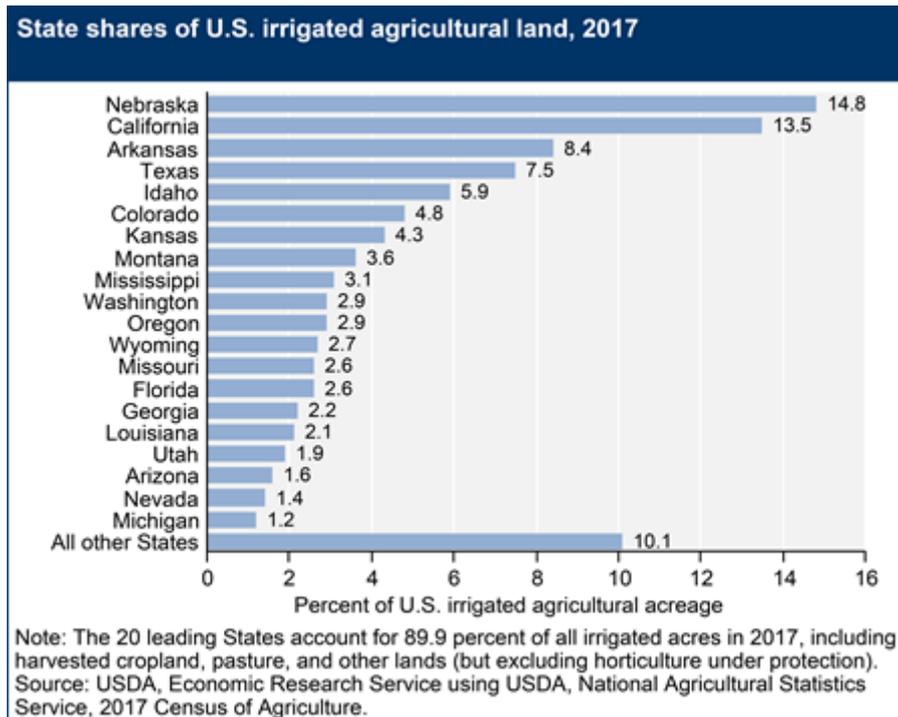


圖 2、美國各州灌溉農田總面積排名

資料來源：同圖 1

(二) 灌溉用水量的趨勢

灌溉對美國農業生產的重要性在過去的一個世紀裡不斷提升，自 1890 年以來，美國灌溉面積從不到 300 萬英畝增加到 2017 年時已超過 5,800 萬英畝。全國灌溉土地的擴張部分歸功於聯邦、州和地方的水開發項目以及地下水抽取的創新技術。最近，灌溉強度（以全國平均每英畝灌溉用水量衡量）有所下降，以應對灌溉面積的區域變化、種植模式的變化以及水應用技術效率的提高，最近 50 年間（1969 年到 2017 年）平均灌溉用水效率從每英畝灌溉超過 2 英畝英尺 (acre-foot) 下降到每英畝灌溉不到 1.5 英畝英尺（1 英尺=0.3048 公尺）。

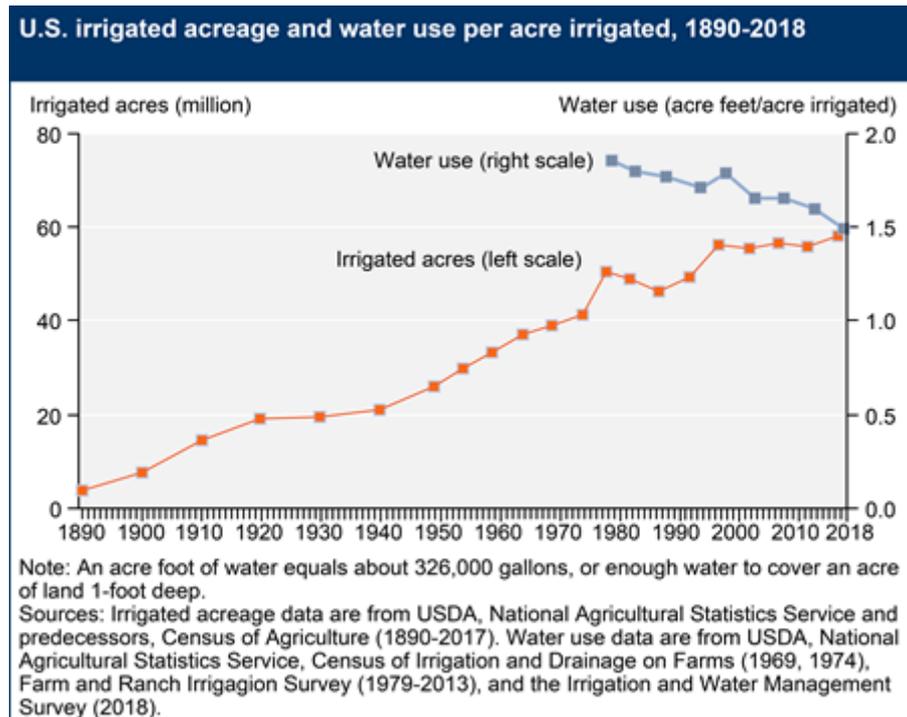


圖 3、美國灌溉面積與灌溉用水效率的變化趨勢

資料來源：同圖 1

總灌溉面積的全國趨勢掩蓋了灌溉發生地點的重要區域間差異。1997 年至 2017 年間，加利福尼亞州的總灌溉農業用地從 880 萬英畝減少至 780 萬英畝，而內布拉斯加州的灌溉用地從 700 萬英畝增加為 860 萬英畝。在同一時期，阿肯色州的灌溉農田面積增加了超過 100 萬英畝，而德克薩斯州減少了近 150 萬英畝。2012 年，阿肯色州取代德克薩斯州，成為僅次於內布拉斯加州和加利福尼亞州的第三大灌溉面積。這些觀察到的區域趨勢反映了與競爭性用水需求、乾旱對地表水供應和地下水枯竭相關的可用水量的變化如何影響灌溉生產的區域分佈。

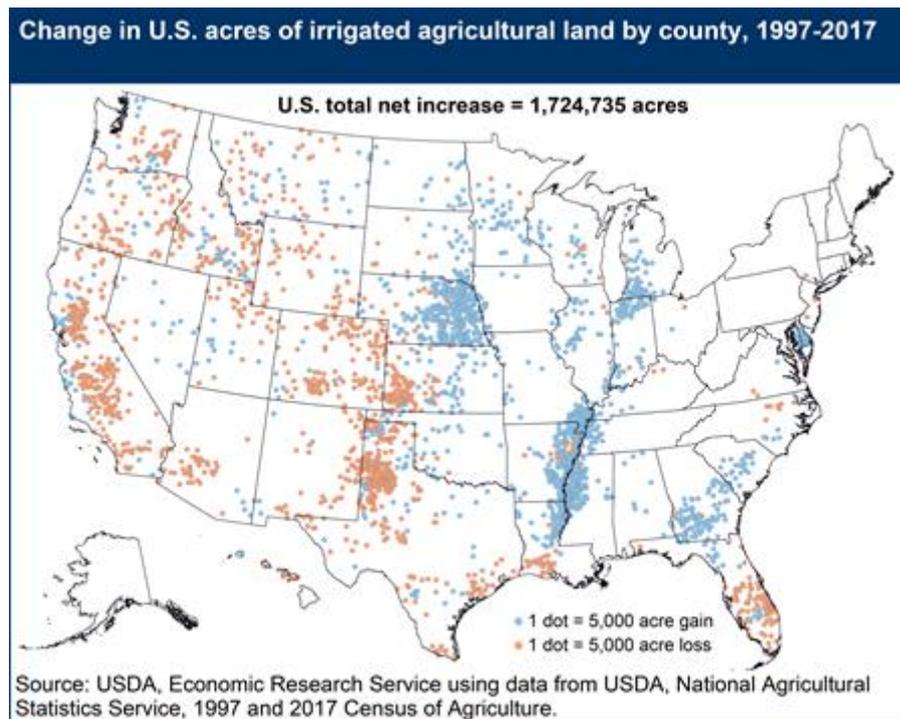


圖 4、美國各區域灌溉面積的變化趨勢

資料來源：同圖 1

(三) 各類作物的灌溉面積變化

按作物分配的灌溉用水反映了氣候和作物用水的需求以及不斷變化的市場條件。過去 50 年來，種植玉米和大豆的灌溉面積增加，1964 年，棉花和乾草、苜蓿為主要的灌溉作物，玉米和大豆加起來的灌溉面積不到 250 萬英畝，2017 年，用於穀物種植的玉米為美國灌溉面積最多的地區，收穫的灌溉面積超過 1,200 萬英畝，大豆在 2017 年的灌溉面積中排名第二，收穫了超過 900 萬英畝的灌溉面積，這些轉變反映了玉米和大豆作為牲畜飼料和生物燃料來源的市場需求不斷擴大，以及灌溉農業向東部轉移的更廣泛，生長季節降雨量的變化促進了玉米和大豆作物的灌溉。

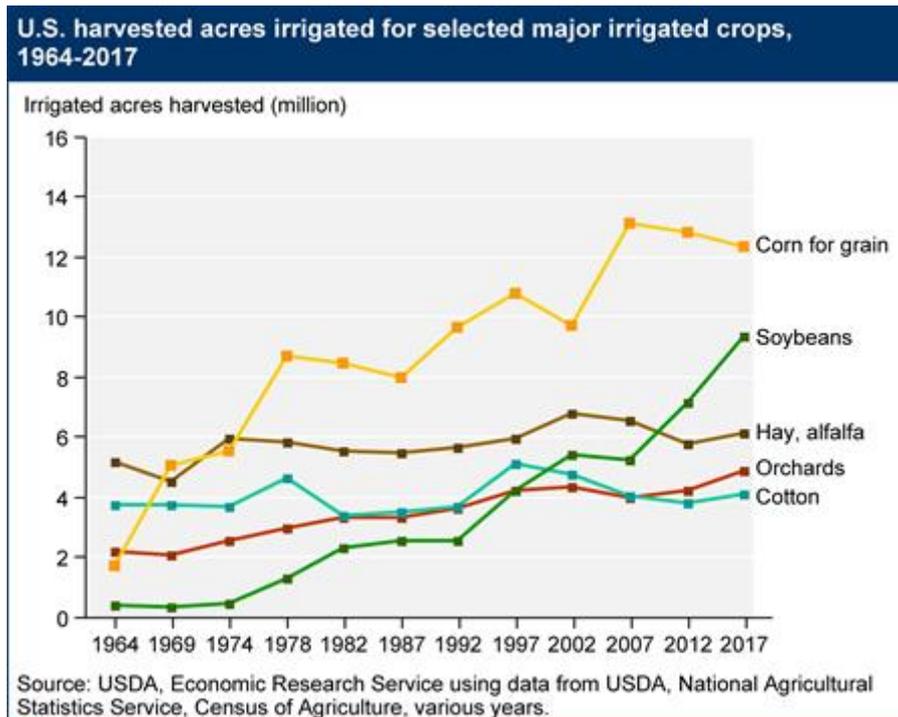


圖 5、美國各類作物的灌溉面積變化趨勢

資料來源：同圖 1

(四) 灌溉水源

灌溉農業主要依賴地表水和地下水來支持作物生產，根據 2018 年灌溉和水資源管理調查，灌溉用水中有一半以上來自地表水，其餘水來自地下水源，地表水灌溉在美國西部最為常見，那裡的聯邦開墾政策和州對灌溉基礎設施的投資利用了該地區的地表水資源。

在美國許多最著名的灌溉農業區，農場取水通常由當地灌溉組織提供或管理。供水組織運營用於向灌溉農場供水的儲水和輸送系統，地下水組織幫助管理從當地地下水資源中抽取的灌溉水，美國農業部 2019 年灌溉組織調查提供了對這些灌溉供水組織的全國代表性調查，大多數灌溉組織的主要職能是向農場供水，超過四分之一的組織管理用於灌溉的農場地下水抽取，許多組織提供供水輸送和地下水管理的雙重功能，灌溉組織還可以提供重要的次要功能，例如用於娛樂目的或野生動物棲息地的發電和水管理。

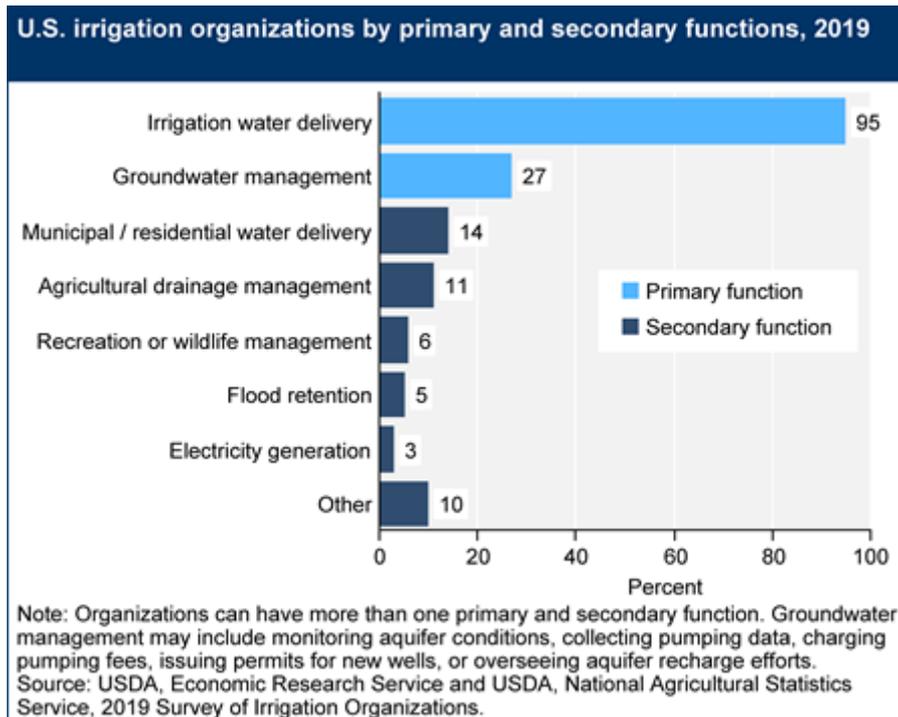


圖 6、美國灌溉管理組織之功能

資料來源：同圖 1

(五) 農作物的灌溉方式

使用多種方法將灌溉水應用於作物，可大致分為重力系統或加壓系統。重力灌溉系統使用田間犁溝或盆地僅通過重力手段將水推進田間表面。加壓系統在壓力下通過管道或其他管道將水直接施加到作物上。加壓灌溉包括由噴灌和微/滴灌系統灌溉的英畝。在許多田間條件下，加壓灌溉系統通常比重力系統更有效地利用水，因為蒸發、深層滲透和田間徑流損失的水更少。在過去的 30 年中，重力向加壓灌溉系統的轉換有所增加，在 1984 年美國西部灌溉農田有 37% 使用加壓灌溉系統，而在 2018 年加壓灌溉系統提升為為 72%。

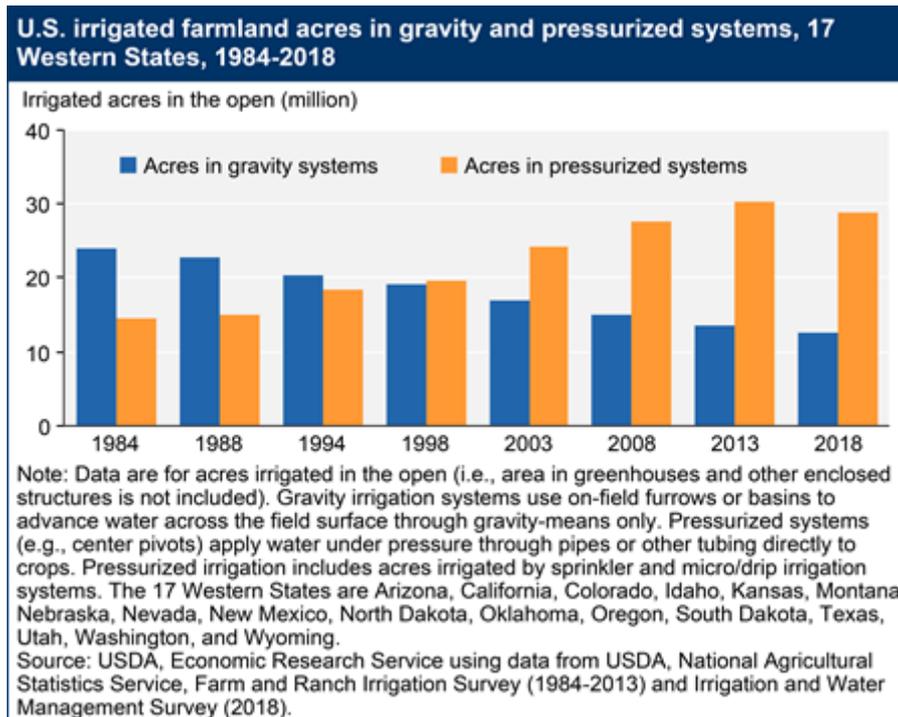


圖 7、美國農作物的重力或加壓灌溉系統的使用趨勢

資料來源：同圖 1

二、美國佛羅里達州農業灌溉用水

佛羅里達州農業和消費者服務部 (Florida Department of Agriculture and Consumer Services, FDACS) 負責制定全州農業用水需求的估算值 (Florida Statewide Agricultural Irrigation Demand project, FSAID)，此 FSAID 報告預測至 2045 年，與區域供水計劃預測期保持一致，全州農業用水需求推估的第一步是確定灌溉的農業用地，見表 1 之 2019 年 FSAID VIII 的農業和灌溉農業區域。

表 1、佛羅里達州的區域農業用地與灌溉農業用地

| WMD | Agricultural Lands 2019 | Irrigated Crop Land 2019 |
|--------------|-------------------------|--------------------------|
| | Acres | Acres |
| NFWMD | 693,135 | 52,845 |
| SFWMD | 2,997,851 | 1,121,964 |
| SJRWMD | 1,192,215 | 160,276 |
| SRWMD | 808,972 | 150,588 |
| SWFWMD | 1,889,710 | 378,069 |
| Total | 7,581,883 | 1,863,742 |

資料來源：佛羅里達州農業和消費者服務部的「佛羅里達農業灌溉水資源需求」報告 [2]

到 2045 年，全州灌溉作物總面積預計將增加 7,774 英畝，其平均年用水量預計將總體增加約 1%，對個別水資源管理區 (Water Management

District, WMD) 的影響不一，南佛羅里達州水資源管理區 (SFWMD)、聖約翰河水資源管理區 (SJRWMD)、佛羅里達州西南部水資源管理區 (SWFWMD) 預計灌溉面積將減少，而最北部地區的灌溉面積預計將增加被灌溉的土地。目前全州農業灌溉用水總量估計為平均每年 1,949 MGD (million gallons per day, MGD)，十年一次的旱年 (1 in 10 dry year) 為 2,643 MGD，表 2 列出各地區的總作物灌溉使用量。表 3 列出不同作物的預計用水量估算，表 4 列出 2019 年至 2045 年的地區級灌溉面積預測，2045 年的平均年農業灌溉用水總需求估計為 1,975 MGD。

表 2、佛羅里達州灌溉面積與作物用水量估算

Table ES- 2. Estimated Irrigated Cropland Water Use

| WMD | 2019 | 2019 | 2019 |
|--------------|------------------|--------------|-------------|
| | Acres | MGD | Inches/Year |
| NFWWMD | 52,845 | 42 | 10.6 |
| SFWMD | 1,121,964 | 1,229 | 14.7 |
| SJRWMD | 160,276 | 177 | 14.8 |
| SRWMD | 150,588 | 138 | 12.3 |
| SWFWMD | 378,069 | 364 | 12.9 |
| Total | 1,863,742 | 1,949 | 14.1 |

資料來源：同表 1

表 3、佛羅里達州各類作物的灌溉需水量

Table ES- 4. Irrigation Demand, MGD by Crop, 2019-2045

| Statewide | 2019 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Avg MGD | Dry MGD |
| Predominant Crop | | | | | | | | |
| Citrus | 451 | 443 | 454 | 463 | 456 | 447 | 438 | 646 |
| Field Crops | 131 | 133 | 134 | 137 | 142 | 148 | 153 | 200 |
| Fruit (Non-citrus) | 74 | 76 | 74 | 73 | 77 | 80 | 83 | 107 |
| Greenhouse/Nursery | 140 | 140 | 143 | 139 | 142 | 146 | 148 | 166 |
| Hay | 112 | 111 | 113 | 113 | 113 | 113 | 111 | 158 |
| Potatoes | 37 | 37 | 37 | 37 | 38 | 38 | 37 | 54 |
| Sod | 48 | 49 | 49 | 49 | 49 | 48 | 50 | 61 |
| Sugarcane | 655 | 655 | 632 | 631 | 631 | 631 | 631 | 870 |
| Vegetables (Fresh Market) | 302 | 303 | 300 | 303 | 309 | 317 | 324 | 410 |
| Total | 1,949 | 1,946 | 1,935 | 1,946 | 1,956 | 1,967 | 1,975 | 2,672 |

資料來源：同表 1

表 4、佛羅里達州灌溉面積預測

Table ES- 5. Projected Irrigated Acreage by Water Management District, 2019-2045

| WMD | 2019 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2019-2045 | 2019-2045 |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|-----------|
| | Acres | Change | % Change |
| NFWWMD | 52,845 | 53,088 | 54,230 | 55,325 | 56,438 | 57,609 | 58,811 | 5,966 | 11% |
| SFWMD | 1,121,964 | 1,120,904 | 1,100,904 | 1,102,234 | 1,103,464 | 1,103,881 | 1,104,503 | (17,461) | -2% |
| SJRWMD | 160,276 | 160,861 | 159,093 | 157,463 | 155,698 | 154,132 | 151,656 | (8,620) | -5% |
| SRWMD | 150,588 | 151,944 | 157,736 | 163,524 | 169,355 | 175,033 | 180,471 | 29,883 | 20% |
| SWFWMD | 378,069 | 378,031 | 377,969 | 377,432 | 376,418 | 375,929 | 376,074 | (1,994) | -1% |
| Total | 1,863,742 | 1,864,829 | 1,849,931 | 1,855,978 | 1,861,373 | 1,866,585 | 1,871,515 | 7,774 | 0% |

資料來源：同表 1

美國農業部的調查數據估計，佛羅里達州農民平均每年提高了約 1% 的用水效率，根據長期的農業生產報告之種植面積和用水量，推估預測了未來灌溉用水效率的趨勢，表 5 提供了未來的用水效率，估計 2045 年灌溉效率將提高年平均灌溉需求總量的 6%。

表 5、佛羅里達州未來的用水效率推估

Table ES- 6. Estimated Efficiency Improvements by Water Management District, MGD

| WMD | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| NFWMD | 0.4 | 2.2 | 3.3 | 4.0 | 4.6 | 5.1 |
| SFWMD | 6.4 | 24.3 | 33.8 | 39.7 | 44.6 | 48.4 |
| SJRWMD | 1.5 | 8.0 | 13.1 | 16.8 | 19.9 | 22.3 |
| SRWMD | 1.7 | 9.5 | 16.7 | 22.4 | 25.8 | 28.1 |
| SWFWMD | 1.5 | 7.2 | 10.1 | 12.3 | 14.3 | 15.8 |
| Total | 11.5 | 51.2 | 77.0 | 95.2 | 109.2 | 119.7 |

*Amounts are cumulative over time; i.e. 51.2 from 2025 is included in 77.0 in 2030

資料來源：同表 1

FSAID 模型結合了影響灌溉用水需求的農藝和經濟因素。該模型能夠捕捉作物間和作物內部的盈利能力隨時間的變化，從而增強了對未來灌溉需求的估計。佛羅里達州農業灌溉需求的未來預測包含許多不確定性因素，柑橘和甘蔗生產都是用水大戶，目前也比其他作物更容易受到全球因素的影響，包括關稅、貿易關係、能源價格、食品安全、土地供應壓力以及與水質有關的環境法規。

農業具有高度固定成本，種植面積和用水量對農業利潤有重要影響。經濟繁榮或蕭條、能源價格、農業的自然災害，皆會影響對農業資本和勞動力造成變化，影響農業用水。病毒大流行導致未收割的農作物、餐廳需求急劇下降、供應鏈中斷和其他營銷挑戰造成重大損失。然而，大多數作物類型的價格和市場似乎已經穩定並有所改善。對於某些生產者來說，收穫某些作物類型的勞動力供應可能仍然是一個挑戰。

FSAID 的灌溉用水需求預測估計，到 2045 年全州灌溉面積將增加約 8,000 英畝，同時年平均需水量將增加約 26 MGD。利用 2045 年網格氣候預測，模擬氣候變遷對灌溉用水需求的影響，結果顯示全州年平均灌溉需求將增加了 10 到 20 MGD。

三、美國密西根州農業用水

密西根州只有 6.7% 的農業生產土地得到灌溉，但灌溉的土地生產高價值作物，包含蔬菜、馬鈴薯、種子作物、草皮和觀賞植物，使灌溉作物的生產價值高於 6.7% 的比例。根據降雨資料顯示，密西根州有豐富水資源，

密西根州年降雨量超過作物和景觀用水，密西根州有可用的水可以補給地下含水層，並供應河流、湖泊、濕地，密西根州的大部分地區，有豐富的地下水資源可以用於灌溉。

但在作物關鍵生長的七月和八月份，密西根州卻是密西西比河以東最乾旱的州，在作物生長期間，僅靠降雨可能無法滿足作物生長的需求。

密西根州東北部每年的降水雨量 28 英寸，其西南和西北部降雨量超過 38 英寸，在部分地區仍須利用灌溉補充作物所需的水量，灌溉用水需求與降雨量、種植的作物、不同的發育階段、天氣條件、土壤的保水能力皆相關。在作物生長的某些時期，若沒有足夠降雨以滿足作物的需求，就需要利用灌溉提供植物生長所需的水分。農業灌溉的考量包含資本、能源、勞動力、管理、環境、經濟、法律因素、與充足的地表水和/或地下水水源。

聖約瑟夫縣為密西根州的最高農業灌溉用水量區域，蒙卡爾姆縣、布蘭奇縣、卡拉馬祖縣和卡斯縣次之，上述五個縣共佔 32% 農業灌溉面積及 32% 農業灌溉總量，其農業灌溉用水的主要來源為地下水，佔 75%，其餘由地表水源供應。

玉米穀物及種子為密西根州最主要的灌溉作物，約佔 40% 總灌溉面積及 37% 的總灌溉用水量。另外大豆、馬鈴薯、蔬菜和溫室苗圃、草皮也是重要的灌溉作物，共約佔 84% 的密西根州農業灌溉面積及 85% 的灌溉用水量。

參、建議

美國農業部的經濟研究局的資料，介紹美國農業灌溉用水的背景資訊，內容分析了美國灌溉用水的空間分布、用水量趨勢、作物的灌溉面積、灌溉水源、與灌溉方式[1]。佛羅里達州農業和消費者服務部與密西根州農業部的報告則討論二個州的灌溉面積、農業用水狀況[2,3]。上述介紹之報告中提及疫情影響了農產品市場的供應鏈、價格、營收、消費量，及其農作物生產的農業用水的時間與空間需求造成之改變，報告中也分析美國不同區域農業用水在時間、空間、作物、灌溉方式的需求變化。

此次疫情造成全世界醫療、公共衛生、經濟的重大影響，台灣的農業水資源與災害分析領域的專家學者可針對疫情、或其他的自然、大規模災害等議題，提供政策規劃單位評估農業生產、農業供需系統、農業用水之不確定性，及可能

造成風險，以協助農委會、農田水利署、及農田水利署各管理處進行未來農業水資源的風險評估與規劃。

此外，農業水資源調度研究的專家學者也可針對臺灣未來氣候變遷、人口變化、國土規劃、農業生產變化等議題，協助農委會、農田水利署、及農田水利署各管理處，模擬各區域可能的情境，提供行政單位進行農業水資源調度決策分析，並針對未來氣候、人口、土地、政策，訂定農業水資源之對應的調適策略。

肆、參考文獻

[1] Economic Research Service of United States Department of Agriculture, Irrigation & Water Use, <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/irrigation-water-use.aspx#private>

[2] Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Florida Statewide Agricultural Irrigation Demand Estimated Agricultural Water Demand, 2019-2045, <https://www.fdacs.gov/Agriculture-Industry/Water/Agricultural-Water-Supply-Planning>

[3] Michigan Commission of Agriculture, Generally Accepted Agricultural and Management Practices for Irrigation Water Use, <https://www.canr.msu.edu/uploads/236/43605/GAAMPS.pdf>