



永續設施生產：水養液有效利用零滲漏策略

陳葦玲^{1*} 錢昌聖¹

摘要

氣候變遷與環境永續議題促使設施生產者改善現有生產體系，封閉式設施無土栽培 (closed soilless cultivation) 除具高水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 外，亦避免肥料和植物保護產品透過水排放，其水養液零滲漏 (zero emission) 管理策略包含：(1) 多元且質佳的水源，養液原水要求 $EC < 0.25 \text{ ms.cm}^{-1}$ 、 $\text{Na}^+ < 0.1 \text{ mmol.L}^{-1}$ ，多加利用雨水且儲水量達 800 L.m^{-2} 溫室面積；(2) 原水及回收養液水質處理，包含曝氣氧化、過濾、酸鹼度調整、陽離子交換、逆滲透及殺菌等一系列操作；(3) 光輻射量及用水模式估算之灌溉水量數據應用；(4) 符合作物水分生理之養液管理，特別是循環利用下避免鈉離子累積造成鹽分逆境；及綜合上述 (5) 建構完善的水養液操作監控系統，目標為創造一個穩定的根區環境，從而實現零排放種植。

關鍵詞：設施栽培、零滲漏、水分利用效率、水質處理、鈉累積、蒸發散

¹ 農業部臺中區農業改場

* 通訊作者 (chenwl@tcdares.gov.tw)



前言

聯合國糧食組織 (Food and Agriculture Organization, FAO) 在糧食與農業情勢 (The State of Food and Agriculture, SOFA) 報告指出，全球 70% 水資源為農業相關產業利用 (FAO, 2020)，隨著水資源的短缺和對淡水 (fresh water) 需求的增加，水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 越受重視。設施栽培為水和肥料使用高投入的生產系統，若使用自由排放系統除損失水資源外，肥料和植物保護產品 (plant protection products, PPPs) 亦同時通過水從溫室排到地面以及地下水，影響環境永續性。因此當灌溉水能準確供給作物而排放水能回收再利用時，設施介質養液栽培是具有高水分利用效率 (圖 1)(van Kooten et al., 2008) 和生產永續性的。

國際借鏡 ~ 設施園藝大國荷蘭水資源規範演變

自 1994 年以來荷蘭設施栽培溫室必須遵循水資源環利用的要求，2000 年歐盟水框架 (EU Water Framework) 方針在提高水域的良好生態狀況，2013 年基礎設施和環境部 (Ministry of Infrastructure and Environment) 公告之氮排放標準限制溫室生產地區肥料和 PPPs 的排放 (Beerling et al., 2014)，2018 年則強制溫室排放水必須經過處理，如除去 95% 的 PPPs，然目前養液偶爾排放仍常見，其主要原因還是與水質有關，例如 EC 過高、鈉積累 ($>6-8 \text{ mmol.L}^{-1}$ ，蘭花作物更低， $1 \text{ mmol.L}^{-1} \text{ Na}^+$ 即會造成植株受傷)、營養不平衡、病害及生長抑制物質等，另在栽培過程中灌溉設定錯誤、過濾時的沖洗水 (flush water)、多於養液滲漏等也會導致水連帶肥料和 PPPs 排放。

最新公告指出地表水和地下水的良好化學和生態品質 (good chemical and ecological quality of surface water and groundwater) 將於 2027 年強制執行，預計氮和磷標準的排放要降為零，以設施最大宗作物番茄來看，目前年氮排量約 $75 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ 須再大幅度降低，因此荷蘭水務局與溫室園藝協會 (Land-en Tuinbouw Organisatie, LTO) 達成協議，要在 2027 年前全面達到溫室養液零排放 (zero-emission) 目標，其園藝產業業者亦同意在 2040 年實現完全二氧化碳中和 (CO₂-neutral)。為了在短期內解決這些需求，生產者



需增加重複使用水量並淨化排放水 (drainage water)，以滿足當前的排放標準，因此促使朝向封閉式無土栽培 (closed soilless cultivation) 模式 (Beerling et al., 2017)。

溫室水養液零滲漏 Zero-emission 策略

為達到水資源高 WUE 及零滲漏 zero-emission，在封閉式無土栽培模式下其策略包含：(1) 多元且質佳的水源、(2) 水質處理、(3) 灌溉管理、(4) 符合作物所需及 (5) 完善的水系統 (圖 2)(Van Os et. al., 2020；van der Salm et al., 2020)，詳細說明如下：

(一) 多元且質佳的水源

用水的品質，可分為物理性 (physical)、化學性 (chemical) 及生物性 (biological) 三部份。物理性指標有水溫、懸浮固體、氣味等，生物性指標如藻類、優養生物、微生物量等；而化學性指標是比較常檢測的項目，包含酸鹼值 (pH)、電導度 (electric conductivity, EC)、鹽度 (salinity)、陰陽離子含量 (cations and anions)、總可溶性固形物含量 (total dissolved solids, TDS)、鈉吸附率 (sodium adsorption rate, SAR)、氧化還原電位 (oxidation-reduction potential, ORP)、硬度 (hardness)、溶氧量 (dissolved oxygen, DO)、生化需氧量 (biochemical oxygen demand, BOD)……等，原水的水質可作為後續養液調配、水質處理及灌溉系統設計之依據。

1. 設施養液栽培用水等級

農業灌溉用水依水質中化學成分含量多寡可分為 5 個等級 (表 1)，若採用養液栽培強烈建議配置養液的原水水質至少在優或良等級， $EC < 0.5 \text{ mS/cm}$ 、 $pH = 5.5 - 7.5$ 、硬度 $< 150 \text{ ppm CaCO}_3$ 、有機質 $< 5 \text{ ppm}$ 、溶氧量 $> 3 \text{ ppm}$ 。在各離子含量方面，硝酸態氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨態氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、硫酸根 (SO_4^{2-})、磷酸根 (PO_4^{3-}) 及鉀 (K^+) $< 5 \text{ ppm}$ ，碳酸根 (CO_3^{2-}) $< 10 \text{ ppm}$ ，鎂 (Mg^{2+}) $< 20 \text{ ppm}$ ，鈉 (Na^+)、氯 (Cl^-) $< 30 \text{ ppm}$ ，鈣 (Ca^{2+}) $< 40 \text{ ppm}$ ；微量元素鐵離子 (Fe^{3+}) $< 1 \text{ ppm}$ ，鋅 (Zn^{2+})、銅 (Cu^{2+})、錳 (Mn^{2+}) $< 0.5 \text{ ppm}$ ，硼 (B^+) $< 0.3 \text{ ppm}$ (表 2)(De Pascale et al., 2013; 高, 2017)。

長期分析中彰投農友送樣原水水質，其中 $EC (0.3 - 1.2 \text{ mS/cm})$ 、 $pH (5.9 - 8.9)$ 、



Ca^{2+} (50-120 ppm)、 Na^{+} (20-50 ppm)、 Cl^{-} (30-50 ppm)、 Mg^{2+} (40-70 ppm) 及 Fe^{3+} (3-12 ppm) 常超出建議水質範圍(表 2)(高, 2017)。pH 值低於 5.5 或高於 7.5 則導致元素利用效率降低或在調配養液過程發生沉澱現象, 除本身地下水鈣鎂離子過多呈現硬水狀態, 經陽離子交換樹脂或 NaCl 軟水器過濾後也可能導致鈉離子及氯離子過量。

2. 水源選擇

農業灌溉用水之可使用雨水、河川水、地下水、井水、泉水、自來水…甚至是逆滲透水等, 唯使用前需先經水質檢測及處理至合適範圍後才能運用。設施養液栽培常用原水有地下水、自來水及雨水, 若以 EC 和 pH 衡量, 雨水及自來水之水質較為穩定, 而河川水及地下水之水質較差且含有病原菌的可能性較大 (Van Os et al., 2019)(表 3)。

雨水儲存的設計應能供應全年溫室用水, 荷蘭溫室種植者有義務根據法律, 雨水儲存能力至少為每公頃 500 立方米的水, 大多數溫室存儲容量範圍為每公頃 500-1,000 m³。臺灣雨量在冬季則相對乾燥, 而夏季風能帶來很高的降雨量, 應可收集並儲存以供利用, 模擬結果顯示, 一個具 800L 儲水量 /m² 溫室地板面積足以全年供灌溉與噴霧系統, 唯在溫室營運的初期必須注意缺水問題 (Speetjens et al., 2012)。

(二) 水質處理

原水水質不佳往往會造成肥料溶解度不佳或沉澱、灌溉管線阻塞及植株吸收營養不均衡等情形發生, 又為求水資源有效應用養液循環再利用有其必要性, 然設施無土栽培回收水甚至原水中常存有疫病菌 (*Phytophthora* spp.)、腐霉病菌 (*Pythium* spp.)、鐮孢菌 (*Fusarium oxysporum*)、立枯絲核菌 (*Rhizoctonia solani*) 等真菌及軟腐病 (*Pectobacterium* spp. and *Dickeya* spp.)、青枯病 (*Ralstonia solanacearum*) 等細菌, 隨著養液系統傳播常造成大規模感染。

水質處理方法在化學性改善上包含曝氣氧化、過濾 (filtration)、酸鹼度調整、軟化 (陽離子交換)、陰離子交換、去離子化 (deionization) 及逆滲透 (reverse osmosis) 等 (Pardossi



et al., 2004)(表 4)，在生物性則可透過過濾膜、逆滲透和殺菌 (disinfection)，常見殺菌方法則有熱、UV 紫外線、強氧化劑 (臭氧或含氯產品) 及化學藥劑添加，其中以 UV 照射和臭氧最為普遍 (Sarah et al., 2019)。

1. 氧化曝氣

原水若含有鐵錳含量較高，一般可採用曝氣氧化、沉澱、吸附過濾的方法處理。第一步驟為曝氣氧化，利用曝氣塔、曝氣池、打氣機等裝置或藥劑添加，將空氣中的氧氣或氧化劑充分的與水進行接觸，除可增加水中的溶氧量外，進而將可溶性的二價鐵離子 (Fe^{2+}) 和二價錳 (Mn^{2+}) 氧化反應成不易溶解、呈膠體或顆粒狀的三價鐵 (Fe^{3+}) 或四價錳 (Mn^{4+}) 化合物 (如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 MnO_2)，後再進行催化過濾。

2. 過濾

從一般過濾 (1,000-10 μm)、微過濾 (10-0.1 μm)、超過濾 (0.1-0.005 μm)、奈米過濾 (0.05-0.001 μm) 到逆滲透 (0.005-0.0001 μm)，過濾孔徑越細，處理成本越來越高 (圖 3)。設施養液栽培水質處理多採一般過濾，以去除 10-1,000 μm 範圍的雜質，其類型有弧形篩 (bow screen)、鼓式過濾 (rotation drum filter)、沙濾 (sand filter)、平板過濾 (flat bed filter) 和篩網碟片過濾 (screen filter)，其中以沙濾和篩網碟片過濾在臺灣較為常見，如需要過除掉真菌和細菌，則需要使用到微米等級過濾裝置 (陳與張，2022)。

3. 陽離子交換 (軟化)

離子交換樹脂可溶解在水中的各種陰陽離子，如陽離子交換樹脂利用 H^+ 或 Na^+ 進行交換，而陰離子交換樹脂則利用 OH^- 或 Cl^- 進行交換。臺灣地下水質 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 過多而呈現硬水狀態，除 pH 較高將造成肥料溶解不易外，配製養液時若按原配方濃度，常會造成鈣、鎂的含量過高，原水需經由陽離子交換軟化處理 (陳與張，2022)。其中 Na 型強酸陽離子交換樹脂為軟化最常使用的處理方式，由陽離子交換樹脂吸收水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等陽離子以軟化水質，交換選擇性依據離子交換基的種類或架橋度而異，大致上 $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 、 Cu^{2+} 、 $\text{Mn}^{2+} > \text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+$ 。



4. 殺菌

A. UV 紫外線照射

100-280 nm 短波 UV-C 具有較佳之殺菌效果，可破壞 DNA 及 RNA 鍵結、蛋白質結構，使微生物無法繁殖或死亡，其中最常使用之殺菌波長為 254nm。所使用的燈管分為高壓 (HD-UV，激發 200-280nm 波長較廣光譜範圍紫外線) 與低壓汞紫外殺菌燈 (LD-UV，激發約 254nm 波長之紫外線)，目前以低壓燈管較常使用 (圖 4A)；殺菌效果取決於光強度和光照射時間的累計，照度 (mW.cm^{-2}) \times 照射時間 (s)= 累積光量 (mJ.cm^{-2})，照射時間可由水養液流速控制， 100mJ.cm^{-2} 用量對於真菌和細菌即有殺菌效果， 160 MJ.cm^{-2} 用量可殺死穿孔線蟲，若欲達完全殺菌 (包括線蟲和病毒) 則需增加至 250 mJ.cm^{-2} (楊與沈，1998)。

B. 氧化劑

利用氫氧自由基 ($\text{OH}\cdot$)、自由基態氧 ($\text{O}\cdot$)、次氯酸 (HClO) 等強氧化特性，破壞微生物細胞及病毒蛋白質結構，進一步破壞細胞核內 DNA 或 RNA，使其代謝受影響，達到抑制繁殖殺菌效果，常見水質處理的氧化劑有臭氧、過氧化氫、二氧化氯及次氯酸鹽類等。臭氧處理可先經 $50\text{-}80\ \mu\text{m}$ 過濾之水以幫浦打進處理槽中，再將臭氧打入，同時亦加入硝酸調整 pH 至 4.0-4.5，每噸原水加入 10 g 臭氧處理一小時，若為使用過之循環水，則需加倍用量處理一小時 (圖 4B)；過氧化氫 H_2O_2 為較弱之氧化劑，5 ppm H_2O_2 可防治腐霉病菌、100 ppm 可殺死大部分真菌、500ppm 對病毒有效，若欲殺死穿孔線蟲需以 400 ppm 處理 24 小時以上，但濃度在 500 ppm 以上即對植物根部造成傷害。含氯化合物處理方便且成本低 (圖 4C)，原水可以 10 ppm Cl 處理，養液桶或灌溉管路則可以 2 ppm、每 1-2 個月進行一次殺菌，養液中 Cl 濃度超過 2.4ppm 則易造成植株受傷 (Raudales et al., 2014)。

隨著臭氧殺菌機的改良和效率提升，Wageningen UR 相關研究結果建議排放水可先以粗過濾雜質，再以 $40\ \mu\text{m}$ microfilter 或 flatboard filter 過濾，而後用臭氧 ($2.1\text{ mg.L}^{-1}\cdot\text{min}$ -1.ozone during 0.5 min at ORP-value at 600 mV) 殺菌，與雨水混合用於養液配置；若排放水之水質真的無法被再被利用，則先以臭氧 ($2.1\text{ mg.L}^{-1}\cdot\text{min}$ -1.



ozone during 1 min at ORP-value at 700 mV)，後以 UV(300 mJ.cm⁻² UV 254 nm) 殺菌並除去 PPPs 才能排出 (Beerling et al., 2017)。

5. 過濾膜

超過濾是薄膜處理中運用最廣的技術，除可過濾水中之懸浮物、膠質、有機質外，亦可移除真細菌與病毒 (圖 5)，但不會改變水溶液中之營養成份，具低能耗、水通量大、阻絕率高等特性，然此形態過濾膜常會黏塞致使效果不穩定。逆滲透去除灌溉水中之鹽類及 PPPs，可用於再循環利用水之消毒及排放前處理。Poseidon 為一有效淨化系統 (圖 6)，特別對於養液循環使用造成鈉離子累積過高會限制作物。該系統包含超過濾、鈉濾和活性炭技術，活性炭吸附有機物質如 PPPs，亦配備了下游逆滲透系統，可濃縮待排放的水，從而減少 80% 的水量。

(三) 灌溉水量數據管理

1. 光輻射量應用

灌溉量及頻率會因光輻射量有所差異，以設施介質栽培番茄為例，依蒸散法則給水量應等於 2-3 mL.J⁻¹(在預設 30% 滲漏量情形下)(表 5)，2,000 J.cm⁻².d⁻¹ 即應給予 4-6 L.m⁻² 灌溉水；頻率在光輻射量 200、400、600 及 800 W.m⁻² 時每一小時分別需灌溉 0-1、1-2、2-3 及 3-4 次 (表 6)。灌溉時間應從日出前 1-2 小時開始到日落後 1-2 小時，每日至少灌溉 10 次以上。

2. 用水量化模式

Van Tuyll 等人 (2022) 利用 Waterstreams 模型 (Voogt et al., 2012) 了解荷蘭番茄溫室用水情形 (圖 7)，其中溫度和降雨預設參數為年平均值。溫室可利用的外部水源有四種：雨水、地下水、自來水和地表水，模型計算這些來源的總年消耗量且取決於降雨量、輻射量 (影響蒸發散量) 以及儲水能力，因此每個水源的耗水量每年都會因地理位置和溫室規格而有所不同；該模型預設設置還包括回收 80% 屋頂冷凝水、30% 滲漏水再循環，被視為內部流動，經計算，上述四個水源消耗量分別為 683 L.m⁻²、128 L.m⁻²、43 L.m⁻² 和 0 L.m⁻²，年總計 854 L.m⁻²。使用其他來源的數據驗證了總耗水量 (Raaphorst and Benninga, 2019; van Woerden, 2005)，年用水



量範圍落在 750 至 950 L.m⁻² 之間。

(四) 符合作物所需

1. 作物需水量

作物蒸發散量 (Evapotranspiration, ET_{crop}) 亦稱作物需水量，由作物生長期時期所需蒸散量及土壤介質蒸發量之和。露天環境下可利用水汽通量 (vapor flux) 系統由垂直風速及絕對濕度之互變異所計算之潛熱 (latent heat)，經單位換算即等於作物群落上方之蒸發散量 (Scott et al. 2003)，由作物實測蒸散量 ETC 和氣象資料所估算之潛勢能蒸散量 (ET_o) 的比值求出作物係數 (crop coefficient, kc)，各種作物之作物係數應依據氣候條件建立估算值，因 kc 是直接受作物特性和所處環境所影響，由以此係數乘以栽植地之蒸發率，即可概略推估需水量。設施栽培中相同的概念也用於「FERTIGATION」模型，該模型基於對作物 ET_c 的長時間計算，並包括了對營養需求的估算 (Voogt et al., 2000)，在菊花溫室生產中應用中能夠大幅減少水和肥料的使用量，並對產量或品質無影響 (Voogt et al., 2006)。然該模型的計算需要溫室的實際環境數據及控制參數，如輻射、溫度、供熱管道、使用屏風等，以及基本的土壤介質物理參數和作物生理以及溫室建設的數據。

2. 鹽類耐受性

營養液循環再利用除上述提到微生物感染問題外，由於植物對 Na 的吸收率較低，故在循環用水情況下 Na 離子累積是另一大克服點，當根系環境濃度高於吸收濃度時，Na⁺、Cl⁻ 等殘留鹽類積累，導致 EC 值升高，透過滲透壓逆境和離子毒性限制植物生長影響光合作用及根系的水分吸收，對產量或品質產生負面影響 (表 7) (Kong et al., 2017)。此外，根表面過量的鈉離子會拮抗植物對其他營養吸收，由於 Na 和 K 離子的化學性質相似，對其吸收有較強的抑製作用，在 Na 脅迫下，植物有必要運行更具選擇性的高親和力 K 吸收系統，以維持充足的鉀營養 (Munns and Tester, 2008)。

Na 吸收濃度 (mmol.L⁻¹) 定義為總 Na 吸收除以總水吸收，營養液中的 Na 與植物的吸收之間存在線性相關性 (Vooght and Van Os, 2010)。作物對 Na 吸收濃度可透



過一系列 Na 處理的封閉系統實驗得出，並確定養液濃度臨界濃度，玫瑰、菊花、及胡瓜對鈉敏感，番茄及彩椒則相對耐受 (表 8)，前人研究來看，番茄在 20 mmol.L⁻¹ Na 範圍內番茄生長、產量及果實品量基本無顯著影響，然通常建議的設施栽養液原水鈉含量 <0.1 mmol.L⁻¹，養液閾值濃度則低於 6 mmol.L⁻¹，以防止植物受傷 (Beerling et al., 2017)。分根系統 (split-root System, SRS) 應用可克服該問題，利用兩個不同鹽分程度的栽培槽，正常槽以一般養液灌溉，殘留槽給予循環排放養液，番茄 'Livento' 栽培期間殘留槽養液 EC 值 5-6 mS.cm⁻¹、Na 濃度介於 6-36 mmol.L⁻¹，此 SRS 環境下 Na 投入含量為慣行的 5.5 倍，栽培之番茄 Na 吸收濃度亦較高，值為 4.48 mmol.L⁻¹，較慣行 2.84 mmol.L⁻¹ 高出 1.6 倍 (陳與 Vooght, 2019；Barbagli et al., 2021)

(五) 完善的水養液操作監測系統

綜和上述要件，為求高 WUE 之封閉式溫室水資源零排放種植，一套完整的水養液系統應包含雨水儲藏、滲漏液回收儲藏、廢水儲藏、水源混合、水質處理、養液配置等單位 (圖 8)，且為了準確控制根部區域水量和養分進入介質均一性且便於管理介質水分含量 WC 和 EC，以滴頭 dripper 為佳，以番茄和黃瓜為例，適用於容量為 3L.hr⁻¹。並透過感測數據估算、監控及回饋進行施肥灌溉精準管理，目標為創造一個穩定的根區環境，從而實現零排放種植。

參考文獻

- 高德錚。2007。液肥配方在設施蔬菜栽培之調配與應用實務。設施蔬菜與無土栽培之研發應用研討會特刊。pp.189-205。彰化：臺中區農業改良場。
- 陳葦玲、Voogt, W.。2019。Sodium uptake and crop response of tomato grown under a split-root system in closed soilless cultivation。臺灣園藝 64(4):286。
- 陳葦玲、張金元。2022。談設施養液栽培水質處理 (一)。農業世界 468:30-34。
- 楊佐琦、沈再發。1998。淺談灌溉水之消毒技術。種苗通訊 36 <http://140.112.183.23/>



- lab551/vegetable/WATER.html。
- Barbagli, T., Voogt, W., Chen, W. L., Arteaga, G. T., Li, B. 2020. Reducing sodium accumulation in the root environment of tomato in a closed-loop cultivation system using a split root system. *Acta Hortic.* 1317:295-302. doi: 10.17660/ActaHortic.2021.1317.34.
- Beerling, E. A. M., Blok, C., Van der Maas, A. A., Van Os, E. A. 2014. Closing the water and nutrient cycles. *Acta Hortic.* 1034:49-56. doi: 10.17660/ActaHortic. 2014.1034.4.
- Beerling, E. A. M., Van Os, E. A., Van Ruijven, J., Janse, J., Lee, A., Blok, C. 2017. Water efficient zero-emission greenhouse crop production: a preliminary study. *Acta Hortic.* 1170:1133-1140. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.146.
- De Pascale, S., Francesco, O., A. Pardossi. 2013. Irrigation water quality for greenhouse horticulture. *FAO plant production and protection paper 217:168-204.*
- FAO. 2020. *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture.* doi: 10.4060/cb1447en.
- Kong, X., Luo, Z., Dong, H., Li, W., Chen, Y. 2017. Non-uniform salinity in the root zone alleviates salt damage by increasing sodium, water and nutrient transport genes expression in cotton. *Sci. Rep.* 7: 2879. doi: 10.1038/s41598-017-03302-x.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59:651-681. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.
- Pardossi, A., Franco T., and Luca I. 2004. Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Hort.* 44:28-34.
- Raaphorst, M. G. M. and Benninga, J. 2019. *Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2019.* Wageningen University & Research, Business Unit Glastuinbouw, Wageningen Economic Research, Bleiswijk.
- Raudales, R. E., Parke, J. L., Guy, C. L., Fisher, P. P. 2014. Control of waterborne microbes in irrigation: A review. *Agri. Water Manage.* 143:9-28. doi: 10.1016/j.agwat.2014.06.007.
- Sarah, A. W., James, S. O., John, C. M., Lorence, R. O., Paul, R. F., Charles, R. H., John, D. L., Fernandez, R.T. 2019. Greenhouse and nursery water management characterization and



- research priorities in the USA. *Water* 11:2338. doi:10.3390/w1111233.
- Scott, P. L., Watts, C., Payan, J. P., Edwards, E., Goodrich, D. C., Williams, D., Shuttleworth, W. J. 2003. The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. *Agric. For. Meteorol.* 114:127-139. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00197-1.
- Van der Salm, C., Voogt, W., Beerling, E. A. M., van Ruijven, J., van Os, E. 2020. Minimising emissions to water bodies from NW European greenhouses; with focus on Dutch vegetable cultivation. *Agri. Water Manage.* 242:106398. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106398.
- Van Os, K., Heuvelink, E., Stanghellini, C. 2008. New development in greenhouse technology can mitigate the water shortage problem of the 21st century. 2008. *Acta Hort.* 767:45-52. doi:10.17660/ActaHortic.2008.767.2.
- Van Os, E. A., Beerling, E. A. M., Blok, C., Janse, J., Leyh, R., Van Ruijven, J. P. M., van der Staaïj, M., Kaarsemaker, R. 2019. Zero discharge of nutrients and pesticides to the environment in hydroponic production. *Acta Hort.* 1266:443–450. doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1266.61.
- Van Os, E. A., Beerling, E. A. M., Blok, C., Leyh, R., Van Ruijven, J. P. M., Van der Staaïj, M., Janse, J., Kaarsemaker, R., Roosen, W. 2020. Zero liquid discharge in soilless greenhouse horticulture: solutions to save water and the environment while ensuring an optimal production. *Acta Hort.* 1273:129-135. doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1273.18.
- van Tuyl, A., Boedijn, A., Brunsting, M., Barbagli, T., Blok, C., Stanghellini, C. Quantification of material flows: A first step towards integrating tomato greenhouse horticulture into a circular economy. *J. Clean. Prod.* 379:134665. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134665.
- Voogt, W., Kipp, J. A., De Graaf, R., Spaans, L. 2000. A fertigation model for glasshouse crops grown in soil. *Acta Hort.* 537:495-502. doi: 10.17660/ActaHortic.2000.537.58.
- Voogt, W., Steinbuch, F., Van Winkel, A. 2006. Evaluation of the ‘fertigation model’ , a decision support system for water and nutrient supply for soil grown greenhouse crops. *Acta Hort.* 718:531-538. doi: 10.17660/ActaHortic.2006.718.62.



Voogt, W. and Van Os, E. A. 2012. Strategies to manage chemical water quality related problems in closed hydroponic systems. *Acta Hortic.* 927:949-955. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.927.117.

表1 灌溉用水等級的允許限值

Table 1 Permissible limits for classes of irrigation water.

Quality Level	EC (ms/cm)	TDS (mg/L)	SARz ($\sqrt{\text{meg/l}}$)	SAR (%)	B (ppm)
Excellent	<0.25	<175	0~2	< 20	< 0.33
Good	0.25~0.5	175~525	2~10	20 ~ 40	0.33 ~ 0.67
Permissible	0.5~1.0	525~1400	10~18	40 ~ 60	0.67 ~ 1
Poor	1.0~1.5	1400~2100	18~26	60 ~ 80	1 ~ 1.25
Unsuitable	>1.5	>2100	>26	> 80	> 1.25

$$\text{SARz } (\sqrt{\text{meg/l}}) \text{ 計算公式} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])}{2}}} = \frac{\left[\frac{\text{Na}^+ \text{ mg/L}}{22.989} \right]}{\sqrt{\frac{\left(\left[\frac{\text{Ca}^{2+} \text{ mg/L}}{20.04} \right] + \left[\frac{\text{Mg}^{2+} \text{ mg/L}}{12.15} \right] \right)}{2}}}$$

$$\text{SAR}(\%) = [\text{Na}]/([\text{Ca}] + [\text{Mg}]) \times 100\%$$

表2 養液配置建議水質

Table 2 Recommended water quality for nutrient solution preparation.

Item	Standard value	Analytical sample value
EC	<0.5 mS/cm	1.2~0.3 mS/cm
pH	6~8	5.9~8.9
Hardness	<150 CaCO ₃	
Organic matter	<5 ppm	
Dissolved oxygen	>5 ppm	
NO-N、NH-N	< 5 ppm	
CO ₃ ²⁻	<10 ppm	
SO ₄ ²⁻ 、PO ₄ ³⁻	<5 ppm	
Ca ²⁺	<40 ppm	120~55 ppm
Na ⁺	<30 ppm	20~50 ppm
Mg ²⁺	<20 ppm	43~73 ppm
K ⁺ ion	<5 ppm	
Fe ³⁺	<1 ppm	3~12 ppm
Mn, Zn, Cu cation	<0.5 ppm	
B anions	<0.3 ppm	


表 3 養液灌溉水源來源、風險及其品質
Table 3 Water sources, risks, and their quality for fertigation.

Source	Pathogen	Nutrients	pH	EC(ms/cm)
Rainwater	+	--	3.5-7.8	0.05-0.4
Tap water	--	+	6.4-7.4	0.2-0.4
Surface water	++	++	5.9-8.2	0.2-1.2
Underground	++	++	5-8	0.3-1.4
Reverse osmosis	-	--		0.00005-0.2
Condensation water	-	--		

表 4 水質處理方法及其用途
Table 4 Water purification methods and their applications.

Method	Total dissolved solids	Bicarbonate and carbonate	Calcium and magnesium	Dissolved iron and manganese	Oxidized iron and manganese	Borate	Fluoride
Reverse osmosis	V	V	V	V		V	V
Deionization	V	V	V	V		V	V
Anion exchange		V				V	V
Water softening			V	V			
Activated carbon							V
Activated alumina							V
Oxidation/Filtration				V			
Chelation				V			
Filtration					V		
Acid injection		V					

表 5 設施番茄計算蒸散量及需水量
Table 5 Calculated transpiration and required water amount of substrate cultivated tomato under greenhouse.

Global radiation (J.cm-2)	24h average temp (°C)	Calculated transpiration (L.m ⁻²)	Water required for 30% drainage
300	17	0.53	0.76 L.m-2 2.5 ml.J-1
1000	18	2.14	3.05 L.m-2 2.5 ml.J-1
1200	21	3.56	5.09 L.m-2 2.5 ml.J-1



表 6 設施番茄建議灌溉量

Table 6 Irrigation volumes and their frequency.

Global radiation (J.cm ⁻²)	Global radiation (J.cm ⁻² .h ⁻¹)	Irrigated water amount (ml.m ⁻²)	Irrigated frequency (/hour)	Water volume (ml/irrigation)	Joules per irrigation
200	72	216	0.5	400	135
400	144	432	1.1	380	128
600	216	648	1.9	340	113
800	288	864	3.0	290	98
1000	360	1080	4.1	260	84

表 7 不同蔬菜作物對灌溉養液鹽分耐受性

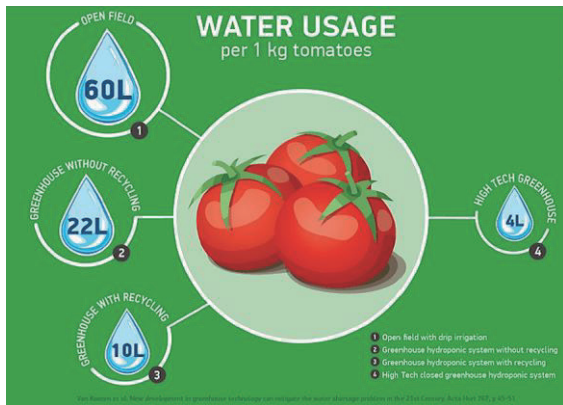
Table 7 Irrigation nutrient salinity tolerances for different vegetable crops.

Crop	0% Yield loss	10% Yield loss	25% Yield loss
	EC (ms.cm-1)	EC (ms.cm-1)	EC (ms.cm-1)
Cantaloupe	1.7	2.6	5.5
Capsicum	1.0	1.5	2.2
Cucumber	1.7	2.2	2.6
Lettuce	0.9	1.2	2.1
Tomato	0.5	2.3	4.4

表 8 不同作物對灌溉養液鈉含量耐受性

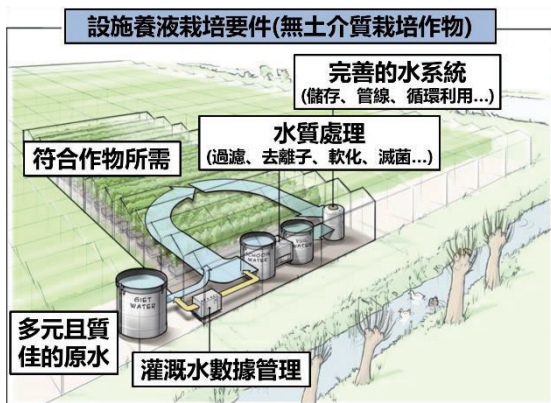
Table 8 Irrigation nutrient Na tolerances for different crops.

Crop	Limit Na (mmol.L-1)	Uptake Na (mmol.L-1)
Tomato	10 → 20	1
Cucumber	8	1.2
Sweet pepper – Vegetative	8 → 14	0.8
Sweet pepper – Vegetative	8 → 15	0.3
Lettuce	8	1.5
Chrysanthemum	6	0.3
Gerbera	10	0.4



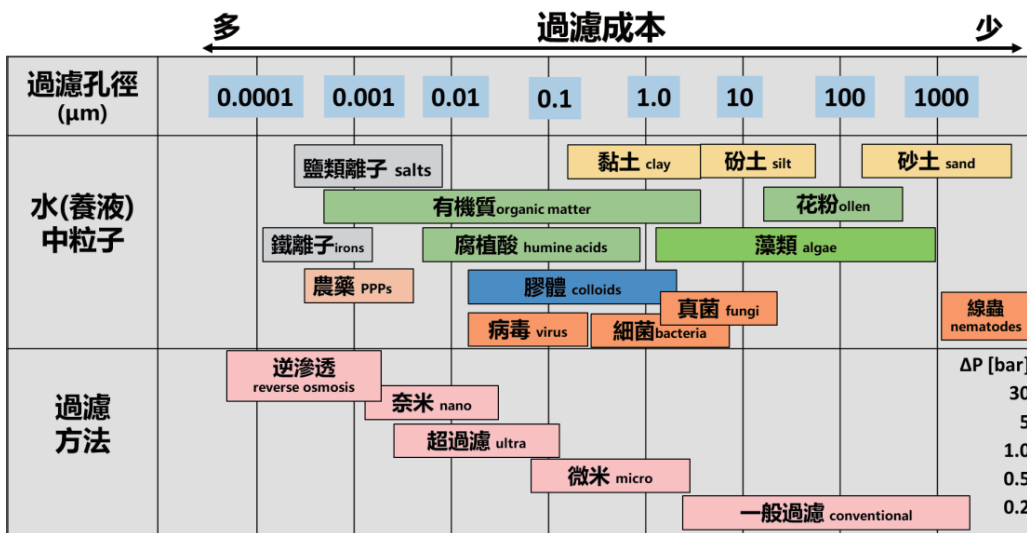
◀ 圖 1 不同栽培環境下番茄生產水分利用效率

Fig. 1 Water use efficiency of tomato production under different cultivated condition.



◀ 圖 2 設施無土栽培水養液零滲漏策略

Fig. 2 Strategy for water zero emission under greenhouse cultivation.



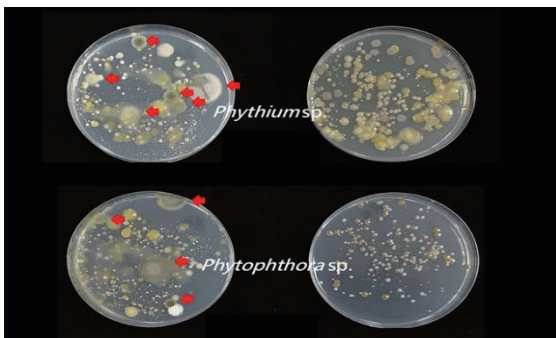
▲ 圖 3 不同等級過濾所排除物質種類及其尺寸

Fig. 3 Types and sizes of substances excluded by different grades of filtration.



▲ 圖 4. UV 殺菌機 (A)、臭氧產生器 (B) 及加氯器 (C)

Fig. 4 UV (A), oxidation (B), and chlorination (C) disinfection machine.



◀ 圖 5 水耕養液經超濾膜過濾後塗抹於 PDA 篩選培養基情形

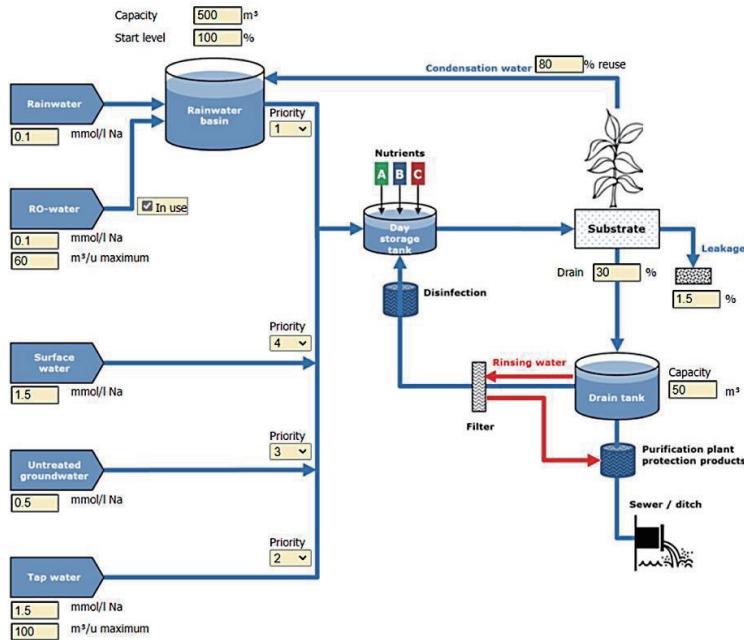
Fig. 5 Hydroponic nutrient purified by ultrafiltration membrane then cultured in the PDA screening medium



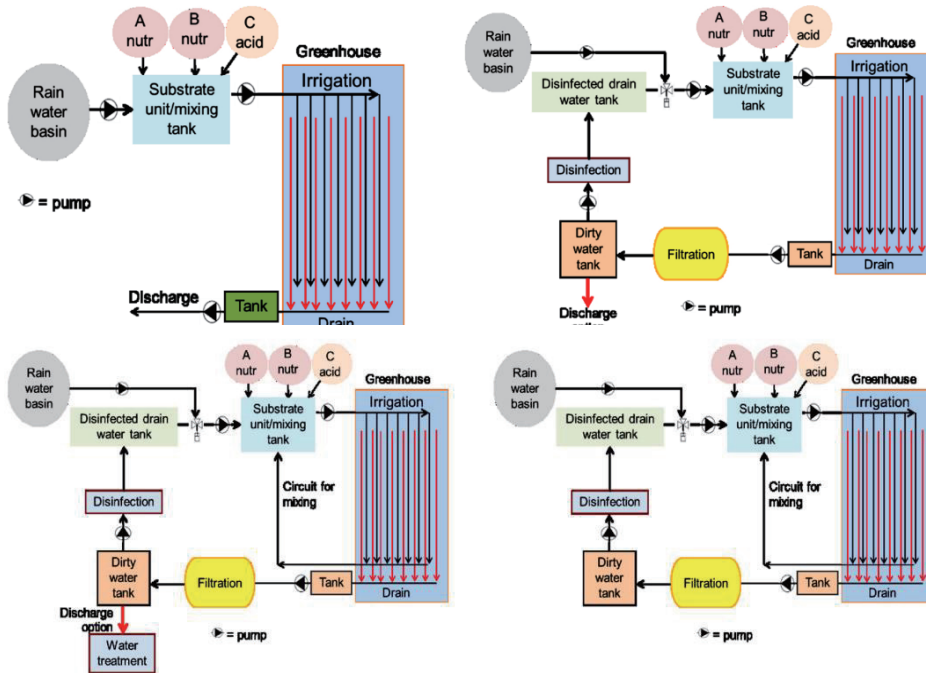
◀ 圖 6 Poseidon 水質淨化系統

Fig. 6 Poseidon water purification system.

(照片來源：<https://www.vanderendegroup.com/>)



◀ 圖 7 Waterstreams 模型用戶界面簡化圖
Fig. 7 A simplified diagram from the Waterstreams model's user interface.



▲ 圖 8 溫室開放式 (A)、半封閉式 (B)、帶有排水循環的半封閉式 (C) 和零排放 (D) 水系統的示意圖

Fig. 8 Schematic overview of an open (A), semi-closed (B), semi-closed with drainage circulation (C), and zero liquid discharge, ZLD (D) water system under greenhouse.



Sustainable greenhouse production ~ strategy to efficient water utilization with zero emission

Wei-Ling Chen^{1*} Chang-Shen Chien¹

Abstract

Climate change and the environmentally sustainable issue have prompted producers to improve existing cultivation systems. Closed soilless greenhouse cultivation, in addition to having a high water use efficiency (WUE), also avoids the discharge of fertilizers and plant protection products through water. The management strategies for water zero-emission included the following: (1) Diverse and high-quality water sources with $EC < 0.25 \text{ ms.cm}^{-1}$ and $Na^+ < 0.1 \text{ mmol.L}^{-1}$, and making efficient use of rainwater and storing up to 800 L.m^{-2} of greenhouse area; (2) Water treatment procedures for both source water and recycled nutrient solution, incorporating a series of processes such as aeration oxidation, filtration, pH regulation, cation exchange, reverse osmosis, and sterilization; (3) Irrigated amount based on radiation and water-use models estimated; (4) Fertigation management in accordance with crop water and stress physiology then preventing sodium accumulation under circulating conditions; (5) Implementation of a comprehensive practicing and monitoring system for water-nutrient system. It aimed to create a stable root zone environment, thereby achieving zero-emission cultivation.

Keyword: Greenhouse cultivation, Evapotranspiration, Sodium accumulation, Water treatment, Water use efficiency, Zero-emission

¹ Taichung District Agricultural Research and Extension Station, MOA., Taiwan

*Corresponding author (chenwl@tcdares.gov.tw)