

整合地下水、雨水及臭氧殺菌之溫網室灌溉水處理系統設計¹

吳有恒²

摘 要

本研究整合地下水、雨水、過濾及臭氧殺菌，設計灌溉水處理系統，以提供溫網室作物高品質的灌溉水。雨水由玻璃溫室屋頂匯集，經過濾能力 140 目的砂濾器濾除雜質後，再以臭氧進行水體殺菌處理。1 m³ 水體在每小時 20 g 的臭氧作用下，水中臭氧濃度可在 30 分鐘內被提升到 5.0 mg L⁻¹；種植者可依作物需要，進行不同程度的灌溉水殺菌作業。本系統可同時使用地下水與雨水，並可最大化利用天然雨水。此系統在擴充上相當容易，僅需再串接增加儲存桶即可增加雨水收集量，可應用於溫網室灌溉、水牆及農產品等清洗作業。

關鍵詞：灌溉水處理系統、臭氧殺菌、雨水收集、砂濾、地下水

前 言

台灣溫室面積已超過 2,100 公頃（許等，2013），由於栽培技術的進步，其面積正逐年快速攀升。利用溫網室以提供作物保護性生產環境，除可減少天然災害影響外，更可進行環境控制，以提升農產品品質及調整產期；因此，包含花卉、種苗、瓜果及蔬菜等相當多的作物均已在溫網室中栽培生產。

溫室生產環境封閉，無法像露地栽培一樣，可直接利用天然降雨進行灌溉，因此抽取地下水以為灌溉使用變成為最普遍的方式；然而，地下水超限利用致使水資源匱乏，極端氣候導致水環境的惡化，以及溫網室生產作物比例的逐年增加，使得灌溉水的取得更為不易，收集雨水以減少地下水的使用已成為溫室灌溉必須發展的方向。

¹行政院農業委員會桃園區農業改良場研究報告第 477 號。

²桃園區農業改良場助理研究員(通訊作者, yhwu@tydais.gov.tw)。

天然雨水有機污染物少、溶氧量高、總硬度小(趙與丁, 2004), 適合灌溉使用; 使用天然雨水更兼具節能、環保、水質易控制及可避免有害物感染等優點。實際上, 已有相當多的校園利用地下蓄水池收集雨水, 並應用於植栽的澆灌(王等, 2011; 翁與黃, 2008)。

為降低水傳播性病害, 提升溫室花卉、蔬菜及種苗品質, 灌溉水不論是來自收集雨水或是回收再使用, 均必須進行殺菌處理(Runia, 1993a)。我國「栽培介質蝴蝶蘭輸美標準作業流程」中更規定灌溉水必須經過消毒處理。溫室灌溉水殺菌方式多樣, 紫外線(Ultraviolet; UV)及臭氧是常用的方式(羅, 2005; Newman, 2004)。臭氧是強烈的氧化劑, 可氧化細胞體, 破壞細菌 DNA 或病毒 RNA 而達到殺菌效果, 常使用於飲用水及廢水處理, 其殺菌效率主要受臭氧濃度及作用時間所影響(Glaze, 1987; Langlais *et al.*, 1991)。

灌溉水水質的潔淨是溫室作物栽培成功的最基本事項。本研究整合地下水、雨水及臭氧殺菌, 設計灌溉水處理系統, 以提供溫網室作物高品質的灌溉水。

材料與方法

本系統是在桃園區農業改良場已有的玻璃溫室下新增裝置, 系統設計可同時使用地下水與雨水, 並可最大化利用天然雨水。雨水由溫室屋頂收集, 經過濾器濾除雜質後, 依每日灌溉需求, 進行定時定量的臭氧殺菌作業。灌溉水於進入滴灌系統前, 並經由 5 μm 過濾器, 以避免滴灌系統堵塞。

一、雨水收集系統

溫室屋頂雨水收集裝置如圖 1 所示。溫室長 22 m、寬 13 m, 屋頂為山型狀玻璃構造, 山凹處裝設有天溝(圖 1a), 可承接由屋頂玻璃面流下的雨水。雨水由天溝流入匯集槽(圖 1b)後, 被導向斜板過濾器(圖 1c), 斜板過濾器可將初下雨時, 由屋頂沖刷下包含樹葉及糞便等較髒污物排出不收集, 以減低雨水儲存時的污染負荷及後端過濾器的負擔; 待雨水量較多時, 多數流入斜板過濾器的雨水才會被收集, 並被導入雨水收集桶。

雨水收集及過濾裝置如圖 2, 1 m^3 雨水收集桶(圖 2a)可同時用於地下水及雨水的初收集。收集桶內較低位置裝設有水位感測器, 可控制地下水的抽停。當無雨水而

抽用地下水時，最多僅可儲存約 0.3 m^3 的地下水；而有雨水流入時，則可允許水位不斷上升至桶頂，過多的雨水則由收集桶上方溢流口排出。

雨水由收集桶抽送進入 3 m^3 儲存桶（圖 2b）前，先經砂濾器（圖 2c）濾除雜質。砂濾器內裝平均有效粒徑 1.2 mm 的石英砂，過濾能力 140 目。過濾器前端裝置壓力錶，以顯示過濾阻力，作為砂濾器反沖洗（圖 2d）及排污的參考。

儲存桶用於收集經砂濾器過濾後之地下水及雨水，桶內上、下均裝置水位感測器。平時桶內僅維持在 0.6 m^3 的下限水位，如遇雨水大量流入收集桶時，抽水馬達自動啟動，並將收集桶內的雨水不斷抽取過濾至儲存桶，直至上限水位後停止。

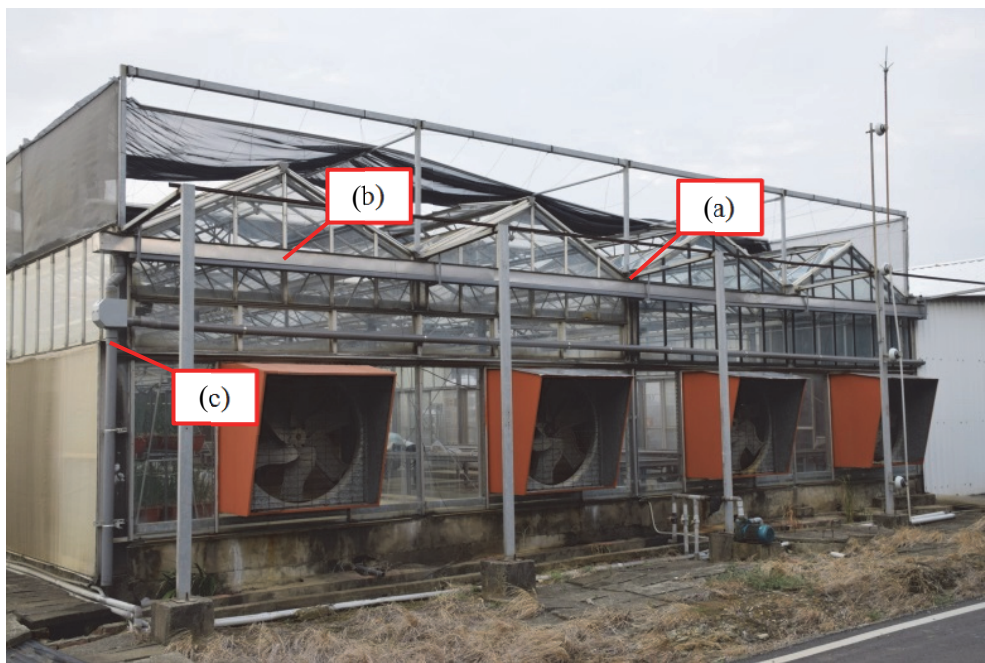


圖 1. 溫室屋頂雨水收集裝置。(a)天溝；(b)匯集槽；(c)斜板過濾器

Fig. 1. The rainwater collection devices on the greenhouse roof. (a) gutter; (b) gathering trough; (c) static screen filter.

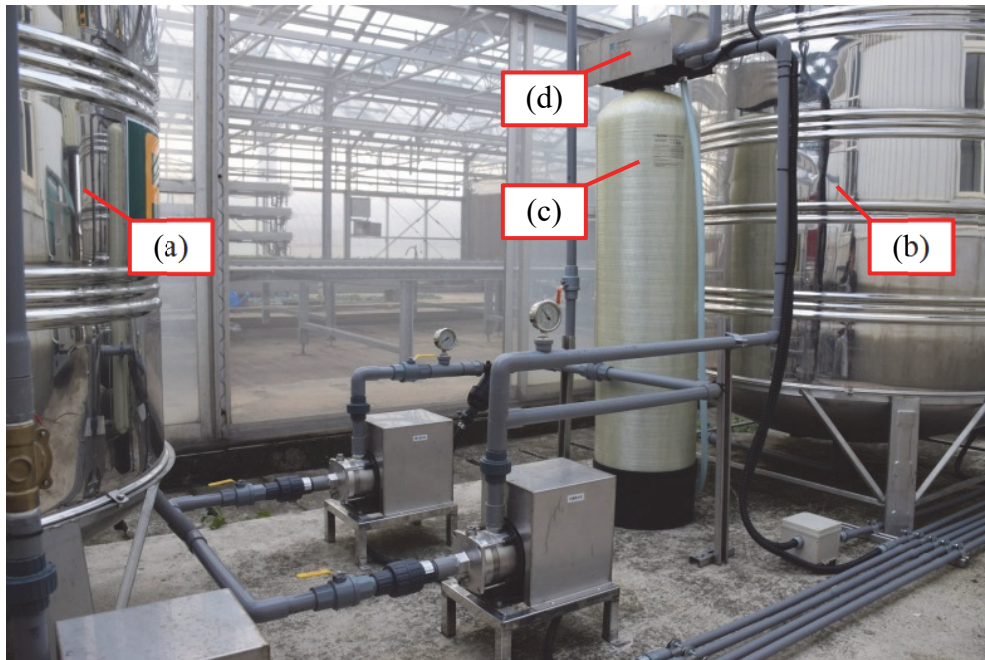


圖 2. 雨水收集及過濾裝置。(a)雨水收集桶；(b)儲存桶；(c)砂濾器；(d)反沖洗控制器

Fig. 2. The rainwater collection and the filtering device. (a) rainwater collection tank; (b) storage tank; (c) sand filter; (d) backwash controller.

二、臭氧殺菌系統

臭氧殺菌系統包含臭氧產生機（圖 3）、抽水馬達、臭氧氣水混合裝置（圖 4）及 1 m^3 暫存桶。臭氧機為高壓放電式，氣源為氧氣製造機生成之純氧，臭氧氣產率最高 20 g hr^{-1} 。臭氧氣水混合利用文氏管（Venturi tube），透過高速水流將臭氧產生機產生之臭氧氣體吸入混合，混合後的臭氧水被導入暫存桶，並不斷地循環混入臭氧氣以增加水中臭氧濃度。

經臭氧消毒後之灌溉水主要用於溫室立體化栽培生產（圖 5），以滴灌系統進行灌溉，灌溉水由控制器控制定壓馬達（ 0.5 hp ）輸出。為避免滴灌系統堵塞，灌溉水進入滴灌系統前，再經 $5\text{ }\mu\text{m}$ 管式過濾器過濾。



圖 3. 臭氧產生機

Fig. 3. Ozone generator.



圖 4. 臭氧氣水混合裝置

Fig. 4. The mixing device for ozone gas and water.



圖 5. 灌溉水應用於立體化栽培生產

Fig. 5. The irrigation water for the vertical crop productions.

三、水質與臭氧量測

雨水及地下水經砂濾及臭氧消毒後，分別量測水體電導度 (Electrical conductivity; EC)、pH 及總溶解固體 (Total dissolved solids; TDS)；水質量測使用 HORIBA U-50 多參數水質同步量測儀。

砂濾理後的水體以每分鐘 7 公升的臭氧氣體進行消毒作業，分別量測消毒前、後水中臭氧濃度，以評估臭氧於灌溉水中溶解及降解的效能。

水體臭氧濃度變化使用 Q46H/64 溶解臭氧分析儀 (Analytical Technology, Inc.) 量測；臭氧氣體則使用 BT200 型 UV 臭氧分析儀 (Sunray Science Co., Ltd.) 量測。

結果與討論

一、雨水收集系統效益

用於雨水收集之溫室面積 286 m²，以桃園地區平均年降雨量 1,790 mm (維基百科, 2014) 及雨水收集率 85% 估算，此溫室屋頂每年可收集 435 m³ 雨水；由於系統

處理後之水體主要用於滴灌作業，因此，如以溫室內作物覆蓋率 80%及灌溉水需求率 $5 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 計算，作物每日需 1.14 m^3 的灌溉水，每年需消耗 416 m^3 。此結果顯示溫室屋頂所收集的雨水，應可滿足溫室內作物的滴灌需求；然而，雖然每年區域性的降雨量變化不大，但不同季節的降雨量並不平均，單由溫網室屋頂所收集的雨水不一定能適時地滿足作物的灌溉需求，因此系統設計可共用地下水與雨水，當雨水不足時，仍可抽取地下水使用。

1 m^3 收集桶收集雨水後，會立刻過濾並抽送至 3 m^3 儲存桶，此目的在於初始收集的雨水所含雜質及細菌較多，如不過濾而直接儲存，將導致水中細菌快速繁衍；因此，為降低污染負荷，雨水先經過濾後再抽入儲存桶儲存。

在過濾器的選用上，主要考量因素是水中有機物與無機物含量，以及雜質的粒徑分布狀況（吳，2014）。本系統主要應用於滴灌作業，需要較高性能的過濾器（謝與許，2013），因此，過濾裝置選用過濾能力 140 目的砂濾器，並配置 $5 \mu\text{m}$ 的管式過濾器，以避免後端滴灌系統堵塞。試驗期間，過濾器之過濾壓力均低於 2 kg cm^{-2} ，顯示過濾器無堵塞，可穩定過濾，此可能與雨水收集前已先經斜板過濾器濾除初始較髒水體，因而減輕過濾器負荷有關；再者，由於 $5 \mu\text{m}$ 管式過濾器的作用，滴灌系統可穩定作業，栽培期間並未有管路堵塞情況。

3 m^3 儲存桶為主要的雨水儲存裝置，增加雨水收集量僅需串聯增加儲存桶即可，具備相當的擴充性。

雨水及地下水砂濾處理結果如表 1 所示。雨水經砂濾處理後，EC 值由 0.463 降至 0.195 mS cm^{-1} ，約 58%無機陰陽離子被砂濾器去除；而地下水則差異不大，僅由 0.299 降至 0.294 mS cm^{-1} 。上述結果顯示地下水的 EC 值相對穩定，應與地表水滲入土壤或岩層時，已類似砂濾器的作用，水體及土壤內的無機鹽類會相互反應，而達到穩定平衡狀態；因此，抽取之地下水經石英砂過濾，對 EC 值的影響不大。

表 1 同時顯示無論是否經砂濾，雨水及地下水的 EC 值均符合我國灌溉水 EC 值小於 0.75 mS cm^{-1} 的水質標準；而 TDS 值亦符合滴灌系統要求小於 500 mg L^{-1} 的水質要求。

桃園地區天然降雨之平均 pH 值低於 5（林等，2003；吳等，2013），呈現酸雨型態。本試驗取得之雨水 pH 值 5.98，砂濾後 5.83，略低於 pH6-9 的灌溉水水質標準；然由於試驗溫室之地下水 pH 值 7.98，過濾後 8.05；因此，可藉由混合地下水與天然雨水以平緩 pH 值，或是透過 pH 調節方式，以自動化感測器配合藥劑處理以調控 pH 值。

表 1. 雨水及地下水經砂濾及臭氧處理效果

Table 1. The effects of treating rainwater and underground water using sand filter and ozone.

水質參數 Water quality parameters	原水 Raw water	砂濾處理後 After sand filter treatment	砂濾及臭氧處理後 After sand filter and ozone treatment
雨水 Rainwater			
EC (mS cm ⁻¹)	0.463	0.195	0.195
pH	5.98	5.83	6.05
TDS (mg L ⁻¹)	301	129	126
地下水 Underground water			
EC (mS cm ⁻¹)	0.299	0.294	0.295
pH	7.98	8.05	8.18
TDS (mg L ⁻¹)	195	191	192

TDS：總溶解固體

TDS: Total Dissolved Solids

二、臭氧殺菌系統效益

灌溉水中臭氧濃度變化如圖 6 所示。1 m³ 水體，在注入臭氧氣體濃度 3.8% 狀態下，水中臭氧濃度 30 分鐘內可增加至 5.0 mg L⁻¹，其濃度呈現穩定增加。由於試驗使用之臭氧機臭氧氣體生產率 20 g hr⁻¹，因此，水體在 30 分鐘內被注入了 10 g 的臭氧；溫室管理者可依不同的殺菌需求，依圖 6 控制臭氧氣水混合時間，以調控灌溉水臭氧濃度，進行灌溉水的殺菌處理。

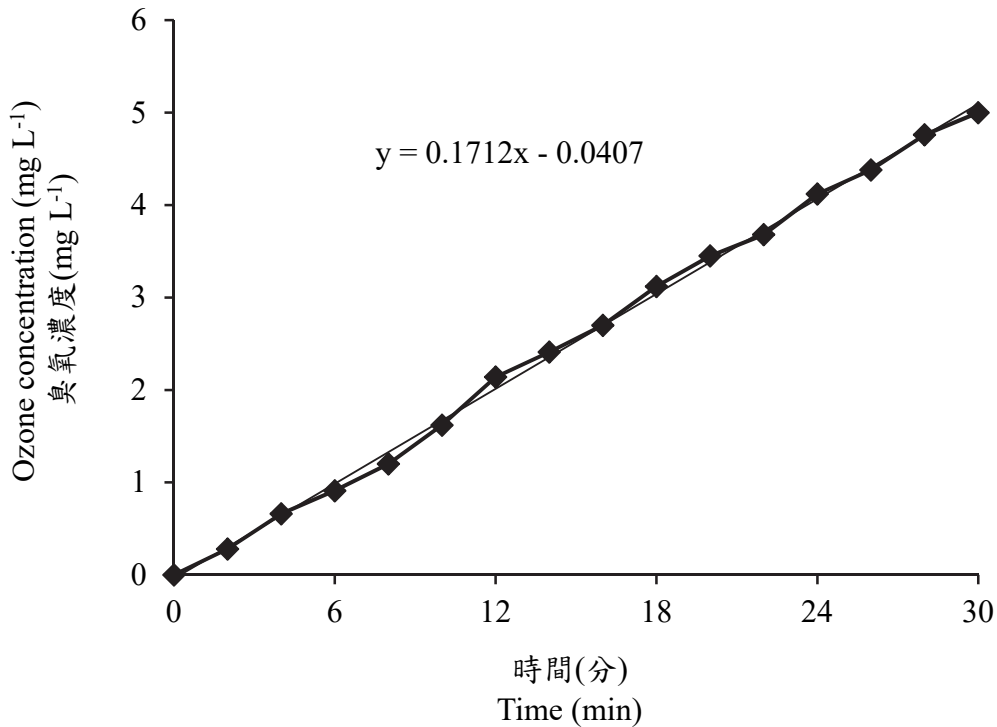


圖 6. 灌溉水水中臭氧濃度

Fig. 6. The ozone concentration in irrigation water.

一般利用臭氧進行灌溉水消毒作業，處理 1 m³ 灌溉水約需 7.5 g 臭氧 (Newman, 2004)；若循環水再使用或排放水回收再利用，就必須增加臭氧量 (Runia, 1993b)。然而，灌溉水並不一定需要完全殺菌，要殺菌到何種程度，可由水體狀態、作物及病害間的關係加以考量。如果過濾系統效能好、水體乾淨或作物抗病性強，不易被感染，則可降低臭氧殺菌濃度或減少臭氧處理時間，以降低殺菌作業成本。

圖 7 為灌溉水注入臭氧 30 分鐘後，關閉臭氧機，水體內臭氧濃度的降解狀況。水體內臭氧濃度會隨時間增加而不斷減少，其降解方程式可以指數方式表示。水中臭氧濃度可在 30 分鐘後，由 5 mg L⁻¹ 降至 1.49 mg L⁻¹，並於 60 分鐘後進一步降至 0.45 mg L⁻¹。依臭氧降解指數方程式，臭氧濃度降到 0.1 mg L⁻¹ 需 98 分鐘，而降到 0.05 mg L⁻¹ 需 115 分鐘；顯示灌溉水經臭氧殺菌後 2 小時，水中幾無臭氧，已可提供灌溉使用。如需快速去除殺菌後水體殘留之臭氧，可利用活性碳或填充塔 (Packed column) 進行水體處理 (Owsley, 1991)。

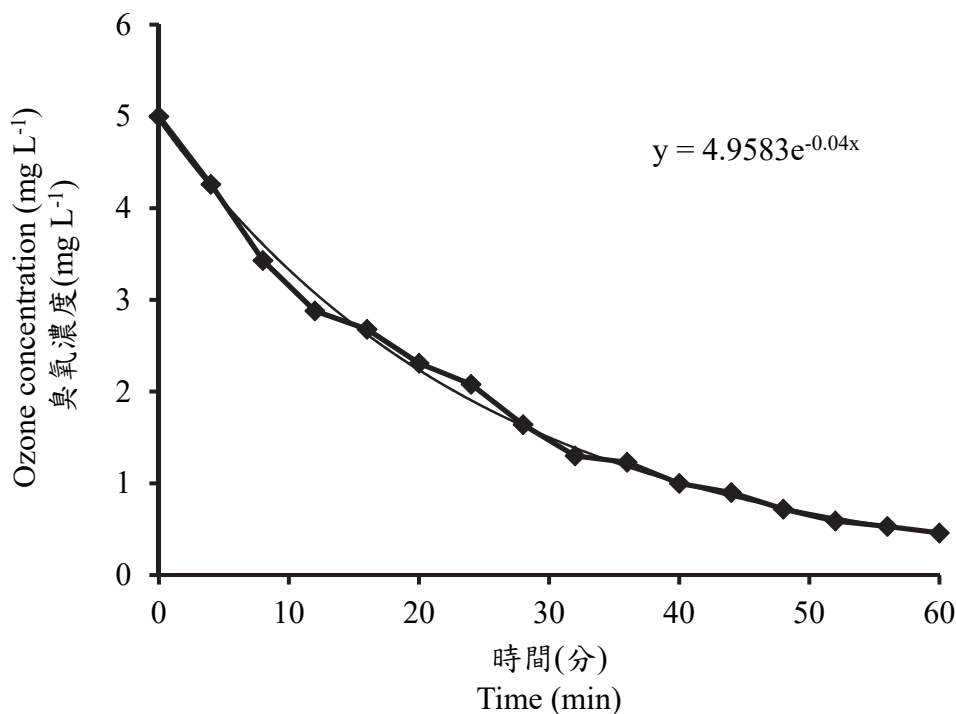


圖 7. 灌溉水水中臭氧降解狀況

Fig. 7. The degradation of ozone in irrigation water.

臭氧溶解效率受溫度、pH、水中溶解有機物含量及無機離子濃度等影響 (Lawson, 1995)。高溫會加速臭氧分解，降低水中臭氧溶解度。由於本系統使用不鏽鋼槽，且置於室外，為提升臭氧殺菌效率，臭氧殺菌作業選擇在晨間低溫時進行；殺菌處理後，隨環境溫度逐漸升高，亦有利於水中臭氧的分解與加速排除尾氣 (Off-gas)。

砂濾後之雨水及地下水經臭氧處理效果如表 1 所示，EC 及 TDS 值幾乎不受影響，僅水中 pH 值分別增加 0.22 及 0.13。此與水中部份氫離子受臭氧作用而濃度降低，使 pH 值略微增加有關。

臭氧是強烈的氧化劑，可有效進行灌溉水的殺菌處理；然而在使用上仍必須小心謹慎，處理後之灌溉水，必須等待水中臭氧還原為氧後，再行灌溉使用，以避免傷害作物。再者，系統作業時亦需留意臭氧是否洩漏，務必使操作人員均在安全的環境下作業。

未來仍需針對不同臭氧濃度對水體病原菌殺菌效果進行檢測，以評估最適合的臭氧殺菌濃度與作用時間，使臭氧系統能以最經濟的方式進行灌溉水殺菌處理。

誌 謝

本研究承行政院農業委員會科技計畫（103 農科-14.4.1-桃-Y1 及 104 農科-16.4.1-桃-Y1）補助，特此致謝；試驗期間，感謝本場作物環境課謝富英先生及林根淡先生協助系統架設與測試。

參考文獻

- 王仁俊、張麗蓉、李孫榮、余光昌、甘其銓、楊奇儒、張翊峰。2011。台灣小型雨水回收系統經濟效益之研究。嘉南學報 37:172-181。
- 林能暉、張木彬、丁望賢。2003。桃園縣酸雨分佈及強度研究。桃園縣環境保護局。
- 吳有恒。2014。溫室灌溉技術。桃園區農業專訊 89:9-13。
- 吳信郁、李宗翰、廖高宗。2013。北部地區農業污染源監測調查。102 年度農業工程與自動化計畫成果研討會論文集。農業試驗所編印。p.142-147。
- 許涵鈞、鍾瑞永、謝明憲、楊藹華、王仕賢。2013。建構亞熱帶適應型溫室~台荷合作計畫。台南區農業專訊 85:22-25。
- 趙純清、丁淑芳。2004。溫室雨水收集系統的應用研究。中國農機化 5:50-51。
- 翁彩瓊、黃世孟。2008。雨水貯留規模之設計-以台北市國小為對象。中華建築技術學刊 5(1):95-106。
- 羅天相。2005。花卉灌溉水的殺菌技術及原理。農業新技術 5:17-18。
- 維基百科。2015。桃園市。2015 年 10 月 1 日，取自 <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%A1%83%E5%9C%92%E7%B8%A3>。
- 謝明憲、許涵鈞。2013。設施節水滴灌應用資材及技術簡介。臺南區農業專訊 84:5-10。
- Glaze, W.H. 1987. Drinking-water treatment with ozone. Environmental science & technology 21(3):224-230.
- Langlais, B., D.A. Reckhow, and D.R. Brink. 1991. Ozone in water treatment: Application and engineering. CRC press.
- Lawson. T.B. 1995. Fundamentals of Aquacultural Engineering. Chapman and Hall, New York.
- Newman, S.E. 2004. Disinfecting irrigation water for disease management. In 20th Annual

Conference on Pest Management on Ornamentals. p.20-22.

Owsley, D.E. 1991. Ozone for disinfecting hatchery rearing water. In Fisheries Bioengineering Symposium: American Fisheries Society Symposium 10. p.417.

Runia, W.T. 1993a. A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless cultures. In IV International Symposium on Soil and Substrate Infestation and Disinfestation 382. p.221-229.

Runia, W.T. 1993b. Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems with ozone. In: International Symposium on New Cultivation Systems in Greenhouse 361. p.388-396.

Design of an Irrigation Water Treatment System Integrating Groundwater, Rainwater, and Ozone Disinfection for Greenhouses¹

Yu-Heng Wu²

Abstract

This study integrated groundwater, rainwater, filtration, and ozone disinfection to design an irrigation water treatment system, thereby providing the high-quality irrigation water for greenhouse crops. The rainwater was collected from the greenhouse roof. After being filtered out the impurities by the sand filter with a filtering capability of 140-mesh, the water was sterilized with ozone. When 1 m³ of water was treated in a rate of 20 g ozone per hour, the ozone concentration in the water was raised to 5.0 mg L⁻¹ within 30 minutes. Growers may take different levels of disinfection operations depending on the crop needs. The system can treat both groundwater and rainwater, and maximize the utilization of rainwater. On system's expansion, it only needs to increase storage tanks to increase the amount of rainwater collection. The system could be used for the greenhouse irrigation operations, the water walls, the washing operations of agricultural products, etc.

Key words: irrigation water treatment system, ozone disinfection, rainwater collection, sand filtering, groundwater

1. Contribution No.477 from Taoyuan DARES, COA.

2. Assistant Researcher (Corresponding author, yhwu@tydais.gov.tw), Taoyuan DARES, COA.