

金門酒廠放流水再利用於農業灌溉之可行性與 風險評估：整合土壤-作物反應與利害關係人觀點

FEASIBILITY AND RISK ASSESSMENT OF REUSING DISTILLERY WASTEWATER FOR IRRIGATION IN KINMEN:
INTEGRATION OF SOIL-CROP RESPONSES AND STAKEHOLDER PERSPECTIVES

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

江 莉 琦
Li-Chi Chiang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
研究助理

廖 啟 鈞
Ci-Jyun Liao

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

廖 宜 泰
Yi-Tai Liao

財團法人農業工程研究中心
環境組
研究員/組長

陳 豐 文
Feng-Wen Chen

國立臺灣師範大學
永續管理與環境教育研究所
博士候選人

彭 光 偉*
Kuang-Wei Peng

摘 要

本研究針對金門地區農業用水受限之現況，評估金門酒廠放流水 (KKL) 與后壠溪水 (HL) 不同比例混合灌溉之可行性與管理風險，並整合生物炭(BC)施用效果與在地利害關係人之問卷調查。田間試驗設置對照組 (HL) 及四組放流水混合比例處理 (T20、T40、T60、T80)，各處理組均配置施用與未施用生物炭之對照，藉以監測灌溉水質及土壤理化性質之變遷。研究結果顯示，隨放流水比例提升，水質之電導度 (EC)、鈉離子含量 (Na)、鈉吸著率 (SAR) 及殘餘碳酸鈉 (RSC) 均顯著增加，顯示中高比例之放流水存在潛在鈉害風險。土壤指標雖具時序波動，但整體趨勢與水質風險一致，而施用生物炭具備條件式之緩解效果。作物驗證方面，高粱之鈉累積以根部與穗部為主，且累積量隨放流水比例增加而顯著上升。社會調查顯示，酒廠員工對再利用計畫持肯定態度；農民雖認知缺水壓力，但對土壤鹽化與作物品質仍有疑慮，其使用意願高度取決於水質監測之透明度。綜言之，放流水灌溉具推廣潛力，惟須建立比例配比控制、例行監測與資訊公開機制，並輔以技術指導以降低環境風險。

關鍵詞：酒廠放流水、鈉、鈉吸著率 (SAR)、殘餘碳酸鈉 (RSC)、水資源再利用。

* 通訊作者，國立臺灣師範大學永續管理與環境教育研究所博士候選人
116059 臺北市文山區汀州路四段 88 號，81146002s@ntnu.edu.tw

FEASIBILITY AND RISK ASSESSMENT OF REUSING DISTILLERY WASTEWATER FOR IRRIGATION IN KINMEN: INTEGRATION OF SOIL-CROP RESPONSES AND STAKEHOLDER PERSPECTIVES

Li-Chi Chiang

Department of Bioenvironmental Systems
Engineering, National Taiwan University

Ci-Jyun Liao

Department of Bioenvironmental Systems
Engineering, National Taiwan University

Yi-Tai Liao

Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering,
National Taiwan University

Feng-Wen Chen

Environment Division,
Agricultural Engineering
Research Center

Kuang-Wei Peng*

Graduate Institute of
Sustainability Management and
Environmental Education,
National Taiwan Normal
University

ABSTRACT

This study addresses the constraints of agricultural water resources in Kinmen by evaluating the feasibility and management risks of using various blending ratios of Kinmen Kaoliang Liquor distillery wastewater (KKL) and Houlong Creek water (HL) for irrigation. The research further integrates the application of biochar (BC) and surveys of local stakeholders. Field experiments included a control group (HL) and four wastewater blending treatments (T20, T40, T60, and T80), with each treatment subdivided into plots with and without BC application to monitor changes in irrigation water quality and soil physicochemical properties. The results indicated that increasing the proportion of distillery wastewater significantly elevated the electrical conductivity (EC), sodium (Na) concentration, sodium adsorption ratio (SAR), and residual sodium carbonate (RSC) of the irrigation water, highlighting potential sodicity risks at medium-to-high blending ratios. While soil indicators exhibited temporal fluctuations, the overall trends aligned with the water quality risks; however, BC application demonstrated conditional mitigation effects. Regarding crop validation, sodium accumulation in sorghum occurred primarily in the roots and panicles, with concentrations increasing significantly as the wastewater ratio rose. Stakeholder surveys revealed that distillery employees support the reclamation project and show high cooperative intent. Conversely, while farmers recognize the water scarcity, they remain concerned about soil salinization and crop quality; their willingness to participate depends heavily on the transparency of water quality monitoring. In conclusion, the reuse of distillery wastewater for irrigation shows promise, provided that a framework for blending control, routine monitoring, and information disclosure is established, alongside technical guidance to mitigate environmental risks.

Keywords: Distillery effluent, Sodium, Sodium adsorption ratio (SAR), Residual sodium carbonate (RSC), Water resource reuse.

Chiang, L.C., Liao, C.J., Liao, Y.T., Chen, F.W., & Peng, K.W.* (2026). "Feasibility and Risk Assessment of Reusing Distillery Wastewater for Irrigation in Kinmen: Integration of Soil-Crop Responses and Stakeholder Perspectives." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(3), 19-33.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202609_72\(3\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202609_72(3).0002)

一、緒論

1.1 研究動機

近年來，受氣候變遷影響，降雨型態呈現集中化與極端化趨勢，導致農業用水供需不穩定之情形日益顯著。相關研究與政策報告指出，降雨時空分布不均將增加乾旱期間農業缺水風險，並使灌溉用水調度與管理面臨更大挑戰，農業部門亟需尋求穩定且具韌性之替代水源，以因應未來氣候變遷帶來之不確定性。在此背景下，放流水回收再利用逐漸被視為提升農業用水效率與強化水資源管理韌性之重要策略之一。

金門地區因地形條件與地質特性限制，地表水資源不易有效蓄存，地下水可利用量亦有限，農業灌溉長期仰賴有限水源支撐。離島地區在面對乾旱或降雨不足情形時，農業用水調度彈性相對不足，使農業生產更易受到水資源限制影響。既有研究與地方政府報告指出，於金門地區推動放流水作為替代灌溉水源，除可降低對地下水之依賴，亦有助於提升整體水資源利用效率，惟放流水水質特性與天然水源存在差異，其對農地與作物之長期影響仍需審慎評估。

多項研究顯示，放流水中鈉離子 (Na^+) 濃度普遍偏高，長期以高鈉水源進行灌溉，可能導致土壤交換性鈉比例上升，進而引發土壤結構劣化、滲透性下降與鹽鹼化風險增加，並影響作物對其他養分元素之吸收效率 (Ayers and Westcot, 1985; Qadir *et al.*, 2007)。為降低高鈉灌溉水對農地與作物之潛在衝擊，部分研究建議透過放流水與天然水源混合之方式，調整灌溉水中鈉、鈣與鎂等陽離子比例，以維持土壤理化性質之穩定，並減緩作物生長不利影響 (Suarez *et al.*, 2006)。

另一方面，生物炭因具備高比表面積、孔隙結構及良好之陽離子交換能力，近年來被廣泛應用於土壤改良相關研究。既有研究指出，生物炭施用可改善土壤理化性質、提升保水能力，並影響土壤中養分之固定與釋放行為 (Farhangi-Abriz and Ghassemi-Golezani, 2021; Rajapaksha *et al.*, 2016)。在高鈉灌溉條件下，生物炭是否能透過吸附或交換機制，降低鈉離子於土壤中的累積風險，並進一步影響作物對 Na 、 Ca 與 Mg 等元素之吸收分布，仍有待進一步實證研究釐清。特別是在放流水混合灌溉與生物炭施用並行之情境下，其交互作用對作物養分吸收與農地管理之影響，目前相關研究仍相對有限。

除水質與作物生理反應外，放流水於農業灌溉之

實際推動成效，亦高度仰賴農民對替代水源之接受程度與實務操作考量。既有經驗顯示，即使再生水或放流水在技術層面具備可行性，若未能充分掌握使用者對水質風險、作物影響及管理成本之認知，仍可能影響其實際應用與長期推動成效 (Ofori *et al.*, 2021; Kiziloglu *et al.*, 2008; Galavi *et al.*, 2010)。特別是在金門等離島農業環境中，農業經營規模、作物種類與灌溉管理方式具高度在地特性，農民對放流水混合灌溉之接受度與使用意願，可能與本島地區存在差異。因此，僅依賴田間試驗或水質分析結果，尚不足以全面評估放流水農業再利用之可行性。

本研究立基於放流水農業再利用之情境，重點探討灌溉水質特性及其對農地土壤理化性質之影響。研究核心聚焦於不同比例之放流水與溪流水混合後，水質成分之變遷趨勢，進而分析其對土壤鹽分動態、陽離子組成及相關環境指標之影響，藉以評估混合灌溉於離島脆弱生態環境中之適用性與潛在風險。為彌補技術試驗與實務推動間之落差，本研究同步納入利害關係人調查，透過問卷蒐集在地農民對放流水再利用之認知、接受度及實務考量，剖析灌溉水質調整措施於耕作現場之可行性與限制。此外，本研究以高粱作為環境指標作物，藉由監測其生長表現與植體陽離子吸收情形，輔助驗證水質與土壤環境之交互影響。期能藉由整合水質化學、土壤理化性質及社會心理調查之數據，為金門地區推動放流水資源化利用與農業灌溉管理提供科學基礎與實務參考。

二、研究區域與方法

2.1 研究區域

本研究以金門地區為研究區域。金門位於臺灣海峽西側，屬於亞熱帶季風氣候區，年降雨量主要集中於夏季，降雨時空分布不均，枯水期農業用水供給易受限制。受限於島嶼型地理環境，金門地區地表水資源不易有效蓄存，農業灌溉長期仰賴地下水與有限之地表水資源，於乾旱或少雨期間，水資源調度彈性相對不足。在地質與土壤條件方面，金門地區多為風化花崗岩母質所形成之土壤，質地以砂質壤土至壤土為主，整體保水能力有限，於不當灌溉條件下，易產生鹽分累積與土壤理化性質劣化等問題。過去研究與地方實務經驗顯示，長期使用水質條件不佳之灌溉水源，可能加速土壤鹽分累積，進而影響農地永續利用與作物生產穩定性。

試驗場址位於金門農業試驗所之示範場域，高粱種植時間為 113 年 10 月到 114 年 2 月，品種為台中五號，灌溉水源主要為金門酒廠放流水及后壠溪溪水，具備實際推動放流水農業再利用之代表性條件。研究區域之農業型態以旱作及雜糧作物為主，灌溉管理方式相對單純，適合作為評估不同灌溉水質條件下，土壤理化性質變化與管理風險之研究場域。綜合而言，金門地區在水資源條件、灌溉需求及農地環境上，兼具水資源受限與替代水源需求之特性，具備探討放流水混合灌溉對灌溉水水質與土壤理化性質影響之研究價值，亦可作為離島地區推動放流水農業再利用管理策略之重要參考案例。

2.1 田間試驗設計

研究試驗設計以評估放流水農業再利用情境下之灌溉水水質特性、土壤理化性質變化及實務推動可行性為主要目標，研究方法包含灌溉水水質分析、田間試驗監測與問卷調查三個部分，並於金門農業試驗所之試驗田進行。高粱田間試驗配置如圖 1 所示，灌溉水處理共分為五組，其中對照組為單一溪流灌溉，水源取自后壠溪 (Houlong River, HL)；其餘四組為放流水與溪流之混合灌溉處理，依放流水比例分別設定為 20% (T20)、40% (T40)、60% (T60) 及 80% (T80)，以研析不同放流水農業再利用情境下之灌溉水質條件 (表 1)。各組灌溉水處理均配置兩塊面積相同之試驗田，每一試驗田尺寸為 8 m × 4 m，評估生物炭施用對土壤環境之影響。依試驗設計，靠近儲水桶之試驗田設定為未施加生物炭之處理 (試驗田 A)，作為對照；相鄰之第二塊試驗田則施加生物炭 (試驗田 B)，進行生物炭影響之比較分析。生物炭施用方式為將生物炭均勻撒布於試驗田內四條畦之表土層，每一畦約施用 0.156 t/ha 生物炭，並拌入土壤表層下約 15 cm 深度，使生物炭與

表 1 灌溉水組合說明

組別編號	灌溉配水組合	生物炭處理
HL	對照組(后壠溪溪水)	無
HL+BC		有
T20	20%KKL+80%后壠溪溪水	無
T20+BC		有
T40	40%KKL+60%后壠溪溪水	無
T40+BC		有
T60	60%KKL+40%后壠溪溪水	無
T60+BC		有
T80	80%KKL+20%后壠溪溪水	無
T80+BC		有

土壤充分混合，總施用量約為每一試驗田 0.625 t/ha。透過此配置，可在相同灌溉水質條件下，比較是否施加生物炭對土壤性質變化之影響，並作為評估放流水混合灌溉搭配生物炭管理措施可行性之依據。

2.3 灌溉水水質、土壤理化性質分析與問卷調查方法

為系統性評估放流水農業再利用情境下，不同灌溉水質條件對農地環境之影響，並補充實務推動層面之資訊，本研究整合灌溉水水質分析、土壤理化性質監測與問卷調查三項研究方法進行分析。試驗期間定期採集各灌溉水處理組之灌溉水樣，以掌握不同放流水與溪流混合比例下之水質特性。分析項目以農業灌溉管理常用之水質指標為主，包括酸鹼值 (pH)、電導度 (EC)，以及鈉 (Na)、鈣 (Ca) 與鎂 (Mg) 等主要陽離子濃度，並據以評估不同灌溉水混合比例對灌溉水鹽分狀態與陽離子組成之影響。

各試驗田區依既定時程進行土壤採樣，土壤樣品之採集位置與採樣深度於各處理間保持一致，以確保比較基礎之嚴謹。土壤分析項目以反映鹽分與陽離子狀態之理化指標為主，包括土壤酸鹼值 (pH)、電導度 (EC)，以及可交換性鈉、鈣與鎂等陽離子含量，分析不同灌溉水質條件下，土壤鹽分累積趨勢與性質變化之情形。相關分析結果做為評估放流水混合灌溉對農地土壤環境之潛在影響與管理風險。

為補充試驗結果於實務推動層面之資訊，本研究同步進行問卷調查，以瞭解金門農民與金門酒廠員工對放流水農業再利用之認知、接受程度與實際操作考量。問卷內容涵蓋灌溉水源使用現況、對放流水水質之看法、對土壤影響之疑慮，以及對放流水混合灌溉管理措施之接受意願等面向，採實地訪談與填答方式

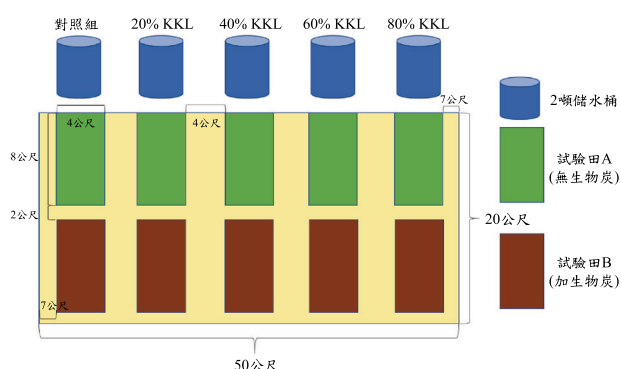


圖 1 試驗田設計示意圖

進行資料蒐集。所得問卷資料以描述性統計方式進行整理，並與灌溉水水質及土壤理化性質分析結果進行對照與整合討論，以評估放流水農業再利用於實務推動層面之可行性與潛在限制。

三、結果與討論

3.1 灌溉水水質特性分析

本研究彙整 113 年 12 月 8 日不同放流水與后壠溪溪水混合比例之灌溉水水質檢測結果，如表 2 所示，評估放流水農業再利用情境中，灌溉水鹽分狀態、主要陽離子組成及其潛在管理風險。灌溉水處理組包含對照組 (HL) 以及四組實驗組 (T20、T40、T60 與 T80)，並以金酒放流水原水 (T100) 作為高濃度放流水之比較。

灌溉水酸鹼值 (pH) 於各處理組介於 7.6 至 8.29 之間，皆落於臺灣灌溉水質基準值建議範圍 (pH 6 ~ 9) 內。隨放流水混合比例提高，pH 呈現緩升趨勢，其中 HL 與 T20 之 pH 均為 7.6，而 T80 與 T100 分別為 8.25 與 8.29，顯示放流水比例增加對灌溉水酸鹼狀態具有一定影響，但短期內仍屬可接受範圍。在電導

度 (EC) 方面，各處理組差異明顯。對照組 (HL) 之 EC 為 769.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，接近臺灣灌溉水質基準值 (750 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，隨放流水比例增加，EC 顯著上升，T20、T40、T60 與 T80 分別達 1,147、1,936、2,638 及 2,410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，金酒放流水 (T100) 則高達 3,920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。此結果顯示，當放流水混合比例超過 20% 後，灌溉水 EC 已明顯高於一般灌溉水建議值，顯示高比例放流水灌溉於鹽分管理上具潛在風險。

陽離子分析結果顯示，鈉 (Na) 濃度隨放流水比例增加而大幅上升。HL 處理組 Na 濃度為 69.03 mg/L，而 T20、T40、T60 與 T80 分別為 157.33、314.17、435.68 與 406.64 mg/L，金酒放流水 (T100) 為 650.83 mg/L。相較之下，鈣 (Ca) 濃度於各處理組間變化較小，介於 23.49 ~ 32.05 mg/L，而鎂 (Mg) 則隨放流水比例增加呈現上升趨勢。此結果顯示，隨放流水比例提高，灌溉水中 Na 相對於 Ca 與 Mg 之比例明顯增加，可能提高鈉害風險。鈉吸著率 (SAR) 結果可進一步確認上述趨勢。HL 處理組 SAR 為 2.88，屬低鈉風險範圍；T20 已上升至 5.69，接近灌溉水建議上限 (SAR = 6)，而 T40、T60 與 T80 分別達 9.70、12.27 與 11.67，金酒放流水 (T100) 高達 14.57，顯示中高比例放流水灌溉已具明顯鈉危害潛勢。此外，殘餘碳酸鈉 (RSC) 亦隨放流水比例升高而顯著增加，由 HL 之 0.15 meq/L 提升至 T40、

表 2 試驗灌溉用水水質分析 (113/12/8)

檢測項目	試驗灌溉配水組別					T100	台灣灌溉水質基準
	HL	T20	T40	T60	T80		
pH	7.6	7.6	8.07	8.13	8.25	8.29	6 ~ 9
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	769.3	1147	1936	2638	2410	3920	750
K (mg/L)	26.72	51.33	99.09	141.16	128.84	232.57	
Na (mg/L)	69.03	157.33	314.17	435.68	406.64	650.83	
Ca (mg/L)	32.05	32.04	26.8	24.94	23.49	25.11	
Mg (mg/L)	7	15.76	32.03	42.89	41.57	76.47	
P (mg/L)	1	11.86	31.45	47.82	43.87	91.83	
Cl ⁻ (mg/L)	98.9	108.88	130.45	118.56	127.45	110.03	175
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	55.98	52.74	39.26	18.19	23.79	2.55	200
SAR (meq/L) ^{1/2}	2.88	5.69	9.7	12.27	11.67	14.57	6
As (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Cd (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01
Cr (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.2
Cu (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.2
Ni (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.02	0.2
Pb (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.02	0.1
Zn (mg/L)	0.08	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	2
RSC (meq/L)	0.15	2.97	9.45	15.75	14.11	27.76	2.5

註：ND 為低於偵測極限，偵測極限為 0.005 mg/L。

T60 與 T80 之 9.45、15.75 與 14.11 meq/L，T100 更達 27.76 meq/L，皆明顯高於建議值 (2.5 meq/L)，說明高比例放流水於土壤結構穩定性方面存在潛在風險。

在其他水質項目方面，氯離子 (Cl⁻) 濃度於各處理組介於 98.9 ~ 130.45 mg/L，低於灌溉水質基準值 (175 mg/L)，硫酸根 (SO₄²⁻) 亦遠低於建議上限 (200 mg/L)。重金屬元素 (As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb) 皆未檢出或遠低於管制標準，顯示放流水於重金屬污染風險方面相對較低。

另討論不同季節金門酒廠放流水水質，表 3 以 110~112 年春、夏、秋三季為例，結果顯示不同季節間確實存在一定程度之水質變異。pH 值於各季節間變化不大，維持弱鹼性；而 EC、Na、Mg、SAR 與 RSC 等鹽分與鈉害相關指標呈較明顯的季節差異，其中夏季 EC、SAR 與 RSC 平均值最高，顯示夏季放流水鹽化、鈉化風險相對較高。相較之下，秋季多數指標略有下降。此結果說明放流水水質具有季節性波動，單一時間點之水質資料難以完全代表全年灌溉條件，未來仍應持續進行跨季節監測，以提升灌溉管理建議之代表性與長期風險評估能力。

整體而言，放流水混合比例為影響灌溉水鹽分狀態、鈉濃度、SAR 及 RSC 之主要因子，當放流水比例超過 20 ~ 40% 後，灌溉水 EC、Na、SAR 與 RSC 已明顯升高，顯示高比例放流水灌溉在土壤鹽分與鈉害管理上具有潛在風險。

3.2 土壤理化性質變化分析

本研究依不同灌溉水混合比例與是否施用生物炭 (BC)，分析田間試驗期間土壤理化性質之變化情形，

以評估放流水混合灌溉於實際農地環境中對土壤鹽分狀態、陽離子組成及養分可利用性之影響。分析項目包括土壤酸鹼值 (pH)、電導度 (EC)、陽離子交換能力 (CEC)、及陽離子 (Na、Ca、Mg)，並與前述灌溉水水質特性進行整合討論。

試驗期間各處理組土壤 pH 介於 5.2 ~ 7.1 之間，呈現明顯時間變動特性。以對照組 (HL) 為例，土壤 pH 由試驗初期 (113/8/28) 之 5.88 上升至 113/11/20 之 6.94，隨後於 113/12/10 降至 5.22，顯示土壤酸鹼狀態除受灌溉水質影響外，亦與季節條件及田間水分狀態密切相關 (表 4)。在放流水混合處理中，中高比例放流水 (T60、T80) 於部分時期呈現較高之土壤 pH，例如 114/01/16 T60 處理組 pH 達 7.05，高於低比例處理組，顯示放流水混合灌溉於短期內可能提高土壤 pH。比較是否施用生物炭可知，生物炭並未造成土壤 pH 之一致性提升，而是在多數中高比例放流水處理中，使土壤 pH 維持於較低或較穩定之範圍。生物炭於本試驗條件下對土壤 pH 主要呈現緩衝調節效果，而非改變酸鹼狀態之主導因子。

土壤電導度結果顯示，各處理組土壤 EC 皆隨時間呈現波動，且其變化趨勢與灌溉水 EC 高低具高度關聯性。於試驗初期 (113/8/28)，各處理組土壤 EC 皆維持相對較低水準 (約 50 ~ 200 μ S/cm)，隨試驗進行，部分中高比例放流水處理於後期呈現較高 EC 值。生物炭對土壤 EC 之影響呈現條件式反應。在部分低至中比例放流水處理 (如 T20、T40)，BC 處理之土壤 EC 於部分時期低於未施用生物炭者，顯示其可能對鹽分累積具有緩衝效果 (Diatta *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2024)；然而在高比例放流水處理 (T80) 下，BC 處理之土壤 EC 於部分時期反而較高，顯示在高鹽分負荷

表 3 各季節金門酒廠放流水水質

	110-夏	110-秋	111-春	111-夏	111-秋	112-春	112-夏	112-秋
pH	7.73	8.27	7.7	7.97	7.8	8.1	8.1	7.8
EC (μ S/cm)	3603.33	3316.67	3232.5	3423.33	3190	4440	4810	4040
Cl ⁻ (mg/L)	258	253.33	248.75	159.4	210	246	240	213
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	45.9	41.73	47.7	60.9	58.6	65.1	64.7	41.2
SAR (meq/L) ^{1/2}	12.5	10.57	8.03	11.3	11.8	18.2	22.8	15.4
RSC (meq/L)	13.63	11.67	10.13	20.47	20.7	30	33.5	21
Na (mg/L)	500.67	448.67	349.5	388.33	413	800	802	634
Ca (mg/L)	14.83	16.43	14.15	13.6	13	15.9	15.8	18.6
Mg (mg/L)	64.53	73.03	78.03	46.53	48.7	78.7	47.5	66.2

表 4 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤 pH 值

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	5.88	5.24	5.55	5.47	5.8	5.67
113/10/17	6.5	6.47	6.5	6.53	6.61	6.59
113/11/20	6.94	6.69	6.55	6.61	6.52	6.52
113/12/10	5.22	5.25	5.8	5.76	6.21	6.33
113/12/26	5.48	5.53	6.29	6.43	7.03	6.53
114/01/16	5.4	5.18	6.21	5.65	6.86	6.49
114/02/11	5.66	5.51	6.43	6.1	6.42	6.46
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	5.83	5.75	6.01	5.66		
113/10/17	6.71	6.45	6.79	6.57		
113/11/20	6.46	6.48	6.38	6.37		
113/12/10	6.33	6.43	6.22	5.72		
113/12/26	6.93	6.33	6.89	6.46		
114/01/16	7.05	6.51	6.49	6.4		
114/02/11	6.7	6.58	6.64	6.39		

表 5 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤電導度值

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	69.33	200.93	54.23	102.53	61.13	113.83
113/10/17	129.6	134.07	120.4	93.74	126.07	90.33
113/11/20	259.03	225.13	290.57	167.37	188.57	219.87
113/12/10	186.6	281.07	205.9	253.3	187.63	195.3
113/12/26	262.4	370.07	185.4	94.49	131.2	171.07
114/01/16	169.7	358.43	131.63	256.83	179.47	217.67
114/02/11	160.63	282.57	210.67	155.13	337.8	211.23
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	64.23	169.23	71	205.67		
113/10/17	101.29	129	145.53	175.37		
113/11/20	184.4	172.8	199.57	258.2		
113/12/10	195.07	207.53	254.67	258.87		
113/12/26	190.7	298.97	261.6	448.47		
114/01/16	269.93	349.23	555.43	480.97		
114/02/11	250.97	232.1	323.33	456.97		

單位：μS/cm

條件下，生物炭對土壤鹽分動態之影響並非單向抑制，而可能與水分條件與鹽類移動行為共同作用（表 5）。

各處理組土壤 CEC 於試驗期間介於約 3.1 至 11.4 meq/100g，呈現顯著時間變異（表 6）。比較生物炭處理可知，BC 並未於所有處理組中穩定提升土壤 CEC。此結果顯示，在本試驗時間尺度與土壤條件下，生物炭對 CEC 之影響並非立即且持續性之提升，可能隨生物炭與土壤作用時間、灌溉水質條件及土壤鹽分狀態而有所差異，顯示其角色較偏向於調節陽離子交換行為。

鈉結果顯示，隨放流水混合比例提高，土壤 Na 含量整體呈現上升趨勢，與灌溉水 Na、SAR 及 RSC 顯著增加之結果一致。於高比例放流水處理（T60、T80），土壤 Na 於多數時期均高於低比例處理，顯示放流水中高鈉負荷將直接反映於土壤鈉累積風險。比較生物炭處理可知，BC 施用後之土壤 Na 含量低於未施用生物炭者，顯示生物炭在部分條件下具降低土壤鈉含量之潛力。然而在高比例放流水處理（T80），BC 對 Na 之降低效果較不穩定，顯示於高鈉負荷條件下，生物炭之調節能力可能受到限制（表 7）。在其他陽離子方

表 6 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤陽離子交換能力值

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	6.59	6.26	8.6	6.08	9.73	8.63
113/10/17	10.63	8.6	8.07	5.46	9.95	4.93
113/11/20	6.17	5.01	6.36	3.14	6.42	5.93
113/12/10	6.59	10.84	6.89	5.9	4.83	6.33
113/12/26	7.11	5.45	6.94	6.71	7.51	5.66
114/01/16	10.54	8.03	10.59	8.18	9.74	7.52
114/02/11	6.09	6.45	5.77	7.35	5.86	4.96
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	9.84	7.12	10.54	11.43		
113/10/17	9.7	10.61	8.88	7.36		
113/11/20	6.18	4.46	9.75	5.1		
113/12/10	8.6	5.31	6.05	5.06		
113/12/26	7.23	6.23	9.27	6.82		
114/01/16	8.17	9.26	8.88	9.97		
114/02/11	5.58	7.43	7.19	6.23		

單位：meq/100g

表 7 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤性質分析(鈉)

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	75.07	80.34	89.25	40.78	51.88	44.86
113/10/17	99.92	93.01	60.24	56.52	84.33	41.01
113/11/20	134.36	57.05	120.37	31.72	74.49	43.85
113/12/10	209.94	199.62	229.59	165.23	264.85	199.87
113/12/26	235.69	244.1	220.71	170.37	247.12	217.12
114/01/16	90.37	127.49	119.23	77.67	158.41	126.16
114/02/11	84.16	98.28	126	59.21	189.98	102.97
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	47.18	75.13	74.63	102.12		
113/10/17	99.75	58.5	109.9	115.06		
113/11/20	197.88	158.87	206.85	182.27		
113/12/10	253.97	248.7	264.75	176.01		
113/12/26	278.5	234.92	337.74	327.26		
114/01/16	214.67	163.48	340.89	235.76		
114/02/11	192.32	115.53	219.65	207.57		

單位：mg/kg

面，Ca 與 Mg 在 BC 處理下多呈現維持或略為增加之趨勢，特別是在中高比例放流水處理中，BC 有助於提高 Ca 與 Mg 相對比例，有助於改善土壤中 Na 與 Ca、Mg 之競合關係 (Hammer *et al.*, 2015) (表 8 ~ 表 9)。

放流水混合比例為影響土壤鹽分狀態與鈉累積之主要因子，而生物炭於本試驗條件下並非全面改善土壤性質之工具，而是於特定灌溉水質條件下，對土壤酸鹼變動、鈉累積與陽離子競合關係具調節效果。特別是在低至中比例放流水灌溉情境中，生物炭有助於降低土壤鈉或維持 Ca、Mg 相對比例，顯示其於放流

水農業再利用管理上具潛在輔助價值。然而，在高比例放流水灌溉條件下，其調節效果有限，顯示灌溉水水質控制仍為降低土壤鹽分與鈉害風險之關鍵。

3.3 高粱鈉含量與鈉害風險之初步評估

為評估不同灌溉水混合比例及生物炭施用下，土壤鈉累積是否進一步反映在作物層級，本研究針對高粱各部位 (根、莖、葉及穗) 之鈉含量進行分析，作為灌溉水水質與土壤理化性質變化對作物潛在鈉害影響

表 8 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤性質分析 (鈣)

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	356.21	355.56	390.52	384.32	442.48	481.05
113/10/17	435.59	528.22	368.19	430.61	618.19	521.91
113/11/20	416.66	625.66	569.44	658.07	474.54	659.72
113/12/10	436.88	443.79	528.27	575.94	583.5	485.86
113/12/26	431.07	470.23	522.98	413.92	505.18	506.15
114/01/16	409	460.33	539.67	543.33	490.67	453.67
114/02/11	321.52	374.02	402.89	385.17	469.16	417
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	476.79	621.9	492.81	618.3		
113/10/17	607.57	613.88	646.08	683.93		
113/11/20	532.41	549.6	499.01	607.48		
113/12/10	541.09	611.11	540.44	581.53		
113/12/26	618.77	558.9	591.26	675.08		
114/01/16	511.33	546.67	577.33	640.33		
114/02/11	478.34	449.47	499.01	697.51		

單位：mg/kg

表 9 不同試驗灌溉配水組別於不同採樣時期之土壤性質分析 (鎂)

日期	HL	HL+BC	T20	T20+BC	T40	T40+BC
113/8/28	253.39	210.98	249.38	196.95	247.86	215.45
113/10/17	303.07	279.6	192.97	207.14	279.57	230.39
113/11/20	274.69	213.73	265.96	201.26	259.09	230.89
113/12/10	287.46	207.29	262.77	208.78	269.43	229.76
113/12/26	278.19	236.37	260.34	229.25	268.2	238.83
114/01/16	229.58	204.64	243.41	202.58	234.97	210.93
114/02/11	224.54	195.56	236.79	176.62	232.85	197.69
日期	T60	T60+BC	T80	T80+BC		
113/8/28	274.73	249	310.84	269.89		
113/10/17	284.75	245.51	331.06	290.3		
113/11/20	249.49	207.32	297.76	242.7		
113/12/10	266.52	255.3	316.45	238.3		
113/12/26	293.87	236.25	349.27	288.61		
114/01/16	261.9	233.54	317.21	275.11		
114/02/11	246.9	211.62	287.93	282.18		

單位：mg/kg

之輔助驗證。結果顯示，高粱鈉主要累積於根部，其次為穗部，莖與葉之鈉含量相對較低 (表 10)。在對照組 (HL) 中，根部鈉含量為 793.86 mg/kg，而施用生物炭後 (HL+BC) 明顯降低至 273.58 mg/kg；穗部鈉含量亦由 659.26 mg/kg 降至 388.22 mg/kg，顯示在低鈉灌溉條件下，生物炭有助於降低高粱鈉累積。隨放流水比例提高，高粱各部位鈉含量整體呈現上升趨勢，尤以根部最為明顯。例如未施用生物炭之處理中，T40、T60 及 T80 根部鈉含量分別為 1,822.36、2,245.56 及 1,762.88 mg/kg，顯著高於 HL 與 T20，顯示高比例

放流水灌溉確實提高作物鈉吸收風險。穗部鈉含量亦於高比例處理中顯著增加，其中 T80 穗部鈉含量高達 1,472.38 mg/kg，顯示在高鈉負荷灌溉條件下，鈉可能進一步轉移並累積於收穫部位。

比較生物炭處理可知，於各放流水比例下，生物炭皆使高粱各部位鈉含量呈現不同程度之降低，且其效果在中高比例放流水處理中特別明顯。例如在 T60 處理中，根部鈉含量由 2,245.56 mg/kg 降至 881.11 mg/kg，穗部則由 875.55 mg/kg 降至 421.48 mg/kg；於 T80 處理中，穗部鈉含量亦由 1,472.38 mg/kg 降至 1,049.21 mg/kg。

表 10 不同試驗灌溉配水組別對高粱不同部位之鈉含量分析結果

灌溉配水組合	部位	鈉	灌溉配水組合	部位	鈉
HL	根	793.86	HL+BC	根	273.58
	莖	206.93		莖	94.23
	葉	166.82		葉	78.96
	穗	659.26		穗	388.22
T20	根	881.43	T20+BC	根	778.27
	莖	258.85		莖	200.58
	葉	153.56		葉	76.32
	穗	432.95		穗	236.3
T40	根	1822.36	T40+BC	根	705.83
	莖	502.53		莖	248.47
	葉	222.19		葉	148.7
	穗	889.33		穗	600.29
T60	根	2245.56	T60+BC	根	881.11
	莖	609.05		莖	352.13
	葉	345.78		葉	211.94
	穗	875.55		穗	421.48
T80	根	1762.88	T80+BC	根	1010.13
	莖	675.63		莖	435.31
	葉	347.8		葉	338.1
	穗	1472.38		穗	1049.21

單位：mg/kg (乾重)

此結果顯示，在高鈉灌溉條件下，生物炭可一定程度上降低作物鈉累積 (Kanwal *et al.*, 2018)，但其緩解效果並非完全消除高比例放流水所帶來之鈉害風險。

高粱穗澱粉、蛋白質與脂肪的含量及其結構特性，皆對後續釀酒品質具有重要影響。既有研究指出指出鹽分逆境下鈉累積會對氮、磷與鉀等巨量元素吸收產生拮抗效應 (Huang *et al.*, 2025)，導致植物體內離子毒害與養分失衡；其中，氮同化相關酵素活性受抑，可能進一步影響胺基酸形成以及蛋白質的累積與組成。另一方面，鈉累積亦會抑制光合作用，包含抑制碳固定相關酵素活性與干擾質子動力勢，降低植物製造與供應碳水化合物化合物的能力 (Acharya *et al.*, 2024)，進而不利於穗成熟與澱粉累積後轉換成葡萄糖，以達預期口感和氣味。因澱粉與蛋白質為影響高粱發酵表現、口感及酒體香氣的重要物質 (Zhao *et al.*, 2024)，因此，若高粱穗部鈉累積過高，可能透過改變穗養分平衡與儲存物質形成，不利釀酒品質。

高粱鈉含量分析結果與前述土壤鈉及陽離子組成變化趨勢一致，顯示灌溉水鈉含量為影響作物鈉累積之主要因子，而生物炭於本試驗條件下可作為降低鈉累積風險之輔助管理措施。然而在高比例放流水灌溉

情境下，高粱仍呈現較高鈉含量，說明灌溉水水質控制仍為降低作物鈉害風險之關鍵。

3.4 問卷調查結果分析

為補充田間試驗結果，並評估放流水混合灌溉於實務應用層面之可行性與接受度，本研究另進行問卷調查，蒐集實際使用者與管理相關人員對放流水灌溉之認知、態度及顧慮情形。問卷調查對象以金門地區實際從事農業生產之農民，以及參與放流水產製與管理之金門酒廠員工為主，以涵蓋灌溉水使用端與供應端之不同觀點。

農民受訪者多為實際從事高粱等作物栽培之在地農戶，具備長期耕作經驗，對灌溉水來源、水質變化及其對土壤與作物之影響具有高度實務認知；酒廠員工則參與製程用水管理、放流水處理或相關行政與技術作業，對放流水水質特性與再利用管理具有專業或實務背景。透過同時納入上述兩類對象，本研究得以從農業生產與水資源管理兩個層面，綜合探討放流水灌溉於金門地區推動之實際可行性。問卷內容設計以放流水灌溉認知、使用意願與接受度、主要疑慮與風險考量及管理與配套需求為核心，題型以封閉式選擇題為主，輔以少量意見回饋題，以利後續進行統整分析。調查結果主要作為本研究工程與管理層面之輔助證據，說明在既有灌溉水質條件與土壤影響評估結果下，實際使用者對放流水灌溉之態度與期待，並不作為社會行為或心理層面之深入分析。

金門酒廠員工問卷調查如圖 2 所示，共回收有效問卷 52 份。受訪者職務以行政管理與環境管理為主 (各 28.8%)，其次為生產製造 (21.2%)、品質管理 (11.6%) 及其他 (9.6%)。年資以資深員工為主，10 年以上占 94.2%，6~10 年占 5.8%。在放流水管理認知方面，多數受訪者認為酒廠放流水符合相關排放標準 (96.2%)。另有 75% 表示了解放流水經處理後可應用於農業灌溉，25% 表示不了解，顯示酒廠端雖具再利用概念，但仍存在部分資訊落差。對於放流水灌溉之影響評估，整體呈現正向態度，受訪者中 71.2% 認為對農業發展具正面影響，15.4% 認為可能有負面影響，11.5% 不確定。就企業形象而言，76.9% 認為有助提升企業社會責任形象，7.7% 擔憂可能帶來負面觀感。

在水資源調度功能上，90.4% 認同放流水可作為乾旱期調節水源措施。在推動與合作意願方面，受訪者願意協助放流水價值化之方式以推廣應用 (63.6%) 為主，其次為參與研究計畫 (19.7%) 與提供技術支援 (12.1%)；另有 78.8% 願意與學術單位合作研究放流水



圖 2 金門酒廠從業人員問卷統計圖

灌溉影響。此外，受訪者認為放流水亦具其他再利用潛力，以景觀綠化 (53.4%) 與 (工業用途 (45.3%) 為主。酒廠員工多數支持放流水再利用及其作為抗旱調度水源之角色，並具推廣與合作意願；惟仍需透過資訊傳遞與風險溝通，降低部分受訪者對應用風險與外部觀感之疑慮。

金門地區農民問卷調查結果如圖 3 所示，共回收

有效問卷 50 份。受訪者以中高年齡及資深耕作者為主，年齡分布為 61 歲以上 44%、41 ~ 60 歲 38%、21 ~ 40 歲 18%；耕作年資 20 年以上 74%、11 ~ 20 年為 22%。主要作物以高粱與小麥為主，分別占 47.1% 與 46.1%。在水資源議題認知上，受訪者對金門水資源短缺問題具高度共識 (100%表示了解)；惟對酒廠放流水灌溉之認識程度不足，不太了解 38%、完全不了

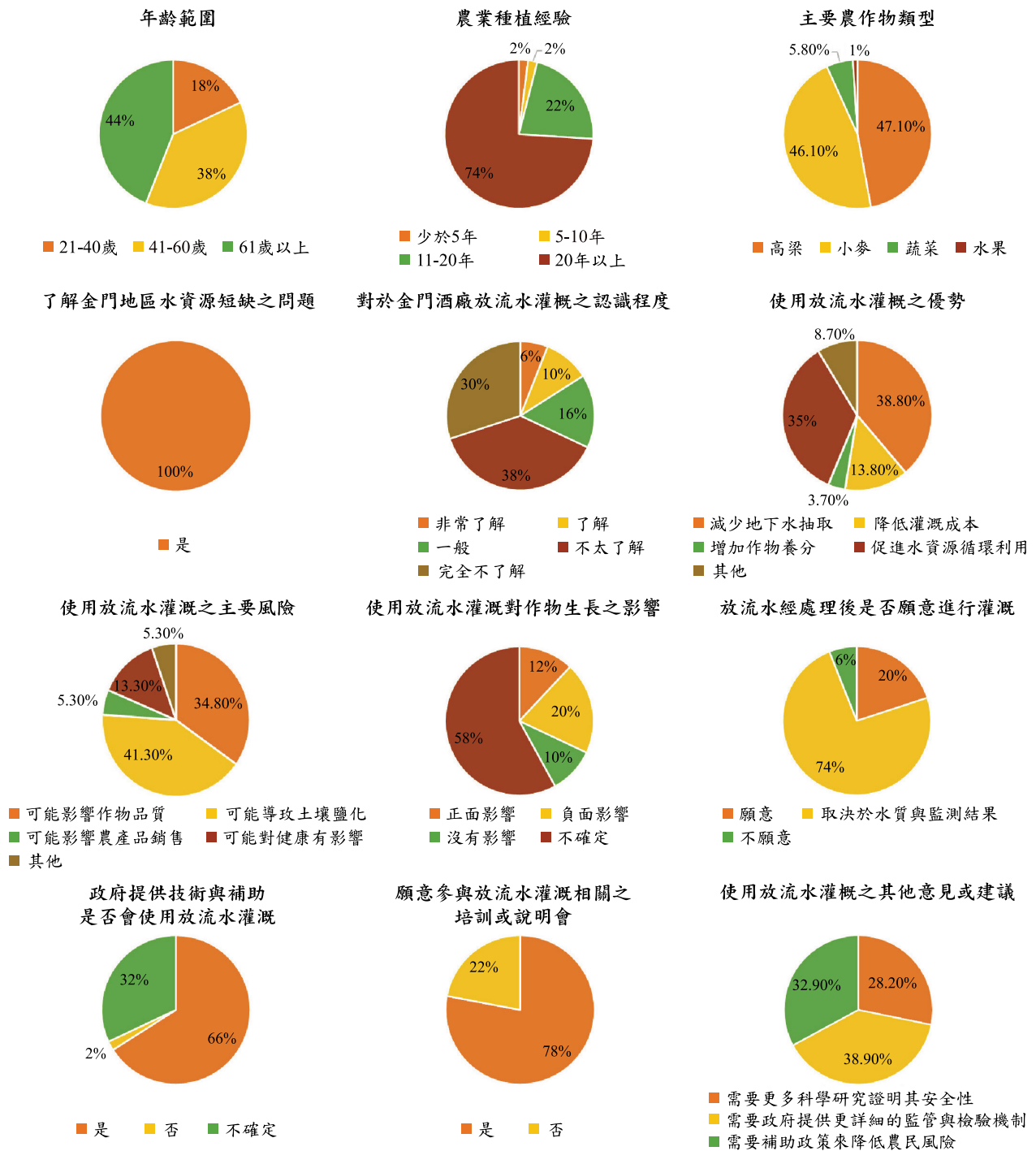


圖 3 農民問卷統計圖

解 30%，了解/非常了解僅合計 16%，顯示推動前仍需補足資訊落差。放流水灌溉之優勢認知，受訪者主要認同其可減少地下水抽取（38.8%）與促進水資源循環利用（35.0%），另有 13.8%認為可降低灌溉成本。風險顧慮則以土壤鹽化為最高（41.3%），其次為影響作物品質（34.8%）與健康影響（13.3%），顯示農民關注焦點集中於土壤劣化與作物品質安全風險。

對放流水灌溉對作物生長影響之評估，多數受訪者仍持保留態度（不確定 58%），另有 20%認為負面、12%認為正面、10%認為無影響。至於使用意願，受訪者中 20%表示願意使用，而多數（74%）表示取決於水質與監測結果，僅 6%表示不願意，顯示農民對放流水灌溉呈條件式接受。若政府提供技術與補助，66%表示會使用（不確定 32%），且 78%願意參與相關培訓

或說明會，顯示配套措施與資訊溝通有助於提升採用意願。農民提出之配套需求以更詳細之監管與檢核機制 (38.9%) 為主，其次為政策協助降低風險 (32.9%) 與更多科學研究與安全性說明 (28.2%)。農民並非全面排斥放流水灌溉，但高度依賴可驗證之水質資訊與制度化監測管理，推動策略宜優先回應土壤鹽化與作物品質之疑慮，並建立透明監測與風險分擔機制，以提高實務可行性。

綜合酒廠員工與農民間卷結果可知，兩端對放流水再利用皆呈現支持但強調配套之共通特徵，惟關注焦點有所差異。酒廠員工端多認為放流水符合排放標準 (96.2%)，並傾向肯定其對農業發展 (71.2%) 及企業形象 (76.9%) 之正面效益，且認同其具乾早期調節水源功能 (90.4%)，合作與推動意願高 (願與學術合作 78.8%)。相較之下，農民端雖普遍了解金門缺水問題 (100%)，但對放流水灌溉之認識仍不足 (不太了解 38%、完全不了解 30%)，其主要顧慮集中於土壤鹽化 (41.3%) 與作物品質 (34.8%) 等長期風險，對作物影響多持保留態度 (不確定 58%)，使用意願以取決於水質與監測結果為主 (74%)。供應端具推動動能與資源整合意願，使用端則以風險可控與資訊透明為採用前提，後續推動放流水農業再利用宜以水質監測制度化與資訊公開為核心，並搭配技術指導與風險分擔之政策配套，縮小兩端認知差異並提升實務可行性。

3.5 利害關係人之風險認知與推動阻力

綜合田間試驗數據與問卷調查結果，本研究進一步針對金門地區推動放流水農業再利用之社會技術層面進行整合討論。首先，調查結果揭示了顯著的資訊不對稱現象：雖然金門農民對在地水資源短缺問題已具備百分之百的高度共識，顯示其具備採用替代水源之強烈潛在動機，但對於酒廠放流水灌溉之認識卻極度匱乏，合計高達 68% 之受訪者表示不了解或完全不了解。相較之下，酒廠端受訪者對放流水之再利用潛力與合規性具備較高信心，多數認為其符合排放標準並對農業具正面影響。這種「供給端信心飽滿」與「使用端資訊匱乏」之落差，顯示推廣阻力並非全然來自水質之硬性技術指標，而在於供給端與使用端之間存在之資訊鴻溝，農民對於新興水源之陌生感極易轉化為對未知風險之排斥。

其次，兩類利害關係人對放流水灌溉之核心價值取向亦存在明顯衝突。酒廠端傾向從企業社會責任、提升企業形象以及乾早期調節水源之巨觀角度審視放流水之再利用效益；然而，農民之關注焦點則緊扣生

計安全，其核心顧慮集中於長期灌溉後可能產生之土壤鹽化風險 (41.3%) 與對作物品質之負面影響 (34.8%)。這種「形象效益」對比「生計風險」之價值落差，直接反映於農民之使用意願上，僅有兩成農民願意直接使用，高達 74% 之農民呈現取決於水質檢測與例行監測結果之「條件式接受」態樣。這說明透明且制度化之水質監測數據，是縮減認知落差、建立使用者信賴感之關鍵橋樑。

最後，本研究的田間試驗結果為前述農民之風險焦慮提供了具體的技術對策。試驗數據顯示，高比例放流水灌溉確實會導致土壤鈉累積及高粱各部位鈉含量上升之風險，但生物炭之施用在特定條件下能調節土壤陽離子競爭關係，並顯著降低高粱根部與穗部之鈉吸收量。在此脈絡下，生物炭資材於實務推動層面不僅是技術上的改良工具，更扮演了緩解社會風險顧慮之功能。結合農民對於「制度化監管機制」與「詳細科學證明」之強烈配套需求，未來推動策略宜將生物炭施用與透明化監測平台整合。藉由將田間試驗之風險緩解證據轉化為公開的管理資訊，方能有效回應農民對土地鹽化之焦慮，進而將放流水灌溉從實驗室之技術可行性，轉化為金門地區具備社會共識與環境韌性之水資源管理實務。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究以金門酒廠放流水與后壠溪溪水混合灌溉為情境，從灌溉水水質、土壤理化性質、作物鈉累積之輔助驗證，以及供應端與使用端問卷結果，綜整評估放流水農業再利用之可行性。結果顯示，灌溉水混合比例為影響系統風險之主要控制因子；隨放流水比例提高，灌溉水鹽分與鈉相關指標 (如 EC、SAR、RSC 等) 上升，並反映於土壤鹽分狀態與鈉之變動，顯示放流水灌溉之可行性需以水質風險可量化與可控管為前提。作物層級以高粱鈉含量作為鈉害風險之輔助驗證指標，鈉主要累積於根部，其次為穗部；在高比例放流水處理下，各部位鈉含量整體提高，且穗部亦可能呈現較高累積，顯示高鈉負荷灌溉條件下仍需關注作物鈉累積風險。生物炭於本試驗條件下呈現條件式調節效果，於部分處理與時期可調節土壤陽離子含量相對比例，且作物各部位鈉含量多呈降低趨勢，惟其作用屬風險緩解而非完全消除，顯示生物炭較適合作為輔助資材，須與灌溉水配比控制與例行監測共同搭

配。問卷結果顯示，推動可行性關鍵在於制度與資訊透明，酒廠員工端多肯定放流水再利用之抗旱調度與社會效益，並具推動與合作意願；農民端雖普遍理解缺水壓力，但對放流水灌溉資訊仍不足，主要顧慮集中於土壤鹽化與作物品質風險，使用意願取決於水質與監測結果之條件式接受型態。本研究結果說明放流水混合灌溉具推動潛力，但其落實需建立在風險可監測、可溝通與可管理之前提。

4.2 建議

推動放流水農業再利用宜採分階段、可驗證策略，首先，應建立水質與土壤之例行監測與資訊公開機制，以 EC、SAR、RSC 等水質指標，搭配土壤 EC 與 Na 等風險指標，作為現場管理與決策依據，並以透明化資訊降低使用端之不確定性與疑慮。其次，建議透過示範田、教育訓練與技術輔導縮小認知落差，將監測結果與操作要點以農民可理解之方式回饋，並建立符合條件即可使用之可操作門檻與流程。第三，政策配套宜聚焦於風險分擔與採用誘因，例如監測補助、資材與管理措施支持，以及針對土壤鹽化與作物品質疑慮之溝通與把關機制，以提高農民採用意願與長期穩定性。最後，生物炭可作為降低鈉累積風險之輔助措施，但不宜取代水質配比控制與監測管理；在高鈉負荷情境下仍應以灌溉水配比與風險指標管控為優先，提高放流水灌溉於金門地區之實務可行性與長期安全性。

金門酒廠放流水應用於農業灌溉之風險具有明顯比例效應，亦即隨放流水混合比例提高，灌溉水之 EC、Na、SAR 與 RSC 均上升，並進一步反映於土壤與高粱植體鈉累積增加。因此，放流水灌溉之管理不宜採單一標準，應依配比與風險程度建立分級管理策略，以作為灌溉調度與現場管理之依據。具體而言，HL 與 T20 可列為常態使用層級，作為平時優先推動之替代水源，但仍須配合例行性水質與土壤監測。T40 可列為警戒使用層級，較適合於枯水期或限水情境下條件式使用，並應搭配輪灌、提高稀釋比例、加密監測及施用生物炭等配套措施，以降低鈉累積風險。T60 與 T80 則宜列為限制使用層級，僅建議於極端乾旱或緊急調度情境下短期使用，不適作為常態灌溉水源。整體而言，未來金門酒廠放流水農業再利用宜以「低比例常態化、中比例條件化、高比例限制化」為管理原則，並將監測、資訊公開與風險溝通納入管理流程，以兼顧替代水源利用效益與農地長期安全。

此外，鑑於酒廠從業人員對參與研究與技術支援

具備高度意願 (78.8%)，且近八成農民願意參加相關培訓說明會，建議未來宜成立「金門水循環智慧協作平台」，將複雜的水質監測數據 (如 SAR、EC) 轉化為直觀的燈號管理或分級建議，以降低農民獲取資訊的門檻，有效填補現狀下超過六成的資訊落差。最後，建議將金門酒廠之企業社會責任 (ESG) 目標與地方農業韌性深度結合，透過產官學三方協作，將放流水從「待處理之廢棄物」轉化為農民信賴之「穩定戰備水源」，以落實循環經濟之社會共識與實務韌性。

參考文獻

1. Acharya, B. R., Gill, S. P., Kaundal, A., & Sandhu, D. Strategies for Combating Plant Salinity Stress: The Potential of Plant Growth-promoting Microorganisms. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1406913, 2024.
2. Ayers, R. S., and Westcot, D. W., "Water Quality for Agriculture (Vol. 29, p. 174)," Rome: Food and agriculture organization of the United Nations., 1985.
3. Diatta, A. A., Fike, J. H., Battaglia, M. L., Galbraith, J. M., and Baig, M. B., "Effects of Biochar on Soil Fertility and Crop Productivity in Arid Regions: A Review," *Arabian Journal of Geosciences*, 13, pp. 1-17, 2020.
4. Farhangi-Abriz, S., and Ghassemi-Golezani, K., "Changes in Soil Properties and Salt Tolerance of Safflower in Response to Biochar-based Metal Oxide Nanocomposites of Magnesium and Manganese," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111904, 2021.
5. Galavi, M., Jalali, A., Ramroodi, M., Mousavi, S. R., and Galavi, H., "Effects of Treated Municipal Wastewater on Soil Chemical Properties and Heavy Metal Uptake by Sorghum (*Sorghum bicolor* L.)," *Journal of Agricultural Science*, 2(3), 235, 2010.
6. Hammer, E. C., Forstreuter, M., Rillig, M. C., and Kohler, J., "Biochar Increases Arbuscular Mycorrhizal Plant Growth Enhancement and Ameliorates Salinity Stress," *Applied Soil Ecology*, 96, pp. 114-121, 2015.
7. Huang, Z., Li, L., Zhang, Y., Mu, Y., Tao, Y., Zhou, Z., & Nie, L., "Imbalanced Starch and Protein Accumulation During Grain Filling Under Salt Stress Leads to Increased Protein Components in Rice Grains," *Field Crops Research*, 332, 110019, 2025.
8. Kiziloglu, F. M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., and

- Dursun, A., "Effects of Untreated and Treated Wastewater Irrigation on Some Chemical Properties of Cauliflower (*Brassica Oleracea* L. var. *Botrytis*) and Red Cabbage (*Brassica Oleracea* L. var. *Rubra*) Grown on Calcareous Soil in Turkey," *Agricultural Water Management*, 95(6), pp. 716-724, 2008.
9. Kanwal, S., Ilyas, N., Shabir, S., Saeed, M., Gul, R., Zahoor, M., Batool, N., Mazhar, R., "Application of Biochar in Mitigation of Negative Effects of Salinity Stress in Wheat (*Triticum Aestivum* L.)," *Journal of Plant Nutrition*, 41(4), pp. 526-538, 2018.
10. Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., and Wanner, J., "Treated Wastewater Reuse for Irrigation: Pros and Cons," *Science of The Total Environment*, 760, 144026, 2021.
11. Qadir, M., and Drechsel, P., "Managing Salts While Irrigating with Wastewater," *CABI Reviews*, pp. 1-11, 2011.
12. Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N. S., and Ok, Y. S., "Engineered/designer Biochar for Contaminant Removal/immobilization from Soil and Water: Potential and Implication of Biochar Modification," *Chemosphere*, 148, pp. 276-291, 2016.
13. Suarez, D. L., Wood, J. D., and Lesch, S. M., "Effect of SAR on Water Infiltration Under a Sequential Rain-Irrigation Management System," *Agricultural Water Management*, 86, 1-2, pp. 150-164, 2006.
14. Wang, X., Ding, J., Han, L., Tan, J., Ge, X., and Nan, Q., "Biochar Addition Reduces Salinity in Salt-affected Soils with no Impact on Soil pH: A Meta-analysis," *Geoderma*, 443, 116845, 2024.
15. Zhao, W., Liu, Y., Zhou, K., Li, K., & Shen, J., "How Sorghum Grain Composition Affects the Quality of Chinese Baijiu-a Comprehensive Review," *Journal of Food Composition and Analysis*, 134, 106512, 2024.
- 收稿日期：民國 115 年 02 月 06 日
修改日期：民國 115 年 04 月 09 日
接受日期：民國 115 年 05 月 05 日