

應用微生物緩解作物淹水逆境研究

郭建志^{1*}、林煜恒²、曾宥紘¹、陳俊位³

¹ 農業部臺中區農業改良場作物環境科副研究員。

² 農業部臺中區農業改良場作物改良科副研究員。

³ 農業部臺中區農業改良場作物環境科研究員。

* kuocc@tcdares.gov.tw

摘 要

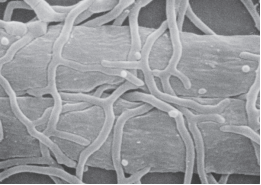
近年來，極端氣候頻頻發生，例如短期強降雨、暖冬乾旱及寒流等等，這些環境逆境不僅會影響農作物正常生理表現，對於作物栽培及產量更有嚴重的影響。因此，如何協助及減輕農友在作物栽培上受非生物逆境之影響，是當前農業研究重要的課題之一。提升作物調適非生物逆境的方式可利用種植耐逆境品種以及調整栽培技術外，還能利用根圈有益微生物 (plant growth-promoting rhizomicroorganism, PGPR)，這些有益微生物菌株具多種分解酵素及肥效能力，促使作物根系生長、協助有效率吸收土壤中肥份。此外亦可生合成IAA與ACC 脫氨酶，藉此降低乙烯 (ethylene) 之生成，以促進根系生長，協助作物抵抗逆境之能力。本研究自土壤中分離與純化80株微生物菌株，經由功能性分析篩選出9株具有耐候潛力之菌株，此9株菌株進行6種葉菜類作物肥效評估結果，篩選3株芽孢桿菌與1株鏈黴菌及1株木黴菌進行田間小規模不結球白菜淹水試驗。經由2022年與2023年之評估結果，比較不同澆灌次數，各菌株於不結球白菜淹水逆境前澆灌3次，相較對照組可提升存活率17.5-32.5%，顯示此5株菌株可緩解不結球白菜之淹水逆境影響，後續擬進行潛力菌株之發酵配方調整與製劑開發，並進行商品化，給予農友面臨極端氣候時可選用之微生物資材。

關鍵字：微生物、環境逆境、淹水逆境、芽孢桿菌、鏈黴菌、木黴菌

前 言

近年來，極端氣候頻頻發生，例如短期強降雨、暖冬乾旱及寒流等等，例如2015年年初，臺灣經歷了十年來最嚴重的旱災；到了年底，又遭逢史上最嚴重的寒害，重創臺灣農漁業，據農業部統計，在這波寒害中，農林漁牧業產物及民間設施估計損失計42億

元 (2016年1月寒流農業災情報告，農業部統計資料)。當氣候變遷下所造成的極端氣候頻繁出現，首當其衝會造成農業生產減產，農業設施受損，並影響品質與農友經濟收益，例如2021年上半年臺灣出現大規模旱災缺水危機，導致農業栽培區進入不同程度的減壓供水、限水及停耕等情況，整體農產損失達8億7千多萬元(2021年3-5月高溫乾旱農業災



情報告，農業部統計資料)；而2023年7至9月份，太平洋上熱帶性低氣壓頻繁產生，數個颱風接連侵襲本島，造成農業損失嚴重。今(2024)年7月下旬又遭逢凱米颱風侵襲，導致中南部農業鄉鎮田區淹水，重創各項農作物的生產，農產統計損失達24億元以上(2024年凱米颱風農業災情報告，農業部統計資料)。對全球農業生產構成嚴峻挑戰。極端氣候包括乾旱、強降雨、颱風、洪水、寒害和高溫等，這些事件往往會導致作物產量的急劇下降和品質的惡化，進而影響全球糧食安全和農民的生計(Yuan *et al.*, 2024)。為了使農作物生產供貨能維持穩定，避免產生供需失調、以及因應高頻度的極端氣候，開發有效地緩解對策，為本場及國內農業試驗單位研究的重點之一。

根據聯合國政府間氣候變化專門委員會 International Conference on Parallel Processing (ICPP) 所發表之第六次評估報告(AR6)中，說明未來極端氣候好發的類型包括：極端高溫、強降雨與淹水、海平面上升、颱風侵擾增多等類型，並可能會導致生態系統受到影響(Daryanto *et al.*, 2016; IPCC 2022)。因此受到颱風所造成的淹水災害之農作物，農藝作物包括水稻、甘蔗、落花生與其他雜糧作物，園藝作物以果樹損失最大，其次為蔬菜類作物。

淹水逆境通常指的是當土壤或栽培環境中含水量過高，導致作物根系長期浸泡於水中，使植物面臨缺氧和代謝失衡的狀態。因此作物於淹水逆境下，會影響呼吸作用、光合作用、水分和無機元素的吸收、固氮作用、促進植物體內離層酸(abscisic acid, ABA)含量的增加，引起荷爾蒙不平衡及脯胺酸(proline)累積(Jackson & Colmer, 2005)，氧氣供應不足會嚴重影響作物根部呼吸代謝，進而抑制能量生成，最終會導致作

物枯萎死亡(Bailey & Voesenek, 2008)。國內現階段緩解極端氣候所造成的農業損失因應策略，包括：育成耐逆境之作物品種、改善或是精進栽培模式、建設強固型溫網室、土壤改良，改善土壤健康和保水能力，減少乾旱和暴雨之影響以及應用微生物製劑的導入，緩解作物遭逢環境逆境之影響，減少農產品產量損失及品質下滑。因此，農友除了種植耐淹水或耐旱之作物品種以及調整栽培模式外，還可利用有益微生物資材，緩解作物因淹水逆境造成的產量損失。有益微生物(如芽孢桿菌、鏈黴菌、木黴菌及螢光假單孢菌等)之功能性除了已知包括促進植物生長、病蟲害防治及有機物質分解外，近年針對施用於緩解作物抗環境逆性方面的研究與實證日益增多(Ahmad *et al.*, 2022; Vurukonda *et al.*, 2016)。

土壤微生物中有一群根圈微生物(plant growth-promoting rhizomicroorganism, PGPM)，可棲群於植物根部並促進植物生長。這些微生物具有多種功能，例如可產生多種分解酵素，IAA、具有固氮、溶磷與嵌鐵能力，可促使作物根系生長、協助有效率吸收土壤中肥份，這些根圈微生物不僅能夠改善土壤結構、促進作物對水分及養分的吸收，還能在逆境條件下通過產生植物激素、代謝調節物等方式來增強作物的生理抗逆性。例如，某些微生物能夠生產ACC脫氨酶(1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase)，減少植物在逆境中產生的乙烯量，從而減緩乙烯對根系生長的抑制效應，協助作物提高光合作效率，克服植物面臨非生物逆境，包括淹水、鹽、乾旱、低溫及高溫等(Glick, 2014)。

研究顯示PGPM菌株，具有生合成為植物賀爾蒙成分如IAA、GA或cytokinin等，例 *Pseudomonas*, *Azospirillum*、*Azotobacter*、

*Bacillus*及*Burkholderia*等，可促進植物根系生長及養分吸收率。此外，某些菌株可以生產 ACC 脫氨酶 (1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase)，藉此降低乙烯 (ethylene) 之生成，以促進根系生長，協助作物抵抗逆境之能力。應用微生物產生蛋白質水解物，為生物刺激素之一種，其水解之寡肽或胺基酸常具有開根、增加根毛量、鉗合微量元素、加速植體氮代謝、調解滲透壓及作為植物激素之前驅物、亦可消除植物於逆境中所產生之ROS，提高植物抗逆境能力 (Glick, 2014 ; Colla *et al.*, 2015)。

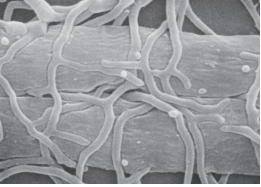
微生物菌株除了病蟲害防治及微生物肥料外，以微生物成分為主之生物刺激素產品的開發亦是目前的趨勢，2012年於法國舉辦的「第一屆國際生物刺激素應用會議」是重要的里程碑，生物刺激素的來源可以是海藻提取物、蛋白質水解物、腐殖質、幾丁質、微生物或是無機元素例如矽，產品特性為可以調節植物生生長和增強逆境抗性，但不直接供應植物營養元素，亦不用直接作用於植物疫病防禦 (Calvo *et al.*, 2014 ; Jardin, 2015)。微生物資材亦為生物刺激素種類之一，目前國內法規仍無明確歸類於哪個範疇。但為了後續產業化發展，本計畫委託中興大學及財團法人農業科技研究院，建立微生物緩解作物環境逆境之功能性解析與功效驗證平台，包括微生物生物膜分析與配方調整、微生物提升作物耐環境逆境之基因表現、生物刺激素PQQ (pyrroloquinoline quinone) 及 Cyclic Dipeptides 分析與配方調整、應用表型體篩選提升果樹耐低溫之潛力微生物菌株 (Albasri *et al.*, 2024 ; Pandit *et al.*, 2020 ; Karnwal *et al.*, 2023 ; Liang *et al.*, 2024)。本研究擬開發可協助葉菜類及甜瓜作物抗水分逆境之微生物製劑，緩解水分逆境對於作物的傷害，並降低產量損失，期能改

善當前現況。

作物遇淹水逆境之機制與影響

淹水逆境是指土壤中水分過多對於植物產生傷害，土壤內氣相部分完全被液相所佔據，土壤水分呈現飽和狀態時，俗稱溼害；當強降雨或風災後，地面積水淹沒作物地基部或是全株對於作物產生的傷害，則稱澇害。土壤水分過多則會妨礙氧氣進入土壤，淹水導致根圈缺氧，進而使土壤變成缺氧環境。在缺氧條件下，呼吸作用受阻，植物被迫轉向效率較低的厭氧途徑，進而產生更少的能量來維持細胞功能。以下是淹水逆境下作物所產生的主要生理反應和機制如下 (Bailey & Voesenek, 2008)：

1. 呼吸作用受阻礙：氧氣是線粒體電子傳遞鏈中的關鍵電子受體，因此於淹水期間需要氧呼吸，使得植物依賴厭氧發酵，此種方式產生的ATP遠少於需氧呼吸，從而導致能量短缺，會影響植物的生長過程，甚至在壓力持續時導致植物枯萎死亡。
2. 養分吸收受損：淹水的土壤限制了氮和鉀等重要養分的可用性，於厭氧環境下還影響根部功能，降低了水分和溶解礦物質的吸收，導致作物出現營養不良，影響生理作用。
3. 植物荷爾蒙失衡：淹水期間，離層酸 (abscisic acid, ABA) 含量會增加，導致氣孔關閉以防止水分流失。但此現象持續下去，氣孔關閉會減少二氧化碳的吸收，進而抑制光合作用。此時乙烯生成增加，促使葉片提早衰退及根部腐爛。
4. 氧化壓力：淹水期間通常會引發植物體內活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的累積，如過氧化氫 (H_2O_2)、超氧化物 (O_2^-)、氫氧自由基 ($OH^\cdot$) 等，這些ROS會損害細胞結構，如攻擊細胞膜、蛋白質和DNA，



造成膜質過氧化、蛋白質變性及基因突變，造成細胞損傷，降低植物對逆境的耐受能力。

微生物製劑調適作物淹水逆境之機制

作物遭逢淹水逆境時，除了作物本身啟動的抵抗機制外，還能選擇栽種耐逆境之作物品種、精進作物栽培模式、建立強固型的溫室、改善土壤特性、健康和保水能力，減少乾旱和暴雨之影響以及導入有益微生物菌株於作物栽培體系中。土壤中的有益微生物中，特別是由可促進作物生長的根圈微生物(PGPM)或菌根真菌構成的製劑，通過多種機制來幫助植物應對淹水逆境，這些機制包括如下：

1. 降低乙烯生成：植物在淹水逆境下會產生過量乙烯，從而抑制植物的生長和發育。PGPR，如含有ACC脫氨酶的菌株，可以分解乙烯的前驅物ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylate)，以減少乙烯的生成，幫助植物緩解淹水逆境。例如利用螢光假單孢菌*Pseudomonas*菌株，可以透過ACC脫氨酶活性減少乙烯生成，促進植物根系生長，提高水稻在淹水條件下的耐受性 (Varrara & Glick, 2001)。
2. 增強抗氧化能力：淹水環境下會導致植物細胞內產生過量的活性氧類(ROS)，這些活性氧會損傷細胞結構。有益微生物菌株可以增強植物的抗氧化系統，例如促進抗氧化酶如超氧化物歧化酶(SOD)、過氧化氫酶(CAT)的生成，從而減少ROS對作物細胞產生的毒性。例如芽孢桿菌*Bacillus*菌株能夠提高小麥植株的抗氧化酶活性，幫

助小於淹水後恢復生長並降低由ROS引起的損傷 (Dimkpa & Bindraban, 2016)。

3. 促進根系生長：微生物製劑施用於作物可促進植物根系生長，增強根系對水分和養分的吸收能力。尤其施用於排水後的復耕作業，因為健康的根系能夠更快地重新吸收養分和水分。例如應用*Azospirillum* spp. 菌株能夠，通過生產IAA來促進植物根系生長，增加根毛數量，幫助植物在淹水後更快恢復 (Bashan & Bashan, 2010)。

應用有益微生物菌株緩解作物淹水逆境之研究

一、耐候微生物菌株之篩選與功能性分析

本研究採集南投縣信義鄉、臺東縣蘭嶼鄉採集腐植土土壤及有機質木屑，將每批土壤樣本均勻混拌後，利用土壤序列稀釋法 (Schmidt & Caldwell, 1967)，依序列稀釋至 10^{-4} 次方，最後於 10^{-4} 次方稀釋液中取樣100 μ L，均勻塗抹於NA培養基上，於30°C定溫箱中培養3天，最後分離及挑選80株微生物菌株，進行純化培養及保存於-30°C甘油保存管中。此80株菌株與本場既有研發菌株包括液化澱粉芽孢桿菌Tcba05、Tcb45及地衣芽孢桿菌TCLigB共同進行菌株功能性測試。測試項目包括5種分解酵素，分別為澱粉 (Cheng & Yang, 1995)、脂質 (Suzuki *et al.*, 2001)、蛋白質 (Sacherer *et al.*, 1994)、纖維素 (Magnelli *et al.*, 1997) 與幾丁質 (De Boer *et al.*, 1998)、嵌鐵能力 (Schwyn & Neilands, 1987)、IAA生合成 (Chen *et al.*, 2010)及ACC deaminase活性能力 (Li *et al.*, 2011) 分析，測試結果如下表。

表一、本研究篩選微生物菌株之分解酵素功能性分析、IAA活性及ACC deaminase測試結果
Table. 1. This study conducted functional enzyme activity analysis, IAA activity assessment and ACC deaminase tests for the selected microbial strains

Bacteria strains	Amylase	Lipase	Proteinase	Cellulase	Chitinase	Siderophore	IAA (mg/L)	ACC deaminase
Tcba05	2.33	1.09	3.27	6.11	0.00	2.34	4.6 ± 1.5	⁻²
Tcb45	2.03	0.00	1.93	6.31	0.00	2.66	5.7 ± 1.2	-
TCLigB	0.20	0.52	1.11	0.84	0.98	0.57	4.2 ± 0.3	-
TCB 2-10	1.35	3.07	0.00	0.98	0.00	0.68	19.4 ± 2.4	-
TCB 2-11	0.85	1.55	1.25	0.58	0.00	0.55	17.1 ± 1.3	-
TCB LTF4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	53.0 ± 0.5	+
TCBLDR14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	48.6 ± 3.5	+
TCBLW17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	34.4 ± 6.0	+
TCSF7-6	1.23	0.00	0.29	3.31	0.00	5.31	5.33 ± 0.5	+

¹ Relative clearance (RC) = (Diameter of hydrolysis zone – diameter of colony) / diameter of colony.

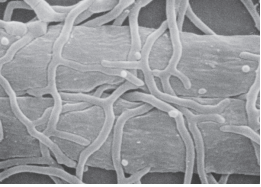
² +, positive for ACC deaminase ; -, negative for ACC deaminase.

檢測結果，依據分解酵素、嵌鐵能力、IAA與ACC脫氨酶等活性，挑選9株(表一)進行耐淹水試驗評估，此9株之都具有嵌鐵及產生IAA之能力，IAA生合成量以TCB LDR14產生量最高，可達48.6 ± 3.5 mg/L；僅TCB LTF4、TCB LDR14、TCB LW17與TCSF7-6菌株，具有ACC deaminase活性，其無菌株均無；幾丁質分解酵素僅只有TCLigB菌株具有；除了TCB LTF4與TCB LDR14以外，大多數菌株都可產生分解酵素。

二、耐候微生物菌株之生長效益分析

利用本次所篩選出之9株微生物菌株進行

不結球白菜(薺芳)苗期生長及6種葉菜類作物，包括甘藍(初秋)、青梗白菜(薺芳)、不結球白菜(純秀)、薺菜(竹葉)、半結球萵苣(福山)、萵菜(白萵)等作物進行盆栽生長促進試驗。所用之不結球白菜為薺芳品種，將種子浸泡於9株微生物之LB發酵液100倍5分鐘，對照組則浸泡無菌水及LB Broth 100倍稀釋液，每個菌株各處理60粒種子。帶種子蔭乾後，將種子分別播種於蔬菜育苗盤中，每隔7天調查1次株高，共調查3次，播種後21天調查發芽率、地上部株高與鮮重。經由21天調查結果，如下表所示：



表二、本研究之9株菌株施用於不結球白菜種子，調查種子發芽及苗期株高與鮮重之結果

Table.2. The 9 bacterial strains in this study was tested on non-heading Chinese cabbage seeds, and the results of seed germination, seedling height and fresh weight during the seedling stage were investigated

Treatment	Germination (%)	Plant Height (cm)	Fresh weight (g)
Tcba05	98	7.63 ± 0.82	0.37 ± 0.07
Tcb45	100	6.88 ± 0.71	0.32 ± 0.05
TCLigB	100	7.77 ± 0.74	0.40 ± 0.06
TCB 2-10	100	7.29 ± 0.58	0.38 ± 0.05
TCB 2-11	98	7.49 ± 0.76	0.39 ± 0.07
TCB LTF4	100	8.29 ± 0.91	0.46 ± 0.09
TCB LDR14	100	7.14 ± 0.64	0.36 ± 0.06
TCB LDR17	100	7.50 ± 0.66	0.40 ± 0.07
TCS F7-6	100	9.08 ± 1.16	0.59 ± 0.15
LB Control	97	6.95 ± 0.62	0.30 ± 0.04
Water Control	100	7.31 ± 0.80	0.34 ± 0.07

不結球白菜種子浸泡於9株微生物之LB發酵液100倍5min後，經播種於穴盤，於21天調查發芽率、株高與鮮重等性狀，發芽率的部分每個處理包括對照組都高於97%以上，並無明顯差異。株高與鮮重的結果均以TCSF7-6處理最高，平均達9.08 cm及0.59 g，其他大多數菌株處理結果，均優於對照組。

後續應用此9株微生物菌株以LB發酵液，施用於前述6種葉菜類作物，以盆栽方式進行，待定植後(甘藍、青梗白菜、不結球白菜與半結球萵苣)與直播 (莧菜與蕓菜)，每7天澆灌1次，連續3次，於21天後調查生育情形。調查結果如下表三 (株高) 與表四 (鮮重) 所示：

表三、本研究之9株菌株施用於6種葉菜類作物之盆栽鮮重結果

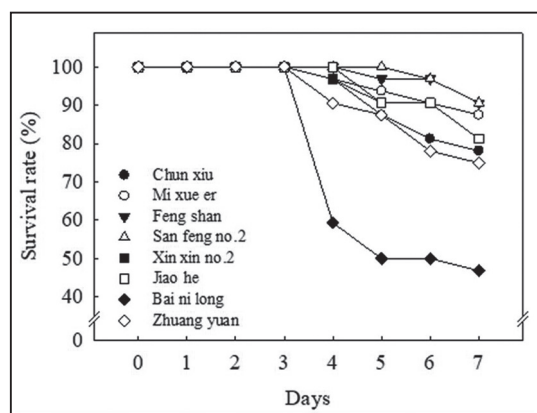
Table 3. The resulted of the 9 bacterial strains in this study was tested on the potted fresh weight of six leafy vegetable crops

	甘藍	青梗白菜	小白菜	半結球萵苣	蕓菜	莧菜
Tcba05	24.93±1.80	7.88±1.31	8.27±1.09	14.83±3.63	2.56±0.47	0.93±0.24
Tcb45	18.52±2.57	6.57±0.85	8.71±1.56	15.42±2.08	2.34±0.55	1.10±0.26
TCLigB	18.21±3.18	6.19±0.91	7.56±1.55	12.76±1.72	2.36±0.35	1.04±0.31
TCB 2_10	22.47±2.15	10.21±1.16	8.19±2.33	21.17±0.54	2.77±0.45	1.00±0.21
TCB 2_11	28.50±2.32	8.32±0.95	9.83±2.42	31.82±3.56	2.84±0.48	1.03±0.27
TCB LTF4	16.41±1.02	6.51±0.79	6.90±1.34	12.26±1.12	2.24±0.45	0.71±0.23
TCB LDR14	10.74±5.70	7.52±1.10	5.80±0.81	13.87±1.77	2.04±0.46	0.82±0.23
TCB LDR17	17.29±2.81	6.94±0.75	5.01±1.88	13.61±1.29	2.23±0.43	0.86±0.22
TCSF7-6	11.67±5.88	8.97±0.33	8.52±5.14	16.14±1.93	2.32±0.43	0.91±0.23
CK	15.39±2.23	5.86±0.75	7.65±5.41	13.54±1.26	2.22±0.53	0.47±0.18

經由株高分析結果來看，甘藍、青梗白菜、薤菜及莧菜施用微生物菌株發酵液後，大多數菌株施用後均能提升株高表現(Data not shown)。而鮮重部分，以Tcba05、Tcb45、TCB 2-10與TCB 2-11施用結果均高於對照，其次為TCB LTF4、TCB LDR17及TCSF7-6菌株(表三)。後續擬進行田間小規模耐淹水試驗評估。

三、不結球白菜之淹水敏感性品種之篩選

本試驗選擇市售20個不結球白菜品種，其中包含8個小白菜品種以及12個青梗白菜品種，進行苗期淹水敏感性試驗，評估最適可作為田間小規模使用之微生物製劑緩解白菜之淹水逆境測試品種。評估試驗於恆溫(日夜溫25℃；光週期12hr/12hr)生長箱內進行。初步測試12個青梗白菜品種經淹水7天，植株生長狀況與存活率無明顯差異；8個小白菜品種，經淹水7天後，白尼龍品種於淹水後第4天，存活率明顯下降，至第7天存活率已低於50%，其他7個品種仍維持70%以上(圖一)。後續田間試驗選用白尼龍作為不結球白菜淹水敏感性之試驗品種。

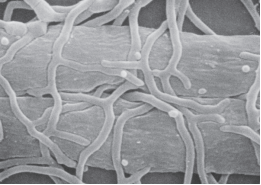


圖一、8種小白菜於連續淹水7天之存活率。

Fig.1. The survival rate of eight varieties of non-heading Chinese cabbage after seven consecutive days of flooding.

四、耐候微生物菌株對不結球白菜之田間小規模耐淹水試驗

本研究共計篩選出9株具有耐淹水潛力之微生物菌株，綜合功能特性分析、促進葉菜類生長情形，以及菌種鑑定結果，擬優先選擇液化澱粉芽孢桿菌Tcba05與Tcb45、地衣芽孢桿菌TCLigB及鏈黴菌TCSF7-6等4株菌株，並與另一有益微生物木黴菌TCT168菌株，共計5株微生物進行田間小規模不結球白菜淹水測試。試驗地點為臺中區農業改良場之有機田區，於2022年11月下旬定植不結球白菜白尼龍品種，田間設置6個處理(包括5株菌株加上對照組)，每個處理各有3畦，分別進行5株菌株LB發酵液100倍稀釋倍數，以不同澆灌次數(1次/2次/3次)進行處理，每畦小白菜定植數量為128株，待第3次澆灌完後隔2天開始進行淹水作業，淹水高度為淹沒白菜基部生長點，經淹水時間達72hr後開始排水，排水後第4天與第7天分別調查各菌株處理之存活情形，表四為排水第7天之各菌株處理之不同澆灌次數存活率結果。本次田間小規模不結球白菜淹水評估試驗結果，各菌株處理分別澆灌1、2、3次，其存活率分析結果，以TCSF7-6菌株，澆灌2次及3次之存活率較高，與對照組相比可提升存活率達17.21%及30.21%；TCT168菌株以澆灌3次之存活率較高，相比對照組可提升41.92%之存活率。



表四、2022年所篩選之5株具潛力之耐候微生物菌株，復水後7天調查其不結球白菜存活率

Table 4. In 2022, the survival rate of non-heading Chinese cabbage was investigated 7 days after rehydration of the five potential weather-resistant microbial strains selected

Treatment	Survival rate (%)		
	Irrigate once	Irrigate twice	Irrigate three
Control	39.06	33.62	16.67
Tcba05_100X	37.07	31.03	25.83
Tcb45_100X	53.23	32.50	23.44
TCLigB_100X	35.94	30.83	28.57
TCSF7-6_100X	31.67	50.83	46.88
TCT168_100X	28.23	33.06	58.59

2023年度同樣以此5株菌株進行田間小規模試驗，以食品級原料作為發酵基質，進行5公升發酵量產，Tcba05與Tcb45則以商品化推薦倍數進行田間小規模不結球白菜淹水評估試驗，同樣以不同澆灌次數 (1次/2次/3次) 進行處理，施用細目如表五所示：各菌株澆灌1次

後，僅TCSF7-6菌株之存活率高於對照組，可提升28.3%；TCSF7-6與TCT168菌株相較對照組均可提升20%存活率；澆灌3次的結果，測試的5株菌株相較對照組均可提升17.5-32.5%，以TCSF7-6菌株之存活率為最高，達55.8% (表五)。

表五、2023年選用5株具潛力之耐候微生物菌株，復水後7天調查其不結球白菜存活率

Table 5. In 2023, Five potential stress-tolerant microbial strains were tested, and the survival rate of non-heading Chinese cabbage was investigated seven days after rehydration

Treatment	Survival rate (%)		
	Irrigate once	Irrigate twice	Irrigate three
Control	29.2	40.0	23.3
Tcba05_250X	25.0	38.3	44.2
Tcb45_500X	14.2	30.0	41.7
TCLigB_100X	16.7	12.5	40.8
TCSF7-6_200X	57.5	62.5	55.8
TCT168_100X	25.0	64.2	51.7



圖二、田間小規模不結球白菜淹水試驗，經淹水72小時，排水7天後之植株情況，對照組 (A)、TCligB菌株(B)、TCSF7-6菌株(C)與TCT168(D)之比較。

Fig. 2. A small-scale field trial on non-heading Chinese cabbage subjected to 72 hours of flooding followed by 7 days of drainage, comparing the plant conditions of the control group (A), TCligB strain (B), TCSF7-6 strain (C), and TCT168 strain (D).

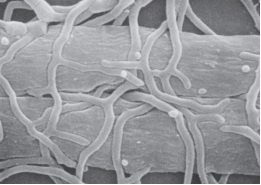
討 論

極端氣候強降雨或颱風所造成的淹水是全球農業中常見且破壞性極強的環境逆境之一，對作物的生長和產量造成顯著影響。當土壤中缺乏氧氣（低氧環境）時，作物的代謝、營養吸收和光合作用均受到抑制，導致植株生長緩慢、根系腐爛，甚至導致作物死亡。針對這一問題，應用微生物製劑來緩解淹水對作物的影響成爲一個值得關注的研究方向 (Elnahal *et al.*, 2022)。微生物製劑可透過多種機制來提高作物在惡劣環境下的生存能力，這些機制包括促進植物生長、增強抗逆性、提高養分吸收效率等。在淹水逆境中，特定的微生物能夠調節作物對低氧環境的適應性，例如促進乙烯的生產或調節氮代謝通路。這些微生物不僅能夠減輕淹水對根系的傷害，還能促進氧氣在土壤中的傳遞，從而減少淹水造成的負面影響。

土壤中可促進植物生長的根圈微生物 (PGPR) 能夠通過分泌代謝物質來提高植物對淹水逆境的耐受性。例如，一些微生物可

以產生離層酸 (ABA)，爲一種植物激素，能夠誘導植物的抗逆境反應，幫助植物在壓力條件下調節生長。此外，這些微生物還能通過分泌抗氧化酶來減少植物在淹水壓力下產生的氧化損傷。國外試驗結果，微生物製劑證明能夠顯著減少淹水對作物的負面影響，例如，在水稻和玉米等易受淹水影響的作物中，應用有益根圈微生物能夠明顯提高其生存率和產量。在這些研究中，接種了不同的微生物製劑後，作物根系的抗逆性和恢復能力顯著增強，不僅減少了根系腐敗的問題，還可加速植株的生長 (Shen *et al.*, 2021)。然而，微生物製劑具有潛力可緩解作物淹水逆境的耐受性，而其實際應用時仍面臨許多挑戰。其中，微生物製劑的效果可能因不同的環境條件而異。土壤結構、溫度、濕度等因素都會影響微生物的活性及其對植物的促進作用。故在應用微生物製劑時，需要根據具體的環境條件進行調整，以確保微生物族群之活性和持續性。

本研究自不同來源土壤中分離共80株微生物菌株與既有試驗微生物菌株，共同經由



功能性分析、包括5種分解酵素、嵌鐵能力、IAA生合成及ACC deaminase活性分析等，篩選共9株微生物菌株進行不結球白菜種子處理與6種葉菜類作物之盆栽肥效評估，綜合分析結果選擇液化澱粉芽孢桿菌Tcba05與Tcb45菌株、地衣芽孢桿菌TCLigB菌株及鏈黴菌TCSF7-6等4株菌株，再搭配既有木黴菌TCT168菌株進行田間小規模不結球白菜淹水緩解試驗。2022年與2023年度之田間小規模不結球白菜淹水逆境評估試驗結果，各試驗菌株於淹水逆境前澆灌3次之微生物菌株處理相較澆灌1次與2次之存活率高。TCSF7-6與TCT168菌株兩次的結果施用3次後，可提升存活率達20%以上；Tcba05、Tcb45與TCLigB菌株以食品級發酵量產處理，均能提升存活率17.5 - 32.5%，以上5株菌株均具有可緩解不結球白菜淹水逆境之潛力，後續可再持續進行配方微調、驗證與商品化邁進。

本研究除了於本場進行田間小規模試驗外，計畫中同時亦設置微生物緩解作物環境逆境之機制研究平台，包括生物刺激素成分分析、作物耐逆境基因調控分析、微生物生物膜含量及表型體研究，本場試驗菌株均有提供至四大平台進行機制探討，生物刺激速分析結果本場及計畫各場所提供之菌株均無PQQ成分產生，但各菌株均會產生環二肽合成酶(cyclodipeptide synthase, CDPSs)，此成分易被證實可緩解作物耐逆境之表現，尤其鏈黴菌屬之菌株具有多種形式之CDPSs，後續可進一步探討。有關作物耐候基因表現，藉由中興大學研究，施用 TCSF7-6菌株於淹水逆境測試結果，確實可以提高Peroxidases與Polyphenol的活性表現 (data not shown)。此外，中興大學在生物膜成分分析結果，本場試驗菌株Tcba05與TCSF7-6菌株可藉由發酵配方調整，增加生物膜於根系的含量，可提高小白菜於水分逆境的生長表現。財團法人

農業科技研究院則是利用表型體結合高光譜影像分析進行施用微生物菌株緩解木瓜寒害之篩選與效益分析，本研究所測試之地衣芽孢桿菌TCLigB對於緩解木瓜寒害具有優異的表現，預先施用可降低木瓜寒害的損害，木瓜寒害後施用，具有回復木瓜生長之表現，顯示此菌株具有緩解作物淹水及寒害之效果，具有開發成為耐候微生物製劑之潛力。

後續研究可以探究具有耐淹水之潛力微生物菌株在不同淹水環境下的適應機制，並開發出適應性更佳的製劑配方，來因應不同作物之淹水逆境。目前已知微生物菌株具有促進作物生長之肥效功能以及防治病蟲害之效益，對於應用微生物制劑來緩解農作物遭遇環境逆境之影響，是目前國際間研發的重點方向之一，尤其可作為生物刺激素的微生物製劑，在美國、歐洲與中國均有產品上市，國內亦正在進行相關研究與商品化，同時法規面也正在研議中，因此微生物製劑有望成為國內農業對抗環境逆境之重要工具之一，並具有提高作物產量與有助於促進農業永續發展及守護糧食安全，給予農友面對極端氣候下栽培農作物的新選擇。

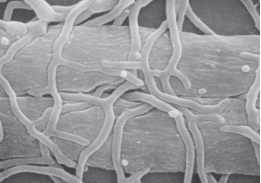
致 謝

本研究感謝農業部動植物防疫檢疫署之科技計畫 (110農科-5.3.6-中-D2、111農科-5.3.6-中-D2、112農科-5.3.6-中-D2)之支持及前計畫助理張世杰先生於計畫期間的幫忙。

參考文獻

1. Ahmad, H. M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A. N., Gul, B., Aziz, O., Rahman, Mahmood. U., Fakhar, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S. H., Wang, X. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the

- effect of drought stress in plants: a review. *Front. Plant Sci.* 13, 875774.
2. Albasri, H. M., Mawad, A. M. M., Aldaby, E. S. E. 2024. Enhancing abiotic stress tolerance in fruit trees using microbial biostimulants. *J. Pure Appl. Microbiol.* doi:10.22207/JPAM.18.3.18.
 3. Bailey, S. J., Voeselek, L. S.C. 2008. Flooding stress: acclimations and genetic diversity. *Annu. Rev. Plant Biol.* 63(1), 313-339.
 4. Bashan, Y., Bashan, L. E. 2010. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth – a critical assessment. *Adv. Agron.* 108, 77-136.
 5. Calvo, P., Nelson, L., Kloepper, J. W. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383(1-2), 3-41.
 6. Chen, M. C., Lin, T. C., Huang, J. W. 2010. Factors affecting IAA production by rhizobacteria. *Plant Pathol. Bull.* 19, 201-212.
 7. Cheng, C. W., Yang, S. S. 1995. Amylase production of *Streptomyces rimosus* TM-55 and their 2-deoxyglucose resistant mutants. *Zhonghua Min Guo Wei Sheng Wu Ji Mian Yi Xue Za Zhi.* 28, 109-116.
 8. Christian O. D., Bindraban, P. S. 2016. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36(1), 7.
 9. Colla, G., Rouphael, Y., Di Mattia, E., El-Nakhel, C., Cardarelli, M. 2015. Co-inoculation of *Glomus intraradices* and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *J. Sci. Food Agric.* 95, 1706-1715.
 10. Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P. A. 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS ONE*, 11(5), e0156362.
 11. De Boer, W., Unnewiek, P. J. A. K., Lafeber, P., Janse, J. D., Spit, B. E., Woldendorp, J. W. 1998. Anti-fungal properties of chitinolytic dune soil bacteria. *Soil Biol. Biochem.* 30, 193-203.
 12. Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S. 2016. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36(1), 7.
 13. Elnahal, A. S. M., Saadony, M. T. E., Saad, A. M., Desoky, E. S. M., Tahan, A. M. E., Rady, M. M., AbuQamar, S. F., Tarabily, K. A. E. 2022. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: a review. *Eur. J. Plant Pathol.* 162(1) doi:10.1007/s10658-021-02393-7
 14. Glick, B.R. 2014. Bacterial ACC deaminase and the alleviation of plant stress. *Adv. Appl. Microbiol.* 89, 183-230.
 15. IPCC. 2022. Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 6th ed. Cambridge University Press.
 16. Jackson, M. B., Colmer, T. D. 2005. Response and adaptation by plants to flooding stress. *Ann. Bot.* 96(4), 501-505.
 17. Jardin, P. D. 2015. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Horti.* 196, 3-14.
 18. Karnwal, A., Shrivastava, S., Tawaha, A. R. M. S. A., Kumar, G., Kumar, A., Kumar, A. 2023. PGPR-mediated breakthroughs in plant stress tolerance for sustainable



- farming. J. Plant Growth Regul. 9, 2955-2971.
19. Li, Z., Chang, S., Lin, L., Li, Y., An, Q. 2011. A colorimetric assay of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) based on ninhydrin reaction for rapid screening of bacteria containing ACC deaminase. Lett. Appl. Microbiol. 53, 178-185.
20. Liang, J., Tang, M., Chen, L., Wang, W., Liang, X. 2024. Oxidative stress resistance prompts pyrroloquinoline quinone biosynthesis in *Hyphomicrobium denitrificans* H4-45. Appl. Microbiol. Biotechnol. 108, 204.
21. Magnelli, P. E., Martínez, A. Mércuri, O. A. 1997. Simple method for determining cellulolytic activity in fungi. Rev. Argent. Microbiol. 29, 210-214.
22. Pandit, A., Adholeya, A., Cahill, D., Brau, L., Kochar, M. 2020. Microbial biofilms in nature: unlocking their potential for agricultural applications. J. Appl. Microbiol. 129, 199-211.
23. Schwyn, B., Neilands, J. B. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. Anal. Biochem. 160, 47-56.
24. Sacherer, P., Défago, G., Haas, D. 1994. Extracellular protease and phospholipase C are controlled by the global regulatory gene *gacA* in the biocontrol strain *Pseudomonas fluorescens* CHA0. FEMS Microbiol. Lett. 116, 155-160.
25. Schmidt, E. L., Caldwell, A. C. 1967. A practical manual of soil microbiology laboratory methods. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
26. Shen, M., Li, J., Dong, Y., Zhang, Z., Zhao, Y., Li, Q., Dang, K., Peng, J., Liu, H. 2021. The effects of microbial inoculants on bacterial communities of the rhizosphere soil of maize. Agriculture 11, 389.
27. Suzuki, T., Nakayama, T., Kurihara, T., Nishino, T., Esaki, N. 2001. Cold-active lipolytic activity of psychrotrophic *Acinetobacter* sp. strain no. 6. J. Biosci. Bioeng. 92, 144-148.
28. Varara P. G., Glick, B. R. 2001. Amelioration of flooding stress by ACC deaminase-containing plant growth-promoting bacteria. Plant physiol. Biochem. 39, 11-17.
29. Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., SkZ, A. 2016. Enhancing drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. Microbiol. Res. 184, 13-24.
30. Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., Ao, X. 2024. Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review. Agronomy 14, 1360.

Application of Beneficial Microbial to Alleviate Crop Flooding Stress

Chien-Chih Kuo^{1*}, Yu-Heng Lin², You-Hong Zeng¹ and Chein-Wei Chen³

¹ Associate Researcher, Crop Environment Section, Taichung District Agricultural Research and Extension Station, Ministry of Agriculture, Changhua, Taiwan, ROC.

² Associate Researcher, Crop Improvement Section, Taichung District Agricultural Research and Extension Station, Ministry of Agriculture, Changhua, Taiwan, ROC.

³ Researcher, Crop Environment Section, Taichung District Agricultural Research and Extension Station, Ministry of Agriculture, Changhua, Taiwan, ROC.

* Corresponding author, e-mail: kuocc@tcdares.gov.tw

ABSTRACT

In recent years, extreme climate events such as short-term heavy rainfall, flood stress, warm winters, drought, and cold spells have become more frequent. These abiotic stresses not only impact the physiological performance of crops but also significantly affect cultivation practices and yield. Addressing and mitigating the effects of abiotic stress on crop cultivation has thus become a key focus in contemporary agricultural research. One approach to enhance crop adaptation to these stresses is through the use of stress-resistant varieties and refined cultivation techniques. Another promising method involves the application of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). These beneficial microbial strains produce various enzymes and improve fertilizer efficiency, promoting root growth and facilitating more efficient nutrient uptake from the soil. Additionally, PGPR can biosynthesize IAA and ACC deaminase, which reduces ethylene production and helps plants better withstand abiotic stresses. In this study, 80 microbial strains were isolated and purified from soil, and through functional analysis, 9 strains were selected with potential weather resistance. The fertilizer efficacy of these 9 strains was evaluated on 6 non-heading Chinese crops, and 3 *Bacillus* strains, 1 *Streptomyces* strain, and 1 *Trichoderma* strain were selected for a small-scale field flooding trial on non-heading Chinese cabbage. Based on the evaluation results from 2022 and 2023, comparing different irrigation frequencies, applying the five bacterial strains three times before the flooding stress in non-heading Chinese cabbage increased survival rates by 17.5% to 32.5% compared to the control group. This indicates that these five strains can mitigate the effects of flooding stress on non-heading Chinese cabbage. The next steps will involve refining the fermentation processes of the bacterial strains and developing formulations, followed by commercialization. This will provide farmers with microbial solutions to combat extreme climate conditions.

Keywords: Microorganism, Abiotic stress, Flooding stress, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Trichoderma*

