Nutr Sci J, 2025, Vol. 49, No. 4, pp.159~169
DOI: 10.6691/NSJ.202512_49(4).0003

紅肉與白肉紅龍果全果水萃取物及超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 生長與 β-Glucosidase 活性之影響

蕭彣玲 [1]　楊珺堯 [1, 2*]

Effect of Red- and White-Fleshed Pitaya Whole-Fruit Aqueous Extracts and Ultrasound Treatment on the Growth and β-Glucosidase Activity of *Lactiplantibacillus plantarum* FEL112

Wen-Ling Hsiao[1], Chun-Yao Yang[1,2*]

[1]Department of Food Science, Fu Jen Catholic University, New Taipei City, Taiwan
[2]Ph.D. Program in Nutrition and Food Science, Fu Jen Catholic University, New Taipei City, Taiwan

（*Received: July 18, 2026. Accepted: October 31, 2026.*）

Abstract Pitaya (*Hylocereus* spp.) is a tropical fruit with varieties divided into red- and white-fleshed pitaya from the color of fruit flesh. Pitaya is rich in saccharides and polyphenols and has the potential to be prebiotics for lactic acid bacteria. The aim of this study is to investigate the effects of whole-fruit aqueous extract of red- and white-fleshed pitaya and ultrasound treatment on the growth and β-glucosidase activity of *Lactiplantibacillus plantarum* FEL112. From the results, the β-glucosidase activity of *L. plantarum* FEL112 in MRS added with the whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and ultrasonic treatment (RPEM-U) at 24 h of incubation was approximately 2.1 folds of that in the control (MRS) without adding the aqueous extract of pitaya and ultrasound, showing that *L. plantarum* FEL112 could adapt appropriately to changes in the medium environment, so as to effectively enhance the β-glucosidase activity by using whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and ultrasound treatment. Besides, the thermal field emission scanning electron microscope (FE-SEM) images for surface morphology of the strain in RPEM-U and MRS at 24 h displayed that *L. plantarum* FEL112 was attached on the surface of the substrate with a slightly shorter length and smoother surface in RPEM-U than that in MRS. This study demonstrated that adding whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya combined with ultrasound treatment can induce *L. plantarum* FEL112 adapting to the new environment with the enhanced enzyme activity and microbial characteristics at the appropriate incubation time, thereby contributing in the application of pitaya-related fermentation products.

Key words: pitaya, ultrasound, aqueous extract, *Lactiplantibacillus plantarum*, β-glucosidase

* Corresponding Author: Chun-Yao Yang
Address: No. 510, Zhongzheng Rd., Xinzhuang Dist., New Taipei City 242062,Taiwan (R.O.C.)
Tel: +886 2 29053624; Fax: +886 2 22093271
E-mail: 133810@mail.fju.edu.tw (C.Y. Yang)

前　言

紅龍果（*Hylocereus* spp.），英文名爲 pitaya 或 dragon fruit，通稱火龍果，屬於仙人掌科植物，廣泛種植於熱帶或亞熱帶地區的重要的水果作物之一[1]；台灣的紅龍果主要以紅色果皮白色果肉（*Hylocereus undatus*）及紅色果皮紅色果肉（*Hylocereus costaricensis & Hylocereus polyrhizus*）爲主[2]，其主要產區包括彰化縣、南投縣、台南市與屏東縣等地。紅龍果是具有生物活性的植物化合物的良好來源，富含維生素、膳食纖維、甜菜青素（betacyanins）、多酚（polyphenols）、多醣（polysaccharides）和萜類化合物（terpenoids）等，極具藥理價值[3]，所以對紅龍果中的植化素及其潛在藥用特性的開發的相關研究越來越多；紅龍果之果肉及果皮皆富含植化素，具有作爲草藥或天然色素的潛力[4]，亦有助於應對癌症、肥胖症、II 型糖尿病和其他代謝綜合症[5, 6, 7]。

除此之外，紅龍果中的主要碳水化合物爲葡萄糖（glucose）、果糖（fructose）和寡醣（oligosaccharides），具有作爲益生元（prebiotic）的潛力，可經由選擇性刺激結腸微生物群來改善腸道健康，其中白肉紅龍果和紅肉紅龍果之果肉和果皮可爲寡糖的豐富來源[3, 8]。在人工結腸中，紅龍果寡糖對人工胃液和 α-澱粉酶（α-amylase）的水解具有抗性，並能刺激乳酸桿菌和雙歧桿菌的生長[9]。紅龍果果皮中的碳水化合物營養素主要以果膠（pectin）和膳食纖維（dietary fiber）爲代表，且紅龍果果皮果膠由甘露糖（mannose）、鼠李糖（rhamnose）、半乳醣醛酸（galacturonic acid）、葡萄糖和半乳糖（galactose）組成，其中半乳醣醛酸是主要的單醣成分，而果膠對膽固醇具有強大的吸收能力，顯示其具有潛在的降低血液膽固醇的作用[10]。

乳酸菌爲革蘭氏陽性菌，可依照其菌體形態區分爲桿菌或球菌，是人體胃腸道中的重要菌群，能夠產生乳酸來作爲醣類發酵的主要代謝產物；在食品工業中，乳酸菌被廣泛用作乳製品、蔬菜和肉類發酵之益生菌或發酵劑，*Lactobacillus*、*Streptococcus* 和 *Bifidobacterium* 則是最常用的供人食用之益生菌。乳酸菌是益生菌中最重要的一群，可發揮有益健康的作用，包含腸道病原菌的抑制、血液中膽固醇的降低、免疫系統的調節、癌症的預防等[11]。乳酸菌中最普遍的酵素爲 β-glucosidase，常用於協助植物性食品的發酵，因此乳酸菌被廣泛探討其 β-glucosidase 活性相關之植物代謝釋放，乳酸菌的代謝與發酵食品的營養價值和感官屬性有關，β-glucosidase 可能參與乳酸菌菌種中之醣類代謝[12]。

超音波（ultrasound）爲一種非熱加工技術（non-thermal processing technology），是屬於安全無毒的物理性技術，可應用於萃取與發酵製程。超音波能在液相中產生空穴，經由空泡的猛烈崩裂和局部熱點的產生來誘導流體中產生壓力和速度波動，產生微細的噴流，稱爲「空穴化微流（cavitation microstreaming）」[13]。此外，超音波亦是一種特殊的環境壓力（stress）來源，可以誘導活細胞中的生物效應，以增加其生物壓力回應（biological stress response）而產生的特定酵素[14]；因不同種類的微生物所表現出對各種外部壓力的耐受性也大大不同，且由於不同種類的微生物細胞中細胞膜的微結構變化大，所以顯著影響超音波作用於不同微生物的效率[15]。以超音波應用於微生物作爲壓力來源時，需要經由超音波放射的過程以表現出最佳壓力回應結果，來促進食品成分之生物轉化[16]。本研究室曾開發了一種以超音波來增強 *Lactobacillus acidophilus* BCRC 10695 的 β-glucosidase 活性的新穎性策略，經由使用超音波照射激發 *L. acidophilus* BCRC 10695 的壓力回應，可以促進細胞膜的滲透性及酵素的傳送，且 *L. acidophilus* BCRC 10695 在靜止期的超音波刺激可產生最高的 β-glucosidase[17]。此外，若以適當的超音波壓力源對乳酸菌進行壓力刺激，也可能誘發乳酸菌因調整其對環境壓力的適應而改變其釋放酵素的能力，包括種類、數量與釋放程度[18]。本研究室亦曾自客家酸菜中篩選出具有高 β-glucosidase 活性之乳酸菌 *Lactiplantibacillus plantarum* FEL112，並以策略性超音波來馴化 *L. plantarum* FEL112，誘發其對超音波及含牛蒡根萃取物的回應，有效應用於牛蒡 - 黑豆豆奶之乳酸菌發酵[19]。

由於乳酸菌需要醣類物質以協助其生長，且紅龍果中含有大量的醣類，主要碳水化合物爲葡萄糖、果糖和寡醣，具有作爲碳源或益生元（prebiotic）的潛力；另一方面，以策略性的超音波刺激乳酸菌，在超音波不同強度的作用下，可誘發

其生物壓力回應，爲了適應環境變化而產生能利用所在環境物質的 β-glucosidase 以抵抗逆境而存活，因此本研究爲探討紅龍果全果水萃取物和超音波處理對 *L. plantarum* FEL112 生長的影響。

材料與方法

一、材料與超音波系統

本研究所使用之紅肉紅龍果（*H. polyrhizus*）與白肉紅龍果（*H. undatus*）分別於 2022 年 12 月與 2023 年 7 月購自彰化縣二林鎮紅龍果產銷班果園，且兩品種各屬同一生產批次，先將紅肉紅龍果與白肉紅龍果個別以清水沖洗後，使用剪刀切除外皮之鱗葉，並切除頭部與蒂後切片，將其放置於鐵盤進行冷凍，採用冷凍乾燥法移除紅龍果中水分。乾燥後之紅肉紅龍果與白肉紅龍果全果以粉碎機磨成粉末，並經 60 mesh 之篩網過篩，所獲得之紅肉紅龍果與白肉紅龍果的全果粉末將保存於乾燥箱以利後續研究使用。本研究所使用之乳酸菌的菌種爲 *Lactiplantibacillus plantarum* FEL112，是本研究室自客家酸菜中篩選出具有高 β-glucosidase 活性之乳酸菌，並於 2021 年委託財團法人食品工業發展研究所 - 生物資源保存及研究中心（Bioresource Collection and Research Center（BCRC）, Food industry research and development institute（FIRDI）, Hsinchu, Taiwan)，以 16S rRNA 基因序列分析與 API 50 CHL 鑑定系統分析進行細菌學名鑑定。

本研究所使用的化學試劑皆購自 Merck（Darmstadt, Germany）、Sigma（St. Louis, Missouri, USA）、Becton, Dickinson and Company（Franklin Lakes, New Jersey, USA）與 Thermo Fisher Scientific Inc.（Waltham, Massachusetts, USA）。本研究所使用的超音波系統爲 10.5 L 恆溫控制水浴槽搭配頻率 40 kHz 與電功率 300 W 的超音波（設備型號爲 LEO-3002S, LEO ULTRASONIC CO., Taiwan）。

二、紅龍果之超音波輔助萃取

本研究將冷凍乾燥後之紅肉紅龍果和白肉紅龍果之全果粉末以去離子水做爲萃取溶劑進行 40 kHz 超音波輔助萃取，紅龍果粉末與去離子水之固液比例爲 1：20（w/v），萃取溫度爲 40℃，將錐形瓶置於水浴槽中的固定位置，進行超音波輔助萃取 15 分鐘。萃取結束後，於室溫（25℃）條件下以 1969×g 離心 10 分鐘，分離紅肉紅龍果和白肉紅龍果全果萃取液及底層殘留物，收集紅肉紅龍果和白肉紅龍果全果萃取液，並以冷凍乾燥方式來獲得紅肉紅龍果全果水萃取物（RPE）和白肉紅龍果全果水萃取物（WPE），乾燥完成後之水萃取物樣品置於室溫環境（25℃）之乾燥箱儲存備用，且皆各屬同一生產批次，且由本研究室先前研究發現 RPE 與 WPE 的萃取產率分別爲 61.963% 與 67.103%[20]。

三、紅龍果水萃取物之乳酸菌發酵

參考 Su et al.（2023）之方法[19]並稍加修改，將紅龍果水萃取物（RPE 與 WPE）以 1%（w/v）之比例添加至 20 mL 的 MRS broth 中，爲了防止培養基質受到雜菌污染以及確保實驗基準的一致性，使用 121℃滅菌 20 分鐘得到紅肉紅龍果全果水萃取物液態基質與白肉紅龍果全果水萃取物液態基質，待前述液態基質冷卻後，接種 1%（v/v）二次活化菌液至液態基質中，分別標示爲 RPEM 與 WPEM，且實測初始值的接種菌數約爲 7.0 $\log_{10}$ CFU/mL。此外，在探討超音波對乳酸菌生長之影響，使用超音波水浴槽（40 kHz/300 W），以 40℃與 15 分鐘之條件進行培養液的超音波處理，處理完成後置於 37℃ 培養箱以 150 rpm 震盪培養 0、12、24、36、48 小時，並測定其菌數、pH 值及 β-glucosidase 活性，使用槽式超音波處理之 RPEM 與 WPEM 則分別標示爲 RPEM-U 與 WPEM-U；未使用超音波處理的組別在培養試驗前皆未使用 40℃與 15 分鐘條件處理。每個實驗條件皆以 3 個不同批次的獨立樣品進行個別獨立試驗，是爲該實驗條件的三重複試驗（n = 3）。

菌數計數分析是將每一個獨立樣品試驗之發酵完成的發酵液進行序列稀釋，取得適當的稀釋倍數進行傾注法，取 1 mL 適當的稀釋倍數之稀釋發酵液至無菌培養皿中，接著倒入已滅菌的 MRS agar 並搖晃培養皿使培養基與菌液混合均勻，待其凝固後倒置於 37℃下培養 48 小時，進行菌落計數，平板重複數亦爲三重複，其可計數的菌落範圍爲 25-250，菌數以 $\log_{10}$ CFU/mL 表示；pH 值之分析則是將發酵液在 4℃條件下以 1969×g 離心 10 分

鐘，取上清液以 pH meter 測定。β-glucosidase 之活性則是參考 Su et al.（2023）之方法[19]，是藉由測 定 *p*-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside（*p*-NPG）的水解速率來判定活性大小，單位爲 unit（U）的定義爲每毫升的基質於每分鐘釋出 1 nanomole *p*-nitrophenol 所需的 β-glucosidase 含量。將發酵完成之發酵液在 4℃條件下以 1969×g 離心 10 分鐘，取上清液進行適當的稀釋後，加入 100 μL 0.1 M 磷酸緩衝溶液（pH 7.4）配製之 5 mM *p*-NPG，以震盪器混合均勻，於 37℃的水浴槽中反應 30 分鐘，之後加入 50 μL 1 M Na_2CO_3 終止反應，並以震盪器混合均勻後，於室溫（25℃）下以 12000×g 離心 30 分鐘，以分光光度計測其於 405 nm 下之吸光值，並以磷酸緩衝溶液作爲空白試驗；使用 *p*-nitrophenol 製作標準曲線來計算樣品內含有的 *p*-nitrophenol 含量。

四、機能性成分與抗氧化能力分析

將發酵後的發酵樣品先以 1969×g 離心 10 分鐘，取上清液進行冷凍乾燥，再以 1：10（w/v）之比例將樣品凍乾粉末與 80% 甲醇混合，並使用槽式超音波（40 kHz/300 W）在 30℃下萃取 2 小時；萃取完成再以 1969×g 離心 10 分鐘，取上清液進行減壓濃縮及冷凍乾燥，得到發酵產物萃取物（fermented product extract, FE），再將 FE 以 1：10（w/v）之比例與 80% 甲醇混合後之樣品進行後續的分析。

機能性成分分析是針對總酚類物質含量（total phenolic content, TPC）與抗氧化能力進行分析。TPC 測定採用 Folin-Ciocalteu 法，取 250 μL Folin-Ciocalteu 試劑（1N）加入 250 μL 樣品，靜置 5 分鐘，再加入 500 μL Na_2CO_3（20%）混合均勻，並於室溫下避光 8 分鐘後，以分光光度計測量在 730 nm 波長下的吸光值，並以 gallic acid 製作標準曲線來計算每克的發酵產物萃取物（FE）所含之 gallic acid equivalent（GAE）[21]。

抗氧化能力分析是採用鐵離子還原抗氧化能力測定法（ferric-reducing antioxidant power（FRAP）assay）。先將 FRAP 試劑置於 37℃恆溫備用，取待測樣品液 15 μL，加入 285 μL FRAP 試劑與 500 μL H_2O 混合均勻，於 37℃反應 4 分鐘後，以分光光度計測量在 593 nm 波長下的吸光值，並以 Trolox 製作標準曲線來計算每克的發酵產物萃取物（FE）所含之 Trolox equivalent（TE）[19]。

五、形態特徵分析

根據 Su et al.（2023）之研究方法[19]並稍加修改，發酵完成之樣品於 4℃下以 1969×g 離心 10 分鐘，並去除上清液；以 0.1 M 磷酸緩衝溶液清洗沉澱物，並於 4℃下以 1969×g 離心 10 分鐘，上述清洗步驟重複三次之後於樣品中加入 2.5% 戊二醛溶液，室溫下浸泡隔夜；之後，於 4℃下以 1969×g 離心 10 分鐘，去除上清液後，於樣品加入 1% 四氧化鋨，室溫下浸泡 1.5 小時。接著於 4℃下以 1969×g 離心 10 分鐘，去除上清液後，並以 0.1 M 磷酸緩衝溶液清洗菌體三次；依序加入 35%、50%、60%、70%、80% 及 95% 乙醇，靜置 10 分鐘後，再以相同條件進行離心脫水，並置於通風櫥中風乾。將前述樣品均委託國立中興大學貴重儀器中心（國科會基礎研究核心設施）進行鍍白金膜，再以熱場發射掃描式電子顯微鏡（Thermal Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM）進行樣品表面結構變化之觀察。

六、統計分析

每個實驗條件係以 3 個不同批次的獨立樣品進行個別獨立試驗，是爲該實驗條件的三重複試驗，實驗數據表示爲平均值 ± 標準差（n = 3）。使 用 IBM SPSS Statistics 20（IBM SPSS Statistics for Windows, Version 20.0, IBM Corp, Armonk, NY, USA），經由 one-way ANOVA 和 Duncan's multiple range test 對統計分析進行評估，顯著性差異爲 $p < 0.05$。

結果與討論

一、有無超音波處理對 *L. plantarum* FEL112 的菌數與酵素活性之影響

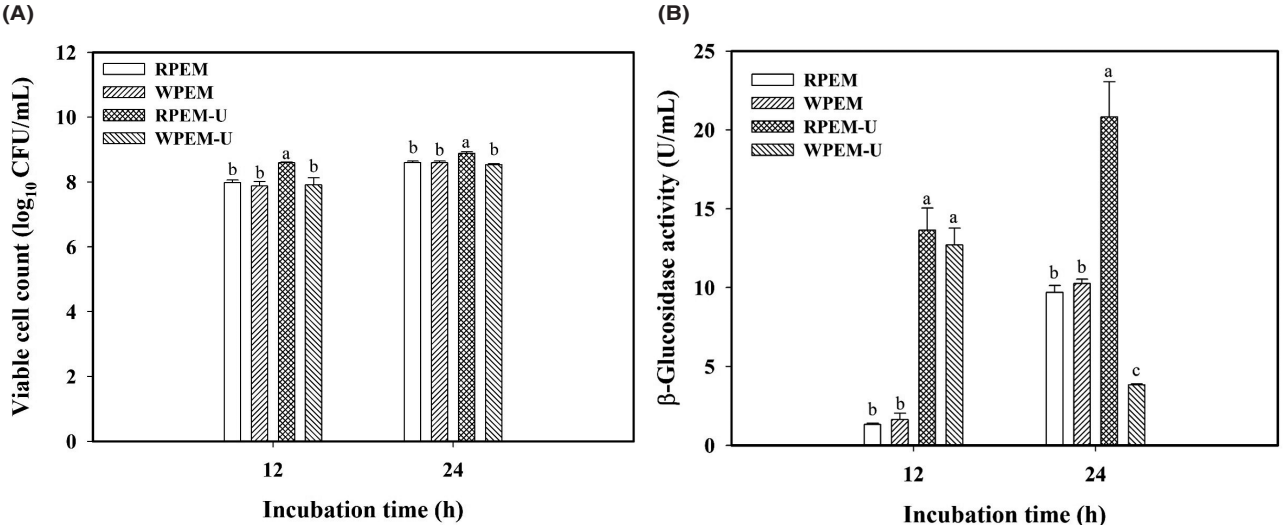
爲了探討超音波對於乳酸菌在含有額外植物來源營養補充劑之培養基中生長的影響，因此將 *L. plantarum* FEL112 接種至含有 RPE 或 WPE 的 MRS 培養基中，並搭配有無超音波處理（以 40 kHz/300 W 的超音波在 40℃ 處理 15 分鐘），觀察

L. plantarum FEL112 於培養 12 小時與 24 小時的變化，如圖一所示。圖一（A）爲有無超音波處理對於 *L. plantarum* FEL112 在含有紅龍果水萃取物的 MRS 培養基中於培養 12 小時與 24 小時的菌數變化，可觀察到菌數皆落在 7.80-8.90 $\log_{10}$ CFU/mL 的範圍內，且亦發現到 RPEM-U 不論是在培養 12 小時或 24 小時皆較其他組別具有顯著較高的菌數；由此可知，超音波處理對於發酵基質和菌液混合具有正面影響之潛力，Yang（2017）曾指出因超音波具有空穴效應（cavitation）之特性，所以使用適當的超音波條件不僅可使得樣品均勻混合，亦可增加質傳作用（mass transfer）並促進微生物菌體之生長[22]。

圖一（B）則爲培養 12 小時或 24 小時的 β-glucosidase 活性，顯示以超音波處理之組別（RPEM-U 與 WPEM-U）在培養 12 小時的時候皆顯著高於未使用超音波處理之組別（RPEM 與 WPEM），顯示以超音波處理可有效提高 *L. plantarum* FEL112 在 12 小時（log phase）的 β-glucosidase 活性。在培養 24 小時則發現到 RPEM-U 的 β-glucosidase 活性爲 20.83 U/mL，此酵素活性顯著高於其他組別，而 WPEM-U 的 β-glucosidase 活性則顯著低於其他組別，但未使用超音波處理之組別（RPEM 與 WPEM）則無顯著差異。由此結果可知，以 RPE 作爲營養補充劑可促進該菌株的 β-glucosidase 活性直至培養 24 小時（此時期爲該菌株之 stationary phase），亦顯示超音波處理在特定的培養時間（12 小時與 24 小時）可有效提升 *L. plantarum* FEL112 在含有 RPE 的 MRS 培養基中之酵素活性。

二、紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對 *L. plantarum* FEL112 存活之影響

探討紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對 *L. plantarum* FEL112 於長培養時間（0-48 小時）下之菌數、β-glucosidase 活性與 pH 值變化（圖二與表一），將以超音波處理與添加紅龍果水萃取物之組別（RPEM-U 與 WPEM-U）和未使用超音波處理與未添加紅龍果水萃取物的 MRS 組（控制組）進行比較。由圖二（A）可發現到控制組、RPEM-U 與



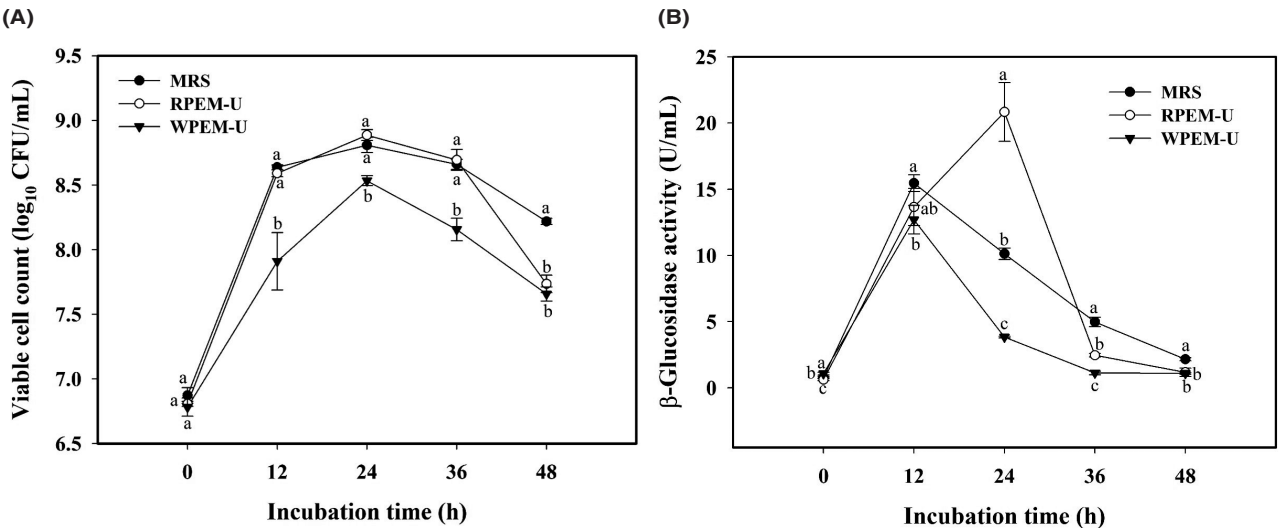
圖一　比較有無超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 在含有紅龍果全果水萃取物的 MRS 培養基於 37℃下培養 12 小時和 24 小時之（A）菌數與（B）β-glucosidase 活性

Figure 1. Comparison of (A) viable cell count and (B) β-glucosidase activity of *L. plantarum* FEL112 incubated in the MRS with whole-fruit aqueous extract of pitaya at 37 ℃ for 12 and 24 h with or without ultrasound. RPEM: MRS broth with 1% aqueous extract of red-fleshed pitaya; WPEM: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of white-fleshed pitaya; RPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40℃ before incubation; WPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of white-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40 ℃ before incubation. Data were expressed as mean±standard deviation (n=3). Different superscript letters at the same incubation time indicated significant difference ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

WPEM-U 的初始菌數約 6.80 $\log_{10}$ CFU/mL，但隨著培養時間的增加，所有組別的菌數均呈增長之趨勢，並於 24 小時達到最高菌數，其中以 RPEM-U 的菌數爲最高（8.89 $\log_{10}$ CFU/mL），而 WPEM-U 的菌數則爲最低，另使用超音波處理與添加紅龍果水萃取物之組別（RPEM-U 與 WPEM-U）於培養後期（48 小時）之菌數顯著低於控制組。

在 β-glucosidase 活性部分（圖二（B）），可發現到控制組與 WPEM-U 皆在培養 12 小時有最佳的 β-glucosidase 活性，分別爲 15.45 U/mL 與 12.70 U/mL，其後明顯下降，而 RPEM-U 則於培養 24 小時達到最佳的 β-glucosidase 活性（20.83 U/mL），爲相同培養時間之控制組的 2.1 倍，而在培養後期（36-48 小時）則發現到所有組別的酵素活性均呈現下降的趨勢。根據此結果推測，即使控制組與 RPEM-U 於培養 24 小時具有相似的菌數，但因含有 RPE 的培養基較控制組（MRS）及 WPEM-U 可提供更多的營養成分[20]，進而促使 *L. plantarum* FEL112 透過利用補充營養物質來提升 β-glucosidase 的活性。

表一爲 pH 值在 *L. plantarum* FEL112 培養 0-48 小時的變化，由此結果可知，使用超音波處理與添加紅龍果水萃取物之組別（RPEM-U 與 WPEM-U）於接菌後之初始 pH 值皆低於控制組，且添加 WPE 的培養基之 pH 值顯著低於添加 RPE 的培養基之 pH 值；另於培養 0-12 小時可觀察到明顯的 pH 值下降趨勢，並於培養 24-48 小時趨於平緩。Pepe et al.（2024）的研究指出紅龍果成熟後 pH 值大約介於 4.5 到 5.8 之間，且對總可溶性固形物（total soluble solid, TSS）和 pH 值而言，紅肉紅龍果的 TSS（12.05%）和 pH 值（5.78）較白肉紅龍果的 TSS（11.72%）和 pH 值（4.63）爲高[23]，此與本研究所顯示 RPEM-U 比 WPEM-U 的初始 pH 值較高之結果具有相似的趨勢。此外，Sestelo et al.（2004）的研究指出 *L. plantarum* USC1 的 β-glucosidase 活性在 pH 4.5 至 7.5 之間穩定，在 pH 5.0 時活性最高，在 pH 值低於 4.0 以下失去活性[24]，所以 *L. plantarum* FEL112 在培養後期因培養基質的 pH 值較低，導致酵素活性受到了限制。



圖二　紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 於 37℃下培養 0-48 小時之（A）菌數與（B）β-glucosidase 活性的影響

Figure 2. Effect of whole-fruit aqueous extracts of pitaya combined with ultrasound treatment on (A) viable cell count and (B) β-glucosidase activity of *L. plantarum* FEL112 at 37°C for 0-48 h of incubation. RPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40°C before incubation; WPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of white-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40°C before incubation. Data were expressed as mean±standard deviation (n = 3). Different superscript letters at the same incubation time indicated significant difference (p < 0.05) by Duncan's multiple range test.

表一　紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 於 37℃下培養 0-48 小時之 pH 值的影響

Table 1. Effect of whole-fruit aqueous extracts of pitaya combined with ultrasound treatment on pH value of *L. plantarum* FEL112 at 37°C for 0-48 h of incubation

Incubation time (h)	pH value		
	MRS	RPEM-U	WPEM-U
0	6.52 ± 0.03[a]	6.10 ± 0.02[b]	6.01 ± 0.02[c]
12	4.53 ± 0.02[a]	4.30 ± 0.03[c]	4.37 ± 0.04[b]
24	3.91 ± 0.01[b]	3.90 ± 0.01[b]	3.95 ± 0.01[a]
36	3.83 ± 0.04[b]	3.90 ± 0.01[a]	3.90 ± 0.02[a]
48	3.85 ± 0.03[b]	3.76 ± 0.01[c]	3.92 ± 0.01[a]

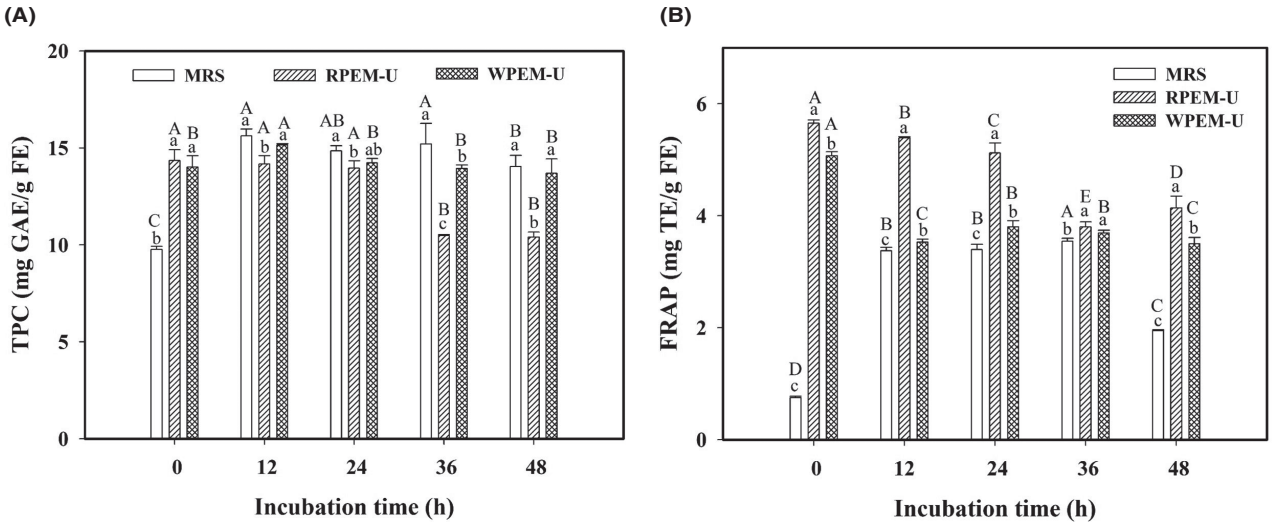
RPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40℃ before incubation; WPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of white-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40℃ before incubation. Data were expressed as mean±standard deviation (n = 3). Different superscript letters at the same row indicated significant difference ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

三、紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對發酵產物之總酚與抗氧化能力的影響

紅龍果爲富含多酚成分的植物，且此類成分具有抗氧化的特性；本實驗室之先前研究發現到使用超音波輔助萃取可有效的增加紅龍果中的生物活性物質之萃取，且在適當的萃取條件下可獲得富含 TPC 的紅龍果水萃取物，此萃取物中含有綠原酸（chlorogenic acid, CGA）與槲皮素（Quercetin），具有抗氧化的能力[20]；因此本研究針對 RPEM-U、WPEM-U 與未經任何處理之控制組（MRS）於不同培養時間的發酵產物之 TPC 與 FRAP 變化進行探討，如圖三所示。圖三（A）爲 MRS、RPEM-U 與 WPEM-U 於不同培養時間之 TPC 變化，可發現 RPEM-U 相較於 WPEM-U 及控制組 MRS 於培養後期（36-48 小時）的 TPC 下降趨勢較爲顯著，此結果推測 *L. plantarum* FEL112 在培養後期於 RPEM-U 仍較於 WPEM-U 及控制組可多利用或代謝酚類化合物，致使其 TPC 減少較多；Gaur 與 Gänzle（2023）指出 *Lactobacillaceae* 擁有廣泛的酵素活性，可用於具有生物活性之酚類化合物的生物轉化[25]。在抗氧化能力方面，由圖三（B）可發現隨著培養時間的延長，WPEM-U 相較於 RPEM-U 的 FRAP 值下降較爲顯著，而 RPEM-U 在 0-24 h 及 48 h 則均顯著高於 WPEM-U 與控制組 MRS，此結果顯示 RPEM 經在超音波處理的 *L. plantarum* FEL112 培養後之多酚成分具有更佳的抗氧化能力。Su et al.（2023）亦指出發酵產物中 FRAP 值的降低可能源自於兩個面向，分別是植物性原料的多醣成分導致其可與多酚類化合物結合，進而降低部分多酚的游離態，以及發酵過程對酚類化合物組成的影響[19]。

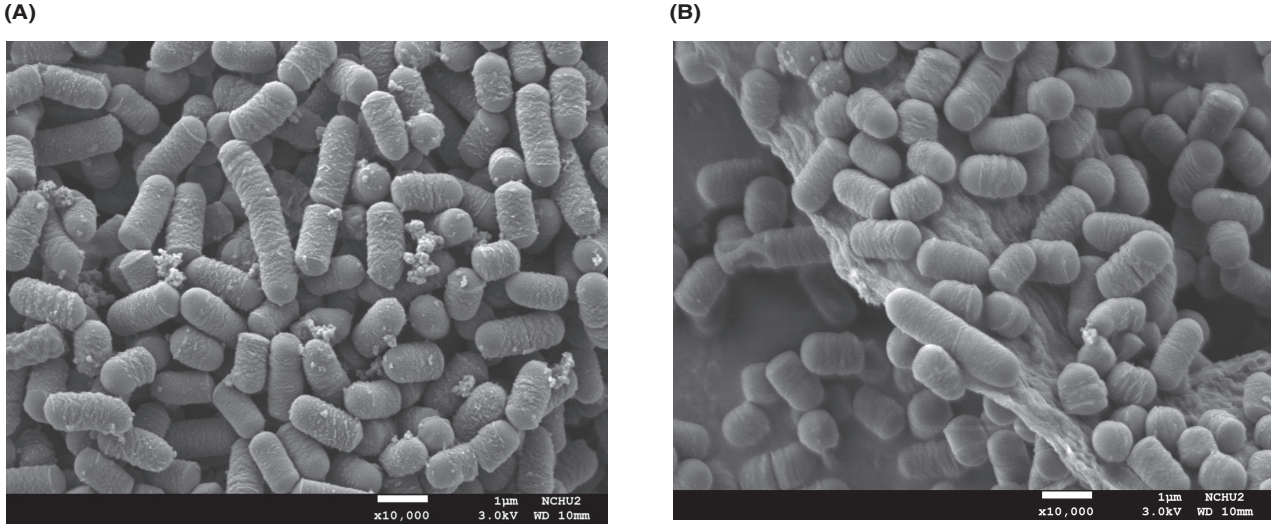
四、*L. plantarum* FEL112 在不同培養基質與超音波處理之表面形態結構

由上述結果可知，以 RPE 和超音波有助於提升 *L. plantarum* FEL112 的生長，且在培養 24 小時的 β-glucosidase 活性在 RPEM-U 中顯著高於在控制組 MRS 中，因此以熱場發射掃描式電子顯微鏡（FE-SEM）觀察培養 24 小時之 MRS（圖四（A））與 RPEM-U（圖四（B））的表面形態結構之代表性視野。比較圖四（A）與（B），可觀察到在 MRS 中培養 24 小時之菌體表面有皺褶的狀態，而相較於在 MRS 中，菌體在 RPEM-U 中則菌體長度較短但表面則較爲光滑，此顯示添加 RPE 與超音波處理可影響 *L. plantarum* FEL112 在培養 24 小時後之菌體表面形態的特徵現象。



圖三　紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 發酵產物萃取物於 37℃下培養 0-48 小時之（A）總酚含量和（B）抗氧化能力 FRAP 之影響

Figure 3. Effect of whole-fruit aqueous extracts of pitaya combined with ultrasound treatment on the (A) total phenolic content (TPC) and (B) ferric-reducing antioxidant power (FRAP) of the fermented product extract (FE) with *L. plantarum* FEL112 at 37°C for 0-48 h. RPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of red-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40°C before incubation; WPEM-U: MRS broth with 1% whole-fruit aqueous extract of white-fleshed pitaya and 40 kHz of ultrasonic treatment for 15 min at 40°C before incubation. Data were expressed as mean ± standard deviation (n = 3). Different lowercase letters at the same incubation time or different uppercase letters at the same incubation treatment were significantly different ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.



圖四　植物乳桿菌 FEL112 於（A）MRS 與（B）RPEM-U 培養 24 小時的 FE-SEM 表面形態結構圖（×10,000）

Figure 4. FE-SEM images of the morphological structures of *L. plantarum* FEL112 incubated for 24 h at (A) MRS (×10,000) and (B) RPEM-U (×10,000).

結　論

本研究以紅龍果水萃取物爲營養補充劑，評估了營養補充來源和超音波處理對 *L. plantarum* FEL112 的生長和 β-glucosidase 活性的影響。在 MRS 培養基中添加紅龍果水萃取物（RPE 或 WPE）後，以 RPE 搭配超音波處理（RPEM-U）對

L. plantarum FEL112 於 24 小時培養後可誘導較高的 β-glucosidase 活性且高於同時間對照組，並使發酵產物具有較高的抗氧化能力，顯示 *L. plantarum* FEL112 具有對發酵基質之環境變化的適應行爲。此外，由 *L. plantarum* FEL112 於 RPEM-U 培養 24 小時之 FE-SEM 表面形態影像圖可觀察到 *L. plantarum* FEL112 的菌體長度較短且表面較光滑，顯示 RPE 搭配超音波處理可影響 *L. plantarum* FEL112 在培養 24 小時後之菌體表面形態的特徵。因此，適度的營養補充和超音波處理有利於提高乳酸菌的存活率，透過適當來源的營養添加和搭配超音波處理的效應誘導乳酸菌適應環境，進而提高其菌體特性，有助於紅龍果相關食品的發酵應用。

致　　謝

作者們非常感謝國家科學及技術委員會補助此專題研究計畫，計畫編號爲 NSTC 112-2221-E-030-001-MY3。作者們也要感謝國立中興大學貴重儀器中心（國科會基礎研究核心設施）協助進行熱場發射掃描式電子顯微鏡（Thermal Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM）分析。

資　　金

國家科學及技術委員會補助此專題研究計畫，計畫編號爲 NSTC 112-2221-E-030-001-MY3。

作者的貢獻

蕭彣玲 (Wen-Ling Hsiao): Investigation, Data curation, Formal analysis.

楊珺堯 (Chun-Yao Yang): Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing- Original draft preparation, Writing- Review and Editing, Project administration, Funding acquisition.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

利益衝突

本文作者皆無利益衝突。

參考文獻

1. Luu TTH, Le TL, Huynh N, Quintela-Alonso P. Dragon fruit: A review of health benefits and nutrients and its sustainable development under climate changes in Vietnam. Czech. J. Food Sci. 2021; 39: 71-94.
2. Lin CP, Ann PJ, Huang HC, Chang JT, Tsai JN. Anthracnose of pitaya (*Hylocereus* spp.) caused by *Colletotrichum* spp., a new postharvest disease in Taiwan. J. Taiwan Agric. Res. 2017; 66: 171-83.
3. Huang Y, Brennan MA, Kasapis S, Richardson SJ, Brennan CS. Maturation process, nutritional profile, bioactivities and utilisation in food products of red pitaya fruits: A review. Foods. 2021; 10: 2862.
4. Zaid RM, Mishra P, Noredyani AS, Tabassum S, Ab Wahid Z, Sakinah AM. Proximate characteristics and statistical optimization of ultrasound-assisted extraction of high-methoxyl-pectin from *Hylocereus polyrhizus* peels. Food Bioprod. Process. 2020; 123: 134-49.
5. Ramli NS, Brown L, Ismail P, Rahmat A. Effects of red pitaya juice supplementation on cardiovascular and hepatic changes in high-carbohydrate, high-fat diet-induced metabolic syndrome rats. BMC Complement. Altern. Med. 2014; 14: 189.
6. Joshi M, Prabhakar B. Phytoconstituents and pharmaco-therapeutic benefits of pitaya: A wonder fruit. J. Food Biochem. 2020; 44: e13260.
7. Jiang H, Zhang W, Li X, Shu C, Jiang W, Cao J. Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: A comprehensive review. Trends Food Sci. Technol. 2021; 116: 199-217.
8. Wichienchot S, Jatupornpipat M, Rastall R. Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties. Food Chem. 2010; 120: 850-7.
9. Khuituan P, K-da S, Bannob K, et al. Prebiotic oligosaccharides from dragon fruits alter gut motility in mice. Biomed. Pharmacother. 2019; 114: 108821.
10. Zaid RM, Mishra P, Ab Wahid Z, Sakinah AM. *Hylocereus polyrhizus* peel's high-methoxyl pectin: A potential source of hypolipidemic agent. Int. J. Biol. Macromol. 2019; 134, 361-7.
11. Nuraida L. A review: Health promoting lactic acid bacteria in traditional Indonesian fermented foods. Food Sci. Human Wellness 2015; 4: 47-55.
12. Michlmayr H, Kneifel W. β-Glucosidase activities of lactic acid bacteria: mechanisms, impact on fermented food and human health. FEMS Microbiol. Lett. 2014; 352: 1-10.
13. Collis J, Manasseh R, Liovic P, et al. Cavitation microstreaming and stress fields created by microbubbles. Ultra-

sonics 2010; 50: 273-9.
14. Wu J, Lin L. Ultrasound-induced stress responses of Panax ginseng cells: enzymatic browning and phenolics production. Biotechnol. Prog. 2002; 18: 862-6.
15. Ewe JA, Abdullah WNW, Bhat R, Karim AA, Liong MT. Enhanced growth of lactobacilli and bioconversion of isoflavones in biotin-supplemented soymilk upon ultrasound-treatment. Ultrason. Sonochem. 2012; 19: 160-73.
16. Jacobo-Velazquez DA, Cuellar-Villarreal MR, Welti-Chanes J, Cisneros-Zevallos L, Ramos-Parra PA, Hernandez-Brenes C. Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. Trends in Food Sci. Technol. 2017; 60: 80-7.
17. Liu WS, Yang CY, Fang TJ. Strategic ultrasound-induced stress response of lactic acid bacteria on enhancement of β-glucosidase activity for bioconversion of isoflavones in soymilk. J. Microbiol. Methods 2018; 148: 145-50.
18. Peng HT, Yang CY, Fang TJ. Enhanced β-glucosidase activity of *Lactobacillus plantarum* by a strategic ultrasound treatment for biotransformation of isoflavones in okara. Food Sci. Technol. Res. 2018; 24: 777-84.
19. Su JY, Chen Y, Yang CY. Impact of nutrient from aqueous extract of burdock roots and ultrasonic stress on the growth and β-glucosidase activity of *Lactiplantibacillus plantarum* FEL112. LWT-Food Sci. Technol. 2023; 175: 114495.
20. Lian WT, Yang CY. Effect of ultrasonic frequencies on the aqueous extraction of polyphenols, chlorogenic acid, and quercetin from the whole fruit of pitaya (*Hylocereus* spp.). Molecules 2025; 30: 3253.
21. Kujala TS, Loponen JM, Klika KD, Pihlaja K. Phenolics and betacyanins in red beetroot (*Beta vulgaris*) root: distribution and effect of cold storage on the content of total phenolics and three individual compounds. J. Agric. Food Chem. 2000; 48: 5338-42.
22. Yang CY. Application of non-thermal ultrasonic technology in food extraction and fermentation. Journal of Agriculture and Forestry 2017; 65: 125-36 (In Chinese).
23. Pepe AV, Çelik C, Yıldırım F, Yıldırım AN. Comparing physico-chemical and antioxidant properties of white-fleshed and red-fleshed pitaya (*Hylocereus* spp.) cultivars. Appl. Fruit Sci. 2024; 66: 797-802.
24. Sestelo ABF, Poza M, Villa TG. β-Glucosidase activity in a *Lactobacillus plantarum* wine strain. World J. Microbiol. Biotechnol. 2004; 20: 633-7.
25. Gaur G, Gänzle MG. Conversion of (poly) phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites. Curr. Res. Food Sci. 2023; 6: 100448.

紅肉與白肉紅龍果全果水萃取物及超音波處理對植物乳桿菌 FEL112 生長與 β-Glucosidase 活性之影響

蕭彣玲[1] 楊珺堯[1, 2*]

[1] 天主教輔仁大學食品科學系
[2] 天主教輔仁大學食品營養博士學位學程

（收稿日期：115 年 7 月 18 日。接受日期：115 年 10 月 31 日）

摘要 紅龍果（*Hylocereus* spp.）是一種熱帶水果，根據果肉顏色可分為紅肉紅龍果和白肉紅龍果，其富含醣類和多酚，具有作為乳酸菌的益生元之潛力。本研究之目的在探討紅肉與白肉紅龍果全果水萃取物和超音波處理對植物乳桿菌 FEL112（*Lactiplantibacillus plantarum* FEL112）生長及 β-glucosidase 活性的影響。研究結果發現，*L. plantarum* FEL112 在添加紅肉紅龍果全果水萃取物與使用超音波處理的 MRS 培養基（RPEM-U）中於 24 小時的 β-glucosidase 活性是未添加紅龍果水萃取物與未使用超音波處理的控制組（MRS）的 2.1 倍，顯示在添加紅肉紅龍果全果水萃取物與超音波的處理下，*L. plantarum* FEL112 具有對發酵基質之環境變化的適應行為，可有效提升其酵素活性。此外，由 RPEM-U 與 MRS 在 24 小時的熱場發射掃描式電子顯微鏡（FE-SEM）表面型態結構圖可觀察到 *L. plantarum* FEL112 附著於基質之表面，在 RPEM-U 之菌體則較在 MRS 之菌體具稍短的長度且表面更為光滑。本研究顯示以紅肉紅龍果全果水萃取物搭配超音波處理可以促使 *L. plantarum* FEL112 適應新環境並於適當的培養時間提升酵素活性與其菌體特性，進而有助於紅龍果相關食品的發酵應用。

關鍵詞：紅龍果、超音波、水萃取物、植物乳桿菌、β-glucosidase

* 通訊作者：楊珺堯
通訊地址：242062 新北市新莊區中正路 510 號
電話：+886 2 29053624；傳真：+886 2 22093271
電子郵件：133810@mail.fju.edu.tw (C.Y. Yang)