

檸檬廢棄物經微生物發酵機能性成分變化及抗氧化特性研究

張佳心^{1†} 楊巧敏^{1†} 呂亭萱¹ 陳蕙如¹ 許雅晴¹ 范植軒² 蔡書憲²
林淨怡^{1,3,4*} 李明怡^{1,4,5*}

Variation in Functional Components and Antioxidant Properties of Lemon Peel Waste after Microbial Fermentation

Chia-Hsin Chang^{1†}, Chiao-Min Yang^{1†}, Ting-Syuan Lu¹, Yi-Ju Chen¹, Ya-Ching Hsu¹
Chih-Hsuan Fan², Shu-Hsien Tsai², Ching-I Lin^{1,3,4*}, Ming-Yi Lee^{1,4,5*}

¹Department of Nutrition and Health Sciences. Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, 333324, Taiwan

²Industrial Technology Research Institute, Hsinchu 31057, Taiwan

³Research Center for Food and Cosmetic Safety. Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, 33303, Taiwan

⁴Department of Nutrition and Health Sciences. Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, 33303, Taiwan

⁵Center for Drug Research and Development. Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, 33303, Taiwan

(Received: June 2, 2025. Accepted: August 14, 2025)

Abstract The lemon processing industry generates large amounts of peel waste annually, which is rich in flavonoids, phenolic acids, and pectin. However, the insoluble structure of these compounds limits their utilization. In this study, lemon peel waste was fermented using five lactic acid bacteria strains, *Lactobacillus paracasei* (LPc), *Lactiplantibacillus plantarum* (LP), *Leuconostoc mesenteroides* (LM), *Lactobacillus pentosus* (LPt), and *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* (LB), at 37°C for 24 hours to evaluate changes in functional components and antioxidant activities. The results showed that the LP group exhibited the highest total flavonoid content ($5.94 \pm 0.20 \mu\text{g QE/mL}$), a 136% increase compared to the unfermented control. LPc presented the highest total phenolic content (281.56

* Corresponding author: Ming-Yi Lee, Ching-I Lin
Address: No. 261, Wenhua 1st Rd., Guishan Dist., Taoyuan City 33303, Taiwan (R.O.C.).
Tel: +886-3-2118999#5473
E-mail: mylee@mail.cgu.edu.tw.
cilin@mail.cgu.edu.tw. (Co-Corresponding author)

$\pm 17.72 \mu\text{g GAE/mL}$), representing a 63% increase compared to the original powder. The LM group had the highest pectin content, reaching $199.57 \pm 12.83 \text{ mg AGA/g}$, 14 times higher than the original peel powder. In antioxidant assays, LPc significantly improved free radical scavenging capacity, with IC_{50} values of DPPH and ABTS dropping to 1.10 ± 0.02 and $5.79 \pm 0.05 \text{ mg/mL}$, respectively, compared to the original powder (2.82 and 9.25 mg/mL). Pearson correlation analysis revealed a high positive correlation between DPPH and ABTS assays ($r=0.76$, $p=0.048$). This study highlights the potential of microbial fermentation for significantly enhancing the functionality of lemon by-products. LPc notably improved phenolic content and antioxidant activity, while LM effectively increased soluble pectin release, suggesting their promising use as high-value food or feed additives.

Keywords *Lemon peel waste, Fermentation, Total flavonoids, Total phenolics, Pectin, Antioxidant*

前 言

檸檬在全球柑橘產業鏈中佔有舉足輕重的地位，無論是生鮮市場、調味加工抑或芳香精油產業皆需大量原料。根據近年農糧署統計，台灣「優利卡」（Eureka）四季檸檬的年種植面積穩定維持在三千公頃上下，年產量約十五萬公噸，其中超過七成於每年七月至九月短期集中上市，如此高度集中產期雖有利於大宗榨汁與外銷，但亦導致供應鏈末端短時間內出現大量壓榨副產物。檸檬壓榨後的果皮、內瓢與種子重量往往佔原果重的一半以上⁽¹⁾，若缺乏即時再利用或貯存技術，這些副產物易在高溫高濕環境下快速發酵腐敗，散發硫化物與有機酸惡臭並釋出大量滲出液，造成加工廠周邊嚴重二次污染。過去業者普遍以掩埋或低價飼料化作為主要去化途徑，然而掩埋不僅無法回收其可貴之生理活性成分，亦增加甲烷等溫室氣體排放，飼料化則受限於檸檬高酸度、高含水率與果膠含量，上游仍須耗費大量能量與脫酸工序。

隨循環經濟與淨零碳排議題崛起，將檸檬副產物轉化為高值機能食材、食品配料或生物活性萃取物之呼聲日盛，歐盟循環生質新政（CBE JU）與我國的「農業副產物加值與循環再利用」等專案皆明定優先支持果蔬加工副產物價值鏈的示範案，其中檸檬因為原料集中、化學組成單純且具高度市場辨識度，已被視為示範轉化平台的重點物種。從環境面、經濟面與社會面來看，檸檬副產物若能透過科學化加工重返食品或保健品市場，不僅能降低一年逾數億元的廢棄處理成本，也能為果農與加工產業創造附加價值，並符合永續發展目標十二「責任消費與生產」的精神。

檸檬廢棄物由外果皮（Flavedo）、內果皮（Albedo）、種子（Seed）及果肉（Pulp）所構成，果肉中又包含果汁（Juice）及瓢瓣（Seg-

ments），其化學組成呈顯著部位特異性，如外果皮與內果皮富含脂溶性單萜、倍半萜及含氧萜類，如檸檬烯（D-limonene）、檸檬醛（Citral）等具香氣與抗菌活性的精油組成分，並富含水溶性高甲基果膠與親水性黃酮配醣體⁽¹⁾，果汁及瓢瓣則以酚酸類含量最高，如咖啡酸（Caffeic）、綠原酸（Chlorogenic acid）、水楊酸（Salicylic acid）、沒石子酸（Gallic acid）及苯甲酸（Benzoic acid）⁽²⁾，兼含胡蘿蔔素與葉黃素等脂溶性色素，亦具強抗氧化特性。種子中蛋白質占乾重約三成，並富含亞油酸與油酸等不飽和脂肪酸，兼具食藥雙用價值。近年代謝體學研究指出，檸檬廢棄物尚含多胺、酵素抑制劑、柑橘多肽及多種可抑制 α -葡萄糖苷酶（ α -Glucosidase）的生理活性小分子，顯示其作為血糖調節與腸道保健原料之潛力，然而，這些化合物多以細胞壁結合型或配醣體形態存在，生物可利用度有限，若能透過適當的生物轉化技術將結合型多酚水解為游離型，其吸收率、作用機制與應用範圍將大幅提升。

微生物發酵是一種歷史悠久且持續演進的生物加工技術，多種微生物能分泌多樣的分解酵素與代謝物，藉此解構植物細胞壁結構與次級代謝物，釋放被封存的營養與生理活性成分，或將大分子降解為更易被人體吸收的小分子形式，在碳源受限或酸性環境下，多種菌株可啟動多醣降解途徑，分泌聚半乳糖醛酸酶、果膠裂解酶⁽³⁾及 β -葡萄糖苷酶⁽⁴⁾等，破壞果膠網狀結構，並移除多酚類配醣體上的糖基，進而釋放黃酮類的糖苷配基（Aglycone）及游離酚酸，這些轉化後的分子由於疏水性提高，更易穿透細胞膜發揮自由基清除或訊號調控功能⁽⁵⁾，也可以使橙皮苷（Hesperidin）、新橙皮苷（Neohesperidin）、柚皮苷（Narirutin）等由配醣體轉為更具生物活性的疏水性 Aglycone 形式，顯著提升 DPPH、ABTS 及 ORAC 抗氧化能力，其活性表現

可達原型配醣體的兩至三倍，並能透過上調 SOD (Superoxide Dismutase)、CAT (Catalase) 及 GPx (Glutathione Peroxidase) 活性實現抗氧化與降脂功能⁽⁶⁾，而不同菌株間可產生協同發酵效應，如乳酸菌生成的乳酸可顯著降低 pH 值、抑制腐敗菌，為耐酸酵母創造優勢生長環境，而酵母分泌的乙醇與小分子肽類則能誘發乳酸菌表面蛋白質表現，增強黏附能力與益生功能，這些微生物間的交互作用可共同提升發酵原料在營養價值、感官特性與食品安全方面的表現⁽⁷⁾。

微生物發酵在食品應用中具有長遠歷史且展現出多元的功能，其能分解植物性蛋白質，增加游離胺基酸 (Free Amino Acid, FAA) 及低分子肽的含量，例如 *Lactiplantibacillus plantarum* 在發酵豆漿中能顯著提升 FAA 含量至原始值的兩倍以上，改善口感並提升消化性⁽⁸⁾，在益生菌補充劑領域方面，*Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* 長期以來被視為經典菌株，最新的安全性評估表明，特定來源的 *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* 缺乏毒素基因與溶血活性，符合 FAO/WHO 與 EFSA 之安全標準，適合作為機能性發酵乳品的菌種⁽⁹⁾。

檸檬加工過程中產生的大量果皮與果渣，因含水量高、酸度強而長期被視為低值廢棄物，然而這些副產物實際上蘊含豐富的黃酮類、酚酸以及高甲基化果膠，潛藏極高的生物利用與應用潛力，綜觀近年研究發現，無論是單株 *Lactiplantibacillus plantarum* 及 *Lactobacillus paracasei* 發酵，或結合酵母菌的協同發酵模式，皆可顯著提升檸檬皮中總多酚含量達 50-120%，游離黃酮類增加 60-90%，並使可溶性果膠產率提高 80-150%，此過程伴隨 DPPH 自由基清除能力提升 30-80%，ABTS 自由基清除率增加 25-75%，發酵產生的果膠寡糖更可經腸道菌代謝為短鏈脂肪酸，使丁酸產量增加 2-3 倍，進而強化腸黏膜屏障功能⁽¹⁰⁾。另一方面，果膠作為檸檬副產物中的另一重要成分，在食品與健康應用中同樣具有廣泛潛力，柑橘果膠以其優異的膠凝、增稠與乳化特性被廣泛應用於食品工業，同時也被證實具有抗癌、降血糖與促進益生菌增殖等生理功效⁽¹¹⁾。

先前本實驗室與工研院共同合作，開發檸檬加工剩餘物——檸檬皮渣的專屬發酵與菌種青貯技術，成功研製具機能性的檸檬乳酸菌高值化動物飼料。該研究以檸檬皮渣為基質並接種 *Lactobacillus paracasei*，發酵後乳酸含量顯著提升，將此發酵產

物部分替代牛隻飼料後，牛隻健康狀況與乳品質均維持正常，未見不良影響，然而，當時研究僅針對乳酸與 pH 進行檢測，對發酵過程中黃酮、多酚及果膠等機能性成分尚缺乏深入分析，若進一步探討檸檬皮發酵後機能性成分的變化趨勢與生理活性驗證，能為檸檬副產物於食品、飼料及保健應用建立更完整的科學基礎與技術依據。

本研究旨在以台灣優利卡檸檬壓榨副產物為基質，選用食品加工中常見且具應用潛力之五株微生物——*Lactobacillus paracasei*、*Lactiplantibacillus plantarum*、*Leuconostoc mesenteroides*、*Lactobacillus pentosus*、*Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*——進行發酵試驗，以評估不同菌株於檸檬副產物基質中生長的適應性與發酵潛力，研究首先進行接種微生物於檸檬副產物中之生長可行性試驗與發酵條件初篩，確立適合各菌株生長與代謝的基本發酵參數，隨後系統性分析發酵後產物之基本成分（包括水分、粗蛋白、粗脂肪、灰分與粗纖維含量），並進一步探討總黃酮、總酚、果膠產率等機能性成分的含量變化，以評估發酵過程對檸檬副產物營養與機能價值的影響，並透過 DPPH 及 ABTS 自由基清除能力試驗，評估發酵產物之抗氧化活性，綜合呈現不同菌株發酵對檸檬副產物功能性提升的潛在效益。

材料與方法

一、檸檬廢棄物樣品製備與發酵條件

實驗所用檸檬廢棄物為檸檬加工副產物，經 75°C 熱風乾燥處理後粉碎成粉末。樣品與純水依比例 1 g : 20 mL 調製為基質，經 121°C 高壓滅菌 15 分鐘處理後冷卻備用。發酵菌株包括 *Lactobacillus paracasei* (LPc)、*Lactiplantibacillus plantarum* (LP)、*Leuconostoc mesenteroides* (LM)、*Lactobacillus pentosus* (LPt) 與 *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* (LB)，凍藏菌株經 37°C 水浴槽回溫後，依據 BCRC 提供之菌株特性說明⁽¹²⁾，於適宜溫度下活化（參見表一），活化培養基為 MRS 培養基。發酵操作中，每株菌液以 1 倍無菌 PBS 稀釋至 1×10^8 CFU/mL，並以接種體積 4% 加入已滅菌之檸檬廢棄物基質，於適宜溫度下發酵 24 小時。發酵後液體經減壓濃縮（70°C 水浴）以去除部分水

表一 發酵菌株生長特性與條件。

Table 1. Growth Characteristics and Culture Conditions of Fermentation Strains⁽¹²⁾.

細菌	菌株編號	活化條件	類型	培養基質
<i>L. paracaseixttag</i>	BCRC 17484	30 °C 2 天	兼性厭氧	MRS
<i>L. plantarum</i>	BCRC 10357	30 °C 2 天	兼性厭氧	MRS
<i>L. mesenteroides</i>	BCRC 12580	30 °C 2 天	兼性厭氧	MRS
<i>L. pentosus</i>	BCRC 12944	30 °C 1 天	兼性厭氧	MRS
<i>L. bulgaricus</i>	BCRC 10696	37 °C 3 天	兼性厭氧	MRS

分，再以凍乾機冷凍乾燥至恆重，所得粉末樣品磨細後置於-30°C 冷凍保存，以供後續分析。檸檬皮粉原樣品以下稱「檸檬皮原粉」、無菌處理對照組稱「未發酵對照組」。

二、檸檬廢棄物發酵產物成分分析

(一) 水分含量 (Moisture Content)

水分含量測定依據重量差法 (AOAC 925.10)。首先預先將稱量瓶乾燥並冷卻至室溫後秤重 (恆重)，作為空瓶重。取樣品 3.00 ± 0.01 g 置於稱量瓶中，於 105°C 烘箱中乾燥 24 小時，取出冷卻至室溫，精確稱重記錄。水分含量計算公式如下：

$$\text{Moisture Content (\%)} = \frac{W_{\text{before}} - W_{\text{after}}}{W_{\text{sample}}} \times 100\%$$

(二) 灰分含量 (Ash Content)

灰分含量測定根據 AOAC 923.03，取 0.50 ± 0.01 g 樣品放入坩堝中，置入高溫爐中進行灼燒，以 550-600°C 灰化 16 小時，冷卻後秤重。計算灰分含量如下：

$$\text{Ash Content (\%)} = \frac{W_{\text{ash}} - W_{\text{crucible}}}{W_{\text{sample}}} \times 100\%$$

(三) 粗蛋白含量 (Crude Protein Content)

粗蛋白含量測定依據 Kjeldahl 法 (AOAC 2001.11)。稱取 0.5 g 乾樣品置於分解管中，加入 5 g 催化劑 (Kjeltec™ Catalyst Tablets, Foss, Denmark) 與 13 mL 的濃硫酸 (18 N)，於消化爐中先以 200°C 預熱 1 小時以碳化樣品，接續提高至 400°C 加熱約 2 小時。冷卻後加入 70 mL 蒸餾水稀釋，

再加 50 mL 之 40% 氫氧化鈉溶液催化反應，將樣品置於以 Kjeldahl 蒸餾裝置，並由含甲基紅與甲基藍指示劑的 4% 硼酸溶液收集蒸餾產物。最後以 0.1 N 鹽酸溶液滴定至微紅色為終點，紀錄消耗的鹽酸體積。計算公式如下：

$$\text{Crude Protein (\%)} = \frac{V \times N \times F \times 1.4007 \times 6.25}{W_{\text{sample}}}$$

其中，V 為滴定所用鹽酸體積 (mL)，N 為鹽酸濃度 (mol/L)，F 為 0.1N 鹽酸力價，1.4007 為計算氮含量之常數 (mg N/mL HCl)。

(四) 粗脂肪含量 (Crude Fat Content)

粗脂肪含量採用索氏萃取法 (AOAC 920.39)。將 3.00 g 樣品置於定量濾紙內包妥，放入圓筒濾紙中，再放入 Soxhlet 萃取管中，以 150 mL 正己烷 (Honeywell, USA) 萃取 8 小時。回收溶劑後置於烘箱中揮發殘餘溶劑，冷卻後秤重。粗脂肪含量計算如下：

$$\text{Crude Fat (\%)} = \frac{W_{\text{afterextraction}} - W_{\text{crucible}}}{W_{\text{sample}}} \times 100\%$$

(五) 粗纖維含量 (Crude Fiber Content)

粗纖維含量依據 AOAC 962.09 進行。樣品 1.00 ± 0.01 g 於 1.25% H₂SO₄ 沸騰 30 分鐘，離心洗滌後再以 1.25% NaOH 處理，重複洗滌、烘乾 (105 °C, 24 h)，再以灰化爐 550 °C 灰化。粗纖維 (%) 計算公式如下：

$$\text{Crude fiber (\%)} = \frac{W_{\text{dried}} - W_{\text{ash}}}{W_{\text{sample}}} \times 100\%$$

三、功能性成分分析

(一) 總黃酮含量

將樣品 (10 mg/mL in 75% EtOH) 與 400 μ L 2% AlCl_3 溶液混合，於室溫避光反應 30 分鐘後測定 430 nm 吸光度。以槲皮素標準曲線 (0–10 μ g/mL) 計算，結果以 QE mg/100 g dry weight 表示。計算公式：

$$\text{Total flavonoids} = \left(\frac{\text{mg QE}}{100\text{g}} \right) \times \frac{(C_{\text{sample}} - V_{\text{sample}})}{W_{\text{sample}}} \times 100$$

(二) 總酚含量

總酚含量採 Folin–Ciocalteu 法。樣品與 1 N Folin–Ciocalteu 試劑、20% Na_2CO_3 反應後，於 750 nm 測定吸光度。以沒食子酸標準曲線 (0–500 μ g/mL) 換算，結果以 GAE mg/100 g dry weight 表示。

$$\text{Total phenols} = \left(\frac{\text{mg GAE}}{100\text{g}} \right) \times \frac{(C_{\text{sample}} - V_{\text{sample}})}{W_{\text{sample}}} \times 100$$

(三) 果膠產率分析

果膠含量以改良 Carbazole 法進行。樣品與 0.125 M $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶液於冰上操作，於 100°C 加熱 5 分鐘後冷卻，加入 0.15% m-Hydroxydiphenyl 溶液顯色，於 520 nm 測定吸光度。以半乳糖醛酸標準曲線 (0–125 μ g/mL) 換算濃度。計算公式：

$$\text{Pectin content (mg/100g)} = \frac{(C_{\text{sample}} - V_{\text{sample}})}{W_{\text{sample}}} \times 100$$

四、抗氧化活性分析

(一) DPPH 自由基清除能力

使用 0.5 mM DPPH 溶液與樣品不同濃度 (0.625–100 mg/mL) 混合反應 30 分鐘後，測定 517 nm 吸光度。DPPH 清除率 (%) 計算公式：

$$\text{DPPH scavenging rate (\%)} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100\%$$

(二) ABTS⁺清除能力

ABTS⁺溶液由 7 mM ABTS 與 2.45 mM $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 反應 16 小時生成，稀釋至吸光值 0.68–0.72。樣品 (0.5–100 mg/mL) 與 ABTS⁺溶液混合後於 734 nm

測定吸光度，ABTS⁺清除能力計算公式：

$$\text{ABTS}^+ \text{ scavenging rate (\%)} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100\%$$

五、統計分析

所有實驗數據以平均值 $\pm$ 標準差 (Mean $\pm$ SD) 表示。組間差異分析採用單因子變異數分析 (One-Way ANOVA)，後續以 Tukey 多重比較法進行事後檢定，用以比較各處理組間差異的顯著性。統計分析使用 SPSS 軟體 (IBM SPSS Statistics 26.0, USA) 進行，顯著性水準設定為 $p < 0.05$ ，當 p 值小於 0.05 時，表示組間差異達顯著。此外，本研究進一步進行 Pearson 相關性分析，探討抗氧化能力 (DPPH、ABTS) 與總多酚含量 (TPC)、總黃酮含量 (TFC) 以及果膠含量 (GalA) 間的相關性。

結果與討論

一、微生物發酵檸檬廢棄物基本成分分析

成分分析的結果中可以發現，各微生物發酵樣品在基本成分上均呈現顯著差異 (One-way ANOVA, $p < 0.05$)。在水分含量方面，LM 組最高 ($7.65 \pm 0.04\%$)，與 LP 及 LPt 組的最低值 (分別為 $5.33 \pm 0.10\%$ 與 $5.14 \pm 0.20\%$) 相比呈顯著差異 ($p < 0.05$)。灰分含量介於 5.35–5.98% 之間，其中 LB、LPt 與 LPc 組顯著高於其他處理 ($p < 0.05$)。過去研究顯示，於橙皮基質中微生物發酵時分泌的果膠酯酶會水解甲氧基團，暴露出游離羧基團，進一步增強對 K^+ 與 Fe^{3+} 的吸附能力，使發酵產物灰分中的鉀含量從初始 4.1 mg/g 提升至 6.8 mg/g⁽¹³⁾。在粗蛋白方面，LPc 最高 ($7.51 \pm 0.11\%$)，顯著優於檸檬皮原粉 ($6.83 \pm 0.23\%$) ($p < 0.01$)，過去研究發現 LPc 菌株能分泌絲氨酸蛋白酶 (Serine protease，分子量約 45 kDa) 與金屬蛋白酶 (Metalloprotease，分子量約 33 kDa)，這兩種酶協同作用可將檸檬皮中的細胞壁延伸蛋白 (Extensin) 與阿拉伯半乳糖蛋白 (Arabinogalactan protein) 水解為 2–5 kDa 的多肽片段，同步進行的菌體自溶 (Autolysis) 過程會釋放胞內儲存的穀胱甘肽合成酶 (Glutathione synthetase) 與肽聚糖水解酶 (Peptidoglycan hydrolase)，促使菌體蛋白質 (約

佔細胞乾重 52%) 溶解釋放至基質中⁽¹⁴⁾。粗脂肪含量亦呈菌株依賴性變化, LPc 與 LP 分別達 $1.95 \pm 0.25\%$ 及 $1.82 \pm 0.26\%$, 顯著高於其他組 ($p < 0.05$), LPc 與 LP 的脂解活性可能與其膜結合型酯酶相關, 過去研究顯示 LPc 菌株對 C12-C18 脂肪酸酯具有特異性親和力, 能有效水解檸檬皮中的阿魏酸固醇酯, 使游離脂肪酸濃度提升⁽¹⁵⁾。粗纖維則以 LP 最高 ($12.92 \pm 0.26\%$, $p < 0.001$), 較未發酵對照組 ($9.11 \pm 0.47\%$) 增加約 42%, 當水分、灰分、蛋白、脂肪與纖維扣除後, 各處理剩餘計算碳水化合物比例仍約佔 70%, 顯示發酵並未大量消耗基質醣源, 與過去文獻在其他柑橘副產物的固態發酵結果一致, 說明檸檬皮尚可提供足夠碳源進一步開發機能性成分⁽¹⁶⁾。

二、微生物發酵檸檬廢棄物機能性成分分析

(一) 總黃酮含量

本試驗以鋁離子比色法量化各處理組之總黃酮, 單因子變異數分析結果顯示, 處理方式對黃酮累積具有顯著影響 ($p < 0.001$)。其中, LP 組的總黃酮含量最高, 達 $5.94 \pm 0.20 \mu\text{g QE/mL}$, 較未發酵對照組 ($2.52 \pm 0.09 \mu\text{g QE/mL}$) 提升約 136%, 且差異達顯著水準 (Tukey $p < 0.05$)。LPc 組次之, 為 $4.52 \pm 0.14 \mu\text{g QE/mL}$, 亦顯著高於檸檬皮原粉 ($3.25 \pm 0.14 \mu\text{g QE/mL}$) 與其他菌株處理組 ($p < 0.01$)。然而, LM、LPt 與 LB 組的黃酮含量與檸檬皮原粉無顯著差異 ($p > 0.05$), 顯示這些菌株對黃酮釋放的影響較小。

黃酮類化合物在植物中多以配醣體形式存在, 需經由 β -葡萄糖苷酶水解釋放其活性形式。*L. plantarum* 已被證實具有 β -葡萄糖苷酶活性, 能有效水解黃酮配醣體, 釋放出具有抗氧化活性的黃酮醇類⁽¹⁷⁾, 此外, Lu 等人研究指出, *L. plantarum* 發酵檸檬皮可顯著提高總黃酮含量, 並增強其抗氧化能力⁽¹⁸⁾, 這些結果與本研究中 LP 組的表現一致, 顯示其在提升檸檬皮黃酮含量方面具有潛力。

(二) 總酚含量

使用 Folin-Ciocalteu 法測定總酚含量, 結果顯示各處理組間存在顯著差異 ($p < 0.001$)。其中, LPc 組的總酚含量最高, 為 $281.56 \pm 17.72 \mu\text{g GAE/mL}$, 與 LM ($270.85 \pm 15.14 \mu\text{g GAE/mL}$)、LB

($270.74 \pm 13.17 \mu\text{g GAE/mL}$) 及 LPt ($253.63 \pm 9.93 \mu\text{g GAE/mL}$) 組間差異不顯著 ($p > 0.05$), 但皆顯著高於檸檬皮原粉 ($172.91 \pm 10.54 \mu\text{g GAE/mL}$) 與未發酵對照組 ($138.88 \pm 9.40 \mu\text{g GAE/mL}$) ($p < 0.001$)。相較之下, LP 組的總酚含量為 $170.62 \pm 3.27 \mu\text{g GAE/mL}$, 與檸檬皮原粉無顯著差異 ($p = 0.38$), 顯示其對酚類提升效果有限。過去研究發現 *L. plantarum* 發酵橙皮可提高酚酸含量, 進一步增強抗氧化活性⁽¹⁹⁾, 與本研究中 LPc 和 LM 組在提升總酚含量方面的表現有關。總酚含量的增加與抗氧化能力密切相關, De Montijo-Prieto 等人的研究也顯示, 橙皮經 *L. plantarum* 發酵後, DPPH 和 ABTS 自由基清除能力顯著提升, 與總酚含量呈正相關⁽¹⁹⁾, 因此 LPc、LM 和 LB 組在本研究中的高總酚含量可能有助於增強其抗氧化活性, 為開發功能性食品提供依據。

(三) 果膠含量

在本研究中, 以半乳糖醛酸 (α -Galactosidase, AGA) 作為定量指標, 探討微生物發酵對檸檬皮渣果膠含量的影響。單因子變異數分析結果顯示, 各處理組間果膠含量存在顯著差異 ($p < 0.05$)。其中, 未發酵對照組與 LM 組的果膠含量分別為 $200.25 \pm 3.29 \text{ mg AGA/g}$ 和 $199.57 \pm 12.83 \text{ mg AGA/g}$, 兩者間無顯著差異 (Tukey $p = 0.94$), 但皆顯著高於檸檬皮原粉 ($13.84 \pm 0.16 \text{ mg AGA/g}$, $p < 0.001$), LPc 與 LPt 分別為 135.18 ± 11.16 與 $119.51 \pm 2.20 \text{ mg AGA/g}$, 雖較 LM 低, 但仍顯著高於原粉 ($p < 0.01$), LP 與 LB 含量分別為 109.69 ± 6.53 與 $95.73 \pm 3.36 \text{ mg AGA/g}$, 顯著低於 LM ($p < 0.05$)。先前研究指出, *Leuconostoc* 屬菌株能表達果膠裂解酶 (Pectate lyase) 和聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase), 這些酵素在酸性環境下可促進果膠的降解與釋放, 進而增加可溶性果膠的含量⁽²⁰⁾, 與本研究趨勢一致。

三、抗氧化活性

(一) DPPH

各組 IC₅₀ 值介於 1.10–2.82 mg/mL, ANOVA 顯示差異顯著。LPc 組 IC₅₀ 僅 $1.10 \pm 0.02 \text{ mg/mL}$, 較未發酵對照組下降 56% ($p < 0.001$), 展現最強清除力。LPt 次之 ($1.97 \pm 0.01 \text{ mg/mL}$), 較檸檬皮原

表二 檸檬皮與發酵產物之基本成分分析結果。

Table 2. Proximate Composition of Lemon Peel and Its Fermentation Products.

(%)	水分	灰分	粗蛋白	粗脂肪	粗纖維
檸檬皮原粉	5.47 ± 0.06 ^e	5.37 ± 0.06 ^e	6.83 ± 0.23 ^c	1.03 ± 0.06 ^c	10.68 ± 0.47 ^{cd}
未發酵對照組	5.93 ± 0.03 ^b	5.35 ± 0.06 ^c	7.04 ± 0.06 ^{bc}	1.19 ± 0.28 ^{bc}	9.11 ± 0.47 ^e
<i>L. paracasei</i>	5.72 ± 0.03 ^{bc}	5.89 ± 0.07 ^a	7.51 ± 0.11 ^a	1.95 ± 0.25 ^a	11.67 ± 0.20 ^{bc}
<i>L. plantarum</i>	5.33 ± 0.10 ^{def}	5.70 ± 0.09 ^b	7.21 ± 0.10 ^{ab}	1.82 ± 0.26 ^{ab}	12.92 ± 0.26 ^a
<i>L. mesenteroides</i>	7.65 ± 0.04 ^a	5.67 ± 0.04 ^b	7.35 ± 0.16 ^{ab}	1.57 ± 0.38 ^{ac}	9.93 ± 0.63 ^{de}
<i>L. pentosus</i>	5.14 ± 0.20 ^f	5.94 ± 0.07 ^a	7.23 ± 0.09 ^{ab}	0.94 ± 0.18 ^c	12.76 ± 0.47 ^{ab}
<i>L. bulgaricus</i>	5.93 ± 0.03 ^{cd}	5.98 ± 0.02 ^a	7.07 ± 0.12 ^{bc}	1.19 ± 0.13 ^{bc}	12.40 ± 0.48 ^{ab}

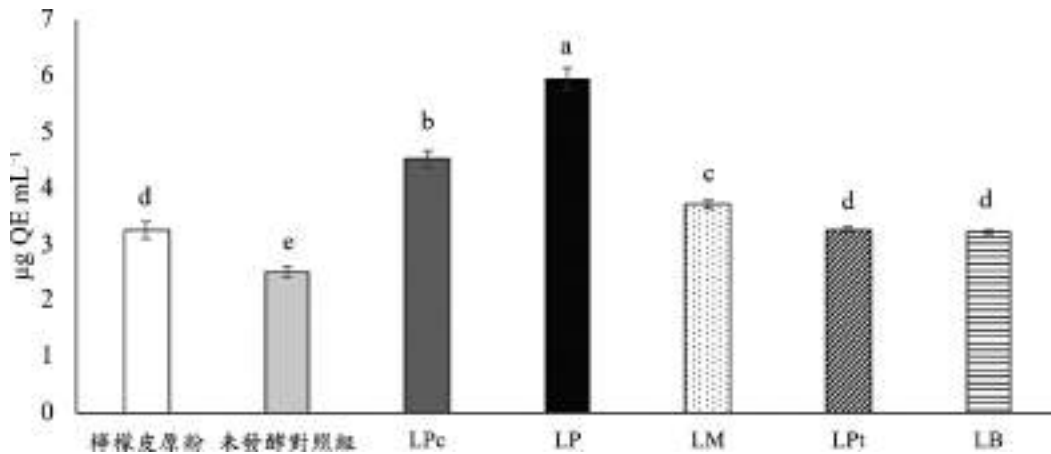
數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析（One-way ANOVA）與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異（ $p < 0.05$ ）。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。

Data are presented as mean ± standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Within each row, different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB).

粉降低 30%（ $p < 0.01$ ）。LM、LP 與 LB 介於 2.28–2.50 mg/mL，與未發酵對照組無顯著差異（ $p > 0.05$ ），但均優於原粉（ $p < 0.05$ ），可能與先前敘述之 *L. paracasei* 可將酚酸活化成較具抗氧化性的游離型相關⁽¹⁷⁾，佐證 LPc 在本研究的優異表現。

（二）ABTS

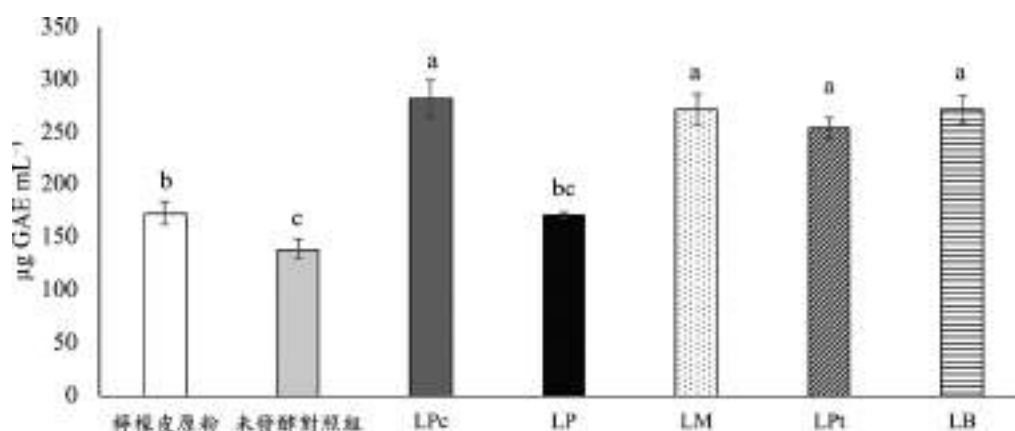
ABTS IC₅₀ 值於 5.79–9.25 mg/mL 間變動，LPc 組再次表現最佳（5.79 ± 0.05 mg/mL），與其他所有組均達顯著差異（ $p < 0.01$ ），未發酵對照組、LP、LM 及 LPt 組之 IC₅₀ 在 7.24–7.94 mg/mL 間，



圖一 檸檬皮與發酵產物之總黃酮含量分析結果。數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析（One-way ANOVA）與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異（ $p < 0.05$ ）。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。總黃酮以槲皮素當量（quercetin equivalent, QE）表示，單位為 µg QE/mL。

Figure 1. Total Flavonoid Content in Lemon Peel and Its Fermentation Products.

Data are presented as mean ± standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB). Total flavonoid content is expressed as quercetin equivalents (QE), in units of µg QE/mL.



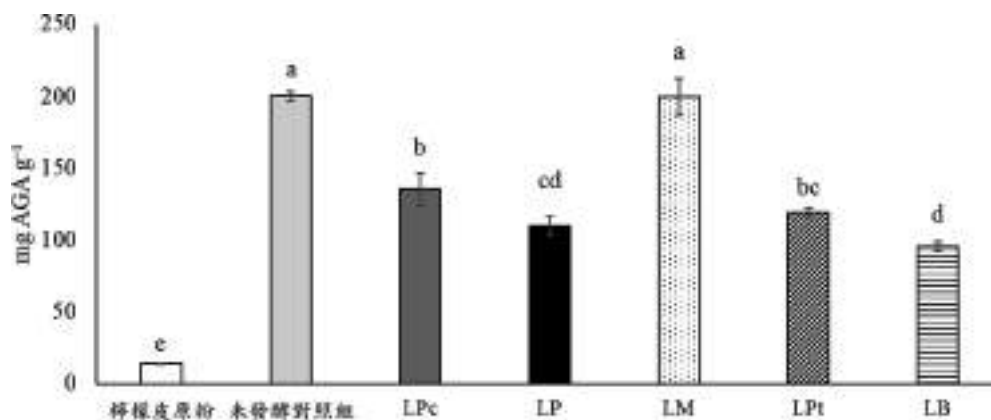
圖二 檸檬皮與發酵產物之總酚含量分析結果。數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析（One-way ANOVA）與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異（ $p < 0.05$ ）。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。總酚以沒食子酸當量 (gallic acid equivalent, GAE) 表示，單位為 µg GAE/mL。

Figure 2. Total Phenolic Content in Lemon Peel and Its Fermentation Products.

Data are presented as mean ± standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB). Total phenolic content is expressed as gallic acid equivalents (GAE), in units of µg GAE/mL.

未呈顯著差異（ $p > 0.05$ ），而 LB 與原粉則分別為 8.81 及 9.25 mg/mL，顯示抗氧化能力較弱，ABTS 結果與 DPPH 呈同向變化。Yang 等人指出 *L. paracasei* 與其他菌株相比可表現出更高的總抗氧化能力

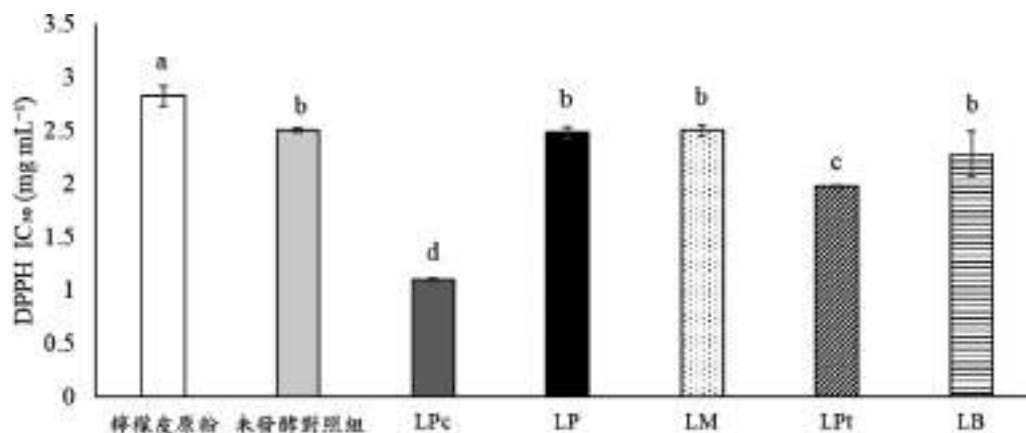
活性，並且對酸和膽鹽具有耐受性⁽²¹⁾，而 Be-hbahani 等人的研究中發現 *L. paracasei* 表現出顯著的 DPPH-RS、ABTS-RS 和抗脂質過氧化活性，分別為 50.80%、56.60% 和 20.50%⁽²²⁾ 支持本研究 LPc



圖三 檸檬皮與發酵產物之果膠含量分析結果。數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析（One-way ANOVA）與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異（ $p < 0.05$ ）。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。果膠含量以半乳糖醛酸當量 (mg AGA/g) 表示。

Figure 3. Pectin Content in Lemon Peel and Its Fermentation Products.

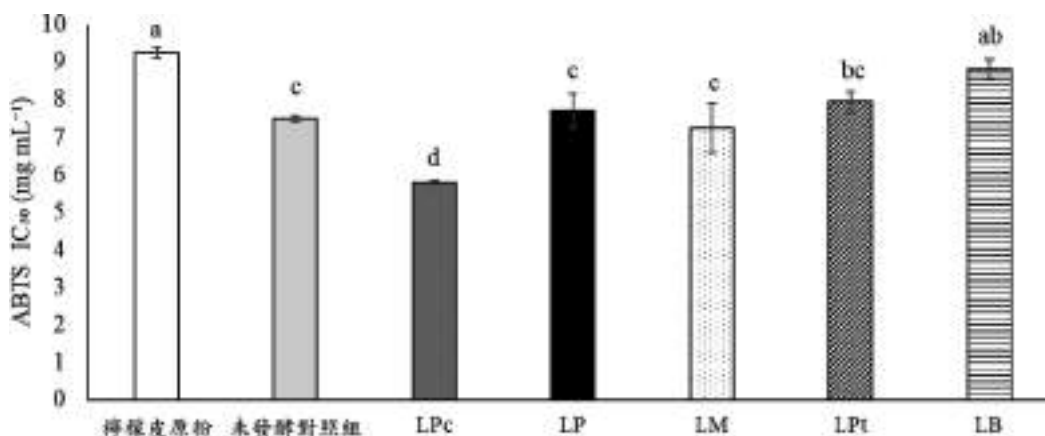
Data are presented as mean ± standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB). Pectin content is expressed as arabinogalacturonic acid (AGA) equivalents, in units of mg AGA/g.



圖四 檸檬皮與發酵產物之DPPH自由基清除能力 (IC₅₀) 分析結果。數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析 (One-way ANOVA) 與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異 ($p < 0.05$)。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。IC₅₀ 值代表清除 50% DPPH 自由基所需樣品濃度，單位為 mg/mL。

Figure 4. DPPH Radical Scavenging Activity (IC₅₀) of Lemon Peel and Its Fermentation Products.

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB). The IC₅₀ value represents the sample concentration required to scavenge 50% of DPPH radicals, expressed in mg/mL.



圖五 檸檬皮與發酵產物之ABTS自由基清除能力 (IC₅₀) 分析結果。數據以平均值±標準差表示，經單因子變異數分析 (One-way ANOVA) 與 Tukey 事後比較進行統計分析。不同小寫字母表示組間在同一成分含量上有顯著差異 ($p < 0.05$)。各處理組包括檸檬皮原粉、未發酵對照組以及接種不同微生物菌株發酵之處理組：*L. paracasei* (LPc)、*L. plantarum* (LP)、*L. mesenteroides* (LM)、*L. pentosus* (LPt) 與 *L. bulgaricus* (LB)。IC₅₀ 值代表清除 50% ABTS 自由基所需樣品濃度，單位為 mg/mL。

Figure 5. ABTS Radical Scavenging Activity (IC₅₀) of Lemon Peel and Its Fermentation Products

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation. Statistical analysis was performed by one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Different lowercase letters indicate significant differences among groups at $p < 0.05$. Treatment groups include: unfermented lemon peel powder (raw material), unfermented control, and lemon peel fermented with *L. paracasei* (LPc), *L. plantarum* (LP), *L. mesenteroides* (LM), *L. pentosus* (LPt), and *L. bulgaricus* (LB). The IC₅₀ value represents the sample concentration required to scavenge 50% of ABTS radicals, expressed in mg/mL.

之優勢。

四、關聯性分析

皮爾森相關係數 (Pearson correlation coefficient) 是衡量兩個連續變數線性關聯強度與方向的無量綱統計量，數值範圍為 -1 至 $+1$ ，正值表示同向、負值表示反向，絕對值愈大代表線性關係愈顯著。為使 r 值的實際意義易於詮釋，本研究採 Schober 等人所建議之分級： $|r| < 0.10$ 為「可忽略」； $0.10-0.29$ 為「低度」； $0.30-0.49$ 為「中度」； $0.50-0.69$ 為「實質」； ≥ 0.70 則屬「高度」相關，搭配 p 值可同時檢視相關趨勢與統計顯著性⁽²³⁾。

在所有十五組配對中僅 DPPH 與 ABTS 之 $r = 0.76$ ($p = 0.048$) 達顯著門檻，屬高度正相關，說明兩自由基模型衡量樣品抗氧化潛力時具有良好一致性，DPPH 與 GalA 呈 $r = -0.64$ ($p > 0.05$) 之實質負相關趨勢，ABTS 與 TPC 的 $r = -0.62$ ($p > 0.05$)

亦屬實質負向趨勢。雖未達顯著，惟仍提示當發酵條件促進可溶性果膠或高分子酚酸累積時，可能伴隨低分子抗氧化物的消耗或被菌體同化，從而使自由基清除 IC_{50} 升高。就酚類與黃酮而言，DPPH 分別對 TPC 及 TFC 呈中度負相關 ($r = -0.33$ 與 -0.35)；ABTS 與 TPC 則為實質負向趨勢，上述結果支持多酚與黃酮在一定範圍內有助降低 IC_{50} ，但並非單一決定因子。GalA 與 TPC 僅呈低度正相關 ($r = 0.11$)，與 TFC 更趨於可忽略 ($r = -0.11$)，顯示果膠釋放與多酚、黃酮釋出並非同步過程。TFC 與其他抗氧化指標僅呈低至中度負相關，亦說明僅提升黃酮並不足以最大化自由基清除能力，這與前述 LP 組雖總黃酮最高但 DPPH IC_{50} 並非最低的實測結果相符。Wang 等人以模型兒茶素進行自氧化聚合，發現樣品分子量增加後，DPPH 與 ABTS 清除率顯著下降⁽²⁴⁾，多酚氧化聚合副產物在稀釋測試條件下可能形成複合大分子，降低其在 DPPH/ABTS 反應系統中的實際還原能力，而寡糖與酚酸



圖六 檸檬皮與發酵產物功能性指標之 Pearson 相關熱圖。色階代表相關係數 r (紅：正相關，綠：負相關)，數值為 r 值；對角線左上至右下為自我相關 ($r=1$)。DPPH、ABTS：自由基清除能力 (IC_{50})；GalA：果膠含量 (mg AGA/g)；TPC：總酚含量 ($\mu\text{g GAE/mL}$)；TFC：總黃酮含量 ($\mu\text{g QE/mL}$)。

Figure 6. Pearson Correlation Heatmap of Functional Indicators in Lemon Peel and Its Fermentation Products. Correlation coefficients (r values) are color-coded (red indicates positive correlation; green indicates negative correlation). The diagonal from top-left to bottom-right represents self-correlation ($r = 1$). Abbreviations: DPPH and ABTS represent radical scavenging activities (IC_{50} values); GalA represents pectin content (mg AGA/g); TPC represents total phenolic content ($\mu\text{g GAE/mL}$); TFC represents total flavonoid content ($\mu\text{g QE/mL}$).

也可能被菌株發酵利用導致降解，Zhang 等人研究發現柑橘果膠寡糖能被 *L. paracasei*、*L. plantarum* 有效利用並促進生長，在發酵後期可能將果膠寡糖作為碳源⁽²⁵⁾，而 Fritsch 等人探討多株乳酸菌 (*L. plantarum*) 在向日葵基質中分解氯原酸與其他酚酸的能力，發現乳酸菌可於發酵後期分解並利用酚酸⁽²⁶⁾，可能與本實驗結果中微生物於發酵尾期對果膠寡糖及酚酸之再利用而稀釋抗氧化效果，導致部分 *r* 值呈負向趨勢有關，相較於化學定量指標 (TPC、TFC、GalA)，自由基清除 IC₅₀ 受化合物分子量及共存基質影響較大，因此即便 *r* 未達顯著，仍可作為預判不同功能性組分動態變化之參考。

綜合相關係數分布代表在目前 24 h 發酵條件下，提升單一功能性成分往往伴隨其他指標的相對下降，若欲同時最大化抗氧化能力與保留高果膠含量，後續可嘗試階段式接種、延長發酵時程或添加選擇性碳源以調節菌群代謝方向，建立各指標隨發酵時間之相關性曲線，以找出兼顧多酚釋放與果膠保留的最佳平衡點。

五、研究優勢與劣勢

本研究在實驗設計上系統性比較五株益生菌對檸檬廢棄物經 24 小時發酵後功能性成分之影響，包括總黃酮、總酚、果膠含量及 DPPH 與 ABTS 自由基清除能力等關鍵生理活性指標，可發現不同菌株在特定功能領域展現出差異化優勢與潛在互補性，如 *L. paracasei* 在促進總酚含量累積與提升抗氧化能力方面效果最為顯著，*L. mesenteroides* 則有效促進可溶性果膠的釋出，研究結果可作為後續依產品開發目標選擇單株或組合發酵策略的依據。在本研究中所有益生菌株於接種階段均經校正至相同濃度 (10^8 CFU/mL)，以確保發酵初始條件一致，並避免菌數差異對發酵結果產生干擾，後續樣品處理採用含菌整體發酵液直接凍乾並進行成分與活性分析，此方法符合多篇前人研究所採評估方式。例如，Hashemi 等人以 *L. plantarum* 發酵甜檸檬汁時，將菌數固定於 10^8 CFU/mL，發酵後分析其抗氧化與抗菌活性⁽²⁷⁾；Pan 等人處理檸檬皮亦採相同菌數條件並以整體發酵產物進行抗氧化與抗發炎評估⁽²⁸⁾；Xu 等人研究中指出在乳酸菌發酵柑橘汁過程中，微生物與基質間的動態交互作用對酚類與黃酮類轉化效率具有顯著影響，且樣品功能性與菌體代謝活性具高度相關性，即便在觀測菌落數變化的前提下，

最終仍以整體發酵液作為功能分析單位⁽²⁹⁾。本研究之樣品製備與功能評估方式即係參考上述研究，發酵條件比對自 Pan 等人並延伸至凍乾後樣品進行系統性成分分析，除確保菌株間評估基準一致外，亦可有效呈現不同菌株於發酵過程中促進檸檬廢棄物中有效成分釋放與轉化之潛力，整體設計與目前柑橘廢棄物於功能性食品應用之研究趨勢相符⁽³⁰⁾。

然而本研究亦存在潛在限制，儘管本研究已在接種階段統一菌數，實際發酵過程中各菌株的生長速率、代謝活性與最終存活量可能仍存在差異，進而造成凍乾樣品中菌體量與胞外代謝物比例的變化，可能干擾功能性成分的濃度與活性表現之比較準確性，不同菌株於發酵後所形成的微生物群落數量與其產生之酵素與代謝產物對基質分解與功能性轉化的貢獻並非完全相同，亦可能影響最終觀測到的黃酮、多酚與果膠釋放結果。此外，本研究僅設單一發酵時程 (24 小時)，缺乏多時點動態數據，使得無法進一步釐清不同菌株在不同發酵階段對基質利用與機能性成分轉化的完整時間曲線，後續若能針對發酵後期 (不同時間下) 菌數變化、成分釋出與生理活性之相關性進行分析，將更有助於提升菌株篩選準確性並建構副產物轉化功效性之評估平台。

結 論

本研究探討不同發酵菌株對檸檬皮渣提升機能性成分與抗氧化能力之潛在效益，並證實 24 小時益生菌發酵可顯著提升檸檬加工廢棄物之機能性價值，*L. plantarum* 有效增加總黃酮含量、*L. paracasei* 兼具總酚累積與自由基清除力提升，而 *L. mesenteroides* 在可溶性果膠釋放方面表現最佳，皮爾遜相關性顯示 DPPH 與 ABTS 評測高度一致，且抗氧化增幅與多酚、果膠含量之變化呈現可預測趨勢，不同菌株展現功能互補，可依終端應用需求選擇單株或共發酵策略，以生產富含多酚、黃酮與果膠之檸檬副產物原料，進一步推動柑橘加工循環經濟與高值化利用。

致 謝

不適用。

資 金

資金資訊不適用。

作者的貢獻

Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Visualization, Project administration. : 張佳心[†]
(第一作者)

Methodology, Formal analysis, Data curation, Supervision. : 楊巧敏[†] (共同第一作者)

Validation, Formal analysis. : 呂亭萱

Validation, Formal analysis. : 陳蕙如

Validation, Formal analysis. : 許雅晴

Supervision. : 范植軒

Supervision. : 蔡書憲

Resources, Writing – review and editing, Supervision. : 林蟬怡* (共同通訊作者)

Conceptualization, Resources, Writing – review and editing, Supervision, Project administration. : 李明怡*
(通訊作者)

利益衝突

本文作者皆無利益衝突。

參考文獻

- Saini, R. K., Ranjit, A., Sharma, K., Prasad, P., Shang, X., Gowda, K. G. M., & Keum, Y. S. (2022). Bioactive Compounds of Citrus Fruits: A Review of Composition and Health Benefits of Carotenoids, Flavonoids, Limonoids, and Terpenes. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11 (2), 239. <https://doi.org/10.3390/antiox11020239>
- Benedetto, N., Carlucci, V., Faraone, I., Lela, L., Ponticelli, M., Russo, D., Mangieri, C., Tzvetkov, N. T., & Milella, L. (2023). An Insight into *Citrus medica* Linn.: A Systematic Review on Phytochemical Profile and Biological Activities. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12 (12), 2267. <https://doi.org/10.3390/plants12122267>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J., Wang, Y., & Geng, W. (2021). Metabolism Characteristics of Lactic Acid Bacteria and the Expanding Applications in Food Industry. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 9, 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Paventi, G., Di Martino, C., Coppola, F., & Iorizzo, M. (2025). β -Glucosidase Activity of *Lactiplantibacillus plantarum*: A Key Player in Food Fermentation and Human Health. *Foods (Basel, Switzerland)*, 14 (9), 1451. <https://doi.org/10.3390/foods14091451>
- Zhang, H., Hassan, Y. I., Liu, R., Mats, L., Yang, C., Liu, C., & Tsao, R. (2020). Molecular Mechanisms Underlying the Absorption of Aglycone and Glycosidic Flavonoids in a Caco-2 BB₁ Cell Model. *ACS omega*, 5 (19), 10782–10793. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00379>
- Lee, E., Lee, B. J., Ha, J., Shin, H. J., & Chung, J. O. (2016). Efficacy of fermented green tea on peripheral skin temperature: a randomized and placebo-controlled clinical study. *Journal of cosmetic dermatology*, 15 (3), 226–230. <https://doi.org/10.1111/jocd.12205>
- Chen, S., Wang, X., Cheng, Y., Gao, H., & Chen, X. (2023). A Review of Classification, Biosynthesis, Biological Activities and Potential Applications of Flavonoids. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28 (13), 4982. <https://doi.org/10.3390/molecules28134982>
- Huo, C., Yang, X., & Li, L. (2023). Non-beany flavor soymilk fermented by lactic acid bacteria: Characterization, stability, antioxidant capacity and *in vitro* digestion. *Food chemistry: X*, 17, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100578>
- Lee, M., Bang, W. Y., Lee, H. B., Yang, S. Y., Lee, K. S., Kang, H. J., Hong, S. M., & Yang, J. (2024). Safety Assessment and Evaluation of Probiotic Potential of *Lactobacillus bulgaricus* IDCC 3601 for Human Use. *Micro-organisms*, 12 (10), 2063. <https://doi.org/10.3390/micro-organisms12102063>
- Ogo Ogo, N. H., Amokaha, R., Jeremiah, O., & Inalegwu, B. (2024). Characterization and antioxidant activity of peel extracts from three varieties of *Citrus sinensis*. *Heliyon*, 10 (7), Article e28456. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28456>
- Kumar, S., Konwar, J., Purkayastha, M. D., Kalita, S., Mukherjee, A., & Dutta, J. (2023). Current progress in valorization of food processing waste and by-products for pectin extraction. *International journal of biological macromolecules*, 239, 124332. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124332>
- Bioresource Collection and Research Center. (n.d.). *BCRC online catalog*. Food Industry Research and Development Institute. <https://www.bcrc.firdi.org.tw>
- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., & Domínguez, J. M. (2008). Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (7), 2380–2387. <https://doi.org/10.1021/jf073388r>
- Toe, C. J., Foo, H. L., Loh, T. C., Mohamad, R., Abdul Rahim, R., & Idrus, Z. (2019). Extracellular proteolytic activity and amino acid production by lactic acid bacteria isolated from Malaysian foods. *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (7), Article 1777. <https://doi.org/10.3390/ijms20071777>

- org/10.3390/ijms20071777
15. Esteban-Torres, M., Landete, J. M., Reverón, I., Santamaría, L., de las Rivas, B., & Muñoz, R. (2015). A *Lactobacillus plantarum* esterase active on a broad range of phenolic esters. *Applied and Environmental Microbiology*, 81 (9), 3235–3242. <https://doi.org/10.1128/AEM.00323-15>
 16. Wang, C., Wang, Y., Shan, W., Han, Y., & Li, X. (2024). Solid-state fermentation with lactic acid bacteria of citric acid degrading for hawthorn fruit improvement: Sensory, flavor, antioxidant properties. *Food Bioscience*, 62, Article 105402. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105402>
 17. Landete, J. M., Curiel, J. A., Rodríguez, H., de las Rivas, B., & Muñoz, R. (2014). Aryl glycosidases from *Lactobacillus plantarum* increase antioxidant activity of phenolic compounds. *Journal of Functional Foods*, 7, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.01.028>
 18. Lu, C. M., Hsu, T. Y., Lin, S. T., Jiang, Z. Y., Huang, W. Z., Wang, J. P., Yang, C. Y., & Huang, H. S. (2024). Effects of fermented lemon peel by *Lactobacillus plantarum* PM-A87 protects skeletal muscle cell. *Journal of Food and Nutrition Research*, 12 (3), 125–130. <https://doi.org/10.12691/jfnr-12-3-3>
 19. De Montijo-Prieto, S., Razola-Díaz, M. D. C., Barbieri, F., Tabanelli, G., Gardini, F., Jiménez-Valera, M., Ruiz-Bravo, A., Verardo, V., & Gómez-Caravaca, A. M. (2023). Fermentation of orange peels by lactic acid bacteria: Impact on phenolic composition and antioxidant activity. *Foods*, 13 (8), Article 1212. <https://doi.org/10.3390/foods13081212>
 20. Razola-Díaz, M. D. C., De Montijo-Prieto, S., Guerra-Hernández, E. J., Jiménez-Valera, M., Ruiz-Bravo, A., Gómez-Caravaca, A. M., & Verardo, V. (2024). Fermentation of orange peels by lactic acid bacteria: Impact on phenolic composition and antioxidant activity. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13 (8), Article 1212. <https://doi.org/10.3390/foods13081212>
 21. Yang, J., Huang, J., Huang, Z., Xu, Y., Li, W., Zhu, S., Zhao, Y., Ye, B., Liu, L., Zhu, J., Xia, M., & Liu, Y. (2023). Reply-letter to the editor: Cardiometabolic benefits of *Lactocaseibacillus paracasei* 8700:2: A randomized double-blind placebo-controlled trial. *Clinical Nutrition*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2023.11.016>
 22. Behbahani, B. A., Jooyandeh, H., Taki, M., & Falah, F. (2024). Evaluation of the probiotic, anti-bacterial, anti-biofilm, and safety properties of *Lactocaseibacillus paracasei* B31-2. *LWT – Food Science and Technology*, 207, Article 116676. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116676>
 23. Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126 (5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
 24. Wang, W., Le, T., Wang, W., Yin, J.-F., & Jiang, H.-Y. (2023). The effects of structure and oxidative polymerization on antioxidant activities of catechins and their polymers. *Foods*, 12 (23), Article 4207. <https://doi.org/10.3390/foods12234207>
 25. Fritsch, C., Vogel, R. F., & Toelstede, S. (2016). Phenolic acid degradation potential and growth behavior of lactic acid bacteria in sunflower substrates. *Food Microbiology*, 57, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.03.003>
 26. Zhang, S., Hu, H., Wang, L., Liu, F., & Pan, S. (2018). Preparation and prebiotic potential of pectin oligosaccharides obtained from citrus peel pectin. *Food Chemistry*, 244, 232–237. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.026>
 27. Hashemi, S. M. B., Mousavi Khaneghah, A., Barba, F. J., Nemati, Z., Sohrabi Shokofti, S., & Alizadeh, F. (2017). Fermented sweet lemon juice (*Citrus limetta*) using *Lactobacillus plantarum* LS5: Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities. *Journal of Functional Foods*, 38, 409–414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.040>
 28. PAN, Y., Lee, Y., Chung, J. H., Kwack, K., Zhao, X., & Park, K.-Y. (2023). The anti-oxidative capacity of fermented lemon peel and its inhibitory effects on Lipopolysaccharide (LPS) -induced RAW 264.7 cell inflammatory response and cell apoptosis. *Food Science and Technology*, 43, e101922.
 29. Xu, H., Feng, L., Deng, Y., Chen, L., Li, Y., Lin, L., Liang, M., Jia, X., Wang, F., Zhang, X., & Sun, Z. (2023). Change of phytochemicals and bioactive substances in *Lactobacillus* fermented Citrus juice during the fermentation process. *LWT*, 180, 114715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114715>
 30. Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Ficca, A. G., & Ruzzi, M. (2019). Health-promoting components in fermented foods: An up-to-date systematic review. *Nutrients*, 11 (5), 1189.

檸檬廢棄物經微生物發酵機能性成分變化及抗氧化特性研究

張佳心^{1†} 楊巧敏^{1†} 呂亭萱¹ 陳蕙如¹ 許雅晴¹ 范植軒² 蔡書憲²
林淨怡^{1,3,4*} 李明怡^{1,4,5*}

¹長庚科技大學民生學院保健營養系

²財團法人工業技術研究院

³長庚科技大學民生學院食品暨化妝品安全研究中心

⁴長庚科技大學民生學院健康產業科技研究所

⁵長庚科技大學民生學院藥物研發中心

(收稿日期: June 2, 2025. 接受日期: August 14, 2025.)

摘要 檸檬產業每年產生大量果皮渣，富含黃酮、酚酸與果膠，但因不溶結構難以利用。本研究以 *Lactobacillus paracasei* (LPc)、*Lactiplantibacillus plantarum* (LP)、*Leuconostoc mesenteroides* (LM)、*Lactobacillus pentosus* (LPt) 與 *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus* (LB) 於 37 °C 發酵檸檬皮渣 24 h，評估機能性成分與抗氧化活性之變化。結果顯示，LP 組總黃酮含量達 5.94 ± 0.20 g QE/mL，較未發酵對照組提升 136%，LPc 組總酚含量最高，為 281.56 ± 17.72 μ g GAE/mL，較原粉增加 63%，而果膠以 LM 組最優，半乳糖醛酸含量 199.57 ± 12.83 mg AGA/g，為原粉之 14 倍。抗氧化評估方面，LPc 組 DPPH 及 ABTS 之 IC₅₀ 分別降至 1.10 ± 0.02 與 5.79 ± 0.05 mg/mL，相較原粉 (2.82 與 9.25 mg/mL) 顯著提高清除力。最後皮爾森相關係數顯示 DPPH 與 ABTS 具高度正相關 ($r = 0.76$, $p = 0.048$)。本研究探討了微生物發酵顯著增強檸檬副產物機能性之前瞻性，其中 LPc 兼具多酚提升與抗氧化增幅，LM 則有效釋放可溶性果膠，具發展高值化食品或飼料添加物之潛力。

關鍵詞：檸檬皮渣、發酵、總黃酮、總酚、果膠、抗氧化

* 通訊作者：李明怡、林淨怡

通訊地址：333324，桃園市龜山區文化一路 261 號

電話：+886-3-2118999#5473

電子郵件：mylee@mail.cgust.edu.tw.

cilin@mail.cgust.edu.tw