

開發具改善代謝症候群與調節腸道菌相之黑豆與糙薏仁共同

發酵產品

潘敏雄^{(1)*}

摘要

隨著飲食西化與生活型態改變，台灣成人過重與肥胖盛行率逐年上升，進而導致代謝症候群相關疾病（如高血脂、第二型糖尿病與非酒精性脂肪肝）日益普遍，已成為重要公共健康議題。本研究以台灣本土黑豆與糙薏仁為原料，利用納豆菌 (*Bacillus subtilis natto*) 進行共同發酵，開發具改善代謝異常之機能性食品。黑豆富含蛋白質、膳食纖維與多酚類化合物，具有抗氧化與調節脂質代謝之功能；糙薏仁則含多酚與多醣，具抗發炎與腸道菌相調節潛力。透過發酵技術，可提升營養素之生物利用率，並產生納豆激酶及 γ -PGA 等活性物質，進一步強化其保健效益。

本研究採用高脂高果糖飲食誘導之 C57BL/6 小鼠作為代謝症候群模型，評估發酵產品之生理功效。結果顯示，補充發酵黑豆糙薏仁可顯著抑制體重增加、降低內臟脂肪堆積及脂肪細胞肥大，並改善肝臟脂質累積與脂肪肝病理變化。此外，該產品能提升葡萄糖耐受性、降低血脂與胰島素阻抗，並抑制發炎反應。機制分析顯示，其主要透過調控 AMPK-SIRT1 訊號路徑，促進脂肪酸氧化並抑制脂質生成。同時，發酵產物可調整腸道菌相組成並增加短鏈脂肪酸生成，進一步改善代謝健康。綜合而言，本研究顯示共同發酵技術可有效提升台灣本土穀物之機能價值，具發展為代謝症候群預防與改善之保健食品潛力。

關鍵詞：黑豆、糙薏仁、發酵、代謝症候群、腸道菌相

(1) 國立臺灣大學食品科技研究所 特聘教授

*通訊作者 (mhpan@ntu.edu.tw)

前言

近年來，隨著飲食西化、高熱量攝取增加及生活型態趨於久坐，肥胖與代謝症候群之盛行率持續攀升，已成為全球重要公共健康議題。根據相關流行病學研究指出，代謝症候群主要包含腹部肥胖、高血糖、高血脂及高血壓等症狀，並與第二型糖尿病、心血管疾病及非酒精性脂肪肝等慢性疾病密切相關。台灣成人過重與肥胖比例已接近六成，顯示代謝異常問題日益嚴重，不僅影響國人健康，亦增加整體醫療負擔。因此，透過飲食調控與機能性食品介入以預防或改善代謝症候群，已成為食品科學與營養領域的重要研究方向。

黑豆與糙薏仁為台灣常見且具潛力之本土雜糧作物。黑豆富含優質蛋白質、膳食纖維及多種植化素，如異黃酮、花青素及多酚類化合物，具有抗氧化、抗發炎、調節血脂及抑制脂肪堆積等生理活性；糙薏仁則因保留麩皮結構，富含多酚、類黃酮及多醣等成分，具改善腸道菌相、降低血脂及抗氧化等功效。然而，傳統穀物因其細胞壁結構複雜，且含有部分抗營養因子，使其活性成分在人體中的釋放與吸收效率有限，進而限制其機能性發揮。

發酵技術被認為是提升穀物營養價值與生物利用率的有效方法之一。透過微生物代謝作用，可分解大分子物質並釋放結合型植化素，同時將其轉換為較易吸收的小分子形式。此外，發酵過程中亦可產生多種具有生理活性的代謝產物，如納豆激酶及聚麩胺酸 (γ -PGA)，進一步增強其健康促進效果。其中，納豆菌 (*Bacillus subtilis natto*) 具有良好的安全性與多重生理功能，不僅可促進植化素轉化，亦具調節腸道菌相與抑制病原菌之能力，在機能性食品開發上具有高度應用潛力。

基於上述背景，本研究以納豆菌進行黑豆與糙薏仁之共同發酵，期望透過原料組合與發酵技術之加乘效果，開發具多重代謝調節功能之產品。並進一步利用高脂高果糖飲食誘導之動物模式，評估其對肥胖、脂質代謝異常、胰島素阻抗及腸道菌相之影響，探討其可能作用機制。期望本研究結果可作為台灣本土雜糧加值應用之科學依據，並促進機能性食品產業之發展。

材料與方法

本研究選用台灣產黑豆 (台南三號) 及去殼糙薏仁 (台中選四號) 為原料，並以納豆菌 (*Bacillus subtilis natto*) 進行共同發酵製備樣品。原料經清洗、浸泡與蒸煮後進行高溫滅菌處理，冷卻至適當溫度後接種納豆菌 (約 10^6 CFU/g)，於控制條件下進行發酵培養，發酵完成後所得產品為發酵黑豆糙薏仁 (FBA)，未經發酵者作為對照組 (UFBA)。動物試驗部分，選用 4 週齡雄性 C57BL/6J 小鼠共 32 隻，於恆溫恆濕及 12 小時明暗循環環境中飼養，經一週適應後隨機分為四組，包括正常飲食組 (ND)、高脂高果糖飲食組 (HFFD)、未發酵樣品組 (UFBA) 及

發酵樣品組 (FBA)，其中 UFBA 與 FBA 組於高脂高果糖飲食中分別添加 6% 對應樣品，試驗期間為 15 週，並提供自由攝食與飲水，高脂飲食脂質熱量占約 45%，並搭配 20% 果糖飲水以誘導代謝症候群。試驗期間定期測量體重變化，實驗結束後以二氧化碳犧牲動物並收集血液及肝臟、腎臟、脾臟與脂肪組織進行分析，血清經離心分離後用於後續生化檢測。此外，收集盲腸內容物進行腸道菌相分析，萃取總 DNA 並針對 16S rRNA 基因 V3-V4 區域進行定序，以評估菌相組成與多樣性，同時利用氣相層析質譜儀分析短鏈脂肪酸 (包括乙酸、丙酸及丁酸) 含量，以探討腸道代謝功能之變化。所有實驗數據以平均值及標準誤表示，並以單因子變異數分析 (one-way ANOVA) 進行統計檢定，搭配事後多重比較分析，並以 $p < 0.05$ 作為顯著差異之判定標準。

結果與討論

本研究結果顯示，高脂高果糖飲食可成功誘導小鼠產生明顯之代謝異常，包括體重顯著增加、內臟脂肪堆積及肝臟脂質累積等現象，而補充發酵黑豆糙薏仁 (FBA) 則可有效改善上述變化。與高脂高果糖組相比，FBA 組小鼠之體重增加幅度顯著降低，且腹腔脂肪重量與脂肪細胞體積均明顯減少，顯示其具抑制脂肪堆積與肥胖形成之能力。在肝臟方面，FBA 處理可降低肝臟重量與脂質含量，並改善脂肪肝相關之組織病理變化，顯示其對脂質代謝異常具有保護效果。代謝功能分析結果進一步指出，FBA 可顯著改善葡萄糖耐受性並降低胰島素阻抗，同時降低血清中三酸甘油酯與總膽固醇濃度，顯示其在調節血糖與血脂方面具有正向作用。此外，發炎相關指標亦顯示，FBA 可抑制發炎細胞激素之表現，並改善與肥胖相關之慢性低度發炎狀態。機制探討結果顯示，FBA 之作用可能與活化 AMPK-SIRT1 訊號傳導路徑有關，該路徑可促進脂肪酸氧化並抑制脂質生成，進而調控能量代謝平衡。另一方面，腸道菌相分析顯示，FBA 可調整腸道微生物組成，增加有益菌比例，並促進短鏈脂肪酸 (特別是丙酸) 之生成，顯示其可能透過腸道微生物代謝途徑進一步影響宿主之能量利用與發炎反應。綜合上述結果，發酵黑豆糙薏仁不僅可從脂質代謝與葡萄糖代謝層面改善代謝症候群，亦可透過調節腸道菌相與抑制發炎反應發揮多重保護效果，其功能性顯著優於未發酵樣品，顯示發酵處理在提升穀物機能性上具有關鍵角色。

結論與建議

本研究證實，以納豆菌進行黑豆與糙薏仁之共同發酵，可顯著提升其機能性，並對高脂高果糖飲食所誘導之代謝症候群具有改善效果。發酵黑豆糙薏仁能有效抑制體重增加與脂肪堆積，改善肝臟脂質累積與脂肪肝情形，並在代謝調控方面展現降低血脂、改善葡萄糖耐受性與減少胰島素阻抗之作用。此外，其亦具

抑制慢性發炎及調節腸道菌相之能力，顯示其可透過多重機制協同作用，包括活化 AMPK-SIRT1 訊號路徑、促進脂肪酸氧化及增加短鏈脂肪酸生成，進一步改善整體代謝狀態。相較於未發酵樣品，發酵處理明顯提升原料之生物活性與健康效益，突顯發酵技術在機能性食品開發中的重要性。

在應用面上，本研究結果顯示發酵黑豆糙薏仁具發展為代謝症候群預防與改善之保健食品潛力，未來可進一步進行人體臨床試驗，以驗證其實際功效與安全性，並探討適當攝取劑量與長期使用效果。此外，亦建議針對發酵條件進行優化，以提升活性成分產量與產品穩定性，並結合食品加工技術開發多元產品型態，以提高消費者接受度。整體而言，本研究不僅提供本土穀物高值化利用之科學依據，亦有助於推動機能性食品產業發展及提升國產雜糧之市場競爭力。

參考文獻

- Chen, H. J., Chung, C. P., Chiang, W. c., and Lin, Y. L. 2011. Anti-inflammatory effects and chemical study of a flavonoid-enriched fraction from adlay bran. *Food Chem.* 126 (4): 1741-1748.
- Gibbs, B. F., Zougman, A., Masse, R., and Mulligan, C. 2004. Production and characterization of bioactive peptides from soy hydrolysate and soy-fermented food. *Food Res. Int.* 37 (2): 123-131.
- Jung, J. H., and Kim, H. S. 2013. The inhibitory effect of black soybean on hepatic cholesterol accumulation in high cholesterol and high fat diet-induced non-alcoholic fatty liver disease. *Food Chem. Toxicol.* 60: 404-412.
- Khosravi, A., and Razavi, S. H. 2021. Therapeutic effects of polyphenols in fermented soybean and black soybean products. *J. Funct. Foods.* 81: 104467.
- Koh, Y. C., Kuo, L. H., Chang, Y. Y., Tung, Y. C., Lo, Y. C., and Pan, M. H. 2023. Modulatory effect of fermented black soybean and adlay on gut microbiota contributes to healthy aging. *Mol. Nutr. Food Res.* 67 (5): e2200700.
- Liu, C., Wen, C., Olatunji, O. J., Suttikhana, I., and Ashaolu, T. J. 2024. Biologically active peptides from soy: Updates on antihypertensive action and gut microbiota modulation. *J. Funct. Foods.* 123: 106592.
- Mohseni, R., Teimouri, M., Safaei, M., and Arab Sadeghabadi, Z. 2023. AMP-activated protein kinase is a key regulator of obesity-associated factors. *Cell Biochem. Funct.* 41 (1): 20-32.
- Panchal, S. K., Poudyal, H., Iyer, A., Nazer, R., Alam, A., Diwan, V., Kauter, K., Sernia, C., Campbell, F., and Ward, L. 2011. High-carbohydrate, high-fat diet-induced metabolic syndrome and cardiovascular remodeling in rats. *J. Cardiovasc. Pharmacol.* 57 (5): 611-624.
- Tamura, M., Hori, S., Inose, A., and Kobori, M. 2020. Effects of γ -polyglutamic acid on blood glucose and caecal short chain fatty acids in adult male mice. *Food Nutr. Sci.* 11 (1): 8-22.

Co-fermented black soybean and dehulled adlay with *Bacillus subtilis natto* mixture ameliorates metabolic disorders in high-fat high-fructose diet-fed mice

Min-Hsiung Pan ^{(1)*}

Abstract

With the westernization of dietary patterns and changes in lifestyle, the prevalence of overweight and obesity among adults in Taiwan has increased steadily, leading to a rising incidence of metabolic syndrome-related diseases, including hyperlipidemia, type 2 diabetes, and non-alcoholic fatty liver disease. These conditions have become major public health concerns. In this study, Taiwanese black soybean and dehulled adlay (*Coix lachryma-jobi* L. var. *ma-yuen*) were used as raw materials and subjected to co-fermentation using *Bacillus subtilis natto* to develop a functional food with potential benefits in improving metabolic disorders. Black soybean is rich in protein, dietary fiber, and polyphenolic compounds, and exhibits antioxidant activity and lipid metabolism regulation, while adlay contains polyphenols and polysaccharides with anti-inflammatory properties and gut microbiota modulation potential. Fermentation enhances the bioavailability of nutrients and generates bioactive compounds such as nattokinase and γ -polyglutamic acid (γ -PGA), thereby further strengthening its health-promoting effects.

A high-fat and high-fructose diet-induced C57BL/6 mouse model was employed to evaluate the physiological effects of the fermented product. The results demonstrated that supplementation with fermented black soybean and adlay significantly suppressed body weight gain, reduced visceral fat accumulation, and decreased adipocyte hypertrophy, while also ameliorating hepatic lipid accumulation and fatty liver pathology. In addition, the fermented product improved glucose tolerance, reduced blood lipid levels and insulin resistance, and attenuated inflammatory responses. Mechanistic analysis suggested that these effects were primarily mediated through the regulation of the AMPK–SIRT1 signaling pathway, promoting fatty acid oxidation and inhibiting lipid synthesis. Furthermore, the fermented product modulated gut microbiota composition and increased the production of short-chain fatty acids, thereby contributing to improved metabolic health.



In conclusion, this study demonstrates that co-fermentation effectively enhances the functional value of Taiwanese local grains and shows great potential for development as a health-promoting food for the prevention and amelioration of metabolic syndrome.

Keywords: Black soybean, Adlay, Fermentation, Metabolic syndrome, Gut microbiota

(1) Institute of Food Science & Technology, National Taiwan University

*Corresponding author (mhpan@ntu.edu.tw)

