

糙薏仁與糙米複合穀類擠壓物對餵食高脂飲食糖尿病大鼠氧化壓力的調節效果

謝艾臻^{1†} 夏詩閔^{2,3,4,5,6†} 林淨怡^{7,8} 林弘育¹ 簡暉慈^{7,9} 江文章^{1,10}
李明怡^{7,11,12*} 鍾成沛^{7,8,11*}

Regulatory effects of cereal extrudates made from dehulled adlay and brown rice on oxidative stress in diabetic rats fed with high-fat diet

Hsieh Ai-Chen^{1†}, Hsia Shih-Min^{2,3,4,5,6†}, Ching-I Lin^{7,8}, Hong-Yu Lin¹, Huei-Tzu Chien^{7,9},
Wenchang Chiang^{1,10}, Ming-Yi Lee^{7,11,12*}, Cheng-Pei Chung^{7,8,11*}

¹Institute of Food and Science and Technology, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

²School of Nutrition and Health Sciences, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

³School of Food and Safety, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

⁴Graduate Institute of Metabolism and Obesity Sciences, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

⁵Research Center of Nutritional Medicine, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

⁶Research Center for Digestive Medicine, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

⁷Department of Nutrition and Health Sciences, Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan

⁸Research Center for Food and Cosmetic Safety, Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan

⁹Geriatric and Long-Term Care Research Center, Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan

¹⁰Center for Food and Biomolecules, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

¹¹Graduate Institute of Health Industry Technology, Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan

¹²Center for Drug Research and Development, Chang Gung University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan

(Received: June 1, 2025. Accepted: August 11, 2025.)

† These authors contributed equally to this work.

Corresponding author: Ming-Yi Lee, Cheng-Pei Chung*

Address: No. 261, Wenhua 1st Road, Guishan District, Taoyuan City
333324, Taiwan

Tel: +886-3-2118999#5473

E-mail: mylee@mail.cgu.edu.tw, cpchung@mail.cgu.edu.tw

Abstract Type 2 diabetes mellitus (DM) is primarily characterized by elevated blood glucose levels, often accompanied by increased oxidative stress. Dietary intervention plays a vital role in glycemic control. Previous studies have shown that the edible parts of adlay (*Coix lachryma-jobi* L. var. *mayuen* Stapf) and rice (*Oryza sativa*) possess supportive effects in diabetes management. This study aimed to develop extruded products with improved shelf-life and consistent quality using brown rice, rice bran, dehulled adlay, and adlay bran, and to evaluate their influence on physiological effects and oxidative stress in diabetic rats. Various combinations of these cereal ingredients were extruded, and the formulation demonstrating optimal physical characteristics and bioactivity (comprising 40% dehulled adlay, 30% brown rice, 10% adlay bran, and 20% rice bran) was selected for further evaluation. The effects of this extrudate on carbohydrate metabolism and oxidative stress were investigated in streptozotocin (STZ)-induced diabetic rats fed with high-fat diet. The results indicated that, regardless of the addition of resistant maltodextrin (RMD), the cereal-based extrudate did not affect normal growth or liver and kidney function. Although its effects on carbohydrate metabolism were inconclusive, likely due to high inter-individual variability, the extrudate significantly reduced oxidative stress under high-fat diet conditions in diabetic rats with a shorter disease duration. These findings suggest potential health-promoting effects of the developed multi-whole grain extruded product.

Key words diabetes mellitus, oxidative stress, dehulled adlay, brown rice, extrudates, high-fat diet

前言

糖尿病 (diabetes mellitus, DM) 是指體內胰島素 (insulin) 分泌或作用異常，導致葡萄糖無法進入細胞被利用，因而造成血中葡萄糖濃度過高及尿中出現葡萄糖的症狀。糖尿病是臺灣社會極需關心的健康問題，其治療由三方面共同著手，分別為飲食、運動及藥物，其中飲食治療是糖尿病控制中最重要一環，藉由培養定時定量的飲食習慣，以輔助維持患者血糖的穩定。此外，糖尿病患者因服用降血糖藥物或施打胰島素的關係，若無定時的補充適量的醣類，則很可能有低血糖的情形發生，因此維持血糖穩定成為糖尿病患者重要的議題。第 2 型糖尿病 (type 2 DM) 為過去所稱的非胰島素依賴型糖尿病 (insulin-independent DM, NIDDM)，主要的原因是身體無法有效的利用胰島素，導致血液中的葡萄糖無法進入周邊細胞為之利用，也就是所謂的胰島素抗性 (insulin resistance, IR) 所造成的高血糖現象，第 2 型糖尿病通常好發於成年人身上，佔總糖尿病人口的 90% 左右，且絕大部份的患者有體重過重或缺乏運動的情形，現今臨床上發現發病年齡有降低的趨勢，更有許多肥胖的孩童被確診第 2 型糖尿病。

現今的研究證實，米 (*Oryza sativa*) 麩皮能用於許多疾病的營養治療，例如糖尿病、高脂血症 (hyperlipidemia)、癌症 (cancer)、脂肪肝 (fatty liver)、高尿鈣症 (hypercalciuria) 及心臟疾病，主要的有效成分包括維生素 B 群、維生素 E、植物固醇 (phytosterols) 等，均與其調節血糖的活

性有關⁽¹⁾，故食用糙米 (brown rice) 已被證實可調節血糖⁽²⁾；薏仁 (*Coix lachryma-jobi* L. var. *mayuen* Stapf) 又稱為薏苡、薏苡仁、薏米等，自古被視為養氣補身之上品君藥，具有健脾、益胃、去風濕之功效，現今人體或動物實驗已發現薏苡籽實的各部位或組成，包括麩皮⁽³⁾、糙薏仁^(4,5)、精白薏仁⁽⁶⁾、薏仁水萃物⁽⁷⁾、薏仁油⁽⁸⁾、醇溶蛋白 (prolamin)⁽⁹⁾ 皆有調節血糖的功效，而薏苡籽實的可食部位中麩皮富含醣類化合物，被認為是諸多生理活性的來源。綜上，全穀類已被發現具有調節血糖的生理活性⁽¹⁰⁾，本研究擬利用糙米、米麩皮、糙薏仁、薏仁麩皮做為原料，開發相較於新鮮原料更具保存性、品質均一的擠壓產物，並評估其對糖尿病大鼠生理代謝的影響，盼開發具有調節血糖活性的複合穀類擠壓產品。

材料與方法

一、糙薏仁、糙米等原料之擠壓物製備

二、藥品與試劑

糙米、米麩皮、糙薏仁、薏仁麩皮等擠壓原料由廣達食品企業有限公司 (臺南，臺灣) 提供，動物試驗之飼料包括商業飼料 (LabDiet® 5001 Rodent diet, Purina Mills LLC, St. Louis, Missouri, USA) 及 AIN-76 配方，原料玉米澱粉、酪蛋白、纖維素、AIN-76 維生素與礦物質購自 ICN Biochemicals (Costa Mesa, CA, USA)，膽固醇購自

Waco (Osaka, Japan)、Triton X-100 購自 Panreac Quimica S. A. (Barcelona, Spain)、KCl 購自 Merck (Darmstadt, Germany)、膽酸、氯化膽鹼以及其他試驗所需之四乙氧基丙烷 (1,1,3,3-tetraethoxy propane, TEP)、2-硫代巴比妥酸 (thiobarbituric acid, TBA)、磷鎢酸鈉 (sodium phosphotungstate)、鏈脲佐菌素 (streptozotocin, STZ)、菸鹼醯胺 (nicotinamide)、葡萄糖、肝素 (heparin)、氯化鈉 (sodium chloride)、硫酸 (sulfuric acid, H_2SO_4)、鹽酸 (hydrochloric acid, HCl) 等藥品購自 Sigma (St. Louis, MO, USA)、正丁醇 (*n*-butanol)、氯仿 (chloroform)、甲醇 (methanol) 等溶劑購自 J. T. Baker (Phillipsburg, NJ, USA)。Glucose Enzymatic Kit、Total Cholesterol Kit、Triglyceride Kit 購自 Randox Laboratories (Antrim, UK)、Rat Insulin ELISA Kit 購自 Mercodia AB (Uppsala, Sweden)、Fructosamine single test strips、HDL-C single test strips 及 Panel I multiple test strips 則購自 Arkray Factory (Kyoto, Japan)。

三、擠壓物物化特性及一般組成分析

穀類擠壓產物委託弘陽食品股份有限公司 (雲林, 臺灣) 代工, 各種擠壓物取 10 段分別以游標尺測量其兩端及中間端的直徑, 取平均值後除以模口之孔徑, 所得的值即為膨發率 (expansion ratio, ER); 取該 10 段 1.5 至 2.5 公分平直部分將兩端切平, 以游標尺測量其長度後除以其乾重, 即為縱向膨發率 (longitudinal ER, long. ER); 比容積 (specific volume, SV) 之測定使用改良油菜籽填充法 (rapeseed method), 以小米取代油菜籽填滿容積為 50 mL 的玻璃量筒後倒出, 此為之後測量用的小米, 再取少許測量用小米倒入量筒內, 放入總重量 5 g 的擠壓產品, 後加入其餘測量用小米至填滿 50 mL 的量筒, 未放進量筒內的測量用小米體積即為擠壓產品的體積, 將體積除以 5 g 即為 SV; 水溶性指標 (water solubility index, WSI) 和吸水性指標 (water absorption index, WAI) 依 Anderson 等的方法⁽¹¹⁾, 將擠壓產品磨成粉至能過 60 網目, 取 2.5 g 的粉末後加入 30 mL 蒸餾水, 以玻棒攪拌均勻避免結塊, 於 30°C 水浴中震盪 30 分鐘, 期間需偶以玻棒攪拌避免結塊, 結束後以 1570×g 離心 10 分鐘, 將上清液倒入空燒杯 (W1) 中, 於 105°C 中烘乾秤重 (W2), 並將離心去除上清液後剩餘的膠體

秤重 (W3), WSI 為 $100\% \times (W2 - W1) / \text{樣品重}$, WAI 則為 $W3 / (\text{樣品重} - W2 - W1)$ 。

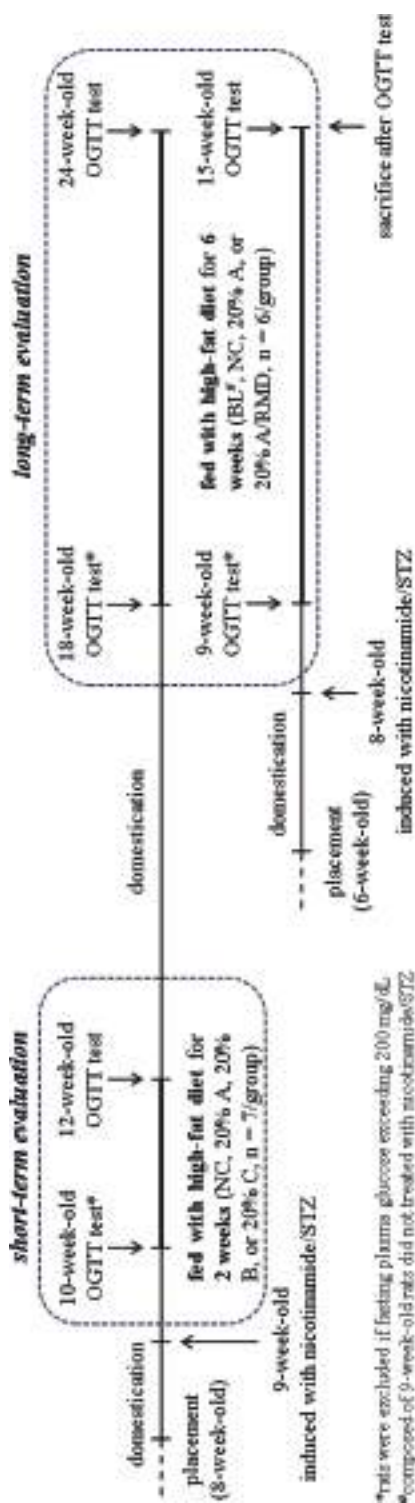
參考 Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) 的方法進行擠壓物之一般組成分析 (proximate analysis) 來測量擠壓產品中水分、灰分 (ash)、粗蛋白 (crude protein)、粗脂肪 (crude fat) 及膳食纖維 (total dietary fiber, TDF) 含量, 將上述數值扣除後之比例視為無氮抽出物 (nitrogen free extract, NFE), 代表醣類含量。

四、動物試驗設計

動物試驗之設計分為短期與長期試驗 (圖一), 以 STZ 誘發糖尿病後, 鑒於過去研究曾指出長期攝取高脂飲食可能誘發胰島素抗性⁽¹²⁾, 而以富含長鏈飽和脂肪酸的豬油餵食大鼠, 其肥胖程度及胰島素抗性較其他脂質來源顯著嚴重, 且豬油飲食會藉由活化固醇調控序列結合蛋白 (sterol regulatory element binding protein, SREBP)-1c 導致脂肪肝⁽¹³⁾, 故本研究將使用含有 10% 豬油及 0.5% 膽固醇之 AIN-76 基本配方修飾進行。短期試驗乃給予於 9 週齡 (約為成人年紀) 以 STZ 誘發糖尿病之雄性 Wistar 大鼠含有 20% 之 A、B 或 C 不同配方組成之擠壓產物 (表一) 的高脂飼料, 進食 2 週後以口服葡萄糖耐受性試驗 (oral glucose tolerance test, OGTT) 評估各樣品調節血糖的效用, 後續將該批已成功誘導糖尿病之大鼠持續馴養至 18 週齡 (約為成人步入中年), 與額外新購之大鼠誘發糖尿病後一同給予含有 20% 之 A、B 或 C 擠壓物中理化性質優良、較具活性者之高脂取代飼料, 進食 6 週後同樣以 OGTT 評估調節血糖活性, 並進行犧牲就各項組織臟器、對應生理指標之測定以比較不同組間之差異, 是為長期試驗。

(一) 短期試驗

8 週齡雄性 Wistar 大白鼠 40 隻購自樂斯科生物科技 (臺北, 臺灣), 以商業飼料馴養 1 週, 9 週齡時禁食 12 小時後依 Masiello 提出的誘導方法⁽¹⁴⁾, 先皮下注射 nicotinamide 溶液 [溶於 0.9% 生理食鹽水, 230 mg/kg body weight (BW)], 15 分鐘後再皮下注射 STZ 溶液 [溶於 0.9% 生理食鹽水配製之 0.01 mmol/L 檸檬酸鹽 (citrate buffer) 緩衝液, 並以 0.1 N NaOH_(aq) 調整至 pH 4.5, 65 mg/kg BW] 完成糖尿病的誘導。誘導 1 週後禁食 12 小



圖一 糖尿病誘發時程及短期、長期動物模式設計

Figure 1. Scheme for induction of diabetes, design on short- and long-term animal models

時，以尾靜脈採血測其血糖濃度，將誘導失敗的大鼠剔除（禁食血糖超過 200 mg/dL 者判定為誘導過重，即可能屬於第 1 型糖尿病），其餘大鼠隨機分為 4 組，分別為負控制組（negative control group, NC）與 A、B 及 C 樣品組（每組 7 隻）均給予高脂飼料，A、B 及 C 樣品組則於飼料中額外添加 20% 的擠壓物，實驗期間每 2 隻大鼠飼養於鋪有墊料的同一壓力籠中，並定期更換墊料，動物室溫度設定為 $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相對濕度 50 至 60%，保持 12 小時的日夜循環，並採自由取食飼育法（*ad libitum*），每 2 天更換飼料及水、每週秤量體重。在餵食實驗飼料滿 2 週後，再以 OGTT 評估擠壓產物調節 STZ 誘導之糖尿病大鼠血糖之效用。

（二）長期試驗

自樂斯科生物科技公司新購 6 週齡雄性 Wistar 大鼠 30 隻，經 2 週馴養後，隨機保留 6 隻為空白組（blank group, BL），其餘於 8 週齡時以前述方法進行糖尿病誘發⁽¹⁴⁾，於 9 週齡藉 OGTT 剔除誘導失敗者，再隨機分為 NC、選定 A 樣品組（9NC、9A），另依據 A 樣品之一般組成分析結果，另設置難消化性麥芽糊精（resistant maltodextrin, RMD）添加組（9A/RMD），乃欲觀察 A 樣品是否與 RMD 具有加成作用，將自人類建議攝取量換算至大鼠為 $5 \div 60 \times 6.25 \times 0.4$ 為每日 0.208 g 之 Fibersol®-2 額外配置於飼料中，於短期試驗中已罹患糖尿病重新馴養至 18 週之大鼠同樣分為負對照、擠壓樣品與添加 RMD 之組別（18NC、18A、18A/RMD），給予高脂飲食 6 週，試驗期結束後再以 OGTT 評估擠壓產品調節不同年齡 STZ 誘導之糖尿病大白鼠血糖功效，於 OGTT 結束後 4 天進行犧牲，犧牲前日將大鼠移入代謝籠以便於收集糞便，糞便乾燥後磨粉於 -20°C 保存留待分析；犧牲當日先以乙醚麻醉後進行腹腔靜脈採血，分離血漿進行各項對應生理指標之測定，並取肝臟、心臟、腎臟、脾臟、肺臟、腹腎脂（abdominal kidney fat）及副睪脂（epididymis fa）秤重，將肝臟冷凍於 -80°C 保存以利後續分析。

五、大鼠口服葡萄糖耐受性試驗

OGTT 試驗進行前先行於大鼠經尾靜脈採血即為第 0 分鐘之血液，接續管餵大鼠 1.0 g glucose/kg BW 的水溶液，並於第 30、60、120 及 180 分鐘同

表一 含糙薏仁、糙米、薏仁麩皮及米糠擠壓物之原料比例及物化特性

Table 1. Formula, physical and chemical properties of extrudates prepared by dehulled adlay, brown rice, adlay bran, and rice bran.

samples	formula (%)				physical and chemical properties					
	dehulled adlay	brown rice	adlay bran	rice bran	ER	long. ER	SV	WSI	WAI	
A		40	30	10	20	1.67±0.14 ^b	14.0±2.0 ^{bc}	1.71±0.05 ^c	20.8±1.1	4.18±0.08
B		30	40	20	10	1.74±0.20 ^b	13.3±1.1 ^c	2.04±0.21 ^b	20.2±0.3	4.17±0.03
C		30	40	10	20	2.14±0.21 ^a	16.5±2.5 ^a	3.50±0.15 ^a	23.3±0.9	4.20±0.02

Each value is expressed as mean ± SD for three independent replicates. Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

樣於尾靜脈採血，於 4°C 下以 1570×g 離心 10 分鐘取得之上清液即為血漿，取 10 μL 血漿與 1mL Glucose Enzymatic Kit 震盪混合，於 37°C 水浴作用 10 分鐘後，取出 200 μL 混合液置入 96 孔盤中，測定 500 nm 之吸光值，並比對標準試劑（100 mg/dL）換算血漿中葡萄糖濃度，其換算公式如下：plasma glucose (mg/dL) = 標準試劑濃度 × (OD sample - OD blank) / (OD standard - OD blank)，視需要以血糖平均值繪製濃度變化曲線，計算曲線下之面積（area under the curve, AUC）評估大鼠之葡萄糖耐受性。

六、大鼠血漿生理指標分析

（一）胰島素濃度測量

取 25 μL 血漿以 Rat Insulin ELISA Kit 分析，量測 450 nm 下之吸光值，將序列稀釋濃度之標準品及其吸光值製做標準曲線公式，再把不同組別、處理時間之大鼠血漿樣品的吸光值帶入公式中換算其血漿胰島素濃度。

（二）總三酸甘油酯（total triglyceride, TG）與總膽固醇（total cholesterol, TC）測量

取 10 μL 血漿與 1 mL Triglyceride Kit 或 Total

Cholesterol Kit 震盪混合，於 37°C 水浴作用 5 分鐘後，取出 200 μ L 混合液置入 96 孔盤中，量測 OD 500 nm 吸光值，並比對標準品（200 mg/dL）換算血漿中總三酸甘油酯或膽固醇濃度，其換算公式如下：Plasma triglyceride 或 cholesterol (mg/dL) = 比對標準品濃度 $\times$ (OD sample - OD blank) / (OD standard - OD blank)。

(三) 脂蛋白、果糖胺 (fructosamine)、尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN)、天門冬胺酸轉胺酶 (aspartate Transaminase, AST) 與丙胺酸轉胺酶 (alanine transaminase, ALT) 測量

以血液自動分析儀 (SPOTCHEM™ EZ SP-4430, Arkray Factory, Kyoto, Japan) 進行，開機後分別以分析試紙 HDL-C single test strips、Fructosamine single test strips、Panel I multiple test strips (量測 BUN、AST 與 ALT) 中所附的磁卡輸入並校正所要測量的項目，取 200 μ L 血漿至儀器專用的微量離心管中，再把微量離心管放到儀器的分析位置，接著打開一條新的分析試紙放到儀器的分析位置上，按下起動鈕後即開始進行高密度脂蛋白 (high-density lipoprotein, HDL) 膽固醇 (HDL-C)、果糖胺及 BUN、AST 與 ALT 等分析，後續依臨床醫學使用的公式來計算低密度脂蛋白 (low-density lipoprotein, LDL) 膽固醇 (LDL-C) = TC - HDL-C - TG / 5⁽¹⁵⁾。

(四) 脂質過氧化物測量

血漿脂質過氧化物量測以 TBA 反應物質 (TBA reactive substances, TBARS) 進行評估，乃取血漿 20 μ L 加入 4 mL 之 1/12N H₂SO_{4(aq)}，再加入 0.5 mL 之 10% sodium phosphotungstate_(aq) 混合均勻，放置室溫 5 分鐘後以 1570 $\times$ g 離心 10 分鐘除去上清液，重複上述步驟取得沉澱物，加入 4 mL 蒸餾水及 1 mL 之 0.67% 2-TBA_(aq) 後激烈混合，置於 95°C 的水浴槽中 60 分鐘後以流水冷卻，最後加入 5 mL 之 *n*-butanol 震盪，再以 1570 $\times$ g 離心 10 分鐘，取上清液以螢光光度計測量螢光強度 (Ex 515 nm、Em 553 nm)。另取 20 μ L 之 1,1,3,3-tetraethoxy propane_(aq) (5 nmole/mL)，由加入 4 mL 蒸餾水開始延續實驗步驟進行作為標準品，最後經比對標準品換算即可

得到 TBARS 值。

七、肝臟與糞便脂質分析

依 Folch 等之方法⁽¹⁶⁾，取 0.2 g 肝臟或乾燥磨粉後的糞便，加入 3.8 mL 之 chloroform/methanol (2:1) 混合溶液，以均質器均質後在 4°C 下以 1570 $\times$ g 離心 10 分鐘，取上清液到新的試管中，再加 chloroform/methanol (2:1) 混合溶液定量至 10 mL，揮發乾燥後再以同樣混合溶液定量至 10 mL 即為待測的脂質萃取液。續依 Carlson 與 Goldfarb 的方法⁽¹⁷⁾，分別取 10 μ L 肝臟或糞便脂質萃取液，加入 10 μ L Triton X-100 混合均勻，再以前述血漿脂質之方法，藉由檢驗套組測定肝臟與糞便中的 TG 和 TC。

脂質過氧化物方面，依 Uchiyama 與 Mihara 的方法⁽¹⁸⁾，取肝臟或糞便粉末 0.5 g，加入 4.5 mL 冰冷的 1.15% KCl_(aq)，於冰浴以均質器均質。取 0.5 mL 均質液、作為空白試驗的 0.9% saline 及作為標準品的 10 nmole/mL 1,1,3,3-tetraethoxy propane_(aq)，分別加入 3 mL 1% H₃PO_{4(aq)}，混合均勻後再分別加入 1 mL 0.67% TBA_(aq) 混合均勻，置於 95°C 的水浴槽中 45 分鐘後取出以流水冷卻，再分別加入 4 mL *n*-butanol 震盪，以 1570 $\times$ g 離心 10 分鐘，取得之上清液以前述血漿 TBARS 值測量方式進行。

八、統計分析

實驗數據以平均值 (means) $\pm$ 標準偏差 (standards deviation, SD) 表示，並以 Statistical Product and Service Solutions (SPSS) (IBM Inc., Chicago, IL, USA) 統計分析軟體分析。以成對 *t* 檢定 (paired *t*-test) 分析血液生化值的差異，當 $p < 0.05$ 時視為存在顯著差異，同時以單因子變異數分析 (analysis of variance, ANOVA)，再以鄧肯氏多變域測驗 (Duncan's multiple range test) 比較各組之間的差異，當 $p < 0.05$ 時視為存在顯著差異。

結 果

一、糙薏仁混合糙米擠壓產物理化性質分析

選擇以糙薏仁、薏仁麩皮、糙米及米麩皮作為穀類擠壓產品原料，考量欲製造出膨發性的擠壓產品，故在原料組成上需有所限制，以澱粉含量較高

的糙薏仁及糙米為主原料，共佔總重量中的 70%，而含脂質、膳食纖維較多的薏仁麩皮及米麩皮為副原料，共佔總重量的 30%，各種擠壓產物原料比例分別如表一所示，外觀無明顯之差別，且均可順利膨發成型。擠壓物 C 之膨發率、縱向膨發率與比容積顯著高於 A、B ($p<0.05$)，而在 WSI 與 WAI 方面三者間雖無顯著差異，但 C 之數值較 A、B 高（表一）。

二、短期食用糙薏仁混合糙米擠壓產物對糖尿病大鼠血糖與血脂調節之影響

短期實驗期間，開始與結束時各組間體重均無顯著差異，二週內的平均攝食量以 C 組最高，顯著高於 B 組 ($p<0.05$)，與 NC、A 組沒有差異，而飼料利用率方面在各組間均無顯著差異。各組大鼠於實驗開始時先行以 OGTT 觀察其血糖代謝狀況，發現在各組間沒有顯著差異，攝食實驗飼料二週後再次進行 OGTT，結果顯示無論是在第 0、30、60、120、180 分鐘所測得的血糖濃度於組間皆無顯著差異，原因可能在於各組內大鼠個體差異較大，然 A 組於給予葡萄糖 180 分鐘後平均值較其他組別低（表二）；血漿 TC 與 TG 方面，實驗起始時各組間均無顯著差異，經給予二週不同擠壓產物取代飼料後於組間亦無顯著差異，原因與各組內大鼠個體差異較大有關，然就平均值觀察上 A、B 組之 TC 與 TG 均較 NC、C 組低，綜合血糖方面之量測結果，擠壓產物 A 似較具有調控糖尿病大鼠代謝狀況之潛力，且根據 A、B、C 三者擠壓產物之理化性質綜合評價（表一），擠壓產物 A 應具有較好的組織結構與保存性質，故長期試驗將選擇產物 A 進行。

三、長期食用糙薏仁混合糙米擠壓產物對糖尿病大鼠生理代謝調節之影響

承上，短期試驗之飼料配製乃直接以 20% 之擠壓產物 A、B 或 C 取代飼料組成，長期試驗中為了更加精確控制大鼠攝食熱量，先行進行擠壓產物 A 之一般組成分析，濕重基準上水分佔 4.14%，灰份佔 3.49%、粗蛋白為 14.41%、粗脂肪為 5.03%，計算醣類佔有 64.78%，膳食纖維的含量方面，水溶性膳食纖維佔 1.42%，非水溶性者則佔 6.72%，依據該等結果，分別以 20% 之比例取代 AIN-76 礦物質、酪蛋白、豬油、玉米澱粉、纖維素等組成。

長期試驗包含了空白組、9 週齡糖尿病大鼠（9NC、9A、9A/RMD）以及 18 週齡糖尿病大鼠（18NC、18A、18A/RMD），空白組給予基本 AIN-76 飼料、負對照組（9NC 與 18NC）給予高脂高膽固醇 AIN-76 修飾飼料、擠壓產物 A 組（9A 與 18A）給予含 20% 擠壓產物 A 取代之高脂高膽固醇 AIN-76 修飾飼料、擠壓產物 A 額外給予 RMD 之組別（9A/RMD 與 18A/RMD）同樣給予含 20% 擠壓產物 A 取代之高脂 AIN-76 修飾飼料並額外添加難消化性麥芽糊精；實驗起始與結束時 9 週齡與 18 週齡的組別間於體重上均無顯著差異，計算飼料利用率亦無明顯不同（表三）。於實驗起始時先行以 OGTT 評估各組大鼠的血糖代謝狀況，起始第 0 分鐘時除了 BL 外，其他各組間均無顯著差異，而於第 180 分鐘時，9 週齡糖尿病大鼠的血糖均顯著高於 18 週齡者 ($p<0.05$)，進一步計算 AUC 趨勢相同（表三）。經 6 週實驗期滿，犧牲 4 日前進行 OGTT 結果顯示，9NC 於第 0 分鐘血糖顯著高於 BL 與 18A 組 ($p<0.05$)，其餘各組間均無顯著差異，第 30 分鐘時仍以 9NC 組最高，顯著高於 BL 及 18 週齡各組 ($p<0.05$)，第 60 分鐘時各組間均無差異，第 120 分鐘、180 分鐘時 9A 及 18A/RMD 組均顯著高於 BL ($p<0.05$)，但與其它處理組別均無顯著差異；量測血漿 TG 於各組間均無差異，血漿 TC 則各處理組均顯著較 BL 高 ($p<0.05$)（表三）。

OGTT 試驗後 4 日進行犧牲，於臟器及脂肪組織之相對重量方面，18A/RMD 組之相對心臟重量顯著低於其他各組 ($p<0.05$)、BL 組織相對肝臟重量顯著低於其他各組 ($p<0.05$)，其餘脾臟、腎臟與肺臟方面於各組間均無顯著差異（表四）；此外，相對副睪脂重以 18A/RMD 最高，顯著高於 BL、9 週齡各組與 18A ($p<0.05$)，前述組別間沒有顯著差異，相對副睪脂重趨勢類似，18A/RMD 組顯著高於 BL 及 9 週齡各組 ($p<0.05$)，但在 18 週齡各組間沒有顯著差異（表四），對應肝腎功能評估指標之 GOT、GTP 與 BUN 值上則在各組間均無顯著差異（表五）。血漿脂蛋白的分布上，BL 組之 LDL 均顯著低於其他處理組 ($p<0.05$)，9NC 組之 LDL 顯著高於其他組別，而其他組別間均無顯著差異，HDL 則在各處理組間均無顯著差異，BL 與 9A、9A/RMD 組間沒有差異，但顯著低於其他處理組 ($p<0.05$)。血漿 TBARS 的表現上，9NC 組顯著高於 9A 及 18 週齡各組 ($p<0.05$)，而與 BL、9A/

表二 糧食各種糙薏仁、糙米、薏仁麩皮、米糠比例擠壓物二週後對糖尿病 Wistar 大鼠葡萄糖耐受性、血漿脂質、體重及飼料利用之影響
Table 2. Influence on glucose tolerance, plasma lipid, body weight, feed intake and efficiency of diabetes Wistar rats fed with various extrudates prepared by different proportions of dehulled adlay, brown rice, adlay bran, and rice bran for 2 weeks.

	OGTT test (plasma glucose, mg/dL)					plasma lipid (mg/dL)		BW (g)	feed intake (g/day)	feed efficiency (g/100g BW)
	0 min	30 min	60 min	120 min	180 min	TG	TC			
	initial									
NC	154±31	208±51	288±72	254±60	229±55	72±49	184±81	394±42	—	—
A	174±54	251±87	257±78	213±77	212±69	87±40	161±33	413±25	—	—
B	155±31	229±21	290±91	252±88	254±112	54±38	130±62	374±42	—	—
C	161±49	280±62	307±73	244±66	208±29	69±46	150±60	395±57	—	—
after 2 weeks										
NC	147±43	238±77	266±100	230±126	217±104	81±23	201±120	439±52	26.6±3.3 ^{ab}	6.2±0.9
A	154±11	238±82	232±83	206±72	194±64	64±11	141±58	464±39	28.2±3.1 ^{ab}	6.2±1.2
B	157±36	244±89	258±101	251±123	257±135	56±20	131±68	410±71	26.5±3.8 ^b	6.7±1.6
C	166±48	259±30	277±48	288±126	252±94	113±99	186±100	441±81	30.6±3.2 ^a	7.2±1.7

Each value is expressed as mean ± SD (n = 7). Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

RMD 組沒有差異（表五）。

在血糖相關的生理指標中，犧牲時的禁食血糖趨勢與 OGTT 進行前第 0 分鐘者具有些許不同，9A/RMD 組別顯著高於 BL 及 18NC ($p < 0.05$)，而與其他組別均無顯著差異；血漿果糖胺濃度趨勢與進食血糖相似，9A/RMD 組別顯著高於 BL、18NC 及 18A/RMD ($p < 0.05$)，而與其他組別均無顯著差異；血漿胰島素濃度在 BL 組中的各體差異較大，顯著高於 9NC 及 9A 組 ($p < 0.05$)，但與其他各組均無顯著差異。

肝臟脂質方面，不論是單位重量組織所含膽固醇或總量，BL 組之 TC 均顯著低於其他組別 ($p < 0.05$)，而各處理組間無顯著差異，18 週齡的各組大鼠單位重量組織中的 TG 以顯著高於 BL 組 ($p < 0.05$)，而與 9 週齡各組沒有差異，TG 總量則除了 18 週齡各組外，9NC 組亦顯著高於 BL 組而與 9 週齡各組沒有差異，而與其他各組沒有差異，肝臟的 TBARS 以 BL 最高，顯著高於各處理組 ($p < 0.05$)，而於各處理組間沒有顯著差異；糞便脂質方面，單位重量糞便 TC 以 18A 組別顯著高於 BL、9 週齡各組與 18ARMD ($p < 0.05$)，而與 18NC 沒有顯著差異，各處理組中 TC 總量則以 18A 最高，顯著高於其他處理組別 ($p < 0.05$)，但與 BL 沒有顯著差異，單位重量糞便 TG 中 BL 組顯著高於 9 週齡各組與 18NC ($p < 0.05$)，而與 18A、18A/RMD 沒有差異，TG 總量趨勢類似，但 18A 額外顯著高於其他處理組別 ($p < 0.05$)。

討 論

一、糙薏仁與糙米複合性穀類擠壓產物之特性

本試驗所使用的擠壓產品為弘陽食品股份有限公司所代工，原料配比表一所示，擠壓的操作條件乃依其過往經驗與模式進行調整操作，螺旋組態排列主要包含輸送樣品、反相螺旋與最終加壓之窄螺距組態，套筒於中段開始加熱，於反向螺軸區減緩原料向前輸送，使原料在套筒內的停留時間增加，進而增加原料加熱的時間，使糙薏仁、糙米等富含醣類的原料糊化完全，末端使用短螺距以增壓使熔融狀態的原料經模孔釋放至一般大氣壓中，因壓力差而瞬間膨發成為擠壓膨發產品。過去有學者以不同直鏈澱粉含量的米為原料進行擠壓，發現直鏈澱

表三 餵食含糙薏仁、糙米、薏仁麩皮及米糠擠壓物六週後對糖尿病 Wistar 大鼠葡萄糖耐受性、血漿脂質、體重及進食量之影響
Table 3. Influence on glucose tolerance, plasma lipid, body weight, and feed intake of diabetes Wistar rats fed with extrudate prepared by dehulled adlay, brown rice, adlay bran, and rice bran for 6 weeks.

	OGTT test (plasma glucose, mg/dL)						plasma lipid (mg/dL)			BW (g)	feed intake (g/day)
	0 min	30 min	60 min	120 min	180 min	AUC	TG	TC			
	initial										
BL	112±8 ^b	145±21 ^b	138±22 ^b	135±17 ^b	146±31 ^b	24729±2277 ^b	86±13 ^b	65±9	409±30 ^b	—	
9-week-old rats											
9NC	142±18 ^a	250±38 ^a	297±69 ^a	250±109 ^a	232±107 ^a	44893±12611 ^a	114±39 ^a	65±24	279±41 ^c	—	
9A	136±27 ^a	217±29 ^a	330±104 ^a	266±85 ^a	249±86 ^a	45189±11021 ^a	109±16 ^a	71±15	277±15 ^c	—	
9A/RMD	146±15 ^a	249±48 ^a	299±130 ^a	229±51 ^a	200±40 ^a	45152±8544 ^a	108±14 ^a	69±43	291±20 ^c	—	
18-week-old rats											
18NC	145±35 ^a	178±31 ^{ab}	199±54 ^b	166±33 ^b	167±46 ^b	31645±6063 ^b	83±42 ^b	113±39	506±66 ^a	—	
18A	134±28 ^{ab}	195±67 ^{ab}	200±82 ^b	188±80 ^b	185±92 ^b	34646±6886 ^b	86±39 ^b	119±31	538±41 ^a	—	
18A/RMD	138±24 ^{ab}	192±19 ^a	208±37 ^b	173±51 ^b	183±47 ^b	35194±15936 ^b	76±34 ^c	109±35	540±67 ^a	—	
after 6 weeks											
BL	128±25 ^b	132±21 ^c	175±34	153±29 ^b	142±18 ^b	26753±3395 ^c	66±44	38±7 ^b	439±49 ^b	27.5±0.9	
9-week-old rats											
9NC	288±186 ^a	393±197 ^a	329±217	301±169 ^{ab}	281±138 ^{ab}	49365±30698 ^{abc}	55±16	267±176 ^a	392±109 ^b	27.2±4.3	
9A	169±43 ^{ab}	272±65 ^{abc}	324±76	316±67 ^a	312±120 ^a	53609±12948 ^{ab}	49±22	190±88 ^a	410±80 ^b	22.0±5.0	
9A/RMD	183±51 ^{ab}	248±105 ^{abc}	259±119	266±127 ^{ab}	250±131 ^{ab}	45296±20404 ^{abc}	61±35	155±58 ^a	418±64 ^b	28.5±7.1	
18-week-old rats											
18NC	151±24 ^{ab}	181±24 ^{bc}	174±32	171±37 ^{ab}	197±63 ^{ab}	31651±4944 ^{bc}	74±27	138±50 ^a	561±85 ^a	22.8±1.0	
18A	145±17 ^b	219±81 ^{bc}	209±68	201±52 ^{ab}	178±49 ^{ab}	35511±9648 ^b	103±47	173±65 ^a	539±42 ^a	25.6±3.5	
18A/RMD	155±16 ^{ab}	195±26 ^{bc}	236±60	216±50 ^a	254±97 ^a	39369±6244 ^b	66±44	130±60 ^a	554±53 ^a	21.0±1.5	

Each value is expressed as mean ± SD (n = 6). Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

表四 糧食含糙薏仁、糙米、薏仁麩皮及米糠擠壓物六週後對糖尿病 Wistar 大鼠臟器及脂肪組織相對重量之影響
Table 4. Influence on relative organ and fat tissue weights of diabetes Wistar rats fed with extrudate prepared by dehulled adlay, brown rice, adlay bran, and rice bran for 6 weeks.

	relative organ weights (g/100 g BW)					relative fat tissue weights (g/100 g BW)	
	heart	spleen	kidney	liver	lung	abdominal kidney	epididymis fat
BL	0.29±0.02 ^a	0.19±0.03	0.66±0.06	2.58±0.33 ^b	0.57±0.18	1.64±0.60 ^c	1.91±0.39 ^b
<i>9-week-old rats</i>							
9NC	0.34±0.07 ^a	0.25±0.05	0.96±0.44	5.53±1.76 ^a	0.54±0.14	1.38±1.19 ^c	1.66±0.53 ^b
9A	0.31±0.03 ^a	0.25±0.06	0.71±0.13	4.49±0.99 ^a	0.52±0.08	2.06±1.31 ^c	1.81±0.60 ^b
9A/RMD	0.30±0.04 ^a	0.25±0.06	0.75±0.22	4.55±1.44 ^a	0.53±0.07	2.05±1.25 ^c	1.98±0.45 ^b
<i>18-week-old rats</i>							
18NC	0.27±0.02 ^a	0.24±0.03	0.62±0.22	4.03±0.99 ^a	0.43±0.04	2.86±0.78 ^{ab}	2.05±0.33 ^{ab}
18A	0.27±0.03 ^a	0.23±0.06	0.73±0.25	4.57±1.31 ^a	0.51±0.06	2.33±0.57 ^{bc}	2.17±0.53 ^{ab}
18A/RMD	0.24±0.01 ^b	0.21±0.06	0.55±0.07	3.80±0.59 ^a	0.49±0.20	3.43±1.31 ^a	2.54±0.54 ^a

Each value is expressed as mean ± SD (n = 6). Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

表五 糧食含糙薏仁、糙米、薏仁麩皮及米糠擠壓物六週後對糖尿病 Wistar 大鼠血漿脂質、血糖控制與肝腎功能相關生化指標的影響
Table 5. Influence on plasma lipids, plasma glucose-, liver and kidney function-related indicators of diabetes Wistar rats fed with extrudate prepared by dehulled adlay, brown rice, adlay bran, and rice bran for 6 weeks.

	plasma lipids				plasma glucose-related indicators			liver and kidney function-related indicators		
	lipoprotein (mg/dL)		TBARS	glucose (mg/dL)		fructosamine (μmol/L)	insulin (μg/L)	AST (IU/L)	ALT (IU/L)	BUN (mg/dL)
	LDL-C	HDL-C								
BL	3±5 ^c	12±2 ^b	2.14±0.42 ^{ab}	40±41 ^b	171±15 ^b	0.94±0.63 ^a	100±73	49±26		18±3
9-week-old rats										
9NC	231±160 ^a	25±16 ^a	2.36±1.32 ^a	344±246 ^{ab}	206±52 ^{ab}	0.43±0.15 ^b	196±147	171±123		28±21
9A	160±83 ^b	20±9 ^{ab}	1.38±0.28 ^b	237±52 ^{ab}	204±41 ^{ab}	0.42±0.17 ^b	135±100	87±79		21±11
9A/RMD	132±49 ^b	22±7 ^{ab}	1.53±0.35 ^{ab}	389±277 ^a	234±58 ^a	0.54±0.38 ^{ab}	215±289	143±179		19±4
18-week-old rats										
18NC	104±48 ^b	19±6 ^a	1.66±0.32 ^b	160±29 ^b	183±29 ^b	0.46±0.18 ^{ab}	128±53	54±39		18±3
18A	132±61 ^b	20±4 ^a	1.83±0.47 ^b	282±258 ^{ab}	201±38 ^{ab}	0.55±0.27 ^{ab}	224±159	134±133		17±3
18A/RMD	98±53 ^b	19±6 ^a	1.40±0.24 ^b	226±129 ^{ab}	188±22 ^b	0.63±0.29 ^{ab}	131±60	93±79		15±3

Each value is expressed as mean ± SD (n = 6). Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

粉含量與產品膨發率有顯著正相關⁽¹⁹⁾，但與吸水性指標呈正相關、而與水溶性指標呈負相關性⁽²⁰⁾，本次使用之梗米與薏仁直鏈澱粉含量分別約為 15 至 20%、15.9 至 25.8%⁽²¹⁾，兩者的直鏈澱粉含量相似，在擠壓的過程中澱粉吸水膨潤，而由剪切力及套筒溫度提供的熱能，則使澱粉能更快速的吸水膨潤，過度的膨潤使澱粉顆粒破裂而其中的直鏈澱粉溶出產生糊化（gelatinization），而糊化的澱粉若繼續在系統中受剪切力及溫度作用，則會發生糊精化（dextrinization）分解成易溶於水的小分子糊精，該等現象將直接影響擠壓產物的消化性質，而文獻指出在薏仁粉擠壓試驗中，當增加螺旋轉速或減少進料水分時，原料所受的剪切力增加，而使澱粉的裂解加劇⁽²²⁾，澱粉的裂解會影響產品膨發狀況，並使產品的水溶性指標升高⁽²³⁾，當擠壓產品的水溶性指標越高時口感越黏牙⁽²⁴⁾。擠壓物 C 之膨發率、縱向膨發率與比容積顯著高於 A、B（ $p<0.05$ ），而在水溶性與吸水性指標方面三者間雖無顯著差異，但 C 之數值較 A、B 高（表一），顯示擠壓產物 C 食用上可能產生黏牙口感，且因膨發率、縱向膨發率大而推測較產物 A、B 容易吸濕、變形、破碎或出粉，比容積方面顯示擠壓產物 C 顯著大於 B、B 又顯著大於 A，表示同樣重量之物料膨發後體積脹大，越大表示結構更加鬆散、脆弱，綜合上述結果推測擠壓樣品 A 可能具有較優良的組織結構與保存性質。

二、糙薏仁與糙米複合性穀類擠壓產物對於給予高脂飲食糖尿病大鼠血糖與血脂代謝的影響

糙薏仁與糙米被認為是健康的穀類食物^(2,4,5)，許多研究發現其麩皮中存在豐富的營養成分與生理活性物質^(1,3)，然新鮮原料難以長期保存、品質不一、無法直接食用，故食品擠壓在穀類加工中扮演了重要的地位，透過擠壓程序可得到品質均一且可直接食用的產物，故本研究乃盼開發營養豐富、具有生理活性的複合穀類擠壓產物，是以，短期試驗先行以 A、B、C 三中擠壓產物評估其調控糖尿病之效能。結果顯示，實驗期間各組間的體重、攝食效率皆無顯著差異（表二），表示攝取各擠壓樣品皆不影響 STZ 誘導之糖尿病大白鼠生長，在餵食實驗飼料 2 週後 OGTT 試驗發現 A、B、C 擠壓產物皆

無調節糖尿病大白鼠血糖及血脂的功效，然就數據平均值而言，擠壓產物 C 於實驗結束時測得的血糖及血脂數值與實驗開始相比有些微的下降，且綜合理化特性之量測顯示 C 應當具有較好的口感與保存性質，故選擇為長期動物實驗的樣品。

長期實驗目的乃選擇短期實驗中所篩選較具調節血糖潛力的擠壓樣品探討細部對於醣類代謝之影響，而為額外評估目前常被用在調節血糖補充劑的難消化性麥芽糊精與擠壓物併用的可能性，故另增一組為二者併用；此外，為試驗給予擠壓產物或難消化性麥芽糊精於不同糖尿病患期的影響，沿用再次經馴養之短期試驗留下的實驗大鼠，新購之大鼠亦使用同樣模式誘發糖尿病，於長期試驗進行時分別為 18 週齡（短期試驗使用之大白鼠、罹患糖尿病 9 週）與 9 週齡（新購之大白鼠、罹患糖尿病 1 週），分別給予高脂飲食、總重量 20% 擠壓產物 C 取代的高脂飲食、或總重量 20% 擠壓產物 C 取代的高脂飲食額外給予難消化性麥芽糊精，另於新購的大白鼠中設置空白組（圖一）。

實驗結果顯示，經過 6 週給予高脂飲食後，18 週齡的各組別已達 24 週齡大，糖尿病病齡為 15 週，發現經排空期 4 週後其高血糖症狀不明顯，實驗開始時所測的 OGTT 試驗中僅有禁食血糖顯著較高，在管餵完葡萄糖後的各時間點血糖值則無顯著差異，似難以確認確診糖尿病，而於 6 週後實驗結束 OGTT 所測的血糖值各抽血點皆無顯著差異，且血漿果糖胺濃度與 BL 組無顯著差異，顯示在過去 3 週間的血糖控制正常而穩定，且注射過 STZ 的 18 週齡大白鼠的胰島素濃度與正常大白鼠無顯著差異，表示該批大白鼠的胰臟損傷可能輕微，所以胰島素的分泌雖然降低仍屬正常範圍，或可解釋為何此批大白鼠的血糖值為正常偏高狀態，且曾有研究指出，大鼠可自行修復輕微損傷的胰臟 β 細胞，這也可能是造成 18 週齡大鼠高血糖症狀不明顯的原因之一。

在擠壓產物 C 及難消化性麥芽糊精對於血脂代謝的影響層面上，實驗開始時實驗大鼠未測出有高膽固醇血症的現象（表三），故推測大鼠出現膽固醇代謝異常的原因應為飼料所引起。在現今動物實驗中，常以富含飽和脂肪的油脂作為飼料的油脂來源，並額外添加膽固醇、氯化膽鹼（choline chloride）及膽酸（cholic acid）做為誘導動脈硬化飲食（atherogenic diet），攝取此類飲食後主要出現的症

狀包含高膽固醇血症、血液中各種脂蛋白膽固醇濃度皆提高、肝臟膽固醇過量累積，通常併發出現胰島素抗性^(25,26)。本實驗所使用的高油脂飼料中含有10%豬油、0.5%膽固醇、0.02%氯化膽鹼及0.01%膽酸，為常見的促動脈硬化飲食。此外，實驗動物血漿TG濃度正常但肝臟TG濃度過高現象可能因為18週齡組別年紀較大且較長時間攝食高脂飼料，同時因胰島素抗性所造成的脂質代謝異常及脂肪肝症狀，但其血漿胰島素濃度與正常大鼠無顯著差異（表五），故推測為攝食高脂飲食較久所致。糞便脂質方面，攝取擠壓產物C顯著增加18週齡組別大鼠由糞便排出的TC及TG總量（表六），很可能是因為糞便中的脂質來自於所攝取的食物，而樣品組大白鼠的攝食量較負控制組及膳食纖維組多，排出的糞便量也較多。

與上述結果相比，長期試驗中9週齡各組別於血糖代謝狀況異常程度上即呈現與BL、18週齡大鼠組別明顯的不同，該批大鼠實驗開始時糖尿病病齡為1週，結束時糖尿病病齡為7週，其高血糖症狀明顯但個體差異大，由實驗開始時所測得的OGTT血糖值可知9週齡組別之大鼠有禁食高血糖及餐後高血糖的症狀（表三），且這些症狀一直延續至實驗結束，而實驗末時所測的血漿胰島素濃度顯著低於正常大白鼠（表五），顯示糖尿病誘導成功，然誠如前各段落討論，每隻大鼠所受到的胰臟損傷程度不同，可能於實驗中末期部份大鼠的胰臟代償無法負荷後乃出現第1型糖尿病的症狀，在血脂代謝上給予擠壓產物C或額外給予難消化性麥芽糊精似乎在不同的糖尿病病齡上沒有出現明顯的差異，而其中9週齡組別大鼠血漿TBARS值較18週齡組別大鼠高，可能因為9週齡組別大鼠高血糖症狀明顯，進而增加血液中葡萄糖自氧化的機會而產生大量自由基，進而增加體內的氧化壓力，同時距離注射STZ的日期較18週齡組別大鼠短，故受STZ的影響可能還未平復。綜合比較擠壓產品C對STZ誘導之糖尿病大白鼠醣類代謝的影響，結果顯示攝取擠壓產物C對9週齡、18週齡組別糖尿病大鼠的OGTT血糖值、血漿胰島素濃度、血漿果糖胺濃度皆無影響，縱再額外給予難消化性麥芽糊精亦無產生明顯的調控現象，文獻顯示本實驗擠壓產物所使用之糙米、米麩皮、糙薏仁及薏仁麩皮具調節血糖的效果^(1,2,3,4,5,6,8,9,10)，但實驗結果卻顯示擠壓產物調節STZ誘導糖尿病大鼠的醣類代謝狀況不明顯，

表六 銀食含糙薏仁、糙米、薏仁麩皮及米糠擠壓物六週後對糖尿病 Wistar 大鼠肝臟與糞便脂質之影響

	liver lipid				fecal lipid				
	TC		TG		TC		TG		
	mg/g liver	total mg	mg/g liver	total mg	TBARS	mg/g feces	total mg	mg/g feces	total mg
BL	1±1 ^b	2±2 ^b	3±2 ^b	8±4 ^b	11.29±4.05 ^a	2.8±1.2 ^b	10.3±5.2 ^{ab}	6.7±2.2 ^a	23.9±9.7 ^a
9-week-old rats									
9NC	18±11 ^a	110±89 ^a	32±20 ^{ab}	175±120 ^a	2.42±0.46 ^b	2.0±0.7 ^b	4.5±2.6 ^b	3.1±0.6 ^b	6.8±1.6 ^c
9A	21±12 ^a	94±55 ^a	28±23 ^{ab}	117±92 ^{ab}	2.56±0.42 ^b	2.8±2.6 ^b	4.7±3.9 ^b	3.2±1.0 ^b	6.7±3.5 ^c
9A/RMD	21±15 ^a	99±72 ^a	32±40 ^{ab}	133±155 ^{ab}	2.54±0.65 ^b	2.7±1.3 ^b	8.5±6.5 ^b	2.4±0.5 ^b	6.2±1.5 ^c
18-week-old rats									
18NC	26±10 ^a	113±79 ^a	57±18 ^a	234±105 ^a	2.77±0.92 ^b	3.7±1.5 ^{ab}	6.4±2.4 ^b	3.8±0.6 ^b	6.6±0.5 ^c
18A	24±16 ^a	118±100 ^a	44±21 ^a	214±158 ^a	2.24±0.57 ^b	6.2±4.1 ^a	16.8±9.3 ^a	8.1±8.0 ^{ab}	19.8±14.9 ^{ab}
18A/RMD	26±11 ^a	98±39 ^a	56±19 ^a	211±2 ^a	2.31±0.48 ^b	2.8±1.6 ^b	5.7±3.3 ^b	4.5±3.4 ^{ab}	8.9±6.0 ^{bc}

Each value is expressed as mean ± SD (n = 6). Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

這很有可能與加工過程有關係。

三、糙薏仁與糙米複合性穀類擠壓產物對於給予高脂飲食糖尿病大鼠體內氧化壓力的影響

血漿 TBARS 與肝臟 TBARS 常用於評估動物體內脂質氧化壓力，STZ 破壞胰臟細胞的機制之一即為製造大量自由基造成細胞的氧化傷害，然 18 週齡組別之大鼠注射 STZ 時間已久，且當時亦注射了具清除自由基能力的 nicotinamide，且由其血糖及血漿胰島素濃度證實當時的傷害不大（表五），故可排除此因素，9 週齡組別之大鼠中 9A 之血漿 TBARS 則顯著低於 9NC，可能與薏仁、米麩皮中含有大量的維生素 E、穀維素（ γ -oryzanol）及阿魏酸（ferulic acid）等已經證實具有抗氧化能力的物質有關^(1, 3)，楊以米麩皮餵食 STZ 誘導之糖尿病大白鼠，五週後發現大白鼠血漿、肝臟及腎臟 TBARS 值顯著下降⁽²⁷⁾。許多研究指出，糖尿病的高血糖症狀使血液中葡萄糖的自氧化機會增加而產生大量的自由基，進而使患者體內的氧化壓力增加；而大量的自由基會攻擊體內不同部位的細胞，造成細胞損傷及氧化物質堆積，這可能是造成糖尿病併發症的原因之一⁽²⁸⁾。此外第 2 型糖尿病患者血液中游離脂肪酸的增加，也很可能是造成氧化壓力增加的原因之一⁽²⁹⁾。然而在本實驗中，BL 組血漿 TBARS 與肝臟 TBARS 濃度顯著高於 18 週齡組別大鼠，比較過去學者曾以相同的糖尿病誘導方式及相同的高油脂飼料配方進行動物實驗，發現無論大鼠有無受糖尿病誘導，其血漿 TBARS 與肝臟 TBARS 濃度皆無顯著差異，且數值極相似^(30, 31)，而在本實驗中正常大白鼠所攝食的是一般的商業飼料，其脂肪酸組成為 SFA : MUFA : PUFA = 1.56 : 1.60 : 1.52；而高油脂飼料中的油脂來源為豬油，其脂肪酸組成為 SFA : MUFA : PUFA = 41 : 47 : 11。過去研究指出飲食中油脂的飽和度會影響血液中脂質過氧化的程度，當攝取的油脂中 PUFA/MUFA 比值越高，血清 TBARS 值也會提升⁽³²⁾。攝取富含 SFA 的油脂，使腸道所能吸收的 PUFA 可獲量相對減少，進而使肝臟微粒體細胞膜磷脂中 PUFA 的含量降低，而達到降低肝臟 TBARS 濃度的效果⁽³³⁾。

四、糙薏仁與糙米複合性穀類擠壓產物影響給予高脂飲食糖尿病大鼠血糖、血脂代謝及體內氧化壓力的可能原因

曾有研究指出，澱粉的糊化程度不同會影響其在生物體內的消化速率，進而影響到餐後血糖的反應⁽³⁴⁾，亦即具較高的升糖指數；而長時間攝取高升糖指數食物則會增加罹患第 2 型糖尿病的風險⁽³⁵⁾。在擠壓加工的過程中，能提供澱粉足夠的水及熱量使之糊化甚至是糊精化，然而負控制組的飼料中主要的醣類來源是生的玉米澱粉，未受加熱糊化處理。因此，攝取擠壓產物無法有效調節 STZ 誘導之糖尿病大鼠醣類代謝的原因很可能與其飼料中澱粉的糊化度較負控制組者為高有關；此外，長期動物實驗所使用以豬油為基底的高油脂飲食，已被證實會加重大鼠的糖尿病症狀⁽¹²⁾，這也很可能是使擠壓產品效果不明顯的原因之一；然而，全穀類中已被證實存在豐富的抗氧化物質^(1, 3)，或許該等抗氧化物質幫助了部分實驗動物的胰島素分泌修復，抑或在高葡萄糖氧化產生大量自由基⁽²⁸⁾的風險中直接抑制了氧化反應的程度，同時試驗動物本身即存在個體差異，造成處理組內生理指標表現產生較大的偏差。

再者，長期實驗中額外給予的難消化性麥芽糊精由玉米澱粉經高溫分解及酵素處理而來，具有易溶於水、黏度低及不被人體腸胃道消化吸收等特性。依據日本松谷化學工業株式會社 2009 年官方網站所提供的資料，該公司所製造的難消化性麥芽糊精 Fibersol®-2 具有促進腸道蠕動增加糞便體積、增加大腸中益生菌的數量、調節血糖以及調節膽固醇等生理功效，其中 Fibersol®-2 被認為能幫助消化物質快速運送至小腸遠端，而達到延緩葡萄糖吸收的效果^(36, 37, 38)，而 Wolf 等人⁽³⁹⁾更指出 Fibersol®-2 能藉由抑制腸道黏膜上的 α -glucosidase 而達到調節血糖的作用；此外，Livesey 與 Tagami 比較多篇有關 RMD 調節血糖功效的實驗，發現不同的添加方式對 RMD 降低血糖反應的能力有顯著差異，原因可能是液態的 RMD 會影響腸胃道內的流動，能將消化物質快速送往遠端小腸，進而減少醣類在近端小腸吸收的時間，達到延緩飯後血糖上升的效果⁽⁴⁰⁾，然本實驗將 RMD 配製在飼料中，實驗動物進食時並非溶解狀態，從而難以實質加快腸道內消化物質的運送，因此影響 RMD 調節血糖的作用；此外在大

多數文獻中，RMD 的給予模式為配置於單餐食物中，即短時間高劑量的給予後進行餐後血糖量測，而本實驗將 RMD 配於飼料中，屬於長時間低劑量的攝取方式，可能是其調節血糖效果不明顯的原因，顯示 RMD 調節血糖的作用需短時間內與食物共同食用。

此外，實驗動物的生理代謝狀況本即存在個體差異，在購買前於動物中心狀況不得而知，表二顯示模式動物在短期的試驗過程中，在二週攝食複合穀類擠壓物期間，動物體重、飼料消耗與利用率均無顯著差異，表三、表四中可得知六週攝食期間，同週齡的模式動物於試驗結束時期體重、飼料消耗、臟器相對重量亦沒有顯著差異，僅於副腎脂、副睪脂存在不一狀況，上述結果顯示動物的飼養環境、過程與誘導模式上應不存在明顯差別，後續許多生理指標標準偏差浮動的原因可能是攝食不同試驗樣品所導致，未來如欲針對複合穀類擠壓物評估其生理活性，或許可將擠壓物中不同成分同時設置於實驗組中，譬如額外增設膳食纖維組、有機化合物組、醇溶蛋白組等，觀察各成分對於模式動物之影響，尤其是全穀類中已被證實具有調節血糖、血脂及抗氧化活性之酚類成分^(1,3)，進而調整產品之成分組成與製程，更可釐清活性成分之屬性，增進未來產業應用或開發為健康食品時規格標準之設置。

結 論

使用 40%糙薏仁、30%糙米、10%薏仁麩皮及 20%米麩皮為原料進行擠壓之產物做為調控 STZ 誘發之糖尿病大鼠醣類代謝之評估樣品，在給予高脂飲食情況下，不論有無添加難消化性麥芽糊精，複合穀類擠壓物不影響模式動物的正常生長與肝腎功能，但對醣類、脂質代謝的調控作用不明顯，可能為實驗動物個體差異過大或擠壓物中組成複雜導致，然就糖尿病齡較短的實驗動物而言，穀類擠壓產物具有在高脂飲食下顯著降低血漿氧化壓力的活性。

聲 明

致 謝

本研究蒙廣達食品股份有限公司提供穀類原料，以及受弘陽食品股份有限公司協助製備擠壓產物，謹致謝忱。

資 金

本研究內容分別蒙經濟部工業局、中華穀類食品工業技術研究所與長庚科技大學（ZRRPF30101、ZRRPF3P0081、ZRRPF3N0091）計畫補助支持。

作者的貢獻

謝艾臻：試驗執行、數據處理、圖表製作；夏詩閔：數據判讀、試驗監督、稿件修訂；林婷怡：數據判讀、稿件修訂；林弘育：試驗執行；簡暉慈：數據判讀；江文章：試驗監督；李明怡：數據判讀、圖表修訂、稿件撰寫；鍾成沛：數據處理、數據判讀、圖表修訂、稿件撰寫；稿件內容業經所有作者閱讀並認可。

論理審查並同意參與

本研究動物實驗接續國立臺灣大學實驗動物照護及使用委員會 96 實證字第 39 號審核通過內容，於民國 98 年 2 月 16 日送件核備在案。

利益衝突

所有作者均無利益衝突。

參考文獻

1. Kodape A, Kodape A, Desai R. Rice bran: Nutritional value, health benefits, and global implications for aflatoxin mitigation, cancer, diabetes, and diarrhea prevention. Food Chem. 2025; 464: 141749.
2. Ikeda N, Yamaguchi M., Nishi N. Health and economic impacts of increased brown rice consumption on type 2 diabetes in Japan: A simulation study, 2019-2029.

- Nutrients 2025; 17: 532.
3. Kim HK, Cho DW, Hahm YT. The effects of coix bran on lipid metabolism and glucose challenge in hyperlipidemic and diabetic rats. J Korean Soc Food Sci Nutr. 2000; 29: 140-146.
 4. Liu SH, Wu WH, Tzeng HP, Chiang W, Chiang MT. Dehulled adlay (*Coix lachryma-jobi* L.) ameliorates hepatic gluconeogenesis and steatosis in streptozotocin/high-fat diet-induced diabetic rats. J Food Drug Anal. 2023; 31: 683-695.
 5. Yeh PH, Chiang W, Chiang MT. Effects of dehulled adlay on plasma glucose and lipid concentrations in streptozotocin-induced diabetic rats fed a diet enriched in cholesterol. Int J Nutr Res. 2006; 76: 299-305.
 6. 楊莉君、陳美櫻、許文音、白永河、喻小珠、蔡敬民。薏仁對高血脂病患血脂質及血糖的影響。1998。食品科學；25：727－736。
 7. Roman Ramos R, Alarcon-Aguilar F, Lara-Lemus A, Flores-Saenz JL. Hypoglycemia effect of plants used in Mexico as antidiabetics. Arch Med Res. 1992; 23: 59-64.
 8. Tseng YH, Chang CW, Chiang W, Hsieh SC. Adlay bran oil suppresses hepatic gluconeogenesis and attenuates hyperlipidemia in type 2 diabetes rats. J Med Food 2019; 22: 22-28.
 9. Zhang G, Li Z, Zhang S, Bai L, Zhou H, Zhang D. Anti-type II diabetic effects of coix seed prolamin hydrolysates: Physiological and transcriptomic analyses. Foods 2024; 13: 2203.
 10. Magi CE, Rasero L, Mannucci E, et al. Use of ancient grains for the management of diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. Nutr Metab Cardiovasc Dis. 2024; 34: 1110-1128.
 11. Anderson RA, Conway VFP, Griffin EL. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. Cereal Sci Today 1969; 14: 4-7.
 12. Bachmann OP, Dahl DB, Brechtel K, et al. Effects of intravenous on dietary lipid challenge on intramyocellular lipid content and the relation with insulin sensitivity in humans. Diabetes 2001; 50: 2579-2584.
 13. Buettner R, Parhofer KG, Woenckhaus M, et al. Defining high-fat-diet rat models: Metabolic and molecular effects of different fat types. J Mol Endocrinol. 2006; 36: 485-501.
 14. Masiello P, Broca C, Gross R, et al. Experimental NIDDM: Development of a new model in adult rats administered streptozotocin and nicotinamide. Diabetes 1998; 47: 224-229.
 15. Friedewald WT, Levy RI, Fredrickson DS. Estimation of the concentration of low-density lipoprotein cholesterol in plasma, without use of the preparative ultracentrifuge. Clin Chem. 1972; 18: 499-502.
 16. Folch J, Lees M, Sloane Stanley GH. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. J Bio Chem. 1975; 226: 497-509.
 17. Carlson SE, Goldfarb S. A sensitive enzymatic method for the determination of free and esterified tissue cholesterol. Clinica Chimica Acta. 1977; 79: 575-582.
 18. Uchiyama M, Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. Anal Biochem. 1978; 86: 271-278.
 19. Goodman DE, Rao RM. Amylose content and puffed volume of gelatinized rice. J Food Sci. 1984; 49: 1204-1205.
 20. de Mosqueda MB, Perez CM, Juliano BO. Varietal differences in properties of extrusion-cooked rice flour. Food Chem. 1986; 19: 173-188.
 21. Li J, Corke H. Physicochemical properties of normal and waxy Job's tears (*Coix lachryma-jobi* L.) Starch. Cereal Chem. 1999; 76: 413-416.
 22. 蔡昭明。1990。薏仁粉的擠壓加工及其產品理化特性之研究。國立臺灣大學食品科技研究所碩士論文。臺北。
 23. Owusu-Ansah J, van de Voort FR, Stanley DW. Physicochemical changes in corn-starch as a function of extrusion variables. Cereal Chem. 1983; 60: 319-324.
 24. Mercier C, Charbonniere R, Grebaut J, et al. Formation of amylase-lipid complexes by twin-screw extrusion cooking of manioc starch. Cereal Chem. 1980; 57: 4-9.
 25. Jiao S, Matsuzawa Y, Matsubara K, et al. Abnormalities of plasma lipoproteins in a new genetically obese rat with non-insulin-dependent diabetes mellitus (Wistar fatty rat). Int J Obes. 1991; 15: 487-495.
 26. Machleder D, Ivandic B, Welch C, Castellani L, Reue K, Lusis AJ. Complex genetic control of HDL levels in mice in response to an atherogenic diet coordinate regulation of HDL levels and bile acid metabolism. J Clin Invest. 1997; 99: 1406-1419.
 27. 楊玉鈴。2006。比較薏仁麩皮與米麩皮對第二型糖尿病大白鼠血糖血脂之影響。國立臺灣海洋大學食品科技系碩士論文。基隆。
 28. Brownlee, M. Biochemistry and molecular cell biology of diabetic complications. Nature 2001; 414: 813-820.
 29. Levin BE, Dunn-Meynell AA. Reduced central leptin sensitivity in rats with diet-induced obesity. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2002; 283: R941-R948.
 30. 趙盈鈞。2006。鹼性電解水對STZ所誘發之第二型糖尿病大白鼠醣類代謝、脂質代謝之影響。國立臺灣海洋大學食品科技系碩士論文。基隆。
 31. 陳佳音。2007。綠豆水對第二型糖尿病大白鼠醣代謝與脂質代謝之影響。國立臺灣海洋大學食品科技系碩士論文。基隆。
 32. Lu YF, Lu S. Influence of dietary fat saturation on lipid peroxidation of serum and low density lipoprotein in rats. Nutr Res. 2002; 22: 463-472.
 33. Lokesh BR, Mathur SN, Spector AA. Effect of fatty acid saturation on NADPH-dependent lipid peroxidation in rat liver microsomes. J Lipid Res. 1981; 22: 905-915.
 34. Holm J, Lunadquist I, Bjorck I, Eliasson AC, Asp NG. Degree of starch gelatinization, digestion rate of starch *in vitro*, and metabolic response in rats. Am J Clin Nutr. 1988; 47: 1010-1016.
 35. Krishnan S, Rosenberg L, Singer M, et al. Glycemic index, glycemic load, and cereal fiber intake and risk of type 2 diabetes in US black women. Arch Intern

- Med. 2007; 167: 2304-2309.
36. Satouchi M, Wakabayashi S, Ohkuma K, Fujiwara K, Matsuoka A. Effects of indigestible dextrin on bowel movements. *Jpn J Nutr.* 1993; 51: 31-37.
37. Tokunaga K, Matsuoka A. Effects of a food for specific health (FOSHU) which contains indigestible dextrin as an effective ingredient on glucose and lipid metabolism. *J Jpn Diabetes Soc.* 1999; 42: 61-65.
38. Wakabayashi S, Kishimoto Y, Matsuoka A. Effects of indigestible dextrin on glucose tolerance in rats. *J Endocrinol.* 1995; 144: 533-538.
39. Wolf BW, Wolever TMS, Bolognesi C, Zinker BA, Garleb KA. Glycemic response to a rapidly digested starch is not affected by the addition of an indigestible dextrin in humans. *Nutr Res.* 2001; 21: 1099-1106.
40. Livesey G, Tagami H. Intervention to lower the glycemic response to carbohydrate foods with a low-viscosity fiber (resistant maltodextrin): Meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Clin Nutr.* 2009; 89: 1-13.

糙薏仁與糙米複合穀類擠壓物對餵食高脂飲食糖尿病大鼠氧化壓力的調節效果

謝艾臻^{1†} 夏詩閔^{2,3,4,5,6†} 林淨怡^{7,8} 林弘育¹ 簡暉慈^{7,9} 江文章^{1,10}
李明怡^{7,11,12*} 鍾成沛^{7,8,11*}

¹國立臺灣大學食品科技研究所

²臺北醫學大學保健營養學系

³臺北醫學大學食品安全學系

⁴臺北醫學大學代謝與肥胖科學研究所

⁵臺北醫學大學營養醫學研究中心

⁶臺北醫學大學消化醫學研究中心

⁷長庚科技大學保健營養系

⁸長庚科技大學食品暨化妝品安全研究中心

⁹長庚科技大學高齡暨長期照護研究中心

¹⁰國立臺灣大學食品與生物分子研究中心

¹¹長庚科技大學健康產業科技研究所

¹²長庚科技大學藥物研發中心

(收稿日期: June 1, 2025. 接受日期: August 11, 2025.)

摘要 第 2 型糖尿病 (diabetes mellitus, DM) 主要症狀為血中葡萄糖濃度過高並伴隨體內氧化壓力 (oxidative stress) 上升, 飲食治療是血糖控制中最重要的一環。研究證實, 薏仁 (*Coix lachryma-jobi* L. var. *ma-yuen* Stapf) 與稻米 (*Oryza sativa*) 的可食部位具輔助控制糖尿病的作用, 故本研究利用糙米、米麩皮、糙薏仁、薏仁麩皮開發具保存性、品質均一的擠壓物, 並評估其對糖尿病大鼠生理代謝及氧化壓力的影響, 盼開發具保健功效的複合穀類產品。經評估不同比例穀類原料組合進行擠壓, 選擇性狀、生理活性較佳者, 乃以 40% 糙薏仁、30% 糙米、10% 薏仁麩皮及 20% 米麩皮混合之擠壓物為樣品, 探討其對於調控給予高脂飲食之鏈脲佐菌素 (streptozotocin, STZ) 誘發糖尿病大鼠醣類代謝及體內氧化壓力之影響, 結果顯示不論有無添加難消化性麥芽糊精 (resistant maltodextrin, RMD), 穀類擠壓產物不影響動物正常生長與肝腎功能, 但對醣類代謝調控不明顯, 可能為動物個體差異過大所致, 然就糖尿病齡較短的實驗動物而言, 穀類擠壓產物具有在給予高脂飲食下顯著降低體內氧化壓力的活性。

* 通訊作者: 鍾成沛、李明怡

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, cpchung@mail.cgust.edu.tw

關鍵字: 糖尿病、氧化壓力、糙薏仁、糙米、擠壓產物、高脂飲食