

國際稻米種原之升糖評估策略

文圖 / 王柏蓉

糖尿病是一種慢性代謝異常疾病，根據世界衛生組織調查，近年來全球糖尿病患人數持續激增，從 1980 年的 1 億 8 千萬人遽升至 2014 年的 4 億 2 千 2 百萬人。在 2016 年，即有 160 萬人死於糖尿病，另有 220 萬人因糖尿病併發症去世，高踞全球第 7 大死因。其中又以第二型糖尿病罹患率最高。

升糖指數 (glycemic index, GI) 的定義為食用含 50 公克碳水化合物的食品一定時間後，血糖變化與攝取含有 50 毫升葡萄糖標準品的比值。一般澱粉類食品可依 GI 區分為低 GI 食品 (GI < 55)、中 GI 食品 (55-70) 及高 GI 食品 (> 70)，作為該食品造成飯後血糖提升風險的指標，糖尿病患者被建議以低 GI 飲食控制病情。稻

米 (*Oryza sativa* L.) 是重要的糧食作物，餵養世界一半以上人口，一般咸認為稻米澱粉容易被分解消化，屬高 GI 食物。事實上，米飯升糖指數通常有糯米 > 蓬萊米 (粳米) > 在來米 (秈米) 之趨勢，主要與其白米直鏈澱粉含量呈負相關，顯示水稻種原已存在升糖指數的高歧異度。由於水稻之升糖指數亦受儲存蛋白、非澱粉類碳水化合物，甚至是澱粉與脂肪酸結合產生之次級結構所影響，因此若單純由直鏈澱粉含量、糊化溫度等單一性狀為篩選指標，恐不易取得具備低升糖指數的水稻品種 (系)。有鑑於此，國際水稻研究所 (International Rice Research Institute, IRRI) 穀物品質與營養中心 (Grain Quality and Nutrition Center, GQNC) 已建置完整的

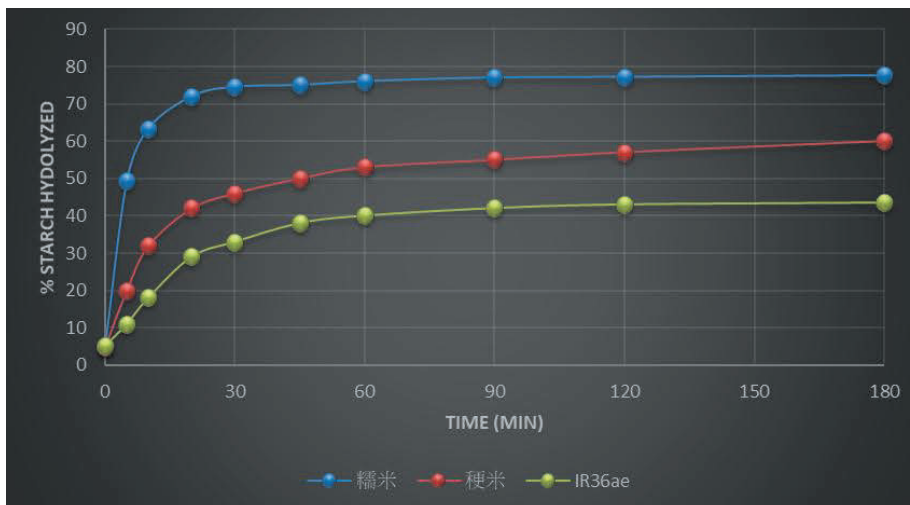


圖 1. 不同直鏈澱粉含量的水稻種類之澱粉消化效率亦不同，「IR36ae」係 IRRI 在 GI 相關試驗平台所使用之 in-house 標準品

水稻 GI 相關分析系統，以直鏈澱粉 / 支鏈澱粉比例、抗性澱粉含量、澱粉水解效率係數 (k-value) 等參數作為澱粉消化效率指標，並從育種試驗材料中，篩選到直鏈澱粉 (amylose) 與抗性澱粉含量顯著較高，且澱粉水解效率較低的硬秈材料「IR36ae」，作為該中心在分析試驗所使用之 in-house 標準品 (圖 1)，取代冗長的人體試驗及索價不貲的商用標準品，有效且較經濟地篩選具低 GI 潛力的水稻品系。

一、抗性澱粉與慢速消化澱粉含量測定

白米中有 90% 以上的澱粉 (w/w)，依其結構分為直鏈澱粉 (Amylose) 及支鏈澱粉 (Amylopectin)。分子篩層析技術 (SEC, Size-exclusion chromatography) 適用於較大分子量 (約 2 kDa 以上) 樣品，是利用較高分子量的聚合物在管柱的滯留時間短，

且分子量較低的聚合物在管柱滯留時間較長的原理，將兩者分離，藉此得知此聚合物分子量的分布，係 IRRI 用來剖析白米原料直鏈及支鏈澱粉比例之技術。人體最主要的澱粉消化發生在小腸腔 (胰澱粉酶或 α -amylase) 及小腸黏膜上皮細胞，當澱粉水解成葡萄糖、少量的果糖及半乳糖，最後切割成單醣後，再由小腸絨毛吸收，使血糖濃度上升。依照澱粉消化利用效率的不同，可將澱粉區分為快速消化澱粉 (rapid digestible starch, RDS)、慢速消化澱粉 (slowly digestible starch, SDS) 及抗性澱粉 (resistant starch, RS)。依據 Englyst 等人 (1992) 定義，在 21-120 分鐘被分解利用的稱為慢性消化澱粉，超過 120 分鐘則是抗性澱粉，屬於不在小腸消化吸收的澱粉，直接進入結腸為細菌發酵利用，在生理作用效果近似膳食纖維，除了有

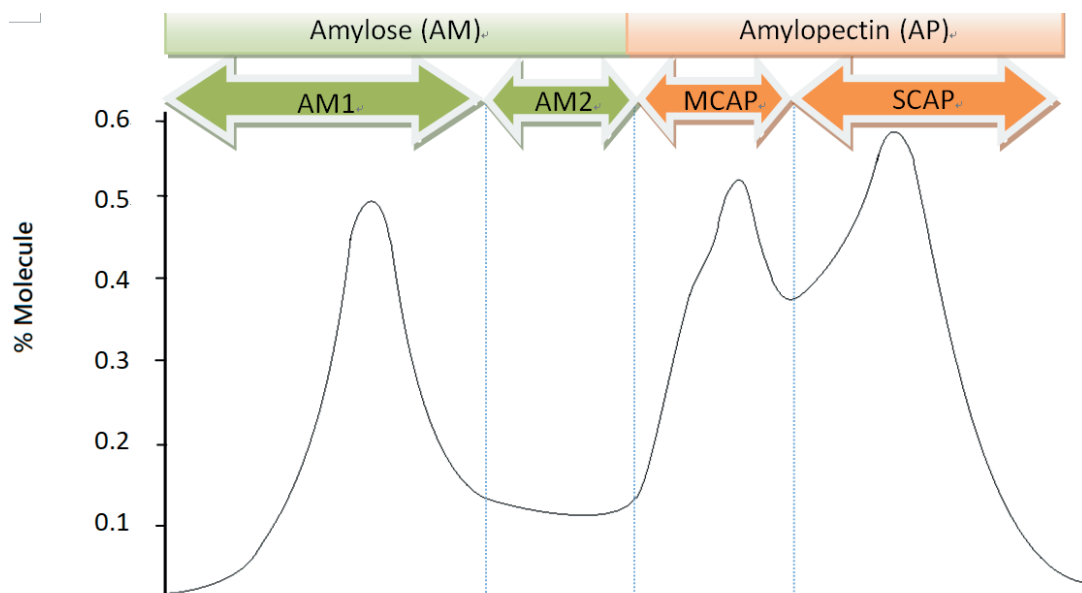


圖 2. 白米以分子篩選層析 (SEC) 將澱粉組成按分子量大小分離

效降低 GI，更可強化腸道益生菌相，降低罹患大腸癌風險。一般而言，澱粉食物中 SDS 與 RS 含量愈高，人體攝食後血糖上升速度則愈緩慢。白米澱粉依其聚合度 (degree of polymerization, DP) 大小，再細分為 DP >1000 者以及 DP 121-1000 者，前者為真實直鏈澱粉 (amylose 1, AM1)，後者則是長鏈支鏈澱粉，又稱為偽直鏈澱粉 (amylopectin 2, AM2)。另外中等支鏈澱粉 (medium-chain amylopectin, MCAP) 屬於 DP37-120 者，而 DP 6-36 則屬於短鏈支鏈澱粉 (short-chain amylopectin)(圖 2)，若白米澱粉中分子量較高的 AM1 比例高，則代表此白米的 SDS 較高，對應之 GI 亦

較低。

二、白米飯澱粉水解試驗 - 澱粉水解效率係數 k 值

即便已建置上述 RS/SDS 標準化分析系統，對於數以萬計的水稻育種材料篩選需求而言，累積的試驗費用仍十分驚人，每日分析通量仍不足。有鑒於此，GQNC 亦開發以體外澱粉水解 (*in vitro* starch amylolysis) 試驗來估算澱粉水解速率，此試驗流程包括將均質、烹煮過之白米樣品以胃蛋白酶分解，再使用胰酶 (pancreatin)/ 葡萄糖苷酶 (amyloglucosidase, AMG) 在 37°C 恆溫水解，分別在 5、10、20、30、45、60、90、120 及 180 分鐘的時間點，

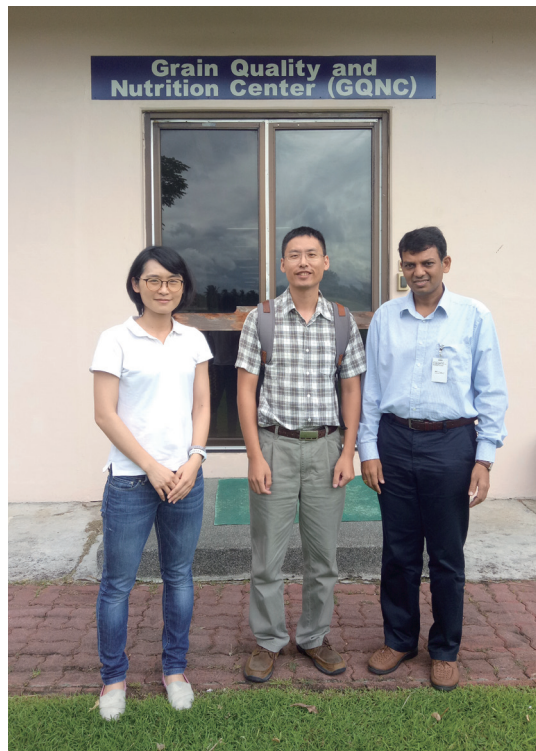


圖 3. 為建立水稻升糖指數評估平台，臺灣研究團隊赴 IRRI 穀物品質與營養中心進行短期研究 (由左至右為筆者、農試所吳東鴻博士及中心主任 Nese Sreenivasulu 博士)

以分光光度計讀取 510 nm 吸光值 (空白處理為水, 用經過與試液相同酵素處理的葡萄糖溶液標準品建立檢量線), 用來估算該樣品之澱粉消化速率, 求得之消化速率代入澱粉水解動力算式 (kinetics of starch hydrolysis): $C=C_{\infty}(1-e^{-kt})$ (C : 於 t 時間之澱粉水解速率、 C_{∞} : 水解 180 分鐘後的平衡澱粉水解率) 後即可得動力學常數 k (kinetic constant, min^{-1})。 k 值愈低, 表示受測基質被水解消化效率較低, 亦即該碳水化合物組成中之 AM1 成分愈高、相對之支鏈澱粉之鏈長愈短。澱粉水解效率係數 k 值 (k -value) 的量測體系較 RS/SDS 分析系統更經濟有效率, 目前已被 IRRI 廣泛應用為低 GI 育種初篩手段。

三、展望 以種子萌芽模式預測升糖指數之可行性

IRRI 米質中心主持人 Nese Sreenivasulu 博士 (圖 3) 指出, 動物

體內消化澱粉的模式, 與種子萌芽過程儲存澱粉被運移利用的模式相近。種子萌芽時, 儲存性澱粉會經由內切水解酶 (endohydrolases)、葡萄糖苷酶 (glucosidases) 作用, 將直鏈澱粉的 α -1,4 葡聚糖鏈結水解, 釋放出游離糖; 支鏈澱粉則以去支鏈酶作用於麥芽糊精的 α -1,6 分支, 以利果糖釋放。因此, 作用於澱粉之相關酵素, 亦決定糖類的釋放效率, 從而左右 GI 的高低。據此, 運用種子發芽過程內生之澱粉水解酵素, 觀測種子於萌芽期間消化儲存澱粉之情形, 比目前使用體外澱粉水解試驗來估測澱粉在人體內被消化的速率, 理論上可行且更經濟。唯欲導入此模式於常規白米 GI 篩選平台, 尚需累積前置背景資料。