

低消化性蛋白質含量稻米 品種之改良與研究現況

撰文/陳榮坤·黃文理

前言

稻米是臺灣最主要的糧食來源，水稻的生產一直以來與經濟發展及國人生活息息相關，可說是提供人民生活最基本的需求，而水稻田在生態上亦具有涵養地下水源與調節氣候的重要功能。長期以來，政府為確保糧食供應無虞，除致力於品種改良及生產技術改進之外，在政策上採取各項有利於水稻生產的措施，為臺灣地區早期稻作生產奠定良好基礎。時至今日，在我國國民生活習慣逐漸國際化及飲食多樣化的趨勢下，每年每人白米消費量已降至 48 公斤以下，加以國際情勢與國內生產環境均不利於稻米產業之競爭力，為了確保國內糧食安全與生態環境的調節，政府仍竭力維持此一栽培面積最廣、栽培戶數最多的產業。

目前我國糧食尚不虞匱乏，然而因為耕地及農業水資源的移用、地球溫室效應、氣候異常等不確定因素，仍應維持適當稻作生產規模及主要糧食自給率。因此，面對高度競爭的生產環境，稻作產業亦應隨之調整，以精緻及多元化的發展與應用，開發稻米新用途，迎合不同層面消費者的需求，擴大稻米消費量，建立高產值與高利潤之稻作產業。

水稻多元化品種的研發與推廣，可將傳統主食用的稻米，進一步擴展延伸至各式養生保健功能，擴大國內對稻米的消費，藉由富營養保健效益的產品內容，增強我國稻米產業的競爭力，降低稻米質

易自由化的衝擊。因此，水稻保健用品種的選育與利用，將可形成市場區隔，提供稻米產業更多不同用途的發展方向；其中低消化性蛋白質含量品種的開發即為極具潛力的方向之一。

低消化性蛋白質含量水稻品種主要是在總蛋白質含量不變的情況下，降低白米中可以被人體消化吸收的蛋白質含量，並且提升非消化性蛋白質含量的水稻品種。根據日本研究者的觀點，一般把可消化吸收蛋白質含量在 4% 以下的稻米稱為低蛋白米，此類水稻品種主要應用在慢性腎臟病患及胺基酸代謝功能異常患者的低蛋白飲食日常保健。世界各國的末期腎臟疾病人口正以驚人的 7% 年成長率增加，臺灣末期腎臟病的發生率與盛行率一直都是世界第一，慢性腎臟病也是臺灣十大死因之一。稻米為國人主食，國產稻米雖然僅含約 6-9% 的植物性蛋白質，慢性腎臟病患及胺基酸代謝功能異常的患者仍不宜長期直接食用，只能食用經過加工的低蛋白食品；然而這些替代食品價格高昂、口味差，長期下來對食物需求、進食樂趣將大幅減低，不但增加患者經濟負擔與精神壓力，亦不容易長期堅持食用，不利於病情控制。國內雖有引進低蛋白米，但低蛋白米為澱粉加工後重新塑成米粒狀之食品，價格昂貴，非一般民眾可負擔，而且口感又與一般稻米不同，使得患者難以接受。因此，開發適合低蛋白飲食需求患者食用，且價格合理之低消化性蛋白米，再配合藥物治療，可減輕患者腎臟之負擔，有其市場

發展潛力。

目前國內尚無此類型水稻品種推出，農委會所屬各農業試驗改良場所已積極引進相關種原進行改良，期望於近年內培育出適合臺灣地區氣候環境栽培的優質低消化性蛋白質含量品種，以嘉惠國內需要低蛋白飲食的患者，更可增加國內米食消費量。然而，在水稻育種策略上，除了導入相關低消化蛋白米種原外，選拔低總蛋白質含量，以及針對可消化性蛋白質於米粒中的分布進行加工碾製，均為降低米飯中可消化蛋白質含量的途徑。

稻米蛋白質的種類與分布

稻米中粗蛋白質含量因品種而異，約占 5-12%，主要受遺傳因子的控制，然而氣候、土壤及栽培管理（例如插秧期、插植密度、肥料與病蟲害管理等）條件等外在環境因素，也會對稻米蛋白質含量有不同程度影響。稻米中蛋白質含量的分布會因為在穀粒的部位不同而有差異，一般而言，種皮和胚的蛋白質含量高於胚乳，愈往胚乳內部深層，則含量愈低，在胚乳中心僅有少量的蛋白質體，此種情形尤以低蛋白質含量稻米為甚；因此，高蛋白水稻之蛋白質含量分布則顯得較低蛋白水稻更均勻。

稻米中蛋白質依其功能性可分為作為種子儲存物質的儲藏性蛋白 (seed storage protein)、維持種子活性之代謝與結構蛋白 (structural and metabolic proteins) 及保護蛋白 (protective proteins)。水稻種子中主要為儲藏性蛋白，占穀粒總蛋白質含量的 50% 左右，其含量多寡與組成會影響種子的營養成分與品質，也是種子發芽與幼苗生長時的主要氮源。稻米儲藏性蛋白質依溶解性質不同，可分為水溶性的白蛋白 (albumins)、鹽溶性的球蛋白 (globulins)、醇溶性的醇溶蛋白 (prolamines) 及酸或鹼溶性的穀蛋白質 (glutelins) 四種，所占的比例大約為 5%、10%、5% 及 80%。此四種蛋白質於稻米中呈現輻射狀分布，白蛋白及球蛋白多為與細胞質或代謝活性相關之蛋白，主要集中在果皮、糊粉層和胚等組織中，越往

穀粒中心則含量愈低；醇溶蛋白及穀蛋白多為儲藏性蛋白，主要分布於胚乳，然而醇溶蛋白較其它三種蛋白質，在稻米中的分布更為均勻。在稻穀加工碾製過程中，果皮、大部份糊粉層、胚及少量胚乳被碾除，分布於這些組織中的蛋白質亦一併去除，因此碾製後獲得的精米主要以醇溶蛋白及穀蛋白為主。

醇溶蛋白及穀蛋白主要分佈於糊粉層以下之胚乳澱粉層，與澱粉顆粒作緊密的排列，兩者在營養價值及消化特性上有很大的差異。水稻穀粒儲藏性蛋白質主要累積在蛋白質體 (protein body, PB) 中，可分為 PB- I (protein body I) 與 PB- II (protein body II)。PB-I 主要含有醇溶蛋白，佔 20-30%，對蛋白分解酵素 pepsin 具抗性；PB- II 包含穀蛋白與球蛋白，約佔 70-80%。只有 PB- II 所含的蛋白質可被人體所消化吸收，被歸類為可消化性蛋白，而 PB-I 則無法被代謝利用。

然而穀蛋白與醇溶蛋白兩者含量間具有密切之互補關係，也就是說，當穀蛋白含量下降時，醇溶蛋白有明顯增加的現象；國內研究則指出，醇溶蛋白含量增加，可能降低梗稻的米飯食味品質。國內以梗型米為主要消費型態，在選育低消化蛋白含量水稻品種時，應特別留意醇溶蛋白對食味品質的負面效應。

因此，對於慢性腎臟病患及胺基酸代謝功能異常的患者而言，為減輕對腎臟的負擔，必須食用低蛋白的食品。就經濟效益、食味口感及以米飯為主食的國人而言，育成具低消化蛋白含量之水稻新品種有其必要性，其關鍵技術在於降低米飯中的穀蛋白與球蛋白含量。

影響稻米蛋白質含量的分子遺傳機制

由於稻米蛋白質含量容易受到環境條件的影響，其蛋白質含量是基因型與環境交感作用產生的結果，遺傳率較低。根據 Tsuzuki 等 (1986) 及 Shenoy 等 (1991) 研究顯示，蛋白質含量的遺傳率約

為 58.8% 及 71.0%。稻米蛋白質含量屬於由多基因控制的數量性狀，主要受累加性效應控制，亦有母體效應和花粉直感現象。

水稻穀粒儲藏性蛋白質分析傳統以 SDS-PAGE 電泳法 (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis) 進行。Villareal 等 (1978) 從白米純化之蛋白中發現主要包含分子量約 38、25 及 16kDa (kilodalton) 三群蛋白；研究相繼發現穀粒中有一分子量 60kDa 左右的穀蛋白多肽前體 (precursor) 與燕麥及豆科作物 11S 蛋白 (legumin-like) 具同源性，可被降解為 40kDa 與 20kDa 左右兩個次單元，上述 38 與 25kDa 蛋白應為穀蛋白之次單元，而 16kDa 蛋白則為醇溶蛋白，類似的結果已陸續被報導。目前普遍認為水稻種子中穀蛋白多肽前體分子量為 55-57kDa 左右，經轉譯後修飾作用可被降解為 37-39kDa 酸性次單元 (acidic subunits) 與 21-23kDa 鹼性次單元 (basic subunits)。此外，電泳分析圖譜上，也包括分子量介於 10-16kDa 之醇溶蛋白與 26kDa 左右之球蛋白。(圖一)

在遺傳機制上，穀蛋白至少由 10 個以上之同源基因家族共同編碼組成，主要分為 *GluA* 與 *GluB* 兩群，所有已知的穀蛋白基因均含有 3 個短片段之

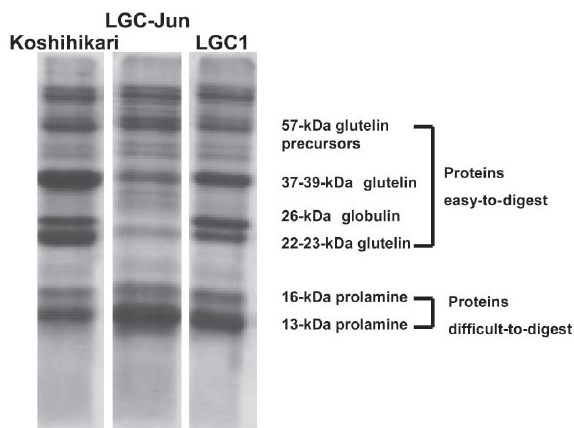
不表現序列 (intron)，兩個在酸性次單元內，另一個位於鹼性次單元中。近期研究則指出穀蛋白至少有 15 個同源基因，並且進一步將其分為 *GluA*、*GluB*、*GluC* 與 *GluD* 四群。

LGC-1(low glutelin content-1) 是最早從水稻誘變系中選育出的低穀蛋白水稻新品種，研究顯示該品種之低穀蛋白特性可能是一顯性突變 (*Lgc1*) 造成 (Iida *et al.* 1997)。Kusaba 等 (2003) 進一步確認 *Lgc1* 為位於第二條染色體短臂上 *GluB4* 與 *GluB5* 兩個控制穀蛋白的高度同源且正反向重複 (inverted repeat) 基因間，有一段 3.5kb(kilobase) 的片段發生缺失而導致穀蛋白含量降低，且為單一顯性突變。此外，由於球蛋白亦為可消化性蛋白質，於 1998 年日本學者亦發現缺失 26kDa 球蛋白之 *gbl1* 水稻突變系。目前 *gbl1* 與 *Lgc1* 突變系為水稻低消化性蛋白含量育種之主要種原。

低消化性蛋白質含量稻米品種之育種改良現況

對慢性腎臟病患及胺基酸代謝功能異常的患者而言，為了減輕腎臟的負擔，通常必須減少米飯的攝取或食用經特殊處理後口感較差且高價位之食用澱粉米，導致飲食之不便與增加患者經濟上的負擔。所以，育成具低消化蛋白含量之水稻新品種，對以米飯為主食的地區實有其必要性，而降低米粒中的可消化性蛋白含量被認為是首要且有效的策略。早於 1989 年日本為擴大其國內稻米需求量，開始進行「新形質」米種的開發，低消化性蛋白質含量稻米品種即為其中一項重要育種目標；並且在選育出相關品種以後，即開始進行低消化性蛋白米之臨床實驗，發現對以米飯為主食的慢性腎臟病患者而言，食用低消化性蛋白米品種「LGC-1」，可以有效減少蛋白質攝取量及降低血清肌酸酐 (serum creatinine)，並且提供充足熱量，進一步延緩病程進展。

在日本，自從 Iida 等學者於 1993 年從水稻品種「Nihonmasari」誘變系中選育出具有低穀蛋白 *Lgc1*



Nishimura *et al.* (2005)。

圖一 利用SDS-PAGE電泳分析糙米儲藏性蛋白質

突變之「LGC-1」水稻新品種後，相繼於 1998 年發表自水稻品種「Koshihikari」誘變選獲具有低球蛋白之 *glul* 水稻突變系，並於 2005 年利用此兩個誘變種原，進行兩基因座的堆疊育種，選育出具有低穀蛋白及低球蛋白的品種「Lgc-katsu」以及「Lgc-Jun」。(表一)

然而，在水稻育種過程中，以傳統 SDS-PAGE 或二維電泳法 (two-dimensional electrophoresis) 進行儲藏性蛋白質檢測，操作繁瑣，而且必須等到穀粒成熟時才能進行分析。利用 DNA 分子標誌檢測技術將可克服傳統育種所遭遇之瓶頸，不僅可以有效且快速於幼苗期偵測植株是否帶有目標基因，不受栽培環境條件的影響，方法省時省工，並且可以針對多個目標基因進行堆疊、選拔效率高，已廣泛被應用至許多作物新品系之選育。因此，在 2005 年 Wang 等學者開始利用 SSR (simple sequence repeat) 系統初步建立與 *Lgc1* 緊密連鎖之 DNA 分子標誌；2009 年 Morita 等學者進一步以 *Lgc1* 突變體為材料，於第二條染色體上 *GluB4* 與 *GluB5* 兩個控制穀蛋白的基因發生缺失 3.5kb 片段內與缺失片段前後兩端序列，分別設計專一性引子，可精準檢測植株之基因型，並且開發球蛋白基因 *gbl1* 專一性分子標誌，輔助選育同時兼具低穀蛋白與低球蛋白，適合低蛋白飲食之水稻新品系。

目前臺灣也引進日本低消化性蛋白質水稻品種，以利選育適合於國內氣候環境栽培生產的低消化性蛋白質水稻品種。行政院農業委員會臺南區農業改良場與國立嘉義大學合作，以日本低消化性蛋白質水稻品種「春陽」(LGC-1 的後代) 為雜交親本，透過 SDS-PAGE 電泳分析及開發專一性 DNA 分子標誌，於 F₃ 世代進行檢測分析，成功選育優質抗病且低穀蛋白之水稻新品系「南稈育 1011013 號」，其糙米穀蛋白比例從 50% 大幅降低至 20% 左右，已於 2013 年進入區域試驗產量調查。花蓮區農業改良場則利用 Morita 等人於 2009 年開發之 *Lgc1* 專一性 DNA 分子標誌作為篩選工具，並配合 SDS-PAGE 電泳，分析「春陽」與「臺稈 16 號」雜交後代之 F₈ 品系，選拔出具低穀蛋白特性之「花稈育 154 號」，具有短芒易辨識的特色，於 2014 年進入區域試驗產量調查。未來，這些新品系經過命名推廣以後，將可以提供有低蛋白質飲食需求的患者作為飲食調節，減輕其腎臟負擔。

結語

國產稻米的品質相當優良，然而隨著人民生活水準日益提升，消費者在要求優質與安全之外，如能賦予稻米養生保健的功能，將可建立寬廣與厚實的稻米市場，創造更高的附加價值，使臺灣稻米產

表一 LGC-潤(Lgc-Jun)與LGC-活(Lgc-katsu)相較越光米(Koshihikari)具有較低的穀蛋白與球蛋白含量

Variety name	Protein content (% of dry matter)	Easy-to-digest protein ²⁾ (% of total protein)	Glutelin (% of total protein)	26-kDa globulin (% of total protein)	Prolamine (% of total protein)	Eating quality
LGC1	7.5	55.1	22.1	14.1	44.9	Moderate
LGC-Katsu	7.6	37.8	13.4	0.0	62.2	Moderate
LGC-Jun	7.7	40.6	16.5	0.0	59.4	Good
Koshihikari	7.5	74.6	47.5	9.4	25.4	Superior

¹⁾10% milled.

²⁾Excluding the 13-and 16-kDa proteins.

業永續發展。

因此，隨著消費意識型態的改變，具有保健機能的農產品將逐漸受到消費者重視。低消化性蛋白質米可以減少人體對米飯蛋白質的消化吸收量，是提供慢性腎臟病患及胺基酸代謝功能異常患者在飲食調節上的最佳選項。在育種策略上，除了導入低消化性蛋白質相關基因外，選拔低總蛋白質含量，以

及粒型大可進行深度碾白，均為降低可消化性蛋白質含量的途徑。透過傳統育種與分子標誌輔助選種技術，將可快速有效選育出具有機能性的新品種，強化米食的營養及保健價值，除了確保國人身體健康之外，還能享受新鮮、自然、在地栽培的國產米，提升國內稻米經濟價值及產業競爭力。

AgBIO

陳榮坤 行政院農業委員會 臺南區農業改良場嘉義分場
副研究員
黃文理 國立嘉義大學 農藝學系 教授

參考文獻

1. 王妙屹等人。2014。利用分子標誌輔助低穀蛋白水稻新品系之選育。作物科學講座暨研究成果發表會。2014年4月24日，臺灣農藝學會，嘉義市。
2. 林泰佑等人。2014。利用分子標誌輔助低消化性蛋白水稻品種研發。作物科學講座暨研究成果發表會。2014年4月24日，臺灣農藝學會，嘉義市。
3. 洪梅珠等人 (2000) 米飯食味特性與白米醇溶性及鹼溶性蛋白質間相關之研究。臺中區農業改良場研究彙報67:1-10。
4. 陳榮坤 (2012) 保健用稻米品種的發展概況。臺南區農業專訊 82:4-7。
5. Cagampang, G. B., et al. (1966) *Studies on the extraction and composition of rice proteins*. Cereal Chemistry 43:145-155.
6. Hayakawa, S., et al. (1987) *Radial distribution of amino acids in the milled rice kernel*. Journal of Agricultural and Food Chemistry 35(4) : 607-610.
7. Huang, F. S., et al. (1998) *Present situations and prospects for the research on rice grain quality forming*. Chinese Journal of Rice Science 12(3): 172-176.
8. Iida, S., et al. (1993) *A rice (Oryza sativa L.) mutant having a low content of glutelin and a high content of prolamin*. Theor. Appl. Genet. 87:374-378.
9. Iida, S., et al. (1997) *Mutants lacking glutelin subunits in rice: mapping and combination of mutated glutelin genes*. Theor. Appl. Genet. 94:177-183.
10. Iida, S., et al. (1998) *Rice mutant lines lacking alpha-blobulin*. Breed. Sci. 48:45-49.
11. Juliano, B. O. (1985) *Biochemical properties of rice*. p.175-197. In: Juliano, B. O. (ed.). Rice: Chemistry and Technology. American Assoc. Cereal Chemists., USA.
12. Kawakatsu, T., et al. (2008) *Characterization of a new rice glutelin gene GluD-1 expressed in the starchy endosperm*. J. Exp. Bot. 59:4233-4245.
13. Kawakatsu, T., et al. (2010) *Reducing rice seed storage protein accumulation leads to change in nutrient quality and storage organelle formation*. Plant Physiol. 154:1842-1854.
14. Krishnan, H. B., et al. (1986) *Structural relationship among the rice glutelin polypeptides*. Plant Physiol. 81:748-753.
15. Krishnan, H. B., et al. (1995) *Morphometric analysis of rice seed protein bodies: Implication for a significant contribution of prolamin to the total protein content of rice endosperm*. Plant Physiol 109:1491-1495.
16. Kusaba, M., et al. (2003) *Low glutelin content1: A dominant mutation that suppresses the glutelin multigene family via RNA silencing in rice*. Plant Cell 15:1455-1467.
17. Li, X., et al. (1993) *Accumulation of prolamines and glutelins during rice seed development: a quantitative evaluation*. Plant Cell Physiol. 34:385-390.
18. Luthe, D. S. (1983) *Storage protein accumulation in developing rice (Oryza sativa L.) seeds*. Plant Sci. Lett. 32:147-158.

參考文獻

19. Mochizuki, T. *et al.* (2000) *Usefulness of low protein rice on diet therapy in patients with chronic renal failure.* Jpn. J. Nephrol. 42:24-29.
20. Morita, R., *et al.* (2009) *Development of PCR markers to detect the *glb1* and *Lgc1* mutations for the production of low easy-to-digest protein rice varieties.* Theor. Appl. Genet. 119:125-130.
21. Nishimura, M., *et al.* (2005) *New rice varieties with low levels of easy-to-digest protein, 'LGC-Katsu' and 'LGC-Jun'.* Breed. Sci. 55:103-105.
22. Ogawa, M., *et al.* (1987) *Purification of protein body-I of rice seed and its polypeptide composition.* Plant Cell Physiol. 28:1517-1528.
23. Okita, T. W., *et al.* (1989) *Structure and expression of the rice glutelin multigene family.* J. Biol. Chem. 264:12573-12581.
24. Shenoy, V., *et al.* (1991) *Inheritance of protein per grain in rice.* Indian Journal of Genetics 51(2): 214-220.
25. Shewry, P. R., *et al.* (2002) *Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization.* J. Exp. Bot. 53:947-958.
26. Takaiwa, F., *et al.* (1991) *Sequences of three members and expression of a new major subfamily of glutelin gene from rice.* Plant Mol. Biol. 17:875-885.
27. Takaiwa, F., *et al.* (1999) *Rice glutelins.* p.401-425. *In:* Seed Proteins. PR Shewry, R Casey (eds.) Kluwer Academic Publishers.
28. Tanaka, Y., *et al.* (1978) *Properties of whole and undigested fraction of protein bodies of milled rice.* Agric. Biol. Chem. 42:2015-2023.
29. Tsuzuki, E. *et al.* (1986) *A trail of rice breeding for high protein variety.* Japan Journal of Crop Science 55(1):7-14.
30. Villareal, R. M., *et al.* (1978) *Properties of glutelin from mature and developing rice grain.* Phytochemistry 17:177-182.
31. Wang, Y. H., *et al.* (2005) *Fine mapping and marker-assisted selection (MAS) of a low glutelin content gene in rice.* Cell Res. 15:622-630.