

乳牛基因科技新應用：BTA-6、SLICK、CSN2 與 CSN3 基因在酪農產業之潛力

畜產試驗所北區分所 楊明桂

一、前言

根據 114 年農業部畜禽統計調查資料顯示，國內目前計有乳牛場 538 場，飼養乳牛 118,160 頭，年產生乳量達 466,096 公噸。相較 113 年同期，114 年底乳牛飼養場數減少 7 場，乳牛在養頭數減少 0.4%，但全年產乳量增加 13,682 公噸，增幅達 3%。顯示在乳牛飼養場數及頭數略微下降之情況下，單位乳牛產乳效率仍持續提升，逐步展現長期推動乳牛產乳性狀育種改良之成果。然而，在全球貿易自由化趨勢下，2025 年起臺紐經濟合作協定（ANZTEC）全面生效，紐西蘭液態乳得以零關稅輸臺，進一步加劇國內乳品市場競爭。

面對進口競爭，臺灣酪農業者面臨多重困境：飼料成本高度依賴進口（玉米、豆粕近 100% 仰賴進口）、夏季高溫多濕導致乳牛熱緊迫（heat stress）嚴重、牧場標示制度不公平等問題，使得酪農利潤微薄、農戶數量持續下滑。此外，依據《2024 年國家氣候變遷科學報告》，臺灣氣溫將持續上升，極端氣候頻率增加，對飼料作物供應與牛隻健康構成長期威脅。

然而，臺灣酪農亦擁有不可忽視的優勢：國產鮮乳從擠乳到上架通常在 48 小時內完成，遠優於進口乳品；部分優良牧場單頭乳牛日產乳量可達 60 公升，達世界領先水準；加上消費者對在地、可溯源食品的需求持續成長，「臺灣鮮乳」品牌具有明確差異化競爭力。

在此產業轉型的關鍵時刻，基因科技提供了一條可行的出路。透過基因體選育（Genomic Selection）與分子標記輔助選拔（Marker-Assisted Selection, MAS），酪農業者得以更精準地選留具有耐熱性、優質乳成分或高乾酪生產效率的個體，在不大幅提高飼養成本的前提下提升競爭力。本文將聚焦於近年研究中備受關注的四個基因位點——BTA-6 染色體酪蛋白基因群、SLICK 基因（泌乳素受體基因，PRLR）、CSN2（ β -酪蛋白基因）及 CSN3（ κ -酪蛋白基因）——介紹其最新應用研究，並探討其對臺灣酪農產業的具體啟示。

二、四個備受矚目的基因

（一）BTA-6 染色體酪蛋白基因群 BTA-6（Bos taurus autosome 6，牛第 6 號染色體）是乳牛基因體研究中最重要之染色體之一，承載了與

泌乳性狀相關的多個核心基因位點。該染色體 q31 - 33 區段集中分佈酪蛋白基因群 (casein cluster)，涵蓋 CSN1S1、CSN2、CSN1S2 與 CSN3 四個基因，佔約 250 kb 的基因組片段，共同調控牛乳中約 80% 的蛋白質組成，是乳蛋白遺傳基礎的核心所在 (Cánepa et al., 2023)。

BTA-6 上另有兩個重要的數量性狀基因座 (Quantitative Trait Loci, QTL) 區域：QTL 第一區 (靠近 ABCG2 基因) 與 QTL 第二區 (靠近 PPARGC1A 基因)。ABCG2 基因上的多型性 (p.Tyr581Ser) 與乳脂率、乳蛋白質率顯著相關；PPARGC1A 則對乳量性狀具有獨立效果 (Cánepa et al., 2023)。2023 年發表於 *Animals* 期刊的系統性回顧確認，BTA-6 在全基因組關聯分析 (Genome-Wide Association Study, GWAS) 與基因體選育中持續是最重要的候選染色體之一，可作為牛乳成分育種的核心遺傳圖譜。

從育種應用角度而言，BTA-6 上的多個 QTL 標記已被整合入現行的基因體估計育種值 (GEBV) 模型，為選育高乳脂、高乳蛋白個體提供了有效工具。臺灣酪農業者可藉由引進具優良 BTA-6 基因型的精液或胚胎，加速群體遺傳改良進程。

(二) SLICK 基因 (PRLR 截短突變) SLICK 基因是指位於泌乳素

受體基因 (Prolactin Receptor, PRLR) 上的功能缺失性截短突變，起源於加勒比海地區的 Senepol 牛隻，為顯性遺傳。攜帶此突變的牛隻毛髮短而光滑 (「slick」即「光滑」之意)，具有顯著優越的體溫調節能力，能有效抵抗熱緊迫 (Goetting et al., 2024)。

PRLR 截短突變的機制在於阻斷泌乳素 (prolactin) 訊號傳遞，進而減少體內產熱、促進散熱。在熱緊迫挑戰試驗中，SLICK 牛核心體溫較對照組低約 0.5 - 1.0 °C，呼吸速率顯著下降，高溫條件下泌乳量損失亦明顯低於非 SLICK 牛隻 (Cuellar et al., 2024)。2024 年，研究人員以 CRISPR/Cas9 基因編輯技術成功在安格斯 (Angus) 與澤西 (Jersey) 品種中引入 PRLR 截短突變，結果顯示基因編輯牛在熱緊迫下體溫調節顯著優於對照組，且生長性狀改善、雄性繁殖功能不受影響，為基因編輯農業動物的商業化應用開創了重要先例 (Cuellar et al., 2024)。

2025 年，加拿大農業期刊 (CJAS) 報告了全球首個 SLICK 複合品種 (3/8 Senepol、1/8 Red Angus、1/2 Galloway)，在溫帶環境的高溫濕度指數 (Temperature-Humidity Index, THI > 72) 下，其呼吸速率與活動量顯著優於非 SLICK 牛隻 ($p < 0.05$)，顯示 SLICK 基因的耐熱效益不僅限於熱帶地區 (Rathje et al., 2025)。此

光泉廠農通訊(132)

<https://www.kuangchuan.com/FacInfo/Dairy>

外，美國食品藥物管理局（FDA）已於 2024 年對 SLICK 安格斯牛隻給予低風險執行裁量，允許其精液、胚胎及後代進行商業販售，為 SLICK 基因的國際推廣奠定法規基礎。

對於臺灣酪農業而言，夏季高溫多濕是最嚴峻的生產瓶頸之一。引入 SLICK 基因不失為解決熱緊迫問題的前瞻性遺傳策略，值得育種單位密切關注。

（三） CSN2 基因（ β -酪蛋白基因，A1/A2 多型性）

CSN2 基因位於 BTA-6 染色體上，編碼 β -酪蛋白（beta-casein），是牛乳中含量最豐富的蛋白質，約佔總酪蛋白的 40%。CSN2 的 A1 與 A2 型別差異僅在多肽鏈第 67 位胺基酸（A1 型為組胺酸 His，A2 型為脯胺酸 Pro），但此微小差異導致 A1 β -酪蛋白在消化過程中釋放 β -酪啡肽 -7（Beta-casomorphin-7, BCM-7），後者為 μ -鴉片受體激動劑，可降低腸道蠕動頻率與幅度，與腸道不適及消化道症狀有關

（Chowdhury et al., 2025）。

近年多項隨機雙盲交叉研究證實，飲用 A2A2 型牛乳的受試者，胃腸道症狀評分顯著低於飲用 A1/A2 混合牛乳者（Sebastiani et al., 2024）。2023 年針對荷蘭牛（Holstein-Friesian）族群（n=2,773 頭）的研究發現，A2 等位基因頻率已達 59.0%，A2/A2 純合型佔 33.9%，且 CSN2 基因型對 305 天泌乳量無統計顯著影響，意味著選育 A2A2 型個體不會犧牲生產性能（Horvatović et al., 2023）。

2025 年，A2 牛奶全球市場估值達 40 億美元，年增率（CAGR）預計達 18.5%（Rabia et al., 2025）。同年，新型快速直接 PCR（direct PCR）基因分型技術的開發，大幅簡化了 CSN2 A2 選育的流程與成本，有助於酪農業者以低廉代價快速普查並轉型（Konieczny et al., 2025）。下表整理不同 CSN2 基因型乳牛的主要特性比較：

基因型	305 天乳量	乳蛋白含量	影響
A1A1	無影響	無影響	可釋出 BCM-7
A1A2	無影響	無影響	部分釋出 BCM-7
A2A2	無影響	無影響	不釋出 BCM-7，腸道耐受性佳

(四) CSN3 基因(κ -酪蛋白基因)

CSN3 基因同樣定位於 BTA-6，編碼 κ -酪蛋白 (kappa-casein)，雖然其在乳中僅佔總酪蛋白約 10%，卻因位於酪蛋白微胞 (casein micelle) 表面，對微胞穩定性、凝乳特性與乾酪 (cheese) 生產效率具有決定性影響 (Grzesiak et al., 2023)。CSN3 主要多型性為 A 型與 B 型等位基因。凝乳酵素 (chymosin) 作用於 κ -酪蛋白的 Phe105-Met106 鍵結，使酪蛋白微胞凝集。B 型 κ -酪蛋白因微胞直徑較小、表面電荷分佈更有利於凝膠形成，相較於 A 型，BB 基因型牛乳凝乳時間縮短 10 - 40%，凝乳硬度提升 20 - 140%，乾酪產率高出 AA 型約 10% (Shimoni et al., 2024)。2024 年以色列荷蘭牛研究進一步量化確認，BB 基因型凝乳時間為 16.9 - 18.3 分鐘，AA 基因型則為 30.4 - 31.3 分鐘，差異達到統計顯著水準 (Shimoni et al., 2024)。2025 年土耳其荷蘭牛研究 (n=519 頭，三省跨場域研究) 亦發現 CSN3 基因型對乳脂率有顯著效果，並存在基因型與環境的互作 (GxE)，強調在不同生產環境中評估 CSN3 效益的必要性

(Akyol et al., 2025)。

下表整理不同 CSN3 基因型乳牛的凝乳性狀差異：

CSN3 基因型	凝乳時間	凝乳硬度	乾酪產率相對增幅
AA	30.4–31.3 分鐘	較低	基準值
AB	約 22–25 分鐘	中等	+5%
BB	16.9–18.3 分鐘	顯著提升	+10%

對於有意轉型乳酪加工的臺灣酪農而言，選育 CSN3 B 等位基因個體是提升乾酪產率、降低加工成本最直接的遺傳策略之一，CSN3 B 等位基因可作為乳酪生產育種的分子標記 (MAS marker)，具有高度實用價值。

三、 產業應用展望

綜合上述四個基因位點的最新研究，可歸納出以下幾項對臺灣酪農產業的具體應用潛力。首先，在耐熱育種方面，SLICK 基因 (PRLR 截短突變) 提供了改善乳牛熱緊迫問題的明確遺傳解方，對於臺灣夏季高溫環境而言，導入 SLICK 基因型精液或胚胎，是最具立即效益的遺傳改良策略；隨著 FDA 法規鬆綁與 CRISPR 技術成熟，SLICK 牛隻的商業化應用將愈趨可行。

其次，在高附加價值乳品開發方面，2025 年已被業界稱為「臺灣起司元年」，政府積極推動酪農業者投

入天然乳酪、奶油、優格等差異化加工品，以消化進口競爭壓力下的生乳剩餘。在此背景下，選育 CSN3 BB 基因型個體以縮短凝乳時間、提升乾酪產率，以及選育 CSN2 A2A2 個體以拓展健康導向高端乳品市場，均為能直接對應市場需求的育種策略。

第三，在政策建議層面，農業部、畜產試驗所及中央畜產會應積極推動臺灣荷斯坦牛群的 CSN2、CSN3 基因型普查，利用已商業化的直接 PCR 快速分型技術建立基因型資料庫，並與基因體選育（GEBV）平台整合，為酪農提供個別牛隻的基因型報告，輔助精準育種決策。同時，政府應建立 SLICK 基因引入的評估與監管機制，研議在現行繁殖改良補助架構下支持耐熱基因型精液的引進與推廣。

展望未來，BTA-6 染色體上多個 QTL 的整合育種效益，加上精準基因分型技術的普及，使臺灣酪農業者得以在不增加飼養成本的前提下，同步改善耐熱性、乳成分品質與加工適性。面對進口競爭，唯有在「新鮮」、「在地」之外，進一步以科學化育種強化「品質差異化」，才能為臺灣酪農產業找到永續發展的出路。

參考文獻

農業統計年報
(<https://agrstat.moa.gov.tw/moasdweb/book/Book.aspx>)。2025 年。農業部。

Akyol, E., and colleagues. 2025. Associations between polymorphisms of the CSN1S1, CSN1S2, CSN2 and CSN3 genes and milk composition traits in Holstein cattle. PubMed, PMID: 40184159.

Cánepa, S., and colleagues. 2023. Using QTL to identify genes and pathways underlying the regulation and production of milk components in cattle. *Animals* 13(5):911. <https://doi.org/10.3390/ani13050911>

Chowdhury, M.I.U., and colleagues. 2025. β -Casein A1 and A2 genetic variants and β -casomorphin-7 in raw milk and processed milk products. *International Journal of Molecular Sciences* 26(17):8612. PMC12428782.

Cuellar, E., and colleagues. 2024. Consequences of gene editing of PRLR on thermotolerance, growth, and male reproduction in cattle. *FASEB BioAdvances*. <https://doi.org/10.1096/fba.2024-00029>. PMC11301273.

Goetting, V., and colleagues. 2024. Gene editing cattle for enhancing heat tolerance: a welfare review of the 'PRLR-SLICK cattle' case. *Ethics and Society*, Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s11569-024-00>

光泉廠農通訊(132)

<https://www.kuangchuan.com/FacInfo/Dairy>

455-8

Grzesiak, W., and colleagues. 2023. Effect of CSN3 gene polymorphism on the formation of milk gels induced by physical, chemical, and biotechnological factors. *Foods* 12(9):1767. PMC10177998. <https://doi.org/10.3390/foods12091767>

Horvatić, M., and colleagues. 2023. The variation in the beta-casein genotypes and its effect on milk yield and genomic values in Holstein-Friesian cows. *Animal Biotechnology* 34(9). <https://doi.org/10.1080/10495398.2023.2267614>

Konieczny, P., and colleagues. 2025. Rapid direct CSN2 genotyping by PCR and its application in population genetics and A2 milk selection in Holstein cattle. *MDPI Ruminants* 7(1):12.

Rabia, H., and colleagues. 2025. Role of A2 milk in rural transformations: health benefits, market potential, and sustainable production pathways. *Dairy Science and Management*, Springer. <https://doi.org/10.1186/s44363-025-00013-x>

Rathje, T.A., and colleagues. 2025.

Development of a new composite SLICK beef cattle breed for improved tolerance to heat stress in temperate environments. *Canadian Journal of Animal Science (CJAS)*. <https://doi.org/10.1139/cjas-2025-0023>

Sebastiani, G., and colleagues. 2024. The effect of A2 milk on gastrointestinal symptoms in comparison to A1/A2 milk: a single-center, randomized, double-blind, cross-over study. PMC11215337.

Shimoni, Y., and colleagues. 2024. Estimating the effect of the kappa casein genotype on milk coagulation properties in Israeli Holstein cows. *Animals* 14(1):54. PMC10778097. <https://doi.org/10.3390/00455-8>

光泉廠農通訊(132)

<https://www.kuangchuan.com/FacInfo/Dairy>