

因應氣候變遷之提升稻米品質策略

吳以健^{1*}、李誠紘¹、鄧執庸¹、張素貞²、盧虎生³

¹ 行政院農業委員會臺中區農業改良場

² 行政院農業委員會苗栗區農業改良場

³ 國立臺灣大學生物資源暨農學院

摘要

氣候變遷與全球暖化是目前人類所面臨的最重要議題，本世紀中的氣溫將上升 2.4°C，世紀末更將面臨 4.4°C 的暖化，暖化的趨勢帶來產量與品質的顯著衝擊。稻米產業在面對未來嚴峻的氣候，亟需研擬因應之策，以穩定臺灣最重要糧食作物稻米的產銷與市場，本文將介紹稻米生產之各種因應策略，包括預警、栽培期調整、田間粒數管理、粒肥管理、灌溉管理及育種研究。預警策略則包括氣候預警與作物模式預估，結果顯示未來夜溫上升與缺水逆境更常發生，而導致稻米稔實率下降、白垩質粒率的增加與外觀品質的劣化。栽培期調整方面，可藉由一期作提早插秧或應用夏季單期作的系統來延後插秧，使穀粒充實期避開高溫風險，然而仍須考慮颱風與鳥害的風險。在田間粒數方面，以適當施肥與曬田管理來控制單位面積粒數，可提高可利用的碳水化合物，降低白垩質粒的發生。粒肥管理方面，則可在抽穗後增施適量氮肥，改善穀粒充實的生理活動，以減少白垩質粒率。灌溉管理方面，應用間歇灌溉、流水灌溉或深水灌溉，可促進根系發展以改善米質。而耐熱品種育成方面，目前許多米質相關基因已被定位且建立分子標誌，可作為育種的重要參考，但有部分基因是多基因調控或具基因多效性，在育種過程仍應謹慎注意。氣候變遷與全球暖化的趨勢與影響是動態的，稻米生產的策略擬定與執行也應該不斷進行討論與修正，這也是水稻研究人員未來主要的職責所在。

關鍵字：水稻、氣候變遷、暖化、米質、插秧期、產量構成要素、間歇灌溉、根系管理、耐熱品種。

Strategies for Improving Rice Quality in Response to Climate Change

Yi-Chien Wu*, Cheng-Hong Li, Chih-Yong Deng, Su-Jein Chang, Hsu-Sheng Lur

Taichung District Agricultural Research and Extension Station, Council of Agriculture, Executive Yuan, Changhua County, Taiwan, 515008 Taiwan R. O. C.

ABSTRACT

* 通訊作者，Corresponding email: wuyc@tdais.gov.tw

Climate change and global warming are the most important issues at present. The temperature will rise by 2.4 °C in the middle of this century, and even up to 4.4 °C in the end of the century. The trend of warming will lead to a significant impact on grain yield and quality. Facing the harsh climate in the future, the rice industry urgently needs to develop strategies to stabilize the production and market of rice in Taiwan. This article will introduce various coping strategies for rice production, including forecasting, adjustment of cultivation period, field grain number management, grain fertilizer management, irrigation management and breeding research. forecasting strategies include climate and crop model forecasts. The results show that rising night temperatures and water shortages will occur more frequently in the future, which will lead to a decrease in rice sterility, increase in chalky grain rate, and a deterioration in appearance quality. In terms of cultivation period adjustment, it is possible to advance or delay transplanting by using a single-phase cropping system in summer, so as to avoid the risk of high temperature during the grain filling period. However, the risk of typhoon and bird damage must still be considered. In terms of grain number in the field, controlling the grain number per area with proper fertilization and drying management can increase the available carbohydrates and reduce the occurrence of chalky particles. In terms of grain fertilizer management, an appropriate amount

of nitrogen fertilizer can be applied after heading to improve the physiological activities of grain filling and reduce the chalky grain rate. In terms of irrigation management, the application of intermittent irrigation, running water irrigation or deep water irrigation can promote root development and improve rice quality. As for the breeding of heat-resistant varieties, many rice quality-related genes have been located and molecular markers have been established, which can be used as an important reference for breeding. However, some genes are polygenic or have pleiotropic effects, and caution should be paid during the breeding process. The trend and impact of climate change and global warming are dynamic, and the formulation and implementation of rice production strategies should also be discussed and revised continuously. This is also the main responsibility of rice researchers in the future.

Keywords: Rice, Climate change, Warming, Rice quality, Transplanting time, Yield component, Alternative wetting and drying (AWD), Root management, Heat-tolerant variety.

前言

氣候變遷與全球暖化是目前人類所面臨的最重要議題，自 1950 年代以來觀測的氣溫上升趨勢顯著高於過去，若不改變產業以進行溫室氣體減排，本世紀中的氣溫將上升 2.4°C，世

氣候與氣象的預警

紀末更將面臨 4.4°C 的暖化，而 CO₂ 的濃度更持續攀升，在 2020 年已高達 414ppm (IPCC 2022)，氣溫以及 CO₂ 濃度的上升是氣候變遷中的長期趨勢與影響，並導致農作物在產量與品質的顯著衝擊，研究顯示，平均溫度每增加 1°C，水稻產量將減少 6-8% (Peng *et al.* 2004; Sheehy *et al.* 2006; Song *et al.* 2022)，且持續升溫將使減產幅度更為劇烈 (Tao *et al.* 2008)，同時帶來外觀品質與食味品質的劣化 (Oh-e *et al.* 2007)，包括胴裂粒、碎粒、白垩質粒、未熟粒等不良穀粒比例的增加 (Morita *et al.* 2005; Tsukaguchi and Iida 2008)，進而導致官能品評結果的不佳 (Morita *et al.* 2016)。而儘管 CO₂ 濃度的增加將帶來 CO₂ 增肥效應而促進產量 (Nakamoto *et al.* 2004)，但該效應在越高溫的狀況下效果越不顯著 (Cheng *et al.* 2009)，且在過去 20 年的 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 研究顯示，在 550ppm 的 CO₂ 濃度將會增加白垩質粒率達 26% (Hu *et al.* 2022)。也就是說，氣候變遷中的暖化與 CO₂ 增加都對稻米的品質造成明顯的損害，且在東亞季風帶的臺灣，氣候變遷的現象將更為嚴重，因此，臺灣稻米產業在面對未來嚴峻的氣候，亟需研擬因應之策，以穩定臺灣最重要糧食作物稻米的產銷與市場，本文將就近年相關研究成果進行介紹，包括預警、栽培管理與育種研究，其中預警主要著重在地區性短、中、長期的預測與因應栽培規劃；栽培管理則囊括栽培時期、田間產量構成要素管理、氮肥與粒肥管理、灌溉與根系管理；育種研究則是藉由新的育種技術、篩選技術以育成新的耐熱品種，以作為最根本的解決之策。

氣候變遷是進行中的變化，要因應未來氣候變遷與異常氣象的衝擊，首先必需就發生的時機、樣態、程度及造成的影響進行預測或模擬，一般多用統計及數學模擬 (Simulation) 或模式 (Modeling) 來預測及評估未來可能發生的變化。與農業相關的是氣象模式與作物模式，氣象模式用來預估該地區未來與作物生長相關氣象因子的變化，如溫度、日射量、及溼度等。作物學上則可利用所謂的作物模式 (Crop modeling) 來預測在環境變動情形下對產量可能發生的影響。國際與臺灣對水稻已有建立作物模式以估算產量 (秦, 2013)，而且其精準度不斷的提升。在融合氣象模式的情形下，大致可預估氣候變遷對各地區主要作物的影響程度 (范, 2017)。

在臺灣的相關研究預測，過去百年來臺灣地區已發生夜溫上升、溫差減少、濕度及小雨天數減少等現象 (盧等, 2006; 盧等, 2009; 蔡, 2017)，未來此趨勢可能持續發生，尤以熱逆境與缺水乾旱發生機會增加顯著 (盧等, 2008; 李等, 2019)，這些種種趨勢都會對作物生育產生顯著的負面效應，例如日均溫、日最低溫與日最高溫分別超過 26.1、22.6 與 31.0°C 時水稻穎果的授粉成功率及稔實率將顯著下降 (Lur 2009)，且在穀粒充實期的日均溫超過 25-27°C 時，‘台梗 9 號’的白垩質粒率呈現明顯增加 (Wu *et al.* 2016)，也就是說以‘台梗 9 號’為例，在日均溫超過 26°C 的情況下，高溫對產量與品質都造成嚴峻的挑戰，未來更可依‘台梗 9 號’的案例建立其他大宗水稻品種

的產量與品質預測模式，以作為因應對策擬定的參考。

栽培期的調整

臺灣位處亞熱帶，不若熱帶地區與寒帶地區的四季溫差小，其春夏秋冬的氣溫有明顯的變化，大抵來說，1月是氣溫最低的月份，接著氣溫逐漸上升，至7月達到最高溫，再漸次下降，回到1月的最冷氣溫（圖3）。除了一些單期作的栽培地區如宜蘭或水旱輪作區之外，大多的臺灣水稻栽培為兩期作栽培，以中部地區來說，一期作在2月中旬至3月上旬插秧，在6月中旬至7月上旬收穫，二期作則在7月中旬至8月上旬插秧，11月上旬至中旬收穫。而稻米品質影響最關鍵的時期為抽穗後15日內之穀粒充實期（吳，2009），以近年氣象資料，中部地區一期稻作的穀粒充實期日均溫幾乎都高於前述的26°C之上，相較之下，二期作的穀粒充實期就較涼爽，形成兩期作品質上的明顯差異（蕭等，2009；Wu *et al.* 2016）。目前已有許多生產者藉由調整栽培期的方式，改變稻株生長遭遇的氣溫（Zhou *et al.* 2021; Tu *et al.* 2022），若是將一期作栽培期提前，可能可以避開穀粒充實期的高溫，抑或是延後插秧並搭配晚熟品種或適用的「夏季單期作品種」（鄧等，2021），將穀粒充實期延後至秋季，亦可降低穀粒充實期遭遇的高溫風險，此外，夏季單期作的栽培時期，更可避開春季降雨不穩定時期，而主要利用夏初的降雨，可減緩稻作缺水的風險，兼顧適作氣溫與水分。

然而，若要採用改變栽培期的策

略，提前至2月上旬甚至1月插秧，在中部或北部地區可能有遭遇低溫的風險，一般來說，秧苗的存活氣溫約為10-15°C，1月至2月偶有發生10-12度的低溫，儘管不至秧苗低溫致死的程度，也會抑制生長速度，甚至最後仍與一般栽培期相同生長進程。其次，若延後插秧期或使用晚熟品種，抽穗後的時期可能須面對颱風侵襲的風險，尤其是近10年的颱風侵臺有延後的趨勢，越來越多颱風在8-9月甚至10月發生。最後，改變栽培期需要大規模同時進行，若只有小面積採用，則由於生長進程與其他田區不一致，容易在成熟期遭遇鳥害，致嚴重的產量損失（吳，2009）。

田間稻株粒數管理

據前人研究的統計資料指出，由高溫引起的稻米乳白粒發生率，與每平方公尺的穀粒數目呈正相關，推測原因為每顆穀粒所分配到的碳水化合物差異（中川等，2006），高溫會導致光合作用降低與碳水化合物的運輸率下降，使葉片合成的碳水化合物實際送達穀粒者顯著減少，導致白垩質的發生（小谷與黑田，2007）。而降低粒數則可提高每顆穀粒可利用的碳水化合物，進而減少白垩質穀粒的發生（Idowu *et al.* 2023），而穀粒中碳水化合物代謝運輸與白垩質粒率的相關性亦早有許多研究證實（Yang *et al.* 2021; Lin *et al.* 2022），因此應藉由施肥方式的改變或灌溉管理以維持適當且不多的單位面積粒數，也就是可從每株分蘗數（穗數）或每穗粒數來管理。每株分蘗數方面，應先以栽培前土壤氮素

檢測結果，適量施用基肥，而插秧時每穴秧苗支數維持在 5-8 支，並藉曬田方式來控制分蘗數；每穗粒數方面，則是在適當時機施用適當的氮肥量，在幼穗分化期施用較少量氮肥，以避免每穗粒數過多 (Wei *et al.* 2022)。從上述研究可知，產量構成要素與外觀品質難以兩全，若要在高溫下提升外觀品質，勢必或多或少犧牲部分稻穀產量。

抽穗後粒肥管理

過去，為了提升穀粒充實程度，常在稻株抽穗後施用氮肥，然而，後來由於時間與人力成本考量，以及蛋白質含量增加而損害食味品質的風險，採用粒肥施用的農民已越來越少。然而，高溫逆境下，將使稻株中的蛋白質代謝發生改變，增加部分抗逆境酵素或熱休克蛋白，以致正常的代謝酵素減少，以致白堊質的發生 (Cooper *et al.* 2008; Lin *et al.* 2010)。後續也有研究指出，在抽穗後施用氮素粒肥，將有助於緩解高溫造成的白堊質穀粒 (Qiao *et al.* 2011; Tang *et al.* 2019)，且以液態氮素粒肥施用效果更好 (Wang *et al.* 2021)，原因推測為額外的氮肥投入，會使穀粒澱粉粒的形狀呈多面體，增加其數量與排列密度，使澱粉粒之間的空隙顯著降低，減少白堊質的發生 (Xiong *et al.* 2008)，然而，如此的氮肥效應，在品種差異上可能存在交感 (Idowu *et al.* 2023)。此外，增施氮素粒肥更可降低穀粒直鏈澱粉含量，可能有助食味品質，但穀粒粗蛋白質含量的提高，亦可能衝擊食味口感 (Zhu *et al.* 2017; Zhang *et al.* 2021)，直鏈澱粉與粗蛋白質之間對食味品質的影響貢

獻，仍有待進一步研究以取得平衡點。

灌溉管理與根系管理

一般來說，稻株生理上可適應湛水的環境，因此栽培期間常以湛水管理提供充足的水分，同時也有效抑制田間雜草，然而稻株在各生育階段最適合的灌溉管理則不盡相同，例如幼穗形成期與抽穗開花期的需水量就很高，而孕穗期與穀粒充實期的田間只需要淺水甚至維持土壤濕潤即可 (李, 2006)。研究指出水稻根系的生長，在土壤乾濕交替或間歇灌溉之下最快速，在排水不良的持續湛水狀態則受到抑制 (Yang *et al.* 2004)，促進的根系發展，有助於氮素及其他營養的吸收，呼應前述的氮素增加有助降低穀粒白堊質的研究。除了間歇灌溉之外，流水灌溉的高溶氧水分，也能維持根系健康並促進根系生長，達到顧根顧品質的目標 (西田等, 2019)，此外，灌溉的時機與灌溉的深度都會有不同的影響，例如夜間排水、白天湛水的乾濕交替灌溉，或深水灌溉以營造涼爽土溫與根溫，都能促進根部健康以改善米質 (中村等, 2003; Hayashi *et al.* 2011)。另外，不只改善灌溉方式，若施用生物炭 (Biochar)，也有助於改變根圈的環境，以降低高溫對稻株的衝擊 (Huang *et al.* 2021)。

因應高溫的新育種技術與方向

因應各種逆境的策略，最為有效且根本的乃是進行品種改良 (Senguttuvel *et al.* 2022)，品種改良的重點包括親本的選擇、篩選方式、新技術導入及其他

效應。親本的選擇通常為現行慣用品種作為母本，而將耐熱的品種作為父本進行雜交，耐熱親本常使用的品種如日本常用的秈稻品種‘Habataki’與‘Takanari’ (Murata *et al.* 2014; Tsukaguchi and Iida 2008)、源自印度具極優良耐熱性的品種‘Nagina22’(Ye *et al.* 2012; Manigbas *et al.* 2014)等。接著將親本雜交後的世代選拔時，需要營造暖化環境來篩選，常用的像是改變栽培期 (Srajan Raju *et al.* 2013)、不同覆蓋程度的網罩 (Senguttuvel *et al.* 2022)、溫度梯度營造 (Maruyama *et al.* 2013)等，並以稻株生理作用、生長形態與產量品質作為篩選標準。為了提升選拔的效率與精準度，近年育種家們積極應用分子標誌輔助技術 (Marker-assisted selection, MAS)，針對目標基因來作大量的篩選，而與高溫下白堊質的發生有相關性的目標基因也已有相當多被定位與建立分子標誌 (表 1)，例如位在第 6 條染色體的 qWB6 與第 9 條染色體的 qWB9，然而應注意的是，儘管此類基因已定位，仍存在多基因影響或基因多效性的現象，例如只存在 qWB9 的品種‘Niigatawase’對高溫仍敏感 (Kobayashi *et al.* 2013)，*Apq1* 基因改善越光的白堊質但也影響種子休眠性，*Amy1A* 與 *Amy1C* 降低穀粒背白，卻也影響儲藏性蛋白質含量 (Sreenivasulu *et al.* 2015)。儘管分子標誌輔助技術可加速育種進程與精準度，但多數文獻都指出高溫耐性的基因為數量遺傳基因座 (QTL) 且由多基因控制 (Ishimaru *et al.* 2016)，因此在篩選上仍需要謹慎進行。

結語

氣候變遷與暖化趨勢對目前水稻生產已造成顯著影響，包括產量與品質，藉由前述各種技術的應用，期望能建立具有氣候變遷韌性的水稻生產系統，然而氣候變遷為一個動態的進行式，如何預測未來趨勢並在現階段研擬相符的因應之策，實屬不易，所幸科技的進步也相當神速，且仍有部分領域是尚未挖掘的，例如野生稻的耐熱特性等。總結以上，水稻的韌性研究，包括預警、栽培管理及育種研究將持續並積極地進行，以維持糧食的永續生產。

參考文獻

- 小谷俊之、黑田晃。2007。登熟期の高温による乳白粒発生と稲体栄養条件。北陸作物學會報 42: 44-46。
- 中村啟二、橋本良一、永島秀樹。2003。登熟期間の水管理の違いが胴割粒・乳白粒の発生に及ぼす影響。北陸作物學會報 38: 18-20。
- 中川博視、白川美翠、永島秀樹。2006。炭水化物供給可能量と穂揃期窒素追肥がイネの白未熟粒の発生に及ぼす影響。p.12-13。第 222 回日本作物学会講演会要旨集。
- 西田和弘、塚口直史、柴田里子、吉田修一郎、塩澤昌。2019。低温・低窒素濃度の灌漑水を用いた掛流し灌漑が玄米タンパク質濃度および白未熟粒割合に与える影響。農業農村工學會論文集 309: 219-226。
- 吳以健。2009。氣候環境與水稻穀粒產量及品質之相關性。國立臺灣大學農藝學系碩士論文。
- 李健鋒。2006。優質安全水稻生產技術

- 之應用。臺中區農業專訊 54: 12-16。
- 李昱祺、王嘉琪、翁叔平、陳正達、鄭兆尊。2019。臺灣氣象乾旱特性未來趨勢推估。大氣科學 47: 66-93。
- 范澤昀。2017。利用品質適栽度模型探討氣候變遷對水稻外觀品質之衝擊與調適策略。國立臺灣大學農藝學系碩士論文。
- 秦松林。2013。DSSAT 作物模式與統計時間序列應用於預測臺灣氣候變化對水稻產量影響之比較。國立臺灣大學農藝學系碩士論文。
- 盧虎生、劉韻華、中央氣象局第三組農業氣象科。2006。臺灣優質水稻栽培之環境挑戰與因應措施。作物、環境與生物資訊 3: 297-306。
- 盧孟明、陳雲蘭、陳圭宏。2008。全球暖化趨勢對臺灣水稻栽培環境之影響。作物、環境與生物資訊 5: 60-72。
- 盧昭彰、林國欽、郭怡婷。2009。台灣歷年溫差變化趨勢及其原因探討。國立臺南大學「環境與生態學報」2: 15-32。
- 鄧執庸、鄭佳綺、廖君達、楊嘉凌、許志聖。2021。資源節約型農藝作物生產的研究 I. 適合夏季單期作栽培的水稻品種(系)篩選初報。臺中區農業改良場研究彙報 150: 13-30。
- 蔡怡真、劉紹臣、林沛練。2017。1961-2015 年間受全球暖化影響下臺灣不同季節降雨的變化趨勢。106 年天氣分析與預報研討會。中央氣象局，臺灣臺北。
- 蕭巧玲、李裕娟、楊純明、賴明信。2009。不同栽植期對水稻臺農 71 號米質之影響。作物、環境與生物資訊 6: 220-232。
- Cheng W, H Sakai, K Yagi and T Hasegawa (2009) Interactions of elevated [CO₂] and night temperature on rice growth and yield. **Agric. For. Meteorol.** 149: 51-58.
- Cooper NTW, TJ Siebenmorgen, PA Counce (2008). Effects of nighttime temperature during kernel development on rice physicochemical properties. **Cereal Chem.** 85: 276-282.
- Hayashi M, K Sugiura, C Kuno, I Endo, Y Tanaka, A Yamauchi. (2011) Reduction of rice chalky grain by deep and permanent irrigation method; effect on growth and grain quality of rice. **Plant Prod. Sci.** 14: 282-290.
- Hu S, K Tong, W Chen, Y Wang, Y Wang, L Yang (2022) Response of rice grain quality to elevated atmospheric CO₂ concentration: A meta-analysis of 20-year FACE studies. **Field Crops Res.** 284: 108562.
- Huang M, X Yin, J Chen and F Cao (2021) Biochar Application Mitigates the Effect of Heat Stress on Rice (*Oryza sativa* L.) by Regulating the Root-Zone Environment. **Front. Plant Sci.** 12: 711725.
- Idowu O, TK Tanaka, T Shiraiwa (2023) Nitrogen fertilizer application does not always improve available carbohydrate per spikelet but decreases chalkiness under high temperature in rice (*Oryza sativa* L.) grains. **Field Crops Res.** 290: 108741.
- Ishimaru T, H Hirabayashi, K Sasaki, C

- Ye, A Kobayashi. (2016) Breeding efforts to mitigate damage by heat stress to spikelet sterility and grain quality. **Plant Prod. Sci.** 19: 12-21.
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056pp.
- Kobayashi A, J Sonoda, K Sugimoto, M Kondo, N Iwasawa, T Hayashi, K Tomita, M Yano, T Shimizu (2013) Detection and verification of QTLs associated with heat-induced quality decline of rice (*Oryza sativa* L.) using recombinant inbred lines and near-isogenic lines. **Breed. Sci.** 63: 339-349.
- Lin CJ, CY Li, SK Lin, FH Yang, JJ Hwang, YH Liu, HS Lur (2010) Influence of High Temperature during Grain Filling on the Accumulation of Storage Proteins and Grain Quality in Rice (*Oryza sativa* L.). **J. Agric. Food Chem.** 58: 10545-10552.
- Lin F, C Rensing, Z Pang, J Zou, S Lin, P Letuma, Z Zhang, W Lin (2022) Metabolomic analysis reveals differential metabolites and pathways involved in grain chalkiness improvement under rice ratooning. **Field Crops Res.** 283: 108521.
- Lur HS (2009) Effects of high temperature on yield and grain quality of rice in Taiwan. In MARCO Symposium 2009– Challenges for Agro-Environmental Research in Monsoon Asia. National Institute for Agro-Environmental Science, Japan. Retrieved from <http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/marco2009/english/W2-06Huu-ShengLurP.pdf>
- Manigbas NL, LAF Lambio, LB Madrid, CC Cardenas (2014) Germplasm innovation of heat tolerance in rice for irrigated lowland conditions in the Philippines. **Rice Sci.** 21: 162-169.
- Maruyama A, WMW Weerakoon, Y Wakiyama, K Ohba (2013) Effects of increasing temperatures on spikelet fertility in different rice cultivars based on temperature gradient chamber experiments. **J. Agron. Crop Sci.** 199: 416–423.
- Morita S, O Kusuda, JI Yonemaru, A Fukushima, H Nakano (2005) Effects of topdressing on grain shape and grain damage under high temperature during ripening of rice. p.560-562. In Proceeding of the World Rice Research Conference “Rice is life: scientific perspectives for the 21st century.
- Morita S, H Wada, Y Matsue (2016) Countermeasures for heat damage in rice grain quality under climate change. **Plant Prod. Sci.** 19: 1-11.

- Murata K, Y Iyama, T Yamaguchi, H Ozaki, Y Kidani, T Ebitani (2014) Identification of a novel gene (*Apq1*) from the indica rice cultivar 'Habataki' that improves the quality of grains produced under high temperature stress. **Breed. Sci.** 64: 273-281.
- Nakamoto H, SH Zheng, K Tanaka, A Yamazaki, T Furuya, M Iwaya-Inoue, M Fukuyama (2004) Effect of carbon dioxide enrichment during different growth periods on flowering, pod set and seed yield in soybean. **Plant Prod. Sci.** 7: 11-15.
- Oh-e I, K Saitoh, T Kuroda (2007) Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. **Plant Prod. Sci.** 10: 412-422.
- Peng S, J Huang, JE Sheehy, RC Laza, RM Visperas, X Zhong, GS Centeno, GS Khush, KG Cassman (2004) Rice yields decline with higher night temperature from global warming. **PNAS.** 101: 9971-9975.
- Qiao J, Z Liu, S Deng, H Ning, X Yang, Z Lin, G Li, Q Wang, S Wang, Y Ding (2011) Occurrence of perfect and imperfect grains of six japonica rice cultivars as affected by nitrogen fertilization. **Plant Soil.** 349: 191-202.
- Senguttuvel P, V Jaldhani, NS Raju, D Balakrishnan, P Beulah, VP Bhadana, SK Mangrauthia, CN Neeraja, D Subrahmanyam, PR Rao, AS Hariprasad, SR Voleti. (2022) Breeding rice for heat tolerance and climate change scenario; possibilities and way forward. A review. **Arch. Agron. Soil Sci.** 68: 115-132.
- Sheehy JE, PL Mitchell, AB Ferrer (2006) Decline in rice grain yields with temperature: models and correlations can give different estimates. **Field Crops Res.** 98: 151-156.
- Song Y, C Wang, HW Linderholm, Y Fu, W Cai, J Xu, L Zhuang, M Wu, Y Shi, G Wang, D Chen (2022) The negative impact of increasing temperatures on rice yields in southern China. **Sci. Total Environ.** 820: 153262.
- Sravan Raju N, P Senguttuvel, SR Voleti, AS Hari Prasad, VP Bhadana, P Revathi, KB Kemparaju, S Ravi Chandran, AK Singh, P Koteswara Rao (2013) Stability analysis of flowering and yield traits to high temperature stress adopting different planting dates in rice (*O. sativa* L.). **Int. J. Agric. Res.** 8: 137-148.
- Sreenivasulu N, VM Butardo, G Misra, RP Cuevas, R Anacleto, PBK Kishor (2015) Designing climate-resilient rice with ideal grain quality suited for high-temperatures. **J. Exp. Bot.** 66: 1737-1748.
- Tang S, H Zhang, W Liu, Z Dou, Q Zhou, W Chen, S Wang, Y Ding (2019) Nitrogen fertilizer at heading stage effectively compensates for the deterioration of rice quality by affecting the starch-related properties under elevated temperatures. **Food Chem.**

- 277: 455-462.
- Tao F, Y Hayashi, Z Zhang, T Sakamoto, M Yokozawa (2008) Global warming, rice production, water use in China: Developing a probabilistic assessment. **Agric. For. Meteorol.** 148: 94-110.
- Tsukaguchi T, Y Iida (2008) Effects of Assimilate Supply and High Temperature during Grain-Filling Period on the Occurrence of Various Types of Chalky Kernels in Rice Plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Prod. Sci.** 11: 203-210.
- Tu D, Y Jiang, L Zhang, M Cai, C Li, C Cao (2022) Effect of various combinations of temperature during different phenological periods on indica rice yield and quality in the Yangtze River Basin in China. **J. Integr. Agric.** 21: 2900-2909.
- Yang D, S Peng, C Zheng, H Xiang, J Huang, K Cui, F Wang (2021) Effects of nitrogen fertilization for bud initiation and tiller growth on yield and quality of rice ratoon crop in central China. **Field Crops Res.** 272: 108286.
- Wada H, Y Hatakeyama, Y Onda, H Nonami, T Nakashima, R Erra-Balsells, K Hiraoka, F Tanaka, H Nakano (2019) Multiple strategies for heat adaptation to prevent chalkiness in the rice endosperm. **J. Exp. Bot.** 70: 1093-1106.
- Wang X, K Wang, T Yin, Y Zhao, W Liu, Y Shen, Y Ding, S Tang (2021) Nitrogen fertilizer regulated grain storage protein synthesis and reduced chalkiness of rice under actual field warming. **Front. Plant Sci.** 12: 715436.
- Wei H, J Ge, X Zhang, W Zhu, F Deng, W Ren, Y Chen, T Meng, Q Dai (2022) Decreased panicle N application alleviates negative effects of shading on rice grain yield and grain quality. **J. Integr. Agric.** In Press.
- Wu YC, SJ Chang, HS Lur (2016) Effects of field high temperature on grain yield and quality of a subtropical type japonica rice—Pon-Lai rice. **Plant Prod. Sci.** 19: 145-153.
- Xiong F, Z Wang, Y Gu, G Chen, P Zhou (2008) Effects of Nitrogen Application Time on Caryopsis Development and Grain Quality of Rice Variety Yangdao 6. **Rice Sci.** 15: 57-62.
- Yang C, L Yang, Y Yang, Z Ouyang (2004) Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. **Agric. Water Manag.** 70: 67-81.
- Ye C, MA Argayoso, ED Redoña, SN Sierra, MA Laza, CJ Dilla, Y Mo (2012) Mapping QTL for heat tolerance at flowering stage in rice using SNP markers. **Plant Breed.** 131: 33-41.
- Zhang J, Y Zhang, N Song, Q Chen, H Sun, T Peng, S Huang, Q Zhao (2021) Response of grain-filling rate and grain quality of mid-season indica rice to nitrogen application. **J.**

Integr. Agric. 20: 1465-1473.

Zhou N, J Zhang, S Fang, H Wei, H Zhang (2021) Effects of temperature and solar radiation on yield of good eating-quality rice in the lower reaches of the Huai River Basin, China. **J. Integr. Agric.** 20: 1762-1774.

Zhu D, H Zhang, B Gui, K Xu, Q Dai, H Wei, H Gao, Y Hu, P Cui, Z Huo. (2017) Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice. **J. Integr. Agric.** 16: 1018-1027.

Zhu, D., H. Zhang, B. Gui, K. Xu, Q. Dai, H. Wei, H. Gao, Y. Hu, P. Cui and Z. Huo. 2017. Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice. **J. Integr. Agric.** 16: 1018-1027.

表 1. 目前已定位的白堊質基因位置、分子標誌與來源品種 (Ishimaru *et al.* 2016)

| Chr. | QTL | Position (Mb) | Nearest marker | LOD | Ad ^a | R ² (%) | Donor | References |
|------|---------------|---------------|---------------------------------------|-------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------------------------|
| 1 | <i>qWK1-1</i> | 1.7 | RM8068 | 3.4 | 2.9 | 8.9 | Chiyonishiki | Tabata <i>et al.</i> (2007) |
| 1 | <i>qWB1</i> | 15.4 | RM7075 | 4.02 | 3.82 | 15.6 | Chikushi52 | Wada <i>et al.</i> (2015) |
| 1 | <i>qWK1-2</i> | 36.3 | RM5501 | 5.7 | 3.6 | 15.0 | Koshijiwase | Tabata <i>et al.</i> (2007) |
| 1 | - | 36.5 | S13781 | 4.3 | 4.6 | 8.6 | Tohoku168 | Shirasawa <i>et al.</i> (2013) |
| 2 | - | 4.4 | RM3865 | 11.6 | 7.8 | 43.0 | Kasalath | Ebitani <i>et al.</i> (2008) |
| 2 | <i>qWK2</i> | 34.9 | RM5916 | 3.8 | 2.8 | 9.3 | Koshijiwase | Tabata <i>et al.</i> (2007) |
| 3 | <i>qWB3</i> | 1.4 | RM4853 | 8.90 | 8.39 | 30.5 | Chikushi52 | Wada <i>et al.</i> (2015) |
| 3 | <i>qWB3</i> | 11.4 | RM4512 | 4.60 | 0.73 | 25.9 | Hana-echizen | Kobayashi <i>et al.</i> (2007, 2013) |
| 3 | - | 33.5_34.0 | OJ24J17-NIAS_Os_aa03002564 | 7.0 | 1.0 | 18.5 | Nipponbare | Hori <i>et al.</i> (2012) |
| 4 | <i>qWB4</i> | 28.0 | RM3288 | 4.36 | 0.53 | 15.2 | Hana-echizen | Kobayashi <i>et al.</i> (2007, 2013) |
| 5 | - | 2.0 | S1946 | 8.0 | 8.7 | 23.7 | Koshihikari | Ebitani <i>et al.</i> (2008) |
| 6 | - | 1.8 | RM190 | 8.6 | 5.6 | 24.1 | Kokoromachi | Shirasawa <i>et al.</i> (2013) |
| 6 | <i>qWB6</i> | 4.3 | RM3034 | 13.39 | 1.14 | 59.6 | Hana-echizen | Kobayashi <i>et al.</i> (2007, 2013) |
| 6 | - | 2.0_2.1 | P548D347-NIAS_Os_aa06000223 | 5.1 | 0.8 | 12.9 | Koshihikari | Hori <i>et al.</i> (2012) |
| 6 | - | 2.1_2.3 | NIAS_Os_aa06000223-O007020 | 7.7 | 0.4 | 19.6 | Koshihikari | Hori <i>et al.</i> (2012) |
| 7 | <i>Apq1</i> | 25.9 | Tak6166-3_RM21971 | NA | NA | NA | Habataki | |
| 8 | <i>qWK8</i> | 0.1 | RM2680 | 3.6 | 2.8 | 9.2 | Koshijiwase | Tabata <i>et al.</i> (2007) |
| 8 | <i>qWB8</i> | 7.5_19.4 | RM3181_RM3689 | 3.30 | 4.40 | 12.9 | Chikushi52 | Wada <i>et al.</i> (2015) |
| 8 | - | 15.3 | NIAS_Os_aa08005271-NIAS_Os_aa08005354 | 6.8 | 0.8 | 21.7 | Koshihikari | Hori <i>et al.</i> (2012) |
| 9 | <i>qWB9</i> | 22.6 | RM2482 | 7.63 | 0.20 | 6.0 | Niigatawase | Kobayashi <i>et al.</i> (2013) |
| 10 | - | NA | E50836 | 3.7 | 3.3 | 7.2 | Kokoromachi | Shirasawa <i>et al.</i> (2013) |
| 11 | - | 19.3_19.4 | NIAS_Os_aa11012252-NIAS_Os_aa11003517 | 6.2 | 0.8 | 18.0 | Koshihikari | Hori <i>et al.</i> (2012) |
| 11 | - | NA | KT19 | 2.2 | 3.6 | 5.3 | Kokoromachi | Shirasawa <i>et al.</i> (2013) |
| 12 | - | 1.1 | RM1208 | 6.0 | 6.1 | 25.1 | Kasalath | Ebitani <i>et al.</i> (2008) |

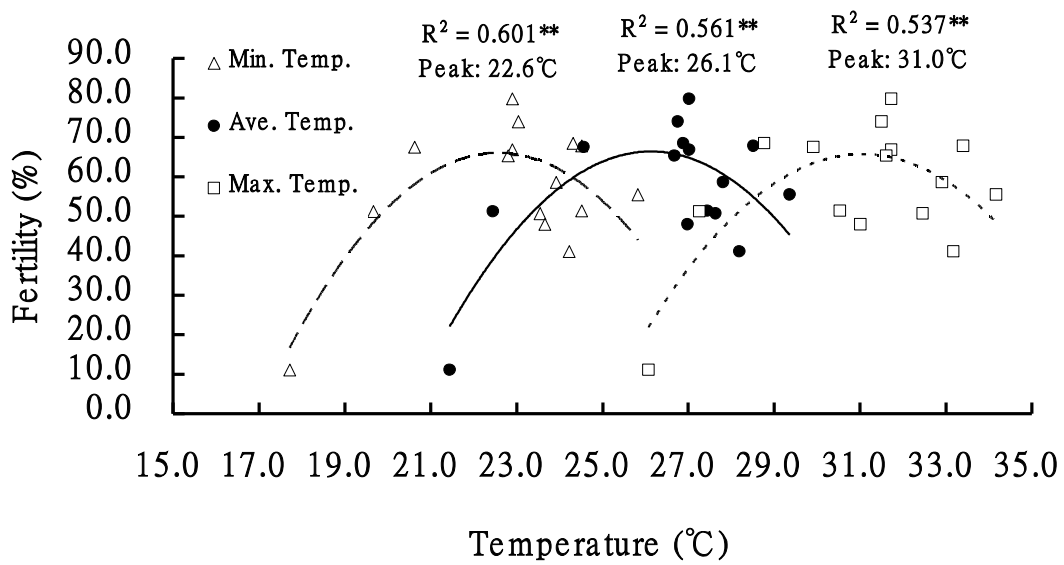


圖 1. 抽穗期日最低溫、日均溫、日最高溫與穀粒稔實率的相關性 (Lur 2009)

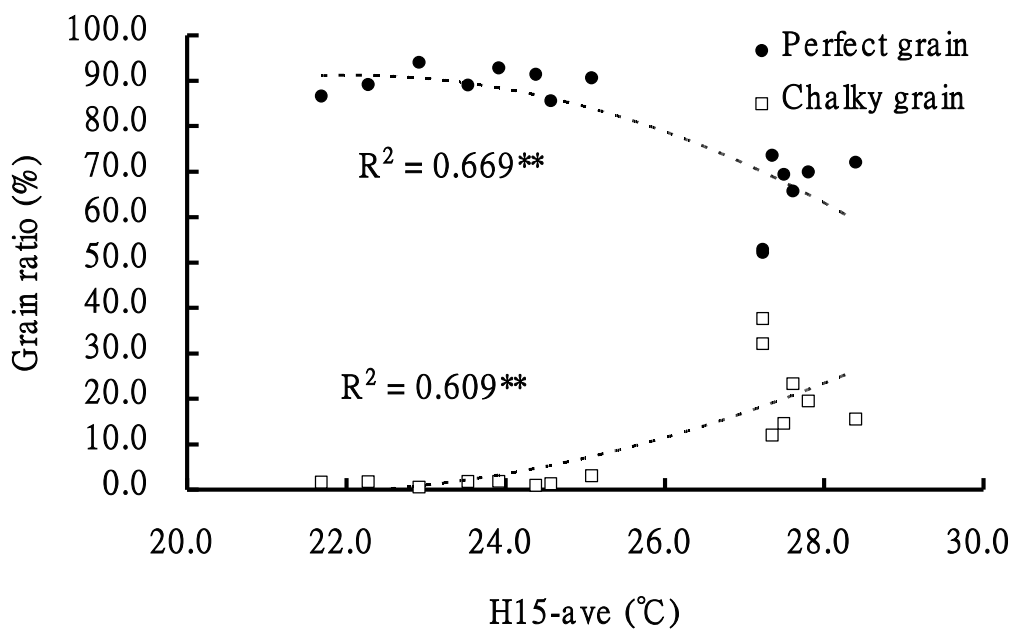


圖 2. 穀粒充實期的日均溫與完整米率及白垩質粒率的相關性 (Wu *et al.* 2016)

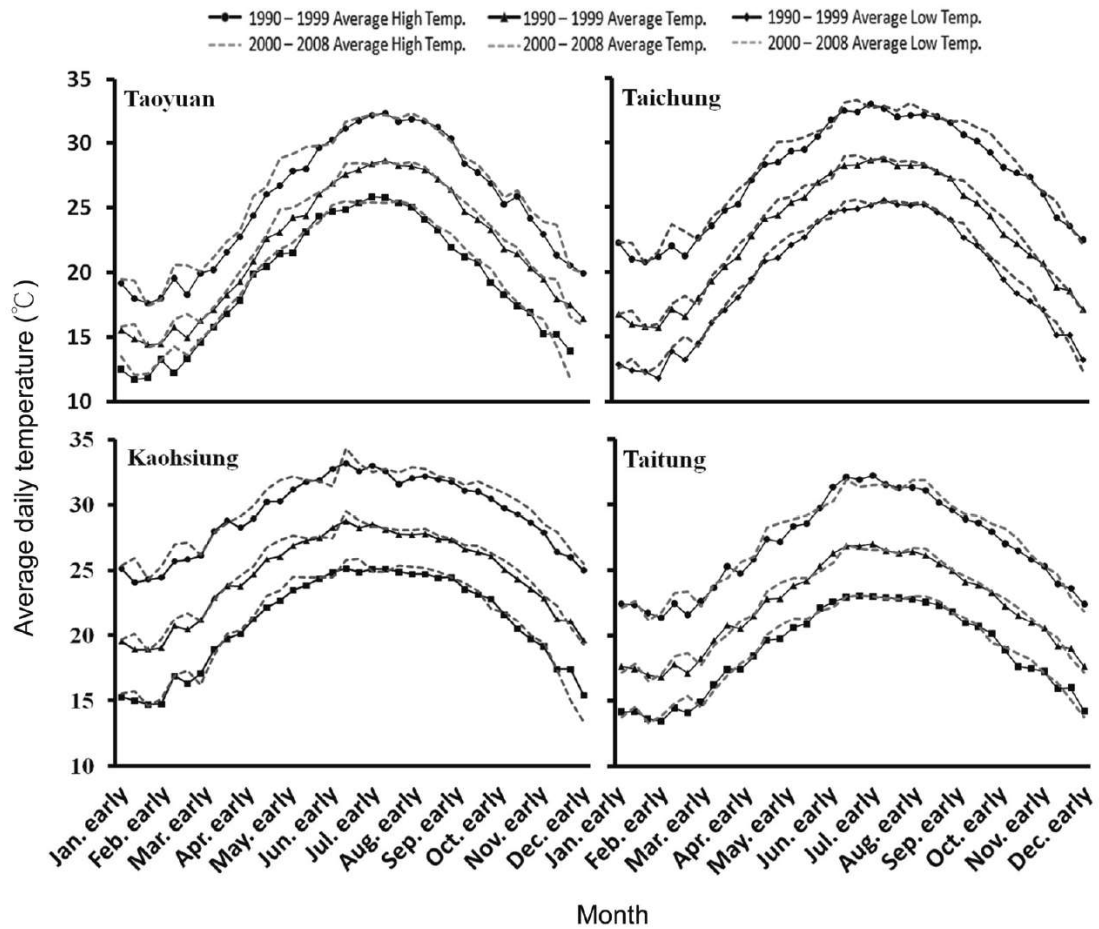


圖 3、臺灣 4 個稻作區 1990 年代與 2000 年代之日均溫年變化圖 (Lur 2009)

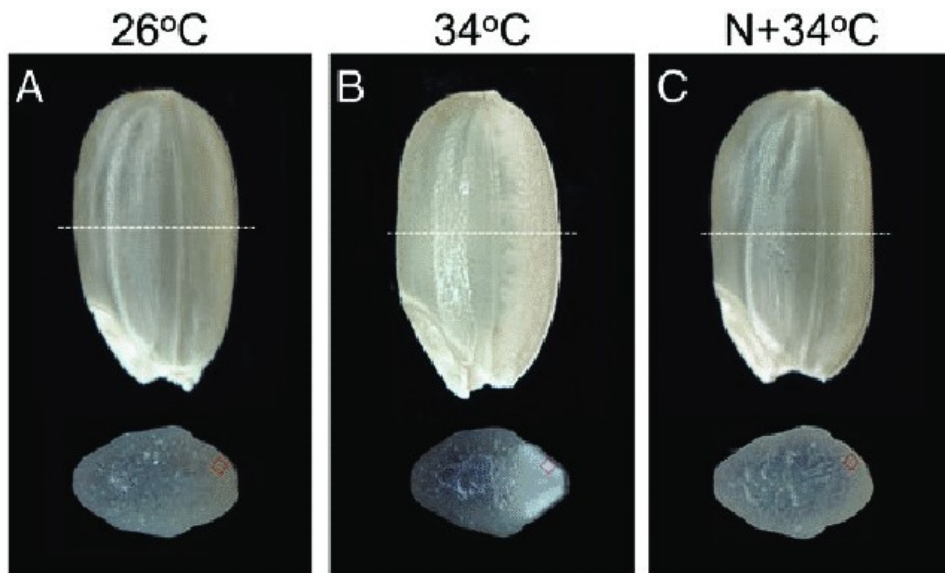


圖 4. 穀粒充實期最適溫度(26°C)、高溫(34°C)與高溫加氮肥處理(N+34°C)的白米外觀 (Wada *et al.* 2019)