

水稻「台農 82 號」誘變系與混系栽培下的稻熱病抗病性及產量表現之研究

廖大經¹ 吳永培^{1,*}

摘要

廖大經、吳永培。2021。水稻「台農 82 號」誘變系與混系栽培下的稻熱病抗病性及產量表現之研究。台灣農業研究 70(3):170–181。

本研究於 2016 年以水稻品種「台農 82 號」及其誘變系為對象，比較「台農 82 號」與誘變系在 1:0、3:1、1:1、1:3 及 0:1 等 5 種不同比例混合栽培模式下，其植株稻熱病抗病性及產量之表現，以及模式預測能力之高低。試驗結果顯示，在第一期作混系組與對照組（即單植「台農 82 號」）比較，隨著混系比例增加，葉稻熱病罹病等級可由 8 級降低至 3 級，罹病度由 88.7% 降低至 28.7%，改善效率最高達 67.6%；穗稻熱病罹病等級由 6 級降低至 3 級，罹病度由 65.6% 降低至 40.0%，改善效率最高達 39.0%；產量由最低 2,379 kg ha⁻¹ 增加至最高為 4,986 kg ha⁻¹，增產效率達 109.6%。惟第二期作對照組葉及穗稻熱病之罹病等級與罹病度，均較前期作減少約 50.0%，致使混系組與對照組在稻熱病防治效果及產量表現方面均無顯著差異。推測原因，可能是 2016 年 9、10 月份稻熱病發生時節連續有颱風侵襲，強風大雨不利於病原菌感染及散布所致。在混系栽培模式對於稻熱病罹病程度與產量之分析及預測能力方面，混系比例每增加 1 個單位，稻株葉稻熱病罹病反應表現為抗病之勝算將提高 3,766 倍，穗稻熱病則為 7 倍；葉及穗稻熱病罹病度分別減少 14.5% 與 5.1%；產量增加 18.7%。模式預測葉稻熱病罹病反應之正確度、特定度及敏感度均達到 80.0% 以上，穗稻熱病均達 73.0% 以上，但不足 80.0%；模式預測葉稻熱病罹病度可解釋 91.1% 總變異量，穗稻熱病僅為 41.6%，產量則為 57.5%。就整體而言，混系栽培模式對於抑制稻熱病發生及穩定產量具有非常顯著的效果，而模式預測能力則以葉稻熱病為優，穗稻熱病及產量的預測效果較差，顯示影響穗稻熱病及產量的因素可能較葉稻熱病為複雜。

關鍵詞：水稻、稻熱病、混系栽培、誘變系、邏輯斯回歸。

前言

台灣水稻周年栽培模式主要分為兩期作，以粳稻為主要栽培作物品種。過去研究指出，粳稻之稻熱病罹病等級與罹病度等嚴重程度明顯受期作效應的影響，並且認為第一期作是稻熱病的好發期節 (Chien 1978; Chen 1990; Chen *et al.* 2004)。據行政院農業委員會農業統計年報 (<https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/book/Book.aspx>) 顯示，2018 年第一期作台灣稻作收穫面積為 169,789 ha，其中粳稻收穫面積

為 154,378 ha，占同期作收穫面積之 90.9% (Council of Agriculture 2018)。另據農糧署統計資料 (未發表)，同期作收穫面積最高之粳稻單一品種為 107,055 ha，占粳稻收穫面積之 69.3%。在單一品種收穫面積占比接近 7 成的情況下，若遭逢適於稻熱病發生的氣候環境，造成大流行的風險極高，也為糧食生產帶來嚴峻的危機。

在兼顧產量及食品安全的要求下，種植抗病品種被認為是最有效的方法 (Chen *et al.* 2004)。然而，抗病品種經常面臨開發育成時間過長及

投稿日期：2020 年 7 月 28 日；接受日期：2021 年 3 月 22 日。

* 通訊作者：wuypei@tari.gov.tw

¹ 農委會農業試驗所嘉義農業試驗分所農藝系副研究員。台灣 嘉義市。

抗病年限過短等兩個難題，以傳統育種法育成抗病新品種平均約需 10 年左右，即使配合分子標誌輔助育種選拔，最快亦需 5–6 年的時間。另一方面，隨著抗病新品種命名推廣後栽培面積的擴增，因生理小種自然選汰壓力的增加，將刺激原有次要小種變成優勢小種，造成小種密度及侵染頻度大增，致使新品種抗病性於短時間內崩解 (Chien *et al.* 1989)。Chen *et al.* (2004) 研究指出，台灣於 1990 年後所育成之梗稻抗病品種，其抗病年限最高為 5 年，最低為 1 年，平均抗病年限約 1.8 年。為了延長抗病年限，除了栽培品種多樣化，控制單一品種栽培面積不致過度擴增以避免生理小種快速演化之外，將數個具不同抗性的抗病基因堆疊於同一栽培品種之中，基於抗病基因與病原菌致病性之專一性原則 (Flor 1955, 1971)，可擴大抗幅以避免抗病性過早失效。若以多親雜交後再回交聚合方式進行，除了在操作技術上有相當難度外，亦需耗費相當時日選拔後代，以剔除因雜交過程所帶來的遺傳累贅 (genetic drag) 現象。

以農藝性狀優良，惟抗病性不佳的栽培品種為輪迴親本，與帶有不同抗病基因的品種(系)為貢獻親本進行雜交後，再與輪迴親本連續回交數代，最後組成一系列農藝性狀與輪迴親本類似，然而各具有不同抗病基因的多系品種 (multiline variety)，是另一種針對病原菌生理小種多變性進行防治的育種方法 (Ou 1971)。多系品種在實務應用上，日本自 1986 年起即開始針對水稻品種「越光」進行抗稻熱病多系品種的選育開發研究，至 2007 年已育成各帶 *Pia*、*Pii*、*Pita-2*、*Piz*、*Pik*、*Pik-m*、*Piz-t* 及 *Pib* 等抗病基因共 11 個多系品種並推廣栽培。在多系品種抗病效果方面，以新潟縣為例，2004 年之前尚未推廣栽培時，感染穗稻熱病的水田面積約占 50–80%，2005 年推廣栽培後發病面積降至 10% 以下，市場上稻熱病防治藥劑之銷貨數量僅及 2004 年的 27% (Ishizaki 2010)，顯示多系品種防治稻熱病的效果相當卓著。

另一個值得考慮的方法，是利用化學藥劑疊氮化鈉 (sodium azide; SA) 進行誘變育種以擴大遺傳變異，其優點是毒性較低，操作安

全，使用量少而育種效率高 (Chern & Huang 1984)。由於疊氮化鈉係造成基因體 (genome) 的點突變 (point mutation) (Al-Qurainy & Khan 2009)，因此適於單一性狀或者主效基因之改良。所獲得之突變系經稻熱病病圃篩選及純化，可獲得一系列抗病性來源不同的近同源系。將這些近同源系以一定比例混合組成混系栽培系統，一方面能降低原有致病性高之優勢小種的適應存活能力，同時阻礙病原菌在田間的散布 (Ou 1971)，可減緩病勢發展及穩定產量 (Chiu & Teng 1976)。

「台農 82 號」為產量穩定、低蛋白質、米飯食味佳的優良梗型水稻品種，惟其對於稻熱病抗病性較弱。本研究以親本「台農 82 號」及對稻熱病具抗性之誘變系為對象，探討親本與誘變系以不同混合比例組成之混系栽培模式，對於植株抗病性、產量及預測抗病效果的影響，提供解決抗病育種年限過長及有效抗病年限過短問題的參考作法之一。

材料與方法

參試材料、田區設計及栽培管理

2016 年第一及第二期作於行政院農業委員會農業試驗所嘉義農業試驗分所 (以下簡稱本分所) 水田試驗田區 (經度 120°28'29"E，緯度 23°29'66"N，海拔 49 m)，選取對葉稻熱病罹病反應為抗級且株型一致優良之 5 個「台農 82 號」誘變系 WM1354、WM1363、WM1370、WM1372 及 WM1543 等重量混合做為參試材料 (簡稱混誘系)，混誘系與親本「台農 82 號」以種子混合重量不同比例做為混系處理方式種植，田區採完全逢機設計方式 (completely randomized design; CRD)，每處理種植 4 重複。另外，單獨種植以上 5 個誘變系做為驗證其抗病性之用，田區同樣採 CRD 設計，每誘變系種植 3 重複。為促進發病，除田區參試材料周圍遍植感病品種 'Lomello' 做為感病源外，全期氮肥施用量為 320 kg ha⁻¹。施肥方式分為基肥、第 1 次追肥、第 2 次追肥及穗肥等 4 次，各次氮肥比例分別為 30、20、30 及 20%。灌溉水分管理方式為移植初期田區水深維持約 3–5 cm；最高分蘖期排乾

水分曬田；抽穗開花期至糊熟期維持 5–10 cm 深水灌溉；黃熟期維持水深 3 cm 輪灌至成熟期為止，收穫日前 1 wk 排乾水分以利機械採收。病蟲害管理除針對縱捲葉蟲及螟蟲等蟲害以培丹藥劑適度防治外，為避免干擾稻熱病發病，未針對白葉枯病及紋枯病進行藥劑防治。

混系處理方式

單植組 (簡稱 M0)：「台農 82 號」與混誘系種子混合比例為 1 : 0。

混系 1 (簡稱 M1)：「台農 82 號」與混誘系種子混合比例為 3 : 1。

混系 2 (簡稱 M2)：「台農 82 號」與混誘系種子混合比例為 1 : 1。

混系 3 (簡稱 M3)：「台農 82 號」與混誘系種子混合比例為 1 : 3。

混系 4 (簡稱 M4)：「台農 82 號」與混誘系種子混合比例為 0 : 1。

田區試驗設計及種植方式

田區試驗處理配置採完全逢機設計，每處理 4 重複，每重複多本植種植 4 行，每行 25 株，行株距 25 cm × 20 cm。

試驗調查方式

一般農藝性狀、產量構成要素及單位面積產量調查

於第一、二期作水稻成熟期進行農藝性狀、產量構成要素及單位面積產量調查，調查時間分別為 2016 年 6 月 27 日及 11 月 14 日。調查方式為每重複隨機選取 10 株調查株高及穗數，收穫時隨機割取 3 株調查產量構成要素，其餘稻株割取後脫粒乾燥至穀粒含水量 13% 時秤重求得單株穀粒重，再乘以 222,222 (每公頃行株距 30 cm × 15 cm 之總株數) 換算得單位面積產量。

稻熱病罹病等級及罹病度調查

本研究關於稻熱病抗病性高低的評估指標有 2 項，分別為罹病等級 (disease scale) 與罹病度 (disease severity; DS)。葉及穗稻熱病罹病等級調查，係參照國際水稻研究所 [International Rice Research Institute (IRRI) 2002] 制定之「水

稻標準評估系統」(Standard Evaluation System for Rice; SES)，以目視方式調查，罹病等級評估標準及對應罹病反應如下：

1. 葉稻熱病罹病等級區分為 0–9 級：0 級，罹病反應為極抗 (high resistant; HR)，葉片無病斑；1 級，葉片有針尖大小點狀病斑，無產孢中心，罹病反應為極抗 (HR)；2 級，稻株下位葉片有直徑 1–2 mm 之小圓至微長灰色病斑，罹病反應為抗 (resistant; R)；3 級，病斑大小形狀與 2 級相同，但稻株上位葉片亦有顯著數量病斑，罹病反應為中抗 (medium resistant; MR)；4 級，葉片有直徑 3 mm 或較長之典型感病型病斑，病斑占葉面積 4% 以下，罹病反應為中抗 (MR)；5 級，葉片上典型之稻熱病病斑占葉面積之 4–10%，罹病反應為中感 (medium susceptible; MS)；6 級，葉片上典型之稻熱病病斑占葉面積之 11–25%，罹病反應為中感 (MS)；7 級，葉片上典型之稻熱病病斑占葉面積之 26–50%，罹病反應為感 (susceptible; S)；8 級，葉片上典型之稻熱病病斑占葉面積之 51–75%，並有許多葉片枯死，罹病反應為極感 (high susceptible; HS)；9 級，葉片面積 75% 以上被害，罹病反應為極感 (HS)。

2. 穗稻熱病罹病等級區分為 0–9 級：0 級，無被害穗，罹病反應為極抗 (HR)；1 級，罹病穗率 5% 以下，罹病反應為抗 (R)；3 級，罹病穗率 5–10%，罹病反應為中抗 (MR)；5 級，罹病穗率 11–25%，罹病反應為中感 (MS)；7 級，罹病穗率 26–50%，罹病反應為感 (S)；9 級，罹病穗率 50% 以上，罹病反應為極感 (HS)。

葉稻熱病及穗稻熱病之調查時期與數量，第一期作分別於 2016 年 4 月 25 日及同年度 6 月 20 日進行調查，每重複各調查 50 株及 10 株；第 2 期作分別自 2016 年 10 月 5 日及同年度 11 月 9 日進行調查，每重複各調查 10 株。平均罹病等級以全部調查植株罹病等級之中位數表示，罹病度計算公式如下 (IRRI 2002)：

$$DS (\%) = \frac{\sum sn_s}{N \times \max(s)} \times 100 \quad (1)$$

式 (1) 中， s 代表罹病等級， n_s 代表該罹病等級的株數， N 代表總調查株數， $\max(s)$ 代表全部罹病等級區分之最高等級。

統計分析

本研究進行之統計分析工作皆以程式語言“R” (3.6.3 版) 撰寫執行，分析株高、穗數、一穗穎花數、稔實率、千粒重、單位面積產量及罹病度等項目之處理效應是否顯著，係調用“base” (R Core Team 2019) 套件之變方分析 (analysis of variance; ANOVA) 進行。若處理效應呈現顯著，欲進行各處理間差異顯著性多重比較，則調用“agricolae” (Felipe de Mendiburu 2020) 套件之最小顯著差異測驗 (Fisher’s least significant difference test; LSD) 進行分析。

為了評估及預測不同混系比例對於稻株罹病度、產量及罹病機率大小之影響，作為混系栽培防治效果的參考，本研究依資料屬性之不同，針對罹病度及產量等連續值調用“base” 套件進行簡單線性回歸 (simple linear regression)。另以邏輯斯回歸 (logistic regression) 對於混系比例與稻株是否抗病之關聯性進行定量分析。為便於進行分析，首先將罹病反應簡化為抗病及感病兩類，以稻株罹病等級 5 級做為簡化罹病反應的分界，其中罹病等級小於 5 級者視為抗病，等於或大於 5 級者則視為感病。由稻株罹病資料中隨機選取 80% 的資料作為訓練資料，以罹病反應為因變數，混系比例為自變數，調用“base” 套件進行邏輯斯回歸配適抗病機率模型。其餘 20% 的資料作為測驗資料套用機率模型建構其混淆矩陣 (confusion matrix) 以評估機率模型之預測效果，混淆矩陣如表 1 所示。

表 1 中，字母 R 代表抗病 (resistant)，S 代表感病 (susceptible)， a 代表模型正確預測為感病，即真陽性 (true positive; TP) 的個數； b 代表模型將實際感病預測為抗病，即偽陰性 (false negative; FN) 的個數； c 代表模型將實際抗病預測為感病，即偽陽性 (false positive;

表 1. 混淆矩陣。

Table 1. Confusion matrix².

Observed	Predicted	
	S	R
S	a	b
R	c	d

² S: susceptible; R: resistant.

FP) 的個數； d 代表模型正確預測為抗病，即真陰性 (true negative; TN) 的個數。評估模型之預測效果指標如下：

1. 正確度 (accuracy)：模型對於資料的整體判別正確率。

$$\text{Accuracy (\%)} = \left(\frac{a + d}{a + b + c + d} \right) \times 100 \quad (2)$$

2. 敏感度 (sensitivity)：模型預測感病個數的正確率。

$$\text{Sensitivity (\%)} = \left(\frac{a}{a + c} \right) \times 100 \quad (3)$$

3. 特定度 (specificity)：模型預測抗病個數的正確率。

$$\text{Specificity (\%)} = \left(\frac{d}{b + d} \right) \times 100 \quad (4)$$

結果

誘變系對於稻熱病抗病性及產量表現

2016 年第一、二期作誘變系對於稻熱病之抗病性及產量表現，調查結果如表 2 所示。第一期作誘變系之葉稻熱病平均罹病等級呈現 2–3 級，罹病度之間達統計顯著差異 ($P = 0.019$)，最低為 WM1372 之 24.2%，最高為 WM1543 之 32.5%，其差幅為 8.3%。穗稻熱病平均罹病等級呈現 3–5 級，罹病度之間未達統計顯著差異 ($P = 0.122$)，可能是 WM1354 及 WM1372 重複間機差較大所致，其中以 WM1543 之 31.1% 為最低，WM1354 之 50.7%

為最高。單位面積產量之間未達統計顯著差異 ($P = 0.064$)，原因可能仍然是 WM1354 及 WM1363 重複間機差過大所造成，其中以 WM1543 之 $6,892 \text{ kg ha}^{-1}$ 為最高，最低為 WM1370 之 $3,855 \text{ kg ha}^{-1}$ 。

第二期作誘變系之葉稻熱病平均罹病等級呈現 3–4 級，罹病度之間未達統計顯著差異 ($P = 0.118$)，罹病度最高為 WM1354 之 44.1%，最低為 WM1370 之 37.0%。穗稻熱病平均罹病等級除 WM1354 為 7 級外，其他表現介於 0–4 級之間，罹病度之間達統計顯著差異 ($P < 0.001$)，以 WM1543 之 15.2% 為最低，WM1354 之 66.3% 為最高，差幅為 51.1%。單位面積產量之間未達統計顯著差異 ($P = 0.151$)，其中以 WM1543 之 $5,573 \text{ kg ha}^{-1}$ 為最高，最低為 WM1354 之 $4,629 \text{ kg ha}^{-1}$ 。

混系處理對於稻熱病抗病效果及產量表現

2016 年第一、二期作混系處理對於稻熱病之抗病性及產量表現，調查結果如表 3 所示。第一期作在稻熱病防治表現方面，與單植組 M0 比較，隨著混系比例之增加，葉稻熱病罹病等級由最高 8 級可降低至 3 級，罹病度防

治效果由 23.0% 可提高至 67.6%。穗稻熱病防治效果略低於葉稻熱病，罹病等級由最高 6 級可降至 3 級，罹病度防治效果由 33.5% 可提高至 39.0%。在產量表現方面，與單植組 M0 比較，混系組之增產效果由 72.8% 可提高至 109.6%。另以混系比例為自變數，分別與罹病度及產量為因變數，利用簡單線性回歸分析探討混系比例與罹病度及產量間的定量關係，配適求得回歸模型如下。

混系比例與葉稻熱病罹病度之回歸模型如式 (5)：

$$y_s = 84.76 - 57.84x_{mix} \quad (5)$$

式 (5) 中， y_s 代表罹病度 (%)， x_{mix} 代表混系比例，回歸模型顯著性測驗達統計顯著水準 ($P < 0.001$)，模型表示混系比例增加 1 個單位 (即 0.25)，罹病度即減少 14.46%。決定係數 $R^2 = 0.911$ ，表示模型可解釋 91.1% 的總變異量。缺適性檢定 (lack of fit test) 不顯著 ($P = 0.1204$)，顯示混系比例與罹病度之間呈線性關係。

混系比例與穗稻熱病罹病度之回歸模型如式 (6)：

表 2. 「台農 82 號」誘變系之稻熱病抗病性及產量表現。

Table 2. The performance of grain yield and blast resistance on 'Tainung 82' mutant lines.

Line	Leaf blast		Panicle blast		Grain yield (kg ha ⁻¹)
	Disease scale	Disease severity (%)	Disease scale	Disease severity (%)	
1 st cropping season					
WM1354	2	25.0 ± 2.38 b ^z	5	50.7 ± 10.68	6,707 ± 1,951.2
WM1363	3	31.0 ± 5.45 a	5	40.4 ± 4.21	6,475 ± 1,403.1
WM1370	2	25.5 ± 2.14 b	4	43.3 ± 6.19	3,855 ± 643.0
WM1372	2	24.2 ± 1.35 b	5	38.1 ± 11.88	5,975 ± 964.3
WM1543	3	32.5 ± 1.64 a	3	31.1 ± 3.85	6,892 ± 417.6
2 nd cropping season					
WM1354	4	44.1 ± 3.39	7	66.3 ± 9.45 a	4,629 ± 490.7
WM1363	4	41.5 ± 1.70	3	25.6 ± 5.77 bc	5,499 ± 730.7
WM1370	3	37.0 ± 2.80	3	34.1 ± 7.80 b	5,268 ± 87.2
WM1372	3	37.4 ± 3.39	4	38.8 ± 8.41 b	5,303 ± 399.9
WM1543	4	39.3 ± 4.49	0	15.2 ± 5.48 c	5,573 ± 175.2

^z Means within each the column followed by the different letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Fisher's protected least significant difference (LSD) test. Percentage data were arcsine-square-root transformed prior analysis.

表 3. 混系處理之稻熱病抗病性及產量表現。
Table 3. The performance of grain yield and blast resistance on the treatment of mixed-line cultivation models.

Mixed line	Leaf blast			Panicle blast			Grain yield (kg ha ⁻¹)	Yield efficiency (%)
	Disease scale	Disease severity (%)	Control efficiency (%)	Disease scale	Disease severity (%)	Control efficiency (%)		
1st cropping season								
M0	8	88.7 ± 3.05 a ^z	-	6	65.6 ± 9.85 a	-	2,379 ± 261.8 c	-
M1	6	68.3 ± 9.71 b	23.0	3	43.6 ± 11.45 b	33.5	4,112 ± 588.0 b	72.8
M2	5	49.8 ± 6.66 c	43.9	5	47.8 ± 2.22 b	27.1	4,986 ± 559.1 a	109.6
M3	4	43.7 ± 4.67 c	50.7	3	43.9 ± 6.38 b	33.1	4,721 ± 441.7 ab	98.4
M4	3	28.7 ± 4.26 d	67.6	3	40.0 ± 3.14 b	39.0	4,951 ± 623.7 a	108.1
2nd cropping season								
M0	4	43.1 ± 2.46	-	3	35.8 ± 6.50	-	5,344 ± 346.6	-
M1	4	42.2 ± 4.16	2.1	3	23.1 ± 11.74	35.5	5,109 ± 656.8	-4.4
M2	4	41.9 ± 3.99	2.8	3	24.7 ± 9.57	31.0	5,341 ± 783.0	-0.1
M3	4	41.1 ± 3.95	4.6	3	32.5 ± 15.19	9.2	5,353 ± 479.2	0.2
M4	4	40.3 ± 3.67	6.5	3	37.5 ± 13.53	-4.7	5,633 ± 379.0	5.4

^z Means within each the column followed by the different letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Fisher's protected least significant difference (LSD) test. Percentage data were arcsine-square-root transformed prior analysis.

$$y_s = 58.33 - 20.33x_{mix} \quad (6)$$

式 (6) 回歸模型顯著性測驗達統計顯著水準 ($P = 0.002$)，模型表示混系比例增加 1 個單位 (即 0.25)，罹病度即減少 5.08%。決定係數 $R^2 = 0.416$ ，表示模型可解釋 41.6% 的總變異量。缺適性檢定為顯著 ($P = 0.0413$)，顯示混系比例與罹病度之間可能呈非線性關係。

混系比例與單位面積產量之回歸模型如式 (7)：

$$y_y = 3,079.5 + 2,300.9x_{mix} \quad (7)$$

式 (7) 中， y_y 代表單位面積產量 (kg ha^{-1})， x_{mix} 代表混系比例，回歸模型顯著性測驗達統計顯著水準 ($P < 0.001$)，模型表示混系比例增加 1 個單位 (即 0.25)，產量即增加 18.68%。決定係數 $R^2 = 0.575$ ，表示模型可解釋 57.5% 的總變異量。缺適性檢定為極顯著 ($P = 0.0028$)，顯示混系比例與產量之間呈非線性關係。

第二期作單植組 M0 與混系組 M1-M4 之葉稻熱病罹病等級均為 4 級，各罹病度之間無顯著差異 ($P = 0.852$)，防治效果則隨著混系比例增加而微幅提高，由混系比例最低 M1 之 2.1% 提高至 M4 之 6.5%。穗稻熱病罹

等級均為 3 級，各罹病度之間無顯著差異 ($P = 0.336$)，防治效果大小有隨著混系比例增加而下降的趨勢，最高為 M1 之 35.5%，最低為 M4 之 -4.7%。單位面積產量之間無顯著差異 ($P = 0.772$)，增產效果亦不明顯，以 M4 之 5.4% 最高，M1 及 M2 較單植組 M0 呈現微幅減產的情況。

誘變系之農藝性狀及產量構成要素

2016 年第一、二期作誘變系之農藝性狀及產量構成要素調查結果，如表 4 所示。第一期作在穗數及一穗穎花數方面均無顯著差異，其他如株高、稔實率及千粒重等呈顯著差異之項目。WM1363 分別在株高與稔實率兩項目中表現最高，分別為 119.3 cm 及 94.3%；而 WM1370 則表現最低，分別為 106.2 cm 及 71.9%。至於千粒重，則以 WM1370 之 29.3 g 為最高，WM1543 之 24.5 g 為最低。

第二期作在穗數及千粒重方面均無顯著差異，其他如株高、一穗穎花數及稔實率呈顯著差異之項目。WM1363 表現與第一期作相同，分別在株高與稔實率兩項目表現最高，分別為 106.8 cm 及 92.3%；而稔實率最低者同樣為 WM1370 之 70.4%。一穗穎花數則以 WM1354 最高為 122.6 粒，最低為 WM1363 之 100.6 粒。

表 4. 「台農 82 號」誘變系之農藝性狀及產量構成要素調查。

Table 4. The investigation of agronomic traits and components of grain yield on 'Tainung 82' mutant lines.

Line	Plant height (cm)	Panicle number (no.)	Spikelet no. per panicle (no.)	Spikelet fertility (%)	1,000-grain weight (g)
1 st cropping season					
WM1354	108.3 ± 10.90 bc ^z	12.0 ± 2.65	131.7 ± 31.98	85.7 ± 7.58 b	25.7 ± 1.06 bc
WM1363	119.3 ± 5.19 a	13.0 ± 3.32	109.3 ± 19.07	94.3 ± 2.24 a	26.8 ± 0.92 b
WM1370	106.2 ± 4.39 c	11.9 ± 2.89	121.0 ± 19.77	71.9 ± 17.99 c	29.3 ± 1.67 a
WM1372	107.3 ± 3.64 bc	11.1 ± 2.26	110.7 ± 17.10	92.7 ± 1.48 a	29.1 ± 0.77 a
WM1543	110.5 ± 4.21 b	13.7 ± 3.16	117.4 ± 31.32	90.8 ± 2.70 ab	24.5 ± 4.40 c
2 nd cropping season					
WM1354	94.4 ± 3.93 c	8.9 ± 1.96	122.6 ± 8.11 a	87.5 ± 3.99 b	29.3 ± 0.98
WM1363	106.8 ± 4.94 a	11.1 ± 2.85	100.6 ± 9.76 c	92.3 ± 2.28 a	29.0 ± 0.97
WM1370	97.1 ± 3.33 b	10.7 ± 2.50	115.7 ± 12.97 ab	70.4 ± 8.95 c	30.0 ± 2.50
WM1372	98.8 ± 3.46 b	9.9 ± 2.09	112.2 ± 9.94 b	88.8 ± 5.36 ab	29.6 ± 0.91
WM1543	105.6 ± 3.43 a	10.3 ± 2.24	109.6 ± 8.81 bc	91.1 ± 2.68 ab	28.2 ± 0.48

^z Means within each the column followed by the different letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Fisher's protected least significant difference (LSD) test. Percentage data were arcsine-square-root transformed prior analysis.

混系處理之農藝性狀及產量構成要素

2016 年第一、二期作混系處理之農藝性狀及產量構成要素調查結果，如表 5 所示。第一期作在穗數及一穗穎花數方面均無顯著差異，其他如株高、稔實率及千粒重等呈顯著差異之項目，則一致以混系組 M4 為最高，對照組 M0 為最低，而 M1-M4 之間則大致隨著混系比例之增加而增加。第二期作在穗數及稔實率方面均無顯著差異，其他如株高、一穗穎花數及千粒重等呈顯著差異之項目。除了千粒重最高為 M4，最低為 M0 外，株高及一穗穎花數均以 M0 為最高，M1-M4 之間則無明顯差異。

混系處理與稻株罹病反應之回歸模型配適及評估

2016 年第一期作以混系比例與葉稻熱病罹病反應進行邏輯斯回歸，配適模型如式 (8) 所示。

$$\pi(x) = \frac{\exp(-4.9598 + 8.2338x)}{1 + \exp(-4.9598 + 8.2338x)} \quad (8)$$

式 (8) 中截距 α 與回歸係數 β 分別為 -4.9598 及 8.2338，並且均達到統計顯著水準。由於 β

為正值，顯示混系比例與抗病機率呈正相關，若混系比例增加 1 個單位，則稻株抗病之勝算 (即同組資料中抗病與罹病機率的比值) 將提高 $\exp(8.2338) = 3,766.12$ 倍。當混系比例 x 為 0、0.25、0.50、0.75 及 1.00 時，則稻株表現為抗病的機率 $\pi(x)$ 分別為 0.0070、0.0521、0.3009、0.7713 及 0.9635。回歸模型對於測驗資料的預測評估結果如表 6 所示，測驗資料的正確度 84.88% 及特定度 85.88% 均高於訓練資料，僅敏感度 84.17% 略低於訓練資料。

混系比例與穗稻熱病罹病反應進行邏輯斯回歸，配適所得模型如式 (9) 所示。

$$\pi(x) = \frac{\exp(-1.1210 + 1.9518x)}{1 + \exp(-1.1210 + 1.9518x)} \quad (9)$$

式 (9) 之截距 α 及回歸係數 β 分別為 -1.1210 及 1.9518，同時均達到統計顯著水準。由於 β 為正值，顯示混系比例與抗病機率呈正相關，若混系比例增加 1 個單位，則稻株抗病的勝算提高 $\exp(1.9518) = 7.04$ 倍。當混系比例 x 為 0、0.25、0.50、0.75 及 1.00 時，稻株表現為抗病的機率 $\pi(x)$ 分別為 0.2458、0.3468、0.4638、0.5849 及 0.6965。回歸模型對於測驗資料的預

表 5. 混系處理之農藝性狀及產量構成要素調查。

Table 5. The investigation of agronomic traits and components of grain yield on the treatment of mixed-line cultivation models.

Mixed line	Plant height (cm)	Panicle number (no.)	Spikelet no. per panicle (no.)	Spikelet fertility (%)	1,000-grain weight (g)
1 st cropping season					
M0	88.9 ± 4.59 d ^z	13.2 ± 4.26	89.1 ± 24.00	67.3 ± 6.15 b	22.1 ± 1.21 c
M1	97.1 ± 7.10 bc	12.3 ± 3.84	87.4 ± 12.23	69.3 ± 10.77 b	24.3 ± 2.71 b
M2	96.5 ± 7.24 c	12.4 ± 3.92	85.9 ± 11.40	78.7 ± 6.57 a	25.2 ± 2.93 b
M3	99.4 ± 7.44 b	13.3 ± 2.00	83.8 ± 14.60	74.4 ± 8.31 ab	25.8 ± 2.02 ab
M4	105.7 ± 7.33 a	13.3 ± 4.05	86.2 ± 9.24	80.4 ± 14.06 a	27.2 ± 2.01 a
2 nd cropping season					
M0	108.0 ± 3.69 a	13.1 ± 1.83	107.4 ± 11.44 a	85.2 ± 6.94	25.0 ± 1.35 d
M1	103.3 ± 4.80 b	11.7 ± 2.27	89.0 ± 18.19 b	85.9 ± 4.94	26.1 ± 1.00 c
M2	103.5 ± 4.11 b	12.2 ± 1.85	94.4 ± 10.88 b	84.0 ± 4.06	27.3 ± 1.78 b
M3	103.9 ± 6.35 b	12.8 ± 2.49	87.4 ± 9.07 b	85.3 ± 6.26	28.3 ± 1.21 ab
M4	102.8 ± 5.79 b	13.0 ± 1.95	84.9 ± 10.29 b	84.6 ± 7.32	29.1 ± 0.83 a

^z Means within each the column followed by the different letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Fisher's protected least significant difference (LSD) test. Percentage data were arcsine-square-root transformed prior analysis.

表 6. 混系比例與葉稻熱病罹病反應回歸模型之混淆矩陣及預測結果。

Table 6. The confusion matrix and the results of prediction on the regression models of the ratio of mixed-line cultivation models and the disease scale of leaf blast².

Training sample	Predicted		Test sample	Predicted	
	S	R		S	R
Observed			Observed		
S	409	56	S	101	12
R	71	259	R	19	73
Accuracy (%)	84.03		84.88		
Sensitivity (%)	85.21		84.17		
Specificity (%)	82.22		85.88		

² S: susceptible; R: resistant.

測評估表現如表 7 所示，雖然測驗資料之正確度 75.00%、敏感度 76.19% 及特定度 73.33% 等指標均優於訓練資料，但是整體預測表現卻較葉稻熱病模型為差。

討論

2016 年第一期作於本分所之試驗結果顯示，「台農 82 號」誘變系混系栽培對於抑制稻熱病及穩定產量方面具有顯著效果。混系組與對照組「台農 82 號」比較，葉稻熱病罹病等級降幅最高可達 5 級，罹病度降幅最高達 60.0%；穗稻熱病抑制效果雖較葉稻熱病低，然而罹病等級降幅最高亦可達 3 級，罹病度降幅最高達 25.6%。在產量表現方面，因稻熱病受抑制而造成增產效果，最高可達 109.6%。混系比例與稻株罹病反應的邏輯斯回歸模型亦顯示，混系比例增加 1 個單位，稻株呈抗病反應

的勝算提高近 3,766 倍，即使是混系比例最低之 M1 稻株，其抗病機率是對照組 M0 的 7.4 倍。第二期作由於對照組之稻熱病罹病等級及罹病度均較前期作減少約 50.0%，而與混系組接近，因此混系組與對照組在稻熱病抑制及產量表現方面無明顯差異。造成對照組在第二期作發病程度較低之原因，可由兩期作之致病優勢生理小種及氣象條件之差異性分別探討。根據「台農 82 號」於 2016–2019 年在本分所旱田式病圃中進行稻熱病檢定結果顯示（未發表），除 2017 年兩期作均表現為中感級外，其他年度兩期作均表現為感級或極感級。由於旱田式病圃屬於較為封閉之場域，受到外界環境變化的影響較少，因此推測在兩期作感染「台農 82 號」的優勢生理小種應無太大變化。在氣象條件方面，影響稻熱病發生的關鍵氣象因子主要是相對濕度與降水日數，若降水日數較多，會增加罹病反應嚴重程度 (Chen *et al.*

表 7. 混系比例與穗稻熱病罹病反應回歸模型之混淆矩陣及預測結果。

Table 7. The confusion matrix and the results of prediction on the regression models of the ratio of mixed-line cultivations and the disease scale of panicle blast².

Training sample	Predicted		Test sample	Predicted	
	S	R		S	R
Observed			Observed		
S	62	25	S	16	4
R	37	40	R	5	11
Accuracy (%)	62.20		75.00		
Sensitivity (%)	62.63		76.19		
Specificity (%)	61.54		73.33		

² S: susceptible; R: resistant.

2004)。根據交通部中央氣象局網站氣象資料顯示 (Central Weather Bureau 2020)，2016 年嘉義市第一、二期作稻熱病發生期節 (第一期作：5、6 月份，第二期作：9、10 月份) 之相對濕度各為 82.0% 及 81.0%，降水量各為 227 mm 及 662 mm，降水日數各為 20 d 及 23 d。第二期作之降水量及降水日數較多，主要為 2016 年 9、10 月曾針對第 14 號強烈颱風莫蘭蒂、第 16 號中度颱風馬勒卡、第 17 號中度颱風梅姬及第 19 號輕度颱風艾利等 4 個颱風發布颱風警報，其中強烈颱風莫蘭蒂及中度颱風梅姬登陸台灣本島。颱風帶來強風造成空氣中病原菌孢子數降低 (Suzuki 1974)，而附著於葉片上的孢子則被強風吹落 (Suzuki 1974) 及大雨沖刷流失 (Asai *et al.* 1967; Chien *et al.* 1984)，均不利於稻熱病之發生與傳播。任何針對稻熱病發生的防治措施，其主要目的均在於確保穩定的產量。混系栽培因涉及品系製種及混合等前置作業，故種植成本勢必高於單一品種栽培方式。因此，就混系比例對於病害防治與增產效果的評估，是攸關混系栽培能否實用的關鍵。表 3 中第一期作除對照組 M0 之外，葉及穗稻熱病抗病表現皆以混系組 M4 為最佳，而 M2 雖然在穗稻熱病抗病表現最差，但是 M2、M3 及 M4 之產量表現無顯著差異，並且以 M2 產量最高，M4 則略低於 M2 居次。比較 M2 及 M4 的產量構成要素資料 (表 5)，發現 M2 僅在千粒重一項顯著低於 M4，其他如穗數、一穗粒數及稔實率雖略低於 M4，但均未達顯著差異水準。在葉稻熱病階段主要影響穗數，此階段 M2 之罹病反應及罹病度雖較 M4 嚴重，然而並未影響穗數表現，顯示 M2 罹患葉稻熱病之稻株似乎有相當之恢復能力。稔實率及千粒重則主要受穗稻熱病之影響，若於穀粒充實期之前即感染穗稻熱病，造成稔實率下降，對於產量影響較大；反之，穀粒充實期後才罹患穗稻熱病者，主要影響千粒重，但造成產量損失程度較少 (Tsai 1988)。由於本研究對照組與混系組調查穗稻熱病日期於 2016 年 6 月 20 日至同年 6 月 24 日完成，無抽穗期不一致的現象，因此就產量構成要素調查結果推論，M2 可能於穀粒充實期開始後才受到穗稻熱病感染。

混系栽培模型除了可明確及合理描述抑制

病害發生的成效與原因之外，對於抑制病害發生程度與穩定產量效果的預測能力亦值得探討。本研究就資料型態之類型，對於模型以兩種統計分析方式來評估其預測能力，罹病度與產量資料使用線性回歸分析；罹病反應資料則使用邏輯斯回歸分析。就葉稻熱病罹病度而言，線性回歸模式的決定係數 R^2 為 91.1%，代表混系比例可解釋模型 91.1% 的變異，缺適性檢定顯示混系比例與罹病度呈線性關係，因此模式應有相當優良的預測效果。另一方面，穗稻熱病罹病度與產量之 R^2 則各僅有 41.6% 與 57.5%，其預測效果不甚理想，缺適性檢定顯示模式非線性關係，表示模式中除了混系比例外可能尚有其他具部分影響力的因子。事實上，若在模式中各增加一項混系比例之 2 次式，則穗稻熱病罹病度之 R^2 由 41.6% 略提高至 50.7%，而產量之 R^2 由 57.5% 大幅提高至 78.8%，表示影響穗稻熱病罹病度變化的因子則較為複雜，致使模式 R^2 改善程度有限，而混系比例與產量之間有較明顯的二次關係。

至於模式對於稻熱病罹病反應之預測，本研究以混系比例影響稻株抗病反應之機率大小來表示。混系比例每增加 1 單位，稻株對於葉稻熱病表現抗病反應的勝算提高約 3,766 倍，遠高於穗稻熱病的約 7 倍；評估模式預測效果的指標：正確度、特定位度及敏感度，同樣以葉稻熱病的表現優於穗稻熱病。綜合以上預測結果說明，影響植株罹患穗稻熱病的因素較葉稻熱病為複雜，致使模式對於穗稻熱病的預測表現不佳，而穗稻熱病造成產量損失的影響更為直接。因此，未來對於穗稻熱病的流行病學，必須作更為深入調查與完整資料蒐集，以提高模式預測能力及防治效果。

誌謝

本研究承行政院農業委員會科技計畫 105 農科-10.5.4-農-C2 經費挹注，試驗調查及資料整理承本分所農藝系羅俊欽及賴佳鴻等同仁協助，特此誌謝。

引用文獻

Al-Qurainy, F. and S. Khan. 2009. Mutagenic effects of

- sodium azide and its application in crop improvement. *World Appl. Sci. J.* 6:1589–1601.
- Asai, G. N., M. W. Jones, and F. G. Rorie. 1967. Influence of certain environmental factors in the field on infection of rice by *Piricularia oryzae*. *Phytopathology* 57:237–241.
- Central Weather Bureau. 2020. CWB Observation Data Inquire System. <https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp> (visit on 01/31/2021)
- Chen, L. C. 1990. Reaction of rice varieties and selections to blast in the uniform blast nurseries. *J. Agric. Res. China.* 39:303–314. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.199012.0006
- Chen, L. C., Y. S. Chen, and Y. H. Cheng. 2004. Test of rice varieties and strains resistant to rice blast in blast nurseries during 1990–2002. *J. Agric. Res. China.* 53:269–283. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.200412.0006
- Chern, C. G. and C. S. Huang. 1984. Mutagenic efficiency of sodium azide on rice variety ‘Tainung 67’. *J. Agric. Res. China.* 33:345–353. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.198412.0001
- Chien, C. C. 1978. Levels of host resistance in relation to the incidence of rice blast. p.225–245. *in: Disease and Insect Pests of Rice: Ecology and Epidemiology.* (Chiu, R. J. ed.) Joint Commission on Rural Reconstruction Publ., Taipei, Taiwan. 331 pp. (in Chinese with English abstract)
- Chien, C. C., W. H. Tsai, Y. Z. Yang, and C. Liu. 1984. Studies on the epidemiology of rice blast disease in central areas of Taiwan. *J. Agric. Res. China.* 33:169–180. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.198406.0009
- Chien, C. C., L. C. Hsieh, and Y. C. Chang. 1989. Studies on the break-down of resistance in rice cultivar ‘Tainung 70’ to rice blast. *J. Agric. Res. China.* 38:72–79. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.198903.0006
- Chiu, S. M. and Y. C. Teng. 1976. Studies on disease resistance, yielding capacity and grain quality of blast resistant multiline and composite varieties of rice. *J. Agric. Res. China.* 25:249–258. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.197612.0001
- Council of Agriculture. 2018. *Agricultural Statistics Yearbook.* Council of Agriculture, Executive Yuan. Taipei, Taiwan. 356 pp. (in Chinese)
- Felipe de Mendiburu. 2020. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research.* R package version 1.3-2. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae> (visit on 07/28/2020)
- Flor, H. H. 1955. Host-parasite interaction in flax rust—Its genetics and other implications. *Phytopathology* 45:680–685.
- Flor, H. H. 1971. Current status of the gene-for-gene concept. *Annu. Rev. Phytopathol.* 9:275–296. doi:10.1146/annurev.py.09.090171.001423
- International Rice Research Institute. 2002. *Standard Evaluation System for Rice.* International Rice Research Institute. Manila, Philippines. 56 pp.
- Ishizaki, K. 2010. Breeding and practical application of ‘Koshihikari Niigata BL Series’ in Niigata Prefecture. *Breeding Res.* 12:160–164. (in Japanese)
- Ou, S. H. 1971. A new approach to rice breeding for blast disease resistance. p.31–48. *in: Rice Diseases.* (Chiu, R. J., ed.) Joint Commission on Rural Reconstruction Publ., Taipei, Taiwan. 372 pp. (in Chinese)
- R Core Team. 2019. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org> (visit on 07/28/2020)
- Suzuki, H. 1974. Studies on the behavior of the rice blast fungus spore and the application for forecasting method of the rice blast disease. *Ann. Phytopath. Soc. Japan.* 40:165–167. (in Japanese) doi:10.3186/jjphytopath.40.165
- Tsai, W. H. 1988. Estimation of rice yield losses caused by panicle blast disease. *J. Agric. Res. China.* 37:86–90. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.198803.0009

Study on the Mixed-Line Cultivation Model of Rice Variety ‘Tainung 82’ Mutant Lines for Resistance of Blast and Grain Yield

Dah-Jing Liao¹ and Yong-Pei Wu^{1*}

Abstract

Liao, D. J. and Y. P. Wu. 2021. Study on the mixed-line cultivation model of rice variety ‘Tainung 82’ mutant lines for resistance of blast and grain yield. *J. Taiwan Agric. Res.* 70(3):170–181.

The materials used for this study were rice variety ‘Tainung 82’ and its mutant lines. All the lines were cultivated in 5 different ratios of mixed combinations, 1 : 0, 3 : 1, 1 : 1, 1 : 3 and 0 : 1 in the first cropping season of 2016. The goal of this study was to investigate blast resistance, grain yield and predictability under mixed-line cultivation models. The results revealed that when the ratio of mixed-line cultivation increased, as compared to the individual cultivation of ‘Tainung 82’, the disease scale of leaf blast decreased from level 8 to 3, disease severity decreased from 88.7% to 28.7%, and the highest efficiency of improvement had reached 67.6%. The disease scale of panicle blast decreased from level 6 to 3, disease severity decreased from 65.6% to 40.0%, and the highest efficiency of improvement had reached 39.0%. The grain yield increased from 2,379 kg ha⁻¹ to 4,986 kg ha⁻¹, and the efficiency of improvement was 109.6%. However, the disease scale and severity of both leaf and panicle blast in the second cropping season decreased about 50.0% when compared to those of the first cropping season. As a result, there was no significant difference on the control effect between the mixed-line cultivation models and the control group, which could be due to typhoon during the experimental period. From September to October of 2016, there were several typhoons attacking Chiayi area, and strong wind and heavy rain decreased the spreading of the pathogen. As for the analysis and predictability for the disease scale of blast and grain yield under mixed-line cultivation models, the ratio of mixed line cultivation increased 1 unit (25.0%), the odds of resistance in the disease scale of leaf blast increased by 3,766-fold, the disease scale of leaf blast increased 7 times, the disease severity of leaf and panicle blast decreased by 14.5% and 5.1%, respectively, and grain yield increased by 18.7%. The accuracy, specificity and sensitivity of predictability for the disease scale of leaf blast under mixed-line cultivation models were greater than 80.0%, the disease scale of panicle blast ranged from 73.0 to 80.0%. The predictability for the disease severity of leaf and panicle blast would be explained by 91.1% and 41.6% of variance, respectively, and the grain yield would be explained by 57.5% of variance. Overall, the mixed-line cultivation models exhibited a great impact on the inhibition of blast and the control of rice blast and stability of grain yield. As for the predictability of mixed-line cultivation models, the predictability of leaf blast was superior, but not in the panicle blast and grain yield, indicating that factors that affect panicle blast and grain yield are more complicated than those of leaf blast.

Key words: Rice, Blast, Mixed-line cultivation, Mutant lines, Logistic regression.

Received: July 28, 2020; Accepted: March 22, 2021.

* Corresponding author, e-mail: wuypei@tari.gov.tw

¹ Associate Research Fellows, Agronomy Department, Chiayi Agricultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Chiayi, Taiwan, ROC.