

水稻生育階段預測模式之建立與驗證

林士閔¹ 呂椿棠² 卓緯玄³ 呂秀英^{4*}

摘要

林士閔、呂椿棠、卓緯玄、呂秀英。2014。水稻生育階段預測模式之建立與驗證。台灣農業研究 63(1):30-42。

本研究主要目的在建立國內現有 3 個重要中晚熟品種（「台稉 9 號」、「台農 71 號」及「台農私 22 號」）之三個重要生育時期（50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期）的水稻生育階段預測模式，作為推估水稻重要特定生育時期的依據，以有效執行田間栽培管理。利用參試品種在 2006-2010 年各兩期作不同插秧日期試驗，以各生育階段期間內每日的發育速率與有效積溫（即生育度數，growing degree days; GDD）建立線性回歸模式，並驗證模式之預測能力。首先將所有試驗資料以內部驗證方式進行建模與驗證，結果發現預測與實際發育速率間之差異的 95% 信賴區間皆包含 0，顯示預測誤差在可接受的 5% 顯著水準範圍內；再合併所有試驗資料建立各品種之 3 個生育階段的 GDD 預測模式，所得到截距與回歸係數之估值皆落在前述驗證程序所得模式之該兩個係數估值的 95% 信賴區間之內，顯示此等 GDD 模式是穩健的，由此可推知各品種達到各生育階段所需之 GDD。本研究亦發現不同品種在各生育階段的發育速率不盡相同，相較於「台稉 9 號」，「台農 71 號」稍早熟而「台農私 22 號」稍晚熟，乃由於「台農 71 號」在 50% 始藥期至幼穗分化期間的發育速率較快，而「台農私 22 號」在插秧至 50% 始藥期間雖發育速率較快但之後到 50% 抽穗期間發育速率變慢所致。因此為提升稻穀產量，不同品種應配合其關鍵生育階段施以適當的田間栽培管理。

關鍵詞：有效積溫、生育度數、生育速率、線性回歸模式、預測誤差。

前言

水稻為世界三大糧食作物之一，在水稻各生育階段當中，始藥期、幼穗分化期及抽穗期之發育情況都會影響水稻收穫產量 (Yoshida 1981; Bollich *et al.* 1999)。水稻穀粒產量受到每株穗數、每穗粒數等構成要素之影響，若在水稻重要特定生育階段時間點進行適當的田間栽培管理，例如水稻始藥期施用氮肥以提高有效分藥數可增加每穗穗數，於幼穗分化期施用氮肥促進幼穗分化可增加每穗粒數，在重要生育階段防治病蟲害等都能有利最終產量之提升 (Yoshida 1981; Slaton & Norman 1994)。

水稻在這些重要生育階段的生長發育，皆受到氣象因子如氣溫、日長、日射量及降雨量等影響 (Yoshida 1981)。近年來由於全球氣候變遷，導致作物生長發育階段越來越難以掌握 (Hodges 1991)，因此，建立精確的水稻生育階段預測模式，做為推估水稻重要特定生育時期的依據，可有效執行田間栽培管理。

由於作物生長發育受基因型及環境的共同影響，建立作物生育階段預測模式可用來量化作物自發芽至營養生長、花芽分化、抽穗、開穎及成熟等生育階段與環境之間的關係 (Horie & Nagakawa 1990)。作物生育階段的時間能夠精準預測，對作物生長生理機制研究非常有幫助

投稿日期：2013 年 9 月 14 日；接受日期：2013 年 11 月 18 日。

* 通訊作者：iying@tari.gov.tw

¹ 國立中興大學農藝學系碩士班研究生。台灣 台中市。

² 農委會農業試驗所作物組副研究員。台灣 台中市。

³ 農委會農業試驗所作物組助理研究員。台灣 台中市。

⁴ 農委會農業試驗所研究員兼副所長。台灣 台中市。

(Hodges 1991; Wang & Engel 1998)。為建立生育階段預測模式或作物物候模式 (crop phenological model)，研究者通常進行多次作物生長發育調查試驗，記錄該作物特定生育階段 (如營養生長期、生殖生長期及成熟期等) 之時間點及收集生長發育期間氣象資料，當試驗結束時，將這些特定生育階段的發育速率與相對應的氣象資料，利用線性或非線性關係的模式來配適，再以後續年度試驗資料來驗證所建模式的預測能力 (Whisler *et al.* 1986)。

作物受到氣溫影響的研究，始自於 Réaumur (1735) 所提出來的熱單位 (heat unit 或 thermal unit) 理論概念，認為作物的生長發育要達到一個階段，需要累積到一定的溫度。水稻的發育速率會隨著有效溫度 (effective temperature) 增加而上升，完成一個生育階段時期所需有效溫度為一個常數，稱為有效積溫 (effective accumulated temperature) 或稱生育度數 (growing degree days; GDD)；GDD 為每日平均氣溫減去特定溫度下限－基礎溫度 (base temperature) 所得剩下的溫度，若得到負值則設 GDD 為 0，也就是指作物生長發育停止 (Glimore & Rogers 1958)。Russelle *et al.* (1984) 指出氣溫對作物生長發育的解釋能力最高可達 95%，利用 GDD 做為溫度指標應用在作物發育速率上能有較合理解釋。

利用 GDD 建立水稻生育階段之預測模式，始於 1970 年代美國 Slaton 之 DD50 (degree days 50) 管理程式，DD50 的計算公式為每日最高溫 (94°F 為上限) 加上每日最低溫 (70°F 為下限) 之平均溫度減去基礎溫度 (50°F)，即為水稻每日生長所需的 GDD；該方法至今已累積 30 多年不同水稻品種之試驗資料，美國阿肯色州有近 60–70% 水稻農戶運用此程式預測水稻生育階段，其預測的誤差僅提早或延後 2 日 (Slaton & Norman 1994)。Norman *et al.* (2002) 在美國進行水稻多個播種日期的生長發育比較試驗，發現生育日數隨著插秧期越晚，生長發育到特定階段的時間就越短，且水稻生長發育到幼穗分化期、抽穗期及生理成熟期需要達到一定累積溫度。因此，即使在不同年度進行水稻生長發育比較試驗，發現相同品種在

不同年度間的特定生長發育階段必需累積溫度大致上也差異不大 (Wilson *et al.* 2005; Frizzell *et al.* 2010)。

由於水稻生長發育也受到日長影響，Horie & Nakagawa (1990) 與 Chang *et al.* (2006) 均指出超過最適日長時間水稻會延遲抽穗開花。因此有些研究同時以 GDD 與日長作為自變數，建立光熱單位模式 (photothermal unit model; PTU 模式)，以預測水稻生長發育階段，但經評估只有幼穗分化期前的感光期生育階段才會受到日長影響 (Horie & Nakagawa 1990; Yin *et al.* 1997a, b)。Chiu (1993) 利用台灣 6 個水稻品種為材料 (「台中 65 號」、「台南 5 號」、「台農 67 號」、「台中 189 號」、「台中 10 號」及「台中 17 號」)，評估 GDD 模式、納入日溫與夜溫之修飾 GDD 模式以及加入日長的 PTU 模式對幼穗分化期之配適表現及預測能力，發現使用 GDD 模式配適良好，但使用同時包含 GDD 與日長的 PTU 模式之配適能力並沒有獲得改善且有更差的傾向，且插秧到幼穗分化期的發育速率對日長改變的反應只有一次效應，在剔除溫度效應後日長對發育速率的影響極微。其推測這是因為台灣地區一期作與二期作連續交替選拔的方式，在自然淘汰作用下，只有光週期鈍感的品系才會留存，建議仍以 GDD 預測模式來配適插秧至幼穗分化期的發育速率。

Chiu (1993) 僅針對水稻幼穗分化期建立 GDD 預測模式，且所分析的參試水稻品種在目前國內栽培面積已經很少甚至不再種植，因此本研究主要目的在建立國內現有 3 個重要中晚熟品種 (「台梗 9 號」、「台農 71 號」及「台農 22 號」) 之 3 個重要生育時期 (50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期) 的 GDD 預測模式。利用 2006–2010 年 3 個品種於各生育階段內每日發育速率與其相對應之每日 GDD 建立線性回歸關係，探討 GDD 預測模式的配適性與預測能力，藉此推估各品種不同生育階段所需之 GDD，並比較各品種間在不同生育階段的發育速率變化差異，期能有利於田間栽培管理之參考。

材料與方法

試驗材料

本研究的 3 個參試品種為「台梗 9 號」(‘TK9’)、「台農 71 號」(‘TNG71’) 及「台農 22 號」(‘TNGS22’), 其中 ‘TNGS22’ 為秈稻 (*indica rice*), 其餘兩個品種均為粳稻 (*japonica rice*)。3 個品種皆為中晚熟品種, 但 ‘TNG71’ 稍早熟而 ‘TNGS 22’ 稍晚熟。試驗於 2006–2010 年在行政院農委會農業試驗所試驗田進行, 不同年度的參試品種不盡相同, 2006–2008 及 2010 年皆有 3 個參試品種, 而 2009 年僅有 ‘TNG71’ 及 ‘TNGS22’ 兩品種, 且 2009 與 2010 年試驗兩期作皆有 3 至 4 個不同插秧期, 因此 ‘TK9’ 共有 14 個年期試驗資料, 而 ‘TNG71’ 及 ‘TNGS22’ 各有 21 個年期試驗資料。各年期的田間試驗皆採用隨機完全區集設計 (randomized complete block design; RCBD), 小區面積為 11.2 m (長) × 2.8 m (寬), 植栽密度為 0.28 m × 0.16 m, 每品種各重複 3 次。

資料收集與整理

試驗期間調查 3 個品種於不同生育階段 (50% 始蘗期、幼穗分化期及 50% 抽穗期) 的生育日數。50% 始蘗期定義為每天調查小區內 50 欖水稻, 直到水稻分蘗之欖數超過 50% 的日期; 幼穗分化期之調查為每隔 1 日取 10 株水稻主桿鏡檢, 直到幼穗長度達 2 mm 的植株超過 5 株以上的日期; 95% 抽穗期為每天調查 50 欖的水稻生長發育, 直到抽穗欖數達到 50% 的日期。

試驗期間並收集記錄每日氣溫資料, 再計算 3 個參試品種於上述 3 個生育階段生育日數相對應的有效累積溫度 (即生育度數 GDD), 每日的 GDD 計算公式如式 [1]:

$$\sum \left\{ \frac{[T_{\max} + T_{\min}]}{2} - T_b \right\} \quad [1]$$

其中 T_{\max} 為每日最高溫, T_{\min} 為每日最低溫, T_b 為生長發育基礎溫度, 本研究假設水稻的生長發育基礎溫度為 10°C。

預測模式建立方法

本研究在假設水稻每日累積發育速率與相對應之每日 GDD 存在線性關係之基礎上, 建立水稻 GDD 模式來預測其重要生育階段。因此, 利用各品種試驗資料建立達到某生育階段前之期間內, 每日累積發育速率與其相對應每日 GDD 間的簡單線性回歸關係如下:

$$Y = b_0 + b_1 X \quad [2]$$

式中 Y 為水稻達到某生育階段前之期間內每日累積發育速率, b_0 為截距 (intercept), b_1 為回歸係數 (regression coefficient), X 為該期間內每日 GDD。截距與回歸係數之估計, 可透過最小平方法 (least square method) 求得。在作物生育期模式化過程中, 某生育階段從開始到結束之期間內每日發育速率可設為達到該生育階段所需生育日數之倒數 (Horie & Nakagawa 1990; Shaykewich 1995; Wang & Engel 1998; Iannucci *et al.* 2008; Ceglar *et al.* 2011); 例如, ‘TK9’ 之 2006 年一期作從插秧至 50% 始蘗期所需生育日數為 19 d, 則該期間內每日發育速率設為 $1/19 \text{ d}^{-1}$, 因此期間內每日累積發育速率為 $1/19$ 、 $2/19$ 、……及 $19/19 \text{ d}^{-1}$ 。

考慮 3 個水稻品種同一期作在同一地區之相同氣候及栽培管理環境下各生育階段的發育速率可能不盡相同, 因此分別建立 3 個生育階段 (插秧至 50% 始蘗期、50% 始蘗期至幼穗分化期、幼穗分化期至 50% 抽穗期) 之每日累積發育速率與每日 GDD 的線性回歸式, 以探討各品種從插秧到 50% 始蘗期、再到幼穗分化期及最後達 50% 抽穗期之不同生育階段時所需的 GDD, 並進行相同環境下品種間之相對發育速率差異比較。各生育階段的 GDD 預測模式除關係式顯著性測驗外, 皆利用決定係數 (coefficient of determination; R^2) 判定配適能力, R^2 值在 0 與 1 之間, 數值越大則代表模式解釋或配適能力越良好。GDD 預測模式之建立與驗證的各項計算, 則利用 SAS 9.3 統計套裝軟體中的 PROC REG 進行分析。

預測模式驗證方法

為評估上述生育階段預測模式所得回歸係數的穩定度與預測能力，將各品種各生育階段的所有年期試驗資料劃分為訓練資料集 (training dataset) 與驗證資料集 (validation dataset)，以進行模式的內部驗證 (internal validation)。內部驗證使用留一法之交叉驗證 (leave-one-out cross validation) 進行，即在運算過程中每一次移除一筆資料藉以對建立的模型進行驗證工作，然後以剩下的資料建立模型，並重複進行 (Witten & Frank 2005)。因此，本研究在所有試驗資料中每次取出某年某期作某插秧日期的試驗資料作為驗證資料集，其餘資料則用來建立模型；例如 'TK9' 執行第 1 次的驗證資料集為 2006 年一期作資料，其餘 13 個年期試驗資料則作為建立 GDD 預測模式的建模資料集，因此共可執行 14 次，以此類推，'TNG71' 可執行共 21 次，'TNGS22' 也可執行共 21 次。每次執行程序中，先利用訓練資料集建立如式 [2] 的模式，再將驗證資料集達到某生育階段之實際有效積溫代入所建模型，以推估達到該生育階段的預測發育速率。由於達到該生育階段時的實際發育速率為 1，因此可藉由預測發育速率與實際發育速率之間的差異，來評估模式的預測能力，然後計算所有執行次數所得之發育速率誤差 95% 信賴區間 (confidence interval; CI)，倘 0 落在 95% CI 內，表示預測誤差在可接受範圍。除此，也計算所有執行次數所得回歸係數的 95% CI，以評估預測模式的穩定度。

最後各品種所有年期試驗資料再全部合併進行預測模式建立，除利用顯著性測驗與 R^2 評估模式配適性外，也檢視回歸式中的截距與回歸係數估值是否落在先前模式驗證程序所得該兩個係數估值的 95% CI 內，倘未超過 95% CI 範圍外，表示預測模式的截距與回歸係數相當穩定，即可將該合併所有試驗資料所得回歸關係式作為預測模式，來預測不同水稻品種各生育階段所需 GDD，並比較各品種在不同生育階段的發育速率差異。

結果

各生育階段實際之生育日數與 GDD 資料整理

3 個參試品種 ('TK9'、'TNG71' 及 'TNGS22') 於三個生育階段 (插秧至 50% 始藥期、50% 始藥期至幼穗分化期、以及幼穗分化期至 50% 抽穗期) 經各年期試驗所調查的生育日數與 GDD 資料，分別整理如表 1 至 3，從變異係數 (CV 值) 可發現除 'TK9' 與 'TNG71' 之 50% 始藥期至幼穗分化期外，所有品種於各生育階段調查之 GDD 在年期之間的變異，均甚小於生育日數之年期變異，尤其是 50% 始藥期以 GDD 之年期變異遠低於生育日數之年期變異。比較 3 個生育階段之 GDD 與生育日數之年期變異，皆以 50% 始藥期在不同年期的變異最大 (表 1-3)。

各生育階段之 GDD 預測模式建立與驗證

從插秧至 50% 始藥期、50% 始藥期至幼穗分化期、以及幼穗分化期至 50% 抽穗期之不同生長期間內，'TK9'、'TNG71' 及 'TNGS22' 每日累積生育速率與每日 GDD 間回歸模式各經執行 14、21 及 21 次之驗證程序結果，每次所得 GDD 預測模式皆配適良好 ($R^2 = 0.835-0.994$ ，未列表)，計算所有執行次數所得模式之截距與回歸係數估值的 95% CI 如表 4 所示，各生育階段不同品種之間存有差異；將每次作為驗證資料集達到各生育階段期的實際 GDD (表 1-3) 帶入每次所得模式，估計出每次執行程序的預測發育速率，並計算所有執行次數建模所得預測發育速率的 95% CI 亦列於表 4，此等與實際達到 50% 始藥期發育速率 (= 1) 皆相當接近；最後估算每次執行驗證程序所得預測與實際發育速率間的差異 (即預測誤差)，各生育階段 3 個品種所有執行次數所得預測誤差的 95% CI 皆含 0 在內，表示利用 GDD 預測此 3 個品種之 50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期的誤差在 5% 水準下與 0 無顯著差異，皆在可接受範圍內 (表 4)。

因此，將 3 個品種所有年期試驗資料再合併進行 GDD 預測模式建立，線性關係配適圖如圖 1，所得分析結果整理如表 5，各品種各

表 1. 「台梗 9 號」水稻品種 2006–2008 及 2010 年於不同期作及插秧日期下各生育階段的生育日數與生育度數 (GDDs)。

Table 1. The calendar days and growing degree days (GDDs) to different growth stages of 'TK9' rice variety planted at different transplanting dates in a two-crop system in 2006–2008 and 2010.

Year	Crop season	Transplanting date	Transplanting to 50% tillering		50% tillering to panicle initiation		Panicle initiation to 50% heading	
			Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)
2006	I	Feb. 21	19.0	189.2	40.3	508.7	20.0	320.1
	II	Aug. 10	10.3	196.6	36.3	655.1	19.0	318.1
2007	I	Feb. 13	18.3	201.5	44.0	524.1	21.0	314.2
	II	Aug. 10	14.7	253.3	34.7	619.2	21.3	350.9
2008	I	Feb. 19	23.7	242.7	38.7	585.6	21.7	320.3
	II	Aug. 11	12.7	244.9	36.0	664.5	18.3	309.8
2010	I	Jan. 20	21.7	227.8	43.0	448.7	28.0	340.8
		Feb. 04	26.3	253.1	39.7	455.6	23.7	323.7
		Feb. 23	20.3	249.9	38.3	463.8	21.3	313.9
		Mar. 05	18.7	213.3	40.0	488.8	21.3	338.5
	II	Jul. 07	14.3	277.2	40.0	752.2	16.3	309.7
		Jul. 23	12.7	232.7	37.3	702.2	17.0	303.5
		Aug. 10	12.3	245.9	36.3	652.9	18.0	316.4
		Aug. 20	11.7	215.9	43.3	777.2	21.3	299.8
Mean		16.9	232.9	39.1	592.8	20.6	320.0	
SD ^z		4.9	25.4	2.9	112.2	3.0	14.5	
CV(%)		29.0	10.9	7.4	18.9	14.6	4.5	

^z SD, standard deviation; CV, coefficient of variation.

生育階段之發育速率與 GDD 間的線性回歸式都極顯著存在 (F 檢定機率值皆 < 0.0001)，且模式都配適良好 ($R^2 = 0.842-0.970$)。各品種合併所有資料建模所得之截距與回歸係數 (表 5)，皆各落在前述多次模式驗證程序中所得截距與回歸係數之 95% CI 內 (表 4)，顯示此等 GDD 預測模式是穩健的。

由表 5 中 GDD 預測模式的回歸係數之大小，可發現插秧至 50% 始藥期之回歸係數估值由大到小，依序為 'TNG22'、'TK9' 及 'TNG71'，表示在達到相同 GDD 下，'TNG22' 的生育速率最快，其次為 'TK9'，而 'TNG71' 最慢，即 3 個參試品種在插秧至 50% 始藥期間的發育速率存在差異；而各品種在 GDD 預測模式中的截距項差異，則可反映出品種在秧苗時已存在的植株發育差異，由大而小依序分別為 'TNG71'、'TNGS22' 及 'TK9'。50% 始藥期至幼穗分化期之 GDD 預測模式中的回歸係數由

大到小，依序為 'TNG71'、'TK9' 及 'TNGS22'，表示在達到相同 GDD 下，'TNG71' 的生育速率最快，其次為 'TK9'，而 'TNGS22' 最慢；各品種在 GDD 預測模式中的截距項差異，則可呈現出品種先前在達到 50% 始藥期時存在的植株發育情況差異，由大而小依序為 'TK9'、'TNG71' 及 'TNGS22'。幼穗分化期至 50% 抽穗期之 GDD 預測模式中的回歸係數，由大到小依序為 'TK9'、'TNG71' 及 'TNGS22'，顯示出達到相同 GDD 下，以 'TK9' 的發育速率最快，'TNG71' 次之，而 'TNGS22' 最慢；由模式中截距項差異，則可呈現出品種在達到幼穗分化期時已存在的植株發育情況差異，由大而小依序為 'TNG71'、'TK9' 及 'TNGS22'。

品種間各生育階段所需 GDD 之比較

利用上述合併所有試驗資料所建立的 3 個重要生育階段發育速率之 GDD 預測模式 (表

表 2. 「台農 71 號」水稻品種 2006–2010 年於不同期作及插秧日期下各生育階段的生育日數與生育度數 (GDDs)。

Table 2. The calendar days and growing degree days (GDDs) to different growth stages of ‘TNG71’ rice variety planted at different transplanting dates in a two-crop system in 2006–2010.

Year	Crop season	Transplanting date	Transplanting to 50% tillering		50% tillering to panicle initiation		Panicle initiation to 50% heading	
			Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)
2006	I	Feb. 21	17.0	166.4	40.7	505.4	18.0	282.6
	II	Aug. 10	12.3	233.5	29.0	525.7	23.3	405.1
2007	I	Feb. 13	16.3	184.9	42.0	477.1	20.3	318.3
	II	Aug. 10	11.7	200.2	32.7	579.9	18.7	329.6
2008	I	Feb. 19	21.3	211.4	36.3	542.3	20.7	291.8
	II	Aug. 11	12.0	232.1	30.7	569.9	19.7	328.7
2009	I	Feb. 04	14.7	173.6	45.3	514.2	23.0	300.8
		Feb. 19	14.0	174.1	45.3	523.9	20.3	291.9
		Mar. 05	14.7	145.7	38.0	472.8	19.7	291.7
	II	Jul. 07	13.0	255.5	36.3	700.6	16.3	338.1
		Jul. 23	10.3	205.7	38.0	733.5	16.3	332.9
		Aug. 10	11.3	216.9	31.0	615.1	17.3	323.0
2010	I	Jan. 20	19.3	196.8	49.0	514.3	23.7	303.2
		Feb. 04	24.3	223.6	42.0	515.1	23.3	323.7
		Feb. 23	21.7	263.6	39.3	450.7	18.3	277.4
		Mar. 05	17.3	193.3	40.3	493.3	18.0	301.0
	II	Jul. 07	15.7	302.2	34.3	648.7	17.3	311.4
		Jul. 23	12.3	226.6	34.0	640.5	18.0	323.6
		Aug. 10	12.0	226.6	34.3	623.8	17.3	318.8
		Aug. 20	14.0	258.4	37.3	668.5	25.0	372.8
Mean			15.1	216.4	37.5	568.3	19.8	319.5
SD ^z			3.8	37.7	5.3	80.1	2.6	30.0
CV(%)			25.2	17.4	14.1	14.1	13.1	9.4

^z SD, standard deviation; CV, coefficient of variation.

5), 可反推得到達到各生育階段所需之 GDD 如表 6。由此發現, 各品種達到 3 個不同生育階段 (50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期) 所需 GDD 有所不同: 相對於其他品種, ‘TNGS22’ 在插秧至 50% 始藥期所需的 GDD 較低, 但之後 50% 始藥期至幼穗分化期、幼穗分化期至 50% 抽穗期所需 GDD 都較高; ‘TNG71’ 與 ‘TK9’ 在插秧至 50% 始藥期所需 GDD 較高且兩者極為相近 (僅差 3.4°C), 但 50% 始藥期至幼穗分化期所需 GDD 以 ‘TNG71’ 最低, 而幼穗分化期至 50% 抽穗期

所需 GDD 則 ‘TNG71’ 與 ‘TK9’ 兩個品種又相近 (僅差 7.5°C)。若以插秧後開始累積至幼穗分化期所需 GDD 來看, 由多至少依次為 ‘TNGS22’、‘TK9’ 及 ‘TNG71’, 由插秧後直至 50% 抽穗期所需 GDD, 由多至少依次也是 ‘TNGS22’、‘TK9’ 及 ‘TNG71’, 故無法得知 3 個參試品種間在不同生育階段所需 GDD 之實際差異變化。因此, 本研究將插秧至 50% 始藥期、50% 始藥期至幼穗分化期、幼穗分化期至 50% 抽穗期以分段方式來分別建立其 GDD 預測模式, 並推估達到該等生育階段所

表 3. 「台農秈 22 號」水稻品種 2006–2010 年於不同期作及插秧日期下各生育階段的生育日數與生育度數 (GDDs)。

Table 3. The calendar days and growing degree days (GDDs) to different growth stages of ‘TNGS22’ rice variety planted at different transplanting dates in a two-crop system in 2006–2010.

Year	Crop season	Transplanting date	Transplanting to 50% tillering		50% tillering to panicle initiation		Panicle initiation to 50% heading	
			Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)	Days	GDD (°C)
2006	I	Feb. 21	18.7	182.5	49.0	640.5	24.7	399.5
	II	Aug. 10	9.3	178.1	36.7	662.2	24.0	404.0
2007	I	Feb. 13	18.3	200.7	50.0	611.2	23.3	374.6
	II	Aug. 10	9.7	166.6	39.0	693.5	20.7	324.7
2008	I	Feb. 19	23.0	234.0	46.3	683.3	25.3	406.2
	II	Aug. 11	9.7	186.7	39.0	722.7	20.7	345.7
2009	I	Feb. 04	17.0	204.0	54.3	626.8	24.0	337.0
		Feb. 19	11.7	150.1	54.0	635.9	23.7	343.7
		Mar. 05	14.3	136.4	47.7	611.6	23.3	376.8
	II	Jul. 07	11.7	228.8	43.7	846.6	17.7	357.5
		Jul. 23	9.0	177.7	44.3	861.0	17.3	344.2
		Aug. 10	10.7	204.1	38.0	747.9	21.0	326.8
2010	I	Jan. 20	19.3	196.8	61.0	657.6	26.0	354.0
		Feb. 04	25.3	238.6	52.7	623.1	21.0	313.9
		Feb. 23	18.0	216.7	48.7	600.5	22.7	368.8
		Mar. 05	19.0	215.7	50.0	656.6	22.7	256.9
	II	Jul. 07	14.0	270.8	41.0	771.3	21.0	381.3
		Jul. 23	11.7	213.5	40.0	751.4	19.3	342.2
		Aug. 10	10.3	194.5	40.3	735.3	19.3	330.7
		Aug. 20	10.3	193.5	41.3	739.2	23.7	343.2
Mean		14.3	198.8	45.4	693.8	22.1	351.9	
SD ^z		4.9	30.5	6.8	74.1	2.4	34.0	
CV(%)		34.3	15.3	15.0	10.7	10.9	9.7	

^z SD, standard deviation; CV, coefficient of variation.

需 GDD，以獲得較多訊息。

再從圖 2 中各品種達到各生育階段 (50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期) 之前的發育速率與 GDD 之變化趨勢來看，自插秧後最初發育速率由快至慢依次為 ‘TNG71’、‘TNGS22’ 及 ‘TK9’，直到 GDD 約 60°C 時 ‘TNGS22’ 發育速率開始超過 ‘TNG71’，隨著 GDD 累積，‘TNGS22’ 發育速率越快，先達到 50% 始藥期，故 ‘TNGS22’ 達到 50% 始藥期所需 GDD 最低；從 50% 始藥期後，‘TNGS22’ 發育速率開始變緩而慢於其他兩品種，而約

在 GDD = 200°C 時，‘TNG71’ 發育速率超過 ‘TK9’，且隨著 GDD 累積，‘TNG71’ 與 ‘TK9’ 間的發育速率差異就越大，最後 ‘TNG71’ 先達到幼穗分化期，故 ‘TNG71’ 由 50% 始藥期至幼穗分化期所需 GDD 最低；從幼穗分化期後，隨著 GDD 累積，‘TNGS22’ 發育速率越慢於其他兩品種，在此生育階段期間內 ‘TK9’ 與 ‘TNG71’ 發育速率相當接近，最後皆先達到 50% 抽穗期，而以 ‘TNG71’ 稍晚於 ‘TK9’，故 ‘TK9’ 與 ‘TNG71’ 在此期間所需 GDD 最低，而 ‘TNG71’ 又略高於 ‘TK9’，但兩者差異甚

表 4. 三個水稻品種之生育度數 (GDDs) 生育階段預測模式進行內部驗證之結果。

Table 4. Results of internal validation of growing degree days (GDDs) models for predicting growth stages in three rice varieties.

Growth stage/Variety	95% CI ^z	Estimated coefficients of linear model ^y		Prediction of development rate (d ⁻¹)	
		b ₀	b ₁	Pred. value	Pre. error
Transplanting to 50% tillering					
TK9	Lower limit	0.02420	0.00405	0.93	-0.07
	Upper limit	0.02792	0.00421	1.06	0.06
TNG71	Lower limit	0.07457	0.00397	0.86	-0.14
	Upper limit	0.07907	0.00403	1.02	0.02
TNGS22	Lower limit	0.04740	0.00451	0.88	-0.12
	Upper limit	0.05146	0.00455	1.01	0.01
50% tillering to panicle initiation					
TK9	Lower limit	0.08439	0.00143	0.84	-0.16
	Upper limit	0.09013	0.00145	1.04	0.04
TNG71	Lower limit	0.04886	0.00162	0.91	-0.09
	Upper limit	0.05074	0.00164	1.03	0.03
TNGS22	Lower limit	0.03793	0.00136	0.94	-0.06
	Upper limit	0.03949	0.00138	1.04	0.04
Panicle initiation to 50% heading					
TK9	Lower limit	0.01047	0.00305	0.97	-0.03
	Upper limit	0.01259	0.00308	1.02	0.02
TNG71	Lower limit	0.02361	0.00294	0.92	-0.08
	Upper limit	0.02547	0.00297	1.01	0.01
TNGS22	Lower limit	0.00926	0.00272	0.93	-0.07
	Upper limit	0.01155	0.00274	1.02	0.02

^z CI, confidence interval.

^y b₀ and b₁ indicate the intercept and regression coefficient in linear model using training dataset in internal validation, respectively.

微。由此可知，3 個品種皆為中晚熟品種，但‘TNG71’由於在 50% 始藥期至幼穗分化期之間的發育速率較快，而呈現稍早熟；‘TNGS22’雖於插秧至 50% 始藥期之間的發育速率較快，但自 50% 始藥期以後到 50% 抽穗期的發育速率變慢，以致呈現稍晚熟。

討論

本研究經多年期試驗調查結果，發現‘TK9’、‘TNG71’及‘TNGS22’3 個水稻品種於 3 個特定生長發育階段所需 GDD 在不同年間的變異，大致上皆小於生育日數之年間變異 (表 1-3)，此與前人研究針對其他水稻品種所得 GDD 在不同年度間差異不大之結論相當一

致 (Wilson *et al.* 2005; Frizzell *et al.* 2010)，顯示相較於生育日數，以 GDD 建立模式當可較不受氣候環境影響，而更能精準預測水稻生育階段。本研究藉由內部驗證程序，顯示使用 GDD 預測 3 個品種於 3 個生育階段的發育速率誤差皆在可接受的 5% 顯著水準範圍內 (表 4)。因此，合併所有試驗資料建立 3 個品種之 3 個生育階段的 GDD 預測模式，其回歸係數也都落在前述驗證程序所得模式之截距與回歸係數的 95% CI 之內，顯示此等 GDD 預測模式是穩健的 (表 5)。由此可推得 3 個品種從插秧至 50% 始藥期、50% 始藥期至幼穗分化期、幼穗分化期至 50% 抽穗期之各分段生育期所需的積溫 (表 6)。依據各生育階段之 GDD 預測模式的回歸係數 (表 5) 或所需 GDD (表 6)

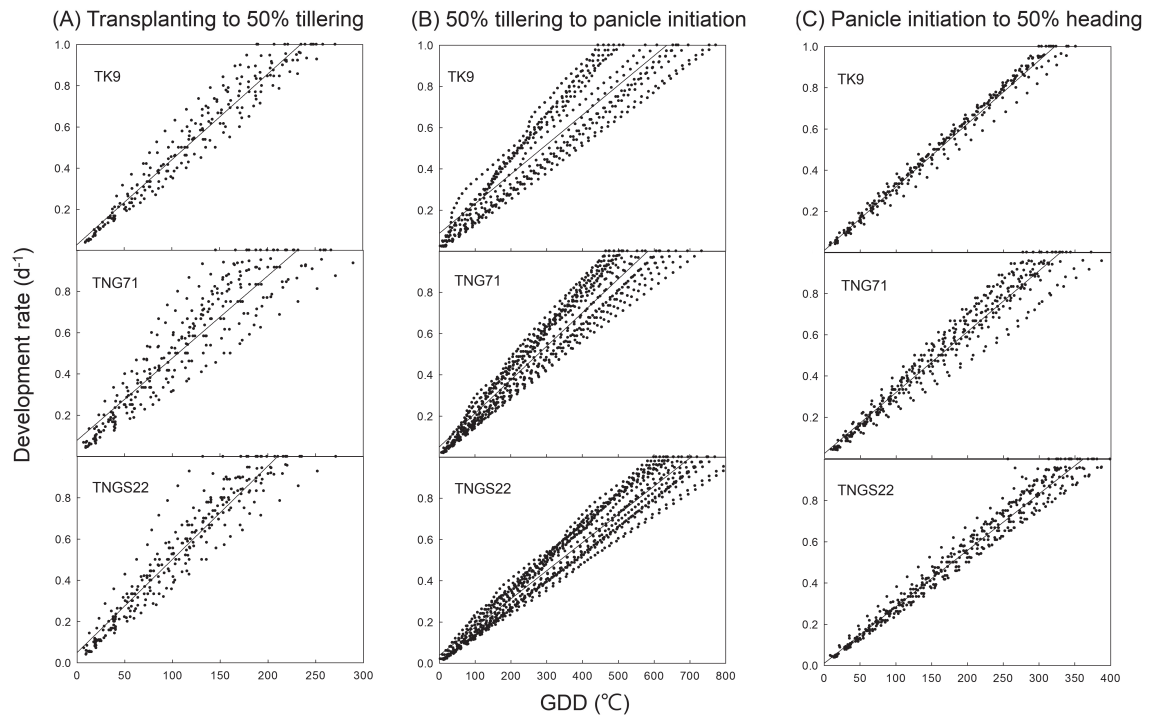


圖 1. 三個水稻品種於不同生育階段的發育速率與生育度數 (GDDs) 之線性關係配適圖。(A) 插秧至 50% 始蘗期；(B) 50% 始蘗期至幼穗分化期；(C) 幼穗分化期至 50% 抽穗期。

Fig. 1. Curve fitting diagrams showing the linear relationships between development rates and growing degree days (GDDs) for different growth stages in three rice varieties. (A) Transplanting to 50% tillering; (B) 50% tillering to panicle initiation; and (C) panicle initiation to 50% heading.

表 5. 三個水稻品種利用所有試驗資料所建立之生育度數 (GDDs) 生育階段預測模式。

Table 5. The growing degree days (GDDs) models for predicting growth stages in three rice varieties based on pooled data sets.

Growth stage/Variety	b_0^z	b_1	R^2	Pr < F
Transplanting to 50% tillering				
TK9	0.02619	0.00415	0.939	< 0.0001
TNG71	0.07707	0.00399	0.842	< 0.0001
TNGS22	0.04954	0.00453	0.900	< 0.0001
50% tillering to panicle initiation				
TK9	0.08769	0.00144	0.851	< 0.0001
TNG71	0.04992	0.00163	0.916	< 0.0001
TNGS22	0.03878	0.00137	0.943	< 0.0001
Panicle initiation to 50% heading				
TK9	0.01159	0.00307	0.986	< 0.0001
TNG71	0.02464	0.00296	0.944	< 0.0001
TNGS22	0.01059	0.00274	0.970	< 0.0001

^z b_0 and b_1 indicate the intercept and regression coefficient in linear model, respectively; R^2 , coefficient of determination; Pr < F, probability of F test.

表 6. 三個水稻品種經由模式預測所推估達到不同生育階段所需的生育度數 (GDDs)。

Table 6. The growing degree days (GDDs) needed to reach different growth stages in three rice varieties using model prediction.

Variety	Transplanting to 50% tillering	50% tillering to panicle initiation	Panicle initiation to 50% heading	Transplanting to panicle initiation	Transplanting to 50% heading
TK9	234.7	633.6	322.0	868.3	1190.3
TNG71	231.3	582.9	329.5	814.2	1143.7
TNGS22	209.8	701.6	361.0	911.4	1272.4

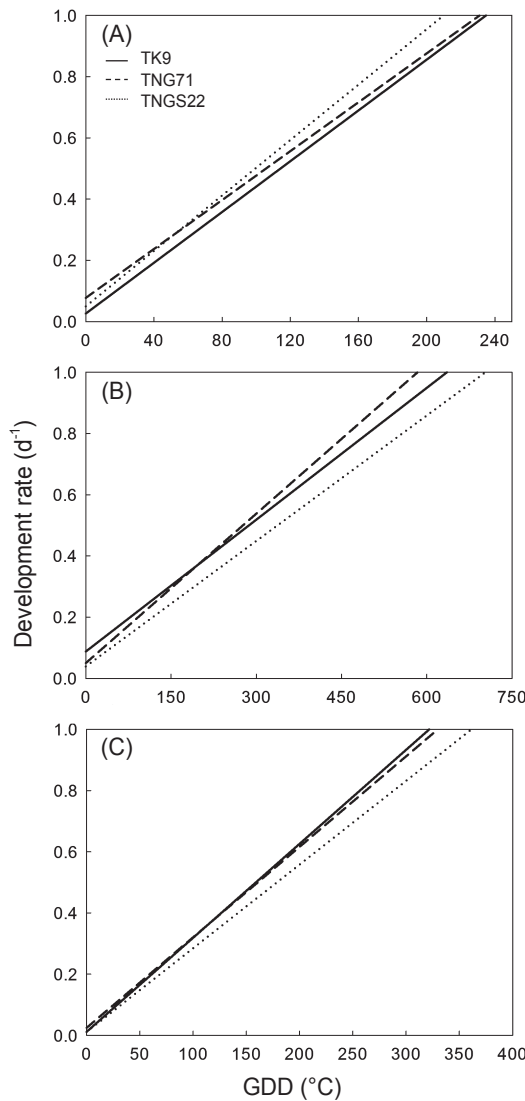


圖 2. 三個水稻品種各生育階段期間內發育速率與生育度數 (GDDs) 之變化趨勢的比較。(A) 插秧至 50% 始藥期；(B) 50% 始藥期至幼穗分化期；(C) 幼穗分化期至 50% 抽穗期。圖中趨勢線為經由 GDD 模式所估得。

Fig. 2. Comparison of the changes of growing degree days (GDDs) and development rates during the periods of different growth stages among rice varieties. (A) Transplanting to 50% tillering; (B) 50% tillering to panicle initiation; and (C) panicle initiation to 50% heading. The trend lines are estimated from GDD models.

的大小，以及 3 個品種達到各生育階段前的發育速率與 GDD 之變化趨勢 (圖 2)，皆可發現不同品種在各生育階段的發育速率不盡相同，由此可用以解釋 3 個品種雖皆為中晚熟品種，但 'TNG71' 稍早熟而 'TNGS22' 稍晚熟，係因 'TNG71' 在 50% 始藥期至幼穗分化期間的發育速率較快，而 'TNGS22' 在插秧至 50% 始藥期間雖發育速率較快，但之後到 50% 抽穗期間發育速率變慢所致。

水稻發育自插秧至幼穗分化期為營養生長期，幼穗分化期至 50% 抽穗期為生殖生長期，此兩時期的發育速率已知未必相同 (Yoshida 1981; Horie & Nagakawa 1990)。為提升稻穀產量，應依照不同品種於其關鍵生育階段實施適當的栽培管理，例如從始藥期至分藥盛期再到幼穗分化期，宜開始追加氮肥與鉀肥 (Yoshida 1981; Bollich *et al.* 1999)；由於幼穗分化為一穗粒數、雄蕊及雌蕊形成的重要生育時間點 (Matsushima 1980; Chiu 1993; Bollich *et al.* 1999)，幼穗分化期宜多施穗肥 (氮肥) 以增加產量 (Yoshida 1981; Slaton & Norman 1994; Bollich *et al.* 1999)；此外，幼穗分化期及抽穗期的抽穗、開穎及授粉，也需要施以較多水分 (Bollich *et al.* 1999)。本研究結果得知，由於 'TK9'、'TNG71' 及 'TNGS22' 3 個國內重要中晚熟品種在各生育階段的發育速率不盡相同，故達到 50% 始藥期、幼穗分化期及 50% 抽穗期的時間並不相同，因此應配合其關鍵生育階段施以適當的肥培與水份管理。

本研究 3 個品種在 3 個生育階段的 GDD 預測模式，經回歸式顯著性及 R^2 值來判斷，皆配適良好 (表 5)，但從發育速率與有效積溫之線性關係配適圖 (圖 1) 而言，發現似乎有些品種在 50% 始藥期與幼穗分化期，隨著 GDD 越高，發育速率的變異越大，意味著該回歸模式可能存在統計上的缺適性 (lack of fit)。一般而言，直線回歸分析存在缺適性問題時，表示試驗資料可能不符合回歸模式的 3 個重要基本假設：殘差 (residue) 要符合獨立性 (independence)、常態性 (normality) 及變方同質性 (homoscedasticity)；對於缺適性若疏忽不處理，所得線性關係之推論將可能產生

誤導或無效，但可藉由用殘差分析之缺適性檢定方法，來顯示模式是否需要轉換或修正 (Kutner *et al.* 2004; Montgomery 2009)。針對本研究 3 個品種分別達 50% 始藥期與幼穗分化期的 GDD 預測模式，經缺適性檢定結果，發現只有 'TNG71' 及 'TNGS22' 達 50% 始藥期的 GDD 預測模式存在顯著的缺適性，因此將此部份試驗資料之發育速率透過 BOX-COX 轉換法 (Kutner *et al.* 2004)，得到最大對數概度值 (maximum log likelihood) 以選取適當的冪次 (exponentiation) 數值進行轉換；資料經冪次轉換後所建立的 GDD 預測模式：'TNG71' 為 $Y = 0.11649 + 0.00388X$ ，'TNGS22' 為 $Y = 0.09009 + 0.00439X$ ，以此估計所需 GDD 各為 227.7°C 及 207.3°C，此與原來未經轉換的兩個 GDD 預測模式 (表 5：'TNG71' 為 $Y = 0.07707 + 0.00399X$ ，'TNGS22' 為 $Y = 0.04954 + 0.00453X$) 及其估得之所需 GDD (表 6：'TNG71' 及 'TNGS22' 各為 231.3°C 及 209.8°C) 相比較，回歸係數相近並仍落在多次模式驗證執行程序之所得回歸係數的 95% CI 之內 (表 4)，且預估所需 GDD 亦相差甚小，因此判斷 'TNG71' 及 'TNGS22' 兩品種達 50% 始藥期的 GDD 預測模式建立並不受缺適性所影響。

引用文獻

- Bollich, P. K., J. K. Saichuk, and E. R. Funderburg. 1999. Soils, plant nutrition and fertilization p.32–36. *in*: Louisiana Rice Production Handbook (Linscombe, S. D., J. K. Saichuk, K. P. Seilhan, P. K. Bollich, and E. R. Funderburg, eds.) LSU Agric. Ctr. Publ. No. 2321. Baton Rouge. 118 pp.
- Ceglar, A., Z. Črepinšek, L. Kajfež-Bogataj, and T. Pogačar. 2011. The simulation of phenological development in dynamic crop model: The Bayesian comparison of different methods. *Agric. For. Meteorol.* 151:101–115.
- Chang, M., J. C. Lo, and C. P. Liu. 2006. Effects of day-length on rice heading date and agronomic characters. *Crop Environ. Bioinform.* 3:147–158. (in Chinese with English abstract)
- Chiu, Y. C. 1993. Predicting the Date of Panicle Initiation of Rice Cultivated in Taiwan. Master thesis. Department of Agronomy, National Chung Hsing University. Taichung. 75 pp. (in Chinese with English abstract)

- Frizzell, D. L., J. D. Branson, C. E. Wilson Jr., R. J. Norman, K. A. K. Moldenhauer, and J. W. Gibbons. 2010. Development of degree day 50 thermal unit thresholds for new rice cultivars. p.187–193. *in*: B. R. Wells Rice Research Studies 2010 (Norman, R. J. and T. H. Johnston, eds.) AAES Res. Ser. 591. Arkansas Agric. Exp. Stn.. Fayetteville. 356 pp.
- Gilmore, E. C. and J. S. Rogers. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agron. J.* 50:611–615.
- Hodges, T. 1991. Temperature and water stress effects on phenology. p.7–13. *in*: Predicting Crop Phenology. (Hodges, Y., ed.) CRC Press. Boca Raton. 233 pp.
- Horie, T. and H. Nakagawa. 1990. Modelling and prediction of development process in rice. I. Structure and method of parameter estimation of a model for simulating development process toward heading. *Jpn. J. Crop Sci.* 59:687–695.
- Iannucci, A., M. R. Terribile, and P. Martiniello. 2008. Effects of temperature and photoperiod on flowering time of forage legumes in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 106:156–162.
- Kutner, M. H., C. J. Nachtsheim, J. Neter, and W. Li. 2004. *Applied Linear Statistical Models*. 5th ed. McGraw-Hill. Irwin, Boston. 1424 pp.
- Matsushima, S. 1980. *Rice Cultivation for the Million*. Japan Scientific Societies. Tokyo. 276 pp.
- Montgomery, D. C. 2009. *Design and Analysis of Experiments*. 7th ed. John Wiley and Sons. River Street Hoboken. 656 pp.
- Norman, R. J., C. E. Wilson Jr., D. L. Boothe, N. A. Slaton, K. A. K. Moldenhauer, and J. W. Gibbons. 2002. Influence of seeding data on the degree days 50 thermal unit accumulations and grain yield of new rice cultivars. p.280–287. *in*: B. R. Wells Rice Research Studies 2002. (Norman, R. J. and J. F. Meullenet, eds.) AAES Res. Ser. 504. Arkansas Agric. Exp. Stn.. Fayetteville. 457 pp.
- Réaumur, R. A. F. De. 1735. Observations du thermomètre, faites à Paris pendant l'année 1735 comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique. *Paris Memoirs, Acad. des Science. Année. Paris.* 545 pp. (in French)
- Russelle, M. P., W. W. Wilhelm, R. A. Olson, and J. F. Power. 1984. Growth analysis based on degree days. *Crop Sci.* 24:28–32.
- Shaykewich, C. F. 1995. An appraisal of cereal crop phenology modeling. *Can. J. Plant Sci.* 75:329–341.
- Slaton, N. and R. Norman. 1994. DD50 computerized rice management program. p.31–36. *in*: Rice Production Handbook. (Helms, S. ed.) Misc. Publ. Arkansas Coop. Ext. Service, Univ. of Arkansas. Little Rock. 90 pp.
- Wang, E. and T. Engel. 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agric. Sys.* 58:1–24.
- Whisler, F. D., B. Acock, D. N. Baker, R. E. Fye, H. F. Hodges, J. R. Lambert, H. E. Lemmon, J. M. McKinnion, and V. R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40:141–207.
- Wilson, C. E. Jr., R. J. Norman, K. A. K. Moldenhauer, J. W. Gibbons, D. L. Frizzell, and A. L. Richards. 2005. Development of degree day 50 thermal unit thresholds for new rice cultivars. p.356–363. *in*: B. R. Wells Rice Research Studies 2005. (Norman, R. J., J. F. Meullenet, and K. A. K. Moldenhauer, eds.) AAES Res. Ser. 540. Arkansas Agric. Exp. Stn.. Fayetteville. 424 pp.
- Witten, I. H. and E. Frank. 2005. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 2nd ed. Morgan-Kaufmann. San Francisco. 560 pp.
- Yin, X., M. J. Kropff, H. Nakagawa, T. Horie, H. G. S. Centeno, D. Zhu, and J. Goudriaan. 1997a. A model for photothermal responses of flowering in rice I. Model description and parameterization. *Field Crops Res.* 51:189–200.
- Yin, X., M. J. Kropff, H. Nakagawa, T. Horie, and H. J. Goudriaan. 1997b. A model for photothermal responses of flowering in rice II. Model evaluation. *Field Crops Res.* 51:201–211.
- Yoshida, S. 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science*. Int. Rice Res. Inst. Los Banos. 269 pp.

Establishment and Validation of Prediction Model for Rice Growth Stages

Shih-Hong Lin¹, Chun-Tang Lu², Woei-Shyuan Jwo³, and Hsiu-Ying Lu^{4,*}

Abstract

Lin, S. H., C. T. Lu, W. S. Jwo, and H. Y. Lu. 2014. Establishment and validation of prediction model for rice growth stages. *J. Taiwan Agric. Res.* 63(1):30–42.

The aim of this study is to establish the models for predicting three major growth stages (i.e., 50% tillering, panicle initiation, and 50% heading) of three mid-late maturing Taiwan rice varieties (i.e., 'TK9', 'TNG71', and 'TNGS22'). Data sets were collected from the field experiments of rice varieties planted at various transplanting dates in a two-crop system in 2006–2010. For every growth stage of each variety, a linear regression model for predicting growth stage was established using daily development rate during the period as the dependent variable and its corresponding daily effective accumulated temperature (growing degree days; GDD) as the independent variable. The predictive capability of GDD model was tested by internal validation. It showed that all the 95% confidence intervals (CI) of the differences between predicted and actual values of development rate included zero, which reveals an acceptable predictive error at 5% significance level. Then, all data sets were pooled to build up the GDD models for predicting growth stage. The estimated values of intercept and regression coefficient in these GDD models were within the 95% CI of those estimated values obtained from above validation procedures. Results suggest that the established GDD models for predicting rice growth stages are robust. With these models, GDDs need to reach each growth stage in three rice varieties could be estimated. Results also indicated that these three rice varieties were not completely identical in development rates during the periods of different growth stages. Although they are mid-late maturing varieties, the sequence of full maturity for these three mid-late maturing varieties is in the order of 'TNG71', 'TK9', and 'TNGS22'. It was due to the growth of 'TNG71' was faster during the period from 50% tillering to panicle initiation, while the growth of 'TNGS22' was slower during the period from 50% tillering to 50% heading in spite of rapid growth before 50% tillering. Therefore, to increase paddy yield, proper field management should be arranged in critical growth stages in respective rice varieties.

Key words: Effective accumulated temperature, Growing degree days, Linear regression model, Development rate, Predictive error.

Received: September 14, 2013; Accepted: November 18, 2013.

* Corresponding author, email: iying@tari.gov.tw

¹ Graduate Student, Department of Agronomy, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC.

² Associate Research Fellow, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

³ Assistant Research Fellow, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

⁴ Research Fellow and Deputy Director General, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.