氮肥施用量及栽植密度對水稻植冠截光能力及光能利用效率之影響[1]

羅正宗[2]　林俊隆[3]

摘　　要

羅正宗、林俊隆。2007-氮肥施用量及栽植密度對水稻植冠截光能力及光能利用效率之影響。台南區農業改良場研究彙報 49：35-48。

本試驗利用不同氮肥施用量及栽植密度處理，探討水稻植冠發育與截光率變化的關係，並評估其對水稻植冠截光能力及光能利用效率之影響。試驗結果顯示水稻植冠截光率(LI)達最大值之時間，較葉面積指數(LAI)達最大值之時間爲早，兩者時間差距以第一期作較長，且氮肥及栽植密度對LAI之效應遠大於LI。於變方分析中則發現在兩期作環境下，氮肥及栽植密度對水稻全生育時期之植冠截光量的主效應及交感效應均達顯著，且兩因子均呈顯著之二次效應；穀粒充實期間之植冠截光量則二次效應不顯著。氮肥及栽植密度對水稻全生育期乾物重之光能利用效率，及稻穀產量之光能利用效率的主效應均呈顯著，但未呈顯著之二次效應。另於反應曲面分析則發現，水稻不同生育期之植冠截光量易受氮肥施用量與栽植密度及其交感作用之影響，並以第一期作較爲顯著；但不同生育期植冠乾物重之光能利用效率及產量光能利用效率，受氮肥施用量與栽植密度及其交感作用之影響則較不明顯。顯示水稻植冠截光量易受栽培環境之影響, 而光能利用效率則較爲穩定, 可作爲描述水稻生長之一重要性狀。

關鍵詞：水稻、植冠、截光能力、光能利用效率

接受日期：2007 年 9 月 10 日

前　　言

自從 Blackman 在 1919 年提出以時間爲基礎的植物生長分析以來，甚多學者投身於作物生長及生理等之研究(朱, 1988)。以葉面積指數(leaf area index, LAI)與總乾物重(total dry weight, TDW)等生長分析項目與時間之函數關係，衍生出的作物生長速率(crop growth rate,

---

1.行政院農業委員會台南區農業改良場研究報告第 335 號。

2.台南區農業改良場嘉義分場助理研究員，嘉義縣鹿草鄉豐稠村農改場 1 號。

3.國立中興大學農藝學系教授。

CGR)與淨同化速率(net assimilation rate, NAR)等公式，在過去雖對植物生長及作物生產研究上作出甚多的貢獻；然而，由於近代之作物生產的栽培密度大幅提高，造成葉面積指數的迅速提升，植冠內葉片高度相互遮陰,致使這些公式很難再提供更多有關作物生質量(biomass)和產量形成機制的有用資訊(Sinclair and Muchow, 1999)。1959 年 DeWit 首次將日光輻射量引入作物生長分析的研究；他假設葉片對飽和光量之利用效率爲一常數，據以分析日光在作物植冠內之分布(cf. Rosenthal *et al*., 1993)。

探討日光輻射在作物生質量或產量之形成機制所扮演的角色時有兩個層次，一是作物植冠對日光輻射之截取，另一是作物植冠所截取之日光輻射量與生質量或產量形成之關係。前者之重點在作物植冠之截光率(light interception rate, LI)，後者則爲作物植冠之光能利用效率(radiation use efficiency, RUE)。在過去十多年來，已有多位學者提出作物乾物質之生產與植冠截光率之關係，並依此探討環境因子對作物生長之影響(Collinson *et al*.,1999; Gwathmey and Howard,1998; Manrique *et al*.,1991; McGiffen *et al*.,1992)。

在作物植冠截光率的研究上，除探討植冠發育性狀對截光率之影響外，尚包括以作物植冠截光率之變化探討其與雜草在生長空間及自然資源(尤其是日光輻射)之競爭的課題(McLachlan *et al*.,1993; Caton *et al*.,1997; Teasdale 1998)。Monteith,1972(cf. Sinclair and Muchow, 1999)認爲植物截光率是生態研究中重要的項目。然則，有關水稻植冠截光率及光能利用效率的研究並不多，主要是因爲在進行水稻植冠截光率之測定時，田間湛水狀態不便於儀器操作(Sinclair and Muchow, 1999)。

台灣位居亞熱帶，氣候高溫多濕，水稻栽培易遭雜草及病蟲爲害。其中尤以雜草問題更是嚴重，近年來殺草劑使用量已超過殺蟲劑及殺菌劑的使用量。水稻生育初期雜草若未能控制得宜，則雜草與水稻在生長空間和自然資源之競爭，均會造成水稻生產力之下降。由於低投施栽培已成未來之趨勢, 更需加強選育對生長空間及自然資源利用之競爭力強的水稻品種。其次，過去曾有許多學者對台灣之第一期稻作與第二期稻作的生長、發育及產量與氣象因子間的關係進行研究。在有些地區，兩期作穀粒充實期間之入射日光輻射量差異甚大, 有些學者認爲這可能是影響兩期作穀粒產量差異的重要因子(張等, 1989; 李, 1999)。周和陳(1978)曾就兩期稻作之水稻葉片生理活性與乾物質生產效率進行比較研究，發現兩期作稻株葉片氮素濃度間並無顯著的差異，但是水稻乾物質生產及產量上卻有明顯的差異。因此，陳等(1996)認爲水稻於第二期作之日射量及植冠的光能利用效率對乾物質生產及產量有相當大的決定性。

本研究除將探討水稻植冠之發育與截光率之關係外，並在不同期作下利用不同氮肥施用量及栽植密度處理，評估其對水稻植冠截光量及光能利用效率之影響，以作爲未來水稻育種及栽培之參考。

材料與方法

本研究於2000年之第一期稻作及第二期稻作，以台農67號及台粳九號兩個粳稻品種

爲材料，進行田間栽植分析試驗，試驗方法如下：

一、田間試驗與佈置：

採裂區設計，以氮肥施用量爲主區試因, 分爲每公頃0, 90, 180公斤氮素三個等級；栽植密度分爲每平方公尺11.1, 22.2, 44.4株(行株距分別爲30x30cm, 30x15cm及15x15cm)，品種與栽植密度之六個處理組合爲副區試因。主區之佈置採隨機完全區集設計(RCBD)，重複三次；每一副區面積爲6 x 6=36 平方公尺，多本植。氮肥(硫酸銨)之施用分爲整地時之基肥、分蘗始期之追肥及幼穗分化期之穗肥三次平均施用。而磷肥(50kg(P_2O_5)ha^{-1})與鉀肥(40kg(K_2O)ha^{-1})則於施用基肥時全量一次施用。田間雜草以除草劑防除，病蟲害之防治與灌溉作業則依實際需要而進行。

二、田間取樣及調查方法：

移植後將每一副區劃分爲若干個樣區(sampling quadrat)，每一樣區除邊行外，各含2x2=4欉。自移植後每隔一至二週在各副區內隨機取一樣區，調查該樣區內稻株之株高、分蘗數及地上部乾物重。乾物重之測定，係將稻株各器官置於溫度80℃之通風乾燥箱中，經48小時後稱其乾重。此外，依羅和林(2000)所述之程序，藉植冠分析儀(LAI-2000, Li-Cor)測定每一副區內水稻植冠之葉面積指數(LAI)及植冠對日光輻射之截光率(LI)。並以全天空輻射計(Li-900, Li-Cor)測定稻株生育期間每日之入射日射量(MJ m^{-2})。

三、水稻植冠葉面積指數、每日日光輻射截取率與累計日射截取量之估算：

在各副區定期測得的植冠截光率(LI_t)及葉面積指數(LAI_t)先藉由時間(t, 移植後日數)的二至四次多項式($f(t)=\beta_0+\beta_1 t+.....+\beta_q t^q$ ， $q=2,3,4$)進行平滑處理(smoothing)，據之逐日推估每日之截光率及葉面積指數，並以每日之截光率與當日入射於植冠之日射量的乘積，作爲植冠在該日之日射截取量; 累積自移植(T)至成熟收穫(M)的整個生育期間之截取量即爲累計的日射截取量($LIsum_{T-M}$)：$LIsum_{T-M}=\sum_{t}(LI_t * R_t)$，其中，$LI_t$ 爲各副區移植後第t日的截光率，R_t 爲第t日之入射日射量。

四、光能利用效率之計算：

乾物重光能利用效率(RUE_{tdw})即作物植冠吸收日射量轉換成乾物質的效率(Monteith, 1977)： $RUEtdw_{T-M}=TDW_M / LIsum_{T-M}$ ，式中之 TDW_M 爲成熟期之總乾物重(g m^{-2})， $LIsum_{T-M}$ 爲全生育期間所累積之日射總截取量(MJ m^{-2})， $RUEtdw_{T-M}$ 爲水稻全生育期乾物重之光能利用效率(g MJ^{-1})。其次，下式則表示水稻自抽穗(H)至成熟期(M)的穀粒充實期間乾物重的光能利用效率：

$RUEtdw_{H-M}=(TDW_M-TDW_H) \ / \ LIsum_{H-M}$ ，式中之 TDW_H 爲抽穗期之總乾物重(g m^{-2})， $LIsum_{H-M}$ 爲稻穀粒充實期間所累積之日射總截取量(MJ m^{-2}) 。此外，爲了探討水稻植冠生育期間所截取之日射量轉換爲稻穀產量之效率，本研究以下式表示稻穀產量之光能利用效率(RUE_y)： $RUE_y=YIELD/ \ LIsum_{T-M}$ ，式中之 $YIELD$ 爲成熟期之稻穀產量(g m^{-2})。

五、統計分析方法：

本研究之數據藉統計軟體SAS/STAT(V8.0)所提供之程序Proc GLM進行變方分析，

並以Proc RSREG進行氮肥施用量及栽植密度對水稻植冠截光量及光能利用效率之影響的反應曲面分析。

結　果

經過平滑處理後的水稻植冠葉面積指數(LAI)與截光率(LI)之動態變化示如圖 1。結果顯示水稻植冠 LI 達最大值之時間較 LAI 達最大值之時間爲早, 這段時間上的差距以第一期作較長。在不施氮肥的條件下, 僅第二期作之高栽植密度處理的水稻植冠可達 LI>0.95 的封合狀態(canopy closure)。第一期作之水稻植冠的 LI 達最大值後不再下降; 持續到收穫期，而 LAI 雖在達最大值後呈現下降趨勢，但下降程度不大。第二期稻作的表現則不盡相同，LI 在達最大值後有下降的現象，而 LAI 在達最大值後，更會呈現快速降低的趨勢，且降低比例以高氮肥且密植者爲最大，無氮肥處理者之降低程度不明顯。兩參試品種的反應相似。

不同氮肥施用量及栽植密度處理，對兩參試品種之植冠截光量及光能利用效率的效應列如表 1。在第一期作，氮肥、栽植密度及品種對水稻全生育時期植冠截光量($LIsum_{T\text{-}M}$)的主效應及其彼此間之交感效應均達顯著水準，且氮肥及栽植密度均呈顯著之二次效應。在第二期作，氮肥、栽植密度及品種之主效應，及氮肥與栽植密度之交感效應達顯著水準，而氮肥呈顯著的一次效應，栽植密度則呈顯著的二次效應。就台農 67 號而言，依反應曲面分析得知，在第一期作時 $LIsum_{T\text{-}M}$ ，除氮肥用量及栽植密度處理之交感項不顯著，其他介量估值列於表 2，其 R^2 值高達 0.9859，另外對該反應曲面模式進行分析，得知 $LIsum_{T\text{-}M}$ 於栽植密度爲 44.2 hill m^{-2} 且氮肥爲 178.8 kg ha^{-1} 時達最大值；第二期作之反應曲面介量亦列如表 2，該模式之 R^2 值爲 0.9211，由結果亦知 $LIsum_{T\text{-}M}$ 則於栽植密度爲 42.3 hill m^{-2} 且氮肥爲 150.4 kg ha^{-1} 時達最大值(圖 2)。另就台稉九號而言，在第一期作反應曲面模式之介量估值亦列如表 2，其 R^2 值高達 0.9871，由該模式分析得知於栽植密度爲 40.3 hill m^{-2} 且氮肥爲 176.1 kg ha^{-1} 時 $LIsum_{T\text{-}M}$ 達最大值。第二期作氮肥對台稉九號之 $LIsum_{T\text{-}M}$ 呈現顯著的一次效應，栽培密度處理雖呈顯著之二次效應，但其最大值出現在本試驗處理之範圍外，試驗範圍內亦隨栽植密度之增加顯著提高 $LIsum_{T\text{-}M}$ 。

另由表 1 中可知，第一期作水稻穀粒充實期間植冠截光量($LIsum_{H\text{-}M}$)於氮肥施用量呈顯著二次效應，栽植密度則呈顯著一次效應，氮肥、品種及栽植密度之交感效應顯著。第二期作三個參試因子主效應均呈顯著水準，且氮肥及栽植密度分呈顯著地一次與二次效應，而兩因子之交感效應亦達顯著。就兩參試品種而言，$LIsum_{H\text{-}M}$ 於第一期作呈現氮肥施用量之二次效應，台農 67 號於氮肥施用量爲 144.1 kg ha^{-1} 時，台稉九號則於 155.9 kg ha^{-1} 時具有最大值(圖 3)。第二期作環境下，氮肥及栽植密度對台農 67 號之 $LIsum_{H\text{-}M}$ 交感效應顯著，氮肥用量爲 140.3kg ha^{-1} 及栽植密度爲 36.1 hill m^{-2} 時具有最大值; 而台稉九號之栽植密度對 $LIsum_{H\text{-}M}$ 呈顯著二次效應，於 33.6 hill m^{-2} 時達最大值。另由表 2 可發現兩品種反應曲面模式之介量估值與 R^2 值，第一期作具有較高之 R^2 值(台農 67 號爲 0.9880，台稉九號爲 0.9768)，第二期作則較低(分別爲 0.7008 及 0.5873)。

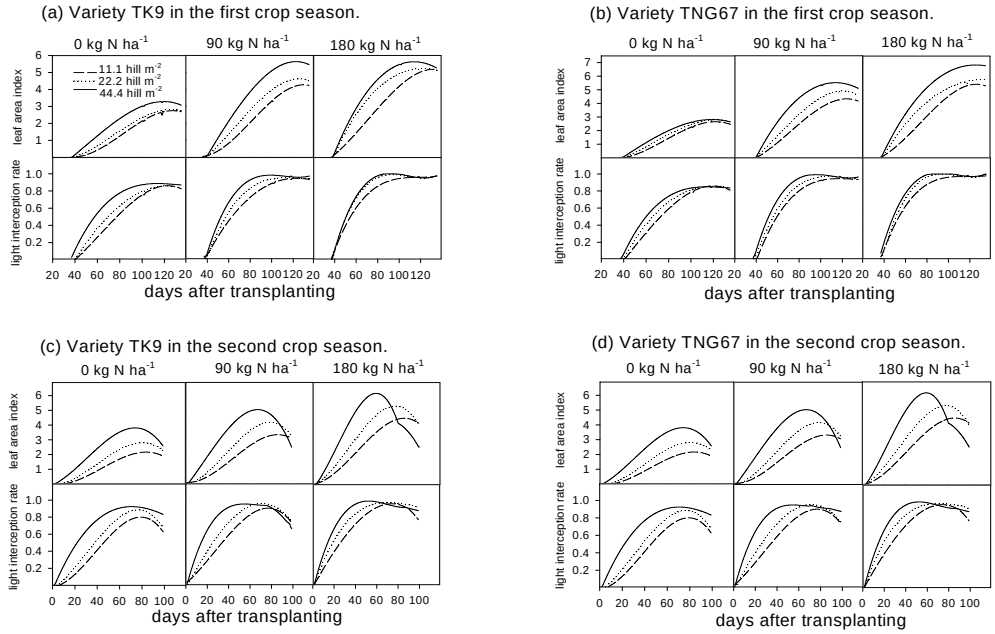


圖 1.不同氮肥施用量及栽植密度處理下水稻葉面積指數及植冠截光率之動態變化
Fig. 1.Drift of leaf area index and light interception rate of the canopy of two rice varieties treated with various nitrogene application rates and planting densities.

由表 1 另可發現水稻全生育期乾物重之光能利用效率(RUEtdw$_{T\text{-}M}$)於三個參試因子之主效應均呈顯著水準，氮肥及栽植密度兩因子均呈顯著之一次效應，惟各因子彼此之交感效應均未達顯著水準。第二期作分析結果與第一期作相似，僅栽植密度具有顯著的二次效應。據此進行二次效應分析，顯示台粳九號則於 44.2 hill m^{-2}時呈現最小值(圖 4)；反應曲面模式之介量估值亦如表 2 所示，第一期作台農 67 號及台粳九號之 R^2 值分別爲 0.7767 及 0.7279，第二期作分別爲 0.9177 及 0.9627，第二期作較第一期作爲高。

水稻穀粒充實期間乾物重之光能利用效率(RUEtdw$_{H\text{-}M}$)於第一期作僅氮肥因子呈現顯著的二次效應，其他因子及彼此間之交感效應均未達顯著水準。第二期作則呈現主效應與交感效應均未達顯著(表 1)。

另由表 1 中得知，水稻穀粒產量之光能利用效率(RUEy)在第一期作品種與栽植密度之交感效應顯著，氮肥及栽植密度兩因子均呈現顯著地一次效應，第二期作氮肥及栽植密度均呈現顯著地二次效應。據此分析可知，第二期作之台農 67 號於栽植密度爲 24.7 hill m^{-2}, 及氮肥用量爲 105.6 kg ha^{-1} 時 RUEy 達最大值；台粳九號則在栽植密度爲 25.22 hill m^{-2}, 及氮肥用量爲 159.0 kg ha^{-1}時 RUEy 具有最大值(圖 5)。依反應曲面模式介量之估測結果，呈現第二期作之 R^2 值大於第一期作(表 2)，台農 67 號第一期作 R^2 值爲 0.7150，第二期作爲 0.8722; 台粳九號則分別爲 0.7453 及 0.8861。

表 1. 水稻植冠累計截光量與光能利用效率之變方分析
Table 1. Analysis of variance of the accumulated interception of solar radiation, and the radiation use efficiencies of total dry weight and grain yield of rice canopy.

Sources of variation	df	Mean square				
		$LIsum_{T-M}$	$LIsum_{H-M}$	$RUEtdw_{T-M}$	$RUEtdw_{H-M}$	RUEy
		---------- First crop season				
Block	2	903	19.1	0.11277	0.09445	0.02389
Nitrogen(N)	2	241727**	16765.0**	0.58573**	0.53412**	0.18750
N_{linear}	1	455501**	27268.0**	1.15921**	0.86924**	0.35019**
$N_{quadratic}$	1	27953**	6263.1**	0.01224	0.19901*	0.02489
Error a	4	252	1.35	0.01918		0.00956
Variety(V)	1	3167**	12.3	0.14137**	0.46055	0.00137
Density(D)	2	55456**	418.2**	0.33337**	0.38936	0.05985**
D_{linear}	1	106385**	822.4**	0.66050**	0.72441	0.11223**
$D_{quadratic}$	1	4526**	13.9	0.00624	0.05432	0.00747
V x D	2	890**	69.5*	0.00148	0.42928	0.01017**
N x V	2	596**	136.9**	0.00001	0.03387	0.00191
N x D	4	1833**	41.8	0.00337	0.19171	0.00299
N x V x D	4	1101**	56.1*	0.00431	0.12034	0.00577
Error b	30	110	13.5	0.00943	0.13493	0.00287
		---------- Second crop season ----------				
Block	2	4655	1027.6	0.01819	0.17091	0.00200
Nitrogen(N)	2	182304**	5036.5**	0.22472**	0.26287	0.04231**
N_{linear}	1	357869**	9727.2**	0.36381**	0.34810	0.04549**
$N_{quadratic}$	1	6740	345.8	0.08563	0.17763	0.03914**
Error a	4	1417	251.5	0.01495	0.32592	0.00131
Variety(V)	1	11422**	1247.4*	0.13590*	0.34896	0.02511*
Density(D)	2	198426**	4253.1**	6.75904**	0.37062	0.64715**
D_{linear}	1	386635**	7469.3**	13.05506**	0.72064	0.59853**
$D_{quadratic}$	1	10218*	1036.9*	0.46303**	0.02059	0.69578**
V x D	2	170	16.7	0.03497	0.01040	0.00135
N x V	2	1473	23.9	0.03370	0.00333	0.00055
N x D	4	4469**	767.3*	0.01970	0.83863	0.00789
N x V x D	4	704	25.0	0.02681	0.17135	0.00617
Error b	30	1426	267.8	0.02234	0.12484	0.00431

*,** Significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

$LIsum_{T-M}$：accumulated interception of solar radiation during the whole growing season,

$LIsum_{H-M}$：accumulated interception of solar radiation during the grain filling period,

$RUEtdw_{T-M}$：radiation use efficiency of total dry weight during the whole growing season,

$RUEtdw_{H-M}$：radiation use efficiency of total dry weight during the grain filling period,

RUEy：radiation use efficiency of grain yield.

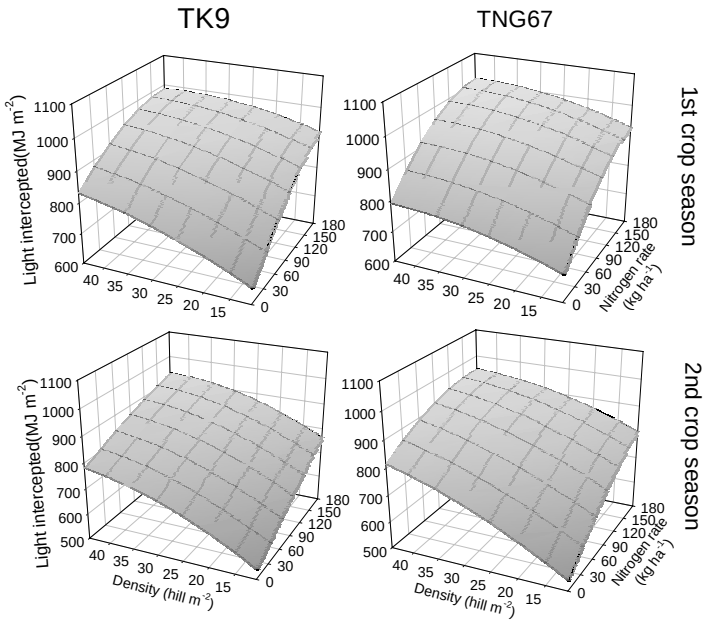


圖 2.氮肥及栽植密度處理對水稻全生育期植冠截光量之效應

Fig. 2. Effects of nitrogen application rates and planting densities on the accumulated interception of solar radiation of rice canopy during the whole growing season.

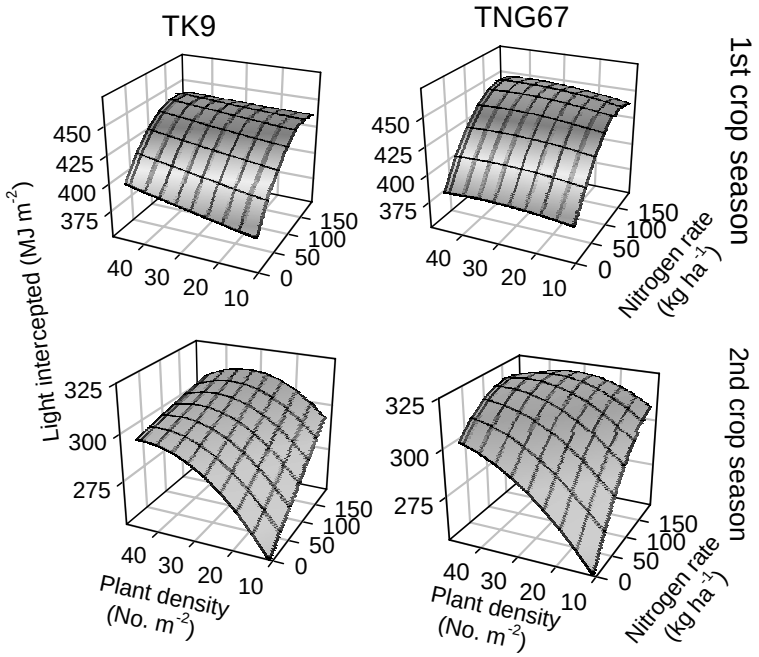


圖 3.氮肥及栽植密度處理對水稻穀粒充實期期植冠截光之效應

Fig. 2. Response of nitrogen rates and planting densities on light intercepted of rice canopy during heading to maturity.

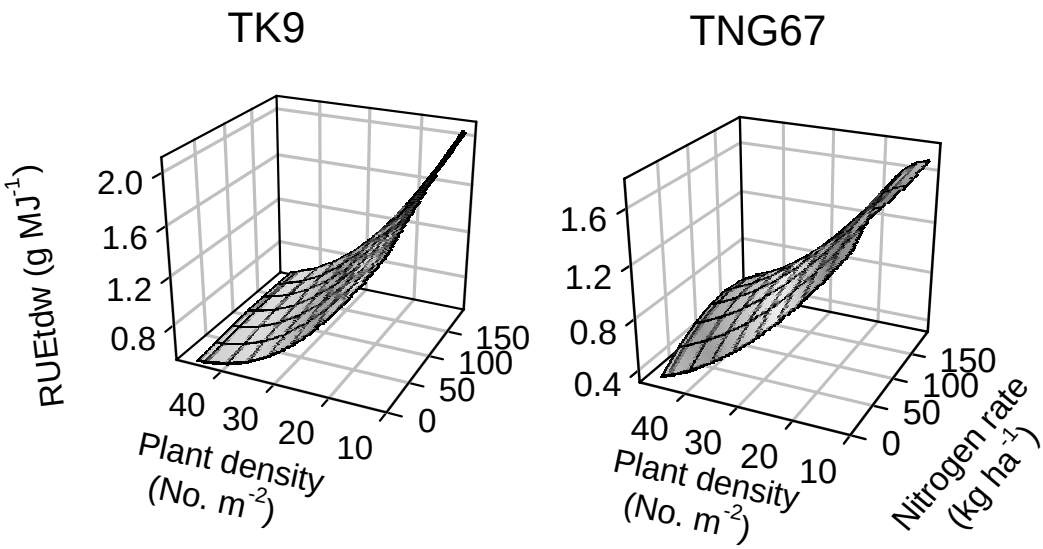


圖 4.氮肥及栽植密度處理對水稻第二期作全生育期乾物重之光能利用效率的效應

Fig. 4.Effects of nitrogen application rates and planting densities on radiation use efficiency of total dry weight during the whole growing period in second crop.

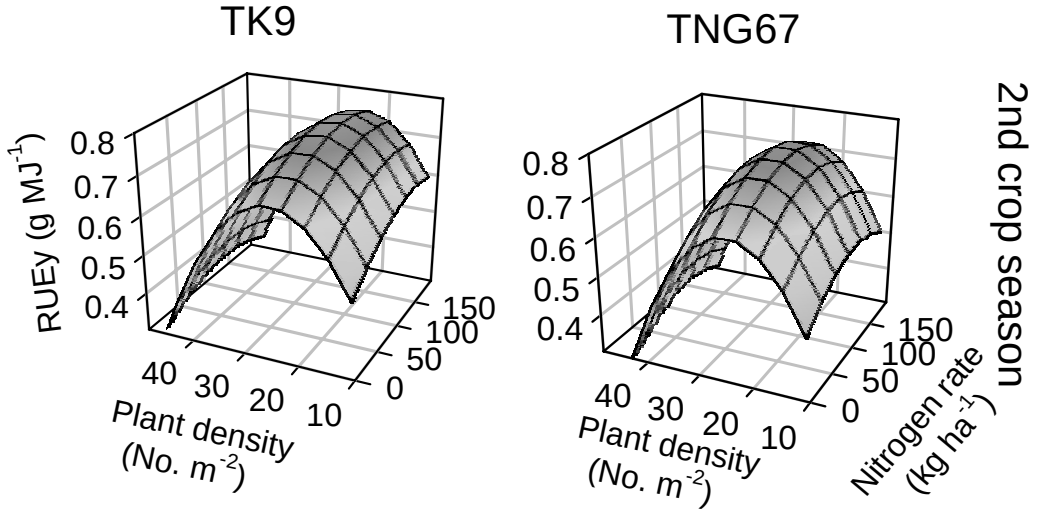


圖 5.氮肥及栽植密度處理對水稻第二期作穀粒產量之光能利用效率的效應

Fig. 5.Effects of nitrogen application rates and planting densities on radiation use efficiency of grain yield of rice in second crop season.

表 2. 不同氮肥施用量及栽植密度處理對水稻植冠截光量及光能利用效率之反應模式的介量估值
Table 2. The estimates of parameters of the reaction model* for light interception and radiation use efficiency of rice canopy by nitrogen rates and planting densities .

crop season	variety	canopy character	Parameters						R^2
			b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}	
first crop season	TNG67	$LIsum_{T-M}$	618.2	2.542620	7.489190	-0.006990	-0.08229		0.9859
		$LIsum_{H-M}$	376.9	0.846120	0.708660	-0.002936	-0.01043	0.000706	0.9880
		RUEtdw	1.330	0.003074	-0.00852	-0.000004	0.000029	-0.000013	0.7767
		RUEy	0.751	0.002469	0.003498	-0.000006	-0.00012	-0.000016	0.7150
	TK9	$LIsum_{T-M}$	552.7	2.58	9.748	-0.00493	-0.07824	-0.01846	0.9871
		$LIsum_{H-M}$	375.1	0.8418	0.5757	-0.0027	0.0015	-0.00306	0.9768
		RUEtdw	1.555	0.002545	-0.01749	-0.000004	0.000159	0.000052	0.7279
		RUEy	0.681	0.002441	0.004113	-0.000005	-0.000089	-0.000011	0.7453
second crop season	TNG67	$LIsum_{T-M}$	393.7	2.5578	14.09	-0.004731	-0.103518	-0.021706	0.9211
		$LIsum_{H-M}$	218.8	0.63417	3.35412	-0.00128	-0.03166	-0.007621	0.7008
		RUEtdw	2.2336	0.00416	-0.06731	-0.000018	0.000589		0.9177
		RUEy	0.0022	0.00186	0.05275	-0.000008	-0.001057		0.8722
	TK9	$LIsum_{T-M}$	419.5	1.07158	13.85561		-0.13766		0.9229
		$LIsum_{H-M}$	213.4	0.31614	3.9347	-0.000044	-0.04517	-0.00576	0.5873
		RUEtdw	2.5727	0.00325	-0.09147	-0.000003	0.001034	-0.000055	0.9627
		RUEy	0.0902	0.00187	0.04706	-0.000006	-0.000933	-0.000016	0.8861

* $Y = b_0 + b_1 N + b_2 D + b_{11} N^2 + b_{22} D^2 + b_{12} ND$
where N , D are nitrogen rate and planting density,

討　論

過去研究顯示台灣地區第二期稻作之光合作用效率較第一期稻作爲低（林，1978），但是第二期稻作葉片之氮素含量卻較第一期稻作爲高（魏和劉，1983）。此外，第二期稻作在穀粒充實期間所生產之乾物質，較第一期稻作爲低，謝（1978）及魏和劉（1983）均認爲此爲水稻第二期作產量低下的原因之一。本試驗的結果則顯示穀粒產量之光能利用效率（RUEy）、全生育期乾物重之光能利用效率（$RUEtdw_{T-M}$），除在無氮肥且疏植之處理組合外，均呈現第一期稻作高於第二期稻作；而且第一期稻作水稻植冠截光量均大於第二期稻作。換言之，在截光量及光能利用效率的表現上，第二期稻作均不及第一期稻作，此概爲第二期稻作產量難以超越第一期稻作產量的重要原因。Wells *et al.*（1993）指出：作物產量之限制因子除光合作用速率外，尚需將植冠截光率及植冠特性考慮在內，因爲提高光合作用速率有賴於日光輻射在植冠中之均勻分布及參與光合作用之葉片比例的提升。雖然在本試驗的結果中呈現第二期作水稻生育初期植冠之發育較第一期作爲快，LAI 及 LI 增加速率較快，但當 LAI

達到最大值後，即迅速下降，以致 LI 不似第一期作般維持在最大值左右，因而降低其穀粒充實期之植冠截光量。

由氮肥對植冠 LAI 之效應顯示，高氮肥促使植冠迅速發育，因而導致 LI 升高速率較快，達封合日數較短。由結果中可知氮肥對 LAI 之效應遠大於對 LI 之效應，且在各栽植密度處理下，均呈相似反應。另由 LI 及 LAI 在全生育期間的動態變化圖中，可了解水稻在抽穗期前之 LI 與 LAI 間呈直線關係，這種現象隨氮肥施用量之增加而更加明顯，而且在不同品種及不同期作下均有相同的趨勢。

Andrade *et al.*（2002）試驗結果指出：窄行處理因提高玉米植冠截光量而使產量提高；Rego *et al.*（1998）指出：高粱之 RUE 會隨氮肥之施用量增加而提高，但當氮肥施用提高至一定量後，RUE 不只不再提高，且可能下降。在我們的試驗也有相同的結果，尤其第二期作更爲明顯。但在植冠截光量上則呈現隨氮肥之減少而降低的情形，Rego *et al.*（1998）認爲氮素缺乏降低 LI 更勝於 RUE，產量因氮肥不足而降低乃是因爲 LI 下降所致。但在 Muchow and Sinclair（1994）的試驗中則認爲氮素施用量對 RUE 之效應大於 LI。一般禾穀類作物植冠對日光輻射之截取能力多於抽穗期前後達到最高（林，1978；Hirota *et al.*, 1978； Siddique *et al.*, 1989；Sinclair and Muchow, 1999），在抽穗期之前，植冠截光率隨生育之進展而呈直線增加，而在抽穗期之後，則保持穩定或稍稍降低。在我們的試驗中亦發現氮肥施用對截光率之增加有促進效應，因此，對不同生育期之累計截光量亦有提高的效應。Wright *et al.*（1993）認爲氮肥施用對作物植冠截光率之效應，主要是因爲提高植冠葉面積所致，氮肥不足會導致葉面積擴展速度變慢，使全生育期平均截光率下降。相對地，因氮素缺乏而使截光率下降,將導致累計日射截光量較低。由本研究中可了解水稻植冠之最大截光率到達時間，比最大 LAI 到達之時間爲早。所以當水稻植冠截光率到達封合或最大值後，其 LAI 仍有可能再提高（Hirota *et al.*, 1978）。Shibles and Weber（1965）指出：作物之植冠截光率隨葉面積指數之增加而提高，當植冠截光率達封合或最大值後，LAI 即使再提高，其植冠截光率亦保持穩定。Purcell *et al.*（2002)指出：提高大豆之栽植密度會促使其植冠 LI 達最大值得時間提前，而本試驗之水稻材料亦有相同之結果，顯示水稻植冠在達到封合後，LAI 之持續增加將造成植冠自然遮陰（圖 1）。Shibles and Weber（1966）以大豆爲材料之研究結果顯示全生育期之最大 LAI 值較植冠封合期之 LAI 值高出甚多。因此，生育後期即使因葉片老化使 LAI 下降，植冠截光率之下降也較 LAI 緩慢；且他們認爲植冠葉片之老化多從下位之寄生葉（parasitical leaf）開始，而位在植冠上方之葉片對日光輻射之截取率並無太大影響。本試驗呈現之第一期作水稻植冠的 LI 值達最大值後 LAI 下降情形較第二期作爲緩, 顯示第一期作水稻植冠下位葉受上位葉之自然遮蔭情況較第二期作嚴重。此亦顯示第一期作水稻雖具有較高之 LAI，但相對地植冠下位葉呈現寄生葉之情形亦較嚴重。

Monteith （1972）認爲作物之光能利用效率(RUE)在一般非逆境條件下穩定性非常高， 利用 RUEtdw 來描述作物生長是相當穩健且適當的（cf. Sinclair and Muchow, 1999）。在本試驗表 1 之變方分析的結果顯示水稻之 RUEtdw 值是甚爲穩定的一種性狀。Horie and Sakuratani （1985）認爲水稻在生長至抽穗後 20 天之前，其乾物質生產與累積植冠截光量間呈直線關係，顯示大部份生長期間 RUEtdw 值均甚穩定。Sinclair *et al.*（1992）

亦認爲 RUEtdw 是量測乾物質生產的有效性狀, 因在一般環境下，同一物種內之全生育期間的 RUEtdw 值甚爲穩定。Sands（1996）認爲溫度影響 RUE 是因爲葉片光合作用對溫度反應所致。作物葉片之最大光合作用速率被認爲是影響 RUEtdw 的主要參數，作物種類或不同栽培環境會因葉片光合作用能力之不同而產生 RUEtdw 之重要差異，逆境造成 RUEtdw 下降的主因即是光合作用速率下降（Earl and Davis, 2003； Saitoh *et al*., 1990；Sinclair *et al*., 1993； Sinclair and Muchow, 1999；Tollenaar and Aguilera, 1992）。Sinclair *et al*.（1993）指出栽培環境或處理造成植冠發育性狀之改變，對植冠截光率之影響遠大於對 RUE 之影響（Sinclair *et al*., 1993）。綜合以上的討論，可了解水稻生育過程中，因栽培管理之不同所造成植冠發育性狀的改變，會影響植冠截光率及光能利用效率之表現，這方面之研究將待進一步的探討。

引用文獻

1.朱德民。1988。植物生長與發育。pp.1-23。國立編譯館。台北。

2.林安秋。1978。一、二期作水稻群落光合作用之比較。In. 臺灣二期作稻低產原因及其解決方法研討會專集。pp. 85-90。謝順景、劉大江編。行政院國家科學委員會。

3.周瑞國、陳清義。1978。台灣一、二期作水稻數種生理特性之比較研究。In. 臺灣二期作稻低產原因及其解決方法研討會專集。pp.113-122。謝順景、劉大江編。行政院國家科學委員會。

4.陳烈夫、魏夢麗、鄭統隆、廖大經、陳正昌、曾東海、劉大江。1996。台灣水稻產量的一些生理問題。稻作生產改進策略研討會專刊79- 88。

5.張富州、郭益全、劉大江。1989。水稻粒種變異與植株氮素、利用效率及產量之關係。中華農學會報新145:32-44。

6.謝昱暲。1978。一、二期作水稻之生長與光合作用構成因子。In. 臺灣二期作稻低產原因及其解決方法研討會專集。pp. 91-100。謝順景、劉大江編。行政院國家科學委員會。

7.魏夢麗、劉大江。1983。期作間水稻光合成物質生產、分配及產量之比較。中華農業研究 32(4): 303-311.

8.羅正宗、林俊隆。2000。利用植冠分析儀測定水稻葉面積指數之標準規範。。中華農藝 10(1)：13-21。

9.Andrade, F.H., P. Calvino, A. Cirilo, and P. Barbieri. 2002. Yield responses to narrow rows on increased radiation interception. Agron. J. 94:975-980.

10.Caton, B.P., T.C. Foin, and J.E. Hill. 1997. Mechanisms of competition for light between rice (*Oryza sativa*)and redstem(*Ammannia* spp.). Weed Sci. 45:269-275.

11.Earl, H.J., and R.F. Davis. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. Agron. J. 95: 688-696.

12.Gwathmey, C.O., and D.D. Howard. 1998. Potassium effects on canopy light interception and earliness of no-tillage cotton. Agron. J. 90:144-149.

13.Hirota, O., T. Takeda, Y. Murata, and M. Koba. 1978. Studies on utilization of solar radiation by crop stands. II. Utilization of short wave and photosynthetically active radiation by rice and soybean plant populations. Jpn. J. Crop Sci. 47(1):133-140.

14.Loomis, R.S., and J.S. Amthor.1999. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. Crop Sci 39:1584-1596.

15.Manrique, L.A., J.R. Kiniry, T. Hodes, and D.S. Axness. 1991. Dry matter production and radiation interception of potato. Crop Sci. 31:1044-1049.

16.McGiffen, Jr, M.E., J.B. Masiunas, and J.D. Hesketh. 1992. Competition for light between tomatoes and nightshades(*Solanum nigrum* or *S. ptycanthum*). Weed Sci. 40-220-226.

17.McLachlan, S.M., M. Tollenaar, C.J. Swanton, and S.F. Weise. 1993. Effect of corn-induced shading on dry matter accumulation, distribution, and architecture of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus)*. Weed Sci. 41:568-573.

18.Meek, D.W., J.L. Hatfield, T.A. Howell, S.B. Idso, and R.J. Reginato. 1984. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. Agron. J. 76:939-945.

19.Purcell, L.C., R. A. ball, J.D. Reaper, and E.D. Vories. 2002. radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. Crop Sci. 42:172-177.

20.Rego, T.J., J.L. Monteith, P. Singh, K.K. Lee, V.N. Rao, and Y.V. Srirama. 1998. Response to fertilizer nitrogen and water of post-rainy season sorghum on a Vertisol. 1. Biomass and light interception. J. Agric. Sci. Cam. 131:417-428.

21.Rosenthal, W.D., T.J. Gerik, and L.J. Wade.1993. Radiation use efficiency among grain sorghum cultivars and plant densities. Agron.J. 85:703-705.

22.Sands, P.J. 1996. Modelling canopy production. III. Canopy light-utilisation efficiency and its sensitivity to physiological and environmental variables. Aust. J. Plant Physiol. 23:103-114.

23.Saitoh, K., H. Shimoda and K. Ishihara.1990. Characteristics of dry matter production process in high yielding rice varieties II. Comparisons among two early and three medium varieties. Jpn.J.Crop Sci.59(2):303-311.

24.Shibles, R.M., and C.R. Weber. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. Crop Sci. 5:575-577.

25.Shibles, R.M., and C.R. Weber. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. Crop Sci. 6:55-59.

26.Siddique, K.H.M., R.K. Belford, M.W. Perry and D. Tennant. 1989. Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a mediterranean-type environment. Aust. J. Agric. Res. 40:473-487.

27.Sinclair, T.R.m J.M. Bennett, and K.J. Boote. 1993. Leaf nitrogen content, photosynthesis and radiation use efficiency in peanut. Peanut Sci. 20:40-43.

28.Sinclair, T.R. and R.C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. Adv. Agron. 65:215-265.

29.Sinclair, T.R., T.Shiraiwa, and G.L.Hammer.1992. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. Crop Sci. 32:1281-1284.

30.Teasdale, J.R.1998. Influence of corn(*Zea mays*)population and row spacing on corn and velvetleaf(*Abutilon theophrasti*)yield. Weed Sci. 46:447-453.

31.Tollenaar, M., and A. Aguilera.1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. Agron.J. 84:536-541.

32.Wells, R.1991. Soybean growth response to plant density: relationship among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. Crop Sci. 31:755-761.

33.Wells, R., J.W. Burton, and T.C. Kilen. 1993. Soybean growth and light interception: Response to differing leaf and stem morphology. Crop Sci. 33:520-524.

34.Wilson, J.W., D.W. Hand, and M.A. Hannah. 1992. Light interception and photosynthetic efficiency in some glasshouse crops. J. Exp. Bot. 43:363-373.

35.Wright, G.C., M.J. Bell, and G.L. Hammer. 1993. Leaf nitrogen content and minimum temperature interactions affect radiation use efficiency in peanut. Crop Sci.33:476-481.

Effects of Nitrogen Application Rates and Planting Densities on the Light Interception and Radiation Use Efficiency of Rice Crop[1]

Lo J.C.[2] and J. L. Lin[3]

Summary

This research used different nitrogen application rates and planting densities to investigate the relationship between canopy development and light intercepted of rice, and estimate the different nitrogen application rates and planting densities affect the light intercepted (LI) and radiation use efficiency (RUE) of rice canopy. The result shows that the light intercepted of rice canopy reaches the time of the maximum is early than the leaf area index (LAI). The two time disparity make longer in first crop season, and the different nitrogen application rates and planting density are greater than LI to the effect of LAI. From the analysis of variance , there were significant main effect and interaction of the nitrogen application rates and planting densities on light intercepted of rice during the whole growth period, both were presenting the quadratic effect. No significant quadratic effect of the nitrogen application rates and planting densities on light intercepted of rice during the grain filling period. There were significant main effect and interaction of the nitrogen application rates and planting densities on radiation use efficiency of dry weight (RUEtdw) and grain yield (RUEy), but there were not significant quadratic effect on RUEtdw and RUEy. From the reaction curve analysis, LI was significantly affected by the main effect of different nitrogen application rates and planting densities, and different nitrogen application rates x planting densities interaction. But those main effect and interaction were not significant for radiation use efficiency of dry weight (RUEtdw) and grain yield (RUEy). In conclusion, the culture environments were apt to influence on LI. The RUEtdw and RUEy were rather stable characters , RUE can be used as important trait of describing rice growth.

Key words: Rice, Canopy, Light intercepted, Radiation use efficiency
Accepted for publication：10 September, 2007

1.Contribution No.335 from Tainan District Agricultural Reseach and Extension Station.
2.Asistant Agronomist, Chiayi Branch, Tainan DARES, No.1 DAIS, Fong-chou village, Lutso 611, Chiayi, Taiwan, R.O.C.
3.Professor, Department of Agronomy, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.