

除草劑田間試驗設計與施藥技術

黃文達

國立台灣大學農藝學系

從事除草劑田間試驗時，參與試驗的作物之性質、試驗環境及試驗時期等，都會影響試驗結果，因此必須選擇正確試驗設計法，才能提高試驗的重現性與準確性。規劃實驗設計時必須考慮的因素有：試驗材料（如作物、雜草）性質之同質或異質，試驗環境之氣象與土壤資料等。規劃各種設計的主要原理是要讓參與試驗的各處理有相同的待遇(均衡原則)，一個好的研究必須要有嚴謹的設計，客觀的試驗過程及合理的推論。

通常進行除草劑藥效試驗時，為使目標物能夠接受到正確的劑量與濃度，施藥程序與儀器校正 (sprayer calibration) 都要謹慎進行。噴藥作業過程中的流量控制、作業壓力與噴施速度之間存在相關性，任一因子條件更動，其他因子也須配合修正，才能確保參試藥劑的處理劑量一致。另外，為了控制噴嘴的噴液量、噴撒均勻、正確敷蓋欲噴施目標物上與藥液飄散量等，就要明瞭噴嘴型式與調整校正。本文針對常見噴嘴特性，藥液飄散控制，噴嘴流量計算與噴藥壓力的掌握等做簡要敘述，另舉例除草劑藥效試驗中較常用的試驗設計及統計分析方法。

一、噴嘴 (Nozzles) 類型

噴嘴會決定噴施量 (the amount of spray delivered)、噴施型態 (spray pattern) 以及除草劑在目標物上的分布。一個基本噴嘴 (typical nozzle) 由噴嘴主體 (nozzle body)、過濾器 (strainer)、噴嘴頭 (nozzle tip) 所組成。一般用於製作噴嘴本體的材料有黃銅 (brass)、尼龍或塑膠 (nylon or plastic)、不銹鋼 (stainless steel)、塑膠和不銹鋼組成 (a combination of plastic and stainless steel) 等，而噴嘴頭也是由前述材質以及硬化不鏽鋼 (hardened stainless steel)、陶瓷 (ceramics) 等製成。

選擇噴嘴及噴嘴頭時必須整體考慮價格 (initial cost)、耐磨性 (resistance to abrasion)、腐蝕性 (corrosion)、溶解性 (solvents)、龜裂性 (breakage)、螺紋密合 (thread stripping) 等。使用過濾器可移除藥液中較大顆粒，以避免堵塞或造成磨損。一般施用低劑量藥劑時可採用 100-mesh 濾網，但很容易堵塞，當使用高劑量或施用可溼性粉劑 (wetable powders) 則必須適當增大網目為 50-mesh 尺寸。大部分噴嘴都是標準規格製造，但可依個別需求更換過濾器或噴嘴頭。

噴嘴型式一般分成扁平扇形 (flat fans)、沖洗式 floods (導流式 deflectors)、圓錐形 (cones) 等基本型 (圖 1)。每型都有不同的特色，會改變了噴施型式 (spray patterns)、噴霧粒徑分布 (spray droplet size distributions) 等，另有一些噴嘴是專門設計提供無噴桿式噴霧器使用 (boomless sprayer)。

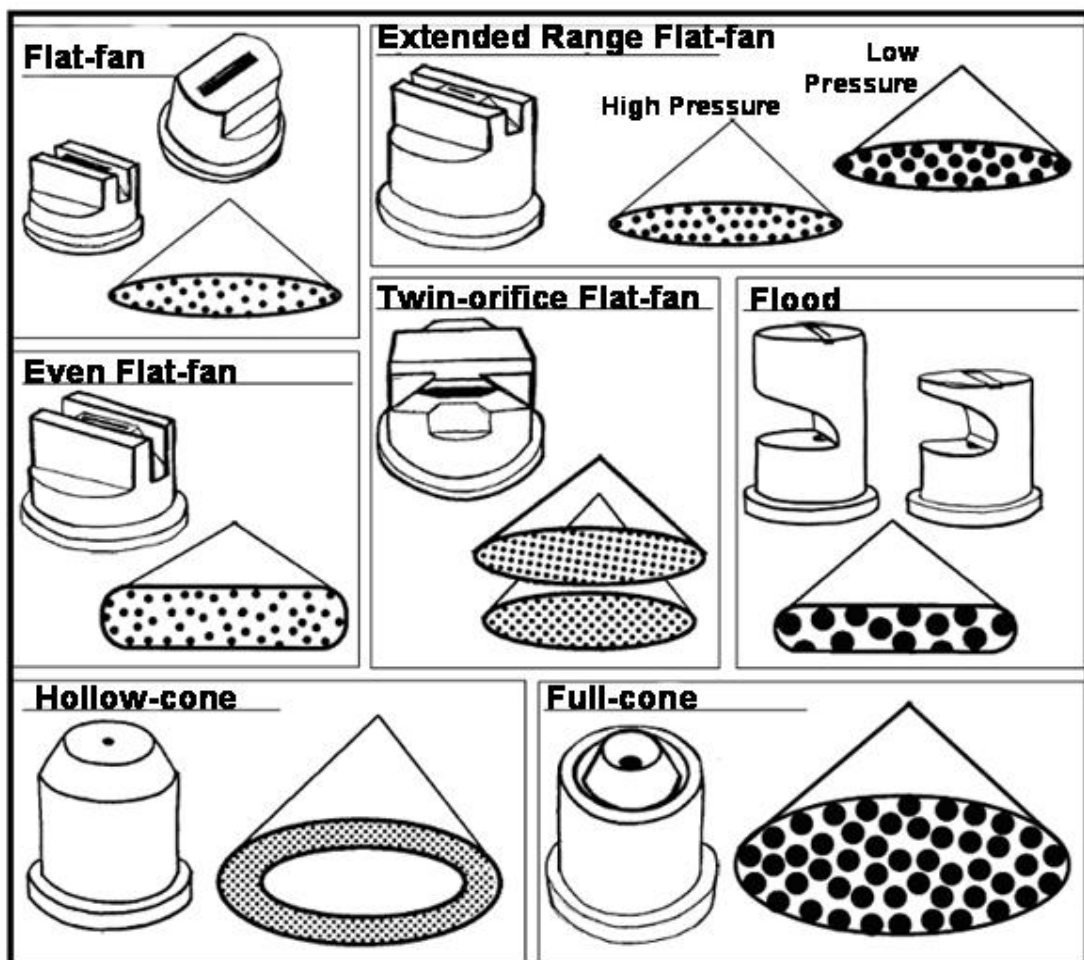


圖1. 各型噴嘴頭與噴施型態。(Johnson and Swetnam, 2010)

1. 扁平扇形噴頭 (Flat fan Nozzles)

標準型扁平扇形噴頭用於全面噴施 (broadcast spray 撒施)，呈現扇形噴出或是薄片形。因扁平扇形噴頭的噴嘴製造成細長縫，因此噴液會以扁平狀噴出，噴量均勻、藥液飄散 (drift) 控制良好，壓力範圍 30~ 60 psi。此為除草劑噴施時最常用的噴嘴，適用於萌前除草劑、萌後接觸型或系統型除草劑，能均勻全面噴施。此類噴頭有多種附加型式，如邊緣截齊式噴嘴頭 (Even flat fan (even-edge)) 可使用在條施 (banding) 以及萌後定向噴施 (directed spray)、雙孔扁平扇形噴頭 (Double-orifice flat fan) 可使噴施覆蓋率更好、以及偏離中央 (Off-center flat fan) 的扁平噴頭其噴嘴頭裝置於噴桿末端或無噴桿的噴嘴。

2. 沖洗式(導流式)噴嘴 [Flood (Deflector) Nozzles]

噴液通過噴頭末端平面轉向，呈現扇形噴出藥液，適用於萌前肥料、萌前除草劑，但噴嘴間噴施面須 100% 重疊才能均勻噴施藥劑，雖然也是錐形但較扁平扇形噴嘴不精準，噴出的藥液較大滴，且壓力範圍 10-25 psi。

3. 圓錐形噴嘴 (Cone Nozzles)

圓錐噴嘴及噴頭噴出呈現環型，雖然不甚整齊，但若將噴嘴與地面形成一定 10° ~ 90° 傾斜角度即能提供令人滿意的全面噴施的效果。具渦流或旋轉室 (Swirl or whirl chamber) 的噴嘴 或雨滴式 (raindrop nozzle) 的噴嘴都適合除草劑的施用。

4. 空心圓錐型噴嘴 (Hollow-cone Nozzles)

空心錐形噴霧實質上是一圓形液體環。使旋轉的液體在離開噴嘴口時形成一空心錐形。壓力範圍 40~ 100 psi，對植冠層內、葉間的穿透力佳，但較其他噴嘴容易造成飄散，此型噴嘴一般適用於殺蟲劑與殺菌劑，除草劑較不適用。

5. 實心圓錐形 (Full-cone Nozzles)

實心錐形之覆蓋區域為圓形、方形或橢圓形。可在其區域內完全充滿噴霧液滴。利用霧化噴嘴或微細噴霧噴嘴的集管排列也可獲得實心錐形覆蓋。壓

力範圍 15~ 40 psi，推薦於須拌土處理的除草劑。

噴嘴為 Teejet 8002 型號，為 Teejet 公司生產的扇形噴嘴系列，具有噴出 80° 角的扇形，在 40 psi 工作壓力下的噴嘴流量為 0.2 GPM。型號 LF80-2 之噴嘴，其中“LF”代表此噴嘴為標準扇形噴嘴系列，具有噴出 80° 角的扇形，在 40 psi 工作壓力下的噴嘴流量為 0.2 GPM。當改變工作壓力，則噴嘴流量也會改變。各公司的噴嘴，從產品型錄都有註明每型噴嘴藥液噴出的夾角、單隻噴嘴流量 (GPM、L/min) 與對應操作壓力 (psi、bar、kg/cm²)，壓力過大易造成藥液飄散的風險。

表 1. 除草劑與殺蟲劑不同時期及操作下所推薦的適用噴嘴。

	Hollow- Cone	Flood	Even Flat-Fan	Twin Orifice Flat-Fan	Standard Flat-Fan	Full-Cone
Pre-Emerge Herbicides						
Soil Incorporation		+			++	+++
Band			+++			
Broadcast		+		+	++	
Post-Emerge Herbicides						
Contact-Band			+++			
Contact-Broadcast	+			++	++	
Systemic-Band			+++			
Systemic-Broadcast	+				++	
Insecticide						
Band			+++			
Broadcast				+	++	

“+” --good, “++”--better, “+++”--best.

二、藥液粒徑與飄散

噴施農藥是以均勻撒佈下，使用最少量的藥液為原則；為達到藥液的完全密佈及減少噴施水量的目的，藥液粒子往往會小到某種程度，因此在大部份的液體噴施時，都免不了會發生藥液飄散 (drifting) 的情形，造成目標區內妨害

物的防治效果降低，鄰近非目標區內敏感作物的藥害，甚至污染環境等不利的後果。管理噴藥時飄移必須考慮因素有噴嘴類型、噴藥壓力、噴施高度、作業前進速度、液滴粒徑及環境因素（風速、溫度、相對溼度）等，其中以液滴粒徑控制為最重要。藥液粒徑的表示單位為微米（micron： μ ），人的頭髮直徑約 100 microns，當藥液粒徑小於 150 microns 就易造成飄散風險（表 2、表 3）。若大於 200 microns 就不易發生飄散。有研究指出當藥液粒徑小於 50 microns 時，將會無限期懸浮大氣中直到蒸發為止。“Fine”至“medium”粒徑的藥液粒子，覆蓋均勻性佳，適用於殺蟲劑與殺菌劑 但藥液飄散風險也大。而藥液粒徑與除草劑藥效間，以“Very fine”粒徑的藥液粒子適用於針葉狀雜草防除，“Medium”則適用於窄葉或直立狀葉的禾草防除，“coarse”最適用於平展開狀葉型如闊葉雜草防除與系統性除草劑（systemic herbicides）噴施。

三、噴藥調校與相關計算

使用壓力穩定之噴霧器，可以使藥劑能夠均勻分佈到全區，或使藥液準確而定向的噴布至受藥處。配合申請藥劑之使用情形，記錄使用之器械類型和操作條件（操作壓力、噴頭口徑、噴頭類型和高度、混拌深度）等。確保用藥量之精準($\pm 10\%$)，記錄影響藥效、雜草防治期程及選擇性等因子。有些噴施器可以減少萌後除草劑的用水量，為了維持有效成分劑量，當減少用水量則除草劑的濃度將提昇。但隨著噴施水量的減少，噴出藥液粒徑也變小，藥液飄移（drift）的風險提高。降低噴施水量發現在接觸型除草劑對闊葉雜草的防除率也會減少，在其他系統系除草劑也有相似情形。為了補償減少的用水量，施藥者就必須將噴液壓力從 30–40 psi 增加至 50–60 psi。

一般觀念，認為較小的粒徑較能“竄入”植冠內，以增加葉面截留量。但這些大量的小液滴在噴出後很快就減速，且在到達植冠前就已經蒸發掉了。因為較小的液滴具有較小的動能，故提高壓力是無法取代噴施的水量，因此仍推薦噴藥壓力維持在 40 psi 以下。至於理想的噴藥高度為使用 80° 噴嘴，高度設 75 cm；若使用 110° 噴嘴，高度則設定 50 cm，前進速度控制在 6~8 km/hr 之間。

表 2. 藥液粒徑的分類。(Grisso, *et al.*, 2009)

Droplet Category ¹	Symbol	Color Code	Approximate VMD Range ² (in microns)
Very Fine	VF	Red	<145
Fine	F	Orange	145-225
Medium	M	Yellow	226-325
Coarse	C	Blue	326-400
Very Coarse	VC	Green	401-500
Extremely Coarse	XC	White	>500

¹ ASABE (American Society of Agricultural & Biological Engineers) Standard 572.

² VMD = Volume median diameter—a value where 50% of the total volume or mass of liquid sprayed is made up of droplets larger than this value, and 50% is made up of droplets smaller than this value. Reported VMD ranges vary widely, based on the type of laser analyzer used.

表 3. 藥液粒徑與飄散程度。(Ross and Lembi, 2009)

粒徑 - μm -	粒型	粒滴數/平方英尺 (用量 1gal/acre)	無風狀態	降落 10 ft 過程飄移距離	
			降落 10 ft 所需 時間	風速 1 mph ---- ft ----	風速 5 mph ---- ft ---
1	↑		28hr		
5	Fog	9,000,000	66min	5810	29,050
10	(aerosol)	1,151,000	17min	1496	7,480
20		144,000	4min	352	1,760
25		81,000			
50	↓	9,000	40sec	59	295
100	Mist	1,160	11sec	15.4	77
200	Fine spray	144	4sec	5.9	30
240	Medium spray	78			
300	↓	43			
400	Coarse spray	18	2sec	3.0	15
600		5.4	1.7sec	2.5	12
800		2.3			
1000	↓	1.1	1sec	1.5	7

***噴嘴流量計算 (Nozzle flow rate) :**

噴嘴流量可依下列公式求得：

$$GPM = \frac{GPA \times MPH \times W}{5940}$$

上式中

GPM : 噴嘴流量 (Nozzle flow rate), 每分鐘噴嘴流出加侖數 (gallons) 。

GPA : 用水量(Application rate), 每英畝 (acre) 欲噴施加侖數。

MPH : 作業速度(Ground speed), 每小時噴藥前進英里數(miles)。

W : 噴藥寬幅(Effective sprayed width), 噴嘴噴撒有效寬度, 單位英吋 (inches) 。

5940 : 常數。

【GPM計算範例】

- 施用萌後除草劑, 依登記藥量加水稀釋至每英畝 10加侖, 噴藥行進速度為 5 MPH, 使用 Teejet 8002 型扁平扇形噴嘴, 噴幅寬度 20 inch , 請計算噴嘴流量? 以及作業壓力應多少?

【答】 將 GAP=10 , MPH=5 , W=20 帶入下式

$$GPM = \frac{GPA \times MPH \times W}{5940}$$

因此 GPM=0.17, 查表 4. 得知噴藥壓力設定應為 30psi

表 4. Teejet 8002 型扁平扇形噴嘴工作壓力與流量對照表。

	工作壓力 (psi)	每個噴嘴流量 (GPM)
Teejet 8002 型	20	0.14
	30	0.17
	40	0.20
	50	0.22
	60	0.24

四、除草劑藥效試驗設計及統計分析

規劃各種設計的主要原理是要讓參予試驗的各處理有相同的待遇 (均衡原則)，一個好的研究必須要有嚴謹的設計，客觀的試驗過程及合理的推論。因此試驗時必須遵守設置重複 (set up replication)、隨機排列 (random arrangement) 及誤差控制 (error control) 三原則。

從事除草劑藥效試驗時，對於試驗所用的作物之性質，試驗環境及試驗時期等，都會影響試驗結果，因此選擇正確試驗設計法，必須考慮下三原則：

1. 試驗材料 (如作物、雜草) 之性質：同質或異質
2. 試驗環境：相同或不同
3. 試驗時間：各處理是否同時進行

由上述試驗設計三原則可規劃出下列五種常用試驗設計：

1. 完全隨機設計 (Completely Randomized Design : CRD)
2. 隨機完全區集設計 (Randomized Complete Block Design: RCBD)
3. 拉丁方設計 (Latin square Design : LSD)
4. 裂區設計 (Split Plot Design: SPD)
5. 條區設計 (Split-Block Design: SBD)

除草劑藥效試驗之範圍，包括雜草防治及對作物選擇性兩部分試驗之執行。試驗條件：試驗內所有試區之栽培狀況 (如土質、水深、肥料、耕犁、播種深度及移植行株距等) 力求一致，且應依循當地農作之慣行肥培管理作業。

試驗規模可採田區試驗或盆鉢栽培試驗。採田區試驗應記錄前期作使用過之除草劑，避免使用施用過殘效長對後作有毒性效應除草劑之試驗田。雖然除草劑藥效試驗規範水稻田試區間之灌排水應各自獨立，使用浪板或 0.5m 寬之田埂帶分隔，以防止水流透過，但田區會因灌排水造成整塊田區肥力的分佈不均質，一般呈現不同程度的肥力梯度。若肥力呈現單方向差異可採用 RCBD，但若肥力分佈呈現雙向差異，則應另採用拉丁方設計。為瞭解田區肥力分佈可於休閒期種植綠肥作物藉由其生長勢觀察，以作為區集劃分的依據。

另於生長箱或溫室採用盆栽試驗，土壤或水耕液容易達到均質性，一般多採用 CRD 設計。但一般生長箱或溫室的微氣候亦呈現某種程度的差異，如生長箱照明或溫室結構會造成光強上呈現梯度的分配，此時仍應配合微氣候計錄器將生長箱或溫室劃分成幾個區集，呈現單方向差異可採用 RCBD，但若分佈呈現雙向差異，則仍應另採用拉丁方設計。

在農藥田間試驗規範有關藥效試驗中，其試驗設計規範有要求應控制試驗誤差於合理範圍內，如以維持機差自由度大於或等於 12 等方式來控制。因此若採用條區設計時其機差自由度會較 RCBD 小，此時，就得盡可能提高重複數，以控制試驗誤差於合理範圍內。茲將各試驗設計法的排列圖簡述於下：

1. 完全隨機設計 (Completely Randomized Design : CRD)

當試驗材料為同質或性質不明，且在相同的環境下同時進行試驗，適合採用本設計法。各處理必須隨機排列於試驗單位上，機差自由度 = 處理數(t) × [重複數(n)-1]。

表 5. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗 (3 重複)，完全隨機設計 (CRD) 試驗之變分分析表

SOV (變異)	DF (自由度)
t(處理)	4
E(機差)	10
T (Total)	14

HB-2X	HB-1.5X	HB-0X	HB-0.5X	HB-0X
HB-1X	HB-0.5X	HB-0X	HB-2X	HB-1X
HB-2X	HB-1.5X	HB-1X	HB-1.5X	HB-0.5X

圖 2. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗 (3 重複)，完全隨機設計 (CRD) 試驗排列圖。

2. 隨機完全區集設計 (Randomized Complete Block Design:RCBD)

當試驗材料為異質，且可明顯歸類成幾個區集 (block)，每一區集內的試驗單位必須等於參試處理數，適合採用本設計法。各處理必須隨機排列於試驗單位上，機差自由度= $[處理數(t)-1] \times [區集數(B)-1]$ 。

表 6. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗 (4 重複)，隨機完全區集設計試驗之變方分析表。

SOV (變異)	DF (自由度)
B (區集)	3
t(處理)	4
E(機差)	12
T (Total)	19

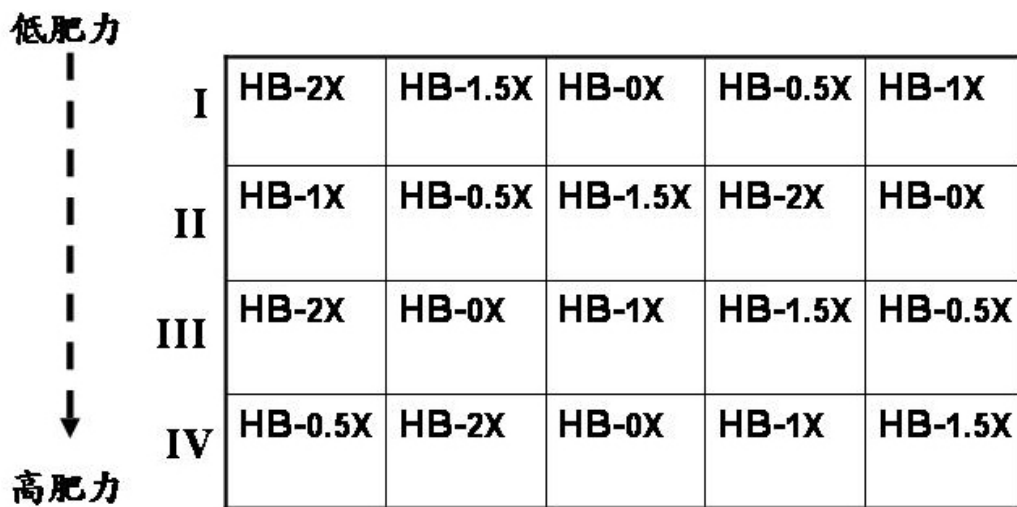


圖 3. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗 (4 重複)，隨機完全區集設計試驗排列圖。

3. 拉丁方設計 (Latin square Design : LSD)

當試驗材料為異質，且可明顯歸類成兩向區集，區集數必須等於處理數，每一區集內的試驗單位亦必須等於參試處理數，適合採用本設計法。各處理必須隨機排列於試驗單位上，機差自由度= $(t-1) \times (t-2)$ 。

表 7. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗，拉丁方設計試驗之變方分析表。

SOV (變異)	DF (自由度)
t(處理)	4
R (行)	4
C (列)	4
E(機差)	12
T (Total)	24

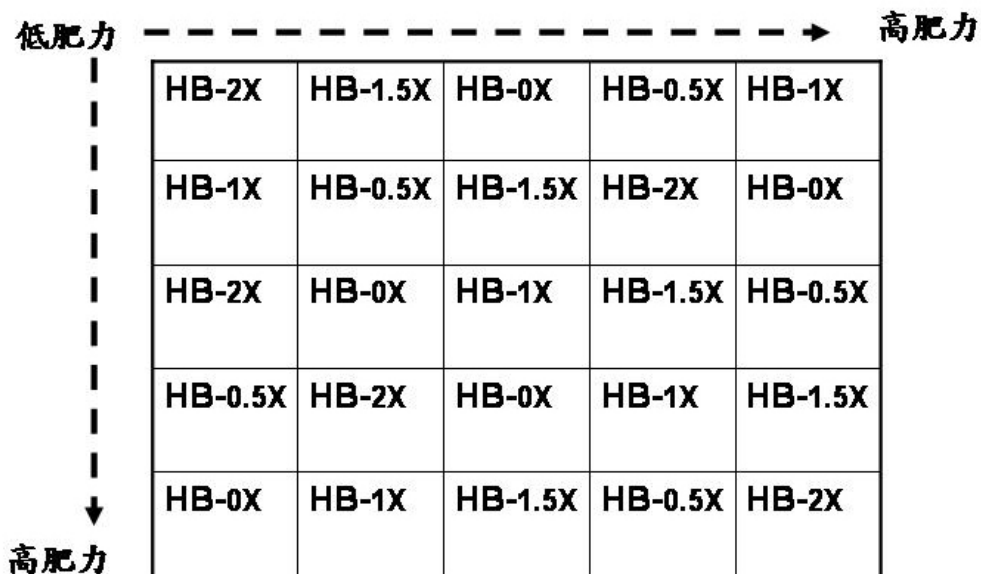


圖 4. 五種劑量除草劑水稻藥效試驗，拉丁方設計試驗排列圖。

4. 裂區設計(Split Plot Design:SPD)

當有個因子適用於必須在較大的試驗單位上才易實施其處理時，用此法較佳。將一區集內先畫大區，如圖?安排灌水深度 (D) 因子，然後在大區內再劃分成幾個小區，以安排除草劑劑量 (HB) 因子。各處理必須隨機排列於試驗單位上，小區因子機差自由度 = $D \times (HB-1) \times (B-1)$ 。

例：設有 4 種除草劑量(HB0、HB0.5、HB 1、HB 1.5)、兩種灌水深度(D1、D2)、三重複。

裂區設計：先對灌水深度進行隨機排列，再就各深度內隨機進行藥劑處理。

		D1		D2	
I	HB-1.5X	HB-1X	HB-0.5X	HB-0X	
	HB-1X	HB-0X	HB-1.5X	HB-1.5X	
	HB-0.5X	HB-0.5X	HB-0X	HB-0.5X	
	HB-0X	HB-1.5X	HB-1X	HB-1X	
		D2		D1	
II	HB-0.5X	HB-1.5X	HB-0X	HB-0X	
	HB-1X	HB-0X	HB-1.5X	HB-1X	
	HB-1.5X	HB-1X	HB-0.5X	HB-0.5X	
	HB-0X	HB-0.5X	HB-1X	HB-1.5X	
		D1		D2	
III	HB-1X	HB-1X	HB-0.5X	HB-0.5X	
	HB-1.5X	HB-0X	HB-1X	HB-1X	
	HB-0.5X	HB-1.5X	HB-1.5X	HB-0X	
	HB-0X	HB-0.5X	HB-0X	HB-1.5X	

圖 5. 四種劑量除草劑與灌水深度裂區設計試驗排列圖。

表 8. 水稻灌水深度與四種劑量除草劑藥效試驗，裂區設計變方分析表。

SOV (變異)	DF (自由度)
區集 R	2
灌水 A	1
主區機差	2
除草 B	3
A x B	3
副區機差	12
總和	23

* 裂區設計：機差均方分為主區與副區兩部份。

* 檢定時，主區均方除以主區機差均方、副區、交感均方除以副區機差均方。

5. 條區設計 (Split-Block Design:SBD)

當兩個因子都必須在相當大的試驗單位上實施其處理時，就可考慮以條區設計來進行試驗。機差自由度 = $(V-1) \times (HB-1) \times (B-1)$ 。

表 9. 五種劑量除草劑與水稻品種條區設計變方分析表。

SOV (變異)	DF (自由度)
R(重複)	4
A 因子(劑量)	4
Error 1(機差 1)	4*4=16
B 因子 (品種)	2
Error 2(機差 2)	4*2=8
A*B(交感)	4*2=8
Error 3(機差 3)	4*4*2=32
T (Total)	74

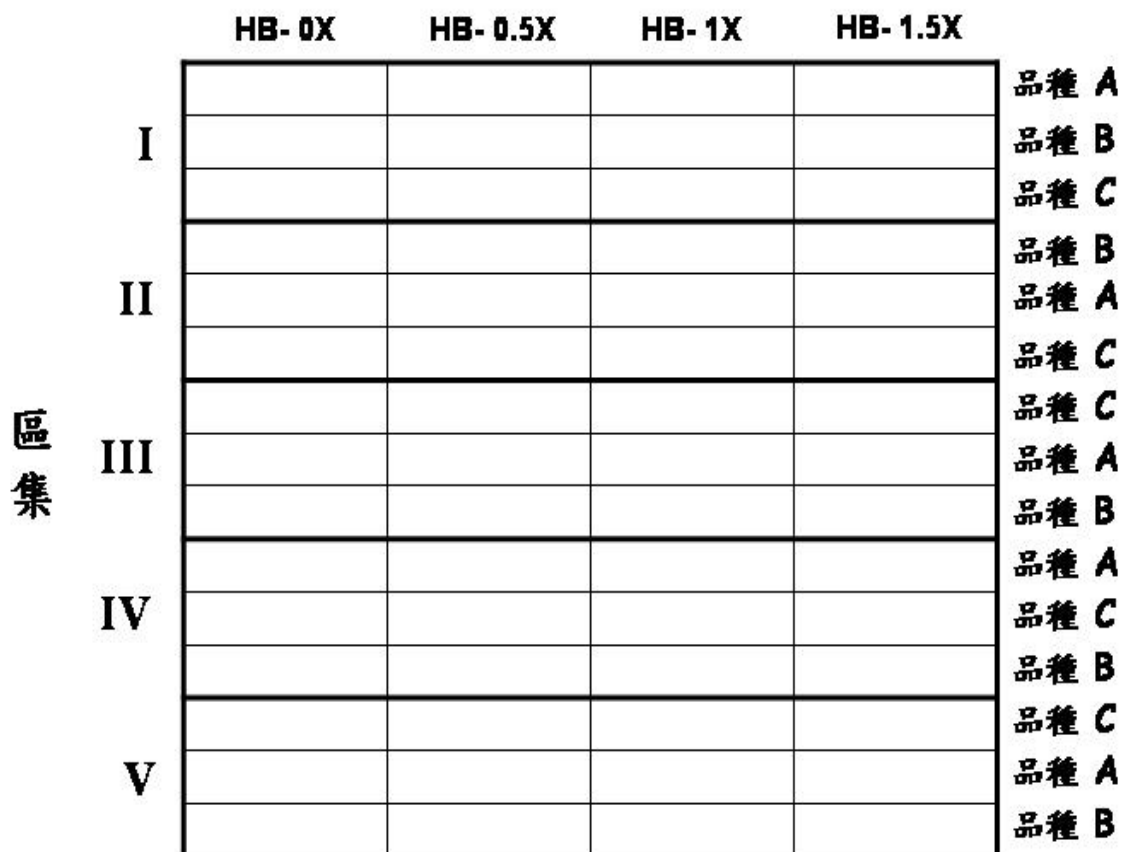


圖 6. 五種劑量除草劑與水稻品種條區設計試驗排列圖。

6. 資料分析：

試驗後將所記錄資料進行變方分析 (ANOVA) 以測驗處理均值間是否有差異。若試驗結果處理項實測 F 值之機率 (P-value) 小於 5%，達顯著性差異，表示參試處理間至少有一對有差異存在。但哪些處理項間有達差異顯著水準？此時要進行參試處理均值間的比較，最常採用的方法為最小顯著差異測驗法 (Least Significant Difference Test: LSD) 與鄧氏新多變域測驗法 (Duncan's New Multiple Range Test)。應採用何種處理均值間的比較方法較合理呢？兩種方法都可以，嚴格來講，Duncan 的新多變域法，此法比較嚴謹、保守，較不容易顯著，LSD 較不保守，也就是兩兩比較時，較容易顯著。

五、參考文獻

- 沈明來。2011。統計分析與 SAS 應用。九州圖書文物有限公司。台灣台北。
- 沈明來。2010。試驗設計學。九州圖書文物有限公司。台灣台北。
- 李欣怡、黃偉嘉、王裕文。裂區設計與條區設計。Crop, Environment & Bioinformatics, 8: 209-216。
- 陳宏銘。2011。高爾夫球場農藥安全施用實作。『草坪雜草管理與農藥安全使用研習會』，pp. 8-1~8-8。中華民國雜草學會，2011年06月28日。台灣南投。
- 蔣永正。2011。除草劑田間試驗設計與藥效評估。雜草管理與農藥安全使用研習會，pp. 1-1~1-5。2011年12月1日。台灣嘉義。
- Grisso R.B., P. H. Shawn, D. Askew, L. Hipkins, Da. McCall. 2009. Nozzles: Selection and Sizing. Virginia Cooperative Extension. Publication Number 442-032.
- Johnson M.P., and L.D. Swetnam. 2010. Sprayer Nozzles: Selection and Calibration. University of Kentucky Cooperative Extension Service. <http://ces.ca.uky.edu/ces/>
- Ross M.A. and C.A. Lembi. 2009. Applied weed science: including the ecology and management of invasive plants. Aptara, Inc. USA.

【附錄】單位換算

重量單位換算：

16 ounces = 1 pound = 453.6 grams

1 gallon water = 8.34 pounds = 3.78 liters

長度單位換算：

3 feet = 1 yard = 91.44 centimeters

5280 feet = 1 mile = 1.61 kilometers

面積單位換算：

9 square feet = 1 square yard

43,560 square feet = 1 acre

1 acre = .405 hectare

640 acres = 1 square mile

速度單位換算：

88 feet per minute = 1 mph

1 mph = 1.61 kilometers per hour

其他：

GPM = gallons per minute

GPA = gallons per acre

psi = pounds per square inch

mph = miles per hour

GPH = gallons per hour

1 bar=1.02kg/cm²=14.50337psi

1 acre = 43,560 square feet

1 gallon = 128 fluid ounces

Gallons per acre = (5,940 x gallons/minute/nozzle) / (MPH x nozzle spacing)

Gallons per minute per nozzle = (gallons/acre x MPH x nozzle spacing) / 5,940

Ounces per minute per nozzle = (gallons/acre x MPH x nozzle spacing x 32) / 1,485

Miles per hour = distance travelled (ft) / (88 x minutes)

= distance travelled (ft) / (.47 x seconds)