試驗設計的正確使用

呂秀英

摘　要

電腦統計套裝軟體之普及化，對學術研究工作提供了方便、快速又計算準確的統計分析，然而根據多年來從事農業統計及試驗設計諮詢服務之工作經驗中發現，越是常用而簡單的統計方法，其被誤用及濫用的現象也最頻繁。爲避免重蹈覆轍，農業研究工作者應該瞭解如何正確地使用試驗設計，才能對試驗結果進行適當之統計分析。對此，將針對以下重點加以說明：一、試驗設計的基本觀念與原則；二、農業上重要的試驗設計方法；三、合併數個試驗（例如合併年度、地區、季節等）的分析方法；四、連續不同時間重複測量（例如不同時期行多次收穫）的試驗；五、處理間的個別比較。

關鍵字：農業統計分析、試驗設計

臺灣省農業試驗所農藝系試驗統計室副研究員

一、試驗設計之基本觀念與原則

㈠何謂試驗設計？

試驗設計爲研究試驗與統計分析間之橋樑；試驗設計只是對試驗提供適當的設計及步驟，並對試驗結果做適當之說明與報告之擬定。試驗設計與統計分析間的關係如圖 1 所示，可知試驗設計重於統計分析。唯有對試驗提供適當的設計，才能收集到最精確的資料，同時也決定了最適當的統計分析方法，最後才能獲致最正確的試驗結果。

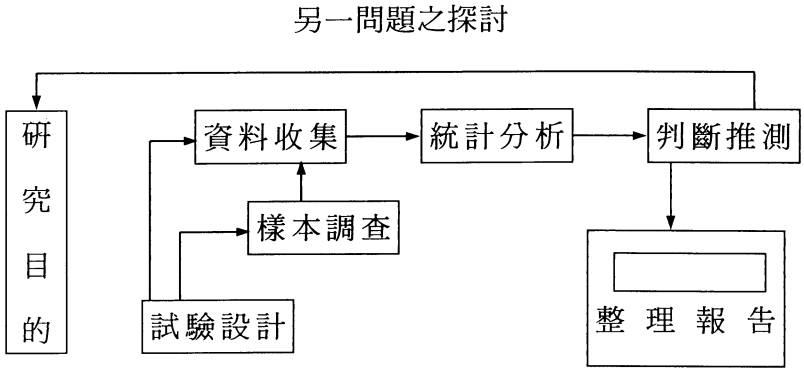


圖 *1.* 試驗設計與統計分析之關係流程圖

㈡試驗設計之原則：

1. 試驗因子（獨立變數）

2. 指示因子（依變數）

3. 併變因子（偏性）

4. 試驗機差（未知因素）

例如探討不同肥料濃度對作物產量之影響試驗，肥料爲試驗因子，即獨立變數，至於產量是會受到獨立變數所影響的依變數，爲指示因子；在試驗進行中，除了試驗因子以外，常常有其他因素也會影響試驗結果，其中可以預知的因子，稱爲併變因子或偏性因子，例如試驗田的土壤地利不均勻或灌排水有差異等，可以藉由事前之試驗設計的區集規劃來加以控制；至於其他無法預知的變異，則一律歸併爲試驗機差。

㈢試驗之必備條件：

1. 處理 (treatments)

⑴試驗單位 (experimental unit)

試驗記錄的基本單位，例如一籠雞、 10 株稻苗、 5g 土壤含氮量等。以作物試驗而言，如果是一株株個別測量，試驗單位就是單株，如果是採收 10 株，綁在一起秤其乾物產量，那麼試驗單位是 10 株。

⑵試因 (factor)

能影響試驗結果之原因，例如肥料處理、品種別等。

⑶變級 (level)

試因之改變條件以進行比較者，例如 50,100,150, 200mg/pot 四種處理之氮肥試因、 A,B,C 三種變級之品種試因等。

⑷取樣次數 (sampling size)

爲降低取樣誤差於每一試驗單位內重複取出的樣本個數，例如每籠 10 隻雞、 10 株稻苗等。取樣單位不一定是試驗單位，像是作物產量試驗通常以小區爲試驗單位，但試驗者因爲小區樣本太多，無法全部逐一調查，故從小區中再逢機取出 10 株進行測量，此時取樣單位爲 10 株，取樣次數爲 10 。植物組織培養試驗，則多是以培養皿或試管爲調查單位，因此試驗單位等於取樣單位。

2. 重複 (replicates)

重複是同一處理試驗幾次，而非重複調查樣本幾次或重複取樣。

3. 逢機 (randomization)

試驗的試因在各重複內的配置必須符合逢機化，才能估計試驗機差，以進行檢定及推定。

4. 分析方法 (analysis methods)

選擇了適當的試驗設計，就決定了分析方法。

二、農業上重要的試驗設計方法

㈠逢機設計與順序設計的差異

試驗設計必須滿足逢機化，才能估計試驗機差，以進行檢定及推定。但有一種特殊的例外情形，是採用非逢機的順序設計，其優點在於簡單方便，但無法估計機差，例如水稻新引進品種觀察試驗，目的純粹在調查各引進品種的性狀表現，以從

中篩選出能在本地種植的品種，而不做任何統計上的差異性比較檢定。逢機設計與順序設計的田間配置方式差異如圖 2 所示。

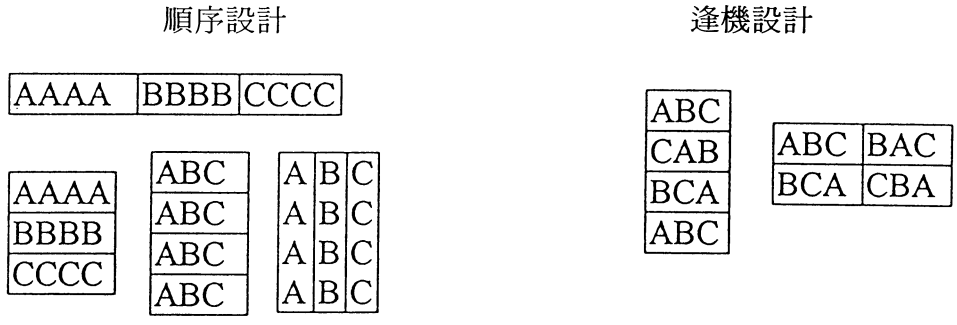


圖 2. 逢機設計與順序設計的田間配置方式之差異。
(設有三個處理，四個重複)

㈡農業試驗重要的設計方法

農業試驗上常用且重要的試驗設計方法，依其控制偏性的方式不同，可有不同類別：完全逢機設計法 (completely randomized design, CRD) 、逢機完全區集設計法(randomized complete block design, RCBD) 、拉丁方設計法(latin square design) 、裂區設計法(split plot design) 等，如表 1 所列。

表 1. 幾個重要試驗設計的特性比較

設　計　方　法	控制偏性之類別	試　因	重　　複
完全逢機設計法(CRD)	無方向性	單、複	可不等
逢機完全區集設計法(RCBD)	單向偏性	單、複	相等、可無重複
拉丁方設計法	雙向偏性	單、複	處理數＝區集數
裂區設計法	不同層次	複	主區必須有重複

試驗的設計與區集之有無及其配置有關，而一般人常誤以爲複因子 (參與試驗的試因在一個以上時) 也是一種設計方法，其實不然，我們應該說「複因子試驗 (factorial experiment) 」，而非「複因子設計 (factorial designs) 」。 試驗設計的主要目的在控制偏性，因此在試驗材料之變異性能控制之範圍內，選擇愈簡單的設計愈好。

區集之設置以使區集內小區間變異最小而區集間變異最大爲原則，因此當變異有特定方向時，以長邊垂直於變異梯度設置長形區集，當變異無特定方向時，也可依土壤均質性測驗結果將肥力相近的小區併爲一個區集，而不一定要長形區集。

單因子試驗各以 CRD 、 RCBD 及拉丁方設計的田間配置圖之差異性，如圖 3 所示。假設該試驗含有 3 處理及 3 重複，則 CRD 是將 3 處理× 3 重複 =9 個組合，逢機配置在 9 個小區內； RCBD 則先將試驗田區分割成 3 個區集後，於各區集內再分別逢機佈置 3 個處理；拉丁方設計則因爲存在雙向偏性，在處理數必須等於區集數的前提下，依一定規則（標準方）在兩向區集內進行逢機排列。 CRD 、 RCBD、拉丁方設計單因子試驗的變方分析比較，如表 2 所列。當 RCBD 中於各區集內再逢機取出 s 個取樣單位時，可以進而估計取樣誤差。

CRD

A	B	C
C	A	A
C	B	B

RCBD

Block 1	2	3
A	B	C
C	C	A
B	A	B

拉丁方設計

Block 1	2	3
1	A	B	C
2	B	C	A
3	C	A	B

圖 *3.* CRD、RCBD、拉丁方設計單因子試驗的田間配置圖比較
（假設3處理，3重複）

表 *2.*CRD、RCBD、拉丁方設計單因子試驗的變方分析比較
(假設t處理，r重複或區集，s取樣次數)

CRD	RCBD (單觀測值)	RCBD (多觀測值)	拉丁方設計
變因 自由度	變因 自由度	變因 自由度	變因 自由度
處理 t-1 機差 t(r-1)	區集 r-1 處理 t-1 機差 (t-1)(r-1)	區集 r-1 處理 t-1 試驗機差 (r-1)(t-1) 取樣誤差 rt(s-1)	橫向區集 t-1 縱向區集 t-1 處 理 t-1 機 差 $(t^2-1)-3(t-1)$
總計 tr-1	總計 tr-1	總計 rst-1	總計 t^2-1

複因子試驗各以 RCBD 及裂區設計的田間配置圖之差異性，如圖 4 所示。假設該試驗含有 2 處理各 3 變級， 2 區集，則 RCBD 是在各區集內將A試因 3 變級×B試因 3 變級＝9 種處理組合，逢機配置在 9 個小區內；裂區設計則在各區集內先將田區分割成 3 個主區（大區），以逢機排列A試因之 3 個變級，然後於各主區內再劃分副區（小區），以逢機排列B試因之 3 個變級。

RCBD

Block 1

A1B1	A2B1	A1B3
A3B2	A1B2	A3B3
A2B3	A3B1	A2B2

Block 2

A2B1	A1B1	A3B2
A2B3	A2B2	A1B2
A3B1	A1B3	A3B3

裂區設計

Block 1

A1	A2	A3
B1	B3	B2
B2	B1	B3
B3	B2	B1

Block 2

A1	A2	A3
B3	B1	B3
B2	B3	B1
B1	B2	B2

圖 4. CBD及裂區設計複因子試驗的田間佈置圖比較
（假設2處理各3變級，2區集）

裂區設計的使用場合，僅受限於管理上的需求或自然的條件。例如灌溉試驗，我們很難將田區劃分成太多太細的小區來配置灌溉因子，因此通常將田區先分割成數個主區以佈置灌溉因子，然後在主區內再劃分成數個副區以佈置另一因子（如品種）。很多人以試因之重要與否，來作爲使用裂區設計的理由，是一種似是而非的說法！認爲試因比較重要，故將該試因安排在副區，常會將試因在主副區的位置完全弄反，例如灌溉試驗，倘認定灌溉因子比品種因子重要，則就會誤將灌溉因子安置在副區，而品種在主區，結果將導致田間管理上的難題，而背離了使用裂區設計的原意。實際上，由於採用裂區設計將會犧牲主區的準確度，因此造成試因似乎有

重要及次重要的表象，這是使用裂區設計後的一個結果，並非原因。

RCBD及裂區設計複因子試驗的變方分析比較，如表 3 所列。因爲裂區設計有主副區之分，因此其變方分析中包含兩種機差項，必須注意的是主區試因之 F 值顯著性測驗之分母項爲主區機差（主區×區集之交感效應），而非試驗機差。

表 3. RCBD及裂區設計複因子試驗的變方分析比較
(假設A試因變級數爲a，B試因變級數爲b，區集數爲r，
區集爲逢機型效應，處理爲固定型效應)

RCBD（單觀測值）				裂區設計			
變因	自由度	均方	F-test	變因	自由度	均方	F-test
區集	r-1	M_r	M_r/M_e	區集	r-1	M_r	$M_r/M_{e.a}$
A試因	a-1	M_a	M_a/M_e	A試因(主區)	a-1	M_a	$M_a/M_{e.a}$
				A x 區集	(r-1)(a-1)	$M_{e.a}$	
B試因	b-1	M_b	M_b/M_e	B試因(副區)	b-1	M_b	$M_b/M_{e.b}$
AxB	(a-1)(b-1)	M_{ab}	M_{ab}/M_e	AxB	(a-1)(b-1)	M_{ab}	$M_{ab}/M_{e.b}$
機差	(ab-1(r-1)	M_e		機差	a(b-1)(r-1)	$M_{e.b}$	
總計	rab-1			總計	rab-1		

三、合併數個試驗的分析方法

農業上有關作物新品種選育、新栽培技術推廣等的試驗過程中，通常都會同時在兩個以上的地區或連續進行數年試驗，希望在較多的相異環境下栽培，讓作物能充分地顯現出其遺傳本能，以篩選出優良的品種或新的栽培方法。這些於各地區或各年期（年度或期作）所進行的個別試驗，都能得到各自的變方分析結果，但根據分開地區及年期的變方分析結果，並無法得知該試驗在不同地區或年期的整體表現情形，因此有必要將所有地區或年期的資料予以合併，再進行變方分析，這樣的變方分析就稱爲綜合（或合併）變方分析 (combined analysis of variance)。

綜合變方分析不是裂區設計，兩者之田間配置間的差異如圖 5 所示。合併年度之 RCBD 試驗之綜合變方分析表列於表 4 ，其區集自由度爲 y(r-1)，而非 (r-1)，且只有一個機差項，並注意年度效應之 F 值顯著性測驗是以區集效應爲分母項。至於合併地區或期作之 RCBD 試驗之綜合變方分析，內容則與表 4 相同，惟將年度改爲地區或期作即可。

雖然綜合變方分析主要應用於合併各地區及年期之數個試驗，但其概念在某些情形下仍可引用至其他試驗，尤其是當複因子試驗中似乎有＂主副區＂之田間配置但＂主區＂無重複的場合，例如灌溉試驗，本來應該採用裂區設計，以灌溉與否作爲主區，而另一處理（例如品種）則逢機佈置在主區內之各副區，但試驗者卻將灌溉與否各僅在一塊田區進行試驗，結果造成主區無重複，即圖 5 (A)中僅有一個區集，這樣的結果將無法測驗灌溉效應的顯著性。基本上，欲使用裂區設計卻讓主區無重複，是不容許也不值得鼓勵的作法，表示試驗者在事前並未作妥善的試驗設計規劃。但不幸地，往往這種情況卻層出不窮。爲使試驗者多年辛苦所收集調查的試驗資料，不致毀於一旦，事後不得不設法的搶救彌補工作仍不可輕言放棄。這種試驗資料如果還能補救的話，只有在主區內各品種有重複的情形下，可將灌溉與否當成是兩個獨立的 CRD 或 RCBD 試驗，如圖 5 (B)所示，於是綜合變方分析在此時就發揮了其另一種效用。其他常見的類似試驗有：水稻高低成本栽培試驗、再生稻與移植水稻之比較試驗、蔬菜栽培設施試驗、果樹不同海拔栽培試驗等。但引用上務必特別注意：個別獨立的試驗仍必須有重複，同時要滿足綜合變方分析的統計前提。

(A)裂區設計：

Block I

F1	F2
V1	V2
V3	V1
V2	V3

Block II

F2	F1
V2	V3
V1	V1
V3	V2

(B)兩獨立之RCBD綜合變方分析

F1

Block I	II
V1	V2
V2	V1
V3	V3

F2

Block I	II
V2	V3
V1	V1
V3	V2

圖 *5.* 裂區設計與綜合變方分析在田間配置圖上的區分

表 *4.* 合併不同年度之品種試驗的綜合變方分析
（假設每一年試驗均採RCBD，v品種，r區集，共進行y年）

變 因	自由度	均 方	F-test
區集/年度	y(r-1)	M_r	M_r /M_e
年度(Y)	y-1	M_y	M_y /M_r
品種(V)	v-1	M_v	M_v /M_e
YxV	(y-1)(v-1)	M_{yv}	M_{yv}/M_e
機差	y(v-1)(r-1)	M_e	
總計	ryv-1		

四、連續不同時間重複測量的試驗

同一試驗單位會重複測量好幾次，例如乳牛飼料試驗中記錄頭四個泌乳期每一期的泌乳產量、不同牧草品種的 RCBD 試驗於不同時期行多次收穫、宿根性多年生作物、肥料連用試驗、作物栽培方法試驗等均是。重複測量試驗，必須考量每個時期的測量值是否會受到前時期結果的影響。當每個時期之間的觀測值互相獨立時，合併試驗資料如同裂區設計形式，將每一試驗單位的連續觀測值視爲副區。倘每個時期的觀測值並不獨立時，可利用變積分析 (covariance analysis) 剔除干擾因子之影響，以估計純淨機差變方並校正處理平均。

五、處理間的個別比較

1. 多重比較測驗 (multiple comparison test)

2. 直交比較 (orthogonal contrasts)

3. 迴歸分析 (regression analysis)

多重比較只適用於處理變級間沒有確定關係之定性處理或研究者在試驗開始前對處理平均值間並無特定的比較計劃的場合，例如品種或殺蟲劑篩選試驗，但在資料分析之前，最好還是先考慮各處理是否可以分成數群。各種多重比較法中仍以傳統的 LSD(least significant difference test, 最小顯著差異測驗法）最爲適用。經由 LSD法的差異性測驗結果，一樣可以使用不同字母來表示處理間的差異性。過去認爲可以使用 Duncan 氏多變域比較法的場合（有確定關係的定量處理間之比較），反不如利用迴歸分析法來估得反應曲線或反應曲面爲理想，因爲迴歸分析法所能得到的訊息絕對要比 Duncan 氏多變域比較法爲多。

以下情況之試驗幾乎從不適用多重比較，而依其目的可採用許多其他統計方法：

⑴參試處理依定量變數分級－例如肥料不同濃度試驗，應該利用迴歸技術求配濃度對反應的曲線或曲面函數。

⑵有計劃的比較處理變級間的直線組合－應該在平均值間或數種平均值間進行直交比較。例如，植物組織培養試驗中欲比較不同培養基（處理）間的差異到底是何種配方所影響，則各種配方間的比較，如加糖對不加糖、有添加物對無添加物等，實際上是多個處理組合間的複合比較，因此宜採用直交比較法。

⑶兩個或兩個以上變級之因子組成的複因子試驗－將變方分析中的處理效應平方和及自由度再劃分，或以圖示說明等。

不同的情況各有不同的考量，其從試驗資料所得到的訊息絕對要比多重比較方法來得豐富而有效。

參考文獻

1. 呂秀英。 1989 。農學與統計．一、農學家與統計工作者。科學農業 37:157-161 。
2. 呂秀英、謝瓊玲。 1989 。農學與統計．二、資料處理。科學農業 37:204-209 。
3. 呂秀英。 1989 。農學與統計．三、設計與分析。科學農業 37:250-256 。
4. 呂秀英、黃乃玫。 1990 。農學與統計．四、頻度資料。科學農業 38:148-155 。
5. 呂秀英。 1990 。農學與統計．五、資料轉換。科學農業 38:182-187 。
6. 陳烈夫、呂秀英。 1990 。農學與統計．六、迴歸與變積分析。科學農業 38:321-331 。
7. 呂秀英。 1990 。多重比較方法之使用與誤用。科學農業 38: 177-181 。
8. 呂秀英。 1993 。試驗設計常見的濫用及誤用。科學農業 41:285-292 。
9. 呂秀英。 1997 。綜合變方分析的正確使用。科學農業：付印中。
10. 沈明來。 1993 。試驗設計學。九州，台北。 pp617 。
11. Gomez, K. A. and A. A. Gomez. 1984. Statistical Procedures for Agricultural Research. John Wiley & Sons, New York. pp680.
12. Compton, M. E. 1994. Statistical methods suitable for the analysis of plant tissue culture data. Plant Cell, Tissue and Organ Culture 37:217-242.
13. Mize, C. W. and Y. W. Chun. 1988. Analyzing treatment means in plant tissue culture research. Plant Cell, Tissue and organ Culture 13:201-217.
14. Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1980. Principles and Procedures of Statistics. McGraw-Hill, New York.

Correct Usage of Experimental Designs

Hsiu-Ying Lu

Summary

The use of computer software for statistical analysis is rapidly increasing in scientific research. During many years of statistical consultation in agricultural research, I found that misuses and abuses of the design and analysis of experiments still frequently occurred, even though the most common and simple analysis. For this reason, it is necessary to have knowledge of correct usage of experimental designs. This talk concentrates on five parts: 1. Basic concepts and principles of experimental design; 2. Important designs in agricultural experiments; 3. Combined analysis of experiments over years, locations or seasons; 4. Repeated measurement over time; 5. Comparisons between treatments.

Key words : Agricultural Statistical Analysis, Experimental Design.

Statistician, Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute.