

高粱穗乾燥模式之研究¹

陳加忠 賴建洲 曹之祖²

摘要 在此研究中，以六種乾燥模式比較其於高粱穗乾燥曲線之適用性。相關係數值和殘差分佈圖被用為選擇之標準。研究結果顯示非線性模式可適用於兩種乾燥方式和不同風速，乾燥厚度條件下之各乾燥曲線。乾燥過程所需之平衡含水率可由此模式求得。乾燥常數K值受到不同乾燥條件顯著性影響。N值則無顯著相關性。在發芽率的比較中，K與N值並無顯著影響。以傳統所用乾燥過程水份損失率的計算方式並不能正確地顯示有關因素對乾燥性能之影響。

高粱穗乾燥作業的基本試驗已有研究(註3)。由於乾燥效應的複雜性，農產品本身的脫水現象受到許多不同的因素所影響；如穀物初期含水率，堆積厚度，熱風溫度，相對濕度，和風速……等。為了比較不同因素對於高粱穗乾燥速率之影響，乾燥過程中穀物含水率隨時間的變化需有適當之乾燥模式加以描述與量化，並以模式所含之參數建立其物理意義，以作為乾燥速率之比較基準。

理論探討

一、穀物乾燥原理

穀物為一生物體，在潮濕的環境中，其平衡蒸氣壓(Pg)小於大氣蒸氣壓(Pa)時，穀物將自周圍環境吸收水份。反之，若穀物平衡蒸氣壓大於大氣中水蒸氣壓力，穀物將失去水份。在乾燥作業中，穀物被置於熱風之中，熱量進入穀物內部提高穀溫，也提高穀物之蒸氣壓，而空氣在加熱後其蒸氣壓降低，因此Pg與Pa之差異增加，穀物內水份移出之驅動勢(driving force)亦為之增大。

隨乾燥作業之進行，穀物逐漸失去水份，Pg與Pa之差異逐漸減少，直至此趨動勢到達平衡。在此階段之最後含水率(final moisture content)通稱為平衡含水率(EMC: Equilibrium Moisture Content)。

高粱穗之平衡含水率並無文獻參考，高粱粒之平衡含水率(Me, %, d. b)平衡相對濕度(RH, decimal)與乾燥溫度(T, °C)之關係可以以下式表達(註14)：

$$Me = \frac{\ln A}{B} - \frac{1}{B} \ln(-(T+C) * \ln RH) \dots\dots\dots (1)$$

$$A = 797.333, B = 0.18159, C = 52.2375$$

二、乾燥模式常數與乾燥速率

穀物在乾燥過程中，含水率隨時間而遞減，典型的乾燥曲線如圖1所示。在乾燥速率的比較中，往往在乾燥曲線上任取兩點(通常為取初值和終值)而求其斜率為乾燥速率，並以此為比較之基準。

1. 臺灣省農業試驗所 研究報告1466號

2. 臺灣省農業試驗所農機系副研究員、助理研究員、技士。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。

此方法依馮氏之研究(註 2)，發現在初期含水率較高的條件時，依上述方法將得較大的乾燥速率，降低最後的含水率則減低乾燥速率。此外任取兩點求截矩，其誤差值極大，如圖 1 中三角度即不相同 ($\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$)。因此此種截短斜率之方法不能真正顯示各乾燥因子對乾燥速率之影響。此種截短值在此研究中定義為水分損失率 (R)，其計算式如下：

$$R = \frac{M_1 - M_2}{T_2 - T_1} \dots\dots\dots (2)$$

為比較玉米穗和玉米粒之平均乾燥遞減率，馮氏(註 2) 假設含水率與乾燥時間為指數函數關係，其應用方程式如下：

$$M(t) = C_1 \text{Exp}(-C_2 t) \dots\dots\dots (3)$$

M(t)：時間 t 之含水率

t：時間 (小時)

依最小平方迴歸分析求得 C_1 與 C_2 值後，再取相同之最初，最後含水率計算平均減乾率，作為乾燥影響因子之比較基準。

三、乾燥曲線之適用模式

在農產品的乾燥研究中，薄層乾燥經驗方程式已有多種形式，其模式之型式如下：

$$M(t) = F(T, RH, M_i, \dots \text{etc.}) \dots\dots\dots (4)$$

由於高粱穗之發芽率受熱風溫度之影響，在此試驗中設定為 40°C，此外由於外界大氣環境在不同試驗過程中極為相近，因此在此研究中僅考慮乾燥熱風之風速與穀層乾燥厚度對於乾燥性能之影響。

農業工程師通常以含水率乾燥指數 (MR) 作為穀物乾燥模式之應變數。

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_i - M_e} \dots\dots\dots (5)$$

M(t)：穀物在時間 t 時之含水率 (%，d. b.)

M_e ：平衡含水率 (%，d. b.)

M_i ：穀物之初期含水率 (%，d. b.)

常用的 MR 經驗方程式如下：(A_i 與 B_i 為常數)

1. $MR = A_1 \text{Exp}(-B_1 t)$ (註 9) $\dots\dots\dots (6)$

線性化函數為：

$$\text{Ln}(MR) = \text{Ln}A_1 - B_1 t \dots\dots\dots (7)$$

2. $MR = \text{Exp}(-A_2 t^{B_2})$ (註 4) $\dots\dots\dots (8)$

線性化函數為：

$$\text{Ln}(-\text{Ln}(MR)) = \text{Ln}A_2 + B_2 \text{Ln}(t) \dots\dots\dots (9)$$

3. $t = A_3 \text{Ln}(MR) + B_3 (\text{Ln}(MR))^2$ (註 7) $\dots\dots\dots (10)$

自統計學之意義而言，曲線函數 (M, t) 可以利用函數之轉化 (transfer) 使其線性化 (linearize)。依 Devore 與 Peck (註 13) 之轉化方式 (圖 2)，在穀物乾燥曲線中，M 值隨 t 值之增加而遞減 (如圖 1)。為適合線性化之要求，兩者必須加以降值 (Value Decrease)，而降值之適用函數主要為對數函數。因此公式 (7)、(9) 與 (10) 式，可視為為使乾燥曲線線性化之函數轉換。(7) 式之型式為 Y 軸座標 (MR 值) 線性化後與 X 軸 (t 值) 加以迴歸分析。(9) 式之型式為 Y 軸 (MR) 值經兩次對數函數線性化後再與線性化後之 X 軸 (t 值) 進行迴歸。(10) 式為 t 值與 LnMR 值進行省略常數項之多項式迴歸 (Polynomial regression)。

比較 M(t) 與 MR(t) 值，可知 M(t) 值為 MR(t) 值的比例化 (Scaling)，因此 $MR(t) = f_1(t)$

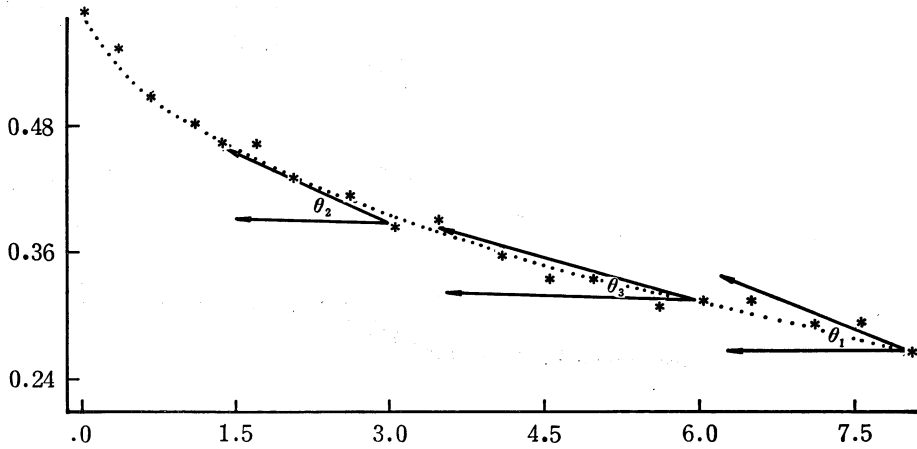


圖1. 典型的乾燥典線與水份損失率 (R)

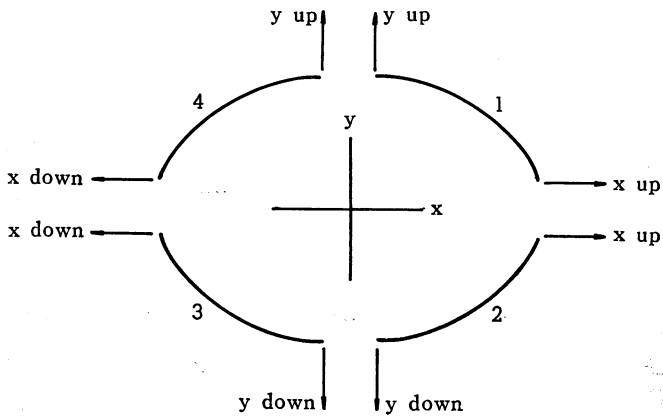


圖2. Daniel 與 Peck 之典線線性化圖

與 $M(t) = f_2(t)$ 兩者曲線僅是Y軸比例之不同，而曲線之形狀並無不同。由此可知 $MR(t)$ 之經驗方程式亦可應用於 $M(t)$ 與 t 之曲線。此 $M(t)$ 與 t 曲線關係之適用模式可表示如下：

$$M(t) = A_1 \text{Exp}(-B_1 t) \dots\dots\dots (11)$$

$$M(t) = \text{Exp}(-A_2 t B_2) \dots\dots\dots (12)$$

為探討 $MR(t)$ 模式之適用性，公式(6)、(8)、(10)，必須先求得 Me 值。因無文獻可求得高粱穗在特定環境之 Me 值，在此研究以公式(1)求得高粱粒之 Me 值，再代入高粱粒和穗含水率之關係式（註3），而求得高粱穗於特定乾燥環境之 Me 值。

$$Me(\text{Ear Sorghum}) = -0.32337 + 1.02953 Me(\text{Kernel}) \dots\dots\dots (13)$$

在 Me 未知之情況下，可假設 Me 為方程式中一參數 (Parameter)，此概念由Henderson氏首先提出（註6），而其 Me 值之計算方法為自乾燥曲線上任取三點而換求截矩值。在此研究中，為求得所有實驗數據對於參數值之影響，以非線性迴歸分析求得 Me 與其他參數，其方法如下：

公式(9)經展開後， M 值表示為：

$$M(t) = Me + (Mi - Me) \text{Exp}(-A_4 t^{B_4}) \dots\dots\dots (14)$$

換言之，設定M(t) 與t之曲線關係為一包含Me, A₄與B₄ 三常數之非線性方程式，再由迴歸分析之結果可得Me值。

四、方程式合適性檢驗

一組多變數的數據可由不同的模式以描述，最佳的合適方程式 (fitting equation) 在解釋迴歸分析的結果和比較不同因素的影響十分重要。Daniel 與 Wood 氏 (註10) 描述尋求合適方程式之目的如下：(1)對一羣數據加以綜結，以得到適當的解釋公式或校正曲線。(2)肯定和證實建立之理論函數和幫助選擇適當的理論模式。在此研究中，為比較不同因子對於高粱穗乾燥速率之影響，適用之乾燥模式選擇十分重要。

有關之模式合適性量化比較標準如下：

- 1. R-square (相關係數)

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{SYY} \dots\dots\dots (15)$$

$$SYY = \sum(Y - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots (16)$$

\bar{Y} : Y值之平均值

- 2. RSS (Sum of Square Residual)

$$RSS = \sum(Y - Y')^2 \dots\dots\dots (17)$$

Y' : 預測值

- 3. S. E. (Standard Error of Estimate of Y value)

$$S. E. = \sqrt{\frac{RSS}{N-K}} \dots\dots\dots (18)$$

N : 數據之總數

K : 方程式之參數數目

除了量化之比較標準之外，殘差分佈圖 (Residual Plots) 在檢查模式之適用性上十分有用，此方式可適用於線性和非線性模式。在迴歸分析之基本假設中，殘差值彼此獨立，其平均值為零，變異數為常數，而且必為常態分佈，而常態分佈之條件可用以判斷一模式是否適用於此數據間自變數和應變數關係。常用的殘差圖Y軸為殘值 (residual)，X軸為預測值 (predicted value)。理想性的殘差分佈如圖 3 所示。圖 a 顯示模式之適用。若殘差圖之分佈如圖b為曲線性 (curvilinear)，模式即不能適切的說明數據間的關係。

實驗方法與結果分析

一、實驗方法

高粱穗基本乾燥試驗之設備與步驟已詳細描述於初步報告 (註 3) 。各試驗因子簡述如下：其中淺層乾燥 (厚度30cm以下) 之定名是為下與薄層單粒乾燥 (thin layer) 加以區分。

- (一) 淺層乾燥 (shallow layer drying)

熱風溫度：40°C

穀層厚度：10, 20, 30cm

熱風風速：0.2, 0.4, 0.6m/s

- (二) 浮動層乾燥 (float layer drying)

熱風溫度：40°C

穀層厚度：10, 20, 30cm

熱風風速：0.2, 0.4m/s

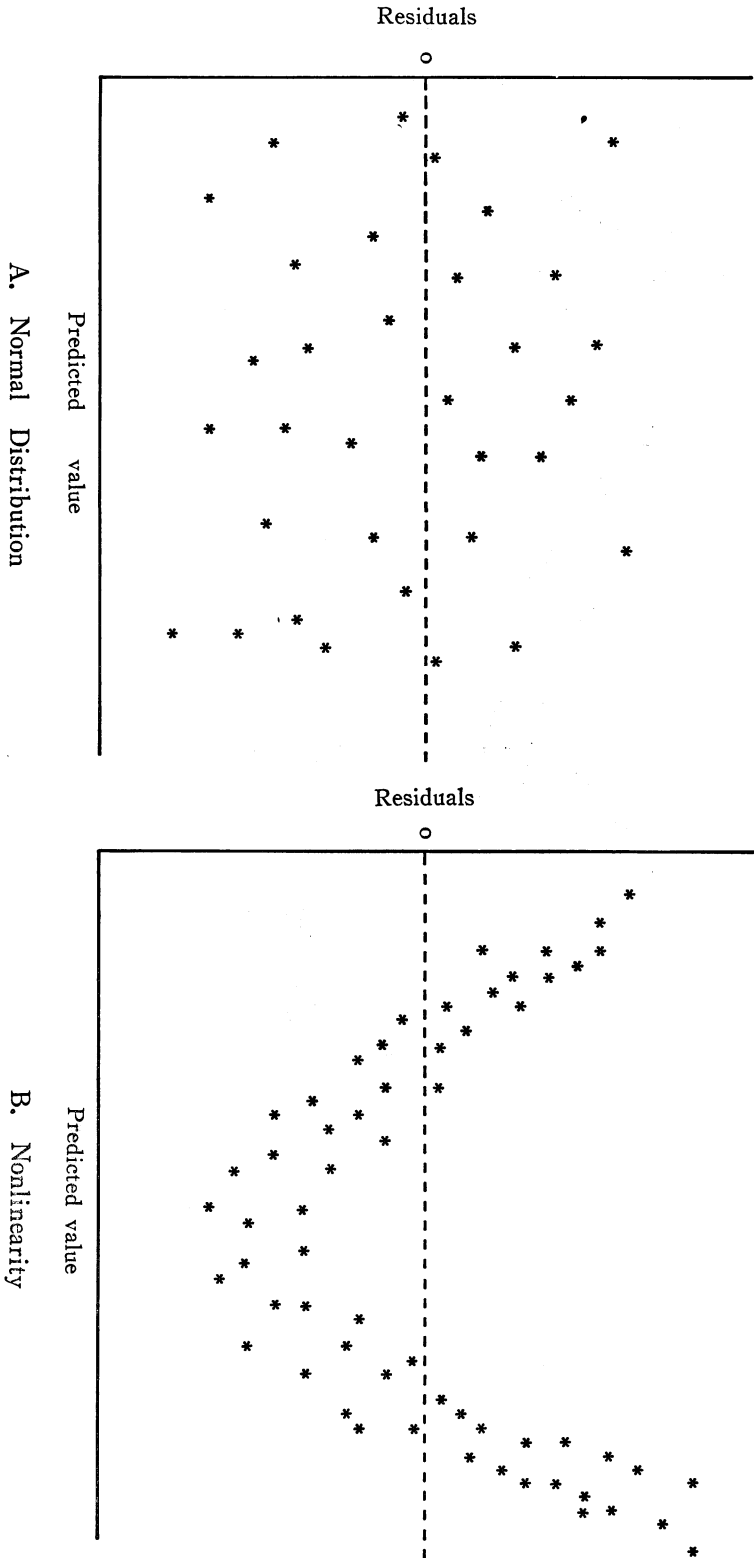


圖3. 迴歸分析殘差圖

二、數據分析

實驗所得穀物含水率與時間之數據，代入公式(7)，(9)，(10)以探討比較MR(t) 與t之適用模式。公式(11)與(12)被用以比較M(t) 與 t 值之適用模式。上述之迴歸分析利用個人電腦之統計套裝軟體加以執行。

公式(14)被用以探討 Me 值與比較M(t) 與t值之適用模式。為執行此非線性模式之迴歸分析，本文作者以BASIC 語言撰寫“NONLIN”程式，利用最小平方方法和Hartley氏⁽⁵⁾之修正式以求得此非線性模式之參考數和其他有關數值。

由於線性方程式之迴歸作業中，其Y值均為經過轉換(如 LnMR, LnM, Ln(-Ln(M)), Lnt), RSS值之比較並無意義。因此量化標準為相關係數R²值。另以定性標準殘差對預測值之散佈圖以判別模式之適用性。

結果與討論

一、乾燥曲線適用模式之比較

在淺層乾燥曲線之比較中，各乾燥模式經迴歸分析結果均有相當高的相關係數，然而其殘差圖 (Residual plots) 却明確顯示模式的適用性與否。以乾燥空氣風速2m/sec，高粱穗乾燥厚度 20cm之

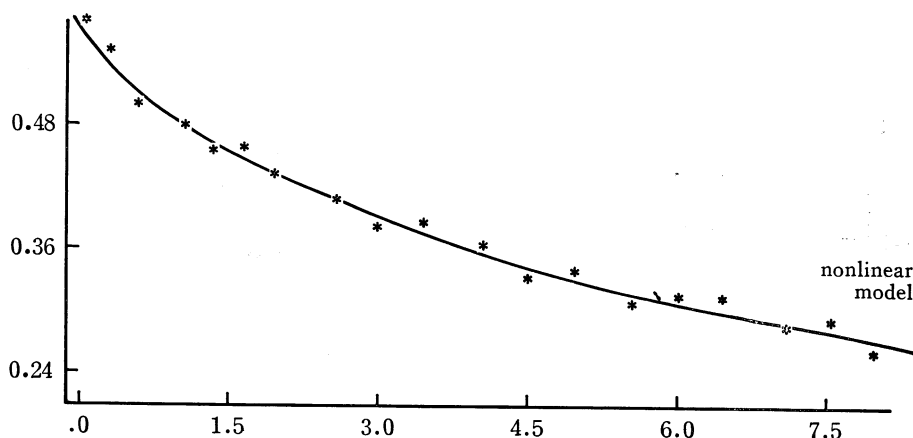


圖4—1. 淺層乾燥典線 (V=2m/sec, D=20cm)

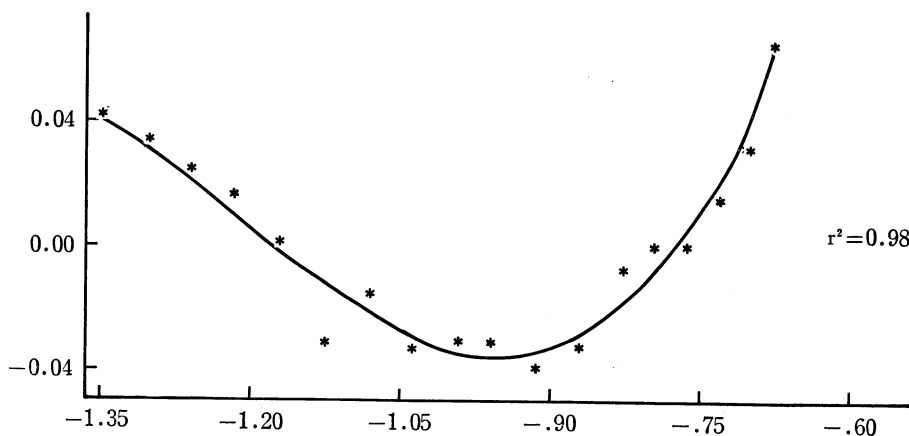


圖4—2. 殘差圖 (公式11)

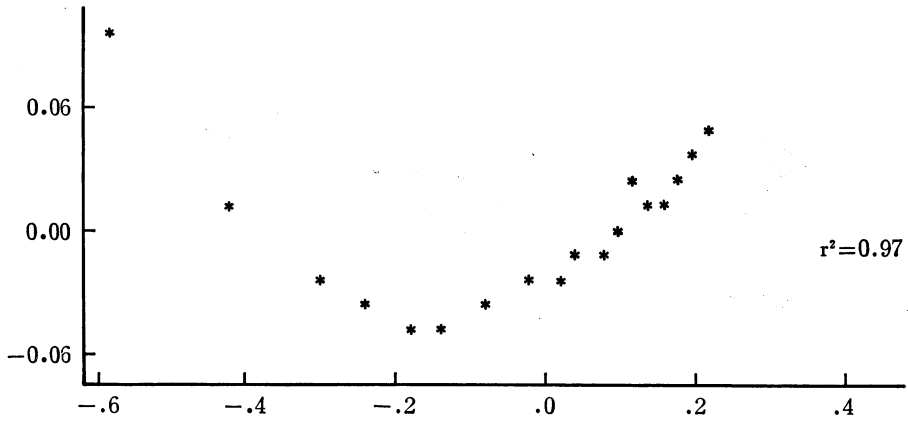


圖4-3. 殘差圖 (公式12)

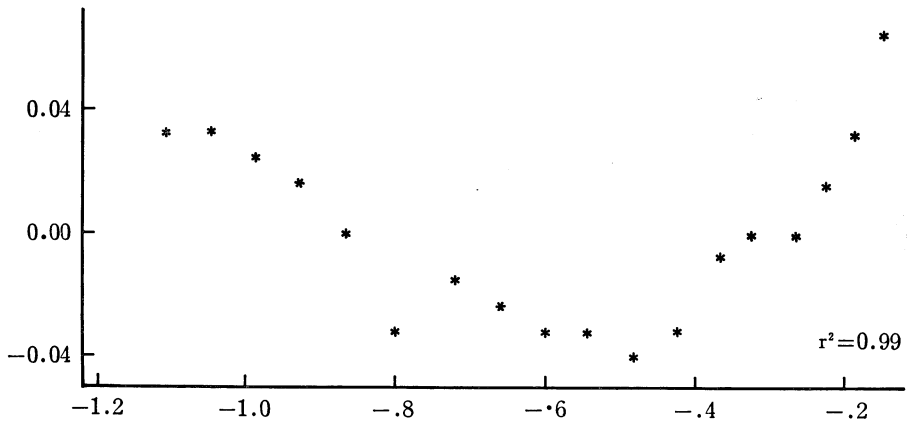


圖4-4. 殘差圖 (公式6)

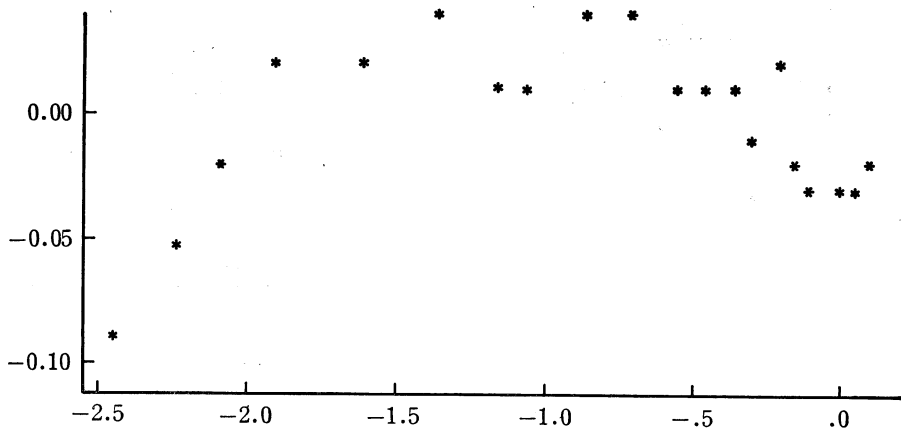


圖4-5. 殘差圖 (公式8)

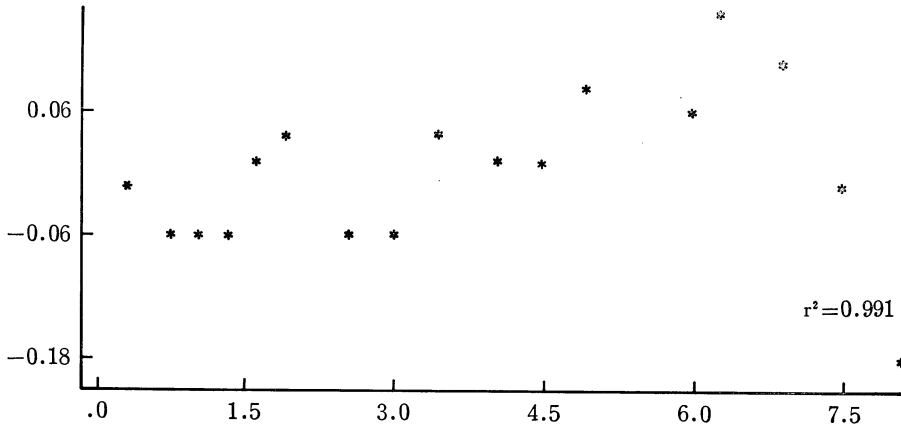


圖4—6. 殘差圖 (公式10)

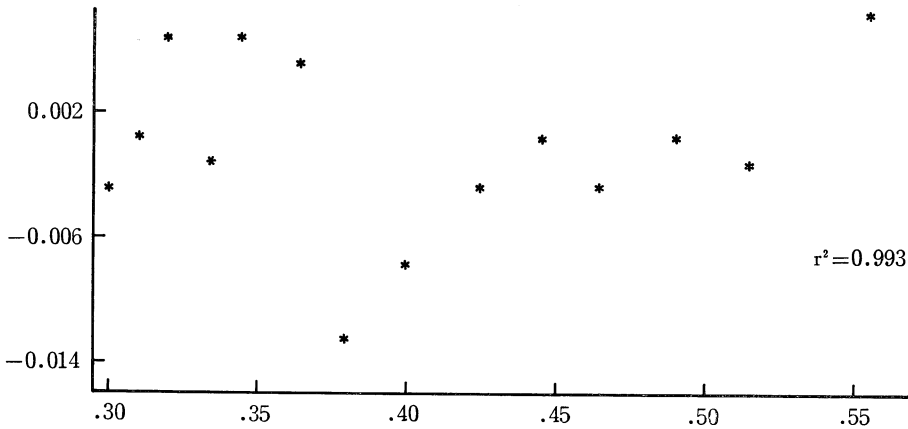


圖4—7. 殘差圖 (公式14)

乾燥曲線為例，典型的乾燥曲線如圖 4—1。各模式之殘差分佈圖如圖 4—2、4—3、4—4 和 4—5 均為曲線分佈。因此可知公式(7)、(8)、(11)與(12)不能表達此乾燥曲線含水率與時間之關係。圖 4—6 (公式 8)，4—7 (公式 14) 之殘差圖趨向常態分佈，表示此兩公公式可適用於乾燥曲線。由非線性模式所得之迴歸曲線繪於圖 4—1，可知此模式可適切表達穀物含水率與時間之關係。

上述六個模式迴歸分析結果之相關係數值均高達 0.98 以上，由此可知高相關係數並不能代表模式之適用，殘差圖為適當的檢查方法。在其他八種乾燥曲線中，僅有非線性模式具有分佈均勻之殘差圖。

浮動層乾燥曲線的迴歸分析結果與淺層乾燥數據的分析結果相近。除了非線性模式具有均勻分佈的殘差圖之外，其他模式之殘差圖均為曲線分佈。

綜合 15 種乾燥試驗數據，僅有非線性模式 (公式 14) 可用以適切表達兩種乾燥方式穀物含水率與時間之關係。

二、乾燥常數之物理意義

非線性模式其參數物理意義表達如下：

$$M = Me + (Mi - Me) \text{Exp}(-k * t^N)$$

Me為在特定乾燥環境下，穀物所能到達的終結含水率。K與N值為乾燥常數，K值愈大，M值隨時間的遞減率愈大，乾燥效果愈好。N值介於0與1.0之間。N值愈大，t值愈大，乾燥效果提高，因此K與N值可視為乾燥速率的比較指數。

15種乾燥曲線中，經非線性迴歸結果所得Me值列於表一。十三種相同乾燥環境下之Me值皆近15%，其他之兩乾燥曲線（浮動層乾燥，風速0.2m/sec，厚度10與20cm）所得Me值亦十分接近。因此在ERH/EMC Model未建立時，非線性迴歸分析可用以估算Me值。此種Me值與經由平衡含水率試驗測得之Me值需有進一步之比較。

表1. 非線性方程式之Me值

(一) 淺層乾燥

厚度單位：cm， 風速單位：m/sec

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 15.01 | 15.01 | 15.00 |
| 0.4 | 15.04 | 14.99 | 15.02 |
| 0.6 | 14.99 | 15.03 | 15.01 |

(二) 浮動層乾燥

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 11.93 | 12.50 | 15.00 |
| 0.4 | 15.08 | 14.94 | 15.02 |

淺層乾燥曲線迴歸所得K與N值列於表二。浮動層乾燥之結果於表三。

風速與乾燥厚度對於高粱穗乾燥之影響圖示於圖5。可知乾燥空氣之風速愈大，厚度愈薄，其K值愈大，即乾燥速率愈大，此為合理之結果。

N值於不同風速和乾燥厚度之結果於圖6。由圖中可知N值與風速、厚度無顯著之趨向。在假定風速與乾燥厚度無交感作用，進行無重覆數據變方分析，結果顯示風速與厚度對N值均無顯著性影響。

表2. 淺層乾燥之K與N值

(一) K值

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 0.327 | 0.233 | 0.163 |
| 0.4 | 0.434 | 0.302 | 0.200 |
| 0.6 | 0.458 | 0.345 | 0.290 |

(二) N值

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 0.702 | 0.812 | 0.875 |
| 0.4 | 0.641 | 0.604 | 0.632 |
| 0.6 | 0.560 | 0.675 | 0.697 |

表3. 浮動層乾燥之K與N值

(一) K值

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 0.092 | 0.059 | 0.045 |
| 0.4 | 0.131 | 0.162 | 0.201 |

(二) N值

| 風速 \ 厚度 | 10 | 20 | 30 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 0.970 | 0.917 | 0.989 |
| 0.4 | 0.837 | 0.785 | 0.673 |

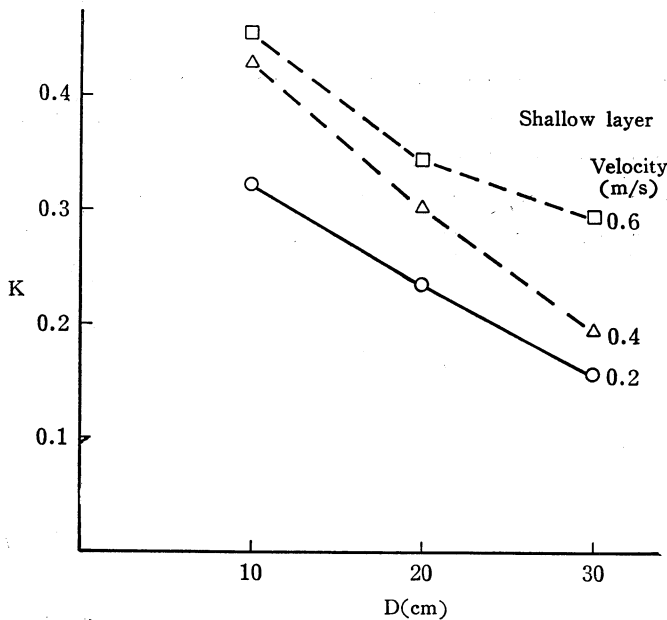


圖5. 淺層乾燥常數K值

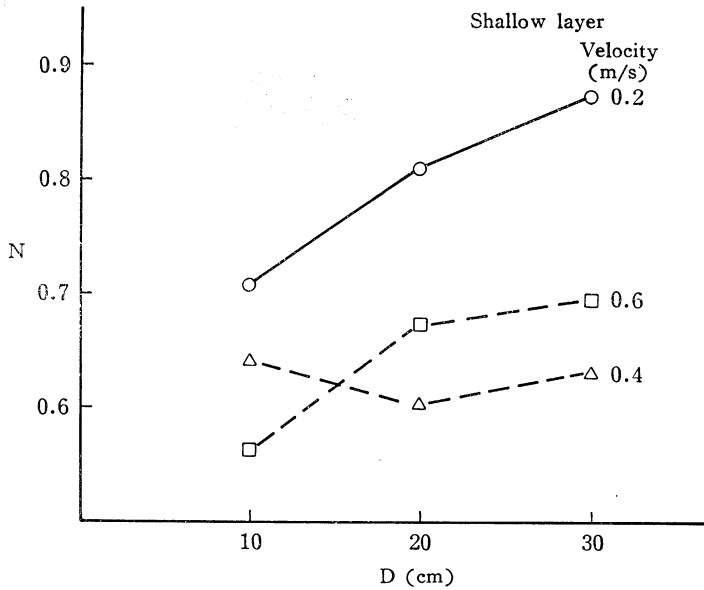


圖6. 淺層乾燥常數N值

兩種乾燥方式對K與N值之影響圖示於圖7、8。淺層乾燥的K值大於浮動層乾燥。在風速0.2 m/s之條件下，浮動層乾燥的速率十分緩慢，淺層乾燥之效果遠勝於浮動層乾燥，但是N值並無顯著差異。

三、發芽率與K、N值

高粱穗之發芽率與K、N值之關係圖示於9、10。由圖可知發芽率與乾燥速率並無相關性。

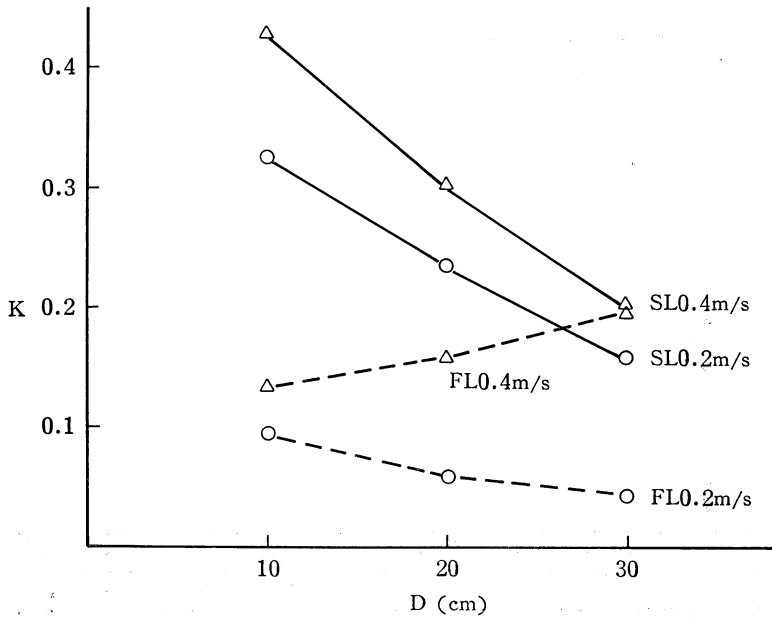


圖7. 兩種乾燥方式K值比較

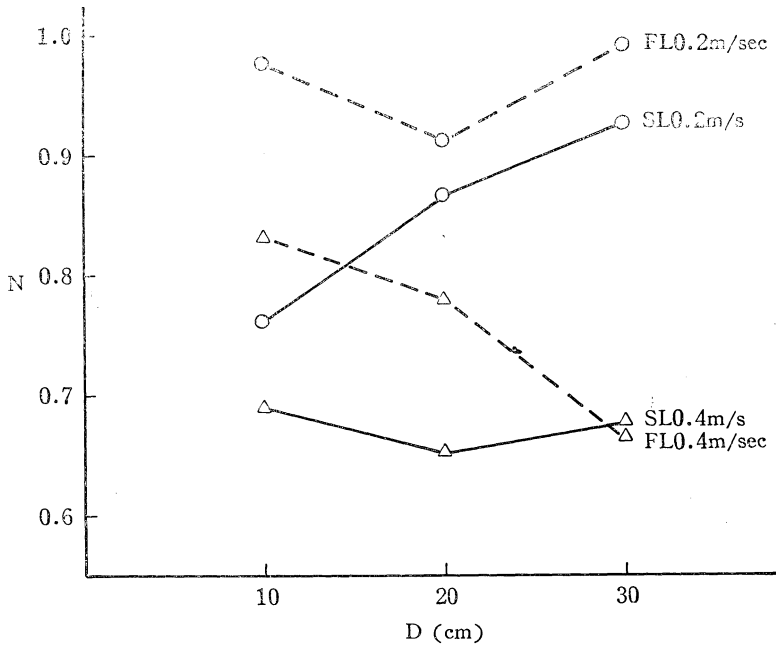


圖8. 兩種乾燥方式N值比較

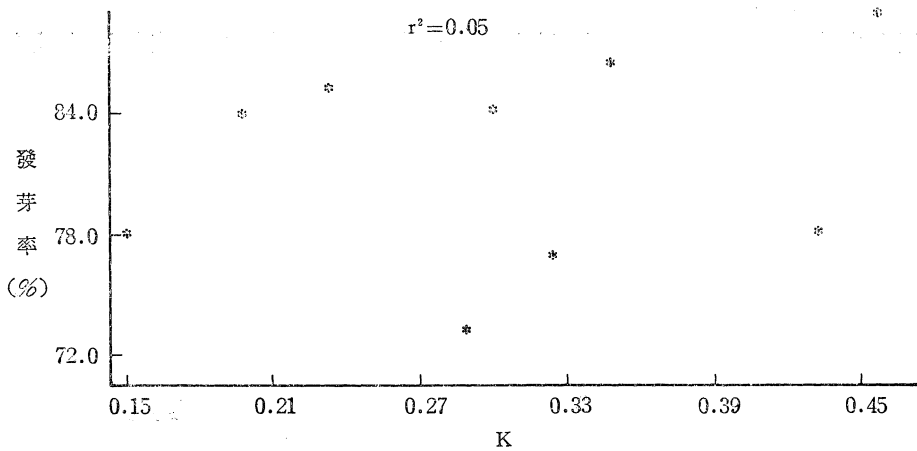


圖9. 發芽率與K值

四、水份損失率與乾燥方式

常用的水份損失率經計算後圖示於圖11。其值之分子為最初含水率與最後含水率之差值。分母為乾燥時間。由圖可知淺層乾燥之 R 值大於浮動層乾燥。然而在風速與厚度對於乾燥常數之影響比較上，R 值無規則性可言，此結果並不合乎實際之乾燥效果。因此可知傳統上利用水份損失率作為乾燥性能各影響因子之比較基準並非恰當。

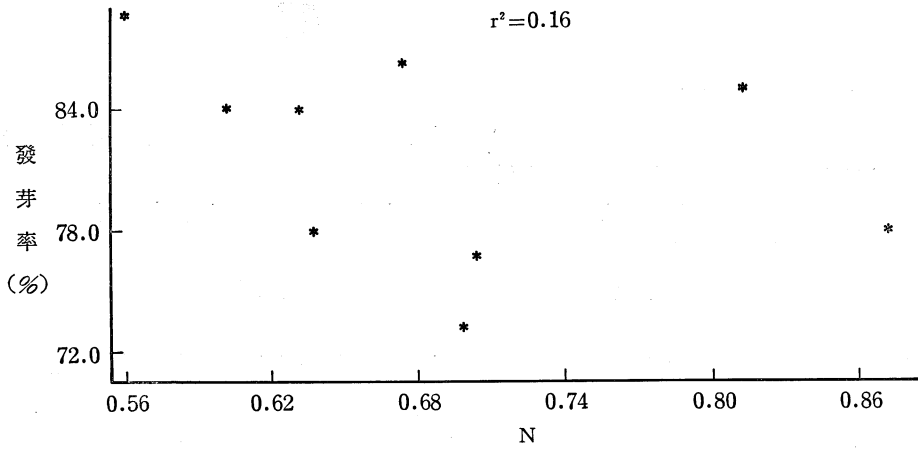


圖10. 發芽率與N值

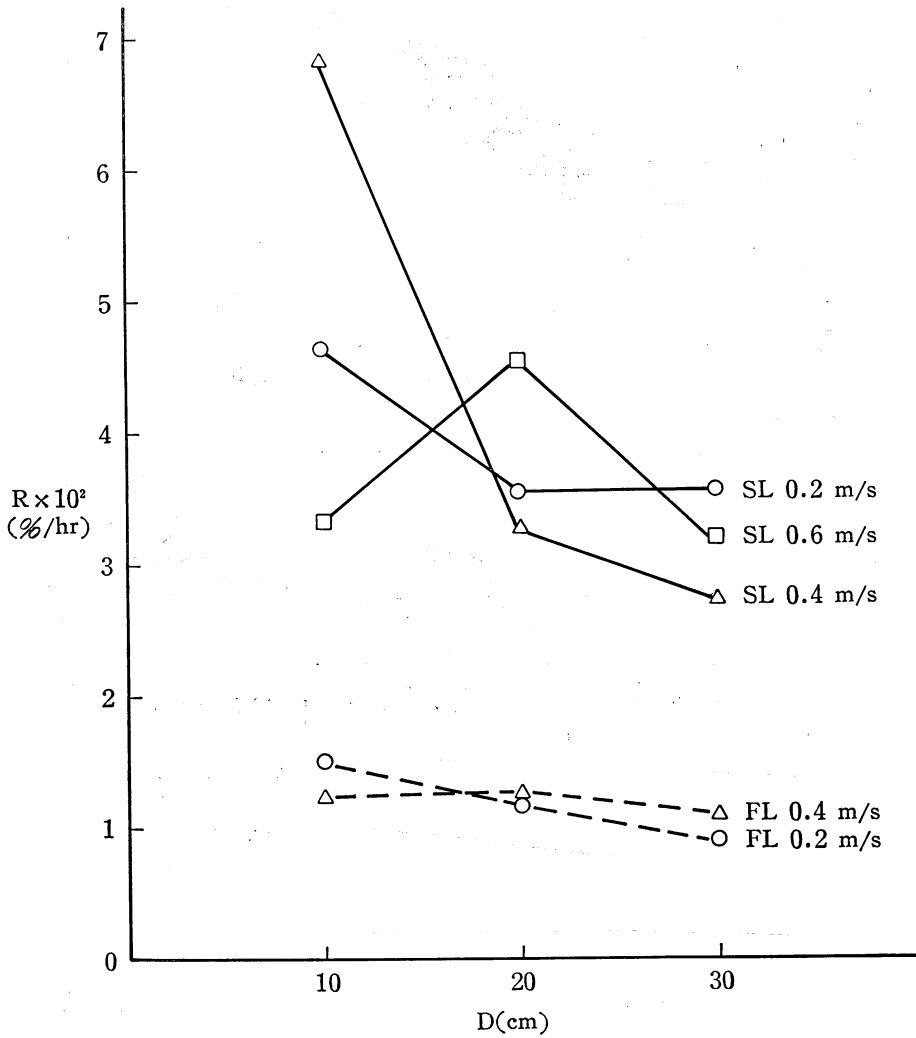


圖11. R值與乾燥方式

結 論

綜合上述研究，所得結論歸納如下：

- 一、在乾燥模式適用性之比較中，量化之標準值相關係數都高於0.95，但於殘差圖中卻有顯著之差異，因此以後者為比較模式適用性的準則較恰當。
- 二、在六種乾燥模式的比較中，非線性乾燥模式可適用於兩種乾燥方式和不同之風速、溫度條件。且由此式可求得乾燥試驗所需知Me值。
- 三、乾燥常數K值受風速、乾燥厚度顯著性的影響，N值所受之影響並不顯著，K與N值與發芽率並未有顯著相關性。
- 四、傳統所用水份損失率之計算方式因數據之選擇而容易有誤差，且不能代表真正之乾燥性能。

參考文獻

1. 馮丁樹•1985.飼料玉米乾燥特性之研究。中國農業工程學報31卷1期。PP. 37-55.
2. 馮丁樹•1986.高粱與玉米穗乾燥處理與調製機械化試驗研究—偏向式通風乾燥玉糧穗之研究。七十五年農機研究發展與示範推廣報告。臺灣省政府農林廳。PP. 128-138.
3. 陳加忠，賴建洲，曹之祖，游祥芳•1989.高粱穗之基本乾燥試驗。中華農業研究38卷2期。pp. 242-260.
4. Page, G. E. 1949. Factors Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers . MS Thesis, Purdue Univ.
5. Hartley, H. O. 1961. The modified Gauss-Newton method for the fitting of non-linear regression functions by least squares. Technometrics 3 : 269-280.
6. Henderson, S. M. 1974. Progress in developing in thin layer drying equation. Trans. of ASAE, 17(6) : 1167-1168, 1172.
7. Tnompson, T. L., R. M. Peart and G. H. Foster, 1968. Mathematical simulation of corn drying-a new model. Trans. of the ASAE. 11(4) : 582-586.
8. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall, 1974. Drying Cereal Grains. AVI. Pub. Co. INC. CONN.
9. Sharaf-Eldeen, Y. I., M. Y. Hamdy and J. L. Blaisdell, 1979. Falling rate drying of fully exposed biological materials: A review of mathematical models. ASAE paper 79-6522. ASAE, MI.
10. Daniel, C. and F. wood, 1980. Fitting Equations to Data, 2ed. edition, Wiley, N. Y.
11. Draper, N. and H. Smith, 1981. Applied linear Regression, 2ed. Wiley, N. Y.
12. Sharma, A. D., O. R. Kunze, H. D. Tolley, 1982. Rough rice drying as a two-compartment model. Trans. of ASAE 25(4) : 221-224.
13. Devore, J and R. Peck, 1986. Statistics, West Publ. Com, CA.
14. Chen. C. C. and R. V. Morey, 1988. Comparson of Four EMC/ERH Equations. ASAE paper 88-6068, ASAE MI.

A Study on the Drying Models of Ear Sorghum¹

C. C. Chen, C. C. Lai, and C. T. Tsao²

Summary

In this study, six drying models are evaluated for the fitting agreement of the drying curves of ear sorghum. The quantitative value of R-square and the residual plots are employed as the criterions. The results indicate that only the nonlinear drying model can appropriately describe the drying curves with different drying factors, such as drying methods, air flow rates, and thickness of grains. The final moisture content not available in present ERH/EMC models can be obtained by the nonlinear drying model. The K value of drying constant is significantly affected by above factors, however, N value is independent with these factors. Germination ratio for sorghum kernels with drying treatment has no relationship with drying constants. The traditional method to calculate the moisture loss ratio can not express adequately the effect of drying factors.

1. Contribution No. 1466 from Taiwan Agricultural Research Institute.

2. Associate researcher, Assistant researcher, Junior specialist, respectively, TARI, Taichung, Taiwan, R. O. C.