

# 荔枝果實之預冷與有關物性

## Precooling of Litchi Fruit and its Related Physical Properties

國立臺灣大學農機系教授

陳 貽 倫

Yi-luen Chen

### 摘 要

荔枝果實在靜止之冰水中預冷，其果皮下 7 mm 處果肉之半冷期 (half-cooling time) 為 4 分鐘、7/8 冷期為 9 分鐘。

在 5°C、96% RH 空氣環境中，荔枝果實在 13 天中失水 2.39% (wb)；其果皮則在 5°C、42.5% RH 環境中，經 4 天，其水分幾蒸散殆盡。

荔枝果實之比熱經測得為：0.9 cal/g-C。

應用有限微分之電腦程式以計算荔枝果實內熱傳現象，並計算果實內各部位之溫度變化。計算值與實驗值比較，求得其導熱度約為：1.6 KJ/HR-M-C。

根據計算，荔枝果實在水冷時，強水流對其冷卻速率影響不大。

### Abstract

A cooling rate experiment of Litchi fruit in ice water was conducted while a computer simulation of heat transfer within the fruit, using finite difference technique, was also programmed. By adjusting the computed results to agree with the experimental ones, the value of conductivity of the fruit was estimated to be 1.6 KJ/HR-M-C.

The Litchi fruit lost 2.39% water content in 13 days in a 5°C-96% RH environment, and the peel lost nearly all its water in 4 days in a 5°C-42.5% RH environment.

The specific heat of the fruit was found to be 0.9 cal/g-C.

In still ice water the half-cooling time of 4 minutes and seven-eighths cooling time of 9 minutes were determined for the fruit flesh (aril) at 7mm depth beneath the peel.

According to calculation, high cooling water flow is not affecting the cooling rate of the fruit significantly.

### 一、前 言

荔枝為我國原產，為果中珍品。今年省產荔枝 6 萬至 7 萬 5 千噸，產期集中 5 月至 7 月，產地南自屏東，北迄新竹。72 年南投地區產地價格每公斤 10~13 元，今年跌至每公斤 5 元，相差懸殊，其

原因可能是：外銷受阻，同時其他應時水果產量多。

外銷為解決盛產季節價格暴跌途徑之一，唯截止目前止，生鮮荔枝外銷數量有限，出口量尚不及生產量之 10%<sup>1</sup>。荔枝果實含糖量高、呼吸旺盛、容易失水乾燥、變褐、腐爛，因此不耐長期貯運<sup>4,5</sup>

。荔枝採收期平均只有15至20天，採取之荔枝果實，在26°C、75~80%RH環境中，若不包裝保濕，果皮水份在18小時後損失大半，果皮表面失去原有光澤；48小時後，果皮水份損失殆盡，組織變褐、硬化。<sup>1,3,23</sup>

低溫為延長荔枝貯藏壽命最有效的方法<sup>4</sup>荔枝最適當之貯藏為5°C，高溫增加腐損和褐變速率。溫度低於2°C，雖能抑制腐爛，但褐變反加快<sup>1</sup>。以PE袋包裝，在2~3°C下貯藏4週，維他命C稍減，pH值上升，總糖和還原糖含量無顯著變化，但滴定酸度減少，風味較甜而單調<sup>4</sup>。

荔枝採收後，先集中果園旁，剪枝去葉，裝塑膠箱或竹籃、運集貨場。在檢驗、裝櫃出口前，用冰水浸漬3~5分鐘，再包裝集中堆積，並在包裝上洒碎冰冷卻。輸日荔枝則必須多經一道燻蒸作業，以5公斤或10公斤紙箱包裝，暫置冷藏庫待運。集貨場至貨輪碼頭之間由冷凍貨櫃運送。

以品溫20°C之荔枝置於塑膠籃筐內，在3°C冷藏庫內，80分鐘後，果肉溫度降至10°C；以24°C之荔枝置於紙箱內，在同樣環境中則需14小時，其品溫才降至10°C；以5°C冰水浸3分鐘，果肉溫度降至13°C。<sup>7</sup>

果蔬採收後，原則上，愈快將品溫降低愈好，但以不引起凍害為度<sup>6</sup>。果蔬預冷之功能為在最短時間內，除去剛採收果蔬之田間餘熱(Field Heat)，以抑制其腐敗，並儘可能保持果蔬原有之鮮度和品味。預冷應在數小時甚至數分鐘之內完成。預冷方法有：水冷、風冷、真空冷，及加冰接觸等4種<sup>8,15</sup>。目前，除真空冷尚未使用外，其餘三種在荔枝外銷作業過程中，均有採用，惟在應用技術上尚需研究改進，某些荔枝物性之探討是進一步研究工作之基礎，本文範圍包括：

1. 實驗測定荔枝果實水冷之冷卻曲線。
2. 以數學程式模擬其冷卻曲線，並據以反求其熱傳係數。
3. 測定荔枝果實之含水率、比熱，及其在不同濕度環境中之失水變化。

## 二、文獻探討

### 1. 有關農產品熱傳理論

自身無熱源、初溫均一之均質球體、投入一恒溫之流體中，其熱傳現象可以下列諸式表達之：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$T(r, 0) = T_1 \quad (2)$$

$$\left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = h (T_s - T_M) \quad (3)$$

式中 t = 時間

r = 離球體中心距離

$\alpha$  = 熱擴散係數 (Thermal Diffusivity)

T = 品溫

T<sub>1</sub> = 最初品溫

T<sub>s</sub> = 物品表面溫度

T<sub>M</sub> = 冷媒溫度

R = 球體半徑

k = 物品之導熱度 (Thermal Conductivity)

h = 物品之對流熱傳係數 (Convection heat Transfer Coefficient)

上述聯立方程式之解析解已由 Arpacı 氏求為下列級數形式<sup>11</sup>：

$$\frac{T(r, t) - T_M}{T_1 - T_M} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \sin \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \left( \frac{\sin \lambda_n r}{\lambda_n r} \right) \quad (4)$$

式中 $\lambda_n$ 係由一含倍夏數 (Biot Number) 超越函數之分離係數所定義。此法之計算甚為繁複，且其假設之最初條件和周邊條件 (Initial and Boundary Conditions) 在處理農產品時不易達到。

當倍夏數介乎0.1和40之間，其解如(4)式；當倍夏數小於0.1時，即當k值大而h值小時，則物品內部可視為無溫度梯度存在，其解簡化為：

$$\frac{T - T_M}{T_1 - T_M} = \text{EXP}(-h A_s / C \rho V) \quad (5)$$

式中A<sub>s</sub> = 物體表面積

C = 物品比熱

$\rho$  = 物品密度

V = 物品容積

如k值小而h值大，倍夏數大於40時，其解為：

$$\frac{T - T_M}{T_1 - T_M} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{R}{r} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin n \pi \frac{r}{R} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{R^2} \right) \quad (6)$$

如物品形狀為無限平板 (Infinite slab)、無限圓柱體或球體，而其熱傳有關之物性為已知，則其解可繪成圖表，稱為Gurney-Lurie Chart，可應用於具規則形狀且均質之農產品。

Charm<sup>16</sup>和Hayakawa<sup>17</sup>分別以 Gurney-Lurie Chart 及熱傳原理計算罐頭食品在冷卻時之溫度分佈，由於罐頭之規則形狀有利於理論上之計算。

Raviv, Ropeman 和楊等應用有限微分技術解上述均質球體個體之熱傳方程式，其結果與解析法相當吻合，其優於解析法者為：物品之初溫不限定均一，冷媒溫度不限為固定<sup>9,21</sup>，此等有限微分技術進一步被 Baird, Misener, Holdredge 等氏引用以計算散裝果蔬之熱傳現象，冷媒溫度可以變數或函數輸入<sup>14,19,20</sup>。

在水冷情況，如水流速度大而造成強制對流，其對流熱傳係數約為 680 W/M<sup>2</sup>K，在靜水中冷卻，表面熱傳係數為 330 W/M<sup>2</sup>K<sup>11,13</sup>。

#### 2. 有關農產品之物性

為便利農產品熱傳、質傳之理論分析，其某些物性必先求出。但因難在農產品本身之種類繁多，國內尚未有人作有系統的蒐集或測定。

A. 比熱——1968年，Reidy<sup>22</sup>從事不同食物之熱性質研究，有關蔬果者經其測定之比熱為：

馬鈴薯	0.84	cal/g-C°
蘋果	0.89~0.98	cal/g-C°
胡瓜	0.98	cal/g-C°
黑莓漿	0.84	cal/g-C°

1971年，Charm<sup>18</sup>提供一實驗公式以估算食物之比熱：

$$C_p = 0.5X_f + 0.3X_s + 1.0X_m$$

式中

$C_p$  = 比熱值

$X_f$  = 食物所含脂肪量比

$X_s$  = 食物所含固體物比

$X_m$  = 食物所含含水率

上述四種蔬果，若以 Charm 公式估算，其比熱值各為：0.859、0.892、0.973、0.819，與 Reidy 氏之實驗值相近。經後人不斷試驗，許多蔬菜已有比熱值可供參考<sup>8</sup>，惟荔枝果實之比熱尚未見諸文獻。

B. 導熱度——1968年，Reidy<sup>22</sup>氏同時提供多種食品之導熱度值，其中有關果蔬者如下：

物品	含水率 (%)	品溫 (F°)	導熱度 (Btu/ft-hr-F)
蘋果	85.6	36~96	0.227
葡萄柚	—	86.5	0.26
蘋果汁	87.4	68	0.323
柳橙	—	86.5	0.2487
豌豆	—	37~62	0.18
蕃茄，生鮮果肉	81.5	35~90	0.32
草莓	—	6~76	0.39

上表雖未能包括所有果蔬之導熱度，但由此有限資料，對果蔬此項物性可有一概略範圍，有關估算食物之導熱度，Riedel (1949)、Maxwell (1904)、Kapelman (1966) 諸氏均有經驗公式，惟均限用於肉類及特定食物<sup>18</sup>。

C. 含水率與平衡含水率——洪、彭 (1983) 文中僅述及荔枝果皮之保水能力極弱、其果實之褐變與果皮之失水有極密切的關係。Tongdee 等<sup>24</sup>指出在 10°、7°、5°及 0°C 環境中貯存荔枝四十天，其水分損失各為 6.3、2.4、2.5及 1.7%。上二文均未述及荔枝果實本身之含水率值及其與環境之間彼此之水分平衡關係。此外，尚無別人作過這方面的實驗。

平衡含水率是吸濕性 (Hydroscopic) 物品之一項特性，物品在該含水率條件下與周遭環境空氣中之水分交換互相平衡。為使荔枝果實不失水，必須將它密封包裝，或者，將它貯存在與其含水率相平衡的空氣中。

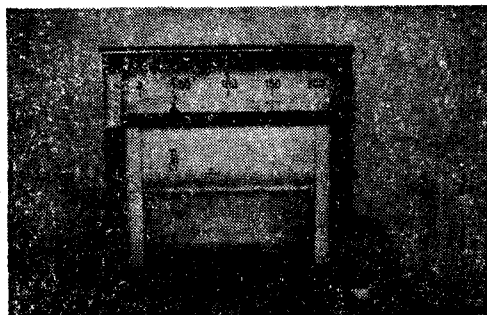
需長期貯存之五穀種子，如：米、玉米、麥、棉、黃豆、花生、高粱等，已有詳細平衡含水率資料 (且有經驗公式可供估算<sup>10</sup>)。1983年，李氏從事木耳平衡含水率測定<sup>2</sup>，其他果蔬尚缺資料。

### 三、材料與方法

荔枝果實	品種：黑葉
	果實大小：高 30~34mm
	徑 32~34mm
	比重：1.1
	初溫：27~28°C
	水溫：2~6°C
	冷卻方式：浸漬

冷卻試驗之荔枝果實插以 C-C 型熱耦測溫針三支，分別測定果實之表皮下，表皮下 7 mm 及核心三處之溫度變化，所獲信號由 Yamatake-

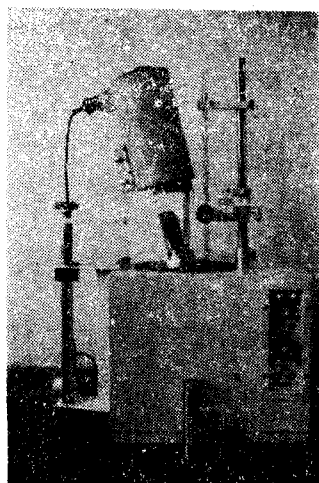
Honeywell NRM 90-2163-F-X-X (T) 溫度紀錄儀紀錄之。(圖一)



圖一 YAMATAKE-HONEYWELL 溫度紀錄儀

含水率以烤箱法測定。烤箱溫度為75°C，烘烤時間72小時，分別測定果皮、果肉、果核及整個果實之含水率。

荔枝果實之比熱是應用西德製 F.G. Bode & Co. 公司之 Record Calorimeter (圖二) 測定。測定時，先將荔枝搗碎成漿，裝入 250立方公分之不銹鋼容器內，加熱至70°C，然後將此容器和荔枝漿投入定量、定溫之水槽內，此水槽之周圍空氣之外層有定溫之水流通，以維持固定之環境條件，在一定時間過後，測定水槽溫升，即可計算荔枝果實之比熱。



圖二 RECORD CALORIMETER

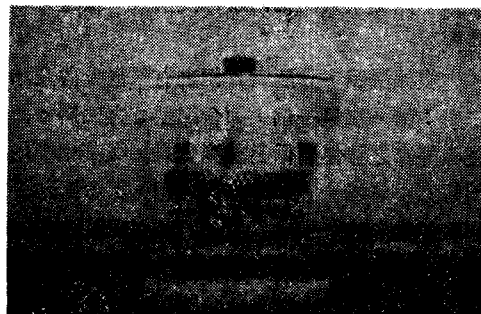
為觀察荔枝果實在不同濕度環境中之失水變化，調製 5 種鹽類之飽和溶液，分別為：

1.  $K_2CO_3 \cdot H_2O$
2.  $CuCl_2 \cdot H_2O$
3.  $NaCl$

#### 4. $KCl$

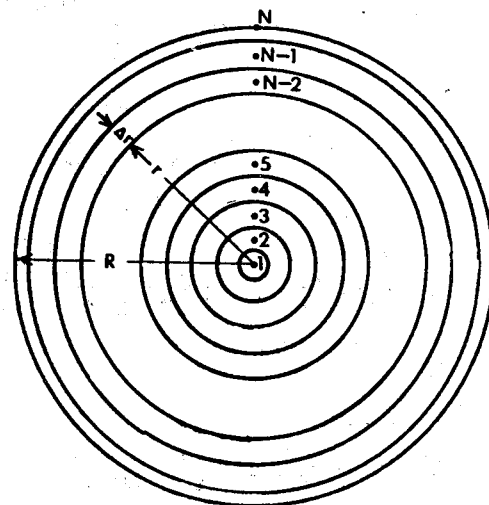
#### 5. $KNO_3$

在 5°C 下，以上 5 種鹽飽和溶液之蒸氣分別具有 42.5、68.6、75.6、87.1 及 96.0 % 之相對濕度。將新鮮荔枝果實或果皮懸置於此等溶液之飽和蒸氣環境中而密封之，定時測量其失重。其裝置如圖三。



圖三 飽和鹽溶液平衡濕度裝置

荔枝之導熱度則採間接計算法，即假設荔枝果實為均質球體，以熱傳理論及有限微分法求其表層、中層及裏層之熱傳平衡程式，以電腦計算，以求其在不同時間內各層面品溫之變化。模擬所得之冷卻曲線與實驗冷卻曲線及圖解法所得曲線互相比較，以決定其熱傳導係數值。



圖四 荔枝果實冷卻模擬之微分球體

假設荔枝果實為均質球體，沿此球體半徑，自中心至表層取等距離  $n$  個節點 (node)，則可將此球體劃分成  $n$  個同心、同壳厚之中空球體 (含節點 1 之球體為實心；含節點 1 與  $n$  之球體壳厚只及其他球體之半——為例外) 如圖四。如果，荔枝果實

之初溫及其熱性質、冷卻媒體溫度，對流熱傳係數等為已知，則可以對流及傳導熱傳公式計算在一定時間內，冷媒與果實最外層間之對流熱傳，及果實內相鄰各層之傳導熱傳。即，在第一時階 (time step) 內，由最外層逐步算到最裏層。俟最中心之品溫求得後，再開始第二時階之計算，如此，周而復始，直至果實內部溫度梯度消失，或達某一特定時間。

根據圖四，分隔成  $n$  個之有限微分薄壳球體分三類：第一類只一個，即含節點  $n$  之表層。此層球體與外界之熱傳關係為對流方式，與其相鄰內層之熱傳則屬傳導。第二類也只一個，即含節點 1 之中心層。其熱傳屬單向傳導，即熱傳只發生於與含節點 2 之球體之間。第三類之有限微分薄壳球體包括除上述兩類之外之其餘各中間層球體。其熱傳為雙向傳導方式。例如，含節點 3 之球體與含節點 2、4 之球體均有熱傳發生。

設荔枝果實之呼吸熱不計，則熱傳之熱交換源自果實之外之冷媒流體。故熱傳計算應由最外層開始。

第一類 (最外層) 薄壳球體之熱傳公式如下：

$$T_n^{m+1} = \frac{3\alpha\Delta t(R - \frac{\Delta r}{2})^2}{\Delta r [R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} T_{n-1}^m + \frac{3R^2 h \alpha \Delta t}{k [R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} T_{n-1}^m + \left\{ 1 - \frac{3\alpha\Delta t}{[R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} \times \left[ \frac{(R - \frac{\Delta r}{2})^2}{\Delta r} + \frac{R^2 h}{k} \right] \right\} T_n^m \quad (10)$$

式中  $\alpha$  = 果實之熱擴散係數 =  $k/\rho C$

第二類 (中心層) 薄壳球體之熱傳公式如下：

$$q_2 [4\pi(\frac{\Delta r}{2})^2] = \rho C \frac{4}{3}\pi(\frac{\Delta r}{2})^3 \frac{T_1^{m+1} - T_1^m}{\Delta t} \quad (11)$$

$$q_2 = k \frac{T_2^m - T_1^m}{\Delta r} \quad (12)$$

合併(11)、(12)式：

$$T_1^{m+1} = \frac{6\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} T_2^m + \left\{ 1 - \frac{6\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \right\} T_1^m \quad (13)$$

第三類 (各中間層) 球體之熱傳公式如下：

$$q_{i-1} [4\pi(r - \frac{\Delta r}{2})^2] + q_{i+1} [4\pi(r + \frac{\Delta r}{2})^2] = \rho C \frac{4}{3}\pi [(r + \frac{\Delta r}{2})^3 - (r - \frac{\Delta r}{2})^3] \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \quad (14)$$

$$q_{i+1} = k \frac{T_{i+1}^m - T_i^m}{\Delta r} \quad (15)$$

$$q_m [4\pi R^2] + q_{n-1} [4\pi (R - \frac{\Delta r}{2})^2] = \rho C \frac{4}{3}\pi [R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3] \frac{T_n^{m+1} - T_n^m}{\Delta t} \quad (7)$$

$$q_m = h (T_\infty^m - T_n^m) \quad (8)$$

$$q_{n-1} = k \frac{T_{n-1}^m - T_n^m}{\Delta r} \quad (9)$$

式中  $q_m$  = 冷媒傳與最外層球體之單位面積對流熱傳導量。

$q_{n-1}$  = 含  $n-1$  節點球體傳與含  $n$  節點球體之單位面積傳導熱傳量。

$R$  = 荔枝果實之半徑

$r$  = 果實任一部位離中心點之距離

$\Delta r$  = 半徑微分

$\rho$  = 果實密度

$C$  = 果實比熱

$T_i^m$  = 含  $i$  節點之薄壳球體在  $m$  時階時之品溫

$T_\infty^m$  = 冷媒在  $m$  時階時之溫度

$\Delta t$  = 時階微分

$k$  = 果實導熱度

合併(7)、(8)、(9)式：

$$q_{i-1} = k \frac{T_{i-1}^m - T_i^m}{\Delta r} \quad (16)$$

式中  $i$  為節點序數， $i$  大於 1、小於  $n$ 。合併(14)、(15)、(16)式：

$$T_i^{m+1} = \left\{ 1 - \frac{3\alpha\Delta t \left[ \left(r - \frac{\Delta r}{2}\right)^2 + \left(r + \frac{\Delta r}{2}\right)^2 \right]}{\Delta r^2(3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4})} \right\} T_i^m + \frac{3\alpha\Delta t \left(r - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{\Delta r^2(3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4})} T_{i-1}^m + \frac{3\alpha\Delta t \left(r + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{\Delta r^2(3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4})} T_{i+1}^m \quad (17)$$

式中  $r = (i-1) \Delta r$

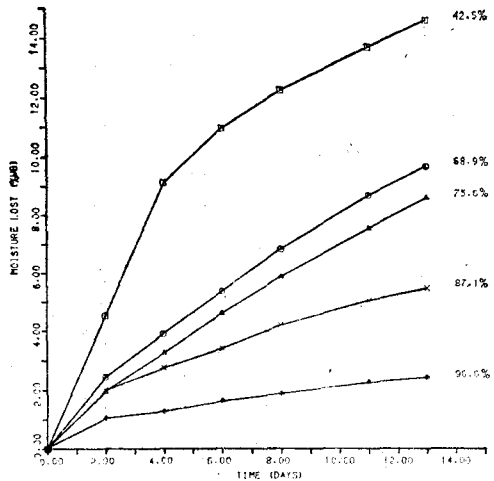
上述(10)、(13)及(17)三式為計算荔枝果實冷卻時果實內溫度變化之數學模擬公式。如果，果實內部之初溫溫度分佈及周遭冷媒溫度，對流熱傳關係為已知，則果實任何部位之溫度可以時間( $t$ )半徑( $r$ )及其導熱度等表達求得之。三式中中大括號內之數值若為正數，則電腦計算結果為收斂。

#### 四、結 果

1. 含水率——表一為荔枝枝果實各部分含水率之測定結果，測定前之果實貯存於 $3.5^\circ\text{C}$ ， $95\%\text{RH}$

表一、荔枝果實各部分之含水率

測定時間	含水率(% wb)			
	果皮	果內	果核	整粒
採 剛 收	74.78	—	—	—
6 小時後	71.52	—	—	—
20 天 後	71.09	88.06	48.49	76.92
25 天 後	72.20	82.99	46.57	77.75

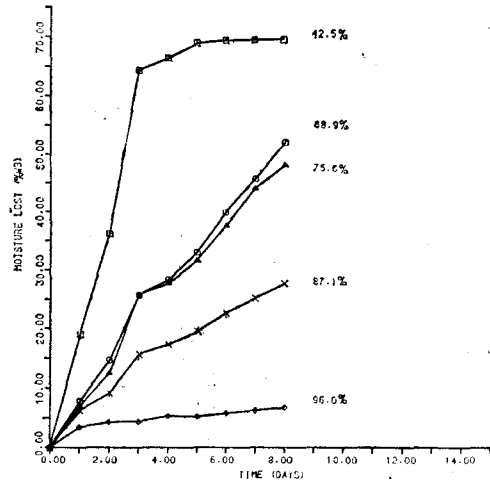


圖五、在 $5^\circ\text{C}$ 時，荔枝果實在不同相對濕度環境中之失水變化

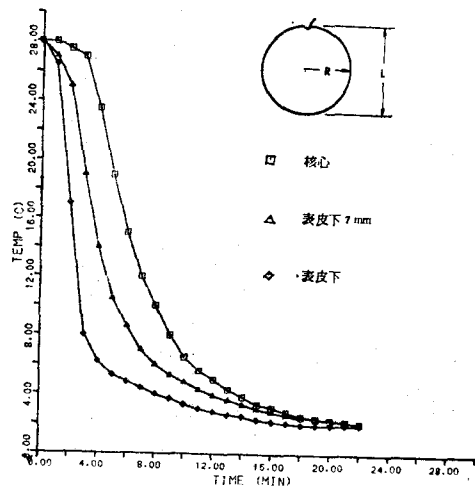
之冷藏庫內。

2. 比熱： $0.9 \text{ cal/g-K}$

3. 荔枝果實在不同濕度環境中之失水變化——圖五、六分別為整粒果實及果皮之實驗結果。



圖六、在 $5^\circ\text{C}$ 時，荔枝果皮在不同相對濕度環境中之失水變化



圖七、荔枝果實各部份實驗冷卻曲線

4. 熱 傳

A. 實驗部分

表二為荔枝果實水冷時，其果實中心部位溫度變化10次實驗之結果，圖七則為其果實表皮、果肉、及其核心部位之典型冷卻曲線。(第5次試驗)

表皮下7mm 果肉之半冷期 (half-cooling time) 約4分鐘，7/8 冷期約9分鐘；核心之半冷期約6分鐘，7/8冷期約12分鐘。

表二、以冰水冷卻時荔枝果實中心部位之溫度變化

實驗編號	果實初溫 (C°)	冰水溫度 (C°)	時間 (min)	中心部位溫度 (C°)	溫度比*	$\frac{\alpha t}{R^2}$ **			
1 (L=30) (R=16.5)	27	2.5	0	27	1.00				
			2	26.4	.98				
			4	24.5	.90				
			6	17	.59				
			8	11	.35				
			10	8	.22				
			12	5.6	.13				
			14	4.4	.08				
			2 (L=31) (R=17)	27	2.5	0	27	1.00	
						2	26.6	.98	
4	24	.88							
6	17	.59							
8	11.4	.36							
10	7.6	.21							
12	5.6	.13							
14	4.6	.09							
3 (L=33) (R=17)	27	2.5				0	27	1.00	
						2	26.5	.98	
			4	25	.92				
			6	18	.63				
			8	12	.39				
			12	8	.22				
			14	6	.14				
			4 (L=32) (R=16)	28	2	0	28	1.00	
						2	26.6	.95	
						4	16	.54	
6	9.6	.29							
8	6.1	.16							
10	4.5	.10							
12	3.6	.06							
5 (L=34) (R=16)	28	2				0	28	1.00	
						2	27.6	.98	
						4	23.5	.83	
			6	15	.50				
			8	10	.31				
			10	6.5	.17				
			12	5	.12				

6 (L=31) (R=16)	28	2	0	28	1.00				
			2	26	.92				
			4	18	.62				
			6	11	.35				
			8	6.3	.165				
			10	4.4	.085				
			12	3.4	.054				
			7 (L=33) (R=17)	28	6	0	28	1.00	
						2	26.5	.93	
						4	20.6	.66	
6	15.5	.43							
8	12.5	.295							
10	10	.18							
12	8.5	.11							
14	7.5	.07							
16	6.6	.03							
8 (L=32) (R=16.5)	28	6				0	28	1.00	
			2	26.6	.94				
			4	20	.64				
			6	15	.41				
			8	12	.27				
			10	10	.18				
			12	8.6	.12				
			14	7.6	.07				
			16	7	.045				
			18	6.5	.07				
9 (L=31) (R=16.5)	34	4	0	34	1.00				
			2	31	.90				
			4	24.5	.68				
			6	18	.47				
			8	13.5	.43				
			10	10.5	.32				
			12	9	.17				
			14	7.5	.12				
			16	6.4	.08				
			18	6.0	.066				
10 (L=32) (R=16.5)	34	4	0	34	1.00				
			2	27	.77				
			4	18.6	.49				
			6	12.6	.29				
			8	9.6	.19	0.186			
			10	7.6	.12	0.233			
			12	6.4	.08	0.279			
			14	5.8	.06	0.326			
			16	5.4	.05	0.372			
			18	5.0	.03	0.419			

\* 溫度比 =  $\frac{\text{中心部位溫度} - \text{冰水溫度}}{\text{果實初溫} - \text{冰水溫度}}$

\*\*  $\alpha$  = 熱擴散係數,  $\text{m}^2/\text{hr}$

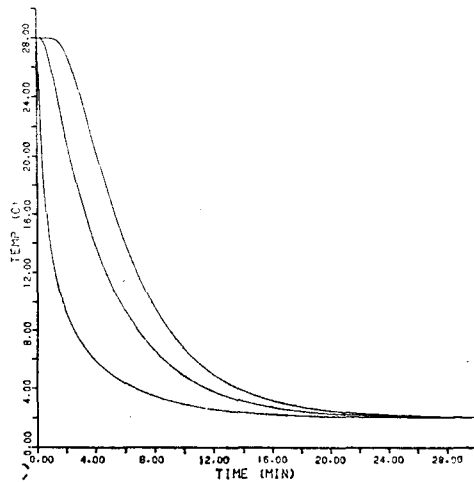
$R$  = 荔枝果實半徑, m

$t$  = 冷却時間, hr

### B. 模擬部分

根據前述(10)、(13)及(17)式作成電腦語言程式如附錄一, 其輸出為各節點 (Nodes) 每隔一分鐘之溫度變化, 如附錄二。模擬冷却時間共歷30分鐘, 圖八為一典型模擬冷却曲線, 在此模擬中, 輸入之數據如下:

1. 荔枝果實直徑,  $R=16\text{mm}$
2. 荔枝果實密度,  $P=1.1\text{ g/cm}^3$
3. 荔枝果實比熱,  $C=3.77\text{ KJ/kg-C}$
4. 導熱度,  $k=1.6\text{ KJ/HR-M-C}$
5. 對流熱傳係數,  $h=330\text{ W/M}^2\text{-C}$
6. 冷媒溫度,  $T_m=2\text{ }^\circ\text{C}$
7. 果實初溫,  $T_1=28\text{ }^\circ\text{C}$
8. 時間微分,  $\Delta T=0.25\text{ Sec}$
9. 節點總數,  $N=34$



圖八 荔枝果實各部份之模擬冷却曲線

## 五、討論與結論

### 1. 關於荔枝果實之含水率和失水實驗

就荔枝果實之保鮮和防止褐化的觀點而言, 果皮之含水率關係最為重要, 因為它與外界空氣直接接觸。根據果皮之失水實驗, 它在  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $96\%$  RH 之空氣環境中 8 天, 失水  $7\%$ 。此數據顯示: 在  $5\text{ }^\circ\text{C}$  時, 若不令果皮失水變乾, 貯藏空間之濕度必須保持在  $96\%$  RH 以上。或者, 若令其在  $96\%$  RH 之環境中不失水, 其貯存溫度須降至  $5\text{ }^\circ\text{C}$  以下。

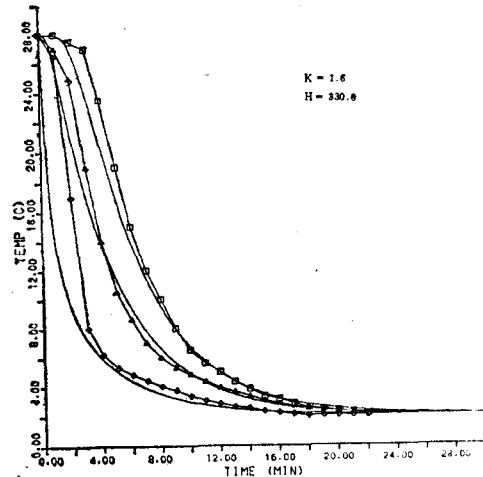
由整粒果實之失水實驗看出, 在  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $96\%$  RH 環境中, 歷時 13 天, 失水約  $3\%$ , 此項事實說

明: 雖然, 荔枝果實與果皮之間幾無水份輸導組織連繫, 果肉部分之水分仍慢慢透過果皮而蒸散。

果實整粒在  $42.5\%$  RH 條件下, 其開始四天失水較快, 四天後失水較緩和, 此點在果皮失水實驗中得到解釋, 即果皮之水分在四天內已蒸散殆盡。

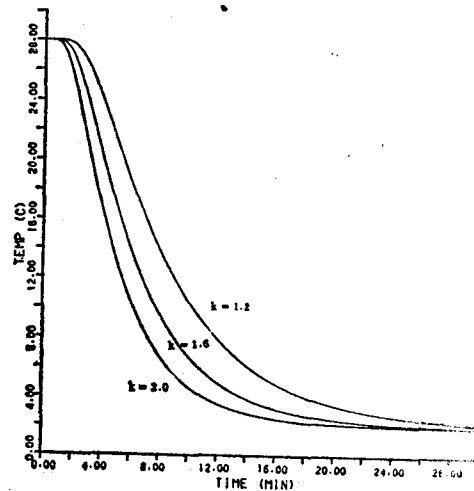
### 2. 關於荔枝果實之 $k$ 與 $h$ 值:

圖七和圖八各為在相同條件下之實驗及模擬結果, 將二者合併如圖九。除冷却之初期外, 二者相當吻合。



圖九 荔枝果實冷却實驗和模擬之比較

在模擬程式中, 其他輸入數值不變, 僅改變  $k$  值, 則果實核心之溫度變化如圖十。由圖可知其  $k$  值影響果實之冷却速度甚大。若  $h$  值固定, 則當  $k=1.6$ , 其模擬結果與實驗結果較吻合。



圖十  $k$  值對於荔枝果實核心模擬溫度變化之影響

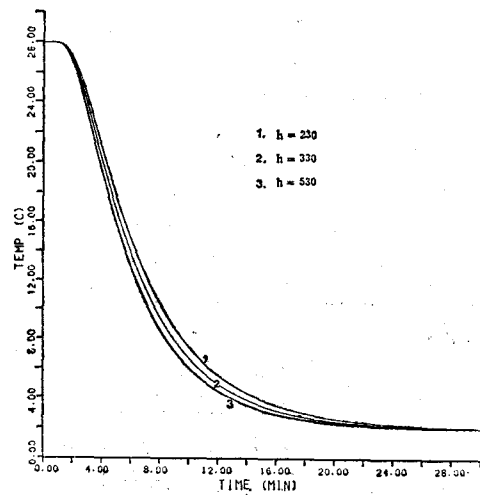


若  $k$  值及其他輸入保持不變，僅改變  $h$  值，則果實核心之溫度變化如圖十一。  $h$  值在  $380 \text{ W/m}^2\text{-C}$  以上時，影響冷卻速度不甚顯著。

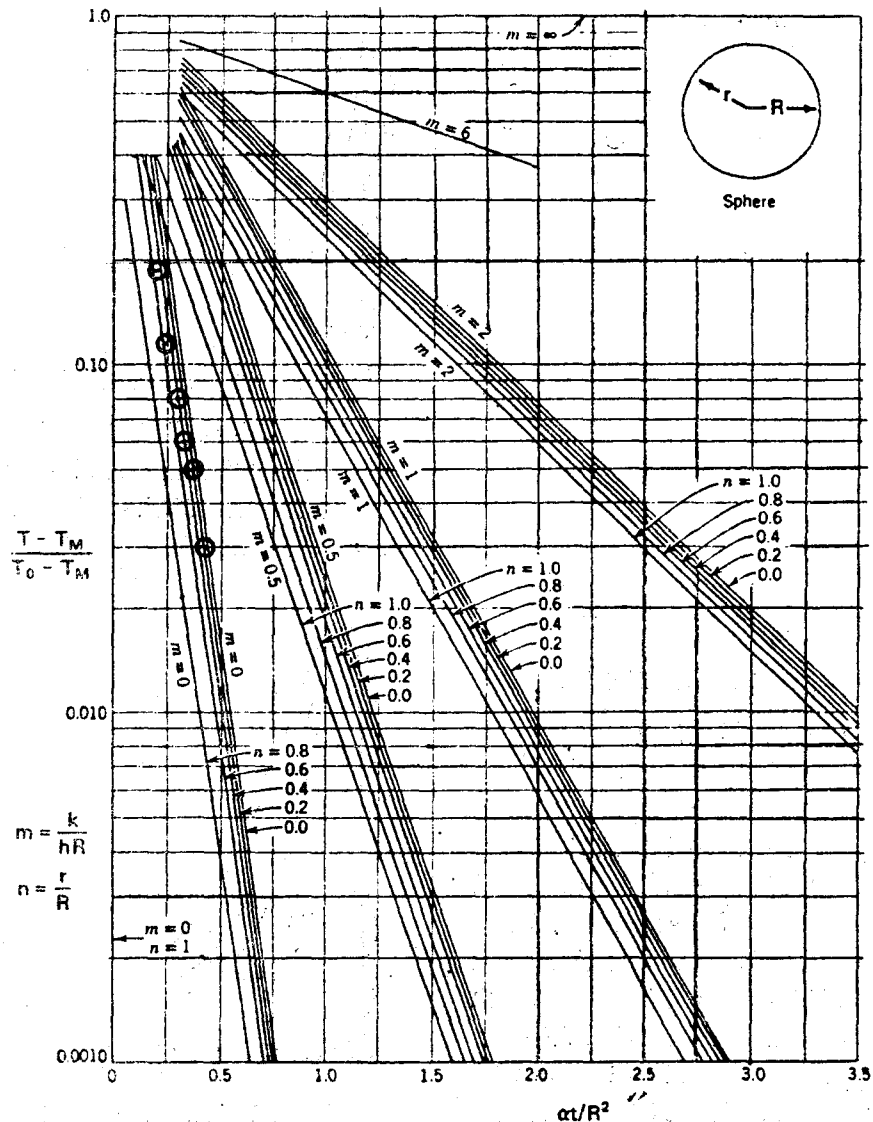
### 3. 關於預冷之速度

根據實驗，荔枝果實在表皮下  $7 \text{ mm}$  處及核心之半冷期分別為  $4$  分鐘及  $6$  分鐘； $7/8$  冷期分別為  $9$  分鐘及  $12$  分鐘。目前外銷荔枝包裝前之預冷措施為用冷水浸漬  $3 \sim 5$  分鐘，水溫有時高達  $16^\circ\text{C}$ ，預冷程度顯然不足。

任意取第10次冷卻實驗數據（表二）以記號  $\circ$  標於 Gurney-Lurie Chart（圖十二）內，此等記號均落在  $m = 0$  之範圍內，並約成一直線，此結果說明：①當以冰水冷卻荔枝果實時，對流熱傳係數甚大於導熱度；②當果實之  $k$ 、 $C$ 、 $\rho$  諸值已求得後，該表可以用來粗估荔枝果實之冷卻速度。



圖十一  $h$  值對於荔枝果實核心模擬溫度變化之影響



圖十二 荔枝果實冷卻實驗數據在 Gurney-Lurie Chart 上之位置

## 六、參考文獻

1. 李堂察、蔡書芬、俞永標, 1983, 溫度和數種不同處理對荔枝貯藏壽命之影響, 中國園藝 29(1):46-52。
2. 李國榮, 1983, 木耳平衡含水率, 國立臺灣大學農業工程研究所碩士論文, 臺北。
3. 林學正、江慧鈴, 1981, 荔枝果實貯運方法之研究, 中華農業研究 30(3):251-260。
4. 胡淼琳、張為憲、劉廷英, 1979, 荔枝之貯藏與防腐試驗, 研究報告第147號, 食品工業發展研究所。
5. 洪登村、彭昌祐, 1983, 荔枝果實收穫後保鮮效果之研究, 中國園藝 29(3):215-222。
6. 洪登村, 1983, 蔬果冷藏時的溫濕度管理, 食品工業 Vol. 15 No. 6, 15-18, 新竹。
7. 張長泉, 1982, 延長荔枝貯存期限以利外銷, 研究報告第282號, 食品工業發展研究所, 新竹。
8. 陳貽倫, 1984, 蔬果預冷, 農工學報 Vol. 30 No. 1, 41-53, 臺北。
9. 楊進添, 1984, 個體甘藍之預冷, 國立臺灣大學農業工程研究所碩士論文, 臺北。
10. Apricultural Engineers' Yearbook, 1983-1984.
11. Albright, L.D., 1976, Cooling short Cylinders in Air Using a Water Spray. Trans of ASAE 762-765, 770.
12. Arpaci, V.S., 1966, Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
13. ASHRAE Handbook and Product Directory. 1978, Applications, Chapter 27 methods of Precooling Fruits and Vegetables.
14. Baird, C.D. and J.J. Gaffney. 1976, A Numerical Procedure for Calculating Heat Transfer in Bulk Loads of Fruits or Vegetables. Transaction of ASHRAE 525-540.
15. Bennett, A.H., 1964, Precooling Fruits and Vegetable, Trans of ASAE 265-266, 270.
16. Charm, S., 1961, A method for Calculating the Temperature Distribution and mass Average Temperature in Conduction-Heated Canned Foods During Water Cooling. Contribution No. 388. Dept. of Food Technology, MIT, Cambridge, Mass.
17. Hayakawa, K. 1969, Estimating the Central Temperatures of Canned Food during the Initial Heating or Cooling Period of Heat Process, Food Technology Vol. 23, 1473-1477.
18. Heldman, D.R., 1977, FOOD PROCESS ENGINEERING, Reprinted Ed. AVI Publishing Co.,

Inc. Westport Connecticut, USA

19. Holdredge, R.M. and R.E. Wyse, 1982, Computer Simulation of the Forced Convection Cooling of Sugarbeets, Trans of ASAE 1425-1430.
20. Misener, G.C. and G.C. Shove, 1976, Simulated Cooling of Potatoes, Trans of ASAE pp. 954-961.
21. Raviv, M.G. and I.J. Kopelman. Prediction of Precooling Heat Transfer in Citrus Fruits. Technion-Israel Institute of Technology, Dept. of Food Engineering & Biotechnology, Haifa, Israel pp. 23-31.
22. Reidy, G.A. 1968, Thermal Properties of Foods and methods of Their Determination, M.S. Thesis Food Science Dept., Michigan State Univ.
23. Scott, K.J., B.I. Brown, G.R. Chaplin, M.E. Wilcox and J.M. Bain, 1982, The Control of Rotting and Browning of Litchi Fruit by Hot Benomyl and Plastic Film, Scientia Horticulturæ. 16 (1982) 253-262. CSIRO Division of Food Research, Australia.
24. Tongdee, S.C., K.J. Scott and W.B. McGlasson, 1982, Packaging and Cool Storage of Litchi Fruit. SCIRO Fd Res. Q. 1982, 42, 25-8.

## 七、致 謝

本文在行政院農業發展委員會計畫經費支持下完成。食品工業發展研究所錢明賽博士提供文獻資料。吳柏青先生協助實驗部分, 黃清白先生協助電腦程式, 青果合作社黃恩雄先生多次引導參觀產地及集貨現場, 了解外銷實務, 在此一併致謝。

## 附 錄 一

```
PROGRAM MAIN (OUTPUT,INDA,OUA,TAPES-INDA,TAPE6-OUA)
DIMENSION TEMP(100),RA(100)
C R : RADIUS
C P : DENSITY
C C : SPECIFIC HEAT
C HC : HEAT CONDUCTIVITY
C H : CONVECTIVE HEAT TRANSFER
C TF : TEMP OF COOLING MEDIUM
C TI : INITIAL TEMP OF FRUIT
C TT : TIME INTERVAL
C N : TOTAL NODES
1 READ (5,10) HC,H
  FORMAT(2F5.1)
10 IF (HC.EQ.0.0) GOTO 300
DATA TF,PI,P,C,R/2.0,28.0,1.1,3.77,16.0/
TT=0.25
N=34
TIME=0.0
WRITE (6,20) R,P,C
20 FORMAT(/T25,'RADIUS=',T60,F6.2,' (MM)'/T25,'DENSITY='
  ,T60,F6.2,' (G/CM**3)'/T25,'SPECIFIC HEAT=',
  ,T60,F6.2,' (KJ/KG-C)')
WRITE (6,30) HC,H,TF
30 FORMAT(/T25,'HEAT CONDUCTIVITY=',T60,F6.2,' (KJ/HR-M-C
  )'/T25,'CONVECTIVE HEAT TRANSFER=',T60,F6.2,
  ,T60,F6.2,' (C)')
WRITE (6,40) TI,TT,N
40 FORMAT(/T25,'INITIAL TEMP OF FRUIT=',T60,F6.2,' (C)'/
  ,T25,'TIME INTERVAL=',T60,F6.2,' (SEC)'/T25,
  ,T60,F6.2,' (C)')
  'TOTAL NODES=',T61,12)
WRITE (6,77)
WRITE (6,77)
```

```

C PRINT TITLE
  WRITE (6,50)
  FORMAT(1X,'TIME',T48,'NODE NO.')
```

C POSITION LOOP

```

DO 110 I=1,N
  J=N-I+1
  JN1=J-1
  JN2=J-2
  IF (J.EQ. 1) THEN
    TEMP(J)=HC7*TEMP(JN1)+HC8*TEMP(J)
  ELSE
    IF (J.EQ. N) THEN
      TEMP(J)=HC1*TEMP(JN1)+HC2*TEMP(JN2)+HC3*TEMP(J)
    ELSE
      X=3*ATN((RR**2*(3*RA(J)**2+RR4))
      HC5=X*(RA(J)-RR2)**2
      HC6=X*(RA(J)+RR2)**2
      HC4=1-(HC5+HC6)
      IF (HC4.LT. 0.0) THEN
        WRITE (6,150)
        FORMAT(/T10,'K4 < 0.0')
```

150

```

        GO TO 165
      END IF
      TEMP(J)=HC4*TEMP(J)+HC5*TEMP(JN1)+HC6*TEMP(JN2)
    END IF
  END IF
END IF
110 CONTINUE
C PRINT DATA
  X=AMOD(TIME,60.0)
  IF (X.EQ. 0.0) THEN
    X=TIME/60.0
    WRITE (6,120) X,(TEMP(I),I=1,17)
    FORMAT(1X,F3.0,17(1X,F5.2))
    IF (N.GT. 17) THEN
      DO 127 I=18,N,17
        K=I+16
        WRITE (6,125) (TEMP(J),J=I,K)
        FORMAT(4X,17(1X,F5.2))
      125 CONTINUE
      127 END IF
    END IF
    GO TO 100
  WRITE (6,160)
  160 FORMAT(/T10,'K3,K4,K8 > 0.0')
```

160

```

  165 WRITE (6,170)
  170 FORMAT('1', ' ')
  GO TO 1
  STOP
  END
300
```

C INITIALIZATION OF TEMP & CALCULATION OF R

```

DO 80 I=1,N
  RA(I)=(I-1)*RR
  TEMP(I)=T1
```

80

C CALCULATION OF COEFFICIENT

```

X=3*ATN((R-RR2)*(R-RR2)**3)
HC1=X*(R-RR2)**2/RR
HC2=X*R**2/HC
HC3=1-X*((R-RR2)**2/RR+R**2/HC)
IF (HC3.LE. 0.0) THEN
  WRITE (6,85)
  FORMAT(/T10,'K3 < 0.0')
```

85

```

  GO TO 165
END IF
HC7=6*ATN(RR**2)
HC8=1-HC7
IF (HC8.LT. 0.0) THEN
  WRITE (6,90)
  FORMAT(/T10,'K8 < 0.0')
```

90

```

  GO TO 165
END IF
X=0.0
GO TO 115
C TIME LOOP
100 TIME=TIME+TT
  IF (TIME.GT. 1800) GO TO 200
```

## 附 錄 二

		RADIUS=		10.00 (m)													
		DENSITY=		1.10 (g/cm <sup>3</sup> )													
		SPECIFIC HEAT=		3.77 (kJ/kg-C)													
		HEAT CONDUCTIVITY=		1.00 (kJ/hr-m-C)													
		CONVECTIVE HEAT TRANSFER=		330.00 (7/HR**2-C)													
		TEMP OF COOLING MEDIUM=		2.00 (C)													
		INITIAL TEMP OF FRUIT=		28.00 (C)													
		TIME INTERVAL=		.25 (sec)													
		TOTAL NODES=		17													
TIME	NODE NO.																
(MIN)	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.
0.	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
1.	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99	27.99
2.	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92	27.92
3.	25.03	24.40	24.75	24.33	23.34	23.14	22.24	21.15	19.37	18.39	16.82	14.89	12.92	10.06	6.75	6.06	4.63
4.	21.32	21.75	21.51	21.09	20.51	19.76	18.85	17.78	16.55	15.20	13.72	12.15	10.52	8.86	7.19	5.55	4.01
5.	18.33	18.48	18.23	17.85	17.32	16.64	15.81	14.86	13.80	12.63	11.39	10.09	8.75	7.41	6.08	4.80	3.58
6.	15.57	15.33	15.33	15.00	14.53	13.74	13.24	12.44	11.34	10.33	9.25	8.49	7.40	6.32	5.25	4.23	3.25
7.	13.07	13.02	12.00	12.06	12.19	11.70	11.11	10.45	9.71	8.92	8.08	7.22	6.34	5.46	4.61	3.76	3.01
8.	10.78	10.74	10.00	10.37	10.25	9.85	9.37	8.83	8.23	7.57	6.91	6.21	5.50	4.79	4.10	3.43	2.81
9.	9.27	9.24	9.12	8.94	8.68	8.35	7.96	7.52	7.03	6.51	5.96	5.39	4.82	4.25	3.69	3.15	2.65
10.	7.65	7.35	7.70	7.61	7.39	7.13	6.82	6.46	6.06	5.64	5.20	4.74	4.27	3.81	3.36	2.93	2.52
11.	6.75	6.73	6.02	6.53	6.33	6.14	5.94	5.73	5.52	5.28	4.94	4.59	4.21	3.83	3.46	3.10	2.75
12.	5.83	5.82	5.70	5.65	5.52	5.39	5.24	5.09	4.91	4.70	4.47	4.23	3.93	3.63	3.34	3.05	2.81
13.	5.11	5.10	5.03	4.95	4.84	4.70	4.54	4.35	4.14	3.92	3.68	3.44	3.20	2.95	2.72	2.49	2.28
14.	4.53	4.49	4.45	4.33	4.24	4.13	4.00	3.87	3.73	3.55	3.35	3.15	2.97	2.77	2.58	2.40	2.22
15.	4.02	4.01	3.98	3.93	3.85	3.76	3.65	3.53	3.39	3.23	3.02	2.84	2.73	2.62	2.47	2.32	2.18
16.	3.63	3.62	3.60	3.55	3.50	3.42	3.33	3.24	3.13	3.01	2.88	2.76	2.63	2.50	2.38	2.26	2.15
17.	3.32	3.31	3.29	3.25	3.21	3.15	3.08	3.00	2.91	2.81	2.71	2.61	2.51	2.40	2.30	2.21	2.12
18.	3.00	3.03	3.04	3.01	2.97	2.93	2.87	2.81	2.73	2.65	2.58	2.49	2.41	2.33	2.25	2.17	2.09
19.	2.73	2.85	2.84	2.82	2.79	2.75	2.70	2.63	2.59	2.53	2.47	2.40	2.33	2.26	2.20	2.14	2.08
20.	2.50	2.69	2.68	2.65	2.64	2.60	2.57	2.52	2.48	2.43	2.38	2.32	2.27	2.21	2.16	2.11	2.06
21.	2.30	2.50	2.55	2.53	2.51	2.49	2.46	2.42	2.39	2.35	2.30	2.26	2.22	2.17	2.13	2.07	2.03
22.	2.15	2.45	2.44	2.43	2.41	2.39	2.37	2.34	2.31	2.28	2.24	2.21	2.17	2.14	2.10	2.07	2.04
23.	2.05	2.30	2.36	2.35	2.33	2.32	2.30	2.28	2.25	2.23	2.20	2.17	2.14	2.11	2.08	2.06	2.03
24.	2.02	2.27	2.29	2.28	2.27	2.26	2.24	2.22	2.20	2.18	2.16	2.14	2.11	2.09	2.07	2.05	2.03
25.	2.02	2.24	2.24	2.23	2.22	2.21	2.19	2.18	2.16	2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.05	2.04	2.02
26.	2.19	2.19	2.19	2.18	2.18	2.17	2.16	2.15	2.13	2.12	2.10	2.09	2.07	2.06	2.04	2.03	2.02
27.	2.15	2.15	2.15	2.15	2.14	2.14	2.13	2.12	2.11	2.10	2.08	2.07	2.06	2.05	2.04	2.02	2.01
28.	2.13	2.12	2.12	2.12	2.11	2.11	2.10	2.09	2.09	2.08	2.07	2.06	2.05	2.04	2.03	2.02	2.01
29.	2.13	2.10	2.10	2.10	2.09	2.09	2.09	2.09	2.07	2.06	2.05	2.05	2.05	2.04	2.03	2.02	2.01
30.	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.04	2.04	2.03	2.03	2.02	2.01