

屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：生活與應用科學(二) (含生物科技/食品科學)

組 別：國中組

作品名稱：「優」質保存，「力」求釋放。探討不同檸檬加工保存法下維生素C的泡水釋放行為。

關 鍵 詞：優力卡檸檬、維生素C釋放、影像量化分析

編號：B7004

摘要

本研究以屏東九如優力卡檸檬為對象，探討冷凍、烘乾、日曬及糖漬等保存法對維生素 C 泡水釋放行為之影響。實驗透過碘液滴定監測 300 秒內的濃度變化，並利用 ImageJ 量化褐變指數 (BI)。

研究發現，加工對組織的破壞程度是影響釋放的關鍵：**冷凍組**因冰晶刺破細胞壁，釋放速率為新鮮組的 1.94 倍，且 BI 值最低 (-0.088)，達成保色與高效攝取的最佳平衡；**糖漬組**受高滲透壓影響，呈現「爆發式溶出」，總釋放量為全組之冠。在烘乾保存方面，**高溫快烘** (70°C) 雖褐變最重 (BI=0.558)，但因組織脆化，釋放效率優於**低溫慢烘** (35°C)，後者則因加工時間長且組織緊實，導致營養流失且溶出受阻。

綜合分析顯示，外觀褐變與營養釋放無絕對正相關。本研究證實，選擇能有效破壞細胞結構的加工法，能顯著提升實際飲用時的營養攝取效率，可作為未來檸檬產業開發機能性產品之參考。

壹、前言

(一) 研究動機

屏東縣九如鄉為臺灣重要的檸檬產區，其中優力卡（Eureka）檸檬因酸度高且富含維生素 C，常被加工成各式檸檬製品，並以泡水飲用作為日常補充營養的方式。為延長保存期限並因應產量過剩，家庭與市面上常見的保存方式包括冷凍、低溫烘乾及高溫烘乾等加工方法。

然而，多數相關討論多著重於「加工後營養是否被保存」，較少探討在實際飲用情境中，經不同加工保存的檸檬在泡水過程中，維生素 C 釋放到水中的速度與可飲用總量是否存在差異。

由於加工方式可能改變檸檬組織結構，進而影響營養成分溶出的行為，因此僅以外觀或加工前後的營養含量作比較，未必能完整反映實際飲用時所能攝取的營養。

基於上述動機，本研究以「泡水釋放行為」為核心，探討不同檸檬加工保存方式對維生素 C 釋放速率與釋放總量之影響，期望更貼近實際飲用情境，提供兼顧保存與飲用品質的參考依據。

(二) 研究目的

本研究以屏東九如優力卡檸檬為材料，透過控制泡水條件，比較不同加工保存方式的檸檬維生素 C 泡水釋放行為，具體目的如下：

1. 比較不同加工保存方式下檸檬於泡水過程中維生素 C 的釋放速率差異。

透過時間序列取樣，觀察各組樣本在短時間泡水中維生素 C 濃度隨時間變化的情形。

2. 分析不同加工保存方式對檸檬泡水後可釋放之維生素 C 總量的影響。

以單位新鮮檸檬重量為基準，比較各組在固定泡水條件下可釋放的維生素 C 總量。

3. 以影像分析方式量化檸檬褐變程度，作為加工造成組織與氧化狀態變化之輔助指標，並探討其與維生素 C 釋放行為之關聯性。

(三) 文獻探討

1. 屏東九如農產業概況

(1) 基本背景

屏東的氣候條件（高溫多雨、排水良好）極適合檸檬生長，主要產區集中在九如、里港、竹田、高樹等鄉鎮，占約 1,400~1,500 公頃（比例約8成）。品種以「優力卡」為主，皮薄、汁多、香氣濃郁，四季皆可生產（但夏季為盛產期）。

屏東檸檬的通路分配會隨季節波動，以下為常態性的分配比例估算：

通路類型	估計比例	說明
手搖飲與餐飲業	40% - 50%	最大宗通路，如清玉、五桐號、王品、瓦城等，需求穩定。
生鮮批發/零售	20% - 30%	包含北農等五大果菜市場、量販店及傳統市場。
加工廠收購	20% - 25%	用於榨汁、乾燥、酵素製作，或次級品的去化。
外銷	5% - 10%	主要銷往中國大陸、香港、東南亞及北美（冷凍原汁）。

(2) 加工方式

加工是穩定產地價格最重要的「調節閥」。當鮮果豐收導致價格崩跌時（曾跌至5元/台斤），農會與合作社會啟動收購加工。加工方式又可分成1. 初級加工：冷凍檸檬原汁、真空包裝鮮果汁。2. 深加工：檸檬片（低溫烘焙）、檸檬酵素、檸檬精油、洗潔劑、保養品。

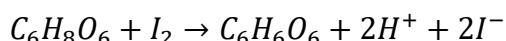
加工前後價格與價值比較(計算基準：以2022-2025年間平均市場波動為例（1台斤 $\approx$ 0.6 kg）。)

產品階段	產地價格/成本	市場售價（預估）	價值增益說明
鮮果(產地價)	\$10-\$30/台斤	\$40-\$60/台斤	隨產季變動大，易受供需影響。
冷凍原汁	約\$150-\$200/公斤 (含加工成本)	\$350-\$500/公斤	延長保鮮至 1 年，具通路議價權。
低溫烘焙檸檬片	約\$30 台斤(原料)	\$150-\$250/100g	產值提升約 5-8 倍；去水後輕量化，利於運輸。
檸檬酵素/生物科技	約\$30/台斤(原料)	\$1,000-\$3,000/瓶	產值最高，屬於生技健康產業範疇。

2. 氧化還原滴定原理

(1) 氧化還原滴定化學反應式

本研究採用「碘量法」測定維生素 C (*L-Ascorbic acid*, $C_6H_8O_6$) 之含量。維生素 C 具有強還原性，能與氧化劑碘分子 (I_2) 發生定量反應。其化學反應方程式如下：



氧化反應：維生素 C 失去電子，變成脫氫抗壞血酸 ($C_6H_6O_6$)。

還原反應：碘分子 (I_2) 得到電子，變成碘離子 (I^-)

(2) 碘溶液的組成

本研究使用之 0.1M 碘溶液為含有過量碘化鉀之穩定水溶液，其活性成分主要以 I_3^- 形式存在。在計算莫耳數比時，由於 I_3^- 與 I_2 對維生素 C 的氧化能力相同，且反應比均為 1:1，故仍以 I_2 作為計算基礎。

(3) 指示劑原理

滴定過程通常使用澱粉溶液作為指示劑。滴定中：滴下的碘液立即與維生素 C 反應消耗掉，溶液保持無色（或樣品原色）。滴定終點：當維生素 C 被耗盡，過量的一滴碘液會與澱粉結合，形成深藍色的錯合物。此時即達到終點。

(4) 計算原理

根據化學反應式，維生素 C 與碘的反應莫耳數比為 1:1。

Step1 計算碘的消耗莫耳數

$$n_{I_2} = 0.01M \times \frac{V_{I_2}(mL)}{1000} \left(\frac{L}{mL} \right)$$

Step2 換算維生素 C 的重量(mg)

維生素 C 的分子量約為 176.12g/mol。

$$W_{VC}(g) = n_{I_2} \times 176.12 = 0.01 \times \frac{V_{I_2}}{1000} \times 176.12 \times 1000$$

Step3 簡化計算公式

$$W_{VC}(mg) = V_{I_2} \times 1.7612$$

3. 檸檬的抗氧化成分

成分名稱	化學分類	對水溶解度 (25°C)	在實驗中的行為與影響	文獻支持 (參考號)
維生素 C (L-Ascorbic Acid)	水溶性維生素	極高 (~330 g/L)	主要滴定對象。反應速率最快，5 分鐘內即可大量溶出。	[十一],[十二]
聖草次苷 (Eriocitrin)	黃烷酮苷 (多酚)	中等	檸檬主要類黃酮。5 分鐘內部分溶出，對滴定有輕微貢獻。	[十三]
橙皮苷 (Hesperidin)	黃酮苷 (多酚)	極低 (~0.02 g/L)	主要存在於白皮層。因難溶於水，短時間浸泡幾乎不干擾。	[十四]
檸檬苦素 (Limonoids)	三萜類化合物	低	苦味來源。性質穩定，不與碘發生氧化還原反應。	[十五]
檸檬烯 (Limonene)	單萜類 (精油)	不溶 (脂溶性)	存在於表皮油胞。浮於水面，對水相滴定影響極微。	[十六]

4. 使用 ImageJ 進行影像灰階分析

(1) 分析原理

影像灰階分析法（**Grayscale Analysis**）是將彩色影像（**RGB**）轉換為單一通道的**8-bit** 影像。在**8-bit** 模式下，每個像素（**Pixel**）的亮度被量化為**0**至**255**之間的整數。其中**0**代表純黑（無反射光），**255**代表純白（完全反射）。褐變反應會產生深色的黑色素（**Melanins**）。隨著褐變程度增加，樣品表面吸收的光線增多、反射光減少，導致影像中的平均灰階值（**Mean Gray Value**）顯著下降。透過測量特定區域內的平均灰階值，可將肉眼觀察到的「變深」現象轉化為具備統計意義的數值。

(2) 操作步驟

Step1 影像導入：執行 **File>Open** 開啟樣品照片。

Step2 格式轉換（**8-bit Conversion**）：執行 **Image > Type > 8-bit**。此時影像會從彩色轉為黑白灰階。

Step3 設定測量參數：執行 **Analyze > Set Measurements...**，勾選 **Mean Gray Value**。

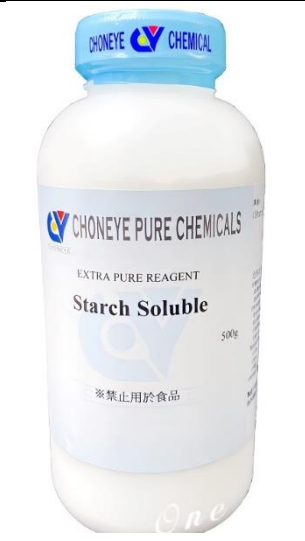
Step4 選取分析區域 (**ROI**)：使用工具列選取工具，圈選欲分析的樣品部位。

Step5 執行測量：執行 **Analyze > Measure**。

Step6 數據記錄：在彈出的 **Results** 視窗中讀取 **Mean** 數值。數值越低代表褐變程度越高。

貳、研究設備及器材

(一) 研究設備與藥品

		
滴定管+滴定架	燒杯	澱粉
		
果乾機	深色容量瓶	0.1M 碘溶液

參、研究過程或方法

(一) 研究材料

本研究以屏東縣九如鄉產之優力卡（Eureka）檸檬為實驗材料。為探討不同加工保存方式對檸檬泡水後維生素 C 釋放行為之影響，將檸檬分為新鮮組、冷凍組、自然風乾組、低溫烘乾組（35°C）、高溫烘乾組（70°C）及糖漬等不同處理方式。

(二) 加工保存處理方式

1. 新鮮組：檸檬切片後立即進行泡水實驗。
2. 冰箱冷凍組 (-18°C)：冷凍24小時。
3. 低溫組 (35°C)：使用果乾機以低溫烘乾方式去除水分。
4. 高溫組 (70°C)：使用果乾機以高溫烘乾方式進行加工保存。
5. 日曬風乾組：檸檬切片後於室溫通風環境下日曬風乾。
6. 糖漬組：檸檬切片後，用砂糖醃漬冷藏保存。

(三) 實驗步驟



1. 影像採集與量化

本研究利用 ImageJ 軟體測量樣本之平均灰階值 (Mean Gray Value)。該數值介於0至255之間，數值越低代表顏色越深（褐變嚴重），數值越高則代表顏色較趨近原色（較明亮）。

步驟1. 使用固定光源拍攝所有樣本。

步驟2. 將所有樣本照片轉為 8-bit 灰階格式。

步驟3. 利用 ImageJ 的圓形選取工具，選取檸檬果肉處（避開種子與果皮）。

步驟4. 記錄 Mean Gray Value，以此作為褐變程度之定量指標。

步驟5. 求出每組的計算 Mean Gray Value 平均值，再與新鮮檸檬的平均值求出每組的褐變指

$$\text{數 (Browning Index, BI), } BI = 1 - \frac{G_{\text{target}}}{G_{\text{fresh}}}。$$

$$\begin{cases} \text{BI} = 0 : \text{完全沒褐變（跟新鮮的一樣）。} \\ \text{BI 趨近} 1 : \text{褐變極其嚴重（接近黑色）。} \end{cases}$$

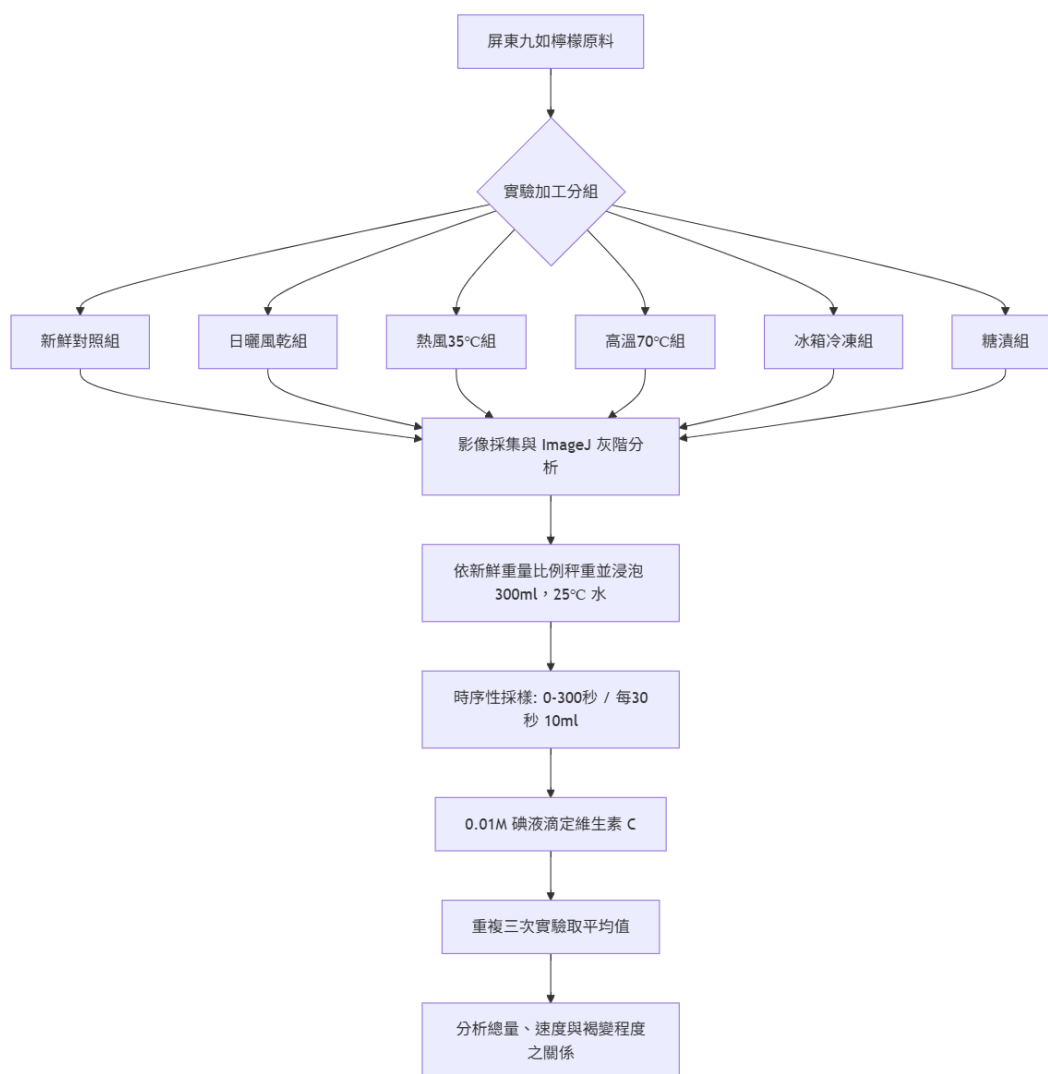
2. 時序性釋放與滴定實驗

步驟1. 將各組樣本（依新鮮重量為基準計算）放入300ml(約25°C)水中，在5分鐘內，每隔30秒抽取水樣10ml。接著對水樣執行碘滴定（維生素 C）。

步驟2. 每組實驗重複三次並取平均值。

3. 對不同加工方式的檸檬，比較泡水釋放出來的維生素 C 總量和維生素 C 的釋放速度，本研究所稱之「維生素 C 釋放總量」，係指在固定泡水條件下，泡水過程中測得之最高維生素 C 濃度與泡水體積（300 mL）之乘積，用以表示在該次泡水中可釋放至水中的維生素 C 總量。為比較不同加工保存方式下檸檬釋放維生素 C 的效率，進一步將上述釋放總量除以各組檸檬所對應之新鮮檸檬重量，作為單位新鮮檸檬重量下的維生素 C 釋放量，以利不同加工方式之比較。

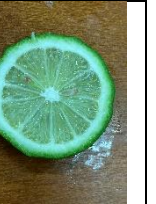
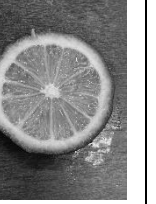
(四) 實驗流程圖



肆、研究結果

一、新鮮檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	159.8	159.6	148.1	161.4	147.2
(Max,min)	(245,110)	(245,110)	(247,12)	(245,84)	(249,63)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆新鮮檸檬(原始重量：114.1g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.5	0.88	300	26.4	0.09
60	0.9	1.58	290	45.9	0.16
90	0.8	1.41	280	39.4	0.14
120	0.9	1.58	270	42.8	0.16
150	0.9	1.58	260	41.2	0.16
180	1.3	2.29	250	57.2	0.23
210	1.4	2.46	240	59.1	0.25
240	1.8	3.17	230	72.9	0.32
270	1.8	3.17	220	69.7	0.32
300	1.8	3.17	210	66.5	0.32

新鮮檸檬重量 (g)	冷凍檸檬泡水釋放的維 生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量 (mg/g)
114.1	95.04	0.83295355

2. 第二顆新鮮檸檬(原始重量：95g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.3	0.53	300	15.8	0.05
60	0.5	0.88	290	25.5	0.09
90	0.6	1.06	280	29.6	0.11
120	0.6	1.06	270	28.5	0.11
150	0.8	1.41	260	36.6	0.14
180	0.8	1.41	250	35.2	0.14
210	0.9	1.58	240	38.0	0.16
240	0.9	1.58	230	36.4	0.16
270	0.9	1.58	220	34.8	0.16
300	1.2	2.11	210	44.4	0.21

新鮮檸檬重量 (g)	泡水釋放的維生素 C 總 量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
95	63.36	0.666947368

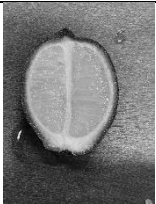
3. 第三顆新鮮檸檬(原始重量：100.5g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.4	0.70	300	21.1	0.07
60	0.4	0.70	290	20.4	0.07
90	0.8	1.41	280	39.4	0.14
120	1.0	1.76	270	47.5	0.18
150	1.0	1.76	260	45.8	0.18
180	1.0	1.76	250	44.0	0.18
210	1.1	1.94	240	46.5	0.19
240	1.1	1.94	230	44.5	0.19
270	1.2	2.11	220	46.5	0.21
300	1.4	2.46	210	51.7	0.25

新鮮檸檬重量 (g)	泡水釋放的維生素 C 總 量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
100.5	73.92	0.735522388

二、冷凍檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	176.3	174.7	157.8	162.9	172.6
(Max,min)	(242,136)	(244,66)	(244,17)	(243,103)	(240,90)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆冷凍檸檬(原始重量：110.7g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.7	1.23	300	37.0	0.12
60	1.5	2.64	290	76.6	0.26
90	1.5	2.64	280	73.9	0.26
120	2.3	4.05	270	109.3	0.40
150	1.9	3.34	260	86.9	0.33
180	3.0	5.28	250	132.0	0.53
210	3.3	5.81	240	139.4	0.58
240	3.8	6.69	230	153.8	0.67
270	4.3	7.57	220	166.5	0.76
300	4.2	7.39	210	155.2	0.74

新鮮檸檬 重量(g)	冷凍檸檬泡水釋放 維生素 C 總量(mg)	每克檸檬釋放 的維生素 C(mg/g)
110.7	227.04	2.05

2. 第二顆冷凍檸檬(原始重量：103g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.5	0.88	300	26.4	0.09
60	0.7	1.23	290	35.7	0.12
90	1.0	1.76	280	49.3	0.18
120	1.0	1.76	270	47.5	0.18
150	1.0	1.76	260	45.8	0.18
180	1.4	2.46	250	61.6	0.25
210	1.6	2.82	240	67.6	0.28
240	1.6	2.82	230	64.8	0.28
270	1.7	2.99	220	65.8	0.30
300	1.7	2.99	210	62.8	0.30

新鮮檸檬重量 (g)	冷凍檸檬泡水釋放的維 生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
103	89.76	0.87

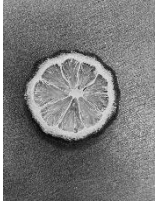
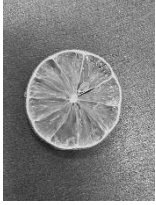
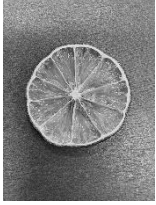
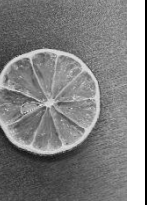
3. 第三顆冷凍檸檬(原始重量：81.64g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.5	0.88	300	26.4	0.09
60	0.5	0.88	290	25.5	0.09
90	0.8	1.41	280	39.4	0.14
120	0.9	1.57	270	42.3	0.16
150	1.0	1.76	260	45.8	0.18
180	1.2	2.11	250	52.8	0.21
210	1.2	2.11	240	50.7	0.21
240	1.1	1.94	230	44.5	0.19
270	1.2	2.11	220	46.5	0.21
300	1.5	2.64	210	55.4	0.26

新鮮檸檬重量 (g)	冷凍檸檬泡水釋放的維 生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
81.64	79.2	0.97

三、低溫烘乾檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	153.0	152.7	145.2	143.5	140.0
(Max,min)	(251,0)	(253,19)	(255,7)	(229,0)	(249,7)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆低溫乾燥檸檬(原始重量：103g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.3	0.53	300	15.8	0.05
60	0.3	0.53	290	15.3	0.05
90	0.4	0.70	280	19.7	0.07
120	0.4	0.70	270	19.0	0.07
150	0.6	1.06	260	27.5	0.11
180	0.6	1.06	250	26.4	0.11
210	0.6	1.06	240	25.3	0.11
240	0.7	1.23	230	28.3	0.12
270	0.9	1.58	220	34.8	0.16
300	0.9	1.58	210	33.3	0.16

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維生 素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生 素 C 含量(mg/g)
103	39	47.52	0.461359

2. 第二顆低溫乾燥檸檬(原始重量：117g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.5	0.88	300	26.4	0.09
60	0.6	1.06	290	30.6	0.11
90	0.6	1.06	280	29.6	0.11
120	0.6	1.06	270	28.5	0.11
150	0.7	1.23	260	32.0	0.12
180	0.8	1.41	250	35.2	0.14
210	0.8	1.41	240	33.8	0.14
240	0.8	1.41	230	32.4	0.14
270	0.9	1.58	220	34.8	0.16
300	1.0	1.76	210	37.0	0.18

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維 生素 C 總量 (mg)	每克檸檬的維 生素 C 含量 (mg/g)
117	37.44	52.8	0.451282

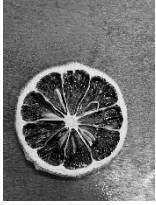
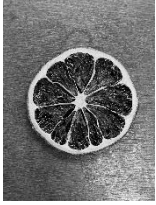
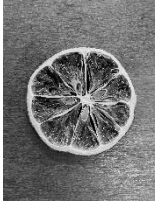
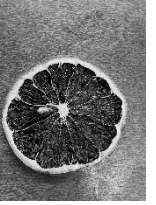
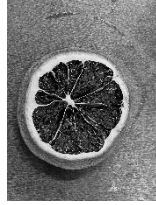
3. 第三顆低溫乾燥檸檬(原始重量：100g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.3	0.53	300	15.8	0.05
60	0.5	0.88	290	25.5	0.09
90	0.6	1.06	280	29.6	0.11
120	0.7	1.23	270	33.3	0.12
150	0.7	1.23	260	32.0	0.12
180	0.7	1.23	250	30.8	0.12
210	0.7	1.23	240	29.6	0.12
240	0.8	1.41	230	32.4	0.14
270	0.8	1.41	220	31.0	0.14
300	0.9	1.58	210	33.3	0.16

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
100	28	47.52	0.4752

四、高溫烘乾檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	67.5	64.3	97.8	60.5	53.1
(Max,min)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(253,0)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆高溫烘乾檸檬(原始重量：140g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.7	1.23	300	37.0	0.12
60	0.8	1.41	290	40.8	0.14
90	0.8	1.41	280	39.4	0.14
120	0.9	1.58	270	42.8	0.16
150	1.1	1.94	260	50.3	0.19
180	1.5	2.64	250	66.0	0.26
210	1.5	2.64	240	63.4	0.26
240	1.9	3.34	230	76.9	0.33
270	2.1	3.70	220	81.3	0.37
300	2.3	4.05	210	85.0	0.40

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維生 素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
140	22.41	121.44	0.867429

2. 第二顆高溫烘乾檸檬(原始重量：135g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.7	1.23	300	37.0	0.12
60	1.0	1.76	290	51.0	0.18
90	1.7	2.99	280	83.8	0.30
120	1.5	2.64	270	71.3	0.26
150	1.5	2.64	260	68.6	0.26
180	1.6	2.82	250	70.4	0.28
210	1.9	3.34	240	80.3	0.33
240	1.9	3.34	230	76.9	0.33
270	2.0	3.52	220	77.4	0.35
300	2.1	3.70	210	77.6	0.37

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維生 素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
135	21.33	110.88	0.821333

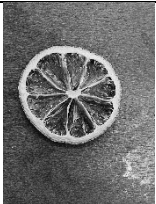
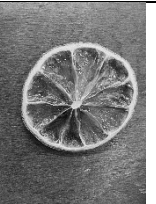
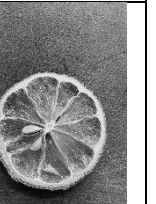
3. 第三顆高溫烘乾檸檬(原始重量：135g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.6	1.06	300	31.7	0.11
60	0.6	1.06	290	30.6	0.11
90	0.8	1.41	280	39.4	0.14
120	0.8	1.41	270	38.0	0.14
150	0.9	1.58	260	41.2	0.16
180	1.0	1.76	250	44.0	0.18
210	1.3	2.29	240	54.9	0.23
240	1.4	2.46	230	56.7	0.25
270	1.7	2.99	220	65.8	0.30
300	2.0	3.52	210	73.9	0.35

新鮮檸檬重量 (g)	烘乾後重量	泡水釋放的維生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
135	28.47	105.6	0.782222

五、日曬風乾檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	118.6	138.2	100.8	114.7	131.3
(Max,min)	(254,1)	(255,0)	(253,0)	(254,3)	(252,0)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆日曬烘乾檸檬(原始重量：120g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.4	0.704	300	21.12	0.0704
60	0.6	1.056	290	30.624	0.1056
90	0.6	1.056	280	29.568	0.1056
120	0.7	1.232	270	33.264	0.1232
150	1.0	1.76	260	45.76	0.1760
180	1.1	1.936	250	48.4	0.1936
210	1.1	1.936	240	46.464	0.1936
240	1.2	2.112	230	48.576	0.2112
270	1.2	2.112	220	46.464	0.2112
300	1.4	2.464	210	51.744	0.2464

新鮮檸檬重量(g)	曬乾後的重量	泡水釋放的維生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
120	35.3	73.92	0.616

2. 第二顆日曬烘乾檸檬(原始重量：130g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.4	0.704	300	21.12	0.0704
60	0.4	0.704	290	20.416	0.0704
90	0.5	0.88	280	24.64	0.0880
120	0.5	0.88	270	23.76	0.0880
150	0.7	1.232	260	32.032	0.1232
180	0.7	1.232	250	30.8	0.1232
210	0.8	1.408	240	33.792	0.1408
240	1.0	1.76	230	40.48	0.1760
270	1.3	2.288	220	50.336	0.2288
300	1.8	3.168	210	66.528	0.3168

新鮮檸檬重量(g)	曬乾後的重量(g)	泡水釋放的維生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
130	31.8	95.04	0.731077

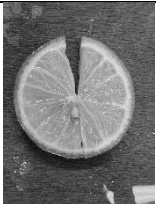
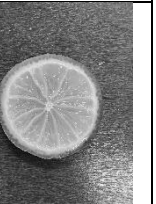
3. 第三顆日曬烘乾檸檬(原始重量：138g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	0.5	0.88	300	26.4	0.0880
60	0.5	0.88	290	25.52	0.0880
90	0.6	1.056	280	29.568	0.1056
120	0.6	1.056	270	28.512	0.1056
150	0.8	1.408	260	36.608	0.1408
180	0.9	1.584	250	39.6	0.1584
210	1.1	1.936	240	46.464	0.1936
240	1.1	1.936	230	44.528	0.1936
270	1.1	1.936	220	42.592	0.1936
300	1.2	2.112	210	44.352	0.2112

新鮮檸檬重量 (g)	曬乾後的重量	泡水釋放的維生素 C 總量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量 (mg/g)
138	34.3	63.36	0.45913

六、糖漬法檸檬

(一) 褐變程度分析

原始照片					
灰階照片 (8-bit)					
Mean	166.3	157.2	160.1	164.1	175.7
(Max,min)	(247,15)	(248,1)	(246,68)	(250,90)	(250,116)

(二) 泡水結果分析

1. 第一顆糖漬檸檬(原始重量：96g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	2.3	4.048	300	121.44	0.4048
60	3.5	6.16	290	178.64	0.6160
90	2.2	3.872	280	108.416	0.3872
120	3.0	5.28	270	142.56	0.5280
150	2.0	3.52	260	91.52	0.3520
180	2.0	3.52	250	88	0.3520
210	3.7	6.512	240	156.288	0.6512
240	3.0	5.28	230	121.44	0.5280
270	2.3	4.048	220	89.056	0.4048
300	2.5	4.4	210	92.4	0.4400

新鮮檸檬重量 (g)	泡水釋放的維生素 C 總 量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
96	195.36	2.035

2. 第二顆糖漬檸檬(原始重量：122g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	2.8	4.928	300	147.84	0.4928
60	5.5	9.68	290	280.72	0.9680
90	4.1	7.216	280	202.048	0.7216
120	5.7	10.032	270	270.864	1.0032
150	3.6	6.336	260	164.736	0.6336
180	4.5	7.92	250	198	0.7920
210	3.7	6.512	240	156.288	0.6512
240	4.2	7.392	230	170.016	0.7392
270	5.4	9.504	220	209.088	0.9504
300	3.2	5.632	210	118.272	0.5632

新鮮檸檬重量 (g)	泡水釋放的維生素 C 總 量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
122	300.96	2.466885246

3. 第三顆糖漬檸檬(原始重量：105g)

浸泡時間(秒)	0.01M 的碘液消耗量(ml)	維生素 C 含量(mg)	檸檬水 體積(ml)	檸檬水 中的維 生素 C 含量 (mg)	檸檬水的 維生素 C 濃度 (mg/ml)
30	2.2	3.872	300	116.16	0.3872
60	2.5	4.4	290	127.6	0.4400
90	3.0	5.28	280	147.84	0.5280
120	3.2	5.632	270	152.064	0.5632
150	2.7	4.752	260	123.552	0.4752
180	2.2	3.872	250	96.8	0.3872
210	2.6	4.576	240	109.824	0.4576
240	2.2	3.872	230	89.056	0.3872
270	2.5	4.4	220	96.8	0.4400
300	2.1	3.696	210	77.616	0.3696

新鮮檸檬重量 (g)	泡水釋放的維生素 C 總 量(mg)	每克檸檬的維生素 C 含量(mg/g)
105	168.96	1.609142857

伍、討論

一、褐變程度分析

我們將各種加工法的 Mean Gray Value 整理如下表，並求出平均值後，結果如下表：

編號\加工法	各種加工法的 Mean Gray Value					
	新鮮 檸檬	冷凍 檸檬	低溫乾燥 檸檬	高溫烘乾 檸檬	日曬 檸檬	糖漬 檸檬
1	159.8	176.3	153	67.5	118.6	166.3
2	159.6	174.7	152.7	64.3	138.2	157.2
3	148.1	157.8	145.2	97.8	100.8	160.1
4	161.4	162.9	143.5	60.5	114.7	164.1
5	147.2	172.6	140	53.1	131.3	175.7
平均	155.22	168.86	146.88	68.64	120.72	164.68
樣本標準差(S)	6.95	8.08	5.76	17.16	14.62	7.09

1. 數據確認與視覺呈現

實驗數據顯示，冷凍組（168.86）與糖漬組（164.68）擁有最高的灰階值，代表其視覺亮度最高，能最有效保持檸檬原有色澤。

冷凍組比新鮮組更明亮的主因是極低溫環境有效抑制了多酚氧化酶（PPO）活性，延緩了氧化褐變。糖漬組其亮度與新鮮組極為接近，推測是因為濃縮糖液包覆了果肉組織，形成了物理性屏障，阻隔空氣中的氧氣接觸，進而減少了果肉的褐變反應。

2. 數據穩定性與加工均勻度

高溫組的灰階標準差高達17.16。這顯示在快速脫水過程中，受熱不均（例如邊緣較乾、中間較濕）會導致每一片檸檬的褐變程度出現顯著差異，這在大量生產時可能導致品質不一。低溫組的標準差僅為5.76，是所有加工件中最穩定的。這代表溫和且長時間的乾燥能讓整批產品的色澤趨於一致。

接著我們以新鮮檸檬組為基準（BI=0），用以對比其他加工法的顏色偏離程度。

各種加工法的 BI 值						
	新鮮 檸檬	冷凍 檸檬	低溫乾燥 檸檬	高溫烘乾 檸檬	日曬 檸檬	糖漬 檸檬
BI 值	0.00	-0.09	0.05	0.56	0.22	0.02

3. 加工溫度與褐變程度之關聯

根據實驗觀測，檸檬在加工過程中，顏色深淺與處理溫度呈現正相關。

高溫烘乾組（70℃）的平均 BI 值達到0.558，為所有組別之冠。這是由於高溫加速了檸檬中還原糖與氨基酸之間的梅納反應（Maillard reaction），以及糖類的焦糖化作用，產生大量深褐色的黑色素。低溫烘乾（35℃）與日曬組的 BI 值分別為0.054與0.222。這說明雖然延長了加工時間，但由於環境溫度較低，氧化反應速度較慢，因此顏色變化較高溫組緩和。

4. 冷凍組的「反白」現象分析

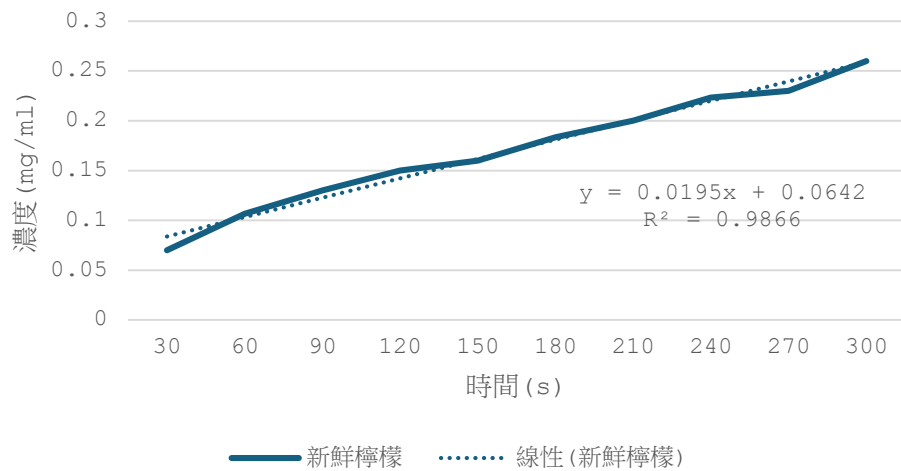
冷凍組的平均 BI 值為-0.088，這在統計上意味著它比新鮮組還要「亮」。這並非表示冷凍能使檸檬「變白」，而是冷凍產生的冰晶破壞了果肉的微觀結構，導致在拍攝影像分析照時，光線的漫反射增加，從而提升了灰階數值。此外，低溫環境能有效抑制檸檬多酚氧化酶（PPO）的活性，防止細胞受損後產生的褐變，這也是冷凍組能維持極佳視覺新鮮度的關鍵。

二、不同加工法的維生素 C 釋放速率比較

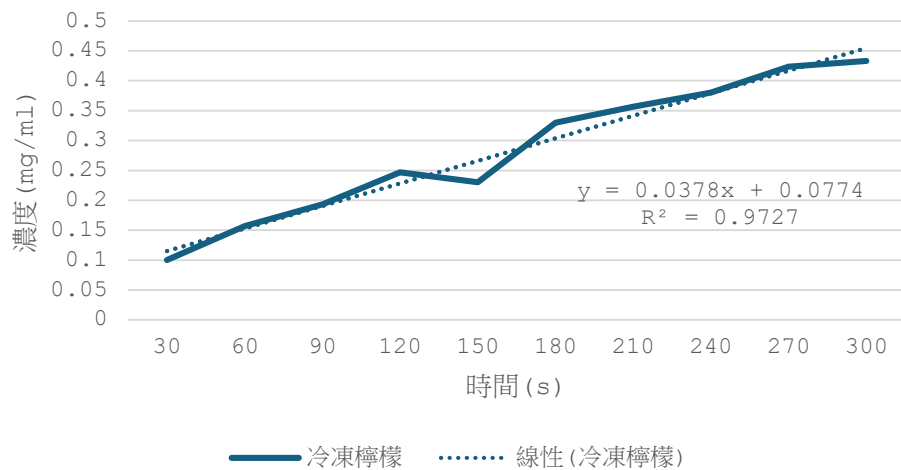
本研究採取三次重複實驗，並以各時段平均濃度進行線性回歸分析，以確保數據的代表性與趨勢的穩定性。各時段平均濃度的表格如下：

時間(s)\加工法	不同加工法的泡水平均濃度(mg/ml)					
	新鮮檸檬	冷凍檸檬	低溫乾燥	高溫烘乾	日曬法	糖漬檸檬
30	0.07	0.1	0.0633	0.1167	0.0763	0.42827
60	0.1067	0.1567	0.0833	0.1433	0.088	0.67467
90	0.13	0.1933	0.0967	0.1933	0.0997	0.5456
120	0.15	0.2467	0.1	0.1867	0.1056	0.69813
150	0.16	0.23	0.1167	0.2033	0.1467	0.48693
180	0.1833	0.33	0.1233	0.24	0.1584	0.5104
210	0.2	0.3567	0.1233	0.2733	0.176	0.58667
240	0.2233	0.38	0.1333	0.3033	0.1936	0.55147
270	0.23	0.4233	0.1533	0.34	0.2112	0.5984
300	0.26	0.4333	0.1667	0.3733	0.2581	0.4576

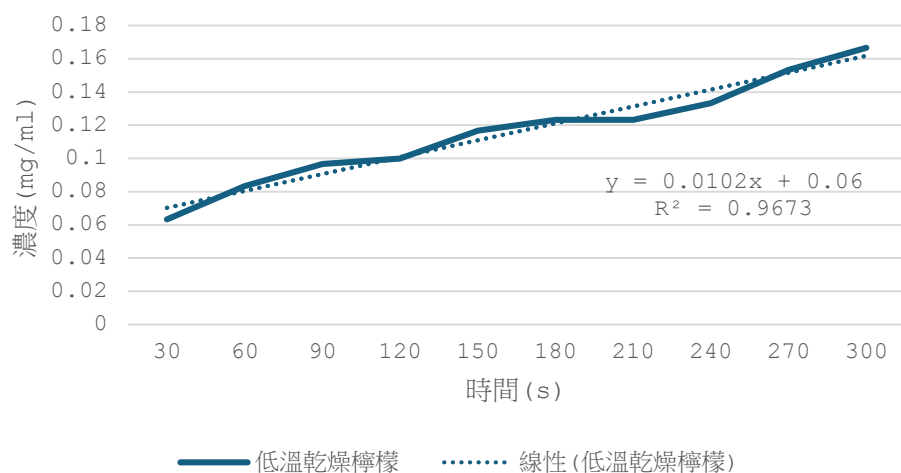
新鮮檸檬泡水的平均濃度變化



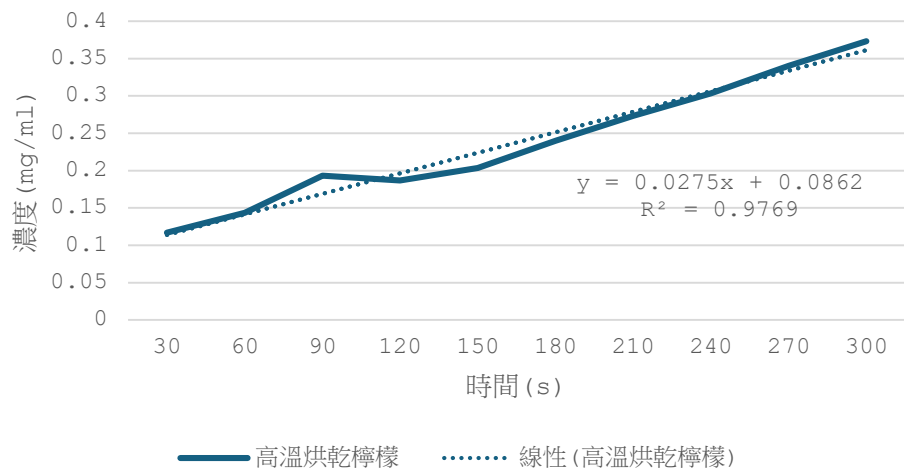
冷凍檸檬泡水的平均濃度變化



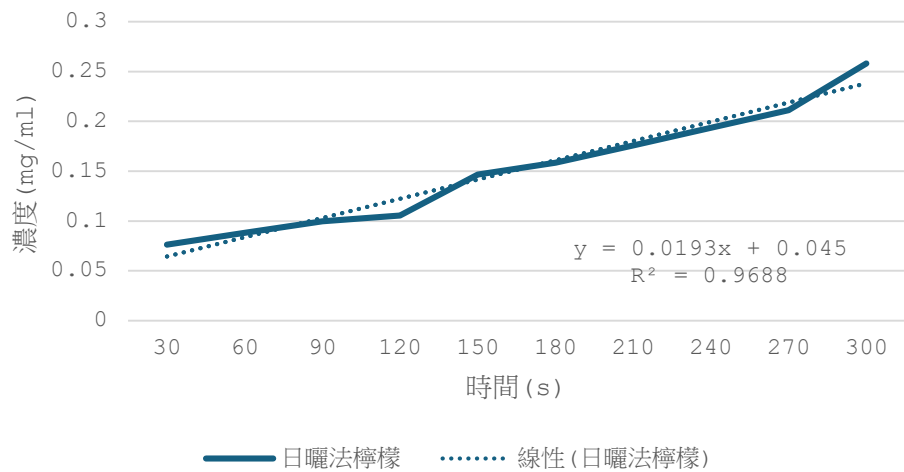
低溫乾燥檸檬的泡水平均濃度變化



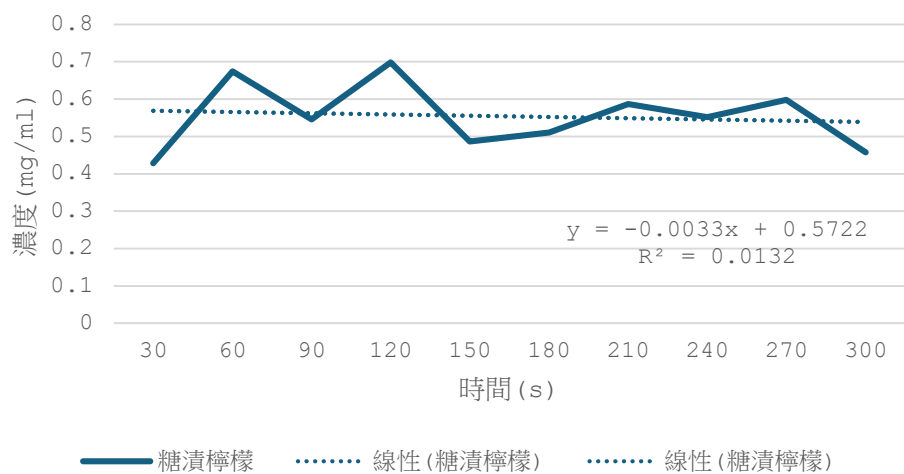
高溫烘乾檸檬的泡水平均濃度變化



日曬法檸檬泡水的平均濃度變化



糖漬檸檬



	不同加工法的泡水平均濃度的回歸線數據整理		
加工法	新鮮檸檬	冷凍檸檬	低溫乾燥檸檬
回歸線方程式	$y = 0.0195x + 0.0642$	$y = 0.0378x + 0.0774$	$y = 0.0102x + 0.06$
回歸線斜率	0.0195	0.0378	0.0102
R^2	0.9866	0.9727	0.9673
加工法	高溫烘乾檸檬	日曬法檸檬	糖漬檸檬
回歸線方程式	$y = 0.0275x + 0.0862$	$y = 0.0193x + 0.045$	$y = -0.0033x + 0.5722$
回歸線斜率	0.0275	0.0193	-0.0033
R^2	0.9769	0.9688	0.0132

1. 不同加工法對維生素 C 釋放速率之影響

本研究以回歸線斜率量化釋放速率（單位：mg/ml/30s），各組速率排序為：冷凍組(0.0378)>高溫烘乾(0.0275)>新鮮組(0.0195)\日曬組(0.0194)>低溫烘乾(0.0102)。冷凍組的釋放速率約為新鮮組的1.94倍。這驗證了冷凍過程中形成的冰晶會刺破細胞壁，大幅降低維生素 C 溶出的物理阻力。高溫組的速率明顯優於低溫組。我們推測是高溫快速脫水使檸檬組織產生較多微孔隙，有利於水分子進入；而低溫慢烘導致組織緊縮，反而鎖住了營養素，導致釋放速率墊底。

2. 糖漬法之特殊釋放行為探討

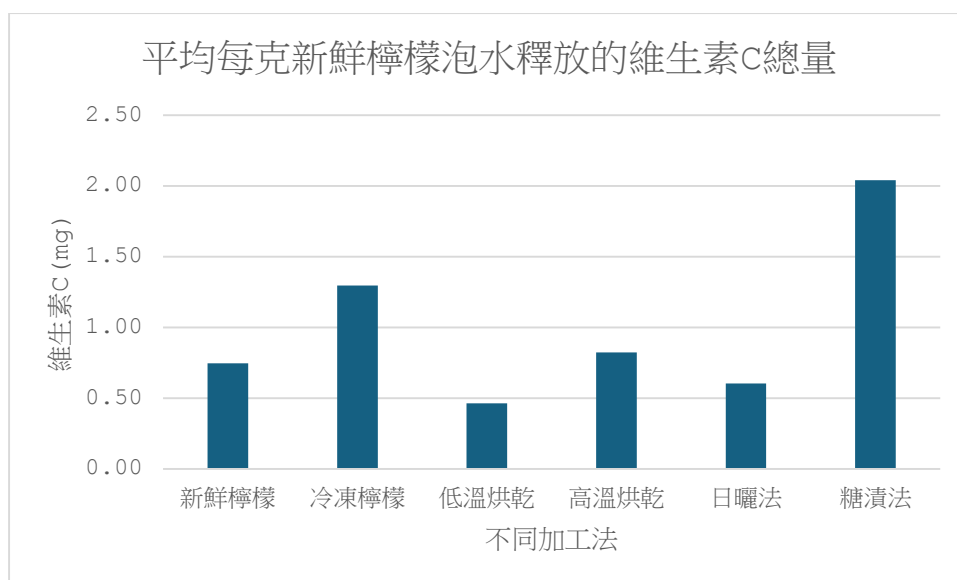
糖漬組 R^2 僅為 0.0002，線性極低。觀察原始數據，糖漬組在沖泡 30 秒時濃度即達到 0.40mg/ml 以上（約為新鮮組的 5 倍）。這代表高滲透壓脫水已徹底破壞細胞完整性，使其營養素呈現「爆發式溶出」，而非一般加工法的漸進擴散行為。

三、不同加工法的維生素 C 泡水釋放量比較

	不同加工法的平均每克新鮮檸檬泡水釋放的維生素 C 總量(mg)					
	新鮮檸檬	冷凍檸檬	低溫烘乾	高溫烘乾	日曬法	糖漬法
1	0.83	2.05	0.46	0.87	0.62	2.04
2	0.67	0.87	0.45	0.82	0.73	2.47
3	0.74	0.97	0.48	0.78	0.46	1.61
平均	0.75	1.30	0.46	0.82	0.60	2.04

本研究定義「釋放總量」為沖泡 300 秒時，樣本所釋出的維生素 C 質量與該樣本原始重量之比值（單位：mg/g），用以評估不同加工法在實際飲用時的營養供給效率。

根據實驗數據，各組每克檸檬釋放的維生素 C 總量排序為：糖漬法(2.04mg/g)>冷凍組(1.30mg/g)>高溫烘乾(0.82mg/g)>新鮮組(0.75mg/g)>日曬組(0.60mg/g)>低溫烘乾(0.46mg/g)。其中糖漬與冷凍處理後的釋放總量顯著高於新鮮組。



糖漬組測得之總量為所有組別最高。這並非加工過程產生了更多維生素 C，而是糖漬產生的高滲透壓導致細胞產生質離現象並徹底破壞細胞壁，使內部的維生素 C 能在短時間內毫無阻礙地溶入水中。

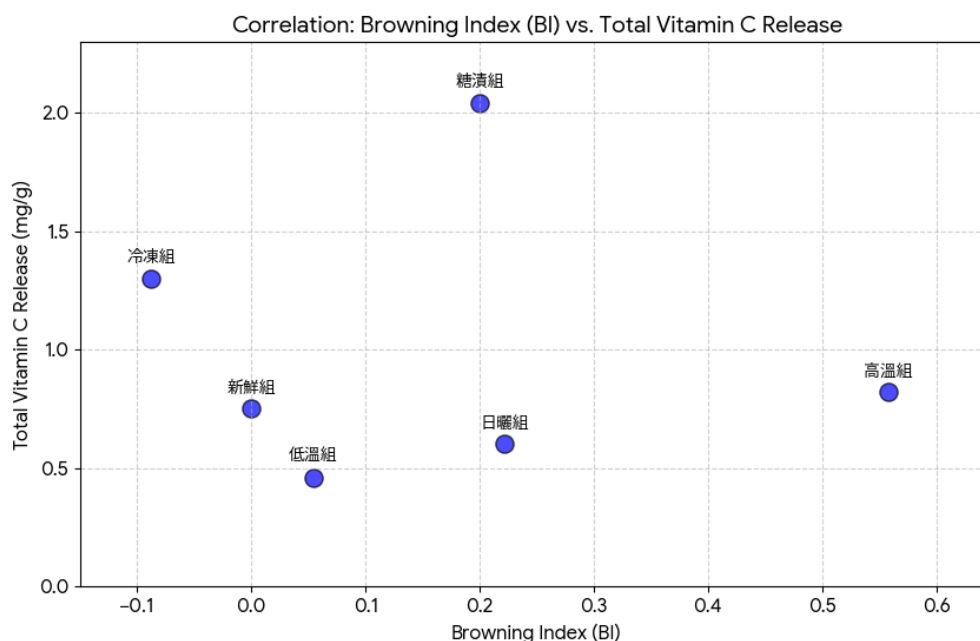
冷凍組的釋放總量約為新鮮組的1.73倍。這驗證了冷凍過程中形成的冰晶會刺破細胞膜與細胞壁，使得在泡水過程中，營養素能更有效地從受損組織中溶出。

實驗結果顯示，高溫烘乾組的釋放總量優於低溫烘乾組。雖然高溫可能造成熱損傷，但低溫乾燥因耗時極長（約 120 小時，將近高溫烘乾的 3 倍），導致切片長時間暴露於空氣中產生氧化損失。此外，高溫烘乾產生的脆硬多孔結構有利於水分子進入；而低溫慢烘可能使組織過於緊縮，導致部分維生素 C 被鎖在組織內部難以溶出。

日曬組的釋放總量低於新鮮組。顯示雖然日曬法看似天然，但在長達數日的乾燥過程中，環境中的光照與氧氣仍會造成維生素 C 的分解，且其乾燥後的組織結構對釋放效率的提升有限。

四、褐變程度與維生素 C 釋放速率及釋放總量的綜合討論

接下來我們要探討檸檬的外觀褐變程度（BI 值）是否能作為判斷營養釋放效率的指標。綜合影像分析與滴定實驗數據，我們發現兩者之間並非簡單的線性負相關。



高溫烘乾組之 BI 值最高（0.558），外觀最黑；然而其釋放速率（斜率 0.0275）與釋放總量（0.82 mg/g）卻均高於新鮮組（斜率 0.0195、總量 0.75 mg/g）。這說明了視覺上的「嚴重褐變」雖然代表部分維生素 C 發生了氧化與梅納反應，但加工過程中的「熱脆化」作用卻大幅降低了果肉組織的物理阻力。因此，即使存量受損，剩餘的維生素 C 卻能更有效地被泡水溶出。這推翻了「顏色越黑，營養越難攝取」的直覺觀點。

冷凍組展現了最低的 BI 值（-0.088，保色效果最佳）與最快的線性釋放速率（斜率 0.0378，為新鮮組的 1.94 倍）。冷凍技術透過低溫抑制了褐變反應（化學路徑），同時利用冰晶刺破細胞壁（物理路徑）。這種「化學抑制、物理破壞」的組合，使其在維持外觀新鮮感與提升營養供給效率上，達到了其他加工法難以企及的最佳平衡。

低溫組與日曬組的 BI 值雖優於高溫組（較不黑），但釋放總量卻墊底。這反映出「長時間暴露」帶來的氧化危害可能大於「短時間高溫」。低溫乾燥與日曬雖然避開了劇烈的熱褐變，但長達數日或數十小時的加工時間，使得維生素 C 在緩慢脫水的過程中持續被空氣氧化，且其產生的組織結構較為緊密，反而不利於營養素釋放。

糖漬組與日曬組的 BI 值極為接近（分別為 0.2 與 0.222），但在釋放總量上卻呈現天壤之別：糖漬組為 2.04mg/g，日曬組僅為 0.60 mg/g。這說明了即使兩者外觀褐變程度相近，但其內部的物理結構完全不同。糖漬的高滲透壓對細胞壁造成了毀滅性的破壞，使得營養素「爆發式溶

出」；而日曬僅是緩慢脫水，組織結構相對完整，且長期暴露於環境中造成了較多的氧化損失。

陸、結論

一、物理結構是決定釋放行為的核心因素

實驗證實，加工保存法對檸檬組織的破壞程度，直接決定了維生素 C 的釋放速率與總量。組織受損愈嚴重（如冷凍、糖漬），營養溶出的效率愈高。

二、冷凍法為兼顧色澤與營養釋放的最佳選擇

冷凍組不僅褐變指數最低（BI = -0.088），且維生素 C 釋放速率高達新鮮組的 1.94 倍，釋放總量（1.30 mg/g）亦顯著優於新鮮組。這證明冷凍產生的冰晶能有效破壞細胞壁，同時低溫環境鎖住了檸檬原色。

三、糖漬法具備爆發式的釋放特性

糖漬組呈現非線性釋放行為，沖泡30秒內的釋放量即達新鮮組的5倍以上，最終釋放總量（2.04mg/g）為全組之冠。這歸因於高滲透壓對細胞結構的徹底摧毀，使其營養素能瞬間溶出。

四、高溫快烘優於低溫慢烘

高溫烘乾組（70°C）雖然褐變最嚴重（BI = 0.558），但因組織脆化多孔，其釋放速率與總量均優於低溫烘乾組（35°C）。低溫組則因加工時間過長導致較多氧化損失，且組織緊縮阻礙了釋放，效率墊底。

五、視覺褐變與營養釋放無絕對正相關

實驗數據推翻了「顏色愈黑營養愈少」的直覺觀點。高溫組雖然視覺品質較差，但實際飲用時能獲得的維生素 C 卻比顏色較亮的低溫組與日曬組更多。

柒、參考文獻

- 一、中央通訊社 (CNA)：關於屏東九如檸檬產銷平衡、品牌化及產地價格之報導(111/10/16)。
- 二、台灣光華雜誌：〈檸檬正青：夏日果園的綠翡翠〉，詳述屏東檸檬發展史、手搖飲通路占比及加工起源。
- 三、農業部農糧署(AFAS)：歷年農產統計資料、作物產量與種植面積普查。
- 四、工商時報：關於2025年氣候異常對屏東檸檬產量影響之即時報導。
- 五、屏東縣政府農業處：關於產地補助與收購加工去化機制之官方公告。
- 六、Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis*. W. H. Freeman and Company.
- 七、衛生福利部食品藥物管理署 (2018)。《食品中維生素 C 之檢驗方法》。
- 八、PubChem, National Library of Medicine. "L-Ascorbic Acid: Physico-chemical Properties".
- 九、Quevedo, R., et al. (2002). "Description of browning image using non-isotropic fractal texture analysis." *Journal of Food Engineering*.
- 十、Palou, E., et al. (1999). "Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree." *Journal of Food Science*.
- 十一、U.S. Department of Agriculture (USDA). (2019). *FoodData Central: Lemons, raw, without peel*. [美國農業部食品資料庫，提供維生素 C 含量之基礎數據]
- 十二、Gregory, J. F. (2007). Vitamins. In S. Damodaran, K. L. Parkin, & O. R. Fennema (Eds.), *Fennema's Food Chemistry*. CRC Press. [詳細記載維生素 C 之溶解度與氧化還原化學特性]
- 十三、Miyake, Y., et al. (1997). Isolation and Identification of Eriocitrin as a Powerful Antioxidant in Lemon Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(12), 4619-4623. [證實聖草次苷為檸檬主要水溶性抗氧化多酚]
- 十四、Kanaze, F. I., et al. (2006). Solubility of hesperidin and hesperetin in water and dietary relevant aqueous solutions. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 40(2), 242-250. [提供橙皮苷極低溶解度之實驗數據]
- 十五、Manners, G. D. (2007). Citrus Limonoids: Analysis, Bioactivity, and Biomedical Prospects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(21), 8285–8294. [論述檸檬苦素之穩定性與抗氧化機制]