

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科(二)

第三名

032906

Q 不容緩！粉圓彈性模型之建立

學校名稱：臺南市立建興國民中學

作者： 國二 戴翊喬 國二 邱筠琦 國二 黃若慈	指導老師： 熊桓翊
---	------------------

關鍵詞：粉圓、彈性模型、實驗設計

-摘要-

參考文獻後，發現水溫、煮製時間與浸泡過程皆會影響澱粉糊化程度與內聚性。透過單/多變因實驗設計，分析各參數對粉圓內聚性影響，並建立粉圓彈性模型。在單變因實驗中，烹煮時間 60 分後，粉圓吸收水分與熱能後與生粉圓相比膨脹 1.4 倍，但超過 120 分後過度糊化而縮小。在多變因實驗中，由 SN 反應圖趨勢，找到澱粉分子、水與熱交互作用最佳條件：生粉圓浸泡 80 度熱水 90 秒、浸泡 10 度冷水 1 小時、沸水烹煮 20 分、50 度悶煮 5 分鐘，且微調後可適用不同生粉圓粒徑。品評後，結果呈現此方法烹煮的粉圓是青年族群的最愛。另外，亦可調整軟硬度，迎合幼、老年族群喜好，未來可結合 AI 智慧機器人達成模組化、自動化、客製化粉圓烹煮流程，實現商業應用。

壹、前言

一、研究動機

我們是一群熱愛珍珠奶茶的女孩，沉醉於 Q 彈珍珠與牙齒碰撞出的好心情。然而粉圓有時過硬難咀嚼，有時則過軟失去彈性，影響整體風味與飲用體驗。這樣的不穩定性引發我們的好奇與思考：究竟是哪些因素決定了粉圓的 Q 彈口感？是否能透過科學方法，找出最佳烹煮條件，讓每一顆粉圓都達到理想狀態？

眾所皆知，珍珠奶茶是風靡全球的台灣代表性飲品，每年全球銷量高達數 10 億杯，市場規模突破 30 億美元。其中粉圓的毛利率竟高達 85%，遠超被譽為「護國神山」的台積電（約 60%）。台灣為全球主要粉圓供應國，產品銷往近 70 個國家。這顯示，若能提升粉圓品質與穩定性，不僅能改善消費者體驗，更有助於強化產業競爭力與台灣在國際上的飲品影響力。

二、文獻回顧

(一) 粉圓：澱粉與粉圓

1. 澱粉：生澱粉粒主要以樹薯澱粉製成(如圖 1- 1)。原結構(如氫鍵)穩固，由 β 澱粉組成。



圖 1- 1 澱粉與粉圓 (此圖由作者進行繪製)

2. 糊化反應：加水、加熱後，氫鍵遭破壞，結晶體遭到改變進而產生空隙使水分子進入，體積及黏度增加進而膨潤形成膠體，即為俗稱的粉圓 (如圖 1- 2)。



圖 1- 2 澱粉粒糊化過程
(出處詳見圖片來源 1)

3. 澱粉老化：遇冷或放置一段時間後，水分蒸發，內部重新產生結晶，導致結構變緊密而變硬 (如圖 1- 3)，即為澱粉老化。

(二) 澱粉含水量與彈性關係：

粉圓因為吸收水分使澱粉顆粒膨脹，如圖形成凝膠狀結構（陳，2017；陳等人，2020），而具有彈性。當適量水分進入粉圓時，粉圓彈性佳 (如圖 1- 4、圖 1-6)；水分過少時，粉圓變硬 (如圖 1- 5)。



圖 1- 3 粉圓遇冷老化的過程
(出處詳見圖片來源 2)



圖 1-4 適量水分進入

(此圖由作者進行繪製)

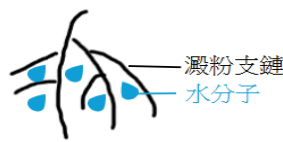


圖 1-5 過少水分進入

(此圖由作者進行繪製)

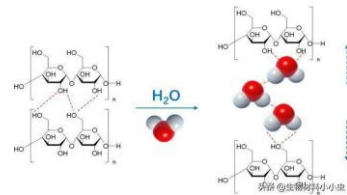


圖 1-6 水撐大粉圓結構

(出處詳見圖片來源 3)

(三) 傳統控制粉圓彈性方法

過去文獻大多探討粉圓與食用膠、修飾澱粉混和的最佳條件，或是改變澱粉組成以達到最佳彈性(鄧，2015)，然而添加物總是引起國人疑慮。如 2013 年的毒澱粉事件，在食品內添加的順丁烯二酸可能造成腎功能衰竭。

因此，本研究為求提高粉圓彈性而減少健康風險，專注在粉圓的烹煮流程，探討粉圓的烹煮流程中各變因對粉圓內聚性影響，並推導內部結構與水分的交互作用。一般烹煮流程是直接將生粉圓投入沸水烹煮 30 分，再悶煮 30 分。在 52 屆高中科展的煮法是先將粉圓浸泡熱水及冷水後烹煮，但並未對其模型進行更精確的討論(沈等人，2012)，故本研究(如圖 1-7)，並利用實驗設計得出最佳烹煮流程。

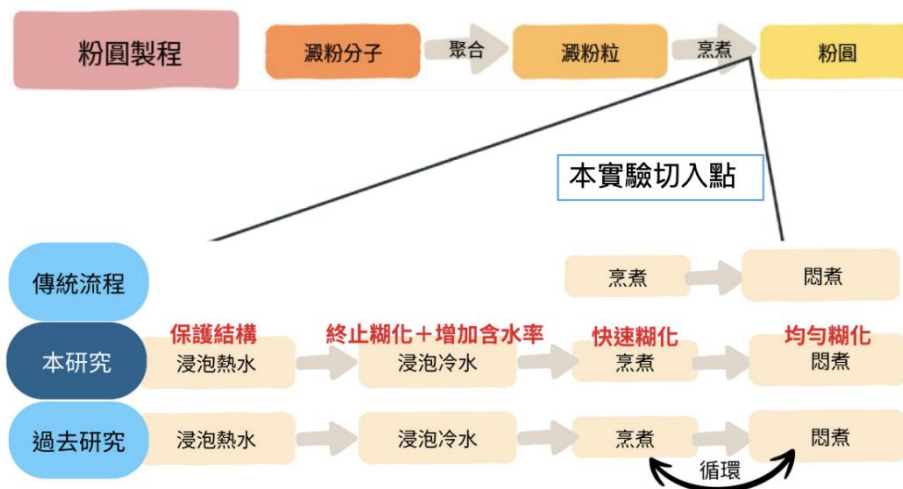


圖 1-7 研究切入點 (此圖由作者進行繪製)

(四) 實驗設計 (Taguchi 田口方法)：

本研究為有效率找出最佳條件，選用此實驗設計。為 1950 年由日本田口玄一博士首創，能大幅減少實驗次數，並達到與傳統實驗設計同樣準確的結果。首先根據實驗變因數、條件數選擇適當直交表，再依直交表實驗條件實驗，並分析信噪比(SN 比)等數據，製成 SN 因子反應圖 (如圖 1-8)。從中了解各操作變因對應變變因的影響程度，進而最佳化實驗因子條件組合。

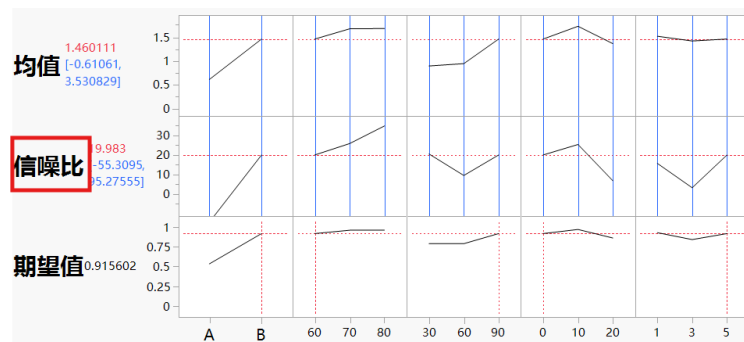


圖 1- 8 SN 因子反應圖示例(此圖由作者進行繪製)


三、研究目的

- (一) 探討熱能、水、時間與澱粉粒子糊化反應，最終形成 Q 彈粉圓的機制。
- (二) 利用 taguchi 直交表設計粉圓烹煮流程實驗，並由實驗結果推理澱粉糊化反應機制與粉圓結構，建立粉圓彈性模型。
- (三) 找到關鍵控制點，用粉圓彈性模型設計不同粉圓粒徑之最適烹煮條件，滿足不同年齡層之顧客喜好。

貳、研究設備及器材

一、設備

表 2-1 本次研究使用的器具及設備(此圖皆由作者進行拍攝)

加熱			烹煮用具	
	Thermo 加熱板	電磁爐		鍋子(蓋)、漏勺、湯杓
量化				
	計時器	電子溫度計		TPA 質構分析儀

(一) 量測儀器(TPA 質構分析儀)

質地剖面分析 (Texture Profile Analysis, 縮寫 TPA)是能量化食品物理性質的儀器，用兩次壓縮模擬咬合。得出力與時間關係圖 (圖 2-1)，提供多項質地參數 (如表 2-2)。

表 2-2 TPA 說明

項目	定義	公式(如圖 2-1)
硬度(hardness)	壓縮所需最大力	壓縮產生峰值
內聚性(cohesiveness)	表示結構強度	$A2/A1$
彈性(Springiness)	首次壓縮回復程度	$T2/T1$
咀嚼性(Chewiness)	綜合指標	硬度*彈性*內聚性

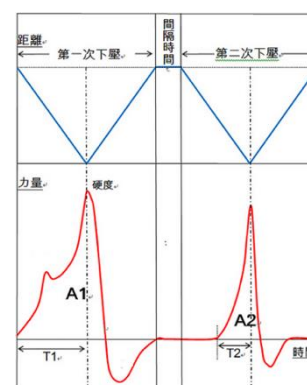


圖 2-1 力與時間關係圖
(出處詳見圖片來源 4)

二、材料

- 1.水、冰塊
2. A 組粉圓(8mm)、B 組粉圓(7mm)

參、研究過程及方法

一、研究流程架構圖

研究探討粉圓烹煮過程各變因對粉圓結構影響，最後建立粉圓彈性模型(如圖 3-1)。

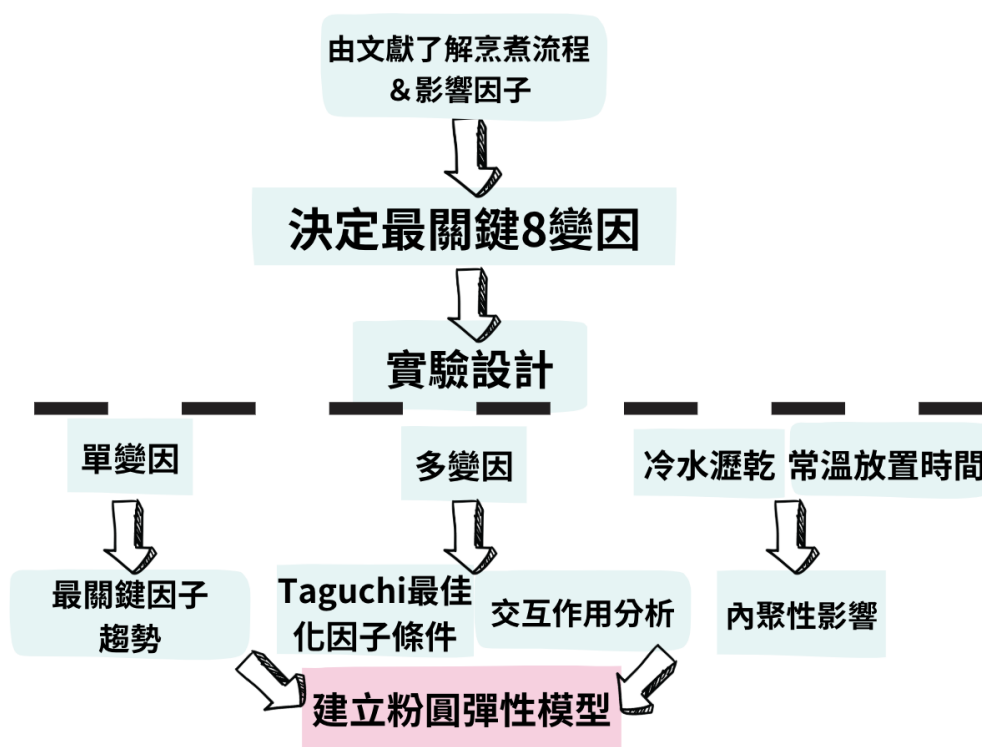


圖 3-1 研究架構圖(此圖由作者進行繪製)

二、實驗設計

(一) 探討水分和熱能對粉圓的影響

1. 在沸水中投入適量粉圓進行烹煮，並依照表 3-1 的時間分別取出 2 粒作為樣本。
2. 記錄其湯汁色澤、粉圓狀態。
3. 為證實水中含有澱粉顆粒，將用以烹煮粉圓 8 小時，溶有過度糊化澱粉分子的水溶液冷藏 9 小時後取出。

表 3-1 烹煮時間

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
煮時	0 分	1 分	5 分	25 分	40 分	1 小時	2 小時	4 小時	5.5 小時	7 小時	8 小時

(二) 探討各因子間交互作用如何控制粉圓內聚性

為最有效率推測最佳因子組合，使用田口方法進行實驗設計。首先，利用 **JMP** 統計軟體製作 **L18** 直交表。輸入所挑選的 8 個影響因子，並分別制定 3 個變數(其中粉圓種類是兩個變數)得出需進行的 18 組實驗條件(如表 3-2)，依此進行實驗後測量每組粉圓的內聚性。每組實驗取 3 粒粉圓，每粒粉圓測量一次，其內聚性平均值四捨五入至小數點後第一位作實驗結果。根據所挑選的 8 個因子，挑選兩粒徑不同之粉圓(A、B)進行實驗。

表 3-2 L18 直交表

	種類	熱水溫	熱水時	冷水溫	冷水時	烹煮時	悶煮溫	悶煮時
1	A	60 度	30 秒	0 度	1 小時	10 分	50 度	5 分
2	A	60 度	60 秒	10 度	3 小時	20 分	60 度	10 分
3	A	60 度	90 秒	20 度	5 小時	30 分	70 度	15 分
4	A	70 度	30 秒	0 度	3 小時	20 分	70 度	15 分
5	A	70 度	60 秒	10 度	5 小時	30 分	50 度	5 分
6	A	70 度	90 秒	20 度	1 小時	10 分	60 度	10 分
7	A	80 度	30 秒	10 度	1 小時	30 分	60 度	15 分
8	A	80 度	60 秒	20 度	3 小時	10 分	70 度	5 分
9	A	80 度	90 秒	0 度	5 小時	20 分	50 度	10 分
10	B	60 度	30 秒	20 度	5 小時	20 分	60 度	5 分
11	B	60 度	60 秒	0 度	1 小時	30 分	70 度	10 分
12	B	60 度	90 秒	10 度	3 小時	10 分	50 度	15 分
13	B	70 度	30 秒	10 度	5 小時	10 分	70 度	10 分
14	B	70 度	60 秒	20 度	1 小時	20 分	50 度	15 分
15	B	70 度	90 秒	0 度	3 小時	30 分	60 度	5 分
16	B	80 度	30 秒	20 度	3 小時	30 分	50 度	10 分
17	B	80 度	60 秒	0 度	5 小時	10 分	60 度	15 分
18	B	80 度	90 秒	10 度	1 小時	20 分	70 度	5 分

表 3-3 直交表實驗流程(此圖由作者進行拍攝)

					
1. 浸泡熱水	2. 浸泡冷水	3. 沸水烹煮	4. 悶煮	5. 冷水瀝乾	6. TPA 測試

(三)探討後製處理對粉圓內聚性影響

由冷水瀝乾、常溫放置兩方面探討

1. 將烹煮完成的粉圓以濾網撈起。
2. 泡入 0°C 冷水 5 秒，再拿起置空氣中 3 秒，重複 3 次。
3. 取 6 粒，3 粒立即以 TPA 測量其內聚性，3 粒置於常溫通風處 5 小時後，再以 TPA 測量其內聚性。每粒只測量一次，三粒內聚性數據取平均值四捨五入至小數點後第一位，作為實驗結果。

(四)官能品評

1. 實施地點: 學校、家中

2. 實施方式:

(1) 試吃杯盛裝事先煮好浸泡糖水的粉圓(粒徑皆為 7mm 且為同一品牌)，分別編號 A、B(A 為自製烹煮流程粉圓，B 為名廚煮法)，進行盲測。

(2) 品評方法：

- a. 依隨機順序進行品評，品評當下立即評分。
- b. 在上一款品評結束後，請受試者先用白開水漱口再開始下一款品評。
- c. 請受試者先觀察樣品外觀後進行試吃，對表格內容（如圖 3-2）進行勾選。

粉圓口感評比問卷

性別：男/女（圈選）

年齡：10以下 / 11-20 / 21-30 / 31-40 / 41-50 / 51-60 / 61-70 / 71-80（圈選）

分為A、B兩種樣品，請勾選各項分數，分數越高代表越喜歡或符合程度越高。

範例：

A 粉圓	1	2	3	4	5
Q彈程度（5代表很Q）					V
外觀(5代表看了很想吃)					V
喜歡程度(5代表非常喜歡)				V	

A 粉圓	1	2	3	4	5
Q彈程度					
外觀					
喜歡程度					

B 粉圓	1	2	3	4	5
Q彈程度					
外觀					
喜歡程度					

其他回饋： _____

圖 3-2 粉圓品評問卷(此圖由作者進行設計)

(五)開發適用不同粉圓粒徑的最佳烹煮流程

條件除悶煮時間外不變，以不同粒徑(7mm、8mm、9mm)粉圓在不同悶煮時間下烹煮。每組實驗取 3 粒粉圓，每粒粉圓測量一次，其內聚性平均值四捨五入至小數點後第一位作為實驗結果。將其繪為折線圖並分析之。

肆、研究結果

一、探討水分和熱能對粉圓影響

- (一) 粉圓顆粒隨著烹煮時間增加，逐漸膨脹直到烹煮時間為 1 小時時達到最大，隨後逐漸縮小(如圖 4- 1)。
- (二) 冷藏後的煮液取出，發現呈濃稠凝膠狀(如圖 4- 2)，應為澱粉分子間的氫鍵重新排列所形成。
- (三) 烹煮時間較短的粉圓周圍沒有咖啡色的痕跡(如圖 4- 3 上)，烹煮時間較長則許多(如圖 4- 3 下)，為移動時過度糊化層沾至桌面所致。證明隨著烹煮時間增加，外部過度糊化部分亦越多。

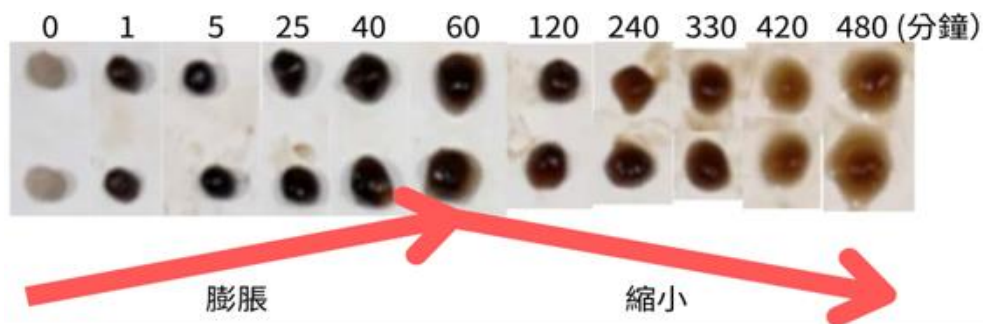


圖 4- 1 粉圓在各烹煮時間下糊化情形(此圖由作者進行拍攝、繪製)

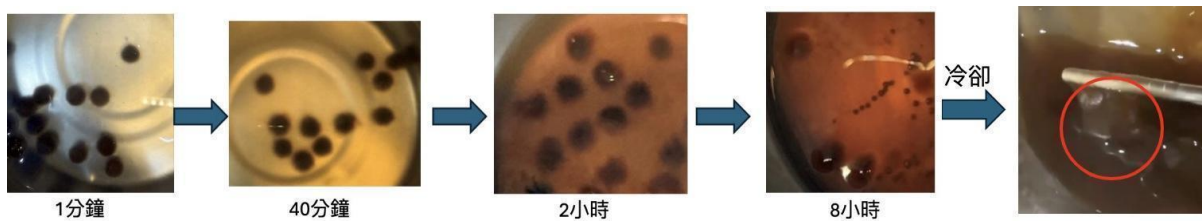


圖 4- 2 粉圓烹煮過程(此圖由作者進行拍攝、繪製)

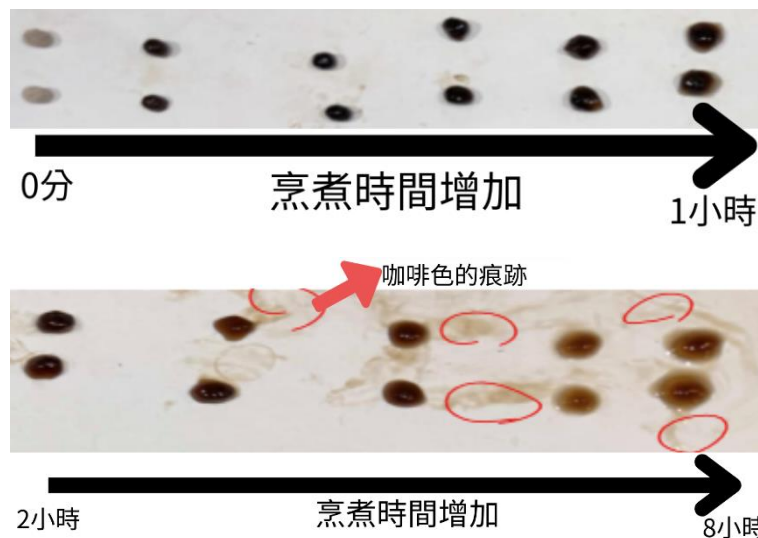


圖 4- 3 粉圓在各烹煮時間下糊化情形局部放大圖(此圖由作者進行繪製)

二、探討各因子間交互作用如何控制粉圓內聚性

(一) 直交表實驗結果

根據直交表將粉圓以 18 組不同流程進行烹煮後，以質構分析儀測量其內聚性，結果如下表：

表 4-1 粉圓不同烹煮流程下內聚性

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
內聚性	0.23	0	0	0.32	0	0.5	0.48	0.74	0.62	0	0.23	0	0.44	0.2	0.77	0.25	0.46	0.73

註：內聚性為 0 時表示澱粉分子間水分過多致結構鬆散無法成形(如圖 4-5)。一般情況下如圖 4-4。

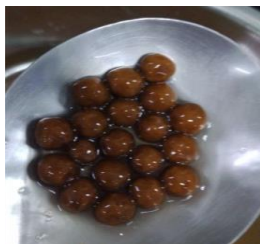


圖 4-4 結構完整，粒粒分明



圖 4-5 結構鬆散，無法成形

(此圖由作者進行繪製)

(此圖由作者自行拍攝)

(二) SN 因子反應圖

1. 目前最佳條件

(1) 浸泡熱水溫度、時間：浸泡熱水 80°C(溫度高)、90 秒(時間長)(如圖 4-7)

- 浸泡熱水溫度方面，設置了 3 個條件分別為 60°C、70°C、80°C。實驗結果顯示(如圖 4-6)，浸泡熱水溫度 80°C 為使內聚性最大值的條件。
- 浸泡熱水時間方面，設置了 3 個條件分別為 30 秒、60 秒、90 秒。實驗結果顯示(如圖 4-6)，浸泡熱水 90 秒為使內聚性最大值的條件。

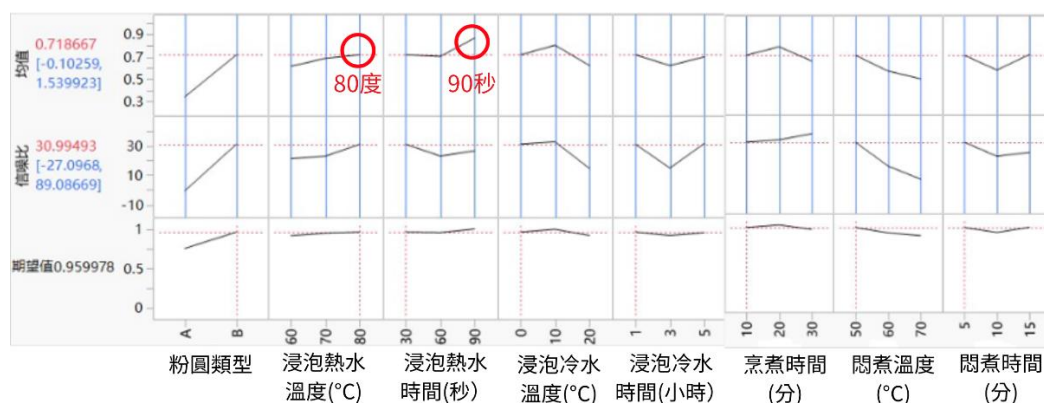


圖 4-6 浸泡熱水溫度、時間 SN 因子反應圖(此圖由作者進行繪製)



圖 4-7 浸泡熱水之溫度、時間最佳值(此圖由作者進行繪製)

(2) 浸泡冷水溫度、時間：浸泡冷水 10°C (溫度適中)、5 小時(時間長)(如圖 4-9)

- 浸泡冷水溫度方面，設置了 3 個條件分別為 0°C、10°C、20°C。實驗結果(如圖 4-8)顯示，浸泡冷水溫度 10°C 為使內聚性最大值的條件。
- 浸泡冷水時間方面，設置了 3 個條件分別為 1 小時、3 小時、5 小時。實驗結果(如圖 4-8)顯示，浸泡冷水時間 1 小時為使內聚性最大值的條件。

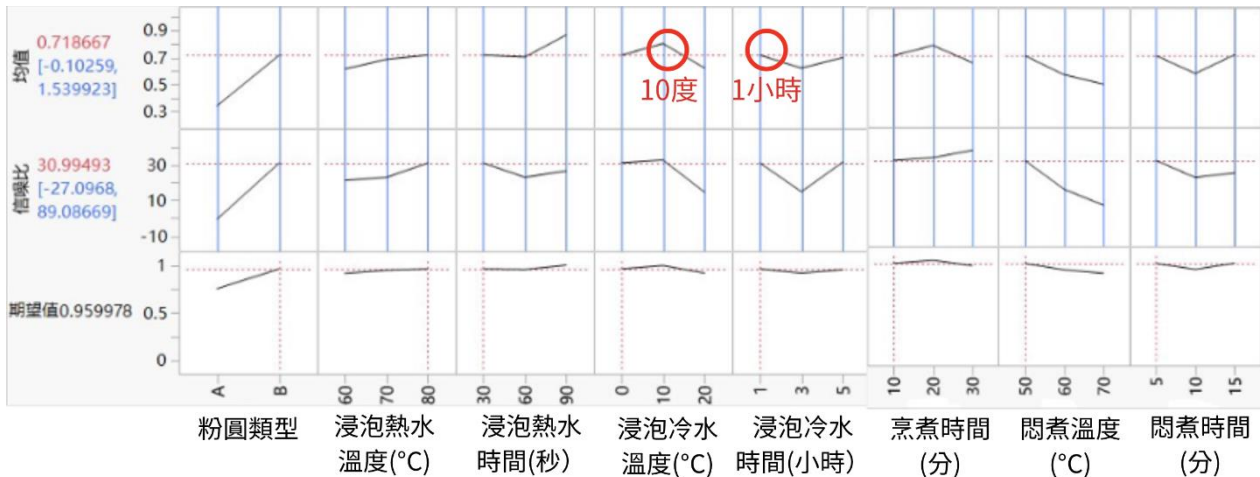


圖 4- 8 浸泡冷水溫度、時間 SN 因子反應圖(此圖由作者進行繪製)



圖 4- 9 浸泡冷水之溫度、時間最佳值(此圖由作者進行繪製)

(3) 烹煮時間：20 分鐘(時間適中) (如圖 4-11)

- 烹煮時間方面，設置了 3 個條件分別為 10 分、20 分、30 分。實驗結果顯示，烹煮 20 分鐘為使內聚性最大值的條件(如圖 4-10)。

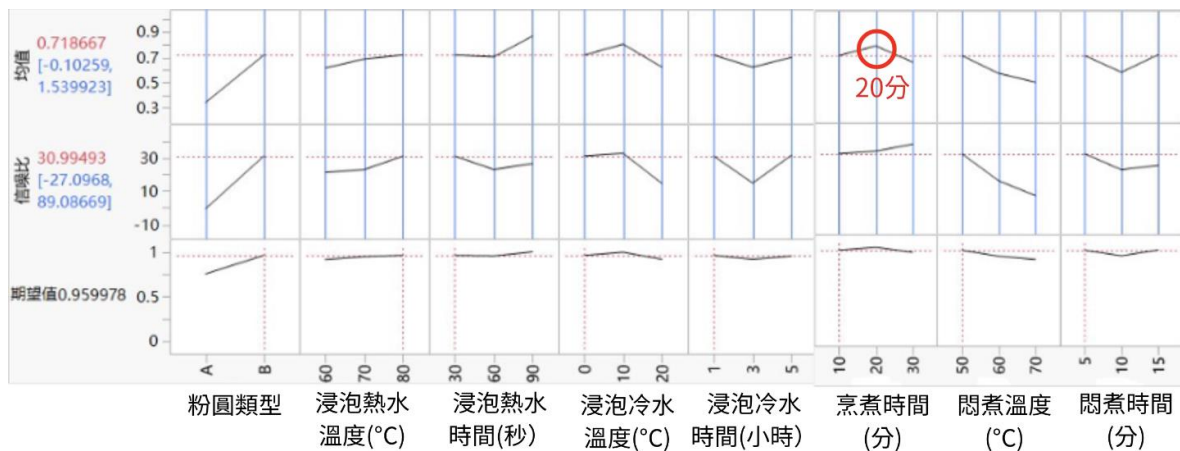


圖 4- 10 烹煮時間 SN 因子反應圖(此圖由作者進行繪製)



圖 4- 11 粉圓 A 烹煮時間最佳值(此圖由作者進行繪製)

(4) 悶煮溫度、時間：悶煮 50°C(溫度低)、5 分鐘(時間短)(如圖 4-13)

- 悶煮溫度方面，設置了 3 個條件分別為 50°C、60°C、70°C。實驗結果顯示，悶煮 50°C 為使內聚性最大值的條件(如圖 4-12)。
- 悶煮時間方面，設置了 3 個條件分別為 5 分、10 分、15 分。實驗結果顯示，悶煮 5 分鐘為使內聚性最大值的條件(如圖 4-12)。

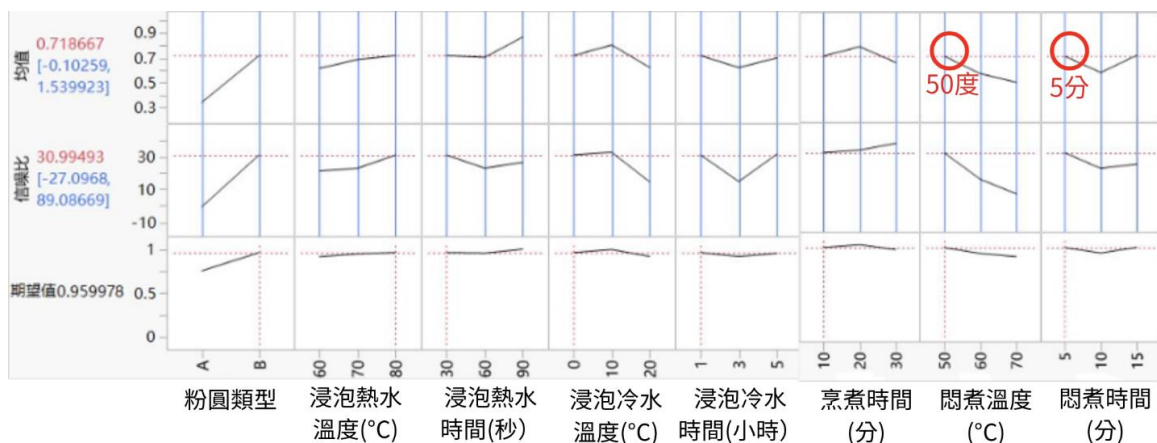


圖 4- 12 悶煮溫度、時間 SN 因子反應圖(此圖由作者進行繪製)



圖 4- 13 粉圓 A 悶煮之溫度、時間最佳值(此圖由作者進行繪製)

(5)粉圓 A、B 在相同烹煮條件內聚性比較

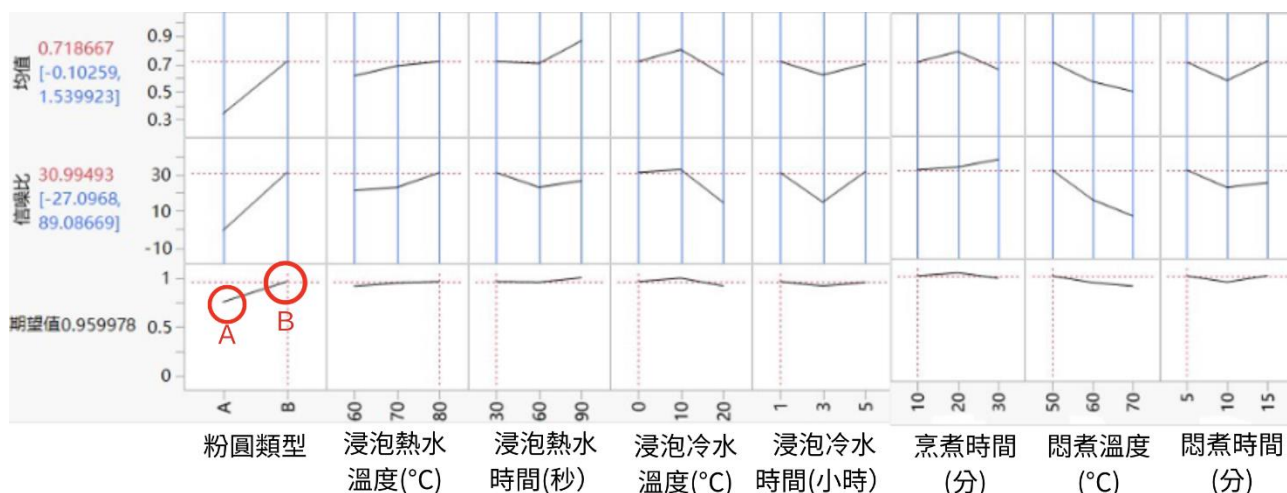


圖 4- 14 相同烹煮條件下粉圓 A、B 內聚性比較(此圖由作者進行繪製)

在相同烹煮條件下，粉圓 B 內聚性大於粉圓 A。

(三) 各流程交互作用探討(反應曲面圖)

我們推測這些影響因子之間存在交互作用，因此選擇三個影響最為顯著的因子(浸泡熱水的溫度、浸泡冷水的溫度、悶煮溫度)，倆倆繪製反應曲面圖進行交互作用的探討。

1."浸泡熱水溫度"和"浸泡冷水溫度"之交互作用(如圖 4- 15)

浸泡熱水溫度為 x 軸、浸泡冷水溫度為 y 軸，內聚性為 z 軸，繪反應曲面圖。



圖 4- 15 浸泡熱水、浸泡冷水分別為第 1、2 步驟(此圖由作者進行繪製)

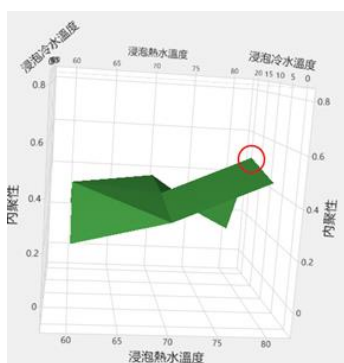


圖 4- 16 冷熱水溫度反應圖 a

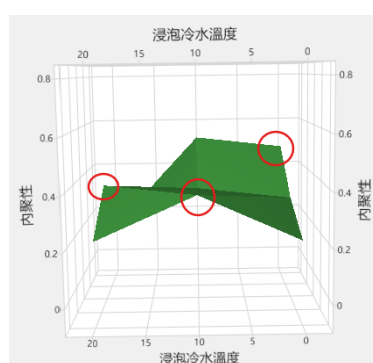


圖 4- 17 冷熱水溫度反應圖 b

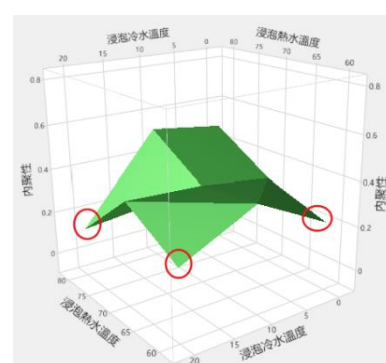


圖 4- 18 冷熱水溫度反應圖 c

(此三圖皆由作者進行繪製)

註：此篇報告中，反應圖 a、b、c 表示由不同角度觀察同一反應曲面圖的結果，熱溫、冷溫、悶溫表示浸泡熱水、冷水及悶煮的溫度。

(1)目前內聚性最佳條件為：浸泡 80°C(高溫)熱水+浸泡 10(適溫)冷水(如圖 4- 16)。

(2)目前內聚性次佳條件為：浸泡 80°C(高溫)熱水+浸泡 20(高溫)冷水、浸泡 60°C(低溫)熱水+浸泡 10°C(適溫)冷水、浸泡 70°C(適溫)熱水+20°C(高溫)冷水(如圖 4- 17)。

(3)兩內聚性低值為：浸泡 60°C熱水+0/20°C冷水、浸泡 80°C熱水+20°C冷水(如圖 4- 18)。

2. "浸泡冷水溫度"和"悶煮溫度"之交互作用

浸泡冷水溫度為 x 軸、悶煮溫度為 y 軸，內聚性為 z 軸，繪反應曲面圖。

(1)使內聚性最大值最佳因子條件為：浸泡 10°C(適溫)冷水+悶煮溫度 70°C(高溫)(如圖 4- 19)。

(2)目前內聚性次佳條件為：浸泡 10°C(適溫)/20°C(高溫)冷水+悶煮 50°C(適溫)、0°C(低溫)冷水+悶煮 60°C(如圖 4- 20)。

(3)浸泡冷水溫度為 0°C時，內聚性在悶煮 60°C達到頂峰。浸泡冷水溫度為 10°C時，內聚性在悶煮 60°C達到低點。浸泡冷水溫度 20°C時內聚性隨悶煮溫度下降呈上升趨勢(如圖 4- 21)。

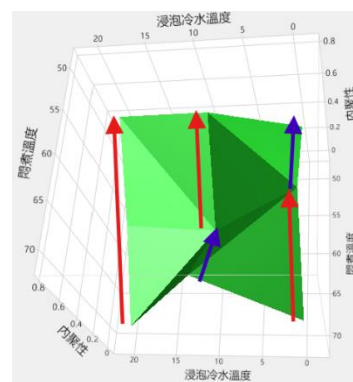
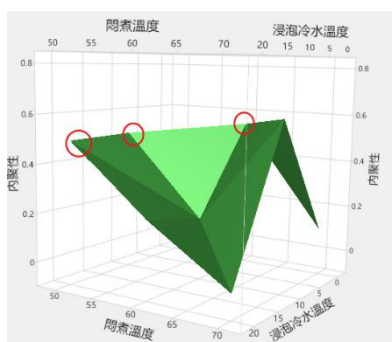
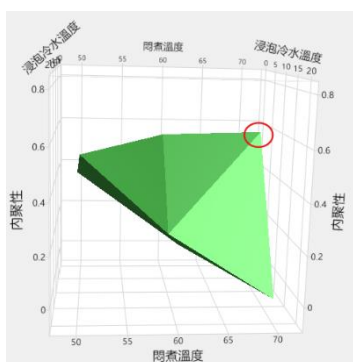


圖 4- 19 冷溫和悶溫反應圖 a 圖 4- 20 冷溫和悶溫反應圖 b 圖 4- 21 冷溫和悶溫反應圖 c

(此三圖皆由作者進行繪製)



圖 4- 22 浸泡冷水、悶煮分別為第 2、4 步驟(此圖由作者進行繪製)

3. 浸泡熱水溫度和悶煮溫度之交互作用(如圖 4- 23)

浸泡熱水溫度為 x 軸、悶煮溫度為 y 軸，內聚性為 z 軸，繪反應曲面圖。

(1)目前內聚性最佳條件為：浸泡 60°C熱水+悶煮溫度 50°C(如圖 4- 24)。

(2)悶煮溫度高時，內聚性隨浸泡熱水溫度提高呈上升趨勢(如圖 4- 25)；悶煮溫度低時，內聚性隨浸泡熱水溫度提高呈下降趨勢(如圖 4- 26)。



圖 4- 23 浸泡熱水、悶煮分別為第 1、4 步驟(此圖由作者進行繪製)

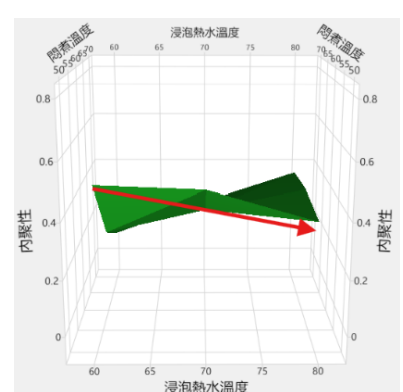
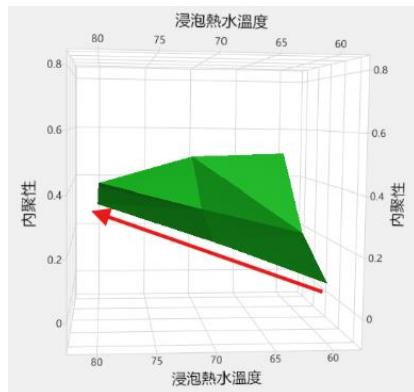
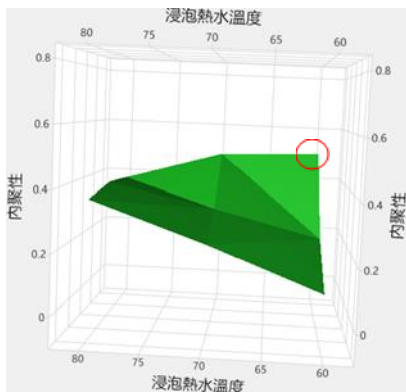


圖 4- 24 熱溫和悶溫反應圖 a

圖 4- 25 熱溫和悶溫反應圖 b

圖 4- 26 熱溫和悶溫反應圖 c

(此三圖皆由作者進行繪製)

三、探討粉圓以冷水瀝乾及常溫下放置時間對其物理性質的影響

冷水瀝乾後(如圖 4- 27)，粉圓的內聚性增加，常溫放置後內聚性則顯著增加(如圖 4-28)。



圖 4- 27 冷水瀝乾為粉圓製程最後一個步驟(此圖由作者進行繪製)

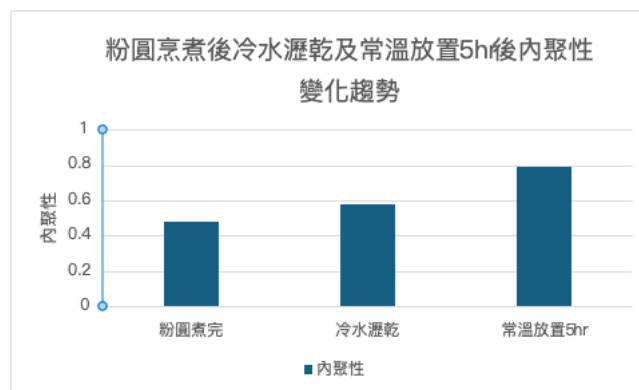


圖 4- 28 粉圓烹煮後冷水瀝乾及常溫放置 5hr 後內聚性變化趨勢(此圖由作者進行繪製)

四、官能品評

由表 4- 2 知，大眾認為自製烹煮流程粉圓 Q 彈度顯著較傳統烹煮流程高，外觀差異不顯著，喜好程度之平均分雖然相近，但從年齡級距來看，較年幼與年老者比較偏向於軟一點的粉圓，而年輕人則是喜歡 Q 彈程度高的粉圓。

表 4-2 不同年齡層對於不同烹煮流程之品評結果

年齡	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	平均
人數	15	83	15	23	12	12	11	9	共 180 人
甲組 Q 彈程度	4.87	4.32	4.25	4.35	4.33	4.41	4.76	4.33	4.45
乙組 Q 彈程度	4.12	4.04	3.99	3.86	4.02	4.00	4.31	3.77	4.01
甲組外觀	4.67	4.35	4.33	4.24	4.38	4.19	4.28	4.47	4.36
乙組外觀	4.71	4.41	4.25	4.47	4.43	4.32	4.19	4.38	4.40
甲組喜好程度	3.86	4.21	4.47	4.16	3.87	3.69	3.63	3.43	3.92
乙組喜好程度	3.97	4.01	3.82	3.77	3.64	3.79	4.00	4.11	3.89

註:甲組為本研究最佳烹煮流程，乙組為網路名廚烹煮流程

五、開發適用不同粉圓粒徑的最佳烹煮流程

(一) 各粒徑粉圓在不同悶煮時間下內聚性結果（如表 4-4）

烹煮條件除改變悶煮時間外，其餘依本研究最佳烹煮流程維持不變。實驗後測量內聚性，做回歸曲線（如圖 4-29），預測最佳參數。

表 4-3 不同悶煮時間在不同粉圓粒徑下粉圓內聚性

	悶煮時間		
粒徑	5 分鐘	60 分鐘	120 分鐘
7mm	0.86	0.62	0.53
8mm	0.65	0.75	0.52
9mm	0.6	0.78	0.51

註：傳統烹煮流程為沸水烹煮 30 分後悶煮 30 分，內聚性為 0.6。

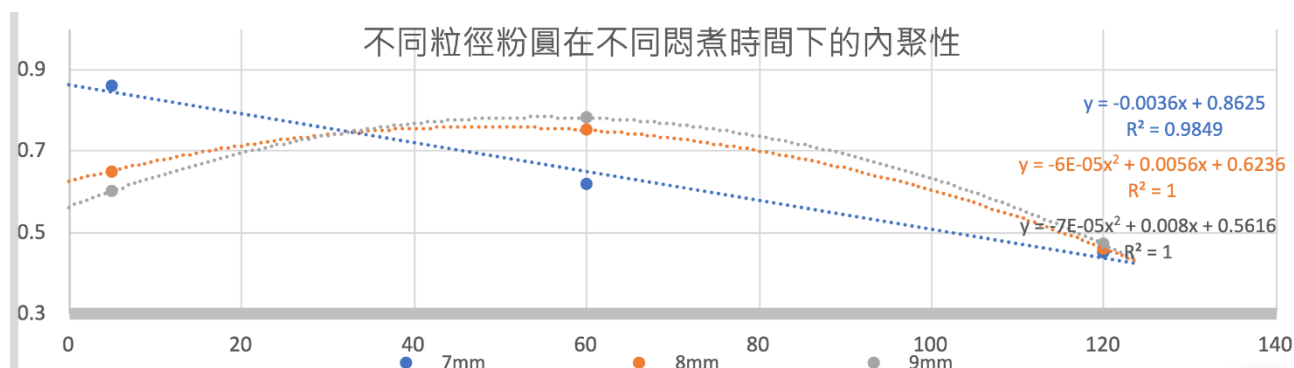


圖 4-29 不同粒徑粉圓在不同悶煮時間下的內聚性之線性回歸模型(此圖由作者進行繪製)

(二) 依據年齡層客製化粉圓內聚性之烹煮條件(如表 4-4)

- 1.已知 21-30 歲對甲組(即內聚性 0.86)喜好程度最高，71-80 歲對乙組(即內聚性 0.6)喜好程度最高。取此兩點作線性回歸後得到其他年齡層「預估喜好內聚性」。
- 2.依線性回歸後所得之各粒徑不同烹煮時間(x)對應不同內聚性(y)的方程式，計算符合「預估喜好內聚性」值的烹煮時間(如表 4-4)

表 4-4 各年齡層喜好內聚性之預估值及不同粒徑預估客製化悶煮時間

年齡	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80
人數	15	83	15	23	12	12	11	9
甲組喜好程度	3.86	4.21	4.47	4.16	3.87	3.69	3.63	3.43
乙組喜好程度	3.97	4.01	3.82	3.77	3.64	3.79	4.00	4.11
預估喜好 內聚性	0.756	0.808	0.86	0.808	0.756	0.704	0.652	0.6
7mm (悶煮時間)	29.58	15.14	0.69	15.14	29.58	44.03	58.47	72.92
8mm (悶煮時間)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.72/ 75.61	5.38/ 87.95	97.37
9mm (悶煮時間)	35.05/ 79.24	N/A	N/A	N/A	35.05/ 79.24	22.06/ 92.23	12.71/ 101.57	6.92/ 107.37

註：紅字為預估值，黑字為實驗值

伍、討論

一、探討水分和熱能對粉圓的影響

(一)觀察 1:粉圓體積隨著烹煮時間增加逐漸增大再縮小

起初熱能使水分進入粉圓內部，因為內部糊化量>過度糊化層溶解量，使其逐漸膨脹至完全煮透。烹煮 1 小時後，粉圓結構被過量熱能和水分破壞，外層過度糊化澱粉顆粒溶解於水中，內部糊化量<過度糊化層溶解量使其逐漸縮小，變得軟爛（如圖 5- 1）

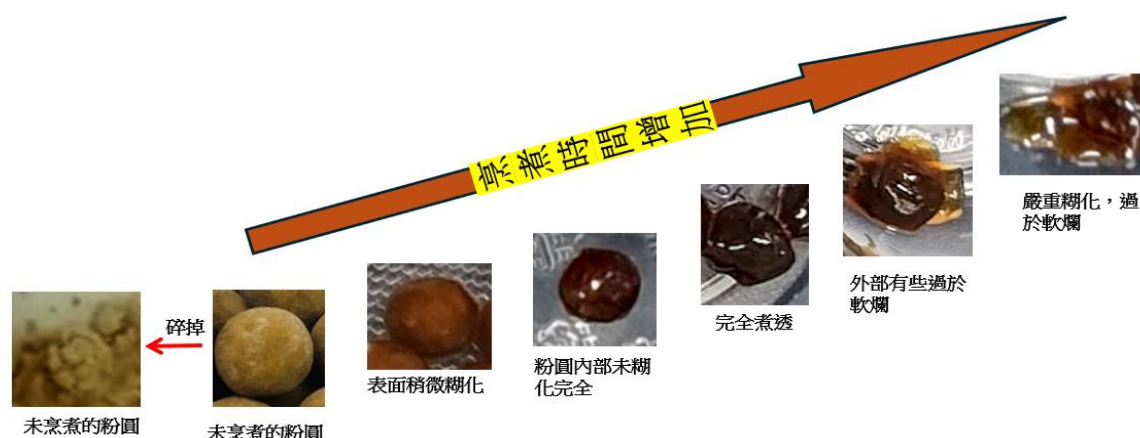


圖 5- 1 粉圓體積隨著烹煮時間的變化(此圖由作者進行拍攝、繪製)

(二)觀察 2:煮液色澤加深、稠度增加

應為澱粉顆粒溶解於水中所致，烹煮越久過度糊化澱粉越多。

二、探討各因子間交互作用如何控制粉圓內聚性

(一) 實驗最佳值反應模型探討

1. 浸泡熱水溫度、時間：浸泡熱水 80°C(溫度高)、90 秒(時間長)

浸泡熱水目的為形成糊化保護層防止結構破壞。而浸泡高溫(80°C)熱水，結合浸泡時間長，使其外部形成較緊密且較厚的糊化層，防止粉圓在浸泡冷水(下一步驟)時內部結構被過量水分破壞(如圖 5- 2)。另外，根據目前研究結果，粉圓內聚性隨浸泡熱水溫度上升呈上升趨勢，因此推測浸泡熱水溫度可能有更好條件。

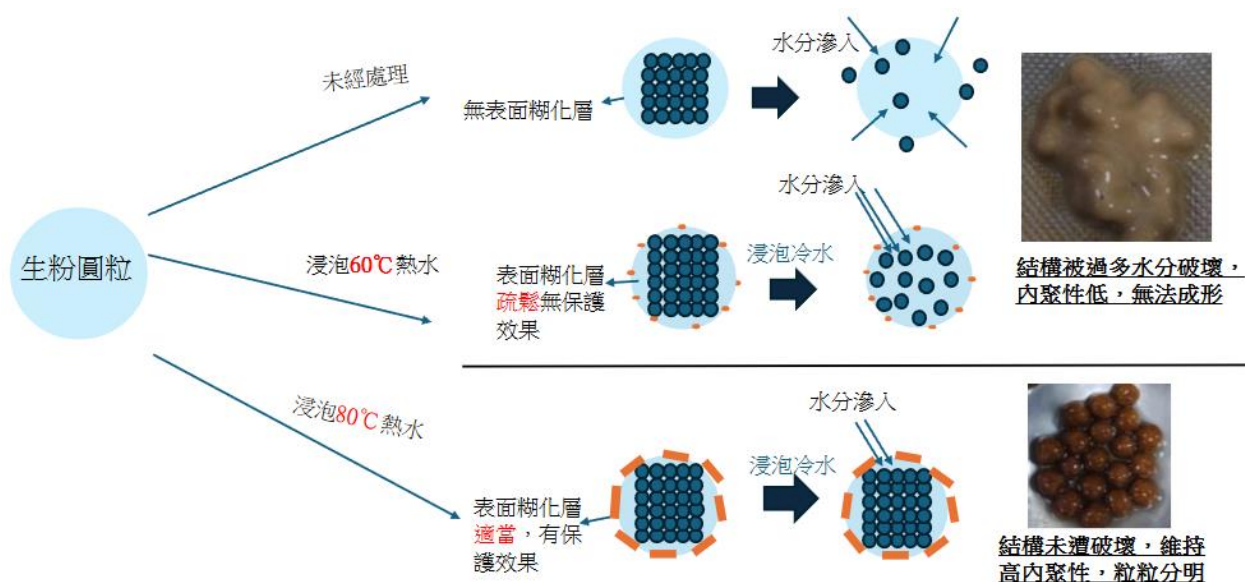


圖 5- 2 浸泡熱水溫度最佳值反應模型示意圖(此圖由作者進行拍攝、繪製)

2. 浸泡冷水溫度、時間：浸泡冷水 10°C (溫度適中)、5 小時(時間長)

浸泡冷水目的有二：

- (1)終止糊化反應和使粉圓內部水分含量增加達到最適值
- (2)高溫熱水使粉圓快速糊化之後，適中的水溫能在終止糊化反應同時避免以下情形

表 5-1 浸泡不同溫度冷水之反應

情況	推測反應模型	示意圖
水溫過低(0°C)	粉圓外層因溫度驟降而收縮，導致結構過於緊密，而造成水分無法進入內部(如圖 5- 3)	<p>圖 5- 3 浸泡冷水溫度過低示意圖 (此圖由作者進行繪製)</p>
水溫過高(20°C)	粉圓外層因溫度過高而無法收縮，導致結構過於鬆散，而造成過多水分進入內部(如圖 5- 4)	<p>圖 5- 4 浸泡冷水溫度過高示意圖 (此圖由作者進行繪製)</p>

搭配浸泡時間長，粉圓內部水分含量達最適值，有助糊化適當而達到最佳內聚性。

3. 烹煮時間：20 分鐘(時間適中)

烹煮目的：使能量和水分迅速進入粉圓內部，外部進入和內部原有的水分獲得熱能後與澱粉分子結合，進行糊化反應。因此，烹煮時間適當，能量在使氫鍵結構能維持完整性的同時，加熱水使其澱粉分子結合、均勻糊化。若烹煮時間過長，則過度糊化；烹煮時間過短，則糊化不足，兩種情況結構皆不穩定，內聚性低(如圖 5- 5)。

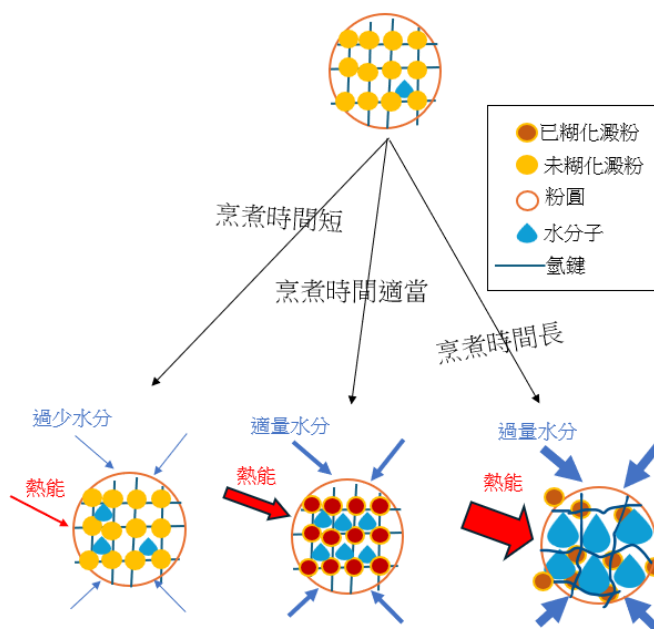


圖 5- 5 烹煮時間最佳值反應模型示意圖(此圖由作者進行繪製)

4. 悶煮溫度、時間：悶煮 50°C(溫度低)、5 分鐘(時間短)

悶煮目的：較低的溫度使粉圓糊化均勻

因此，悶煮溫度低方面，分為水分和溫度兩部分影響，造成內聚性提高：

(1)水分方面：外部澱粉分子間孔隙較小(溫度較低)，水分緩慢滲入粉圓，內部結構不被破壞。

(2)溫度方面：糊化速度緩慢，粉圓內外糊化較均勻(如圖 5- 6)。

同時，悶煮時間短方面，是因為水分在悶煮 5 分鐘達均勻後，若持續悶煮則過多水分破壞內部結構，導致內聚性降低。

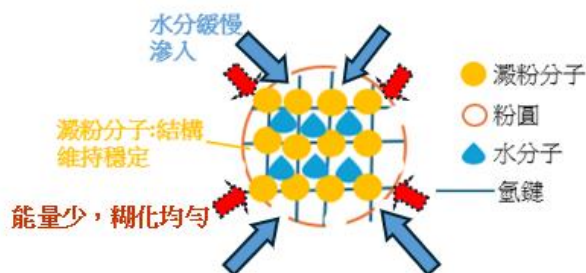


圖 5- 6 悶煮時間最佳值反應模型示意圖(此圖由作者進行繪製)

(二) 相同烹煮條件下粉圓 B 內聚性較粉圓 A 高之反應模型

因為粉圓 B 粒徑較粉圓 A 小 12.5%(粉圓 A 粒徑為 8mm，而粉圓 B 粒徑僅為 7mm)，所以在相同烹煮條件下糊化較完全，內聚性較高。

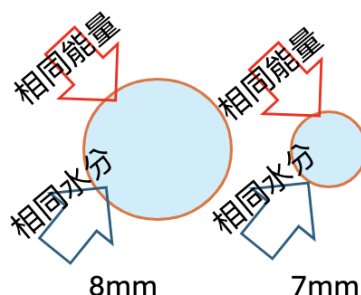


圖 5- 7 粉圓 B 反應模型示意圖(此圖由作者進行繪製)

(三) 粉圓內聚性交互作用之反應模型探討

1."浸泡熱水溫度"和"浸泡冷水溫度"之交互作用

(1) 目前內聚性最佳條件為：浸泡 80°C(高溫)熱水+浸泡 10°C(適溫)冷水，改為浸泡 0°C(低溫)冷水則為次佳條件，改為浸泡 20°C(高溫)冷水則為內聚性最低條件。

表 5-2 浸泡不同冷水溫度對於糊化反應的影響

浸泡冷水溫度	推測反應模型(如圖 5- 8)
0°C	雖然過度收縮導致較少水分進入，但能夠有效終止糊化，內聚性亦佳。
10°C	在終止糊化反應的同時，使其粉圓外部收縮程度適中，使適量水分能夠進入粉圓內部。
20°C	浸泡 20°C 冷水未能終止其糊化反應，導致內聚性因過度糊化而降低。

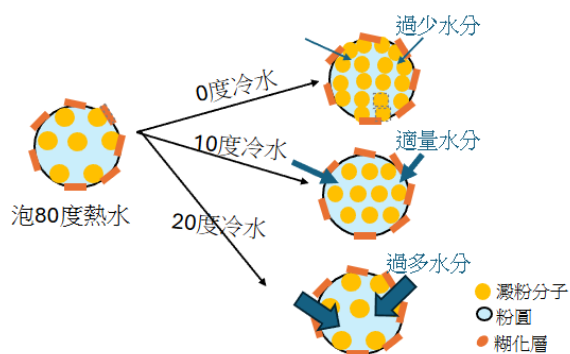


圖 5- 8 泡 80°C 熱水後於不同溫度冷水浸泡之反應示意圖(此圖由作者進行繪製)

(2)其餘內聚性次佳條件為：浸泡 70°C(適溫)熱水+20°C(高溫)冷水

浸泡 20°C 冷水在能終止糊化反應的同時，使其粉圓外部收縮程度適中，使適量水分能夠進入粉圓內部。

(3)浸泡 60°C(低溫)熱水+浸泡 0/20°C(低溫)冷水為內聚性最低條件，而改為浸泡 10°C(適溫)冷水則為內聚性次佳條件，相較於浸泡 60°C熱水後，粉圓外部無法形成足夠緊密的糊化層保護內部結構。

表 5-3 浸泡不同冷水溫度對粉圓外側層收縮程度

浸泡冷水溫度	推測反應模型(如圖 5- 9)
0°C	外層過度收縮，且 60°C溫度較低，終止糊化反應對於粉圓影響並不顯著。
10°C	外層收縮適當，外層澱粉分子間孔隙適中，水分進入量適中，內聚性高
20°C	外層無法收縮，水分進入量過多，澱粉結構被破壞，內聚性低。

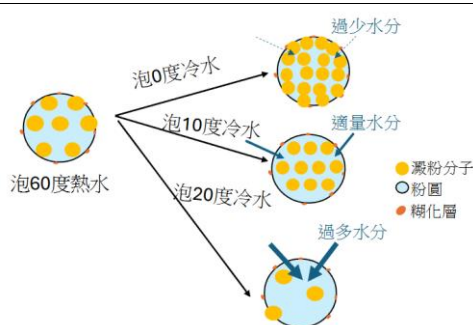


圖 5- 9 泡 60°C熱水後於不同溫度冷水浸泡之反應示意圖(此圖由作者進行繪製)

(4)如何調整浸泡冷水溫度使粉圓收縮程度適中?

綜合以上討論推測，當浸泡熱水溫度為 70°C以下、60°C以上時，若浸泡熱水和冷水溫度差為 50°C內聚性達佳值。而浸泡熱水 80°C時，因溫度較高，則需浸泡 10°C冷水使其糊化終止。

2."浸泡冷水溫度"和"悶煮溫度"之交互作用

(1) 目前內聚性最佳條件為：浸泡 10°C(適溫)冷水+悶煮溫度 70°C(高溫)

浸泡 10°C冷水使澱粉分子間距離適中，內部水分含量適當，之後沸水烹煮水分也較易進入內部，此時悶煮溫度需提高，使內部澱粉能充分糊化。

(2)目前內聚性次佳條件為：浸泡 10°C(適溫)/20°C(高溫)冷水+悶煮 50°C(低溫)、0°C(低溫)冷水+悶煮 60°C

浸泡 10°C或 20°C冷水後澱粉分子間距離較大且內部水分較多，之後沸水烹煮時糊化較為均勻，悶煮 50°C能夠讓餘溫持續糊化粉圓內部並減少水分持續進入，使糊化均勻。

(3)浸泡冷水溫度為 0°C時，內聚性在悶煮 60°C(適溫)達到頂峰。浸泡冷水溫度為 10°C時，內聚性在悶煮 60°C(適溫)達到低點。浸泡冷水溫度 20°C時內聚性隨悶煮溫度下降呈上升趨勢。

表 5-4 浸泡不同冷水溫度對於粉圓的含水率之影響

浸泡冷水溫度	推測反應模型(如圖 5- 10)
0°C	外層緊縮使內部水分較少。適當的悶煮溫度使外部水分能進入粉圓內部並與澱粉分子產生糊化反應的同時，避免悶煮溫度過低水分無法進入、澱粉無法糊化，或是悶煮溫度過高糊化不均。
10°C	內部水分適當，因為 60°C 恰為澱粉糊化溫度，此時澱粉結構較不穩定，內聚性較低。
20°C	內部水分較多，悶煮溫度低能減緩水分進入速率，使結構不因過多水分而被破壞。

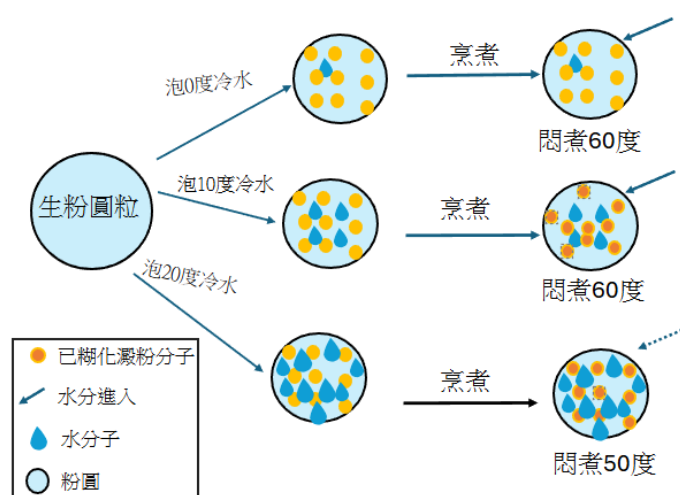


圖 5- 10 粉圓浸泡冷水和悶煮交互作用示意圖(此圖由作者進行繪製)

3. “浸泡熱水溫度”和”悶煮溫度”之交互作用

(1) 目前內聚性最佳條件為：浸泡 60°C(低溫)熱水+悶煮溫度 50°C(低溫)

於 50°C 悶煮粉圓能使其內部結構轉趨穩定，然而能量不足使水分極難滲入，導致糊化不均。浸泡 60°C 的熱水能夠使外層的糊化層較薄，雖然悶煮溫度 50°C 時缺乏能量使水分進入粉圓，仍能有適當的水分進入，均勻糊化內部，提高內聚性。

(2) 悶煮溫度高時，內聚性隨浸泡熱水溫度提高呈上升趨勢；悶煮溫度低時，內聚性隨浸泡熱水溫度提高呈下降趨勢

悶煮溫度高時，能量使更多水分進入粉圓使內部結構易遭到破壞，此時浸泡熱水溫度提高能在外形成較緊密糊化層減少外部水分滲入，進而保護內部結構提高內聚性。

悶煮溫度低時，較少能量導致較少水分進入粉圓均勻糊化內部，此時浸泡熱水溫度降低能夠在外形成較疏鬆糊化層使更多水分滲入，進而使內部糊化均勻提高內聚性。

三、探討後製處理對粉圓內聚性影響

冷水瀝乾後，粉圓的內聚性增加，常溫放置後內聚性則顯著增加。推測原因為冷水瀝乾造成粉圓外層老化(如圖 5- 11)，粉圓結構變硬，因此內聚性增加。常溫放置則是因粉圓內部水分蒸發(如圖 5- 12)，導致粉圓結構變硬，因此內聚性增加。

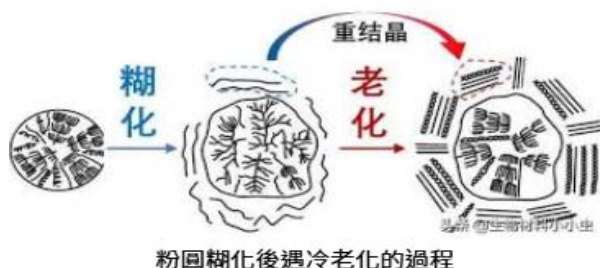


圖 5- 11 粉圓遇冷老化過程示意圖

(出處詳見圖片來源 2)

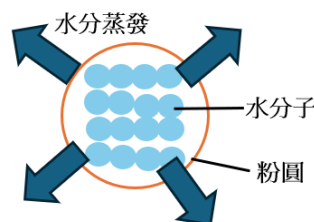


圖 5- 12 粉圓內部水分蒸發示意圖

(此圖由作者進行繪製)

四、官能品評

(一)大眾普遍認為自製烹煮流程較 Q 彈(由圖 5-14)

這除了證實內聚性與大眾認知的”Q 彈“有一定關聯性，也說明我們的自製烹煮流程有一定的市場價值。

(二)回饋中有 11 人表示自製烹煮流程粉圓口感較傳統烹煮流程均勻

推測原因是自製烹煮流程中“浸泡冷水”的步驟使水分進入粉圓，使粉圓能均勻糊化。而傳統烹煮流程則是以沸水直接烹煮，熱水劇烈糊化粉圓外部，造成外層過度糊化而軟爛，內層又無法完全糊化，造成外軟內硬。

(三)不同年齡層喜好有顯著差異

- 1.本來以為無論任何年齡層都喜愛 Q 彈的粉圓，然而結果(如圖 5-14)發現 1-10 歲和 51 歲以上的族群較喜愛偏軟的粉圓，而 21-30 歲喜愛較 Q 彈的粉圓。
- 2.整體而言，喜愛粉圓 Q 彈程度：21-30 歲>11-20 歲、31-50 歲>1-10 歲、51 歲以上。由先前 SN 因子反應圖結果，我們建立了使 8mm 粉圓能達到最佳彈性的烹煮條件。但是由此實驗後，我們希望能建立能符合各年齡需求的粉圓烹煮流程模型。於是，我們從自製烹煮流程之悶煮步驟切入，試著增加時間的操作變因（較容易控制且市場可行性高）。同時，為了推廣至各種粉圓，我們也進一步討論如何因應不同粒徑改變烹煮條件。
- 3.另外，在外觀的評分上未有顯著差異(如圖 5- 16)，表示我們和市售粉圓的賣相無太大區別。

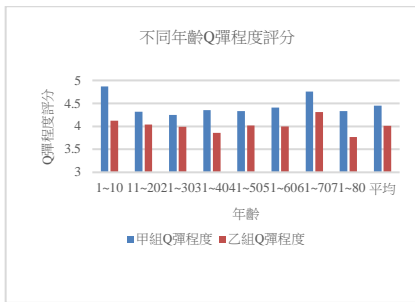


圖 5-14 不同年齡 Q彈程度評分

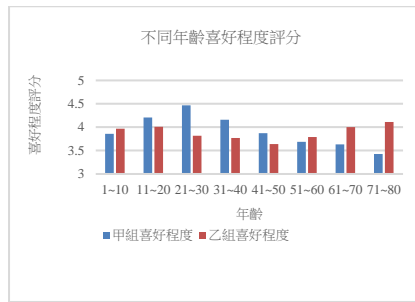


圖 5-15 不同年齡喜好程度評分

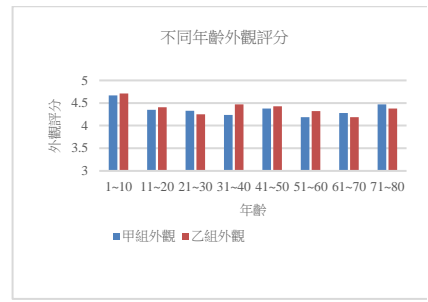


圖 5-16 不同年齡外觀評分

(此三圖皆由作者進行繪製)

五、開發適用不同粉圓粒徑的最佳烹煮流程

(一) 7mm、8mm、9mm 粉圓趨勢觀察（如圖 4-29）

1.在實驗操作範圍內，7mm 粉圓內聚性隨悶煮時間增加而下降，表示 7mm 粉圓在悶煮 5 分鐘後糊化反應已完成，因此在悶煮時間大於 5 分鐘之後，澱粉粒子內水分持續增加，粉圓結構強度隨之降低。

2.粒徑 8mm、9mm 粉圓內聚性在悶煮 60 分鐘前，內聚性隨悶煮時間增加而上升，但是在 60 分鐘後卻呈現下降趨勢。這表示粒徑 8mm 以上的粉圓在相同烹煮條件下，至少需要悶煮 60 分鐘後才能糊化完全。然而，5-60 分鐘之間的實驗數據不足，無法判斷更精準的轉折點。

(二) 客製化悶煮時間滿足全年齡層需求

表 5-5 不同年齡區間偏好粉圓內聚力

年齡	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80
7mm 悶煮時間 (分)	29.58	15.14	0.69	15.14	29.58	44.03	58.47	72.92
8mm 悶煮時間 (分)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.72/ 75.61	5.38/ 87.95	97.37
9mm 悶煮時間 (分)	35.05/ 79.24	N/A	N/A	N/A	35.05/ 79.24	22.06/ 92.23	12.71/ 101.57	6.92/ 107.37

註：其中部分內聚性條件因數據不足，回歸曲線預測無法達到，以 N/A 表示。

綜合以上討論，待完成不同粒徑與不同悶煮時間的實驗數據，即可精準打造針對全年齡層喜好的客製化烹煮流程。

陸、結論

一、成功提高粉圓 43%內聚性由 0.6(市售烹煮流程) 到 0.86(本研究最佳烹煮流程)：

(一) 實驗最佳值：

- 1.浸泡熱水溫度及時間：80 度、90 秒
- 2.浸泡冷水溫度及時間：10 度、1 小時
- 3.烹煮時間：20 分鐘
- 4.悶煮溫度及時間：50 度、5 分鐘

二、水平展開研究成果

建立粒徑 7/8/9mm 粉圓之完整烹煮流程與彈性模型，可精準打造滿足全年齡層喜好的客製化烹煮流程，具有市場化潛力。

三、未來展望

結合 AI 智慧機器人達成模組化、自動化、客製化粉圓烹煮流程，實現商業應用。

四、成功與食品大廠簽署合作意向



圖 6-1 與公司主管之合照
(圖片由作者自行拍攝)

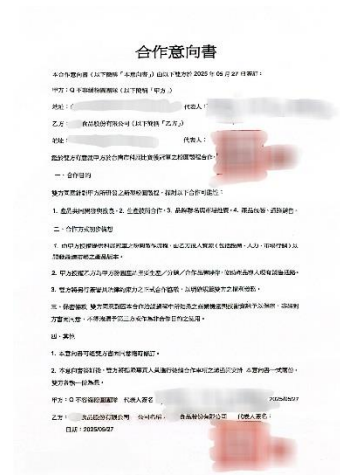


圖 6-2 合作意向書
(圖片由作者自行拍攝)

柒、參考文獻資料

行政院環境保護署毒物及化學物質局(2017/11)珍珠變 Q 變硬的秘密: 順丁烯二酸化學澱粉 —

—這就是所謂 Q 彈的代價?(上)。PanSci 泛科學。取自 <https://pansci.asia/archives/128261>

李育琴(2014/01)。懶人包:2013 年順丁烯二酸(毒澱粉)事件(上)。環境資訊中心。取自

<https://e-info.org.tw/node/97156>

沈明鎮、何志鴻、陳品妙(2012)。波霸珍珠神秘的外衣。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
高職組 農業及生物科技科。

長安化學工業股份有限公司(2023/06)。珍珠奶茶的粉圓為甚麼會 Q?是不是加了甚麼黑魔法?

長安化學工業股份有限公司 Facebook。取自

<https://www.facebook.com/Chanan.pharma/posts/277739354918405/>

長宏儀器開發(2023/09)。全質構分析。長宏儀器開發股份有限公司。取自

https://www.horninstr.com.tw/tra/texture_analyzers/ta_0_3.html。

品質工程(2024/10)。維基百科。取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/品質工程>

食話食說 Foodtalkingtw(2022/08)。煮飯的學問遠超過你想像—澱粉的糊化與老化到底是什

麼?。食話食說。取自 [https://foodtalkingtw.com/煮飯的學問遠超過你想像-澱粉的糊化與
老化到底/](https://foodtalkingtw.com/煮飯的學問遠超過你想像-澱粉的糊化與老化到底/)

粉圓(2024/10)。維基百科。取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/粉圓>

陳昭穎、許薰延、陳聖文(2020)。珍珠膜來膜去-天然快煮粉圓之研發。中華民國第 60 屆中
小學科學展覽會高職組農業與食品學科。

鄧皓容(2015)。澱粉及膠類用於紫玉地瓜圓之研究。國立高雄餐旅大學。碩士論文。取自

<https://hdl.handle.net/11296/w8sht6>

圖片來源

1. iFuun(2016/06/11)。為什麼糯米吃起來那麼黏? 取自

<http://www.ifuun.com/a2016611143919/>

2. 長安化學工業股份有限公司(2024/11/25)。長安化學工業股份有限公司。Facebook。取自

[https://www.facebook.com/Chanan.pharma/posts/pfbid0RFD0LXxzzqLmiE4X1RTrkX7WZX
kU348XbUGGpsNFBXHZxZu975VYZnNPpiLsJc59l](https://www.facebook.com/Chanan.pharma/posts/pfbid0RFD0LXxzzqLmiE4X1RTrkX7WZXkU348XbUGGpsNFBXHZxZu975VYZnNPpiLsJc59l)

3. 生物材料小小蟲(2020/02/04)。煮餃子加鹽、加涼水的科學原理。每日頭條。取自

<http://kknews.cc/zh-tw/food/azke8nn.html>

4. 全質構分析(n.d.)。長紅儀器股份有限公司。取自

https://www.horninstr.com.tw/tra/texture_analyzers/ta_0_3.html

【評語】 032906

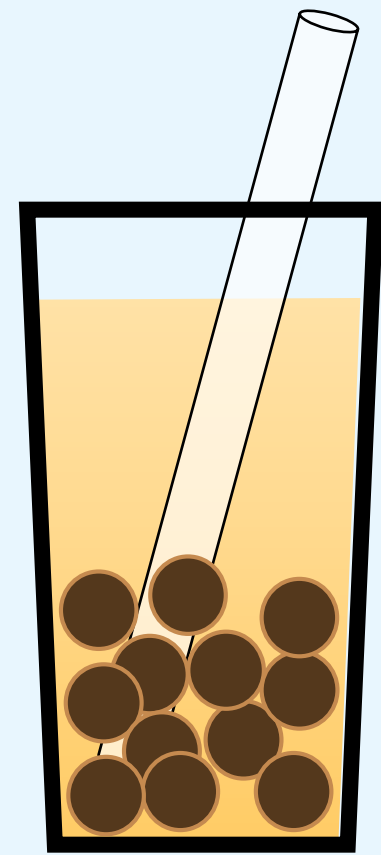
本作品著力在於改進前人的研究結果，並進行模型的探討，以田口直交法進行實驗，並以 TPA 分析粉圓 Q 彈度，進行最適條件的分析，並加上感官品評來分析不同年齡層民眾的喜好度，達到客製化的應用模式，是應用性高的研究作品，作品在結果討論都有清楚的陳述和深入的討論，可看出參賽者的努力和熱忱，是用心的作品。以下建議供同學參考：

1. 摘要中「SN」縮寫需要定義，不然不知道是指什麼。
2. 同學在實驗設計時有考慮到科學方法的重複性，每次取 3 粒量測，但因樣品取得不甚困難，應可取更多粒量測使數據更有可信度。作品中亦應敘明每次煮/浸泡粉圓的水量和顆數，這些都會影響結果，也應作好控制。此外，除了提供平均值之外，建議也要報導數據的標準差或誤差範圍。此外，還可以考慮實驗的再現性，於不同時日重複烹煮後，進行量測。
3. 若考慮量測的誤差範圍，例如浸泡熱水溫度的數值，是否確實有顯著差異？尤其 P.19 論述「粉圓內聚性隨浸泡熱水溫

度上升呈上升趨勢」，若持續增加溫度或更長時間是否能有更高的內聚性？

4. 請定義「信噪比」是如何計算出來的。在只有三個資料點時，實不容易理想的討論雜訊。
5. 建議同學可以再設計適當的器具來進行客觀的比較分析。例如：彈性、黏性、糊化程度，可以加入科學方法加以比較。
6. 除了置於常溫通風處（較類似於食品店內保存狀況），建議也可以考慮例如長時間泡在水裡、奶茶裡、刨冰裡等等，偏向實際購買後食用的狀況。
7. P.10 局部放大的圖形比較，可採用軟體分析。
8. 使用方程式擬合時，需說明所選擇函數的原因與每一項變數對應的物理量，不然沒有太大意義。尤其在圖 4-29 中，有的用 $ax+b$ 有的用 ax^2+bx+c 處理，原因不明。此外，對於只有三個資料點用三個變數擬合，其 R^2 必然為 1，容易有過度擬合的狀況。

作品海報



Q不容緩！

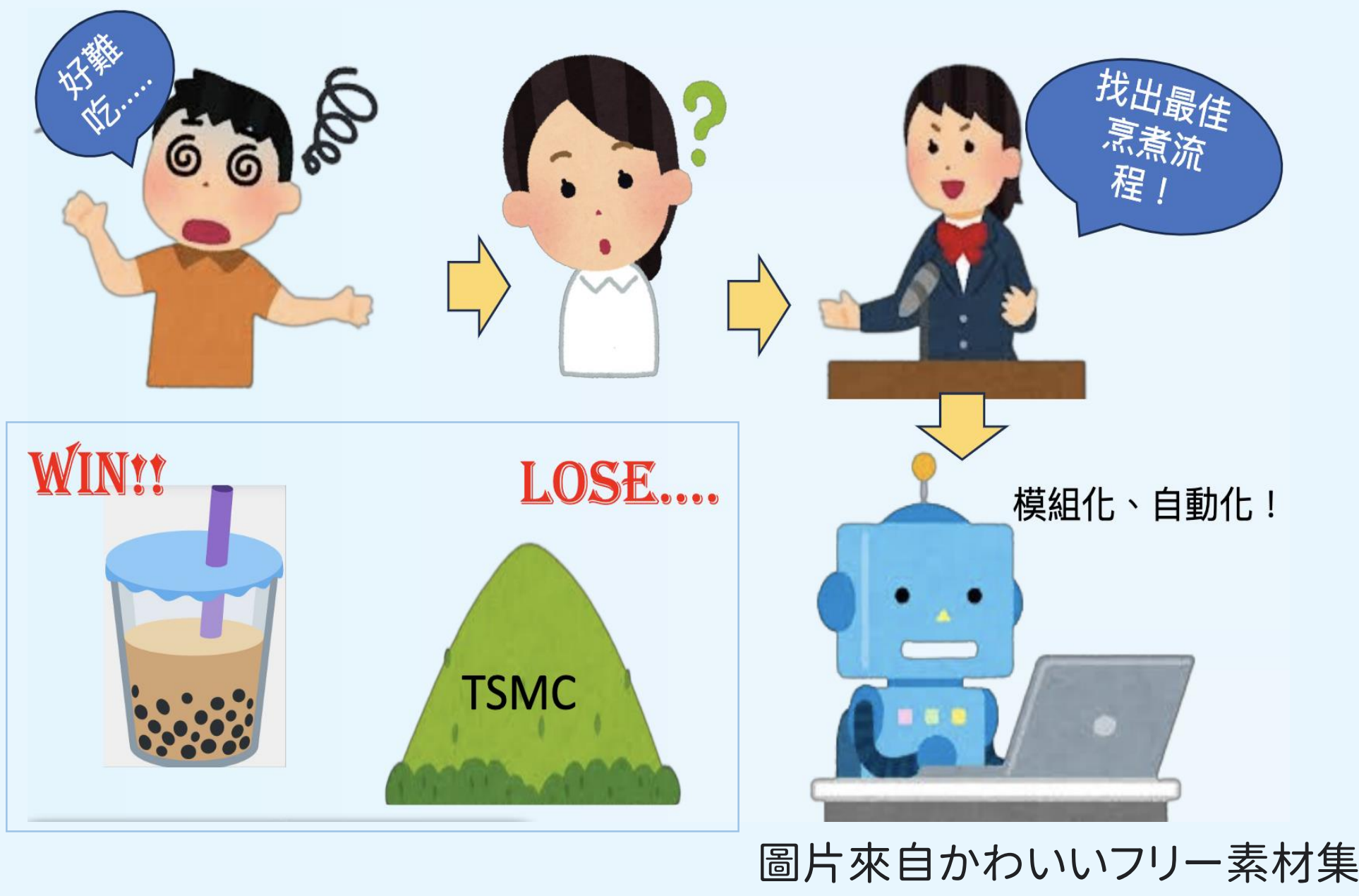
粉圓彈性模型之建立

壹、前言

一、摘要

透過單/多變因實驗設計，分析各參數對粉圓內聚性影響並建立彈性模型。單變因實驗顯示，粉圓烹煮60分鐘後**體積膨脹1.4倍**，超過120分鐘後則因澱粉粒子外層崩解，體積縮小。多變因依SN反應圖找到最佳條件：生粉圓浸泡**80度熱水90秒**、**10度冷水1小時**、**沸水煮20分**、**50度悶煮5分鐘**，並可依粉圓粒徑最佳化烹煮條件。品評結果顯示，青年族群最愛此烹煮條件，亦可**調整軟硬度**滿足全齡需求。未來可結合AI機器人實現自動化、客製化流程，實現商業應用。

二、研究動機



三、文獻回顧

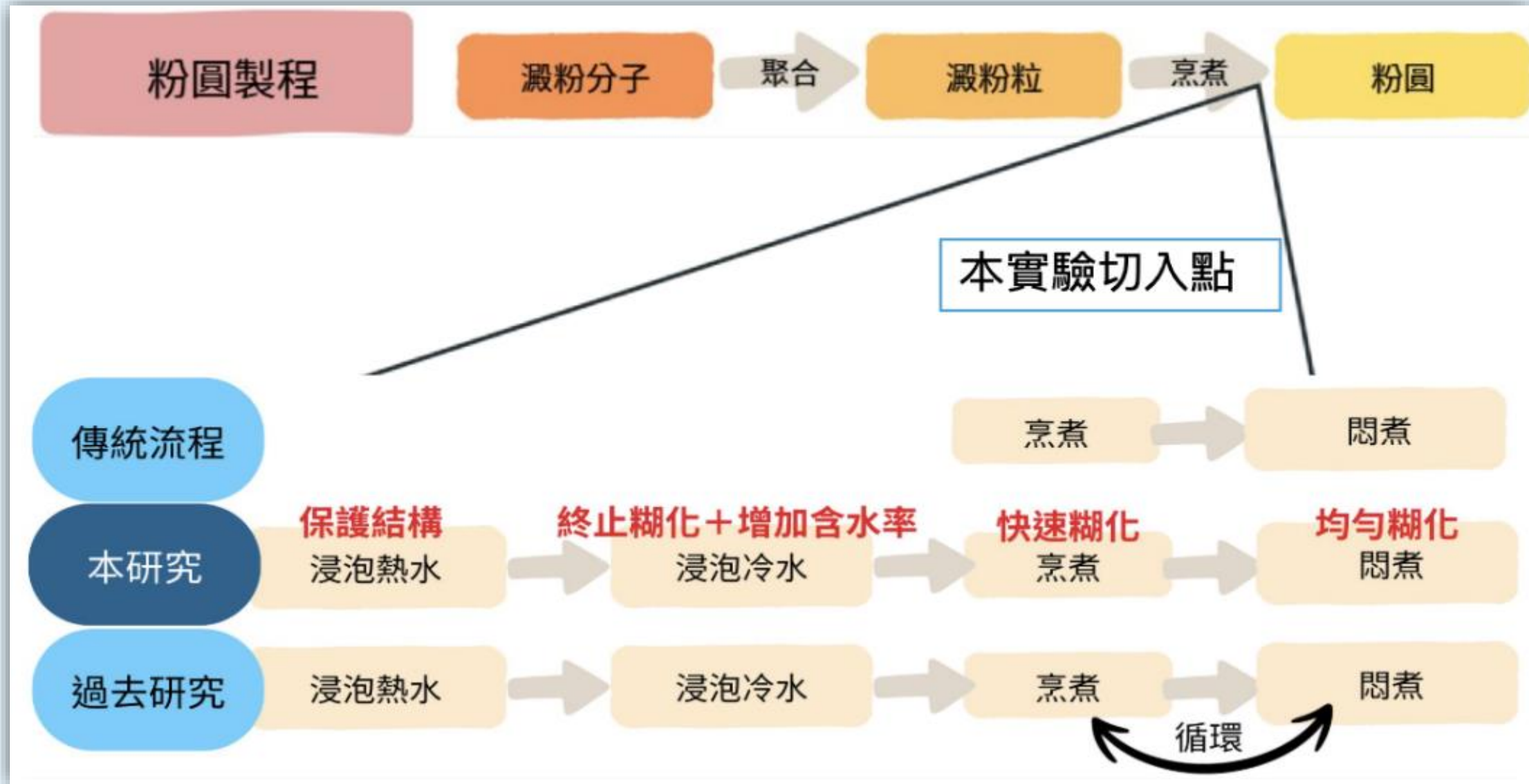


圖1-7研究切入點(此圖由作者進行繪製)

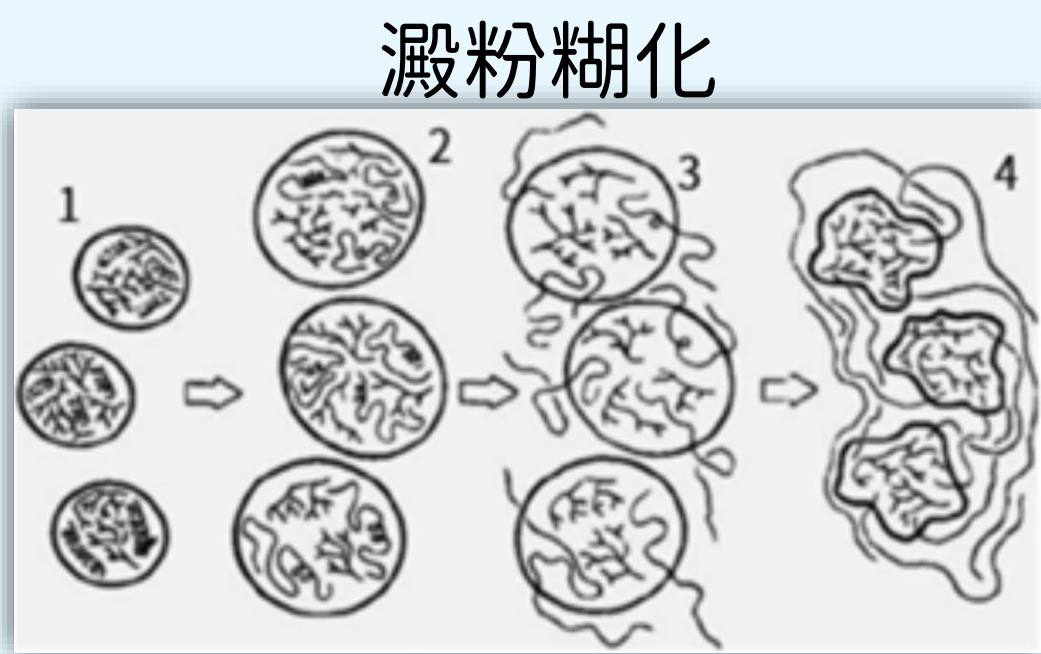


圖1- 2澱粉粒糊化過程

來源：為什麼糯米吃起來那麼黏？-iFuun

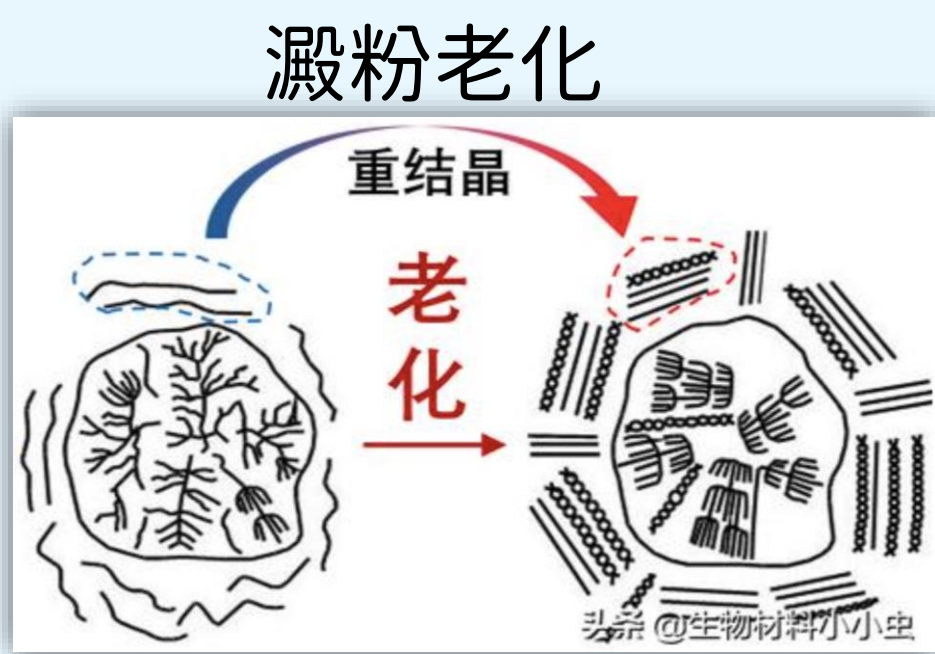


圖1- 3粉圓遇冷老化的過程

來源：煮餃子加鹽、加涼水的科學原理-每日頭條

四、研究目的

- (一) 探討**熱能**、**水**、**時間**對澱粉粒子糊化反應的影響，解析Q彈粉圓的關鍵控制因子。
- (二) 運用taguchi直交表設計粉圓烹煮流程實驗，推論澱粉糊化反應與其結構變化，建立**粉圓彈性模型**。
- (三) 調整關鍵控制點，依模型設計不同粒徑粉圓的最佳烹煮條件，並可客製化軟硬度，滿足全年齡層之顧客喜好。

貳、研究設備及材料

本次研究使用的器具及設備(圖皆由作者進行拍攝)



Thermo加熱板



粉圓A、粉圓B



溫度計



TPA質構分析儀

有別於一般主觀的描述，能客觀量化粉圓結構強度。本研究中使用”內聚性”指標(A2/A1)

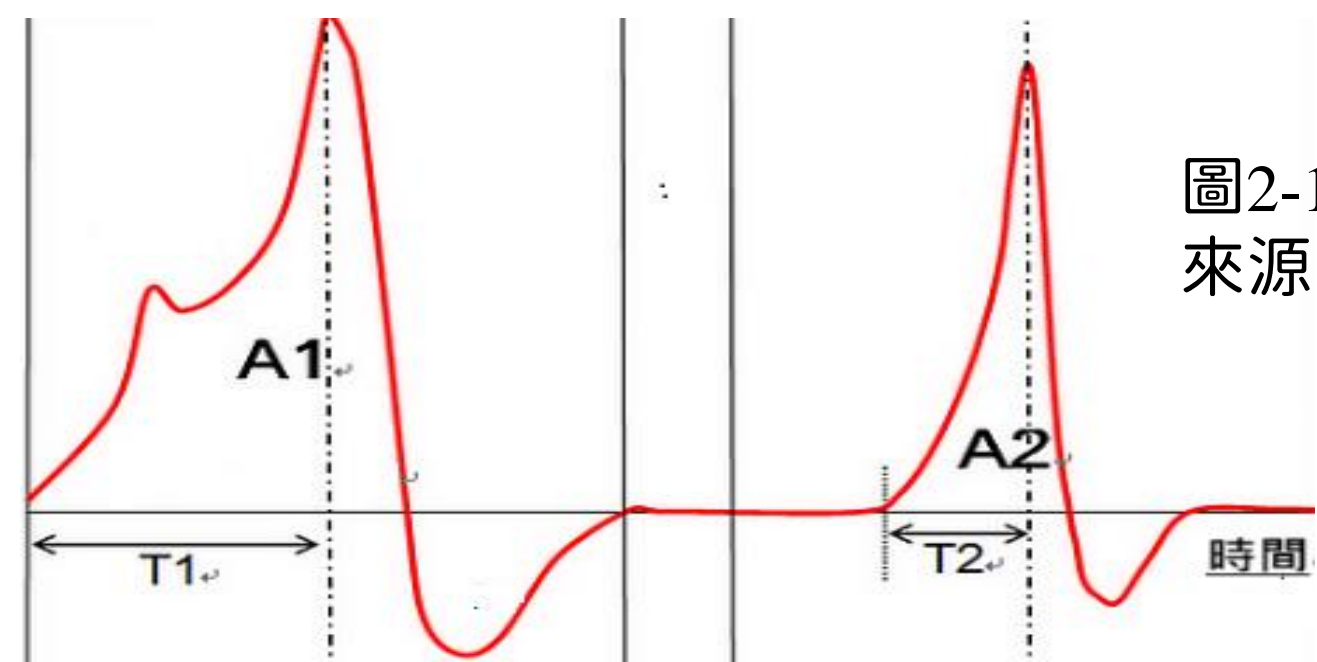


圖2-1力與時間關係圖
來源：分析百科測試網

參、研究過程與方法

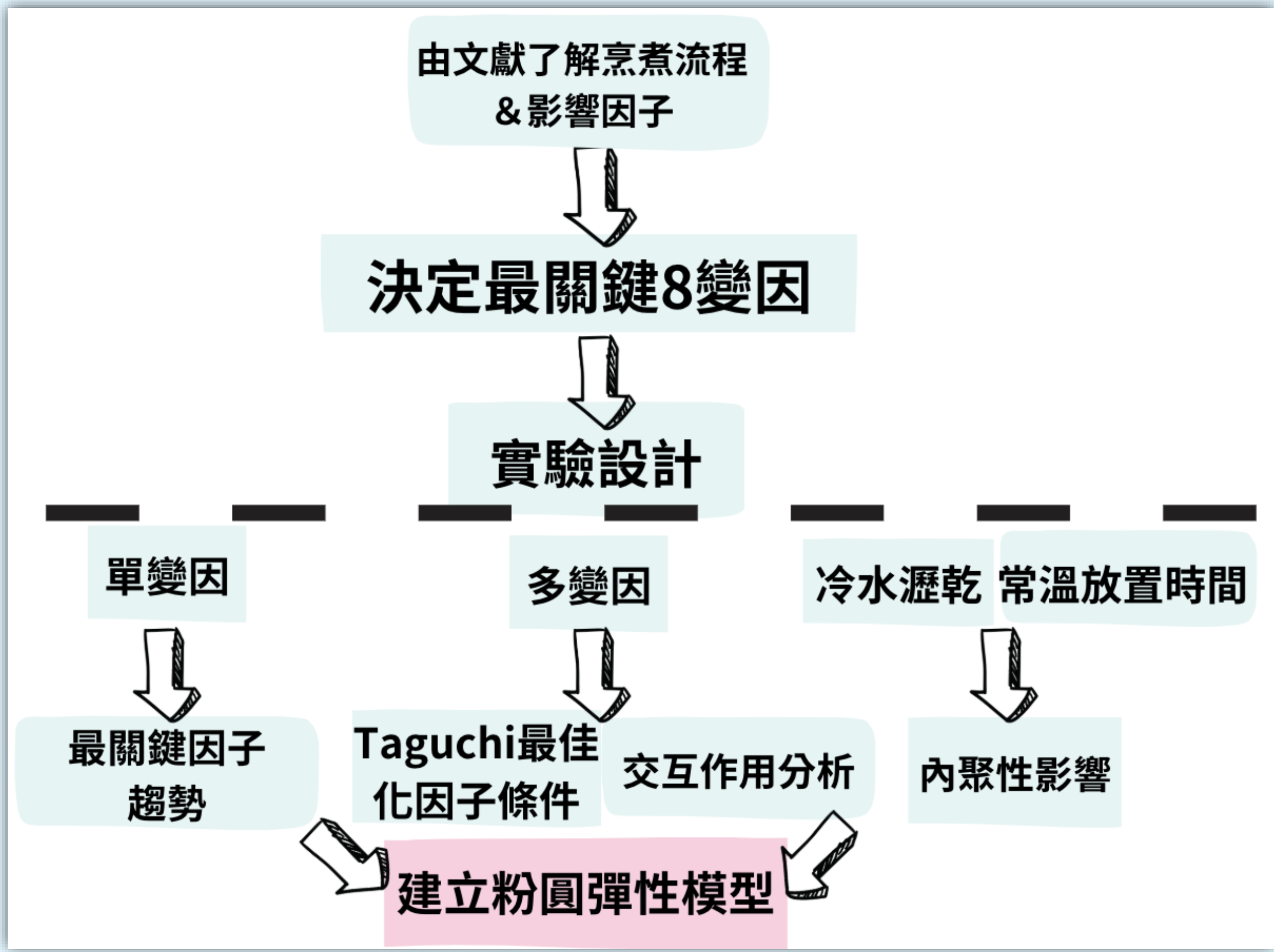


圖3- 1 研究架構圖(此圖由作者進行繪製)

表3- 2 L18直交表(此表由作者自行製作)

	種類	熱水溫	熱水時	冷水溫	冷水時	烹煮時	悶煮溫	悶煮時
1	A	60度	30秒	0度	1小時	10分	50度	5分
2	A	60度	60秒	10度	3小時	20分	60度	10分
3	A	60度	90秒	20度	5小時	30分	70度	15分
4	A	70度	30秒	0度	3小時	20分	70度	15分
5	A	70度	60秒	10度	5小時	30分	50度	5分
6	A	70度	90秒	20度	1小時	10分	60度	10分
7	A	80度	30秒	10度	1小時	30分	60度	15分
8	A	80度	60秒	20度	3小時	10分	70度	5分
9	A	80度	90秒	0度	5小時	20分	50度	10分
10	B	60度	30秒	20度	5小時	20分	60度	5分
11	B	60度	60秒	0度	1小時	30分	70度	10分
12	B	60度	90秒	10度	3小時	10分	50度	15分
13	B	70度	30秒	10度	5小時	10分	70度	10分
14	B	70度	60秒	20度	1小時	20分	50度	15分
15	B	70度	90秒	0度	3小時	30分	60度	5分
16	B	80度	30秒	20度	3小時	30分	50度	10分
17	B	80度	60秒	0度	5小時	10分	60度	15分
18	B	80度	90秒	10度	1小時	20分	70度	5分

肆、研究結果與討論

實驗一、單因子(烹煮時間)對粉圓彈性影響

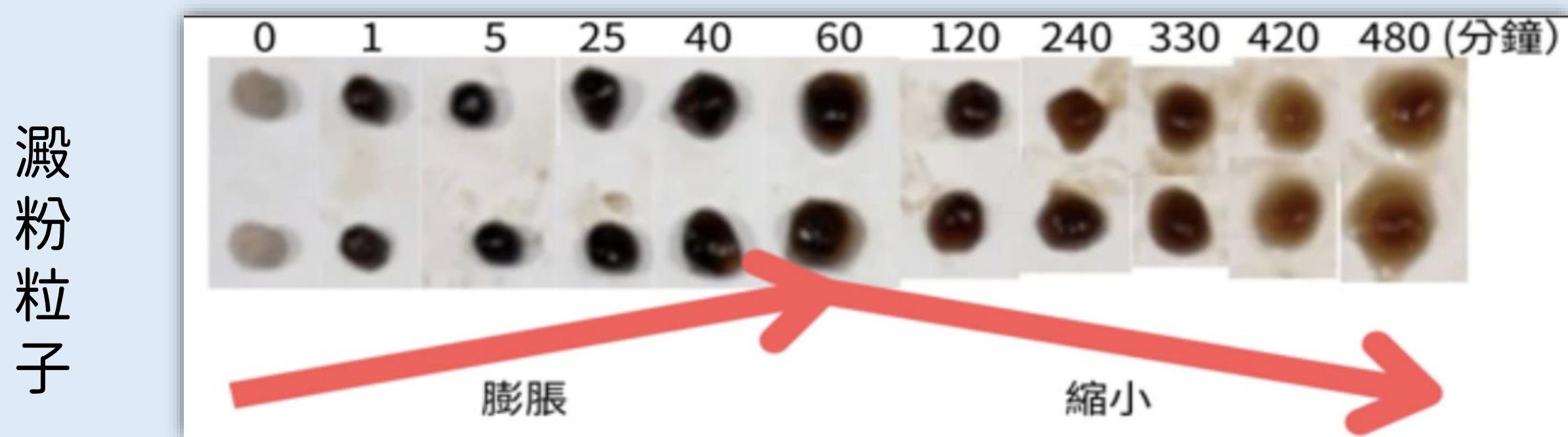


圖4- 1粉圓在各烹煮時間下糊化情形(此圖由作者進行拍攝)

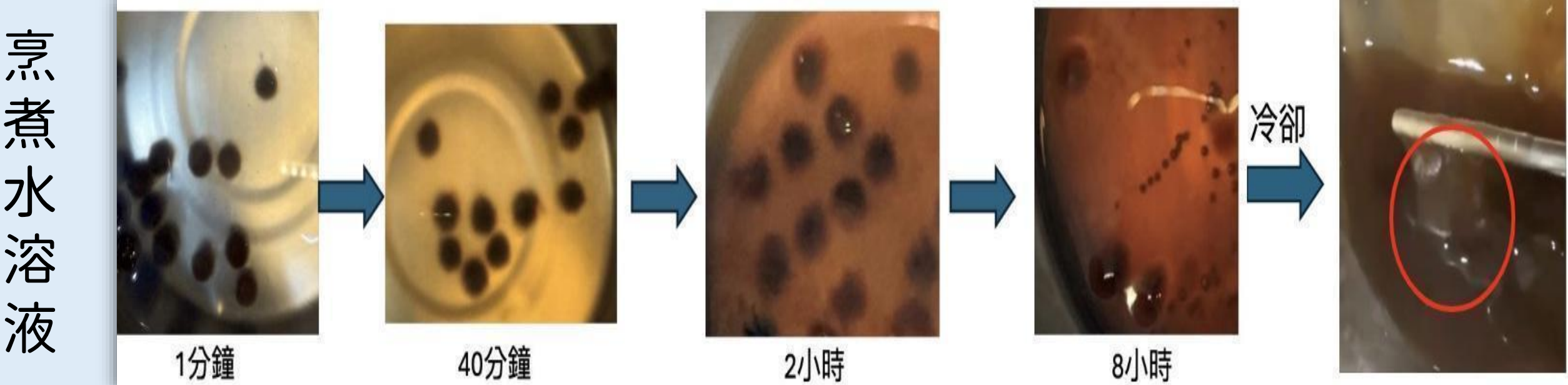


圖4- 2粉圓烹煮過程(此圖由作者進行拍攝)

粉圓外觀的觀察

- 在前60分鐘，內部糊化量>外層澱粉溶解量，體積逐漸膨脹。
- 超過60分鐘，內部糊化量<外層澱粉溶解量，體積逐漸縮小。

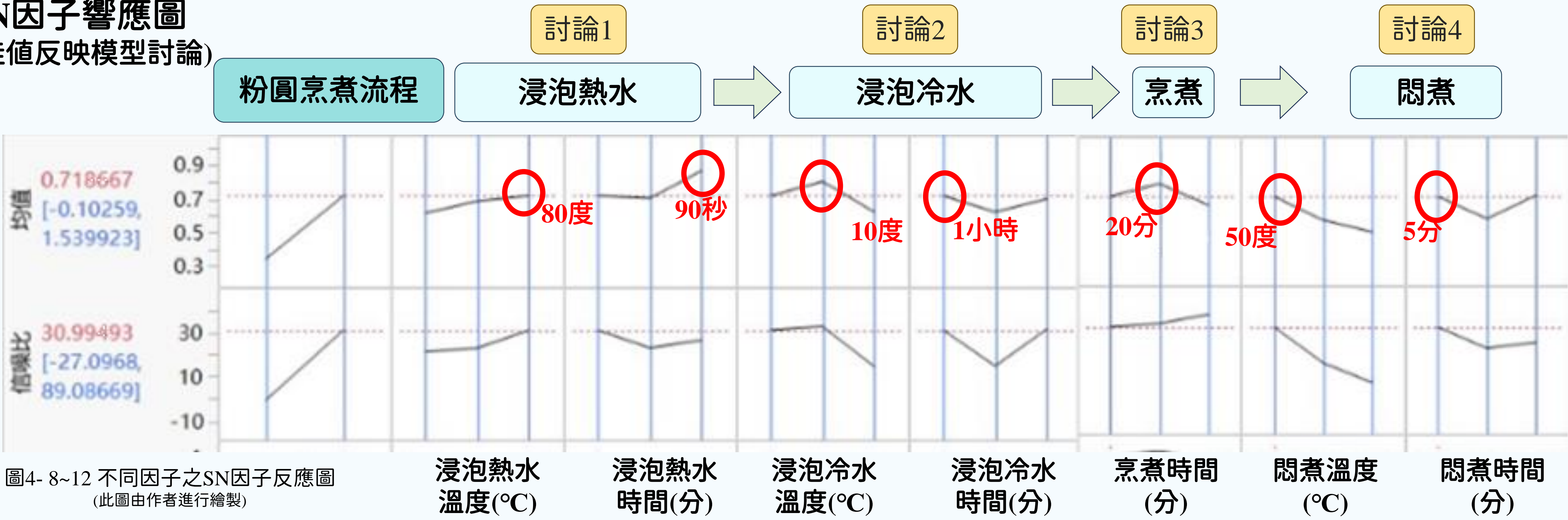
煮液的觀察

冷卻後的煮液呈濃稠凝膠狀
推測：為溶解於水中之澱粉分子間氫鍵重新排列所形成。

實驗二、多因子 (粉圓各烹煮流程)對粉圓內聚性交互作用

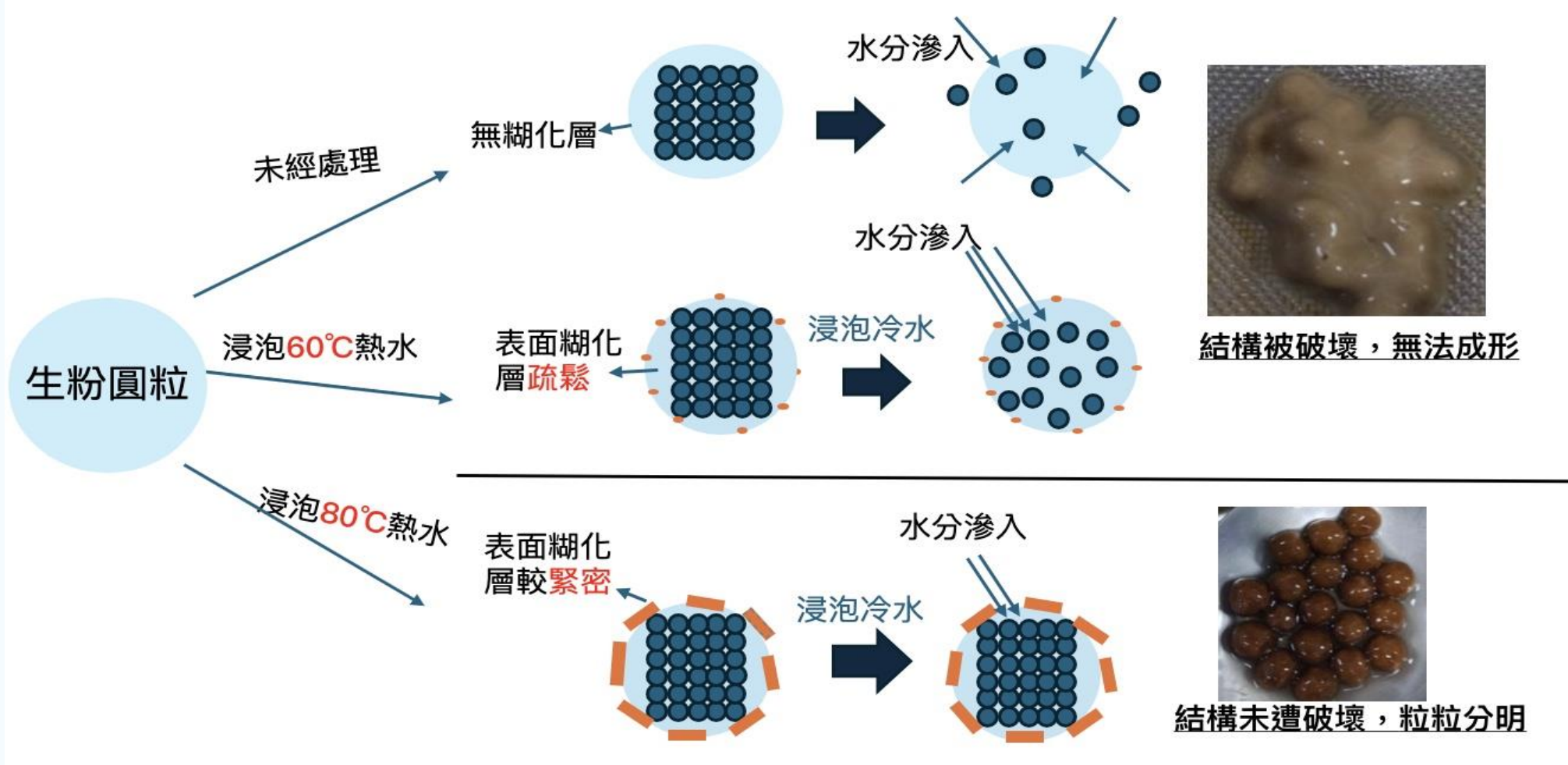
(一) SN因子響應圖

(實驗最佳值反映模型討論)



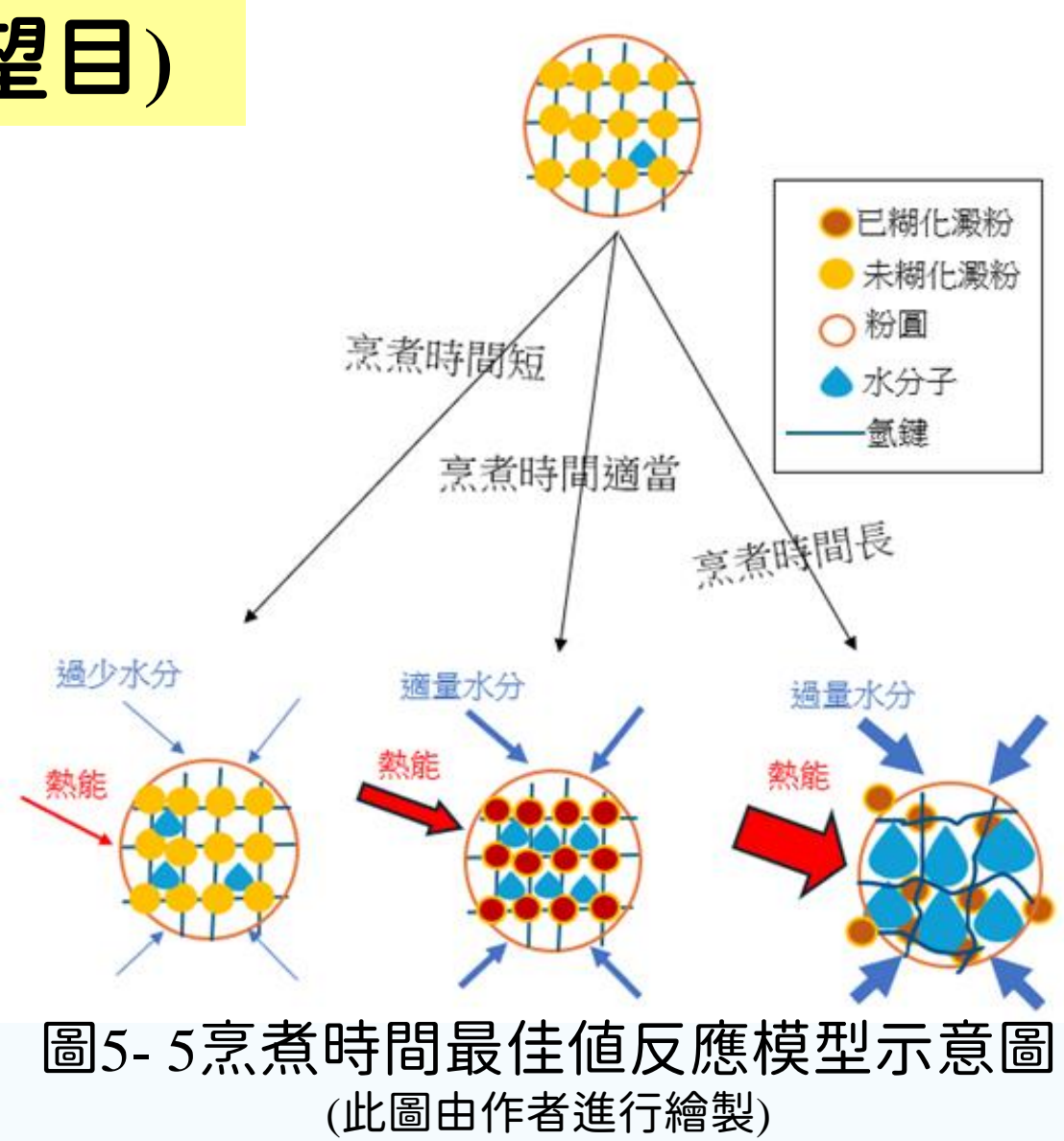
討論1 浸泡熱水80°C(望大)、90秒(望大)

形成**緊密且較厚糊化層**，保護內部結構



討論3 烹煮20分鐘(望目)

烹煮時間過長，過多水分及能量進入粉圓，使其**結構被破壞**，烹煮時間過短，**糊化不完全**，因此烹煮時間**剛好最佳**。



討論2 浸泡冷水10 °C (望目)、5小時(望大)

高溫熱水使粉圓糊化後，**適中水溫終止糊化反應**同時避免以下

表5-1浸泡不同溫度冷水之反應(此表由作者進行繪製、拍攝)

情況	推測反應模型	示意圖
水溫過低 (0°C)	結構過緊密， 水分無法進入	圖5- 3浸泡冷水溫度過低示意圖 (此圖由作者進行繪製)
水溫過高 (20°C)	結構鬆散， 過多水分進入	圖5- 4浸泡冷水溫度過高示意圖 (此圖由作者進行繪製)

討論4 悶煮50 °C(望小)、5分鐘(望小)

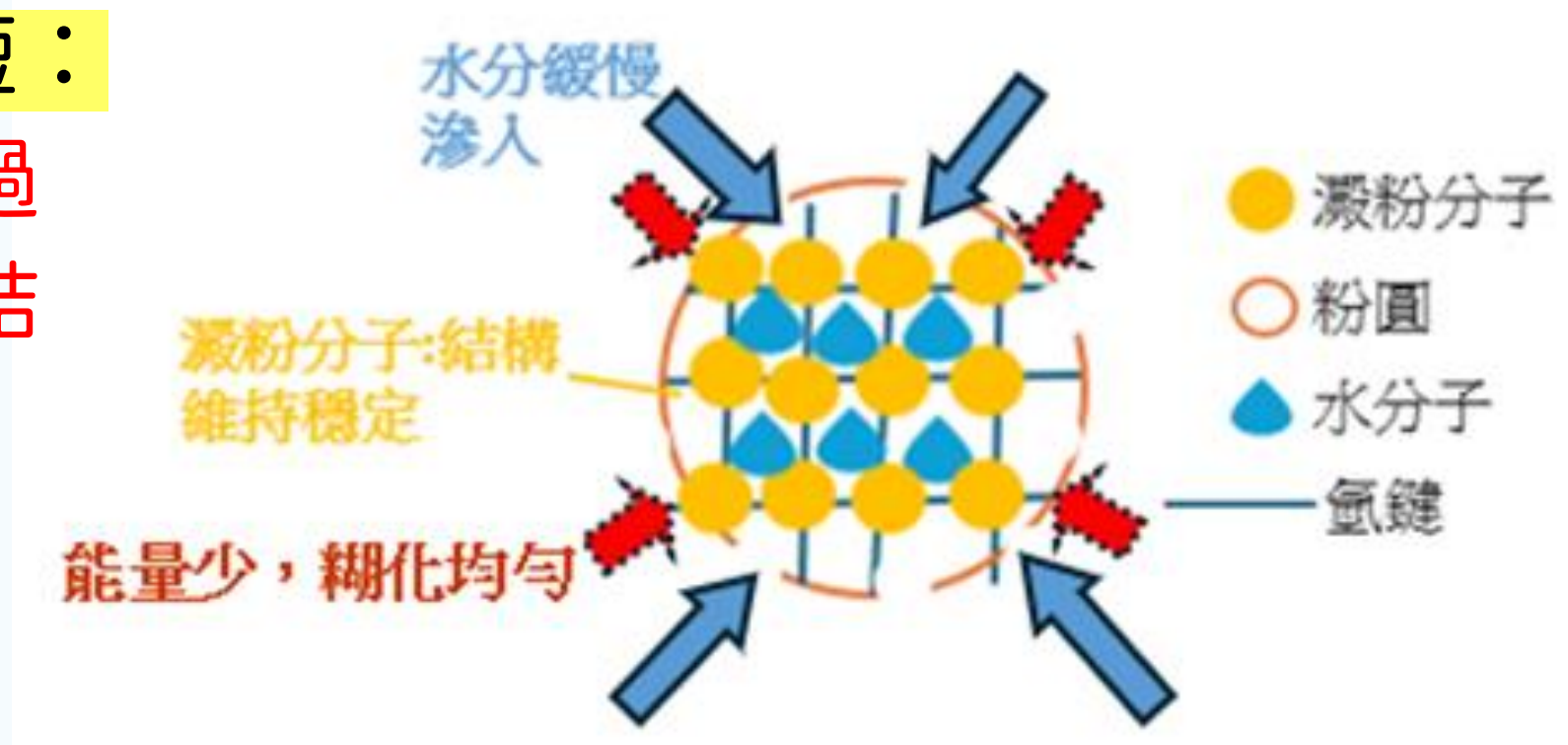
1.悶煮溫度低：

(1)水分：水分緩慢滲入粉圓，**內部結構穩定**。

(2)溫度：糊化速度緩慢，內外**糊化較均勻**。

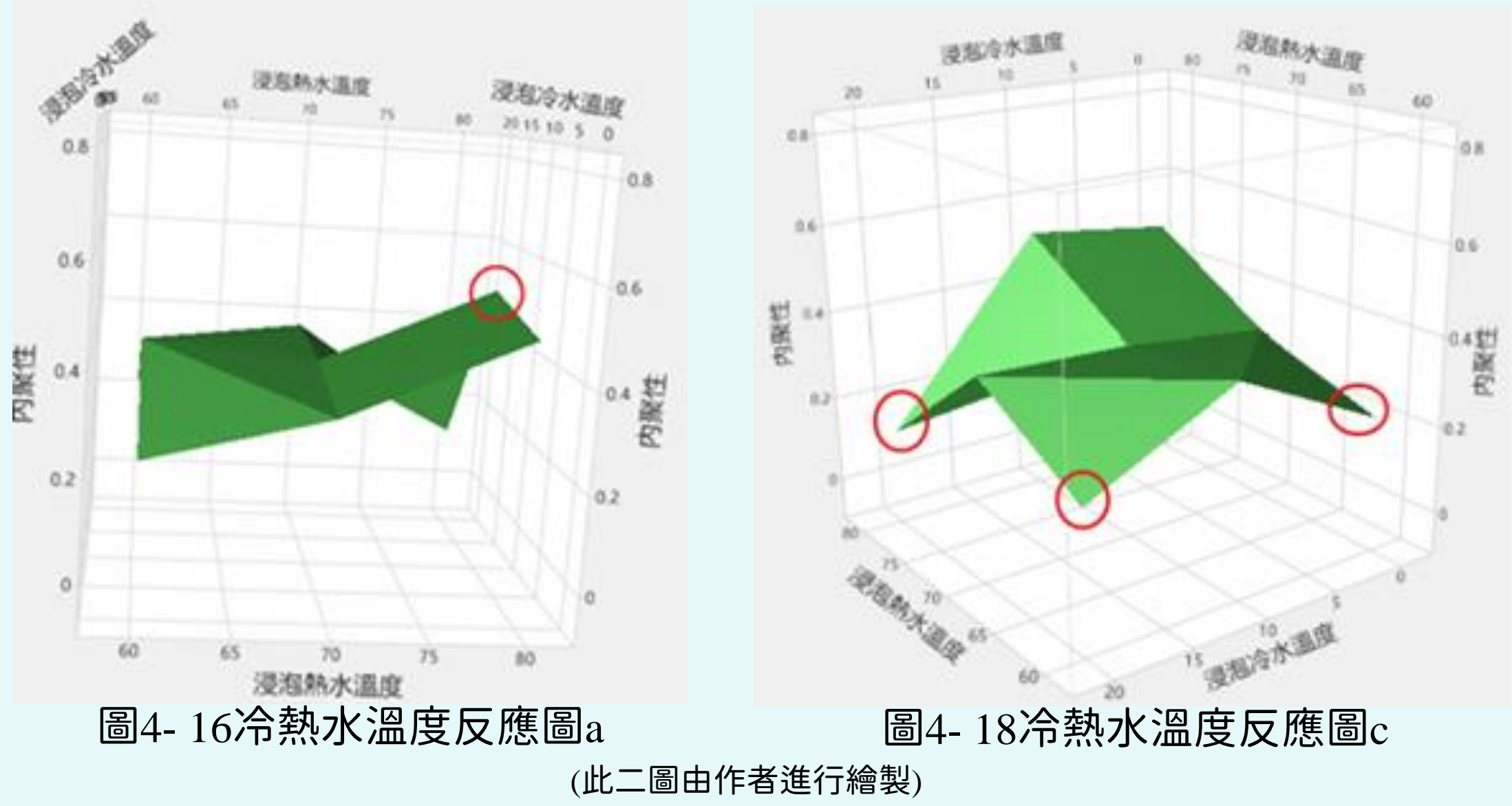
2.悶煮時間短：

持續悶煮則**過多水分破壞結構**。



(二) 響應曲面圖（兩兩交互作用討論）

討論1 "泡熱水溫度"和"泡冷水溫度"交互作用



討論2 "泡熱水溫度"和"悶煮溫度"交互作用

(1)最佳-泡60 °C (望小) 熱水悶 50°C(望小)：浸泡熱水溫度低時糊化層較薄，水分容易進入，此時悶煮溫度太高易破壞粉圓結構，因此悶煮溫度低較好。

(2)悶煮溫度及泡熱水溫度對內聚性的影響

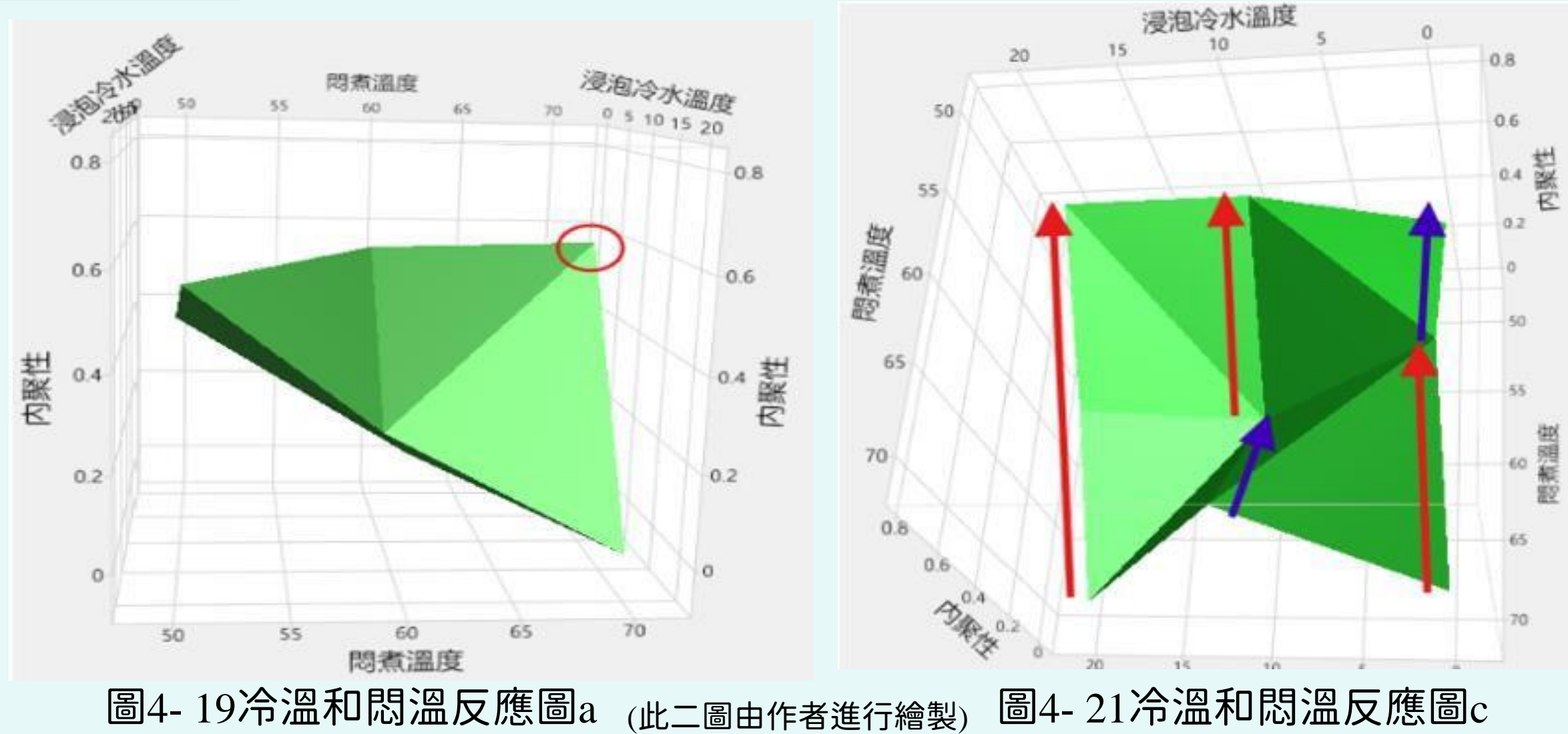
悶煮溫度高→ 內聚性提高

推測反應模型：更多水分進入，**緊密糊化層保護結構**

悶煮溫度低→ 內聚性降低

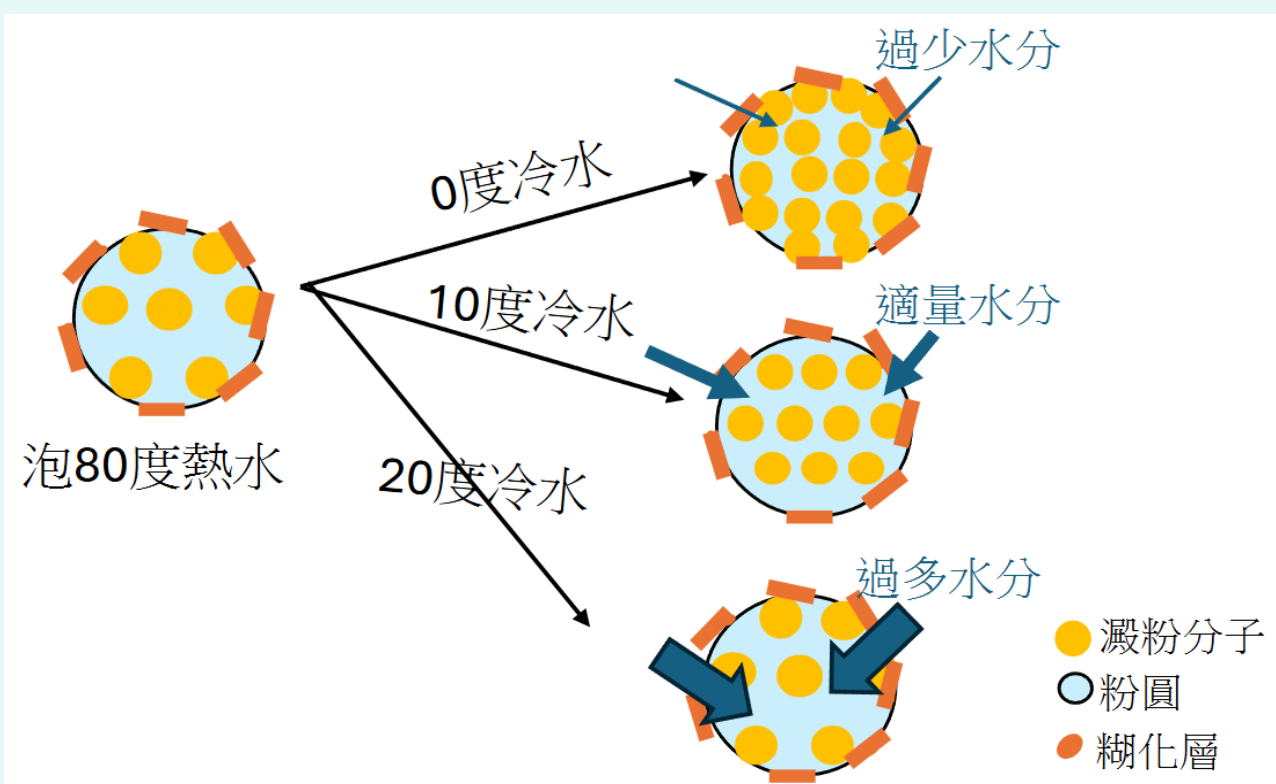
推測反應模型：較少水分進入，**疏鬆糊化層使水分進入**

討論3 "泡冷水溫度"和"悶煮溫度"交互作用



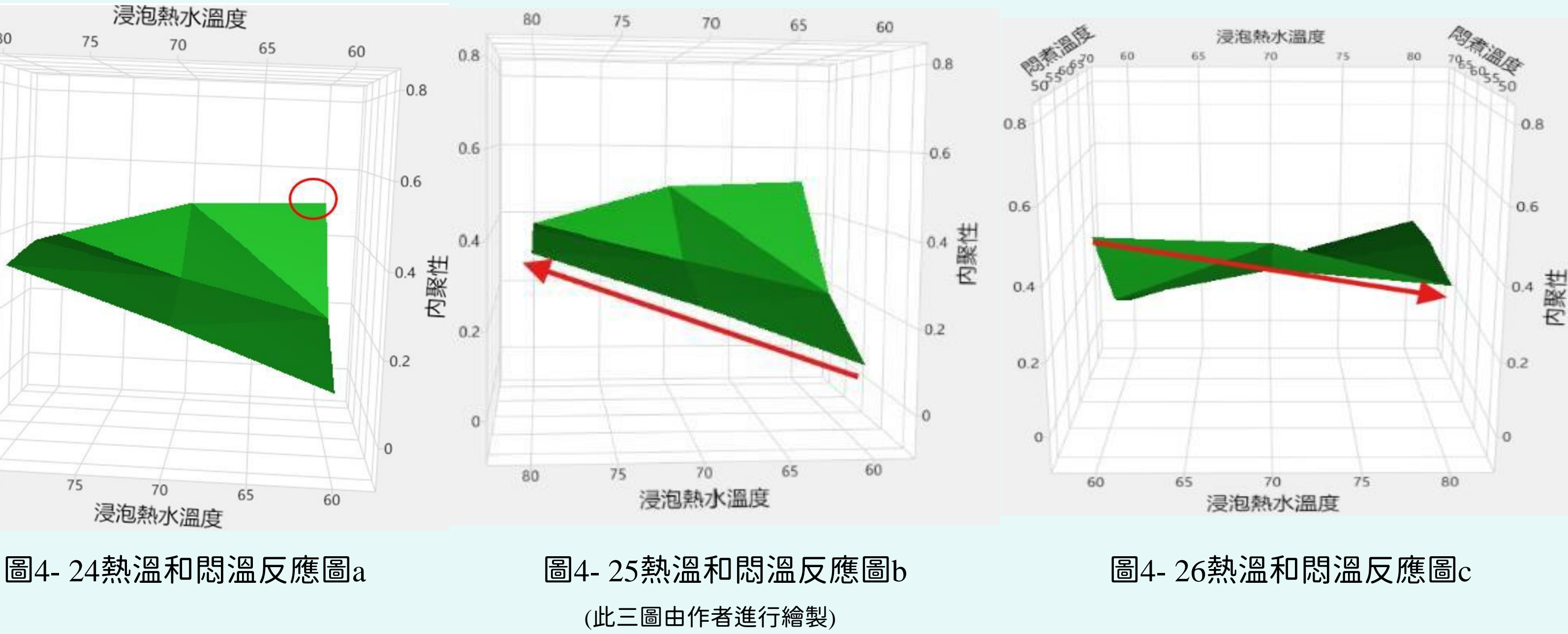
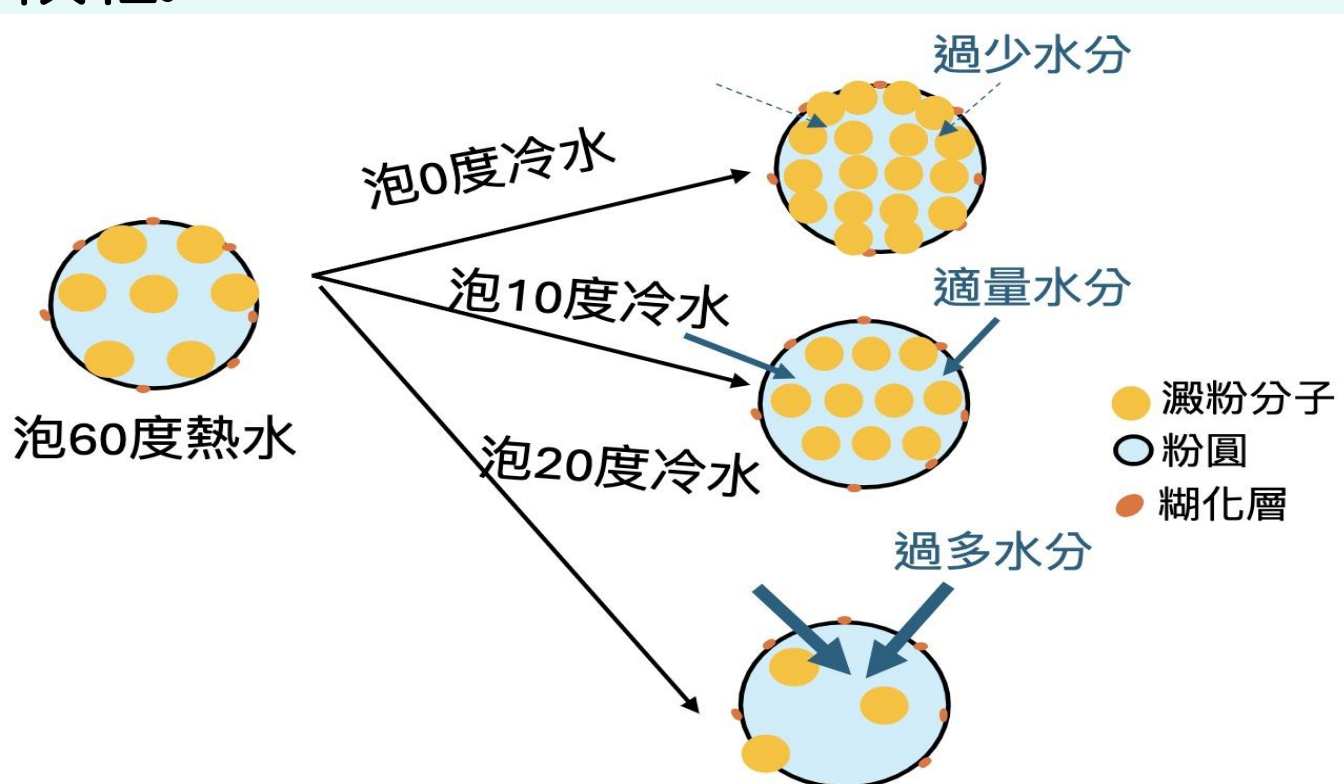
(1)浸泡80度C(高溫)熱水時：

浸泡0度冷水過少水分進入
浸泡20度冷水過多水分進入，內聚性皆不好



(2)泡60°C(低溫)熱水時：

泡熱水60度(低溫)粉圓糊化層較薄，水分較易進入，相較於泡熱水80度+泡10度冷水，泡熱水60度+泡10度冷水內聚性較低。



(1) **最佳-泡10°C(望目)冷水悶煮溫 70°C(望大)**：泡10°C冷水時含水量適當，悶煮溫度高使澱粉充分糊化。

表5-2浸泡不同冷水溫度對於糊化反應的影響(此表由作者自行製作)

浸冷水溫	內聚性	推測反應模型
0°C	悶60°C時達 頂峰	內部水分少，適溫悶煮使水分進入也避免糊化不均
10°C	悶60°C時達 低點	60°C為澱粉糊化溫度 ，結構不穩定
20°C	隨溫度降而升	內部水分多，低溫悶煮使水分進入慢

(三)官能品評

最佳烹煮流程粉圓(甲組，編號A)、市售煮法(乙組，編號B)給大眾盲測。

表4- 2 不同年齡層對於不同烹煮流程之品評結果(此表由作者自行製作)

年齡		1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	平均
Q彈程度	甲	4.87	4.32	4.25	4.35	4.33	4.41	4.76	4.33	4.45
	乙	4.12	4.04	3.99	3.86	4.02	4.00	4.31	3.77	4.01
外觀	甲	4.67	4.35	4.33	4.24	4.38	4.19	4.28	4.47	4.36
	乙	4.71	4.41	4.25	4.47	4.43	4.32	4.19	4.38	4.40
喜好程度	甲	3.86	4.21	4.47	4.16	3.87	3.69	3.63	3.43	3.92
	乙	3.97	4.01	3.82	3.77	3.64	3.79	4.00	4.11	3.89

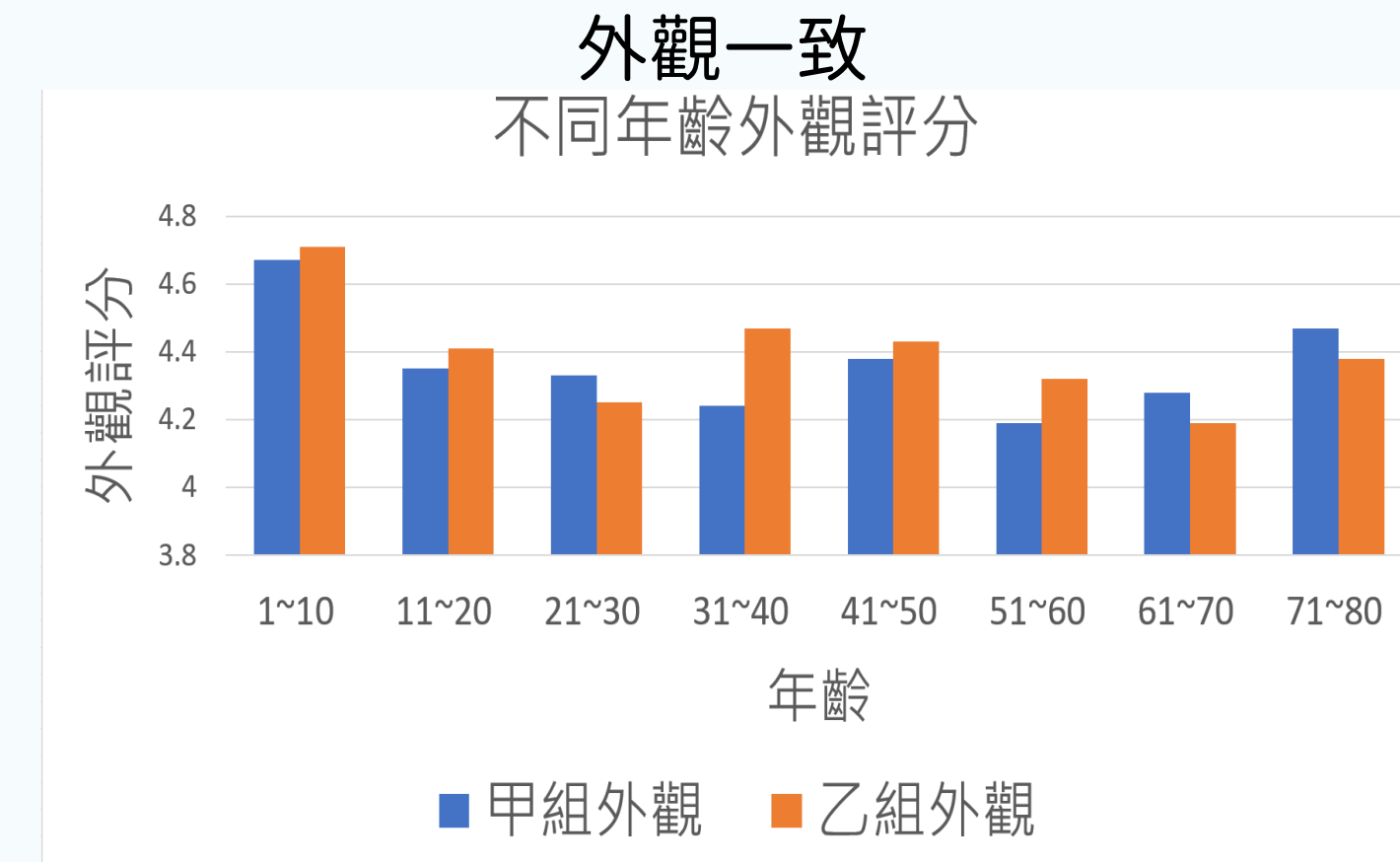


圖5-16 不同年齡外觀評分(此圖由作者進行繪製)

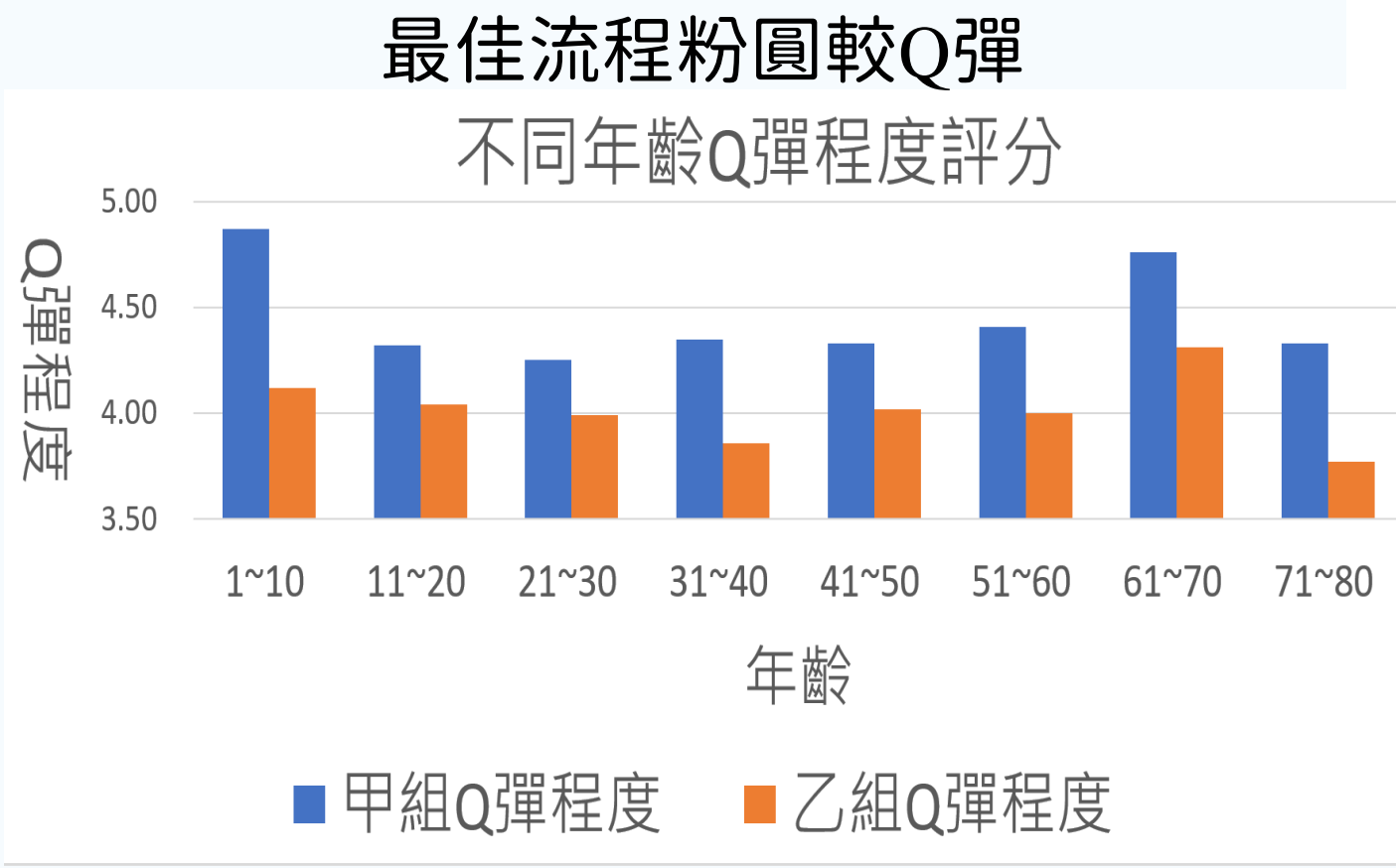


圖5-14 不同年齡Q彈程度評分(此圖由作者進行繪製)

(四)客製化烹煮模型

1. 針對不同粒徑的粉圓，調整悶煮時間進行實驗，以建立適用於各種粒徑的客製化烹煮模型。

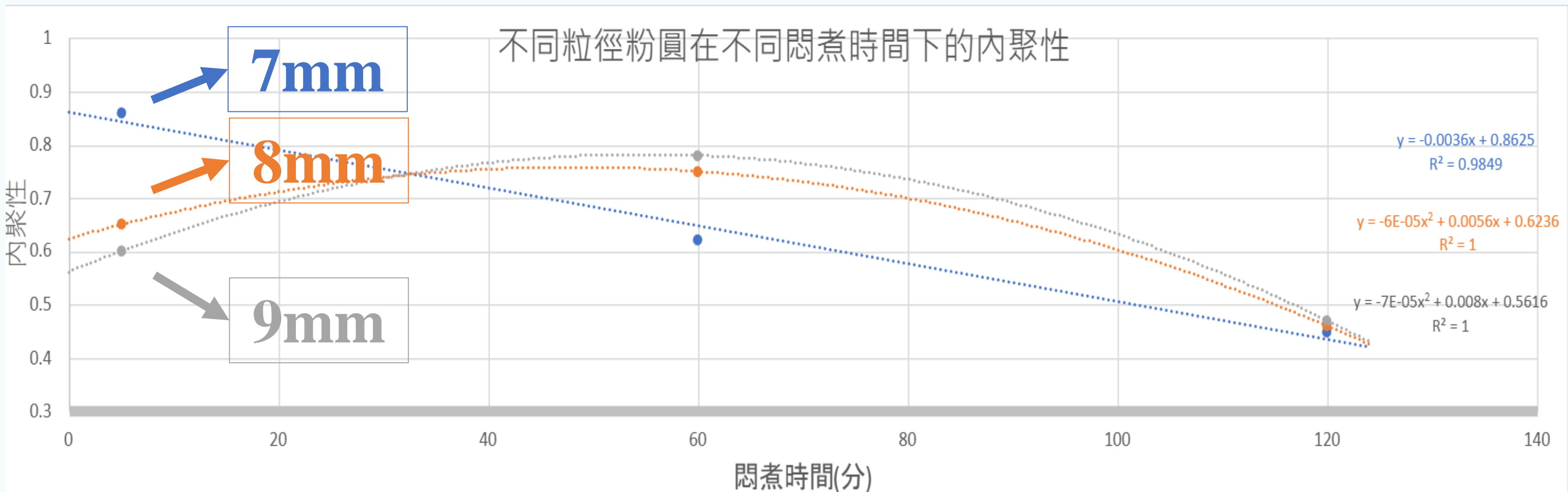


圖4-29 不同粒徑粉圓在不同悶煮時間下的內聚性之線性回歸模型(此圖由作者進行繪製)

2.全齡友善

根據推估之各年齡偏好之粉圓內聚性，由模型計算出最佳悶煮時間

表4-4 各年齡層喜好內聚性之預估值(此表由作者自行製作)

年齡層	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	
預估偏好內聚性	0.76	0.81	0.86	0.81	0.76	0.70	0.65	0.6	
悶煮時間(分)	7mm	29.58	15.14	0.69	15.14	29.58	44.03	58.47	72.92
	8mm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	75.61	87.95	97.37
	9mm	79.24	N/A	N/A	N/A	79.24	92.23	101.57	107.37

註：藍字爲預估值，黑字爲實驗值

成果 最佳流程粉圓Q彈程度高11%

討論 不同年齡之內聚性期望不同

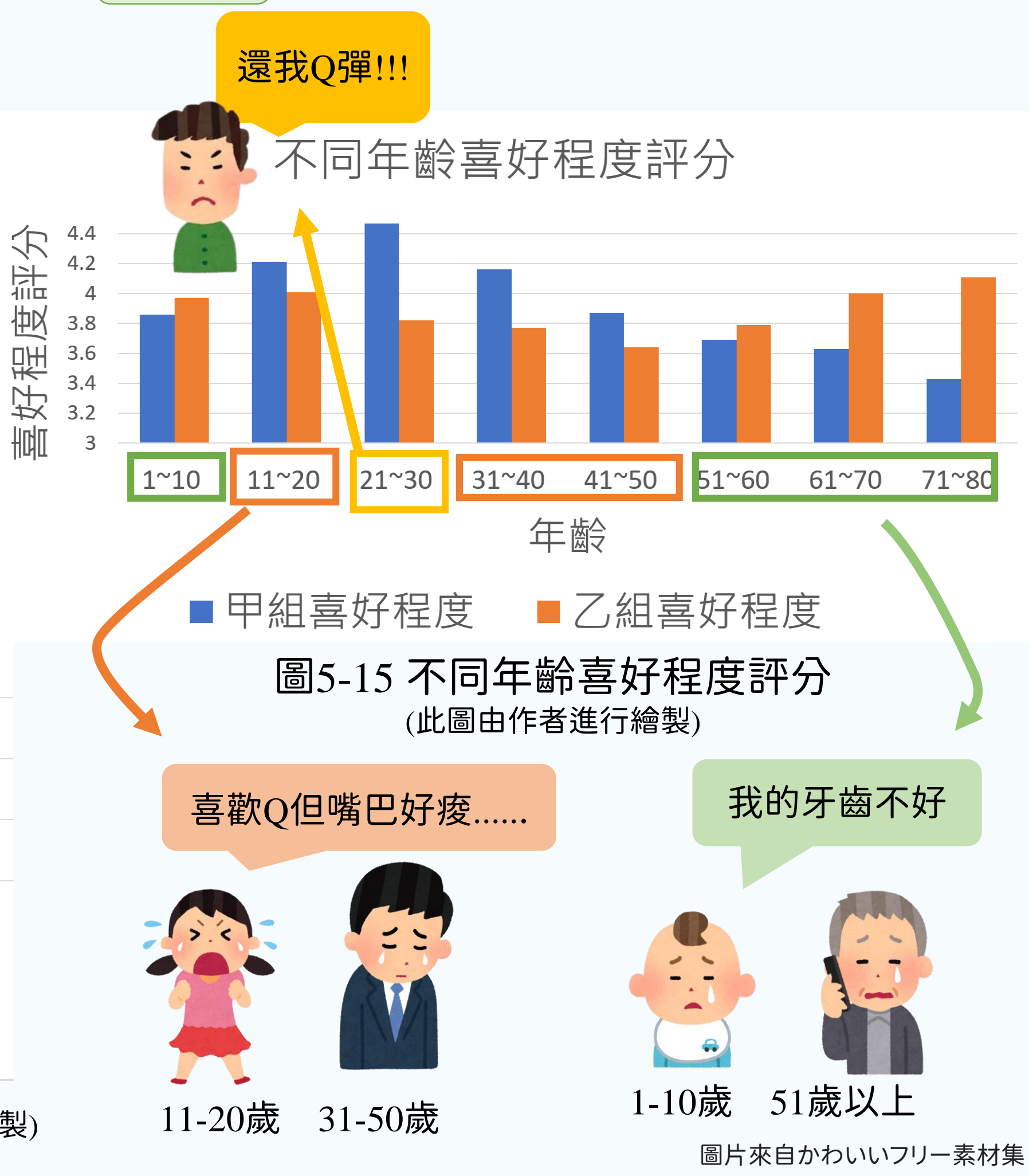
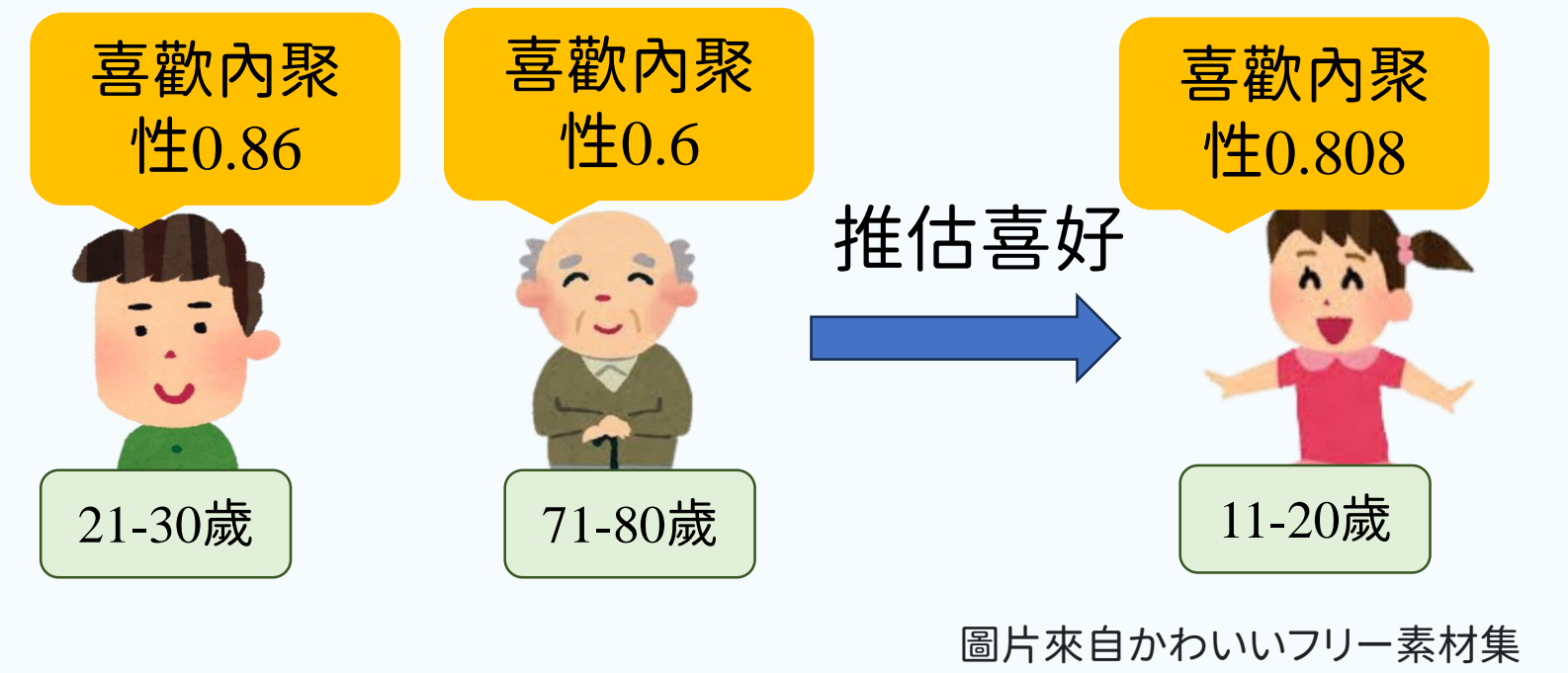


表4- 3 不同悶煮時間在不同粉圓粒徑下粉圓內聚性(此表由作者自行製作)

悶煮時間			
粒徑	5分鐘	60分鐘	120分鐘
7mm	0.86	0.62	0.53
8mm	0.65	0.75	0.52
9mm	0.6	0.78	0.51

成果 1.可客製化內聚性
2.適用所有粒徑

討論 需確認各年齡層喜好內聚性



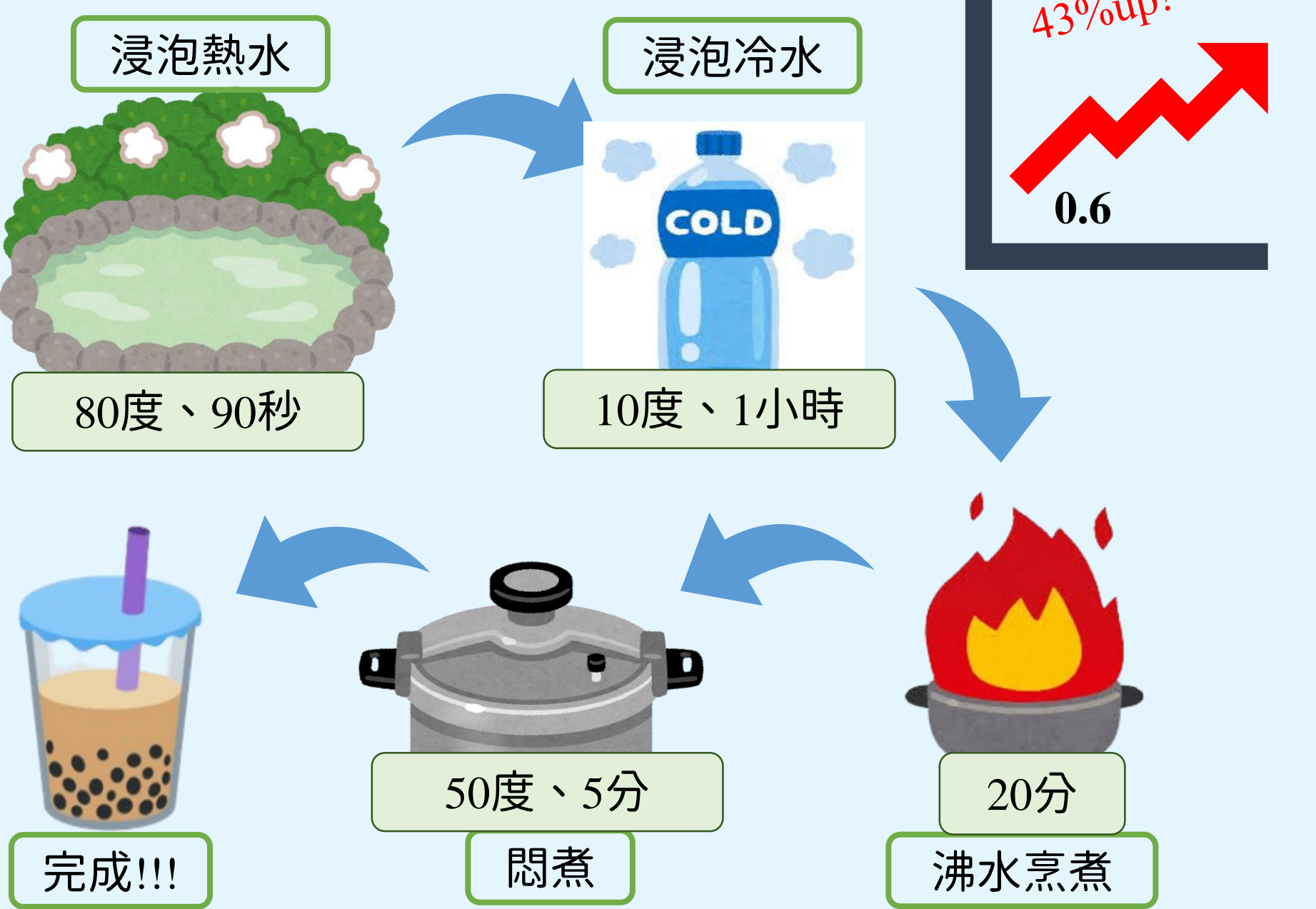
成果 適用不同粒徑、年齡烹煮條件

討論 N/A需再實驗取得完整回歸曲線

伍、結論

一、提高粉圓內聚性43%

實驗最佳值:



圖片來源かわいいフリー素材集

三、未來展望

(一)模組化生產 上下游分工

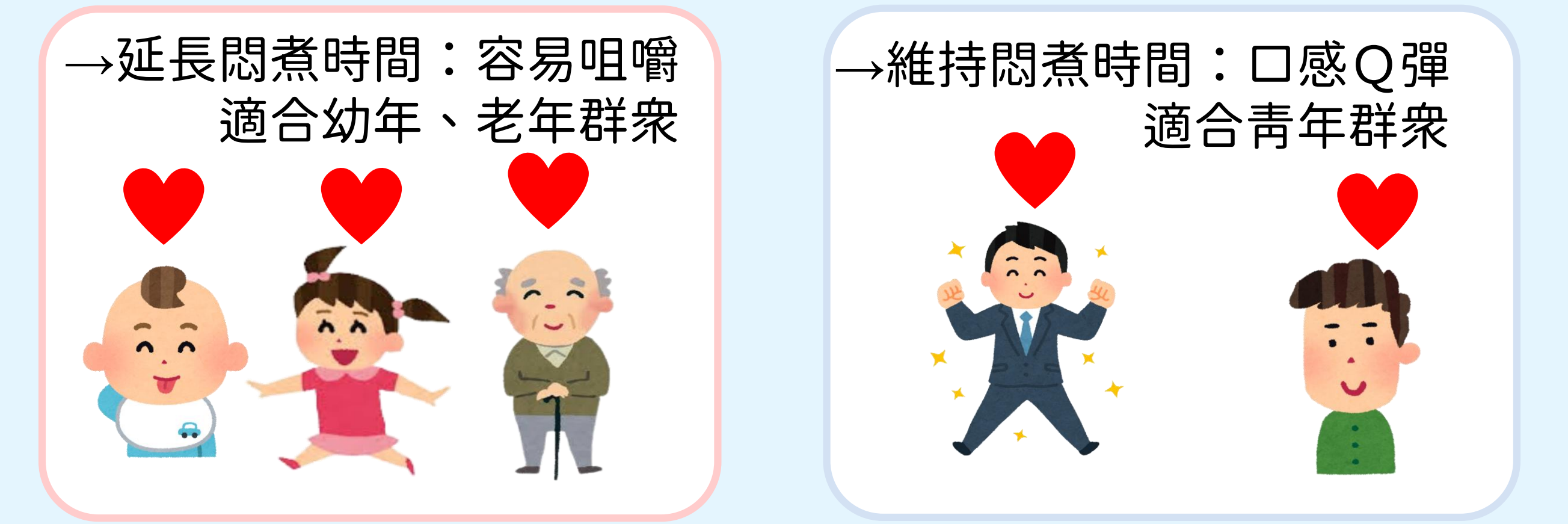


(二)自動化

客製化粉圓烹煮AI機器人，提升工作效率。

二、成功建立粉圓彈性模型

水平展開研究成果，掌握全粒徑粉圓並建立客製化烹煮模型。



圖片來自かわいいフリー素材集

四、與食品大廠簽署合作意向
實現商業應用。



圖6-1與公司主管之合照
(此圖由作者自行拍攝)

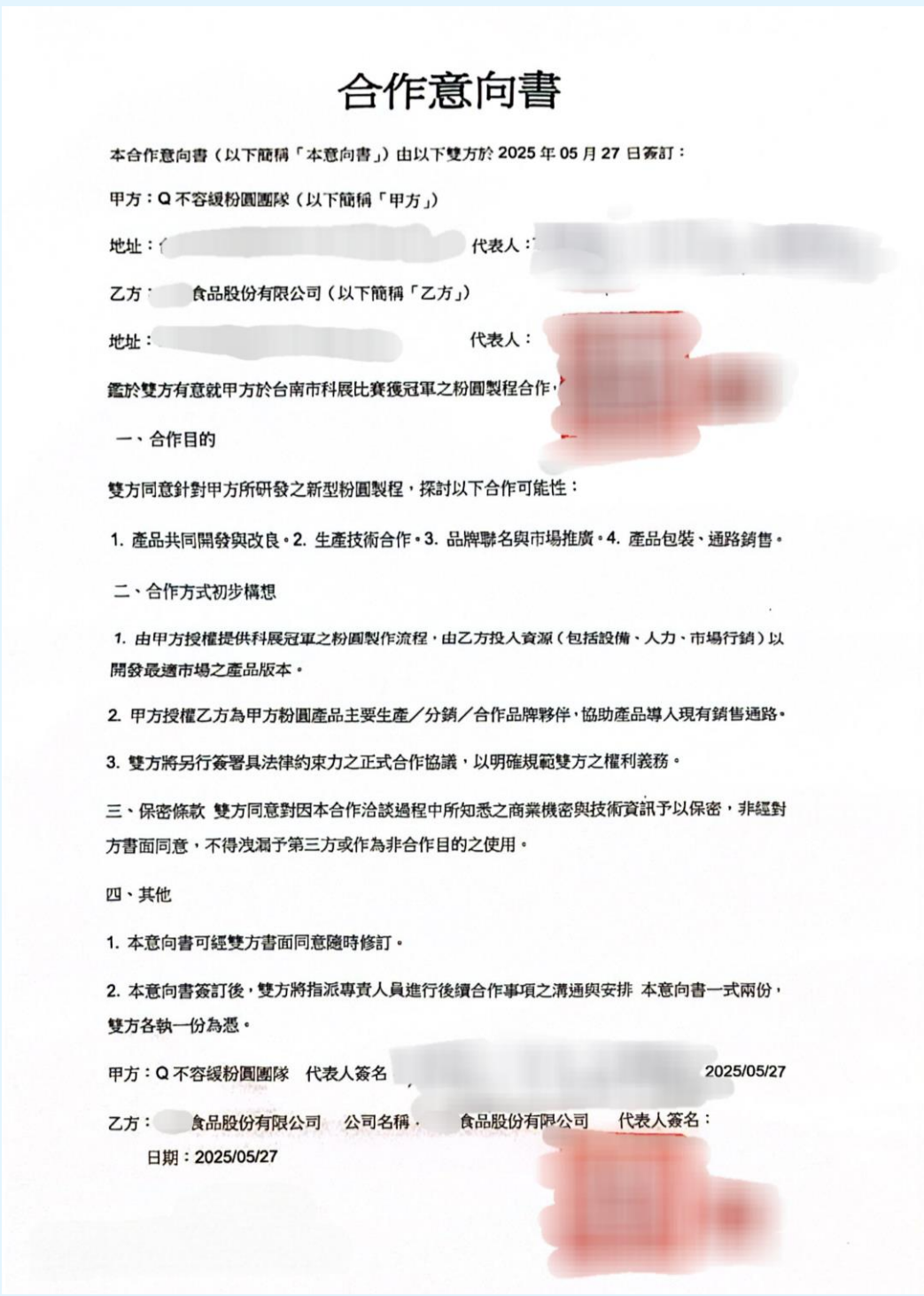


圖6-2合作意向書
(此圖由作者自行拍攝)

陸、參考資料

- 行政院環境保護署毒物及化學物質局(2017/11)珍珠變Q變硬的秘密: 順丁烯二酸化學澱粉——這就是所謂Q彈的代價?(上)。PanSci 泛科學。取自<https://pansci.asia/archives/128261>
- 李育琴(2014/01)。懶人包:2013年順丁烯二酸(毒澱粉)事件(上)。環境資訊中心。取自<https://e-info.org.tw/node/97156>
- 沈明鎮、何志鴻、陳品妙(2012)。波霸珍珠神秘的外衣。中華民國第52屆中小學科學展覽會 高職組 農業及生物科技科。
- 長安化學工業股份有限公司(2023/06)。珍珠奶茶的粉圓為甚麼會Q?是不是加了甚麼黑魔法?長安化學工業股份有限公司 Facebook。取自<https://www.facebook.com/Chanan.pharma/posts/277739354918405/>
- 長宏儀器開發(2023/09)。全質構分析。長宏儀器開發股份有限公司。取自https://www.horninstr.com.tw/tra/texture_analyzers/ta_0_3.html
- 品質工程(2024/10)。維基百科。取自<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/品質工程>
- 食話食說。煮飯的學問遠超過你想像—澱粉的糊化與老化到底是什麼？。食話食說。取自<https://foodtalkingtw.com/煮飯的學問遠超過你想像-澱粉的糊化與老化到底/>
- 粉圓(2024/10)。維基百科。取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/粉圓>
- 陳昭穎、許薰延、陳聖文(2020)。珍珠膜來膜去-天然快煮粉圓之研發。中華民國第 60 屆中小學科學展覽會高職組農業與食品學科。
- 鄭皓容(2015)。澱粉及膠類用於紫玉地瓜圓之研究。國立高雄餐旅大學。碩士論文。取自<https://hdl.handle.net/11296/w8sht6>