

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

080110

跳舞的油滴

學校名稱：國立高雄師範大學附屬高級中學(附設國
小)

作者： 小六 盧宥岑 小六 高珮嘉	指導老師： 林怡君 林夢筑
-------------------------	---------------------

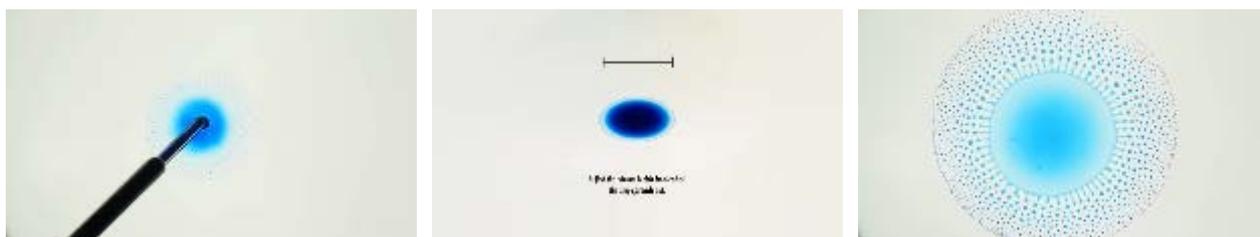
關鍵詞：馬倫哥尼效應、表面張力、液滴開花

摘要

我們詳細地進行了液滴開花現象相關的研究，發現不同油品發生液滴開花現象的條件並不相同，其中的關鍵是表面張力的大小。分析動態過程發現在不同條件下(酒精濃度、油品種類)，液滴的擴展與收縮過程很相似。進一步使用懸滴法自行測量各種油品以及不同濃度酒精的表面張力，對照相關文獻數據確認實驗所得數據的合理性。最後，我們也嘗試統計與分析液滴開花後碎液的大小與數量，以量化的方式解釋實驗的各種現象，確認馬倫哥尼效應(液滴開花)是因為酒精溶液與蔬菜油兩種不相溶的液體表面張力相近，同時上方的酒精溶液揮發性極強而導致酒精濃度下降、表面張力增加而造成液滴碎裂開花的效果。

壹、研究動機

我們偶然在 Youtube 看到了一部影片：



<https://reurl.cc/Vj1mQ5>

覺得這個現象看起來很好看，便上網找了關於影片的相關資料。發現這個現象叫做馬倫哥尼效應(Marangoni effect)是由英國物理學家 James Thomson 在 1855 年首度發現並提出的現象。但是，影片下方的論文連結實在看不懂，於是我們決定以這個當主題，做為科展的研究題目，嘗試由我們自己一起設計實驗探究這個有趣的現象。

貳、研究目的

- 一、找出可以發生液滴開花的酒精濃度。
- 二、測試不同蔬菜油是否都能產生液滴開花的效果。
- 三、分析液滴開花的動態過程與特性。
- 四、測量各種蔬菜油的表面張力。
- 五、測量不同濃度酒精的表面張力。

六、解釋液滴開花的過程相關機制與原理。

七、分析與統計不同濃度酒精開花後的碎液滴數量與大小關係

參、研究設備及器材

研究用具照片			
名稱	泰山純芥花油	大農坊亞麻仁油	椰子油
用途	實驗 1 所用的油	實驗 2 所用的油	實驗 2 所用的油

研究用具照片		
名稱	手機架、手機、器皿、滴管	酒精(95%)
用途	拍攝用儀器	實驗 1、2 用

研究用具照片			
名稱	量筒(10ml)	食用色素	微量滴管 (1ml、5ml)
用途	測量液體用	方便觀察所使用	滴水及酒精用

肆、研究過程與方法

一、觀察現象

測試實驗：依照參考影片中說明提到的蔬菜油，我們準備了幾種蔬菜油—芥花油、亞麻仁油、椰子油以及大豆沙拉油，先使用芥花油(感覺比較符合蔬菜油這個名稱)測試，滴入幾滴加了紅色食用色素的酒精溶液，發現主要有兩種類型的現象發生：

- (一) **液滴不開花**：酒精濃度較低時，酒精液滴聚集形成一個完整的圓形，經過長時間(約六個小時)仍沒有發生任何變化(見圖一)。
- (二) **液滴開花**：酒精濃度較低時，酒精液滴聚集形成一個完整的圓形，經過長時間(約六個小時)仍沒有發生任何變化(見圖二)。



圖一、液滴不開花



圖二、液滴開花

二、 進行量化實驗

由測試實驗觀察到的現象，我們接著進行幾個實驗，希望能找出不同條件下，液滴開花的特性與規律，希望能得到量化的數據供我們進一步分析討論。

實驗一：找出液滴開花效果最明顯的酒精濃度

實驗設計：將水和酒精的比例改變，觀察是否會出現同樣的現象。

步驟 1：將 40 毫升的芥花油倒入量杯再倒入容器中。

步驟 2：將 5 毫升的 95%酒精與 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.4、1.4、1.5、1.6、2.0 毫升的水和 2 滴綠色染料混合。

步驟 3：使用滴管將步驟 2 調出的液體，滴 5 滴進入步驟 1 放芥花油的容器。

步驟 4：錄影及觀察現象。



圖三、實驗一設備與現象

實驗二：不同種類的油效果是否不同？

實驗設計：改變油的種類，觀察是否會出現同樣的現象。

步驟 1：將 10 毫升的亞麻仁油或椰子油倒入量筒再倒入容器中。

步驟 2：將 5 毫升的 95%酒精與 0、1、2、3、4 毫升的水和 2 滴紅色染料混合。

步驟 3：使用滴管將步驟 2 調出的液體，滴 5 滴進入步驟 1 放油的容器。

步驟 4：錄影及觀察現象。

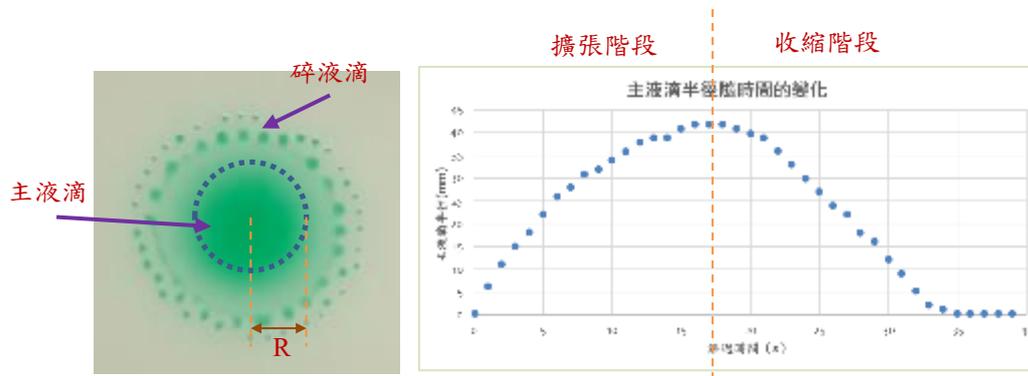


圖四、實驗二進行過程與器材

三、進一步分析液滴開花現象

經過各種不同條件的實驗之後，我們發現液滴開花過程非常有趣，除了我們一開始界定的開花與不開花兩種類型，我們還觀察到液滴開花過程還是有些微的差異，因此我們仔細研究討論了開花的過程，希望能進一步分析這個動態過程的一些細節。

液滴開花的過程中液滴的圖形可明顯區分為兩大部分，我們把中間稱之為主液滴，外圍碎裂的部分稱為碎液滴。我們發現主液滴一開始會擴張，達到一個極限之後又開始收縮(見圖五)。這個現象在各種蔬菜油與不同濃度的酒精液滴都看得到類似的效果，因此我們設計實驗三，希望能進一步探討不同條件下，影響這個現象的因素是甚麼？



圖五、液滴開花過程動態分析

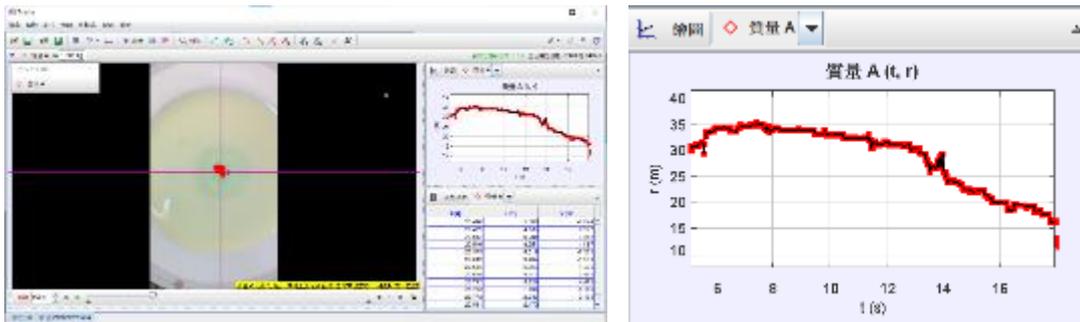
實驗三：分析液滴開花的動態過程

實驗設計：使用 Tracker 分析液滴開花的動態過程。

步驟 1：利用前面實驗測試獲得效果較明顯的酒精濃度與蔬菜油種類，使用微量滴管微量改變酒精濃度，拍攝影片。

步驟 2：將拍攝之影片匯入 Tracker 分析。

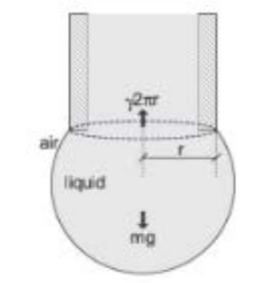
步驟 3：追蹤中心主液滴的邊緣，測量主液滴的半徑擴散及收縮過程隨時間的變化。



圖六、實驗三使用之分析軟體-Tracker

四、探討液滴開花現象的原因

參考許多資料與影片說明之後，我們發現主要的解釋都提及，液滴開花現象是因為酒精溶液和蔬菜油之間的表面張力的些微差異導致這麼有趣的現象，然而我們並沒有測量表面張力的相關設備，在老師的協助之下，我們得知一種非常簡易的方法可以測量液體的表面張力，這種方法叫做懸滴法(圖七)，這個方法雖然不需要很厲害的儀器，卻需要很仔細而且很有耐心地使用滴管一滴一滴將液體滴入量筒中，測量量筒中液體的重量與液滴數量，以及量筒前端滴口的直徑，就可以計算出這種液滴的表面張力。於是我們設計了實驗四來測量各種蔬菜油以及不同濃度的酒精溶液他們的表面張力大小。



圖七、懸滴法示意圖

實驗四：測量各種蔬菜油與不同濃度酒精的表面張力

實驗設計：使用懸滴法測量不同濃度的酒精與不同蔬菜油的表面張力。

步驟 1：使用滴管吸取適量蔬菜油，垂直滴入量筒中。

步驟 2：計算滴數，達到 100、200、300 滴時以電子秤量測蔬菜油的重量。

步驟 3：由懸滴法的公式計算蔬菜油的表面張力。

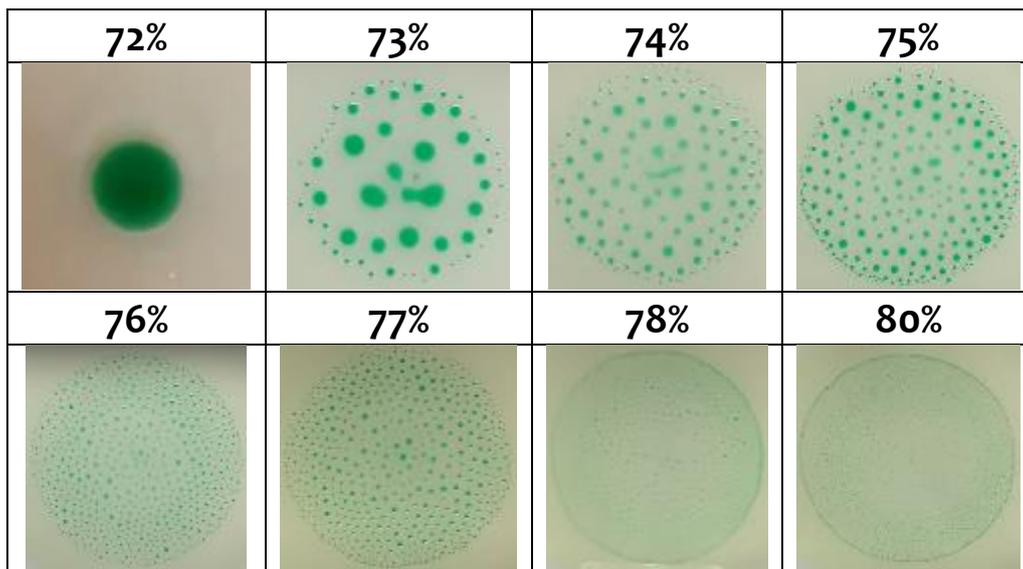
步驟 4：改變蔬菜油的種類以及不同濃度的酒精，重複上述步驟。



圖八、使用懸滴法測量各種液體的表面張力

五、分析與統計不同濃度酒精液滴開花後的碎液滴數量與大小關係

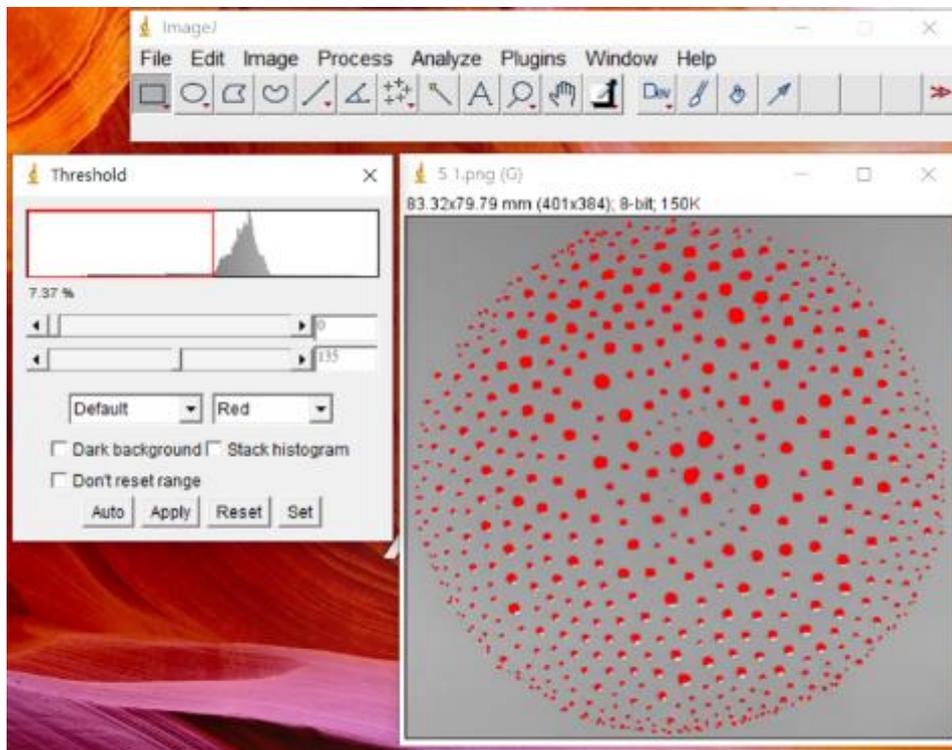
我們發現不同濃度的酒精液滴開花之後的碎液滴大到小雨數量似乎呈現某種趨勢(圖九)，因此老師建議我們學習使用 ImageJ 分析並統計不同濃度酒精液滴開花後的碎液滴數量與大小。



圖九、不同濃度的酒精液滴開花之後的碎液滴樣態

實驗五：使用 ImageJ 測量與統計不同濃度酒精液滴開花後的碎液滴數量與大小

我們下載並安裝 ImageJ 程式，將液滴開花後的影片截圖之後使用 ImageJ 轉成灰階圖檔，設定長度並調整閾值，便可以開始統計不同大小區間的碎液滴數量與平均面積。我們選取液滴開花最明顯的濃度範圍(72%~80%)進行量測與統計。



圖十、使用 ImageJ 量測並統計碎液滴數量與面積

伍、研究結果

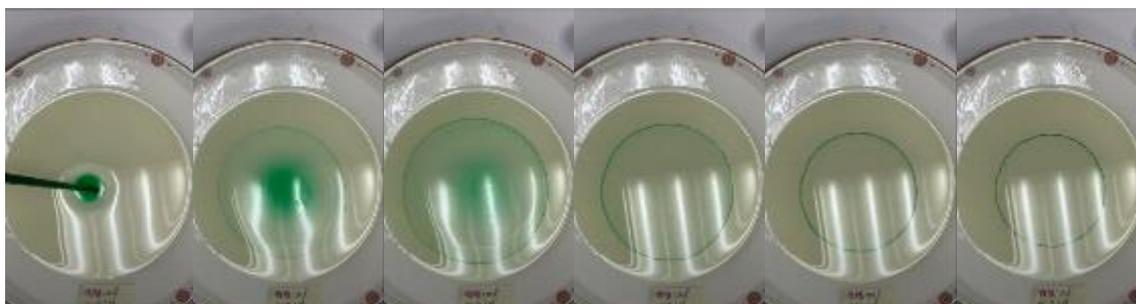
實驗一：找出液滴開花效果最明顯的酒精濃度

芥花油 每 20 秒截一張圖

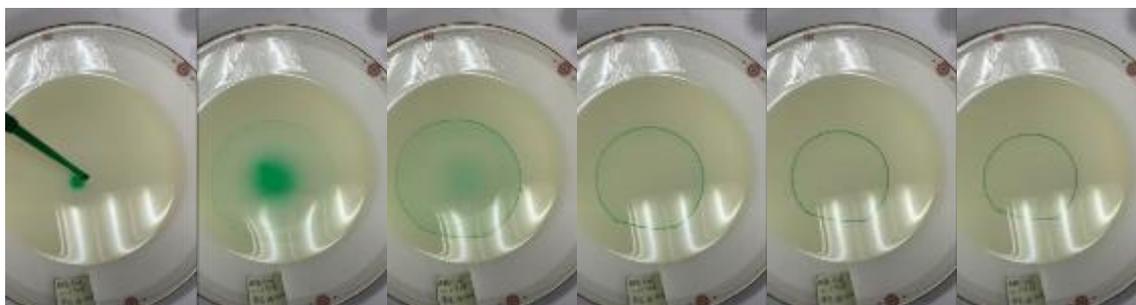
1. 酒精 5 毫升、水 0.2 毫升



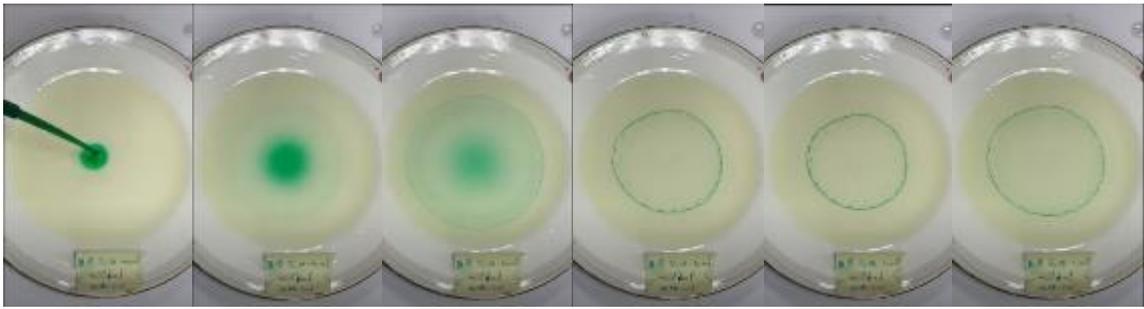
2. 酒精 5 毫升、水 0.3 毫升



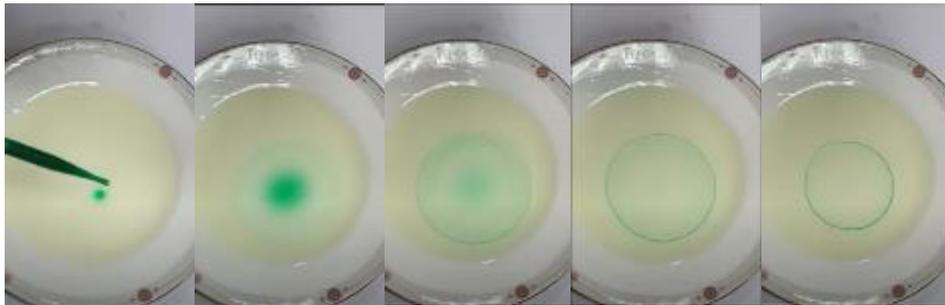
3. 酒精 5 毫升、水 0.4 毫升



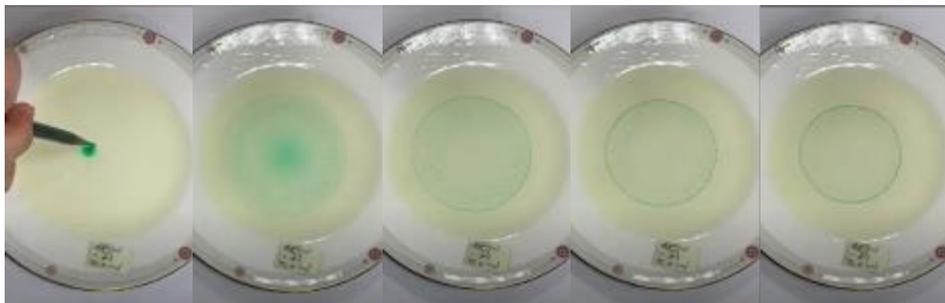
4. 酒精 5 毫升、水 0.6 毫升



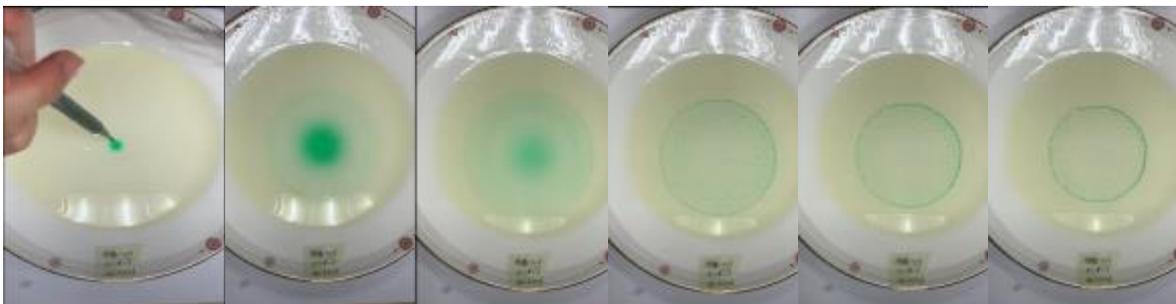
5. 酒精 5 毫升、水 0.7 毫升



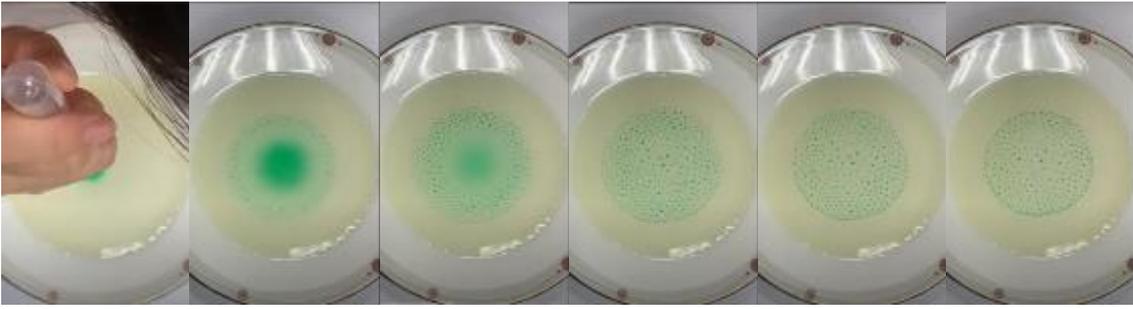
6. 酒精 5 毫升、水 0.8 毫升



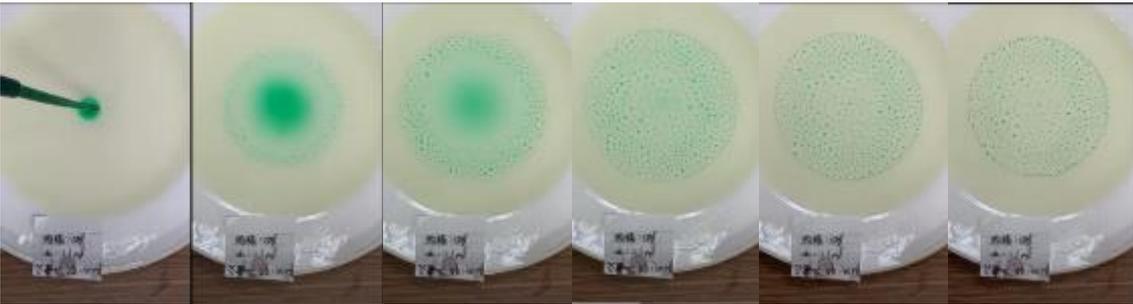
7. 酒精 5 毫升、水 0.9 毫升



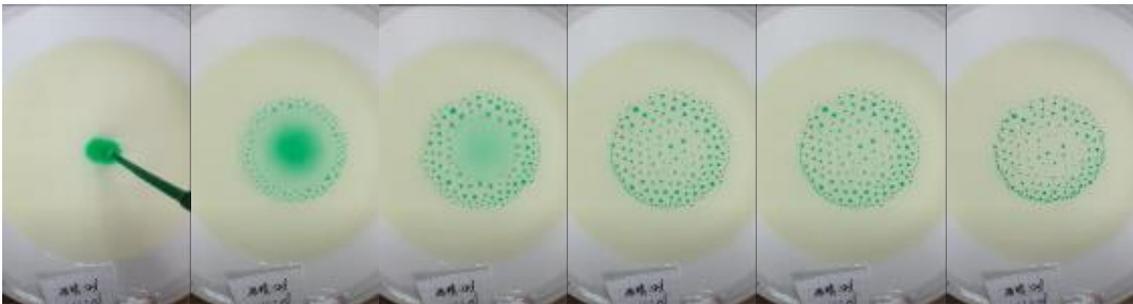
8. 酒精 5 毫升、水 1 毫升



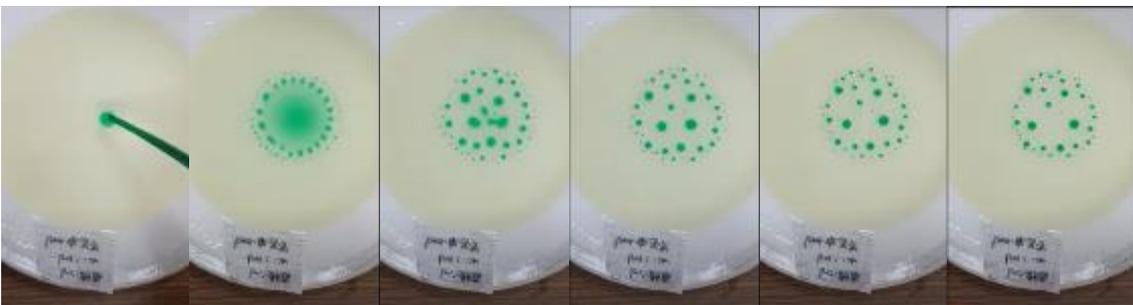
9. 酒精 5 毫升、水 1.1 毫升



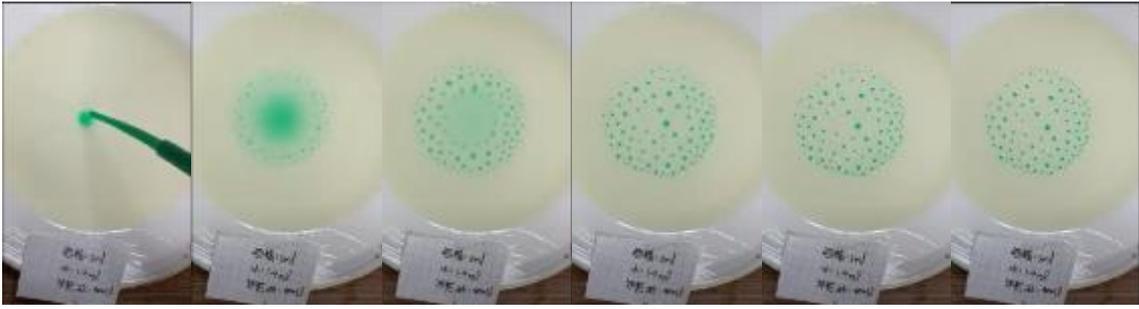
10. 酒精 5 毫升、水 1.2 毫升



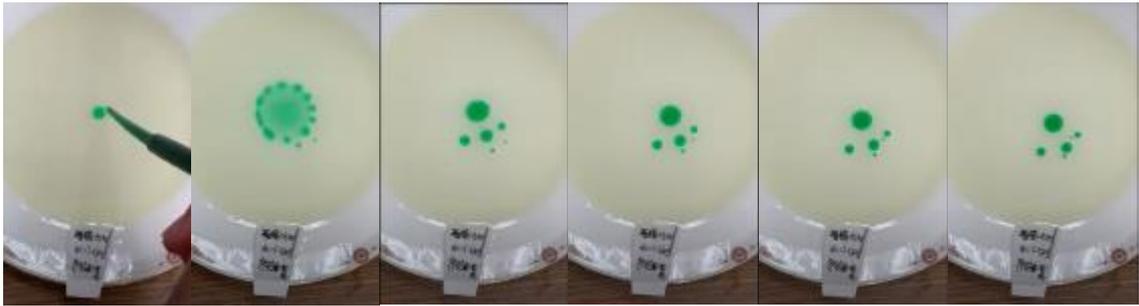
11. 酒精 5 毫升、水 1.3 毫升



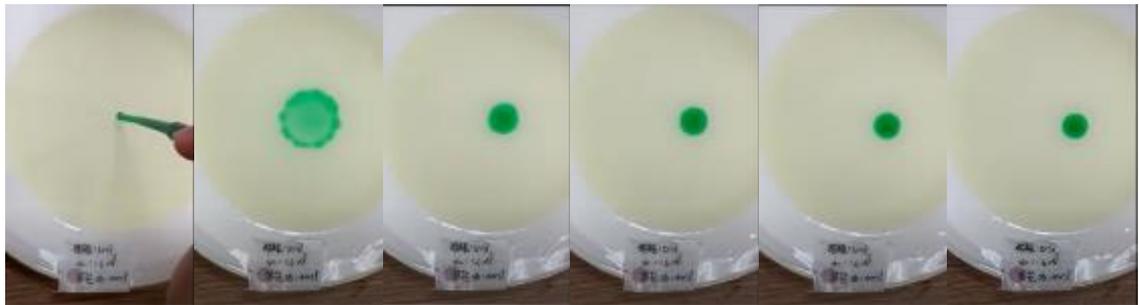
12. 酒精 5 毫升、水 1.4 毫升



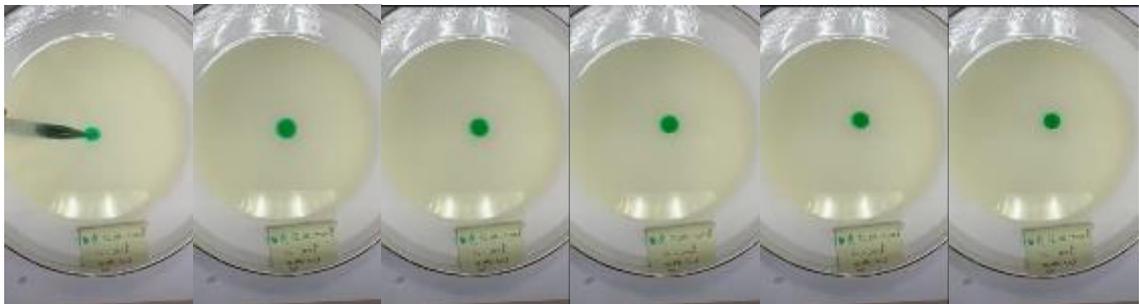
13. 酒精 5 毫升、水 1.5 毫升



14. 酒精 5 毫升、水 1.6 毫升



15. 酒精 5 毫升、水 2 毫升



實驗結果發現：

1. 芥花油有反應的濃度是介於水 0.2~1.6 毫升加入 5 毫升的酒精。
2. 酒精濃度較大時(酒精 5 毫升、水 0.2~1 毫升)，擴散出去的外緣較大，外圍分裂出的液滴較小，接著外圍邊緣有明顯收縮的趨勢。
3. 酒精濃度較低時(酒精 5 毫升、水 1.1~1.5 毫升)，擴散出去的過程分裂出來的液滴較大。
4. 酒精濃度更低時(酒精 5 毫升、水 1.6 毫升以上)，液滴開花的現象不會發生。

實驗二：不同種類的油效果是否不同？

亞麻仁油 每 20 秒截一張圖

1：酒精 5 毫升、水 0 毫升



2：酒精 5 毫升、水 1 毫升



3：酒精 5 毫升、水 2 毫升



4：酒精 5 毫升、水 3 毫升



5：酒精 5 毫升、水 4 毫升

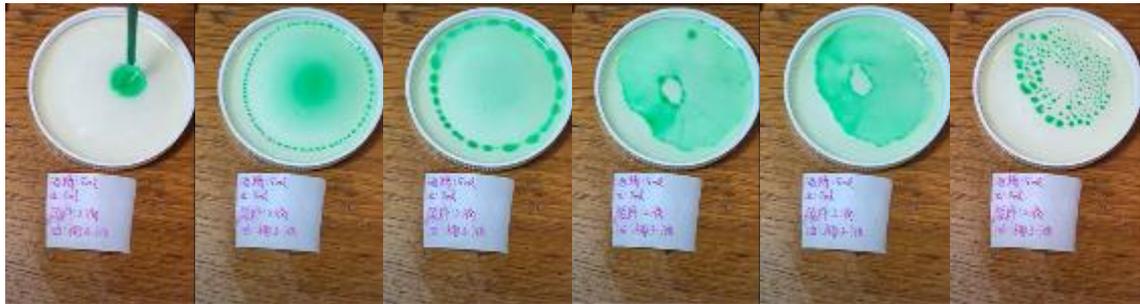


實驗結果發現：

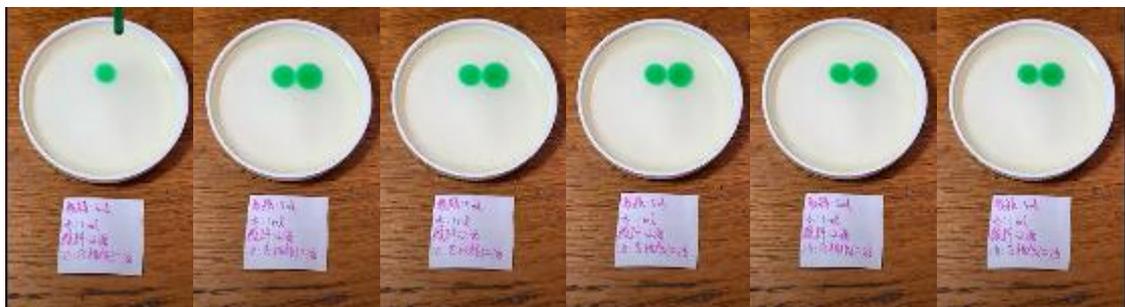
1. 亞麻仁油有反應的濃度是介於水 0~3 毫升加入 5 毫升的酒精。
2. 液滴開花的現象較不明顯，但仍可看到液滴有明顯的擴散現象。
3. 酒精濃度低於酒精 5 毫升、水 4 毫升時液滴開花的現象不再發生。

椰子油 每 20 秒截一張圖

1：酒精 5 毫升、水 0 毫升



2：酒精 5 毫升、水 1 毫升



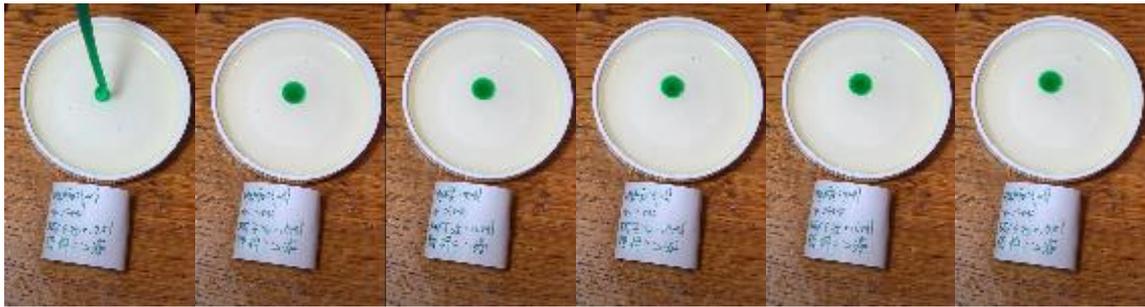
3：酒精 5 毫升、水 2 毫升



4：酒精 5 毫升、水 3 毫升



5：酒精 5 毫升、水 4 毫升

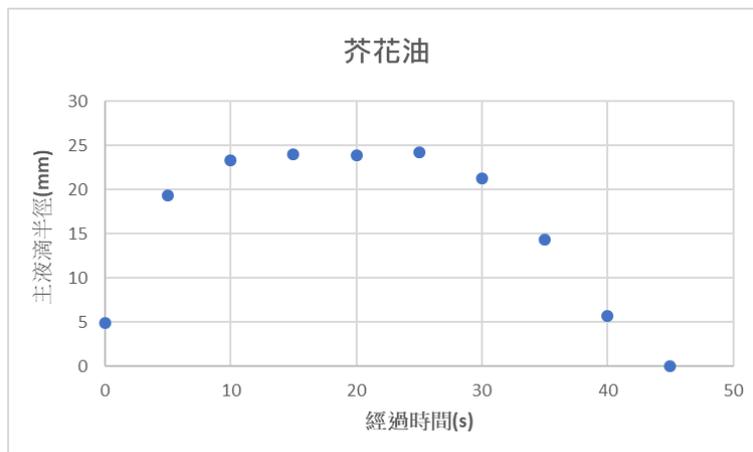


實驗結果發現：

1. 椰子油有反應的濃度只有酒精不加水的狀況下。
2. 液滴開花的現象還算明顯，但過程與前兩種油很不一樣，一開始液滴擴散時外圍有分裂出一些小液滴，接著有一度是整片均勻的液體，最後又分裂成許多小液滴。
3. 酒精只要加水，濃度略降之後就看不到液滴開花的現象。

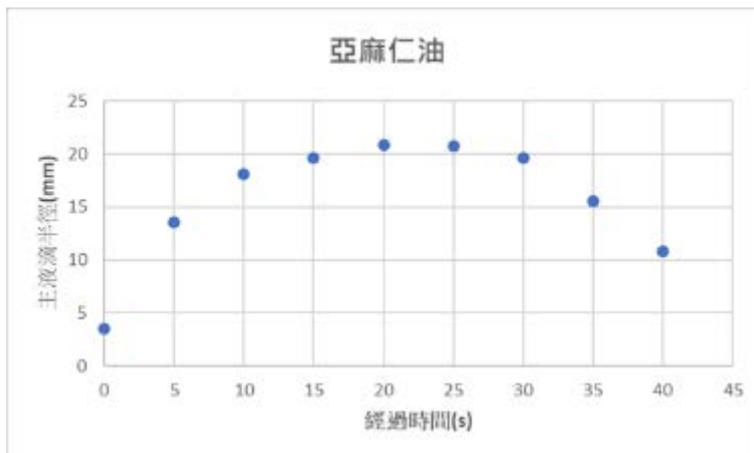
實驗三：分析液滴開花的動態過程

1. 芥花油主液滴半徑隨時間的變化



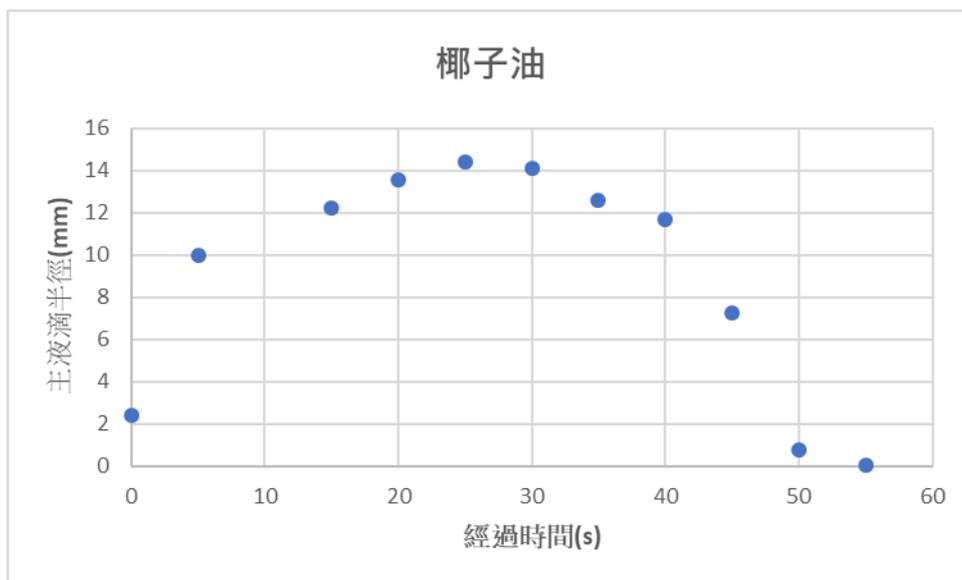
圖十一、芥花油主液滴半徑隨時間的變化

2. 亞麻仁油主液滴半徑隨時間的變化



圖十二、亞麻仁油主液滴半徑隨時間的變化

3. 椰子油主液滴半徑隨時間的變化



圖十三、椰子油主液滴半徑隨時間的變化

由實驗結果可看出，不同蔬菜油發生液滴開花時，主液滴都有類似的現象：先擴張再收縮，前半段的擴張階段，主液滴外緣一邊向外擴展，一邊持續分裂為碎液滴，收縮階段則是因為主液滴也從外緣開始向內碎裂，因而造成主液滴面積持續減小。

實驗四：測量各種蔬菜油與不同濃度酒精的表面張力

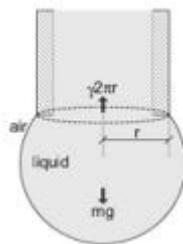
1. 芥花油&亞麻仁油

芥花油	第一次		第二次	
滴數	體積(ml)	重量(g)	體積(ml)	重量(g)
0	0	28	0	28.3
100	2.9	30.3	3.6	31.4
200	6.4	33.7	6.7	34.1
300	9.4	36.4	9.6	36.6

表一、芥花油液滴數量與體積及重量之關係

亞麻仁油	第一次		第二次	
滴數	體積(ml)	重量(g)	體積(ml)	重量(g)
0	0	28.3	0	28.3
100	3.6	31.2	3.4	31.4
200	6.7	34.1	6.5	34
300	9.6	36.7	9.5	36.7

表二、亞麻仁油液滴數量與體積及重量之關係



圖十四、應用泰特定律(Tate's Law)計算液滴的表面張力

由英文參考資料 3 的論文中，我們找到應用泰特定律(Tate's Law)計算液滴的表面張力的方法(圖十四)，使用懸滴法計算表面張力：

$$mg = \gamma \cdot 2\pi r$$

其中 m 是液滴的質量， γ 是液滴-空氣界面的表面張力， g 是重力加速度， r 是滴頭半徑。泰特定律假設一旦形成，整個懸垂水滴就會分離，從而獲得理想的水滴。然而，實驗與理論有所不同。由滴頭形成的下降液滴的重要部分通常會從其上脫落，而剩餘的較小部分則保持懸浮在滴頭上。由於這種不希望的影響，測量的表面張力結果低於實際值，因為分離的液滴小於理想液滴。為了解決這個問題，獲得的表面張力值必須乘以一個公認的校正因子 ψ 。通過應用校正因子 ψ ，可得到表面張力的公式：

$$\gamma = \frac{mg}{\psi 2\pi r}$$

我們把測得的數據代入上面公式，可以得到芥花油與亞麻仁油的表面張力如下表：

芥花油	亞麻仁油
m(g)	m(g)
0.027666667	0.028
m(kg)	m(kg)
2.76667E-05	0.000028
mg(N)	mg(N)
0.000271133	0.0002744
2r=d(mm)	2r=d(mm)
2.5	2.5
圓周長(m)	圓周長(m)
0.007853982	0.007853982
表面張力 (mN/m)	表面張力 (mN/m)
34.52176819	34.93769311

表三、計算得到之芥花油與亞麻仁油之表面張力

計算所得結果，芥花油的表面張力是 34.52 mN/m、亞麻仁油的表面張力是 34.94 mN/m，參考論文中的數據，雖然沒有芥花油與亞麻仁油的數據，然而由表四可看到，菜籽油(Rapessed)、葵花油(Sunflower)、大豆油(Soybean)、棕櫚油(Palm)、玉米油(corn)、葡萄籽油(Grapeseed)，這些蔬菜油在常溫(10~50°C)的表面張力都是介於 30.7~34.6 mN/m，因此我們自行量測計算所得的表面張力數據還算合理。

Table 6
Dependence between surface tension and temperature for automotive the analyzed samples.

Temp. (°C)	Surface tension (mN/m)							
	Diesel	Biodiesel	Rapeseed	Sunflower	Soybean	Palm	Corn	Grapeseed
10	29.0	32.5	34.5	34.6	34.6	-	34.5	34.6
20	28.0	31.7	33.8	34.0	33.9	-	33.8	33.9
30	27.4	30.9	33.0	33.1	33.2	-	32.9	33.1
40	26.4	30.1	32.1	32.3	32.4	31.5	32.2	32.3
50	25.5	29.1	31.3	31.5	31.6	30.7	31.4	31.5
60	24.8	28.0	30.5	30.7	30.7	30.0	30.6	30.8
70	24.0	27.2	29.8	30.0	30.0	29.2	29.8	30.0
80	23.2	26.3	29.1	29.2	29.2	28.5	29.0	29.2
90	22.4	25.5	28.3	28.6	28.4	27.8	28.2	28.5
100	21.7	24.7	27.6	27.7	27.7	27.1	27.6	27.8
110	21.1	23.7	26.7	27.0	27.2	26.5	26.9	27.2
120	20.3	22.8	26.1	26.3	26.5	25.7	26.1	26.4
130	19.3	22.1	25.5	25.5	25.8	25.1	25.3	25.9
140	18.6	21.2	24.7	24.8	25.1	24.4	24.7	25.1

表四、論文(英文參考資料 3)中各種液體的表面張力數據

2. 不同濃度的酒精表面張力：

酒精濃度(%)	論文資料(mN/m)	實驗值(mN/m)
0	72.75	
10	48.14	
20	38.56	
30	33.53	
40	30.69	
50	28.51	28.77
60	26.72	
70	25.48	25.64
80	24.32	
90	23.23	24.07
100	22.31	

表五、不同濃度的酒精表面張力

Table 2. Surface Tension of Ethanol (1) + Water (2)

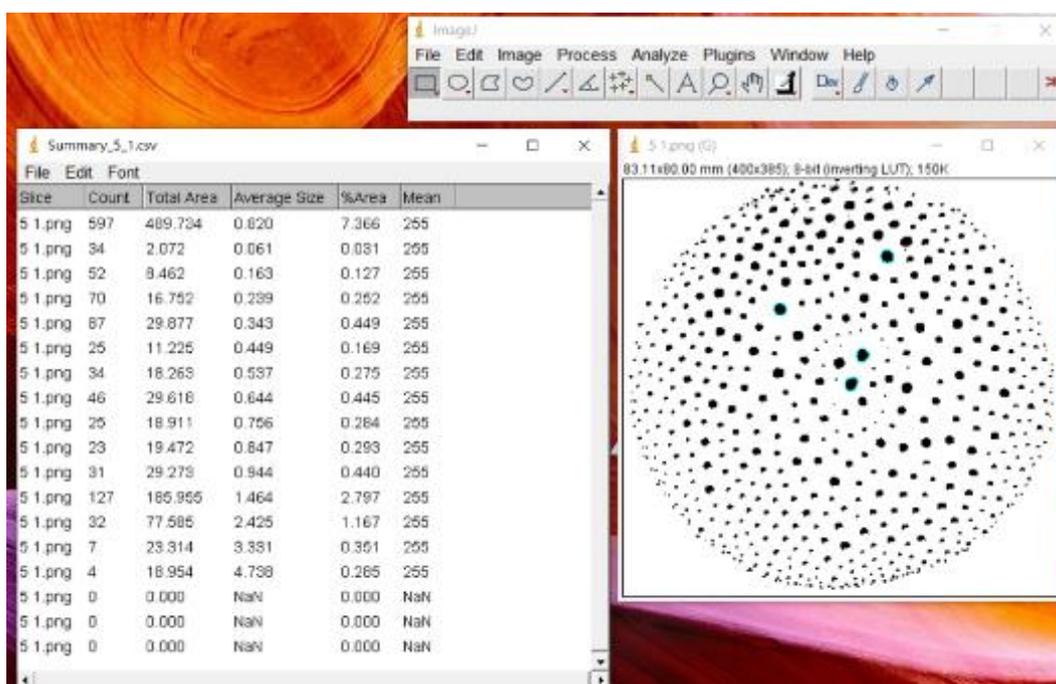
mass %	x_1	$\sigma(\text{mNm}^{-1})$ at $t/^{\circ}\text{C}$						
		20	25	30	35	40	45	50
0	0.000	72.75	72.01	71.21	70.42	69.52	68.84	67.92
5	0.020	56.41	55.73	55.04	54.36	53.63	52.96	52.16
10	0.042	48.14	47.53	46.88	46.24	45.58	44.97	44.26
15	0.065	42.72	42.08	41.49	40.88	40.27	39.64	38.96
20	0.089	38.56	37.97	37.38	36.83	36.28	35.71	35.12
25	0.115	36.09	35.51	34.96	34.41	33.86	33.31	32.76
30	0.144	33.53	32.98	32.43	31.94	31.42	30.89	30.34
40	0.207	30.69	30.16	29.68	29.27	28.77	28.28	27.82
50	0.281	28.51	27.96	27.53	27.11	26.64	26.21	25.78
60	0.370	26.72	26.23	25.81	25.43	24.97	24.54	24.11
70	0.477	25.48	25.01	24.60	24.21	23.76	23.33	22.92
80	0.610	24.32	23.82	23.39	23.01	22.54	22.12	21.71
90	0.779	23.23	22.72	22.32	21.94	21.53	21.13	20.71
100	1.000	22.31	21.82	21.41	21.04	20.62	20.22	19.82

表六、不同濃度的酒精表面張力

另一方面，不同濃度酒精的表面張力，我們測得的數據與論文中查到的數據也有吻合處，獲得這些數據之後可以幫助我們理解並解釋液裡開花過程的原理，詳細的討論請參考下一節討論與結論。

實驗五：使用 ImageJ 測量與統計不同濃度酒精液滴開花後的碎液滴數量與大小

使用 ImageJ 程式可以讓電腦幫我們計算各種大小的碎液滴面積與數量，真的非常方便，尤其是處理這些數量極大且面積很小的碎液滴，真的是絕佳的工具(圖十五)，我們將取得的數據製成表七，可看到所有數據彙整的結果。



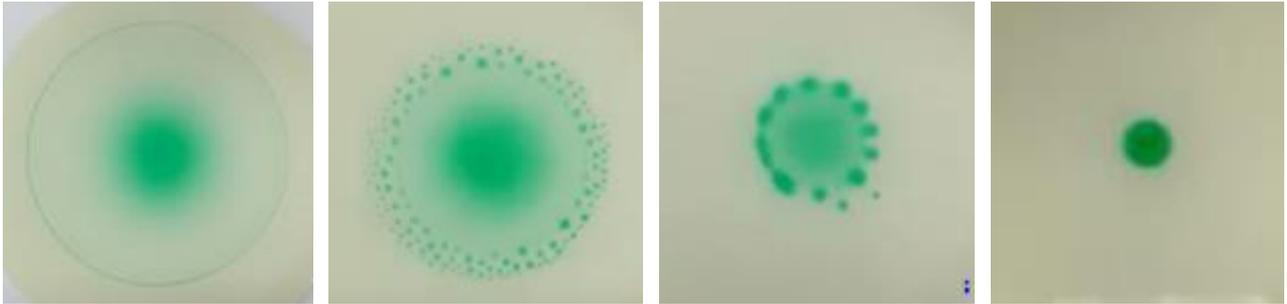
圖十五、75%酒精液滴的 ImageJ 分析過程

表七、不同濃度酒精開花後碎液滴的面積與數量

酒精濃度(%)	72	73	74	75	76	77	78	80
碎液滴面積(mm ²)	碎液滴數量(顆)							
0 ~ 0.1	0	2	6	34	174	324	902	1974
0.1 ~ 0.2	0	1	6	52	60	99	311	173
0.2 ~ 0.3	0	1	3	70	56	90	58	17
0.3 ~ 0.4	0	0	3	87	32	54	12	3
0.4 ~ 0.5	0	0	3	25	46	45	5	2
0.5 ~ 0.6	0	2	2	34	24	39	1	0
0.6 ~ 0.7	0	3	2	46	26	24	0	0
0.7 ~ 0.8	0	1	1	25	22	9	0	0
0.8 ~ 0.9	0	1	2	23	32	15	1	0
0.9 ~ 1.0	0	1	0	31	26	7	0	0
1.0 ~ 2.0	0	9	7	127	110	20	0	0
2.0 ~ 3.0	0	1	2	32	28	10	0	0
3.0 ~ 4.0	0	2	4	7	14	2	0	0
4.0 ~ 5.0	0	1	2	4	2	5	0	0
5.0 ~ 6.0	0	0	1	0	0	1	0	0
6.0 ~ 7.0	0	1	1	0	0	0	0	0
7.0 ~ 8.0	0	1	1	0	1	0	0	0
8.0 ~ 9.0	0	0	1	0	0	0	0	0
9.0 ~ 10.0	0	0	1	0	0	0	0	0
10.0 ~ 20.0	0	0	1	0	0	0	0	0
20.0 ~ 30.0	0	1	0	0	0	0	0	0
30.0 ~ 40.0	0	0	0	0	0	0	0	0
40.0 ~ 50.0	1	0	0	0	0	0	0	0
總個數	1	28	49	597	617	744	1290	2169
平均面積(mm ²)	48.9	2.63	2.09	0.82	0.37	0.32	0.23	0.05

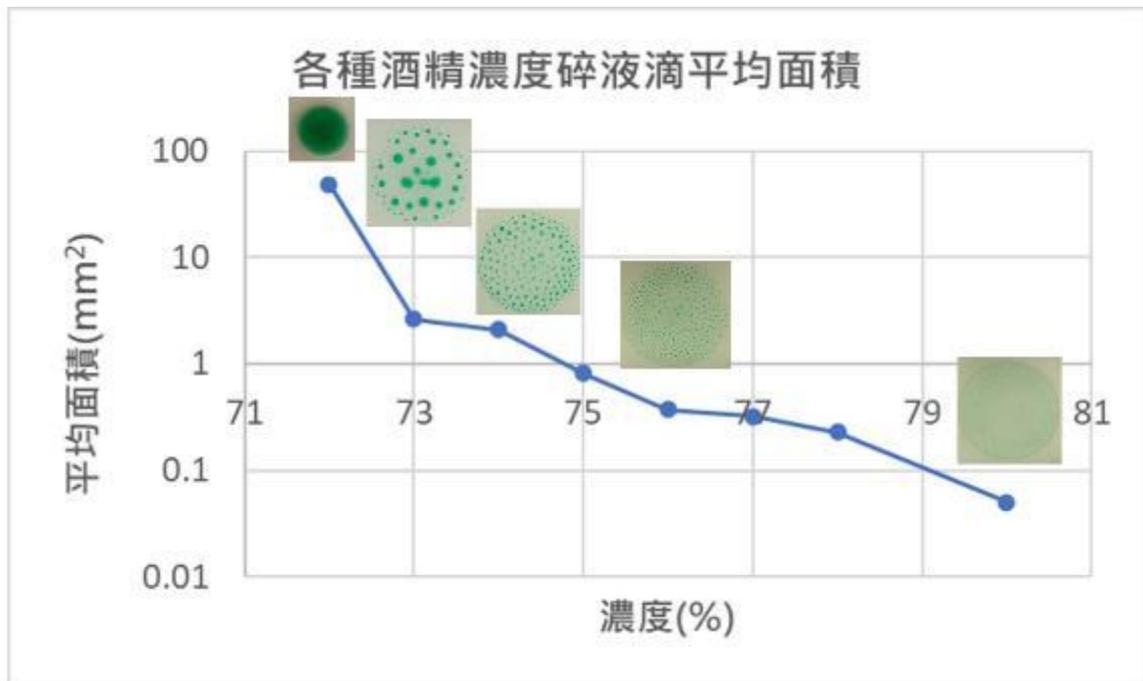
陸、討論與結論

1. 由實驗一與實驗二先歸納出它的規律，第一個就是不同的濃度擴散出去液滴的大小，我們能用肉眼觀察出酒精濃度越高，擴散出去的點就越小，而酒精濃度越低，擴散出去的點就越大，而酒精濃度低到一定程度之後，液滴開花的現象就不會發生。如圖十六分別是不同濃度酒精滴入芥花油 20 秒的照片，可明顯看出這樣的效果。



酒精 5 毫升、水 0.2 毫升 酒精 5 毫升、水 1.2 毫升 酒精 5 毫升、水 1.5 毫升 酒精 5 毫升、水 1.6 毫升
圖十六、不同酒精濃度擴散出去的液滴大小

2. 我們還觀察到碎液滴最後的大小會因為酒精濃度而改變，於是我們測量之後，參考表七做成一張圖(如圖十七)。後來我們測出各種液體的表面張力以及酒精的揮發速率，便可以嘗試解釋這個現象的原理(陸、結論與討論-6)。



圖十七、碎液滴最後的大小與酒精濃度的關係

3. 猶如許多參考資料所提及的，我們覺得液滴開花的機制與表面張力有直接的關聯性。接下來，我們開始試圖理解實驗的原理，既然是表面張力，於是我們嘗試複製了一個常見的小實驗，再水面撒上一些胡椒粉，接著以棉花棒沾一些洗碗精，當棉花棒接觸液面中心的瞬間，液面的粉末會瞬間從中心被拉開，以下是實驗的截圖(0.5 秒 1 張)：



圖十八、表面張力測試實驗

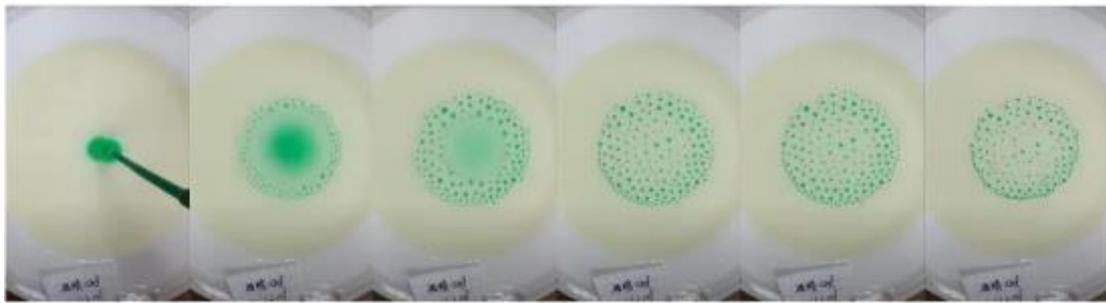
4. 我們覺得液滴開花現象跟上面的表面張力實驗是類似的原理，只不過上面的這個實驗液面擴張的速度非常快。我們沒有查到洗碗精的表面張力，但是幾份科展作品實驗結果都顯示洗碗精溶液的表面張力會遠小於水的表面張力，因此洗碗精溶液會被迅速地拉展開。我們嘗試使用這個原理來解釋液滴開花的現象：

(1) 由實驗四的實驗數據以及論文資料可知，不同濃度的酒精表面張力從 0% 酒精的 72.75 mN/m 逐漸遞減到 100% 酒精的 22.31 mN/m，而實驗一芥花油的表面張力為 34.52 mN/m。所以當 90% 酒精滴下去時，酒精和油會互相拉扯，所以是表面張力 21.66 mN/m 的酒精溶液和表面張力 34.15 mN/m 的芥花油互相拉扯，由於 90% 酒精表面張力較低，會在很快的時間內擴散出去，此時外部的碎液滴非常小，可參考實驗一的「1. 酒精 5 毫升、水 0.2 毫升」連續截圖。



圖十九、實驗一 1.酒精 5 毫升、水 0.2 毫升

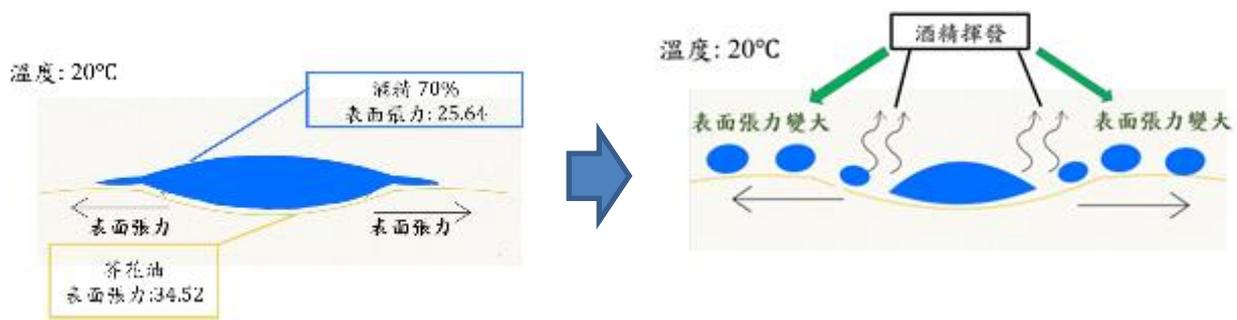
(2) 而在水量逐漸增加後，隨著酒精的濃度減小其表面張力變大，漸漸地變成跟芥花油的表面張力越來越接近，兩邊互相拉扯僵持不下，才導致擴展的速度較慢。至於有一顆顆的碎液滴擴散出去，而且會隨著時間液滴逐漸變小，我們猜測是因為酒精揮發後酒精濃度降低，導致表面張力變大，所以液滴外緣會因為表面張力增高而開始自行聚集成小液珠，也就是我們看到外圍的碎液珠，而最後液滴會逐漸變小則是因為酒精繼續揮發，慢慢液珠內部水的比例增加，表面張力也增加，導致碎液珠越來越小顆，可參考實驗一的「11. 酒精 5 毫升、水 1.2 毫升」連續截圖(圖二十)，可明顯看出，相較於較高濃度的酒精(圖十九)，此時的外圍碎液珠的顆粒較大。



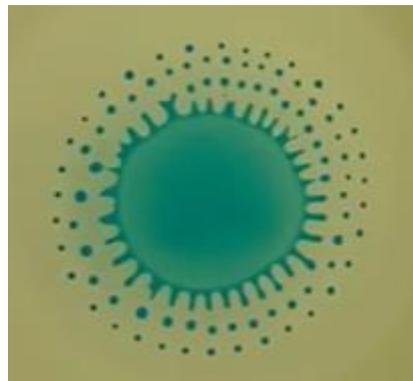
圖二十、實驗一 1.酒精 5 毫升、水 1.2 毫升

(3) 上網查所得到的資料:亞麻仁油表面張力 23.2 mN/m，而椰子油表面張力 31.5 mN/m，這兩種油的表面張力都和 95% 酒精的表面張力 22.77 mN/m 接近，這能解釋為甚麼兩種油都只有在酒精濃度較高時才能有較明顯的現象。

5. 關於酒精的揮發速率，我們在網路上找到相關的敘述：蒸氣壓與物質分子脫離液體或固體的趨勢有關。對於液體，從蒸氣壓高低可以看出蒸發速率的大小。具有較高蒸氣壓的物質通常說其具有揮發性。我們找到酒精的蒸氣壓為 2226.5 hPa，而水的蒸氣壓則為 1013.2 hPa，可以支持我們解釋液滴開花的原因：當酒精液滴的表面張力接近而且小於下方蔬菜油的表面張力時，酒精液滴擴展的速度較慢，液滴擴展過程伴隨著外圍液滴較薄，酒精揮發後表面張力增加，導致外圍的液體開始聚集成小液珠(圖二十一)，就是我們看到美麗的液滴開花現象(圖二十二)。



圖二十一、酒精液滴與下方蔬菜油橫截面示意圖



圖二十二、液滴開花外圍出現碎液珠

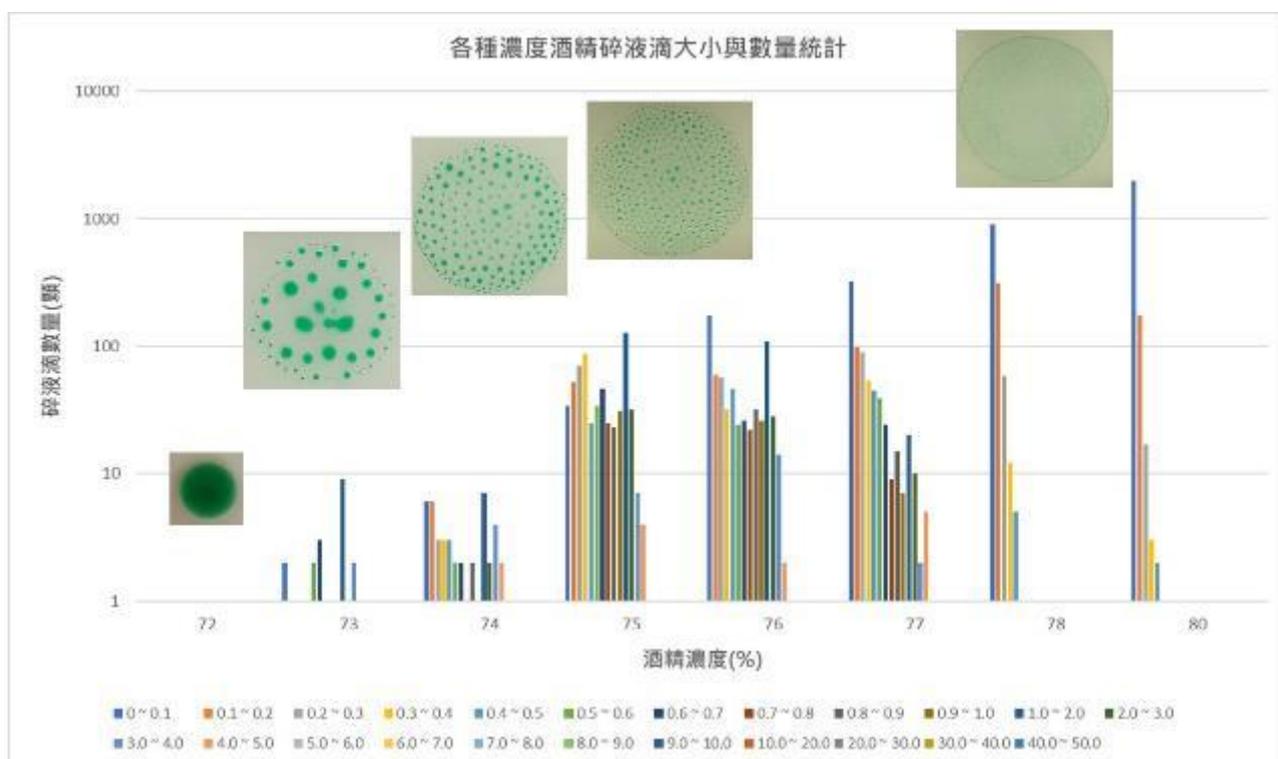
6.綜合以上的數據與原理探討，我們可以比較完整地理解液滴開花機制以及發生的條件，還可以解釋各種不同條件下發生的液滴開花不同的效果，彙整如下：

- (1) 酒精溶液的濃度會影響其表面張力，不同的蔬菜油表面張力也不同，因此可以解釋實驗一與實驗二得到的結果，不同的蔬菜油在某個酒精的臨界濃度時液滴開花的效果最明顯，因為此時酒精溶液和蔬菜油的表面張力最接近，也就造成液滴擴展的速度最慢，因而此時現象最明顯。
- (2) 酒精濃度低於這個臨界濃度時，會因為表面張力大於蔬菜油的表面張力，因而聚成一個大液滴，不會發生液滴開花的現象。
- (3) 酒精濃度大於臨界濃度時，會發生液滴開花的現象，但是隨著酒精濃度增加，酒精溶液的表面張力越小，蔬菜油的表面張力相對比較大，因此開花的速度會較快，外圍的碎液珠也會比較小。
- (4) 液滴開花現象外圍會發生液滴碎裂的情形，主要的原因則是因為酒精的揮發速度較快，當液滴開花擴展速度較慢(接近臨界濃度時)，外圍的酒精溶液會因為擴展也厚度變薄，

加上液面酒精持續揮發，造成外圍的溶液的**表面張力**增加，達到一個程度時會開始聚成圓型液珠，也就是我們看到的液滴碎裂的現象(圖二十二)。

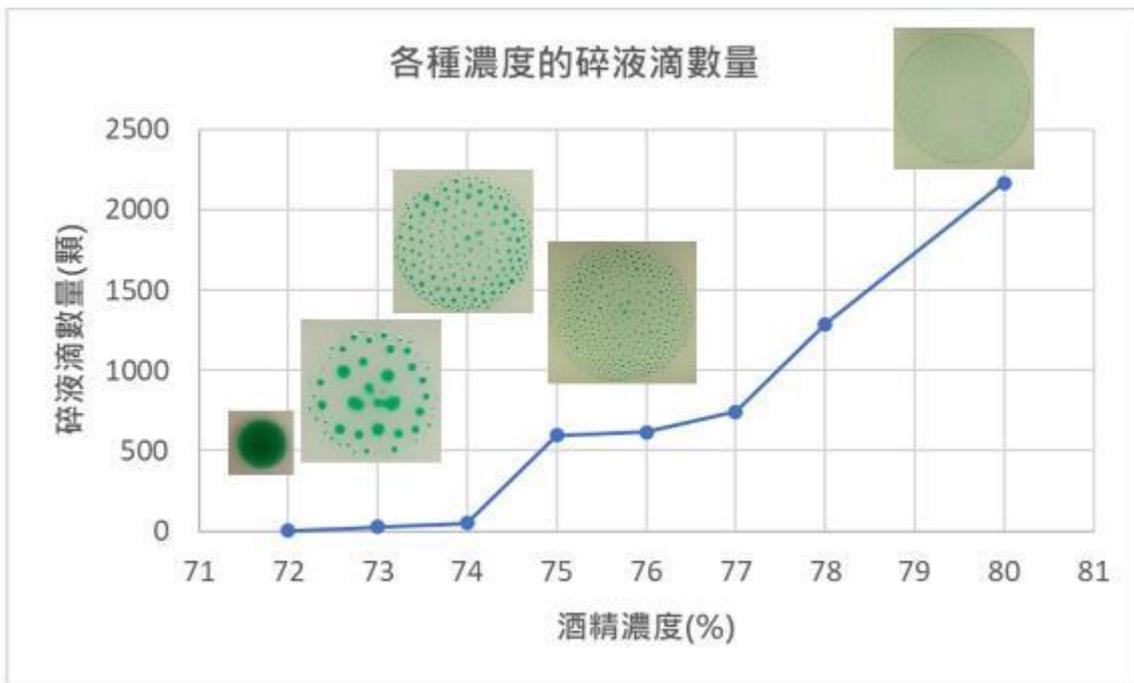
(5) 液滴碎裂的效果又會受到液滴擴展的速度影響，因此我們看到酒精接近臨界濃度時，碎液珠會較大，酒精濃度較高時，液滴擴展速度較快，碎液珠則較小，這樣的效果可以在前面的第2點所得到數據獲得明顯的支持(圖十七)。

7. 我們嘗試將實驗五所得到的數據(表七)作圖，可得到圖二十三的不同濃度酒精碎液滴大小與數量關係，由各種濃度的不同顏色長條圖可看出不同大小的數量比例，不難看出達到臨界濃度之後碎液滴面積較大，數量較少，隨著濃度增加，碎液滴的數量大幅增加，面積也極具減小。



圖二十三、各種濃度酒精的碎液滴大小與數量統計圖

8. 圖二十四則是將酒精濃度與的碎液滴數量作圖，可看到液滴數量隨著酒精濃度上升而大幅增加，主要也是因為高濃度的酒精表面張力較小，主液滴擴展速度較快，主液滴外圍的較薄而隨著酒精的揮發，酒精濃度降低表面張力增加而發生液滴碎的開花現象，主液滴外圍較薄也就導致碎液滴面積較小而造成數量大增。



圖二十四、酒精濃度與的碎液滴數量關係圖

9. 液滴開花現象可以在很多網路影片與相關論文找到資料，然而影片大多只是示範這個現象，並沒有詳細說明，論文中有許多相關的公式與計算，但是對相關的細節並沒有說明清楚，這次的研究過程我們學會了使用 google 翻譯閱讀論文資料，也動手操作進行許多實驗，學會如何使用微量滴管與許多實驗技巧，尤其是尋找各種油品的表面張力與蒸氣壓資料時，我們學會使用英文搜尋相關論文資料，自己找到芥花油與椰子油的表面張力數據真的很有成就感。
10. 有了這段時間的經驗與基礎，未來我們希望能進一步設計實驗比較論文中的公式理論。我們也發現很多表面張力的數據和溫度有關，未來我們也希望能嘗試改變油和酒精的溫度，期待可以調整出更多不同的比例與溫度組合，研究這些現象的原理是否符合我們原來的解釋。另一方面，我們認為酒精揮發是導致酒精液滴開花的重要因素，未來希望也能找到操控酒精揮發速度的方法，進一步探討酒精揮發速度對液滴開花現象的影響。

陸、參考資料

壹、中文部分

1. 周永傑(2015)・乙醇表面張力之測量・小論文寫作比賽・取自
<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2015/03/2015033102003430.pdf>

貳、英文部分

1. DDBST GmbH
<http://ddbonline.ddbst.de/DIPPR106SFTCalculation/DIPPR106SFTCalculationCGI.exe>
2. Zdziennicka A, Szymczyk K, Jańczuk B, Longwic R, Sander P. Surface, Volumetric, and Wetting Properties of Oleic, Linoleic, and Linolenic Acids with Regards to Application of Canola Oil in Diesel Engines. *Applied Sciences*. 2019; 9(17):3445.
<https://doi.org/10.3390/app9173445>, from <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/17/3445/pdf>
3. Bernat Esteban, Jordi-Roger Riba, Grau Baquero, Rita Puig, Antoni Rius, Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines, *Fuel*, Volume 102, 2012, Pages 231-238, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112005911>
4. Anne-Marie Olsson, STFI, Dick Sandberg, KTH-Tra, Analysis of the interaction between wood and high solid linseed oil paint, from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:998253/FULLTEXT01.pdf>
5. Singleton, W.S., Benerito, R.R. Surface phenomena of fats for parenteral nutrition. *J Am Oil Chem Soc* 32, 23 (1955). <https://doi.org/10.1007/BF02636473>, from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02636473>

【評語】 080110

本作品驗證馬倫哥尼效應，探討不同油品發生液滴開花現象的條件。

本作品是 IYTP 的題目，而且馬倫哥尼效應可以在很多網路影片與相關論文找到資料，大部分的實驗結果都是可以預期的，但是本作品用了應用泰特定律計算液滴的表面張力，並且與文獻作比較，得到一致的實驗結果，這種追求數據可靠性的精神必須要給予做實驗的同學肯定。

實驗的控制變因也做得相當好，使用 Tracker 分析液滴開花的動態過程及 ImageJ 分析並統計碎液滴數量與大小，觀測到的實驗現象都盡量以量化的方式解釋，算是一份相當完整的科展作品。

作品簡報



跳舞的油滴

馬倫哥尼效應
(Marangoni effect)



Micro-structure of the Marangoni effect



• 觀察現象



液滴開花：
滴下後有碎液滴向外擴散



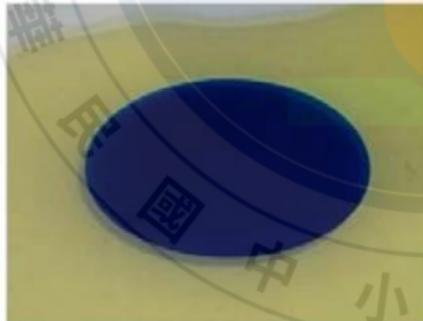
液滴不開花：
滴下後無任何反應

• 進行量化實驗

實驗一：找出液滴開花效果最明顯的酒精度



圖三、實驗一設備與現象



實驗二：不同種類的油效果是否不同？

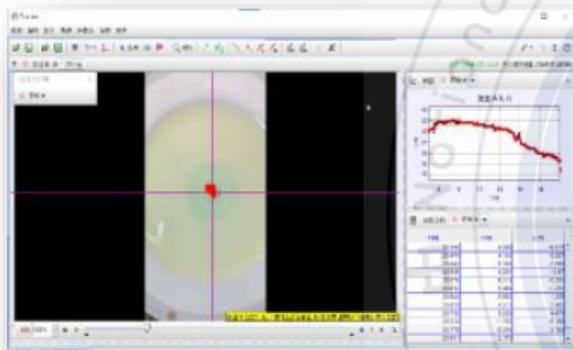


圖四、實驗二進行過程與器材

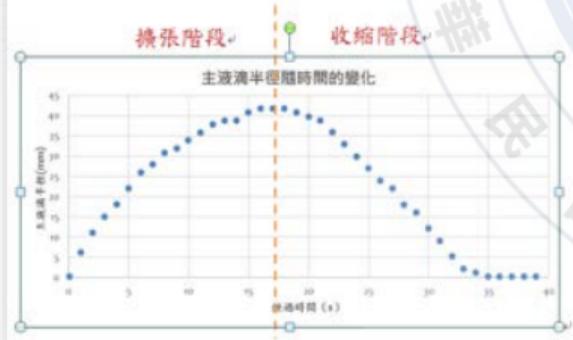


研究過程與方法

分析液滴開花的動態過程



Traker畫面

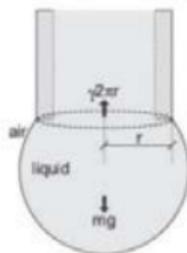


液滴開花的動態過程分析

測量各種蔬菜油與不同濃度酒精的表面張力



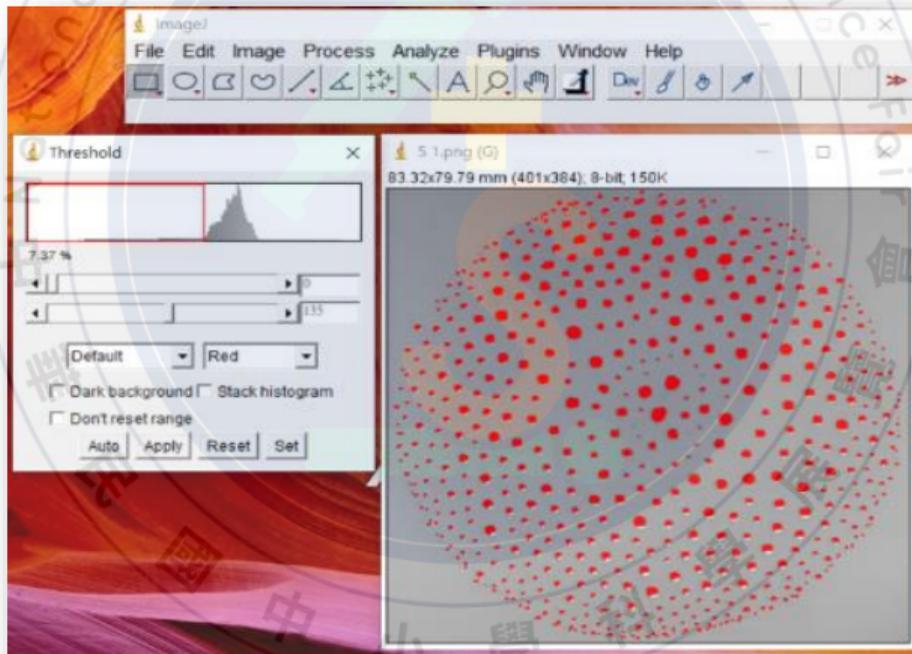
圖八、使用懸滴法測量各種液體的表面張力



圖七、懸滴法示意圖

研究過程與方法

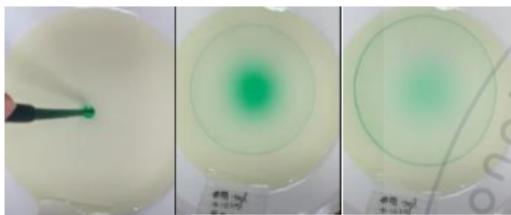
- 分析與統計不同濃度酒精液滴開花後的碎液滴數量與大小關係



伍、研究結果

芥花油

酒精5ml 水0.2ml



酒精5ml 水1.2ml



酒精5ml 水2ml

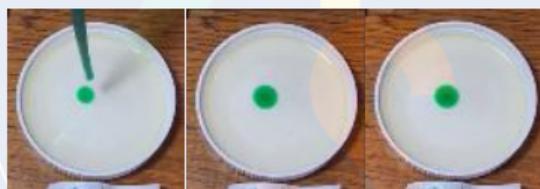


椰子油

酒精5ml 水0ml



酒精5ml 水2ml



酒精5ml 水4ml



亞麻仁油

酒精5ml 水0ml



酒精5ml 水2ml

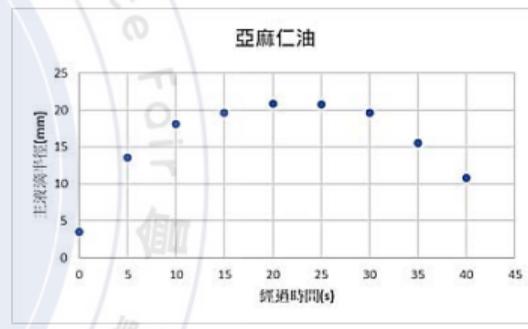
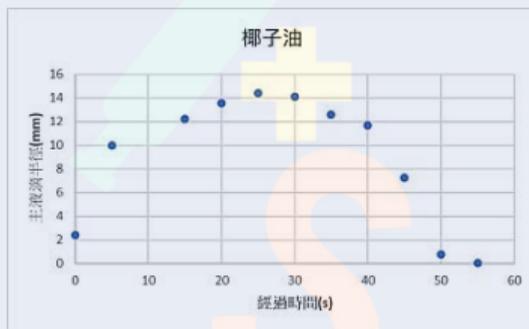
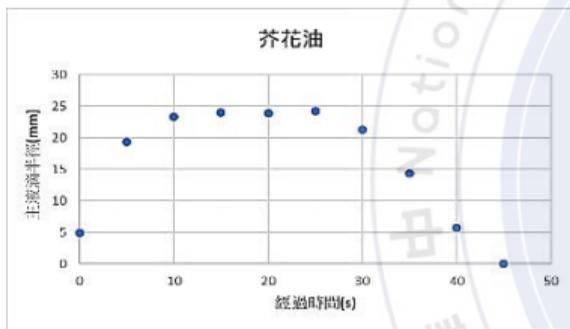


酒精5ml 水4ml



伍、研究結果

- 分析液滴開花的動態過程



主液滴半徑隨時間的變化

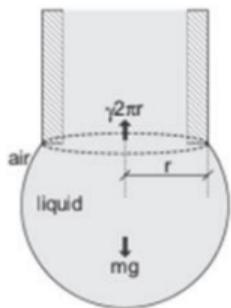
不同的油主液滴都有類似變化

伍、研究結果

四、測量各種蔬菜油與不同濃度酒精的表面張力

芥花油		第一次		第二次		亞麻仁油		第一次		第二次		
滴數	體積 (mL)	重量 (g)	體積 (mL)	重量 (g)	滴數	體積 (mL)	重量 (g)	體積 (mL)	重量 (g)	滴數	體積 (mL)	重量 (g)
0	0	28	0	28.3	0	0	28.3	0	28.3	0	0	28.3
100	2.9	30.3	3.6	31.4	100	3.6	31.2	3.4	31.4	100	3.6	31.2
200	6.4	33.7	6.7	34.1	200	6.7	34.1	6.5	34	200	6.7	34.1
300	9.4	36.4	9.6	36.6	300	9.6	36.7	9.5	36.7	300	9.6	36.7

芥花油	
一滴的質量(kg)	0.0000283
一滴的重量(mN)	0.278
滴管口徑(m)	0.0025
滴管開口周長(m)	0.00785
表面張力(mN/m)	35.41

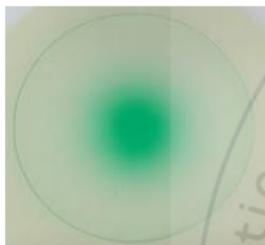


懸滴法
示意圖

芥花油的表面張力是 **35.41 mN/m**
亞麻仁油的表面張力是 **34.96 mN/m**

陸、討論與結論

1：分析規律：分裂出的碎液滴會因酒精濃度而改變



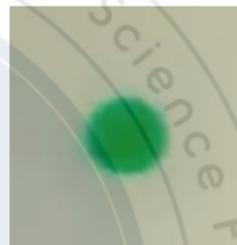
酒精96%



酒精81%

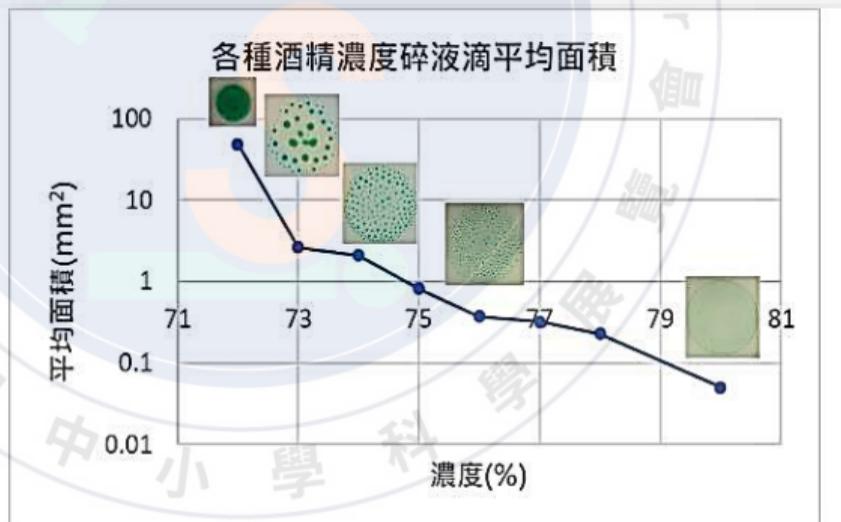


酒精79%



酒精71%

2：碎液滴最後大小
與酒精濃度的關係



討論與結論

4.1：濃度高的酒精開花現象觀察



4.2：濃度低的酒精(略高於臨界濃度)的開花現象觀察

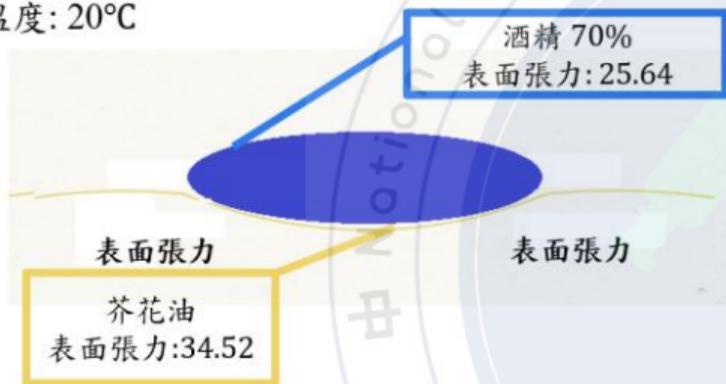


4.3：亞麻仁油及椰子油的開花現象解釋

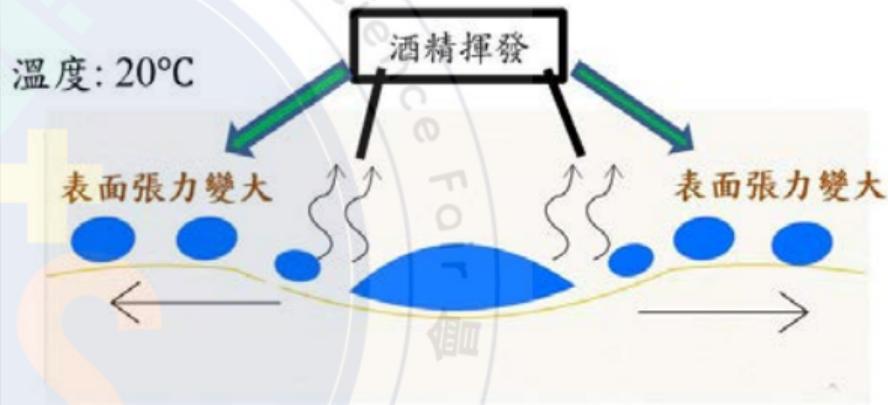
種類	表面張力 (mN/m)	種類	表面張力 (mN/m)
亞麻仁油	23.2	酒精(95%)	22.77
椰子油	31.5	酒精(90%)	23.23

討論與結論

溫度: 20°C



溫度: 20°C



1. 酒精的蒸氣壓為2226.5 hPa，而水的蒸氣壓則為 1013.2 hPa
2. 蒸氣壓高低與蒸發速率的大小有關。較高蒸氣壓的物質稱之具有揮發性
3. 酒精液滴表面張力接近而且小於油的表面張力時，液滴擴展的速度較慢
4. 液滴擴展時外圍液滴逐漸變薄，酒精揮發後表面張力增加，導致外圍的液體開始聚集成小液珠

討論與結論

5：酒精揮發對形成碎液滴的影響

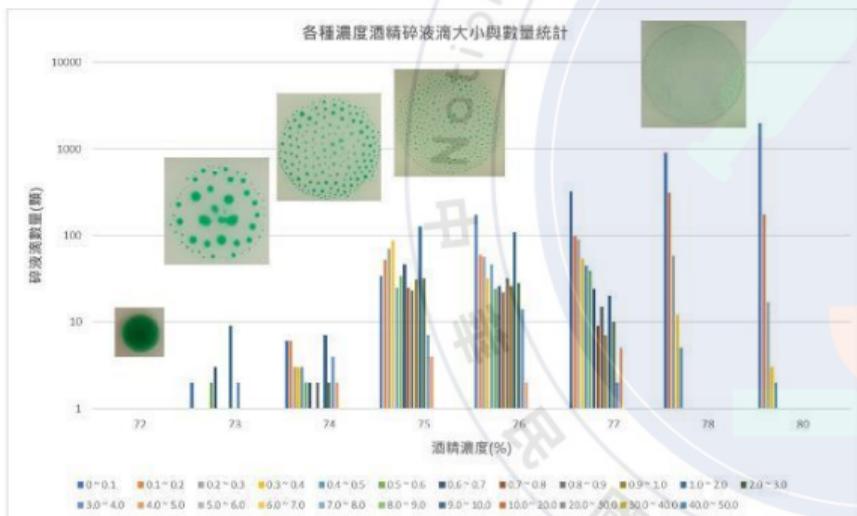
酒精比水容易揮發，一段時間後，酒精濃度因為揮發而變小，表面張力變大，形成外面的碎液滴，也就是我們所看到的液滴開花現象

6：酒精濃度與油的表面張力對開花現象的影響

- 1 酒精濃度越高其表面張力越小
- 2 酒精濃度低於臨界濃度不會有開花現象
- 3 臨界濃度就是酒精的表面張力與油的表面張力很接近的時候
- 4 酒精揮發導致液滴碎裂的現象
- 5 酒精濃度較低時開花速度快，碎液滴小

討論與結論

7. 酒精濃度對碎液滴大小的數量的影響



8. 酒精濃度對碎液滴數量的影響

