

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 化學科

團隊合作獎

050201

「醇」「醇」欲動——探討丙二醇液滴的馬蘭哥尼效應

學校名稱：國立科學工業園區實驗高級中學

作者：  高二 葉芳瑜  高二 謝秉希  高二 謝亞彤	指導老師：  謝道任
---	------------------

關鍵詞：馬蘭哥尼效應、表面張力、丙二醇

## 摘要

本實驗探討不同濃度醇類液滴在載玻片上的交互作用現象「馬蘭哥尼效應」。我們以火焰燃燒 15 秒、載玻片懸空 19 公分代替電暈表面處理，並進行一連串實驗與分析。實驗發現欲使兩液滴產生互相推拉的運動，兩液滴間須保持一最小表面張力差值為 3 dynes/cm；又表面張力差越大，液滴運動的加速度越大，表示液滴移動愈快，從錄影紀錄也能清楚看見。此外我們也發現了「混合區」的存在，並確定其與兩液滴交互作用的關係。利用比爾定律計算出混合區的濃度，可發現與我們所得之表面張力最小極限值相符合，藉此找出液滴停止推拉現象之成因。

透過上述研究結果，設計出改良式的選色實驗（sorting experiment），以階梯式取代等長式液滴層，並選用 1%、5%、15%、25%、40%與 60%的丙二醇液滴，成功讓七彩液滴在載玻片上舞動。



（圖一）階梯式選色實驗

## 壹、研究動機

在 Stanford News 於 2015 年 3 月發表的影片中，有一影片為「Mystery of the dancing droplets」，呈現不同濃度丙二醇的液滴在電暈表面處理（corona treatment）的載玻片上牽引、推動的交互作用，實驗中液滴經色素染色後不僅更有利於觀察，也增添視覺上的美感，顯得格外引人注目。由於影片甚少提到實驗背後的原理，我們搜尋文獻、網路資料，才得知此現象稱為「馬蘭哥尼效應」（Marangoni effect）。此效應指在流體介面，因表面張力梯度而造成的傳質現象，在日常生活或工業廣泛應用，但實際原理並不清楚易解，影片中的被動選色實驗（sorting experiment）或稱階梯實驗看似簡單，但經初步嘗試後，我們發現成功率不高。為了完美重現此實驗，我們設計一系列的研究。首先我們想探討不同藥品的水溶液是否能呈現與丙二醇相似的馬蘭哥尼效應，也嘗試調整醇與水的濃度，觀察液滴運動的快慢，並進一步探討導致液滴交互作用停止或混合的原因，推測兩液滴交界處存在一狹窄的「混合區」，兩液滴會在此區進行物質傳遞。藉由研究物質傳遞的多寡與相對濃度，並推論濃度與表面張力的關係，我們想印證維持兩液滴交互作用所需最小的表面張力差值，找出產生馬蘭哥尼效應的必要條件。

## 貳、研究目的

- 一、設計實驗系統模組
- 二、研究不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應
- 三、研究不同濃度之溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同之處
- 四、設計被動選色 (sorting experiment, 或稱階梯實驗) 之機制
- 五、探討溶液混合或停止追逐現象之成因

## 參、研究設備及器材

實驗器材：

量筒、食用色素 (紅色七號、黃色四號、藍色二號)、溫溼度計、鑷子、載玻片、本生燈、黑色油性奇異筆、燒杯、攪拌棒、微量滴管、擋風板

實驗藥品：

乙醇、乙二醇、正丙醇、丙二醇、乙酸、硝酸鉛、碘化鉀

## 肆、研究方法

馬蘭哥尼效應：

馬蘭哥尼效應是由於流體介面的表面張力梯度 (gradient of surface tension) 所造成的傳質現象。造成表面張力差異的變因包含溫度與界面活性劑，如清潔劑。當載玻片的溫度經加熱提高後，其表面能會增加，增加其潤濕性與附著力，使液滴接觸角變小。此液滴與載玻璃接觸面積較大，同時液滴自身的表面張力使其產生回縮的趨勢，因此液滴邊緣的溶液較薄，即「薄膜」(thin film)。(圖二) 此區的較大表面積使蒸發對溶液影響加劇。水的表面張力較醇類溶質高，蒸發速率也較快，所以在薄膜中，醇類的濃度較高、表面張力較小，整顆液滴的不同區域因而有表面張力的差異，相對邊緣區域，液滴中央的表面張力高於邊緣區域，溶液會從低表面張力流至高表面張力的區域，由外側底部沿著表面往上流動，即馬蘭哥尼流。

當兩顆液滴在一定距離內，兩顆液滴會就表面張力的差異而產生追逐或相吸的現象。

第一種情形是當兩顆液滴丙二醇的濃度相同時，它們會互相吸引直到匯聚成同一顆液滴。兩顆液滴中間的水分蒸發量因蒸氣聚集而較兩側少，因此此區水分濃度高，所以表面張力也較高，吸引溶液流向此。另外一種追逐的情形則發生在兩顆液滴的表面張力達一定差值時，高表面張力會吸引低表面張力的液滴，造成貌似追逐的現象，也就是高

濃度會朝低濃度醇類水溶液液滴靠近。(圖三)



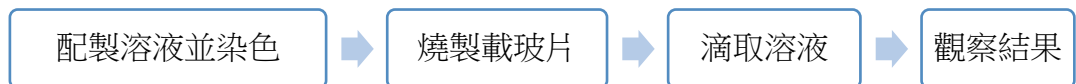
(圖二) 液滴於加熱前後的載玻片

(圖三) 丙二醇濃度與液滴表面張力的關係

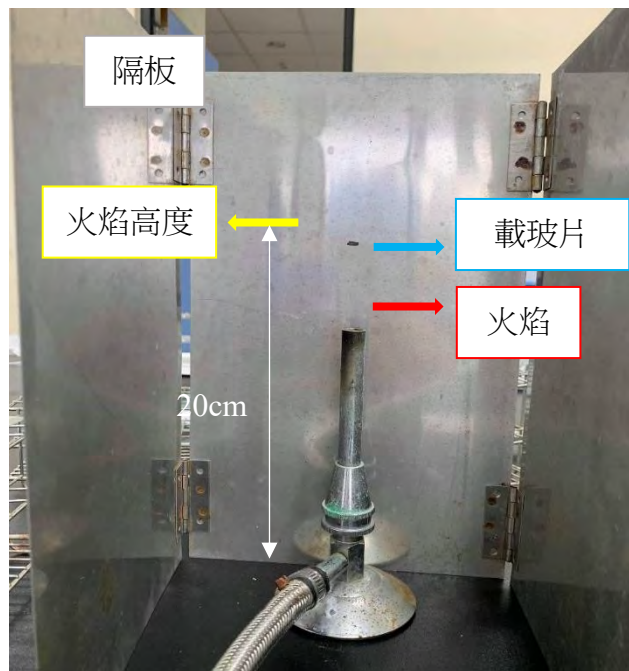
## 一、設計實驗系統模組

### (一) 實驗流程與裝置

實驗流程可分為下列步驟：



為控制每一片載玻片的溫度，本生燈的火焰高度（火焰的上端）設置在 20 公分，載玻片的懸空高度為 19 公分（如圖四），加熱的時間固定為 15 秒。加熱完畢後，載玻片需靜置待其溫度降回室溫。

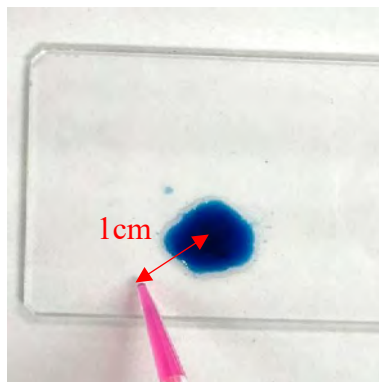


(圖四) 實驗裝置

如圖五所示，我們使用微量吸管吸取溶液，使每次實驗之液滴大小控制在 $10\mu\text{l}$ 。每一組實驗的兩液滴之間距為1公分（以液滴中心計算）（如圖六）。



（圖五）微量吸管

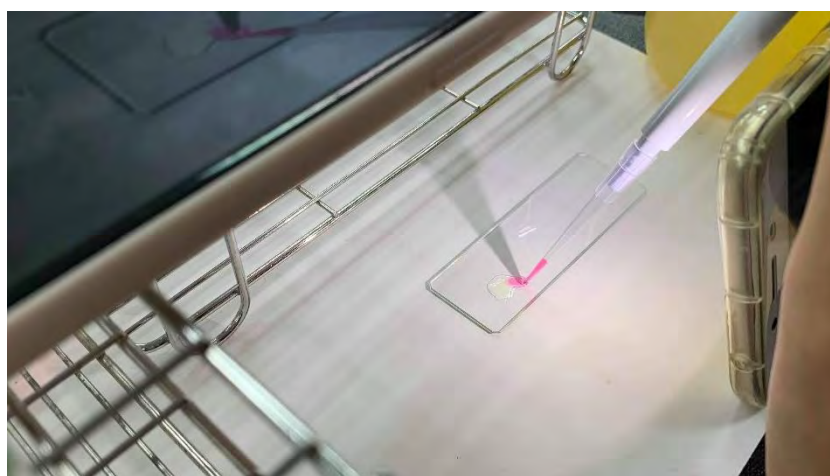


（圖六）液滴間距

如圖七所示，我們放置攝影機，以記錄實驗結果，同時在手電筒提供光源的情況下能更清楚觀察液滴移動的情形。



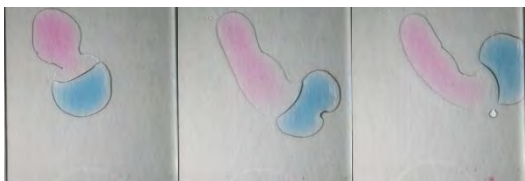

（圖七）攝影裝置



（圖八）實驗操作過程

## (二) 實驗結果成功或失敗之定義

不同種狀況下會產生不一樣的液滴互推結果，為使討論方便，我們定義了實驗成功或失敗如下：

結果	圖片	描述
成功		粉色液滴明顯推動藍色液滴，兩液滴有明顯分界。
失敗		粉色液滴起初看似要推動黃色液滴，但兩者隨即混合。

(表一) 實驗成功與失敗之定義

註：左上溶液為高濃度，右下溶液為低濃度。後續表格也如此顯示。

## 二、研究不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應

建立實驗系統後模組後，我們欲探討除了丙二醇之外，其他藥品是否能成功呈現出馬蘭哥尼效應。因此我們以同為醇類的乙醇、乙二醇與正丙醇進行實驗，也選用同為有機物的乙酸。

## 三、研究不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同之處

### (一) 不同濃度之實驗結果

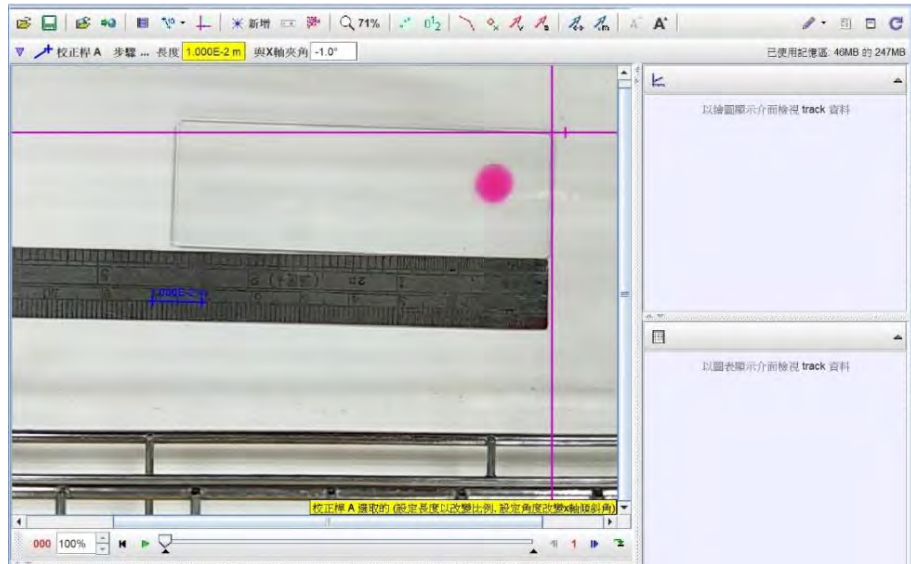
藉由改變兩滴液滴的濃度，我們欲探討濃度對馬蘭哥尼效應的影響。根據第 11 頁表三，丙二醇液滴的交互作用情形最易觀察，因此我們先選擇 1%、25% 與 40% 的丙二醇水溶液進行實驗。

實驗過程中，不同濃度的液滴間會有相異的移動情形，如路徑長、速率。透過 Tracker 程式分析液滴的移動狀態並計算，可得知液滴的加速度。

根據牛頓第二運動定律  $F = ma$ ，影響液滴加速度的關鍵為其受力大小。又由原理得知馬蘭哥尼效應的重要變因之一為液滴的表面張力差。因此能進一步推論濃度迥異導致的表面張力差與液滴受力大小的關係。

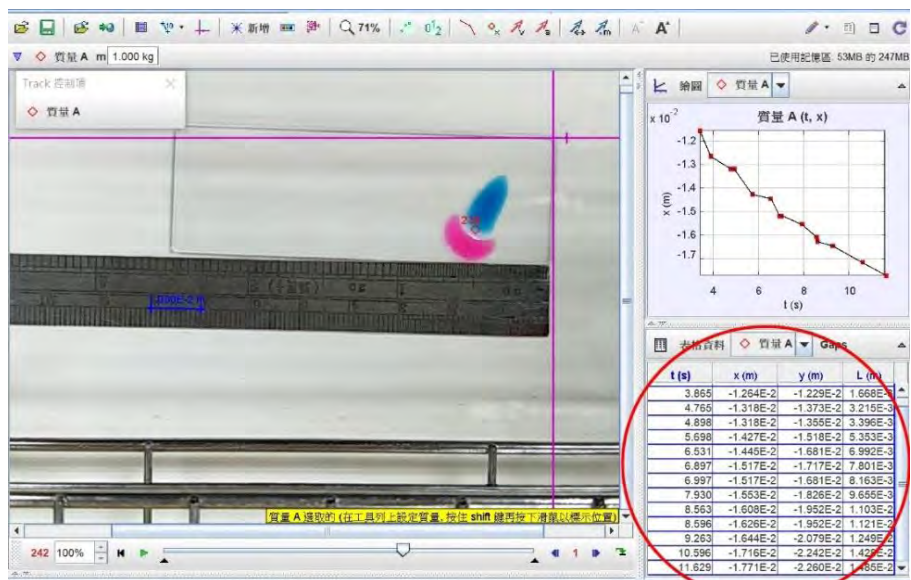
Tracker 使用步驟說明：

1. 將欲分析的影片匯入 Tracker 軟體中。
2. 自訂坐標軸原點（粉紅）（原點位置不影響我們要分析的路徑長）
3. 新增校正桿（藍），以直尺 1cm 作為校正依據。



（圖九）Tracker 使用介面

4. 使用追蹤質點功能得到後方液滴（藍）在不同時間的坐標值，每支影片約取 20 點。
5. 分析取得的坐標，運用  $\frac{1}{2}at^2 = s$  公式計算小液滴的加速度。



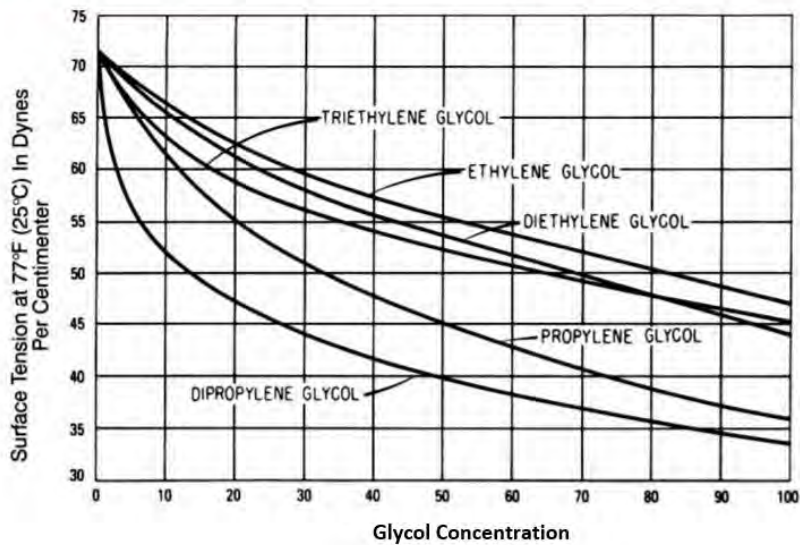
（圖十）Tracker 數據

## (二) 探討所需最小表面張力差

由第 2 頁馬蘭哥尼效應的原理得知，液滴移動是因兩者之間存在足夠的表面張力。經實驗 1%、25%與 40%三種濃度後，可發現其都能產生穩定的馬蘭哥尼效應。我們假設若繼續改變濃度，以縮小液滴間表面張力差值，最後能找到使實驗成功的最小表面張力差極限值。於是我們設計了以下實驗：

為了確定丙二醇溶液在不同濃度時的表面張力，我們尋找了國外的文獻資料，且用座標法去計算，圖表如下圖：

Figure 19- Surface Tensions of Aqueous Solutions of Glycols at 77°F (25°C)

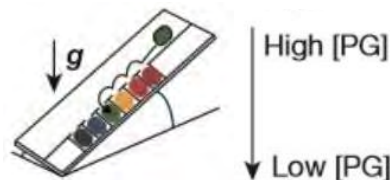


(圖十一) 二羥基醇濃度與表面張力的關係 (參考資料二)

實驗結果若成功，我們就再次縮小液滴的表面張力值，直到實驗結果失敗。

## 四、設計階梯實驗之機制

我們改良文獻中的被動選色機制 (圖十二)，根據目前實驗所得數據，重現實驗動機所提的影片實驗。



註：PG 為丙二醇的英文簡寫，g 為重力

(圖十二) 被動選色機制 (參考資料六)



根據（圖十一），我們同樣以座標軸算出不同濃度的表面張力，並找出適合進行實驗的六種濃度差，如下表：

顏色	濃度（%）	表面張力 （dynes/cm）
紅	1	70.8
黃	5	65.7
青綠	15	59.3
藍	25	53.8
紫	40	47.9
粉紅	60	43.5

（表二）被動選色實驗中液滴的丙二醇濃度與其對應表面張力

## 五、探討溶液混合或停止追逐現象之成因

由第 2 頁的原理得知，馬蘭哥尼效應，是源於兩液滴之間存在足夠大的表面張力差，在實驗三 - （二）中，我們也找出表面張力差的最小極限值。

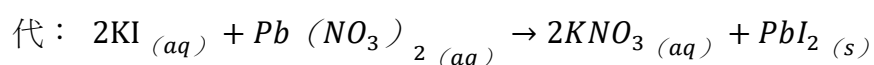
實驗中，兩液滴的交互作用並非永恆，液滴最後會停止移動或混合。若兩液滴的表面張力差持續存在，兩液滴應可以永遠維持交互作用，然而實驗結果並非如此。

透過此現象，我們推測液滴在推動的過程中，其交界處存在一「混合區」。兩邊的液滴將於此混合區交換溶液，最終使得兩液滴的濃度隨著移動的時間改變。在過程中，低濃度的液滴濃度會逐漸升高，使得前後兩液滴的濃度差越來越小，表面張力差也越來越小，當其量值小於我們所計算出的最小極限值時，兩液滴的表面張力差即不足以維持交互作用，而造成液滴停止推動與混合的現象。

為了印證此假設，我們設計以下實驗：

### （一）驗證混合區的存在

若採用原先實驗操作，兩滴液滴以不同色素染色，如黃色和藍色，會因微量混合使顏色變化不易清楚辨別。因此我們選擇以沉澱反應替代：



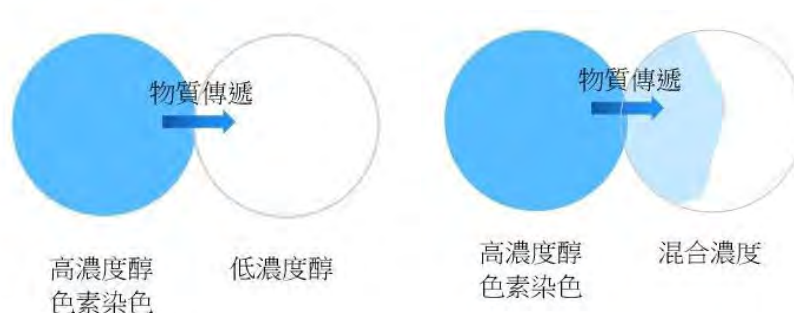
碘化鉀和硝酸鉛反應後會產生黃色沉澱物碘化鉛，若將碘化鉀和硝酸鉛分別配製在不同濃度的丙二醇溶液中，就能觀察到液滴在運動過程中是否有混合。

實驗步驟：

1. 將碘化鉀水溶液和硝酸鉛水溶液分別配成 1% 及 40% 丙二醇溶液。
2. 在燒好的載玻片上執行實驗操作，並運用錄影機拍攝。

## (二) 分析混合區的濃度

由上述沉澱實驗，我們確知在運動過程中，會有部分溶液混合，因此我們設計下一步實驗，分析兩滴液滴混合前，混合區的丙二醇濃度。



(圖十三) 液滴間物質傳遞過程

若有一杯色素量固定（顏色深度不變）的高濃度溶液與另一杯透明無色的低濃度溶液混合，會得到一杯新的混合溶液，其顏色因色素濃度被稀釋而變淺，丙二醇濃度也介於高濃度與低濃度之間，我們就能藉顏色的變化來推得混合溶液的濃度。

在實際操作實驗時，一滴為無色的較低濃度丙二醇水溶液，另一滴則為色素染色後的較高濃度丙二醇水溶液，在運動過程中，前面的無色液滴為低濃度，後面則為高濃度且經過染色，所以在液滴運動進行物質傳遞的同時，前面的顏色因色素濃度增加會逐漸加深，也就代表其丙二醇的濃度提高。

在兩液滴混合前以微量吸管吸取混合區的溶液，應用比爾定律（Beer's law）比色，便可知其色素相對濃度並進一步推出兩滴液滴完全混合前丙二醇的濃度。

比爾定律為光吸收定律，當光通過一介質後，介質會吸收光束而減少光束強度。當此介質的濃度愈大、厚度愈大，則光強度的減弱會愈明顯。

當一束平行單色光垂直通過某一均勻非散射的吸光物質時，其吸光度  $A$  與吸光物質的濃度  $c$  及吸收層厚度  $l$  成正比。其關係式為：

$$A = k \times l \times c$$

$K$ ：係數，為衰減係數或莫耳吸光係數

$l$ ：吸收介質的厚度，一般以  $\text{cm}$  為單位

$c$ ：吸光物質的濃度，單位可以是  $\text{g/L}$  或  $\text{mol/L}$

實驗步驟：

1. 取得待測溶液

- (1) 配製丙二醇 25%、40%的水溶液，並以色素將 40%染色。
- (2) 在載玻片上先滴未經染色的 25%丙二醇水溶液。
- (3) 取固定間隔後滴入 40%丙二醇水溶液。
- (4) 觀察溶液運動狀態。
- (5) 在兩者停止運動時，運用微量吸管吸取液滴混合區顏色淡化的溶液。
- (6) 重複上述步驟 25 次，完成一次溶液收集 (A)。

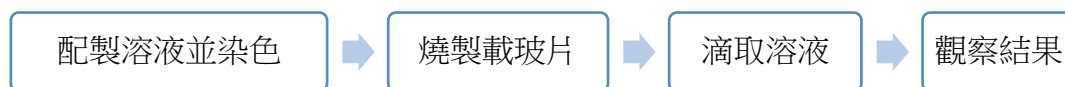
2. 得出相對濃度

- (1) 將原染色的 40%丙二醇水溶液與無色 40%丙二醇以 1：9 的比例混合以使其顏色淡化，得一溶液 (B) 以便於比色，。
- (2) 將 (A) 與 (B) 應用比爾定律在光源下比色。
- (3) 在相同容器的條件下，由正上方俯視兩瓶溶液，調整 (B) 之溶液量直到其顏色與 (A) 相同。
- (4) 量測兩溶液之高，得出其相對濃度。

## 伍、 研究結果

### 一、 設計實驗系統模組

實驗流程：



本生燈火焰高度：20 公分

液滴大小：10  $\mu$ l

玻片高度：19 公分

液滴間隔：1 公分

### 二、 研究不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應

實驗結果：

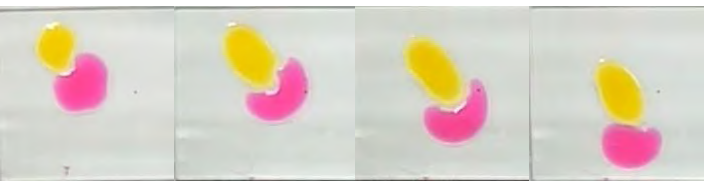
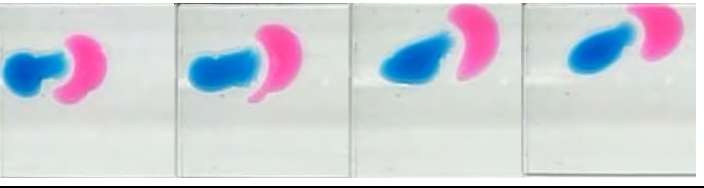
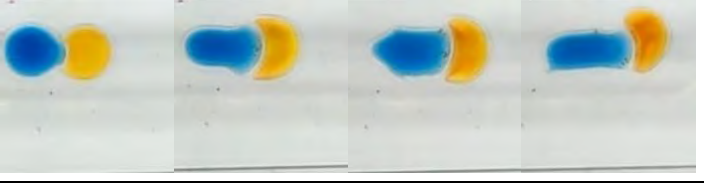
藥品	結果	
乙醇		成功
	利用乙醇溶液能成功使高濃度液滴推動低濃度液滴，但乙醇表面張力太小導致高濃度乙醇散成薄膜。	
乙二醇		成功
	利用乙二醇溶液操作實驗能成功使高濃度液滴推動低濃度液滴，而且表面張力足夠使液滴維持一完整液滴狀，使觀察容易。	
正丙醇		成功
	利用正丙醇溶液能成功使高濃度液滴推動低濃度液滴，但正丙醇表面張力太小使高濃度溶液散成薄膜。	
乙酸		成功
	利用乙酸溶液能成功使高濃度液滴推動低濃度液滴，但乙酸味道太重不適合實驗。	

(表三) 不同有機溶劑的馬蘭哥尼效應

三、 研究不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同之處

(一) 不同濃度之實驗結果

實驗結果：

濃度	結果	
1%+25%		成功
1%+40%		成功
25%+40%		成功

(表四) 不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應

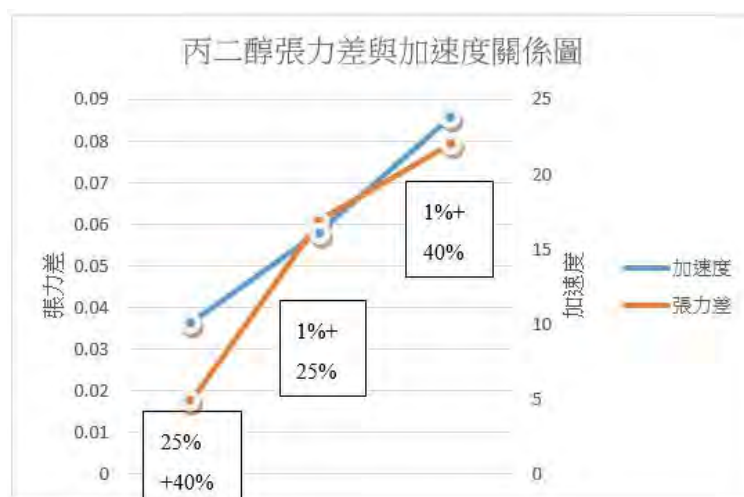
註：左方溶液為高濃度，右方溶液為低濃度。

紅色液滴濃度為 1%，黃色液滴濃度為 25%，藍色液滴濃度為 40%

由實驗結果數據（請見附錄一）可整理出：

藥品	表面張力差 (dynes/cm)	加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )
丙二醇 1%+25%	17	0.0583
丙二醇 1%+40%	22	0.0835
丙二醇 25%+40%	5	0.0365

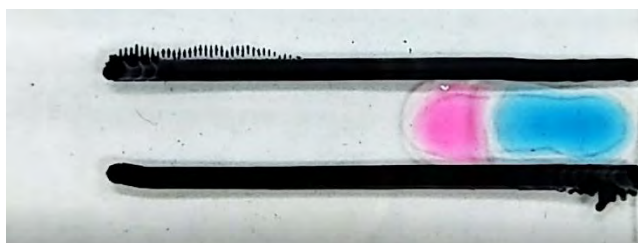
(表五) 不同濃度溶液間的表面張力差與加速度



(圖十四)  
丙二醇表面張力差  
與加速度關係圖

由表五和圖十四，我們皆可清楚觀察到液滴的加速度確實與兩液滴間的表面張力差呈現正相關的趨勢，也可推測表面張力差越大，液滴所受的力越大。

因表面張力可定義為單位長度的力，由於液滴在運動過程會產生形變，因此兩液滴交界面的長度也會隨著改變，因此我們試著將液滴移動路徑以黑色簽字筆界定（圖十五），使液滴在直線上移動，固定兩液滴的交界面長度。

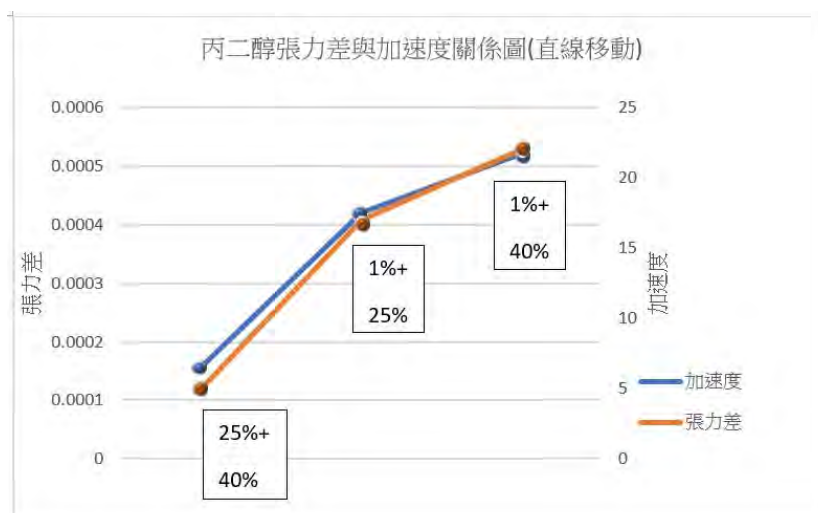


(圖十五) 直線移動路徑

由實驗結果數據（請見附錄二）可整理出：

藥品	表面張力差 (dynes/cm)	加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )
丙二醇 1%+25%	17	0.0420
丙二醇 1%+40%	22	0.0520
丙二醇 25%+40%	5	0.0157

(表六) 不同濃度溶液間的表面張力差與加速度（直線移動）

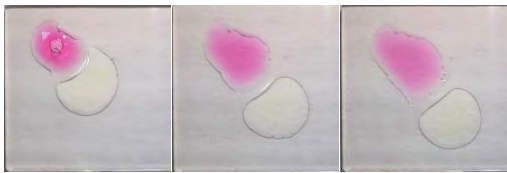


(圖十六)  
丙二醇表面張力差  
與加速度關係圖  
(直線移動)

由表六和圖十六，液滴的加速度與兩液滴間的表面張力差呈現正相關的趨勢，表面張力差越大，液滴所受的力越大。然而每一組實驗的加速度值皆比前次實驗小，我們推測在以奇異筆界定液滴運動路徑後，液滴在運動過程中與奇異筆線之間有摩擦力作用，因此整體加速度值變小。

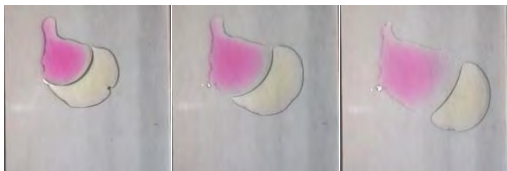
(二) 不同濃度差之實驗結果

第一次：

濃度	表面張力差	結果	
22% +50%	9.2		成功

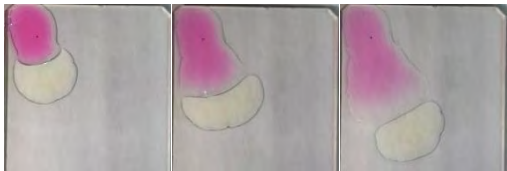
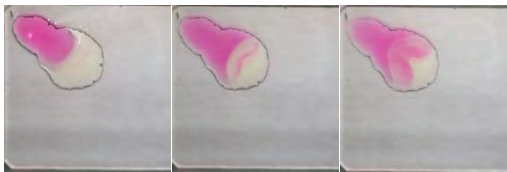
(表七) 丙二醇 22%+50%的馬蘭哥尼效應

第二次：

濃度	表面張力差	結果	
33% +50%	5.0		成功

(表八) 丙二醇 33%+50%的馬蘭哥尼效應

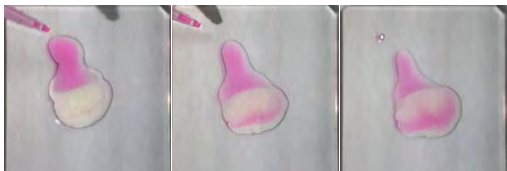
第三次：

濃度	表面張力差	結果	
40% +50%	2.9		成功
			失敗

(表九) 丙二醇 40%+50%的馬蘭哥尼效應

當實驗至濃度 40%對 50%時，表面張力差值只剩約為 3 dynes/cm，我們發現實驗成功率大幅降低，因此我們推測此數值應逼近表面張力差的最小極限值。接著我們將表面張力差值再縮小到 2 dynes/cm。

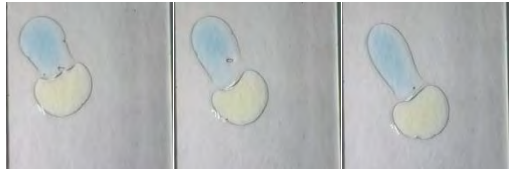
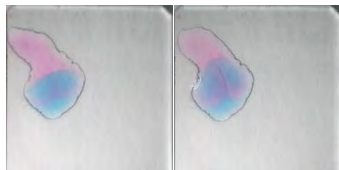

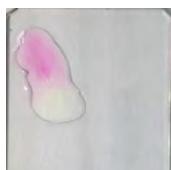
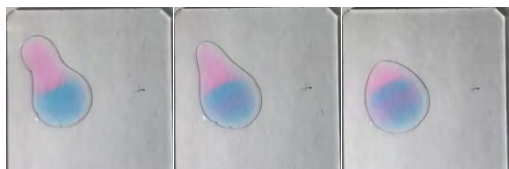
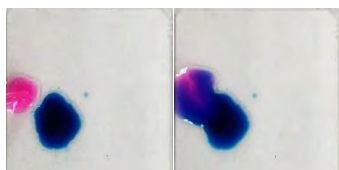
第四次：

濃度	表面張力差	結果	
44% +50%	1.8		失敗

(表十) 丙二醇 44%+50%的馬蘭哥尼效應

濃度 44%對 50%經多次實驗後，結果皆為失敗，因此我們推測要使實驗成功確實存在一表面張力差的最小極限值，約在 3 dynes/cm 左右。

為了印證我們的假設，我們又找了另外三組不同的濃度，表面張力差值各為 2 和 3 dynes/cm，來進行實驗：

濃度	表面張力差	結果	
33% +44%	3.2		成功
			失敗
20% +27%	2.9		成功
			失敗
27% +33%	2.1		失敗
25% +30%	2.0		失敗

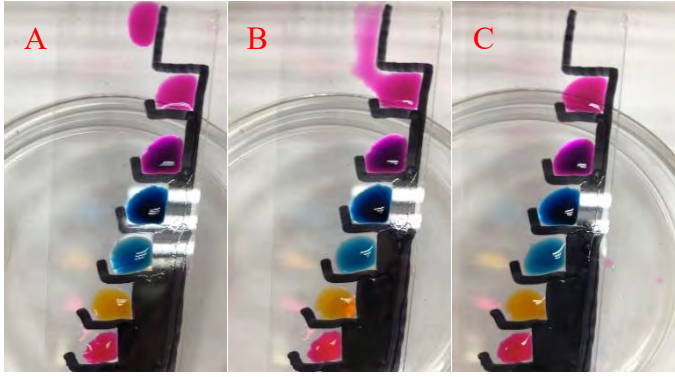
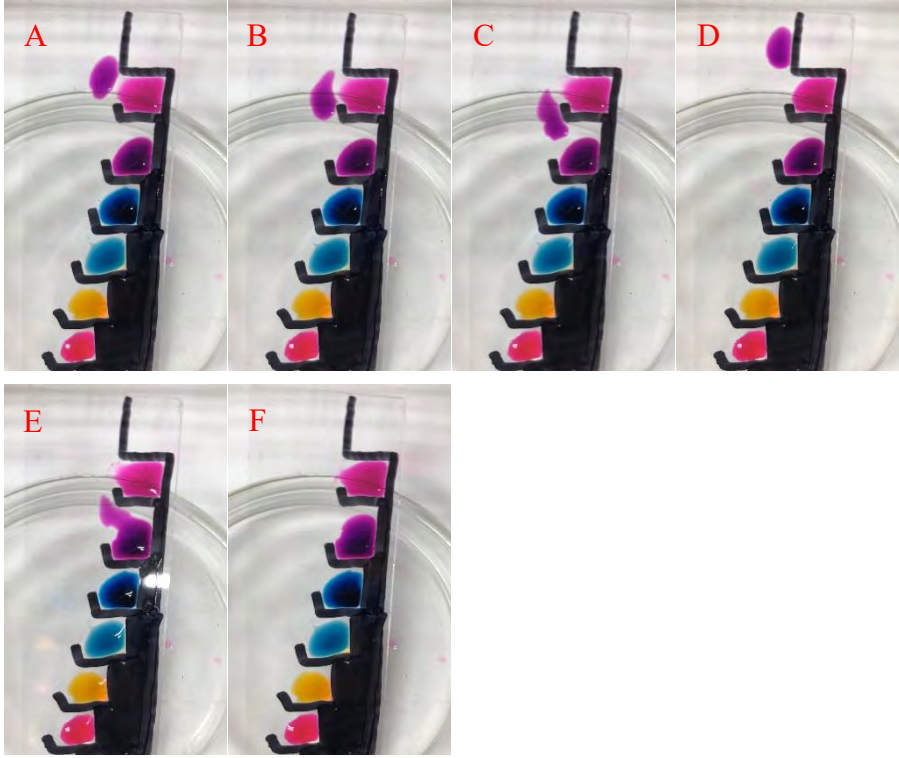
(表十一) 丙二醇多種濃度的馬蘭哥尼效應

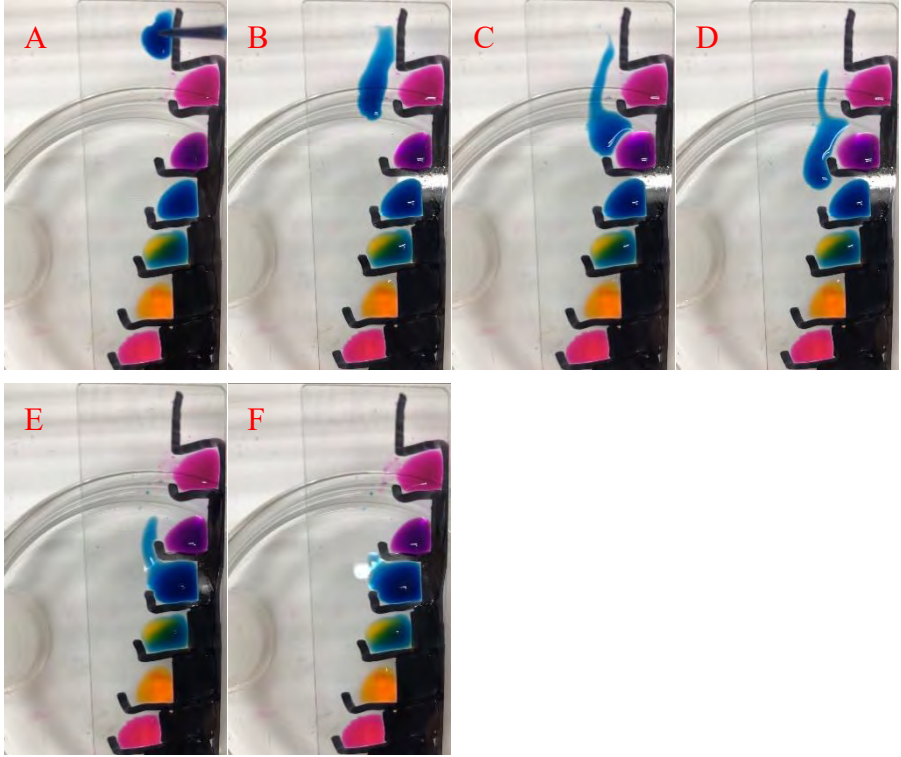
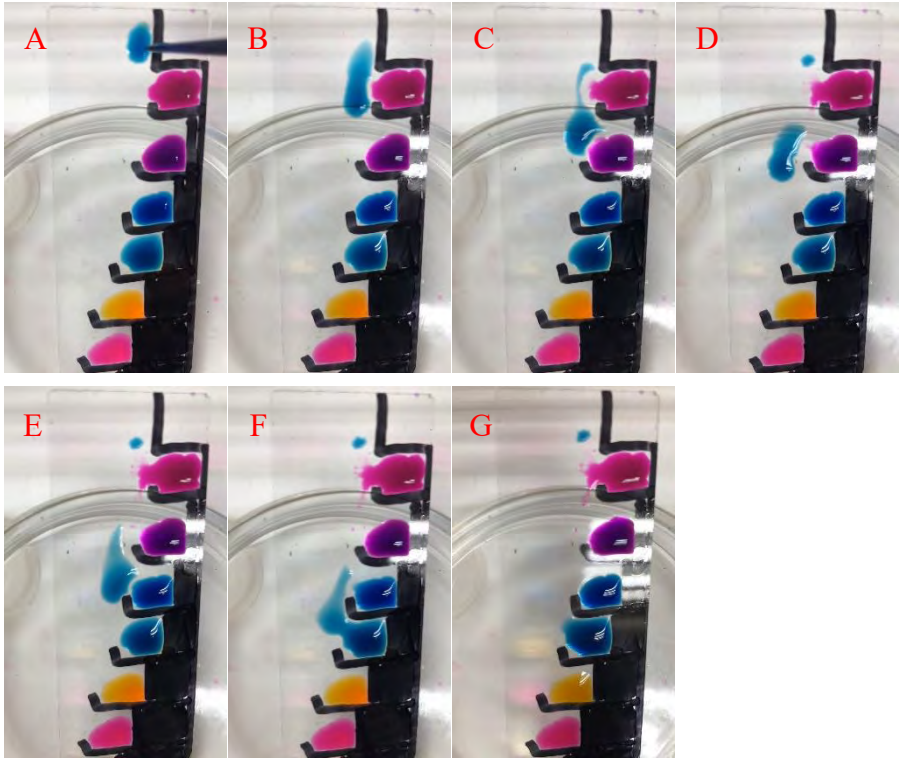
可見當表面張力差值接近 3 dynes/cm 時，實驗雖會有可能會成功也會失敗，而表面張力差值接近 2 dynes/cm 時必定失敗。故最小表面張力差極限值約為 3 dynes/cm。



四、設計階梯實驗之機制

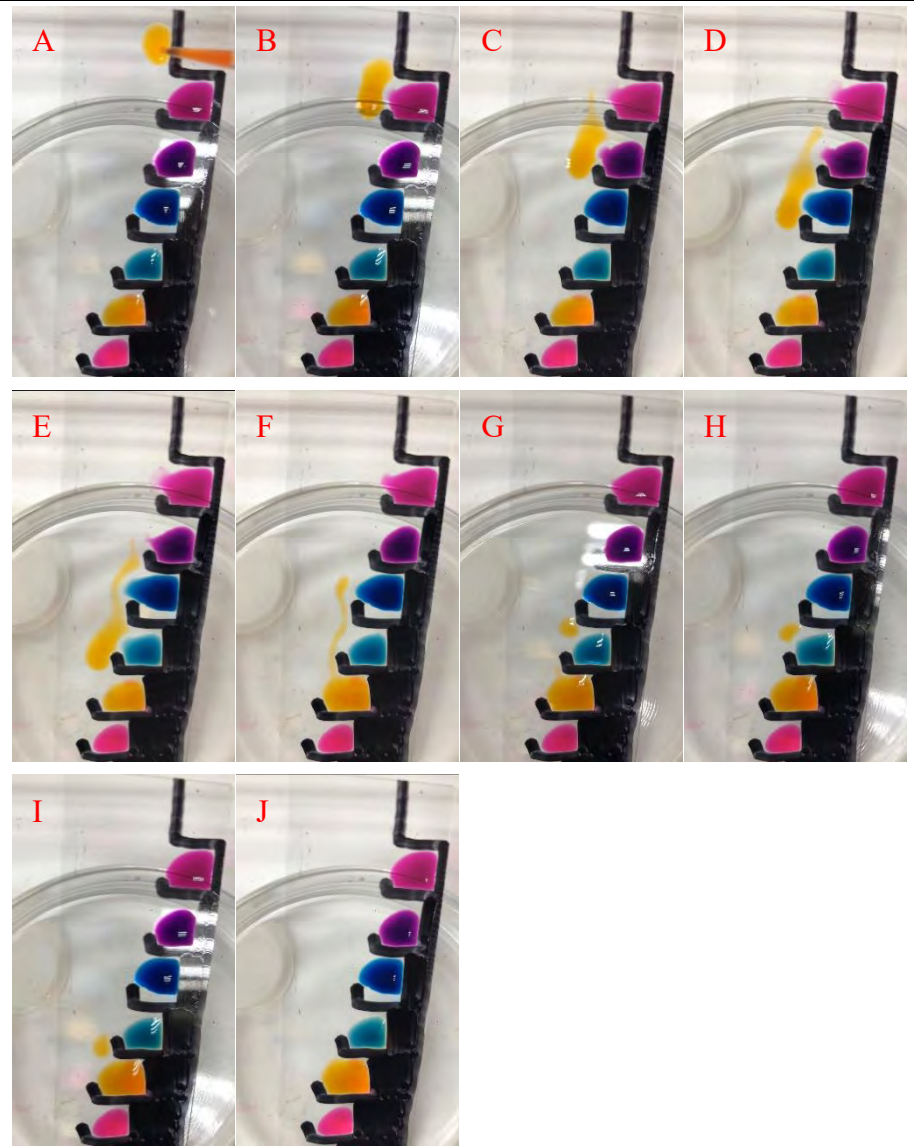
實驗結果：

液滴 顏色	表面 張力	結果
粉紅	43.5	 <p data-bbox="539 741 1442 828">向下流的粉紅液滴，一遇到粉紅液滴層便開始混合(圖 B)。液滴於(圖 C)完全進到欄內。</p>
紫	47.9	 <p data-bbox="539 1603 1442 1691">向下流的紫色液滴遇到粉色液滴時遭到排斥(圖 B、C、D)，接著才與紫色液滴混合(圖 E)。液滴於(圖 F)完全進到欄內。</p>

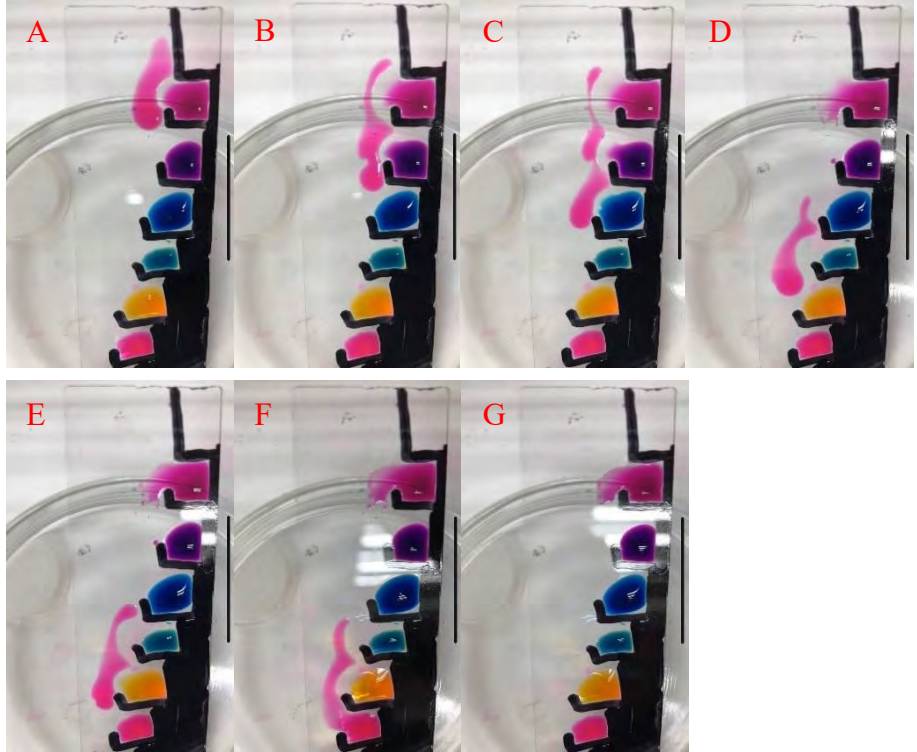
藍	53.8	 <p data-bbox="539 920 1444 1008">向下流的藍色液滴被欄內的粉、紫液滴排斥後(圖 B、C、D)，才與藍色液滴混合(圖 E)。液滴於(圖 F)完全進到欄內。</p>
青綠	59.3	 <p data-bbox="539 1783 1444 1915">向下流的青綠色液先後被粉、紫、藍色液滴排斥(圖 B、C、D、E)，最後才與第四層中的青綠色液滴混合(圖 F)。液滴於(圖 G)完全進到欄內。</p>

黃

65.7



向下流的黃色液滴先後被粉、紫、藍、青綠色液滴排斥(圖 B~E)，最後才與第五層的黃色液滴混合(圖 E、F)。其中值得注意的是，黃色液滴在向下流的過程中分成兩小滴(圖 G)，但最後也都進到了正確的欄中。(圖 I、J) 液滴於(圖 J)完全進到欄內。

紅	70.8	 <p data-bbox="523 922 1444 1099">           向下流的紅色液滴先後被粉、紫、藍、黃色液滴排斥(圖 A~D)，最後才與第六層的紅色液滴混合(圖 E)。其中當紅色液滴經過第四層時(青綠)疑似因為玻璃表面的關係導致液滴並沒又順著原路徑留下(圖 C、D)，而是彎了過去。液滴於(圖 G)完全進到欄內。         </p>
---	------	---

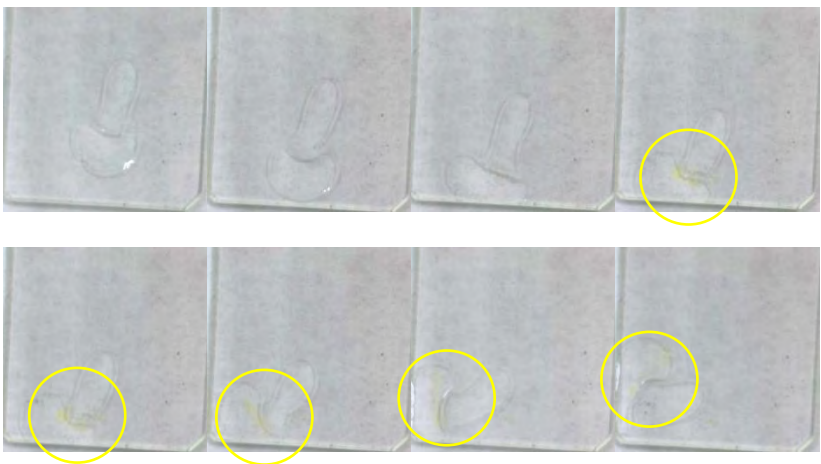
(表十二) 階梯式選色實驗

註：因為液滴作用時其實會有溶液傳遞的現象，所以我們發現如果液滴之間的交互作用時間太長，就會有混色的現象發生，也可能使原液滴濃度產生變化導致實驗失敗。

## 五、 探討溶液混合或停止追逐現象之成因

### (一) 驗證混合區的存在

實驗結果：

濃度	圖片
1%+40% %	

(表十三) 馬蘭哥尼效應下的沉澱反應

透過實驗可以發現在液滴運動時，兩液滴交界處確實會出現黃色沉澱物，也就證明了兩液滴雖看似不混合，但仍有少量的溶液會從後面的液滴進到前面的液滴，「混合區」確實存在。

### (二) 分析混合區的溶液濃度

原高濃度溶液與混合溶液圖片如圖十七，使用比爾定律比色結果為表十四。



(圖十七)

溶液高度(cm)	第一次	第二次	第三次
(A)收集的混合溶液	0.45	0.50	0.41
(B)40%稀釋後溶液	1.23	1.65	1.15

(表十四) 收集溶液之高度

由比爾定律  $A = K \times l \times c$  ( $K$ : 係數, 為衰減係數或莫耳吸光係數;  $l$ : 吸收介質的厚度 (cm);  $c$ : 吸光物質的濃度 (g/L)), 可知在兩瓶溶液顏色相同的情況下, 其高度與濃度成反比。

	第一次	第二次	第三次
(A)收集的混合溶液	1.23	1.65	1.15
(B) 40%稀釋後溶液	0.45	0.50	0.41

(表十五) 收集溶液之相對濃度

計算: 因(B)為稀釋十倍之溶液, 故(B)須乘以十倍再除(A)的濃度相對值, 結果會等於原染色的 40%丙二醇在混合溶液中所佔的比例, 剩餘百分比則是 25%無色丙二醇水溶液。

$$\text{一: } \frac{123}{450} \times 40\% + \left(1 - \frac{123}{450}\right) \times 25\% = 29.10\%$$

$$\text{二: } \frac{165}{500} \times 40\% + \left(1 - \frac{165}{500}\right) \times 25\% = 29.95\%$$

$$\text{三: } \frac{115}{410} \times 40\% + \left(1 - \frac{115}{410}\right) \times 25\% = 29.21\%$$

三次結果的算術平均值為 29.41%, 代表混合區的丙二醇濃度為 29.41%, 查照圖十一其表面張力為 51.2 dynes/cm。

丙二醇濃度	25%	29.41%	40%
溶液表面張力 dynes/cm	52.9	51.2	47.9

(表十六) 溶液濃度與表面張力轉換

在兩液滴混合前一刻, 混合區溶液與後面高濃度液滴的表面張力差值約為 3.3 dynes/cm, 逼近我們在實驗三 - (二) 所量測出的 3 dynes/cm, 因此不足以維持兩液滴的交互作用。

## 陸、討論

### 一、設計實驗系統模組

#### (一) 載玻片的前置處理

在原文文獻中，載玻片經過電暈處理，意即利用高頻率高電壓使欲處理的非導體表面電暈放電，使其產生低溫電漿。這些帶電粒子藉由電擊和滲透破壞物體表面的分子結構，將其表面分子氧化和極化，增加表面的潤濕性與附著力。

由於我們不具備電暈放電（corona discharge）的技術，所以我們選擇火焰處理。其原理是在以本生燈燃燒載玻片時，火焰燃燒產生的氧自由基、碳分子等會破壞附著在載玻璃表面的長鏈分子結構。從微觀角度來看，載玻片的表面會變得比較粗糙，因而增加載玻片對液滴的附著力。



(圖十八) 液滴於燃燒前的載玻片



(圖十九) 液滴於燃燒後的載玻片

未經燃燒的載玻片有較差的潤濕性，其上的液滴接觸角較大（圖十八），相比之下，燃燒後的載玻片有高表面能，使液滴較易附著（圖十九），利於實驗進行。

### 二、研究不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應

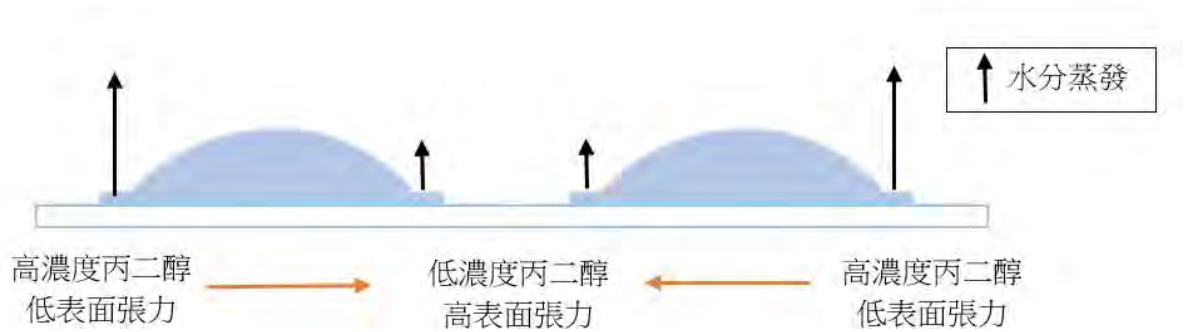
#### (一) 探討產生馬蘭哥尼效應的條件

經實驗乙醇、乙二醇、丙二醇、正丙醇、和乙酸後，以上都能產生馬蘭哥尼效應。根據實驗原理，馬蘭哥尼效應的原動力是表面張力梯度，在液滴薄膜中，因較大的表面積會使蒸發量對液滴影響加劇，我們認為，只要此物質與水的蒸發速率有差異，就會造成表面張力不均勻，而產生馬蘭哥尼效應。由於此五種有機溶劑中，丙二醇的實驗效果最佳，液滴交互作用的情形最易觀察，故往後皆以丙二醇來進行實驗。

### 三、研究不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同之處

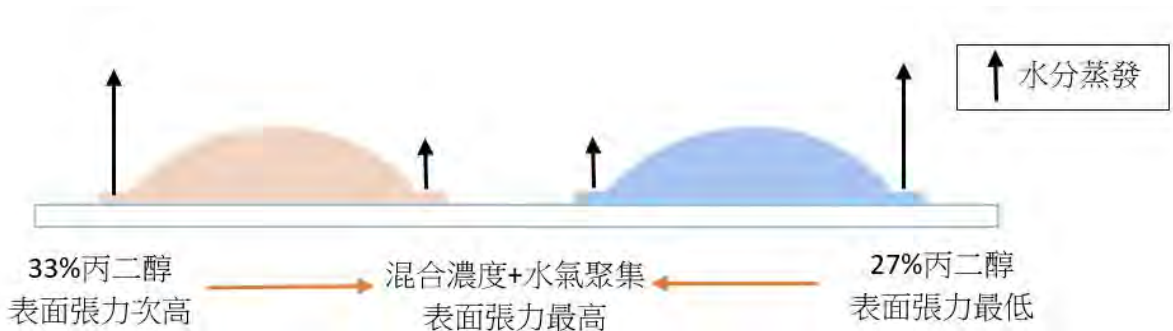
#### (一) 探討存在最小表面張力差值的原因

液滴之所以會運動，是由於表面張力差所致。已知相同丙二醇濃度的兩滴液滴會產生如圖二十的交互作用。在兩液滴之間的薄膜內，因水氣聚集影響，水分的蒸發量會較外圍區少，此區水分含量因而相對高，表面張力也較高（水的表面張力大於丙二醇表面張力），因此液滴會持續接近彼此，直到混合為一體。我們認為當表面張力差小於臨界值 3 dynes/cm 時，兩滴液滴的丙二醇濃度十分相近，兩液滴之間表面張力大於兩者之中較低濃度的液滴，因此也會停止追逐運動而互相接近並混合。



(圖二十) 相同濃度丙二醇液滴的交互作用

圖二十一為一次失敗實驗所使用的丙二醇濃度，當混合區的表面張力有系統中最高的表面張力時，在表面張力梯度的作用下，兩邊液滴會互相靠近，直到最後混合在一起。



(圖二十一) 實驗失敗時液滴的交互作用



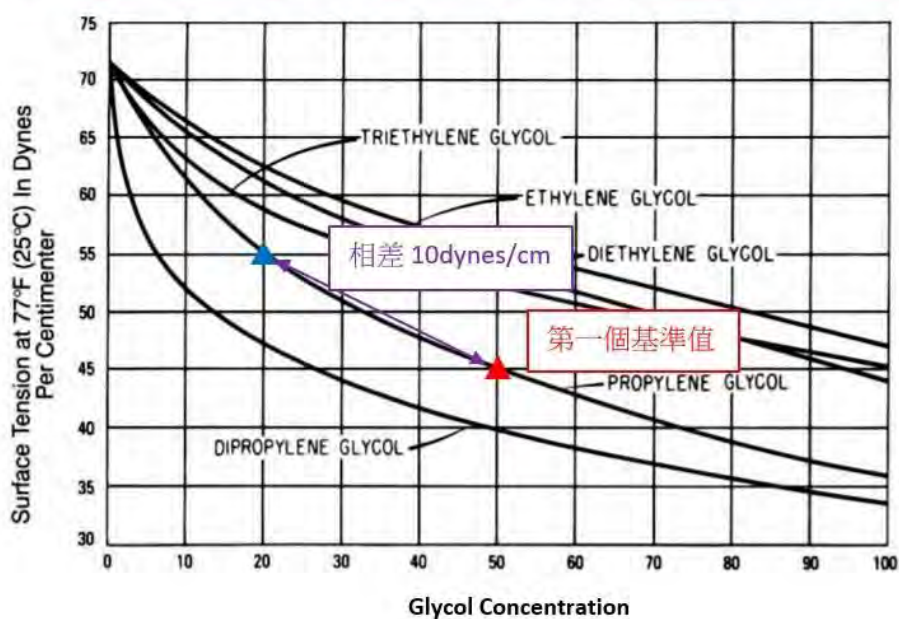
## (二) 決定欲使用的丙二醇濃度

我們先選擇一固定濃度（50%）作為基準值，並利用圖十一計算出基準值的表面張力，再利用與此溶液表面張力相差 10 dynes/cm 的丙二醇溶液（20%）開始實驗。

實驗可行後我們欲改變丙二醇濃度以降低兩液滴的表面張力差，為了實驗方便性，我們會以上組實驗時兩濃度之一的丙二醇溶液作為基準值，再利用同樣的圖十一查出接續欲實驗的張力差值所對應的濃度，同時確保此濃度值易於配製。

最後我們對回圖十一，找出另一組張力差相等的溶液作為驗證組。

Figure 19- Surface Tensions of Aqueous Solutions of Glycols at 77°F (25°C)



(圖二十二) 查照丙二醇濃度的方法

#### 四、設計階梯實驗之機制

##### (一) 如何決定以階梯式操作此實驗

實驗動機提到的影片中，原實驗區隔不同顏色液滴的黑色簽字筆線為等長式，如圖二十三所示。



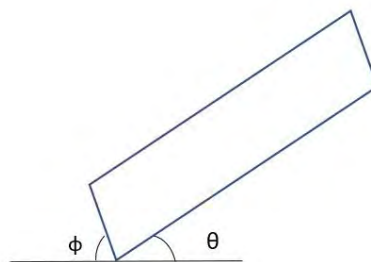
(圖二十三) 等長式液滴層



(圖二十四) 階梯式液滴層

經嘗試後，我們認為等長式不適合被動選色機制，第一，因油性簽字筆的性質易被醇類溶解，所以液滴無法靜止在簽字筆層而會直接流過；第二，不同濃度的液滴間會存在引力，使其無法靜止於每一層中，第三，如圖二十一所示，直線式不易讓下滑液滴與各液滴接觸，所以我們決定改良成階梯式（圖二十四），每一層較上層突出 1 公分，因此階梯式能克服上述問題，又因每一滴下滑液滴可以輕易的掉入每一層中，所以不同濃度間液滴推動的現象能清楚看見。

液滴下滑的原動力為重力，實驗中載玻片以右下角為支點，向右下傾斜，每次實驗我們皆固定傾斜角度（ $14^\circ$ ），使液滴能以適合的速率下滑。若向下傾斜的角度太小，液滴的下滑速率就會因太慢而其與層間液滴的交互作用時間拉長，導致溶液傳遞過多，使原濃度值偏差，造成實驗失敗。



(圖二十五) 向右下傾斜的載玻片

註： $\theta = \varphi = 14^\circ$

## (二) 決定欲使用的丙二醇濃度

由實驗三 - (二) 中可得知表面張力差的最小值約為 3 dynes/cm，於是我們將其運用在階梯實驗中。為了使選擇濃度易於配製，故選用濃度 1% 與其餘 5 的倍數。以下為各種濃度與其表面張力值的表格：

濃度	表面張力值 (dynes/cm)	濃度	表面張力值 (dynes/cm)
1%	70.8	35%	50.1
5%	65.7	40%	47.9
10%	62.5	45%	46.3
15%	59.3	50%	45.0
20%	55.0	55%	43.9
25%	53.8	60%	43.5
30%	51.8	65%	41.7

(表十七) 丙二醇濃度與其對應表面張力值

要找出六種不同濃度，而相近濃度之間的面張力差須超過 3 dynes/cm，於是我們最後選擇 1%、5%、15%、25%、40% 與 60%。

## (三) 探討階梯實驗的原理

本實驗是馬蘭哥尼效應的應用，液滴受重力下滑的過程會先碰到比自己濃度高的液滴，並在表面張力梯度的作用下回縮彈開，直到遇到濃度相同的液滴後，才無排斥力而混合，因而稱為「被動選色」。以我們計算出的所需最小張力差為間距，對回圖十一就可以找出多種不同適合的濃度，設計更多層階梯。

## 五、 探討溶液混合或停止追逐現象之成因

### (一) 探討混合區存在的意義

實驗中兩液滴實際由同二種物質構成：丙二醇與水。起初看到低濃度液滴吸引高濃度液滴時，我們以為兩液滴沒有實際接觸，但經過實驗五 - (一) 的碘化鉛沉澱後，我們發現兩液滴之間確實為有物質傳遞的現象。我們認為正因為有物質傳遞，才會形成一連續的表面張力梯度，讓後方的液滴受到前方較大表面張力液滴的吸引。

## 柒、結論

- 一、 同為有機溶劑的乙醇、乙二醇、正丙醇、與乙酸實驗結果都會成功產生馬蘭哥尼效應。乙二醇與乙酸所呈現的視覺效果與丙二醇一樣好，而乙醇與正丙醇則因本身表面張力太小使高濃度溶液散成薄膜。
- 二、 不同濃度溶液間要產生相似的交互作用存在一表面張力差的最小極限值，約為 3 dynes/cm，而當兩種濃度溶液間的表面張力差越大時，液滴運動的加速度越大，所以液滴運動的也越快。
- 三、 丙二醇溶液濃度分別為 1%、5%、15%、25%、40%與 60%，並採用階梯式，能產生成功的被動選色機制（sorting experiment）。
- 四、 液滴交互作用時，交界處確實存在一「混合區」。
- 五、 液滴停止交互作用的原因是因為混合區的存在使其進行物質傳遞，低濃度液滴的濃度因此逐漸上升，最終因表面張力差不足以維持獨立的兩液滴而混合。

## 捌、未來展望

- 一、 持續探討兩液滴表面張力差與加速度的關係

在實驗三 - (一) 中，我們只選用了 1%、25%與 40%三組濃度來分析液滴的運動，實驗結果也只能得出兩液滴的表面張力差與液滴的加速度呈現正相關，未來希望能分析更多組不同表面張力差之液滴的運動狀況，整理成圖表，推論表面張力差值與液滴加速度間是否存在線性關係。如此一來，選用任兩濃度的丙二醇液滴，我們即可得知兩者間是否產生相對運動，若有相對運動，也可進一步得知其加速度，也就是液滴移動多快。

- 二、 使用光譜儀分析混合區的丙二醇濃度

在實驗五 - (二) 中，我們在光源下將稀釋十倍的 40%丙二醇溶液與混合區溶液進行比色，而非使用光譜儀，原因是收集到的混合區溶液量很稀少（第 23 頁圖十九），容易因雜質造成誤差，所以我們初步以比色的方式進行實驗。欲準確檢驗混合區的色素濃度，應將染色後的 40%丙二醇水溶液以無色 25%丙二醇水溶液稀釋，配製成標準溶液，再以光譜儀分析混合區的丙二醇濃度。

## 玖、參考資料及其他

- 一、Tom Abate (2015). Stanford researchers solve the mystery of the dancing droplets *Stanford Report* Retrieved September 5, 2018, from <https://news.stanford.edu/news/2015/march/dancing-droplets-prakash-031115.html>
- 二、Takamura, K., Fischer, H., & Morrow, N. R. (2012). Physical properties of aqueous glycerol solutions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 98, 50-60.
- 三、Marangoni effect Retrieved September 5, 2018, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Marangoni\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Marangoni_effect)
- 四、Corona treatment Retrieved September 5, 2018, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_treatment](https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_treatment)
- 五、國立台中教育大學科學遊戲實驗室・水滴之舞・取自 <http://scigame.ntcu.edu.tw/water/water-024.html>
- 六、Cira, N. J., Benusiglio, A., & Prakash, M. (2015). Vapour-mediated sensing and motility in two-component droplets. *Nature*, 519(7544), 446.
- 七、Beer - Lambert law Retrieved September 5, 2018, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law)
- 八、Flame treatment Retrieved September 5, 2018, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Flame\\_treatment](https://en.wikipedia.org/wiki/Flame_treatment)

丙二醇 1%+25%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
1.80	$2.38 \times 10^{-3}$	$5.83 \times 10^{-4}$
5.30	$8.63 \times 10^{-3}$	
10.13	$1.88 \times 10^{-2}$	
6.76	$8.80 \times 10^{-3}$	
13.80	$2.49 \times 10^{-2}$	
11.00	$1.76 \times 10^{-2}$	
5.76	$8.66 \times 10^{-3}$	
7.66	$1.28 \times 10^{-2}$	

（附表一）丙二醇 1%+25%數據

丙二醇 1%+40%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
2.73	$6.71 \times 10^{-3}$	$8.35 \times 10^{-4}$
2.14	$5.05 \times 10^{-3}$	
14.20	$1.83 \times 10^{-2}$	
2.70	$5.32 \times 10^{-3}$	
14.54	$2.83 \times 10^{-2}$	
6.43	$1.18 \times 10^{-2}$	
7.16	$1.31 \times 10^{-2}$	
8.00	$1.30 \times 10^{-2}$	

（附表二）丙二醇 1%+40%數據

丙二醇 25%+40%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
11.51	$1.51 \times 10^{-2}$	$3.65 \times 10^{-4}$
16.14	$2.15 \times 10^{-2}$	
9.43	$1.45 \times 10^{-2}$	
6.66	$1.05 \times 10^{-2}$	
7.13	$1.24 \times 10^{-2}$	
8.43	$1.11 \times 10^{-2}$	
9.10	$1.50 \times 10^{-2}$	
2.70	$4.24 \times 10^{-3}$	

（附表三）丙二醇 25%+40%數據

附錄二（第 13 頁）

丙二醇 1%+25%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
8.59	$1.33 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-4}$
9.83	$1.26 \times 10^{-3}$	
9.49	$1.17 \times 10^{-3}$	
10.2	$1.22 \times 10^{-3}$	
5.2	$1.48 \times 10^{-3}$	
7.03	$1.23 \times 10^{-3}$	
6.9	$8.46 \times 10^{-4}$	
4.9	$1.93 \times 10^{-3}$	
4.1	$1.58 \times 10^{-3}$	

（附表四）丙二醇 1%+25%數據

丙二醇 1%+40%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
4.13	$1.71 \times 10^{-3}$	$5.2 \times 10^{-4}$
8.49	$1.43 \times 10^{-3}$	
4.13	$1.47 \times 10^{-3}$	
4.26	$1.68 \times 10^{-3}$	
7.66	$1.37 \times 10^{-3}$	
6.86	$1.30 \times 10^{-3}$	
3.86	$1.09 \times 10^{-3}$	
6.10	$1.48 \times 10^{-3}$	
8.56	$1.07 \times 10^{-3}$	

（附表五）丙二醇 1%+40%數據

丙二醇 25%+40%		
時間 (s)	路徑長 (m)	平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )
14.8	$8.66 \times 10^{-4}$	$1.57 \times 10^{-4}$
4.96	$1.53 \times 10^{-3}$	
11.6	$6.70 \times 10^{-4}$	
12.2	$8.05 \times 10^{-4}$	
14.0	$6.75 \times 10^{-4}$	
14.4	$5.55 \times 10^{-4}$	
12.1	$7.82 \times 10^{-4}$	
4.96	$1.06 \times 10^{-3}$	
21.4	$7.86 \times 10^{-4}$	

（附表六）丙二醇 25%+40%數據

## 【評語】 050201

馬蘭哥尼效應為物理現象，後續在生物學細胞體液輸送為重要的作用，工業上矽晶片乾燥也應用此理論。作者改變條件(例如不同溶劑，不同載玻片處理方式用加熱，不同梯度區隔方式等)作相同觀察，原創性雖嫌不足，但有去計算不同條件表面張力的不同，算是有用心解釋實驗結果。既然馬蘭哥尼效應已經被深入研究，作者應更深入探討不同成分之分子量、極性、電荷等所造成的效應。



## 摘要

本實驗探討不同濃度醇類液滴在載玻片上的交互作用現象「馬蘭哥尼效應」(Marangoni effect)。我們以火焰燃燒15秒、載玻片懸空19公分代替電暈表面處理；實驗後發現欲使兩液滴產生互相推拉的運動，兩液滴間須保持一最小表面張力差值為3 dynes/cm；又表面張力差越大，液滴運動的加速度越大，表示液滴移動愈快，從錄影紀錄也能清楚看見。此外我們也發現了「混合區」的存在，並確定其與兩液滴交互作用的關係。利用比爾定律計算出混合區的濃度，可發現與我們所得之表面張力最小極限值相符合，藉此找出液滴停止推拉現象之成因。

透過上述研究結果，設計出改良式的選色實驗 (sorting experiment)，以階梯式取代等長式液滴層，並選用1%、5%、15%、25%、40%與60%的丙二醇液滴，成功讓七彩液滴在載玻片上舞動。

## 研究動機

在Stanford News於2015年3月發表的影片中，有一影片為「Mystery of the dancing droplets」，呈現不同濃度丙二醇的液滴在電暈表面處理 (corona treatment) 的載玻片上牽引、推動的交互作用，實驗中液滴經色素染色後不僅更有利於觀察，也增添視覺上的美感，顯得格外引人注目。此現象在日常生活或工業廣泛應用，但實際原理並不清楚易解，影片中的被動選色實驗 (sorting experiment) 或稱階梯實驗看似簡單，但經初步嘗試後，我們發現成功率不高。為了完美重現此實驗，我們展開一系列的研究。

## 研究目的

- 一、設計實驗系統模組
- 二、研究不同有機溶劑是否產生馬蘭哥尼效應
- 三、研究不同濃度之溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同之處
- 四、設計被動選色 (sorting experiment, 或稱階梯實驗) 之機制
- 五、探討溶液混合或停止追逐現象之成因

## 研究設備及器材

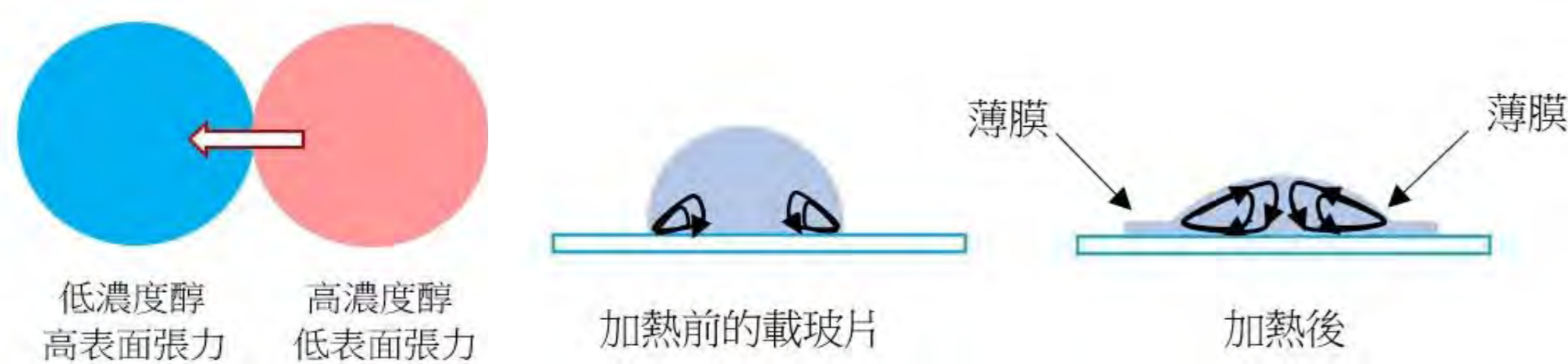
實驗器材：  
量筒、食用色素 (紅色七號、黃色四號、藍色二號)、鑷子、載玻片、本生燈、黑色油性奇異筆、燒杯、攪拌棒、微量滴管、擋風板

實驗藥品：  
乙醇、乙二醇、正丙醇、丙二醇、乙酸、硝酸鉛、碘化鉀

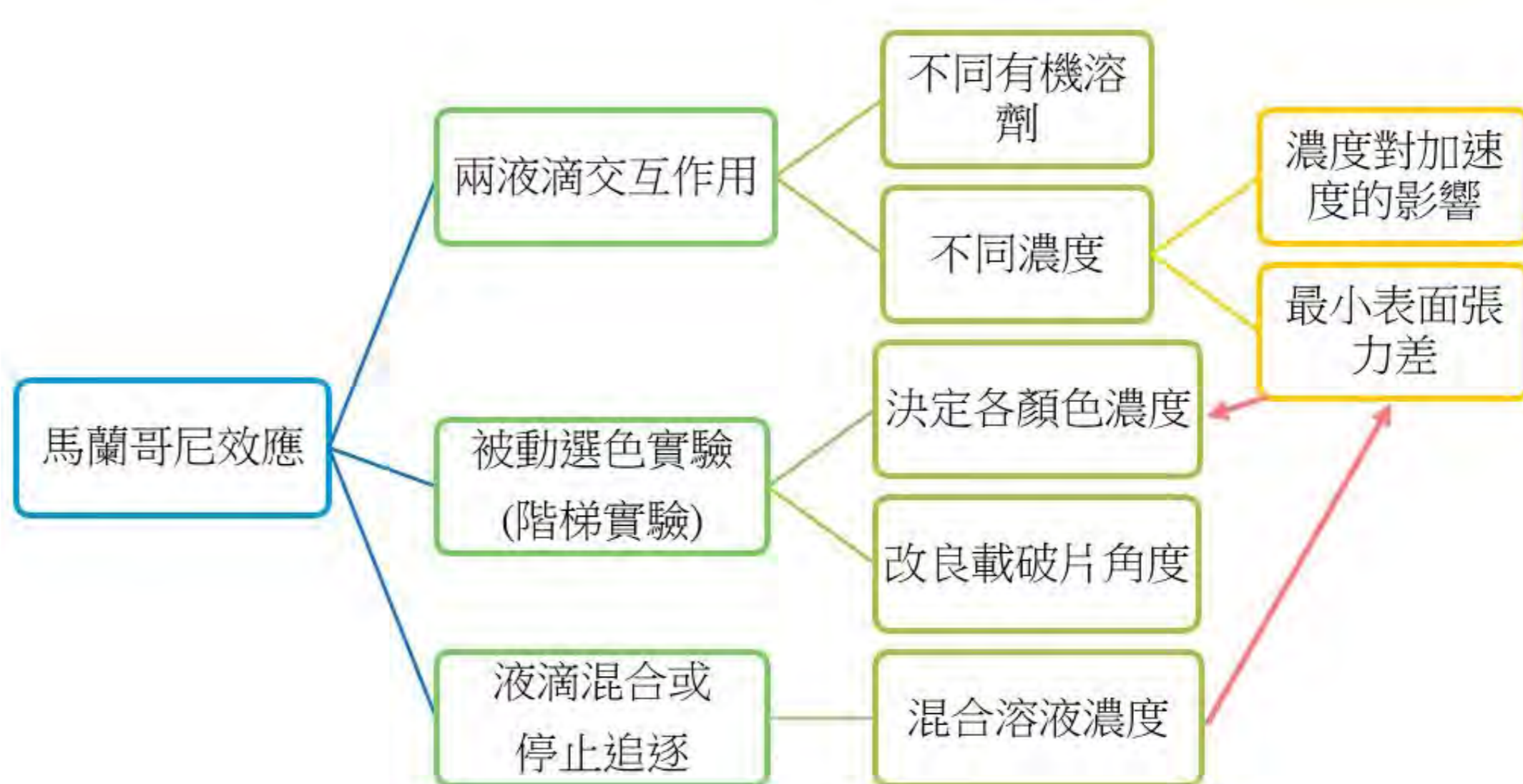
## 研究方法

馬蘭哥尼效應是由於流體介面的表面張力梯度 (gradient of surface tension) 所造成的傳質現象。當載玻片的溫度經加熱提高後，其表面能會增加，增加其潤濕性與附著力，使液滴接觸角變小。此液滴與載玻璃接觸面積較大，同時液滴自身的表面張力使其產生回縮的趨勢，因此液滴邊緣的溶液較薄即「薄膜」(thin film)。(左圖)此區的較大表面積使蒸發對溶液影響加劇。水的表面張力較醇類溶質高，蒸發速率也較快，所以在薄膜中，醇類的濃度較高、表面張力較小，溶液便會從低表面張力流至高表面張力的區域，由外側底部沿著表面往上流動，即馬蘭哥尼流。當兩顆液滴在一定距離內，兩顆液滴會就表面張力的差異而產生追逐或相吸的現象。

第一種情形是當兩顆液滴丙二醇的濃度相同時，它們會互相吸引直到匯聚成同一顆液滴。因為兩顆液滴中間的水分蒸發量因蒸氣聚集而較兩側少，因此此區水分濃度高，所以表面張力也較高，吸引溶液流向此。另外一種追逐的情形則發生在兩顆液滴的表面張力達一定差值時，高表面張力會吸引低表面張力的液滴，造成貌似追逐的現象，也就是高濃度會朝低濃度醇類水溶液液滴靠近。(右圖)

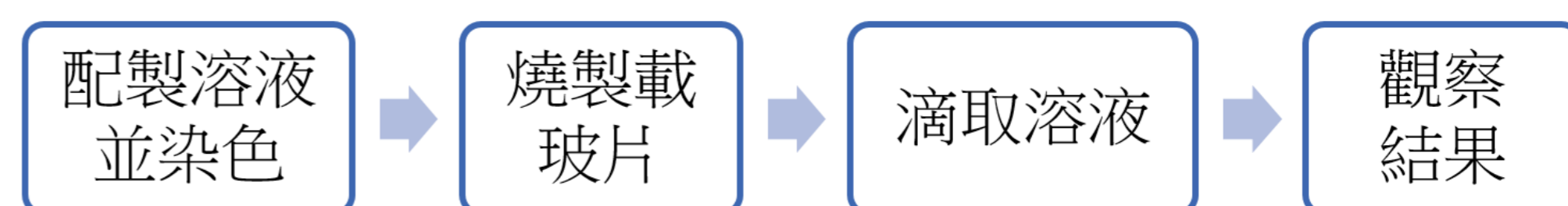


## 研究架構



## 實驗系統模組

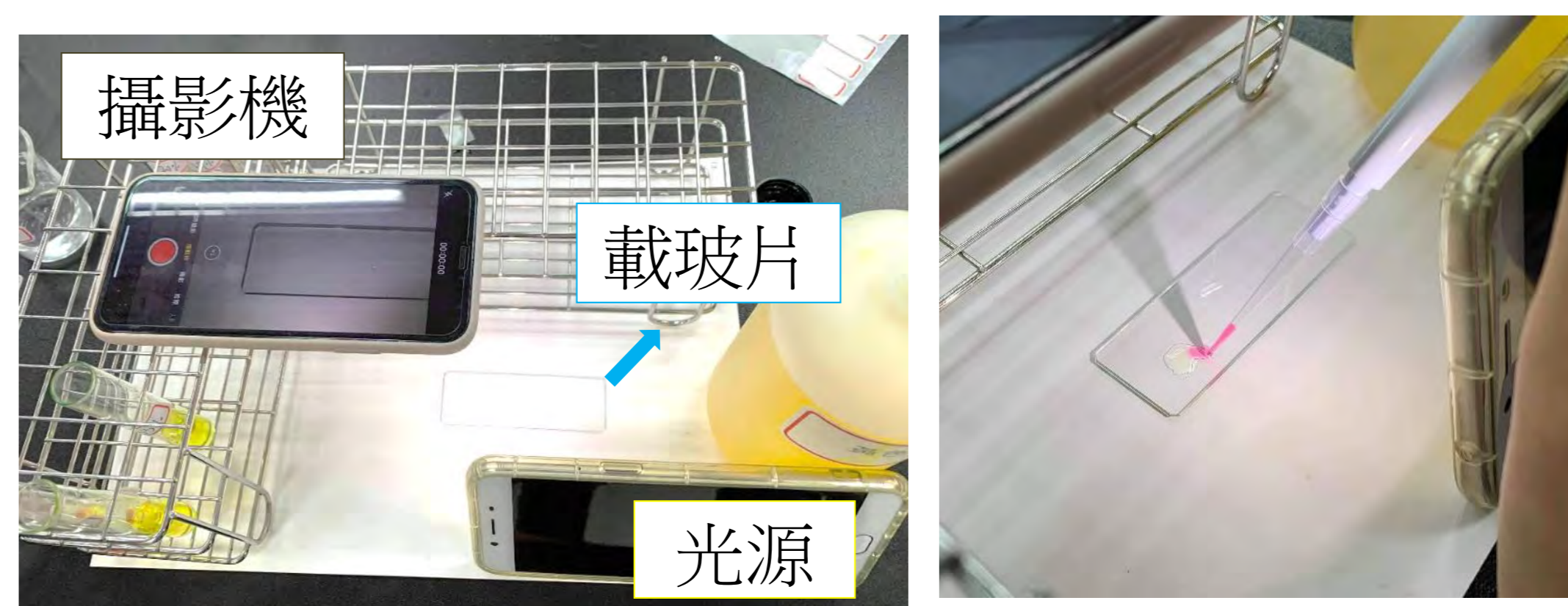
實驗流程：



控制變因：

本生燈火焰高度：20公分 液滴大小：10 μl  
玻片高度：19公分 液滴間隔：1公分

操作裝置與過程圖：



## 參考資料及文獻

- 一、Tom Abate, Stanford researchers solve the mystery of the dancing droplets Stanford Report Retrieved March 11, 2015 from <https://news.stanford.edu/news/2015/march/dancing-droplets-prakash-031115.html>
- 二、Takamura, K., Fischer, H., & Morrow, N. R. (2012). Physical properties of aqueous glycerol solutions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 98, 50-60.
- 三、Marangoni effect from [https://en.wikipedia.org/wiki/Marangoni\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Marangoni_effect)
- 四、Corona treatment from [https://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_treatment](https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_treatment)
- 五、國立台中教育大學科學遊戲實驗室·水滴之舞·取自<http://scigame.ntcu.edu.tw/water/water-024.html>
- 六、Cira, N. J., Benusiglio, A., & Prakash, M. (2015). Vapour-mediated sensing and motility in two-component droplets. *Nature*, 519(7544), 446.
- 七、Beer - Lambert law [https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law)
- 八、Flame treatment from [https://en.wikipedia.org/wiki/Flame\\_treatment](https://en.wikipedia.org/wiki/Flame_treatment)

## 研究結果

### 【實驗二：研究不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應】

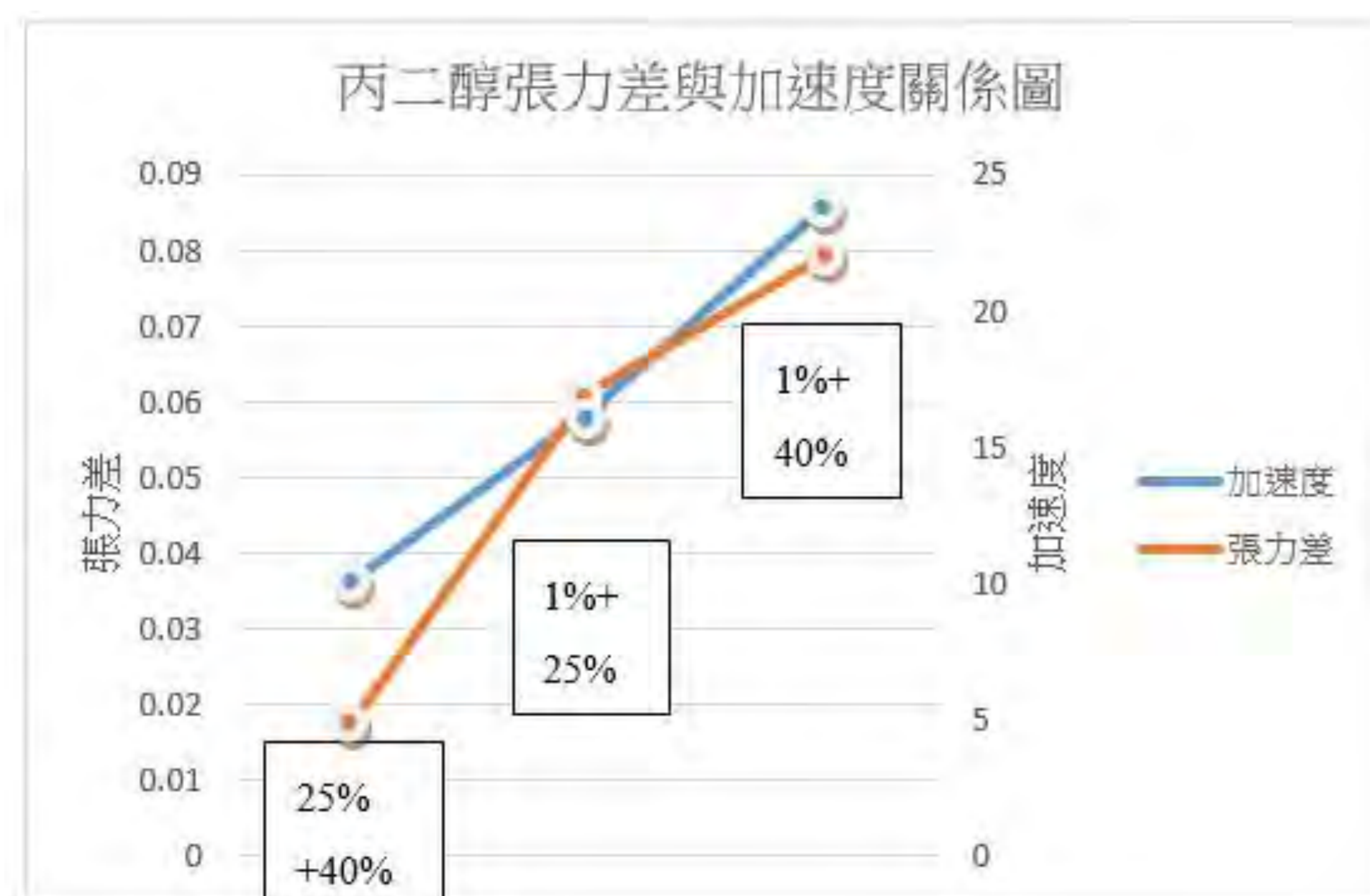
藥品	結果	
乙醇		成功
乙二醇		成功
正丙醇		成功
乙酸		成功

### 【實驗三：研究不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同】

#### (一) 不同濃度之實驗結果

我們將不同濃度的實驗結果記錄下來，各做十次，並用Tracker分析液滴的移動的加速度。

濃度	結果	表面張力差	加速度
1% +25%		17	0.0583
1% +40%		22	0.0835
25% +40%		5	0.0365



由上圖，可清楚觀察到液滴的加速度確實與兩液滴間的表面張力差呈現正相關的趨勢，也可推測表面張力差越大，液滴所受的力越大。

#### (二) 探討所需之最小表面張力差

濃度	表面張力差	結果
22% +50%	9.2	成功
33% +50%	5.0	成功
40% +50%	2.9	成功
		失敗

我們發現在表面張力接近3 dynes/cm時實驗成功率大幅降低，因此我們推測此數值應逼近表面張力差的最小極限值。接著我們將表面張力差值再縮小到2 dynes/cm。

濃度	表面張力差	結果
44% +50%	1.8	失敗

濃度44%對50%經多次實驗後，結果皆為失敗，因此我們推測要使實驗成功確實存在一表面張力差的最小極限值，約在3 dynes/cm左右。

### 【實驗三：研究不同濃度溶液間的馬蘭哥尼效應有何異同】

(接續左下半部)

為了印證我們的假設，我們又找了另外三組不同的濃度，表面張力差值各為2和3 dynes/cm，來進行實驗：

濃度	表面張力差	結果
44% +50%	1.8	失敗
33% +44%	3.2	成功
		失敗
20% +27%	2.9	成功
		失敗
27% +33%	2.1	失敗
25% +30%	2.0	失敗

可見當表面張力差值接近3 dynes/cm時，實驗雖會有可能會成功也會失敗，而表面張力差值接近2 dynes/cm時必定失敗。故最小表面張力差極限值約為3 dynes/cm。

### 【實驗四：設計被動選色實驗之機制】

我們改良文獻中的被動選色機制，根據目前實驗三所得數據，重現實驗動機所提的影片實驗。

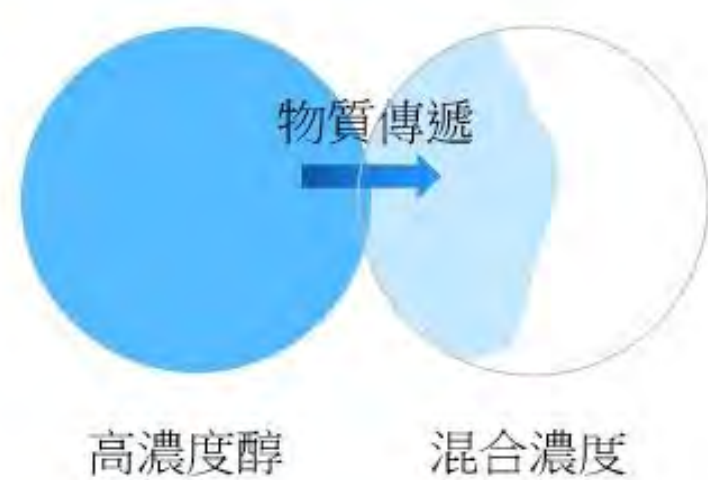
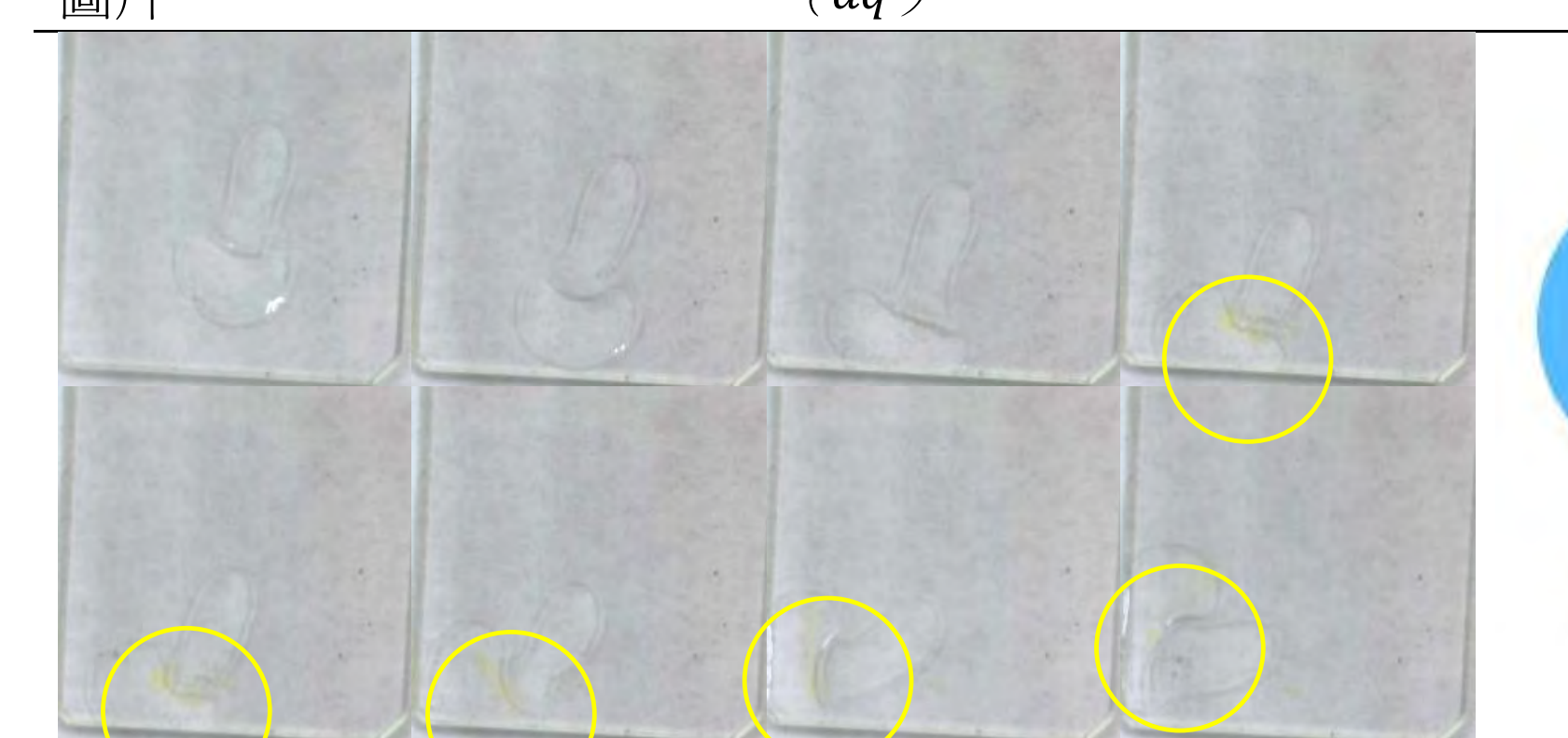
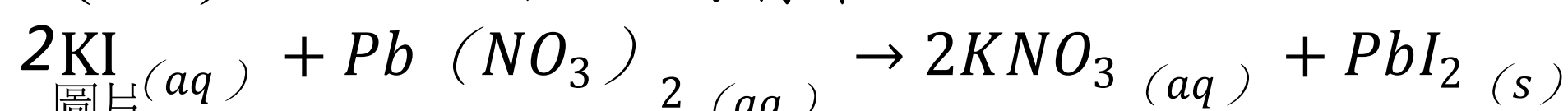
液滴顏色	表面張力	結果
粉紅	43.5	
紫	47.9	
藍	53.8	
青綠	59.3	
黃	65.7	
紅	70.8	

任兩種顏色液滴之間表面張力差皆大於3 dynes/cm，所以我們能看見向下流的液滴先後被不同顏色的液滴排斥，直到接觸同顏色的液滴後才混合。

# 研究結果

## 【實驗五：探討溶液混合或停止追逐現象之成因】

### (一) 驗證混合區的存在



### (二) 分析混合區的溶液濃度



溶液高度(cm)	第一次	第二次	第三次
(A)收集的混合溶液	0.45	0.50	0.41
(B)40%稀釋後溶液	1.23	1.65	1.15

由比爾定律可知在兩瓶溶液顏色相同的情況下，其高度與濃度成反比。

丙二醇濃度	25%	29.41%	40%
溶液表面張力 dynes/cm	52.9	51.2	47.9

兩液滴在推動的過程中，將於「混合區」交換溶液，使低濃度的液滴濃度逐漸升高。當前後兩液滴的濃度差越小，表面張力差也越小，經三次實驗後，混合溶液與後面40%液滴的表面張力差約為3.3 dynes/cm，逼近我們所量測出的3 dynes/cm，因此不足以維持液滴交互作用，造成液滴停止推動與混合。

## 討論

### 【討論一：設計實驗系統模組—載玻片前置處理】

我們以本生燈燃燒載玻片替代原文文獻提到的電暈放電的技術。火焰燃燒時產生的氧自由基、碳分子等會破壞附著在載玻璃表面的長鏈分子結構。從微觀角度來看，載玻片的表面會變得比較粗糙，因而增加載玻片對液滴的附著力。

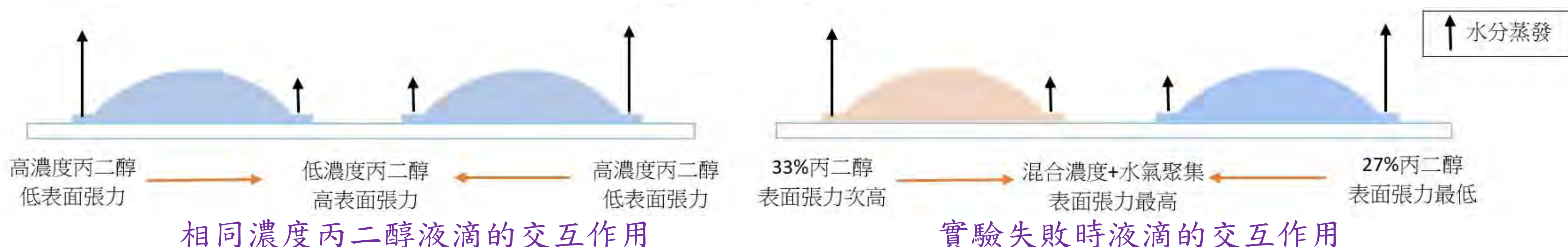
燃燒前的載玻片有較差的潤濕性 液滴接觸角較大	
燃燒後的載玻片有高表面能 液滴較易附著利於實驗進行	

### 【討論二：不同有機溶劑是否能產生馬蘭哥尼效應】

經實驗乙醇、乙二醇、丙二醇、正丙醇、和乙酸後，以上都能產生馬蘭哥尼效應。馬蘭哥尼效應的原動力是表面張力梯度，在液滴薄膜中，因較大的表面積會使蒸發量對液滴影響加劇，我們認為，只要此物質與水的蒸發速率有差異，就會造成表面張力不均勻，而產生馬蘭哥尼效應。

### 【討論三：探討存在最小表面張力差的原因】

液滴之所以會運動，是由於表面張力差所致。已知相同丙二醇濃度的兩滴液滴會產生交互作用。在兩液滴之間的薄膜內，因水氣聚集影響，水分的蒸發量會較外圍區少，此區水分含量因而相對高，表面張力也較高（水的表面張力大於丙二醇表面張力），因此液滴會持續接近彼此，直到混合為一體。我們認為當表面張力差小於**臨界值3 dynes/cm**時，兩滴液滴的丙二醇濃度十分相近，且兩液滴之間表面張力大於兩者之中較低濃度的液滴，在表面張力梯度的作用下，兩邊液滴會互相靠近，直到最後混合在一起。



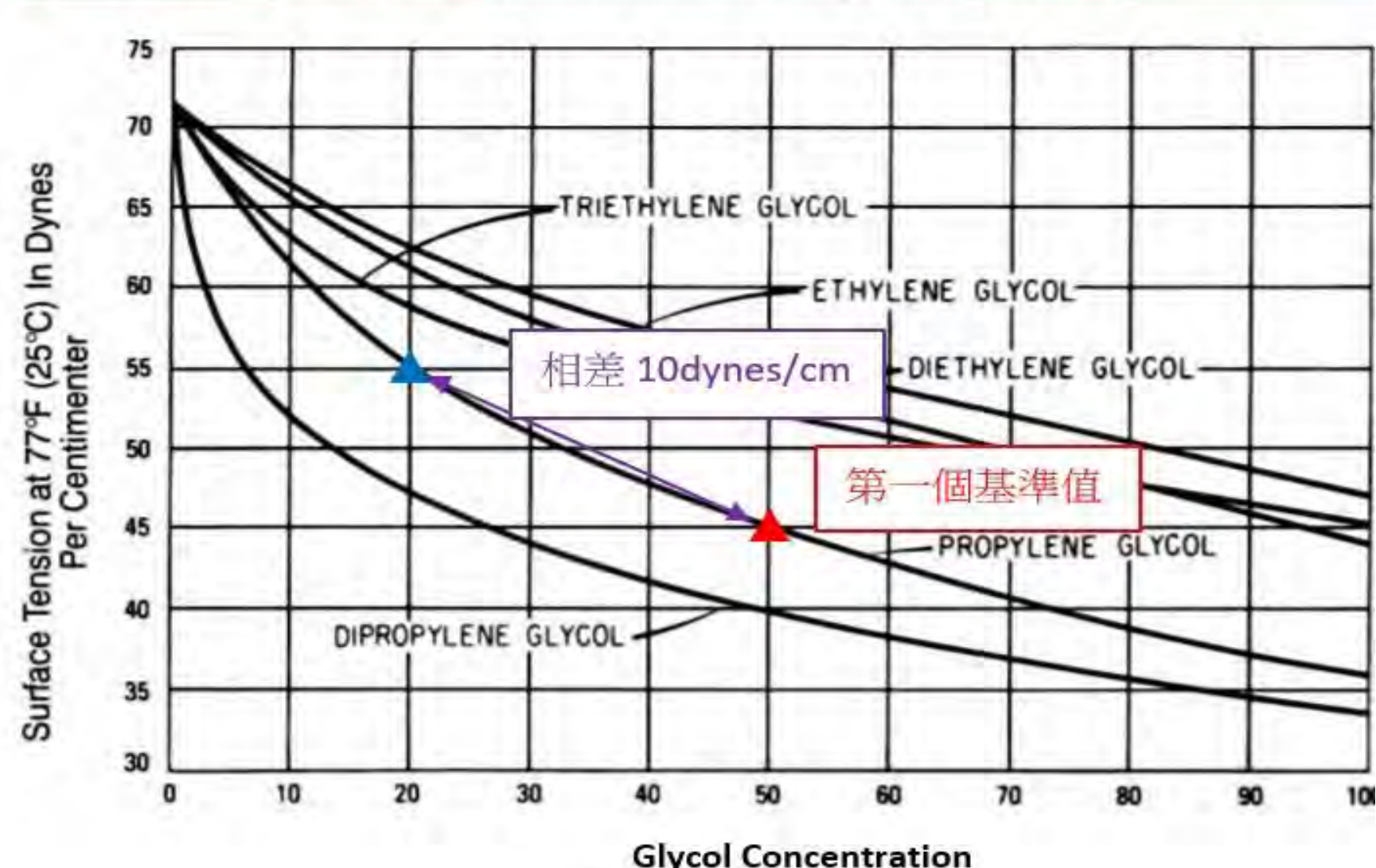
### 【討論四：決定欲使用的丙二醇濃度】

我們先選擇一固定濃度（50%）作為基準值，並利用右圖計算出基準值的表面張力，再利用與此溶液表面張力相差10 dynes/cm的丙二醇溶液（20%）開始實驗。

實驗可行後我們欲改變丙二醇濃度以降低兩液滴的表面張力差，為了實驗方便性，我們會以上組實驗時兩濃度之一的丙二醇溶液作為基準值，再利用同樣的圖十一查出接續欲實驗的張力差值所對應的濃度，同時確保此濃度值易於配製。

最後我們找出另一組張力差相等的溶液作為驗證組。

Figure 19- Surface Tensions of Aqueous Solutions of Glycols at 77°F (25°C)



### 【討論五：設計階梯實驗之機制—如何決定以階梯式操作此實驗】

原文獻影片	等長式液滴層	改良後	階梯式液滴層
不適合被動選色機制： • 油性簽字筆的性質易被醇類溶解 • 不同濃度的液滴間存在引力，使液滴無法靜止在每一層中 • 直線式不易讓下滑液滴與各液滴接觸		改良重點： • 每一層較上層突出1公分，使下滑液滴可以輕易的掉入每一層中 • 載玻片以右下角為支點，向右下傾斜（14°），使液滴能以適合的速率下滑	 $\theta = \phi = 14^\circ$

### 【討論六：探討階梯實驗的原理】

本實驗是馬蘭哥尼效應的應用，液滴受重力下滑的過程會先碰到比自己濃度高的液滴，並在表面張力梯度的作用下回縮彈開，直到遇到濃度相同的液滴後，才無排斥力而混合，因而稱為「被動選色」。

## 結論

- 一、同為有機溶劑的乙醇、乙二醇、正丙醇、與乙酸實驗結果都會成功產生馬蘭哥尼效應。乙二醇與乙酸所呈現的視覺效果與丙二醇一樣好，而乙醇與正丙醇則因本身表面張力太小使高濃度溶液散成薄膜。
- 二、不同濃度溶液間要產生相似的交互作用存在一表面張力差的最小極限值，約為3 dynes/cm，而當兩種濃度溶液間的表面張力差越大時，液滴運動的加速度越大，所以液滴運動的也越快。
- 三、丙二醇溶液濃度分別為1%、5%、15%、25%、40%與60%，並採用階梯式，能產生成功的被動選色機制（sorting experiment）。
- 四、液滴交互作用時，交界處確實存在一「混合區」。
- 五、液滴停止交互作用的原因是因為混合區的存在使其進行物質傳遞，低濃度液滴的濃度因此逐漸上升，最終因表面張力差不足以維持獨立的兩液滴而混合。