

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

030212

蕨鬥吧！FIRE！—以塵爆進行孢子脂質分析研究

學校名稱：桃園市立光明國民中學

作者： 國二 黃均楷 國二 陳宥妤	指導老師： 謝秉桓 池婷伊
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：粉塵爆炸、孢子

摘要

本研究試圖探討「使用含有脂質的蕨類孢子進行塵爆實驗會有什麼樣的效果？可否藉由塵爆實驗結果分析孢子成分」，於是我們使用玉米粉和石松、海金沙孢子進行研究。實驗過程中觀察粉末的各種物理性質，並以染色法分析孢子脂質含量，最後進行開放系統和密閉系統的塵爆實驗並交叉比對。結果發現，石松與海金沙孢子在塵爆過程中因其生物結構特性而會有劈哩啪啦的聲響，且海金沙因孢子之孢粉素殘留會有黑煙出現。密閉系統的塵爆實驗中，我們得到粉末的塵爆威力大小為：石松>海金沙>玉米粉，此結果與孢子脂質含量分析有直接相關。

壹、研究動機

七下生物課，上到蕨類孢子時，老師播放了一部使用石松粉做燃燒實驗的影片（網路影片，2012），上網查找才知道石松是一種蕨類，而石松粉是石松孢子，我們很好奇石松孢子為何會產生這麼大的火焰，我們上網搜尋相關資料發現，石松孢子在工業上稱為石松粉，含40%的油脂可用作閃光劑（維基百科，2019）。難道在蕨類孢子中，只有石松孢子有這樣的性質嗎？後來我們發現作為中藥的海金沙也是蕨類海金沙的孢子，在辨別真偽時，也可以點火燃燒，易著火發出爆鳴聲及閃光（金門縣農業試驗所，2008），我們想如果蕨類孢子燃燒威力這麼大，那麼它跟八仙塵爆的主角—玉米粉比較，誰的威力比較強呢？

而一說到粉塵爆炸，近年來大家最熟悉的應該就是2015年的八仙塵爆案。當時塵爆的原因疑似為當天活動使用大量玉米粉，並接觸到高溫燈具導致爆炸（蘋果日報，2016）。粉塵爆炸（本文簡稱塵爆）是指懸浮在封閉或侷限空間中，或戶外環境的可燃粉塵顆粒快速燃燒。粉塵具有非常大的表面積質量比（單位質量所具有的表面積比例），導致粉塵比其他散裝物料更易燃。粉塵易燃且只要濃度過高就容易引發爆炸，爆炸有一定的危險性（維基百科，2019）。可見了解塵爆的性質是一個相當重要的課題。

所以我們便猜想：「如果使用蕨類孢子來進行實驗會有什麼樣的效果呢？海金沙、石松含有大量脂質（中藥大辭典，2006）是否也和塵爆有一定的關連性呢？」，我們希望可以藉由脂質含量和塵爆威力的關係，利用塵爆結果作為粉末分類的依據，基於以上的想法，便開始了我們的科展研究。

貳、研究目的

在了解蕨類孢子經燃燒後有類似塵爆的性質後，查閱文獻發現石松、海金沙含有大量脂質（中藥大辭典，2006），我們猜測脂質含量和塵爆之間有一定的關連性。為了驗證我們的假說，我們便想嘗試使用石松、海金沙來進行塵爆實驗，分析孢子的脂質含量，以模擬塵爆裝置來觀察孢子脂質含量和塵爆之間的關係。

於是我們列出下幾點研究目的：

- 一、以肉眼及顯微鏡觀察玉米粉、石松孢子和海金沙孢子的各種物理性質
 - 二、利用染色法分析玉米粉、石松孢子和海金沙孢子的脂質含量
 - 三、觀察及討論開放系統塵爆實驗中，各種粉末反應過程燃燒狀態及反應後粉末狀態
 - 四、觀察及討論密閉系統塵爆實驗的塵爆威力，以及塵爆威力與粉末脂質含量的關係
- 由上述之研究目的我們得到了以下的研究架構圖：

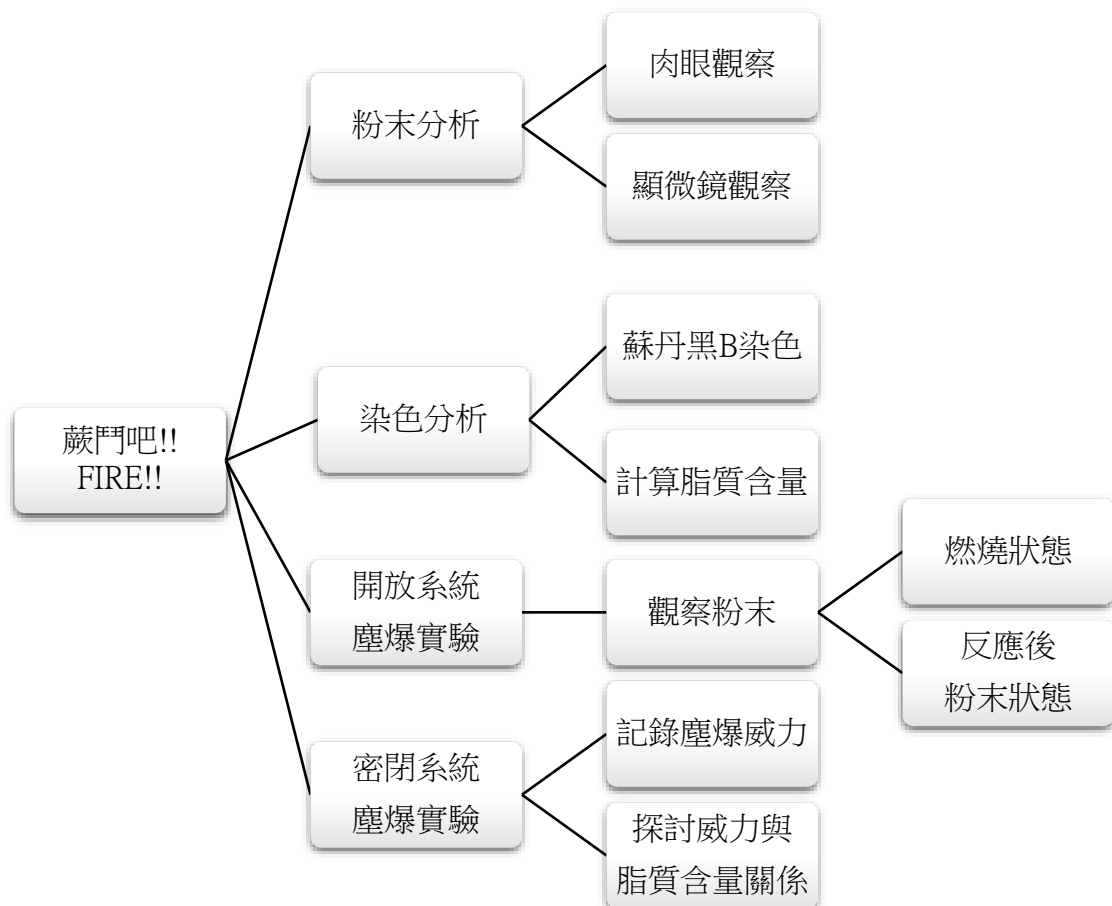


圖 2-1 研究架構圖

參、研究器材與藥品

一、研究器材（圖 3-1）

- (一) 檢測粒徑：顯微鏡、物鏡測微器、蓋玻片、懸滴玻片、篩網
- (二) 檢測脂質：顯微鏡、蓋玻片、懸滴玻片、滴管、燒杯、培養皿、溫度計、離心管、保麗龍盒
- (三) 塵爆裝置：塑膠桶、壓克力管、紙管、空壓機、送氣管、氣壓塊（保麗龍球、砝碼）、鋁箔紙、三腳架、陶瓷纖維網、蒸發皿、電子天平、刮勺、坩鍋夾、濕抹布、打火機、電線膠布、軟木塞
- (四) 改良後塵爆裝置：鐵桶、壓克力管、空壓機、送氣管、氣壓塊（保麗龍球、砝碼）、三腳架、陶瓷纖維網、蒸發皿、電子天平、刮勺、滴管、坩鍋夾、濕抹布、打火槍、漏斗

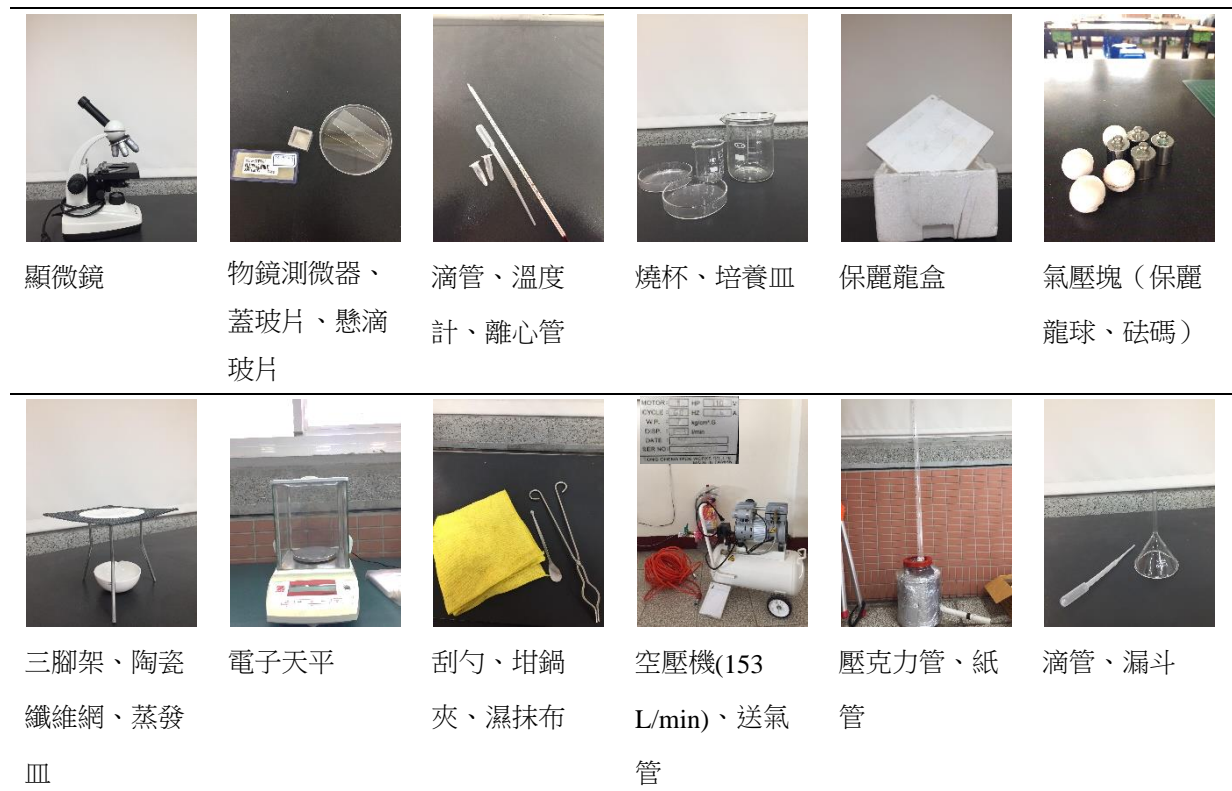


圖 3-1 研究器材

(五) 塵爆裝置與改良後塵爆裝置：

1. 原塵爆裝置（改良自林子傑、譚瑋城、戴琦森，2016）



圖 3-2 原塵爆裝置

圖 A 側面觀；圖 B 正面觀

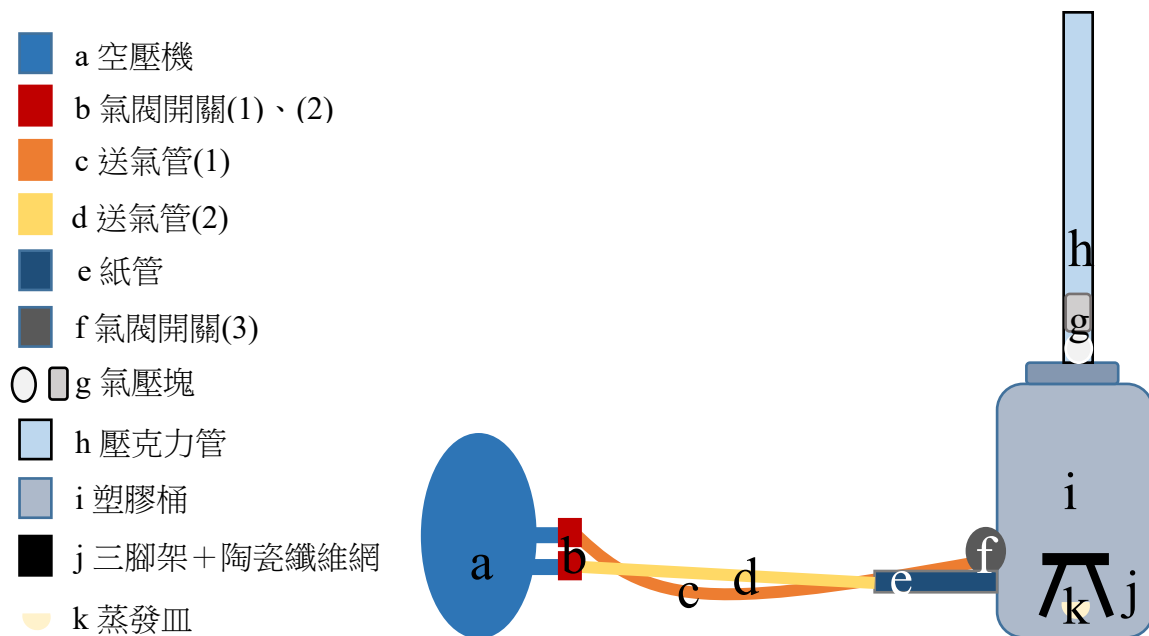


圖 3-3 原塵爆裝置示意圖

我們參考了林子傑、譚瑋城、戴琦森(2016)科展研究中的塵爆裝置（圖 3-2）進行改良。但由於原裝置的主要容器是以塑膠桶包上鋁箔紙製造而成，經過實驗後發現容易損毀，因此我們改成鐵製塵爆裝置（圖 3-4）。

2. 改良後塵爆裝置



圖 3-4 改良後塵爆裝置

圖 A 側面觀；圖 B 正面觀

- 圖 A
- a 空壓機
 - b 氣閥開關(3)
 - c 送氣管
 - d 氣閥開關(1)
 - e 氣閥開關(2)
 - f 氣壓塊
 - g 壓克力管
 - h 鐵桶
 - i 三腳架+陶瓷纖維
 - j 蒸發皿

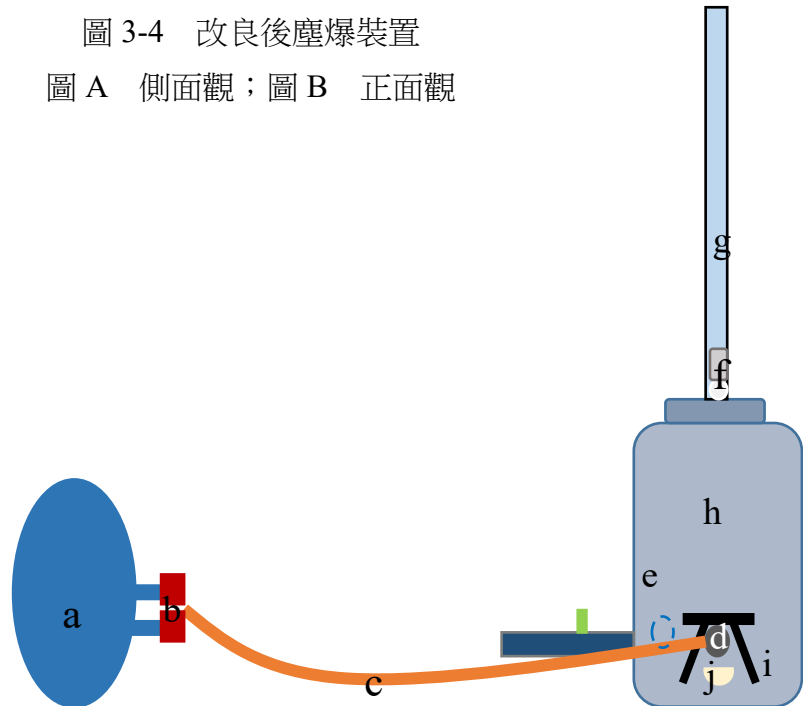


圖 B

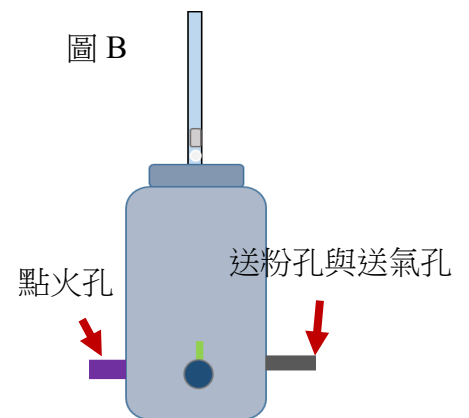


圖 3-5 改良後塵爆裝置示意圖

圖 A 側面觀；圖 B 正面觀

因為原塵爆裝置較不穩定，同學的爸爸剛好是開鐵工廠的，於是我們就請他幫我們用鐵鍋、鍋蓋、鐵管和打氣閥開關製成塵爆裝置（圖 3-4），同時也做了一些調整，然而在塵爆裝置改良後，我們一度遇到成功率大幅下降的問題，後來發現是原送粉管管徑較粗導致氣壓不足以推動粉末的狀況，因此我們最後改以原送氣管同時送粉且送氣的方式（圖 3-5）解決此問題。

3. 塵爆裝置與改良後塵爆裝置的差異



圖 3-6 塵爆裝置比較

原塵爆裝置中，蓋子上的孔用來作為換氣孔（圖 3-6-A），改成用點火孔（圖 3-6-B）做調整，因此此孔可同時做為點火孔及換氣孔；點火孔和送氣孔原本是同一個孔且在紙管上方（圖 3-6-C），換成鐵桶後更改為兩個孔，在鐵管左側的為點火孔，右側的為送氣孔與送粉孔。（圖 3-6-D）

二、藥品（圖 3-7）

（一）脂質染色：乙醇、蘇丹黑 B

（二）塵爆實驗：玉米粉、石松粉、海金沙、變性酒精



圖 3-7 藥品

肆、研究過程及方法

一、觀察玉米粉、石松孢子和海金沙的各項性質

- (一) 取懸滴玻片，將玉米粉及石松和海金沙孢子各放在玻片上，用滴管滴水後蓋上玻片
- (二) 放置顯微鏡底下並拍照記錄
- (三) 取物鏡側微器放置於顯微鏡底下並拍照記錄
- (四) 比照兩者相同倍率的照片並推算出孢子的粒徑大小

二、染色法分析

(一) 試染玉米粉及石松和海金沙孢子的脂質含量

我們使用張焜標、許秋容、張雯婷 (2010) 研究中脂質含量的染色法進行實驗，但實驗後我們發現染色結果並不如我們預期，於是我們開始探討各種變因對染色的影響並進行實驗。

(二) 調整染色方法實驗

1. 孢子染色時水溫的差異：

觀察染色時水溫在 65°C、70°C、75°C 時的染色情形。

2. 離心管放置的溫度：

事前先將該次要染色的孢子放入離心管內並加入 70% 酒精，一管放入冷凍庫 (-8°C)，另一管則放置於常溫，並觀察孢子染色情形的差別而在我們使用改良之後的方法 (表 4-1) 重新對三種粉末進行染色。

表 4-1 染色法差異

	溫度	離心管放置溫度
原本	40~60°C	常溫
改良	75°C	冷凍

(三) 孢子染色實驗

1. 事前先將該次要染色的孢子放入離心管內，加入 70% 酒精，並放到冷凍庫冷凍 1 天
2. 用滴管滴一滴水至懸滴玻片上後，再滴一滴蘇丹黑 B

3. 將試管架放入保麗龍盒，玻片放入培養皿內，再將培養皿放上試管架，倒入 75°C 的熱水至桶子的六分滿（水不能直接碰到培養皿），加熱 60 分鐘
4. 之後將玻片取出，將粉末浸泡在 70% 酒精 3 分鐘，再用水浸泡粉末 1 分鐘（去染）
5. 放至複式顯微鏡上觀察並用手機拍照記錄
6. 匯入 GeoGeBra，計算並分析脂質含量

三、進行開放系統粉末塵爆實驗（圖 4-1）

- (一) 擺設好酒精燈及鐵盤
- (二) 烤乾玉米粉並將其粉末及孢子粉末放入點眼瓶
- (三) 固定噴射距離與高度
- (四) 擠壓點眼瓶使粉末噴灑於火焰上方
- (五) 將鐵盤內的粉末到在紙上觀察
- (六) 收集粉末，製成玻片
- (七) 以顯微鏡觀察，並拍攝照片

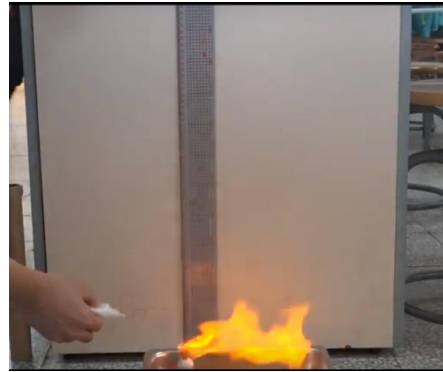


圖 4-1 開放系統粉末塵爆實驗過程

四、進行密閉系統粉末塵爆實驗

(一) 塵爆裝置的製作與更新

我們參考了林子傑、譚瑋城、戴琦森 (2016) 科展研究中的塵爆裝置進行實驗(圖 3-2)。但是實驗後發現以塑膠桶製成的塵爆裝置較不穩定且實驗時容易損毀，所以將塵爆裝置換成鐵製的。而以下是鐵桶的製作方式：

1. 在桶子右側底部焊接上氣閥開關作為送粉和送氣孔
2. 在桶子左側底部焊接上氣閥開關作為點火孔
3. 在桶子蓋子中央處打一個洞裝上 200cm 內徑 3cm 的壓克力管並以電鑽每 5cm 鑽一個直徑 0.5cm 的孔（用來降低內部氣壓），並用奇異筆標上刻度
4. 將保麗龍球和砝碼放入壓克力管，當作氣壓塊

(二) 以玉米粉、石松和海金沙孢子進行塵爆實驗

1. 以塑膠製的塵爆裝置進行塵爆實驗

我們在塑膠桶裝置使用 1 公克的粉末進行實驗，但後來因為裝置不穩定且實驗時容易損毀，所以我們改使用鐵製的裝置進行實驗。

2. 以鐵製的塵爆裝置進行塵爆實驗（圖 3-5-A）

- (1) 在蒸發皿內倒入 2ml 的變性酒精放入鐵桶內，並放入三腳架及陶瓷纖維網
- (2) 在氣閥開關(1)內倒入 0.2g 粉末
- (3) 將打火機伸入氣閥開關(2)對準蒸發皿內的酒精
- (4) 將壓克力管（內有保麗龍球、砝碼作為氣壓塊）連同蓋子蓋上
- (5) 開始錄影，用打火機點燃酒精
- (6) 點燃酒精後，打開空壓機氣閥開關(3)
- (7) 透過錄製的影片觀察氣壓塊的高度

伍、研究結果

一、分析玉米粉、石松和海金沙孢子和的各項性質

(一) 肉眼觀察

以肉眼觀察粉末外觀的顏色

(圖 5-1)

(二) 測量玉米粉和孢子的粒徑大小

利用顯微鏡觀察、測量孢子粒徑大小，經過觀察發現玉米粉與兩種蕨

類植物的粒徑大小不同，經過測量得玉米粉約為

10~20 μm ，石松約為 40 μm ，海金沙約為 80 μm 。

所以粒徑大小：海金沙 > 石松 > 玉米粉。(圖 5-2)

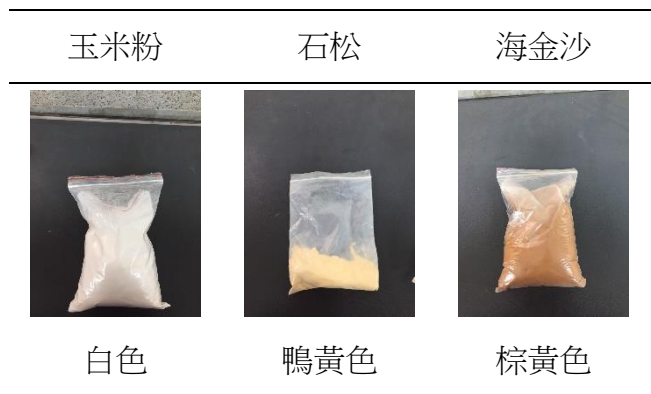


圖 5-1 粉末的外觀顏色

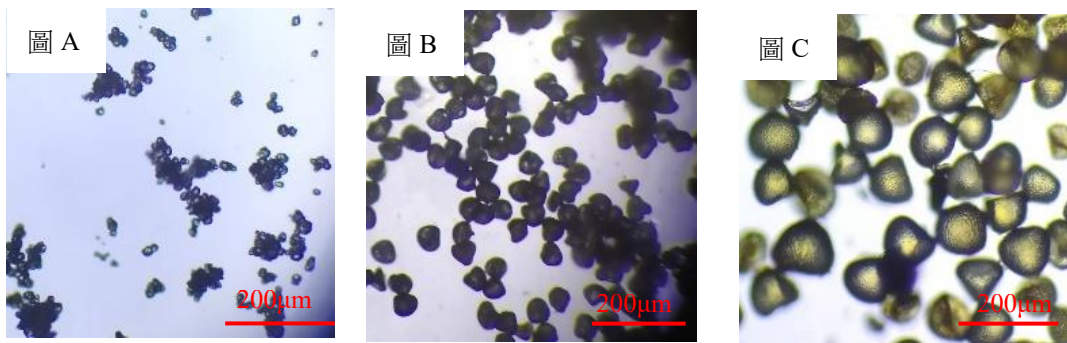


圖 5-2 玉米粉和孢子的粒徑大小

圖 A 玉米粉 10~20 μm ； 圖 B 石松 40 μm ； 圖 C 海金沙 80 μm

二、染色法分析

(一) 調整染色方法實驗

1. 孢子染色時水溫的差異 (65°C、70°C、75°C)

由測試結果得知，當水溫為 75°C 孢子染色效果最好。(圖 5-3)

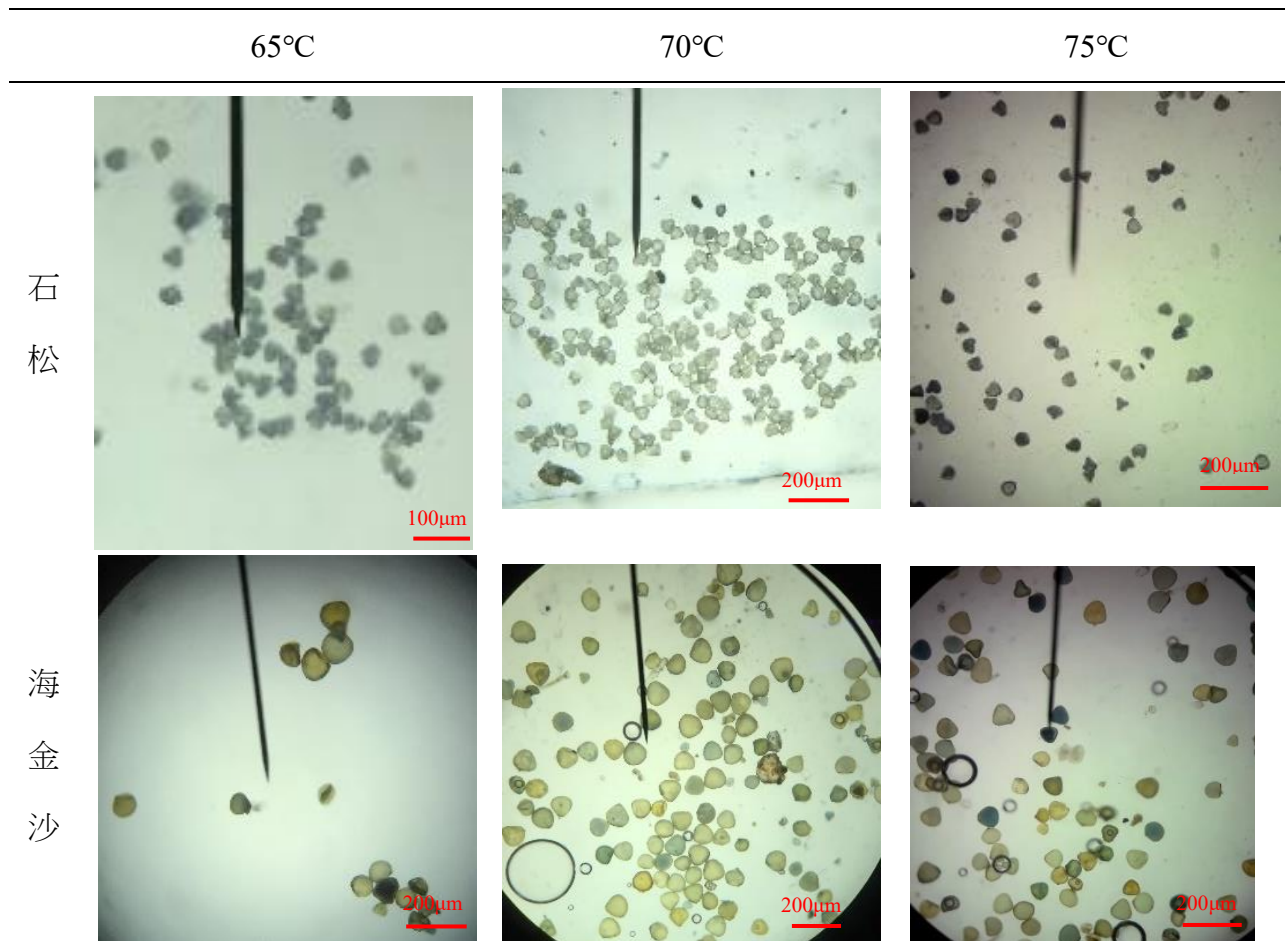


圖 5-3 孢子染色結果

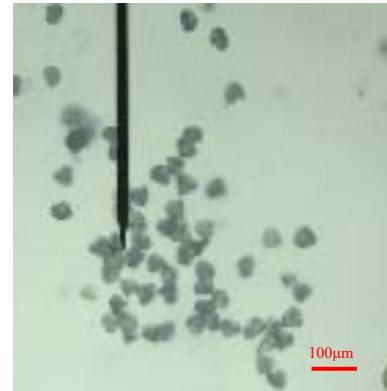
2. 離心管放置的溫度 (常溫、冷凍)

經過實驗，發現離心管先放置於冷凍庫再拿去染色，染色較成功。(圖 5-4)

常溫

冷凍

石松



海金沙

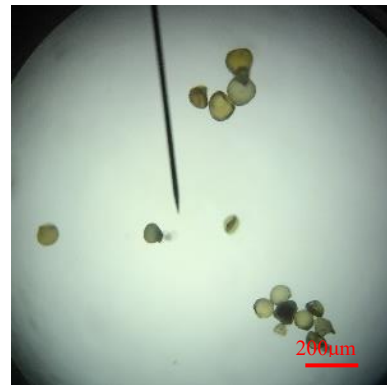
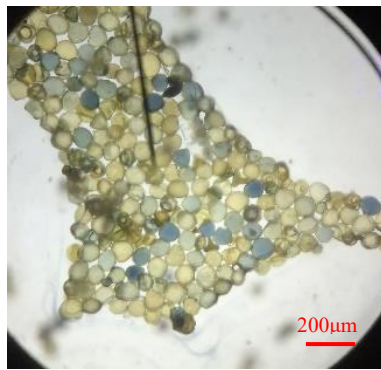


圖 5-4 孢子染色結果

(二) 脂質含量分析結果

(一) 我們將染色好的圖片匯入 GeoGeBra 量測整顆孢子的面積和內部脂質的面積 (圖 5-5)

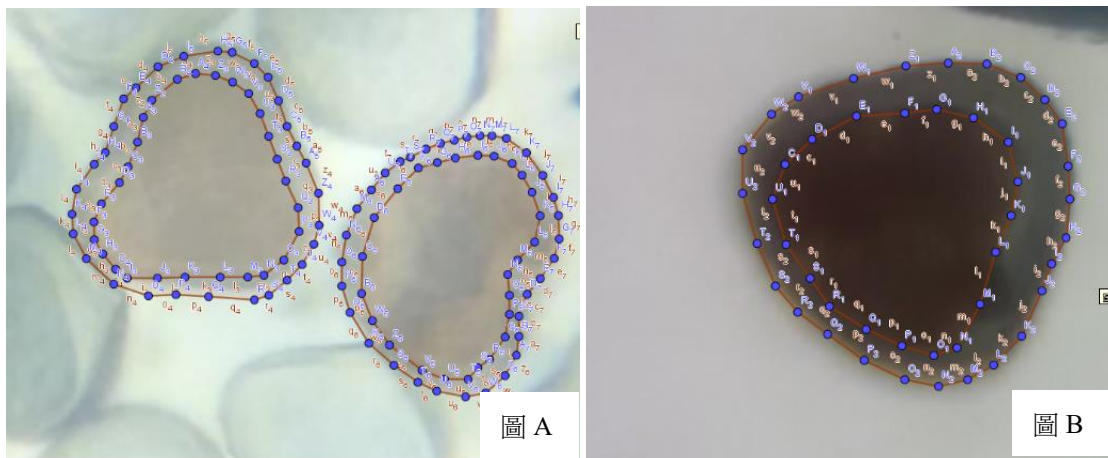


圖 5-5 利用 GeoGeBra 計算面積

圖 A 石松；圖 B 海金沙

得石松整顆孢子的面積為 0.31 平方單位、內部脂質的面積為 0.2 平方單位；海金沙整顆孢子的面積為 1.8 平方單位、內部脂質的面積為 1 平方單位。

(二) 算出內部脂質含量的面積比

$$\frac{\text{石松內部脂質的面積}}{\text{石松整顆孢子的面積}} = \frac{0.2}{0.31} = 64.58\%$$

$$\frac{\text{海金沙內部脂質的面積}}{\text{海金沙整顆孢子的面積}} = \frac{1}{1.86} = 53.76\%$$

(三) 由內部脂質含量面積比換算出內部脂質含量的體積比，再推算出孢粉素在孢子中所佔體積比

$$(\text{石松內部脂質含量的體積比})^{1.5} = (64.58\%)^{1.5} = 51.83\%$$

$$(\text{海金沙內部脂質含量的體積比})^{1.5} = (53.76\%)^{1.5} = 39.42\%$$

$$\text{石松孢粉素體積比} = 100\% - 51.83\% = 48.17\%$$

$$\text{海金沙孢粉素體積比} = 100\% - 39.42\% = 60.58\%$$

由於 Sugandha G(n.d.)的文章指出石松的孢粉素重量百分比為 31%，因此我們須藉由孢粉素體積比推算海金沙的孢粉素重量百分比。

(四) 算出海金沙的孢粉素重量百分比，再推算出石松和海金沙孢子內部脂質含量重量百分比

$$\frac{\text{石松孢子孢粉素體積百分比}}{\text{石松孢子孢粉素重量百分比}} = \frac{\text{海金沙孢子孢粉素體積百分比}}{\text{海金沙孢子孢粉素重量百分比}}$$

$$\frac{48.17\%}{31\%} = \frac{60.58\%}{X}$$

$$X = 39\% \text{ (此為海金沙的孢粉素重量百分比)}$$

$$\text{石松內部脂質含量重量百分比} = 100\% - 31\% = 69\%$$

$$\text{海金沙內部脂質含量重量百分比} = 100\% - 39\% = 61\%$$

不論石松或海金沙其孢子扣除孢粉素外殼後，內部大部分都為油脂，因此便以計算後的 69%和 61%重量百分濃度表示。

三、進行開放系統粉末塵爆實驗



圖 5-6 開放系統粉末塵爆實驗

(圖 5-6) 的圖中，看出火焰的顏色是石松和海金沙相近呈現黃白色，而玉米粉則為黃橘色。實驗中我們觀察到海金沙燃燒後會產生黑煙，而其他兩者皆不會。在實驗的過程中，發現石松和海金沙都有劈哩啪啦的爆裂聲，而玉米粉卻沒有聲音。

(一) 反應後的粉末狀態

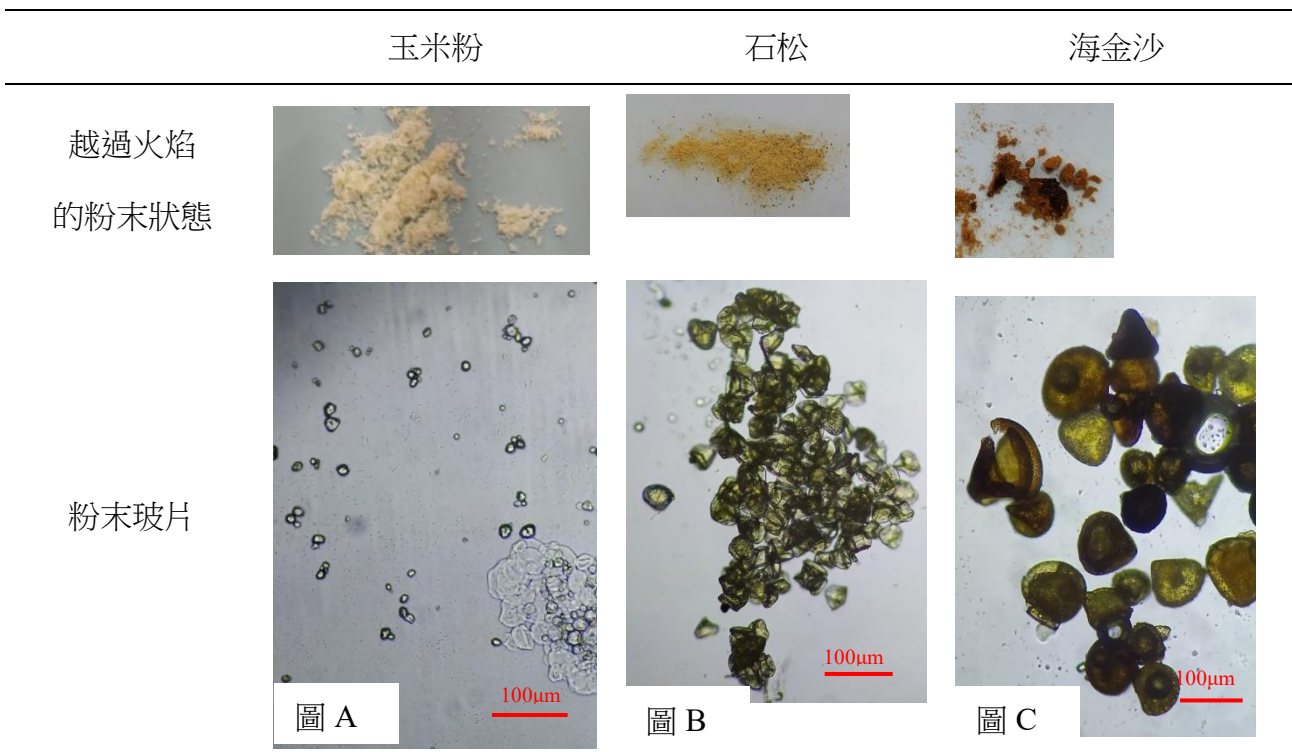


圖 5-7 開放系統反應後粉末狀態

圖 A 玉米粉在燃燒前、燃燒後皆無差別

圖 B 石松在燃燒後只剩外圍的孢粉素、少部分的碳粒

圖 C 海金沙在燃燒後，出現焦黑及孢子破裂的狀態

(二) 以海金沙、石松的孢子和玉米粉進行塵爆實驗

1. 密閉系統粉末塵爆實驗結果

我們利用改良後塵爆裝置進行大量的塵爆實驗，最後得出以下結果（表 5-1）

表 5-1 密閉系統粉末塵爆實驗結果（單位：cm）

	玉米粉	石松	海金沙
第一次	65	140	140
第二次	75	75	70
第三次	65	95	135
第四次	100	110	95
第五次	130	155	100
平均	87.00	115.00	108.00

我們總共做了 7 次玉米粉、7 次石松、11 次海金沙。其中石松有 1 次因為氣壓塊超出壓克力管而無法計算，海金沙則有 2 次；海金沙有 2 次實驗失敗，我們剔除了上述的數據和毛誤差，對 5 次成功的玉米粉、石松及海金沙的實驗數據做出平均，結果得到：玉米粉為 87 公分、石松為 115 公分、海金沙為 108 公分。

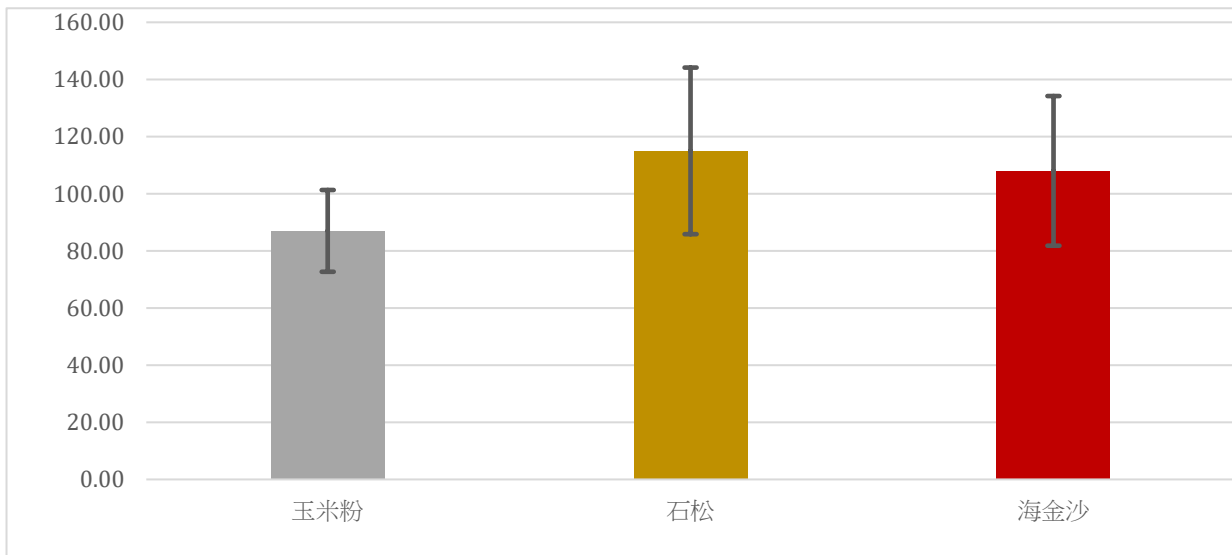
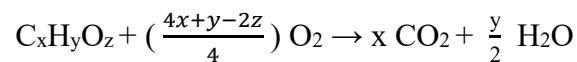


圖 5-8 塵爆實驗結果

2. 塵爆後產生氣體量的理論值

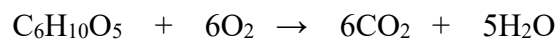
我們推測我們的實驗會形成以下的反應式：



所以我們將粉末的分子帶入式子內並計算出塵爆後所產生氣體體積的理論值

玉米粉主要是由澱粉（ $C_6H_{10}O_5$ ）組成。

我們推測 0.2 g 的玉米粉反應式如下：



理論莫耳數：
$$\frac{0.2g}{162} \quad \frac{1.2}{162} \quad \frac{1.2}{162} \quad \frac{1}{162}$$

我們可以得出氣體量為 $\frac{1.2+1}{162}$ mole

利用亞佛加厥定律我們可以得知氣體量為 $\frac{2.2}{162} \approx 0.0136$ 單位體積

孢子則是由孢粉素（ $C_{90}H_{144}O_{27}$ ）和三酸甘油酯（ $C_{55}H_{100}O_6$ ）所組成。

我們在計算脂質面積的部分有算出海金沙孢粉素重量百分比為 39%，石松則為 31%；海金沙內部脂質重量百分比為 61%，石松則為 69%。

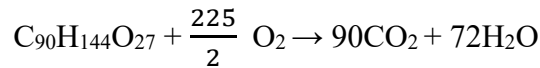
同理，我們可以推算出兩者塵爆後所產生氣體體積的理論值：

海金沙：

$$\text{孢子中孢粉素占：} 0.2 \times 39\% = 0.078$$

$$\text{三酸甘油酯：} 0.2 \times 61\% = 0.122$$

我們推測 0.078 g 孢粉素 (C₉₀H₁₄₄O₂₇) 反應式如下：

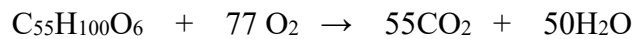


$$\text{理論莫耳數} : \frac{0.078g}{1656} \quad \frac{8.775}{1656} \quad \frac{7.02}{1656} \quad \frac{5.616}{1656}$$

$$\text{我們可以得出氣體量為} \frac{7.02+5.616}{1656} \text{ mole}$$

$$\text{同理，利用亞佛加厥定律我們可以得知氣體量為} \frac{12.636}{1656} \doteq 0.0076 \text{ 單位體積}$$

我們推測 0.122g 三酸甘油脂 (C₅₅H₁₀₀O₆) 反應式如下：



$$\text{理論莫耳數} : \frac{0.122g}{856} \quad \frac{9.394}{856} \quad \frac{6.71}{856} \quad \frac{6.1}{856}$$

$$\text{我們可以得出氣體量為} \frac{6.71+6.1}{856} \text{ mole}$$

$$\text{利用亞佛加厥定律我們可以得知氣體量為} \frac{12.81}{856} \doteq 0.0150 \text{ 單位體積}$$

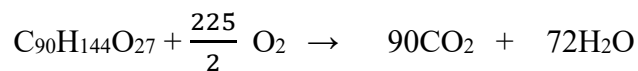
所以海金沙產生的總氣體量約為 0.0076 + 0.0150 = 0.0226 單位體積

石松：

$$\text{孢子中孢粉素占} : 0.2 \times 31\% = 0.062$$

$$\text{三酸甘油脂} : 0.2 \times 69\% = 0.138$$

我們推測 0.062 g 孢粉素 (C₉₀H₁₄₄O₂₇) 反應式如下：

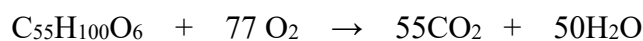


$$\text{理論莫耳數} : \frac{0.062g}{1656} \quad \frac{6.975}{1656} \quad \frac{5.58}{1656} \quad \frac{4.464}{1656}$$

$$\text{我們可以得出氣體量為} \frac{5.58+4.464}{1656} \text{ mole}$$

$$\text{同理，利用亞佛加厥定律我們可以得知氣體量為} \frac{10.044}{1656} \doteq 0.0061 \text{ 單位體積}$$

我們推測 0.138g 三酸甘油脂 (C₅₅H₁₀₀O₆) 反應式如下：



$$\text{理論莫耳數} : \frac{0.138g}{856} \quad \frac{10.626}{856} \quad \frac{7.59}{856} \quad \frac{6.9}{856}$$

我們可以得出氣體量為 $\frac{7.59+6.9}{856}$ mole

利用亞佛加厥定律我們可以得知氣體量為 $\frac{14.49}{856} \doteq 0.0169$ 單位體積

所以石松產生的總氣體量約為 $0.0061 + 0.0169 = 0.0230$ 單位體積

從我們的計算結果可以看出塵爆後所產生的理論氣體量為 石松 > 海金沙 > 玉米粉，而我們的實驗結果（圖 5-8）也是如此

陸、討論

一、玉米粉、石松和海金沙孢子的各種性質與結構為何？

玉米粉主要由澱粉所組成（維基百科，2019），澱粉屬於一種多醣，是由葡萄糖為單體組合成的聚合物，分子式為 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 。

而石松孢子和海金沙孢子的結構上基本差異不大（圖 6-1），都是由外圍的孢粉素和內部的脂質所組成。由文獻搜尋的結果我們得知孢粉素是由 β -胡蘿蔔素、葉黃素（如花藥黃素）和脂肪酸所組成的的聚合物(Sugandha G, n.d.)，本身具有抗分解的特性（圖 6-2）、對於酸、高溫和壓力有較強的耐受能力。

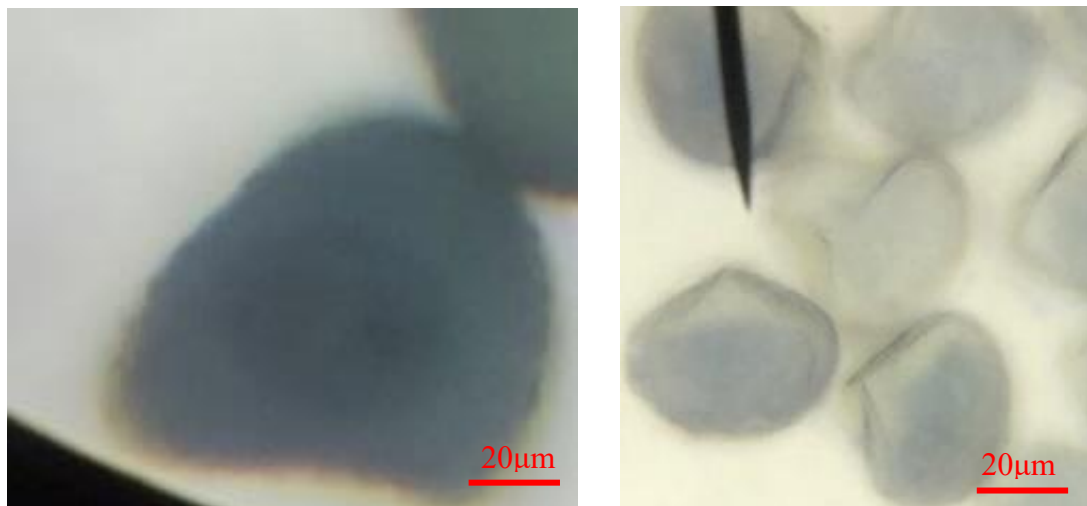


圖 6-1 孢子的結構比較

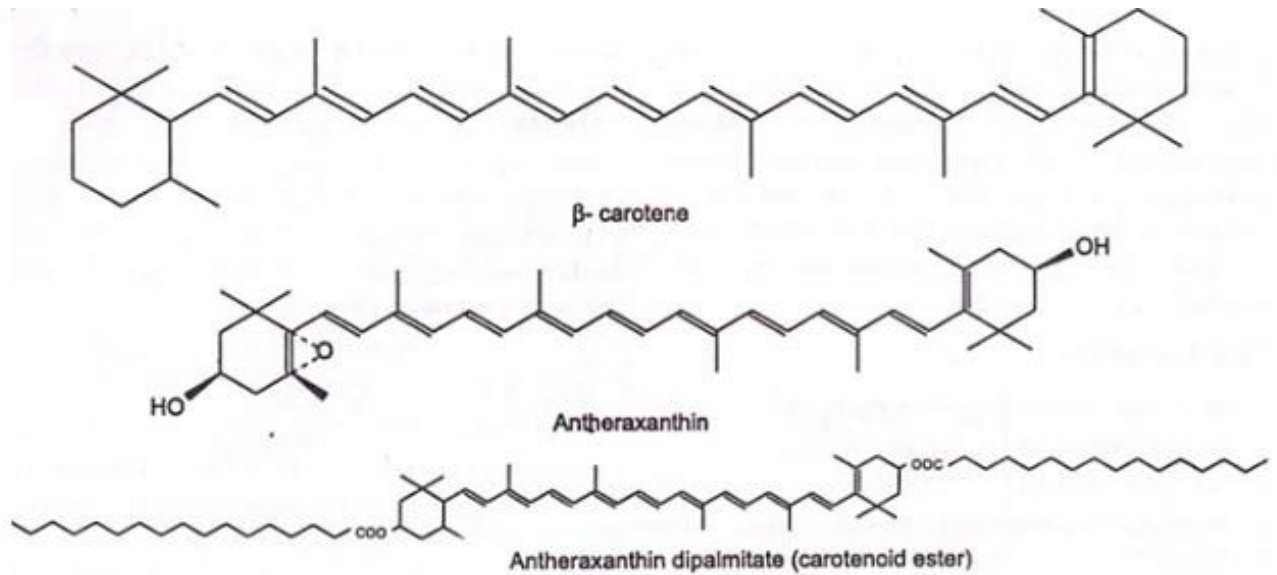


圖 6-2 β -胡蘿蔔素、葉黃素和脂肪酸分子結構圖

孢子內部脂質成分經由文獻搜尋後發現，孢子脂質與種子脂肪一樣，主要成分為三酸甘油酯(Armin R.Gemrich , 1997)要成分包含：油酸 $C_{18}H_{34}O_2$ 、亞油酸 $C_{18}H_{32}O_2$ 和棕櫚酸 $C_{16}H_{32}O_2$ 。

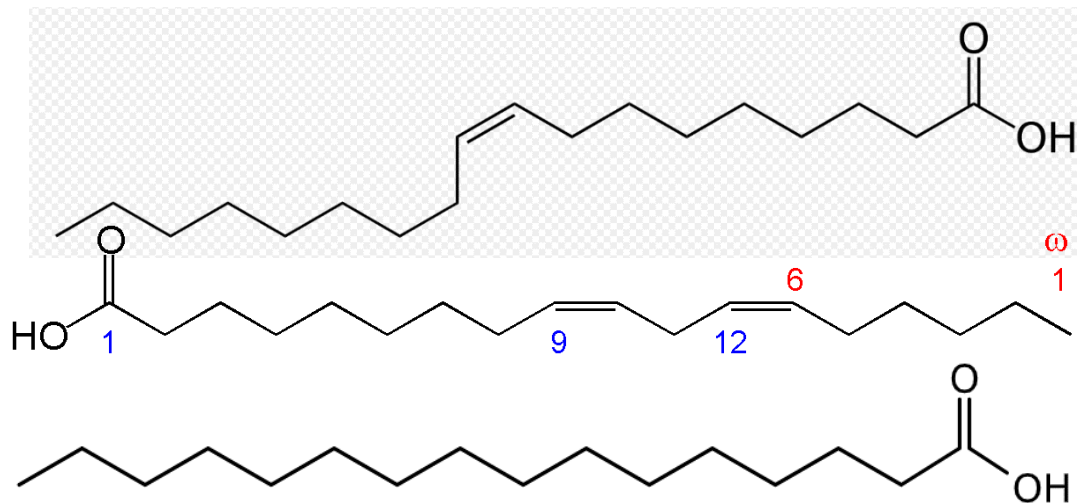


圖 6-3 油酸、亞油酸和棕櫚酸分子結構圖 (引自維基百科)

經由實驗我們發現玉米粉、石松和海金沙孢子粒徑大小為：海金沙 > 石松 > 玉米粉 (表 5-2)。以下關於塵爆實驗的討論都是基於上述文獻搜尋及實驗結果討論得出。

二、孢子脂質含量的推算方式準確嗎？

經由圖 5-5 和其計算結果，我們推得石松孢子孢粉素重量百分比約為 31%、脂質含量約為 69%；海金沙孢子孢粉素重量百分比約為 39%、脂質含量約為 61%。其實在進行完染色法後，我們嘗試用各種方式分析，最後發現可以利用數學課學到的 Geogebra 程式進行分析，主要是這個程式可以幫助我們計算不規則圖形的面積進而推算，當算出面積之後，又由於實驗中所使用孢子幾乎都是接近球體的形狀，因此我們便藉由數學計算推得不同孢子的孢粉素和內部脂質的體積比。

另外在文獻搜尋的過程中，我們查到石松孢子孢粉素的重量百分比為 31%（圖 6-4），分子式為 $C_{90}H_{144}O_{27}$ (Sugandha G, n.d.)，在假設石松和海金沙孢子的孢粉素和脂質成分相差不大的前提之下我們便取 Geogebra 分析後的體積比例結果和石松孢子孢粉素重量百分比進行比例換算，算出海金沙孢子孢粉素的重量百分比為 39%，並將剩餘成分皆視為脂質。

Table 2.1 : Proportion of sporopollenin
(as calculated by residue from acetolysis)

Species	Percent Sporopollenin	Molecular formulae
Spores		
<i>Lycopodium clavatum</i>	31.0	$C_{90}H_{144}O_{27}$
<i>Equisetum arvense</i>	30.5	$C_{90}H_{144}O_{31}$
Pollen		
<i>Pinus sylvestris</i>	25.9	$C_{90}H_{158}O_{44}$
<i>Alnus glutinosa</i>	10.7	$C_{90}H_{122}O_{50}$
<i>Chenopodium album</i>	11.2	$C_{90}H_{144}O_{35}$

圖 6-4 石松孢子孢粉素的重量百分比 (Sugandha G, n.d.)

三、開放系統塵爆實驗的燃燒狀態為何？

從實驗結果（圖 5-6），玉米粉的焰色呈現黃橘色，石松和海金沙的焰色為黃白色。從（維基百科，2019）我們可以知道玉米粉火焰的溫度為 $460^{\circ}C \sim 570^{\circ}C$ ，石松和海金沙為 $570^{\circ}C \sim 740^{\circ}C$ ，因為海金沙和石松的火焰顏色相近，所以我們可以推斷出脂質含

量會影響火焰的溫度也就是火焰的顏色。

在實驗過程中會發現石松與海金沙會有劈哩啪啦的聲響而玉米粉卻沒有聲音，我們將塵爆後的粉末做成玻片，經觀察後發現過程中的劈哩啪啦聲響應該是孢子爆裂（圖 6-5）的聲音。

實驗過程中，我們發現海金沙在燃燒時會有黑煙出現，而玉米粉和石松則沒有黑煙，我們知道顆粒越小，表面積越大的粉末燃燒較完全（康軒文教，2020），而海金沙的粒徑 > 玉米粉、石松，由此我們認為燃燒實驗中海金沙冒的黑煙是它孢粉素燃燒不完全的痕跡。



圖 6-5 孢子爆裂

由以上幾點，我們能以燃燒時會發出劈哩啪啦的聲響及火焰的顏色區分孢子與玉米粉，再以燃燒時是否產生黑煙來判斷石松和海金沙。

在實驗後我們收集了反應後的粉末，玉米粉在反應前、後沒有差別（圖 5-7-A）；石松孢子反應後，可以看出石松的孢子經燃燒後有許多的孢子只剩下外圍的孢粉素，我們推測內部的脂質可能被完全燃燒殆盡（圖 5-7-B）；海金沙孢子反應後燒焦的部分有出現孢子焦黑和破裂的狀態。（圖 5-7-C）

四、為何密閉系統塵爆裝置改良？優點為何？

起初我們使用塑膠桶製的塵爆裝置進行實驗，但塑膠桶的蓋子因為爆炸後的氣流太強，容易被衝破（圖 6-6），且每一次都必須重新製作裝置，於是我們決定換成較堅固的鐵製裝置（圖 3-2）。



圖 6-6 實驗失敗的蓋子

圖 A 蓋子爆裂；圖 B 累積的蓋子

換成鐵製裝置後卻因為無法將粉末順利從管內吹出，所以我們將原本的送氣孔拿來當送粉孔，使粉末能順利吹散至管內。

五、脂質含量與密閉系統塵爆威力的關係？

我們早期假設塵爆威力是受粉末顆粒大小所影響，但後來發現只要粉末粒徑小於 $75\mu\text{m}$ 便能產生塵爆，而後我們又思考了「威力」為何？以我們的密閉系統塵爆實驗裝置而言，氣壓塊上升高度應該就是代表塵爆威力了，那氣壓塊上升的高度又主要受什麼影響呢？後來我們推測：應該是燃燒後產生的氣體量吧？那關於燃燒後產生的氣體量的判斷又得從反應物，也就是粉末的主要成分進行判斷。由前面的文獻搜尋結果我們知道不論是孢子中的孢粉素、脂質，還是玉米粉中的澱粉，它們都是只含碳、氫和氧的有機化合物，而只含碳氫氧的有機化合物在充分氧氣的狀況下燃燒的最終產物就是 CO_2 和 H_2O ，以這樣的前提而言，不就代表我們以定量（ 0.2g 粉末）的條件進行反應，塵爆後產生的氣體量越多，塵爆威力就會越大。

而由我們實際實驗結果（圖 5-8）可看出，密閉系統塵爆結果順序為石松 > 海金沙 > 玉米粉，此結果正好與結果中對於塵爆產生的氣體量推論大致相符。

六、密閉系統塵爆實驗的誤差討論

我們在塵爆完後觀察桶子內部的情形，發現桶子內部有少量反應不完全的粉末。但是因為每次實驗多少都有少量反應不完全的粉末，所以我們將它視為固定的誤差。而要講求更精密的實驗，都是我們未來可以更進一步改良的部分。

我們再次改良鐵製裝置後，因為鐵桶較難重新修正進行改裝，所以我們使用送氣孔進行裝粉的動作，並沒有另行加裝送粉孔，導致我們裝粉的時候，為了堵住洞口不讓粉末在實驗前先掉進桶子內，手指上都會沾有極少量的粉末，而使進入桶內的粉末有極些微的差距。

我們的實驗也會因為當天氣候、濕度、溫度狀況而受到影響，但礙於我們的場地不足以讓我們在室內進行實驗，使我們無法避免外在環境因素的干擾。

柒、結論

一、結論

- (一) 玉米粉、石松和海金沙的粒徑大小排序為：海金沙 > 石松 > 玉米粉。化學結構的部分：玉米粉為澱粉組成，而石松和海金沙孢子都由外圍的孢粉素和內部的脂質組成。
- (二) 石松孢子孢粉素重量百分比約為 31%、脂質含量約為 69%；海金沙孢子孢粉素重量百分比約為 39%、脂質含量約為 61%。
- (三) 在開放系統下石松與海金沙因為孢粉素破裂而有劈哩啪啦的聲響，可以與燃燒時無聲音的玉米粉做區分，再以燃燒時是否產生黑煙來判斷為石松還是海金沙。
- (四) 塑膠桶製得塵爆裝置蓋子容易爆裂，既危險且重組又沒效率，換成金屬製得後避免了這個問題。建議在未來進行塵爆相關實驗時使用金屬製的裝置，增加穩定性。
- (五) 密閉系統塵爆威力大小為：石松 > 海金沙 > 玉米粉。我們由理論推得粉末所含的氧原子比例越少，產生的氣體量越多，經計算後石松與海金沙孢子的孢粉素氧原子都少於玉米粉。因此我們確定密閉系統塵爆威力大小與孢子脂質含量分析直接相關。

二、未來展望

本次塵爆實驗因為鐵桶較難重新修正進行改裝，導致我們在進行最後一次改良時無法另行加裝送粉孔，導致裝粉時手指上會沾有極少量的粉末，我們期望未來可以重新製作鐵製塵爆裝置，使實驗更加準確。另外希望未來可以在室內進行實驗，避免外在環境因素的干擾。

另外，我們在實驗前期曾前往林口森林步道採集台灣北部低海拔杪欏科植物孢子台灣杪欏、鬼杪欏和筆筒樹，但我們在過篩後發現孢子的量極為稀少，導致我們沒有使用它們進行實驗，希望未來可以採集更多的台灣本土的孢子進行實驗。

捌、參考文獻

石松子 (2006)。《中藥大辭典》

http://www.zysj.com.cn/zhongyaocai/yaocai_s/shisongzi.html

石松科 (2020)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%B3%E6%9D%BE%E7%A7%91>

石松粉的粉塵爆炸 (2012)

https://www.youtube.com/watch?v=y_to5DXdl74

石松粉的閃燃 (2012)

<https://www.youtube.com/watch?v=L9UWs0qF2ys>

林子傑、譚瑋城、戴琦森 (2016)。「粉」可怕。中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/56/pdf/030213.pdf>

亞油酸 (2018)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%9A%E6%B2%B9%E9%85%B8>

油酸 (2018)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B2%B9%E9%85%B8>

康軒文教事業 (2020)。《國中自然與生活科技課本 第四冊 (2 下) (四版二刷) (頁 97-98)》。

臺北：康軒文教事業股份有限公司。

威猛的粉塵爆炸 (2016)

<https://www.youtube.com/watch?v=NMIROP-W-D0>

海金沙 (2006)。《中藥大辭典》

http://www.cfbchina.org/zhongyaocai/yaocai_h/haijinsha.html

海金沙 (2008)。金門縣農業試驗所

<https://ari.kinmen.gov.tw/cp.aspx?n=87111AFC129B9300>

粉塵爆炸 (2019)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%89%E5%B0%98%E7%88%86%E7%82%B8>

焰 (2019)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%84%B0>

張焜標、許秋容、張雯婷 (2010)。孢子之染色研究，珊瑚樹小孢子的發育。林業研究季刊
32(1):51-62

[http://lifes.nchu.edu.tw/Pic/Writings/13766604061038\(1\).pdf](http://lifes.nchu.edu.tw/Pic/Writings/13766604061038(1).pdf)

【動畫還原】八仙塵爆 (2016)。蘋果日報

<https://tw.appledaily.com/headline/daily/20160427/37183991/>

單位「目」到底是個什麼鬼？

<https://kknews.cc/news/mnboa6.html>

棕梲酸 (2018)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%A3%95%E6%AB%9A%E9%85%B8>

澱粉 (2019)。維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B7%80%E7%B2%89>

Armin R.Gemrich (1997). Fatty acid composition of fern spore lipids. *Phytochemistry*, 16(7)
Pages 1044-1046

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031942200867217#!>

Lycopodium Powder on Water - Science Experiment (2016)

<https://www.youtube.com/watch?v=cklrfRLecjc>

Sugandha G (n.d.). Sporopollenin: Distribution, Production and Functions. *Biologydiscussion*.

Author. Retrieved February 12, 2020 from the World Wide Web:

<http://www.biologydiscussion.com/palynology/sporopollenin-distribution-production-and-functions-2/64378>

【評語】 030212

1. 舊有塵爆實作裝置問題解決與改良值得嘉許。
2. 在假設條件下以 GeoGeBra 去估算孢子內部脂質面積到內部脂質含量重量百分比等之估計誤差值未考量。
3. 塵爆實驗之實用價值與結果可信度不高。

摘要

本研究試圖探討「使用含有脂質的蕨類孢子進行塵爆實驗會有什麼樣的效果？可否藉由塵爆實驗結果分析孢子成分」，於是我們使用玉米粉、石松孢子和海金沙孢子進行研究。實驗過程中觀察粉末的各種物理性質，並以染色法分析孢子脂質含量，最後進行開放系統和密閉系統的塵爆實驗並交叉比對。結果發現，石松孢子與海金沙孢子在塵爆過程中因其生物結構特性而會有劈哩啪啦的聲響，且海金沙孢子因孢粉素殘留會有黑煙出現。密閉系統的塵爆實驗中，我們得到粉末的塵爆威力大小為：石松孢子 > 海金沙孢子 > 玉米粉，此結果與孢子脂質含量有正相關。

研究動機

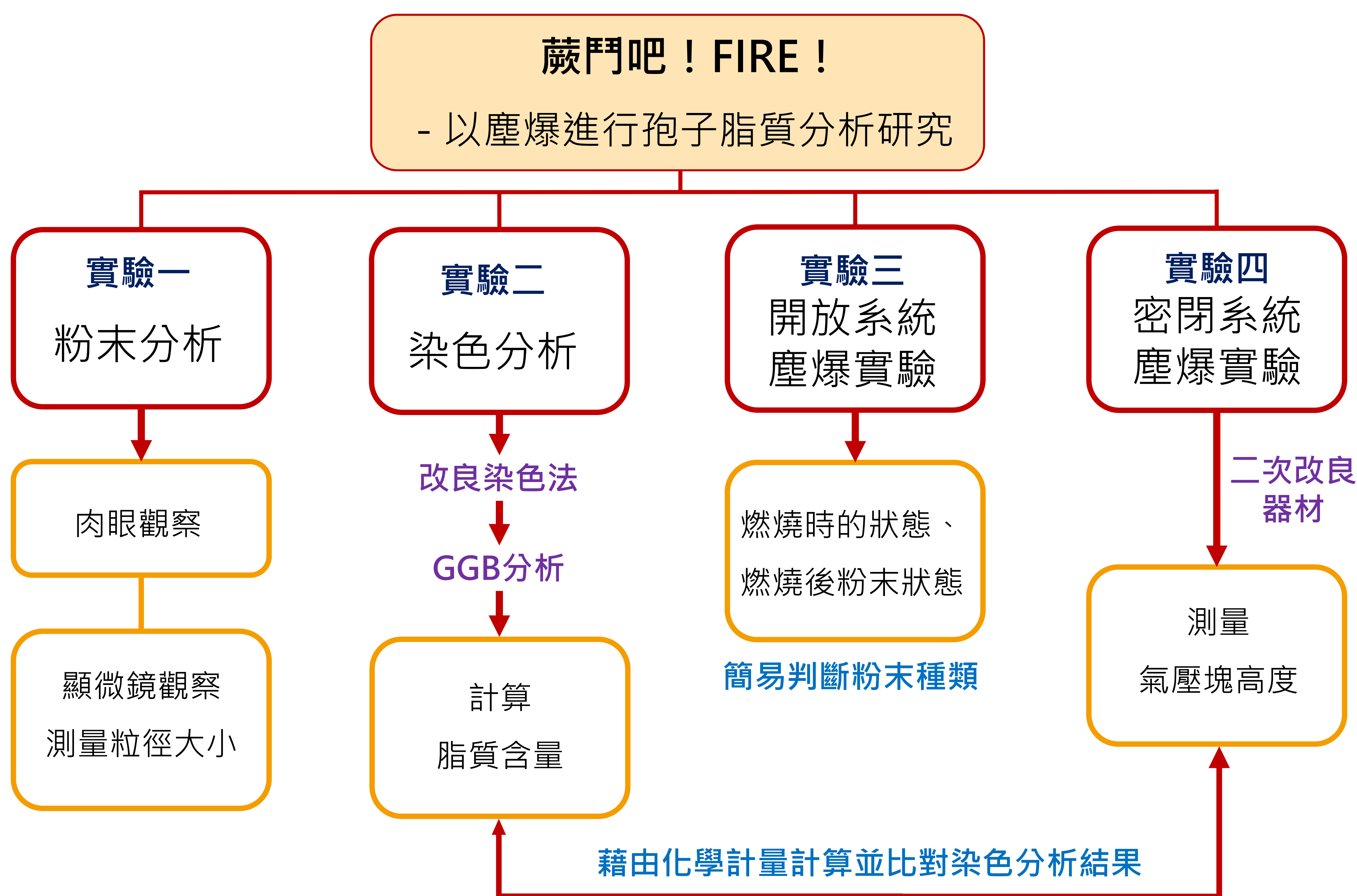
生物課上看到石松粉燃燒的影片，回家後在網路上知道石松是一種蕨類，其孢子含有40%的油脂可作為閃光劑。難道，蕨類孢子中，只有石松有這樣的性質嗎？後來發現海金沙孢子也有此性質，在辨別真偽時，可以點火燃燒，易著火還會有爆鳴聲及閃光。

本研究嘗試使用石松孢子及海金沙孢子來進行塵爆實驗並分析孢子的脂質含量。

研究目的

- 一.以肉眼及顯微鏡觀察玉米粉、石松孢子和海金沙孢子的物理性質
- 二.利用染色法分析玉米粉、石松孢子和海金沙孢子的脂質含量
- 三.觀察及討論開放系統塵爆實驗中，各種粉末反應過程燃燒狀態及反應後粉末狀態
- 四.觀察及討論密閉系統塵爆實驗的塵爆威力，與粉末脂質含量的關係

研究流程圖



研究方法

實驗一、粉末分析

- 一. 以肉眼觀察玉米粉、石松孢子及海金沙孢子。
- 二. 顯微鏡觀察三種粉末並測量粒徑大小。
- 三. 由文獻搜尋結果對照實驗結果。

實驗二、染色分析

- 一. 試染玉米粉、石松孢子及海金沙孢子
使用張焜標、許秋容、張雯婷 (2010) 的孢子染色方法。→ 結果不如預期
- 二. 改良染色法

表一 改良染色法，加強冷熱破壞孢子壁效果

	染色水溫	離心管溫度
原染色法	40°C ~ 60°C	常溫
改良後	75°C	冷凍

改良後實驗步驟為：

1. 孢子放入離心管，並加入70 %酒精，放到冷凍庫冷凍一天。(冷縮)

2. 用滴管滴一滴步驟1溶液至懸滴玻片上後，再滴一滴蘇丹黑B。
3. 先取試管架放入保麗龍盒，再將玻片放入培養皿並一起放上試管架，最後倒入75°C的熱水至保麗龍盒的六分滿，水溫75°C保持60分鐘。(替代烘箱，讓孢子壁經冷縮熱脹後出現縫隙，使染劑進入孢子內部)
4. 將玻片取出，將粉末浸泡在70%酒精3分鐘，再用水浸泡粉末1分鐘(去染)。
5. 顯微鏡觀察並拍照紀錄。

實驗三、開放系統塵爆實驗

- 一. 架設酒精燈並於下方放置鐵盤。
- 二. 將玉米粉、石松孢子及海金沙孢子放入點眼瓶。
- 三. 固定噴射距離與高度。
- 四. 擠壓點眼瓶使粉末噴灑於火焰上方。
- 五. 錄影紀錄實驗過程。
- 六. 收集鐵盤內的粉末，製成玻片並以顯微鏡觀察。

實驗四、密閉系統塵爆實驗

一. 第一次改良：改良密閉系統塵爆裝置

原塵爆裝置依照文獻 (林子傑、譚瑋城、戴琦森, 2016) 為塑膠製, 內部貼上鋁箔紙。實作後發現容易燒毀且具危險性, 因此我們將塵爆裝置改為金屬製 (圖一、圖二與圖三)。而改良的過程中, 我們也依照實驗操作的經驗, 對裝置的結構做出一些改變 (表二):



圖一 原塵爆裝置

圖二 改良後塵爆裝置

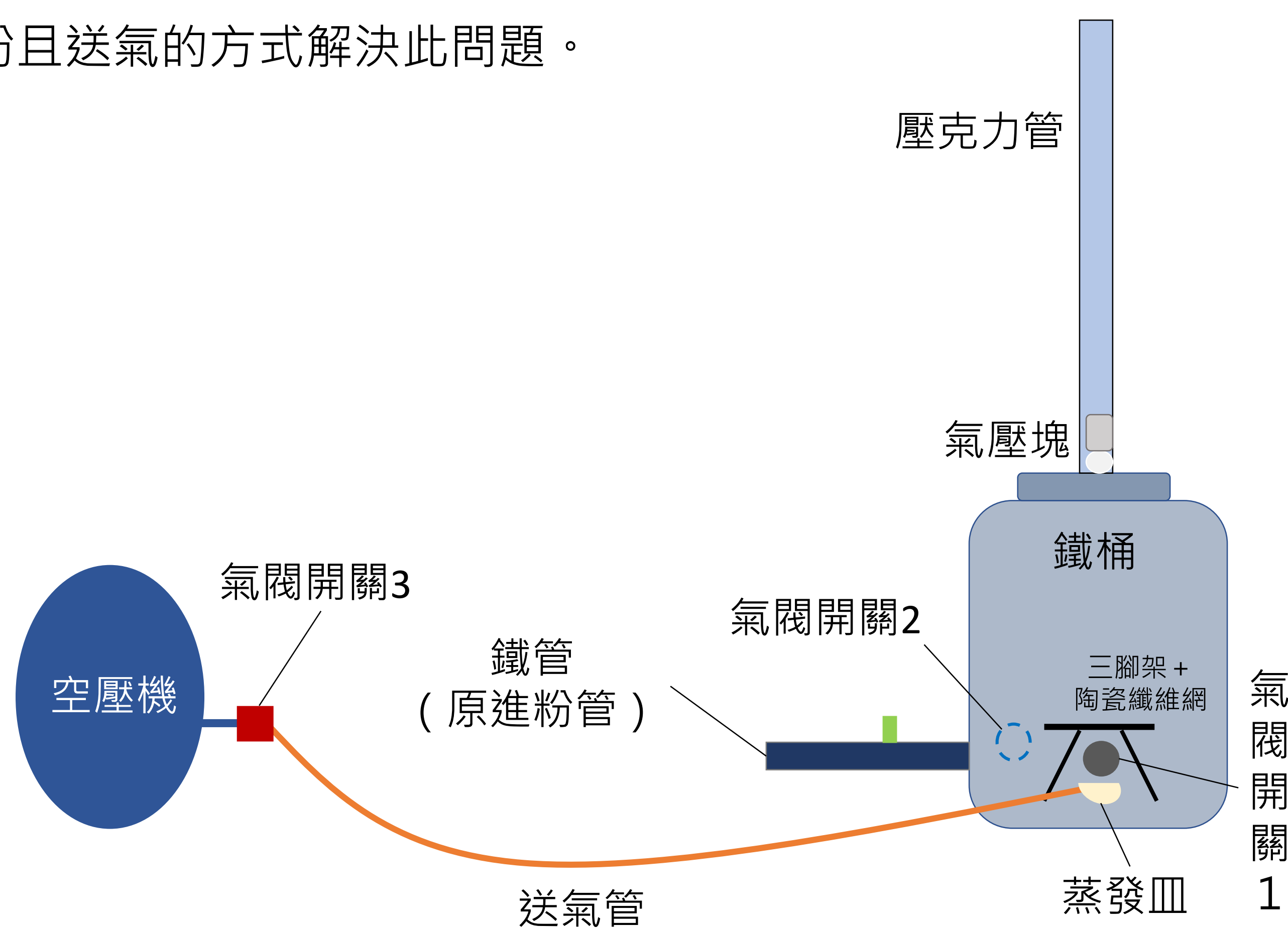
圖三 改良後塵爆裝置
示意圖正面觀

表二 塵爆裝置比較表

原塵爆裝置	改良後塵爆裝置

二. 第二次改良：改良塵爆實驗方法

塵爆裝置改良後, 我們一度遇到成功率大幅下降的問題, 後來發現是原送粉管管徑較粗導致氣壓不足以推動粉末的狀況, 因此我們最後改以原送氣管同時送粉且送氣的方式解決此問題。



圖四 改良後塵爆裝置示意圖側面觀

三. 密閉系統塵爆實驗步驟

1. 在蒸發皿內倒入 2 ml 的變性酒精, 並與三腳架及陶瓷纖維網一起放入鐵桶內。
2. 在氣閥開關 1 內倒入 0.2 g 粉末。
3. 將打火機伸入氣閥開關 2, 並對準蒸發皿。
4. 蓋上蓋子。
5. 開始錄影並點火。
6. 打開空壓機氣閥開關 3。
7. 由影片內容記錄氣壓塊高度。

研究結果與討論

實驗一、粉末分析

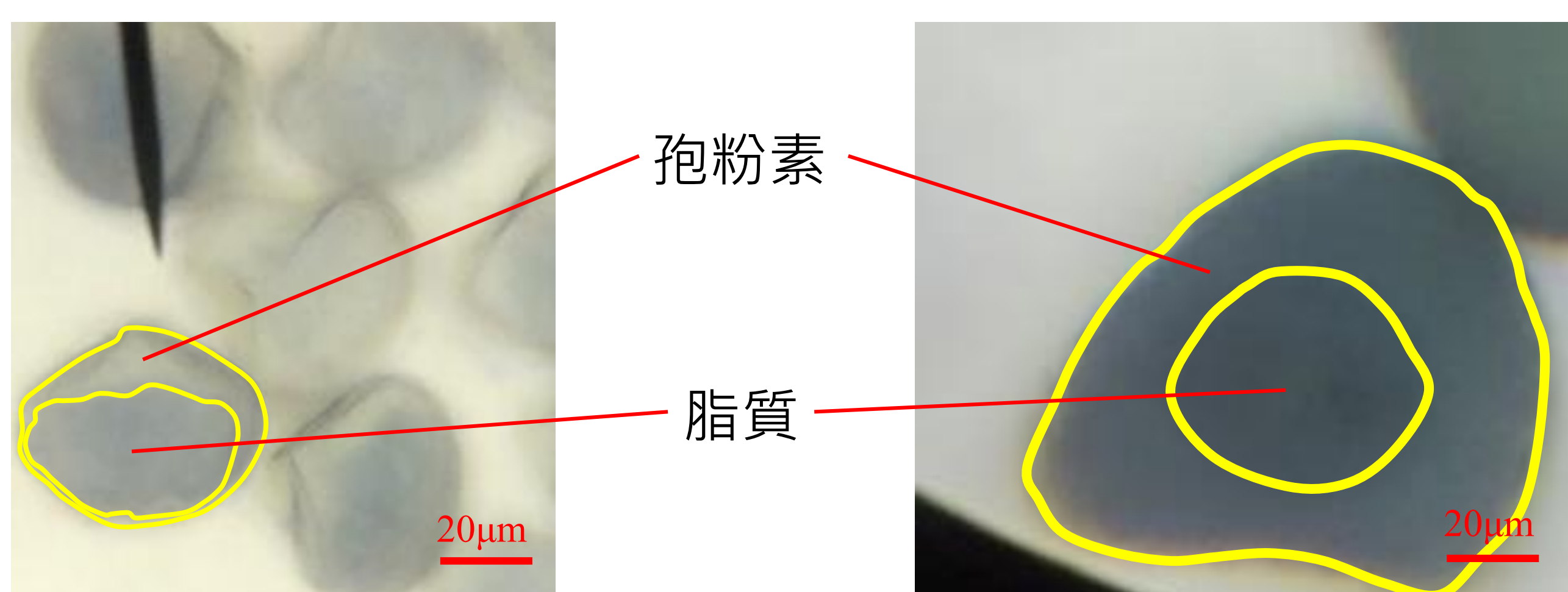
一. 玉米粉、石松孢子及海金沙孢子的粒徑大小

表三 粉末粒徑表

	玉米粉	石松孢子	海金沙孢子
圖			
粒徑	10~20 μm	40 μm	80 μm

海金沙孢子 > 石松孢子 > 玉米粉

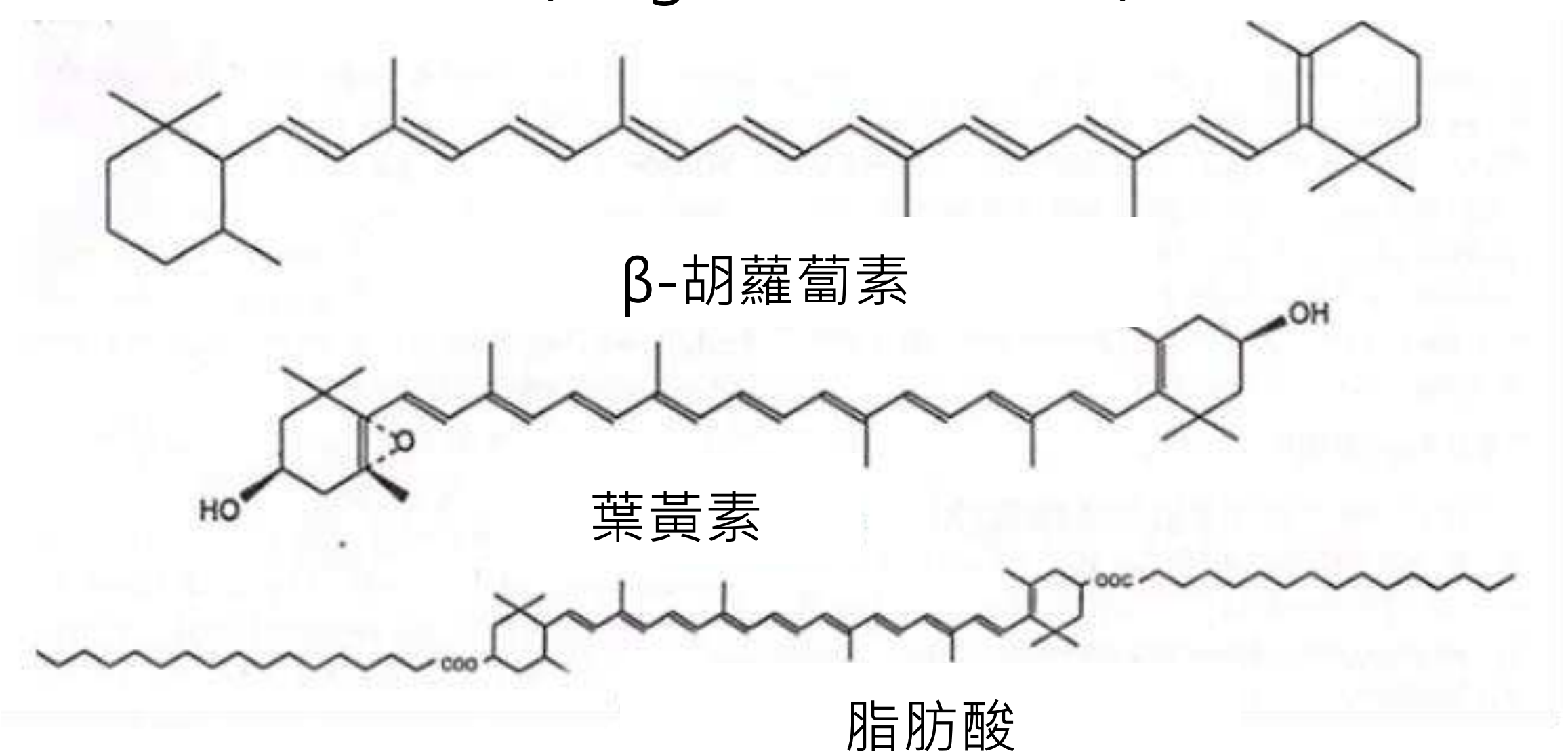
二. 石松孢子及海金沙孢子的結構



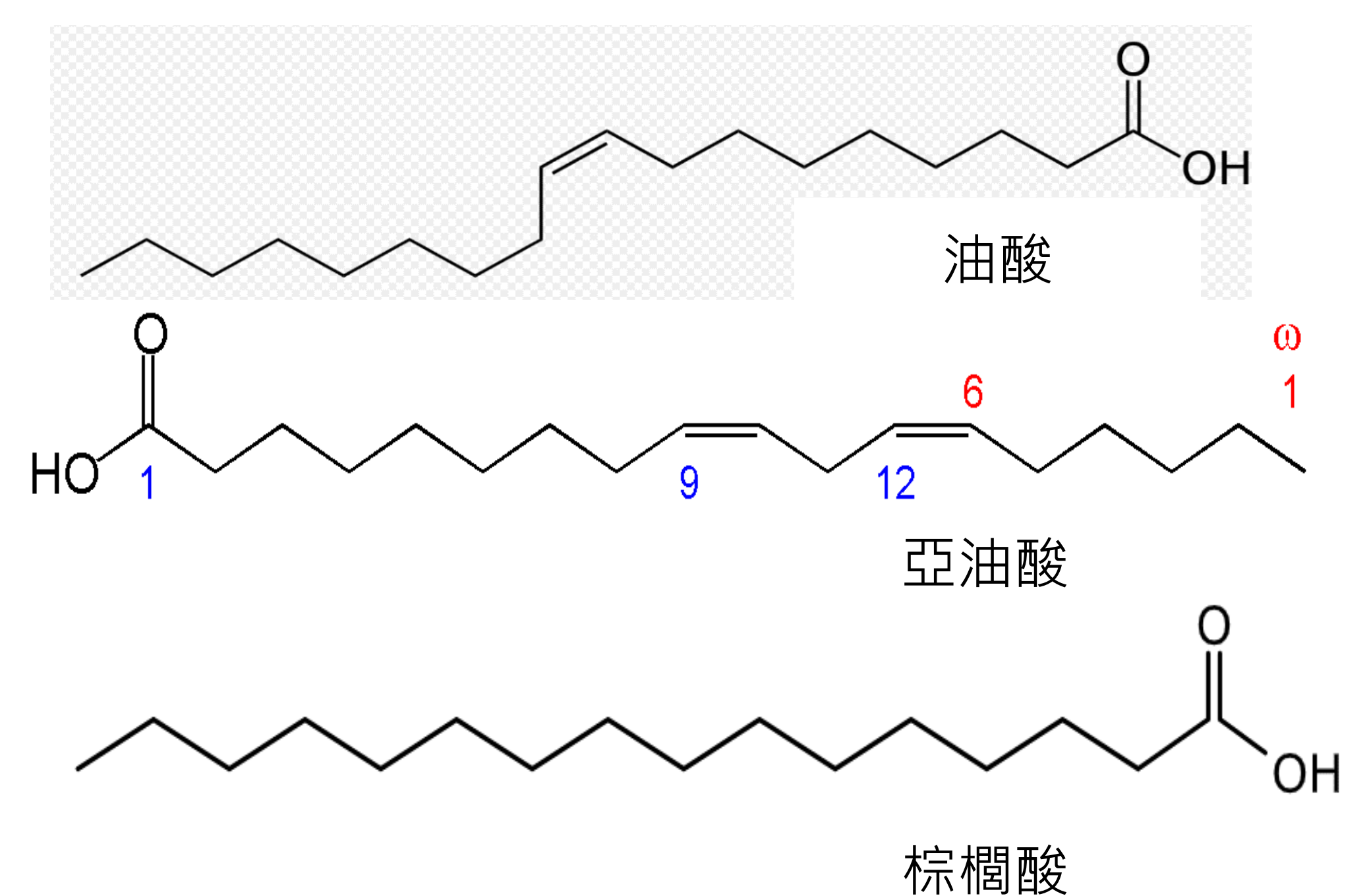
圖五 石松孢子結構圖

圖六 海金沙孢子結構圖

孢子是由外圍的孢粉素和內部的脂質組成, 而孢粉素是以下三者所組成的聚合物 (Sugandha G, n. d.):



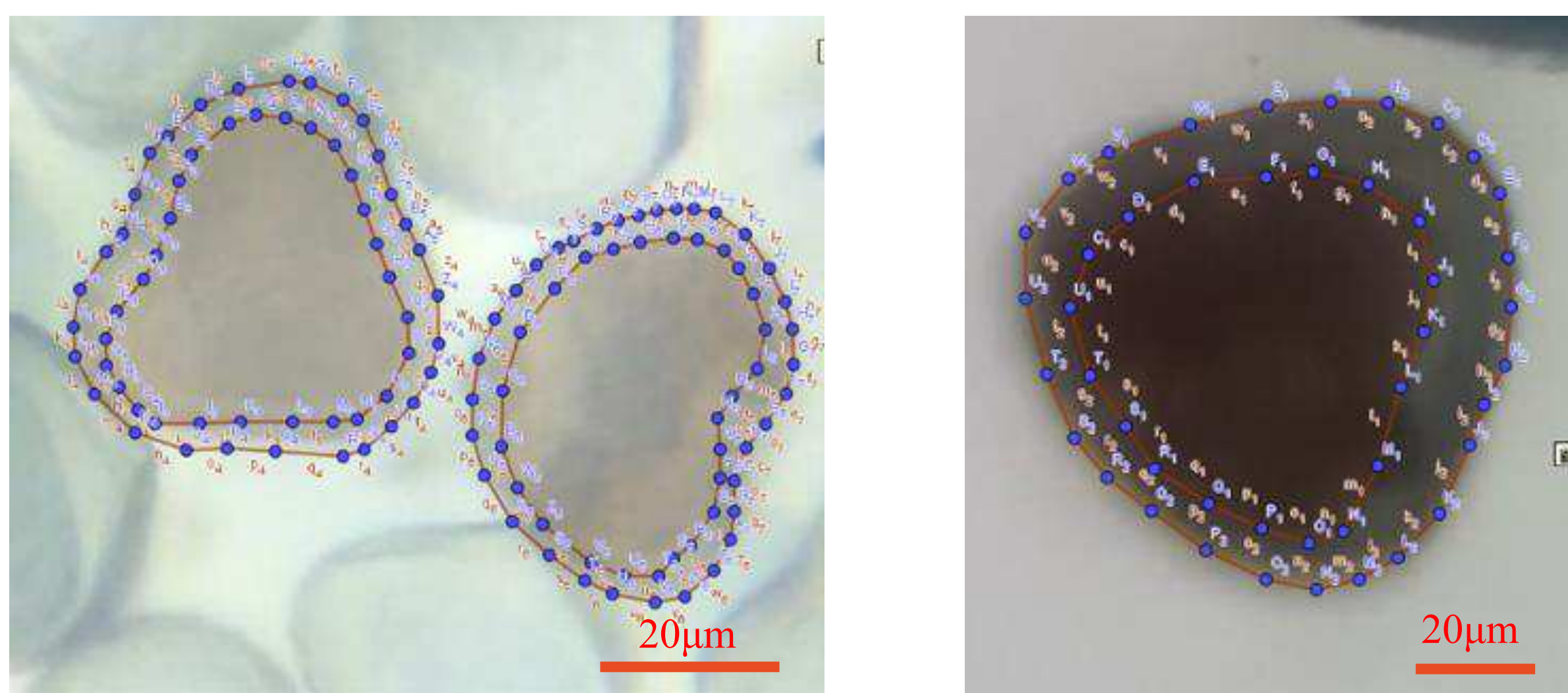
孢子脂質與種子脂肪一樣, 主要成分為油酸、亞油酸和棕櫚酸所組成的三酸甘油酯 (Armin R. Gemmrich, 1997)。



實驗二、染色分析

• 計算條件：

1. 石松與海金沙同為蕨類，計算中將其孢子視為同組成物體。
2. 兩種孢子經觀察都接近球體，計算中以球體視之。
3. 文獻中(Sugandha G, n. d.)，石松孢子孢粉素重量百分比約為31%。



圖七 GGB分析圖 (左：石松孢子；右：海金沙孢子)

1. 由GGB分析我們得到兩種孢子面積和孢子內部脂質面積，並直接計算脂質所占面積比：

$$\frac{\text{石松孢子內部脂質的面積}}{\text{石松孢子的面積}} = \frac{0.20}{0.31} = 64.58\%$$

$$\frac{\text{海金沙孢子內部脂質的面積}}{\text{海金沙孢子的面積}} = \frac{1.00}{1.86} = 53.76\%$$

2. 將面積比換算成體積比

$$(\text{石松孢子脂質面積比})^{1.5} = (64.58\%)^{1.5} = 51.83\%$$

$$(\text{海金沙孢子脂質面積比})^{1.5} = (53.76\%)^{1.5} = 39.42\%$$

3. 計算孢子孢粉素體積比

$$\text{石松孢子孢粉素體積比} = 100\% - 51.83\% = 48.17\%$$

$$\text{海金沙孢子孢粉素體積比} = 100\% - 39.42\% = 60.58\%$$

4. 由石松孢子孢粉素重量百分比31%，推算兩種孢子脂質重量百分比

$$\frac{\text{石松孢子孢粉素重量百分比}}{\text{石松孢子孢粉素體積百分比}} = \frac{\text{海金沙孢子孢粉素重量百分比}}{\text{海金沙孢子孢粉素體積百分比}}$$




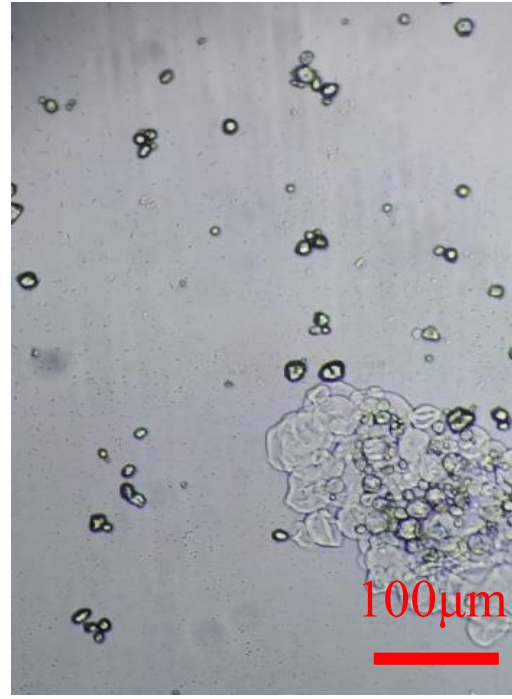
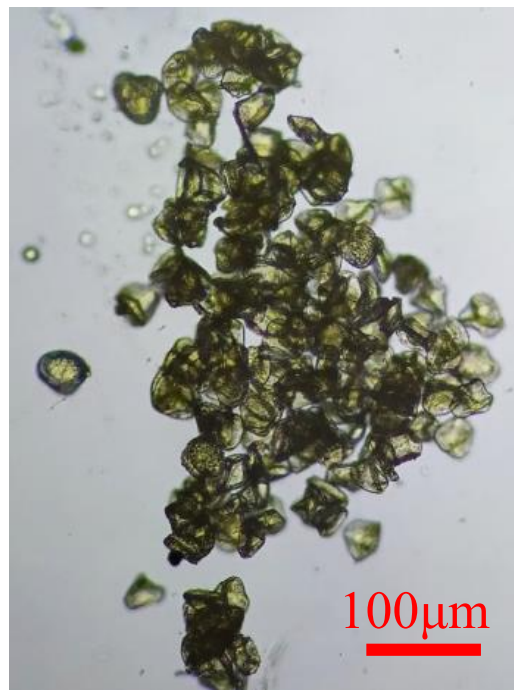
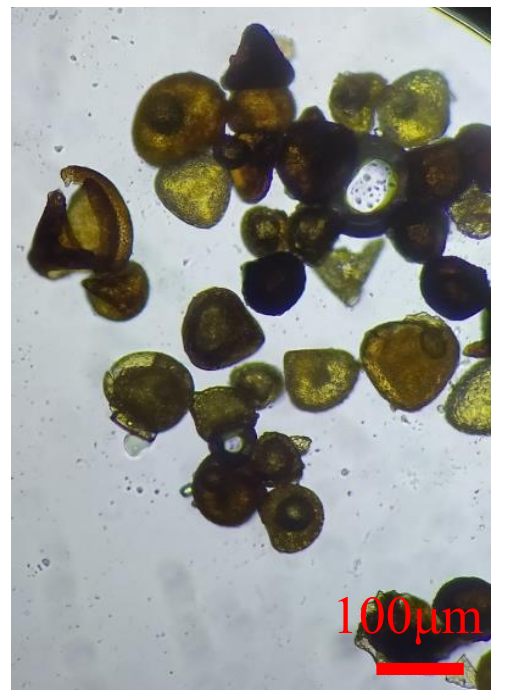
$$\frac{31.00\%}{48.17\%} = \frac{X}{60.58\%} \quad X = 39.00\%$$

$$\text{石松孢子脂質重量百分比} = 100\% - 31.00\% = \mathbf{69.00\%}$$

$$\text{海金沙孢子脂質重量百分比} = 100\% - 39.00\% = \mathbf{61.00\%}$$

實驗三、開放系統塵爆實驗

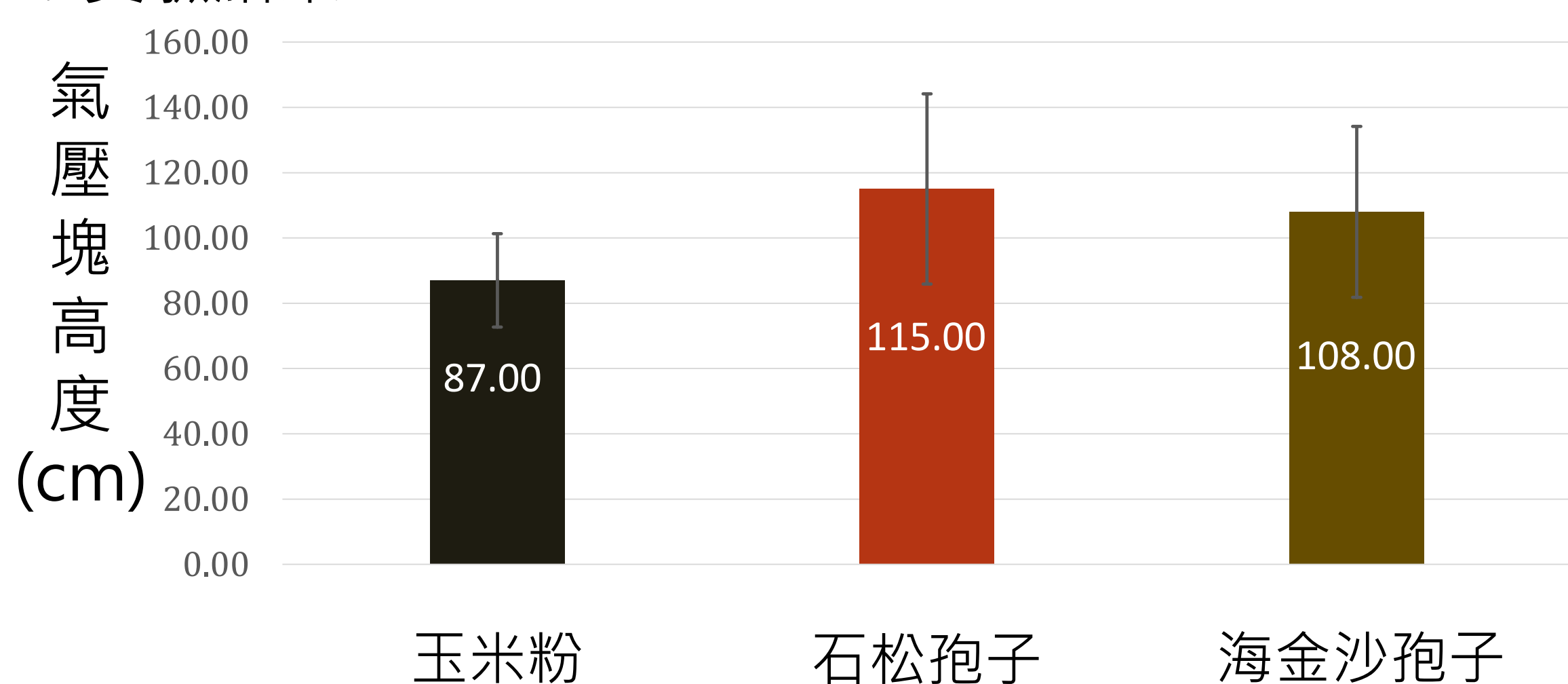
表四 開放系統粉末比較表

	玉米粉	石松孢子	海金沙孢子
燃燒狀態			
反應後的粉末玻片			

- 石松孢子和海金沙孢子燃燒時有劈哩啪啦的爆裂聲。
- 海金沙孢子燃燒時有黑煙產生。

實驗四、密閉系統塵爆實驗

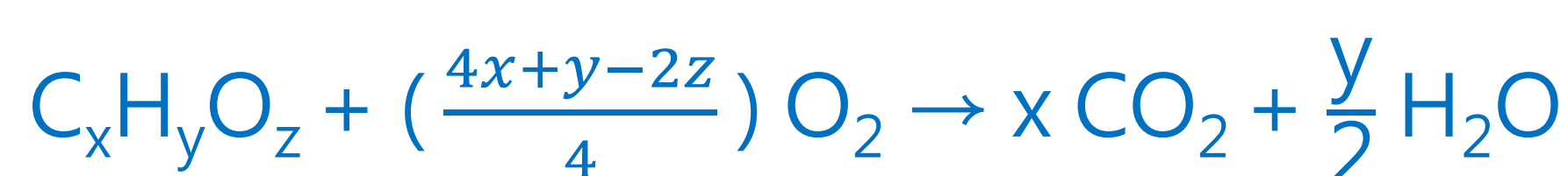
- 一. 實驗結果



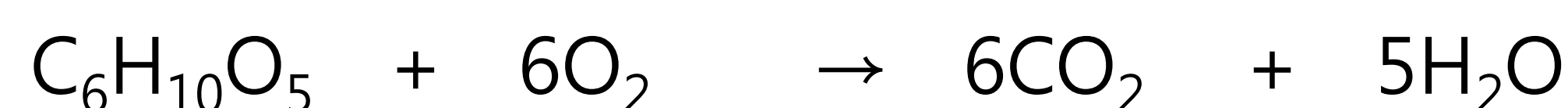
二. 粉末塵爆氣體產量推算

- 實驗中所使用的粉末量都為0.2克，並視粉末為限量試劑進行運算。

1. 粉末塵爆的理論反應式為：



2. 玉米粉的氣體產量



$$\frac{0.20}{162} \text{ mole} \quad \frac{1.20}{162} \text{ mole} \quad \frac{1.20}{162} \text{ mole} \quad \frac{1.00}{162} \text{ mole}$$

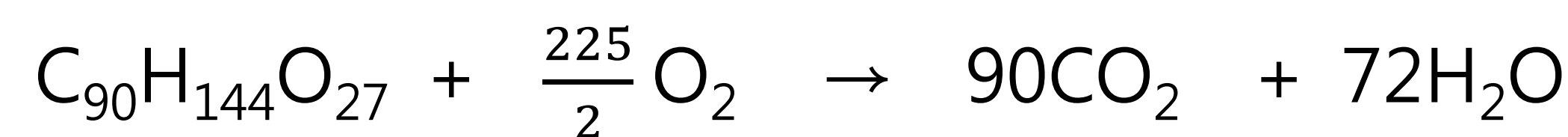
$$\text{計算後得到氣體總產量為 } \frac{2.20}{162} \text{ mole} \approx \mathbf{0.0136 \text{ mole}}$$

3. 石松孢子的氣體產量

$$0.2\text{克的石松孢子含}31\%\text{的孢粉素}(C_{90}H_{144}O_{27})$$

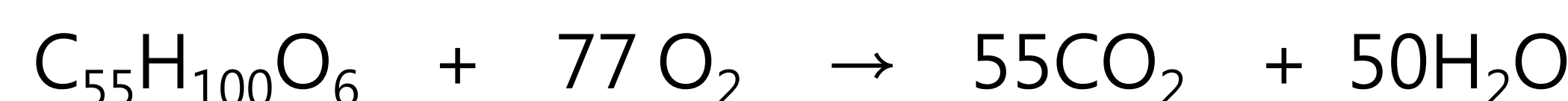
$$0.062\text{克和}69\%\text{的三酸甘油酯}(C_{55}H_{100}O_6) \quad 0.138\text{克}$$

經計算：



$$\frac{0.062}{1656} \text{ mole} \quad \frac{6.975}{1656} \text{ mole} \quad \frac{5.580}{1656} \text{ mole} \quad \frac{4.464}{1656} \text{ mole}$$

$$\text{孢粉素氣體產量為 } \frac{10.044}{1656} \text{ mole} \approx \mathbf{0.0061 \text{ mole}}$$



$$\frac{0.138}{856} \text{ mole} \quad \frac{10.626}{856} \text{ mole} \quad \frac{7.590}{856} \text{ mole} \quad \frac{6.900}{856} \text{ mole}$$

$$\text{三酸甘油酯氣體產量為 } \frac{14.490}{856} \text{ mole} \approx \mathbf{0.0169 \text{ mole}}$$

$$\text{石松孢子氣體產量為 } 0.0061 + 0.0169 = \mathbf{0.0230 \text{ mole}}$$

4. 海金沙孢子的氣體產量

以0.2克海金沙孢子含39%的孢粉素和61%的三酸甘油酯進行相同的計算可得：

$$\text{海金沙孢子氣體產量為 } \mathbf{0.0226 \text{ mole}}$$

三. 比較實驗結果與推算結果

密閉系統塵爆實驗結果與化學計量推算結果皆為：

石松孢子 > 海金沙孢子 > 玉米粉

結論

- 一. 粉末粒徑大小為：**海金沙孢子 > 石松孢子 > 玉米粉**。
玉米粉為**澱粉**，石松孢子和海金沙孢子由外圍**孢粉素**和內部**脂質**組成。
- 二. 石松孢子孢粉素占**31%**、脂質占**69%**；海金沙孢子孢粉素占**39%**、脂質占**61%**。（皆為重量百分比）
- 三. 玉米粉與蕨類孢子燃燒時**火焰顏色不同**，且石松孢子與海金沙孢子燃燒時有**劈哩啪啦的聲響**，海金沙孢子還會**產生黑煙**。
- 四. 塵爆實驗裝置建議使用**金屬製**，增加穩定性與安全性。
- 五. 實驗得到密閉系統塵爆威力大小為：**石松孢子 > 海金沙孢子 > 玉米粉**。與化學計量推算結果相符合。

未來展望

- 一. 降低實驗誤差，並期待能以塵爆裝置作為粉末成分分析工具。
- 二. 希望可採集更多的台灣本土蕨類孢子進行實驗。

參考文獻

- 石松子 (2006) . 《中藥大辭典》
http://www.zysj.com.cn/zhongyao/yaocai_s/shisongzi.html
- 林子傑、譚瑋城、戴瑞森 (2016) . 「粉」可怕。中華民國第56屆中小學科學展覽會
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/56/pdf/030213.pdf>
- 海金沙 (2006) . 《中藥大辭典》
http://www.cfchina.org/zhongyao/yaocai_h/hailinsha.html
- 張焜標、許秋容、張受婷 (2010) . 孢子之染色研究，珊瑚樹小孢子的發育。林業研究季刊 32(1):51-62
[http://lifes.nchu.edu.tw/Pic/Writings/13766604061038\(1\).pdf](http://lifes.nchu.edu.tw/Pic/Writings/13766604061038(1).pdf)
- Armin R.Gemrnich (1997). Fatty acid composition of fern spore lipids. *Phytochemistry*, 16(7) Pages 1044-1046
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003194220087217#>
- Sugandha G (n.d.). Sporopollenin: Distribution, Production and Functions. *Biologydiscussion*. Author. Retrieved February 12, 2020 from the World Wide Web:
<http://www.biologydiscussion.com/palynology/sporopollenin-distribution-production-and-functions-2/64378>