

來電~「樹」「素」看！

名次：國中組數理類第二名

學校名稱：忠孝國中

作者：吳宇森、劉鈺祥、蔡承陽、葉宇軒

指導教師：許暉東

〈摘要〉

本實驗以水果電池為發想，以樹葉打成汁的濾液，作為取代果肉的電解質，並以鋅、銅為兩極電極。我們以雜草、發財樹、月桃等五種校園植物為測試物，最後發現以月桃葉製作的樹葉電池發電效果最佳，因此我們以月桃葉作為本次探討樹葉電池的研究對象。

我們發現月桃葉顏色越深，作成樹葉電池發電效果越好，意外的是泛黃的月桃葉作成樹葉電池發電效果也不差。月桃葉濾液若添加酸性電解物質（如檸檬汁、鹽酸），樹葉電池的發電效果會增加，尤其若添加洋菜粉製作成果凍狀，除了可提升發電功率外，尚可延長樹葉電池最佳供電狀況的持續時間。

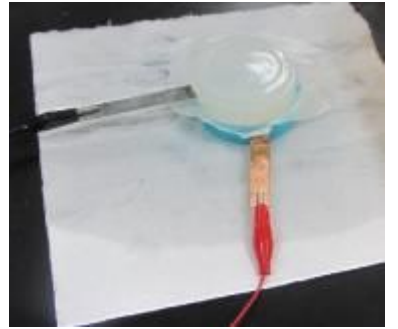
此外，我們改變不同電極種類組合，其中以鋅。銅為電極，發電狀況最佳。而且隨著兩極越接近，沒入月桃濾液(或月桃凍)的深度越深，發電效果越好。

最後，我們根據本此實驗結果，串聯五個自製樹葉電池，可提供 3.6V、5.04W 的功率，並可持續發電 168 小時以上。並根據實驗結果及文獻，推論出本次實驗的反應流程為：

1. 隨著樹葉濾液氧化變酸，使得葉綠素脫鎂。
2. 脫鎂葉綠素，與樹葉濾液中的銅離子結合成葉綠酸銅。
3. 鋅片與月桃濾液中的葉綠酸銅（或銅離子）產生氧化還原反應，產生電能。

壹、研究動機

某日我們進行鋅銅果凍電池實驗完後，發現實驗完畢後，發現硫酸銅果凍很難處理，既不可丟垃圾桶，又不可廢液回收，就覺得很不環保。恰好暑假颱風來襲，校園內刮滿了落下的樹葉，於是我們靈機一動，是否就地取材，利用校園刮壞的樹葉萃取液來取代傳統的化學電解液，讓化學電池實驗更環保，以下就是我們的實驗。



貳、研究目的

- 一、 研究不同樹葉種類對於樹葉電池發電的影響
- 二、 研究不同葉綠素濃度對於樹葉電池發電的影響
- 三、 研究不同的葉綠素添加物對於樹葉電池發電的影響
- 四、 研究不同電極組合對於樹葉電池發電的影響
- 五、 研究不同的電極距離對樹葉電池發電的影響

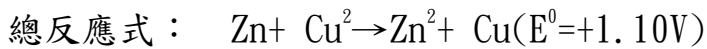
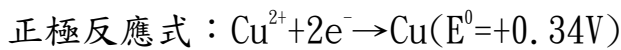
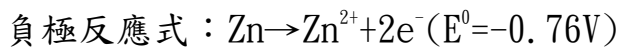
參、文獻探討

一、化學電池原理-鋅銅電池原理

鋅銅電池的運作原理：利用鋅與銅的活性不同，負極的鋅片(Zn)會失去電子變成(Zn^{2+})，同時釋放出的電子(e^-)會沿著導線的移動至正極的銅片上形成電子流，硫酸銅($CuSO_4$)中的銅離子(Cu^{2+})會得到電子還原成銅(Cu)，附著在銅片(Cu)上，反應式如下所示，經資料查詢後產生的標準電壓為 1.10V。而鹽橋中的正負離子則扮演溝通電路，維持電池的電中性。



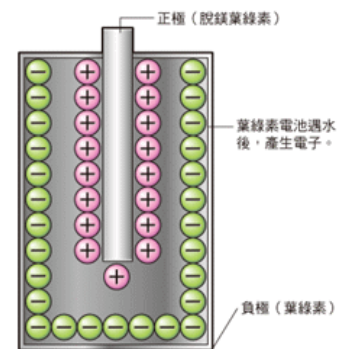
※鋅銅電池反應式



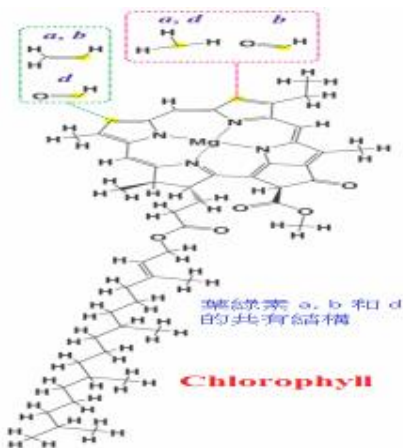
二、葉綠素電池

葉綠素有機電池的構想來自模仿植物的光合作用，即葉綠素(chlorophyll)吸光、遇水後，會先成為離子態「脫鎂葉綠素」($C_{55}H_{72}O_5N_{42} - Mg^{2+}$)，在這過程中釋放出能量將其轉換成電能。電池的基本結構包含電解質與導電材質等，若將其中電解質以葉綠素替代，加水形成離子態後，一樣會有發電效果。更特別的是，葉綠素形成離子態後，還可與水進行氧化還原反應，產生電流。

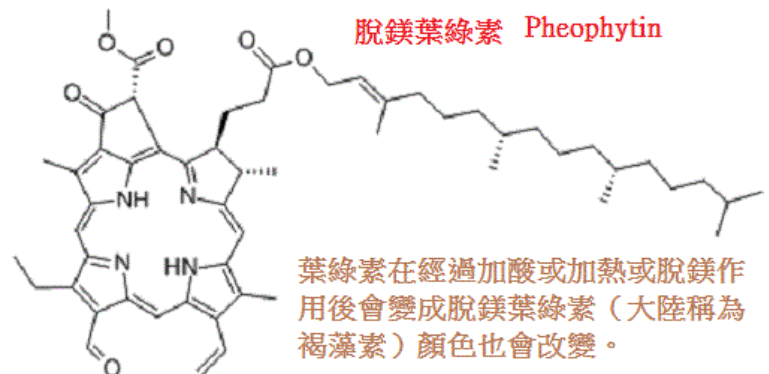
不過，葉綠素池的最大難題是葉綠素為弱電解質，一開始研發的電池原型只能產生約 0.7V 的電壓、1mA 的電流（一般電池的電流約 1200 mA）



葉綠素電池中的成份葉綠素遇水會先發生解離，使葉綠素離子化，之後才進行氧化還原反應產生電流。(電腦繪圖：姚裕評)



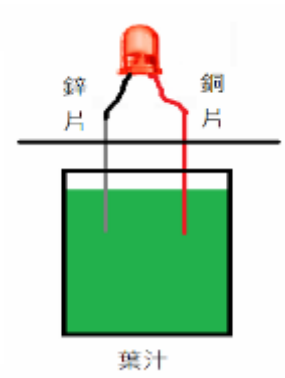
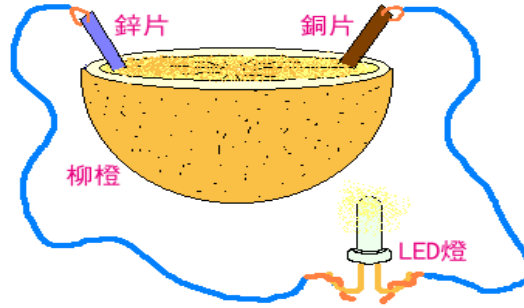
(圖 1. 葉綠素結構)



(圖 2. 脫鎂葉綠素結構)

三、本次實驗設計發想—樹葉電池

由於葉綠素電池製作上，某些程度超過我們國中生的水準，於是我們利用鋅與銅間電位的差異，模仿水果電池的製作的方法，改以各種樹葉的萃取液，為了作



為我們的電解液，以下簡稱樹葉電池，希望能更環保簡易。 (圖 3. 樹葉電池)

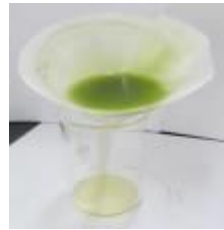
肆、實驗器材

一、實驗器材：果汁機、三用電表、燒杯、量筒、玻璃罐

二、實驗藥品：硝酸鉀、硫酸銅、食鹽、氫氧化鈉、石墨粉、鹽酸

三、實驗步驟簡示：

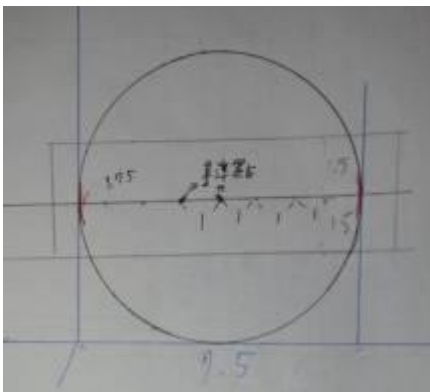
(一)收集樹葉 → (二)用果汁機打成泥 → (三)濾紙過濾 → (四)三用電表測量



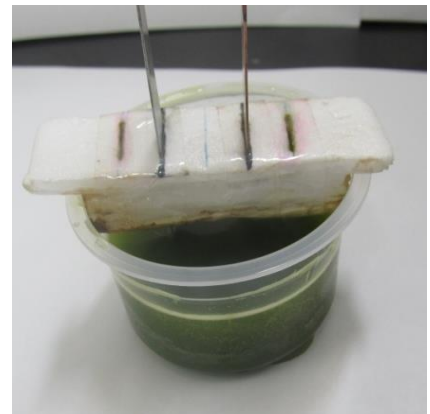
{自行設計器材} 電極支撐架

我們在實驗試作時，發現電極間的距離，會影響實驗數據甚大，於是我們利用珍珠板設計一個支架，以布丁盒為容器，以原中心為基準點，分別以 1cm 做為我們電極插入的刻度，本次實驗除了以距離為變因的實驗外，均以鋅片、與銅片相隔 2 cm，以固定距離變因。

<設計手稿>



<支撐架設計>



伍、研究過程與結果

一、研究不同樹葉種類對於樹葉電池發電的影響

※實驗步驟：

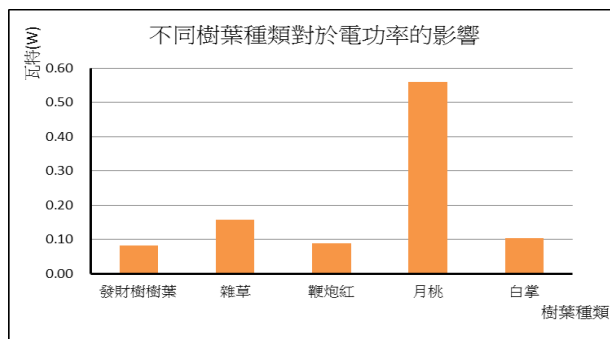
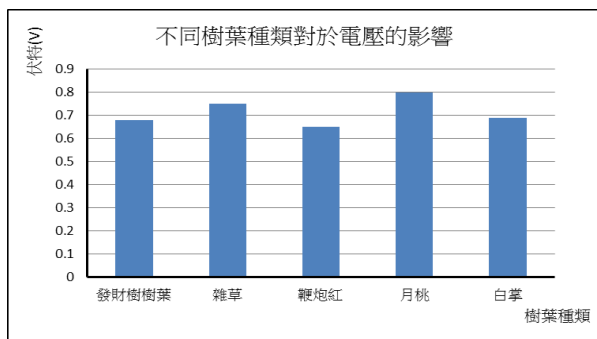
1. 我們分別取 300mL 的水、50 公克 5 種不同的校園樹葉(發財樹、雜草、鞭炮紅樹葉、白掌、月桃葉)，放到果汁機中打成汁過濾後。



2. 過濾完後，取 35 毫升的濾液，加入 15 毫升的水，放入自製電池模具中測量。

※實驗結果：

樹葉名稱	發財樹樹葉	雜草	鞭炮紅樹葉	月桃	白掌
水	15ml	15ml	15ml	15ml	15ml
葉子(汁)	35ml	35ml	35ml	35ml	35ml
電壓 (V)	0.68	0.75	0.65	0.8	0.69
電流 (I)	0.12	0.21	0.135	0.7	0.15
功率	0.0816	0.1575	0.08775	0.56	0.1035



1. 我們發現五種樹葉電壓差異不大，均在 $0.7 \pm 0.1V$ 附近。
2. 就電池發電功率來說，其中以月桃葉的發電功率最佳。

二、研究不同樹葉的濃度對於樹葉電池發電的影響

1. 我們分別取 300mL 的水、50 公克 5 種不同的校園樹葉(發財樹、雜草、鞭炮紅樹葉、白掌、月桃葉)，放到果汁機中打成汁過濾後。

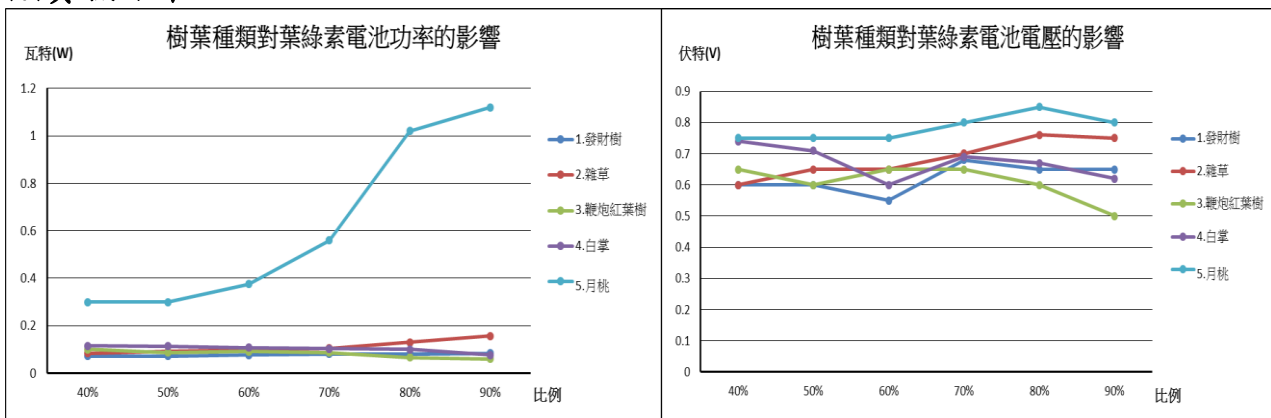
2. 過濾完後，以下表不同體積的比例，作為配方，放入自製電池模具中測量。

		一	二	三	四	五	六
體積比例		40%	50%	60%	70%	80%	90%
	水	30mL	25mL	20mL	15mL	10mL	5mL
	樹葉濾液	20mL	25mL	30mL	35mL	40mL	45mL

※實驗結果

		一	二	三	四	五	六
體積比例		40%	50%	60%	70%	80%	90%
	水	30mL	25mL	20mL	15mL	10mL	5mL
	樹葉濾液	20mL	25mL	30mL	35mL	40mL	45mL
1.發財樹	電壓 (V)	0.6	0.6	0.55	0.68	0.65	0.65
	電流 (A)	0.12	0.12	0.14	0.12	0.125	0.13
	功率 (W)	0.072	0.072	0.077	0.0816	0.08125	0.0845
2.雜草	電壓 (V)	0.6	0.65	0.65	0.7	0.76	0.75
	電流 (A)	0.14	0.14	0.15	0.15	0.172	0.21
	功率 (W)	0.084	0.091	0.0975	0.105	0.13072	0.1575
3.鞭炮紅樹葉	電壓 (V)	0.65	0.6	0.65	0.65	0.6	0.5
	電流 (A)	0.155	0.145	0.14	0.135	0.11	0.12
	功率 (W)	0.10075	0.087	0.091	0.08775	0.066	0.06
4.白掌葉	電壓 (V)	0.74	0.71	0.6	0.69	0.67	0.62
	電流 (A)	0.155	0.16	0.18	0.15	0.15	0.125
	功率 (W)	0.1147	0.1136	0.108	0.1035	0.1005	0.0775
5.月桃葉	電壓 (V)	0.75	0.75	0.75	0.8	0.85	0.8
	電流 (A)	0.4	0.4	0.5	0.7	1.2	1.4
	功率 (W)	0.3	0.3	0.375	0.56	1.02	1.12

※實驗結果：



1. 從數據得知不同樹葉的電壓大小變化不大，均在 $0.7 \pm 0.1V$ 附近，隨著葉汁濃度的變大，電壓僅有微小的變化。
2. 但對於樹葉電池發電的電功率，**我們發現月桃葉的濾液，效果最好。**
3. 由於實驗一、二的結果，均以月桃葉最好，下列實驗我們均以月桃葉作為我們研究的對象。

{延伸實驗 1-1} 葉子的顏色深淺是否會影響樹葉電池發電？

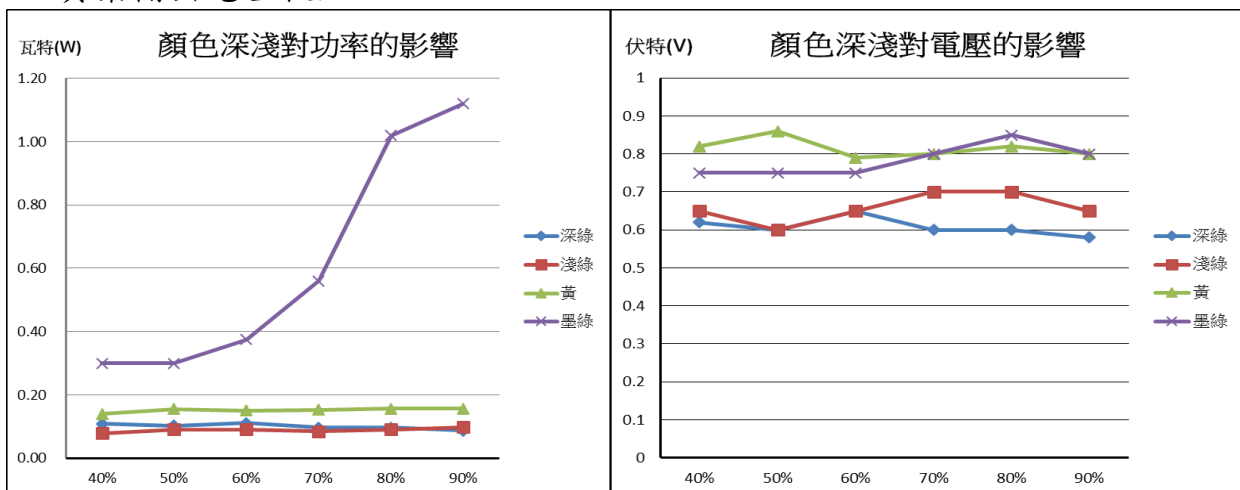
為了了解葉子顏色深淺是否為提升電池功率的主因，於是我們進行進一步的實驗，我們將月桃葉的樹葉，按照顏色等級深淺，分為淺綠、深綠、墨綠、黃色四種等級，再依實驗二的實驗步驟，再重做一次，製表後發現：

		一	二	三	四	五	六
體積比例		40%	50%	60%	70%	80%	90%
	水	30mL	25mL	20mL	15mL	10mL	5mL
	月桃葉濾液	20mL	25mL	30mL	35mL	40mL	45mL
1.深綠	電壓 (V)	0.62	0.6	0.65	0.6	0.6	0.58
	電流 (A)	0.175	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15
	功率(W)	0.1085	0.102	0.1105	0.096	0.096	0.087
2.淺綠	電壓 (V)	0.65	0.7	0.7	0.65	0.6	0.65
	電流 (A)	0.15	0.13	0.12	0.14	0.15	0.12
	功率(W)	0.0975	0.091	0.084	0.091	0.09	0.078
3.墨綠	電壓 (V)	0.8	0.85	0.8	0.75	0.75	0.75
	電流 (A)	1.4	1.2	0.7	0.5	0.4	0.4
	功率(W)	1.12	1.02	0.56	0.375	0.3	0.3
4.黃	電壓 (V)	0.8	0.82	0.8	0.79	0.86	0.82
	電流 (A)	0.195	0.19	0.19	0.19	0.18	0.17
	功率(W)	0.156	0.1558	0.152	0.1501	0.1548	0.1394

1. 以發電功率來說，我們發現電功率跟葉子顏色深淺有關係「墨綠 > 深綠 > 淺綠」。

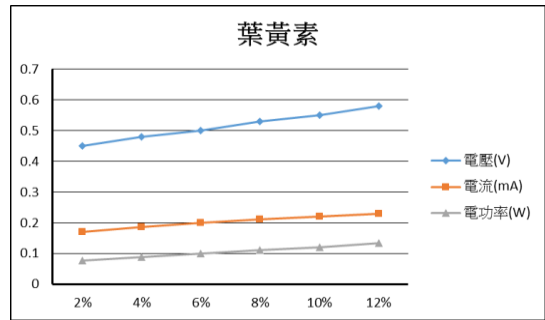
2. 此外，我們更意外的發現，原來枯黃的樹葉亦有助於發電功效，而電功率依序為「墨綠 > 黃 > 深綠 > 淺綠」。

3. 以電壓來說，彼此之間差異性不大多維持在 (0.7±0.1V) 間，其中以墨綠及黃葉輸出電壓較大。



{延伸實驗 1-2} 黃葉素是否可以幫助樹葉電池發電？

由於在延伸實驗 1-1 中，我們意外的發現黃葉竟然也可協助發電，而且功率還不小，在我們詢問生物老師後得知「葉黃素的增加，是植物變黃的主因」，於是我們利用市售的葉黃素，配成飽和溶液後，按照不同比例調配電解液，重複實驗二的步驟，結果顯示，隨著葉黃素的比例增加，電壓、功率也會隨之增加，因此可得知**葉黃素確定為可幫助化學電池發電變因一。**



		一	二	三	四	五	六
體積比例		2%	4%	6%	8%	10%	12%
	水	45mL	40mL	35mL	30mL	25mL	20mL
	葉黃素汁	5mL	10mL	15mL	20mL	25mL	30mL
葉黃素	電壓 (V)	0.45	0.48	0.5	0.53	0.55	0.58
	電流 (A)	0.17	0.185	0.2	0.21	0.22	0.23
	功率(W)	0.0765	0.0888	0.1	0.1113	0.121	0.1334

{延伸實驗 1-3} 不同萃取法是否影響化學電池發電？

為了解不同的萃取法是否會影響化學電池的發電，於是們將實驗一中 300mL 的水取代變為不同濃度的酒精（或丙酮）水溶液，如下表所示，重複實驗二

	一	二	三	四	五	六	七
水(mL)	300	250	200	150	100	50	0
酒精或丙酮 (mL)	0	50	100	150	200	250	300
體積比例	0%	16.67%	33.33%	50%	66.67%	83.33%	100%

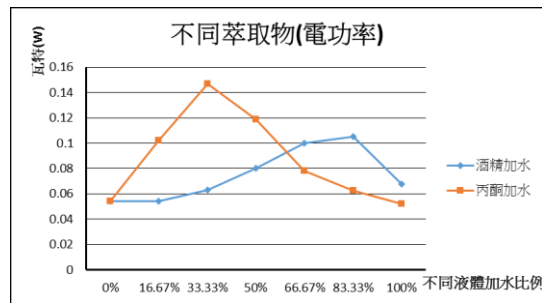
※實驗結果

比例	體積比例	一	二	三	四	五	六	七
1.酒精	電壓 (V)	0.45	0.45	0.45	0.5	0.5	0.5	0.45
	電流 (A)	0.12	0.12	0.14	0.16	0.2	0.21	0.15
	功率(W)	0.054	0.054	0.063	0.08	0.1	0.105	0.0675
2.丙酮	電壓 (V)	0.45	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4
	電流 (A)	0.12	0.17	0.21	0.17	0.13	0.125	0.13
	功率(W)	0.054	0.102	0.147	0.119	0.078	0.0625	0.052

1. 酒精水溶液以 83.3%、丙酮水溶液以 33.3% 萃取效果最好。
2. 純酒精或純丙酮萃取後的電解液效果反而不佳。



圖.隨著酒精濃度提升，萃取顏色越深



三、研究不同的添加物對於樹葉電池的影響

(一) 添加不同果汁對於樹葉電池的影響

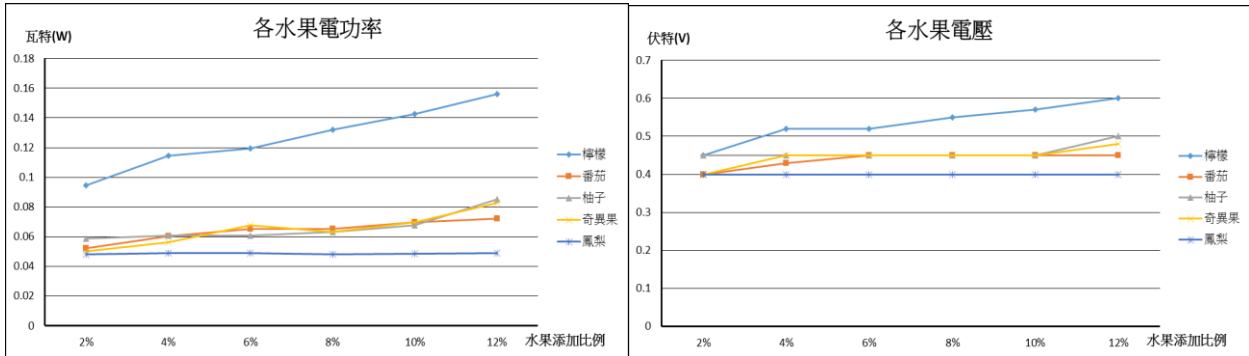
我們根據延伸實驗 1-3，以體積比例 83.3% 的酒精濃度，進行以下實驗。

※實驗步驟

1. 配置體積比例 83.3% 的酒精水溶液。
2. 我們分別取 300mL 的酒精水溶液、50 公克的月桃葉，放到果汁機中打成汁過濾。
2. 添加不同類的現榨果汁（檸檬、番茄、柚子、奇異果、鳳梨），依不同比例加入月桃葉萃取液（如下表所示），放入自製電池模具中測量

		一	二	三	四	五	六
體積比例		2%	4%	6%	8%	10%	12%
	月桃酒精濾液	49mL	48mL	47mL	46mL	45mL	44mL
	果汁	1mL	2mL	3mL	4mL	5mL	6mL
1.檸檬汁	電壓 (V)	0.45	0.52	0.52	0.55	0.57	0.6
	電流 (A)	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
	功率(W)	0.0945	0.1144	0.1196	0.132	0.1425	0.156
2.番茄汁	電壓 (V)	0.4	0.43	0.45	0.45	0.45	0.45
	電流 (A)	0.13	0.14	0.145	0.145	0.155	0.16
	功率(W)	0.052	0.0602	0.06525	0.06525	0.06975	0.072
3.柚子汁	電壓 (V)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5
	電流 (A)	0.13	0.135	0.135	0.14	0.15	0.17
	功率(W)	0.0585	0.06075	0.06075	0.063	0.0675	0.085
4.奇異果汁	電壓 (V)	0.4	0.45	0.45	0.45	0.45	0.48
	電流 (A)	0.125	0.125	0.15	0.14	0.155	0.172
	功率(W)	0.05	0.05625	0.0675	0.063	0.06975	0.08256
5.鳳梨汁	電壓 (V)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	電流 (A)	0.12	0.122	0.122	0.12	0.121	0.122
	功率(W)	0.048	0.0488	0.0488	0.048	0.0484	0.0488

※實驗結果



1. 加入檸檬汁後，效果最好，無論電功率及電壓均隨著檸檬汁濃度而增加。
2. 加入鳳梨汁，效果最差，電功率及電壓無論濃度的增加，均無變化。
3. 而添加番茄汁、柚子汁、奇異果汁則效果有限。

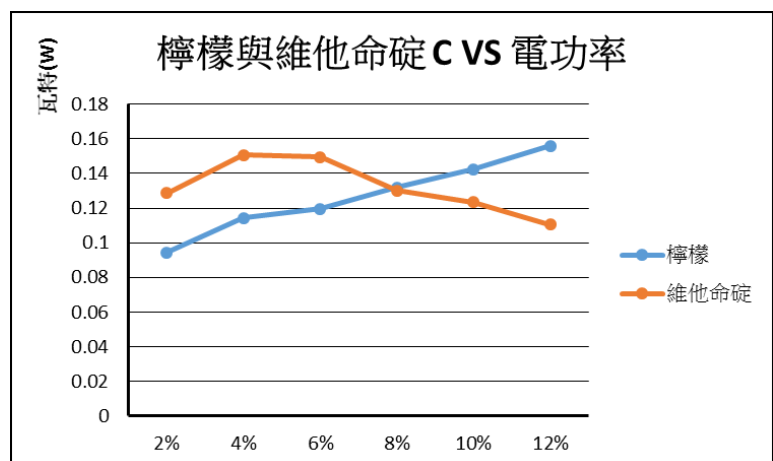
{延伸實驗 2-1} 是檸檬中的維他命 C 提升樹葉電池功率嗎?

檸檬中富含維他命 C，我們懷疑是否為檸檬中的維他命 C 有助於提升化學電池功率，於是我們以市售的維他命 C 錠，配成飽和溶液，依實驗二中的實驗步驟，進行實驗，實驗數據如下表。

		一	二	三	四	五	六
體積比例		2%	4%	6%	8%	10%	12%
	月桃酒精濾液	49mL	48mL	47mL	46mL	45mL	44mL
	飽和維他命 c 溶液	1mL	2mL	3mL	4mL	5mL	6mL
維他命 c 錠	電壓 (V)	0.56	0.58	0.65	0.65	0.65	0.65
	電流 (A)	0.23	0.26	0.23	0.2	0.19	0.17
	功率(W)	0.1288	0.1508	0.1495	0.13	0.1235	0.1105

※實驗結果：

我們將添加檸檬與維他命 C 做比較，研究後發現，隨著維他命 C 濃度增加，有助於電壓的增加，卻會造成功率率的下降，由此可推論**檸檬中的維他命 C 並不是提升樹葉電池功率的主因**。



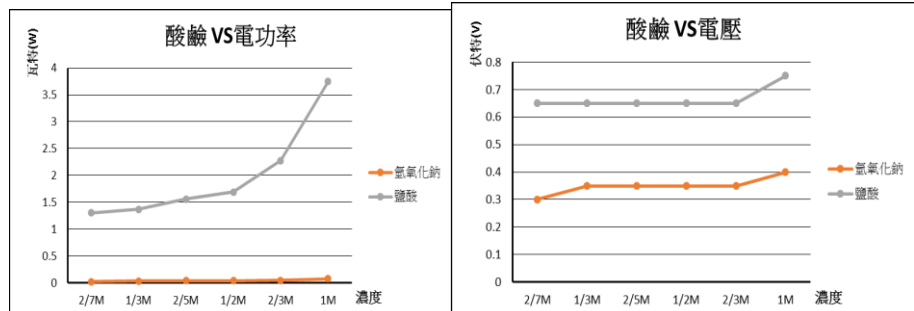
{延伸實驗 2-2}是酸、鹼性提升樹葉電池功率嗎?

此外檸檬汁是酸性的，因此我們另一項疑問，月桃葉萃取物會因酸、鹼性的而影響樹葉電池的功率或電壓嗎？因此我們利用鹽酸（HCl）、氫氧化鈉（NaOH）做為酸鹼性的代表，實驗數據如下表，研究結果發現：

		一	二	三	四	五	六
酸鹼濃度		2/7M	1/3M	2/5 M	1/2M	2/3M	1M
	月桃酒精濾液	40mL	40mL	40mL	40mL	40mL	40mL
比例	酸(鹼)體積	10mL	10mL	10mL	10mL	10mL	10mL
1.鹽酸	電壓 (V)	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.75
	電流 (A)	2	2.1	2.4	2.6	3.5	5
	功率(W)	1.3	1.365	1.56	1.69	2.275	3.75
2.氫氧化鈉	電壓 (V)	0.3	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4
	電流 (A)	0.07	0.09	0.1	0.11	0.12	0.18
	功率(W)	0.021	0.0315	0.035	0.0385	0.042	0.072

1. 鹼性環境使月桃葉萃取物產生沉澱，造成電阻變大，電流極小。
2. 酸性環境除了提升輸出電壓外，也大幅提升樹葉電池的電功率。
3. 因此我們推論，檸檬中的**酸性物質是提升樹葉電池功率、電壓的主因**。

圖.月桃葉萃取物遇鹼沉澱



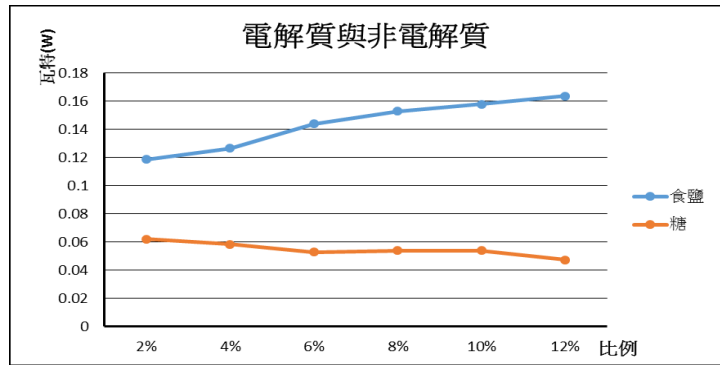
{延伸實驗 2-3}是電解質提升樹葉電池功率嗎?

我們進一步探討，檸檬酸是電解質，於是我們擴大研究，月桃葉萃取物會因添加電解質而影響樹葉電池的功率或電壓嗎？因此我們利用飽和食鹽（NaCl）、飽和糖水做為電解質、非電解質的代表，實驗數據如下表，研究結果發現：

體積比例		2%	4%	6%	8%	10%	12%
	月桃酒精濾液	49mL	48mL	47mL	46mL	45mL	44mL
	飽和溶液	1mL	2mL	3mL	4mL	5mL	6mL
1.飽和食鹽水	電壓 (V)	0.54	0.55	0.6	0.6	0.62	0.63
	電流 (A)	0.22	0.23	0.24	0.255	0.255	0.26
	功率(W)	0.1188	0.1265	0.144	0.153	0.1581	0.1638
2.飽和糖水	電壓 (V)	0.45	0.45	0.44	0.45	0.45	0.43
	電流 (A)	0.138	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11
	功率(W)	0.0621	0.0585	0.0528	0.054	0.054	0.0473

*實驗結果

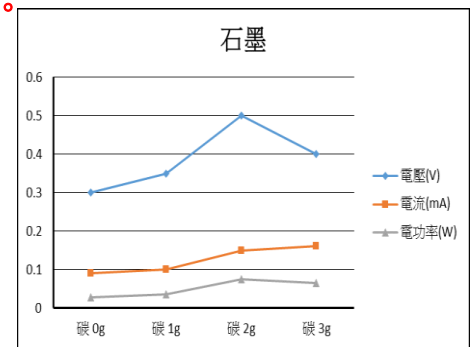
1. 隨著食鹽的比例增加，有助於提升樹葉電池的電功率。
2. 隨著糖的比例增加，降低了樹葉電池的電功率。
3. 因此我們推論，添加電解質進入樹葉電池有助於提升發電功率。



{延伸實驗 2-4} 添加石墨會提升樹葉電池功率嗎?

我們再試著添加非電解質、卻可導電的石墨粉，如下表，隨著**石墨粉的增加**雖有助於功率的提升，添加石墨的功率大小仍是偏低。

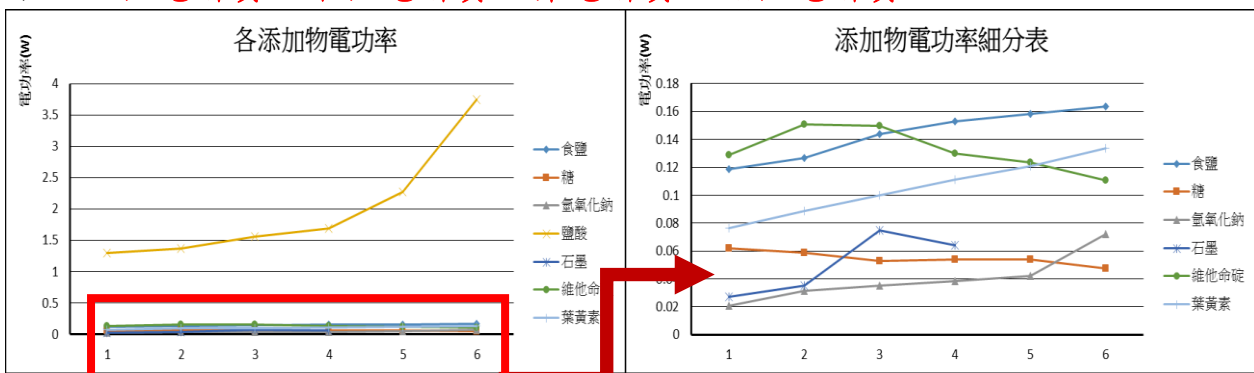
		一	二	三	四
	石墨粉	0g	1g	2g	3g
	月桃酒精濾液	50mL	50mL	50mL	50mL
石墨	電壓 (V)	0.3	0.35	0.5	0.4
	電流 (A)	0.09	0.1	0.15	0.16
	功率(W)	0.027	0.035	0.075	0.064



※{綜合討論}

我們嘗試把先前添加過的物品，整理成總表，我們推論：

1. 月桃葉萃取液添加電解質中，有助於提升發電效能，尤其含有酸性物質的「H⁺」，對於提升樹葉電池的效果最好，添加含有鹼性物質的「OH⁻」最差。
2. 若再做更一步的細分，我們發現添加物，對於提升樹葉電池功率成效依序如下：**酸性電解質 > 中性電解質 > 非電解質 > 鹼性電解質**



(二)添加洋菜粉對於化學電池發電的影響

先前由於我們均使用月桃葉液作為我們樹葉電池的填充物，由於液態的樹葉電池難以攜帶，於是我們試著添加入洋菜粉，使其變成樹葉果凍電池，並進行下列實驗，以研究添加洋菜粉是否會造成發電功率的影響。



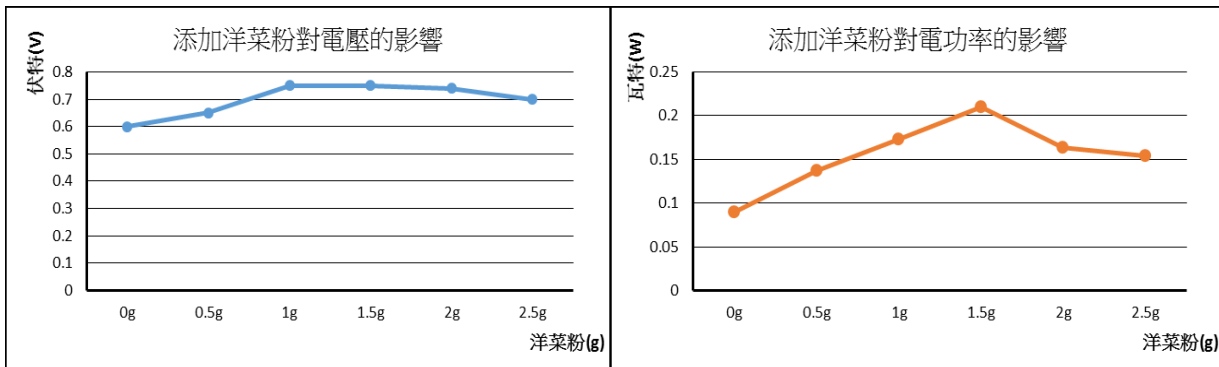
※ 實驗步驟

1. 取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，打成汁過濾後。
2. 取 50mL 的月桃葉濾液加入不同重量的洋菜粉後，加熱 10 分鐘後，待冷卻。
3. 放入自製電池模具中測量。

		一	二	三	四	五	六
洋菜粉(g)		0g	0.5g	1g	1.5g	2g	2.5g
月桃葉濾液		50mL	50mL	50mL	50mL	50mL	50mL
	電壓 (V)	0.6	0.65	0.75	0.75	0.74	0.7
	電流 (A)	0.15	0.21	0.23	0.28	0.22	0.22
	功率(W)	0.090	0.137	0.173	0.210	0.163	0.154

※ 實驗結果

1. 我們實驗發現利用酒精萃取出來的月桃濾液，添加入洋菜粉無法凍化。於是，這次我們改採利用水萃取出來的月桃濾液，來加入洋菜粉使其凍化。
2. **添加洋菜粉有助於提升樹葉電池的電壓及功率，尤其以添加洋菜粉 1.5g 效果最好。**



{延伸實驗 2-5} 樹葉果凍電池需多久時間達到最佳歷程?

我們想繼續探討，添加洋菜粉後，要多久可以達成最佳狀態，可使用多並觀察放電的歷程為何?繼續做此延伸實驗：

※ 實驗步驟

1. 取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，打成汁過濾後。
2. 取 50mL 的月桃葉濾液加入 1.5g 的洋菜粉後，加熱 10 分鐘後，待冷卻。
3. 放入自製電池模具中測量。

時間(分)	樹葉電池(液態)			樹葉電池(果凍化)		
	電流(A)	電壓(V)	功率(W)	電流(A)	電壓(V)	功率(W)
0	0.2	0.5	0.1	0.18	0.6	0.108
10	0.2	0.55	0.11	0.19	0.6	0.114
20	0.19	0.6	0.114	0.2	0.6	0.12
30	0.18	0.6	0.108	0.2	0.6	0.12
40	0.16	0.6	0.096	0.21	0.6	0.126
50	0.15	0.55	0.0825	0.21	0.65	0.1365
60	0.15	0.54	0.081	0.21	0.65	0.1365
70	0.14	0.5	0.07	0.21	0.65	0.1365
80	0.14	0.5	0.07	0.22	0.6	0.132
90	0.14	0.5	0.07	0.2	0.6	0.12
100	0.14	0.5	0.07	0.2	0.6	0.12
110	0.15	0.5	0.075	0.19	0.6	0.114
120	0.15	0.5	0.075	0.18	0.55	0.099

※實驗結果

1. 達成最佳狀態時間來說：

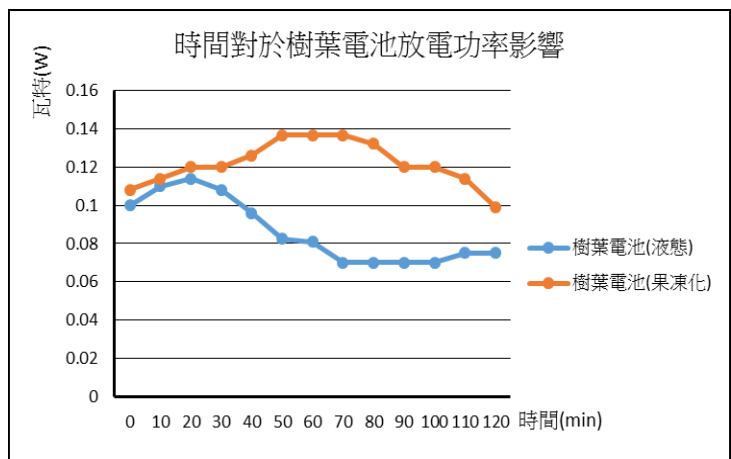
我們發現液態的樹葉電池(20 分)快於凍化樹葉電池(50 分)。

2. 以提供最大功率來說：

凍化樹葉電池(0.136W) > 液態樹葉電池(0.114W)，

3. 以放電持續力來看：

凍化樹葉電池開始衰退時間(70 分始)長於液態樹葉電池電池開始衰退時間(20 分始)，凍化樹葉電池可延長放電時間。



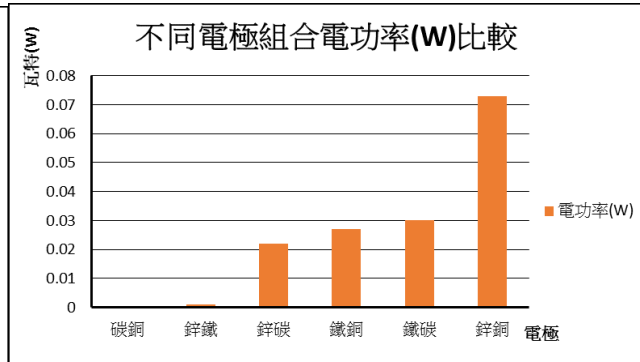
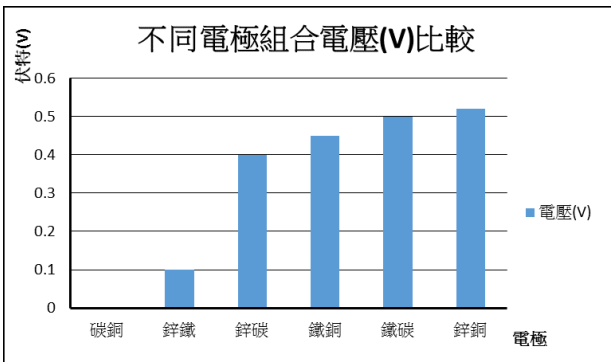
四、研究不同的電極組合對於葉綠素電池發電的影響



※實驗步驟

1. 我們分別取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，放到果汁機中打成汁過濾，取 50 cc 的濾液。
2. 更換不同的電極組合（如下表所示），放入自製電池模具中測量。

		一	二	三	四	五	六
	正負極	碳銅	鋅鐵	鋅碳	鐵銅	鐵碳	鋅銅
	月桃葉濾液	50mL	50mL	50mL	50mL	50mL	50mL
不同電極	電壓 (V)	0	0.1	0.4	0.45	0.5	0.52
	電流 (A)	0	0.01	0.055	0.06	0.06	0.14
	功率(W)	0	0.001	0.022	0.027	0.03	0.0728



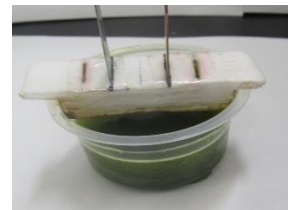
※研究結果：

1. 我們發現各種組合中，**無論電壓與電功率以鋅銅電極最佳。**

五、研究不同的電極距離對葉綠素電池發電的影響

※實驗步驟

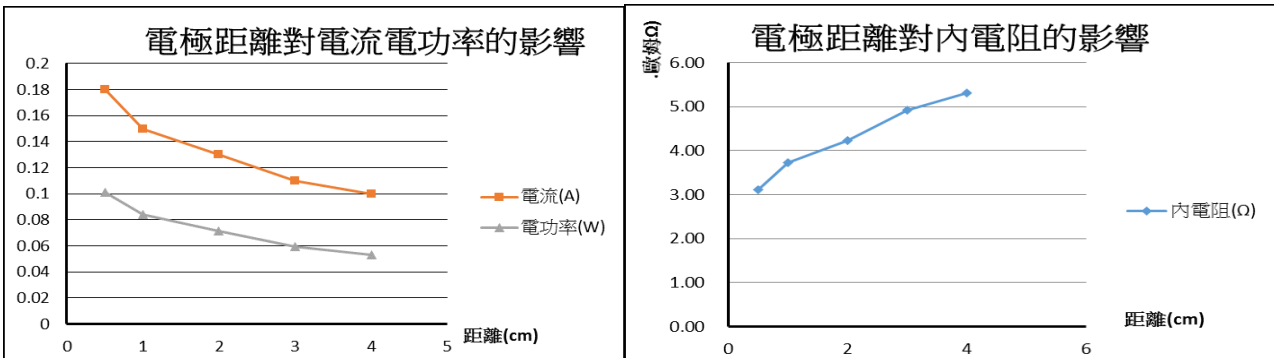
1. 我們分別取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，放到果汁機中打成汁過濾。取 50mL 倒入的自制測量器，分別調整電極間的距離（如下表所示），放入自製電池模具中測量。



		一	二	三	四	五
	月桃葉濾液	50mL	50mL	50mL	50mL	50mL
	距離	0.5cm	1cm	2cm	3cm	4cm
改變電極距離	電壓 (V)	0.56	0.56	0.55	0.54	0.53
	電流 (A)	0.18	0.15	0.13	0.11	0.1
	功率(W)	0.1008	0.084	0.0715	0.0594	0.053
	內電阻(Ω)	3.11	3.73	4.23	4.91	5.30

※實驗結果

1. 經研究發現改變電極距離影響電壓大小不大($0.55 \pm 0.01V$)，但電流跟電功率是很明顯的隨距離變大而減小。
2. 經我們換算成內電阻發現，距離越大造成系統內的電阻越大。



{延伸實驗 4-1} 研究不同的電極沒入深度對於樹葉電池發電的影響

我們做此實驗的過程中，意外發現電極沒入的深度影響樹葉電池發電狀況甚大，於是我們針對電極沒入的深度，依實驗四的研究條件再做一次，實驗步驟如下：

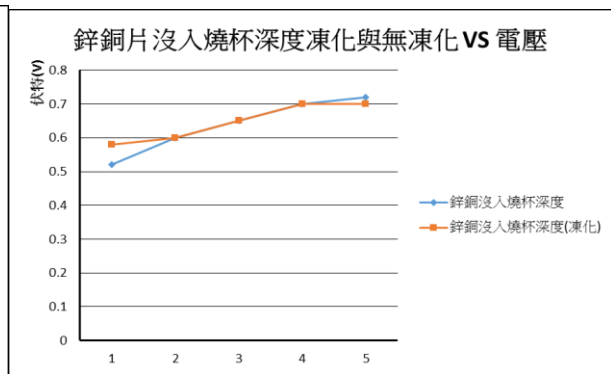
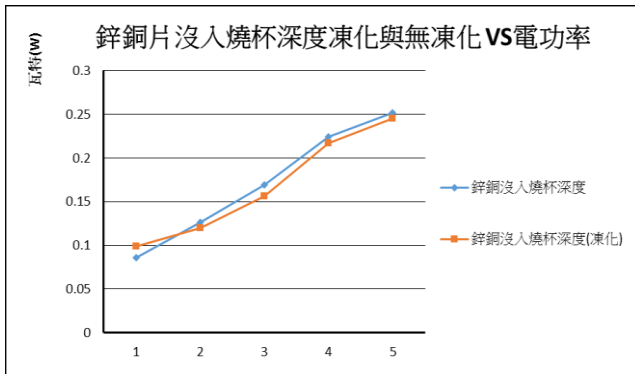
1. 分別取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，放到果汁機中打成汁過濾，放入燒杯中。
2. 量取沒入深度
3. 利用三用電表測量電壓、電流、及計算電功率。
4. 重覆實驗步驟 1-3，加入 1.5g 洋菜粉，製成樹葉果凍，再測量一次。



	葉子(汁)	50mL	50mL	50mL	50mL	50mL
	深度	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
未添加洋菜粉	電壓 (V)	0.52	0.6	0.65	0.7	0.72
	電流 (A)	0.165	0.21	0.26	0.32	0.35
	功率(W)	0.0858	0.126	0.169	0.224	0.252
添加洋菜粉	電壓 (V)	0.58	0.6	0.65	0.7	0.7
	電流 (A)	0.17	0.2	0.24	0.31	0.35
	功率(W)	0.0986	0.12	0.156	0.217	0.245

※實驗結果

1. 無論是否有果凍化，沒入的深度越深，對於樹葉電池輸出電壓、電流、電功率均有提升。
2. 綜合本系列實驗，發現電極的反應面積越大，距離越短有助於提升樹葉電池發電功率。



{延伸實驗 4-2} 需串連多少個樹葉電池方能讓 Led 燈發亮

根據延伸 4-1，我們發現加深電極沒入深度，有助於樹葉電池發電的效能，再加上我們想要研發一個可攜帶式的樹葉電池，於是我們將月桃葉汁製成果凍，進行下列實驗，實驗步驟如下：

1. 分別取 300mL 的水、50 公克的月桃葉，放到果汁機中打成汁過濾，放入燒杯中，加入 1.5g 洋菜粉，製成樹葉果凍。
2. 將電極（相隔 1 cm）插入燒杯底部，量取沒入深度約為 10cm。
3. 試著串聯樹葉電池，並接上 led 燈泡，置入密閉紙箱中，觀測發亮情形。
4. 利用三用電表測量電壓、電流、及計算電功率。

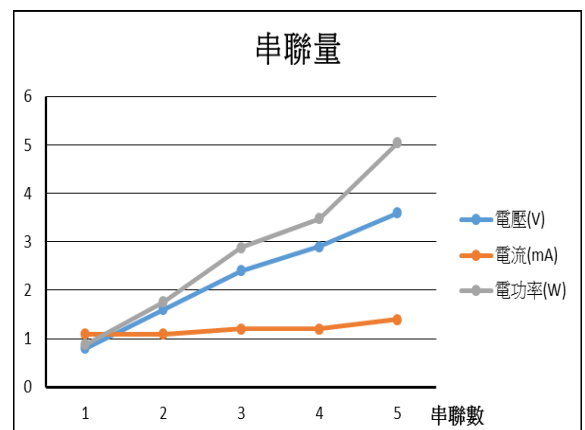
串聯量	1	2	3	4	5
電壓(V)	0.8	1.6	2.4	2.9	3.6
電流(A)	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4
電功率(W)	0.88	1.76	2.88	3.48	5.04
可否讓燈泡亮	不可	可(微量)	可	可	可

※實驗結果

1. 我們發現串聯兩個樹葉果凍即可有市售 3 號電池的輸出電壓大小。
2. 串聯 3 個以上的樹葉電池，即可讓 Led 燈泡發亮。
3. 串聯 5 個樹葉電池可讓燈泡發亮 168 小時以上。



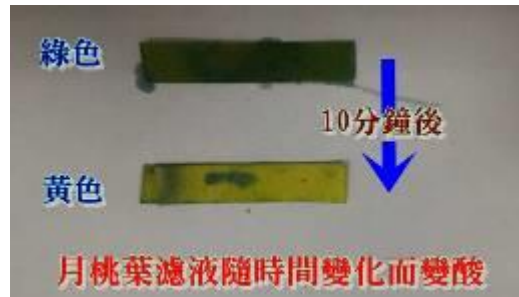
圖.串聯 5 個樹葉電池，燈泡發亮情形



陸、研究討論

一、樹葉濾液會隨時間氧化而變酸，製造容易讓葉綠素脫鎂的環境

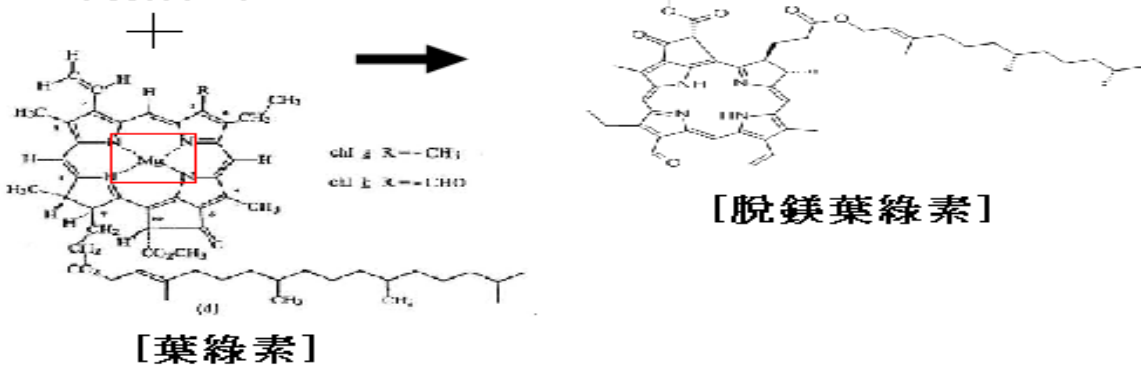
在實驗中發現，樹葉濾液(本次以月桃葉為主)若以廣用試紙測試，原先會呈現中性偏酸，但10分鐘後使廣用試紙慢慢趨近於黃色，這樣的結果引起我們的興趣。於是我們利用pH計來測量剛濾好的濾液pH約為5.8，但過了2小時後，發現pH約為5.1，很明顯的有酸化的現象，於是我們得到一個結論，樹葉濾液會隨著空氣氧化而變酸。



所以我們初步推論，本實驗中的樹葉電池反應，應為： $Zn + 2H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2$ ，是樹葉電池中的鋅片，與樹葉濾液氧化後 H^+ 進行氧化還原反應而放電，但在反應中，我們並沒有看到氫氣的產生，因此此項推論為錯誤的。

去查文獻「葉綠素紫質環中的鎂離子可被氫離子、銅離子、鋅離子所置換。酸性條件下，葉綠素分子很容易失去紫質環中的鎂成為去鎂葉綠素。用酸處理過的葉片，氫離子易進入葉綠體，置換鎂形成去鎂葉綠素，使葉片呈褐色。」因此我們進一步推論：

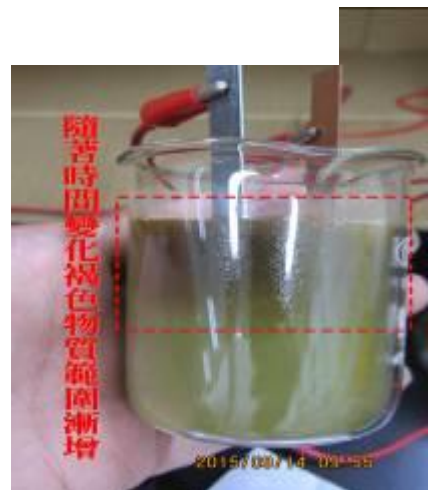
[氧化變酸 樹葉濾液]



也因此可解釋本實驗中，為何加入檸檬、鹽酸可幫助樹葉電池放電，因為加酸可幫助葉綠素脫鎂，進行下一步的反應。

二、鋅與葉綠酸銅反應為本實驗放電的主因

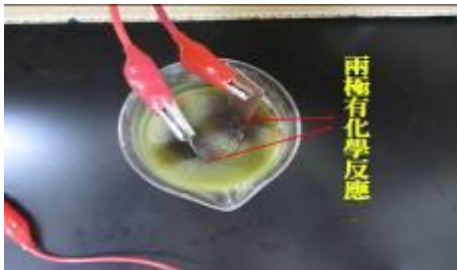
我們在果凍樹葉電池實驗中發現，隨著時間的增加，電極兩端明顯呈現變褐色的物質，而且隨著放電的時間增加，褐色物質範圍也越來越大，由於葉綠素脫鎂會讓葉綠素變褐色，可證明樹葉電池發



電與脫鎂葉綠素越來越多有關。

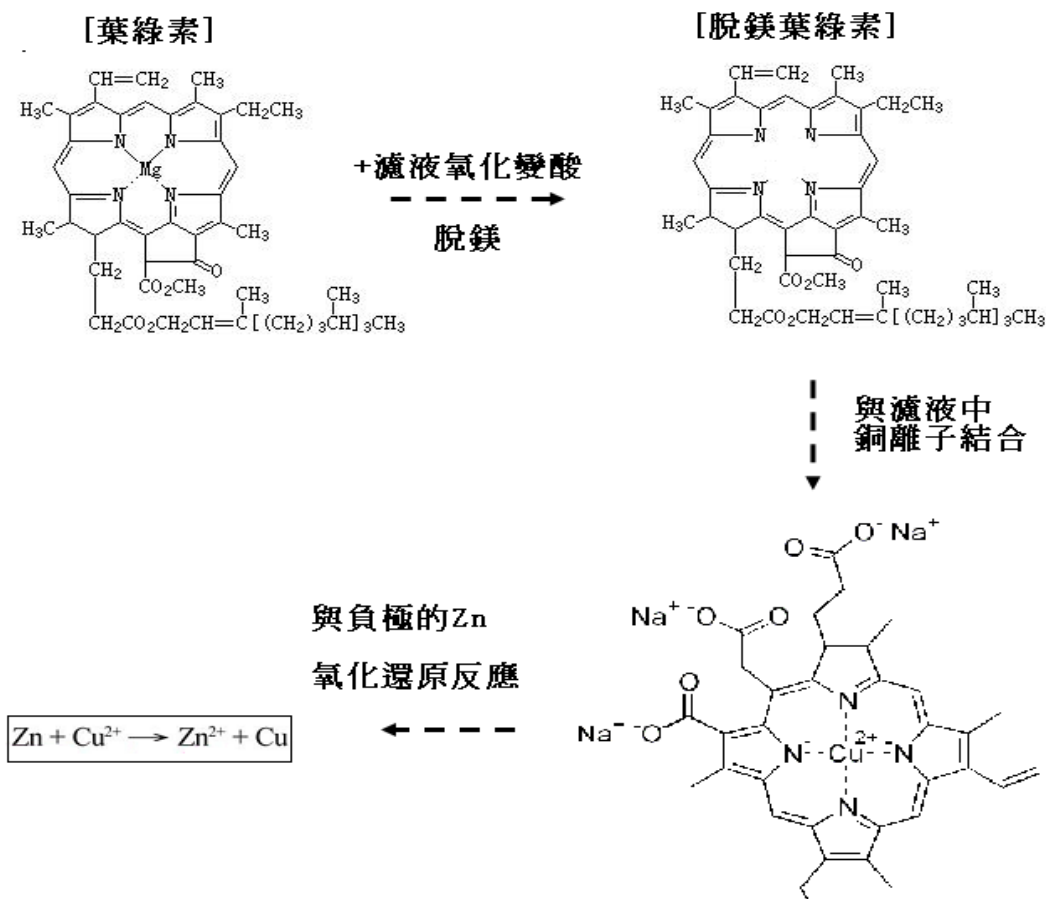
此外，更驚人的發現，在負極上的銅，竟然被鍍上一層微量的銅，但葉綠素中真的有銅離子的存在嗎？於是我們查文獻發現

- (1) 「銅為樹體內的葉綠素形成需要元素之一，作物以自由態銅離子及鉗合態吸收。」
- (2) 「天然的葉綠素穩定性較差，在高溫或酸性的條件下，葉綠素中的鎂離子會被釋出，並且變色，但以銅離子置換鎂離子後，所形成的銅錯合物，就是很穩定的化合物」。



所以我們根據文獻資料與實驗結果試著把本實驗的反應機構，拼湊而出如下所示：

1. 隨著樹葉濾液氧化變酸，使得葉綠素脫鎂。
2. 脫鎂葉綠素，與樹葉濾液中的銅離子結合成葉綠酸銅。
3. 鋅片與濾液中的葉綠酸銅（或銅離子）產生氧化還原反應，產生電能。



由於天然葉綠素在自然界中極度不穩定，也難怪本實驗在進行初期，常會因為葉綠素氧化脫鎂，發生測量電壓跳來跳去的現象，唯有在後期，加入洋菜粉凍化後，減緩了葉綠素的氧化、脫鎂現象，電壓才得以較為穩定。

三、葉綠素可視為葉綠酸的酯，能與鹼進行皂化反應，也因此為何本實驗樹葉濾液添加氫氧化鈉會產生沉澱。

柒、結論

- 一、本次以校園植物作為樹葉電池為填充物，發現以月桃葉的效果最佳，隨著濃度越大，電池提供的電壓及電功率也隨之上升。
- 二、月桃葉的顏色越深，作為樹葉電池的效果最好，但意外的是，黃葉發電效果也不錯。
- 三、月桃葉若以 83% 酒精的萃取液、33.3% 丙酮萃取液，做作為樹葉電池的效果最好，但跟水相較起來，提供的功率是下降的。
- 四、月桃葉濾液添加入酸性電解質，有助於樹葉電池的發電功率；而添加洋菜粉，除了可增加發電功率，並能使樹葉電池發電的持續力變長。
- 五、樹葉電池以鋅銅作為電極發電效果最好，而且兩極越靠近、沒入填充物越深，樹葉電池發電效果更佳。
- 六、本實驗串聯 5 個自製樹葉電池，可提供 3.6V、5.04W 的功率，並可持續發電 168 小時以上。

捌、參考資料

1. 蘇盈安、蘇盈亘(2010)。「果」真如此-動量水果電池。中華民國第 50 屆中小學科學展覽會參展作品。科學教育館：台北。
2. 吳佳臻、范宇芮、連名妤、管雅涵、游雅涵、張承涵(2013)。「雜草也能做電池？」中華民國第 53 屆中小學科學展覽會參展作品。科學教育館：台北。
3. 葉綠素簡介：<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=48452>
4. 葉綠酸簡介：<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=57943>
5. 郭重吉(2016)等編。國民中學自然與生活科技課本第六冊。台南：南一。