

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中甲組

作品名稱：「霧」出道「離」——探討超音波霧化溶液前後水中離子濃度的變化

關鍵詞：超音波霧化、離子、濃度

編 號：115JA-P005

摘要

本研究旨在探討超音波霧化對水溶液離子濃度的影響。實驗自製裝置收集霧化溶液，並測量純水的濃度差以確立誤差基準。實驗發現，鹽酸霧化前後的氫離子濃度損失隨pH值增加呈指數衰減；氫氧化鈉的氫氧根離子濃度損失亦隨pH值下降呈指數衰減。兩者主要離子的損失倍率同屬10的一次方數量級，即流失速度相當。後續以不易揮發的中性離子氯化鈉水溶液進行霧化實驗：建立「濃度－電阻」公式以推算濃度，而結果顯示氯化鈉水溶液霧化前後濃度無顯著差異。綜合所述，離子能隨霧化被帶出，但部分離子無法完全隨溶液霧化到空氣中。

壹、前言

一、研究動機：

由於超音波加濕器是許多台灣人使用的冬季設備，使用時也常會在其中加入芳香精與精油增加室內芳香，這讓我們產生了一個疑問：若加濕器內霧化的水參雜雜質的話，是否能隨著霧化過程被散佈在空氣中。因為台灣南部自來水中鈣、鎂離子含量較高，而霧化後的霧氣將被室內人員吸入，所以我們想要了解如果使用這類的水，原本存在水中的離子是否影響室內空氣組成及其影響程度，於是我們進行以下研究。

二、研究目的：

- (一) 探討自製裝置的集霧效率
- (二) 純水霧化前後的氫離子濃度變化
- (三) 鹽酸霧化前後的氫離子濃度變化
- (四) 氫氧化鈉霧化前後的氫氧根離子濃度變化
- (五) 氯化鈉水溶液霧化前後的電阻變化，探討其中離子濃度變化

三、文獻探討：

2017年由A. E. Sain等人發表的《Size and mineral composition of airborne particles generated by an ultrasonic humidifier》（超音波加濕器產生的空氣顆粒大小和礦物成分），文獻中提到超音波加濕器產生的微粒大小主要分布在可吸入範圍內的PM2.5且該尺寸微粒能長時間飄散在空氣中。而文獻提到霧化後的微粒，其化學組成直接反映了加濕器水源的成分，主要包含鈣、鎂、鈉、鉀和矽等。且使用自來水時，室內PM2.5濃度可輕易超過數百 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，遠高於環境空氣品質標準。因此，我們決定探討溶解在水中的常見離子是否真的會被霧化，以及霧化前後濃度改變的程度。

但由於手邊儀器並無法簡單測定未知濃度的鈣、鎂離子含量，在完成自製集霧器後，我們首先選擇可以被簡易pH計測量的氫離子，測量霧化前後水溶液的pH變化及氫離子濃度差，以分析變化機制。


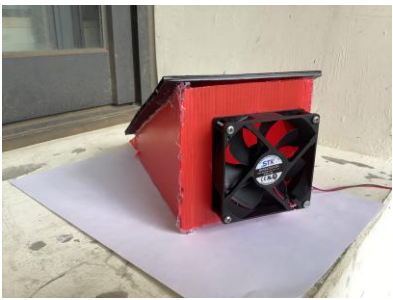
貳、研究設備及器材

一、實驗器材

各濃度鹽酸 HCl	氫氧化鈉顆粒 NaOH	氯化鈉 NaCl粉末
酸鹼測計 (pH計)	燒杯	電子秤
圓頭超音波霧化器	捕霧網 (針織遮光網 50%)	12V風扇
瓦楞板	塑膠水盆	純水
防水噴霧	市售霧化器masonic MU303	吸濾瓶
水管	培養皿	電阻
電源供應器	Arduino	

二、器材定義:

裝置五中的器材多為自製，定義以下名稱來代稱：

集水板 (黏捕霧網、噴防水噴霧)	斜狀屋頂+風扇 (可以引導水霧至集水板)	超音波霧化器 (24V 500ml/h)
		

參、研究過程與結果

實驗一：探討自製裝置的集霧效率

實驗一-1：探討自製裝置的集霧效率

一、實驗目的：測試並比較不同集霧裝置的集霧效率。



二、實驗步驟：

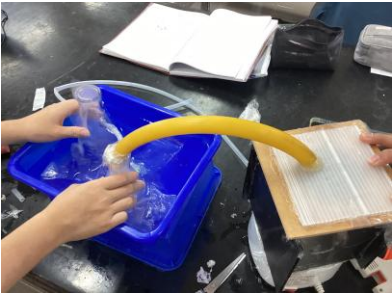
(一) 利用市售超音波霧化器製造水霧

(二) 將水霧通過捕霧裝置，聚集並收集

(三) 測量所收集到的液體重量並計算每種收集方法在10分鐘內的集霧效率

三、實驗裝置：

	裝置照片	裝置說明
裝置一		將水管上方一半黏到培養皿上，稍微留縫隙讓空氣可以流通，並讓水霧附著在培養皿聚集後落下。
裝置二		使用管子讓霧化器產生的水霧朝捕霧網噴霧，讓其附著於網子上滴下。
裝置三		將捕霧網覆蓋在水管管口上，使用培養皿收集水霧。

裝置四		將管子連接一吸濾瓶，並將兩吸濾瓶用管子連通，浸泡於冰水中，運用冷凝集霧。
-----	---	--------------------------------------

	測試一 (g/10min)	測試二 (g/10min)	測試三 (g/10min)	平均 (g/10min)
裝置一	2.23	1.80	2.16	2.0
裝置二	0.0	推測此裝置難以收集水霧，故結束實驗。		
裝置三	4.07	3.30	3.64	3.88
裝置四	2.03	1.73	1.33	1.70

表1-各裝置集霧效率

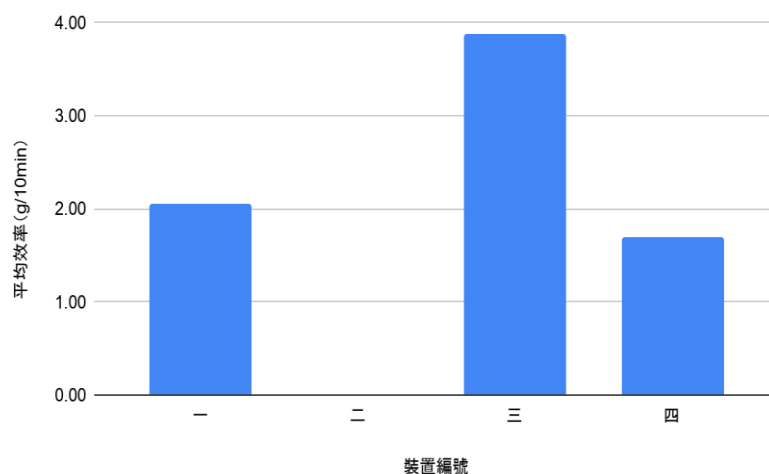


圖1-各裝置之集霧效率長條圖

四、討論:

- (一) 因為裝置三、四實驗過程需要人工手持集霧裝置，所以誤差較大。
- (二) 藉由裝置一和三比較可知捕霧網可有效提升收集效率。
- (三) 由裝置四發現空氣不流通可能導致無法使水霧順利聚集。
- (四) 比較裝置二和其他裝置，可發現裝置二的集霧裝置較開放，可能使水霧過多溢散，導致無法成功收集。

(五) 因為裝置四瓶身長且瓶口向內縮減，難以取出全部收集到的水氣，以致收集量不如預期。

(六) 藉由裝置一和四比較可知冷凝未達預期。

五、結論:

(一) 未來裝置將改為固定式以減少人為誤差。

(二) 未來裝置將加入捕霧網以提升集霧效率。

(三) 未來裝置將加入風扇引導水霧流向集霧的地方。

(四) 未來裝置要收集至一個相對較密閉的空間。

(五) 透過這些實驗發現裝置三的集霧效率最高，因此決定在後續實驗保留培養皿及捕霧網的架設方式。

實驗一-2：比較新舊裝置的集霧效率

因為裝置三的機器效率不夠高，且含有許多人為因素，因此我們決定直接購買霧化器並自製裝置五收集。

一、**實驗目的**：測試新霧化器的收集效率，並與裝置三比較。

二、**實驗步驟**：

(一) 利用超音波霧化器製造水霧

(二) 使水霧通過捕霧裝置，讓水霧凝聚

(三) 計算在10分鐘內的集霧效率

三、**實驗裝置**：

裝置五		使用兩顆超音波霧化器，並於霧化器上裝斜狀屋頂，加強空氣的流通，並使用電風扇抽氣，使水霧吹往集水板。
-----	---	---

	測試一 (g/10min)	測試二 (g/10min)	測試三 (g/10min)	平均 (g/10min)
裝置五	17.46	18.62	17.80	17.96

表2-裝置五集霧效率

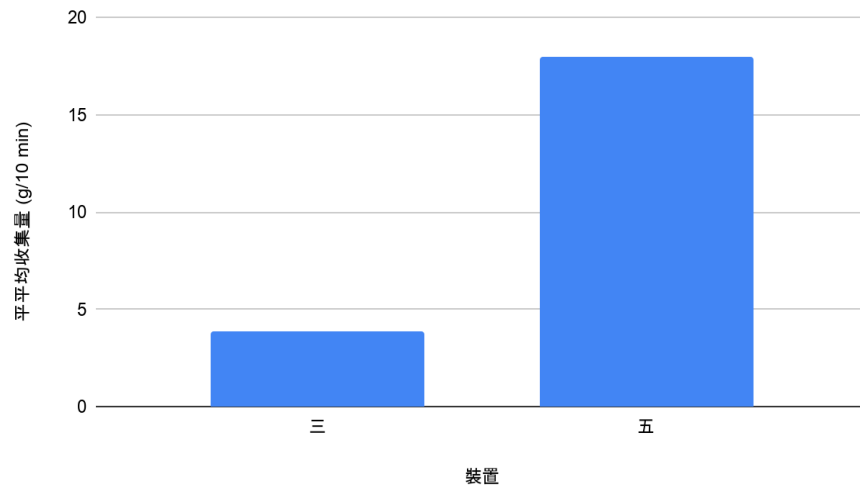


圖2-裝置三與裝置五集霧效率長條圖

四、討論：

- (一) 裝置五的霧化器可能因霧化效率較高，導致集霧效率也較高。
- (二) 裝置五因集霧裝置也較裝置三密閉，而增加了水霧接觸面積與有接觸到的量，導致效率更高。
- (三) 裝置五加裝較強的風扇使水霧較容易快速排出並收集，使集霧效率更高。

五、結論：

- (一) 透過實驗發現裝置五的集霧效率較裝置三還要更高，因此決定在後續實驗使用裝置五做後續實驗。

實驗一-3: 水位對霧化效率的影響

一、實驗目的：藉由觀察裝置內水位與霧化效率的關係，找出霧化效率最佳的水位。

二、實驗步驟：

- (一) 將整台裝置放置在電子秤上並歸零
- (二) 秤取要測量的水量，倒入固定大小的裝置內
- (三) 讓它噴霧10分鐘後，測量水的減少量 Δw (g)

三、實驗數據:

	測試一 ($\Delta w/10 \text{ min}$)	測試二 ($\Delta w/10 \text{ min}$)	測試三 ($\Delta w/10 \text{ min}$)	平均霧化量 ($\Delta w/10 \text{ min}$)
600g	40.0	42.9	42.0	41.6
650g	52.5	56.0	55.9	54.8
700g	57.6	54.7	52.0	54.8
750g	54.7	52.0	57.1	54.6
800g	50.5	50.6	51.1	50.7
850g	62.0	57.3	60.8	60.0
900g	51.5	52.3	54.5	52.8

表3-不同水量的霧化效率

四、討論：

(一) 不同水量代表不同水位，而水位造成霧化器上水壓的不同，可能為影響霧化效率的原因，另外較不易控制的變因為環境氣溫或水溫。

五、結論：

(一) 透過這個實驗，我們發現當水量為 850g時，可以使霧化量達到最高量值，其水深為 6.5cm，因此我們決定以這個水位作後續實驗。

實驗二：純水霧化前後的酸鹼度變化

一、實驗目的：藉由測量純水霧化前後的酸鹼度變化，作為空白對照組。

二、實驗步驟：

- (一) 秤取純水850g
- (二) 使用裝置五霧化純水並收集
- (三) 用 pH計測量霧化後收集到的純水酸鹼值

三、實驗數據：

	收集到的pH	裝置內的pH	原氫離子濃度 (M)	收集到的氫離子濃度 (M)	收集到的濃度差
8.04	7.67	7.65	9.12×10^{-9}	2.14×10^{-8}	1.23×10^{-8}
7.41	7.42	6.95	3.89×10^{-8}	3.80×10^{-8}	-8.86×10^{-10}
6.78	6.91	6.92	1.66×10^{-7}	1.23×10^{-7}	-4.29×10^{-8}
6.85	6.81	7.12	1.41×10^{-7}	1.55×10^{-7}	1.36×10^{-8}
6.60	7.31	6.76	2.51×10^{-7}	4.90×10^{-8}	-2.02×10^{-7}
6.56	6.80	6.78	2.75×10^{-7}	1.58×10^{-7}	-1.17×10^{-7}

表4-純水霧化前後氫離子濃度變化

四、討論：

- (一) 霧化前後水溶液濃度差 (收集) 的平均為 -5.61×10^{-8} 。
- (二) 霧化前後裝置內濃度差的平均為 -3.52×10^{-8} M。
- (三) 純水的霧化結果 (氫離子濃度) 理論上應維持相同，推測此誤差來自氣溫、pH計測量。

實驗三：鹽酸霧化前後的酸鹼度變化

一、實驗目的：藉由測量鹽酸霧化前後的酸鹼度變化，以判斷霧化後的溶液組成是否有改變，以及改變程度。

二、實驗步驟：

- (一) 使用 pH計調製各濃度鹽酸850mL
- (二) 使用裝置五將不同濃度鹽酸霧化並收集
- (三) 用 pH計測量霧化後收集到的鹽酸酸鹼值

三、實驗數據：

原 pH	收集到的 pH	裝置內的 pH	原氫離子濃度 (M)	收集到的氫離子濃度 (M)	收集到的濃度差	濃度差平均
2.00	2.09	2.03	1.00×10^{-2}	8.13×10^{-3}	1.87×10^{-3}	2.04×10^{-3}
2.00	2.27	2.16	1.00×10^{-2}	5.37×10^{-3}	4.63×10^{-3}	
2.00	2.08	2.13	1.00×10^{-2}	8.32×10^{-3}	1.68×10^{-3}	
2.00	2.18	2.14	1.00×10^{-2}	6.61×10^{-3}	3.39×10^{-3}	
2.00	2.01	2.02	1.00×10^{-2}	9.77×10^{-3}	2.28×10^{-4}	
2.00	2.02	1.96	1.00×10^{-2}	9.55×10^{-3}	4.50×10^{-4}	
3.00	3.02	3.03	1.00×10^{-3}	9.55×10^{-4}	4.50×10^{-5}	4.07×10^{-4}
3.00	2.87	3.02	1.00×10^{-3}	1.35×10^{-3}	-3.49×10^{-4}	
3.00	3.40	2.95	1.00×10^{-3}	3.98×10^{-4}	6.02×10^{-4}	
3.00	3.30	無數據	1.00×10^{-3}	5.01×10^{-4}	4.99×10^{-4}	
3.00	3.23	無數據	1.00×10^{-3}	5.89×10^{-4}	4.11×10^{-4}	
3.00	3.79	3.07	1.00×10^{-3}	1.62×10^{-4}	8.38×10^{-4}	
3.00	3.70	3.11	1.00×10^{-3}	2.00×10^{-4}	8.00×10^{-4}	
4.00	4.87	4.04	1.00×10^{-4}	1.35×10^{-5}	8.65×10^{-5}	9.28×10^{-5}
4.00	4.87	4.03	1.00×10^{-4}	1.35×10^{-5}	8.65×10^{-5}	
4.00	6.08	無數據	1.00×10^{-4}	8.32×10^{-7}	9.92×10^{-5}	

4.00	6.11	4.21	1.00×10^{-4}	7.76×10^{-7}	9.92×10^{-5}	
4.00	5.14	無數據	1.00×10^{-4}	7.24×10^{-6}	9.28×10^{-5}	
5.00	6.90	5.88	1.00×10^{-5}	1.26×10^{-7}	9.87×10^{-6}	9.46×10^{-6}
5.00	6.41	6.07	1.00×10^{-5}	3.89×10^{-7}	9.61×10^{-6}	
5.00	6.20	5.42	1.00×10^{-5}	6.31×10^{-7}	9.37×10^{-6}	
5.00	6.47	6.04	1.00×10^{-5}	3.39×10^{-7}	9.66×10^{-6}	
5.00	5.91	5.57	1.00×10^{-5}	1.23×10^{-6}	8.77×10^{-6}	
6.00	6.38	6.59	1.00×10^{-6}	4.17×10^{-7}	5.83×10^{-7}	6.83×10^{-7}
6.00	6.58	6.36	1.00×10^{-6}	2.63×10^{-7}	7.37×10^{-7}	
6.00	6.48	6.60	1.00×10^{-6}	3.31×10^{-7}	6.69×10^{-7}	
6.00	6.44	6.53	1.00×10^{-6}	3.63×10^{-7}	6.37×10^{-7}	
6.00	6.68	6.80	1.00×10^{-6}	2.09×10^{-7}	7.91×10^{-7}	

表5-不同pH值的鹽酸霧化前後氫離子濃度

pH	原濃度	收集濃度	氫離子濃度差平均
2	1.00×10^{-2}	7.96×10^{-3}	2.04×10^{-3}
3	1.00×10^{-3}	6.13×10^{-4}	4.07×10^{-4}
4	1.00×10^{-4}	7.17×10^{-6}	9.28×10^{-5}
5	1.00×10^{-5}	5.43×10^{-7}	9.46×10^{-6}
6	1.00×10^{-6}	3.17×10^{-7}	6.83×10^{-7}

表6-不同pH值的鹽酸霧化前後氫離子濃度平均

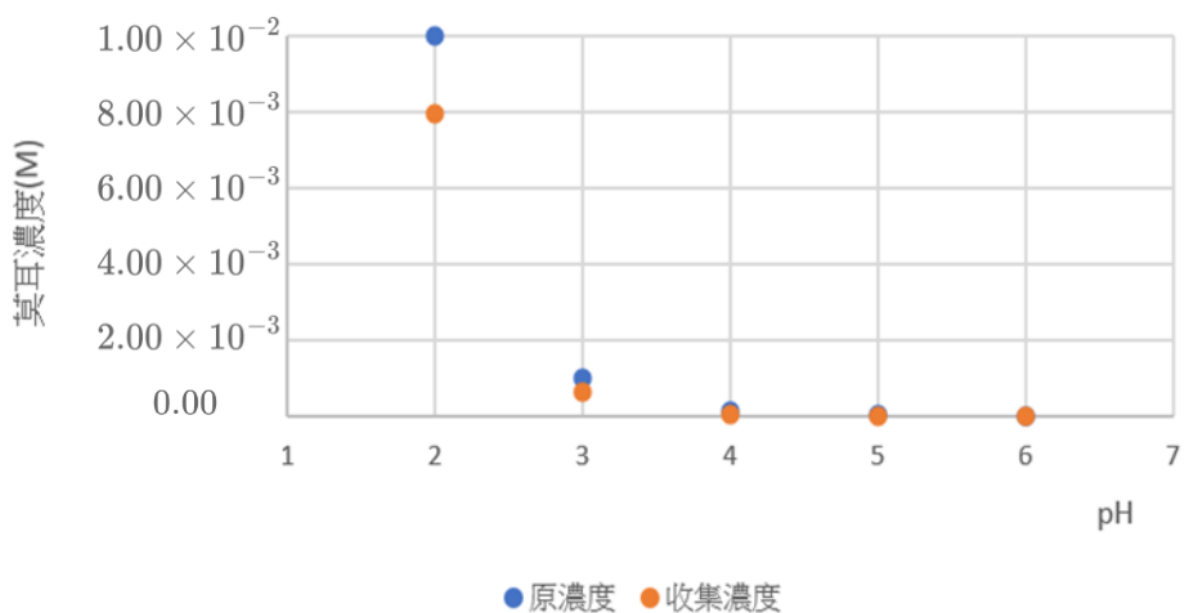


圖3-鹽酸霧化前後氫離子濃度變化

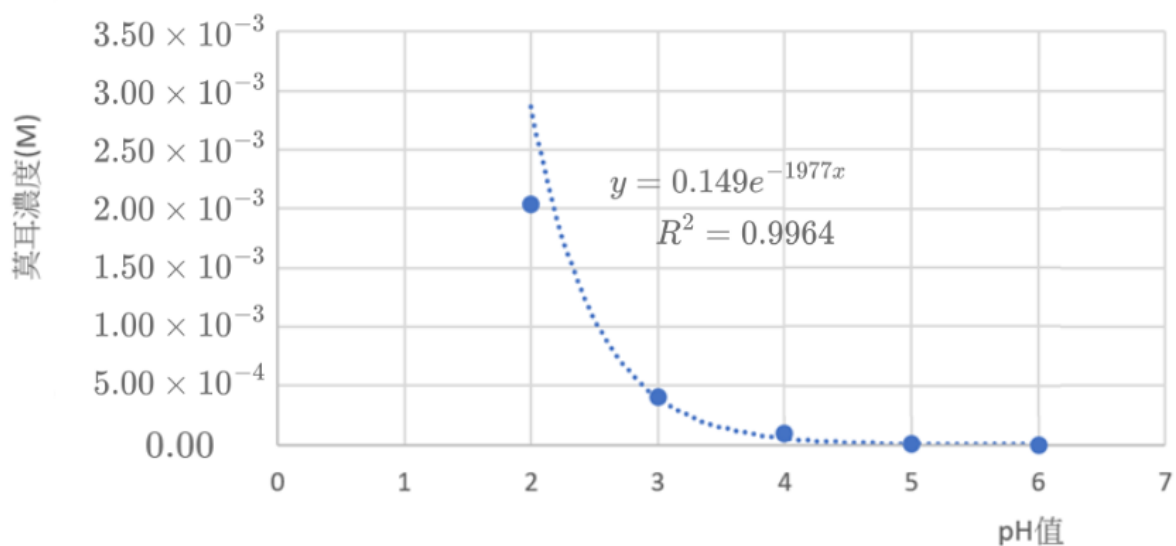


圖4-鹽酸霧化前後氫離子濃度差平均趨勢線

四、計算過程：

(一) 氫離子濃度計算 (表5)：

$$\text{原氫離子濃度 (M)} = 10^{-\text{原pH}}$$

$$\text{收集的氫離子濃度 (M)} = 10^{-\text{收集到的pH}}$$

$$\text{濃度差} = \text{原氫離子濃度 (M)} - \text{收集的氫離子濃度 (M)}$$

(二) 趨勢分析 (圖4) :

$$\text{指數趨勢線 } y = a e^{bx}$$

五、討論：

(一) 數據趨勢：

根據圖4，不同 pH值的鹽酸在霧化前後的氫離子濃度差，隨pH值越大呈現指數衰減曲線。利用其趨勢線方程式可得當pH值每增加 1，霧化前後的氫離子濃度差約會變為原 pH值的 0.138倍，即 pH值越小（越酸）的鹽酸經霧化後的氫離子損失量越大（變得越中性）。以下為變化倍率的計算過程（ Δ 為氫離子的濃度差）：

$$\frac{y_{pH+1}}{y_{pH}} = \frac{0.149 e^{-1.977(x+1)}}{0.149 e^{-1.977x}} = e^{-1.977(x+1) - (-1.977x)} = e^{-1.977} \approx 0.138$$

$$\Delta_{pH+1} \approx 0.138 \times \Delta_{pH} \quad (\Delta_{pH} \approx 7.14 \times \Delta_{pH+1}) \text{。}$$

(二) 氫離子濃度下降的原因推論：

- 1.霧化液滴表面積增大，提升了氯化氫從液滴中的揮發速率。然而，在多水霧的空間下，揮發出的氯化氫分子理論上會重新溶入水霧微滴中。且同時間，水也會從表面積大的液滴中蒸發，若水蒸發速率大於氯化氫分子揮發速率，反而會造成濃度上升。然而，我們都使用濃度不高的稀鹽酸，因此氯化氫分子揮發程度可能影響不大。
- 2.超音波霧化器產生的空蝕現象，會在水中製造無數個微小氣泡。當這些氣泡迅速產生與破裂時，會產生強大的衝擊力，將溶於水中的二氧化碳分子強行釋放出來到空氣中，即超音波的脫氣作用（degassing）。若上升原因僅是二氧化碳被去除，則不同 pH值的濃度變化量應具一致性。但在本實驗中，不同pH溶液中，氫離子濃度改變量有顯著不同。
- 3.有部分溶於水中的離子無法霧化成水霧，而留在裝置內。但若離子無法隨霧化過程移出，殘留在裝置內的離子應因霧化過程而使水分減少，導致濃度上升。但實驗觀測到裝置內殘液濃度差異不大，或有些許下降。

實驗四：氫氧化鈉霧化前後的酸鹼度變化

一、實驗目的：可以藉由測量氫氧化鈉霧化前後的酸鹼度變化，以判斷霧化後的溶液組成是否改變及其改變程度，並與前一實驗做對比。

二、實驗步驟：

- (一) 使用 pH計調製各濃度氫氧化鈉850mL
- (二) 使用裝置五將不同濃度氫氧化鈉霧化並收集
- (三) 用 pH計測量霧化後收集到的氫氧化鈉酸鹼值

三、實驗數據：

原 pH	收集到的 pH	裝置內的 pH	原氫離子濃度 (M)	收集到的氫離子濃度 (M)	收集到的濃度差	濃度差平均
13.00	12.34	12.83	1.00×10^{-13}	4.57×10^{-13}	3.57×10^{-13}	2.66×10^{-13}
13.00	12.54	無數據	1.00×10^{-13}	2.88×10^{-13}	1.88×10^{-13}	
13.00	12.26	12.75	1.00×10^{-13}	5.50×10^{-13}	4.50×10^{-13}	
13.00	12.60	12.96	1.00×10^{-13}	2.51×10^{-13}	1.51×10^{-13}	
13.00	12.55	12.92	1.00×10^{-13}	2.82×10^{-13}	1.82×10^{-13}	
12.00	10.66	11.81	1.00×10^{-12}	2.19×10^{-11}	2.09×10^{-11}	3.66×10^{-11}
12.00	10.58	11.9	1.00×10^{-12}	2.63×10^{-11}	2.53×10^{-11}	
12.00	10.19	11.83	1.00×10^{-12}	6.46×10^{-11}	6.36×10^{-11}	
11.00	9.77	10.87	1.00×10^{-11}	1.70×10^{-10}	1.60×10^{-10}	2.15×10^{-10}
11.00	9.47	10.83	1.00×10^{-11}	3.39×10^{-10}	3.29×10^{-10}	
11.00	9.78	10.87	1.00×10^{-11}	1.66×10^{-10}	1.56×10^{-10}	
10.00	7.86	9.4	1.00×10^{-10}	1.38×10^{-8}	1.37×10^{-8}	

10.00	8.08	9.78	1.00×10^{-10}	8.32×10^{-9}	8.22×10^{-9}	1.04×10^{-8}
10.00	8.03	9.48	1.00×10^{-10}	9.33×10^{-9}	9.23×10^{-9}	
9.00	8.04	7.89	1.00×10^{-9}	9.12×10^{-9}	8.12×10^{-8}	1.23×10^{-8}
9.00	7.76	7.76	1.00×10^{-9}	1.74×10^{-8}	1.74×10^{-8}	
9.00	7.87	7.67	1.00×10^{-9}	1.35×10^{-8}	2.14×10^{-8}	

表7-不同pH值的氫氧化鈉霧化前後氫離子濃度

氫氧化鈉溶液中實際發生濃度變化的主要是氫氧根離子，而非氫離子。因此，將表7的氫離子濃度改為氫氧根離子濃度，較能直接反映主導的鹼性離子變化情形，也有助於與實驗三中鹽酸的實驗結果進行比對。

原 pH	收集到 pH	原氫氧根離子濃度 (M)	收集到的氫氧根離子濃度 (M)	氫氧根離子濃度差 (M)	氫氧根離子濃度差平均
13.00	12.34	1.00×10^{-1}	2.19×10^{-2}	7.81×10^{-2}	7.00×10^{-2}
13.00	12.54	1.00×10^{-1}	3.47×10^{-2}	6.53×10^{-2}	
13.00	12.26	1.00×10^{-1}	1.82×10^{-2}	8.18×10^{-2}	
13.00	12.6	1.00×10^{-1}	3.98×10^{-2}	6.02×10^{-2}	
13.00	12.55	1.00×10^{-1}	3.55×10^{-2}	6.45×10^{-2}	
12.00	10.66	1.00×10^{-2}	4.57×10^{-4}	9.54×10^{-3}	9.67×10^{-3}
12.00	10.58	1.00×10^{-2}	3.80×10^{-4}	9.62×10^{-3}	
12.00	10.19	1.00×10^{-2}	1.55×10^{-4}	9.85×10^{-3}	
11.00	9.77	1.00×10^{-3}	5.89×10^{-5}	9.41×10^{-4}	

11.00	9.47	1.00×10^{-3}	2.95×10^{-5}	9.70×10^{-4}	9.50×10^{-4}
11.00	9.78	1.00×10^{-3}	6.03×10^{-5}	9.40×10^{-4}	
10.00	7.86	1.00×10^{-4}	7.24×10^{-7}	9.93×10^{-5}	9.90×10^{-5}
10.00	8.08	1.00×10^{-4}	1.20×10^{-6}	9.88×10^{-5}	
10.00	8.03	1.00×10^{-4}	1.07×10^{-6}	9.89×10^{-5}	
9.00	8.04	1.00×10^{-5}	1.10×10^{-6}	8.90×10^{-6}	9.20×10^{-6}
9.00	7.76	1.00×10^{-5}	5.75×10^{-7}	9.42×10^{-6}	
9.00	7.87	1.00×10^{-5}	7.41×10^{-7}	9.26×10^{-6}	

表8-不同pH值的氫氧化鈉霧化前後氫氧根離子濃度

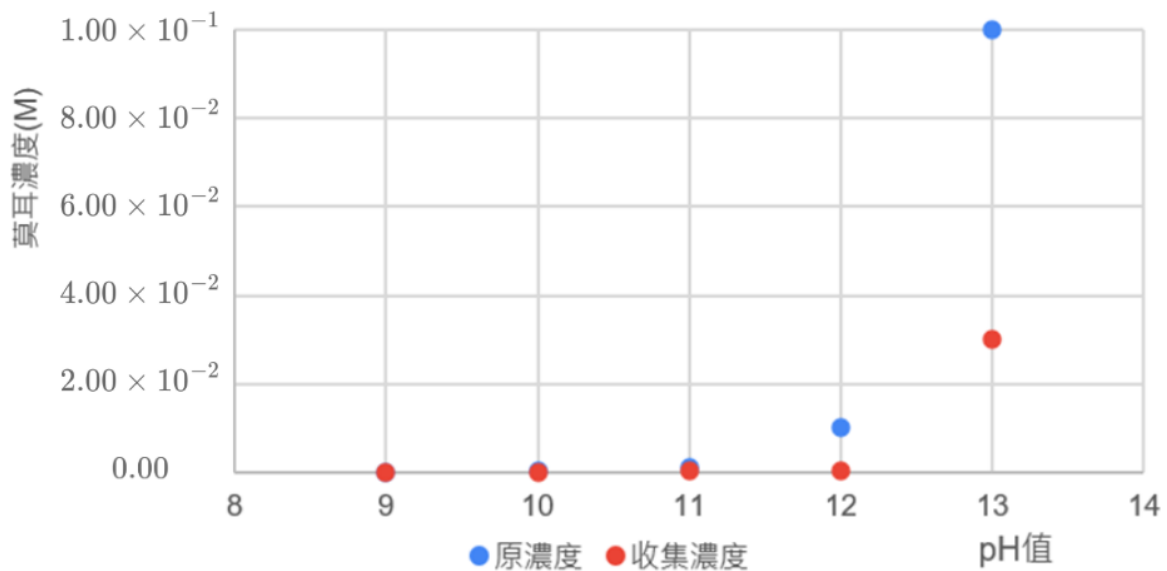


圖5-氫氧化鈉霧化前後氫氧根離子濃度變化

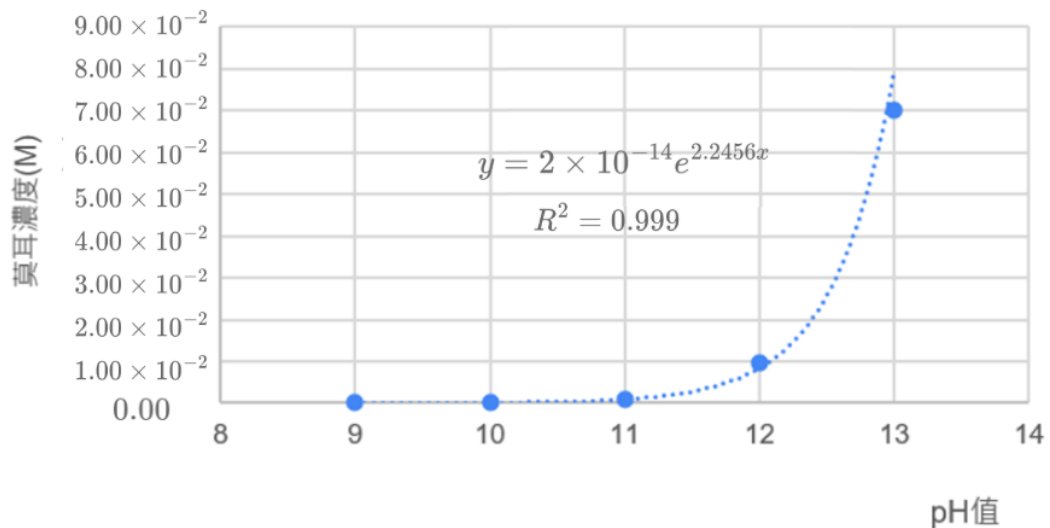


圖6-氫氧化鈉霧化前後氫氧根離子濃度差平均趨勢線

四、計算過程：

(一) 氫離子濃度計算 (表7)：

$$\text{原氫離子濃度 (M)} = 10^{-\text{原pH}}$$

$$\text{收集氫離子濃度 (M)} = 10^{-\text{收集到的pH}}$$

$$\text{濃度差} = \text{收集的氫離子濃度 (M)} - \text{原氫離子濃度 (M)}$$

氫氧根離子濃度計算 (表8)：

$$\text{原氫氧根離子濃度 (M)} = 10^{-(14-\text{原pH})}$$

$$\text{收集氫氧根離子濃度 (M)} = 10^{-(14-\text{收集到的pH})}$$

$$\text{濃度差} = \text{原氫氧根離子濃度 (M)} - \text{收集氫氧根離子濃度 (M)}$$

(二) 趨勢分析 (圖6)：

$$\text{指數趨勢線 } y = a e^{bx}$$

五、討論：

(一) 數據趨勢：

1. 根據圖6，不同 pH值的氫氧化鈉水溶液在霧化前後的氫氧根離子濃度差，隨pH值越小呈現指數衰減曲線，利用其趨勢線方程式可得當 pH值每增加 1，霧化前後的氫氧根離子濃度差約變為原 pH值的 9.029倍，即 pH值越大（越鹼）的氫氧化鈉水溶液，經霧化後的氫氧根離子損失量也

會越大（變得越中性）。以下為變化倍率的計算過程（ Δ 為氫氧根離子的濃度差）：

$$\frac{y_{pH+1}}{y_{pH}} = \frac{2 \times 10^{-14} \times e^{2.2456(x+1)}}{2 \times 10^{-14} \times e^{2.2456x}} = e^{2.2456(x+1) - 2.2456x} = e^{2.2456} \approx 9.45$$

$$\Delta_{pH+1} \approx 9.45 \times \Delta_{pH}。$$

(二) 氫氧根離子濃度下降的原因推論：

1.由於霧化後氫氧化鈉霧滴暴露在空氣中，容易吸收二氧化碳並發生酸鹼中和反應，但是每次霧化實驗過程僅花費10分鐘，而氫氧化鈉水溶液吸收二氧化碳的速率與其對 pH值產生的影響不足以支撐我們所觀測到的 pH值變化量，顯示二氧化碳並非pH值上升的唯一因素。

2.如同實驗三的討論，也有可能是脫氣效應和離子沒有被霧化而導致，但這些推論仍有疑點。

(三) 比較及分析鹽酸與氫氧化鈉水溶液之結果：

實驗三中(圖4)，鹽酸霧化前後的氫離子濃度差結果為 $\Delta_{pH+1} \approx 0.14 \times \Delta_{pH}$ ，可改寫為 $\Delta_{pH} \approx 7.14 \times \Delta_{pH+1}$ ；而實驗四中(圖6)，氫氧化鈉水溶液霧化前後的氫氧根離子濃度差結果為 $\Delta_{pH+1} \approx 9.45 \times \Delta_{pH}$ 。比較兩結果顯示：鹽酸的pH值每下降一個單位，其氫離子濃度損失量變大7.14倍；而氫氧化鈉的pH值每上升一個單位，其氫氧根濃度損失量約變大9.45倍。兩者損失倍率均屬於10的一次方數量級，故兩者損失主要離子的速度相當。

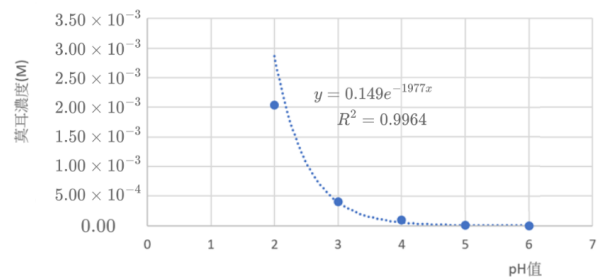
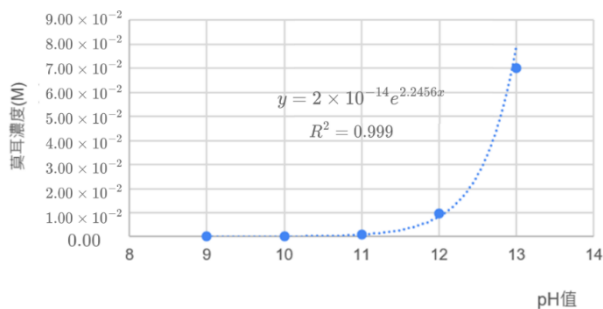


圖4、圖6

(四) 在實驗三及實驗四中，酸鹼值較容易受到揮發、酸鹼中和等化學反應或環境因素等影響。因此，後續實驗擬改用中性鹽類並測其電阻，以此排除酸鹼中和或環境因素的影響，並檢視除了氫離子、氫氧根離子外的其他離子是否能被霧化以及霧化程度。

實驗五：測量氯化鈉水溶液電阻的前置裝置

一、實驗目的：利用分壓方式測量出氯化鈉水溶液電阻。並透過建立氯化鈉水溶液濃度與電阻之關係曲線，作為後續實驗推算霧化後未知氯化鈉水溶液濃度的基準。

二、實驗步驟：

- (一) 製作Arduino uno電阻測量裝置與編修程式
- (二) 調製不同濃度的氯化鈉水溶液
- (三) 利用上述裝置測量其電阻（收取100組數據）

三、裝置圖：

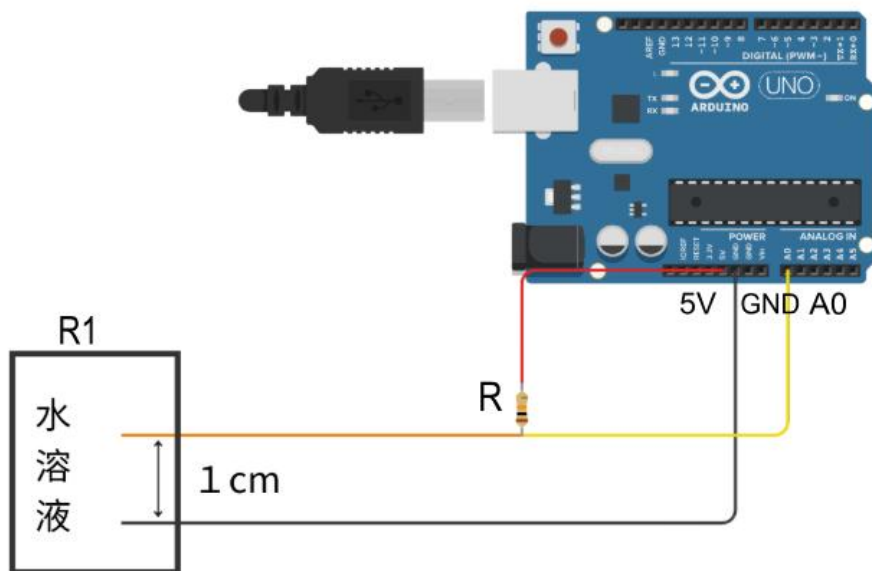


圖7-Arduino uno電阻測量裝置

10k電阻 = R

水溶液 = R1（模擬氯化鈉水溶液）

輸出電壓 = 5V = vcc

A0讀取電壓 = vOut

因兩電阻串聯：通過R的電流 = 通過R1的電流

$$V = IR$$
$$\frac{vcc - vOut}{R} = \frac{vOut}{R1}$$

四、程式：

```
// 定義類比腳位與固定電阻值
const int analogPin = A0; // 分壓點連接到 A0
const float vcc = 5.0; // Arduino 供電電壓 (5V)
const float rFixed = 10000.0; // 固定電阻值 (單位: Ohm) , 10k 歐姆

void setup () {
    Serial.begin (9600) ; // 初始化序列埠監控視窗
}

void loop () {
// 1. 讀取類比訊號 (0-1023) , 定義變數
    int analogValue = analogRead (analogPin) ;
    float vOut = 0;
    float rUnknown=0;

// 避免除以零的錯誤 (短路)
    if (analogValue == 0) {
        Serial.println ("Resistance: 0 Ohm (短路)");
    } else {
// 2. 計算分壓點電壓
        vOut = (analogValue * vcc) / 1023.0;

// 3. 根據分壓公式計算未知電阻 R_unknown = R_fixed * (vOut / (vcc - vOut))
        rUnknown = rFixed * (vOut / (vcc - vOut)) ;
// 4. 輸出結果
        Serial.print ("Analog: ");
        Serial.print (analogValue) ;
        Serial.print (" | Voltage: ");
        Serial.print (vOut) ;
        Serial.print ("V | Resistance: ");
        Serial.print (rUnknown) ;
        Serial.println (" Ohm");
    }

    delay (500) ; // 每 0.5 秒測一次
}
```

五、實驗數據：

氯化鈉水溶液濃度	平均電阻值 (Ω)	標準差	10倍標準差 (L OQ)
0.00%	12807.75	181.41	1814.10
4.17%	4748.29	10.70	107.00
8.00%	4696.84	25.48	254.80
13.00%	3993.61	23.59	235.90
17.86%	3402.23	31.85	318.50
20.00%	3434.37	9.54	95.40
23.33%	3215.02	14.61	146.10

表9-不同濃度氯化鈉水溶液的對應電阻

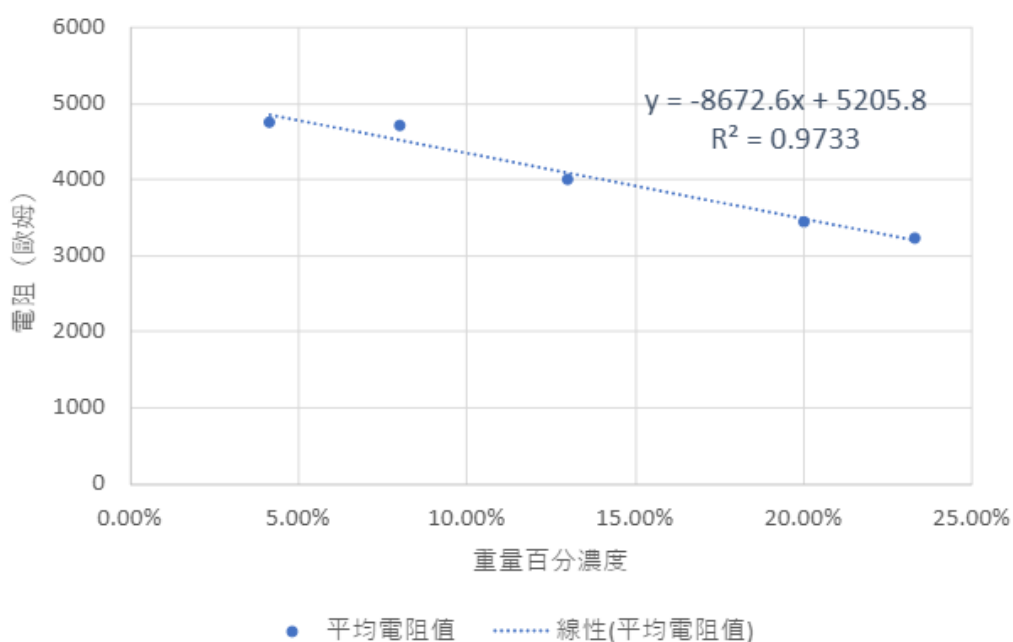


圖8-不同濃度氯化鈉水溶液的對應電阻

六、討論：

(一) 圖8得出濃度-電阻關係式為線性變化： $y = -8672.6x + 5205.8$ 。y為電阻值 (Ω)，x為氯化鈉水溶液濃度 (%)。將作為實驗六之參考依據。

(二) 誤差來源：

1.溫度：因為不同濃度的電阻是在不同日期測量的，所以溫度有差異，可能會影響。

2.電極極化：電極在通電過程產生化學反應，使測量儀器判定電阻大於實際值。

實驗六：氯化鈉水溶液霧化前後的電阻變化

一、實驗目的：藉由測量氯化鈉水溶液霧化前後的電阻變化，判斷霧化後的離子濃度是否有改變。

二、實驗步驟：

- (一) 調製濃度15%、22%氯化鈉水溶液850mL
- (二) 使用裝置五將氯化鈉水溶液霧化並收集
- (三) 利用分壓方式測量霧化後收集到的氯化鈉水溶液的電阻

三、實驗數據：

(一) 15%氯化鈉水溶液（換算濃度依照實驗五之結果來進行換算）

實驗	原電阻	原電阻 換算濃度	收集到電阻	收集到電阻 換算濃度	裝置內電阻	裝置內電阻 換算濃度
1	3622.66	19.13%	3560.03	19.88%	無數據	無數據
2	3579.25	19.65%	3461.74	21.07%	3441.46	21.32%
3	3651.21	18.78%	3598.52	19.42%	3391.57	21.92%
4	3415.63	21.63%	3338.70	22.56%	3441.07	21.32%
5	3425.20	21.51%	3346.88	22.46%	無數據	無數據
平均	3538.79	20.14%	3461.17	21.08%	3424.70	21.52%
標準差	111.11	1.20%	119.06	1.29%	28.69	0.28%

表10-15%氯化鈉水溶液霧化前後離子濃度

(二) 20%氯化鈉水溶液

實驗	原電阻	原電阻 換算濃度	收集到電阻	收集到電阻 換算濃度	裝置內電阻	裝置內電阻 換算濃度
1	3115.23	25.26%	3264.27	23.46%	3339.88	22.54%
2	3318.15	22.81%	3261.19	23.50%	3444.83	21.28%
3	3342.01	22.52%	3083.53	25.64%	3074.26	25.75%
4	3382.48	22.03%	3227.58	23.90%	3168.19	24.62%
平均	3289.47	23.15%	3209.14	24.12%	3256.79	23.55%
標準差	103.19	1.25%	73.936	0.89%	144.42	1.74%

表11-20%氯化鈉水溶液霧化前後離子濃度

四、討論：

（一）從實驗結果可知：

- 1.依照實驗五之公式代入實驗六量測到的電阻值，與我們自己秤重所配出的濃度不太相同，公式得出濃度皆較大。我們在表格以及下列分析中所呈現與分析之數據以公式得出濃度數值為主。
- 2.從表10、表11中可以看到，兩種濃度氯化鈉水溶液在霧化後濃度皆上升，上升幅度皆為1%左右。與表中固定濃度之下的濃度標準差（平均為1%）相當，代表氯化鈉水溶液在霧化前後離子濃度無顯著差異。同時，收集到的水溶液與原水溶液之電阻差異皆小於實驗五的十倍標準差，即目前的儀器與實驗設計，尚無法測出顯著差異。因此，氯化鈉水溶液中的鈉離子與氯離子極可能與水趨於等比例霧化。然而，此現象是否一併適用於其他種類之離子物種，仍須進一步實驗驗證。

（二）誤差討論：

- 1.調配結果與公式結果之差異：將實驗所測之電阻值代入實驗五的公式中，所得之換算濃度與實際配製濃度有約 2% 至 4% 的差異。推測是因環境溫度而造成的誤差。
- 2.溫度影響：對水溶液而言，溫度升高會導致電阻下降。不過，我們在實驗前後測量了調配與收集及裝置內的溫度變化，裝置內的溫度大約上升6°C，但是收集到的溫度並無明顯變化。
- 3.水蒸發：霧化過程中液滴表面積極大，水分快速蒸發導致氯化鈉水溶液濃度相對上升。不過水蒸發對濃度提升的貢獻有限，不足以解釋實驗中觀察到的濃度的變化幅度。

肆、結論

經由這個實驗，我們得出以下結論：

- 一、裝置五的最佳集霧效率為17.96mL/10min；最佳霧化效率水位為6.5cm。
- 二、實驗結果濃度差小於 $\pm 5.61 \times 10^{-8}$ M，則為機器及環境造成的誤差；若大於此數值，則代表離子濃度在霧化前後有顯著差異。
- 三、不同 pH值的鹽酸在霧化前後的氫離子濃度差呈現指數衰減曲線。其衰減程度關係式為 $\Delta_{pH} \approx 7.14 \times \Delta_{pH+1}$ ，可得其氫離子損失量隨pH值每減少1而變大約7倍。
- 四、不同pH值的氫氧化鈉水溶液在霧化前後的氫氧根離子濃度差呈現指數衰減曲線。其衰減程度關係式為 $\Delta_{pH+1} \approx 9.45 \times \Delta_{pH}$ ，可得其氫氧根離子損失量隨pH值每增加1而變大9倍。
- 五、濃度 (x%) 與電阻 (y Ω) 關係式： $y = -8672.6x + 5205.8$ 。
- 六、氯化鈉水溶液在霧化前後離子濃度無顯著差異，溶質與溶劑趨於等比例霧化。

伍、未來展望

- 一、增加離子種類，深入探討其他種類之離子水溶液霧化前後濃度變化。例如含鈣、鎂離子的水溶液。
- 二、針對霧化過程中氫離子、氫氧根離子濃度改變情形，分析並釐清兩離子之去向。根據實驗三的討論，我們提到pH值增加的原因可能為超音波的脫氣作用將二氧化碳釋放出來，因此，未來可測量機器附近的二氧化碳濃度，檢測是否有顯著上升。
- 三、比較不同氣壓、水溫、液體重量、表面張力及離子價數或電性是否對霧化前後之水溶液組成有影響。
- 四、針對溫度導致的電阻測量誤差，未來可讀取溶液溫度並帶入修正公式，得出校準後的電阻值，以換算出更準確的濃度變化。

陸、參考文資料

段亦鳴、李承穎、王子宸（2019），探網取霧－影響捕霧網集水特性之探討與應用。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。

Carvalho, T. C., & McConville, J. T. (2016, Feb 5). The function and performance of aqueous aerosol devices for inhalation therapy. *Journal of Aerosol Medicine*, 15(1), 23. PubMed, WoS, Scopus. 10.1111/jphp.12541

Mayu, K., Takatoshi, Y., & Kazuhiro, K. (2023). *Hard water can be softened by atomization*. J-STAGE. https://www.jstage.jst.go.jp/article/fstr/29/6/29_FSTR-D-23-00059/_html-char/en

Sain, A. E., Marr, L. C., Davy, B. M., Zook, J., & Dietrich, A. M. (2017, Aug 28). *Size and mineral composition of airborne particles generated by an ultrasonic humidifier*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/319015492_Size_and_mineral_composition_of_airborne_particles_generated_by_an_ultrasonic_humidifier

Teruyuki, K., Junsuke, A., Masanori, S., Shin-Ichi, H., & Kyuichi, Y. (2019, 7 5). *Effect of horn and liquid height in ultrasonic atomization*. IOPscience. <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/1347-4065/ab1bd4/meta>

Umezawa, M., Sekita, K., Suzuki, K., Kubo-Irie, M., Niki, R., Ihara, T., Sugamata, M., & Takeda, K. (2013, Dec 21). *Effect of aerosol particles generated by ultrasonic humidifiers on the lung in mouse*. Springer Nature Link. <https://link.springer.com/article/10.1186/1743-8977-10-64>

von Helmholtz, H. (n.d.). *Cavitation*. Wikipedia. Retrieved February 26, 2026, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>

【作品內圖表照片說明】

本作品「『霧』出道『離』——探討超音波霧化溶液前後水中離子濃度的變化」內容所有照片、圖片、圖表，皆由作者自行拍攝、繪製。