

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 200017
參展科別 環境工程
作品名稱 以空氣盒子探討台灣環境中懸浮微粒的潮解膨脹現象
得獎獎項 大會獎 二等獎

就讀學校 臺北市立麗山高級中學
指導教師 蕭大智、周家祥
作者姓名 陳禹齊

關鍵詞 空氣盒子、懸浮微粒、潮解

作者簡介



我是陳禹齊。從小受父親耳濡目染，產生對科學研究的高度興趣。對於一件我想做的事情，我會經常犧牲掉我生活大部分的事物，來完成目標。做研究對我來說是一件很熱血的事，研究工作的結果當然重要，不過享受過程也一樣重要。面對過程中或結果的挫折，對我來說是一種成長。在這過程中，除了會學習到更多與研究相關的知識，更有辦法在面對困境時冷靜下來，仔細地思考如何去解決問題，我很喜歡這樣成長的感覺。

摘 要

我們的研究是利用空氣盒子設計出一個裝置，用以觀察環境中懸浮微粒潮解膨脹現象。

我們觀察了由硝酸銨與硫酸銨各自以及不同比例與混合模式組成的懸浮微粒。純硝酸銨的潮解點不明顯，純硫酸銨有明顯的潮解點。內混合懸浮微粒有一個潮解點，並且出現3種類型的潮解行為，分別是偏向硝酸銨或硫酸銨以及過渡型，後者粒徑成長的比例會比前兩者來得高。外混合懸浮微粒有兩個潮解點，保留兩種成分各自的特性。

我們利用雨水觀察環境中懸浮微粒的潮解膨脹現象，將其與內混合懸浮微粒的潮解點與潮解行為做比較，來推估其成分與來源。確定我們的裝置能推估出主要的污染成分及來源。

Abstract

In this research, our goal is to utilize the airbox as the device to investigate the hygroscopic property of ambient aerosols.

We observed the hygroscopic behavior of pure, internally and externally mixed ammonium nitrate and ammonium sulfate. Pure ammonium nitrate doesn't have an obvious deliquescence relative humidity, pure ammonium sulfate has an obvious deliquescence relative humidity. Internally mixed aerosols show 3 different hygroscopic behavior, which is ammonium nitrate form, ammonium sulfate form, and the transitional form. The transitional form internal mix aerosols show better hygroscopicity than the other forms. Externally mixed aerosols will have 2 deliquescence relative humidity, and it remain their original hygroscopic properties.

Rainwaters are collected to infer the hygroscopic behavior of ambient aerosols. We compare their deliquescence relative humidity and hygroscopic behavior with the internally mixed aerosols, to ensure that our device can be used to estimate the main component and source of the pollutants.

前 言

隨著都市化與工業的進步，空氣污染成了全世界熱烈討論的議題。政府制定了許多相關的政策與法規，我們的空氣品質才有今天的水準。近年來台灣空氣污染爭議，與能見度及懸浮微粒有密不可分的關係。懸浮微粒中 $PM_{2.5}$ 甚至成為大眾耳熟能詳的名詞！因此引起了我們對相關議題的興趣。從文獻中我們注意到懸浮微粒有一部分是鹽類，而這些鹽類在達到某個臨界相對濕度時會開始潮解膨脹。環境中存在著不同成份的鹽類懸浮微粒，他們有不同的混合模式與混合比例。我們想要知道，內混合與外混合懸浮微粒潮解行為的差別。因此我們用空氣盒子設計了一個裝置，來觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象。我們總共觀察硝酸銨與硫酸銨各自以及依照不同比例與混合模式組成的懸浮微粒，混合模式分別有內混合和外混合。

我們想要透過我們的裝置，利用環境中懸浮微粒的潮解行為，來推估空氣污染主要的成分和來源。在路面上蒐集到的雨水，集結著大氣中各種混合的懸浮微粒。我們想要用雨水產生懸浮微粒，用我們的裝置觀察其潮解膨脹現象。我們會將雨水產生的懸浮微粒潮解行為與我們實驗室產生的懸浮微粒潮解行為做比對，去推估雨水主要的空氣污染成分，再根據文獻推測空氣污染主要的來源。

我們的研究目的主要有三個方面：

- (一) 以空氣盒子作為量測工具，設計一個可以觀測環境中懸浮微粒潮解膨脹現象的裝置。
- (二) 觀察不同成分懸浮微粒在不同混合模式與比例下的潮解膨脹現象。
- (三) 搜集雨水，以雨水產生懸浮微粒。觀察其潮解膨脹現象，以推估其污染的種類與來源。

研究環境中懸浮微粒潮解膨脹現象，我們需要尋找以下問題的答案：

- (一) 不同成分的懸浮微粒，在不同混合模式與比例的潮解膨脹現象會有什麼變化？這背後的意義是什麼？如何應用？
- (二) 我們是否能從雨水中，觀察到懸浮微粒的潮解膨脹現象？我們是否能從現象中推估污染主要的成分和來源？

一、 研究方法或過程

(一) 相關原理探討

1. 什麼是懸浮微粒？

懸浮微粒泛指懸浮在空氣中的固體顆粒或液滴，顆粒微小甚至肉眼難以辨識，但仍有尺度的差異。空氣動力學直徑（以下簡稱直徑）小於或等於 10 微米 (μm) 的懸浮微粒稱為懸浮微粒 (PM_{10})；直徑小於或等於 2.5 微米的懸浮微粒稱為細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$)（維基百科，2019a）。

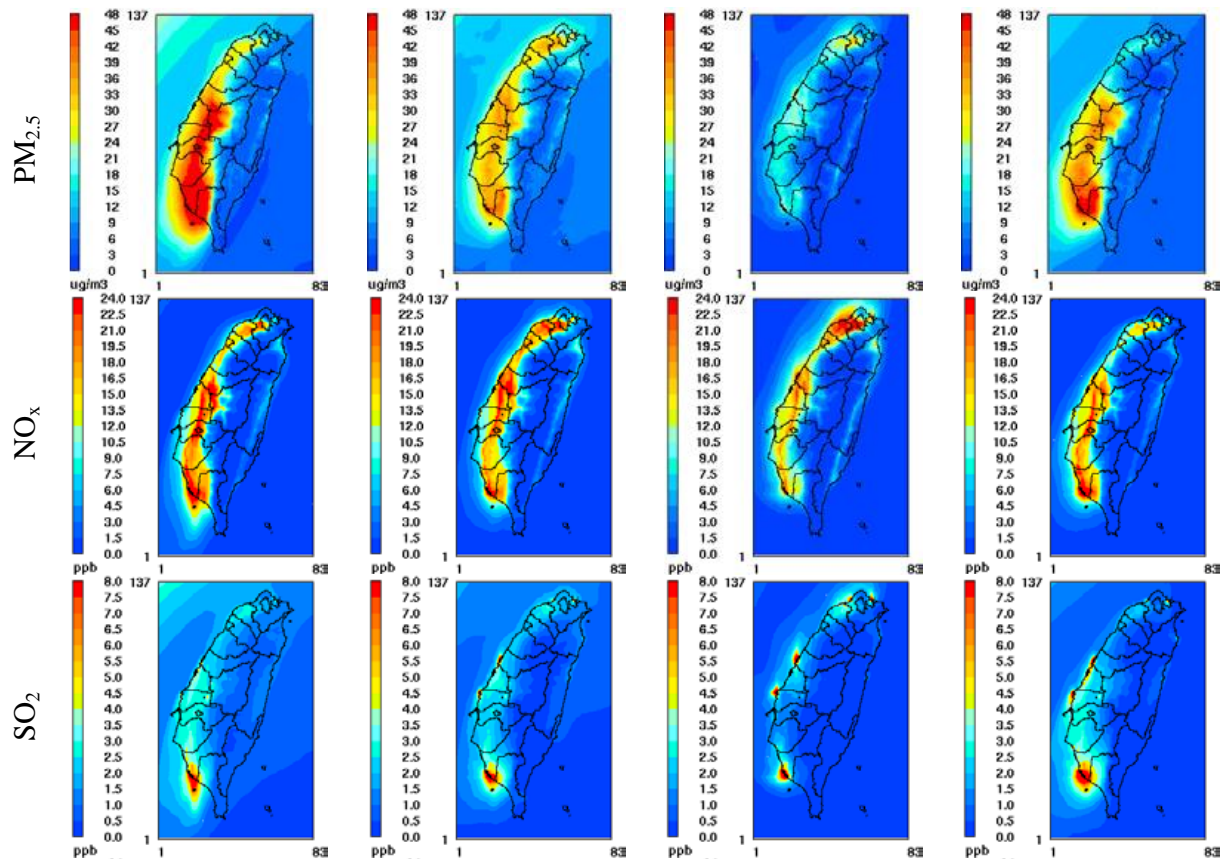
懸浮微粒來源有天然及人為之分，天然來源有揚塵、海鹽……等，人為來源有氧化還原物以及鹽類……等（Wikipedia, 2019）。

懸浮微粒從空氣中移除的機制是什麼？「主要是沉降作用，包含濕沉降與乾沉降兩大類。前者指的是微粒隨著雨、雪、霧或雹等降水型態而落到地面者；後者則是指在不下雨的日子，從懸浮微粒藉由碰撞成長，粒徑與質量增大，受重力吸引而自天空落下。」（洪逸文等，2011）

2. 空氣污染物與空氣中鹽類微粒的關係

圖一為台灣空氣污染物 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x) 一月、四月、七月、十月的平均值的空間分佈 (Lu et al., 2019)。由圖一可以發現台灣西半部的主要氣態污染物是氮氧化物 (NO_x)，而硫氧化物 (SO_x) 主要分布在高雄工業區一帶。「氮氧化物 (NO_x) 的主要排放源為陸上運輸業，但是各行業別皆有不同程度的貢獻；但是硫氧化物 (SO_x) 則是燃氣供應業化學材料製造業、製造業與基本金屬製造業為主，因此臺灣硫氧化物 (SO_x) 是可以做為工業源與交通源區分的重要指標污染物，一旦有工業源的污染時，工業區的特定位置就是污染源，不像交通源的氮氧化物會集中於交通繁忙的區域，同時污染的發生會於一日中的交通流量有關。」（謝瑞豪等，2016）

這些空氣中的 NO_x 和 SO_x 受到陽光的刺激後，會變成「二次氣膠」或二次顆粒物，二次顆粒物「是由一次污染物經光化學反應所產生顆粒物稱之。如由汽機車所排放之 NO_x 、 CO 及碳氫化合物會形成含 PAN 之懸浮微粒之衍生顆粒物，或燃煤工廠排放 SO_x 與 NO_x 經光化反應後產生硫酸根 (SO_4^{2-}) 或硝酸根等陰離子與大氣中氨 (NH_3) 或金屬離子形成硫酸銨、硝酸銨。硫酸鹽及硝酸鹽之微粒即屬二次顆粒物，二次顆粒物在大氣污染量中佔很高的比例。」（於幼華，2002）而都市常見的空氣污染物成分之一，即為硫酸銨和硝酸銨這一類的鹽類顆粒（王國英，2009）。



圖一 台灣空氣污染物 (PM_{2.5}、NO_x、SO₂) 一月、四月、七月、十月的平均值的空間分佈 (Lu et al., 2019)

3. 空氣中的鹽類顆粒發生潮解現象的條件

空氣中的鹽類顆粒並非在任何狀況下都會發生潮解，而是要超過特定的相對濕度值才會發生，並且不同鹽類開始潮解的濕度值是不同的，這個特定的相對濕度值就是「臨界相對濕度」。「給定溫度下鹽類的臨界相對濕度指的是在鹽類開始吸收潮解時環境的相對濕度。當環境的相對濕度小於臨界相對濕度時，鹽類不會從環境中吸收水汽；只有環境的相對濕度大於臨界相對濕度時，鹽類才會吸收水汽。」(維基百科，2019b) 硝酸銨的臨界相對濕度為 61.83%、硫酸銨的為 79.4% (Jacobson, 2019)。

由此可見，當空氣的相對濕度達到某些臨界值時，空氣中的鹽類顆粒就會開始潮解，我們認為潮解之後可能就會轉變成嚴重影響光散射效率的大顆粒。所以，能見度與相對濕度的關係應可反映出鹽類 PM_{2.5} 的潮解現象。

4. 官方測量 PM_{2.5}、PM₁₀ 的方法與疑慮

行政院環境保護署 (2019) 的官方測量方法，是利用貝他射線分析法來分析空氣中粒狀物的濃度。貝他射線分析儀能長時間連續自動監測，氣體樣品由空氣泵引進，先經過採樣系統，包括採樣口、篩分器及加熱裝置，以篩分出所需的粒徑的顆粒，其

中加熱裝置是為了去除樣品中粒狀物的水分，以免水分影響輻射線的穿透率，干擾監測結果。樣本通過採樣系統之後，再通過特殊材質（如玻璃纖維）的濾紙收集粒狀物，最後系統發出輻射脈衝（如 C14 貝他射線）穿過濾紙，再由計數器接收計數脈衝強度。由於濾紙上的粒狀物會影響輻射脈衝的通過量，因此可以利用這種裝置測量出粒狀物的濃度。

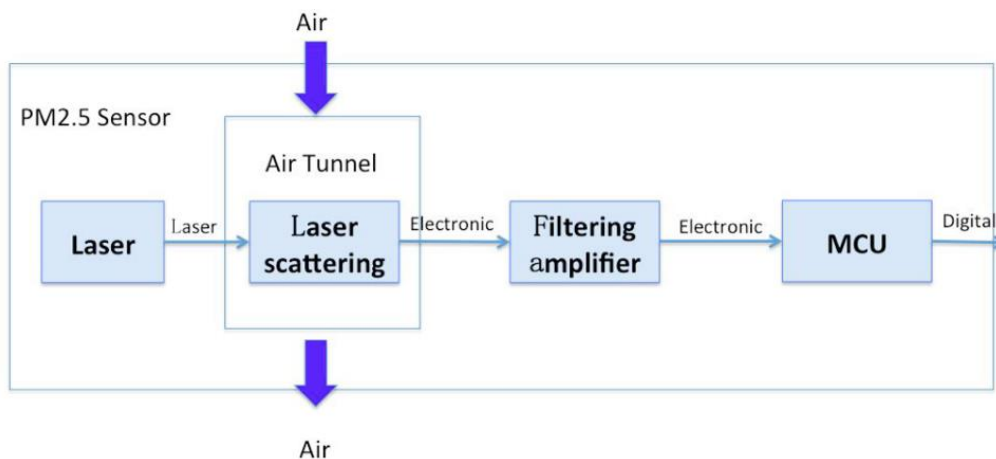
因為貝他射線分析儀在採樣時有加熱去除顆粒水分的程序，可能會改變氣體樣本中的顆粒大小，因此監測到的數據會有無法完全反映實際狀況的疑慮。

5. Gore-Tex 和 Nafion 兩材質加濕管的差別

在我們先前的研究中，我們有試圖利用 Nafion 來加濕懸浮微粒，但其加濕效果不穩定。Nafion 的加濕方式為在管外通入濕空氣，然後讓濕空氣透過半透膜進入管內，但是 Nafion 管要足夠長才能達到有效的加濕效果 (Southeastern Automation Inc., 2020)，而且要預先產生控制好濕度的空，就如同先前研究中的裝置。而使用 Gore-Tex 是只要控制好管外的水溫，濕度就會慢慢的改變。

6. 空氣盒子的測量原理

我們使用的空氣盒子為 HK-A5 Laser PM2.5/10 Sensor。它的測量原理為發射紅光雷射，然後測量其散射率，可以測量到直徑在 $0.3\mu\text{m}$ 以上的懸浮微粒，再將散射率換算成質量濃度輸出。測量原理圖如圖十一。當懸浮微粒質量濃度越高，空氣盒子測量到的散射量越高。



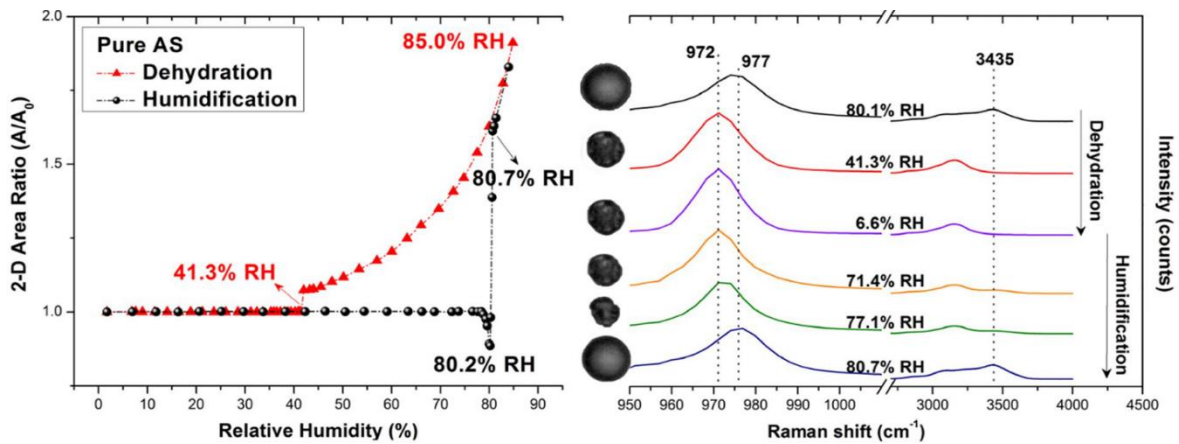
圖二 空氣盒子測量原理（海克智動，2016）

(二) 相關研究概述

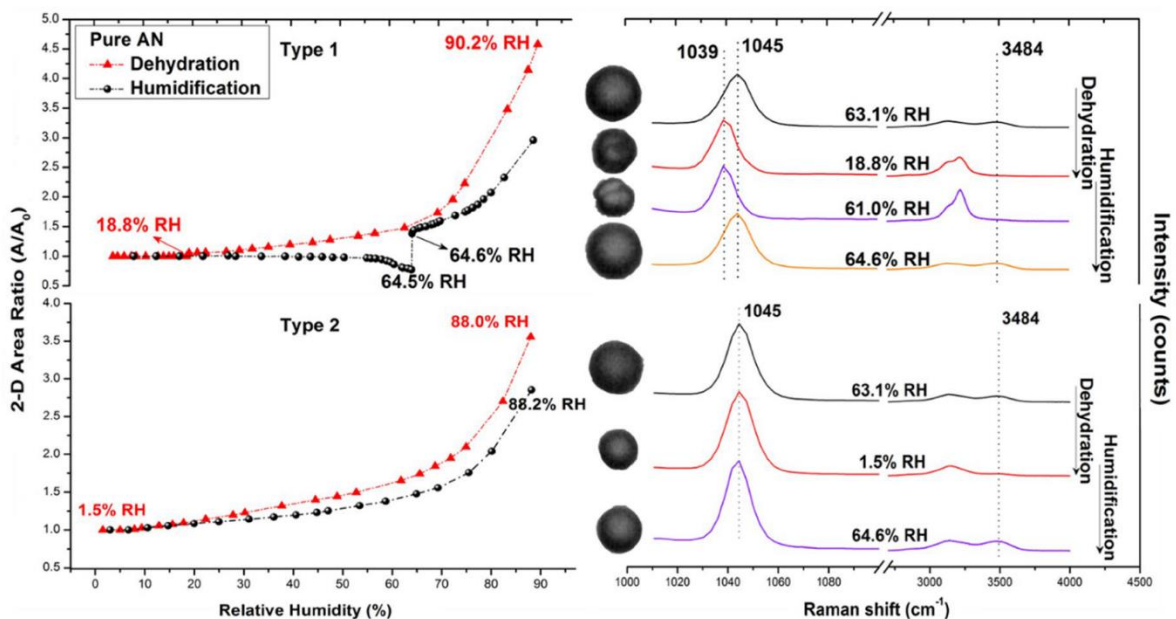
1. 懸浮微粒潮解臨界相對濕度的相關研究

Wu et al (2019) 發表了有關硝酸銨、硫酸銨、混合兩種鹽類的臨界相對濕度研究。

他們的作法為觀察乾燥懸浮微粒與潮濕懸浮微粒的表面積比值隨濕度的變化。他們發現硫酸銨顆粒的粒徑會在相對濕度 80.2% 時開始上升 (圖三)。硝酸銨懸浮微粒則是有兩種潮解行為，一種有明顯的潮解臨界相對濕度，另一種沒有 (圖四)。文獻指出，發生兩種潮解行為的原因是因為前者 (type 1) 是同質成核，後者 (type 2) 是異質成核。



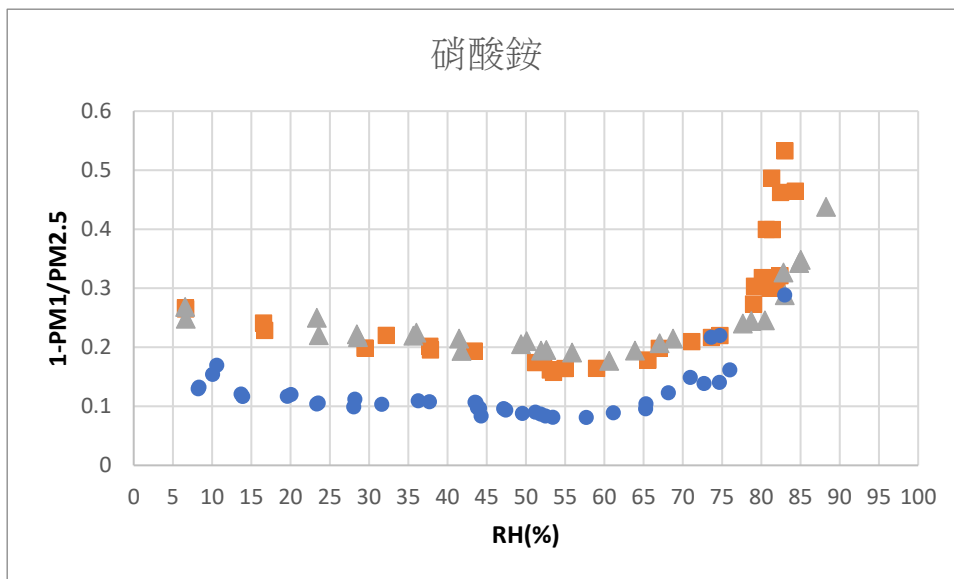
圖三 純硫酸銨的潮解現象 (Wu et al, 2019)



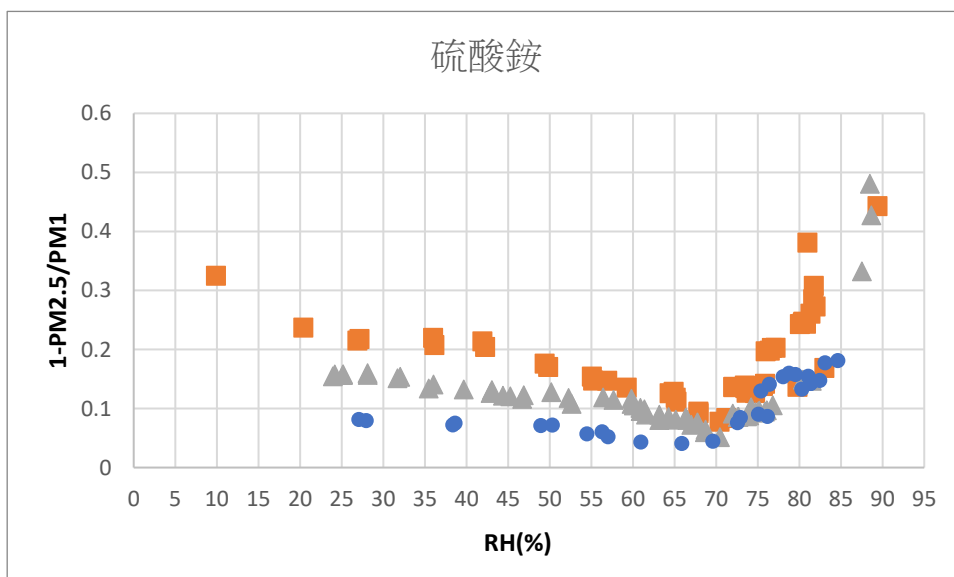
圖四 純硝酸銨的潮解現象 (Wu et al, 2019)，
其中 Type 1 和 Type 2 是由不同成核過程產生的硝酸銨微粒

2. 我們先前的研究

我們先前的研究中，透過觀察台灣不同地區能見度與相對濕度的關係，來找出懸浮微粒的潮解效應並且判斷污染物的種類。我們觀察到基隆和台北主要的污染物為硝酸銨，而台中、高雄、花蓮主要的污染物為硫酸銨。之後，我們設計了一個可以觀察懸浮微粒潮解效應的裝置。我們可以從觀察的數據得知，硝酸銨平均會在相對濕度 57.2% 時開始潮解，而硫酸銨平均會在相對濕度 69.6% 時開始潮解（圖五、圖六）。此外，我們注意到在我們的裝置內懸浮微粒的濃度比值會隨時間下降，而且懸浮微粒有提早潮解的現象。



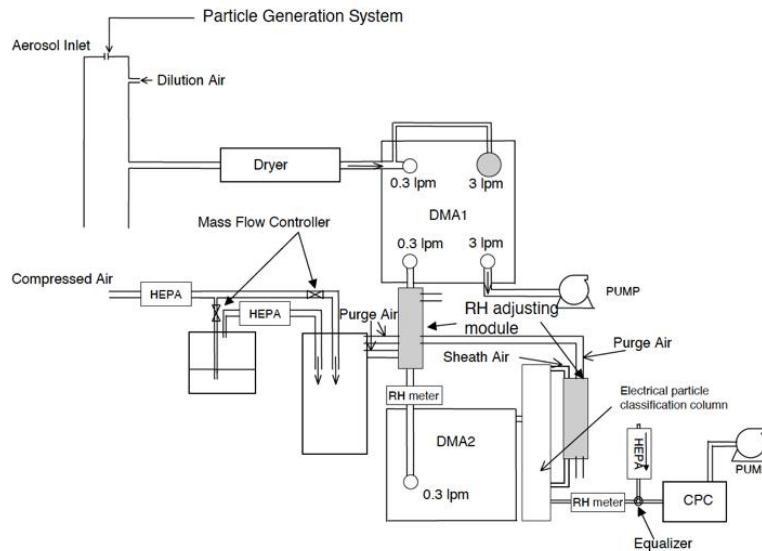
圖五 硝酸銨 PM2.5 濃度和 PM1 濃度的比值隨相對濕度的變化



圖六 硫酸銨 PM2.5 濃度和 PM1 濃度的比值隨相對濕度的變化

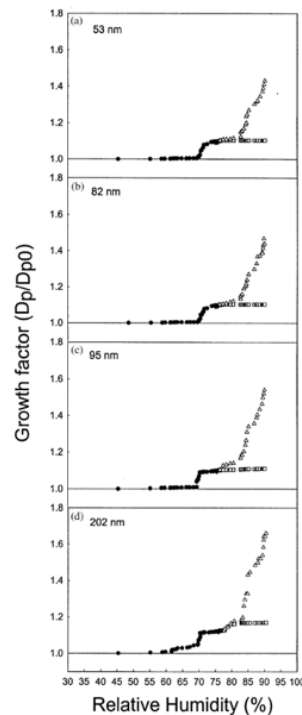
3. 台北市懸浮微粒吸濕性的研究

Chen et al. (2003) 發表了有關台北市懸浮微粒吸濕性的研究。其中提及，在低濃度的情況下，單純靠混合乾濕空氣並不適合作為觀察懸浮微粒吸濕性的加濕手段，他們使用了加濕器直接加濕懸浮微粒（RH adjusting module，裝置如圖七）。



圖七 懸浮微粒的潮解吸濕實驗裝置圖 (Chen et al., 2003)

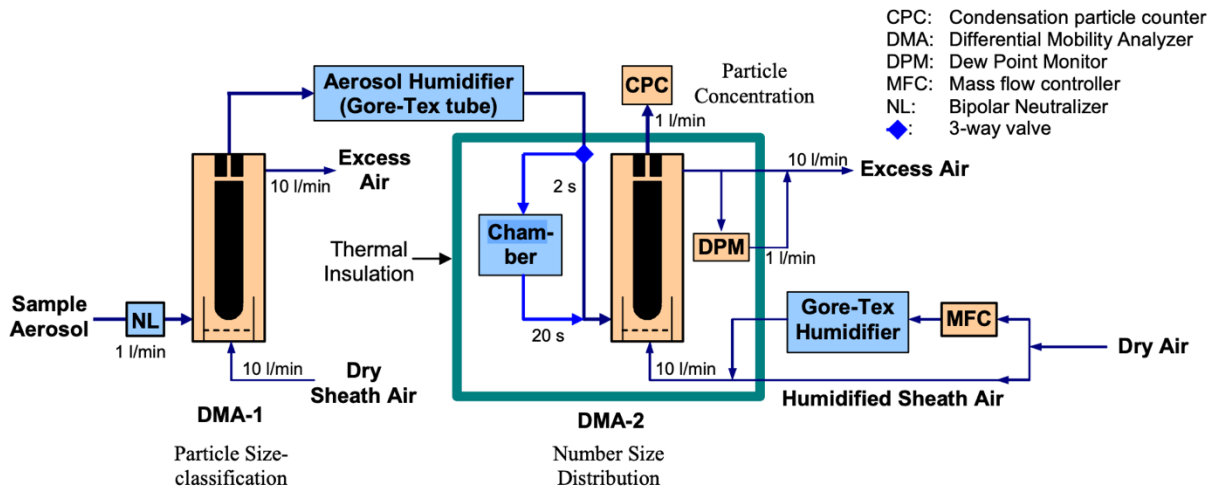
在該篇研究報告中，他們提及 NH_4HSO_4 （臨界相對濕度為 39%）對懸浮微粒的成長沒有帶來影響，因為在相對濕度 55% 懸浮微粒的成長因子沒有出現變化（圖八）。他們還有提及在他們的研究中，高濕度的環境下懸浮微粒的成長沒有受到硫酸銨以外的懸浮微粒的成長沒有受到硫酸銨以外的鹽類影響。



圖八 台北市大氣中懸浮微粒不同粒徑潮解吸濕現象 (Chen et al., 2003)

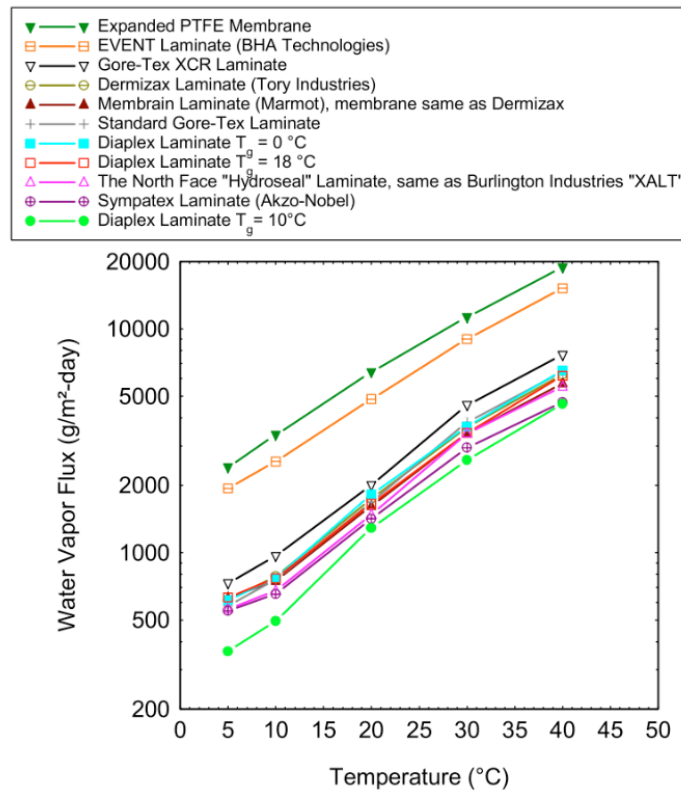
4. 利用 Gore-Tex 作為加濕管來觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象

Kokkola et al. (2006) 發表了有關硫酸銨的潮解膨脹現象，他們的裝置如圖九。其中他們使用了 Gore-Tex 作為加濕管。使用 Gore-Tex 的好處在濕度控制的穩定性，只需要以水溫來控制濕度，不需要另外產生溼空氣。加濕的過程中，藉由改變 Gore-Tex 管外溫水的溫度就可以改變 Gore-Tex 管內的濕度 (Purinton et al., 2020)。



圖九 使用 Gore-Tex 的懸浮微粒潮解吸濕實驗裝置圖 (Kokkola et al., 2006)

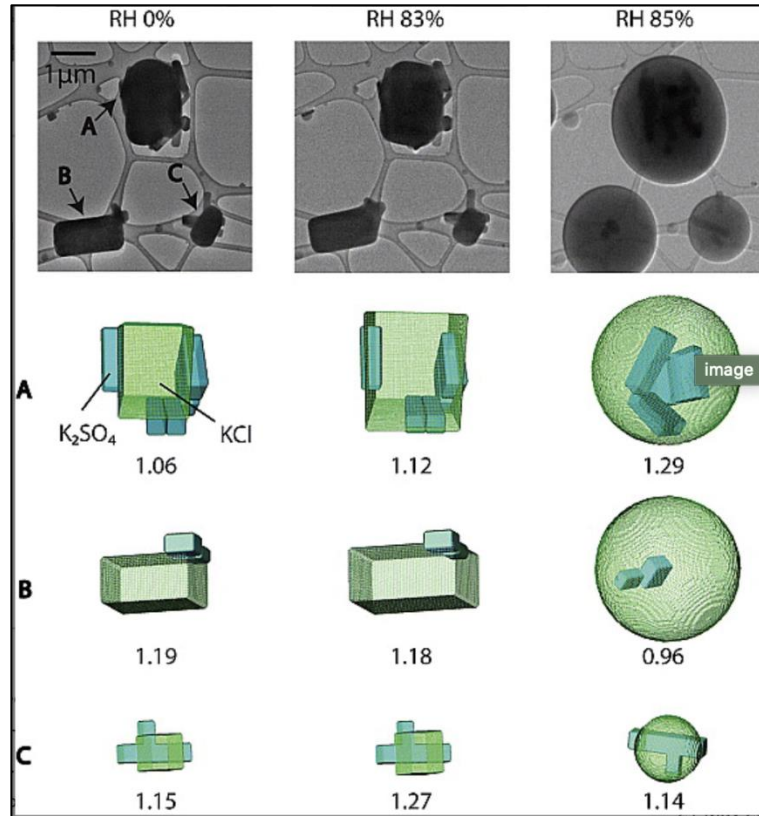
Phil Gibson (2000) 發表了關於溫度對 Gore-Tex 透水率的變化。從圖十中我們可以得知，溫度與透水率呈正相關。



圖十 溫度與各種材料透水率關係圖 (Phil Gibson, 2006)

5. 內混合懸浮微粒的潮解膨脹現象

Adachi et al. (2011) 用穿透式的電子顯微鏡，觀察了內混合懸浮微粒在各個濕度粒徑的變化如，圖十一。他們指出，內混合顆粒較易吸水的成分會先吸水，再來才是比較不容易吸水的開始吸水。這代表著內混合懸浮微粒的潮解點會和單一成分的懸浮微粒有所差異。



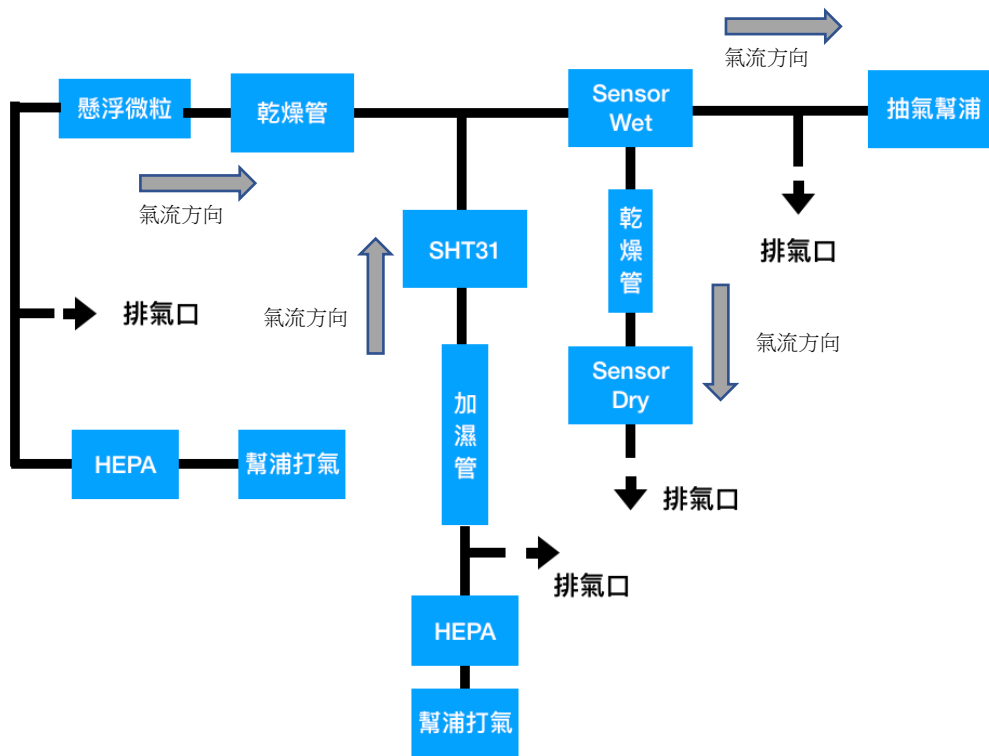
圖十一 潮解前與潮解後的內混合懸浮微粒 (Adachi et al., 2011)

(三) 實驗一設計：製作裝置觀察懸浮微粒潮解膨脹現象

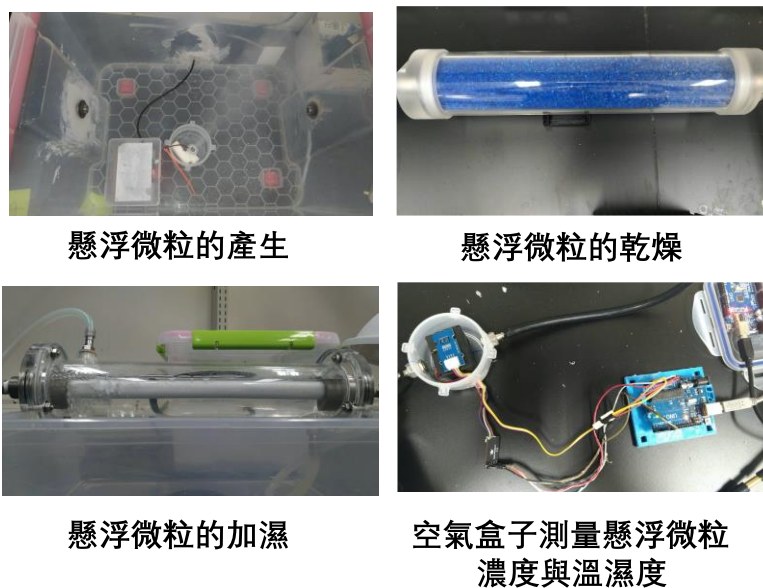
1. 裝置設計架構

我們的實驗裝置如圖十二。霧化器產生的懸浮微粒會在幫浦加壓後注入裝置，流入裝置的懸浮微粒會先經過乾燥管加以乾燥到相對濕度為 10% 左右，再和由 Gore-Tex 管產生的濕空氣 (RH≈25%~99%) 混合。混合後通過空氣盒子來測量加濕後懸浮微粒的溫濕度以及濃度，也有一個溫濕度探測器在測量加濕管產生的濕空氣的濕度。懸浮微粒會被分流到粉塵監測儀和乾燥管，用來測量再乾燥後的懸浮微粒的濃度。

這樣一來，我們可以量到加濕後與沒有加濕的懸浮微粒的差別，也可以讓濕度穩定的上升，不會因為裝置冷凝以及流量調整的影響。



圖十二 實驗裝置圖

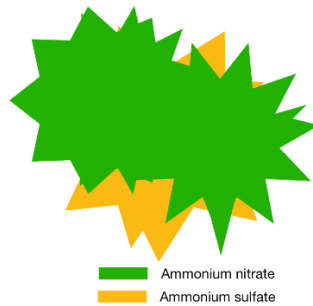


圖十三 實驗裝置照片

2. 懸浮微粒的產生

硝酸銨與硫酸銨為都市空氣污染物的主要成分（王國英，2009），因此我們觀察的懸浮微粒成份為硝酸銨和硫酸銨。為了讓我們用霧化器產生的懸浮微粒的粒徑分佈得到控制，我們根據硝酸銨與硫酸銨密度相近的特性，讓配置的溶液的重量百分濃度控制在 0.3%。外混合的部分，我們是將硝酸銨與硫酸銨先乾燥後再混合，並且用懸浮微粒的產生時間來控制外混合的濃度比例。

內混合懸浮微粒是指不同成份的顆粒經由碰撞後變成一個顆粒，如圖十四。我們製造硝酸銨與硫酸銨內混合懸浮微粒的方法，是將兩種不同鹽類按照莫耳數比配製成一杯溶液後，用霧化片霧化。



圖十四 內混合懸浮微粒示意圖

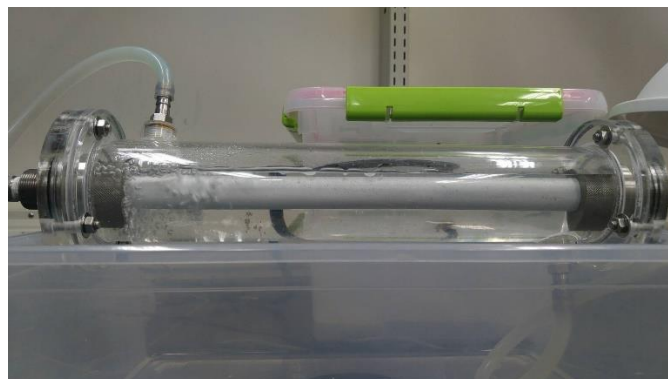
外混合懸浮微粒是指不同成份的顆粒各自存在在一團空氣中，同一顆粒僅存在單一成分，如圖十五。我們製造硝酸銨與硫酸銨外混合懸浮微粒的方法，是將它們乾燥後再混合，並且用懸浮微粒的產生時間來控制外混合的濃度比例。



圖十五 外混合懸浮微粒示意圖

3. 可控制的加濕

我們的加濕方法，是調整加濕管裡 Gore-Tex 管外的循環水溫度，來增加 Gore-Tex 管的透水率（圖十六）。我們控制讓水溫在大約 1 分 30 秒上升 1 度，並且讓裝置內的相對濕度（與乾燥懸浮微粒混合後）在 30 分鐘內，從大約 30% 上升到大約 85%。



圖十六 加濕管

4. 懸浮微粒的測量

我們使用 HK-A5 Laser PM2.5/10 Sensor 空氣盒子測量懸浮微粒的質量濃度，用 SHT31 測量相對濕度。當懸浮微粒吸濕潮解後，粒徑增加，在空氣盒子中的散射量也會增加。所以散射光越強，代表懸浮微粒質量濃度越高。空氣盒子測量到的潮解懸浮微粒質量濃度是被高估的，因為這些質量濃度除了懸浮微粒本體的質量外，還包含了水的質量。我們根據空氣盒子高估潮解懸浮微粒質量的特性，來觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象，透過計算乾燥與加濕後的懸浮微粒質量濃度比值對濕度的關係，來得到懸浮微粒潮解後在不同濕度下的成長比例。



圖十七 空氣盒子 HK-A5 Laser PM2.5/10 Sensor

5. 實驗組設計

- (1) 單一成分懸浮微粒：都市空氣污染中，主要的成分為硝酸銨和硫酸銨。所以我們選擇產生純硝酸銨和純硫酸銨懸浮微粒作為觀察的對象。
- (2) 內混合懸浮微粒：我們觀察了 11 種硝酸銨與硫酸銨內混合比懸浮微粒，我們將它們的莫耳濃度比例分為三種類型，如表一。一種是硝酸銨含量較多，一種是硫酸銨含量較多，另一種是硝酸銨與硫酸銨比例相近。

表一 內混合比例實驗組設計

混合類型	硝酸銨：硫酸銨
偏向硝酸銨型	8:1、4:1、2:1
過渡型	1.625:1、1.25:1、1:1、 1:1.25、1:1.625
偏向硫酸銨型	1:2、1:4、1:8

- (3) 外混合懸浮微粒：我們觀察了 4 種外混合比的懸浮微粒，我們同樣也將它們的莫耳濃度比例分為三種類型，如表二。

表二 外混合比例實驗組設計

混合類型	硝酸銨：硫酸銨
偏向硝酸銨型	4:1
過渡型	1.625:1、1:1.625
偏向硫酸銨型	1:4

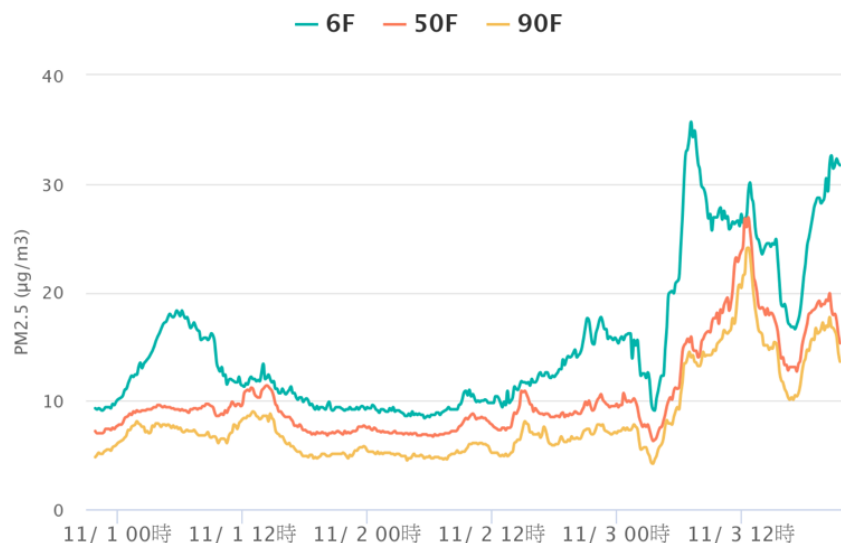
6. 觀測數據的計算與繪圖

當懸浮微粒達到臨界相對濕度時，就會潮解膨脹，導致散射率增加。因此我們透過加濕後懸浮微粒的質量濃度成長比例，來觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象。我們以相對濕度作為橫軸、加濕後與乾燥時的懸浮微粒濃度比值為縱軸做 X-Y 散佈圖，以觀察相對濕度對加濕後與乾燥時的懸浮微粒濃度比值的變化情形。

(四) 實驗二設計：利用研究裝置分析推估雨水中空氣污染物的主要成分

1. 為什麼是搜集雨水而不是空氣？

在實驗設計初期，我們原先計劃將室外空氣抽進裝置中，但是我們裝置在加濕的過程中，會將打入裝置的懸浮為質量濃度稀釋至原本的約 6.6%（打入約 900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，稀釋至約 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。以台北市 101 大樓 6 樓在 2020 年 10 年 31 日 21:30 至 11 月 03 日 21:30 共 72 小時內所測量到的懸浮微粒為例（圖十八），懸浮微粒的質量濃度在 9.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 到 35.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間（台北市環保品質資訊網，2020），這樣的質量濃度在我們的裝置中稀釋後，將導致無法觀測潮解行為。



圖十八 台北 101 大樓各樓層的懸浮微粒質量濃度
（台北市環保品質資訊網，2020）

所以我們後來改成搜集雨水來觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象。這些雨水是被沖刷下來的環境中各種混合懸浮微粒的溶液。如此一來我們可以用雨水產生懸浮微粒，用我們的裝置觀察懸浮微粒的潮解膨脹現象，再和內混合的潮解點與潮解行為做比較，來推測大氣中的懸浮微粒的成分與來源。

2. 實驗組設計

我們在實驗一完成以後即開始搜集雨水，觀察雨水產生的懸浮微粒潮解膨脹現象。搜集的時間從 2020 年 9 月 2 日開始，收集地點在台北市南港區。凡遇雨日即盡可能取樣，但由於樣本製備手續耗時，截至目前為止，我們完成了 2020 年 9 月 2 日、10 月 5 日、10 月 11 日、10 月 12 日共四天的樣本分析，我們已可初步觀察由雨水產生懸浮微粒的潮解膨脹現象。

3. 收集雨水產生懸浮微粒

我們以水桶收集雨水，之後將雨水冷藏保存。分析時，我們先待雨水回復室溫後，將 400ml 的雨水倒入燒杯，用加熱盤加熱，直至雨水剩下 50ml（濃縮 8 倍）。將雨水倒入我們的裝置，觀察乾濕懸浮微粒濃度比值隨濕度的變化。

4. 比較推估雨水主要的污染成分及來源

將雨水樣本乾濕懸浮微粒濃度比值隨濕度的變化和實驗一的內混合數據比對，找出其中硝酸銨和硫酸銨的比例，並進一步推估雨水樣本主要的污染成分及來源。因懸浮微粒是由雨水中產生，因此若雨水中溶有不同鹽類，由它們產生的懸浮微粒應是內混合狀態。

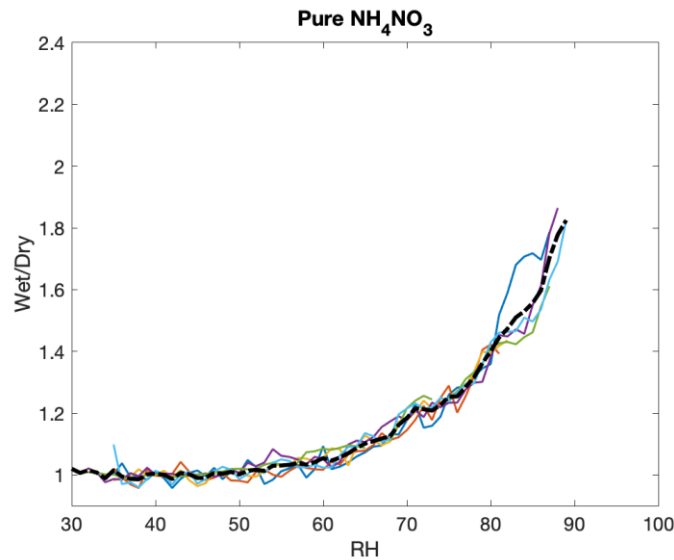
二、 研究結果與討論

(一) 實驗一結果：製作裝置觀察懸浮微粒潮解膨脹現象

1. 純硝酸銨與純硫酸銨懸浮微粒的潮解膨脹現象

(1) 純硝酸銨懸浮微粒

圖十九為純硝酸銨組成的懸浮微粒，3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

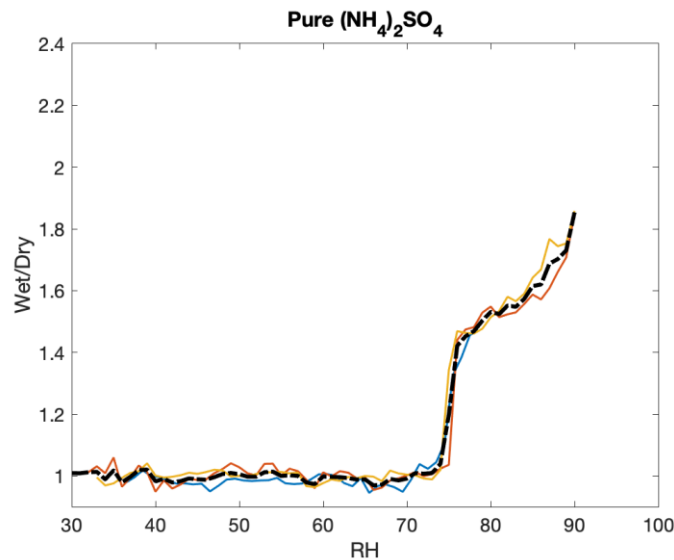


圖十九 硝酸銨組成的乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到硝酸銨懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 50% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 50% 時開始上升。這代表著硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(2) 純硫酸銨懸浮微粒

圖二十為純硫酸銨組成的懸浮微粒，3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。



圖二十 硫酸銨與組成的乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到硫酸銨懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 73% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 73% 時開始上升。這代表著硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

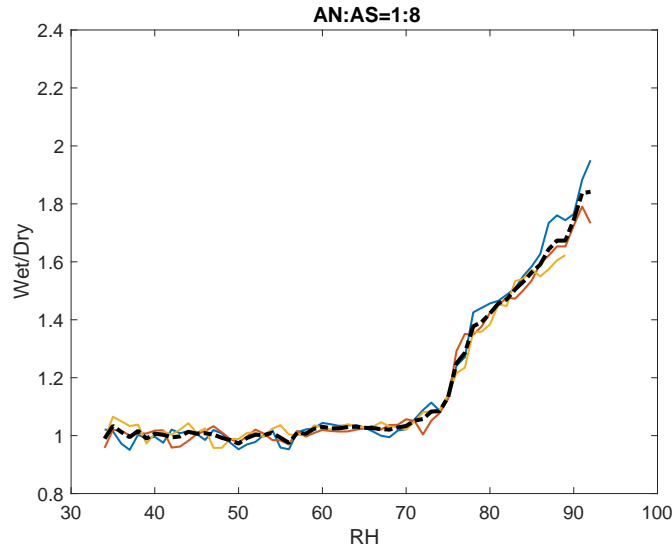
(3) 綜合討論與分析

由圖十九及圖二十可以發現，純硫酸銨的乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度會有明顯的轉折跳升現象，而純硝酸銨則沒有。我們認為這是因為當硫酸銨達臨界相對濕度時，相較硝酸銨開始潮解時有更多的水氣可以吸收，讓它可以有比較全面的吸濕潮解現象發生。純硝酸的這種現象在 Wu et al. (2019) 的研究中，也曾出現過類似的現象（參見圖四，type 2）。

2. 硝酸銨與硫酸銨內混合懸浮微粒的潮解膨脹現象

(1) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:8，內混合懸浮微粒

圖二十一為硝酸銨與硫酸銨比例 1:8，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

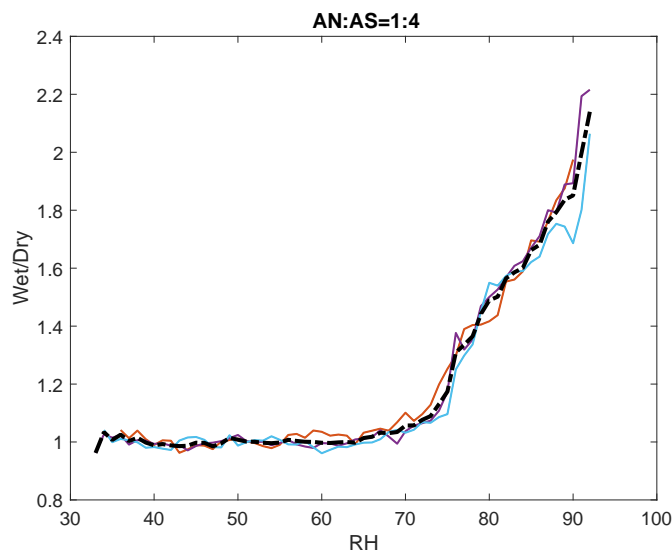


圖二十一 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:8，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 74% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過 74% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(2) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:4，內混合懸浮微粒

圖二十二為硝酸銨與硫酸銨比例 1:4，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

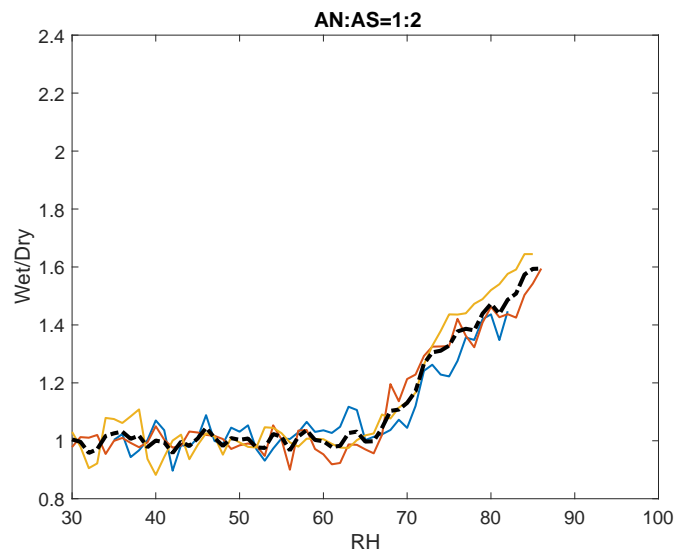


圖二十二 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:4，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 72% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過 72% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(3) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:2，內混合懸浮微粒

圖二十三為硝酸銨與硫酸銨比例 1:2，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

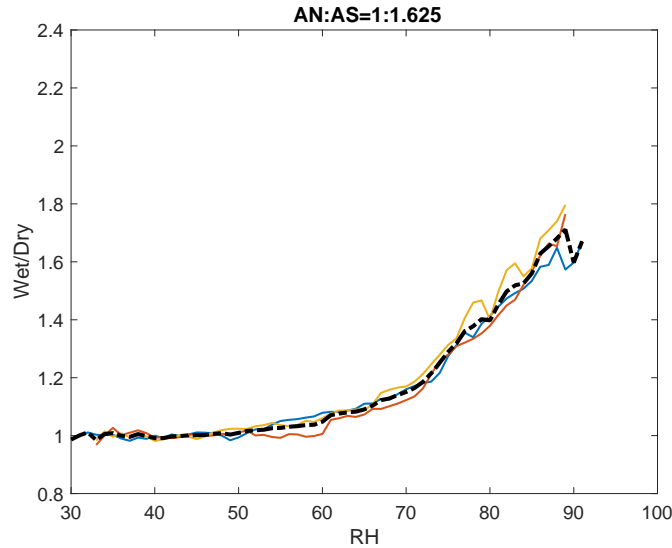


圖二十三 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:2，乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 66% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過 66% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(4) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:1.625，內混合懸浮微粒

圖二十四為硝酸銨與硫酸銨比例 1:1.625，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

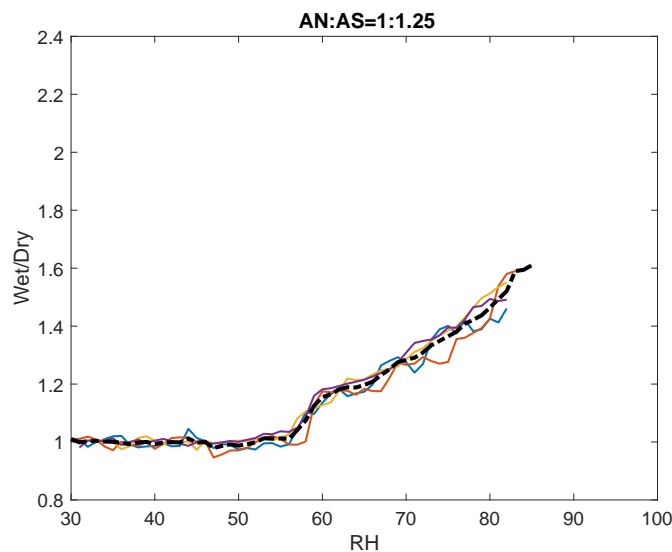


圖二十四 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:1.625，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 49% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 49% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(5) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:1.25，內混合懸浮微粒

圖二十五為硝酸銨與硫酸銨比例 1:1.25，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

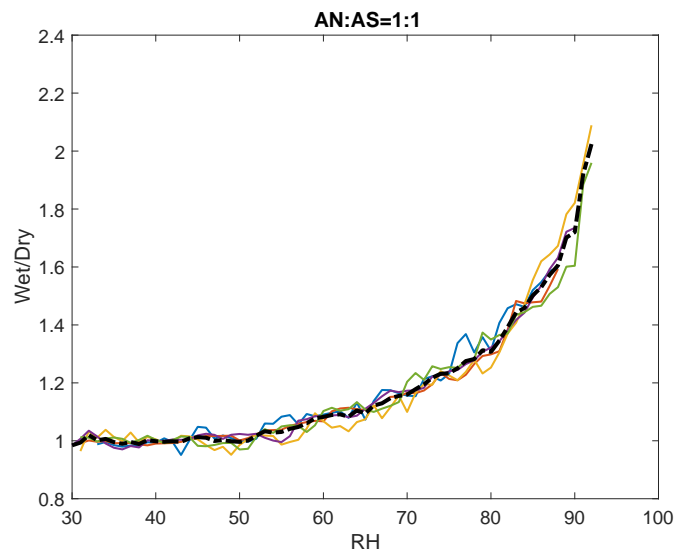


圖二十五 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:1.25，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 56% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 56% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(6) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:1，內混合懸浮微粒

圖二十六為硝酸銨與硫酸銨比例 1:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

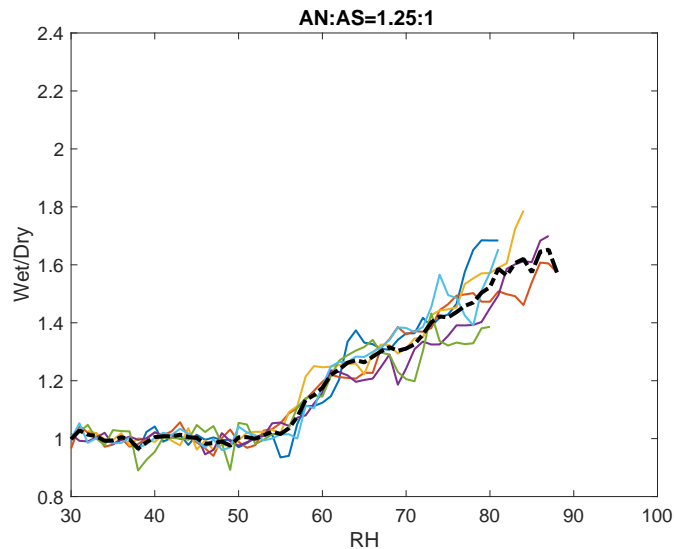


圖二十六 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1:1，乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 51% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 51% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(7) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1.25:1，內混合懸浮微粒

圖二十七為硝酸銨與硫酸銨比例 1.25:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

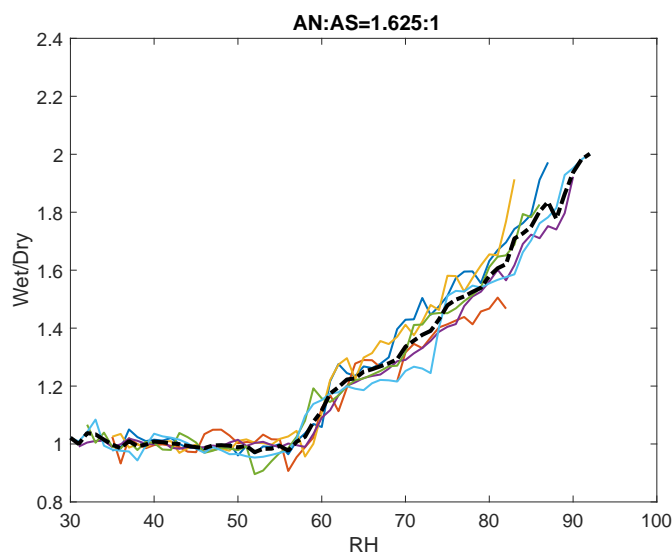


圖二十七 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1.25:1，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 55% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 55% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(8) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1.625:1，內混合懸浮微粒

圖二十八為硝酸銨與硫酸銨比例 1.625:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

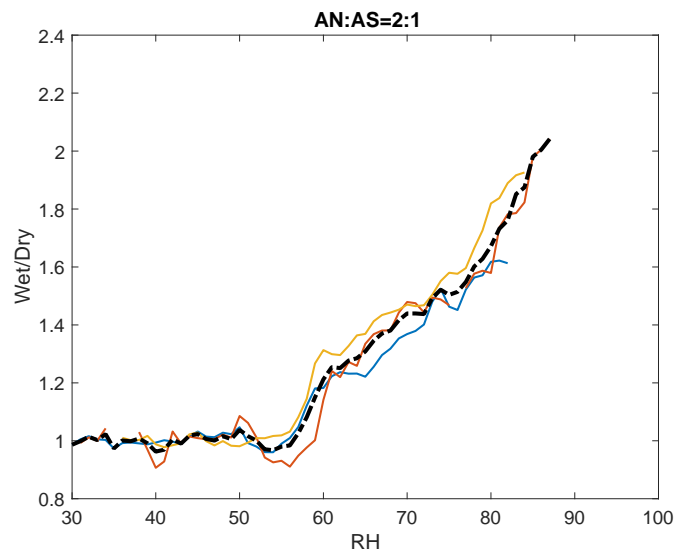


圖二十八 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 1.625:1，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 56% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 56% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(9) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 2:1，內混合懸浮微粒

圖二十九為硝酸銨與硫酸銨比例 2:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

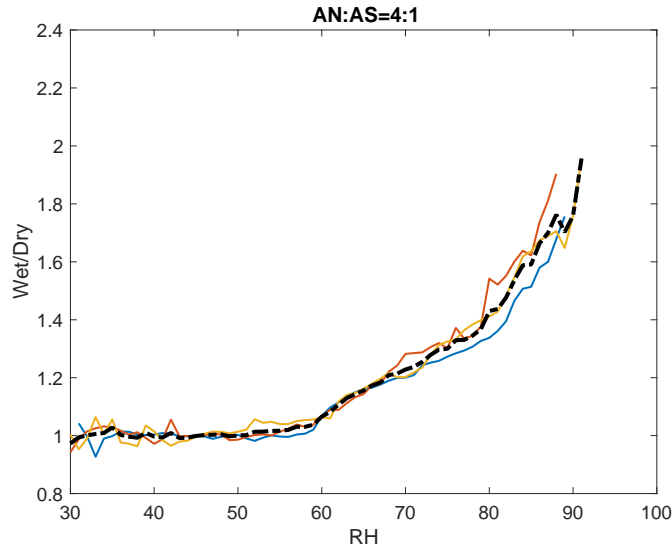


圖二十九 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 2:1，乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 58% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 58% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(10) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 4:1，內混合懸浮微粒

圖三十為硝酸銨與硫酸銨比例 4:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

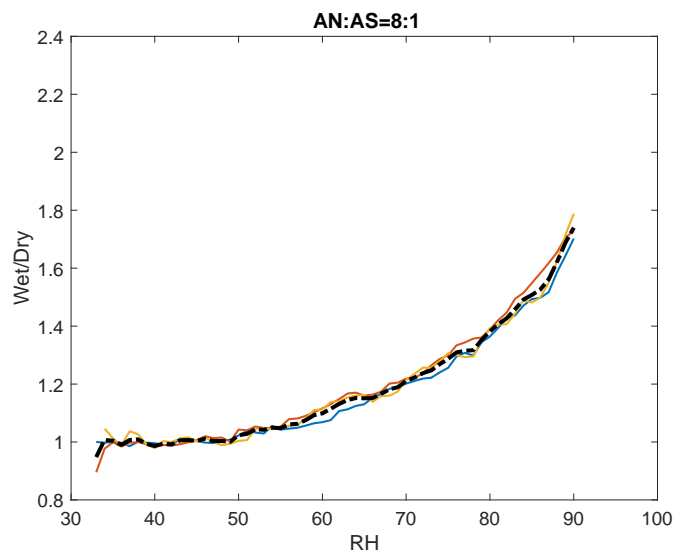


圖三十 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 4:1，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 55% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 55% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

(11) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 8:1，內混合懸浮微粒

圖三十一為硝酸銨與硫酸銨比例 8:1，以內混合方式混合並做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

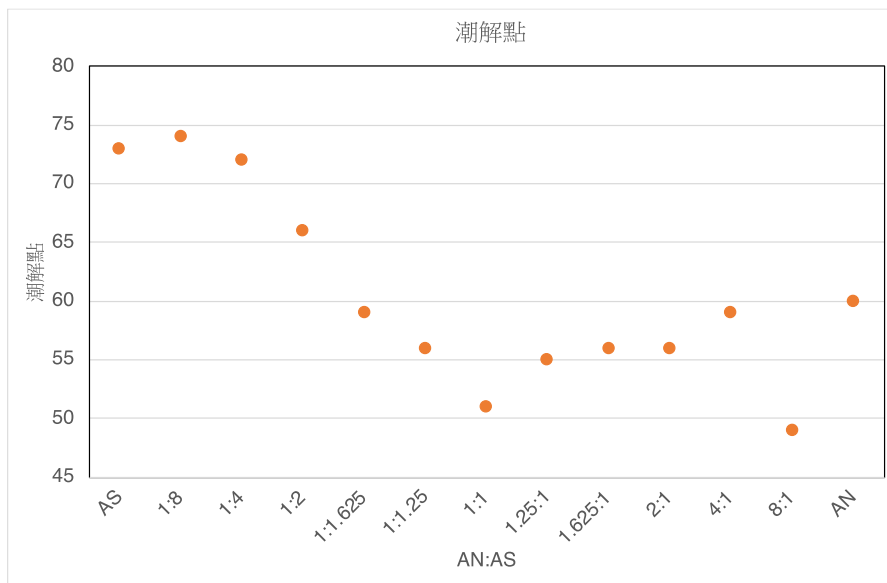


圖三十一 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)莫耳濃度比 8:1，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（內混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 49% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 49% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

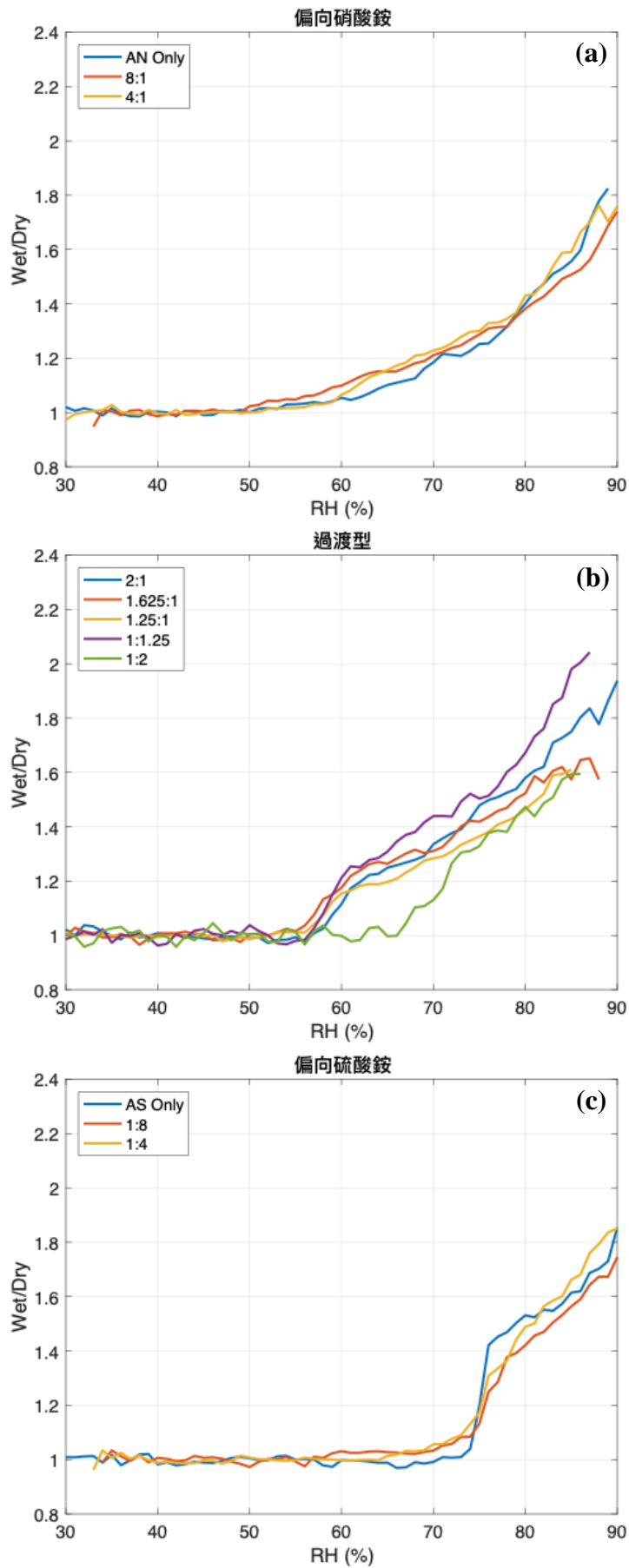
(12) 綜合討論與分析

圖三十二整理了不同內混合比下懸浮微粒的潮解點。我們可以發現到當硫酸銨與硝酸銨莫耳濃度比為 2:1 時，懸浮微粒的潮解點較接近純硫酸銨的潮解點；其餘比例都較接近純硝酸銨。這代表著當硫酸銨含量低於硝酸銨的兩倍的時候，懸浮微粒的潮解點將由硝酸銨主導。



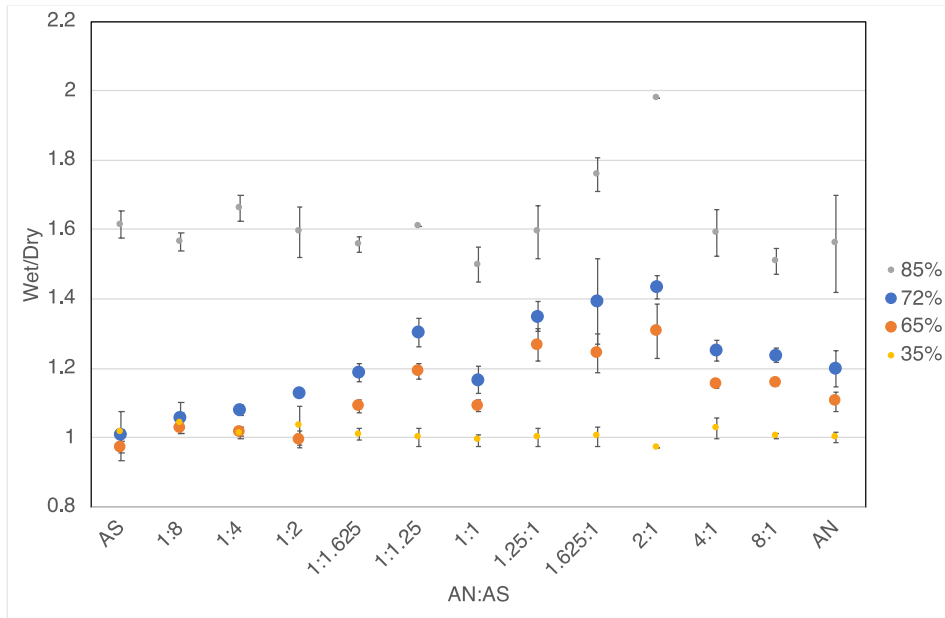
圖三十二 各個內混合比懸浮微粒的潮解點

我們根據懸浮微粒內混合比的類型，發現它們的潮解行為各有特性。偏向硝酸銨型的潮解點不明顯，類似於純硝酸銨（圖三十三(a)）。過渡型大多有明顯的潮解點，其中多數的潮解點接近純硝酸銨的潮解點，只有硝酸銨與硫酸銨比例 2:1 的懸浮微粒潮解點接近純硫酸銨的潮解點（圖三十三(b)）；值得注意的是，內混合比 1:1 和 1:1.625 的懸浮微粒潮解行為相當特殊（未繪於圖三十三(b)中），它們沒有明顯的潮解點。偏向硫酸銨型也有明顯的潮解點，類似於純硫酸銨（圖三十三(c)）。



圖三十三 不同內混合比例的懸浮微粒的乾濕濃度比值與相對濕度的關係圖
(a)偏向硝酸銨型 (b)過渡型 (c)偏向硫酸銨型

圖三十四是懸浮微粒的乾濕濃度比值與內混合比例的關係圖，我們設定了完全沒有潮解的相對濕度 35%，完全潮解的相對濕度 85%，以及介於兩者之間的相對濕度 65% 及 72% 共 4 個觀察點。我們可以注意到，內混合的硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒在相對濕度 65% 和 72% 時，乾濕懸浮微粒的濃度比值大致上都比純硝酸銨和純硫酸銨懸浮微粒還要高。這代表著內混合的懸浮微粒部分潮解後，相較於純硝酸銨和純硫酸銨，在量測未去水懸浮微粒質量濃度的時候，高估現象比較顯著。



圖三十四 懸浮微粒的濕乾濃度比值與內混合比例的關係圖

在裝置內懸浮微粒達到臨界相對濕度以前都是被乾燥的結晶，並在達到臨界相對濕度時開始吸濕。鹽類懸浮微粒吸水量足夠時就會形成不飽和的水溶液，並解離且形成溶劑殼。這些溶劑殼最外層的電荷會開始吸環境中水氣中與其極性不同的電荷。當外層的電荷越多，吸的水就越多，對懸浮微粒的體積及散射率的影響就越大。在氣溫攝氏 30 度下，硝酸銨的溶解度是 2.42g/ml，臨界相對濕度是 59.4%，而硫酸銨的溶解度是 0.781g/ml，臨界相對濕度是 79.2%。這代表硝酸銨相比於硫酸銨，會在相對濕度較低的時候開始潮解。我們透過比較硝酸銨與硫酸銨的臨界相對濕度，可以發現到硝酸銨開始潮解時周圍的水氣量，會比硫酸銨開始潮解時周圍的水氣量少。這代表著，當硫酸銨開始吸水時溶劑殼外的電荷量，會比硝酸銨開始吸水時溶劑殼外的電荷量多，所以硫酸銨開始吸水時體積成長比較顯著。同樣粒徑的硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒，會因為分子量不同的關係，而導致會有不同數量的硝酸銨或硫酸銨分子。當它們解離後電荷的數量會不同，這也是造成硝酸銨與硫酸銨潮解行為不同的原因。

硝酸銨與硫酸銨的內混合懸浮微粒潮解行為，會受到他們的混合比影響。硝酸銨會先開始吸水，進一步讓硫酸銨也開始吸濕。在一定的比例範圍內，硝酸銨吸濕會讓硫酸銨溶解，讓硫酸銨在達到臨界相對濕度前就開始吸濕。當硝酸銨與硫酸銨一起吸濕，會因為硫酸銨解離後電荷數較多的緣故，而可以吸收相較於硝酸銨更多的水。當內混合比介於 1:2 到 2:1 之間之間，我們可以發現過渡型的潮解行為相較於偏向硝酸

銨的潮解行為，會有明顯的潮解點，類似於偏向硫酸銨的潮解行為，但是潮解點比偏向硫酸銨的為低。我們推測這是因為硝酸銨導致硫酸銨提早潮解，而硫酸銨相較於硝酸銨有較好的吸濕性，讓硝酸銨與硫酸銨的內混合懸浮微粒中只要含有一定比例的硫酸銨，就會有相較於純硝酸銨懸浮微粒更好的吸濕性，讓體積成長顯著，而表現出明顯的轉折點。

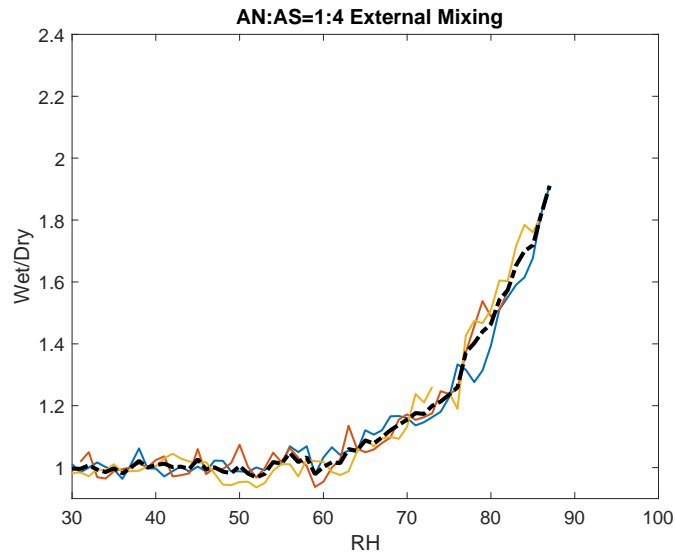
我們從以上的分析中發現，在量測未去水懸浮微粒質量濃度時，有高估不一致的現象。雖然此現象不影響我們裝置的運作，但值得另行加以延伸研究：

- i. 我們在測量未去水的環境中懸浮微粒質量濃度時，會因為硝酸銨含量高於硫酸銨 0.5 倍的內懸浮微粒臨界相對濕度偏低的特性。這會讓我們在測量環境懸浮微粒質量濃度時會比較容易高估懸浮微粒的質量濃度。我們可以在未來設計公式，讓空氣盒子測量到的懸浮微粒質量濃度在懸浮微粒沒有被去水的情況下也可以被準確的測量。
- ii. 我們未來設計公式時，可以根據不同環境下懸浮微粒的潮解點得知空氣盒子量測開始出現高估的濕度。
- iii. 我們必須根據環境各個懸浮微粒成分的佔比來制定不同的修正公式，而不是根據潮解點將資料套到同一個公式裡。因為不同成分比例的懸浮微粒會有不同的潮解點與潮解行為。我們無法確切地得知環境中不同成分懸浮微粒的比例，所以我們必須透過長期的觀察空氣盒子高估環境懸浮微粒質量濃度的趨勢，來找到修正質量濃度的方法。

3. 硝酸銨與硫酸銨外混合懸浮微粒的潮解膨脹現象

(1) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:4，外混合懸浮微粒

圖三十五為硝酸銨與硫酸銨比例為 1:4，以外混合方式混合並做 3 次實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

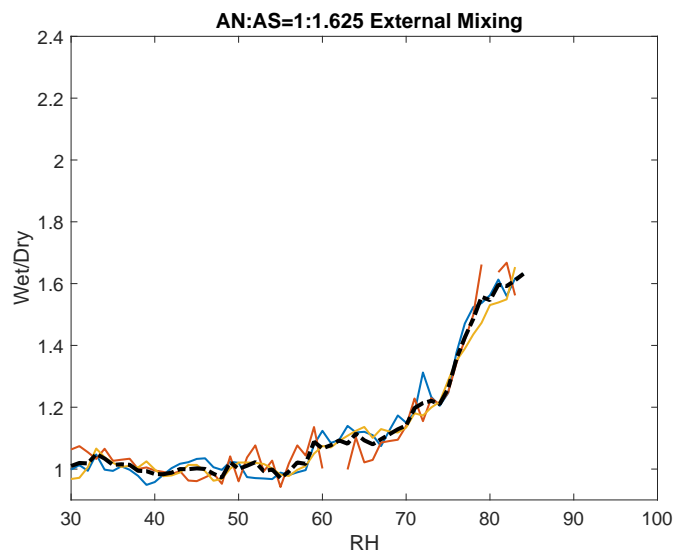


圖三十五 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)濃度比 1:4，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（外混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 59% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 59% 時開始上升，在相對濕度 75% 時上升的趨勢開始變大。這代表著硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，分別開始潮解膨脹。

(2) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1:1.625，外混合懸浮微粒

圖三十六為硝酸銨與硫酸銨比例為 1:1.625，以外混合方式混合並做 3 次實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

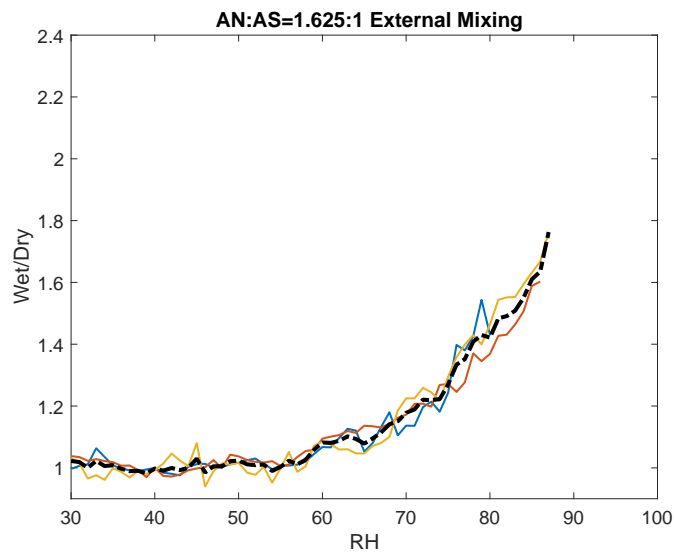


圖三十六 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)濃度比 1:1.625，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（外混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 58% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 58% 時開始上升，在相對濕度 74% 時上升的趨勢開始變大。這代表著硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，分別開始潮解膨脹。

(3) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 1.625:1，外混合懸浮微粒

圖三十七為硝酸銨與硫酸銨比例為 1.625:1，以外混合方式混合並做 3 次實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

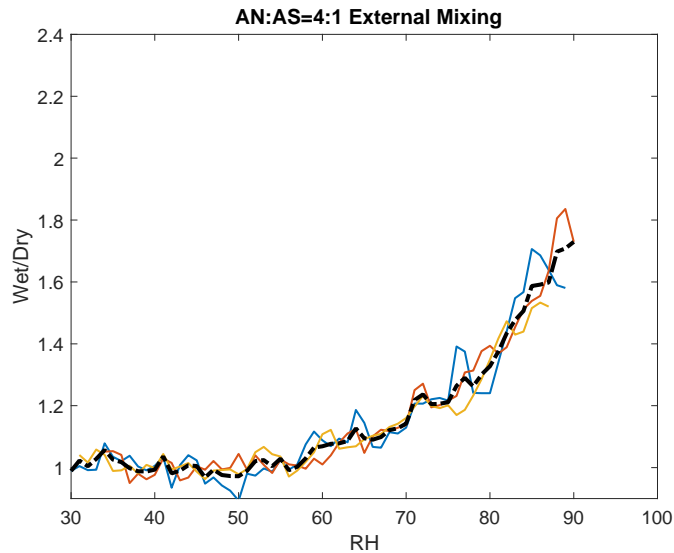


圖三十七 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)濃度比 1.625:1，乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（外混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 57% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 59% 時開始上升，在相對濕度 74% 時上升的趨勢開始變大。這代表著硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，分別開始潮解膨脹。

(4) 硝酸銨：硫酸銨莫耳濃度比 4:1，外混合懸浮微粒

圖三十八為硝酸銨與硫酸銨比例為 4:1，以外混合方式混合並做 3 次實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

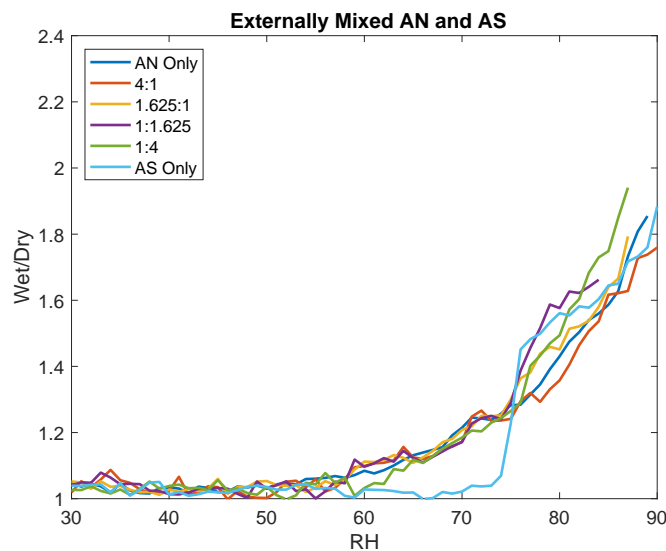


圖三十八 硝酸銨(AN)：硫酸銨(AS)濃度比 4:1，
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖（外混合）

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 58% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 58% 時開始上升，在相對濕度 80% 時上升的趨勢開始變大。這代表著硝酸銨與硫酸銨懸浮微粒達到臨界相對濕度，分別開始潮解膨脹。

(5) 綜合討論與分析

表三為外混合懸浮微粒潮解點一覽表，圖三十九為不同外混合比例的懸浮微粒的濕乾濃度比值與相對濕度關係圖。我們可以發現，在每個比例下都有兩個潮解點，且潮解點的濕度都相近。這是因為硝酸銨與硫酸銨微粒還是個別的微粒（參見圖十五），它們保留各自的特性，潮解點不受彼此的影響。當硝酸銨的比例較多的時候，硫酸銨的潮解點就比較不明顯。



圖三十九 不同外混合比例的懸浮微粒的濕乾濃度比值與相對濕度的關係圖

表三 各個外混合比懸浮微粒的潮解點

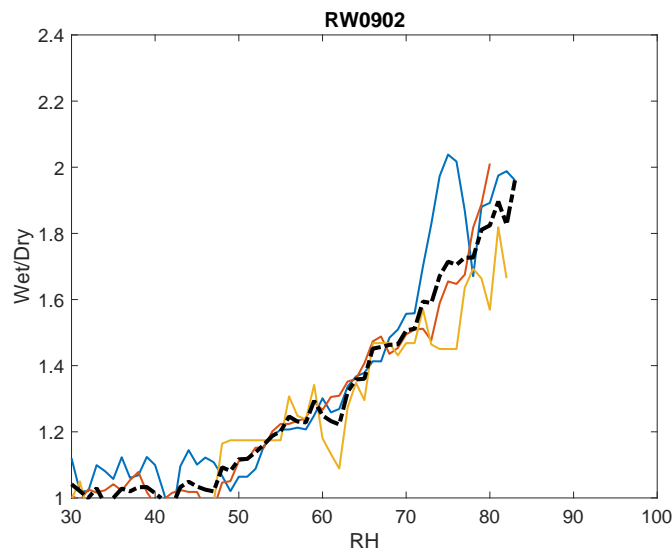
硝酸銨：硫酸銨	潮解點一	潮解點二
1:4	59%	75%
1:1.625	58%	74%
1.625:1	59%	74%
4:1	58%	80%

環境中存在各種內混合比的懸浮微粒，它們之間的關係則為外混合。我們可以從上述綜合討論推論出，如果我們將環境中的空氣抽進裝置裡，應該至少可以看到兩個潮解點，代表不同內混合比的懸浮微粒。

(二) 實驗二結果：利用研究裝置分析推估雨水中空氣污染物的主要成分

1. 雨水樣本 RW0902

圖四十為 2020 年 9 月 2 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW0902，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

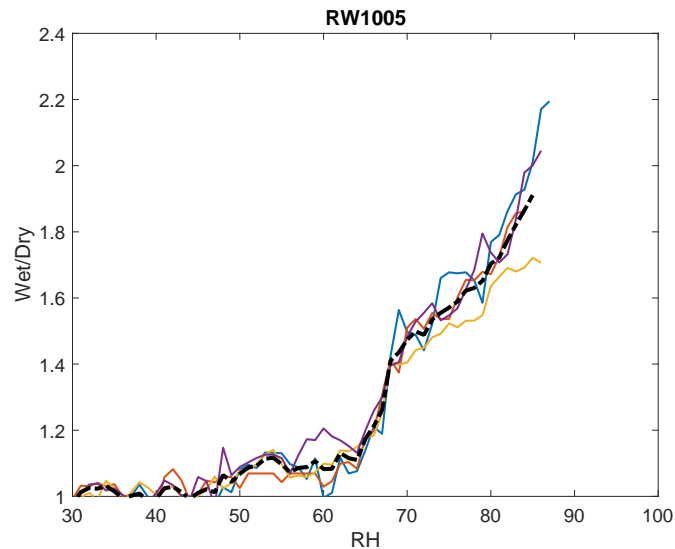


圖四十 2020 年 9 月 2 日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值在相對濕度 42% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 42% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

2. 雨水樣本 RW1005

圖四十一為 2020 年 10 月 5 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW1005，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

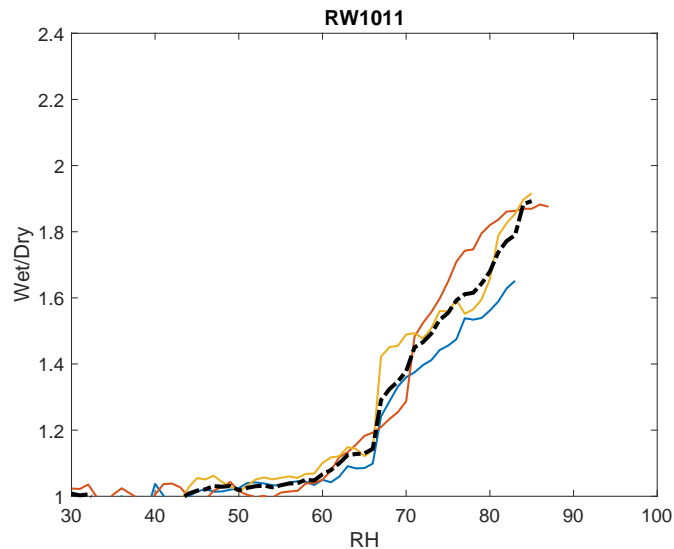


圖四十一 2020 年 10 月 5 日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 64% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 64% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

3. 雨水樣本 RW1011

圖四十二為 2020 年 10 月 11 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW1011，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

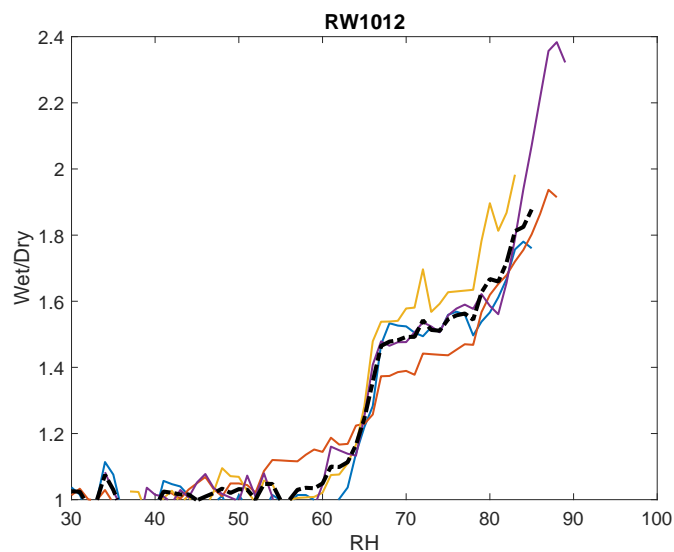


圖四十二 2020年10月11日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 66% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 66% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

4. 雨水樣本 RW1012

圖四十三為 2020 年 10 月 12 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW1012，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

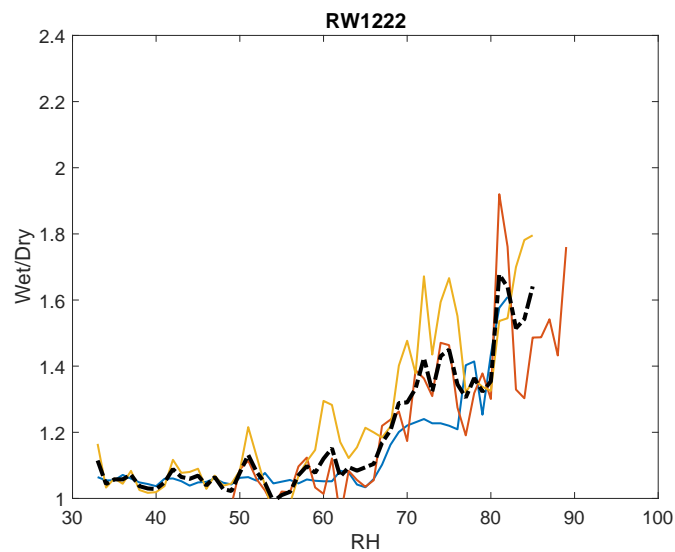


圖四十三 2020年10月12日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 63% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 63% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

5. 雨水樣本 RW1222

圖四十五為 2020 年 12 月 22 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW1222，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

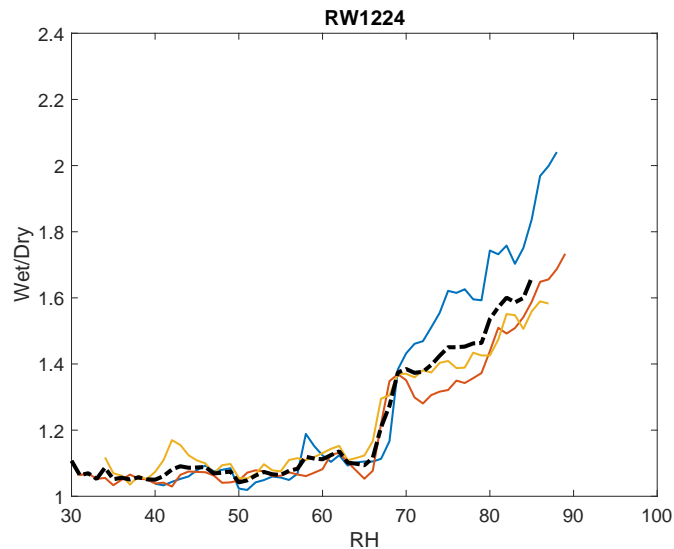


圖四十五 2020 年 12 月 22 日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 66% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 66% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

6. 雨水樣本 RW1224

圖四十六為 2020 年 12 月 24 日收集到的雨水所產生的懸浮微粒，樣本編號 RW1224，做 3 次以上實驗平均，在各個濕度下乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖。圖的 x 軸為相對濕度，y 軸為乾燥與加濕過後的懸浮微粒濃度比值。

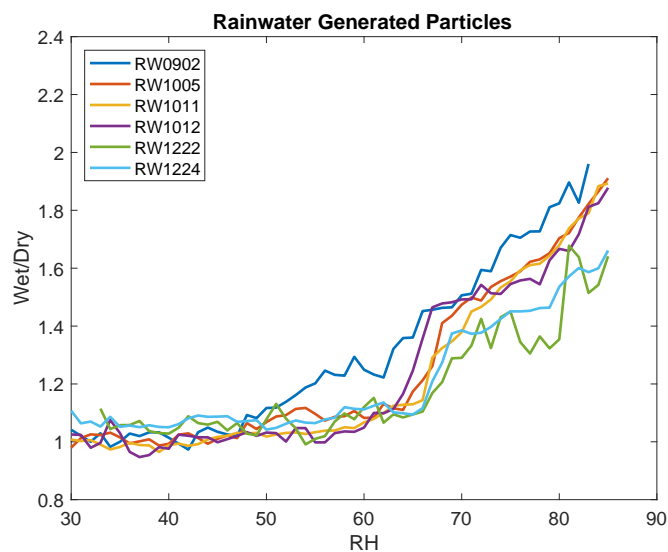


圖四十六 2020 年 12 月 24 日雨水產生懸浮微粒
乾濕懸浮微粒濃度比值對相對濕度關係圖

從圖中我們可以看到懸浮微粒濃度比值，在相對濕度 66% 以前都是呈現平緩狀態，比值約為 1，相對濕度過了 66% 時開始上升。這代表著懸浮微粒達到臨界相對濕度，開始潮解膨脹。

7. 綜合討論與分析

圖四十七為所有雨水樣本產生的乾濕懸浮微粒濃度比值，對相對濕度的成長曲線疊圖。我們可以發現雨水樣本 RW0902 的潮解行為與其餘樣本的潮解行為不同。RW0902 的潮解點在相對濕度 42%，其餘的皆在相對濕度 65% 左右。



圖四十七 所有雨水樣本產生的乾濕懸浮微粒濃度比值，對相對濕度的成長曲線疊圖

從以上除了 RW0902 以外的雨水樣本中，我們可以發現到用它們產生出的懸浮微粒的潮解行為都偏向硫酸銨，可見主要來源為工業污染，而非交通排放。因為我們觀測的樣本都是在台灣的秋冬季採樣的，依照中央氣象局台北測站的風向觀測值，主要都是吹東北風（如表四），而台灣工業區主要位於台北以南，我們可以進一步推論這些懸浮微粒可能來自台灣東北方的境外工業排放。我們還可以發現到這些懸浮微粒雖然有和硫酸銨類似的潮解行為，但是他們的潮解點不同，我們認為這是因為這些雨水中還有混雜一些不是硫酸銨的鹽類。

樣本 RW0902 產生的懸浮微粒的潮解行為，我們認為是偏向硝酸銨與硫酸銨的過渡期行為。在 2020 年 9 月 2 日時，台灣吹的是西南風（如表四）。我們認為這些懸浮微粒的來源可能是來自台灣境內的工業以及交通污染。

表四 取樣日中央氣象局台北測站風向表（取自 CODiS）

觀測時間(時)	2020/09/02	2020/10/05	2020/10/11	2020/10/12	2020/12/22	2020/12/24
3	210	70	100	120	90	310
6	210	140	90	70	90	300
9	220	90	80	80	90	330
12	270	80	100	80	80	330
15	280	80	70	70	90	80
18	290	80	80	80	80	40
21	150	80	80	80	80	80
24	180	130	80	90	70	110

我們可以發現到，雨水產生的懸浮微粒成長曲線相較於人工產生的懸浮微粒有右移的現象。我們認為這是因為我們用雨水產生出的懸浮微粒粒徑分佈較大，所以他們需要吸收更多的水才能潮解，導致成長曲線右移。

三、 結論與應用

我們利用空氣盒子設計了一個裝置，成功的觀察到了硝酸銨與硫酸銨各自以及不同比例內外混合組成的懸浮微粒，其吸濕潮解膨脹現象。當懸浮微粒達到臨界相對濕度的時候，就會開始潮解，並且產生粒徑的變化。其中內、外混合的懸浮微粒有著不同的吸濕性表現。我們在這個部份的主要發現如下：

- (一) 純硝酸銨與純硫酸銨的潮解點分別為相對濕度 60%和 73%。其中純硝酸銨的潮解點較不明顯，我們認為這是因為當硫酸銨達臨界相對濕度時，相較硝酸銨開始潮解時有更多的水氣可以吸收，讓它有比較全面的吸濕潮解現象發生。
- (二) 內混合懸浮微粒偏向硝酸銨型的吸濕潮解表現與純硝酸銨類似，潮解點不明

顯。過渡型能多數能明顯看出接近純硝酸銨的潮解點。偏向硫酸銨型則可明顯看出接近純硫酸銨的潮解點。各種不同比例內混合懸浮微粒的潮解行為相當複雜，且過渡型內混合懸浮微粒潮解後的粒徑成長比例會比其他 2 型來得高，此即為所謂的特別高估現象。

- (三) 外混合懸浮微粒都有兩個潮解點，分別接近純硝酸銨與純硫酸銨的潮解點。這是因為硝酸銨與硫酸銨微粒是個別的微粒，它們保留各自的特性，潮解點不受影響。當硝酸銨的比例較多的時候，硫酸銨的潮解點就比較不明顯。

由於我們裝置的特性，無法直接量測大氣中懸浮微粒的潮解膨脹現象，因此我們研究的第二個部份是分析濃縮後的雨水樣本。我們將採自台北市南港區的雨水樣本，用我們的裝置觀察其潮解膨脹現象，並與內混合懸浮微粒的潮解點和潮解行為做比對，確定能推估主要的污染成分，進而辨識出主要的污染來源。

我們在研究過程中又發現了一些待解問題。首先，過渡型內混合懸浮微粒有少數比例的潮解行為特殊，可能需要日後觀察更多內混合比的懸浮微粒潮解膨脹現象，才有機會確認原因為何。其次，在測量未去水懸浮微粒時，發現空氣盒子可能有特別高估內混合懸浮微粒的質量濃度，雖然不影響我們裝置運作，但值得另行加以延伸研究。

關於雨水中的污染來源分析，由於樣本製備手續耗時，截至目前為止，我們只完成了 4 個樣本分析，雖然足供我們確認研究裝置的應用性，但若是能對更多雨水樣本進行系統分析，必定能夠對不同時間甚至不同地點的雨水污染物有更加深入的了解。這也是我們未來研究繼續努力的方向。

四、 參考文獻

- 王國英 (2009)。空氣污染。臺灣大百科全書。2019 年 3 月 10 日。取自 <http://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=3342>。
- 中央氣象局。觀測資料查詢 CODiS。2020 年 12 月 25 日。取自 <https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/>
- 台北市環境品質資訊網 (2020)。101 大樓垂直高層 PM_{2.5} 監測。2020 年 11 月 3 日，取自 https://www.tldep.gov.taipei/Public/EnvMonitoring/Air_101.aspx
- 行政院環境保護署 (2019)。懸浮微粒 (PM₁₀)-貝他射線分析法。2019 年 4 月 8 日，取自 <https://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/b1305.aspx>
- 於幼華 (主編) (2002)。環境科學大辭典。台北：文景書局。
- 洪逸文、陳正達 (2011)。懸浮微粒--常被忽略的大氣成分。科學 online。2018 年 3 月 26 日，取自 <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=23380>
- 海克智動 (2016)。HK-A5 Laser PM_{2.5}/10 Sensor。北京：海克智動公司。
- 徐嘉鴻 (2015)。高雄都會區氣膠吸濕特性之探討。台灣大學大氣科學研究所碩士論文。

- 維基百科 (2019a)。懸浮微粒。2019年3月26日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/懸浮粒子>
- 維基百科 (2019b)。臨界相對濕度。2019年3月26日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/臨界相對濕度>
- 謝瑞豪、李睿桓、詹長權 (2016)。台灣大氣中 PM2.5 污染濃度和汙染源的時空分布。 *台灣醫學*，20 (4)。
- Adachi, P. et al. (2011). *Shapes of internally mixed hygroscopic aerosol particles after deliquescence, and their effect on light scattering*. Retrieved October 28, 2020, from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011GL047540>
- Chen, L.-Y. et al. (2003). Hygroscopic behavior of atmospheric aerosol in Taipei. *Atmospheric Environment*, 37, 2069–2075
- Gibson, P. (2000). Temperature-Dependent Water Vapor Diffusion Through Shape- Memory Polymer Laminates: Performance Comparison With Other Waterproof-Breathable Laminates. *Water*, 19(12), 1–27
- Jacobson, M. Z. (2012). Example equilibrium problem, *Fundamentals of Atmospheric Modeling, 2nd Edition*. 575-577. Cambridge University Press.
- Kokkola, H. et al., 2006. On the hygroscopic growth of ammoniated sulfate particles of non-stoichiometric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6(1), 1–16.
- Lu, H.-Y. et al. (2019). Various Sources of PM2.5 and their Impact on the Air Quality in Tainan City, Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(3), 601–619.
- Purinton et al. (2020). Gore-Tex: An Introduction to the Material and Treatments. Retrieved March 5, 2020, from <https://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v11/bp11-33.html>
- Southeastern Automation, Inc. *Nafion® Dryers and Humidifiers, The Ten Most Common Questions*. Retrieved March 5, 2020, from <http://southeastern-automation.com/PDF/Perma%20Pure/Perma%20Pure%20PDF%20Cutsheets/TECH%204-Questions.pdf>
- Wikipedia (2019). *Particulates*. Retrieved March 28, 2019, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Particulates>
- Wu, L. et al. (2019). Hygroscopic Behavior of Ammonium Sulfate, Ammonium Nitrate, and their Mixture Particles. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(3), 196-211.

【評語】 200017

本作品以空氣盒子設計一裝置，可以觀察懸浮微粒的潮解、膨脹現象，以硝酸銨與硫酸銨組成之懸浮微粒，探討不同混合模式與比例下的潮解、膨脹現象，並以實際雨水之懸浮微粒的潮解膨脹現象，以推估其污染的種類與來源。作品兼具學術理論探討與實用推估價值。