

基本摘要內容：

計畫名稱：114 年度配合環境部政策執行環境監測採樣作業計畫

計畫編號：YLEPB-114-050

主管機關：雲林縣環境保護局

執行單位：昱山環境技術服務顧問有限公司

計畫主持人：賴典政

聯絡人：劉文雅

聯絡電話：(05)5361946

傳真號碼：(05)5379716

總經費：6,370 千元整

全期期程：114 年 04 月 01 日至 114 年 12 月 31 日

本期期程：114 年 09 月 01 日至 114 年 12 月 31 日

1. 執行進度：預定(%) 實際(%) 比較(%)

本期進度	100	100	100
------	-----	-----	-----

2. 經費支用：預定(仟元) 實際(仟元) 支用比率(%)

本期經費	3,185	3,185	100
------	-------	-------	-----

3. 主要執行內容：

(1) 辦理懸浮微粒氣膠化學監測及分析

I. 使用地面氣膠化學監測與分析，包括水溶陰陽離子、元素碳、有機碳化學成分(至少 1 站點)。

II. 分析地面氣膠之特徵及流佈。

(2) 辦理大氣環流探空觀測工作

I. 解析探空資料，提供大氣環流分布(至少 1 站點)。

II. 分析大氣 VOCS 及醛酮類樣本。

(3) 分析長程傳輸對大氣污染物之影響

I. 建立污染源解析模型，並綜合分析不同污染物種的流佈特性，透過科學方法探討空氣污染的成因，提供空氣品質改善建議，除期望能有效降低污染影響外，並進一步為環境政策制定提供科學依據(至少 1 式)。

(4) 資料整合分析、資料庫及紀錄片製作(1部)及成果發表

I. 協助影像拍攝及紀錄實驗過程

II. 探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析

III. 參與空氣品質、大氣環境、監測技術等相關論壇或活動，發表成果。

4. 計畫變更說明：無。

5. 落後原因分析：無。

6. 解決辦法：無。

7. 主管機管管考建議：無。

「114 年度配合環境部政策執行環境監測採樣作業計畫」期末報告
基本資料表

甲、委辦單位	雲林縣環境保護局		
乙、執行單位	昱山環境技術服務顧問有限公司		
丙、年 度	114 年度	計畫編號	YLEPB-114-050
丁、專案性質	勞務類 94-污水及垃圾處理、公共衛生及其他環保服務		
戊、專案領域	空氣品質		
己、計畫屬性	<input type="checkbox"/> 科技類		<input checked="" type="checkbox"/> 非科技類
庚、全程期間	114 年 04 月 01 日~114 年 12 月 31 日		
辛、本期期間	114 年 09 月 01 日~114 年 12 月 31 日		
壬、本期經費	新台幣 <u> 叁佰壹拾捌萬伍仟 </u> 元整		
	資本支出		經常支出
	土地建築 <u> </u> 千元		人事費 <u> 495 </u> 千元
	儀器設備 <u> </u> 千元		業務費 <u> 2,082.5 </u> 千元
	其 他 <u> </u> 千元		材料費 <u> 183.7 </u> 千元
			其 他 <u> 423.8 </u> 千元
癸、摘要關鍵詞（中英文各三則）			
氣膠化學採樣分析 Aerosol Chemical Sampling and Analysis			
大氣環流探測 Atmospheric Circulation Observation			
污染傳輸解析 Air pollution Transport Analysis			

參與計畫人力資料：（如僅代表簽約而未參與實際專案工作計畫者則免填以下資料）

參與計畫人員姓名	工作要項或撰稿章節	現職與簡要學經歷	參與時間(人月)	聯絡電話及 e-mail 帳號
賴典政	計畫主持人報告審核及督導整合	1. 弘光科技大學環境工程所碩士 2. 雲林縣環保局「106 年度空氣品質維護管理暨懸浮微粒削減管制整合計畫」－計畫工程師 3. 雲林縣環保局「108-112 年度雲林縣空氣品質維護管理計畫」－計畫經理 4. 雲林縣環保局「113-114 年度雲林縣空氣品質維護管理計畫」－協同主持人	3 人月	05-5361946 djlai@wecc.com.tw
劉文雅	計畫經理負責撰寫第一至四章及第六章節	1. 雲林縣環保局「109-111 年度雲林縣空氣品質維護管理計畫」－計畫工程師 2. 雲林縣環保局「113 年度雲林縣空氣品質監測車操作維護計畫」－計畫工程師	9 人月	05-5361946 wenya@wecc.com.tw
蕭宥豪	計畫工程師負責撰寫第五章節	1. 雲林縣「太陽光電申設案件管控委託專業服務案」－專案管理	9 人月	05-5361946 yuhao@wecc.com.tw

雲林縣環境保護局期末報告中文摘要（簡要版）

- 一、中文計畫名稱：114 年度配合環境部政策執行環境監測採樣作業計畫
- 二、英文計畫名稱：2025 Environmental Monitoring and Sampling Operations Project in Compliance with the Ministry of Environment Policies
- 三、計畫編號：YLEPB-114-050
- 四、執行單位：昱山環境技術服務顧問有限公司
- 五、計畫主持人（包括共同主持人）：賴典政
- 六、執行開始時間：114 年 04 月 01 日
- 七、執行結束時間：114 年 12 月 31 日
- 八、報告完成日期：115 年 01 月 06 日
- 九、報告總頁數：194 頁
- 十、使用語文：中文、英文
- 十一、報告電子檔名稱：YLEPB-114-050.DOC
- 十二、報告電子檔格式：WORD 2010
- 十三、中文摘要關鍵詞：密集觀測期、氣膠化學採樣分析，大氣環流探測，污染傳輸解析
- 十四、英文摘要關鍵詞：Intensive Observation Period、Aerosol Chemical Sampling and Analysis, Atmospheric Circulation Observation, Air pollution Transport Analysis

十五、中文摘要（約三百至五百字）：

本計畫執行期程自 114 年 4 月 1 日至 114 年 12 月 31 日止。期末報告應完成之工作項目皆已達成契約工作量，茲將執行成果說明如下：至計畫期程結束，已完成三次密集觀測期(Intensive Observation Period)，以下簡稱 IOP，並完成所有累積工作量：地面氣膠監測 1 站點、大氣環流探空觀測工作 1 站點及 1 站點之醛酮類分析作業。

大氣環流觀測結果顯示，IOP1 主要受大氣條件影響顯著，因邊界層偏低，風速微弱等因素，使污染擴散不易；且污染可能並非由區域排放的向上傳輸，而是境外污染導致。IOP2 污染可能來源為傳輸效應和本地排放，加上局地氣象條件影響，使空品些微惡化。IOP3 顯示雲林空品不僅受北方境外傳輸影響，在特定天氣型態及流場下，其空品惡化亦有本地排放和鄰近縣市的貢獻。

垂直 VOCs 採樣分析結果顯示，IOP1 污染呈現多層次結構：地面層主要受局地排放源影響，中層（約 200-500 公尺）則顯示出溶劑使用等工業活動特徵，而高空層（800 公尺以上）則反映區域傳輸的污染特性。IOP2 顯示 VOCs 於大氣中的分布並非完全均勻，而是同時受到近地面排放強度、邊界層結構及短程輸送過程的共同影響。IOP3 可清楚辨識出排放型態與強度差異：斗六站以乙烯、乙烷、甲苯及丙烷為主，呈現以交通與一般區域排放為主的特徵。

氣膠化學分析結果顯示，雲林斗六及臺西在夜間有明顯的光化產物累積，導致夜間濃度高於日間，且斗六濃度高於臺西，顯現較具都市型態且內陸地區的斗六有較高的光化產物生成累積的潛勢。環境微生物所釋放的生物性醣醇物種較夜間活躍，且有少量的生質燃燒貢獻。醛酮類分析結果顯示，臺西及鎮西國小可能受微量排放甲醛、乙醛、丙烯醛等影響。

十六、英文摘要：

Project Implementation and Results Summary, Project Duration: April 1, 2025 – December 31, 2025. The work items scheduled for the final report have been fully executed in accordance with the contractual requirements. The implementation results are summarized as follows: By the conclusion of the project period, three Intensive Observation Periods (IOPs) were conducted, and the cumulative workload was completed, including ground-level aerosol monitoring at one site, atmospheric circulation sounding observations at one site, and carbonyl (aldehydes and ketones) analysis at one site.

Atmospheric Circulation Observations. IOP1: Results indicate that air quality was significantly dictated by atmospheric conditions. A low Planetary Boundary Layer (PBL) and weak wind speeds hindered pollutant dispersion. Furthermore, findings suggest that pollution was likely driven by long-range transport rather than the upward flux of local emissions. IOP2: The primary drivers of pollution were a combination of transport effects and local emissions, which, coupled with local meteorological conditions, led to a slight deterioration in air quality. IOP3: Observations show that air quality in Yunlin is not only influenced by long-range transport from the north; under specific weather patterns and flow fields, local emissions and contributions from neighboring counties also play significant roles.

Vertical VOC Sampling and Analysis. IOP1: Pollutant distribution exhibited a multi-layered structure. The surface layer was primarily influenced by local sources; the middle layer (approx. 200–500m) showed characteristics of industrial activities, such as solvent use; and the upper layer (above 800m) reflected regional transport characteristics. IOP2: The distribution of Volatile Organic Compounds (VOCs) was non-uniform, resulting from the complex interplay between surface emission intensity, boundary layer structure, and short-range transport processes. IOP3: Distinct

emission patterns were identified. The Douliu Station was characterized by high concentrations of ethylene, ethane, toluene, and propane, reflecting an emission profile dominated by traffic and general urban activities.

Aerosol Chemical and Carbonyl Analysis. **Aerosol Analysis:** Significant nocturnal accumulation of photochemical products was observed in Douliu and Taixi (Yunlin), leading to higher nighttime concentrations compared to daytime levels. Concentrations at Douliu were higher than those at Taixi, highlighting that the inland, urbanized environment of Douliu has a higher potential for the accumulation of photochemical products. **Biological Markers:** Biogenic sugar alcohols released by environmental microorganisms were more active during the day, with minor contributions from biomass burning also detected. **Carbonyl Analysis:** Results indicate that the Taixi and Zhenxi Primary School sites were affected by trace emissions of formaldehyde, acetaldehyde, and acrolein.

預定進度及查核點

一、契約書中計畫預定進度及查核點（甘特圖）

工作內容項目	月次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	年別	114								
	月份	4	5	6	7	8	9	10	11	12
地面氣膠化學監測	★	★	★	★	★					
	配合環境部於地面測站進行氣膠化學監測及分析(至少 1 站點)									
大氣環流探空觀測工作	★	★	★	★	★					
	配合環境部執行探空觀測，解析探空資料，提供大氣環流分布(至少 1 站點)									
氣膠化學成分及來源解析							★	★	★	★
	包括水溶陰陽離子、元素碳、有機碳化學成分(至少 1 站點)									
探空觀測大氣 VOCs 及醛酮類 分析作業							★	★	★	★
	分析大氣 VOCs 及醛酮類樣本(至少 1 站點)									
探討氣膠流布及組成來源									★	★
	分析地面氣膠之特徵及流佈(至少 1 站點)									
分析長程傳輸對大氣污染物 之影響			★	★	★	★	★	★	★	★
	分析長程傳輸對大氣污染物之影響									

工作內容項目	月次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	年別	114								
	月份	4	5	6	7	8	9	10	11	12
探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析									★	★
	探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析									
製作紀錄片及成果發表	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	協助影像拍攝及紀錄實驗過程 參與空氣品質、大氣環境、監測技術等相關論壇或活動，發表成果									
工作月報	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
期中報告						1 式				
期末報告										1 式
預定進度累積百分比 (%)						50				100
查核點	預定完成時間					查核點內容說明				
期中報告	履約起始日起 5 個月內，期滿次日起 7 日內					1.地面氣膠監測 1 站點 2.大氣環流探空觀測工作 1 站點				
期末報告	履約期滿次日起 7 日內					完成所有工作項目				

備註：1.上表應檢附於服務建議書，須經執行單位確認，並明訂於契約書中。

2.期中報告、期末報告應明列查核重點。

二、實際預定進度及查核點說明

契約書之預定進度累積百分比 (%)		100%			實際執行進度 (%)	100%	
工作內容項目	實際執行情形	差異分析 (打√)			落後原因	困難檢討及對策	預計改善完成日期
		符合	落後	超前			
地面氣膠化學監測	100%	√					
大氣環流探空觀測工作	100%	√					
氣膠化學成分及來源解析	100%	√					
探空觀測大氣VOCs及醛酮類分析作業	100%	√					
探討氣膠流布及組成來源	100%	√					
分析長程傳輸對大氣污染物之影響	100%	√					
探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析	100%	√					
製作紀錄片及成果發表	100%	√					
查核點	預定完成時間		查核點內容說明				
期中報告	履約起始日起 5 個月內，於期滿次日起 7 日內		1. 地面氣膠監測 1 站點位於第四章 2. 大氣環流探空觀測工作 1 站點位於第四章				
期末報告	履約期滿次日起 7 日內		完成所有工作項目				

114 年度配合環境部政策執行環境監測採樣作業計畫

報告大綱

本計畫主要工作內容為配合環境部「114 年雲嘉南至高屏地區空氣污染物監測及垂直氣膠物理化學採樣專案計畫」(以下簡稱 114 年 3D 空品實驗)，於雲林縣轄內執行懸浮微粒氣膠化學監測及分析、大氣環流探空觀測工作、分析長程傳輸對大氣污染物之影響、建立資料整合分析、資料庫及紀錄片製作及成果發表，透過上述採樣、監測分析建立模型、資料庫分析，預期可建立完整的大氣氣膠與污染監測數據，提供大氣環流與污染傳輸科學分析及空氣品質改善建議，除期望能有效降低污染影響外，並進一步為環境政策制定提供科學依據，以提升雲林縣的空氣品質管理效能，並以紀錄片方式推廣環境監測成果並提升公眾意識改善雲林縣民眾的生活環境，降低空氣污染對民眾健康的影響。以下就各章節內容重要說明：

第一章 前言

說明本計畫執行目標、工作項目及達成進度。

第二章 重點背景回顧

此章節說明本計畫執行緣由及文獻回顧。

第三章 執行方法

此章說明各項工作項目的採樣執行及分析方法、流程，及紀錄片製作流程。

第四章 大氣環流觀測結果

此章節說明三次密集觀測，大氣環流觀測之結果。

第五章 垂直觀測及 VOCs 採樣分析

此章節說明三次垂直觀測及 VOCs 採樣分析之結果。

第六章 地面氣膠及醛酮類採樣分析

此章節說明地面氣膠及醛酮類採樣分析之結果。

第七章 紀錄片製作

此章節說明及錄片製作之成果。

第八章 結論與建議

此章節說明本計畫執行結論與建議。

第九章 參考文獻

目錄

第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 計畫目標	1-2
1.3 計畫工作內容	1-2
1.4 預期成果	1-4
1.5 工作量化目標之執行成果	1-4
第二章 重點背景回顧	2-1
2.1 七海計畫(7-SEAS)	2-1
2.2 高屏空品 3D 實驗(KPEX)	2-4
2.3 文獻回顧	2-5
第三章 執行方法	3-1
3.1 環境部 114 年雲嘉南高屏實驗計畫	3-1
3.2 大氣環流觀測實驗	3-5
3.2.1 實驗規劃	3-5
3.3 垂直 VOCs 採樣、觀測及分析	3-10
3.3.1 實驗規劃	3-10
3.4 地面氣膠採樣	3-19
3.5 地面醛酮類採樣	3-29
3.6 紀錄片製作	3-37
第四章 大氣環流觀測結果	4-1
4.1 第一次密集觀測(IOP1：04/07~04/09)	4-1

4.1.1 天氣與環流場分析.....	4-2
4.1.2 大氣環流探空觀測.....	4-11
4.2 第二次密集觀測(IOP2：10/14~10/17).....	4-16
4.2.1 天氣與環流場分析.....	4-16
4.2.2 大氣環流探空觀測.....	4-22
4.3 第三次密集觀測(IOP3：11/7~11/9).....	4-26
4.3.1 天氣與環流場分析.....	4-26
4.3.2 大氣環流探空觀測.....	4-32
第五章 垂直觀測及 VOCs 採樣分析.....	5-1
5.1 第一次密集採樣(IOP1：04/07~04/09).....	5-1
5.1.1 垂直觀測作業.....	5-1
5.1.2 VOCs 採樣與分析.....	5-4
5.2 第二次密集採樣(IOP2：10/13~10/17).....	5-10
5.2.1 垂直觀測作業.....	5-10
5.2.2 VOCs 採樣與分析.....	5-14
5.3 第三次密集採樣(IOP3：11/8~11/9).....	5-29
5.3.1 垂直觀測作業.....	5-29
5.3.2 VOCs 採樣與分析.....	5-31
第六章 地面氣膠及醛酮類採樣及分析.....	6-1
6.1 地面氣膠分析.....	6-1
6.2 地面醛酮類採樣分析.....	6-18
第七章 紀錄片製作.....	7-1

第八章 結論與建議	8-1
8.1 結論.....	8-1
8.2 建議.....	8-4
第九章 參考文獻	9-1

圖目錄

圖 2.1	BASE-ASIA、7-SEAS/東沙實驗以及合作觀測站點位置圖	....2-3
圖 2.2	不同高度模式流場與探空及污染分佈資料	.....2-10
圖 2.3	斗六無人機 O ₃ 和 PM _{2.5} 逐時剖面濃度變化	.....2-13
圖 2.4	空品模式模擬結果	.....2-15
圖 2.5	不同噸數之柴油大貨車 VOCs 種類排放	.....2-15
圖 3.1	114 年環境部計畫整體架構	.....3-3
圖 3.2	114 年環境部計畫人力配置	.....3-3
圖 3.3	大氣環流、垂直觀測站與環境部光化站（探空、UAV）	.....3-4
圖 3.4	地面觀測站地理位置示意圖（地面氣膠成份）	.....3-4
圖 3.5	探空儀器示意圖	.....3-6
圖 3.6	探空資料接收軟體示意圖	.....3-7
圖 3.7	2020-2024 4 月、10 月、11 天氣型態與污染事件日統計	.....3-9
圖 3.8	無人機觀測採樣點	.....3-11
圖 3.9	無人機搭載採樣罐實照圖	.....3-11
圖 3.10	無人機觀測作業流程	.....3-13
圖 3.11	無人機觀測(搭載感測器)	.....3-14
圖 3.12	環境部團隊使用之分析系統	.....3-16
圖 3.13	無人機於不同時間垂直剖面採樣之 CFCs 濃度分布圖	.....3-18
圖 3.14	離子成分分析流程圖	.....3-22
圖 3.15	碳成分分析流程圖	.....3-24

圖 3.16 金屬元素分析流程圖.....	3-26
圖 3.17 醛酮類之液相層析圖譜(15 項).....	3-31
圖 3.18 紀錄片製作流程.....	3-38
圖 4.1 IOP1 探空氣球施放情形.....	4-1
圖 4.2 IOP1 天氣型態說明.....	4-3
圖 4.3 PM _{2.5} 濃度分布圖-4 月 8 日 4 時與 9 時.....	4-5
圖 4.4 PM _{2.5} 濃度分布圖-4 月 9 日 4 時與 9 時.....	4-5
圖 4.5 IOP1 臺南市 PM _{2.5} 濃度時序圖.....	4-6
圖 4.6 IOP1 彰化縣 PM _{2.5} 濃度時序圖.....	4-6
圖 4.7 IOP1 雲林縣 PM _{2.5} 濃度時序圖.....	4-6
圖 4.8 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 PM _{2.5} 與風場時序圖.....	4-7
圖 4.9 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 PM ₁₀ 與風場時序圖.....	4-7
圖 4.10 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 O ₃ 與風場時序圖.....	4-8
圖 4.11 IOP1 前後一日斗六測站之光達觀測訊號(NRB).....	4-8
圖 4.12 IOP1 彰化縣及雲林縣 PM _{2.5} 濃度時序圖.....	4-9
圖 4.13 4 月 9 日 8 至 13 時地面流場圖.....	4-10
圖 4.14 大氣環流探空圖-4 月 8 日 9 日 8、20 時.....	4-12
圖 4.15 流場圖-4 月 9 日 8 時.....	4-13
圖 4.16 大氣環流探空軌跡圖-4 月 9 日 8 時.....	4-13
圖 4.17 大氣環流觀測垂直剖面圖.....	4-15
圖 4.18 IOP2 天氣型態.....	4-17

圖 4.19	PM _{2.5} 濃度分布圖-10 月 14 日 8 時、15 日 9 時	4-18
圖 4.20	彰化縣 PM _{2.5} 濃度時序圖	4-19
圖 4.21	IOP2 前後一日臺灣西半部測站 PM _{2.5} 與風場時序圖	4-19
圖 4.22	IOP2 前後一日臺灣西半部測站 PM ₁₀ 與風場時序圖	4-20
圖 4.23	IOP2 前後一日臺灣西半部測站 O ₃ 與風場時序圖	4-20
圖 4.24	IOP2 前後一日斗六測站之光達觀測訊號	4-21
圖 4.25	雲林縣 IOP2 PM _{2.5} 濃度時序圖	4-21
圖 4.26	流場圖-10 月 14 日 5 時	4-23
圖 4.27	流場圖-10 月 14 日 17 時	4-24
圖 4.28	大氣環流探空圖-10 月 14 日 5 時、17 時	4-25
圖 4.29	IOP3 天氣型態說明	4-27
圖 4.30	PM _{2.5} 濃度分布圖-11 月 8 日至 9 日	4-29
圖 4.31	IOP3 彰化縣 PM _{2.5} 濃度時序圖	4-30
圖 4.32	IOP3 高雄市 PM _{2.5} 濃度時序圖	4-30
圖 4.33	IOP3 雲林縣 PM _{2.5} 濃度時序圖	4-31
圖 4.34	流場圖-11 月 8 日 11 時	4-33
圖 4.35	大氣環流探空圖-11 月 8 日(a)11 時、(b)23 時	4-34
圖 4.36	流場圖-11 月 8 日 23 時	4-35
圖 5.1	IOP1 無人機觀測 PM _{2.5} 逐二時高度分布	5-2
圖 5.2	IOP1 無人機觀測 O ₃ 逐二時高度分布	5-2
圖 5.3	IOP1 無人機觀測 TVOC (ppb)逐二時高度分布	5-3

圖 5.4	2 L 採樣罐	5-4
圖 5.5	IOP1 無人機垂直剖面採樣之輕碳烷類濃度分布圖	5-7
圖 5.6	IOP1 無人機垂直剖面採樣之輕碳烯類濃度分布圖	5-8
圖 5.7	IOP1 無人機垂直剖面採樣之芳香烴濃度分布圖	5-9
圖 5.8	IOP2 斗六無人機觀測 PM _{2.5} 逐二時高度分布	5-12
圖 5.9	IOP2 斗六無人機觀測 O ₃ 逐二時高度分布	5-12
圖 5.10	IOP2 臺西無人機觀測 PM _{2.5} 逐二時高度分布	5-13
圖 5.11	IOP2 臺西無人機觀測 O ₃ 逐二時高度分布	5-13
圖 5.12	IOP2 測站垂直濃度變化統計盒鬚圖	5-16
圖 5.13	斗六站 10/14 中午烷烴、烯烴和芳香烴垂直分布	5-19
圖 5.14	斗六站 10/14 夜間烷烴、烯烴和芳香烴垂直分布	5-20
圖 5.15	臺西站 10/14 凌晨烷烴、烯烴和芳香烴垂直分布	5-20
圖 5.16	臺西站 10/14 中午烷烴、烯烴和芳香烴垂直分布	5-21
圖 5.17	IOP2 各因子所佔比例	5-22
圖 5.18	斗六站空中與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物濃度比較 ..	5-25
圖 5.19	台西站空中與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物濃度比較 ..	5-25
圖 5.20	不同高度與批次的 NMHC 濃度差異	5-26
圖 5.21	IOP3 斗六無人機觀測 PM _{2.5} 高度分布	5-30
圖 5.22	IOP3 斗六無人機觀測 O ₃ 高度分布	5-30
圖 5.23	IOP3 測站垂直濃度變化統計盒鬚圖	5-31
圖 5.24	斗六站無人機 VOCs 採樣剖面圖(06-07 時)	5-33

圖 5.25	斗六站無人機 VOCs 採樣剖面圖(12-13 時)	5-33
圖 5.26	IOP3 空中與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物濃度比較	5-35
圖 5.27	不同高度與批次的 NMHC 濃度差異	5-36
圖 6.1	雲林內陸地區鎮西國小 PM _{2.5} 氣膠陰陽離子組成	6-6
圖 6.2	雲林沿海地區臺西國小 PM _{2.5} 氣膠陰陽離子組成	6-8
圖 6.3	雲林內陸地區鎮西國小 PM _{2.5} 金屬元素組成	6-11
圖 6.4	雲林沿海地區臺西國小 PM _{2.5} 金屬元素組成	6-13
圖 6.5	鎮西國小 PM _{2.5} 二次光化產物合計之逐日日夜濃度變化	6-15
圖 6.6	臺西國小 PM _{2.5} 二次光化產物合計之逐日日夜濃度變化	6-15
圖 6.7	鎮西國小 PM _{2.5} 海鹽(Na ⁺ +Cl ⁻)之逐日日夜濃度變化	6-16
圖 6.8	臺西國小 PM _{2.5} 海鹽(Na ⁺ +Cl ⁻)之逐日日夜濃度變化	6-16
圖 6.9	鎮西國小 PM _{2.5} 塵土(Ca+Mg)之逐日日夜濃度變化	6-17
圖 6.10	臺西國小 PM _{2.5} 塵土(Ca+Mg)之逐日日夜濃度變化	6-17
圖 6.11	實際採樣裝置圖	6-18
圖 6.12	台西國小甲醛濃度圖	6-21
圖 6.13	鎮西國小甲醛濃度圖	6-21
圖 6.14	台西國小乙醛濃度圖	6-22
圖 6.15	鎮西國小乙醛濃度圖	6-22
圖 6.16	台西國小丙烯醛濃度圖	6-23
圖 6.17	鎮西國小丙烯醛濃度圖	6-23
圖 6.18	台西國小正丁醛濃度圖	6-24

圖 7.1	居民、校長拍攝過程.....	7-11
圖 7.2	司長、局長、科長拍攝過程.....	7-12
圖 7.3	環境部考核評鑑現場發表影片.....	7-13

表目錄

表 1.1	計畫工作項目對應期末報告目錄章節	1-3
表 1.2	各期應完成工作項目及達成情形	1-5
表 3.1	Aerosond 量測的誤差範圍與各項參數	3-7
表 3.2	多旋翼無人載具系統規格	3-14
表 3.3	元素分析儀操作條件	3-24
表 3.4	醛酮類儀器分析參數設定	3-31
表 3.5	醛酮類檢量線線性和相關係數	3-33
表 3.6	醛酮類精確度(RSD)與準確度(Recovery)測試結果	3-34
表 3.7	醛酮類方法偵測極限測試結果	3-36
表 5.1	IOP1 無人機採樣時間及數量	5-5
表 6.1	雲林內陸地區鎮西國小 PM _{2.5} 氣膠陰陽離子組成	6-5
表 6.2	雲林沿海地區臺西國小 PM _{2.5} 氣膠陰陽離子組成	6-7
表 6.3	雲林內陸地區鎮西國小 PM _{2.5} 金屬成分	6-10
表 6.4	雲林沿海地區臺西國小 PM _{2.5} 金屬成分	6-12
表 6.5	醛酮類化合物檢測前、後之檢量線	6-25
表 7.1	拍攝腳本	7-3

第一章 前言

1.1 計畫緣起

臺灣環境部長期參與東南亞區域大氣觀測與研究，自 2007 年臺美雙方建立「臺美微脈衝雷射雷達監測網與氣膠自動監測網合作協定」後，即受邀加入由美國太空總署戈達德太空飛行中心（NASA/GSFC）主導之「七海計畫」（Seven South East Asian Studies, 7-SEAS），並與多個東南亞國家共同推動跨國大氣觀測與研究工作。七海計畫以東南亞地區生質燃燒為核心議題，透過整合地面觀測、遙測與衛星資料，探討污染物對區域空氣品質、大氣環境及氣候之影響，逐步建立跨國、跨尺度之長期觀測基礎。

隨著七海計畫於 2022 年在臺灣重新啟動，研究焦點由區域尺度生質燃燒議題，進一步延伸至城市空氣品質及其健康影響。環境部在此背景下，結合 NASA 及國內學研能量，於 2024 年春季規劃並推動「高屏實驗」（Kao-Ping Experiment, KPEx），針對高屏地區進行密集觀測，重點解析氣膠與臭氧之時空分布特性，以及其受局部環流、地形與區域輸送影響之機制。該實驗為環境部成立以來首度辦理之大型國際合作空氣品質密集觀測行動，對提升我國空品科學研究能量具重要意義。

高屏實驗成果顯示，污染物於特定環流條件下具有明顯跨區傳輸特性，單一區域觀測仍難以完整呈現污染生成與傳遞之整體樣貌。鑑此，環境部進一步擴展觀測範圍，推動「雲嘉南高屏實驗」，將研究尺度由局部延伸至區域層級，以掌握雲嘉南與高屏地區間之上、下風關係，以及不同季節環流型態下之污染傳輸行為，作為區域聯防與跨縣市空氣品質治理之科學基礎。

環境部委台灣氣膠研究學會再次集合多所國內大學與研究機構之專業能量，形成橫跨中央、地方與學研單位合作執行雲嘉南高屏實驗，在整體實驗架構下，本計畫配合環境部之研究規劃，協助於雲林地區執行密集觀測與採樣工作。雲林地區位處中部與南部空氣污染傳輸路徑之關鍵節點，兼具沿海、農業及工業活動特性，且易受西南氣流與局部

環流影響，為解析污染來源與傳輸機制之重要區域。透過本計畫強化雲林地區之觀測資料，可有效補足區域污染傳輸研究之關鍵資訊，並提升整體實驗成果對空氣品質管理與政策決策之支援效益。

1.2 計畫目標

- 一、 辦理懸浮微粒氣膠化學監測及分析。
- 二、 辦理大氣環流探空觀測工作。
- 三、 分析長程傳輸對大氣污染物之影響。
- 四、 資料整合分析、資料庫及紀錄片製作(1 部)及成果發表。

1.3 計畫工作內容

以下說明本計畫工作內容及其對應章節，如表 1.1 所示：

- 一、 辦理懸浮微粒氣膠化學監測及分析
 - (一) 使用地面氣膠化學監測與分析，包括水溶陰陽離子、元素碳、有機碳化學成分(至少 1 站點)。
 - (二) 分析地面氣膠之特徵及流佈。
- 二、 辦理大氣環流探空觀測工作
 - (一) 解析探空資料，提供大氣環流分布(至少 1 站點)。
 - (二) 分析大氣 VOCS 及醛酮類樣本。
- 三、 分析長程傳輸對大氣污染物之影響
 - (一) 建立污染源解析模型，並綜合分析不同污染物種的流佈特性，透過科學方法探討空氣污染的成因，提供空氣品質改善建議，除期望能有效降低污染影響外，並進一步為環境政策制定提供科學依據(至少 1 式)。
- 四、 資料整合分析、資料庫及紀錄片製作(1 部)及成果發表
 - (一) 協助影像拍攝及紀錄實驗過程。
 - (二) 探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析。

(三) 參與空氣品質、大氣環境、監測技術等相關論壇或活動，
 發表成果。

表 1.1 計畫工作項目對應期末報告目錄章節

目標	項目	章節目錄
辦理懸浮微粒氣膠化學監測及分析	使用地面氣膠化學監測與分析，包括水溶陰陽離子、元素碳、有機碳化學成分	第六章
	分析地面氣膠之特徵及流佈	
辦理大氣環流探空觀測工作	解析探空資料，提供大氣環流分布	第四章 第五章 第六章
	分析大氣 VOCs 及醛酮類樣本	
分析長程傳輸對大氣污染物之影響	建立污染源解析模型，並綜合分析不同污染物種的流佈特性，透過科學方法探討空氣污染的成因，提供空氣品質改善建議，除期望能有效降低污染影響外，並進一步為環境政策制定提供科學依據	第四章 第五章
資料整合分析、資料庫及紀錄片製作	協助影像拍攝及紀錄實驗過程	第四章 第五章 第六章 第七章
	探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析	
	參與空氣品質、大氣環境、監測技術等相關論壇或活動，發表成果	

1.4 預期成果

- 一、建立完整的大氣氣膠與污染監測數據：透過地面氣膠化學監測，分析水溶性陰陽離子、元素碳、有機碳等成分，掌握雲林縣空氣污染特徵與變化趨勢。
- 二、提供大氣環流與污染傳輸科學分析：透過探空觀測，解析大氣環流分布，並建立污染源解析模型，以掌握長程傳輸對空氣品質的影響，為污染防制提供依據。
- 三、提出空氣品質改善建議：透過數據分析與污染成因研究，提供降低污染的科學建議，以改善雲林縣空氣品質。
- 四、推廣環境監測成果並提升公眾意識：製作環境監測紀錄片，參與學術論壇與相關活動，向社會大眾傳達監測成果，提高空氣污染議題的關注度。

1.5 工作量化目標之執行成果

依據契約書要求計畫自 114 年 4 月 1 日承接後，至 114 年 12 月 31 日前，應完成期末報告工作量，各期應完成工作項目及達成情形如表 1.2 所示。

表 1.2 各期應完成工作項目及達成情形

項次	工作項目	總目標數	期中報告 工作量	期末報告 工作量	累積工作 達成率(%)	執行情形說明
1	地面氣膠監測	1 站點	1 站點	1 站點	100%	已完成 1 站點採樣作業，並於第六章說明。
2	大氣環流探空觀測工作	1 站點	1 站點	1 站點	100%	已完成 1 站點觀測作業，並於第四章說明。
3	氣膠化學成分及來源解析	1 站點	-	1 站點	100%	已完成 1 站點採樣作業，並於第六章說明。
4	探空觀測大氣 VOCs 及醛酮類分析作業	1 站點	-	1 站點	100%	已完成 1 站點採樣作業，並於第五章及第六章說明。
5	探討氣膠流布及組成來源	1 式	-	1 式	100%	已完成 1 站點採樣作業，並於第六章說明。
6	分析長程傳輸對大氣污染物之影響	1 式	-	1 式	100%	已完成 1 站點觀測作業，並於第四章說明。
7	探空觀測資料及地面氣膠監測資料整合解析	1 式	-	1 式	100%	已於第四章至第六章說明。

項次	工作項目	總目標數	期中報告 工作量	期末報告 工作量	累積工作 達成率(%)	執行情形說明
8	製作紀錄片及成果發表	1 式	-	1 式	100%	已於第七章說明。

第二章 重點背景回顧

本計畫為配合環境部主計畫執行，而環境部主計畫為「114 年雲嘉南至高屏地區空氣污染物監測及垂直氣膠物理化學採樣專案計畫」，此計畫為延續 2024 年 NASA 高屏空品計畫，故 2.1 節及 2.2 節將說明前述計畫成果重點回顧。

2.1 七海計畫(7-SEAS)

七海計畫全名為 Seven SouthEast Asian Studies (7-SEAS) Mission，2007 年 5 月美國太空總署 (NASA)、美國海軍研究中心 (NRL) 邀請臺灣、越南、泰國、印尼、菲律賓、新加坡、馬來西亞等東南亞國家，於印尼雅加達召開首次工作會議，共同發起七海計畫 (7-SEAS)。此計畫透過地面、飛機、海洋船與衛星多平台觀測，結合模式模擬，建構跨國、大尺度、大氣科學與環境研究網絡，並建立區域資料庫。七海計畫涵蓋雲與降水、輻射傳遞、生質燃燒與人為排放、背景大氣化學特性、熱帶與亞熱帶氣象，以及即時預報與衛星校正等七大科學領域。

七海計畫自啟動以來，歷經多個重要實驗與階段性觀測，以下說明其實驗進程與里程碑。

- 2007 年 8 月：虛擬生質燃燒實驗 (The Virtual Biomass Burning Experiment, VBBE) 目的在於收集並留存東南亞地區相關數據，讓參與成員熟悉了解實驗計畫及流程，並著重於東南亞生質燃燒氣膠的影響評估，初步建立源頭排放與長程傳輸的化學特徵 (Lin et al.2013)。
- 2009 年：國立新加坡大學 (National University of Singapore, NUS) 超級觀測站建立，南方區域的採樣工作於夏季至秋季正式展開。
- 2010 年至 2012 年：在 7 海計畫中北部區域試點實驗 在春季期間成功執行了一系列密集觀測期 (IOPs)，包括：

- 2010 年：東沙實驗 (Dongsha Experiment) 於南海北部之東沙群島設立觀測站，首次於該區域針對海面邊界層 (Marine Boundary Layer, MBL) 及其下風區域，進行生質燃燒排放、氣膠組成與垂直分布之高解析度採樣，並結合氣象探空球觀測，以掌握大氣邊界層之結構與變化特性。
- 2011 與 2012 年：越南山羅 (Son La) 第一、二階段觀測。
- 2013 年 2 月至 5 月：7-SEAS/BASELInE 聯合行動 (Biomass-burning Aerosols & Stratocumulus Environment: Lifecycles and Interactions Experiment)，為「生質燃燒氣膠與層積雲環境：生命週期與交互作用實驗」的國際合作，目的在於深入了解亞洲季風前期，區域生質燃燒氣膠的生命週期及其與層積雲的交互作用，利用雷達、地面測站、無人機與衛星資料分析氣膠對雲微物理特性與輻射通量的影響，同時透過數值模式模擬氣膠對雲與邊界層結構的影響，顯示污染物在不同環流條件下的傳輸及累積過程。
- 2017 至 2019 年：建立東南亞 PM_{2.5} 監測網 (Pan-Marine Southeast Asia Network, PMSEANET)，橫跨多國城市與鄉村地區，透過長期監測累積空氣品質資料，分析季節性生質燃燒排放與都市排放對區域空氣品質的貢獻。研究發現，氣膠在西南季風及局部地形引導下可長程傳輸，並透過因邊界層高度及雲性的改變，間接影響區域輻射通量與降水分布。

回顧七海計畫，於 2007 年至 2013 年共發表了 30 餘篇期刊論文，包含提供東南亞北部「源 (Source)」到「匯 (Sink)」地區首份相對完整的氣膠化學與物理觀測紀錄並詳細描述生質燃燒產生的氣膠（如黑碳、有機碳）以及空氣有毒物質（如大氣汞與戴奧辛）的空間分佈，及其在低層自由對流層 (Lower Free Troposphere, LFT) 的傳輸機制。也研究證實生質燃燒會顯著降低地表溫度（冷卻效應），但增加大氣內部的熱量（加熱效應），進而改變邊界層高度並增加大氣穩定度。

七海計畫不僅累積大量觀測資料及證實上述主要研究成果，並且培育區域科學合作機制，為後續臺灣的高屏及雲嘉南高屏密集觀測提供方法論與科學資料基礎。

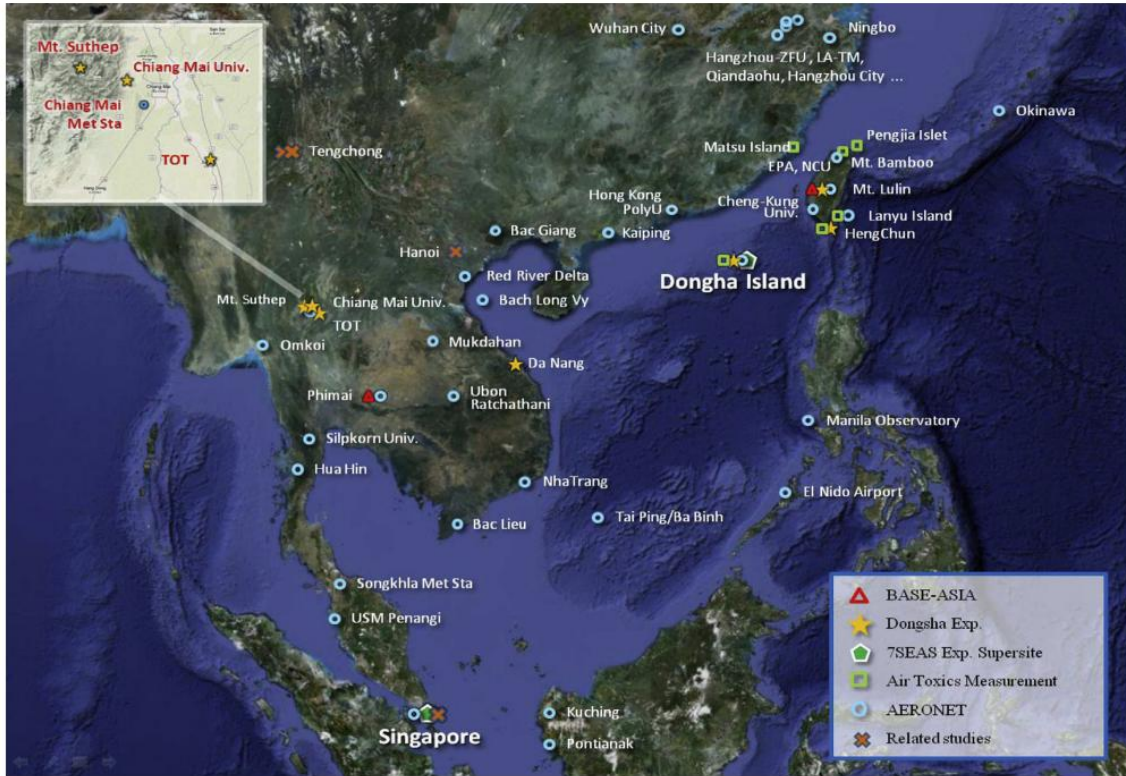


圖 2.1 BASE-ASIA、7-SEAS/東沙實驗以及合作觀測站點位置圖

2.2 高屏空品 3D 實驗(KPEX)

高屏空品 3D 實驗全名為 Kao-Ping Experiment，高屏空品 3D 實驗結合交通部氣象署、美國國家航空暨太空總署 (NASA) 及國內中央大學等，15 個跨部會與地方單位、20 個學術研究單位、45 位專家學者，於 2024 年春季針對高屏地區進行大型局部環流觀測實驗，透過地面空品測站、無人機、探空氣球、剖風儀、風光達、太陽光度計、衛星及搭載精密儀器，量測三維空間的各項空氣污染物分佈及組成，以解析空氣污染物傳輸及化學轉化的過程，為環境部成立以來首次大型國際空氣品質監測及密集觀測實驗。

2024 年 NASA 兩架科研飛機 G-III 及 DC-8，分別在臺灣西部上空不同高度蒐集空品數據，G-III 在 8,600 公尺利用遙測和光學雷達量測細懸浮微粒 (PM_{2.5})、氮氧化物、揮發性有機物 (VOCs) 等空氣污染物；DC-8 則是即時量測 15 公尺至 3,300 公尺的空氣化學成分。

此次計畫觀測到高空 200 至 500 公尺的 PM_{2.5}、臭氧、及 VOCs 濃度較地面高；而 VOCs 主要成分包括乙烯、甲苯和二甲苯。另透過觀測與氣膠成分解析得知硝酸鹽及有機成分是 PM_{2.5} 的二次生成物。

此次計畫亦觀察到，高屏地區在 500 至 1,500 公尺的高度，常受溫度較高的南風影響、空氣不易流動，使得近地面的空氣污染物難以向上擴散；地形效應引發的渦流現象，也加劇污染物滯留與累積在高屏地區，導致空品惡化。

2.3 文獻回顧

一、懸浮微粒氣膠化學

林等(2015)利用雲林斗六地區空氣品質監測站之空氣品質資料，探討各空氣品質變項之間的相互關係，人為因子、自然因子、燃燒因子以及水氣因子為影響空氣品質優劣的主要因素。其中自然因子之風向以及風向小時值為影響最為顯著的兩變項。懸浮微粒濃度較高月份為冬季與春季，此時台灣 10 月至 4 月正受東北季風影響，斗六位於華山及八卦山腳，北部有台中火力發電廠及彰化焚化廠，北部吹來的微粒容易堆積在地勢較低的斗六，斗六又屬於背風坡風速小，微粒不容易擴散，因此造成冬季微粒濃度來的比夏季高。李(2016)探討 PM_{2.5} 組成與氣相污染物季節化學特徵，發現斗六地區 PM_{2.5} 平均濃度春、秋、冬季(45.7±20.2 μg/m³、49.7±12.8 μg/m³、53.1±15.6 μg/m³)明顯高於夏季(25.5±9.1 μg/m³)約兩倍。秋冬兩季除受東北季風影響，亦可能受上風生質燃燒(稻作+露天燃燒)影響使 PM_{2.5} 濃度上升；兩年春季 PM_{2.5} 變異性較大，若遇春季高濕度環境(晨霧)常使得 PM_{2.5} 衍生型氣膠(NH₄NO₃)大量生成。

環境部(2014)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明，斗六站受大氣擴散不良的影響較大，發生高 PM_{2.5} 質量濃度時，機動車輛和工業排放源、有機氣膠產生源的影響值得重視。

環境部(2015)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明，NO₃⁻前驅 NO_x 排放源的管制應該加強。PM_{2.5} 金屬元素成分濃度最高兩個元素為 Na 和 K，顯示受海風、塵土逸散、生質燃燒影響大。計算各站金屬元素富集因子，顯示地殼、燃煤、交通排放為重要排放源。彙整採樣 PM_{2.5} 濃度大於 35 μg/m³ 事件污染來源，指出大部分事件都是區域傳輸、擴散不佳、發生光化學反應所造成，少數來自境外傳輸。

環境部(2016)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，PMF 受體模式推估結果，主要污染因子以二次硝酸鹽和二次硫酸

鹽這兩類富含衍生污染物的因子為主，其中，二次硝酸鹽於冬、春季多有最高占比，二次硫酸鹽則多在夏、秋季有最高占比，突顯各季節污染源變化特性。大氣能見度推估顯示影響能見度最大的 PM_{2.5} 化學成分為 NH₄⁺ 或 SO₄²⁻，顯示衍生污染物對於能見度的影響相當可觀。

環境部(2016)透過大氣與特定污染源的 PM_{2.5} 同位素特徵和受體模式的推估結果，深入探討雲彰嘉投地區 PM_{2.5} 的污染來源，結果顯示現代碳和化石碳對雲彰嘉投地區 PM_{2.5} 的貢獻度大約相當。透過高低 PM_{2.5} 事件日之化學組成濃度差異的分析，發現 PM_{2.5} 事件日期間的二次氣膠和現代碳之濃度明顯上升，反映光化學反應和生質燃燒行為的影響。針對不同測站的污染源分析結果發現，臺西站和麥寮站的碳以工業排放為主；斗六及崙背站的碳均以生質燃燒的貢獻較高。PMF 推估結果指出，斗六站以生質燃燒為主，其次為工業排放；臺西站和麥寮站以工業排放為主，其次為二次氣膠，第三貢獻量為交通排放；工業排放、交通排放、二次氣膠和生質燃燒對崙背站的貢獻相近。

環境部(2018)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明，斗六冬季 PM_{2.5} 化學成分以 NO₃⁻ 為主，PMF 受體模式解析斗六最高占比因子為「硝酸鹽與燃燒排放」，顯示受到擴散條件不佳，污染衍生物的在地影響程度大。

環境部(2019)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，有機物分析發現塑化劑與阻燃劑物質是重要成分，可能來自塑膠材料風化碎裂、焚化過程受熱裂解揮發等過程。分析含氮物質氧化率(Nitrogen Oxidation Ratio, NOR)顯示採樣日過剩 NO₃⁻ 發生頻率由中部向南遞增，台灣中部以南的 NO_x 前驅氣體充足。

環境部(2020)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明，EC 濃度普遍反增，NO₃⁻ 與 OC 則於 2019 和 2020 年反增或是持平，顯示移動污染源，將成為改善高 PM_{2.5} 濃度期間空氣品

質的主要目標。PMF 受體模式顯示硫酸鹽、硝酸鹽與車輛排放為三大污染源，車輛排放於斗六以北測站影響逐年增加。

環境部(2021)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明，高 PM_{2.5} 和 NO₃⁻濃度仍分布在中部以南測站，高濃度的 NO₃⁻指出 NO_x 前驅污染源管制的重要性；SO₄²⁻濃度下降快速，表示 SO_x 管制成效良好；OC 濃度降低趨緩與污染來源多元有關，EC 濃度持續降低，表示柴油車管制具有成效。金屬元素檢測到鍋爐燃燒排放或生質燃燒微粒指標成分，以 PMF 受體模式分析 PM_{2.5} 化學成分來源，貢獻濃度前三高污染源因子大多為「硫酸鹽」、「硝酸鹽」及「車輛排放」。

環境部(2022)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明 PM_{2.5} 質量及化學成分濃度從臺灣東部經北部往中、南部逐漸增高，解析的化學成分特徵持續彰顯出 NO_x 污染源管制的重要性。且多項金屬元素出現高濃度，顯示污染源眾多；其中，濃度相對高的金屬元素多具有燃煤、鋼鐵業及車輛排放貢獻特徵。PMF 受體模式污染因子季度貢獻變化顯示最高平均濃度，主要受到「硝酸鹽」的貢獻，其次是「硫酸鹽」和「車輛排放」；說明除了 NO₃⁻，SO₄²⁻和 OC 也需要進行管制。

環境部(2023)執行 PM_{2.5} 採樣並分析質量及化學成分濃度，結果說明斗六高污染季(3月)PM_{2.5} 化學成分以 NO₃⁻為主，PMF 受體模式解析出「燃油」、「揚塵」、「硝酸鹽/氯鹽」、「硝酸鹽」及「工業污染」五個因子，其中「硝酸鹽/氯鹽」平均貢獻最多，另「工業污染」指紋含有大部分的重金屬成分。該計畫進一步從採樣期間依氣象條件擷取出具有代表性的五個氣象條件，分別是「北方」、「西南偏南方」、「西南偏西方」、「地方環流(日)」及「地方環流(夜)」，PM_{2.5} 濃度最高時間為「地方環流(日/夜)」，以本地和鄰近地區傳輸污染為主，主要污染因子為「硝酸鹽/氯鹽」和「燃油」。

二、大氣環流探空觀測

影響空氣品質的主要因素有三：地形、氣象及排放。要維護良好的空氣品質，需要嚴謹調查與分析這三個因素，並結合排放控制技術的進步及行政責任的考量，最終才能形成科學依據作為施政策略的基礎。

臺灣位於亞洲與太平洋的交界處，四面環海，氣候受到東亞季風影響，地形多樣，包含平原、盆地、縱谷及超過三千公尺的高山。在不同天氣系統與複雜地形的影響下，臺灣西半部經常出現背風渦流，使空氣品質惡化。此外，海陸熱力差異導致海陸風、山谷風等局部環流，進一步影響邊界層發展與污染物的傳輸與擴散。因此，要探討臺灣空氣污染的成因，特別是中南部地區，必須深入研究天氣型態的影響及當地大氣的三維熱動力結構。中南部地區的空氣品質相對較差，特別是在冬末至春季期間，空氣品質惡化事件較為頻繁。除了本地既有的污染排放來源外，境外污染物的傳輸亦是影響臺灣空氣品質的重要因素。冬季東北季風南下時，東北部處於迎風面，污染相對較低，而西半部則位於背風面，特別是中南部，若遇上境外污染物傳輸或擴散條件不佳的天氣型態，空氣品質便會顯著惡化。

文獻研究亦顯示，空氣污染累積與背風渦流的影響密不可分。例如，Hsu 與 Cheng (2016) 利用二階段集群分析法，研究 2013 至 2015 年間雲林縣的天氣型態，發現高濃度 PM_{2.5} 事件日多發生於三種情況：(1) 微弱的大陸高壓外圍環流受中央山脈阻隔，導致風速減弱，污染物不易擴散；(2) 弱綜觀天氣條件下發生海陸風環流，使污染物累積；(3) 強烈大陸反氣旋帶來東北季風，並攜帶境外污染物至臺灣。

Lai 與 Lin (2020) 透過 WRF 模式分析 2013 至 2017 年間臺灣 PM_{2.5} 濃度與環境風場的關聯，結果顯示背風渦流多存在於邊界層內 700 至 1500m 高度，且與臺灣中南部 PM_{2.5} 高濃度事件高度

相關。Lai 等人 (2023) 則利用 WRF、CMAQ 及 Hysplit 模式探討 2022 年 3 月 2 日至 3 日的空氣污染事件，發現 3 月 3 日的 PM_{2.5} 主要由長程傳輸累積而成，且高屏沿海地區的背風渦流進一步影響了 PM_{2.5} 的水平與垂直傳輸。目前，對於臺灣空氣污染與氣象條件的研究多依賴觀測資料分析與模式模擬。然而，由於地面觀測數據有限，高空氣象與空品數據主要依賴模式推估，缺乏詳細的高層觀測資料。因此，若要完整理解氣流與污染物的關聯性，不同高度的大氣觀測資料至關重要。

2024 年高屏實驗(Kao-Ping Experiment, KPEx)透過探空施放，提供溫度、相對溼度、PM_{2.5} 濃度、位溫 (Theta)、風速與風向等垂直剖面數據，解析邊界層、混合層與西風層的特徵。實驗結果顯示，3 月 12 日至 14 日中南部空氣污染加劇時，東北風繞過中央山脈，在臺灣西南部形成兩支背風渦流，其位置與高污染區域高度吻合，顯示高壓迴流與背風渦流在雲嘉南與高屏地區污染物累積中的重要作用。

綜合上述分析可見，臺灣空氣品質的變化牽涉地形、氣象與排放等多重因素的交互影響，特別是在中南部地區，複雜的地形與特殊天氣型態常導致污染物累積與擴散不易。通過收集高空觀測數據，並結合數值模式模擬，探討局部環流特徵及污染物傳輸的路徑。根據 2024 年的探空觀測結果(圖 2.2)，地面至 950 hPa 的風向為北風，950-850 hPa 逐漸由北風轉為南風，700 hPa 以上則轉為西風。數值模式模擬的風場結果顯示，地面風為北風，隨著高度的增加逐漸轉為南風，這與探空觀測結果一致。此外，模擬風場清楚顯示，來自台灣東側的氣流繞過台灣南端後，形成局部的小尺度反氣旋流場，尤其在西半部地區，這些背風渦流覆蓋了雲嘉南地區，渦流中心位於台南內陸，可能會引發污染事件。這個案例顯示，垂直大氣觀測對於解析台灣中南部地區空氣品質的成因具有關鍵作用。

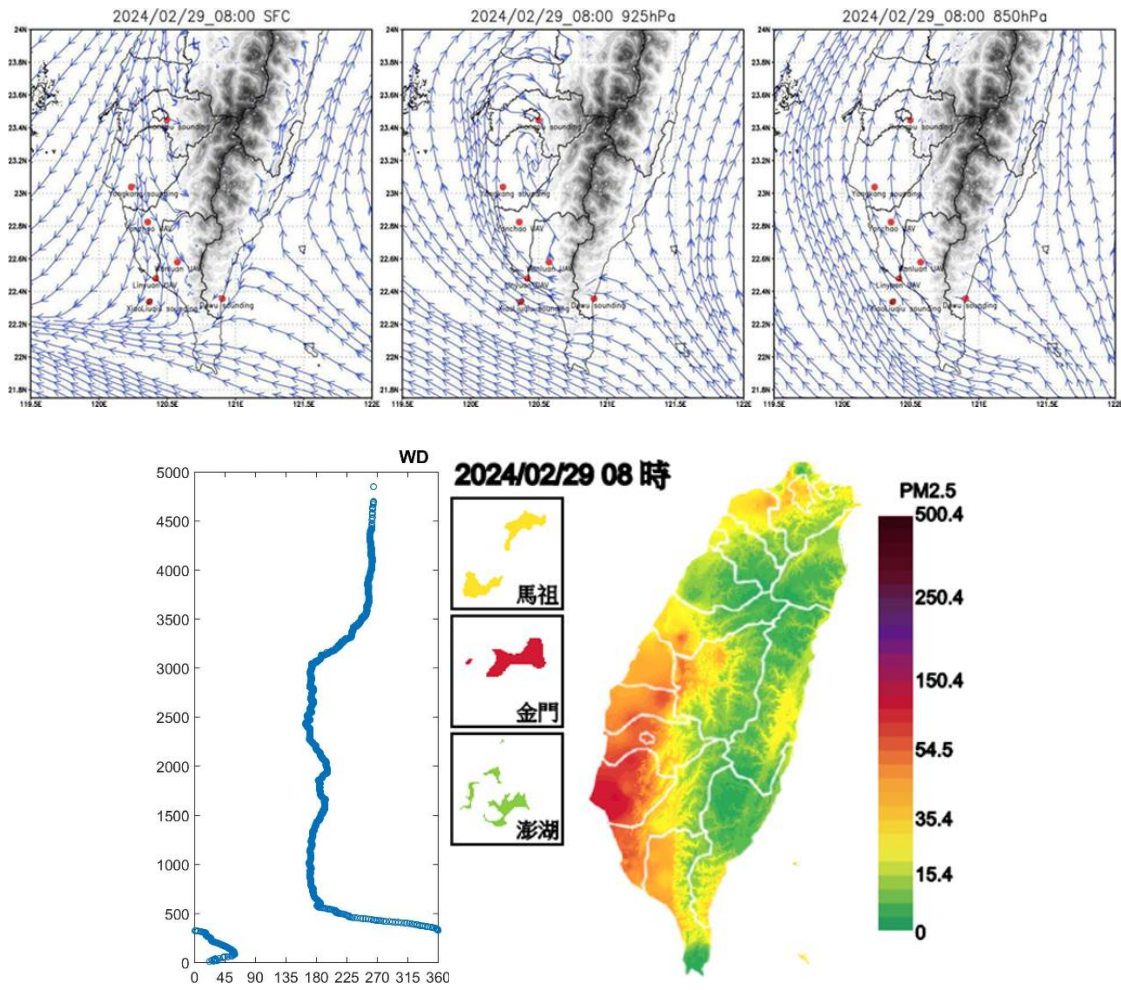


圖 2.2 2024 年 2 月 29 日不同高度模式流場與探空及污染分佈資料

三、無人機高空採樣

陳誼(2021) 利用新建構的無人機觀測系統與氣膠光達於斗六地區進行高時間解析度的氣象場與氣膠剖面觀測，同時搭配地面空氣品質測站資料和 WRF 模式模擬的再分析場，整合分析空污事件之演變過程。研究結果顯示，弱綜觀天氣條件下，斗六地區污染物的傳輸與擴散特徵與海陸風環流、背風渦旋及逆溫結構有關。

王等(2023)開發一系列大氣專用的無人機，並參與 7-SEAS 國際觀測實驗，協助環境部與氣象署執行高污染空污事件、海陸風環流觀測，截至 2024 年，成功執行大氣垂直剖面觀測達 1500 次以上。2020-2022 年亦參與國科會大氣學門整合觀測計畫 T-POMDA (Taiwan atmospheric PBL observation, Modeling, and Data assimilation, 台灣大氣邊界層觀測模擬與同化實驗)，針對台灣西半部雲嘉南地區，進行密集的邊界層觀測實驗，應用一系列的空氣污染垂直剖面觀測技術，例如無人機、微型探空、風光達等，嘗試釐清中部空氣品質不良的問題。2024 年參與美國 NASA 及台灣環境部的高屏三維空品實驗(KPEX)，進行全面整合性的空品觀測實驗，解析高屏地區空氣污染惡化的原因。然而過去的觀測主要還是針對較大範圍的區域尺度進行研究探討，較少針對局地(local)或城市尺度進行密集觀測與了解，雲林斗六附近雖無重大污染源，但零星工廠及交通道路污染排放之貢獻不可忽視，又因為地理位置特殊，可能為空氣污染物水平傳輸匯聚的地點，再者，斗六地區可能受地形效應影響，較有污染累積的可能性，值得利用無人機在空間及垂直上的部署優勢，深入討論其污染來源。

故為補足傳統探空氣球與地面監測在時間與空間解析度上的不足，雲林縣環保局於 112 及 113 年度所執行之無人機高空採樣觀測成果，進一步釐清雲林地區秋冬季高污染事件之垂直結構與傳輸特徵。根據 112 年度觀測報告顯示，午後隨混合層逐步上升至 1,000 至 1,500 公尺之間，常出現 PM_{2.5}與臭氧濃度偏高的污染層，並於夜間隨邊界層下降而有下沉作用，導致清晨地面濃度再度升

高。此現象已被視為解釋夜間與清晨空氣品質惡化的重要機制之一。

此外，112 年度的 VOC 採樣結果亦指出，高空樣品中可檢出交通、石化工業與部分生物源排放特徵，顯示其對臭氧生成潛勢有顯著影響；而 PM_{2.5} 中硫酸鹽與硝酸鹽比例偏高，則反映了二次氣膠生成的主導角色。這些發現與本年度模式模擬中所揭示的區域傳輸影響相互呼應。

進一步於 113 年度多次污染事件期間所執行之密集無人機觀測，則更清楚揭示了污染傳輸機制。觀測結果顯示，午後至夜間常可偵測到 400 至 500 公尺以上的臭氧殘留層，其濃度可持續至深夜甚至隔日清晨，與地面站所呈現之日夜變化差異一致(圖 2.3)。同時，風場與地形分析證實污染氣團常自中彰沿海地區輸送至斗六內陸，並受河谷地形引導進一步輸送至竹山山麓區域，造成區域性累積效應。113 年度 VOC 樣品主成分分析則顯示，除交通與工業來源外，亦出現農業燃燒之跡象；部分樣品呈現「臭氧偏低、PM_{2.5} 偏高」之現象，推測為 NO_x 豐富氣團造成臭氧滴定效應。

綜合引用上述 112 與 113 年度之成果，可確認雲林地區高空污染層的形成、下沉與區域傳輸特徵，均對地面空氣品質惡化有直接影響。此發現支持本計畫對污染成因之解析，即污染並非僅限於地面排放，更涉及高空層內之殘留、轉換與傳輸。未來若能持續整合無人機高空採樣成果與模式模擬，以及鄰近縣市之協同觀測，將有助於更精確地掌握污染來源，並提升空氣品質預測與防制策略的有效性。

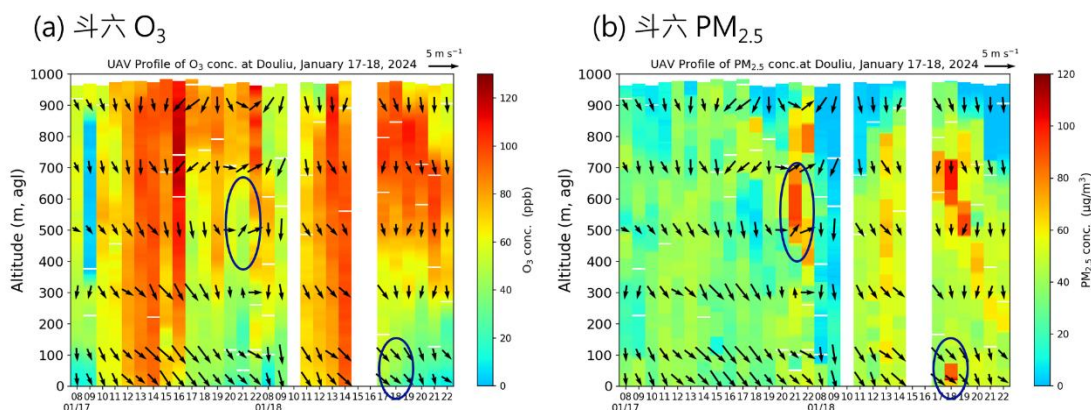


圖 2.3 斗六無人機 O₃ 和 PM_{2.5} 逐時剖面濃度變化

四、醛酮類採樣分析

環境中揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)中所有含氧的有機物，統稱為含氧揮發性有機物(Oxygenated VOCs, OVOCs)，如醇、醚、醛、酮、酯、醯胺類等，因其結構式含碳與氧雙鍵，故常稱為羰基化合物(Carbonyls)。環境大氣中羰基化合物中以醛類(Aldehydes)與酮類(Ketones)物質為最常見，主要排放源分為一次及二次污染物兩類，一次污染為污染源直接排放於大氣中，可分為自然源與人為源。自然源主要來自於生質燃燒、植物排放(如 C₆-醛及 C₆-醇等 (Heiden et al., 2003))。人為排放則如石化燃燒、工業源、汽機車、建築塗料等，其中以工業源為主要排放來源之一 (Kim et al., 2008)；都會區則以移動源排放之甲醛、乙醛、苯甲醛、丙酮尤為顯著。醛酮類有害物質尚有二次光化學污染生成，如天然源之植物存在於臭氧環境中會生成 C₆-C₁₀ 的醛類物質 (Wildt et al., 2003)，其他二次污染物則為 VOCs 與 NO_x 反應而產生。

陳等(2015)研析高雄市小港光化學監測站 54 種非甲烷碳氫化合物(Non-methane hydrocarbons, NMHCs)總和、小港空氣品質測站總非甲烷碳氫化合物(TNMHC)測值與空品模式模擬，研究結果顯示高雄市小港區、林園區具有潛在 OVOCs 熱源，但因缺少醛酮類監測數據，故未驗證污染源來自於固定或移動源貢獻 (Chen et al.,

2015)，如圖 2.4 所示，模擬結果顯示臨海、林園工業區及其周邊存在顯著 OVOCs 排放。Tsai 等(2019)以 AERMOD 模式模擬高雄市小港區有害空氣污染物與統計致癌風險，模擬結果顯示該區 6 項主要致癌風險物質中，甲醛為其中之一，主要來自之一為移動源貢獻 (Tsai and Gu, 2019)。Yao 等(2015)將柴油大貨車依載重噸數低-高，區分為低噸數 LDDT(Light-duty diesel trucks)、中噸數 MDDT(Medium-duty diesel trucks)與高噸數 HDDT(High-duty diesel trucks)並研析主要 VOCs 排放，如圖 2.5 所示，結果顯示三種噸數之柴油大貨車主要空氣污染物排放主要為醛酮類有害物質 (Carbonyls)，相較其次烷烴(Alkanes)高 1.5-5 倍 (Yao et al., 2015)。若比較總排放占比，Carbonyls 排放超過 50% 為占比最高，其餘污染物總合不到 Carbonyls 一半，顯示柴油車排放中主要污染物排放為醛酮類有害物質。

歸納上述文獻結果，顯示高雄市小港區與林園區存在顯著 OVOCs 排放，且該區之主要健康風險疑慮物質與臭氧前驅物為甲醛等醛酮類有害物質，主要來源可能為固定源(臨海、林園工業區)與移動源(柴油大貨車等港口相關運輸)，可能為高屏主要醛酮類物質主要排放源。

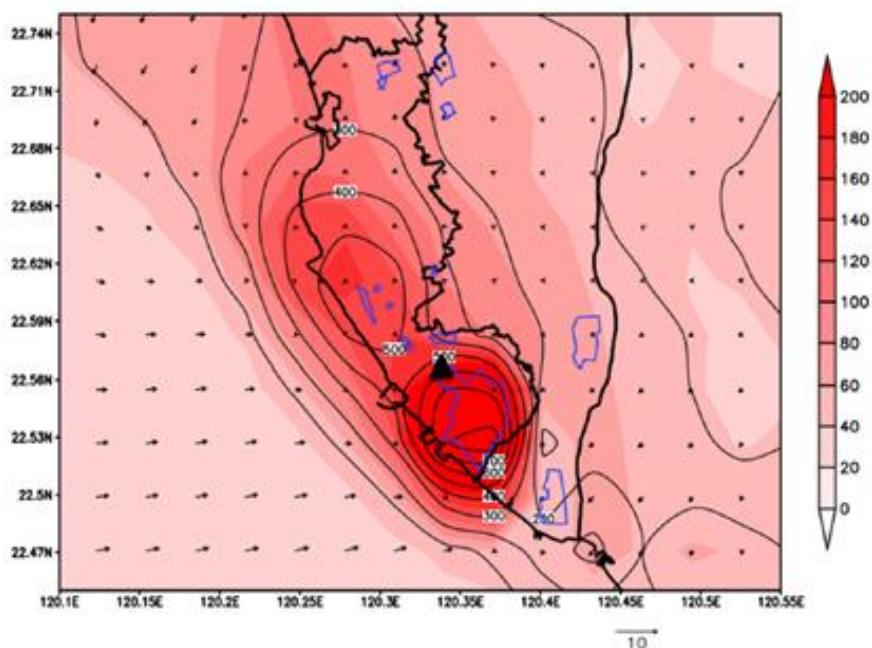


圖 2.4 空品模式模擬結果

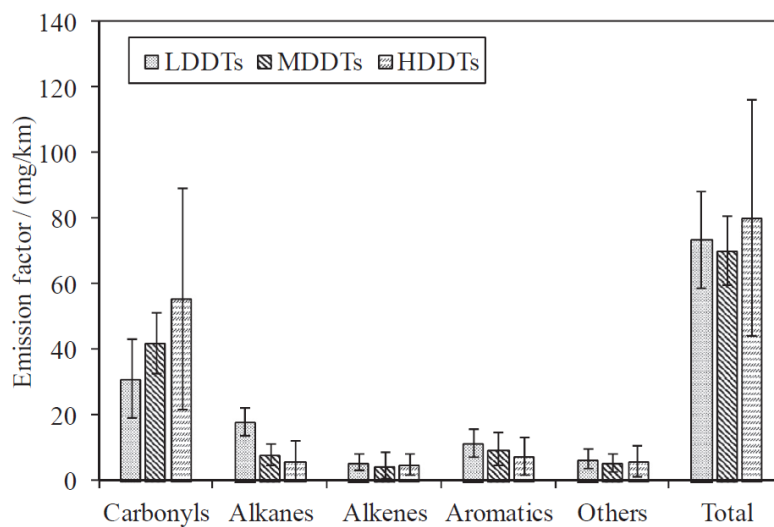


圖 2.5 不同噸數之柴油大貨車 VOCs 種類排放

第三章 執行方法

3.1 環境部 114 年雲嘉南高屏實驗計畫

延續 2024 年與 NASA 合作成果，環境部於 2025 年繼續辦理實驗計畫，規劃執行「114 年雲嘉南高屏空污監測及垂直氣膠物理化學採樣專案計畫」(以下簡稱環境部計畫)，擴大垂直上空調查範圍延伸至雲嘉南地區，以進一步瞭解臺灣南部上風處空品變化。

本計畫為配合環境部計畫執行採樣監測，故本章節將說明環境部計畫執行方法。

一、環境部計畫重點工作：

- (一)地面與垂直之大氣化學與大氣物理密集觀測
- (二)大氣環流三維與時間高解析密集觀測
- (三)研究資料整合分析、衛星應用與大氣模擬解析污染物傳送與轉化過程
- (四)推動參與七海計畫與亞洲空品飛航計畫之國際合作

圖 3.1 及圖 3.2 為環境部計畫整體架構與人力配置。如圖 3.3 與圖 3.4 所示布建、垂直觀測(如無人機)、環流觀測(探空)與地面觀測站，(1) 大氣化學與大氣物理觀測以雲嘉南與高屏為主要範圍，(2) 則涵蓋馬公、綠島、彰化、屏東為邊界之範圍，以取得三維大氣流場分布，(3) 則應用衛星及模擬方法，結合觀測資料進行事件解析。(4) 以本計畫所獲得之資料，與七海計畫與亞洲空品飛航計畫或其後期國際合作實驗進行整合性分析，並推動參與國際合作活動，展現我國環境監測之量能。

採樣觀測時間部分，環境部計畫主要觀測期間為春季及秋冬季，以大氣環流分部為依據，進行三次密集觀測期(Intensive Observation Period, IOP)。IOP 則由環境部計畫團隊以天氣預報選

擇適當之天氣條件之指定時期進行。其他地面採樣(氣膠化學與有害物質)與垂直採樣(臭氧化學)則配合大氣環流實驗規劃,日間採樣定義為 08:00-17:00,夜間為其他時間。

本計畫配合提供環境部計畫監測能量,於 2025 上半年配合進行密集觀測一次,圖 3.3 左圖為探空觀測點,綠色為常態性的標準探空,由中央氣象署及空軍等單位執行,橘色微型探空由環境部計畫執行,本計畫則配合執行橘色微型探空彰化縣大城探空站之監測作業,探空觀測目的是解析探空資料,提供大氣環流分布。圖 3.3 右圖為 UAV 觀測地點,其中斗六及臺西 UAV 由本計畫負責,UAV 觀測目的是提供排放源指紋資料作為受體模式 PMF 源解析結果比對,評估各類污染源在受體點的貢獻度。

圖 3.4 為地面氣膠成份採樣地點,雲林縣採樣點為斗六市鎮西國小及臺西鄉臺西國小。其中臺西鄉臺西國小由本計畫負責執行,觀測目的是提供排放源指紋資料作為受體模式解析結果比對,評估各類污染源在受體點的貢獻度。

主要工作內容為配合環境部計畫執行,故於環境部計畫團隊指定之時間及地點採樣,已完成三次密集觀測採樣,時間分別為 IOP-1:4 月 7 日至 11 日、IOP-2:10 月 14 日至 17 日、IOP-3:11 月 8 日至 9 日。經三次 IOP 結束,以採樣分析結果分析個別 IOP 事件長程傳輸對大氣污染物之影響,並將所有採樣資料整合分析,並以紀錄片方式製成成果發布。

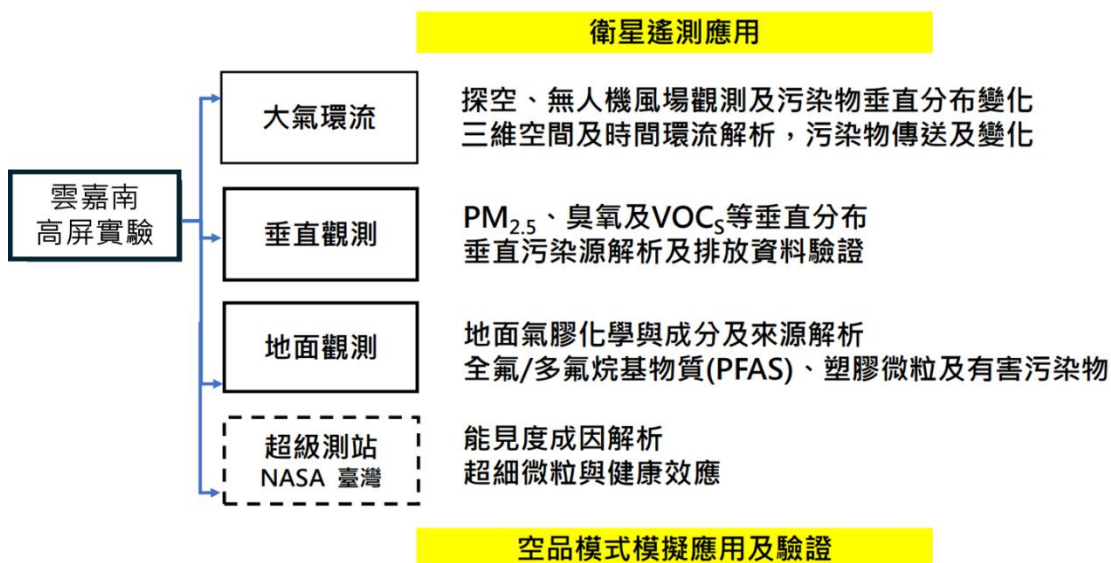


圖 3.1 114 年環境部計畫整體架構



圖 3.2 114 年環境部計畫人力配置



圖 3.3 大氣環流、垂直觀測站與環境部光化站（探空、UAV）

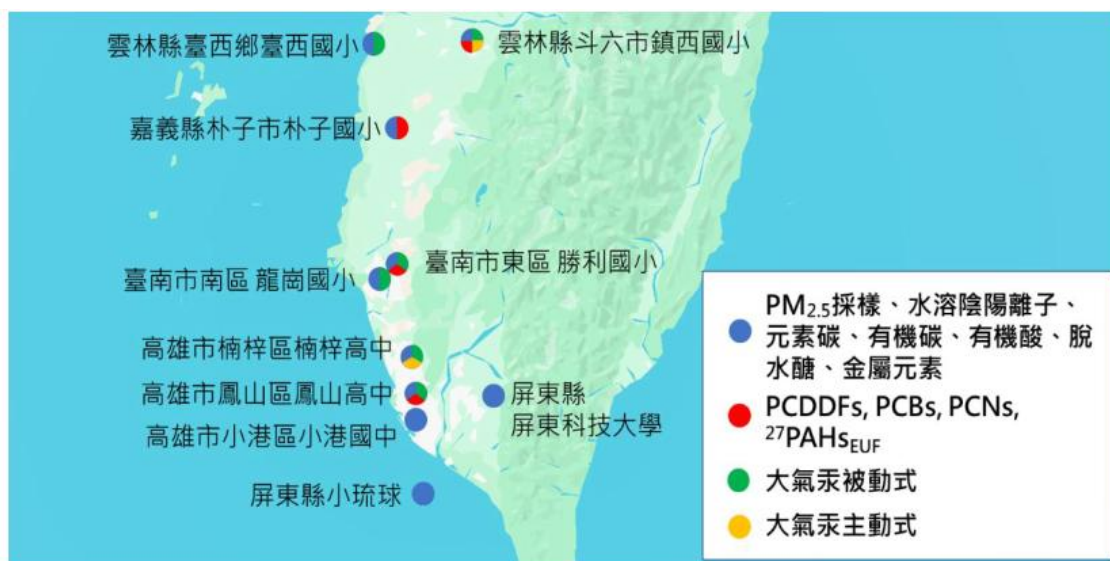


圖 3.4 地面觀測站地理位置示意圖（地面氣膠成份）

3.2 大氣環流觀測實驗

大氣環流觀測實驗於彰化縣大城鄉利用探空儀器進行密集三日環流觀測，前一天抵達施放地點進行天線的架設、確認資料傳輸的硬體設備的設置、連線測試有無問題。觀測期間每 3 小時施放一次，共 48 小時、單站施放 17 次，施放觀測高度約為 11~12 公里。探空施放流程如下：

- 一、施放前：探空施放行前，相關儀器進駐站點
- 二、施放第 1 天：早上 8 點第一次施放，每 3 小時一次
- 三、施放第 2 天：24 小時持續施放，每 3 小時一次
- 四、施放第 3 天：早上 2 點持續施放到 8 點，施放完畢後撤站

透過觀測實驗可取得各站點之垂直氣象資料，搭配氣象模式不同高度下之流場結果，可更好的解釋局部小尺度環流與垂直觀測資料間之時空變化關係。

3.2.1 實驗規劃

一、觀測方法

本計畫使用觀測設備為中央大學王聖翔教授執行國科會計畫研發之 Aerosond 探空，其可量測垂直剖面之溫度、溼度、壓力、風速和風向，之後將量測結果進行混合層高度判斷。圖 3.5 為 Aerosond 探空系統各儀器，包含溫校箱、氣球、微型探空感測器、天線（地面資料接收端）、使用個人電腦蒐集資料。微型探空感測器主要包含溫度、濕度、氣壓、GPS 之元件並建立在 ARM 為核心的微型控制主板。有即時回傳數據之功能，以確保資料完整性，各項參數誤差範圍為表 3.1 所示。資料蒐集為使用個人電腦之專用接收軟體進行接收（如圖 3.6 所），可以即時呈現於電腦上。

探空觀測資料包含品保 (Quality Assurance, QA) 和品管 (Quality

Control, QC) 兩部分。其中 QA 部分有三項措施：

- 一、在施放探空前將探空儀放入強制通風的溫校箱內，避免探空儀被太陽或地面加熱造成溫度高估。
- 二、比對探空儀資料與地面氣象資料，倘若探空儀數據與地面氣象資料差異過大則捨棄不使用。
- 三、規範各站氣球體積大小，使浮力差異不致過大、確保上升速度皆介於 2-3 m s⁻¹。

QC 部分則包括資料處理與誤差修正，如濾除異常值、進行反應時間修正等，使觀測誤差最小化，其中反應時間修正為調整探空溫溼度感測元件在觀測時因儀器反應時間所造成的觀測延遲。



圖 3.5 探空儀器示意圖

表 3.1 Aerosond 量測的誤差範圍與各項參數

參數	溫度	溼度	壓力	風速	風向
精準度	±0.3°C	±2%	±1.0hPa	±0.5m/s	< 10°
解析度	0.015°C	0.01%	0.01hPa	0.1m/s	0.1°
工作溫度	-40°C~ + 80°C				
資料頻率	1Hz 以上				
儲存方式	數據即時回傳個人電腦並紀錄資料				

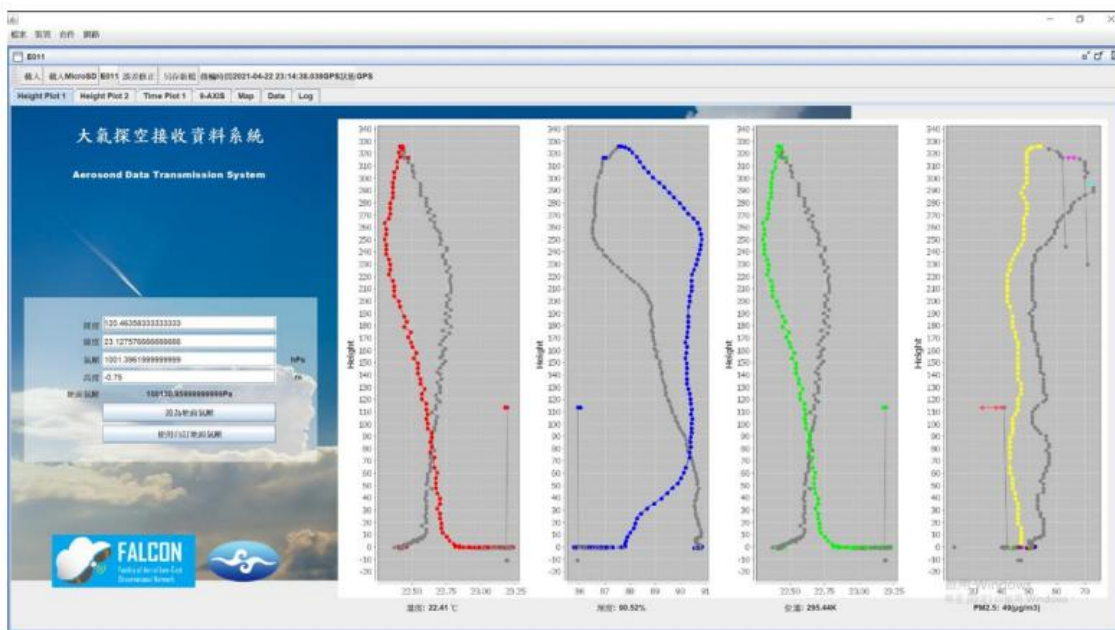


圖 3.6 探空資料接收軟體示意圖

二、實驗設計

預計於彰化縣大城鄉進行為期三天的密集探空觀測，目的為解析大氣環流於不同天氣型態（如高壓迴流、高壓東移、高壓出海、弱綜觀及東北季風）對於臺灣不同區域發展之特性及對污染物傳輸與擴散過程的影響，進行高層觀測資料蒐集，並搭配數值模式模擬，對局部環流解析與污染物傳輸軌跡之探討。

此次環境部計畫地點選定在彰化縣大城鄉特色遊學中心，位於彰化縣的西南地區，以濁水溪為自然分界，與雲林縣的麥寮鄉相鄰。東風經由臺灣南北繞山後，多在中南部地區旋入內陸形成背風渦流，此地點有助於更準確判斷渦流位置和海陸風所造成的影響。大城位於雲林上風處，在冬季盛行東北季風時，可作為判斷雲林污染來源的重要基準點，更清楚的知道雲林空品受境外污染影響的程度。且彰化比雲林沿海的重工業少，可以更好的藉由觀測資料和流場判斷境外污染對雲林空品惡化的貢獻。

實驗日期根據環境部計畫提供的未來五日流場預報資料、污染濃度模擬以及中央氣象署的天氣預報圖，並統計過去五年最易出現污染的天氣型態(圖 3.7)，選擇容易引發污染的天氣型態來啟動觀測。實驗規劃方面，每次密集觀測第一天 23 時施放第一顆，每 3 小時施放一次，直至密集觀測期最後一天 23 時施放最後一顆，每次密集觀測期共施放(日數 x8-7)顆。

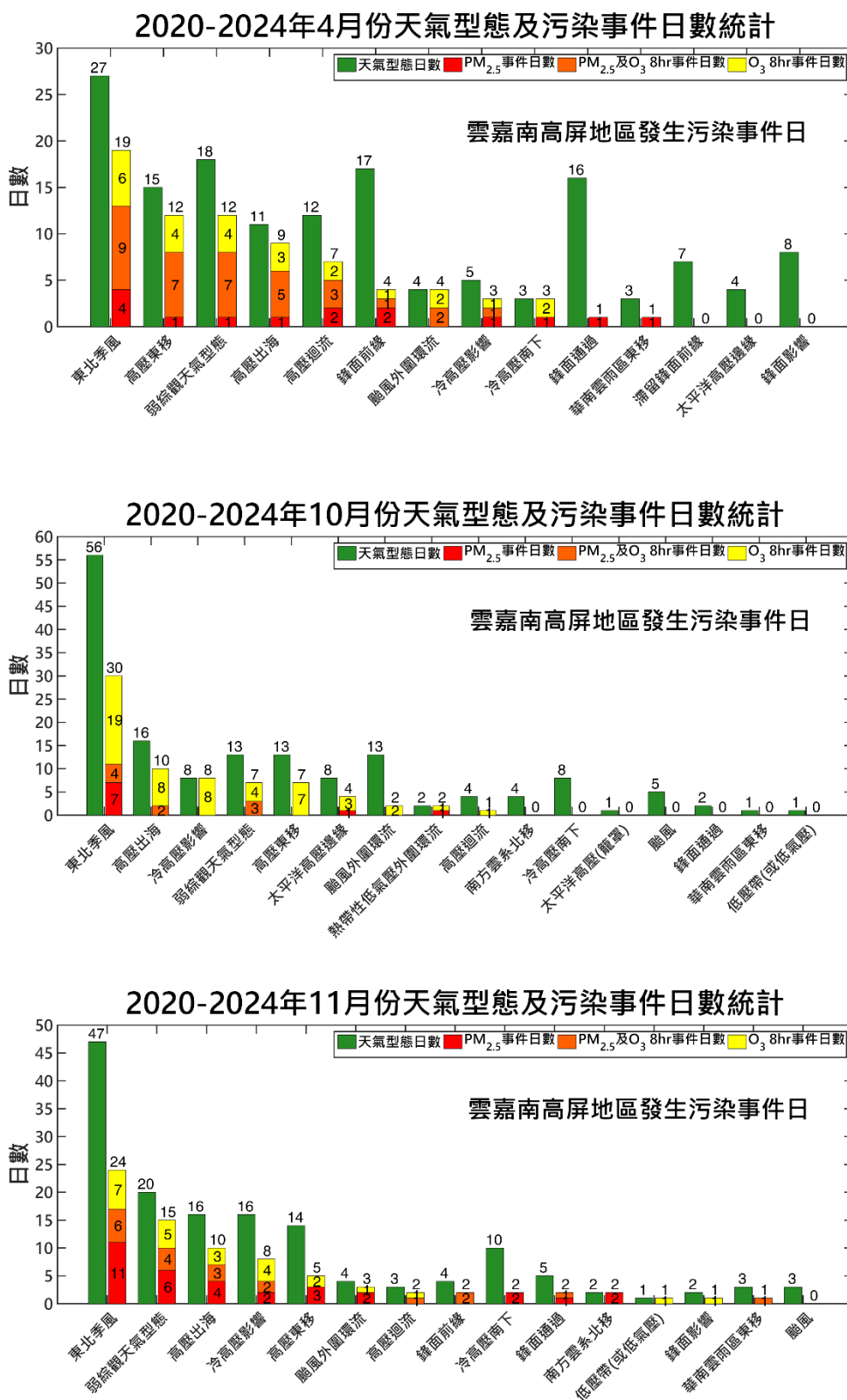


圖 3.7 2020-2024 4 月、10 月、11 天氣型態與污染事件日統計

3.3 垂直 VOCs 採樣、觀測及分析

執行無人機垂直觀測 VOC，選擇斗六市或臺西鄉進行密集三日無人機掛載採樣罐與吸附管採集 VOCs 樣本，採樣範圍設定為 0 公尺至 800 公尺進行密集觀測。每次觀測時間不少於 6 小時，共計採集 48 個樣品。採集的樣本使用氣相層析-質譜儀 (GC-MS) 進行成分分析，驗證污染來源及其對本縣的影響，為後續的污染防制提供依據。

3.3.1 實驗規劃

無人機觀測委由中央大學王聖翔教授執行，包含無人機小組、採樣分析小組，聚焦在無人機定點垂直方向獲取大氣參數以及揮發性有機化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 成分及濃度，實驗規劃說明如下：

一、觀測設計

本計畫配合環境部於雲林縣斗六地區執行無人機飛行觀測採樣作業，觀測地點選定於斗六市三叔公田園餐廳周邊場域(圖 3.8)。該地點位於雲林縣內陸平原區域，周邊環境相對開闊，且遠離高密度都市核心區與大型固定污染源，可降低近源排放對垂直觀測結果之即時干擾，適合作為區域性大氣結構與污染物傳輸特性之觀測位置。

每次的採樣共有 6 個採樣高度，由於無人機負重及電池電量的限制，每趟次無人機飛行僅能攜帶 1 支採樣鋼瓶至指定的採樣高度，包括 0 公尺、100 公尺、200 公尺、300 公尺、500 公尺和 800 公尺等 6 個不同高度，其中各高度係依據無人機量測之氣壓資料換算為相對高度。「0 公尺」代表垂直剖面之起始採樣高度，並非實際地表高度。實際採樣配置圖 3.9 所示。

採樣罐於採樣前先以高純度氮氣加壓到 30 psig 及抽真空至 0.05 torr 方式重複清洗三次，最終抽真空至 0.05 torr 以下，無人機飛行至指定的高度。此時，開啟採樣罐閥門，因為壓力差的因素，周圍空氣會吸入罐內。10 秒後關閉閥門，為了確保閥門正確運作，會再度開啟閥門

10 秒後關閉閥門，完成採樣任務後，無人機返回地面，將已裝滿的採樣罐卸下，並安裝下一個新的罐子，然後再次起飛到另一個高度重複這一過程，約 1 至 13 分鐘完成單趟 6 個高度垂直採樣。



圖 3.8 無人機觀測採樣點

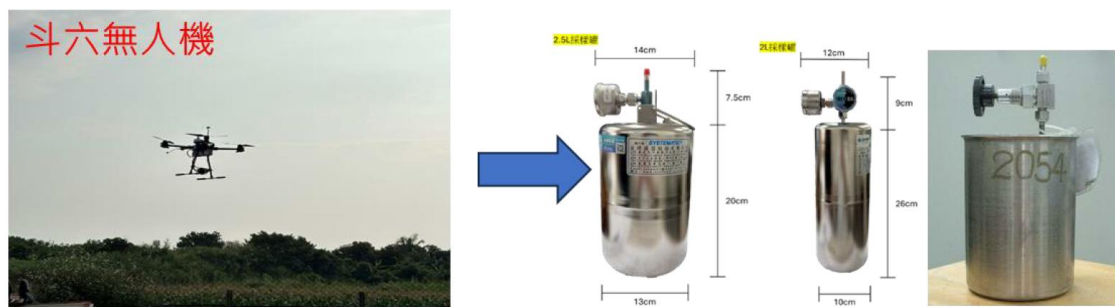


圖 3.9 無人機搭載採樣罐實照圖

密集觀測實驗，而前一天抵達施放地點進行儀器架設、確認資料傳輸的硬體設備的設置等。飛行策略採用每 2 小時一次氣象與空品剖面觀測，每 6 小時一次不同高度採樣罐採集，另由於計畫執行之無人機飛行作業涉及空域使用與飛航安全管理，皆須依據相關法規辦理空域申請作業。於每次飛行前，需先確認作業區域是否屬於管制或限制空域，並依規定向主管機關提出申請，檢附飛行計畫書、作業時間、飛行高度、作業範圍、無人機機型及操作人員等相關資料；經主管機關審核同意後，方可於核准之時間與空域內執行飛行作業。飛行當日亦須依核准內容確實執行，並配合現場安全管制與必要之即時聯繫，以確保飛航安全並避免影響既有空中活動。

隨交通部民用航空局實施《遙控無人機管理規則》，政府機關、學校及法人於執行無人載具相關作業時，均須遵循空域申請與管理規範。環境部計畫依現行法規與實務經驗，建立標準作業流程（SOP），作為例行觀測作業之執行依循，其流程如圖 3.10 所示。首先，需將能力審查所需文件上傳至交通部民用航空局「遙控無人機管理資訊系統」，取得能力審查資格後，方可提出無人機活動申請；於活動申請通過後，若作業空域與其他單位之既有作業產生重疊，則須事前進行空域協調，以避免衝突。

此外，最遲須於觀測作業前三日，將相關資料送交民航局無人機辦公室，申請發布飛航公告（NOTAM）；取得飛航公告號碼後，並依臺北或高雄近場管制塔臺之最新規定，於觀測作業前二個工作日之上午 9 時至 12 時期間，將飛航公告號碼、作業相關資訊、塔臺聯絡官資料及聲明書、切結書等文件寄送至近場管制塔臺，並於作業當日派遣聯絡官進駐塔臺進行即時回報與聯繫。

另於觀測作業執行前，須審慎評估觀測啟動條件與飛航行程規劃，包含氣象條件、場域環境及飛航風險等因素。作業前將透過中央氣象署之天氣預報資訊，研判可能之天氣狀況，並持續追蹤預報變化；同時，須事先掌握執行場域周邊之地形、建築物及其他環境限制，於空域規劃上盡量避開軍、民航主要航線，降低飛航風險並確保觀測作業之安全。

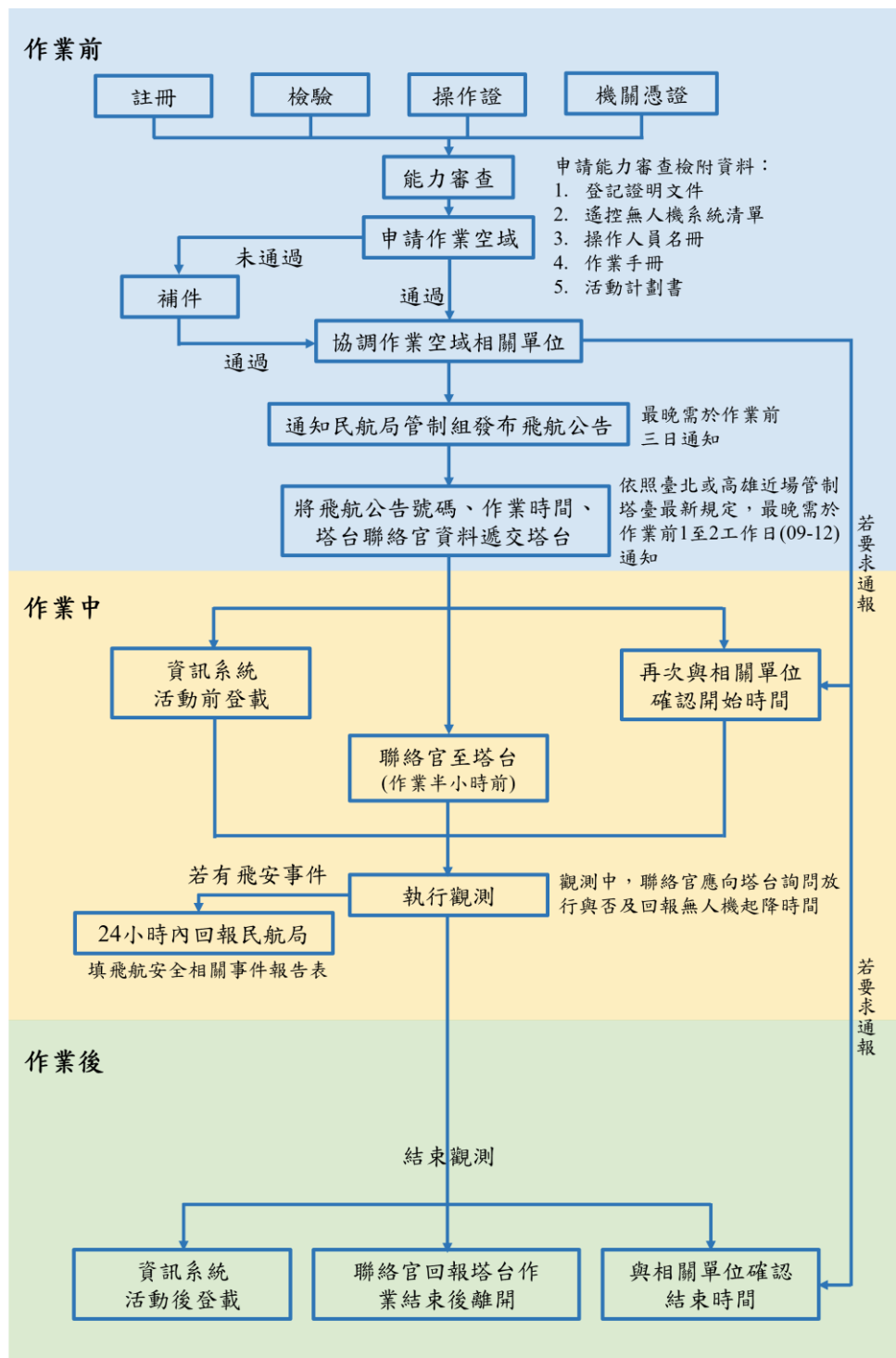


圖 3.10 無人機觀測作業流程

二、觀測設備

無人機觀測系統為空污監測專用之多旋翼無人載具系統，如圖 3.11，其技術規格如表 3.2。此無人機可酬載 PM_{2.5} 感應器、微量氣體感測器(如臭氧、NO₂、TVOC 等)、溫度、濕度、壓力與姿態感測，其中姿態感測可用以反演風速和風向的觀測依據，其餘測項皆為直接觀測之數值，同時以即時資料回傳系統，確保觀測的連續性。此套系統經由交通部中央氣象署驗收認證，確保系統的可信度，在密集觀測觀測前，將針對感測元件進行標準化的氣象儀器校正流程和空品站平行比對實驗，以確保觀測數值的準確性。



圖 3.11 無人機觀測(搭載感測器)

表 3.2 多旋翼無人載具系統規格

尺寸	對角距離 900 mm 六旋翼飛機
最大載重	2 kg
飛行距離	≤ 1 km
飛行時間	懸停飛行 20 分鐘 / 運動飛行 15 分鐘
動力來源	電力供應：鋰聚電池
乘載儀器	Aeromount, POM, 氣體採樣罐
抗風程度	6 級
飛行策略	1km 內近地面單點垂直觀測

三、分析方法

分析方面，因大氣中有機物質通常在數 ppb 濃度就可能構成污染或健康風險問題，在此濃度下若直接將空氣注入氣相層析儀 (gas chromatography, GC) 中，會因為濃度低於儀器偵測極限而無法有效檢測，因此空氣樣品必須先經過預濃縮後再進入氣相層析儀分析。故環境部計畫所使用之預濃縮單元是利用 Peltier 晶片將吸附劑降至 $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ ，藉由降低分子動能後即可有效捕捉所有介於 $\text{C}_2 - \text{C}_{12}$ 之間的有機化合物。當進樣濃縮時以鋁塊間接降溫石英管，並將晶片熱面緊貼於具有導熱管之散熱座以提升散熱效率。欲注射樣品進行層析時再利用圍繞石英管周圍的加熱線圈迅速升溫脫附分析物。以此預濃縮單元作為核心，再加上配置周邊的閥門組件、氣體傳輸管路、流量控制、溫度控制元件以及電腦控制的軟硬體等組件，即可組裝成一套完整的前濃縮熱脫附 (thermal desorption) 設備，簡稱 TD。由於空氣樣品中大量的水氣會與分析物質同時被冷凝在吸附劑表面，並在熱脫附過程中一起被注入層析管柱而造成干擾，因此，在 TD 系統的前端必須先進行除水處理。除水裝置的機構原理與 TD 相似，主要是通過將除水管的溫度設定在露點以下來實現水氣的去除，稱為 DW (de-waterizer)。

在氣相層析儀分析系統中，環境部計畫採用 Deans switch 技術以精準控制樣品流向，將不同碳數範圍的 VOCs 導入最適合的管柱中進行分離。當樣品經由進樣系統進入管柱後，Deans switch 可動態調節流路，將碳數介於 $\text{C}_2 - \text{C}_6$ 高揮發 VOCs 導入具有多孔層開管柱 (porous layer open tubular, PLOT)，同時將碳數在 $\text{C}_6 - \text{C}_{12}$ 低揮發 VOCs 分流至 TG-1MS 管柱。通過在分析過程中精確控制切換時機，Deans switch 確保各組分都能在最適合的條件下完成分離，有效減少共析現象，提升定量與定性的能力。

經過各自管柱有效分離後的 VOCs 會通過管路分別導向兩組火焰離子偵測器 (flame ionization detector, FID)，分別獲取輕、重 VOCs 的獨立訊號。這種多層次管柱設計結合 Deans switch 的流向控制優勢，使得整體分析系統能在 $\text{C}_2 - \text{C}_{12}$ 的寬廣沸點範圍內都能夠維持高選擇性、

解析度，從而提高了整體分析的可靠度。此外，我們還串聯了一台電子捕捉偵測器 (electron capture detector, ECD)，用於監測每個空氣樣本中環境內標 (CFC-11、CFC-12、CFC-113、CCl4) 的穩定性，以確認單次數據的可靠性。環境部團隊使用之分析系統，如圖 3.12 所示。

垂直空氣樣品除了分析 VOCs 與溫室氣體成分外，無人機上亦搭載氣象與環境感測器，除可獲得溫度、濕度、壓力等數據外，還可得到風速、風向、臭氧、懸浮微粒等數據。此些參數可用於解釋大氣污染物的垂直特徵，有助於解釋污染物在 排放強度、化學活性與大氣混合、傳送機制下交互的影響。

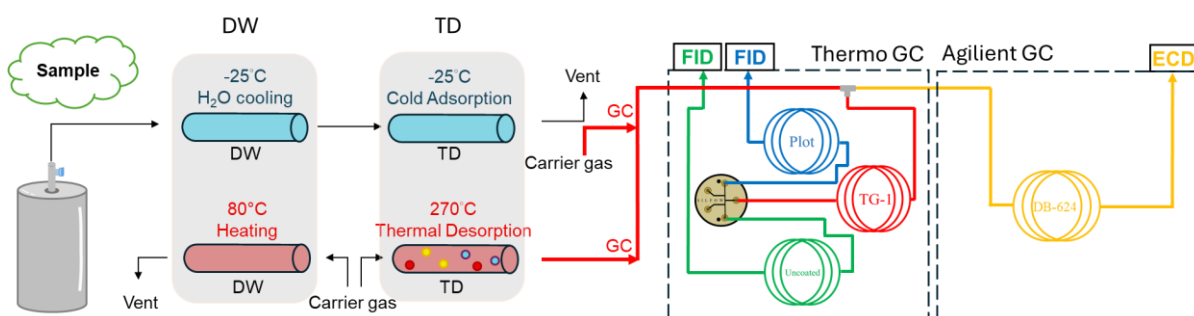


圖 3.12 環境部團隊使用之分析系統

四、數據品質

為了確保採樣結果的可信度，必須確保數據品質，將所有無人機採樣罐樣品以氣相層析質譜儀進行分析，共測得 109 種 VOCs，以及 N₂O、CO₂、CH₄ 等溫室氣體。其中，氟氯碳化物 (chlorofluorocarbons, CFCs) 因其具有長生命期的特性，且依據《1987 年蒙特婁議定書》的規定，不得生產或排放，故經過 30 年後主要作為冷媒和泡棉發泡劑使用之 CFCs 在大氣中的濃度已趨於穩定，無論在不同經緯度、高度下個別 CFCs 之大氣濃度在相對短的時間下(~幾個月內) 表現非常均一的特性；同樣地，N₂O 亦為一種具有長生命期的溫室氣體，主要由土壤排放，其大氣生命期約 100 年，與 CFCs 有類似的大氣均勻特性。如圖 3.13 所示。相反的，當其他 VOCs 物質的水平或垂直濃度出現明顯變異時，就意味著這些物質存在明顯排放源，無論垂直和水平濃度變化特徵會受到化學活性、排放強度、和大氣混合三種機制所共同影響。

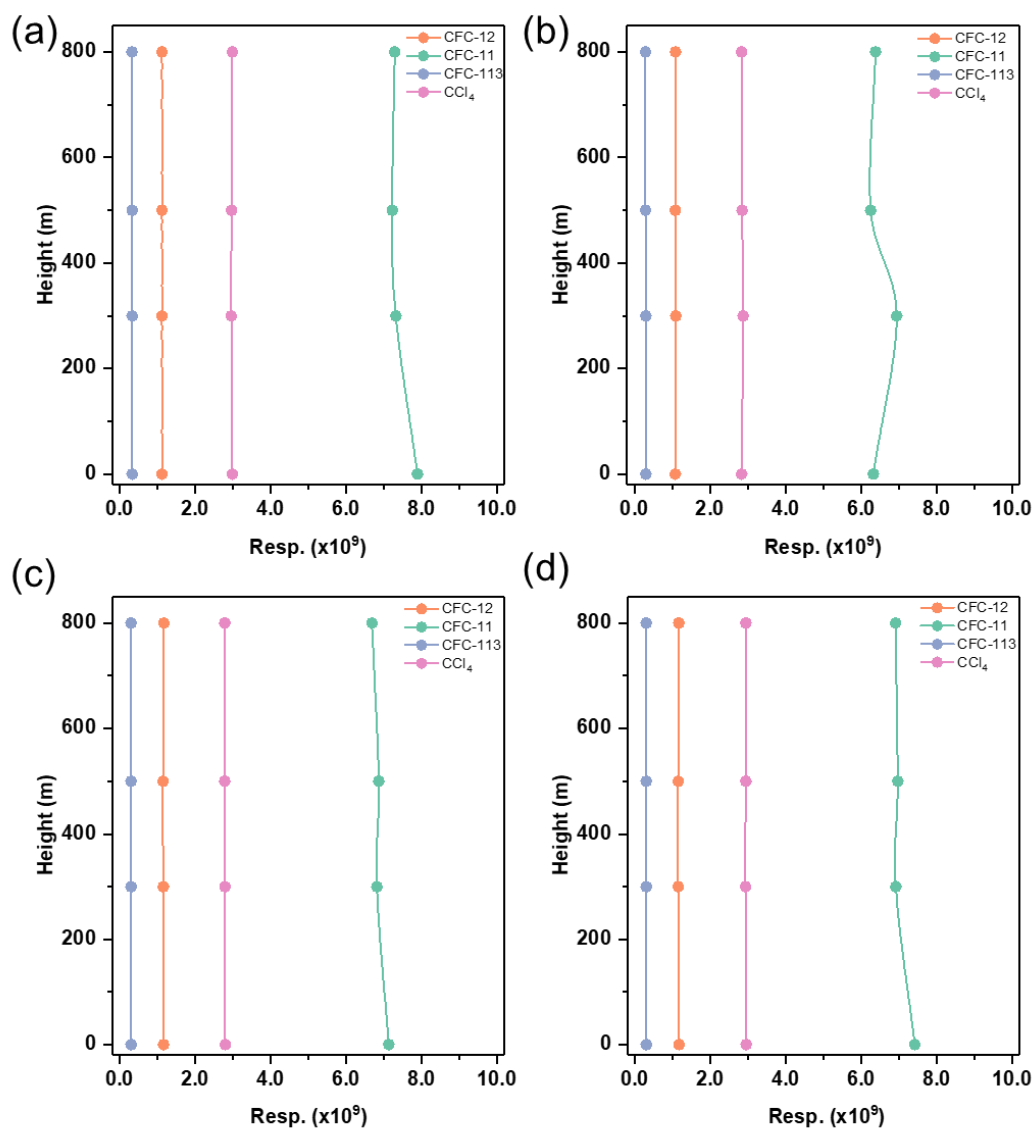


圖 3.13 無人機於不同時間垂直剖面採樣之 CFCs 濃度分布圖

3.4 地面氣膠採樣

一、實驗設計

配合環境部執行雲林縣臺西國小採樣，考量雲林海線沿海受海洋氣膠吹拂、離島產業園區及農牧排放影響的環境屬性，故採樣地點位於雲林縣臺西鄉臺西國小的臺西測站進行大氣 PM_{2.5} 採樣，分析內容配合水溶性陰陽離子、碳元素、有機酸脫水醣、金屬元素，其餘項目則由環境部計畫負責，透過成分解析，可進一步判斷污染來源(如交通、工業、農業燃燒或境外傳輸)。

採樣頻率為密集觀測期間，密集採集大氣日間及夜間 PM_{2.5}，日間採樣為 8 點(前後時間緩衝)，採到下午 4 點(前後時間緩衝)，再更換為夜間採樣，採到隔天早上 8 點(前後時間緩衝)，每次密集觀測期共有(2x 日數)個樣本，並以手動採樣的方式進行。

二、監測項目

細懸浮微粒採樣使用 PM_{2.5} 個人式環境氣膠微粒採樣器(MSP Personal Environmental Monitor, PEM-10-2.5)，以採集粒徑小於等於 2.5 μm 之細懸浮微粒，上述設備係參考並修正我國環境部公告之標準測定方法(NIEA A205.11C)的方式，進行大氣中 PM_{2.5} 採樣，以達 PM_{2.5} 採樣質量濃度品管的一致性，兼顧儀器運用的機動性及便利性。

PM_{2.5} 化學成份分析分析項目包括離子成分、金屬成分及碳成分。其中離子成分分析項目包括有 F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等 9 種陰陽離子成分，另外亦在分析有機酸鹽及脫水醣類，以探討生質燃燒微粒排放的特定追蹤物種；金屬元素成分分析項目包括有 Mg、K、Ca、Ti、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、Al、As、Cd、Pb、V、Cu、Ba 及 Sb 等金屬元素；而碳成分分析項目則包括元素碳(EC)、有機碳(OC)、總碳(TC)等成分。

三、分析方法

(一) 質量濃度分析

PM_{2.5} 採樣前後，皆須將採樣器所使用之石英濾紙置於相對濕度為 40±5%及氣溫為 20±5°C的乾燥箱中，進行 48 小時的調理(conditioning)，並將乾燥箱置於氣溫為 20±5°C且相對濕度≤50%的室內環境中保存，以避免石英濾紙受水份及有機物殘留而影響分析的準確性。將採樣前後之濾紙精確稱重至 1 μg，並記錄稱重結果後，再將濾紙置於濾紙盒中放入恆溫恆濕乾燥箱中保存。將採樣前後濾紙稱重所得的重量相減，所得重量差即為採樣期間所採集到的 PM_{2.5} 重量。依據採樣期間記錄表中詳細記錄的採樣時間、採氣流量及抽引空氣總體積量，即可計算細懸浮微粒的質量濃度。PM_{2.5} 質量濃度計算公式詳如式(1)~式(2)：

$$C = \frac{(W_e - W_s)}{V} \times 10^6 \quad \text{式(1)}$$

$$V = \frac{Q_s + Q_e}{2} \times t \quad \text{式(2)}$$

式中

C：細懸浮微粒濃度(μg/m³)

We：採樣後之濾紙稱重重量(g)

Ws：採樣前之濾紙稱重重量(g)

V：吸引空氣量(m³)

Qs：採樣開始之採氣流量(m³/min)

Qe：採樣終止時之採氣流量(m³/min)

t：採樣時間(min)

(二) 水溶性離子分析

離子成分分析係使用離子層析儀(ion chromatography ; IC)。離子層析儀之操作原理為離子交換、流洗液(eluent)抑制作用及電導度偵測或電化學檢測器等，分析 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等離子，所使用之常規離子層析儀為 Dionex ICS-1100 型離子層析儀，在陰離子之成分分析中以 1.8 mM Na_2CO_3 /1.7 mM $NaHCO_3$ 作為流洗液帶動樣本萃取液，在分離管柱(separation column)中移動，並於抑制管中形成 H_2CO_3 低離解酸，將沖提液所引起之導電度干擾降至最低，以提高偵測極限，其內壓設定為 2500 psi，流洗液流量為 1.5 ml/min；而陽離子成分分析則以 20 mM 甲磺酸(methane sulfonic acid)作為流洗液帶動樣本，流洗液流量則設定為 1.5 ml/min。

另一型式較為特殊分析陰離子及有機酸鹽包括 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、lactate, acetate, formate, pyruvate, glyoxylate, glutarate, succinate, malate, malonate, tartrate, maleate, fumarate, oxalate, phthalate, and citrate 成份，使用 Thermo ICS-5000⁺雙系統型及梯度沖提方式分離並後經電導度偵測為之，eluent 為 DI Water, 5 mM NaOH, 100 mM NaOH, 100 % MeOH。分析脫水糖類使用 Thermo ICS-5000⁺雙系統型，搭配電化學檢測器之黃金電極(8003)進行分析。水溶性離子分析流程說明如下，流程圖如圖 3.14 所示。

1. 將濾液注入離子層析儀進行離子成分分析前，須先將懸浮微粒固相離子成分萃取至液相萃取液中，並以超音波震盪萃取法萃取。
2. 以陶瓷刀裁取欲分析離子成分之石英濾紙 1/2 等分，置入 50 ml 聚乙烯(PE)瓶中。
3. 於放置濾紙樣品的 PE 瓶中加入 30 ml 電阻率 $>18.0 M\Omega \cdot cm$ 的去離子水，並且確保濾紙樣品全數浸泡於去離子水中。

4. 於超音波震盪機中注水至距離滿水位約 2-3 cm 處，將處理好的 PE 瓶放入後，進行震盪 120 min。
5. Dionex ICS-1100 型離子層析儀、ICS-5000⁺ 雙系統型離子層析儀使用 0.45 μm 醋酸酯纖維濾紙將震盪過後之樣品加以過濾，並將過濾完成的濾液注入 IC 中，即可進行離子成分分析。

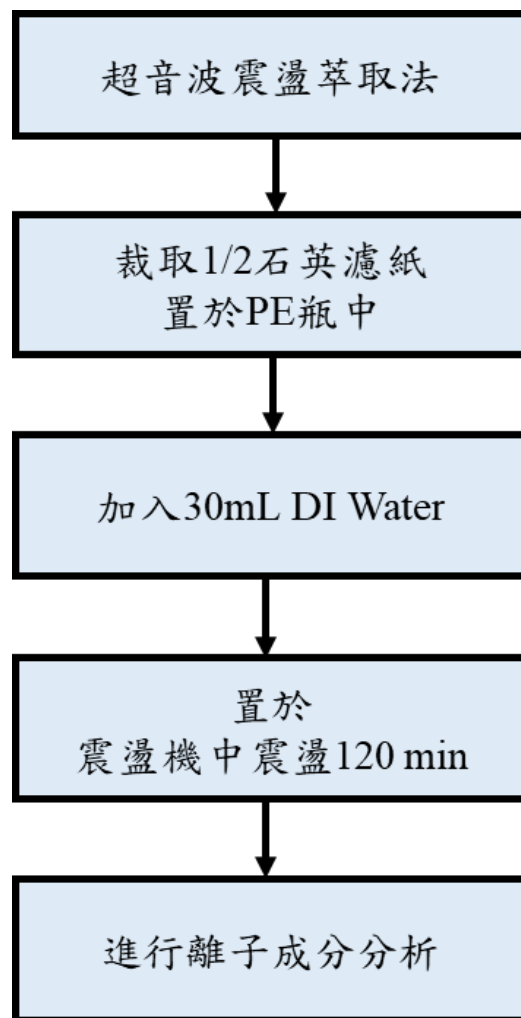


圖 3.14 離子成分分析流程圖

(三) 碳成分分析

碳成分分析採用之元素分析儀為 Carlo Erba 公司生產之 CHNS/O 1108 型元素分析儀(elemental analyzer, EA), 並配合 AS 200 型自動進樣器及 DP 700 型積分儀進行分析或同原理 EA 的分析儀器進行, 分析元素碳(elemental carbon, EC)及總碳(total carbon; TC)含量, 再將總碳含量扣除元素碳含量而得有機碳(organic carbon, OC)含量。元素分析儀操作條件設定如表 3.3 所示或調整參數後進行。

元素分析儀之分析原理為瞬間動態燃燒氧化法, 樣品在高熱狀態之石英反應管中, 化學鍵被破壞而形成原子及分子裂片, 之後與通入之氧氣發生快速氧化, 反應形成氣體氧化物(CO₂), 再經 Cu 還原部分氧化物, 經由分離管柱分離, 最後以熱導電偵測器(TCD)定量偵測之。碳成分分析流程說明如下, 流程圖如圖 3.15 所示。

1. 採樣前先將石英濾紙置於高溫爐, 以 900°C 高溫烘 1.5 小時, 以降低背景碳成分。在進行碳成分分析前, 需先將部分濾紙進行前處理。
2. 以陶瓷刀裁取欲分析碳成分之 1/16 張石英濾紙共兩份, 其中一份置於 345 ~ 425°C 之烘箱中加熱 30 分鐘, 用以去除有機碳。
3. 將經烘箱加熱處理及未經加熱處理之濾紙秤重後, 分別填充入錫箔中並壓錠。
4. 將上述壓錠完成之樣品置入元素分析儀連續進樣器中, 逐樣進行碳成分分析。

表 3.3 元素分析儀操作條件

項目	設定條件
氧化爐溫度	1050°C
還原爐溫度	500°C
載流氣體流速	100 mL/min±10%
樣品延遲時間	8-15 秒
全部執行時間	9-12 分鐘

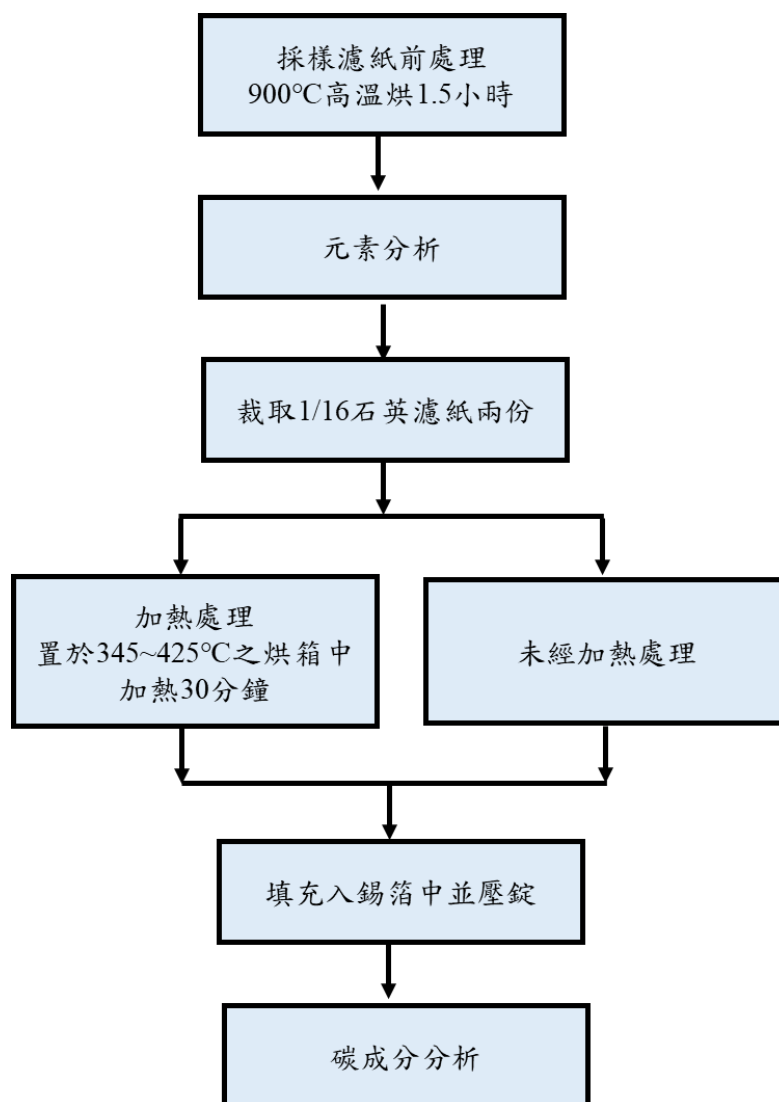


圖 3.15 碳成分分析流程圖

(四) 金屬元素分析

金屬元素成分分析係採用感應耦合電漿原子發射光譜儀(簡稱 ICP-OES)，為 PERKIN ELMER 公司生產，在進行 ICP-OES 金屬元素成分分析前，濾紙須先經過消化萃取步驟處理，才能夠以感應耦合電漿原子發射光譜儀進行分析。金屬元素分析流程說明如下，流程圖如圖 3.16 所示。

1. 以陶瓷刀裁取欲分析金屬元素成分之石英濾紙 1/4 等分，置入 150 ml 鐵氟龍材質微波消化瓶中，依樣品對消化瓶依序編號。
2. 將濃度為 70% 之 HNO_3 及濃度為 37% 之 HCl 以 1:3 之比例配置 30 ml 混酸，將此混酸加入微波消化瓶中。
3. 將消化瓶鎖緊後，進行消化時間為 20 min 的微波消化。
4. 微波消化過後之待測樣品以 0.45 μm 醋酸酯纖維濾紙進行過濾，將濾液注入定量瓶中並加入去離子水定量至 50 ml 完成後將待測濾液儲存於 PE 瓶中。

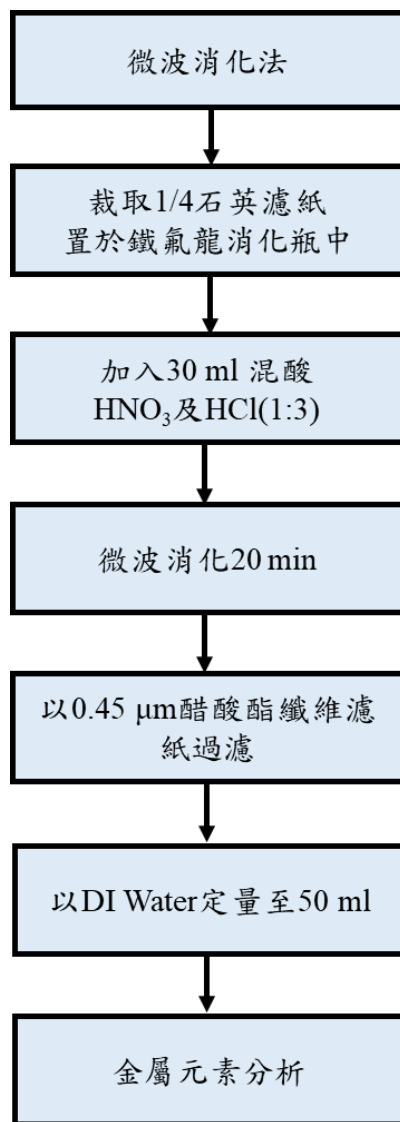


圖 3.16 金屬元素分析流程圖

四、品保品管

(一)採樣方法品保品管

細懸浮微粒(PM_{2.5})人工採樣後之品保與品管方法均參考及修正環境部公告之標準方法(NIEA A205.11C)進行。

1. 濾紙選擇與調理

本計畫選用 PALL 公司出廠，具有耐壓損、耐高溫及低背景濃度值特性之石英濾紙，因考慮到單一採樣濾紙需分析多種成分(水溶性離子成份、金屬元素成份、碳成份)，故在濾紙選擇上，除無破損、皺褶外，亦需不干擾化學成分分析之條件。為避免溫度及濕度影響樣品秤重前後之秤重品質及準確性，採樣前後需將濾紙放置於乾淨且恆溫恆濕(RH：40±5%及 T：20±5°C)之乾燥箱內，確認秤重前後的環境及濾紙的調理條件相同，以減少量測之誤差。

2. 天秤檢測與校正

本計畫採用 SARTORIUS 公司出廠的 MSA6.6S 型六位數微量分析天秤或 SARTORIUS 公司出廠的 CP2P 六位數天秤，可精確量測 PM_{2.5} 的重量，其靈敏度為 0.000001 g (1 µg)，秤重前需先確認室內保持恆溫狀態及儀器內部校正，並定期針對儀器進行外部校正，以確保天秤之準確性。

3. 採樣儀器流量校正

本計畫 PEM-10-2.5 採樣流量控制為 10.0±0.1 Lpm，採樣前儀器流量以乾式流量計(Shinagwa DC-2A)進行校正。

4. 採樣過程與樣本保存方法

本計畫在採樣過程中換取濾紙樣品時皆使用不銹鋼攝子，並在更換濾紙及分析過程中全程需戴上無粉橡膠手套，避免污染濾紙。採樣期間須將採樣前後流量、採樣日期、採樣天氣

概況或可能影響採樣品質之事件等確實記錄於採樣紀錄表。採樣前後濾紙樣品需保存於濾紙盒中，並將濾紙盒存放於深色樣品罐中，避免光敏性物質揮發而導致負誤差，故應儘速攜回實驗室，放入乾燥箱中調理及存放，以降低外部環境造成的誤差。

(二) 分析方法品保品管

各分析儀器於成分分析前，應配置不同濃度之標準品以製作檢量線，然後由樣品之積分面積來換算成濃度。檢量線可做為同批次樣品的定量依據，其製作步驟如下：取欲分析成分之標準品濃度包含一個空白及至少四個不同濃度，其中一個應接近但不小於方法偵測極限，一個應接近但不大於定量範圍的上限。在分析方法之線性範圍內，由儀器所得之讀值，相對於校正標準品之濃度，可獲得一相關之線性圖。利用數據迴歸之方法求得其判定係數，以判斷此法所配置之濃度範圍是否具線性關係。通常各成分檢量線之線性迴歸線之判定係數(R^2)必須在 0.995 以上才符合此標準，由此所計算出之濃度值方具有意義。

每十個樣本及每批次分析須有一空白分析及品管標準品分析，檢量線空白分析值應小於 2 倍方法偵測極限，檢量線查核標準溶液分析結果之相對誤差值應在 $\pm 10\%$ 以內。

3.5 地面醛酮類採樣

一、實驗設計

醛酮類屬於揮發性有機物 (VOCs) 的一部分，在光化學反應中扮演臭氧生成的重要前驅物，本計畫醛酮類採樣規劃與大氣 PM_{2.5} 採樣一致，於雲林縣臺西國民小學執行日間至少 8 小時連續採樣與檢測，每兩小時採集一個樣品。實際採樣執行與數量將視天候、場地等因素決定。

二、採樣設備

醛酮類採樣與監測方法為參考 USEPA TO-11A 方法，為固態吸附匣衍生法。環境周界採樣裝置分為三部分，環境空氣經由外接幫浦抽引空氣後，依序通過臭氧去除器(Ozone scrubber)與吸附匣(Cartridges)。採樣幫浦為採用小型攜帶式幫浦(Portable pump)，本計畫使用幫浦廠牌為 GilAir Plus 與 Buck LP-5。吸附匣使用 Supelco 公司生產商業化吸附匣，內部含有塗佈 DNPH 之 Silica 粉末，充填重量為 350 mg；臭氧去除器採用 Waters 公司之商業化臭氧去除器，內含 1.5 g 之碘化鉀(KI)。文獻指出環境周界採樣醛酮化合物時需裝設臭氧去除器，避免周界臭氧與吸附匣內 DNPH 產生干擾物質，進入 HPLC-UV 時產生干擾峰而影響主要分析譜峰（可能在液相層析中與待測物共析，及產生許多雜訊進而影響主要醛酮類化合物定量）。

三、採樣方法

醛酮類採樣步驟敘述如下：

- (一)採樣時，採樣口位置應架設於距離地面 1.2 至 1.5 公尺，避免採集地面塵土阻塞前端臭氧去除器。
- (二)使用口徑合適的矽膠管連結上述三項採樣設備，順序分別為臭氧去除器、吸附匣，最後為氣體採樣幫浦。為避免光照分解衍生物，吸附匣應使用鋁箔紙包覆避光。氣體採樣

幫浦之流量約為 0.5-1.0 L/min，本計畫設定為 1.0 L/min，採樣時間為 120 分鐘，總採樣體積為 120 L。

(三)記錄採樣時的日期、時間、氣象條件(溫度、溼度、風速、風向)等環境參數。

(四)採樣完畢後迅速將吸附匣兩端用蓋子塞住，並置於樣品保存箱冰浴，於 4°C 下避光保存，每日採完樣後送回實驗室分析。

四、分析方法及設備

醛酮類有害物質分析使用超高效能液相層析儀搭配紫外光偵測器(UltraHigh- Performance Liquid Chromatography – Photo Diode Array, UHPLC-PDA) (Nexera XR, Shimadzu, JP)。可在幫浦中設定輸出階段比例之溶劑至液相層析管柱中，藉由溶劑中不同極性比例、強弱等將待測物分離，當待測物進入偵測器後藉由固定波段之波長定量量測。本計畫使用 C18 逆向(Reverse phase)層析管柱(25cm × 4.6 mm × 5 μm) (Restek, PA, US)。儀器內配置自動進樣注射裝置，可自行排程執行連續進樣。為求分析穩定性，儀器配備管柱保溫烘箱，精準維持層析管柱溫度，提升圖譜穩定性(再現性)與維持層析滯留時間。

表 3.4 為儀器分析參數設定值，移動相搭配為純水與乙腈(Acetonitrile, ACN)，藉由階段式梯度沖提將 15 項待測物分離，PDA 偵測器波長設定為 360 nm。圖 3.17 為 15 項醛酮類之液相層析圖譜，單一樣品分析時間約為 25 分鐘。

表 3.4 醛酮類儀器分析參數設定

實驗條件				
進樣參數	移動相參數			偵測器參數
流速：1 (mL/min) 進樣量：20 μ L 層析管柱：恆溫 30°C	分鐘	water(%)	ACN(%)	吸收波長： 360 nm
	0	45	55	
	4	30	70	
	23	30	70	

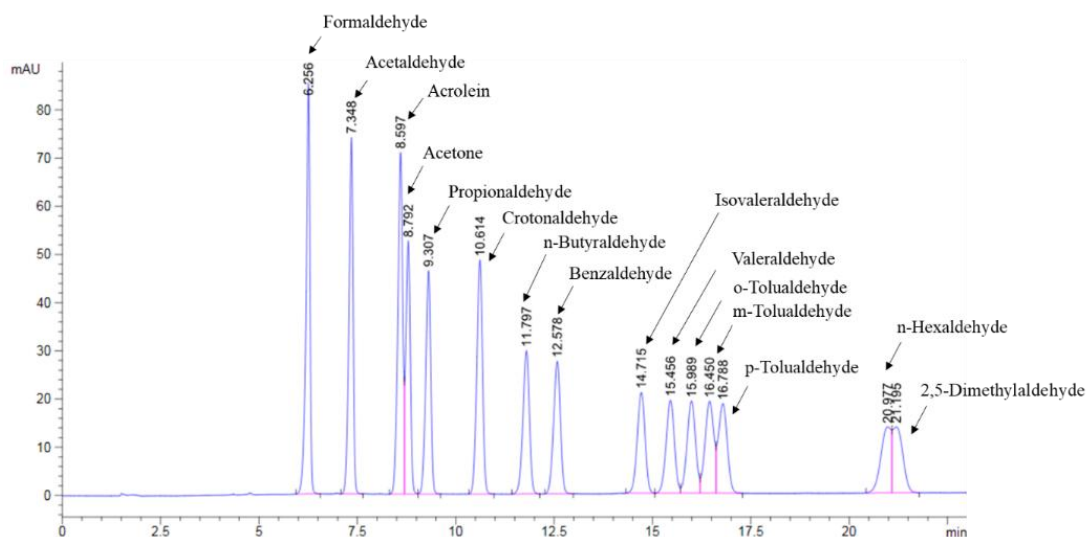


圖 3.17 醛酮類之液相層析圖譜(15 項)

五、品保品管

醛酮類採樣時將執行空白樣品分析，除了批次分析吸附匣空白測試（1/40，每 40 個吸附匣執行一次空白分析）之外，尚執行旅運空白 (Travel blank sample)，即到現場後吸附匣不拆封，由運送空白樣品之分析結果，判斷樣品在運送過程是否遭受污染。其餘品保與品管之項目詳述如下：

(一) 檢量線

檢量線製備需配製五種不同濃度之標準品，濃度需平均分配，以建立合理範圍之檢量線。本計畫中使用商業化 TO-11A 標準品 (Sigma-Aldrich, MA, US)，為已衍生化醛酮標準液，將商業化標準品配製為 0.21、0.63、0.99、2.01、3.99 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 等五種濃度，以自動進樣系統注入 HPLC/UV 進行分析，標準品之範圍約可用於測量一般環境周界濃度(ppbv 等級)。單一標準品濃度測試次數為 5 次，全部濃度為反覆測試 2 次，確保檢量線重製具有再現性。

檢量線線性之決定係數(Determination of correlation)，常以 R^2 表示（如表 3.5）， R^2 範圍介於 0.9996-0.9997，符合允收標準(> 0.9995)，代表 15 項醛酮類有害物質之濃度檢量線為高度線性。商業化標準品具有保存期限，開封後僅能冷藏保溫兩週，故檢量線建立超過兩週後需要開封新標準品，重新建立檢量線。標準品開封後雖有冷藏保溫，但仍需注意超過兩週後即不可使用，避免濃度揮發導致儀器感度下降，檢量線濃度低估。

表 3.5 醛酮類檢量線線性和相關係數

編號	醛酮類有害物質	檢量線公式	決定係數(R ²)
1	Formaldehyde	$y = 541.7x + 23.8$	0.9997
2	Acetaldehyde	$y = 502.1x + 22.9$	0.9997
3	Acrolein	$y = 558.7x + 26.2$	0.9997
4	Acetone	$y = 385.9x + 17.0$	0.9997
5	Propionaldehyde	$y = 386.0x + 17.3$	0.9997
6	Crotonaldehyde	$y = 456.8x + 20.3$	0.9997
7	Butyraldehyde	$y = 316.9x + 14.1$	0.9997
8	Benzaldehyde	$y = 311.2x + 13.0$	0.9997
9	Isovaleraldehyde	$y = 274.6x + 8.7$	0.9998
10	Valeraldehyde	$y = 266.8x + 10.5$	0.9997
11	o-Tolualdehyde	$y = 271.7x + 11.2$	0.9997
12	m-Tolualdehyde	$y = 278.8x + 12.0$	0.9997
13	p-Tolualdehyde	$y = 270.4x + 11.9$	0.9997
14	Hexaldehyde	$y = 237.4x + 9.8$	0.9997
15	2,5-Dimethylbenzaldehyde	$y = 227.6x + 10.2$	0.9996

(二)精確度與準確度

精確度與準確度測試為確保回收率與具備再現性，本計畫使用檢量線中濃度 1.75 µg/mL 進行精密度與準確度測試，經過 7 次重複量測後，計算相對標準偏差(Relative Standard Deviation, RSD)與回收率(Recovery)，前者代表精密度測試結果，後者代表準確度測試結果。精密度與準確度允收標準參考現行標準方法 NIEA A705.12C，誤差訂為±15% (85-115%)。

測試結果如表 3.6 所示，RSD 介於 0.9-1.3%間；Recovery 介於 98.3-101.0%，皆符合允收標準，顯示重複分析之回收率與再現性均符合允收標準

表 3.6 醛酮類精確度(RSD)與準確度(Recovery)測試結果

編號	醛酮類有害物質	RSD(%)	Recovery(%)
1	Formaldehyde	1.1	98.9-100.9
2	Acetaldehyde	1.1	98.7-100.8
3	Acrolein	0.8	99.4-100.7
4	Acetone	1.3	98.3-100.9
5	Propionaldehyde	1.3	98.6-101.0
6	Crotonaldehyde	1.1	98.8-100.9
7	Butyraldehyde	1.1	98.7-100.8
8	Benzaldehyde	1.1	98.6-100.8
9	Isovaleraldehyde	0.9	98.6-100.7
10	Valeraldehyde	0.9	98.7-100.9
11	o-Tolualdehyde	0.9	98.9-100.9
12	m-Tolualdehyde	1.0	98.9-100.9
13	p-Tolualdehyde	1.1	98.7-100.8
14	Hexaldehyde	1.1	98.7-101.0
15	2,5-Dimethylbenzaldehyde	1.0	98.8-100.8

(三)方法偵測極限(MDL)

本計畫方法偵測極限(Method Detection Limit, MDL)的測定方法參考環境檢驗所公告環境檢驗方法偵測極限測定指引 NIEA-PA107。首先預估 15 項醛酮類有害物質之個別 MDL，本計畫直接參考 TO-11A 測得之 MDL，預估濃度採用 0.75 µg/mL。其次需配製低於預估濃度之標準品，進行濃度再確認，確認濃度採用 0.60 µg/mL。將預估濃度及確認濃度之標準品分別添加至吸附匣中進行七次重複，計算標準偏差(Standard Deviation, S)，即可獲得 SA 及 SB 值，帶入 F-test。通過 F-test 後，計算 Spooled。最後計算最終 MDL，如表 3.7 所示。

標準偏差 S：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

其中： X_i =待測樣品之個別測定值

\bar{X} =待測樣品測定值之平均值

n=測定次數(7 次)

F-test：

$$\frac{SA^2}{SB^2} < 3.05$$

共同標準偏差 Spooled：

$$S_{pooled} = \left[\frac{6S_A^2 + 6S_B^2}{12} \right]^{1/2}$$

最終 MDL：

$$MDL = 2.681 \times S_{pooled}$$

表 3.7 醛酮類方法偵測極限測試結果

編號	化合物名稱	預估 MDL	確認 MDL	最終 MDL
1	Formaldehyde	0.17	0.16	0.15
2	Acetaldehyde	0.13	0.12	0.11
3	Acrolein	0.12	0.12	0.11
4	Acetone	0.13	0.11	0.11
5	Propionaldehyde	0.15	0.12	0.12
6	Crotonaldehyde	0.15	0.11	0.12
7	Butyraldehyde	0.12	0.12	0.11
8	Benzaldehyde	0.10	0.12	0.10
9	Isovaleraldehyde	0.10	0.11	0.09
10	Valeraldehyde	0.10	0.09	0.09
11	o-Tolualdehyde	0.11	0.07	0.10
12	m-Tolualdehyde	0.12	0.10	0.09
13	p-Tolualdehyde	0.12	0.08	0.09
14	Hexaldehyde	0.11	0.15	0.12
15	2,5-Dimethylbenzaldehyde	0.15	0.12	0.12

單位：ppbv

3.6 紀錄片製作

紀錄片製作流程如圖 3.18，在紀錄片製作初期，首先確認目標觀眾、影片播放的管道與適用場合，以便決定影片的風格與呈現方式。接著與環保局進行討論，釐清影片的長度需求及其可接受範圍，同時確認拍攝主題及整體方向，確保製作內容符合宣導目的及實際需求。

確認方向後，進入素材收集階段，包含拍攝現場採樣作業、相關活動及重點畫面的照片與影像資料。素材收集完成後，先進行初步剪輯，整理出影片大致架構與內容走向，作為後續判斷影片是否符合預期的依據。

若初剪內容經確認無誤，則進入精修階段，進行畫面微調、色彩校正、字幕與旁白配音的加入，以及背景音效的搭配，以提升影片整體品質與觀賞性。但若初剪結果不符合期待，則需與相關單位重新討論影片主題與拍攝方向，再行規劃與製作，確保最終成果達到溝通與教育效果。

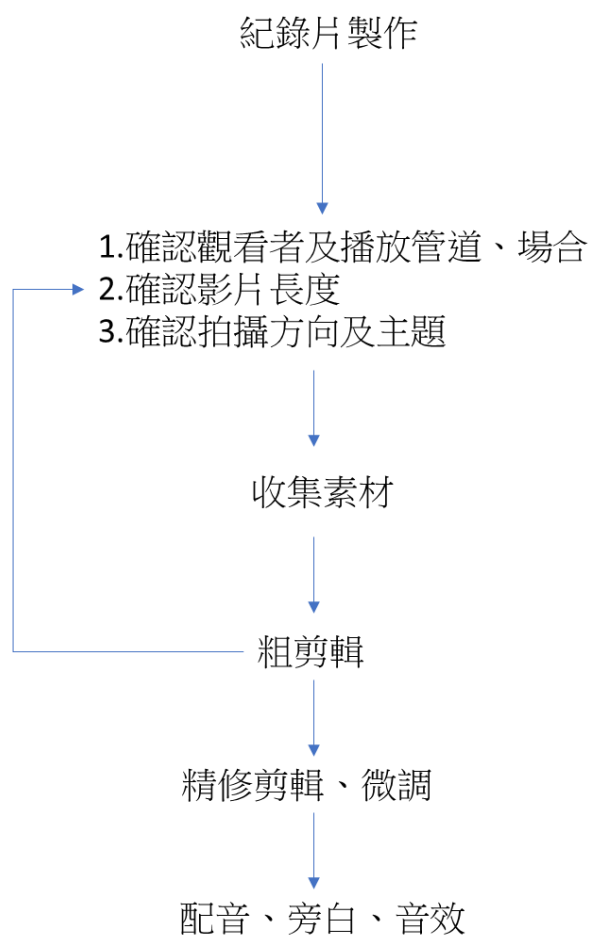


圖 3.18 紀錄片製作流程

第四章 大氣環流觀測結果

4.1 第一次密集觀測(IOP1：04/07~04/09)

環境部依照天氣條件、空品警示資訊以及空域管制等綜合考量，通知於 114 年 4 月 7 日至 9 日執行第一次密集觀測期(IOP1)；其中依環境部空氣品質監測網預報顯示 4 月 8 日至 9 日以 PM_{2.5} 為主，臭氧其次。

本計畫選定彰化縣特色遊學中心作為施放站點，IOP-1 施放時段為 4 月 7 日 23 時施放第一顆，每 3 小時施放一次，於 4 月 9 日 23 時施放最後一顆，共計 17 顆，施放情形如圖 4.1。

施放前：由中大進行探空施放教育訓練、相關觀測儀器進駐觀測地點進行架設準備。

施放第一天：23 點進行第一次施放

施放第二天：持續施放至 23 點，每 3 小時施放一次

施放第三天：持續施放至 23 點，每 3 小時施放一次



圖 4.1 IOP1 探空氣球施放情形

4.1.1 天氣與環流場分析

一、天氣型態說明

根據當時天氣型態分析(圖 4.2)，自 4 月 7 日至 4 月 10 日臺灣大氣環境主要為高壓迴流主導，期間風場與降雨特徵逐漸變化，每日變化情況如後說明：4 月 7 日，太平洋高壓移動至臺灣東北方，風向為東北東風，東部地區有零星降雨；此風場配置較不利污染物擴散，西半部開始有累積現象。至 4 月 8 日，高壓中心已東移至日本南方海面，臺灣位於其西南側，風向轉為偏東風，降雨主要集中在迎風的花東地區，背風的中南部則相對穩定，此時污染物逐漸累積，顯示為高壓迴流典型環境。

4 月 9 日延續高壓迴流型態，此環境使得大氣擴散條件降低，有利污染加劇。但此時華中地區形成一低壓系統，與東側高壓形成的交界區位於東海至臺灣海峽一帶，臺灣附近風場呈現弱輻合，並伴隨微弱鋒面結構，西北部與山區出現局部降雨。

4 月 10 日清晨起，鋒面逐漸南下通過臺灣，北部及中部地區出現明顯降雨，空氣品質逐漸改善。整體而言，本次觀測期間的天氣型態可概括為由高壓東移轉為高壓迴流，再過渡至鋒面通過，8 日、9 日風場持續偏東，為臺灣西半部帶來風場持續偏弱且大氣條件相對靜穩之情形，使污染物易於累積，進而發展為區域性空氣污染事件。

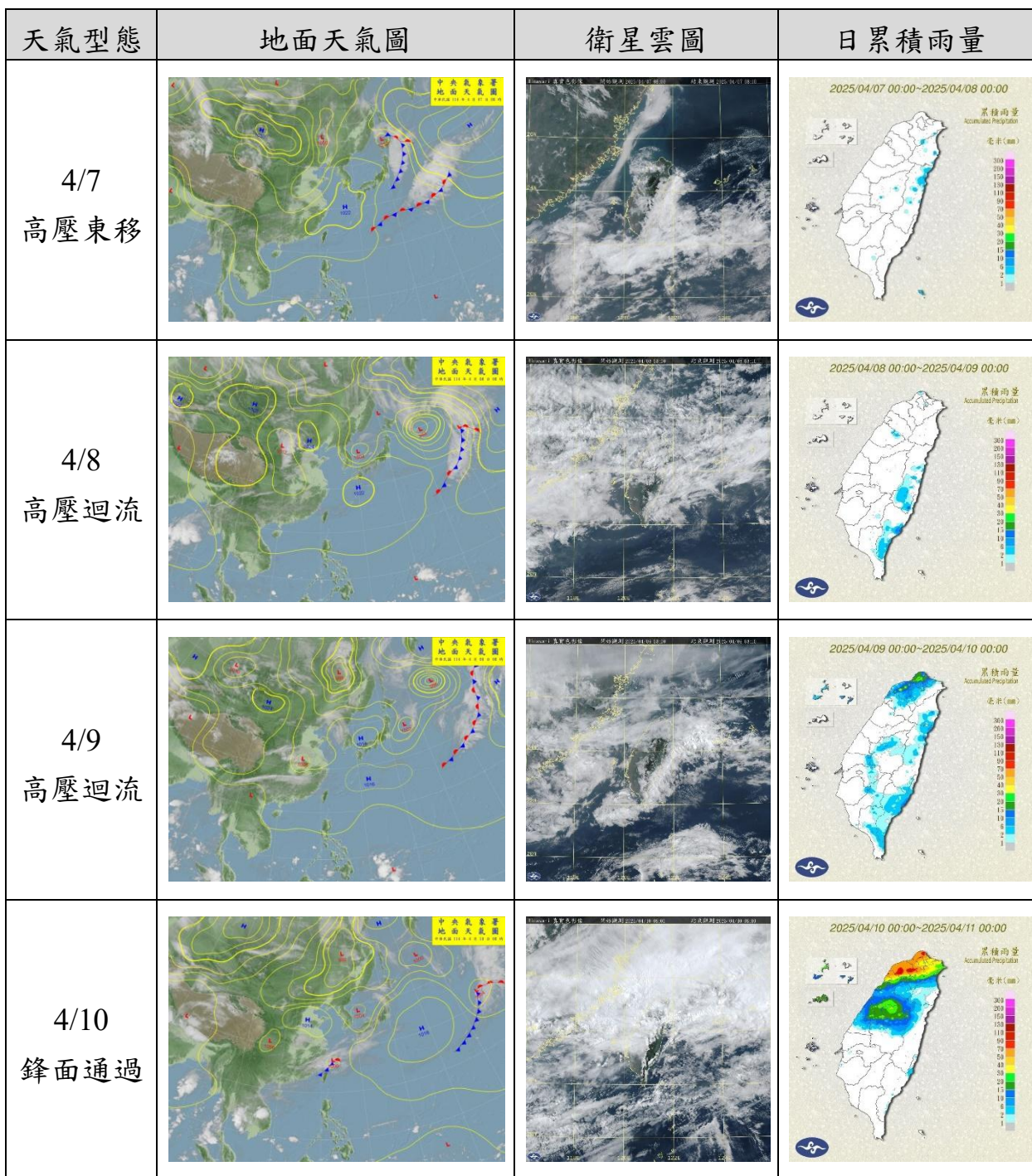


圖 4.2 IOP1 天氣型態說明

二、全台空氣品質概述

本次觀測涵蓋自 4 月 7 日至 9 日的時段，其中空氣品質惡化情況主要集中於 8 日與 9 日上午，特別是在 8 時前後達到污染高峰。根據濃度圖顯示(圖 4.3)，4 月 8 日自凌晨 4 時起，雲林下風處的臺南永康、雲林斗六及臺中大里等地開始出現較高的 PM_{2.5} 濃度，其中永康地區污染程度最為嚴重，為本次觀測期間南部主要的污染。4 月 9 日南部仍有達橘色提醒(PM_{2.5} ≥ 30.5 μg/m³)以上等級，但濃度不及 4 月 8 日。

接續至 4 月 9 日，污染現象自 8 日下午 16 時開始累積，於清晨 4 時開始出現較明顯的高值(圖 4.4)，污染區域較前一日略有北移，涵蓋桃園中壢與觀音、新竹湖口，以及雲林及其上風處彰化的部分區域。至上午 8 時前後，中部南部地區整體空品皆呈現明顯惡化情況，其中中部地區情況尤為嚴重，為此次觀測中部的主要污染(圖 4.5 至圖 4.7)。臺南市仍有局部空品不良區域，特別集中在永康與東區一帶，與前一日情況相似。8 日彰化縣多數測站也達橘色提醒等級，但中部整體嚴重情況以 9 日最為明顯。

再依觀測期間的臺灣西半部測站 PM_{2.5}、PM₁₀ 與風場時序圖可見(圖 4.8 及圖 4.9)，8 日與 9 日中南部地區因位於偏東風環境風場之背風側，當地風速微弱，特別是夜間，較容易累積 PM_{2.5} 及 PM₁₀。由臭氧及風場時序圖(圖 4.10)則可見觀測期間臭氧呈現日夜周期變化，8 日與 9 日多數時間為晴天，有利於光化作用發生、使臭氧濃度升高。最後由斗六氣膠光達資料可見(圖 4.11)，觀測期間並未有顯著境外污染移入，白天邊界層發展至約 1 公里高，夜間穩定邊界層則在 500 公尺以下，且地面夜間風速微弱，因此利於污染物於夜間累積。

本次密集觀測於 4 月 7 日至 9 日進行，規劃時根據氣象及空品預報推估可能造成污染事件的天氣型態，實際結果亦證實預判準確。污染高峰多出現在清晨至中午時段，尤以上午 8 至 10 時

PM_{2.5} 濃度最高，部分地區達橘色提醒等級，顯示污染規模具區域性。8 日污染以南部為主，9 日主要受影響區域則為中部地區，低風速、夜間逆溫、邊界層抑制等大氣穩定條件皆為污染累積的重要推力。

整體而言，本次觀測期間成功預測到預期中的污染發展階段與空間分布，對後續污染成因的分析提供良好的依據。

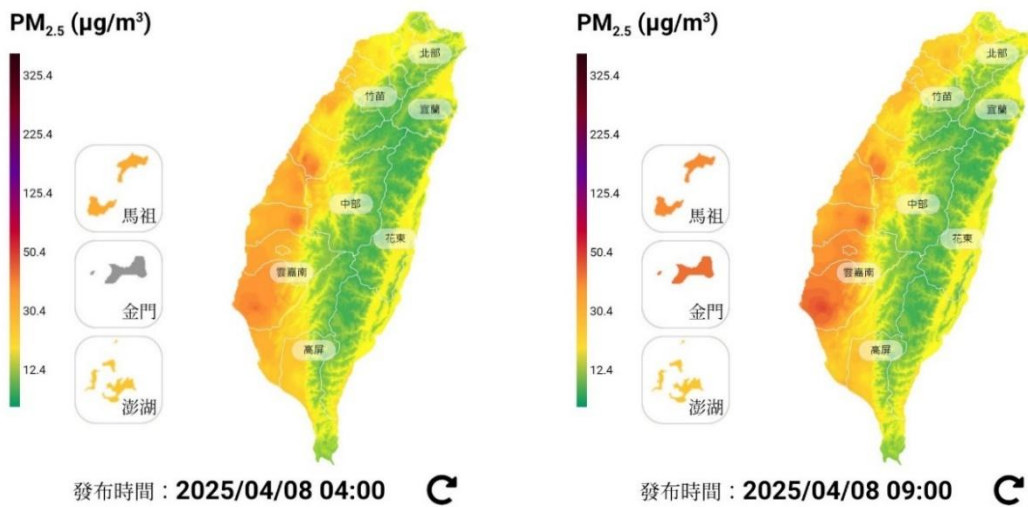


圖 4.3 PM_{2.5} 濃度分布圖-4 月 8 日 4 時與 9 時

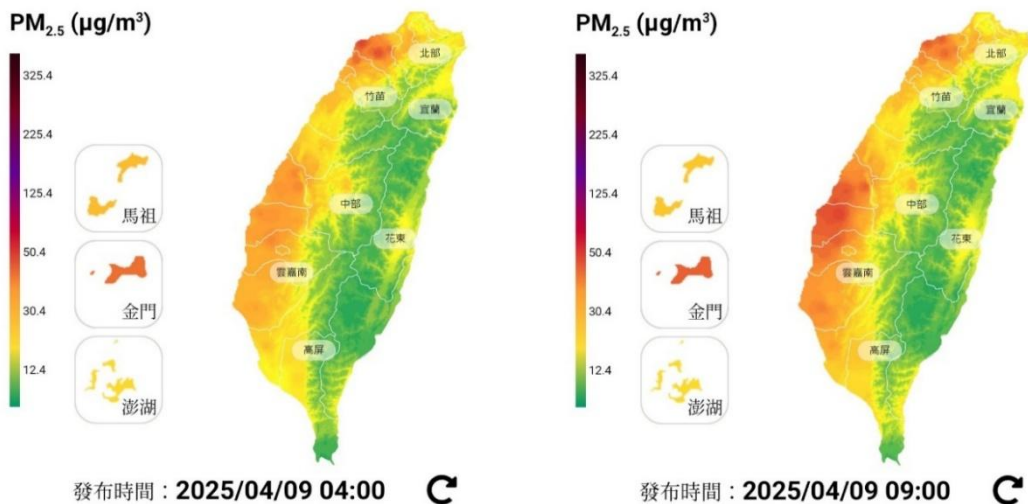


圖 4.4 PM_{2.5} 濃度分布圖-4 月 9 日 4 時與 9 時

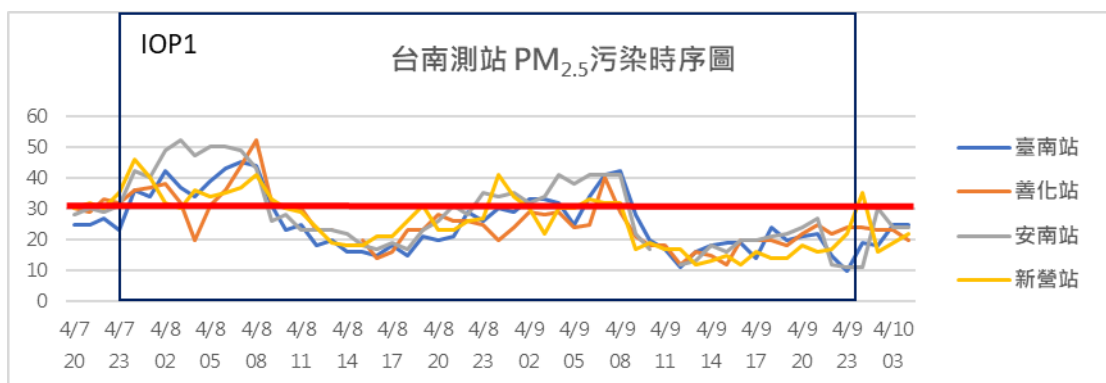


圖 4.5 IOP1 臺南市 PM_{2.5} 濃度時序圖

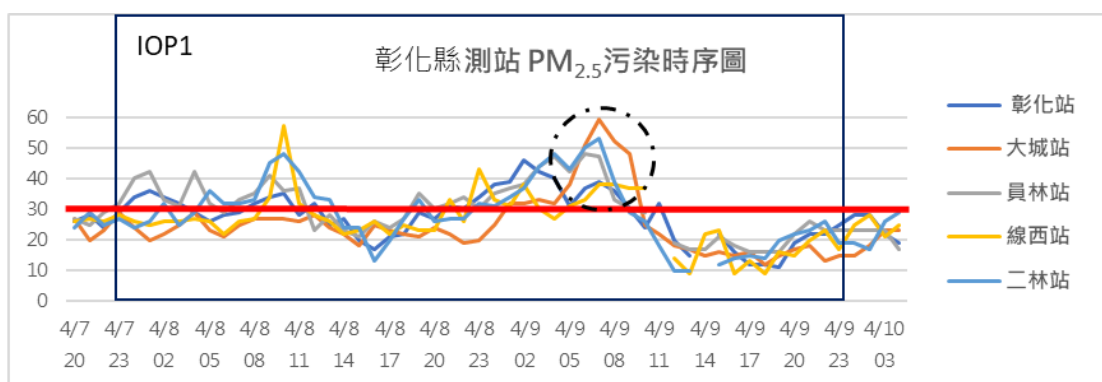


圖 4.6 IOP1 彰化縣 PM_{2.5} 濃度時序圖

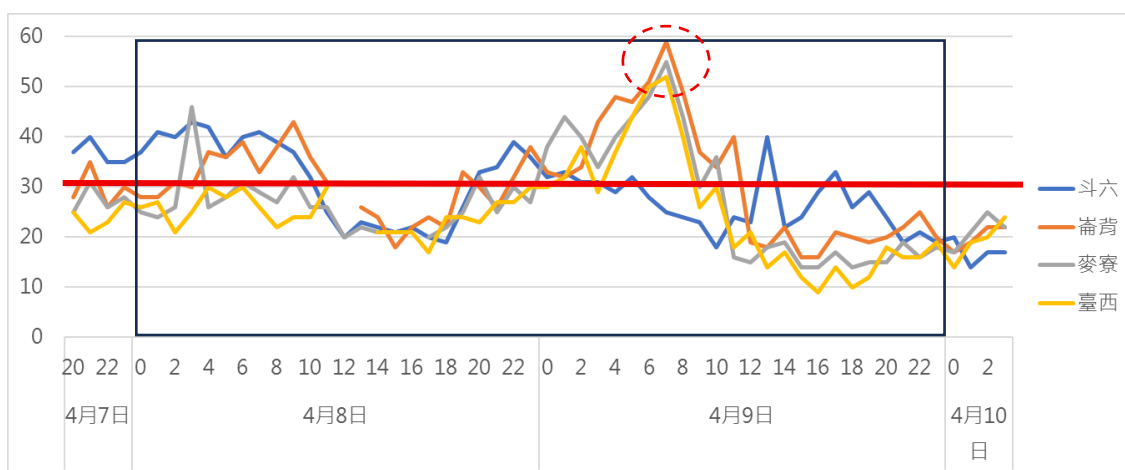


圖 4.7 IOP1 雲林縣 PM_{2.5} 濃度時序圖

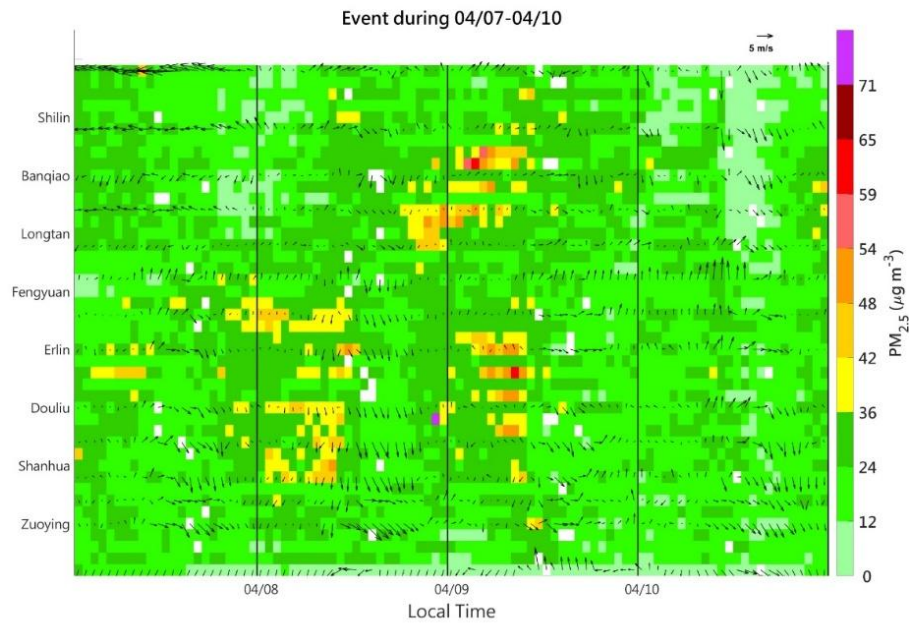


圖 4.8 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 $\text{PM}_{2.5}$ (色階) 與風場 (風標) 時序圖

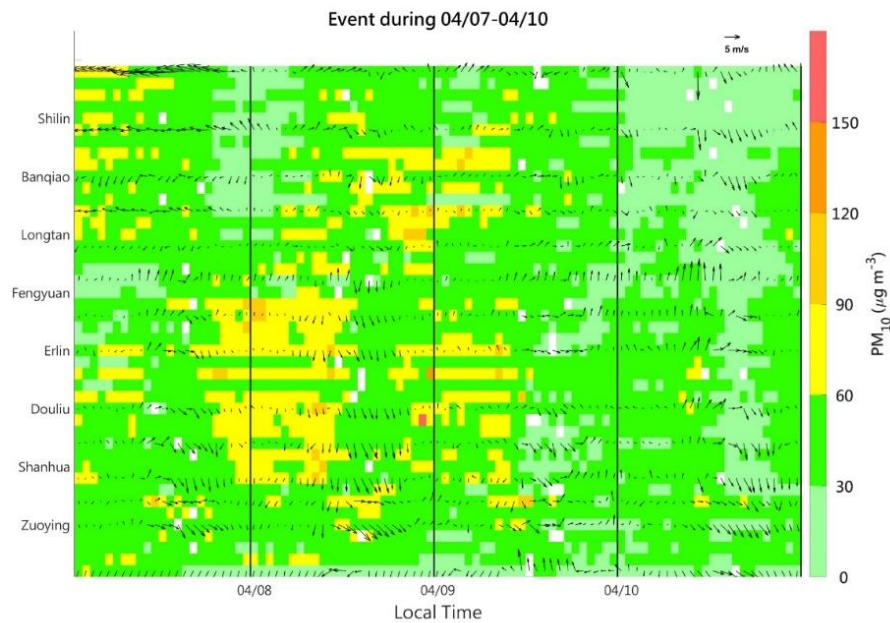


圖 4.9 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 PM_{10} (色階) 與風場 (風標) 時序圖

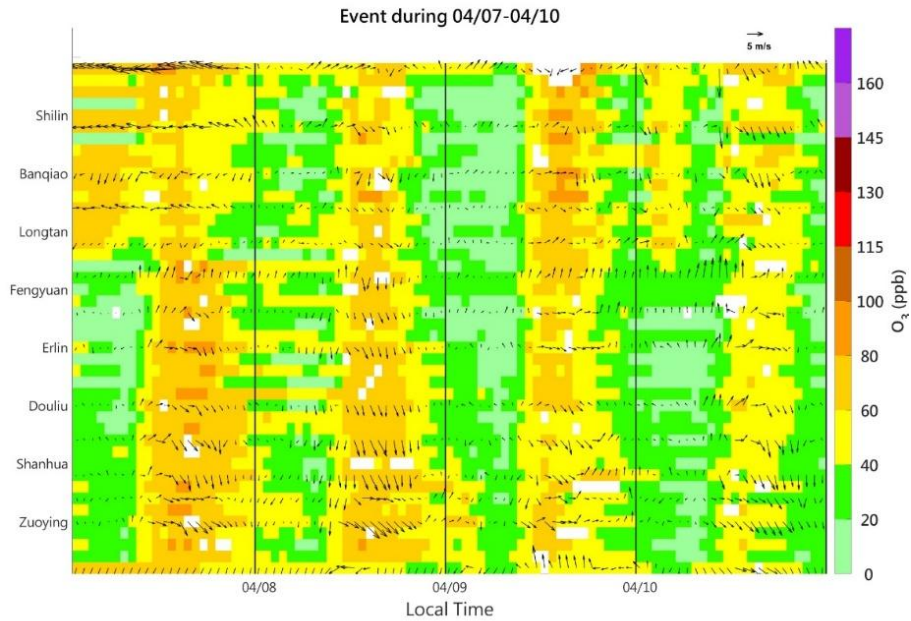
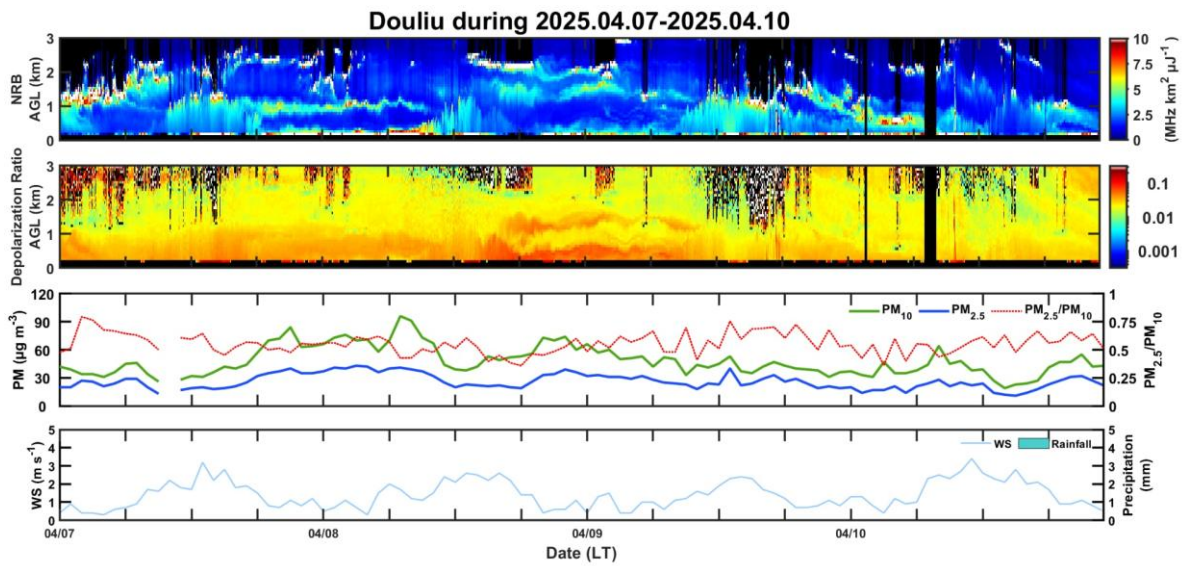


圖 4.10 IOP1 前後一日臺灣西半部測站 O₃ (色階) 與風場 (風標) 時序圖



*PM 及氣象資料採自斗六空氣品質監測站資料

圖 4.11 IOP1 前後一日斗六測站之(a)光達觀測訊號(NRB)；(b)消偏振比；(c)逐時 PM_{2.5}、PM₁₀ 與 PM_{2.5}/PM₁₀；(d)降水量與風速

三、雲林縣空品概述

此觀測期間，中部主要污染事件發生在彰化、雲林、嘉義(圖 4.4)。4 月 7 日及 8 日彰化、雲林各測站污染並無明顯的趨勢變化，濃度最高為二林($48 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，發生在早上 10 時，隨後顯著下降，持續到 16 時。16 時開始，彰化二林、大城、雲林麥寮、崙背、臺西污染開始累積，直到 9 日 8 時前後達最污染高值。

時序圖(圖 4.12)顯示在雲林、彰化主要污染區域的各站於早上 7 時前後達最大值，分別為二林 $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、大城 $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、臺西 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、麥寮 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和崙背 $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，皆已達紅色警戒等級($\text{PM}_{2.5} \geq 50.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，斗六測站位置有別於其他測站，因其位置較靠近內陸，所以變化趨勢不同，斗六測站於 4 月 9 日 10 時開始累積。如圖 4.13，8 時及 9 時斗六附近風場為東北風和西北風，此時污染濃度皆呈現下降趨勢，10 時開始斗六轉為西風，原聚集在沿海區域的污染開始傳輸至內陸，使斗六測站污染逐漸升高。

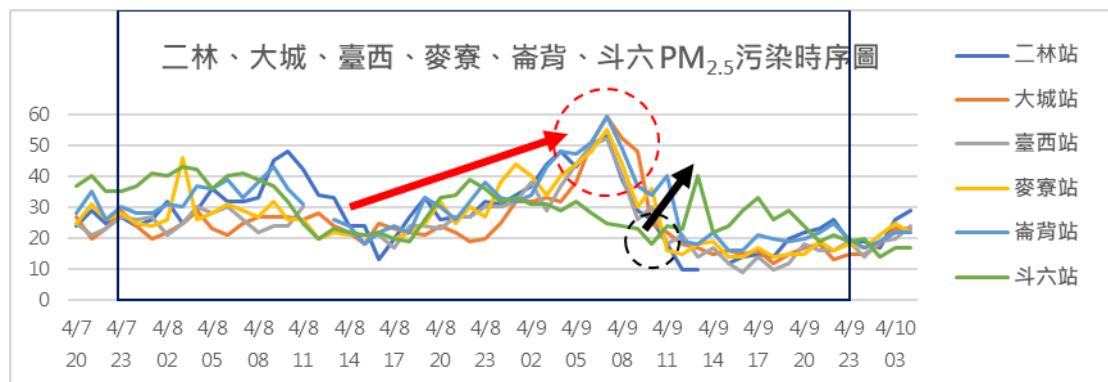


圖 4.12 IOP1 彰化縣及雲林縣 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度時序圖

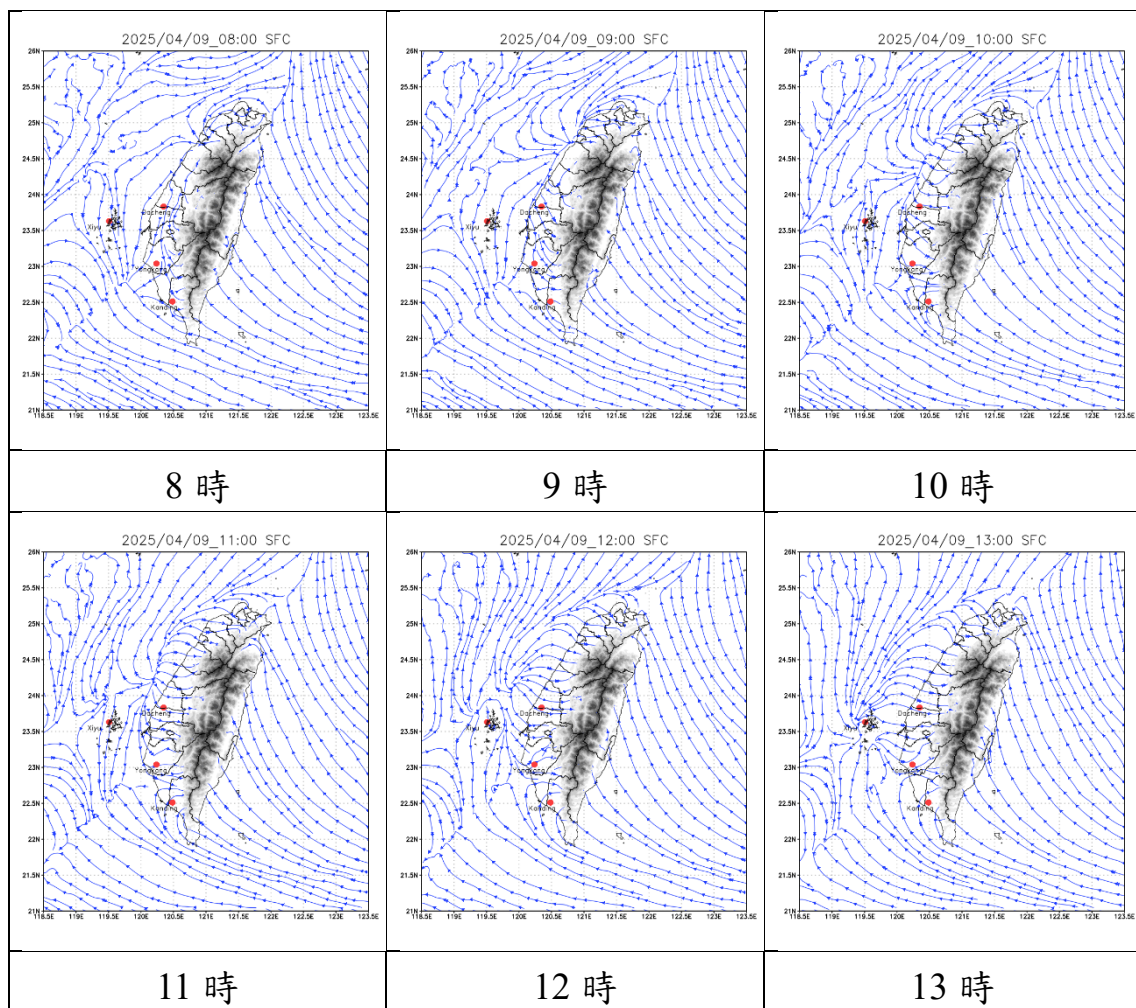


圖 4.13 4 月 9 日 8 至 13 時地面流場圖

4.1.2 大氣環流探空觀測

根據環境部濃度分布圖和污染時序資料，濃度高值發生在 9 日早上 8 時前後，此時彰化大城和雲林地面為東北風，且風速微弱，其西南方流場特徵呈現類似鋒面之輻合特性，925 百帕以西南風為主，南方有一順鐘向的背風渦流籠罩在台南及高屏地區，800 及 850 百帕皆為西南風，至 750 百帕轉為西風。

探空剖面圖(圖 4.14)顯示，9 日 8 時大城在 200 公尺處有一逆溫層，PM_{2.5} 濃度主要累積在此高度之下，且近地面風速僅約 2.5 公尺/每秒。比較兩天大氣垂直條件，4 月 8 日早上 8 時邊界層高度約在 350 公尺，4 月 9 日則在 200 公尺左右，兩時段風速皆小於 5 公尺/秒，而因 9 日邊界層較 8 日更低，所以污染濃度較高。8 日及 9 日的 20 時也有顯著差異，8 日邊界層約只有 150 公尺，而 9 日邊界層高度將近 500 公尺，對應時序圖(圖 4.12)可知，因 8 日入夜後邊界層明顯降低且持續至隔日(9 日早上)，因此 9 日的污染從 8 日就開始累積。而 9 日達污染高值後，因邊界層逐漸升高，空品得以改善。圖 4.15 模擬流場顯示，中部地區 8 時地面為東北風，隨高度轉為西南風持續到 850 百帕後轉為西風，對應探空軌跡圖(圖 4.16)，探空儀稍微向西飄後馬上轉為向東北方向移動，隨後則持續往西。風場與模式模擬流場高度一致。

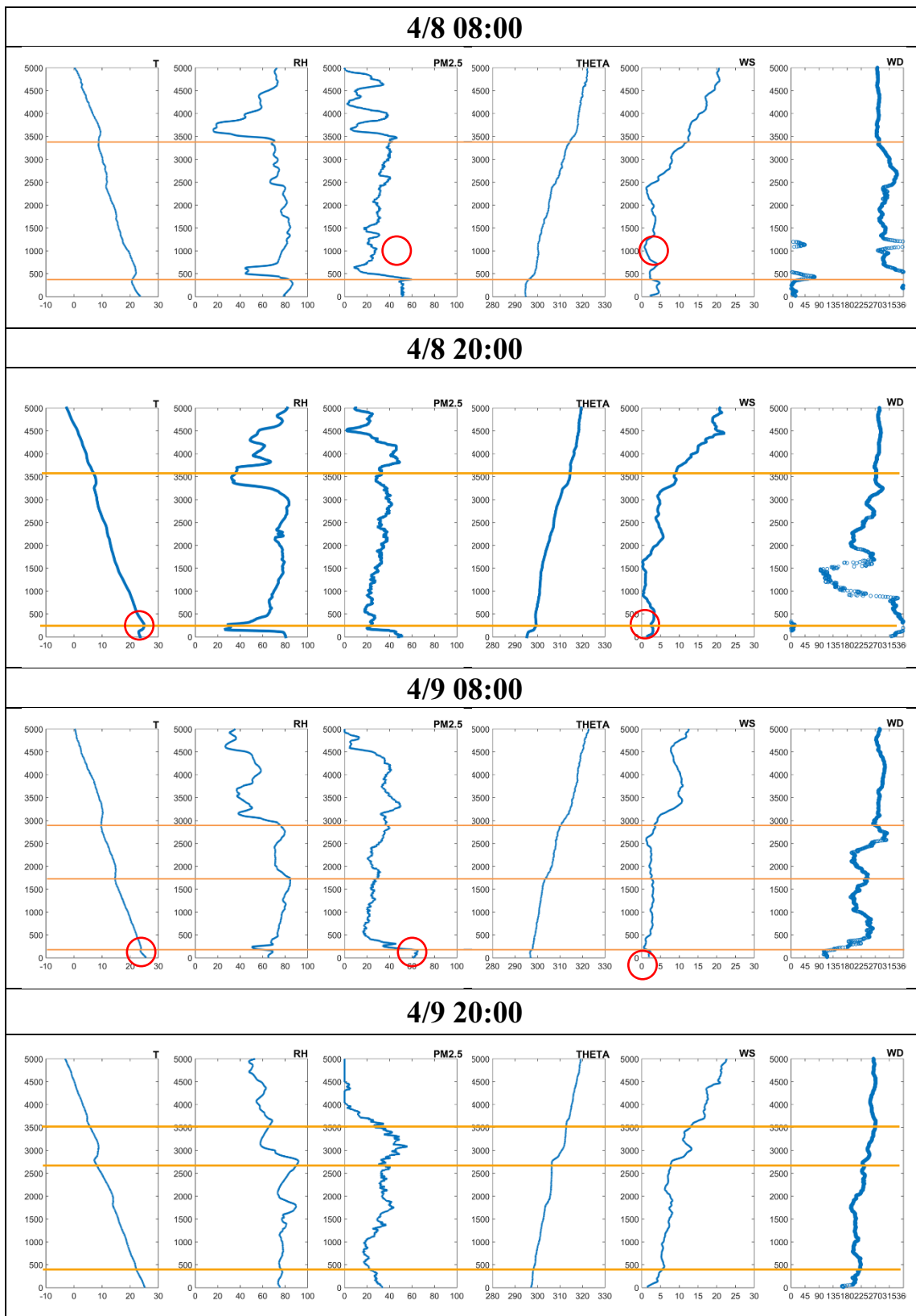


圖 4.14 大氣環流探空圖-4 月 8 日 9 日 8、20 時

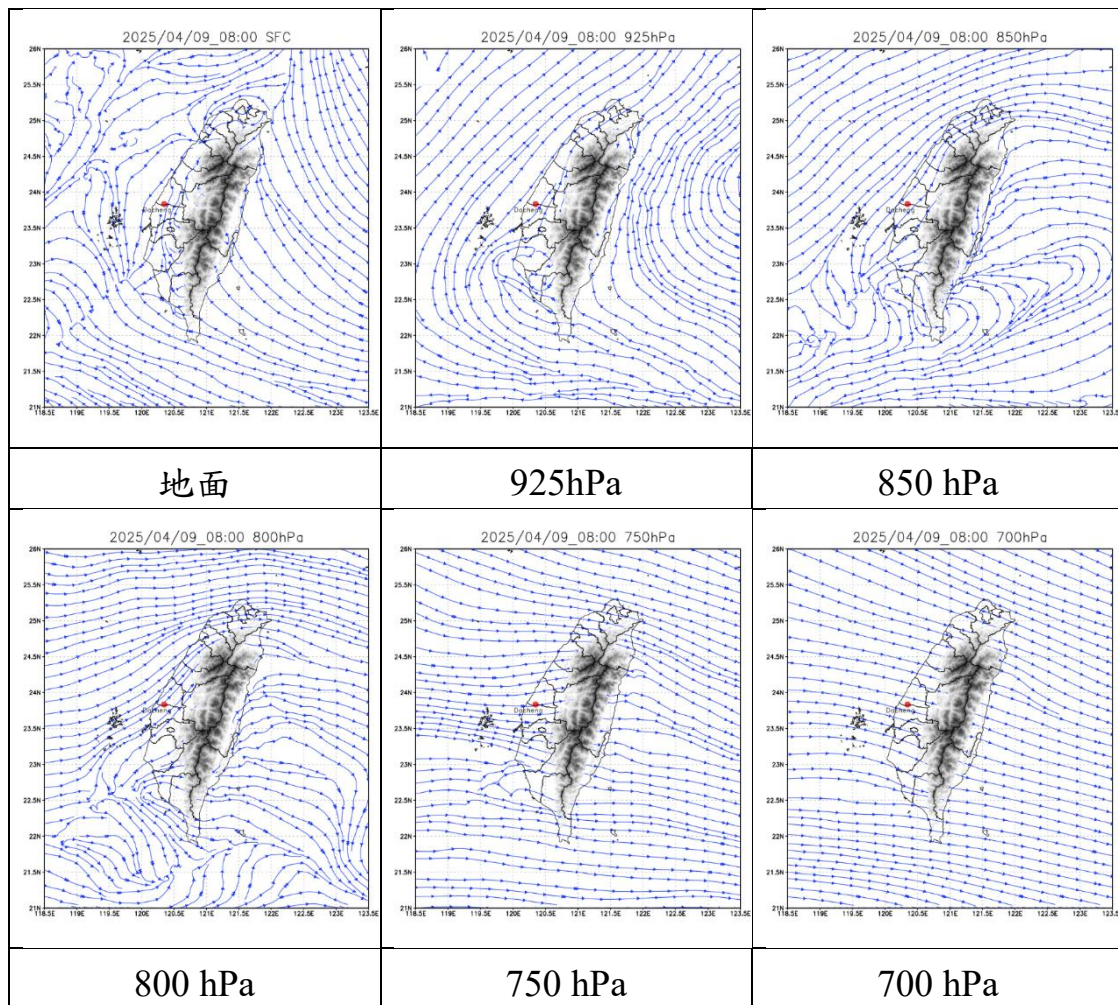


圖 4.15 流場圖-4月9日8時



圖 4.16 大氣環流探空軌跡圖-4月9日8時

此次觀測期間雲林和彰化的污染主要發生於 4 月 9 日上午 8 時前後，圖 4.12 顯示，9 日彰化和雲林相近測站污染時序的變化趨勢高度相似，8 日下午污染開始累積且持續到 9 日 8 點前後。對應探空(圖 4.14)，溫度剖面顯示大城有多個明顯的逆溫層且邊界層偏低，污染高值明顯落在邊界層以下的區域，而對應地面風速僅約 2.5 公尺/秒，顯示此次地面污染受大氣條件影響顯著，因邊界層偏低，風速微弱等因素，使污染擴散不易。

圖 4.16 顯示探空氣球雖然已升至約 5,000 公尺的高空，但崙背、麥寮距離施放站點不到 15 公里，仍屬近距離範圍，故其所量測到的資料在一定程度上可反映該區域的大氣狀況。因此推測雲林污染成因與大城相似，皆為受大氣條件影響而使空氣品質惡化。

在探空圖上(圖 4.14)，PM_{2.5} 數據顯示在約 3,400 公尺處有另一高值，其氣壓約在 680 百帕，流場為西風。剖面時序圖顯示(圖 4.17)，9 日污染開始累積時，500 至 1,000 公尺空品皆為良好等級，而 1,000 公尺以上及地面測得 PM_{2.5} 污染，在整個污染時段內，地面濃度逐漸增加，高層也有輕微的增加，而 500 至 1,000 公尺在此時段內仍保持良好等級，顯示高層污染可能並非由區域排放的向上傳輸，而是境外污染導致，配合模式模擬流場分析，此高層污染來源可能為台灣西側。

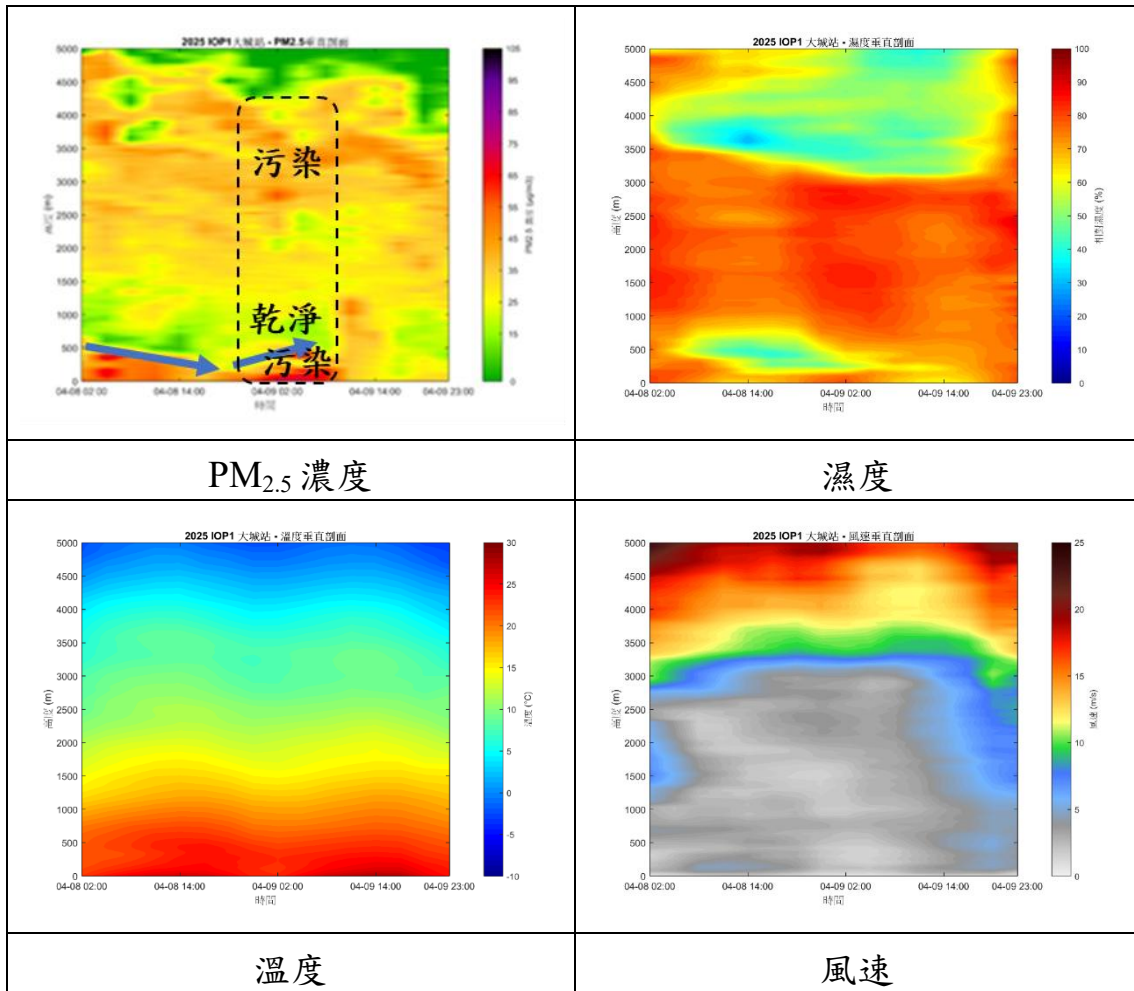


圖 4.17 大氣環流觀測垂直剖面圖

4.2 第二次密集觀測(IOP2：10/14~10/17)

依據環境部於 10 月 8 日發布的空氣品質預報，第二次觀測實驗於 10 月 13 日至 10 月 15 日進行，各測站則於 10 月 13 日完成儀器安裝與現場準備。環境部通知於 114 年 10 月 13 日至 17 日執行第二次密集觀測期(IOP2)。IOP-2 施放時段為 10 月 13 日 23 時施放第一顆，每 3 小時施放一次，於 10 月 15 日 23 時施放最後一顆，共計 17 顆

4.2.1 天氣與環流場分析

一、天氣型態說明

根據觀測期間天氣型態顯示臺灣主要受太平洋高壓影響。10 月 13 日受太平洋高壓籠罩影響，天氣型態穩定，盛行風為偏東風；14 日上午高壓已位於東經 125 度以東，之後緩慢東移，屬高壓迴流的天氣型態，環境風場為東風。；至 10 月 15 日，隨高壓略微減弱，臺灣位處於太平洋高壓邊緣區域，風向仍以偏東風為主。此種風場條件使西半部地區位於背風側，水平擴散不佳，易造成 PM_{2.5} 等細懸浮微粒累積(圖 4.18)。

在高壓影響下，臺灣整體天氣晴朗，日間強烈的太陽輻射有助於午後光化學反應，可能使臭氧濃度顯著升高。此外，亦會促使山區及部分平地午後出現熱對流發展，出現午後雷陣雨。

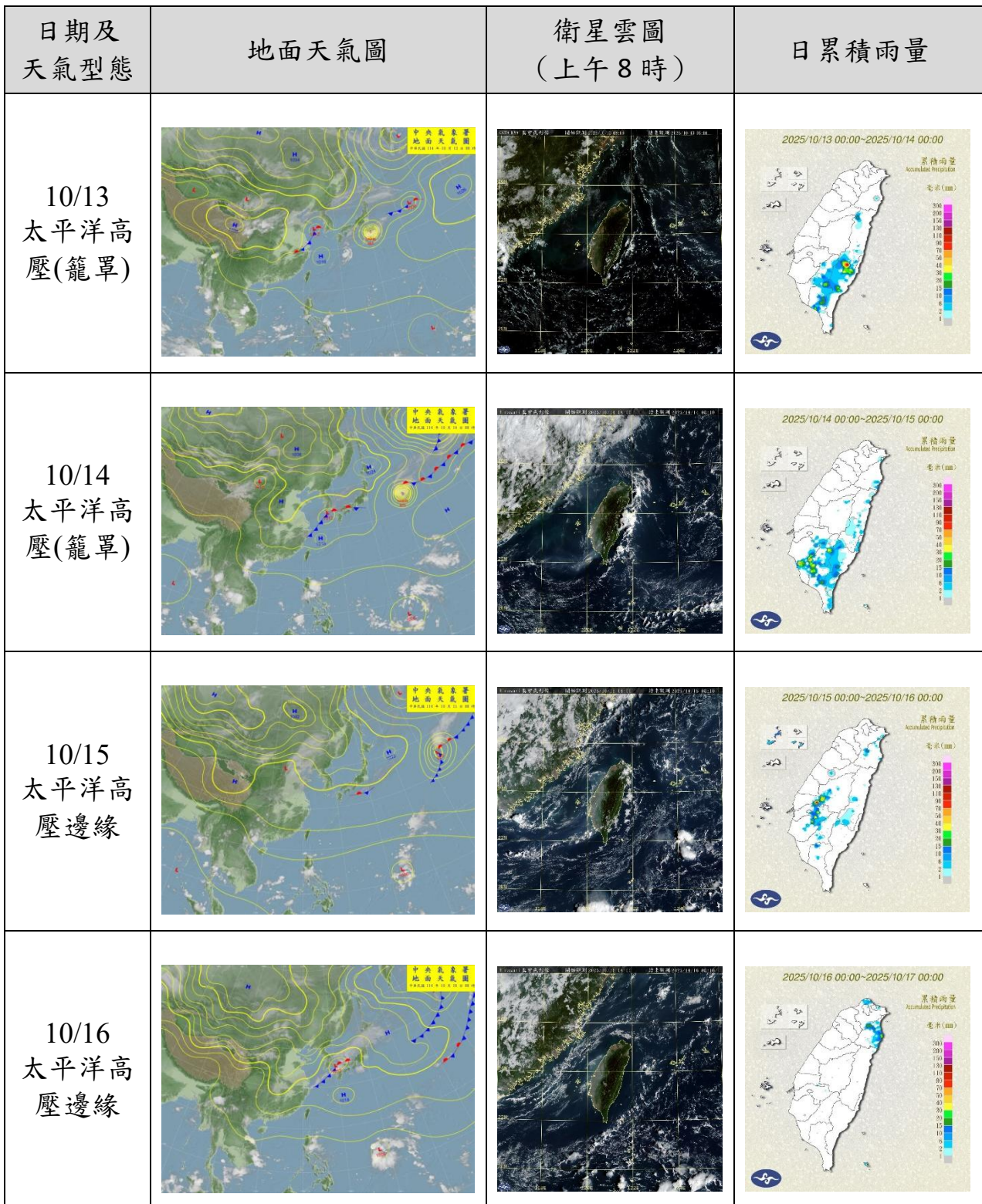


圖 4.18 IOP2 天氣型態

二、全台空氣品質概述

由圖 4.19 看出觀測期間，污染主要發生於中部地區，14 日主要污染發生於彰化、雲林、嘉義，仍以清晨至早上污染較為明顯，在 14 日早上 8 時後空品才逐漸改善。彰化市最高值發生於 4 時，二林測站濃度為 $41\mu\text{g}/\text{m}^3$ (圖 4.20)。15 日污染相對高值仍主要分布在中部地區與高屏交界，此日桃園、新竹空品已明顯改善，污染主要分布在新竹以南地區，兩日空品主要為普通等級。彰化最高值仍為二林測站，濃度為 $38\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

臺灣西半部測站 $\text{PM}_{2.5}$ 與風場時序圖(圖 4.21)可見，14 日與 15 日中南部地區有 $\text{PM}_{2.5}$ 累積。午後風速稍微增加讓擴散條件改善， $\text{PM}_{2.5}$ 濃度因此降低。期間 PM_{10} 濃度(圖 4.22)與 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度數值相當接近，顯示污染物主要由細顆粒組成。由臺灣西半部測站臭氧及風場時序圖(圖 4.23)則可見 IOP2 期間臭氧呈現日夜周期變化，除了 15 日的雙北地區之外都為晴天，有利於光化作用發生，使中午前後臭氧濃度快速上升。

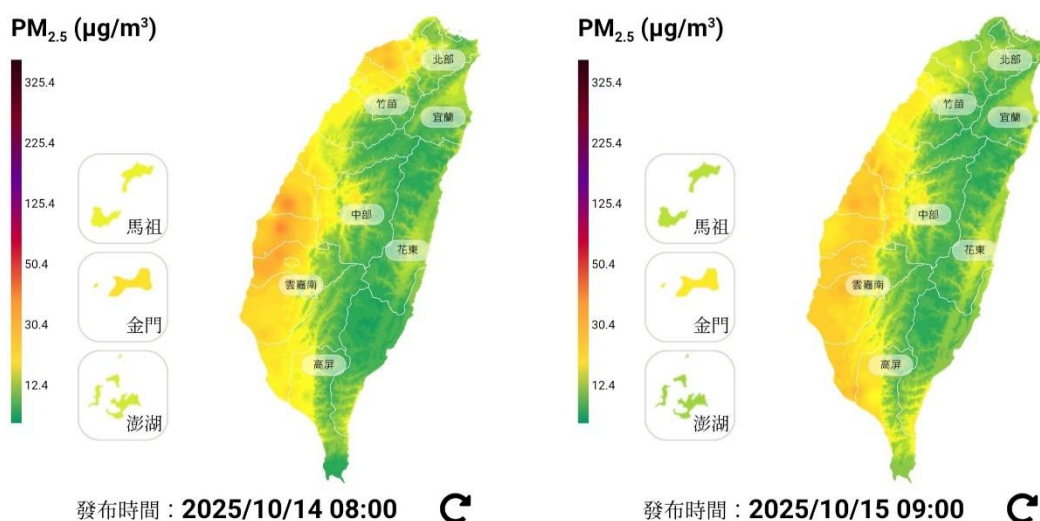


圖 4.19 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度分布圖-10 月 14 日 8 時、15 日 9 時

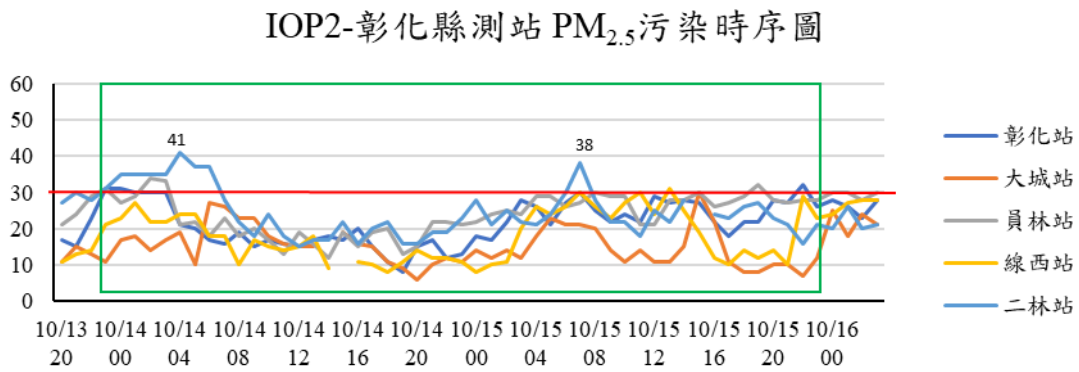


圖 4.20 彰化縣 PM_{2.5} 濃度時序圖

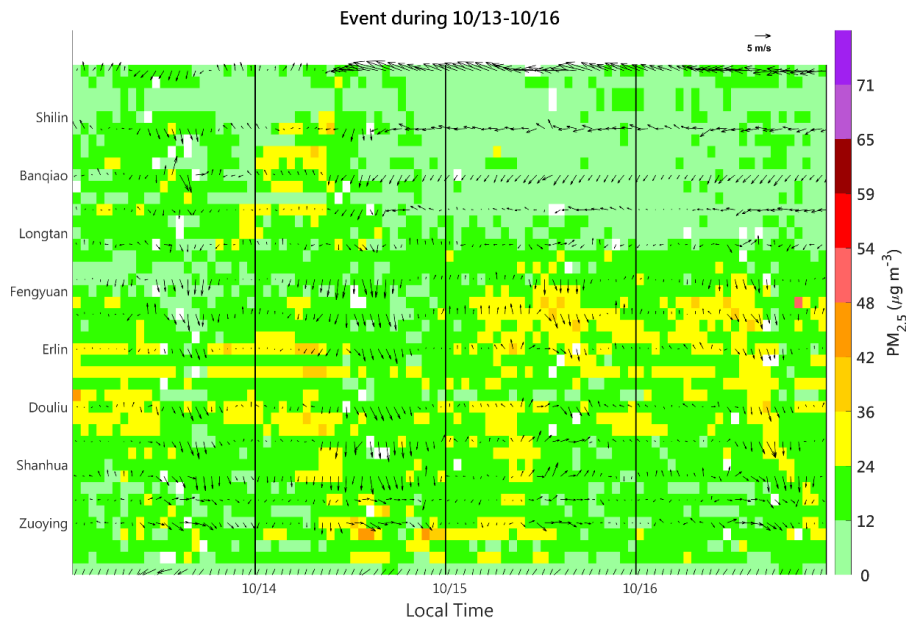


圖 4.21 IOP2 前後一日臺灣西半部測站 PM_{2.5} (色階) 與風場 (風標) 時序圖

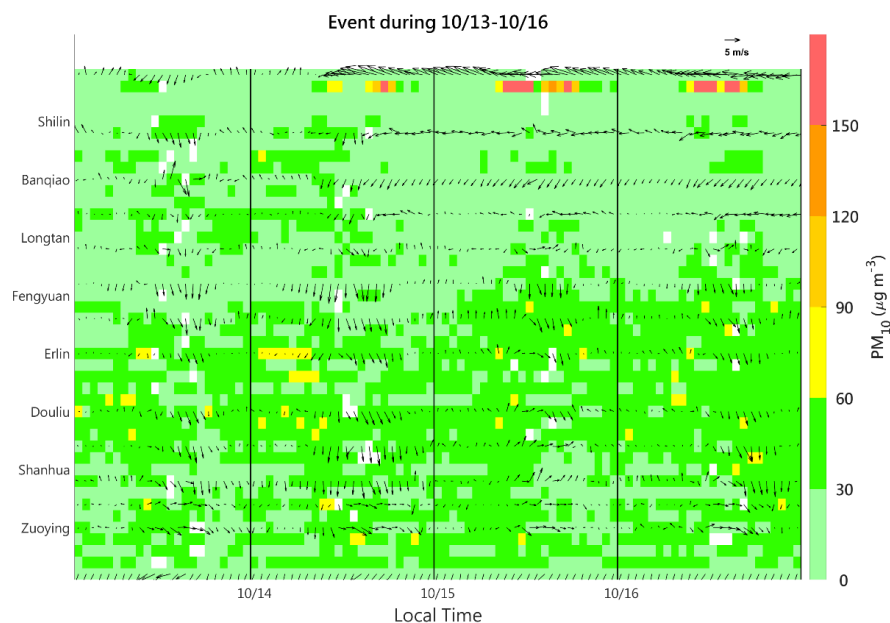


圖 4.22 IOP2 前後一日臺灣西半部測站 PM₁₀ (色階) 與風場 (風標) 時序圖

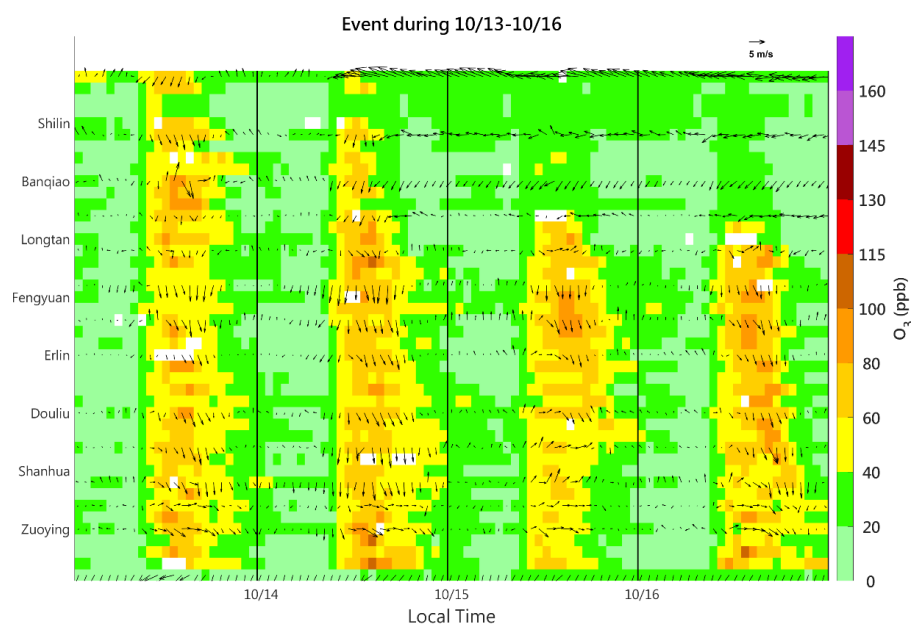
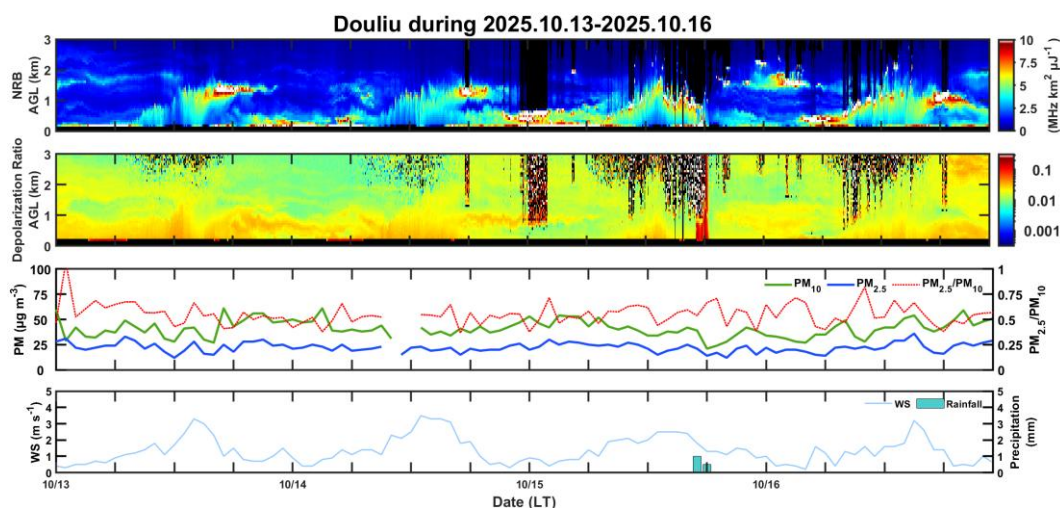


圖 4.23 IOP2 前後一日臺灣西半部測站 O₃ (色階) 與風場 (風標) 時序圖



*PM 及氣象資料採自斗六空氣品質監測站資料

圖 4.24 IOP2 前後一日斗六測站之(a)光達觀測訊號(NRB)；(b)消偏振比；(c)逐時 PM_{2.5}、PM₁₀ 與 PM_{2.5}/PM₁₀；(d)降水量與風速

三、雲林縣空品概述

IOP-2 整體空品較 IOP-1 良好，14 日污染主要發生在清晨，最高值為崙背測站，濃度為 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；15 日則發生於 16 時，最高值仍為崙背測站，濃度為 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，各測站的濃度變化差異未呈現明顯的一致性(圖 4.25)，僅在 15 日 16 時後麥寮、臺西和斗六測站呈現較明顯的下降趨勢；整體空品約在普通等級。

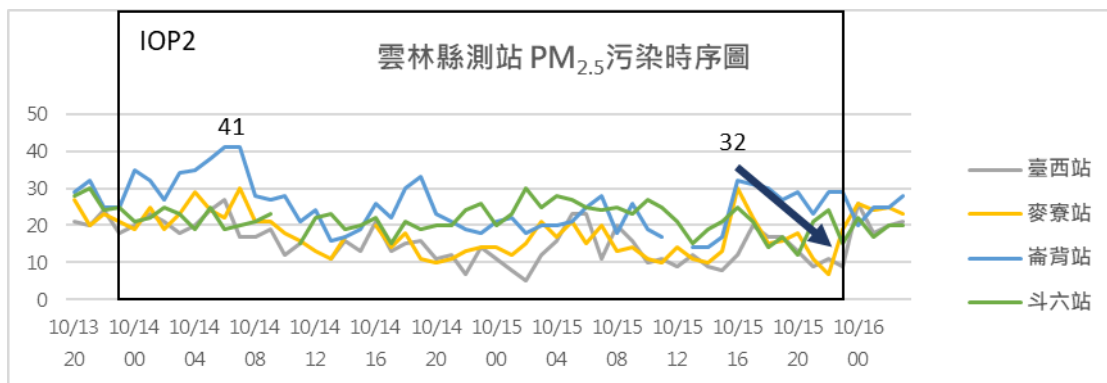


圖 4.25 雲林縣 IOP2 PM_{2.5} 濃度時序圖

4.2.2 大氣環流探空觀測

IOP2 整體空品狀況較佳，10 月 14 日 5 時為雲林污染較嚴重時段，最高值出現在崙背測站，即位於大城探空站點南方，根據 14 日 5 時流場圖(圖 4.26)，此時中部沿海為北風，流線經由大城探空站點通過雲林。5 時探空資料亦顯示大城在近地表有明顯污染(圖 4.28)，污染時序圖亦顯示位於大城探空站上游的二林於 4 時亦測得污染相對高值，推測 5 時雲林污染主要為傳輸所導致。靠近沿海的麥寮及臺西測站因風速較強，空品惡化情況不如崙背測站明顯。

崙背與大城探空站點相距不到 10 公里，故大城所量測大氣垂直條件一定程度上代表崙背的大氣狀況，(圖 4.28)顯示 5 時大城邊界層高度約 450 公尺，污染高值多累積至此高度以下。17 時邊界層略高於 5 時，高度約 500 公尺，污染雖一樣累積在此高度以下但濃度明顯降低。流場圖(圖 4.27)亦顯示地面流場經由大城探空站點通過崙背，17 時前後崙背測站亦污染值，故污染仍為傳輸效應所導致。

探空圖(圖 4.28)顯示大城兩時段在高度 1,000 公尺附近皆有測得污染第二高值，925 百帕流場圖(圖 4.26、圖 4.27)顯示兩時段大城皆以東北風為主，因 500 公尺左右空品較為良好，故推測此污染為從外縣市傳輸，而非地面污染向上傳輸，且雲林上空亦有可能出現相似的污染分布型態。

IOP-2 月臺灣仍受太平洋高壓影響，750 百帕以上流場以東風和東北風為主，且因臺灣位處於太平洋高壓邊緣，在澎湖西側地面至 700 百帕易出現順鐘向環流的流場，而非西風。此次觀測雲林低層污染無極端高值，最高值仍發生於清晨，14 日 5 時地面主要為北風，且大城探空在 5 時亦測得污染濃度值，推測雲林污染可能來源為傳輸效應和本地排放，加上局地氣象條件影響，使空品些微惡化。

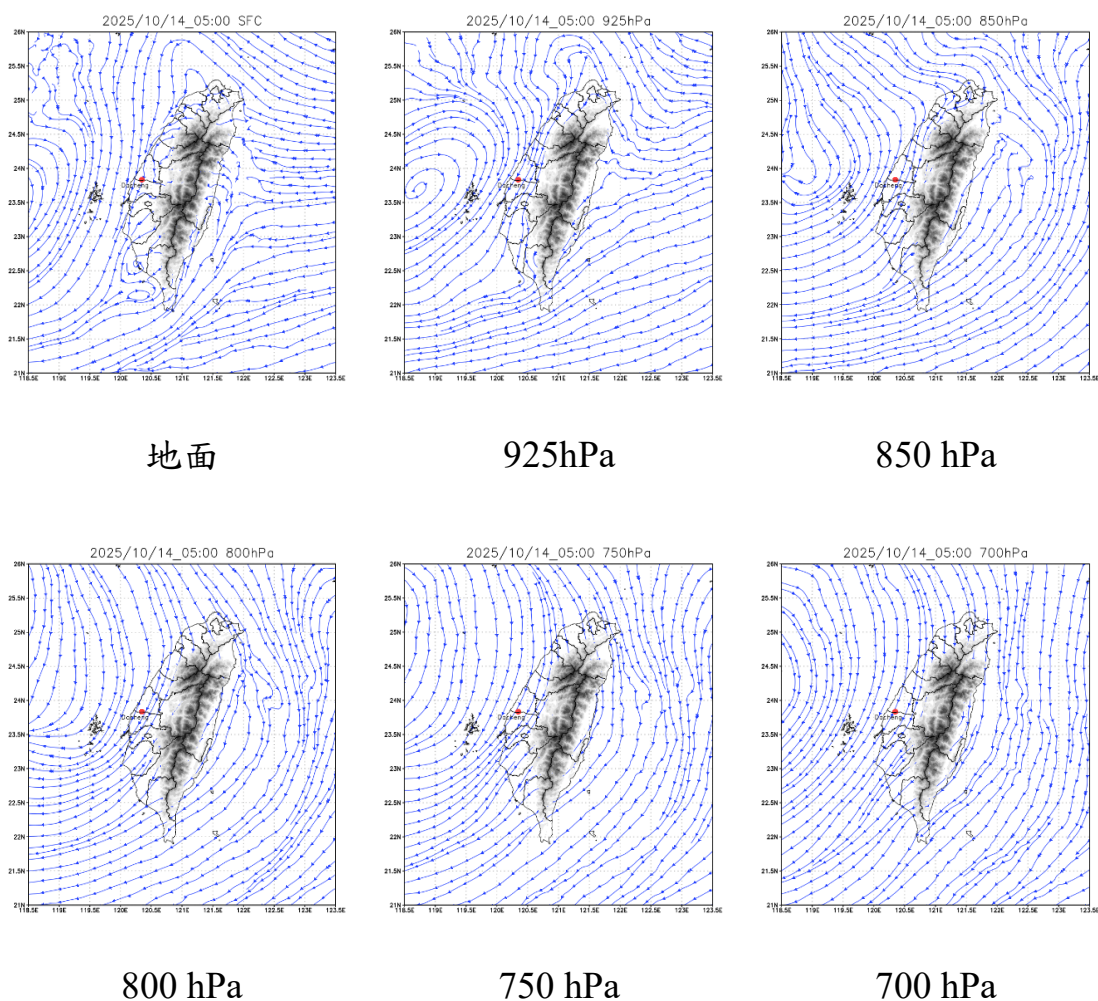


圖 4.26 流場圖-10月14日5時

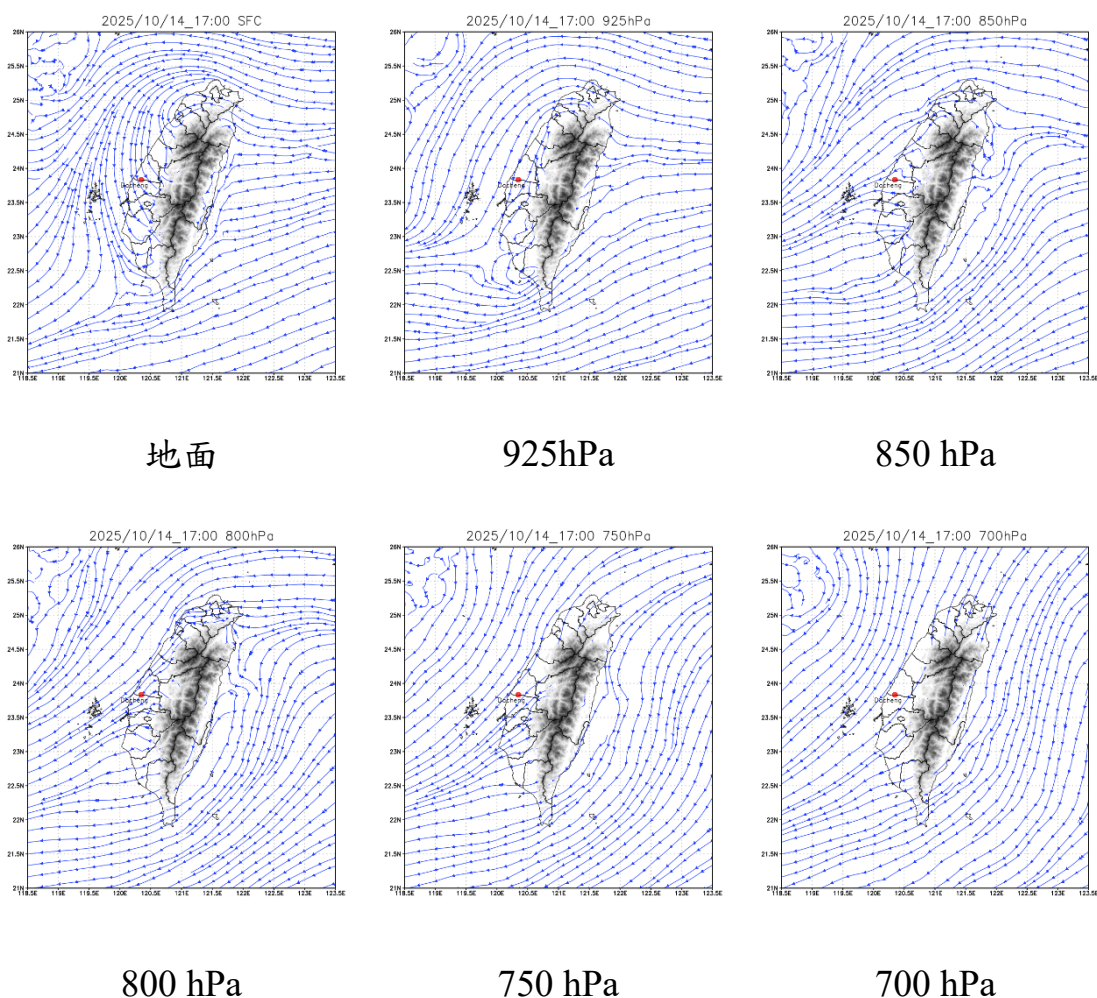


圖 4.27 流場圖-10月14日17時

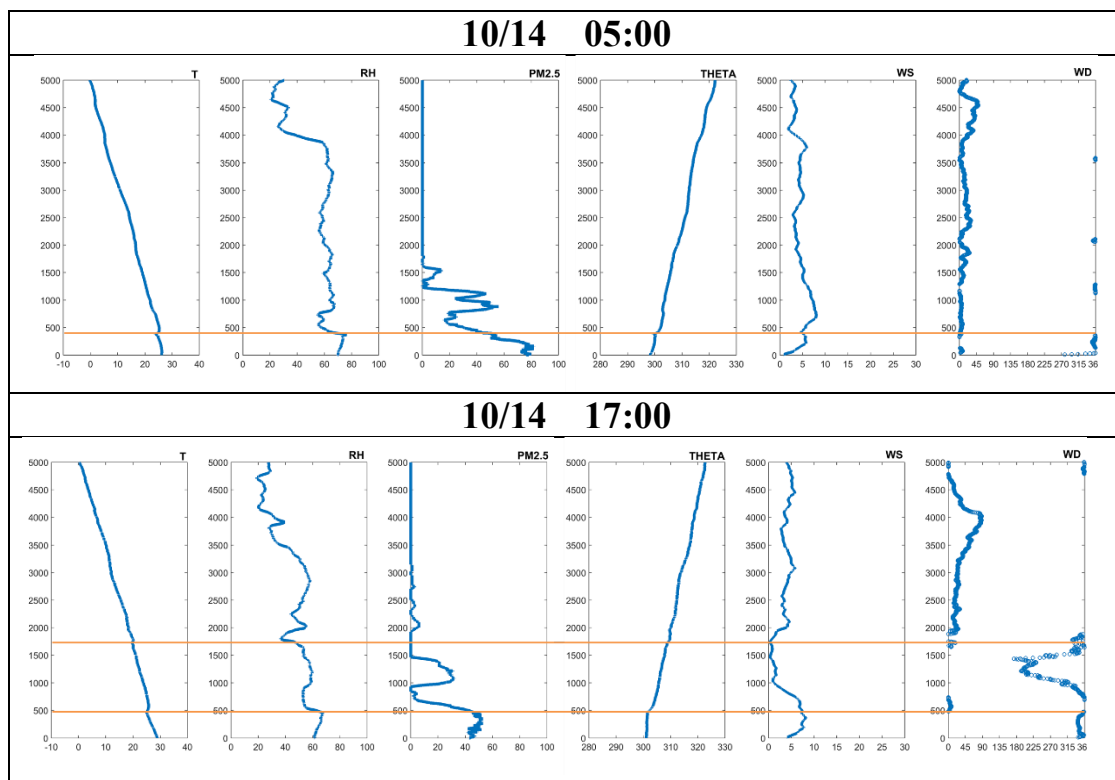


圖 4.28 大氣環流探空圖-10月14日5時、17時

4.3 第三次密集觀測(IOP3：11/7~11/9)

4.3.1 天氣與環流場分析

一、天氣型態說明

環境部團隊通知於 114 年 11 月 7 日至 9 日執行第二次密集觀測期(IOP3)，IOP3 因 7 日晚上即有顯著污染，施放時段為 11 月 7 日 20 時施放第一顆，每 3 小時施放一次，於 11 月 9 日 23 時施放最後一顆，共計 18 顆。

根據預報資料，最後一次觀測安排於 11 月 7 日至 9 日進行，各測站則於 7 日完成儀器架設與現場準備。此次觀測期間，天氣型態受高壓東移、鋒面前緣、東北季風以及颱風外圍環流等多種天氣型態影響(圖 4.29)。

7 日時，高壓東移，環境風場以東風為主，東半部迎風面出現零星降雨，西半部位於背風側易有污染累積。8 日，大陸冷高壓逐漸增強，風向轉為東北東，臺灣位於鋒面前緣，此為易發生空氣污染的天氣型態之一。

9 日，東北季風逐漸南下，風向逐漸轉為東北風，迎風面的東北角地區出現陣雨。至 10 日，鳳凰颱風逐漸靠近臺灣，受颱風外圍環流與東北季風影響，在北部及東部造成明顯降雨。

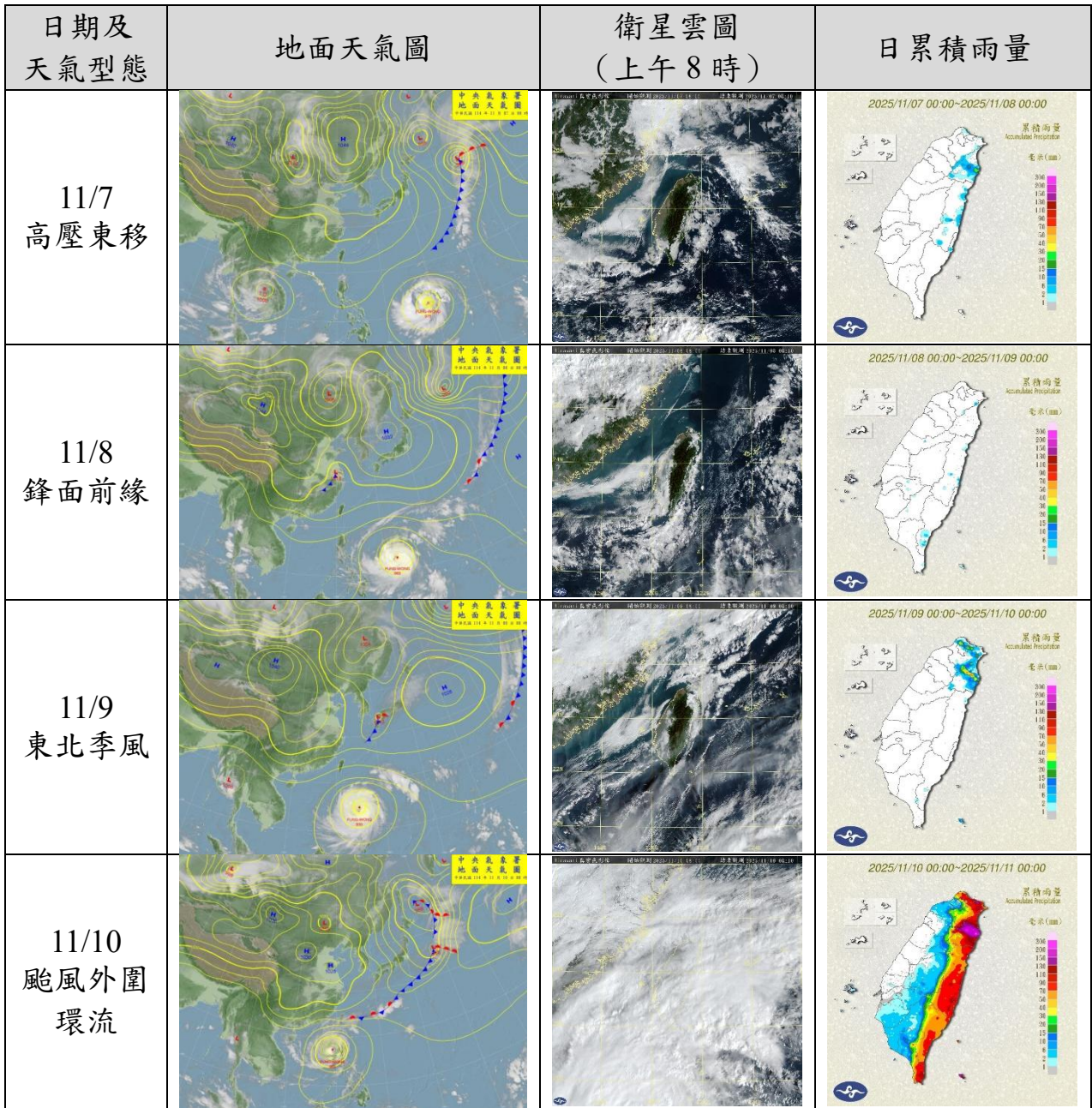


圖 4.29 IOP3 天氣型態說明

二、全台空氣品質概述

IOP3 污染仍以中部及高屏為主要區域，中部地區 8 日上午即有明顯污染發生，且持續至 9 日。8 日空品從彰化開始惡化，空品惡化區域隨時間逐漸向南投及雲林內陸移動(圖 4.30)。8 日彰化濃度最高值為大城測站，濃度為 $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (圖 4.31)。雲林 8 日亦為主要污染區域，於後續章節雲林空品進行探討。

9 日 $\text{PM}_{2.5}$ 相對高值仍以中部內陸為主，包含彰化、南投、雲林和南高屏地區。高雄各測站污染時序呈現相似變化趨勢，多數測站皆在 9 日 8 時前後達最大值，濃度最高為左營測站 $54\mu\text{g}/\text{m}^3$ (圖 4.32)。

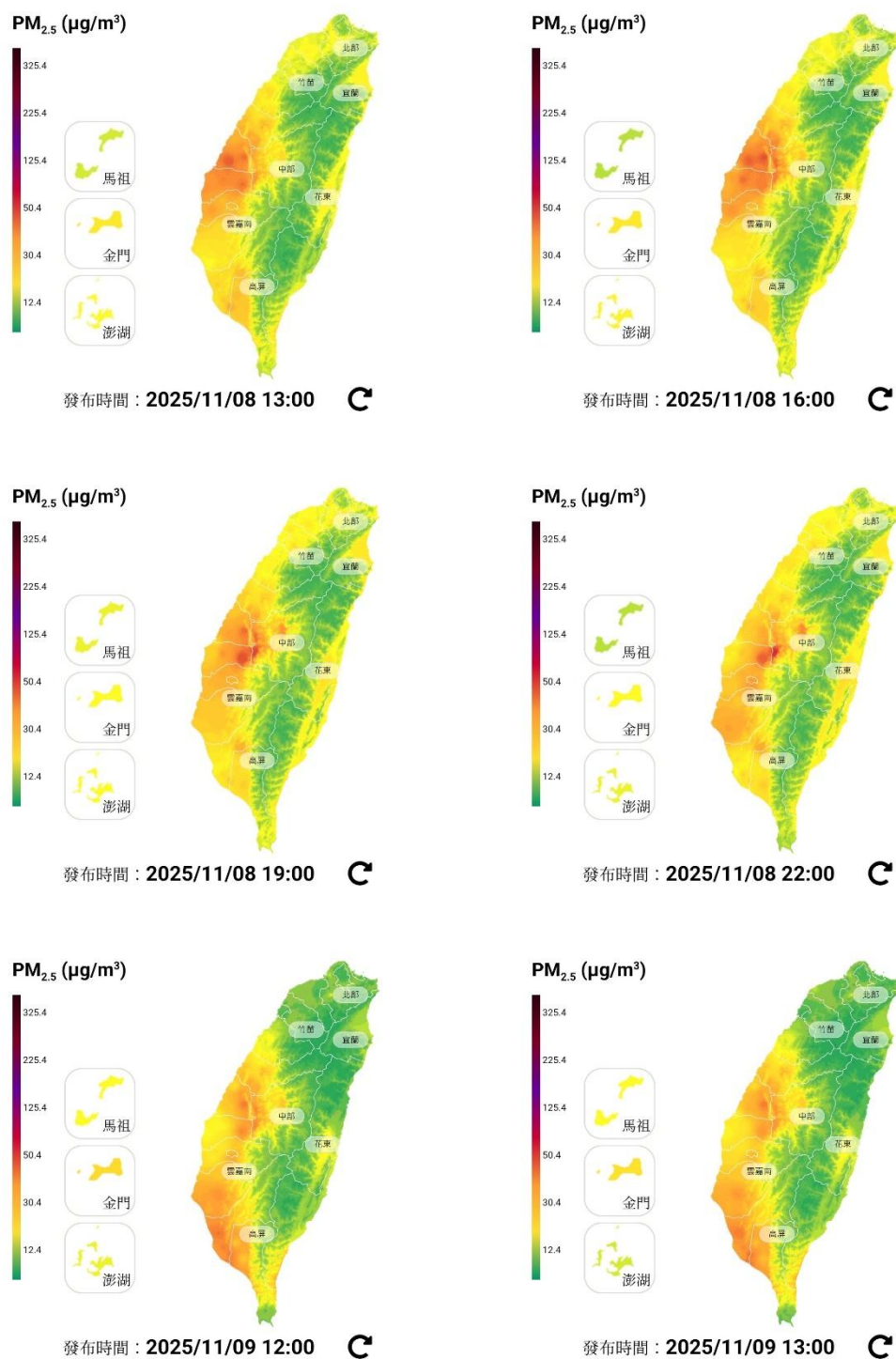


圖 4.30 PM_{2.5} 濃度分布圖-11 月 8 日至 9 日

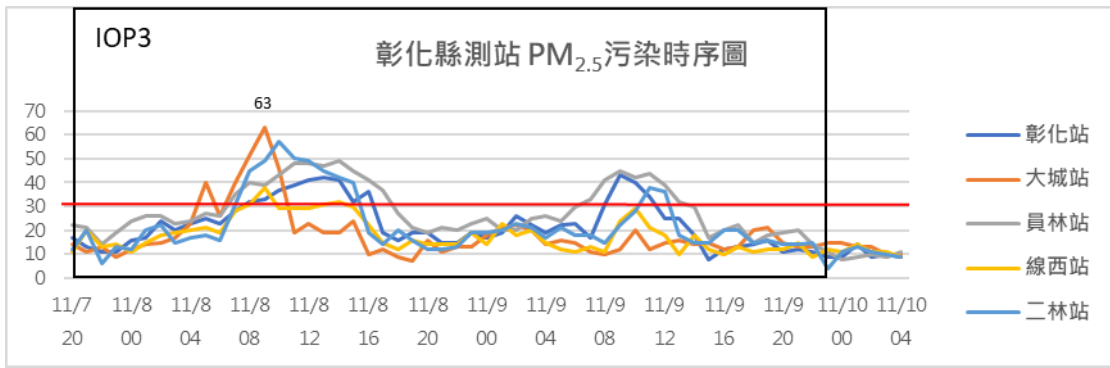


圖 4.31 IOP3 彰化縣 PM_{2.5} 濃度時序圖

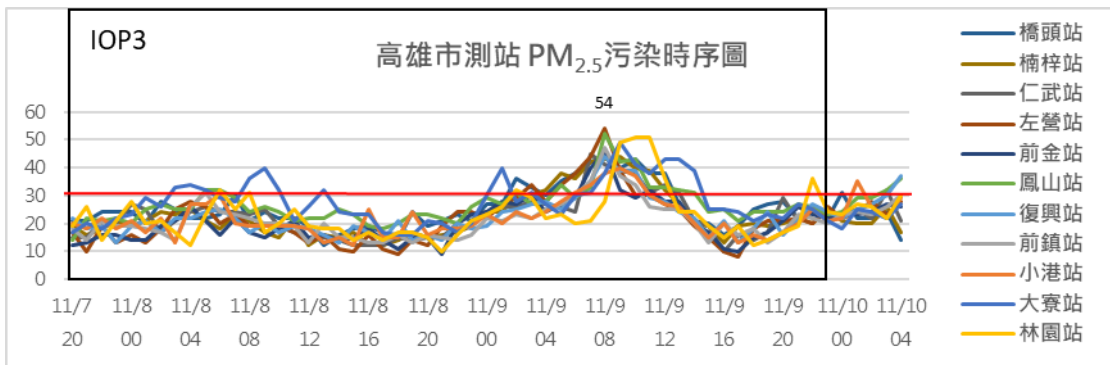


圖 4.32 IOP3 高雄市 PM_{2.5} 濃度時序圖

三、雲林縣空品概述

此次 IOP 雲林污染主要以 8 日為主，且各測站呈現高度相似的變化趨勢，如圖 4.33 各測站最高濃度為臺西 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (9 時)、麥寮 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (11 時)、崙背 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (9 時)、斗六 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (16 時)。與 IOP-1 相似，斗六測站因位於較內陸地區，變化趨勢與其他三站呈現不同特性。9 日最高值為斗六測站，濃度為 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，發生於 8、9 時。

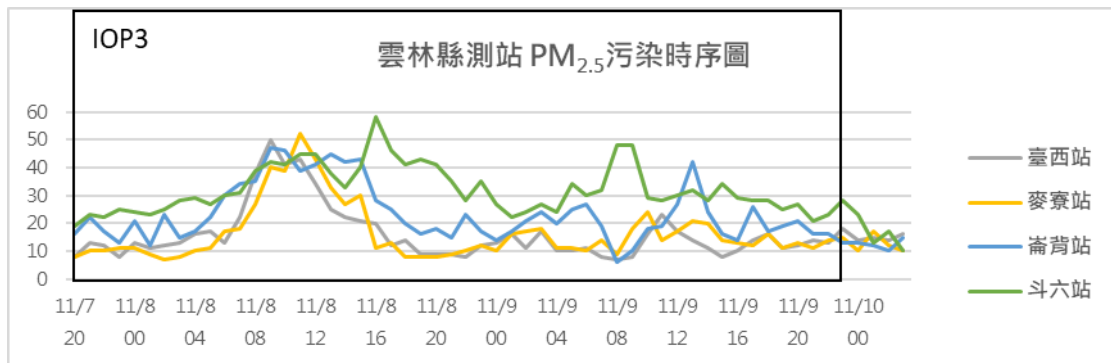


圖 4.33 IOP3 雲林縣 PM_{2.5} 濃度時序圖

4.3.2 大氣環流探空觀測

11月8日上午9時到11時為此次IOP雲林主要污染時段(圖4.33)，此次中部流場呈現與IOP-2不同的型態，西半部雖仍以北風和東北風為主，但流線在南高屏地區偏轉至內陸後北轉，呈現逆鐘向的流場結構，此時大城變成雲林的下風處(圖4.34)。雲林各測站皆測得較明顯的濃度值，同時大城11時在地面亦測得濃度值，顯示此次雲林污染可能來自本地排放或從境外及南部縣市經由逆鐘向環流傳輸到雲林，並持續傳輸至雲林內陸後累積。儘管11時邊界層高度略高於23時(圖4.35)，但因11時內陸風速微弱，且逆鐘向流場結構進一步限制內陸污染的擴散，使得污染情況並無明顯改善。925百帕亦出現逆鐘向環流結構，此流場可能將海上及南部污染傳輸至中部，並侷限污染擴散。

至23時，除斗六測站外，雲林空品相對白天已明顯改善，此時地面流場顯示僅靠近山區的內陸風速較弱(圖4.36)，推測斗六污染係因日間逆鐘向環流將污染帶進內陸，而到夜晚風速微弱以致污染持續累積。23時925百帕出現明顯雙渦流結構，北支逆鐘向的氣旋式環流，南支為順鐘向的反氣旋式環流，此時雲林、彰化、嘉義上空正處於兩渦流交界的弱風區，大城23時探空亦在900公尺以上測得污染。

探空顯示IOP-3中部污染以低層為主，約1,500公尺以上即無污染濃度值，此次觀測風向轉變，彰化轉為雲林下風處，雲林測得污染高值，再次顯示雲林空品不僅受北方境外傳輸影響，在特定天氣型態及流場下，其空品惡化亦有本地排放和鄰近縣市的貢獻，此次IOP邊界層雖有顯著日夜變化，但中尺度和局地環流影響較顯著，故儘管白天邊界層高度較高，卻因地面逆鐘向環流傳輸和侷限污染擴散、背風渦流等因素，使日間出現污染高值。

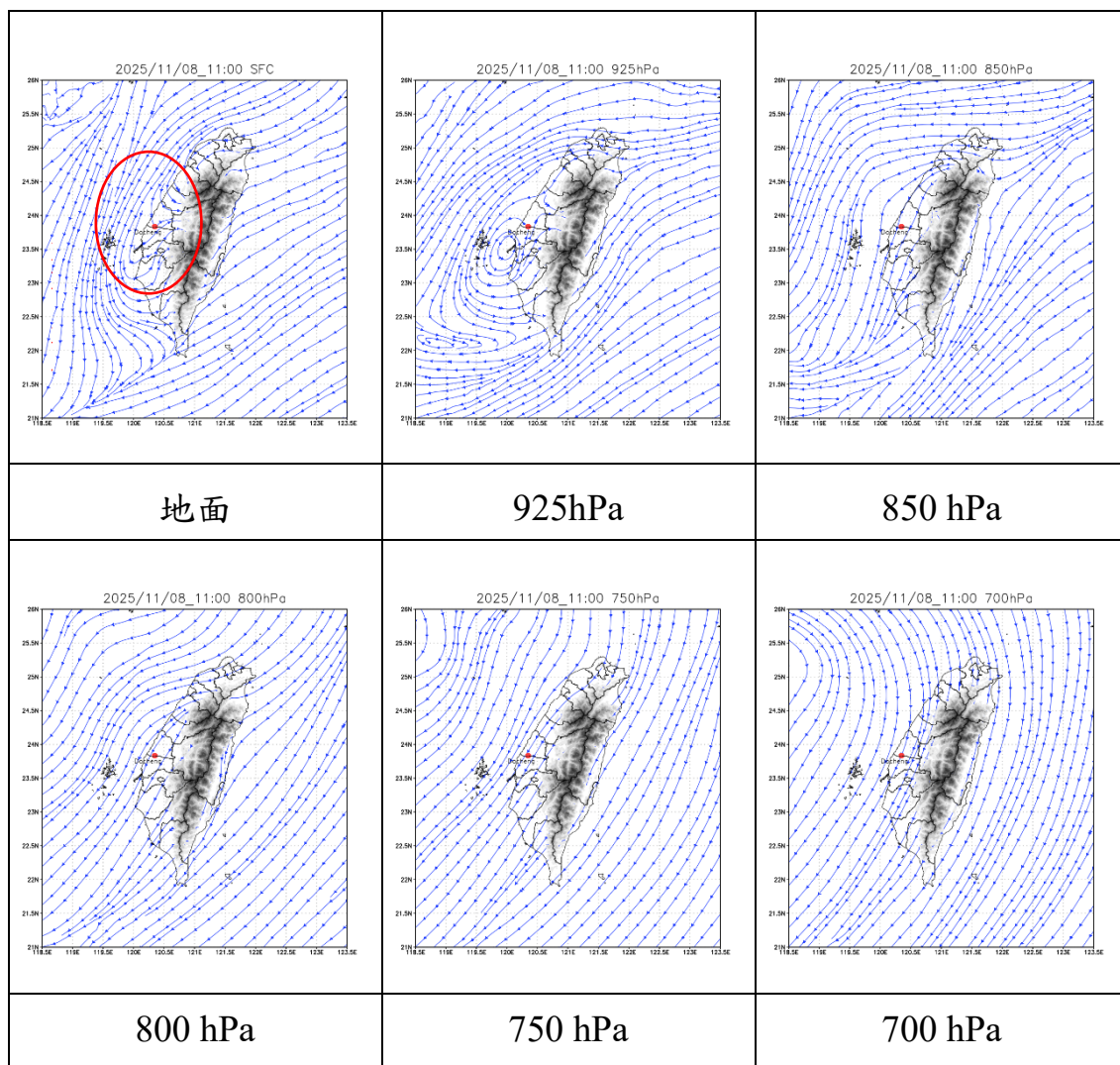
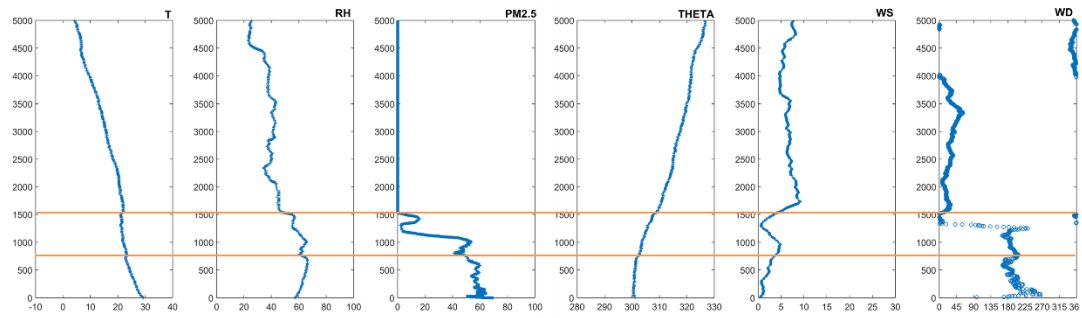


圖 4.34 流場圖-11月8日11時

(a)2025 年 11 月 08 日 11 時



(b)2025 年 11 月 08 日 23 時

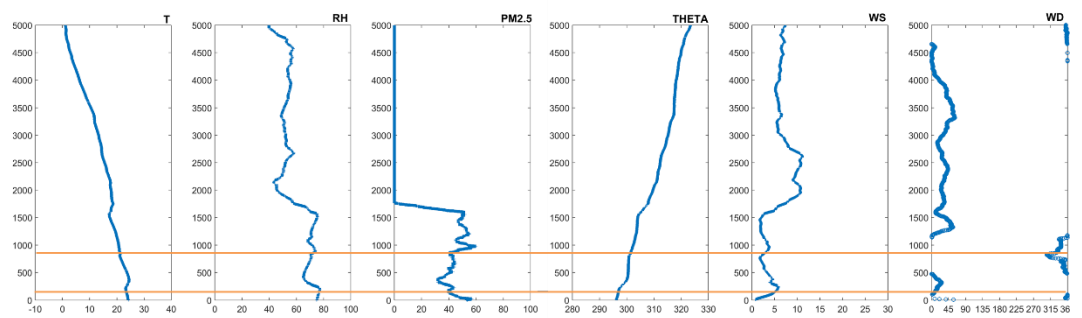


圖 4.35 大氣環流探空圖-11 月 8 日(a)11 時、(b)23 時

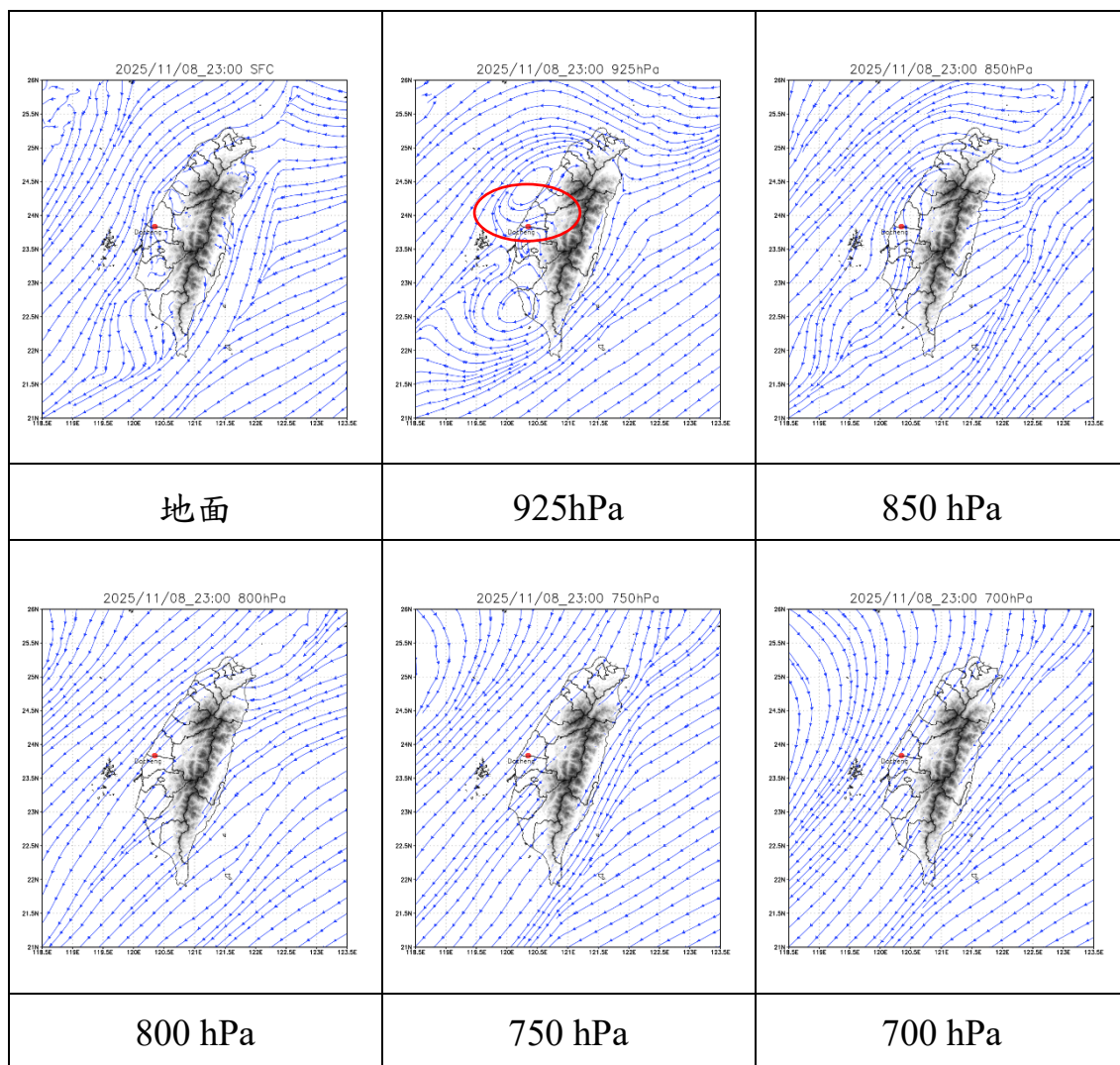


圖 4.36 流場圖-11月8日23時

第五章 垂直觀測及 VOCs 採樣分析

5.1 第一次密集採樣(IOP1：04/07~04/09)

5.1.1 垂直觀測作業

圖 5.1 為 8 日 2 時至 10 時，PM_{2.5} 受邊界層抑制而在近地面有最大值，同時間風向以東或東北的陸風為主；12 時起 PM_{2.5} 開始在垂直方向上擴散混合使濃度降低，風向也轉為偏北風，此特徵持續至 18 時。此外在 8 日 0 至 8 時的 800-1000 m，有東風攜帶濃度的 PM_{2.5} 移入斗六上空。8 日 20 時至 9 日 8 時間 PM_{2.5} 再次因邊界層高度降低而開始在 400 m 以下累積，風向也轉為東風（陸風）。9 日 2 時至 8 時在 100 m 附近風速稍微增加，水平擴散條件稍微改善，使該高度之 PM_{2.5} 濃度略為降低。9 日 10 時起 PM_{2.5} 再次開始在垂直方向上擴散混合。9 日 12 時在 200 m 以上風向先轉為西風或西北風，為海風的特徵，可能將沿海或平原的污染物往斗六傳送。隨後 9 日 14 時在 200 m 以下亦轉為西北風。9 日 16 時至 18 時間有降雨，PM_{2.5} 被洗除故濃度降低，此後維持較低濃度至 10 日 0 時密集觀測結束。

圖 5.2 為 1 km 以下之 O₃ 及水平風場。O₃ 濃度大致隨高度增加，且因光化作用，在白天 O₃ 濃度高於晚間，另外在兩日的 14 時與 16 時 200 m 以上可見 O₃ 濃度較兩小時前明顯增加。9 日 18 時 1 km 以下 O₃ 濃度則較兩小時間明顯降低，因在兩趟觀測間轉為多雲且有降雨，不利於光化反應。

TVOC 濃度圖 5.3 在白天濃度較低，特別是 8 日之 10 時至 18 時與 9 日之 10 時至 16 時濃度甚至趨近於 0。TVOC 濃度與 O₃ 濃度呈反向變化，大致隨高度增加而降低。TVOC 濃度在 8 日 20 時至 9 日 8 時之間在 300-600 m 較低，在該高度可見較高的 O₃ 濃度。

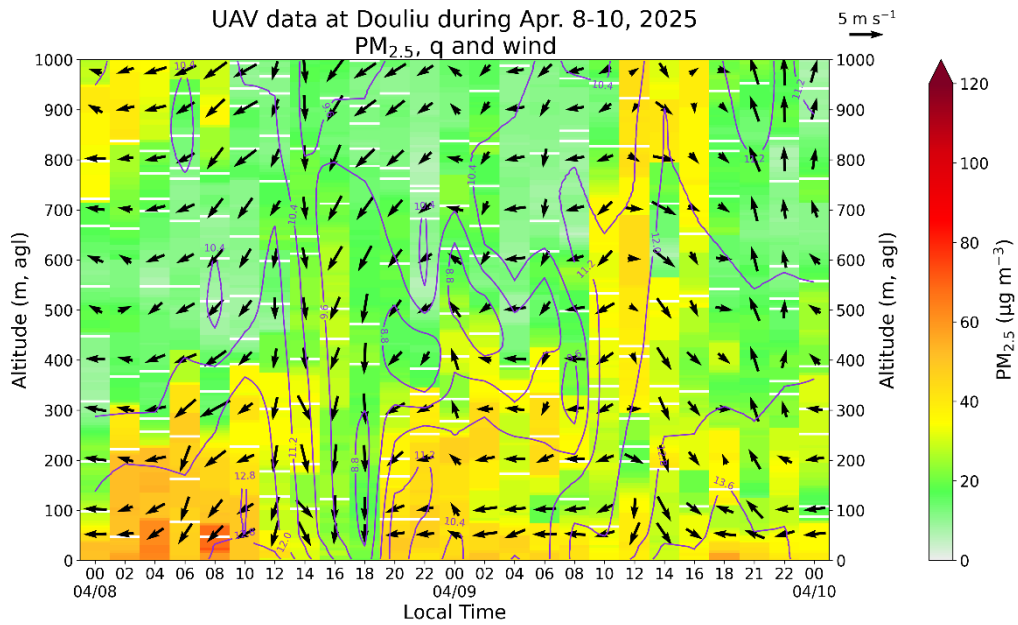


圖 5.1 IOP1 無人機觀測 PM_{2.5} 逐二時高度分布疊加比濕(g/kg)等值線與水平風場(m/s)

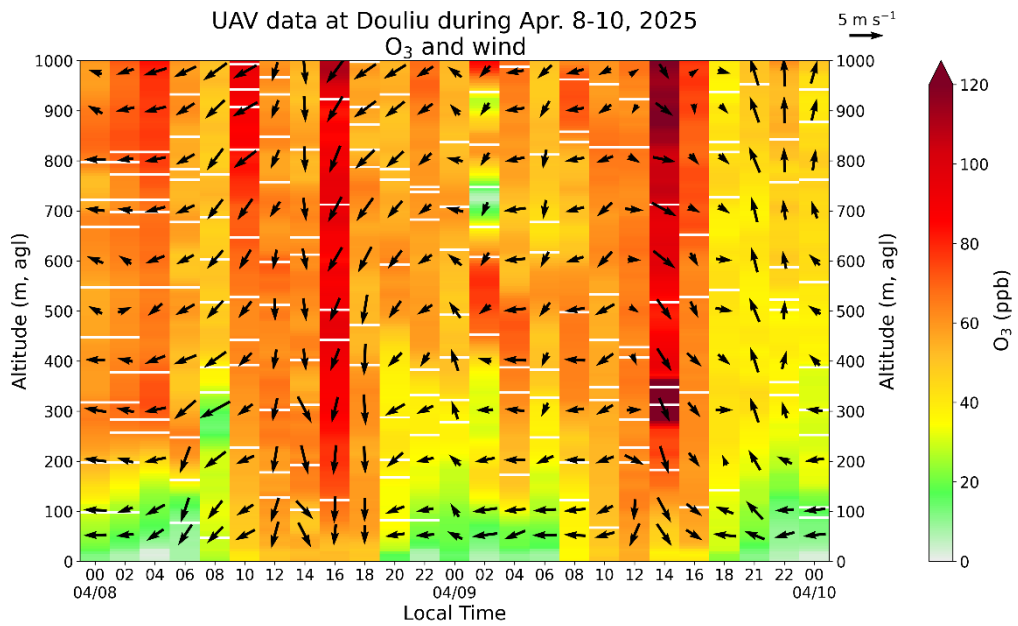


圖 5.2 IOP1 無人機觀測 O₃ 逐二時高度分布疊加水平風場(m/s)

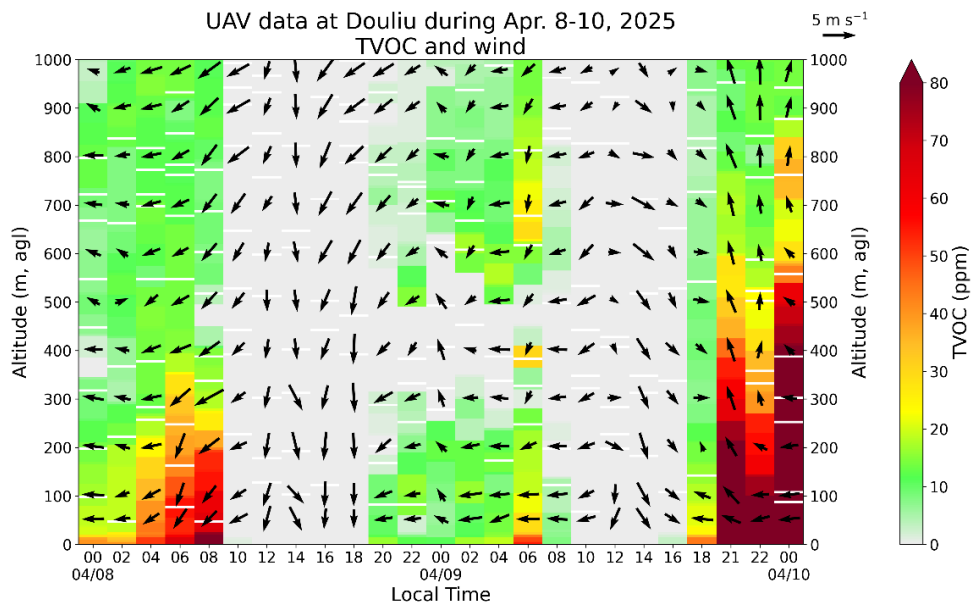


圖 5.3 IOP1 無人機觀測 TVOC (ppm)逐二時高度分布疊加水平風場 (m/s)

5.1.2 VOCs 採樣與分析

一、垂直 VOCs 採樣

4 月 8 日至 9 日於雲林斗六三叔公田園餐廳安排具備高空懸停能力的多軸無人飛行載具 (unmanned aerial vehicle, UAV) 搭載 2 L 不鏽鋼採樣罐 (canister) 在不同高度 (100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 800 m) 取得高空大氣樣本，並使用 2.5 L 不鏽鋼採樣罐於地面 (0 m) 取得地面大氣樣本，圖 5.4 為採樣罐實照圖，此次 IOP 共獲得八組 800 米以下之有機污染物垂直濃度分布，時間及數量規劃如表 5.1，無人機返抵地面後，針對採樣罐中的 VOCs 進行後續脫附、分離與定量分析。



圖 5.4 2 L 採樣罐

表 5.1 IOP1 無人機採樣時間及數量

時間		2 L 採樣罐	2.5 L 採樣罐	總計
		800 m, 500 m, 300 m, 200 m, 100 m	0 m	
04/08	00:00-01:00	5	1	6
	06:00-07:00	5	1	6
	12:00-13:00	5	1	6
	14:00-15:00	5	1	6
	18:00-19:00	5	1	6
04/09	00:00-01:00	5	1	6
	06:00-07:00	5	1	6
	12:00-13:00	5	1	6
總計		40	8	48

二、VOCs 排放與垂直特徵

針對此次 IOP 所收集的 48 個無人機採樣罐樣品的分析結果進行分析，多數物質的濃度在垂直高度上並不顯著，如圖 5.5 中，輕碳的烷類雖然濃度較高，但是變異性卻較小。04/08 06:00-07:00 發現在地面有高濃度的 Butane，表明可能存在局地的液化石油氣洩漏或使用排放，04/09 12:00-13:00 在高空中有高濃度 Propane，這種垂直分布特徵可能與區域傳輸有關。相較於圖 5.6 輕碳的烯類，特別是乙烯 (Ethylene) 和丙烯 (Propylene)，則有較大的變異性，特別是在 04/08 18:00-19:00，在地面有乙烯的高值，在 04/09 00:00-01:00 在 200 公尺與 500 公尺高空中有乙烯的高值。圖 5.7 為芳香烴的垂直濃度分布，我們觀察到甲苯 (Toluene) 和異丙苯 (Isopropylbenzene) 有較大的變異，在 04/09 06:00-07:00 200 公尺有 Toluene 高值。

綜合分析這些垂直剖面數據，我們可以看出研究區域的 VOCs 污染呈現多層次結構：地面層主要受局地排放源如液化石油氣使用和交通排放影響，中層（約 200-500 公尺）則顯示出溶劑使用等工業活動特徵，而高空層（800 公尺以上）則可能反映了區域傳輸的污染特性。不同高度的污染物種組成差異明顯，表明大氣垂直結構

在污染物分布中扮演重要角色。

VOCs 的垂直結構與來源特徵具有顯著的空間差異。斗六站主要受地表排放與邊界層內混合作用控制，高空層的輸送影響相對有限；相較之下，台西站則同時呈現地面污染累積、良好垂直混合以及高空輸送事件並存的多重型態，顯示其大氣組成受到沿海氣象條件與區域尺度輸送的共同調控。PMF 分析進一步指出，在高空樣本中，移動源因子的貢獻明顯降低，而老化空氣與工業相關來源的比例則相對提高，凸顯 UAV 量測對區域背景氣團與高空污染煙流特徵具有較高的解析敏感度。

透過無人機不鏽鋼採樣罐，並搭配 TD-GC-FID/ECD 高靈敏度分析系統，本計畫不僅成功捕捉到 100 m 與 300 m 高度的污染增強層與複雜垂直分層結構，也驗證 CFC-113 等背景型氣體可作為評估垂直採樣穩定度與資料品質的重要內部參考指標。整體而言，UAV 的垂直觀測有效彌補傳統地面監測在高空污染偵測上的不足，對於釐清西部臺灣 VOCs 的來源結構、垂直傳輸行為及區域輸送機制具有關鍵性的貢獻，並為未來空氣品質管理策略中納入高空傳輸效應提供重要的科學依據。

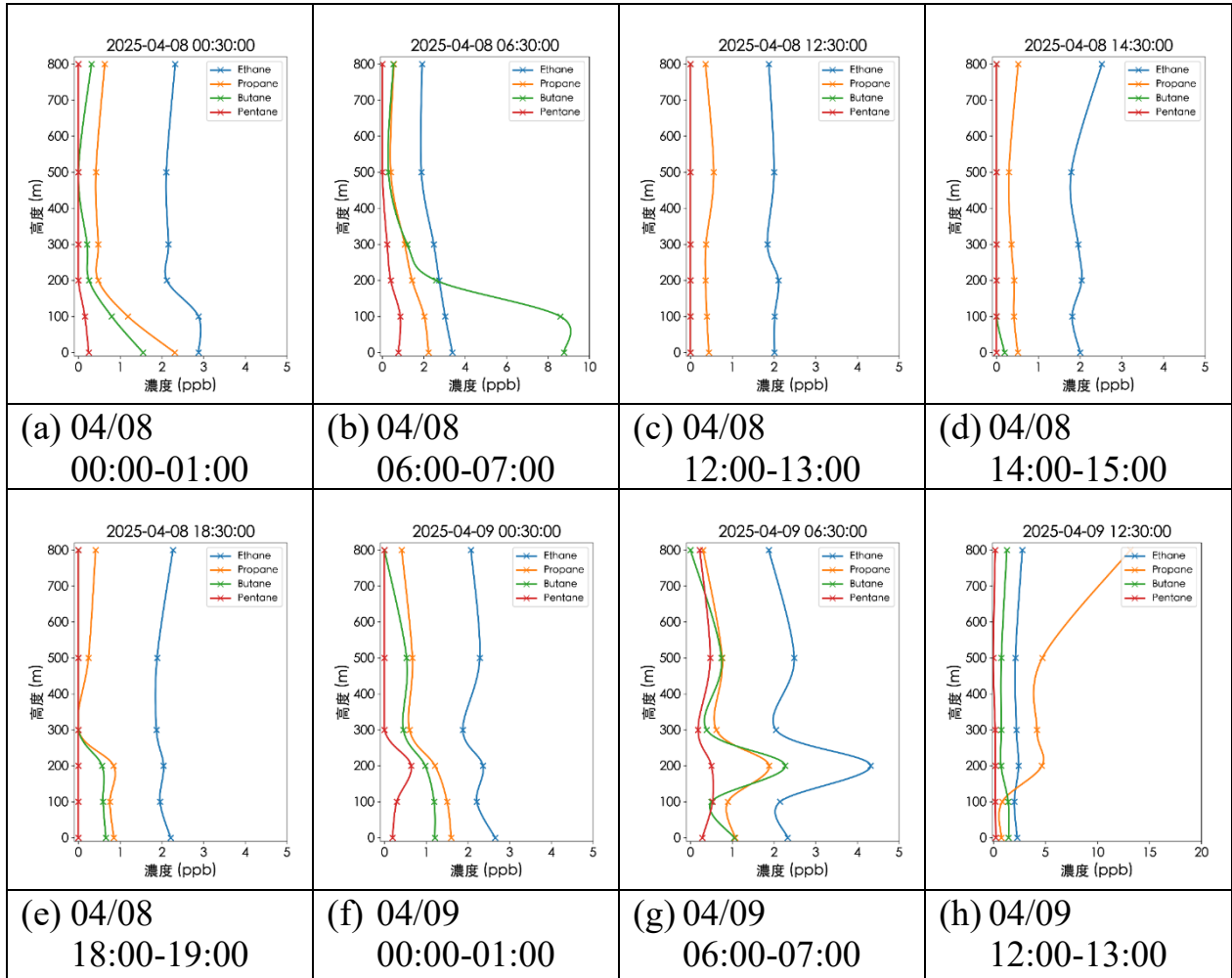


圖 5.5 IOP1 無人機垂直剖面採樣之輕碳烷類濃度分布圖

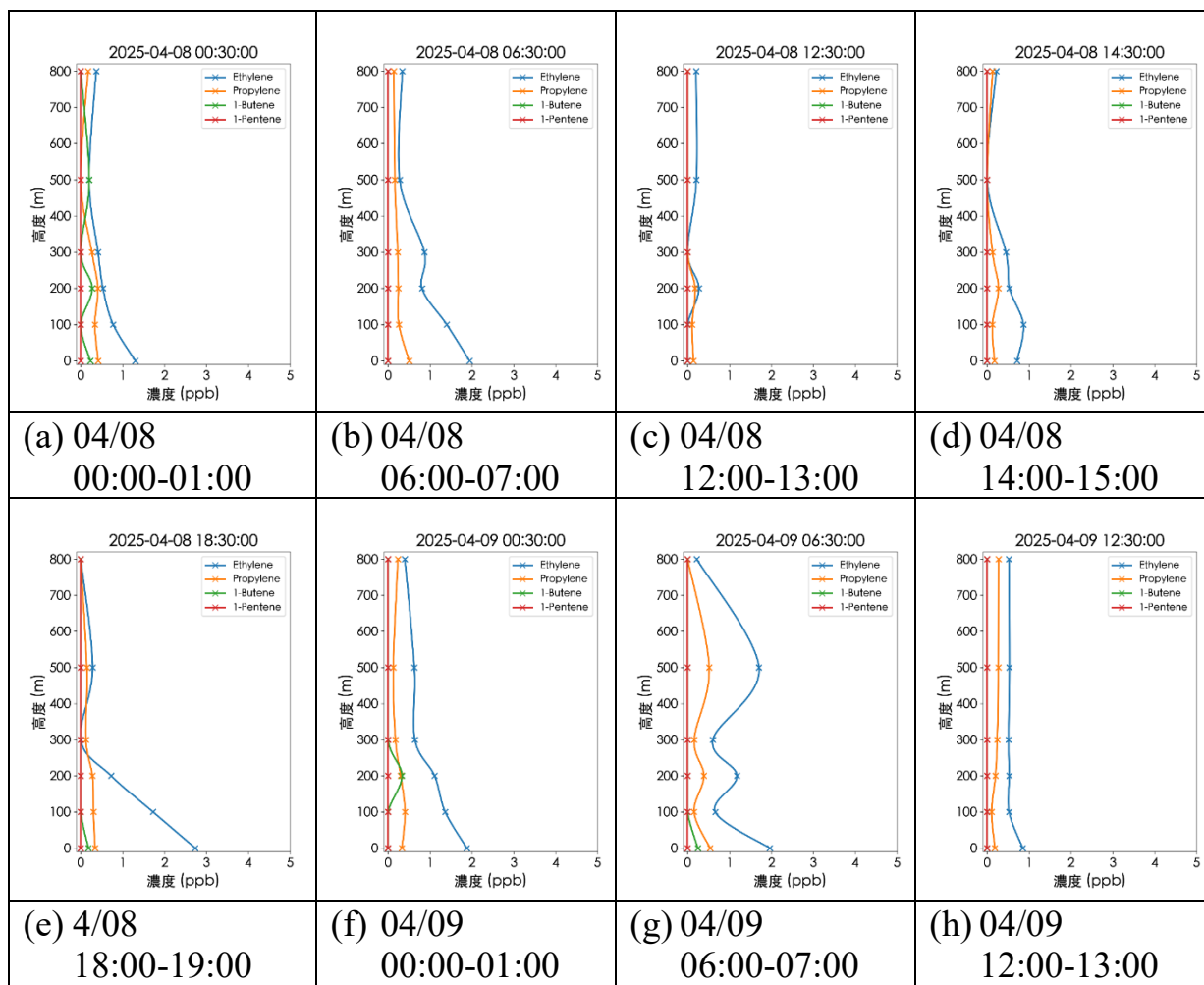


圖 5.6 IOP1 無人機垂直剖面採樣之輕碳烯類濃度分布圖

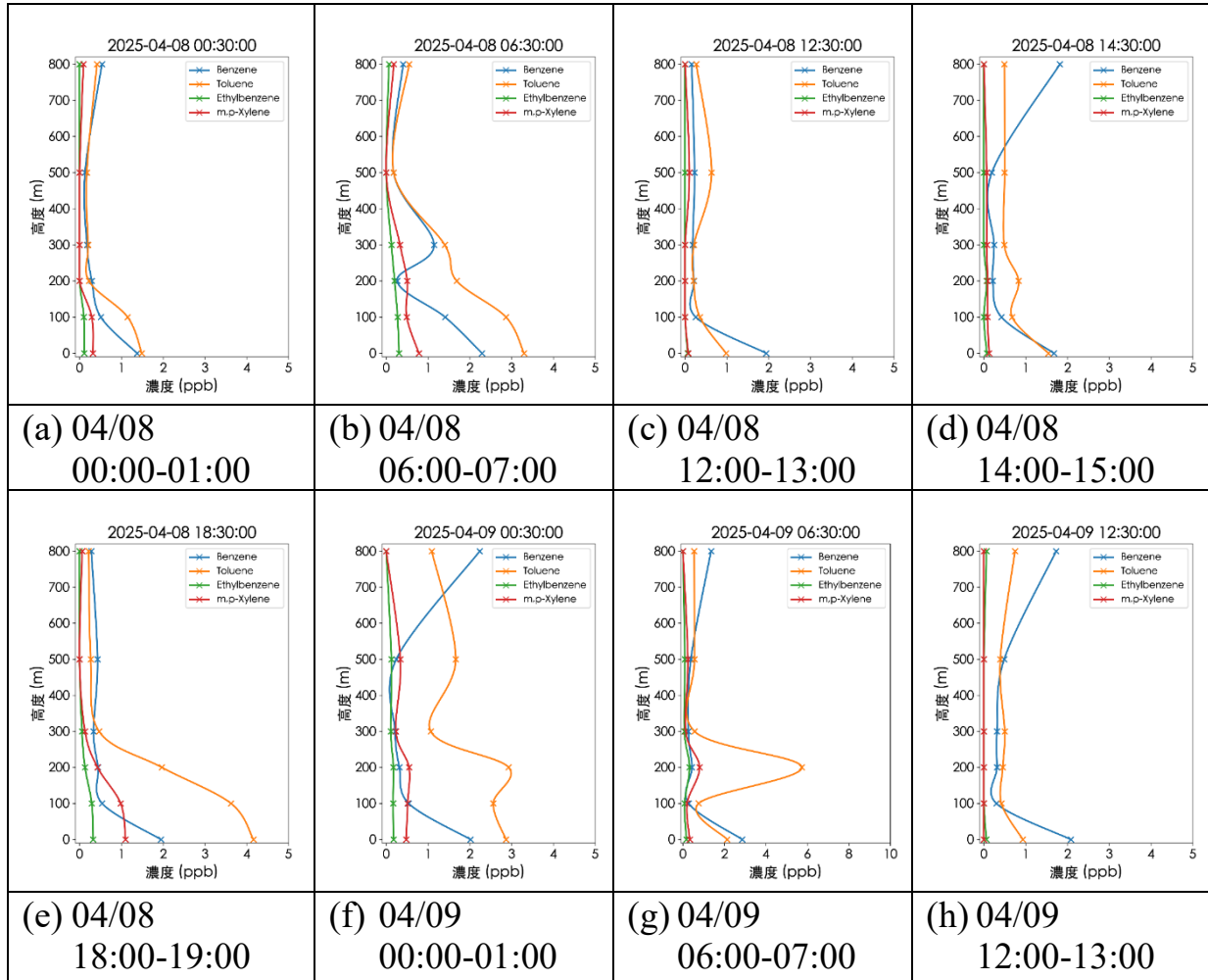


圖 5.7 IOP1 無人機垂直剖面採樣之芳香烴濃度分布圖

5.2 第二次密集採樣(IOP2：10/13~10/17)

於 IOP2 期間，因環境部團隊整體觀測配置與研究需求之考量，除既有觀測作業外，另於雲林縣臺西鄉執行無人機探空採樣作業。每站執行 8 組採樣作業，兩站合計完成 16 組採樣作業。每組採樣包含採樣高度為 800 公尺、500 公尺、300 公尺、200 公尺、100 公尺、地面之樣本。另外於密集觀測開始前一日晚間在地面採集 1 個樣本。爰此，以下小節將同步呈現臺西測點之無人機探空採樣觀測結果，以利整體分析與比較。

5.2.1 垂直觀測作業

斗六站 PM_{2.5}(圖 5.8)在 14 日 0 時至 2 時主要分布在 500 公尺以下。1 公里以下 PM_{2.5} 濃度降低。但 14 日 6 時的 150 至 750 公尺高度間，有強風挾帶較高濃度的 PM_{2.5} 移入斗六站，到 14 日 8 時此現象則發生於 300 至 450 公尺間與 700 至 900 公尺間。14 日 10 時至 16 時 PM_{2.5} 因垂直混合而趨於均勻分布。14 日 18 時至 15 日 8 時，水平風風速減弱使當地 PM_{2.5} 累積，在 600 公尺以下 PM_{2.5} 濃度較高，期間在 600 公尺以下除 15 日 6 時外皆無逆溫發生，顯示低風速造成的水平擴散條件不良為此時 PM_{2.5} 濃度維持高值的主要因素。15 日 10 時在 1 公里以下水平風風速增加，水平擴散條件改善使 PM_{2.5} 濃度降低。15 日 12 時在 500 公尺至 1 公里有層較高濃度之 PM_{2.5}，之後高度逐漸降低，在 15 日 23 時密集觀測結束前高度降到約 100 至 500 公尺間。15 日 17 時至 18 時斗六站有降雨洗除污染物，使 200 公尺以下 PM_{2.5} 濃度在 15 日 19 時明顯降低。

斗六站 O₃(圖 5.9)在 14 日 0 時原有較高濃度，14 日 2 時起則因水平風速增加，使較高濃度的 O₃ 被帶離斗六。但 14 日 8 時在 400 公尺以上有較高濃度的 O₃ 移入，14 日 10 時再被帶離，濃度因此產生變化。14 日 10 時至 16 時因光化作用，1 公里以下 O₃ 濃度逐漸上升。14 日 20 時至 15 日 8 時，O₃ 濃度因夜間滴定作用

而降低。15 日 10 時起再因光化作用使 O₃ 濃度上升，日落後無光化作用產生 O₃，100 公尺以下 O₃ 濃度因夜間滴定作用而降低；100 公尺以上 O₃ 濃度則大致維持定值。

位於中部沿海的臺西站白天多數時間為風速較強的西北風或北風，由於風速較強，PM_{2.5} 被帶離當地因而濃度降低(圖 5.10)。夜間時，14 日在 2 時至 8 時低層吹偏東風(陸風)，PM_{2.5} 濃度略高，此段時間並未有逆溫發生，所以污染物相對均勻地分布在 500 至 600 公尺以下。14 日 22 時至 4 時低層吹偏西風，因臺西站西側無排放源，無污染物移入，因此 PM_{2.5} 濃度相較前一晚為低。

臺西站在個案期間 O₃ 濃度(圖 5.11)的時空分布特徵跟斗六接近，但數值上台西臭氧濃度更高，且容易量測到突然的高值，尤其在高層更容易出現臭氧濃度高值，例如在 14 日 20 時至 22 時的 800 公尺以上，有較高濃度的 O₃ 隨東北風移入台西上空，使 O₃ 濃度上升，綜觀比較斗六和台西結果，臭氧的分布具有區域的一致性，但沿海一帶因地理位置及排放源的相對位置，更容易在高層觀測到臭氧高值，沿海測站呈現明顯的高空外來污染煙羽輸送跡象。低空臭氧的日夜變化上，白天約 10 時至 12 時因光化反應增加臭氧濃度，到 16 至 17 時有最大值；日落後 O₃ 濃度降低。

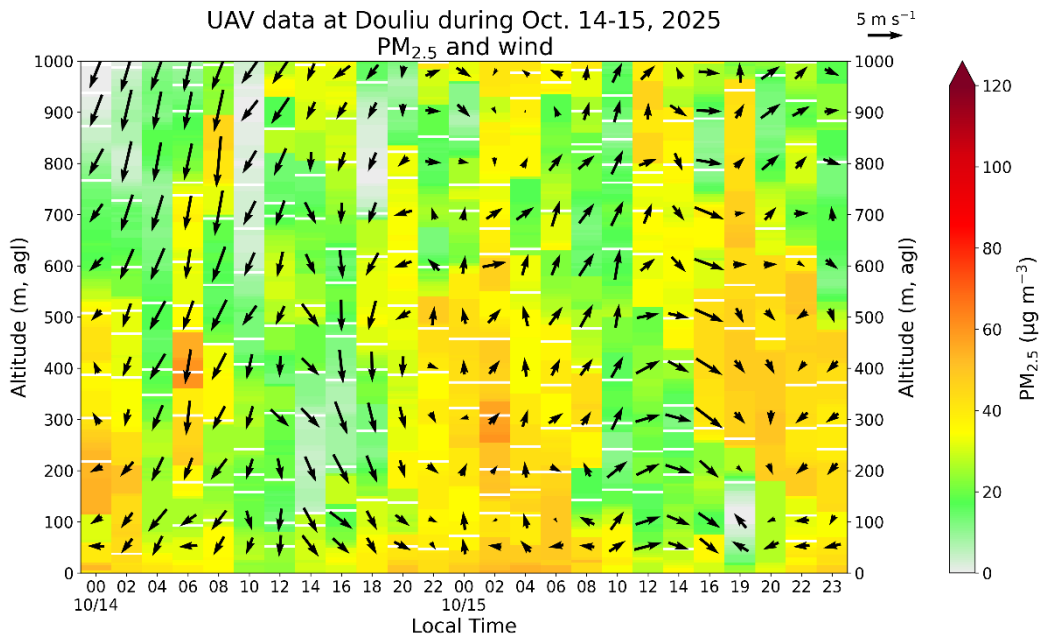


圖 5.8 IOP2 斗六無人機觀測 PM_{2.5} (µg/m³) 逐二時高度分布疊加比濕 (g/kg) 等值線與水平風場(m/s)

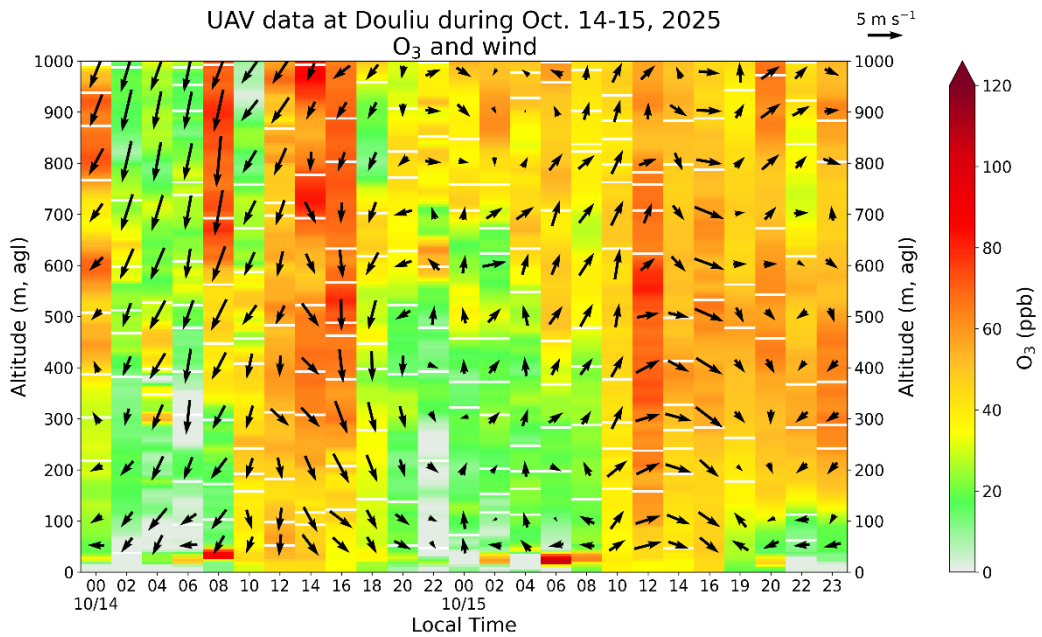


圖 5.9 IOP2 斗六無人機觀測 O₃ (ppb) 逐二時高度分布疊加水平風場 (m/s)

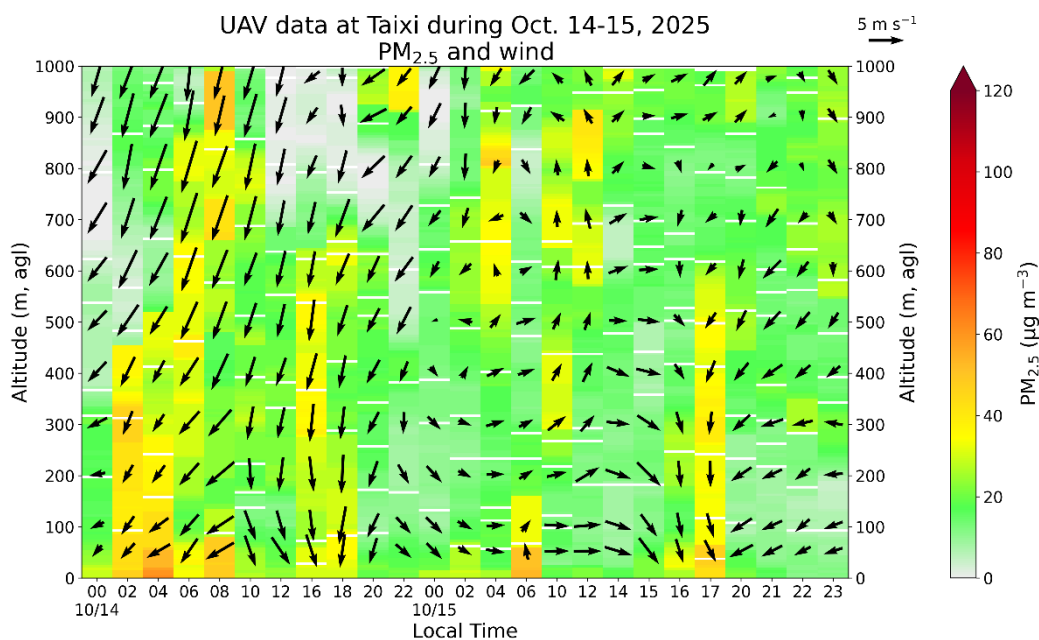


圖 5.10 IOP2 臺西無人機觀測 PM_{2.5} (µg/m³) 逐二時高度分布疊加比濕(g/kg)等值線與水平風場(m/s)

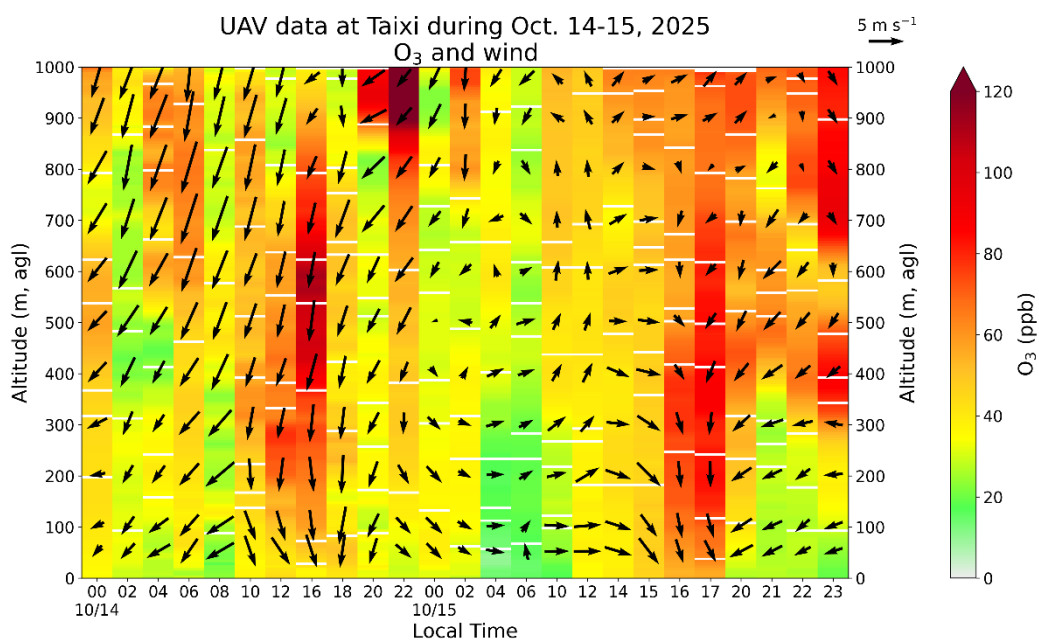


圖 5.11 IOP2 臺西無人機觀測 O₃ (ppb) 逐二時高度分布疊加水平風場(m/s)

5.2.2 VOCs 採樣與分析

一、垂直 VOCs 採樣

本計畫於 2025 年 10 月 13 日至 15 日於雲林縣台西鄉農業部水產試驗所 (後稱臺西站)，雲林縣斗六市三叔公庭園餐廳 (後稱斗六站) 進行進行密集觀測 (intensive operation period, IOP)，在此 IOP 期間，安排具備高空懸停能力的多軸無人飛行載具 (unmanned aerial vehicle, UAV) 搭載 2 L 不鏽鋼採樣罐 (canister) 在不同高度 (100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 800 m) 取得高空大氣樣本，除此之外，在斗六站使用 2 L 不鏽鋼採樣罐於地面 (0 m) 取得地面大氣樣本，在台西站使用 2.5 L 不鏽鋼採樣罐於地面 (0 m) 取得地面大氣樣本，此次 IOP 共獲得九組 800 米以下之有機污染物垂直濃度分布，無人機返抵地面後，我們將針對採樣罐中的 VOCs 進行後續脫附、分離與定量分析。

採樣罐於採樣前先以高純度氮氣加壓到 30 psig 及抽真空至 0.05 torr 方式重複清洗三次，最終抽真空至 0.05 torr 以下，接著以無人機搭載採樣罐飛行至指定的高度。此時，開啟採樣罐閥門，因為壓力差的因素，周圍大氣會吸入罐內。每個不鏽鋼採樣罐 10 秒後關閉閥門，完成採樣任務後，無人機返回地面，將已裝滿的採樣罐卸下，並安裝下一個新的罐子，然後再次起飛到另一個高度重複這一過程，約 1 至 13 分鐘完成單趟 6 個高度垂直採樣。採樣完成後，將採樣罐攜回實驗室進行分析。

二、VOCs 排放與垂直特徵

針對本次 IOP 共 98 個採樣罐的分析結果，本計畫對所有量測之 VOCs 與 CFCs 進行統計處理，並將濃度較高的 20 種化合物及 CFCs 的變異性以盒鬚圖方式呈現在圖 5.12 中。雖然單一樣品可檢測出超過 55 種化合物，但多數物質在不同垂直高度之間的濃度差異並不顯著；相對而言，乙烷 (ethane)、乙烯 (ethylene)、丙烷 (propane) 及甲苯 (toluene) 等物種不僅具有較高的濃度，同時也

呈現較大的變異幅度。這些高變異度的 VOCs 主要反映工業排放與交通廢氣等複合型來源特徵，涵蓋石化製程、溶劑使用以及車輛尾氣等排放途徑。此類高排放貢獻的物質在垂直方向上展現出明顯差異，顯示 VOCs 於大氣中的分布並非完全均勻，而是同時受到近地面排放強度、邊界層結構及短程輸送過程的共同影響。值得注意的是，在台西站觀察到乙烯濃度偏高的現象，顯示該區可能受到石化工業排放的顯著影響。相較之下，CFC-12 與 CFC-113 的濃度表現極為穩定，其變異度明顯低於其他化合物，符合其無直接排放源且高度均勻混合的特性，並可作為評估資料品質與背景濃度的參考基準。

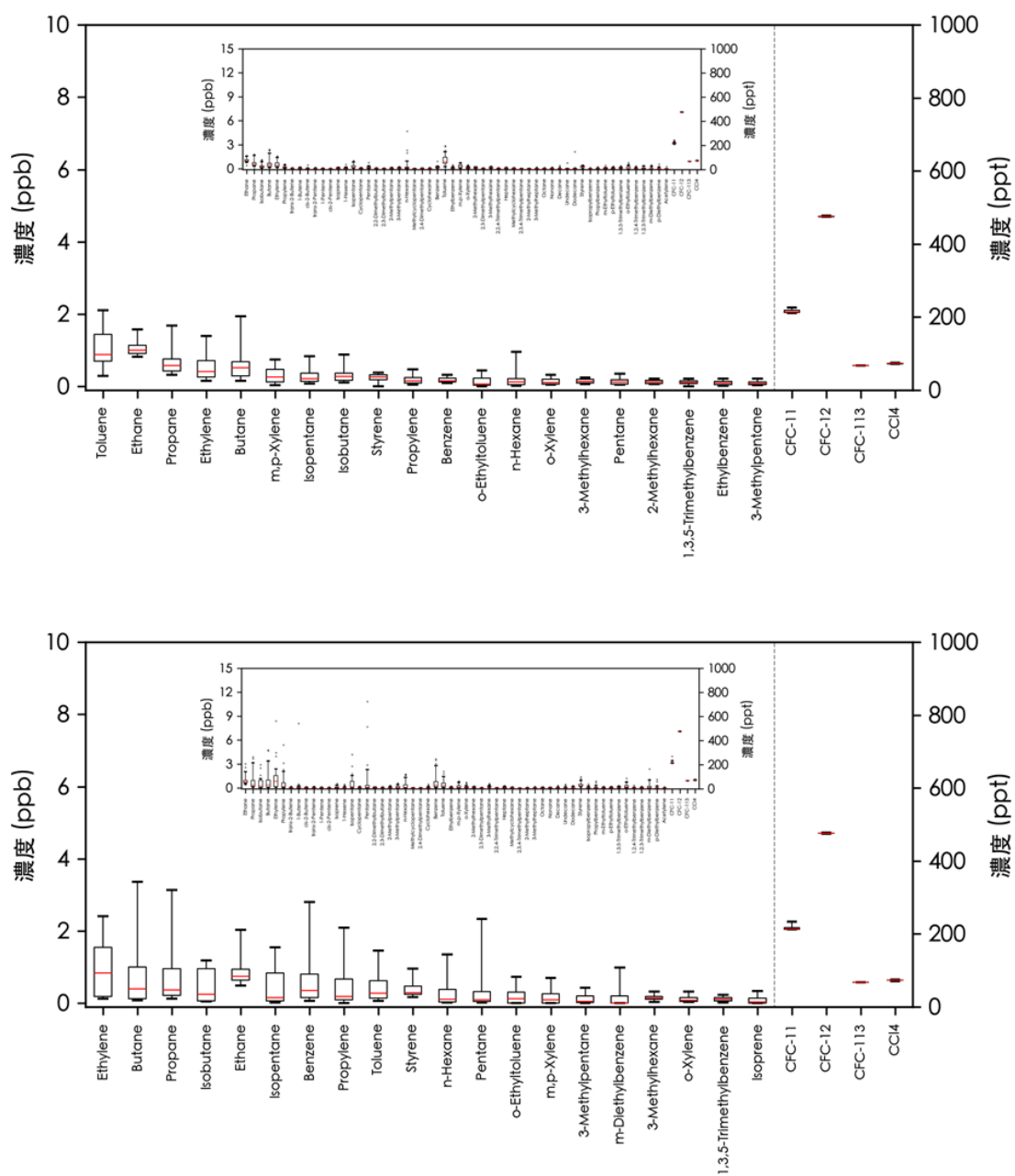


圖 5.12 IOP2 測站垂直濃度變化統計盒鬚圖(上圖斗六，下圖臺西)

三、事件日差異

本計畫針對各採樣站，分別挑選兩個較為明顯之事件進行詳細的解析，如圖 5.13 至圖 5.16 所示，這些圖展示在不同高度下各類 VOCs 物質的濃度變化情況。通過對比這些垂直分布特徵，能夠清楚發現大氣中 VOCs 的濃度和組成在垂直方向上表現出高度不均勻性，這種不均勻性來源於當地排放源的影響以及區域大氣傳輸過程，為理解污染物的來源與傳輸機制提供關鍵線索。

圖 5.13 中顯示無人機於 2025 年 10 月 14 日中午進行 0 至 800 公尺高度之探空觀測結果，量測項目包含溫度、相對濕度、氣壓、風速與風向，以及 VOCs 各組分濃度。由溫度垂直剖面可見，氣溫自地面約 34°C 隨高度逐步下降，至 800 公尺約為 26°C，呈現正常的大氣遞減率，相對濕度自地面約 55% 起，隨高度增加而逐漸上升，於 600 公尺以上接近 80% 以上，顯示低層大氣主要受日間加熱影響，此分布型態符合晴朗午後條件下常見的濕度結構，未觀察到逆溫或顯著穩定層等異常結構。風速剖面顯示近地面風速較弱，隨高度提升而逐漸增強，屬於典型邊界層動力特徵；在風向方面，各高度間存在輕微偏轉，顯示出一定程度的風切現象。就 VOCs 的垂直分布而言，包含烯類、烷類及芳香烴等化合物整體呈現較為均勻的混合狀態。然而，部分物種在約 100 至 300 公尺高度範圍內出現較明顯的濃度變化，推測該高度層可能與局地傳輸或混合過程相關。

圖 5.14 中顯示溫度自地面約 28°C 隨高度呈均勻下降趨勢，至 800 公尺約為 23°C，符合典型日間的大氣正常遞減率，未觀察到逆溫或其他異常的穩定層結構。相對濕度方面，地面濕度約為 80%，並隨高度上升至約 500 公尺期間維持在高濕狀態，其後略為下降至約 70%，顯示中層水氣條件相較低層稍為乾燥。在風場結構上，可於約 350 公尺高度觀察到風向出現明顯轉變，顯示該高度存在風切現象，可能與不同氣團特性或地形效應對低層風場的影響有關。就化學成分而言，CFCs 在各高度的濃度變化極小，其

垂直剖面幾乎維持一致，屬於典型的背景型物質，顯示研究區域內並無顯著的局地排放來源。烯類化合物在地面具有最高濃度，並於約 200 至 300 公尺高度範圍內迅速下降，主要受到地面排放強度與混合層發展的共同控制。相對地，烷類與芳香族化合物的垂直分布則在約 500 公尺附近出現變化，顯示該高度層可能受到外來氣團或水平傳輸影響，使這些反應性相對較低的 VOCs 在中層仍可觀測到濃度的增加。

圖 5.15 中溫度剖面顯示，氣溫由地面約 28°C 隨高度整體呈下降趨勢，惟在約 350 公尺高度出現短暫回升，形成一明顯的逆溫層。此逆溫結構抑制了大氣的垂直混合，並作為低層與中高層空氣之間的分隔界面。相對濕度自地面約 80% 略為上升後，於 500 公尺以上逐漸下降至約 50%，顯示逆溫層以上的氣團水氣含量相對偏低。風場觀測結果顯示，整個高度範圍內皆以東北風為主，且在逆溫層高度附近風速明顯增強，顯示該高度層可能存在較強的水平輸送作用。就化學成分而言，CFCs 在各高度的濃度皆維持近乎一致，屬於典型的背景型氣體，顯示研究區域內並無顯著的局地排放來源。此外，烯類、烷類、重烷類與芳香族化合物皆在約 300 公尺高度出現明顯濃度峰值，顯示該高度空氣中可能含有額外來源的揮發性有機物，此高值的存在與逆溫層所在的位置有關。綜合該高度所觀察到的逆溫結構與較強的東北風訊號，可推測 300-350 公尺高度為一外來污染物輸送帶，其 VOCs 的組成與濃度特徵明顯不同於近地面背景條件。

圖 5.16 中溫度剖面顯示，在近地層即出現明顯的西北風強風，為海風的特徵，高度約為 20 公尺，且帶來較溫暖來自海洋表面的空氣，對應到 VOC 濃度採樣，濃度較低。此地面強風層之上，隨即出現接近中性的大氣條件，垂直混合作用受到抑制，風向來自北風，為環境風場特徵。風場觀測結果指出，研究區域內存在明顯的風切結構，特別是在逆溫層高度附近，風向或風速出現突變，顯示不同來源氣團交替影響該高度層。此類動力結構可

能促使污染物在特定高度聚積，或經由水平輸送進入觀測區域。就化學垂直剖面而言，各類 VOCs (包括烷類、烯類、重烷類及芳香族化合物) 皆於約 100-200 公尺高度呈現較高濃度，顯示該高度存在一層污染氣團或潛在的輸送帶，污染來自於北風。烯類化合物因反應性較高，地面濃度相對偏高並隨高度迅速下降，但仍在 100-200 公尺高度出現明顯增幅，進一步支持該高度層存在污染輸送現象。相較之下，烷類與芳香族等反應性較低的物種則呈現更為顯著的中層濃度增加，反映其較容易隨氣團進行長距離傳輸。

2025/10/14 斗六

- 13:28 800 m
- 13:02 200 m
- 12:29 500 m
- 12:19 100 m
- 13:12 300 m
- 12:00 0 m

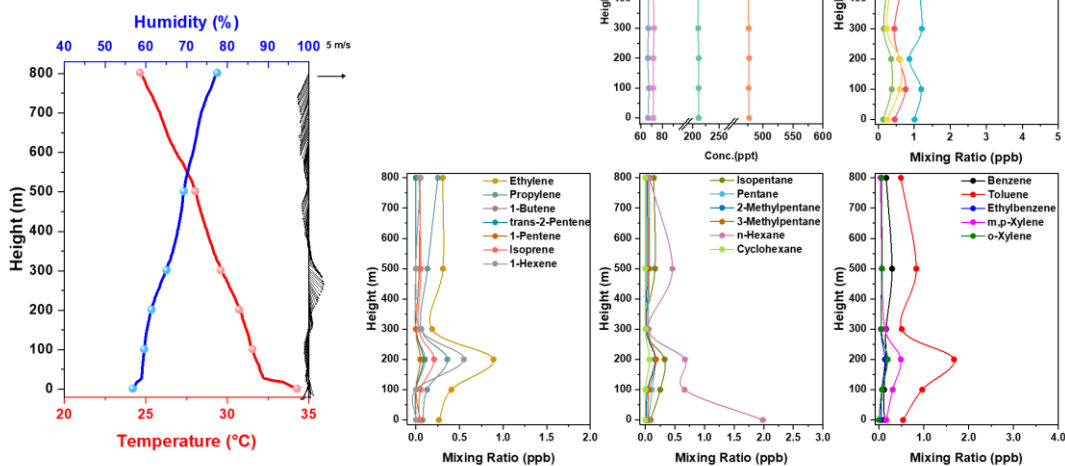


圖 5.13 斗六站 10/14 中午烷烴、烯烴和芳香烴、CFCs、風場與溫溼度垂直分布

2025/10/14 斗六

- 19:09 800 m • 18:37 200 m
- 18:16 500 m • 18:28 100 m
- 18:49 300 m • 18:00 0 m

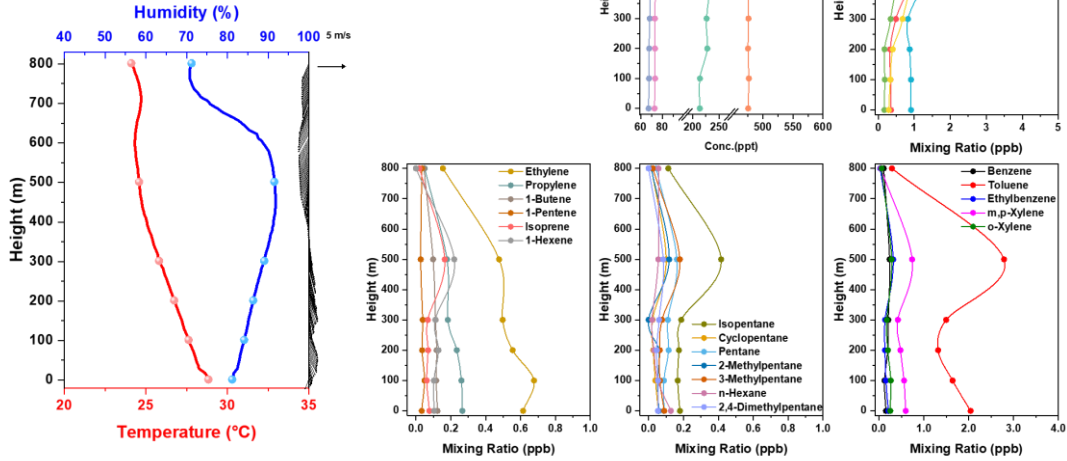


圖 5.14 斗六站 10/14 夜間烷烴、烯烴和芳香烴、CFCs、風場與溫溼度垂直分布

2025/10/14 台西

- 00:40 800 m • 01:18 200 m
- 01:00 500 m • 01:24 100 m
- 01:10 300 m • 00:14 0 m

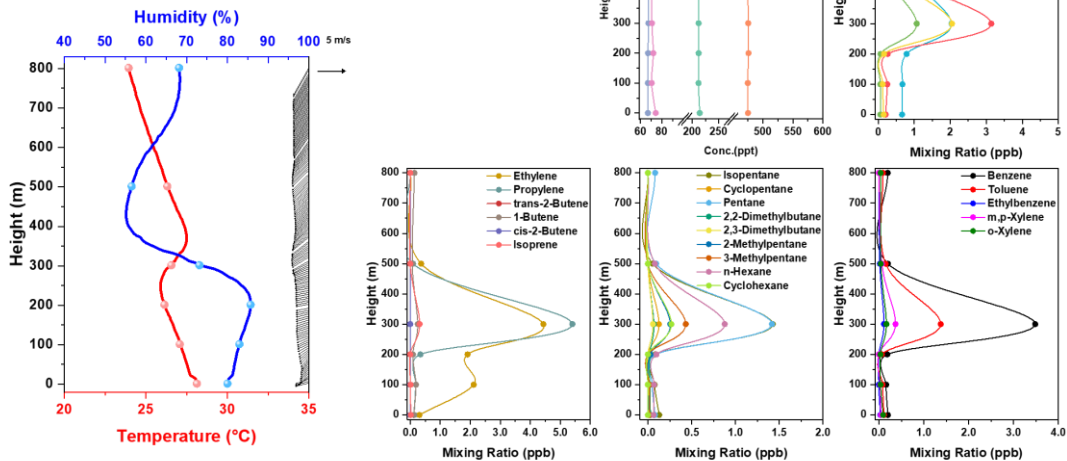


圖 5.15 臺西站 10/14 凌晨烷烴、烯烴和芳香烴、CFCs、風場與溫溼度垂直分布

2025/10/14 台西

- 13:01 800 m • 12:28 200 m
- 12:54 500 m • 12:19 100 m
- 12:46 300 m • 12:00 0 m

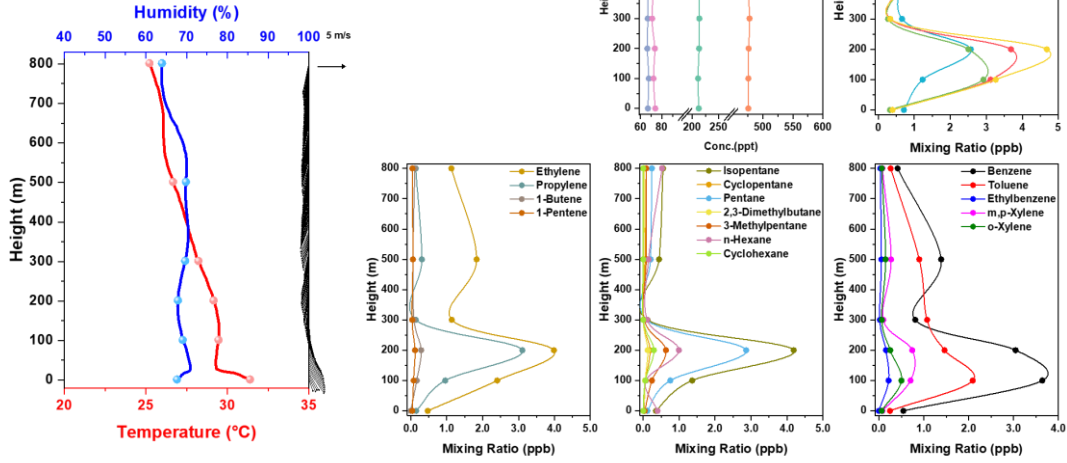


圖 5.16 臺西站 10/14 中午烷烴、烯烴和芳香烴、CFCs、風場與溫溼度垂直分布

四、VOCs 正矩陣因子分析結果 (PMF)

圖 5.17 顯示老化空氣因子的貢獻約介於 18-30%之間，其中以靠海的雲林臺西站最高，顯示其較易受到沿海風場與大尺度輸送的影響；相較之下，雲林斗六站的貢獻最低，反映該站所截取之高空氣團較少受到外部區域長程輸送之老化空氣影響。溶劑使用因子則呈現高度變異，在雲林臺西約占 15%，而在雲林斗六則高達 42%，成為斗六站的主導來源，推測與其位於下風處的地理位置，以及工業區溶劑排放於高空層的傳輸有關。移動源因子在兩站的貢獻皆低於 2%，進一步顯示移動源污染主要存在於地面層，難以有效輸送至高空。

整體而言結果顯示，UAV 所捕捉之高空污染主要可歸納為兩類特徵：其一為中度老化的區域背景氣團，其二為自工業區輸送至高空層的污染煙羽；且不同測站因地形條件與風場結構差異，受各類污染來源支配的程度亦有所不同。UAV 所提供的垂直觀測資訊有效彌補地面測站難以偵測高空污染特徵的限制，特別是在溶劑使用與煉油廠排放方面展現出更高的靈敏度與辨識能力，對於理解區域空氣品質的垂直結構與污染輸送機制具有重要的科學價值，並有助於強化空氣品質管理策略中對高空污染傳輸的掌握。

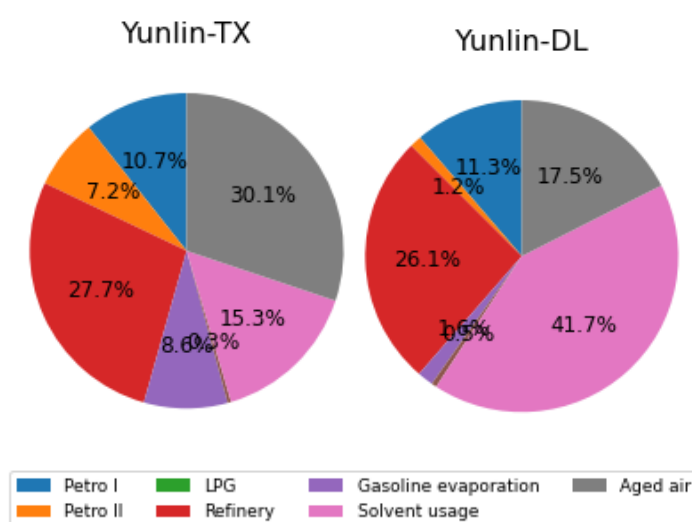


圖 5.17 IOP2 各因子所佔比例

五、VOCs 地面與高空分析

圖 5.18 至圖 5.19 分別呈現不同地點的空中樣本與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物 (tVOC) 濃度比較。tVOC 濃度由每個樣本中 54 種揮發性有機物 (VOCs) 濃度相加而成，可有效反映整體非甲烷碳氫化合物負荷量。圖中的虛線對角線代表理論上的 1:1 關係，即地面與高空樣本濃度相同，表示大氣為充分混合狀態；因此資料點相對於此線的位置，可用於判斷不同高度間的垂直濃度差異以及大氣混合程度。

斗六站仍展現出明顯的垂直梯度特徵，符合其位於內陸、以地表排放為主導地區的典型型態。幾乎所有觀測資料點皆分布於 1:1 參考線之下，顯示地表層的 tVOC 濃度普遍高於高空層。地面層濃度多介於 8-15 ppb，而高空層濃度則大多低於 10 ppb。此一分布型態反映當地排放來源 (如都市活動、交通排放及工業操作) 對近地層空氣品質具有較為顯著的影響，並與白天邊界層內相對有限的垂直混合作用相互配合。在垂直輸送較弱的條件下，tVOC 容易於近地表累積，此現象亦符合冬季內陸地區常見之穩定或弱對流氣象特性。僅有少數樣本顯示高空層濃度與地面層相當，甚至略高，暗示偶發且規模有限的垂直混合或微弱向上輸送事件。相較於沿海測站，斗六站並未觀察到明顯的高空外來污染煙羽輸送跡象。

臺西站的垂直結構特徵與斗六站相比呈現明顯差異。觀測資料點分布較為分散，呈現近似羽流 (plume-like) 的擴散型態，且在垂直與水平方向上皆具有高度延伸性。相當比例的樣本落於接近 1:1 參考線的位置，顯示該沿海區域經常處於大氣混合條件良好的狀態。此類情境反映穩定的海洋邊界層流動，以及海陸風循環，有助於促進地表與高空之間 VOCs 的均質化分布。然而，仍可觀察到多筆資料明顯分布於 1:1 參考線之上，其高空層 tVOC 濃度可達 30-40 ppb，而地表濃度則維持在相對偏低的水準 (<10 ppb)。此類事件顯示，存在高空污染層由區域性工業或石化排放經輸送後累積於上層大氣，惟其混合程度不足以使污染物有效傳輸至地表。

相對地，亦有少數案例顯示地表層濃度可達約 30 ppb (例如 Batch 2)，而高空層濃度仍低於約 10 ppb，反映午夜過後邊界層高度降低，導致地表排放物在淺層中累積的現象。此外，在同一批次中，不同高度的樣本亦呈現較為分層的濃度結構，顯示清晨過渡時期存在明顯的垂直分層特性。此類情況常發生於海陸風轉換階段，當殘留層中的空氣於早晨逐漸與近地層重新發生部分混合時，容易形成較為複雜的垂直濃度梯度。整體而言，台西站同時呈現良好混合狀態、高空污染事件以及地表淺層累積事件三種型態並存的特徵，反映沿海氣象條件、海陸風循環與區域輸送之間的高度交互作用，使其 VOCs 的垂直結構相較其他測站更加多變且複雜。

圖 5.20 顯示不同高度與批次的總 NMHC 濃度差異，並揭示台西與斗六主要 NMHC 物種的貢獻，以協助理解主導排放來源及其影響 NMHC 分布的相關大氣過程。

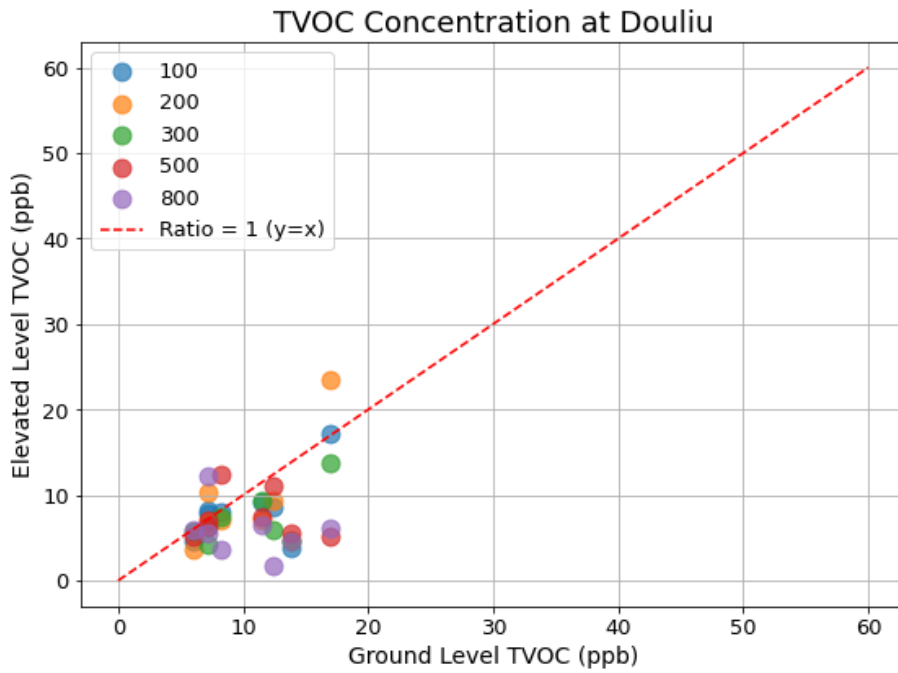


圖 5.18 斗六站空中樣本與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物 (tVOC) 濃度比較

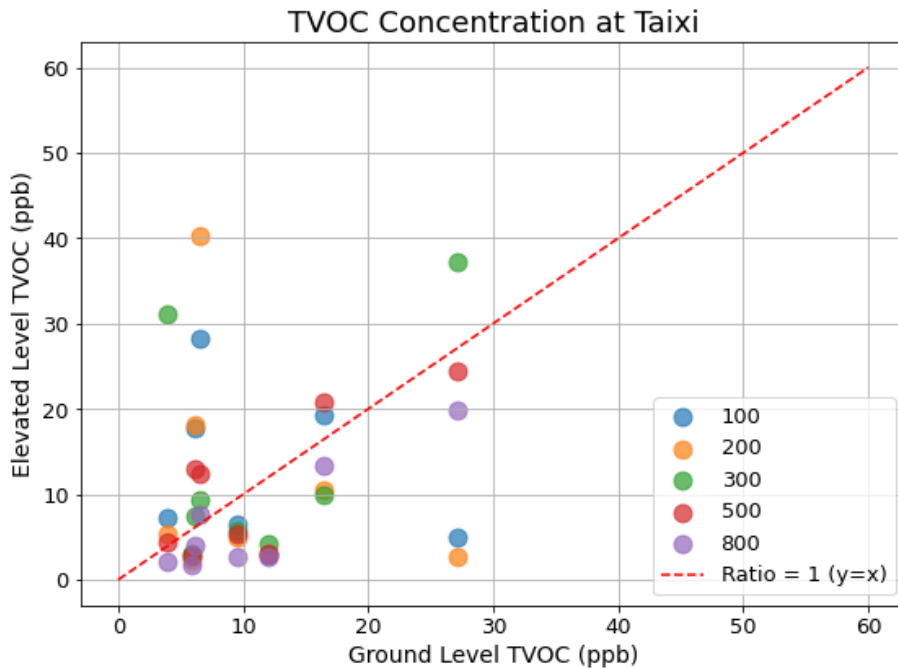


圖 5.19 台西站空中樣本與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物 (tVOC) 濃度比較

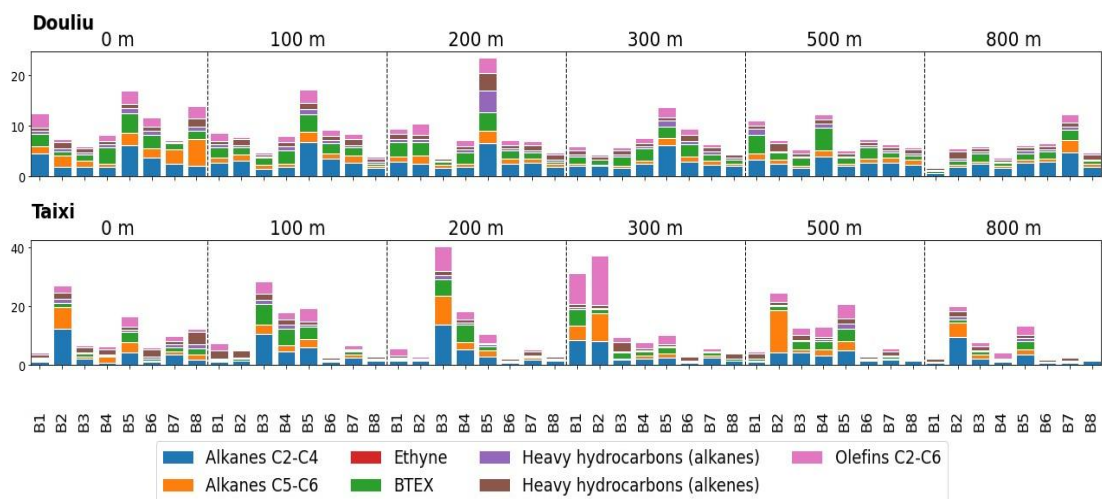


圖 5.20 不同高度與批次的 NMHC 濃度差異

六、無人機觀測採樣分析小結

在斗六站，各高度層的 NMHC 組成皆以輕烷類 (C_2-C_4) 及中輕烷類 (C_5-C_6) 為主要成分，尤其在地表層表現最為明顯；相對而言，烯烴、BTEX 以及較重的碳氫化合物則維持穩定且中等的貢獻比例。多數批次及不同高度間的濃度變化幅度有限，顯示都市活動與交通排放在當地形成一個持續且相對穩定的影響來源。由地面延伸至高空層（約 100-800 公尺）皆可觀察到相似的物種組成分布，說明地表來源的污染物能有效混入下邊界層上部，使整體 NMHC 在垂直方向上呈現高度一致性。此一垂直結構特徵反映地方都市排放，特別是車輛廢氣，與區域背景濃度共同作用所塑造的結果。本次 IOP 期間，高空層中 BTEX 與烯烴的尖峰濃度已明顯減弱，顯示高空污染入侵事件相對較少，邊界層內部亦呈現較高的混合程度，與本次 IOP 普遍偏低的 VOCs 總濃度相互一致。整體而言，斗六站於本次 IOP 所呈現的 NMHC 垂直結構，主要反映多來源的穩定貢獻與邊界層混合作用共同影響下的結果。

台西站在本次 IOP 各測站中呈現出最為多樣且變化明顯的 NMHC 垂直結構特徵。在多數高度層中，輕烷類 (C_2-C_4) 仍為主要貢獻物種，但烯烴、BTEX 以及較重的碳氫化合物亦頻繁出現，且其比例隨不同批次與高度呈現高度變動。此種波動性與台西位於西部沿海的地理位置相符，顯示海陸風循環與區域尺度輸送對當地氣團性質具有強烈的調控作用。整體而言，台西的 VOCs 組成展現出明顯的高空層特徵，反映多元排放來源與邊界層狀態之間的交互影響。於午夜時段 (Batch 1)，約 300 公尺高度出現顯著的濃度增強，主要由烯烴、BTEX 以及輕、重烷類共同主導，其濃度明顯高於地表層。此分布型態符合夜間穩定邊界層條件下的污染煙羽滯留機制，即鄰近工業區所排放的污染物被困留於高空層，而地面層的垂直混合則因穩定大氣而受到抑制。清晨時段 (Batch 2)，300 公尺高度再度觀測到大量烯烴與芳香烴，其組成與 Batch 1 相當接近，顯示可能仍受到相同工業排放來源的持續影響。相較

之下，地表層濃度於清晨明顯上升，且主要由交通相關物種所主導，符合清晨初期邊界層高度仍低、垂直混合作用尚未完全發展時，新鮮地表排放物易於累積的典型情境。此時，100-200 公尺高度所呈現的低濃度特徵，則反映垂直混合尚未完全連通，使工業煙羽仍滯留於約 300 公尺高度，而地表交通排放則被限制於近地層。至中午時段 (Batch 3)，隨著邊界層高度逐漸抬升，地表至高空的垂直分層明顯減弱，整體濃度趨於一致且偏低。然而，在約 200-300 公尺高度仍可觀察到局部增強現象，主要由輕烴類與中等比例的 BTEX 所構成。由於地表層並未出現相對應的濃度上升，顯示該高空污染並非源自當地排放，而較可能來自沿海風處或區域性工業區的長程輸送。此推論亦與十月份進入東北季風初期的氣象背景相一致，該季節條件有利於在地面混合層以上，將外來氣團推送至內陸地區。整體而言，台西站同時呈現良好混合狀態與顯著垂直分層事件並存的特性，顯示其大氣組成同時受到地表本地排放、海洋邊界層混合作用，以及區域尺度工業污染高空輸送的共同影響。此種隨高度變動的 NMHC 結構，突顯沿海氣象動力與多重污染源交互作用下，所形成之複雜且高度變化的大氣化學特徵。

在 IOP2 各測站中，NMHC 的垂直分布特性呈現出明顯的空間差異。台西站表現為混合型態，其地表排放、沿海邊界層動力與工業來源相互作用，使不同高度間的物種組成呈現高度變化。相較之下，斗六站則展現較為一致的垂直分布特徵，主要由交通相關的烴類與中等比例的 BTEX 所主導，在相對穩定的邊界層混合作用下，各高度層的濃度變化趨於一致。整體而言，研究結果突顯西部臺灣 NMHC 來源具有顯著的空間異質性，並顯示各測站的垂直結構係由地方排放特性、氣象混合過程與區域尺度輸送作用共同形塑而成。

5.3 第三次密集採樣(IOP3：11/8~11/9)

IOP-3 實驗地點在斗六市三叔公庭園餐廳 (後稱斗六站)，使用無人機攜帶 2 公升不鏽鋼採樣罐，在不同高度下採樣分析 VOCs 濃度及成分以獲得垂直分布特徵。於 48 小時內共進行 8 批次的採樣，每批次採樣均在 6 個不同高度進行採樣工作。

5.3.1 垂直觀測作業

斗六站 (圖 5.21) 在 8 日 0 時至 10 時在 500 公尺高度有逆溫層存在，使 PM_{2.5} 主要累積在 500 公尺以下，同時間 500 公尺以上仍有 PM_{2.5} 殘餘於此層。8 日 10 時起風向逐漸轉換為西風或西北風且風速加強，為海風的特徵。隨著水平和垂直擴散條件改善，斗六上空 PM_{2.5} 濃度降低。然而在 8 日 14 時，在 200-1,000 公尺間強風反而將較高濃度的 PM_{2.5} 帶進斗六上空。8 日 23 時至 9 日 6 時轉為較弱的偏東風，為陸風的特徵，同時在 350 公尺左右的高度有逆溫層存在，使污染物累積於此穩定邊界層內。9 日 8 時至 16 時，邊界層高度逐漸增加到 1,000 公尺以上，邊界層內 PM_{2.5} 接近均勻混合。9 日 16 時觀測後有小雨，因降雨洗除 PM_{2.5}，9 日 18 時後可見 500 公尺以下 PM_{2.5} 濃度因此降低，而在 500 公尺以上則有殘餘層存在。

斗六站 O₃ (圖 5.22) 在 8 日和 9 日的 10 時至 18 時因光化作用，1 公里以下 O₃ 濃度逐漸上升。兩日的 20 時至 8 時，有滴定作用使低層 O₃ 濃度降低。但在 8 日 20 時至 9 日 2 時，400-1,000 公尺間有北風使較高 O₃ 移入斗六上空。

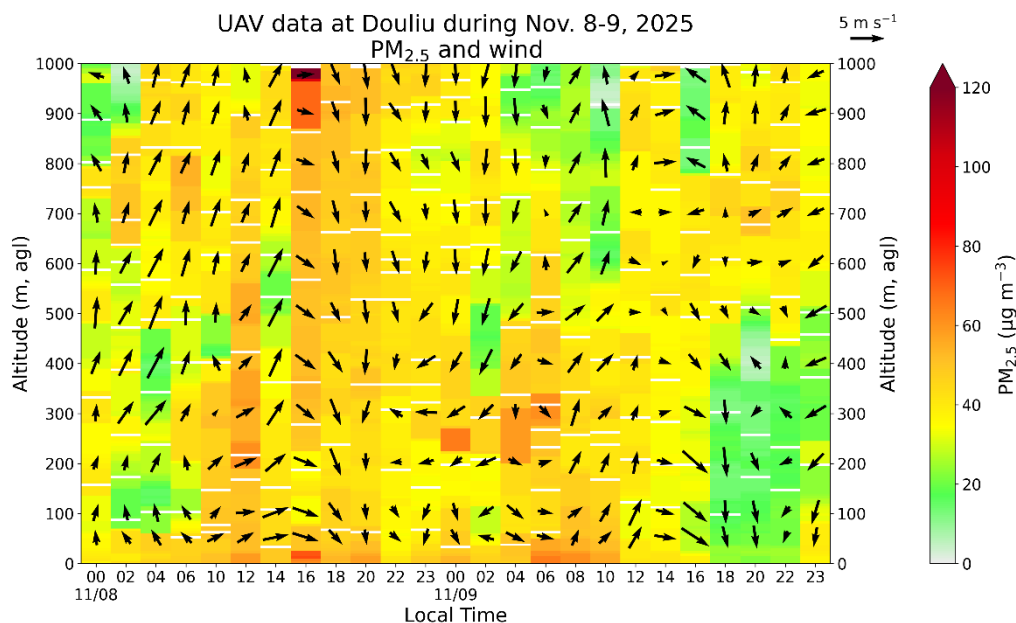


圖 5.21 IOP3 斗六無人機觀測 PM_{2.5} (µg/m³)高度分布疊加風標圖

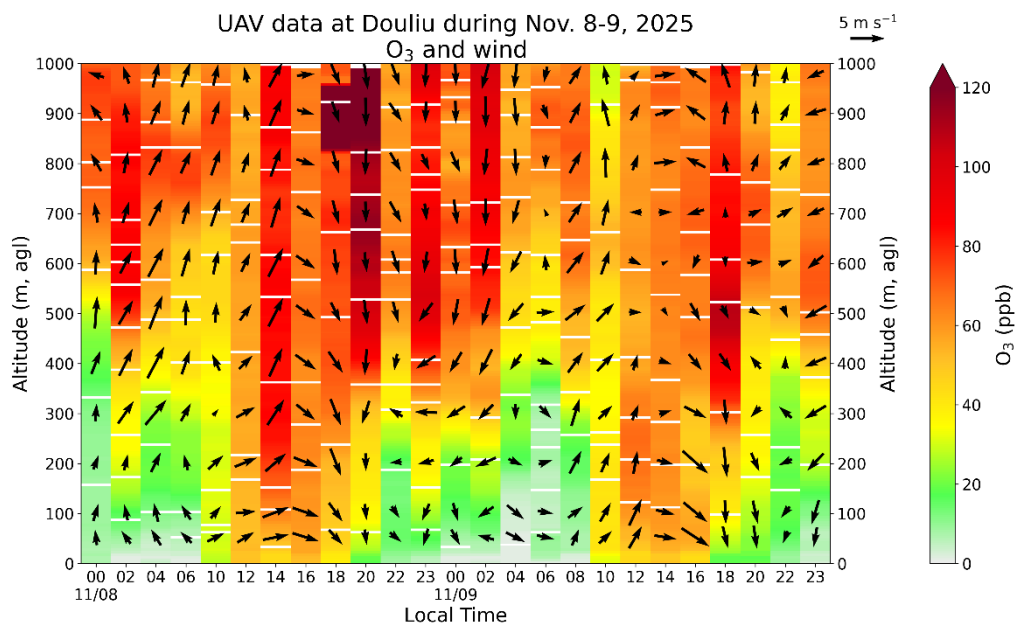


圖 5.22 IOP3 斗六無人機觀測 O₃ (ppb)高度分布疊加風標圖

5.3.2 VOCs 採樣與分析

一、垂直 VOCs 採樣

針對 IOP3 共 49 個採樣罐的分析結果，本計畫對所有量測的 VOCs 與 CFCs 進行統計分析，並將濃度較高的 20 個物種以及 CFCs 的變異性以盒鬚圖呈現在圖 5.23 中。多數物質在不同垂直高度之間的濃度差異並不顯著；相對而言，乙烷 (ethane)、乙烯 (ethylene)、丙烷 (propane) 及甲苯 (toluene) 等物種不僅具有較高的濃度，同時也呈現較大的變異幅度。這些高變異度的 VOCs 主要反映工業排放與交通廢氣等複合型來源特徵，涵蓋石化製程、溶劑使用以及車輛尾氣等排放途徑。此類高排放貢獻的物質在垂直方向上展現出明顯差異，顯示 VOCs 於大氣中的分布並非完全均勻，而是同時受到近地面排放強度、邊界層結構及短程輸送過程的共同影響。

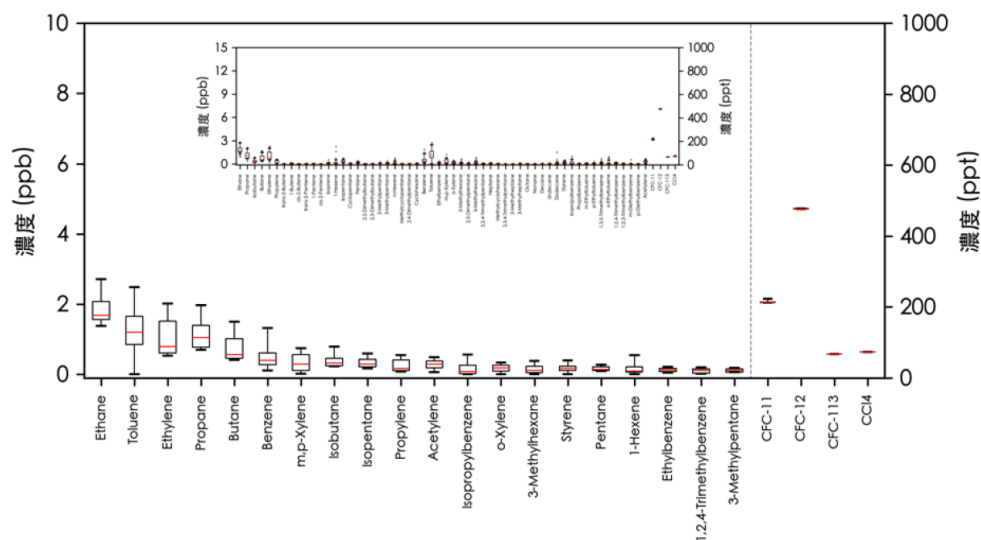


圖 5.23 IOP3 測站垂直濃度變化統計盒鬚圖

二、VOCs 排放與垂直特徵

圖 5.24 顯示 11 月 08 日 06-07 時 0 至 800 公尺高度之探空觀測結果。溫度剖面於約 100 公尺高度出現逆溫現象，即氣溫在該高度呈現局部回升，使低層大氣的垂直混合受到抑制，形成一個穩定結構的分隔層，顯示邊界層內存在明顯的熱力結構與污染物垂直分層特徵。此清晨逆溫通常由夜間地表冷卻造成，具有抑制污染物擴散的效果，容易導致污染物在逆溫下方累積。在化學物種的垂直分布方面，地面呈現高濃度的正己烷，顯示近地層存在明顯的烷類排放來源，可能與交通、燃油揮發或附近工業活動相關。與地面相比，在 100-200 公尺之間，苯與甲苯濃度則呈現顯著升高，形成一個中層的芳香族污染帶。此結構代表苯與甲苯的主要來源並非地面累積，而可能經由近地層抬升後在逆溫之下聚集，或由水平氣流輸送至此高度後被穩定層阻擋，因而形成濃度峰值。由於在地面與 100-200 公尺分別有不同類型的 VOCs 在垂直方向上呈現差異化分布，代表污染來源或傳輸機制並非一致。逆溫層的存在使得己烷、苯、甲苯這些來源與化學性質不同的 VOCs 在邊界層內被分隔於不同高度，形成清晨典型的污染分層現象。

圖 5.25 顯示 11 月 08 日 12-13 時 0 至 800 公尺高度之探空觀測結果。與前一時段相比，大氣的熱力結構已出現明顯變化。溫度隨高度穩定下降，先前的逆溫現象已消失，大氣層結趨於不穩定，垂直混合作用逐漸增強。濕度的垂直分布也較為均勻，同樣反映出此時段邊界層內的混合活動較前一時段活躍。在各化學物種的垂直分布上，約 300 公尺高度處出現了明顯的 VOCs 濃度偏高現象，烷類與苯、甲苯等芳香族化合物均在此高度出現峰值。這樣的分布特徵無法以地面排放向上擴散來解釋，推測是由上風處的污染源區透過該高度的風場，將污染氣團水平輸送至觀測站上空所造成，屬於外來污染的輸入而非本地排放的累積。綜合來看，此時段的邊界層雖已從清晨的穩定分層狀態轉變為混合較活躍的狀態，但 300 公尺處仍存在一個由水平輸送帶來的獨立污染層。這說明此時段

的 VOCs 垂直分布同時受到本地大氣混合與外來污染輸送兩種機制的影響，污染來源較前一時段更為複雜。

2025/11/8 斗六

- 06:23 800 m
- 06:31 500 m
- 06:36 300 m
- 06:41 200 m
- 06:44 100 m
- 06:00 0 m

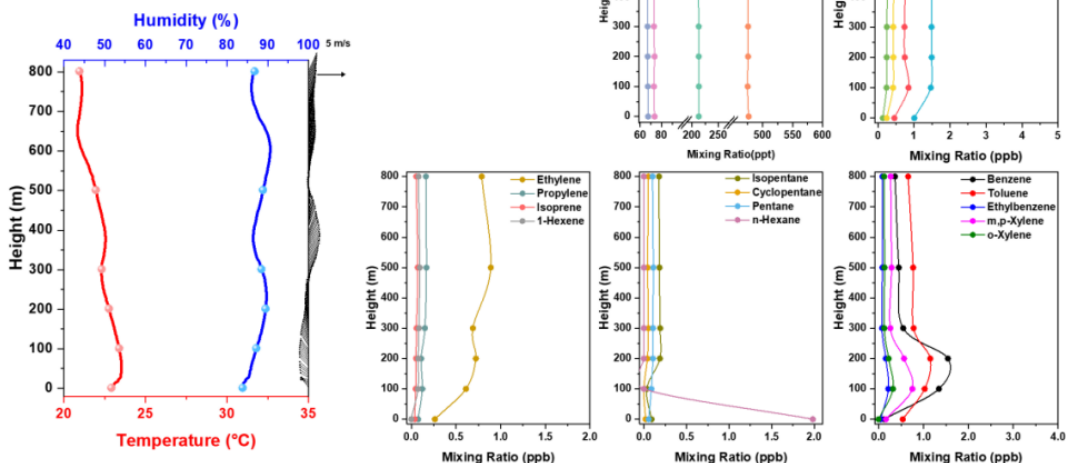


圖 5.24 斗六站無人機 VOCs 採樣剖面圖(06-07 時)

2025/11/9 斗六

- 12:18 800 m
- 12:28 500 m
- 12:36 300 m
- 12:44 200 m
- 12:50 100 m
- 12:00 0 m

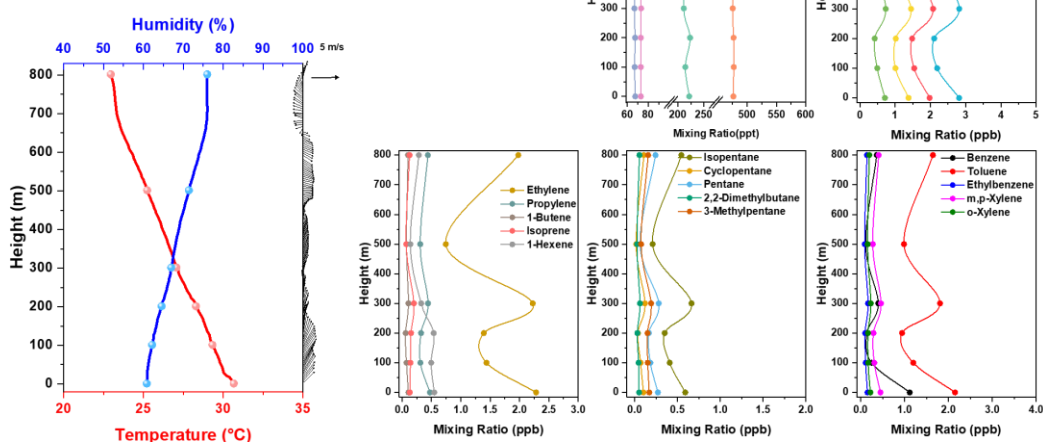


圖 5.25 斗六站無人機 VOCs 採樣剖面圖(12-13 時)

三、VOCs 地面與高空分析

圖 5.26 顯示斗六 IOP3 的空中樣本與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物 (tVOC) 濃度比較。與 IOP1 明顯不同的分布特徵，大量樣本聚集於 1:1 線附近，顯示 tNMHC 濃度隨高度變化較為均勻，垂直混合效率高。從圖中可見，地面濃度主要集中於 8 至 20 ppb 的範圍內，而各高度層（100 至 800 公尺）的高空濃度亦多落於相近區間，顯示地面與高空之間的濃度差異相當有限。

值得注意的是，在地面濃度較高（約 18 至 20 ppb）的情況下，部分 100 公尺層的數據點仍緊貼 1:1 線分布，顯示即使在較高污染負荷的時段，垂直混合仍能有效將污染物向上傳輸。相較之下，少數落於 1:1 線以下的數據點（尤其是 300 至 800 公尺的綠色與橙色點）主要出現在地面濃度約 10 至 13 ppb 的中等濃度範圍，高空濃度約為 6 至 9 ppb，顯示在部分時段仍存在輕微的地面累積現象，但整體濃度差距不大。僅有少數樣本落於 1:1 線以下或以上，表明強烈地面累積或孤立高層污染的影響均十分有限。與此一致，垂直混合條件佔主導地位（約 62.5 至 75%），而以地面為主導及高層事件的比例相對較低（分別一般不超過 37.5%與 12.5%）。

圖 5.27 IOP3 呈現出相對一致的垂直剖面特徵，各高度層的 tNMHC 平均濃度維持在相近的範圍內（約 10 至 13 ppb），顯示地面與高空層之間的濃度緊密耦合，垂直混合效率良好。與其他觀測期次相比，此時段的垂直濃度梯度明顯較小，反映邊界層內部的混合作用已足以將地面排放的污染物有效向上傳輸並重新分布於整個垂直柱中。批次間的變異程度適中，且隨高度變化較為均勻，顯示此時段的大氣狀態較為穩定，並不存在強烈的垂直分層或間歇性高層濃度增強事件。

此一特徵與臺西形成鮮明對比——臺西頻繁出現地面與高空濃度顯著差異的情況，而斗六 IOP3 則在所有高度層上均未觀察到系統性偏高或偏低的濃度特徵，任何單一高度皆無法代表明顯的污

染累積或稀釋區域。此種均勻混合的垂直結構，反映斗六 IOP3 期間邊界層發展較為完善，對流混合活動相對活躍，有利於污染物在垂直方向上的均質化分布。在此條件下，地面排放的新鮮污染物不易在近地層大量累積，亦無明顯的外來高層輸送事件介入，使得整體大氣組成在垂直方向上趨於一致。因此，此時段的地面觀測數據對整體邊界層的大氣組成具有較高的代表性，地面測量結果能較可靠地反映整個垂直柱的平均污染狀況。整體而言，斗六 IOP3 所呈現的 NMHC 垂直結構，主要體現了發展良好的混合邊界層對污染物垂直分布的主導作用。

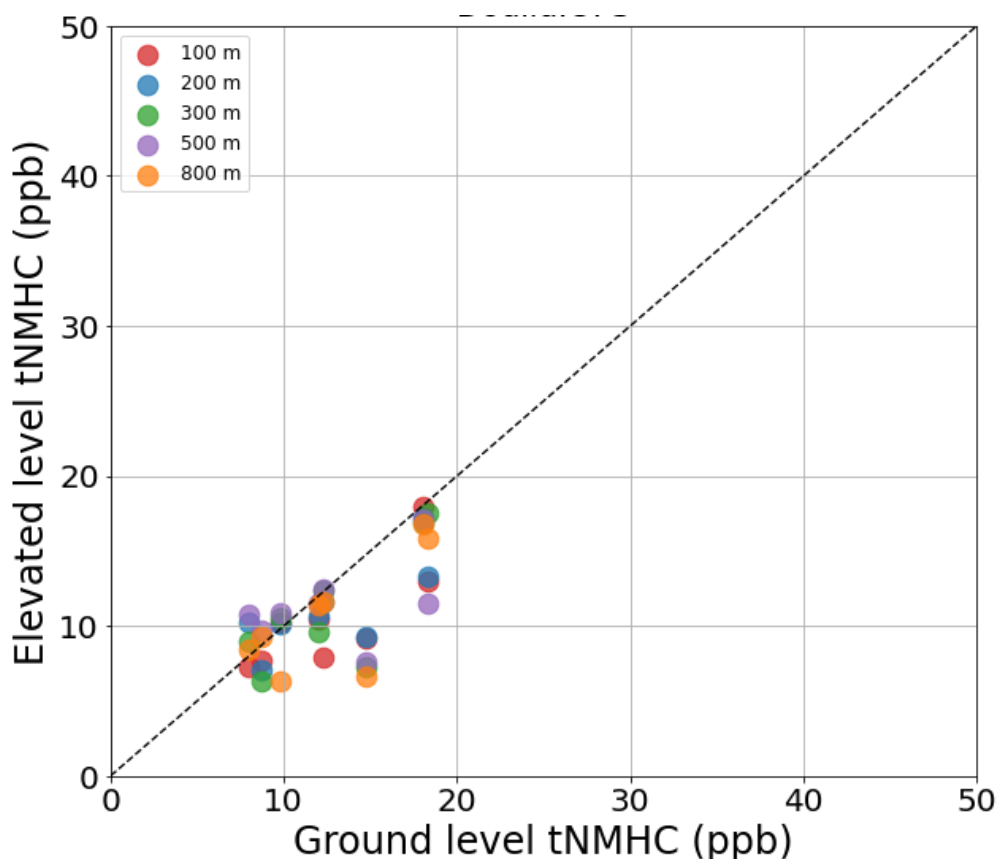


圖 5.26 IOP3 空中樣本與地面樣本之總非甲烷碳氫化合物 (tVOC) 濃度比較

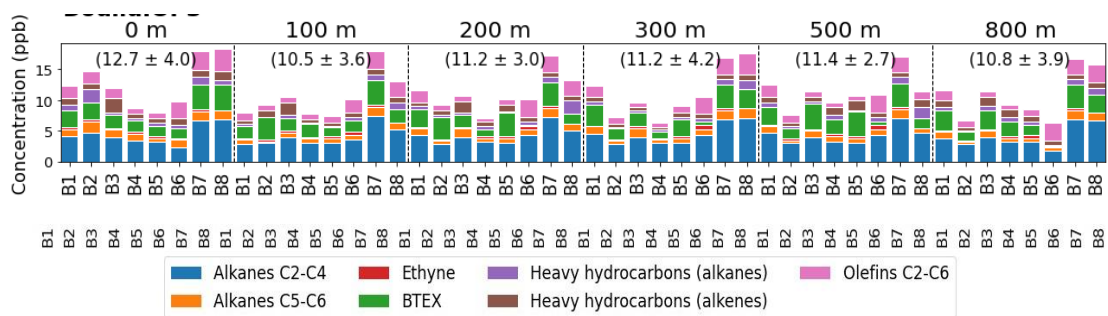


圖 5.27 不同高度與批次的 NMHC 濃度差異

第六章 地面氣膠及醛酮類採樣及分析

6.1 地面氣膠分析

採樣於 114 年 4 月 7 日上午 8 時開始，至 114 年 4 月 11 日上午 8 時結束，以日間 9 小時與夜間 15 小時分別採一組樣品，2 處一共 16 組樣品，本計畫於臺西國小採樣，而環境部團隊於斗六鎮西國小採樣，本計畫將採樣結果一併比較，分別代表雲林內陸與沿海地區，1 處日夜樣品各為 4 組，2 處日夜樣品共 16 組，較原計畫規劃的共 8 組樣品數量增加一倍，以更完整解析兩處大氣環境 PM_{2.5} 氣膠濃度與組成變化。

一、陰陽離子及含碳物質

雲林內陸地區鎮西國小站 PM_{2.5} 陰陽離子組成，日夜間濃度範圍、日夜間濃度平均及日平均濃度如表 6.1 及圖 6.1 所示，鎮西國小 Na⁺ 之日間濃度介於 1.10-2.09 μg/m³，平均為 1.60±0.41 μg/m³，夜間濃度介於 0.73-1.16 μg/m³，平均為 0.86±0.19 μg/m³，全日濃度約為 1.09±0.10 μg/m³。NH₄⁺ 之日間濃度介於 1.34-1.96 μg/m³，平均為 1.78±0.29 μg/m³，夜間濃度介於 3.03-5.97 μg/m³，平均為 4.17±1.31 μg/m³，全日濃度約為 3.52±1.09 μg/m³。K⁺ 之日間濃度介於 0.28-0.79 μg/m³，平均為 0.52±0.21 μg/m³，夜間濃度介於 0.43-0.60 μg/m³，平均為 0.52±0.07 μg/m³，全日濃度約為 0.53±0.08 μg/m³。Mg²⁺ 之日間濃度介於 0.26-0.47 μg/m³，平均為 0.37±0.09 μg/m³，夜間濃度介於 0.22-0.28 μg/m³，平均為 0.24±0.02 μg/m³，全日濃度約為 0.28±0.02 μg/m³。Ca²⁺ 之日間濃度介於 1.04-1.68 μg/m³，平均為 1.42±0.28 μg/m³，夜間濃度介於 0.67-1.35 μg/m³，平均為 0.96±0.28 μg/m³，全日濃度約為 1.08±0.22 μg/m³。Cl⁻ 之日間濃度介於 0.67-1.48 μg/m³，平均為 1.13±0.38 μg/m³，夜間濃度介於 0.51-1.00 μg/m³，平均為 0.74±0.19 μg/m³，全日濃度約為 0.86±0.19 μg/m³。NO₃⁻ 之日間濃度介於 0.58-1.83 μg/m³，平均為 1.20±0.57 μg/m³，夜間濃度介於 0.59-1.25 μg/m³，平均為 0.97±0.28 μg/m³，全日濃度約為

$1.04 \pm 0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 SO_4^{2-} 之日間濃度介於 $0.96\text{-}1.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.15 \pm 0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $2.18\text{-}7.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $4.68 \pm 2.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $3.71 \pm 1.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Oxalate 之日間濃度介於 $0.04\text{-}0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.06 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.15\text{-}0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.26 \pm 0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.20 \pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。myo-inositol 之日間濃度介於 $0.82\text{-}1.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.15 \pm 0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.62\text{-}0.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.78 \pm 0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.89 \pm 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。Levoglucosan 之日間濃度介於 $\text{ND}\text{-}0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.04 \pm 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.04\text{-}0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.10 \pm 0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.08 \pm 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

OC 之日間濃度介於 $2.60\text{-}3.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $3.07 \pm 0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $2.34\text{-}6.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $4.30 \pm 1.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $4.67 \pm 2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。EC 之日間濃度介於 $1.51\text{-}2.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.95 \pm 0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $1.71\text{-}4.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $3.13 \pm 1.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $2.86 \pm 1.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

在鎮西國小日間主要以 OC 及 NH_4^+ 為微粒中主要物種，夜間則是 SO_4^{2-} 、OC 及 NH_4^+ 為微粒化學組成的主要物種，尤其是 SO_4^{2-} 在夜間平均濃度為日間的 4.07 倍， NH_4^+ 在夜間平均濃度為日間的 2.34 倍，顯示雲林內陸在夜間有明顯的光化產物累積。雖然在雲林的內陸地區，但海陸風的影響仍然存在，在白天的海鹽組成 ($\text{Na}^+\text{+Cl}^-$) 濃度高於夜間。代表真菌微生物的代謝排放的生物排放物種 myo-inositol，其濃度在白天高於夜間，顯示白天的環境中因氣溫較高，有陽光的照射，環境微生物所釋放的生物性醣醇物種較夜間活躍。在此區域有微量的 levoglucosan 濃度，顯示有少量但不明顯的生質燃燒貢獻。

雲林沿海地區臺西國小站 $\text{PM}_{2.5}$ 陰陽離子組成日夜間濃度範圍、日夜間濃度平均及日平均濃度如表 6.2 及圖 6.2 所示，臺西

國小站 Na^+ 之日間濃度介於 $1.45\text{-}2.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $2.03\pm 0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.69\text{-}1.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.91\pm 0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $1.31\pm 0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 NH_4^+ 之日間濃度介於 $1.46\text{-}2.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.83\pm 0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $3.58\text{-}5.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $4.40\pm 0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $3.47\pm 0.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 K^+ 之日間濃度介於 $0.44\text{-}0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.67\pm 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.33\text{-}0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.43\pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.43\pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 Mg^{2+} 之日間濃度介於 $0.26\text{-}0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.32\pm 0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.16\text{-}0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.21\pm 0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.25\pm 0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 Ca^{2+} 之日間濃度介於 $1.01\text{-}1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.10\pm 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.57\text{-}1.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.87\pm 0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.95\pm 0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 Cl^- 之日間濃度介於 $0.42\text{-}2.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.21\pm 0.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.14\text{-}0.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.42\pm 0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.70\pm 0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 NO_3^- 之日間濃度介於 $0.75\text{-}1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.01\pm 0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $1.11\text{-}1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.33\pm 0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $1.21\pm 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 SO_4^{2-} 之日間濃度介於 $0.69\text{-}1.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.91\pm 0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $2.70\text{-}9.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $5.88\pm 2.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $4.10\pm 1.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Oxalate 之日間濃度介於 $0.04\text{-}0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.08\pm 0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.10\text{-}0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.26\pm 0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.20\pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。myo-Inositol 之日間濃度介於 $0.92\text{-}2.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.64\pm 0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.93\text{-}1.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $1.03\pm 0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $1.25\pm 0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。Levogluconan 之日間濃度介於 $\text{ND}\text{-}0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.009\pm 0.009 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $0.10\text{-}0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $0.047\pm 0.029 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $0.009\pm 0.019 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

OC 之日間濃度介於 $3.66\text{-}5.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $4.20\pm 0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $5.02\text{-}9.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $6.73\pm 2.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度

約為 $6.62 \pm 4.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。EC 之日間濃度介於 $1.85\text{-}2.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $2.48 \pm 0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，夜間濃度介於 $2.81\text{-}5.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為 $3.61 \pm 1.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全日濃度約為 $3.52 \pm 2.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

在雲林海線的臺西國小日間主要以 OC 及 EC 為微粒中主要物種，夜間則是 OC、 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 為微粒化學組成的主要物種，與雲林內陸的斗六相似，臺西的 $\text{PM}_{2.5}$ SO_4^{2-} 在夜間平均濃度為日間的 6.46 倍， $\text{PM}_{2.5}$ NH_4^+ 在夜間平均濃度為日間的 2.40 倍，顯示雲林沿海在夜間亦有明顯的光化產物累積，甚至以沿海 SO_4^{2-} 物種濃度更高於內陸。此外，雲林的沿海地區，海陸風的影響明顯，在白天的海鹽組成 ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) 濃度明顯高於夜間，而代表真菌微生物的代謝排放的生物排放物種 myo-Inositol，與內陸的鎮西國小一致，其濃度在白天高於夜間。顯示海線白天的環境中因氣溫較高，有陽光的照射，環境微生物所釋放的生物性醣醇物種較夜間活躍。在此區域有微量的 levoglucosan 濃度，顯示有少量但不明顯的生質燃燒貢獻。

表 6.1 雲林內陸地區鎮西國小 PM_{2.5} 氣膠陰陽離子組成

斗六 PM _{2.5} 組成	日間(n=4)		夜間(n=4)		全日平均 ±標準差
	範圍	平均 ±標準差	範圍	平均 ±標準差	
Na ⁺	1.10-2.09	1.60±0.41	0.73-1.16	0.86±0.19	1.09±0.10
NH ₄ ⁺	1.34-1.96	1.78±0.29	3.03-5.97	4.17±1.31	3.52±1.09
K ⁺	0.28-0.79	0.52±0.21	0.43-0.60	0.52±0.07	0.53±0.08
Mg ²⁺	0.26-0.47	0.37±0.09	0.22-0.28	0.24±0.02	0.28±0.02
Ca ²⁺	1.04-1.68	1.42±0.28	0.67-1.35	0.96±0.28	1.08±0.22
Cl ⁻	0.67-1.48	1.13±0.38	0.51-1.00	0.74±0.19	0.86±0.19
NO ₃ ⁻	0.58-1.83	1.20±0.57	0.59-1.25	0.97±0.28	1.04±0.31
SO ₄ ²⁻	0.96-1.62	1.15±0.31	2.18-7.44	4.68±2.27	3.71±1.90
Oxalate	0.04-0.08	0.06±0.02	0.15-0.43	0.26±0.12	0.20±0.11
<i>myo</i> -Inositol	0.82-1.57	1.15±0.31	0.62-0.97	0.78±0.14	0.89±0.15
Levogluconan	ND*-0.10	0.04±0.04	0.04-0.15	0.10±0.05	0.08±0.04
OC	2.60-3.44	3.07±0.42	2.34-6.74	4.30±1.89	4.67±2.92
EC	1.51-2.53	1.95±0.50	1.71-4.23	3.13±1.16	2.86±1.92

備註：*MDL 值為 0.001 µg/m³；單位為µg/m³

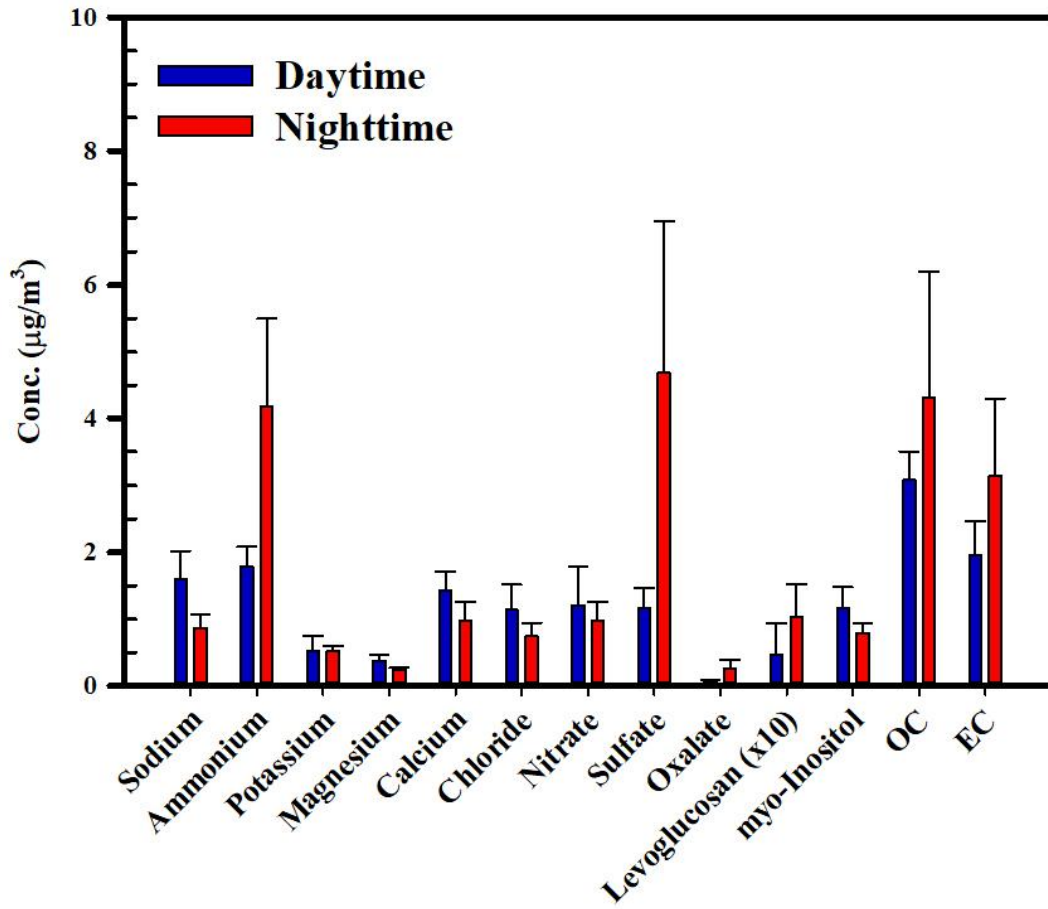
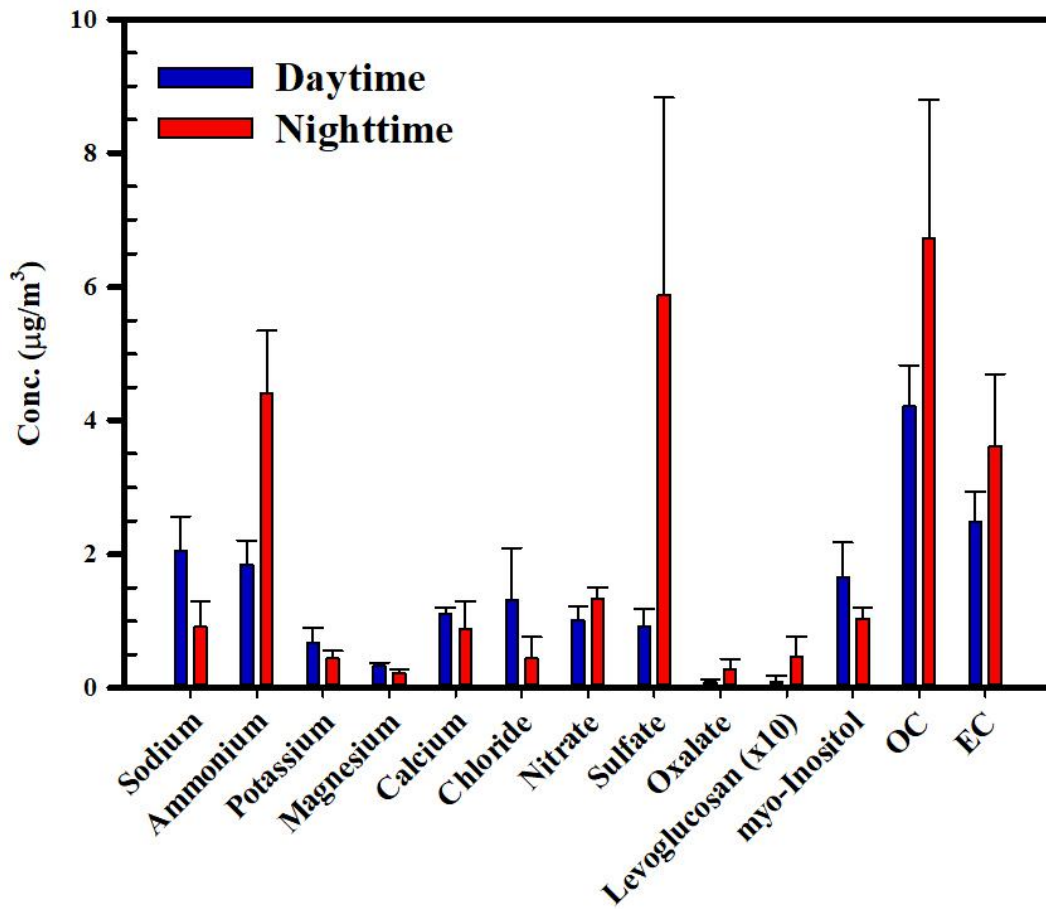


圖 6.1 雲林內陸地區鎮西國小 PM_{2.5} 氣膠陰陽離子組成

表 6.2 雲林沿海地區臺西國小 PM_{2.5} 氣膠陰陽離子組成

臺西 PM _{2.5} 組成	日間(n=4)		夜間(n=4)		全日平均 ±標準差
	範圍	平均 ±標準差	範圍	平均 ±標準差	
Na ⁺	1.45-2.71	2.03±0.52	0.69-1.47	0.91±0.37	1.31±0.31
NH ₄ ⁺	1.46-2.24	1.83±0.36	3.58-5.65	4.40±0.94	3.47±0.67
K ⁺	0.44-0.88	0.67±0.22	0.33-0.57	0.43±0.11	0.43±0.11
Mg ²⁺	0.26-0.38	0.32±0.05	0.16-0.30	0.21±0.06	0.25±0.05
Ca ²⁺	1.01-1.21	1.10±0.09	0.57-1.48	0.87±0.40	0.95±0.28
Cl ⁻	0.42-2.30	1.21±0.80	0.14-0.90	0.42±0.34	0.70±0.28
NO ₃ ⁻	0.75-1.18	1.01±0.20	1.11-1.50	1.33±0.16	1.21±0.15
SO ₄ ²⁻	0.69-1.27	0.91±0.26	2.70-9.74	5.88±2.94	4.10±1.93
Oxalate	0.04-0.13	0.08±0.03	0.10-0.45	0.26±0.12	0.20±0.11
<i>myo</i> -Inositol	0.92-2.16	1.64±0.52	0.93-1.28	1.03±0.16	1.25±0.19
Levogluconan	ND*-0.01	0.009±0.009	0.10-0.08	0.047±0.029	0.009±0.019
OC	3.66-5.00	4.20±0.62	5.02-9.59	6.73±2.07	6.62±4.19
EC	1.85-2.83	2.48±0.46	2.81-5.19	3.61±1.07	3.52±2.36

備註：*MDL 值為 0.001 µg/m³；單位為µg/m³

圖 6.2 雲林沿海地區臺西國小 PM_{2.5} 氣膠陰陽離子組成

二、金屬元素

PM_{2.5} 氣膠金屬元素組成物種日夜濃度如圖 6.3 至圖 6.4 及表 6.3 至表 6.4 所示，分析結果顯示，內陸及沿海皆以地殼元素為主，尤其是鈣(Ca)、鎂(Mg)、鋁(Al)與鐵(Fe)。

雲林內陸地區的鎮西國小日間金屬成份平均濃度由高至低依序為：Ca ($1.91 \pm 0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mg ($0.80 \pm 0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、K ($0.79 \pm 0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Fe ($0.65 \pm 0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Al ($0.47 \pm 0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Pb ($0.20 \pm 0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Zn ($0.22 \pm 0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ti ($0.19 \pm 0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cu ($0.16 \pm 0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、V ($0.06 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mn ($0.06 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ni ($0.04 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cr ($0.03 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cd ($0.02 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；夜間金屬成份平均濃度由高至低依序為：Ca ($2.20 \pm 0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mg ($1.62 \pm 0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、K ($1.07 \pm 0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Fe ($0.90 \pm 0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Al ($0.54 \pm 0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Zn ($0.60 \pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ti ($0.22 \pm 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cu ($0.20 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Pb ($0.17 \pm 0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、V ($0.07 \pm 0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mn ($0.07 \pm 0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ni ($0.05 \pm 0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cr ($0.05 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cd ($0.02 \pm 0.0009 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。鎮西國小站點夜間 Ca 濃度上升至 $2.20 \pm 0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，Mg 亦增加至 $1.62 \pm 0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，反映夜間大氣穩定度較高擴散較日間為差，導致氣膠污染物累積。相似的趨勢也出現在位於雲林海線的臺西國小。

雲林海線的臺西國小日間金屬平均濃度依序為：Ca ($1.48 \pm 0.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mg ($0.99 \pm 0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、K ($0.98 \pm 0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Al ($0.62 \pm 0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Fe ($0.37 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ti ($0.28 \pm 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cu ($0.15 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Zn ($0.09 \pm 0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Pb ($0.08 \pm 0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、V ($0.06 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mn ($0.05 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ni ($0.02 \pm 0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cd ($0.02 \pm 0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cr ($0.01 \pm 0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；夜間金屬平均濃度依序為：Ca ($2.16 \pm 0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mg ($1.49 \pm 0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、K ($1.17 \pm 0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Fe ($0.67 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Al ($0.67 \pm 0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ti ($0.26 \pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Pb ($0.24 \pm 0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cu ($0.16 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Zn ($0.06 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、V

($0.06\pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Mn ($0.06\pm 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Ni ($0.02\pm 0.003 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cd ($0.02\pm 0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、Cr ($0.01\pm 0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，其中夜間 Ca 略高於日間，而 Mg 與 K 的上升幅度亦略為顯著，推測與日間海風轉夜間陸風之再循環效應及海鹽氣膠傳輸有關。

IOP1 的雲林內陸與沿海地區，春季皆呈現夜間金屬濃度高於日間的現象。無論日夜，元素 Ca 總是 PM_{2.5} 金屬組成最多的物種，顯示道路揚塵日夜持續存在。這種日夜變化主要與邊界層高度、氣象穩定度及人為活動頻頻率有關。夜間因輻射冷卻作用，邊界層高度顯著下降，大氣垂直擴散受限，使污染物容易累積，並隨翌日混合作用再度擴散稀釋。

表 6.3 雲林內陸地區鎮西國小 PM_{2.5} 金屬成分

斗六 PM _{2.5} 金屬成分	日間(n=4)	夜間(n=4)	日夜比較趨勢
	平均濃度 ±標準差	平均濃度 ±標準差	
Ca	1.91±0.29	2.20±0.61	夜間較高
Mg	0.80±0.41	1.62±0.63	夜間較高
K	0.79±0.45	1.07±0.30	夜間較高
Fe	0.65±0.63	0.90±0.39	夜間較高
Al	0.47±0.23	0.54±0.14	夜間較高
Pb	0.20±0.03	0.17±0.08	日間較高
Zn	0.22±0.16	0.60±0.11	夜間較高
Ti	0.19±0.08	0.22±0.04	夜間較高
Cu	0.16±0.06	0.20±0.02	夜間較高
V	0.06±0.02	0.07±0.002	夜間較高
Mn	0.06±0.02	0.07±0.004	夜間較高
Ni	0.04±0.02	.05±0.006	夜間較高
Cr	0.03±0.01	0.05±0.02	夜間較高
Cd	0.02±0.01	0.02±0.0009	相近

備註：單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

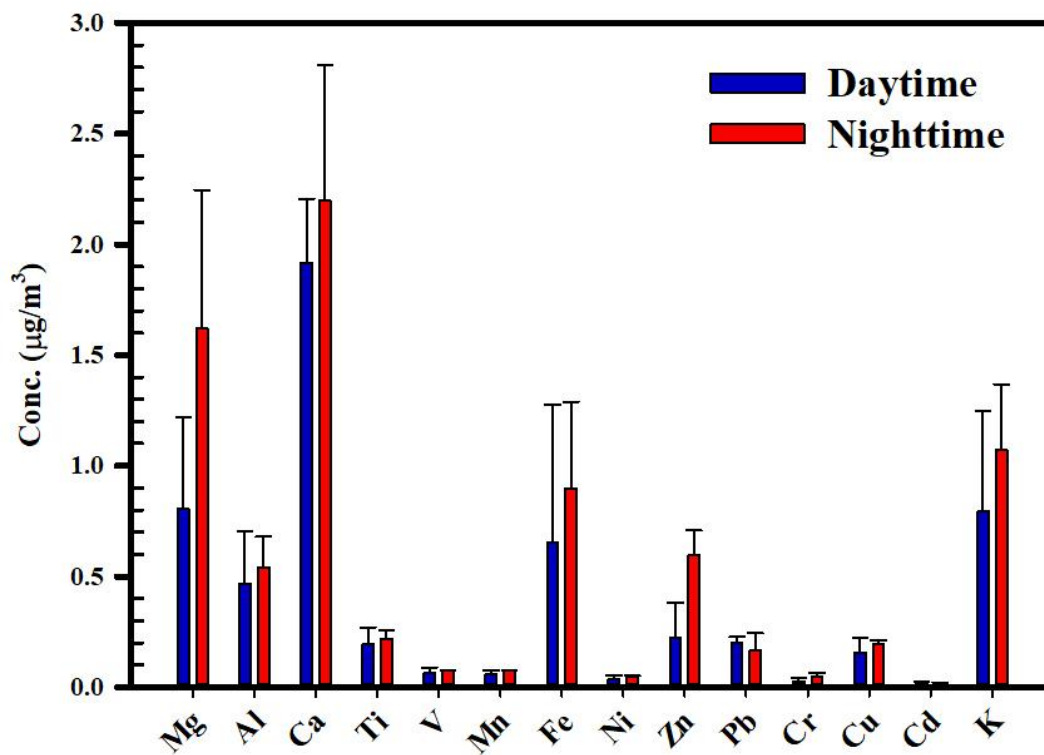


圖 6.3 雲林內陸地區鎮西國小 PM_{2.5} 金屬元素組成

表 6.4 雲林沿海地區臺西國小 PM_{2.5} 金屬成分

斗六 PM _{2.5} 金屬成分	日間(n=4)	夜間(n=4)	日夜比較趨勢
	平均濃度 ±標準差	平均濃度 ±標準差	
Ca	1.48±0.49	2.16±0.64	夜間較高
Mg	0.99±0.14	1.49±0.62	夜間較高
K	0.98±0.40	1.17±0.33	夜間較高
Fe	0.62±0.19	0.67±0.19	夜間較高
Al	0.37±0.18	0.67±0.18	夜間較高
Pb	0.28±0.09	0.26±0.11	日間較高
Zn	0.15±0.02	0.16±0.02	夜間較高
Ti	0.09±0.06	0.06±0.01	日間較高
Cu	0.08±0.07	0.24±0.11	夜間較高
V	0.06±0.01	0.06±0.01	相近
Mn	0.05±0.01	0.06±0.02	夜間較高
Ni	0.02±0.004	0.02±0.003	相近
Cr	0.02±0.001	0.02±0.001	相近
Cd	0.01±0.005	0.01±0.001	相近

備註：單位為μg/m³

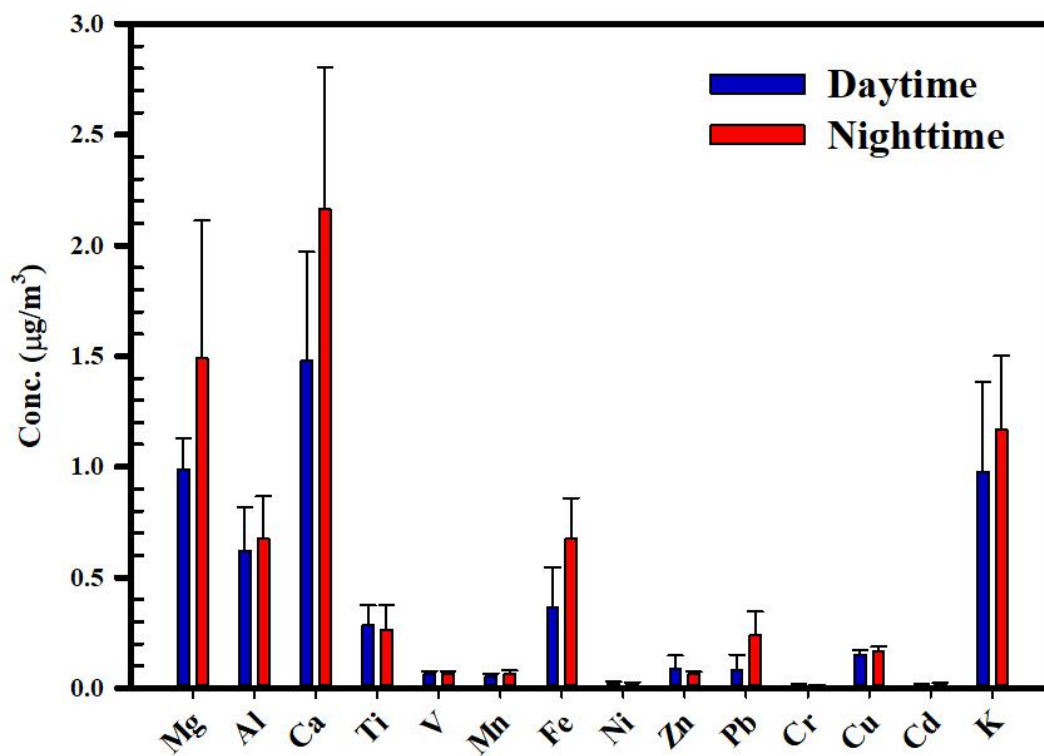


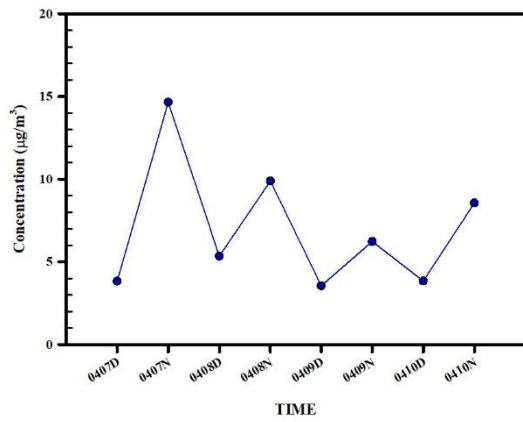
圖 6.4 雲林沿海地區臺西國小 PM_{2.5} 金屬元素組成

三、二次光化產物於 IOP 期間及夏季背景差異

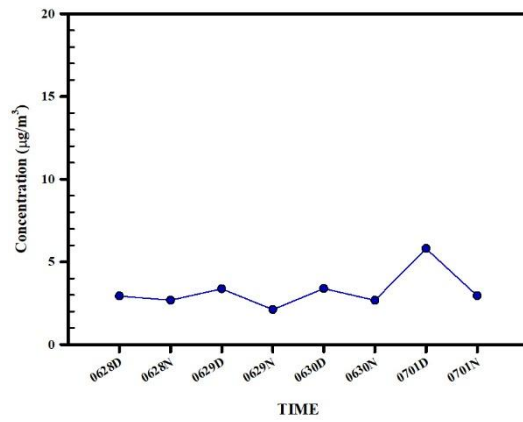
鎮西國小及臺西國小 $PM_{2.5}$ NH_4^+ 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 合計的二次光化產物逐日日夜濃度變化如圖 6.5 至圖 6.6 所示，在 IOP1 期間不論鎮西國小或臺西國小之光化產物濃度主要以夜間高於日間為主，因在 IOP1 期間夜間大氣擴散不良，導致光化產物在夜晚產生累積現象，導致夜間濃度高於日間。而在夏季背景值期間不論鎮西國小或臺西國小之光化產物濃度主要以日間高於夜間為主，無明顯光化產物在夜晚累積的現象，顯現春季擴散條件較差與夏季大氣擴散良好所造成的二次氣膠組成濃度的季節性差異，內陸 $PM_{2.5}$ 氣膠的光化產物濃度高於沿海地區，顯現較具都市型態且內陸地區的斗六有較高的光化產物生成累積的潛勢，且內陸及沿海地區均在夏季的大氣氣膠光化產物濃度較春季為低。

鎮西國小及臺西國小 IOP 期間 $PM_{2.5}$ 海鹽($Na^+ + Cl^-$)之逐日日夜濃度變化如圖 6.7 至圖 6.8 所示，在 IOP 期間不論鎮西國小或臺西國小之海鹽濃度主要以日間高於夜間為主，在 IOP1 期間或夏季背景值皆具有明顯海陸風影響之現象，且季節的海鹽濃度差異較小。

鎮西國小及臺西國小 IOP 期間 $PM_{2.5}$ 塵土($Ca + Mg$)之逐日日夜濃度變化如圖 6.9 至圖 6.10 所示，在鎮西國小 IOP1 之 2025 年 4 月 7 日至 8 日及 4 月 10 日主要以夜間塵土濃度較日間塵土濃度高，而 4 月 9 日則有相反之日夜趨勢。而在 2025 年 6 月 28 日至 6 月 30 日夏季背景值主要以夜間塵土濃度較日間塵土濃度高，而 7 月 1 日則有相反之日夜趨勢。在臺西國小不論是 IOP1 或夏季背景值主要是以夜間塵土濃度較日間塵土濃度高。 $PM_{2.5}$ 塵土濃度以內陸的鎮西國小較沿海的臺西國小為高，而春季擴散條件較差與夏季大氣擴散良好所造成的塵土組成濃度的季節性差異，內陸及沿海地區均在夏季大氣氣膠存在塵土濃度較春季為低。

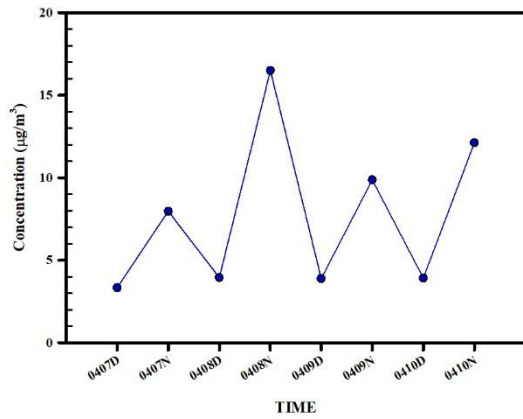


(a) IOP1 期間

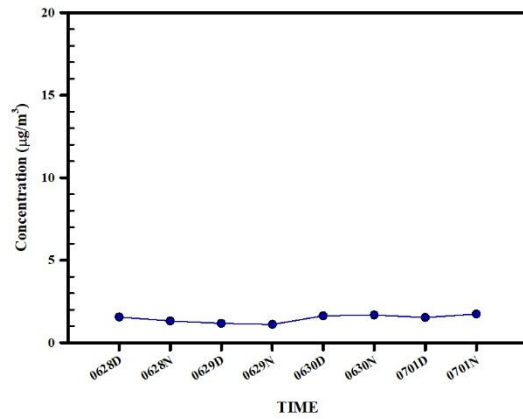


(b) 夏季背景

圖 6.5 鎮西國小 PM_{2.5} 二次光化產物合計之逐日日夜濃度變化

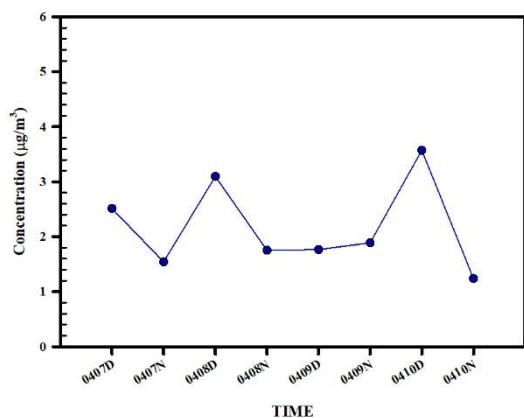


(a) IOP1 期間

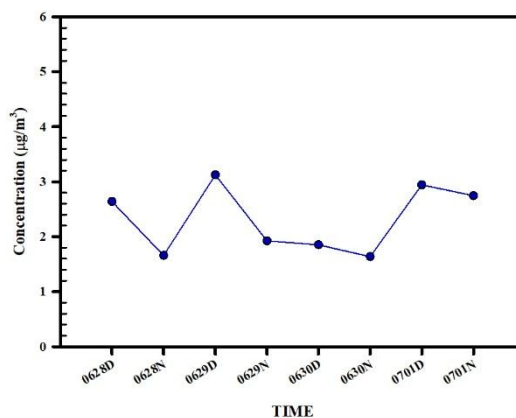


(b) 夏季背景

圖 6.6 臺西國小 PM_{2.5} 二次光化產物合計之逐日日夜濃度變化

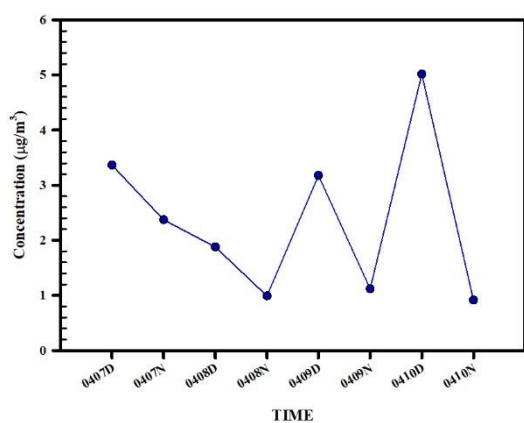


(a) IOP1 期間

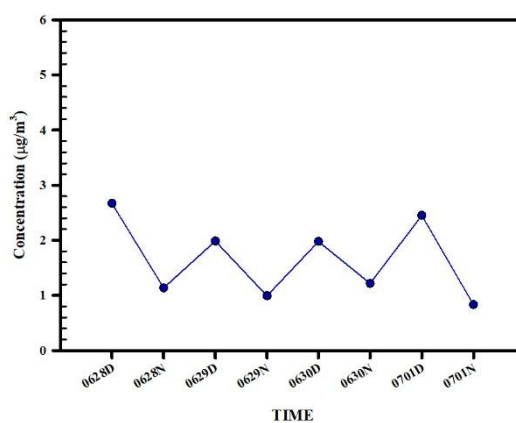


(b) 夏季背景

圖 6.7 鎮西國小 PM_{2.5} 海鹽(Na⁺+Cl⁻)之逐日日夜濃度變化

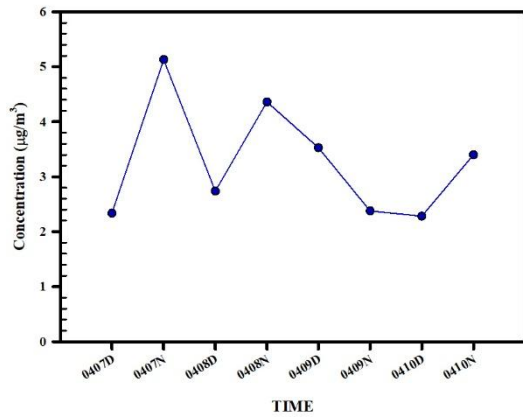


(a) IOP1 期間

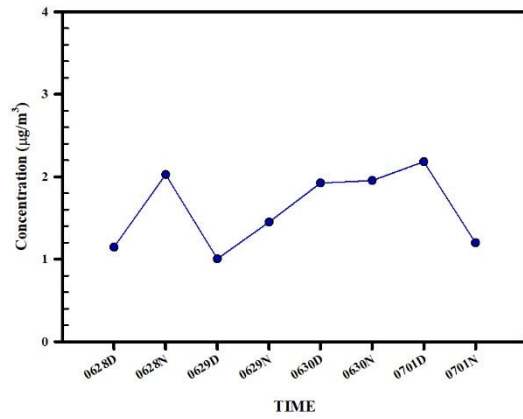


(b) 夏季背景

圖 6.8 臺西國小 PM_{2.5} 海鹽(Na⁺+Cl⁻)之逐日日夜濃度變化

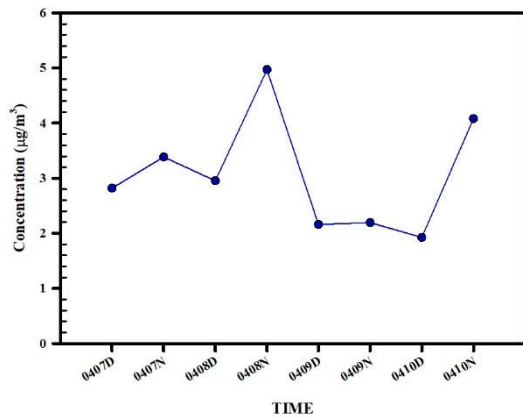


(a) IOP1 期間

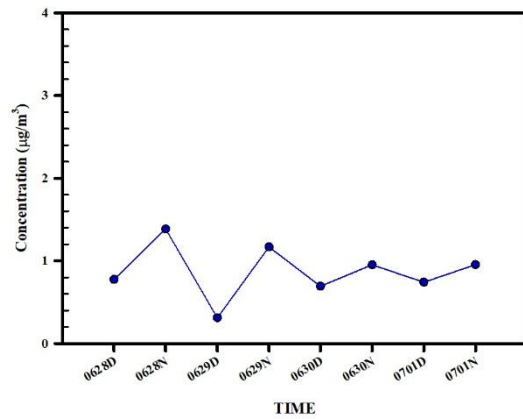


(b) 夏季背景

圖 6.9 鎮西國小 PM_{2.5} 塵土(Ca+Mg)之逐日日夜濃度變化



(a) IOP1 期間



(b) 夏季背景

圖 6.10 臺西國小 PM_{2.5} 塵土(Ca+Mg)之逐日日夜濃度變化

6.2 地面醛酮類採樣分析

本次醛酮類採樣配合 PM_{2.5} 微粒陰陽離子、垂直觀測有機物採樣時間，第一次密集觀測(IOP-1)時間為 114 年 4/8-4/9 兩天，採樣時間為 08:00-16:00，每兩小時採集一個樣品，兩天共計 8 個樣品。針對空白樣品測試，單次 IOP 會準備一個旅運樣品(Trip blank)，即吸附匣在未拆封裝況下攜帶至現場，再與其他採樣樣品冷藏攜回實驗室進行空白分析。為了避免吸附匣與臭氧去除器拆封後發現異樣，額外準備兩組採樣裝置作為備用。

本次醛酮類採樣地點為雲林縣臺西鄉臺西國民小學。採樣點位與實際採樣裝置圖如圖 6.11 所示。另環境部計畫於斗六市鎮西國小亦同步執行醛酮類採樣作業，故本計畫將鎮西國小分析結果一併納入說明。

雲林縣台西國小：
2-hrs採樣，08:00-16:00(8小時)，共8組樣品



2025/04/09 雲林縣台西國小 12:00-14:00 採樣裝置圖

圖 6.11 實際採樣裝置圖

一、 甲醛

圖 6.12 為 IOP-1 (4/8、4/9)台西國小甲醛逐時濃度圖，4/8 之甲醛濃度在 08:00 起開始緩慢上升，12:00-14:00 時最高值(1.0 ppbv)，下午後濃度為 N.D.，由於中午時間為光化學反應最旺盛時期，顯示臺西站之甲醛為二次光化所產生。4/9 之甲醛濃度與前一日不同，08:00-12:00 濃度值持平，12:00 起緩慢下降，濃度隨混合層高度升高而降低，顯示測站可能受微量排放甲醛影響，而隨著中午混合層高度升高而降低，兩日呈現不同型態。

圖 6.13 為 OP-1 (4/8、4/9)鎮西國小甲醛逐時濃度圖，4/8 之甲醛濃度均 < 0.5 ppbv，08:00-10:00 時測得甲醛當日最高值 0.46 ppbv，濃度隨時間遞減，顯示該地可能有微量一次排放，濃度隨混合層高度升高而降低；4/9 之甲醛濃度為 0.47-0.59 ppbv，亦顯示受微量一次排放甲醛影響，隨混合層高度升高而降低，兩日之濃度值與趨勢相近。

二、 乙醛

圖 6.14 為 IOP-1 (4/8、4/9)台西國小乙醛逐時濃度圖，4/8、4/9 之乙醛濃度均 < 0.5 ppbv，部分濃度值為 N.D.，兩日之濃度值相近且趨勢相似，中午時間濃度隨混合層高度升高而降低，當地可能具有乙醛微量排放，或碳氫化合物氧化後之微量濃度。

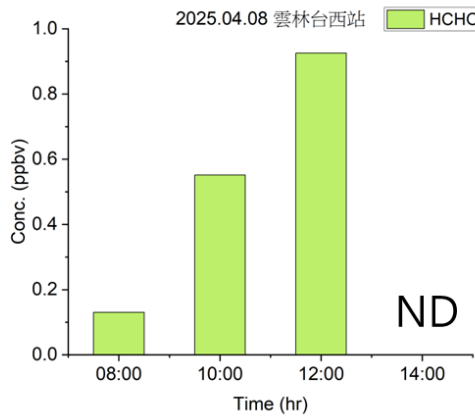
圖 6.15 為 IOP-1 (4/8、4/9)鎮西國小乙醛逐時濃度圖，4/8、4/9 之乙醛濃度均 < 0.3 ppbv，兩日之濃度分布分別為 4/8 0.14-0.25 ppbv、4/9 0.11-0.25 ppbv，兩日之濃度值相近且趨勢一致，與前述甲醛之高值原因相似，濃度隨混合層高度升高而降低可能，且當地可能具有乙醛微量且持續性排放，但濃度均非常低。

三、 其他醛類

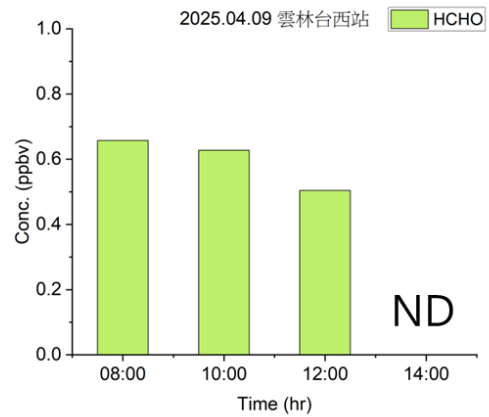
除了甲醛與乙醛外，其餘醛類如丙烯醛、正丁醛均存在低濃度排放。圖 6.16 為 IOP-1 (4/8、4/9)台西國小丙烯醛逐時濃度圖。4/8

丙烯醛濃度在下午 14:00-16:00 達到最高值，濃度為 2.5 ppbv；4/9 之四個濃度皆為~1.0 ppbv。圖 6.17 為 IOP-1 (4/8、4/9)鎮西國小丙烯醛逐時濃度圖，丙烯醛濃度範圍為 4/8 0.25-0.79 ppbv、4/9 0.83-1.02 ppbv。

圖 6.18 為 IOP-1 (4/8、4/9)台西國小正丁醛逐時濃度圖，4/8 正丁醛濃度在中午 12:00-14:00 達到最高值；4/9 四個濃度皆為~1.0 ppbv，推測可能具有微量直接排放。

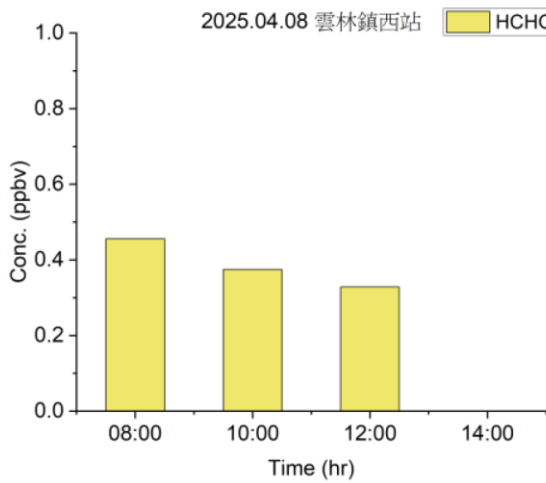


4 月 8 日

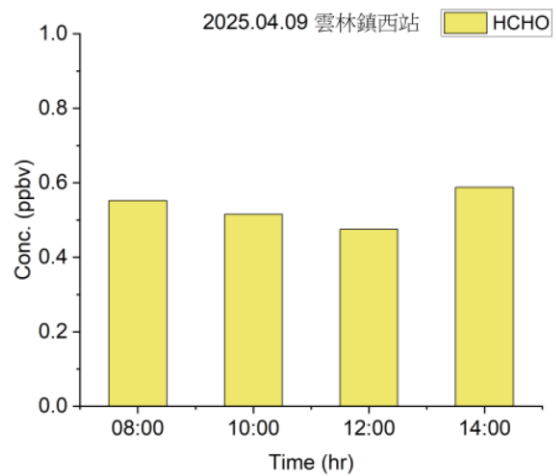


4 月 9 日

圖 6.12 台西國小甲醛濃度圖

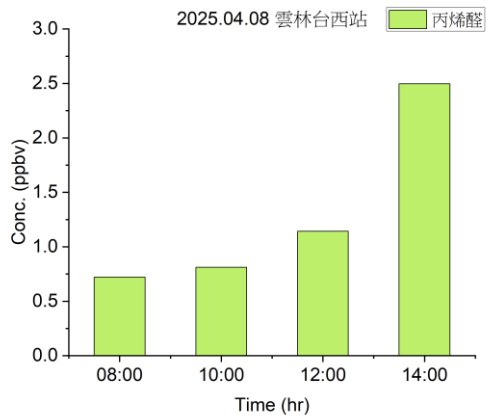


4 月 8 日

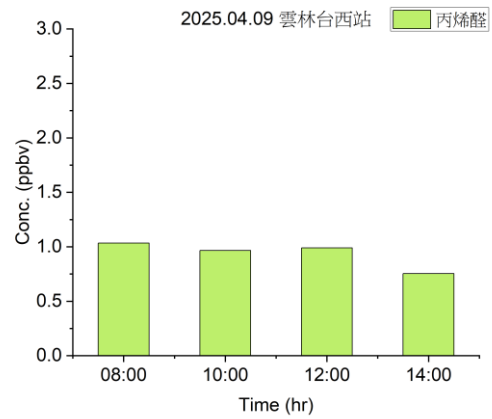


4 月 9 日

圖 6.13 鎮西國小甲醛濃度圖

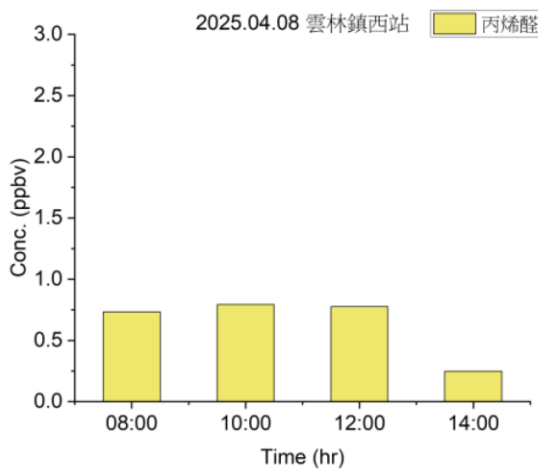


4 月 8 日

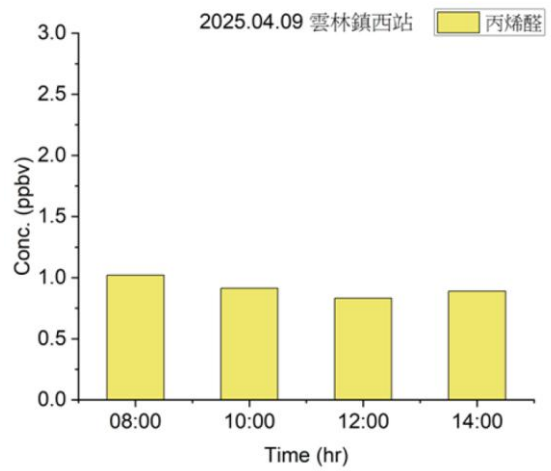


4 月 9 日

圖 6.16 台西國小丙烯醛濃度圖



4 月 8 日



4 月 9 日

圖 6.17 鎮西國小丙烯醛濃度圖

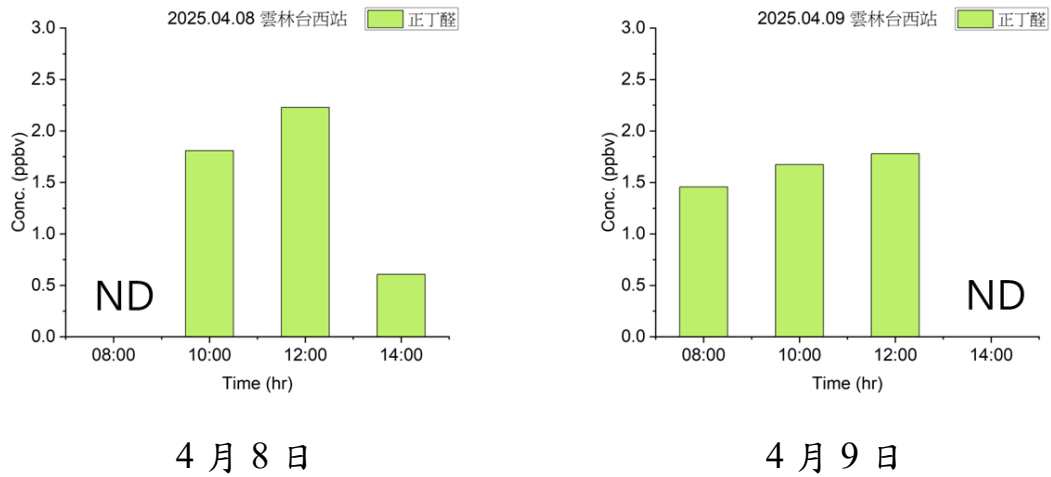


圖 6.18 台西國小正丁醛濃度圖

四、數據品保與品管

醛酮類採樣與檢測之數據品保與品管方法，為參考「空氣中氣態醛酮類化合物檢測方法標準作業手冊」，包含精確度、準確度(回收率)、方法偵測極限(Method detection limit, MDL)製作方法。於檢測前、後會重新製作五點檢量線，確保檢測結果準確無誤，表 6.5 為檢測樣品前、後之五點檢量線線性結果，其決定係數(Determination of coefficient) R^2 值均 > 0.9950 以上，呈現高度線性。

表 6.5 醛酮類化合物檢測前、後之檢量線

醛酮類化合物	Aldehydes	檢測前檢量線 R^2	檢測後檢量線 R^2
甲醛	Formaldehyde	0.9993	0.9975
乙醛	Acetaldehyde	0.9987	0.9958
丙烯醛	Acrolein	0.9976	0.9968
丙酮	Acetone	0.9979	0.9973
丙醛	Propionaldehyde	0.9976	0.9982
巴豆醛	Crotonaldehyde	0.9993	0.9967
正丁醛	n-Butyraldehyde	0.9987	0.9954
苯甲醛	Benzaldehyde	0.9987	0.9965
異戊醛	Isovaleraldehyde	0.9990	0.9985
正戊醛	Valeraldehyde	0.9993	0.9951
鄰甲基苯甲醛	o-Tolualdehyde	0.9993	0.9990
間甲基苯甲醛	m-Tolualdehyde	0.9988	0.9977
對甲基苯甲醛	p-Tolualdehyde	0.9952	0.9982
正己醛	n-Hexaldehyde	0.9979	0.9951
2,5-二甲基苯 甲醛	2,5-Dimethylaldehyde	0.9989	0.9962

第七章 紀錄片製作

拍攝紀錄片及宣傳目的在於以「雲林的空氣」為核心議題，透過居民生活經驗、學校現場、環保團體行動，以及環保局與學界的專業觀點，呈現空氣污染從何而來、如何影響民眾健康、如何一起改善。

影片不僅記錄可以民眾對空污的真實感受，也進一步顯示污染形成的複雜成因，包含地理條件、產業結構、境外傳輸與在地排放等因素，讓觀眾理解「看不見的污染」如何存在於日常之中。透過科學採樣、數據分析與治理行動的呈現，說明政府如何以實證為基礎，逐步找出污染來源並研擬改善策略，並引導民眾思考自身行為在空氣品質改善中所扮演的角色。

一、製作流程及腳本定案

本紀錄片在腳本設計上，首先以貼近生活的角度切入，引導觀眾從自身經驗出發，理解空氣污染並非遙遠或抽象的議題，而是早已存在於日常之中。影片開場透過民眾的感受與生活觀察，呈現灰濛濛的天空、空氣中異味，以及長期暴露在空污環境下的無力感，讓觀眾在第一時間產生共鳴，讓觀眾先「感受到」問題的存在，建立情感連結。

接續在學校場域的呈現，透過校長的訪談，進一步將空氣污染的影響延伸到孩子與教育現場。影片說明，空氣品質不僅影響學生的健康狀況，也連帶影響學習表現、戶外活動安排，甚至整體校園氛圍。藉由教育工作者的第一線觀察，讓觀眾理解空污問題並非短期或個別事件，而是對下一代造成長期影響的重要公共議題。

接著影片加入環保團體的行動與聲音，呈現民間對空氣品質的關注與訴求。透過抗議行動與公共倡議畫面，補充說明社會各界長期以來對空污議題的關切，並凸顯這不只是個人感受，而是牽涉到整體環境正義與公共健康的問題。

在情感鋪陳完成後，影片中段邀請中央部會與地方政府相關

長官出面說明，將敘事重心轉向專業與科學層面。透過訪談與畫面輔助，系統性解釋雲林縣空氣污染的成因，包括地理條件、風向影響、境外傳輸、在地工業與農業排放等多重因素，說明空污問題的複雜性。並進一步介紹實際進行的採樣計畫與研究方法，讓觀眾理解政府與學界如何透過地面與高空監測、數據分析，逐步釐清污染來源，作為後續治理政策的依據。

透過編排不僅回應前段民眾的疑問與不安，也讓觀眾看到制度面正在進行的努力，理解空氣治理並非口號，而是需要長期、細緻且以科學為基礎的工作。

在紀錄片的結尾段落，則再次將視角拉回民眾，透過環保局科長的說明與生活情境畫面，邀請觀眾思考自身在空氣品質改善中可以扮演的角色。影片強調，空氣品質與每個人的生活選擇息息相關，無論是汽機車定期檢驗、減少露天燃燒、祭祀減燒，或選擇更友善環境的交通方式，都是日常中可實踐的行動。透過溫和而具行動力的呼籲，讓觀眾在理解問題、看見努力之後，願意從生活中開始參與改變。

整體而言，本腳本的敘事設計由情感共鳴出發，逐步引導觀眾進入問題核心，再以專業說明建立理解，最終回到全民參與的行動邀請，期望讓觀眾在觀影結束後，不僅「知道」空氣污染的存在，更願意成為守護空氣品質的一份子。

表 7.1 拍攝腳本

〈天空的顏色〉空污現象、民眾心聲	
【1】空景	以空景畫面帶出此節
【2】民眾感受	<p>居民訪談【斗六市居民 黃小姐】</p> <p>Q.您覺得雲林的空氣品質跟以前比，有差別嗎？</p> <p>早上起來，你會聞到其實空氣中有時候會有一些酸酸的味道 或是臭臭的味道</p> <p>Q.您平常會怎麼知道今天空氣好不好？</p> <p>出門其實我們自然的第一反應，就是會看一下天空。那你看到天空灰灰的，心裡大概就會想今天應該空氣的品質不是那麼的好。</p> <p>校長訪談【鎮西國小 陳嘉銘校長】</p> <p>Q.空污天氣對學生的學習活動、戶外課程或運動時間，會產生什麼影響嗎？</p> <p>我們是學校單位，對於我們而言最重要的是學生的整個身體的影響，空氣好的時候，當然學生在整個學習狀況就會很好，空氣品質不好的時候，那我想不論是在我們的整個氛圍，都會呈現不良的反應，那如果呈現不良反應的時候，學習效果就會不好。</p> <p>《旁白》</p> <p>空氣是生命中不可或缺的元素，在不知不覺中，一層灰色的面紗悄然降臨……</p>

表 7.1 拍攝腳本(續)

第二章〈無形的污染〉(1/2)計畫主軸、採樣介紹、數據分析	
【1】空景	<p>以車輛行駛過的揚塵畫面帶出此節</p>
【2】採樣計畫的緣起和目標	<p>局長訪談【雲林縣環保局 張喬維局長】</p> <p>Q 您認為影響雲林縣空氣品質的主要來源有哪些？</p> <p>① 雲林縣是一個很特殊的地方，北邊有濁水溪，所以在東北季風就有所謂的濁水溪揚塵，另外它剛好在中部空品區最底端，北部會承接臺中火力發電廠或者是中龍鋼鐵這些污染來源，這些污染源會沿著八卦山脈的兩側匯集到斗六市；所以從北邊會承接中部空品區的污染排放。</p> <p>② 另外雲林縣本身在斗六市有兩個工業區包含：斗六工業區、雲林科技工業區，還有福懋，這些都是污染源比較多的工業區，另外主要就是我們西半邊有臺灣最大的石化工業區就是臺塑六輕。</p> <p>③ 其實在雲林縣還要承接海陸風效應的話，那又會把這些污染源那遺留在我們雲林縣，那這些都是雲林縣空氣品質比較不良的主要原因。</p> <p>Q 既然污染來源這麼多元，要怎麼確認真正的主要來源是什麼呢？</p> <p>④ 我們要針對於空污的成因，開始做細部研究，包含混合層高度以上，如果去登山的話，會看到斗六地區會霧茫茫的一片，這個就是在混合層以下的 PM_{2.5} 所造成的，我們現在希望來瞭解這些成因，它到底是混合層以上，所謂的境外傳輸，包含從日本、大陸傳輸過來的或者是其他外縣市所造成的；混合層以下這些到底是畜牧業所造成的，或者是其他的商業行為。那這些我們都需要把它重新做一些調查、重新做一些整合。透過整個學術研究的方式，我們才能找出下一個階段我們在空污治理方面上面的一個主要的工作。</p>
【3】過場	<p>《旁白》</p> <p>我們生活的地方，難免會受到地形、風向和產業等影響，空氣品質有時候就沒那麼理想。這些都和我們的健康有關，要改善問題，就要先找出原因。</p>

表 7.1 拍攝腳本(續)

第二章〈無形的污染〉(2/2) 計畫主軸、採樣介紹、數據分析	
【1】採樣緣起	<p>前司長訪談【環境部監資司 前司長】</p> <p>Q 中央曾經做的「NASA 高屏實驗」包含哪些主要內容與成果可以借鏡雲林呢？</p> <p>高屏實驗最主要 NASA 有兩架飛機，進行四次的飛航實驗，那我們結合國內的學者專家跟研究機構去配合相關的採樣，那建立這個垂直方向的氣象參數的掌握，不同高度的這些污染物。</p> <p>所以在整個從監測角度來看，未來有需要增加的是在垂直方向上的掌握，那再來就是在污染源的解析譬如說好這個二次污染物不管是 2.5 或者是臭氧，因為它是經過二次的反應，那它的來源跟它的轉變等等，那這些都需要監測來提供足夠的資訊，那換句話說如果我們能夠掌握更清楚它的來源、它的轉變，那就能夠回去掌握到到底該去管哪些來源。</p>
【2】採樣畫面	<p>《旁白》</p> <p>為了找出空氣污染從哪裡來，雲林縣環保局和學界、研究團隊一起努力，在地面不同的監測設備會設置在各個位置，透過實際採樣與監測，在相同時間、不同地點蒐集空氣資料，才能拼湊出完整的樣貌，準確找出污染的來源。</p> <p>除了地面監測，採樣也延伸到高空。無人機兩小時飛行一次，將高空的空氣樣本帶回分析；探空氣球則是每三小時升空一次，持續蒐集高空的氣象與污染資料，，就能判斷污染是不是從遠方飄來。</p> <p>為了在關鍵時刻掌握污染來源，我們在空氣品質特別容易惡化的時期，會加強採樣與監測的頻率。每天地面、高空同步進行，希望能更精準找出污染源。</p>
【3】分析畫面	<p>《旁白》</p> <p>採樣只是第一步，後續還需要將樣品送進實驗室，利用專業儀器進行分析，才能完成整個採樣流程。透過這些分析，才能更清楚掌握污染的線索，為大家每天呼吸的空氣把關。</p>

表 7.1 拍攝腳本(續)

第三章〈行動與轉變〉環保局其他作為	
【1】會議討論	<p>《旁白》</p> <p>十幾年來，雲林的空氣污染其實也在慢慢改變。以前，最主要的問題來自農田燒稻草和燃煤鍋爐，不過隨著管制和產業調整，這些情況已經大幅減少。</p>
【2】環保局應變行動	<p>前司長訪談【環境部監資司 前司長】</p> <p>以污染物來講，不管是粒狀污染物、二氧化氮、氮氧化物然後硫氧化物其實都整個往下降，那我也知道這個局長對於整個系統的整合跟3D的運用非常的重視，用無人機去監控工地逸散源的管制跟監測資料去做陳情的預防。對於六輕的管制固定污來源管制等等，也都有很多的效果。那我想這個最主要是這個在結合中央地方，然後跨局處有這樣的一個成果，那未來會有更大的挑戰。</p>

表 7.1 拍攝腳本(續)

第四章〈從生活做起〉(1/2)未來挑戰	
<p>【1】民眾協助</p>	<p>科長宣導【雲林縣環保局 鄧雅謨科長】</p> <p>① 空氣品質和大家的健康息息相關，也是我們每天最關心的事情。為了讓空氣更乾淨，我們更需要大家的配合與行動，有很多舉手之勞的事情都可以減少污染</p> <p>② <汽機車定檢、共享運具></p> <p>交通工具就像是我們的腳，所以汽機車的定期檢驗就非常重要！其實，我們這麼重視汽機車定檢，是因為車輛維護得好，排氣才會乾淨。除此之外，現在雲林縣政府有推動 Moovo、GoShare、TPASS 這樣交通方式，我們可以試著使用共享運具，不僅方便、省錢，還可以減少空氣污染與停車困擾喔~</p> <p>③ <新紙錢三燒></p> <p>臺灣人民是宗教信仰非常虔誠的族群，所以環境部有推動「新紙錢三燒」~就是集中燒、適量燒、替代燒，「集中燒」就是透過環保局的收運，將紙錢送到設有空污防制設備的環保金爐燃燒；「適量燒」是改為使用大面額又高品質的紙錢去燒，從源頭減少燒紙錢的量；「替代燒」則是用以功代金或以米代金之類的方式，不僅環保又能發揮更大的實質效益！心誠則靈，少一點濃煙、多一點清新，讓信仰與環保共存。</p> <p>④ <避免露天燃燒 ></p> <p>雲林是農業大縣，有時候大家為了清理農田或果園，就點個火，把樹葉、雜草燒一燒，但是露天燃燒所產生的不僅僅是那股刺鼻的味道，黑煙與有害氣體，對鄰居、長輩、幼童還有呼吸道比較敏感的人都會造成健康上的影響。</p> <p>⑤ 一起從生活做起，讓我們的家、我們的雲林，都成為乾淨呼吸的地方。</p>
<p>【2】過場幕</p>	<p>僅音效(下段訪談聲先出現)</p>

表 7.1 拍攝腳本(續)

第四章 〈從生活做起〉 (2/2) 未來挑戰	
【3】未來展望	<p>局長訪談【雲林縣環保局 張喬維局長】</p> <p>Q 在縣府規劃中，空品治理的核心價值是什麼？</p> <p>雲林縣的環境治理價值，那就是「永續」，就是這兩個字，這部分就是我們一直在做的，透過輔導那減量協談，我們希望污染降到最低，讓環境跟經濟可以永續的發展。最重要的那就是要符合 WHO 的規定，我們也需要有一個健康的空氣品質，我們希望說我們的下一代來享受這些成果，我們發展的永續就是讓臺灣更好、雲林更好。</p>
【4】結尾畫面	<p>《旁白》</p> <p>清新的空氣，其實就靠你我的選擇。每一次小小的改變，都是為了讓孩子和下一代能安心呼吸。雲林的藍天，不只是夢想，而是我們大家一起守護的承諾。</p>
【5】致謝	<p>致謝</p> <p>指導單位 | 環境部、雲林縣政府</p> <p>主辦單位 | 雲林縣環境保護局</p>

二、拍攝與訪談過程

在拍攝規劃上，本紀錄片以貼近生活的方式進行訪談與影像紀錄，透過不同角色的觀點，逐步帶出空氣污染的影響、成因與改善行動。拍攝順序亦依照故事敘事邏輯安排，從民眾的生活感受出發，再延伸至教育現場、政府治理與專業觀點，最後回到全民參與的行動呼籲，以下說明各訪談者訪談契機、地點挑選等，拍攝過程如圖 7.1 及圖 7.2。

首先進行的是居民訪談的拍攝。為了讓受訪者能在熟悉且自在的環境中分享自身感受，拍攝地點選擇在居民日常活動的戶外涼亭進行。這樣的環境不僅方便居民到場，也能在自然光與開放空間中營造較為輕鬆的訪談氛圍，使受訪者能以較自然的方式表達對空氣品質的觀察與生活經驗。拍攝內容主要圍繞居民對雲林空氣品質的感受、與過去相比的變化，以及日常生活中如何判斷當天空氣好壞等議題，藉由生活化的描述，讓觀眾更容易產生共鳴。

接續拍攝的是學校校長的訪談。拍攝地點安排於校園內進行，除了訪談畫面外，也同步拍攝學生在校園中活動及進行戶外課程的情境畫面，作為後續剪接時的輔助影像。透過校長的分享，說明空氣品質對學生健康、戶外活動安排及整體學習環境的影響，呈現空氣污染不僅影響一般生活，也與教育環境及下一代的成長密切相關。

在完成前段民眾與教育現場的拍攝後，接著配合局長行程安排，於環保局局長室進行訪談拍攝。訪談方式以較為輕鬆的對談形式進行，希望局長能以淺顯易懂的方式，向觀眾說明雲林縣空氣污染的主要來源，包括地理條件、境外傳輸、在地產業活動等因素，同時也分享環保局在空氣品質治理上的理念與未來願景。透過這段訪談，將影片從民眾感受逐步帶入專業分析與政策面說明，使觀眾更理解空污問題背後的複雜性。

接著安排科長的拍攝，主要以宣導與公共溝通的角度進行。拍

攝內容著重於說明民眾在日常生活中可以採取的具體行動，例如汽機車定期檢驗、選擇共享運具、減少露天燃燒、祭祀減燒等。透過較為親切的語氣與生活化的案例，邀請民眾一起從生活中的小改變開始，共同改善空氣品質。此段內容也搭配相關實際畫面，例如交通工具使用、攔檢現場、廟宇金紙減量等，更具體易懂。

另外在拍攝過程中，也安排訪問中央部會的司長。由於其為過去「高屏空氣污染實驗計畫」的重要推動者之一，因此特別邀請其分享當時高屏實驗的經驗與成果，包括如何透過跨單位合作與科學監測方式，了解污染在不同高度與不同區域的傳輸情形。同時也請司長從中央角度分享其觀察到雲林縣環保局在空氣污染治理上的努力與成果，例如監測技術的運用、污染源管制措施以及跨單位合作的成效。透過中央與地方視角的補充，使影片內容更具完整性與專業深度。

整體拍攝過程以自然情境與真實訪談為主軸，透過不同角色的觀點串連出完整故事脈絡，讓觀眾從生活感受出發，逐步理解空氣污染的成因與治理努力，最終回到全民共同參與改善空氣品質的行動呼籲。



圖 7.1 居民、校長拍攝過程



圖 7.2 司長、局長、科長拍攝過程

三、成果發表



圖 7.3 環境部考核評鑑現場發表影片

第八章 結論與建議

8.1 結論

一、大氣環流觀測

三次 IOP 觀測因天氣型態不同，故其污染成因亦不同，分別說明如下：

- (一)IOP1 天氣型態為高壓迴流，在垂直結構上，雲林之觀測以近地表與 2,000 公尺以上高層污染為主；揭示在高壓迴流與背風渦流下，雲林之污染事件主要為「累積+傳輸+下沉」的交互機制；事件並非僅由地面排放驅動。
- (二)IOP2 天氣型態為太平洋高壓壟罩，以低層污染為主，約在 1,500-2,000 公尺高度以上即測不到污染訊號，此次污染與邊界層高度和弱風高度相關。
- (三)IOP3 天氣型態為鋒面前緣，中部地區污染濃度明顯高於其他地區，探空亦顯示大城邊界層高度在污染時段皆較低，顯示地面邊界層對局地污染影響顯著。

總整以上分析，雲林的污染可分為近地表及高層，且成因有所不同，近地表污染主要因為不利於污染擴散的大氣條件所致，包括近地表風速偏弱及邊界層高度較低，導致雲林的空氣品質惡化，而雲林空品不僅受境外傳輸影響，亦受周圍縣市的傳輸及本地排放貢獻。

二、垂直觀測及 VOCs 採樣

整體作業成功建立 0-800 公尺高度、6 層垂直採樣系統，分析 55 種 VOCs 與溫室氣體的三維資訊，得知大氣中 VOCs 在垂直方向呈現高度不均勻分布，傳統單點地面監測難以全面反映空氣污染真實狀況。

- (一)IOP1 斗六的垂直觀測結果清晰展示大氣中污染物濃度分布的

明顯不均勻性，且 VOCs 呈現明顯多層次結構：地面層(0-200m)受局部排放源及交通影響；中層(200-500m)受工業及溶劑排放活動影響；高層(>500m)受區域傳輸影響。

(二)IOP-2 觀測顯示，臺西站因風速較強及地理位置影響，污染物較易擴散，PM_{2.5} 濃度相對較低；但在高層更容易觀測到臭氧高值，顯示沿海地區較易受到高空外來氣團或煙羽輸送影響。相較之下，內陸斗六地區則較易因低風速與邊界層結構導致污染累積。

(三)IOP-2 VOCs 的垂直結構與來源特徵具有顯著的空間差異。斗六主要受地表排放和邊界層內混合作用控制，高空輸送影響輕微；而臺西則表現為地面累積、良好混合與高空輸送等多種型態並存，反映出其受沿海氣象和區域輸送的複雜共同控制。

(四)藉由地面及高空 VOCs 分析判斷不同高度間的垂直濃度差異及空氣混和狀況顯示，斗六站作為內陸都市型測站，其 VOCs 垂直結構主要受本地地面排放（包括交通、都市活動及工業操作）所主導，以輕烓類與中輕烓類為主要物種，整體呈現地面濃度高於高空的垂直梯度特徵，高空層的輸送影響相對有限。IOP2 期間邊界層處於過渡狀態，混合與分層情況交替出現；IOP3 期間則因邊界層發展較為完善，垂直混合效率顯著提升，各高度濃度趨於均一，地面觀測對整體大氣組成具有較高的代表性。相較之下，臺西站作為沿海工業型測站，其 VOCs 垂直結構明顯更為複雜且多變，同時受到本地地面排放累積、海陸風循環驅動的大氣混合，以及區域性工業污染高空輸送三種機制的共同影響，在所有觀測期次中展現出最為異質的垂直分布特徵。

(五)在污染傳輸機制方面，本計畫多次觀察到高空層（尤其是 200 至 300 公尺高度）出現與地面組成明顯不同的 VOCs 濃度增強事件，結合同步觀測的氣象垂直剖面資料，可將此類現象歸因

於逆溫層阻擋下的污染物滯留，或東北季風驅動下的區域性工業排放長程輸送。此類高空污染事件在地面測站難以有效偵測，突顯了垂直觀測在全面掌握污染特徵上的不可替代性。

(六)PMF 來源解析結果進一步印證了上述發現。UAV 整合資料所解析出的來源結構與地面基準情境存在顯著差異：移動源因子的貢獻在高空樣本中明顯降低，而老化空氣與工業相關排放因子的貢獻則相對提高，顯示高空大氣組成更能反映區域輸送與垂直污染累積的特性，同時凸顯 UAV 量測對區域背景氣團與高空污染煙流特徵具有較高的解析敏感度。

三、地面氣膠化學監測分析

(一)地面 PM_{2.5} 細懸浮微粒水溶性化學組成以 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻ 或 Na⁺ 為主要離子成份。尤其是 SO₄²⁻ 及 NH₄⁺ 是主要陰陽離子，總體顯示氣膠來源主要來自二次衍生性有機氣膠及二次衍生無機氣膠的貢獻。

(二)夜間風速較低，大氣擴散較為不良，因此 PM_{2.5} 夜間光化產物濃度較日間高，且在沿海及內陸均有較高濃度累積。

(三)區域受到海陸風之影響，導致日間濃度普遍高於夜間。白天時，帶有海鹽的海風將其傳輸至陸地，因此在雲林沿海地區，海鹽對 PM_{2.5} 濃度的貢獻在日間顯著高於夜間和內陸地區。

(四)PM_{2.5} 塵土組成 (Ca+Mg) 具有顯著的區域與日夜差異。雲林塵土貢獻濃度較高，且呈現夜間濃度高於日間的現象，顯示夜間揚塵活動或夜間累積較為盛行。

(五)PM_{2.5} myo-inositol 白天濃度高於夜間，顯示白天溫度較高，真菌微生物較為活躍，真菌類生物代謝逸散的指標組成明顯存在 PM_{2.5} 氣膠之中。

8.2 建議

一、科學研究建議

- (一)持續投入 PM_{2.5} 化學組成與來源解析監測：雲嘉南高屏實驗已取得初步成果，然污染物來源複雜，建議持續利用地面測站、微型感測器、光達 (Lidar)、無人機或探空氣球觀測高空污染層，並搭配固定污染源煙道等採樣作業。協助釐清「污染累積」、「高空長程傳輸」等之污染情形。
- (二)建立同位素指紋庫：例如利用鉛 (Pb) 同位素比例來區分污染源，分辨 PM_{2.5} 是來自「燃煤」、「移動源 (車輛)」還是「生物質燃燒」。
- (三)建立氨氣(NH₃)長期觀測資料為管制作業進行準備：硝酸銨係 PM_{2.5} 的關鍵成份，欲進一步削減 PM_{2.5}，有必要針對 NH₃ 進行管制，。因此建議進行管制前期的準備作業，包括觀測 NH₃ 濃度，建立長期背景濃度資料及氨排放清冊等等。掌握排放清冊後，未來可鎖定污染源進行減量及管制措施，並將氨排放實質納入 PM_{2.5} 減量績效評估。

二、管制策略建議

- (一) 建立空品惡化預警機制：若氣象預報顯示將出現「高壓迴流、風速偏弱」之天氣，則提前啟動空品預警。
- (二) 發展 AI 進行資料判讀，識別於不同氣象條件、不同季節的污染來源特徵、依優先順序執行各類管制作為。

第九章 參考文獻

1. Chen, S.-P., Su, Y.-C., Chiu, C.-J., Lin, C.-H., Chang, J.S., Chang, C.-C., Wang, J.-L., 2015. Inter-comparison of network measurements of non-methane organic compounds with model simulations. *Atmospheric Environment* 122, 94-102.
2. Heiden, A.C., Kobel, K., Langebartels, C., Schuh-Thomas, G., Wildt, J., 2003. Emissions of Oxygenated Volatile Organic Compounds from Plants Part I: Emissions from Lipxygenase Activity. *Journal of Atmospheric Chemistry* 45, 143-172.
3. Hsu, C.H., Cheng, F.Y., 2016. Classification of weather patterns to study the influence of meteorological characteristics on PM_{2.5} concentrations in Yunlin County, Taiwan. *Atmospheric Environment* 144, 397–408.
4. Kim, K.-H., Hong, Y.-J., Pal, R., Jeon, E.-C., Koo, Y.-S., Sunwoo, Y., 2008. Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emission sources. *Chemosphere* 70, 807-820.
5. Lai, H.C., Lin, M.C., 2020. Characteristics of the upstream flow patterns during PM_{2.5} pollution events over a complex island topography. *Atmospheric Environment* 227, 117418.
6. Lai, H.C., Dai, Y.T., Le, L.P., Pan, B.H., Lai, L.W., Hsiao, M.C., 2023. Estimation the effect of accumulated long-range transported pollutants during a PM_{2.5} event in Taiwan. *Atmospheric Pollution Research* 14(6), 101758.
7. Tsai, J.H., Gu, W.T., 2019. Emission Characteristics and Risk Assessment in an Industrial Metropolitan Area in Taiwan using the AERMOD Model. *Adv. Geosci.* 49, 113-119.
8. Wildt, J., Kobel, K., Schuh-Thomas, G., Heiden, A.C., 2003. Emissions

- of Oxygenated Volatile Organic Compounds from Plants Part II: Emissions of Saturated Aldehydes. *Journal of Atmospheric Chemistry* 45, 173-196.
9. Yao, Z., Shen, X., Ye, Y., Cao, X., Jiang, X., Zhang, Y., He, K., 2015. On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China. *Atmospheric Environment* 103, 87-93.
 10. 王聖翔、柯立晉、潘巧玲、劉豪聯、李育棋、游志淇、邱思翰，「新一代低層大氣無人機探空系統」，*前瞻科技與管理*，12 卷 1 期，38-59 頁，2023。
 11. 林宜潔、張嘉儀、邱靜娥，「微粒濃度與空氣品質因子自動監測資料之關係探討—以雲林斗六地區為例」，國立雲林科技大學工業工程與管理研究所，雲林，2015
 12. 李哲璋，「斗六地區 PM_{2.5} 與酸性氣膠季節特徵分佈探討」，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系碩士論文，2016
 13. 陳誼，「整合無人機與光達觀測解析斗六地區空污事件之演變過程」，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，2021。
 14. 雲林縣環境保護局，「112 年空氣品質維護管理計畫」，2023
 15. 雲林縣環境保護局，「113 年空氣品質維護管理計畫」，2024
 16. 環境部，「臺灣細懸浮微粒(PM_{2.5})成分與形成速率分析」，2014
 17. 環境部，「104-105 年細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成份監測專案工作計畫」，2015
 18. 環境部，「細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，2016
 19. 環境部，「細懸浮微粒碳及鉛同位素分析技術發展與應用計畫」，2016
 20. 環境部，「107 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，

2018

21. 環境部，「108 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，
2019

22. 環境部，「109 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，
2020

23. 環境部，「110 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，
2021

24. 環境部，「111 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，
2022

25. 環境部，「112 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分監測及分析計畫」，
2023