

空氣污染與噪音類

臺灣臭氧前驅物「精準減量」策略與 固定污染源臭氧減量效益評估

陳聖博*、劉文治**、許長嵐***、蔡智琦****、黃于珊*****、
江勝偉*****、王家麟*****

摘 要

臭氧(O₃)劣化為臺灣近年來日益重視的空氣品質問題之一。綜整環境部空品觀測網 1994~2022 年數據顯示，近三十年臺灣臭氧前驅物(NO_x與 VOCs)年平均值呈現逐年降低趨勢，迄今降幅已達 60%，顯示我國一次排放污染物減量成效卓著；然而，二次光化污染物 O₃ 並未出現相似的下降趨勢，由年平均值顯示 1994-2007 年逐年上升，2007 年至今則持平且略微上升趨勢；近年來受到 COVID-19 疫情影響，自 2019 年後年均值已略有下降趨勢，然而隨著產業復甦與全球暖化效應，似乎更不利於 O₃ 改善。自 2020 年環境部公告最新空氣污染防制區，新增臭氧八小時劃分結果，整個西半部為判定為三級防制區，因此對於 O₃ 管制，需要有別於傳統作法，使用更創新的方式評估其前驅物減量是否得宜。

過去對於削減揮發性有機物(VOCs)做法上並未考慮個別成分光化活性差異大的特性而只針對總量管理，本研究使用臭氧前驅物「精準減量」策略，針對臺灣西半部篩選整體與分區中，具有「影響 O₃ 生成關鍵 VOCs 個別物種」之污染源，並進行減量效益分析。因此「精準減量」以 VOC 個別物種角度出發，透過 VOCs 個別物種之臭氧生成潛勢(OFP)篩選關鍵污染源，並結合空氣品質模式模擬，量化 O₃ 減量效益。OFP 計算使用臺灣空氣

污染物排放清冊 (TEDS) 排放量、VOCs 物種分類圖譜與最大增量反應性 [Cohan et al.]，首先對全臺灣點源行業別進行 OFP 統計，其次計算北 (北北基桃竹苗)、中 (中彰投雲嘉南)、南 (高屏) 三大空品區工廠之 OFP 並篩選關鍵污染源。減量效益模擬使用 CMAQ-PAMS，為 CMAQ 空品模式擴增 PAMS 模組，可同時模擬 PAMS 個別物質，利用環境部光化學評估測站 (PAMS) 觀測校驗 VOCs 模擬結果，提供符合科學之 VOCs 模擬驗證。

結果顯示，臺灣高 OFP 區域以桃竹苗、雲嘉南及高屏地區為關鍵，重點行業為塑膠製品製造業、化學原材料製造業及塑膠原料製造業，關鍵物種以乙烯、1,3- 丁二烯與丙烯為主。由 2020 年在弱綜觀天氣形態為主的臭氧事件日模擬結果顯示，各空品區的臭氧減量 (ΔO_3) 主要發生在靠近排放源的地區並隨之影響下風位置。以最大小時 ΔO_3 而言，中部 OFP 熱區之 O_3 減量效益最顯著，提供 16.7ppb 之 O_3 減量，為當下 O_3 濃度的 18%。北、中、南前十大工廠減排後分別得到 5.38 ppb、10.12 ppb 與 9.10 ppb 的臭氧減量，佔當下臭氧濃度比例為 7.25%、10.29% 與 8.47%，2021 年事件日模擬結果亦顯示關鍵 VOCs 污染源減排對於 ΔO_3 成效。以各區高 OFP 工廠減排後的 VOCs 減量濃度 ($\Delta VOCs$) 作為歸一化 (normalize) 臭氧減量指標，全國前五大行業別的 ΔO_3 效益最高，其次為各空品區前十大工廠，惟不同事件日的大氣擴散條件不同，會影響各空品區的 ΔO_3 效益，整體而言固定源「精準減量」皆有顯著的減量成效。

透過臭氧前驅物「精準減量」策略，可以找出對臭氧減量提供最有效的管制對象，並具體量化其臭氧減量效益。如此更精準控管八小時臭氧，可以減少對社會與經濟的衝擊。

【關鍵字】精準減量、管制策略、臭氧前驅物、揮發性有機物

*	中原大學環境工程學系	助理教授
**	中原大學化學系	助理教授
***	環科工程顧問股份有限公司	資深協理
****	環科工程顧問股份有限公司	計畫經理
*****	環科工程顧問股份有限公司	主任工程師
*****	環境部大氣環境司	技正
*****	中央大學化學系	教授

一、前言

臭氧(Ozone, O₃)為臺灣現今尚待改善之空氣污染物，其涉及揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs)及氮氧化物(Nitrogen Oxide, NO_x)兩者大氣化學相互影響，且兩者為非線性之光化反應關係，因此在臭氧管制策略擬定，需藉助科學方法加以演算，以掌握較適切空氣污染物管制方向。相較於 O₃，氣膠 (Aerosol) 在大氣中同時為原生與衍生污染物，因此透過原生性污染物的管制可以有較顯著的減量成效，此策略用在管制 O₃ 時不見得可以達到具體成效，甚至還會有反效果，因此需要從 O₃ 與其前驅物之物化特徵擬定管制策略。

對於臺灣 O₃ 減量控制，過去大部分以 O₃ 與其前驅物之光化學反應相關性概念 (Empirical Kinetic Modeling Approach, EKMA) 作為前驅物排放減量評估方式，並使用空品模式靈敏度試驗 (如 CMAQ-ISAM 或 CMAQ-HDDM 等方法) 評估整體 O₃ 前驅物 (VOCs 與 NO_x) 減量後之 O₃ 改善情形 (Chang et al., 2023; Cohan et al., 2005; Dunker et al., 2002; Koplitz et al., 2022; Luecken et al., 2018)。常見的方式為使用臺灣空氣污染物排放清冊 (Taiwan Emission Database System, TEDS)，對特定區域或高 O₃ 下風站 (小琉球) 之所有 NO_x 或 VOCs 排放量進行等比例減量模擬，或是檢視點源、線源、面源各自的 O₃ 貢獻 (張良輝, 2020; 彭彥彬, 2021; 王家麟, 2021; 陳杜甫, 2023)。近年來亦有針對空氣污染物防制計畫書管制策略擬定 NO_x 與 VOCs 減量並模擬 O₃ 改善情形 (張良輝, 2021)，結果大多顯示管制 VOCs 為近年 O₃ 管制首要對象 (VOCs-limited)。

綜上，現階段臺灣的 O₃ 改善應以 VOCs 減量為關鍵，然而目前 VOCs 管制主要以 VOCs 排放「總量」角度進行管理，對於管制面上會有執行難度。此外，VOCs 物種多元且各物種光化反應性均不同，針對物種光化特性差異切入 O₃ 管制，可以更精準掌握影響 O₃ 之關鍵污染源與物種。為精準掌握臭氧減量效益，需透過科學研究實證作為基礎，其可掌握關鍵污染源及物種，故本計畫使用臭氧前驅物「精準減量」策略，從 VOC 個別物種角度出發，運用 TEDS 排放量清冊結合美國物種分配數據 (SCC 與 SPECIATE) 及 VOCs 物種之最大增量反應性 (Maximum Increment Reactivity, MIR)，推估縣市、行業別，甚至是個別 VOCs 物質之臭氧生成潛勢，以掌握臺灣地區影響臭

氧生成之關鍵行業及化學物質，之後再進一步使用 CMAQ-PAMS 模式進行 O₃ 減量模擬，量化高活性污染源減排對於 O₃ 改善效益，以提供 O₃ 管制策略之參考。希冀藉由科學研究成果，提供具體 O₃ 管制方向，同時減少產業衝擊與行政負擔，達到產官學三贏效果。

二、臭氧前驅物「精準減量」策略

VOCs 是為數眾多的化學物質總稱，因個物質間光化反應性不同，因此彼此在大氣中產生 O₃ 的能力亦會有很大差異，加上各地區 NO_x 濃度不同、氣象條件等客觀因素亦因時空而異，因此無法簡單推估。所幸在 1977 年後大氣科學家對於 VOCs 與二次 O₃ 的生成機制有相對完整的了解，因此在美國加州與休士頓等地區，已經開始對 VOCs 管制方法進行改進，由總量 (Mass-based) 治理的方法轉為化學活性 (Reactivity-based) 的方法，從高反應性 VOCs 開始管制 (Avery, 2006)。大氣 VOCs 個別物值質依據光化學活性差異，可以使用兩種方式進行物種管制：(1) 反應性 (Reactivity) 與 (2) 增量反應性 (Incremental Reactivity)。VOCs 反應性由個別物質的光化學反應動力常數可得，主要為 VOCs 物質和 OH(kOH)、NO₃ 和 O₃ 等自由基的化學反應。增量反應為考量複雜環境下，少量 VOCs 物質增減後所造成的 O₃ 生成靈敏度。VOCs 反應性雖然為動力常數，亦會隨環境條件改變；然而因為使用時需要的考慮的參數較多 (NO_x 和 VOCs 排放量、溫度、濕度、光照強度、自由基濃度等)，雖與 O₃ 形成有關，但較為複雜與間接；相較之下，MIR 概念所包含的反應步驟較全面、完整，係透過模式計算而得之參數，僅需乘以 VOCs 排放量，便可以直接用來量化 VOCs 物質對於 O₃ 生成差異，為直觀的量化指標，因此 MIR 比 kOH 更能表現實際大氣中 VOCs 個別物質對於 O₃ 生成之效率差異。

基此，本研究引用臭氧前驅物「精準減量」策略 (Chen et al., 2024; 王家麟, 2022) (圖 1)，從 VOC 個別物種角度出發，使用 TEDS 排放清冊排放量，搭配 Source Classification Code (SCC)、SPECIATE 與 MIR 數據，將所有 TEDS 人為污染源中具高 OFP 之污染源及物種進行篩選，找出對於 O₃ 生成的關鍵污染源，包括行業別、個別工廠與單一物質，亦可稱為「優先減量」策略。針對關鍵污染源，再透過空氣品質

模式進行高 OFP 排放源「靈敏度試驗」，量化高 OFP 污染源削減後對 O₃ 的具體減量效益。



圖 1 臭氧前驅物管制策略之研究流程 (王, 2022)

三、臺灣固定源 OFP 統計

為了在固定源 (或點源) 中初步鑑別出高 OFP 關鍵行業及物種，使用 TEDS 11 版之 THC 排放量、SCC 物種分配與 MIR 數據資料 (Carter et al., 2003; Carter, 1994; 2010)，估算 TEDS 點源之 OFP 值，然 OFP 計算需要參考 TEDS 中點源所記載之 SCC 代碼，找出所對應之 VOCs 物種分配圖譜 (SPECIATE)，進而能將 THC 排放總量分配至單一物質排放量，其推估公式如下：

$$OFP_i = \sum (THC_i \times SCC_i^j \times MIR_j)$$

其中 THC 為 TEDS 中點源所列之年排放量，i 為清冊中排放量數據，j 為 SCC 與 MIR 圖譜所記載之單一物種。透過上述推估公式統計所有點源 OFP 數據，首先針對全臺固定源 (點源部分，不包括面源溢散源) 之 OFP 分布概況進行解析，再進一步依區域 (北北基、桃竹苗、中彰投、雲嘉南、高屏、宜花東及離島) 分別依行業及物質進行排序，以掌握 OFP 區域、行業及其物種分布情形，分析結果如后說明。

3.1 全臺固定源 OFP 分析

全臺固定源 OFP 推估結果如圖 2 所示，全臺固定源 OFP 為 179,150 MtO₃/yr，其中以桃竹苗 OFP 為 70,274 MtO₃/yr，佔全臺 39% 為最高，其次為雲嘉南、高屏及中彰投，分別為 34,535 MtO₃/yr、32,877 MtO₃/yr 與 27,925 MtO₃/yr，佔全臺 19、18 及 16%，而北北基、宜花東及離島相對較低（後續將以本島區域進行研析）。此外，為瞭解 THC 排放量與 OFP 對應關係，另以全臺灣點源 THC 排放量與相對應的 OFP 量值加入「地理位置」進行對照（圖 3），結果顯示全臺灣點源 THC 排放分佈以西半部為主，其中又以北部與南部密度相對較高，中部相較之下較為分散。THC 排放量分佈和 OFP 空間分佈範圍頗為相似，惟 OFP 空間分佈更突顯點源與臭氧生成之相關性。

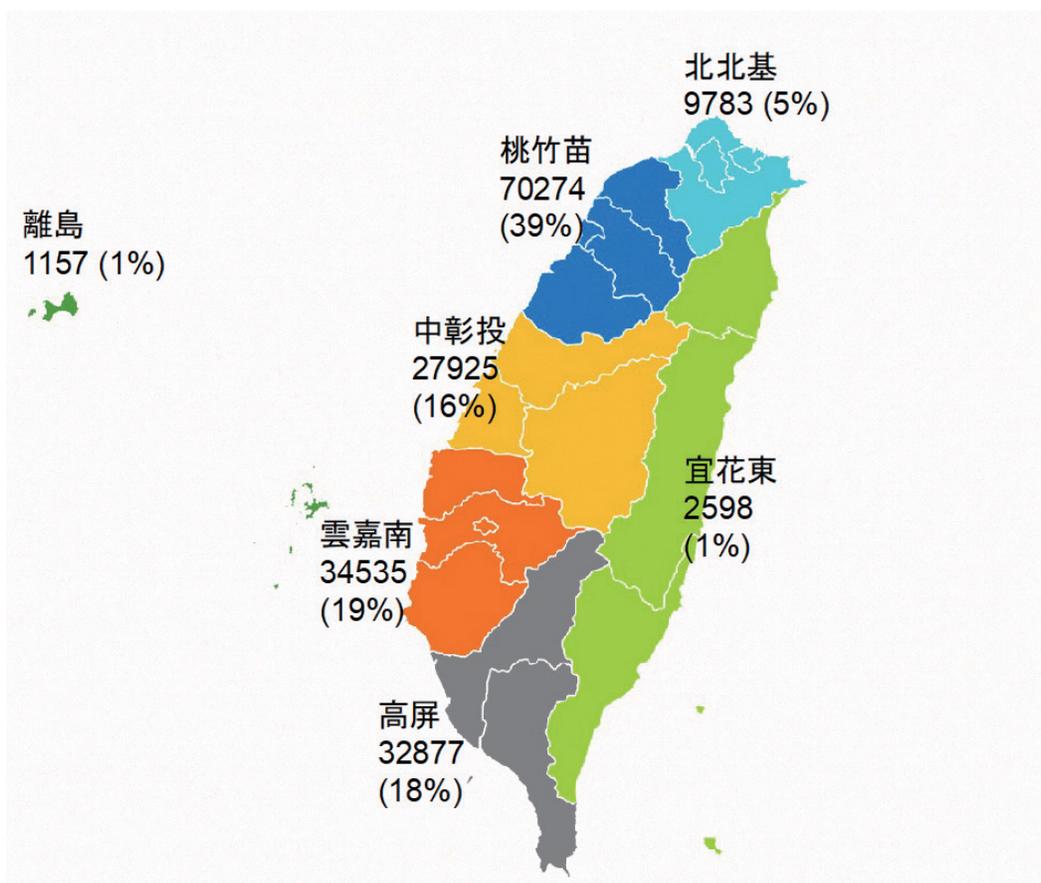


圖 2 全臺固定源 OFP 統計與佔比 (本團隊整理)

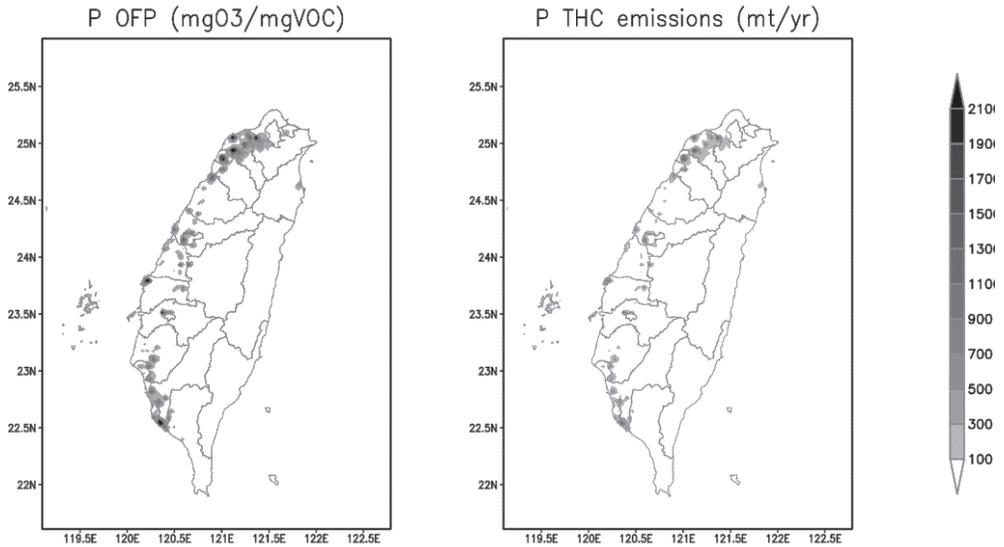


圖 3 臺灣本島點源 OFP(左)與 THC(右)空間分佈情形。其中 OFP 單位為 MtO_3/yr ，THC 排放量單位為 Mt/yr (本團隊整理)

針對高 OFP 行業別，以全臺 OFP 佔比 60% 為基線，篩選出前 15 大 OFP 行業，由圖 4a 可知，前三大行業分別為塑膠製品製造業、化學原材料製造業及塑膠原料製造業，其 OFP 分別為 $17,201 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ 、 $14,951 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ 及 $9,124 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ ，以區域而言，塑膠製品製造業主要分布在桃竹苗、雲嘉南及中彰投，化學原材料製造業則分布在雲嘉南、桃竹苗及高屏，塑膠原料製造業則分布在雲嘉南、中彰投及高屏。另在積體電路製造業 (OFP 為 $6,996 \text{ MtO}_3/\text{yr}$) 重點區域為桃竹苗，石油及煤製品製造業 (OFP 為 $6,747 \text{ MtO}_3/\text{yr}$) 分布於桃竹苗及高屏，印刷電路板製造業、電子零組件製造業及化學製品製造業 (OFP 分別為 $5,862 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ 、 $5,447 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ 及 $5,363 \text{ MtO}_3/\text{yr}$) 以桃竹苗為重點區域，而鋼鐵冶煉業及船舶及浮動設施製造業 (OFP 分別為 $3,832 \text{ MtO}_3/\text{yr}$ 及 $3,724 \text{ MtO}_3/\text{yr}$) 主要以高屏區域為重點。整體而言，高 OFP 行業均分布於不同區域，且不同區域有其重點高 OFP 行業，因此在各區域建議朝區域重點行業著手，可有效率管制並改善 O_3 問題。

除了統計行業別 OFP 值，另可針對單一化學物質排放量之 OFP 進行排序；圖 4b 為前 15 大重點物種之 OFP 排序，佔整體 OFP 61.9%，關鍵物種為乙烯、甲苯、丙烯、甲醛、二甲苯及 1,3- 丁二烯，為製造塑膠、橡膠、化學品之重要原料，分布區域分別在桃竹苗、雲嘉南及高屏為主。

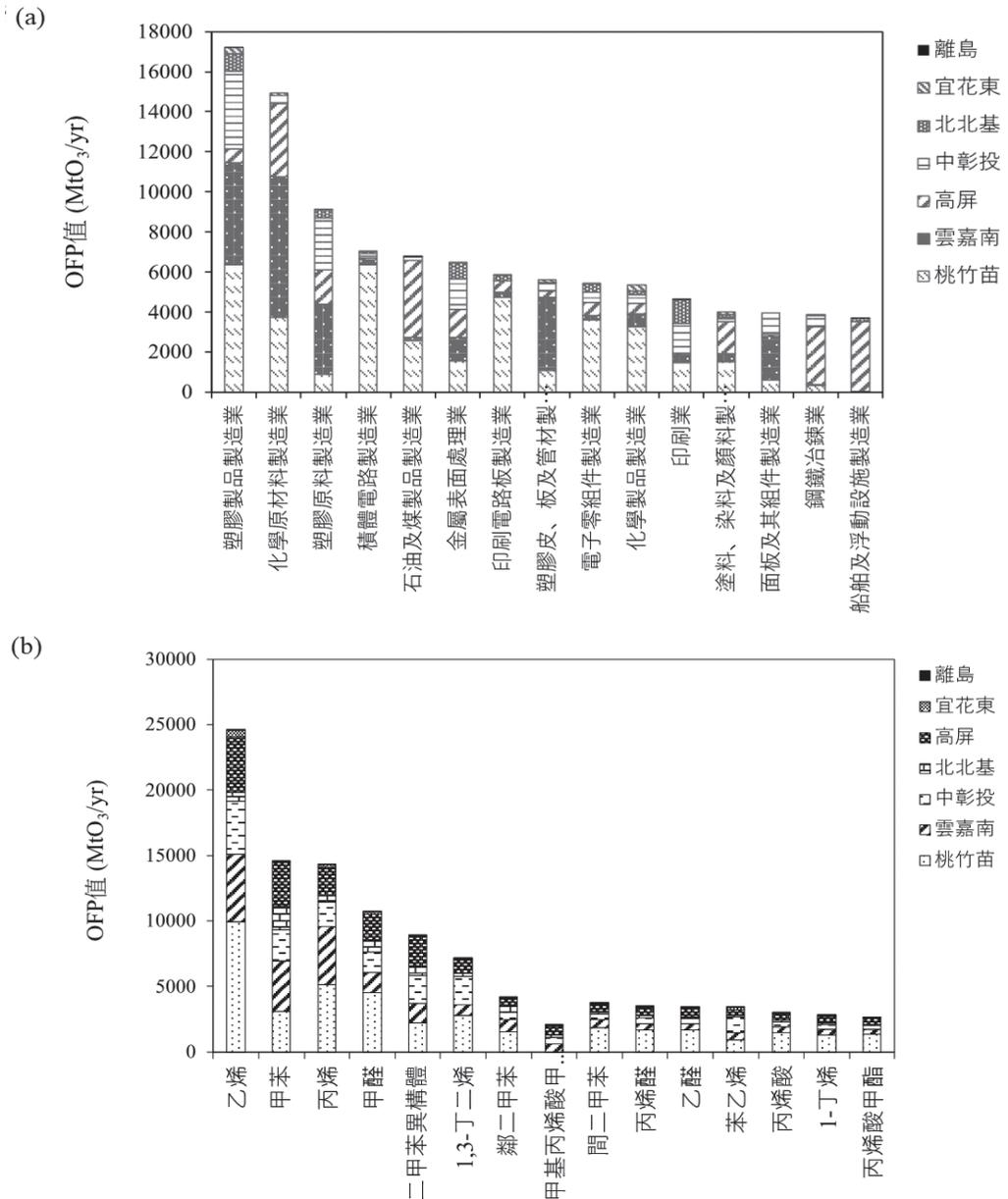


圖 4 全臺固定源 (a) 前 15 大行業與 (b) 前 15 大物種 OFP 統計 (本團隊整理)

為顯示各區域 O₃ 管制之關鍵行業，由前 15 大行業在各區域之 OFP 高於 1,000 MtO₃/yr 者進行前三名排序 (圖 5)，結果顯示桃竹苗之前 15 大行業涵蓋 7 項高 OFP 行業，3 項行業涵蓋次高 OFP 行業，顯示桃竹苗區域針對 O₃ 減量有大幅改善空間，其次依序為雲嘉南、高屏及中彰投。



圖 5 OFP 關鍵行業及其區域分析。其中各行業及其區域 OFP 1,000 MtO₃/yr 以上者，列為該行業之重點區域並依序排名 (本團隊整理)

3.2 北、中、南三大空品區高 OFP 工廠統計

臺灣 O₃ 問題主要發生在臺灣西半部，因此以西半部作為後續「精準減量」VOCs 減排與 O₃ 減量研究範圍。為掌握區域性空污減量關鍵之所在，本研究以北（北北基桃竹苗）、中（中彰投雲嘉南）、南（高屏）三大空品區進行 OFP 統計，以釐清區域性固定源污染改善重點。

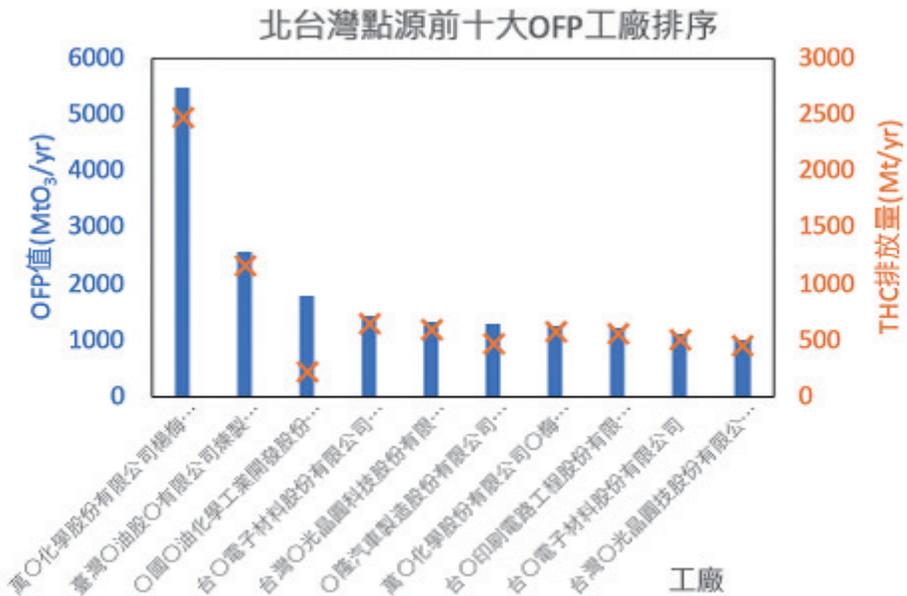
圖 6a 為北區點源 OFP 前十大工廠清單，分佈以桃園市、新竹縣與苗栗縣為大宗。北區前十大工廠所歸屬的行業主要為石油及煤製品製造業 (1700)、化學材料製造業 (1810)，印刷電路板製造業 (2630)、積體電路製造業 (2611)、汽車製造業 (3010)、化學製品製造業 (1990) 與電子零組件製造業 (2699)。單一工廠包含一個以上點源排放量，以及可能（包含）一種以上 SCC 代碼。在進行全臺灣點源 OFP 統計時，發現有諸多排放量使用 SCC 預設代碼（進行 VOCs 物種分配）；統計北區前十大工廠使用 SCC 預設圖譜比例高達 7 家（資料筆數佔比約為 83%）。以○○化學楊梅一廠為例，該工廠目前在 TEDS 清冊中 THC 排放筆數有 37 件且皆使用 SCC 預設成分指紋圖譜，產業或製程的代表性可再改善，未來可針對此現象逐步建置本土化更具代表性之 VOCs 排放指紋檔。由北區前十大工廠的 THC 排放量與 OFP 值比較，顯示 OFP 排序不完全與 THC 排放成正比；○○化學 OFP 排序第三名，但其 THC 排放量為第 22 大，其使用預設 SCC 比例頗低 (13%)，故物種分配瑕疵所造成的誤差應不嚴重（姑且不論 SCC 代碼誤植比例，假設 SCC 圖譜皆符合工廠製程排放特徵），所以判斷應該為合理之高 O₃ 污染源。由於 VOCs 物種分配係數引用有誤差空間（因部分使用預設指紋圖譜），目前較合理篩選方式，可先由 THC 排放量篩選前十大工廠，再由 OFP 輔助，提升高 OFP 工廠的排序合理性。

圖 6b 為中區點源 OFP 前十大工廠清單，分佈位置以臺中市、雲林縣與臺南市為大宗。中區前十大工廠所歸屬的行業別為塑膠皮、板及管材製造業 (2201)、化學材料製造業 (1810)、塑膠原料製造業 (1841)、液體、氣體燃料及相關產品批發業 (4631)、塑膠製品製造業 (2209)、照相機製造業 (2771) 與染整業 (1140)。中區前十大工廠有 3 家工廠使用 SCC 預設指紋圖譜（資料筆數佔比約為 53%）。與北空相同，中區前十大

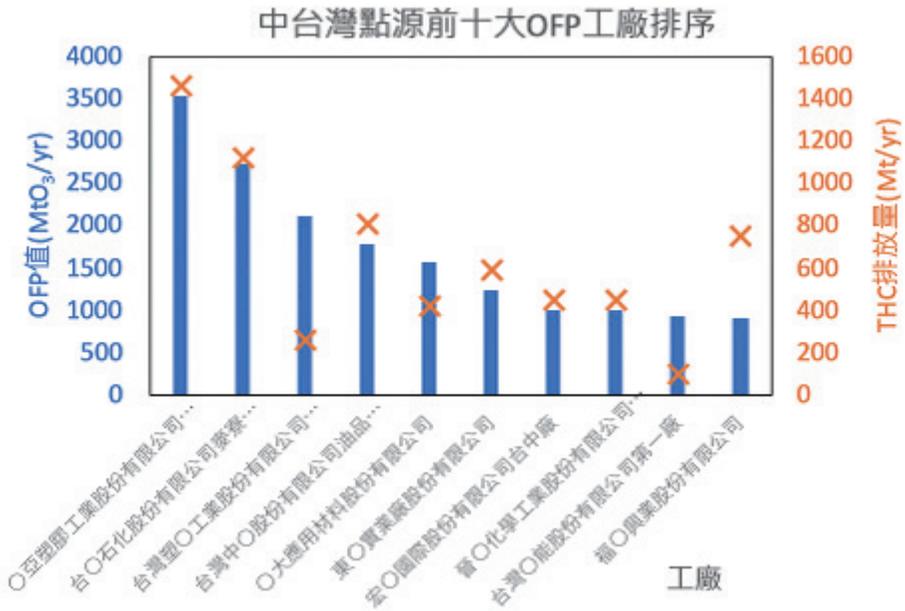
工廠的 OFP 排序仍舊呈現不完全與 THC 排放成正比現象；台灣○○工業 OFP 排序第三名，但其 THC 排放量為第 17 大。類似情形亦發生在○○應用材料與台灣○○，顯示其為 O₃ 生成高度相關產業 (低 THC 高 OFP)。而○○興業則呈相反情形 (高 THC 低 OFP)，所排放 VOCs 物種與 O₃ 生成相關性較低。

圖 6c 為南區點源 OFP 前十大工廠清單，主要分佈在高雄市沿海地區。南區前十大工廠所歸屬的行業別為鋼鐵冶鍊業 (2411)、船舶及浮動設施製造業 (3110)、石油及煤製品製造業 (1700)、塗料、染料及顏料製造業 (1920)、化學材料製造業 (1810)、木製傢俱製造業 (3211)、紙製品製造業 (1599)、光電材料及元件製造業 (2649) 與合成塑膠原料製造業 (1842)。有 6 家工廠使用 SCC 預設指紋圖譜 (資料筆數佔比約為 81%)。○○鋼鐵 OFP 排序第一名，但其 THC 排放量為第四大。類似情形亦發生在○○造漆，顯示兩者為高 O₃ 相關產業。

(a) 北部空品區



(b) 中部空品區



(c) 南部空品區

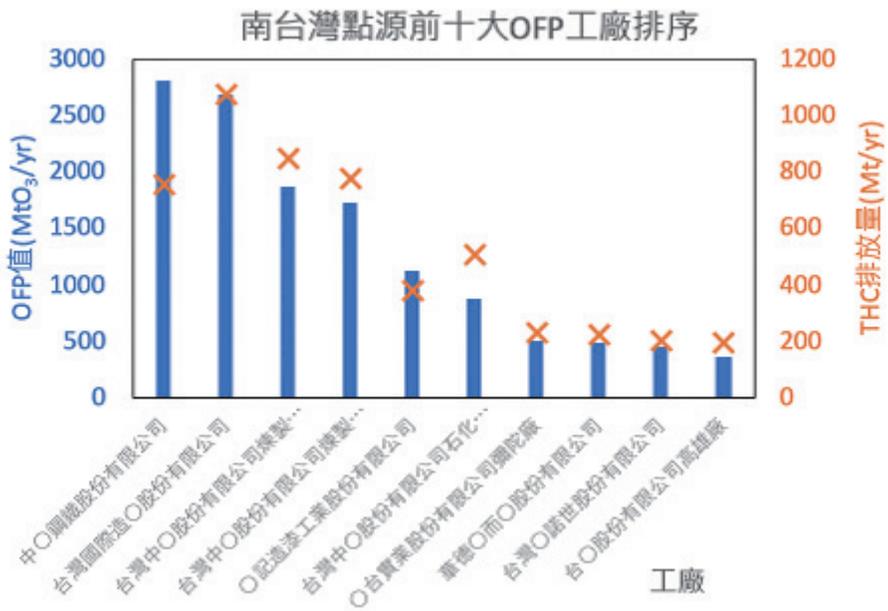


圖 6 北、中、南空品區點源 OFP 前十大工廠之 OFP 與 THC 排放量 (本團隊整理)

四、臭氧減量效益評估

OFP 篩選方法找出了全臺灣與 O_3 生成相關性較高的點源；然而由於 MIR 量值為國外引用數據，為箱型模式在高 NO_x 情境下之計算結果，不見得可以真實反映臺灣污染源的 O_3 減量效益，需要另外使用可因地制宜的量化方法（包括擬真的排放、氣象、地形等因素）；使用空氣品質模式即為相對應的配套工具之一，可以提供符合臺灣大氣物理、化學、沉降與排放特徵之數值模擬。

為瞭解全臺灣、跨縣市或單一縣市之 O_3 減量效益，初擬三方面臭氧減量情境，包含：高 OFP 行業別、物種及工廠，其對不同管制單位均具有不同減量效益或執行優劣勢；例如以高 OFP 「行業別」進行改善，可透過中央單位研擬行業別標準，或針對既有行業別研擬加嚴標準予以管制，達污染減量目的；若以高 OFP 「物種」進行管制，可透過掌握關鍵物種，除考量反應性外，亦可針對屬高危害性之有害物種 (HAPs) 加以管制，進一步結合現行法規評估是否需要增加納管關鍵物種管制，如：甲醛、1,3-丁二烯為空污費未徵收對象，藉由關鍵物種篩選出特定行業或縣市，由中央或地方推動許可及空污費管制；而若是以高 OFP 「工廠」執行減量，可針對大型固定污染源提出誘因進行減量協談，因此可透過區域或地方機關掌握現況，藉由針對性的管理方式來達到污染減量。因此，本研究依上述不同減量情境（排放靈敏度試驗），透過空品模式模擬研析較適切之減量方案。

4.1 模式模擬設定與高臭氧案例簡介

選用 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model 空品模式作為臭氧減量情境的模擬工具。CMAQ 空品模式為美國環境部發展超過三十年以上的區域化學傳輸模式 (Byun and Ching, 1999)，該模式為模組化架構，亦為社群模式（由全世界科學家與工程師共同研發），且每年皆會依據最新的科研發展，不定期地更新氣膠或氣態污染物的物理化學模組，因此被世界各地的學術機構與中央 / 地方環保單位廣泛使用；目前臺灣環境部監資司之空品預報模式 (Air Quality Forecast system, AQF) 即使用 Weather Research and Forecast (WRF) model 氣象模式搭配 CMAQ 模式進行空品預

報 (Cheng et al., 2021)。由於本計畫著重 VOCs 減排對 O₃ 減量影響，因此如何準確模擬 VOCs 與 O₃ 為本研究的重點。然而，大氣中的 VOCs 組成複雜，為簡化模式運算時間 (大部分空品模式模擬以 PM_{2.5} 或 O₃ 等為主要預報物質)，模式對於 VOCs 模擬的處理方式較簡易 (使用物種簡併方式模擬 VOCs，即將化性相近的單一物質合併為單一簡併物種進行模擬，常見的空氣品質模式皆使用此方式簡化模式)，因此 VOCs 模擬較難與觀測直接進行比較驗證 (Chen, et al., 2010; 2015)。有鑑於此，本研究進一步使用 CMAQ-PAMS (CMAQ 模式擴充 PAMS 模組，可同時模擬 CMAQ 之 O₃ 相關污染物與 PAMS 單一物質) 作為臭氧前驅物「精準減量」方法之模式模擬工具，搭配臺灣 PAMS 光化連續監測數據與模式驗證，可以提供更符合科學實證之 VOCs 模擬結果。後續同時使用該模式進行 O₃ 減量效益模擬。CMAQ-PAMS 模式模擬設定主要依循環境部監資司之 AQF 空品預報系統與相關研究計畫 (鄭芳怡, 2019)，在此不多加贅述。

本研究篩選 2020~2021 年臺灣臭氧好發季節事件日評估全國與各大空品區高 OFP 污染源之 O₃ 減量成效，包括 2020 年 09 月底與 2021 年 10 月初兩個事件日 (圖 7)。兩事件日發生期間之綜觀天氣皆以弱綜觀為主 (穩定高壓型態，地表大氣呈現低風速與相對穩定情形，不利污染物擴散)。礙於篇幅限制，O₃、NO_x 與 VOCs 模擬與觀測比對部分 (包括 NMHC 與 PAMS 光化觀測校驗) 可參考相關研究成果 (鄭芳怡, 2019)。

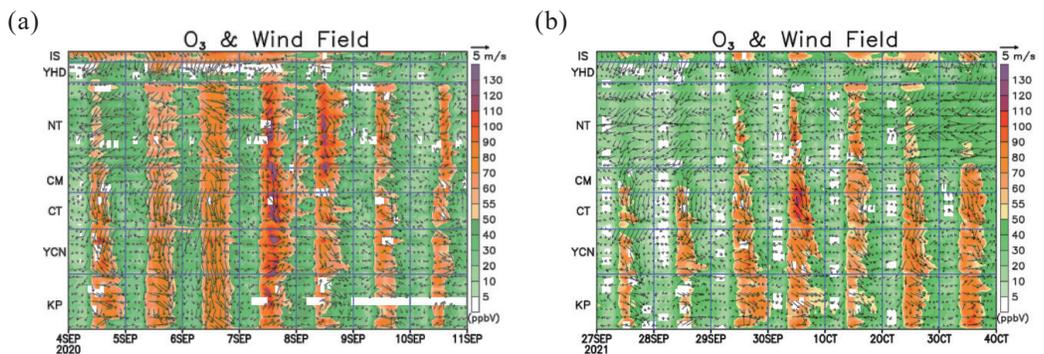


圖 7 (a)2020 與 (b)2021 事件日期間臺灣空品監測站 O₃ (ppb) 與風場觀測，包括離島 (IS)、宜花東 (YHD)、北北基桃 (NT)、竹苗 (CM)、中彰投 (CT)、雲嘉南 (YCN) 與高屏 (KP) 地區測站 (鄭, 2019)

4.2 「精準減量」策略模擬情境

O₃ 前驅物來源包括人為與生物源排放，為釐清 O₃ 前驅物「精準減量」管制對象，理論上應對所有會產生 O₃ 的 VOCs 排放源進行 OFP 計算。然而，過去研究描述本事件日發生時，臺灣都會地區空品測站之 O₃ 來源主要以人為排放為主 (Chen et al., 2024)，因此本研究設定以人為污染源 VOCs 排放進行研析。TEDS 排放清冊中之 VOCs 排放源包括點源、線源與面源，雖然皆可使用「精準減量」策略計算個別排放對象之 OFP 值；然而，除了點源係透過清查與空污費申報等具備較詳盡的污染源排放量與索引，線源與面源大多使用人口活動數據與排放係數等方式推估，在誤差上會高於點源，因此本研究首先將「精準減量」策略應用於點源管制。

針對高 OFP 污染源，後續將使用 CMAQ-PAMS 進行排放源靈敏度試驗，主要為對照污染源 VOCs 排放前後之 O₃ 模擬結果差異，作為其 O₃ 減量或貢獻 (ΔO_3)。減量情境包括：

- 一、全臺點源 OFP 前五大行業。
- 二、北、中、南三大空品區 OFP 前十大工廠。

理論上不可能完全使特定行業或工廠之 VOCs 零排放，因此本研究之減量情境可以作為量化高 OFP 行業或工廠 VOCs 排放之 O₃ 貢獻；未來除了可針對關鍵污染源進行 EKMA 方法評估排放減量比例效益 (NO_x 或 VOCs 減量多少可以達到最佳的 ΔO_3 成效)，環境部或地方環保局若體認高 OFP 污染源有減量必要，則可以從高 OFP 對象著手進行 O₃ 減量管制與協商。

4.3 全臺點源前五大行業別臭氧減量成效

由前述 THC 排放量與 OFP 空間分佈 (圖 3) 已可看出熱區集中位置，因此可在空品測站位置上與鄰近或所屬熱區的測站模擬結果進行比較與分析 (圖 8)。首先由選取之空品站比對結果顯示模式模擬結果時序演變整體上與觀測結果吻合。各地區之 ΔO_3 代表當地前驅物減排後 O₃ 減少結果，因 O₃ 是白天光化所產生，所以 ΔO_3 發生時間以白天為主，到了夜間 ΔO_3 明顯遞減。此外，事件日模擬期間北部地區 (如：平鎮站)

與中部以北沿海地區(如：臺西站)在9月6日以前還是有受到境外移入 O_3 影響(O_3 無顯著日夜高低值變化)，中部位置較內陸與南部的測站基本上以本地影響為主(如：小港站)。

比對全臺前五大 OFP 行業別 VOCs 減排後之 O_3 減量，在前述所提及的北(新北-桃園工業區)、中(雲林麥寮工業區)、南(高雄臨海工業區)OFP 熱點區域，統整鄰近各測站的最大 O_3 減量範圍(北、中、南熱點以新北市和桃園市、雲林縣和嘉義縣、高雄市之空品站統計)，顯示事件日模擬期間，由北、中、南空品區測站的最大 VOCs 減量(Δ VOCs)範圍為 6.5~140 ppbC、7~60 ppbC、4~100ppbC，最大 ΔO_3 範圍為 0~4.5 ppb(桃園龍潭站無 O_3 減量)、1.4~7 ppb、1.2~2.7 ppb。測站 O_3 是否減量與其位置是否在高 OFP 污染排放後之 O_3 減量氣團移動路徑有關。以龍潭站為例，整個事件日模擬期間皆無 O_3 減量，主因為其與北區 OFP 前五大行業的位置較遠，故其 O_3 減量未在該測站顯現；臺西站(圖 8b)位於麥寮工業區的下風位置(之一)，因此容易顯現出園區 VOCs 減排後之 O_3 減量效果。

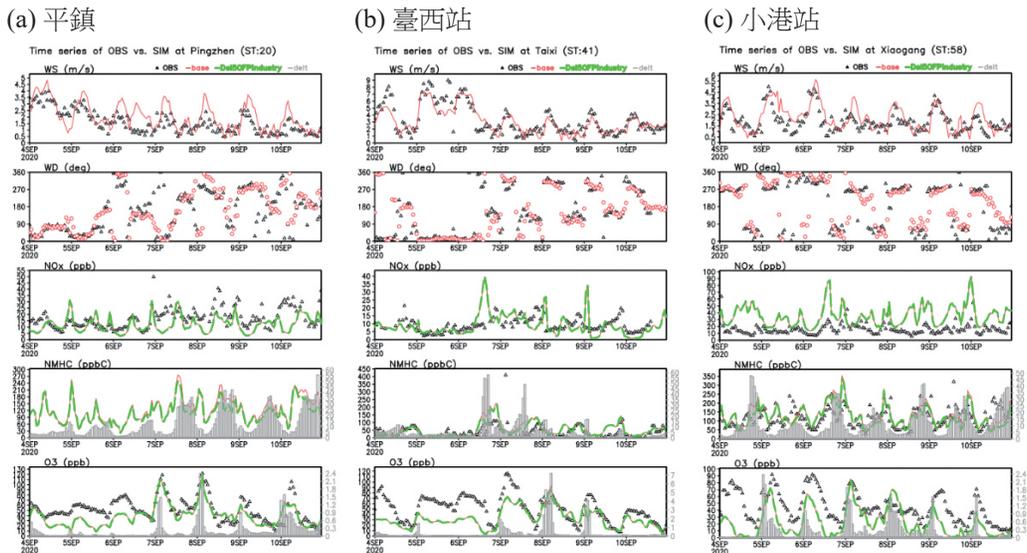


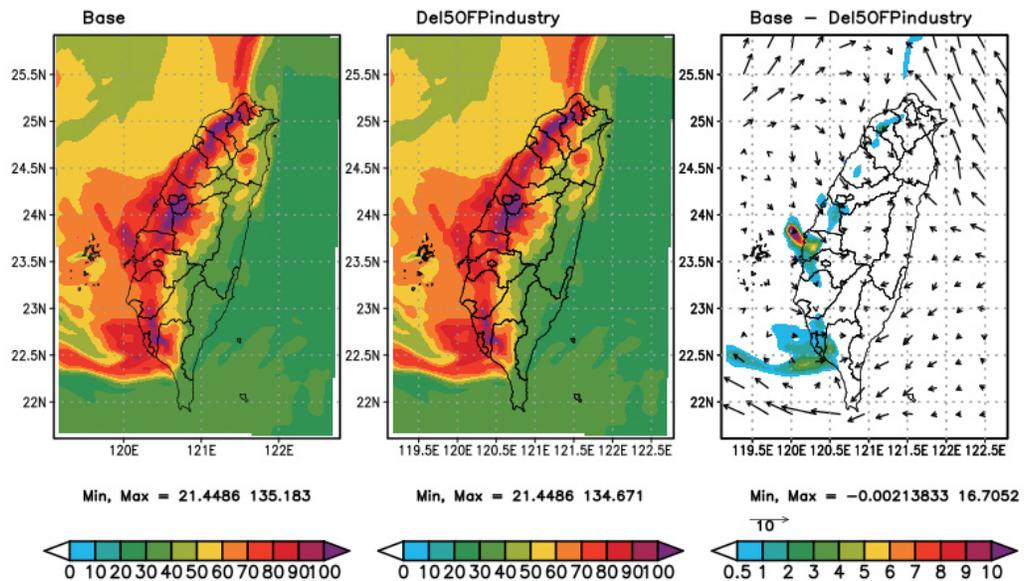
圖 8 (2020 年 09 月事件日空品站風場、 O_3 前驅物與 O_3 小時時序圖。三角點為空品觀測值，實線為 CMAQ-PAMS 模擬值(紅色實線為基本案例模擬，綠色虛線為前五大 OFP 行業別減排後模擬值)，柱狀圖為 OFP 前五大行業減排結果。日期標示時間為上午 8 時(本團隊整理)

圖 9 為基準案例與點源前五大 OFP 行業減排後之 O_3 與最大 ΔO_3 空間分佈。事件日模擬期間最大 1h- ΔO_3 發生時間為 9 月 8 日上午 11 時，8h- ΔO_3 發生時間為 09 月 08 日上午 12 時，以中部麥寮園區的 O_3 減量最顯著，分別為 $\Delta O_3 = 16.7$ ppb 與 5.3 ppb，約佔該時地 O_3 小時與八小時值 18% 與 8% ($16.7/95 \sim 0.18$ 、 $5.3/67 \sim 0.08$)。其二 ΔO_3 顯著的地區為高雄臨海地區，再者為新北與桃園地區。

上述為 2020 年事件日模擬結果，2021 年事件日呈現相似情形，不再贅述。值得注意的是，由過去研究顯示臺灣西半部多為 VOCs-limited 區域，因此 NO_x 自排放源排放後，不見得會馬上產生 O_3 ，需要遇上 VOCs 後才會進行一連串光化作用並產生 O_3 ；模擬結果顯示 ΔO_3 位置鄰近點源排放源位置，代表臺灣西部大多為 NO_x -rich 區域，因此當 VOCs 從源頭排放後，在大氣條件穩定且不利擴散情況下，即會在排放源頭附近產生 O_3 ，因此管制高 OFP 點源所產生之 O_3 減量效果會直接在鄰近排放源附近地區反映。

(a) 1h- O_3 ; 2020 年 09 月 08 日上午 11 時

O_3 conc. (ppbV) on 03Z08SEP2020



(b) 8h- O_3 ; 2020 年 09 月 08 日上午 12 時

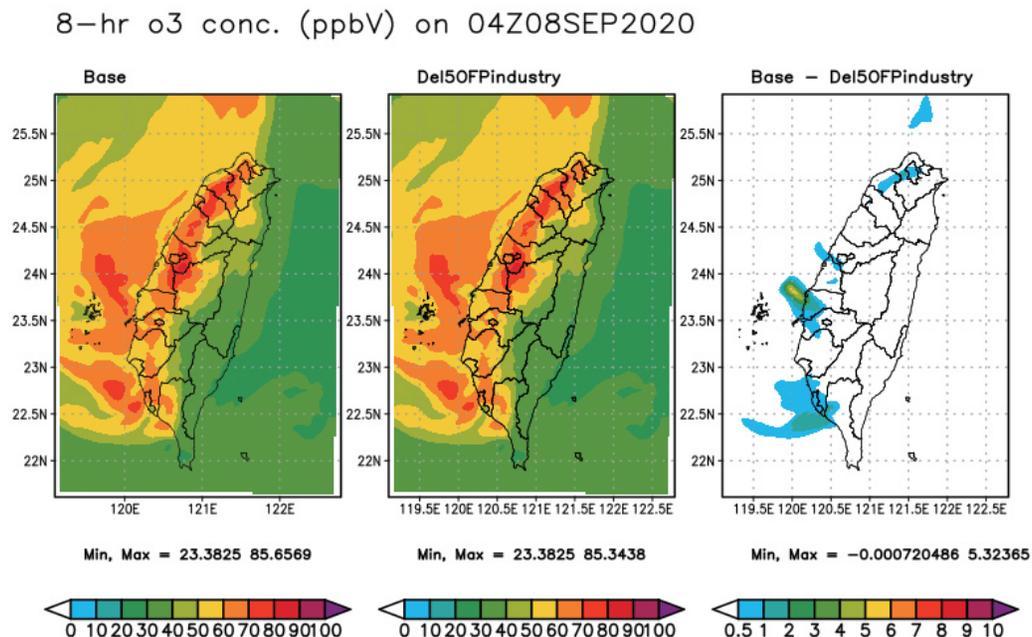


圖 9 全臺點源 OFP 前五大行業別最大 ΔO_3 模擬空間分佈。其中 (a) 為最大 1hr- ΔO_3 發生時間，(b) 為最大 8h- ΔO_3 發生時間。Base 為初始模擬值，Del50FPindustry 為前五大 OFP 行業別減排後模擬值，單位：ppb(本團隊整理)

兩個事件日之低風速與穩定大氣為導致空氣污染物不易平流與擴散主要原因，污染物高濃度亦與秋冬季節大氣邊界層較低有關。因此在類似事件日(臭氧好發季節)針對高 OFP 排放源進行精準減量管制，可以有效減少關鍵污染源 VOCs 濃度，進而減少 O_3 濃度。由模式模擬結果，顯示全臺灣西半部空品站在高 OFP 污染源減量後，均可得到 O_3 減少，代表臭氧前驅物的「精準減量」或「優先減量」對臺灣各地 O_3 減量均有成效。

4.4 北、中、南三大空品區 OFP 前十大工廠臭氧減量成效

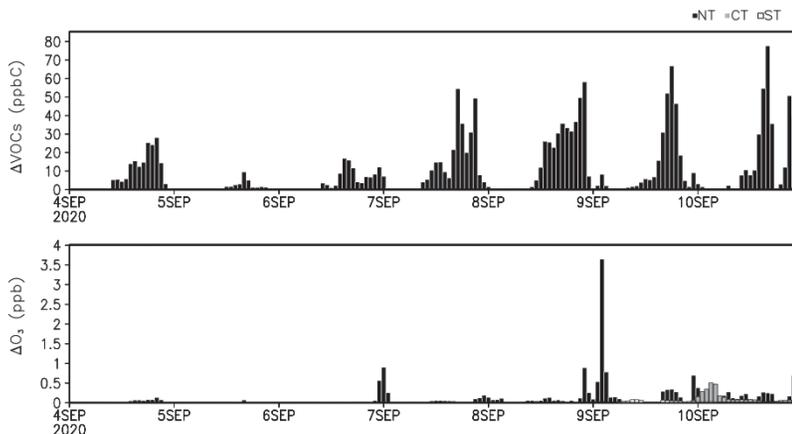
綜整北、中、南三大空品區點源 OFP 前十大工廠減排後的 ΔO_3 結果，主要前十大工廠位置以及各地區內的小尺度氣象場特徵有關。各區 OFP 前十大工廠的 ΔO_3 可參考圖 8~9 方法，分析臺灣整體與測站之 ΔO_3 幅度(由於分析方法與行業別相同，

在此僅簡述研析結果)。以全臺灣 1h- ΔO_3 減量幅度而言，中區 > 南區 > 北區；以 1h- ΔO_3 影響範圍而言，中區 > 北區 > 南區 (與 OFP 工廠分佈疏密有關)，中區工廠減排所得之 1h- ΔO_3 值最大；8h- ΔO_3 減量幅度仍以中區為首，發生地點為麥寮園區的 VOCs 減排後所帶來的 ΔO_3 減量。8h- ΔO_3 影響幅員範圍由大而小依次為南區 > 中區 > 北區，由於南部空品區的風場導引氣流較強，因此有利於 8h- ΔO_3 傳輸。

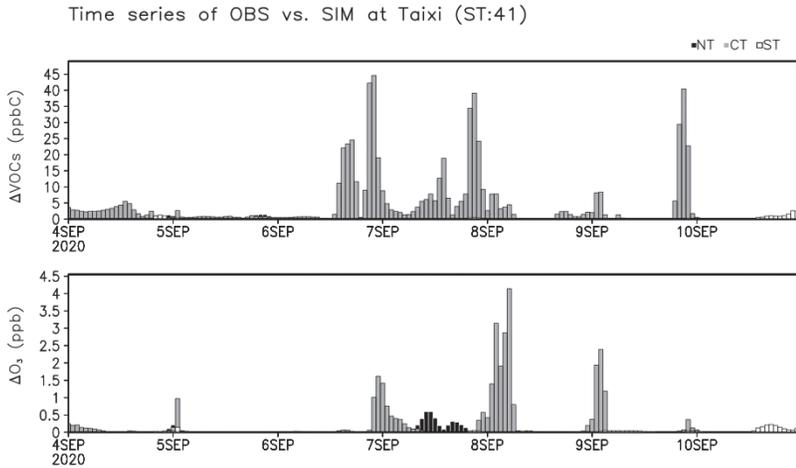
相較於 2020 年事件日，2021 年事件日各空品區的最大小時 ΔO_3 減量值略為減少，主要因為綜觀天氣條件差異 (大陸高壓影響臺灣大氣程度較大) 導致 2021 年 09 月事件日的 ΔO_3 氣團之污染物濃度累積程度不如 2020 年事件。由此可見不同天氣型態會影響各空品區前十大工廠 ΔO_3 減量的程度；綜合兩個臭氧好發季節的事件日分析結果，當臺灣綜觀環境有利於大氣穩定條件生成時，當地氣團有幅合現象，有利於污染物累積，因此對於 ΔO_3 減量幅度最明顯。

除了不同減排情境的 ΔO_3 結果，另一個值得注意切入點為不同空品區減量對於鄰近地區影響。圖 10 為 2020 年事件日各空品區鄰近 OFP 工廠測站之 $\Delta VOCs$ 與 ΔO_3 時序圖。結果顯示選取測站 ΔO_3 主要受到鄰近 OFP 工廠減排影響，跨區 ΔO_3 減量則出現遞減趨勢。以大園站而言，鄰近桃園高 OFP 工廠，最大 1h- ΔO_3 約為 3.5 ppb；以臺西站而言，臨近麥寮園區，最大 1h- ΔO_3 約為 4 ppb；以林園站而言，鄰近高雄臨海工業區之高 OFP 工廠，最大 1h- ΔO_3 約為 4 ppb。在發生最大 1h- ΔO_3 前，會有較高 1h- $\Delta VOCs$ 發生。

(a) 大園站 Time series of OBS vs. SIM at Dayuan (ST:18)



(b) 臺西站



(c) 林園站

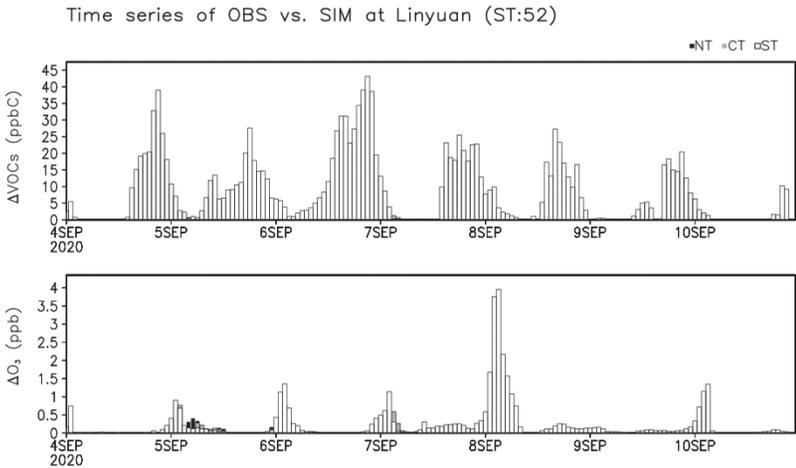
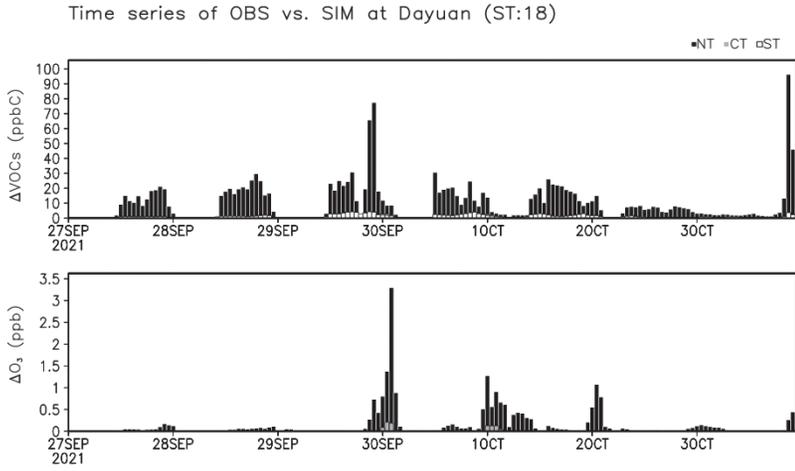


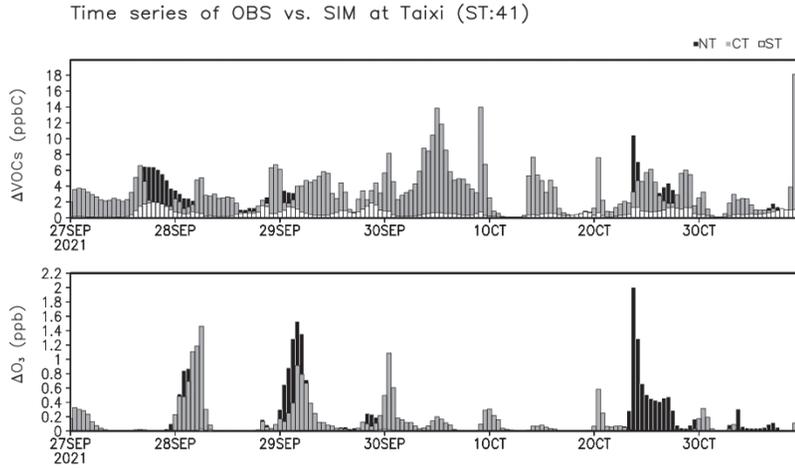
圖 10 2020 年事件日空品站 ΔVOCs 與 ΔO_3 時序。黑色、灰色與白色柱狀圖依序代表北 (NT)、中 (CT)、南 (ST) 三大空品區 OFP 前十大工廠貢獻。日期標示時間為上午 8 時 (本團隊整理)

2021 年事件日 (圖 11) 與 2020 年事件日各測站逐時 ΔO_3 有類似情形。比較各大空品區 OFP 前十大工廠減排後當地測站 ΔO_3 結果，顯示 2021 年事件日期間，北部與南部空品區 ΔO_3 受到當地排放減量主導，中部地區 ΔO_3 則明顯受到北部 ΔVOCs 影響，南部空品區甚至有少許北部排放之 ΔO_3 貢獻 (與東北風傳輸作用較強有關)。綜上，當綜觀天氣趨於大氣不穩定的情況時 (如東北季風增強時)，在強勁東北風的尾流地區，易於將強勁氣流所帶來的污染物匯聚， O_3 跨區傳輸現象會更顯著。

(a) 大園站



(b) 臺西站



(c) 林園站

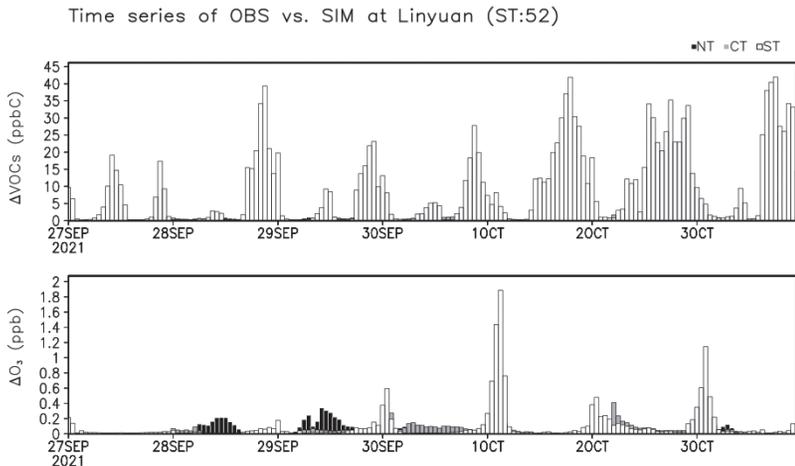


圖 11 2021 年事件日空品站 Δ VOCs 與 Δ O₃ 時序 (標示與圖 10 相同) (本團隊整理)

過去本團隊曾經對於臺灣風場類型做過統計 (Chen et al., 2018)，依據風向轉變情形，可以分為傳輸、環流與擴散等風場。不同風場的大氣條件對於污染物在大氣環境中物理化學過程皆有所不同，因此用風場類型來對 O_3 分類亦為了解高 O_3 濃度發生的方法之一。然而，對於臭氧好發季節之高臭氧診斷，除了有大氣擴散條件 (即風場特徵) 需要考慮，不同季節之大氣溫度差異所導致的邊界層高低亦為促使污染物濃度累積的因素之一。此外，以點源為例，每一家工廠或煙囪在不同季節的排放強度不見得都相同 (如待機或旺季加工等差異發生)，因此排放與氣象條件皆為管制 O_3 時需要考量的因素。臺灣的臭氧好發季節為秋季，因此大氣邊界層發展高度相對夏季較低，先天上已經有利於污染物在大氣環境中累積。

不同臭氧好發季節的污染源排放特徵與 O_3 減量效益應成為下階段臭氧前驅物「精準減量」應該檢視的重點之一，如果秋冬或年末為高 OFP 產業旺季，則其排放將提供更多臭氧前驅物導致 O_3 劣化；此外，不同季節的大氣擴散條件不同，應有不同的高污染管制作為。在減少產業衝擊的前提下，可以針對不同空品區 (或特定區域) 的高臭氧劣化進行解析，嘗試了解即便在大氣邊界層條件有利污染物累積與污染物排放強度較高之季節，是否可以透過污染物排放強度調節 (如增加年初或夏季的產能)，或在特定風場條件發生時，對特定區域的高 OFP 污染源進行降載，以弱化高 O_3 的主觀生成條件 (特定風場條件發生可以參考過去氣象與空品觀測資料進行解析)。而對於未來臭氧好發季節，風場條件可透過氣象及空品預報中所提供之風場預報先行診斷，提供高 O_3 預警給特定空品區，進而對高 O_3 發生進行預防作為。

綜合以上論述，有別於過去空污預警以全盤式的污染類別進行防制，在 O_3 前驅物「精準減量」或「優先減量」的策略下，本研究篩選全國與各空品區的高 OFP 污染源，並透過空品模式量化其對於 O_3 貢獻，具體量化高 OFP 污染源對於 O_3 減量成效。對於臺灣臭氧好發季節管制，可以整合預報與臭氧「精準減量」研究成果，在特定風場條件下對不同高 OFP 污染源進行篩選式的管理方法，以產生對 O_3 減量最有效益之管理策略。

4.5 不同模擬情境綜合比較

表 1 提供綜整目前計畫所擬定的「精準減量」策略下，2020 年 09 月事件日模擬結果之量化指標，包括全國前五大行業別與各空品區 VOCs 減排 (Δ VOCs) 後的 Δ O₃ 減量，以小時值加總、八小時值加總與每日最大八小時值加總顯示。統計結果為對整個案例模擬期間全臺灣的 Δ VOCs 與 Δ O₃ 進行統計。單純由 Δ O₃ 減量大小無法對不同區域、不同管制方法的結果進行「效率」比較，僅能稱為臭氧減量「淨」成效。所謂精準減量或優先減量之 O₃ 減量效率，可透過歸一化 (Normalization) 之量化方式來呈現 (亦即用一個基準來比較臭氧減量成效)；以表 1 為例，提供小時和八小時的 Δ O₃ 作為比較對象，歸一化的方式可以透過 (1)VOCs 減排筆數、(2)VOCs 減排排放量以及 (3)VOCs 減排後的濃度減量作為基準。表列 C/A 與 D/B 為目前選用的減量效益指標，為以上述 (3)VOCs 減排後的濃度減量作為基準後，所得到的精準減量臭氧減量效益；以小時值而言，全國、北，中，南的小時臭氧「減量效益」分別為 0.12、0.05、0.07 與 0.12 ppb O₃/ppbC VOCs。若使用不同的比較基準，可以顯示不同的減量效率；以使用 (2) VOCs 減排排放量而言，得到的小時值全國、北，中，南的小時臭氧減量效率則分別為 5.85、4.80、5.33 與 6.91 ppb O₃/Mt VOCs。然而，使用 (1) 和 (2) 為基準，因為是以「年」為單位，而模式所得的 Δ O₃ 或 Δ VOCs 是以「小時」為單位，因此會有時間尺度上之差異；有鑑於此，目前以 (3) 所得比值作為減量效率量化指標相對合理。

表 1 2020 年事件日「精準減量」臭氧減量效益統計 (本團隊整理)

統計值 \ 管制策略	全國 前五大行業	北區 前十大工廠	中區 前十大工廠	南區 前十大工廠
VOCs 排放筆數 ^{註 1}	9,029	266	627	502
VOCs 排放量 (Mt/yr) ^{註 2}	23,176	7,652	6,408	5,183
A: Δ VOCs 小時值加總 ^{註 3} (ppbC)	1,727,755	684,417	520,392	287,586
B: Δ VOCs 八小時值加總 (ppbC)	1,658,558	659,721	497,391	272,626
C: Δ O ₃ 小時值加總 (ppb)	135,533	36,743	34,147	35,800

管制策略 統計值	全國 前五大行業	北區 前十大工廠	中區 前十大工廠	南區 前十大工廠
D: ΔO_3 八小時值加總 (ppb)	132,582	36,305	33,381	34,312
E: $\Delta VOCs$ 每日最大八小時值加總 (ppbC)	127,142	49,758	44,500	20,598
F: ΔO_3 每日八小時值加總 (ppb)	9,976	2,839	2,665	2,298
C/A (ppb O_3 /ppbC VOCs)	0.08	0.05	0.07	0.12
D/B (ppb O_3 /ppbC VOCs)	0.08	0.06	0.07	0.13
F/E (ppb O_3 /ppbC VOCs)	0.08	0.06	0.06	0.11

註 1: TEDS 排放清冊點源總筆數為 239,008。

註 2: TEDS 排放清冊點源 THC 總排放量為 81,952 Mt/yr。

註 3: ΔO_3 與 $\Delta VOCs$ 統計 2020 年 09 月 04~10 日期間模擬結果。

全國前五大行業別因為囊括較廣泛的點源筆數與排放量，因此 $\Delta VOCs$ 和 ΔO_3 皆遠大於各區減量，其小時值 $\Delta VOCs$ 減量約為各空品區 2.5~6.6 倍以上，而 1h- ΔO_3 約為各空品區 4 倍以上；8h- ΔO_3 亦有類似情形。若以模擬全臺灣減量加總的 ΔO_3 / $\Delta VOCs$ 比值作為整體 O_3 減量效率指標，其由大而小為：南區 > 全國 > 中區 > 北區。南區指標之所以為目前減量策略中最大，主要因為其 $\Delta VOCs$ 相對於其他空品區略少；以 1h- $\Delta VOCs$ 而言，南區約為北、中區 $\Delta VOCs$ 的一半（主要因為南區前十大工廠 VOCs 排放量較少，且地理位置分佈較其他空品區集中），然而卻得到與北、中區量值相當的 ΔO_3 減量結果。然而，因為各空品區的地理環境不同，受到的盛行風氣流與地形效益影響程度不一樣（如：北區受到東北風的影響會大於中南區，而南區在穩定條件下因為氣流侷限在小範圍，即便 $\Delta VOCs$ 相對濃度不高卻仍得到高 ΔO_3 減量結果），因此在 2020 年事件日所得到的南區減量效率為最高。

表 2 為 2021 年事件日的統計效益統計結果。比較兩個臭氧好發季節的 O_3 減量效率，顯示全國、北、中、南 O_3 減量效率為 0.07、0.07、0.05 與 0.02 ppb O_3 /ppbC VOCs，與 2020 年事件日分區減量效率高低不同。對照北、中、南分區 OFP 前十大工廠 VOCs 排放量，顯示北區 > 中區 > 南區；以 O_3 前驅物排放量而言，不考慮 NO_x 排放量情況下 (NO_x -rich)，北區理應有最高 O_3 減量效率，然而 2020 年事件日呈現南

區 > 中區 > 北區相反結果，主因為模擬期間日間綜觀天氣導引氣流較強，所帶來東北風或西南風不利於 O₃ 減量累積，形成 O₃ 後便往中南部 (外海) 或臺灣北方 (外海) 傳輸；2021 年事件日模擬期間東北風較弱，因此累積較高 ΔO₃。

表 2 2021 年事件日「精準減量」臭氧減量效益統計 (本團隊整理)

統計值 \ 管制策略	全國 前五大行業	北區 前十大工廠	中區 前十大工廠	南區 前十大工廠
VOCs 排放筆數 ^{註 1}	9,029	266	627	502
VOCs 排放量 (Mt/yr) ^{註 2}	23,176	7,652	6,408	5,183
A: Δ VOCs 小時值加總 ^{註 3} (ppbC)	2,444,551	1,240,045	858,244	620,829
B: Δ VOCs 八小時值加總 (ppbC)	2,371,459	1,201,624	831,821	602,867
C: Δ O ₃ 小時值加總 (ppb)	177,971	83,668	35,693	13,333
D: Δ O ₃ 八小時值加總 (ppb)	175,630	82,519	35,266	13,158
E: Δ VOCs 每日最大八小時值加總 (ppbC)	152,044	75,529	56,167	35,663
F: Δ O ₃ 每日八小時值加總 (ppb)	12,061	5,590	2,449	1,071
C/A (ppb O ₃ /ppbC VOCs)	0.07	0.07	0.04	0.02
D/B (ppb O ₃ /ppbC VOCs)	0.07	0.07	0.04	0.02
F/E (ppb O ₃ /ppbC VOCs)	0.08	0.07	0.04	0.03

註 1: TEDS 排放清冊點源總筆數為 239,008。

註 2: TEDS 排放清冊點源 THC 總排放量為 81,952 Mt/yr。

註 3: ΔO₃ 與 ΔVOCs 統計 2021 年 09 月 27~10 月 03 日期間模擬結果。

比較全國前五大行業與各區前十大工廠 ΔO₃ 在各縣市減量幅度 (圖 12)，全國前五大行業在西部各縣市均有最高減量，東部與離島減量低。各區前十大工廠所帶來 O₃ 減量除了在當地產生 O₃ 減量 (北部前十大工廠在北部各縣市有不同程度減量)，在不同空品區也會有 O₃ 減量；由於事件日主要以東北風和西南風主導臺灣周遭大氣污染物傳輸，因此各區工廠減排會影響 ΔO₃ 跨區域傳輸；北空會影響鄰近的中空區域，甚至會影響南部地區，而南空工廠減排亦有影響北空的情形。

綜上，「精準減量」或「優先減量」的全國或分區減量策略在臭氧事件均有得到不同程度 O₃ 減量效率，全國前五大行業囊括最多污染源，O₃ 減量效率最高；北、中、南空品區 O₃ 減量與 VOCs 排放量成正比，但是受到各區域大氣擴散條件影響污染物演變，進而影響各區 O₃ 減量效率，通常在弱綜觀天氣條件下之 O₃ 減量效率會比較高。

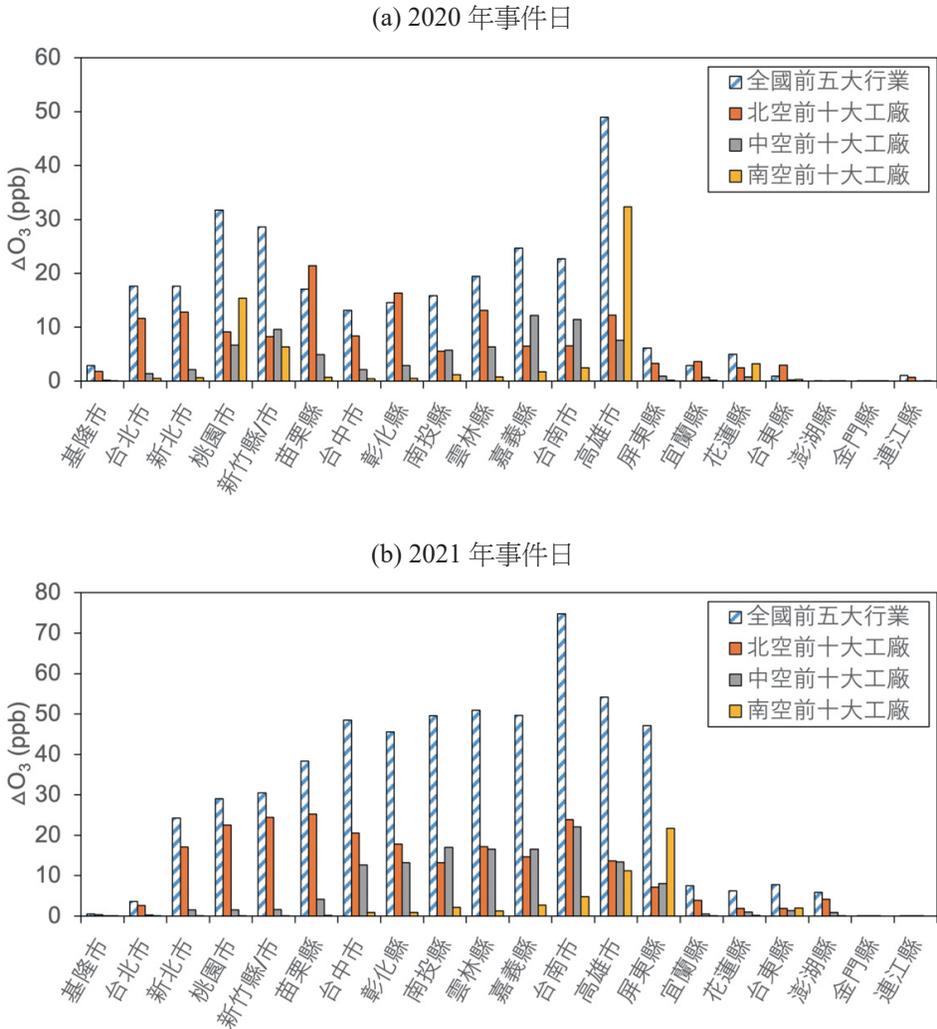


圖 12 全國與各區減量策略之 ΔO_3 平均值 (本團隊整理)

五、結論與建議

本研究使用臭氧前驅物「精準減量」策略，參考 MIR、TEDS 與 SCC 物種分配圖譜等數據，盤點全臺灣點源 OFP 前五大行業別與北、中、南空品區前十大工廠，進行減量策略示範，包括影響臺灣 O₃ 生成需最管制之行業及物種。由於目前環保法規尚未對高 O₃ 物種進行管制，為了得到最直接且有效管制策略，可參考其與 HAPs 之間之相關性（與「精準減量」同為管制 VOCs 但是管制目的不同，故可以交集兩者所篩選出的關鍵物種，相得益彰），提供未來聚焦管制臭氧與有害空氣污染物減量策略。

全臺灣點源 OFP 前三大行業分別為塑膠製品製造業、化學原材料製造業及塑膠原料製造業，OFP 物種為乙烯、甲苯、丙烯。北、中、南空品區 OFP 前十大工廠分佈位置，北區集中在桃園市、新竹縣與苗栗縣。中區以臺中市、雲林縣與臺南市為大宗，分佈較廣。南部則位於高雄市沿海地區，最為集中。

「精準減量」之全國或分區減量策略在臭氧好發季節事件中均有得到不同程度的 O₃ 減量效益，全國前五大行業所篩選污染源分佈較廣，在好發季節（事件日）中均有不錯的 O₃ 減量成效與效益。大氣擴散條件會影響北、中、南空品區的 O₃ 減量成效與效益；弱綜觀的天氣條件（穩定大氣）所得到的 O₃ 減量效益較高。未來將深入探討「精準減量」策略在不同大氣傳輸條件下的臭氧減量成效，以了解最有利於「精準減量」策略進行的大氣擴散條件下，O₃ 減如何影響當地或跨區傳送 O₃。

參考文獻

- 王家麟 (2021)，桃園市固定污染源臭氧管制策略評估工具建置，國立中央大學，桃園市環保局。
- 王家麟 (2022)，臺灣高臭氧生成機制長期趨勢分析與臭氧前驅物評估與管制方法建立，國立中央大學，環境部。
- 張良輝 (2020)，建置 AERMOD 本土化模式及空品模式審驗制度專案工作計畫 Rep.，環保署。
- 張良輝 (2021)，台灣空氣污染防制計畫對空氣品質改善成效之模擬與評估，雲林科技大學，環境部。
- 陳杜甫 (2023)，精準控管各縣市 NO_x 及 NMHC 排放量以改善 O₃ 污染，雲林科技大學，環境部。
- 彭彥彬 (2021)，高屏空品區臭氧成因探討 - 以小港及琉球為例，中山大學環境工程研究所，環境部。
- 鄭芳怡 (2019)，影響空氣品質變化之氣象特性分析與預報技術提升計畫，國立中央大學，環境部。
- Avery, R. J. (2006), Reactivity-Based VOC Control for Solvent Products: More Efficient Ozone Reduction Strategies, *Environmental Science & Technology*, 40(16), 4845-4850, doi:10.1021/es060296u.
- Byun, D., and J. K. S. e. Ching (1999), Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System Rep.
- Carter, W., G. Tonnesen, and G. Yarwood (2003), INVESTIGATION OF VOC REACTIVITY EFFECTS USING EXISTING REGIONAL AIR QUALITY MODELS.
- Carter, W. P. L. (1994), Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds, *Air & Waste*, 44(7), 881-899, doi:10.1080/1073161X.1994.10467290.

- Carter, W. P. L. (2010), Development of the SAPRC-07 chemical mechanism, *Atmospheric Environment*, 44(40), 5324-5335, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.026>.
- Chang, J., S. Griffith, S. Kong, M.-T. Chuang, and N.-H. Lin (2023), Development of a CMAQ-PMF-based composite index for prescribing an effective ozone abatement strategy: a case study of sensitivity of surface ozone to precursor volatile organic compound species in southern Taiwan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 6357-6382, doi:[10.5194/acp-23-6357-2023](https://doi.org/10.5194/acp-23-6357-2023).
- Chen, S.-P., W.-T. Liu, F.-Y. Cheng, C.-H. Wang, S.-M. Huang, and J.-L. Wang (2024), Ozone containment through selective mitigation measures on precursors of volatile organic compounds, *Science of The Total Environment*, 908, 167953, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167953>.
- Chen, S.-P., C.-H. Lu, J. E. Davies, C.-F. Ou-Yang, N.-H. Lin, A. K. Huff, B. R. Pierce, S. Kondragunta, and J.-L. Wang (2023), Infusing satellite data into aerosol forecast for near real-time episode detection and diagnosis in East Asia, *Science of The Total Environment*, 856, 158797, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158797>.
- Chen, S.-P., C.-H. Wang, W.-D. Lin, Y.-H. Tong, Y.-C. Chen, C.-J. Chiu, H.-C. Chiang, C.-L. Fan, J.-L. Wang, and J. S. Chang (2018), Air quality impacted by local pollution sources and beyond – Using a prominent petro-industrial complex as a study case, *Environmental Pollution*, 236, 699-705, doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.091>.
- Cheng, F.-Y., C.-Y. Feng, Z.-M. Yang, C.-H. Hsu, K.-W. Chan, C.-Y. Lee, and S.-C. Chang (2021), Evaluation of real-time PM_{2.5} forecasts with the WRF-CMAQ modeling system and weather-pattern-dependent bias-adjusted PM_{2.5} forecasts in Taiwan, *Atmospheric Environment*, 244, 117909, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117909>.

- Cohan, D. S., A. Hakami, Y. Hu, and A. G. Russell (2005), Nonlinear Response of Ozone to Emissions: Source Apportionment and Sensitivity Analysis, *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6739-6748, doi:10.1021/es048664m.
- Dunker, A. M., G. Yarwood, J. P. Ortmann, and G. M. Wilson (2002), The Decoupled Direct Method for Sensitivity Analysis in a Three-Dimensional Air Quality Model Implementation, Accuracy, and Efficiency, *Environmental Science & Technology*, 36(13), 2965-2976, doi:10.1021/es0112691.
- Kopplitz, S., H. Simon, B. Henderson, J. Liljegren, G. Tonnesen, A. Whitehill, and B. Wells (2022), Changes in Ozone Chemical Sensitivity in the United States from 2007 to 2016, *ACS Environmental Au*, 2(3), 206-222, doi:10.1021/acsenvironau.1c00029.
- Luecken, D. J., S. L. Napelenok, M. Strum, R. Scheffe, and S. Phillips (2018), Sensitivity of Ambient Atmospheric Formaldehyde and Ozone to Precursor Species and Source Types Across the United States, *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4668-4675, doi:10.1021/acs.est.7b05509.