

臭氧導致 PM2.5

中山大學最新研究：水扮演多重角色

接近地表的臭氧往往來自工業或交通等人為空氣污染，不僅會對生物體造成氧化傷害，更是衍生型 PM2.5 的重要氣體前驅物。臭氧如何介入衍生型 PM2.5 的生成，以及有哪些重要因子對其造成影響？是全球各國科學家亟欲釐清的重要議題。國立中山大學化學系副教授兼氣膠科學研究中心主任王家蓁研究團隊，利用真空紫外光氣膠光電子光譜技術，探討環境中重要的揮發性有機物「檸檬烯」與臭氧反應所生成的衍生型 PM2.5，並發現大氣中的水，在介入衍生型有機 PM2.5 的生成機制、熱力學特性、電子能級結構及產率上扮演多重且重要角色；此外，環境中（包括室內）臭氧濃度對促成衍生型 PM2.5 生成的效應，及其對健康可能造成的影響不容忽視。此最新研究成果發表於國際重要期刊物理化學快訊（J. Phys. Chem. Lett），並獲選為當期內頁封面。

環境中有許多揮發性有機物質（volatile organic compounds, VOCs），特別是具有碳碳雙鍵的不飽和碳氫化合物，一旦進入到環境中很容易與大氣中的氧化物發生一連串複雜的化學反應而產生微小的氣膠細懸浮微粒。這些經複雜反應所衍生的細懸浮微粒，往往粒徑小於 2.5 微米，可歸類於衍生型 PM2.5。衍生型 PM2.5 在總體細

懸浮微粒污染中大約佔 7 至 8 成。研究團隊此次探討的檸檬烯是環境中含量第三高的單萜烯類，除了來自自然界本身生物源性的釋放，人類日常生活中也處處可見檸檬烯的存在，例如含有檸檬或柑橘香味的家用清潔用品、芳香精油等。過去有研究發現，使用含檸檬烯的產品可能使室內的檸檬烯濃度，比室外高出超過兩個數量級。由於檸檬烯具有兩個碳碳雙鍵，極易與環境中的臭氧發生反應，並形成衍生型 PM2.5，檸檬烯的臭氧化被認為是室內衍生型 PM2.5 的最重要來源之一。

「過去已有研究指出，暴露於包括檸檬烯在內等單萜烯類臭氧化所產生的衍生型 PM2.5，可能對呼吸道及肺部造成氧化傷害、發炎反應及肺損傷等不良健康效應。」王家蓁指出，研究團隊利用國家同步輻射研究中心產生的真空紫外光做為游離光源，透過真空紫外光氣膠光電子光譜技術，全球首次實驗觀測到檸檬烯氣膠以及其臭氧化所形成的衍生型 PM2.5 的價電子能級結構，且發現當檸檬烯氣膠含水量愈高時，其所生成的衍生型 PM2.5 產量也愈高。在此次研究中所測試含水量最高的實驗條件下，衍生型 PM2.5 的光電子產率比起無水狀態下可高達 4.8 倍。

研究團隊透過光電子光譜的解析，並結合泛函密度量子力學計算及高解析度液相層析電噴灑質譜量測，研究團隊發現水直接介入

檸檬烯與臭氧的反應過程當中，並影響此過程中克里奇反應中間體的化學。水一方面扮演催化劑的角色，降低克里奇反應中間體異構化產生氫過氧化物的能量障礙，一方面又扮演反應物的角色，直接與臭氧化過程中產生的克里奇反應中間體反應，因而開闢新的衍生型 PM2.5 形成途徑，其中又以水二聚體（water dimer）的影響最為顯著。研究結果亦發現在含水的情況下所生成的衍生型 PM2.5 與無水情況下具有不同的化學組成。

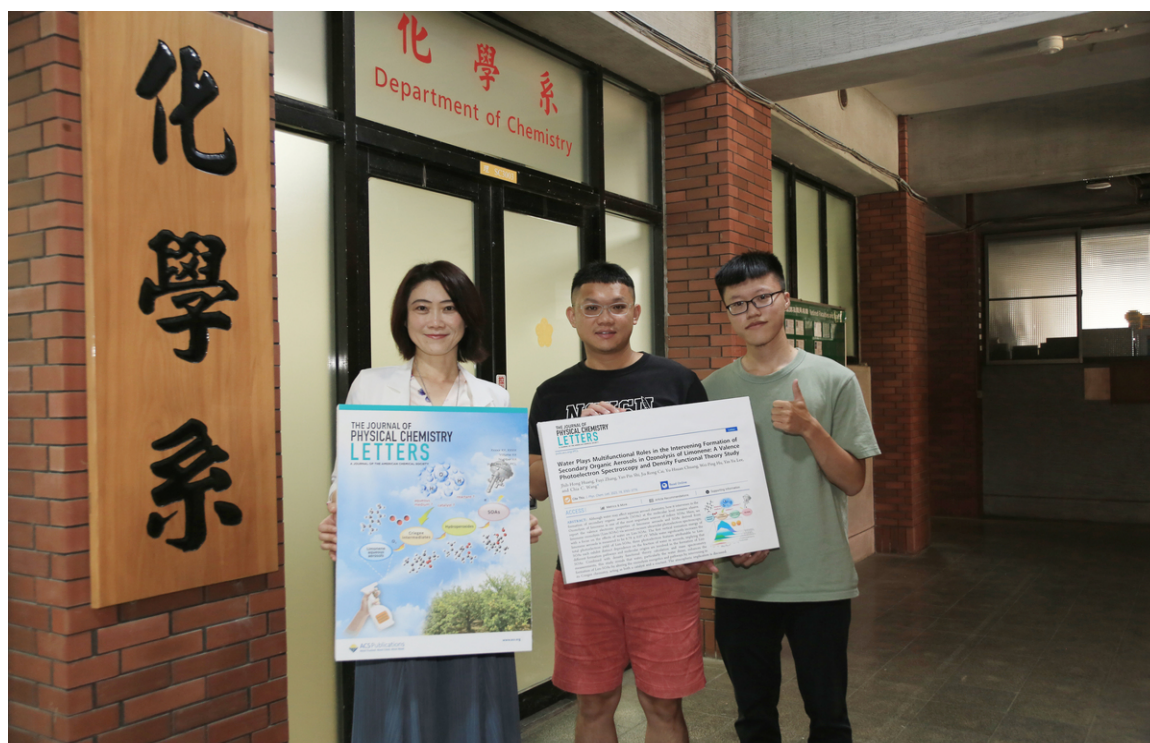
水是大氣中氮與氧之外成分第三高的物質，過去人們往往僅將水視做一種極性介質，而非催化劑或反應物。然而近年來愈來愈多研究發現在空氣污染較嚴重的區域，大氣中水的重要性有增加的趨勢。此議題在相對濕度較歐美國家高出許多且空氣污染更嚴重的亞洲國家更加不容忽視。此最新研究成果首次從分子層級揭示出水在參與單萜烯臭氧化導致衍生型 PM2.5 形成過程中的多重角色。由於目前全球大多數進行大氣化學反應的模式模擬並未將水列入考慮，因此可能低估了許多水可能參與其中的反應最終生成衍生型 PM2.5 的產量，並連帶影響判斷氣膠影響氣候變遷時的不確定性。

本研究揭示的另一個重要訊息則是環境中（包括室內）臭氧濃度對於衍生型 PM2.5 的貢獻及其對健康可能造成的影響不容忽視。王家蓁並指出，由團隊自行開發設計的真空紫外光氣膠光電子光譜

技術是目前全球解析度最高的探測氣膠價電子能級結構技術，此技術近來已被美國勞倫斯柏克萊國家實驗室的氣膠研究團隊沿用。本研究第一作者為中山大學化學系博士候選人黃志宏，跨校合作共同作者包括國家同步輻射研究中心李英裕博士及國立中正大學化生系胡維平教授。

論文連結：<https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.3c00560>





符合聯合國永續發展目標(SDGs)各細項目標

永續發展目標	細項目標
目標三：確保健康及促進各年齡層的福祉	3.9 在西元 2030 年以前，大幅減少死於危險化學物質、空氣污染、水污染、土壤污染以及其他污染的死亡及疾病人數。
目標四：確保有教無類、公平以及高品質的教育，及提倡終身學習	4.7 在西元 2030 年以前，確保所有的學子都習得必要的知識與技能而可以促進永續發展，包括永續發展教育、永續生活模式、人權、性別平等、和平及非暴力提倡、全球公民、文化差異欣賞，以及文化對永續發展的貢獻。
目標六：確保所有人都能享有水及衛生及其永續管理	6.6 在西元 2020 年以前，保護及恢復跟水有關的生態系統，包括山脈、森林、沼澤、河流、含水層，以及湖

	泊。
目標七：確保所有的人都可取得負擔得起、可靠的、永續的，以及現代的能源	7.1 在西元 2030 年前，確保所有的人都可取得負擔得起、可靠的，以及現代的能源服務。
目標八：促進包容且永續的經濟成長，達到全面且生產力的就業，讓每一個人都有一份好工作	8.4 在西元 2030 年以前，漸進改善全球的能源使用與生產效率，在已開發國家的帶領下，依據十年的永續使用與生產計畫架構，努力減少經濟成長與環境惡化之間的關聯。
目標十一：促使城市與人類居住具包容、安全、韌性及永續性	11.3 在西元 2030 年以前，提高融合的、包容的以及可永續發展的都市化與容積，以讓所有的國家落實參與性、一體性以及可永續發展的人類定居規劃與管理。
目標十三：採取緊急措施以因應氣候變遷及其影響	13.3 在氣候變遷的減險、適應、影響減少與早期預警上，改善教育，提升意識，增進人與機構的能力。
目標十四：保育及永續利用海洋與海洋資源，以確保永續發展	14.2 在西元 2020 年以前，以可永續的方式管理及保護海洋與海岸生態，避免重大的不利影響，作法包括強健他們的災後復原能力，並採取復原動作，以實現健康又具有生產力的海洋。
目標十五：保護、維護及促進領地生態系統的永續使用，永續的管理森林，對抗沙漠化，終止及逆轉土地劣化，並遏止生物多樣性的喪失	15.3 在西元 2020 年以前，對抗沙漠化，恢復惡化的土地與土壤，包括受到沙漠化、乾旱及洪水影響的地區，致力實現沒有土地破壞的世界。
目標十六：促進和平且包容的社會，以落實永續發展；提供司法管道給所有人；在所有的階層建立有效的、負責的且包容的制度	16.b. 促進及落實沒有歧視的法律與政策，以實現永續發展。
目標十七：強化永續發展執行方法及活化永續發展全球夥伴關係	17.14 提高政策的連貫性，以實現永續發展。