

# 建立同時分析土壤中有機磷酯阻燃劑與含溴阻燃劑方法

## Development of Analytical Method for Organophosphate Esters Flame Retardants and Brominated Flame Retardants Simultaneously

羅仕麟\*、蔡清蘭、吳仲平、李其欣、黃壬瑰、楊喜男

國家環境研究院檢測技術中心 sllo@moenv.gov.tw

### 摘要

電子產品、建築、傢俱與交通車輛等產品為符合安全法規的需要，市場對阻燃劑的需求趨勢不減反增。因為其使用範圍廣泛，阻燃劑的生物毒性與環境殘留逐漸受到關注，各國的法規也逐步對阻燃劑進行管制甚至在商品中禁用。2022年USEPA提出的污染物候選清單 5 (Contaminant Candidate List 5, CCL5)將磷酸三正丁酯 (Tributyl phosphate, TnBP)及磷酸三(2-氯乙基)酯((Tris(2-chloroethyl) phosphate, TCEP)列為毒性評估清單，2023年12月USEPA發布磷酸三(2-氯乙基)酯風險評估初稿，指出其對人類健康與環境有不合理的風險 (Unreasonable risk)，其它包含鏈狀與芳香族磷酸酯也都正在被評估毒性。此外，六溴環十二烷(Hexabromocyclododecane, HBCDs)主要添加在聚苯乙烯商品(如保麗龍，建築物隔音材質與保溫材質等)，因其具有生物累積性、長程傳輸以及生物毒性，在2013年被列入斯德哥爾摩公約中的持久性有機污染物，而本國亦在2014年由環保署(現環境部)將HBCDs納入毒性化學物質法列管，其中發泡聚苯乙烯(EPS)與壓出發泡成型聚苯乙烯(XPS)之製造仍被許可添加。由於有機磷酯阻燃劑中的化合物用途不單只作為防火，亦被用來做塑化劑或是塑膠黏度調和劑，因此商品中有可能混用多種阻燃劑。工廠製造、使用以及棄置過程中，不同的物化特性化合物經由不同的移動路徑如遷移(migration)、析出(leaching)或是釋放(release)而進入到環境中，因而容易在不同基質中進行殘留，其中土壤具有一定的吸附能力因而可能將這些污染物吸附，對土壤生態具有潛在的危害性。目前土壤中六溴環十二烷已有公告方法可引用，有機磷酯阻燃劑目前僅有相關文獻可供參考，考量樣品分析即時性與便捷性，以減少因不同分析方法的多次取樣而增加的分析與時間成本以及樣品時效性，本研究發展以液相層析串聯式質譜儀同時分析土壤中OPFRs以及HBCDs方法，並以真實土壤樣品進行方法驗證，使用2種固相萃取匣測試淨化效果，以評估前處理方法對兩者分析的回收率與提供可能的方法限制，建立的方法可提供後續環境調查、暴露評估與不同基質分析方法建立等學術研究與政策擬定之參考。

關鍵字：有機磷酯阻燃劑 (Organophosphate esters flame retardants, OPFRs)、六溴環十二烷 (Hexabromocyclododecane, HBCDs)、液相層析串聯式質譜儀 (Liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC/MS/MS)