

# 浅析土壤中半挥发性有机化合物的污染与防治

郎杭\* 张盼伟 赵轶凡 赵晓辉

中国水利水电科学研究院

DOI:10.12238/eep.v7i11.2310

**[摘要]** 半挥发性有机物(SVOCs)是一类具有复杂化学性质和多种环境行为的有机污染物,在环境科学领域占有重要地位。SVOCs广泛存在于各类工农业及生活垃圾中,其化学组成复杂、多组分特征复杂,其来源解析与作用机理研究尤为迫切。本文从三个方面对SVOCs展开分析与研究,首先,深入分析半挥发性有机物的来源,其次,深入剖析半挥发性有机物对土壤污染的影响作用,最后提出土壤半挥发性有机物污染控制的对策,意在为土壤污染治理提供数据支撑。

**[关键词]** 半挥发性有机化合物; 源解析; 土壤污染; 迁移转化

中图分类号: X131.3 文献标识码: A

## Source apportionment and characterization of semi-volatile organic compounds in soil.

Hang Lang\* Panwei Zhang Yifan Zhao Xiaohui Zhao

Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research

**[Abstract]** Semivolatile Organic Compounds (SVOCs), a category of organic pollutants with intricate chemical properties and various environmental behaviors, hold a significant position in the domain of environmental science. SVOCs are prevalently found in all types of industrial, agricultural, and domestic wastes. Their chemical composition is complex, and the multi-component characteristics are intricate. The research on source apportionment and action mechanisms of SVOCs is particularly pressing. This paper conducts an analysis and study of SVOCs from three aspects. Firstly, an in-depth analysis of the sources of semivolatile organic compounds is carried out. Secondly, a thorough exploration of the influence of semivolatile organic compounds on soil pollution is conducted. Finally, countermeasures for the pollution control of semivolatile organic compounds in soil are proposed, with the intention of providing data support for soil pollution governance.

**[Key words]** SVOCs; Source apportionment; soil pollution; migration and transformation

近几十年来,随着环境监测手段的不断发展,人们对土壤中SVOCs的分布特征、来源及影响机制的认识不断加深。开展SVOCs来源解析,可识别不同来源对环境污染的贡献,并有效识别关键污染源及关键控制点。同时,可系统研究SVOCs在土壤中的迁移转化与富集规律,揭示其环境行为特征与生态风险,为发展和优化土壤修复技术提供理论支撑。所以,对半挥发性有机物的来源解析及对土壤污染的影响研究具有重要意义。

### 1 半挥发性有机化合物的源解析

半挥发性有机物(SVOCs)的来源可分为两种,一种是自然源,另一种是人为源<sup>[1]</sup>。自然来源包括植物挥发性排放、森林火灾、火山喷发等,这些自然来源向大气及土壤中释放大量SVOCs。而人为的来源则更为复杂,有工业生产、运输、农业、家庭生活等方面的原因。在工业生产过程中,石油化工、金属加工等生产过程中可产生大量SVOCs,并通过机动车尾气、污水、固体废物等

途径进入环境。而交通排放的SVOCs以机动车尾气和船舶尾气为主。农业生产中使用的杀虫剂、除草剂、化肥等也是SVOCs的重要来源。另外,烧煤、使用清洁剂、装修材料、电器等日常生活中也会释放出SVOCs。

### 2 半挥发性有机化合物在土壤污染中的作用

#### 2.1 累积效应

半挥发性有机物(SVOCs)在土壤环境中的累积效应具有复杂而持久的特征,由于其挥发性低,当其进入土壤环境后,会在土壤颗粒表面或孔隙中缓慢累积。SVOCs在土壤中长期存在,并随时间增长而增加,增强了对环境和人类健康的危险性,同时还会对土壤理化性质造成深刻的影响,将改变土壤微观结构,进而影响土壤透水和气体交换性能<sup>[2]</sup>。同时SVOCs在土壤中长期积累,可与土壤重金属离子形成稳定复合体,进一步增强其难降解性,增加修复难度。其累积效应不仅对土壤健康构成威胁,而且可经

食物链逐级传递,对生态系统平衡产生影响。

## 2.2 生物可利用性

半挥发性有机物(SVOCs)对土壤污染具有复杂且重要的作用,尤其对污染物的生物有效性有重要影响。SVOCs是一种易吸附于土壤颗粒物表面的挥发性物质,具有较强的挥发性。SVOCs进入土壤后,可通过扩散、对流以及对有机质的吸附等方式与颗粒物紧密结合。这一结合特性对其在土壤中的迁移及生物有效性具有重要影响。强吸附往往会降低污染物的生物有效性,使其难以被土壤微生物及植物根系所吸收降解。此外,SVOCs降解产物可能存在毒性差异、迁移能力差异等问题。调控土壤有机质含量、改变土壤结构等理化性质,可部分调控SVOCs生物有效性,降低其生态风险。

## 2.3 迁移性

迁移性是指这些物质在土壤中迁移的能力,它受到土壤物理、化学和环境条件等多种因素的影响。由于SVOCs具有半挥发性,其在土壤中的运移具有垂向和水平向两种特征<sup>[3]</sup>。土壤的垂向运移主要受到重力作用及土壤孔隙结构的影响,这些物质可经降雨淋溶进入地下水系统,进而向更大范围扩散。而SVOCs的横向迁移主要通过地表径流、地下水和土颗粒输运三种途径传播。地表径流可携带SVOCs向其它地区扩散,在坡度较大、植被稀疏的地区尤为明显。同时,地下水水平流动也会导致SVOCs在地下水中的运移,地下水流速及流向又受到地质结构、水文等因素的影响,使得污染物在地下水系统中的分布面积不断增大。土壤颗粒的运动以风蚀和水力侵蚀为主,特别是在干旱、风沙严重的地区,颗粒中的SVOCs可被风吹长距离传输。土壤孔隙结构、颗粒吸附能力、有机质含量等因素均会影响SVOCs在土壤中的运移行为。如土壤孔隙结构决定着水、气在土壤中的运移路径,直接影响SVOCs在土壤中的迁移速率与方向;土壤颗粒对污染物的吸附能力决定着污染物在土壤中的停留时间及解吸率;土壤有机质含量越高,SVOCs越易吸附,迁移风险越小。

## 3 基于半挥发性有机化合物的土壤污染防治措施

源头控制是土壤半挥发性有机物污染防治的重要途径,其中,治理工业废水和废气是非常重要的,必须严格控制工业污染源,采取有效的污水及废气处理工艺,而吸附法、催化氧化法是应用较为广泛的两种工艺。吸附法是一种以活性炭为代表的吸附材料,能有效去除水中的SVOCs。有研究表明,在800~1500m<sup>2</sup>/g范围内,活性炭对重金属离子的吸附效率可达95%以上<sup>[4]</sup>。另外,催化氧化技术是利用催化剂将挥发性有机污染物氧化为二氧化碳和水,效率可达80~90%。此外,应加强农业投入品管理,以降低土壤挥发性有机化合物的积累,合理施用农药、化肥,推广低毒低残留农药,可有效降低土壤挥发性有机污染物的浓度。有研究表明,与DDT等传统杀虫剂相比,Bt在土壤中的半衰期只有1~2周。在此基础上,结合精准施肥技术,农户可根据土壤营养状况及作物需求,精准调控化肥用量,避免过量施入造成的SVOCs积累,而精准施肥技术可在保证作物产量的前提下,减少化肥用量20%~30%。同时,加强固体废物分类处置,禁止含SVOCs的乱堆乱

烧,是治理土壤污染的重要途径。电子垃圾、塑料等固体废弃物产生的多环芳烃(PAHs)经高温焚烧后进入大气并最终沉降于土壤中。为避免这一现象,可采用高温焚烧炉及先进的烟气净化技术,在850℃以上的高温垃圾焚烧炉中,结合二级燃烧室及高效烟气净化系统,PAHs的脱除效率可达99%以上。另外,应提倡垃圾分类与回收,以减少固体废物的产生。

## 4 土壤修复技术

土壤修复技术有物理法、化学法和生物法修复法各有各的适用场合和优点,物理修复是利用物理的方法来分离土壤中的污染物,如土壤蒸汽提取法就是一种常用的物理修复方法。这种方法是把受污染的土壤加热,释放出挥发性或半挥发性的有机物,再用萃取设备收集和处理,将土壤加热至100~200℃,保温30~60分钟,可有效去除大部分的SVOCs。有研究表明,土壤气提技术对含多环芳烃(PAHs)污染土壤的去除率可达90%以上,但一次性处理的土壤比较少,不能应用于大规模土壤污染。而化学修复是利用化学手段,把污染物转化成无害的物质,常用的化学氧化方法是使用过硫酸盐、臭氧等强氧化剂加入到受污染土壤中,使其pH值保持在3~5之间,可有效地降低土壤中SVOCs的含量,去除率达85%以上。臭氧氧化技术是向土壤中排放臭氧气体,使其快速分解挥发性有机化合物,用50mg/L臭氧连续处理48小时后,土壤中苯并[a]芘的含量可由20mg/kg降至2mg/kg,去除率达90%。但化学修复方法存在投资高、二次污染风险大、处理效果不稳定等问题,或可利用微生物的代谢活性,实现对挥发性有机污染物的降解。具体途径包括在土壤中接种特定降解菌或优化土壤环境条件等,可通过添加氮、磷等养分,优化土壤环境条件,也可显著提高微生物降解效率。

## 5 监测和评估

土壤污染防治措施监测与评价,是一项涉及多个环节、多手段的复杂系统工程,有规律的监督是根本。应建立土壤污染监测网是及时掌握土壤挥发性有机污染物动态变化的基础,这需要在全国选择代表性监测点,定期采集土样并进行分析。同时,可利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)对SVOCs进行定量分析<sup>[5]</sup>,为保证数据准确性与可比性,各监测点每季度取样一次,通过对不同季节和地区SVOCs浓度的对比分析,能够更好地把握其时空分布特征。此外,风险评估同样重要,研究SVOCs在土壤环境中的迁移转化及生物效应,为评价其环境与人类健康带来的潜在风险提供科学依据。可采用模拟试验与模型计算相结合的方法,通过室内土柱试验,研究SVOCs在不同类型土壤中的迁移转化规律。如可通过添加一定量的萘酚,观察萘在砂壤土和粘壤土中的扩散速度,发现在砂壤土中萘的扩散速度只有0.1cm/h,而在粘壤土中的扩散速度只有0.1cm/h,表明土壤质地对SVOCs扩散具有重要影响。在模型计算方面,利用RISC-HUMAN等环境风险评估模型,输入SVOCs浓度、土壤理化参数(有机碳、pH等)、暴露途径(呼吸、饮水、食物链等),计算人类健康风险。若风险超出国家标准(如致癌风险>10<sup>-6</sup>),需采取土壤修复和污染源控制等措施。应建立健全土壤污染监测数据库,对各监测点的SVOCs、土壤理化

## Ecological Environment and Protection

特性、污染源等进行采集与整理,建立综合的、系统的数据库。在实际应用中,可利用地理信息系统(GIS)技术,将监测数据和空间信息有机地结合起来,生成土壤污染地图。

## 6 政策与法规

政府应建立健全的法律法规体系,对SVOCs的治理标准、控制要求进行明确,这一规定应包括SVOCs的排放标准、环境质量标准、土壤污染修复标准。在借鉴国际先进标准的基础上,结合我国国情,制定相应的排放标准,以实现污染源的有效控制。在标准中,要对不同用途的土壤进行SVOCs浓度控制,保证土壤质量能够满足不同用途(如工农业生产)的需要,整治标准应明确整治目标及技术要求,以指导整治工作的开展。政策上要鼓励科技创新,加大科研投入,推动SVOCs治理技术的开发和应用;政府可通过财政拨款、税收减免和专项资金等方式,支持高校、科研院所及企业进行土壤有机挥发性有机物污染控制技术研发。如发展高效、廉价的土壤检测与修复技术,提高污染控制的效率与效果等。在污染源治理上,要建立严格的排污许可制度,严格控制含SVOCs的工业废水、废气及固体废弃物。在生产过程中,要采取清洁生产工艺,降低挥发性有机废气的排放。对已产生的SVOCs废弃物,应采取焚烧、固化和填埋等安全环保的处置方式,以避免二次污染。同时,要加强农药、化肥等农业挥发性有机污染物的监督管理,推广绿色农业技术,减少农业污染源的污染。在土壤污染监测中,应建立健全土壤环境监测网,对重点地区、重点行业、重点污染源实行长期监测,并在此基础上,建立土壤污染信息数据库,对监测数据进行整理和分析,为土壤污染治理提供科学依据对新近发现的土壤污染问题,政府应建立相应的政策体系,必须严格执行“谁污染谁负责”的原则,并要求污染者承担治理责任与费用,在整治过程中,要注重整治效果的评估,确保整治达标后方可恢复生产生活活动。此外,政府还应该加大

宣传力度,开展土壤有机挥发性有机物污染的宣传教育活动,提高公众对土壤有机挥发性有机污染物的认识,提高全社会参与土壤污染治理的积极性和主动性。同时,要加大对非法排放和倾倒垃圾的查处力度,对相关人员进行法律追究,形成强有力的法律威慑。

## 7 结束语

综上所述,分析半挥发性有机物在土壤中的来源及影响,对认识和治理环境污染具有重要的科学意义。以SVOCs为研究对象,深入解析SVOCs的主要来源,可揭示其在环境中的迁移转化行为。未来,应进一步加强多学科交叉合作,实现环境治理与生态修复的可持续发展。在不断探索、不断创新的基础上,为子孙后代创造一个更清洁、更健康的地球环境。

## [参考文献]

- [1]王圣,陈功平.合成材料面层总挥发性有机化合物(TVOC)释放量测定不确定度评估[J].广东建材,2023,39(11):26-30.
- [2]周凯.室内装修板材挥发性有机化合物检测技术分析[J].江西建材,2023,(10):102-103+106.
- [3]周妮,余宏,李加涛,等.气候箱法测定人造板中挥发性有机化合物的检出限探讨[J].理化检验-化学分册,2023,59(10):1228-1230.
- [4]季军宏,杜安梅.涂料挥发性有机化合物(VOC)的解读及展望[J].涂料工业,2023,53(12):45-51.
- [5]杨缘缘.河流挥发性有机化合物污染特征分析及健康风险评估[J].山西化工,2023,43(09):223-226.

## 作者简介:

郎杭(1991—),女,汉族,河南省人,理学博士,工程师,研究方向:环境化学,中国水利水电科学研究院。