

# 含氟农药的风险与发展

张晓桐<sup>1</sup> 柳轶群<sup>2</sup>

1. 黑龙江农业职业技术学院 黑龙江 佳木斯 154005

2. 江苏海企技术工程股份有限公司 江苏 南京 210019

**摘要:** 含氟农药对于提升农作物防效、保障农作物增产有着举足轻重的地位,但大量使用含氟农药也会造成环境污染。本文分析PFAS在土壤和水体中的迁移转化规律与生物累积效应,阐述其对生态系统和人体健康的长期威胁;总结针对含氟农药的结构优化、非氟化助剂替代及污染治理三项绿色技术研发进展;未来,含氟农药行业需结合全球监管态势,构建以技术创新、精准应用、监管完善和风险管控为主导的系统性框架。

**关键词:** 含氟农药; PFAS类农药; 环境风险; 优化; 发展

## 1 引言

全氟和多氟烷基物质(PFAS)因碳—氟键赋予的稳定性、表面活性及脂溶性,作为助剂广泛应用于农药领域,在提升农作物对病虫害防治效果、提高农业产量方面有着难以替代的作用<sup>[1]</sup>。然而,PFAS极强的环境持久性与生物累积性,导致其长期残留在土壤、水体及生物体中,并通过环境迁移扩散至全球形成污染,对生态环境与人类健康产生威胁,引起了全球监管机构的持续关注与重视。

当前,含氟农药的发展面临着国内外加强对PFAS重点管控的困境,环境和社会的双重压力迫使相关行业寻求绿色转型路径<sup>[2]</sup>。在此背景下,本文针对PFAS的环境风险特征,分析其迁移转化规律、生态危害机制以及人体健康风险,梳理了含氟农药的结构改进、助剂替代与减排工艺三项优化技术的进展;最后结合政策演进,构建涵盖技术创新、应用模式、监管体系与风险管控的未来发展框架,旨在推动含氟农药行业的可持续发展。

## 2 含氟农药的风险

PFAS在自然界迁移转化表现出链长依赖性。PFAS链长越长,持久性和生物蓄积性越高;PFAS链长越短,越容易发生降解、稀释和富集。三氟乙酸、三氟甲磺酸等短链PFAS物质因其水溶性较强、土吸附系数较低等特性,极易通过地表径流或地下水渗透的方式迁移至水体,进而造成水体污染<sup>[3]</sup>;而PFOA、PFOS等长链PFAS物质具有疏水性特征,能被土壤有机物吸附在表层土壤中,半衰期可达数年至数十年。

### 2.1 生态风险

PFAS污染物通过根系吸收和叶面吸附等方式进入农作物体内,从而产生PFAS的农作物暴露。辽宁某氟化工

厂周边农田内胡萝卜的总PFAS含量高达7176 ng/g,远高于国家食品安全标准限值。PFAS长期暴露在鱼类和甲壳类等水生生物体内会使得水生生物出现生长缓慢、繁殖能力下降等问题。巴西某农业流域的检测结果表明鱼类肝脏中PFOS含量达到280 ng/g,造成鱼类肝脏损伤和抗氧化酶活性异常<sup>[4]</sup>;PFAS类农药对于蜜蜂、鸟类等非靶标生物存在潜在的危害。美国加州有关部门的调查数据显示,蜜蜂的死亡率与区域PFAS污染程度呈正相关。

农药中的PFAS成分还可以通过水解、光解等非生物过程转化为其他PFAS衍生物,部分衍生物具有更强的毒性。此外,PFAS的迁移转化还受土壤pH、质地、有机质含量等因素影响,在酸性土壤、砂质土壤及低有机质土壤中具有更强的迁移能力,带来的环境风险更高。

### 2.2 健康风险

PFAS物质通过饮食、皮肤接触等途径进入人体后,可在血液、肝脏、肾脏等组织中蓄积并缓慢释放,引发多种健康问题。国际癌症研究机构(IARC)已将PFOA列为一类致癌物,其在长期暴露在人体会引起肾癌、睾丸癌等多种癌症的发病风险增加;PFAS可干扰正常甲状腺激素、生殖激素的正常分泌,影响儿童生长发育与生殖健康,孕妇暴露会导致胎儿呈现低出生体重、发育迟缓等状况<sup>[5]</sup>;

此外,PFAS物质的长期累积可能会造成胆固醇升高、免疫功能下降、肝损伤等问题,还会引发心血管疾病、糖尿病等慢性病。饮食摄入是人体PFAS暴露的主要途径,据欧洲食品安全局(EFSA)统计,通过饮食摄入的PFAS占人体总暴露量的60%~80%,其中农产品摄入比例占饮食暴露的30%~40%。综上所述,过多的摄入PFAS物质成为重要的人体健康风险来源。

### 3 含氟农药的优化

对农药中的氟化合物进行分子结构的改型或修饰可削弱氟化合物的持久性和生物累积性,并且保留氟原子的基本作用<sup>[6]</sup>。在含氟农药分子中引入酯基、酰胺基等易降解功能基团,可加速氟化合物在环境中的水解或生物降解以缩短半衰期。

开发环境友好的非氟化替代产品,是减少氟化合物污染的重要手段<sup>[7]</sup>。醚类表面活性剂已成为PFOA的主要替代品之一,这类表面活性剂具有良好的分散性、乳化性以及优异的生物降解性;茶皂素、鼠李糖脂等植物源或微生物源表面活性剂具有低毒、高降解率的特点,能够有效提高农药的增溶效果<sup>[8]</sup>;聚丙烯酸酯等非氟高分子助剂能显著提高农药的稳定性和附着性,用于替代PFAS类分散剂,此类助剂的水解产物为无害小分子,对环境的影响几乎可以忽略<sup>[9]</sup>。

对于残留在环境中的PFAS污染物,采用臭氧氧化、电催化氧化等高级氧化技术,可高效降解短链PFAS,臭氧氧化技术对三氟乙酸的降解率高达90%,但对长链PFAS降解效果有限<sup>[10]</sup>;活性炭、离子交换树脂、金属有机框架等吸附材料可被用来吸附残留在水体中的PFAS,金属有机框架材料对PFAS的最大吸附容量高达200 mg/g,是传统活性炭吸附容量的5-10倍,且可重复使用<sup>[11]</sup>。

### 4 含氟农药的发展

面对全球PFAS管控升级,含氟农药行业亟需从高功效、高风险向高功效、低风险转移。未来发展的核心在于既要药物的替代助剂研发和末端治理技术革新,又要借助精准化应用模式落实农药的减量增效,构建集研发、生产、施用、管控于一体的综合发展体系。

#### 4.1 技术创新

持续优化含氟农药分子结构的改进与修饰技术,在保留氟化合物效能的同时降低环境风险;加大非氟化助剂的研发投入,提升产品性能与稳定性,降低生产成本,推动醚类表面活性剂等替代助剂的规模化研发生产<sup>[12]</sup>;开发低成本、高效率的PFAS污染治理技术,推动光催化、高级氧化等技术在农药生产废水与农田退水处理中的工程化应用;开发快速灵敏的环境检测技术,实现对农药产品和环境介质中氟污染物的精准定量<sup>[13]</sup>。

#### 4.2 应用模式

结合无人机遥感、病虫害智能监测等技术,实现农药的精准投放,根据作物生长周期和病虫害发生规律优化施药方案;建立含PFAS农药、生物农药和非PFAS化学农药的轮换用药模式,延缓有害生物对药物的抗性发展;

严格限制PFAS类农药在水源保护区、生态敏感区、农产品区等区域的使用,划定禁用区域;建立废弃物处置点用以回收农药包装,减少包装材料中PFAS的浸出污染;建造农田生态缓冲带、植被过滤带等措施,拦截地表径流中的PFAS从而降低水体污染风险。

#### 4.3 监管体系

基于科学风险评估,规定农药产品中PFAS的限值标准、环境质量标准以及排放标准,明确管控阈值;完善农药登记制度,要求企业公开产品中PFAS的含量、种类及环境影响数据,未登记的PFAS助剂不得用于农药生产;建立PFAS农药从生产、使用到废弃的全周期监管体系,加强对企业的排放监测、农产品残留检测<sup>[14]</sup>;加强各国PFAS监管政策的协调与对接,推动建立全球统一的PFAS分类标准、检测方法与管控原则。

#### 4.4 风险管控

开展含氟农药环境风险和健康风险评估,为制定科学合理的管控政策提供理论依据;全面开展环境监测网建设,加强对农药生产地区、大面积农用地的监测;加大对农药生产者、经营者和使用者的宣传科普和培训力度,提高大众对含氟农药尤其是PFAS类农药对于环境与人体风险的认知;充分保障大众对PFAS类农药产品的知情权、监督权,建立举报奖励机制。

### 5 结论

含氟农药凭借着对促进农作物的质量与产量双重提升的独特功效,已被广泛应用于农业生产,并且PFAS助剂会让农药的性能更加优越。但PFAS污染物的在农业区域的暴露会对生态环境与人体健康构成威胁,全球各国相关机构已将其列为重点管控物质。目前针对降低PFAS类农药风险的措施已经得到发展,包括对农药分子的结构改进、开发使用新型替代品、推广减排技术。在未来,农药行业应把握以技术创新为引领,智能施用、依法监管和精准防控的原则,最大程度降低含氟农药污染风险,促进含氟农药向高功效、低风险方向的全面转型,实现含氟农药行业的可持续发展。

#### 参考文献

- [1]马毓阳.三唑酮及其含氟农药衍生物的合成和生态风险评价研究[D].上海应用技术大学,2024. DOI: 10.27801/d.cnki.gshyy.2024.000386.
- [2]李姣,裴丹,钟良坤,等.含氟新农药的研究进展[J].浙江化工,2019,50(05):15-21+24.
- [3]张一宾.全球含氟农药品种概况及新开发的含氟农药[J].现代农药,2013,12(01):1-7.
- [4]Shan D, Liao J, Zhu Y, et al. Insights into the chronic

toxicity and mechanisms of fluorine-containing pesticides on earthworms [J]. *Environmental toxicology and pharmacology*, 2025, 119104811. DOI: 10.1016/J.ETAP.2025.104811.

[5]马毓阳.三唑酮及其含氟农药衍生物的合成和生态风险评估研究[D].上海应用技术大学,2024. DOI: 10.27801/d.cnki.gshyy.2024.000386.

[6]赵雪君.三种农药、表面活性剂及微塑料混合污染对农药降解的影响[D].南京农业大学,2021. DOI: 10.27244/d.cnki.gnjnu.2021.002076.

[7] Jeschke P. Recent developments in fluorine-containing pesticides[J]. *Pest management science*,2023,80(7): 3065-3087.DOI: 10.1002/PS.7921.

[8]王佩刚,方敏,关旻,等.PFOA替代物在含氟聚合物中的应用研究进展[J].*浙江化工*,2013,44(11):1-4+18.

[9]伍雅婧,付亦临,符杰,等.全氟和多氟烷基物质(PFAS)对土壤微生物群落的影响及作用机制[J/OL].*生态毒理学报*,1-16[2025-12-30].<https://link.cnki.net/urlid/11.5470.x.20251217.1353.016>.

[10] Wu N, Zhao L, Jiang C, et al. A naked-eye visible colorimetric and fluorescent chemo sensor for rapid detection of fluoride anions: Implication for toxic fluorine-containing pesticides detection[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 302112549-112549. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.112549.

[11]司伟杰,张涛,梅向东,等.含氟农药的研究进展[J].*河北工业科技*,2014,31(03):262-270.

[12]徐东震,王军,张凯,等.浅析含氟农药中间体行业企业风险管控现状[J].*世界农药*,2022,44(08):7-11. DOI: 10.16201/j.cnki.cn10-1660/tq.2022.08.02.

[13] Mori T, Matsuo N. Synthetic Studies of Fluorine-containing Compounds for Household Insecticides[J]. *Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan*, 2007, 65(6): 620-625. DOI: 10.5059/yukigoseikyokaishi.65.620.

[14]罗宇震,宗博洋,李秋菊,等.环境中全氟和多氟烷基化合物的检测方法研究进展[J/OL].*分析测试学报*,1-18[2025-12-30]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1318.TH.20250818.1128.002>.