

壬基酚在制药行业土壤污染的检测与环境风险分析

张兆年*

(上海市金山区环境监测站, 上海 201500)

摘要: 制药行业土壤中壬基酚污染严重威胁环境与人类健康, 既影响微生物群落结构与功能、阻碍植物正常生长, 又经食物链危害人体健康, 引发免疫系统紊乱、内分泌失调等问题。本文采取绿色替代技术改革生产原料与流程、构建智能监测体系并推动产学研合作的策略, 减少壬基酚使用与排放, 实时监控生产过程, 加速环保技术创新应用, 以降低土壤污染水平, 增强生态系统恢复能力, 保障公众健康, 充分展现实际生产中实施环境可持续发展措施的有效性。

关键词: 壬基酚; 制药行业; 土壤污染; 绿色替代技术; 智能监测系统

0 引言

壬基酚(NP)由苯酚与壬烯、壬醇等烷基化剂, 在活性白土、离子交换树脂或三氟化硼等酸性催化剂作用下生产。实际工业场景中, 多家化工企业参与生产^[1-3]。如A企业年采购、使用壬基酚39.9 t, 无库存, 生产连续高效; B企业年采购10.8 t, 无库存, 生产线规模小但稳定; C企业年采购仅1.5 t, 无库存, 生产规模小或对壬基酚需求低。

壬基酚分子由苯环和壬基烷基链构成, 分子式 $C_{15}H_{24}O$ 。其化学稳定性强、水溶性低, 在环境中行为复杂。因其疏水性好, 壬基酚在水环境中易吸附于固体颗粒, 进而在土壤和沉积物中累积。它难以自然分解, 增大了环境风险。此外, 土壤pH值、温度和有机物含量等, 会显著影响壬基酚在土壤中的迁移、转化及生物可利用性。

壬基酚在制药行业土壤中存在, 不但显著影响土壤生物多样性与活性, 致使微生物种类减少、功能活性下降, 还极可能经由食物链干扰人类健康, 引发内分泌失调等潜在风险。鉴于此, 当前正深入探讨并实施污染控制和修复技术, 剖析污染现状、研究新技术开发及应用, 为制药产业环境策略提供依据与支持。

1 制药行业土壤壬基酚污染问题

1.1 污染现状不明

制药行业将壬基酚用作多功能化学中间体, 受检测手

段有限、污染源多样等因素制约, 其释放到环境后的污染情况难以精确监测评估。当前, 针对地表水和沉积物的研究较多, 但土壤中壬基酚的具体含量、分布及长期变化趋势尚不明确。这导致环境科学家和政策制定者难以制定有效的干预和修复策略。

1.2 污染途径复杂

制药行业中, 壬基酚在原材料存储、生产废物排放和产品处置等环节, 通过多种途径污染土壤。液体废弃物排入地表水后渗透至土壤, 滤饼、残留物等固体废物能直接进入土壤, 还能经大气沉降污染土壤^[4-6]。以上海市某制药企业周边土壤调查为例, 0~50 m范围内土壤壬基酚平均浓度48.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 50~100 m范围内土壤壬基酚平均浓度降至10.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 100~200 m范围内土壤壬基酚平均浓度为8.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 表明污染通过地表水渗透和大气沉降, 且随距离增加而减弱。

1.3 污染持续性难测

壬基酚化学稳定性强、难以分解, 土壤一旦被污染, 影响可持续数年甚至数十年。此外, 土壤类型、温度、湿度及有机质含量等因素会影响其在土壤中的行为。这些变量的不确定性, 增加了预测难度, 带来长期潜在威胁, 也给土壤污染治理和修复造成挑战。

2 制药行业土壤壬基酚检测技术

2.1 高效液相色谱-质谱联用技术(HPLC-MS)

HPLC-MS技术灵敏度高, 常用于复杂基质中壬基酚定量分析。检测前, 需对土壤样品进行干燥、粉碎, 用

* 通信作者: 张兆年, 硕士, 助理工程师, 新污染物治理、土壤治理。E-mail: 617201148@qq.com

溶剂萃取以提取目标物、去除杂质。HPLC 系统借助 C18 反相色谱柱，通过优化流动相组成、流速和温度分离壬基酚，质谱采用电喷雾离子化 (ESI) 源，在多反应监测 (MRM) 模式下运行，保障检测的选择性与灵敏度^[7-9]。最新研究引入新型离子化技术、优化色谱条件，检测限降至 0.005 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，用于超痕量检测。如在某制药企业周边土壤检测中，成功检测出低至 0.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的壬基酚残留。

2.2 气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS)

气 GC-MS 技术适用于挥发性较强的壬基酚检测。用正己烷提取样品后，通过蒸发或氮吹浓缩提升检测灵敏度。选用 5%-苯基-甲基硅氧烷柱等合适色谱柱，并优化柱温程序、载气流速等色谱条件至关重要。质谱分析采用电子撞击 (EI) 电离和选择离子监测 (SIM) 模式，实现精准定量。结合新型气相色谱柱技术，GC-MS 检测限可降至 0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。研究团队用该技术检测多个制药企业周边土壤，部分区域壬基酚浓度高达 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，远超安全标准。

2.3 荧光光谱检测技术

该技术操作简便、检测速度快，适合现场快速筛查。

用乙腈或丙酮提取土壤中的壬基酚，扫描荧光光谱确定最佳激发和发射波长后进行定量分析，检测限 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，适用于低浓度污染区域初步检测^[10-12]。研究人员开发了新型荧光探针，将检测灵敏度提高 10 倍，检测限降至 0.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，可在突发污染事件中快速筛查出污染区域。

2.4 生物传感器检测技术

生物传感器基于生物识别层与壬基酚特异性结合，通过检测物理或化学性质变化实现快速检测，检测限 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，可用于现场筛查。最新研发的纳米材料修饰生物传感器，检测限降至 0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，响应时间缩短至 10 min，在多个制药企业周边土壤现场检测中成效显著。

2.5 固相微萃取-气相色谱技术 (SPME-GC)

SPME-GC 结合固相微萃取的高效富集与气相色谱的高分离性能。通过搅拌、加热使土壤中壬基酚释放，被 SPME 纤维吸附后，直接插入气相色谱仪分析，检测限 0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，适合中等浓度污染区域检测^[13-15]。最新研究将其检测限降至 0.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，在某制药企业周边土壤污染监测中，准确检测出污染扩散范围，见表 1。

表 1 不同检测方法的灵敏度对比

检测方法	灵敏度(检测限)	适用性分析
HPLC-MS	0.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$	适用于复杂基质样品，检测限低，适合高浓度污染区域的精准定量分析
GC-MS	0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$	适合挥发性较强的样品，检测限适中，适合中等浓度污染区域的检测
荧光光谱检测技术	0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$	操作简便，检测速度快，适合现场快速筛查，但检测限较高，适合低浓度污染区域的初步检测
生物传感器检测技术	0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$	适合快速检测，适合现场快速筛查，但检测限较高，适合低浓度污染区域的初步检测
SPME-GC	0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$	适合挥发性较强的样品，检测限较低，适合中等浓度污染区域的检测

3 制药行业土壤壬基酚环境风险分析

3.1 对土壤微生物群落结构和功能的影响

借助 16SrRNA 基因测序分析可知，壬基酚会显著影响土壤微生物群落结构。未受污染土壤中有 120 种微生物，当土壤中壬基酚浓度达 10 mg/kg 时，微生物种类降至 70 种，减少 41.7%，对环境污染物敏感的微生物受抑制明显。此外，经生化方法测定，在壬基酚浓度达 10 mg/kg 的土壤中，脲酶活性降低 60%，磷酸酶活性降低 50%^[16]。这影响土壤氮循环，削弱土壤肥力和生态系统功能。

3.2 对土壤-植物系统生长发育及物质代谢的干扰

研究人员通过温室实验模拟壬基酚污染土壤环境，探究其对不同植物的影响。实验将不同浓度壬基酚添加到植物生长土壤中，监测根长、茎长、叶绿素含量及总生物量

等指标。研究发现，壬基酚会抑制植物生长，高浓度时影响更显著^[17]。如土壤中壬基酚浓度达 0.5 mg/kg 时，植物根长和茎长缩短，叶绿素含量减少约 20%，总生物量降低约 30%。此外，测定植物体内糖类、氨基酸等代谢物质，能深入了解其对植物物质代谢的干扰，这些变化会影响植物生长与环境适应能力。

3.3 通过食物链传递对人体健康的潜在危害

科学家借助鼠类实验，探究壬基酚在食物链中的传递以及对人类健康的潜在危害。让鼠类摄食壬基酚浓度为 5 mg/kg 的污染植物后，鼠血液、肝脏、肾脏中壬基酚浓度分别达 0.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、2 $\mu\text{g}/\text{g}$ 、1.5 $\mu\text{g}/\text{g}$ ，表明该物质在动物体内显著积累。进一步分析，实验鼠雌激素水平升高 80%，繁殖能力下降 50%^[18]。这表明壬基酚会干扰动物内分泌系统，致使其激素失衡，引发繁殖功能受损、生长发育异常和免疫功能下降等问题，凸显对动物健康的负面

影响。

4 应对制药行业土壤壬基酚污染策略

4.1 研发绿色替代技术, 革新生产原料与流程

这一举措旨在降低制药行业壬基酚生产对环境的负面影响。筛选环境友好型生物催化剂, 以水为溶剂, 替代传统有机溶剂, 减少有毒副产品排放。优化生产过程, 提高原料转化率, 降低能耗与废物产生。改造生产设备, 引入高效回收系统, 采用闭环生产技术, 实现壬基酚回收再利用与零排放。提升过程控制和自动化水平, 降低事故性排放风险。定期开展环境影响评估, 监测生产排放及周边土壤、水体的壬基酚含量。某制药企业应用该技术后, 壬基酚排放量减少 80%, 周边土壤含量显著降低。

4.2 构建智能监测体系, 实施动态精准管控

在生产流程中部署高精度在线监测设备, 实时监测壬基酚浓度与排放量, 并将数据传输至数据处理系统, 对异常排放快速响应^[19]。将监测数据集成到中央控制系统后, 运用机器学习算法分析, 预测潜在排放风险, 自动调整生产参数, 削减污染物排放。依据实时数据优化工厂运营策略, 降低环境影响。定期维护校准系统, 审核监测数据, 确保数据可靠。

4.3 推动产学研合作, 促进污染治理技术落地

搭建产学研合作平台, 打破大学、研究机构和制药企业间的信息壁垒, 实现资源共享。明确共同研究主题, 如壬基酚替代化学品研发等, 各方发挥专长, 制定研究计划。大学和研究机构提供理论支持与实验室测试, 企业提供场地开展规模化测试^[20]。定期举办研讨会和技术展示会, 交流研究进展, 吸引行业参与者与政策制定者, 推动制药行业绿色发展。

5 结束语

在制药行业中, 壬基酚污染带来的环境风险备受关注, 针对这一问题的治理策略也成为研究重点。其中, 绿色替代技术的关键作用、智能监测系统的显著成效, 以及产学研合作的重要意义尤为突出。通过施行这些策略, 环境管理效率得以提升, 公众健康和生态安全也得到保障。研究成果突出持续创新与合作在解决环境问题中的核心价值, 为制药行业可持续发展和环境保护提供实践指南与策略建议。

参考文献

[1] 邵文哲, 马秀婷, 董来, 等. 氘标记4-n-壬基酚的合成与结构表征[J]. 化学研究与应用, 2024, 36(12): 2885-2893.

- [2] 胡雅琪, 姜婷婷, 马蒙, 等. 再生水灌溉双酚A和壬基酚在玉米中的分布、转运及影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(6): 570-578.
- [3] 冯金龙, 张荣明. 壬基酚单硫化化合物的合成及其性能研究[J]. 化学与生物工程, 2024, 41(9): 60-64.
- [4] 王雨欣, 陈丹娜, 雷卓凡, 等. 壬基酚诱导肝细胞氧化损伤及铁死亡机制研究[J]. 中国兽医学报, 2024, 44(8): 1793-1799.
- [5] 殷甫祥, 曹健. 泰州市制药企业周边土壤污染防治对策[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(21): 44-46+68.
- [6] 肖琼, 王齐齐, 邬磊, 等. 施肥对中国农田土壤微生物群落结构与酶活性影响的整合分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1598-1609.
- [7] 曾辉. 长三角地区制药企业对土壤环境质量的影响[J]. 山东化工, 2024, 53(5): 249-251+254.
- [8] 张洁, 丁丽, 彭小武, 等. 菌渣施肥对土壤—作物体系重金属污染及迁移特征评价[J]. 新疆环境保护, 2021, 43(1): 17-27.
- [9] 王坚. 某制药企业搬迁场地土壤污染调查[J]. 科技创新导报, 2019, 16(18): 135-136.
- [10] 司玮, 李明, 王佳域, 等. 土壤污染对中药材质量影响的文献计量学分析[J]. 养生保健指南, 2019, (12): 254.
- [11] 田喜强, 赵宏吉, 唐志国, 等. 土壤污染及修复方法的研究进展[J]. 现代农业科技, 2019, (4): 154-155, 159.
- [12] 阮晓玲, 李翔, 邹青, 等. 中药渣在废水处理及土壤修复中的应用[J]. 湖南生态科学学报, 2024, 11(1): 58-65.
- [13] 贾博. 西安市某制药企业土壤污染状况调查及风险评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [14] 刘钰. 重金属污染场地土壤调查采样网格的研究——以某制药厂为例[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
- [15] 程瑜, 胡建, 刘强, 等. 粪产碱杆菌矿化土壤中重金属离子的研究及应用[J]. 金属矿山, 2022, (8): 254-261.
- [16] 黄志强, 邱景璇, 李杰, 等. 基于16SrRNA基因测序分析微生物群落多样性[J]. 微生物学报, 2021, 61(5): 1044-1063.
- [17] 吕剑, 武君, 骆永明. 滨海缺水地区再生水灌溉条件下土壤污染及生态风险评估[C]//第一届全国土壤修复大会论文集. 2018: 13-13.
- [18] 韦欢妮, 刘润峰, 伍莉, 等. 孕期壬基酚暴露对大鼠子代生长发育和神经行为的影响[J]. 广西医科大学学报, 2023, 40(6): 975-980.
- [19] 汪钰, 冯成强, 张文生. 细胞模型在土壤污染物毒性评价中的应用进展[J]. 毒理学杂志, 2023, 37(5): 423-427+432.
- [20] 涂轲, 凌欣华, 徐国宝. 草地土壤污染致雷州山羊颈部化脓创的诊疗[J]. 畜禽业, 2021, 32(8): 136-138.