

城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的共赋存特征及其复合生态风险评价

纪柏帆

普洱学院茶叶咖啡学院, 云南 普洱 665000

DOI:10.61369/EAE.2026040008

摘 要 : 随着城市的高速发展,城市生活污水中微塑料和增塑剂污染日趋显著,并以其联合作用效应及生态毒性为当前环境污染研究中的热点之一。本文从城市污水中微塑料和增塑剂来源、分析方法及两者交互作用等方面进行综述,并建立了表征该类物质联合作用风险指数体系,进一步探讨其对水生生物及污水厂的影响作用。结果表明:微塑料与增塑剂广泛存在于城市污水中,并且各类型废水所含上述两种物质的种类、浓度及分布差异较大。

关 键 词 : 城市生活污水;微塑料伴生塑化剂;复合生态风险

Co occurrence Characteristics and Composite Ecological Risk Assessment of Microplastic Associated Plasticizers in Urban Domestic Sewage

Ji Bofan

Tea and Coffee College, Pu'er College, Pu'er, Yunnan 665000

Abstract : With the rapid development of cities, the pollution of microplastics and plasticizers in urban domestic sewage is becoming increasingly significant, and their combined effects and ecological toxicity are currently one of the hotspots in environmental pollution research. This article reviews the sources, analysis methods, and interactions of microplastics and plasticizers in urban sewage, and establishes a risk index system to characterize the combined effects of these substances, further exploring their impact on aquatic organisms and sewage treatment plants. The results indicate that microplastics and plasticizers are widely present in urban wastewater, and there are significant differences in the types, concentrations, and distributions of these two substances in various types of wastewater.

Keywords : urban domestic sewage; microplastics accompanied by plasticizers; composite ecological risk

引言

随着城市化进程的加速,由于微塑料和塑化剂作为新型持久性污染物,在不断发展的城市生活中产生的城市生活污水中的污染情况也日趋严重。微塑料来源于日常用品磨损、工业生产废水中排放、处理厂未完全去除等因素;塑化剂主要源于各类塑料制品在生产加工过程中以及应用过程中所产生的有机化合物,分别进入城市的废水系统中,并以不同的方式存在,在一定条件下不能轻易降解,并可能通过食物链富集而威胁环境及人的身体健康。

一、城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的共赋存特征

(一)微塑料与塑化剂的来源分析

城市污水中存在大量微塑料和塑化剂,并且来源十分多样、途径非常繁杂,最主要的是来自日常生活消费品、工业排放和不恰当废弃物处理处置。生活中的洗面奶、牙膏、涤纶面料衣物、塑料袋等均是主要的微塑料来源。其通过冲洗、扫除或粉碎后进

入排水管道而排入生活污水中。此外,塑化剂是塑料制品的主要添加剂,广泛应用于食品容器、医疗器械及建材等行业,在食品容器中使用较为普遍。有研究表明,塑化剂会从废弃塑料制品上脱落(老化、摩擦、溶出)进入水体环境并随着微塑料一起排放到生活污水中。工业排放是另一个重要的源头,在其中以化学、纺织及药品等行业为甚。在这些行业中排出的废水中有大量的微塑料与塑化剂存在,加重了城市的污水处理负担。另外,垃圾填埋

课题信息:项目名称:污水中微塑料赋存特征及其生态风险研究,项目编号:202301BA070001-125。

作者简介:纪柏帆(1991.06—),女,拉祜族,云南省普洱市人,硕士研究生学历,普洱学院,茶叶咖啡学院就职,助理研究员,主要从事生态学、咖啡科学与工程、食品质量与安全的教学工作。课题:主持省级课题1项,市级课题结题3项。

以及不正确的废物处置也会造成微塑料与塑化剂的泄漏，并由此经由地面水流或者地下水流的方式进入到生活的污水中去。

（二）共赋存特征的监测方法

要研究并掌握城市生活污水中的微塑料与塑化剂之间的共生关系就需要运用一些科学有效的收集方法以及处理方式还有检测手段等。在收集过程中一般会采取定点的方式来进行取样工作以便于更好的保证所获得样本具有代表性并且便于比较分析。比如可以在污水处理站内不同位置的出入口处设立相应的采样地点来达到很好的了解整个过程的目的，包括从进入到排出的过程。对于样品中的分离，在样品处理中常用的方法有浮选法、过滤法以及消解等。其中，浮选法是根据溶液的密度来将微塑料颗粒分开，并且可以通过改变溶液的密度来进行微塑料颗粒的筛选，主要是采用不同大小的筛子或者滤纸，比如300目的筛子或者是600目的筛子，还有1 μ m的玻璃纤维滤膜等等，都可以用来对微塑料和纳米塑料进行筛选。

通过采用化学消解的方法，比如用65%的硝酸+30%的过氧化氢溶液等方法可以将样品中所含有的有机物质除去，进而提升目标物质的回收量。对于检测技术而言，则主要运用了傅立叶变换红外光谱以及拉曼光谱这两种手段来开展有关于微小颗粒及塑化剂的相关检验工作，并且还能够其中获得相关的分子结构信息，在此基础上便能够明确出具体的目标污染成分及其含量情况。但是每一种方法都有其优缺点，在灵敏性上各有千秋，并且在操作难易程度及成本投入等方面也有所不同。比如采用浮选的方法简单方便，但是对于低密度的微塑料却难以实现较好的分离效果。而采用光谱的技术可以达到很高的分辨能力，但是仪器的成本相对较高并且对于样本的要求较为苛刻。

（三）不同类型城市生活污水的共赋存特征差异

不同类型的城镇生活污水中的微塑料同时含有塑化剂的情况存在较大差别，并且受到该地区功能类型以及人们行为方式的不同而有所影响。在居民区内产生的生活污水中含有微塑料和塑化剂的数量较少但是品种较多，主要是由于人们的日常生活用品和个人卫生用品所导致。根据研究发现，在居民区的生活污水中含有的纤维状微塑料最多，这是由于经常性的清洗衣物造成的。而商业区的生活污水中的微塑料及塑化剂明显增多，并且在一些餐饮、零售业比较集中的地区尤为突出。这些污水中含有较多的颗粒状微塑料以及邻苯二甲酸酯类塑化剂，表明了大量使用的塑料包装材料与一次性的用品。而在工业区内，由于各种原因导致的混合污染情况更加严重，在其中发现的微塑料以及塑化剂的数量和类型都比其它地方要高得多。

在工业废水中主要存在的是聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP），而且是伴随着大量的塑化剂，如DEHP、DBP等。这是因为在工业生产中对于塑料及其添加物的用量较大，在废水处理时很难将它们彻底清除干净，通常出现在工业废水中的是两种类型的微塑料——聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP），并且其中还含有大量的塑化剂，比如邻苯二甲酸二辛酯（DEHP）或邻苯二甲酸二丁酯（DBP）。造成这一现象的原因是由于在工业生产和加工的过程中，对于塑料材料及添加物的广泛利用，在废水处理环节无法有效将微塑与

塑化剂完全清除出去。除此之外，值得注意的问题还有来自各地区的生活污水处理所呈现出的不同特点，比如从表1可以看出工业废水中微塑料的总去除率为86.73%，明显高于生活污水中的74.84%，说明了工业废水的处理方法比生活污水更能有效地除去微塑料，但是却不能很好地去除塑化剂。

二、城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的复合生态风险评价

（一）复合生态风险评价指标体系构建

建立复合生态风险评价指标体系。为了能够充分地分析出城市生活中产生的污水中的微塑料所伴随出现的塑化剂对于整个环境所产生的危害程度，在研究的过程中就需要建立起相关的复合生态风险评价指标体系，并且在制定过程中要保证其具有一定的科学性以及合理性还有可行性，从而使得最终得出的结果更加实用有效。对于所选指标的选择要充分考虑到微塑料以及塑化剂的生态毒性和生物富集系数、持久性以及可迁移性等因素，在具体的实践中可以通过开展相应的急性毒性实验或者慢性毒性实验来获得相关的生态毒性指标，并以此作为衡量污染物给水生动物造成危害的重要依据之一；而通过生物富集系数可以了解污染物在食物网中被积累的可能性大小，从而判断出该类污染物会对处于较高营养等级上的生物产生何种程度的影响。

（二）对水生生物的影响

微塑料所伴随产生的塑化剂会对水生生物产生一定的危害，在其中一方面表现为物理上的伤害以及另一方面为化学方面的毒害，具体表现形式也会随着污染物质不同及生物体本身处于哪个营养等级有所不同。在物理上来说，微塑料可能会被水生生物吃入到身体中去，造成消化系统堵塞或者出现其他部位受到损害的情况发生，甚至还会使机体承受更大的压力等。特别是像一些以过滤方式来获取食物的生物，比如浮游动物或者是贝类，当它们进食了这些微小的塑料时就会对其正常的食物摄入量带来很大的影响，并且还会影响到他们的成长与发育情况。从化学毒性的角度来说，由于塑化剂是微塑料常见的伴随污染物质且有很强的生物活性，能够穿过细胞壁进入到细胞内部，破坏生物体内的内分泌以及新陈代谢，并损害人体的免疫力等。研究发现，在较低剂量下，塑化剂就会导致水生生物出现氧化压力并改变基因表达情况，从而降低它们的存活率及生育力。

（三）对污水处理厂处理工艺的影响

城市生活污水中的微塑料伴生塑化剂对污水处理厂各处理工艺的干扰已成为一个亟待关注的问题。在物理处理阶段，微塑料颗粒的存在可能影响沉淀池和过滤装置的正常运行，导致悬浮物去除效率下降和设备堵塞风险增加。在化学处理阶段，塑化剂的引入可能改变污水的化学性质，如pH值和溶解性有机碳含量，从而影响混凝、絮凝和高级氧化等工艺的处理效果。尤其是膜分离过程中的微塑料会在膜上产生沉积物，造成膜污染现象加重、膜通量降低及运营费用提高等不良影响，在生物处理过程中，伴随而来的塑化剂会对微生物种类及其活动带来较大影响。塑化剂的

毒害作用可能会使活性污泥中的相关生物体失去活力，从而影响它们对于污染物质的分解程度；另外，由于微塑料颗粒的存在可能会成为一些耐污生物的良好附着体，在处理过程中被富集而改变了微生物群体结构及多样性的变化。这将导致整个污水系统的处理效果下降，并且还会造成二次污染的问题出现，使得城市的水资源遭受更大的破坏性影响。

（四）基于联合毒性效应的交互作用风险评估

对于复合性生态风险来说，在评价过程中将微塑料、塑化剂作为两个单独存在的物质是不合理的，相互影响产生一种特殊的毒理作用——其结果往往是无法用简单的数学运算得出答案（即不是相加的关系），这这也是一个难题。因此，在评价时要跳出单一污染物的概念，主要关注的是“载体效应”，以及“协同毒性”。由于微塑料是疏水性的有机物载体，并且能将污水中所含有的塑化剂等物质吸收并富集到较高水平，在水中形成的混合型污染物，因此一旦被水生动物吞入体内之后，在其消化系统内会存在一定的释放现象，使得原本存在于微塑料上的塑化剂更容易进入生物体内部而发挥出更大的作用，即产生了所谓的“特洛伊木马”。

采用毒性单位方法或者混合性毒理学指数来定量描述微塑料和塑化剂共同存在下产生的协同、拮抗或加和作用。比如需要考虑的是微塑料造成的身体损害是否降低了机体免疫力从而加大了塑化剂带来的内分泌影响。借助建立的剂量-效应曲线模型研究在不同比例条件下所产生的联合毒性临界点，可以更加明确复合污染物对于水生动物生长发育以及基因变化所造成的影响程度，防止由于忽视相互作用而给环境管理工作带来错误指导。

（五）全生命周期动态迁移与生物富集风险评价

传统上以静态的环境浓度作为风险评价的基础，并未考虑伴随于微塑料上的塑化剂在处理过程中发生的转变与变化情况，在更全面地了解微塑料带来的危害时，需要将其视作一个完整的体系来看待——即从微塑料产生的源头开始，经过污水厂处理之后进入最终接收水域的过程。在污水厂内部，微塑料可能会因为吸收塑化剂而导致自身沉降性发生改变从而导致在初沉池或二沉池处被去除率降低，这会使得最后排出的水中所含有的危险物质含量发生变化。考虑复合污染物的食物链营养级放大作用，并研究

底栖动物因摄入含有微塑料—塑化剂复合体的沉积物而将污染物转移至更高营养水平鱼的可能性，建立以食物网为载体、传递为基础的动态生态风险预警体系。

（六）基于风险矩阵法的分级管控与不确定性分析

为便于实施管理措施应对复杂的数据信息，建议利用风险矩阵法评估微塑料伴生塑化剂的复合生态风险并对其进行分级处理。此方法结合了污染物发生可能性（即环境中的污染水平）以及其可能产生的结果（如生态毒性作用），将其分为几个等级。根据监测结果，将不同地区的生活污水中的微塑料以及塑化剂的暴露情况划分成低、中、高的三种级别。结合生态毒性数据来判断这些物质对于重要生物或生态系统的影响是否具有危险性。利用一个矩阵图来进行反应，把两种等级结合起来，并且找出那些有很高危险性的区域和可以被人们所接受的风险区域，以此作为区分的标准。例如，而如果已经确认是高危区域的话，在这种状况下就必须采取更加严格的方法来处理问题。除此之外在危险程度上还需要考虑到一些不稳定的因素，并且还要将取样时产生的误差、所测得数值的限制范围以及毒性的转移方式等带来的不确定的因素都纳入到其中去。通过敏感性分析的方式找出危险程度评估过程中的最关键的部分，例如说粒径或者是增塑剂释放的速度等等，并且能够确保结果真实有效。

三、结束语

本文详细分析了城市生活污水中共存于微塑料上的塑化剂并对其进行了综合评估，并且阐明了微塑料和塑化剂在城市生活污水处理过程中的来源以及它们之间的关系。结果表明，在不同城市的生活中处理过程中发现的主要原因包括日常使用的物品或工业废物等。同时，这些物质的存在方式也因所处的城市而异。通过对建立的复合生态风险评价指标体系分析得出，在该评价指标体系下，不仅会对水生生物产生一定的影响，并且也会对污水处理厂所采用的处理方式造成一定的影响，特别是对于其中的生态毒性以及生物富集等方面产生的影响较为明显。这在一定程度上也为城市的水环境治理提供了一定的支持作用，同时也在很大程度上为相关的生态风险评估工作起到了积极的作用。

参考文献

- [1] 宣立强, 刘硕, 万鲁河, 等. 典型城市不同来源污水中 MPs 的分布特征差异 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(6): 87-92.
- [2] 李海燕, 杨小琴, 简美鹏, 等. 城市水体中微塑料的来源、赋存及其生态风险研究进展 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 407-420.
- [3] 李宇翔, 刘硕, 古雪倩, 等. 哈尔滨人工渠中微塑料赋存特征 [J]. 世界生态学, 2024, 13(1): 69-75.
- [4] 郭荣欣, 邹德勋, 仝婧婧, 等. 生态环境中的微塑料: 文献计量网络分析 [J]. 应用化工, 2021, 50(S01): 248-259.
- [5] 徐丹影, 陈奥飞, 赵胤祺, 等. 武汉城市污水中微塑料的分离、鉴定及其微观特征分析 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 637-645.