

# 生物降解材料在土壤污染治理与修复中的运用探索

宋伟娇

天津津环中新环境评估服务有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i3.3125

**[摘要]** 生物降解材料具有在自然环境中可被微生物完全代谢成为无害产物的特性,在土壤污染治理与修复方面有很大应用潜力。本文全面梳理了生物降解材料,包括天然高分子材料、生物基合成材料、石化基可生物降解材料。并从恢复土壤活性与保护生态环境两方面阐述了这类材料的运用价值,及其清除污染物且维系土壤微生态系统完整的作用。针对性能维护、成本控制、政策市场规范和新型材料研发等方面,提出了推动生物降解材料工程化运用的系统策略。

**[关键词]** 生物降解材料; 土壤污染治理; 修复; 运用

中图分类号: G633.91 文献标识码: A

## Exploration of the Application of Biodegradable Materials in Soil Pollution Control and Remediation

Weijiao Song

Tianjin Jinhuan Zhongxin Environmental Assessment Service Co., Ltd

**[Abstract]** Biodegradable materials have the characteristic of being completely metabolized by microorganisms into harmless products in the natural environment, and have great potential for application in soil pollution control and remediation. This article comprehensively reviews biodegradable materials, including natural polymer materials, bio based synthetic materials, and petrochemical based biodegradable materials. And the application value of such materials was elaborated from two aspects: restoring soil activity and protecting the ecological environment, as well as their role in removing pollutants and maintaining the integrity of soil micro ecosystems. A systematic strategy has been proposed to promote the engineering application of biodegradable materials in terms of performance maintenance, cost control, policy market regulation, and research and development of new materials.

**[Key words]** biodegradable materials; Soil pollution control; Repair; apply

近些年,生物降解材料开始兴起,对于突破土壤污染困境提供了新的思考方向。这种材料在完成土壤修复后能够自然消解,防止外源物质在土壤里的长期留存,而且其降解产物可为土著微生物提供碳源、能源,推动受损土壤生态系统自行恢复。

### 1 生物降解材料概述

#### 1.1 天然高分子材料

在自然界中直接存在的聚合物便是天然高分子材料,该材料主要由淀粉、纤维素、壳聚糖、木质素、海藻酸盐等构成。这些材料普遍分布于植物细胞壁、动物外骨骼、微生物胞外分泌物里,属于地球上储量颇为丰富的有机资源种类之一。其中淀粉凭借其良好成膜性、价格低廉且易获取等优势,成为了早期研究的热门要点,其分子链是由葡萄糖单元借助糖苷键连接形成的,在土壤环境中极易被淀粉酶水解。纤维素则依靠其高度有序结晶结构、出色的力学性能,在维持材料强度的情况下仍拥有可降解的特性。壳聚糖作为甲壳素脱乙酰化之后的产物,其分子链上

分布的较密集的氨基赋予了该材料独特的抗菌活性、重金属螯合能力,在治理重金属污染土壤领域展示出独特价值。天然高分子材料的最大优势,在于其来源具备可再生性,生物相容性良好,并且降解产物没有毒性和危害,不过其机械强度、热稳定性、降解速率的可控性通常比不上合成材料,需要通过化学改性或者与其他材料进行复合来弥补这些不足。

#### 1.2 生物基合成材料

生物基合成材料是把可再生的生物质资源作为原料,依靠微生物发酵或者化学聚合等人工工艺制作而成的降解材料。聚乳酸是当前产业化方面最为成熟的典型代表,其以玉米淀粉、甘蔗或者木薯等发酵生成的乳酸作为单体,经过缩聚或者开环聚合制得。聚乳酸的降解过程一开始呈现为酯键的水解断裂,分子量降低后的寡聚物进一步被微生物利用,整个周期能够依据分子量与结晶度的调整在数月甚至数年内完成。聚羟基脂肪酸酯是另一类重要的生物基合成材料,由多种细菌在碳源过剩且氮源

受限的状况下作为胞内储能物质合成,其降解速率通常比聚乳酸快,且降解产物对土壤微生物展现出明显的营养效应。生物基合成材料兼具天然原料的可再生性与合成材料结构的可设计性,借助共聚、共混或者添加成核剂等手段,能够在较大范围内调节其力学性能和降解行为,以适应不同污染类型与修复场景的差异化需求。

### 1.3 石化基可生物降解材料

石化基可生物降解材料在初始原料方面依赖石油化工产品,然而其分子链里引入了能够被生物酶切断的酯键或者酰胺键结构,具备在自然环境中完全降解的能力。聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯是这类材料的一个典型范例,它由己二酸、对苯二甲酸跟丁二醇共聚生成,有较好的柔韧性和成膜性能,常常和聚乳酸等脆性材料混合使用来改进整体韧性。聚丁二酸丁二醇酯凭借适中的降解速率、优异的加工流动性在土壤修复领域得到运用。聚己内酯虽然熔点比较低、降解速度相对较慢,不过它和多种高分子材料的相容性很好,经常作为增塑剂或者降解速率调节组分添加到其他生物降解材料中<sup>[1]</sup>。石化基可生物降解材料弥补了天然高分子材料力学性能欠缺、生物基合成材料耐热性有限的不足,这三类材料共同组成了从性能互补到运用场景适配的完备模式,为后续研究其在土壤污染治理与修复中的具体用途奠定了材料学基础。

## 2 生物降解材料在土壤污染治理与修复中的运用价值

### 2.1 恢复土壤活性

对于恢复土壤活性来说,传统的物理化学修复方法,虽然能比较快地清除或固定土壤里的污染物,然而常常会在这个过程中削弱土壤作为一个有生命的系统的核心功能。化学氧化剂在分解有机污染物的时候,有可能杀死大量的土著微生物,固化稳定化处理则有可能改变土壤的酸碱平衡、离子交换能力,致使修复后的土壤变成缺乏生物活力的惰性介质。而生物降解材料却有着不一样的方式。这类材料进入土壤后,一方面能够作为吸附载体来富集污染物,进而降低其生物有效性,另一方面其自身会逐渐降解,持续释放出小分子有机物质,给土壤微生物提供易利用的碳源和能量。微生物种群的复苏与活跃必定会带动胞外酶分泌量的增多,这些酶又会反过来加速污染物的转化与矿化,形成良性循环。随着土壤团聚体结构在微生物代谢产物的粘合作用下慢慢重建,土壤的保水、保肥、通气性能也会得到改善,原本因为污染而变得板结或者退化的土壤重新恢复活性,回到能够支持植物健康生长、养分正常循环的状态。

### 2.2 保护生态环境

以保护生态环境为视角进行审视,生物降解材料的运用规避了传统修复方法中常见的二次污染风险。不少化学修复剂或增溶剂在使用之后自身很难从土壤里移除,长期残留有可能通过淋溶作用进入地下水或者随扬尘扩散到周边区域,对更广泛的生态系统造成威胁。生物降解材料的突出优点是其最终归宿是无害的自然循环产物,不会在土壤中形成持久性残留。更关键

的是,这类材料的设计和选用能够针对特定污染类型调节降解速率,在保证修复效果的同时尽量缩短外源物质在土壤中的存在时间,进而把对非靶标生物的干扰降到最低。这种和土壤自然代谢过程相契合的材料行为,使得污染治理并非以牺牲土壤生态功能为代价,而是将修复自身融入生态系统的自我调节与恢复中,实现了清除污染物与保护生物多样性的统一<sup>[2]</sup>。

## 3 生物降解材料在土壤污染治理与修复中的运用策略

### 3.1 注重性能维护

生物降解材料是现阶段备受瞩目的焦点,将其与土壤污染治理结合起来能够发挥出最大价值,确保相关工作的进展更尽人意。推动生物降解材料在土壤污染治理与修复领域从理论探索迈向工程运用的实质性跨越,就要从性能维护、成本把控、政策市场规范、新型材料研发这四个相互关联的方面建立一套系统化的运用策略,使其发挥出自身的保障效力。性能维护是保障生物降解材料在真实土壤环境中稳定发挥预期功能的关键前提。实际污染场地的条件要比实验室复杂得多,土壤酸碱度剧烈波动、高浓度盐分累积、多种重金属复合胁迫、有机污染物空间异质性分布,这些均可能干扰材料降解速率的正常进程。如果材料降解过快,还未完成对污染物的吸附、固定或促降解作用,便已消失;如果材料降解过慢,就可能长时间留在土壤中,影响后续土地利用。所以,在材料投入使用前,要针对目标场地的理化性质、水文条件和污染特征,展开全面的适应性评估,然后据此选择匹配的生物降解材料类型。施工时还要建立材料存储与投放的操作规范,防止紫外线过度照射、机械损伤或高温高湿储存,致使材料性能劣化。对于需要长期修复的大面积场地,需要现场埋设监测样片,定期取样检测材料的质量损失、分子量下降趋势及中间产物生成情况,以便及时发现异常并调整方案,保证修复工程一直处于可控状态。

### 3.2 把控生产成本

目前来说,成本控制是保障效益的关键,因此需要关注成本控制问题,运用科学方式净化成本环境,让其维持在合理范围,避免超出一定的界限而影响到最终的效益。解决生物降解材料推广难这一实际瓶颈的关键在于把控生产成本。相较于传统土壤修复剂,生物降解材料在原料纯化、聚合反应、性能调控环节的投入偏高,致使诸多修复工程面对成本核算时选择放弃。降低成本需多措并举。于原料端而言,开发非粮生物质资源颇具战略意义,像农作物秸秆、稻壳、麸皮、甘蔗渣、食品加工行业产生的诸多有机废弃物等,经适当预处理后均可作为发酵碳源,这既大幅降低了原料采购费用,又实现了废弃物的资源化利用。在工艺端,优化菌株选育与发酵条件,提高单位体积反应器的产物得率,同时探寻连续发酵与分离耦合的一体化工艺,减少溶剂使用和能耗支出。在应用端,把生物降解材料与黏土矿物、生物炭、粉煤灰等廉价载体材料复合,在保障修复效果的情况下显著降低纯材料用量<sup>[3]</sup>。当区域性的修复需求达成一定规模后,建立专业化、标准化的材料生产线也有助于摊薄单位成本,实现从实验室小批量制备到工业化稳定生产的转变。

### 3.3 规范政策市场

在新的时代背景下,开展各项工作均需要政策的支持与保障,以此才能规范行为,促使工作进展更加顺利,实现阶段性目标,助力各项工作稳定开展。规范政策、市场环境为生物降解材料健康有序运用给予了不可缺少的制度支撑<sup>[4]</sup>。当下市场上标称“可降解”的产品数量众多,然而缺少专门针对土壤修复场景的生物降解材料评价标准和认证模式,致使用户在筛选材料时难以得到可靠的依据。要加快建立分级分类的技术规范,针对重金属污染、有机污染、复合污染等不同场景,分别制定降解率、降解周期、中间产物毒性、土壤微生物影响等核心指标。政府部门的引导作用也非常关键,通过设立修复专项补贴、实行绿色采购制度或者对采用认证材料的修复项目给予税收优惠,能够有效提高市场对于优质生物降解材料的接纳意愿。建立全生命周期的信息追溯机制,记录材料从原料来源、生产工艺、运输储存直至投用降解的全过程数据,有助于形成可核查、可比较、可追责的市场运行模式,抑制虚假标注降解性能的投机行为。

### 3.4 研发新型材料

开发新型材料是推动该领域持续取得突破的内在动力。当前的生物降解材料在降解速率的外部调控、功能特异性、力学强度等方面存在着比较明显的缺陷。未来的研究需致力于开发具备智能响应特性的新模式,比如设计只在特定污染物诱导的情况下才会加速降解的材料,或者是在降解过程中能够同时释放植物促生菌剂与微量营养元素的复合功能材料<sup>[5]</sup>。多功能一体化是另一个关键方向,理想的新型材料在完成污染修复主要任务之时,还应同时拥有改善土壤团聚结构、调节酸化或盐碱化、拮抗土传病原菌等辅助功能。分子方面的精准设计会逐渐成为现实,借助计算化学与高通量筛选技术,可以在合成之前预测不同单体组合、共聚比例及官能团修饰对降解行为和修复效率所产生的影响,进而大幅缩短新材料从概念走向运用的周期。生物降解材料与基因工程菌株的杂合模式也值得深入探究,把高效降解菌固定在材料基质中,利用材料自身的降解过程持续为菌株提供营养底物,有望突破现有修复技术在处理高浓度或混合型污染物时的效率限制<sup>[6]</sup>。上述这些策略相互交织、必

不可少,只有把性能保障、经济可行、制度完善与技术创新统一推进,生物降解材料才能够真正实现其在土壤污染治理与修复中的运用价值。

## 4 结语

在土壤污染治理与修复领域中,生物降解材料的运用体现出从末端处置到生态兼容修复的关键转变。伴随材料科学、环境微生物学、土壤学等多学科研究的持续发展,生物降解材料在土壤污染治理与修复领域发挥着越来越重要的作用,为建立绿色可持续的土壤环境管理模式给予了坚实的技术支持。通过本文的概述,明确了生物降解材料在土壤修复治理中占据的重要地位,据此提出相关的理论观点,旨在为具体工作的开展提供参考依据。

## [参考文献]

[1]刘瑾,黄庭伟,车文越,等.面向秦岭生态修复的可调型水凝胶材料构建:重构性能与微观机理[J].地球科学,2026,51(02):419-431.

[2]辛照炜,陈晨,吴婉晴,等.PLA和PBAT可生物降解微塑料对土壤-植物系统的生态效应[J].农业环境科学学报,2025,44(02):342-352.

[3]王晓东,宋亮,王琴,等.燃烧氧化-缓释-非分散红外吸收法测定生物降解材料中总有机碳的研究[J].广东化工,2023,50(02):169-171.

[4]张登奎,王琦.垄沟集雨覆盖种植对土壤水分特征及红豆草生长特性的影响[J].草原与草坪,2019,39(03):26-34.

[5]范森,段梦洁,刘亚兰,等.聚乳酸材料在不同土壤环境中生物降解的菌群结构分析[J].微生物学通报,2017,44(10):2321-2329.

[6]张惠,李娟,贾志宽,等.渭北旱塬不同覆盖材料对旱作农田土壤水分及春玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(02):93-100.

## 作者简介:

宋伟娇(1987--),女,汉族,河北省石家庄晋州市人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:生态环境。