

土壤生态环境现状及污染防控治理研究

张馨艺 赵学仕* 兰 鹏 阿佳娇
云南碧蓝环境工程有限公司 云南 昆明 650034

摘 要：当前土壤面临理化性质退化、生物群落多样性下降及生态功能衰减的严峻形势，污染类型涵盖无机、有机及复合污染，持久性强，有协同毒性，修复难度也较高。针对这些问题，已经构建了源头防控、过程阻控与生态保育相结合的防控技术体系，以及物理、化学、生物及联合修复等治理技术体系。多技术协同应用能有效应对复合污染，实现土壤污染的系统性防控与生态功能恢复。

关键词：土壤生态环境；污染防控；污染修复治理

引言：土壤作为陆地生态系统的核心载体，其理化性质退化、生物多样性丧失与生态功能衰减等问题日益严峻。当前土壤面临无机、有机及复合污染的多重胁迫，污染物持久存留、协同毒性强、修复难度大。我们系统梳理了土壤生态环境现状特征及主要污染类型，构建了涵盖源头防控、过程阻控与生态保育的防控技术体系，以及物理、化学、生物及联合修复等治理技术体系，为土壤污染的系统性防控与生态功能恢复提供理论支撑与技术参考。

1 土壤生态环境整体现状特征

1.1 土壤理化性质现状

当前土壤理化性质整体呈现基础载体质量下降的态势。土壤质地结构趋于紧实，孔隙度普遍降低，气体交换与水分运移受阻。酸碱度偏离自然背景范围，部分地区呈现酸化或盐碱化趋势，影响养分有效性。有机质含量持续走低，土壤固碳与供肥能力减弱。养分组分中氮磷钾比例失调，中微量元素缺乏问题突出，养分失衡现象普遍存在。这些理化指标的退化带来土壤板结、通透性变差、酸碱缓冲能力下降等系统性失衡特征。土壤基础载体的物理稳定性、化学适宜性都受到明显削弱，给后续生态功能发挥带来不利条件。

1.2 土壤生物群落现状

土壤生物群落呈现多样性下降与结构简化的明显趋势。微生物方面，细菌、真菌等关键类群的丰富度降低，优势种过度集中，稀有物种减少，群落组成趋于单一。土壤动物如线虫、蚯蚓等的种群密度和分布范围普遍缩减，食物网结构断裂。植物根系与土壤微生物共生的菌根群落活性降低，根系分泌物调节能力跟着弱化。

通讯作者：赵学仕，1992年7月，男，汉族，云南大理，本科，中级工程师，生态环境保护督察整改和生态环境保护管理。

生物活性指标如微生物呼吸强度、酶活性等整体处于较低水平。群落之间相互作用减弱，协同代谢与养分转化效率下降。生态系统中生物链的完整性受损，功能冗余丧失，抵御外界干扰的能力也不如从前。土壤生态系统活力不足，生物群落的健康状况已经成为制约土壤生态恢复的核心问题之一。

1.3 土壤生态功能现状

土壤生态功能整体呈现衰减与稳定性下降的特征。保水保肥能力减弱，水分入参与保持效率降低，养分易流失，供给作物的持续性变差。物质循环功能受阻，碳、氮、磷等元素在土壤内部的转化速率减慢，循环通量下降，有机残体分解不彻底。污染物缓冲功能弱化，土壤对酸碱变化、重金属及有机污染物的吸附、固定与降解能力降低，环境风险上升。生态涵养功能受损，土壤支持植被生长、维持水源调节、保持地表稳定的能力整体不足^[1]。各功能之间的协同性变差，自我修复能力持续弱化，外界扰动下功能波动加剧。当前土壤生态功能难以维持正常的地球化学循环和生态支撑作用。

2 土壤主要污染类型及污染特征

2.1 无机污染类型及特征

无机污染以重金属及无机盐类为主导，呈现广泛的富集趋势。重金属在表层土壤中累积明显，沿垂直与水平方向的分布受土壤质地、酸碱条件及有机质含量共同影响，空间异质性强。无机盐类伴随水分运移在特定土层中聚积，形成盐分累积区。这类污染物迁移性相对有限，但容易在土壤孔隙中缓慢扩散，逐步向深层或周边环境迁移。无机污染的核心问题在于隐蔽性强，不改变土壤外观与气味的情况下长期存在。滞留周期极长，多数重金属难以被自然过程降解或转化，在土壤中存留数十年甚至上百年。自然消解能力很弱，靠淋溶或风化过程去除，效率极低。

2.2 有机污染类型及特征

有机污染涉及持久性有机污染物、挥发性有机物及农用有机残留物等多种类型。持久性有机污染物在土壤有机质中吸附牢固,迁移缓慢但分布广泛,很难被微生物有效分解。挥发性有机物容易从土壤液相和气相中扩散,可向大气及地下水迁移,污染范围不局限于施用地。农用有机残留物在土壤中转化后生成中间产物,部分产物具有更强的迁移活性。有机污染的一个显著特点是容易渗透扩散,污染物随水分和气体运动向深层土壤及周边环境转移^[2]。同时容易产生二次毒害,降解过程中可能生成毒性高于母体物质的中间产物。有机污染对土壤生物代谢活动有直接抑制作用,干扰微生物的分解与转化功能,降低土壤生态系统的代谢活力。

2.3 复合污染类型及特征

复合污染表现为无机与有机污染物在土壤中叠加共存的复杂状态。无机污染物改变土壤表面电荷与酸碱环境,进而影响有机污染物的吸附与解吸行为。有机污染物则通过改变土壤有机质结构,调控重金属的形态转化与生物有效性。两者的交互作用形成协同毒害效应,联合毒性明显高于各污染物独立毒性之和。复合污染的分布范围比单一污染更广,污染物之间的相互作用可能促进一方或双方在土壤中进一步迁移扩散。修复难度明显升高,单一修复措施很难同时有效去除性质迥异的两类污染物,修复过程中还可能引发污染物形态转化或二次释放。总的来看,复合污染毒性增强、范围也在扩大,对修复技术的要求更复杂了。

3 土壤污染防控技术体系

3.1 源头防控技术

源头防控技术着眼于污染进入土壤之前的前置干预。土壤环境动态监测技术通过布设监测点位、定期采集与分析土壤样品,实时掌握土壤理化性质变化及污染物累积趋势,为预警提供依据。污染输入阻断技术针对外源污染物进入途径,包括大气沉降、灌溉用水、物料输入等环节,采取物理拦截、替代输入等方式切断污染源。土壤基底保育技术通过维持土壤有机质水平、优化酸碱条件、增强团聚体稳定性,提升土壤自身抵抗污染的缓冲能力。污染风险预判技术依据区域土壤背景、污染源特征及迁移转化规律,建立污染风险等级,指导预防性措施的精准部署。这几项技术把防控关口前移到污染发生之前,靠监测、阻断、保育与预判配合使用,最大限度减少污染物进入土壤的机会,从源头上控制污染负荷。

3.2 过程阻控技术

过程阻控技术针对污染物进入土壤圈层后的迁移、扩散与转化环节实施干预。吸附固定技术利用土壤原有组分或外加材料对污染物的表面吸附、离子交换及络合作用,降低污染物在土壤液相中的可迁移浓度,抑制其向深层或周边环境扩散。络合钝化技术通过向土壤中引入钝化剂,与重金属或有机污染物形成稳定性高的络合物或沉淀物,改变污染物存在形态,降低其生物有效性与迁移活性。迁移阻隔技术采用物理屏障或水力调控手段,在污染区域周边设置垂直或水平阻隔层,切断污染物随地下水、毛细水或气体扩散的通道^[3]。

3.3 生态保育防控技术

生态保育防控技术以提升土壤自身抗污染能力为核心目标。调控土壤生物群落技术通过引入功能性微生物、恢复土壤动物种群密度及优化根系共生结构,增强土壤生物对污染物的降解、转化与固定能力。补充有机质技术向土壤中添加稳定性高的有机物料,改善土壤胶体性质,增加吸附位点,同时促进团聚体形成,提升土壤对污染物的物理化学固定作用。优化土壤结构技术通过耕作方式改良、孔隙度调节及水分管理,构建利于污染物固定与降解的土壤微环境,降低污染物迁移通道的连通性。这些生态化技术相互协同,形成以增强土壤生物活性、改善土壤理化性状、提升污染物固持能力为核心的长效防控体系,不依赖外部化学材料投入,靠土壤生态系统自我调节与功能强化来实现污染防控的持续性。

4 土壤污染修复治理技术

4.1 物理修复治理技术

物理修复治理技术依靠物理分离或状态改变实现污染物去除或固定。土壤气相抽提技术通过抽气系统在土壤孔隙中产生负压,促使挥发性有机物从土壤颗粒表面解吸并进入气相,被抽提至地面后进行处理,适用于挥发性和半挥发性有机污染。热脱附技术通过直接或间接加热土壤,使有机污染物或部分重金属在设定温度下挥发或解吸,再对尾气进行收集处理,能高效去除多种有机污染物。筛分分选技术利用污染物与土壤颗粒在粒径、密度等物理性质上的差异,通过振动筛、风力分选等设备将富集污染物的细粒组分分离,减少需要进一步处理的土方量。固化稳定化技术向污染土壤中添加固化剂,通过物理包裹或化学反应形成低溶解性产物,降低污染物的浸出毒性,适用于重金属及部分有机污染。物理修复的优势是处理周期相对可控,对污染物类型适应范围较广,而且不引入新的化学物质。

4.2 化学修复治理技术

化学修复治理技术基于化学反应改变污染物的形态

或结构。化学淋洗技术将淋洗剂注入或喷洒至污染土壤中,使污染物从固相解吸进入液相,随后通过回收系统将淋洗液提取至地面进行处理,能同时去除重金属和有机污染物。氧化还原技术向土壤中添加氧化剂或还原剂,将有机污染物氧化分解为低毒或无毒产物,或改变重金属价态降低其溶解性和生物有效性。化学沉淀技术通过添加沉淀剂,使重金属离子转化为难溶性沉淀物,从土壤溶液中析出并固定于固相。螯合修复技术利用螯合剂与重金属离子形成稳定的螯合物,改变其环境行为^[4]。化学修复的局限在于淋洗剂或化学药剂可能残留在土壤中,对土壤理化性质和生物群落产生扰动。部分技术在黏性土壤中传质受限,处理不均匀。氧化还原过程对污染物选择性较强,非目标物质可能消耗药剂,降低处理效率。

4.3 生物修复治理技术

生物修复治理技术依靠生物体的代谢活动转化或固定污染物。微生物降解技术利用土著或外加细菌、真菌等微生物,将有机污染物作为碳源或能源物质进行分解代谢,最终转化为无毒小分子产物,适用于石油烃、农药等可生物降解的有机污染。植物富集技术选用对特定重金属具有超累积能力的植物种类,通过根系吸收污染物并向地上部分转运,收获植物体后实现污染物的去除。生物固化技术借助微生物代谢产生的胞外聚合物或酶类,改变重金属的形态和价态,降低其迁移性和生物可利用性。菌剂修复技术将筛选驯化的高效降解菌或钝化菌制成菌剂投入土壤,增强土壤中功能性微生物的种群密度和代谢活性。生物修复的生态优势是对土壤结构破坏小,能耗低,过程中不引入有害化学物质,能与其他生态技术协同运行。应用时要求土壤环境参数适宜生物生长代谢,修复周期相对较长,对高浓度污染或复合污染的耐受能力有限。

4.4 联合修复治理技术

联合修复治理技术针对复合污染场景整合多种修复方法的优点。物理生物联合模式先采用气相抽提或热脱附等物理手段去除土壤中浓度高、易挥发的有机污染

物,减轻对后续生物处理单元的毒性抑制,再通过微生物降解或植物富集处理残留的中低浓度污染物及伴生重金属。化学生物联合模式利用化学氧化或螯合修复改变污染物的化学形态或结构,提高其生物可利用性,随后由微生物或植物完成进一步降解或富集,或者先由生物处理降解有机污染物,再以化学沉淀或钝化技术固定重金属。多技术耦合模式根据污染组分与土壤性质,将物理分离、化学转化、生物代谢等不同原理的技术按序或同步组合,形成各环节功能互补的修复链条^[5]。联合修复在复合污染场景下的适配性强,能避免单一技术对某类污染物去除效率高而对另一类无能为力的局限。治理上污染物去除更彻底,修复周期与成本之间能获得更优平衡,对土壤性质的扰动总体可控。

结束语:总的来看,当前土壤生态环境面临理化退化、生物多样性降低与功能衰减的多重压力,无机、有机及复合污染叠加让治理难度加大。构建源头防控、过程阻控与生态保育相协同的防控体系,配合物理、化学、生物及联合修复等多元治理技术,是实现土壤污染系统防控与生态功能恢复的有效路径。下一步需要进一步强化多技术耦合与精准施策,推动土壤环境质量持续改善和生态系统可持续发展。

参考文献

- [1]郭习林.生态环境监测在土壤污染治理中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)自然科学,2026(2):160-163.
- [2]曾晓岛.农业土壤污染现状及土壤环境保护治理策略研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)农业科学,2025(1):034-037.
- [3]康周平.土壤污染防治与生态环境修复协同治理策略研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(18):150-152.
- [4]李嘉乐.土壤中重金属污染现状及治理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2025(6):122-125.
- [5]杨北辰.土壤污染与生态环境保护的现状与防治策略研究[J].中国厨卫,2024,23(11):259-261.