

土壤污染治理中生物修复技术的应用

柳 焱

中科博一环保科技有限公司 湖南 长沙 410000

摘 要：土壤污染是全球面临的重要环境问题之一，直接威胁生态安全和人类健康。生物修复技术凭借其环保、高效、低成本的特点，成为土壤污染治理的重要手段。本文从生物修复技术的应用现状出发，分析其在微生物修复、植物修复、动物修复及联合修复等领域的具体实践，探讨当前技术面临的环境适应性差、修复周期长、成本高等难点，并从技术创新、政策支持、资金投入、公众参与等方面提出提升普及应用的对策，以期土壤污染治理提供参考。

关键词：土壤污染；生物修复技术；微生物修复；植物修复；环境治理

土壤是人类生存和发展的基础，承载着农业生产、生态系统平衡等重要功能。然而，随着工业化、城市化进程的加快，农药化肥滥用、重金属排放、有机污染物泄漏等问题导致土壤污染日益严峻。据《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国土壤污染点位超标率达16.1%，其中耕地污染问题尤为突出，重金属（如镉、汞、铅）和有机污染物（如多环芳烃、农药）是主要污染物。

传统的土壤污染治理技术（如物理修复、化学修复）虽然见效快，但存在成本高、易造成二次污染、破坏土壤结构等缺陷。相比之下，生物修复技术利用微生物、植物、动物等生物的代谢活动或吸收富集能力，将污染物降解、转化或固定，具有环境友好、修复彻底、可持续性强等优势，逐渐成为土壤污染治理的研究热点和发展方向。本文将围绕生物修复技术的应用现状、难点及推广路径展开分析，为该技术的实际应用提供理论支持。

1 土壤污染治理中生物修复技术的应用现状

生物修复技术主要包括微生物修复、植物修复、动物修复以及多种技术结合的联合修复模式，每种技术各有特点，适用于不同类型的土壤污染场景。

1.1 微生物修复技术：降解有机污染物的“主力军”

微生物修复是利用土壤中天然存在或人工培育的微生物（如细菌、真菌、藻类），通过代谢活动将有机污染物分解为无害的二氧化碳、水或转化为其他低毒物质的过程。该技术对多环芳烃（PAHs）、石油烃、农药（如滴滴涕、六六六）等有机污染物效果显著。例如，在石油污染场地修复中，假单胞菌、芽孢杆菌等细菌可通过氧化、还原、水解等反应降解石油烃类物质。研究表明，在石油污染土壤中接种高效降解菌剂，可使土壤中总石

油烃（TPH）的去除率在3个月内提升40%以上^[1]。此外，真菌对难降解有机物（如多氯联苯、二噁英）的修复能力也备受关注。白腐真菌分泌的木质素过氧化物酶和锰过氧化物酶，能破坏有机污染物的苯环结构，使其转化为无害小分子。微生物修复还可通过生物强化（添加高效菌剂）和生物刺激（补充营养物质、氧气）来提升效果。例如，在农药污染的农田中，向土壤中添加氮、磷等营养元素，可促进土著微生物的繁殖，加速农药降解。

1.2 植物修复技术：重金属污染的“天然净化器”

植物修复是利用某些植物对重金属的吸收、富集或固定能力，降低土壤中污染物浓度的技术，主要包括植物提取、植物稳定和植物挥发三种类型。

植物提取技术：选择重金属超富集植物（如蜈蚣草富集砷、东南景天富集镉），通过根系吸收土壤中的重金属并转运至地上部分，收割后集中处理。这类植物的特点是对特定重金属的吸收能力强（地上部重金属浓度可达普通植物的10-100倍），且能在污染土壤中正常生长。例如，中国科学院南京土壤研究所的研究团队发现，利用蜈蚣草修复砷污染土壤，连续种植3-5年可使土壤砷含量降低15%-20%^[2]。

植物稳定技术：通过种植耐重金属植物（如草本植物、灌木），将土壤中的重金属固定在根系周围，减少其迁移性和生物有效性。例如，在铅污染场地种植蓖麻、向日葵，植物根系分泌的有机酸可与铅离子结合，形成难溶性化合物，降低铅对地下水和农作物的威胁。

植物挥发技术：利用某些植物将土壤中的挥发性污染物（如汞、硒）转化为气态形式释放到大气中。例如，转基因烟草可将土壤中的甲基汞转化为单质汞挥发，从而降低土壤汞污染。

1.3 动物修复技术：土壤生态的“辅助调节器”

动物修复主要通过土壤动物（如蚯蚓、线虫、螨虫）的生理活动改善土壤结构，促进污染物降解或富集。蚯蚓是最典型的土壤动物修复载体，其洞穴系统可增加土壤通气性和透水性，加速微生物扩散；同时，蚯蚓的肠道分泌物能刺激微生物活性，提高污染物降解效率。研究显示，在多环芳烃污染土壤中引入蚯蚓，可使PAHs的降解率提高10%-20%^[3]。此外，某些水生动物（如贻贝、田螺）可用于湿地或河滨带污染修复，通过滤食作用去除水体和底泥中的污染物。

1.4 联合修复技术：协同增效的“复合方案”

单一修复技术往往受限于污染物类型、土壤环境等因素，联合修复技术通过整合微生物、植物、动物及物理化学方法，实现优势互补。例如：

植物-微生物联合修复：在植物根系周围接种降解菌剂，形成“根际效应”。植物为微生物提供碳源和氧气，微生物帮助植物降解根际污染物，同时促进植物生长。如在石油污染土壤中，种植黑麦草并接种石油降解菌，可使修复效率提升30%以上。

微生物-动物联合修复：蚯蚓活动改善土壤微环境（如pH值、养分），为微生物提供更适宜的生存条件，二者共同加速污染物降解。

化学-生物联合修复：通过添加表面活性剂（如十二烷基硫酸钠）提高有机污染物的溶解度，增强微生物的可利用性，再结合微生物降解实现高效修复。

2 土壤污染治理中生物修复技术存在的难点

尽管生物修复技术具有显著优势，但其在实际应用中仍面临诸多挑战，主要体现在以下几个方面：

2.1 技术本身的局限性

环境适应性差：微生物和植物的生长代谢对土壤温度、pH值、含水率、氧气含量等条件敏感。例如，大多数降解菌在25-35℃、中性偏酸环境中活性最佳，当土壤pH值低于5或高于9时，降解效率显著下降；重金属超富集植物通常对特定土壤类型（如酸性红壤）适应性强，在碱性土壤中生长受限。

修复周期长：生物修复依赖生物的自然生长和代谢过程，对于高浓度污染或复合型污染土壤，修复周期可达数年甚至数十年。例如，植物提取技术需要多次种植和收割，若土壤重金属浓度过高，植物可能出现生长抑制或死亡，进一步延长修复时间。

污染物针对性强：一种微生物或植物通常只能针对特定类型的污染物（如某种重金属或有机化合物），对复合型污染（同时存在重金属和有机污染物）的修复效果有限。此外，部分难降解有机物（如全氟化合物

PFAS）缺乏有效的生物降解途径，现有技术难以处理。

二次污染风险：植物提取技术中，若收割的植物处理不当（如随意焚烧或填埋），重金属可能重新释放到环境中；微生物修复过程中，若菌剂过度繁殖或与土著微生物竞争，可能破坏土壤微生态平衡，引发新的环境问题。

2.2 成本与效率的矛盾

前期投入高：高效降解菌剂的筛选、基因工程菌的构建、超富集植物的培育需要大量科研经费；联合修复技术涉及多种技术整合，设备和材料成本较高。修复效率受土壤异质性影响：土壤质地（砂土、黏土）、有机质含量、污染物分布不均等因素会导致修复效果不稳定。例如，黏土吸附能力强，污染物难以被微生物接触，修复效率低于砂土；深层土壤缺氧环境会抑制好氧微生物活性，需额外通入氧气，增加能耗。

2.3 政策与管理的挑战

技术标准和规范缺失：目前我国缺乏统一的生物修复技术评价体系，不同地区、不同项目的修复效果难以横向比较，影响技术推广。例如，微生物菌剂的安全性评估、植物修复后的土壤质量验收标准尚未完善。

责任主体和资金分配不明确：土壤污染治理涉及政府、企业、农户等多方主体，部分污染场地责任主体灭失或无力承担修复费用，导致项目停滞。此外，生物修复周期长，短期效益不明显，社会资本参与积极性低，主要依赖政府财政投入。

2.4 公众认知与接受度不足

技术透明度低：普通公众对生物修复技术的原理和效果缺乏了解，担心微生物或转基因植物可能对生态和人体健康产生潜在风险，对修复项目持观望或抵触态度。例如，部分地区在推广转基因修复植物时，遭遇周边居民反对。

长期监测机制缺失：生物修复完成后，需要长期跟踪土壤质量变化，但目前多数项目缺乏后续监测，公众无法直观看到修复效果，影响技术信任度。

3 如何提高土壤污染治理中生物修复技术的普及应用

针对上述难点，需从技术创新、政策支持、资金保障、公众参与等多维度协同发力，推动生物修复技术从实验室走向实际应用。

3.1 加强技术研发，突破核心瓶颈

开发环境适应性强的生物材料，利用基因工程、合成生物学技术改造微生物，提高其在极端环境（如高盐、强酸/强碱）中的生存和降解能力。

构建复合型修复技术体系，针对复合型污染，研发

“植物提取+微生物降解+动物改良”的联合修复模式。例如，在同时存在镉和多环芳烃污染的土壤中，种植镉富集植物（如遏蓝菜），并接种PAHs降解菌，配合蚯蚓改善土壤结构，实现重金属和有机物的同步修复。结合物联网、传感器技术实时监测土壤环境参数（如温度、湿度、污染物浓度），通过智能控制系统动态调整修复方案（如补充营养、调节水分），提高修复效率。

解决二次污染和生态风险，建立修复生物安全性评估体系，对基因工程菌、转基因植物进行风险评估，确保其在自然环境中无逃逸和生态入侵风险。规范修复后产物处理流程，如将收割的重金属富集植物进行稳定化处理（如高温焚烧制成生物炭），实现重金属的安全固化和资源回收。

3.2 完善政策法规，强化制度保障

制定生物修复技术标准和指南由生态环境部牵头，联合科研机构、企业制定《土壤生物修复技术应用规范》，明确微生物菌剂、修复植物的准入标准，修复过程的环境监测指标，以及修复效果的验收方法。例如，规定微生物菌剂必须经过至少3个月的田间安全性试验，方可大规模应用。建立土壤污染治理技术库，将成熟的生物修复技术纳入推荐目录，给予项目申报、资金补贴等政策倾斜。

明确责任主体和资金机制落实“污染者付费”原则，通过法律手段倒逼工业企业、农业生产者承担土壤污染修复责任。对历史遗留污染场地，建立政府、企业、社会资本共同参与的多元化资金筹措机制，例如发行土壤修复专项债券、引入PPP（公私合营）模式。中央和地方财政设立生物修复技术专项基金，对科研项目、示范工程给予补贴（如按修复面积补贴50%-70%的成本），降低企业应用门槛。

3.3 加大资金投入，推动产业化发展

支持产学研深度融合，鼓励高校、科研院所与环保企业合作，建立生物修复技术研发中心，加速成果转化。企业可委托科研机构定向筛选适合特定污染场地的高效菌剂，形成“研发-生产-应用”一体化链条。设立国家级生物修复技术产业化基地，集中开展中试试验和规模化应用示范，降低技术推广风险。例如，在湖南镉污染耕地、大庆石油污染场地建设示范项目，通过实际案例验证技术可行性。

降低应用成本，优化菌剂和植物种苗的生产工艺，通过大规模发酵、组培快繁技术降低生产成本。利用工业废弃物（如酒糟、秸秆）作为微生物培养基，减少原材料费用。推广“生物修复+生态农业”“生物修复+土地开发”等模式，在修复过程中实现土地增值。例如，在修复后的耕地上种植高附加值作物（如有机蔬菜），通过收益反哺修复成本。

3.4 加强公众教育，营造社会共识

普及生物修复技术知识，通过科普讲座、纪录片、互动展览等形式，向公众解释生物修复的原理（如“微生物如何吃掉污染物”“植物如何搬运重金属”），展示成功案例（如某工业区通过植物修复后变成公园），消除“谈生物色变”的误解。邀请公众参与修复项目的监测和监督，例如开放土壤样品检测实验室，公示修复过程中的污染物浓度变化数据，增强透明度。

建立长期监测和反馈机制，要求每个生物修复项目制定至少5年的后续监测计划，定期公布土壤质量数据，让公众看到修复效果的持续性。例如，在修复后的农田设置监测点，每年公示重金属含量、作物产量等指标。鼓励社区、环保组织参与修复效果评估，形成政府、企业、公众三方共治的良性循环。

4 结论

生物修复技术作为土壤污染治理的绿色解决方案，具有广阔的应用前景。尽管当前面临技术适应性、成本、政策等方面的挑战，但通过技术创新提升修复效率，通过政策引导完善制度保障，通过资金支持推动产业化发展，通过公众参与营造社会共识，生物修复技术有望成为未来土壤污染治理的主流手段。未来，需进一步加强跨学科融合（如生物技术与信息技术结合）、跨领域协作（如农业、环保、国土部门联动），构建“预防-修复-监管”一体化的土壤环境保护体系，为守住土壤环境安全底线、实现“净土保卫战”目标提供有力支撑。

参考文献

- [1]周启星.土壤污染修复原理与技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [2]骆永明,滕应,过园.中国土壤污染退化现状与生物修复技术研究进展[J].土壤学报,2019,56(1):1-13.
- [3]李顺鹏.环境微生物修复技术[M].北京:高等教育出版社,2013.