

土壤重金属污染修复技术的进展与挑战

关 燕

内蒙古八思巴环保科技有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：本文综述了土壤重金属污染修复技术的最新进展，分析了物理、化学、生物及新兴融合技术的原理、应用案例及优缺点。研究指出，尽管修复技术呈现多元化发展，但仍面临技术局限性、资金短缺、政策执行不足等挑战。例如，物理修复成本高，化学修复可能引发二次污染，生物修复受环境条件限制。同时，政策执行差异和历史遗留问题进一步制约了修复效率。未来，需加强技术创新、政策优化和社会参与，推动智能化、绿色化修复技术发展，实现生态与经济的双重效益。

关键词：土壤重金属污染；修复技术；挑战

引言

土壤重金属污染是全球面临的重大环境问题之一，其来源广泛，包括工业活动、农业生产、交通排放等。重金属具有持久性、毒性和生物累积性，对生态系统安全和人类健康构成严重威胁。近年来，随着环保法规的强化和公众意识的提升，土壤重金属污染修复技术成为研究热点。本文综述了当前修复技术的进展，分析了技术应用面临的挑战，旨在为治理实践提供参考。

1 土壤重金属污染修复技术进展

土壤重金属污染是全球面临的重大环境问题之一，对生态环境、食品安全和人体健康构成严重威胁。随着工业化和城市化进程的加快，土壤重金属污染问题日益突出，修复技术研发与应用成为当务之急。近年来，国内外在土壤重金属污染修复领域取得了显著进展，形成了物理修复、化学修复、生物修复及新兴技术融合等多种技术手段。

1.1 物理修复技术

1.1.1 客土与换土法

客土与换土法是最早应用的物理修复技术之一，其原理是通过替换或混合清洁土壤，降低污染土壤中重金属的浓度。这种方法适用于小面积重度污染土壤的修复，尤其适用于污染程度极高且难以通过其他方法修复的情况。例如，上海西北地区某工业地块修复工程中，采用异位高级氧化和土壤淋洗技术，有效去除了汞、砷等污染物，修复后土壤符合安全利用标准。该案例表明，客土与换土法在特定条件下能够实现高效的污染土壤修复。然而，这种方法也存在明显缺点：一是成本高昂，包括土壤挖掘、运输和处置费用；二是可能破坏土壤原有的结构和生态系统，影响土壤的功能和生产力。

1.1.2 电动修复与热处理法

电动修复和热处理法是两种具有创新性的物理修复技术。电动修复利用电场驱动重金属离子在土壤中的迁移，将其富集到电极区域，再通过收集系统去除。这种方法适合低渗透性土壤，能够高效地去除重金属，且操作相对简单。热处理法则是通过高温使重金属挥发或改变其化学形态，从而降低其在土壤中的毒性。这种方法尤其对汞污染有效，因为汞在高温下容易挥发^[1]。然而，这两种方法也存在局限性：一是受土壤性质影响较大，如土壤含水量、pH值等都会影响修复效果；二是可能引发二次污染，如电动修复过程中可能产生酸性溶液，热处理过程中可能释放有害气体。

1.2 化学修复技术

1.2.1 固化/稳定化技术

固化/稳定化技术是化学修复技术中的主流方法，其原理是通过添加固化剂（如水泥、沸石等），将重金属固定或包裹在固化体内部，减少其迁移性和生物有效性。这种方法适用于多种类型的重金属污染土壤，且成本相对较低。例如，广东某钢铁厂修复项目采用异位化学氧化与稳定化联合技术，成本约550元/立方米，验证了多学科融合技术的经济性。固化/稳定化技术的关键在于固化剂的选择和配比，不同的固化剂对重金属的固定效果差异显著。此外，固化体的长期稳定性也是一个需要关注的问题，因为随着时间的推移，固化体可能出现老化、破裂等现象，导致重金属重新释放。

1.2.2 化学淋洗法

化学淋洗法是利用提取剂（如EDTA、硝酸等）与土壤中的重金属发生化学反应，逆转其吸附状态，使其从土壤中解吸并随淋洗液排出。这种方法具有高效、快速的特点，尤其适用于复合污染土壤的修复。例如，天津某工程采用化学淋洗修复复合污染土壤，取得了良好的

效果。然而，化学淋洗法也存在成本高、淋洗液处理难度大等问题。此外，淋洗过程中可能破坏土壤结构，影响土壤肥力。因此，在选择化学淋洗法时，需要综合考虑修复效果、成本和环境影响等因素。

1.3 生物修复技术

1.3.1 植物修复

植物修复是利用超富集植物（如蜈蚣草、东南景天等）对重金属的吸收能力，将土壤中的重金属转移到植物体内，再通过收割植物达到修复目的。这种方法适用于轻度或中度污染的土壤，且能够同时修复多种重金属污染。例如，湖南某矿区试验表明，蜈蚣草能够显著降低土壤中的砷浓度。然而，植物修复也存在修复周期长、超富集植物种类有限等问题。此外，为了提高植物修复效率，往往需要配套土壤改良措施，如添加有机肥、调节土壤pH值等。

1.3.2 微生物修复

微生物修复是利用微生物（如细菌、真菌等）对重金属的吸附、溶解或氧化还原作用，将土壤中的重金属转化为低毒或无毒形态。这种方法具有高效、环保的特点，且适用于多种类型的重金属污染土壤。国内研究筛选出对Pb去除率达96.54%的青霉菌株，表明微生物修复在重金属污染土壤修复中具有巨大潜力^[2]。然而，微生物修复的大规模应用仍面临技术稳定性问题，如微生物在不同环境条件下的适应性、与土著微生物的竞争关系等。此外，微生物修复过程中可能产生代谢副产物，对土壤环境造成潜在影响。

1.4 新兴技术融合

1.4.1 化学-生物联合修复

化学-生物联合修复是将化学修复技术与生物修复技术相结合，利用化学方法快速去除土壤中的重金属，同时利用生物方法长效修复土壤生态系统。例如，某研究中采用乙二胺四乙酸（EDTA）与大豆联合体系，提高了铅、锌、镉的去除率。EDTA作为化学淋洗剂，能够高效地解吸土壤中的重金属，而大豆作为植物修复物种，能够吸收并富集解吸出来的重金属。这种联合修复技术既发挥了化学修复的高效性，又体现了生物修复的环境友好性，是一种具有前景的修复方案。然而，化学-生物联合修复也需要关注化学试剂对生物体的潜在影响，以及生物体对化学试剂的适应性等问题。

1.4.2 生物炭基材料应用

生物炭基材料是将生物炭（由生物质热解产生的多孔碳材料）与修复技术相结合，利用生物炭的吸附、固定和改良土壤环境等功能，提高修复效率。研究证实，

生物炭基调理剂与树木联合修复能显著降低土壤重金属活性，适用于大面积污染场地。生物炭具有巨大的比表面积和丰富的孔隙结构，能够吸附土壤中的重金属，减少其迁移性和生物有效性。同时，生物炭还能够改良土壤结构，提高土壤肥力，为植物修复提供有利条件。然而，生物炭基材料的应用也受到生物炭制备成本、长期稳定性等因素的限制。此外，生物炭对不同类型的重金属的吸附效果存在差异，需要根据具体污染情况选择合适的生物炭基材料。

2 修复技术面临的挑战

尽管土壤重金属污染修复技术取得了显著进展，但在实际应用过程中仍面临诸多挑战。这些挑战涉及技术本身、资金与人才、政策与规划以及社会经济等多个方面，严重制约了修复工作的有效推进。

2.1 技术瓶颈与适用性问题

物理修复技术，如客土与换土法、电动修复与热处理法等，虽然具有操作直接、效果快速的优势，但也存在明显的局限性。客土与换土法需要大规模挖掘和运输土壤，不仅成本高昂，而且容易破坏土壤原有的结构和肥力，对生态环境造成不利影响。这种方法主要适用于小面积重度污染土壤的修复，对于大面积污染场地则难以实施。电动修复与热处理法虽然能够高效地去除土壤中的重金属，但也存在成本高、工程量等问题^[3]。此外，这些方法对土壤性质要求较高，如电动修复法在低渗透性土壤中效果较好，但在高渗透性土壤中则可能受到限制。同时，热处理法可能引发二次污染，如高温处理过程中可能产生有害气体，对周围环境造成污染。

化学修复技术，如固化/稳定化技术、化学淋洗法等，通过添加化学试剂改变重金属的化学形态或结合状态，从而降低其迁移性和生物有效性。然而，这种方法也可能引入新的化学物质，对土壤环境造成潜在影响。固化/稳定化技术虽然能够长期稳定重金属，但固化体的长期稳定性仍是一个需要关注的问题。化学淋洗法虽然能够高效地去除土壤中的重金属，但淋洗液的处理难度大，且可能破坏土壤结构，影响土壤肥力。此外，化学淋洗法的成本也相对较高，限制了其在大规模污染场地修复中的应用。

生物修复技术，如植物修复、微生物修复等，利用生物体的代谢活动将土壤中的重金属吸收、转化或固定，具有环境友好、成本低廉的特点。然而，生物修复技术也存在明显的局限性。植物修复受环境条件影响较大，如土壤pH值、养分含量等都会影响植物的生长和修复效果。此外，植物修复周期较长，难以快速应对突发

污染事件。微生物修复虽然能够高效地去除土壤中的重金属,但微生物在不同环境条件下的适应性存在差异,且大规模应用时需解决菌株的稳定性和安全性问题。

2.2 经济与人力资源约束

土壤重金属污染修复是一项长期而复杂的工程,需要大量的资金投入。然而,在经济落后地区,由于缺乏足够的资金支持,修复工作往往难以开展。例如,部分矿厂关闭后,由于历史遗留问题,修复资金难以落实,导致污染场地长期得不到有效治理。此外,修复技术的成本也是制约修复工作推进的重要因素。物理修复和化学修复技术往往成本高昂,而生物修复技术虽然成本较低,但修复周期长,难以在短期内取得显著效果。土壤重金属污染修复需要专业的技术人才支持,包括环境科学、土壤学、化学、生物学等多个领域的专家。然而,在实际应用中,技术人才匮乏的问题十分突出。一方面,由于修复技术涉及多个学科领域,培养专业的修复技术人才需要较长的周期和较高的成本。另一方面,由于修复工作往往在经济落后地区开展,难以吸引和留住高素质的技术人才。这导致修复技术在推广和应用过程中存在困难,难以充分发挥其应有的效果。

2.3 政策与规划不足

尽管国家出台了一系列关于土壤重金属污染修复的政策和法规,但在实际执行过程中仍存在差异。部分地区由于缺乏详细的治理规划,政策执行力度不一,导致修复工作难以有效推进。例如,一些地区在修复过程中过于注重短期效果,忽视了长期稳定性和生态安全性,导致修复后出现二次污染等问题。此外,政策执行过程中还存在监管不到位、责任划分不明等问题,影响了修复工作的整体效果^[4]。矿山、化工厂等历史污染场地是土壤重金属污染的重要来源之一。然而,由于历史遗留问题复杂,责任划分不明,修复资金难以落实,导致这些污染场地长期得不到有效治理。例如,一些矿山在开采过程中未采取有效污染防治措施,导致周边土壤受到严重污染。然而,由于矿山已经关闭或破产,修复责任难以界定,修复资金也难以筹措,导致污染问题长期存在。

2.4 社会经济影响

土壤重金属污染修复工程可能对农业生产造成短期影响。例如,在修复过程中可能需要挖掘和运输土壤,破坏农田基础设施,影响农作物的种植和生长。此外,修复过程中使用的化学试剂可能对土壤肥力造成不利影

响,进一步影响农业生产。这可能导致农民收入减少,加剧农村贫困化问题。矿厂关闭是导致土壤重金属污染的重要原因之一,但同时也对农民就业和农村经济发展造成严重影响。矿厂关闭后,大量农民失业,加剧了农村人口流失问题。这不仅影响了修复工程的实施,也对农村经济发展和社会稳定造成不利影响。此外,高成本的修复技术限制了其在大规模污染场地修复中的应用,进一步加剧了农民就业和农村经济发展的困境。

为了应对这些挑战,需要采取综合措施。在技术方面,应加大研发投入,推动修复技术的创新和发展,提高修复效率和效果。在经济方面,应建立多元化的资金筹措机制,鼓励社会资本参与修复工作,同时加强技术人才培养和引进工作。在政策方面,应完善相关法规和标准体系,加强政策执行力度和监管力度,推动修复工作的规范化和标准化。在社会经济方面,应关注修复工程对农业生产、农民就业和农村经济发展的影响,采取相应措施减轻负面影响,促进农村经济的可持续发展。

结语

当前土壤重金属污染修复技术呈现多元化发展趋势,物理、化学、生物及融合技术各有优劣。尽管取得显著进展,但技术局限性、资金短缺、政策不足等问题仍制约修复效率。展望未来,需要加强多学科融合,开发高效、低成本、绿色的修复技术。例如,纳米材料、人工智能在污染监测与修复中的应用。同时,完善法规标准,明确责任划分,加大财政支持。如《土壤污染源头防控行动计划》推动受污染农用地溯源整治。还需要鼓励公众参与,提高环保意识,推动修复产业可持续发展。土壤重金属污染修复是一项长期系统性工程,需整合技术、政策、社会多方力量,实现生态与经济的双重效益。未来,智能化、绿色化修复技术将成为发展方向,助力全球土壤污染治理。

参考文献

- [1]陈曦,陈忻,许锋,等.重金属污染土壤修复技术的研究进展[J].云南化工,2024,51(08):24-27.
- [2]何雪莲,韦超前,来楷迪,等.耕地土壤重金属污染与修复技术研究进展[J].资源节约与环保,2023,(12):141-148.
- [3]石永春.农田重金属污染土壤修复技术研究进展[J].山东化工,2023,52(18):244-246.
- [4]颜永毫,韩云,夏晨曦,等.重金属污染土壤修复领域技术研发进展[J].黄河科技学院学报,2023,25(02):47-53.