

我国重金属污染土壤修复技术的发展现状及选择策略

Present situation and screening strategies of remediation technology for heavy metal contaminated soil in China

摘要 介绍了重金属污染修复技术及其在国内外应用情况，提出土壤修复技术选择的原则和程序。阐述了我国重金属污染土壤修复存在的问题，对阻隔填埋、固化稳定化、土壤清洗和植物修复在我国的应用问题进行了深入分析，并提出了对策建议。

关键词 重金属 ; 土壤污染 ; 土壤修复 ; 污染场地 ; 风险评估

文/宋云 尉黎 王海见

2014年4月17日，环境保护部和国土资源部联合发布了《全国土壤污染状况调查公报》^[1]，公报显示全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染严重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出，全国土壤总的超标率为16.1%，以无机型为主，无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%。无机污染物主要是镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍8种重金属，以轻微和轻

度污染为主。因此，重金属污染土壤修复是土壤环境保护领域面临的一大难题。我国典型重金属污染土壤包括：铅、锌、铜、镍等冶炼形成的重金属污染土壤；矿山开采、选矿和尾矿库形成的重金属污染土壤；土法炼金形成的汞污染土壤，汞触媒、汞电极和荧光灯生产或使用形成的汞污染土壤；铬盐生产和铬渣堆场形成的六价铬污染土壤，铅盐生产形成的土壤铅污染；电池生产、处置和回收形成

的土壤重金属污染；金属表面处理和电镀造成的重金属污染场地；染料生产造成的重金属污染场地；石油化工和化工生产造成的重金属污染场地；农业生产活动造成土壤重金属积累。

重金属土壤修复技术应用及选择

重金属污染土壤修复技术概述

重金属污染土壤修复指利用物理、化学和生物的方法转移、吸收、降解和转化土壤中的重金属，使其浓度或毒性风险降低到可接受的水平，满足相应土地利用类型的要求。重金属修复从治理途径上可分为两种，一种是改变重金属在土壤中的存在形态，使其固定，降低其在环境中的迁移性和生物可利用性；另一种是从土壤中去掉重金属，使其残留浓度接近或达到土壤重金属背景值或标准。从治理技术上可以分为物理修复技术、化学修复技术、物理化学修复技术和植物修复技术(图1)。有些技术(如电动修复)由于缺少完整的经费与工程运行参数，在污染场地修复领域的实际应用时间不长，还不能被推广；有些技术(如玻璃化和热解析技术)由于运行费用、技术复杂程度

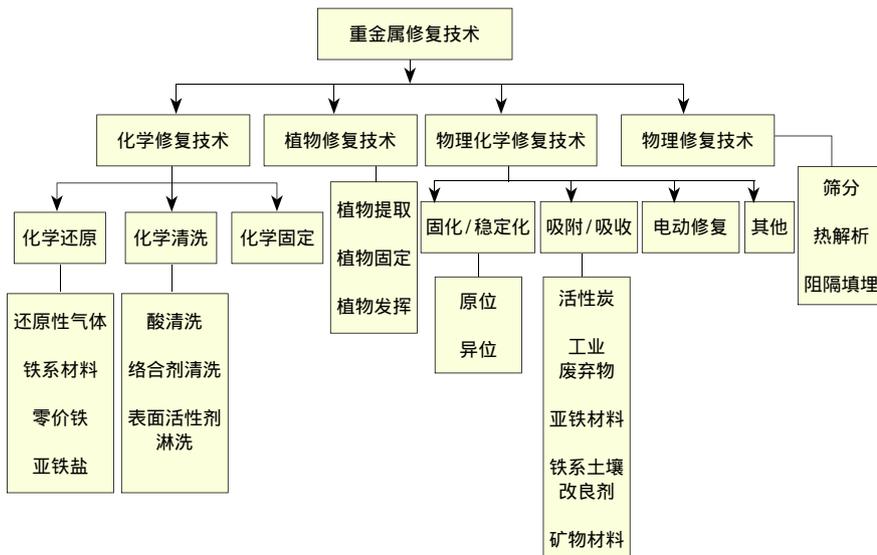


图1 重金属污染土壤修复技术

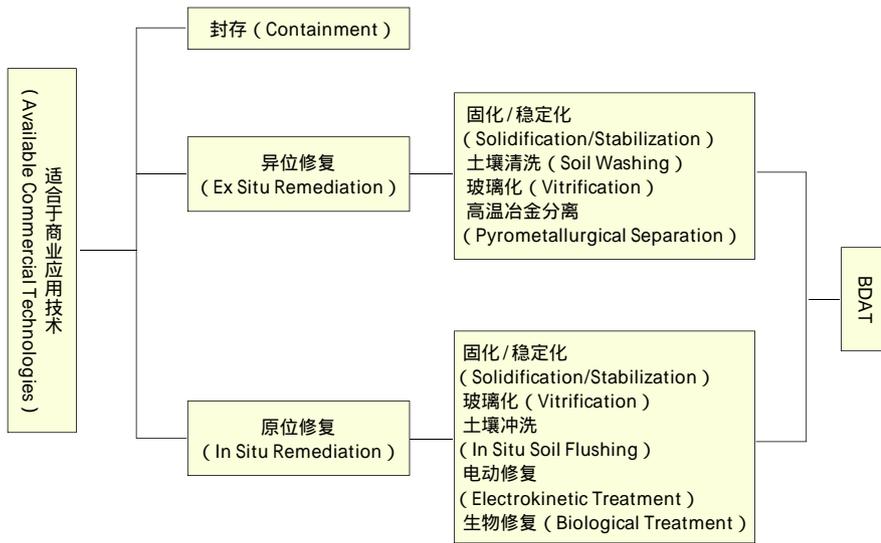


图2 美国适合于商业应用的土壤重金属修复技术

受到一定的影响而没有被广泛推广使用。目前，常用的重金属污染修复技术有：阻隔填埋、固化/稳定化、植物修复、土壤清洗和汞污染土壤热解析等。

国外重金属污染土壤修复技术应用情况

美国EPA于1986年颁发规章，要求通过运用BDAT (Best Demonstrated Available Technology)使危险废物处理达到确立的标准，美国土壤重金属污染修复的BDAT技术^[2]如图2所示。

1982-2005年统计的金属和准金属污染的229个美国超基金场地修复项目中，使用生物修复技术5个、多相抽提1个、化学处理13个、原位冲洗5个、焚烧6个、中和6个、物理分离6个、植物修复4个、化学溶剂提取1个、固化稳定化180个、土壤清洗2个、玻璃化1个^[3]。

在国外，挖掘、阻隔填埋和异位固化稳定化作为传统技术被广泛应用在重金属污染土壤的修复中，土壤清洗、植物修复、原位固化稳定化和热解析技术趋于成熟，工程应用正在逐渐

增加。较为成熟的技术组合有：固化稳定化与阻隔填埋技术结合、土壤清洗与固化稳定或阻隔填埋技术结合、植物修复与钝化技术结合、修复技术与土壤再利用技术结合。

我国重金属污染土壤修复技术应用情况

我国已对重金属污染土壤修复技术进行了研究和示范，并已开始重金属污染土壤修复工程的实施，主要技术包括阻隔填埋、固化/稳定化（S/S）、植物修复、土壤清洗、热解析和电动修复。其中前三种技术在国内已有成功的工程案例，土壤清洗和汞污染土壤热解析已进行工程示范，电动修复目前还处于实验室研究阶段。

重金属污染土壤修复技术选择

土壤修复技术选择原则

美国超级基金场地修复技术选择的9个基本原则是：短期效果；长期效果；对污染物毒性、迁移性和数量减少的程度；可操作性；成本；符合应用与其他相关要求；全面保护人体健康与环境；政府接受程度；公众接

受程度。通过以上原则选择出来的修复技术能充分体现该技术的成熟程度及优先性。

我国重金属污染土壤修复技术选择原则建议遵循以下几点：污染扩散控制的原则；污染场地风险和用地发展规划结合的原则；技术可行和方案可实施的原则；修复成本和修复风险控制结合的原则；减量化、资源化、无害化原则。

土壤修复技术选择程序

重金属污染物和土壤的理化性质、场地特性、土地利用和修复目标、修复时间和费用、政府和业主的接受程度及公众的意见等因素在很大程度上决定着修复技术的选择。

根据以上原则和因素，提出重金属土壤修复技术选择程序（图3）。在选择修复技术时，首先应先确定场地的重金属污染范围和污染程度，并根据风险评估确定风险控制目标；然后根据土壤理化性质、场地水文地质条件、重金属形态和性质等因素筛选一种或几种修复技术，并进行实验室和现场试验获取工艺等相关参数；分析和比较所选技术的工艺和参数、修复目标和可达性、二次污染控制 and 环境影响及投资和运行成本；最后征求相关方意见，确定修复技术，并对修复方案进行设计和优化。

我国重金属污染土壤修复存在问题

重金属污染土壤修复不仅仅是一个修复技术选择及方案确定和实施的过程，它还包括污染调查、风险评估及修复验收和长期环境监管。但我国还没有建立起全过程重金属污染土壤修复的管理制度，难免会出现对制度控制、风险控制采用的争议，如：深层重金属是否可以不修复，是否可以采取风险控制。具体分析如下：

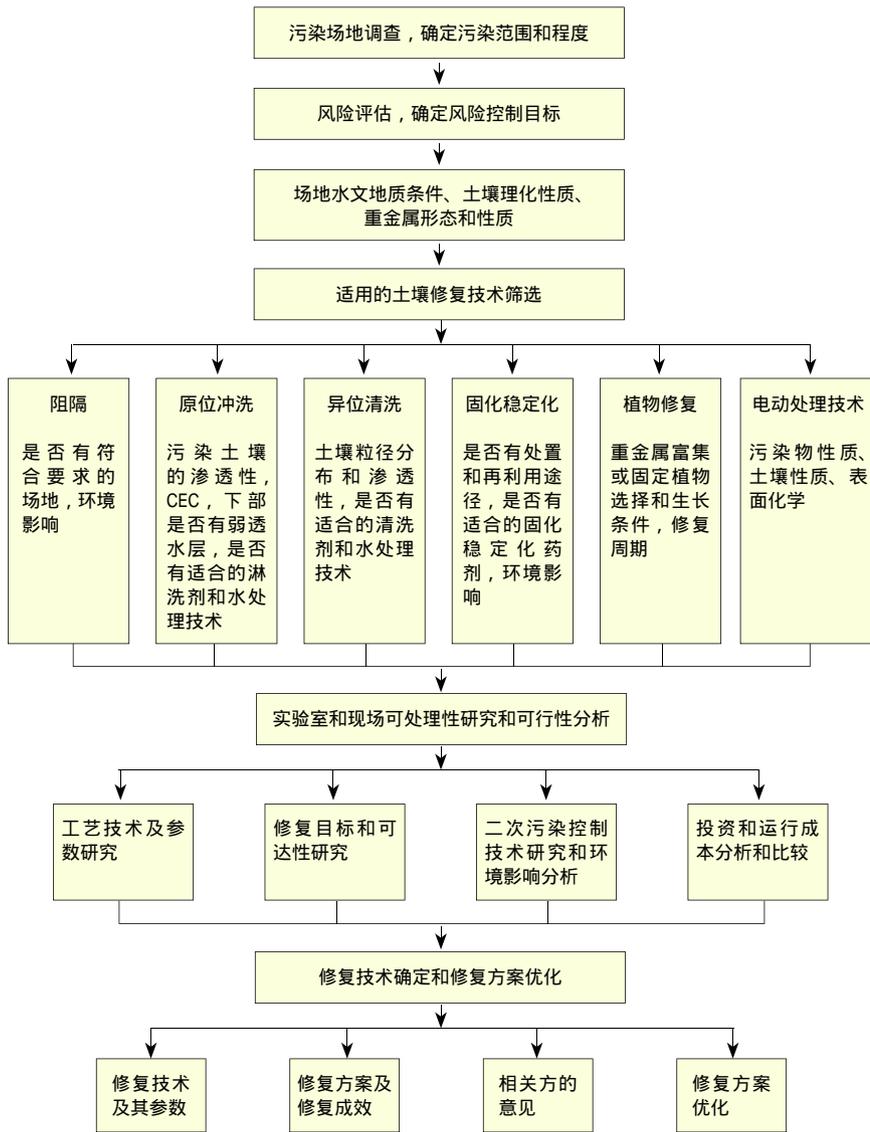


图3 重金属污染土壤修复技术筛选程序

污染程度和范围调查精度不够

目前, 我国在重金属污染土壤修复方案制定时, 业主方或项目申报方在土壤污染调查方面不重视, 投入不足, 取得的采样分析数据明显不能支撑土壤污染程度、范围和修复目标的确定。在冶金和矿山等大面积重金属污染采样布点设计时采用大网格布点技术, 布点精度较差, 不能清晰地划分出重污染区、中度污染区和轻度污染区, 与实际污染程度和范围差距很大, 或造成人为扩大污染范围, 或人

为缩小污染范围。电镀场地和废渣堆场等污染场地存在采样过浅, 导致深度方向的污染调查不确定性大, 难于捕捉渗漏和地下水造成的土壤污染。

污染暴露途径判断不准确

土壤重金属污染的危害是基于人体健康风险和生态风险评价进行的, 而我国目前却以土壤重金属的浸出实验结果判断土壤的危害, 很少考虑人体直接暴露的健康风险路径。采用稳定化技术或钝化技术, 虽然切断了重金属浸出迁移的暴露途径, 但人体直

接吸入和摄入的途径却还存在, 需进行风险评估, 采取阻隔等风险控制措施。对于与人体没有接触途径的深层重金属污染土壤, 如无重金属浸出迁移的可能, 是否需要修复, 可结合土地利用进行风险评估, 采取风险监控措施。

修复技术和方案脱离污染实际

修复技术和方案较单一, 过度依赖现有固废的处理技术(填埋、固化稳定化), 不论污染程度如何, 土方量大小, 均按某一修复技术进行修复, 或导致修复过度, 或存在较大的环境风险。对于复杂污染场地, 如果按照实际污染情况分类修复, 根据土壤质地和用途, 对重度污染、中度污染和轻度污染土壤分别筛选有针对性的修复技术, 最后结合费用和修复周期确定修复方案, 不仅可以提高污染土壤的修复效率, 而且可以实现最佳的费效比。

缺乏修复验收和修复完成后的环境监管

修复完成后如何进行验收, 验收的流程和指标如何, 目前国家层面并没有相关管理办法和技术导则。采用阻隔填埋、固化稳定化、化学还原等不能分离重金属的修复技术存在长期潜在环境风险, 需要进行长期环境监管, 然而我国同样存在缺失长期环境监管办法和技术导则的问题, 难于确保修复工程的质量和长期环境风险的防范。

具体修复技术应用经验不足、评估不完善

在具体修复技术应用层面上, 由于我国重金属污染土壤修复历史不长, 存在经验不足和评估技术不完善等问题, 会出现修复过度、修复失效、修复风险大或修复费效比低等问题。

一是阻隔填埋。我国重金属污染土壤修复广泛利用固体废物处置的技术，填埋是最常用的技术，一般采用粘土和HDPE膜联合对填埋场底部、侧面和顶部全方位进行防渗处理，接近我国危险废物填埋场污染控制水平。更有甚者，对污染土壤进行高强度（使用40%以上的水泥）水泥固化后再填埋。当重金属污染土壤相对处理量大时，这会导致修复工程建设费用高，费效比低。我国重金属污染土壤填埋存在要求过于保守及过度修复的问题。此外，国外较为常见的顶部阻隔和垂直阻隔技术^[4]在我国的应用案例较为少见。我国重金属填埋场的防渗材料中，HDPE膜成为了绝对主导的防渗材料，而国际上先进的、建设费用低的粘土复合阻隔材料和吸附材料几乎没有在我国得到应用。国外更注重填埋场的再利用，一般在填埋场上建货场、公园娱乐设施或进行景观绿化，而我国填埋场封场后土地再利用基本没有考虑在前期填埋场设计中。

除了规范的填埋场设计，严格的施工监管是填埋场长期运行，确保环境安全的重要保证。我国目前存在的问题是重视填埋场前期建设的论证，轻视施工质量的监管，给填埋场的环境安全带来了隐患。此外，填埋场长期监测和监管缺乏责任和实施主体，填埋场的环境风险得不到有效监控。

二是固化稳定化。我国已开展固化稳定化和稳定化技术修复重金属污染土壤的研究和应用，且以稳定化药剂（钝化剂）开发和应用为主，对稳定化的工艺和设备研究不足，工艺参数的确定缺乏依据，高效混合设备依靠进口。砷污染土壤及铅（或镉、锌等阳离子重金属）与砷形成的复合污染土壤的稳定化技术没有取得明显突

破。重金属土壤稳定效果无有效的浸出方法和评估标准，目前我国使用的硫酸硝酸浸出方法不能全面反映土壤重金属浸出的实际情况，对砷等阴离子重金属的浸出结果可能会与实际情况相反，误导稳定化效果。我国对稳定化技术的长期有效性认识不足，没有系统地研究影响稳定化技术长期有效性的影响因素和规律，重金属污染土壤稳定化存在长期风险。我国没有建立土壤修复药剂的评估和认定管理程序，稳定化药剂大规模应用存在破坏土壤结构、影响植物生长的风险，及稳定化药剂使用带来二次环境污染问题。绿色生态的稳定化技术虽然在国外矿山重金属污染的表层土壤修复得到了广泛成功地应用，然而在我国没有引起足够的重视。结合植物恢复，使用天然绿色的稳定化剂，不仅可以防止污染土壤随风和地表径流扩散，而且减轻了土壤重金属浸出迁移。

虽然固化稳定化技术效果好，对重金属的固定和阻断效果明显好于稳定化技术，其长期有效性能得到保证，在国外是主流技术^[5]，但我国对重金属污染土壤固化稳定化技术应用不够重视。究其原因，主要有两点：一是工艺复杂，技术要求多，养护时间长；二是污染土壤固化稳定化后处置和再利用缺乏技术规范支撑。我国需建立一套科学评估管理程序，鼓励使用废物（如粉煤灰和高炉渣）作为固化稳定化的凝胶材料和填充材料，并将固化后土壤应用在地基、路基和

岸堤建设中，但必须控制这些废物中重金属等有毒有害物质的含量水平。

三是土壤清洗。虽然土壤清洗在我国重金属污染土壤修复还未有实际工程案例，但六价铬污染土壤工程示范研究和砷污染土壤工程示范已经开展，并取得了成果。我国重金属土壤清洗的研究集中在化学或生物清洗剂的筛选上^[6]，虽然采用化学清洗可以明显提高重金属的清洗效率，但清洗水的处理及清洗剂在土壤中的残存问题没有解决，高昂的清洗费用也妨碍了化学清洗在实际工程的应用。物理清洗（土壤粒径分级）采用圆筒筛、振动筛和水力旋流器将砾石、粗砂、细沙与粉粘土分离，把重金属转移到粉粘土中，是重金属污染土壤修复的发展方向，实现了污染土壤减量化，与先进的机械摩擦洗和电动修复结合可进一步实现污染土壤的减量化，但要解决设备和工艺的规模化、高效和自动化问题。

四是植物修复。在过去十多年里，重金属污染土壤的植物修复技术由于其较低的成本和对环境友好引起了众多关注，适合污染面积大、污染程度低和污染在植物根层范围的土壤，已成为我国农田重金属污染土壤修复的重要示范技术。我国在砷、铅、镉的超富集植物研究取得了成果^[7-8]，然而大部分重金属超富集植物具有生物量小、生长缓慢、生长环境特殊、去除重金属周期长和富集重金属单一等特征，难满足农民的经济需求，并且常常受到当地气候条

目前，我国在重金属污染土壤修复方案制定时，业主方或项目申报方在土壤污染调查方面不重视，投入不足，取得的采样分析数据明显不能支撑土壤污染程度、范围和修复目标的确定。

件以及可用植物物种的限制，一直没有全面推广，农田土壤重金属污染修复一直是摆在我国面前的难题^[9]。

我国重金属土壤污染以轻微污染和轻污染为主，除了超富集植物的应用示范研究外，应关注经济作物对轻污染土壤重金属浓度水平和生物有效性的调控，采取农业种植结构调整的方式，恢复土壤重金属含量趋于“安全”水平，并实现环境和经济双赢。

结论及建议

一是尽快建立适合我国国情的污染调查、风险评估和决策、风险管控和修复及长期环境监管的重金属污染土壤修复体系。重金属污染土壤根据其暴露途径和暴露程度，按轻度、中度和重度污染分类进行风险管理和修复。

二是建立重金属污染土壤修复的科学评估体系，尽量减少过度修复或修复不足，在体系中建立适合我国土壤重金属污染特征的浸出方法和评估标准，在此基础上确定重金属污染土壤的填埋污染控制要求、固化稳定化

技术要求及修复后土壤处置和再利用污染控制要求。

三是总结我国现有科研成果、示范工程成果和实际工程经验，建立重金属污染土壤修复工程技术指南，特别是填埋技术、固化稳定化技术、土壤清洗技术及植物修复技术。尽快建立典型六价铬、砷、汞等重金属污染土壤的修复技术示范，解决这些面大、点多、影响大的重金属污染土壤风险控制 and 修复技术难题。

四是鼓励绿色、减量化和资源化的修复技术，对修复药剂和材料的安全性进行评估和认定。^{HB}

参考文献

- [1]环境保护部，国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [2]Cynthia R. Evanko, David A. Dzombak. Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater[R]. 1997.
- [3]U. S. Environmental Protection Agency (EPA). Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (twelfth Edition) [R]. 2007.
- [4]California Environmental Protection Agency. Proven technologies and remedies

guidance: remediation of metals in soil[R]. 2008.

[5]EPA 524-R-00-010. Solidification/Stabilization use at superfund sites[R]. 2007.

[6]高国龙，张望，周连碧，等. 重金属污染土壤化学淋洗技术进展[J]. 有色金属工程，2013，3(01): 49-52.

[7]胡杨勇，马嘉伟，叶正钱，等. 东南景天 *Sedum alfredii* 修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 浙江农林大学学报，2014，31(01): 136-144.

[8]段桂兰，王利红，陈玉，等. 植物超富集砷机制研究的最新进展[J]. 环境科学学报，2007，27(05): 714-720.

[9]郭彬，李伟东，丁能飞，等. 重金属污染土壤的植物修复技术的问题及对策[J]. 浙江农业学报，2013，25(04): 852-857.

(宋云系轻工业环境保护研究所总工程师、工业场地污染与修复北京市重点实验室主任；尉黎，轻工业环境保护研究所；王海见，工业场地污染与修复北京市重点实验室、轻工业环境保护研究所)

速读

珍爱地球 尽享精致生活 中科宇图微保APP上市

4月22日世界地球日当天，为唤起人类爱护地球、保护家园的意识，中科宇图天下科技有限公司自主研发的环境生活类移动应用产品——微保APP在北京国家会议中心举行了新产品发布仪式。中国环境科学学会秘书长任官平、中国地理信息产业协会副秘书长汤海、北京市科委电装处处长万荣、中国科学院研究员张义丰、中科宇图董事长兼总裁姚新，中科院地理所、媒体记者等百余人参加了本次发布会。

会上，中科宇图公众服务产业群首席运营官董元对微保进行了介绍。目前微保的功能业务主要有三大块，其一，可提供实时空气质量指数、穿衣指数、晨练指数；可对未来5天天气、空气质量进行预测预报；并且地图版块这些信息都可以空间形式展现。其二，微保有搜索周边的功能，用户可实时搜索周边餐厅、超市、停车场、银行等近百个小分类。其三，在探索版块，用户还可以分享文字、图片以及对环境问题进行实时评论。

会后，相关负责人介绍，未来微保将基于地图拓展更多的与环境相关的信息服务，让大家在任何地方都可以了解到周边关于噪声、水、垃圾、固废、污染源等与环境相关的信息，为大众提供精致的环境、健康、生活服务。