

附件

土壤污染防治先进技术装备目录

1. 异位间接热脱附技术装备

技术路线：通过加热将污染物从土壤中转移至气体中，再通过气体净化实现污染物去除。污染土壤经破碎、筛分等预处理后送入污染土壤与加热介质间接接触的加热装置；通过控制污染土壤的加热温度和停留时间将目标污染物加热到沸点以上，从而使污染物气化挥发达到污染物与土壤分离目的；气化污染物进入气体处理系统去除或回收。

主要指标：设备处理能力 1~20t/h，土壤进料粒径<30mm、含水率<30%，加热温度 150~650℃可调，土壤在加热装置内停留时间 10~60min 可调。有机污染物去除率可达 95%以上。

适用范围：挥发性、半挥发性有机物及汞污染土壤修复。

2. 异位直接热脱附技术装备

技术路线：将污染土壤经破碎、筛分等预处理后送入加热火焰与土壤直接接触的加热装置；部分污染物被加热至气化温度转移至气相中，部分污染物被直接高温氧化去除；气相中的污染物经气体处理系统去除或回收。

主要指标：设备处理能力可达 100t/h；进料粒径<50mm，加

热装置内气体温度 150~850℃可调。土壤在加热装置内停留时间 10~60min 可调。有机污染物去除率可达 95%以上。

适用范围：挥发性、半挥发性有机污染土壤修复。

3. 原位气相抽提修复技术

技术路线：通过向土壤中施以负压产生空气流动，促使挥发性有机污染物挥发并由气流带出，达到土壤净化目的。气相抽提系统主要由抽气井群、输气管道、抽气系统（负压风机或真空泵）和尾气处理系统组成。土壤孔隙中含挥发性有机物的气体经抽气井、管道被不断抽出，抽出气经尾气处理装置处理达标后排放。尾气处理可采用活性炭吸附、催化氧化或焚烧等方法；尾气处理产生的废弃活性炭及气水分离系统产生的废水采用适宜技术妥善处理。

主要指标：单井影响半径（与土壤透气率等相关）一般为 5~30m，抽提井口负压 0.8~25kPa（8~250cmH₂O 柱），单井抽气速率 0.28~2.8m³/min。

适用范围：亨利常数大于 0.01 或蒸汽压力大于 66.6Pa（0.5mmHg 柱）的挥发性有机物污染土壤的修复，土壤透气率大于 1×10⁻⁴cm/s。

4. 多相抽提修复技术

技术路线：通过真空抽提设备将污染区域的气体和液体（包括土壤气、地下水和非水相液体）同时从地下抽出至地上处理，

达到迅速控制并同步修复土壤与地下水污染的目的。抽出的气体、液体或气液混合物在地面处理系统中通过气液分离器、非水相液体-水分离器进行多相分离。分离后气体中污染物可采用热氧化法、催化氧化法、吸附法、浓缩法、生物过滤及膜法过滤等方法处理；污水采用膜法、生化法和物化法处理；分离得到的非水相液体及产生的废活性炭一般作危险废物处理。

主要指标：单井影响半径 $>2\text{m}$ ，系统负压 $>0.05\text{MPa}$ ，抽提井头负压 $>0.01\text{MPa}$ ，气体抽提流量 $>100\text{m}^3/\text{h}$ ，液体抽提流量 $>1.0\text{m}^3/\text{h}$ 。

适用范围：非水相液体如汽油、柴油、有机溶剂等污染土壤和地下水修复，不适用于渗透性差或地下水水位变动较大的场地。

5. 类芬顿氧化法污染土壤修复技术

技术路线：该技术以 Fe^{2+} （或 Fe^{3+} ）为催化剂，在酸性条件下 H_2O_2 产生具有强氧化能力的羟基自由基，氧化分解污染土壤中的有机污染物。用于异位土壤修复时，将污染土壤按一定比例与类芬顿试剂混合搅拌并反应一定时间后，去除土壤中有机污染物。

主要指标：土壤中 H_2O_2 和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 浓度依据现场试验确定，体系含水率 30% 左右，反应体系 pH 值调整至 4 左右。污染物去除效果以苯并（a）芘为例，初始浓度 $4.53\text{mg}/\text{kg}$ ，经处理后浓度降至 $0.172\text{mg}/\text{kg}$ ，去除率可达 96%。

适用范围：有机污染场地。

6. 污染土壤异位淋洗修复技术

技术路线：通过采用水等淋洗液冲洗颗粒表面吸附的污染物，促使污染物从土壤固相颗粒转移至液相，实现土壤净化和污染土壤减量的目的。污染土壤经筛分、破碎等预处理工序去除较大粒径（>50mm）渣块后，剩余土壤通过进料斗进入造浆设备，经水力分离逐级筛选出的较大粒径颗粒经冲洗后达标，较小粒径颗粒与洗脱废水混合为泥浆。泥浆固液分离后的滤液采用混凝沉淀、催化氧化、活性炭吸附等工艺处理后回用，重金属污染泥饼采用固化稳定化工艺处理，有机物污染泥饼采用热脱附或水泥窑处理。

主要指标：处理能力>20m³/h，水土比 5:1~10:1，洗脱时间 20~120min，污染土减量>75%。

适用范围：重金属及半挥发性有机物污染土壤修复，不宜用于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25%的土壤。

7. 基于天然矿物混合材料的重金属污染场地稳定化技术

技术路线：该混合材料以沸石类天然矿物为主要成分，混合少量钙镁化合物、铁盐、铝盐及粘性土等制备而成。根据重金属污染浓度，经试验确定材料配比和添加量，添加比例一般在 1%~10%，将材料与污染土壤充分混匀，保持含水率 25%，自然养护 7d。对于土壤清挖、运输过程中可能产生的扬尘污染，采取

洒水、覆盖等措施进行控制。

主要指标：混合材料中污染物含量符合国家相关标准要求，粒径 $<1\text{mm}$ ，pH 值 7.5 左右，颗粒含水率 3%~5%，比表面积平均 $30\text{m}^2/\text{g}$ ，阳离子交换量 $>140\text{cmol}/\text{kg}$ ，处理后土壤重金属浸出率可降低 96%。

适用范围：重金属（铜、铅、镉、锌等）污染场地土壤修复。

8. 基于生物质灰复合材料治理土壤重金属污染的钝化/稳定化技术

技术路线：以生物质燃烧灰为主要原料，配伍碱性矿物、含磷矿物、有机肥等，混匀后经过造粒等工艺生产颗粒状土壤重金属钝化/稳定化材料。制备的材料含有硅、磷、钙、有机质等，可通过材料中释放的羟基、硅酸盐、磷酸盐等与土壤中重金属发生吸附、沉淀、离子交换、螯合等物理化学作用，实现重金属的钝化/稳定化。施用时将材料均匀撒于土壤后深耕混匀搅拌。

主要指标：钝化/稳定化材料中污染物含量符合国家相关标准要求。轻度污染土壤施用量 $100\sim 200\text{kg}/\text{亩}$ ，中度污染土壤施用量 $300\sim 500\text{kg}/\text{亩}$ ；每 2~3 年施用 1 次。稻米降镉率 $>50\%$ 。

适用范围：镉、铜、铅、锌等重金属污染的酸性土壤及矿山修复治理、矿区复垦等。

9. 水田土壤镉生物有效态钝化/稳定化技术

技术路线：选用对土壤镉具有吸附、沉淀效果的天然碱性矿

物材料，采用磨制、筛分、复混等工艺加工制成钝化/稳定化材料。根据土壤镉污染程度确定单位面积耕地材料施加量。施用方法：水稻播种或移栽前 7~15d（旱地作物 20~30d）直接施撒到水田土壤上，再用旋耕机将钝化材料与土壤混匀，然后灌水（旱作适量浇水）平衡。

主要指标：钝化/稳定化材料有效 CaO 含量>18%，有效 SiO₂ 含量>0.1%，其他有效成分（氧化镁+三氧化二铁+氧化锰等）>1%，污染物含量符合国家相关标准要求，pH 值>8，细度（粒径<0.25mm）>85%，水分<2%。用量 100~300kg/亩。稻米降镉率>50%。

适用范围：轻中度镉污染酸性水田土壤，对于土壤 pH 值<6.5，土壤总镉 0.3~1.5mg/kg 的水田土壤修复效果良好。

10. 砷污染土壤蜈蚣草修复技术

技术路线：在污染土壤中种植对砷具有超常富集能力的蜈蚣草，蜈蚣草在生长过程中快速萃取、浓缩和富集土壤中的砷，通过定期收割蜈蚣草去除土壤中的砷，实现修复土壤的目的。收割的蜈蚣草按环保要求无害化处置。

主要指标：砷富集系数 10~100，迁移系数≥5。种苗参数：高 15cm，单作和间作种植，种植密度 30cm×30cm，每年收割 2~3 次，每次收割的生物量>5000kg/hm²。

适用范围：矿山砷污染土壤修复。

11. 土壤与修复药剂自动混合一体化设备

技术路线：该设备由破碎筛分机、输送装置、计量装置、搅拌装置、药剂存储装置和控制系统等组成。污染土壤经破碎、筛分、除杂后进行自动计量；依据计量结果定量输送药剂，与土壤在搅拌混合系统中充分混合均匀。

主要指标：设备处理能力 20~160m³/h，筛分系统下料粒径 ≤30mm，混合均匀性变异系数 ≤15%。

适用范围：污染土壤与修复药剂固固混合、固液混合。

12. 车载式原位注入装备

技术路线：该装备可配制并向土壤和地下水中精准注入修复剂(包括化学修复药剂、淋洗剂及微生物制剂等)，通过反应破坏、降解土壤中污染物达到修复目的。该设备将修复剂配制系统、加压注入系统、控制系统组合成集装箱，实现车载移动注入。控制系统可对固体和液体制剂投加、进水、搅拌、泵启动过程及投加比、投加量等进行集中控制和调节，通过精准计算和模型构建实现边配制边有效注入。

主要指标：固相制剂最大投加量 50kg/h，投加精度 0.5%；注入流量范围 0~1000L/h，注入精度 0.5%；设备加压能力 0~12MPa。

适用范围：污染土壤和地下水原位氧化还原及生物修复。

13. 污染土壤及地下水高压旋喷注入装备

技术路线：将污染区场地平整和压实后，确定注入点钻孔位

置并自地表引孔，穿透硬层或基础。采用气、液二重管工艺自下而上旋转提升钻杆的同时，自孔内高压注入氧化剂（如高锰酸盐、过硫酸盐等）、活化剂及空气至土壤和地下水中，高压液流切割搅拌使修复药剂与土壤充分混合并在含水层中进一步扩散。

主要指标：扩散半径 0.5~3.5m（通过现场试验确定），药剂注射压力 20~30MPa，压缩空气注射压力 0.3~0.8MPa，药剂注射流量 20~120L/min。

适用范围：低渗透性污染土壤和地下水的原位化学氧化还原、稳定化等修复。

14. 污染地块直接推进式钻探与采样系统

技术路线：采用高频液压装置提供下压动力，将内外钻杆同时直接贯入土壤中；配合使用直接推进采样装置，可连续快速取到地表到特定地下深度的土壤样品；配合使用螺旋中空钻杆，可取地下水样或建造地下水监测井；配合使用污染物监测探头、带有防护层的柔性数据采集电缆，可在线采集不同位置污染物浓度并反馈到地面显示器；配合使用注射泵和注射管路系统，可将修复药剂注射到目标土层位置。

主要指标：取样钻杆直径：5.72cm（取样管内径 3.81cm）、8.26cm（取样管内径 5.72cm）；进尺速度 15m/h；单次取样推进深度 1~2m；最大取样深度可达 30m；钻机：伸缩 500mm，倒摆 $\pm 7^\circ$ ，倾斜 $\pm 5^\circ$ ，额定功率 70kW，液压油压力 18MPa，液压冲击力

122Nm，液压装置下压力 12.98t，液压装置回拔力 18.60t，最大扭矩/转速 380Nm/（1400~1600）rpm。

适用范围：污染场地非卵石层无扰动土壤取样、地下水取样、钻探位置污染物在线浓度探测、原位药剂注射等。

15. 土壤砷（形态）、锑、汞液相-原子荧光（LC-AFS）分析仪

技术路线：液相泵在流动相的携带下以一定速度将液体样品注入色谱柱，使被测元素各个不同形态发生分离，先后进入反应体系与还原剂发生氢化反应生成蒸汽相，蒸汽相进入原子化器后转变为基态自由原子，基于自由原子经激发光源照射后产生的荧光经透镜聚焦后被光电倍增管接收并放大，工作站接收信号并检测分析出被测元素不同形态、价态的浓度。

主要指标：检出限：砷（As） $\leq 0.01\text{ng/mL}$ 、锑（Sb） $\leq 0.01\text{ng/mL}$ 、汞（Hg） $\leq 0.001\text{ng/mL}$ 、一甲基砷（MMA） $\leq 4\text{ng/mL}$ 、二甲基砷（DMA） $\leq 4\text{ng/mL}$ 、三价砷（As（III）） $\leq 2\text{ng/mL}$ 、五价砷（As（V）） $\leq 10\text{ng/mL}$ ；定量测量重复性（RSD）：As $\leq 0.8\%$ 、Sb $\leq 0.8\%$ 、Hg $\leq 0.8\%$ 、As（V） $\leq 5\%$ ；测量线性相关系数（r）：As ≥ 0.998 、Sb ≥ 0.998 、MMA ≥ 0.997 、DMA ≥ 0.997 、As（III） ≥ 0.997 、As（V） ≥ 0.997 ；线性范围： 10^3 ；基线稳定性（30min）：As 漂移 $\leq 2\%$ 、As 噪声 $\leq 2\%$ ，Sb 漂移 $\leq 2\%$ 、Sb 噪声 $\leq 2\%$ 。

适用范围：土壤中 As、Sb、Hg 等污染物总量分析，As 形态和价态分析。