附件

**《土壤污染防治先进技术装备目录》（征求意见稿）**

**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土壤与加热源不直接接触的加热装置；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5～45m，抽提井口负压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0.5mmHg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＞2m，系统负压＞0.05MPa，抽提井头负压＞0.01MPa，气体抽提流量＞100m3/h，液体抽提流量＞1.0m3/h。

**适用范围：**易挥发、易流动的非水相液体如汽油、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Fe2+为催化剂，在酸性条件下H2O2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：**土壤中药剂浓度H2O2 1.2mol/kg和FeSO4·7H2O 0.12mol/kg为宜，体系含水率0.3左右，反应体系pH值调整至4左右。苯并（a）芘初始浓度4.53mg/kg，经处理后浓度降至0.172mg/kg，去除率达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：**粒径＜1mm，pH值7.5左右，颗粒含水率3%～5%，比表面积平均30m2/g，阳离子交换量＞140meq/100g，土壤重金属稳定化率＞96%。

**适用范围：**重金属铜污染场地土壤修复。

**8.利用生物质燃烧灰制备土壤重金属钝化/稳定化制剂技术**

**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：**根据土壤污染情况，轻度污染土壤施用量100～200kg/亩，中度污染土壤施用量300～500kg/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.农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）直接施撒到农田土壤上，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：**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%，pH值＞8，细度（粒径＜0.25mm）＞85%，水分＜2%。用量100～300kg/亩。稻米降镉率可达38%。

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

**10.水稻叶面喷施稀土复合硅溶剂抑制稻米镉积累技术**

**技术路线：**通过水稻茎叶分配镉、硅调控竞争机制抑制稻米镉积累。在水稻拔节期至抽穗期进行2次喷施，喷施时间选择晴天上午10点前、下午4点后，气温范围为15～30℃，喷施量每次0.5～1L/亩，喷施时将该稀土复合硅溶剂稀释100倍，并避免与碱性农药混合喷施。

**主要指标：**稀土复合硅溶剂：Si＞100g/L、pH值7.0～9.0、水不溶物＜10g/L、钠含量＜10g/L，汞＜5mg/kg、砷＜10mg/kg、镉＜10mg/kg、铅＜50mg/kg、铬＜50mg/kg。

**适用范围：**中轻度镉污染农田。

**11.基于蜈蚣草的砷污染土壤植物修复技术**

**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。收割的蜈蚣草进行焚烧处置，焚烧灰渣经鉴别按一般固废或危险废物进行处置。

**主要指标：**砷富集系数10～100，迁移系数≥5。种苗参数：高15 cm，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：**农用地和矿山砷污染土壤修复。

**12.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。

**13.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。

**14.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、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧等）、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0.9～2.9m，加压能力25～30MPa，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。

**15.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：2.25英寸（取样管内径1.5英寸）、3.25英寸（取样管内径2.25英寸）；进尺速度15m/h；单次取样推进深度1～2m；最大取样深度＞30m；钻机：伸缩500mm，倒摆±7°，倾斜±5°，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。

**16.土壤As（形态）、Sb、Hg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）≤0.01ng/mL、锑（Sb）≤0.01ng/mL 、汞（Hg）≤0.001ng/mL、一甲基砷（MMA）≤4ng/mL、二甲基砷（DMA）≤4ng/mL、三价砷（As（III））≤2ng/mL、五价砷（As（V））≤10ng/mL；定量测量重复性（RSD）：As≤0.8%、Sb≤0.8%、Hg≤0.8% 、As（V）≤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：103；基线稳定性（30min）：As漂移≤2%、As噪声≤2%、Sb漂移≤2%、Sb噪声≤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。