

ICS
CCS

团 体 标 准

T/XXX-2022

重金属污染土壤修复技术导则

Technical guidelines for remediation of heavy metal contaminated soil

征求意见稿

2022-×-××发布

2022-×-×实施

中国国际科技促进会 发布

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》起草。

某些内容可能涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国国际科技促进会标准化工作委员会提出并归口管理。

本文件主编单位：南开大学、中国电力建设集团有限公司、中科环境修复（天津）股份有限公司、天津农学院、天津市生态道德教育促进会

本文件主要起草人员：刘乐、宋欣、金擘、张莹、王雁南、李程、郭凤娟、陈玉龙、李君、赵莹、陈庆斌、李晓珍、宋秀鸯、李慕辰、鞠美庭

重金属污染土壤修复技术导则

1 适用范围

本导则规定了重金属污染土壤修复的技术要求,适用于重金属污染土壤的修复及长效治理。本导则规定土壤修复需以土壤环境现状调查及土壤样品监测分析为基础,针对重金属污染土壤现状制订分类修复方案,包括:重污染场地土壤修复、土壤生态长效调理及土壤联合治理方案。

2 规范性引用文件

- GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》
- GB 36600-2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》
- HJ 25.1—2019《建设用地土壤污染状况调查技术导则》
- HJ 25.2—2019《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》
- HJ 25.3—2019《建设用地土壤污染风险评估技术导则》
- HJ 25.4—2019《建设用地土壤修复技术导则》
- HJ 25.5—2018《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》

3 术语和定义

3.1 土壤样品采集

将土壤从野外、田间、培养或者栽培单元中取出具有代表性的一部分的过程。

3.2 土壤样品制备

土壤样品从田间采集后经历混匀、干燥、磨细和过筛的过程。

3.3 酸分解法

测定土壤中重金属常用的前处理方法,使用混合酸消解体系分解样品的方法。

3.4 碱熔分解法

将土壤样品与碱混合,在高温下熔融,使样品分解的方法。

3.5 土壤阻隔填埋技术

将污染土壤或经过一定处理后的土壤进行挖掘,然后运输至填埋场内,或在原位通过铺设水平、垂直阻隔层,来防止污染物向阻隔系统外进行迁移扩散、污染周围环境,对人体造成危害。

3.6 土壤污染物化学淋洗技术

借助能促进土壤中污染物溶解或迁移作用的液体淋洗剂,加入污染土壤,使吸附、配合或固定在土壤颗粒表层上的污染物脱附、溶解、解配而最终去除的技术。

3.7 原位化学淋洗修复技术

在被污染土壤原先所处的位置进行就地淋洗修复。

3.8 异位化学淋洗技术

将受污染土壤挖掘取出后,再投入其他反应容器中进行淋洗修复。

3.9 化学还原技术

利用化学还原剂的强还原性,与多价态重金属污染物发生还原反应而使其转化为低价态、难溶解、低毒性的状态,从而达到土壤修复目的一类技术。

3.10 植物提取修复技术

利用植物的积累能力,将重金属和有机污染物转移到地上器官中,然后集中收割植物地上部分来达到从土壤中提取污染物的目的。

3.11 植物挥发修复技术

利用植物将土壤中的一些可挥发性污染物吸收到植物体内,然后将其转化为毒性较小的气态物质排放到大气中,从而使污染的土壤得到治理作用。

3.12 植物稳定修复技术

利用耐性植物根系分泌物来吸收、沉淀和富集根际圈污染物,使其失去生物有效性,减少污染物的毒害作用。

3.13 根际圈

由植物根系与土壤微生物之间相互作用所形成的独特圈带,它以植物根系为中心聚集了大量的细菌、真菌等微生物和蚯蚓、线虫等土壤动物,形成了一个特殊的“生物群落”,构成了污染土壤中极为独特的生态修复单元。

3.14 根际圈生物降解修复

利用植物根际圈菌根真菌、专性或非专性细菌等微生物的降解作用来转化污染物,减少或完全消除其生物毒性,从而达到修复污染土壤的目的。

3.15 根分泌物

植物根系在新陈代谢过程中释放到周围环境中的各种物质的总称,是植物与土壤、水、大气进行物质、能量和信息交换的重要介质之一。

4 技术思路和工作程序

本导则的主要目标是为重金属污染土壤的修复及长效调理提供技术支持和参考。本导则中指出土壤修复需以土壤环境现状调查及土壤样品监测分析为基础，针对重金属污染土壤现状制订分类修复方案，包括：重污染场地土壤修复、土壤生态长效调理及土壤联合治理方案。



图 1. 重金属污染土壤修复技术思路

5 土壤环境现状调查

5.1 资料收集

资料收集的主要工作内容是初步了解土壤环境相关的地理要素信息,收集场地相关的自然环境状况、土地利用现状、历史及土壤环境影响源等方面的信息。

5.2 土壤理化特性调查

土壤理化特性调查是针对土体构型、土壤结构、土壤质地、阳离子交换量、氧化还原电位、饱和导水率、土壤容重、孔隙度、有机质、全氮、有效磷、有效钾等指标所开展的针对性现场调查工作。

5.3 土壤污染源调查

土壤污染源可分为工业污染源、农业污染源和自然污染源三种类型。其中,工业污染源调查包括:①企业概况;②生产工艺;③原材料和能源消耗;④生产布局;⑤管理状况;⑥污染物排放情况;⑦污染防治调查;⑧污染危害调查。农业污染源调查包括:①农药使用;②化肥使用;③农业废弃物产量及其处置方式;④水土流失情况。

6 土壤污染监测

6.1 土壤样品采集制备

(1) 土壤样品采集

土壤样品采集是将土壤从野外、田间、培养或者栽培单元中取出具有代表性的一部分,并根据不同的分析目的选择与其相对应的采集方法。按照不同的采样深度,采样可以分为采集土壤表层样品和采集土壤剖面样品。

(2) 土壤样品制备

土壤样品制备是指土壤样品从田间采集后经历混匀、干燥、磨细和过筛的过程。野外采集到的新鲜土样除了立即进行与微生物活动、氧化还原条件、挥发性物质等相关的性状分析以外,其余样品需要及时干燥,以抑制土壤微生物的活动和化学变化,使所得分析结果更为稳定,也便于长期保存。

6.2 土壤样品预处理

土壤样品预处理的目的是使土壤样品中待测组分的形态和浓度符合测定方法的要求,减少或消除共存组分的干扰。重金属污染土壤样品预处理常用的分解方法包括酸分解法、碱熔分解法、微波加热分解法、高压密闭分解法等。

(1) 酸分解法

酸分解法是测定土壤中重金属常用的前处理方法,使用混合酸消解体系分解样品的方法。

(2) 碱熔分解法

碱熔分解法是将土壤样品与碱混合,在高温下熔融,使样品分解的方法。

(3) 高压密闭分解法

将加水或混合酸后混匀的土样放入耐压密封容器,加热高压分解样品的方法。

(4) 微波加热分解法

以土样和酸的混合液为对象,通过微波从内部进行加热使样品受到分解的方法。

6.3 重金属污染物测定分析

(1) 电感耦合等离子体原子发射光谱法

将预处理后的土壤消解液经等离子发射光谱仪进样器中的雾化器雾化并由氩载气带入等离子体火炬中,分析物在等离子炬中挥发、原子化、激发并辐射出特征谱线。不同元素的原子在激发或电离时可发射出特征光谱,特征光谱的强弱与样品中原子浓度有关,将其与标准溶液进行比对,即可定量测定样品中含有的各元素的含量。

(2) 电感耦合等离子体质谱法

土壤样品经消解后,加入内标溶液,样品溶液经进样装置被引入到电感耦合等离子体中,根据各元素及其内标的质荷比测定各元素离子的计数值;由各元素的离子计数值与其内标的离子计数值的比值,计算元素的浓度。

(3) X 射线荧光光谱法

土壤样品经过衬垫压片或铝环、塑料环压片后测定,试样中的原子在受到适当的高能辐射激发后,可以放射出该原子所具有的特征 X 射线,射线强度大小与试样中的该元素浓度成正比;通过测量特征 X 射线的强度可以测定试样中各元素的含量。

(4) 原子荧光法

样品经王水分解、硼氢化钾还原,生成原子态元素,经氩气导入原子化器,用原子荧光光度计进行测定。

(5) 火焰原子吸收分光光度法

采用酸分解法预处理后的消解液喷入具有富燃性的空气-乙炔火焰中,在火焰的高温下形成重金属基态原子,该基态原子蒸汽对相应的空心阴极灯发射的特征

谱线能够产生选择性吸收，在选择的最佳条件下测定重金属元素的吸光度。

(6) 石墨炉原子吸收分光光度法

土壤经消解后注入石墨炉原子化器中，经过干燥、灰化和原子化，元素化合物形成的基态原子对特征谱线产生吸收，其吸收强度在一定范围内与元素浓度呈正比。

7 重金属污染土壤修复方案

7.1 重污染场地土壤修复

(1) 土壤阻隔填埋技术

将污染土壤或经过一定处理后的土壤进行挖掘，然后运输至填埋场内，或在原位通过铺设水平、垂直阻隔层，来防止污染物向阻隔系统外进行迁移扩散、污染周围环境，对人体造成危害。土壤阻隔填埋技术可根据操作地点分为原位阻隔填埋技术和异位阻隔填埋技术。

(2) 土壤污染电动修复技术

电动修复技术修复污染土壤的基本方法是在土壤或液相系统中插入电极，通以直流电，形成稳定的电场，土壤中的污染物在电场、电化学等作用下，发生迁移，使得污染物富集于电极区，从而达到去除土壤污染物的目的。

(3) 土壤污染固化稳定化技术

固化/稳定化处理技术是指通过添加固化/稳定化试剂，通过固化剂和稳定剂对被处理物质的吸附、络合、螯合和沉淀等作用固定土壤中重金属元素，以降低污染物的生物有效性和可迁移性，进而达到修复目的的方法。

(4) 土壤污染化学淋洗技术

土壤污染物化学淋洗技术是指借助能促进土壤环境中污染物溶解或迁移作用的液体淋洗剂，加入污染土壤，使吸附、配合或固定在土壤颗粒表层上的污染物脱附、溶解、解配而最终去除的技术。土壤化学淋洗技术分为原位化学淋洗和异位化学淋洗。

(5) 土壤污染化学还原技术

化学还原技术是利用化学还原剂的强还原性，与多价态重金属污染物发生还原反应而使其转化为低价态、难溶解、低毒性的状态，从而达到土壤修复目的一类技术。化学还原技术一般适用于对还原性物质敏感的重金属污染物，例如以铬、铀和钚为代表的重金属元素。

7.2 土壤生态长效调理

(1) 植物提取修复

植物提取主要是利用植物的积累能力,将重金属和有机污染物转移到地上器官中,然后集中收割植物地上部分来达到从土壤中提取污染物的目的。植物提取修复技术分为诱导性植物提取和持续性植物提取。

(2) 植物挥发修复

植物挥发修复技术利用植物将土壤中的一些可挥发性污染物吸收到植物体内,然后将其转化为毒性较小的气态物质排放到大气中,从而使污染的土壤得到治理作用。利用植物挥发修复技术的研究应用主要集中在汞和硒两种具有挥发性的重金属。

(3) 植物稳定修复

利用耐性植物根系分泌物来吸收、沉淀和富集根际圈污染物,使其失去生物有效性,减少污染物的毒害作用。

(4) 根际圈生物降解修复

根际圈生物降解修复利用植物根际圈菌根真菌、专性或非专性细菌等微生物的降解作用来转化污染物,减少或完全消除其生物毒性,从而达到修复污染土壤的目的。

(5) 微生物吸附累积

微生物可借助细胞表面电荷吸附或在吸收自身代谢所需物质时主动吸收重金属,以此把重金属集中在细胞表面或贮存在体内,它对重金属的吸附与累积方式主要为以下三种:胞外吸附、胞外沉淀、胞内积累。

(6) 微生物氧化还原

微生物可通过一种或多种途径直接对土壤中重金属进行氧化或还原,金属价态的改变会直接影响重金属在土壤中的存在形式、迁移规律、生物利用有效性。

(7) 微生物溶解

微生物对非离子态的重金属主要是依靠微生物自身产生的低分子有机酸直接或间接使土壤中结合态的重金属重新恢复离子态的过程。

(8) 蚯蚓修复技术

蚯蚓修复技术是通过其在污染土壤中生长、繁殖、穿插等活动过程对污染物进行破碎、分解、消化和富集的作用,从而使污染物降低或消除的生物修复技术。蚯蚓对土壤重金属的修复作用包括:酶作用修复、自身活动修复、蚯蚓粪修复。

7.3 土壤污染联合修复方案

(1) 植物-微生物联合修复

微生物强化植物修复重金属污染土壤主要有两种形式，一是通过自身代谢产物活化沉淀态重金属，增强植物对有效态重金属的吸收富集量，增加植物体内重金属的浓度，减少土壤中重金属含量；二是提高植物对重金属的耐受性和植物自身的生物量，进一步促进植物吸收有效态重金属，从而达到强化植物修复的目的。

(2) 植物-微生物-蚯蚓联合修复

植物-微生物-动物联合修复是植物、动物与微生物之间的共同作用。植物根系的生长为动物（如蚯蚓）创造了良好的环境，蚯蚓一方面通过蠕动、汲取食物改善土壤结构、水分、养分、肥力和通气状况，促进植物根系生长，另一方面通过分泌液和蚯蚓粪来提高土壤微生物的活性和数量。蚯蚓的自身活动对植物生长和重金属富集有促进作用。土壤中微生物能借助蚯蚓分泌的有机酸活化金属离子，增加植物根系对重金属富集。在蚯蚓活动和根瘤菌的作用下，植物根系的生长大大提高了土著微生物活性，加快了微生物的繁殖与活动，同时也改善植物根系微环境和改变土壤重金属的存在形态。

(3) 螯合剂-植物联合修复

螯合剂-植物修复技术通过促进土壤中重金属的溶解，改变重金属在土壤中的存在形态，形成水溶性的络合物，提高植物对重金属的吸收效率，继而通过植物转运增加重金属在植物地上部的积累，最终通过收割而彻底去除土壤中的污染物。

(4) 表面活性剂-植物联合修复

在修复重金属污染土壤中，表面活性剂分子先附着在土壤颗粒物表层与重金属的结合物上，然后当重金属从土壤颗粒解析进入土壤溶液时，与表面活性剂羧基发生络合反应，继而进入表面活性剂胶束中，降低表面张力，使重金属从土壤中解离到土壤溶液中，被植物的根系吸收而进入植物体内，最终从土壤中去除。

(5) 电动—植物联合修复

在临近植物根际受污染土壤中施加低强度电场，利用电动力辅助强化植物对污染土壤修复。

电动力通过不同维度和形式的电场布置，实现体系土壤重金属离子向根际表面迁移，解决植物根系可达性问题，使植物根部能接触到的有效重金属量增多。

电力作用可以改变土壤团聚体、胶体颗粒的表面双电层结构及组成结构，进而改变土壤重金属的形态特征，促进重金属解离及迁移转化。

适宜强度的电场会增加必需养分的生物有效态比例，也可能改变植物体内的酶活性、根毛细胞膜电位和其他代谢过程，而对植物生长产生促进作用，增加植物的生物量。

(6) 钝化—生物联合修复

一方面，通过土壤钝化剂的吸附、沉淀和氧化还原作用达到修复目的；另一方面，微生物在与之相适应的钝化剂（生物炭等）的保护下，可有效提高其在植物体内和根际的存活及代谢能力，促进富集植物的生长和提高植物生物量，进而促进植株对土壤中重金属的吸收。