



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202203028 中图分类号 X53 文献标识码 A

刘爽, 陈盼, 宋慧敏, 等. 我国华东地区污染土壤异位热脱附修复碳排放及减排策略[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2663-2671. [LIU Shuang, CHEN Pan, SONG Huimin, et al. Carbon emissions and emission reduction strategy for remediation of contaminated soil by ex-situ thermal desorption in East China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2663-2671.]

我国华东地区污染土壤异位热脱附修复碳排放及减排策略

刘爽¹, 陈盼^{1,✉}, 宋慧敏¹, 陈恺¹, 李慧², 王飞坤¹, 李沛焯¹, 佟星睿¹

1. 中科鼎实环境工程有限公司, 北京 100020; 2. 苏州精英环保有限公司, 苏州 215000

摘要 为探索我国污染土壤异位热脱附修复的碳减排路径, 采用生命周期评价方法理论, 确定污染土壤异位热脱附修复碳排放核算系统边界和清单。将异位热脱附修复划分为土壤开挖、运输、预处理、主处理、尾气处理、最终处置 6 个过程, 基于华东区域 5 个典型工程的能源及物料调研数据, 核算了异位热脱附修复过程碳排放水平, 识别出碳排放的主要影响因素, 提出针对性的减排策略。结果表明, 异位热脱附修复 1 m³ 污染土壤全过程碳排放为 212.22 kgCO_{2eq}, 碳排放集中在预处理、主处理和尾气处理 3 个过程, 尾气处理过程最高, 占比为 54%。从碳排放源上看, 主要为间接碳排放, 占比达 62%。生石灰、天然气、NaOH 碱性溶液等物料投入量是碳排放的主要影响因素。同时, 修复后土壤外运距离超过 300 km 后, 将会对全过程碳排放产生较大影响, 应提高物料使用率、控制土壤外运距离, 以实现修复过程碳减排。本研究结果可为污染土壤异位热脱附修复技术的低碳应用提供参考。

关键词 土壤修复; 异位热脱附; 碳排放; 影响因素; 减排策略

土地资源紧张已成为制约城市经济可持续发展的主要因素^[1]。近年来, 随着我国城市化进程和产业升级转移步伐的加快, 全国大中城市纷纷实施了“退二进三”、“退城进园”和“产业转移”等政策, 致使大批高污染化工企业搬迁或关闭^[2-4]。这些高污染化工企业旧址土壤中含有多环芳烃(PAHs)、总石油烃(TPH)和有机氯农药(OCPs)等有机污染物, 若不经妥善管理和处置, 将对生态环境和人体健康造成严重危害, 从而制约城市土地资源的高效流转与利用^[5-8]。

目前, 针对有机污染土壤有多种修复技术, 包括气相抽提、化学氧化、化学淋洗、热脱附、阻隔填埋等^[9-10]。相较而言, 热脱附技术具有适用性广、处理效率高、修复彻底、二次污染可控等显著优势, 已被广泛应用于有机污染土壤修复工程中^[11-13]。根据污染土壤修复地点的差异, 将热脱附技术分为原位和异位 2 类^[14]。相比原位修复过程在地下的“黑箱”状态, 异位修复过程的温度和停留时间可由异位热脱附设备中控端直接调控, 整个修复过程更加直观和可控^[15]。经过 30 余年的探索研发, 欧美等发达国家已将异位热脱附技术广泛应用于工程实践当中^[16]。2009 年, 我国首次引入异位热脱附设备。2020 年底, 北京 2 家企业自主研发的异位热脱附设备入选工业和信息化部颁发的《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2020 年版)》^[17]。经过十余载的不断研发和创

收稿日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1803003)

第一作者: 刘爽(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 596247381@qq.com; ✉通信作者: 陈盼(1992—), 女, 硕士, 助理工程师, chenpan926@126.com

新, 异位热脱附技术已成为我国污染场地治理修复的主要选择。

现有对异位热脱附技术的研究, 主要集中在设备工艺参数、土壤特性和污染物特性对处理能力的影响^[18-21]、尾气处理系统优化^[22-23]、系统能耗优化^[24-25]等方面, 鲜有涉及技术应用过程的碳排放分析。2021年, 国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出: 将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程和各方面, 明确各地区、各领域、各行业目标任务^[26]。“十四五”时期, “绿色、低碳、可持续”将成为土壤修复工程技术发展的主要方向, 绿色可持续修复工程评价体系和碳排放核算技术体系亟待完善^[27]。绿色可持续修复强调修复工程的整个生命周期可能对环境产生的影响, 生命周期评价方法被逐步应用和拓展^[28-29]。已有异位热脱附修复技术的生命周期评价多侧重于技术比较和筛选过程的决策分析, 用于评估不同技术的修复性能与环境影响的关系^[30-31], 较少涉及技术应用过程碳排放核算及其影响因素的分析。本研究基于生命周期思想, 拟建立污染土壤异位热脱附过程碳排放核算系统边界和清单, 核算污染土壤异位热脱附修复各过程碳排放水平, 并分析主要碳排放过程和影响因素, 最终针对性地提出异位热脱附修复过程碳减排策略及建议, 以为异位热脱附技术的低碳可持续应用提供参考。

1 碳排放核算方法

1.1 系统边界

生命周期评价是一种对产品、工艺或活动的全过程, 包括原材料开采、产品生产、运输、使用、废弃物处置, 所消耗的资源以及污染物排放造成的潜在环境影响等进行量化的系统分析方法^[32]。生命周期评价的目的在于识别关键环节, 有效避免或减缓二次污染或污染转移^[33]。根据生命周期评价方法理论, 为全面分析异位热脱附修复过程碳排放, 识别碳排放关键过程和因素, 首先要明晰污染土壤异位热脱附修复过程及各过程投入的能源、物料及产生的废弃物。污染土壤异位热脱附修复包括6个过程。

1) 土壤开挖。使用挖机将污染土壤从污染区域挖出, 以便运送至处理大棚。

2) 运输。使用运输车辆, 将污染土壤从污染地运送到预处理大棚的过程, 预处理大棚一般设置在污染场内或者其附近, 距离运输较近, 最大不超过2 km。

3) 预处理。为防止气味逸散和二次污染, 污染土壤需要在PVDF膜材质的负压大棚内进行破碎、筛分、含水率调节等预处理工序。预处理后土壤粒径一般小于50 mm, 含水率在15%~20%^[4]。

4) 主处理。通过上料机和传送装置, 将污染土壤输送到回转窑, 通入天然气, 将污染土壤均匀加热到设定的温度, 并按照设定速率向窑尾输送至出料仓, 在回转窑中使土壤中的污染物充分气化挥发。

5) 尾气处理。热脱附后的废气经过旋风除尘器、二次燃烧室、热交换器、急冷塔、布袋除尘器和喷淋吸收洗涤塔后达标排放, 尾气处理过程除电力和水的投入外, 还需要活性炭和氢氧化钠(NaOH)碱性溶液吸收尾气。

6) 最终处置。热脱附后的土壤, 会暂存在修复场地内等待效果评估单位的验收, 验收合格后回填到场地内或运输到场地外处置。为统一核算过程, 这里只考虑场地内填埋时土壤运输卡车的柴油消耗。

污染土壤异位热脱附修复过程的碳排放源包括化石燃料产生的直接碳排放源和处理过程投入物料及产出废弃物处置产生的间接碳排放源。结合污染土壤异位热脱附修复全过程分析, 建立碳排放核算系统边界, 见图1。

1.2 碳排放清单

碳排放是温室气体排放的简称, 包含二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)、甲烷(CH₄)、六氟化硫

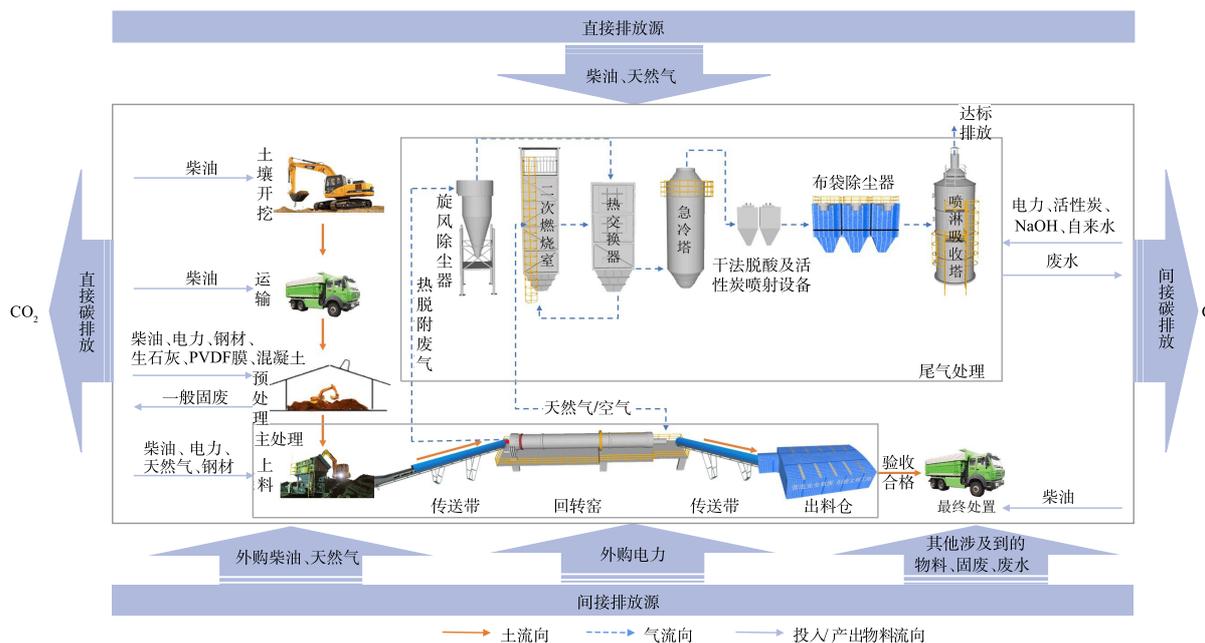


图 1 污染土壤异位热脱附修复过程碳排放计算系统边界

Fig. 1 Boundary of carbon emission calculation system in remediation process of contaminated soil by ex-situ thermal desorption

(SF₆)、氢氟碳化物 (HFCs) 和全氟化碳 (PFCs) 等，包括直接碳排放和间接碳排放，根据不同气体对温室效应的贡献，所有温室气体的排放单位归一为二氧化碳当量 (CO_{2eq})^[34]。污染土壤异位热脱附修复过程的碳排放源包括化石燃料燃烧产生的直接碳排放、化石燃料生产及运输过程产生的间接碳排放和修复过程投入物料及产出废弃物处置产生的间接碳排放源，碳排放源清单见表 1。

表 1 异位热脱附修复污染土壤过程碳排放源清单

Table 1 Inventory of carbon emission source during remediation process of contaminated soil by ex-situ thermal desorption

修复过程	直接排放源	间接碳排放源
土壤开挖	柴油	柴油
运输	柴油	柴油
预处理	柴油	柴油、电力、生石灰、钢材、PVDF膜、混凝土、一般固废
主处理	柴油、天然气	柴油、电力、天然气、钢材
尾气处理	—	电力、活性炭、NaOH、自来水、废水
最终处置	柴油	柴油

1.3 碳排放计算

目前常用的碳排放计算方法可归纳为实测法、质量平衡法和排放因子法 3 种。实测法基于排放源的现场实测基础数据，质量平衡法需要纳入考虑范围的中间过程较多，2 者数据获取困难，应用较少。而排放因子法是 IPCC 提出的第一种碳排放估算方法，也是目前广泛应用的方法^[35-36]。排放因子法的基本思路是依照碳排放清单列表，针对每一种排放源构造其活动数据与排放因子，以活动数据和排放因子的乘积作为该排放项目的碳排放量估算值^[37]。结合表 1 碳排放清单，将污染土壤异位热脱附修复过程碳排放源归纳为材料消耗的碳排放、化石燃料消耗的碳排放和电力消耗的碳排放 3 个类别，各类碳排放之和即为污染土壤异位热脱附修复总碳排放。

1) 材料消耗的碳排放。材料消耗的碳排放指污染土壤异位热脱附修复过程使用到的设备耗材

和药剂在生产过程的碳排放,如钢材、土壤调理剂等。该部分排放实际发生在材料生产企业控制的设施上,为间接碳排放,其计算如式(1)所示。

$$E_m = \sum_i (ef_i \times q_i) \quad (1)$$

式中: E_m 为材料消耗的碳排放; i 为材料类别, ef_i 为材料 i 的排放因子; q_i 为材料 i 的消耗量。

2) 化石燃料消耗的碳排放。化石燃料消耗的碳排放指污染土壤异位热脱附修复过程土壤开挖、运输、破碎、筛分、热脱附回转窑等设备运行过程燃烧的化石燃料,如柴油、汽油、天然气等产生的 CO_2 排放,这类排放发生在污染土壤修复现场,为直接碳排放。另外,化石燃料的生产运输过程也产生一定的间接碳排放,也需要考虑在内。因此,化石燃料碳排放的计算如式(2)所示。

$$E_n = \sum_r (ef_d \times v_d) + \sum_r (ef_{in} \times v_d) \quad (2)$$

式中: E_n 为化石燃料消耗的碳排放; r 为燃料类别, ef_d 为燃料 r 的直接碳排放因子; ef_{in} 为燃料 r 的间接碳排放因子; v_d 为燃料 r 的消耗量。

3) 电力消耗的碳排放。电力消耗的碳排放指污染土壤异位热脱附修复过程用电设备消耗电力蕴含的 CO_2 排放,如污染土壤预处理大棚引风机、上料/出料设备、旋风除尘器、布袋除尘器等用电设备。该部分排放实际发生在电力企业控制的设施上,为间接碳排放。电力消耗碳排放计算如式(3)所示。

$$E_p = \sum_t (ef_p \times u_t) \quad (3)$$

式中: E_p 为电力消耗的碳排放; t 为耗电设备类别, ef_p 为处理设备用电的区域电网碳排放因子; u_t 为设备 t 的耗电量。

4) 污染土壤异位热脱附修复总碳排放。将材料碳排放、燃料碳排放和电力碳排放累加即为污染土壤异位热脱附修复总碳排放,其计算如式(4)所示。

$$E_{\text{tot}} = E_m + E_n + E_p \quad (4)$$

式中: E_{tot} 为污染土壤异位热脱附修复总碳排放; E_m 为材料消耗的碳排放; E_n 为化石燃料消耗的碳排放; E_p 为电力消耗的碳排放。

2 碳排放核算数据

2.1 物料清单数据

通过现场访谈及问卷调查,搜集了我国华东区域5个污染土壤异位热脱附修复工程案例的过程数据。调研的5个工程案例分别涉及了农药、化工、焦化、电镀、有色金属冶炼5大土壤污染重点行业,修复目标污染物包括石油烃、有机农药、多环芳烃、多氯联苯、卤代烃等其他VOCs、SVOCs。将这5个案例的工程数据进行均值化,可有效代表异位热脱附修复的过程数据。为方便统计分析,以处理 1 m^3 (实方)污染土壤为基本功能单位,得到异位热脱附修复 1 m^3 污染土壤的能源和材料投入量及废物的产出量,见表2。

2.2 物料碳排放因子

碳排放因子,也称碳排放系数,表示消耗单位质量或体积的能源或材料产生的碳排放量,包括直接碳排放因子和间接碳排放因子。由于区域间能源结构、排放水平和生产工艺的差异均会对物料的碳排放因子产生一定影响。因此,在选取碳排放因子数据时,选择本地数据库中的碳排放因子更能代表本区域的实际排放水平。另外,假定修复过程中所涉及的物料均为本地采购,不考虑运输过程碳排放。异位热脱附修复污染土壤涉及物料的碳排放因子、数据来源及假设说明见表3。

3 碳排放结果分析

3.1 碳排放关键过程

经计算，异位热脱附修复 1 m³ 污染土的总碳排放量为 212.22 kgCO_{2eq}。其中，直接碳排放量为 79.52 kgCO_{2eq}，间接碳排放量为 132.70 kgCO_{2eq}，占比达 62%。异位热脱附修复各过程的碳排放量见图 2。可看出，从土壤开挖、运输、预处理、主处理到尾气处理过程的碳排放量呈阶梯形增长。其中，尾气处理过程的碳排放量最高，占全过程碳排放量的 54%。预处理、主处理和尾气处理 3 个过程碳排放总量占全过程碳排放量的 99.3%，是异位热脱附修复碳排放的关键过程。而土壤开挖、运输和最终处置 3 个过程的碳排放量均小于 1 kgCO_{2eq}，相对于异位热脱附全过程的碳排放量来看，可忽略不计。

3.2 碳排放关键因素

对预处理、主处理和尾气处理过程主要投入及产出物料的碳排放量进行比较(见图 3)发现，预处理过程中生石灰的碳排放量最大，占该过程碳排放总量的 54%；主处理过程中天然气的碳排放量最大，占该过程碳排放总量的 97%；尾气处理过程中 NaOH 碱性溶液的碳排放量最大，占该过程碳排放总量的 85%。生石

表 2 异位热脱附修复 1 m³ 污染土物料清单

Table 2 Material list of 1 m³ contaminated soil remedied by ex-situ thermal desorption

修复过程	设备名称	材料/能源	投入/产出量
土壤开挖	挖掘机	柴油	0.11 L
运输	卡车	柴油	0.13 L
	筛分机	柴油	0.60 L
预处理	破碎机	柴油	0.15 L
	—	生石灰	6.00 kg
	负压大棚骨架	钢材	0.13 kg
	负压大棚覆膜	PVDF膜	0.0012 m ²
	负压大棚地面	混凝土	0.0054 m ³
	负压大棚引风机	电力	9.07×10 ³ kJ
主处理	—	一般固废	50.00 kg
	上料机	柴油	0.20 L
	热脱附设备	钢材	0.08 kg
	—	天然气	35.00 m ³
	—	电力	5.40×10 ³ kJ
	—	电力	9.00×10 ³ kJ
尾气处理	—	活性炭	0.98 kg
	—	NaOH	50.00 kg
	—	自来水	0.20 t
	—	废水	5.00 t
最终处置	回填设备	柴油	0.21 L

表 3 异位热脱附修复污染土过程涉及物料碳排放因子及说明

Table 3 Carbon emission factors and descriptions of materials involved in contaminated soil remedied by ex-situ thermal desorption

物料名称	碳排放因子	数据来源	假设及说明
柴油	2.68 kgCO _{2eq} ·L ⁻¹ (直接)	省级温室气体清单编制指南(试行) ^[38]	处理过程所有车辆或设备消耗的柴油型号一致，本地采购
	0.54 kgCO _{2eq} ·L ⁻¹ (间接)	省级温室气体清单编制指南(试行) ^[38]	
天然气	2.17 kgCO _{2eq} ·m ⁻³ (直接)	省级温室气体清单编制指南(试行) ^[38]	来自本地市政燃气管道
	0.07 kgCO _{2eq} ·m ⁻³ (间接)	省级温室气体清单编制指南(试行) ^[38]	
电力	2.19×10 ⁻⁴ kgCO _{2eq} ·kJ ⁻¹ (间接)	2019年中国区域电网基准线排放因子 ^[39]	处理过程所有电力消耗均来自华东电网
自来水	0.17 kgCO _{2eq} ·t ⁻¹ (间接)	中国生命周期基础数据库CLCD ^[40]	处理过程用水均来自本地市政管网供水
生石灰	1.34 kgCO _{2eq} ·kg ⁻¹ (间接)	中国生命周期基础数据库CLCD ^[40]	不考虑预处理过程投入的其他药剂
混凝土	321.30 kgCO _{2eq} ·m ⁻³ (间接)	中国生命周期基础数据库CLCD ^[40]	现场采用的混凝土型号均为C30混凝土
活性炭	9.97 kgCO _{2eq} ·kg ⁻¹ (间接)	煤基活性炭单位产品能源消耗限额(GB 29994>-2013) ^[41] 、省级温室气体清单编制指南(试行) ^[38]	本地采购及处置，不考虑处置过程的碳排放
钢材	1.97 kgCO _{2eq} ·kg ⁻¹ (间接)	高春艳等 ^[42]	单位消耗由设备使用寿命内的污染土总处理量均摊，现场采用的型号一致，且本地采购

续表 3

物料名称	碳排放因子	数据来源	假设及说明
PVDF膜	—	黄欢等 ^[43]	本地采购, PVDF膜产品寿命长达25年, 可多次重复利用, 其碳排放忽略不计
NaOH	1.97 kgCO _{2eq} ·kg ⁻¹ (间接)	李容等 ^[44]	不考虑碱性溶液中投入的其他微量药剂, 本地采购
废水	1.06 kgCO _{2eq} ·t ⁻¹ (间接)	余娇等 ^[45]	现场达标处理后排放到市政污水管道

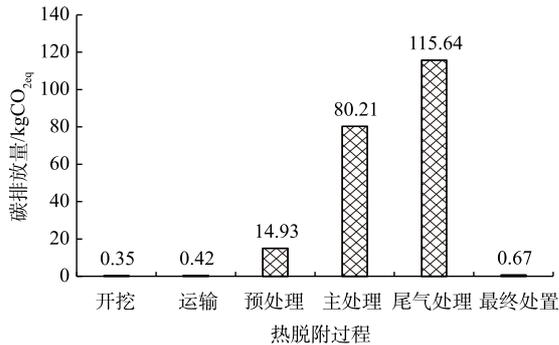


图 2 污染土壤异位热脱附修复各过程碳排放量

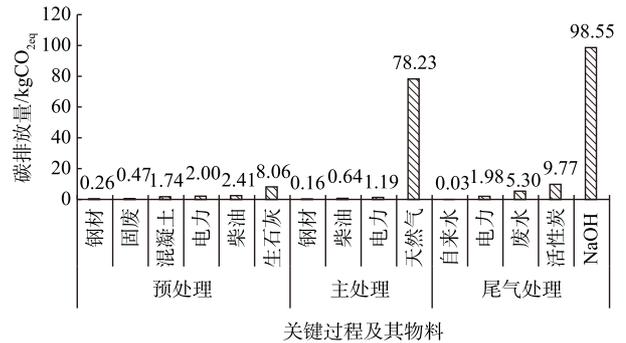


图 3 污染土壤异位热脱附修复关键过程主要物料碳排放量

Fig. 2 Carbon emissions from different remediation processes of contaminated soil by ex-situ thermal desorption Fig. 3 Carbon emissions of main materials in the key process of contaminated soil by ex-situ thermal desorption

灰主要用于降低土壤含水率, 天然气为污染土壤中有机物的分离提供热量, NaOH 配置的碱性溶液可有效吸附尾气中的污染物。3 者对污染土壤的异位热脱附修复过程必不可少, 3 者的碳排放总和占全过程碳排放量的 87%, 是影响异位热脱附修复过程碳排放的关键因素。

整体来看, 污染土壤异位热脱附修复过程中 NaOH 碱性溶液的碳排放量最大, 占全过程碳排放量的 46%, 是影响异位热脱附修复过程碳排放的最主要因素。NaOH 碱性溶液是尾气处理过程投入的主要原料, 用于吸收热脱附过程产生的酸性气体。为保证经喷淋吸收塔后的尾气达标排放, 需要投入大量的 NaOH 碱性溶液。在工程实践中, NaOH 碱性溶液的浓度, 是按照完全吸收最大浓度的酸性气体时所需要的理论值确定的。实际上, 尾气中污染物的浓度是时刻发生变化的, 但 NaOH 碱性溶液的浓度并没有按照尾气中污染物浓度的变化进行及时调整, 会造成 NaOH 的投入过量。因此, NaOH 碱性溶液的大量使用产生了较高的间接碳排放。另外, NaOH 投入量为 5 个工程案例的均值, 部分工程中 NaOH 投入量更大, 产生的碳排放更高。因此, 在今后的异位热脱附修复工程应用中, 应重点关注 NaOH 投入对碳排放的影响。

3.3 运输距离对碳排放的影响

异位热脱附修复过程碳排放结果分析发现, 土壤最终处置过程的碳排放占比较低。这是因为, 该处置过程只考虑了将修复后污染土壤进行原场地回填的运输油耗产生的碳排放。企业工程实践经验表明, 异位热脱附修复后土壤回填技术要求高、回填周期长。且回填后土地开利用需要再次开挖, 会造成工作重复, 浪费人力和物力。修复后土壤外运处置将成为主流方式。除外运填埋外, 修复后土壤进行资源化利用, 如制砖、制陶粒等, 目前已被应用到一些工程案例中。修复后土壤外运过程的碳排放将会对异位热脱附修复全过程碳排放结果产生一定的影响。

通过访谈土方运输从业人员得知, 20 m³ 容量的土方车满载时 100 km 油耗约为 55 L, 则 1 m³ 土 1 km 消耗柴油为 0.027 5 L。基于该数据和柴油的碳排放因子, 可得出土壤外运距离与碳排放的关系 (见图 4)。当修复后土壤外运距离小于 100 km 时, 外运碳排放占全过程的比例小于 5%; 外运

距离大于 300 km 时,碳排放占比大于 10%;外运 500 km 时,碳排放量达到 44.16 kgCO_{2eq},碳排放占比为 17%。可见,修复后土壤外运距离在 100 km 以内,对异位热脱附修复全过程碳排放的结果较小,超过 300 km 后会产生较大影响。

3.4 碳减排策略与建议

污染土壤异位热脱附修复过程碳排放核算及分析发现,主处理过程碳排放最高,而天然气是主处理过程碳排放的主要贡献者,也是热能的唯一来源。有研究表明,污染土壤中的水分受热挥发会消耗大量的热量,土壤含水率越高消耗的天然气也越多^[46]。因此,预处理过程降低污染土壤含水率,保证含水率在 15%~20%,才能有效降低污染土壤异位热脱附修复过程碳排放。预处理时,经常采用生石灰调节污染土壤的含水率,生石灰也是预处理过程碳排放的主要贡献者。加入生石灰前,应对污染土壤进行充分筛分、破碎,减小土壤粒径,增大接触面积。加入生石灰后,要增加翻拌频率,增加接触机会。保证生石灰与污染土壤中充分接触,才能有效吸收水分,降低主处理过程的天然气消耗,进而减少修复过程的碳排放。

尾气处理过程一般采 NaOH 制备的碱性溶液吸附热脱附废气中的酸性尾气,NaOH 投入量直接影响尾气处理过程的碳排放。碱性溶液中 NaOH 的配比用量由尾气成分和浓度决定。因此,应根据污染土壤类别和热脱附废气情况及时调整配比。同时,应对急冷塔和喷淋吸收塔进行定期检查,使用 1 年半到 2 年的时间应进行检测维修,检查磁盘的填充情况、喷淋管包装和清洁,以保证 NaOH 碱性溶液对尾气吸收的效率。

修复后土壤制砖、制陶粒等资源化利用方式,可有效解决污染土壤异位热脱附修复后土壤消纳面临的主要问题,各地政府应加强政策鼓励和扶持。考虑到运输距离对污染土壤异位热脱附修复过程碳排放的影响,建议修复后土壤外运距离最好控制在 300 km 以内。另外,土壤短距离运输产生的碳排放量虽较低,但若将未经处理的污染土壤直接进行外运处置,运输过程存在较高的二次污染风险。因此,建议污染土壤进行原场地适当修复处理后再外运消纳。

4 结论

1) 利用排放因子法和我国华东区域 5 个污染土壤异位热脱附工程案例的过程均值数据,核算出异位热脱附修复 1 m³(实方)污染土壤全过程碳排放量为 212.22 kgCO_{2eq},其中间接碳排放量超过 60%。

2) 污染土壤异位热脱附修复 6 个过程中,尾气处理过程的碳排放量最高。生石灰、天然气、NaOH 碱性溶液是主要碳排放因子,修复后土壤外运距离大于 300 km 会对碳排放产生较大影响。

3) 为降低污染土壤异位热脱附修复全过程碳排放,可优化污染土壤主处理工艺,严格控制进入异位热脱附回转窑的土壤含水率、土壤粒径等参数,提高尾气处理系统的适应性。另外,修复后土壤外运处置的距离最好控制在 300 km 以内。

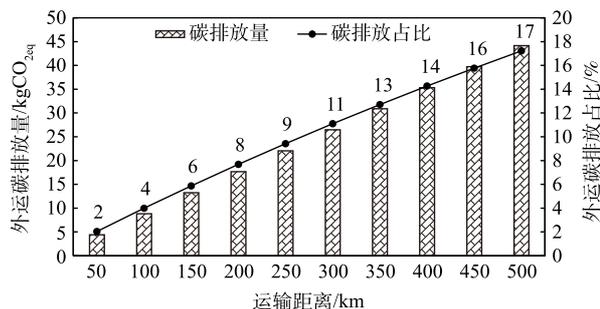


图 4 修复后土壤外运距离及其碳排放

Fig. 4 Transportation distance and its carbon emission of post-remediation soil

参考文献

- [1] CHANG B B, CHEN L. Land economic efficiency and improvement of environmental pollution in the process of sustainable urbanization: case of eastern China[J]. *Land*, 2021, 10(8): 845.
- [2] 吴嘉茵, 方战强, 薛成杰, 等. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(8): 2015-2024.
- [3] 焦文涛, 方引青, 李绍华, 等. 美国污染地块风险管控的发展历程、演变特征及启示[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1821-1830.
- [4] 杨勇, 黄海, 陈美平, 等. 异位热解吸技术在有机污染土壤修复中的应用和发展[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(6): 559-570.
- [5] 于鑫娅, 蒋鹏, 张华, 等. 石油烃污染场地的微波修复土壤急性毒性及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2021, 40(11): 3413-3420.
- [6] KUPPUSAMY S, MADDELA N R, MEGHARAJ M, et al. Impact of total petroleum hydrocarbons on human health[J]. in: total petroleum hydrocarbons[M]. Cham: Springer, 2020: 139-165.
- [7] TAIWO A M. A review of environmental and health effects of organochlorine pesticide residues in Africa[J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 1126-1140.
- [8] PATEL A B, SHAIKH S, JAIN K R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 562813.
- [9] 梁竞, 王世杰, 张文毓, 等. 美国污染场地修复技术对我国修复行业发展的启示[J]. *环境工程*, 2021, 39(6): 173-178.
- [10] 郭书海, 吴波, 胡清, 等. 污染土壤修复技术预测[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3797-3804.
- [11] O'BRIEN P L, DESUTTER T M, CASEY F X M, et al. Thermal remediation alters soil properties: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 826-835.
- [12] ZHANG X, YAO A. Pilot experiment of oily cuttings thermal desorption and heating characteristics study[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, 9(2): 1263-1270.
- [13] 沈宗泽, 陈有鑑, 李书鹏, 等. 异位热脱附技术与设备在我国污染场地修复工程中的应用[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2060-2073.
- [14] 焦文涛, 韩自玉, 吕正勇, 等. 土壤电阻加热技术原位修复有机污染土壤的关键问题与展望[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2027-2036.
- [15] 姜文超, 殷瑶, 朱煜. 异位间接两级热脱附技术在有机污染土壤修复工程中的应用[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3764-3772.
- [16] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 841-855.
- [17] 工业和信息化部, 科学技术部, 生态环境部. 国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2020年版)[EB/OL]. [2020-12-29]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/29/5574686/files/6983f1727340470b8cbc46fd9f3d3c20.pdf>, 2020.
- [18] 陈星, 宋昕, 吕正勇, 等. PAHs污染土壤的热修复可行性[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(10): 2833-2844.
- [19] 蒋村, 孟宪荣, 施维林, 等. 氯苯污染土壤低温原位热脱附修复[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7): 1720-1726.
- [20] 戴梦嘉, 刘钰钦, 张倩, 等. 熟石灰强化热脱附修复重质石油污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2020(12): 3534-3540.
- [21] 于天, 陈春红, 徐成华, 等. 基于碳数分段法的石油烃污染土壤异位热脱附工艺的优化[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(6): 1988-1999.
- [22] 朱伊娜, 徐东耀, 伍斌, 等. 低温等离子体降解污染土壤热脱附尾气中DDTs[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(12): 2140-2145.
- [23] MA F J, ZHU Y N, WU B, et al. Degradation of DDTs in thermal desorption off-gas by pulsed corona discharge plasma[J]. *Chemosphere*, 2019, 233: 913-919.
- [24] 许优, 顾海林, 詹明秀, 等. 有机污染土壤异位直接热脱附装置节能降耗方案[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2074-2082.
- [25] DING D, SONG X, WEI C L, et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 449-463.
- [26] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. [2021-10-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm, 2021.
- [27] 孙宁, 徐怒潮, 李静文, 等. 2020年我国土壤修复行业发展概况及“十四五”时期行业发展态势展望[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(9): 2858-2867.
- [28] 董璟琦. 污染场地绿色可持续修复评估方法及案例研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [29] MARTINS F, MACHADO S, ALBERGARIA T, et al. LCA applied to nano scale zero valent iron synthesis[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(5): 707-714.
- [30] VISENTIN C, WILLIAM A, BEATRIZ A, et al. Application of life cycle assessment as a tool for evaluating the sustainability of contaminated sites remediation: A systematic and bibliographic analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 893-905.
- [31] 潘吉秀, 夏天翔. 生命周期评价在污染场地修复中的应用进展研究[C]//中国环境科学学会. 2014年中国环境科学学会学术年会论文集. 成都, 2014: 3188-3194.
- [32] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040 environmental management life cycle assessment general principles and framework[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [33] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 446-455.
- [34] 王遥, 崔莹, 洪睿晨, 等. 2018中国环境权益市场报告[J]. *环境经济*, 2019(18): 18-45.
- [35] GUO C, XU J, YANG L, et al. Life cycle evaluation of greenhouse gas emissions of a highway tunnel: A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 972-980.
- [36] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. *热带地理*, 2014, 34(2): 248-258.

- [37] IPCC/UNEP/OECD/IEA. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Program, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, 1997.
- [38] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《省级温室气体清单编制指南(试行)》[EB/OL]. [2014-01-13]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>, 2011.
- [39] 中华人民共和国生态环境部. 《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》[EB/OL][2020-12-29]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [40] 中国生命周期基础数据库[EB/OL]. [2021-09-26]. <http://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd>.
- [41] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 煤基活性炭单位产品能源消耗限额: GB 29994-2013[S]. 北京: 中国标准化研究院, 2013.
- [42] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. *当代经济管理*, 2021, 43(8): 33-38.
- [43] 黄欢, 周君, 何甜甜, 等. PVDF膜的紫外透过率影响因素及其对背板老化速度的影响[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(10): 111-116.
- [44] 李容, 曾永寿, 段成义. 烧碱行业碳排放现状分析及企业碳排放管理[J]. *中国氯碱*, 2020(5): 36-39.
- [45] 余娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(6): 1052-1062.
- [46] 杨振, 靳青青, 衣桂米, 等. 原地异位建堆热脱附技术和设备在石油污染土壤修复中的应用[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2083-2091.
- (责任编辑: 金曙光)

Carbon emissions and emission reduction strategy for remediation of contaminated soil by ex-situ thermal desorption in East China

LIU Shuang¹, CHEN Pan^{1,*}, SONG Huimin¹, CHEN Kai¹, LI Hui², WANG Feikun¹, LI Peiye¹, TONG Xingrui¹

1. Zhongke Dingshi Environmental Engineering Co., Ltd, Beijing 100020, China; 2. Suzhou Jingying Environmental Protection Co., Ltd, Suzhou 215000, China

*Corresponding author, E-mail: chenpan926@126.com

Abstract To explore the carbon emission reduction path of ex-situ thermal desorption remediation of contaminated soil in China, the boundary and list of carbon emission accounting system of the process were determined based on the life cycle assessment theory. Ex-situ thermal desorption was divided into six processes: soil excavation, transportation, pretreatment, main treatment, tail gas treatment and final disposal. Based on the energy and material research data of five typical projects in East China, the carbon emission levels in the process of ex-situ thermal desorption were calculated. The main influencing factors of carbon emissions were analyzed and identified. Based on the analysis above, emission reduction strategies were put forward directing at the key processes and factors of carbon emission. The results showed that the carbon emission of 1 m³ contaminated soil remediation by ex-situ thermal desorption was 212.22 kgCO_{2eq}. Carbon emissions were concentrated in three processes: pretreatment, main treatment and tail gas treatment. The carbon emission of tail gas treatment was the highest, accounting for 54%. From the perspective of carbon emission sources, it was mainly indirect carbon emissions, accounting for 62%. The input of quicklime, natural gas, alkaline solution prepared by NaOH and other materials was the main influencing factor of carbon emission. Meanwhile, the transportation distance of post-remediation soil beyond 300 kilometers will have a great impact on the whole process of carbon emissions. The utilization rate of materials should be improved and the outward transportation distance of soil should be controlled to achieve carbon emission reduction in the remediation process. The research results provide a theoretical reference for the low-carbon application of ex-situ thermal desorption technology.

Keywords soil remediation; ex-situ thermal desorption; carbon emissions; influence factors; emission reduction strategy