

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.003

肖萌, 刘鹏, 孟豪, 等. 基于绿色可持续理念的污染场地修复碳足迹研究进展. 土壤, 2023, 55(4): 708–717.

基于绿色可持续理念的污染场地修复碳足迹研究进展^①

肖萌¹, 刘鹏^{1,2}, 孟豪^{1,3}, 张红振³, 董璟琦³, 李香兰^{1*}

(1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 2 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 3 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 污染场地修复工程, 以其短期、在较小空间尺度内产生高强度的能源消耗和碳排放而受到广泛关注。在全球环境变化及“双碳”政策背景下, 污染场地的绿色可持续修复成为必然趋势。降低污染场地修复工程的碳排放水平, 可以为减缓气候变化、实现修复行业的绿色发展提供重要支撑。然而, 目前我国污染场地修复行业仍存在碳足迹评估技术研究不充分、绿色可持续修复理念贯彻不深入等问题。本文梳理了污染场地绿色可持续修复的发展历程和存在问题, 以修复行为的碳足迹核算为着力点, 综述了基于绿色可持续修复理念的碳足迹核算研究进展与案例分析, 从场地、区域和宏观的不同尺度层面探究了污染场地修复评估方法体系中碳核算相关工作。在气候变化的全球背景下和“双碳”政策的国家背景下, 污染场地碳足迹核算将为我国修复行业实现减污降碳、推进绿色低碳管理提供参考。

关键词: 碳中和; 生命周期评价; 绿色修复技术; 环境足迹

中图分类号: X53 文献标志码: A

Carbon Footprint on Remediation of Contaminated Sites Based on Concept of Green and Sustainability: A Review

XIAO Meng¹, LIU Peng^{1,2}, MENG Hao^{1,3}, ZHANG Hongzhen³, DONG Jingqi³, LI Xianglan^{1*}

(1 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Beijing Construction Engineering Environmental Remediation Co., Ltd., Beijing 100015, China; 3 Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Remediation projects on contaminated site have received extensive attention for their high-intensity energy consumption and carbon emissions at small spatial scales in short time. Under the background of global environmental changes and carbon peak and neutrality policy, the green and sustainable remediation of polluted sites has become an inevitable trend. Reducing carbon emission level from remediation projects of contaminated sites, it can provide important support for mitigating climate change and realizing the green development of the remediation industry. However, there are still problems such as insufficient research on assessment technologies of carbon footprint and in-depth implementation of the concept of green and sustainable restoration in Chinese polluted site remediation industry. This paper sorts out the development history and existing problems of green and sustainable remediation of polluted sites, focuses on carbon footprint accounting of remediation behaviour, summarizes the research progress and cases of carbon footprint accounting based on the concept of green and sustainable remediation, and explores the related work of carbon accounting in the assessment method system of contaminated site remediation from site, region and macro scales. In the global context of climate change and the national context of carbon peak and carbon neutrality policy, it provides a reference for Chinese remediation industry to reduce pollution and carbon, and promote green and low-carbon management.

Key words: Carbon neutral; Life cycle assessment; Green remediation technology; Environmental footprints

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3703304 和 2022YFC3703301)资助。

* 通讯作者(xlli@bnu.edu.cn)

作者简介: 肖萌(1999—), 女(满族), 河北承德人, 硕士研究生, 主要从事污染场地绿色可持续修复研究。E-mail: 202121490024@mail.bnu.edu.cn

污染场地在世界范围内普遍存在,对全球生态环境和人类健康产生严重影响。据欧洲环保署估测,欧洲经济区成员国存在潜在污染场地约 250 万个^[1];美国则大约有 294 000 个污染场地亟待清理和修复^[2]。《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国约有 16% 的土地采样点位受到不同程度的污染^[3]。加强我国污染场地的修复手段与治理技术研究,是践行“美丽中国”和“绿水青山就是金山银山”的重要保障。随着污染场地修复行业的不断发展,各类修复技术在不断进步。我国污染场地修复技术以化学氧化/还原、热脱附、固化/稳定化、抽出处理等技术为主,并向原位修复和异位修复相结合的方向转变^[4]。无论采取何种修复技术,污染场地修复必然会带来一定的二次环境影响以及资源、能源消耗。为解决这一问题,同时避免过度修复的情况发生,绿色可持续修复成为修复行业未来发展的重点和必然趋势。绿色可持续修复强调综合考虑全生命周期的环境、社会和经济的净影响,着力于减少修复过程中的二次环境污染以及能源、材料的消耗。近 20 年,绿色可持续修复理念在专业修复技术规范、政府指导性政策制定以及学术研究等方面不断渗透^[5]。绿色可持续修复的兴起是一个重要里程碑,修复行业将会重塑,建立新的标准和技术规范供从业者遵循^[6]。相较于欧美国家,我国绿色可持续修复发展起步晚,缺乏有效评估和监管,亟待充分借鉴国际经验并结合自身特色进行因地制宜地完善和发展。

结合气候变化的全球背景以及“双碳”政策的国家背景,切实将绿色可持续理念贯穿于场地修复中具有重要意义。场地修复碳足迹核算是科学评价污染场地修复环境影响和可持续程度的重要手段之一,也是实现绿色可持续修复的核心着力点之一。在我国现有实践和政策基础上,实现绿色可持续修复有必要加快从场地、区域和宏观 3 个尺度完善修复行业碳足迹评估体系,全面实现污染场地修复减污降碳和绿色可持续发展。本文通过对污染场地绿色可持续修复发展、存在问题和污染场地修复碳足迹计算方法及案例的梳理,为推动我国修复行业绿色可持续发展中的低碳化转变提供借鉴和参考。

1 污染场地修复碳足迹核算

碳足迹是环境足迹中的一种,一般用于表征产品或服务在其生命周期内直接和间接的温室气体排放^[7],单位是二氧化碳当量(CO₂-eq)。根据尺度分类标准,碳足迹可以分为个人碳足迹、产品碳足迹、

家庭碳足迹、城市碳足迹以及国家碳足迹;根据产业或部门分类标准,碳足迹则可以分为工业碳足迹、交通碳足迹、建筑碳足迹、供水系统碳足迹、医疗卫生碳足迹等^[8]。碳足迹的计算方法主要可以分为 IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会)清单法、自下而上的过程分析法(基于生命周期评价)和自上而下的投入产出法^[8-9]。IPCC 清单法实用性较强但会产生遗漏项,不确定性较大;生命周期评价法详细、全面,适用于微观层面的碳核算,但其较为复杂,边界的确定过程中会产生截断误差,且缺乏影响评价过程中本地化的特征因子;投入产出法能够综合反映直接和间接碳排放,适用于宏观层面的碳核算,但对数据量的要求较高,且存在一定的滞后性。

污染场地修复工程的碳排放水平核算可以作为环境可持续性的定量参考,将切实推进污染场地修复绿色、低碳、可持续实践,推动绿色可持续修复的完善和发展。从场地、区域和宏观 3 个不同维度对修复活动的可持续性进行科学度量和定量评估,可为低碳修复技术优化创新、区域碳减排策略协调以及修复行业宏观政策制定提供重要科学依据(图 1)。

1.1 场地尺度碳核算

通过对污染场地修复进行碳核算,一方面可以了解各子过程的碳排放水平,有针对性地采取措施以减少修复行为碳足迹;另一方面可以对修复的备选方案进行碳足迹数据综合比对,从而选择环境效益更优的修复方案。场地尺度碳核算的常用方法包括美国环保局(EPA)提出的环境足迹评估电子表格 SEFA、美国可持续修复论坛提出的生命周期评估(LCA)方法以及由不同国家或机构开发的碳足迹计算器,如美国空军工程与环境中心开发的土壤修复工具(SRT)、美国海军和美国陆军工程兵团开发的 Site Wise 工具以及 Tauw 二氧化碳计算器等。一些学者在 LCA 的基础上,引入混合 LCA、基于投入产出的 LCA(IO-LCA)等方法进行污染场地修复碳足迹核算和环境影响评价^[10-11],为碳足迹核算提供了更加准确和多样的方法。

环境足迹分析在北美场地修复绿色可持续评价中应用较为广泛,是美国环保局绿色修复评价的重要环节之一,并发布了 SEFA 工具来帮助决策者分析修复项目的环境足迹。纳入 SEFA 工具的指标与美国环保局提出的绿色修复核心要素保持一致,包括能源使用、温室气体排放、NO_x、SO_x 和 PM₁₀ 排放、水资源利用等。Huang 等^[12]采用 SEFA 工具对比不同情景下总石油烃(TPH)污染场地修复的环境足迹,结果表

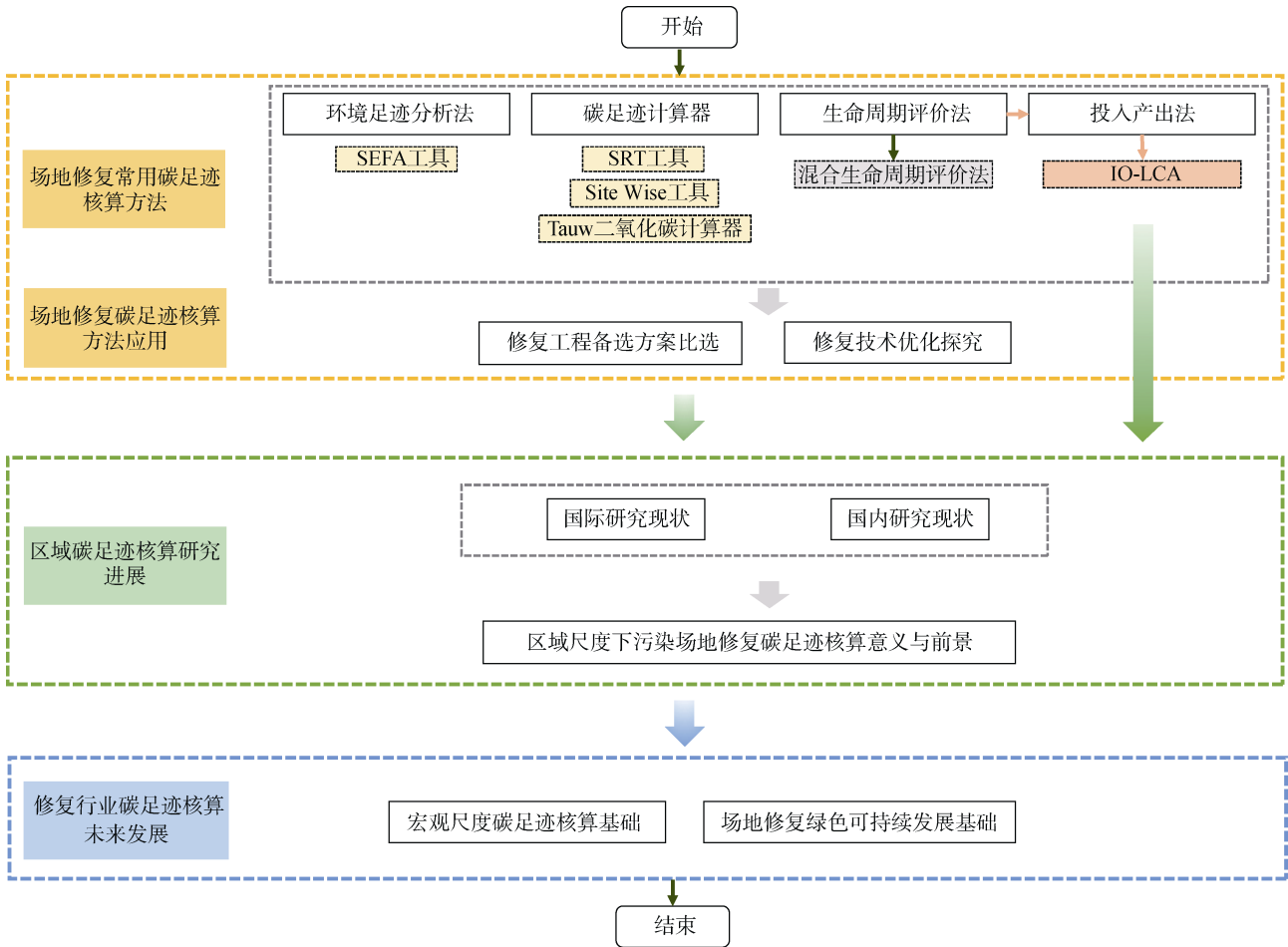


图 1 场地、区域和宏观 3 个不同尺度污染场地修复碳足迹核算方法

Fig. 1 Carbon footprint accounting methods for remediation of contaminated sites at site, regional and macro scales

明,采取化学氧化修复所排放的温室气体远大于生物修复(分别为 118.414 t 和 15.64 t);结合田间规模种植测试结果发现,经过生物修复的污染土壤更肥沃,更具生物活性,是更加绿色、低碳、可持续的修复方法。Ali Khan 等^[13]采用 SEFA 工具量化巴基斯坦某污染场地 3 种不同修复情景下的环境足迹(即完全不使用任何可再生能源的修复;使用少量可再生能源的修复;大量使用可再生能源的修复),根据核算及对比结果,指出将可再生资源应用在场址修复中能够有效减少超过 68% 的环境足迹。

在场址尺度,基于绿色可持续修复的碳核算案例以 LCA 法的应用最为广泛。Favara 等^[14]认为 LCA 法是对当前产品或项目整个生命周期——从原材料获取到生产、使用、报废、回收和最终处置(“摇篮”到“坟墓”)中的潜在环境影响进行评估。LCA 法共包括 4 个步骤:目的与范围确定、清单分析、影响评估和解释说明。

LCA 法广泛应用于场址尺度建设用地修复工程

和农用地修复工程的碳核算。Harbottle 等^[15]通过 LCA 法比较了建设用地污染土壤分别采用原位固化/稳定化技术与挖掘填埋的碳排放水平,并对不同修复方法的子过程进行了碳足迹核算,结果表明,与挖掘和填埋处置相比,固化/稳定化技术在废物产生、运输和原材料的使用等阶段的碳排放水平较低,是更加低碳的修复方案。Sparrevik 等^[16]通过 LCA 法比较了工业污染沉积物中主动和被动薄层封盖备选方案与自然恢复的环境足迹,确定了修复方案的优先级和优化方案,实现了沉积物可持续管理。Ferdos 和 Rosén^[17]采用 LCA 法对比分析了瑞典 2 个工业污染场地 21 个修复场景的碳足迹,结果发现,长途运输残渣的修复技术产生显著碳足迹,船舶的残余运输将导致更高的温室气体排放。Hou 等^[18]采用 LCA 法比较了中国南方汞污染农田土壤修复场地中热解吸和土壤固化/稳定化处理的碳足迹,结果表明,高温解吸法处理每吨受污染土壤将排放 357 kg CO₂-eq 的温室气体,而使用煤基粉末活性炭固化/稳定化处理则排放 365 kg

CO₂-eq 的温室气体。分析各个修复方案关键环节的碳足迹排放,将为进一步制定绿色可持续修复方案及改善环境效益提供重要理论支撑。

LCA 法应用于场地尺度绿色可持续修复碳核算的主要目的是优化修复技术,降低污染场地修复碳排放水平和能源消耗量,实现绿色可持续发展。在相关研究中,一般考虑的是同种技术的不同配置情况。Vigil 等^[19]对所使用的两种不同生物量管理的植物修复配置进行碳排放水平的比较,发现具有生物质价值的植物修复方案更具可持续性。Hou 等^[20]对比了固化/稳定化技术(是否使用生物质炭)和两种热解吸技术(高温和低温)不同配置下的碳排放水平,分析得出,使用基于生物质炭的粉末活性炭的固化稳定化技术(从 365 kg CO₂-eq 减少至 105 kg CO₂-eq)以及在低温下进行的热解吸(从 357 kg CO₂-eq 减少至 264 kg CO₂-eq)的碳排放量最小。因此,可以根据这些配置开展技术优化,以尽可能降低环境影响。Martins 等^[21]通过 LCA 法对两种合成零价铁纳米粒子的方法(使用硼氢化钠的传统方法和使用天然产物提取物的绿色方法)进行环境影响评估,得出以选择更具更加低碳的合成方法,可降低应用纳米铁的修复活动对环境的影响。

由于不同修复措施的选择很大程度上取决于特定的 LCA 法和对清单数据所做的假设,因此若使用方法不恰当,可能会导致从业人员和决策者在选择修复方案时做出错误决策^[22-24]。LCA 法是一项数据密集型评估方法,数据质量对于评估结果至关重要。为应对这一挑战,Amponsah 等^[25]学者认为应当列出明确的数据来源说明,对假设进行深思熟虑并明确定义系统边界,从而更加有效地将 LCA 法应用于场地修复,减少其不确定性,增加协调性和提高成果的透明度。针对 LCA 法存在的一系列问题,Favara 等^[14]提出了一个 9 步流程,具体包括确定研究目标和范围、定义功能单元、建立系统边界、建立项目指标、编制项目清单(即输入和输出)、评估影响、分析影响评估结果的敏感性和不确定性、解释清单分析和影响评估结果、报告研究结果。该流程提供了一致、透明、可重复的方法来进行修复项目的足迹分析和生命周期评估,在一定程度上解决了 LCA 法的局限性。碳足迹计算器是修复领域场地尺度碳核算的重要工具之一。碳足迹计算器种类多样、操作简单,通常利用简单的排放因子公式将电、油、气和煤等消耗量转化为二氧化碳的排放量,或者根据运输工具的类型和运输距离来计算相应的二氧化碳排放量^[26]。由于不同碳

足迹计算器的复杂程度和包含的计算项目不同,结果往往差别很大甚至相互矛盾^[27]。在污染场地修复领域,SRT、Site Wise、Tauw 二氧化碳计算器是常用的碳足迹计算工具。SRT 一般用于现有修复技术系统的优化或基于可持续性指标比较修复方案。其纳入的修复技术包括挖掘、土壤气相抽提、抽出处理、原位生物降解、热处理、原位化学氧化、渗透反应屏障、长期监测等;依据的可持续性指标涉及环境、社会、经济 3 个维度,如 CO₂、NO_x、SO₂ 和 PM₁₀ 的排放量,能源消耗总量,资源服务的变化,技术成本,事故风险等。Site Wise 用于计算修复技术的基础环境足迹,目前可以提供包括温室气体、能源使用、标准空气污染物(包括 SO_x、NO_x 和颗粒物)、用水量、资源消耗和事故风险等可量化指标的详细评估。Tauw 开发的二氧化碳计算器主要目的是量化不同土壤修复方案对环境的影响,包括 3 个带有转换系数的数据库,土壤修复方案的各个环节(如运输、废物产生等)对环境的影响以二氧化碳当量表示。

碳足迹计算器仅对修复核心过程的碳足迹进行核算,并未考虑工厂制造等供应链的排放。为推动碳足迹计算器在修复领域场地碳核算中的应用,Sampson 等^[28]创建了针对场地修复的数据收集和分析工具,用于进行包括供应链排放在内的全生命周期的碳核算,从而可以对修复过程中的真实碳足迹进行量化。该工具应用于格拉斯哥 2014 年英联邦运动会运动员村整治项目,对挖掘和填埋处置、土壤淋洗两种修复方案进行了比较,发现实际使用的土壤淋洗方案比挖掘和填埋处理方案的全生命周期碳足迹低 14%,是更低碳、可持续的修复方案;同时也使用该工具对比各个修复环节不同情景碳足迹,发现如本地采购材料、在工厂制造中使用回收材料、提高运输或土方工程的燃料效率等都会一定程度降低碳足迹。优化后的碳足迹计算器对场地碳核算具有重要意义,可适用于以下场景:①修复前,通过该工具预测一系列修复方案的碳排放,为修复方案选择提供依据;②修复过程中,在工作期间收集修复项目的特定数据,用于指示减排环节和目标;③修复后,采用该工具从财政或监管角度开展全面的二氧化碳核算,为此后的项目排放估算和碳排放管理提供支撑。

投入产出模型于 1936 年由 Leontief^[29]首次提出,用于研究经济系统不同部门之间的相互依存关系。后投入产出分析逐渐应用于环境领域,形成以 LCA 法为基础的 IO-LCA 法,该方法能够从宏观层面,通过各部门的经济关联性来追溯隐性物质消耗和

能源消耗,从而量化碳排放和环境影响情况^[30]。相比传统的 LCA 方法, IO-LCA 法不需要大量且复杂的数据,节省了时间和成本且具有更加广泛的边界。在场地领域, Chen 等^[10]使用 IO-LCA 法对比了 3 种土壤修复技术包括原位封存技术(ISE)、异位热解吸技术(ESTD)和原位热解吸技术(ISTD)所形成的 4 个修复方案的碳排放及其他污染物排放量,并结合社会、经济因素筛选了综合可持续性最佳的方案。IO-LCA 法应用于场地碳核算的相关研究较为有限,其特点更加适用于进行宏观层面的研究,对于区域尺度碳足迹核算具有重要意义。

1.2 区域尺度碳核算

通过区域尺度碳核算可以从中宏观的角度对区域温室气体减排和环境管理提供指标度量,一方面可以为区域协调碳减排策略、开展区域产业规划等提供科学依据,另一方面也可以从数据中挖掘不同区域碳排放规律和特点,有针对性地制定相关策略。在修复领域,碳核算的相关研究主要集中在场地尺度,区域尺度相关研究较少。从区域视角对修复领域进行碳核算,可以从更加宏观的层面对土壤修复碳排放进行把握,是推动“双碳”政策实施的重要环节,需要进一步引起重视。

区域层面的污染场地碳核算在国内外有初步的应用。通过对区域内各个污染场地的修复活动进行碳核算,可以充分了解该区域修复碳排放强度特点,为制定区域碳减排策略提供数据基础。从区域尺度上进行碳核算一般采取将 LCA 法与其他工具或方法结合的方式进行。Hou 等^[31]认为对于区域或城市级别的碳足迹评估,使用 IO-LCA 法更加适合同时评估一定数量的场地碳足迹;其在研究美国旧金山市棕地再开发对气候变化的缓解潜力时,将棕地再开发所进行的修复活动的碳足迹作为次要影响;在计算次要影响时由于城市层面的核算涉及大量站点,采用了 IO-LCA 法对旧金山市各个污染站点修复活动的碳足迹进行了核算,结果表明,棕地重新开发利用相比绿色可持续发展理念的修复管控,可以使温室气体净排放量在 70 年间减少 519 t CO₂-eq,相当于 2010 年旧金山市碳排放水平的 14%。该研究明确了城市尺度的棕地再开发相比绿地开发具有更低的碳足迹、更高的环境效益,成为推动区域绿色可持续发展的重要策略。

在我国,修复领域区域尺度的碳核算案例较少,主要以北京和天津为主。北京市在 2006—2020 年统计的成规模修复工程项目有 48 个,包括北京染料厂、北京焦化厂、化工二厂及首钢等重点行业污染地块。

经统计,北京市污染场地原位修复技术主要采用了原位阻隔、原位化学氧化(ISCO)、原位气相抽提(SVE)和原位热脱附(ISTD)等 4 种技术;异位修复技术主要采用了水泥窑协同处置、直接安全填埋、常温解吸、异位热脱附、固化稳定化等 5 种技术。修复后土壤的最终去向总体分为 3 类:原位回填、安全填埋和资源化利用。

区域尺度下的污染场地修复碳足迹核算具有重要意义和广阔前景。如应用于城市碳足迹的城市碳地图(CCM)^[32]、城市碳网络(CCN)^[33]等概念也同样适用于区域污染场地修复碳排放管理。污染场地修复是点状的、具有消费行为的环境治理活动;污染场地和处置终端(水泥窑、填埋场)之间会有污染土的流动,污染场地和水处理厂之间可能有污水的流动,修复工程产生的危废固废也有向处置终端的流动。可见,污染场地修复适于建立区域碳地图、碳网络,以更加直观、简洁的形式体现区域尺度污染场地修复碳足迹,对于未来区域碳排放管理具有积极意义。探究区域污染场地修复技术适宜性是另一重要方向,也是区域尺度污染场地碳足迹核算的重要应用。同一个区域尺度下的污染场地特点具有一致性和相似性,从社会、经济和环境 3 个角度探究区域最佳污染场地修复方法,可以有效实现区域污染场地绿色可持续发展。如对于尼日利亚三角洲大片受到原油污染的场地, Zabbey 等^[34]回顾了尼日尔三角洲地区受污染土地的社会、经济和生态影响以及全球最先进的修复方法,并使用沿海环境清理案例研究来证明生物修复因其较低的环境足迹、经济成本,成为尼日利亚三角洲区域修复的首选方案。但该研究仅通过实例验证的方式对最佳修复方法进行了选择,缺乏碳足迹核算结果、可持续性评估结果的数据支撑。

总体来看,目前区域尺度下的污染场地修复碳核算相关研究较少,还没有建立统一的方法和模型,需要进一步地探索和发展。结合场地尺度污染场地修复碳足迹核算和其他行业碳足迹核算的相关研究,本研究认为区域尺度污染场地修复碳足迹核算可以采用 LCA 法核算各修复技术的一般碳足迹,得出统计意义的碳排放水平;在区域乃至更大尺度上,建立区域场地清单,从而能够根据清单内地块的污染特征信息预设修复技术路线;最终根据技术路线,对涉及的污染土类别、修复技术、修复方量赋值碳排放量并加权合计,实现该区域修复工程碳排放核算。该方法具有一定科学性和可行性,可以成为我国建立区域尺度污染场地碳足迹核算方法的新尝

试,具有一定的参考意义。

1.3 宏观尺度碳核算

在全球环境变化和“双碳”政策的背景下,以现有制度和实践为基础,我国修复领域亟待借鉴相关经验,加强从宏观视角对修复行业碳足迹进行评估和分析。其不仅对污染场地绿色可持续修复政策制定以及碳中和、碳达峰的实现具有重要意义,同时也可以为未来土壤修复和环境管理的减排特点和路径选择提供方向指引和数据支撑。然而,目前国内外学者还没有在宏观尺度上进行土壤修复碳足迹评估的相关研究,但有相关研究涉及从宏观视角进行全球尺度、国家尺度碳足迹评估,其使用的技术、方法以及评估思路可以为土壤修复领域宏观尺度碳足迹评估提供一定的参考和借鉴。

Hertwich 和 Peters^[35]量化了与全球 73 个国家和 14 个地区的商品和服务最终消费相关的温室气体排放,并分析了 8 个类别的贡献,发现在全球范围内,72% 的温室气体排放与家庭消费有关,10% 与政府消费有关,18% 与投资有关。在澳大利亚,为引入排放交易计划并合理地制定温室气体排放政策,Wood 和 Dey^[36]采用投入产出分析的方法计算该国碳足迹,结果发现,2005 年国内总碳排放量为 5.819 亿 t,同时分析了各行业类别温室气体排放量随时间的变化趋势。在英国,Wiedmann 等^[37]采取了国际多区域投入-产出(MRIO)模型计算了英国从 1992—2004 年的国家碳足迹,根据计算结果发现,大多数温室气体随着时间的推移,消费者排放量显著增加,生产者和消费者排放量之间的差距不断扩大。Ivanova 等^[38]基于 EXIOBASE 2.3 多区域投入产出数据库中的消费者支出调查以及环境和贸易细节,发现不同区域国家的隐含温室气体排放量存在空间异质性,在 0.6~6.5 t CO₂-eq 之间变化很大,就总排放量和人均排放量而言,区域贡献的显著差异表明气候变化责任存在巨大的空间不平等。在我国,Yang 等^[39]使用详细的排放清单以高空间分辨率(10 km×10 km)绘制了 2012 年全球消费驱动的中国二氧化碳排放图,结果表明,国外地区在中国的碳足迹集中在重要的制造业中心,包括长三角、珠三角和华北平原,中国约 1% 的土地面积拥有全球 75% 的碳足迹。了解我国碳足迹热点有利于我国推动下游产业协同减排,对我国碳足迹热点有更加清晰、准确的认知。

以上宏观尺度的碳核算技术与方法未来可以有选择地应用在修复领域,为宏观视角下的修复领域碳核算提供技术支撑。在积极推进生态文明建设,坚持

走绿色发展道路的新形势下,如何将污染场地防治与绿色发展和可持续发展相衔接,形成一套符合生态文明思想、支撑绿色发展理念、促进土壤资源永续利用的污染地块绿色可持续修复评估技术和管理体系,是推动我国环境管理与可持续发展的艰巨任务。在修复领域,从宏观尺度上进行碳足迹评估一方面有利于从宏观视角把握土壤修复碳足迹变化趋势和特点,从而有针对性地进行宏观调节和控制,为实现碳达峰、碳中和奠定基础;另一方面也将推动构建综合考虑场地修复社会总投入和生态环境总损失的宏观框架指标,为实现场地修复环境管理和社会治理现代化水平提供支撑保障^[40]。

2 面临挑战与未来展望

2.1 问题与挑战

许多学者在进行绿色可持续修复实证研究的过程中,发现其依然存在诸多的问题和挑战(表 1)。也有学者试图探讨解决该问题的途径和方法,并对可持续性修复的未来发展进行了展望。本文在综述绿色可持续修复存在问题的同时,分析其问题内核与碳足迹核算的关联,可以促进碳足迹核算与绿色可持续修复协同发展。

从绿色可持续修复的概念来看,可持续性是一个偏原则性、多形态的概念,它可以灵活地适应各种需求,但不易转化为可实施的行动^[6]。Hou 等^[20]和 Prior^[20, 52]提出应当更深入地了解可持续性的真正含义,更多地关注和理解如何将可持续规范、规则和价值观念纳入修复和更多研究以提高其实用性。绿色可持续修复缺乏系统的、明确的监管要求,应在当前监管框架内整合可持续修复指标的具体、明确和共识指南^[41-42]。绿色可持续修复过程评估缺乏统一的标准,需要尽快建立明确的可持续性评估标准和指南,以用于可持续性评估或修复过程^[53]。绿色可持续性修复设计的环境、经济和社会 3 个维度之间存在冲突,如何一致且平衡地评估 3 个维度存在困难。为了更好地识别和权衡,可持续性评估方法和工具应更具综合性,可持续性目标必须一致并相互兼容,避免 3 重维度之间的冲突^[45-47]。

从绿色可持续修复推进的外部条件来看,也存在诸多挑战。①缺少鼓励研究、创新和绿色可持续修复实践发展的财政激励措施,进行可持续修复的可用资金较为缺乏。一方面需要政府和有关部门加大对可持续修复的资金支持力度,另一方面需要更多的研究探究更具经济效益的可持续性修复方法和技术^[41, 48]。

表 1 “双碳”政策背景下绿色可持续修复面临的挑战
Table 1 Challenges of green sustainable remediation in context of carbon peak and neutrality policy

类别	序号	面临挑战	应对方式	是否涉及碳足迹核算	参考文献
内源性问题	1	绿色可持续修复概念的偏原则性与多形态	深入理解可持续真正含义, 将其规则和价值观融入修复实践, 提高其实用性	逻辑上包含, 具体实施层面缺失	[6]
	2	绿色可持续修复缺乏监管要求	在当前监管框架内整合可持续修复指标具体的明确的共识指南	未纳入社会经济活动碳核算体系	[41-42]
	3	绿色可持续修复过程和评估缺乏统一的标准	尽快建立明确的可持续性评估标准和指南	缺少可实施性强的精准评估方法	[43-44]
	4	绿色可持续性 3 个维度之间的平衡	更具综合性特点的可持续评估方法和工具; 一致并相互兼容的可持续性目标	行业 and 全社会的关注度不够	[45-47]
外源性问题	1	缺少鼓励绿色可持续修复实践的财政激励政策, 缺乏可用资金	政府部门加大资金支持力度; 探究更具经济效益的可持续性修复技术	尚未纳入监管考核体系	[41, 48]
	2	涉及利益相关者众多, 理解程度各不相同	开发评估工具, 引入多标准决策分析协调各方利益	所有利益相关方不够重视	[41, 49]
	3	相关从业人员以及整个社会对绿色可持续修复理解不足	加强业内人士乃至整个社会对可持续修复的深入理解	从业人员缺乏减碳降碳意识	[43-44]
	4	难以充分满足客户(例如站点所有者)的需求	在修复速度和修复成本之间做好权衡	减碳未计入综合成本核算	[50]
欧美以外其他国家的特殊障碍	1	其他国家缺乏自主研发、因地制宜的绿色可持续修复技术	加强技术储备, 借鉴欧美国家经验开发适合自己国家的修复技术	缺少低碳绿色的修复技术	[20]
	2	其他国家的行政组织体系不利于监管	结合欧美国家经验重构行政组织体系, 形成有效监管	尚未纳入行业碳核算和碳计量体系	[51]
	3	社会不公平现象	-	-	[50]

②环境修复从业人员以及整个社会对绿色可持续修复原则的了解不足, 对有效地融入修复过程从而对可持续修复的推广和实施产生了阻碍^[43]。为应对这一挑战, 需要加强业内人士乃至整个社会对绿色可持续修复的深入理解, 了解绿色可持续修复的优势所在。③环境修复涉及的利益相关者众多, 对绿色可持续修复的理解程度各不相同, 难以保证不同的利益相关者对绿色可持续修复的期望和从业者的行为进行完全的支持^[41, 49]。应对这一问题, 可以进一步开发评估框架和工具, 引入多标准决策分析协调各方利益, 减少冲突和矛盾^[54]。④难以充分满足客户(例如场地所有者)的需求。场地所有者是修复行业的关键参与者, 其为修复行为负责并通常做出最终决定。场地所有者往往希望以较低的成本迅速清理空置的受污染土地, 以便将其投入生产使用, 其需要在修复速度与修复成本之间进行权衡^[50]。

与欧美国家相比, 其他国家在绿色可持续修复发展方面还存在着特殊的挑战。首先, 由于绿色可持续修复技术需要因地制宜, 而大多数方法是由欧美国家的实体开发的, 在许多方面并不代表其他国家的实际情况, 这也为其绿色可持续修复发展带来了一定的阻

碍^[20]。其次, 其他国家还面临着高成本、缺乏监管和对专业知识的需求等额外挑战。Huang 等^[51]针对其他国家在可持续修复监管方面的问题重新构建了行政组织体系, 以促进绿色可持续修复的发展和实施。再次, 其他国家由于修复的重点是高经济价值的土地, 从而导致较贫穷的省市可能无法清理受污染的场地, 进而出现社会不公平的现象^[50]。除以上相较于欧美国家其他国家普遍存在的问题之外, 我国学者针对我国目前的发展情况, 有针对性地指出我国绿色可持续修复发展面临着可持续管理体系与决策机制不健全、技术力量不足、融资渠道不畅、各方权责不清等问题^[55]。

2.2 结论与建议

虽然绿色可持续修复目前存在着诸多问题和挑战, 但不可否认其强劲的总体发展趋势。在全球气候变化的背景下, 从绿色可持续修复的外部发展来看, 弹性修复和风险管控将成为适应气候变化的重要实践方向, 协同绿色可持续修复可为场地修复减缓和适应气候变化做出贡献; 从绿色可持续修复的内部发展来看, 在场地、区域和宏观 3 个尺度完善污染场地修复碳核算体系, 通过碳核算准确评估和优化修复活动

的碳排放,是切实实现污染场地绿色可持续修复的重要途径,其将对于应对气候变化、实现可持续发展起重要作用,也是绿色可持续修复未来完善发展的方向之一。

目前各国业界已经对绿色可持续修复进行了较为丰富的理论研究和实践研究,绿色可持续修复虽然发展迅猛,但其依旧面临着内部、外部的诸多挑战,需要进一步应对。同时,绿色可持续修复需要不断地实践和落实,污染场地碳核算作为实现绿色可持续修复的重要抓手,亟待加强从场地、区域和宏观3个尺度完善其方法体系,从不同维度推动修复领域绿色、低碳、可持续发展。

结合国内外绿色可持续修复的发展以及碳核算领域的研究进展,为推动我国修复领域绿色可持续发展,提出以下建议:

1) 在场地尺度,结合碳足迹核算结果的对比评估和绿色修复材料、监测自然衰减等技术发展,通过修复方法的选择和优化,推动污染场地零碳修复与低碳修复。

2) 在区域尺度,评估区域绿色可持续修复强度,制定区域尺度可持续修复与风险管控区划规划,积极开展区域可持续度评估;建立区域污染场地碳足迹动态评估机制,为实现污染场地修复绿色可持续发展提供数据基础和科学依据;强化碳足迹核算结果的指导作用,推动开展区域土壤和地下水修复管控碳达峰与碳中和策略,探索污染场地修复协同减排路径。

3) 在宏观尺度,尽快建立修复行业碳排放相关管理标准与核算导则,加强政策引领,完善碳核算方法体系,促进碳减排监测管理,推动绿色可持续修复的落实和发展。

参考文献:

- [1] European Commission. Progress in management of contaminated sites (CSI 015) in Europe [D]. 2013.
- [2] Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Response. Cleaning up the nation's waste sites: Markets and technology trends[M]. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
- [3] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 国土资源通讯, 2014(8): 26-29.
- [4] 郑苇,高波,闵海华,等. 我国污染场地修复技术应用现状与发展研究[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3): 6-8.
- [5] 侯德义,李广贺. 污染土壤绿色可持续修复的内涵与发展方向分析[J]. 环境保护, 2016, 44(20): 16-19.
- [6] Hou D Y, Al-Tabbaa A. Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 39: 25-34.
- [7] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [8] 王微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.
- [9] 张琦峰,方恺,徐明,等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708.
- [10] Chen C, Zhang X M, Chen J A, et al. Assessment of site contaminated soil remediation based on an input output life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121422.
- [11] Gallagher P M, Spataro S, Cucura J. Hybrid life cycle assessment comparison of colloidal silica and cement grouted soil barrier remediation technologies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 250/251: 421-430.
- [12] Huang W Y, Hung W, Vu C T, et al. Green and sustainable remediation (GSR) evaluation: Framework, standards, and tool. A case study in Taiwan [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(21): 21712-21725.
- [13] Ali Khan M A, Qadir Z, Asad M, et al. Environmental footprint assessment of a cleanup at hypothetical contaminated site[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 4907.
- [14] Favara P J, Krieger T M, Boughton B, et al. Guidance for performing footprint analyses and life-cycle assessments for the remediation industry[J]. Remediation Journal, 2011, 21(3): 39-79.
- [15] Harbottle M J, Al-Tabbaa A, Evans C W. A comparison of the technical sustainability of *in situ* stabilisation/solidification with disposal to landfill[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(2): 430-440.
- [16] Sparrevik M, Saloranta T, Cornelissen G, et al. Use of life cycle assessments to evaluate the environmental footprint of contaminated sediment remediation[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(10): 4235-4241.
- [17] Ferdos F, Rosén L. Quantitative environmental footprints and sustainability evaluation of contaminated land remediation alternatives for two case studies[J]. Remediation Journal, 2013, 24(1): 77-98.
- [18] Hou D Y, Gu Q B, Ma F J, et al. Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 949-956.
- [19] Vigil M, Marey-Pérez M F, Martínez Huerta G, et al. Is phytoremediation without biomass valorization sustainable?—Comparative LCA of landfilling vs. anaerobic co-digestion[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 844-850.
- [20] Hou D Y, Guthrie P, Rigby M. Assessing the trend in sustainable remediation: A questionnaire survey of remediation professionals in various countries[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 18-26.
- [21] Martins F, Machado S, Albergaria T, et al. LCA applied to nano scale zero valent iron synthesis[J]. The International

- Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(5): 707–714.
- [22] Lemming G, Hauschild M Z, Bjerg P L. Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies: Literature review[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(1): 115–127.
- [23] Owsianiak M, Lemming G, Hauschild M Z, et al. Assessing environmental sustainability of remediation technologies in a life cycle perspective is not so easy[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1182–1183.
- [24] Suer P, Andersson-Sköld Y. Biofuel or excavation? —Life cycle assessment (LCA) of soil remediation options[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(2): 969–981.
- [25] Amponsah N Y, Wang J Y, Zhao L. A review of life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of commonly used *ex-situ* soil treatment technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 514–525.
- [26] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 6–12.
- [27] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(1): 1–6.
- [28] Sampson J, Biesta M, Crapper M, et al. Carbon dioxide accounting: 2014 commonwealth games athletes' village[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2013, 166(3): 150–160.
- [29] Leontief W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105–125.
- [30] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3): 262.
- [31] Hou D Y, Song Y N, Zhang J L, et al. Climate change mitigation potential of contaminated land redevelopment: A city-level assessment method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 1396–1406.
- [32] Wiedmann T O, Chen G W, Barrett J. The concept of city carbon maps: A case study of Melbourne, Australia[J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(4): 676–691.
- [33] Chen G W, Wiedmann T, Wang Y F, et al. Transnational city carbon footprint networks—Exploring carbon links between Australian and Chinese Cities[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1082–1092.
- [34] Zabbey N, Sam K, Onyebuchi A T. Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, *Nigeria*: Prospects and challenges[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 952–965.
- [35] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414–6420.
- [36] Wood R, Dey C. Australia's carbon footprint[J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 243–266.
- [37] Wiedmann T, Wood R, Minx J C, et al. A carbon footprint time series of the UK—Results from a multi-region input-output model[J]. Economic Systems Research, 2010, 22(1): 19–42.
- [38] Ivanova D, Vita G, Steen-Olsen K, et al. Mapping the carbon footprint of EU regions[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(5): 054013.
- [39] Yang Y T, Qu S, Cai B F, et al. Mapping global carbon footprint in China[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1–8.
- [40] 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(北京), 2019.
- [41] Booth P, Gaskin V. Can sustainability be applied to our remediation challenges? [C]//Proceedings of ASME 2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, September 25–29, 2011, Reims, France. 2012: 33–37.
- [42] Hou D Y, Al-Tabbaa A, Guthrie P. The adoption of sustainable remediation behaviour in the US and UK: A cross country comparison and determinant analysis[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 905–913.
- [43] Mulligan C N, Dumais S, Noel-De-Tilly R. Sustainable remediation of contaminated sites[M]//Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications. Torino, Italy: CRC Press, 2013: 663–670.
- [44] Song Y N, Hou D Y, Zhang J L, et al. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 391–401.
- [45] Bardos P. A review of the contaminated land rehabilitation network for environmental technologies in Europe (CLARINET). Part 2: Working Group findings[J]. Land Contamination & Reclamation, 2003, 11(1): 15–30.
- [46] Harclerode M, Ridsdale D R, Darmendrail D, et al. Integrating the social dimension in remediation decision-making: State of the practice and way forward[J]. Remediation Journal, 2015, 26(1): 11–42.
- [47] Marinovich M J, Funk W A, Kelly S, et al. Sustainable remediation and decision analysis practices at an onshore gas well site[J]. Remediation Journal, 2016, 26(4): 95–115.
- [48] Adams J A, Reddy K R. State of the practice of characterization and remediation of contaminated sites[M]//Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012. 2012: 423–442.
- [49] Bardos P, Bone B, Boyle R, et al. Applying sustainable development principles to contaminated land management using the SuRF-UK framework[J]. Remediation Journal, 2011, 21(2): 77–100.
- [50] Hou D Y, O'Connor D. Green and sustainable remediation: Past, present, and future developments[M]//Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater. Amsterdam: Elsevier, 2020: 19–42.
- [51] Huang S, Tan X J, Zhu Y. Implementation of a green and sustainable concept to evaluate footprint and optimize contaminated site remediation in China: A case study[J]. Environmental Engineering Science, 2019, 36(9): 1269–1280.

- [52] Prior J. The norms, rules and motivational values driving sustainable remediation of contaminated environments: A study of implementation[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 824–836.
- [53] Held T, Noé K. Green and sustainable remediation-eine perspektive Bei der altlastenbearbeitung?[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2012, 84(7): 1062–1069.
- [54] Reddy K, Kumar G. Green and sustainable remediation of polluted sites: New concept, assessment tools, and challenges[J]. *European Conference on Geotechnical Engineering*, 2018, 2(2/3): 83–92.
- [55] 张红振, 於方, 曹东, 等. 发达国家污染场地修复技术评估实践及其对中国的启示[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(2): 105–111.