引用格式：谭树波，余锦涛，张长波．土壤与地下水修复碳排放核算标准建立与研究[J]．标准化学报，2026(11)：113-121．
TAN Shubo, YU Jintao, ZHANG Changbo. Establishment and Research of Standards for Carbon Emission Accounting in Soil and Groundwater Remediation[J]. Journal of Standardization, 2026(11): 113-121.

土壤与地下水修复碳排放核算标准建立与研究

谭树波[1] 余锦涛[1] 张长波[2*]
（1.上海化工院环境工程有限公司；2.上海化工研究院有限公司）

摘 要：【目的】建立一套系统化、可量化的碳排放核算标准框架，以解决修复工程碳排放无法科学评估的难题，推动修复行业绿色发展。【方法】基于“识别—量化—核算—验证”的标准化闭环流程，参考国内外标准规范，以排放因子法为核心，覆盖直接、间接能源排放核算范围，通过明确源项、边界及数据质量控制，实现全生命周期碳足迹的科学量化与管理。【结果】为系统核算修复活动的碳排放，构建了完整的碳排放核算公式体系。针对不同修复技术明确了其具体的核算方法，同时，为保障核算可行性，研究设定了清晰的数据获取优先级。【结论】该标准框架实现了对修复活动全生命周期碳排放的覆盖，具有可靠的实用价值，为土壤修复行业的绿色转型提供关键支撑，为实现“净土”与“降碳”的双赢目标奠定技术基础。

关键词：碳排放核算；土壤与地下水修复；全生命周期评估；绿色修复；方法标准化
DOI编码：10.3969/j.issn.2097-857X.2026.11.013

Establishment and Research of Standards for Carbon Emission Accounting in Soil and Groundwater Remediation

TAN Shubo[1] YU Jintao[1] ZHANG Changbo[2*]
(1.Shanghai Institute of Chemical Industry Environmental Engineering Co., Ltd.;2. Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] This study develops a systematic and quantifiable standards framework for carbon emission accounting in remediation projects to address the current inability to assess emissions scientifically and to support the industry’s green development. [Methods] Following a standardized “identify–quantify–account–verify” workflow, the framework employs the emission factor method as its core, drawing on international and domestic standards and specifications. It accounts for direct and indirect energy-related emissions across defined system boundaries, supported by clear source identification and data quality control to enable lifecycle carbon footprint management. [Results] A comprehensive set of carbon accounting formulas is established. The framework specifies emission calculation methods for different remediation technologies and defines data acquisition priorities to

基金项目：本文受国家自然科学基金项目“锰氧化真菌修复底泥高环PAHs的生物与非生物协同代谢与调控研究”（项目编号：52500230）资助。
作者简介：谭树波，硕士，高级工程师，研究方向为土壤/地下水修复工程与应用。
张长波，通信作者，博士，正高级工程师，研究方向为土壤/地下水修复工程与应用。

ensure practical applicability. [Conclusion] The proposed standards framework provides the full coverage of carbon emissions over the remediation lifecycle and offers reliable practical utility. It supplies essential technical support for greening the remediation industry and lays the groundwork for achieving both “clean land” and “carbon reduction” objectives.

Keywords: carbon emission accounting; soil and groundwater remediation; full lifecycle assessment; green remediation; methodological standardization

0 引言

在全球碳中和行动加速推进的背景下，碳排放管控已成为衡量产业绿色转型成效的关键指标。土壤与地下水修复作为保障人居环境安全[1-3]，推动土地可持续再利用的重要环节，其修复工程的目标已从单纯追求效率转变为低碳减排与高效修复并重[4]。修复工程依赖高能耗的工艺与大量物料投入，已成为不可忽视的隐性碳排放源[5]。尽管行业碳排放总量相对较低，但在快速城市化和工业用地更新背景下，其局部与短期的碳足迹对区域影响显著[6]。

目前，土壤与地下水修复项目的碳排放核算仍处于初步探索阶段，尽管国家层面已有绿色低碳修复的指导意见，但仍面临方法不统一、数据基础薄弱、系统化技术标准缺失等问题[7]。因此，构建一套系统化、可量化、可验证的碳排放核算标准与框架，成为推动行业绿色低碳转型的迫切需求[8]。

本研究以“减污降碳协同增效”为目标，旨在建立适用于土壤与地下水修复活动的碳排放核算方法学框架，为全面量化修复工程碳足迹、识别关键减排环节、优化工程设计与技术选型提供科学基础，推动污染治理与气候变化应对的协同，助力实现“净土”与“降碳”双赢的可持续发展使命。

1 修复碳排放标准进展

1.1 修复碳排放国内外标准

当前，国际碳排放核算标准已形成多层次、全覆盖且日益协同的方法论体系，但尚无专门针对土壤与地下水修复领域的核算标准。现有实践通常是参考通用温室气体核算国际标准并将其应用于具体修复项目的生命周期评估中。例如，《2006年IPCC国家温室气体清单指南》（2019年修订版）[9-10]作为国家层面的基础方法论，为各国编制温室气体清单提供统一框架和参考排放因子，是下游行业核算的源头依据；ISO[11]系列标准在IPCC核算框架基础上细化：ISO 14064-1:2018《温室气体 第1部分：组织层面温室气体排放和清除的量化和报告的规范及指南》规范组织层面温室气体排放与去除的量化和报告要求，ISO 14064-2:2019《温室气体 第2部分：项目层面温室气体减排或清除增强的量化、监测和报告的规范及指南》则针对减排项目层面的基线设定、监测与减排量核算，两者共同支撑企业碳盘查与项目碳减排验证；ISO 14067:2018《温室气体—产品碳足迹—量化和通报的要求和指南》延伸至产品层面，提供产品碳足迹核算的全生命周期原则与方法，填补了“产品级”碳数据空白，成为国际贸易、供应链管理和绿色产品认证的重要技术依据。上述标准从国家宏观、组织中观到产品微观形成了多层次衔接，为土壤与地下水修复项目的多维度碳核算提供了系统化的标准支撑。

国内土壤与地下水修复领域碳排放核算标准正处于“起步突破、亟待完善”的关键阶段。浙江省生态环境厅发布的《浙江省建设用地土壤地下水污染风险管控和修复工程碳排放核算技术指南（试行）》（2025年10月公开征求意见）[12]，提出了修复工程的碳排放核算方法；上海市生态环境局发布的《上海市建设用地典型修复技术碳排放核算技术指南

（试行）》2025年12月发布通知[13]，提出了单位处理量的碳排放强度计算公式；山东省生态环境厅组织发布的《建设用地土壤污染修复绿色低碳评价技术指南（征求意见稿）》（2024年8月征求意见通知）[14]规定了土壤修复碳排放强度的计算方法。另外，中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟发布的T/GIA 022.3—2023《石化污染地块土壤–地下水原位协同修复技术指南》团体标准，针对石化地块原位协同修复，将碳排放分析与控制作为工程技术要求。

国内尚无统一核算标准，导致修复活动的碳排放难以有效监管、考核与优化。建立相关标准可实现不同技术路线碳排放的可比，推动低碳修复工艺创新，为技术比选和工程优化提供数据支撑，实现污染治理与碳减排协同。因此，制定统一的土壤与地下水修复碳排放核算标准具有紧迫的战略意义。

1.2 修复碳排放标准工作流程

本研究参考国内外相关的技术规范与政策指导文件，工作采用“识别—量化—核算—验证”的标准化闭环流程，其核心目标是以科学、统一的方法，系统评估修复活动碳排放数据，为修复行业的绿色低碳转型提供量化依据和决策支持。标准化工作流程（见图1）可描述如下：（1）确定核算范围，明确修复采用的具体修复工艺技术；根据物理边界、工艺单元等划分核算边界与核算范围。（2）计算排放，基于确定的活动数据和排放因子确定核算方法，通过计算和汇总得到该修复工程边界内的碳排放总量。（3）质量保证，为确保核算结果的准确性、

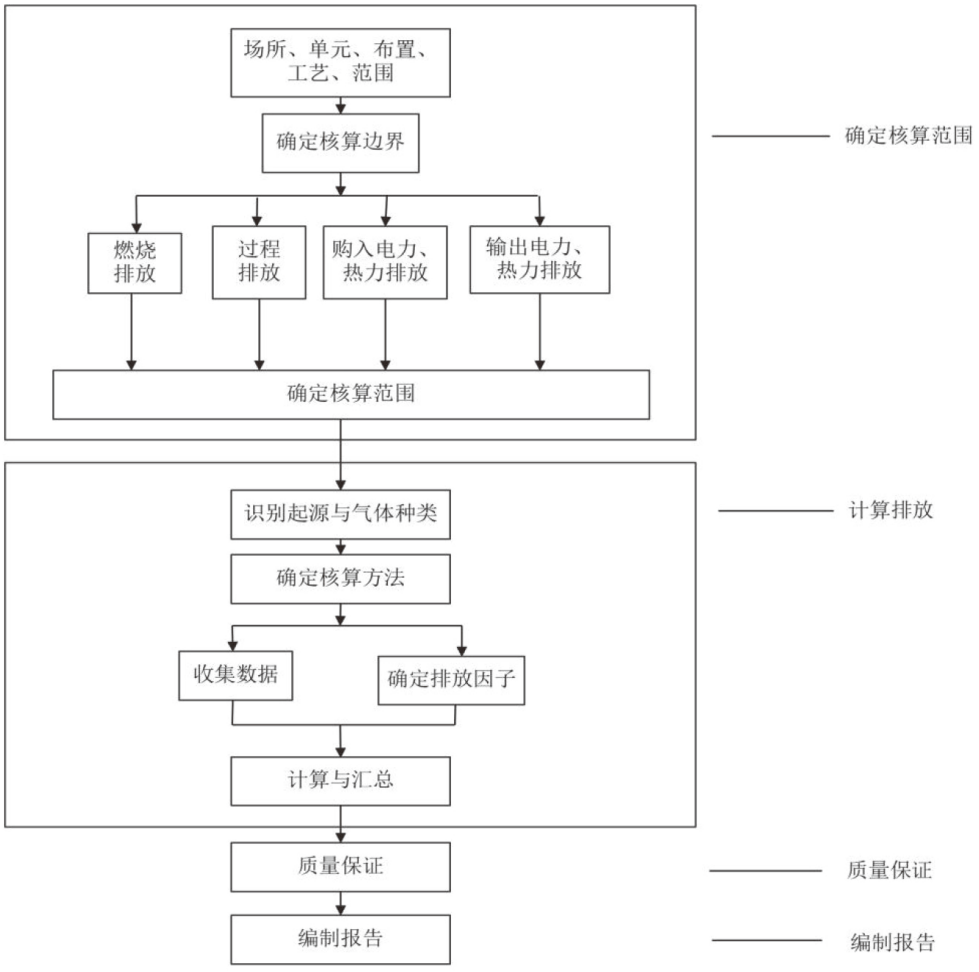


图1 土壤与地下水修复温室气体排放核算工作流程图

可靠性和可追溯性进行质量控制。(4)编制报告，将所有步骤和结果进行系统性的整理与汇总。

1.3 工艺特征与碳排放

不同修复技术路径对应着差异化的碳排放特征。异位修复涉及大量的土壤开挖、转运及异地处置作业，其碳排放主要来源于高强度的机械作业与长距离运输；原位修复则通过维持土壤原状大幅降低了运输与扰动相关的排放，但这一优势往往被修复药剂的生产、运输及现场注入过程所产生的碳排放抵消，特别是化学氧化/还原等依赖大量耗材的工艺。碳排放特征与能源消耗、材料投入及施工方式紧密相关，高碳技术依赖大量能源消耗（燃料、电力）或高碳材料投入，如热脱附[15-16]、焚烧等技术；中碳技术碳排放主要来源于药剂生产（间接排放）和施工过程中的机械能耗，如固化/稳定化[17]、土壤淋洗[18]等技术；低碳技术能耗极低，主要依靠自然过程或生物活动，属于基于自然的解决方案修复技术（如监测自然衰减、生物修复、植物修复）和风险管控措施技术（见表1）。

土壤与地下水修复工艺的碳排放特征复杂多样，迫切需要建立修复碳排放标准，为修复方案的选择和优化提供合理绿色方案建议，推动修复行业向绿色低碳转型。

1.4 核算边界及排放源

1.4.1 核算边界

核算边界的确定是准确量化修复企业温室气体排放的基础，根据核算目的（如企业报告或项目评估）明确主体范围，不同目的对应不同的边界尺度。

企业报告偏向以独立核算单位为边界，以企业法人或视同法人的独立核算单位为主体，以其管理权限范围为界将企业整体作为主要核算对象。项目评估通常以场地红线或项目活动范围作为地理边界，即传统意义上的厂区围墙或场地红线范围内，所有与修复相关的活动和设施；以直接参与污染治理的核心工艺设备为边界，如热脱附装置、化学氧化注入设备、气相抽提系统等；以修复活动支持单元为界，如动力供应、供水、化验检测、机修、库房、运输、环保设施等；以修复项目服务单元为界，如项目管理、监理、监测服务、外包运输等。

核算边界的设定基于修复项目活动的完整性与避免重复计算的原则，设定边界时须确保涵盖所有显著的、可控制或影响较大的排放源，同时清晰界定上下游接口，避免与其他企业的排放责任发生重复或遗漏计算，确保核算结果的完整性与准确性。

1.4.2 排放源

排放源涵盖修复系统、辅助系统及附属服务系统等[19]。根据污染土壤修复系统的物质与碳排放特征，可以将排放源划分为碳流入、核心处理过程和碳流出3个部分（见图2）。

碳流入主要涉及进入修复系统的物质流与能源流，构成了碳排放的主要来源。污染土壤/地下水作为处理对象，本身携带含碳物质会作为输入项；修复过程中使用的各类化学药剂，以及系统运行所需的燃料注入，均属于直接的碳源输入；系统运行依赖的外购电力和热力，虽然能量形式不同，但均对应外部生产环节的碳排放。

核心处理过程是修复系统内部进行物质和能量转化的核心区域，主要的温室气体与污染物通过该过程产生。热处理，涉及燃料燃烧[20]的热脱

表1 修复工艺与碳排放特点

技术类别	典型技术	主要碳排放源	碳排放强度范围
热处理技术	热脱附、焚烧（土壤）	燃料消耗、电力需求	较高
化学处理技术	稳定化/固定化 化学氧化/还原（土壤/地下水）	药剂生成、机械能耗	中等
物理处理技术	土壤淋洗（土壤）、多相抽提（地下水）	药剂生成、设备能耗	中等
生物处理技术	生物修复、植物修复（土壤/地下水）	能耗较低，可能具有碳汇效应	较低
风险管控技术	阻隔、制度控制（土壤/地下水）	材料生产、施工能耗	较低

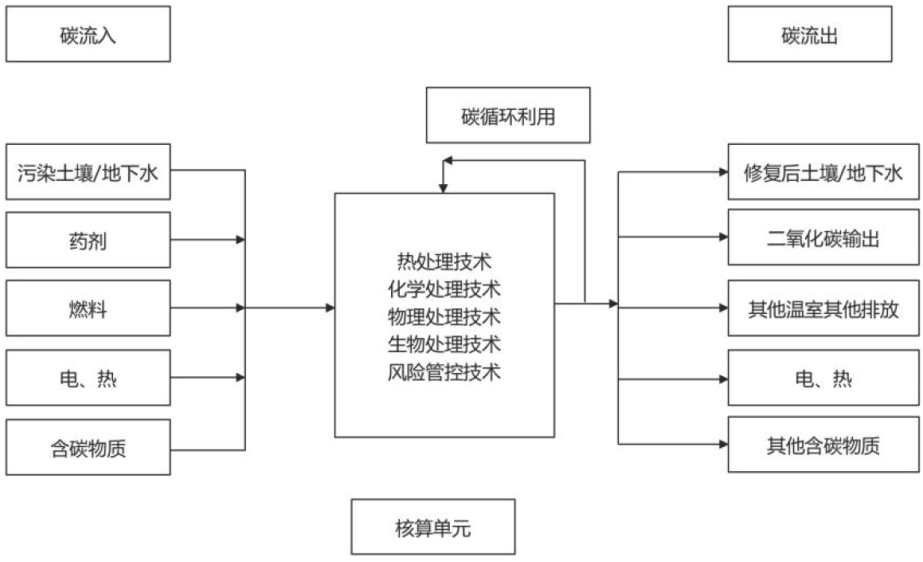


图2 排放核算单元

附、焚烧；物理处理技术，通过物理手段改变物质形态；化学处理技术，涉及污染物或药剂在化学反应中分解[21-22]；生物处理技术，利用微生物代谢过程；风险管控技术，针对特定风险实施管控措施。

碳流出主要是经过处理后排出系统外的物质与能量。具体包括以下4种类型：修复后介质，处理达标后的土壤或地下水重新回归环境；气体排放物，包括二氧化碳等温室气体，以及其他挥发性有机化合物；二次资源与能源，处理过程中产生的可回收副产品或释放的热能、电能；其他含碳物质，未能完全降解或需进一步处理的残余物。

在进行碳核算时，需遵循完整性原则，结合活动水平数据和碳排放因子进行量化，确保核算结果的全面性与准确性。

1.4.3 核算方法

本研究建立的土壤与地下水修复企业碳排放核算以排放因子法为核心[23-26]。其原理是将“活动水平数据”乘以对应的“排放因子”计算碳排放量。首先核算覆盖修复全过程边界，针对设备运行化石能源消耗、化学药剂消耗、场内场外交通运输、电力或热力消耗及材料消耗等关键环节进行数据收集与计算。活动水平数据及排放因子优先选用实测值，其次为推荐值或工程类比数据。最终累加各环节碳排放量得到工程总量，计算单位体积污染介质的碳排放强度，以评估修复技术碳效率。该标准体系旨在系统量化修复活动的直接排放、能源间接排放及其他间接排放，为修复方案比选与减排评估提供依据。

2 核算过程

本研究遵循温室气体核算的通用平衡原则对土壤与地下水修复过程碳排放进行核算，即排放总量 = 直接排放 + 间接排放 – 输出能源与回收碳的抵减，具体计算见式（1）：

$$E_{总}=E_{热处理}+E_{过程}+E_{购入电}+E_{购入热}+E_{废弃物}-E_{输出电}-E_{输出热}-E_{CO_2回收} \quad (1)$$

式中：$E_{热处理}$、$E_{过程}$属于直接排放，$E_{热处理}$主要指化石燃料燃烧产生的CO_2排放，$E_{过程}$指修复过程中发生的非燃料燃烧化学反应产生的温室气体排放。$E_{购入电}$、$E_{购入热}$属于间接排放，核算为修复活动供电、供热的上游生产活动产生的排放。$E_{废弃物}$属于废弃物处理产生的直接或间接排放。$E_{输出电}$、$E_{输出热}$、$E_{CO_2回收}$属于抵减项。如果修复项目有能源输出或实现了二氧化碳的捕集与封存，这部分可避免的排放可以从总排放中扣除，以避免重复计算。$E_{废弃物}$主要指挖掘出的污染土壤、处理后的残渣等固体废弃物在最终处置环节产生的温室气体

排放。核算采用活动数据（AD）×排放因子（EF）的方法，参考固体废弃物焚烧相关参数计算。

2.1 热处理排放计算

土壤与地下水修复企业的温室气体排放为各个核算单元的热处理燃料燃烧产生的二氧化碳排放，按式（2）~（3）计算：

$$E_{热处理}=\sum_i\left(E_{燃烧}+E_{热脱附}+E_{机械}+E_{其他热处理工艺}\right) \quad (2)$$

$$E_i=AD_j\times CC_j\times OF_j\times 44/12 \quad (3)$$

式中：E_i 为核算期内核算单元i的燃料燃烧产生的二氧化碳排放量，tCO_2e；AD_j为核算期内第j种化石燃料用作燃料或污染物燃烧的消费量，对固体或液体燃料，t；对气体燃料（10^4Nm^3）；CC_j为核算期内第j种化石燃料或污染物的含碳量，对固体或液体燃料，tC/t；对气体燃料，$tC/10^4Nm^3$；OF_j为核算期内第j种化石燃料或污染物的碳氧化率；44/12为二氧化碳与碳的相对分子质量之比；i为核算单元编号；j为化石燃料类型代号。

2.1.1 活动数据获取

土壤与地下水修复企业温室气体排放数据应根据企业能源消费台账或统计报表来确定，污染物产生的二氧化碳排放量根据土壤/地下水调查污染物含量进行计算。企业根据自身条件从燃料含碳量测定、低位发热量换算、燃料低位发热量推荐值、燃料碳氧化率等方式中选择适宜数据进行计算。

1）燃料含碳量的测定根据式（4）计算：

$$CC_j=\sum_n\left[\left(12\times CN_n\times\varphi_n\right)\times 10/22.4\right] \quad (4)$$

式中：φ_n为待测气体每种气体组分n的体积分数，取值范围0~1，例如95%的体积分数取值为0.95；CN_n为气体组分n化学分子式中碳原子的数目；12 为碳的摩尔质量，kg/kmol；22.4为标准状况下理想气体摩尔体积，Nm^3/kmol。

2）低位发热量换算燃料的含碳量根据式（5）计算：

$$CC_j=NCV_j\times EF_j \quad (5)$$

式中：NCV_j为化石燃料品种j的低位发热量，对固体或液体燃料，GJ/t；对气体燃料（$GJ/10^4Nm^3$）；EF_j为燃料品种j的单位热值含碳量，tC/GJ。

3）燃料低位发热量推荐值、燃料碳氧化率参考《省级温室气体清单编制指南（2025年版）》《2005中国温室气体清单研究》等官方参考推荐值。

2.1.2 其他热处理及废弃物处理

其他热处理工艺及废弃物处理参照对应技术标准[27]，例如水泥窑协同处理/陶粒窑协同处置参考水泥企业核算方法GB/T 32151.8—2023《碳排放核算与报告要求 第8部分：水泥生产企业》。

2.2 过程排放计算

土壤与地下水修复过程涉及氧化、还原、稳定化、固定化、淋洗等药剂处理方式，过程排放量等于不同种类的温室气体排放的二氧化碳当量之和。

2.2.1 计算公式

修复过程中产生的二氧化碳排放根据涉及相关物质的用量和二氧化碳排放因子计算：

$$E_{CO_2,i}=\sum_i\left(E_{修复药剂}+E_{污染物}-E_{修复药剂残余}-E_{污染物残余}\right)\times 44/12 \quad (6)$$

$$E=AD_i\times CC_i \quad (7)$$

式中：$E_{CO_2,i}$为第i个核算单元修复过程中产生二氧化碳排放量，t_{CO_2}；i为涉及使用药剂或修复污染物过程中产生二氧化碳排放的单元，如果实际使用的是多种修复药剂混合物或涉及多种污染物，应分别考虑每种药剂或污染物的二氧化碳排放；AD_i为第i个核算单元使用的药剂用量或污染物量，t；CC_i为第i个核算单元的二氧化碳排放因子，每吨使用药剂产生二氧化碳排放量，$t_{CO_2}/t_{药剂}$，或每吨修复污染物产生二氧化碳排放量，$t_{CO_2}/t_{污染物}$。估算条件可将修复使用药剂默认为完全消耗，修复污染物默认为完全去除。

2.2.2 排放活动数据获取

每种生产技术类型的药剂使用量或污染物含量应根据企业台账或统计报表来确定。

2.3 电力、热力排放计算

遵循运营控制权原则，核算企业因运营活动实际净购入的二次能源所对应的排放，从而避免重复计算，计算见式（8）。

$$E_{热电}=E_{购入电}+E_{购入热}-E_{输出电}-E_{输出热} \quad (8)$$

式中：$E_{购入电}$、$E_{购入热}$为核算主体为满足自身生产运营而购买的所有电力与热力的隐含排放。$E_{输出电}$、$E_{输出热}$为核算主体将自产能源（如自备电厂发电、余热回收）对外销售或传输的部分。这部分能源的消耗及排放已计入购买方的核算范围，因此需从自身排放中扣除。

通过“购入”减“输出”得到“净购入量”，再乘以相应的排放因子（根据能源来源地电网或热力生产结构确定），即可得出最终排放量E热电。此方法确保了在区域或供应链层面，能源消费的排放责任被清晰、无重复地归属。

2.3.1 计算公式

核算单元电力和热力二氧化碳排放量，分别按购入、输出电量（热量）与相应排放因子相乘计算，计算公式如式（9）~（10）：

$$E_{热,i} = AD_{热,i} \times EF_{热} \quad (9)$$

$$E_{电,i} = AD_{电,i} \times EF_{电} \quad (10)$$

式中：$E_{热,i}$为核算单元i购入/输出热力所产生的二氧化碳排放量，t_{CO2}；$AD_{热,i}$为核算期内核算单元i购入/输出热力，GJ；$EF_{热}$为热力消费的排放因子，t_{CO2}/ GJ；$E_{电,i}$为核算单元i购入/输出电力所产生的二氧化碳排放量，t_{CO2}；$AD_{电,i}$为核算单元i购入/输出电力（MWh）；$EF_{电}$为区域电网年平均供电排放因子，t_{CO2}/ MWh。

2.3.2 活动数据的获取

热力活动数据，以热力购售结算凭证、企业能源消费台账或统计报表为据。

1）以质量单位计量热水可按式（11）转换为热量单位：

$$AD_{热水} = Ma_w \times (T_w - 20) \times 4.1868 \times 10^{-3} \quad (11)$$

式中：$AD_{热水}$为热水的热量，GJ；Ma_w为热水的质量，t；T_w为热水的温度，℃；4.186 8为水在常温常压下的比热容，kJ/（kg·℃）。

2）以质量单位计量的蒸汽可按式（12）转换为热量单位：

$$AD_{蒸汽} = Ma_{st} \times (EN_{st} - 83.74) \times 10^{-3} \quad (12)$$

式中：$AD_{蒸汽}$为蒸汽的热量，GJ；Ma_{st}为蒸汽的质量，t；EN_{st}为蒸汽所对应的温度、压力下每千克蒸汽的热焓，kJ/kg。83.47为水温度为 20 ℃时焓值。

电力活动数据，以企业和电网公司结算的电表读数或企业能源消费台账或统计报表为据。

2.3.3 排放因子数据的获取

排放因子数据的获取来自：1）热力消费的排放因子可取推荐值0.11（t_{CO_2}/GJ），也可采用政府主管部门发布的官方数据。2）电力消费的排放因子应根据企业生产场地，按目前的东北、华北、华东、华中、西北、南方电网划分，选用国家主管部门的最近年份发布数据相应区域电网排放因子。

2.4 回收排放计算

2.4.1 计算公式

每个核算单元回收且外供的二氧化碳按式（13）计算。

$$R_{CO_2回收,i} = Q_i \times PUR_{CO_2,i} \times 19.77 \quad (13)$$

式中：$R_{CO_2回收,i}$为第i个核算单元的二氧化碳回收利用量，t_{CO_2}；Q_i为第i个核算单元回收且外供的二氧化碳气体体积，10^4Nm^3；$PUR_{CO_2,i}$为第i个核算单元的二氧化碳外供气体的纯度（二氧化碳体积分数），以%表示；19.77为标准状况下二氧化碳气体的密度，$t_{CO_2}/10^4Nm^3$。

2.4.2 活动数据的获取

二氧化碳气体回收外供量应根据企业台账或统计报表来确定。

3 讨 论

3.1 核算范围

标准构建遵循温室气体核算的基本原则，考虑修复行业特有的工艺流程、能源材料消耗及二次环境影响等特点。碳排放核算范围包含3个层次：直接碳排放、能源间接碳排放和其他间接碳排放。

直接碳排放主要来源于修复过程中化石燃料的现场燃烧，其中一些特殊的化学反应过程也会产生直接碳排放。能源间接碳排放是指修复企业消耗的外购电力、热力所对应的能源生产环节的碳排放。这部分排放虽不直接发生在修复场地边

界内，但因修复活动的能源需求而产生，是修复碳足迹的重要组成部分。其他间接碳排放涵盖了修复活动中使用的材料（如药剂、钢材等）的生产运输、废弃物的处理处置，以及人员交通运输等环节产生的碳排放。

核算范围的确定需结合具体的修复技术路线。对于异位热脱附修复技术，其核算边界应覆盖土壤开挖、运输、预处理、主处理、尾气处理和最终处置等全过程；对于原位修复技术，则可能更注重能源消耗和药剂使用等环节。碳排放核算的时间边界通常覆盖从修复工程开始至效果评估验收合格的整个周期。在确定核算范围时，还需注意扣除修复过程中回收外供的二氧化碳或其他含碳物质。

3.2 数据的获取

活动数据与排放因子是量化土壤/地下水修复企业碳排放的关键参数，其准确性和可靠性直接决定核算结果的精确度。根据数据来源和质量活动数据的获取可分为3个优先级：高优先级为现场实测数据；中优先级包括施工记录、结算账单、采购清单等文档记录的数据；低优先级则为相似工程类比数据或设计参数。对于前瞻性核算（修复方案编制阶段），活动数据通常基于设计参数和相似工程经验进行预估；而对于过程性核算（修复实施阶段）和回顾性核算（修复评估阶段），则应基于实际监测和记录的数据进行核算。这种区分确保了碳排放核算在不同阶段均可实施，并为修复方案的低碳比选和施工过程的碳减排优化提供了依据。

排放因子是将活动数据转化为碳排放量的关键系数，选择也应遵循明确的优先级顺序：首选地方标准或实测值；其次选国家标准、行业标准或国内数据库提供的因子；最后考虑国际数据库或文献报道的因子。这种优先级排序既考虑了数据来源的可靠性和适用性，也兼顾了不同层级标准的权威性和地方差异性。不同地区的电力结构差异也会导致排放因子的显著不同，必须充分考虑其时效性和地域适用性。

4　结 语

土壤与地下水修复过程的碳排放核算标准建设是行业绿色低碳转型的重要基础。本研究构建的核算框架已基本覆盖修复活动的主要碳排放源，既包括能源消耗的直接排放，也涵盖产业链上下游的间接排放，体现了全生命周期碳足迹管理理念。针对不同修复技术探索差异化的核算方法，为行业提供了核算规范与依据。结合现有技术的局限，提出未来工作的方向：

（1）推动标准统一与细化。各地现有指南在关键要素定义上存在差异，建议形成统一的核算原则，同时允许地方结合实际制定实施细则，实现原则性与灵活性的平衡。

（2）加强数据监测与报告。建立健全企业能源资源消耗的监测、报告与核查体系，推动活动数据收集的规范化。鼓励企业提升监测能力，优先采用实测数据，减少对设计参数或类比数据的依赖。

（3）完善排放因子数据库。建立并定期更新修复行业排放因子数据库，反映能源结构变化与技术进步。鼓励地方开发符合区域特点的本地化因子，避免直接套用全国或国外平均值导致的偏差。

随着“双碳”目标推进与绿色修复理念普及，核算标准体系将持续完善。通过科学界定核算范围、精准收集活动数据、合理确定排放因子，将推动修复行业向更精准、透明、低碳的方向发展，为减污降碳协同增效提供支撑。

参考文献

[1] 骆永明，滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33（2）: 145–152.

[2] Falciglia P P, Lumia L, Giustra M G, et al. Remediation of petrol hydrocarbon–contaminated marine sediments by thermal desorption[J]. Chemosphere, 2020, 260: 127576.

[3] Ambaye T G, Chebbi A, Formicola F, et al. Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and

perspectives[J]. Chemosphere, 2022, 293: 133572.

[4] 李力, 马妍, 史鹏飞, 等. 场地修复技术全生命周期单元过程数据库构建与案例应用[J]. 环境工程学报, 2025, 19(8): 2004-2014.

[5] 刘文晓, 夏天翔, 张丽娜, 等. 基于修复效果的污染土壤修复工程环境足迹分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2368-2377.

[6] 晏井春, 宋静, 孙钰沅, 等. 我国工业场地土壤污染防治十大科技问题与对策[J]. 环境科学研究, 2024, 37(12): 2734-2744.

[7] 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[J]. 土壤, 2023, 55(4): 708-717.

[8] 顾斌杰, 赵海霞, 骆新燎, 等. 基于文献计量的减污降碳协同减排研究进展与展望[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 85-95.

[9] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Geneva: IPCC, 2019.

[10] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Geneva: IPCC, 2006.

[11] ISO 14064-1:2018(E) Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals[S].

[12] 浙江省生态环境厅. 建设用地土壤地下水污染风险管控和修复工程碳排放核算技术指南(试行)[EB/OL]. (2025-10-14)[2026-06-08]. https://minyi.zjzwfw.gov.cn/dczjnewls/dczj/idea/topic_24911.html .

[13] 上海市生态环境局. 上海市建设用地典型修复技术碳排放核算技术指南(试行)[EB/OL].(2025-12-15)[2026-06-08]. https://sthj.sh.gov.cn/hbzhywpt5004/20251218/3ebe6634f77a4ede97a0f1d797aa5c3a.html .

[14] 山东省生态环境厅. 山东省建设用地土壤污染修复绿色低碳评价技术指南(征求意见稿)[EB/OL]. (2024-08-05)[2026-06-08]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhh/202408/t20240809_4750954.html .

[15] 李书鹏, 焦文涛, 李鸿炫, 等. 燃气热脱附技术修复有机污染场地研究与应用进 展[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2037-2048.

[16] Fu J Y, Cai P T, Zhan M X, et al. Formation and control of dioxins during thermal desorption remediation of chlorine and non-chlorine organic contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 436: 129124.

[17] 周实际, 孙慧洋, 李颖臻, 等. 污染土壤稳定化碳排放计算方法及案例研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4840-4848.

[18] 赖欣蕾, 谭斌, 刘昭, 等. 铅污染场地土壤异位淋洗修复技术碳排放特征案例研究[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(5): 1522-1531.

[19] 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.

[20] Wu E X, Wang Q Z, Ke L H, et al. Study on carbon emission characteristics and emission reduction measures of lime production: a case of enterprise in the Yangtze River Basin[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10185.

[21] Kim D H, Hwang B R, Moon D H, et al. Environmental assessment on a soil washing process of a Pb-contaminated shooting range site: a case study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8417-8424.

[22] 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: 391-401.

[23] UK Government. UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting[EB/OL]. (2025-06-09)[2026-06-08]. https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting .

[24] U.S. Environmental Protection Agency. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. (2024-06-05)[2026-06-09]. https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/ghg-emission-factors-hub-2024.pdf .

[25] European Environmental Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019[EB/OL]. (2016-05-02)[2026-06-09]. http://learning-cleanairasia.org/lms/library/ga3/15-EMEP-EEA-air-pollutant-emission-inventory-guidebook.pdf.

[26] 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.

[27] 吴翠华, 于晓华, 高军政, 等. 典型水泥窑协同处置废弃物的碳排放核算及碳减排分析[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 30-36, 60.