



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202206063 中图分类号 X53 文献标识码 A

王文兵, 李春阳, 董纤凌, 等. 双碳背景下污染场地修复策略与技术前景[J]. 环境工程学报, 2023, 17(1): 188-196. [WANG Wenbing, LI Chunyang, DONG Qianling, et al. Strategies and technology prospects for contaminated site remediation in carbon peak and carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(1): 188-196.]

双碳背景下污染场地修复策略与技术前景

王文兵, 李春阳, 董纤凌, 龚天添, 陈汐昂, 张梦, 李辉[✉]

上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

摘要 我国承诺在 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和的目标。在此“双碳”背景下, 我国场地修复行业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。这一转变对未来的污染场地修复提出了新的要求, 即需要全面融入低碳环境服务过程, 注重风险管控、原位治理和节能降耗等。因此, 在设计具体的修复路线时, 应尽量实现修复过程节能降耗减排、逸散性温室气体排放控制和修复后土壤资源化利用等目标。基于这些要求, 传统的原位热脱附技术将面临降低能耗的严苛挑战, 多相抽提技术将面临设备节能降耗挑战, 增溶脱附技术将面临材料研发绿色节能挑战, 土壤淋洗技术将面临药剂绿色挑战等。为实现将低碳目标贯彻污染场地修复过程这一目的, 针对性的措施和技术包括: 技术装备的低碳运行、使用人工智能修复装备、碳排放智能监测计算、场地大数据分析技术、可持续原位生物修复技术、原位风险阻隔技术、多参数实时原位监测技术和土壤生态碳汇技术等。上述方面的优化和转型升级将有望成为未来污染场地修复中新装备及新技术的发展方向。

关键词 人工智能; 碳汇; 低碳节能; 土壤修复; 可持续

工业化为人类生活带来巨大便利的同时, 也产生了环境污染和发展不可持续等问题, 而碳的过度排放是环境问题日益关注的焦点^[1]。为缓解全球变暖和解决相关环境问题, 1992 年, 《联合国气候变化框架公约》^[2]在联合国大会上通过, 该公约提出将温室气体维持在一定的浓度范围, 以确保在该浓度范围内气候不会因人类活动而产生影响的最终目标。在这一背景下, 全球先后通过了《京都议定书》和《巴黎协定》等重要法律文书, 形成了《巴厘路线图》《多哈修订案》和《坎昆决议》等重要决定^[3-6]。其中, 《巴黎协定》确定了全球温室气体排放的长期目标, 即将全球平均气温上升幅度控制在 2 °C 以内(较前工业化时期), 尽力将温度上升幅度限制在 1.5 °C 以内。为了确保上述目标的实现, 联合国政府气候变化专门委员会及其众多国际机构进行了大量科学研究, 各国也相继出台了对应减排政策。

截至 2020 年底, 全球已有多个国家和地区做出了碳中和承诺。2017 年, 瑞典承诺在 2045 年实现碳中和, 并制定净零排放目标; 2019 年, 加拿大总理特鲁多在竞选中承诺净零排放, 并在 2050 年达成碳中和; 同年, 智利宣布将致力于实现碳中和, 法国也将净零排放目标列入法律; 2020 年, 日本和韩国宣布将于 2050 年完成碳中和目标^[7]。与此同时, 中国为实现《巴黎协定》设

收稿日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-11-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1805800, 2020YFC1808200); 国家自然科学基金资助项目(42177386, 41907165, 41907318, 41877377); 上海市学科带头人计划资助项目(18XD1424100); 上海市科学技术委员会创新计划资助项目(19DZ1205300, 19010500200); 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“曙光学者”资助项目(19SG35X)

第一作者: 王文兵(1988—), 男, 博士, 副研究员, zaoanw@shu.edu.cn; ✉通信作者: 李辉(1979—), 男, 博士, 研究员, hui2018@shu.edu.cn

定的目标也做出了积极努力^[8]。2015年9月,中美两国元首共同发表了《中美元首气候变化联合声明》^[9],中国政府承诺于2030年前后实现二氧化碳(CO₂)排放达到峰值^[10,11]。为实现这一目标,中国发布了一系列减排政策^[12]。2016年10月,中国国务院颁发《“十三五”控制温室气体排放工作方案》,方案以有效控制碳排放总量为目标^[13]。同年12月,国务院发布《“十三五”节能减排综合工作方案》^[14]和《能源发展“十三五”规划》^[15],明确了“十三五”节能减排的主要目标和重点任务,全面部署全国节能减排。2018年,生态环境部颁布了《公民生态环境行为规范(试行)》,进一步规范公民低碳出行和绿色消费等行为^[16]。在2020年9月的联合国气候峰会上,中国政府宣布“碳达峰、碳中和”计划,提出“CO₂排放在2030年达到峰值,2060年之前实现碳中和”的战略目标,并在《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》(2021)中作出明确规定^[17]。碳达峰和碳中和不仅是我国在全球气候谈判中的国际承诺,也是中国实现结构转型和高质量发展的必然选择。

1 双碳背景下污染场地修复技术发展现状及趋势

根据国家战略需求,在双碳背景下,未来的场地修复会将低碳全面融入环境服务中,充分降低石油煤炭等高碳能源消耗,削减温室气体排放量,从而达到经济发展和生态环境保护双赢的社会发展形态。场地修复是利用物理、化学和生物的方法对场地土壤和地下水中的污染物进行去除^[18]。然而,以往的场地修复技术存在能源消耗过大、效率不高和造成潜在二次污染等弊端。因此,将低碳概念融入场地修复具有重大意义,未来发展趋势主要有以下几个方面:开发低碳修复技术、技术装备的低碳运行、碳排放智能监测等。

1.1 污染场地修复技术发展现状

1) 国外污染场地修复技术发展现状。美国EPA发布的最新版超级基金修复报告(2020.7,第16版)统计了1982—2017年场地地下水修复技术发展趋势(图1)^[19]。可以看出,抽提处理技术占比则逐年下降(降至22.2%),而生物修复、化学修复和渗透反应墙技术占比呈现动态上升的趋势,其中生物和化学修复技术占比涨幅明显(最高分别达到40.8%和36.7%)。此外,曝气技术占比在1993—1999年间有小幅度的上升(最高达到18.5%),但在1999年后逐渐下降。此外根据超级基金修复报告,2015—2017年,原位修复技术平均占比为51%,而抽提处理技术占比则相对较低,平均占比为20%,低于2013—2015年的平均占比(23%)。因此,原位修复技术仍是目前优先选择的场地地下水修复技术和策略。

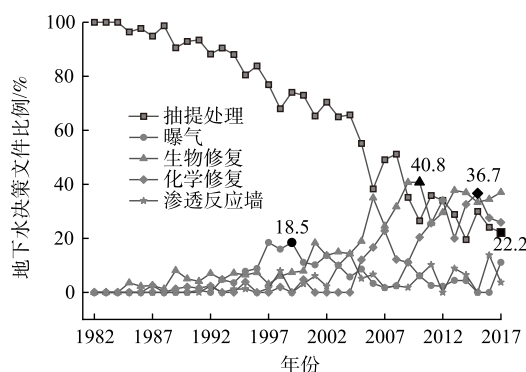


图1 国外场地地下水修复技术发展趋势^[19]
Fig. 1 Development trend of groundwater remediation technologies in foreign sites^[19]

美国超级基金计划发布的地下水修复文件中,关于原位修复技术文件的占比高达51%(表1),其中主要涉及原位微生物修复和原位化学修复技术。在微生物修复的决策文件中(30项),70%(21项)针对厌氧微生物修复;在选择化学修复的决策文件中(26项),73%(19项)针对原位化学氧化技术,30%针对原位化学还原技术(表1)。

2) 国内污染场地修复技术发展现状。我国修复场地主要位于沿海发达城市,以及污染严重的湖南、河北地区。场地污染类型包括有机污染(占43%),重金属污染(占30%),复合污染(占25%)。目前我国土壤修复的治理方式以复合修复为应用重点,其中关键修复技术包括土壤气相抽提、化学氧化还原、热脱附、淋洗与化学萃取^[20]。原位修复技术是我国主要采用的土壤地下水修

表 1 美国超级基金决策文件中的地下水修复技术^[19]

Table 1 Groundwater remediation technologies from decision documents of U.S. Superfund^[19]

修复技术	决策文件数量 (2015—2017)	决策文件占比/%	修复技术	决策文件数量 (2015—2017)	决策文件占比/%
异位修复技术 (P&T)	22	20	多相抽提	4	4
原位修复技术	56	51	曝气	3	3
微生物修复	30	27	固化/稳定化	2	2
原位厌氧微生物修复	21	19	电动力学	1	1
原位生物微强化修复	11	10	淋洗	1	1
原位好氧微生物修复	5	5	植物修复	1	1
其它原位微生物修复	4	4	气相抽提	1	1
化学处理法	26	24	其它原位修复技术	3	3
原位化学氧化	19	17	监测自然衰减	22	22
原位化学还原	8	7	垂直工程屏障	1	1
原位中和	1	1	制度控制	78	71
热处理	6	5	替代水源补给	5	5
渗透反应墙	5	5			

复技术，占比 56% (图 2)，主要包括化学氧化还原、热脱附、固化稳定化和抽提处理技术^[21]。此外，植物修复、动物修复和微生物修复技术因其环境友好性而拥有较好的应用前景。我国场地修复技术虽然发展很快，但仍然存在很多制约性和局限性；最需要加强的是环保设备的创新、绿色修复药剂的制备和低碳修复技术的研发等方面。高效环保设备的研发不仅能提升场地修复效率，而且能促进场地修复技术在全球范围内的进步和发展。除了提升环保设备开发的创新性，低碳修复技术和修复药剂的深度研发也尤为重要，这非常有利于提升污染场地的低碳原位修复效果。

1.2 污染场地修复技术发展趋势

1) 场地修复-低碳技术的开发应用。将低碳概念融入场地修复需开发低碳节能的修复技术。从高能耗的热活化、热脱附等聚焦修复为主转变为聚焦修复和低碳同步考虑，如开发低能耗的植物修复技术、可持续原位生物修复技术、原位风险阻隔技术、多相抽提等场地修复技术和土壤生态碳汇技术^[23]。植物修复技术和可持续原位生物修复技术能够根据场地污染物成分，自由选择合适的植物和微生物进行，实现低能耗和高选择性的场地修复，尽管修复周期相对较物理、化学技术较长，可通过与其他技术耦合等手段进行强化。多相抽提通过真空抽提和提取等手段，能够同时将污染场地有机气体、地下水和油类污染物进行多级分离和修复处理。该技术在高效完成污染物去除的同时对环境影响较小^[24]，但修复过程往往需要投加一定量的表面活性剂。

2) 场地修复-技术装备的低碳运行。将低碳概念融入污染场地修复技术，需要更深入地促进技术装备的低碳运行。技术装备低碳运行主要包括：选材绿色环保、设施结构优化、科学设计人性

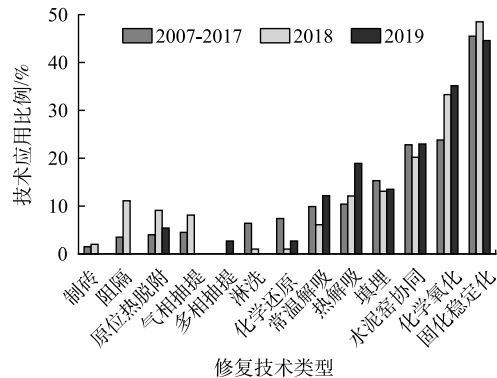


图 2 国内场地土壤和地下水修复技术发展趋势^[22]

Fig. 2 Development trends of soil and groundwater remediation technologies on domestic sites^[22]

化和加强设备的智能化等方面^[25]。《“十四五”工业绿色发展规划》提出大力发展绿色环保装备，提高能源利用效率^[26]。污染场地修复同样必须加速环保设备的科技创新改造，不断革新和研发新装备和新技术，从而实现技术装备的低碳运行，助力碳中和目标的实现。张红振等^[27]研发了绿色修复核心技术装备，不仅制备了绿色原位氧化修复材料能有效缓解土壤和地下水污染情况，高效节能的原位燃气热脱附集成技术还可使能耗降低 30%-40%。此外，构建并完善土壤及地下水系统的风险管控体系和污染监控预警平台，进行多参数实时原位检测，可避免过度修复、粗放修复而导致的二次污染和资源浪费引起的碳排放过度问题。

3) 场地修复-碳排放智能监测计算。实施修复场地碳排放智能监测计算需依托互联网和云计算等技术手段，以信息化系统地实现碳排放的可视化、可量化和智能化分析^[28]。通过采集、监测、分析及管理各类能源消耗碳排放数据能够：①为场地环保设备低碳运行改造提供数据支撑；②对能耗过程与水平、费用支出等进行合理分配，发掘节能潜力；③量化节能减排措施，便于进一步开展场地精细化碳排放管理工作。目前，碳排放智能监测计算的主要难点在于对监测数据的准确度要求非常高，需进一步加强在仪器、点位布置、自动监测等方面的标准化。

2 污染场地修复和固碳增汇途径与策略

2.1 双碳背景下未来场地修复工艺选择考虑因素

1) 修复过程节能降耗减排。中国针对污染场地的修复起步较晚，目前常用的土壤地下水修复技术的实施常伴随着大型设备的使用及电热等强化手段的耦合以优化处理效果，该过程将消耗大量能源。因此，有必要优化修复过程，减少能量的使用和损耗，提高能源的利用效率。

2) 逸散性温室气体排放控制。场地土壤和地下水修复过程中，大型仪器设备的使用会产生和排放大量逸散性温室气体。此外，场地有机污染物在部分修复技术处理的过程中会被分解为 CO₂ 和甲烷等逸散性温室气体。因此，在土壤和地下水污染场地修复过程中有必要对逸散性温室气体的排放进行估算和控制，同时进行收集捕获，从而实现逸散性温室气体的排放控制。

3) 修复后土壤资源化利用。场地土壤修复过程中，涉及污染土壤修复完成后的后续处置，目前污染土壤修复后的资源化利用率普遍偏低。可通过政策引导修复后土壤多途径回收利用，开发相应安全技术，排除行业疑虑，保障产品安全从而形成修复后土壤资源循环利用。

2.2 场地修复和固碳增汇途径

1) 植物捕获 CO₂ 协同生物质低温炭化实现土壤固碳增汇及修复。植物修复作为一种低成本、不破坏生态环境、不引起二次污染的技术在场地土壤修复领域中具有巨大应用前景^[29]。利用植物修复技术将场地有机污染土壤修复与 CO₂ 捕获相联合，实现同步去除土壤有机污染物和吸收大气 CO₂ 的效果。通过低温炭化将成熟植株转化成生物炭返还土壤中，还可以实现大气 CO₂ 的土壤固碳增汇^[30] (图 3)。此外，低温炭化获取的生物炭可用于重金属污染土壤修复，富集重金属后的植株需统一回收处理。

2) 改性强化生物炭形成碳滞留、土壤组分与环境因子人工干预提高土壤修复及碳封存。生物炭是生物质 (如果皮、秸秆等) 在一定条件

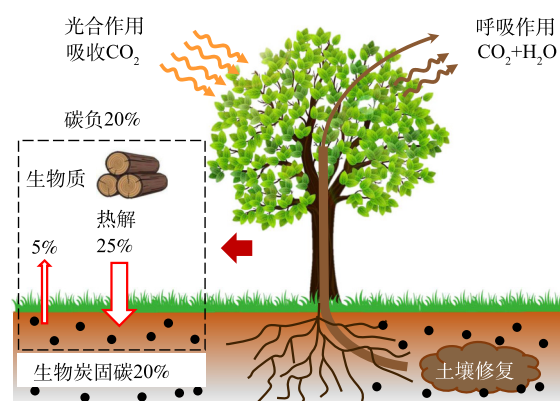


图 3 植物捕获 CO₂ 协同生物质低温炭化实现土壤固碳增汇及修复^[29, 30]

Fig. 3 Achievement of soil carbon sequestration and soil remediation through plant capture CO₂ cooperate with biomass low-temperature carbonization^[29, 30]

下热解炭化形成的固体副产物^[31]。传统方法制备生物炭的生物质炭化率较低,并不能充分利用生物质组分中的碳。因此,可通过改性方法最大程度提高生物质中碳的利用率形成碳滞留。将改性的生物炭投入到土壤中,不仅可以提高土壤的肥力值缩短农作物的生长周期,还可以协同去除土壤中的污染物。XU等^[32]研究发现,秸秆生物炭(SB)、椰壳生物炭(CSB)和污泥生物炭(SSDB)3种生物炭均能显著降低污染土壤中重金属的浸出浓度和酸溶分数。此外,人工碳材料(ACMs)在重金属离子/有机污染物去除与固定、改善土壤理化性质、影响微生物群落效应、提高作物肥力等修复过程中也具有重要意义^[33]。

3) 生物质转化与碳排放固碳潜势智能预测。《3060零碳生物质能发展潜力蓝皮书(2021)》显示,到2030年,我国利用生物质能将减碳超 9×10^8 t,到2060年将减碳超 20×10^8 t^[34]。目前,针对生物质转化与生物质能源碳排放固碳潜势还未有成型的智能预测模型和技术。常用的分析方法仅计算生物质加工生产过程中化石能源的碳排放,忽略了生物质能源利用过程中由于土地利用变化和生物质能源燃烧造成的碳排放,以及生物质利用造成的固碳损失。这使得生物质转化与生物质能源碳排放估计不准确,计算结果不能客观准确的与化石能源的排放进行对比^[35]。对于土壤修复及固碳潜势的定量模型往往局限于单一过程和较小尺度范围,对全过程、大尺度的土壤修复及固碳潜势的定量模型缺乏有效性和准确性。因此,如何构建全过程、大尺度的土壤修复及固碳潜势准确定量模型是亟待解决的问题。刘国伟等^[35]充分考虑了生命周期分析中生物质整个过程的碳排放,提供了一种基于生命周期分析的生物质碳排放估算系统及方法,该系统和方法能够真实的估计生物质碳排放。此外,刘国伟等^[36]还提供了一种生物质能源化利用温室效应的估算系统及方法,该系统及方法同时考虑了生物质加工生产过程中化石能源产生的温室效应和生物质能源利用过程中生物质产生的温室效应,以及植物再生长的抵消作用和固碳差异,能够较真实地估计生物质能源利用产生的温室效应。

4) 人工智能新能源修复装备和智能控制策略协同促进碳中和。基于社会经济活动影响和减排路径的不确定性,碳达峰、碳中和目标的高效精准实现已无法通过单一的技术手段和机械装备完成。人工智能装备的应用不仅可以节约人力,更高效便捷地完成场地修复工作,还将降低人类中毒的风险;新能源修复装备的使用可有效降低污染场地修复碳排放,对我国场地修复转型和能源转型具有重要的意义;智能控制策略的实施则有利于场地修复策略的高效制定和场地修复过程中设备的监控维护。

5) 双碳背景下未来场地修复-碳排放智能监测计算。碳排放智能监测计算是未来场地修复完成减碳目标的前提条件,数字技术可使碳排放智能监测计算集约化、数据化和精细化,为智能监测计算碳排放提供可靠安全的支撑^[37]。场地大数据碳排放智能分析与可视化展示平台的构建,可以实现碳排放信息的双向管理、实时精准监测、碳数据深度挖掘、减碳分析方案提供、碳核算结果智能分析,以保证碳排放管理的精准、规范、全面、智能和高效^[38]。

3 未来行业科学技术研发发展方向

3.1 多学科交叉-场地低碳修复技术路径

场地低碳修复可利用管理学和经济学实现“碳达峰、碳中和”政策管理与核算;通过环境科学与工程、机械科学与工程、材料科学与工程、通信科学与工程完成CO₂捕集转化材料、技术和低碳装备的研发;通过计算机科学与工程可实现碳排放实时监测和双碳实现路径可视化平台的设计(图4)。对于存在重金属污染以及有机物污染的场地而言,可通过利用微生物修复技术实现对污染物的针对性处理^[23],或通过植物修复技术借助各类植物使场地在一定时间内恢复原始生态功能。此外,还有其它的关键场地低碳修复技术途径:植物捕获协同低温炭化实现大气CO₂的土壤

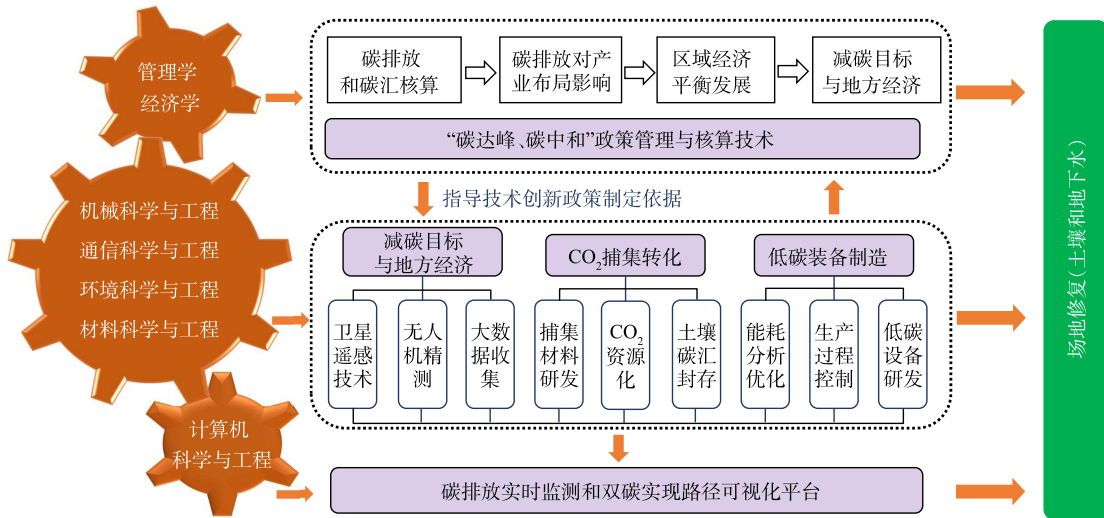


图 4 多学科交叉-场地低碳修复路径

Fig. 4 Multi-disciplinary integration for optimizing site low-carbon remediation pathway

固碳增汇及土壤修复、改性强化生物炭形成碳滞留、土壤组分与环境因子人工干预提高土壤修复及碳封存、生物质转化与碳排放固碳潜势智能预测；全过程、大尺度的土壤修复及固碳潜势定量模型；人工智能装备、新能源修复装备、智能控制策略等协同促进碳达峰、碳中和目标实现。

3.2 未来场地修复行业科学技术发展方向

1) 场地双碳政策管理与核算评估技术。我国颁布的“双碳”政策，表明国家未来的发展必将沿着可持续发展道路前进。地球现有的资源和环境承载能力无法支持各国沿着老的发展模式继续前进。在即将到来的数字化时代，社会经济运行的重要特点之一就是信息的快速、高效流动，迅速捕获社会的需求，并通过快速重组资源配置来创造新价值^[39]。针对场地双碳政策的管理有：场地修复低碳技术的开发应用、技术装备的低碳运行、碳排放智能监测计算。

2) 场地 CO₂ 排放精确监测技术与装备。进入 21 世纪以来，无人机技术凭借其优异的性能和极强的适用性在民用领域得到了广泛应用^[40]。在大气环境监测方面，未来气体监测的重要手段之一就是无人机与大气环境监测耦合技术，该技术可以进行实时、大面积、多层面大气环境监测，能有效弥补传统监测方法存在的弊端。地面传感器观测作为传统 CO₂ 浓度监测手段，受监测范围和监测周期的限制，卫星遥感观测受成本的限制，难以实现高速、精准和低成本监测^[41]。与上述观测手段相比，无人机观测具有高灵活性、强机动性、低成本、大监测面积等优点，可实现对场地不同高度 CO₂ 浓度的实时大面积监测^[42]。AURELL. J^[43] 将六旋翼无人机与气体传感器及颗粒物采样器相结合，构建了一套可以对露天焚烧物所产生的气体以及颗粒物进行监测的系统。ALTSTAEDTER. B 等^[44] 将改装过的溶胶测量仪器搭载在无人机上，可快速获取超微粒在大气边界层的水平和垂直分布。牛记等^[45] 设计了基于六旋翼无人机的 PM_{2.5} 近地层垂直分布测量系统，实现了对空中垂直方向上 PM_{2.5} 分布规律的研究。综上，将无人机系统自身优势与 CO₂ 浓度监测技术结合可以满足近地面 CO₂ 浓度监测的应用需求。

3) CO₂ 捕集与资源化技术装备。吸收法、吸附法和膜分离法是 CO₂ 捕集的主要技术^[46]。将捕集后的 CO₂ 资源化利用是实现碳中和最具潜力、最具实效的途径之一，主要方式包括生物转化、矿化利用、化学品合成等。如何将 CO₂ 捕集与资源化技术装备合理高效地应用于污染场地修复过程是未来场地低碳修复发展的主要方向。

4) 生物质转化与生态碳汇技术与装备。在目前“双碳”背景下，发展生物质将逐渐成为发展低碳经济的一项重要举措，如从水稻秸秆生物质中直接催化生产高价值的 2,5-呋喃二甲酸^[47]。基于生

物质原料的绿色可持续合成生物基材料随着生物质炼制和催化转化技术的进步而不断发展,如“碳基肥”、“生物炭土壤改良剂”、“炭化生物质煤”等,在污染场地土壤修复和土壤封存 CO₂ 中有广阔的应用前景。

5) 场地双碳智能分析与可视化展示。依据国内外“双碳”建设经验,创设基于精细化、专业化监测数据的智慧城市基础设施,精准采集排放数据,实现采集数据的多元化和可视化,从而引导政策制定、场景打造等才是核心基础。场地双碳背景下的智能分析与可视化展示平台利用数字技术介入生态文明建设,融合 AIOT 的数据的采集、汇聚、建模分析、仿真模拟和可视化展示技术,有望成为碳排放数字化动态核算与数字碳中和的重要推动器。未来场地双碳智能分析与可视化展示平台主要有如下 3 个发展方向。首先是碳排放智能监测及决策平台,该平台基于重点行业、产业及家庭碳排放的感知数据,制作碳排放的全景式图像,对碳排放量进行实时监测和可视化;其次是碳排放及治理模拟仿真环境,该技术基于碳中和等治理措施的物理原理,构建生产过程中的碳排放和治理的数字孪生模拟环境;最后是低功耗边缘计算技术,利用低功耗的硬件和绿色能源,助力数据中心节能减排(图 5)。此外,还可以通过研究边云协同的计算任务调度和算力资源的分配算法,进一步优化耗电量,进而降低碳排放。

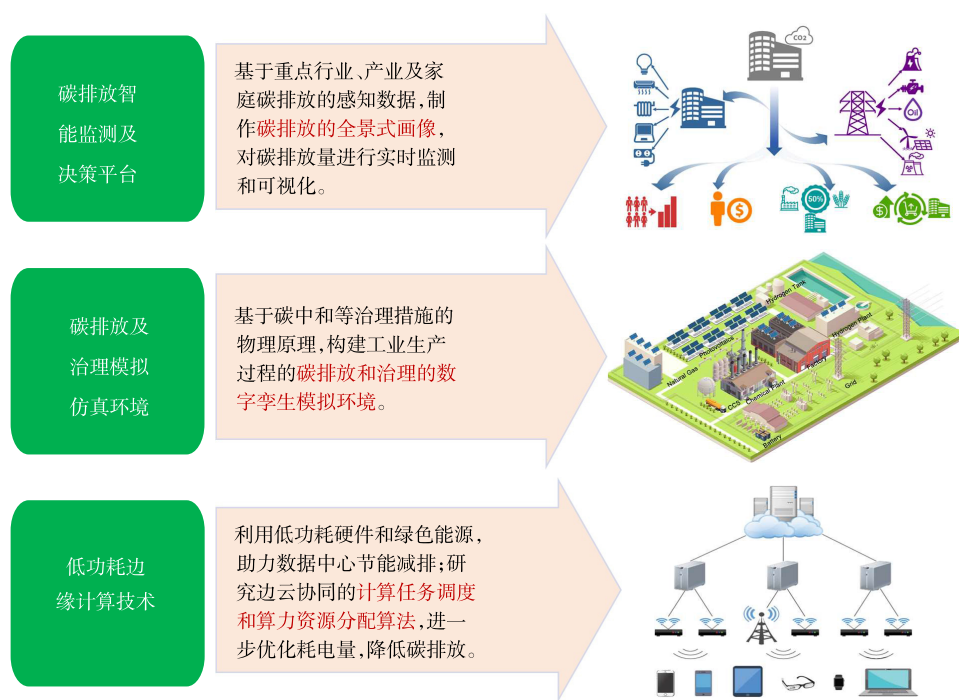


图 5 场地双碳智能分析与可视化展示^[48-50]

Fig. 5 Site intelligent analysis and visualization display for achieving carbon peak and carbon neutrality^[48-50]

参考文献

- [1] 辛靖, 王连英. “双碳”愿景对炼化产业的影响及其路径展望[J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(6): 1-10.
- [2] 联合国. 联合国气候变化框架公约 [EB/OL]. [2022-06-14]. [https://www.un.org/zh/documents/treaty/A-AC.237-18\(PARTII\)-ADD.1](https://www.un.org/zh/documents/treaty/A-AC.237-18(PARTII)-ADD.1).
- [3] 联合国. 多哈修正案 [EB/OL]. [2022-06-14]. https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_chinese.pdf.
- [4] PRAMOVA E, LOCATELLI B. Cancún agreements: Historic step forward or rushed deal?[J]. BOIS ET FORÊ TS DES TROPIQUES, 2011, 307(1): 3-6.
- [5] FRENCH D. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change[J]. *Journal of Environmental Law*, 1998, 10(1): 215-224.

- [6] 联合国. 巴厘路线图[EB/OL]. [2022-06-14]. <https://unfccc.int/process/conferences/the-big-picture/milestones/bali-road-map>.
- [7] 刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施[J]. *阅江学刊*, 2021, 13(2): 48-60.
- [8] GONG W F, WANG C H, FAN Z Y, et al. Drivers of the peaking and decoupling between CO₂ emissions and economic growth around 2030 in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 29(3): 3864-3878.
- [9] 中美元首气候变化联合声明[EB/OL]. [2022-06-14]. http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=537165.
- [10] LI H N, QIN Q D. Challenges for China's carbon emissions peaking in 2030: A decomposition and decoupling analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 857-865.
- [11] XU G Y, SCHWARZ P, YANG H L. Adjusting energy consumption structure to achieve China's CO₂ emissions peak[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 122: 109737.
- [12] YU S W, ZHENG S H, LI X, et al. China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: Evidence from industry restructuring[J]. *Energy Economics*, 2018, 73: 91-107.
- [13] 国务院. “十三五”控制温室气体排放工作方案[EB/OL]. [2022-06-14]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.
- [14] 国务院. “十三五”节能减排综合工作方案[EB/OL]. [2022-06-14]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm.
- [15] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[EB/OL]. [2022-06-14]. http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf.
- [16] 董战峰, 季曦, 刘宇, 等. 碳中和实现路径与政策选择(笔谈)[J]. *阅江学刊*, 2021, 13(3): 5-34.
- [17] 中国中央政治局. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2022-06-14]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [18] 郑红, 陈崇光. 低碳技术在废水治理上的应用[J]. *能源环境保护*, 2011, 25(3): 17-19+41.
- [19] U. S. Environmental Protection Agency. Superfund Remedy Report 16th Edition [EB/OL]. [2022-06-14]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100ZS05.PDF?Dockey=P100ZS05.PDF>.
- [20] 李鑫, 蔡相仪, 吉喜燕, 等. 国外土壤修复专利技术分析与展望[J]. *应用技术学报*, 2021, 21(3): 253-259.
- [21] 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): 11-13.
- [22] 李书鹏. 土壤与地下水修复行业发展报告(2018)[R]. 北京: 中国环境保护产业协会, 2019.
- [23] 张雪峰, 晏闻博. 污染场地土壤修复技术与修复效果评价[J]. *绿色环保建材*, 2021(9): 48-49.
- [24] 高耘飞. 多相抽提—原位微生物联合修复石油烃污染土壤的技术[J]. *化工管理*, 2021(19): 48-50.
- [25] 杨行豪. 环保设施的科技创新改造及应用研究[J]. *皮革制作与环保科技*, 2021, 2(16): 160-161.
- [26] 工业和信息化部. “十四五”工业绿色发展规划[EB/OL]. [2022-06-14]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/5655701/files/4c8e11241e1046ee9159ab7dcad9ed44.pdf>.
- [27] 张红振. 大型复杂污染场地绿色修复与可持续风险管控关键技术及应用[J]. *中国环保产业*, 2022(2): 2.
- [28] 马虹. 智慧能源及碳排放监测管理云平台系统方案研究与应用[J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28(4): 28-31+115.
- [29] 张莹. 植物修复技术及其在环境保护中的运用思考[J]. *生态环境与保护*, 2021, 4(3): 156-157.
- [30] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. *核农学报*, 2013, 27(5): 681-686.
- [31] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(2): 83-89.
- [32] XU X Y, WU Y H, WU X K, et al. Effect of physicochemical properties of biochar from different feedstock on remediation of heavy metal contaminated soil in mining area[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 32: 102058.
- [33] LAN Y B, DU Q, TANG C Y, et al. Application of typical artificial carbon materials from biomass in environmental remediation and improvement: A review - ScienceDirect[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113340.
- [34] 中国产业发展促进会生物质能产业分会、德国国际合作机构(GIZ)、生态环境部环境工程评估中心、北京松杉低碳技术研究院. 3060零碳生物质能发展潜力蓝皮书[EB/OL]. [2022-06-14]. https://www.xdyanbao.com/doc/xg5ohtm23x?bd_vid=10737689387904027249.
- [35] 刘伟国, 彭长辉. 一种基于生命周期分析的生物质碳排放估算系统和方法, CN109544038A [P]. 2019-03-29.
- [36] 刘伟国, 彭长辉, 王猛. 一种生物质能源化利用温室效应的估算系统及方法, CN112508333A [P]. 2021-03-16.
- [37] 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探[J]. *中国科学院*, 2021, 36(9): 1019-1029.
- [38] 吴孟辉. 搭建碳排放智能平台 服务低碳经济发展[J]. *福建质量技术监督*, 2019(4): 10-11.
- [39] 刘晓光. 数字经济背景下的“双碳”政策对产业升级的影响分析[J]. *中国发展*, 2021, 21(S1): 67-71.
- [40] 赵庆展, 张天毅, 陈洪. 小型四旋翼无人机空气质量监测仪设计[J]. *现代电子技术*, 2017, 40(24): 94-99.
- [41] 李扬, 陈宝林, 赵新学, 等. 农田二氧化碳浓度梯度原位同步测量系统优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 138-144.
- [42] 李杨, 马舒庆, 贾小芳, 等. 基于无人直升机探测的北京地区重雾霾天气大气颗粒物垂直变化特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(6): 179-183.
- [43] AURELL J, MITCHELL W, CHIRAYATH V, et al. Field determination of multipollutant, open area combustion source emission factors with a hexacopter unmanned aerial vehicle[J]. *Atmospheric*

- [Environment](#), 2017, 166: 433-440.
- [44] ALTSTAEDTER B, PLATIS A, WEHNER B, et al. ALADINA - an unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer[J]. [Atmospheric Measurement Techniques](#), 2015, 8(4): 1627-1639.
- [45] 牛记, 王仁波. 基于六旋翼无人机的PM2.5低空测量系统[J]. [科学技术与工程](#), 2014, 14(36): 72-76.
- [46] 闫平科, 王来贵. 二氧化碳的捕集及资源化研究进展[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), 2011(6): 4-6.
- [47] CHAI Y Z, BAI M, CHEN A W, et al. Cr-Mn bimetallic functionalized USY zeolite monolithic catalyst for direct production of 2, 5-Furandicarboxylic acid from raw biomass[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2022, 429: 132173.
- [48] TAO Z Y, XIA Q, HAO Z J, et al. A Survey of Virtual Machine Management in Edge Computing[J]. [Proceedings of the IEEE](#), 2019, PP(99): 1-18.
- [49] ZHANG R J, YAO Y, TU L Y, et al. Non-targeted metabolomics of multiple human cells revealing differential toxic effects of perfluorooctanoic acid[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2021, 409: 125017.
- [50] WEI X T, QIU R, LIANG Y T, et al. Roadmap to carbon emissions neutral industrial parks: Energy, economic and environmental analysis[J]. [Energy](#), 2022, 238: 121732.
- (责任编辑: 金曙光)

Strategies and technology prospects for contaminated site remediation in carbon peak and carbon neutrality vision

WANG Wenbing, LI Chunyang, DONG Qianling, GONG Tiantian, CHEN Xi'ang, ZHANG Meng, LI Hui*

College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

*Corresponding author, E-mail: huili2018@shu.edu.cn

Abstract China has committed to hitting carbon peak emission by 2030 and reaching carbon neutrality by 2060. Under the 'dual carbon' background, the direction of China's site remediation industry has transformed from simply pursuing efficiency to emphasizing both carbon emission reduction and efficient remediation. This transition puts forward new demands for future remediation of contaminated sites, namely, it is necessary to fully integrate into the low-carbon environmental service process, focus on risk control, in-situ treatment, energy conservation and consumption reduction. Therefore, specific restoration routes should be designed to achieve as much as possible: energy saving and emission reduction in the remediation process, emission control of escaped greenhouse gases, or resource utilization of soil after remediation. Based on these requirements, the traditional in-situ thermal desorption technology will face the severe challenge of reducing energy consumption, the multiphase extraction technology will face challenges of energy saving equipment, the solubilization desorption technology will face the challenge of developing green materials, and soil leaching technology will face the challenge of developing green agents. To achieve low-carbon goals in the polluted site remediation process, targeted measures and technologies include: low-carbon operation of the environmental remediation facilities, use of artificial intelligence remediation equipment, intelligent monitoring and calculation of carbon footprint, field data analysis technology, sustainable in-situ bioremediation technology, in-situ risk barrier technology, multi-parameter real-time in-situ monitoring technology, and soil ecological carbon sink technology. The optimization, transformation and upgrading of the above aspects will be the development direction of new equipment and technology for contaminated site's remediation in the future.

Keywords artificial intelligence; carbon sink; low-carbon and energy-saving; soil remediation; sustainable