

进展综述

污染土壤修复中心的发展现状及方向展望

籍龙杰^{1,2,3}, 张婧卓^{1,2}, 陈梦巧^{1,2}, 邢轶兰^{1,2}, 孙 静^{1,2}, 李霖倩¹,
牟兵兵¹, 詹明秀³, 周 毅⁴, 焦文涛³

(1. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 2. 污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015;
3. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
4. 广西壮族自治区柳州市生态环境局, 广西 柳州 545001)

[摘要] 污染土壤修复中心作为区域综合处置中心, 具有修复周期短、便于多技术联合应用以及降低修复成本等优势。土壤修复中心模式在国外已有成熟应用, 但在我国仍处于探索阶段。本文介绍了我国土壤修复行业的发展现状及趋势, 梳理了国内外土壤修复中心的建设案例, 分析了国内土壤修复中心发展的适应性、经济性和可持续性, 并从政策、市场、技术和公众4个方面分析了我国土壤修复中心建设所需的支撑条件及可能遇到的问题。最后, 对我国土壤修复中心的发展方向进行了展望, 以期为其建设提供有益借鉴。

[关键词] 污染场地; 有机污染物; 重金属; 土壤修复中心

[中图分类号] X53

[文献标志码] A

[文章编号] 1006-1878(2022)02-0125-09

[DOI] 10.3969/j.issn.1006-1878.2022.02.001

Development status and direction of contaminated soil remediation center

JI Longjie^{1,2,3}, ZHANG Jingzhuo^{1,2}, CHEN Mengqiao^{1,2}, XING Yilan^{1,2}, SUN Jing^{1,2},
LI Linqian¹, MU Bingbing¹, ZHAN Mingxiu³, ZHOU Yi⁴, JIAO Wentao³

(1. Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation Co. Ltd., Beijing 100015, China; 2. National Engineering Laboratory for Site Remediation Technologies, Beijing 100015, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
4. Bureau of Ecology and Environment of Liuzhou in Guangxi, Liuzhou 545001, China)

Abstract: As a regional comprehensive treatment center, the contaminated soil remediation center has the advantages of short remediation cycle, convenient application of multiple technologies and low remediation cost. This article introduces the development status and trends of soil remediation industry in China, sorts out the construction cases of soil remediation centers at home and abroad, analyzes the adaptability, economy and sustainability of domestic soil remediation centers, and analyzes the supporting conditions and possible problems in construction of remediation center in China from 4 aspects of policy, market, technology and the public. Finally, the future development tendencies of soil remediation center in China are prospected to provide beneficial information for soil remediation center construction in China.

Key words: contaminated site; organic pollutant; heavy metal; soil remediation center

随着“退二进三”和“产业转移”等政策的实施, 我国各大城市出现了大量因工厂搬迁导致的污染场地, 引发了一系列环境污染和社会安全问题。YANG等^[1]调研了402块工业场地的重金属污染情况, 结果显示, 铅、砷和镉浓度超过污染控制标准的地块分别占23.1%、23.8%和100%。同时, 土壤中的多环芳烃等有机污染物也呈现逐年累积的

趋势^[2]。污染的土壤可以通过直接接触、呼吸吸入

[收稿日期] 2021-04-16; [修订日期] 2021-12-15。

[作者简介] 籍龙杰(1989—), 男, 山东省临沂市人, 博士, 高级工程师, 电话 13735810897, 电邮 jilongjie@bceer.com。通讯作者: 焦文涛, 电话 13910796093, 电邮 wtjiao@rcees.as.cn。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2018YFC1802100); 中国博士后科学基金面上项目(2019M660823)。

和食品摄入等多种途径进入人体, 有较大的人体健康风险^[3-4]。因此, 急需开展污染土壤修复治理, 降低其对人体和环境的危害^[5-6]。

现有的土壤修复工程依据污染土壤处置位置分为原址修复和异地修复。原址修复虽是目前的主流模式, 但修复施工过程中场地占用时间较长, 且大型修复设备的安装周期较长, 高频次的设备拆装、运输也会大幅降低其使用寿命。结合我国污染地块数量众多、位置相对集中、施工周期短等特点, 建立符合区域污染场地特点, 服务于区域性土地整治与开发, 通过长期运营模式持续开展修复工程服务的污染土壤异地修复中心模式呼之欲出^[7]。修复中心旨在集中快速解决生产生活过程中产生的污染土壤问题, 同时可提供从实验室检测到终端处置及产品综合利用的“一站式”服务, 具有二次污染风险小、环境风险低、污染地块修复周期短等优势, 更适用于区域污染地块集中、需快速进入用地程序的场地^[8]; 且具有多技术联合修复优势, 更适用于复杂污染土壤的修复。日美等发达国家已建成类似的大型土壤终端处置中心, 但国内尚处于探索阶段。

本文首先通过文献分析我国土壤修复行业的发展现状, 梳理出目前修复过程存在的问题, 明确了土壤修复中心建设的必要性; 其次, 通过调研国内外土壤修复中心建设现状和案例, 总结了修复中心发展的基本条件, 同时从政策、技术和市场等方面解析了我国修复中心建设过程中存在的相关问题; 最后, 对修复中心的发展前景予以展望, 以期为国家或者相关从业单位提供有益借鉴。

1 我国土壤修复行业的发展现状及趋势

1.1 我国土壤修复行业的发展现状

随着土壤修复产业的发展, 全国土壤修复项目的数量和修复资金逐年递增。如图1^[9]所示, 仅十余年时间, 土壤修复项目已由2008年的4项飙升至2020年的265项, 且呈现加快增长的趋势。从修复资金规模看, “十三五”期间政府累计投入约281亿元。2020年中央财政安排土壤污染防治专项资金40亿元, 同时, 国家通过地方专项债、绿色基金等多种资金来助力污染防治和生态保护, 促进环保产业发展。据中国环境保护产业协会土壤与地下水修复专业委员会统计, 工业类污染场地修复工程仍是

工程类业务的主体, 2020年工业污染场地修复资金约90.5亿元, 比2019年增长约30%。此外, 中央财政还支持土壤修复行业技术创新的国家重点研发计划项目“场地土壤污染成因与治理技术”, 目前场地专项共计启动76个项目, 项目周期均为3~4 a, 中央财政经费累计拨款约20亿元。另据不完全统计, 修复行业相关从业单位已有23 530家。这些数据均表明修复行业的规模在持续扩大。最终, 土壤修复市场预计可达千亿甚至万亿元^[9]。

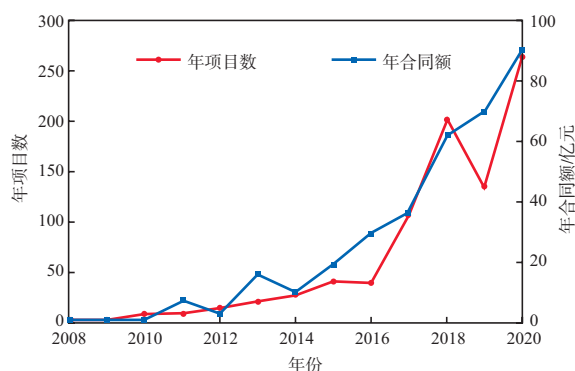


图1 全国工业污染场地年项目数及合同额

依据地域分布, 我国土壤修复项目主要集中在区域环境问题突出或经济较为发达的区域(表1^[5]), 包括京津冀、沪苏浙、两广以及重庆地区, 其中上海、北京、江苏和浙江数量最多^[10]。依据污染物种类划分, 我国总体上以有机污染地块为主, 但不同区域存在差异。较为发达的沿海地区如京津冀和沪苏浙地区有机污染物污染地块数量较多, 西南和中南地区则以重金属污染地块为主^[11]。依据污染场地类型划分, 我国大型污染地块主要为化工、焦化、钢铁和农药污染地块。其中, 化工和农药污染修复地块数量最多, 分别占总大型污染地块数量的42%和31%^[12]。

1.2 我国土壤修复行业的发展趋势

环境修复行业虽然得到了快速发展, 但也暴露了一些问题。未来发展过程中需要进一步落实场地污染责任, 完善行业管理体系建设, 拓展商业模式, 加强技术创新成果产业化水平与成果落地等。其中, 关于创新修复模式的讨论尤为激烈。由于我国对污染土壤外运采取较为严格的管控措施, 外运审批流程复杂, 且外运土壤需进行危废鉴定, 故现有污染土壤的修复倾向于采取原址修复。但原址修复也存在一定局限性, 如修复施工条件苛刻、施工难度大。国内的污染场地数

量众多、污染面积广、污染深度大,且存在复合污染,导致该类场地在修复过程中往往可用于摆放设备的修复区域较小,为施工带来难度。原址修复也不适于开发利用周期短的污染地块的修复。我国约66.7%的土壤修复项目的修复周期短于200 d,约12.6%的修复周期长于500 d^[13]。对于开发周期短

的项目需要对其进行治理以达到用地需求,而原址修复过程基本均需进行密闭大棚搭建、地面防渗处理、设备安装与调试、修复后设备拆除以及配套设施安装等工作,使得本来就短暂的施工周期更为紧张。原址开展土壤修复工作占用待开发土地,不利于土地的快速利用^[8]。

表1 2019年全国工业场地修复项目工程实施情况(共134个)

省级行政区域	修复项目工程实施数量
黑龙江、内蒙古、西藏、陕西、宁夏、河南、福建、台湾、广西、海南、香港、澳门	暂无数据
吉林、辽宁、北京、河北、山西、山东、安徽、江西、四川、甘肃、青海、新疆	1~5个
天津、江苏、浙江、湖北、重庆、贵州、云南、广东	6~10个
上海、湖南	11~16个

鉴于以上原址修复过程存在的诸多问题,目前土壤修复行业也在积极探索新的创新修复模式。部分修复公司已在着手布局以生态为导向的城市发展模式,进行山水林田湖草系统治理,开启“环境修复+开发建设”等多元化发展模式^[7]。技术应用方面,向着多技术耦合系统修复方面发展。工程实施方面,从源头、污染过程、污染修复、修复后安全利用开发以及集成治理全过程开展污染土壤修复工程,也更倾向于向土壤污染协同智慧修复方向发展^[14-15]。同时,少数修复公司也在积极探索采取长期运营的土壤修复中心模式,以期服务于区域性土地整治与开发,持续开展修复工程服务等。

2 国内外土壤修复中心的发展现状

污染土壤修复中心作为区域综合处置中心,具有地块修复周期短、便于多技术联合应用以及降低修复成本等优势。此外,作为多技术集成、智慧化运行的土壤综合处置中心,可以提高修复效率、优化处置工艺、减少二次污染,符合土壤智慧修复趋势。因此,污染土壤修复中心是我国土壤处置智慧化、集成化的一种新的选择,适用于区域污染地块集中、需要快速进入用地程序的场地^[16]。

2.1 国外修复中心发展现状

国外修复中心建设较为成熟,已有多家企业参与发展建设,详见表2。

由表2可见,发达国家率先开展了土壤修复中心治理修复土壤的研究。位于英国北安普顿郡的King Cliffe垃圾填埋场2008年被改造为土壤修复中

心^[17]。为了弥补土壤填埋成本过高、环境影响较大的问题,UK Remediation公司在英国汉普郡的哈万特开设土壤修复中心^[18]。2017年8月,英国伦敦西部建立了土壤修复中心,满足伦敦西部及其周边的土壤修复工程需求^[8]。ERS公司建立的土壤修复中心用来处置污染体积较小、场地需尽快规划施工的污染土壤,且可以节省约80%的成本,土壤中的重金属等无机材料回收利用,碳氢化合物和氰化物等作为能源可持续使用^[19]。Provectus公司将修复中心建在废弃采石场,修复并回收利用各种废弃物^[20]。Watermaiden公司在英国温彻斯特附近设有一个永久性土壤处理中心,污染土壤处理后可在符合许可条件的开发场所重新使用,或在垃圾填埋场作为工程填料使用^[21]。DEME公司于比利时安特卫普港和阿尔贝特运河沿岸分别建立了土壤修复中心,前者目前为欧洲最先进的土壤修复中心之一^[8, 22]。

美国最大的废弃物处置公司之一Clean Earth公司在包括马里兰州、新泽西州、宾夕法尼亚州、康涅狄格州等美国多地建立了土壤修复中心,形成修复网络,保障相关区域土壤污染修复工程需求^[23]。此外,公司位于特拉华州新城堡的土壤修复中心年处理量360 kt,利用热脱附和生物修复技术处理各种挥发性和半挥发性污染物,处理过程中将所有金属和未污染的物料分离回收^[27];位于宾西法尼亚州费城的土壤修复和循环利用工厂利用热脱附技术处理挥发性和半挥发性有机物污染土壤,每天最多处理6 kt^[28]。

Geo-Re公司在日本兵库县尼崎市建设了两个

土壤修复中心，位于近畿地区的中心，高速公路通达，另外还有专门的码头用于接收运送远处污染土壤的船舶。到2019年底，这两个中心已经处理了约2 250 kt土壤^[24]。S.P.E.C.公司在日本的固废与污染土壤修复中心于2017年6月开始营业，外来污染土壤进厂前业主方需提供一份土质分析检测报告，同时配备实验室，具备分析检测重金属类、挥发性有机物类和农药类物质等污染物的能力^[25]。成友兴公司于日本东京超级生态城内建有城南岛第一工厂和第二工厂，是可同时处理污染土壤和废弃物的新型土壤修复中心，污染土壤处理后生成的改质土

壤主要交由水泥厂用于生产水泥^[26]。

国外土壤修复中心的建立大多是为了弥补污染土壤填埋成本较高、环境影响较大、二次污染风险较高的缺陷，将需要进行填埋处置的污染土壤送至修复中心处置^[20]。修复中心处置的污染土壤多来自于规划处置时间较短、缺少处置空间、无法回收利用，或是污染体积较小导致建设设备成本较高的污染地块，处置中心修复后的土壤尽可能在原污染场地原址消纳或回收利用^[19]。由于土壤修复中心需要较大的占地面积且远离市区，其建设选址一般为垃圾填埋场、采石场、矿场等工业废弃场地。

表2 国外土壤修复中心汇总表

国别	运营企业	修复土壤类型	修复工艺	年处置量/kt	文献
英国	Augean	多类型污染土壤	淋洗、生物修复、固化稳定化	100	[17]
英国	UK Remediation	多类型污染土壤	未提及	125	[18]
英国	未提及	多类型污染土壤	生物修复、物理化学淋洗、土壤固化、热脱附	未提及	[8]
英国	ERS	重金属、碳氢化合物和氰化物土壤	未提及	未提及	[19]
英国	Provectus	油性土壤	未提及	未提及	[20]
英国	Watermaiden	多类型污染土壤	未提及	未提及	[21]
比利时	DEME	河道底泥	生物修复、物理化学淋洗、土壤固化、热脱附	60~400	[8, 22]
美国	Clean Earth	多类型污染土壤	热脱附、生物修复、化学固定和物理隔离	未提及	[23]
日本	Geo-Re Japan	多类型污染土壤	淋洗、热脱附	250	[24]
日本	S.P.E.C.	多类型污染土壤	淋洗、水泥窑协同处置	200~300	[25]
日本	成友兴业	多类型污染土壤	固化稳定化	300~400	[26]

2.2 国内修复中心发展现状

我国目前污染土壤多为城市工业企业搬迁后遗留下的大片污染场地，多为聚集性污染地块且远离市区，可以根据国外发展模式在工业园区周边设立修复中心，进行集中处理，以实现修复的高效能、低污染和废弃物资源化利用。但目前土壤修复工作的开展一般根据市场投标机制分地块进行处理，导致土壤修复中心起步较晚，发展缓慢。国内修复中心的建立多源于工业区的开发建设，因工业区开发建设过程中存在大量需要修复的污染地块。

例如，为治理上海宝山南大老工业区，相关部门决定设立“修复工厂”，全过程服务于整个规划区域的开发建设。工厂包括封闭式处置作业区、废气处理区、淋洗作业区、热脱附作业区、污染土堆存区、绿化培植区等功能区域，以对污染土进行集中处理。对于修复后的土壤，分类设定再利用方

式的风险控制标准，经治理达标后进行资源化安全再利用或就地消纳，以降低污染土的环境影响。同时，配备临时实验室，具备技术研发、中试、工程示范的功能。此外，项目组还建立了一整套“全生命周期”的安全利用长期监控系统，以加强对场地污染衰减状况及风险水平的全程跟踪。

修复中心的选址应综合考虑土壤和地下水污染风险、污染物种类、规划用地功能、区域环境条件及地块开发进程等因素，因地制宜建立修复中心，综合处置区域内污染地块。上海桃浦603地块场地面积约 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，修复工作量包括 $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 污染土、 $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 污染水，最大污染深度达14 m，含多种污染物。为了更好地开展污染防治工作，上海建工集团综合考虑污染状况、规划情况等，建立修复中心以全过程服务于整个规划区域的整治开发，对周边区域的污染土壤进行集中修复。

修复中心内集中建立的污染土壤修复大棚专门用来接收桃浦工业区内多个污染地块的污染土壤, 对其进行集中管理处置。这种集中化修复治理模式的有效推行, 节省了修复成本, 提升了修复效率, 降低了二次污染风险, 进一步促进了生态修复的可持续发展。

杭州钢铁集团有限公司厂区污染地块修复企业同样具备修复中心的发展理念。根据前期调查, 杭钢厂区污染土方量超过 $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$, 为保证治理修复效果, 严格做好二次污染防治, 避免处置场地重复建设, 实现污染土壤集中治理, 同时可对厂区及周边区域小型污染场地进行协同处置, 企业通过投资建设以异位直接热脱附工艺为核心技术的土壤治理集中处置中心, 开展后续修复实施工作。

由此可见, 随着国家和社会对土壤污染问题的逐渐重视, 政府将不断完善管理对策和措施, 鼓励技术研发和行业发展。但土壤污染控制在总体上还不能满足国民经济发展和土壤环境保护的需要, 缺少先进的拥有自主知识产权的关键技术和高效的产学研用机制。通过建立国家环境保护集约化土壤修复中心, 加大自主创新力度, 加快提升技术能力, 并实现先进研究成果工程化、产业化推广应用, 对我国土壤环境保护和可持续发展均具有重要意义。

2.3 国内修复中心发展的适应性、经济性与可持续性分析

2.3.1 适应性分析

由于国内污染场地修复设施往往是临时性的, 相应安全设施和环保应急设施比较简陋, 在修复过程中存在处理设施异常引起的超标噪声及废气、废水排放的环保风险, 尤其是污染地块位于城市中心、周边有居民时, 更是有产生环保事故的风险, 严重时直接影响污染场地修复进度。污染场地修复完成后, 在修复过程中使用的一次性材料不可重复再利用, 进一步造成了二次污染影响, 使环保项目反而存在“环保风险”。

土壤修复中心建成后, 大部分有安全隐患和可能产生环保风险的处置工作均在修复中心内部进行。修复中心为永久性污染土壤处理设施, 各项安全设施和环保应急措施非常完善, 可以及时有效地应对各种可能出现的安全生产事故和环保风险事故。另外, 得益于修复中心为永久设施, 在修复过

程中所使用的大部分材料均可以重复利用, 降低了二次污染的影响。

因此, 建立集约化土壤修复中心也是落实《土壤污染防治专项规划》和《重金属污染综合防治规划》等重要规划和决定的具体体现, 是推进技术成果在土壤环境保护领域的应用和发展、解决城市土壤污染治理难题、适应我国经济建设和土壤环境保护事业发展的需要, 在我国建设资源节约型、环境友好型社会中具有重要地位。

2.3.2 经济性分析

我国污染场地治理修复问题正日益受到关注, 随着相关法律法规的强化, 场地治理修复需求正逐步得到释放。随着场地调查工作的全面开展, 在环保政策和标准日益完善、城市建设对土地利用的需求日益迫切等情况下, 全国各地土壤修复业务将迎来爆发式增长。由于污染土壤原址修复技术受工程周期短、舆情压力大、场地施工条件苛刻、修复效果反弹、验收程序繁琐等不利因素影响, 业主倾向于选择快速高效的异位修复技术, 尤其是急于出让开发的、修复体量1亿元以内的中小型污染地块, 土壤修复中心可大幅缩短污染场地的治理周期, 加快污染地块再开发利用的速度, 降低污染场地治理的时间成本, 市场前景非常广阔。同时, 土壤修复中心可为当地居民提供就业岗位, 改善当地土地污染状况, 对保持生态环境、改善投资环境以及工业区面貌具有重要意义。

2.3.3 可持续性分析

以天津市为例, 近两年天津市土壤修复市场份额约为20亿元, 峰值可维持5~6 a。天津市远期具有80余个需要进行详细调查与修复工作的污染地块, 以及157个尚未进行场地调查的污染地块存量市场, 随着污染地块场地调查的陆续开展, 需要异位处理的污染土壤市场供应量依然巨大。土壤修复中心建设主要是为满足日益增长的土壤修复市场异位处置要求, 兼顾土壤修复成果展示、修复技术中试、技术咨询服务。修复中心建成后可为区域污染地块使用权人提供技术咨询、方案设计、异位处置等全流程专业化服务, 协助业主快速完成场地清挖、基坑验收、污染土壤修复等土地出让前的备案工作流程, 缩短地块挂牌上市时间。并通过引进先进的技术/设备和科学高效的运营管理理念, 规范土壤修复市场秩序, 为土壤修复行业提供新颖的商业模式, 推动行业跨越式发展。

3 修复中心建设的影响因素

通过对国内外修复中心发展现状的分析可知,国外修复中心建设已较为成熟,已有多家公司开展修复中心相关业务,且初步构建起修复网络。而我国的土壤修复中心建设还处于起步阶段,与发达国家存在一定差距。从国内外修复中心的发展历程来看,土壤修复中心的建设存在以环境修复公司主导、多种修复技术联合应用、修复后土壤综合利用、中心选址远离居民区等特点。另外,目前未见修复中心对污染地下水进行统一处理的相关报道,这可能是出于经济性的考量。若场地中污染地下水量较小,可以通过现场建设小型集约化、模块化、便携化的污水处理站对抽出地下水进行处理处置;若污染地下水量较大,亦可在土壤修复中心内建设污水处理站,通过管道或车辆运输对污染地下水做集中处置。为进一步推动我国修复中心的建设,需要法规政策、市场环境、技术装备及社会公众等多层面的共同努力与协作。

3.1 法规政策层面

修复中心的建设需要完善的政策法律体系作为支撑,从而规范土壤修复技术的实施和土壤修复中心的建设。欧美国家已出台多部环境治理和土壤修复相关法律标准,如美国1980年颁布《超级基金法》、德国颁布《德国联邦政府土壤保护战略》《土壤保护行动计划》、英国颁布《污染控制法》、荷兰颁布《土壤保护法》等,这些法律侧重于整体的环境保护和场地污染修复,促进土壤污染治理行业的发展^[29]。此外,欧美国家对各层级机构在土壤污染中的权责做了明确界定,如美国环保署作为其国家土壤污染治理的主导机构,各州在法律范围内行使监管责任;加拿大设立跨省协调委员会,推动联邦、省级和地区政府等环境机构间的合作和土壤污染治理的跨部门协调。明确的职责界定和良好的协调机制有利于污染土壤跨区域修复,共同驱动土壤修复中心业务的发展^[29]。同时,各国环境机构保持与私人组织、民营企业、非政府组织的合作,使土壤修复先进技术落到实处。

2010年以来,生态环境部陆续发布一系列法规标准推动我国土壤修复行业的发展。2019年,一系列土壤相关标准导则的出台建立了完整的土壤修复环境标准体系。但政策法规对各环境管理部门的责任尚未明确,如农业部、国土资源部、住建部

等,导致其相互协调不够,造成土壤修复行业发展缓慢,进而影响修复中心的建设。此外,污染土壤外运审批流程复杂,依据《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十一条规定,需要外运处置的土壤在外运前必须进行危废鉴定,若鉴定后不属于危险废物,应制定污染土壤转运方案,并向当地和接受地主管部门报送运输的时间、方式、路线、污染土壤数量、去向等^[30]。对外运的污染土壤属于危险废物的,应遵照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的有关规定运送至具有危废处置资质的相关单位进行处理^[31]。因此,合适的危废鉴定方法和规范的土壤外运流程是修复中心建立的前提。

3.2 市场环境层面

土壤修复中心能否发挥预期作用与国家的修复行业发展、污染地块分布特征、市场环境等因素息息相关。欧美国家土壤修复行业发展约40 a,有较多成熟的修复公司,具有核心优势修复技术和较高的市场占有率,因此更容易开展全国性的修复中心建设业务。欧美国家的修复中心在功能上一般兼顾垃圾填埋场和土壤修复两种功能^[32],在模式上更倾向于网络式发展,建立遍布全国的修复中心以服务各区域的土壤修复业务。

我国的土壤修复行业起步较晚,市场竞争激烈,发展粗放,相关领域的修复公司发展仅十余年。相对于国外,土壤修复的技术和市场均不成熟,业主和修复公司更倾向于选择时间短、见效快的修复技术,忽略修复的环境和社会效益。近些年,综合考虑修复的经济、社会和环境影响的绿色可持续修复逐步成为修复的重点研究方向,以降低过度修复和二次污染风险^[33]。土壤修复中心一方面可以综合多种修复技术,提高修复效率,另一方面可加快用地程序,缩短场地开发利用周期,此外还可重复利用修复设备和资源化利用修复后的土壤,降低成本和环境影响。因此,修复中心在我国有一定的市场前景。企业一方面可以依托大体量的污染地块修复项目来建立修复中心,接收周边污染土壤进行修复,并加强企业间的合作;另一方面可参考日本、美国等的做法,建设遍布全国的修复网络。

3.3 技术装备层面

土壤修复中心的一个重要优势是可以实现多种修复技术协同作用,以修复不同类型的污染土壤。与发达国家相比,我国污染场地具有污染成因

复杂、污染种类繁多、污染程度严重、修复规模大等特点。但我国修复技术的基础理论较为欠缺，尤其是针对多种技术工艺组合的协同修复技术基础研究薄弱；技术应用过于单一，多技术协同应用的修复工程实践经验相对缺乏；与我国经济发展水平相适应的国产化、智能化技术装备相对落后，环保产业发展薄弱。

修复技术与装备是修复中心建设的关键，决定修复中心的修复效率和成本^[34]。以热脱附为例，我国现有热脱附技术装备和工程应用水平普遍存在能耗高、二次污染成因不清、设备智能化模块化水平低等问题，已难满足土壤修复行业的要求。未来，研发具有热回用单元的低能耗、智能化、可快速移动及组装的异位热脱附成套技术与装备，提升我国异位热脱附成套技术与装备的修复能力和能效水平将成为主流趋势。因此，一方面需要大力推动土壤修复的科研进展，研究适应我国土壤性质的本土化修复技术；另一方面，应加强土壤修复设备的研发，掌握设备核心运行参数，为修复技术应用提供坚实保障。

3.4 社会公众层面

我国现在仍然是发展中国家，虽然人民的生活水平、环保意识在不断提高，但各级政府仍以发展经济为主要导向，缺乏对城市土壤环境的关注和宣传。受发展水平、能力等因素制约，民众对城市土壤污染问题认识不足。特别是城市土壤污染具有隐蔽性和长期积累性等特点，若无污染事件发生，在短时间内很难引起公众的关注。这就导致各级政府特别是经济欠发达地区的政府和民众对城市土壤污染问题的认识不足，甚至出现某些企业在遇到土壤污染问题时视而不见的情况。

目前社会公众在国内污染场地修复过程中参与度较低，普遍对污染场地修复治理方法及意义缺乏了解。而原址修复可能缺乏有效的二次污染防控技术、药剂和专业装备，会给场地周边居民带来诸如异味扰民等问题。因此，社会公众应加强对场地修复的重视程度，对污染地块可能产生的环境风险引起警觉，积极举报污染土壤和地下水的不法行为。同时，在场地修复治理过程中，拥有健全的信息交流沟通渠道和机制，保障公众知情权，可有效避免因公众的疑虑和恐慌影响场地修复工程的顺利进行。借鉴国外场地修复公众参与经验，健全国内的污染场地公众参与机制，增加公众的参与度，在

推动污染土壤修复中心的建设过程中十分重要。

4 结语和展望

目前，我国土壤修复中心的建设还处于起步阶段，污染土壤修复更多的以工业污染场地为主，进行原址修复施工，缺少集约化处置平台。国外现有的土壤修复中心大都依托于工业区的开发建设，针对特定的工业区建立土壤集约化处置平台，但在修复中心长期规划、区域综合处置、技术创新方面缺少战略规划。有鉴于此，国内未来的修复中心建设应注重强化修复中心的区域化、资源化、科技创新和人才培养等。

a) 开发区域污染地块综合化处置平台。修复中心处置的污染土壤主要来源于周边城市，因此中心建设、修复技术研发需要调研周边区域污染状况，根据主要污染类型、土壤理化性质、土地规划方式、区域环境条件等因地制宜建设修复中心，选用最优修复技术组合工艺。

b) 打造污染土壤资源化利用平台。资源化利用是修复后土壤的首选利用方式，有助于降低污染土壤的环境影响，促进其循环利用。因此，修复中心未来建设方向之一是作为污染土壤资源化利用产业链关键环节，联通污染地块修复项目和土壤资源化利用业务，依据污染土壤性质选择适合的污染土壤资源化利用方式，促进污染土壤资源化利用产业链的发展。

c) 推动污染土壤修复中心数字化、智能化发展。环保产业的数字化、智能化是未来产业发展的趋势。2017年，工信部发布的《关于加快推进环保装备制造业发展的指导意见》指出，需要加快创新，推动企业数字化、智能化，从而推动环保行业节能降耗以及污染协同处置。因此，土壤修复中心的建设应对接修复智能化，研发智能化修复设备，推动修复过程的信息管理、修复效果可视化、全过程质量控制，在线监管修复情况和设备运行情况，以提高修复效率，降低修复成本。

d) 提供人才交流培养平台。作为污染土壤综合处置平台，修复中心未来需加强与高校、科研机构和合作，促进土壤修复技术创新。与此同时，应作为企业与科研机构的人才枢纽，提高企业修复行业从业人员的技术能力和科学素养，向修复行业输送从业人员。而科研机构也可利用企业对接市场，解决修复行业面临的现实问题以及研发贴近

市场需求的修复技术。

参 考 文 献

- [1] YANG Q Q, LI Z Y, LU X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 642: 690 – 700.
- [2] ZHANG P, CHEN Y G. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: a review [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 605/606: 1011 – 1020.
- [3] LI T K, LIU Y, LIN S J, et al. Soil pollution management in China: a brief introduction[J]. *Sustainability*, 2019, 11 (3): 556.
- [4] NRIAGU J O. *Encyclopedia of environ health* [M]. [S. l.]: Elsevier Science, 2011: 650 – 659.
- [5] 刘阳生, 李书鹏, 邢轶兰, 等. 2019年土壤修复行业发展评述及展望[J]. *中国环保产业*, 2020(3): 26 – 30.
- [6] 张娟, 刘阳生, 李书鹏, 等. 2018年土壤修复行业发展概述及发展展望[J]. *中国环保产业*, 2019(4): 15 – 17.
- [7] 郭媛媛, 江河, 沈鹏. 在我国土壤污染治理中推行“场地修复+”模式的思考与建议[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(4): 126 – 129.
- [8] 李超, 李修强, 金晶, 等. 土壤热脱附技术修复工厂化模式研究[J]. *环境科技*, 2020, 33(1): 45 – 49.
- [9] 李书鹏, 邢轶兰, 张璇, 等. 2020年土壤修复行业发展评述及2021年发展展望[R]. 北京: 中国环保产业协会, 2021.
- [10] 韦伯咨询. 场地修复项目数量金额持续多年增长, 潜在市场规模超千亿[EB/OL]. (2020-05-20) [2021-05-18]. http://www.weibozixun.com/page9?article_id=268.
- [11] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1689 – 1692.
- [12] 孙兴凯, 黄海, 王海东, 等. 大型污染场地修复过程中的问题探讨与工程实践[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(5): 883 – 890.
- [13] 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]. *Sci Total Environ*, 2018, 610/611: 391 – 401.
- [14] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1137 – 1142.
- [15] 张红振, 邓璟菲, 李书鹏, 等. 我国“十四五”土壤生态环境保护发展建议[J]. *环境保护*, 2020, 48(8): 39 – 41.
- [16] 周骏, 闫国杰, 施曙东. 土壤修复技术进展及国外发展趋势[J]. *广州化工*, 2016, 44(22): 12 – 14, 23.
- [17] Augean. Southern soil treatment centre for Terramundo [EB/OL]. (2008-02-25) [2021-05-18]. <https://www.augeanplc.com/2008/02/25/southern-soil-treatment/>.
- [18] UK Remediation Ltd. New soil treatment facility opens in Hampshire[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://ukremediation.co.uk/havant-soil-treatment-facility>.
- [19] ERS. Soil treatment centres[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://www.ersremediation.com/what-we-do/site-remediation/soil-treatment-centres/>.
- [20] Provectus Remediation Ltd. Launch of new soil treatment centre[EB/OL]. (2016-11-29) [2021-05-18]. <https://www.provectusgroup.com/news/2016/11/29/launch-of-new-soil-treatment-centre>.
- [21] Watermaiden. Services - soil treatment hub, Winchester[EB/OL]. [2021-05-18]. <http://www.watermaiden.com/Equipment-Soil-Treatment-Hub.asp>.
- [22] DEME. Technology[EB/OL]. [2021-05-18]. [https://deme-group.com/technology-0?f\[0\]=main_equipment:26](https://deme-group.com/technology-0?f[0]=main_equipment:26).
- [23] Clean Earth. Contaminated soil[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://www.cleanearthinc.com/contaminated-soil>.
- [24] Geo-Re Japan Inc. 施設概要[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://geore.co.jp/equipment/index.html>.
- [25] S.P.E.C.株式会社. S.P.E.C.の工程別処理フロー[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://ecore.tokyo/flow.html>.
- [26] 成友興業株式会社. Plant[EB/OL]. [2021-05-18]. <http://seiyukogyo.co.jp/business/plant/>.
- [27] Clean Earth. New Castle, Delaware soil facility[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://www.cleanearthinc.com/locations/new-castle>.
- [28] Clean Earth. Philadelphia, Pennsylvania soil treatment & recycling facility [EB/OL]. [2021-05-18]. <https://cleanearthinc.com/locations/philadelphia>.
- [29] 罗明, 魏洪斌, 鞠正山. 欧美国家污染土地治理修复政策及启示[J]. *资源导刊*, 2017(6): 54 – 55.
- [30] 韩双. 土壤修复产业现状及发展[J]. *资源节约与环保*, 2019(8): 23 – 25.

- [31] 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2020(2): 414-430.
- [32] Auegan. Landfill and soil treatment centres[EB/OL]. [2021-05-18]. <https://www.aueganplc.com/portfolio-items/landfill-soil-treatment/>.
- [33] 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.
- [34] 陆兵. 浅谈环保设备的现状及发展趋势[J]. 产业创新研究, 2020(16): 120-121.

(编辑 魏京华)



扫码了解更多相关信息