

场地土壤污染物归趋、风险评估和 修复治理研究进展

金芮合, 刘敏*, 何尔凯, 李晔, 黄晔, 杨静, 刘欣然

(华东师范大学地理科学学院地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 随着城市化快速发展与产业结构的调整, “退二进三”政策的实施以及重污染企业地理位置的变迁, 使得多数城市产生大量可再利用再开发的场地。当前场地土壤环境污染状况日益严峻, 对场地土壤开展污染物来源识别, 成因解析和防控管理等已成为场地土壤污染治理修复的研究重点。基于国内外文献, 综述了场地土壤污染物迁移转化过程、风险评估、治理修复等研究进展, 发现场地中污染物的来源、输送的“源—汇”关系和不同介质/界面间迁移转化机制等环境行为的综合性研究有待进一步深化; 风险评估框架与方法仍具有一定的不全面性和不确定性; 绿色可持续联合修复技术已成为土壤修复治理的核心。未来需加强场地土壤“多来源、多途径、多介质、多界面、多尺度”环境过程和机理以及“排放来源、输送途径、迁移转化、动态累积”生态风险评估的系统研究, 发展绿色可持续修复功能材料和技术, 以期为我国本土场地土壤污染防治管理与修复治理提供依据。

关键词: 场地土壤; 迁移转化; 风险评估; 修复治理

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)02-0492-10

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2021081802](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2021081802)

金芮合, 刘敏, 何尔凯, 李晔, 黄晔, 杨静, 刘欣然. 场地土壤污染物归趋、风险评估和修复治理研究进展 [J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 492 - 501

JIN Rui-he, LIU Min, HE Er-kai, LI Ye, HUANG Ye, YANG Jing, LIU Xin-ran. Research Progress on Fate, Risk Assessment and Remediation of Site Soil Pollutants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 492 - 501

“棕地”的概念最早于 1980 年美国《环境应对、赔偿和责任综合法》提出^[1], 1994 年美国环境保护局明确定义为“因含有或可能含有危害性物质、污染物质或致污物质而使扩张、再开发或再利用变得复杂的不动产^[2]”。我国学者将具备“棕地”共同特征的土壤称为“场地”。随着工业化和城市化的快速发展, 在产业结构调整和城市发展转型的过程中, 产生大量遗留、遗弃场地。据相关研究统计, 美国目前存在超过 45 万块场地^[3], 中国为 30 万~50 万块^[4], 场地土壤的环境污染问题日益严峻, 严重威胁着人体健康和生态环境安全。为缓解城市环境压力、解决城市用地紧张等问题, 场地土壤的管控治理与改造利用成为各国城市经济转型后再复兴的重要议题^[5]。国际上, 美国拉夫运河污染事件和荷兰莱克科克污染等事件的发生, 推动了美国超级基金法案和荷兰《土壤保护法》等一系列土壤污染防治措施和法律法规的制定^[1], 为加强土壤污染源控制、污染途径阻

断和污染修复提供政策依据和法律保障。为进一步提高污染物风险分级和管控治理, 欧美发达国家综合考虑污染物毒性、场地检出率等因素制定了优先污染物筛选原则。美国先后建立了国家优先控制场地名录 (NPL) 和场地土壤优先污染物名录 (SPL)^[6], 目前已涵盖 275 种污染物。近年来, 我国土壤环境状况总体不容乐观, 与大气和水相比, 土壤污染具体呈现出污染物类型多样、新老污染物并存和无机—有机复合污染等特征^[7]。为应对我国严峻的土壤污染形势, 我国政府虽然相继出台了《土壤污染防治行动计划》和《土壤污染防治法》等法律法规和文件, 并通过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准 (试行)》对 85 种污染物制定了管控标准。但对场地土壤污染源识别、成因解析和管理防控等研究较为薄弱, 需进一步强化。因此, 本文基于大量的国内外文献, 在梳理了场地土壤污染物归趋、污染机理、风险评估、修复治理等研究现状的基础上,

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-12-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1806700) 资助

作者简介: 金芮合 (1997-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为污染场地土壤归趋与修复。E-mail: jrh2016416971@163.com

*通讯作者: E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

对其研究趋势进行了展望, 以期为落实国家“土十条”, 实现场地土壤污染风险管控与安全利用提供理论基础和依据。

1 场地土壤污染物的研究现状与进展

1.1 场地土壤污染物的迁移归趋

土壤污染物迁移归趋行为的研究是为场地土壤提供精细化管理与污染综合防治的关键环节。在场地土壤差异大、多样化和复杂性等特点的前提下(图1), 利用不同技术手段追踪特征污染物从源到场地污染形成过程, 揭示其源—流—汇动态平衡机制; 阐明污染物跨介质迁移、转化、累积和降解等生物地球化学关键环境行为; 基于污染物在土—水、土—气界面上的竞争吸附行为及机理, 探讨分配作用和表面吸附与土壤理化性质和污染物性质之间的关系对其分配、吸附和跨介质等行为的影响成为场地土壤污染物迁移归趋行为的研究重点。基于土壤和地下水高度相关性, 国内外学者就场地中污染物的来源、输送的“源—汇”关系和不同介质/界面间迁移转化机制等环境行为展开了大量的研究。

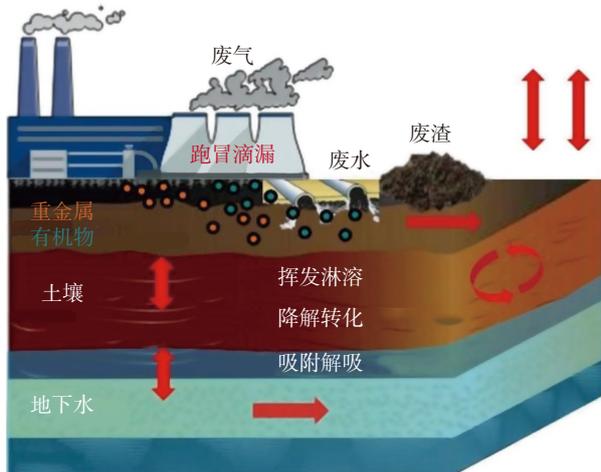


图1 场地土壤污染特点

Fig.1 Characteristics of soil pollution in sites

(1) 场地土壤污染物多界面传质过程和迁移转化机制。近年来, 主成分分析、聚类分析、回归分析等统计学分析方法被广泛用于确定污染物在土壤与地下水体系中的化学成分和总污染水平, 从而解析了场地土壤污染物的溯源^[8-9]。为模拟污染物在场地多介质间的传质机制和迁移转化, 通过采集污染土壤原位土柱, 设置室内和室外吸附、降解等模拟实验, 分析了土壤的组成、性质和环境条件对污染物在大气干湿沉降^[10]、地表径流输送^[11]、土壤挥发/

渗漏^[12]、植被吸收^[13]等分配吸附、降解转化^[14]、多介质/界面等行为的影响。利用先进的同位素示踪—原位形态表征技术追踪污染物从源到场地污染形成的不同排放来源、途径和多介质环境行为过程, 对场地土壤进行多来源、多途径污染物的定量源解析。例如, 单体稳定碳同位素示踪土壤多环芳烃来源^[15]、多元同位素混合模型解析土壤重金属来源及其贡献^[16]。虽然, 同位素示踪—原位形态表征技术的发展和运用实现了从微观尺度上精确解析场地土壤污染来源特征和源汇关系, 但目前已有的同位素研究多集中于单一类型污染物, 针对多种污染物复合污染的同位素示踪体系亟待建立, 缺乏场地土壤污染成因、过程机理和定量化解析的深入性研究。

(2) 场地土壤污染物多界面/介质累积和多尺度归趋模拟。为突破实地采样监测数据质量、采样代表不确定性和难以反映场地污染历史信息 and 未来趋势的局限性^[17], 采用加拿大特伦特大学开发的环境多介质模型可预测污染物在不同尺度环境介质中的累积过程和时空分布^[18]。经过多年发展, 环境多介质模型在规模上由整体发展到局部, 介质从少到多, 成为具有多门类、多功能的环境评价工具^[19], 常见的有EQC模型和SimpleBox模型等(表1)。Johannessen等^[21]在土壤、水和空气中化学排放量相等的情况下, 基于EQC模型模拟发现了HMMM在土壤和水之间的持久性随甲氧基的损失而降低, 范围55~73天。虽然上述模型在全球、区域或局部等大尺度范围内模拟环境多介质污染质迁移转化过程等领域得到了广泛运用, 但是对于场地、园区等小尺度土壤污染质多介质迁移转化和累积过程的评估存在局限性。当前广为采用GMS和Hydrus模型模拟土壤及含水层污染物物理、化学、生物多过程耦合反应过程^[25]。邓一荣等^[26]运用GMS模拟发现, 在垂向上因重力分异浮苯迁移速度较小, 溶解态苯靠地下水驱动力作用其迁移速度较大。李玮等^[27]通过Hydrus-1D模型, 模拟了多环芳烃萘、菲随灌溉水在包气带中的迁移衰减反应过程。为满足场地精细化模拟需求, 降低现场观测和室内试验等精细完整的数据及详细的场地历史信息的获取难度, 在Hydrus模型的基础上发展了Hydrus-site模型, 具体分为1.0和2.0两个版本(图2)。对于关闭多年, 大部分建筑物已拆除, 无法现场判断厂区工艺和污染物质泄漏状况, 只可获取土壤基础环境数据和污染观测数据的场地可使用Hydrus-site-1.0模型。Hydrus-site-2.0模型适用于在产或模拟场地污染的实验区, 大部分建筑物保存完

好，可判断工艺流程和污染物泄漏情况的开放场地。虽然 Hydrus-site 模型成功降低了精细完整数据的获取难度，但相关研究表明^[28-29]，目前场地小尺度的环境多介质模型多模拟污染物的多尺度静态过程，且模型分辨率往往以公里为单位，难以模拟场地和园区尺度污染物多介质污染水平及迁移累积的动态过程，后期可以通过构建基于土壤—地下水—地表水—

大气—植被系统输入—输出动态平衡场地土壤污染物迁移、转化和累积模型，耦合 GIS 技术对研究区域进行高精度空间网格划分，综合考虑土壤污染物迁移途径、时空分布、排放源强和水文地质条件等区域差异性，结合网格化污染源排放数据、污染物理化性质参数、运移扩散参数和环境系统参数，构建园区尺度高时空分辨率网格化模型进行解决。

表 1 环境多介质暴露评估模型主要功能和机理^[20,22-24]
Table 1 Main function and mechanism of environmental multi-media exposure assessment model

名称 Name	用途 Use	机构 Institution	介质 Medium	区域 Area	输入参数 Input parameter	输出参数 Output parameters	过程 Process	污染物质 Pollutants
EQC	化学品在环境多介质中的分配和归趋评估	加拿大环境建模和化学品中心	大气、地表水、土壤、沉积物	区域	化学品介质间分配系数	介质间通量、浓度分布	湿沉降、蒸发、沉淀	有机化学品
SimpleBox	化学品在环境多介质中的分配和归趋评估	荷兰公共卫生与环境研究所	大气、水、沉积物、土壤	区域 洲际 全球	环境参数	归趋分布、各介质浓度	降解（气、水、沉积物、土壤）；平流（气流、水流、土壤径流、洋流混合、干湿沉降）；扩散（气—水，气—土，沉积物—水，土壤—水）	有机化学品
GMS	化学品在地下水中分配和运移的数值模拟	美国Brigham Young University环境模型研究实验室和美国军队排水工程试验工作站	地下水	区域	河流水位、河床高程、补给系数、降雨量、补给量、渗透系数、垂直各向异性系数、土壤单位体积容重、纵向弥散度、污染物浓度、吸附常数、有效孔隙度	污染物范围 和浓度	蒸散、补给、排泄、降解、对流、弥散	有机化学品
Hydrus	水流、溶质、热和CO ₂ 运移和反应模拟	美国农业部、盐碱实验室等机构	饱和及非饱和介质	区域	土壤理化性质、污染物环境过程、边界条件、模型内部参数	污染物浓度范围、反演优化参数、水和污染物的通量，土壤水分特征曲线、含水率变化曲线等	传导；对流—弥散；扩散；降解；吸附	有机化学品

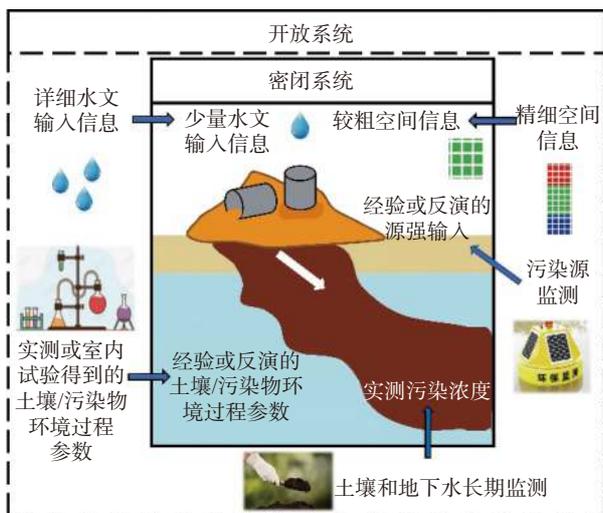


图 2 Hydrus-site 模型应用
Fig.2 Hydrus-site model application

1.2 场地土壤污染物的风险评估

风险评估是场地污染防治管控、确定修复

目标和安全利用的重要依据^[30]。美国《超级基金法》的颁布^[31]、国际上首部场地污染生态风险评估指南（EPA/540-1-89/001）的发布^[32]以及欧盟“污染源—污染途径—风险受体”场地污染风险评估思路^[33]的提出皆为各国场地土壤污染风险评估技术指南提供了理论基础和构架。基于此，国内外学者针对场地土壤污染的特点，开展了风险评估框架、评估方法和模型分析等方面的研究，以推动我国场地土壤污染风险评估技术指南的建立，实现场地土壤污染的精细化管理。

（1）场地土壤污染物的风险评估框架。由于场地土壤污染的高度空间异质性等特点，在进行风险评估时应考虑其实际针对性，通过采用随层级由低到高，所获信息数量与质量逐步增强，不确定性逐渐降低，所容许不良效应水平有所改变，并充分展现风险要素之间关联性的层级法是解决场地土壤污

染风险评估针对性问题的关键方法^[30]。当前,国际上多采用美国 USEPA 三步法标准框架(图 3)作为场地土壤污染风险评估框架的基本框架,主要由问题形成、暴露效应分析和风险表征三部分组成^[32]。各国为解决场地土壤污染风险评估的实际针对性特征问题,因地制宜制定了各种采用野外调查等方式作为最终评估的层级递进式评估框架^[34-35]。

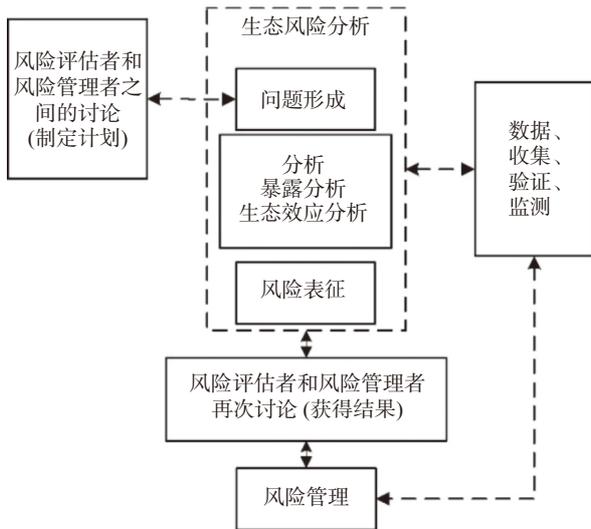


图 3 美国 EPA 生态风险评估标准框架^[32]

Fig.3 Standard ecological risk assessment framework of US-EPA

(2) 场地土壤污染物的风险评估方法。纵观场地污染风险评估技术的发展,风险评估方法和风险表征手段逐渐由单一走向耦合,当前国内外学者大多采用“证据—权重法”^[36]中的定性权重分析法、半定量权重分析法和定量权重分析法等^[37]将土壤化学参数、生态毒理学参数、生物生理生化参数以及生态学参数与参考值对比,获得相应的风险指数,根据权重获得的整体风险指数对场地土壤污染进行整体风险评估。但这些评估方法由于无法确保数据质量、存在主观判断差异和缺乏统一计算标准等问题难以满足实际场地土壤污染的风险评估要求^[38]。为创建一套适用于场地土壤污染复杂条件下的风险评估体系,后期可将 EPA 四步法和层级法进行耦合,改进“证据—权重法”风险评估体系,在一定程度上增强数据的客观真实性。

(3) 场地土壤污染物的风险评估模型。在风险评估框架中,模型构建是问题分析的基础环节,也是实现场地土壤污染物风险评估的关键内容。就目前而言,国内外学者大多应用 EUSES 模型和 Cal

TOX 模型等(表 2)评估场地土壤污染物对人体健康和生态环境的风险。例如:Ti 等^[40]评估得出目前镀铬厂周边水体中 F-53B 的浓度接近 0.7 mg L^{-1} ,若其使用不受控制,到 2020 年将达到 2.3 mg L^{-1} ,对水生环境产生潜在风险。然而,上述模型的输入数据质量控制模块和过程公式解析方面还有待进一步完善。EEMMS 模型(图 4)是一种通过考虑区域时空尺度上的源、空气质量、非饱和带、地下水四个子模块模拟解决复杂多媒介环境中污染物去向和迁移过程等问题,并能够协助管理污染过程中产生环境影响的风险评估工具^[43]。Yuan 等^[44]运用 EMMS-MCM 模型评估垃圾填埋场中苯浓度对周边环境的风险影响,验证其可以准确的评估土壤和地下水之间污染物迁移扩散的长期风险水平。虽然该模型在输入数据和过程公式等方面进行了改善,但仍具有一定的不确定性、不全面性和时空局限性^[45],缺乏多个污染源浓度与不同环境介质间污染物复杂物理化学过程的动态模拟。美国 EPA 提出的通过三维立体形式直观反映污染物释放和迁移至潜在受体使人群和环境发生污染暴露的动态过程^[46]的场地概念模型(CSM)成为污染场地管理和治理修复的重要模型之一。相关研究发现^[47-48],在借助 RBCA、CLEA 等国外模型研究场地土壤污染物风险评估的过程中,模型中部分参数与我国场地污染实际情况不相符合,最终影响场地风险评估的结果。为此,国内学者开发了场地健康与环境风险评估模型(HERA)对有机物—重金属复合型污染场地土壤中苯和甲苯的分层修复目标值开展了多层次风险评估^[50-51]。虽然该模型适用于我国场地土壤污染物的风险评估,但是只对一种污染物筛选值进行推导和比较,筛选值的确定还需考虑当地的土壤背景值等因素^[52]。

1.3 场地土壤污染物的治理修复

2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明,工业化的不断发展在推动国家经济发展与提升人类生活水平的同时,也对人体健康和生态环境造成了严重的危害^[53]。加快场地土壤污染物的修复治理成为城市可持续发展与复兴的基础保障,但是场地土壤理化性质、水文气候条件和污染类型的不同,使得场地土壤污染物修复工作极具挑战性。针对目前土壤污染严峻的现状,国内外学者在解析了当前常见的土壤污染物修复技术类型的基础上,进一步探究了不同场地土壤污染物修复技术的应用,为后

表 2 源排放风险评估模型主要功能和机理^[39,41-42,49]
Table 2 Main function and mechanism of source emission risk assessment model

名称 Name	用途 Use	机构 Institution	介质 Medium	区域 Area	输入参数 Input parameter	输出参数 Output parameter	过程 Process	局限性 Limitation
EUSES	化学品在环境多介质中的分配和归趋评估	欧盟联合研究中心	大气、土壤、地表水、地下水、沉积物	局部区域 全球	区域基本信息(面积、人口、等)、环境参数(土壤密度、介质间的传质系数等)、化学品属性	归趋分布、各介质稳态浓度、迁移转化速率	降解(气、水、沉积物、土壤); 平流(气流、水流、土壤径流、洋流混合、干湿沉降); 扩散(气-水, 气-土, 沉积物-水, 土壤-水)	无输入数据质量控制模块, 某些过程公式需要进一步完善, 未考虑农药和杀生物剂风险
Cal TOX	污染场地的多介质暴露及健康风险评估	美国劳伦斯和伯克利重点实验室	大气、地表水、表层土壤、根际土壤及包气带土壤沉积物、植物	区域 洲际	化学品属性(分子量、 K_{ow} 、蒸汽压、水溶解度、pKa、降解速率、熔点)	介质暴露浓度和人体保留浓度	降解(气、水、土壤); 平流(气流、水流、土壤径流、淋溶、干湿沉降); 扩散(气-水, 气-土, 沉积物-水, 土壤-水)	不可用于表明活性剂和挥发性金属, 存在时间、空间范围限制, 仅适用于水体占比不超过10%的环境系统
EEMMS	多尺度、组分、相态污染物运移模拟与风险评估	加拿大康科迪亚大学	大气、非饱和带、饱和带	区域	区域空间信息、特定化学物质环境数据、土壤理化性质、污染排放特征	地面以上环境大气污染浓度、地下水水位污染物浓度和流入质量流量、潜在受体污染物浓度	对流、扩散、弥散、吸附、生化反应衰减、放射性衰变	未考虑温度和压力效应等复杂物理过程; 未验证多个来源污染物浓度的迁移过程
HERA	污染场地健康与环境风险的风险评估与修复	中国科学院南京土壤研究所污染场地修复中心	土壤、地下水	区域	污染物浓度、土壤理化性质、厚度与深度、地下水埋深、人体暴露参数、污染物毒理学及理化性质参数	介质暴露频率、浓度和人体保留浓度、物质在系统内停留时间	预先设定目标污染物的风险水平(TCR), 再通过实测和既定毒理学参数、污染物对人体的主要暴露途径和主要受体的特征参数反推污染物筛选值	模型只对一种污染物选值进行推导和比较, 土壤筛选值的制定还需要考虑当地的土壤背景值等因素

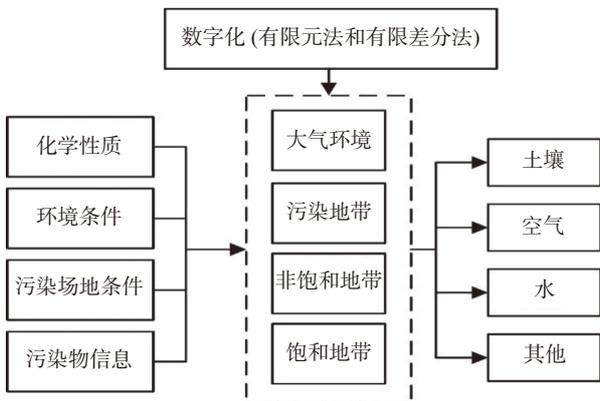


图 4 EEMMS 模型概念图^[44]

Fig.4 Conceptual diagram of EEMMS model

期场地土壤污染物质的修复治理提供科学参考。

(1) 场地土壤污染物主要类型。土地利用方式的不同导致土壤污染来源、途径以及特征的差异, 在城市化、工业化加速发展的过程中, 常见的场地土壤污染(表 3)主要有矿区土壤污染、化工区土壤污染和复合型土壤污染类型^[54], 针对场地土壤的使用和污染特征选择合适的修复治理技术成为有效修复土壤污染的核心。通过改变土壤中污染物的存在形态或结合方式, 降低污染物在土壤中的可迁移性和生物可利用性及浓度的土壤污染修复技术, 常见的有物理修复、化学修复、生物修复和联合修复等方法^[55-58](图 5)。

(2) 场地土壤污染物物理修复技术。物理修复

技术是通过物理手段分离或固定土壤中污染物, 从而使土壤中的污染物得到有效控制的技术^[59]。客土、换土、深耕翻土等传统技术, 不仅工程量大且仅适用于小尺度区域的土壤修复治理。借助热介质对污染土壤进行直接或间接加热, 使污染物挥发、分离或裂解的热脱附技术^[60]成为目前最受欢迎的物理修复技术之一。谢炳坤等^[61]、Yuan 等^[62]实践证明了原位电热脱附对 PAHs 具有良好的去除效果, 去除率达到 99.99% 以上。电阻加热技术也被广泛应用于 VOCs 修复, 研究发现该技术能快速地从渗流区和饱和区中去除挥发性有机物, 处理深度可达 40 m, 且受土壤异质性影响小^[63]。虽然该技术修复效率较高, 使用范围较广, 但对污染物缺乏针对性, 对土壤有机质结构破坏较大, 试剂渗透效果也会受到土壤理化性质影响^[64]。于鑫娅等^[65]准确评估了微波修复后的场地石油烃污染土壤黑麦草发芽率、高度等皆大于修复前土壤, 而根伸长指数明显小于修复前土壤, 急性毒性效应和生态风险均明显减弱。

(3) 场地土壤污染物化学修复技术。借助化学剂将土壤中的有害污染物通过氧化还原、离子交换等化学反应转化为低毒产物或进行分离的化学修复技术, 通过改变污染物在土壤中的赋存形态实现场地土壤污染的治理修复。Monfort 等^[66]研究发现了高铁酸盐在脱碳土壤中降解 PCBs 效率比原土中的效率提高 15%。Yang 等^[67]通过电极吸附提取与使用低分

表 3 不同场地土壤污染类型特征、来源和代表物质^[54]
Table 3 Characteristics, sources and representative substances of soil pollution types in different sites

类型 Type	特征 Characteristics	来源 Source	污染物 Pollutant
矿区 (重金属污染)	重金属本身不可降解; 不可通过焚烧等方法去除; 对土壤中的生物造成一定程度的损害。	冶炼、电镀、塑料、采矿等行业生产过程中产生的含有重金属的废料。	As、Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg、Cr等。
化工区 (有机物污染)	具有自己的特性; 可以通过微生物进行降解; 对土壤危害极大。	农药生产、石油化工、染料生产以及电子废物回收等行业生产的有机化学品。	多环芳烃、多氯联苯、多溴联苯醚等。
复合型污染	污染源众多, 修复处理难度增大。	含重金属废料排放和有机化学品的污染。	既包括重金属物质, 又涉及有机污染物。

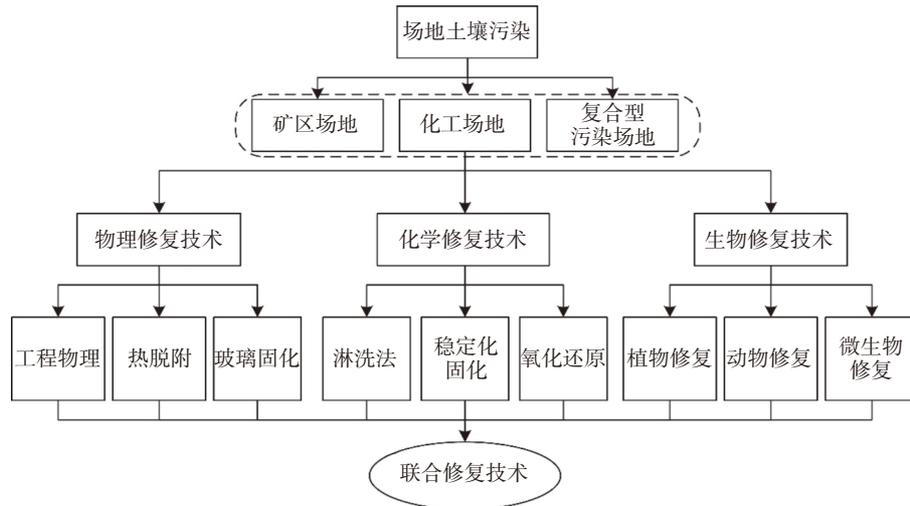


图 5 场地土壤污染修复技术
Fig.5 Site soil pollution remediation technology

子量有机酸去除土壤中的铜和锌实验, 得出柠檬酸盐对于铜和锌的修复效果更好。Zhai 等^[68]进一步提出 FeCl_3 能去除土壤中 6%~20% 的重金属且对镉的去除效果优于柠檬酸盐。然而, 化学修复技术不仅存在流程长且处理费用高等问题, 还有可能造成土壤、地下水的二次污染。

(4) 场地土壤污染物生物修复技术。利用土壤中土著或外源生物的代谢功能进行降解, 借助细胞分泌的胞外酶或吸收后由胞内酶进行处理, 将矿山、垃圾填埋场等场地中有机污染物转化成无污染物的生物修复技术已成为高效、经济和环保的修复手段^[69]。Shanker 等^[70]研究证明微生物通过自身生长代谢过程中分泌的胞外聚合物及铬还原酶等代谢产物, 通过粘附/还原铬离子的方式, 将高毒性的 Cr(VI) 还原固化成低毒性的化合物沉淀。同时, 微生物利用或转化有机物也是场地有机物污染降解修复的主要技术之一^[71]。例如, Yang 等^[72]发现当 $\text{pH} = 7.2$ 时, *Dehalococcoides mccartyi* (Dhc) 还原性脱氯活性最强, 通过转化氯代有机物的方式降解修复场地污染。生物修复技术不仅实现了绿色环保, 对污染物的专一性, 还在很大程度上降低了对土壤理化性质的破坏

及要求, 但环境因素对生物活性的影响较大^[73]。

工业生产过程中产生的污染物类型并非是单一存在的, 往往会涉及到多种污染物共存, 单一土壤修复技术往往难以达到理想的治理修复效果, 因此多种土壤修复技术相结合的联合修复技术成为场地土壤污染修复领域的研究热点和发展方向^[74]。将土壤淋洗、热处理、化学氧化等物理化学修复技术与生物修复技术耦合, 结合不同修复阶段的关键参数, 提高复合型场地土壤污染物的治理修复效率^[75]。例如, 在微生物和化学技术联合修复层面, 施加适当电场可以提高嗜酸性氧化亚铁硫杆菌对污染土壤的重金属脱除率^[76]; 将过氧化氢和过碳酸钠活化过硫酸钠与铜绿假单胞菌联合, 发现经化学氧化后再进行的生物降解率提高了 5.96%~12.08%^[77]。此外, 陈浮等^[78]通过 PBC 和 TPBC 生物炭与小白菜—黑麦菜—小白菜 3 季连茬种植实验, 发现了生物炭联合速生植物连茬种植也能够实现工业场地土壤镉污染原位修复。

2 场地土壤污染物的研究展望

综上所述, 鉴于我国场地土壤异质性强, 污染物来源和过程复杂化的特点, 对比国外研究技术,

以“多来源排放—多途径输送—多介质/界面迁移转化—多尺度累积”特征为主线开展针对性的研究工作显得尤为重要。

(1) 加强场地土壤污染物“多来源、多途径、多介质、多界面、多尺度”环境过程和机理的综合研究。土—水—气—生多介质/界面是污染物发生复杂的迁移转化等环境行为的重要场所,在实地采样监测和室内外模拟系统的基础上,耦合同位素示踪—原位形态表征联合技术,建立目标污染物在多介质/界面相互作用机制的同位素示踪体系,能精细化的揭示污染物多介质/界面的关键过程(吸附解析、氧化还原、生物降解等)、迁移路径,阐释场地土壤污染物“源—汇”关系、累积通量、排放清单和迁移转化作用机理。

(2) 完善场地土壤污染物“排放来源、输送途径、迁移转化、动态累积”生态风险评估的系统研究。为实现大数据采集、分析和发布一体化管理,开发具有多源异构数据集管理、智能分析等多功能的系统工具(如:人工智能、云计算等),基于多介质逸度模型,耦合多种污染物运移模型的跨介质、多尺度场地土壤污染物动态累积模型对其环境动态过程、归趋和累积进行系统化、高分辨率和精细化描述,优化风险评估体系,实现不同时空尺度下场地土壤污染动态预警和生态风险评估。

(3) “双碳”战略和绿色可持续修复理念交互下,促进绿色可持续修复功能材料和新技术的研究与发展。研发绿色、高效、环境友好、低廉的化学氧化还原药剂、土壤淋洗药剂、生物修复菌剂等修复功能材料,有效降低场地污染过度修复和次生负面效应的影响;考虑土地利用功能、土壤修复目标和研究对象的多元化,发展原位生物激发和强化生态修复技术、电动力—微生物联合修复技术、光降解—生物联合修复技术等绿色原位联合技术,加快场地污染的修复治理。

参考文献:

- [1] 王 曦,胡 苑. 美国的污染治理超级基金制度[J]. 环境保护, 2007, 10(5): 64 - 67.
- [2] U. S. Senate Committee on Environment & Public Works. Comprehensive environmental response, compensation, and liability act (CERCLA) [EB/OL]. (2014-5-16). <http://epw.senate.gov/cercla>.
- [3] Environmental Protection Agency (EPA). Overview of the brownfields program[DB/OL]. <https://www.epa.gov/brownfields/brownfield-overview-and-definition>.
- [4] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [5] 宋 颀, 张新佳, 吕 扬, 等. 地理学视角下的城市棕地研究综述与展望[J]. 地理科学, 2019, 39(6): 886 - 897.
- [6] ASTM International. ASTM E2893-16e1 Standard guide for greener cleanups [S]. West Conshohocken: American Society for Testing Materials, 2016.
- [7] 朱 辉, 叶淑君, 吴吉春. 中国典型有机污染场地土层岩性和污染物特征分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(5): 26 - 34.
- [8] 牛真茹, 齐 硕, 吴庭雯, 等. 某有色冶炼场地浅层土壤重金属空间变异规律与分布特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 738 - 745.
- [9] 刘玉兰, 许敬红. 废弃电镀厂污染场地土壤污染分布规律研究[J]. 绿色科技, 2020, 24(1): 111 - 115.
- [10] 徐 腾, 南 丰, 蒋晓锋, 等. 制革场地土壤和地下水中铬污染来源及污染特征研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1341 - 1352.
- [11] 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 等. 焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1081 - 1092.
- [12] 侯文隽, 龚 星, 詹泽波, 等. 粤港澳大湾区丘陵地带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 416 - 426.
- [13] Xiao R, Zhang H, Wang Z, et al. Foliar litters: Sources of contaminants in phytoremediation sites by returning potentially toxic metals (PTMs) back to soils[J]. Chemosphere, 2019, 222(5): 9 - 14.
- [14] Wang S F, Ling X H, Wu X, et al. Release of tetrabromobisphenol A (TBBPA)-derived non-extractable residues in oxic soil and the effects of the TBBPA-degrading bacterium *Ochrobactrum* sp. strain T[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 378: 120666.
- [15] Yang J, Sun P, Zhang X, et al. Source apportionment of PAHs in roadside agricultural soils of a megacity using positive matrix factorization receptor model and compound-specific carbon isotope analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 403: 123592.
- [16] Salmanzadeh M, Hartland A, Stirling C H, et al. Isotope tracing of long-term cadmium fluxes in an agricultural soil[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 7369 - 7377.
- [17] European Chemicals Agency. ECHA-16-G-03-EN Guidance on information requirements and chemical safety assessment, chapter R. 16: Environmental exposure assessment[S]. Helsinki: ECHA, 2016.
- [18] Mackay D. Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach[M]. CRC Press, 2001.
- [19] Bates M L, Bigot M, Cropp R A, et al. On the formulation of environmental fugacity models and their numerical solutions[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2016, 35(9): 2182 - 2191.

- [20] Hughes L, Mackay D, Powell D E, et al. An updated state of the science EQC model for evaluating chemical fate in the environment: Application to D5 (decamethylcyclohexane)[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(2): 118 – 124.
- [21] Johannessen C, Parnis M J. Environmental modelling of hexamethoxymethylmelamine, its transformation products, and precursor compounds: An emerging family of contaminants from tire wear[J]. *Chemosphere*, 2020, 280: 130914.
- [22] Schoorl M, Hollander A, van de Meent D. SimpleBox 4.0: A multimedia mass balance model for evaluating the fate of chemical substances[R]. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 2016.
- [23] Han Z, Qu G R, Huang L X. Quantitative simulation of groundwater by mathematical model in Muzhu river aquifer using GMS[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 510(4): 1 – 7.
- [24] Šimúnek J, Genuchten M T V, Gribb M M, et al. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47(1): 27 – 36.
- [25] 殷乐宜, 魏亚强, 陈 坚, 等. 土壤和地下水耦合数值模拟研究进展[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(3): 27 – 131.
- [26] 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 等. 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 427 – 434.
- [27] 李 玮, 何江涛, 刘丽雅, 等. Hydrus-1D软件在地下水污染风险评估中的应用[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 639 – 647.
- [28] Berns E, Sanford R A, Valocchi A J, et al. Contributions of biotic and abiotic pathways to anaerobic trichloroethene transformation in low permeability source zones[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, 224: 103480.
- [29] Brusseau M L, Guo Z L. The integrated contaminant elution and tracer test toolkit, ICET 3, for improved characterization of mass transfer, attenuation, and mass removal[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 208: 17 – 26.
- [30] 王美娥, 丁寿康, 郭观林, 等. 污染场地土壤生态风险评估研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3946 – 3958.
- [31] Suter G W. Ecological risk assessment in the United States Environmental Protection Agency: A historical overview[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, 4(3): 285 – 289.
- [32] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Ecological risk assessment framework for superfund: Processing for designing and conducting ecological risk assessments (EPA540-R-97-006) [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Environmental Response Team, 1997.
- [33] Smith R, Pollard S J T, Weeks J M, et al. Assessing significant harm to terrestrial ecosystems from contaminated land[J]. *Soil Use and Management*, 2005, 21(2): 527 – 540.
- [34] NEPC (National Environment Protection Council). National environment protection (Assessment of site contamination) measure 1999: Schedule B5a, guideline on ecological risk assessment(F2013L00768) [S]. Australia: National Environment Protection Council, 2013.
- [35] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). Ecological risk assessment guidance document[S]. Winnipeg, Manitoba, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2020.
- [36] Dagnino A, Sforzini S, Dondero F, et al. A weight of evidence approach for the integration of environmental “triad” data to assess ecological risk and biological vulnerability[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, 4: 314 – 326.
- [37] Suter G, Cormier S, Barron M. A weight of evidence framework for environmental assessments: Inferring quantities[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13(6): 1045 – 1051.
- [38] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Weight of evidence in ecological assessment (EPA/100/R-16/001) [R]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, 2016.
- [39] van de Meent D, Quik J T, Traas T. Identification and preliminary analysis of update needs for EUSES[R]. Bilthoven: National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2014.
- [40] Ti B W, Liu J G, Chen C K. Global distribution potential and regional environmental risk of F-53B[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 1365 – 1371.
- [41] McKone T E, Enoch K G. CalTOX (registered trademark), A multimedia total exposure model spread sheet user's guide. Version 4.0(Beta)[M]. 2002: 1-10.
- [42] Yuan J, Chen Z. An extended environmental multimedia modeling system (EEMMS) for landfill case studies[J]. *Environmental Forensics*, 2009, 10(4): 336 – 346.
- [43] Yuan J, Chen Z, S M, et al. Application of an environmental multimedia modeling system for health risk assessment: Key influencing factors and uncertainties research[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2021, 17(4): 877 – 886.
- [44] Yuan J, Elektorowicz M. Extended environmental multimedia modeling system assessing the risk carried by pollutants in interacted air-unsaturated-groundwater zones[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 381: 120852.
- [45] 青达罕, 许宜平, 王子健. 基于环境逸度模型的化学物质暴露与风险评估研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(6): 13 – 29.
- [46] Lapointe M C, Martel R, Diaz E. A conceptual model of fate and transport processes for RDX deposited to surface soils of north American active demolition sites[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(6): 1444 – 1454.
- [47] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA和CLEA模型在某重金属污染场地环境风险评估中的应用比较[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 241 – 247.
- [48] American Society for Testing and Materials. Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release site

- (ASTM E-1739-95) [S]. West Conshohocken: ASTM International, 1996.
- [49] 陈梦舫. 污染场地健康与环境风险评估软件(HERA)[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 344 + 335 + 399.
- [50] 陈小军. 污染场地健康与环境风险评估模型(HERA)在土壤污染调查修复中的应用研究[J]. 节能, 2020, 39(5): 129 - 131.
- [51] 许伟, 施维林, 沈楨, 等. 工业遗留场地复合型污染分层健康风险评估研究[J]. 土壤, 2016, 48(2): 322 - 330.
- [52] 符小菲, 袁艺, 黄世霞, 等. HERA和RBCA模型在土壤筛选值推导中的应用比较[J]. 池州学院学报, 2019, 33(3): 57 - 60.
- [53] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复技术研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137 - 1142.
- [54] 闫雪莲. 工业污染场地土壤修复技术研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(11): 184 - 185.
- [55] Abhisek M, Kumar D B, Meenakshi A, et al. Porous media transport of iron nanoparticles for site remediation application: A review of lab scale column study, transport modelling and field-scale application[J]. Journal of hazardous materials, 2020, 403: 1 - 15.
- [56] Wang L S, Huang L H, Xia H B, et al. Application of a multi-electrode system with polyaniline auxiliary electrodes for electrokinetic remediation of chromium-contaminated soil[J]. Separation & Purification Technology, 2019, 224: 106 - 112.
- [57] 沈威, 高柏, 章艳红, 等. 化学淋洗法对铀污染土壤的修复效果研究[J]. 有色金属, 2019, 11: 81 - 86.
- [58] 刘维涛, 张雪, 梁雨琛, 等. 电子垃圾拆解区土壤污染与生物修复技术[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(8): 64 - 76.
- [59] 张方立, 党志, 孙贝丽, 等. 不同淋洗剂对土壤中多氯联苯的洗脱[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 287 - 294.
- [60] Biache C, Mansuyhuait L, Faure P, et al. Effects of thermal desorption the composition of two coking plant soil: Impact on solvent extractable organic compounds and metal bioavailability[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 671 - 677.
- [61] 谢炳坤, 姜祖明, 曾俊, 等. 多环芳烃类污染场地应用原位电热脱附技术的能效分析[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 173 - 187.
- [62] Yuan C, Hao S, Yang E T, et al. Distribution and bio-accessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrially contaminated site soils as affected by thermal treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 125129.
- [63] Stroo H F, Leeson A, Marqusee J A, et al. Chlorinated ethene source remediation: Lessons learned[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6438 - 6447.
- [64] 杨敏, 白建峰, 张长波, 等. 化学氧化与微生物法修复电子废物拆解场地有机污染土壤[J]. 广东化工, 2020, 47(20): 82 - 85.
- [65] 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估[J]. 环境化学, 2021, 40(11): 1 - 8.
- [66] Monfort O, Usman M, Soutrel I, et al. Ferrate (VI) based chemical oxidation for the remediation of aged PCB contaminated soil: comparison with conventional oxidants and study of limiting factors[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 355: 109 - 117.
- [67] Yang X, Liu L H, Tan W F, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by organic acid extraction and electrochemical adsorption[J]. Environmental Pollution, 2020, 264: 114745.
- [68] Zhai X Q, Li Z W, Huang B, et al. Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization[J]. Science of The Total Environment, 2018, 635: 92 - 99.
- [69] 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.
- [70] Shanker A K. Chromium: Environmental pollution, health effects and mode of action[J]. Encyclopedia of Environmental Health, 2019: 624 - 633.
- [71] Yang Y, Higgins S A, Yan J, et al. Grape pomace compost harbors organohalide-respiring Dehalogenimonas species with novel reductive dehalogenase genes[J]. The ISME Journal, 2017, 11(12): 2767 - 2780.
- [72] Yang Y, Cápiro NL, Yan J, et al. Resilience and recovery of Dehalococcoides mccartyi following low pH exposure[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2017, 93(12): 1 - 9.
- [73] 徐正国, 唐秋萍, 王颖. 腐殖质在工业污染场地土壤修复中的应用综述[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 1016 - 1022.
- [74] 庞小平, 梁宏宇, 敖伊敏. 重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 88 - 90.
- [75] 谭海剑, 黄祖照, 宋清梅, 等. 粤港澳大湾区典型城市遗留地块土壤污染特征研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 976 - 986.
- [76] 王健伟, 白建峰, 顾卫华, 等. 嗜酸细菌在不同强度微电场下对电子废物拆解场地土壤重金属的脱除效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1336 - 1342.
- [77] 高春阳, 韩占涛, 陈昌照, 等. 过氧化氢、过碳酸钠活化过硫酸钠氧化-微生物降解联用技术修复原油污染土壤[J]. 化工环保, 2019, 39(1): 71 - 76.
- [78] 陈浮, 朱燕峰, 马静, 等. 生物炭+速生植物对工业场地周边土壤镉污染原位修复[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1477 - 1486.

Research Progress on Fate, Risk Assessment and Remediation of Site Soil Pollutants

JIN Rui-he, LIU Min*, HE Er-kai, LI Ye, HUANG Ye, YANG Jing, LIU Xin-ran

(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization and the adjustment of industrial structure, the environmental pollution situation of site soil is becoming increasingly serious. The source identification, reason analysis and prevention management of the pollutants in the site soil have become the focus of the research on the remediation of the soil pollution. Based on the literature at home and abroad, this paper summarized the research status and progress on the migration and transformation mechanism, risk assessment, treatment and remediation of the site soil pollutants. It was found that the comprehensive research on environmental behavior, such as the source of pollutants, the “source-sink” relationship of transport and the migration, the transformation mechanism between different media / interfaces, needs to be further deepened. The framework and methods of risk assessment were still incomplete and uncertain, the green and sustainable joint remediation techniques had become the core of soil remediation. It is necessary to strengthen the systematic research on the environmental process and mechanism of “multi-source, multi-way, multi-medium, multi-interface and multi-scale”, the ecological risk assessment of “emission source, transport route, migration and transformation and dynamic accumulation”, and to develop green and sustainable functional restoration materials and technologies in the future, which will provide theoretical and scientific bases for the prevention, control management and remediation for soil site pollution in China.

Key words: Site soil; Migration and transformation; Risk assessment; Treatment and remediation

[责任编辑: 张玉玲]