

欧美发达国家场地土壤污染防治技术体系概述*

陈卫平¹ 谢天^{1,2} 李笑诺¹ 王若丹³

(1 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)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710062)

摘要 国际经验表明, 科学完整的土壤污染防治技术体系是全面推进土壤质量保护和土壤污染防治工作的基础保障, 尤其对处于起步阶段且面临诸多挑战的中国土壤污染防治工作, 虽然任重而道远, 却是土壤污染管理能力建设的必然。为有效预防和治理修复工业遗留场地的土壤污染问题, 加快推动城市土地的安全与可持续利用, 本文全面系统地阐述了美国、英国和欧洲发达国家场地土壤污染防治技术体系的要素构成及演变特点: 各国土壤污染防治制度及管理方法异同并存, 构建一套完整有效的土壤污染防治体系必须以基于风险的全过程可持续管理为原则, 涵盖法律保障、技术体系和管理手段等三个相互关联、相互影响的要素方面。其中, 法律法规是标准制定和措施执行的核心原则和关键导向; 标准导则是加强法律法规可行性的细化、具象; 管理手段是法律法规和标准导则实践层面的配套保障。欧美等发达国家完善的场地土壤污染防治体系对中国防治体系的构建具有非常重要的指导意义, 借鉴发达国家成功经验, 从中国土壤污染防治的现实需要和具体国情出发, 提出了三元一体的“法律—技术—管理”土壤污染防治技术体系的发展方向 and 重要内容, 该体系涵盖法律法规体系、技术标准体系和可持续管理体系三个方面。

关键词 污染场地; 土壤污染防治; 法律体系; 技术标准; 管理机制

中图分类号 X3; X53 **文献标识码** A

土壤是生态和社会可持续发展的物质基础, 是人类生存、兴国安邦不可或缺、不可替代、不可再生的战略资源。但近年来, 日益突出的土壤污染问题已对生态环境、农作物产量和质量、人体健康、城市建设和社会经济可持续发展构成严重威胁, 引起世界各国对土壤污染防治的广泛关注和积极探索。

土壤污染防治是一项复杂的系统工程, 不仅需要各行政管理部门、社会团体、公民、企业和专家学者等各利益方的积极参与, 更离不开法律法规体系的原则思想指导及标准技术文件的配套保障实施。欧美发达国家早在 20 世纪 80 年代就将土壤保护纳入国家环境管理体系, 目前已形成完善的集法律法规、技术标准和机制为一体的土壤污染防治技术体系, 采取以风险管控为核心的集污染预防、风险管控、治理修复和土地流转再利用为一体的土壤分级分类可持续管理策略。

我国土壤污染防治工作较欧美发达国家起步晚, 各级政府、各地区、各部门已采取一系列措施积极应对严峻的土壤环境形势, 同时, 复杂的污染状况、不完善的防治体系等诸多挑战, 也大大增加了开展土壤污染防治工作的难度。由于国情的差异、污染背景的不同, 不能完全依靠引进国外修复技术解决我国土壤污染问题, 但借鉴发达国家先进的土壤污染防治技术体系及成熟的管理经验, 对尚处于起步阶段的我国土壤污染防治工作具有重要的指导意义。因此, 本文通过对美国、英国和

*环境保护部土壤环境管理司项目资助 Supported by the Foundation of the Department of Soil Environment Management, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China

作者简介: 陈卫平 (1976—), 男, 河南开封人, 博士, 研究员, 主要研究领域: 土壤污染过程与风险管控。E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

收稿日期: 2017-12-13; 收到修改稿日期: 2017-12-25; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

欧洲发达国家土壤污染防治技术体系的全面系统阐述,分析借鉴其成功经验,探索建立健全我国土壤污染防治技术体系的有效方法,全面推动土壤质量保护和土壤污染防治工作。

1 美国土壤污染防治技术体系

以 20 世纪 70 年代发生的“拉夫运河 (Love Canal) 污染事故”为起点,在追求地下水质量的目标驱动下,美国形成了一套完整的涵盖法律法规、技术规范及管理手段的土壤污染防治体系。基于《国家环境政策法》(National Environmental Policy Act, NEPA)发布的《综合环境污染响应、赔偿和责任认定法案》(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA, 也称“超级基金法”)和《资源保护及恢复法案》(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)对于美国开展土壤污染防治具有里程碑式的意义,旨在预防固体废物、工业废物和危险废物对地下水和土壤的潜在污染,并规范治理已产生的污染问题^[1-2]。超级基金法首次明确定义棕地 (brownfield) 为“不动产,而这些不动产的扩张、重新开发或再利用可能由于有害物质或污染物的存在或潜在存在而变得复杂”^[1]。在基础法案指导下,美国的土壤污染防治法律法规体系随棕地项目的开展进一步完善,主要表现为以下三个方面:(1)根据法案中对含有石油或有害物质的地下储油罐技术要求的规定,美国环保署发布了一系列地下储油罐相关法律、法规,并在每个州建立地下储油罐项目(UST Program),清理污染场地的油气泄漏问题,治理场地土壤与地下水污染^[3-4]。(2)基于《安全饮用水法案》(Safe Drinking Water Act, SDWA)设置最大污染物浓度值(Maximum contaminant levels, MCLs),以保障饮用水质量安全,限制公共饮水系统中所允许的污染物最大浓度值^[5]。(3)为提高超级基金法的有效性和公平性,针对执行过程中暴露的问题,特别是由于潜在的责任方可能承担无限的且不确定的责任,会引起大量的法律诉讼,使小企业承受不公平的负担,美国政府陆续颁布了一系列修正案和补充法案,包括 1986 年的《超级基金修订与授权法》(Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA),鼓励自愿和解而减少诉讼,强调永久性修复和修复技术革新的重要性,使州政府和市民更多地参与超级基金计划的各个阶段^[6-7];2002 年的《小企业责任减免与棕地复兴法》(Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act, BRA, 又称棕地法),明确污染责任人和非责任人的界限,以保护无辜的土地所有者或使用者的权利,避免棕地的废弃或闲置等^[8-9]。

在有效的法律保障下,美国政府又制定了一系列技术规范和指南,为土壤污染防治过程中环境管理机制的落实提供技术依据,规范和指导场地环境调查、风险评估和棕地修复等行为。主要包括:

1.1 《土壤筛选导则》

《土壤筛选导则》(Soil Screening Guidance, SSG)为场地管理者确定基于风险和特定场地背景的土壤筛选水平提供了分层次的管理框架。土壤筛选水平不是国家修复标准,其旨在确定污染场地面积、暴露途径和化学污染物浓度等,促进污染场地评估和土壤修复。由使用标准指南、场地概念模型、地表和地下土壤筛选数据质量目标、污染物化学性质和人体健康基准等附加文件组成,指导对污染场地进行初步筛选,进而确定是否需要开展进一步的“修复调查”和“可行性研究”,或无需采取任何修复行动^[10]。

1.2 美国环保署第 9 区初步修复目标行动值

美国各区或州均制定了适用于本地实际情况的土壤环境质量标准,其中,美国第 9 区(临太平洋西南部地区)的初步修复目标值根据毒理学参数和物理化学常数的修正进行实时更新,提供了用于计算场地修复目标的详细技术信息^[11]。考虑到其与第 3 区和第 6 区均以风险评价为理论基础且计算方法类似,因此,美国环保署将第 3 区风险浓度 (Region 3 Risk-Based Concentrations, RBCs)、第 6 区人体健康中度限定筛选水平 (Region 6 Human Health Medium-Specific Screening Levels, HMSSL) 和第 9 区初步修复目标值 (Region 9 Preliminary Remediation Goals, R9 PRGs) 合并,为

居住用地、商业/工业用地土壤、大气和饮用水制定了最新的超级基金场地化学污染物的区域筛选水平 (Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites, RSLs)^[12]。筛选水平的计算同时考虑其他环境法规设定的浓度限值 (如安全饮用水法最大污染物水平) 和特定暴露条件下基于风险计算的浓度限值。

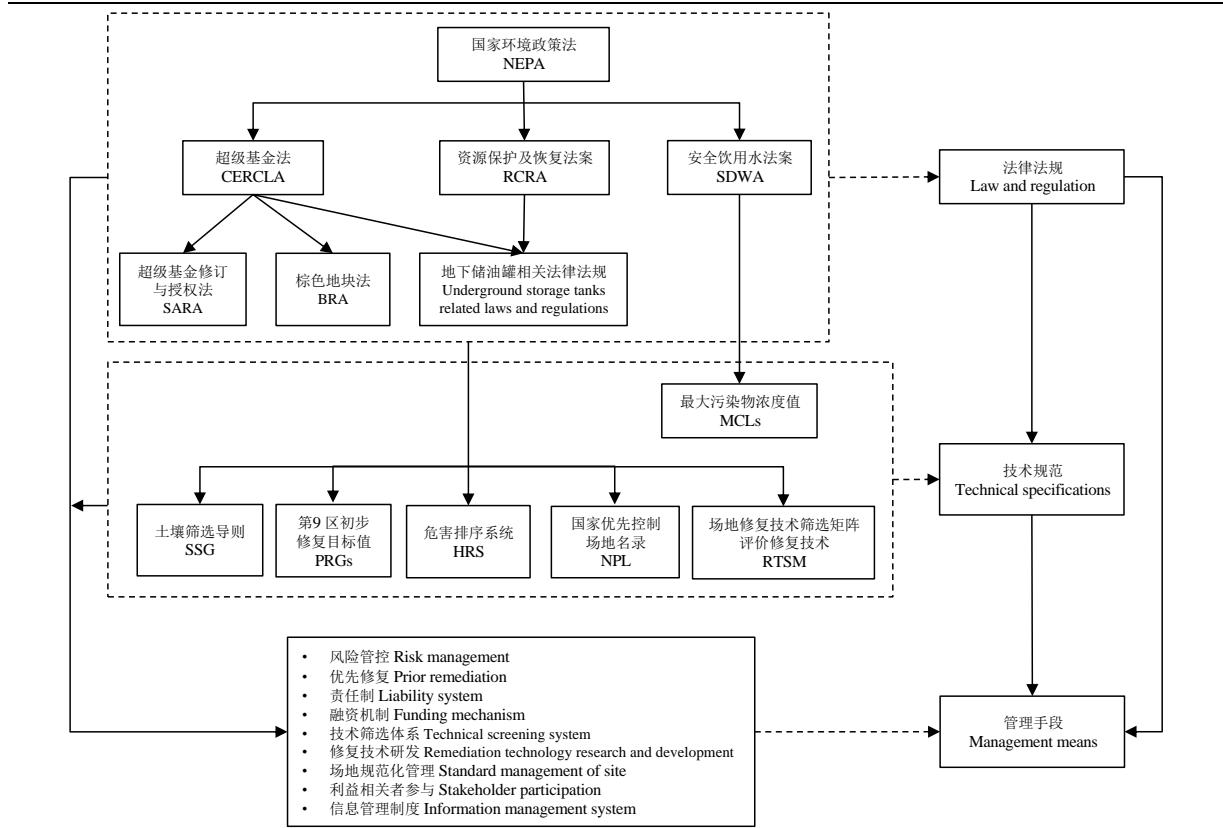
1.3 《国家优先控制场地名录》和危害排序系统

受资金、资源、人力、时间等因素限制, 为使更多的受污染土地得到及时治理, 美国建立了国家优先控制场地名录 (National Priorities List, NPL), 有助于污染场地修复优先性排序, 确定哪个场地需要深入调查^[13]。污染场地被列入国家优先控制场地名录的主要判别依据是危害排序系统 (Hazard Ranking System, HRS), 利用初步场地评估的有限信息, 评估该场地对人类健康和周边环境的潜在威胁^[14]。基本操作程序为: 首先, 通过现场调查初步评价污染状况, 并将信息录入超级基金信息系统, 然后, 通过危害排序系统判定土壤污染程度, 评估场地对人体和环境的危害程度, 对于经判定后仍需开展进一步详细评估的场址, 列入优先修复名录; 随后, 对优先修复名单上的场地, 按照场地环境详细调查、修复方案设计与可行性研究、工程施工、竣工验收、污染修复设施运行与维护等流程操作, 验收合格的地块将从优先修复名录中除名。

1.4 场地修复技术筛选矩阵

美国修复技术圆桌会议 (FRTR) 推荐在决策初期使用场地修复技术筛选矩阵 (Remediation technologies screening matrix, RTSM) 评价修复技术, 将 64 种原位和异位土壤/地下水修复技术分成 14 大类, 筛选变量包括适用污染物类型、成本、修复周期、技术推广程度等 16 个指标, 评价标准包括优于平均值、平均值、低于平均值和其他^[15]。场地修复技术筛选矩阵记录了大量工程案例的场地污染及修复信息, 针对场地污染表征调查、修复技术初筛和修复技术综合评价等污染场地修复技术筛选的不同阶段, 设计了不同的数据信息表格, 供评估者查询^[16], 尤其为相似背景场地修复的技术筛选与可行性评估节省了时间投入与经济成本。

至此, 美国形成了一套完善的涵盖法律、技术规范及管理制度的土壤污染防治体系 (图 1), 涉及的主要保障机制与有效管理手段包括: 污染者、所有者和使用者严格连带无限责任制; 污染付费、税收政策与政府补助等相结合的多渠道长效融资机制; 基于风险的筛选、评估与管控, 场地污染分类与优先修复; 各级政府、投资者、公众等利益相关者在土壤污染防治各环节的广泛参与; 规范完整的棕地管理程序和信息公开机制; 先进的修复技术研发与筛选体系等。在其联动作用下, 截止 2016 年, 1 337 个污染场地被列入美国国家优先修复名录, 其中 392 个场地得到有效治理, 从名录中移除, 极大推动了美国棕地的管理与再利用进程^[17]。



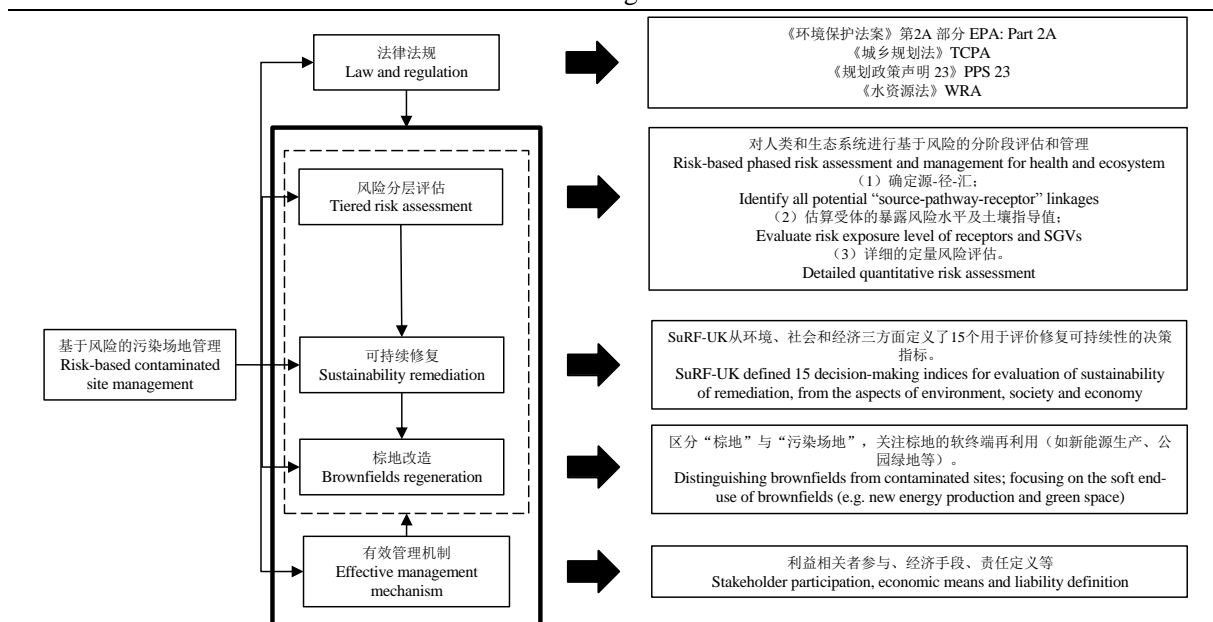
NEPA: National Environmental Policy Act; CERCLA: Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act; RCRA: Resource Conservation and Recovery Act; SDWA: Safe Drinking Water Act; SARA: Superfund Amendments and Reauthorization Act; BRA: Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act; MCLs: Maximum contaminant levels; SSG: Soil Screening Guidance; PRGs: Region 9 Preliminary Remediation Goals; HRS: Hazard Ranking System; NPL: National Priorities List; RTSM: Remediation technologies screening matrix

图1 美国土壤污染防治体系

Fig.1 The prevention and control system of soil pollution in USA

2 英国土壤污染防治技术体系

作为工业革命发源地，英国在社会经济快速发展的同时，也承受了由此造成的严重的土壤及地下水污染问题。英国对土壤污染防治采取从污染场地识别至治理行动实施全过程的风险管控，并积极鼓励当地社会群体尽早参与整个决策过程。随着土壤污染防治实践的深入，逐渐形成了一套基于风险管控的英国土壤污染防治技术体系，其特点为：法律法规保障、风险分层评估、可持续修复和棕地改造^[18-19]，并在相应技术导则的规范指导和有效管理机制的保障下得到有效实施（图2）。



EPA: Part 2A: Environmental Protection Act 1990: Part 2A; TCPA: Town and Country Planning Act; PPS 23: Planning Policy Statement 23; WRA: Water Resources Act; SGVs: Soil Guideline Values; SuRF-UK: Sustainable Remediation Forum UK

图2 英国土壤污染防治体系

Fig. 2 The prevention and control system of soil pollution in the UK

20 世纪 70 年代后，以可持续发展、污染者付费和污染预防为基本原则，英国的立法指导思想转为通过制定环境标准来防治环境问题^[20]。1990 年颁布的《环境保护法案》第 2A 部分 (Environmental Protection Act 1990: Part 2A) 是英国污染场地管理的核心法规，为土壤污染鉴定及恢复整治提供了依据，并明确了污染场地的定义，将风险评估的思想纳入土壤污染防治^[21-22]。其他重要的污染场地法规包括《规划政策声明 23》(Planning Policy Statement 23, PPS 23)、《城乡规划法》(Town and Country Planning Act, TCPA) 和《水资源法》(Water Resources Act, WRA) 等。

在污染场地识别阶段，英国土壤污染防治技术指南建议对人类和生态系统进行基于风险的分阶段评估和管理。第一阶段基于场地相关资料和现场踏勘开发特定场地概念模型 (Conceptual site model, CSM)，揭示污染物的源、汇及其迁移转化规律。第二阶段采用污染场地暴露评估模型 (Contaminated land exposure assessment, CLEA) 估算暴露风险及土壤指导值 (Soil Guideline Values, SGVs)，判断是否采取进一步评估或修复行动，同时可排列污染场地优先次序。第三阶段为详细的定量风险评估，确定场地污染的严重程度和进行修复的时间^[23-25]。

在场地修复初始阶段，受污染土地以重型工程方案为主，但其费用高昂，对环境和社会的影响也比较大。某些情况下，影响相对较小的风险管控方法更有实际意义 (例如，不直接修复，而是通过设立屏障阻止人们进入污染场地)。因此，围绕风险管控的核心思想，英国环保署发布了污染场地管理规范程序 (CLR 11: Model procedures for the management of land contamination)，以一种遵循英国政府法律法规的方式，帮助包括土地所有者、开发商、专业咨询、政法主体、投资方等在内的所有利益方，从风险评价、修复方案评估和修复策略实施三个方面，为污染场地风险管控提供规范的技术框架^[26]。

此外，结合环境影响消减计划的目标——“减小对挖掘和清除技术的依赖，并尽可能回收利用材料，以减少利用自然资源和保护土壤”^[11]，英国提出了可持续修复的概念，将可持续发展的理念贯穿于整个工程初始设计、实施和后期监测阶段。配套政策立法和实践工程检验，英国可持续修复论坛 (Sustainable Remediation Forum UK, SuRF-UK) 形成了第一个完整的可持续修复框架和修复技术评估指标导则，旨在为污染土壤和地下水的可持续修复提供决策支撑^[27-29]。SuRF-UK 从环境、社

会和经济三方面定义了包含 15 个主要指标的修复决策可持续评估指标 (表 1), 然后根据项目目的、数据可得性、成本、时间等因素分别采用定性—半定量—定量的分层方法评价修复可持续性。其中, 多准则分析法 (Multi-criteria analysis)、生命周期评价 (Life cycle assessment)、成本效益分析 (Cost benefit analysis) 等方法、技术相对成熟, 并广泛应用于修复技术筛选^[30-34]。

表 1 可持续修复主要类别及指标^[28]

Table 1 Overarching categories from SuRF-UK

环境指标 Environment	社会指标 Society	经济指标 Economy
大气 Emissions to air	人体健康与安全 Human health & safety	直接经济成本和收益 Direct economic costs & benefits
土壤与地面条件 Soil and ground conditions	伦理与公平 Ethics & equity	间接经济成本和收益 Indirect economic costs & benefits
地下水与地表水 Groundwater & surface water	邻里与当地社会环境 Neighbourhoods & locality	雇佣和雇佣资本 Employment & employment capital
生态 Ecology	居民与社区参与 Communities & community involvement	诱发经济成本和收益 Induced economic costs & benefits
自然资源与废弃物 Natural resources & waste	不确定性及证据 Uncertainty & evidence	项目周期和应变能力 Project lifespan & flexibility

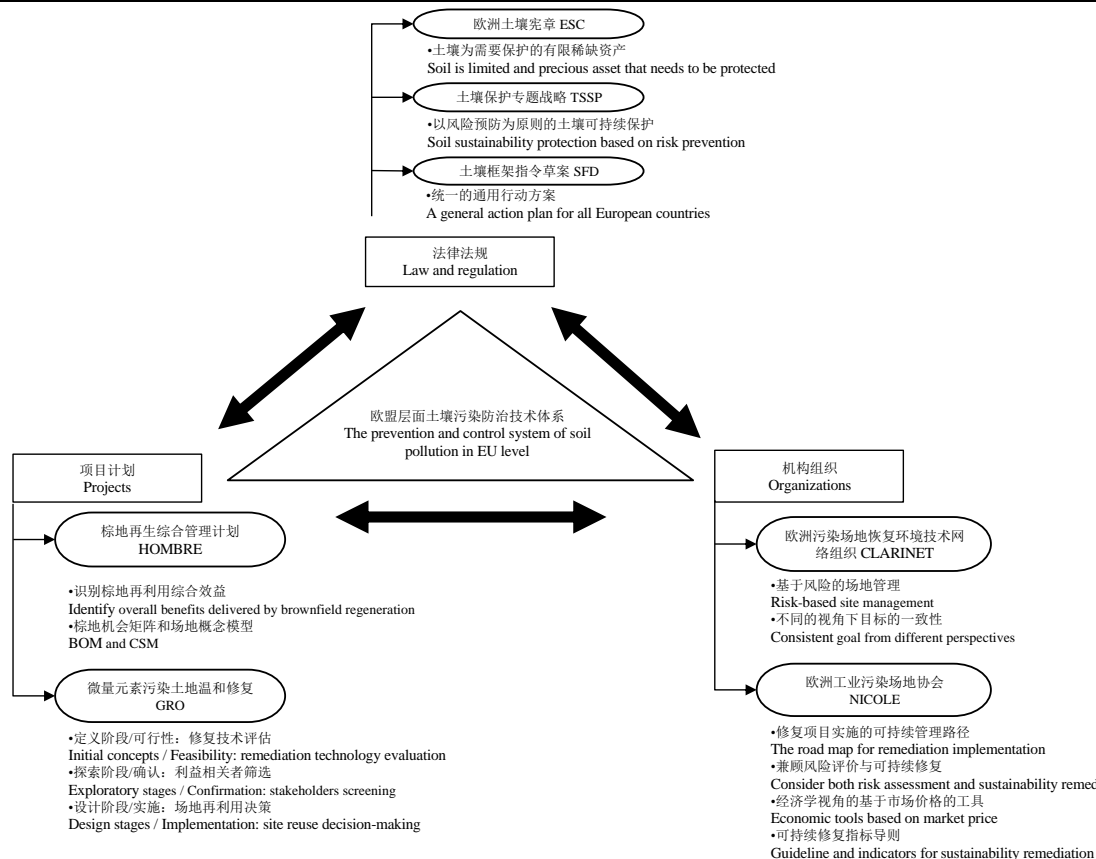
明确“棕地”概念是英国实现土壤污染有效防治的另一个重要因素, 以“适合使用”为土壤污染防治的中心策略, 指导棕地治理方式、标准及再利用用途, 促进棕地再开发与可持续管理。以改善环境质量和提高城市服务功能为目标, 棕地的软终端再利用 (soft end-use) (如新能源生产、公园绿地、生物栖息地等) 凭借社会、经济和环境的可持续性, 及可获得的额外增值价值得到越来越多的关注并在英国广泛实施。

最后, 完善的土壤污染防治体系及污染场地风险管控的有效开展, 均离不开管理手段的配套落实, 如: (1) 对棕地治理所产生的费用采取“污染者付费”的原则, 同时辅以资本津贴和税收减免政策两种主要经济手段, 激励棕地的污染治理与再开发^[19]; (2) 定义两类污染责任主体: A 类为造成场地污染或容许污染行为发生的责任主体, B 类为在无法确认 A 类责任主体的情况下, 场地当前所有人或使用者将承担修复治理责任^[35]。

3 欧洲土壤污染防治技术体系

3.1 欧盟层面土壤污染防治技术体系

欧洲是土壤污染防治技术体系较完善的地区, 以法律法规为保障指导, 由各成员国工业代表和科研机构创建的污染场地管理机构组织, 是建立健全欧盟土壤污染防治技术体系的主体, 制定了风险管控、可持续修复、场地再利用决策等技术导则, 并通过项目、计划的实施, 检验污染防治理念在工程操作中的可行性 (图 3)。



ESC: European Soil Charter; TSSP: Thematic Strategy for Soil Protection; SFD: Soil Framework Directive; HOMBRE: Holistic Management of Brownfield Regeneration; GRO: Gentle remediation options; CLARINET: The Contaminated Land Rehabilitation Network For Environmental Technologies in Europe; NICOLE: Network for Industrially Contaminated Land in Europe; BOM: Brownfield Opportunity Matrix; CSM: Conceptual site model

图3 欧盟层面土壤污染防治技术体系

Fig. 3 The prevention and control system of soil pollution in the European Union (EU)

3.1.1 主要法律法规 为阻止自然或人为因素造成的欧洲各国土地持续恶化，欧盟于 1972 年颁布了《欧洲土壤宪章》(European Soil Charter, ESC)，第一次将土壤视为需要保护的有限稀缺资产^[36]。2006 年欧盟委员会制定了土壤保护专题战略 (Thematic Strategy for Soil Protection, TSSP)，强调以风险预防为原则，在欧盟层面和国家层面上采取有利于土壤可持续性的防治措施。其中包含《土壤框架指令》草案 (Soil Framework Directive, SFD)，该草案旨在建立统一的通用行动方案，指导各成员国开展土壤防治工作，各成员国根据本国实际情况建立国家土壤修复计划，以减轻土壤环境风险^[37-40]，但由于技术转让、各成员国的市场成熟度以及利益者冲突等因素，导致该指令未能最终通过^[11]。

3.1.2 主要实施主体 欧洲污染场地恢复环境技术网络组织 (The Contaminated Land Rehabilitation Network For Environmental Technologies in Europe, CLARINET) 致力于探索处理污染场地问题的有效手段，以不损害人体健康和水资源质量、建立商业团体对土地再开发效益的信赖及土地的可持续利用为目标^[41-42]。其主要目的是为欧洲污染场地重建决策提供科学的技术建议，利用现有的专业知识为欧盟国家政策制定者提供合理建议，并促进政策、实践和科学知识的相互作用等。欧洲污染场地恢复环境技术网络组织在促进污染场地相关领域的国际合作项目方面与欧洲工业污染场地协会 (Network for Industrially Contaminated Land in Europe, NICOLE) 关系密切，其“基于风险的场地管理”核心理念，在很大程度上促进了环境政策中土壤质量、水资源保护和土地利用管理的协调统一，并从空间规划、环境保护和环境工程等不同的视角达成一致目标。

于 1995 年成立的欧洲工业污染场地协会 (NICOLE) 是另一个在欧洲国家工业污染场地管理中发挥重要作用的中坚力量, 旨在创造一个污染场地管理知识推广和交流的平台, 开展合作研究, 促进欧洲工业产业更有效地识别、评价和管理污染场地, 加强国际合作, 转化利益相关者 (如土地开发商、投资商、当地政府部门等) 的智力成果^[43-45]。目前, 欧洲工业污染场地协会的可持续修复工作组 (SRWG) 正广泛收集整理已开展的案例研究, 建立示范项目数据库, 检验可持续修复理论在污染场地修复管理中的有效性和可行性。

3.1.3 主要项目计划 棕地再生综合管理 (Holistic Management of Brownfield Regeneration, HOMBRE) 是欧盟第七计划框架 (EU FP7) 的子项目之一, 其目的是探索修复场地的软终端利用如何实现项目的预期效益, 可取得哪些额外收益, 并明确棕地利益相关者 (开发商、科学家、政策制定者、政府管理者、方案设计方、工程实施方等) 可获得的总体价值, 主要通过棕地机会矩阵 (Brownfield Opportunity Matrix, BOM) 和场地概念模型 (Conceptual site model, CSM) 执行^[46-48]。棕地机会矩阵的理念认为, 场地干预手段和其传递的服务之间具有强烈的协同作用, 这种协同作用具有创造增值价值的潜力, 其价值包括直接财政收益 (如能源收益)、自然资产价值 (如改善当地生态环境)、文化价值 (如促进社区融合)、有形的经济效益 (如清洁土地增值) 和无形的经济效益 (如场地管理者良好的声誉) 五个方面^[48-50]。通过干预—服务矩阵 (表 2) 明确污染场地再利用的增值服务与提供此服务的干预机制 (例如生物质发电带来的经济效益和教育价值) 之间的关系。

表 2 棕地机会矩阵干预机制与服务分类^[48]

Table 2 Intervention and service defined in BOM

干预 Intervention	服务/效益 Service / Benefit
土壤资源管理 Soil management activities	土壤改善 Soil improvement
水资源管理 Water management activities	水资源改善 Water resource improvement
绿色基础设施实施 Implementing green infrastructure	绿色基础设施供给 Provision of green infrastructure
温和修复选择 Gentle remediation options	降低污染土壤及地下水风险 Risk mitigation of contaminated soil and groundwater
其他修复选择 Other remediation options	调节气候变化 Mitigation of human induced climate change
可更新能源 (能源, 材料和生物质) Renewables	社会—经济效益 Socio-economic benefits
可持续场地规划和发展 Sustainable land planning and development	

场地概念模型拟通过识别污染源—暴露途径—暴露受体之间的关联, 建立基于风险评估的污染场地可持续管理概念模型, 评估不同管理决策对场地周边人体健康和环境的有利、不利影响, 筛选最优决策方案, 并开展实例研究验证模型的可靠性^[46, 51]; 促进决策过程中的利益相关者参与对模型的构建, 对实现场地再开发的社会效益、经济效益、环境效益的有机统一具有重要的现实意义。可持续性纽带 (Sustainability linkages, SL) 是构建场地概念模型的核心概念, 依据 SuRF-UK 主要类别建立污染源、暴露途径和暴露受体之间的关联, 以识别干预措施对社会、环境和经济受体的作用机制 (图 4), 如地表植被覆盖可通过改变生物多样性影响当地生态服务功能:

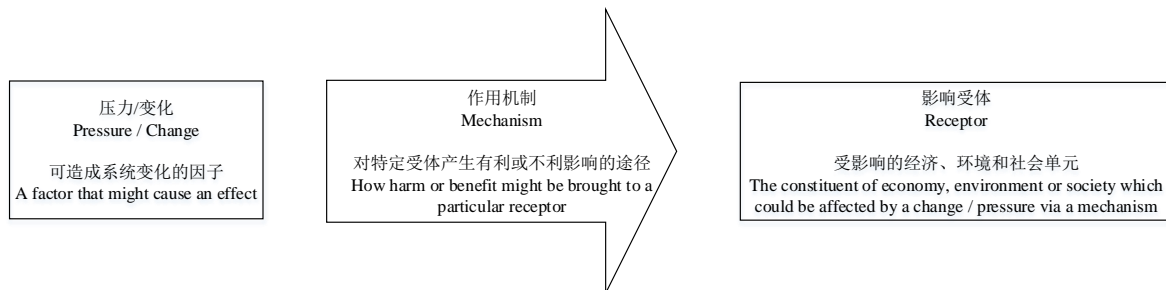


图 4 可持续性纽带

Fig. 4 Sustainability linkage

温和修复 (Gentle remediation options, GRO) 是为治理修复重金属或类金属污染的土壤而采取的风险管控决策或风险控制技术 (包括植物修复和微生物修复技术), 其在有效控制潜在风险的同时可改善土壤功能。通过原位稳定化、提取、转化或降解污染物, 减少其向当地受体的转移^[52-53]。目前, 温和修复已被成功运用于法国^[54-56]、德国^[57-58]、西班牙^[59]等欧洲国家修复其污染工业用地、农业用地、矿区等多种土地利用类型。尽管其在风险管控、资金调配和可持续性方面与传统修复技术相比, 具有绝对优势, 但由于项目周期长、场地面积限制、缺乏利益相关者认知及认可等因素, 温和修复在实践修复工程中的应用仍十分有限。为提高温和修复技术的可行性、可靠性和应用的广泛性, 微量元素污染土地温和修复 (Gentle Remediation of Trace Element Contaminated Land, GREENLAND) 项目制定了基于欧洲污染场地温和修复案例的技术导则, 利用微软 Excel 的用户友好性操作界面, 从定义阶段/可行性、探索阶段/确认、设计阶段/实施等三个阶段, 开展修复技术评估、利益相关者筛选和场地再利用决策, 尤其适用于场地再开发的软终端利用^[60]。

3.2 荷兰土壤污染防治技术体系

除欧盟层面的法律制度和技术框架外, 在国家层面上, 荷兰和德国是较早关注土壤污染防治工作并已取得有效成果的典型。

荷兰是最早制定土壤保护专项法律的欧洲发达国家之一^[61-62]。1983 年的《土壤修复临时法》(Interim Soil Remediation Act) 基于土壤背景值和专家经验提出了最初的 A、B 和 C 土壤标准值体系 (SQSs), 引入“多功能土壤”的定义, 认为土壤修复的标准为可满足任何功能的土地再利用用途^[63]。1987 年《土壤保护法》(Soil Protection Act) 生效, 强调土壤污染的防治, 首次引入“污染者付费”的理念^[64]。2008 年《土壤质量法令》(Soil Quality Decree) 发布, 强调土壤的可持续管理, 探索健康的人居环境与土壤功能间的平衡, 并考虑到土壤治理成本和治理目标的可行性, 以“适用性”原则替代“多功能土壤”原则, 即根据土地当前用途和再开发用途确定治理目标^[65]。2013 年《土壤修复通告》(Soil Remediation Circular) 作为土壤保护法的补充法案, 重新定义了土壤修复标准和目标, 用以判断土地修复的紧迫性^[66]。

如图 5 所示, 以完善的立法框架为基础, 荷兰对土壤环境实行涵盖污染预防、土地可持续利用和污染场地修复的全过程管理, 土壤污染防治技术体系也随实践经验的积累得到不断改进。污染者付费、风险评估、适用性原则、可持续利用、制定技术标准等先进创新思想在很大程度上推动了土地的可持续利用。

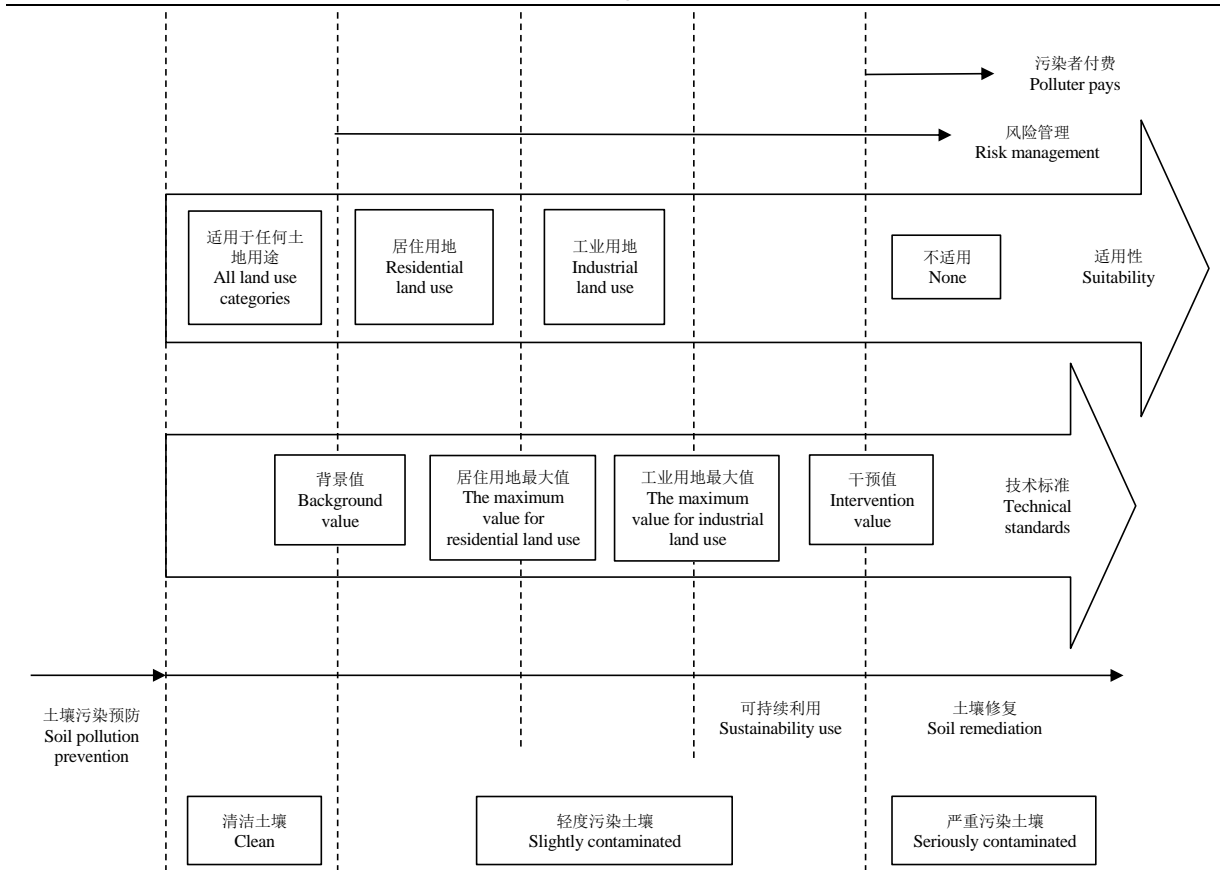


图5 荷兰土壤污染防治技术体系

Fig.5 The prevention and control system of soil pollution in the Netherlands

荷兰政府在土壤环境管理实践中认识到，越早开展土壤污染防治工作，所付出的社会经济成本就越小，预防成本仅约为治理修复成本的1%，因此强调“预防为主，兼顾治理”的土壤管理模式。此外，执行政策或受政策影响的利益群体的接纳支持度，将在很大程度上影响土壤污染防治工作的成效，因此，主张在管理决策的早期阶段考虑各工业和环境群体的利益需求。制定土壤质量标准和风险评估技术框架是荷兰成功开展土壤污染防治工作的另一个关键决定性因素，基于全国范围农业用地和自然保护地等，随机采取的未受扰动土壤中252种土壤污染物浓度确定土壤背景值；基于人体健康和生态毒理风险确定干预值；基于农业、居住和工业等不同土地利用方式的风险限值确定最大值^[67]。根据背景值和干预值，将土地分为清洁土壤、轻度污染土壤和严重污染土壤，考虑适用性原则，清洁土壤适用于任何用途的土地利用，轻度污染土壤根据最大值又划分为居住适用类型和工业适用类型，严重污染土壤不适用于任何土地用途的直接开发。对受到污染但未超过干预值的土壤纳入可持续利用管理，对超过干预值的土壤按“场地环境调查—风险评估及基于风险的治理目标和措施—修复技术筛选及可行性评价—修复结果评估检测”的程序开展土壤修复，按照污染者付费、土地所有者负责（无法确定污染者）、当地政府部门负责（确定土地所有者免责）的原则，合理分配污染者、业主、政府、开发者等各责任人职责，筹措修复资金^[68]。

3.3 德国土壤污染防治技术体系

德国的土壤污染防治注重土壤保护的立法体系建设，已形成一套围绕欧盟、联邦和州政府三层面的完整土壤污染防治体系。在欧盟层面相关法律法规引导下，以《联邦土壤保护法》（The Federal Soil Protection Act / FSPA）为核心法律，辅以《联邦土壤保护与污染地条例》（Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance）、《联邦区域规划法》（Federal Regional Planning Act）、《闭合循环管理法》（Closed Cycle Management Act）、《污水污泥条例》（Sewage Sludge Ordinance）、

《联邦自然保护法》(The Federal Nature Conservation Act)等联邦法规,以各州土壤保护法为配套性补充^[69-70]。

德国强调土壤的循环利用,同时也认为土壤污染预防与修复同等重要,因此,其土壤污染防治体系涵盖了土壤污染预防、土壤环境调查、风险评估和污染场地修复的全过程,并分别对工业污染场地和农业土壤利用作了说明,规定了预防原则、责任机制、风险管控、土壤监测与信息公开、功能性修复等基本原则。

3.3.1 预防与责任机制 同其他发达国家类似,德国以“谁污染谁付费”为原则追溯污染土壤治理的责任人及修复资金,明确了场地调查、清除污染的责任人及土地使用者、所有者规避危险的原则。土地使用者和所有者应采取适当措施预防土壤的有害改变,若土壤发生有害改变,则依法追责。如果污染者拒绝承担相应责任,尤其是拒绝清除污染物,将被处以罚款,严重情况下可被判监禁。政府当局也可开展必要修复工作,但相关费用由污染责任人承担。对于无法确定责任人的土地修复资金,可通过抵押财产的方式索赔^[71]。

3.3.2 风险管控 为判别土壤是否污染以采取进一步的应对措施,三种基于风险的土壤环境标准分别被定义为:适用于不同暴露途径(土壤至人体、土壤至植物和土壤至地下水)的触发值,在土壤至人体的暴露途径下,还考虑了不同的土地用途(游乐场、居民区、公园和娱乐设施、工业和商业用地);基于土壤至人体、土壤至植物暴露途径制定的行动值;防止新的土壤污染发生的预防值。超过触发值,须对超标的个别点位开展进一步调查,考虑土壤利用,确定是否存在土壤的有害改变或场地污染。超过行动值通常表示存在土壤的有害改变或场地污染,考虑土壤利用并需要采取补救措施。超过预防值表示存在土壤的有害改变,考虑地质因素或与扩散、沉降相关的污染物浓度^[72]。

3.3.3 土壤环境质量监测与信息公开 政府当局、土壤污染调查小组及相关责任人负责对土壤进行长期监测,记录土壤的生物、理化特性及污染物浓度等,随时了解土壤质量变化和发展趋势,及时预防新的土壤污染或评估治理措施有效性。配合污染场地识别与登记制度,对污染场地相关信息进行详细补充,建立全国土壤信息数据库系统,为联邦和州政府开展土壤污染防治工作提供支持。土壤信息可在基层行政机关之间进行交换,并需向受影响的利益群体及时公开土壤环境信息和场地清理行动。

3.3.4 土壤修复措施 在土壤修复上,德国以保护土壤特殊功能为原则,采取三种主要修复措施:移除污染源,如将污染土壤挖出转运至其他地方进行后续处理,原场地填埋以清洁土壤;阻隔封闭污染物,如利用固封材料阻止污染物向水体或大气的扩散、移动;保护污染暴露受体,如通过设置物理障碍或信息张贴等方式告知公众,限制其接近污染源。通常情况下,三种措施会综合应用。根据这一修复思想,德国目前需要治理的土壤中,仅有10%需要进行技术改造^[73]。

4 对我国土壤污染防治技术体系建设的启示与建议

对美国、英国和欧洲国家土壤污染防治技术体系的系统分析发现,各国土壤污染防治制度及管理方法既有相似又存在差异,一套完整的土壤污染防治体系必须围绕风险全过程可持续管理的核心原则,从法律、管理制度及技术规范三个层面构建。其发展趋势具有如下特点:(1)政府主导下,更多层级与更多部门的明确分工、联合监管和协调推动作用;(2)范围更广、信息更全、公开度更透明的土壤环境质量监测工作;(3)更多样性的创新融资机制,保证土壤污染防治稳定充足的经济来源;(4)贯穿于土壤污染防治各个阶段的风险管控和可持续管理思想;(5)责任人界定及责任的不断严格、完善,保护无辜利益者权利;(6)鼓励更多利益相关者更早及全过程参与土壤环境管理决策;(7)修复技术向环境友好型、多手段原位联合修复、快速设备化修复方向演化。

污染场地因多位于城市人口密集地区,存在较大的环境安全隐患,但目前,我国土壤污染防治仍面临法律法规缺失、技术标准配套落后、管理体系不完善等诸多问题和挑战^[74-75],借鉴发达国家

丰富的先进管理经验将有助于建立健全我国土壤污染防治技术体系，从而快速有效实现土壤质量保护和土壤污染治理的长期目标。

4.1 由“重技术、轻体系”向“法律—技术—管理”三元体系转变

由于土地快速开发的需求，对资本收益、工程周期和成本节约的追求，工程实践中更偏向以客户需求为导向的短时高效的修复技术，这在一定程度上加快了修复技术研发和工程化应用，但同时严重忽视了法律体系和管理体系建设，存在盲目修复、资源浪费、二次污染风险、影响社会公平等隐患，不利于土地修复、开发和城市发展的可持续性。因此，为保障风险管控方案的有效落实，提高土壤修复治理效果及降低污染防治成本，应将全面构建法律法规体系、技术标准体系和可持续管理体系三元一体的“法律—技术—管理”土壤污染防治技术体系作为当前工作的重点方向。

4.2 加快推动土壤污染防治法律法规体系建设

由于土壤污染的严重性和场地管理的复杂性，土壤污染防治难以通过环境介质法律法规的分散式管理实现，尽管《土壤污染防治行动计划》（简称“土十条”）被当作当前和今后一个时期我国土壤污染防治的行动纲领，在一定程度上为土壤质量管理提供了政策性指引，但其约束力有限。当务之急，必须加快土壤污染防治专门立法，包括针对污染问题突出的农田、场地的污染防治相关法律法规，尤其需明确土壤污染防治工作中各部门职责与协作机制、土壤环境调查与信息公开机制、责任追溯与基于市场的融资机制、公众参与机制等相关规定。增强土壤污染防治顶层设计的法律效力，不仅有助于完善土壤污染防治法律体系的系统性，为各部门开展工作提供法律支持，而且能有效缓解严峻的土壤环境形势，提高土壤生态系统服务功能。

4.3 完善土壤污染防治技术标准体系

作为环境执法和管理的基本依据和主要工具，原则层面的法律法规必须有依法制定的标准、指南等技术规范的配套才能有效落实。而我国现行的土壤污染防治技术标准多数空白或滞后，如《土壤环境质量标准》（GB 1995）作为全国通用标准，土壤污染物类型少、适用范围小，已不能满足当前土壤环境质量评价的现实需要。借鉴国外经验，应根据现阶段土壤质量现状、污染特点和现实挑战，及时修订、制定不同土地利用类型、不同区域的土壤环境质量标准，不同污染物、不同场地特征、不同再利用用途的修复技术筛选和修复标准指南，不同污染物、不同治理修复技术的工程技术规范等，咨询和修复企业的行业准入及从业人员技能标准等，完善污染调查、风险评估、治理修复和修复结果验收相关技术体系。

4.4 建立基于风险分类分级的可持续管理体系

我国土壤类型的多样性和土壤污染的复杂性等特点决定了按污染程度和土地用途实施土壤环境风险分类分级管理的基本决策。对农用地按污染程度实施风险分级管控，全面治理农田土壤污染及农作物重金属超标情况，具体表现为：对清洁土壤（对应“土十条”中未污染和轻微污染类别）采取优先保护，对轻度污染土壤采取农艺调控，对中度污染土壤采取治理修复，对重度污染土壤采取替代种植措施等。对建设用地根据企业生产状态（新建、在产、搬迁后土地用途变更和搬迁后闲置）分别实施以污染预防、清洁生产、安全利用和防止污染扩散为重点的分类管理措施，形成建设用地污染预防、环境调查、风险评估、治理修复、全过程监管和可持续再利用技术体系。在保障人体健康和环境安全的同时，深入学习发达国家绿色可持续修复的内涵、原则、评价指标、技术和管理要求，将绿色可持续性理念贯穿修复设计和施工全过程，鼓励各利益方的积极参与与监督。一方面，从环境敏感性的角度降低或消除生态风险，减少修复行为自身的环境足迹，预防产生二次污染；另一方面，从社会可接受的角度刺激经济生产力，综合考虑人体健康、技术可行性、公众接受度、市场价值等的平衡；第三，从城市发展的角度结合土壤环境功能和城市空间规划，合理确定土地再利用用途，关注土地流转再利用过程环境、社会及经济效益的有机统一。同时，积极探索信息数据库与共享、部门职责与协调、私人与社会融资、公众参与决策等管理机制，以完善管理体系并保障其有效实施。

参考文献

- [1] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA). 1980 [2017-03-08]. <https://www.epa.gov/enforcement/comprehensive-environmental-response-compensation-and-liability-act-cercla-and-federal>
- [2] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Overview. 1976 [2017-12-15]. <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-overview>
- [3] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Underground Storage Tanks (USTs) Laws and Regulations. 1988 [2017-12-15]. <https://www.epa.gov/ust/underground-storage-tanks-usts-laws-and-regulations>
- [4] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Underground Storage Tanks (USTs). 1984 [2017-12-15]. <https://www.epa.gov/ust>
- [5] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Safe Drinking Water Act (SDWA). 1974 [2017-12-15]. <https://www.epa.gov/sdwa>
- [6] United States Environmental Protection Agency (USEPA). The Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA). 1986 [2016-11-08]. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-amendments-and-reauthorization-act-sara>
- [7] 中国环境与发展国际合作委员会. 土壤污染管理研究. 2015 [2017-04-28]. <http://www.cciced.net/>
China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED). Research on soil pollution management (In Chinese). 2015 [2017-04-28]. <http://www.cciced.net/>
- [8] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act. 2002 [2017-03-08]. <https://www.epa.gov/brownfields/summary-small-business-liability-relief-and-brownfields-revitalization-act>
- [9] 叶露, 董丽娟, 郑晓云, 等. 美国的土壤污染防治体系分析与思考. 江苏环境科技, 2007, 20(1): 59-61
Ye L, Dong L X, Zheng X Y, et al. The analysis and consideration of the remediation and prevention system of the soil contamination in the United States (In Chinese). Jiangsu Environmental Science and Technology, 2007, 20(1): 59-61
- [10] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Superfund Soil Screening Guidance. 1996 [2017-03-08]. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-soil-screening-guidance>
- [11] 龚宇阳. 国际经验综述: 污染场地管理政策与法规框架. 2012 [2017-03-08]. <http://documents.worldbank.org/curated/zh/652301468024563703/China-International-experience-in-policy-and-regulatory-frameworks-for-brownfield-site-management>
Gong Y Y. Review on international experience: Policy and regulation framework of contaminated site management (In Chinese). 2012 [2017-03-08]. <http://documents.worldbank.org/curated/zh/652301468024563703/China-International-experience-in-policy-and-regulatory-frameworks-for-brownfield-site-management>
- [12] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites. 2016 [2016-11-08]. <https://epa-prgs.ornl.gov/chemicals/>
- [13] United States Environmental Protection Agency (USEPA). National Priorities List. 2016 [2017-03-08]. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-national-priorities-list-npl>
- [14] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Hazard Ranking System. 2016 [2017-03-08]. <https://www.epa.gov/superfund/introduction-hazard-ranking-system-hrs>
- [15] The Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). Remediation Technologies Screening Matrix. 1994 [2016-11-08] https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf
- [16] 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. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 105-111
Zhang H Z, Yu F, Cao D, et al. The technology evaluation in contaminated site remediation in developed countries and its implication to China (In Chinese). Environmental Pollution & Control, 2012, 34(2): 105-111
- [17] United States Environmental Protection Agency (USEPA). NPL Site Totals by Status and Milestone. 2016 [2017-03-08].

- <https://www.epa.gov/superfund/npl-site-totals-status-and-milestone>
- [18] Coulon F, Jones K, Li H, et al. China's soil and groundwater management challenges: Lessons from the UK's experience and opportunities for China. *Environment International*, 2016, 91: 196-200
- [19] Environment Agency (EA). Land contamination: Technical guidance. 2014 [2016-11-08].
<https://www.gov.uk/government/collections/land-contamination-technical-guidance>
- [20] 王世进, 许珍. 美、英两国土壤污染防治立法及其对我国的借鉴. *农业考古*, 2007(6): 81-85
Wang S J, Xu Z. The legislation for soil pollution prevention and control in the USA and UK, and reference to China (In Chinese). *Agricultural Archaeology*, 2007(6): 81-85
- [21] Department for Environment Food & Rural Affairs (Defra). Environmental Protection Act 1990: Part 2A. 2012 [2016-11-08].
<http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1990/43/part/IIA>
- [22] 布莱克·史密斯环境研究所. 土壤项目政策报告. 2015 [2017-04-28]. <http://www.ecegp.com/chinese/knowledge/Section-4.asp>
Blacksmith Environment Institute. Policy report on soil projects (In Chinese). 2015 [2017-04-28].
<http://www.ecegp.com/chinese/knowledge/Section-4.asp>
- [23] Land Quality Management (LQM). Land contamination management in the UK. 2015 [2016-11-08].
<http://www.lqm.co.uk/risk-management-process/>
- [24] 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 等. 中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(3): 14-18
Chen M F, Luo Y M, Song J, et al. Comparison of USA, UK and Chinese risk assessment guidelines and the implications for China (In Chinese). *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23(3): 14-18
- [25] 刘乙敏, 李义纯, 肖荣波. 西方国家工业污染场地管理经验及其对中国的借鉴. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1438-1443
Liu Y M, Li Y C, Xiao R B. Management experience of industrial contaminated sites in western countries and its implications for China (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8): 1438-1443
- [26] Environment Agency (EA). CLR 11: Model procedures for the management of land contamination. 2004 [2017-04-20].
<http://www.environment-agency.gov.uk>
- [27] Contaminated Land: Applications in Real Environments (CL: AIRE). The SuRF-UK indicator set for sustainable remediation assessment. 2011 [2016-11-01].
http://www.claire.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=748:annex-1-surf-uk-indicator-set-for-sustainable-remediation&catid=966&Itemid=78
- [28] Contaminated Land: Applications in Real Environments (CL: AIRE). A review of published sustainability indicator sets: How applicable are they to contaminated land remediation indicator-set development? 2009 [2016-11-01].
http://claire.co.uk/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=398
- [29] Bardos P. Progress in sustainable remediation. *Remediation Journal*, 2014, 25(1): 23-32
- [30] Bardos P. Initial Sustainability Assessment of a C-CURE biochar application. Presentation in SuRF-UK Phase 2 Workshop Meeting. 2011
- [31] Bardos P, Bone B, Boyle R, et al. Applying sustainable development principles to contaminated land management using the SuRF-UK framework. *Remediation Journal*, 2011, 21(2): 77-100
- [32] Bardos P, Bone B D, Boyle R, et al. The rationale for simple approaches for sustainability assessment and management in contaminated land practice. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564: 755-768
- [33] Rosén L, Back P E, Söderqvist T, et al. SCORE: A novel multi-criteria decision analysis approach to assessing the sustainability of contaminated land remediation. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 621 - 638
- [34] Söderqvist T, Brinkhoff P, Norberg T, et al. Cost-benefit analysis as a part of sustainability assessment of remediation alternatives for contaminated land. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157(1): 267 - 278
- [35] Government Digital Service (GOV.UK). Contaminated land. 2016 [2016-11-08].
<https://www.gov.uk/contaminated-land/buying-contaminated-land>
- [36] Council of Europe. European Soil Charter. 1972 [2016-11-09].

- <http://adlib.eversite.co.uk/adlib/defra/content.aspx?id=000IL3890W.184T088WW808AP>
- [37] European Commission (EC). Thematic Strategy for Soil Protection. 2006 [2016-11-09]. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006DC0231>
- [38] European Commission (EC). Soil Framework Directive. 2006 [2016-11-09]. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006PC0232>
- [39] Kraemer R A, Landgrebe-Trinkunaite R, de Teran T D, et al. EU Soil Protection Policy: Current Status and the Way Forward. 2004 [2016-11-09]. <http://ecologic.eu/de/12350>
- [40] Prokop G. The state of EU soil policy and soil related research. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, 4(3): 81 - 86
- [41] The Contaminated Land Rehabilitation Network For Environmental Technologies in Europe (CLARINET). Sustainable Management of Contaminated Land: An overview. 2002 [2016-11-06]. http://www.commonforum.eu/Documents/DOC/Clarinet/rblm_report.pdf
- [42] The European Groundwater and Contaminated Land Information System (EUGRIS). CLARINET - The Contaminated Land Rehabilitation Network For Environmental Technologies in Europe. 2008 [2016-11-05]. <http://www.eugris.info/displayproject.asp?Projectid=4420>
- [43] de Groof A, Waters J, Sévêque J L, et al. Contaminated land management: Opportunities, challenges and financial consequences of evolving legislation in Europe. 2010 [2016-11-05]. <http://www.eugris.info/displayproject.asp?Projectid=4416>
- [44] Network for Industrially Contaminated Land in Europe (NICOLE). Road Map for Sustainable Remediation. 2010 [2016-11-05]. <http://www.nicole.org/uploadedfiles/2010-wg-sustainable-remediation-roadmap.pdf>
- [45] Network for Industrially Contaminated Land in Europe (NICOLE). Sustainable Remediation Work Group Report. 2012 [2016-11-05]. http://www.claire.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=575:nicole-sustainable-remediation-work-group-report&catid=954&Itemid=93
- [46] Beumer V, Deltares, Bardos P, et al. HOMBRE D-5.2: Decision support system on soft reuses. 2014 [2016-11-01]. http://www.zerobrownfields.eu/HombreTrainingGallery/HOMBRE_D5.2_final.pdf
- [47] Ellen G J, Blauw M, van Ek R, et al. HOMBRE D-2.2: Cost effective monitoring within the circular land management framework. 2013 [2016-11-05]. http://www.zerobrownfields.eu/HombreTrainingGallery/HOMBRE_D2.2_final.pdf
- [48] Menger P, Bardos P, Ferber U, et al. HOMBRE D-5.1: Valuation approach for services from regeneration of brownfields for soft re-use on a permanent or interim basis, creating opportunities from synergies between environmental, economic and social improvements. 2013 [2016-11-05]. http://www.zerobrownfields.eu/HombreTrainingGallery/HomePage/HOMBRE_D5.1_final_Services_SoftReUse.pdf
- [49] Bardos P, Jones S, Stephenson I, et al. Optimising value from the soft re-use of brownfield sites. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564: 769 - 782
- [50] Bardos P, Stephenson I, Menger P, et al. Maximising the value-proposition for soft re-use of brownfields. 2015 [2016-11-01]. <http://www.zerobrownfields.eu/HombreMainGallery/Docs/Bardos%20Session%202.3%20ACS%202015%20v2%20Hombre%20web%20site.pdf>
- [51] Bardos P, Menger P. Conceptual site or project models for sustainability assessment. ThS D3.3 methods and tools for environmental footprint assessment. 2013 [2016-11-05]. http://www.r3environmental.co.uk/downloadsnew/Aqua_consoil_2013_2284_Conceptual_Site_or_Project_Models_for_Sustainability_Assessment_v3.pdf
- [52] Cundy A, Bardos R P, Puschenreiter M, et al. Developing effective decision support for the application of “gentle” remediation options: The GREENLAND project. *Remediation Journal*, 2015, 25(3): 101-114
- [53] Cundy A B, Bardos R P, Puschenreiter M, et al. Brownfields to green fields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. *Journal of Environmental Management*, 2016, 184 (Part 1): 67-77
- [54] Bert V, Lors C H, Ponge J F, et al. Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: A field study focusing on plants, springtails, and bacteria. *Environmental Pollution*, 2012, 169: 1-11

- [55] Hattab N, Motelica-Heino M, Bourrat X, et al. Mobility and phytoavailability of Cu, Cr, Zn, and As in a contaminated soil at a wood preservation site after 4 years of aided phytostabilization. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21 (17): 10307-10319
- [56] Hattab N, Motelica-Heino M, Mench M. Aided phytoextraction of Cu, Pb, Zn, and As in copper-contaminated soils with tobacco and sunflower in crop rotation: Mobility and phytoavailability assessment. *Chemosphere*, 2016, 145: 543-550
- [57] Cundy A B, Bardos R P, Church A, et al. Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for "gentle" remediation approaches: The European context. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 283-291
- [58] Dietzsch. Utilisation of contaminated soils (In German). 2011 [2016-11-01]. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14994/documents/17993>
- [59] Becerra-Castro C, Monterroso C, Prieto-Fernandez A, et al. Pseudometallophytes colonizing Pb/Zn mine tailings: A description of the plant-microorganism-rhizosphere soil system and isolation of metal-tolerant bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 217/218: 350-359
- [60] Gentle remediation of trace element contaminated land (GREENLAND). Best practice guidance for practical application of gentle remediation options. 2014 [2016-11-01]. <http://www.greenland-project.eu>
- [61] Bouma J, Droogers P. Translating soil science into environmental policy: A case study on implementing the EU soil protection strategy in the Netherlands. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(5): 454 - 463
- [62] Wesselink L G, Notenboom J G M, Tiktak A. The consequences of the European Soil Framework Directive for Dutch policy. 2006 [2016-11-10]. <http://www.pbl.nl/en/publications/2006/TheConsequencesOfTheEuropeanSoilFrameworkDirective>
- [63] Rijkswaterstaat. Into Dutch soils. 2014 [2016-11-10]. <http://rwsenvironment.eu/>
- [64] Rijkswaterstaat. Legislation and instruments. 1987 [2016-11-10]. <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/>
- [65] Rijkswaterstaat. Soil Quality Decree. 2007 [2016-11-10]. <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-quality-decree/>
- [66] Rijkswaterstaat. Soil Remediation Circular. 2013 [2016-11-10]. <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-remediation/>
- [67] Swartjes F A, Rutgers M, Lijzen J P A, et al. State of the art of contaminated site management in The Netherlands: Policy framework and risk assessment tools. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 1 - 10
- [68] Ferguson C C. Assessing risks from contaminated sites: Policy and practice in 16 European countries. *Land Contamination & Reclamation*, 1999, 7(2): 33-54
- [69] BBodSchG. The Federal Soil Protection Act. 1999 [2016-11-11]. <http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/index.html>
- [70] Umweltbundesamt. Soil Protection Law. 2015 [2016-11-11]. <http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/soil-agriculture/soil-protection/soil-protection-law>
- [71] Elshorst D, Fuder A, Clifford Chance. Environmental law and practice in Germany: Overview. 2015 [2016-11-11]. <http://uk.practicallaw.com/4-503-0486#a72569>
- [72] Schäfer L, Dannemann G. Act on Protection against Harmful Changes to Soil and on Rehabilitation of Contaminated Sites. 2013 [2016-11-11]. <http://germanlawarchive.iuscomp.org/?p=322#7>
- [73] 陈梦舫, 张益. 土壤污染: 中外立法建设和防治实践纵横谈. 2015 [2016-11-11]. <http://mhuanbao.bjx.com.cn/default.aspx/582840/>
Chen M F, Zhang Y. Soil pollution: Discussion on legislative construction and practical prevention and control internationally (In Chinese). 2015 [2016-11-11]. <http://mhuanbao.bjx.com.cn/default.aspx/582840/>
- [74] 宋昕, 林娜, 殷鹏华. 中国污染场地修复现状及产业前景分析. *土壤*, 2015, 47(1): 1-7
Song X, Lin N, Yin P H. Contaminated site remediation industry in China: Current state and future trends (In Chinese). *Soils*, 2015, 47(1): 1-7
- [75] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1088-1094
Zhang Q, Jiang D, Gu Q B, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1088-1094

Generalizaion of Technical Systems for Soil Pollution Prevention and Control in Developed Countries

CHEN Weiping¹ XIE Tian^{1,2} LI Xiaonuo¹ WANG Ruodan³

(1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract International experience shows that a complete and scientific technical system for prevention and control of soil pollution is the foundation key to comprehensive promotion of protection of soil quality and protection and control of soil pollution, particularly in China where the work to prevent and control soil pollution is still at its starting stage and confronted a series of challenges. Although the responsibility is heavy and long-lasting, it is a must for building up soil pollution management capacity. In this sense, to effectively prevent and address the problem of severe soil pollution in deserted industrial sites, and promote safety and sustainable utilization of urban lands, this paper presents a comprehensive and systematic overview of the technical systems for prevention and control of soil pollution in the USA, UK and other European countries, including their elements, composition, evolution features, laws and regulations, technical guidelines and standards, and management system. Though the technical systems of these countries are quite similar, but do differ from each other in certain aspects. The establishment of a complete effective sets of soil pollution prevention and control systems must be based on the principle of end-to-end sustainable management of risks and encompass the three interrelated and mutually affected elements, i.e. legal support, technical system and management means. Laws and rules are the core principles and key guidance in standard formulation and measure enforcement; standard guidelines further detail and specify feasibilities of the laws and rules; and management means are assorted guarantees of the laws, rules and standard guidelines at the practice level. The perfect site soil pollution prevention and control systems of the developed countries may serve as reference of great guiding significance to China in building its soil pollution prevention and control system. By referring to the successful experience of the developed countries, and proceeding from the actual needs and specific national conditions, this paper elaborated development direction and important contents of a "legislation - technology - management" integrated soil pollution prevention and control system.

Key words Contaminated site; Soil pollution prevention and control; Legal system; Technical standards; Management mechanism

(责任编辑: 陈荣府)