

DOI: 10.11766/trxb202010120569

李笑诺, 陈卫平, 吕斯丹. 国内外污染场地风险管控技术体系与模式研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 38–53.

LI Xiaonuo, CHEN Weiping, LÜ Sidan. Advancement in Researches on Technical Systems and Modes for Risk Management and Control of Contaminated Sites at Home and Abroad[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 38–53.

## 国内外污染场地风险管控技术体系与模式研究进展\*

李笑诺<sup>1</sup>, 陈卫平<sup>1, 2†</sup>, 吕斯丹<sup>3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境科学与技术实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟院重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 以风险管理为基本原则的污染场地可持续治理修复及安全利用已成为全球范围内一个紧迫的环境和发展问题。为促进快速、经济、有效的风险管控技术在我国土壤污染防治初期阶段的广阔应用, 本文在明确污染场地风险管控广义和狭义内涵属性的基础上, 系统阐述了工程控制、制度控制和监测自然衰减等狭义风险管控技术的技术原理、工程应用和适用条件, 剖析英美等发达国家风险管控体系并结合我国土壤环境管理实际建立技术体系和政策体系支撑下的风险管控模式, 最后针对我国污染场地风险管理基础薄弱、风险管控体系不健全和风险管控技术支撑不足等问题, 提出基于绿色可持续理念和全生命周期管理理论的“防、控、治、管”四位一体的污染场地风险管控总体布局, 对于推动我国风险管控技术应用和提高场地风险管理水平具有重要的现实意义。

**关键词:** 污染场地; 风险管控; 技术体系; 决策模式; 管理策略

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A

## Advancement in Researches on Technical Systems and Modes for Risk Management and Control of Contaminated Sites at Home and Abroad

LI Xiaonuo<sup>1</sup>, CHEN Weiping<sup>1, 2†</sup>, LÜ Sidan<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Soil Environmental Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** With risk management as basic principle, sustainable remediation and safe utilization of contaminated sites has become an urgent environmental and developmental issue worldwide. To promote the application of rapid, economical and effective risk management and control technologies at the early stage of the soil pollution prevention and control drive in China, while specifying attributes of the broad and narrow connotations of risk management and control of contaminated sites, the paper elaborated systematically the technical theory, engineering implementation and applicable conditions of the risk management technologies in narrow connotation, including engineering control, institutional control and monitored natural attenuation,

\* 国家重点研发计划项目(2020YFC1807500)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2020YFC1807500)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

作者简介: 李笑诺(1988—), 女, 山东烟台人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤污染政策体系与可持续风险管控研究。E-mail: xnli@rcees.ac.cn

收稿日期: 2020-10-12; 收到修改稿日期: 2020-12-08; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-01-28

analyzed the risk management and control systems in developed countries, with reference to the risk management and control mode supported by the technical system and policy system established on the reality of the soil environmental management in China. In the end, aiming at the problems of weak foundation, unsound system and insufficient technical support of the risk management and control system in China, the authors put forth an overall layout of “prevention-control-remediation-management” for risk management and control of contaminated sites in consistence with the idea of green sustainability and the theory of life cycle management, which is expected to be of great practical significance to promotion of application of the technology and improvement of the risk management level.

**Key words:** Contaminated site; Risk management and control; Technical system; Decision-making mode; Management strategy

土壤环境安全是支撑美丽中国和生态文明建设的重要基础。然而近年来,在产业结构调整和城市发展转型的过程中,工矿企业搬迁后遗留场地的土壤和地下水污染问题呈集中爆发态势,环境风险和土地再利用安全隐患突出。从国内外历年场地修复工程实践看,风险管控技术具有更好的地质适应性、更强的复合污染处理能力和更广的场地适用范围。在项目开展的早期阶段系统地整合风险管控技术方法,能进一步降低项目成本、减少实施过程中的不确定性以及提高场地污染治理的成功率<sup>[1-2]</sup>。这一认识逐渐推动了污染场地管理思想从以工程技术彻底清除污染物向以管控风险为目标的转变,发达国家污染场地管理中工程控制、监控自然衰减、制度控制等风险管控技术单独或联合应用的比例也随之增加<sup>[3-4]</sup>。

与发达国家相比,我国具有污染场地数量庞大、场地条件和污染物环境行为复杂的国情特殊性,同时面临污染场地管理工作起步较晚、风险管理经验较少和风险管控技术体系支撑薄弱的挑战<sup>[5-10]</sup>。从现有污染状况、技术水平和经济条件来看,我国目前还不具备对污染场地进行大规模全面修复的技术力量和经济实力,采用相对快速、经济、环保的风险管控技术是有效防范场地环境风险、保障人居环境安全和实现土地可持续利用的重要战略需求。在此背景下,本文系统分析了污染场地风险管控技术的分类应用与国内外体系架构,建立了涵盖风险标准体系和技术体系的污染场地风险管控模式,并结合绿色可持续修复的核心思想提出了“防、控、治、管”四位一体的宏观风险管控管理策略,以期迅速提高我国污染场地全过程风险有效管理的科技水平提供可推广思路。

## 1 污染场地风险管控概念与内涵

根据管控对象类型,土壤污染风险管控制度可分为农用地土壤污染风险管控、建设用地土壤污染风险管控和工矿用地土壤污染风险管控,基于不同土地功能由不同的风险管控责任主体采取不同的风险管控措施。根据国内外对风险管控内涵及技术分类的主导认知(表1),土壤污染风险管控内涵有广义和狭义之分,以污染场地为例,广义的风险管控是指在土壤污染预防与治理全生命周期中,基于污染风险配套采用一系列减缓或控制土壤污染风险的管理制度和技术方法,如移除或者清理污染源、切断暴露途径、隔离风险受体等措施,在管控土壤风险的同时保护人类健康与环境,达到污染场地治理与再利用的目的<sup>[11-12]</sup>。狭义的风险管控技术定义为适应性较强、可显著减少场地治理过程中环境足迹的基于风险的治理方法,根据美国环保局国家优先名录(NPL)对污染场地管理措施的汇总分类,主要包括工程控制技术、制度控制技术和监测自然衰减技术<sup>[13]</sup>。基于污染场地风险管控内涵所划分的技术分类如图1所示。

可以看出,国内外对污染场地风险管控的内涵并未达成一致,关键分歧在于治理修复技术是否独立于风险管控手段之外。通常情况下,污染地块风险管控与治理修复处于交叉或者复合状态,从近期我国发布的政策性文件来看,多采用“风险管控和修复”的概念。但无论广义还是狭义维度上的风险管控界定,均体现了以下几方面内容:(1)与治理修复目标的一致性,即综合考虑经济、技术、环境、社会等各方面因素,实现土地资源的最优化、可持续利用,保护人体健康和土壤生态安全;(2)基于

对风险作用机制的准确把握,联合污染源处置、风险暴露途径阻断和风险暴露受体防护三个方面制定风险管控策略,达到风险可接受的效果目标;

(3) 借鉴全生命周期管理的理念,将风险管控延展至土壤污染调查、风险识别、风险管控、效果评估、后期监管和土地再利用全过程。本研究中工作内容均基于狭义的风险管控技术展开。

## 2 污染场地风险管控技术及应用分析

以狭义的风险管控技术为研究范畴,根据美国超级基金场地修复报告,自 20 世纪 90 年代以来,工程控制(Engineering Controls)(封存与阻隔等)、

制度控制(Institutional Controls)、监控自然衰减(Monitored Natural Attenuation)等污染场地风险管控技术(单独使用或联合修复技术)在美国超级基金场地土壤或地下水修复中的应用比例逐渐增加<sup>[4, 19-22]</sup>。其中,各项风险管控技术的应用比例较 2005 年之前均有明显提高,污染源修复中的工程控制和制度控制增幅约 10%,地下水修复中的监测自然衰减和制度控制分别增长约 10%和 40%(图 2)。

### 2.1 工程控制技术

工程控制技术主要是利用各种人工工程措施将污染物封存,限制污染物迁移(地表迁移和地下迁移),切断污染源与受体之间的暴露途径,以达到降低污染暴露风险和保护受体安全的目的。按场地污

表 1 污染场地风险管控内涵及技术类别界定

Table 1 Definition and category of contaminated site risk management and control technologies

参考依据 Reference	内涵定义 Definition
美国环境保护局(US EPA) <sup>[13-14]</sup>	将土壤污染的风险管控与治理修复并列为土壤污染治理的主要技术手段,通常作为土壤治理与修复的补充手段,修复失效或者修复未能达到预期修复目标时的“最后补救措施”
英国环保局(UK EA) <sup>[3, 15]</sup>	将污染土壤的修复治理与风险管控措施统称为治理,并按风险作用机制分为去除或消减污染源、阻断污染源与受体(人或物)之间的传递途径、减少暴露风险和移除受体四类治理措施
国内研究人员 <sup>[1, 10, 16-17]</sup>	将土壤污染控制与治理措施统称为土壤污染风险管控技术,包括基于污染物消减的物理、化学、生物修复技术,基于暴露途径切断与受体防护的工程控制技术,以及自然衰减技术、制度控制技术等
国内研究人员 <sup>[18]</sup>	将土壤风险管控技术拓展为与土壤环境保护相关的政策法规完善、规范标准制定、资金保障、组织架构建立、源头预防、污染调查、工程和技术阻隔、治理与修复、监管体系和能力建设、绩效评估、目标考核、宣传推广等
原环境保护部(2017)《铬污染地块风险管控技术指南(试行)(征求意见稿)》	风险管控技术属于被动控制方法,通过将污染物封存在原地截断污染迁移途径、限制地块开发利用和禁止无关人员活动切断风险暴露途径等方式,达到风险控制的目的,保护公众健康和环境安全。铬污染地块风险管控方案包括阻隔覆盖、雨水导排、地下水阻隔和废水处置等,同时需制定长期监测和应急方案
生态环境部(2019)《污染地块风险管控与修复效果评估技术导则》	将风险管控技术限定为固化/稳定化、封顶、阻隔填埋、地下水阻隔墙、可渗透反应墙等五类,后期环境监管的方式一般包括长期环境监测与制度控制
生态环境部(2019)《建设用地土壤污染风险管控和修复 监测技术导则》	
生态环境部(2019)《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》	区分土壤污染风险管控和修复,强调风险管控贯穿土壤污染状况调查、土壤污染风险评估、风险管控、风险管控效果评估和后期管理各个阶段
生态环境部(2018)《中华人民共和国土壤污染防治法》第三十五条	

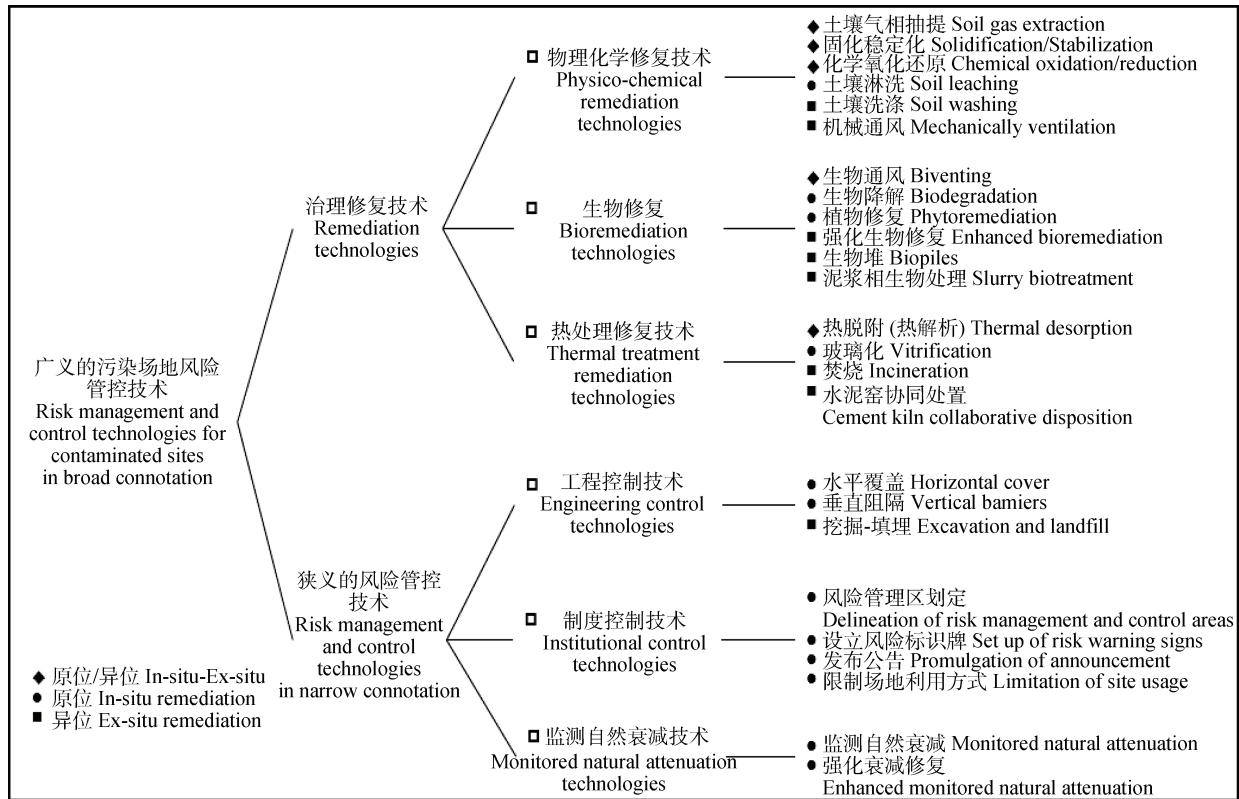
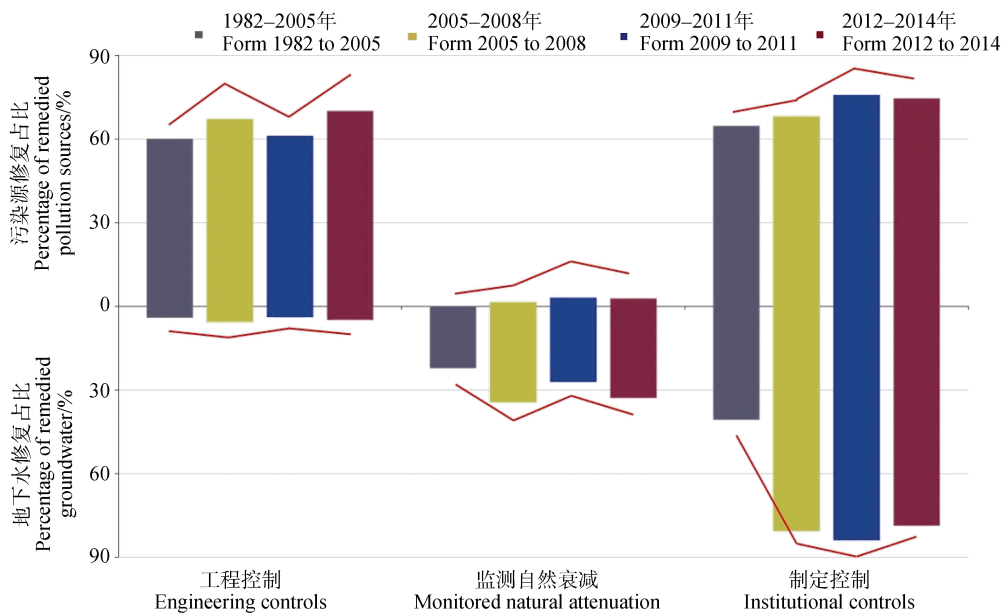


图 1 风险管控技术分类

Fig. 1 Classification of risk management and control technologies



注：根据美国超级基金场地修复报告，污染源修复中源介质包括土壤、沉积物、淤泥和建筑垃圾等；工程控制包括原位阻隔和异位填埋两种方式；监测自然衰减包括（增强型）监测自然衰减和（增强型）监测自然修复。Note: According to the Superfund Remedy Report released by the US EPA, remedied pollution sources include soil, sediment, silt and construction waste, etc.; engineering controls includes two approaches of on-site containment and off-site disposal; monitored natural attenuation includes (enhanced) monitored natural attenuation and (enhanced) monitored natural remediation.

图 2 美国超级基金场地风险管控技术应用趋势

Fig. 2 Trend of the application of risk management and control technologies to Superfund sites in the USA

染物迁移扩散的途径可将工程控制措施分为水平阻隔和垂直阻隔两种方式<sup>[23]</sup>。

表层覆盖是水平阻隔的主要手段,通过将污染物与暴露受体隔开,减少因污染物挥发、扬尘、地表径流和植物富集等造成的污染物地表迁移。典型的覆盖系统通常由六个基本层组成,自上而下分别为表层、保护层、排水层、阻隔层、气体收集层和基础层<sup>[1]</sup>。美国 CRA/CERCLA (资源保护和恢复法案/环境应对、赔偿和责任综合法案)对覆盖层的组成、材料、施工工艺、质量控制方法等均做了详细规定,能有效控制污染物的地表迁移,达到风险控制效果的要求<sup>[24]</sup>。垂直阻隔技术在水利工程防渗中应用广泛,通过建设地下阻隔墙来封存污染物或改变地下水流向,以控制污染物在地下的自然渗滤和迁移,尤其是消除污染物随地下水迁移对下游受体造成的风险隐患,具体的技术方法包括泥浆墙 (Slurry wall)、灌浆墙 (Grouting walls)、板桩墙 (Sheet pile wall)、土壤原位搅拌 (Soil mixing)、土工膜 (Geomembranes) 和衬层 (Liners) 等<sup>[17, 25]</sup>。其中,可渗透反应墙 (Permeable Reactive Barrier, PRB) 技术在地下水污染修复中应用较为普遍,通过在地下安装活性材料墙体来拦截污染羽状体,当污染羽体依靠自然水力传输通过预先设计好的反应介质时,污染物在可渗透反应墙内发生沉淀、吸附、氧化还原、生物降解等作用得以去除或转化,从而达到地下水净化的目的<sup>[26]</sup>。

工程控制技术在水利工程、地质工程、垃圾填埋等工程实施中具有较长的应用历史和较成熟的技术基础,尤其对污染情况复杂的场地具有较强的适应性,能以相对较低的成本在短期内完成污染源阻隔,限制污染物迁移,降低污染风险,对不同类型的污染均具有较好的风险控制效果。从 US EPA 36 个工程控制场地的效果评价结果来看,如果设计科学、建设得当,工程控制措施表现出较好的短期和中长期风险阻隔效果,且效果稳定。失效的场地主要是由于施工缺陷 (如设计的嵌入深度不够) 导致的污染物泄漏。因此,工程控制全生命周期过程 (包含设计、建设和后期跟踪监测环节) 的质量控制和质量保证是提高风险管控实际效果的关键<sup>[1]</sup>。

基于上述优势,工程控制技术近年来在污染场地风险控制中的应用越来越广泛。英国环保局统计数据示,英国于 2000—2013 年开展的 511 个场地

土壤污染治理项目中,68%的污染场地采用了工程控制技术<sup>[3]</sup>。美国环保局超级基金修复报告显示,1982—2008 年 1417 个实施污染源修复的超级基金场地中,约 62%的场地应用了工程控制技术<sup>[20-21]</sup>。国内研究人员已对工程控制技术实施的可行性、成本、时间、风险控制的有效性等方面进行了初步探索<sup>[27-29]</sup>,但污染场地的实际工程应用较少,缺乏成熟、成功的案例经验。技术规范方面,尚缺乏国家层面的工程控制相关技术规范,仅北京市针对重金属污染土壤填埋场的建设和运行做了相关规定,北京、广东、江苏、上海和天津等地发布的地下连续墙工程建设规范也被作为现阶段地下垂直阻隔施工的技术依据执行。

## 2.2 制度控制技术

美国环保局是制度控制的主导机构,2000 年颁布第一个制度控制场地管理者指南,将制度控制定义为“采用非工程的措施,例如行政管理或法律法规的发布来削减人类暴露于污染物的风险及确保污染场地治理的完整性,包括所有权控制 (Proprietary Controls)、政策控制 (Governmental Controls)、强制与许可控制 (Enforcement and Permit Tools with IC Components) 和信息工具 (Information Devices) 四个组成部分”<sup>[19]</sup>。随后又陆续制定了一系列关于制度控制规划、实施、维护和评估方面的指南,用于规范和指导制度控制在污染场地的应用,并应用制度控制跟踪系统 (Institutional Control Tracking System, ICTS) 来确定污染场地治理的优先顺序以及选择何种跟进的治理措施,形成了比较完善的制度控制管理体系<sup>[19, 21, 23]</sup>。

美国环保局超级基金修复报告显示,2009—2011 年 288 个实施污染源修复的超级基金场地中,约 76%的场地使用了制度控制技术,与其他修复技术联用的比例高达 50%<sup>[4]</sup>。美国超级基金场地的管理经验表明,制度控制在场地修复中起着非常重要的作用,在污染场地全生命周期中整合制度控制能有效提高污染场地的管理水平以达到更好的治理效果。一方面,制度控制措施适应性强,可应用于污染场地修复的各个环节 (涵盖早期调查、中期修复和后期监测),尤其是由于受经济、技术和时间等因素的制约,一个污染场地修复完成后可能存在污染物残留,修复后的场地无法达到任意使用和任意暴露的标准,此情景下通常选择制度控制作为必要的

补充修复手段<sup>[30]</sup>；其次，制度控制通常联合其他风险管控措施使用达到修复目的，能为污染严重、修复困难、风险级别高等需要长期治理或管控的场地提供跟踪管理的保障，并显著降低修复成本和缩短修复时间<sup>[31]</sup>。例如，采用帽封措施治理的场地，搭配场地未来挖掘许可制度或场地使用限制，保障了帽封的完整性和长期有效性；第三，制度控制措施通过限制公众对土地资源的使用，引导公众在场地上的行为，提高公众主动规避风险的意识，可有效降低和控制公众暴露于污染物的风险。

我国《污染地块风险管控技术指南-阻隔技术(试行)(征求意见稿)》、《污染地块风险管控与修复效果评估技术导则》、《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》等文件对制度控制的定义、目的、手段等作了简要说明，指出制度控制是为了减少或阻止人群对场地污染物的暴露，杜绝和防范污染场地可能带来的风险和危害，从而达到对污染场地的潜在风险进行控制的目的，可通过限制地块使用方式、限制地下水利用方式、通知和公告地块潜在风险、制定限制进入或使用条例等管理手段实现。然而制度控制的计划、实施、维护和执行的整个流程均需有完善的管理政策与法律法规，以及污染场地长期跟踪监测系统的保障<sup>[32]</sup>，当前国情下推广仍存在诸多阻碍。研究层面也仅停留在对国外管理经验的总结与借鉴。

### 2.3 监测自然衰减技术

监测自然衰减技术是修复地下水和土壤污染较为经济有效的风险管控方法之一。基于对场地土层结构、水文地质条件、污染物扩散运移等方面精确的了解，监测自然衰减技术在场地污染风险可控的管理与监控前提下，通过实施有计划的监测方案，利用场地内自然发生的物理、化学及生物系列过程(包括稀释、扩散、挥发、吸附、化学性或生物性稳定、生物降解以及放射性衰减等)，使得土壤和地下水中污染物的数量、毒性、移动性降低到风险可接受水平，从而降低场地内污染物的暴露风险<sup>[20, 33]</sup>。任何污染场地均存在污染物的自然衰减，但自然衰减强度随污染物性质及其所处的环境条件表现出时间与空间上的显著差异<sup>[34]</sup>。通常，监测自然衰减修复时间相对较长、修复效率相对较低，实际应用中需采用强化衰减修复技术(Enhanced Attenuation, EA)，通过人工干预的方式增强污染物的自然降解

能力。强化衰减修复技术与MNA的联合运用是当前污染场地水土治理的主要发展趋势<sup>[35]</sup>。

监测自然衰减技术具有诸多优势，包括：1)在自然环境中将污染物降解为二氧化碳、水等无害产物；2)不涉及污染土壤开挖、回填及地下水抽取，对场地的扰动小；3)工程施工少，减少噪音、废气、废水、异味等环境影响和公众影响；4)可处理有机污染物、垃圾渗滤液、杀虫剂等多种污染物；5)明显的成本优势等<sup>[33, 36]</sup>。欧美发达国家对监测自然衰减技术的研究起步较早，积累了丰富成熟的理论研究和工程应用经验。一方面，很多国家均制定了监测自然衰减技术指南，用于揭示特定污染物的生物地球化学过程和指导建立指标体系来评价其自然衰减能力<sup>[37]</sup>；另一方面，监测自然衰减技术和强化衰减修复技术已在污染场地土壤和地下水修复工程中商业化应用，成为联合其他修复技术治理地下水的主要发展趋势。美国环保局超级基金修复报告显示，1986—2014年地下水修复案例中监测自然衰减技术的应用比例(含联合其他修复技术)由1990年前低于10%增至1995年的30%左右，2012—2014年这一技术的应用比例高达33%<sup>[4]</sup>。

国内研究在监测自然衰减技术的评价方法、降解机理、衰减能力、成本效益分析等方面均开展了深入研究，在室内模拟实验和场地小试、中试中也均取得了一定的进展<sup>[35-40]</sup>。2014年原环境保护部发布的《污染场地修复技术目录(第一批)》将监控自然衰减技术纳入地下水污染修复技术，但目前还未出台监控自然衰减技术实施的相关指南和规范。目前，监控自然衰减技术的工程应用正逐步推广开来，如北京东方化工厂污染地块长期风险管控项目建立了空气-土壤气-地下水的多介质环境监测体系，动态评估风险管控与生态恢复效果，有效保障了风险管控策略的绿色可持续性。

### 2.4 风险管控技术应用SWOT分析

从发达国家污染场地风险管控的成功经验来看，在多种污染并存、修复难度较大、污染场地条件和污染物环境行为复杂的情况下，风险管控技术适用范围更大，能同时处理不同类型的污染物，对不同水文地质条件的场地具有更好的处理效果，还能克服修复技术诸如施工工程风险、治理周期长、成本高、修复效果不理想等弊端<sup>[1]</sup>。同时，风险管控技术也面临灵活性大、技术与管理要求高、社会

影响因素多、针对性标准少和可接受程度低等劣势。

我国污染场地风险管控技术研究起步较晚,受污染场地风险管控理念不完善、技术施工经验不成熟、决策者偏好、政策支持基础薄弱和土地再利用方式限制等客观因素主导,目前国内污染场地修复仍以高成本的清除手段为主,风险管控技术应用较少<sup>[16, 41-42]</sup>。在此背景下,了解各项风险管控技术的

优劣势并识别其工程应用的驱动、阻碍主导因素,开展污染场地风险管控 SWOT (优势-劣势-机会-威胁) 分析,有利于判断污染场地是否具备开展风险管控的条件,及可采取的风险管控措施,从而为污染场地中长期风险管理策略提供科学依据。如表 2 所示,结合已有研究中关于风险管控影响因素的态势分析,将风险管控措施应用的驱动因素和阻碍因

表 2 风险管控技术 SWOT 矩阵

Table 2 SWOT matrix of risk management and control technologies

技术	优势	劣势	因素	机会/驱动	威胁/阻碍
Technology	Strength	Weakness	Factor	Opportunity/Driver	Threat/Barrier
工程控制	受污染物类型影响小;处理周期短;处理效果好;可操作性强;成本相对较低;不受土壤质地限制小;施工技术成熟	无法彻底清除污染物;有失效风险;不适用污染物水溶性强或渗透率高的土壤;依赖长期监测;不适用于地质活动频繁或地下水水位高的地区;限制场地再开发,不能扰动土壤或破坏现有工程	场地物理条件-环境因素	场地地理位置偏僻;污染物不易迁移;污染多样,情况复杂;污染严重难处理;污染范围大;场地地质条件复杂;土壤渗透率低;相对独立的水文地质条件,污染物迁移扩散易人为控制;存在自然衰减;场地水体未污染;地下水埋深较深	场地易接近;污染物易迁移扩散;污染单一、污染程度轻或范围小,易处理;场地地质条件简单;较高的土壤渗透率;无或弱自然衰减现象;地质活动频繁;地下水水位较高;场地存在水体污染
自然衰减	成本相对较低;工程施工少;技术实施简单;对场地的扰动小;可在自然环境中将很多污染物彻底降解为二氧化碳、水等无害产物;环境影响及对公众影响小;可避免污染物挥发、散逸造成的安全风险	依赖长期监测;仅适用于特定条件的场地或特定污染物;场地调查所需时间较长,需精确掌握场地的水文地质条件、污染物的扩散运移等情况;存在失效风险;效果不确定性大;修复时间长;对长期监测、管理要求高	社会经济因素	修复成本有限;修复净效益较低;修复行为对周围社区产生干扰;修复行为对施工人员产生健康、安全全隐患;利益相关方诉求;周边敏感目标少;能与后期开发很好的结合;管控后不影响场地再利用;管控后场地人为活动受限	各利益方对修复目标意见不一致;场地修复后价值显著提升;利益方要求开展修复;未来规划为居住用地等具有地下扰动的土地利用类型;修复资金充足;修复技术研发、示范需求;修复行为对周围社区居民干扰小;修复行为对施工人员的健康、安全隐患小;管控后场地人为活动频繁
制度控制	成本相对较低;无工程施工;技术实施简单;对场地的扰动小;环境影响及对公众影响小;可操作性强;不受污染物类型和场地条件限制	需要更新;需与其他技术搭配;无法彻底清除污染物;依赖长期监测;限制场地再开发	风险-技术管理因素	修复可能导致污染迁移;现阶段修复技术不成熟;已开展修复,失败;修复可能产生二次污染;未来土地利用紧迫;可持续发展需求;风险管理需求;污染物暴露风险小	现阶段修复技术成熟;修复不存二次污染问题;对风险管控缺乏信心;缺乏政策法规支持;对场地风险识别不足;土地再开发时间充足;风险管理要求高,需彻底清除污染物;风险管控效果难评估;长期效果难以保证

素归纳为场地物理条件-环境因素、社会经济因素和  
 风险-技术管理因素等三个类别<sup>[43]</sup>。风险管控的驱动  
 因素以场地物理条件-环境因素为主，包括污染场地  
 的地质条件、污染物处理难度、污染羽流范围等，  
 而阻碍因素多数情况下来源于风险管控效果的不确  
 定性和对土地再开发利用的需求等<sup>[18]</sup>。

### 3 国内外风险管控体系研究

#### 3.1 发达国家污染场地风险管控体系

风险评估理论是污染场地风险管控体系的核心思想。1983 年，美国国家科学院提出了健康风  
 险评估的定义与框架，确定其基本流程包括危害  
 识别、毒性评估、暴露评估和风险表征四个步骤<sup>[44]</sup>。  
 在此基础上，美国环保署颁布了《致畸风险评估  
 指南》、《暴露风险评估指南》、《神经毒性风险评

估指南》、《暴露因子手册》、《超级基金场地健康  
 风险评估手册》、《致癌风险评估指南》等一系列  
 技术文件、导则和指南，系统介绍了环境与健康  
 风险评估的方法、内容和技术要求等<sup>[45-50]</sup>。基于  
 风险评估理论，英国通过研究污染场地暴露评估  
 方法学，完善了暴露评估方法学、污染物理化参  
 数及风险评估导则<sup>[51-53]</sup>；荷兰等欧盟国家也相继  
 建立起各自国家的风险评估体系<sup>[54]</sup>。目前，美英  
 等发达国家已经形成了系统的风险评估理论框架  
 与方法体系，并广泛应用于污染场地风险管理的  
 工程实践中，建立起系统完善的以风险管理法律  
 法规为保障、以风险评估技术体系为支撑的污染  
 场地风险管控体系。图 3 对美国超级基金与《资  
 源保护与恢复法案》工业遗留场地管理体系、英  
 国棕地治理与再利用管理体系的主要法律法规和  
 风险评估技术文件作了部分汇总。

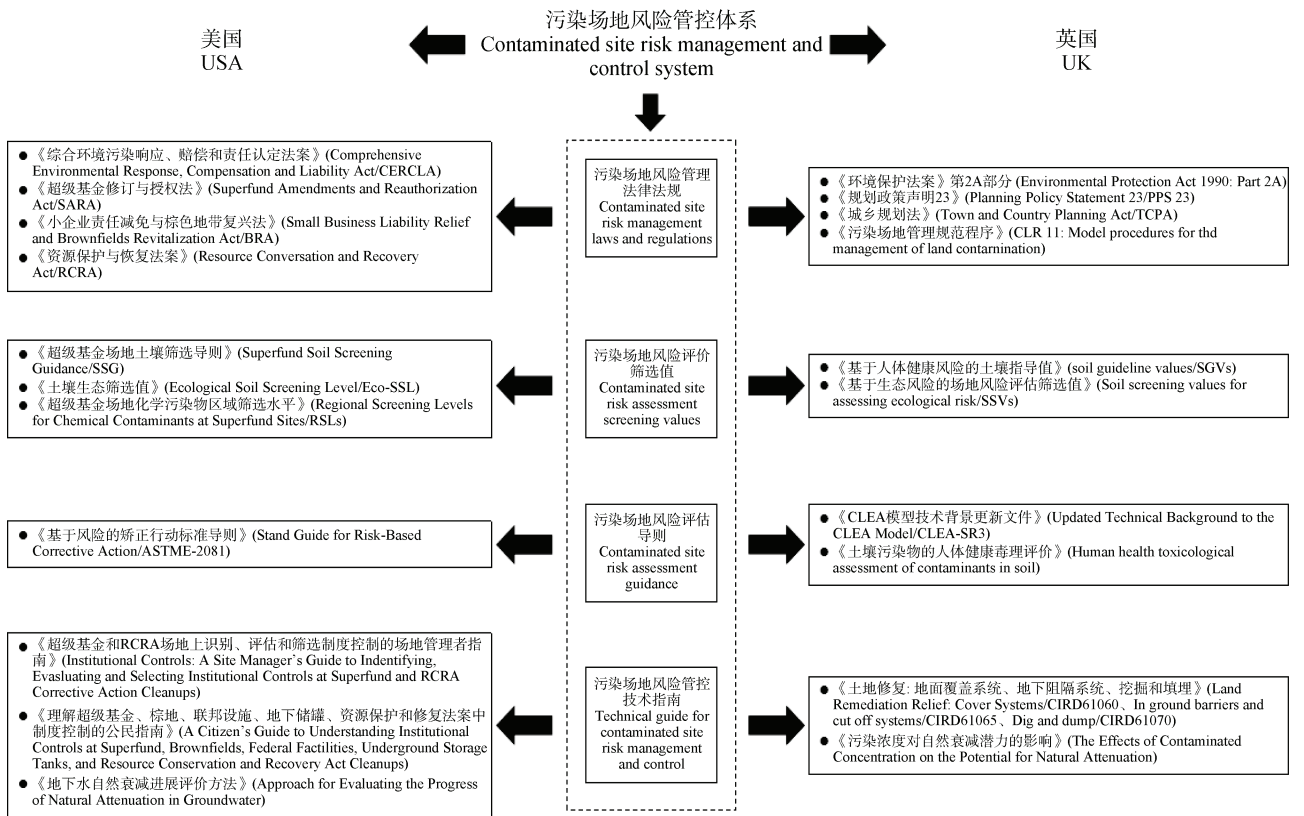


图 3 美英污染场地风险管控体系

Fig. 3 Risk management and control systems of contaminated sites in the USA and the UK

#### 3.2 我国污染场地风险管控体系

2000 年，北京市环境保护科学研究院主持完成  
 《北京化工集团七厂及北京市第一建筑构件厂等用

地性质改变的环境风险调查与分析》项目，这是国  
 内首次引入场地风险评估技术的场地调查与风险评  
 估项目，开展场地土壤砷和汞污染风险评估及修复



目标值推导<sup>[55]</sup>。随后,我国风险管控制度体系经过近二十年发展衍变,经历了从适用普遍性规范到独立性立法两个阶段,在污染场地环境管理系列技术导则、风险管控标准与技术指南及北京、重庆等地方污染场地风险评价筛选值和技术导则的补充完善下,初步形成了以《土壤污染防治法》为专门立法、以“土十条”为具体实施要求、配套系列技术导则的污染场地全过程风险管控体系,覆盖了风险预防、风险调查、风险评估、风险管控、效果验收和后期监管等各个阶段(图4)。但风险管控技术体系仍以借鉴发达国家风险评估框架和方法为主,缺乏切合我国土壤环境特征和管理目标的本土化毒理参数、技术导则,难以有效支持区域土壤差异化管理下风险管控的科学性。

### 3.3 我国污染场地风险管控模式

污染场地风险管控是一个复杂的多属性决策过程,就我国当前污染场地管理模式而言(图5),污染场地管理决策以符合国家法规、导则等规范性文件的具体要求为前提,涉及土壤污染风险的识别、评价、管控、效果验收评估和后期监管等各个阶段,通过实时更新完善各个阶段的场地概念模型(Conceptual Site Model, CSM),最终形成起以风险管控为导向、以风险管控体系为支撑、以系统的技术方法和量化模型为配套的污染场地全生命周期管理决策系统。风险管控基本思路为:

1) 识别风险作用机制:通过调查场地实际特性构建场地概念模型,确定潜在污染物、暴露途径、暴露受体及其之间的相互关系;

2) 明确风险水平与风险管控适用条件:判断修正暴露剂量等模型参数,在暴露评估和毒性评估的基础上,应用风险评估模型评估场地风险状态,结合场地实际和管理需求等影响风险管控技术应用的关键因素(表2)判断风险管控措施的适用性;

3) 设计与实施风险管控策略:若适用,则制定风险管控方案,基于场地概念模型和风险评估模型预测场地管控效果,解决“谁来管控”(管控主体)、“如何管控”(管控措施)及“管控到何种程度”(管控目标)等问题;

4) 评估管控效果与后期监管:风险管控完成后,结合验收指标评估污染场地的实际管控效果是否满足场地安全利用的目标,并论证后期监管措施的合

理性和适用性。

可以看出,涵盖污染场地管理各个环节的风险管控模式已具雏形,其中,风险评价和技术筛选不仅是污染场地风险精确识别与有效管控的两个核心环节,也是建立污染场地风险管控模式的关键技术手段:

一方面,以健康风险评价为主的污染场地风险评价是确定风险管控目标及制定风险分级分类管理策略的重要决策依据。我国自2000年首次引入场地风险评估技术,已在基础理论、案例应用、毒理实验和场地风险管理等方面开展了大量工作并取得重要进展,但由于风险评价具有高度的地块差别性和地域性特点,目前仍存在诸多不足,例如一刀切的限值型标准、忽略污染物赋存形态的影响、基于总量的保守评估、对污染物归趋的简单模拟、模型参数的不确定性、非本土化毒理数据的适用性等问题,均会对风险评价结果造成较大的不确定性,不仅影响风险管控措施的科学决策与有效落实,过于保守的评估结果还会大大增加场地管理的成本和难度<sup>[56-67]</sup>。

另一方面,选择合理的风险管控或治理修复技术是污染场地管控工作成败的关键,直接关乎风险管理策略的精细化设计和管控目标的可达性。影响污染场地修复技术筛选的因素非常复杂,涉及地块位置、规划用途、污染物性质、污染空间分布、地质与水文情况、可能的迁移扩散程度、周围敏感目标、资金水平等各个方面,基于国别背景、场地环境和评估者专业知识的差异,对于选取何种指标和方法作为污染场地修复技术决策的关键评判依据,目前还没有获得业界一致认可,但均强调环境、社会、经济和技术等多维度的综合考量,从人体健康、社会公平、经济成本、技术可行性和环境影响等多个方面构建技术筛选指标体系。基于技术筛选评价指标,多目标决策分析方法(MCA/MCDA)、成本-效益分析法(CBA/CEA)、生命周期评价法(LCA/LCIA)等方法被广泛应用于修复技术的综合定量评价,为REC、SCORE、SiteWise和DESYRE模型等污染场地修复决策系统快速判别场地污染风险与修复技术可行性提供方法支撑,增强和扩大了决策者处理场地污染问题的能力和范围<sup>[68-78]</sup>。

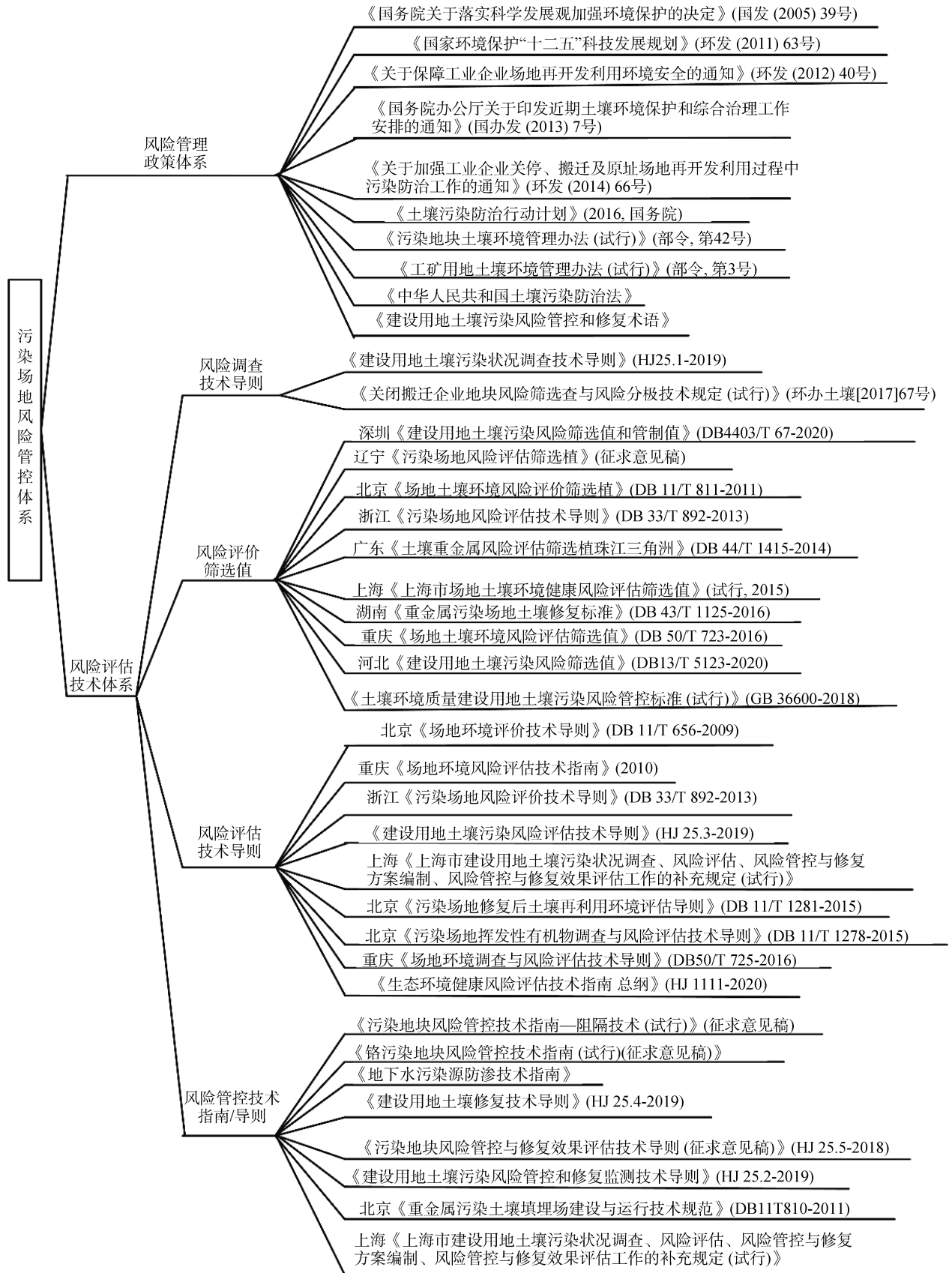


图 4 我国污染场地风险管控体系

Fig. 4 Risk management and control system of contaminated sites in China

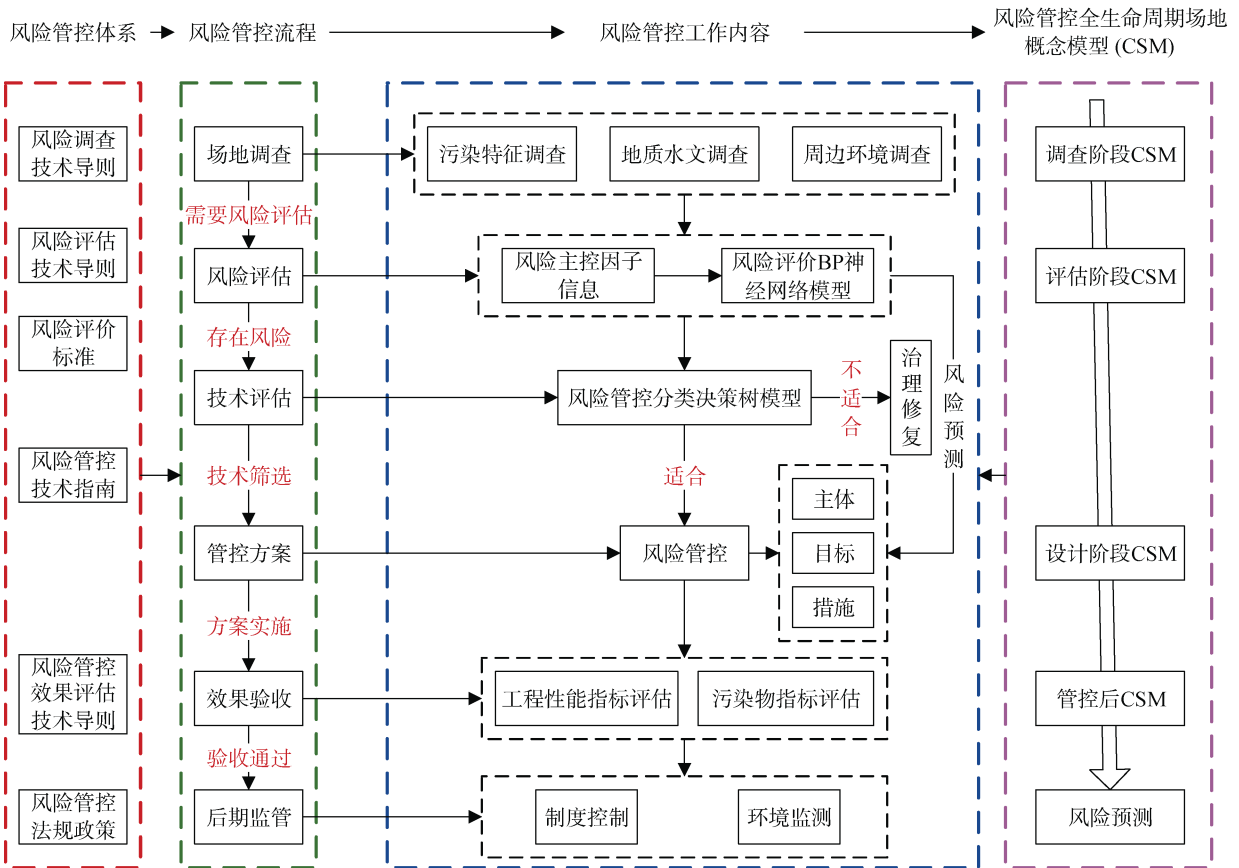


图 5 污染场地全生命周期风险管控模式

Fig. 5 Life-cycle risk management and control mode for contaminated sites

### 4 污染场地全生命周期风险管控策略

经过近二十年的工作积累，我国已形成了污染场地风险管控体系与决策模式的基本框架，但仍面临风险管理基础薄弱、风险管控体系不健全、风险管控技术支撑不足等挑战。在此背景下，为快速、高效、全面提升污染场地风险管控能力，达到土地安全可持续再利用目标，提出以可持续发展目标和风险管理理念为驱动、着眼于全生命周期管理视角的“防、控、治、管”四位一体污染场地风险管控总体战略布局（图 6）。

1) 防：源头预防是根本。土壤是大气、水、固体废物等各类污染物的最终受体，土壤一旦被污染，修复起来难度大、周期长、成本高。因此，源头预防是土壤污染防治的根本，土壤污染防治法以专章规定的形式对源头预防加以强化，设立土壤环境影响评价、土壤有毒有害物质名录、土壤污染重点监管单位名录、土壤污染防治应急预案等多项制度，齐头并进全面消除土壤污染源头、减少土壤污染输

入、严防土壤污染新增风险。考虑到土壤环境高度的空间异质性和复杂性，准确的污染风险识别和可靠的污染源解析对于制定针对性的源头预防措施至关重要。基于土壤点位实测数据，利用地统计学的空间插值方法建立特征污染物含量的连续性表面，实现污染由点到面的数值化、空间化表征是了解土壤污染风险空间分布特征的热点、难点问题。而从土壤学、地球化学、统计学以及人工智能交叉视角出发的土壤污染源解析技术，是建立区域尺度上污染物污染动态源谱数据库的前沿发展方向。

2) 控：过程控制是重点。针对生产运营期的工业企业，以过程控制、污染排查、污染监测、应急响应为土壤环境联合管理原则，可从以下四个方面开展土壤污染风险防治工作：第一，配套法律法规制度设计，督促在产企业绿色安全生产和末端无害化处理，形成系统化防控土壤污染风险的全过程联动机制；第二，针对土壤环境污染监管重点区域、重点行业企业，建立土壤污染隐患排查制度，及时识别可能造成土壤污染的污染物、设施设备和生产

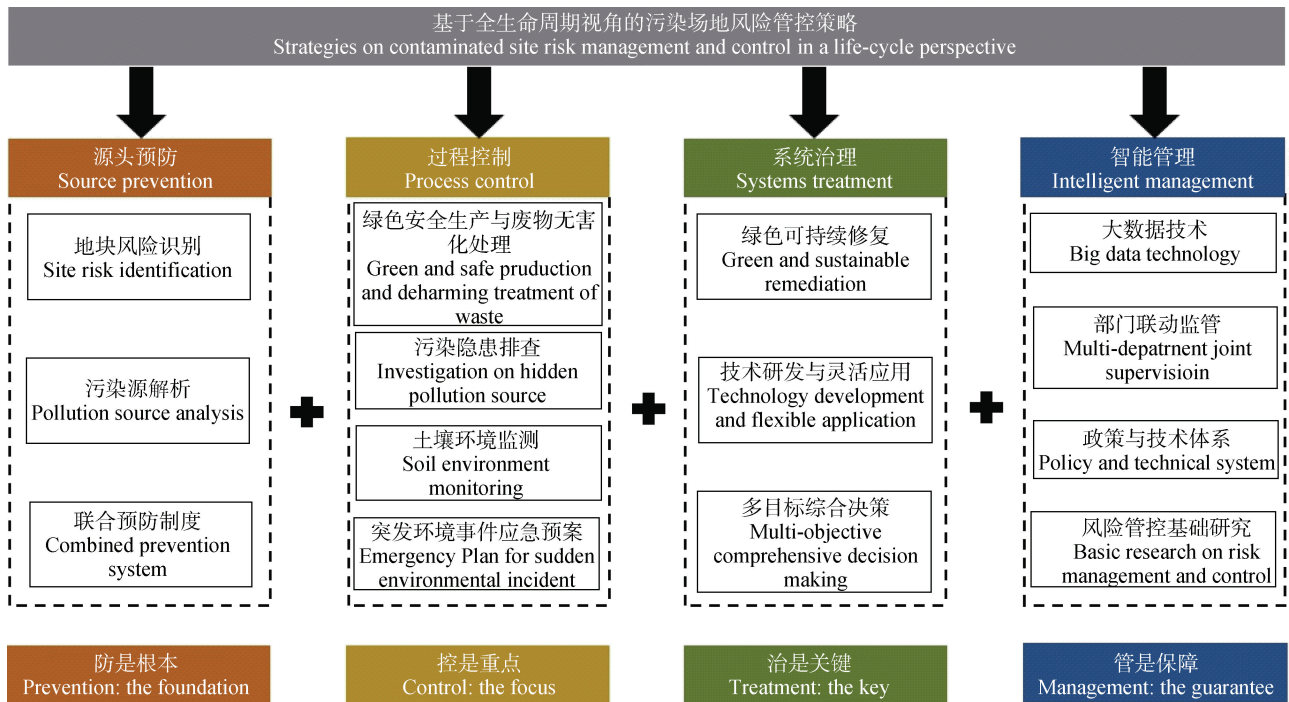


图 6 污染场地“防、控、治、管”四位一体风险管控策略

Fig. 6 The “prevention-control-remediation-management” four-in-one strategy for contaminated site risk management and control

活动；第三，定期开展在产企业及周边土壤及地下水自行监测和第三方监察，建立有效的多元主体风险沟通与风险交流机制，实时掌握土壤环境质量状况；第四，制定技术整改策略、风险管控措施和完善企业突发环境事件应急预案，系统提升土壤污染风险的预警水平和防控能力。

3) 治：系统治理是关键。面对我国场地污染状况复杂、技术水平薄弱和土地流转期限短、经济投入有限等现实国情与大规模工程彻底清除污染需求之间的矛盾，亟需加快风险管控关键技术攻关和大规模工程应用推广，充分发挥其可持续性、灵活性和系统性优势。一方面，秉承国际通用的绿色可持续修复理念，以土壤生态环境安全、人体健康保护和社会经济效益为考量，实现风险管控技术在社会、经济、环境等多维尺度上的综合效益最大化；另一方面，加快风险管控技术、材料和装备的科研投入、智能化发展、产业化推广和工程化应用，增强其对政策法规、场地环境、决策者偏好和技术进步等变化因素的应对能力和适应性；第三，污染场地风险管控是一项庞大、复杂的系统工程，合理的风险管控决策还应统筹衔接区域功能定位、资源禀赋、土地利用规

划和关键利益方等诸多要素和环节。

4) 管：智能管理是保障。在我国污染场地风险管控基础薄弱的初期阶段，建立基于大数据技术的场地管理创新机制，是“互联网+”背景下污染场地智能化、系统化管理的重要发展机遇。具体为：①应用大数据技术服务于场地多源信息的系统整合与深度挖掘，全面评估工矿企业用地土壤环境承载容量，确定风险区划与管控优先顺序，提高土壤污染监控与风险预警能力；②完善涵盖地块流转全过程的土壤环境管理信息化系统，实现住房城乡建设、城乡规划、国土资源、环保等相关部门信息共享与联动监管，建立多元主体交互参与决策机制，以系统部署场地风险管控策略，提高决策的科学有效性；③建立健全“十四五”土壤环境管理目标驱动下符合我国污染场地风险管控实际和可持续发展格局的风险评价技术体系和风险管控体系，充分发挥宏观层面风险管控政策体系的保障支撑作用；④开展复杂场地精准环境调查与风险甄别、高难度场地安全高效修复、场地再利用生态景观统筹规划等关键技术的前瞻性基础研究，以符合未来污染场地风险精细化管理的迫切需求。

## 5 结 论

特定场地情景下, 污染场地风险管控技术具有较好的地质适应性、较强的复合污染处理能力和较广的场地适用范围, 同时能在一定程度上规避传统修复的二次污染风险、成本高昂、治理周期长等弊端, 因此, 近年来工程控制、监控自然衰减、制度控制等风险管控技术得到了越来越多的关注和工程应用。但我国污染场地风险管控技术研究起步较晚, 虽已初步形成了污染场地全过程风险管控的制度体系和管理模式, 目前国内污染场地风险管控技术应用仍未获得足够重视, 阻碍因素主要来源于污染场地风险管控理念不完善、技术施工经验不成熟、社会影响因素多、政策支持基础薄弱和土地再利用限制等多个方面, 此外, 在制定与我国土壤环境特征和管理目标相契合的毒理参数和技术导则、形成可推广可操作的可持续风险管控决策系统等方面仍需持续发力。在此背景下, 以国际可持续发展目标和风险管理理念为导向的污染场地全生命周期可持续风险管控“防、控、治、管”四位一体总体战略布局, 是对标我国“十四五”土壤环境管理和生态文明建设目标的重大战略需求, 对于引领我国土壤污染攻坚战具有深远的现实意义。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Xie Y F, Cao Y Z, Zhang D D, et al. Engineering control technologies and its application in the risk management for contaminated sites[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2 ( 1 ): 51—59. [谢云峰, 曹云者, 张大定, 等. 污染场地环境风险的工程控制技术及其应用[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2( 1 ): 51—59.]
- [ 2 ] Pizzol L, Zabeo A, Critto A, et al. Risk-based prioritization methodology for the classification of groundwater pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 506/507: 505—517.
- [ 3 ] UK EA. Dealing with contaminated land in England: progress from April 2000 to December 2013 with Part 2A of the Environmental Protection Act 1990[R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2016.
- [ 4 ] US EPA. Superfund remedy report[R]. 15th ed. Washington D C: Office of Land and Emergency Management, the United States Environmental Protection Agency, 2017.
- [ 5 ] Yuan K S. Brownfield redevelopment risk control legal regulation research in China[D]. Chongqing: Southwest University of Political Science and Law, 2016. [苑克帅. 我国污染场地再开发风险管控法律规制研究[D]. 重庆: 西南政法大学, 2016.]
- [ 6 ] Chang C Y, Dong M G, Deng Y R, et al. Thoughts on and construction of a risk management and control system for contaminated sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 ( 12 ): 5570—5580. [常春英, 董敏刚, 邓一荣, 等. 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考[J]. *环境科学*, 2019, 40 ( 12 ): 5570—5580.]
- [ 7 ] Lu W T. Research on remediation of contaminated sites based on risk management and control[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22 ( 16 ): 65—67. [陆文婷. 基于风险管控思路的污染场地修复研究[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22 ( 16 ): 65—67.]
- [ 8 ] Chen X H, Shen G X, Guo C X, et al. International experience of risk management of reclaimed farmland from low-efficiency industrial land and its enlightenment[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41 ( 9 ): 1120—1124. [陈小华, 沈根祥, 郭春霞, 等. 城市低效工业用地复垦农用风险管控的国际经验及启示[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41( 9 ): 1120—1124.]
- [ 9 ] Zhang Z Y. Normative analysis and change path of soil risk control system[J]. *Journal of North China Electric Power University: Social Sciences*, 2019 ( 5 ): 1—8. [张真源. 土壤污染风险管控制度的规范分析与完善路径[J]. *华北电力大学学报: 社会科学版*, 2019 ( 5 ): 1—8.]
- [ 10 ] Wang X H. Intelligent identification and precise risk control of site pollution driven by big data[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47 ( 13 ): 14—16. [王夏晖. 大数据: 场地污染智能识别与风险精准管控驱动力[J]. *环境保护*, 2019, 47 ( 13 ): 14—16.]
- [ 11 ] Bardos R P, Bone B D, Boyle R, et al. The rationale for simple approaches for sustainability assessment and management in contaminated land practice[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564: 755—768.
- [ 12 ] Wang H. Method of urban brownfield regulatory planning based on environmental risk management[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018. [王慧. 基于环境风险管控的城市棕地控规编制方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.]
- [ 13 ] ASTM International. Standard guide for greener cleanups ( ASTM E2893-16e1 ). West Conshohocken: American Society for Testing Materials, 2016.
- [ 14 ] Deeb R, Hawley E, Kell L, et al. Assessing alternative endpoints for groundwater remediation at contaminated sites[R]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [ 15 ] UK EA. Dealing with contaminated land in England and Wales: A review of progress from 2000—2007 with Part 2A of the Environmental Protection Act[R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2009.
- [ 16 ] Tang F, Hu H Q, Liu Y H, et al. Types of contaminated sites and risk control techniques[J]. *Environmental*

- Science & Technology, 2013, 36 (S2): 195—202. [汤帆, 胡红青, 刘永红, 等. 污染场地类型及其风险控制技术[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (S2): 195—202.]
- [ 17 ] Li Z T, Wang X H, Gao Y X, et al. Countermeasure study of environmental management and control of contaminated sites[J]. Environmental Protection Science, 2016, 42 (4): 40—42. [李志涛, 王夏晖, 高彦鑫, 等. 污染地块环境风险管控对策研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42 (4): 40—42.]
- [ 18 ] Li Y Z, Dong J, Liu S Y, et al. Prospect and research of soil pollution control based on risk management[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26 (6): 1075—1084. [李云祯, 董荐, 刘姝媛, 等. 基于风险管控思路的土壤污染防治研究与展望[J]. 生态环境学报, 2017, 26 (6): 1075—1084.]
- [ 19 ] US EPA. Institutional controls: A site manager's guide to identifying, evaluating and selecting institutional controls at Superfund and RCRA Corrective Action Cleanups[R]. Washington D C: Office of Land and Emergency Management, the United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [ 20 ] US EPA. Monitored natural attenuation: USEPA research program—an EPA science advisory board review[R]. Washington D C: Office of the Administrator Science Advisory Board, 2001.
- [ 21 ] US EPA. Institutional controls: A guide to planning, implementing, maintaining, and enforcing Institutional Controls at contaminated sites[R]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2012.
- [ 22 ] US EPA. Superfund remedy report[R]. 14th ed. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2013.
- [ 23 ] US EPA. Strategy to ensure Institutional Control implementation at Superfund Sites[EB/OL]. 2004 [2020-09-10]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/icstrategy.pdf>.
- [ 24 ] US EPA. Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers (Draft) [R]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [ 25 ] Chien C C, Inyang H I, Everett L G. Barrier systems for environmental contaminant containment and treatment[M]. Florida: CRC Press, 2005.
- [ 26 ] US EPA. Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation[R]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 1998.
- [ 27 ] Chen J. Risk assessment and remediation program discussion of a typical fluoride contaminated site[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. [陈静. 某氟化物污染场地再利用风险评估及修复方案探讨[D]. 南京: 南京大学, 2016.]
- [ 28 ] Chen S Y, Wang F, Wang W F, et al. Research and application of engineering control in contaminated sites[J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (5): 146—149, 137. [陈素云, 王峰, 王文峰, 等. 污染场地工程控制技术应用研究[J]. 环境工程, 2014, 32 (5): 146—149, 137.]
- [ 29 ] Zheng Y, Yu Z, Hu J C, et al. Restoration and risk control of a retired industrial site in Zhejiang Province[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46 (10): 115—117, 135. [郑阳, 余湛, 胡佳晨, 等. 浙江省某退役工业场地修复治理及风险管控工程实例[J]. 广东化工, 2019, 46 (10): 115—117, 135.]
- [ 30 ] Ma Y, Dong B B, Xie Y F, et al. Experience of institutional controls in American contaminated sites and its enlightenment to China[J]. Environmental Protection, 2016, 44 (Z1): 98—101. [马妍, 董彬彬, 谢云峰, 等. 美国污染场地制度控制经验及实践应用[J]. 环境保护, 2016, 44 (Z1): 98—101.]
- [ 31 ] Shen K, Song Y, Zhao K H. Contaminated site remediation technology and risk management[J]. Environment and Sustainable Development, 2011, 36 (2): 1—5. [申坤, 宋云, 赵可卉. 污染场地修复技术及风险管理[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36 (2): 1—5.]
- [ 32 ] Zhang H, Jiang P, Teng J Q, et al. Analysis on institutional control of polluted sites in America and its revelation of China[J]. Environmental Protection Science, 2012, 38 (4): 49—52. [张华, 蒋鹏, 滕加泉, 等. 美国污染场地的制度控制分析及对我国的启示[J]. 环境保护科学, 2012, 38 (4): 49—52.]
- [ 33 ] Li Y J, Wang S J, Zhang M, et al. Research progress of monitored natural attenuation remediation technology for soil and groundwater pollution[J]. China Environmental Science, 2018, 38 (3): 1185—1193. [李元杰, 王森杰, 张敏, 等. 土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38 (3): 1185—1193.]
- [ 34 ] Chen R R. Application investigation of Monitored Natural Attenuation technology on chlorinated organic compounds contaminated sites[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. [陈然然. 监控自然衰减技术在氯代有机物污染场地的应用探究[D]. 南京: 东南大学, 2016.]
- [ 35 ] Jiao X. Comment on monitored natural attenuation of organic contaminants in soil and groundwater[J]. Shanghai Land and Resources, 2011, 32 (2): 30—35. [焦珣. 地下水有机污染MNA修复研究综述[J]. 上海国土资源, 2011, 32 (2): 30—35.]
- [ 36 ] NRC (National Research Council). Natural attenuation for groundwater remediation[M]. Washington D C: National Academies Press, 2000.
- [ 37 ] [37] US EPA. Monitored Natural Attenuation of MTBE as a risk management option at leaking underground storage tank sites[R]. Washington D C: Office of

- Research and Development, the United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [ 38 ] Zhu R L. Natural Attenuation of 1,1,1-trichloroethane in shallow groundwater at a contaminated site in Shanghai, China[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014. [朱瑞利. 上海某污染场地地下水三氯乙烷的自然衰减机制研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.]
- [ 39 ] Yin Y, Dai Z H, Jiang P, et al. Research on the feasibility assessment programs of Monitored Natural Attenuation in Contaminated Aquifers of Volatile Organic Contaminants contaminated sites[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2013 (3): 28—31. [尹勇, 戴中华, 蒋鹏, 等. VOCs 污染场地地下水监测式自然衰减法可行性评估程序研究[J]. 江西化工, 2013 (3): 28—31.]
- [ 40 ] Jia H, Wu X F, Hu L M, et al. Research of the natural attenuation capacity of oil pollutants based on *in-situ* experiment[J]. Environmental Science, 2011, 32 (12): 3699—3703. [贾慧, 武晓峰, 胡黎明, 等. 基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究[J]. 环境科学, 2011, 32 (12): 3699—3703.]
- [ 41 ] Yan K, Lou J, Wang H Z, et al. Research of contaminated sites based on knowledge graph analysis and its development trend[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, [严康, 楼骏, 汪海珍, 等. 基于知识图谱分析的污染场地研究现状与发展趋势[J]. 土壤学报, 2021.]
- [ 42 ] Luo Y M. Current research and development in soil remediation technologies[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21 (2/3): 558—565. [骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21 (Z1): 558—565.]
- [ 43 ] Harclerode M A, MacBeth T W, Miller M E, et al. Early decision framework for integrating sustainable risk management for complex remediation sites: Drivers, barriers, and performance metrics[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 57—66.
- [ 44 ] NAS (National Academy of Sciences). Risk assessment in the federal government: Managing the process[M]. Washington D C: National Academies Press, 1983.
- [ 45 ] US EPA. Guidelines for mutagenicity risk assessment[R]. Washington D C: Risk Assessment Forum, the United States Environmental Protection Agency, 1986.
- [ 46 ] US EPA. Guidelines for exposure assessment[R]. Washington D C: Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, the United States Environmental Protection Agency, 1992.
- [ 47 ] US EPA. Exposure factors handbook[R]. Washington D C: Risk Assessment Forum, the United States Environmental Protection Agency, 1997.
- [ 48 ] US EPA. Guidelines for neurotoxicity risk assessment[R]. Washington D C: Risk Assessment Forum, the United States Environmental Protection Agency, 1998.
- [ 49 ] US EPA. Risk assessment guidance for superfund: Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental guidance for dermal risk assessment) [R]. Washington D C: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, the United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [ 50 ] US EPA. Guidelines for carcinogen risk assessment[R]. Washington D C: Risk Assessment Forum, the United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [ 51 ] UK EA. Compilation of data for priority organic pollutants for derivation of soil guideline values[R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2008.
- [ 52 ] UK EA. Human health toxicological assessment of contaminants in soil[R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2009.
- [ 53 ] UK EA. Updated technical background to the CLEA model[R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2009.
- [ 54 ] Chen M F, Han L, Luo F. Soil and groundwater risk assessment methodologies for contaminated sites[M]. Beijing: Science Press, 2017. [陈梦舫, 韩璐, 罗飞. 污染场地土壤与地下水风险评估方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [ 55 ] Zhou Y Y, Jiang L, Zhang C Y, et al. Development of risk assessment of contaminated sites in China[J]. Environmental Protection, 2019, 47 (8): 34—38. [周友亚, 姜林, 张超艳, 等. 我国污染场地风险评估发展历程概述[J]. 环境保护, 2019, 47 (8): 34—38.]
- [ 56 ] Luo H K, Yan Q Y, Zhang S W, et al. Determination of remediation goal in an arsenic contaminated site in Pearl River Delta[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44 (14): 185—187. [罗海鲲, 严青云, 章生卫, 等. 珠三角典型砷污染场地修复目标值的确定[J]. 广东化工, 2017, 44 (14): 185—187.]
- [ 57 ] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1137—1142. [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.]
- [ 58 ] Sheng C. Environmental risk assessment and repair system for contaminated sites[J]. Environment and Development, 2019, 31 (5): 35, 229. [盛瑾. 污染场地环境风险评价与修复体系研究[J]. 环境与发展, 2019, 31 (5): 35, 229.]
- [ 59 ] Wang J M, Wen Q Q, Chen G D. Health risk evaluation and remediation strategies for an abandoned pesticide factory site contaminated by atrazine[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2019, 29 (3): 85—88. [王金梅, 温其谦, 陈国栋. 典型农药场地阿特拉津污染风险评价与修复[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29 (3): 85—88.]
- [ 60 ] Wang J, Feng C H, Zeng Q J, et al. Risk assessment of environmental pollution and human health in hong'ao

- construction and demolition waste landfill in Shenzhen[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42 (7): 213—218. [王婧, 冯春华, 曾庆军, 等. 深圳红坳渣土受纳场污染及人体健康风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42 (7): 213—218.]
- [ 61 ] Ye J L, Tian L P, Wu W W, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal pollution in typical mining area in zhejiang, Huize County, Yunnan Province[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, 31 (3): 36—40. [叶金利, 田路萍, 吴文卫, 等. 云南会泽者海镇典型矿区场地重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31 (3): 36—40.]
- [ 62 ] Zhang C, Qin R L. The application of screening values and standards for soil and groundwater in contaminated site[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45 (6): 147—148, 119. [张驰, 秦榕璘. 污染场地土壤与地下水筛选值及标准应用[J]. *广东化工*, 2018, 45 (6): 147—148, 119.]
- [ 63 ] Cao P Q, Fujimori T, Juhasz A, et al. Bioaccessibility and human health risk assessment of metal (loid) s in soil from an e-waste open burning site in Agbogbloshie, Accra, Ghana[J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124909.
- [ 64 ] Hou D Y, Qi S Q, Zhao B, et al. Incorporating life cycle assessment with health risk assessment to select the ‘greenest’ cleanup level for Pb contaminated soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1157—1168.
- [ 65 ] Xiao X, Zhang J X, Wang H, et al. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 135292.
- [ 66 ] Zhang R H, Han D, Jiang L, et al. Derivation of site-specific remediation goals by incorporating the bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons with the probabilistic analysis method[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121239.
- [ 67 ] Wang L Q. Health risk assessment of contaminated sites[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. [王利群. 污染场地健康风险评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.]
- [ 68 ] Huysegoms L, Rousseau S, Cappuyns V. Friends or foes? Monetized Life Cycle Assessment and Cost-Benefit Analysis of the site remediation of a former gas plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 258—271.
- [ 69 ] Reddy K R, Chetri J K, Kiser K. Quantitative Sustainability Assessment of Various Remediation Alternatives for Contaminated Lake Sediments: Case Study[J]. *Sustainability: The Journal of Record*, 2018, 11 (6): 307—321.
- [ 70 ] Søndergaard G L, Binning P J, Bondgaard M, et al. Multi-criteria assessment tool for sustainability appraisal of remediation alternatives for a contaminated site[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18 (11): 3334—3348.
- [ 71 ] Song Y N, Hou D, Zhang J L, et al. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 391—401.
- [ 72 ] Tao H, Liao X Y, Yan X L, et al. Application of multiple attributes decision analysis to selection of soil remediation technologies for contaminated sites[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (8): 4850—4860. [陶欢, 廖晓勇, 阎秀兰, 等. 应用多属性决策分析法筛选污染场地土壤修复技术[J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (8): 4850—4860.]
- [ 73 ] Wu M. Remediation technique screening on industrial soil-polluted site—A case study of industrial soil-polluted site in Quanzhou City of Fujian Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38 (6): 195—199. [吴敏. 工业污染场地修复技术的筛选——以福建省泉州市某工业污染场地为例[J]. *水土保持通报*, 2018, 38 (6): 195—199.]
- [ 74 ] Zhang Q, Jiang D, Gu Q B, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1088—1094. [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[J]. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1088—1094.]
- [ 75 ] Huysegoms L, Cappuyns V. Critical review of decision support tools for sustainability assessment of site remediation options[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 278—296.
- [ 76 ] Onwubuya K, Cundy A, Puschenreiter M, et al. Developing decision support tools for the selection of “gentle” remediation approaches[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407 (24): 6132—6142.
- [ 77 ] 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[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 621—638.
- [ 78 ] Zhang H B, Zhang L B, Li D Q, et al. Research of decision for contaminated site remediation based on DESYRE model[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2 (4): 339—348. [张海博, 张林波, 李岱青, 等. 基于 DESYRE 模型的污染场地修复决策研究[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2 (4): 339—348.]

(责任编辑：卢萍)