《石油化工污染场地土壤—地下水污染修复技术遴选指南》

编制说明

中国科学院南京土壤研究所

南京大学

北京高能时代环境技术股份有限公司

江苏省环境科学研究院

南开大学

成都理工大学

南京尚土生态环境有限公司

中船绿洲环保(南京)有限公司

目 录

1 任务来源 1
2 制定标准的必要性和意义 1
3 主要起草过程 1
4 制定标准的原则和依据 2
4.1 制定原则 2
4.2 编制依据 3
5 主要条款说明 4
5.1 指南目和适用范围 4
5.2 指南术语和定义 4
6 关于技术遴选原则的说明 5
7. 关于技术遴选方法的说明 6
8. 关于修复组合技术推荐的说明 7
9. 关于决策指标评分方法的说明 10
9.1 决策指标评分表格编制说明 10
9.2. 《指标评分标准表》参数的编制说明 11

1 任务来源

为了响应国家政策要求，贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》，解决现有石油化工场地土壤-地下水污染修复标准的不足，提出制定《石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南》。该指南旨在通过科学研究和技术创新，提出一套符合我国国情、区域土壤特征的土壤和地下水污染协同阻控与修复技术体系，以实现土壤环境的精准治理和有效保护，促进生态文明建设和生态环境质量的持续改善。项目承担单位为中国科学院南京土壤研究所、南京大学、北京高能时代环境技术股份有限公司、江苏省环境科学研究院、南开大学、成都理工大学、中船绿洲环保(南京)有限公司。

2 制定标准的必要性和意义

随着石油化工行业的快速发展，环境污染问题日益突出，特别是石油化工污染场地的土壤和水体污染问题，已经成为制约行业可持续发展的重要因素。土壤和水体作为生态系统的重要组成部分，其污染不仅影响土地资源的可持续利用，还可能通过食物链和生态系统传递，对人类健康构成威胁。因此，制定一套科学、合理、有效的石油化工污染场地土壤-水污染组合修复技术遴选指南，对于指导污染场地的修复工作、保护生态环境和保障公众健康具有迫切的现实意义。

同时，本指南也体现了国家对于环境保护的重视程度和对于石油化工产业可持续发展的要求。通过推广和应用本指南，可以推动石油化工产业在追求经济效益的同时，更加注重环境保护和社会责任，实现经济效益和环境效益的双赢。

因此，本指南的编制不仅是必要的，而且是紧迫的。期待通过本指南的实施，为石油化工场地的土壤地下水污染修复提供有力支持，为构建美丽中国、实现可持续发展贡献力量。

3 主要起草过程

2020年3月，科技部发布了国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项2020年度项目申报指南，围绕国家场地土壤污染防治的重大科技需求，设立了“场地土壤-水污染多介质协同修复机理”项目。

2020 年 11 月，中国21 世纪议程管理中心对“场地土壤-水污染多介质协同修复机理（2020YFC1807000）”正式立项，该项目由牵头单位中国科学院南京土壤研究所，联合南京大学、南开大学、北京高能时代环境技术股份有限公司、中国地质大学、和江苏省环科院共同实施。项目以长三角、京津冀典型石油、化工重点行业聚集区场地为对象，研究多环芳烃、卤代有机污染物等典型污染物在土壤-地表水-地下水的迁移分配规律和时空分布特征，揭示污染物多介质迁移转化与累积耦合机制，构建土壤-地表水-地下水污染物多介质、多相流、多反应、多情景时空演化模型；研究场地土壤-水多介质污染物调控与治理的物理、化学和生物学耦合机制，揭示土壤-水污染协同阻控与修复技术原理；阐明高效、经济、安全的场地土-水污染多介质组合技术优化协同整治机制并示范性验证。

2021 年9 月，成立标准编制组，正式开展石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南的制定工作。

2024 年9 月，编制组初步确定了明确石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术的技术特定和适用范围，确定了相关修复技术遴选原则、方法和流程，形成了石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选的决策指标评价体系和修复技术筛选矩阵，最终形成《石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南》。

4 制定标准的原则和依据

4.1 制定原则

以《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国土壤污染防治法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《土壤污染防治行动计划》和《关于加强土壤污染防治工作的意见》等我国现行的环境保护法律法规、政策、条例、标准的相关规定和要求为主要依据，确保石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南的制定符合国家法律法规的要求。

科学性原则是整个指南制定过程的基石。在石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南制定过程中，严格遵循科学严谨的原则，确保指南与国内外的先进经验相结合，以形成一个既实用又高效的体系，确保每一项技术措

施都经过严格的科学验证，能够有效应对土壤和地下水污染问题。预防为主的原则则提醒我们，污染的预防远比事后修复来得重要和经济，因此在指南中应包含一系列预防措施，以减少污染事件的发生概率。

在借鉴国内外经验方面，石油化工污染场地土壤-地下水污染修复技术遴选指南制定过程中参考国际上如美国的修复指南和欧盟的相关指令和标准，这些国际标准和指南为本指南的制定提供了宝贵的经验和参考。同时，国内的成功案例，如一些已经完成的土壤和地下水污染修复项目，也是学习的重要对象。这些案例不仅帮助了解国内的实际情况，还能从成功和失败中吸取教训，为本指南的制定提供实践支持。

在评估指南的体系可行性和可行性时，本指南从多个角度进行了深入分析。充分考虑了技术可行性，它要求所提出的修复技术必须经过科学验证，确保其成熟、有效，能够达到预期的修复目标。经济可行性也是不可忽视的，本指南详细分析修复成本和效益，确保修复方案在经济上是可行的，不会给企业或政府带来过重的经济负担。同时，社会可行性和环境可行性也是重要的评估指标，本指南考虑修复活动对当地社区和环境的影响，确保社会可接受且不会造成二次污染。最后，法律合规性也是本指南严格遵守的原则，本指南在制定过程中严格遵守现行法律法规的要求，避免法律风险。

4.2 编制依据

GB/T 36198-2018土壤质量 土壤气体采样指南

GB/T 36197-2018土壤质量 土壤采样技术指南

GB/T 30760-2024水泥窑协同处置固体废物技术规范

GB 3096-2008 声环境质量标准

GB 3838-2002 地表水环境质量标准

GB 14554-1993 恶臭污染物排放标准

GB/T 14848-2017 地下水质量标准

GB 18598-2019 危险废物填埋污染控制标准

GB 18484—2020危险废物焚烧污染控制标准

GAEPI 1-2015：污染场地修复技术筛选指南

T/CAEPI39—2021石油化工企业场地地下水污染防治技术指南

HJ25.4-2019：建设用地土壤修复技术导则

HJ 25.6—2019：污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 1164—2021污染土壤修复工程技术规范 异位热脱附

HJ 1165—2021 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附

HJ/T 415-2008 环保用微生物菌剂环境安全评价导则

HJ 1266-2022生物质废物堆肥污染控制技术规范

HJ 1205—2021排污单位自行监测技术指南 固体废物焚烧

HJ 1282—2023污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化

HJ 1283—2023污染土壤修复工程技术规范 生物堆

HJ 1019—2019地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则

5 主要条款说明

5.1 指南目和适用范围

本指南适用于石油化工污染场地的土壤和水体污染修复技术的遴选工作。这些场地包括但不限于石油开采、炼油、化工生产、储运等环节造成的土壤和水体污染区域。

本指南针对的污染物包括但不限于多环芳烃、石油烃、氯代烃等石油化工场地特征污染物。

本指南不适用于放射性物质的场地。

5.2 指南术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

5.2.1 石油化工企业 petrochemical enterprisie

从事石油、天然气及其产品的开采、加工、提炼、运输等业务的企业。

5.2.2 场地修复 site remediation

采用物理、化学或生物的方法固定、转移、吸收、降解或转化场地土壤、地下水中的污染物，其含量降低到可接受水平，或将有毒有害的污染物转化为无害物质的过程。

5.2.3 目标污染物 target contaminant

在土壤或地下水中存在，其数量或浓度已达到对生态系统和人体健康具有实际或潜在不利影响的，需要行风险管控和修复的污染物。

5.2.4 场地风险识别 site risk assessment

对特定场地可能存在的风险因素以及这些风险对人员、财产和环境可能造成的影响进行识别、分析和评价的过程。

5.2.5 污染监测：contamination monitoring

对污染物的浓度、排放量等进行的检测和监测活动。通过定期监测，可以及时发现污染问题，评估污染趋势，并为污染治理提供科学依据。

5.2.6 场地修复目标 site remediation goal

由场地环境调查和风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险的污染修复终点。

利用微生物或植物的新陈代谢作用，降解、吸收或稳定土壤中的污染物。

5.2.7 组合修复技术 combined remediation techniques

结合多种修复技术，针对污染场地的实际情况，制定科学、合理、有效的修复方案，以达到修复目标的技术方法。

6 关于技术遴选原则的说明

(1) 综合考虑石油化工污染场地土壤、地下水、地表水，兼顾区域和场地周边，遴选修复技术。

编制说明：全面评估污染场地的不同介质，确保修复技术的适用性和有效性，避免单一介质修复可能带来的局限。参考《污染场地修复技术应用指南》（征求意见稿）和《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.2-2019），强调综合考虑污染场地的多种环境介质。

(2) 采用科学的方法，综合考虑场地修复目标、修复技术的处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的影响等因素，遴选修复技术。

编制说明：通过科学方法评估修复技术的各项指标，确保技术选择的合理性和经济性。结合《建设用地地下水污染修复和风险管控技术导则》（DB32/T 4611-2023），强调科学评估和多因素综合考量。

(3) 根据石油化工污染场地的污染特征及污染物性质、水文地质条件、周边环境敏感目标、对人体健康或生态环境造成的危害、地块拟规划用地类型、修复周期等，因地制宜的遴选场地修复技术，使修复目标可达、修复工程切实可行。

编制说明：根据具体场地条件和污染特征选择最合适的修复技术，确保修复工程的可行性和目标达成。参考《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019），强调因地制宜原则。

(4) 遴选出的石油化工污染场地修复技术要确保技术应用实施过程安全，防止对施工人员、周边人群健康及生态环境产生危害和二次污染。

编制说明：确保修复过程的安全性和生态保护，防止产生新的污染或健康风险。结合《建设用地地下水污染修复和风险管控技术导则》（DB32/T 4611-2023），强调安全性和环境友好性。

(5) 遴选出的石油化工污染场地修复技术应遵循技术成熟、实施安全、修复目标可达、修复成本可控、修复周期合理等原则。

编制说明：选择成熟可靠的技术，确保修复过程的稳定性和经济性。参考《环境空气质量模型遴选工作指南（试行）》，强调技术成熟度和经济合理性。

(6) 石油化工污染场地修复技术的遴选除符合本标准规定外，还应遵守国家现行的有关法律、法规、标准和行业规范的规定，符合国家和地方对场地污染修复工程质量、安全、消防等方面的强制性标准规定。

编制说明：遵循法律法规和行业标准，确保修复工程的合法性和符合性。结合多项国家标准和法律法规，确保技术选择的合规性。

7. 关于技术遴选方法的说明

（1）本指南采用指标评价-决策矩阵法对石油化工污染场地中的土壤和水体修复技术进行系统性遴选，通过量化指标的方式，为修复技术的选择提供科学依据。

（2）针对石油化工场地内不同类型的污染物，本指南建立了修复技术遴选数据库，以供专业人员在结合场地具体污染情况的基础上，选择最为适合的修复技术。

（3）本指南构建了包括可操作性、污染物去除率、修复时间、设备投资、运行费用、后期费用、残余风险、长期效果、健康影响、管理可接受程度、公众可接受程度等因素在内的决策指标体系，为修复技术的筛选提供多维度评估标准。

（4）制定了修复技术筛选矩阵以及指标评分标准表，帮助专业人员根据石油化工污染场地的实际情况，从中遴选出最优的修复技术或组合修复方案，确保修复工作的针对性和高效性。

8. 关于修复组合技术推荐的说明

不同修复技术进行组合时应综合考虑石油化工污染场地土壤、地下水、地表水，兼顾区域和场地周边。同时，采用科学的方法，综合考虑场地修复目标、修复技术的处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的影响等因素；根据石油化工污染场地的污染特征及污染物性质、水文地质条件、周边环境敏感目标、对人体健康或生态环境造成的危害、地块拟规划用地类型、修复周期等，因地制宜的遴选场地修复技术进行组合，使修复目标可达、修复工程切实可行；被列入可组合的修复技术应遵循技术成熟、实施安全、修复目标可达、修复成本可控、修复周期合理等原则。按照上述原则形成的石油化工污染组合修复技术除符合本指南规定外，还应遵守国家现行的有关法律、法规、标准和行业规范的规定，符合国家和地方对场地污染修复工程质量、安全、消防等方面的强制性标准规定。

(1) 化学氧化-微生物组合修复

编制说明：化学氧化具有高效、快速等优点，但存在修复不彻底、易破坏土壤的性质及结构、药剂成本较高且易产生二次污染等问题。微生物修复对环境的扰动小，但效率较低且修复周期过长，股难以满足实际工程需求。化学氧

化与生物修复组合，化学氧化处理能够为微生物修复提供电子受体、生物可利用的有机小分子等条件。现有研究表明，化学氧化耦合微生物修复技术在有机污染土壤修复中比单一修复技术具有更显著的优势，是一种有应用前景的绿色、低碳、经济、高效的有机污染场地土壤修复技术。

(2) 气相抽提+原位曝气技术：

编制说明：适用于半挥发卤代化合物的处理，可采用气相抽提的方法将污染物进行富集，富集后的污染物可集中处理。由于半挥发性卤代化合物的特性，使其可能在土壤中残留，从而影响气相抽提的处理效率。因此，在剩余的污染土壤中通入空气和营养物质,利用微生物对污染物的降解作用处理其中残留的污染物，从而达到修复的目的。

(3) 土壤淋洗-高级氧化组合修复

编制说明：土壤淋洗-高级氧化组合修复是一种用于处理化工污染土壤和水体的先进技术。表面活性剂可以通过降低表面张力、界面张力和胶束溶解作用，促进油污染物从非水相液体或固相迁移到水中并溶解到水中，然后通过淋洗液将污染物从土壤中带走。同时向洗脱液中加入氧化剂可以进一步去除污染物。这种组合修复技术可以提高污染物的去除效率，减少二次污染。

(4) 土壤淋洗-微生物组合修复

编制说明：针对炼油厂附近石油污染的土壤，首先根据土壤理化性质和微生物降解所需的营养条件，对污染土壤进行改良，优化环境因子。注入表面活性剂，表面活性剂可以将有机污染物从土壤颗粒表面脱附，从而改善有机污染物的生物可利用性，提高生物修复效率。随后按照相应的水平和添加方式，加入降解菌，来对污染物进行处理，从而达到清除目的。

(5) 多相抽提-生物组合修复

编制说明：多相抽提和生物修复技术是两种常用于处理受有机污染物污染的土壤和地下水的技术。将这两种技术结合使用，可以提高污染物的去除效率。通过在污染地层中安装抽提井，利用真空泵同时抽取土壤气体、地下水和非水相液体（NAPL）。随后按照相应的水平和添加方式，加入降解菌，进一步降解残留的有机污染物，减少二次污染。

(6) 电化学-微生物组合修复

编制说明：电化学技术可以有效地辅助微生物及营养物质在土壤中的输送和扩散，并具有高度定向性，显著减少营养物质的投加量，降低修复成本，提高微生物的代谢活性。电动强化生物修复技术一般有两种应用模式：一种是在土壤中设立生物降解区以去除污染物，另一种是利用电场在土壤中扩散营养物质和降解微生物。

(7) 植物-微生物组合修复

编制说明：利用由土壤、植物、微生物组成的复合体系来共同降解污染物。在污染场地中种植特定植物（如黑麦草、苜蓿），这些植物在生长过程中，会吸收污染物并将其代谢从而完成对污染物的转化和矿化。该系统在植物修复的同时，还通过光合作用及植物脱落物（其中含有糖、醇、蛋白质和有机酸等）为微生物提供氧气和养料，促进微生物的生长代谢，加速了其降解污染物的速率。

(8) 电动力学修复+植物修复

编制说明：可用来处理无机物污染的土壤，先采用电动力学修复技术对土壤中的污染物进行富集和提取,对富集的部分单独进行回收或者处理。然后利用植物对土壤中残留的无机物进行处理，可将高毒的无机污染物变为低毒的无机污染物，或者利用超累积植物对土壤中污染物进行累积后集中处置

(9) 气相抽提+氧化还原

编制说明：可用来处理挥发性卤代和非卤化化合物污染的土壤，先采用气相抽提的方法将土壤中易挥发的组分抽取至地面,对富集的污染物可利用氧化还原的方法进行处理，或采用活性炭或液相炭进行吸附，对于吸收过污染物的活性炭和液相炭采用催化氧化等方法进行回收利用。

(10) 土壤淋洗+生物降解

编制说明：适用于燃料类污染土壤的处理，一般先采用原位土壤淋洗技术进行处理，待污染物降解到一定程度后，将淋洗液抽出处理后排放。由于燃料类污染物遇水易形成NAPL，易在土壤孔隙中残留，无法通过抽取的方法从土壤中去除。因此在形成NAPL的位置通入空气和营养物，采用生物降解的方法对其中残留的污染物进行处理，进而达到清除的目的。

(11) 氧化还原+固化稳定化

编制说明：适用于无机物污染土壤的处理。无机污染物，特别是重金属类污染物的毒性与价态相关,在自然界的各种工作用下其价态可发生变化。此联合方式是先采用氧化还原的方法将高毒的无机物氧化还原成低毒或者无毒的无机物，为避免逆反应的发生，需在处理后加入固化剂等物质降低污染物的迁移性，从而保证污染土壤的处理效果。

(12) 原位曝气技术+土壤气相抽提

编制说明：适用于土壤和地下水中挥发性有机物的处理。在土壤和地下水污染处设置曝气装置，一方面通过增加氧气含量促进微生物降解，-方面利用空气将其中的挥发性污染物汽化进入包气带。利用土气相抽提系统将汽化的污染物抽出到地面集中处理。这是一种较好的修复技术组合方法。

9. 关于决策指标评分方法的说明

采用指标客观值评价与数值评分评价两种方法结合的形式对决策指标评分。其中：

（1）客观值评价

对“修复时间、设备投资、运行费用和后期费用”四项指标采用客观值评价。由工程师和造价师根据实际工程情况和成本控制要求进行精确计算，得出相应的客观评价值，确保评价结果的科学性和准确性。

（2）数值评分评价

对于“修复效果”采用0-1数值评分评价，根据修复是否达到既定目标进行评分。若达到修复目标，得分为1，未达到目标则得分为0。“可操作性、污染物去除率、残余风险、长期效果、健康影响、管理可接受程度、公众可接受程度”则采用1-5数值评分评价。通过专家调查问卷，邀请具有丰富实践经验的相关领域专家，依据评分标准与实际经验，对修复技术进行综合评定。

9.1 决策指标评分表格编制说明

石油化工污染场地土壤-水污染修复技术评分方法采用指标客观值评价与数值评分评价两种方法结合的形式。其中修复时间、设备投资、运行费用和后期费用四项采用客观值评价；修复效果采用0-1评分法评价；可操作性、污染物去

除率、残余风险、长期效果、健康影响、管理可接受程度、公众可接受程度七项指标采用数值评分评价。

指标评分标准表

评分指标	很好	好	较好	较差	差
	4-5分	3-4分	2-3分	1-2分	0-1分
可操作性					
修复时间					
投资					
运行费用					
后期费用					
修复效果					
长期效果					
可接受程度					
残余风险/健康影响					
总评分					

9.2.《指标评分标准表》参数的编制说明

（1）可操作性：

编制说明：系统考虑修复技术可靠性（技术成熟度），管理人员经验的丰富程度，必要的设备和资源的可获得性，修复过程中污染介质的贮存、运输、安全处置方面的可操作性，以及与场地再利用方式或后续建设工程匹配性相关的可操作性指标等方面的影响因素，由专业人员根据修复技术的特性与所考虑因素的匹配度进行打分。

（2）修复时间：

编制说明：即达到修复目标/指标所需要的时间。该指标由专业人员结合场地情况和经验确定具体客观数值。

（3）投资：

编制说明：包括直接费用（包括原材料、设备、设施费用等）和间接费用（包括工程设计、许可、启动、意外事故费用等间接投资）。该指标由专业人员根据场地情况和经验确定具体客观数值。

（4）运行费用：

编制说明：包括人员工资、培训、防护等费用；水电费；采样、检测费用；剩余物处置费用；维修和应急等费用；保险、税务、执照等费用。该指标由专业人员根据场地情况和经验确定具体客观数值。

（5）后期费用：

编制说明：日常管理、周期性监测等后期费用。该指标由专业人员根据场地情况和经验确定具体客观数值。

（6）修复效果：

编制说明：修复效率由修复目标确定，修复技术筛选对修复效率的要求具有强制性。因此，该指标采用0-1评分法评价，即能达到修复效果和不能达到修复效果。

（7）残余风险、长期效果、健康影响：

编制说明：根据修复技术处理后的是否产生二次污染或产生二次污染的风险性（残余风险、长期效果）、以及修复期间和修复工程达到修复目标后需要应对的健康风险（健康影响）进行评分。该指标由专业人员根据修复技术的特性与系统所考虑因素的匹配度进行打分。

（8）管理可接受程度、公众可接受程度：

编制说明：在实施过程中对周围居民可能造成的影响（气味、噪声等），以及与现行法律法规、相关标准和规范的符合性。该指标由专业人员根据场地情况和经验确定具体客观数值。