

长江经济带工业区污染场地特征及修复技术选择分析

蒋林惠^{1,2}, 汪子阳^{1,2}, 沈酃宇^{1,2}, 潘月^{1,2}, 刘翠翠^{1,2}, 靳楠³, 蔡天明³, 臧常娟⁴, 王水^{1,2*}

- 江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 江苏 南京 210036
- 江苏省土壤与地下水污染防控工程研究中心, 江苏 南京 210036
- 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095
- 江苏大地益源环境修复有限公司, 江苏 南京 210012

摘要: 掌握工业场地污染特征及修复技术选择信息, 明确场地污染防治需求, 对长江经济带工业区污染场地土壤污染防治及再开发安全利用具有重要意义. 本文对长江经济带工业区 621 个污染场地修复治理的案例数据进行调研, 采用相关性分析等方法, 对工业场地的污染特征及修复技术的优先选择进行了综合解析. 结果表明: 砷、镍、汞、铅、铬、锌、镉、苯、1,2-二氯乙烷、氯仿、苯并[a]芘和石油烃是长江经济带工业区的主要目标污染物, 也是引起下游地区以复合型污染为主 (48%) 的主要因子, 而砷、铅、镉、铬等的普遍存在是造成中上游地区以无机型污染为主 (上游无机型污染占 48%, 中游占 67%) 的主要原因; 化学原料和化学制品制造业污染场地中涉及污染物种类 (116 种) 最多, 占据长江经济带工业区污染场地中发现污染物种类的 85%; 调研的案例中污染深度较大的场地 (污染深度>10 m) 多集中于下游地区, 可能受场地土层结构、污染物本身性质以及企业的生产年限等因素影响; 目前长江经济带工业区污染场地修复技术多选择异位修复, 主导因素为场地污染类型、用地规划以及修复效果和工期. 研究显示, 长江经济带工业区场地污染特征具有区域性, 以异位固化/稳定化、水泥窑协同处置和异位化学氧化为主的异位修复技术应用广泛, 未来需要进一步加强引导土壤污染防治向绿色低碳发展.

关键词: 长江经济带; 污染场地; 土壤污染特征; 行业类别; 修复技术

中图分类号: X53

文章编号: 1001-6929(2024)03-0596-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.25

Pollution Characteristics and Selection of Remediation Technology in Industrial Contaminated Site in the Yangtze River Economic Belt

JIANG Linhui^{1,2}, WANG Ziyang^{1,2}, SHEN Dingyu^{1,2}, PAN Yue^{1,2}, LIU Cuicui^{1,2}, JIN Nan³, CAI Tianming³, ZANG Changjuan⁴, WANG Shui^{1,2*}

- Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210036, China
- Jiangsu Province Engineering Research Center of Soil and Groundwater Pollution Prevention and Control, Nanjing 210036, China
- College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China
- Jiangsu DDBS Environment Remediation Co., Ltd., Nanjing 210012, China

Abstract: It is of great significance to describe pollution characteristics and selection of remediation technology of industrial contaminated site in the Yangtze River Economic Belt for soil pollution prevention and control and safe utilization of redevelopment. In this study, 621 cases of contaminated sites in the Yangtze River Economic Belt were obtained to comprehensively analyze the pollution characteristics and selection of remediation technology using correlation analysis and other methods. The analysis results showed that arsenic, nickel, mercury, lead, chromium, zinc, cadmium, benzene, 1,2-dichloroethane, chloroform, benzo[a]pyrene and petroleum hydrocarbons were the target pollutants in the Yangtze River Economic Belt, and also the main factors causing serious metal-organics combined pollution in the

收稿日期: 2023-09-24 修订日期: 2023-11-19

作者简介: 蒋林惠 (1990-), 女, 山东烟台人, 工程师, 博士, 主要从事土壤污染防治及生态评价研究, jianglh1206@126.com.

* 责任作者, 王水 (1975-), 男, 江苏徐州人, 研究员级高级工程师, 主要从事污染场地调查修复与环境管理等研究, 735621101@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2019YFC1804000); 江苏省环境工程重点实验室开放课题 (No.ZX2022005)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2019YFC1804000); Open Research Fund of Jiangsu Province Key Laboratory of Environmental Engineering, China (No.ZX2022005)

lower reaches of the Yangtze River (48%). The widespread presence of arsenic, lead, cadmium and chromium was the main cause of heavy metal pollution in the upper and middle reaches of the Yangtze River. Chemical manufacture involved the largest types of pollutants, accounting for 85% of all pollutants in the Yangtze River Economic Belt. The sites with pollution depth greater than 10 m were mostly concentrated in the lower reaches of the Yangtze River, which may be affected by the soil layer structure, the nature of the pollutants themselves, and the production duration. *Ex-situ* remediation was the more preferred remediation technology in the Yangtze River Economic Belt. The type of site contamination, land use planning, remediation effect and duration maybe the dominant factors. This study shows that the pollution characteristics of industrial sites in the Yangtze River Economic Belt have regional characteristics. *Ex-situ* remediation technologies based on solidification/stabilization, cement kiln co-disposal and *ex-situ* chemical oxidation are widely used. At the same time, it is necessary to guide the development of soil pollution prevention in the direction of green and low-carbon development in the future.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; contaminated site; soil contamination characteristics; industry category; remediation technology

随着城市化进程加快,工业企业搬迁遗留下大批退役场地。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,690家高污染企业和146个工业园区中,有1/3的场地受到污染^[1],退役污染场地严重阻碍了城市建设和地方的经济发展。为切实加强土壤污染防治、逐步改善土壤环境质量,国务院于2016年发布《土壤污染防治行动计划》(简称“《土十条》”),成为较长时期内我国土壤污染防治工作的行动纲领。2019年施行《中华人民共和国土壤污染防治法》(简称“《土壤法》”),填补了我国土壤污染防治专项法律的空白。随后颁布的系列土壤污染风险管控和修复技术标准,形成了我国较为完善的土壤环境保护制度。2022年《中国生态环境状况公报》显示,全国土壤环境风险得到基本管控,土壤污染加重趋势得到初步遏制,重点建设用地安全利用得到有效保障,但仍需扎实推进关闭搬迁企业地块土壤污染管控,保障“住得安心”^[2]。

场地修复是工业场地土壤风险管控的重要环节,但是修复技术选择的不确定性会影响污染场地土壤污染防治及再开发安全利用^[3]。研究^[4-5]表明,修复技术筛选的影响因素包括场地条件、污染特征、技术指标、修复周期、经济指标和环境指标等。美国环境保护局数据显示,美国污染场地修复技术在选择过程中综合考虑场地条件、污染特征、环境指标等多种要素,早在2014年就实现了以原位修复技术为主(占54%),包括气相抽提、原位化学及生物修复等多种技术^[6]。而我国因城市建设中土地再开发周期紧迫,修复方式以周期较短的异位修复为主,选择多样性较低,多选择阻隔/填埋、异位固化/稳定化、化学氧化等技术^[7-9],且这些技术在实施过程中极易引起二次污染^[10-11]。因此,识别工业场地污染特征及修复技术筛选主控因素,对于污染场地修复方案的比选制定、修复技术的产业化发展以及为政府提供科学有效的决策依据等具有重要意义。

长江经济带因其独特的地理优势,聚集了大量生产和运输高度依赖水资源的工业企业,环境风险点多。“退二进三”“退城进园”及“沿江化工企业关改搬转”等一系列相关政策的出台,促使长江经济带各省市大量工业企业关停或搬离了城市区域,形成众多退役场地。由于生产年限较长,同时沿江地区地下水存在较强的水力交互作用,退役场地极有可能对周边土壤和地下水造成严重污染^[12-13],对人体健康和生态安全构成严重威胁^[14]。随着长江大保护战略的实施,深入打好污染防治攻坚战成为长江经济带发展的首要任务,遗留工业场地的修复治理及再开发安全利用迫在眉睫^[15-16]。工业污染场地具有污染多源、多介质、空间变异性大、修复难度高、场地环境风险水平高等特点^[14,17-18],掌握场地地质条件、污染特征、污染来源、污染物迁移性等特征是污染场地修复与风险管控的基础,也是高效治理场地污染和保障再开发安全利用的重要前提。

因此,本文通过多源渠道收集到621个长江经济带工业区污染场地修复案例,研究长江经济带工业区土壤污染空间分布特征,探讨修复技术选取的主导因素,以期为长江经济带工业场地土壤污染防治和质量管理提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文以“长江经济带工业区场地的污染特征及修复技术的应用情况”为研究目标开展相关场地的信息收集工作。通过公共网站检索以及相关单位企业项目信息收集等途径,汇总整理了长江经济带9省2市2010—2022年招标进行污染修复的621个工业地块场地信息(见图1)。其中公共网站获取途径包括中国招标投标公共服务平台(<https://bulletin.cebpubservice.com>)、全国公共资源交易平台(http://deal.ggzy.gov.cn/ds/deal/dealList.jsp?HEADER_DEAL_TYPE=02)、

各省市公共资源交易中心网站、剑鱼标讯(公众号)、CSER 土壤修复平台(公众号)和百度搜索等;相关单位企业项目信息获取途径包括江苏大地益源环境修复有限公司、生态环境部南京环境科学研究所和重

庆市生态环境科学研究所所涉及的相关项目. 场地信息包括各污染场地所在行政区域、行业类别、土壤污染因子及深度、水文地质条件、用地规划、场地选用修复技术等.

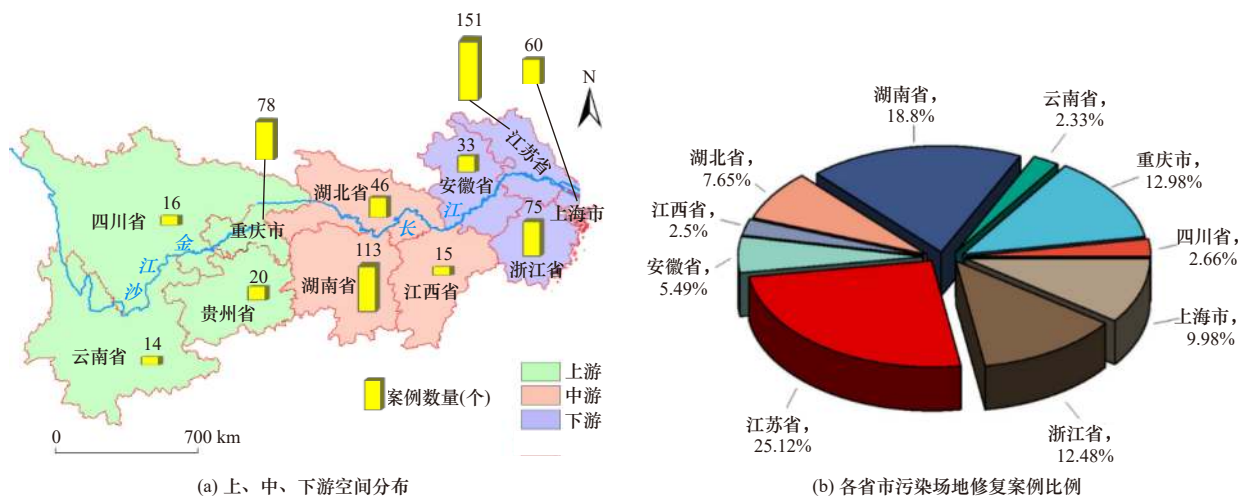


图1 长江经济带工业区污染场地修复案例空间分布

Fig.1 Spatial distribution of remediation cases in the Yangtze River Economic Belt

1.2 数据分析方法

本文将长江经济带划分为3个区域,其中,上游包括贵州省、四川省、云南省和重庆市,中游包括湖南省、湖北省和江西省,下游包括安徽省、江苏省、浙江省和上海市. 污染物类型和污染物种类由统计土壤污染状况调查和风险评估确定的目标污染物得出;污染物类型按照2014年《全国土壤污染状况调查公报》分为无机型、有机型和复合型污染;行业类别根据场地工业生产活动中主要涉及的生产工艺及产品,参照中国《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)确定;场地再开发利用类型根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)、《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011)及《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)土地类型的划分方法来确定一类用地或二类用地.

使用 Microsoft Excel 2016 软件对收集到的场地信息数据进行处理,对621个案例从多维度(污染类型、污染因子种类、污染深度、行业类别、选用修复技术、用地规划等)进行统计分析. 利用 Microsoft Excel 2016 软件绘制柱状图,采用基于 R 语言的 Hiplot Pro 在线云工具 (<https://hiplot.com.cn/home/index.html>) 绘制热图、金字塔图以及相关分析图,对长江经济带工业区区域性土壤污染特征、不同行业类别土壤污染特征、修复技术选择情况进行可视化分析.

2 结果与讨论

2.1 长江经济带工业区场地土壤的污染特征

长江经济带工业区污染场地的土壤污染类型呈现一定的区域特性,由图2(a)可知,中上游地区以无机型污染为主,下游地区以复合型污染为主. 以往研究表明,长江经济带中上游地区呈现类似的污染特征,而下游地区尤其是长三角区域因有较为发达的工业企业,污染程度较为严重^[12-13],这可能与各区域行业类型、水文地质、气候条件等密切相关^[19-21]. 利用聚类树对土壤污染类型进一步分析,如图2(b)所示,下游省市和上游的重庆市以复合型污染为主、中上游省市均以无机型污染为主,这可能与各省市行业类型有关. 重庆市作为中国六大老工业基地之一,市内高风险场地涉及的行业类型广泛,有化工、冶炼、医药、钢铁、设备制造等多种典型行业企业. 研究结果显示,与其他上游地区不同,重庆市复合型污染占比高达62.8%,考虑到多种行业类型涉及复杂的生产工艺和多样化的产品,易导致多种污染物在场地土壤累积,可能是造成复合型污染的主要原因^[18].

分析显示,长江经济带各省市目标污染物种类主要包括砷、镍、汞、铅、铬、锌、镉、苯、1,2-二氯乙烷、氯仿、苯并[a]芘和石油烃,这与以往研究结果^[22-23]类似. 由图3(a)(b)可知,下游地区污染物种类多于中上游地区,污染物种类数量由低到高顺序为上游地区(56种)、中游地区(67种)、下游地区(130种).

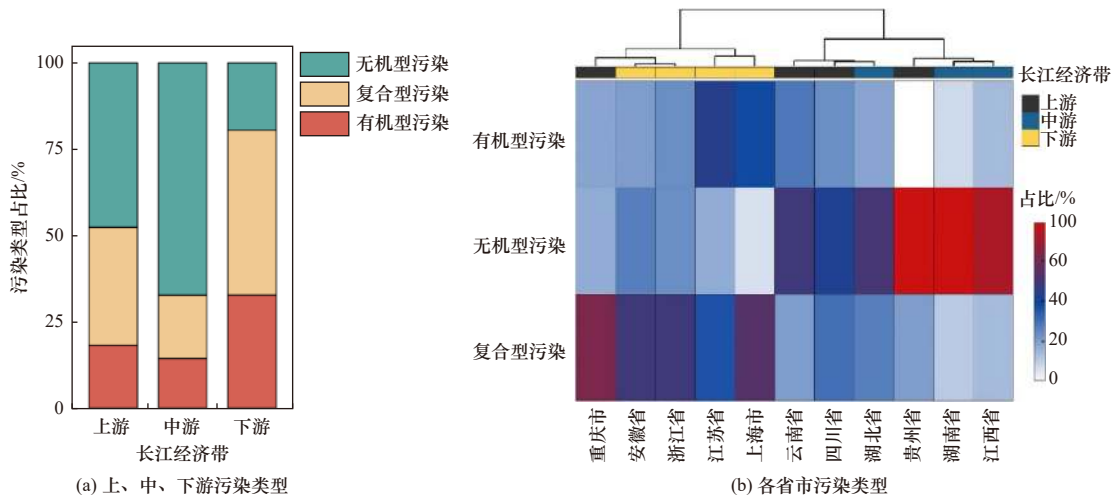


图2 长江经济带各区域工业区土壤污染类型

Fig.2 Types of soil contamination in industrial areas of the Yangtze River Economic Belt

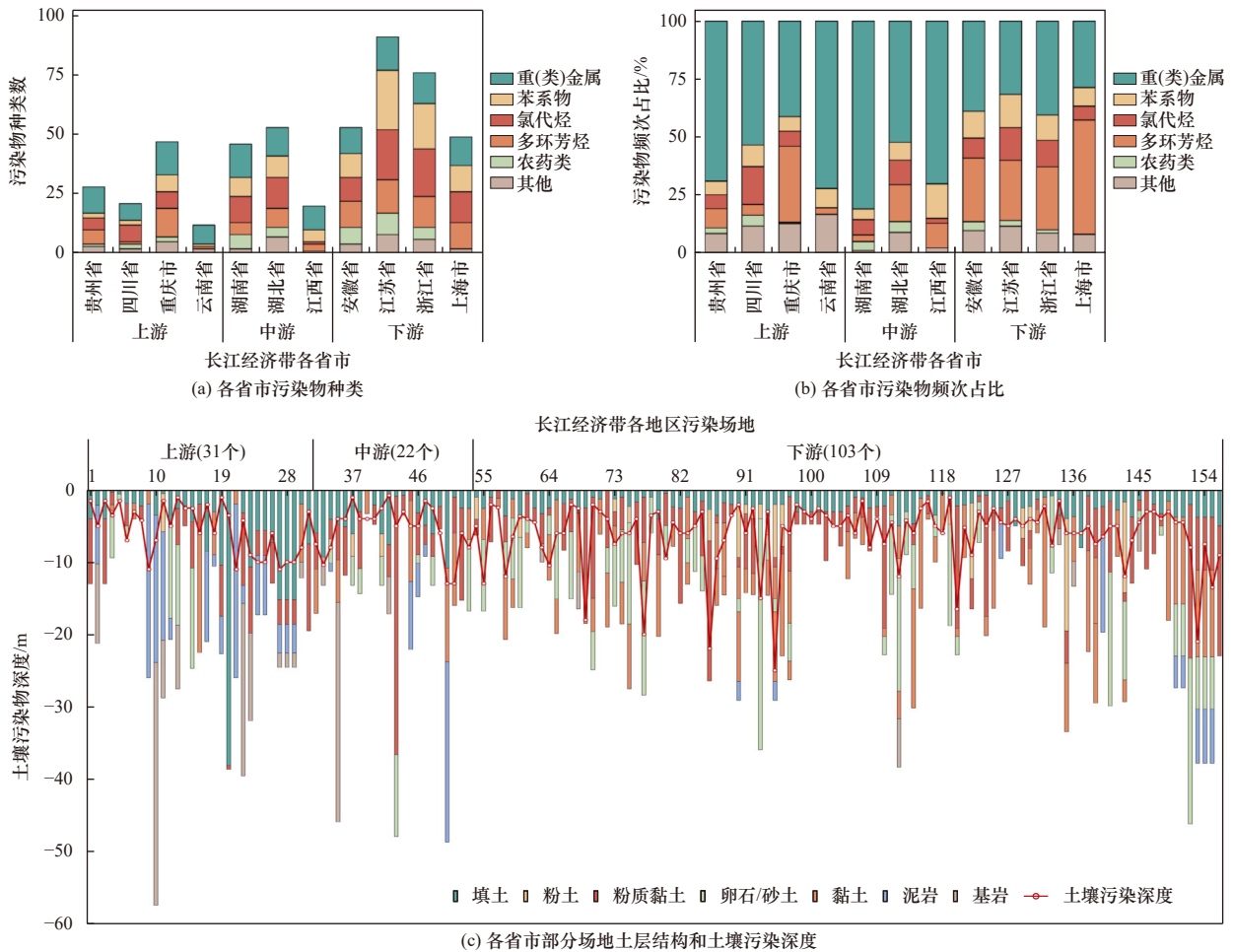


图3 长江经济带各区域工业区土壤污染物种类、频次占比、土层结构和土壤污染深度

Fig.3 Soil pollutants types, frequency percentage, layer structure and pollution depth of in industrial areas of the Yangtze River Economic Belt

下游地区污染物以有机物为主(如多环芳烃、苯系物、氯代烃和农药),而中上游地区以重(类)金属为主,这一差异与产业分布密切相关.下游多有化工企业,中

上游有色金属矿采及冶炼企业较多,石化等企业主要分布在中下游^[24-26];中上游有色金属矿采企业较多可能是该地区重(类)金属污染为主的主要原因^[13,27];下

游地区化工、石化企业长期生产需要使用大量有机原料,导致该地区以有机物污染为主.同时化工企业生产过程中使用催化剂多为重(类)金属,且排放烟尘沉降也会导致重(类)金属积累^[28-31].值得关注的是,尽管下游地区是农药生产中心,但农药产业正在逐渐向上游地区转移,中上游地区也存在一定比例的农药类污染物^[32-33].

对收集到的长江经济带上游31个、中游22个、下游103个案例的土层结构和最大污染深度信息进行分析[见图3(c)]:从场地尺度上来看,长江上、中、下游不同省份的土层结构存在较大差异.从区域尺度上来看,上、中游土层结构较为简单,大多呈现“填土-粉质黏土/黏土-卵石/泥岩-基岩”的土层分布,含有粉土层的场地仅有3处,占比为5.7%;下游土层结构中往往含有粉土层,呈现“填土-粉土/粉质黏土-黏土/卵石”的土层分布,出现粉土层的场地有18处,占比为17.5%.案例中土壤污染深度范围为0.7~25 m,上、中、下游最大污染深度分别为11、13和25 m,平均值分别为5.43、5.37和6.16 m,下游污染深度较大.考虑到下游土层结构中存在粉土层,通常粉土比粉质黏土或黏土的渗透系数大^[34],污染物容易垂直迁移.除了土层结构以外,污染深度还与企业生产年限和污染物性质有关^[23].长江经济带下游地区工业起步较早,企业长期生产运行增加污染垂向迁移的风险.另外,下游地区污染场地中氯代烃和苯系物污染物较多,通常大多数氯代烃的辛醇-水分配系数较小^[35],在含水层中受吸附影响小,迁移速率快,同时密度通常比水大,在重力和淋洗作用下易向深层土壤迁移;而苯系物易挥发、易迁移,淋溶过程通常存在吸附-解吸的共同作用,进入土壤后苯系物会与土壤组分发生吸附结合,

但是在水分淋溶作用下会被解吸下来,从而向下迁移至土壤深层,甚至进入地下水中^[36-37].

2.2 主要行业的场地污染特征

从调研的621个修复案例中选取污染场地数量排前13位的行业进行分析,包括化学原料和化学制品制造业(化学工业),有色金属冶炼和压延加工业(有色冶炼),黑色金属冶炼和压延加工业(黑色冶炼),金属制品业(金属制品),石油、煤炭及其他燃料加工业(石油加工),医药制造业(医药制造),电气机械和器材制造业(电器制造),通用设备制造业(通用制造),皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业(皮毛制造),非金属矿物制品业(非金属制品),纺织业(纺织),橡胶和塑料制品业(橡胶塑料),以及专用设备制造业(专用制造).污染场地数量最多的行业是化学工业(共有233个,占37.5%),其次是有色冶炼、黑色冶炼、金属制品和石油加工.我国早期的产业结构主要以制造业和重工业为导向,重点发展化工制造、金属冶炼、钢铁生产等行业^[38-39].近年来,随着我国城市化进程中“退二进三”和“产业转移”政策落实步伐的加快,自2015年长江经济带工业区产业结构由“二三一”向“三二一”转变,并不断巩固、优化^[40].同时,在“生态优先、绿色发展”指引下,大批高污染物排放量的化学工业、金属冶炼、金属制品等行业企业关闭或搬迁,导致城市遗留了大量的相关行业污染场地,对场地的土壤环境造成了较大的影响.

由图4(a)可知,各行业污染场地的土壤污染类型有较大差异,化学工业的三种污染类型占比较为平均,无机型污染、复合型污染和有机型污染占比分别为26.4%、37.3%和36.3%;有色冶炼、电器制造、金属制品和皮毛制造行业主要表现为无机型污染,占比

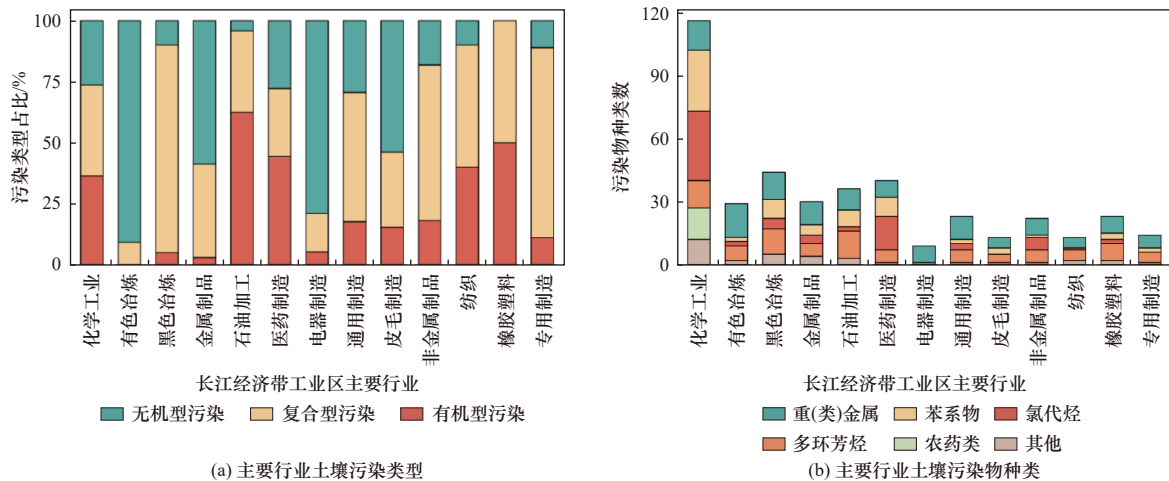


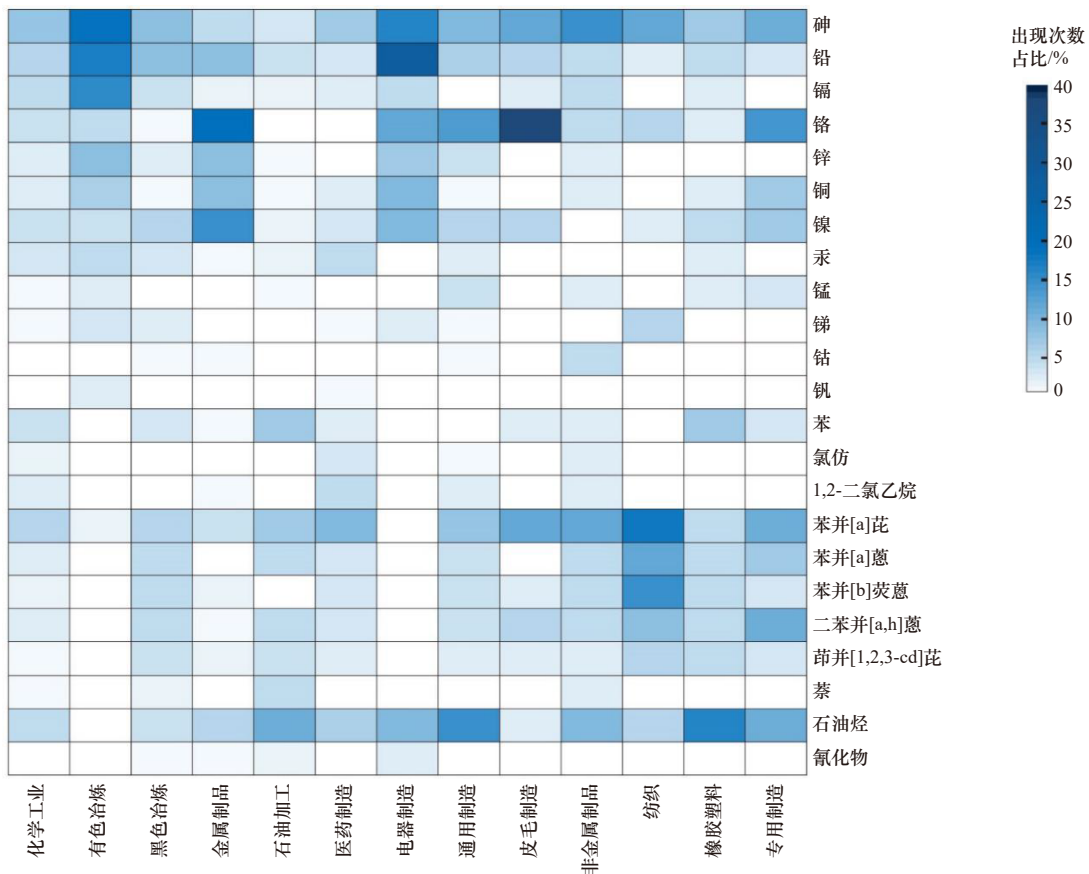
图4 长江经济带工业区主要行业土壤污染类型和污染种类

Fig.4 Types of soil contamination and pollutants in main industries in industrial zone of Yangtze River Economic Belt

分别为 90.8%、78.9%、58.8% 和 53.8%; 黑色冶炼、专用制造、非金属制品和通用制造行业主要表现为复合型污染, 占比分别为 85.0%、77.8%、63.6% 和 52.9%; 石油加工和医药制造行业主要表现为有机型污染, 占比分别为 62.5% 和 44.4%。

如图 4(b) 所示, 调研的 621 个污染场地共涉及 136 种污染物, 分布在 13 个不同行业的企业中。与已有研究结果^[41-42]一致, 化学工业污染场地的污染物种类最多, 共有 116 种。这主要是因为化工行业涉及多种化学品制造, 产品种类多、工艺复杂、污染物排放量高^[43], 其中以苯系物和氯代烃为主要污染物, 占比分别为 25.0% 和 28.4%。由图 5 可知, 有色冶炼和金

属制品行业污染物种类以重(类)金属为主, 其中有色冶炼主要涉及砷、铅、镉污染, 而金属制品污染种类以镍和铬为主, 这些行业存在涉重金属原料使用量大、生产过程粗放和固废处置过程不当^[18,44]等问题。由于黑色冶炼和石油加工行业在生产过程中使用到金属矿物和焦炭等, 导致重(类)金属和多环芳烃类污染物产生。医药制造行业中氯代烃污染物种类也占据了较大比例。值得关注的是, 重(类)金属、多环芳烃和石油烃在各行业均存在较普遍污染, 可能是由于生产过程中重(类)金属催化剂和石油类产品的广泛使用, 同时重(类)金属的存在可能导致沉积物对石油烃的吸附^[45]。



注: 选取每个行业中出现次数位于前 5 位的污染物进行绘图。

图 5 不同行业污染场地主要污染物统计分析

Fig.5 Statistics of characteristic pollutants of contaminated sites in different industries

2.3 污染场地修复技术选择情况

调研污染场地修复技术应用情况如图 6(a) 所示, 长江经济带工业区污染场地修复技术多选择异位修复, 该结论与相关研究结果^[9]一致。调研的 621 个修复场地中, 异位固化/稳定化 (22.2%)、水泥窑协同处置 (18.0%)、异位化学氧化 (14.7%) 成为长江经济带工业区污染场地中应用最广泛的修复技术, 阻隔风险

管控 (8.0%)、异位热脱附 (7.9%)、原位化学氧化 (4.6%)、原位固化/稳定化 (3.8%)、异位化学淋洗 (3.5%) 也是主要应用的修复技术。相比之下, 原位热脱附 (1.5%)、微生物修复 (0.6%) 和植物修复技术 (0.3%) 在长江经济带工业区污染场地的应用占比较低。

如图 6(b) 所示, 长江经济带工业区污染场地的主流修复技术选择在 2018 年后发生较大变化, 原位

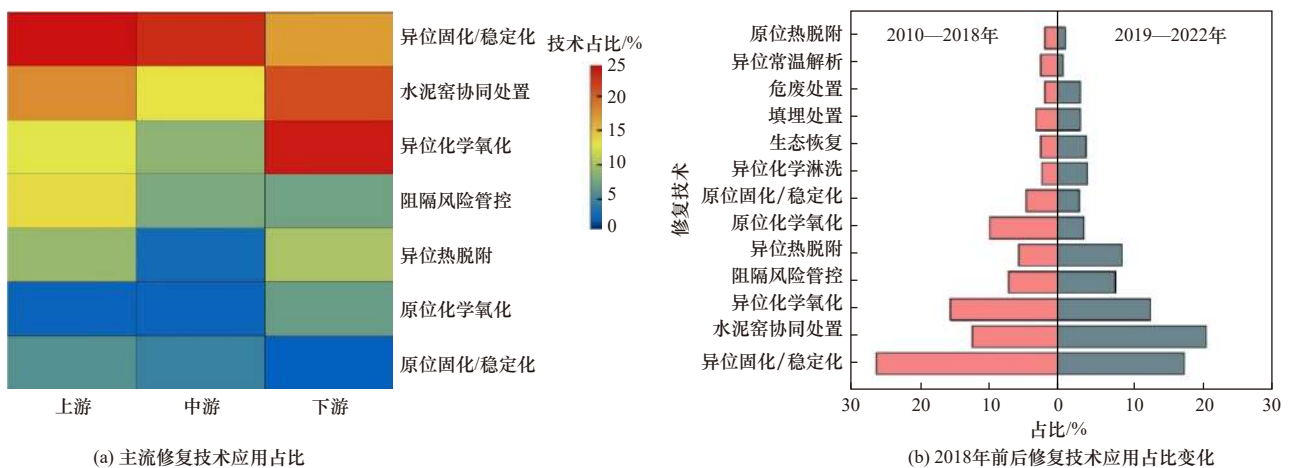


图6 长江经济带工业区主流修复技术应用占比及其在2018年前后的占比变化

Fig.6 The proportion of main remediation technology application of Yangtze River Economic Belt and their changes in proportion before and after 2018

化学氧化和固化/稳定化技术由于效果评估周期延长, 2018年之后其使用比例较2018年之前分别下降了8.2%和9.4%;而水泥窑协同处置、阻隔风险管控、异位热脱附、化学淋洗和生态恢复的使用比例分别增加了9.1%、1.2%、3.6%、2.0%和1.6%。近年来,《土十条》《土壤法》等一系列管理政策及技术导则的出台,推动了污染场地修复治理过程。同时,土壤污染防治相关环境问题逐渐步入公众视野,促进污染场地治理方法和修复技术能力不断创新,扩大了修复技术的可选范围。于靖靖等^[42]发现,我国修复/管控的污染场地数量在2016年增势凸显,在2018年达到了顶峰,利好环境法规政策和技术标准在污染场地修复治理过程中发挥了极其重要的作用。

与原位修复技术相比,异位修复过程中通常会涉及污染土壤的清挖及运输,除了成本相对较高以外,也会容易造成二次污染^[46]。借鉴欧美等发达国家的场地修复/管控技术发展经验,原位修复技术或许会成为未来发展的趋势^[6,9,47]。然而笔者调研发现,2018年之后,长江经济带工业区污染场地主流修复技术中异位修复的选择占比增加了4.5%、原位修复的选择占比降低了5.5%,这可能与我国污染场地土地资源的需求与配置等密切相关^[7-8]。

2.4 修复技术选择分析

不同污染类型及用地规划的污染场地,其污染物的暴露途径均有所不同,对人体健康及生态环境风险也有较大的差异^[48]。为明确长江经济带工业区污染场地修复技术选择的主控因素,本文对各类型污染场地和各类用地规划污染场地的修复技术选择种类进行了分析,主要技术选用占比结果如表1和表2所示。

根据表1,长江经济带上、中、下游无机型污染场地使用频次最多的技术均为异位固化/稳定化技术(占比分别为30.77%、40.40%和37.84%);有机型污染场地使用频次最多的技术是化学氧化和水泥窑协同处置技术;复合型污染场地中,上游多选择水泥窑协同处置技术(占比为34.27%),中下游多选择异位固化/稳定化和异位化学氧化技术。与上游地区污染防治技术种类(14种)相比,中下游地区所选择的污染防治技术更加多元化(中下游均为20种)。对各类型污染场地修复技术选择结构进行相关性分析,如图7所示,相同污染类型的场地所选用技术结构类似,表明污染场地的污染类型对修复技术的选择具有较大影响。从不同区域来看,长江经济带中上游地区场地修复技术采用最多的是异位固化/稳定化技术,下游地区是异位化学氧化技术,这与中上游无机型污染突出、下游有机型污染突出的特征相匹配。

考虑到人体健康风险大小在较大程度上取决于场地的再利用途径,根据表2所示结果,长江经济带尺度上用地规划为一类的污染场地,上游多选择水泥窑协同处置技术(占比为31.82%),中游多选择异位固化/稳定化技术(占比为31.73%),下游多选择异位化学氧化(占比为21.95%)和水泥窑协同处置技术(占比为17.38%),这可能与各地区场地主要的污染类型相关。对各类用地规划的污染场地修复技术选择结构进行相关性分析,如图8所示,上、中、下游每个区域的一类 and 二类用地,其技术选择结构均与该区域一类用地相似,可能受污染场地修复目标值、修复工期等多种因素影响。由于一类用地和二类用地在风险评估计算过程中考虑的暴露途径、暴露时间等参数存

表1 各类型污染场地主流修复技术应用占比

Table 1 The proportion of main remediation technology application in each type of soil contaminated site

长江经济带污染类型		主流修复技术应用占比/%						
		异位固化/稳定化	水泥窑协同处置	异位化学氧化	阻隔风险管控	异位热脱附	原位化学氧化	原位固化/稳定化
上游	无机型污染	30.77	12.31	0	12.31	3.08	0	9.23
	有机型污染	0	30.00	30.00	3.33	16.67	3.33	0
	复合型污染	15.38	34.27	6.99	2.10	8.39	2.80	2.10
中游	无机型污染	40.40	5.56	0	6.06	0	0	7.07
	有机型污染	3.23	19.35	32.26	9.68	9.68	3.23	0
	复合型污染	20.00	12.31	15.38	6.15	12.31	6.15	1.54
下游	无机型污染	37.84	22.97	1.35	13.51	0	0	5.41
	有机型污染	1.16	12.79	26.74	12.21	10.47	20.35	1.16
	复合型污染	18.47	15.92	21.66	5.10	11.46	6.37	1.91

注: 表中仅展示主流修复技术应用占比, 加粗数字为最大值。

表2 各类用地规划主流修复技术应用占比

Table 2 The proportion of main remediation technology application in each type of land use

长江经济带用地类型		主流修复技术应用占比/%						
		异位固化/稳定化	水泥窑协同处置	异位化学氧化	阻隔风险管控	异位热脱附	原位化学氧化	原位固化/稳定化
上游	一类用地	13.64	31.82	13.64	1.14	4.55	3.41	2.27
	二类用地	20.99	16.05	3.70	13.58	6.17	2.47	8.64
	一类+二类用地	16.90	33.80	5.63	1.41	14.08	1.41	0
中游	一类用地	31.73	16.35	11.54	1.92	6.73	2.88	2.88
	二类用地	31.16	5.03	2.51	10.55	2.51	0	5.53
	一类+二类用地	27.78	2.78	11.11	5.56	0	8.33	8.33
下游	一类用地	16.46	17.38	21.95	5.79	7.62	12.20	3.05
	二类用地	14.11	12.88	14.72	15.95	10.43	9.20	1.23
	一类+二类用地	14.10	20.51	19.23	6.41	11.54	5.13	1.28

注: 表中仅展示主流修复技术应用占比, 加粗数字为最大值。

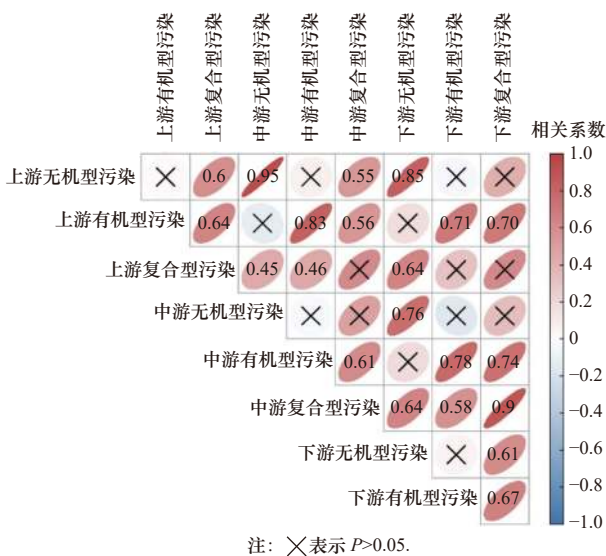


图7 各类型污染场地修复技术选择结构相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of remediation technology application for various types of contaminated sites

在差异, 通常一类用地计算出的风险控制值更低, 也意味着执行更严格的修复目标值. 对于一类和二类用

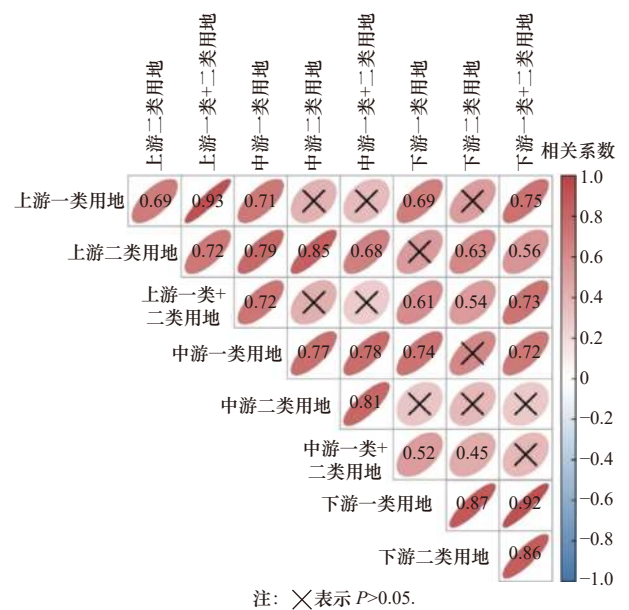


图8 各类用地规划污染场地修复技术选择结构相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of remediation technology application for various types of land use type

地污染场地,施工单位往往基于保守原则,全部按照一类用地确定修复技术,因此技术选择结构与一类用地相似.此外,一类用地大多是居住用地、中小学用地等,这类涉及民生工程的修复项目通常对修复工期要求较高,往往选取周期较短能够确保工期要求的异位修复技术.

3 结论与展望

a) 长江经济带工业区污染场地的土壤污染类型呈现一定的区域特性,中、上游地区以无机型污染为主,最大污染深度平均值分别为 5.43 和 5.37 m;下游地区以复合型污染为主(占比为 47.74%),污染物种类较多(分别是上游和中游的 1.94 倍和 2.32 倍),且最大污染深度平均值较深,为 6.16 m.下游地区污染类型和污染物种类更加复杂、污染深度更大,该地区将是长江大保护中土壤污染防治工作的重点之一.

b) 长江经济带工业区污染场地中数量最多的行业是化学工业(占比为 37.5%),其次是有色冶炼、黑色冶炼、金属制品和石油加工,这些行业多涉及重(类)金属、多环芳烃、苯系物、氯代烃及总石油烃等污染物,主导了经济带尺度场地污染类型的空间分布特征.在未来场地土壤污染防治工作中,应加强对化工、有色冶炼、黑色冶炼、金属制品和石油加工行业生产的全过程监管,并对重(类)金属和多环芳烃污染土壤污染防治予以充分关注.

c) 长江经济带工业区污染场地修复技术中异位修复技术占比为 76.15%,其中异位固化/稳定化、水泥窑协同处置和异位化学氧化应用最广泛,但受新政策法规推出、污染防治技术创新、公众关注度提高等因素影响.结合协同减污降碳工作要求,未来应加强引导土壤污染风险管控和修复技术向绿色低碳发展.

参考文献(References):

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL].北京:生态环境部,(2014-04-17)[2023-09-22].<https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>.
- [2] 生态环境部.2022 中国生态环境状况公报[EB/OL].北京:生态环境部,(2023-05-29)[2023-09-22].<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202305/P020230529570623593284.pdf>.
- [3] 赵玲,滕应,骆永明.我国有机氯农药场地污染现状与修复技术研究进展[J].土壤,2018,50(3):435-445.
ZHAO L,TENG Y,LUO Y M.Status of organochlorine pesticide contaminated sites in China and advances in site remediation[J].Soils,2018,50(3):435-445.
- [4] 谷庆宝,郭观林,周友亚,等.污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J].环境科学研究,2008,21(2):197-202.
GU Q B,GUO G L,ZHOU Y Y,et al.Classification,application and selection of contaminated site remediation technology:an overview[J].Research of Environmental Sciences,2008,21(2):197-202.
- [5] 姜珺秋,王雪莹,王宇航,等.基于模糊综合评估的污染场地可持续修复效果综合评价方法研究[J].环境科学研究,2023,36(1):159-167.
JIANG J Q,WANG X Y,WANG Y H,et al.Study on comprehensive evaluation method of sustainable remediation effect of contaminated sites based on fuzzy comprehensive evaluation[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(1):159-167.
- [6] US EPA.Superfund remedy report (fifth edition)[M].Washington DC:Office of Land and Emergency Management,2017.
- [7] 马妍,王盾,徐竹,等.北京市工业污染场地修复现状、问题及对策[J].环境工程,2017,35(10):120-124.
MA Y,WANG D,XU Z,et al.Current situation,problems and countermeasures of industrial contaminated sites remediation in Beijing[J].Environmental Engineering,2017,35(10):120-124.
- [8] 孙兴凯,黄海,王海东,等.大型污染场地修复过程中的问题探讨与工程实践[J].环境工程技术学报,2020,10(5):883-890.
SUN X K,HUANG H,WANG H D,et al.Discussion of problems in the process of large-scale contaminate sites remediation and project practice[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2020,10(5):883-890.
- [9] 梁竞,王世杰,张文毓,等.美国污染场地修复技术对我国修复行业发展的启示[J].环境工程,2021,39(6):173-178.
LIANG J,WANG S J,ZHANG W Y,et al.Review on contaminated site remediation technologies in the USA and their revelation to China[J].Environmental Engineering,2021,39(6):173-178.
- [10] 可欣,周燕,张飞杰,等.污染场地修复药剂安全利用问题及对策[J].环境科学研究,2021,34(6):1473-1481.
KE X,ZHOU Y,ZHANG F J,et al.Problems and strategies of safe utilization of agents for contaminated sites[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(6):1473-1481.
- [11] 王珍霞,宋久浩,苑文仪,等.我国污染场地化学氧化修复技术应用特征及再利用潜在腐蚀风险分析[J].环境科学研究,2022,35(5):1140-1149.
WANG Z X,SONG J H,YUAN W Y,et al.Application characteristics and potential corrosion risks of chemical oxidation remediation technology for contaminated sites in China[J].Research of Environmental Sciences,2022,35(5):1140-1149.
- [12] 张慧,高吉喜,乔亚军.长江经济带生态环境形势和问题及建议[J].环境与可持续发展,2019,44(5):28-32.
ZHANG H,GAO J X,QIAO Y J.Current situation,problems and suggestions on ecology and environment in the Yangtze River Economic Belt[J].Environment and Sustainable Development,2019,44(5):28-32.
- [13] 张义,周心劝,曾晓敏,等.长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J].环境科学,2022,43(4):2062-2070.
ZHANG Y,ZHOU X Q,ZENG X M,et al.Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River Economic Belt[J].Environmental

- Science,2022,43(4):2062-2070.
- [14] 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(增刊1):558-565.
LUO Y M.Current research and development in soil remediation technologies[J].Progress in Chemistry,2009,21(Suppl 1):558-565.
- [15] 陈梦舫.我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J].中国科学院院刊,2014,29(3):327-335.
CHEN M F.Review on heavy metal remediation technology of soil and groundwater at industrially contaminated site in China[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2014,29(3):327-335.
- [16] 周冯琦,陈宁.优化长江经济带化学工业布局的建议[J].环境保护,2016,44(15):25-30.
ZHOU F Q,CHEN N.Suggestions on optimizing the layout of chemical industry in the Yangtze River Economic Belt[J].Environmental Protection,2016,44(15):25-30.
- [17] MAO G Z,SHI T T,ZHANG S,et al.Bibliometric analysis of insights into soil remediation[J].Journal of Soils and Sediments,2018,18(7):2520-2534.
- [18] 罗帅,马新月,王东,等.重庆市场地土壤污染特征分析及行业来源识别[J].生态环境学报,2020,29(4):810-818.
LUO S,MA X Y,WANG D,et al.Analysis of soil pollution characteristics and identification of industry sources in contaminated sites in Chongqing City,China[J].Ecology and Environmental Sciences,2020,29(4):810-818.
- [19] 廖晓勇,崇忠义,阎秀兰,等.城市工业污染场地:中国环境修复领域的新课题[J].环境科学,2011,32(3):784-794.
LIAO X Y,CHONG Z Y,YAN X L,et al.Urban industrial contaminated sites:a new issue in the field of environmental remediation in China[J].Environmental Science,2011,32(3):784-794.
- [20] JIA X L,HU B F,MARCHANT B P,et al.A methodological framework for identifying potential sources of soil heavy metal pollution based on machine learning:a case study in the Yangtze Delta,China[J].Environmental Pollution,2019,250:601-609.
- [21] 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.
TAN H J,HUANG Z Z,SONG Q M,et al.Characterization of soil contaminations in brownfield sites in a typical city in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(4):976-986.
- [22] 杨勇,何艳明,栾景丽,等.国际污染场地土壤修复技术综合分析[J].环境科学与技术,2012,35(10):92-98.
YANG Y,HE Y M,LUAN J L,et al.Comprehensive analysis on soil remediation technologies of international contaminated sites[J].Environmental Science & Technology,2012,35(10):92-98.
- [23] 骆永明.中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J].环境监测管理与技术,2011,23(3):1-6.
LUO Y M.Contaminated site remediation in China:progresses, problems and prospects[J].The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2011,23(3):1-6.
- [24] 黄成,邓明亮.长江经济带化学工业集聚特征的实证研究[J].长江大学学报(社会科学版),2019,42(2):45-51.
HUANG C,DENG M L.An empirical study on agglomeration characteristics of chemical industry in Yangtze River Economic Belt[J].Journal of Yangtze University (Social Sciences Edition),2019,42(2):45-51.
- [25] 邹辉,段学军.长江沿江地区化工产业空间格局演化及影响因素[J].地理研究,2019,38(4):884-897.
ZOU H,DUAN X J.Spatial evolution of chemical industry and its influencing factors in the regions along the Yangtze River[J].Geographical Research,2019,38(4):884-897.
- [26] 赵玉婷,李亚飞,董林艳,等.长江经济带典型流域重化产业环境风险及对策[J].环境科学研究,2020,33(5):1247-1253.
ZHAO Y T,LI Y F,DONG L Y,et al.Environmental risks and countermeasures of heavy chemical industry in the Yangtze River Economic Belt[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1247-1253.
- [27] CHEN N C,XU L,CHEN Z Q.Environmental efficiency analysis of the Yangtze River Economic Zone using super efficiency data envelopment analysis (SEDEA) and Tobit models[J].Energy,2017,134:659-671.
- [28] 国家统计局.中国统计年鉴 2019(汉英对照附光盘)[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [29] 林根满,吴健,王敏,等.石化工业周边土壤中多环芳烃的组成及分布特征分析[J].环境污染与防治,2015,37(8):39-45.
LIN G M,WU J,WANG M,et al.Analysis of composition and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in surrounding soil of petrochemical industrial area[J].Environmental Pollution & Control,2015,37(8):39-45.
- [30] LIU G,NIU J J,GUO W J,et al.Assessment of terrain factors on the pattern and extent of soil contamination surrounding a chemical industry in Chongqing,Southwest China[J].CATENA,2017,156:237-243.
- [31] 冉宗信,陈靖宇,王亚婷,等.典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素[J].环境科学,2019,40(10):4594-4603.
RAN Z X,CHEN J Y,WANG Y T,et al.Characteristics and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from typical industrial areas of Chengdu[J].Environmental Science,2019,40(10):4594-4603.
- [32] 国家统计局.金砖国家联合统计手册-2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [33] 国家统计局.中国第三产业统计年鉴-2019[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [34] 刘伟超,杨广庆,熊保林,等.低液限粉土水理特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):926-932.
LIU W C,YANG G Q,XIONG B L,et al.Research on the water-physical property of the low liquid limit silt[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(4):926-932.
- [35] 任加国,鄯普闻,徐祥健,等.地下水氯代烃污染修复技术研究进展[J].环境科学研究,2021,34(7):1641-1653.
REN J G,GAO P C,XU X J,et al.Advances in remediation technology for chlorinated hydrocarbons contamination in

- groundwater[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(7):1641-1653.
- [36] LI M,CHEN Q,YANG L,et al.Contaminant characterization at pesticide production sites in the Yangtze River Delta:residue,distribution,and environmental risk[J].*Science of the Total Environment*,2023,860:160156.
- [37] 蔡五田,张敏,刘雪松,等.某石油化工场地土层挥发性有机物的污染特征[J].*水文地质工程地质*,2011,38(2):89-96.
- CAI W T,ZHANG M,LIU X S,et al.Contamination characteristics of volatile organic compounds in the subsoil of a petrochemical contaminated site[J].*Hydrogeology & Engineering Geology*,2011,38(2):89-96.
- [38] BI X Y,FENG X B,YANG Y G,et al.Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County,western Guizhou,China[J].*Environment International*,2006,32(7):883-890.
- [39] 余勤飞,侯红,吕亮卿,等.工业企业搬迁及其对污染场地管理的启示:以北京和重庆为例[J].*城市发展研究*,2010,17(11):95-100.
- YU Q F,HOU H,LU L Q,et al.Industrial enterprise relocation and their implications to contaminated site management:Beijing and Chongqing case study[J].*Urban Studies*,2010,17(11):95-100.
- [40] 杨荣金,孙美莹,张乐,等.长江经济带生态环境保护的若干战略问题[J].*环境科学研究*,2020,33(8):1795-1804.
- YANG R J,SUN M Y,ZHANG L,et al.Strategic issues of ecological environment protection in the Yangtze River Economic Belt[J].*Research of Environmental Sciences*,2020,33(8):1795-1804.
- [41] 葛锋,张转霞,扶恒,等.我国有机污染场地现状分析及展望[J].*土壤*,2021,53(6):1132-1141.
- GE F,ZHANG Z X,FU H,et al.Distribution of organic contaminated sites in China:statu quo and prospect[J].*Soils*,2021,53(6):1132-1141.
- [42] 于靖靖,梁田,罗会龙,等.近 10 年来我国污染场地再利用的案例分析与环境管理意义[J].*环境科学研究*,2022,35(5):1110-1119.
- YU J J,LIANG T,LUO H L,et al.Case analysis and environmental management significance of contaminated site reuse in China from 2011 to 2021 [J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(5):1110-1119.
- [43] 彭聃,彭颖,余健,等.湖北省化工行业环境污染特性分析[J].*环境科学与技术*,2016,39(增刊2):562-565.
- PENG D,PENG Y,SHE J,et al.The analysis of characteristics of chemical industrial pollution in Hubei Province[J].*Environmental Science & Technology*,2016,39(Suppl 2):562-565.
- [44] 冯于耀,史建武,钟曜谦,等.有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评估[J].*环境科学*,2020,41(8):3547-3555.
- FENG Y Y,SHI J W,ZHONG Y Q,et al.Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dust from non-ferrous smelting parks[J].*Environmental Science*,2020,41(8):3547-3555.
- [45] ZHOU R,QIN X B,PENG S T,et al.Total petroleum hydrocarbons and heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay,China: long-term variations in pollution status and adverse biological risk [J].*Marine Pollution Bulletin*,2014,83(1):290-297.
- [46] 黄沈发,杨洁,吴健,等.城市再开发场地污染风险管控研究及实践[J].*环境保护*,2018,46(1):31-35.
- HUANG S F,YANG J,WU J,et al.Research and practice on pollution risk management and control of urban redevelopment sites[J].*Environmental Protection*,2018,46(1):31-35.
- [47] 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.
- 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.
- [48] TANG J C,WANG M,WANG F,et al.Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil[J].*Journal of Environmental Sciences*,2011,23(5):845-851.

(责任编辑:周巧富)