

长三角地区关闭搬迁企业遗留地块土壤污染特征^①

潘月^{1,2}, 朱冰清^{1,2}, 孟维坤^{1,2}, 王水^{1,2*}, 蒋林惠^{1,2}, 李梦雅^{1,2}

(1 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2 江苏省土壤与地下水污染防治工程研究中心, 南京 210036)

摘要: 通过整理和分析长江三角洲(长三角)地区 602 个关闭搬迁企业遗留地块的土壤污染调查数据, 从场地水文地质特征、空间分布特征、行业特征、污染及风险状况、主要污染物类型维度, 探究了长三角地区不同行业遗留地块土壤污染特征及管理策略。结果表明: 长三角地区有机化学原料制造、金属表面处理及热处理加工和化学农药制造行业是土壤环境管理需要重点关注的行业类型。遗留地块污染主要以重金属和有机复合污染为主, 苯系物, 氯代烃, 重金属汞、砷、铅和镍均为地块检出频率较高的污染物。遗留地块土壤污染物与行业类型和工业利用时间关系密切, 化工各行业遗留地块苯系物、石油烃、氯代烃和多环芳烃均有不同程度的检出频率, 涉重的金属表面处理及热处理加工行业和其他电池制造行业遗留地块重金属六价铬和铅分别是检出频率最高的污染物。

关键词: 长三角地区; 遗留地块; 行业特征; 土壤污染

中图分类号: X53; X825 文献标志码: A

Soil Pollution Characteristics of Land Plots Left by Closed and Relocated Enterprises in the Yangtze River Delta Region

PAN Yue^{1,2}, ZHU Bingqing^{1,2}, MENG Weikun^{1,2}, WANG Shui^{1,2*}, JIANG Linhui^{1,2}, LI Mengya^{1,2}

(1 Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2 Jiangsu Province Engineering Research Center of Soil and Groundwater Pollution Prevention and Control, Nanjing 210036, China)

Abstract: Based on the collation and analysis of soil pollution investigation data from 602 legacy sites of closed and relocated enterprises in the Yangtze River Delta (YRD) region, this study explored the soil pollution characteristics and corresponding management strategies for these sites across different industries. The analysis was conducted from multiple dimensions, including site hydrogeological features, spatial distribution, industrial characteristics, pollution and risk conditions, and major pollutant types. The results showed that the industries of organic chemical raw material manufacturing, metal surface treatment and heat treatment and chemical pesticide manufacturing should be paid attention to in soil environmental management. Heavy metals and organic pollutants were the main pollutants in the left plots. Benzene-series compounds, chlorinated hydrocarbons, heavy metals mercury, arsenic, lead and nickel were the most frequent pollutants in the left plots. There was an obvious relationship between soil pollutants in the left plots and the types of industries and duration of industrial utilization. Benzene-series compounds, petroleum hydrocarbons, chlorinated hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons all had different frequencies in the left plots of chemical industry. The most frequent heavy metals of chromium and lead were in the left plots of heavy metal surface treatment and heat treatment industries and other battery manufacturing industries.

Key words: Yangtze River Delta region; Left plots; Industry characteristics; Soil pollution

随着产业结构调整的深入推进, 大量工业企业关停并转或搬迁, 遗留地块往往作为城市建设用地被再次开发利用, 但遗留地块存在污染状况不明、环境隐患突出等问题。沿长江三角洲(长三角)地区发展快,

化工、农药、电镀、金属冶炼企业数量多, 污染排放也相对较高, 近年由城市工业区污染企业搬迁、工业“三废”倾倒、生产工艺落后等引发的土壤污染问题日益显现。长三角地区已关停搬迁数千家污染严重的

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3713304)、江苏省生态环境科研项目(2025025)和省属公益类科研院所自主科研项目(GYYS202401—领军人才培养, GYYS202401—青年拔尖人才)资助。

* 通信作者(wangshuihky@163.com)

作者简介: 潘月(1987—), 女, 江苏南京人, 博士, 主要研究方向为土壤及地下水污染修复和风险管控。E-mail: panyue611@126.com

企业^[1]。全国土壤污染状况调查公报显示,从污染分布情况看,南方土壤污染重于北方;长三角、珠三角等部分区域土壤污染问题较为突出;在调查的 81 块工业废弃地的 775 个土壤点位中,超标点位占 34.9%,主要污染物为锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃,主要涉及化工业、矿业、冶金业等行业^[2]。长三角地区的气候类型、水文地质条件、土壤类型各具其特殊性,导致关闭搬迁企业遗留地块的土壤污染特征具有复杂性和多样性。该区属于亚热带季风气候,温和湿润的冬季和炎热多雨的夏季为土壤污染物的迁移和转化提供了条件,特别是梅雨季节的大量降水可能导致重金属等污染物的淋溶和扩散^[3]。同时,该区河网密布,湖泊众多,地下水丰富,土壤中的污染物可通过地下水系统迁移,增加了污染扩散的风险。此外,长三角地区土壤类型多样,这些土壤的物理化学性质对污染物的吸附、固定和生物有效性有重要影响。

遗留地块的环境风险是污染特征、自然条件、政策制度及技术管理等多方面因素共同作用的结果。从污染来源看,行业类型直接决定污染物种类,如化学原料及化学品制造业、医药制造业、纺织和化学纤维制造业等行业,主要污染物为砷、铅、多环芳烃、氯代烃、石油烃、苯系物等。而工业利用时间则与污染物累积程度相关,工业利用时间越长,污染程度通常越严重;环境风险不仅取决于污染物本身,还受环境介质的迁移传播能力影响。土壤、空气和水体等介质的污染可能性^[4]、空间分布、污染程度,共同决定了污染物的迁移与扩散潜力^[5],自然条件如地块的水文地质与区域气候条件,进一步调控污染物的迁移路径和范围;在人类活动与政策制度层面,政策与管控措施对环境风险具有关键调控作用。国家宏观经济政策的调整、企业环保行为与政策要求的匹配程度,以及法律法规与监管体系的变化,均直接或间接影响环境风险水平。同时,场地是否实施了有效的环境监测和工程控制措施,如沥青阻隔、防渗膜阻隔、垂直阻隔技术等,也直接决定污染是否能得到有效控制^[6]。

目前对于长三角遗留地块土壤污染风险及管控重点的研究还比较有限。因此,本研究通过调查长三角地区关闭搬迁企业遗留地块的土壤污染物特征,从场地水文地质特征、污染特征、行业特征、污染程度和范围几个方面进行分析,探究了长三角地区不同行业遗留地块土壤污染风险,为建立地块优先管控名录提供科学依据,从而有效控制和预防污染扩散。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲(长三角)地区位于中国东部沿海,包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省,地处长江下游,濒临黄海与东海,具有独特的气候和水文地质特征。长三角地区是中国最重要的经济区域之一,其工业发展历史可追溯至 19 世纪末至 20 世纪初的晚清时期,彼时上海作为对外贸易的重要港口,开始逐步发展起以纺织、面粉等轻工业为主的工业体系。20 世纪初,随着洋务运动的推进,长三角地区的工业得到了进一步的发展。

改革开放后,特别是 20 世纪 90 年代以来,长三角地区的工业发展进入了快车道。上海作为经济中心,其工业结构逐渐从轻工业向重工业和高新技术产业转型,形成了以汽车、石化、钢铁、电子等为主的工业体系。同时,江苏、浙江和安徽三省也依托各自的区位优势和产业基础,发展出了各具特色的工业体系。受制于技术、市场、原材料、交通等多重因素,长三角地区是我国化工行业最为集中的地区^[7]。江苏省在电子信息、装备制造、石化、金属冶炼、食品加工及医药制造业等领域具有明显的产业规模优势,特别是在苏州、无锡、常州等城市,高新技术产业和先进制造业得到了快速发展。浙江省则以装备制造、石化、金属冶炼、纺织服装以及汽车制造业等为重点产业,特别是在杭州、宁波、温州等城市,民营经济和轻工业十分活跃。安徽省虽然整体工业发展程度相对较低,但在食品加工和非金属矿物制品业方面与长三角地区其他省市差距较小,特别是在合肥等城市,近年来高新技术产业和战略性新兴产业发展迅速。

进入 21 世纪,长三角地区的工业发展更加注重产业结构的优化升级和可持续发展。2018 年,长三角一体化发展上升为国家战略,区域内的工业发展更加强调协同创新和产业链的整合提升。三省一市在科技创新、产业协同、基础设施互联互通等方面加强合作,共同推动长三角地区工业的高质量发展。此外,长三角地区的工业发展还面临着产业转移和分工合作的挑战和机遇^[8]。上海等经济发达地区正逐步将一些劳动密集型产业向苏北、浙西南和安徽等地区转移,而自身则更多地发展技术密集型和资本密集型产业。这种产业转移和分工合作不仅推动了区域经济的均衡发展,也促进了产业结构的优化升级。

1.2 数据来源

本研究收集整理了长三角地区 2016—2023 年完

成调查的 602 个关闭搬迁化工遗留污染地块调查数据,其中超标地块 304 个,非超标地块 298 个。根据 GB/T4754—2017《国民经济行业分类》^[9]将其分为 79 个行业类型,其中炼焦、炼钢、氮肥制造等 63 个行业的遗留地块较少(均不超过 10 个地块),为避免偶然因素影响,这 63 个行业不从行业角度进行土壤污染特征分析,仅用于讨论区域尺度土壤污染特征。

1.3 数据分析方法

通过收集与分析调查报告中不同行业类型地块数量、占比、土壤污染物超标总倍数、土壤污染面积、污染物种类、污染物类型等相关数据,研究长三角地区关闭搬迁遗留地块的土壤污染特征,探讨该地区工业发展、人类活动、行业类型等对土壤污染的影响。

对于不同行业地块土壤污染风险水平,采用国际上通用的污染负荷指数法(PLI)进行分析。计算公式如下:

$$PLI = \frac{1}{3} \sqrt{CF1 + CF2 + CF3}$$

式中:CF1 为同一行业污染地块占比;CF2 为土壤污染物超标总倍数;CF3 为土壤污染面积。

所有数据均采用 Excel 2016 软件进行分析,并绘图。

2 结果与讨论

2.1 遗留地块行业分布特征

本研究中,长三角地区关闭搬迁企业遗留地块共 602 个,根据《国民经济行业分类》^[9]行业小类的统计,共分为 79 个行业类型,其中 63 个行业小类地块数量均少于 10 个。统计分析数量不少于 10 个地块的 16 个行业小类,发现地块数量最多的前 3 个行业类型分别是:有机化学原料制造、金属表面处理及热处理加工、化学试剂和助剂制造(图 1)。长三角地区是中国经济发展最为活跃的区域之一,拥有较为完善的工业基础和产业链,这为有机化学原料制造业的发展提供了良好的条件。有机化学原料广泛应用于医药、农业、塑料、纺织、涂料和化妆品等行业^[10]。长三角地区作为中国的经济中心,对下游产品的需求量大,有力带动了有机化学原料制造业、金属表面处理及热处理加工行业的发展;这些行业作为制造业的关键环节,广泛应用于汽车、机械、电子、航空航天等领域,并在本地区已形成较为明显的产业集聚效应^[11]。同时,化工园区的建设和发展,为金属表面处理及热处理加工行业提供了良好的生产环境和合作机会。此外,长三角地区拥有发达的交通网络和

物流体系,便于原料的进口和产品的出口,降低了企业的物流成本,提高了市场竞争力。综上所述,长三角地区以上 3 个行业小类企业聚集的原因是多方面的,包括产业基础、市场需求、政策支持、技术创新、产业集聚、区域合作、物流优势和环境治理等。

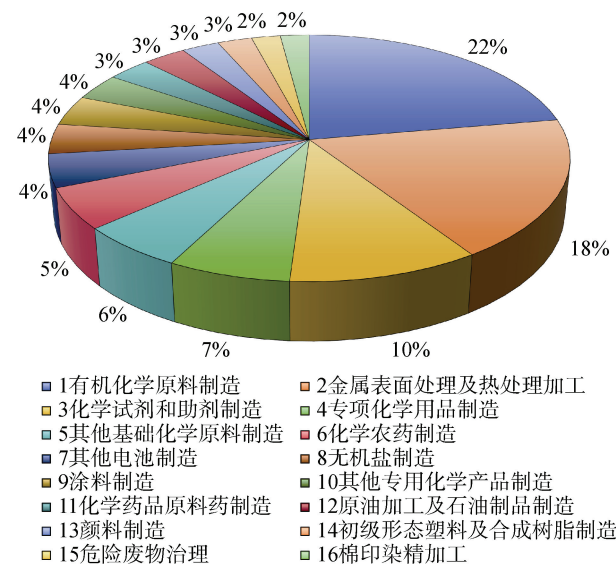


图 1 长三角地区各行业类型遗留地块占比
Fig. 1 Proportions of various types of legacy plots in Yangtze River Delta

2.2 遗留地块空间分布特征

遗留化工地块数量与工业企业发展的历史有较大关系。分析发现,长三角地区关闭搬迁企业遗留地块主要呈“三沿一环”空间分布格局:沿沪宁线分布、沿江分布、沿东陇海线分布和环太湖分布。沿沪宁线发展的城市凭借优越的地理位置、发达的交通和良好的经济基础,促进了自身工业化的发展。进入 21 世纪后,由于环保问题越来越引起大家的关注,各类环保政策的出台,导致一些环保工艺不达标、污染严重的企业关闭。2007 年,随着新修订的《江苏省太湖水污染防治条例》^[12]的出台,苏南地区提高了行业准入门槛及污染物排放标准,部分治理水平低下、不能达标排放的企业逐渐关闭,成为遗留地块。2016 年,江苏省人民政府印发《江苏省土壤污染防治工作方案》^[13],浙江省人民政府印发《浙江省土壤污染防治工作方案》^[14],上海市人民政府印发《上海市土壤污染防治行动计划实施方案》^[15],均明确提出开展土壤污染状况详查,逐步开展治理与修复,减少土壤污染存量。2017 年江苏省开展“两减六治三提升”专项行动以来,有相当数量的化工、电镀、印染等重污染企业及低效产能企业关停搬迁,潜在的土壤污染

地块逐步增加。

2.3 遗留地块水文地质特征

根据遗留地块的地下水埋深情况统计(图 2)可知,长三角地区关闭搬迁企业遗留地块地下水埋深范围主要为 0~10 m,其中地下水埋深在 0~0.5、0.5~1 m 以及 1~2 m 的地块数量最多,分别占全部地块数量的 20%、40%和 30%,整体来说,长三角地区关闭搬迁企业遗留地块的地下水埋深相对较浅。根据陈晨^[16]的研究结果,地下水埋深对地下水中有有机污染物的影响程度最高。地下水埋深越深,包气带越厚,污染物经包气带迁移时,挥发弥散、土壤吸附、微生物降解等作用可以减缓污染物的迁移速度或降低污染物迁移至地下水的浓度。因此,地下水埋深越浅,地下水污染风险越高^[17]。根据遗留地块包气带土层性质可知,60% 以上的地块包气带土层性质均为碎石土,包气带渗透性好,污染物可以通过土壤孔隙直接向下渗透,使污染物在土壤中的迁移距离和速度增加,从而加大了地下水污染的可能性。对于挥发性有机污染物,渗透性好的包气带会使这些污染物更容易挥发并进入地下水,例如,含酚、氰化物的污水排入土壤后,挥发性有机物会很快通过渗透进入地下水。而对于重金属污染物,在渗透性好的包气带中,也更容易通过渗透作用进入地下水。

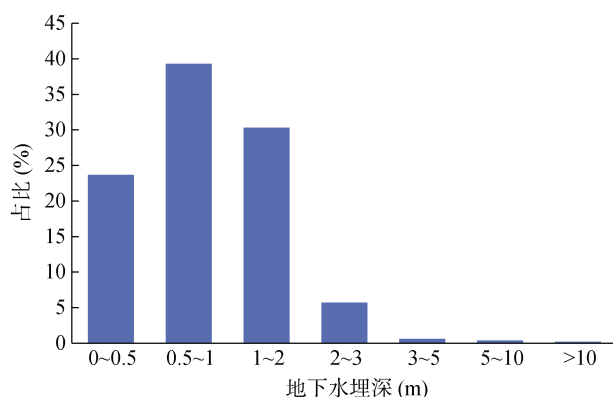


图2 遗留地块地下水埋深占比统计

Fig. 2 Proportions of groundwater buried depths in left plots

2.4 遗留地块土壤污染风险状况

对不同行业遗留地块采用污染负荷指数法进行风险评价,结果如图 3 所示。根据不同行业的 PLI 值,将土壤污染风险划分为 3 个层次: $PLI \geq 90$ 的为高风险, $60 < PLI < 90$ 为较高风险, $PLI \leq 60$ 的为一般风险。有机化学原料制造、金属表面处理及热处理加工和化学农药制造 3 个行业的遗留地块 PLI 值均超过 90,属于土壤污染高风险;化学试剂和助剂制造、专项化学用品制造、无机盐制造和化学药品原料药制造

行业遗留地块为较高风险;其他行业遗留地块属于一般风险。

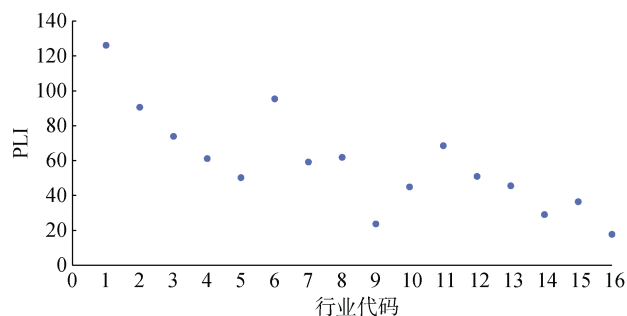


图3 不同行业遗留地块污染负荷指数

Fig. 3 Pollution load indexes (PLI) of left plots of different industries

将遗留地块工业利用时间划分为 4 段: <5、5~20、20~40、>40 a,根据超标比例来表征工业利用时间对土壤污染的影响程度,结果见图 4。由图 4 可知,随着工业利用时间的增加,遗留地块超标比例逐渐增大,工业利用时间超过 40 a 的遗留地块,超标比例超过 70%。污染物在土壤中会逐渐积累,这一特性使得土壤污染具有长期性。同时,工业利用时间长的企业可能在环保意识和措施相对薄弱的时期运营,导致污染物排放控制不严格,甚至存在违规排放现象,随着时间的推移,这些历史遗留的污染物在土壤中不断累积,使得污染程度加重。长期运营的工业企业设备老化,容易出现跑冒滴漏等现象,导致原辅材料或产品中的有毒有害物质进入土壤,这种长期的设备管理问题加剧了土壤污染的程度。此外,长期的工业活动还可能会破坏土壤的结构和功能,降低土壤的自净能力。例如,工业废水的长期排放会导致土壤酸碱度失衡,影响土壤微生物的活性,从而减弱土壤对污染物的降解和净化能力。

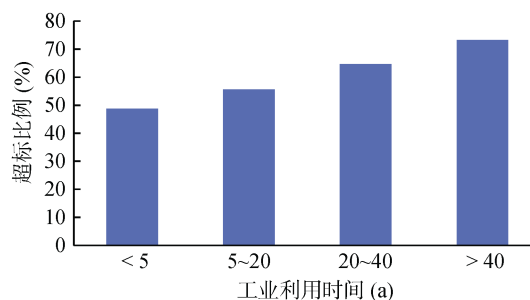


图4 不同工业利用时间遗留地块超标比例

Fig. 4 Proportions of contaminated sites exceeding standards under different durations of industrial utilization

2.5 遗留地块主要污染物类型

土壤污染超标地块主要存在的污染物如图 5 所

示。不同行业遗留地块的污染物类型差异较大, 污染物主要以重金属、多环芳烃、石油烃、苯系物、氯代烃为主, 其中苯系物和氯代烃的检出频率较高, 均超过 25%。沈城等^[18]发现, 再开发利用工业场地土壤中重金属汞、镉和锑在表层土壤中存在明显累积。重金属化工、石油加工和机械制造等其他工业活动也会造成不同程度的土壤重金属污染^[18-19]。焦化、冶炼、石油化工、电子拆解等工业场地土壤中的多环芳烃污染问题则更加突出^[20], 但长三角地区该类型企业数量较少, 因此该区多环芳烃类污染物检出频率不高。苯系物广泛应用于石油化工、农药、涂料等行业, 具有较强的挥发性和溶解性, 因此在生产和生活过程中的广泛应用可能会导致其进入环境介质, 对空气、水体、土壤以及农作物等造成污染。同时, 大气和颗粒物中的苯系物会通过干湿沉降进入土壤, 而土壤中的苯系物也可能挥发重新进入大气, 当沉降通量持续大于挥发通量时, 就会导致苯系物在土壤中逐渐积累。特定场地的历史生产工艺可能导致某些特定污染物的检出频率较高, 例如, 氯代烃在某些化工厂场地的污染特征研究中显示出高检出率。葛峰等^[21]调查分析了全国 277 个有机污染场地, 发现多环芳烃污染多在各地区焦化厂场地中出现, 总石油烃与重金属复合污染出现在机械制造和金属冶炼行业场地, 氯代烃类污染物出现在氯碱生产相关场地。

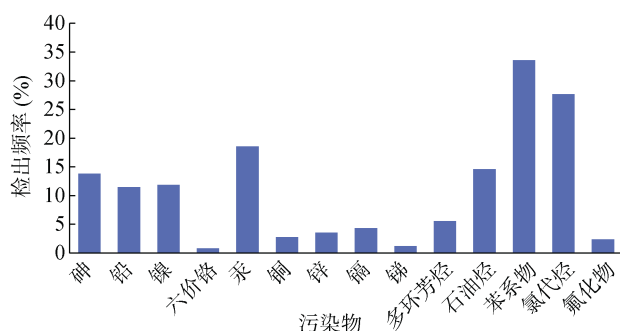


图 5 遗留地块各类型污染物检出频率

Fig. 5 Occurrence frequencies of various types of pollutants in legacy plots

不同行业遗留地块各类型污染物检出频率有较大的差异(图 6)。有机化学原料制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍、汞、铜、锌和镉, 以及多环芳烃、石油烃、苯系物、氯代烃和氟化物, 其中苯系物和氯代烃检出频率超过 40%。该行业生产原料及产品有较大差异, 但是整体上氯代烃和苯系物是该行业遗留地块的主要特征污染物, 其总量可占总挥发性有机化合物(VOCs)成分的 38.2% 和 12.0%^[22]。

金属表面处理及热处理加工行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍、六价铬、铜、锌和锑, 以及多环芳烃、石油烃、苯系物、氯代烃和氟化物, 其中重金属六价铬检出频率超过 60%。在该行业中, 镀锌、镀铜、镀镍和镀铬是应用最广的工艺。这些工艺在生产过程中会使用大量的强酸、强碱、重金属盐溶液, 包括铬酸酐和持久性有机污染物等有毒有害化学品。这些化学品能通过电镀液泄漏和“三废”(废气、废水、废渣)排放进入环境, 导致环境中锌、铜、镍、铬等重金属和全氟化合物含量增加, 对生态系统安全构成威胁^[23]。化学试剂和助剂制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍、六价铬和镉, 以及石油烃、苯系物和氯代烃, 其中苯系物检出频率接近 40%。专项化学用品制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍和镉, 以及多环芳烃、石油烃、苯系物和氯代烃, 其中苯系物检出频率超过 70%, 氯代烃检出频率超过 80%。其他基础化学原料制造行业遗留地块污染物包括重金属锌、石油烃、苯系物和氯代烃, 检出频率分别为 10%、40%、60% 和 70%。化学农药制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍和镉, 以及多环芳烃、石油烃、苯系物和氯代烃, 其中苯系物和氯代烃检出频率分别超过 50% 和 60%。其他电池制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、六价铬、镉和锑, 其中铅检出频率接近 90%。无机盐制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅、镍、汞、铜、锌和镉, 以及多环芳烃、石油烃、苯系物和氯代烃, 检出频率均在 10% 左右。涂料制造行业遗留地块污染物包括重金属镍、石油烃、苯系物和氯代烃, 其中氯代烃检出频率超过 60%。其他专用化学产品制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、六价铬和锑, 以及多环芳烃和苯系物, 其中苯系物检出频率约为 50%。化学药品原料药制造行业遗留地块污染物包括多环芳烃、石油烃、苯系物、氯代烃和氟化物, 其中多环芳烃、石油烃和苯系物检出频率均超过 40%。颜料制造行业遗留地块污染物包括重金属砷、铅和镉, 以及氯代烃。初级形态塑料及合成树脂制造行业遗留地块污染物包括多环芳烃、苯系物和氯代烃。危险废物治理行业遗留地块污染物包括多环芳烃、石油烃、苯系物和氯代烃。棉印染精加工行业遗留地块污染物包括石油烃和苯系物, 在调查的每个地块中均有检出。

2.6 遗留地块土壤污染修复技术

针对不同行业遗留地块的污染物类型, 结合风险管控及修复技术的成熟度、运行维护成本、资金投入以及系统可靠性等因素, 选择一种或多种技术进行组

合修复，能够显著提升修复效率和效果。目前土壤污染修复市场已初步构建起涵盖物理、化学、生物及其组合技术的土壤修复技术体系^[24-25]，且基于此，形成

了针对不同行业遗留地块的推荐修复技术(表 1)。通过合理组合修复技术，能够有效提高修复效率，降低修复成本，并实现污染地块的可持续利用。

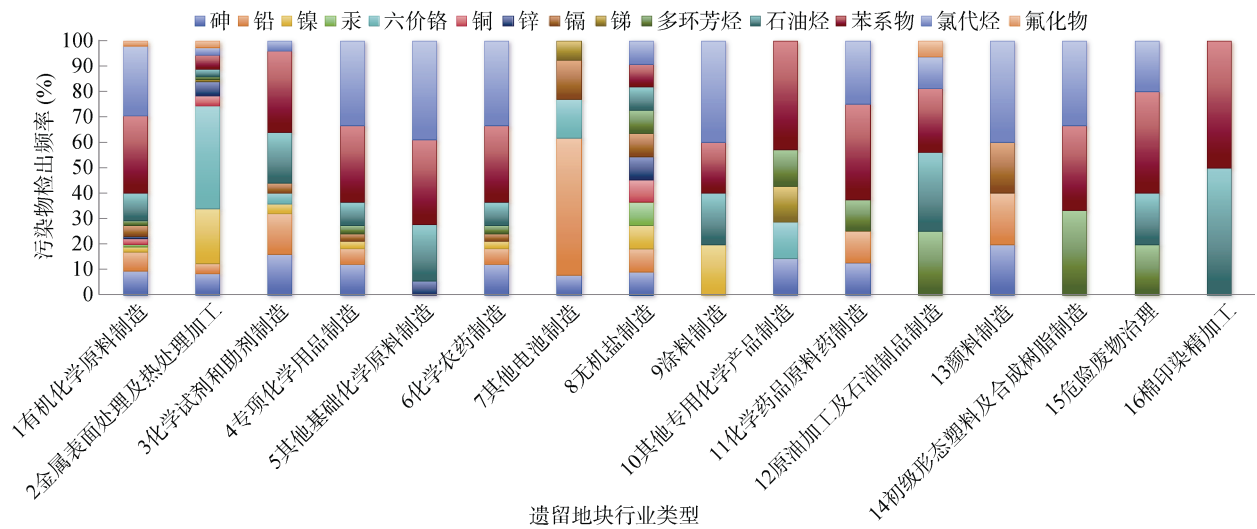


图 6 不同行业遗留地块各类型污染物检出频率

Fig. 6 Frequencies of various types of pollutants in left plots of different industries

表 1 不同行业遗留地块土壤污染修复技术推荐

Table 1 Recommended soil pollution remediation techniques for left plots of different industries

| 行业类型 | 土壤主要污染物类型 | 修复技术推荐 |
|------------------|----------------------|--|
| 1 有机化学原料制造 | 苯系物、重金属、氯代烃、多环芳烃、石油烃 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术、生物修复技术 |
| 2 金属表面处理及热处理加工 | 重金属 | 水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 3 化学试剂和助剂制造 | 重金属、苯系物、石油烃 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 4 专项化学用品制造 | 氯代烃、苯系物、重金属 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 5 其他基础化学原料制造 | 氯代烃、苯系物、石油烃 | 化学氧化/还原技术、生物修复技术 |
| 6 化学农药制造 | 氯代烃、苯系物、重金属 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 7 其他电池制造 | 重金属 | 水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 8 无机盐制造 | 重金属 | 水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 9 涂料制造 | 氯代烃、苯系物、石油烃、重金属 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 10 其他专用化学产品制造 | 氯代烃、重金属、多环芳烃 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 11 化学药品原料药制造 | 苯系物、氯代烃、重金属、多环芳烃 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 12 原油加工及石油制品制造 | 石油烃、多环芳烃、苯系物、氯代烃 | 化学氧化/还原技术、生物修复技术 |
| 13 颜料制造 | 重金属、氯代烃 | 化学氧化/还原技术、水泥窑/隧道窑协同处置修复技术、固化稳定化技术 |
| 14 初级形态塑料及合成树脂制造 | 苯系物、多环芳烃、氯代烃 | 化学氧化/还原技术、生物修复技术 |
| 15 危险废物治理 | 苯系物、多环芳烃、石油烃、氯代烃 | 化学氧化/还原技术、生物修复技术 |
| 16 棉印染精加工 | 苯系物、石油烃 | 化学氧化/还原技术、生物修复技术 |

3 结论与建议

1)长三角地区有机化学原料制造、金属表面处理及热处理加工和化学农药制造行业是土壤环境管理需要重点关注的行业类型。针对这些行业的遗留污染地块,对于急需开发利用的,需要行土壤污染状况调查和风险评估,采取有效的污染防控和修复措施,确保地块达到安全利用标准。对于暂不开发利用的污染地块,实施以防止污染扩散为目的的风险管控:包括设立标志和标识,采取隔离、阻断等措施,防止污染进一步扩散;划定管控区域,限制人员进入,防止土壤扰动;通过用途管制,规避随意开发带来的风险;开展土壤、地表水、地下水、空气环境监测,发现污染扩散时,及时采取有效补救措施。

2)长三角地区遗留地块污染主要以重金属和有机污染物复合污染为主,苯系物、氯代烃、重金属汞、砷、铅和镍均为地块检出频率较高的污染物。遗留地块土壤污染物与行业类型有密切的关系,化工各行业苯系物、石油烃、氯代烃和多环芳烃均有不同程度的检出频率,涉重的金属表面处理及热处理加工行业和其他电池制造行业中,重金属六价铬和铅分别是检出频率最高的污染物。针对复合污染地块,可采用多种技术的组合来提高修复效率和效果,例如,先通过化学沉淀降低重金属的生物有效性,再利用植物-微生物联合修复进一步去除重金属和有机污染物。

3)长三角地区作为中国经济最发达的区域之一,工业化、城市化进程迅速,但也面临着严峻的土壤污染问题。为有效应对这一挑战,需从多个层面采取系统性措施。首先,应加强土壤污染的监测与评估,建立覆盖工业区、农田和城市区域的监测网络,定期发布数据,并开展风险评估,针对高风险的行业制定针对性的治理方案。其次,需强化法律法规的执行力度,严格落实《土壤污染防治法》,加大对违法排污企业的处罚力度,同时出台地方性法规,明确土壤污染治理责任和资金支持机制。在污染治理方面,应优先修复重污染场地,采用物理、化学或生物修复技术,确保污染土地的安全再利用。此外,推动产业升级也是关键,通过淘汰落后产能、关闭高污染企业,促进绿色制造和清洁生产,同时支持环保产业发展,培育土壤修复技术研发和应用的企业。科研与技术推广也应得到重视,加大对土壤污染治理技术的研发投入,并建立技术推广平台,逐步改善土壤污染问题,实现经济与环境的可持续发展。

参考文献:

- [1] Chi J Y, Xu G L, Yang Q Q, et al. Evolutionary characteristics of ecosystem services and ecological risks at highly developed economic region: A case study on Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(1): 1152-1166.
- [2] 王蓉, 梁雨蕾, 陈忠清. 长三角地区环境水文地质特征及其对重金属污染物迁移的影响[J]. *上海国土资源*, 2024, 45(2): 48-52.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 全国土壤污染状况公报[OL]. 2014. <https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>.
- [4] Qu M K, Guang X, Wu S J, et al. Determining the net input fluxes of pollutants based on the spatial source apportionment receptor model for early warning of regional soil pollution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 471: 134409.
- [5] Qiao M, Cai C, Huang Y Z, et al. Characterization of soil heavy metal contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 172(1): 353-365.
- [6] 李社锋, 杜少霞, 包申旭, 等. 国际污染土壤修复技术的文献计量分析与发展趋势探讨[J]. *环境工程*, 2023, 41(12): 329-336, 342.
- [7] 鞠铁男, 雷梅, 郭广慧, 等. 长三角土壤污染重点监管单位综合风险评价[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(12): 6490-6499.
- [8] 姜哲. 高质量背景下长三角环境污染的空间异质性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2022.
- [9] 中华人民共和国民政部. 国民经济行业分类: GB/T 4754-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 李金林. 长三角城市群市场一体化对绿色发展效率的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [11] Wang L, Jiang S M, Xu H. Reexamining the impact of industrial structure on haze pollution based on the Yangtze River Delta[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(5): 613.
- [12] 江苏省第十届人民代表大会常务委员会. 江苏省太湖水污染防治条例[OL]. 2007-09-27. <https://www.taicang.gov.cn/taicang/tchbj05/200709/8b1e8e24b2274e5b9364865b07ab8851.shtml>.
- [13] 江苏省人民政府. 江苏省土壤污染防治工作方案[OL]. 2016-12-27. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2016/12/27/art_46143_2543271.html.
- [14] 浙江省生态环境厅. 浙江省土壤污染防治工作方案[OL]. 2016-12-26. <https://www.ezhihuan.net/qy-gs-detail-1894582914024148992.-1894582914024148736>.
- [15] 上海市人民政府. 上海市土壤污染防治行动计划实施方案[OL]. 2016-12-31. https://www.shanghai.gov.cn/nw39327/20200821/0001-39327_50912.html.
- [16] 陈晨. 地块特征参数对土壤污染风险评估的影响[J]. *环境科技*, 2022, 35(6): 25-30.
- [17] Negi P, Mor S, Ravindra K. Impact of landfill leachate on the groundwater quality in three cities of North India and

- health risk assessment[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 22(2): 1455–1474.
- [18] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 5125–5132.
- [19] 李梦婷, 沈城, 吴健, 等. 快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险[J]. *环境科学*, 2021, 42(10): 4889–4896.
- [20] 陈梦舫, 周源, 韩璐, 等. 中国优控多环芳烃土壤污染特征及国内外生物可给性研究进展[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 892–915.
- [21] 葛峰, 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.
- [22] 李美云. 典型化工企业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [23] 王晨熹, 鹿晓菲, 杨济妮, 等. 电镀行业排放重金属及全氟化合物时空分布及风险评估[J]. *环境化学*, 2024, 43(6): 1881–1897.
- [24] 张桃林, 王兴祥. 推进土壤污染防治与修复 厚植农业高质量发展根基[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 251–258.
- [25] 黄金鹏, 韦行, 孙梦强, 等. 重金属污染土壤电动修复技术研究进展及展望[J]. *土壤*, 2024, 56(6): 1173–1183.

(责任编辑: 于 飞)