

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.005

葛锋, 张转霞, 扶恒, 等. 我国有机污染场地现状分析及展望. 土壤, 2021, 53(6): 1132–1141.

我国有机污染场地现状分析及展望^①

葛锋¹, 张转霞^{2,3}, 扶恒⁴, 唐诗月^{2,3}, 徐珂珂¹, 宋昕^{2*}, 王晴², 骆永明²

(1 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 南京康地环保科技有限公司, 南京 210006)

摘要: 以有机污染场地为研究对象, 调查分析了全国 277 个有机污染场地的行业类别、污染类型以及有机污染物种类分布情况, 发现主要贡献行业为化学原料及化学品制造行业, 贡献率为 37.9%; 污染类型中以各类有机污染物复合污染为主; 除了不同有机污染物之间的相互复合, 有机污染物与重金属复合污染特征明显, 占总场地 58.5%。有机污染物种类分布中多环芳烃类污染场地最多, 占 54.9%, 与欧美有机污染场地中氯代烃类污染场地占比最多不同; 其次为总石油烃和苯系物, 占比分别为 49.5% 和 36.8%。全国典型地理区域的有机污染特征和污染物超筛选值结果表明, 总体上南方有机污染场地数目多于北方, 东部经济发达地区场地数目明显多于经济发展中地区, 西南和中南地区有机污染与重金属复合污染特征明显。各区域内污染物种类分布与行业相关性强, 如多环芳烃污染多在各地焦化厂场地中出现, 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; 多氯联苯、多溴联苯醚、二噁英等污染出现在电子废弃物拆解集中区。通过对全国有机污染场地的分析和各地区污染特征的讨论, 以期开展污染场地环境调查与修复提供一定的参考, 并为污染场地的监督与管理等工作提供依据。

关键词: 有机污染场地; 复合污染; 区域污染特征

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Distribution of Organic Contaminated Sites in China: Statu Quo and Prospect

GE Feng¹, ZHANG Zhuaxia^{2,3}, FU Heng⁴, TANG Shiyue^{2,3}, XU Keke¹, SONG Xin^{2*}, WANG Qing², LUO Yongming²

(1 *Nanjing Institute of Environmental Science, MEE, Nanjing 210042, China*; 2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4 *Nanjing Kangdi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 210006, China*)

Abstract: In this paper, 277 contaminated sites with organic contaminants in China were analyzed based on their contaminants of concern, industry and regional distribution. It was found that the industry that contributed the most was the chemical industry, with a contribution rate of 37.9%. Among all sites with mixed contaminants, heavy metals were the most encountered co-contaminants, accounting for 58.5%. Compared with the dominating contaminants of chlorinated aliphatic hydrocarbons in Europe and USA, our analysis showed that polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was the most predominating contaminant of concern in China, accounting for 54.9% of all 277 sites. Total petroleum hydrocarbons and BTEX, accounted for 49.5% and 36.8%, respectively, were ranked the second and third organic contaminants that were encountered. The analysis on the regional distribution showed that the contamination in the south was more severe than that in the north, and the number of contaminated sites was more significant in the well-developed areas in the east region than that in the west. In particular, it was found that the contamination of organics co-mingled with heavy metals were commonly encountered in the southwest and central south regions. Furthermore, the analysis results showed that the typical contaminants of concern were closely related to the industries. Specifically, polycyclic aromatic hydrocarbons were most commonly found in the coking industry, total petroleum hydrocarbons in the machinery manufacturing industry, chlorinated aliphatic hydrocarbons in the chlorine-alkali manufacturing industry, and polychlorinated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1805700)、中国科学院南京土壤研究所“一三五”计划和前沿项目(ISSASIP1657)和江苏省重点研发计划项目(BE2019624)资助。

* 通讯作者(xsong@issas.ac.cn)

作者简介: 葛锋(1981—), 男, 江苏扬中人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤环境基准制定、生态规划等方面的研究。E-mail: gefeng@nies.org

and dioxins in the electronic waste recycling industry. The results of this study can provide valuable references for the contamination investigation, as well as insight for the management of contaminated sites.

Key words: Organic contaminated sites; Combined contamination; Regional contamination character

我国城市化进程的加快和产业结构的进一步调整促使了传统工业企业的改型,同时使得城市内及周边区域出现大量的工业遗留污染场地。有机化合物作为生产原料、产品或中间产物,在化工行业、金属冶炼行业、石油加工等多类行业中均涉及,它们在生产、运输和储藏过程中通过“跑冒滴漏”进入场地土壤,造成土壤污染,因此有机污染物是我国工业污染场地污染土壤中的主要污染物类型之一^[1]。工业场地中有机污染物具有来源广泛、种类繁多、迁移性强和污染持久等特点。常见的有机污染物包括总石油烃、氯代烃、苯系物、多环芳烃(PAHs)、农药、多氯联苯、二噁英类及其他有机污染物;场地有机污染类型包括有机污染物单一污染和有机污染物复合污染^[2-3]。除各类有机污染物复合污染外,还存在有机污染物与各种无机污染物的复合情况,如重金属、氰化物、氟化物、硫化物等^[4-6]。

2014年《全国土壤污染状况调查公报》^[7]针对不同土地利用类型进行了污染特征和污染物分析。梁增强等^[1]则以行业为分类依据,对硫酸冶炼行业、氯碱生产行业、石油化工等典型行业污染场地重点关注污染物和产污环节进行了综述。然而,目前我国有机污染场地的行业分布、污染物类型、污染特征和区域分布等信息尚不完善,缺乏系统研究。在实际场地调查、修复与综合利用中,区域性水文地质条件对有机污染物在地下环境中的赋存、迁移转化和归趋具有重要影响;此外,我国行业分布也存在一定的区域性特征。因此,需要对我国当前有机污染场地进行全面总结分析,从整体上开展污染场地的行业分布研究、各行业的特征污染物识别、污染类型分析等工作,并探索我国有机污染场地的区域分布特征,从而促进我国有机污染场地的进一步详细调查和修复工作。

本文调查分析了全国 277 个有机污染场地,并详细讨论了主要贡献行业、有机污染物类别和污染类型分布,在此基础上与欧美污染场地的有机污染特征进行了对比分析,之后以地理区域为划分单元讨论了我国各区域内的污染类型和典型污染物的超标情况,以期开展场地监督和管理提供信息和依据。

1 全国有机污染场地特征

本研究中污染场地数据来源于各行政省市已公

开土壤污染重点监管单位名录及其相关场地调查报告、风险评估报告等资料,以及重点论文、专著等学术文献,污染信息真实有效。利用各省市生态环境厅(局)官网进行检索整理各省市建设用地土壤污染风险管控和修复名录、土壤污染重点监管单位名录、污染地块名录;此外利用公开的招标信息以及修复项目环评公示等进行补充。重点论文和专著利用知网平台,以“污染场地”、“场地污染土壤”等为关键词进行检索,得到相关污染场地信息。本研究以工业污染场地为对象,截止于 2019 年 12 月共整理得到全国 473 个场地的污染信息,本文主要关注和讨论有机污染场地,共 277 个,分析有机污染场地的行业分布和各典型行业的特征污染物、不同有机污染物类别以及场地的不同污染类型。

1.1 有机污染场地行业分布特征

根据 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类与代码》^[8]和 HJ 25.1—2019《建设用地土壤污染状况调查技术导则》^[9]中所列常见场地行业分类,将所有场地分为化学原料及化学品制造业(包括硫酸、氯碱生产等)、金属冶炼和压延加工业、机械制造业、石油加工业、焦化行业、塑料和橡胶制品业、金属制品业、废弃资源综合利用业、环境治理业、电气机械及器材制造业、纺织业、燃气生产和供应业、交通运输工具维修业、造纸及纸制品业、火力发电等 15 个行业;不属于 HJ 25.1—2019 附录 B 中地块类型及现有调研信息无法明确其地块类型与行业分类的污染地块,归纳为其他类型场地。行业场地类型共计 16 种。各行业场地数目和行业分布百分比如图 1 所示。

各行业的特征污染物因不同生产原辅料、生产工艺和产品而异。化学原料及化学品制造业中包括氯碱、硫酸、农药化肥等一系列化工产品合成的行业,在此类场地中特征污染物多样,包括 PAHs、石油烃、苯系物、氯代烃及农药等,这与前人研究结果一致^[10-13]。焦化行业主要生产焦炭、煤焦炉气、焦油、苯、萘等多种化工产品。生产中大量有机污染物(如 PAHs 和苯系物等)进入场地土壤中,造成场地土壤污染^[14]。刘庚等^[15-16]对某焦化场地中的 4 种 PAHs(苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘)进行了分析,结果显示 4 种 PAHs 主要分布在炼焦、煤气净化等生产车间土壤中,其中苯并(b)荧蒽最高含量达到

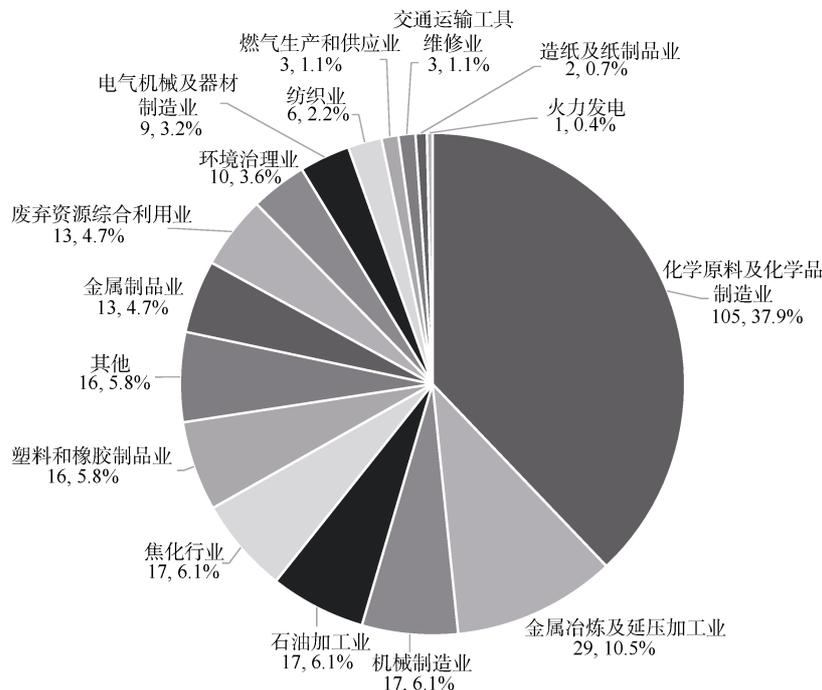


图 1 各行业有机污染场地数目和占比分布

Fig. 1 Distribution of contaminated sites among 16 industries

470 mg/kg, 而对 16 种常见的 PAHs 的研究结果也显示, 16 种 PAHs 均有超标现象。金属冶炼和压延加工业场地中, 焦炭等在加热过程中的使用, 导致 PAHs 和总石油烃等有机污染物的产生^[17]。对上海某以钢铁铸造和铜带厂为搬迁基础的污染场地的污染特征研究结果表明, 该场地受到重金属、PAHs 和总石油烃的复合污染^[18]。石油加工污染场地中特征污染物以总石油烃、苯系物和 PAHs 为主。裴芳等^[19]对某炼油厂退役场地土壤的监测结果显示, 场地土壤酚类物质污染严重, 以苯酚为主的挥发酚含量最高可达 2 825.7 mg/kg, 主要分布在核心工艺区与储油罐所在地, 同《全国土壤污染状况调查公报》(2014)^[7]结果一致。废弃资源和废旧材料回收加工过程中涉及电子废物的拆解, 因此在废弃资源综合利用业场地中多出现多氯联苯、多溴联苯、多溴联苯醚及重金属等污染物^[20-21]。

1.2 有机污染场地污染物分类的污染特征

利用计数方法, 对场地污染中存在的几类有机污染物进行计数分析, 得到图 2A 结果。在 277 个有机污染场地中, PAHs 污染场地最多, 占 54.9%, 与前文中对主要贡献行业的分析一致, 多种行业均会产生 PAHs。其次是总石油烃污染场地, 占 49.5%, 主要出现在石油加工场地、化学原料及化学品制造业等以石油为生产原料的行业场地中。苯系物污染场地占比为 36.8%, 苯系物多作为生产原料, 在石

油加工业、焦化行业、化学原料及化学品制造业场地中均发现存在不同程度污染。氯代烃污染场地占比为 29.2%, 氯代烃作为主要的工业溶剂和原料, 在化学原料及化学品制造业如农药加工和氯碱生产场地出现较多。农药污染场地占比为 7.9%, 主要出现在农药厂场地中。多氯联苯以及其他有机污染物如多溴联苯醚、氯化石蜡、二噁英类物质污染场地占总场地百分比为 5.4%, 其中二噁英产生于焦化、金属冶炼、热电等涉及热过程的行业场地中; 多氯联苯、多溴联苯醚、氯化石蜡等作为电子产品阻燃剂, 出现在废弃资源综合利用业的场地中, 且多存在与重金属的复合污染。

从各行业有机污染场地分布和典型行业特征污染物分布可知, PAHs 为调查场地中最常见的有机污染物, 本文调查所涉及的 16 种行业场地中均存在 PAHs 污染情况, 与严康等人^[22]研究结果一致。《全国土壤污染状况调查公报》(2014 年)^[7]调查结果中农药类污染物滴滴涕超标严重, 其次为 PAHs, 而本文有机污染物分类的污染特征中也显示 PAHs 污染严重, 但农药污染特征不明显。与美国 EPA 资料^[23]相对照, 如图 2B 所示, 从污染物种类的分布来看, 美国含氯 VOCs 和 PAHs 污染场地最多, 占比分别为 17.0% 和 16.6%; 其次为苯系物、多氯联苯和农药污染场地, 占比分别为 13.1%、11.8%、11.0%。我国有机污染中 PAHs 污染场地数目最多, 其次为总石油烃

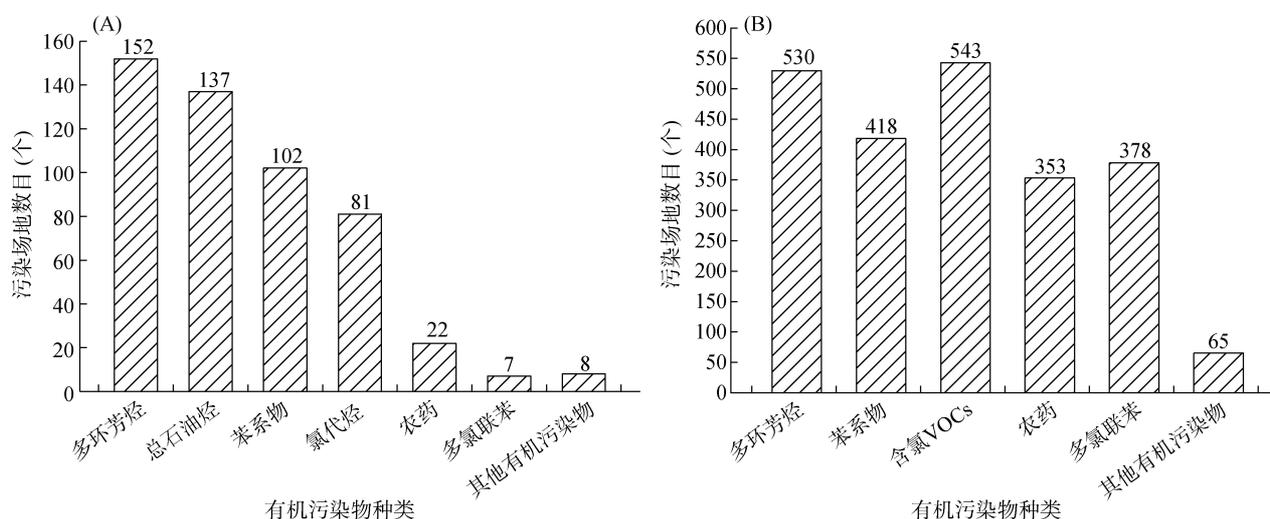


图 2 中国(A)和美国(B)各类污染物出现次数
Fig. 2 Occurrences of organic contaminants in China (A) and USA (B)

和苯系物, 氯代烃相较美国的污染场地占比较少, 而农药和多氯联苯污染场地比例相似。

1.3 我国有机污染场地与欧美国家的污染特征对比

本文参照美国 EPA 资料中有机污染场地污染类型的分类, 将各类有机污染物分为挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs), 包括氯代烃和苯系物; 半挥发性有机物 (semi-volatile organic compounds, SVOCs), 包括 PAHs、总石油烃、农药、多氯联苯、二噁英等难挥发性有机物; 从而将有机污染场地污染类型分为 VOCs 单独污染、SVOCs 单独污染、VOCs 和重金属复合污染、SVOCs 和重金属复合污染、VOCs 和 SVOCs 污染、VOCs 和 SVOCs 及重金属复合污染 6 个污染类型^[23]。我国和美国各种污染类型的场地数目及所占总场地的百分比分布见图 3。277 个有机污染场地中, VOCs 单独污染场地数目较少, 占比仅为 6.1%; SVOCs 单独污染场地占比为 17.7%, 其中 PAHs 和总石油烃污染场地数目最多, 主要出现在以石油燃料为能源的热过程工业场地中, 如化工场地、金属冶炼厂场地等; VOCs 和重金属复合污染场地占比为 7.2%; SVOCs 和重金属复合污染场地数目最多, 占比为 28.5%, 其中总石油烃与重金属复合污染场地最多, 主要出现在制造行业和金属冶炼行业场地中; VOCs 和 SVOCs 污染场地占比为 17.7%, 其中 PAHs 与苯系物复合污染情况主要出现在焦化行业场地中, 这与有机污染场地行业分布和典型行业特征污染物分析结果一致; VOCs 和 SVOCs 及重金属复合污染场地占比为 22.7%, 出现在化学工业、金属冶炼业、焦化行业场地中。所有污染类型中,

SVOCs 污染场地占比为 86.6%, 高于 VOCs 污染场地所占比例 53.8%, 而多种有机物相互复合, 是我国有机污染场地修复的一大难点^[24]。有机污染物单独污染场地占比为 41.5%, 有机污染物与重金属复合污染场地占比为 58.5%, 总体呈现出我国有机污染场地中有机污染物与重金属复合污染的特征, 有机污染物与重金属的复合污染, 为有机污染场地的治理和修复带来了更大的挑战。

2020 年美国 EPA 资料^[23]显示, 1 327 个污染场地受到 VOCs、SVOCs 等有机污染物污染。从污染类型来看, 美国有机污染场地中 VOCs 单独污染、SVOCs 单独污染、VOCs 和重金属复合污染、SVOCs 和重金属复合污染、VOCs 和 SVOCs 污染, 以及 VOCs、SVOC 和重金属共同复合污染场地数目所占比例依次为 11.2%、3.9%、9.1%、8.7%、8.5% 和 58.6%。VOCs 污染场地总计占比为 87.3%, 远高于本文研究结果 53.8%; SVOCs 污染场地总计占比为 79.7%, 本文研究结果 86.6% 与此较为接近。美国有机污染物单独污染场地共占 23.6%, 有机污染物与重金属复合污染场地占比为 76.4%, 本文研究结果 41.5% 和 58.5% 与此相比, 可以发现我国有机污染场地中有机污染物单独污染特征明显, 两国均存在有机污染物与重金属的复合污染。在环境中 PAHs 易吸附在土壤颗粒上从而停留在表层土壤中, 氯代烃作为典型的重质非水相液体, 进入土壤后不断迁移至地下环境, 地下水中的氯代烃污染较为严重。我国土壤修复起步较晚, 且前期主要集中在浅层土壤的调查和修复中, 导致调查结果中 PAHs 污染突出, 从而 SVOCs 污染场地多于 VOCs 污染场地。

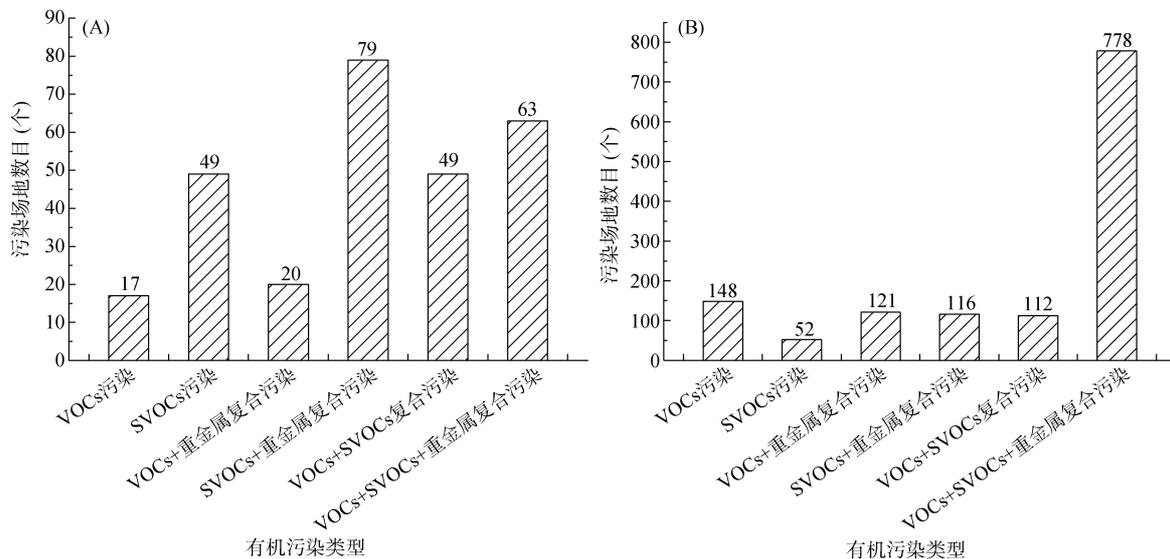


图 3 中国(A)和美国(B)各有机污染类型场地数目

Fig. 3 Occurrences of contaminated sites with different contaminants in China (A) and USA (B)

欧洲也存在大量的潜在污染地块。2014 年发布的《Progress in the management of contaminated sites in Europe》^[25]显示, 欧洲的 27 个国家有 250 万个地块存在不同程度的潜在污染, 其中 34 万个场地受到严重污染, 亟需修复。污染物分布中, 除重金属外, 矿物油、PAHs、苯系物和氯代烃为主要的有机污染物, 污染地块数目占比依次为 24%、11%、10%、8%, 此外, 报告中指出欧洲污染场地还存在部分酚类污染地块^[25]。氯代烃作为欧洲污染场地最常见的污染物之一, 与美国污染特征相似; 而总石油烃和重金属的复合污染, 主要出现在金属加工、加油站和采矿等行业场地中, 与我国金属冶炼及延压加工行业产生总石油烃和重金属的复合污染特征相同。

2 有机污染场地区域分布特征

根据我国 8 个典型地理区域的划分, 对各区域有机污染场地进行了比较分析。不同地理区域按有机污染场地数目由多到少, 依次为长三角地区、中南地区、京津冀地区、西南地区、珠三角地区、中部地区、东北老工业基地和西部地区。全国各地区有机污染场地数量分布见图 4。从各地区的污染场地数目分布来看, 我国有机污染场地东部多于西部, 南方多于北方, 且经济发达地区场地数目明显多于经济发展中地区, 与之前的研究结果一致^[26]。这与长三角地区、京津冀地区经济发达, 对污染场地的重视程度较高, 地区率先开展污染场地的调查和修复工作, 可得到的场地

数据较多相关。

根据各地区的污染情况, 对各区域的污染特征和污染物进行了分析, 并将各地区主要污染物最高含量与 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[27]中二类用地的筛选值进行比较, 列出主要超筛选值的污染物、污染物含量及其超筛选值倍数, 具体信息见表 1。

长三角地区是我国经济发展最快、经济总量最大的产业和城市密集区。长三角地区 97 个场地中化工行业场地占比达 44.3%。PAHs 污染场地最多, 占比高达 70.1%。袁西鑫^[28]对江苏某化工企业场地进行了调查, 发现场地中存在苯并(a)芘、苯并(b)荧蒽、苯并(a)蒽等 PAHs 类污染物。长三角地区还存在典型电

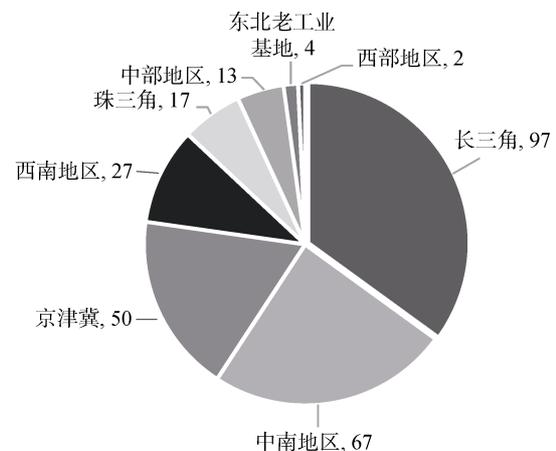


图 4 全国各地区有机污染场地数量分布

Fig. 4 Distribution of contaminated sites in different regions in China

表 1 各区域内特征污染物最高含量及场地分布
Table 1 Representative contaminants and their corresponding detected highest concentrations in different regions

地区	污染物种类	污染物	最高含量(mg/kg)	超筛选值倍数	场地名称	场地行业类型	
长三角地区	总石油烃	总石油烃	14 000	2.1	南通某醋酸化工地块场地	化工行业	
		苯系物	苯	465	115.3	安徽北部某焦化厂场地	焦化行业
	PAHs	苯并(a)芘	737.8	490.9	巢湖某电镀厂地块	电镀行业	
		苯并(a)蒽	994	65.3	安徽北部某焦化厂场地	焦化行业	
		苯并(b)荧蒽	1 000	65.7	安徽北部某焦化厂场地	焦化行业	
其他有机污染物	二噁英类	1.3	32 699	浙江某电子拆解基地	电子拆解行业		
珠三角地区	氯代烃	氯仿	380	421	广东某氯碱化工厂	氯碱行业	
		四氯化碳	1 120	399	广东某氯碱化工厂	氯碱行业	
	苯系物	苯	27.9	5.9	广东某氯碱化工厂	氯碱行业	
东北老工业基地	总石油烃	总石油烃	10 000	1.1	辽宁省大庆油田场地	石油化工	
		氯代烃	氯仿	26.2	28.1	辽宁沈阳某制药厂场地	医药制造
	农药	β-六六六	4.6	4	辽宁沈阳某制药厂场地	医药制造	
		4'-DDD	121	16	辽宁沈阳某制药厂场地	医药制造	
		4,4'-DDT	143	20.3	辽宁沈阳某制药厂场地	医药制造	
		苯系物	苯	5.8	0.5	辽宁沈阳某制药厂场地	医药制造
	PAHs	苯并(a)蒽	496.3	32.1	沈阳某焦化场地	焦化行业	
		苯并(b)荧蒽	331.8	21.1	沈阳某焦化场地	焦化行业	
		苯并(a)芘	431.1	86.4	沈阳某焦化场地	焦化行业	
		总石油烃	总石油烃	25 000	4.6	北京某场地	运输施工
京津冀地区	苯系物	苯	10.7	1.7	北京某焦化厂	焦化行业	
		PAHs	苯并(a)芘	172	113.7	北京某焦化厂	焦化行业
	PAHs	苯并(a)蒽	138	8.2	北京某焦化厂	焦化行业	
		苯并(b)荧蒽	393	25.2	北京某焦化厂	焦化行业	
		茚并(1,2,3-cd)芘	144	8.6	北京某焦化厂	焦化行业	
中南地区	总石油烃	总石油烃	81 044	17	重庆某地块	化工行业	
		PAHs	苯并(a)芘	18	11	重庆某地块	化工行业
	PAHs	苯并(b)荧蒽	20.3	0.4	重庆某地块	化工行业	
西南地区	总石油烃	总石油烃	25 344	4.6	成都某场地	新兴行业	
		农药	α-六六六	1.0	2.3	贵阳某轮胎加工场地	石油化工
	β-六六六		1.6	0.7	贵阳某轮胎加工场地	石油化工	
	苯系物	苯	4.2	0.1	贵阳某轮胎加工场地	石油化工	
		PAHs	苯并(b)荧蒽	40.8	1.7	四川达州万源某冶炼公司场地	金属冶炼
	PAHs		苯并(a)蒽	27.3	0.8	四川达州万源某冶炼公司场地	金属冶炼
中部地区	PAHs	苯并(a)芘	33.1	21.1	四川达州万源某冶炼公司场地	金属冶炼	
		氯代烃	氯苯	323	0.9	青岛某污水处理厂地块	焦化行业
		氯仿	1.1	0.3	青岛某污水处理厂地块	焦化行业	
	农药	四氯化碳	4.2	0.5	青岛某污水处理厂地块	焦化行业	
		α-六六六	8.8	28.2	山东淄博某农药化工场地	农药化工	
		β-六六六	103.0	111	山东淄博某农药化工场地	农药化工	
	苯系物	苯	203	49.8	呼和浩特某焦化厂	焦化行业	
		乙苯	9 614.3	342.4	河南濮阳某能源化工疑似场地	石油化工	
		PAHs	苯并(a)蒽	80.2	4.3	青岛某污水处理厂地块	焦化行业
			二苯并(a, h)蒽	138.0	91	太谷某焦化厂	焦化行业
			苯并(b)荧蒽	131.2	86.5	呼和浩特某焦化厂	焦化行业
		西部地区	石油烃	石油烃	-	-	新疆乌鲁木齐某石油场地
PAHs	苯并(a)芘		-	-	新疆乌鲁木齐某石油场地	石油化工	

注：新疆乌鲁木齐某石油场地超标污染物含量未公开。

子垃圾拆解区,产生如重金属铅、汞、镉以及多氯联苯、多溴联苯醚等污染物^[29],造成场地中有机污染物与重金属复合污染。滕应等^[30]对长江三角洲地区土壤中的多氯联苯污染特征进行研究,揭示了该地区农田土壤多氯联苯的来源和工业场地废弃电器拆解的相关性。电子垃圾拆解中也会产生二噁英类污染物,表 1 中长三角地区最高的二噁英类污染物超筛选值倍数高达 32 699 倍。

珠三角地区共 17 个污染场地,其中总石油烃污染场地最多,污染物含量中氯代烃污染超标倍数最高,广东某氯碱化工厂中,四氯化碳和氯仿超筛选值倍数分别达到 399 倍和 421 倍。颜湘华等^[31]在华南地区某农药搬迁厂址中的采样分析结果显示,该场地中苯的含量为 10.1 mg/kg,超筛选值 1.5 倍,低于表 1 中的苯的超筛选值倍数,同时该场地也受到氯苯、1,2-二氯苯的污染。粤港澳大湾区典型化工场地苯系物的污染特征研究结果显示场地土壤中苯系物的含量均超过筛选值^[32]。与长三角地区类似,珠三角地区存在的电子垃圾拆解场地,导致区域内出现氯化石蜡、二噁英等污染物^[33-34]。

东北老工业基地共调查得到 4 个场地,主要污染物有总石油烃、PAHs、氯代烃和农药。其中 PAHs 类污染物含量超筛选值倍数高,如沈阳某焦化场地的苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽和苯并(a)芘超标倍数依次为 32.1 倍、21.1 倍和 86.4 倍。王坚^[35]对辽宁省 6 个包括焦化、制药、轮胎制造、农药和味精场地土壤中 PAHs 的组成和污染的相关性特征进行了分析,结果显示,焦化厂的 PAHs 含量明显高于其他 5 个不涉及 PAHs 生产和使用的场地,如萘在焦化厂场地中最高含量达到 70 900 mg/kg。研究也发现区域内钢铁厂、油田区污染场地等均存在 PAHs 和总石油烃污染物^[36-37]。辽宁某制药厂场地除了石油烃和氯代烃污染物外,也存在农药污染,说明区域内存在各类有机污染物复合污染。

京津冀地区共 50 个场地。PAHs 与总石油烃污染场地较多,分别为 28 个和 24 个,出现在化工行业、金属冶炼行业和石油化工行业中。刘媛媛^[38]对北京某垃圾场和油库场地土壤分析显示,场地除存在多种氯代烃、苯系物等污染物外,PAHs 和农药的检出率也较高,这些污染物主要来源于生活垃圾分解释放、土壤农药残余和石油泄漏。周欣^[39]的研究也发现唐山市和天津市某化工区场地中存在二噁英和多氯联苯的污染。

中南地区共 67 个场地。中南地区的工业以金属

采选和冶炼为特色,本研究中的有机污染场地中涉及有机污染物与重金属的复合污染特征明显,有机污染物与重金属复合污染场地共 50 个。2014 年全国土壤调查结果也显示,西南、中南地区的土壤污染以重金属超标为主。有机污染物中总石油烃污染场地最多,存在于除了农药厂以外所有类型的场地中,其中重庆某地块中总石油烃最高含量超筛选值 17 倍。六六六和 DDT 为中南地区调查所得主要的农药类污染物,蓬丹^[40]对重庆市某农药厂场地及其周边土壤中有机氯农药进行研究分析,结果显示该厂区土壤中六六六和 DDT 含量较高。赵玲等^[41]也综述了我国有机氯农药的场地污染现状和污染物分布特征,并分析了六六六和 DDT 的分布和残留特征。

西南地区共 27 个污染场地,与中南地区类似,有机物与重金属复合污染特征明显(23 个)。有机污染场地与重金属复合特征与地区内有色金属矿(如汞、铅、锌、镉、砷、钒等)以及金属冶炼厂的广泛分布息息相关。郭书海等^[42]指出西南地区土壤重金属背景值显著高于全国平均水平,加上区域的有色金属矿冶使得当地重金属的污染更加明显。有机污染物中总石油烃污染特征明显,这是由于西南地区如化工和制造行业、焦化行业、火力发电和金属冶炼等行业均会使用或产生总石油烃。此外由于金属冶炼行业场地的广泛分布,区域内 PAHs 污染也较明显。陈凤等^[43]对贵州省赫章县典型铅锌冶炼区所在地土壤进行了分析,结果显示场地 PAHs 污染与当地长时间的铅锌冶炼活动有关。

中部地区共 13 个污染场地,主要来源于化工行业和焦化行业,特征污染物为 PAHs 和苯系物,其中苯系物超标严重。呼和浩特某焦化厂场地和河南某化工场地中苯和乙苯超筛选值倍数高达 49.8 倍和 342.4 倍。董敬^[44]的研究结果显示山东某氯碱厂场地中苯和三氯甲烷污染严重。刘锦卉等^[45]研究了山西某大型煤气化污染场地中的 PAHs 最高达到 19 120.7 mg/kg,且污染点位多位于生产区域,揭示了场地污染与原生产活动之间的关联性。

西部地区调研中得到 2 个场地信息,分别为电子拆解行业场地和石油化工行业场地,出现的污染物有苯并(a)芘和石油烃。吕晓立等^[46]对西部某石油化工污染场地中地下水中污染物进行分析,结果表明土壤和地下水中 PAHs、总石油烃以及氯代烃、苯系物等多种污染物均来源于地表厂区的机械加工、原油储存和工业废水排放等工业过程。

各区域不同类型污染物污染场地数目如图 5

所示。从各地区污染物种类分布来看,长三角地区污染场地各类污染物共同存在,其 PAHs 的污染场地显著多于其他污染类型场地;京津冀地区的污染物种类主要是 PAHs 和总石油烃;珠三角地区、东北老工业基地、中南地区、西南地区和中部地区则是总石油烃污染场地多于 PAHs 污染场地;苯系物在各地区中污染也较为突出,为第三大类污染物。特征污染物的最高含量与典型行业的相关性明显,PAHs 类污染物最高含量多在各地

区焦化行业场地中出现;总石油烃污染物在各地区的最高值污染差别不大,多出现在机械制造行业,且多与重金属产生复合污染;农药类污染物在中部地区农药厂场地中含量达到最高;多氯联苯、多溴联苯醚、二噁英等污染物主要分布在长三角和珠三角电子废弃物拆解集中区。从污染类型特征来看,本文调查结果显示各地区均存在多类有机污染物复合污染,其中中南和西南地区重金属复合污染特征明显。

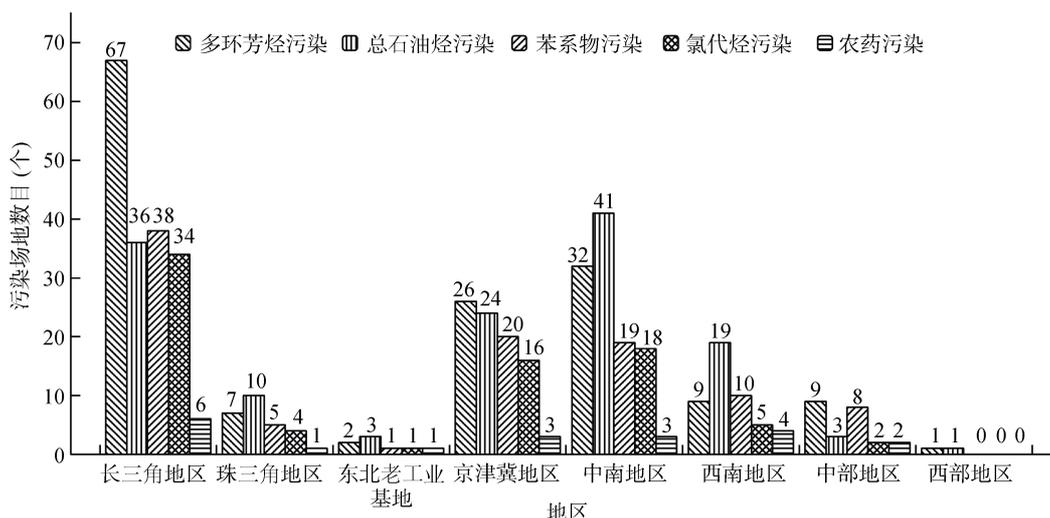


图5 全国各地区污染物种类分布

Fig. 5 Site numbers of each contaminants in different regions

我国工业场地污染区域特征明显,因此在进行场地调查与修复工作的过程中需要深入明确区域污染特征。此外,各地区典型水文地质条件差别较显著,其中长三角地区地下水埋深较浅,黏土层较多,因此污染物污染深度相对较浅(一般小于地下20 m);华北地区地下水较深,主要为砂质含水层,污染物迁移至地下深层,甚至对风化岩层造成严重污染;西南地区和中南地区是以喀斯特地貌为主的石灰岩;西部地区包括内蒙古的钙成土、石膏盐成土、西藏青海地区的高山土;东北老工业基地则是不饱和的硅铝土而东南珠三角地区则是富铝土,各地区土壤和地下水理化性质均有所差异^[47]。因此,针对区域特有的水文地质条件并结合相对应的场地污染特征综合考虑,有助于区域内场地土壤污染调查、风险评估和修复等相关工作的科学有序推动。

3 总结

以有机污染场地为研究对象,调查分析了全国277个有机污染场地的行业分布、污染类型以及不同种类有机污染物分布情况。我国有机污染场地行业分

布、不同种类有机污染物和污染类型分布以及区域分布特征明显。化学原料及化学品制造业作为有机污染场地主要贡献行业,污染场地数目占比为37.9%;重点污染物分析中发现我国PAHs类污染场地数目最多,占54.9%;污染类型中SVOCs污染场地多于VOCs污染场地,且以复合污染为主,其中有机污染物与重金属的复合污染明显,占比为58.5%,复合有机污染尤其是有机污染物与重金属的复合污染是我国有机污染场地修复的一大挑战;在污染场地区域分布中以长三角、京津冀、珠三角和中南等地区污染场地数目居多,污染物含量超标严重为特征,总体上南方污染场地数目多于北方,经济发达地区污染场地数目明显多于经济发展中地区,西南和中南地区的有机污染与重金属复合污染特征突出。

随着我国产业结构的调整、国家环境保护和场地管理相关标准的出台,通过结合行业贡献对有机污染场地污染物种类进行分析讨论,有助于在开展污染场地详细环境调查中提供一定的参考和依据。在场地污染环境调查工作中应明确生产原料、辅料及产品,结合场地历史生产工艺及储藏运输区域,确定潜在污染

物及其潜在迁移转化途径,开展调查工作以确定污染物的水平和垂直方向上的分布特征及范围。为进一步开展场地修复工作,还需要结合场地水文地质条件深入调查研究污染物在环境中的迁移规律和赋存特征,从而选择合适的修复技术和管理手段,推动我国有机污染场地土壤污染管控与修复工作。

参考文献:

- [1] 梁增强,杨菁,毛安琪. 典型行业污染场地重点关注污染物浅析[J]. 广东化工, 2018, 45(14): 201-202.
- [2] 王甫洋,田璐,夏晶,等. 南京某化工企业搬迁场地土壤有机污染调查及健康风险评估研究[J]. 四川环境, 2020, 39(1): 105-111.
- [3] 张红振,董璟琦,吴舜泽,等. 某焦化厂污染场地环境损害评估案例研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3159-3165.
- [4] 陈梦华,陈峰. 南方某农药厂退役场地环境调查与污染特征分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(3): 149-151.
- [5] 吴志远,张丽娜,夏天翔,等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4180-4196.
- [6] 尹勇,戴中华,蒋鹏,等. 苏南某焦化厂场地土壤和地下水特征污染物分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1525-1531.
- [7] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[OL]. 2014-04-07. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类及代码: GB/T 4754—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染状况调查技术导则: HJ 25.1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [10] 陈宏,刘翔,卢欣,等. 某化工污染场地土壤与地下水污染特征分析[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(1): 21-24, 60-61.
- [11] 陈志良,雷国建,周建民,等. 典型氯碱污染场地环境风险评价[J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2579-2584.
- [12] 孟宪荣,许伟,张建荣. 化工污染场地氯苯分布特征[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1144-1150.
- [13] 黄爽兵,韩占涛,赵龙,等. 某污染场地地下水氯代烃污染特征及水化学指示意义[C]/2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都, 2014: 959-965.
- [14] 楼春,钟茜. 焦化厂场地土壤污染分布特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(4): 177-179.
- [15] 刘庚,郭观林,南锋,等. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4256-4262.
- [16] 刘庚,毕如田,王世杰,等. 某焦化场地土壤多环芳烃污染数据的统计特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1722-1728.
- [17] 董捷,黄莹,李永霞,等. 北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3540-3546.
- [18] 刘颖. 某复合污染场地污染特征及修复技术可行性分析[J]. 勘察科学技术, 2018(3): 7-14.
- [19] 裴芳,罗泽娇,彭进进,等. 某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4251-4255.
- [20] 林浩忠,王锐,谢莹莹,等. 华南典型电子垃圾拆解区土壤中十溴联苯醚的分布特征及迁移特性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 341-346.
- [21] 林娜娜,单振华,朱崇岭,等. 清远某电子垃圾拆解区河流底泥中重金属和多氯联苯的复合污染[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1685-1693.
- [22] 严康,楼骏,汪海珍,等. 污染场地研究现状与发展趋势: 基于知识图谱的分析[J]. 土壤学报, 58(5): 1234-1245.
- [23] USEPA. Superfund remedy report[OL]. 16th Edition. 2020. <https://www.doc88.com/p-53547360207043.html?r=1>
- [24] 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.
- [25] Liedekerke M V, Prokop G, Rabl-Berger S. Progress in the management of contaminated sites in Europe[R]. JRC Reference Reports, 2014.
- [26] 骆永明,滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145-152.
- [27] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [28] 袁西鑫. 某化工企业旧址污染地块土壤修复工程的应用案例[J]. 广东化工, 2020, 47(4): 140-141.
- [29] 安琼,董元华,王辉,等. 长江三角洲典型地区农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 3528-3532.
- [30] 滕应,郑茂坤,骆永明,等. 长江三角洲典型地区农田土壤多氯联苯空间分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3477-3482.
- [31] 颜湘华,刘星海,王兴润,等. 改性芬顿试剂修复农药污染土壤的工艺条件优化[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(2): 288-292.
- [32] 邓一荣,陆海建,董敏刚,等. 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5615-5622.
- [33] 路风辉,陈满英,陈燕舞,等. 电子垃圾拆解区氯化石蜡和多氯联苯的分布特征——以广东清远龙塘镇为例[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1297-1303.
- [34] 江萍,赵平,万洪富,等. 珠江三角洲典型地区表层农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 土壤, 2011, 43(6): 948-953.
- [35] 王坚. 辽宁省典型污染场地土壤多环芳烃组成特征研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(17): 116-118, 120.
- [36] 田靖,朱媛媛,杨洪彪,等. 大型钢铁厂及其周边土壤多环芳烃污染现状调查、评价与源解析[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 1002-1008.

- [37] 赵琪, 苏小四, 左恩德, 等. 某石油烃污染场地包气带介质及含水介质 TPH 污染特征[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 25-29.
- [38] 刘媛媛. 某污染场地土壤和地下水中污染物的分布特征和地下水污染现状评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [39] 周欣. 我国典型地区二噁英和多氯联苯在土壤中污染特征研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [40] 蓬丹. 典型污染场地有机氯农药污染特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2013.
- [41] 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.
- [42] 郭书海, 吴波, 李宝林, 等. 中国土壤环境质量区划方案[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3127-3138.
- [43] 陈凤, 王程程, 张丽娟, 等. 铅锌冶炼区农田土壤中多环芳烃污染特征、源解析和风险评价[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1515-1523.
- [44] 董敬. 某氯碱厂污染场地土壤—地下水典型污染物污染特征及风险评估[D]. 济南: 济南大学, 2017.
- [45] 刘锦卉, 刘利军, 李磊, 等. 煤气化污染场地土壤 PAHs 分布特征初探[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 55-59.
- [46] 吕晓立, 邵景力, 刘景涛, 等. 某石油化工污染场地地下水中挥发性有机物污染特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 97-102.
- [47] 席承藩, 张俊民. 中国土壤区划的依据与分区[J]. 土壤学报, 1982, 19(2): 97-109, 212.