



我国石油炼化行业特征污染物及其健康风险分析

彭树青^{1,2}, 李婧^{1,2,3,4}, 韩璐^{2,3,✉}, 张文影^{2,3}, 陈梦舫^{1,2,3,✉}, 陈雪艳^{2,3},
谷涵远^{2,5}, 周源^{1,2}, 侯少林^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 江苏省污染场地土壤与地下水修复工程实验室, 南京 210008; 4. 南京景鸿泽环境科技有限公司, 南京 210000; 5. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310000

摘要 石油炼化行业是我国国民经济的重要支柱产业, 但在加工炼制及储存运输过程中出现的“跑、冒、滴、漏”等现象造成了土壤和地下水的污染, 给人体健康带来了一定风险。本研究通过梳理国内石油炼化企业的空间分布及相关污染调查文献资料, 查明了我国石油炼化行业典型污染物, 并分析了典型污染物的暴露特征及潜在健康风险。结果表明我国石油炼化行业的分布具有较强的不均匀性, 空间分布呈“沿海强、内地弱”特征。该类场地中以有机-无机和有机-有机复合污染为主, 主要污染物为总石油烃 (TPH) 和重金属, 而地下水中以 TPH 和苯系物等有机污染为主。污染物的风险表征结果表明, 场地土壤中 TPH (38%)、二甲苯 (33%) 和苯 (12%) 存在显著非致癌健康风险, 其中 TPH 的危害商达 19.1; 而苯 (41%)、乙苯 (29%) 和镍 (11%) 存在显著的致癌健康风险, 苯的致癌风险水平为 1.05×10^{-4} 。地下水中 TPH 的非致癌危害最高为 75.9, 苯的致癌风险最高为 1.84×10^{-5} 。因此控制 TPH 和苯系物非致癌危害和致癌风险是石油炼化场地中土壤与地下水污染治理的关键。

关键词 石油炼化; 特征污染物; 总石油烃; 健康风险分析

石油炼化行业是指将原油等石油类物质进行一系列物理和化学加工处理, 得到各种以汽油、煤油、柴油等为主的成品油石油产品和烯烃、芳烃等基础化工原料的行业, 主要涉及原油开采、加工、炼油产品生产、销售和运输等方面, 是石油工业和基础化工的关键连接点, 担负着为社会提供燃动能源的重任, 对国家能源安全、社会经济发展和建设节约型社会有着直接的影响。我国炼油能力逐年增长, 到 2022 年, 我国净增炼油能力 $1.260 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 总能力升至 $9.24 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 根据美国能源信息署统计, 同年美国可运营炼油能力继续下降至 $8.98 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 中国已经稳居世界第一大炼油生产国^[1]。然而我国石油炼化行业存在产能过剩和“大而不强”的问题。一方面, 根据《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》^[2]的工作目标, 到 2025 年约 30% 的行业落后产能需要实施淘汰升级, 以提高行业的绿色低碳能力。另一方面, 我国炼油厂数量众多, 截止目前资料统计, 我国共有 225 家炼油企业, 平均加工规模 $411 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。随着我国碳中和、碳达峰重大战略的持续推进, 将推动石油炼化行业产能升级、结构优化、绿色低碳高质量发展。由于原料和产品的有毒有害性质, 且其具有生产周期长、工艺链复杂、生产设备多、管线密集等特点^[3-5], 以及前期监管缺失等原因, 在开采、加工炼制及储存运输过程中容易出现“跑、冒、滴、漏”等现象, 石油炼化工业场地存在较大环境污染风险, 土壤及地下水污染形势严峻^[6-7], 并对人体健康具有一定的危害。WU 等^[8]以我国胜利油田为对象, 对不同人口密度地区多环芳烃的健康风险进行了评价, 结果表明原油开采造成了区域内土壤的多环芳烃污染, 在人口密度低、中和高的地区, 成人总致癌风险 (TCR) 超过 10^{-6} 的概率分别为 9.9%、9.3% 和 13.4%, 而儿童的 TCR 分别为 7.8%、7.1% 和 10.1%。ZHANG 等^[9]对我国南方某炼油厂各加工单元的 61 种挥发性有机化合物 (VOCs) 逸散性排放进行了监测, 以评估 VOCs 对该炼油厂工人的健康风险,

收稿日期: 2024-02-07 录用日期: 2024-02-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3703102); 云南省科技厅科技计划资助项目 (202203AC100001); 国家自然科学基金资助项目 (42277071)

第一作者: 彭树青 (2000—), 男, 硕士研究生, 2496223912@qq.com ✉通信作者: 韩璐 (1985—), 女, 博士, 助理研究员, hanlu@issas.ac.cn; 陈梦舫 (1964—), 男, 博士, 研究员, mfchen@issas.ac.cn

结果表明基础化工和炼化领域内的工人均存在致癌风险。明确石油炼化行业特征污染物及开展相应的风险评估^[10-11]，对后续产业升级改造及落后产能安全再利用具有重要的指导作用。

目前我国国内已经开展了不少在产或已经退役的石化类场地土壤及地下水污染的调查工作，结果显示，在石化场地及其周边土壤和地下水中检出有多种有机污染物，包括石油烃^[12]、苯系物^[13-14]和卤代烃^[15]等挥发性有机物以及多环芳烃^[16-18]等半挥发性有机物。同时已有研究表明原油中含有重金属，在原油炼制和加工的过程中所排放的大量废水、废气、废渣也可能对土壤及地下水造成一定的重金属污染^[19-21]。因此，为避免此类石化场地遗留污染物对周围环境及人体健康造成更大的损害，明晰石油炼化行业的特征污染物并对其进行健康风险分析就变得尤为重要。

本研究通过整理国内炼化企业的地理位置信息及石化污染场地调查相关文献资料，分析我国石油炼化行业的分布情况及行业典型污染物，并对典型污染物的暴露特征及它们的潜在健康风险进行量化模拟计算，以期石油炼化在产场地土壤与地下水风险管控提供基础理论支持。

1 我国石油炼化行业分布

石油炼化行业作为我国国民经济的重要支柱产业，其分布情况与自然资源条件、交通运输条件、市场需求以及政策支持等多方面因素息息相关^[22]。本研究通过“天眼查”、“百度地图”等公开渠道获取了我国总共 4 330 家石油炼化企业的地理位置信息，各地区的炼化企业数量分布见图 1。从整体上来看，我国石油炼化行业的分布具有较明显的不均匀性，主要集中在东部沿海地区和长江中下游地区，空间格局呈“沿海强、内地弱”特征，小微炼厂众多，产业集约化、规模化、一体化水平较低，高端石化产品发展较为滞后^[23]。借鉴一些发达国家的石化行业分布格局，近年来，我国进一步改善并优化了产业布局，形成了长江三角洲、珠江三角洲、环渤海地区三大炼化产业集聚区^[24]和以东北、西北、沿江三大炼化产业带为特征的炼化产业“三圈三带”格局，空间布局基本成形。据统计，近年来新建的大型炼油企业基本布局于沿海地区炼化一体化基地，中西部、东北、西北地区没有新布局大型炼油项目。2023 年下半年，国内暂无新建及改扩建炼油项目建成投产，全国炼油总能力保持在 9.2×10^8 t 的规模，而化工项目原料需求明显上升，预计全年原油加工量为 7.36×10^8 t，未来产业集群化仍然是我国石化行业布局的主流趋势。

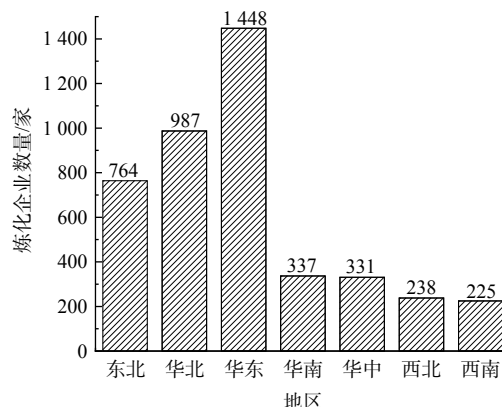


图 1 我国石油炼化企业分布

Fig. 1 Distribution of petroleum refining and chemical enterprises in China

2 石油炼化行业特征污染物

为进一步了解石油炼化行业的典型污染物，本研究基于文献计量分析，在 Web of Science (WOS) 数据库中以“refinery”“oil exploitation”“polluted sites”“soil”“groundwater”等为主题词进行检索，文献类型以“article”和“review”作为限制，共检索英文文献 1 500 余篇，将文献数据导出后运用 VOSviewer (1.6.20) 的共现分析 (co-occurrence) 功能，对高频关键词进行分析，分析过程中对同义词进行替代后共有 7 089 个关键词，提取频次高于 25 次的 57 个关键词 (图 2)^[25-26]。图中，出现频次较高的与污染物种类相关的关键词有石油烃 (202 次)，多环芳烃 (228 次)，重金属 (132 次)，说明石油炼化污染场地以石油烃、多环芳烃和重金属为主要污染物类型。

此外，本研究在 Web of Science (WOS)、中国知网和万方数据库中使用关键词“石化场地”、“加油站”以及“炼油厂”等检索了 2000—2023 年近 20 年内国内报道的有关石化行业污染场地的调查文献及部分石化场地风险评估文献，对石化行业的特征污染物进行分析。如表 1 所示，本研究共计检索中英文文献 46 篇，涉及石化污染场地 49 个，分布于我国的七大地理分区，可以在一定程度上反映我国大部分地区的石化场地污染状况。这些文献报告了我国目前在役或是已经退役的一些石化场地及其周边土壤及地下水中的污染物数据，

表2 石化场地土壤主要污染物组成与含量特征

Table 2 Composition and content characteristics of major pollutants in soil of petrochemical sites

污染物类别	污染物名称	场地检出率/%	浓度/mg·kg ⁻¹			
			最小	最大	平均	筛选值
石油类	TPH	57.14	0.8	56 967	1 953.39	4 500 ^a
重金属	铅	54.80	2.27	454	29.36	800 ^a
	砷	46.34	0.012	112	10.87	60 ^a
	镍	45.24	5	954	33.34	900 ^a
	铜	45.24	3.60	1 030	33.50	18 000 ^a
	镉	42.86	0.02	7.69	0.44	65 ^a
	汞	40.48	0.004	13.40	0.82	38 ^a
	铬	30.95	0.50	206	60.10	—
	锌	23.81	7.5	2050	104.81	—
苯系物	苯	45.24	0.004	155	2.38	4.00 ^a
	甲苯	40.48	ND	79.25	5.52	1 200 ^a
	乙苯	33.33	ND	95.90	20.74	28 ^a
	二甲苯	33.33	ND	2 137	—	570 ^a
多环芳烃	萘	40.48	ND	166.1	7.01	70 ^a
	苯并[k]荧蒹	35.71	ND	3.09	0.21	151 ^a
	苯并[a]蒽	35.71	ND	2.61	0.16	15 ^a
	苯并[a]芘	35.71	ND	2	0.21	1.50 ^a
	苯并[b]荧蒹	33.33	ND	0.90	0.14	15 ^a
	茚并[1,2,3-c,d]	33.33	ND	1.20	0.13	15 ^a
	芘	30.95	ND	4.03	0.35	—
	蒽	28.57	ND	4.32	0.35	1 293 ^a
	苯并[g,h,i]芘	28.57	ND	0.96	0.14	—
	菲	28.57	ND	9.75	1.10	—
	荧蒹	26.19	ND	1.85	0.22	1.50 ^a
	二苯并[a,h]蒽	26.19	ND	1.30	0.17	—
	芴	21.43	ND	5.06	0.52	—
	蒽	21.43	ND	5.86	0.70	—
	芘	19.05	ND	0.65	0.08	—
	芘烯	16.67	ND	0.76	0.08	—
卤代烃	氯仿	16.67	0.000 55	0.14	0.02	0.90 ^a
	二氯甲烷	16.67	0.000 75	15.59	0.05	616 ^a

注：场地检出率指污染物在所有统计场地中检出的频率；ND表示污染物未检出；“—”表示数据缺失；筛选值a选取《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600—2018）^[36]中第二类用地筛选值。

要污染物。本研究对文献中 TPH 的最大浓度进行了统计，以筛选值 4 500 mg·kg⁻¹^[36] 为限值，炼化场地土壤中 TPH 浓度最高达 28 848 mg·kg⁻¹^[37]，以上海市第二类用地地下水石油烃（C10-C40）筛选值 1.2 mg·L⁻¹ 为限值，炼化场地地下水中 TPH 污染浓度最高达 91.1 mg·L⁻¹^[37]，表明石油炼化污染场地土壤和地下水存在

表 3 石化场地地下水主要污染物组成与含量特征

Table 3 Composition and content characteristics of major pollutants in groundwater of petrochemical sites

污染物类别	污染物名称	场地检出率/%	浓度/mg·L ⁻¹			
			最小	最大	平均	筛选值
石油类	TPH	60.71	0.0042	2 777.40	8.62	1.2 ^c
重金属	砷	21.43	ND	0.0254	0.001	0.05 ^b
	铅	17.86	ND	0.285	0.001	0.1 ^b
苯系物	苯	60.71	ND	44.71	0.321	0.12 ^b
	二甲苯	50	ND	197.185	8.78	—
	甲苯	42.86	ND	155.625	4.54	1.4 ^b
	乙苯	32.14	ND	32.66	4.04	0.6 ^b
卤代烃	1,2-二氯乙烷	25	ND	5.45	0.19	0.04 ^b
多环芳烃	萘	17.86	ND	0.233	0.006	0.6 ^b

注：场地检出率指污染物在所有统计场地中检出的频率；ND表示污染物未检出；“—”表示数据缺失；筛选值b选取《地下水质量标准》^[38]中IV类水体限值；筛选值c选取上海市建设用地地下水污染风险管控筛选值补充指标。

较高的环境风险。

从污染物的浓度特征来看，各场地土壤和地下水中污染物的浓度变化范围较大，这可能是由于各场地的生产工艺和污染管控措施不尽相同，且场地土壤与地下水条件存在差异，导致污染程度各异。多数场地的污染物最小检出浓度为未检出(ND)或是很小，而最大检出浓度最高可达上千乃至上万 mg·kg⁻¹ 或 mg·L⁻¹，例如韩丰磊等^[37]对一废弃石化场地的污染调查发现土壤中 TPH 的浓度范围为 32~28 848 mg·kg⁻¹。从场地污染物的平均浓度来看，土壤中各污染物的平均浓度都处在一个较低的水平且未超过相应筛选值，而地下水中的 TPH、苯、甲苯、乙苯和 1,2-二氯乙烷均超过了筛选值，超标倍数分别为 6.18、2.01、2.24、5.73 和 3.75 倍。土壤中以 TPH 和重金属的平均浓度占污染物总量(平均浓度总和)比例最高，分别为 87.91% 和 8.27%，地下水中则以 BTEX 和 TPH 占比最高，分别为 66.88% 和 32.85% (图 3)。

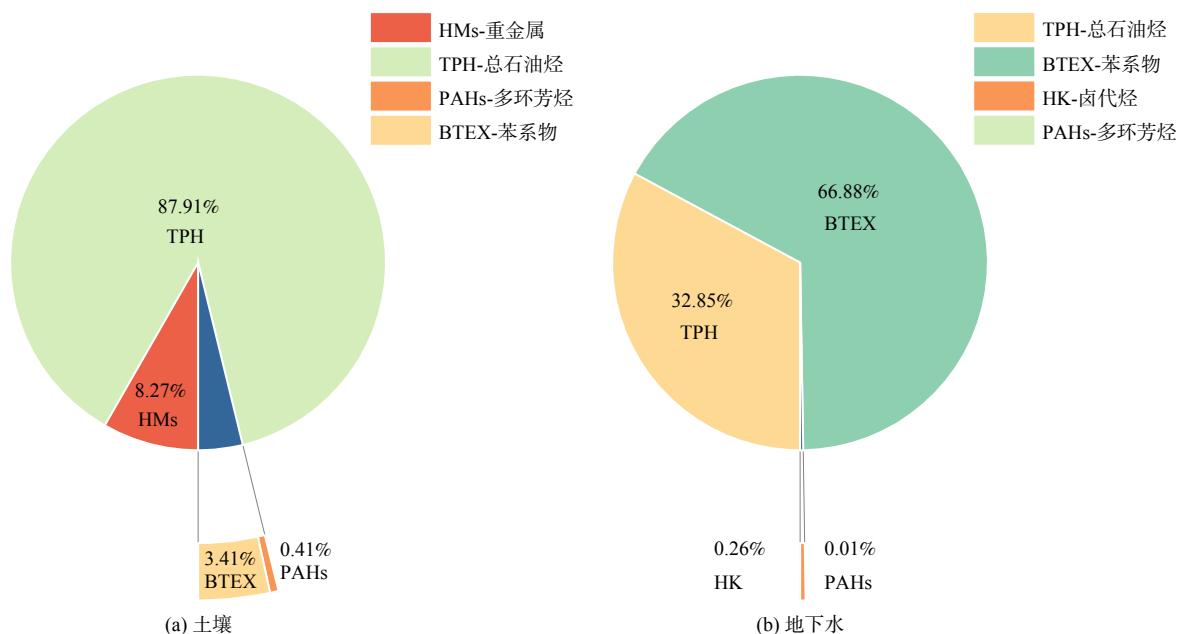


图 3 土壤与地下水中各类污染物平均浓度占污染物总量比例

Fig. 3 Concentrations of various pollutants in soil and groundwater accounted for the proportion of total pollutants

3 典型污染物暴露特征及潜在健康风险

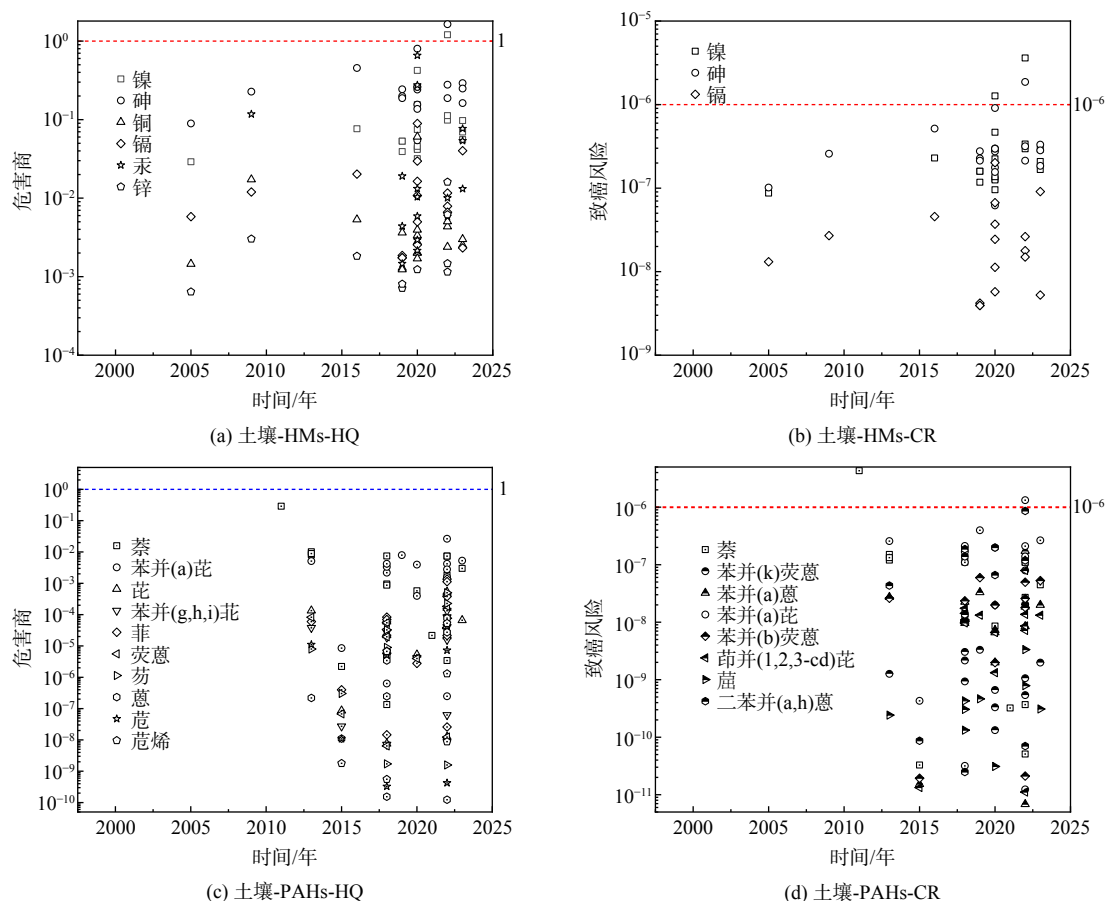
3.1 风险评估方法

石油炼化场地属于《城市用地分类与规划建设用地标准》GB50137-2011 规定的第二类工业用地^[39]。本研究选取表 2 (土壤) 和表 3 (地下水) 中列出的污染物作为关注污染物, 利用课题组自主研发的污染场地土壤与地下水风险评估软件 HERA⁺⁺^[40], 依据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)^[41] 初步计算各类污染物不同暴露途径下的健康风险并推导主要暴露途径的贡献率^[42-45]。本研究根据所有统计文献中各污染物在每个场地的最大浓度进行健康风险计算。若计算得到的单一污染物的危害商 (hazard quotient, HQ) 大于 1 或致癌风险 (carcinogenic risk, CR) 大于 10^{-6} , 可以认定为该地块区域的污染风险不可接受, 反之则没有风险^[46-50]。各受体暴露参数均为《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)^[41] 推荐默认值。

3.2 风险表征结果与分析

1) 土壤污染物健康风险。风险表征结果如图 4 所示, 其中图 4(a)、(c)、(e) 反映了各场地土壤中污染物的 HQ 统计结果, HMs 中仅有砷和镍存在部分超标, 二者超标率仅为 5%; PAHs 的 HQ 均小于 1, 说明土壤中 PAHs 不存在非致癌风险; TPH、苯和二甲苯的 HQ 均有超标, 超标率分别为 38%、12% 和 33%, 其中 TPH 的 HQ 最大值达 19.1。而图 4(b)、(d)、(f) 则反映了各场地土壤中污染物的 CR 统计结果, HMs 中砷和镍的超标率分别为 5% 和 11%; PAHs 中仅有萘和苯并(a)芘存在少数超标, 超标率均不高于 10%; BTEX 中以苯和乙苯的超标率最高, 分别为 41% 和 29%, 其中苯的 CR 普遍较高, 最大值达 1.05×10^{-4} 。

2) 地下水污染物健康风险。如图 4(g) 所示, 场地地下水污染物仅有 TPH 的 HQ 超标, 且超标率高达 65%, HQ 最大值为 75.9, 说明其存在较高的非致癌风险。如图 4(h) 所示, 地下水中各污染物的 CR 超标率从高到低依次为 1,2-二氯乙烷 (29%)、苯 (27%) 和乙苯 (22%), 其中以苯的 CR 最高, 达 1.84×10^{-5} 。



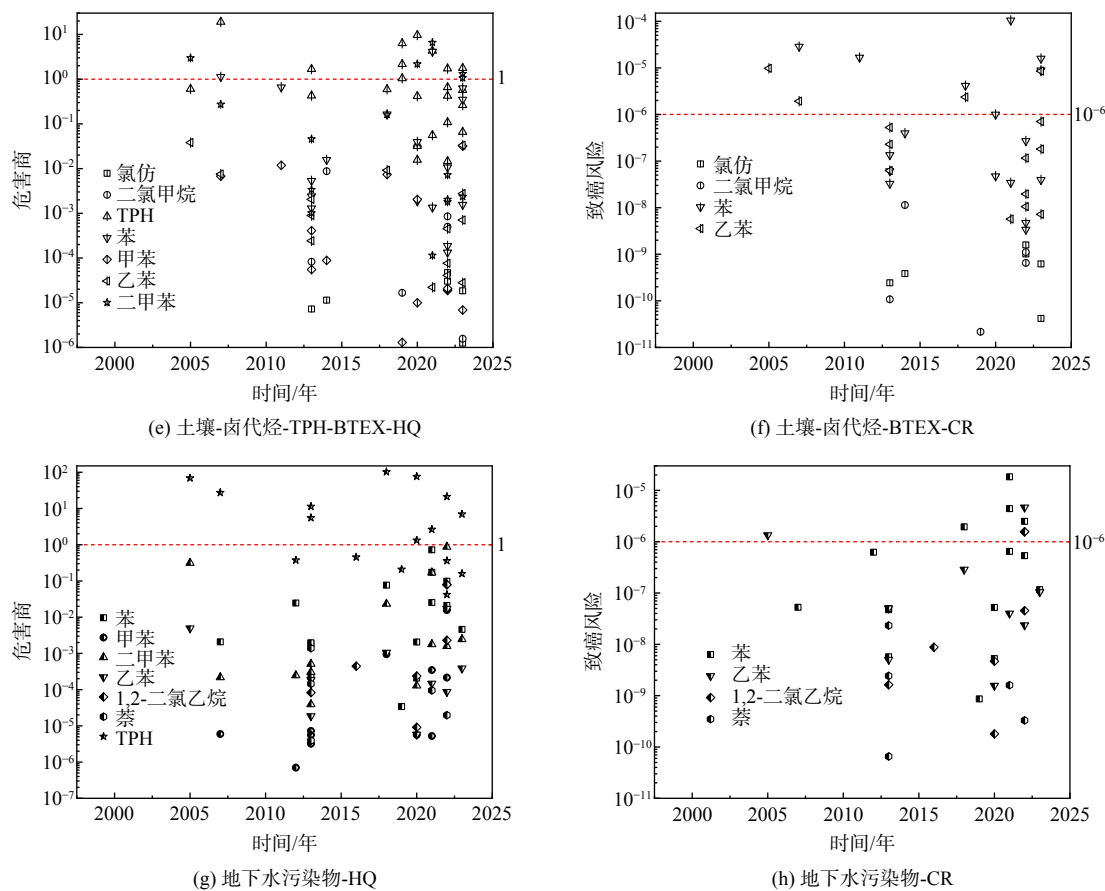


图 4 近 20 年我国石化污染场地土壤与地下水中污染物的风险统计

Fig. 4 Risk statistics of pollutants in soil and groundwater of petrochemical contaminated sites in China in last 20 years

3) 暴露途径贡献率分析。针对场地土壤与地下水中风险超标率高于 10% 的污染物，利用 HERA⁺⁺软件，根据国家导则默认参数，推导出了它们在不同暴露途径下的贡献率 (exposure pathway contribution, PPC)，见表 4。表 4 的贡献率分析结果表明，土壤中重金属镍的主要暴露途径为吸入室内土壤颗粒物，致癌

表 4 土壤与地下水中污染物在不同暴露途径下对致癌风险/危害商的贡献率

Table 4 Contribution rates of pollutants in soil and groundwater to carcinogenic risk/hazard quotient under different exposure paths

环境介质	污染物	不同暴露途径下对致癌风险 (非致癌危害商) 的贡献率/%								
		PPC _s ^{ing}	PPC _s ^{der}	PPC _s ^{ip}	PPC _s ^{op}	PPC _s ^{sur-ov}	PPC _s ^{sub-ov}	PPC _s ^{iv}	PPC _{gw} ^{ov}	PPC _{gw} ^{iv}
土壤	镍	—	—	82.80	17.20	—	—	—	—	—
	苯	3.00 (3.14)	—	0.01 (0.01)	0.00 (0.00)	0.60 (0.62)	1.20 (1.23)	95.20 (95.00)	—	—
	乙苯	4.50	—	0.00	0.00	1.50	3.00	91.00	—	—
	二甲苯	(0.55)	—	(0.04)	(0.01)	(1.61)	(3.21)	(94.58)	—	—
	TPH	(0.78)	—	(0.00)	(0.00)	(0.11)	(0.23)	(98.88)	—	—
地下水	苯	—	—	—	—	—	—	—	3.09	96.91
	乙苯	—	—	—	—	—	—	—	2.99	97.01
	1,2-二氯乙烷	—	—	—	—	—	—	—	3.89	96.11
	TPH	—	—	—	—	—	—	—	(2.54)	(97.45)

注：PPC_s^{ing}，经口摄入土壤；PPC_s^{der}，皮肤接触土壤；PPC_s^{ip}，吸入室内土壤颗粒物；PPC_s^{op}，吸入室外土壤颗粒物；PPC_s^{sur-ov}，吸入表层土壤室外蒸气；PPC_s^{sub-ov}，吸入下层土壤室外蒸气；PPC_s^{iv}，吸入下层土壤室内蒸气；PPC_{gw}^{ov}，吸入地下水室外蒸气；PPC_{gw}^{iv}，吸入地下水室内蒸气；括号内为危害商贡献率；—，污染物对应暴露途径下无致癌风险/非致癌危害商。

风险贡献率高达 82.80%，其次为吸入室外土壤颗粒物 (17.20%)。土壤中的苯、乙苯、二甲苯和 TPH 等有机物以吸入下层土壤室内蒸气为主要暴露途径，致癌风险/非致癌危害商贡献率均达 90% 以上，其他途径占比较小，不超过 5%。地下水中污染物均以吸入地下水室内蒸气为主要暴露途径，对致癌风险/非致癌危害商的贡献率都高达 96% 以上，吸入地下水室外蒸气途径贡献率或可忽略不计。

以上的暴露途径贡献率分析结果可为降低石油炼化行业从业人员的健康风险提供一定的指导依据。相关从业人员工作时应佩戴好相应的防护用具，如面具、手套等，如有待建新厂区，建议选址时做好前期勘查工作，尽量以粘性土作地基，对于已建成厂区应加强对室内地面裂缝的监测，以减少蒸气入侵带来的健康风险。

3.3 不确定性分析

本研究仅基于可查询的已公开发表的文献数据对我国石油炼化行业场地典型污染物的浓度和健康风险进行统计分析，而较多污染场地调查监管情况由于数据保密性，难以被查询获取，研究结果仅能部分反映我国石化行业污染特征与潜在健康风险情况，因此评估结果具有一定的不确定性；此外，本次风险评估研究主要根据我国《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)^[41]推荐的默认参数进行统一计算，但我国石油炼化行业场地分布广泛，不同区域场地水文地质条件及人群暴露特征差异显著，因此评估结果可能与实际特定条件下的风险水平存在差异。总体而言，本研究主要起到对石油炼化行业场地典型污染物的人群健康风险进行初步筛选作用。

4 结论

1) 我国石油炼化行业的分布具有较强的不均匀性，空间分布呈“沿海强、内地弱”特征。近年来，我国进一步改善和优化了产业布局，形成了长江三角洲、珠江三角洲、环渤海地区三大炼化产业集聚区和以东北、西北、沿江三大炼化产业带为特征的炼化产业“三圈三带”格局，空间布局基本成形，未来产业集群化仍会是我国石化行业布局的主流趋势。

2) 石油炼化行业污染场地土壤污染类型以有机-无机复合污染为主，主要污染物种类为总石油烃 (TPH)、多环芳烃 (PAHs)、苯系物 (BTEX)、卤代烃和重金属，其中以铅和 TPH 的场地检出率最高，分别为 56.10% 和 53.66%。场地地下水以有机污染为主，其中以苯和 TPH 的场地检出率最高，分别为 61.54% 和 57.69%。各场地土壤和地下水中污染物的浓度变化范围较大，可能是由于各场地的生产工艺不尽相同，且场地土壤与地下水条件存在差异，导致污染程度各异。土壤中以 TPH 和重金属占污染物总量比例最高，分别为 87.91% 和 8.27%，地下水中则以 BTEX 和 TPH 占比最高，分别为 66.88% 和 32.85%。

3) 污染物的风险表征结果表明，场地土壤中 HQ 超标污染物主要为 TPH (38%)、二甲苯 (33%)、苯 (12%)，以 TPH 的 HQ 最高，达 19.1；CR 超标污染物主要为苯 (41%)、乙苯 (29%) 和镍 (11%)，以苯的 CR 最高，达 1.05×10^{-4} 。场地地下水中仅有 TPH 的 HQ 超标，超标率高达 65%，HQ 最大值 75.9；各污染物的 CR 超标率从高到低依次为 1,2-二氯乙烷 (29%)、苯 (27%) 和乙苯 (22%)，其中苯的 CR 最大值 1.84×10^{-5} 。综上，应重点关注场地中 TPH 和苯带来的非致癌和致癌风险。对各暴露途径的贡献率分析表明，土壤中重金属镍的主要暴露途径为吸入室内土壤颗粒物，苯、乙苯、二甲苯和 TPH 等有机物以吸入下层土壤室内蒸气为主要暴露途径；而地下水中污染物均以吸入地下水室内蒸气为主要暴露途径。

参考文献

- [1] 费华伟, 王婧, 高振宇, 等. 2022 年中国炼油工业发展状况及近期展望[J]. 国际石油经济, 2023, 31(4): 53-58.
- [2] 国家发展改革委等四部门印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022 年版)》[J]. 上海节能, 2022(7): 941.
- [3] SONG Q W, XUE Z K, WU H J, et al. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study[J]. Environmental Research, 2023, 216(4): 114816.
- [4] 谭海涛, 刘涛, 曹兴涛, 等. 石化场地土壤与地下水污染防治研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(8): 2112-2115+2121.
- [5] 邱爱华. 浅谈石化企业开展场地环境调查的重要性[J]. 新西部(理论版), 2014(12): 67+81.
- [6] 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.
- [7] 李煜婷, 许德刚, 李巨峰, 等. 典型石油炼制厂地下水中优控污染物识别方法的建立和验证[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2770-2780.
- [8] WU B, GUO S H, WANG J N. Assessment of the human health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from areas of crude oil exploitation[J]. Environmental Research, 2021(193): 110617.

- [9] ZHANG Z J, YAN X Y, GAO F L, et al. Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018(238): 452-461.
- [10] 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.
- [11] 陈梦舫, 韩璐, 罗飞. 污染场地土壤与地下水精细化风险评估理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [12] YUAN L M, WU Y Q, FAN Q H, et al. Spatial distribution, composition, and source analysis of petroleum pollutants in soil from the Changqing Oilfield, Northwest China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 185(B): 114338.
- [13] 夏凤英. 石油类场地典型挥发/半挥发性污染物分布及环境风险研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2010.
- [14] 罗帅. 典型石化行业场地土壤中苯系物的污染特征及迁移行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [15] CHEN R H, TENG Y G, CHEN H Y, et al. A coupled optimization of groundwater remediation alternatives screening under health risk assessment: An application to a petroleum-contaminated site in a typical cold industrial region in Northeastern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021(407): 124796.
- [16] 洪毅鸿. 某石化企业地下水环境状况调查结果分析[J]. *质量与认证*, 2022(9): 80-82.
- [17] 康晓钧, 姜月华, 李云, 等. 苏南某市 A₁ 加油站渗漏污染特征及启示[J]. *地下水*, 2013, 35(3): 65-68.
- [18] CAO W, GENG S Y, ZOU J, et al. Post relocation of industrial sites for decades: Ascertain sources and human risk assessment of soil polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020(198): 110646.
- [19] 李婷. 石油炼制场地土壤典型污染物分布及迁移特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [20] SCHRODER J, BASTA N, LOCHMILLER R, et al. Soil contamination and bioaccumulation of inorganics on petrochemical sites[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(8): 2066-2072.
- [21] HUANG L, ZHANG L, GAO X H, et al. Application and development of anti-heavy metal technology for catalytic cracking catalyst[J]. *Industrial Catalysis*, 2018, 26(6): 1-7.
- [22] 刘鹤, 金凤君, 刘毅. 中国石化产业空间组织的演进历程与机制[J]. *地理研究*, 2012, 31(11): 2031-2043.
- [23] 赵亚萍, 马庚宇. 石化产业空间格局与演进机制研究[J]. *石油化工设计*, 2017, 34(1): 4.
- [24] 王小军, 廖传华, 李永亮, 等. 我国石化产业基地布局及其水安全保障研究[J]. *环境保护*, 2020, 48(17): 41-44.
- [25] 严梓辰, 余海波, 唐伟, 等. 基于文献计量分析的场地化学氧化修复技术研究热点和趋势[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3423-3433.
- [26] 李海生, 李小敏, 赵玉婷, 等. 基于文献计量分析的近 40 年国内外环境影响评价研究进展[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(5): 1091-1101.
- [27] 李慧. 石化场地土壤多环芳烃生物可给性及其精细化健康风险评估[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [28] 董欣竹, 钱林波, 龙颖, 等. 高级氧化技术修复苯污染土壤和地下水研究进展[J]. *土壤*, 2023, 55(1): 11-20.
- [29] 钱林波, 李航宇, 陈梦舫, 等. 高级氧化技术修复苯并[a]芘污染土壤研究进展[J]. *环境化学*, 2022, 41(10): 3205-3213.
- [30] 董欣竹, 钱林波, 龙颖, 等. 铁碳复合材料活化过氧化氢吸附-氧化苯的机理[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(6): 1348-1356.
- [31] 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/OL]. *土壤学报*, 1-26[2024-09-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20231211.1109.002.html>.
- [32] 张厚福. 石油地质学[M]. 北京: 石油出版社, 1999.
- [33] 王昭申, 胡玉星. 土壤中总石油烃(C10-C40)检测过程中影响因素探讨[J]. *干旱环境监测*, 2023, 37(4): 145-148.
- [34] 刘丹青. 我国污染场地土壤石油烃环境质量标准体系的现状与趋势[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(1): 138-146.
- [35] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [36] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600-2018[S]. 2018.
- [37] 韩丰磊, 李婷, 孙慧, 等. 废弃石化用地土壤和地下水污染调查与评估[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1238-1245.
- [38] 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. 地下水质量标准: GB/T 14848-2017[S]. 2017.
- [39] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137-2011[S]. 2010.
- [40] 陈梦舫. 污染场地健康与环境风险评估软件(HERA)[J]. *中国科学院院刊*, 2014, 29(3): 344-344+335+399.
- [41] 生态环境部. 建设用土壤污染风险评估技术导则: HJ 25.3-2019[S]. 2019.
- [42] 张博宇, 孙明波, 杨玉敏, 等. 典型加油站石油烃污染场地环境调查及风险评估方法应用[J]. *石油石化绿色低碳*, 2023, 8(3): 27-34.
- [43] 郭诗卉, 李磊, 肖艳霞, 等. 污染地块土壤总石油烃调查与健康风险评估研究[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(5): 44-47.
- [44] 汤曼琳, 李翌洲. HERA 软件在石油污染场地风险评估中的应用研究[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(6): 33-35.
- [45] 史俊祥, 郑娟, 杨洋, 等. 基于 HERA 土壤分层风险评估的 SVE 修复方案优化[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(12): 2954-2962.
- [46] 王璇, 于宏旭, 熊惠磊, 等. 南方某典型矿冶污染场地健康风险评估及修复建议[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3823-3831.
- [47] 李政红, 张胜, 毕二平, 等. 某储油库地下水有机污染健康风险评估[J]. *地球学报*, 2010, 31(2): 258-262.
- [48] LIU G, NIU J J, ZHANG C, et al. Characterization and assessment of contaminated soil and groundwater at an organic chemical plant site in Chongqing, Southwest China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, 38(2): 607-618.
- [49] CHEN X Y, LI J, HAN L, et al. Human health risk-based soil generic assessment criteria of representative perfluoroalkyl acids (PFAAs) under the agricultural land use in typical Chinese regions[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 335: 122368.
- [50] HAN L, WU W P, CHEN X Y, et al. The derivation of soil generic assessment criteria for polychlorinated biphenyls under the agricultural land scenario in Pearl and Yangtze River Delta regions, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162015.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis of characteristic pollutants and health risks in the petroleum refining industry in China

PENG Shuqing^{1,2}, LI Jing^{1,2,3,4}, HAN Lu^{2,3,*}, ZHANG Wenyong^{2,3}, CHEN Mengfang^{1,2,3,*}, CHEN Xueyan^{2,3}, GU Hanyuan^{2,5}, ZHOU Yuan^{1,2}, HOU Shaolin^{1,2}

1. School of Environment, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Engineering Laboratory of Soil and Groundwater Remediation of Contaminated Sites, Nanjing 210008, China; 4. Nanjing Jinghongze Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing, 210000, China; 5. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China

*Corresponding author, E-mail: hanlu@issas.ac.cn; mfchen@issas.ac.cn

Abstract Petroleum refining is an important pillar industry of China's national economy. However, the phenomena of “running, bubbling, dripping and leaking” in the process of processing, refining, storage and transportation have caused soil and groundwater pollution, which poses a certain risk to human health. By combing the spatial distribution characteristics of domestic petroleum refining enterprises and relevant pollution investigation literature, this study analyzed the typical pollutants in China's petroleum refining industry, and analyzed the exposure characteristics of typical pollutants and their potential health risks. The results showed that the petroleum refining industries in China were unevenly distributed in coastal areas mostly and less in inland areas. The sites were mainly polluted by the mixed organic-inorganic or organic-organic compounds, with total petroleum hydrocarbon (TPH) and heavy metals as dominant pollutants in soil, while TPH and BTEX mainly in groundwater. On the one hand, the results of risk characterization showed that TPH (38%), xylene (33%) and benzene (12%) in soils could introduce notable noncarcinogenic health risk with the highest hazard quotient (HQ) of 19.1 for TPH, and the carcinogenic risks (CR) of benzene (41%), ethylbenzene (29%) and nickel (11%) were much higher than other pollutants, with the highest CR of 1.05×10^{-4} for benzene. On the other hand, the highest HQ for TPH was up to 75.9, while the highest CR for benzene reached 1.84×10^{-5} . Therefore, controlling the non-carcinogenic hazards and carcinogenic risks of TPH and BTEX is the key for the remediation of soil and groundwater contamination in petroleum refinery sites.

Keywords petroleum refining; characteristic pollutants; total petroleum hydrocarbon; health risk analysis