油墨涂料地块土壤中苯系物污染特征及健康风险评估

钱 岩，郑 玲，郭凌川，吕占禄*
中国环境科学研究院，环境基准标准与风险管控全国重点实验室，国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室，北京 100012

摘 要：苯系物是苯、甲苯、乙苯、二甲苯和苯乙烯等苯衍生物的总称，工业上广泛应用于油漆、印刷、石油化工和油墨涂料等行业，具有较强的挥发性和溶解性。目前国内外学者对苯系物的研究多聚焦于石油化工和家具制造等行业，对于油墨地块土壤中苯系物的研究极为欠缺。本研究以广东省某油墨涂料地块为研究区域，在其油墨车间、柴油罐、储罐区等区域，采集0~20cm、100~120cm和200~250cm土壤样品共计22个，检测苯、甲苯、乙苯、二甲苯等25种苯系物，系统分析其污染特征、空间分布、污染成因以及潜在健康风险。结果表明，该地块土壤中检出的25种苯系物，均未超过国家相应标准，其中，甲苯总含量最高，达到54.97μg/kg（四分位间距：22.48~86.22μg/kg），是该油墨地块土壤的特征苯系物污染物，油墨车间是该区域总苯系物的浓度最高的区域。苯系物相关性分析和主成分分析表明：第一主成分包括苯、1,3,5-三甲基苯等19种组分，各组分相关性高且来源相似，主要来源于油墨车间作业过程中复杂苯系物组分的无组织排放；第二主成分包括甲苯、乙苯、异丙基苯和1,3-二氯苯，来源相似，主要来自该地块生产所用的含苯有机原料和溶剂。人群通过经口摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒物三种途径暴露于土壤中苯系物时，其非致癌健康风险和终身致癌健康风险均处于可接受水平，该地块无需开展针对性风险管控或修复。

关键词：油墨涂料地块；土壤；苯系物；反距离权重插值法；主成分分析；健康风险评估
DOI：10.3724/j.issn.2097-4221.2025.03.005
CSTR：32284.14.issn.2097-4221.2025.03.005

基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（2023YSKY-35）。
作者简介：钱岩（1989—），男，副研究员，主要研究方向为环境与健康风险评估研究。
通讯作者：吕占禄，E-mail：lv.zhanlu@craes.org.cn

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

引言

苯系物通常包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯和苯乙烯等芳香烃类化合物，是苯衍生物的总称[1]。苯系物作为工业工业领域常用有机溶剂，具有较强的挥发性和溶解性，广泛应用于油漆、印刷、石油化工和油墨涂料等行业[2-3]。近年来，关于工业地块苯系物污染与人群健康的研究不断升温，大多集中于环境空气[4-6]。土壤是苯系物源汇的重要环境介质，大气颗粒物中的苯系物通过干湿沉降累积在土壤中[7]。此外，土壤中的苯系物也会在大气降水及其自身重力的作用向深层土壤迁移，并在地表径流的作用下向周边环境迁移，造成二次污染[8]。在大量使用或储存含苯有机溶剂的工业区中，苯系物暴露带来的健康风险更高[9]。Tohid等人暴露带来的环境空气中苯、甲苯、苯乙烯和二甲苯的平均浓度分别为8.17、14.61、2.29和14.64μg/m^3，并且苯对当地居民具有致癌风险[10]。然而，此前国内外学者对苯系物的研究多聚焦于石油化工和家具制造等行业，对于油墨涂料行业地块土壤中苯系物的研究极为欠缺。

随着我国工业产业的快速发展，重点行业地块土壤重金属和有机物的污染愈发严重，已经成为污染地块土壤环境治理修复领域需要重点解决的问题。这些已经存在的环境问题需要对其损害程度进行鉴定评估，针对水生态、土壤、湿地生态环境以及大气环境等环境情况，进行基线确定、因果关系判定、损害数额量化等损害鉴定[11]。

因此，本研究以广东省某油墨涂料地块为研究区域，采集表层及不同深度的土壤样品，探讨土壤中苯系物的污染特征、空间分布、污染成因、潜在人群健康风险，并开展生态环境损害价值量化研究，以期为苯系物污染精准防控、土壤环境治理修复及人体健康与生态环境安全保障提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　地块特性

该油墨厂位于广东省中山市，具有多年的工业生产历史，于2003年建成投产。主要生产塑胶凹版油墨、平版油墨及环保型加工材料等产品，年产能2.5万吨。生产过程中因含苯有机原料及溶剂的使用，可能存在跑冒滴漏及无组织排放的现象。该地块所在区域年平均气温23.0℃，年均降雨量1791.3mm，冬季主导风向以西北风为主，夏季为西南风；地形以平原为主，自西北地区向东南倾斜。

1.2　点位布设与样品采集

该油墨地块厂区内地面已完全硬化，厂房为不完全封闭结构。根据厂区生产/储存

厂房分布、地下管线布设，以及采样便携式气相色谱仪（GC）现场快速勘探与测定情况，在其柴油罐、槽车装卸区/槽车喷洒区、天那水车间、油墨车间、储罐区、平板车间、卸料区等区域采集0~20cm表层土壤样品11个；在柴油储罐旁、储罐区和油墨车间附近采集20cm、100cm和300cm深度柱状土壤样品11个，共采集22个样品，采样示意图见图1。

土壤样品采集严格参考《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》（HJ 1019—2019）进行，采用不锈钢非扰动采样器，将采样柱直接插入表层土壤中，随后将采样柱中的土壤直接推入预先加入5mL甲醇的40mL棕色玻璃瓶中，确保土壤样品全部浸没于甲醇中。拧紧瓶盖后，清除样品瓶外表面黏附的土壤；每采集一个样品，使用沾有甲醇的棉球对不锈钢非扰动采样器上黏附的土壤进行清理，样品标记后迅速放入低温采样箱中运输至检测单位。

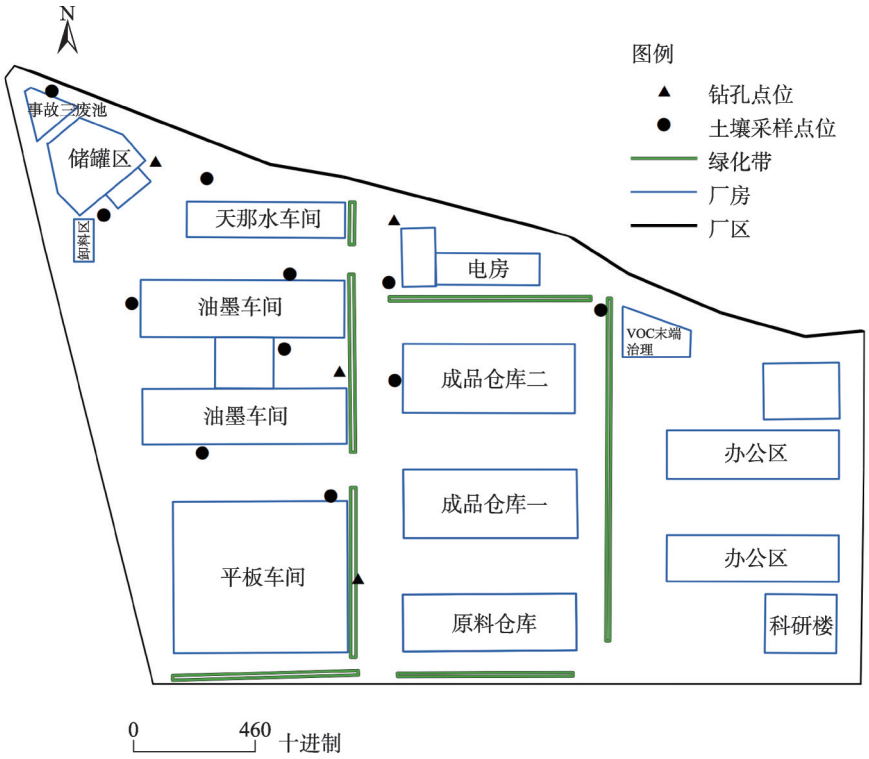


图1　油墨地块土壤采样示意图

1.3　样品前处理、检测及质量控制

土壤样品的前处理与测定参照《土壤和沉积物 挥发性有机物的测定 顶空/气相色谱-质谱法》（HJ 642—2013）执行。使用顶空自动进样器（HP 7694）和气相色谱-质谱仪（Agilent 7890B and 5977A）进行测定。共检出25种苯系物，检出率见表1。

实验室检测质量控制主要采用加标回收和重复测试的方式，同时设置实验检测空

白。加标回收率在87.5%~115.6%之间。在分析过程中进行每日校准，每10个样品插入1个中间浓度校准样，且校准样的相对误差需控制在±10.0%以内；另外，每10个样品分析1个平行样品，平行样品的相对标准偏差控制在±8.0%以内。

1.4 统计分析

使用ArcGIS软件的反距离权重（IDW）插值法对苯系物空间分布进行分析；使用Pearson相关性分析对苯系物之间相关性进行分析；使用主成分分析（PCA）对苯系物污染来源进行分析。采用SPSS 26.0、R 4.1.2、Graphpad Prism 8.0.2和ArcGIS 10.6等软

表1 苯系物的致癌斜率因子和参考浓度

序号	污染物	CAS编号	RfD	RfC	SF	URF	来源
			mg/(kg·d)	mg/m^3	$[mg/(kg·d)]^{-1}$	$(mg/m^3)^{-1}$	
1	苯	71-43-2	0.004	0.03	0.055	7.8×10^{-6}	IRIS
2	甲苯	108-88-3	0.08	5	—	—	RSL
3	乙苯	100-41-4	0.1	1	0.011	2.5×10^{-6}	IRIS
4	间二甲苯	108-38-3	0.2	0.1	—	—	IRIS
5	对二甲苯	106-42-3	0.2	0.1	—	—	IRIS
6	邻二甲苯	95-47-6	0.2	0.1	—	—	IRIS
7	苯乙烯	100-42-5	0.2	1	—	—	IRIS
8	氟苯	462-06-6	—	0.03	—	—	RSL
9	异丙基苯	98-82-8	0.1	0.4	—	—	RSL
10	溴苯	108-86-1	0.008	0.06	—	—	IRIS
11	正丙基苯	103-65-1	0.1	1	—	—	RSL
12	氯苯	108-90-7	0.02	0.05	—	—	RSL
13	1,3,5-三甲基苯	108-67-8	0.01	0.06	—	—	RSL
14	4-氯甲苯	106-43-4	0.02	—	—	—	IRIS
15	叔丁基苯	98-06-6	0.1	—	—	—	IRIS
16	仲丁基苯	135-98-8	0.1	—	—	—	IRIS
17	1,2,4-三甲基苯	95-63-6	0.01	0.06	—	—	IRIS
18	1,3-二氯苯	541-73-1	0.02	—	—	—	RSL
19	4-异丙基甲苯	99-87-6	—	—	—	—	—
20	1,4-二氯苯-d4	3855-82-1	—	—	—	—	—
21	1,4-二氯苯	106-46-7	0.07	0.8	—	—	IRIS
22	正丁基苯	104-51-8	0.05	—	—	—	IRIS
23	1,2-二氯苯	95-50-1	0.7	0.2	—	—	IRIS
24	1,2,4-三氯苯	120-82-1	0.01	0.002	—	—	RSL
25	1,2,3-三氯苯	87-61-6	0.0008	—	—	—	RSL

注 IRIS：Integrate Risk Information System；RSL：US EPA's Regional Screening Level；“—”：缺少参考值。

件进行统计分析及绘图。

1.5　人群健康与生态环境风险评估

地块土壤中苯系物的人群健康风险评估参照《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3—2019）[12] 进行，鉴于该地块未来规划为工业用地，无儿童长期暴露场景，因此仅考虑成人期暴露风险。土壤中的苯系物主要通过经手口摄入污染土壤、经皮肤接触污染土壤和经呼吸吸入土壤产生的粉尘和挥发性物质等 3 种暴露途径进入人体 [13]。暴露评估和风险表征参照 HJ 25.3—2019 中 A2.1、A2.2、A2.3、C1.1、C1.2、C1.3、C2.1、C2.2 和 C2.3 进行计算，10^{-6} 和 1 作为致癌健康风险和非致癌健康风险可接受水平 [14]。暴露参数参考《中国人群暴露参数手册（成人卷）》《中国人群暴露参数手册（儿童卷）0~5 岁》和《中国人群暴露参数手册（儿童卷）6~17 岁》及国际权威组织或机构的推荐值。在检出的 25 种苯系物中，苯、乙苯、苯乙烯、1,4-二氯苯和异丙基苯等 5 种物质被国际癌症研究机构（IARC）判定为 2B 类及以上致癌物，针对此类物质开展致癌健康风险评估。苯系物的参考剂量（RfD）、参考浓度（RfC）、经口摄入的致癌斜率因子（SF）和经呼吸道吸入的单位致癌斜率系数（URF），均来源于美国 EPA 区域筛选值（RSL）[15] 和综合风险信息系统（IRIS）[16]。生态环境损害价值量化参考《土壤污染防治法》《生态环境损害赔偿制度改革方案》《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节第 1 部分：总纲》（GB/T 39791.1—2020）和《生态环境损害鉴定评估技术指南环境要素第 1 部分：土壤和地下水》（GB/T 39792.1—2020）执行，详见表 1。

2　结果与讨论

2.1　地块土壤中总苯系物的含量和分布情况

2.1.1　总苯系物含量特征

该地块土壤中共检出 25 种苯系物，检出率在 36.36%~100.00% 之间。总苯系物浓度范围为 30.37~1015.90μg/kg，其中甲苯含量最高，为 54.97μg/kg（四分位间距 22.48~86.22μg/kg），这与厂区生产中含甲苯有机原料及溶剂的大量使用直接相关。对比《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600—2018）二类用地筛选值，所有检出的苯系物浓度均未超过标准限值。与其他化工厂地块土壤苯系物浓度研究的结果相比，本研究地块土壤中苯系物的含量均低于其他文献报道的区域（表 2）。

2.1.2　垂直分布特征

不同深度土壤中总苯系物及特征组分的垂直分布如图 2 所示。可以直观地看出该地块土壤中，苯、甲苯、乙苯、间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、仲丁基苯、1,2,4-三甲

表2 油墨地块土壤样品中总苯系物浓度与其他文献对比 （μg/kg）

苯系物	检出率	平均数	标准差	最大值	最小值	四分位数			GB36600—2018二类用地筛选值	其他文献		
						P25	P50	P75		染料化工厂地块[17]	搬迁化工厂原址地块[18]	化工仓储地块[19]
苯	45.45%	2.32	4.04	15.60	ND	ND	ND	3.47	4000	ND~12100	86.2~134000	50~11800
甲苯	100.00%	88.95	143.5	699.85	4.23	22.48	54.97	86.22	1200000	ND~14800	7.34~5080000	ND~3800
乙苯	95.45%	12.39	18.01	86.64	ND	1.66	8.81	13.89	28000	ND~3600	7.4~16300	15.0~26600
间二甲苯	72.73%	8.72	15.49	70.77	ND	ND	3.35	10.84	570000	ND~2090000	7.0~10800	30~11700
对二甲苯	72.73%	8.66	15.39	70.30	ND	ND	3.33	10.77	570000	ND~2090000	7.0~10800	30~11700
邻二甲苯	72.73%	11.78	16.19	66.63	ND	ND	5.62	17.39	640000	ND~777000	3.0~6930	15~5640
苯乙烯	68.18%	3.80	4.82	15.45	ND	ND	1.44	7.59	1290000	—	0.63~31	130~6880
氟苯	45.45%	39.80	50.49	127.79	ND	ND	ND	77.82	—	ND~1600000	—	—
异丙基苯	100.00%	0.09	0.19	0.81	ND	ND	0.01	0.10	270000	—	—	—
溴苯	36.36%	2.87	4.66	20.86	0.011	0.21	1.45	3.01	—	—	—	—
正丙基苯	72.73%	0.87	3.90	18.31	ND	ND	ND	0.06	—	—	—	—
氯苯	50.00%	4.63	12.98	62.03	ND	ND	1.34	3.23	—	—	17.8~273000	30~91200
1,3,5-三甲基苯	68.18%	2.78	3.70	11.30	ND	ND	0.60	4.96	—	—	—	—
4-氯甲苯	54.55%	0.34	0.49	1.68	ND	ND	0.04	0.65	—	—	—	—
叔丁基苯	54.55%	1.23	1.70	5.22	ND	ND	0.20	2.26	—	—	—	—
仲丁基苯	68.18%	7.05	10.20	30.87	ND	ND	0.62	14.14	—	—	—	—
1,2,4-三甲基苯	63.64%	6.99	10.15	30.77	ND	ND	0.65	14.00	—	—	—	—
1,3-二氯苯	100.00%	2.00	3.12	10.68	ND	ND	0.71	2.71	—	—	—	—
4-异丙基甲苯	63.64%	19.68	24.13	80.68	ND	ND	10.68	29.65	—	—	—	—
1,4-二氯苯-d4	68.18%	0.26	0.32	1.44	ND	ND	0.20	0.37	20000	—	—	—
1,4-二氯苯	68.18%	7.15	29.14	137.47	ND	ND	0.29	1.86	—	—	1.16~110	—
正丁基苯	72.73%	0.14	0.20	0.89	ND	ND	0.10	0.19	560000	—	—	—
1,2-二氯苯	68.18%	0.23	0.25	1.16	0.002	0.10	0.13	0.26	—	—	3.6~100	—
1,2,4-三氯苯	63.64%	0.32	0.50	2.26	ND	ND	0.21	0.44	—	—	—	—
1,2,3-三氯苯	63.64%	0.21	0.23	0.80	ND	ND	0.17	0.35	—	—	—	—
总苯系物	100.00%	233.25	206.52	1015.90	30.37	119.58	192.47	304.31	—	—	—	—

注 样品数量22个，ND表示未检出。

基苯和1,4-二氯苯-d4等物质的分布具有相似性，表现为表层土壤（20cm）和深层土壤（300cm）浓度高于亚表层土壤（100cm），表明这些物质是该油墨厂长期持续累积的污染物；而异丙基苯、溴苯、正丙基苯和正丁基苯等组分则是在亚表层土壤中浓度较高。由于部分苯系物的辛醇-水分配系数和有机碳分配系数较低，其在土壤中的迁移性比较强，迁移转化由多种作用机制共同控制，会同时经历挥发、吸附-解吸、淋溶和降解等过程[7]。Hawthorne等人的研究表明，苯、甲苯、乙苯和二甲苯等物质在土壤中迁移性较强[20]。污染物从土壤浅层缓慢渗出，需经过较长时间才能到达深层低渗透层，在此过程中会在这些层位形成相关的浓度峰值。由此可以推断，不同土层的黏性和边界可能对污染物垂直分布模式的形成起了重要作用。

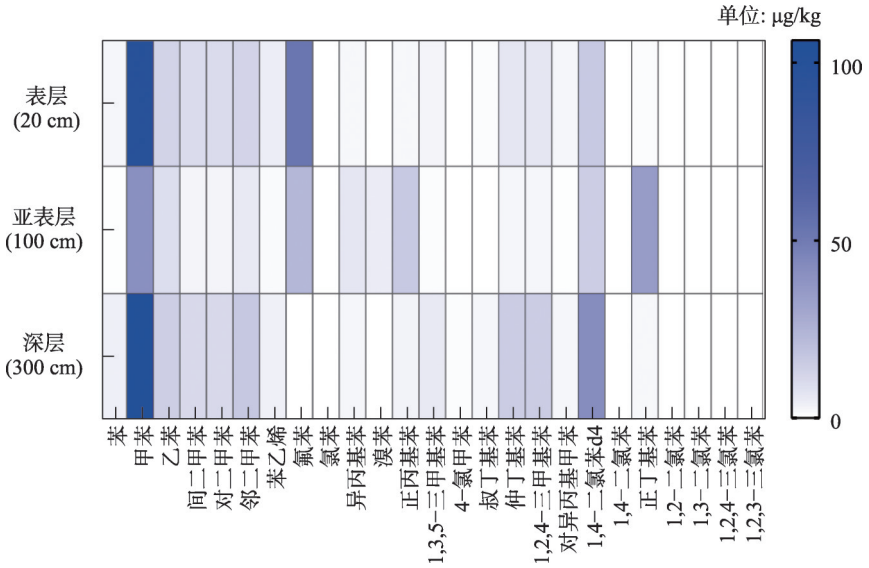
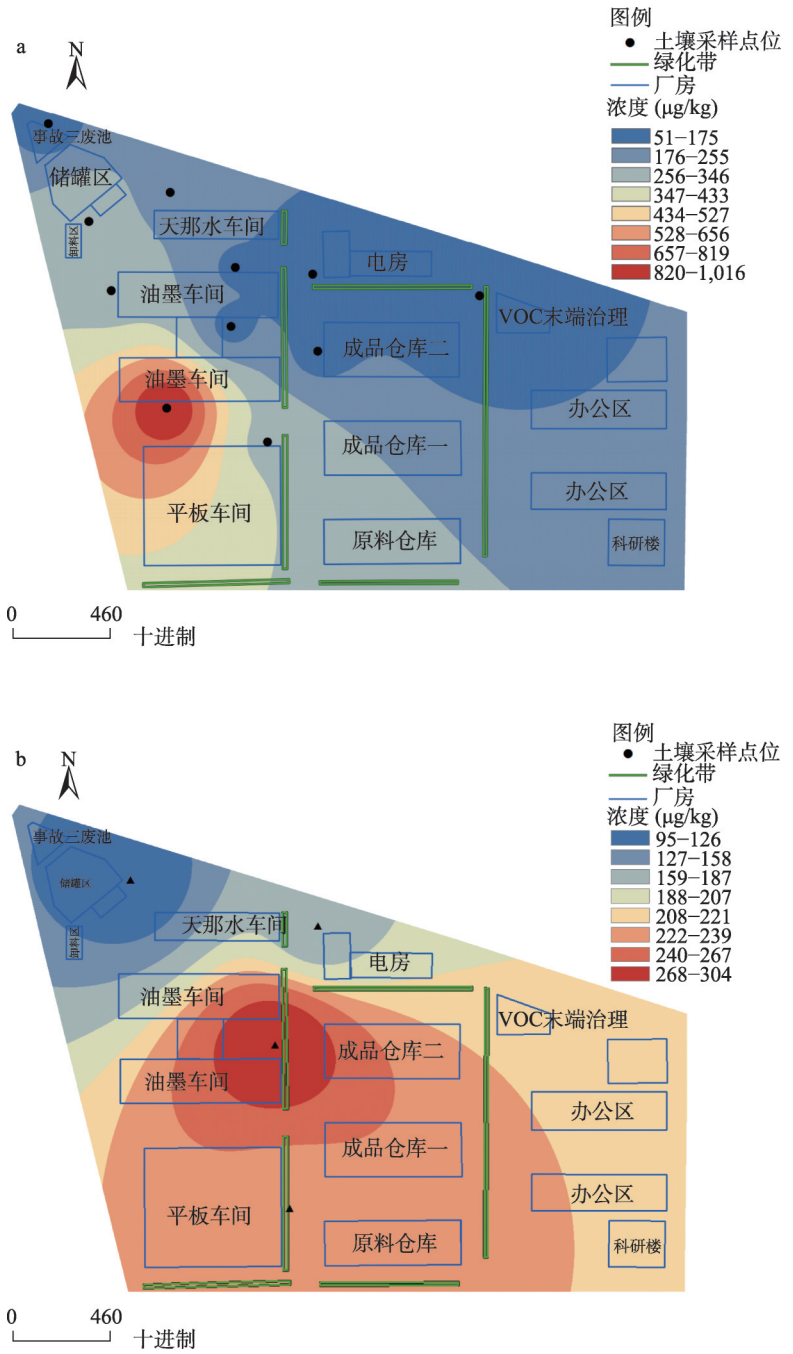


图2　油墨地块不同土壤深度苯系物含量垂直分布热图

2.1.3　水平分布特征

对地块土壤表层采样点位和钻孔点位的总苯系物的空间分布情况，采用IDW插值法进行分析，分布情况如图3所示。IDW插值法是根据相近相似原理，将各样品的测量数据转换为连续的数据曲面，由观测值的随机波动性，造成所得数据曲面不够平滑，会在格网区域内出现许多环状低值区域，即“牛眼”区域[21]，该方法可以直接反映不同点位苯系物的浓度大小。

由土壤表层采样点位的苯系物空间分布示意图（图3A）可见，油墨车间附近的表层土壤苯系物浓度最大，污染程度最高；油墨车间、平板车间和卸料区属于该厂区内高污染区域，办公区及北区的仓库等区域属于轻污染区。苯系物是典型的挥发性有机污染物，通常认为亨利系数（K_H）>$1.01\times10^2 Pa/m^3$时，挥发作用是有机化合物的主要迁移机



注：图3A为土壤表层采样点位总苯系物空间分布图，图3B为钻孔点位总苯系物空间分布图

图3 油墨地块内总苯系物平均浓度空间分布图

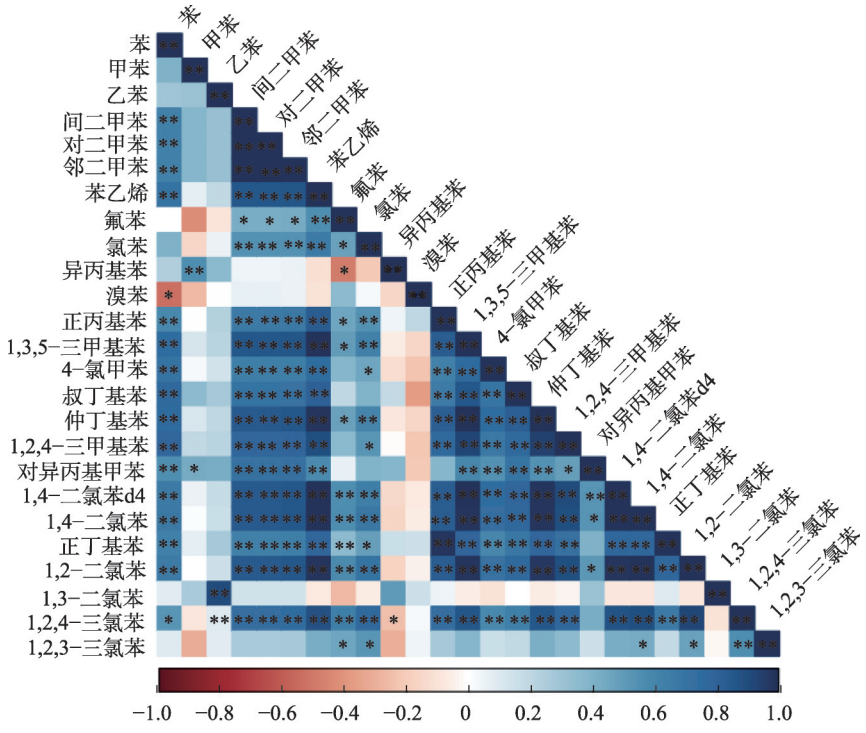
理[22]。苯、甲苯、乙苯、二甲苯和异丙基苯等组分的亨利系数均远大于1.01×10^2Pa/m^3[23]。李炳华等人通过柱实验发现，不同环境条件下，苯系物的挥发速率有所不同，且同种苯系物相比其挥发速率也不一样[24]。因此需要特别注意表层土壤中苯系物的挥发作用，尤其是夏季等高温季节。

由土壤钻孔点位的苯系物空间分布示意图（图3B）可见，油墨车间附近的苯系物

总浓度仍然是最高的，污染高风险区域聚集在厂区的东南部；车间、仓库以及办公区等区域的污染浓度高于厂区西北部的废池处理区等区域。虽然该油墨地块所处的地形以平原为主，但其自西北向东南倾斜，在降雨淋溶和自身重力等因素的共同作用下，部分苯系物向东南部迁移，导致办公和科研等清洁区的深层土壤有较高的苯系物污染。联合土壤采样点和钻孔点位的苯系物空间分布情况可以得出：油墨车间是该油墨地块总苯系物的浓度最高的核心污染区域。

2.2　不同苯系物组分间的相关性分析

相关性分析是推测苯系物来源的重要依据，若不同组分间相关性显著或极显著，则表明物质间一般具有同源关系[25]。该地块土壤苯系物组分含量之间的Pearson相关分析结果图4所示。可以观察到大多数苯系物组分（如苯、间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯、正丙基苯、1,3,5-三甲基苯和4-氯甲苯等）之间呈现显著且较强的正相关关系（P<0.05），表明这些组分之间同源或者是同一种有机溶剂的同系物/副产物。而异丙基苯、溴苯、1,3-二氯苯和以苯为代表的其他组分之间基本呈现负相关的关系，代表这三类物质与苯等物质非同源或者非同一种物质的同系物/副产物。异丙基苯和1,3-二氯苯（R=0.508，P=0.016<0.05）、甲苯（R=0.559，P=0.007<0.05）之间存在较强的正相关关系，同时1,3-二氯苯和乙苯之间又存在极强的正相关关系（R=0.907，P=0.000



注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,
**表示在0.01 水平(双侧)上显著相关。

图4　油墨地块苯系物组分间相关性热图

<0.001），表明异丙基苯和甲苯、1,3-二氯苯、乙苯可能来自同一污染源。

2.3 地块土壤中苯系物组分的主成分分析

土壤中苯系物主要来源于工业排放、交通排放等人类活动，通过主成分分析可以有效判别苯系物组分的污染来源[26]。经KMO检验和Bartlett球度检验，地块土壤中苯系物组分的主成分分析结果（P<0.05），按特征值大于1的原则提取2个主成分，方差累计贡献率达71.9%，说明来自同一污染源的污染物之间一般存在一定的相关性，反映的信息具有一定的重叠[27]。由表3可知，第一主成分（PC1）贡献率为57.7%，在苯、

表3 油墨地块土壤苯系物的主成分分析成分矩阵表

苯系物	因子载荷	
	PC1	PC2
苯	**0.747**	0.380
甲苯	0.160	**0.787**
乙苯	0.265	**0.609**
间二甲苯	**0.900**	0.167
对二甲苯	**0.900**	0.167
邻二甲苯	**0.907**	0.167
苯乙烯	**0.986**	−0.098
氟苯	**0.505**	−0.640
氯苯	**0.672**	−0.298
异丙基苯	−0.034	**0.807**
溴苯	−0.086	−0.328
正丙基苯	**0.844**	−0.072
1,3,5−三甲基苯	**0.987**	−0.032
4−氯甲苯	**0.767**	−0.013
叔丁基苯	**0.833**	0.270
仲丁基苯	**0.980**	−0.048
1,2,4−三甲基苯	**0.913**	0.036
4−异丙基甲苯	**0.643**	0.487
1,4−二氯苯−d4	**0.978**	−0.127
1,4−二氯苯	**0.980**	−0.151
正丁基苯	**0.805**	0.045
1,2−二氯苯	**0.977**	−0.174
1,3−二氯苯	0.015	**0.649**
1,2,4−三氯苯	**0.879**	−0.298
1,2,3−三氯苯	0.405	−0.412
方差贡献率/%	57.663	14.234
累积方差贡献率/%	57.663	71.898

间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯、氟苯、氯苯、正丙基苯、1,3,5-三甲基苯、4-氯甲苯、叔丁基苯、仲丁基苯、1,2,4-三甲基苯、4-异丙基甲苯、1,4-二氯苯-d4 等 19 种组分的含量上载荷较高，主要反映了这 19 种组分的富集信息。这些组分两两之间存在极显著相关，分析判断出 PC1 中 19 种组分可能来源于同一污染源，该地块油墨车间含苯等成分的有机溶剂使用过程中，副产物的产生是该成分的主要来源，因此 PC1 代表了该工厂油墨车间工作时无组织排放的含苯污染物。第二主成分（PC2）贡献率为 14.2%，其中甲苯、乙苯、异丙基苯和 1,3-二氯苯有较高的载荷，主要反映了这 4 种组分的富集信息。由于厂区大量使用的天那水、异丙基苯等有机溶剂，其主要成分为甲苯、醋酸丁酯、环己酮及异丙基苯等物质，因此 PC2 代表了该工厂主要使用的含苯有机原料和溶剂。油墨地块土壤苯系物主成分载荷分布如图 5 所示，不同苯系物组分间的距离也反映了组分含量间的相关性 [28]。苯和间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯、氟苯、氯苯、正丙基苯等组分距离较近；甲苯和乙苯、异丙基苯、1,3-二氯苯距离较近，均表现出较强的相关性。与前述相关性分析的结果一致，苯和异丙基苯这两大类各自子组分之间具有一定的同源性，而两类之间异源性显著。

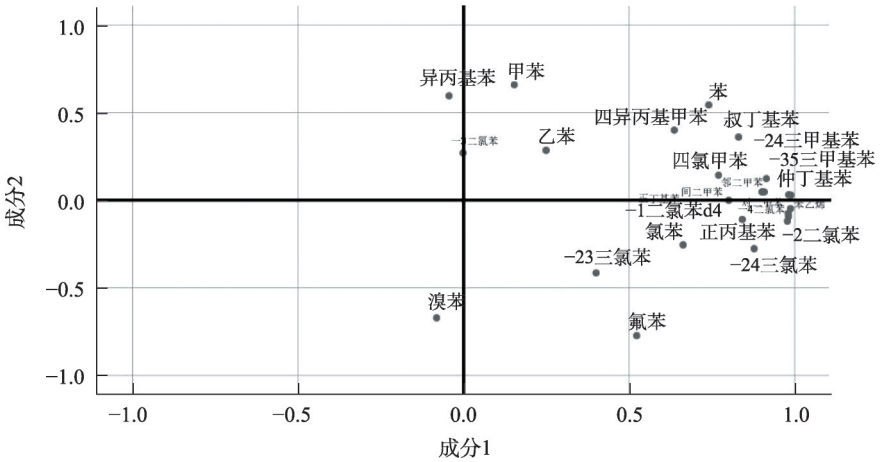


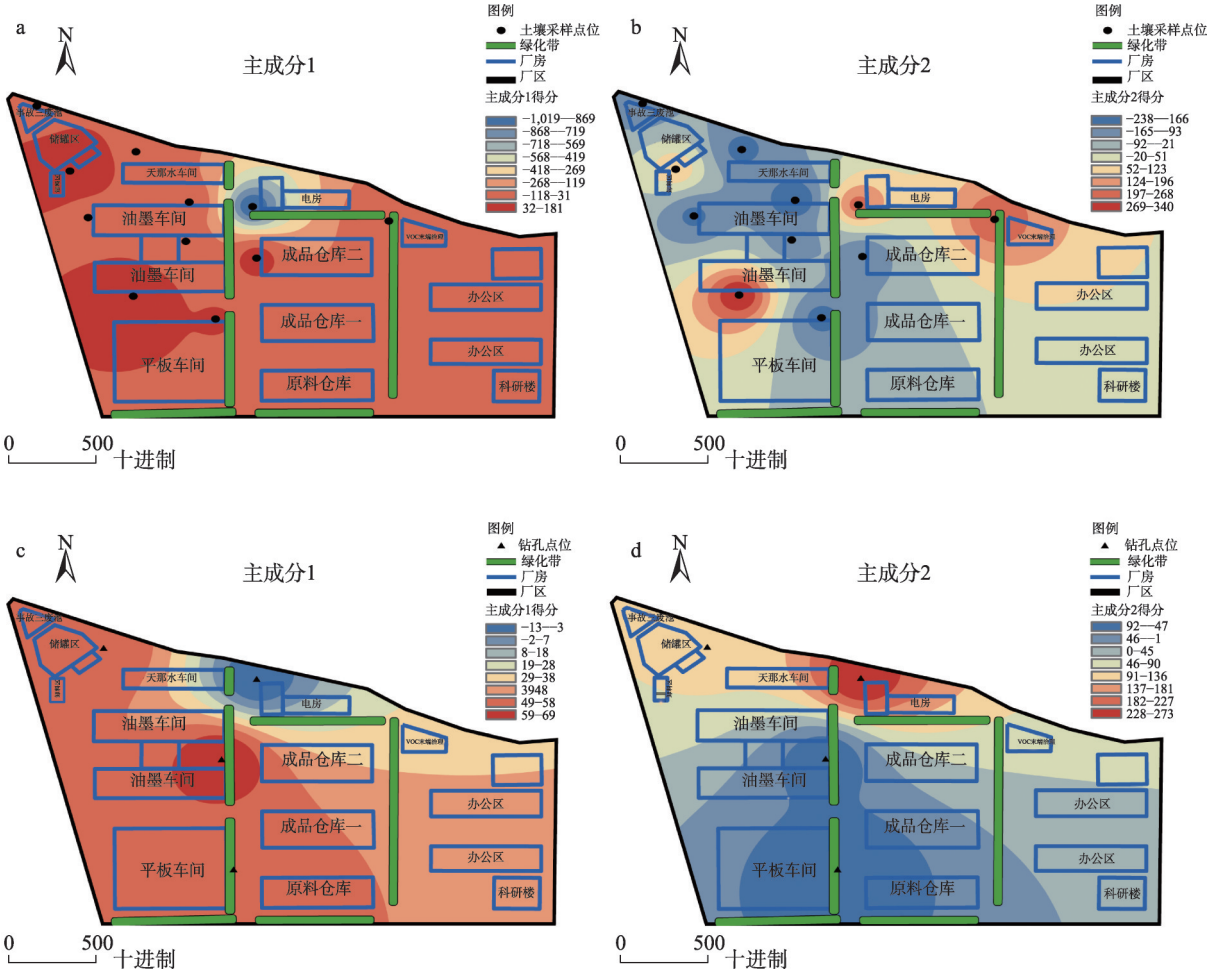
图 5　油墨地块土壤苯系物主成分载荷图

2.4　地块土壤主成分空间分布情况

该油墨地块主要分为车间工作区、仓库存放区、污染治理区和办公区，地形呈现西北高东南低的态势。如图 6A 和 6C 所示，PC1 在空间上差异不太显著，高值区主要分布在油墨车间区、储罐区和卸料区，地块北部出现部分低值区。这一分布特征可能与油墨车间苯系物的无组织排放密切相关，同时受地块西北高东南低的地形影响，以及冬季中山市主导风向为偏北风 [29]，在大气沉降的作用下，对周边特别是下风向区域土壤苯系物累积，可能造成一定的影响。由此可以得出：PC1 高值区主要为油墨车间无

组织排放的复杂苯系物组分在土壤中沉积形成的区域。

由图6B和6D可见，PC2在空间上差异较显著，高值区主要分布在挥发性有机物（VOCs）末端治理区、天那水车间和油墨车间，低值区则位于仓库存放区和办公区。PC2主要包括甲苯、乙苯、异丙基苯和1,3-二氯苯，天那水和异丙基苯主要成分为甲苯、醋酸丁酯、环己酮和异丙基苯等，其余组分极大概率为VOCs末端治理逸散的相对单一苯系物组分。可以推测天那水和异丙基苯等有机溶剂存放不当，导致出现苯系物的PC2高值区。



注：图6A和6B为土壤表层采样点位苯系物主成分得分的空间分布图，图6C和6D图为钻孔点位苯系物主成分得分的空间分布图

图6　油墨地块苯系物主成分得分的空间分布

2.5　健康风险评估

人群暴露于土壤苯系物的非致癌健康风险（HI）和致癌健康风险（CR）如图7、表4和表5所示。人群经口摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒物中苯系物的总非致癌健康风险均值在5.34E-09~1.74E-05之间，其中甲苯的HI最高，其次是1,2,4-三甲基苯和苯，

异丙基苯最低；甲苯经口摄入和经皮肤吸收的非致癌健康风险均值（HQ）最高，分别为2.46E-06和1.49E-05，HI和HQ值均小于1，暴露于苯、乙苯和1,4-二氯苯等3种致癌苯系物的终身致癌健康风险均值在2.49E-09~8.78E-09之间，CR值均小于10^{-6}，表明人群经上述3种途径暴露时，土壤中苯系物的非致癌健康风险和终身致癌健康风险均处于可接受水平，但需要注意的是，本研究仅对地块土壤苯系物进行了采样分析，且采样的时间为秋冬季，而气温是影响苯系物迁移转化的重要因素，高温条件下土壤中的苯系物极易挥发至大气中[30]，因此仍需关注大气介质中苯系物的污染及暴露风险。

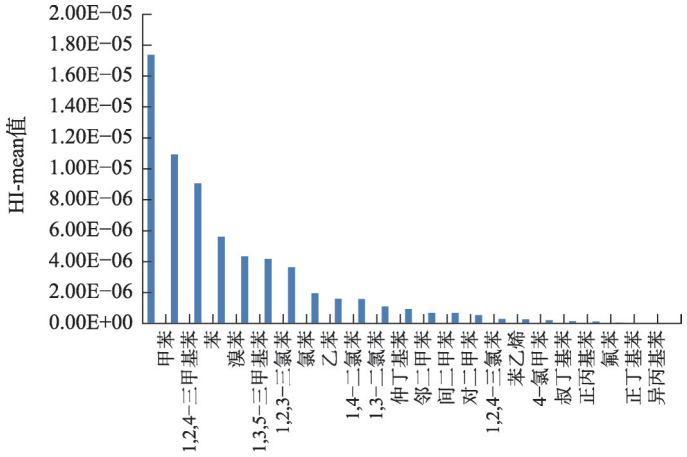


图7　苯系物总非致癌风险排序图

2.6　生态环境损害价值量化

根据土壤环境介质损害确认结果，油墨地块土壤中苯系物未超过GB36600—2018二类用地筛选值。依据 GB/T 39792.1—2020，通过“土壤污染程度—损害系数”模型计算，该地块土壤生态损害价值低于修复阈值，表明未对生态环境造成实质性损害，无需开展针对性修复工作。

2.7　不确定性分析

苯系物中不同暴露途径的非致癌风险贡献结果如图8所示：氟苯的非致癌风险全部来源于吸入途径，贡献率为100.00%；苯、甲苯、乙苯等绝大多数苯系物的非致癌风险主要来源皮肤接触，经口摄入的贡献率均低于20%，吸入途径的贡献率极小；除氟苯外，只有1,2,4-三氯苯的吸入途径贡献率最高，但占比仅为2.76%。

苯系物不同暴露途径的致癌风险贡献结果表明，苯、乙苯和1,4-二氯苯的致癌风险几乎全部来自皮肤接触，贡献率分别为99.40%、99.43%和99.43%，经口摄入和吸入途径的贡献基本可以忽略。本研究中，苯系物的致癌风险几乎全部来自皮肤接触土壤的途径，非致癌风险来自皮肤接触土壤途径的贡献率也高达80.00%这可能与苯系物亲脂

表 4　人群成人期暴露于苯系物的非致癌健康风险（HQ）

序号	污染物	经口摄入土壤途径			皮肤接触土壤途径			吸入土壤颗粒物			总非致癌风险		
		HQ_{ois}-mean	HQ_{ois}-P50	HQ_{ois}-P90	HQ_{dcs}-mean	HQ_{dcs}-P50	HQ_{dcs}-P90	HQ_{pis}-mean	HQ_{pis}-P50	HQ_{pis}-P90	HI-mean	HI-P50	HI-P90
1	苯	1.28E-06	2.77E-12	4.86E-06	7.77E-06	1.68E-11	2.94E-05	6.85E-09	1.48E-14	2.05E-08	9.06E-06	1.95E-11	3.43E-05
2	甲苯	2.46E-06	1.52E-06	4.40E-06	1.49E-05	9.21E-06	2.66E-05	1.58E-09	9.74E-10	2.23E-09	1.74E-05	1.07E-05	3.10E-05
3	乙苯	2.75E-07	1.95E-07	5.20E-07	1.66E-06	1.18E-06	3.14E-06	1.10E-09	7.81E-10	1.65E-09	1.94E-06	1.38E-06	3.67E-06
4	间二甲苯	9.66E-08	3.71E-08	2.45E-07	5.84E-07	2.24E-07	1.48E-06	7.73E-09	2.97E-09	1.56E-08	6.88E-07	2.64E-07	1.74E-06
5	对二甲苯	9.60E-08	3.69E-08	2.44E-07	5.80E-07	2.23E-07	1.47E-06	7.68E-09	2.95E-09	1.55E-08	6.84E-07	2.63E-07	1.73E-06
6	邻二甲苯	1.31E-07	6.23E-08	3.69E-07	7.89E-07	3.77E-07	2.23E-06	1.04E-08	4.98E-09	2.34E-08	9.30E-07	4.44E-07	2.62E-06
7	苯乙烯	4.21E-08	1.60E-08	1.30E-07	2.54E-07	9.68E-08	7.87E-07	3.36E-10	1.28E-10	8.26E-10	2.97E-07	1.13E-07	9.18E-07
8	氟苯	—	—	—	—	—	—	1.18E-07	1.48E-14	2.97E-07	1.18E-07	1.48E-14	2.97E-07
9	异丙基苯	2.05E-09	2.13E-10	7.55E-09	1.24E-08	1.29E-09	4.56E-08	2.05E-11	2.13E-12	5.98E-11	1.45E-08	1.50E-09	5.32E-08
10	溴苯	7.94E-07	4.01E-07	2.41E-06	4.80E-06	2.43E-06	1.46E-05	4.23E-09	2.14E-09	1.02E-08	5.60E-06	2.83E-06	1.70E-05
11	正丙基苯	1.93E-08	1.11E-13	8.11E-09	1.17E-07	6.70E-13	4.90E-08	7.73E-11	4.43E-16	2.57E-11	1.36E-07	7.81E-13	5.71E-08
12	氯苯	5.13E-07	1.48E-07	7.47E-07	3.10E-06	8.97E-07	4.51E-06	8.20E-09	2.37E-09	9.47E-09	3.62E-06	1.05E-06	5.27E-06
13	1,3,5-三甲基苯	6.15E-07	1.32E-07	2.28E-06	3.72E-06	7.99E-07	1.38E-05	4.10E-09	8.80E-10	1.21E-08	4.34E-06	9.32E-07	1.61E-05
14	4-氯甲苯	3.77E-08	4.79E-09	1.31E-07	2.28E-07	2.89E-08	7.95E-07	—	—	—	2.66E-07	3.37E-08	9.26E-07
15	叔丁基苯	2.72E-08	4.51E-09	1.04E-07	1.65E-07	2.73E-08	6.29E-07	—	—	—	1.92E-07	3.18E-08	7.33E-07
16	仲丁基苯	1.56E-07	1.37E-08	6.12E-07	9.45E-07	8.28E-08	3.70E-06	—	—	—	1.10E-06	9.65E-08	4.31E-06
17	1,2,4-三甲基苯	1.55E-06	1.44E-07	6.09E-06	9.37E-06	8.73E-07	3.68E-05	1.03E-08	9.63E-10	3.22E-08	1.09E-05	1.02E-06	4.30E-05
18	1,3-二氯苯	2.21E-07	7.90E-08	9.69E-07	1.34E-06	4.78E-07	5.86E-06	—	—	—	1.56E-06	5.57E-07	6.83E-06
19	4-异丙基甲苯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	1,4-二氯苯-d4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	1,4-二氯苯	2.26E-07	9.12E-09	1.29E-07	1.37E-06	5.52E-08	7.78E-07	7.92E-10	3.19E-11	3.57E-10	1.60E-06	6.43E-08	9.07E-07
22	正丁基苯	6.38E-09	4.48E-09	1.42E-08	3.86E-08	2.71E-08	8.56E-08	—	—	—	4.50E-08	3.16E-08	9.97E-08
23	1,2-二氯苯	7.44E-10	4.21E-10	1.71E-09	4.50E-09	2.55E-09	1.03E-08	1.04E-10	5.89E-11	1.90E-10	5.34E-09	3.03E-09	1.22E-08
24	1,2,4-三氯苯	7.19E-08	4.67E-08	1.83E-07	4.35E-07	2.82E-07	1.11E-06	1.44E-08	9.34E-09	2.90E-08	5.21E-07	3.39E-07	1.32E-06
25	1,2,3-三氯苯	5.94E-07	4.66E-07	1.67E-06	3.59E-06	2.82E-06	1.01E-05	—	—	—	4.18E-06	3.28E-06	1.18E-05

注“—”：缺少参数，无法获得计算值。

表 5 人群成人期暴露于苯系物的致癌健康风险(R)

序号	污染物	致癌等级	经口摄入土壤途径			皮肤接触土壤途径			吸入土壤颗粒物			总致癌风险		
			R_{ois}-mean	R_{ois}-P50	R_{ois}-P90	R_{dcs}-mean	R_{dcs}-P50	R_{dcs}-P90	R_{pis}-mean	R_{pis}-P50	R_{pis}-P90	CR-mean	CR-P50	CR-P90
1	苯	1	4.65E-11	1.00E-16	1.76E-10	8.17E-09	1.76E-14	3.09E-08	2.64E-12	5.69E-18	9.97E-12	8.22E-09	1.77E-14	3.11E-08
2	乙苯	2B	4.97E-11	3.53E-11	9.41E-11	8.73E-09	6.21E-09	1.65E-08	4.52E-16	3.21E-16	8.55E-16	8.78E-09	6.24E-09	1.66E-08
3	苯乙烯	2B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1,4-二氯苯	2B	1.41E-11	5.67E-13	8.00E-12	2.47E-09	9.97E-11	1.41E-09	1.15E-15	4.62E-17	6.51E-16	2.49E-09	1.00E-10	1.41E-09
5	异丙基苯	2B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注 “—”:缺少参数,无法获得计算值。

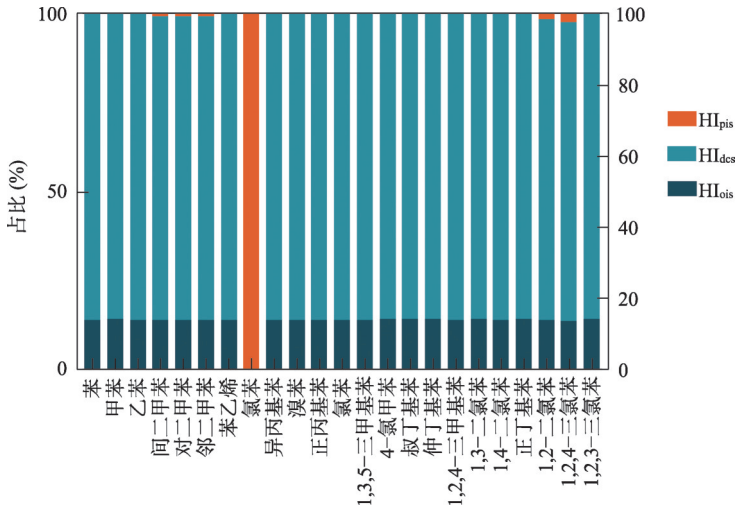


图8 苯系物不同暴露途径的总非致癌风险贡献率分布图

性的特点有关[31]，因此需重点关注皮肤接触土壤的暴露风险。

3 结论

（1）油墨涂料地块土壤中检出的25种苯系物，其含量均未超过国家标准限值。不同苯系物组分的土壤垂直分布模式存在差异，其中甲苯为该地块的特征苯系物污染物；研究区总苯系物浓度最高的区域为油墨车间。

（2）通过相关性分析和主成分分析推断，苯、间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯等19种组分相关性高且来源相似，为PC1，代表了该地块油墨车间工作时排放的含苯污染物；PC2反映了甲苯、乙苯、异丙基苯和1,3-二氯苯的富集特征，代表了该油墨地块主要使用的含苯有机原料和溶剂。空间分布上，PC1高值区位于油墨车间、储罐区和卸料区，PC2高值区位于VOCs末端治理区、溶剂调配车间和油墨车间。

（3）人群通过经口摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒物三种途径暴露于土壤中苯系物时，其非致癌健康风险和终身致癌健康风险均处于可接受水平，该地块无需开展针对性风险管控或修复工作；其中，皮肤接触是土壤苯系物主要的暴露途径。

参考文献

1 Zhang J, Jiang L, Liu Z, et al. A bibliometric and visual analysis of indoor occupation environmental health risks: Development, hotspots and trend directions[J]. J Clean Prod, 2021, 300: 126824.

2 Lyu X, Guo H, Wang Y, et al. Hazardous volatile organic compounds in ambient air of China[J]. Chemosphere, 2020, 246: 125731.

3 Zheng H, Kong S, Xing X, et al. Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and

gas station in northwest China for 1 year[J]. Atmos Chem Phys, 2018, 18(7): 4567-4595.

4 Durmusoglu E, Taspinar F, Karademir A. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment[J]. J Hazard Mater, 2010, 176(1): 870-877.

5 宋鑫, 袁斌, 王思行, 等. 珠三角典型工业区挥发性有机物（VOCs）组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性[J]. 环境科学: 2023, 44(3): 1336-1345.

6 Liu R, Ma S, Chen D, et al. Human exposure to BTEX emitted from a typical e-waste recycling industrial park: External and internal exposure levels, sources, and probabilistic risk implications[J]. J Hazard Mater, 2022, 437: 129343.

7 刘佳. 苯系物在土壤中垂向迁移特征研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.

8 Iavorivska L, Boyer E W, DeWalle D R. Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation [J]. Atmos Environ, 2016, 146: 153-163.

9 Na K, Kim Y P, Moon K, et al. Concentrations of volatile organic compounds in an industrial area of Korea[J]. Atmos Environ, 2001, 35(15): 2747-2756.

10 Tohid L, Sabeti Z, Sarbakhsh P, et al. Spatiotemporal variation, ozone formation potential and health risk assessment of ambient air VOCs in an industrialized city in Iran[J]. Atmos Pollut Res, 2019, 10 (2): 556-563.

11 於方, 张志宏, 孙倩, 等. 生态环境损害鉴定评估技术方法体系的构建[J]. 环境保护, 2020, 48 (24): 16-21.

12 HJ 25.3—2019 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.

13 郭观林, 王世杰, 施烈焰, 等. 某废弃化工场地VOC/SVOC污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学, 2010, 31(02): 397-402.

14 Chen D J, Liu R R, Lin Q H, et al. Volatile organic compounds in an e-waste dismantling region: From spatial-seasonal variation to human health impact[J]. Chemosphere, 2021, 275.

15 EPA U. US EPA’s Regional Screening Levels (RSL)[EB/OL]. https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables.

16 EPA U. Integrated risk information system (IRIS)[EB/OL]. https://www.epa.gov/iris.

17 彭进进, 李琳, 郑川, 等. 某染料化工厂地块苯系物分布特征分析[J]. 环境工程, 2021, 39(04): 187-194.

18 刘芬芬, 孙小华, 丁力, 等. 搬迁企业原址场地土壤挥发性有机物污染特征——以北京某搬迁化工厂为例[J]. 城市地质, 2021, 16(01): 18-24.

19 李灿, 方楠. 苯系物分布特征思考——上海某化工仓储场地为例[J]. 上海节能, 2022(07):821-826.

20 Hawthorne S B, Miller D J. Evidence for Very Tight Sequestration of BTEX Compounds in Manufactured Gas Plant Soils Based on Selective Supercritical Fluid Extraction and Soil/Water Partitioning[J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(16): 3587-3594.

21 Miri M, Rostami Aghdam Shendi M, Ghaffari H R, et al. Investigation of outdoor BTEX: Concentration, variations, sources, spatial distribution, and risk assessment[J]. Chemosphere, 2016, 163: 601-609.

22 金相灿. 有机化合物污染化学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

23 李炳华, 陈鸿汉, 何江涛, 等. 长江三角洲某地区浅层地下水单环芳烃污染特征及其原因分析[J]. 中国地质, 2006(05): 1124-1130.

24 童玲, 郑西来, 李梅, 等. 不同下垫面苯系物的挥发行为研究[J]. 环境科学, 2008(07): 2058-2062.

25 Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences Hillsdale New Jersey L Erlbaum[J]. 1988.

26 Mojarrad H, Fouladi Fard R, Rezaali M, et al. Spatial trends, health risk assessment and ozone formation potential linked to BTEX[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(10): 2836-2857.

27 Lan C H, Huang Y L, Ho S H, et al. Volatile organic compound identification and characterization by PCA and mapping at a high-technology science park[J]. Environ Pollut, 2014, 193: 156-164.

28 Yang J J, Liu C C, Chen W H, et al. Assessing the altitude effect on distributions of volatile organic compounds from different sources by principal component analysis[J]. Environ Sci-Proc Imp, 2013, 15(5): 972-985.

29 蔡乐, 林晓剑, 劳钊明. 中山市空气质量特征与气象影响因子分析[J]. 广东化工, 2011, 38(07): 110-111.

30 Liu C C, Chen W H, Yuan C S, et al. Multivariate analysis of effects of diurnal temperature and seasonal humidity variations by tropical savanna climate on the emissions of anthropogenic volatile organic compounds[J]. Sci Total Environ, 2014, 470: 311-323.

31 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.

Characteristics of Benzene Compounds Pollution and Health Risk Assessment in Soils of Ink and Paint Sites

QIAN Yan, ZHENG Ling, GUO Lingchuan, LÜ Zhanlu*

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Key Laboratory of Chemical Ecological Effect and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Benzene homologues comprise a class of benzene derivatives, including benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene. They are widely used in industrial applications such as paint production, printing, petrochemical manufacturing, and ink and coating industries, owing to their high volatility and solubility. Current research on benzene homologues, both domestically and internationally, has largely focused on sectors such as petrochemicals and furniture manufacturing, while studies examining their presence in soils at ink-related sites remain scarce. This study investigates a former ink and coating site in Guangdong Province. A total of 22 soil samples were collected from depths of 0-20 cm, 100-120 cm, and 200-250 cm in areas including the ink workshop, diesel tank zone, and storage tank area. The samples were analyzed for 25 types of benzene homologues, including such as benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene, to systematically assess their pollution characteristics, spatial distribution, sources, and potential health risks. Results showed that none of the 25 detected benzene homologues exceeded the relevant national standards. Toluene exhibited the highest total concentration, reaching 54.97 μg/kg (interquartile range: 22.48-86.22 μg/kg), identifying it as the characteristic pollutant in the site's soil. The ink workshop displayed the highest overall concentration of benzene homologues. Correlation analysis and principal component analysis (PCA) revealed two dominant components: PC1 included 19 components, such as benzene and 1,3,5-trimethylbenzene, exhibiting strong intercorrelations and common sources, primarily attributed to fugitive emissions during ink production. PC2 comprised toluene, ethylbenzene, isopropylbenzene, and 1,3-dichlorobenzene, likely originating from benzene-containing raw materials and solvents used in the production process. Health risk assessment indicated that both non-carcinogenic and lifetime carcinogenic risks resulting from three exposure pathways, including oral ingestion, dermal contact, and inhalation of soil particles, were within acceptable ranges. Therefore, no targeted risk control or remediation is currently required for this site.

Keywords: Ink coating block; Soil; Benzene series; IDW; PCA; Health risk assessment