



Analysis of Pollution Characteristics and Health Risk of Phenolic Pollutants in the Surface Soil of an Industrial Park in Ningxia, China

Yue Sun¹, Zengyu Han², Wenjuan Jiang³, Hongbin Cao^{1,*}

¹ Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² Ningxia Ecological and Environmental Monitoring Center, Ningxia 750000, China

³ Shizuishan Ecological and Environmental Monitoring Station, Ningxia 753000

*Corresponding author. Email: caohongbin@bnu.edu.cn

ABSTRACT

In this article, surface soil samples from an industrial park in Ningxia were collected to determine the concentrations of six phenolic pollutants. Single factor pollution index and Nemerow integrated pollution index methods were used to evaluate the degree of soil phenolic pollution, the spatial distribution characteristics of phenolic pollutants was analyzed based on GIS spatial interpolation. The health risk of phenolic pollutants was evaluated by carcinogenic risk and hazard quotient. The results show that the average and maximum concentration values of six phenolic pollutants in the industry park were all far lower than corresponding soil pollution risk screening values in China (GB36600-2018), and the pollution levels of six phenolic pollutants were all clean. The carcinogenic risk of 2,4-dichlorophenol and pentachlorophenol was far less than 10^{-6} , implying the carcinogenic risk was acceptable. The exposure level of phenol, 2,4-dichlorophenol and 2,4,6-trichlorophenol was too low to cause noncarcinogenic risk. Phenolics in the soil affect human health mainly via oral intake and dermal exposure pathway.

Keywords(Bold): Industrial park, phenolic pollutants, degree of pollution, spatial distribution, health risk assessment

宁夏某工业园区表层土壤中酚类污染物的 污染特征及健康风险分析

孙越¹, 韩增玉², 姜文娟³, 曹红斌^{1,*}

1. 北京师范大学地理科学学部

2. 宁夏回族自治区生态环境监测中心, 宁夏 750000

3. 石嘴山市生态环境监测站, 宁夏 753000;

*通讯作者: 曹红斌 E-mail: caohongbin@bnu.edu.cn

摘要

本文采集了宁夏某工业园区内的表层土壤样品, 检测了 6 种酚类污染物。运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法评估了土壤酚类污染程度, 基于 GIS 空间插值分析了酚类污染物的空间分布特征; 采用致癌风险及危害商值对酚类污染物的健康风险进行评价。结果显示: 园区内 6 种酚类污染物的浓度平均值和最大值均远低于我国建设用地土壤污染风险筛选值 (GB36600-2018), 污染程度均为清洁水平; 2, 4-二氯酚和五氯酚具有致癌毒性, 但致癌风险均远远小于 10^{-6} 的可接受风险水平; 苯酚、2, 4-二氯酚、2, 4, 6-三氯酚和五氯酚具有非致癌毒性, 但暴露水平低, 不存在非致癌风险。土壤中的酚类物质主要通过经口摄入和皮肤接触途径影响人类健康。

关键词: 工业园区, 酚类污染物, 污染程度, 空间分布, 健康风险评价

1. 引言

随着全球经济的快速发展, 越来越多的酚类化合物被广泛应用于各行各业。在酚类的合成、提取和使用过程中酚类污染物会被释放到环境中, 尤其是焦化、医药、纺织、煤气生产、石油、冶金等行业, 酚类污染物会被大量排放^[1]。酚类污染物作为高毒性的有机污染物, 对人体健康既有致癌性的危害, 也有非致癌性的损伤, 其对人类的生殖功能、内分泌系统以及神经系统的危害格外值得警惕^[2]。同时, 释放到环境中的酚类化合物对于其他动植物的正常生理、生命活动均会产生不利影响, 尤其是对于水产动物 (以鱼类为代表) 和粮食作物, 会导致农业资源的严重衰退和农业生产的大规模减产^[3-5]。

酚类化合物具有疏水性、蒸汽压低, 辛醇-水分配系数高等特性, 较易吸附在水体底部的沉积物中, 从而长时间地存留在水环境^[6]。因此, 在以往对于酚类污染物的研究中, 对于水体和沉积物介质中的酚类污染物研究较多^[7-8]。近年来, 我国对于土壤中酚类化合物的研究发展较快, 尤其是关于高效检测方法的探讨^[9]。秦冲等^[10]建立了微波萃取-衍生化-气相色谱质谱联用法, 可同时测定土壤中 14 种酚类化合物。对衍生化过程进行的优化, 解决了衍生化过程复杂、耗时长等相应问题。时磊等^[11]采用索氏提取-气相色谱

谱法测定高含水量土壤中 21 种酚类化合物, 得到了高精度、高稳定性的数据。然而, 对于酚类化合物的土壤污染特征和污染评价研究相对较少。陈洁霞等^[12]对长江沿岸某化工园区土壤和底泥中酚类化合物进行研究, 得到土壤中 11 类酚类污染物总含量范围为 10.16 -30.66 mg/kg, 平均含量为 18.26 mg/kg, 其中最主要的酚类污染物为 4-硝基苯酚和 4-氯-3-甲酚。钟艳霞等^[13]对宁东能源化工基地核心区表层土壤中的 6 种优控酚类污染物进行研究, 发现 2, 4-二氯酚和 2, 4, 6-三氯酚处于清洁水平, 五氯酚在部分区域为重度污染。表层土壤中的酚类污染物会长期存在, 并受风力作用以及纵向迁移作用影响而扩大其分布范围, 进一步影响到地下水。因此, 对于表层酚类污染物的防治也是污染场地有机物污染治理的重要一环。

西北地区生态环境脆弱, 且存在较多的高污染、高耗能的企业。因此, 本文选取宁夏某工业园区中的典型行业和重要企业, 采集表层土壤样品, 测定 6 种酚类化合物。通过 GIS 空间插值对酚类化合物的空间分布进行了分析; 采用内梅罗综合污染指数法和单因子评价法对园区表层土壤酚类化合物的污染程度进行评价; 参照《建设用地土壤污染风险评估技术导

则》(HJ 25.3—2019)^[14],对土壤酚类化合物的健康风险进行评价。

2. 材料与方法

2.1 采样及化学分析

工业园区位于我国宁夏回族自治区,属温带大陆性气候,土壤主要为灰漠土、砾质土及砂质土。园区内企业主要涉及煤化工、化学品制造、化学农药制造、冶金等多个行业。参考国家标准《土壤质量 土壤采样技术指南》(GB/T 36197-2018)^[15],于2020年8月13日至9月17日在11个代表性企业厂区内采集表层土壤样本65个。在每个采样点挖出约20cm深的剖面,自上至下将土壤刮取混匀后装入40mL配聚氯乙烯瓶盖的螺纹口棕色玻璃瓶中。将采集好的样品在室内阴凉处自然风干,研磨后过100目筛(0.149mm孔径),<4℃避光保存备用。

本研究采用气相色谱质谱联用仪GC-MS(美国安捷伦公司,型号8860-5799B)测定土壤中2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚、五氯酚、苯酚、邻-甲酚和4-硝基苯酚6种优控酚类含量,处理方法及检测方法参照《土壤和沉积物 酚类化合物的测定 气相色谱法》(HJ 703-2014)执行。2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚、五氯酚、苯酚、邻-甲酚、4-硝基苯酚的检出限分别为0.014,0.019,0.024,0.017,0.019和0.013 mg/kg。加标回收率分别为92%,98.2%,88.9%,102%,94.2%和72.1%,平行样相对偏差为未检出,1.0%,18.2%,未检出,0.0%,9.1%,结果符合质控要求。

2.2 统计分析与空间分析

地统计方法是描述土壤污染物浓度空间分布的常用手段,本文以样点实测浓度作为输入,选择普通克里金插值法^[16],采用球面模型拟合半变异函数,使用软件ArcGIS version 10.2完成土壤重金属污染的空间分析及制图。

本文的统计分析使用软件Microsoft Excel 2013。

2.3 污染评价

在众多的污染评价方法中,单因子污染指数法不仅操作简单,而且能直观地反映土壤中每一种污染物的超标情况。同时,为综合反映工业园区内的污染情况,选择内梅罗综合污染指数法进行分析评价。计算公式如下^[17]:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P_i = \sqrt{\frac{(P_i)_{\text{ave}}^2 + (P_i)_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_i 为土壤中酚类污染物*i*的单因子污染指数; C_i 为酚类污染物*i*的实测含量,mg/kg; S_i 为酚类污染物*i*的评价标准值,mg/kg; $P_{\text{综}}$ 为土壤中酚类污染物的内梅罗综合污染指数; ave 和 max 分别代表平均值和最大值。本研究采用《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)^[18]中第二类用地的风险筛选值作为酚类污染物的评价标准值。污染程度划分标准为: $P_{\text{综}} \leq 1$ 为清洁, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ 为中度污染, $P_{\text{综}} > 3$ 为重度污染; $P_i \leq 1$ 为清洁, $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i > 3$ 为重度污染。

2.4 健康风险评价

本文按照建设用地第二类用地类型进行健康风险评估,主要考虑成人的暴露来评估酚类污染物的健康危害。暴露途径主要考虑经口摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒物和吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物4种途径,分别计算单个酚类物质的致癌风险(cancer risk, CR)和危害商(hazard quotient, HQ),最后计算出总致癌风险水平和总危害商。《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)^[14]中规定:单一污染物的可接受致癌风险水平为 10^{-6} ,单一污染物的可接受危害商为1。相关计算公式如下:

经口摄入土壤途径:

$$CR_{\text{ois}} = \frac{\text{OISR}_a \times \text{ED}_a \times \text{EF}_a \times \text{ABS}_o \times \text{SF}_o \times \text{C}}{\text{BW}_a \times \text{AT}_{\text{ca}}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$HQ_{\text{ois}} = \frac{\text{OISR}_a \times \text{ED}_a \times \text{EF}_a \times \text{ABS}_o \times \text{C}}{\text{BW}_a \times \text{AT}_{\text{nc}} \times \text{RfD}_o \times \text{SAF}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

皮肤接触土壤途径:

$$CR_{dcs} = \frac{SAE_a \times SSAR_a \times E_v \times ED_a \times EF_a \times ABS_d \times SF_o \times C}{BW_a \times AT_{ca} \times ABS_{gi}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$HQ_{dcs} = \frac{SAE_a \times SSAR_a \times E_v \times ED_a \times EF_a \times ABS_d \times C}{BW_a \times AT_{nc} \times RfD_o \times ABS_{gi} \times SAF} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$SAE_a = 239 \times H_a^{0.417} \times BW_a^{0.517} \times SER_a \quad (7)$$

吸入土壤颗粒物途径:

$$CR_{pis} = \frac{PM_{10} \times ED_a \times PIAF \times (EFI_a \times fspi + EFO_a \times fspo) \times IUR \times C}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$HQ_{pis} = \frac{PM_{10} \times ED_a \times PIAF \times (EFI_a \times fspi + EFO_a \times fspo) \times C}{AT_{nc} \times RfC \times SAF} \times 10^{-6} \quad (9)$$

吸入室外空气来自于表层土壤途径:

$$CR_{ioiv} = C \times IUR \times VF_{suroa} \times \frac{EFO_a \times ED_a}{AT_{ca}} \quad (10)$$

$$HQ_{ioiv} = \frac{C \times VF_{suroa} \times EFO_a \times ED_a}{RfC \times SAF \times AT_{nc}} \quad (11)$$

总致癌风险:

$$CR_n = CR_{ois} + CR_{dcs} + CR_{pis} + CR_{ioiv} \quad (12)$$

总危害商:

$$HI_n = HQ_{ois} + HQ_{dcs} + HQ_{pis} + HQ_{ioiv} \quad (13)$$

式中: OISR_a 为成人每日摄入土壤量; Ed_a 为成人暴露期; EF_a 为成人暴露频率; ABS_o 为经口摄入吸收因子; AT_{ca} 为致癌效应平均时间; BW_a 为成人体重; AT_{nc} 为非致癌效应平均时间; SSAR_a 为成人皮肤表面土壤粘附系数; ABS_d 皮肤接触吸收效率因子; E_v 为每日皮肤接触事件频率; H_a 为成人平均身高; SER_a 为成人暴露皮肤所占面积比; PM₁₀ 为空气中可吸入颗粒物含量; DAIR_a 为成人每日空气呼吸量; PIAF 为吸入土壤颗粒物在体内滞留比例; f_{spo} 为室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例;

f_{spi} 为室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例;

EFO_a 为成人的室外暴露频率; EFI_a 为成人的室内暴露频率; IUR 为呼吸吸入单位致癌因子; RfC 为呼吸吸入参考浓度; RfD_o 为呼吸吸入参考剂量; SF_o 为经口摄入致癌斜率因子; ABS_{gi} 为消化道吸收效率因子; SAF 为暴露于土壤的参考剂量分配比例; VF_{suroa} 为表层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子。暴露参数及毒性参数的计算及取值参照《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)^[14]。

3. 结果与讨论

3.1 污染特征分析

由于酚类污染物主要为合成有机物,一般不进行土壤背景值调查,所以本文根据我国第二类建设用地标准筛选值,对研究区6种酚类污染物从浓度统计、污染程度及空间分布等方面进行分析。

该工业园区表层土壤6种酚类化合物的平均浓度如表1所示。其中,2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚、五氯酚、苯酚、邻-甲酚、4-硝基苯酚的浓度平均值分别为0.023,0.044,0.230,0.126,0.121,0.189 mg/kg。依照GB 36600—2018^[18]中第二类用地筛选值,2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚三种酚类化合物浓度均未超标,且与标准值存在数量级上的差异。在统计分析的基础上进一步对污染程度进行评估,以上三种酚类化合物的污染程度均为清洁。

国内外均有研究针对不同场地土壤中酚类污染物的浓度水平进行调查。陈洁霞^[19]对南京化工园区的研究发现,表层土壤中五氯酚的浓度为0.001-0.003 mg/kg,4-硝基苯酚的浓度为2.479-9.910 mg/kg,苯酚浓度则随季节的变化而存在较大波动,但都并未超过土壤环境质量标准值(40mg/kg)。尹勇等^[20]在某焦化厂土壤污染的调查中得到挥发酚的浓度范围为1-87 mg/kg。Kumar等^[21]对印度巴格帕特县的混合土地利用带土壤中的11种优先酚类污染物进行了检测,得到总酚平均含量为1.92mg/kg,其中五氯酚为BDL(低于检出限)-2.67mg/kg,苯酚为BDL-0.60 mg/kg,4-硝基苯酚为BDL-2.72 mg/kg,2,4-二氯酚和2,4,6-

三氯酚均低于检出限。Persson 等^[22]对瑞典 5 个伐木场土壤样品中氯酚类物质分析结果显示,部分污染场地土壤中五氯酚(PCP)仍维持较高水平,其中最高

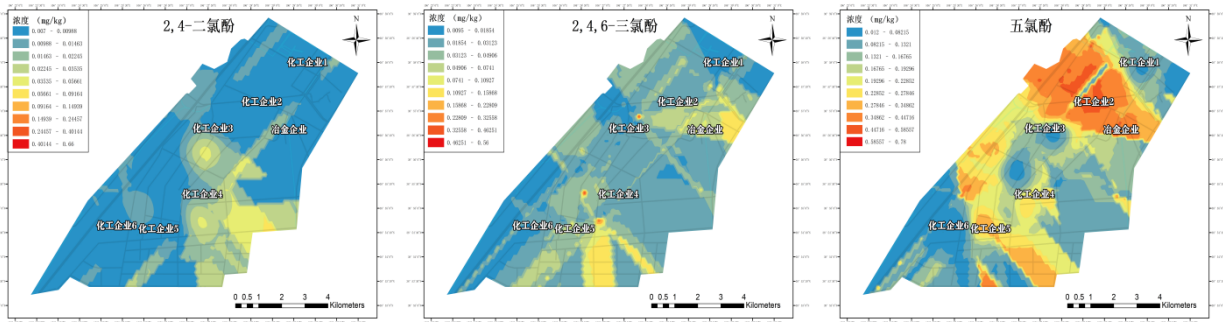
含量可达 950 mg/kg。土地利用类型、利用强度以及利用时长的不同,都会影响土壤中酚类污染水平。

表 1 土壤中 6 种酚类污染物的浓度

酚类污染物种类	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	中值 (mg/kg)	标准偏差 (mg/kg)	风险筛选值 (mg/kg)
2,4-二氯酚	0.66	未检出	0.023	未检出	0.085	843.0
2,4,6-三氯酚	0.56	未检出	0.044	未检出	0.111	137.0
五氯酚	0.78	未检出	0.230	0.18	0.172	2.7
苯酚	1.47	未检出	0.126	未检出	0.266	无此项
邻-甲酚	1.51	未检出	0.121	未检出	0.266	无此项
4-硝基苯酚	2.51	未检出	0.189	0.09	0.362	无此项

该工业园区表层土壤中的 6 项酚类污染物的污染程度虽然属于清洁水平,但存在浓度的空间分异,提示不同人类活动的影响及在土壤中的累积。通过普通克里金插值,得到这 6 种酚类污染物的空间分布见图 1。其中,2,4-二氯酚主要在工业园区的东南部累积,2,4,6-三氯酚主要以两个热点分别向南部和东部

延伸,五氯酚在园区北部的大范围区域和东南部相对浓度较高,苯酚则主要在工业园区的中部和东南部呈现高值,邻-甲酚在工业园区范围内大面积富集,并主要集中在工业园区的中部和东南部,4-硝基苯酚则主要集中分布于工业园区的南部。



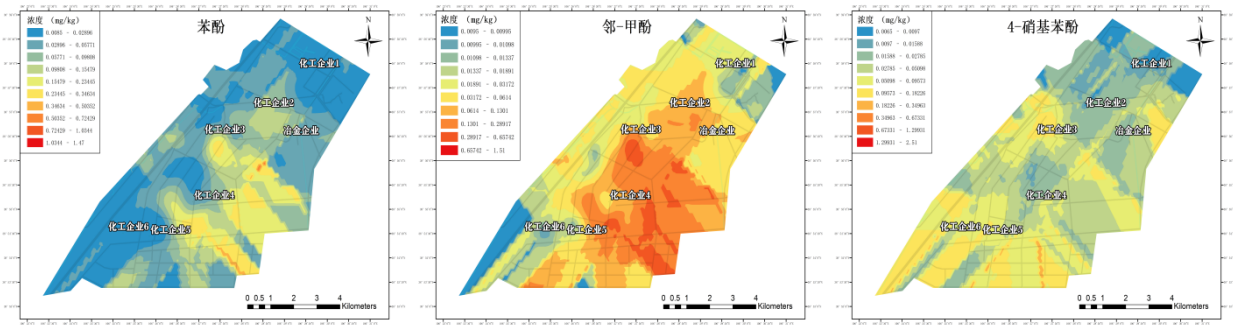


图 1 六种酚类污染物土壤浓度的空间分布图

有研究表明,在发展焦化、煤制烯烃及电石乙炔化工时可能会产生这几种酚类污染物^[23-24]。而在本次研究中,酚类污染物的高值点主要分布在化工企业附近。其中,2,4-二氯酚和苯酚主要分布在以电石、石灰氮、硅铁为主要产品的化工企业3和以合成氨、聚乙烯醇、电石为主要产品的化工企业4附近;2,4,6-

三氯酚、苯酚和4-硝基苯酚则分布在以电石为主要材料的化工企业5附近。而常用作化学农药和消毒剂的五氯酚则主要分布在以多菌灵、敌草隆为主要产品的化工厂2附近。通过对这几个化工企业的主副产品进行验证,初步推断这几种酚类化合物的主要源为化工生产。

表 2 土壤表层 4 种酚类污染物的致癌风险水平和危害商

表 3 三种暴露途径贡献率分析

酚类污染物种类	总致癌风险		总危害商	
	平均值	最大值	平均值	最大值
2, 4-二氯酚	无此项	无此项	2.70E-05	7.82E-04
2, 4, 6-三氯酚	2.94E-10	4.01E-09	1.57E-04	1.99E-03
五氯酚	8.43E-08	2.90E-07	2.56E-04	8.68E-04
苯酚	无此项	无此项	2.34E-06	2.74E-05

同时,化工产品在进行运输的过程中会带出少量 污染物进入环境,造成一定的污染。结合该工业园区

酚类污染物	致癌风险贡献率				非致癌风险贡献率			
	经口摄入	皮肤接触	吸入颗粒	吸入气体	经口摄入	皮肤接触	吸入颗粒	吸入气体
2, 4-二氯酚	无此项	无此项	无此项	无此项	62.32%	37.68%	0.00%	0.00%
2, 4, 6-三氯酚	60.00%	36.28%	0.68%	3.04%	62.32%	37.68%	0.00%	0.00%
五氯酚	39.75%	60.08%	0.02%	0.15%	39.82%	60.18%	0.00%	0.00%
苯酚	无此项	无此项	无此项	无此项	60.05%	36.31%	3.60%	0.04%

的道路交通来看,工业园区的东南部和中部道路都相对集中,而大部分的酚类污染物分布的高值点集中在这两个位置,推测可能为处于这一区域的化工企业3、4、5进行运输时产生的。但是,由于使用率更高的主干道沿线附近酚类污染物浓度较低,推测交通源的贡献较小,为次要源。

由于可检出的酚类物质较少,只能通过空间分布上的重叠性推测来源,无法进一步进行源解析。

3.2 健康风险分析

由于毒性参数所限(HJ 25.3-2019),本文仅评估了土壤中4类酚类污染物的总致癌风险水平和总危害商值(表2)。对于总致癌风险而言,2,4,6-三氯酚和五氯酚均为可接受风险水平,尤其是2,4,6-三氯酚,其最大值与可接受风险水平相差3个数量级。对于非致癌风险而言,4种酚类污染物的四种暴露途径的总危害商值均远远小于1,不存在非致癌风险。

各个暴露途径对于总致癌风险和总非致癌风险的贡献率见表3。三种暴露途径中,吸入土壤颗粒物途径和吸入室外空气来自于表层土壤的途径对于4种酚类污染物的贡献率都是最低的,4种酚类污染物对于人体的影响主要集中在经口摄入和皮肤接触两种途径。除了五氯酚的致癌风险和非致癌风险贡献率主要为皮肤接触途径外,其他酚类化合物的主要贡献途径均为经口摄入。同时,由于本次研究中的样本数量较少,在进行敏感性分析时选取参数值的不同会导致结果差异较大,所以并没有进行敏感性分析。本研究中工业园区表层土壤的酚类污染程度和健康风险均处于较低水平。陈洁霞^[12]等人对于长江沿岸某化工厂的研究,也与本论文研究结果存在一定的相似性。这一点,裴芳等^[25]在对退役炼油厂的研究中推测可能是由于表层土壤的自净能力更强,即在光照更强、氧气更充足的地方,好氧微生物的降解作用和光降解作用更强烈,对于酚类化合物的分解能力更强。同时,工业用地的类型、工厂的分布密集程度以及工厂生产过程中的清洁程度都会影响酚类化合物在表层土壤中的污染程度及分布情况。

4. 结论

(1)在西北某工业园区的表层土壤样品中,6种优先控制的酚类化合物中只有五氯酚、苯酚和4-硝基酚有大范围检出,其余三种污染物大部分样品中未被检出。在空间分布上,几种酚类化合物空间分布特征明显,差异性较大。单因子和内梅罗综合污染指数评价结果显示,依据GB 36600—2018第二类用地风险筛选值,研究区内2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚均为清洁水平。但由于筛选值的推导通常为确保有较大的保险系数而选取较为保守的系数,应进一步研究是否该被管控。

(2)园区土壤中2,4,6-三氯酚和五氯酚的致癌风险远远小于 10^{-6} 的可接受风险水平;土壤中苯酚、2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚均不存在非致癌风险;贡献率分析显示,几种酚类污染物的致癌风险和非致癌风险中,主要贡献的途径为经口摄入和皮肤接触,而两种呼吸途径的贡献率很小。

致谢

本论文得到宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2019BFG02020)的支持。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部 中华人民共和国国家统计局 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[N]. 人民日报,2010-02-10(016). DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2010.003250.
- [2] 赵晗,艾仕云,丁葵英,郝莹,孙军,李建军. 酚类污染物的危害及其检测技术研究进展[J]. 检验检疫学刊,2015,25(06):66-68.
- [3] Lv Y Z, Yao L, Wang L, et al. Bioaccumulation, metabolism, and risk assessment of phenolic endocrine disrupting chemicals in specific tissues of wild fish [J]. Chemosphere, 2019, 226: 607-615
- [4] 李华,张笑,洪卫,庄会栋,于长伟. 酚类有机物污

- 染场地调查和修复方法研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(02): 113-115.
- [5] 陈家长, 孙正中, 瞿建宏, 吴伟, 胡庚东. 长江下游重点江段水质污染及对鱼类的毒性影响[J]. 水生生物学报, 2002(06): 635-640.
- [6] 杨跃志, 张海丽, 李正炎, 杜秀萍, 王志峰, 孟范平. 北部湾沿岸表层沉积物中酚类内分泌干扰物与多环芳烃的污染特征及生态风险评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(06): 87-92.
- [7] 董军, 李向丽, 栾天罡, 邹世春, 林里. 珠江口地区沉积物中酚类物质污染及其生态安全评价[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(05): 113-116.
- [8] 梅琼. 水体中典型酚类污染物高级氧化降解机制及其毒性预测研究[D]. 山东大学, 2021. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2021.000179.
- [9] 周艳玲. 酚类化合物检测方法研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(S1): 70-77.
- [10] 秦冲, 冉卓, 邹佳洁, 赫彦涛, 刘淑红, 刘安. 微波萃取-衍生化-气相色谱质谱联用法测定土壤中酚类化合物[J]. 冶金分析, 2022, 42(03): 59-65.
- [11] 时磊, 吕爱娟, 蔡小虎, 沈小明, 刘娇, 沈加林. 索氏提取-气相色谱法测定高含水率土壤中 21 种酚类化合物[J]. 理化检验(化学分册), 2019, 55(08): 892-897.
- [12] 陈洁霞, 韦恩泽, 鲜啟鸣. 长江沿岸某化工园区土壤、底泥中酚类化合物的污染现状[J]. 色谱, 2014, 32(08): 843-848.
- [13] 钟艳霞, 肖俊丞, 杨帆, 王幼奇, 白一茹, 罗红雪. 宁东能源化工基地核心区表层土壤酚类污染物的污染评价、空间分布及来源解析[J]. 化工环保, 2021, 41(01): 112-119.
- [14] 环境保护部科技标准司. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2019 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 36197-2018 土壤质量 土壤采样技术指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- [16] Schaefer K, Einax J W. Source apportionment and geostatistics: An outstanding combination for describing metals distribution in soil [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2016, 44(7): 877-884
- [17] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. 环境科学, 1979(04): 67-71.
- [18] 生态环境部土壤环境管理司, 生态环境部科技标准司. 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]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [19] 陈洁霞. 南京化工园区及周边环境中优先控制酚类污染物的甄别[D]. 南京大学, 2015. DOI: 10.27235/d.cnki.gnjj.2015.000633.
- [20] 尹勇, 戴中华, 蒋鹏, 张华, 陈莉娜. 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(08): 1525-1531.
- [21] Kumar B, Tyagi J, Verma V K, et al. Distribution of eleven priority phenolic compounds in soils from mixed landuse and assessment of health hazard for human population [J]. Adv Appl Sci Res, 2014, 5(2): 125-132.
- [22] Ylva P, Staffan L, Lars Ö, Mats T. Levels of chlorinated compounds (CPs, PCPPs, PCDEs, PCDFs and PCDDs) in soils at contaminated sawmill sites in Sweden[J]. Chemosphere, 2006, 66(2): 234-242
- [23] 王培俊, 刘俐, 李发生, 田亚静, 胡振琪, 阳春花. 炼焦过程产生的污染物分析[J]. 煤炭科学技术,

2010, 38(12):114-118.

[24] 孟冬冬. 论当代煤化工废水处理工艺的现状与发展方向[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(04):44.

[25] 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华. 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.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

