

# 退役医药化工场地土壤健康风险评估

杨逸飞

湖北工业大学

DOI:10.32629/eep.v9i2.3091

**[摘要]** 本文解析某退役医药化工场地的污染谱系,建立其多介质环境数据集,并为下一阶段基于风险的修复决策提供关键基线。结果显示:土壤方面,场地存在显著的重金属与挥发性有机物(VOCs)复合污染。以第一类用地筛选值为基准,砷(As)超标点位比例约为29.2%,最大超标倍数达11.9倍;石油烃( $C_{10}-C_{40}$ )超标点位比例7.1%,最大超标倍数9.38倍;甲醛超标点位比例22.1%,最大超标倍数16.98倍;苯超标点位比例8.0%,最大超标倍数16.5倍;甲苯超标点位比例4.4%,最大超标倍数64.58倍;乙苯超标点位比例15.9%,最大超标倍数12.72倍;二氯甲烷超标点位比例14.2%,最大超标倍数13.51倍;氯苯超标点位比例14.2%,最大超标倍数33.24倍;氯仿超标点位比例14.2%,最大超标倍数17.87倍。

**[关键词]** 医药化工场地; 场地调查; 土壤污染; 风险评估; 污染迁移

中图分类号: X131.3 文献标识码: A

## Health Risk Assessment of Soil in Decommissioned Pharmaceutical and Chemical Industrial Sites

Yifei Yang

Hubei University of Technology

**[Abstract]** This paper analyzes the pollution spectrum of a retired pharmaceutical and chemical industry site, establishes its multi-media environmental dataset, and provides a key baseline for the next stage of risk-based remediation decisions. The results show that in terms of soil, the site has significant combined pollution of heavy metals and volatile organic compounds (VOCs). Based on the first-class land use screening values, the proportion of arsenic (As) exceeding the standard is approximately 29.2%, with the maximum exceedance multiple reaching 11.9 times; the proportion of petroleum hydrocarbons ( $C_{10}-C_{40}$ ) exceeding the standard is 7.1%, with the maximum exceedance multiple of 9.38 times; the proportion of formaldehyde exceeding the standard is 22.1%, with the maximum exceedance multiple of 16.98 times; the proportion of benzene exceeding the standard is 8.0%, with the maximum exceedance multiple of 16.5 times; the proportion of toluene exceeding the standard is 4.4%, with the maximum exceedance multiple of 64.58 times; the proportion of ethylbenzene exceeding the standard is 15.9%, with the maximum exceedance multiple of 12.72 times; the proportion of dichloromethane exceeding the standard is 14.2%, with the maximum exceedance multiple of 13.51 times; the proportion of chlorobenzene exceeding the standard is 14.2%, with the maximum exceedance multiple of 33.24 times; and the proportion of chloroform exceeding the standard is 14.2%, with the maximum exceedance multiple of 17.87 times.

**[Key words]** Pharmaceutical and chemical industry site; Site investigation; Soil pollution; Risk assessment; Pollution migration

### 引言

医药化工行业在其生产运营周期中,通常涉及多种高毒性、难生物降解或具有持久性、生物累积性的化学物质,这些物质一旦泄漏或不当处置,极易造成土壤、地下水乃至更广阔生态系统的长期污染<sup>[1,2]</sup>。国内研究则聚焦于复杂场景的技术适配性,如清华大学吴静团队创新性地将刑侦“指纹比对”思路引入水环

境监管,建立了包含148种污染源和320种污染物的水质指纹数据库,实现污染排放源的快速精准识别<sup>[3]</sup>。

### 1 研究区域概况

研究地块位于重庆市渝北区,地处长江北岸,总用地面积约2.66万 $m^2$ ,地势东高西低。原场地为某医药化工股份有限公司(A公司)生产经营地,运营期自1979年至2021年,共计42年。主要产

品包括甲醇钠、叶酸、盐酸普鲁卡因、K199、T97-C等,生产过程中使用大量有机溶剂和金属催化剂,历史上曾存在废液、废渣随意堆放和渗排现象。

## 2 样品采集与分析方法

### 2.1 采样策略与依据

样品采集严格遵循国家及地方技术规范,包括《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ25.1-2019)的分阶段调查原则、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ25.2-2019)的针对性、规范性和可行性要求、《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》(HJ1019-2019)的VOCs专用采样技术、《地下水环境监测技术规范》(HJ164-2020)的点位布设与样品保存方法,以及《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)的混合样制备标准(分点数5~20个)<sup>[4]</sup>。

### 2.2 样品采集与保存

土壤样品采集使用不锈钢采样器,避免交叉污染;表层土壤按HJ/T166-2004要求制备混合样,分点数5~20个。地下水采样前完成洗井(稳定水位恢复后),采用低扰动潜水泵采集,样品容器根据监测项目选择(如VOCs使用顶空瓶,重金属使用聚乙烯瓶)。样品保存严格按规范执行:VOCs样品4℃冷藏避光,重金属样品酸化至pH<2,氰化物样品添加NaOH保存。运输过程配备冷藏箱,全程避光防震,确保样品代表性。

## 3 健康风险评价

健康风险评价依据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)开展,通过量化污染物经口摄、皮肤接触及吸入途径对人体健康的潜在危害,为风险管控提供科学依据。评价涵盖危害识别、暴露评估、毒性评估及风险表征四环节,核心指标为致癌风险(CR)与非致癌危害商(HQ)。

### 3.1 评价模型与参数

健康风险评价采用RBCA(Risk-Based Corrective Action)模型,其核心为慢性日摄入量(CDI)的计算,综合三种暴露途径:经口摄入途径:

$$CDI_{oral} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (式1)$$

皮肤接触途径:

$$CDI_{dermal} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (式2)$$

吸入途径:

$$CDI_{inh} = \frac{C \times IR_{air} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (式3)$$

式中: C为污染物浓度(mg/kg); IR为土壤摄入率(mg/d); EF为暴露频率(d/a); ED为暴露持续时间(a); BW为体重(kg); AT为平均寿命(a); SA为皮肤接触面积(cm<sup>2</sup>); AF为皮肤吸附因子(mg/cm<sup>2</sup>); ABS为皮肤吸收系数; IR<sub>air</sub>为空气吸入率(m<sup>3</sup>/d)<sup>①</sup>。

基于CDI,致癌风险(CR)与非致癌危害商(HQ)计算如下:

致癌风险模型:

$$CR = CDI \times SF \quad (式4)$$

非致癌危害商模型:

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (式5)$$

其中SF为致癌斜率因子(kg·d/mg),表征污染物单位剂量致癌概率; RfD为参考剂量(mg/kg·d),代表污染物每日允许摄入阈值。总风险通过多途径叠加:总致癌风险(TCR)为各途径CR之和,总非致癌风险(THI)为各途径HQ之和<sup>②</sup>。

### 3.2 风险表征与判定标准

致癌风险(CR)以10<sup>-6</sup>(可接受下限)至10<sup>-1</sup>(可接受上限)为判定区间;非致癌危害商(HQ)以1为阈值,超过1即存在潜在非致癌风险。例如,某地块苯并(a)芘的CR达1.2×10<sup>-5</sup>(>10<sup>-6</sup>),石油烃(C10)的HQ为1.8(>1),表明两者均需管控。

### 3.3 风险控制值计算

对超阈值污染物,需反推风险控制值。以苯并(a)芘为例,其土壤风险控制值计算公式为:

$$C_{控制} = \frac{CR_{目标} \times BW \times AT}{SF \times IR \times EF \times ED \times 10^{-6}} \quad (式6)$$

代入参数后,苯并(a)芘控制值为0.549 mg/kg,石油烃为826 mg/kg,作为修复目标依据。

### 3.4 风险评价结论

健康风险评价需明确主控途径与优先管控污染物。最终结论结合风险控制值与修复技术可行性,提出分层策略:高风险区域实施工程修复,中低风险区域采用制度控制(如限制用途),保障土地安全利用。

## 4 土壤健康风险评价实践分析

### 4.1 环境风险评价结果

本次调查两阶段共分析了1151个土壤样品(n=1151)。以GB36600-2018第一类用地筛选值及推导的风险控制值为评价基准,主要检出的超标污染物潜在生态风险评价见表1。

表1 潜在生态风险评价

项目	潜在生态风险指数(PI)												RI
	Ni	As	Cr	石油烃	苯	甲苯	乙苯	二氯甲烷	氯苯	氯仿	锰	甲醛	
均值	18.97	23.79	2.81	4.63	2.50	64.58	12.72	1.73	3.32	85.00	0.37	16.98	2,032.46
标准差	20.87	30.59	0.58	8650	3.8	77.5	8.16	95.8	210.5	1.12	1850	53.0	12852.85
最小值	6.12	12.05	2.30	0.5	0.002	1.0	0.27	0.026	0.0012	0.0035	112	0.88	115.64
最大值	83.33	175.90	5.23	77500	16.5	175.0	91.6	1270	2260	5.36	7290	270.0	9775.56
危害程度	低	低	低	低	低	高	中	低	低	高	低	高	极高

### 4.2 健康风险评价结果

由表2可知,本地块各种污染物的健康风险大于成人受体可接受的风险水平,后续在对地块进一步利用的过程中,需对土壤采取有效的治理和管控措施。

## 5 结论

本文通过对A公司原址退役医药化工场地进行的系统性多

介质环境调查与初步评估,揭示了场地污染的复杂性与系统性,主要结论如下:

表2 健康风险评估结果

污染物	剂量-反应评估(毒性参数)	风险表征(致癌风险 CR/非致癌危害商 HQ)
砷(As)	SF: $1.5(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=4.82\times 10^{-3}$
	RfD: $3\times 10^{-3}\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=10.7
苯(Bz)	SF: $0.029(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=3.48\times 10^{-3}$
	RfD: $4\times 10^{-3}\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=0.3
甲苯(Tol)	无致癌性	HQ=2.625
	RfD: $0.08\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	
石油烃(C <sub>10</sub> -C <sub>28</sub> )	RfD: $0.01\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$ (参考C <sub>10</sub> -C <sub>28</sub> 组分)	HQ=4.5
氯苯(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl)	SF: $0.017(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=9.35\times 10^{-3}$
	RfD: $0.02\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=0.275
二氯甲烷(CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	SF: $0.0075(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=1.28\times 10^{-3}$
	RfD: $0.06\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=0.28
甲醛(CH <sub>2</sub> O)	SF: $0.045(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ (IARC1类)	$\text{CR}=1.71\times 10^{-3}$
	RfD: $0.2\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=0.019
锰(Mn)	RfD: $0.14\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=68.6
铬(六价)	SF: $41(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=0.492$
	RfD: $3\times 10^{-3}\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=4
镍(Ni)	SF: $1.7(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$\text{CR}=3.57\times 10^{-3}$
	RfD: $0.02\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{d}$	HQ=0.105

(1)该场地呈现显著的重金属与挥发性有机物(VOCs)复合污染特征。污染物以砷、锰、六价铬等重金属和苯系物、氯代烃、甲醛等VOCs为主,部分区域污染物浓度超标严重,如甲苯最大超标倍数达64.58倍。污染具有多介质、多途径特点,形成了“固废-土壤-地下水”垂向淋溶与“土壤-水-气”相际转化的跨介质迁移链,复合污染叠加导致健康风险高度放大,大部分区域存在不可接受的人体健康风险。(2)场地形成了“源-介质-路径”联动的多介质复合污染系统。场地污染并非孤立存在于各介质中,而是构成了一个相互关联、相互影响的整体。污染谱系以重金属(砷、锰、六价铬等)和挥发性有机物(VOCs,如苯系物、氯代烃、甲醛)为核心,在土壤、地下水、土壤气和固废中均有检出。历史遗留的约19027m<sup>3</sup>煤渣与铁泥混合废渣(固废)是关键“潜在源”,其在降雨淋滤作用下,持续向下方土壤和

地下水释放污染物,构成了长期的面源污染。(3)污染物跨介质迁移路径清晰,多介质耦合效应显著。污染物的迁移呈现出明确的跨介质链条:“固废-土壤-地下水”垂向淋溶链:T97-C和蝶啶谷氨酸车间(C区西北部)区域的土壤是VOCs的“一次源”,污染物通过垂向淋溶穿透包气带,已进入深层土壤和地下水,导致地下水中多项指标远超IV类水标准。“土壤-水-气”相际转化与挥发链:第二层高渗透性卵石层不仅是溶解态污染物横向快速迁移的“高速公路”,其与长江的密切水力联系也对下游水体构成潜在威胁。同时,溶解于地下水中的VOCs和土壤中的残余VOCs持续挥发,在包气带中形成了超标(如甲苯)的土壤气羽,证实了“水-气”和“土-气”的耦合迁移路径。(4)多介质复合污染导致场地环境风险高度叠加与放大。场地的环境风险并非单一介质风险的简单加和,而是多介质风险叠加后的放大效应。例如,停车场区域(E区)的乙苯和氯苯不仅造成了土壤污染,其深垂向迁移更污染了地下水,同时其挥发形成的土壤气羽又增加了吸入暴露风险。这种“土壤-水-气”三位一体的污染模式,使得场地大部分区域存在不可接受的人体健康风险,单一介质的管控措施已无法有效阻断所有暴露途径。(5)未来管控与修复需采取多介质协同的系统化策略。(1)需对历史废渣堆(固废)进行风险管控或清除,从源头切断污染释放。(2)需针对地下水和土壤气污染羽,构建“水力截获”与“气相抽提”等路径阻断措施。(3)在对污染介质进行修复的同时,需建立长期的多介质(水、土、气)监测网络,确保风险可控。

#### [注释]

①参见美国材料与试验协会(ASTM)发布的RBCA标准指南(E2081)

②参见美国国家环境保护署(US EPA)发布的《超级基金风险评价指南》

#### [参考文献]

[1]孙萱萱,雷荣荣,闫劲焯,等.新疆某石油化工园区土壤中多环芳烃赋存特征、来源解析及风险评价[J].干旱区资源与环境,2025,39(03):187-199.

[2]徐炳先,彭雨欣,付帅.退役化工场地土壤有机污染特征及生态风险评价[J].环境工程,2023,41(S2):742-746.

[3]解小凡.黄河三角洲石油化工区农田土壤-玉米体系PAHs的分布特征及风险评价[J].生态学报,2021,41(3):987-997.

[4]杨帆,罗红雪,钟艳霞,等.宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价[J].环境科学,2021,42(05):2490-2501.

#### 作者简介:

杨逸飞(1999--),男,汉族,四川人,湖北工业大学硕士生,研究方向为资源与环境。