

上海某典型工业地块土壤中特征污染物铜、汞、钴重金属污染健康风险评估

邓冬冬

上海申环环境工程有限公司, 上海

收稿日期: 2022年3月14日; 录用日期: 2022年4月17日; 发布日期: 2022年4月24日

摘要

以上海市某金属表面加工及热处理企业地块中特征污染物铜、汞、钴为研究对象, 对地块内土壤中超标污染物铜(浓度: 3190 mg/kg)、汞(浓度: 13.6 mg/kg)和钴(浓度: 69.5 mg/kg)进行风险评估。初步调查识别关注污染物, 后续进行进一步详查和风险评估。经过污染危害识别、暴露评估和毒性评估、风险表征、确定修复目标值等评估流程, 并结合理化参数分析得到评估结果。风险评估结果表明: 特征污染物铜、汞、钴对于潜在暴露人群风险的健康风险超过了可接受范围。

关键词

土壤, 铜, 汞, 钴, 风险评估

Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution of Characteristic Pollutants Copper, Mercury and Cobalt in Soil of a Typical Industrial Plot in Shanghai

Dongdong Deng

Shanghai Shenhuan Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 14th, 2022; accepted: Apr. 17th, 2022; published: Apr. 24th, 2022

Abstract

Taking the characteristic pollutants copper, mercury and cobalt in the plot of a metal surface

文章引用: 邓冬冬. 上海某典型工业地块土壤中特征污染物铜、汞、钴重金属污染健康风险评估[J]. 土壤科学, 2022, 10(2): 91-100. DOI: 10.12677/hjss.2022.102012

processing and heat treatment enterprise in Shanghai as the research object, the risk assessment was carried out on the excessive pollutants copper (concentration: 3190 mg/kg), mercury (concentration: 13.6 mg/kg) and cobalt (concentration: 69.5 mg/kg) in the soil in the plot. The pollutants of concern are identified through preliminary investigation, and further detailed investigation and risk assessment are carried out later. Through the assessment processes of pollution hazard identification, exposure assessment and toxicity assessment, risk characterization, determination of repair target value, and the assessment results of rationalization parameter analysis. The risk assessment results show that the health risks of the concerned characteristic pollutants copper, mercury and cobalt to the potential exposed population exceed the acceptable range.

Keywords

Soil, Copper, Mercury, Cobalt, Risk Assessment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着我国城市企业的“退二进三”和“退城进园”，一大批污染较重的工矿企业将由城市人口稠密区迁往郊区，或进入规划的工业园区，这无疑对城市生态环境的改善与环境保护有着十分重要的促进作用。但污染企业迁出后，原场址土地与土壤均可能受到不同程度的污染[1]，由于遗留土地往往位于城市中心或人口稠密区，且其使用功能大多被转换为居住与商业用地等，若不加强土壤污染状况调查、风险评估、污染防治与生态修复，原场址土壤中残留的污染物就可能通过接触、呼吸等途径进入人体，进而影响城市和人居环境，危害居民健康。

铜、汞、钴为金属表面加工及热处理过程中典型特征污染物，土壤重金属污染会导致严重的生态环境和人类健康风险。土壤中重金属污染物来源复杂、污染途径多样[2]，毒性大、残留时间长、迁移性小、隐蔽性大、化学行为和生态效应复杂，可通过根系进入植物体，再通过食物链的传递和富集，最终危害人体健康，目前已受到相关学科领域与社会的广泛关注[3] [4]。随着工业化、城市化的发展，大量重金属污染物通过工业“三废”进入到土壤中，土壤重金属含量越来越高，严重危害着土壤环境质量安全，对人体健康构成严重的威胁。

有研究表明，重金属可对人体神经系统、免疫功能等产生非致癌影响，同时部分重金属元素还具有强致癌性。因此，土壤重金属的健康风险已引起国内外学者的广泛关注[5] [6]。本文以上海市某工业地块中特征铜、汞、钴为研究对象，研究其地块内土壤中的铜、汞、钴含量及其健康风险，并根据评估结果，为上海市场地土壤管理与保护提供参数依据，并提供下一步修复目标值。

2. 材料与方法

2.1. 土壤样品的采集

GeoProbe@7822DT 的 DT22 采样系统进行土孔钻探，并使用 PETG-Liner 采样管采集非扰动土壤样品工作。土壤采样时，采样人员均佩戴一次性的丁腈手套，每个土样采样前均要更换新的手套，以防止样品之间的交叉污染。

使用光离子化探测器(PID, Photo-Ionization Detector)和 X 射线荧光光谱分析(X Ray Fluorescence)对从土孔中取出的土样进行挥发性有机物和重金属的测试,同时做肉眼观察,记录各土层基本情况,包括土壤的组成类型、密实程度、湿度和颜色,并特别注意是否有异样的污渍或异味存在,并进行记录。

现场由专人全面负责所有样品的采集、记录与包装。首先采集需检测挥发性有机物的土壤样品,根据《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》(HJ 1019-2019)的相关要求,从采样管中取出非扰动土壤样品后,刮除土芯表面的土壤,在新露出的土芯表面利用非扰动采样器采集约 5 g 土壤样品,并立即转移至已添加样品保护剂的 40 ml 土壤样品瓶中。而后快速清除掉瓶口螺纹处粘附的土壤,拧紧瓶盖,并清除土壤样品瓶外表面上黏附的土壤。对于使用 PETG-Liner 采样管采集的土壤样品,使用 PE 膜和 Geoprobe 专用管帽密封保存。专人负责对采样日期、采样地点、样品编号、土壤及周边情况等进行记录,并在容器标签上用记号笔进行标识并确保拧紧容器盖,并用铝箔纸包裹以避光,最后对采样点进行拍照记录。样品采集完成后,对无需设置监测井的点位利用水泥膨润土浆液进行封孔。

2.2. 检测项目及方法

检测项目为土壤中的铜、汞、钴。委托分析实验室检测项目与检测方法如下表 1。

Table 1. Laboratory analysis and testing methods

表 1. 实验室分析检测方法

| 分析物 | 分析方法 | 检出限 |
|-----|-------------|-------------|
| 铜 | HJ 491-2019 | 0.09 mg/kg |
| 汞 | HJ 680-2013 | 0.002 mg/kg |
| 钴 | HJ 803-2016 | 0.03 mg/kg |

检测分析过程中重复样品合格率达到 100%,文中数据经 SPSS 统计处理。

2.3. 检测结果

地块土壤检测结果如下表 2。

Table 2. Summary of exceeding standard points of soil pollutants in the plot

表 2. 地块土壤污染物超标点位汇总

| 点位 | 关注污染物 | 最大检测值(mg/kg) | 评价标准(mg/kg) | 超标倍数 |
|-----|-------|--------------|-------------|------|
| T12 | 铜 | 3190 | 2000* | 0.60 |
| T10 | 汞 | 13.6 | 8* | 0.70 |
| B5 | 钴 | 69.5 | 20* | 2.48 |

“*” 《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)第一类筛选值。

检测结果显示监测点(T12)的铜检出浓度超过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)中的第一类筛选值,超标倍数分别为 0.60 倍;监测点(T10)的汞检出浓度超过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)中的第一类筛选值,超标倍数分别为 0.70 倍;监测点(B5)的钴检出浓度超过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)中的第一类筛选值,超标倍数分别为 2.48 倍。

3. 风险评估

3.1. 危害识别

场地在未来开发中将作为三类住宅组团用地、教育设施用地、公共绿地及道路使用，相应土地利用方式下的敏感人群包括教育科研工作者和学生、地块内居民以及周边居民。

3.2. 暴露评估与场地概念模型

3.2.1. 暴露情景

未来教育科研工作者和学生：未来地块内教育科研工作者和学生可能会长时间暴露于本地块的污染土壤和地下水而产生致癌风险或非致癌危害。对于致癌效应，考虑终生暴露危害，根据儿童期和成人期的暴露来评估污染物的终生致癌风险；对于非致癌效应，根据儿童期暴露来评估污染物非致癌危害效应。

地块内及周边居民：居住在地块内及周边的儿童和成人均可能会长时间暴露于本地块的污染土壤和地下水而产生致癌风险或非致癌危害。对于致癌效应，考虑未来居民的终生暴露危害，根据儿童期和成人期的暴露来评估污染物的终生致癌风险；对于非致癌效应，儿童体重较轻、暴露量较高，根据儿童期暴露来评估污染物的非致癌危害效应。

3.2.2. 暴露途径

地块内未来居民相较于未来教育科研工作者、学生及周边居民的暴露途径更多，暴露风险对其影响更大，对地块内居民可能的暴露途径进行分析，其暴露途径包括经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物及吸入室内、室外来自土壤和地下水的气态污染物。参考规范中提供的暴露途径，并且根据本地块未来的用途与可能的暴露情景，基于保守原则，将潜在的暴露途径小结在表 3 中。

Table 3. Exposure pathway assessment

表 3. 暴露途径评估

| 污染介质 | 暴露途径 | 未来居民(儿童和成人) |
|------|---------------------|-------------|
| 土壤 | 经口摄入土壤 | √ |
| | 皮肤接触土壤 | √ |
| | 吸入土壤颗粒物 | √ |
| | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | √ |
| | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | √ |
| | 吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物 | √ |

3.2.3. 场地概念模型

根据上述污染源、污染物迁移途径、敏感受体以及暴露途径分析，建立本场地的“污染源 - 途径 - 受体”概念模型，如表 4；暴露概念模型见图 1。

3.2.4. 受体暴露参数

暴露评估的相关参数选择主要根据：1) 现场实测数据；2) 上海和国内导则中的风险评估模型参数推荐值；3) 美国环保署发布模型参数推荐值；以及 4) 合理的最大化暴露量预期值。根据现行的国家和上海的导则，受体暴露参数取值参考《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)中的推荐值见表 5。

Table 4. Site conceptual model
表 4. 场地概念模型

| 污染源 | 暴露介质 | 暴露点 | 迁移途径 | 暴露途径 | 暴露受体 |
|------|------|-------------------|---|-----------------------------------|----------------|
| 工业用地 | 土壤暴露 | 商业服务业设施用地和绿地与广场用地 | 表层、下层土壤中的挥发性污染物可扩散进入室外空气, 下层土壤中挥发性污染物可扩散进入室内空气; 土壤中污染物可淋溶、迁移进入地下水 | 经口摄入上层土壤 皮肤接触上层土壤 吸入上层土壤颗粒物 | 地块内未来居民(儿童、成人) |
| | | | 吸入室外空气中来自上层土壤的气态污染物 | | |
| | | | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | | |
| | | | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | | |

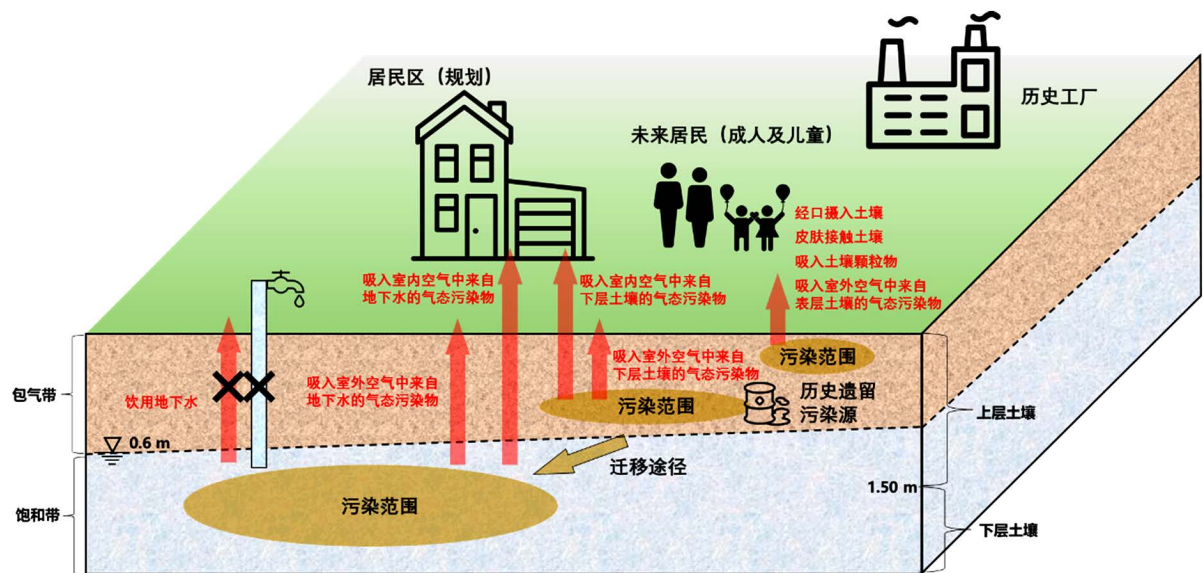


Figure 1. Conceptual model of land exposure
图 1. 地块暴露概念模型

Table 5. Receptor exposure parameter value
表 5. 受体暴露参数取值

| 参数符号 | 参数名称 | 单位 | 未来居民 | |
|---------|----------|-----|-------|--------------------|
| | | | 取值 | 数据来源 |
| ED_a | 成人暴露期 | a | 24 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| ED_c | 儿童暴露期 | a | 6 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EF_a | 成人暴露频率 | d/a | 350 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EF_c | 儿童暴露频率 | d/a | 350 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EFI_a | 成人室内暴露频率 | d/a | 262.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EFI_c | 儿童室内暴露频率 | d/a | 262.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EFO_a | 成人室外暴露频率 | d/a | 87.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| EFO_c | 儿童室外暴露频率 | d/a | 87.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| BW_a | 成人平均体重 | kg | 61.8 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| BW_c | 儿童平均体重 | kg | 19.2 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| H_a | 成人平均身高 | kg | 161.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |

Continued

| | | | | |
|-----------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| H_c | 儿童平均身高 | kg | 113.15 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| E_V | 每日皮肤接触事件频率 | 次/d | 1 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $DAIR_a$ | 成人每日空气呼吸量 | kg | 14.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $DAIR_c$ | 儿童每日空气呼吸量 | kg | 7.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $OSIR_a$ | 成人每日摄入土壤量 | mg/d | 100 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $OSIR_c$ | 儿童每日摄入土壤量 | mg/d | 200 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| f_{spi} | 室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例 | 无量纲 | 0.8 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| f_{spo} | 室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例 | 无量纲 | 0.5 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| SAF | 暴露于土壤的参考剂量分配比例 | 无量纲 | 0.33 (挥发性有机物)/0.5 (其他污染物) | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| WAF | 暴露于地下水的参考剂量分配比例 | 无量纲 | 0.33 (挥发性有机物)/0.5 (其他污染物) | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| SER_a | 成人暴露皮肤所占体表面积比 | 无量纲 | 0.32 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| SER_c | 儿童暴露皮肤所占体表面积比 | 无量纲 | 0.36 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $SSAR_a$ | 成人皮肤表面土壤粘附系数 | mg/cm ² | 0.07 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $SSAR_c$ | 儿童皮肤表面土壤粘附系数 | mg/cm ² | 0.2 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $PIAF$ | 吸入土壤颗粒物在体内滞留比例 | 无量纲 | 0.75 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| ACR | 单一污染物可接受致癌风险 | 无量纲 | 1.00E-06 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| AHQ | 可接受危害商 | 无量纲 | 1 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| AT_{ca} | 致癌效应平均时间 | d | 27,740 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| AT_{nc} | 非致癌效应平均时间 | d | 2190 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| ABS_O | 经口摄入吸收效率因子 | 无量纲 | 1 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $DWCR_a$ | 成人每日饮用水量 | L·d ⁻¹ | 1.0 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| $DECR_c$ | 儿童每日饮用水量 | L·d ⁻¹ | 0.7 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| SAE_a | 成人暴露皮肤表面积 | cm ² | 5373.99 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |
| SAE_c | 儿童暴露皮肤表面积 | cm ² | 2848.01 | 根据 HJ25.3-2019 推荐值 |

3.2.5. 地块特征参数

地块特征参数的选择主要根据：1) 现场实测数据；2) 上海和国内导则中的风险评估模型参数推荐值见表 6。根据现行的国家和上海市的导则，参考顺序为：实测值；《上海市建设用地土壤污染状况调查、风险评估、风险管控与修复方案编制、风险管控与修复效果评估工作的补充规定(试行)》(沪环土[2020]62号)；《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)。

Table 6. Selection of plot characteristic parameters under the first type of land use mode
表 6. 第一类用地方式下地块特征参数取值

| 参数符号 | 参数名称 | 单位 | 实际值 ¹ | 上海 62 号文 ² | HJ 25.3 | 本次评估选用的特征参数取值 |
|-------------------|----------------|--------------------|------------------|-----------------------|------------|---------------|
| 土壤性质参数 | | | | | | |
| d | 表层污染土壤层厚度 | cm | 150 | - | 50 | 150 |
| L_s | 下层污染土壤层埋深 | cm | 300 | - | 50 | 300 |
| d_{sub} | 下层污染土壤层厚度 | cm | 150 | - | 100 | 150 |
| ρ_b | 土壤容重 | kg/dm ³ | 1.384 | - | 1.5 | 1.384 |
| ρ_s | 土壤颗粒密度 | kg/dm ³ | 2.73 | - | 2.65 | 2.73 |
| P_{ws} | 土壤含水率 | kg/kg | 0.344 | - | 0.2 | 0.344 |
| f_{om} | 有机质含量 | g/kg | 5.8 | - | 15 | 5.8 |
| θ | 孔隙体积比 | 无量纲 | 0.493 | - | - | 0.493 |
| Θ_{ws} | 孔隙水体积比 | 无量纲 | 0.476 | 无量纲 | - | 0.476 |
| Θ_{as} | 孔隙空气体积比 | 无量纲 | 0.017 | 无量纲 | - | 0.017 |
| A | 污染源区面积 | cm ² | 16,000,000 | - | 16,000,000 | 16,000,000 |
| W | 污染源区宽度 | cm | 4000 | - | 4000 | 4000 |
| 水文地质特征参数 | | | | | | |
| L_{gw} | 地下水埋深 | cm | 60 ⁴ | - | - | 60 |
| h_{cap} | 土壤地下水交界处毛细管层厚度 | cm | - | - | 5 | 5 |
| h_v | 非饱和土层厚度 | cm | 55 | - | 295 | 55 |
| Θ_{acap} | 毛细管层孔隙空气体积比 | 无量纲 | - | - | 0.038 | 0.038 |
| Θ_{wcap} | 毛细管层孔隙水体积比 | 无量纲 | - | - | 0.342 | 0.342 |
| δ_{gw} | 地下水混合区厚度 | cm | - | - | 200 | 200 |
| K_v | 土壤透性系数 | cm ² | - | - | 1.00E-08 | 1.00E-08 |
| 空气特征参数 | | | | | | |
| U_{air} | 混合区大气流速 风速 | cm/s | - | - | 200 | 200 |
| δ_{air} | 混合区高度 | cm | - | - | 200 | 200 |
| PM ₁₀ | 空气中可吸入颗粒物含量 | mg/m ³ | - | 0.045 ⁵ | 0.119 | 0.045 |
| 建筑物特征参数 | | | | | | |
| Θ_{acrack} | 地基裂隙中空气体积比 | 无量纲 | - | - | 0.26 | 0.26 |

Continued

| | | | | | | |
|-------------------|--------------------|------------------|---|---|---------|---------|
| Θ_{wcrack} | 地基裂隙中水体积比 | 无量纲 | - | - | 0.12 | 0.12 |
| L_{crack} | 室内地基厚度 | cm | - | - | 35 | 35 |
| L_B | 室内空间体积与气态污染物入渗面积之比 | cm | - | - | 220 | 220 |
| ER | 室内空气交换速率 | 次/s | - | - | 12 | 12 |
| η | 地基和墙体裂隙表面积所占比例 | 无量纲 | - | - | 0.0005 | 0.0005 |
| τ | 气态污染物入侵持续时间 | a | - | - | 30 | 30 |
| dP | 室内室外气压差 | $g \cdot s^2/cm$ | - | - | 0 | 0 |
| Z_{crack} | 室内地面到地板底部厚度 | cm | - | - | 35 | 35 |
| X_{crack} | 室内地板周长 | cm | - | - | 3400 | 3400 |
| A_b | 室内地板面积 | cm^2 | - | - | 700,000 | 700,000 |

注：1、实际值为地块内样品实际数据；2、《上海市建设用地土壤污染状况调查、风险评估、风险管控与修复方案编制、风险管控与修复效果评估工作的补充规定(试行)》(沪环土[2020] 62号)；3、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)；4、保守起见，地下水埋深 L_{gw} 采用初步调查及地质勘探阶段测得的最小地下水埋深 0.60 m；5、空气中可吸入颗粒物含量 PM10，参考《上海市生态环境公报》(2019年)。

3.3. 受体暴露量计算

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)中的计算公式评估受体在各暴露途径下的暴露量。各途径暴露量的模型计算公式如下：

1) 经口摄入土壤途径：

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$OISER_{ca} = \frac{\left(\frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c}{BW_c} + \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a}{BW_a} \right) \times ABS_o}{AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

2) 皮肤接触土壤途径：

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$DCSER_{ca} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_{vx} \times ABS_d}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_{vx} \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$DCSER_{nc} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

3) 吸入土壤颗粒物途径:

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fspo \times EFO_c + fspi \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \\ + \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (fspo \times EFO_a + fspi \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fspo \times EFO_c + fspi \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

4) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径:

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$IOVER_{ca1} = VF_{suroa} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right)$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$IOVER_{nc1} = VF_{suroa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}}$$

5) 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径:

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$IOVER_{ca2} = VF_{suboa} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right)$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$IOVER_{nc2} = VF_{suboa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}}$$

6) 吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径:

a) 单一污染物的致癌效应暴露量

$$IIVER_{ca1} = VF_{subia} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFI_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right)$$

b) 单一污染物的非致癌效应暴露量

$$IIVER_{nc1} = VF_{subia} \times \frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}}$$

3.4. 毒性评估

在危害识别的工作基础上, 分析关注污染物对人体健康的危害效应。根据关注污染物毒理学性质的不同将分别考虑致癌效应和非致癌效应, 确定与关注污染物相关的毒性参数, 包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和单位致癌因子等。

3.5. 风险表征

风险表征计算包括单一污染物的致癌风险值、所有关注污染物的总致癌风险值、单一污染物的危害商值和多个关注污染物的危害指数(非致癌风险值)。

土壤关注污染物铜、汞、钴风险主要通过计算土壤中关注污染物通过各个暴露途径的风险值相加得到, 见下表 7。

Table 7. Future residents are exposed to the risk level of soil concerned with pollutants

表 7. 未来居民暴露于土壤关注污染物的风险水平

| 点位 | 污染物 | 毒性效应 | 经口摄入土壤 | 经皮肤接触土壤 | 吸入土壤颗粒 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物所有暴露途径下的致癌/非致癌风险 | 风险控制水平 | 风险是否可接受 |
|-----|-----|------|----------|---------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------|---------|
| T10 | 汞 | 非致癌 | 1.37E+00 | 0E+00 | 5.37E-03 | 4.90E-02 | 0E+00 | 0E+00 | 1.43E+00 | 1 | 否 |
| T12 | 铜 | 非致癌 | 1.59E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 1.59E+00 | 1 | 否 |
| B5 | 钴 | 致癌 | 0E+00 | 0E+00 | 6.56E-06 | 0E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 6.56E-06 | 1.00E-06 | 否 |
| | | 非致癌 | 4.63E+00 | 0E+00 | 9.05E-01 | 0E+00 | 0E+00 | 0E+00 | 5.53E+00 | 1 | 否 |

未来居民(儿童和成人)在 B5 点位所有土壤暴露途径下的钴致癌风险分别为 6.56×10^{-6} , 超过风险控制水平 10^{-6} , 风险均不可接受。未来居民(儿童和成人) T12 点位(铜)、B5 点位(钴)、T10 点位(汞)在所有土壤暴露途径下的非致危害商值分别为 1.59、5.53、1.43, 超过风险控制水平 1, 风险均不可接受。

4. 结论与建议

根据本次土壤污染风险评估的结果, 本地块部分区域的受污染土壤中注污染物为重金属(铜、汞、钴)对于部分潜在暴露人群(未来居民)的健康风险超过了可接受范围。建议根据上海市及国家相关规定针对超风险范围内的土壤开展风险管控或修复工作。

此外, 现确定的风险控制值是基于健康风险评估模型的计算值, 是确定污染地块修复目标值的重要参考值。污染地块修复目标值根据不同修复方式(原位/异位)和不同修复技术(污染物总量削减/风险途径控制)而确定, 修复目标值并不完全等同于风险控制值。选择原位修复技术时, 修复目标值可引用风险控制值; 选择异位修复技术时, 修复目标值应根据不同修复策略和处置方式制定。特定污染地块的土壤/地下水修复目标值的确定, 还应综合考虑区域背景、筛选标准、修复技术、经济、时间等方面的可行性。

参考文献

- [1] 杨再福. 污染场地调查评价与修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 1-25.
- [2] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区锦冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. 土壤, 2013(6): 1036-1047.
- [3] 岳强, 管玉峰, 涂秀云, 等. 广东北江上游流域农田土壤有机氯农药残留及其分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 321-326.
- [4] 朱方志, 李东伟, 廖世国, 等. 城市搬迁场地重金属污染健康风险评估[J]. 城市建设, 2010(66): 93-94.
- [5] 刘永伟, 毛小苓, 孙莉英, 等. 深圳市工业污染源重金属排放特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010(2): 279-285.
- [6] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.