

电镀企业周边土壤铬污染分布规律与修复对策

张珑腾

信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司 四川 成都 610021

【摘要】：电镀行业是铬污染的主要来源之一，其周边土壤铬污染问题直接威胁生态环境与人体健康。为明确污染范围与迁移特征，为修复治理提供科学依据，本文通过梳理国内外相关研究成果与实测数据，系统分析电镀企业周边土壤铬污染的来源与污染特征，深入探讨铬在土壤中的水平、垂直及形态分布规律，结合不同修复技术的适用场景，提出物理、化学、生物及联合修复对策。研究表明，电镀企业周边土壤铬浓度随距污染源距离增加呈指数衰减，垂直方向上主要富集于0-60cm表层土壤，六价铬因迁移性强对深层土壤存在潜在风险；还原稳定化化学修复与植物-微生物联合修复是当前兼具经济性与有效性的主流技术。本文成果可为电镀污染场地土壤治理与风险管控提供技术支撑。

【关键词】：电镀企业；土壤铬污染；分布规律；修复技术；风险管控

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.020

1 研究背景

电镀工艺因能提升金属材料的耐腐蚀性、耐磨性及装饰性，广泛应用于机械制造、电子信息、汽车零部件等诸多领域。铬作为电镀行业的核心原料，在电镀过程中会通过废水渗漏、废渣堆放、大气沉降等多种途径进入周边土壤环境。铬在土壤中具有强稳定性与累积性，其中六价铬因具有强氧化性与生物毒性，可通过皮肤接触、食物链富集等方式进入人体，诱发呼吸道疾病、皮肤溃疡甚至癌症，严重威胁生态系统安全与人体健康。近年来，随着我国环保法规的日趋严格，电镀企业污染治理力度不断加大，但历史遗留污染与潜在污染风险仍不容忽视。明确电镀企业周边土壤铬污染的分布规律，是制定科学修复方案、实现精准治理的前提。目前，关于土壤铬污染的研究多集中于单一地块的污染监测或单一修复技术的研发，对污染分布规律的系统性梳理与修复对策的综合优化仍有待深化。基于此，本文结合现有研究数据与工程实践经验，系统分析电镀企业周边土壤铬污染的来源、分布特征及迁移规律，提出针对性的修复技术与管控建议，为电镀污染场地的生态修复与土地安全利用提供参考。

2 电镀企业周边土壤铬污染来源与污染特征

2.1 主要污染源

电镀企业周边土壤铬污染源具有多样性，核心来源包括电镀废水、电镀废渣及大气沉降，其中废水渗漏与废渣堆放是最主要途径。电镀废水含铬浓度较高，若处理工艺不完善或处理设施运行不稳定，废水会通过地下管网渗漏、地表漫流等方式渗入土壤；部分小型电镀企业存在偷排、漏排行为，进一步加剧了土壤污染风险。电镀废渣主要包括电镀槽渣、污水处理污泥等，此类废渣中铬含量极高，若未按危废管理要求进行规范处置，随意堆放会导致铬通过雨淋、渗滤作用进入土壤，形成长期污染。此外，电镀过程中产生的含铬气溶胶会通过大气沉降落到周边土壤表面，形成面状污染，但此类污染贡献量相对较低，主要影响企业周边1km范围内的土壤。

2.2 核心污染特征

电镀企业周边土壤铬污染呈现出复合性、累积性与强毒性三大特征。污染复合性体现在土壤中不仅存在总铬超标，还常伴随铜、镍、锌等其他重金属污染，多种重金属协同作用会增强对生态系统的危害。累积性表现为铬在土壤中迁移转化速度缓慢，半衰期长，易在土壤胶体表面吸附累积，即使企业关停，土壤中的铬污染也会长期存在。强毒性主要源于六价铬的高活性，其在土壤中具有较强的迁移能力，可突破土壤缓冲层进入地下水系统，形成“土壤-地下水”协同污染，扩大污染影响范围。同时，土壤中铬的毒性还与形态密切相关，六价铬的生物有效性远高于三价铬，即使总铬含量未超标，若六价铬占比过高，仍会存在显著环境风险。

3 电镀企业周边土壤铬污染分布规律

土壤铬污染的分布受污染源类型、土壤理化性质、气象条件及水文地质等多种因素影响，其分布规律主要体现在水平分布、垂直分布及形态分布三个维度，结合实测数据与相关研究成果总结如下。

3.1 水平分布规律

电镀企业周边土壤铬污染的水平分布呈现“近源高浓、远源衰减”的核心特征，铬浓度随距污染源距离的增加呈指数函数衰减，且污染范围与企业生产规模、污染治理水平密切相关。大型电镀园区周边土壤铬污染影响范围可达500-1000m，而小型电镀作坊的污染影响范围多集中在200m以内。不同功能区的污染程度存在显著差异，电镀车间排污口、废渣堆放场周边为核心污染区，铬浓度普遍超标10-50倍；厂区边界处污染程度有所降低，超标2-10倍；距离厂区500m以外区域，铬浓度多能满足《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准》中的筛选值要求。表1为某典型电镀企业周边不同距离土壤铬含量实测数据，清晰反映了水平分布衰减特征。

表1 典型电镀企业周边不同距离土壤铬含量实测数据

采样点	距排污口距离 (m)	总铬含量 (mg/kg)	六价铬含量 (mg/kg)	超标倍数 (以筛选值为基准)
1# (核心区)	50	1268.3	325.1	24.4
2# (近厂区)	200	489.7	98.6	8.8
3# (厂区边界)	500	156.2	23.4	2.1
4# (远厂区)	1000	62.8	3.2	0

注：筛选值参考《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB36600-2018)，总铬筛选值为52mg/kg，六价铬筛选值为5.7mg/kg。

此外，风向对水平分布也存在一定影响，主导风向下风向的土壤铬浓度略高于上风向，尤其是在大气沉降贡献较大的区域，这种差异更为明显。

3.2 垂直分布规律

铬在土壤垂直方向上的分布主要受土壤质地、孔隙度及地下水埋深影响，整体呈现“表层富集、深层递减”的特征，但在地下水活动强烈或土壤渗透性强的区域，会出现深层污染现象。

0-20cm 表层土壤因直接接受大气沉降、地表径流携带的铬，且土壤有机质含量较高，对铬的吸附能力强，成为铬富集的主要层位，总铬含量可达深层土壤的3-5倍；20-60cm 土层中，铬含量随深度增加快速下降，这一层位的铬主要来自表层土壤的垂直渗滤；60cm 以下深层土壤中，铬含量普遍较低，但当电镀废水存在长期渗漏时，深层土壤铬含量会显著升高，甚至污染地下水。某电镀污染场地不同深度土壤铬含量监测数据显示，0-20cm 土层总铬含量为892.5mg/kg，60-80cm 土层降至126.3mg/kg，而在地下水埋深120cm处，土壤总铬含量又升至312.7mg/kg，表明存在废水渗漏导致的深层污染。六价铬的垂直迁移能力强于总铬，因其在土壤中吸附能力较弱，更易随渗滤水向深层迁移，因此深层土壤中六价铬的占比相对较高，对地下水的污染风险更大。

3.3 形态分布规律

土壤中铬的形态分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机质结合态及残渣态，不同形态铬的迁移性与生物有效性差异显著，其分布规律直接决定污染风险程度。电镀企业周边土壤中，铬主要以残渣态为主，占总铬含量的50%-70%，此类形态铬稳定性强，迁移性与生物有效性极低，

对环境风险较小；铁锰氧化物结合态占比次之，约为20%-30%，其稳定性受土壤pH值与氧化还原电位影响较大，在还原条件下可转化为可迁移态；可交换态与碳酸盐结合态占比最低，合计不足10%，但此类形态铬迁移性强，易被植物吸收富集，是土壤铬污染的主要风险来源；有机质结合态占比约为5%-15%，主要通过络合作用形成，稳定性中等。值得注意的是，六价铬多以可交换态或碳酸盐结合态存在，虽占总铬比例不高，但因其强毒性，即使低含量也会产生显著环境风险。土壤pH值是影响铬形态分布的关键因素，碱性条件下，六价铬稳定性增强，迁移性提升；酸性条件下，六价铬易被还原为三价铬，形成稳定的化合物。

4 电镀企业周边土壤铬污染修复对策

结合电镀企业周边土壤铬污染的分布特征与风险等级，修复对策应遵循“因地制宜、分级管控、协同增效”的原则，优先选择成本低、效果好、二次污染风险小的技术，核心分为物理修复、化学修复、生物修复及联合修复四大类，各类技术特点与适用场景如下。

4.1 物理修复技术

物理修复技术通过物理手段分离或阻隔土壤中的铬，核心包括土壤淋洗、土壤客土与换土、固化/稳定化等，适用于高浓度污染土壤的应急处理或前期预处理。土壤淋洗技术利用淋洗剂（如柠檬酸、EDTA等）将土壤中的铬转化为可溶态，通过淋洗、固液分离实现铬的去除，对可交换态与碳酸盐结合态铬去除率可达70%-90%，但存在淋洗剂二次污染风险，需配套淋洗剂回收处理系统，适用于中高浓度、渗透性强的土壤。土壤客土与换土技术通过填埋清洁土壤或更换污染土壤，可快速降低土壤铬浓度，修复效果显著，但成本较高，且需妥善处置挖出的污染土壤，适用于小面积、高浓度核心污染区。固化/稳定化技术通过添加固化剂（如水泥、石灰）或稳定剂，将土壤中的铬转化为稳定形态，降低其迁移性与生物有效性，成本低、操作简单，适用于大面积、中低浓度污染土壤，但长期稳定性受土壤环境变化影响较大。

4.2 化学修复技术

化学修复技术通过化学反应改变铬的形态与活性，实现污染治理，核心包括还原稳定化、化学还原沉淀等，是当前电镀污染场地铬修复的主流技术。

还原稳定化技术通过添加还原剂（如硫酸亚铁、亚硫酸钠、零价铁等）将毒性强的六价铬还原为毒性低的三价铬，再通过调节土壤pH值，使三价铬形成氢氧化铬等稳定沉淀，还原率可达95%以上，且成本适中、操作简便，适用于各类浓度的铬污染土壤。其中，零价铁因还原效率高、稳定性强，在实际工程中应用广泛，但需注意还原剂添加量的控制，避免过量导致土壤理化性质恶化。化学还原沉淀技术通过添加沉淀剂（如磷

酸盐、硫化物)与铬形成难溶性沉淀,实现铬的固定,适用于高浓度污染土壤,但沉淀剂的添加可能改变土壤养分结构,需后续进行土壤改良。

4.3 生物修复技术

生物修复技术利用生物(植物、微生物)的代谢作用去除或固定土壤中的铬,具有成本低、二次污染小、生态友好等优势,适用于中低浓度污染土壤的长期修复。植物修复技术通过筛选富集铬能力强的超富集植物(如蜈蚣草、东南景天、印度芥菜等)吸收土壤中的铬,通过收割植物实现铬的去除,对中低浓度铬污染土壤修复效率可达30%-50%,且可改善土壤生态结构。但超富集植物生长周期长,对高浓度污染土壤耐受性较差,适用于大面积、低浓度污染区域的生态修复。微生物修复技术利用微生物(如假单胞菌、芽孢杆菌等)的还原作用将六价铬转化为三价铬,或通过络合作用固定铬,修复效率可达60%-80%,且反应条件温和,可与其他技术协同使用。但微生物活性受土壤pH值、温度等环境因素影响较大,需针对性优化修复条件。

4.4 联合修复技术

单一修复技术存在局限性,联合修复通过整合不同技术的优势,可显著提升修复效率与稳定性,是未来电镀污染场地修复的发展方向。常见的联合修复模式包括“化学还原+固化稳定化”“土壤淋洗+植物修复”“微生物+植物联合修复”等。“化学还原+固化稳定化”联合技术先通过还原剂将六价铬还原为三价铬,再添加固化剂固定三价铬,既保证了毒性去除效果,又提升了长期稳定性,适用于中高浓度污染土壤。“土壤淋洗+植物修复”联合技术先通过淋洗去除土壤中大部分可溶态铬,再利用超富集植物吸收残留铬,兼顾修复效率与生态效益,适用于中浓度污染土壤。“微生物+植物联合修复”通过微生物改善土壤环境,提升植物对铬的吸收能力,修复效率比单一植物修复提升20%-30%,适用于低浓度污染土壤的生态修复。

参考文献:

- [1] 崔诗宇.土壤铬污染下的社区花园植物景观营建研究[D].浙江农林大学,2023.
- [2] 冯艺文.北京市工业遗留场地周边土壤铬污染与微生物响应特征研究[D].中国地质大学(北京),2023.
- [3] 罗亚婷.草酸青霉 SL2 联合纳米零价铁对场地土壤铬形态转化影响及机制[D].浙江大学,2023.
- [4] 卢鑫.硫化物对电镀厂铬污染土壤稳定化处理及其长期稳定性研究[D].华东理工大学,2017.
- [5] 卢鑫,罗启仕,刘馥雯,等.硫化物对电镀厂铬污染土壤的稳定化效果及其机理研究[J].环境科学学报,2017,37(06):2315-2321.

表2 为不同修复技术的核心参数对比,可为修复技术的选择提供参考。

修复技术	核心原理	修复效率 (%)	成本 (元/吨土)	优点	缺点	适用场景
土壤淋洗	淋洗剂溶解铬并分离	70-90	300-800	效率高、周期短	淋洗剂二次污染	中高浓度、渗透性强土壤
还原稳定化	还原剂将六价铬还原为三价铬	85-95	100-300	成本低、操作简	长期稳定性受环境影响	各类浓度污染土壤
植物修复	超富集植物吸收铬	30-50	50-150	生态友好、成本低	周期长、耐受度低	低浓度、大面积土壤
微生物-植物联合	微生物协同植物富集/还原铬	50-80	80-200	效率高、生态性好	受环境因素影响大	中低浓度污染土壤

5 结论

电镀企业周边土壤铬污染来源以废水渗漏与废渣堆放为主,污染呈现复合性、累积性与强毒性特征;分布规律表现为水平方向随距污染源距离增加呈指数衰减,核心污染区集中在500m范围内,垂直方向以0-60cm表层土壤富集为主,深层污染由废水渗漏导致,形态分布以残渣态为主,但六价铬因高迁移性与强毒性成为主要风险源。修复技术方面,物理修复适用于高浓度应急处理,化学还原稳定化是主流技术,生物修复生态友好,联合修复可实现增效提质,需根据污染浓度、土壤性质与修复目标选择适配技术。