

有色金属冶炼厂区土壤重金属污染特征及源解析研究

梁贵芬

单位：云南泰义检测技术有限公司

摘要：有色金属冶炼是土壤重金属污染的重要来源之一。本文以云南省某大型铅锌冶炼企业为研究对象，系统分析了厂区及周边土壤中重金属污染特征及来源。通过分析冶炼厂区 14 个土壤监测点位的检测数据，重点研究了铅、锌、镉、砷、汞、铬、镍、铜等 8 种重金属元素的分布规律。结果表明：冶炼厂区土壤中铅、锌、镉、砷污染较为突出，厂区内监测点铅含量最高达 386mg/kg，超过农用地风险筛选值 2.5 倍；镉含量最高达 5.9mg/kg，超过筛选值近 20 倍。主成分分析显示，铅锌冶炼烟尘沉降是首要污染源，贡献率达 58.7%。本研究可为同类冶炼企业土壤污染防控提供科学依据。

关键词：有色金属冶炼；土壤重金属；污染特征；源解析；铅锌企业

一、引言

有色金属冶炼行业是典型的重金属排放源，在矿石采选、冶炼、加工等生产过程中，铅、镉、砷、汞等有毒有害重金属元素可通过废气排放、废水渗漏、固体废物堆存等途径进入周边土壤环境。云南省是我国重要的有色金属生产基地，铅锌矿资源丰富，冶炼企业分布广泛。部分企业建厂历史长，环保设施不完善，厂区及周边土壤重金属累积问题突出，对区域生态环境和人体健康构成潜在威胁。

依据《土壤污染防治行动计划》和《工矿用地土壤环境管理办法》要求，重点排污单位应定期开展土壤和地下水自行监测。本文以云南某大型铅锌冶炼企业为案例，基于 2026 年度企业自行监测数据，系统分析厂区土壤重金属污染特征，运用多元统计方法识别污染来源，为同类冶炼企业土壤污染风险管控提供技术参考。

二、材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于云南省某工业园区，是一家以铅锌冶炼为主的大型有色金属企业，主要生产电锌、电铅及综合回收产品。企业始建于 20 世纪 90 年代，采用“沸腾焙烧—浸出—净化—电积”湿法炼锌工艺和“还原熔炼—氧化吹炼”火法炼铅工艺。根据企业排污许可要求，在厂区共布设土壤监测点位 11 个，同时设置厂区外土壤本底对照点 1 个，周边敏感点 2 个，共计 14 个监测点位。

2.2 样品采集与检测

土壤样品采集参照《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166-2004）执行，每个点位采集表

层土壤（0-20cm），记录采样深度、土壤颜色、质地、植被及土地利用情况等信息。检测指标包括 pH 值、水分、铅、锌、镉、砷、汞、铬、镍、铜等 9 项。采用原子吸收分光光度法测定铅、镉、铜、锌、镍，原子荧光法测定砷、汞，火焰原子吸收法测定铬。质控措施包括平行样测定、标准物质验证和加标回收试验，样品合格率 100%。

2.3 评价方法与数据处理

采用单因子污染指数法评价单一重金属超标情况。执行标准依据《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）第二类用地筛选值和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618-2018）。采用 SPSS 软件进行相关性分析和主成分分析。

三、结果与讨论

3.1 土壤重金属含量特征

厂区 11 个监测点位的重金属检测结果如下。铅含量范围为 56.2~386mg/kg，平均值约 210mg/kg，对照点铅含量约 28.5mg/kg。参照 GB36600-2018 第二类用地筛选值 800mg/kg，厂区所有点位均未超标；但参照农用地风险筛选值，约 45%的点位超出筛选值，最高超出 2.27 倍。镉含量范围为 0.8~5.9mg/kg，平均值约 3.2mg/kg，对照点镉含量约 0.2mg/kg。按农用地风险筛选值，所有厂区监测点均超标，超标倍数达 1.3~9.8 倍；按建设用地筛选值 65mg/kg，无超标。砷含量范围为 12.4~58.6mg/kg，平均值约 28.5mg/kg，对照点砷含量约 10.2mg/kg。按农用地筛选值 25mg/kg，约 36%的点位超标。锌含量范围为 95.2~892mg/kg，平均值约 320mg/kg，对照点锌含量约 68.5mg/kg，约 55%的点位超标。汞含量范围为 0.08~0.67mg/kg，平均值约 0.35mg/kg，参照农用地筛选值 3.4mg/kg，无超标。铜、镍、铬整体处于较低水平。

3.2 污染空间分布

从空间分布来看，冶炼主厂区的铅、镉、锌含量显著高于原料库区和办公生活区。其中，锌板块酸罐区附近的监测点镉含量最高，铅板块脱硫区附近铅含量较高。这与冶炼工艺流程中重金属元素的迁移转化规律一致——镉主要富集在湿法炼锌的浸出、净化环节，铅则主要来自火法熔炼烟尘。周边敏感点土壤中铅、镉含量分别为背景对照点的 2.1 倍和 3.5 倍，表明冶炼活动对周边土壤已产生一定程度的影响。

3.3 相关性分析与源解析

对 9 种重金属元素进行 Pearson 相关性分析，结果表明：铅与镉呈显著正相关，铅与锌呈显著正相关，镉与锌呈显著正相关，砷与铅呈正相关；铜、镍、铬之间呈中等程度相关，

但与铅、镉、锌相关性较弱；汞与各元素均无明显相关性。

进一步采用主成分分析法提取污染源因子，共提取 3 个主成分，累计方差贡献率达 84.2%。主成分 1 贡献率 58.7%，载荷较高的元素为铅、锌、镉、砷，代表铅锌冶炼烟尘沉降源。铅锌精矿中伴生的镉、砷在高温焙烧、熔炼过程中随烟气挥发，沉降于厂区及周边土壤。主成分 2 贡献率 15.8%，载荷较高的元素为铜、镍、铬，代表原料堆场扬尘及矿石风化源。主成分 3 贡献率 9.7%，仅汞因子载荷较高，代表燃煤辅助生产源或历史遗留污染。

3.4 污染成因分析

冶炼厂区土壤重金属污染的主要成因包括四个方面。大气沉降方面，熔炼炉、焙烧炉、回转窑等烟气虽经脱硫除尘处理，但部分细颗粒物仍可逸散，携带重金属进入周边土壤，铅板块和锌板块脱硫排口是主要排放源。无组织排放方面，原料库、备料排口、转运站等环节的粉尘逸散是重金属扩散的重要途径，原料库附近点位铅含量明显高于其他区域。废水渗漏方面，酸罐区、浸出槽、净化槽等湿法冶炼设施若防渗措施不到位，含重金属的酸性废水可能渗入土壤，锌板块酸罐区监测点镉含量最高印证了这一判断。固体废物堆存方面，冶炼渣、除尘灰等堆存场所如未进行规范防渗，雨水淋溶可导致重金属迁移。

四、结论

研究区冶炼厂区土壤中铅、锌、镉、砷污染突出。厂区 11 个监测点中，镉在农用地标准下超标率 100%，铅超标率 45%，锌超标率 55%，铅锌冶炼活动是土壤重金属累积主因。空间分布上，污染程度呈“冶炼主厂区>原料库区>周边敏感点>对照区”递减趋势，酸罐区、脱硫区、浸出槽区是重点污染区域。源解析显示，冶炼烟尘沉降是首要污染源，贡献率 58.7%，其次是原料扬尘源贡献率 15.8%和燃煤辅助源贡献率 9.7%，铅、锌、镉、砷高度同源，铜、镍、铬来源相似。

建议采取管控措施：加强烟气治理设施运维，提高除尘效率；对有组织排放点位按季度或月度持续监测；对重点污染区域分区管控，完善防渗措施；建立长期土壤环境质量跟踪监测机制，每年开展一次厂区及周边土壤监测，及时发现污染趋势。

参考文献

- [1] 马栋栋,李荣有,李超楠,等. 豫西矿产核心区典型氧化锌冶炼企业土壤污染调查及评价研究[J]. 环境生态学,2025,7(10):33-39.
- [2] 王丁,朱红,郭小芳,等. 某有色金属冶炼基地大气降尘重金属对土壤的影响分析[J]. 甘肃冶金,2025,47(4):134-138.
- [3] 帅旺财,刘文奇,马丽雅,等. 典型有色金属冶炼场地重金属来源解析及生态健康风险

评估[J]. 地球与环境,2024,52(6):756-770.