doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.327

引用格式:徐白璐.铁路场段土壤重金属含量分布特征及生态风险评价[J].中国地质调查,2025,12(3):128-137.(Xu B L. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils in railway depots[J]. Geological Survey of China,2025,12(3):128-137.)

铁路场段土壤重金属含量分布特征及生态风险评价

徐白璐

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西西安 710043)

摘要:铁路交通运输是土壤重金属元素的重要潜在来源,为探究铁路场段土壤重金属空间分布规律以及污染程度,选取我国北方某铁路机务段、车辆段和编组场作为研究对象,测定机务段、车辆段各 16 处和编组场 6 处样点的土壤重金属(As、Hg、Cd、Pb、Cu 和 Ni)含量,对比分析铁路各场段土壤重金属的分布特征,阐明相关关系,并采用内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 生态风险评价法评估各场段土壤重金属环境质量和生态风险。研究结果表明:①研究铁路场段存在重金属积累现象,但积累程度较轻,不存在超标现象;②机务段土壤Pb、Cd 含量和车辆段土壤 Cu、Cd、Pb 含量空间分布存在差异,重金属积累受人为活动影响较大,机务段油库、洗车机电控楼和锅炉房土壤 Pb 含量或 Cd 含量偏高,车辆段锅炉房、变电所、预检预修库、轮对段修间和指挥中心中土壤 Cu 含量、Pb 含量或 Cd 含量偏高,车辆段锅炉房、变电所、预检预修库、轮对段修间和指挥中心中土壤 Cu 含量、Pb 含量或 Cd 含量偏高,车辆段锅炉房、变电所、预检预修库、轮对段修间和指挥中心中土壤 Cu 含量、Pb 含量或 Cd 含量偏高,各场段工艺差异会导致不同重金属在土壤中积累;③场段土壤 Cd 含量与 Pb 含量、As 含量呈显著正相关,3 种重金属可能受油料燃烧废气、油品存放使用、车辆尾气、铁路煤炭运输等因素影响;④各场段综合土壤环境质量判定结果均为无污染,土壤生态风险程度处于最低级别。研究结果可为铁路场段设计、运营以及土壤环境影响评价提供参考。

关键词: 土壤重金属; 铁路机务段; 铁路车辆段; 铁路编组场; 生态风险评价 中图分类号: X825; P681.7 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 8706(2025)03 - 0128 - 10

0 引言

早在 20 世纪 90 年代,铁路土壤环境污染就 已经引起了国内外的关注,波兰、中国、塞尔维亚、 日本 等国 学者先后开展的相关研究结果表 明^[1-6]:无论是呈线性的铁路两侧区域土壤,还 是呈点状的铁路枢纽、货场、车辆清洗间等区域土 壤,普遍存在一定程度的重金属富集情况,且富集 程度随离铁轨的距离变小呈上升趋势,就不同铁 路性质而言,客运铁路和货运铁路两侧土壤同样 呈现出重金属的积累,类似结论也在其他对公路 等线性交通工程的相关研究中得以验证^[7]。土壤 中富集的重金属不易扩散,且重金属污染物可能 与其他类型污染物产生协同效应,从而对生物体 产生毒性^[8],威胁土壤生态环境健康。我国铁路 建设起步较早,铁路网分布广泛且运输繁忙,铁路 长期的运输作业、列车维护都是导致周边土壤重 金属富集的潜在因素^[9]。

铁路场段是铁路中负责综合整备、整体检修的 单位,具有作业地点固定,工艺环节繁杂的特点。目 前,我国对铁路土壤污染的研究主要集中在铁路沿 线的调查分析,对铁路场段土壤污染的研究暂无系 统性研究结果,谷朝君等^[10]的研究显示某铅金属矿 石铁路货场周边土壤存在重金属 Pb 和 Cd 污染,且 重金属的累积效应十分明显。2018 年,生态环境部 发布的《HJ 964—2018 环境影响评价技术导则 土壤 环境(试行)》^[11]中明确指出"铁路的维修场所"属于

收稿日期: 2023-11-27;修订日期: 2024-05-11。

基金项目:中铁第一勘察设计院集团有限公司科技研究计划开发项目"铁路场段土壤污染现状研究及环境影响评价技术探析(编号: 2021KY30ZD(STHB)-01)"及中国铁建股份有限公司科研计划课题"铁路场段土壤重金属及总石油烃污染现状及防治措施 研究(编号:2021-C51)"联合资助。

第一作者简介:徐白璐(1992—),女,工程师,主要从事铁路环保设计研究工作。Email: 498686615@qq.com。

土壤环境影响评价项目类别中的"III类",在敏感程 度较高时应开展土壤环境影响评价。可见开展铁路 场段的土壤重金属污染现状研究,掌握铁路场段土 壤重金属的环境影响及程度是十分必要的。

选取我国北方铁路某机务段、车辆段和编组场作 为研究对象,通过现场布点取样和重金属含量测定等 技术手段,对比分析铁路各场段土壤重金属含量的分 布特征,阐明其相关关系,并评估各场段土壤重金属环 境质量和生态风险,以期为铁路场段设计与环评提供 依据,也为铁路场段的环境保护管理工作提供参考。 1 研究区概况

研究区位于关中盆地东部渭河河谷阶地区,各 场段采样点布设见图 1。研究区域内地形开阔、地 势平坦,属暖温带半湿润大陆性季风气候,区域地 层岩性上部主要为第四系全新统冲积黏质黄土、细 砂、中砂、粗砂及细圆砾土等;下部为第四系上更 新统冲积粉质黏土、细砂、中砂及粗砂,局部夹粉 土层。



(a) 研究区平面位置示意



⁽b) 车辆段采样点位置

(c) 编组场采样点位置**图1 各场段采样点位置**

(d) 机务段采样点位置

Fig. 1 Location of sampling points in each railway depot

2 材料与方法

2.1 取样地点与土样处理

供试土壤采集于中国北方某机务段、某车辆段 和某编组场,3个场段位置相邻,其中机务段、车辆 段于 2003 年开始运营,编组场于 1979 年开始运 营。本研究分析各场段工艺流程及平面布局后,机 务段选取 16 处采样点、车辆段选取 16 处采样点、 编组站选取 6 处采样点,采样点距离场段内各建筑 物最小距离按 0.5 m 控制。选择非硬化地面处表 土进行采样。2022 年9 月按五点采样法采集各采 样点表层土壤(0~20 cm)约3 kg,去除杂物混合后 密封于棕色磨口顶空瓶和塑封袋,粘贴标签并记录 采样基本信息,实验室避光4℃冷藏保存,用于基 本物理化学性质和重金属含量测定。

2.2 基本物理化学性质测定

土壤 pH 值、氧化还原电位(Eh)测定采用电位法 (PHS-3C 型 pH 计、TR-901 型土壤 ORP 计); 阳离 子交换量(cation exchange capacity, CEC)测定采用三 氯化六氨合钴浸提-分光光度法(TU-1810DASPC 型 紫外可见分光光度计); 总孔隙度、渗滤率、土壤容 重测定采用环刀法(202-2ES型电热恒温干燥箱、 JY3002型电子天平)。土壤 pH 值、氧化还原电位 测试前采用标准液进行仪器校准,阳离子交换量测 试前采用和样品同步配制的空白样 2 个和标准液 建立 R² ≥0.999的标准曲线,总孔隙度、渗滤率、土 壤容重测试前校准电子天平,每组样品随机设置平 行样 2 个进行质量控制,相对标准偏差≤10%。测 试所用试剂选用分析纯试剂,测试用水为蒸馏水。

2.3 重金属含量测定

As、Hg 的测定采用原子荧光法仪器为 SK - 2003AZ 型原子荧光光谱仪,检出限: As 为 0.01 × 10⁻⁶, Hg 为 0.002 × 10⁻⁶。Cd、Pb 的测定采用石墨炉 原子吸收分光光度法,仪器为 AA - 7050 型原子吸收 分光光度计,检出限: Cd 为 0.01 × 10⁻⁶, Pb 为 0.1 × 10⁻⁶; Cu、Ni 的测定采用火焰原子吸收分光光度法, 仪器为 AA - 7050 型原子吸收分光光度计,检出限: Cu 为 1.0 × 10⁻⁶, Ni 为 3.0 × 10⁻⁶。重金属含量测试

前采用和样品完全同步配制的两个空白样和标准液 建立相 R² ≥0.999 的标准曲线,每组样品随机设置 两个平行样及一个有证标准样品进行质量控制,相 对标准偏差均≤10%。测试所用试剂选用分析纯试 剂,测试用水为蒸馏水。

3 各场段土壤基本物理化学性质与 重金属含量分析

3.1 各场段土壤基本物理化学性质

各场段土壤基本物理化学性质见表 1,采用 SPSS 22.0 软件中的 Duncan 法进行数据差异性分 析,机务段土壤 CEC 和车辆段土壤 CEC 分别显著 超过编组场土壤 2.16 cmol/kg 和 2.59 cmol/kg,车 辆段土壤 Eh 值显著超过编组场土壤,各场段土壤 pH 值、总孔隙度、渗滤率和土壤容重不存在显著 差异。

表1 各场段土壤基本物理化学性质

Tab. 1 The basic physical and chemical characteristics of soils in different railway depots

场段	采样点数/处	pH 值	$CEC/(\text{ cmol }\cdot\text{ kg}^{-1})$	Eh 值/mV	总孔隙度/%	渗滤率/(mm・min ⁻¹)	土壤容重/(g・cm ⁻³)
机务段	16	8.14 $\pm 0.16a$	$12.43 \pm 1.61a$	$429.25\pm50.05ab$	$37.69 \pm 3.27a$	$0.87\pm0.26a$	$1.194\pm0.018a$
车辆段	16	8.16 $\pm 0.12a$	$12.86 \pm 1.62a$	466.13 $\pm 41.40a$	$37.09 \pm 3.43a$	$0.82\pm0.24a$	$1.193\pm0.018a$
编组场	6	$8.09 \pm 0.03a$	$10.27 \pm 3.91b$	$401.83\pm30.13b$	$38.63 \pm 0.92a$	$0.94 \pm 0.10a$	$1.185 \pm 0.017a$
	~~~~						4 H

注:同一列不同小写字母表示不同场段差异显著(P<0.05),a与b之间存在显著差异,a、b与ab之间不存在显著差异。

# 3.2 各场段土壤重金属含量

各场段土壤重金属含量见表 2, 机务段土壤 As、Cd、Pb、Cu、Ni 含量高于所在城市土壤化学元素 背景值[12],分别是背景值的1.13、1.08、1.46、1.04 和1.08倍;车辆段土壤Pb和Ni含量高于所在城 市背景值,分别是背景值的1.57和1.18倍;编组 场土壤 As、Pb 和 Ni 含量高于所在城市背景值,分 别是背景值的 1.06、1.17 和 1.10 倍。可见本研究 中各场段土壤重金属含量存在高于背景值的情况, 但整体超标倍数较低,此外各场段土壤重金属含量 均远低于《GB 36600-2018 土壤环境质量 建设用 地土壤风险管控标准(试行)》^[13]中的第二类用地 筛选值。就不同场段中同一重金属元素含量而言, 采用 Duncan 法进行数据差异性分析,机务段土壤 As 含量显著超过车辆段土壤 As 含量;编组场土壤 Hg含量虽然显著超过机务段土壤 Hg含量,但均低 于所在城市背景值;车辆段土壤 Ni 含量分别显著

超过机务段和编组场土壤 Ni 含量。可见本研究中 各场段土壤 As、Hg 和 Ni 含量存在差异,可能与各 场段功能及生产工艺不同有关。

采用变异系数(coefficient of variation, CV)衡量 重金属元素受人为活动影响和空间分布特征, CV < 20%时为低度变异, [20%, 50%]时为中度变异, CV > 50%时为高度变异^[14]。机务段土壤 Pb(CV = 37.03%)和 Cd(CV = 33.22%)为中度变异, 其余为 低度变异;车辆段土壤 Cu(CV = 41.37%)、Cd (CV = 38.39%)和 Pb(CV = 21.01%)为中度变异, 其余为低度变异;编组场土壤重金属均为低度变 异。可见研究区机务段土壤 Pb、Cd 含量和车辆段 土壤 Cu、Cd、Pb 含量空间变异性较大,可能受到人 为活动影响。

本研究进一步分析了各场段中变异系数为中 度的土壤重金属的分布空间差异,各场段采样点位 置见表3,不同采样点的土壤重金属含量见图2,机 表 2 各场段土壤重金属含量描述性统计

	Tab. 2 Descriptive statistics of heavy metals in soils of different railway depots							
场段	特征值	As	Hg	Cd	Pb	Cu	Ni	
	含量范围/10-6	10.00 ~ 19.60	$0.024 \sim 0.048$	0.07~0.26	23.20~76.60	20.00 ~40.00	$32.00 \sim 40.00$	
机务段	平均值 ± 标准差/10 ⁻⁶	$13.51 \pm 2.17a$	$0.038\pm0.008b$	$0.14\pm 0.05a$	$33.48 \pm 12.39a$	$28.00\pm5.51a$	$34.56\pm2.09b$	
	变异系数/%	16.04	19.89	33.22	37.03	19.68	6.05	
	含量范围/10-6	8.20~15.40	$0.035 \sim 0.048$	$0.05 \sim 0.24$	25.30 ~ 53.50	18.00 ~64.00	$33.00 \sim 47.00$	
车辆段	平均值 ± 标准差/10 ⁻⁶	$11.49\pm1.88b$	$0.043\pm0.005ab$	$0.13\pm 0.05a$	$36.09 \pm 7.58a$	$26.81 \pm 11.09a$	$37.88\pm3.37a$	
	变异系数/%	16.41	12.77	38.39	21.01	41.37	8.90	
	含量范围/10-6	$11.30 \sim 14.00$	$0.036 \sim 0.048$	0.08~0.13	23.20 ~30.20	$15.00 \sim 23.00$	$34.00 \sim 38.00$	
编组场	平均值 ± 标准差/10 ⁻⁶	$12.73\pm0.94ab$	$0.045\pm0.005a$	$0.11\pm0.02a$	$26.89 \pm 2.60a$	20.17 $\pm 2.67a$	$35.17\pm1.34b$	
	变异系数/%	7.39	11.29	16.27	9.65	13.25	3.82	
所在城市	「土壤化学元素背景值[12]/10-6	12	0.059	0.13	23	27	32	
建设用地	土壤风险管控标准/10-6	60	38	65	800	18 000	900	

注:同一列不同小写字母表示不同场段差异显著(P<0.05), a 与 b 之间存在显著差异, a \ b 与 ab 之间不存在显著差异;建设用地土壤风险管控标准参照第二类用地筛选值。

#### 表3 各场段土壤采样点位置

#### Tab. 3 Soil sampling sites in different railway depots

	编号	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16
机务段	位署	污水	受电弓	洗车机	段办	2号	地下	整备	1号	锅炉	油店	材料	检修	小辅	旋轮	职教	合告
	匹且	处理站	检测间	电控楼	公楼	发油点	油库	Г	发油点	房	1田)平	库	库	修库	库	中心	民王
	编号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	С9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
车辆段	位置	制动间	材料 库	易燃品 存放间	预检 预修库	修车 库	配件 加修库	设备 维修间	变电 所	轮对段 修间	轮轴厂 修库	洗罐 棚	污水 处理站	指挥 中心	锅炉房	宿舍	食堂
사람 사람 부국	编号		B1		]	B2		B3			B4			B5		B6	
骊组切	位置	上行词	周车场西	国区	上行调	车场中区	上	行调车	场东区	下行	调车场西	互区	下行调	车场中	区下行	行调车	汤东区
40 35 30 901/(sy) 80 15 10 5 0	- As( - Pb(	虚线为背員 虚线为背員	A function of the second	10/11/12	11-21-41-5	100 90 80 70 90(/(qd)) 60 0(/(qd)) 30 20 10 0	40 35 30 901/(SY) 9 15 10 5 0	- As(虚	は线为背景 ( () () () () () () () () () () () () () (	<ul> <li>(1)</li> <li>(1)</li> <li>(2)</li> <li>(2)</li> <li>(2)</li> <li>(3)</li> <li>(4)</li> <li>(4)</li> <li>(5)</li> <li>(5)</li> <li>(6)</li> <li>(7)</li> <li>(7)</li></ul>	87970 877	23455	100 -90 -80 -70 -50 (01/(qd)) -300 -20 -10 -0	40 355 300 225 10 5 5 0	As(虚线) Pb(虚线)	为背景位) 	100 20 30 70 50 50 40 30 20 10 50
		(a) 机	务段 As	₅、Pb 含量	1. E.			(1	o) 车辆	段 As 、Pl	b含量			(c) 绯	扁组场 As	、Pb含t	<u>ま</u> 里
0.10 0.08	Hg Cc	g(虚线为背 l(虚线为背	景值) 景值)			0.5	0.10 0.08	Hg( Cd()	虚线为背身 虚线为背身	そ值) そ值)			0.5	0.10	Hg(虛线 → Cd(虛线	为背景值) 为背景值)	0.5 0.4
9-01/( ^g H)ω 0.02						0.3 9.01 0.2 9.0 0.1	9-01/( ^g H) 0.04 0.02	X	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		$\sum$	V	α(cq)/10-2 α (Cq)/10-2 α (Cq)	9-01/(gH) 0.04 0.02	$\sim$		ω(Cq)/10- ₂ 6.0
0.00	<u>.</u> ১৯৫ ৫	5 yk ys ys	<b>、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、</b>	101111	12.21×12	0.0	0.00	<u>ರಿ</u> ರಿರಿ		<u>・・・・</u> ふののc 采样点	1901090	³ C1 ⁸ C1 ⁵ C	] 0.0 المحر	0.00	<b>やややや</b> 采样』	¥ \$\$}\$\$	0.0
		(d) 机	务段H	g、Cd 含量	島 里			(	e) 车辆	段 Hg、C	ld 含量			(f) 约	扁组场 H _e	g、Cd 含	量
	图 2 - 1 各场段不同区域土壤重金属含量																

Fig. 2-1 Heavy metal content in soils of different areas in each railway depot



Fig. 2 - 2 Heavy metal content in soils of different areas in each railway depot

务段中土壤 Pb 含量较高的点位为锅炉房,为背景 值^[12]的3.33倍,土壤 Cd 含量较高的点位为油库、洗 车机电控楼和锅炉房,分别为背景值的2.00、1.62和 1.46倍;车辆段中土壤 Cu 含量较高的点位为变电 所和预检预修库,分别为背景值的2.37和1.56倍, 土壤 Cd 含量较高的点位为锅炉房、变电所和指挥中 心,分别为背景值的1.85、1.69和1.46倍,土壤 Pb 含量较高的点位为变电所、指挥中心和轮对段修间, 分别为背景值的2.33、2.02和1.81倍。

· 132 ·

锅炉房土壤 Pb、Cd 含量偏高可能与锅炉房燃 料燃烧有关^[15],经现场调查,研究场段均采用燃气 锅炉,燃料燃烧后排放的烟尘中可能含有 Pb、Cd 等 重金属,烟尘通过大气沉降到周边土壤中导致土壤 表层重金属含量上升^[16]。变电所土壤 Cu、Pb 含量 偏高可能与变压器油的使用有关,车凯等^[17]的研 究表明某变电站表层土壤 Cu、Pb 含量均高于对照 土壤,分别是所在地土壤背景值的 3.85 和 4.15 倍,与本研究相符,其指出超标原因为变电站运营 期检修保养和变压器油泄漏。油库或油品存放区 域土壤容易受到重金属污染,有研究表明油库中汽 油和柴油存放区多种土壤重金属含量超过背景 值^[18],新疆某油库储罐周边土壤 Cd 含量为 (0.04~0.28)×10⁻⁶,超过背景值^[19],与本研究相 符。Pb、Cd是设备涂料的常见组成成分,铁路车体 材料一般为高强度铝合金^[20],预检预修库、洗车机 电控楼、轮对段修间均为铁路场段中维修作业区 域^[21],现场调查中发现,由于预检预修库部分区域 为露天作业且轨道周围未进行场地硬化,土壤颜色 已发生改变,该区域土壤 Cd、Cu、Pb 含量偏高的原 因可能与车辆清洗、打磨、维修工艺相关。此外,由 于研究场段主要服务于货运车辆,运输的货物如 煤、油等可能残留于车体,在场段进行车体清洗维 修作业时附着于周边土壤。

# 3.3 相关性分析

相关性分析可以解释不同土壤重金属元素含量之间的关系,是识别土壤重金属来源和有效控制因素的途径^[22]。本研究对各铁路场段不同土壤重金属含量进行 Pearson 相关性分析,结果见表4。机

Tab. 4 Correlation analysis of neavy metal content in sons of uncerent ranway depots							
场段	相关系数	As	Hg	Cd	Pb	Cu	Ni
	As	1					
	Hg	-0.083	1				
扣友庇	Cd	0.500 *	-0.073	1			
机分权	Pb	0.115	-0.068	0.554 *	1		
	Cu	-0.011	-0.063	0.328	0.238	1	
	Ni	-0.373	0.410	-0.087	0.109	0.250	1
	As	1					
	Hg	0.052	1				
<u> 大</u> - 左正 F几	Cd	0.387	0.298	1			
牛捆权	Pb	0.316	-0.229	0.690 * *	1		
	Cu	-0.260	0.268	0.285	0.450	1	
	Ni	-0.024	0.030	-0.384	-0.203	0.055	1

表 4 各场段不同土壤重金属含量之间的相关性分析

avy motal contant in sails of diffe

							<b></b>
场段	相关系数	As	Hg	Cd	Pb	Cu	Ni
	As	1					
	Hg	0.458	1				
4040 亿	$\operatorname{Cd}$	0.187	0.029	1			
珊组切	Pb	0.445	0.130	-0.299	1		
	Cu	-0.340	-0.143	0.785	-0.403	1	
	Ni	0.628	0.203	0.545	0.039	0.364	1

注: **表示 P<0.01, *表示 P<0.05。

务段土壤 Cd 含量与 As、Pb 含量呈显著正相关,车辆 段土壤 Cd 含量与 Pb 含量呈极显著正相关,说明这 3 种重金属元素可能具有相同或者类似的来源,这与 前人对不同场地的研究结果^[22-24]相吻合,本研究中 土壤 Cd 含量、Pb 含量和 As 含量较高点位主要为机 务段和车辆段的锅炉房、油库及变电所,上述 3 种重 金属元素的含量可能与燃料燃烧废气、油品存放使 用、车辆尾气、铁路煤炭运输等因素相关^[25]。

4 各场段土壤重金属环境质量评价

## 4.1 评价方法

本研究采用内梅罗综合污染指数法^[24]从综合 污染角度评价场段土壤重金属环境质量,该方法在 单因子指数法的基础上综合各元素污染影响,突出 含量高、影响大的元素,是综合评价土壤环境质量 的方法,其计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad , \tag{1}$$

$$P_{n} = \sqrt{\frac{(P_{imax})^{2} + (P_{imean})^{2}}{2}} \quad (2)$$

式中: *P_n* 为内梅罗综合污染指数,无量纲; *P_{imax}*为 元素污染指数的最大值,无量纲; *P_{imean}* 为各元素污 染指数的平均值,无量纲; *C_i* 为元素在土壤中的含 量,10⁻⁶; *S_i* 为元素土壤含量的标准值,10⁻⁶; 因本 研究场段用地属于道路与交通设施用地,标准值选 用《GB 36600—2018 土壤环境质量 建设用地土壤 风险管控标准(试行)》^[13]中的第二类用地筛选值。

# 4.2 评价结果

该方法根据内梅罗综合污染指数的大小对污 染程度分为5个等级,划分标准见表5。各场段土 壤重金属内梅罗综合污染指数评价结果见表6,各 场段内梅罗综合污染指数大小顺序为机务段 (0.163)>编组场(0.154)>车辆段(0.139),均远 小于0.7,即无污染,研究认为铁路场段整体土壤重

表 5 内梅罗综合污染指数等级划分标准

Tab. 5 Grading standards of Nemerow comprehensive

pollution index

级别	$P_n$	污染程度
1	$P_n \leq 0.7$	清洁
2	[0.7,1)	警戒
3	[1,2)	轻度污染
4	[2,3)	中度污染
5	$P_n \ge 3$	重度污染

### 表 6 各场段土壤重金属内梅罗综合污染指数

 Tab. 6
 Nemerow comprehensive pollution index for

heavy metals in soils of different railway depots

场段	$P_n$	级别	污染程度
机务段	0.163	1	清洁
车辆段	0.139	1	清洁
编组场	0.154	1	清洁

金属环境质量较好。主要因为铁路场段以车辆维修保养工艺为主^[26],不涉及有毒有害原料或产生 高污染物的生产工艺,长期运营对场地土壤重金属 含量影响较小。

5 各场段土壤重金属生态风险评价

### 5.1 评价方法

采用 Men 等^[27]基于 Hakanson 生态风险评价 法上提出的综合生态风险指数法评价场段土壤重 金属生态风险,该方法综合考虑了重金属毒性系数 和多种重金属复合污染的累计风险,广泛应用于土 壤生态风险评价,其计算公式为

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \quad , \tag{3}$$

$$N_{IRI} = \sqrt{\frac{(E_{rmax}^{i})^{2} + (E_{rmean}^{i})^{2}}{2}} \quad (4)$$

式中: $C_i$ 为元素在土壤中的含量, $10^{-6}$ ; $B_i$ 为元素 土壤含量背景值, $10^{-6}$ ,本研究选用场段所在城市 土壤化学元素背景值(表 2); $T_i$ 为元素的毒性系 数,无量纲,本研究 As、Hg、Cd、Pb、Cu、Ni 的毒性系 数分别取 10、40、30、5、5、5^[28]; *N*_{IRI} 为综合生态风险指数,无量纲; *Eⁱ_{max}* 为重金属元素生态风险指数的最大值,无量纲; *Eⁱ_{mean}* 为各重金属元素生态风险 指数的平均值,无量纲。该方法根据生态风险指数 *Eⁱ_r* 和综合生态风险指数 *N*_{IRI}的大小对生态风险分 为五个等级,划分标准见表7。

表 7 生态风险指数等级划分标准 Tab. 7 Grading standards of ecological risk index

_		
$E_r^i$	N _{IRI}	风险程度
$E_r^i \leq 40$	$N_{IRI} \leq 40$	轻微风险
[40,80)	[40,80)	中等风险
[80,160)	[80,160)	较强风险
[160,320)	[160,320)	很强风险
$E_r^i \ge 320$	$N_{IRI} \ge 320$	极强风险
		$E_r^i$ $N_{IRI}$ $E_r^i \leq 40$ $N_{IRI} \leq 40$ [40,80)         [40,80)           [80,160)         [80,160)           [160,320)         [160,320) $E_r^i \geq 320$ $N_{IRI} \geq 320$

# 5.2 评价结果

各场段土壤重金属生态风险指数评价结果见 图 3,机务段各元素  $E_r^i$ 大小顺序为 Cd(32.163) > Hg(25.720) > As(11.260) > Pb(7.277) > Ni (5.400) > Cu(5.185),均处于轻微风险级别;车 辆段各元素  $E_r^i$ 大小顺序为 Cd(30.865) > Hg (29.110) > As(9.571) > Pb(7.846) > Ni(5.918) > Cu(4.965),均处于轻微风险级别;编组场各元素  $E_r^i$ 大小顺序为 Cd(30.169) > Hg(24.231) > As(10.611) > Pb(5.844) > Ni(5.495) > Cu(3.735), 均处于最低等级轻微风险。



Fig. 3 Ecological risk index of heavy metals in soils of different railway depots

各场段土壤重金属综合生态风险指数评价结 果见表 8,各场段综合生态风险指数大小顺序为: 机务段(24.948) > 车辆段(24.178) > 编组场 (23.328),均小于 40,即风险程度为轻微风险。

表 8 各场段土壤重金属综合生态风险指数 Tab. 8 Comprehensive ecological risk index for heavy metals in soils of different railway depots

场段	N _{IRI}	级别	风险程度
机务段	24.948	1	轻微风险
车辆段	24.178	1	轻微风险
编组场	23.328	1	轻微风险

由上可见各场段不同重金属元素的生态风险 和各场段综合生态风险均为最低等级轻微风险,研 究认为铁路场段整体土壤重金属生态风险较低。 *E*,和*N*_{IRI}的大小与重金属本身的毒性系数极其相 关,研究表明 Hg、Cd 是毒性系数较高的重金属, As、Pb、Cu 和 Ni 相比而言毒性系数较低^[29],结合前 文对场段重金属含量和分布的研究,建议在铁路场 段的土壤环境质量管控和生态风险管控中重点关 注涉及燃料燃烧(如锅炉房)、油品使用(如油库、 变电所)和清洗打磨喷漆(如预检预修、轮对鉴修、 车辆清洗)的作业地点。

# 6 结论

为探究铁路场段土壤重金属空间分布规律以 及污染程度,本研究采集某运营多年的铁路机务 段、车辆段和编组场内不同位置的表层土壤,通过 测定各点土壤重金属含量及相关性分析,开展了铁 路场段重金属含量分布空间特征的研究,同时进行 场段土壤重金属环境质量评价和生态风险评价,主 要研究结论如下。

(1)机务段土壤 As、Cd、Pb、Cu、Ni 含量,车辆 段土壤 Pb 和 Ni 含量,编组场土壤 As、Pb 和 Ni 含 量高于所在城市土壤背景值,但均远低于《GB 36600—2018 土壤环境质量 建设用地土壤风险管 控标准(试行)》限值,表明研究铁路场段存在重金 属积累现象,但积累程度较轻,不存在超标现象。

(2)机务段土壤 Pb、Cd 含量和车辆段土壤 Cu、 Cd、Pb 含量空间分布存在差异,表明各场段土壤重 金属积累受人为活动影响较大,机务段油库、洗车机 电控楼和锅炉房土壤 Pb 含量或 Cd 含量偏高,车辆 段锅炉房、变电所、预检预修库、轮对段修间和指挥 中心中土壤 Cu 含量、Pb 含量或 Cd 含量偏高,表明 各场段工艺差异会导致不同重金属在土壤中积累。

(3)场段土壤 Cd 含量与 Pb 含量、As 含量呈显 著正相关,3 种重金属可能受油料燃烧废气、油品存 放使用、车辆尾气、铁路煤炭运输等因素影响,是铁路场段需重点关注的重金属元素,在铁路场段运营 作业中应加强针对防治。

(4)各场段综合土壤环境质量判定结果为无污染,各场段土壤生态风险程度处于最低级别,即轻微风险,表明研究铁路场段土壤重金属污染程度较轻。建议在今后的铁路场段设计、运营以及环境影响评价中重视涉及燃料燃烧、油品使用和车体清洗打磨喷漆等工艺区域的土壤重金属含量,保护铁路场段土壤环境。

### 参考文献(References):

- [1] Malawska M, Wiłkomirski B. Soil and plant contamination with heavy metals in the area of the old railway junction Tarnowskie Góry and near two main railway routes[J]. Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny,2000,51(3):259 - 267.
- [2] Malawska M, Wiłkomirski B. An analysis of soil and plant (taraxacum officinale) contamination with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the area of the railway junction Hawa Główna, Poland [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 127(1):339 - 349.
- [3] Wang L F,Bai Y X,Gai S N. Single factor and Nemerow multi factor index to assess heavy metals contamination in soils on railway side of Harbin – Suifenhe railway in northeastern China[J]. Applied Mechanics and Materials,2011,71 –78(71 –78):3033 – 3036.
- [4] Zhang H, Wang Z F, Zhang Y L, et al. The effects of the Qinghai Tibet railway on heavy metals enrichment in soils [J]. Science of the Total Environment, 2012, 439:240 – 248.
- [5] Stojic N, Pucarevic M, Stojic G. Railway transportation as a source of soil pollution [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 57:124 – 129.
- [6] 王桢. 铁路沿线土壤重金属污染特征与来源分析[D]. 成都: 西南交通大学,2018.

Wang Z. Contamination Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal in Soil in Vicinity of Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

 [7] 周怡,吴秋梅,樊亚男,等. 江苏省典型高速公路沿线土壤重 金属分布特征及影响因素研究[J]. 土壤通报,2023,54(1): 161-170.

Zhou Y, Wu Q M, Fan Y N, et al. Spatial distribution and influencing factors of heavy metals in soils around typical highways in Jiangsu provinces [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1):161-170.

- [8] Wierzbicka M, Bemowska Kałabun O, Gworek B. Multidimensional evaluation of soil pollution from railway tracks[J]. Ecotoxicology, 2015, 24(4):805 – 822.
- [9] Chen J S, Li T T, Wang L. Soil heavy metal pollution in the soil of railway traffic: a mini – review [J]. Academic Journal of Agricul-

ture & Life Sciences, 2020, 1(1):1-8.

- [10] 谷朝君,姜海波,宋珺,等. 铁路货场土壤重金属污染研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,2010,37(1):29-31.
  Gu Z J, Jiang H B, Song J, et al. Research on heavy metal pollution in the soil in railway freight yard[J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection,2010,37(1):29-31.
- [11] 生态环境部. HJ 964—2018 环境影响评价技术导则 土壤环境 (试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
  Ministry of Ecological Environment. HJ 964—2018 Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment — Soil Environment[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2018.
- [12] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘,2014,21(3):265-306.
  Cheng H X,Li K,Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers,2014,21(3):265-306.
- [13] 生态环境部,国家市场监督管理总局. GB 36600—2018 土壤 环境质量 建设用地土壤风险管控标准(试行)[S]. 北京:中 国环境科学出版社,2019.

Ministry of Ecological Environment, State Administration for Market Regulation. GB 36600—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Development Land[S]. Beijing:Standards Press of China, 2019.

- [14] Niu S P, Gao L M, Wang X. Characterization of contamination levels of heavy metals in agricultural soils using geochemical baseline concentrations[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4): 1697 – 1707.
- [15] 王显软,费学海,杨员,等.贵阳市花溪城区 PM 2.5 中重金属 元素的污染特征、来源及健康风险评价[J].环境科学学报, 2023,43(6):110-118.
  Wang X Q, Fei X H, Yang Y, et al. Pollution characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metal elements in PM 2.5 collected in Huaxi urban areas, Guiyang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(6):110-118.
- [16] 赵洪刚,刘忠攀,王海苗,等.小型燃气供暖锅炉的燃烧与污染物排放试验[J].煤炭加工与综合利用,2020(12):83-87.
  Zhao H G,Liu Z P, Wang H M, et al. The emission test of combustion and pollutants of small gas heating boiler[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization,2020(12):83-87.
- [17] 车凯,郁金星,宫云茜,等.变电站场地土壤环境调查与评价[J].环境科学与技术,2021,44(S1):120-125.
  Che K,Yu J X,Gong Y Q, et al. Investigation and evaluation of soil environment in substation [J]. Environmental Science & Technology,2021,44(S1):120-125.
- [18] 任剑峰, 王波. 某废弃油库土壤重金属污染健康风险评估[J]. 安徽大学学报:自然科学版,2021,45(4):100-108.
  Ren J F, Wang B. Health risk assessments of soil polluted by heavy metals at the site of an abandoned oil depot[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition),2021,45(4):100-108.
- [19] 陈昱君. 新疆油田土壤污染调查及典型污染物迁移转化研

究[D].北京:中国石油大学(北京),2021.

Chen Y J. Investigation of Soil Pollution and Study on Migration and Transformation of Typical Pollutants in Xinjiang Oilfield [D]. Beijing; China University of Petroleum (Beijing), 2021.

- [20] 康兴东,任玉鑫,高超,等. 铁路客车车体结构材料的演变与展望[J]. 铁道机车车辆,2019,39(2):119-124.
  Kang X D, Ren Y X, Gao C, et al. Evolution and prospect of railway passenger car carbody structure materials[J]. Railway Locomotive & Car,2019,39(2):119-124.
- [21] 何勇.重载铁路 C96 型 30 t 轴重车辆段工艺适应性设计研究[J].铁道标准设计,2018,62(8):174-177.
  He Y. Process adaptability design and research on C96 30 t axis vehicle depot of heavy haul railway[J]. Railway Standard Design, 2018,62(8):174-177.
- [22] 王诗雨,李淳,赵洪伟,等. 某试验场土壤重金属分布特征及 其污染评价[J]. 环境科学,2023,44(3):1657-1667.
  Wang S Y, Li C, Zhao H W, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in soils of a testing range[J].
  Environmental Science,2023,44(3):1657-1667.
- [23] 罗帅,马新月,王东,等. 重庆市场地土壤污染特征分析及行业来源识别[J]. 生态环境学报,2020,29(4):810-818.
  Luo S, Ma X Y, Wang D, et al. Analysis of soil pollution characteristics and identification of industry sources in contaminated sites in Chongqing city, China [J]. Ecology and Environmental Sciences,2020,29(4):810-818.
- [24] 字星辰,张家浩,王庆同,等. 莱州湾南岸滨海湿地表层土壤 重金属元素分布与生态风险评价[J].中国地质调查,2023, 10(5):82-90.

Yu X C, Zhang J H, Wang T Q, et al. Heavy metal elements distribution in the surface soil of coastal wetland in Southern Laizhou Bay and ecological risk assessment[J]. Geological Survey of China,2023,10(5):82-90.

- [25] 梅梅,闵宁.运煤铁路两侧土壤重金属分布特征及污染评价
  [J].河北北方学院学报:自然科学版,2019,35(9):49-53.
  Mei M, Min N. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in soil on both sides of coal railway[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition),2019, 35(9):49-53.
- [26] 丁莉. 包头西机务段和谐型电力机车 C4 修工艺方案研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(11):153-157.
  Ding L. Research on harmonious electric locomotive C4 maintenance process program for Baotou West locomotive depot[J].
  Railway Standard Design,2016,60(11):153-157.
- [27] Men C, Liu R M, Xu L B, et al. Source specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 388:121763.
- [28] 李旭,李军,李开明,等. 基于蒙特卡洛模拟的兰州银滩湿地 公园沉积物重金属污染特征及风险评价[J].环境化学, 2024,43(7):2340-2355.

Li X, Li J, Li K M, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals contamination in sediments from the Lanzhou Yintan wetland park based on Monte Carlo simulation model [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(7):2340-2355.

[29] 王新军,窦红菲,黄山倩,等. 高速公路路域土壤重金属污染
 特征与生态风险评价[J]. 交通运输研究,2021,7(4):75 84.

Wang X J, Dou H F, Huang S Q, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of roadside soil a-long expressway[J]. Transport Research, 2021, 7(4):75-84.

# Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils in railway depots

# XU Bailu

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710043, China)

Abstract: Railway transportation is an important potential source of the heavy metals in soils. In order to explore the spatial distribution pattern and pollution level of soil heavy metals in railway depots, the authors selected a locomotive depot, a vehicle depot and a marshalling yard in the northern part of China as the study object and measured the heavy metals (As, Hg, Cd, Pb, Cu, and Ni) content of the respective 16 samples from locomotive depot and vehicle depot, and 6 samples from the marshalling yard. The distribution characteristics of heavy metal in each railway depot were analyzed by comparing with the standards, and their correlation relationships were identified. The environmental quality and ecological risks of heavy metals in the soils of each depot were evaluated by Nemerow comprehensive pollution index and Hakanson ecological risk assessment method. The results are as follows. ① There is a phenomenon of heavy metal accumulation in the railway depot, but the accumulation degree is relatively light without a sign of exceeding the standard. ② The spatial distribution of Pb and Cd content in the locomotive depot and Cu, Cd, and Pb content in the vehicle depot has huge variations. The accumulation of heavy

metals is greatly affected by human activities, and Pb and Cd content in the soils of the oil depot, washing workshop, and boiler room of the locomotive depot is higher. Cu, Pb, and Cd content in the soils of the boiler room, substation, pre – inspection and pre – repair warehouse, wheelset overhaul workshop, and command center of the vehicle depot is higher as well. Furthermore, the divergences in the process of each railway depot will lead to the accumulation of different heavy metals in the soil. ③ There is a significant positive correlation between Cd content and Pb and As content, and these heavy metals may be influenced by the factors such as oil combustion exhaust gases, storage and usage of oil, vehicle exhaust gases, and railway coal transportation. ④ The results of comprehensive soil environmental quality assessment show that there is no pollution in each depot, and the ecological risk degree of each depot is at the lowest level. This research results could provide references for the design, operation, and soil environmental impact assessment of railway depots.

**Keywords**: heavy metals in soils; railway locomotive depot; railway soil vehicle depot; railway marshalling yard; ecological risk assessment

### (责任编辑:王晗)