

钢铁企业周边土壤重金属污染特征及风险评价*

余正兴

(三明市闽环国投环保有限公司, 福建 三明 353000)

摘要 为明确钢铁企业周边土壤的污染程度及污染风险, 以福建省某钢铁企业为例, 采用系统布点法并结合大气沉降范围和地形等因素, 共布点23个, 其中在距企业边界50 m内布点5个(记空间距离为50 m), 在边界外大气沉降范围内距企业边界约500 m处布点15个(记空间距离为500 m), 在大气沉降范围外距企业边界约1 000 m处布对照样点3个(记空间距离为1 000 m), 测定土壤中镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)共8种重金属含量, 并采用单因子指数法、内梅罗综合指数法对土壤环境进行了评价。结果表明, 50和500 m处土壤的As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn含量均超过福建省土壤背景值。评价结果表明, 距钢铁企业边界50和500 m处, 内梅罗综合指数分别为20.47、24.85, 为重污染, Cd和Zn单因子指数均大于1, 为重污染, 表明钢铁企业周边土壤受到污染。

关键词 钢铁企业; 土壤; 重金属含量

中图分类号: S151.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2024) 06-0128-07

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202406019

Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Soil Surrounding A Steel Enterprise

YU Zhengxing

(Sanming Min Environmental Protection Investment Co., Ltd, Sanming, Fujian 353000, China)

Abstract To clarify the pollution situation and risks of soil surrounding the iron and steel enterprise, taking a steel enterprise in Fujian province as an example, a systematic point distribution method was adopted, combined with factors such as atmospheric deposition range and terrain, with a total of 23 points distributed. Among them, 5 points were distributed within 50 meters of the enterprise boundary (with a spatial distance of 50 m), 15 points were distributed about 500 meters away from the enterprise boundary within the atmospheric deposition range outside the boundary (with a spatial distance of 500 m), and 3 control points were distributed about 1000 m away from the enterprise boundary outside the atmospheric deposition range (with a spatial distance of 1 000 m) to determine the content of 8 heavy metals, including cadmium Cd, mercury Hg, arsenic As, lead Pb, chromium Cr, copper Cu, nickel Ni, and zinc Zn, in the soil. The single factor index method and Nemerow comprehensive index method were used to evaluate the soil environment. The results showed that the content of 8 heavy metals, including As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, at 50 and 500 m exceeded the background values. The evaluation results showed that the Mero comprehensive index at 50 and 500 m of the steel enterprise was 20.47 and 24.85, respectively, indicating heavy pollution. The single factor index of Cd

* 作者简介: 余正兴(1987—), 男, 工程师, 主要从事生态环境评价, 环境保护等工作, E-mail: 625095455@qq.com。

and Zn was greater than 1, indicating that the soil around the steel enterprise was polluted.

Key words iron and steel enterprises; soil; heavy metal content.

钢铁产业在现代工业体系中占据着举足轻重的地位,对国民经济的发展起着至关重要的作用。我国的钢铁生产总量约占全世界的50%,具有极大的社会经济影响^[1-2]。然而,钢铁企业在生产过程中会产生大量含有重金属的污染物,如烧结、炼铁、炼钢等工序会排放含有铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As)等重金属的废气、废水和废渣。这些污染物通过大气沉降、废水排放、废渣堆存及淋溶等途径进入周边环境,造成土壤重金属污染。

土壤是构成人类生存的生态系统基本要素之一^[3],不仅具有生产绿色植物的功能,还具有过滤性、吸附性、缓冲性等特性^[4],是人类赖以生存和发展的物质基础。随着人们对环境保护和健康问题关注度的不断提高,土壤重金属污染因其隐蔽性、长期性、不可逆性以及对生态系统和人类健康的潜在威胁而备受关注。钢铁企业周边土壤的重金属污染不仅会影响土壤的生态功能,如土壤肥力下降、微生物群落结构改变等,还可能通过食物链传递危害人类健康,例如重金属在农作物中的累积可能导致食用者体内重金属超标,引发各种疾病。

随着钢铁产业的快速发展,其对环境的影响也日益凸显,尤其是土壤环境污染问题,已成为社会关注的焦点。本文以福建省某钢铁企业为例,探讨钢铁企业对土壤的影响,分析污染成因,并提出相应的治理措施,以期环境保护和可持续

发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为福建省某钢铁企业周边区域,该企业以生产钢和钢铁制造为主。该区域平均气温偏高,为19.9℃,降水偏少,年平均降水量为1375.2mm。

1.2 样品采集

土壤样点的布设采用系统布点法,共设23个点,具体如下,通常将土壤监测点设于工业园区边界红线外20m范围内的裸露土壤,但此处20m内无裸露土壤,故向外延伸,最远不超50m^[5],在距企业边界50m内布点5个(记空间距离为50m)。距企业边界约500m处布点(记空间距离为500m);经前期调研,监测企业是否污染周边土壤,在可能受污染区域加密布点,于边界外距企业边界约500m处布点15个。距企业边界约1000m处布对照样点(记空间距离为1000m):根据环评结果,且该区域超过1000m为高山,大气沉降^[6]很难影响1000m以外区域,所以在大气沉降范围外距企业边界约1000m处布对照样点3个。土壤样品于2022年9月晴天采集,按《土壤环境监测技术规范HJ/T166-2004》^[7]采集0~20cm表层土。采集后的土壤样品经自然风干后,按表1方法测定各项指标。监测样点分布可参照图1,具体点位信息见表2。

表1 各指标测定方法

Tab. 1 Determination method of each index

指标 Index	测定方法 Determination methods
pH	玻璃电极法测定 ^[8]
Cu、Zn、Ni、Cr	《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法HJ491-2019》 ^[9]
Cd、Pb	《土壤质量 铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法GB/T17141-1997》 ^[10]
As、Hg	《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法GB/T22105.2-2008》 ^[11]

1.3 评价方法

1.3.1 单因子污染指数评价法 单因子污染指数评价法^[12]是近年来常用于土壤污染评价的方法,其表达式为:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 为土壤污染物*i*的单项污染指数; C_i 为土壤中污染物*i*的实测数据,单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;本研究中 S_i 采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》^[13]中“其他”农用地的风险筛选值。污染等级分为4级,见表3所示^[14]。



注：地图来源于谷歌地图。
Note: The map is from Google Maps.

图 1 研究区域及样点分布示意
Fig. 1 Study area and the sample distribution diagram

表 2 采样样点距企业边界距离
Tab. 2 Distance between the sampling points and the enterprise boundary

样点编号 Sampling point No.	距边界距离/m Distance from boundary	样点编号 Sampling point No.	距边界距离/m Distance from boundary
样点 1	7	样点 13	145
样点 2	23	样点 14	245
样点 3	33	样点 15	128
样点 4	50	样点 16	160
样点 5	10	样点 17	144
样点 6	428	样点 18	240
样点 7	363	样点 19	430
样点 8	327	样点 20	428
样点 9	132	样点 21 (CK1)	1 140
样点 10	200	样点 22 (CK2)	1 060
样点 11	470	样点 23 (CK3)	1 030
样点 12	400		

表 3 土壤单因子污染指数评价分级^[14]

Tab. 3 Evaluation and grading of soil single factor pollution index

等级划分 Classification	单项污染指数 (P_i) Single pollution index	污染等级 Pollution level
1	$P_i \leq 1.0$	无污染
2	$1.0 < P_i \leq 2.0$	潜在污染
3	$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻污染
4	$P_i > 3.0$	重污染

1.3.2 内梅罗综合指数法 内梅罗综合指数法^[15]综合考虑所有测量指标，能更直观定性描述土壤环境质量，计算公式为：

$$P_{jc} = \sqrt{\frac{P_{ijmax}^2 + P_{ijave}^2}{2}}$$

式中， P_{jc} 为第 j 个监测点的综合污染指数； P_{ijmax} 为第 j 个监测点 i 污染物所有单项污染指数中的最大值； P_{ijave} 为第 j 个监测点 i 污染物所有单项污染指数的平均值。污染等级分为 5 级，见表 4 所示^[14]。

1.4 数据处理与分析

数据分析及作图由 Excel2010、SPSS20.0 和 ArcGIS 10.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤 pH 分布特征

研究区不同空间距离土壤样品的 pH 值见图 2，50 m 处 pH 值为 7.22 ± 0.60 ，500 m 处 pH 值为 7.53 ± 1.03 ，1 000 m 处土壤 pH 值为 4.69 ± 0.23 ，50 m 处和 500 m 处土壤 pH 值均极显著大于 1 000 m 处土壤 pH 值 ($P < 0.01$)，但两者无显著性差异，且大于福建省环境土壤背景值 4.7，均大于 7，土壤呈碱性。

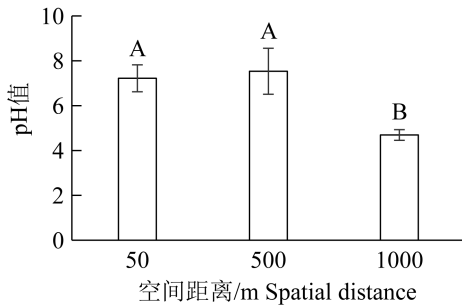
2.2 土壤重金属含量分布特征

研究区不同空间距离下重金属含量见表 5。Cd、Cr、Hg、Ni 和 Pb 在不同空间距离下的平均含量均大于福建省土壤背景值^[15]。8 种重金属元素在不同空间距离土壤间均无显著性差异。土壤 As 元素在 50 和 500 m 处含量均高于福建省土壤环境背景值 ($5.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，分别约为土壤背景值的 2.00 倍和 2.39 倍。土壤 Zn 元素在 50 和 500 m 处含量均约为福建省土壤环境背景值的 4.9 倍。土壤 Cu 仅 1 000 m 处含量低于福建省背景值 ($21.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

表 4 内梅罗综合指数评价分级^[14]

Tab. 4 Nemerow comprehensive index evaluation and grading

等级划分 Grading	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Class of pollution	污染水平 Pollution level
1	$P_c \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_c \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P_c \leq 2.0$	轻污染	土壤污染物超过背景值，视为轻污染，作物开始污染
4	$2.0 < P_c \leq 3.0$	中污染	土壤、作物均受到中度污染
5	$P_c > 3.0$	重污染	土壤、作物受污染已相当严重



注：不同字母表示组间存在极显著差异 ($P < 0.01$)。
Note: Different letters indicate highly significant differences between groups ($P < 0.01$).

图 2 福建省某钢铁企业边界土壤 pH 范围

Fig. 2 PH range in boundary soil of a steel enterprise in Fujian province

2.3 土壤重金属相关性

研究土壤中重金属含量的相关性，可以推测其来源是否相同，若重金属含量有显著相关性，说明来源可能相同，否则来源可能不止一个。用 SPSS 软件对这 8 种重金属进行相关性分析 (表 6)，结果表明，土壤中的 Zn 与 Cd、Pb、Cr、Cu 均为极

显著正相关 ($P < 0.01$)；Ni 与 Cd、Hg、Pb、Cr、Cu 均为正相关；Cu 与 Cd、As、Pb、Cr 正相关；Cr 与 Cd、Pb 正相关；Pb 与 Cd 极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.4 土壤重金属风险水平评价

基于农用地土壤污染风险筛选值，采用单因子指数法计算，距研究区不同距离下的土壤重金属单因子评价结果如表 7 所示，污染水平分布如图 3 所示。由表 7 可知，50 m 处的 P_i 均值依次为 Cd (5.90) > Zn (1.56) > Cu (0.76) > Pb (0.69) > As (0.39) > Cr (0.23) > Ni (0.16) > Hg (0.08)，其中，Cd 单因子指数均值为 5.90， $P_i > 3$ ，说明土壤是重污染。500 m 处的 P_i 均值依次为 Cd (3.38) > Zn (1.45) > Cu (0.90) > Pb (0.75) > As (0.49) > Cr (0.32) > Ni (0.13) > Hg (0.08)，其中，Cd 单因子指数均值为 3.38， $P_i > 3$ ，表明土壤是重污染。1 000 m 处土壤 P_i 均值均小于 1，说明土壤尚未受到污染。

表 5 福建省某钢铁企业边界不同空间距离下土壤重金属质量分数平均值

Tab. 5 Average mass fraction of heavy metals in soil under different spatial distances in a steel enterprise in Fujian province

元素 Element	空间距离/m Spatial distance			研究区土壤背景值/ Soil background value in the study area ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	50	500	1 000	
As	11.57±7.00a	13.80±9.59a	4.42±2.25a	5.78
Cd	1.94±2.34a	1.87±3.76a	0.12±0.07a	0.05
Cr	49.00±24.91a	70.87±45.32a	47.03±32.02a	41.30
Cu	69.80±44.06a	75.93±81.53a	16.33±10.56a	21.60
Hg	0.21±0.15a	0.21±0.24a	0.19±0.15a	0.081
Ni	21.80±15.61a	16.40±7.63a	15.10±4.71a	13.50
Pb	85.60±36.44a	127.21±152.57a	49.30±15.29a	34.90
Zn	406.60±209.98a	408.67±499.63a	75.30±15.36a	82.70

注：同行数据后字母不同表示差异性显著 ($P < 0.05$)。
Note: Data with different letters are significantly different ($P < 0.05$).

表 6 福建省某钢铁企业边界土壤不同重金属含量相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis of different heavy metal contents in boundary soil of a steel enterprise in Fujian province

重金属 Heavy metal	镉 Cd	汞 Hg	砷 As	铅 Pb	铬 Cr	铜 Cu	镍 Ni
汞	0.037						
砷	0.301	0.281					
铅	0.799**	-0.066	0.197				
铬	0.534**	-0.029	0.224	0.619**			
铜	0.834**	0.192	0.422*	0.792**	0.655**		
镍	0.450*	0.417*	0.130	0.521*	0.579**	0.751**	
锌	0.896**	0.200	0.390	0.887**	0.585**	0.919**	0.619**

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上显著相关。

Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level, ** indicates a significant correlation at the 0.01 level.

表 7 福建省某钢铁企业边界土壤重金属单因子评价结果

Tab. 7 Single factor evaluation results of heavy metals in boundary soil of a steel enterprise in Fujian province

空间距离/m Space distance	单项污染指数 P_i Single pollution index							
	镉 Cd	汞 Hg	砷 As	铅 Pb	铬 Cr	铜 Cu	镍 Ni	锌 Zn
50	5.90±8.17a	0.08±0.06a	0.39±0.23a	0.69±0.38a	0.23±0.11a	0.76±0.39a	0.16±0.06a	1.56±0.78a
500	3.38±6.24a	0.08±0.12a	0.49±0.35a	0.75±0.88a	0.32±0.19a	0.90±0.91a	0.13±0.08a	1.45±1.65a
1 000	0.41±0.25a	0.15±0.11a	0.11±0.06a	0.73±0.74a	0.31±0.21a	0.33±0.21a	0.25±0.08a	0.38±0.08a

注：同行数据后字母不同表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

Note: Data with different letters are significantly different ($P < 0.05$).

由图 3 可知，所有监测土壤样品中，Hg、Cr、Ni 均属于无污染。对于 Cd 元素，50 m 处 40% 样品为潜在污染，20% 样品为轻污染，40% 样品为重污染；500 m 处 13% 样品为潜在污染，13% 样品为轻污染，27% 样品为重污染；1 000 m 处均为无污染。对于 As 元素，500 m 处 13% 属于潜在污染，其他样品均为无污染。对于 Pb 元素，50 m 处 20%

样品为潜在污染，500 m 处 13% 样品为潜在污染，7% 样品为轻污染，其他样品均为无污染。对于 Zn 元素，50 m 处 20% 样品为潜在污染，40% 为轻污染，500 m 处 27% 样品为潜在污染，7% 样品为轻污染，14% 样品为重污染，其余样品均为无污染。对于 Cu 元素，50 m 处 20% 样品为潜在污染，其他样品为无污染。

■ 无污染 Non-pollution ■ 潜在污染 Potential pollution ■ 轻污染 Light pollution ■ 重污染 Heavy pollution

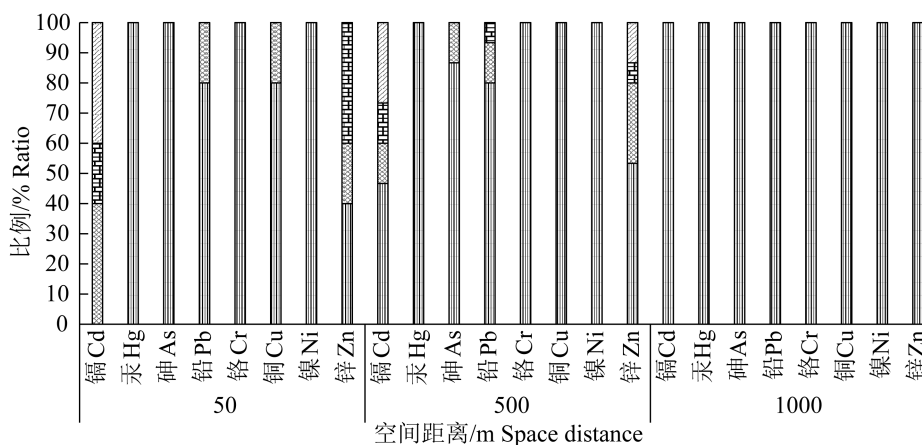


图 3 福建省某钢铁企业边界不同空间距离土壤重金属污染程度分布

Fig. 3 Distribution of soil heavy metal pollution levels at different spatial distances at the boundary of a steel enterprise in Fujian province

利用内梅罗污染指数法计算研究区的综合污染指数, 结果表明(表 8), 以农用地土壤污染风险筛选值作为评价标准基, 50 m 处内梅罗综合指数为 20.47, 表明土壤中各种金属元素均已有一定程度的积累, 且土壤受到重污染。500 m 处内梅罗综合指数为 24.85, 说明土壤受到重污染。1 000 m 处内梅罗综合指数为 1.00, 表明土壤处于警戒限。

表 8 福建省某钢铁企业边界土壤重金属污染评价结果
Tab. 8 Assessment results of soil heavy metal pollution at the boundary of a steel enterprise in Fujian province

空间距离/m Space distance	内梅罗综合指数 P_c Nemerow composite index	评价 Evaluate
50	20.47	重污染
500	24.85	重污染
1 000	1.00	警戒限

3 讨论与结论

土壤 pH 值主要通过影响重金属化合物在土壤溶液中的溶解度和重金属元素离子的活度, 进而影响重金属元素在环境中的行为^[16]。研究区 50 和 500 m 处土壤 pH 值均大于 7, 为碱性土壤。陈轶楠^[14] 对晋南某钢厂及其周边农田土壤进行 pH 值测定与分析, 结果表明钢铁厂内部表层土壤 pH 值的平均值是 8.08, 周边农田土壤 pH 值的范围是平均值是 8.14, 均呈碱性, 本研究与其研究结果相似。

重金属性质稳定且难以降解, 会在土壤中中长期蓄积^[17-18], 已有研究表明, 钢铁厂、焦化厂、化工厂等高污染企业土壤中重金属含量水平较高^[18]。本研究表明, 研究区 50 和 500 m 处土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量均高于 1 000 m 处重金属含量, 且均高于福建省土壤背景值, 这表明研究区土壤已受到外源重金属污染。韩鹏^[20] 对北京市首钢进行研究, 结果表明土壤重金属 Pb、Cd、Zn 和 Hg 的平均含量已经超出当地的背景值。李勇^[21] 相关研究表明, 钢铁厂的主要重金属污染是电炉冶炼中产生含 As 的烟尘和炉渣、五氧化二钒的工艺、金属铬车间会产生的含 Cr 废水; 张施阳^[22] 对某钢铁厂遗留场地进行研究, 结果表明土壤中 Cu ($39.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Pb ($47.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Sb ($0.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Co ($13.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、V ($90.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 超出对照点浓度水平。

研究土壤中各重金属含量的相关性可以推测重

金属来源是否相同, 如果重金属含量间有显著的相关性, 说明其可能具有相同的来源^[23]。从土壤重金属元素相关性来看, 研究区内 8 种重金属元素相关性复杂且显著, 本文研究结果表明, Zn 与 Cd、Pb、Cr、Cu 极显著正相关, Ni 与 Pb、Cr 极显著正相关, 说明 Zn、Cd、Pb、Cr、Cu 和 Ni 来自相同污染, 可能由钢铁厂引起。田甜^[24] 对闽西钢铁厂周边农田土壤重金属污染进行研究, 结果也表明土壤重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 和 Ni 具有同源性, 推测可能是来自钢铁厂废水和粉尘的污染。耿婷婷^[24] 对北方某钢铁厂研究区展开研究, 相关分析表明, 研究区土壤中的 Zn 与 Pb、Zn 与 As、Hg 与 Cu 之间关系紧密, 且均为正相关。

单项污染指数结果表明该调查区域的土壤重金属污染形势较为严峻, 本研究中, 50 和 500 m 处 Cd 和 Zn 单项污染指数均大于 1, 且内梅罗综合指数分别为 20.47、24.85, 为重污染。本研究结果表明, 50 m 处所有土壤样品中的 Cd、Pb 和 Zn 元素均有样品有污染, 说明钢铁厂周边土壤已经受到重金属污染。有研究报道, 钢铁厂周边土壤重金属均达重污染, 处于很强和极强生态风险水平, 这与本研究结果一致^[25]。因此认为本研究区内 Cd 和 Zn 元素污染源可能来自钢铁生产过程中的排污行为, 包括废水和粉尘等。

研究表明, 土壤污染可能会导致周边的作物出现重金属富集超标现象, 马鑫^[25] 等人对黄石市某钢铁厂周边苔藓植物进行研究, 结果表明苔藓植物富集着大量的 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 元素。土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性, 本研究结果表明, 调查区域土壤由于长期受到钢铁厂废水和粉尘污染源的影响, 已经受到重金属污染, 因此, 需要采取措施进行修复。目前, 主要修复措施有以下几种^[27], 一是工程措施, 如客土、换土和深耕翻土等措施; 二是物理防治方法, 如电动修复、电热修复、土壤淋洗等; 三是化学修复, 如向土壤中投放硅酸盐钢渣, 其对 Cd、Ni 和 Zn 离子具有吸附和共沉淀作用; 四是生态修复, 如植物修复、微生物修复等。

目前, 主要的修复措施包括工程措施(如客土、换土和深耕翻土等)、物理防治方法(如电动修复、电热修复和土壤淋洗等)、化学修复(如向土壤中投放硅酸盐钢渣, 其对 Cd、Ni 和 Zn 离子具有吸附和共沉淀作用)以及生态修复(如植物

修复和微生物修复等)^[27]。

参考文献

- [1] 侯艺璇. 北方某大型钢铁企业场地土壤多环芳烃三维刻画与修复决策研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2023.
- [2] 杨磊,熊黑刚. 新疆准东煤田土壤重金属来源分析及风险评价[J]. 农业工程学报,2018,34(15):273-281.
- [3] 周千,王学涛,王靖逸,等. 土壤重金属污染微生物修复技术研究进展[J]. 现代农业科技,2024(13):95-98,122.
- [4] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,2007.
- [5] 王倩. 工业园区周边土壤污染分析与管制[J]. 中国资源综合利用,2022,40(7):152-155.
- [6] 倪刘建,张甘霖,杨金玲,等. 钢铁工业区降尘对周边土壤的影响[J]. 土壤学报,2007(4):637-642.
- [7] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范:HJ/T166-2004[S]. 北京:中国环境出版社,2004.
- [8] 奚旦立,孙裕生,刘秀英. 环境监测(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [9] 生态环境部. 土壤和沉积物铜,锌,铅,镍,铬的测定火焰原子吸收分光光度法:HJ/T491-2019[S]. 北京:中国环境出版集团,2019.
- [10] 国家环境保护总局. 土壤质量铅,镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T17141-1997[S]. 北京:中国环境出版社,1997.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土壤质量总汞,总砷,总铅的测定原子荧光法:GB/T22105.2-2008[S]. 北京:中国环境出版社,2008.
- [12] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京:中国环境科学出版社,2011:158.
- [13] 生态环境部,国家市场监督管理总局. GB15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京:中国环境出版集团,2018.
- [14] 陈铁楠. 晋南某钢厂及其周边农田土壤重金属含量分析与污染状况评价[D]. 太原市:山西师范大学,2013.
- [15] 张春梅. 城市土壤重金属的污染和生态风险评价[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [16] 陈振金,陈春秀,刘用清,等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. 环境科学,1992(4):70-75,95.
- [17] 李怡欣,谢桂军,李腊梅,等. 广东麻竹笋及产地土壤重金属污染与风险评价[J]. 林业与环境科学,2020,36(6):103-109.
- [18] 郭瑾,葛蔚,柴超,等. 化学工业区周边土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评估[J]. 环境化学,2018,37(2):14.
- [19] 张施阳. 钢铁厂遗留场地土壤重金属和多环芳烃的污染特征及健康风险评价[J]. 环境污染与防治,2022,44(10):1336-1342.
- [20] 韩鹏. 北京市首钢地区土壤重金属分布及土壤质量评价[D]. 北京:中国地质大学,2012.
- [21] 李勇. 西安某污染场地土壤重金属污染现状及健康风险评价[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
- [22] 张施阳. 钢铁厂遗留场地土壤重金属和多环芳烃的污染特征及健康风险评价[J]. 环境污染与防治,2022,44(10):1336-1342.
- [23] 高云峰,马小强,白永兴. 裕河省级自然保护区野菜资源调查[J]. 蔬菜,2016(3):38-39.
- [24] 田甜,杨婷,邹县梅,等. 钢铁厂周边土壤重金属污染特征及风险评价:以闽西三明钢铁厂周边农田为例[J]. 农学学报,2021,11(6):42-46,95.
- [25] 耿婷婷. 某钢铁污染场地健康风险评价研究[D]. 石家庄:石家庄经济学院,2011.
- [26] 马鑫,尹刚,吴乐知. 黄石市某钢铁厂周边苔藓植物重金属含量研究及污染评价[J]. 湖北农业科学,2019,58(10):51-56.
- [27] 崔德杰,张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报,2004(3):366-370.