

# The Targeted Management of Soil Heavy Metal Pollution Risk in Industrial Parks Based on the Analysis of Pollution Sources

Yong Liu<sup>1</sup>, Chengjun Wang<sup>2</sup>, Dongyuan Wang<sup>3</sup>, Zilin Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China

<sup>2</sup>School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China

<sup>3</sup>School of Information & Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China

## 基于污染源解析的工业园区土壤重金属污染风险靶向管理

刘勇<sup>1</sup>, 王成军<sup>2</sup>, 王冬源<sup>3</sup>, 张梓琳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安建筑科技大学理学院, 西安 710055, 中国

<sup>2</sup>西安建筑科技大学管理学院, 西安 710055, 中国

<sup>3</sup>西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055, 中国

### Abstract

At present, industrial parks are the harder-hit of heavy metal pollution in soil. Heavy metal pollution in soil has seriously affected the sustainable utilization of land and the security of people's living environment. In industrial parks that involve a large number of companies, the key to prevent and control the heavy metal pollution in soil is to accurately control pollution companies. This paper proposes the concept of targeted management of soil heavy metal pollution risk in industrial parks based on pollution source analysis technology. Through the investigation of heavy metal pollution in soil in typical industrial park and the analytical model of lead isotope fingerprint sources, the main sources of pollution in different areas of industrial parks can be found and precise pollution control can be proposed. The targeted management model of enterprises can provide technical and management support for the

prevention and control of heavy metal pollution in industrial parks.

**Keywords:** Industrial park; soil; pollution source analysis; targeted management

### 摘要

目前工业园区是土壤重金属污染的重灾区,土壤重金属污染已经严重影响到土地的可持续利用及人们的生存环境安全。在工业园区这个涉重企业众多的环境里,土壤重金属污染防治的关键是精准管控污染企业。本文基于污染源解析技术提出工业园区土壤重金属污染风险靶向管理的概念,通过对典型工业园区土壤重金属污染的调研、利用铅同位素指纹源解析模型找到工业园区不同区域污染的主要来源,提出精准监管污染企业的靶向管理模式,可为工业园区土壤重金属污染防治提供技术和管理支持。

**关键词:** 工业园区; 土壤; 污染源解析; 靶向管理

## 1. 引言

目前,我国土壤环境状况总体不容乐观,工业污染已成为土壤重金属污染的主要来源,严重影响了土地的可持续利用和人们的生存环境安全。相关统计显示,我国土壤重金属污染主要分布在中南和西南地区,尤以工业园区及其周边最为严重<sup>[1]</sup>。工业园区土壤重金属污染防控迫在眉睫。然而,工业园区土壤重金属污染防控环境管理现实中处于被动地位,往往是土壤重金属危害、环境事件已经产生才开始调查、寻找污染源,处理污染企业,此时土壤重金属污染治理及费用问题已经是很难解决的问题了。对于工业园区这个污染企业集中的特殊环境,土壤在污染初期及时有效精准的管控污染企业是解决工业园土壤重金属污染的基础。

## 2. 工业园区土壤重金属污染来源

土壤重金属的产生的途径主要分为自然途径和人为途径。自然途径是因为重金属是地壳构成的基本元素,在成土过程中受自身重金属含量影响;人为途径是因为工业污染、农业污染、交通运输污染等人为活动引起的重金属通过干湿沉降等方式进入土壤。工业生产中消耗大量的矿物燃料和矿物资源,如金属矿石的采矿、选矿、冶炼,热电、焦化等行业通过废水、废渣、废气都向环境中排放重金属,特别是这些行业的废气中含有大量带有重金属的烟尘,通过干湿沉降进入工业园区及周边的土壤中,从而导致土壤重金属含量显著高于当地背景值,土壤重金属污染严重<sup>[2]</sup>。

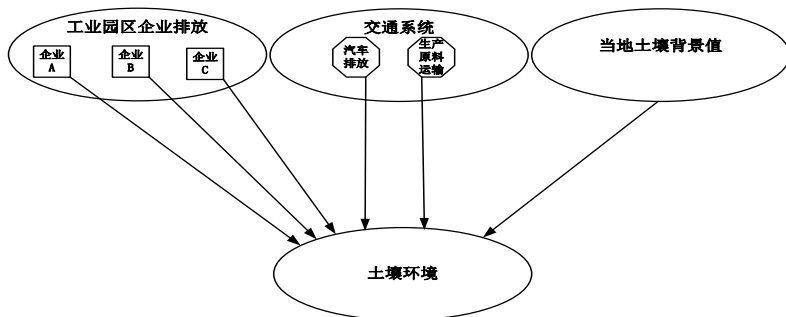


图1 工业园区土壤重金属污染的来源示意图

## 3. 土壤重金属污染来源解析模型

工业园区及周边土壤中重金属的主要来源为园区企业排放污染物,通过不同的方式进入土壤。不同企业的污染物进入土壤不但会改变土壤中重金属的浓度,也会改土壤中本地值得铅同位素指纹。因此,在环境污染研究方面,常常利用铅同位素这种特殊的“指纹”特征来示踪铅污染的来源。

### 3.1 土壤中铅同位素指纹源解析模型

为了研究工业园区不同区域土壤重金属的主要污染来源及贡献率,以采样监控数据为数据源,根据园区企业污染端元铅同位素指纹及土壤中铅同位素指纹建立模型,污染来源解析模型如下<sup>[3,4]</sup>:

$$\gamma(n) = \max(f_1, f_2, f_3, f_4) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s = f_1 \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_1 + f_2 \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_2 + f_3 \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_3 + f_4 \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_4 \\ \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s = f_1 \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_1 + f_2 \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_2 + f_3 \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_3 + f_4 \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_4 \\ \left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s = f_1 \left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_1 + f_2 \left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_2 + f_3 \left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_3 + f_4 \left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_4 \\ f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s$ 、 $\left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s$ 、 $\left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_s$  为样品

丰度比;  $\left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_1$ 、 $\left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_1$ 、 $\left( \frac{^{209}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_2$ 、 $\left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_3$ 、

$\left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} \right)_4$  分别为4个主要端元铅同位素丰度比;

$f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 和 $f_4$ 分别为四个端元的相对贡献率。 $\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_s$ 、 $\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_1$ 、 $\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_2$ 、 $\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_3$ 、 $\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_4$ 均可通过试验测得,即已知条件。 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 和 $f_4$ 为未知,因此可通过上式求解各端元的相对贡献率, $\gamma(n)$ 为第 $n$ 个网格划分区域土壤重金属主要污染源判定函数。

3.2 数据来源与污染源贡献率

研究区域位于陕西西部某工业园区,园区面积 48 平方公里,其中建设规划面积 11 平方公里,工业规划面积 5 平方公里,分为北部电力能源工业区、中部行政商业区、西南部冶炼化工工业区和东南部居住小区四个功能区。工业园区主要的涉铅企业主要有三家,分别为铅

锌冶炼厂、焦化厂和热电厂。在工业园区污染较重的区域 4km<sup>2</sup> 范围内,采样 32 个土壤样检测铅同位素指纹及企业排放污染物铅同位素指纹

$$P = \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)$$



图 2 源解析采样点分布图

主要重金属污染企业有三家,分别是铅锌冶炼厂、焦化厂和热电厂。三家企业的主要重金属污染物清单列入表 1 中。  
32 个采样点、5 个背景点、热电燃煤、焦煤、铅锌矿石的土壤铅同位素指纹  
 $P = \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)$ 如表 2 所示<sup>[15]</sup>。

表 1 工业园区固定排放源因子

污染物	排放因子		
	铅锌矿粉 mg/kg	焦化混合煤 mg/kg	电力用煤 mg/kg
Pb	19. 82	21. 4	22. 0
Zn	27. 79	68. 6	27. 0
Cu	0. 30	53. 7	16. 5
Cr	59. 5	66. 1	33. 5
As	0. 13	2. 18	3. 96
Cd	0. 28	0. 28	1. 55
Hg	198	0. 12	0. 178

表 2 土壤样及污染源铅同位素指纹信息

Sample	n	Pb content (mg/kg)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb
E	4	28. 9605-126. 505	17. 8272 -18. 4706	15. 5957-15. 6457	37. 8594-38. 681
S	4	53. 6685-74. 8001	17. 8205-17. 9912	15. 5961-15. 6042	37. 8726-38. 121
W	4	27. 6219-40. 6196	18. 3235-18. 1589	15. 6190- 15. 6264	38. 3144- 38. 52
N	4	22. 7273-60. 8520	18. 0387-18. 6297	15. 6136-15. 6602	38. 1632-38. 861
ES	4	53. 5663-70. 396	17. 9344-18. 0890	15. 6018-15. 6177	38. 0017-38. 201
WS	4	22. 993-44. 0939	17. 9999-18. 5365	15. 6082-15. 6505	38. 1154 -38. 75
WN	4	31. 791-68. 5056	17. 9505-18. 1678	15. 6040- 15. 6220	38. 0100- 38. 33
EN	4	24. 7301-29. 6656	18. 3591-18. 4123	15. 6300-15. 6369	38. 5385-38. 661
背景点	5	19. 8223-25. 8126	18. 6499-18. 8265	15. 6551-15. 6728	38. 8136-38. 991
热电燃煤	1		17. 6375	15. 5914	37. 6495
焦煤	1		17. 7547	15. 5382	38. 0603
铅锌矿石	1		18. 4006	15. 7509	38. 9392

把研究区域网分（图 3），土壤采样点分布在 16、17、18、26、27、28、36、37 号地块上，对这 8 个地块分别用铅同位素溯源的方法进行污染来源解析，求得铅锌冶炼厂、焦化厂和热电厂关于这 8 个地块的相对贡献率，贡献率最大的重金属污染企业即为该地块的主要污染源（表 3，表 4）。

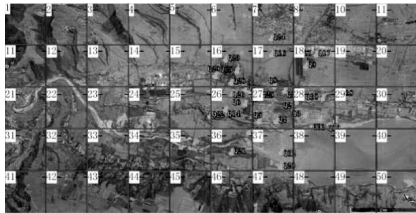


图 3 源解析采样点网分图

表 3 工业园区地块土壤铅同位素指纹信息

地块编号	206Pb/204 Pb	207Pb/204 Pb	208Pb/204Pb
16	18.39360288	15.57673881	38.3978242
17	18.46742592	15.6402928	38.56185165
18	18.41280185	15.54659461	38.38609631
26	18.45188211	15.63589320	38.53579961
27	18.19149827	15.61109332	38.22203955
28	18.11815958	15.61425734	38.14515622
36	18.43563815	15.58626115	38.47318911
37	18.47362765	15.64157815	38.61961199

表 4 源解析地块污染等级及主要污染源

地块编号	污染等级	主要污染源	地块编号	污染等级	主要污染源
16	低度	铅锌冶炼厂	27	重度	热电厂
17	中度	热电厂	28	重度	焦化厂
18	中度	焦化厂	36	中度	热电厂
26	中度	热电厂	37	中度	铅锌冶炼厂

#### 4. 工业园区土壤重金属污染风险防控靶向管理

土壤重金属污染风险靶向管理是指在土壤重金属污染初期通过监测、溯源及分源精准找到工业园区内的污染企业，在土壤重金属污

染超标前精准监管污染企业，有效防控土壤重金属污染灾害（图 4）。

工业园区内涉重企业不止一家，工业园区土壤重金属污染来源的实证分析发现，涉重企业都对工业园区及周边土壤中重金属有贡献。而涉重企业主要通过有组织和无组织方式向大气中排放重金属污染物，再通过大气干湿沉降对园区及周边土壤进行污染。对于工业园区土壤重金属污染，责任主体是存在的，但由于工业园区内有企业众多，涉重企业不止一家，土壤重金属污染是由多家涉重企业的超标排放造成的。理清土壤重金属污染的主要来源是土壤质量环境管理的关键，对工业园区中主要的污染企业及时靶向管理是减少污染加剧，控

制污染物含量上升的根本。在工业园区监测地块土壤重金属污染来源，明确重金属污染主要来源，对工业园区污染企业进行精确监督、检查，精准管理污染源防止污染持续加大是解决工业园区土壤重金属污染关键。

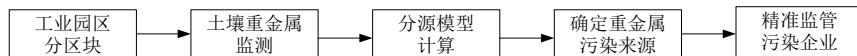


图 4 工业园区土壤重金属污染风险防控靶向管理

## 5. 结论

1) 铅稳定同位素组成具有明显的“指纹特征”，在土壤重金属来源解析中具有独特的优势。铅同位素的源解析技术是解析重金属污染来源的有效手段，可以很大程度上解决工业园区土壤重金属污染防控没有靶向的问题，为工业园区土壤重金属污染防控管理提供依据。

2) 工业园区土壤重金属污染防控的核心是对污染企业的精准管理，找到对工业园区土壤重金属污染防控的着力点，依据土壤重金属污染源解析结果提升对工业园区土壤重金属污染风险防控的管理质效，靶向管理工业园区污染企业。

## 致谢

本研究得到了陕西省社科项目“基于企业污染行为选择的陕西省工业园区土壤重金属污染

防控管理体系研究”（项目编号：2017S001）和陕西省自然科学基金基础研究计划项目“工业园区土壤重金属污染防控体系研究”（项目编码：2018JM7003）资助。

## 参考文献

- [1] 环境保护部国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 中国国土资源报, 2014-04-18002.
- [2] Tao C, Chang Q, Jing L, et al. Identification of soil heavy metal sources and improvement in spatial mapping based on soil spectral information: A case study in northwest China. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 155-164.
- [3] 路远发, 杨红梅, 周国华, 马丽艳, 梅玉萍, 陈希清. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究. *第四纪研究*, 2005(03): 355-362.
- [4] 刘勇, 王成军, 冯涛. 土壤中铅污染源解析研究. *西北大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(01): 147-151.