



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

乔丽洁,李文斐,景琳,等. 西安市主城区大气降尘重金属的污染水平及生态风险评价[J]. 能源环境保护, 2020, 34(4): 86-91.

QIAO Lijie, LI Wenfei, JING Lin, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals from urban atmospheric deposition in Xi'an[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 86-91.

西安市主城区大气降尘重金属的 污染水平及生态风险评价

乔丽洁,李文斐,景琳,孟晨星,李荣荣,候昕,董继先

(陕西科技大学机电工程学院, 陕西西安 710021)

摘要: 基于西安市主城区大气降尘中重金属含量分布进行了来源解析, 并对其潜在生态风险进行了评价。利用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-OES)测定重金属的浓度组成, 采用富集因子法判别大气降尘中6种重金属的来源, 采用潜在生态风险指数法评价其生态风险。结果表明: 6种重金属的平均含量依次为 $Cd < Ni < Cu < Cr < Pb < Zn$, 测定的重金属元素质量浓度超出1996年西安市数据的3.0~6.8倍; Cd、Pb、Zn、Cu、Cr、Ni富集因子EF平均值分别为24.544、8.085、5.552、3.397、1.334和1.412; Cd的RI值为1397.38, 远超其他5种金属, 风险程度最高; 6种重金属元素浓度的季节、空间差异明显, 反映出人类活动是西安市大气降尘中重金属的主要污染来源; 富集最为严重的Cd主要来源于垃圾焚烧, Zn的富集可能是受燃煤和垃圾焚烧的共同作用, Pb主要由汽车尾气和汽车刹车轮胎摩擦产生, Cu、Cr、Ni主要由于自然来源和一些人类活动; Cd对城市及周边郊区生态系统的危害最为严重, Pb有不利影响, Cu、Zn、Cr和Ni的危害较小。

关键词: 大气降尘; 富集因子; 生态风险评价; 电感耦合等离子发射光谱法(ICP-OES); 重金属

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2020)04-0086-06

Pollution and ecological risk assessment of heavy metals from urban atmospheric deposition in Xi'an

QIAO Lijie, LI Wenfei, JING Lin, MENG Chenxing, LI Rongrong, HOU Xin,
CHEN Jiadong, DONG Jixian

(Collage of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and
Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Based on the distribution of heavy metal content in the atmospheric deposition in the main urban area of Xi'an city, the potential ecological risks were evaluated. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) was used to determine the concentration of heavy metals. The sources of six heavy metals in atmospheric deposition were analyzed by Elemental Enrichment Factor Method. The potential ecological risk was evaluated by Potential Ecological Risk Method. The results show that the average contents of six heavy metals are $Cd < Ni < Cu < Cr < Pb < Zn$ in turn. The concentrations of heavy metal elements was 3.0 ~ 6.8 times higher than those in 1996. The average EF concentrations of Cd, Pb, Zn, Cu, Cr, and Ni are 24.544, 8.08, 5.552, 3.397, 1.334, and 1.412, respectively. The RI value of Cd is 1397.38 which is far higher than the other 5 metals and shows the highest risk. The seasonal and spatial differences of six heavy metal concentration are obvious which indicates that

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 陕西省大学生创新创业训练项目(S201910708018)

第一作者简介: 乔丽洁(1976-), 女, 河南孟县人, 博士在读, 主要从事环境资源利用、轻工装备及控制方面的研究工作。E-mail: qiaolijie@sust.com.cn

human activities are the main source of heavy metal pollution in atmospheric deposition in Xi'an. Cd, the most enriched heavy metal, is mainly from garbage incineration. The enrichment of Zn may be caused by the combined action of coal combustion and garbage incineration. Pb is mainly caused by car exhaust and the friction of car brake tires. Cu, Cr, Ni are mainly from natural sources and some human activities. Tourban and suburban ecosystems, Cd is the most hazardous heavy metal, Pb shows an adverse effect, and Cu, Zn, Cr, and Ni are less harmful.

Key Words: Atmospheric deposition; Elemental enrichment factor; Ecological risk assessment; Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES); Heavy metal

0 引言

大气降尘即为“落尘”,是指粒径多在 10 微米以上,悬浮于空气中且能借助重力、降水、湍流等自然因素降落于地表的固体颗粒物^[1]。大气降尘在物理迁移过程中,吸附了由于人类活动所产生的大量废弃物,其中不乏污染物,造成大气层乃至生态圈的污染,直接影响到人类的健康与生存。

处于“一带一路核”心区的重要城市—西安,大气降尘污染严重。田晖等研究了西安市灰尘的来源,得到了灰尘的形成模式图^[2];李欢娟等研究了西安市主要湖泊的重金属污染及其潜在生态风险^[3];李路野等人以西安市地铁为对象,调查了大气颗粒物的污染情况^[4];于燕等对西安市大气颗粒物及其金属的特征进行了研究^[5];另外,虽然已有对中国部分城市降尘重金属污染的研究^[6-10],但是关于西安市近年来大气颗粒物中重金属的污染特征和潜在生态危险还所知甚少。西安市大气颗粒物污染问题突出,探讨西安市降尘中主要重金属的污染水平,评价其潜在生态风险,可以确知重金属对西安市大气环境问题的影响程度,为制定环境质量评价和污染防治措施提供参考。

针对西安市空气质量现状,本文研究了主城区大气降尘中 Pb、Cu、Zn、Cr、Cd 和 Ni 6 种重金属元素的污染水平,对重金属进行来源解析,并对其潜在生态风险进行评价,从而为今后制定大气环境保护对策和污染防治措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样点位及样品采集

本研究根据 4 种不同的城市功能区划在西安市主城区共设置 5 个采样点,点位分布于西安市东、西、南、北、中向,分别为轻工业区(西安理工大学曲江校区,雁塔区)、居民文教区(西北大学,雁塔区)、重工业区(中国科学院西安光机所,长安

区)、混合区(轻工业与新建居民区,陕西科技大学,未央区)、商业区(北大街,新城区),采样分布见表 1。由于西安市春、秋两季的气候相似,故而选取春、夏、冬三个季节进行采样,更具代表性。

表 1 采样点位情况

序号	点位	地理位置	所属功能区	行政归属
1	陕西科技大学	三环以外	轻工业区、新建居民区	未央区
2	北大街	二环以内	商业区	新城区
3	西北大学	二环以内	居民文教区	雁塔区
4	西安理工大学	二环以外	轻工业区	雁塔区
5	光机所	三环以外	重工业区	长安区

本研究采集的样品分别为 2018 年冬季 12 月 24 至 2019 年 1 月 14 日、2019 年春季 3 月 11 日至 3 月 31 日、2019 年夏季 5 月 6 日至 5 月 26 日。

设定采样周期需考虑各种环境因素的干扰^[11],保证收集足量的降尘以满足检测要求。本实验使用加入足量乙二醇的聚乙烯圆筒集尘缸,加入乙二醇的好处是保证了采样期间筒内始终有液体(乙二醇不挥发),以及避免落入筒内的降尘再次扬起。盖好缸盖,置于采样点位后再取下缸盖,准备集尘。

1.2 样品处理及重金属检测与分析

充分收集降尘,将残留的树叶、昆虫等杂质剔除后,一般根据液体量不同,采用电热恒温干燥箱进行 3~15 小时的彻底烘干操作。经蒸发烘干后,样品经研磨装入聚乙烯塑料样品袋以便进行下一步的性质检测。

样品前处理是精确测定重金属元素的关键。降尘样品前处理采用微波消解法,使用奥地利安东帕 Multiwave Go 微波消解仪进行操作。精确称取 0.1 g 降尘试样置于微波消解罐中,加入 10 mL HNO₃、3 mL H₂O₂,将罐放入消解仪,设置升温程序开始消解。升温程序如下:升温 5 分钟至 120 ℃,再升温 5 分钟至 160 ℃,继续升温 5 分钟至 210 ℃,210 ℃恒温保持 20 分钟^[12]。待消解完

成的样品冷却后,转移至烧杯中;加入少量去离子水清洗消解罐,注意将清洗液完全转移至烧杯中,采用电加热板赶酸;将溶液蒸发至干,剩余约 1 mL 溶液时,加入 5 mL 硝酸溶液回溶,后放至冰柜冷藏。实验前将样品从冰柜取出,将消解过的样品稀释至 pH>2,并保证样品浓度低于 100 mg/L。样品需为澄清水样,在电感耦合等离子发射光谱(即 ICP-OES)测试前用 0.45 μm 滤膜过滤。本实验 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 Ni 6 种重金属元素的测定均使用美国 THERMO(热电公司)电感耦合等离子发射光谱仪。

1.3 评价方法

1.3.1 富集因子法

元素富集因子法(Elemental Enrichment Factor Method)又称富集因子法,此法可以用来表示大气降尘中重金属的富集水平并判别其来源。富集因子用 EF 表示,计算时必须选择一种合适的参比元素,用样品里重金属和参比元素的质量浓度之比与所选土壤背景(地壳中)的二者平均含量之比的比率即为 EF^[11]。EF 是判断重金属元素来源的判据:当某元素的 EF>10 时,基本认定其来源于人为污染源;当 EF≈1 时,则土壤和地壳成为该元素的主要来源^[13]。富集因子计算公式为:

$$EF = (C_i / C_n)_{\text{样品}} / (C_i / C_n)_{\text{土壤背景}} \quad (1)$$

C_i ——重金属元素的含量,mg/kg;

C_n ——参比元素的含量,mg/kg。

参比元素的选择是计算的关键。目前广泛用作参比元素的 Al 具有较好的稳定性,富集因子法对 Al 有足够高的灵敏度,而且 Al 大量存在于参比体系中,同时普遍存在于样品中^[14]。本文选择 Al 作为参比元素,根据富集因子大小将元素富集程度分为 5 级评价标准^[15],见表 2。

表 2 富集因子分级表

EF 值	富集程度	污染级别
<2	<1:无富集/1~2:轻微富集	1
2~5	中度富集	2
5~20	显著富集	3
20~40	强烈富集	4
>40	极强富集	5

1.3.2 潜在生态风险指数法

上世纪八十年代,瑞典地球化学家 Hakanson 提出潜在生态风险指数法,能够从沉积学角度评价土壤或沉积物中的重金属污染状况^[16]。本文根据此法对 Pb、Cu、Zn、Cr、Ni 和 Cd 进行风险评价。单个重金属的潜在生态风险指数为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_i / C_0 \quad (2)$$

式中, C_i ——第 i 种重金属的实测浓度;

C_0 ——重金属元素参比值;

T_r^i ——重金属生物毒性响应系数。

本文中的参比值 C_0 采用各元素在陕西省地表土中的背景值表示^[17]。 T_r^i 为各重金属的生物毒性响应系数,反映该重金属元素的毒性强度及生态环境对该元素的敏感程度,本文的 C_0 和 T_r^i 如下表 3 所示。

多种重金属潜在生态危害指数:

$$RI = \sum E_r^i \quad (3)$$

表 3 生物毒性响应系数及背景值^[18]

重金属种类	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni	Cd
生物毒性响应系数	5	5	2	1	5	30
陕西地表土背景值	20.1	20.9	61.1	66.1	27.7	0.088 6

下表 4 可以用来判定重金属元素的潜在生态风险水平。

表 4 重金属潜在生态风险程度等级划分标准^[19]

E_r^i	单因子重金属潜在生态风险程度	RI	总的重金属潜在生态风险程度
<40	I 生态危害低	<150	I 生态危害低
40~80	II 生态危害中等	150~300	II 生态危害中等
80~160	III 生态危害较高	300~600	III 生态危害较高
160~320	IV 生态危害高	>600	IV 生态危害高
>320	V 生态危害极高		

2 结果与讨论

2.1 重金属的质量浓度特征

经测定,得到西安市大气降尘中重金属质量浓度如表 5、6、7 所示。金属 Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、Ni 的平均含量高低依次为 Cd<Ni<Cu<Cr<Pb<Zn。本文测定的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等元素的质量浓度与 1996 年^[20]西安市数据相比,依次超出当时的 3.0、5.3、6.8、3.5 和 3.6 倍,反映出西安市空气质量问题较二十年前严重。

表 5 西安市冬季大气降尘中重金属元素质量浓度

采样点位	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
陕西科技大学	205.86	420.65	914.25	217.60	6.02	241.5
北大街	99.78	188.35	511.20	98.25	2.78	187.05
西北大学	159.33	157.26	523.73	103.18	3.10	191.60
西安理工大学	240.52	249.96	681.26	144.76	2.52	73.42
光机所	189.57	314.23	763.58	126.31	5.25	104.28

表 6 西安市春季大气降尘中重金属质量浓度

采样点位	mg/kg					
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
陕西科技大学	178.65	408.89	612.25	208.08	5.24	217.8
北大街	75.69	106.80	320.40	85.05	2.52	55.97
西北大学	108.34	98.60	356.2	83.06	2.87	99.69
西安理工大学	161.50	184.49	487.69	127.33	2.16	138.27
光机所	153.11	238.99	520.10	82.27	4.52	143.23

表 7 西安市夏季大气降尘中重金属元素质量浓度

采样点位	mg/kg					
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
陕西科技大学	131.56	226.59	468.30	151.25	5.31	121.83
北大街	59.07	101.75	180.07	56.52	2.26	42.91
西北大学	80.37	83.07	238.5	79.06	1.76	46.11
西安理工大学	122.53	133.11	254.22	124.20	2.46	94.79
光机所	136.43	1.668	251.21	66.03	2.89	101.79

表 8 为计算出的西安市冬季重金属元素的变异系数,其顺序为: Ni>Cd>Pb>Cr>Cu>Zn,除 Zn 元素变异系数较小外,其他元素的变异系数普遍高于 29%,其中变异系数最大的是 Ni 元素,为 43.2%。变异系数大反映了各重金属元素空间分布的差异性,说明各功能区发展不尽相同,环境情况亦有较大区别。

表 8 冬季各重金属元素变异程度

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
标准偏差	53.10	105.30	169.39	48.25	1.59	68.87
平均值	179.01	266.09	678.80	138.02	3.93	159.57
变异系数	0.297	0.396	0.250	0.350	0.404	0.432

2.2 重金属富集因子

从表 5 至 7 的重金属元素含量来看,相对而言,冬季重金属浓度普遍高于其他季节,所以采用冬季数据计算富集因子,表 9 是采用公式(1)计算得出的富集因子数据。分别给冬季 5 个样品进行编号,1~5 号分别为为陕西科技大学、北大街、西北大学、西安理工大学和光机所样品。由表 9 可知,重金属元素富集因子 EF 平均值的趋势为: Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni。其中,Cd 的富集因子平均值达到 24.544,显示出很强的富集程度,富集级别达到次高级;达到显著富集的程度的元素是 Zn 和 Pb,其平均值分别为 5.552 和 8.085;此外,达到中度富集程度的元素是 Cu,其平均值为 3.397;而达到轻微富集程度的元素是 Cr 和 Ni,平均值为 1.334 和 1.412。数据表明,所有富集因子均比 1 大,显示出 6 种重金属元素均非来源于地壳或者

土壤,最大可能是人为污染源。

表 9 西安市冬季大气降尘重金属富集因子

	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd
	1	4.215	9.765	6.87	1.868	1.565
2	2.865	6.956	4.302	1.188	1.402	22.223
3	3.279	7.235	4.702	1.202	1.479	24.452
4	2.985	7.771	5.865	1.468	1.024	22.684
5	3.642	8.697	6.020	1.333	1.201	25.799
平均值	3.397	8.085	5.552	1.412	1.334	24.544
级别	2	3	3	1	1	4
程度	中度富集	显著富集	显著富集	轻微富集	轻微富集	强烈富集

2.3 重金属来源解析

综上所述,并结合表 10,人类活动是西安市大气降尘中重金属的主要污染源,富集最严重的是 Cd,Pb 和 Zn 相对来说也比较严重。富集最为严重的 Cd 元素主要来源于垃圾的焚烧,西安市垃圾焚烧站目前建有两座,均位于三环以外,故郊区 Cd 富集程度较市区高,但由于风力作用,在市区也可以检测到 Cd 元素的踪迹;Zn 元素来源广泛,本市产生的富集原因可能是由于燃煤和垃圾焚烧共同作用,因西安属于北方城市,冬季供暖期燃煤量大,故燃煤可能是 Zn 元素的主要来源;Pb 主要是由于汽车尾气和汽车刹车轮胎摩擦产生。截止 2016 年,西安市机动车保有量突破 250 万辆,为全国第九,故由汽车带来的 Pb 元素也较为富集;Cu、Cr、Ni 三种元素富集程度较低,其主要是由于自然来源和一些人类活动如燃油、尾气和垃圾焚烧等共同带来的。

表 10 各类污染源排放的主要元素^[11]

来源	主要元素
土壤	Si、Al、Fe、Ti、K、Ca、Na、Mg、Mn、Cr、Se、Co、Eu、Yb、Rb、La、Ce、Lu、Sm、Th、Cl
燃煤	As、S、Se、Si、Al、Fe、Ti、Ca、Mn、Cr、Co、Cu、Pb、Zn、Hg、Ni、V、I、Br、La、Ce、Th
燃油	V、Ni、Co、Cu
垃圾焚烧	Zn、Cd、Sb、Cu
汽车尾气	Pb、Ba、Br、Cl、Ni
海盐	Na、Cl
金属冶炼	Cr、Cu、Zn、Fe

2.4 重金属生态风险评价

根据公式(2)及(3)计算出各重金属潜在生态风险指数 E_i^p 及多种重金属潜在生态危害指数 RI,并求平均,如下表 11 所示。由表 11 可知,Cd

的 RI 值为 1 397.38, 远超其他 5 种金属, 按照风险程度分级为极高, 说明 Cd 对城市及周边郊区生态系统的危害最为严重; 其次, Pb 的 RI 值为 70.88, 按照风险程度分级为中等, 对生态环境有不利影响; 生态风险程度低的是 Cu、Zn、Cr 和 Ni, 这四种重金属生态风险指数较小, 显示出最小生态危害。

表 11 生态风险评价结果

重金属	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd
RI	30.28	70.88	11.52	6.56	11.95	1 397.38
等级	I	II	I	I	I	V
水平	低	中等	低	低	低	极高

3 结论

(1) 西安市各季节、各地点大气降尘重金属元素质量浓度特征的差别较大, 显示了外源物质的贡献。其影响因子除了社会经济活动外, 还受到自然因子的影响; 6 种重金属 Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、Ni 的平均含量高低依次为 Cd<Ni<Cu<Cr<Pb<Zn, 本文测定的除了 Cd 之外五种元素的质量浓度超出 1996 年西安市数据的 3.0~6.8 倍, 反映出西安市空气质量问题较二十年前严重; 并且由变异系数可以看出, 金属元素浓度的空间差异明显。

(2) 西安市重金属元素富集因子 EF 平均值的趋势为: Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni。其中, Cd 的富集因子平均值达到 24.544, 显示出很强的富集程度, 富集级别达到次高级; 达到显著富集的程度的元素是 Zn 和 Pb, 其平均值分别为 5.552 和 8.085; 此外, 达到中度富集程度的元素是 Cu, 其平均值为 3.397; 而达到轻微富集程度的元素是 Cr 和 Ni, 平均值为 1.334 和 1.412。数据表明, 所有富集因子均比 1 大, 显示出 6 种重金属元素均非来源于地壳或者土壤, 最大可能是人为污染源。

(3) 人类活动是西安市大气降尘中重金属的主要污染源, 富集最严重的是 Cd、Pb 和 Zn 相对来说也比较严重。富集最为严重的 Cd 元素主要来源于垃圾的焚烧; Zn 元素来源广泛, 西安市产生 Zn 富集的原因可能是由于燃煤和垃圾焚烧共同作用; Pb 元素则主要是由于汽车尾气和汽车刹车轮胎摩擦产生。Cu、Cr、Ni 三种元素富集程度较低, 其主要是由于自然来源和一些人类活动如燃油、尾气和垃圾焚烧等共同带来的。

(4) 西安市大气降尘中 Cd 元素的 RI 值为 1 397.38, 远超其他 5 种金属, 按照风险程度分级

为极高, 说明 Cd 对城市及周边郊区生态系统的危害最为严重; 其次, Pb 的 RI 值为 70.88, 按照风险程度分级为中等, 对生态环境有不利影响; 生态风险程度低的是 Cu、Zn、Cr 和 Ni, 这四种重金属潜在生态风险指数较小, 对生态环境的风险最小。

参考文献

- [1] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [2] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14 (8): 975-1001.
- [3] 雒昆利, 苏文智, 杨建业, 等. 西安市区降尘的元素特征 [J]. 西安矿业学院学报, 1996 (1): 41-43.
- [4] SUTHERLAND R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (6): 611-627.
- [5] 于燕, 张振军, 李义平. 西安市大气颗粒物污染现状及其金属特征研究 [J]. 环境与健康杂志, 2003, 20 (6): 359-360.
- [6] 梅凡民, 徐朝友, 周亮. 西安市公园大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的化学形态特征及其生物有效性 [J]. 环境化学, 2011, 30 (7): 1284-1290.
- [7] 田晖, 刘连刚, 徐文世, 等. 西安市灰尘来源探析 [J]. 北京地质, 2002, 14 (1): 23-27.
- [8] 杨丽萍, 陈发虎, 张成君, 等. 兰州市大气降尘的化学特性 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2002, 38 (5): 115-120.
- [9] 徐争启, 倪师军, 度先国, 等. 潜在生态危害指数法评价重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31 (2): 112-115.
- [10] 焦荔, 沈建东, 姚琳, 等. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究 [J]. 环境污染与防治, 2013, 1 (35): 73-76+80.
- [11] 李路野, 樊越胜, 谢伟, 等. 西安市地铁环境中大气颗粒物污染现状调查 [J]. 环境与健康杂志, 2013, 2 (30): 160-161.
- [12] 孙友宝, 马晓玲, 李剑, 等. 微波消解 ICP-AES 法测定飞灰中的多种金属元素 [J]. 环境化学, 2014, 33 (4): 701-703.
- [13] 罗建民, 王爱霞, 杨中. 乌鲁木齐市供暖期大气颗粒物中重金属分布特征与化学形态分析 [J]. 环境研究与监测, 2015, 28 (4): 7-12.
- [14] 陈家栋, 程浚峰, 赵静怡, 等. 城市大气降尘中重金属的研究方法综述 [J]. 能源环境保护, 2017, 31 (4): 1-4+14.
- [15] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 [J]. 环境科学, 2018, 39 (7): 3118-3125.
- [16] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 [J]. 环境科学, 2018, 39 (9):

4051-4059.

[17] 李欢娟, 李会霞, 史兴民. 西安市主要湖泊表层沉积物重金属污染及生态风险评估 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 2 (33): 122-126.

[18] 李萍. 兰州市大气降尘重金属污染规律研究及风险评价

[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 22-49.

[19] 云中来. 西安市大气降尘污染特征研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015: 40.

[20] 张棕巍. 泉州市大气颗粒物中重金属和 REE 污染特征及来源解析 [D]. 泉州: 华侨大学, 2017: 12-14.