

浅析重污染天气条件下环境空气中的重金属污染情况

杨博然, 张稚妍*, 段利丽, 窦道科, 黎亮

天津市滨海新区生态环境监测中心, 天津

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月7日; 发布日期: 2025年3月14日

摘要

采用原子吸收分光光度法测定分析对比空气质量良好和重污染天气情况下的空气中7种重金属元素含量, 并对比四种不同条件下两种空气样本中的重金属含量。本研究以天津市某地区环境空气为研究对象, 选取空气质量良好和重污染天气两种样本, 测定了环境空气中铜、锌、铅、镉、铬镍和锰7种重金属的含量, 结果表明, 重污染天气情况下环境空气中重金属含量比天气良好状态下含量高, 且秋季重污染天气最为严重; 由于特殊的产业结构和机动车尾气排放, 元素Pb的含量增加尤为明显, Cd和Cr具有潜在的致癌风险, 政府和相关部门应更关注重金属污染物的排放与监测。

关键词

重金属测定, 重污染天气, 原子吸收分光光度法, 空气, 影响因素

Analysis of Heavy Metal Pollution in Environmental Air under Heavy Pollution Weather Conditions

Boran Yang, Zhiyan Zhang*, Lili Duan, Daoke Dou, Liang Li

Tianjin Binhai New Area Ecological Environment Monitoring Center, Tianjin

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 7th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

Abstract

Using atomic absorption spectrophotometry to determine and compare the content of seven heavy

*通讯作者。

文章引用: 杨博然, 张稚妍, 段利丽, 窦道科, 黎亮. 浅析重污染天气条件下环境空气中的重金属污染情况[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 338-348. DOI: 10.12677/ojns.2025.132035

metal elements in the air under good air quality and heavy pollution weather conditions, and comparing the content of heavy metals in two air samples under four different conditions. This study takes the ambient air in a certain area of Tianjin City as the research object, selects two samples of good air quality and heavy pollution weather, and measures the content of seven heavy metals including copper, zinc, lead, and chromium in the ambient air. The results show that the content of heavy metals in the ambient air is higher under heavy pollution weather conditions than under good weather conditions, and heavy pollution weather is most severe in autumn; Due to the special industrial structure and vehicle exhaust emissions, the content of element Pb has increased significantly, while Cd and Cr have potential carcinogenic risks. The government and relevant departments should pay more attention to the emission and monitoring of heavy metal pollutants.

Keywords

Heavy Metal Determination, Heavy Pollution Weather, Atomic Absorption Spectrophotometry, Air, Influence Factor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

创新发展是一把双刃剑，在全球工业化和城市现代化的飞快发展的背景下，重金属污染的监测和治理已成为不可忽视的重要问题。重金属污染与其他有机化合物的污染不同，不少有机化合物可以通过自然界本身的物理的、化学的或生物的进化使有害性降低或解除，而重金属具有富集性，很难在环境中降解，我国依然面临严峻的重金属污染源多、范围较广且治理难[1] [2]等问题。

重金属的污染主要来源于工业污染，其次是交通污染和生活垃圾污染。工业污染大多通过废渣、废水、废气排入环境，在人和动物、植物中富集，从而对环境和人的健康造成很大危害。交通污染则主要是指汽车尾气的排放。我国在重金属的开采、冶炼、加工过程中，造成不少重金属如铅、汞、铬、钴等进入大气、水、土壤中，引起严重的环境污染。

重污染天气是指空气质量指数(AQI) > 200 及环境空气质量达到重度及以上污染程度，影响人们正常生活，危害身体健康。重污染天气是大气污染物排放、气象条件和二次转化综合作用的结果。秋冬季受不利气象条件影响，是重污染天气的高发期。除了水和土壤之外，空气也是重金属污染的不可忽视受体[3]，其中重金属污染物可通过呼吸道直接进入人体[4]，所以探究重污染天气情况下环境空气中的重金属含量是很有必要的。

本研究以天津市某空旷点位为研究对象，参考《空气和废气监测分析方法》(第四版增补版)第三篇，第二章(十二)铜、锌、镉、铬、锰及镍原子吸收分光光度法(B)[5]和《环境空气铅的测定石墨炉原子吸收分光光度法》(HJ 539-2015)[6]建立了环境空气中重金属元素的监测方法，分析对比了秋冬季空气质量良好和重污染天气下环境空气重金属含量情况，使用原子吸收分光光度法测定不同空气质量状况下环境空气中铜、锌、铅、镍、铬、镉、锰的含量，通过分析数据，对比得出结论。

2. 研究区域概况

为保证研究数据的真实性和全面性，增加数据的可参考性，对采集样品所在区域进行区域[7]情况介绍，如表 1 所示。

Table 1. Overview of the study area**表 1.** 研究区域概况

指标	参数
地理位置	位于华北平原北部
海拔高度/m	4
气候类型	大陆性季风气候，具有海洋性气候特征
年均降水量/mm	520~660
年日照时间/h	2500~2900

由于特殊的地理位置，天津市属于大陆性季风气候，并具有海洋性气候特点：冬季寒冷、少雪；春季干旱多风；夏季气温高、湿度大、降水集中；降水随季节变化显著，冬、春季少，夏季集中。全年大风日数较多。主要气象灾害有：大风、大雾、暴雨、风暴潮、扬沙暴等。

3. 材料与方法

3.1. 方法原理

采集在玻璃纤维滤筒(过氯乙烯滤膜)上的颗粒物。用酸化消解(硫酸-灰化)法。消化制备成样品溶液，然后将溶液引入火焰或石墨炉原子化器内，用标准曲线法或标准加入法。测定溶液中各元素的浓度。测定镉时，可用碘化钾-甲基异丁基酮进行萃取分离，以消除干扰。如用石墨炉测定，则可用氘灯扣除背景消除干扰。

3.2. 采样点布置和样品采集

通过现场勘查，结合空气质量情况、风速和温湿度等实际情况，选取秋和冬季空气质量良好和重污染天气两种空气样本。空气质量良好样本的天气情况为：湿度 22%~35%，空气指数 29~67，温度为 3℃~12℃；重污染天气样本的天气情况为：湿度 20%~34%，空气指数 > 200，温度为 6℃~15℃，风速 < 4 级。

空气质量良好的天气选取海拔为 4 m 处的空旷地点和海拔为 20 m 处为空旷地点进行采样布点，采样点东侧和北侧距离 500 m 为城市主干路，在机动车流量方面具有很好的代表性；周边 5 km 范围内分布有居民小区、学校、酒店和行政办公区等，也是城区典型的生活区，无单一污染源，人口较为密集，工业企业分布较少，无明显重金属污染源。选取采样点一般要求空间抽样样本之间的距离最好不大于一定的采样间距下区域化变量存在空间性变化的。

样品采集按照《大气污染物无组织排放监测技术导则》HJ/T55-2000 相关要求，选择空气质量良好的天气，在空旷地点和楼顶采集样品，采集样品使用玻璃纤维滤筒，采集时间为 1 h、2 h、3 h、4 h；选择重污染天气，在空旷地点和楼顶采集样品，采集样品使用玻璃纤维滤筒，采集时间为 1 h、2 h、3 h、4 h。将采集样品放入塑料袋内，立即带回实验室前处理进行监测分析，监测项目为铜、锌、铅、镉、锰、镍、铬 7 种重金属项目。

3.3. 样品前处理实验步骤

裂解石墨坩埚法：适用于铜、锌、镉、铅、锰、镍、铬元素分析的样品溶液制备，取适量样品滤筒，于裂解石墨坩埚锅中，加入 0.7% 硫酸溶液，使样品充分润湿，浸泡 1 小时，然后在电热板上加热，小心蒸干，将坩埚置于 XL-箱式电阻炉中 400℃ ± 10℃，加热 4 小时至有机物完全烧尽，停止加热，待炉温降

至 300℃ 以下时,取出干锅,冷至室温,加 4~6 滴氢氟酸,摇动使其中残渣溶解。在电热板上小心加热至干,再加 7~8 滴硝酸,继续加热至干,用 0.16 mol/L 硝酸溶液将样品定量。转移至 10 ml 容量瓶中,并稀释至标线,摇匀即为待测样品溶液。按与标准曲线绘制相同的仪器工作条件,测定样品溶液的吸光度,取同批号等面积的空白滤膜,按样品测定步骤测定空白值。

电热板消解[8]:适用于铜、锌、镉、锰、镍、铬元素分析的样品溶液制备,取适量样品滤筒,于聚四氟乙烯坩埚中,加入 16 mol/L 硝酸溶液 10 ml,使样品充分润湿,盖上盖子放置一夜,然后在电热板上盖盖子回流加热 3 h,温度为 150℃,打开盖子加热,小心蒸干,加入 33.3 mol/L 氢氟酸 5 ml 和 12 mol/L 高氯酸 5 ml,在加热板上 170℃ 加热,盖盖子回流 2 h,待溶液澄清后,打开盖子小心加热至干,用 0.16 mol/L 硝酸溶液将样品定量。转移至 10 ml 容量瓶中,并稀释至标线,摇匀即为待测样品溶液。按与标准曲线绘制相同的仪器工作条件,测定样品溶液的吸光度,取同批号等面积的空白滤膜,按样品测定步骤测定空白值。

适用于铅元素分析的样品溶液制备,将滤筒裁成小块,置于锥形瓶中,然后依次加入 10 ml 的硝酸、5 ml 的盐酸和 3 ml 的过氧化氢。静置 20 min~30 min 左右。在初始反应趋于平静后,于电热板上加热纸杯沸进行消解,蒸至尽干。再加入 5 ml 的硝酸、1.5 ml 的过氧化氢,加热至尽干,冷却,然后加入 5 ml 硝酸烧热溶解,将溶液过滤至 50 ml 容量瓶中,并用 1%浓度的硝酸反复冲洗滤膜残渣至少 3 次,将洗涤液与过滤液合并定容至刻度并摇匀。

3.4. 仪器和试剂

PerkinElmer AA900 原子吸收分光光度计(美国 PE 公司), SKML-2-4B 型电热板, XL-箱式电阻炉(天津市中环实验室电炉有限公司),铜空心阴极灯(PerkinElmer)、锌空心阴极灯(PerkinElmer)、铅空心阴极灯(PerkinElmer)、镉空心阴极灯(PerkinElmer)、铬空心阴极灯(PerkinElmer)、镍空心阴极灯(PerkinElmer)、锰空心阴极灯(PerkinElmer), Milli-Q 纯水机(默克公司),一般实验室常用玻璃器皿。

硝酸(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯),氢氟酸(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯),高氯酸(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯),硫酸(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯),铜、锌、铅、铬、镉、锰及镍标准使用液(生态环境部标样所),过氧化氢(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯),磷酸二氢铵(天津市科密欧化学试剂有限公司,优级纯)。

3.5. 实验方法

标准曲线的制备

铜、锌、铅、铬、镉、锰及镍标准使用液,临用时需吸取 10.00 标准储备液,于 100 ml 容量瓶中滴加 1.0 ml 硝酸,用水稀释至标线。此溶液每毫升含铜、锌、铬、镉、锰及镍各元素 100 μg。标准曲线的绘制,取 100 ml 容量瓶按照表 2 配置各待测元素的标准系列,并按照原子吸收分光光度法的工作条件测定吸光度,以吸光度对各相应元素的浓度绘制标准曲线。

Table 2. Standard curve concentrations of each element

表 2. 各元素标准曲线浓度

瓶号	0	1	2	3	4	5
Cd 浓度(μg/L)	0.00	0.20	0.50	1.00	1.50	2.00
Cr 浓度(μg/ml)	0.00	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00
Cu 浓度(μg/ml)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50

续表

Mn	浓度($\mu\text{g/ml}$)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
Ni	浓度($\mu\text{g/ml}$)	0.00	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00
Pb	浓度($\mu\text{g/L}$)	0.00	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
Zn	浓度($\mu\text{g/ml}$)	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00

3.6. 结果与讨论

3.6.1. 标准曲线线性关系

按 3.5.1 方法绘制铅、铬、镉等 7 种元素的标准曲线, 得出了各元素的回归方程、标准曲线相关系数和线性情况等见表 3, 从表 3 中可以得出, 各元素在其线性范围内线性关系都符合要求, 其中使用原子吸收分光光度计火焰法测试的元素相关系数均大于 0.999; 使用原子吸收分光光度计石墨炉法测试的元素相关系数均大于 0.995, 符合方法要求。

Table 3. Regression equations and correlation coefficients R for each element

表 3. 各元素回归方程及相关系数 R

元素	回归方程	相关系数 R
Cd	$y = 0.00255 + 0.03909x$	0.997
Cr	$y = 0.00128 + 0.03058x$	0.999
Cu	$y = 0.00588 + 0.14569x$	0.999
Mn	$y = 0.01173 + 0.24275x$	0.999
Ni	$y = 0.00301 + 0.08861x$	0.999
Zn	$y = 0.01200 + 0.66059x$	0.999
Pb	$y = 0.00351 + 0.00197x$	0.995

3.6.2. 准确度检查结果

相同步骤测定有证标准物质(生态环境部标样所)(编号 200939、编号 201630、编号 201312), 及实验室空白样品的浓度值, 结果见表 4~6。

Table 4. Determination results of certified reference material samples for copper, zinc, lead, cadmium, and nickel elements

表 4. 铜、锌、铅、镉、镍元素有证标准物质样品测定结果

样品编号 200939	铜测定结果	铅测定结果	锌测定结果	镉测定结果	镍测定结果
1	0.491	0.240	0.603	0.135	0.252
2	0.486	0.238	0.612	0.128	0.256
测定结果 ($\mu\text{g/ml}$)	3 0.497	0.242	0.600	0.136	0.258
	4 0.490	0.241	0.604	0.129	0.254
	5 0.492	0.239	0.599	0.125	0.250
	6 0.496	0.244	0.602	0.131	0.251
平均值浓度($\mu\text{g/ml}$)	0.492	0.241	0.603	0.131	0.254
有证标准物质标准值 ($\mu\text{g/ml}$)	0.497 ± 0.025	0.241 ± 0.012	0.617 ± 0.030	0.138 ± 0.008	0.258 ± 0.014

Table 5. Determination results of certified reference material samples for chromium element
表 5. 铬元素有证标准物质样品测定结果

样品编号 201630		铬测定结果
测定结果($\mu\text{g/ml}$)	1	1.90
	2	1.89
	3	1.91
	4	1.87
	5	1.92
	6	1.91
平均值浓度($\mu\text{g/ml}$)		1.90
有证标准物质标准值($\mu\text{g/ml}$)		1.92 ± 0.09

Table 6. Determination results of certified standard substance samples for manganese element
表 6. 锰元素有证标准物质样品测定结果

样品编号 203511		锰测定结果
测定结果($\mu\text{g/L}$)	1	1.23
	2	1.22
	3	1.25
	4	1.27
	5	1.24
	6	1.23
平均值浓度($\mu\text{g/L}$)		1.24
有证标准物质标准值($\mu\text{g/ml}$)		1.25 ± 0.05

3.6.3. 不同气象条件下对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响

Table 7. Results of the effects of different meteorological conditions on two samples with good air quality and heavy pollution weather

表 7. 不同气象条件下对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响的结果

元素种类	校准曲线 相关系数	秋季(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g/m}^3$, 其余为 mg/m^3)		冬季(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g/m}^3$, 其余为 mg/m^3)	
		空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下
Cd	>0.997	0.007	0.299	0.004	0.285
		0.007	0.299	0.004	0.287
		0.006	0.301	0.004	0.285
		均值: 0.007	均值: 0.300	均值: 0.004	均值: 0.286
Cr	>0.999	0.005	0.072	0.006	0.063
		0.005	0.071	0.006	0.062
		0.004	0.072	0.006	0.060
		均值: 0.005	均值: 0.215	均值: 0.006	均值: 0.062

续表

			0.021		0.018
			0.022		0.016
Cu	>0.999	未检出	0.022	未检出	0.016
			均值: 0.022		均值: 0.017
			0.066		0.052
			0.067		0.051
Mn	>0.999	未检出	0.067	未检出	0.051
			均值: 0.067		均值: 0.051
Ni	>0.999	未检出	未检出	未检出	未检出
			0.075		0.066
			0.076		0.066
Zn	>0.999	未检出	0.075	未检出	0.065
			均值: 0.075		均值: 0.066
		0.335	2.81	0.347	2.65
		0.336	2.80	0.346	2.64
Pb	>0.995	0.336	2.77	0.346	2.64
		均值: 0.336	均值: 2.79	均值: 0.346	均值: 2.64

根据新区独特的地理位置以及特殊的产业结构,秋冬季易出现重污染天气。其中秋季温度适中,较为宜人,有风日较少且风速小,尤其在重污染天气条件下,风速 < 3 级;冬季干燥寒冷,少雪,且季风盛行风速较大。通过比较秋冬季两种不同气象条件下重污染天气状况下重金属元素浓度情况,选择同一点位,使用相同的采集方法,采集时间为 1 h,采集秋冬两季空气质量良好天气和重污染天气不同样品,使用聚四氟乙烯坩埚消解后进行测定,分析三次实验数据求均值,结果见表 7,由表 7 可知,空气良好天气和重污染天气两种状态比较,秋季比冬季环境空气中的重金属含量高;且秋季重污染天气情况下空气中重金属含量最高。分析原因为冬季季风盛行,风速较大,风速与大气中重金属沉降情况呈负相关,冬季重污染天气比秋季重污染天气空气流动速率大,重金属不宜聚集[9]。

3.6.4. 不同海拔对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响

选择秋季空气质量良好天气和重污染天气两种条件下采集样品,通过对比不同采集样品的高度对重污染天气状态下重金属含量结果。在宽阔地面选取采集点位,其海拔高度为 4 m,和宽阔地面点位附近楼顶,其海拔高度为 20 m 的条件下使用相同的条件进行时间为 1 h 的样品采集,使用聚四氟乙烯坩埚消解后进行测量分析,分析三次实验数据求平均值,结果见表 8。由表 8 可知,空气良好天气和重污染天气两种状态比较,海拔高度对空气中重金属含量影响并不明显,海拔高度低的区域,贴近居民日常生活区域较楼层高处空气中重金属含量略高。分析原因为海拔贴近居民日常生活区域,各类生产生活活动较多,且车辆尾气大多集中在低海拔区域排放,海拔高度与空气中重金属沉降情况呈负相关,故海拔高度为路面高度且在重污染天气状况下重金属含量最高。

Table 8. Results of the effects of different altitudes on two samples with good air quality and heavy pollution weather
表 8. 不同海拔对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响的结果

元素种类	校准曲线相关系数	海拔高度 4m 样品的测定结果(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)		海拔高度 20m 样品的测定结果(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)	
		空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下
Cd	>0.997	0.006	0.297		0.237
		0.006	0.296	未检出	0.236
		0.006	0.297		0.236
		均值: 0.006	均值: 0.297		均值: 0.236
Cr	>0.999	0.005	0.073	0.005	0.056
		0.004	0.073	0.006	0.056
		0.004	0.071	0.005	0.057
		均值: 0.004	均值: 0.072	均值: 0.005	均值: 0.056
Cu	>0.999		0.023		0.017
		未检出	0.022	未检出	0.017
			0.023		0.015
			均值: 0.023		均值: 0.016
Mn	>0.999		0.068		0.056
		未检出	0.067	未检出	0.056
			0.067		0.054
			均值: 0.067		均值: 0.055
Ni	>0.999	未检出	未检出	未检出	未检出
Zn	>0.999		0.069		0.057
		未检出	0.070	未检出	0.056
			0.070		0.057
			均值: 0.070		均值: 0.057
Pb	>0.995	0.336	2.86	0.321	2.61
		0.339	2.85	0.323	2.61
		0.341	2.86	0.320	2.60
		均值: 0.339	均值: 2.86	均值: 0.321	均值: 2.61

3.6.5. 不同消解方法对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响

选择秋季空气质量良好天气和重污染天气采集样品, 采集时间为 1 h, 通过对使用不同的消解方法, 比较重污染天气状态下重金属含量结果。使用聚四氟乙烯坩埚进行消解, 通过使用硝酸、高氯酸和氢氟酸进行消解, 最后使用 0.16 mol/L 硝酸溶液定容至 10 ml 的容量瓶中, 放置一夜后进行测量分析; 使用裂解石墨坩埚, 使用硫酸-灰化法, 送入 XL-箱式电阻炉, 消解, 最后使用 0.16 mol/L 硝酸溶液定容至 10 ml 的容量瓶中, 放置一夜, 进行测量分析, 分析三次实验数据求平均值, 结果见表 9。由表 9 可知, 使用聚四氟乙烯坩埚和裂解石墨坩埚分别消解滤筒, 结果相差不大, 不论是用哪种方法, 重污染天气状况下空气中重金属含量远高于天气良好状态下。其中使用裂解石墨坩埚消解过程耗时较长, 且消解滤筒过

程中需反复观察, 不仅耗时较长, 且中途易产生损耗。

Table 9. Results of the effects of different digestion methods on two samples with good air quality and heavy pollution weather
表 9. 不同消解方法对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响的结果

元素种类	校准曲线 相关系数	聚四氟乙烯坩埚消解样品测定结果(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)		裂解石墨坩埚消解样品测定结果(含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)	
		空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下
Cd	>0.997	0.007	0.294		0.282
		0.007	0.294	未检出	0.287
		0.006	0.292		0.287
		均值: 0.007	均值: 0.293		均值: 0.285
Cr	>0.999	0.005	0.070	0.005	0.056
		0.005	0.070	0.006	0.056
		0.004	0.071	0.005	0.057
		均值: 0.005	均值: 0.070	均值: 0.005	均值: 0.056
Cu	>0.999		0.022		0.015
		未检出	0.022	未检出	0.015
			0.021		0.013
			均值: 0.022		均值: 0.014
Mn	>0.999		0.063		0.055
		未检出	0.063	未检出	0.056
			0.063		0.058
			均值: 0.063		均值: 0.056
Ni	>0.999	未检出	未检出	未检出	未检出
Zn	>0.999		0.071		0.064
		未检出	0.070	未检出	0.065
			0.070		0.064
			均值: 0.070		均值: 0.064
Pb	>0.995	0.341	2.89	0.333	2.64
		0.340	2.87	0.335	2.65
		0.341	2.87	0.333	2.62
		均值: 0.341	均值: 2.88	均值: 0.334	均值: 2.64

3.6.6. 不同样品采集时间对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响

选择秋季空气质量良好天气和重污染天气采集样品, 通过比较不同的采集时间, 比较重污染天气状态下重金属含量结果。在同一点位, 使用相同的采集方法, 比较采集时间为 1 h、2 h、3 h、4 h 的不同样品, 通过聚四氟乙烯坩埚消解后进行测定, 分析三次实验数据求平均值, 结果见表 10, 由表 10 可知, 重污染天气比空气质量良好状态下重金属含量高, 且随着采集时间的增加, 空气中重金属含量增加, 但基本在 3 小时左右重金属含量增加缓慢。故重污染天气下不宜在户外剧烈活动时间过长。

Table 10. Results of the effects of different sample collection times on good air quality and heavy pollution weather samples
表 10. 不同样品采集时间对空气质量良好和重污染天气两种样品的影响的结果

元素种类	校准曲线相关系数	采集时间 1 h (含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)		采集时间 2 h (含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)		采集时间 3 h (含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)		采集时间 4 h (含量, 其中除 Pb、Cd 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余为 mg/m^3)	
		空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下	空气良好状态下	重污染天气状态下
Cd	>0.997	0.006	0.294	0.261	0.472	0.296	0.723	0.308	0.841
		0.006	0.291	0.261	0.475	0.299	0.721	0.311	0.842
		0.007	0.292	0.262	0.472	0.298	0.722	0.310	0.839
		均值: 0.006	均值: 0.292	均值: 0.261	均值: 0.473	均值: 0.298	均值: 0.722	均值: 0.310	均值: 0.841
Cr	>0.999	0.005	0.069	0.054	0.085	0.065	0.095	0.062	0.103
		0.005	0.066	0.056	0.089	0.068	0.097	0.066	0.097
		0.005	0.066	0.058	0.086	0.068	0.094	0.062	0.096
		均值: 0.005	均值: 0.067	均值: 0.056	均值: 0.087	均值: 0.067	均值: 0.095	均值: 0.063	均值: 0.099
Cu	>0.999	未检出	0.020	0.016	0.027	0.018	0.034	0.021	0.038
		未检出	0.019	0.016	0.030	0.020	0.035	0.021	0.041
		未检出	0.020	0.016	0.028	0.022	0.036	0.020	0.038
		均值: 未检出	均值: 0.020	均值: 0.016	均值: 0.028	均值: 0.023	均值: 0.035	均值: 0.021	均值: 0.039
Mn	>0.999	未检出	0.064	0.047	0.069	0.055	0.073	0.060	0.071
		未检出	0.066	0.047	0.069	0.056	0.072	0.059	0.074
		未检出	0.065	0.049	0.071	0.056	0.071	0.061	0.073
		均值: 未检出	均值: 0.065	均值: 0.048	均值: 0.070	均值: 0.056	均值: 0.072	均值: 0.060	均值: 0.073
Ni	>0.999	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
Zn	>0.999	未检出	0.069	0.063	0.089	0.074	0.091	0.075	0.092
		未检出	0.071	0.066	0.087	0.075	0.091	0.075	0.094
		未检出	0.072	0.063	0.088	0.073	0.090	0.076	0.092
		均值: 未检出	均值: 0.071	均值: 0.064	均值: 0.088	均值: 0.074	均值: 0.091	均值: 0.075	均值: 0.093
Pb	>0.995	0.333	2.79	2.21	3.79	2.32	5.82	2.33	6.86
		0.332	2.75	2.23	3.84	2.32	5.84	2.34	6.90
		0.335	2.76	2.21	3.83	2.34	5.91	2.33	6.91
		均值: 0.333	均值: 2.77	均值: 2.22	均值: 3.82	均值: 2.33	均值: 5.86	均值: 2.33	均值: 6.89

3.6.7. 主成分分析

通过“降维”的原理从多个变量中筛选出具有代表性的主要因子，因子能够最大程度解释所有变量代表的信息[10]。本研究对七种金属元素进行主成分分析，根据方差计算的结果比较，降维提取特征值 > 1 的主因子进行分析，用于评价重金属含量最高的样本中重金属来源解析。本研究将七种金属元素纳入因子分析，经计算，因子分析，显示结果特征根 > 1 有 1 个主因子，说明重污染天气中重金属元素主要来源于 1 种类型，主因子中载荷绝对值较高的元素为 Pb 和 Cd [11]，如无明显污染源，考虑原因为道路机动车及施工影响。

4. 结论

该地区大气污染物中重金属的变化情况受季节影响大于随机因素，重金属污染物含量受秋冬季的气象条件影响，重污染天气条件下大气重金属含量高于天气良好的情况下。

通过比较不同气象条件下、不同海拔高度、不同消解方法以及不同样品采集时间四种情况下，空气质量良好天气和重污染天气两种样品中重金属含量分析得出，重污染天气比天气状况良好情况重金属下空气中重金属含量高。秋季重污染天气因为季节气候原因风速较小，且风速与空气中重金属含量呈负相关，所以比冬季重污染天气空气中重金属含量高；在海拔高度为 4 m 时，贴近居民正常生产生活区域比楼层高处略高；随着采集样品时间增加，重金属含量增加，在采集时间达到 3 h 后重金属含量增长速率变缓；不同的消解方法对重金属含量基本无影响。重污染天气下，空气中的重金属含量增加，其中 Pd 含量最高，考虑原因主要为汽车尾气排放和工业污染物等，Cd 和 Cr 具有潜在的致癌风险[11]，居民应减少户外剧烈活动时间，政府和相关部门应更关注重金属污染物的排放与监测。

参考文献

- [1] 康爱民. 对锡林郭勒草原退化、沙化、水土流失的思考[J]. 水利发展研究, 2002, 2(6): 36-38.
- [2] 董建林. 浑善达克沙地(局部)沙化土地动态变化分析[J]. 林业资源管理, 2000(5): 25-29.
- [3] 魏永强, 田鸿业. 环境重金属污染研究进展[J]. 现代农业科技, 2024(19): 104-106, 120.
- [4] 田鹏州, 李爱勤, 张晓偲, 等. 河南省浅层地下水重金属污染特征研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(7): 50-56.
- [5] 国家环境保护总局, 空气和废气监测分析方法编委会. 空气和废气监测分析方法(第四版增补版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [6] 环境保护部科技标准司. HJ 539-2015 环境空气铅的测定石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 生态环境部, 2015.
- [7] 冯玉婷. 地表水中重金属污染因子分布特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 22-25.
- [8] 邹永. 不同消解方式对原子吸收分光光度法测定土壤中六种重金属的影响[J]. 市场监管与质量技术研究, 2024(3): 31-36.
- [9] 张靖伟, 雷晓毅, 许明佳, 等. 上海市某郊区大气 $PM_{2.5}$ 中金属及类金属元素污染特征及健康风险评估[J]. 职业与健康, 2024, 40(20): 2822-2827.
- [10] 雷淼, 马嘉晖, 杨璐平, 等. 不同空气质量下河南主要城市冬季 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(1): 275-286.
- [11] 骆善彩, 张雯, 陈国才, 等. 淮安市 2020-2022 年 $PM_{2.5}$ 中重金属污染的来源解析和健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2024, 51(11): 1962-1967.