

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021092804

李刚, 刘艳, 李富强, 等. 2020年冬季石河子市城区和工业区 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素污染特征及来源[J]. 环境化学, 2023, 42(2): 501-510.

LI Gang, LIU Yan, LI Fuqiang, et al. Characteristics and sources of the inorganic elements of PM<sub>2.5</sub> in Shihezi urban and industrial areas in winter, 2020[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (2): 501-510.

## 2020年冬季石河子市城区和工业区 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素污染特征及来源

李刚<sup>1</sup> 刘艳<sup>2</sup> 李富强<sup>2</sup> 彭玉杰<sup>3</sup> 刘雨鑫<sup>3</sup> 何友江<sup>1\*</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京, 100012;

2. 第八师石河子市生态环境局, 石河子, 832099; 3. 石河子市生态环境监测站, 石河子, 832099)

**摘要** 石河子市是位于新疆乌昌石区域中部的工业城市, 2020年12月和2021年1月在石河子市城区和工业区共布设2个采样点, 全天候采集细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)样品61d, 利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对24种元素含量进行分析, 并通过富集因子法(EF)解析PM<sub>2.5</sub>中无机元素的污染特征及来源. 结果表明, 冬季采样期间, 石河子市重度及以上污染天数占整个采样期的53.2%, 以PM<sub>2.5</sub>为首要污染物的污染天数占整个采样期的98.4%, 采样期城区和工业区的PM<sub>2.5</sub>日均值分别为164.7 μg·m<sup>-3</sup>和113.6 μg·m<sup>-3</sup>, 表明石河子市冬季PM<sub>2.5</sub>污染严重; 采样期城区和工业区PM<sub>2.5</sub>中无机元素浓度分别为4.4 μg·m<sup>-3</sup>和3.6 μg·m<sup>-3</sup>, 主要成分均为K、Ca、Na、Mg、Al、Fe, 6种元素之和在城区和工业区元素中的占比分别为97.4%和97.5%, 表明这6种元素为城区和工业区元素的主要组分, 城区和工业区主要元素组成差异性较小, 污染天K和Ca元素的累积速度最快, Na和Ca元素的累积量最大; 石河子市2020年冬季PM<sub>2.5</sub>中主要富集元素为K、Ca、Na、Mg、Fe, 富集元素主要来源于工业区、机动车、地壳物质以及餐饮油烟等, 城区元素富集程度和污染程度略高于工业区.

**关键词** 石河子市, 城区和工业区, 无机元素, 冬季, 污染特征及来源.

## Characteristics and sources of the inorganic elements of PM<sub>2.5</sub> in Shihezi urban and industrial areas in winter, 2020

LI Gang<sup>1</sup> LIU Yan<sup>2</sup> LI Fuqiang<sup>2</sup> PENG Yujie<sup>3</sup> LIU Yuxin<sup>3</sup> HE Youjiang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing, 100012, China; 2. Shihezi Ecology and Environment Bureau, the Eighth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, 832099, China; 3. Shihezi Ecological and Environmental Monitoring Station, the Eighth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, 832099, China)

**Abstract** Shihezi is an industrial city located in the middle of Wu-Chang-Shi region in Xinjiang. 2 sampling sites were set up in Shihezi urban and industrial areas in December 2020 and January 2021. The fine particles (PM<sub>2.5</sub>) were collected for 61 days in total. 24 kinds of elements were analyzed by ICP-MS, and the characteristics and sources of the inorganic elements of PM<sub>2.5</sub> were investigated by using enrichment factor method (EF). The results showed that: During the sampling period in winter, the number of the severe pollution days accounted for 53.2% of the whole sampling days, and the pollution days with PM<sub>2.5</sub> as the primary pollutant accounted for 98.4% of the whole sampling period. The daily mean values of PM<sub>2.5</sub> in urban and industrial areas were 164.7 μg·m<sup>-3</sup> and 113.6 μg·m<sup>-3</sup>, respectively, demonstrating the heavy air pollution in winter in Shihezi city; The

2021年9月28日收稿(Received: September 28, 2021).

\* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: heyj@craes.org.cn

concentrations of the inorganic elements of  $PM_{2.5}$  in urban and industrial areas were  $4.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $3.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively, in the sampling period. The main components of the inorganic elements of  $PM_{2.5}$  in urban and industrial areas were K, Ca, Na, Mg, Al and Fe. These 6 kinds of elements were the primary components of the inorganic elements, and accounted for 97.4% and 97.5% of the whole elements amount in total in urban and industrial areas. The composition structure showed little difference for the inorganic elements of  $PM_{2.5}$  between the urban and industrial areas; The main enriched elements in  $PM_{2.5}$  of Shihezi city in winter were K, Ca, Na, Mg and Fe, and mainly come from industries, motor vehicles, crustal substances and cooking fume, etc. The enrichment and pollution degree of elements in urban areas were slightly higher than those in industrial areas.

**Keywords** Shihezi City, urban and industrial areas, inorganic elements, winter, pollution characteristics and sources.

石河子市是位于新疆乌昌石区域中部的工业城市,近几年随着经济的快速发展,其大气污染较为严重,冬季以细颗粒物( $PM_{2.5}$ )为首要污染物的污染天时有发生<sup>[1-4]</sup>.无机元素作为细颗粒物的主要成分之一,大部分具有容易富集和难以降解的特点,尤其是重金属元素在人体中的富集会危害人体器官健康,造成不可逆的功能性障碍<sup>[5-7]</sup>.近年来北京市<sup>[8]</sup>、上海市<sup>[9]</sup>、沈阳市<sup>[10]</sup>、广州市<sup>[11]</sup>、成都市<sup>[12]</sup>、乌鲁木齐市<sup>[13]</sup>、珠三角区域<sup>[14]</sup>等对  $PM_{2.5}$  中无机元素的研究主要针对重金属元素.王琼等<sup>[15]</sup>研究认为,北京冬季大气  $PM_{2.5}$  中元素的致癌风险高于夏季,污染日大气  $PM_{2.5}$  中元素的致癌风险高于清洁日,  $PM_{2.5}$  中元素的健康风险具有较为明显的季节性变化特征,冬季有针对性地控制大气  $PM_{2.5}$  污染,对人体健康意义深远.任慧清等<sup>[16]</sup>通过研究石河子市冬季 5 种重金属元素(Ni、Cu、Zn、Pb、Fe),并选取重金属元素 Zn 进行大鼠肺部损伤实验发现,供暖季石河子市  $PM_{2.5}$  浓度为  $(109.9\pm 58.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{2.5}$  和 Zn 浓度的升高能够显著抑制超氧化物歧化酶(SOD)活性,引起对大鼠肺部的损伤.李瑶等<sup>[17]</sup>通过对石河子市进行  $PM_{2.5}$  高精度遥感反演发现,石河子市  $PM_{2.5}$  的空间分布呈现北低南高,西低东高的特点.丁俊男等<sup>[18]</sup>通过富集因子法研究河南省典型城市采暖季  $PM_{2.5}$  中无机元素的来源,发现郑州市、洛阳市和平顶山市的 Se、Cd、Br、Pb、Zn、Cu、Co、Sc、Cr、Ni、As、Mn、Ba 等元素的富集因子大于 10,主要来源于人为源,这 13 种元素质量浓度在 22 种元素中占比为 18.9%—26.3%,主要来源于燃煤、机动车、扬尘和建筑尘等, Ni、Co、Sr、Ba 还有来自其他排放源的贡献.张晶晶等<sup>[19]</sup>通过研究昌吉市采暖季  $PM_{2.5}$  的污染特征发现,采暖季  $PM_{2.5}$  的浓度高于非采暖季 5.6 倍,采暖季首要污染物为  $PM_{2.5}$ ,比例最高占 66.3%.

石河子市工业区主要集中在城区北部,紧邻城区.石河子市冬季以  $PM_{2.5}$  为首要污染物的污染天频发,  $PM_{2.5}$  中富集的重金属元素会损害人体器官,研究  $PM_{2.5}$  中无机元素的变化特征和来源对于评价城市环境质量,制定环境治理对策具有重要意义<sup>[20-21]</sup>.本研究在石河子市城区和工业区进行冬季  $PM_{2.5}$  样品采集,分析 2 个功能区无机元素的浓度水平和变化特征,并通过富集因子法(EF)对冬季  $PM_{2.5}$  污染来源进行解析<sup>[22-23]</sup>.

## 1 采样点与方法(Sample sites and methods)

### 1.1 采样点

石河子市工业区主要集中在城区北部,在城区和工业区内共设置 2 个采样点,采样点信息如表 1 所示,城区采样点位于环境监测站楼顶,其正东方向 1.6 km 处为阳光学校国控站点,正南方向 1.2 km 处为艾青诗歌馆国控站,工业区采样点位于大全新能源股份有限公司(大全)办公楼楼顶,工业区排放源主要以化工、电力、电解铝、硅冶炼、水泥等大型重工业高架点源为主.2 个采样点同时开展为期 2 个月的全天候  $PM_{2.5}$  采样,采样点距地垂直高度均不低于 10.0 m,周围无明显污染源,因此能够代表周围区域大气环境特征.

表 1 采样点信息

Table 1 Sample sites information

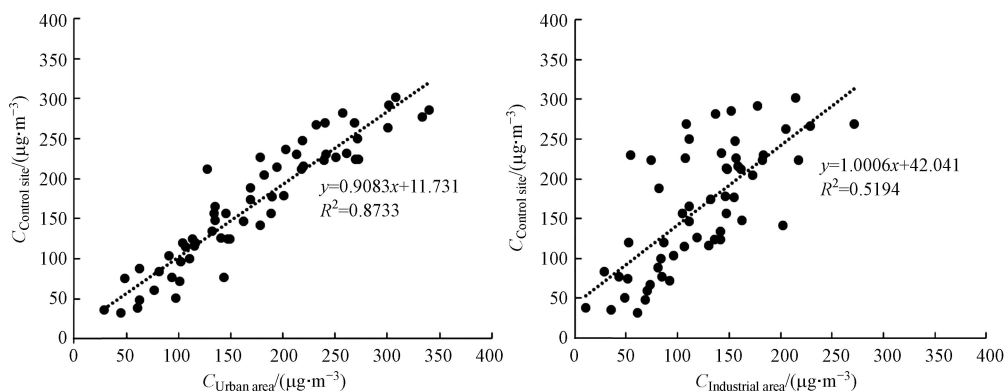
采样点 Sample sites	环境监测站 Environmental monitoring station	大全 Daquan
经度	86.0576 E	86.0957 E
纬度	44.3133 N	44.4220 N
高度/m	14.0	13.0
功能区	城区	工业区
有效样品/个	60	61
与国控站距离	阳光学校西1.6 km	阳光学校北12.0 km

## 1.2 PM<sub>2.5</sub> 样品采集与分析

在石河子市城区和工业区的 2 个采样点均使用武汉天虹 TH-16A 型四通道采样器进行采样(另外两通道平行采样备用),各通道采样流量均为 16.7 L·min<sup>-1</sup>. 采样日期为 2020 年 12 月 1 日—2021 年 1 月 31 日,共采集 62 d,采样时间为每天 10:00—翌日 09:00,累积采样时长 23 h. 每日采样滤膜为一张直径 47 mm 的石英纤维滤膜(Q 膜, Pall, Sweden)和一张直径 47 mm 的聚丙烯滤膜(P 膜, Whatman, Sweden),具体方法按照《环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)手工监测方法(重量法)技术规范》<sup>[24]</sup> 要求. 利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Agilent 7800, America)对滤膜进行元素分析,取 1/4 面积滤膜,放置于聚四氟乙烯消解罐中,加入 5.0 mL MOS 级硝酸,放置 2 h 后再加入 2.0 mL MOS 级盐酸,2.0 mL 优级纯 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,加盖密封后,用微波消解萃取仪消解(在 10 min 内升温到 190 °C 后至少保持 30 min). 待消解罐冷却至室温,再利用赶酸器在 140 °C 将消解液浓缩至约 0.5 mL(约 4—5 h),用超纯水转移定容为 25.0 mL,然后进行仪器分析. 包括 Be、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Ag、Cd、Ba、Tl、Pb、Th、U,共 24 种.

## 1.3 PM<sub>2.5</sub> 质量控制

对 P 膜进行样品称重,根据采集样品量和采样体积计算 PM<sub>2.5</sub> 浓度<sup>[24]</sup>,并与石河子市国控站 PM<sub>2.5</sub> 值进行对比,如图 1 所示. 一般认为 PM<sub>2.5</sub> 的相关性在 80%—120% 之间是合理的<sup>[25]</sup>,城区和工业区手工采样 PM<sub>2.5</sub> 值与国控站进行比较,可判断手工采样 PM<sub>2.5</sub> 的代表性和各点位 PM<sub>2.5</sub> 的差异,城区采样点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度值与国控站的 PM<sub>2.5</sub> 浓度值相关系数  $R^2$  为 0.87,线性关系较好,而工业区采样点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度值与国控站的 PM<sub>2.5</sub> 浓度值相关系数  $R^2$  为 0.52,说明工业区 PM<sub>2.5</sub> 污染浓度特征与城区有所不同.

图 1 PM<sub>2.5</sub> 线性关系Fig.1 PM<sub>2.5</sub> linear relationship

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 污染特征

2020 年 12 月 1 日—2021 年 1 月 31 日在石河子市共采样 62 d,以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的污染天占

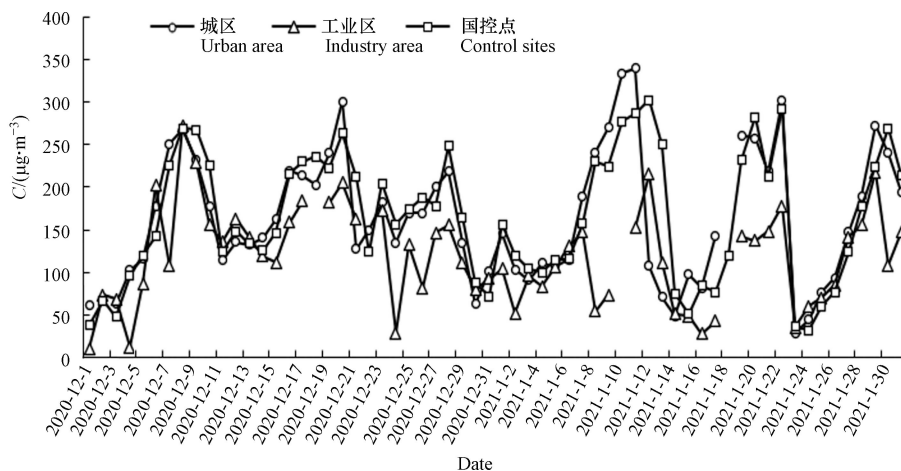
比较高,如表 2 所示,采样期石河子市空气质量为优的天数为 0,重度污染天最多,占整个采样期的 38.7%,严重污染天数占整个采样期的 14.5%,以  $\text{PM}_{2.5}$  为首要污染物的污染天数占整个采样期的 98.4%。

表 2 采样期污染天数

Table 2 The number of pollution days in sampling period

	优 Excellent	良 Good	轻度 Light	中度 Medium	重度 Heavy	严重 Severe
污染天数/d	0	9	8	12	24	9
$\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物天数/d	0	8	8	12	24	9

如图 2 所示,采样期内共发生 6 次污染过程,其中 2020 年 12 月发生 3 次,2021 年 1 月发生 3 次,污染过程时间最长的持续 8 d,最大  $\text{PM}_{2.5}$  日均值发生在 2021 年 1 月 12 日,国控站测得日均值为  $302.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整个采样期国控站  $\text{PM}_{2.5}$  的日均值为  $165.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,以  $\text{PM}_{2.5}$  为首要污染物的污染天  $\text{PM}_{2.5}$  日均值为  $167.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,两者数据很接近,与《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)<sup>[26]</sup> 中规定的  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度二级标准限值 ( $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 相比,超过  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的天数为 54 d,占整个采样期的 87.1%,说明石河子市冬季以  $\text{PM}_{2.5}$  为首要污染物的污染天形势非常严峻。整个采样期城区手工采样的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度日均值为  $164.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,工业区手工采样的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度日均值为  $113.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,表明城区  $\text{PM}_{2.5}$  污染程度高于工业区。两采样点直线距离约 12.0 km,城区采样点距离国控点较近,由图 2 可知,城区手工  $\text{PM}_{2.5}$  与国控点  $\text{PM}_{2.5}$  的变化趋势较一致,采样期两者  $\text{PM}_{2.5}$  平均差值为  $6.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,说明两者相关性好,误差较小。工业区主要以化工、火电、电解铝、硅冶炼、水泥等重工业高架点源排放为主,冬季石河子北部区域地面风场以弱偏北风为主,城区位于工业区的下风向,有研究表明一定条件下工业区高架点源对 10.0—12.0 km 范围区域影响明显<sup>[27-28]</sup>,石河子城区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高的原因可能与工业区企业高架点源排放和远距离传输到城区有关。

图 2 采样期  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化特征Fig.2 Concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  during sampling period

## 2.2 无机元素浓度特征

石河子市城区和工业区环境  $\text{PM}_{2.5}$  中元素浓度如表 3 所示,城区  $\text{PM}_{2.5}$  中元素浓度由高到低依次为:  $\text{Na}>\text{Ca}>\text{K}>\text{Fe}>\text{Al}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{Pb}>\text{Mn}>\text{Cu}>\text{Ba}>\text{As}>\text{Cr}>\text{V}>\text{Ni}>\text{Cd}>\text{Mo}>\text{Co}>\text{Se}>\text{Tl}>\text{Be}>\text{U}>\text{Ag}>\text{Th}$ , 工业区  $\text{PM}_{2.5}$  中元素浓度由高到低依次为:  $\text{Na}>\text{Ca}>\text{K}>\text{Al}>\text{Fe}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{Pb}>\text{Mn}>\text{Cr}>\text{V}>\text{Ba}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Ni}>\text{Mo}>\text{Cd}>\text{Co}>\text{Tl}>\text{Be}>\text{U}>\text{Se}>\text{Th}>\text{Ag}$ 。采样期城区  $\text{PM}_{2.5}$  中元素浓度和为  $4353.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,工业区  $\text{PM}_{2.5}$  中元素浓度和为  $3556.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,城区和工业区元素 K、Ca、Na、Mg、Al、Fe 质量浓度较大,均超过了  $100.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,6 种元素在城区元素总浓度的占比为 97.4%,在工业区元素总浓度的占比为 97.5%,说明这 6 种元素为石河子市无机元素的主要组成部分。从采样期元素浓度均值来看,工业区的元素浓度值低于城区,说明无机元素在城区  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物上的富集程度高于工业区。昌吉市与石河子市同为乌昌石区域城市,赵

强等<sup>[29]</sup>研究发现昌吉市因春、夏、秋季多风,易导致扬尘发生,冬季冰雪覆盖裸土,施工较少,冬季燃煤量大,污染物积累导致元素浓度与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度规律不符,元素浓度表现为秋季>夏季>春季>冬季,即冬季元素浓度水平最低,同时与国内南部城市广州市<sup>[30]</sup>、中部城市南昌市<sup>[31]</sup>以及北部城市天津市<sup>[32]</sup>冬季 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素浓度对比发现,石河子市和昌吉市等区域 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素浓度水平低于其他城市,原因可能为石河子市冬季大雪覆盖裸土,扬尘较少所致.

表 3 采样点元素浓度

Table 3 Elements concentration of 2 sample sites

元素 Elements	城区/(ng·m <sup>-3</sup> ) Urban	工业区/(ng·m <sup>-3</sup> ) Industrial	比值 Ratio	广州市 <sup>[30]</sup> /(ng·m <sup>-3</sup> ) Guangzhou	天津市 <sup>[31]</sup> /(ng·m <sup>-3</sup> ) Tianjin	南昌市 <sup>[32]</sup> /(ng·m <sup>-3</sup> ) Nanchang
Be	0.2	0.3	0.6	—	—	—
Na	1779.0	1342.0	1.3	1210.0	1925.0	—
Mg	201.7	168.4	1.2	390.0	1188.0	537.0
Al	448.4	416.7	1.1	1190.0	1377.0	740.0
K	520.1	436.2	1.2	2480.0	4081.0	734.0
Ca	838.4	840.9	1.0	1390.0	5278.0	1207.0
V	1.9	4.9	0.4	—	4.9	9.0
Cr	4.3	5.6	0.8	13.5	176.7	20.0
Mn	13.9	7.6	1.8	83.4	190.9	43.0
Fe	453.9	263.4	1.7	1220.0	4357.0	571.0
Co	0.3	0.4	0.8	—	1.2	4.0
Ni	1.3	1.8	0.7	8.6	87.9	150
Cu	10.0	4.3	2.4	112.0	239.1	19.0
Zn	39.3	32.9	1.2	670.0	945.1	279.0
As	5.5	4.3	1.3	35.1	43.4	10.0
Se	0.3	0.3	1.1	—	—	—
Mo	0.4	0.6	0.7	—	—	—
Ag	0.1	0.1	0.4	—	—	—
Cd	0.5	0.5	1.0	6.1	10.2	5.0
Ba	6.1	4.7	1.3	—	51.2	325.0
Tl	0.2	0.3	0.7	—	—	—
Pb	27.2	19.9	1.4	190.0	541.1	106.0
Th	0.1	0.2	0.3	—	—	—
U	0.1	0.3	0.3	—	—	—
总和	4353.0	3557.0	24.5	8999.0	20498.0	4759.0

备注:“—”表示未检测出.

从石河子市城区和工业区元素在无机元素中的占比来看(图 3),占比最大的为 Na 元素,城区 Na 元素占比 40.9%,工业区占比 37.7%,其次为 Ca 元素,城区占比 19.3%,低于工业区的 23.6%,城区 Fe 元素占比为 10.4%,工业区为 7.4%,表明城区的 Na、Fe 元素相对占比较高,而工业区的 Ca 元素占比比较高,从浓度水平来看,两者元素浓度较为接近.

### 2.3 不同污染条件下元素浓度特征

不同的 PM<sub>2.5</sub> 污染条件下,元素浓度特征不同,选取非沙尘天的典型污染天 2021 年 1 月 12 日(PM<sub>2.5</sub> 日均值为 302.0 μg·m<sup>-3</sup>)和清洁天 2021 年 1 月 24 日(PM<sub>2.5</sub> 日均值为 32.0 μg·m<sup>-3</sup>)的元素浓度进行对比,如图 4 所示,与污染天相比,清洁天 Na 和 Ca 元素的浓度下降水平较大,下降水平平均超过 0.4 μg·m<sup>-3</sup>,其次为 K、Al 和 Fe 元素,表明污染天 Na 和 Ca 元素的浓度累积量最大.从下降百分比来看,主要元素

浓度下降百分比由高到低依次为:  $K > Ca > Pb > Na > Al > Zn > Fe$ , K 和 Ca 元素的浓度百分比下降均超过 50%, 其中 K 元素的浓度百分比下降最大, 为 59.5%, Ca 元素为 50.1%, 表明污染天 K 和 Ca 元素的累计速率较快.

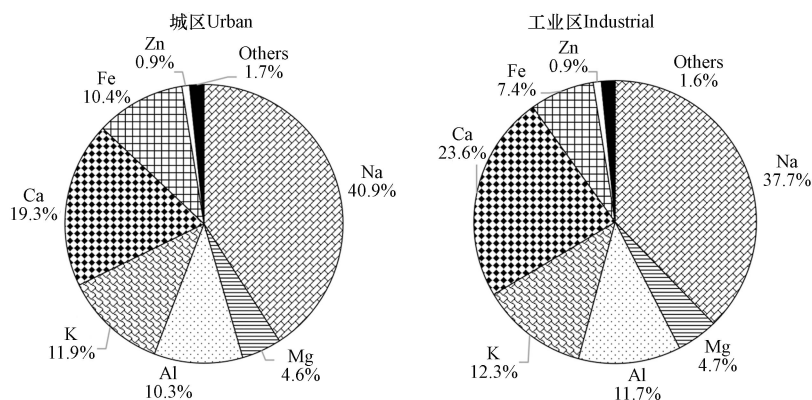


图 3 采样期元素浓度占比

Fig.3 Compositions of elements during sampling period

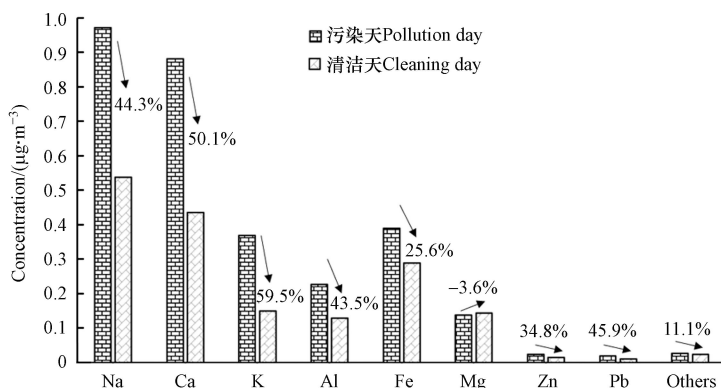


图 4 污染天和清洁天元素浓度特征

Fig.4 Concentration characteristics of elements in pollution and cleaning days

#### 2.4 富集因子法(EF)来源解析

富集因子法(EF)采用双重归一化的数据处理方法研究人为源和天然源对  $\text{PM}_{2.5}$  中元素的贡献程度, 通过无机元素浓度的富集因子(EF)来研究大气颗粒物中元素的富集程度, 分析  $\text{PM}_{2.5}$  中污染物的来源, 在各类研究中应用较为广泛<sup>[33,34]</sup>. 元素的富集程度越高, 环境  $\text{PM}_{2.5}$  中相应元素的浓度较地壳物质中相应元素的浓度越高, 说明人为因素对环境  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献越大<sup>[35]</sup>. 富集因子的计算公式为:

$$EF_i = \frac{(C_i/C_r)_{\text{环境}}}{(C_i/C_r)_{\text{背景}}}$$

式中:  $C_i$  表示为第  $i$  种元素的浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C_r$  表示为选定的表征背景的参比元素的浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 根据富集因子(EF)分级法则, 当  $EF_i > 100$  时, 表明第  $i$  种元素明显受到人为源的影响, 当  $100 \geq EF_i > 10$  时, 表明第  $i$  种元素受人为扰动, 当  $EF_i \leq 1$  时, 表明第  $i$  种元素在环境  $\text{PM}_{2.5}$  中没有富集. 石河子市土壤主要为灰漠土、潮土和草甸土, 本研究中各元素的土壤背景值取自于《中国土壤元素背景值》<sup>[36]</sup> 中以上 3 种土壤的均值, 并选则 Al 元素作为参比元素<sup>[37]</sup>.

石河子市 2020 年冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中 24 种元素的富集因子(EF)如表 4 所示, 由于城市周围土壤不同, 石河子市与郴州市<sup>[38]</sup>、温州市<sup>[39]</sup>等地级市元素 EF 值有所不同, 城区和工业区的 K、Ca、Na、Mg、Fe 元素的富集因子均大于 1000, 表明  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物中这 5 种元素主要来自人为源, 受周围自然源的影响较小, 是典型的人为排放的污染元素, 通常 Na、K 元素多来自生物质燃烧和餐饮油烟, Fe 元素多来自于地壳物质或燃煤, Ca 元素主要来源是石灰和水泥<sup>[40,41]</sup>, 石河子市  $\text{PM}_{2.5}$  中 Ca 元素主要来自建筑扬尘以及电石厂原料氧化钙、碳酸钙等, 张靳杰<sup>[42]</sup> 研究认为机动车尾气颗粒物中无机元素排放因子最高的

是 K、Ca、Na、Mg, 说明石河子市冬季 PM<sub>2.5</sub> 受工业区排放、机动车和地壳物质以及餐饮油烟等的影响, 城区 Se、Cd、Pb 元素富集因子大于 10, 工业区 Se、Cd、Pb、Ag 元素富集因子大于 10, 通常 Se 是燃煤标识物, Cd 来自工业粉尘, Pb 是机动车排放的标识性元素<sup>[43,44]</sup>, 说明环境 PM<sub>2.5</sub> 中这些元素受燃煤、工业粉尘和机动车等人为扰动影响. Cu、Zn、As、Cr、Mn、Ba 等元素富集因子值较低, 受人为扰动影响较小, 主要来自天然源.

表 4 石河子市 PM<sub>2.5</sub> 中 24 种元素 EF 值Table 4 Enrichment factors of 24 elements in PM<sub>2.5</sub> of Shihezi city

序号 Serial number	元素 Elements	PM <sub>2.5</sub> 富集因子 Enrichment factors of PM <sub>2.5</sub>		A层土元素 Element of layer A soil	郴州市 <sup>[38]</sup> EF值 Enrichment factors of Chenzhou City	温州市 <sup>[39]</sup> EF值 Enrichment factors of Wenzhou City
		城区 Urban	工业区 Industrial	质量分数( $\times 10^6$ )/(g·g <sup>-1</sup> ) Mass percentage		
1	Be	1.1	2.1	187.7	—	—
2	Na	14765.3	11986.5	151.0	—	22.2
3	Mg	2840.9	2551.4	89.0	—	3.0
4	Al	1.0	1.0	562.0	0.02	—
5	K	3325.4	3001.5	196.0	—	11.6
6	Ca	3704.0	3998.0	283.7	—	20.1
7	V	0.3	0.9	7293.3	45.7	0.4
8	Cr	1.0	1.4	5510.0	106.8	112.5
9	Mn	0.3	0.2	63266.7	14.0	7.7
10	Fe	2078.6	1297.9	273.7	0.6	3.7
11	Co	0.3	0.4	1250.0	—	5.0
12	Ni	0.6	1.0	2496.7	66.8	38.7
13	Cu	5.9	2.7	2136.7	370.0	227.5
14	Zn	7.3	6.6	6753.3	155.8	509.7
15	As	7.6	6.4	910.0	521.1	301.0
16	Se	17.5	16.8	20.0	—	—
17	Mo	2.4	3.8	206.7	—	—
18	Ag	5.5	15.6	11.7	1599.2	—
19	Cd	61.5	64.7	9.5	10880.9	1691.0
20	Ba	0.2	0.1	50133.3	3.3	—
21	Tl	5.4	8.0	54.7	—	—
22	Pb	15.9	12.6	2136.7	262.4	176.8
23	Th	0.1	0.3	1030.7	—	—
24	U	0.3	1.3	261.7	—	—

备注: “—”表示未检测出.

### 3 结论(Conclusion)

(1) 2020 年冬季在石河子市进行为期 61d 的 PM<sub>2.5</sub> 样品采集中, 重度及以上污染天数占整个采样期的 53.2%, 以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的污染天数占整个采样期的 98.4%, 采样期城区 PM<sub>2.5</sub> 的日均值为 164.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 工业区 PM<sub>2.5</sub> 的日均值为 113.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重;

(2) 采样期城区 PM<sub>2.5</sub> 中元素浓度为 4.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 工业区为 3.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 城区和工业区 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素的主要成分均为 Na、Mg、K、Ca、Al、Fe, 6 种元素在城区元素中的占比为 97.4%, 在工业区元素中的占比为 97.5%, 表明 2 个功能区 PM<sub>2.5</sub> 中元素浓度差异性较小. 污染天 K 和 Ca 元素的累积速度最

快, Na 和 Ca 元素的累积量最大;

(3) 石河子市 2020 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 中主要富集元素为 K、Ca、Na、Mg、Fe, 富集元素主要来源于工业区、机动车、地壳物质以及餐饮油烟等, 城区的元素富集程度和污染程度略高于工业区。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 元雪婷, 杨静. 乌昌石区域耗煤行业排放特征及对空气质量的影响 [J]. *工业安全与环保*, 2020, 46(9): 60-64.  
YUAN X T, YANG J. Emission characteristics of the coal-consumption industries in Wuchangshi area and its impact on air quality [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2020, 46(9): 60-64 (in Chinese).
- [ 2 ] 闵月. 天山北坡乌昌石地区污染天气过程的气象特征研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.  
MIN Y. The Meteorological characteristics of air pollution in northern slope of Tianshan Mountains [D]. Lanzhou, Lanzhou University, 2020 (in Chinese).
- [ 3 ] 王晴, 王宝庆, 蔡宁宁, 等. 乌昌石区域化石燃料固定燃烧点源大气污染物排放清单及时空分布 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(6): 712-716.  
WANG Q, WANG B Q, CAI N N, et al. Emission inventory of atmospheric pollutants from fossil fuel fixed combustion point source and its temporal and spatial distribution in Wuchangshi area [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(6): 712-716 (in Chinese).
- [ 4 ] 张斌, 吕宝磊, 王馨陆, 等. 利用集合深度学习方法订正空气质量数值预报结果: 以新疆乌昌石城市群为例 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 931-938.  
ZHANG B, LÜ B L, WANG X L, et al. Improving air quality forecast accuracy in Urumqi-Changji-Shihezi region using an ensemble deep learning approach [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(5): 931-938 (in Chinese).
- [ 5 ] HAN X, LIU Y Q, GAO H, et al. Forecasting PM<sub>2.5</sub> induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved PM<sub>2.5</sub> and spatial analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1009-1017.
- [ 6 ] BENMERAD M, SLAMA R, BOTTURI K, et al. Chronic effects of air pollution on lung function after lung transplantation in the Systems prediction of Chronic Lung Allograft Dysfunction (SysCLAD) study [J]. *European Respiratory Journal*, 2017, 49(1): 1600206.
- [ 7 ] ZHAI Y B, LIU X T, CHEN H M, et al. Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> from Changsha [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 109-115.
- [ 8 ] 王淑兰, 柴发合, 杨天行. 北京市不同尺度大气颗粒物元素组成的特征分析 [J]. *环境科学研究*, 2002, 15(4): 10-12.  
WANG S L, CHAI F H, YANG T X. Characteristics analysis of elements contained in air suspended particles with different sizes in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(4): 10-12 (in Chinese).
- [ 9 ] 胡鸣, 张懿华, 赵倩彪. 上海市冬季PM<sub>2.5</sub>无机元素污染特征及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 1993-1999.  
HU M, ZHANG Y H, ZHAO Q B. Characteristics and sources of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 1993-1999 (in Chinese).
- [ 10 ] 田莎莎, 张显, 卞思思, 等. 沈阳市PM<sub>2.5</sub>污染组分特征及其来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 487-496.  
TIAN S S, ZHANG X, BIAN S S, et al. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution components and their sources in Shenyang [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 487-496 (in Chinese).
- [ 11 ] 赵金平, 谭吉华, 毕新慧, 等. 广州市灰霾期间大气颗粒物中无机元素的质量浓度 [J]. *环境化学*, 2008, 27(3): 322-326.  
ZHAO J P, TAN J H, BI X H, et al. The mass concentrations of inorganic elements in atmospheric particles during haze period in Guangzhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(3): 322-326 (in Chinese).
- [ 12 ] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市PM<sub>2.5</sub>中 toxic 重金属污染特征及健康风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2225-2232.  
LI Y P, LIU H F, ZHOU H, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Chengdu [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(7): 2225-2232 (in Chinese).
- [ 13 ] 纪元, 康宏, 李刚. 乌鲁木齐市冬季重污染天气下PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及来源解析 [J]. *干旱环境监测*, 2016, 30(3): 127-131.  
JI Y, KANG H, LI G. The heavy metal pollution characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> under the heavy pollution of Urumqi winter weather [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2016, 30(3): 127-131 (in Chinese).
- [ 14 ] 张洛红, 范芳, 蒋炜炜, 等. 珠三角地区大气PM<sub>2.5</sub>中重金属污染水平及健康风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 370-380.  
ZHANG L H, FAN F, JIANG W W, et al. Concentrations and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in the Pearl River Delta Region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1): 370-380 (in Chinese).
- [ 15 ] 王琼, 董小艳, 杨璐璐, 等. 基于北京市大气PM<sub>2.5</sub>中9种元素的环境健康风险评估 [J]. *环境卫生学杂志*, 2018, 8(3): 197-203.  
WANG Q, DONG X Y, YANG L L, et al. Environment health risk assessment on 9 elements in PM<sub>2.5</sub> in Beijing [J]. *Journal of*



- Environmental Hygiene, 2018, 8(3): 197-203(in Chinese).
- [16] 任慧清, 鲁建江, 宁建英, 等. 石河子市PM<sub>2.5</sub>中重金属污染及健康风险评估 [J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1716-1725.  
REN H Q, LU J J, NING J Y, et al. Pollution and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> of Shihezi City [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(6): 1716-1725(in Chinese).
- [17] 李瑶, 刘琳, 胡潭高, 等. 石河子市PM<sub>2.5</sub>浓度的遥感反演研究 [J]. 环境科学与管理, 2018, 43(1): 138-142.  
LI Y, LIU L, HU T G, et al. Remote sensing estimation model of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in Shihezi city [J]. *Environmental Science and Management*, 2018, 43(1): 138-142(in Chinese).
- [18] 丁俊男, 王帅, 王瑞斌, 等. 河南省典型城市PM<sub>2.5</sub>无机元素污染特征及来源分析 [J]. 中国环境监测, 2017, 33(6): 25-32.  
DING J N, WANG S, WANG R B, et al. Characteristics and sources analysis of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> in typical cities of Henan Province [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(6): 25-32(in Chinese).
- [19] 张晶晶, 张清花. 昌吉市采暖期和非采暖期PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染特征分析 [J]. 干旱环境监测, 2018, 32(1): 24-28.  
ZHANG J J, ZHANG Q H. Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in heating and non-heating season in Changji city [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2018, 32(1): 24-28(in Chinese).
- [20] TAIWO A M, HARRISON R M, SHI Z B. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97: 109-120.
- [21] XU L L, YU Y K, YU J S, et al. Spatial distribution and sources identification of elements in PM<sub>2.5</sub> among the coastal city group in the Western Taiwan Strait region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 77-85.
- [22] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度特征和来源分析 [J]. 环境科学, 2017, 38(3): 876-883.  
QIAO B W, LIU Z R, HU B, et al. Concentration characteristics and sources of trace metals in PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3): 876-883(in Chinese).
- [23] KYLLÖNEN K, KARLSSON V, RUOHO-AIROLA T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2260-2269.
- [24] 环境保护部. 中华人民共和国环保行业标准: 环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)手工监测方法 HJ 656—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental Protection Standard of the People's Republic of China: Technical Specifications for gravimetric measurement methods for PM<sub>2.5</sub> in ambient air. HJ 656—2013 [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2013(in Chinese).
- [25] 杨佳美, 戴启立, 刘保双, 等. 关中地区背景点位环境空气PM<sub>2.5</sub>来源解析与多模型结果对比 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(2): 184-192.  
YANG J M, DAI Q L, LIU B S, et al. Source apportionment of ambient PM<sub>2.5</sub> at background sites in Guanzhong area, China: Comparison of results obtained by multiple models [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2): 184-192(in Chinese).
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 环境空气质量标准 GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Ambient air quality standard. GB 3095—2012 [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2016(in Chinese).
- [27] 王伟平, 苏高利, 杨海鹏. 城北高架点源对西湖风景区影响的研究 [J]. 气象, 2002, 28(1): 13-17.  
WANG W P, SU G L, YANG H P. A study on influence of high elevation point source of northern Hangzhou on the scenic zone of west lake [J]. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(1): 13-17(in Chinese).
- [28] 陈瑞. 城市高架点源对空气质量的影响分析 [J]. 浙江树人大学学报, 2003, 3(5): 77-79.  
CHEN R. Effects of high chimney emission on air quality in the urban area [J]. *Journal of Zhejiang Shuren University*, 2003, 3(5): 77-79(in Chinese).
- [29] 赵强. 昌吉市大气颗粒物污染特征及来源解析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.  
ZHAO Q. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric particulate matter in Changji City [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018(in Chinese).
- [30] 符小晴, 彭晓武, 王钰钰, 等. 广州市大气PM<sub>2.5</sub>中元素特征及重金属健康风险评估 [J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(2): 154-158.  
FU X Q, PENG X W, WANG Y Y, et al. Characteristic of elements in PM<sub>2.5</sub> and health risk assessment of heavy metals in Guangzhou [J]. *Journal of Environment and Health*, 2018, 35(2): 154-158(in Chinese).
- [31] 董海燕, 古金霞, 姜伟, 等. 天津市颗粒物中元素化学特征及来源 [J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(1): 25-28.  
DONG H Y, GU J X, JIANG W, et al. Character and source analysis of chemical element in particulate matters in Tianjin [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24(1): 25-28(in Chinese).

- [32] 樊孝俊, 徐义邦, 赵阳. 南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染及生态风险评价 [J]. *中国环境监测*, 2016, 32(2): 26-30.  
FAN X J, XU Y B, ZHAO Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in autumn in Nanchang [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(2): 26-30(in Chinese).
- [33] 王永慧, 刘芑岩, 于泊蓁, 等. 保定市日间、夜间大气PM<sub>2.5</sub>中无机组分的特征及来源分析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(9): 1941-1948.  
WANG Y H, LIU P Y, YU B Q, et al. Characteristics and source analysis of inorganic components in PM<sub>2.5</sub> samples collected during daytime and night in Baoding City [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(9): 1941-1948(in Chinese).
- [34] 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 攀枝花工矿区土壤重金属人为污染的富集因子分析 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 13-16.  
TENG Y G, TUO X G, NI S J, et al. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 13-16(in Chinese).
- [35] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染 [J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2006, 39(2): 94-99.  
JI Y Q, ZHU T, FENG Y C, et al. Application of the enrichment factor to analyze the pollution of elements in soil dust in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, 39(2): 94-99(in Chinese).
- [36] 中国土壤环境背景值研究[Z]. 北京市, 中国环境监测总站, 2001.01. 01.  
Research on the environmental background of soil in China[Z]. Beijing, Environmental Monitoring of China, 2001.01. 01(in Chinese).
- [37] 赵晓亮, 岳阳霞, 许端平, 等. 阜新市秋冬季节PM<sub>2.5</sub>中无机元素污染特征及来源 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4247-4258.  
ZHAO X L, YUE Y X, XU D P, et al. The pollution characteristics and source analysis of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> during autumn and winter in Fuxin [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4247-4258(in Chinese).
- [38] 杨麒, 傅致严, 刘湛, 等. 郴州市大气PM<sub>2.5</sub>中无机元素污染特征及来源分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(6): 133-140.  
YANG Q, FU Z Y, LIU Z, et al. Characteristics and sources of inorganic elements in atmospheric PM<sub>2.5</sub> at Chenzhou city [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(6): 133-140(in Chinese).
- [39] 郑元铸, 葛琳琳, 郑旭军, 等. 温州市区PM<sub>2.5</sub>无机元素污染特征及来源分析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(1): 84-91.  
ZHENG Y Z, GE L L, ZHENG X J, et al. Characteristics and source apportionment of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> in Wenzhou, Zhejiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(1): 84-91(in Chinese).
- [40] TIAN H Z, WANG Y, XUE Z G, et al. Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980–2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(23): 11905-11919.
- [41] ZHANG W J, SUN Y L, ZHUANG G S, et al. Characteristics and seasonal variations of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and TSP aerosol in Beijing [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2006, 19(6): 461-468.
- [42] 张靳杰. 武汉市机动车尾气VOCs和颗粒物排放特征研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
ZHANG J J. Study on the characteristics of volatile organic compounds and particulate matter from on-use vehicles in Wuhan[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [43] 郭海全, 郝俊杰, 李天刚, 等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 786-791.  
GUO H Q, HAO J J, LI T G, et al. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil in Hebei plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 786-791(in Chinese).
- [44] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 江西德兴矿区土壤重金属污染的富集因子分析 [J]. *金属矿山*, 2005(12): 57-60.  
CHEN C H, NI S J, HE B B, et al. Enrichment factor analysis of soil pollution by heavy metals in Dexing mining area, Jiangxi Province [J]. *Metal Mine*, 2005(12): 57-60(in Chinese).