

## 沈阳市人为源大气污染物排放清单研究

祝胜男<sup>1,2</sup>, 赵帝<sup>2,3</sup>, 李一倬<sup>2,3</sup>, 王帆<sup>1,2</sup>, 刘岩<sup>1,2</sup>

- (1. 沈阳环科检测技术有限公司, 沈阳 110067;  
2. 沈阳环境科学研究院, 沈阳 110167;  
3. 辽宁省城市大气污染防治重点实验室, 沈阳 110167)

**摘要:** 为全面评估沈阳市大气污染物排放状况, 文章收集和整理了相关活动水平信息和排放因子数据并采用排放因子法建立了2016年沈阳市人为源大气污染物排放清单。结果显示: 2016年沈阳市人为源CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、BC和OC的排放总量分别为38.64×10<sup>4</sup>、10.63×10<sup>4</sup>、3.17×10<sup>4</sup>、5.28×10<sup>4</sup>、14.03×10<sup>4</sup>、5.54×10<sup>4</sup>、10.59×10<sup>4</sup>、0.57×10<sup>4</sup>和1.82×10<sup>4</sup> t。按照排放源分类, CO、NO<sub>x</sub>和BC主要来自移动源, SO<sub>2</sub>主要来自化石燃料固定燃烧源, NH<sub>3</sub>主要来自农业源, VOCs主要来自工艺过程源, PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>主要来自扬尘源, OC主要来自其他排放源。按照排放源区县分类, NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和BC主要来自铁西区, CO、OC主要来自新民市, NH<sub>3</sub>主要来自辽中区。

**关键词:** 人为源; 排放清单; 排放特征; 排放因子; 沈阳市

中图分类号: X51

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022060007

## Emission inventory of anthropogenic air pollutant sources in Shenyang

ZHU Shengnan<sup>1,2</sup>, ZHAO Di<sup>2,3</sup>, LI Yizhuo<sup>2,3</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>1,2</sup>

- (1. Shenyang Environmental Testing Technology Co., Ltd., Shenyang 110067, China; 2. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110067, China; 3. Liaoning Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environmental Pollution Prevention and Control, Shenyang 110067, China)

**Abstract:** In order to comprehensively evaluate the emission status of anthropogenic air pollutants in Shenyang, the activity data and emission factors were collected, and the emission factor method was used to establish the emission inventory of anthropogenic air pollutant sources in Shenyang in 2016. The results showed that the total emissions of CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, BC and OC in Shenyang were 38.64×10<sup>4</sup>, 10.63×10<sup>4</sup>, 3.17×10<sup>4</sup>, 5.28×10<sup>4</sup>, 14.03×10<sup>4</sup>, 5.54×10<sup>4</sup>, 10.59×10<sup>4</sup>, 0.57×10<sup>4</sup> and 1.82×10<sup>4</sup> t in 2016, respectively. According to the classification of emission sources, CO, NO<sub>x</sub> and BC were mainly from the mobile source, and SO<sub>2</sub> was mainly from the stationary combustion source. NH<sub>3</sub> was mainly from the agricultural source, and VOCs was mainly from the industrial process source. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> were mainly from the fugitive dust source, and OC was mainly from the other emission sources. According to the classification of districts, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, VOCs, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and BC were mainly distributed in Tiexi District. CO and OC were mainly distributed in Xinmin City, and NH<sub>3</sub> was mainly distributed in Liaozhong District.

**Keywords:** anthropogenic sources; emission inventory; emission characteristics; emission factor; Shenyang

CLC number: X51

随着经济社会的高速发展, 城市中的工业化燃料燃烧<sup>[1]</sup>、民用散煤燃烧<sup>[2]</sup>、机动车排放<sup>[3-6]</sup>、道路扬尘<sup>[7-8]</sup>、餐饮油烟<sup>[9-10]</sup>等多种污染源排放大量CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>, 多种污染物的作用下产生的城市大气复合污染引发了越来越多的关注。

排放源清单是指某一特定地理区域在某一特

定时期内, 基于污染源分类的, 由各种污染源排放到大气中的一种或多种污染物的列表<sup>[11]</sup>。排放源清单是利用空气质量模型开展大气复合污染研究与控制的关键数据, 建立准确、完整、更新及时的大气污染物排放清单是识别污染源、科学有效开展大气污染防治工作的基础和前提<sup>[12]</sup>。我国开展大气污染物排放清单研究较发达国家晚, 各地区的研

收稿日期: 2022-06-07

录用日期: 2022-09-01

作者简介: 祝胜男(1989-), 女, 硕士、工程师。研究方向: 环境污染控制。E-mail: zhushengnan@syhky.com

引用格式: 祝胜男, 赵帝, 李一倬, 等. 沈阳市人为源大气污染物排放清单研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 105-111.

究比较零散,多数借鉴国外编制研究经验<sup>[13]</sup>,原环境保护部于 2014 和 2016 年先后发布了《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 8 个有关大气污染物排放清单的编制技术指南,初步规范了我国大气污染物排放清单的编制体系和技术方法。排放清单可以采用物料衡算法、排放因子法、实际测量法和模型估算法核算污染物的排放量,其中排放因子法是最广泛的方法之一<sup>[11]</sup>。

辽宁省是我国重要的老工业基地之一,沈阳市是辽宁的经济核心区,工业和人口集中。沈阳等城市组成的辽宁中部城市群是《重点区域大气污染防治“十二五”规划》(环发[2012]130号)和《大气污染防治行动计划》(国发[2013]37号)划定的重点区域之一,受长白山高压等一些局地天气系统的影响,沈阳市大气的扩散稀释能力变差,严重地影响城市环境大气质量<sup>[14-15]</sup>。辽宁地区完整的排放源清单较少,袁梦晨等<sup>[16]</sup>核算 2012 年辽宁省人为源大气污染物排放清单,其中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、BC 和 OC 中沈阳市的排放量占比较大。王秀艳等<sup>[17]</sup>、吴丹等<sup>[18]</sup>和王龙等<sup>[19]</sup>等采用排放因子法,分别核算了沈阳市 2007 年餐饮 VOCs 排放量、沈阳市 2013 年道路机动车的 CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 和 HC 排放量、沈阳市 2015 年人为源大气 VOCs 排放总量。沈阳地区的排放源清单大多比较零散,没有建立完整的排放源清单,无法全面细致地反映沈阳市大气污染物排放特征,不利于利用空气质量模型开展相关大气污染研究。因此需要开展沈阳市地区完整的人为源大气污染物排放清单研究。

本研究以沈阳市为研究对象,根据《城市大气污染物排放清单编制技术手册》(2018)(以下简称《手册》)的估算方法,活动水平数据来自文献、实地调研数据和环境统计资料等,主要采用《手册》中推荐的排放因子,建立沈阳市大气污染物人为源排放清单。通过排放清单,可以为利用空气质量模型开展大气复合污染研究与控制提供数据支持,为研究沈阳市大气污染防治政策效果评估提供支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域与对象

本研究基准年为 2016 年,以沈阳市为研究区域,空间范围覆盖沈阳市下辖所有区县。研究对象

包括以下 9 种污染物:一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、氨(NH<sub>3</sub>)、挥发性有机物(VOCs)、细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、黑炭(BC)和有机碳(OC)。按照《手册》划分排放源种类,排放源包括化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和其他排放源(主要指餐饮油烟)10 类排放源,见表 1。

表 1 沈阳市大气污染排放源分类

Table 1 Categories and subcategories of anthropogenic emission sources in Shenyang

第一级排放源	第二级排放源
化石燃料固定燃烧源	电力生产
	热力生产和供应
	其他工业
	民用源
工艺过程源	农副食品加工业
	食品制造业
	酒、饮料和精制茶制造业
	纺织业
	石油加工、炼焦和核燃料加工业
	化学原料和化学制品制造业
	化学纤维制造业
	橡胶和塑料制品业
	非金属矿物制品业
	黑色金属冶炼和压延加工业
有色金属冶炼和压延加工业	
移动源	载客汽车
	载货汽车
	摩托车
	工程机械
	农业机械
溶剂使用源	柴油发电机组
	民航飞机
	印刷印染
	表面涂层
农业源	农药使用
	其他溶剂使用
	氮肥施用
	畜禽养殖
	土壤本底
	固氮植物
	秸秆堆肥

续表 1

第一级排放源	第二级排放源
扬尘源	人体粪便
	土壤扬尘
	道路扬尘
	施工扬尘
	堆场扬尘
生物质燃烧源	生物质锅炉
	户内生物质燃料
	生物质开放燃烧
储存运输源	天然气输送
	原油运输
	汽油储存
	汽油运输
	柴油储存
	柴油运输
	汽油加油站
	柴油加油站
废弃物处理源	废水处理
	固废处理
	烟气脱硝
其他排放源	餐饮企业
	家庭餐饮

## 1.2 排放量估算方法及活动水平来源

本研究主要采用排放因子法建立 2016 年沈阳市大气污染物排放清单, 排放量估算, 见式(1):

$$E = A \times EF \times (1 - \eta) \quad (1)$$

式中:  $A$  为活动水平;  $EF$  为各污染物的产生系数;  $\eta$  为末端控制技术的去除效率。本文未特殊说明, 排放因子均参考《手册》附录 A-M。

1.2.1 化石燃料固定燃烧源 对于化石燃料固定燃烧源中的电力、热力等行业的燃煤产生的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、BC 和 OC 的排放因子采用物料衡算法获取, 见式(2~5):

$$EF_{\text{SO}_2} = 2 \times S \times (1 - sr) \quad (2)$$

$$EF_{\text{PM}} = Aar \times (1 - ar) \times f_{\text{PM}} \quad (3)$$

$$EF_{\text{BC}} = EF_{\text{PM}_{2.5}} \times f_{\text{BC}} \quad (4)$$

$$EF_{\text{OC}} = EF_{\text{PM}_{2.5}} \times f_{\text{OC}} \quad (5)$$

式中:  $S$  为平均燃煤收到基硫分;  $sr$  为硫分进入底灰比例;  $Aar$  为平均燃煤收到基灰分;  $ar$  为灰分进入

底灰比例;  $f_{\text{PM}}$  为排放源产生  $\text{PM}_{2.5}$  或  $\text{PM}_{10}$  范围颗粒物占总颗粒物比例;  $f_{\text{BC}}$  和  $f_{\text{OC}}$  分别是 BC 和 OC 占  $\text{PM}_{2.5}$  比例。

化石燃料固定燃烧源的活动水平数据中, 工业企业燃料消耗量、锅炉类型、煤炭的硫分和灰分等来自沈阳市环境统计资料和企业调查, 民用源煤炭燃烧数据来自散煤调查数据, 民用天然气和液化石油气数据来自《沈阳市统计年鉴 2017》。民用源散煤燃烧的硫分和灰分根据《沈阳市人民政府办公厅关于印发沈阳市 2018 年散煤治理工作方案和居民散煤替代工作方案的通知》(沈政办发[2018]96 号)<sup>[20]</sup> 和《沈阳市人民政府办公厅关于重新划定高污染燃料禁燃区的通知》(沈政办发[2018]98 号)<sup>[21]</sup> 相关要求, 取 0.6% 和 16%。

1.2.2 工艺过程源 工艺过程源包括化学原料和化学制品制造业、橡胶和塑料制品业、石油加工、炼焦和核燃料加工业、酒、饮料和精制茶制造业等。排放量估算公式参照公式(1), 工艺过程源的活动水平数据主要为产品产量, 相关信息来自沈阳市环境统计资料和企业调查。

1.2.3 移动源 移动源包括道路移动源和非道路移动源, 具体可以分为载客汽车、载货汽车、摩托车、飞机、工程机械和农业机械等。道路移动源排放量估算, 见式(6~7):

$$E = P \times EF \times VKT \quad (6)$$

$$EF = BEF \times \varphi \times \gamma \times \lambda \times \theta \quad (7)$$

式中:  $E$  为排放量;  $P$  为机动车保有量, 来自交通部门历史数据;  $EF$  为基于行驶里程排放系数;  $VKT$  为年均行驶里程。其中  $EF$  需要结合实际情况修正获得,  $BEF$  为基准排放系数;  $\varphi$  为环境修正因子;  $\gamma$  为平均速度修正因子;  $\lambda$  为劣化修正因子;  $\theta$  为车辆其他使用条件(如负载系数、油品质量等)修正因子。受限数据, 参考《手册》, 针对基准排放因子按照沈阳市实际温度和湿度做了修正。

非道路移动源排放量, 见式(8):

$$E = A \times EF \quad (8)$$

式中:  $A$  为活动水平,  $EF$  为污染物排放系数。对于飞机, 活动水平为起飞着陆循环次数; 对于其他非道路移动源, 活动水平为燃油消耗量。其中飞机起飞着陆循环次数来自《沈阳市统计年鉴 2017》, 工程机械和农业机械的柴油消耗量数据来自交通部门

和农业部门的历史数据。

**1.2.4 溶剂使用源** 溶剂使用源主要是 VOCs 的排放,包括印刷印染、农药使用和其他溶剂使用等。排放量估算公式参照公式(1)。溶剂使用的活动水平数据主要为品的产品产量及溶剂使用量等,其中工业企业数据来自沈阳市环境统计资料和企业调查。农药使用量和其他溶剂使用等来自《沈阳市统计年鉴 2017》。

**1.2.5 农业源** 农业源主要是  $\text{NH}_3$  的排放,包括氮肥使用、畜禽养殖、土壤本底和固氮植物等。排放量估算公式参照公式(8)。其中氮肥使用的活动水平为氮肥使用量,畜禽养殖的活动水平为各类畜禽数量,土壤本底的活动水平为耕地面积、固氮植物的活动水平为大豆、花生等种植面积等,数据主要来自《沈阳市统计年鉴 2017》。

**1.2.6 扬尘源** 扬尘源主要涉及  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放,包括土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘和堆场扬尘。

土壤扬尘排放量计算,见式(9):

$$W_{\text{Si}} = E_{\text{Si}} \times A_{\text{S}} \quad (9)$$

式中:  $W_{\text{Si}}$  为土壤扬尘中  $\text{PM}_i$  总排放量;  $E_{\text{Si}}$  为土壤扬尘源的  $\text{PM}_i$  排放系数;  $A_{\text{S}}$  为土壤面积,土地面积数据来自《沈阳市统计年鉴 2017》。

道路扬尘排放量计算,见式(10~11):

$$W_{\text{Ri}} = E_{\text{Ri}} \times L_{\text{R}} \times N_{\text{R}} \times \left(1 - \frac{n_r}{365}\right) \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$E_{\text{Pi}} = k_i \times (sL)^{0.91} \times W^{1.02} \times (1 - \eta) \quad (11)$$

式中:  $W_{\text{Ri}}$  为道路扬尘源中颗粒物  $\text{PM}_i$  的总排放量;  $E_{\text{Ri}}$  为道路扬尘源中  $\text{PM}_i$  平均排放系数;  $L_{\text{R}}$  为道路长度,来自《沈阳市统计年鉴 2017》,本研究仅计算铺装道路;  $N_{\text{R}}$  为一定时期内车辆在该段道路上的平均车流量,本研究通过对典型路段架设摄像机和人工统计的方式获取;  $n_r$  为不起尘天数,根据气象数据统计。  $E_{\text{Pi}}$  为铺装道路的扬尘中  $\text{PM}_i$  排放系数;  $k_i$  为产生的扬尘中  $\text{PM}_i$  的粒度乘数,根据《手册》 $\text{PM}_{10}$  取 0.62、 $\text{PM}_{2.5}$  取 0.15;  $sL$  为道路积尘负荷,通过对典型路段实测的方式获取。  $W$  为平均车重,通过对典型路段统计的方式获取。

施工扬尘源排放量计算采用总体排放量计算的方式,排放量计算,见式(12~13):

$$W_{\text{Ci}} = E_{\text{Ci}} \times A_{\text{C}} \times T \times k_i \quad (12)$$

$$E_{\text{Ci}} = 2.69 \times 10^{-4} \times (1 - \eta) \quad (13)$$

式中:  $W_{\text{Ci}}$  为整个建筑施工区域中  $\text{PM}_i$  总排放量;  $E_{\text{Ci}}$  为整个施工工地  $\text{PM}_i$  的平均排放系数;  $A_{\text{C}}$  为施工区域面积;  $T$  为工地的施工活跃月份数;  $k_i$  为  $\text{PM}_i$  在土壤扬尘中百分含量,根据《手册》 $\text{PM}_{10}$  取 0.49、 $\text{PM}_{2.5}$  取 0.1;  $\eta$  为污染控制技术对扬尘的去除效率。施工工地的活动水平数据和扬尘控制措施来自施工工地调查。

堆场的扬尘源排放量是装卸、运输引起的扬尘与堆积存放期间风蚀扬尘的加和,排放量估算,见式(14):

$$W_{\text{Y}} = \sum_{i=1}^m E_{\text{h}} \times G_{\text{Yi}} \times 10^{-3} + E_{\text{w}} \times A_{\text{Y}} \times 10^{-3} \quad (14)$$

式中:  $W_{\text{Y}}$  为堆场扬尘源中颗粒物总排放量;  $E_{\text{h}}$  为堆场装卸运输过程的扬尘颗粒物排放系数;  $m$  为每年料堆物料装卸总次数;  $G_{\text{Yi}}$  为第  $i$  次装卸过程的物料装卸量;  $E_{\text{w}}$  为料堆受到风蚀作用的颗粒物排放系数;  $A_{\text{Y}}$  为料堆表面积。堆场的活动水平数据来自沈阳市环境统计资料和企业调查。

**1.2.7 生物质燃烧源** 生物质燃烧源,包括生物质锅炉、生物质炉灶和生物质开放燃烧。生物质锅炉、生物质炉灶排放量参照公式(1),活动水平为生物质燃料消耗量,生物质燃烧量数据来自调查数据。生物质开放燃烧消耗的生物量计算,见式(15):

$$A = P \times N \times R \times \eta \quad (15)$$

式中:  $P$  为农作物产量,相关数据来自《沈阳市统计年鉴 2017》;  $N$  为草谷比;  $R$  为秸秆露天焚烧比例,按照 10% 计算;  $\eta$  为燃烧率,根据《手册》取 0.9。

**1.2.8 储存运输源** 储存运输源的主要涉及 VOCs 的排放,包括加油站、储油库等,排放量估算公式参照公式(1)。储存运输的活动水平是加油站销售量和储油库储存量等。活动水平数据和控制措施信息来自《沈阳市统计年鉴 2017》和加油站调查数据。

**1.2.9 废弃物处理源** 废弃物处理的主要涉及  $\text{NH}_3$  和 VOCs 的排放,包括废水处理、固废处理、烟气脱硝等。排放量估算公式参照公式(1)。其中

废水处理排放的活动水平指污水处理量、固废处理排放的活动水平指固废处理量、烟气脱硝排放的活动水平指使用脱硝技术的煤炭使用量。活动水平数据来自沈阳市环境统计资料和企业调查。

1.2.10 其他排放源 其他排放源主要指餐饮油烟排放,排放量估算公式参照公式(1), $A$ 为烟气排放量, $EF$ 为排放系数; $\eta$ 为油烟净化器去除效率。 $A$ 的计算,见式(16):

$$A = n \times V \times H \quad (16)$$

式中: $n$ 为固定炉头数; $V$ 为烟气排放速率; $H$ 为年

总经营时间。餐饮企业信息来自环保部门历史数据和调查数据。家庭餐饮信息根据实地调查和相关文献[9],按每户家庭1个炉头,每天做菜时间1小时,每年365天计算,烟气排放速率参考《手册》中小型餐饮企业的烟气排放速率,全市户数来自《沈阳市统计年鉴2017》。

## 2 结果与讨论

### 2.1 2016年沈阳市大气污染物排放清单

基于上述估算方法和数据,得到2016年沈阳市人为源排放清单,见表2。

表2 2016年沈阳市人为源排放清单

第一级排放源	化石燃料固定燃烧源	工艺过程源	移动源	溶剂使用源	农业源	扬尘源	生物质燃烧源	储存运输源	废弃物处理源	其他排放源	合计
CO	14.68	1.20	14.87	-	-	-	7.89	-	-	-	38.64
NO <sub>x</sub>	4.94	0.13	5.33	-	-	-	0.23	-	-	-	10.63
SO <sub>2</sub>	2.77	0.12	0.12	-	-	-	0.16	-	-	-	3.17
NH <sub>3</sub>	-	0.01	0.10	-	4.77	-	0.10	-	0.31	-	5.28
VOCs	0.52	7.00	2.34	1.55	-	-	1.18	0.39	0.05	1.00	14.03
PM <sub>2.5</sub>	0.58	0.77	0.28	-	-	1.56	1.13	-	-	1.22	5.54
PM <sub>10</sub>	0.82	1.10	0.31	-	-	5.64	1.19	-	-	1.53	10.59
BC	0.14	0.11	0.15	-	-	-	0.15	-	-	0.02	0.57
OC	0.14	0.13	0.05	-	-	-	0.64	-	-	0.86	1.82

注:“-”表示无数据。

表2可知,2016年沈阳市人为源CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、BC和OC的排放总量分别为38.64×10<sup>4</sup>、10.63×10<sup>4</sup>、3.17×10<sup>4</sup>、5.28×10<sup>4</sup>、14.03×10<sup>4</sup>、5.54×10<sup>4</sup>、10.59×10<sup>4</sup>、0.57×10<sup>4</sup>和1.82×10<sup>4</sup> t。

### 2.2 排放源贡献率特征分析

(1)CO主要来自含碳物质不完全燃烧<sup>[22]</sup>。移动源、化石燃料固定燃烧源和生物质燃烧源是CO的主要排放源,分别占CO排放总量的38.49%、37.98%和20.41%。其中,移动源中主要来自载客汽车,排放量为11.99×10<sup>4</sup> t,占CO排放总量的31.02%;化石燃料固定燃烧源中主要来自民用源和热力生产和供应业,排放量分别为6.49×10<sup>4</sup>和4.89×10<sup>4</sup> t,占CO排放总量的16.78%和12.66%;生物质燃烧源中主要来自户内生物质燃烧,排放量

为6.05×10<sup>4</sup> t,占CO排放总量的15.66%。

(2)移动源和化石燃料固定燃烧源是沈阳市NO<sub>x</sub>最大的排放贡献源,分别占NO<sub>x</sub>排放总量的50.11%和46.50%。其中,移动源中主要来自载货汽车,排放量为3.64×10<sup>4</sup> t,占NO<sub>x</sub>排放总量的34.20%;化石燃料固定燃烧源的NO<sub>x</sub>排放主要来自热力生产和供应业和电力生产,排放量分别为2.57×10<sup>4</sup>和1.92×10<sup>4</sup> t,分别占NO<sub>x</sub>排放总量的24.14%和18.03%。

(3)化石燃料固定燃烧源是沈阳市SO<sub>2</sub>最大的排放贡献源,占SO<sub>2</sub>排放总量的87.27%。SO<sub>2</sub>主要来自煤炭中的硫,化石燃料固定燃烧源中热力生产和供应业排放量最大,为1.44×10<sup>4</sup> t,占SO<sub>2</sub>排放总量的45.34%。这与热力生产和供应业的煤炭消耗量较大,且含硫量较高有关。

(4)NH<sub>3</sub> 的主要排放源是农业源, 占比达到 90.27%。其中农业源中的畜禽养殖排放量最大, 为 4.42×10<sup>4</sup> t, 占 NH<sub>3</sub> 排放总量的 83.70%, 其次为土壤本底、人体粪便等。

(5)工艺过程源是沈阳市 VOCs 最大的排放贡献源, 占 VOCs 排放总量的 49.86%。其次为移动源和溶剂使用源。其中, 工艺过程源中化学原料和化学制品制造业排放量最大, 排放量为 6.17×10<sup>4</sup> t, 占 VOCs 排放总量的 43.96%, 这与沈阳市有多家制药化工相关企业, 且化学原料和化学制品制造业的排放系数较大有关; 其次为移动源中的载客汽车, 排放量为 1.76×10<sup>4</sup> t; 然后是溶剂使用源中的表面涂层, 排放量为 1.05×10<sup>4</sup> t, 占 VOCs 排放总量的 7.49%, 汽车制造业、设备制造业等行业是沈阳市优势产业, 存在大量表面喷涂环节。

(6)PM<sub>2.5</sub> 的排放, 扬尘源、其他排放源和生物质燃烧源是最大的排放源, 分别排放 1.56×10<sup>4</sup>、1.22×10<sup>4</sup> 和 1.13×10<sup>4</sup> t, 分别占 PM<sub>2.5</sub> 总排放量的 28.11%、22.10% 和 20.38%。化石燃料固定燃烧源和工艺过程源排放 0.58×10<sup>4</sup> 和 0.77×10<sup>4</sup> t, 分别占

PM<sub>2.5</sub> 总排放量的 10.45% 和 13.86%。

(7)PM<sub>10</sub> 的排放, 扬尘源是最大的排放源, 扬尘源 PM<sub>10</sub> 的排放量占 PM<sub>10</sub> 总排放量的 53.25%, 贡献了一半以上的 PM<sub>10</sub> 排放; 其次为其他排放源和生物质燃烧源, 占 PM<sub>10</sub> 总排放量的 14.44% 和 11.25%。

(8)BC 总体排放量较少, 其中移动源、生物质燃烧源占比最大, 分别为 26.45%、26.21%, 贡献了一半以上的 BC 排放; 其次是化石燃料固定燃烧源、工艺过程源, 分别占 BC 总排放量的 23.64% 和 19.38%。

(9)其他排放源和生物质燃烧源是 OC 最大的排放源, 占 OC 排放总量的 47.06% 和 35.36%, 这两个污染源占 OC 排放总量的 80% 以上。其中, 其他排放源主要是家庭餐饮排放, 生物质燃烧源主要是户用生物质燃烧排放。

### 2.3 区县排放分布特征

沈阳市各区县的人为源大气污染物的排放情况, 见图 1。

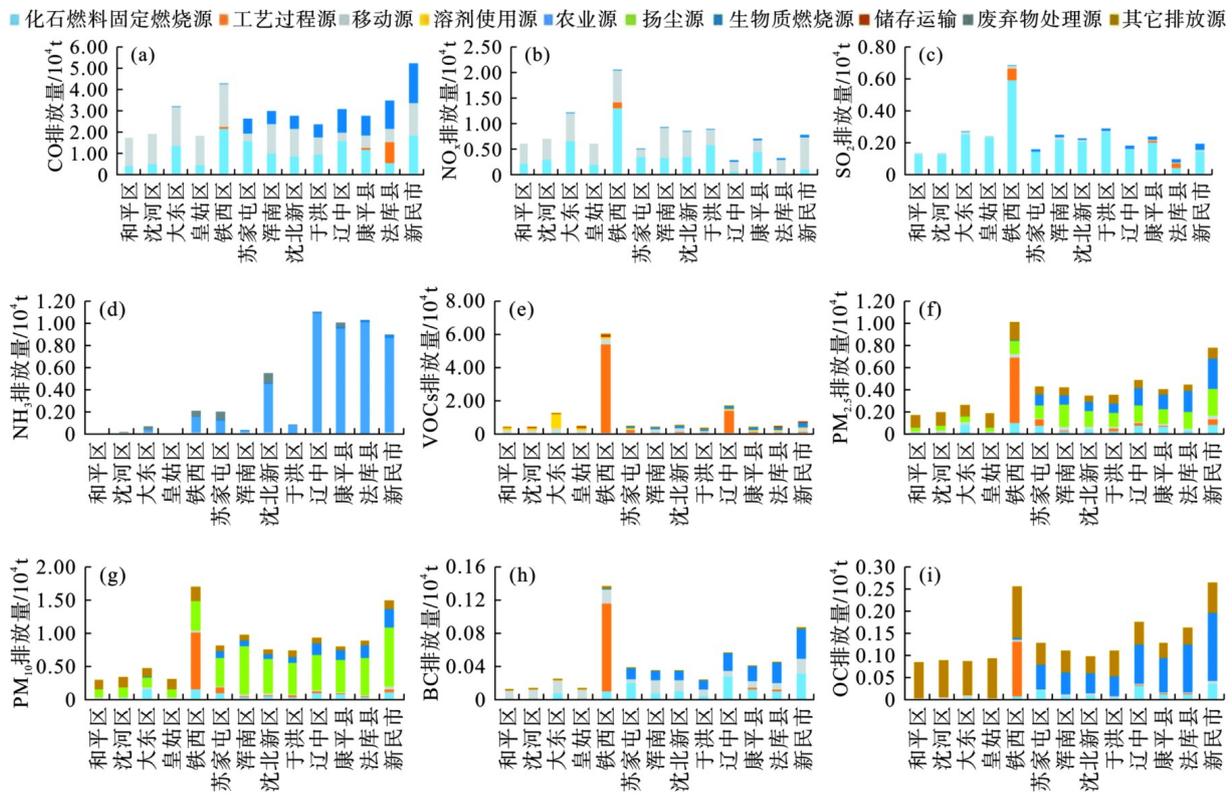


图 1 2016 年沈阳市各区县(市)分污染物分排放源的排放量

Fig. 1 Pollutant emissions in each district and county of Shenyang in 2016

CO 排放最高的区县(市)依次为新民市、铁西区、法库县和大东区。新民市是由于化石燃料固定

燃烧源中的散煤排放的 CO 较多。铁西区、大东区的辖区内存在火电厂, 化石燃料固定燃烧源的排放

较高；同时人口密集，移动源的排放量也相对较高。法库县存在多家非金属制品制造企业，导致该地区工艺过程源的CO排放量较高，同时生物质燃烧源也相对排放较多。

铁西区、大东区和浑南区化石燃料燃烧量较大导致这些区县的 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 排放量较高，其中铁西区是沈阳市煤炭和天然气燃烧量最多的区县。

辽中区、法库县、康平县、新民市和沈北新区依次是 $\text{NH}_3$ 排放量最大的区县， $\text{NH}_3$ 主要来自农业源，由于上述区县牧业产值较大，导致 $\text{NH}_3$ 的排放量较大。

铁西区是VOCs的主要排放区县，占全市VOCs排放总量的43.11%。铁西区聚集了沈阳市的1/5以上工业企业，铁西区的工艺过程源排放的VOCs可以占全市VOCs排放总量的37.84%。排名第二的区县是辽中区，辽中区的VOCs占全市VOCs排放总量的12.40%，主要来自辖区内工艺过程源排放。

和平区、沈河区、大东区和皇姑区由于区域面积较小， $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、BC和OC的排放量基本比其他9个区县少。铁西区和新民市是 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、BC和OC的主要排放区县(市)，铁西区的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、BC和OC均主要来自辖区内的工艺过程源排放，其中铁西区工艺过程源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和BC分别占铁西区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和BC排放总量的50%以上。新民市的 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC和OC主要来自辖区内的生物质燃烧，这是由于新民市是沈阳市面积最大的区县(市)，与农作物农业总产值最大有关。

#### 2.4 不确定性来源

清单的不确定性主要来自核算方法、活动水平和排放因子。本次清单在编制过程中不可避免地存在一定的不确定性。

在核算方法方面，研究的估算采用《手册》推荐的统一核算方法，对于个别企业可能存在核算过于粗放等问题。

在活动水平方面，畜禽养殖、农作物信息、道路长度和人口等主要来自《沈阳市统计年鉴2017》，数据较为准确。工业企业相关数据来自沈阳市环境统计资料，环境统计资料的统计对象以规模以上的工业企业和重点排污单位为主，导致排放清单中缺少小规模企业的排放，特别是在以企业点源排放为主的污染源缺失明显中，如化石燃料固定燃烧

源、工艺过程源和溶剂使用源等，这是排放清单的主要不确定来源。散煤燃烧、机动车保有量、施工工地信息和堆场信息等很多参数不在相关部门的常规统计数据范围之内，需要通过调查历史数据和参考相关技术人员经验调查得到，导致排放清单具有一定的不确定性。车流量、平均车重数等来自实测数据，如道路车流量是选取典型道路进行统计的，统计点位不能覆盖所有道路，选点造成的偏差会对排放清单造成一定程度的不确定性。

在排放因子方面，本研究编制清单时主要依据《手册》提供的全国平均的排放因子及参数进行估算。不同的地区、不同的企业在工艺技术和末端治理技术上都存在着一定的差异，可能导致估算的排放量与实际的排放量差别较大，导致排放清单具有一定的不确定性。

### 3 结论

(1)2016年沈阳市人为源CO、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、VOCs、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、BC和OC的排放总量分别为 $38.64 \times 10^4$ 、 $10.63 \times 10^4$ 、 $3.17 \times 10^4$ 、 $5.28 \times 10^4$ 、 $14.03 \times 10^4$ 、 $5.54 \times 10^4$ 、 $10.59 \times 10^4$ 、 $0.57 \times 10^4$ 和 $1.82 \times 10^4 \text{t}$ 。

(2)CO、 $\text{NO}_x$ 和BC主要来自移动源，占比分别为38.49%、50.11%和26.45%； $\text{SO}_2$ 中占比最大的污染源为化石燃料固定燃烧源，为87.27%； $\text{NH}_3$ 中占比最大的污染源为农业源，为90.27%；VOCs中占比最大的污染源为工艺过程源，为49.86%； $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 中占比最大的污染源为扬尘源，分别为28.11%和53.25%；OC中占比最大的污染源为其他排放源，占比达到47.06%。

(3)铁西区是 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、VOCs、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和BC的主要排放区县，分别占全市排放总量的19.41%、21.71%、43.11%、18.44%、16.10%和24.02%。新民市是CO、OC的主要排放区县，分别占全市排放总量的13.55%、14.80%。辽中区是 $\text{NH}_3$ 的主要排放区县，占全市排放总量的21.11%。

(4)2016年沈阳市大气污染源排放清单的不确定性主要来自缺少小规模企业数据、本地化参数和排放因子不完善等。部门之间应该建立长效的数据获取机制，开展本地化估算参数和排放因子研究，进一步完善和细化沈阳市大气污染源排放清单。

(下转第125页)

的积水进行定期收集和处理, 避免含重金属的水体造成进一步的污染。再者, 建议针对矿区周边农田建立连续监测机制, 动态监测周边土壤中的重金属含量以判断土地用途的合理性。

#### 4 结论

(1) 研究区农田土壤中存在重金属累积现象。

(2) 研究区农田土壤中 Hg 的累积受人为干扰程度最大, 累积现象最严重, 生态风险贡献值最高。

(3) 研究区农田土壤中 As、Cd、Cu、Zn、Cr 和 Ni 同源性较高, 主要来源为自然源。Hg 的来源为复合源(人为源+自然源), 其中人为源为主要来源。

#### 参考文献

[1] 刘奇林, 崔宝山, 陈蓓, 等. 岷县曙光金矿无主矿区土壤污染治

理项目场地环境调查报告[R]. 甘肃: 岷县人民政府, 2019.

[2] 王莹捷, 张波, 马鑫, 等. 甘肃省武威酿酒葡萄种植区土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 99-108.

[3] 王钦德, 杨坚. 食品试验设计与统计分析基础[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 34-36.

[4] 王蕊, 陈楠, 张二喜, 等. 龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1114-1122.

[5] 杨蕊, 李小平, 王继文, 等. 西宁市城市土壤重金属分布特征及其环境风险[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1531-1538.

[6] 孙建伟, 贾煦, 刘向东, 等. 豫西金矿集区矿业活动对周边农田土壤重金属影响研究[J]. 岩矿测试, 2023, 42(1): 192-202.

[7] 张江华, 徐友宁, 陈华清, 等. 小秦岭金矿区土壤-小麦重金属累积效应对比研究[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 284-294.

[8] 林蕊, 梁文静, 焦阳, 等. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 749-763.

[9] 牛真茹, 齐硕, 吴庭雯, 等. 某有色冶炼场地浅层土壤重金属空间变异规律与分布特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 738-745.

(上接第 111 页)

#### 参考文献

[1] 孙洋洋. 燃煤电厂多污染物排放清单及不确定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[2] 谢卧龙, 张怀德, 刘鑫, 等. 山西省农村地区燃煤采暖情况入户调查及排污量估算[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 642-647.

[3] 刘佳, 余家燕, 刘芮伶, 等. 重庆市主城区移动源排放清单建立与分布模拟[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 172-176.

[4] 孙世达, 姜巍, 高卫东. 青岛市机动车排放清单与空间分布特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(1): 49-59.

[5] WANG S X, HAO J M. Air quality management in China: Issues, challenges, and options[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(1): 2-13.

[6] 李贝睿, 刘湛, 尤翔宇, 等. 长株潭区域机动车尾气排放清单及特征分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(11): 167-173.

[7] 李莉莉. 哈尔滨市高分辨率扬尘源排放清单及控制对策的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[8] 卞思思, 赵帝, 王维宽, 等. 沈阳冬季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子变化特征及来源分析[J]. 环境保护科学, 2021, 47(3): 129-132.

[9] 吴雪伟, 陈卫卫, 王堃, 等. 长春市餐饮源 PM<sub>2.5</sub> 和 VOC<sub>S</sub> 排放清单[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2882-2889.

[10] 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 等. 餐饮行业细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 排放测算方法: 以上海市为例[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 1971-1977.

[11] 郑君瑜, 王水胜, 尹沙沙, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-28.

[12] 毛红梅, 张凯山, 第宝锋, 等. 成都市大气污染物排放清单高分

辨率的时空分配[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 23-33.

[13] 杨柳柳, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3521-3534.

[14] 吴曼丽. 长白山高压对辽宁中部城市群大气污染影响的数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[15] 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 长白山高压对辽宁中部城市群大气污染影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1401-1409.

[16] 袁梦晨, 祖彪, 张青新, 等. 辽宁省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1345-1357.

[17] 王秀艳, 史建武, 白志鹏, 等. 沈阳市烹饪油烟中 VOCs 排放特征分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 364-366.

[18] 吴丹, 张立平, 闫艳芳, 等. 沈阳市机动车大气污染物排放清单的研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(6): 30-33.

[19] 王龙, 李一倬, 祝雷, 等. 沈阳市人为源挥发性有机物排放清单研究[J]. 环境保护科学, 2019, 45(2): 80-87.

[20] 沈阳市人民政府办公厅. 沈阳市人民政府办公厅关于印发沈阳市 2018 年散煤治理工作方案和居民散煤替代工作方案的通知(沈政办发[2018]96号)[EB/OL]. (2018-7-17)[2022-6-6]. [http://www.shenyang.gov.cn/zw/gk/zcwj/zfwj/szfbgtwj1/202112/t20211201\\_1700298.html](http://www.shenyang.gov.cn/zw/gk/zcwj/zfwj/szfbgtwj1/202112/t20211201_1700298.html).

[21] 沈阳市人民政府办公厅. 沈阳市人民政府办公厅关于重新划定高污染燃料禁燃区的通知(沈政办发[2018]98号)[EB/OL]. (2018-7-18)[2022-6-6]. [http://www.shenyang.gov.cn/zw/gk/zcwj/zfwj/szfbgtwj1/202112/t20211201\\_1700699.html](http://www.shenyang.gov.cn/zw/gk/zcwj/zfwj/szfbgtwj1/202112/t20211201_1700699.html).

[22] 王甜甜, 陈良富, 陶金花, 等. 生物质燃烧对中国东北地区 CO 浓度的影响研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 297-306.