

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0060

袁梦晨 祖彪 张青新 等.2018.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, 38(4): 1345-1357

Yuan M C , Zu B , Zhang Q X , et al. 2018.Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Liaoning Province [J].Acta Scientiae Circumstantiae ,38(4) : 1345-1357

## 辽宁省人为源大气污染物排放清单及特征研究

袁梦晨<sup>1</sup> 祖彪<sup>2</sup> 张青新<sup>2</sup> 刘鹏辉<sup>3</sup> 赵瑜<sup>1,\*</sup>

1. 南京大学环境学院,南京 210023

2. 辽宁省环境监测实验中心,沈阳 110161

3. 辽阳市环境监测站,辽阳 111000

收稿日期: 2018-01-11

修回日期: 2018-02-05

录用日期: 2018-02-05

**摘要:**为全面评估辽宁省关键大气污染物排放状况,系统收集和整理全省基础活动水平信息,采用排放因子法建立了该省 2012 年人为源大气污染物排放清单.结果显示 2012 年辽宁省 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、BC、OC 及 NH<sub>3</sub> 排放总量分别为 1434.8×10<sup>3</sup>、1632.3×10<sup>3</sup>、6682.9×10<sup>3</sup>、1529.9×10<sup>3</sup>、1087.8×10<sup>3</sup>、74.5×10<sup>3</sup>、176.1×10<sup>3</sup> t 及 880.4×10<sup>3</sup> t. BC 和 OC 最大贡献源为生物质燃烧源,排放集中分布在辽宁中、西部; NH<sub>3</sub> 主要来自畜禽养殖与化肥施用,排放高值区位于辽宁中部农业畜牧业发达地区;其他污染物主要来自固定燃烧源和工艺过程源,集中分布在辽宁中部城市群以及大连金州区、甘井子区和普兰店区.大连、沈阳是 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub> 和颗粒物主要排放城市,鞍山和本溪由于钢铁行业发达,成为 CO 排放量最大的城市.基于卫星观测获得的 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度对 NO<sub>x</sub> 排放空间分布进行评估,两者相关性系数为 0.57 ( $p < 0.01$ ). 辽宁省级排放清单与国家尺度排放清单在一定程度上存在差异,主要原因在于采用的活动水平和污染物控制效率的不同.基于详细本地化污染源信息建立的省级排放清单可以较好地反映实际情况.建议完善点源排放特征信息并加强本地化测试,进一步降低省级排放清单不确定性.

**关键词:** 排放清单; 人为源; 空间分布; 垂直柱浓度

文章编号: 0253-2468(2018)04-1345-13

中图分类号: X51

文献标识码: A

## Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Liaoning Province

YUAN Mengchen<sup>1</sup>, ZU Biao<sup>2</sup>, ZHANG Qingxin<sup>2</sup>, LIU Penghui<sup>3</sup>, ZHAO Yu<sup>1,\*</sup>

1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023

2. Liaoning Environmental Monitoring & Experiment Centre, Shenyang 110161

3. Liaoyang Environmental Monitoring Station, Liaoyang 111000

Received 11 January 2018;

received in revised form 5 February 2018;

accepted 5 February 2018

**Abstract:** In order to comprehensively evaluate air pollutant emissions in Liaoning, a detailed provincial emission inventory of anthropogenic sources was developed for 2012 based on collected activity data and emission factors. The total emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, black carbon (BC), organic carbon (OC) and NH<sub>3</sub> in Liaoning were estimated at 1434.8×10<sup>3</sup>, 1632.3×10<sup>3</sup>, 6682.9×10<sup>3</sup>, 1529.9×10<sup>3</sup>, 1087.8×10<sup>3</sup>, 74.5×10<sup>3</sup>, 176.1×10<sup>3</sup> and 880.4×10<sup>3</sup> t, respectively. Distributed principally in central and western Liaoning, BC and OC were mainly from biomass combustion source. N-fertilizer application and livestock were the top two contributors of NH<sub>3</sub> emissions, and NH<sub>3</sub> emissions were mainly distributed in central area with developed agriculture and stockbreeding. Industrial process source and stationary combustion source contributed significantly to other pollutants, which were concentrated in the city clusters in the middle of Liaoning and Jinzhou, Ganjingzi and Pulandian District of Dalian. Shenyang and Dalian were the cities with largest SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> and particles emissions. Anshan and Benxi were the cities with the largest CO emissions due to the developed iron and steel industry. NO<sub>2</sub> vertical column densities (NO<sub>2</sub>-VCD) from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) were used to evaluate the spatial distribution of NO<sub>x</sub> emissions, and the spatial correlation coefficient between them was 0.57 ( $p < 0.01$ ). There were some differences between provincial and national emission inventory for Liaoning owing to application of different activity level and pollutant control efficiencies in the two inventories. Our provincial inventory based on detailed information on individual pollution sources is expected to be more consistent with actual conditions. Improvement on emission

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项( No. 201509004)

Supported by the Special Research Projects for Public Welfare of Environmental Protection ( No.201509004)

作者简介: 袁梦晨(1992—),女, E-mail: ymcsmile@163.com; \* 责任作者, E-mail: yuzhao@nju.edu.cn

Biography: YUAN Mengchen (1992—), female, E-mail: ymcsmile@163.com; \* Corresponding author, E-mail: yuzhao@nju.edu.cn

estimation of point sources and domestic measurements on local emission factors are further recommended in the future to reduce the uncertainty of provincial emission inventory.

**Keywords:** emission inventory; anthropogenic sources; spatial distribution; vertical column density

## 1 引言( Introduction)

辽宁省是我国重工业基地,从空间结构上看,省会沈阳市及周边鞍山、抚顺、辽阳和本溪是工业最密集地区,城市之间排放的大气污染物相互作用、相互影响,形成了特有的“城市群污染”(马雁军等 2003).辽宁省由西南至东北被辽河平原贯通,两侧为山地丘陵.高能耗、高污染的工业生产,加上地形地势的影响容易引起逆温、小风天气及“大锅盖”效应,使得大气扩散稀释能力较差、污染问题较严重(吴曼丽 2008).因此,不少研究者加强了对辽宁省等东北地区大气污染问题的研究.

排放清单是指特定区域各种排放源在一定时间间隔内向大气环境中排放的各种污染物量的集合.区域排放清单是深入理解大气化学过程和污染机制,以及科学制定污染控制措施的基础.李瑞敏(2015)计算了1978—2010年东北地区农业源 $PM_{10}$ 的年排放量,发现高值区集中在5—10月,2010年秸秆燃烧是 $PM_{10}$ 的最大农业源,约占总排放的54.5%.许万智等(2015)发现2007—2012年辽宁省沈阳、鞍山、本溪、抚顺4个城市中,鞍山 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度最高,6年均值分别为 $108.38 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $67.1 \mu g \cdot m^{-3}$ ;沈阳观测浓度最低,分别为 $70.28 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $48.62 \mu g \cdot m^{-3}$ ,鞍山的矿业生产减排措施对 $PM_{2.5}$ 的减少具有显著作用.王甜甜等(2016)利用AIRS卫星数据研究了2012年中国东北地区CO时空分布特征及变化趋势,发现近地表CO浓度高值出现在冬季和春季,低值出现在夏季和秋季,2011—2013年CO浓度与火点数的相关系数均在0.52左右,显著相关.但目前针对辽宁省大气污染物排放清单的研究较少,与发达城市相比该地区没有一套完整地、可以全面细致地反映该省大气污染物排放特征的清单.虽可以从已建立的国家清单降尺度得到辽宁省的污染物排放结果,但应用到省级尺度时存在口径差异、时空分辨率不足、难以满足当地空气质量模拟需求的问题,导致决策者对主要污染物排放总量、时空分布、行业贡献等信息掌握不足.

因此本研究以辽宁省为研究对象,通过文献及实地调研等方式收集该地区2012年各类人为源详细活动水平数据,采用国家环境保护部编制的《城

市大气污染物排放清单编制技术手册》(中华人民共和国环境保护部 2015)(以下简称《手册》)中推荐的排放因子及估算方法,建立辽宁省大气污染物人为源排放清单,并识别该省重点排放源及排放区域,分析各污染物空间分布特征,以为后续空气质量数值模拟及预报预警提供高精度数据支持,为制定本地化大气污染物控制政策提供科学依据.

## 2 材料和方法( Materials and methods)

### 2.1 研究区域与对象

本研究以辽宁省为研究区域,如图1所示.基准年为2012年,研究对象主要包括8种主要污染物:二氧化硫( $SO_2$ )、氮氧化物( $NO_x$ )、一氧化碳(CO)、颗粒物( $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ )、黑碳(BC)、有机碳(OC)及氨( $NH_3$ ).依据《手册》划分排放源种类,包括固定燃烧源、工艺过程源等7大类,具体如表1所示.

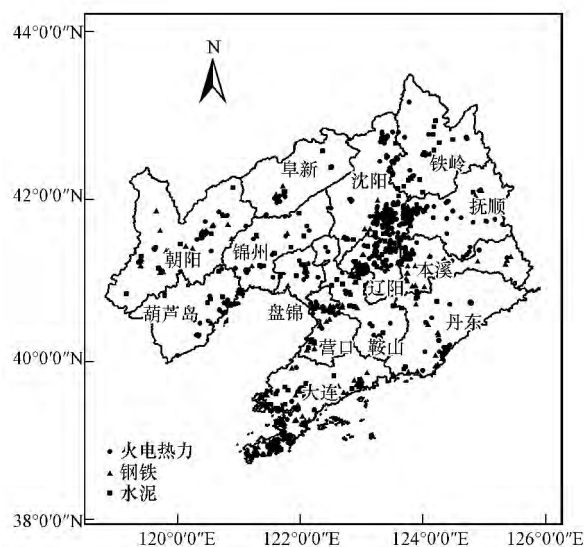


图1 研究区域及部分点源空间位置示意图

Fig.1 Study domain and the spatial distribution of some point sources

### 2.2 排放源定量表征及数据来源

2.2.1 排放量定量表征 本研究采用物料衡算法及排放因子法自下而上建立辽宁省2012年人为源大气污染物排放清单.其中固定燃烧源 $SO_2$ 和颗粒物采用物料衡算法估算(公式(1)、公式(2)及公式(3)),其他污染物采用排放因子法估算(公式(4)).

表 1 人为排放源分类

Table 1 Categories and subcategories of anthropogenic emission sources

一级排放源	二级排放源	一级排放源	二级排放源
固定燃烧源	火电热力	生物质燃烧源	家用燃烧
	工业燃烧		露天燃烧
	民用化石燃烧	农业源	化肥施用
工艺过程源	水泥		畜牧养殖
	黑色金属冶炼	道路移动源	微型客车
	有色金属冶炼		小型客车
	砖瓦		中型客车
	炼油和化工		大型客车
	其他工业		微型货车
	轻型货车		
非道路移动源	农业机械		中型货车
	工程机械		重型货车
	交通运输		三轮汽车
生活其他排放源	固废污水处理		低速货车
	人体排放		摩托车
	餐饮		

$$E = \frac{64}{32} \times A \times W \times S \times (1 - \eta) \quad (1)$$

式中,  $E$  表示企业  $\text{SO}_2$  排放量 (t);  $\frac{64}{32}$  表示二氧化硫与硫的分子量之比;  $A$  表示燃料消耗量 (t);  $W$  表示燃料含硫率;  $S$  表示硫释放率, 其中燃煤取 90%, 燃油、燃气取 100%;  $\eta$  表示  $\text{SO}_2$  控制效率。

$$E = A_1 \times H \times (1 - D) + A_2 \times EF / 1000 \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中,  $E$  表示总悬浮颗粒物排放量 (t);  $A_1$  表示燃煤量 (t);  $A_2$  表示燃油、燃气量 (t);  $H$  表示煤炭灰分;  $D$  表示煤炭灰分进入底灰的比例;  $EF$  表示颗粒物排放系数 ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $\eta$  表示颗粒物去除效率。

$$E_i = E_{0i} \times F_{ij} \quad (3)$$

式中,  $E_i$  表示不同粒径颗粒物排放量 (t);  $E_0$  表示总悬浮颗粒物排放量或  $\text{PM}_{2.5}$  排放量 (t);  $F$  表示分级粒径比例;  $i, j$  分别表示污染物种类 ( $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{BC}$  和  $\text{OC}$ ) 及燃料类别。

$$E = A \times EF \times (1 - \eta) \quad (4)$$

式中,  $E$  表示不同污染物排放量 (t);  $A$  表示排放源能源消耗量或产品产量 (t);  $EF$  表示污染物排放因子 ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $\eta$  表示污染控制设施对污染物的控制效率。

2.2.2 排放源活动水平及污染物排放因子数据收集 本研究需要收集辽宁省 2012 年不同排放源的活动水平数据及污染物排放因子。以下基于不同排放源特点, 针对各类排放源活动水平及排放因子选取分别进行阐述。在排放因子的选择上主要遵循以

下原则: ①优先选取国内专家实测数据; ②若无实测数据选取《手册》推荐排放因子和最为接近本研究基准年的文献成果; ③最后考虑选取国外排放因子。

### 1) 固定燃烧源

固定燃烧源采用物料衡算法及排放因子法进行估算。主要活动水平包括燃料消耗量、燃料含硫率等。所有企业的活动水平取自《2012 年辽宁省环境统计数据》, 并逐一估算排放量, 其中火电热力企业地理位置如图 1 所示; 民用化石燃烧源活动水平取自《辽宁统计年鉴 2013》(辽宁省统计局, 2013)。本研究结合污染源普查数据、环保部公开资料《全国投运燃煤机组脱硫/脱硝设施清单》等交叉验证环境统计关键参数的可靠性, 根据燃料的种类、燃烧方式、燃烧设备规模等因素选取合适的排放因子。 $\text{SO}_2$  和颗粒物的排放系数及相关参数取自《手册》, 其他污染物排放因子数据来源如表 2~4 所示。

表 2 电厂热力行业排放因子

Table 2 Emission factors for thermal power plants

污染物	燃料类型	技术类型	排放因子 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	参考文献
$\text{NO}_x$	燃煤	$\geq 300$ MW, 先进低氮燃烧器	4.30	Liu <i>et al.</i> , 2015
		$\geq 300$ MW, 传统低氮燃烧器	5.38	Zhao <i>et al.</i> , 2012
		[100 MW, 300 MW], 传统低氮燃烧器	6.83	
		[100 MW, 300 MW], 无低氮燃烧器	7.91	
	燃油	< 100 MW, 无低氮燃烧器	7.04	
			8.90	
		天然气	2.70	
CO	燃煤	煤粉炉, $\geq 200$ MW	0.66	Zhao <i>et al.</i> , 2012
		煤粉炉, < 200 MW	2.00	
		层燃炉	2.60	
		循环流化床	2.10	
		燃油	0.60	
	天然气	1.90		
$\text{NH}_3$	燃煤		0.02	尹莎莎等, 2011
		燃油	$0.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
		天然气	$51.30 \text{ kg} \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3}$	

注: 大机组 2006 年前使用传统型低氮燃烧器, 2006 年后使用先进型低氮燃烧器; 中机组 1997 年前无低氮燃烧器, 1997 年后使用传统低氮燃烧器; 小机组无低氮燃烧器 (Liu *et al.*, 2015)。

表 3 工业燃烧源排放因子

Table 3 Emission factors for industrial combustion

污染物	燃料类型	排放因子/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	参考文献
$\text{NO}_x$	燃煤	4.24	Zhao <i>et al.</i> , 2012
	燃油	8.90	
	天然气	2.70	
CO	燃煤	2.60	Zhao <i>et al.</i> , 2012
	燃油	0.60	
	天然气	1.90	
$\text{NH}_3$	燃煤	0.02	尹莎莎等, 2011
	燃油	$0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
	天然气	$51.30 \text{ kg}\cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3}$	

表 4 民用源排放因子

Table 4 Emission factors for residential combustion

污染物	燃料类型	技术类型	排放因子/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	参考文献	
$\text{NO}_x$	燃煤	层燃炉	4.70	Zhao <i>et al.</i> , 2012	
		茶浴炉	1.80		
		小煤炉	0.90		
	燃油		6.70	Zhang <i>et al.</i> , 2000	
		天然气	1.80		田贺忠, 2003
CO	燃煤	层燃炉	2.60	Zhao <i>et al.</i> , 2012	
		茶浴炉	12.10		
		小煤炉	75.00		
	燃油		0.60		
		天然气	1.90		
$\text{NH}_3$	燃煤	层燃炉/茶浴炉/小煤炉	0.90	尹莎莎等, 2011	
	燃油		$0.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$		
天然气		$320.51 \text{ kg}\cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3}$			

## 2) 工艺过程源

工艺过程源包括黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业、石油加工、化学原料及化学制品制造业等,对所有企业基于能源消耗量及产品产量利用公式(4)逐一进行估算,其中钢铁、水泥企业位置如图 1 所示.活动水平取自《2012 年辽宁省环境统计数据》和《中国工业统计年鉴 2013》(中华人民共和国国家统计局工业统计司, 2013).本研究工艺过程源的所有污染物排放因子主要参考《手册》和相关文献(Zhao *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2012; Lei *et al.*, 2011; Huo *et al.*, 2012; 尹莎莎, 2011).

## 3) 道路移动源

根据公式(5)估算道路移动源排放量:

$$E = P \times EF \times VKT \quad (5)$$

式中  $E$  表示不同污染物排放量 ( $\text{t}$ );  $P$  表示机动车保有量 (辆);  $EF$  表示基于行驶里程排放系数 ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-1}$ );  $VKT$  表示年均行驶里程 ( $\text{km}$ ).不同排放控制阶段机动车保有量由辽宁省监测站提供,因无法获得本地化年均行驶里程量,本研究使用《手册》推荐的全国平均水平数据.

## 4) 非道路移动源

非道路移动源包括飞机、船舶、农业机械与农用运输车、铁路和工程机械.飞机污染物排放量基于一个完整的降落与起飞(Landing and take-off, LTO)周期进行估算.排放因子取自张礼俊等(2010)和隗潇(2013)的研究结果, LTO 周期数来自辽宁省各机场统计资料.其他非道路移动源排放量参考张礼俊等(2010)的方法和排放因子,结合公式(1)和(4),基于燃油消耗量进行计算.其中,农业机械、农用运输车的燃油消耗量取自《中国农业统计资料 2013》(中华人民共和国农业部, 2013);工程机械燃油消耗量取自《辽宁统计年鉴 2013》(辽宁省统计局, 2013);船舶和铁路的燃油消耗量根据客、货周转量及相应燃油经济系数估算,数据来自《中国交通年鉴 2013》(中国交通年鉴社, 2013).

## 5) 农业源

农业源包括畜禽养殖和化肥施用,是氨排放的主要贡献源,分别以不同种类畜禽养殖量和不同类型化肥施用量作为活动水平.根据公式(4)计算排放量.活动水平取自《辽宁统计年鉴 2013》(辽宁省统计局, 2013);排放因子采用沈兴玲等(2014)和杨志鹏等(2008)的研究成果.

## 6) 生物质燃烧源

生物质燃烧源主要包括秸秆家用燃烧、薪柴家用燃烧及秸秆开放燃烧 3 种.活动水平由不同种类农作物年产量、草谷比计算得到,农作物年产量来源于《辽宁统计年鉴 2013》(辽宁省统计局, 2013);草谷比取自《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》(发改办环资[2015]3264号).排放因子取自《手册》,污染物排放量基于公式(4)进行估算.

## 7) 生活及其他排放源

生活及其他排放源主要是根据公式(4)估算人体呼吸、排汗和粪便排泄活动、固体废弃物处理、污水处理及餐饮行业等人类活动的污染物排放量.人体活动及餐饮行业的活动水平为辽宁 2012 年人口数量,固体废弃物和污水处理活动水平为辽宁 2012

年垃圾清运量和污水年处理量,均取自《辽宁统计年鉴 2013》(辽宁省统计局,2013)。排放因子取自沈兴玲等(2014)研究结果和古颖纲等(2012)的测试结果。

### 2.3 空间分配

本研究基于不同污染源的排放特征及实际可获得的污染源地理位置信息,借助 ArcGIS 空间分析工具,采用不同的特征参数对污染物排放量进行空间分配。具有明确经纬度坐标的企业按照其地理位置分配排放量。机动车采用 Zheng 等(2009)提出的基于 GIS 的“标准道路长度法”,综合不同等级道路车流量及长度,实现对道路移动源污染物的空间分配。农业源、生物质家用燃烧及民用化石燃烧按照农业人口进行空间分配;生物质开放燃烧源基于

MODIS 火点信息进行分配;生活源基于辽宁省人口权重因子进行分配;非道路移动源由于缺少相应的地理信息,故将其按照辽宁省工业生产总值进行分配。

## 3 结果与讨论(Results and discussion)

### 3.1 辽宁省 2012 年人为源排放清单

基于上述估算方法和数据,得到 2012 年辽宁省人为源排放清单(表 5)。结果显示,辽宁省 2012 年人为源 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、BC、OC 和 NH<sub>3</sub> 排放量分别为 1434.84×10<sup>3</sup>、1632.27×10<sup>3</sup>、6682.92×10<sup>3</sup>、1529.85×10<sup>3</sup>、1087.82×10<sup>3</sup>、74.52×10<sup>3</sup>、176.09×10<sup>3</sup> 和 880.36×10<sup>3</sup> t。

表 5 2012 年辽宁省人为源排放清单

Table 5 Anthropogenic emission inventory of Liaoning Province for the year of 2012

10<sup>3</sup>t

排放源类别	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	BC	OC	NH <sub>3</sub>
固定燃烧源	942.1	1001.5	459.1	556.2	343.1	11.4	29.6	12.3
工艺过程源	438.4	216.1	3862.5	743.8	526.9	23.5	26.2	18.62
道路移动源	4.6	288.7	789.0	14.6	13.1	7.0	2.2	2.5
非道路移动源	22.4	86.5	71.3	5.5	6.8	3.8	1.2	0.0
农业源	—	—	—	—	—	—	—	626.6
生物质燃烧源	27.3	39.5	1500.9	209.9	198.0	28.8	116.9	22.0
生活及其他排放源	—	—	—	—	—	—	—	198.3
总计	1434.8	1632.3	6682.9	1529.9	1087.8	74.5	176.1	880.4

### 3.2 排放源贡献率分析

图 2 展示了辽宁省大气污染物主要行业的排放分担率。固定燃烧源是辽宁省 SO<sub>2</sub> 最大的排放贡献源,占 SO<sub>2</sub> 排放总量的 65.7%。其中,火电热力和工业锅炉燃烧分别占 36.3% 和 24.1%,这与其煤炭消耗量大及能源燃料品质差有关。冬季采暖期增加煤炭消耗且环统数据中企业煤炭平均含硫率高达 0.9%,使得固定燃烧源的 SO<sub>2</sub> 排放量高于其他排放源。同时固定燃烧源也是 NO<sub>x</sub> 的第一大排放源,其次是道路移动源,主要来自重型柴油货车和汽油小客车。CO 主要来自含碳物质的不完全燃烧,前三大排放源分别为工艺过程源、生物质燃烧源和道路移动源,排放分别占比为 57.8%、22.5% 和 11.8%。其中工艺过程源 CO 排放主要来自钢铁行业的烧结、炼铁及炼钢吹氧冶炼过程,占总排放的 47.1%;秸秆家用燃烧产生的 CO 占总量的 16.4%;机动车 CO 排放主要来自轻型货车和小型客车。

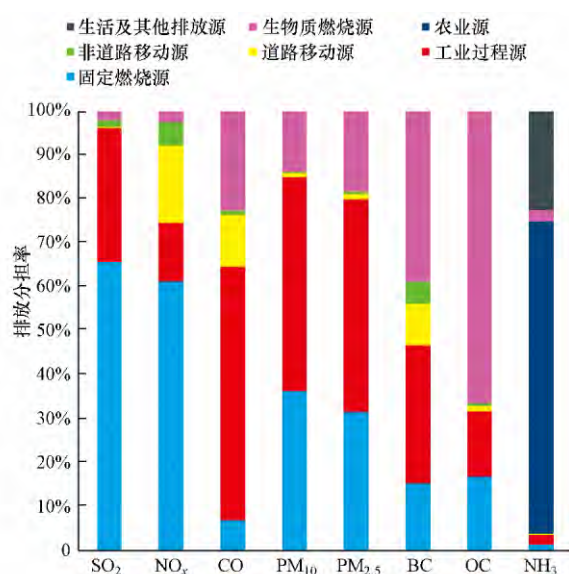


图 2 2012 年辽宁省人为源排放贡献率

Fig.2 Source contributions by categories in Liaoning Province for the year of 2012

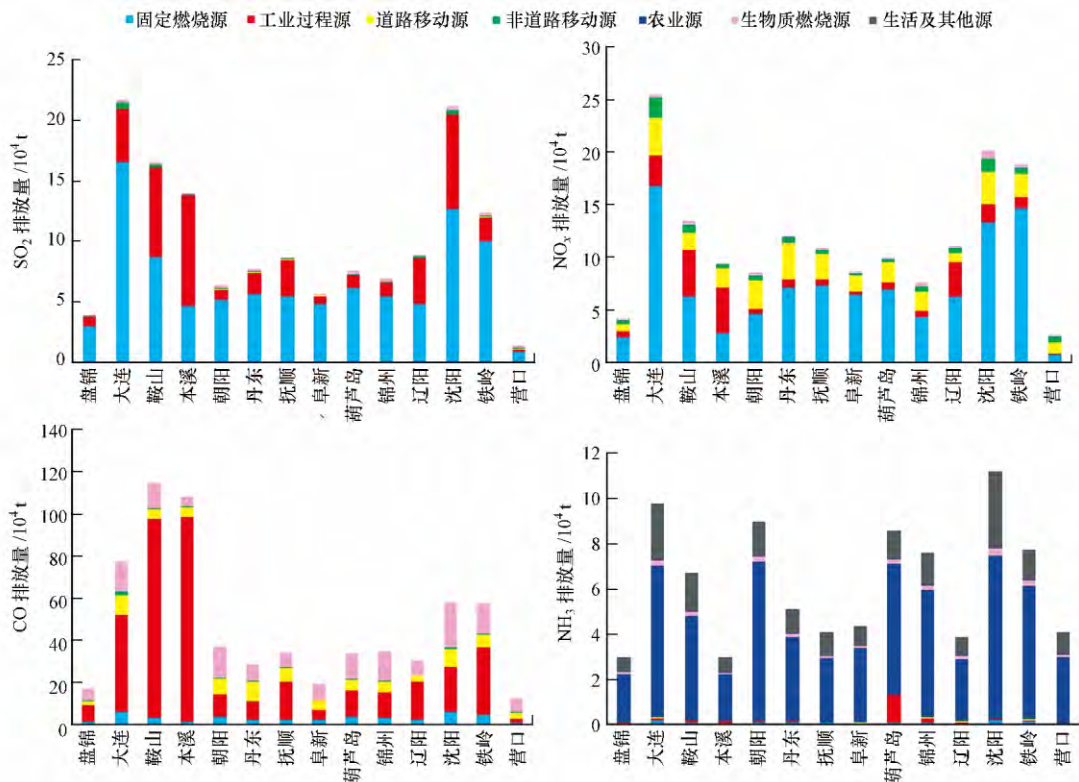
对于颗粒物排放,工艺过程源和固定燃烧源是PM<sub>2.5</sub>的前两大排放源,分别占总排放的48.4%和31.5%。其中,水泥和钢铁是工艺过程源主要排放行业,对于PM<sub>2.5</sub>的贡献率分别为25.4%和17.2%。水泥厂在石灰石破碎、煤炭燃烧及原料卸载、物料运输和传送等过程中会产生大量颗粒物;炼铁、铸造和烧结工序是钢铁生产最主要的颗粒物排放过程。值得注意的是,虽然“十一五”、“十二五”规划期间我国火电热力行业的大气污染物控制成果显著,但由于辽宁省2012年煤炭灰分较高(平均值为26.4%),且除尘效率较低(平均值为77.2%),火电热力行业对颗粒物排放的贡献不容忽视。PM<sub>10</sub>排放分担率与PM<sub>2.5</sub>相近。生物质燃烧源作为BC和OC第一大排放源,对两种污染物排放贡献率分别为38.7%和66.4%,农作物秸秆的不完全燃烧以及燃烧设备简陋、燃烧效率低等因素都是该源BC、OC排放大的原因。此外,工艺过程源是BC的第二大排放源,占总排放的31.5%,主要来自钢铁、砖瓦生产中煤、油的不完全燃烧过程。农业源是氨最大的排放源,占氨排放总量的71.2%,其中畜禽养殖源和化肥施用源分别占42.0%和29.2%。

### 3.3 城市排放分布特征

图3展示了辽宁省主要大气污染物的城市贡献率。大连、沈阳和鞍山依次是SO<sub>2</sub>排放最高的3个城市,

同时对NO<sub>x</sub>排放贡献也很大。主要是因为这3个城市工业生产总产值、火电热力企业煤炭消耗量和机动车保有量分别占全省的57.1%、33.2%和47.1%,大量的煤炭消耗及较高的机动车保有量导致了较多的SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放。铁岭成为大连、沈阳之后NO<sub>x</sub>排放第三大城市,这与其火电热力厂燃煤量较大,位居辽宁省第三位有关。鞍山和本溪因其发达的钢铁行业成为CO排放量最高的2个城市,钢铁产品产量和燃煤量分别占全省的87.4%和74.0%,对CO贡献率达45.1%。

铁岭、大连和鞍山是PM<sub>2.5</sub>排放最多的3个城市,占辽宁省PM<sub>2.5</sub>总排放的38.8%。铁岭火电热力行业的燃煤消耗量位居全省前三,另外环统数据表明该市火电热力行业煤炭灰分为0.33,高于全省平均水平0.26,故而铁岭PM<sub>2.5</sub>排放最多。与铁岭情况不同,大连和鞍山PM<sub>2.5</sub>的主要污染来源是工艺过程源。环统数据显示大连水泥产量居全省第一,占全省总产量24.7%;鞍山的钢铁行业发达,燃煤量和产品产量均位于全省第一位,这导致两市成为重要PM<sub>2.5</sub>排放城市。正因为如此,大连、鞍山对BC的贡献率也较大。沈阳作为农村人口最多的地级市,农作物产量位居全省第一,秸秆和薪柴消耗量大,成为BC和OC排放第一大市,生物质燃烧源是最大贡献源。



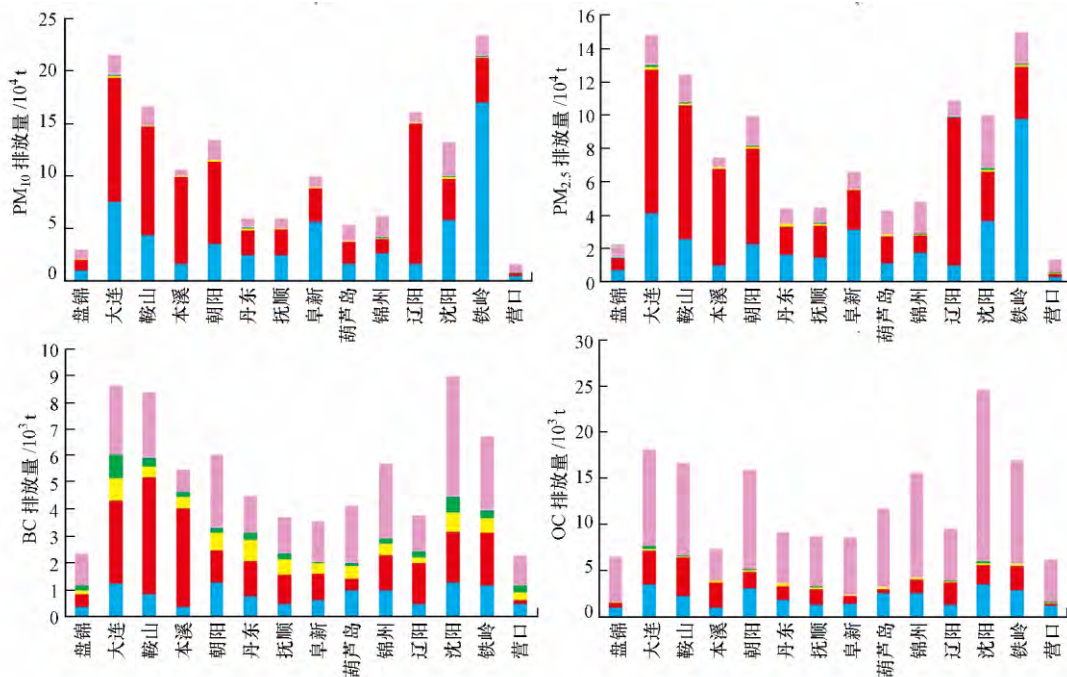


图3 辽宁省各城市主要人为源污染物排放

Fig.3 City-specific pollutant emissions from anthropogenic sources in Liaoning Province

NH<sub>3</sub>主要来自农业源,沈阳、锦州、铁岭、大连、朝阳和葫芦岛的牲畜饲养量和农产品产量较大,故排放较多的NH<sub>3</sub>。其中沈阳和大连不仅农林牧渔总产值最高,而且较大的人口数量使餐饮、污水固废处理等生活源成为NH<sub>3</sub>另一大排放源,因此成为NH<sub>3</sub>的前两大排放城市。

3.4 排放清单结果比较

针对辽宁省,目前没有研究者对近几年大气污染情况进行完整独立的排放清单研究,故而将本研究建立的排放清单与清华大学建立的2012年MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) 国家

清单进行对比,结果如表6和图4所示。2份排放清单的结果在一定程度上存在差异,这主要是二者在活动水平、控制措施数据来源及排放因子选取的不同造成的。本研究所有企业的活动水平信息、污染物控制措施及效率均来自《2012年辽宁省环境统计数据》和污染普查数据,其他活动水平信息取自辽宁省2012年相关统计年鉴,更贴近当地实际情况。此外,排放因子选取的不同也会带来清单结果的差异。本研究排放因子结合了环保部颁布的《手册》和相关研究者测试的本地化参考值,而MEIC清单多采用全国平均控制技术水平下的排放因子。

表6 辽宁省人为源排放清单结果对比

Table 6 Comparison of Liaoning anthropogenic emission inventory with MEIC

10<sup>3</sup> t

行业	清单类别	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	BC	OC	NH <sub>3</sub>
火电	MEIC	171.0	330.5	128.4	46.0	32.0	0.1	0.0	0.0
	本研究	322.8	537.7	106.3	294.9	162.2	0.3	0.0	1.7
工业	MEIC	691.8	646.3	3627.9	1018.6	267.7	24.7	25.0	5.0
	本研究	983.9	613.8	3970	967.8	675.1	24	29.5	22.9
民用	MEIC	60.6	47.2	2752.2	199.8	183.8	31.1	110.9	25.8
	本研究 A	98.8	85.8	1493.7	191.3	176.0	32.1	112.0	25.0
	本研究 B	101.2	105.5	1746.3	247.1	230.6	39.3	143.2	28.3
交通	MEIC	10.3	322.0	671.6	23.1	21.5	12.5	4.1	1.0
	本研究	27.0	375.2	860.4	20.0	19.9	10.8	3.4	2.5
农业	MEIC								325.4
	本研究								626.6

注: 民用源中本研究 A 表示未计入生物质开放燃烧; 本研究 B 表示计入生物质开放燃烧。MEIC 未考虑开放生物质燃烧。

从排放量方面看,2份排放清单的 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{BC}$ 和 $\text{OC}$ 结果较为接近。 $\text{SO}_2$ 的差异集中在电厂和工业部门,《2012年辽宁省环境统计数据》获得71家火电厂信息,脱硫效率均值为69.0%;967家热力生产和供应企业,其中只有122家企业具备有效脱硫效率,均值为41.0%。较低的脱硫效率使得本研究电厂和工业部门 $\text{SO}_2$ 估算结果高于MEIC清单。 $\text{PM}_{2.5}$ 估算结果高的原因可能是辽宁省煤炭灰分水平偏高,颗粒物的控制效率较低(火电热力行业除尘效率约为77.2%,水泥和钢铁行业除尘效率约为93.1%和32.4%)。而MEIC清单除了掌握个别大型排放源部分信息外,对其他中小型工业企业相关参数的调研较为缺乏,使用的除尘效率可能更适用于大型企业,总体上或许高于辽宁省平均除尘水平,所以本研究 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量比MEIC结果高出1倍。

对于农业源 $\text{NH}_3$ 排放的计算,本研究排放量是MEIC结果的1.9倍。现有氨排放清单在畜牧养殖源和化肥施用源缺少本地化氨挥发率的测试,清单编制者采用的排放因子不同,造成氨排放清单差异较大、不确定性较高。

从排放源贡献率方面看,本研究与MEIC结果十分一致。工业部门是 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 及 $\text{PM}_{2.5}$ 的最大排放源。火电部门是 $\text{SO}_2$ 第二大排放源,交通和电厂部门对 $\text{NO}_x$ 贡献较大,民用部门是 $\text{BC}$ 、 $\text{OC}$ 最大排放源,农业部门是 $\text{NH}_3$ 的最重要来源。

综上所述,活动水平信息、污染物控制水平及排放因子选取是造成本研究与MEIC排放清单差异的重要原因。基于详细本地化污染源信息建立的辽宁省人为源排放清单可以较好地反映污染物排放水平。

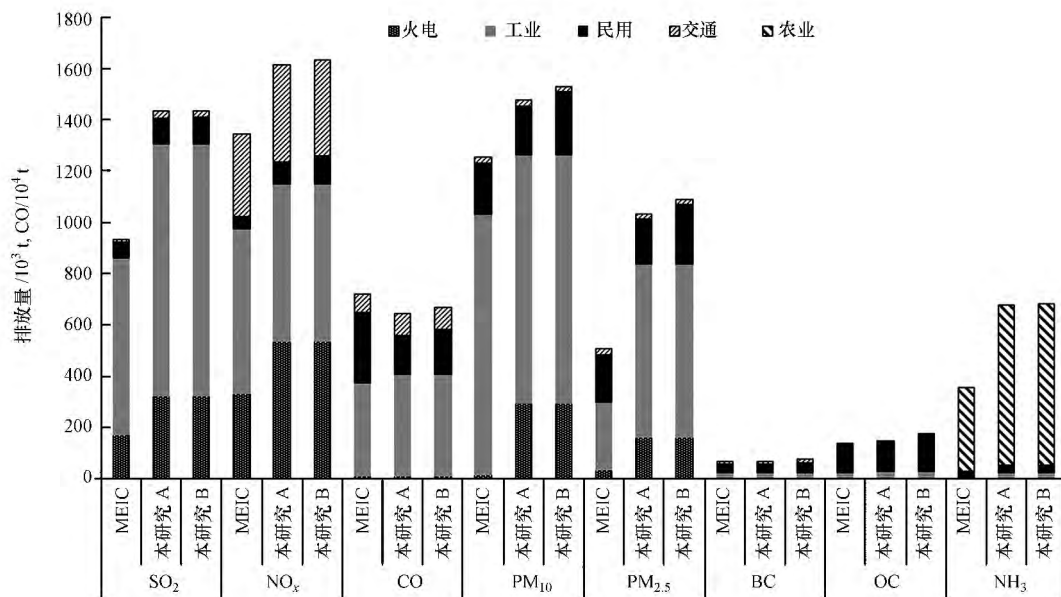


图4 辽宁省人为源排放清单结果对比

Fig.4 Comparison of Liaoning anthropogenic emission inventory with MEIC

### 3.5 各污染物空间分布特征

本研究利用ArcGIS分析工具,按照2.2节介绍的空间分配方法将2012年辽宁省人为源大气污染物分配至 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的网格中,如图5所示。 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 高值区主要集中在沈阳、辽阳、本溪、抚顺城市群以及大连金州区、甘井子区和普兰店区,这些地区火电热力企业密集(如图1所示)、人口集中,工业煤炭和民用化石燃料的大量使用造成 $\text{SO}_2$ 排放高。同时在国道、省道及城市公路交通密集区,如长深高速和鹤大高速等, $\text{NO}_x$ 会出现明显带状分布。

$\text{CO}$ 空间分布主要受工业源如钢铁行业的影响,故而 $\text{CO}$ 排放高值区主要集中在鞍山、本溪等地区;同时轻型货车和小型客车也是 $\text{CO}$ 的重要来源,所以 $\text{CO}$ 会有与 $\text{NO}_x$ 类似的带状空间分布。 $\text{NH}_3$ 主要来自化肥施用及畜禽养殖源,所以高值集中在辽宁中部地区,如沈阳、盘锦和辽阳等水稻土覆盖区域(白树彬,2016)。颗粒物受火电热力、钢铁水泥等行业排放影响较大,排放量主要集中在工业企业密集的城区。而 $\text{BC}$ 和 $\text{OC}$ 排放主要受生物质燃烧影响,在农业火点、农村人口集中的辽宁中、西部呈片状分布。



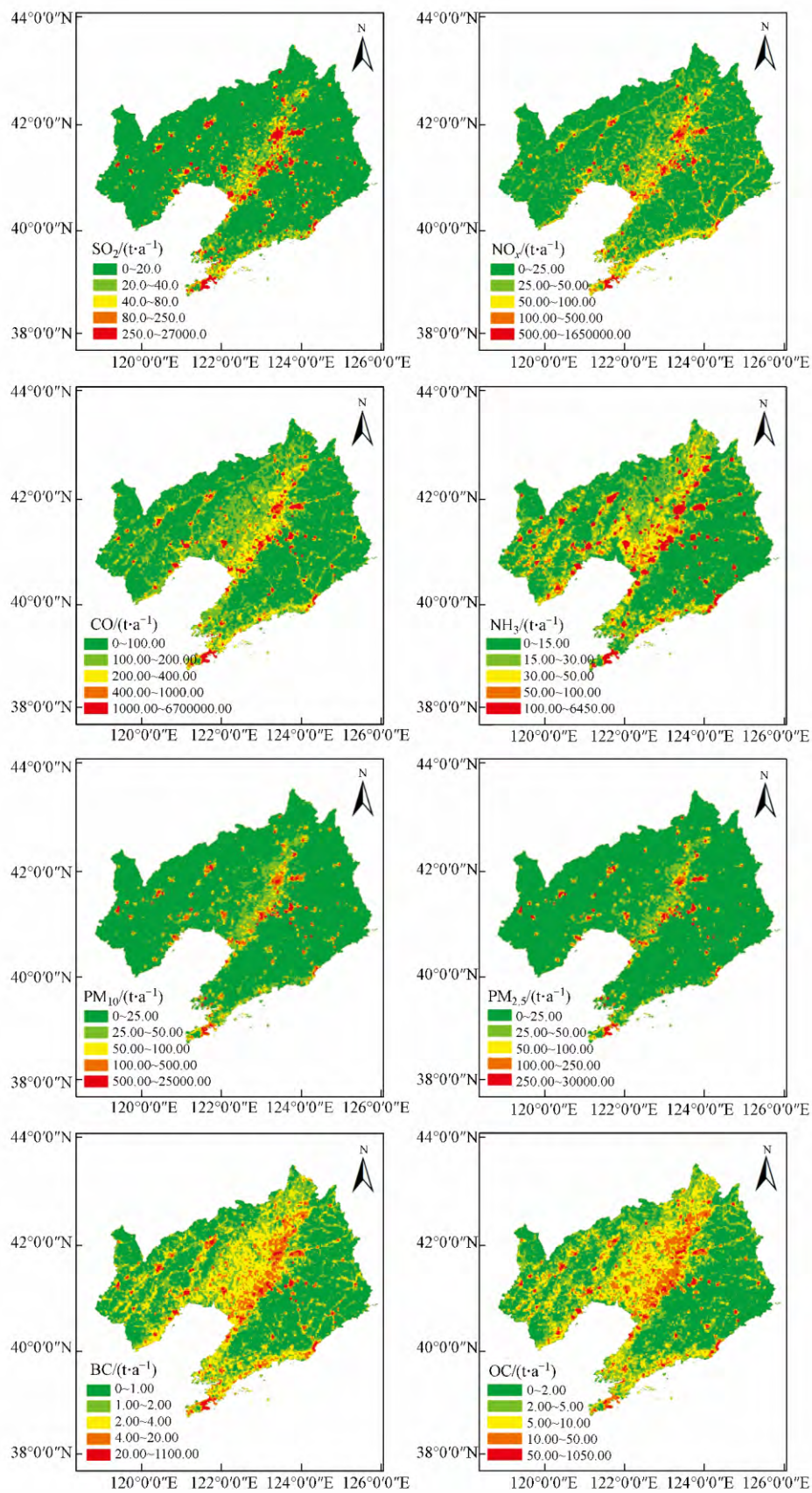


图 5 2012 年辽宁省大气污染物排放空间分布

Fig.5 Spatial distribution of air pollutant emissions in Liaoning Province in 2012

3.6 基于卫星观测评估排放清单分布

Lin 等 (2014) 在荷兰皇家气象研究所联合 NASA 开发的 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度数据基础上对对流层气团因子进行本地化处理, 获得在中国区域优化后的 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度 (Vertical Column Densities, VCD) 产品 POMINO, 本研究采用夏季 (6、7、8 月) POMINO 月均垂直柱浓度数据与排放清单 NO<sub>x</sub> 排放进行空间相关性分析. 因为该产品空间分辨率较低, 为 0.25°×0.25°, 若降尺度到 3 km×3 km 网格可能会造成较大偏差, 所以本研究按网格面积权重重新将 3 km×3 km 排放数据进行空间分配, 使之与 NO<sub>2</sub>-VCD 空间分辨率一致. 图 6 给出了辽宁省 2012 年 NO<sub>x</sub> 排放与 NO<sub>2</sub>-VCD 空间分布的相关性分析结果. POMINO 的 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度和本研究 NO<sub>x</sub> 排放的空间分布整体一致, 但又存在一定的差别. 由于受到辽

宁省东、西山地丘陵的阻挡, 垂直柱浓度高值区集中在辽宁省中部平原地带, NO<sub>2</sub>-VCD 空间分布可以反映 NO<sub>x</sub> 排放高值区 (如大连南部、沈阳及周边地区), 虽有部分网格错位但仍相邻; 将 NO<sub>x</sub> 排放量前 50 的企业地理位置与 NO<sub>2</sub>-VCD 空间分布相对比, 发现高 NO<sub>x</sub> 排放与高 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度在空间上较为匹配, 说明辽宁省工业源对 NO<sub>x</sub> 的贡献占主导地位. 为了进一步评估 NO<sub>x</sub> 排放的空间分布状况, 本研究按照 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度的高低划分高、中、低区间, 分别对 3 个区间的 NO<sub>x</sub> 排放与相应 NO<sub>2</sub>-VCD 进行空间相关性分析. 其中, 柱浓度高值区为 NO<sub>2</sub>-VCD ≥ 6.0×10<sup>15</sup> molec·cm<sup>-2</sup> (网格数为 36 约占 15%); 柱浓度中值区为 NO<sub>2</sub>-VCD 介于 3.0×10<sup>15</sup> ~ 6.0×10<sup>15</sup> molec·cm<sup>-2</sup> (网格数为 145, 排放量约占 55%); 柱浓度低值区为 NO<sub>2</sub>-VCD < 3.0×10<sup>15</sup> molec·cm<sup>-2</sup> (网格数

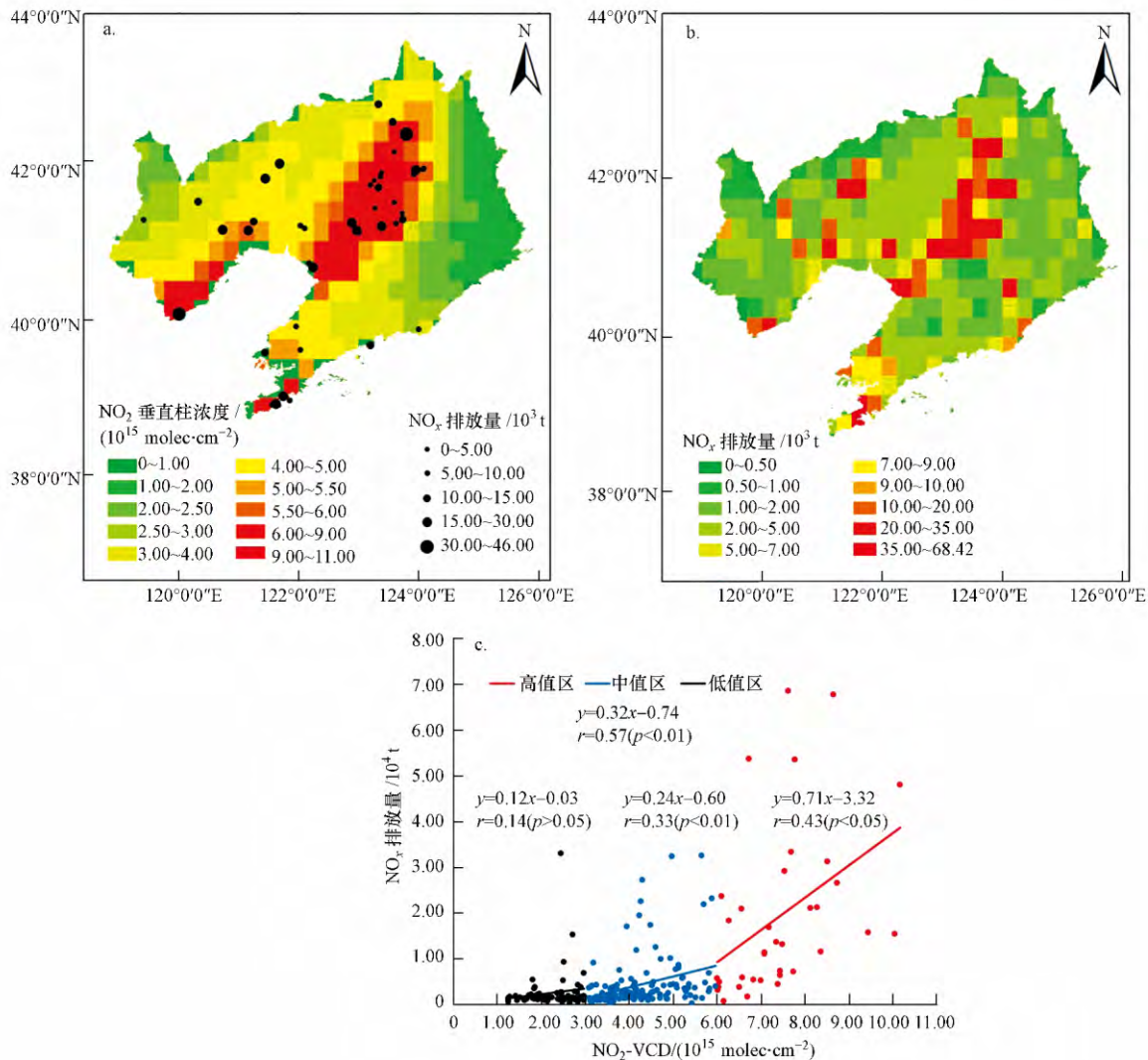


图 6 NO<sub>2</sub>-VCD 空间分布 (a)、NO<sub>x</sub> 排放空间分布 (b)、NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度与 NO<sub>x</sub> 排放的空间相关性 (c)

Fig.6 Spatial distribution of NO<sub>2</sub>-VCD (a) and NO<sub>x</sub> emissions (b) and Spatial correlations of NO<sub>2</sub>-VCD and NO<sub>x</sub> emissions (c)

为 71 (排放量约占 30%)。整体上,  $\text{NO}_2\text{-VCD}$  与  $\text{NO}_x$  排放的相关系数  $r$  为 0.57 ( $p < 0.01$ ), 垂直柱浓度在高、中值区与排放的空间分布相关系数分别为 0.43 ( $p < 0.05$ ) 和 0.33 ( $p < 0.01$ ), 高于低值区相关性系数 0.14 ( $p > 0.05$ )。这可能是由于卫星观测数据的空间分辨率低, 不能反映更小尺度及排放较低时的污染物分布状况。在浓度高值区,  $\text{NO}_x$  排放与对应网格点  $\text{NO}_2\text{-VCD}$  拟合的斜率为 0.71, 高于中、低浓度区间斜率 0.24 和 0.12。原因可能是在  $\text{NO}_2\text{-VCD}$  高值区,  $\text{NO}_2$  更易发生光解反应生成  $\text{NO}$  和基态原子氧, 随后基态原子氧与  $\text{O}_2$  分子反应生成  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  的反应使它自身的增加受到限制, 所以在  $\text{NO}_2\text{-VCD}$  高值区,  $\text{NO}_2$  柱浓度对  $\text{NO}_x$  排放的敏感性相对较弱。

### 3.7 不确定分析

近年来我国大气氧化性增强、污染物二次转化加剧, 挥发性有机物 (VOCs) 是大气复合污染形成过程的重要前体物, 虽然有学者对中国人为源 VOCs 排放清单加以研究, 但在活动水平的可靠性、排放因子的本地化及空间分配准确性方面仍存在问题, 故而本研究没有涉及 VOCs 排放量的估算, 具体原因如下: ①部分 VOCs 排放源活动水平数据难以直接获取 (如溶剂使用源、油气运输源), 只能通过相关参数加以推算, 给排放量的估算带来较大不确定性。②VOCs 排放过程复杂, 除了有组织排放外, 化工企业的储罐挥发、装置区泄漏等都存在 VOCs 无组织排放, 排放因子测试难度较大, 所以目前我国 VOCs 排放因子库尚不完善, 一些排放源需要使用欧美发达国家的排放因子, 这也是 VOCs 清单不确定性的主要来源。③排放空间分配参数可靠性需提高。由于污染源地理位置信息的缺乏, 部分排放源只能以国民生产总值或人口为权重对 VOCs 排放进行空间分配, 得到的结果与实际情况存在较大偏差。基于以上原因, 本研究在建立辽宁省 2012 年大气污染物排放清单时没有涉及 VOCs 的计算。

除 VOCs 外, 其它污染物清单的编制也存在一定的不确定性, 主要来自 3 方面: 一是活动水平数据来源; 二是排放因子的选取; 三是空间分配的参数选择, 在此对本研究的不确定性进行定性描述。①活动水平数据来源。本研究所有企业的能源消耗量及产品产量均来自于《2012 年辽宁省环境统计数据》及《中国工业统计年鉴 2013》(中华人民共和国国家统计局工业统计司, 2013), 民用化石能源消耗量、农作物生产量和机动车保有量取自《辽宁统计年鉴

2013》(辽宁省统计局, 2013) 及辽宁省监测站, 数据来源相对可靠。而非道路移动源的工程机械、农业机械以及船舶、飞机、铁路能源消耗量均没有直接数据来源, 需根据经验公式间接获得, 不确定性较高。②排放因子的选取。本研究编制清单时主要依据《手册》和相应文献提供的排放因子及参数进行估算。企业排放估算所需要的煤炭含硫率、灰分、控制效率均来自《2012 年辽宁省环境统计数据》。民用化石燃烧源由于受到燃烧设备、控制措施的影响, 不同研究者采用的排放因子相差较大。③空间分配的参数选择。所有企业均依据《2012 年辽宁省环境统计数据》中的经纬度识别地理位置, 道路移动源和生物质开放燃烧分别依据路网信息、MODIS 火点信息, 其准确性较高。而非道路移动源基于工业 GDP 参数, 农业源基于农业人口信息, 生活源基于人口信息进行空间分配, 都会带来较大不确定性。后续的工作中还要加强活动水平的调研、本地化排放因子的测试以及空间分布的精细化处理。

## 4 结论 (Conclusions)

1) 2012 年辽宁省大气污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{BC}$ 、 $\text{OC}$  及  $\text{NH}_3$  排放总量分别为  $1434.8 \times 10^3$ 、 $1632.3 \times 10^3$ 、 $6682.9 \times 10^3$ 、 $1529.9 \times 10^3$ 、 $1087.8 \times 10^3$ 、 $74.5 \times 10^3$ 、 $176.1 \times 10^3$  及  $880.4 \times 10^3$  t。

2)  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  主要来自于固定燃烧源,  $\text{CO}$  主要来自于工艺过程源, 工艺过程源和固定燃烧源是  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的最大排放源,  $\text{BC}$  和  $\text{OC}$  主要来源于生物质燃烧源,  $\text{NH}_3$  主要来自畜禽养殖源与化肥施用源。

3) 大连、沈阳是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$  和颗粒物主要排放城市, 鞍山和本溪因其发达的钢铁行业成为  $\text{CO}$  最主要的排放城市, 同时鞍山对  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献也较大。

4) 辽宁省地区人为源排放的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$  和颗粒物主要分布在辽宁中部城市群及大连金州区、甘井子区和普兰店区,  $\text{BC}$  和  $\text{OC}$  主要分布在辽宁中、西部,  $\text{NH}_3$  排放高值区集中在辽宁中部农业发达地区。

5) 相比国家排放清单 MEIC, 辽宁省 2012 年污染物排放清单的排放量会有一定程度的差异, 由于掌握详细本地污染源资料, 可能估算结果更接近本地情况。同时基于夏季  $\text{NO}_2$  垂直柱浓度对  $\text{NO}_x$  排放空间分布进行评估, 二者相关系数为 0.57 ( $p <$

0.01)  $\text{NO}_2$ -VCD 尤其在柱浓度高值区与  $\text{NO}_x$  排放吻合较好.但该清单也存在一定的不确定性,后续可加强活动水平填报监督工作,开展本地化排放因子测试以及空间分布的精细化操作,进一步完善和细化辽宁省大气污染物排放清单.

责任作者简介:赵瑜(1981—),男,教授,主要研究内容包括不同空间尺度大气污染物排放的定量表征,使用各类观测与模拟手段评估排放清单的不确定性和可靠性,以及大气污染物排放控制的典型环境效应.

#### 参考文献(References):

- 白树彬. 2016. 辽宁省耕地地力评价及地力提升研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学
- 董文煊, 邢佳, 王书肖. 2010. 1994—2006 年中国人源大气氨排放时空分布 [J]. 环境科学, 31(7): 1457-1463
- 曹国良, 安心琴, 周春红, 等. 2010. 中国区域反应性气体排放源清单 [J]. 中国环境科学, 30(7): 900-906
- European Environment Agency, EEA. 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016 [OL]. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Fu X, Wang S X, Zhao B, et al. 2013. Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 70: 39-50
- Fu X, Wang S X, Ran L M, et al. 2015. Estimating  $\text{NH}_3$  emissions from agricultural fertilizer application in China using the bi-directional CMAQ model coupled to an agro-ecosystem model [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(12): 6637-6649
- Gao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. 2011. Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China [J]. Chinese Science Bulletin, 56(8): 781-788
- 古颖纲, 王伯光, 杨俊, 等. 2012. 城市污水厂氨气的来源及排放因子研究 [J]. 环境化学, 31(5): 708-713
- Huang X, Song Y, Li M M, et al. 2012. A high-resolution ammonia emission inventory in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 26, GB1030, Doi: 10.1029/2011gb004161
- IIASA. 2010. Emission Stage-specific  $\text{NH}_3$  Emission Factors for Livestock Categories [R]. Laxenburg Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
- 辽宁省统计局. 2013. 辽宁统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 李瑞敏. 2015. 东北地区农业源  $\text{PM}_{10}$  排放清单研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所)
- 林金泰. 2014. Satellite  $\text{NO}_2$ : POMINO [OL]. 北京: 2018-01-11. <http://www.phy.pku.edu.cn/~acm/acmProduct.php#POMINO>
- Lin J T, Martin R V, Boersma K F, et al. 2014. Retrieving tropospheric nitrogen dioxide from the ozone monitoring instrument: effects of aerosols, surface reflectance anisotropy, and vertical profile of nitrogen dioxide [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(3): 1441-1461
- Liu F, Zhang Q, Tong D, et al. 2015. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(23): 13299-13317
- 刘宁微, 马雁军, 王扬锋. 2012. 辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究 [J]. 气象学报, 70(4): 814-820
- 马雁军, 刘宁微, 王扬锋. 2005. 辽宁中部城市群大气污染分布及与气象因子的相关分析 [J]. 气象科技, 33(6): 527-532
- 马雁军, 杨洪斌, 方志刚, 等. 2003. 辽宁中部城市群大气污染现状及发展趋势分析 [J]. 城市环境与城市生态, 16(5): 89-91
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian Emission Inventory of Anthropogenic Emission Sources for the Period 1980-2020 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 7(16): 4419-4444
- 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 2015. 广东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, 35(9): 2655-2669
- 仇丽萍. 2015. 城市大气污染物排放清单建立及评估 [D]. 南京: 南京大学
- 沈兴玲, 尹沙沙, 郑君瑜, 等. 2014. 广东省人为源氨排放清单及减排潜力研究 [J]. 环境科学学报, 34(1): 43-53
- 宋学岭, 李杰, 刘佳. 2016. 东北地区能源生产行业 VOCs 排放清单及不确定性分析 [J]. 化工环保, 36(5): 577-582
- 苏诗慧, 金玉然, 何正柯, 等. 2013. 辽宁省钢铁企业发展综述 [J]. 中国市场, 757(42): 7-9
- 台湾环境保护署. 2007. 环署空字第 0960014388A 号 公私场所固定污染源申报空气污染防制费之挥发性有机物之行业制程排放系数、操作单元(含设备组件)排放系数、控制效率及其他计量规定 [S]. 台北: 台湾环境保护署
- 唐晓慧. 2014. 辽宁省大气颗粒物污染控制措施初探 [J]. 环境保护与循环经济, 34(9): 66-68
- 田贺忠. 2003. 中国氮氧化物排放现状、趋势及综合控制对策研究 [D]. 北京: 清华大学
- 田徽. 2010. 辽宁省能源消耗及碳排放规律研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学
- Tsinghua University. 2012. Multi-resolution Emission Inventory for China [OL]. <http://www.meicmodel.org/dataset-mix.html>
- U S EPA. 1995. Emissions factors and AP42, compilation of air pollutant emission factors [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>
- 王丽涛. 2006. 北京地区空气质量模拟和控制情景研究 [D]. 北京: 清华大学
- 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 2005. 中国大陆 CO 人为源排放清单 [J]. 环境科学学报, 25(12): 8-13
- 王甜甜, 陈良富, 陶金花, 等. 2016. 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, 31(2): 297-306
- 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 2012. 辽宁本溪大气颗粒物浓度特征 [J]. 环境化学, 31(2): 235-242
- 魏红梅. 2016. 大气污染对城镇居民健康危害的研究——以辽宁中部城市群为例 [J]. 中国市场, 901(34): 220-222
- 隗潇. 2013. 京津冀非道路移动源排放清单的建立 [C]. 2013 中国环境科学学会学术年会. 昆明: 1631-1637
- 吴曼丽. 2008. 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
- 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等. 2014. 江苏省人为源挥发性有机物排放

- 清单 [J]. 环境科学研究, 193(2): 120-126
- 许万智, 陈仲榆, 陈辉, 等. 2015. 辽宁省中部城市大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染特征研究 [C]. 2015 年中国环境科学学会学术年会. 深圳: 3063-3067
- 杨志鹏. 2008. 基于物质流方法的中国畜牧业氨排放估算及区域比较研究 [D]. 北京: 北京大学
- 尹沙沙. 2011. 珠江三角洲人为源氨排放清单及其对颗粒物形成贡献的研究 [D]. 广州: 华南理工大学
- Zhang J F, Smith K R, Ma Y, *et al.* 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 34 (26): 4537-4549
- 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 2017. 兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征 [J]. *环境科学学报*, 37(4): 1227-1242
- 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 2010. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发 [J]. *环境科学*, 31(4): 886-891
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14): 5131-5153
- Zhao B, Wang S X, Wang J D, *et al.* 2013. Impact of national NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> control policies on particulate matter pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 77: 453-463
- Zhao Y, Nielsen C P, McElroy M B, *et al.* 2012. CO emissions in China: uncertainties and implications of improved energy efficiency and emission control [J]. *Atmospheric Environment*, 49: 103-113
- Zheng J Y, Che W W, Wang X M, *et al.* 2009. Road-network-based spatial allocation of on-road mobile source emissions in the Pearl River Delta region, China and comparisons with population-based approach [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(12): 1405-1416
- Zheng J Y, Zheng Z Y, Yu Y F, *et al.* 2010. Temporal, spatial characteristics and uncertainty of biogenic VOC emissions in the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 44(16): 1960-1969
- 中国交通年鉴社. 2013. 中国交通年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2015. 农业部办公厅关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知 [OL]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2018-01-11. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201512/t20151216\\_767695.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201512/t20151216_767695.html)
- 中华人民共和国国家统计局工业统计司. 2013. 中国工业统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 中华人民共和国环境保护部. 2013. 关于公布全国燃煤机组脱硫脱硝设施等重点大气污染减排工程的公告 [OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部. [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201305/t20130506\\_251654.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201305/t20130506_251654.htm)
- 中华人民共和国环境保护部. 2015. 城市大气污染物排放清单编制工作手册 [M]. 北京: 中华人民共和国环境保护部
- 中华人民共和国国家统计局能源统计司. 2013. 中国能源统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 邹旭东, 杨洪斌, 张云海, 等. 2014. 辽宁中部城市灰霾天气数值模拟 [J]. *气象与环境学报*, 30(6): 92-99