

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022061003

张雪纯, 王文钜, 王明娅, 等. 中国盆地城市人为源大气污染物排放清单及空间分布特征——以晋城市为例[J]. 环境化学, 2022, 41(12): 4016-4031.

ZHANG Xuechun, WANG Wenju, WANG Mingya, et al. Emission inventory and spatial distribution characteristics of anthropogenic air pollutants in basin city in China——A case study of Jincheng City[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (12): 4016-4031.

中国盆地城市人为源大气污染物排放清单及空间分布特征 ——以晋城市为例*

张雪纯¹ 王文钜¹ 王明娅¹ 王海峰² 张浩² 韩桥³

熊钦卿¹ 张春晖¹ 王明仕^{1**}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作, 454000; 2. 晋城市生态环境局, 晋城, 048000;
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550081)

摘要 为厘清晋城盆地大气污染源特征, 基于实地调研所获取的人为污染源活动水平数据, 采用排放因子与物料衡算相结合的方法构建2020年晋城盆地人为源排放清单, 利用ArcGIS进行1 km×1 km空间网格分配、Monte Carlo模拟量化各污染物排放量的不确定性。结果表明, 晋城市6种大气污染物年排放量分别为: SO₂ 43736.24 t、NO_x 54522.10 t、CO 494967.08 t、VOCs 35912.37 t、PM₁₀ 46275.92 t和PM_{2.5} 24314.39 t。其中, 电厂和工业锅炉等燃料燃烧活动贡献了79.8%的SO₂; 化石燃料燃烧和移动源分别贡献46.7%和29.7%的NO_x; CO大部分来源于以钢铁冶金和铸件制造为主的工艺过程源, VOCs主要来自移动源, 这两类源分别贡献CO和VOCs总排放量的53.8%和31.3%; 工艺过程源贡献了32.5%的PM₁₀和35.3%的PM_{2.5}, 扬尘源贡献了37.5%的PM₁₀和20.0%的PM_{2.5}。盆地较弱的污染物扩散能力和低海拔地区密集的污染源导致晋城市大气污染物空间分布特征差异显著, 在285—750 m的低海拔地区污染物排放量高, 而盆地边缘750—2200 m的中高海拔地区排放量较低, 污染物主要集中在城区、泽州北部、阳城西部、高平中部和南部。Monte Carlo模拟结果表明, 在95%的置信区间内, 各污染物排放量的不确定性范围处于-27.31%—26.77%, 其中CO的不确定性最低为-15.59%—15.52%, VOCs的不确定性最高为-27.31%—26.77%。

关键词 盆地城市, 人为排放, 排放清单, 空气污染特征, 不确定性分析。

Emission inventory and spatial distribution characteristics of anthropogenic air pollutants in basin city in China—— A case study of Jincheng City

ZHANG Xuechun¹ WANG Wenju¹ WANG Mingya¹ WANG Haifeng² ZHANG Hao²
HAN Qinqing³ XIONG Qinqing¹ ZHANG Chunhui¹ WANG Mingshi^{1**}

(1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000, China; 2. Jincheng Ecological Environment Bureau, Jincheng, 048000, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550081, China)

Abstract To clarify the characteristics of air pollution sources in the Jincheng Basin, an emission inventory of anthropogenic sources in the Jincheng basin in 2020 was constructed using a

2022年6月10日收稿(Received: June 10, 2022).

* 国家自然科学基金(42007175)资助。

Supported by National Natural Science Foundation of China (42007175).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 0391-3987998, E-mail: mingshiwang@hpu.edu.cn

combination of emission factors and material balance, the 1 km × 1 km spatial grid assignment was obtained using ArcGIS, and Monte Carlo simulations were used to quantify the uncertainty of pollutant emission. The results showed that the annual emissions of pollutants were as followings: SO₂ 43736.24 t, NO_x 54522.10 t, CO 494967.0 t, VOCs 35912.37 t, PM₁₀ 46275.92 t, and PM_{2.5} 24314.39 t. Fuel combustion activities such as power plants and industrial boilers contributed 79.80% of the SO₂; fossil fuel combustion and mobile sources contributed 46.7% and 29.7% of the NO_x respectively; CO mostly came from the industrial process sources such as steel metallurgy and casting manufacturing, and VOCs mainly came from mobile sources, which account for 53.76% and 31.30% of the total CO and VOCs emissions respectively; the industrial process sources contributed 32.5% of PM₁₀ and 35.3% of PM_{2.5}, additionally the dust sources contributed 37.5% of PM₁₀ and 20.0% of PM_{2.5}. The weak pollution dispersion capacity in the basin and the dense pollution sources at low altitudes lead to significant differences in the spatial distribution characteristics of air pollutants in Jincheng, with high pollutant emissions at low altitudes between 285—750 m and low emissions at middle and high altitudes between 750—2200 m at the edge of the basin, with pollutants mainly concentrated in Chengqu, northern Zezhou, western Yangcheng, and central and southern Gaoping. The Monte Carlo simulation showed that the uncertainty in emissions for each pollutant was in the ranges of -27.31% to 26.77% at the 95% confidence interval, with the lowest uncertainty of -15.59% to 15.52% for CO and the highest uncertainty of -27.31% to 26.77% for VOCs.

Keywords basin city, anthropogenic emissions, emission inventory, air pollution characteristic, uncertainty analysis.

空气中的有毒气态污染物不仅严重破坏生态环境,而且可以通过呼吸系统进入人体,引发一系列呼吸系统和心脑血管疾病,甚至造成肺癌^[1-2]。根据《柳叶刀》污染与健康委员会发布的一份报告,全球每年由大气污染造成死亡人数远超艾滋病、结核病和疟疾等传染病死亡人数之和^[3-4],其中 2019 年我国因空气污染造成的死亡人数占全世界的 27.74%。自《大气污染防治行动计划》等政策相继颁布以来,中国大气环境已有所改善,但仍不容乐观^[5]。

大气污染事件通常是以企业生产、建筑施工、道路运输等人为活动产生的大气污染物为基础,在复杂地形和不利气象条件的综合影响下,污染物在短时间累积的现象。因此对特定时间、特定区域范围内的不同污染物排放量进行核算是了解大气污染特征,开展科学的环境空气质量预测的重要基础。大气污染源排放清单正是解决这一问题的先决条件,完整准确的排放清单对污染物来源识别、污染事件成因、污染源现状和发展趋势、大气环境容量测算、区域环境空气控制等具有重要作用^[6]。近年来,我国针对不同排放源建立了多种排放清单,如周子航等^[7]应用 GIS 技术建立的移动源排放清单表明污染物的空间分布特征呈现出从城市中心向远郊区递减的趋势;Li 等^[8]通过建立的扬尘排放清单发现,大规模的基础设施建设是造成颗粒物高排放的主要原因。由人为活动生成的一次污染物在不利天气影响下形成的二次气溶胶颗粒等是重污染天气形成的基础,因此对人为源进行污染防控才是区域空气质量改善的“推进器”^[9]。此外,复杂的地形条件对区域空气质量也起着非常重要的作用^[10-11]。如盆地等复杂地形地区下垫面的非均匀性会使当地及其周边大气产生热力和动力作用并引发局地次级环流,局地次级环流之间会产生非线性相互作用,导致大气污染物的稀释扩散能力降低^[12],大气环境容量远远小于平原城市,在同样强度的大气污染物排放情况下,盆地等复杂地形地区比平原地区更易形成空气重污染事件^[13-14]。向怡等^[15]发现,盆地中的大气污染物与周围高海拔山体产生“撞山”效应,污染物难以扩散,累积下沉。在胡洵等^[16]的研究中,盆地内的大气风场呈现出从周围高海拔地区沿地形走势向中央汇流的趋势,导致盆地中央低海拔地带污染物积聚。郭晓梅^[17]研究了地形对大气扩散效应的影响,结果表明,尤其是在秋冬季,盆地内上升气流远弱于下沉气流,阻止了污染物的垂直输送,使得盆地中央低海拔地区上空出现空气“穹窿”,进而导致整个盆地发生严重雾霾事件。在中国,许多城市建立在盆地之中^[18-19],而我国学者对排放清单进行的大量研究主要集中在平原地区^[20-22],针对盆地地形对大气污染特征的影响研究还相当缺乏。四川盆地是中国四大重度雾霾污染地区之一^[23],在盆地的独特地形

和不利气象条件的协同作用下,夜间气温下降缓慢、昼夜温差较小、全年低风速有利于静稳天气发生,大气污染物在境内积聚,污染形势严峻;兰州,中国最早报道发生光化学烟雾的城市,其独特的河谷盆地环境导致当地常年风速小、大气层稳定且逆温频率高,污染物难以自行消散,加之当地严重失衡的能源结构,大气污染事件频繁发生^[24]。

晋城盆地坐落于山西省东南部,是京津冀大气污染物传输通道“2+26”重点治理城市之一,2019年其空气质量在全国168个重点监测城市中排名倒数第10位^[25],大气环境污染严重,控制其污染物的排放对缓解山西省空气污染乃至京津冀及其周边地区的空气污染具有重要作用,同时可为具有盆地地形特征的城市厘清污染物来源提供科学借鉴。因此,为了解晋城盆地大气污染物的排放特征、明确重要污染源和重点控制区域建立一份人为源大气污染物排放清单刻不容缓。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域

研究区域涵盖晋城全市,包括城区、泽州、沁水、陵川、阳城、高平,如图1所示。晋城盆地西倚中条山,北靠丹朱岭,东、南依太行、王屋二山,最低海拔285 m,最高海拔2260 m,年平均风速低,约为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在山脉阻隔和背风坡气流沉降的影响下,境内易形成气流停滞区,污染物扩散受阻累积、浓度居高不下。同时,晋城地处黄土高原边缘地带,受外来尘影响较大。尽管我国大气污染情况已从煤烟型污染转变为煤烟与机动车尾气复合型污染,但目前乃至未来很长一段时间,煤炭燃烧依旧处于中国的能源消费的主导地位^[26],2020年中国煤炭占一次能源消费比重的56.8%^[27],远高于世界平均水平的27.2%^[28]。晋城盆地作为中国重要的燃煤电力输出地,支柱产业和日常消费能源均以煤炭为主,2020年,电力行业煤炭消费量高达一次能源消费的93.7%^[29]。在严重失衡的能源结构和复杂地形条件的双重影响下,晋城盆地的大气污染特征与其他重污染地区相比更有其独特性,这给空气质量的持续改善造成巨大的压力和挑战。

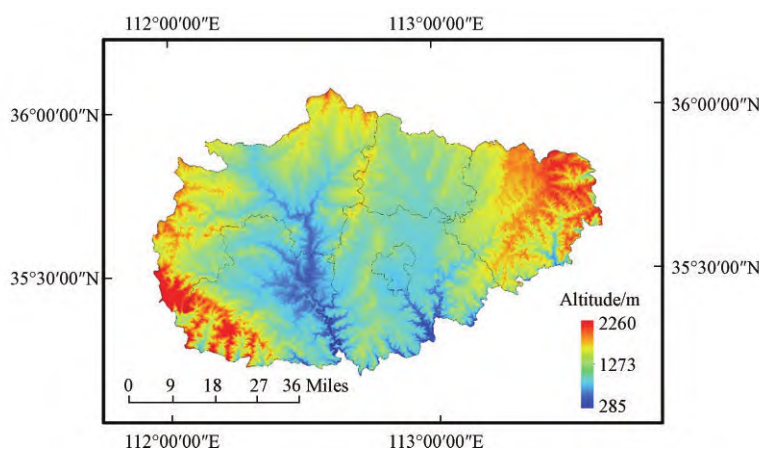


图1 研究区域示意图

Fig.1 Location of the study area

1.2 污染源分类

本清单所涉及的大气污染物包括 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$,根据《城市大气污染物排放清单编制指南》^[30],结合晋城社会经济特征和能源结构,将污染源划分为九类:化石燃料燃烧、工艺过程、移动、溶剂使用、扬尘、生物质燃烧、储存运输、废弃物处理和其他排放污染源。在以前的污染源分类研究时,常常忽略了土壤和堆场扬尘的影响,这导致了对区域颗粒物排放认识存在局限性,在该研究中,土壤和堆场扬尘对 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献分别高达22.43%和22.71%,因此将土壤和堆场扬尘一并纳入扬尘源;并根据燃料类型、产品类型、技术类型和污染控制措施将9类一级污染源进一步划分为三至五级,共287个子类别,充分确保了清单的全面、精确性。由于篇幅限制,在此仅列举化石燃料固定燃烧源的5级详细分类,见表1。

表 1 污染源分类

Table 1 Classification of pollution sources

一级源分类 Primary source classification	二级源分类 Secondary source classification	三级源分类 Tertiary source classification	四级源分类 Quadruple source classification	五级源分类 Five-level source classification
		烟煤/无烟煤/褐煤/贫煤	煤粉炉/流化床炉/层燃炉	切向燃烧/壁燃/ 低NO _x 燃烧器
	电力供热	煤气/高炉煤气/天然气	燃气锅炉	
		柴油/燃料油	燃油锅炉	
化石燃料固定燃烧源		煤	煤粉炉/流化床炉/ 层燃炉/其他炉	
	工业锅炉	焦炭		
		原油/柴油/燃料油	燃油锅炉	
		天然气	燃气锅炉	
	民用燃烧	煤	传统炉灶	
		液化石油气/天然气/煤气	先进炉灶	

1.3 数据获取及排放量计算方法

通过实地调查获取了 1873 个点源详细数据,非点源数据通过政府部门调研以及调查问卷等方式获取,由于部分面源和线源信息无法直接获得,收集市级统计数据估计排放总量,使用不同的替代参数如人口密度、土地利用等,将其分配到各区县^[31]。为了保证排放因子的精确性,优先选取研究地区排放因子实测数据、邻近该研究地区的排放因子数据以及国内外专家最新实测数据。污染物排放量估算方法详见下面的小节。

1.3.1 化石燃料固定燃烧源

晋城盆地能源消费以煤炭为主,2020 年煤炭消费量为 1792.8 万吨^[29],占一次能源消费的主导地位。化石燃料使用包括电厂、工业燃烧和住宅燃料燃烧,各企业排污设施经纬度、锅炉类型、化石能源消耗量、污染控制设施类型以及各个区县不同炉灶技术下各能源的使用量等相关计算数据来源于晋城市环境统计数据、排污申报数据和现场调研。污染物年排放量采用排放因子法估算,见公式(1):

$$E_{i,j} = \sum_{j=1}^m EF_{i,j} \times A_{i,j} \times (1 - \eta_i) \quad (1)$$

式中, E 为污染物排放量, t ; A 为活动水平; EF 为排放因子; η 为污染物去除效率,%; i 为不同的污染物; j 为不同排放源; m 为排放源总个数。

化石燃料燃烧产生的 SO_2 采用物料衡算法进行计算,详见公式(2):

$$E_{SO_2} = \sum_{k=1}^n \beta \times Q_k \times S \times (1 - \eta_k) \quad (2)$$

式中, E 为 SO_2 排放量, t ; Q 为 k 排放源的燃料消耗量; S 为燃料含硫率,%; β 为燃料系数; η 脱硫效率,%, n 为排放源总个数。

NO_x 的形成与燃烧过程中的温度和富氧率密切相关^[32],温度和富氧率又受燃烧器技术、机组容量、锅炉类型、燃料种类和控制措施的影响。目前,煤粉锅炉是我国电厂的主要燃煤锅炉,占总装机容量 85% 以上^[33],随着国家能源结构的转型,锅炉低氮排放成为新时代的新要求^[34],自 2004 年以来,新建或扩建的发电厂均已安装低 NO_x 燃烧器系统(LNBs)^[35]。为了精细化 NO_x 排放因子,参考 Liu 等^[36]、Zhang 等^[37]、Tian 等^[38] 研究,对锅炉机组容量和燃烧器安装情况做如下分类:(1)2004 年以后 100—300 MW 的机组和现有 300 MW 以上机组配置 TLNBs(Traditional LNBs);(2)现有 300 MW 以上机组配置 ALNBs(Advanced LNBs);(3)300 MW 以下机组不配置 LNBs。表 2—4 分别为燃煤电厂 PC 锅炉的 NO_x 排放因子和其它燃烧源污染物排放因子。

表 2 燃煤电厂煤粉锅炉 NO_x 排放因子(kg·t⁻¹)Table 2 NO_x emission factors of pulverized coal boilers in coal-fired power plants(kg·t⁻¹)

机组容量 Unit capacity	燃烧方式 Combustion mode	无烟煤/贫煤 Anthracite/Lean coal		沥青/褐煤 Bitumen/Lignite	
		有LNBS	无LNBS	有LNBS	无LNBS
<100 MW	切线燃烧	N/A ^a	7.84	N/A	7.14
	壁燃	N/A	10.76	N/A	6.82
	W型火焰燃烧	N/A	12.78	N/A	8.64
≥100 MW	切线燃烧	6.46	6.54	3.90	5.95
	壁燃	8.26	8.97	5.17	5.69
	W型火焰燃烧	9.16	10.65	3.89	7.2

a: “N/A”表示不适用.

a: “N/A” indicates not applicable.

表 3 火电厂 SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放因子(kg·t⁻¹)Table 3 Emission factors of SO₂, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and PM_{2.5} in thermal power plants (kg·t⁻¹)

燃料类型 Fuel Type	燃烧技术 Combustion Technology	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	数据来源 Data Source
煤	煤粉炉	18S ^a		2	0.04	46	12	[39 - 42]
	层燃炉	18S ^a		8	0.04	13.88	5.25	
	循环流化床炉	12S ^a	2.64	2	0.04	28.08	5.4	
煤 ^b			0.96	1.3	0.02	0.2	0.2	
高炉煤气 ^b			1.35	1.3	0.05	0.14	0.14	[30, 39 - 40, 43]
天然气 ^b			4.1	1.3	0.045	0.03	0.03	
燃料油		20	5.84	0.6	0.13	0.85	0.62	[30, 39 - 40, 42 - 43]
柴油		3	9.62	0.6	0.04	0.5	0.5	

a: S代表燃料含硫量(下文同); b: 气体燃料排放因子单位g·m⁻³.a: S represents the fuel sulfur content (same below); b: Gas fuel emission factors in g·m⁻³.表 4 其他化石燃料燃烧源排放因子(除特殊标注外,其余排放因子单位均为 kg·t⁻¹)Table 4 Emission factors from other fossil fuel combustion sources (except for special labeling, the unit of other emission factors is kg·t⁻¹)

排放源 Emission Source	燃料类型 Fuel Type	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	数据来源 Data Source
工业燃烧	煤	20S(1-Sr) ^a	4	15	0.18	5.4	1.89	[33, 43 - 45]
	焦炭	20S(1-Sr) ^a	9	6.6	0.04	0.29	0.14	
	原油		5.09	0.86	8.04	1.6	0.06	
	柴油	3.78	9.62	0.6	7.65	0.5	0.5	
	燃料油	3.78	5.84	0.6	0.04	1.03	0.67	
	天然气 ^b	0.15	1.76	1.3	0.18	0.24	0.17	
民用燃烧	煤	3.7	1.88	75	0.6	8.82	6.86	[30, 43, 46]
	液化石油气 ^b	0.15	0.88	0.36	0.36	0.22	0.15	
	天然气 ^b	0.15	1.46	1.3	0.13	0.24	0.17	
	煤气 ^b		0.69	1.3	0.00044	0.2	0.2	

a: Sr表示灰分中的硫含量; b: 气体燃料排放因子单位为: g·m⁻³.a: Sr denotes the sulfur content in ash; b: Gaseous fuel emission factor in g·m⁻³.

1.3.2 工艺过程源

该研究考虑了 45 个工艺过程子排放源, 污染物排放量采用公式(1)估算. 详细信息来自晋城市环境统计数据以及开展 2020 年晋城市大气污染物排放清单研究收集数据, 包括地理位置、生产技术、生产类型、产量和污染控制技术 & 控制效率等. 部分排放因子的选择见表 5.

表 5 工艺过程源排放因子

Table 5 Industrial process source emission factors

排放源 Emission Source	工艺技术 Technology	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	单位 Unit	数据来源 Data Source
钢铁冶炼	烧结	3.2	0.6	11	0.25	5.81	2.52		
	高炉	0.2	0.2	4.2		8.43	5.25		
	转炉	0.003	0.1	22		14.68	10.5	kg·t ⁻¹	[43, 47 - 50]
	电炉	0.1	0.2	9	0.1	8.12	6.02		
	铸造	1.732	0.548	41		9	7.1		
有色金属 冶炼					6.98/0.25/ 85.52/124.84 ^a	5.2/0.19/ 63.84/111.27 ^a			[47 - 48, 51]
焦炭		0.91	1.23	1.8	1.25	8.79	5.22	kg·t ⁻¹	[30, 44]
水泥	新型干法		15.3	12	0.39	44.1	18.9		
	旋窑		18.5	18	0.39	35	14	kg·t ⁻¹	[43, 50 - 53]
	生料磨机					21.84	7.28		
	水泥磨机					8	2	kg·t ⁻¹	[30, 51]
	压碎机					2.2	0.2	kg·t ⁻¹	
石灰		1	1.6	115	0.39	12	1.4	kg·t ⁻¹	[30, 54]
砖瓦		0.53	0.13	150	0.132	0.71	0.27	kg·t ⁻¹	
平板玻璃					4.4	8.27	7.92	kg·t ⁻¹	[43, 47 - 48, 51]
玻璃纤维					3.15	3.12	2.45	kg·t ⁻¹	
合成氨			1	43	4.72			kg·t ⁻¹	[43, 51, 55]
肥料						0.24	0.18	kg·t ⁻¹	
尿素					0.01	1.2	0.9	kg·t ⁻¹	[43]
基础化学 原料		6.75 ^b			1.66/0.223/ 1.3/430 ^c			kg/生产线	[43, 56 - 57]
合成橡胶					15			kg·t ⁻¹	[57]
轮胎					0.285			kg/个	[51]
合成树脂					0.7448/3/5.7/ 10/3/2.2 ^d	100 ^e	5 ^e	kg·t ⁻¹	[43, 51, 58]
人造革					0.182			kg·m ⁻²	[43]
石油加工		0.9	0.3	10	1.82	0.12	0.1	kg·t ⁻¹	[43, 50, 56]
油漆					15			kg·t ⁻¹	[43]
石墨					0.18	1.6	1.44	kg·t ⁻¹	[44]
沥青					27.2			kg·t ⁻¹	[51]
水性胶黏剂					0.5			kg·t ⁻¹	[58]
塑料制造					40/50/60/ 120/2.2 ^f			kg·t ⁻¹	[59 - 60]
纸浆					3.1			kg·t ⁻¹	[57]
纸					2.6			kg·t ⁻¹	[61]
酒					0.25/0.5/ 25/218.25 ^g			kg·t ⁻¹	[43]
油					3.7/9.165 ^h			kg·t ⁻¹	[43, 57]

a: 二次铝/二次铜/二次铅/氧化锌; b: 硫酸; c: 乙烯/苯乙烯/邻苯二甲酸酐/原始化学药品; d: 聚氯乙烯/聚丙烯/高密度聚乙烯/低密度聚乙烯/丙烯腈丁二烯苯乙烯树脂/其他; e: 聚氯乙烯的单位为g·t⁻¹; f: 聚氯乙烯加工/聚酯加工/聚苯乙烯泡沫加工/聚氨酯泡沫加工/其他; g: 啤酒/红酒/白酒/酒精; h: 食用植物油/非食用植物油。

a: Secondary Aluminum/Secondary Copper/Secondary Lead/Zinc Oxide; b: Sulphuric acid; c: Ethylene/Styrene/Phthalic anhydride/Primary chemicals; d: PVC/Polypropylene/HDPE/LDPE/Acrylonitrile butadiene styrene resin/Others; e: The unit of polyvinyl chloride is g·t⁻¹; f: PVC processing/Polyester processing/Polystyrene foam processing/Polyurethane foam processing/Others; g: Beer/wine/liquor/alcohol; h: Edible vegetable oil/Non-edible vegetable oil.

1.3.3 移动源

道路移动源污染物排放量基于机动车保有量,采用公式(3)估算,不同类型车辆年均行驶里程来自晋城市环境统计数据 and 交通运输部门,排放因子采用 COPERT 基于本地化参数计算。

$$E_{j,k} = \sum_i \sum_h P_{i,h,k} \times EF_{i,j,h,k} \times VKT_i \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, P 为机动车保有量, 辆; EF 为排放因子; VKT 为车辆年均行驶里程, $\text{km} \cdot \text{辆}^{-1}$; i 为车辆类型; j 为污染物类型; h 为排放阶段; k 为燃料类型。

城市涉及的非道路移动源包括农业机械和工程机械。污染物排放量的估算采用如公式(1)所示的基于燃油消耗量的排放因子法, SO_2 排放量的估算采用公式(2)。排放因子参考张凯等^[24]、Hua 等^[51]、Zhang 等^[62]的研究。

1.3.4 溶剂使用源

溶剂使用源的组成具有分散性与复杂性^[63], 是 VOCs 的主要排放源, 活动水平为有机溶剂的使用量, 工业点源溶剂使用量采用“自下而上”的方式进行获取, 主要来自晋城市市场监管局、生态环境局等部门和排污申报数据; 非工业面源溶剂使用量采用替代参数进行估算, 排放因子的选择如表 6 所示。

表 6 溶剂使用源主要污染物排放因子

Table 6 Main pollutant emission factors of solvent source

排放源 Emission source	种类 Category	VOCs	单位 Unit	数据来源 Data source
印刷		100/216/243/620/683/750 ^a	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	[57]
工业涂层	家具	0.4/218 ^b	$\text{t} \cdot \text{年}^{-1}$	[43]
	家电	0.2	$\text{kg} \cdot \text{件}^{-1}$	
	交通设备	0.3/1.8/2.43/20/21.2 ^c	$\text{kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	
	其他涂层	0.455/0.4/0.4/0.235 ^d		
建筑涂料		120/120/590 ^e	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	[45, 51]
农药施用		276/568/576 ^f	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	[43]
鞋		0.06	$\text{kg} \cdot \text{双}^{-1}$	[64]
木制人造板		0.5	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	[51]
洗涤剂		44	$\text{g} \cdot \text{人}^{-1}$	[45]
干洗		1000	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	[43]
烹饪		3.5	$\text{g} \cdot \text{人}^{-1}$	[57]

a: 柔性版印刷/胶印/凸版印刷/凹版印刷/丝网印刷/其他印刷; b: 木制家具/金属家具; c: 自行车/摩托车/轿车/汽车/货车; d: 线圈($\text{t}/\text{生产线}$)/设备制造($\text{kg} \cdot \text{件}^{-1}$)/机床($\text{kg} \cdot \text{件}^{-1}$)/其他; e: 建筑内墙/外墙水性涂料/外墙溶剂型涂料; f: 百草枯/稻瘟净/敌敌畏。

a: Flexographic printing/offset printing/letterpress printing/gravure printing/screen printing/other printing; b: Wooden furniture/metal furniture; c: Bicycle/motorcycle/car/automotive/truck; d: Coils (t/line)/equipment manufacturing (kg/piece)/machine tools (kg/piece)/other; e: Building interior/exterior water-based coating/exterior solvent-based coating; f: Paraquat/kitazine/dichlorvos.

1.3.5 扬尘源

扬尘源属于复杂混合源, 受多种因素影响, 来源广泛、时空变化大且无规律^[8]。该文扬尘源涵盖了铺装道路扬尘、施工扬尘、土壤扬尘和堆场扬尘。

铺装道路扬尘易受到风、人群活动、机动车移动等驱动因素的影响, 该研究将晋城市 6 个区县的道路分为城市道路、乡村道路、公路和高速公路 4 个等级, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量采用(4)计算:

$$W_{Ri} = EF_{Ri} \times L_R \times N_R \times \left(1 - \frac{n_r}{365}\right) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, EF_{Ri} 为排放因子, 计算方法参考文献^[65]; L_R 为道路长度, km ; N_R 为平均车流量, $\text{辆} \cdot \text{a}^{-1}$; n_r 为不起尘天数, 该研究采用 2020 年里降水量大于 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的天数表示。

施工扬尘的排放因子和排放量分别采用公式(5、6)计算, 施工面积、周期等活动水平数据从晋城市统计年鉴和各区县建设主管部门获取。施工扬尘的控制效率根据不同地区对扬尘的控制措施进行选取。

$$W_{Ci} = EF_{Ci} \times A_C \times T \quad (5)$$

$$EF_{Ci} = 2.69 \times 10^{-4} \times (1 - \eta) \quad (6)$$

式中, EF_{Ci} 为排放因子; A_C 为施工区域面积, m^2 ; T 为工地施工月份数, 一般按施工天数(30)计算; η 为扬尘的去除效率, %.

相较于其他扬尘, 对土壤扬尘的防治是当前改善颗粒物污染的首要控制方向^[66]. 风蚀方程是估算土壤扬尘排放量的常用模型, 详见公式(7—10).

$$W_{Si} = EF_{Si} \times A_S \quad (7)$$

$$EF_{Si} = k_i \times I_{we} \times f \times L \times V \times C \times (1 - \eta) \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$C = 0.504 \times \frac{u^3}{PE^2} \quad (9)$$

$$PE = 1.099 \times \frac{p}{[0.5949 + (0.1189 \times T_a)]} \quad (10)$$

式中, EF_{Si} 为排放因子; A_S 为尘源面积, m^2 ; η 为污染措施去除率, 由于裸露地面完全无遮蔽, 在计算时取 0; k 为粒度系数 (PM_{10} 取 0.30, $PM_{2.5}$ 取 0.05); I_{we} 为土壤风蚀指数; f 为地面粗糙因子, 取值 0.5; L 为无屏蔽宽度因子, 即无明显覆盖物的最大范围, 其值为 1.0; V 为植被覆盖因子, 指裸露土壤面积占总计算面积比例, 该文通过 Li 等^[67] 的方法进行确定; C 为气候因子, 由 Thorn Thwaite 降水-蒸发指数 PE、晋城市年平均风速 u 、年降水量 p 和年平均气温 T_a 共同决定, 取值 0.0199. 参数获取途径为中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)、土地利用类型图以及现场调研.

堆场扬尘源是指由于堆积、装卸、运输等操作以及风蚀作用造成的扬尘. 活动水平数据涉及堆场的占地面积、高度和年物料装卸总量, 以发表调查和现场调查相结合的形式获取, 估算公式(11)如下:

$$W_Y = \sum_{i=1}^m EF_h \times G_{Yi} \times 10^{-3} + EF_W \times A_Y \times 10^{-3} \quad (11)$$

式中, EF_h 为排放因子, 计算方法参考文献^[65]; m 为料堆物料装卸总次数; G_{Yi} 为第 i 次装卸过程的物料装卸量, t; EF_W 为料堆受到风蚀作用的颗粒物排放系数, $kg \cdot m^{-2}$; A_Y 为料堆表面积, m^2 .

1.3.6 生物质燃烧源

生物质燃烧来源包括露天秸秆燃烧和室内秸秆燃烧, 尽管秸秆燃烧目前已被大力整治, 但在许多县区, 它仍被用作烹饪燃料^[68]. 该文基于作物产量、谷草比、秸秆燃烧速率和燃烧效率等估算了污染物排放量. 水平活动数据来自生态环境局、企业填报以及社区/村庄问卷调查. 排放因子均来自文献^[30], 如表 7 所示.

表 7 生物质燃烧源主要污染物排放因子 ($kg \cdot t^{-1}$)

Table 7 Emission factors of main pollutants from biomass combustion sources

排放源 Emission Source	燃料类型 Fuel Type	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}
生物质锅炉	生物质成型燃料	0.70	2.79	6.22	1.13	1.12	1.13
	小麦秸秆	2.36	0.51	172	9.37	8.86	8.24
户用生物质炉具	玉米秸秆	1.33	0.83	57	7.34	7.39	6.87
	薪柴	0.4	0.97	29	3.13	3.48	3.24
生物质开放燃烧	小麦秸秆	0.74	2.89	60	7.49	7.73	7.13
	玉米秸秆	0.45	3.43	53	10.2	11.95	11.3

1.3.7 储存运输源

储存运输源是指汽/柴油在储藏、运输及装卸过程中逸散泄露造成 VOCs 排放的排放源. 基于储油库汽/柴油吞吐量、油罐车汽/柴油运输量和加油站汽/柴油销售量等活动水平数据, 采用公式(1)计算 VOCs 排放量. 活动水平数据来自实地调研和晋城市商务局, 排放因子来自闫雨龙等^[69] 的研究.

1.3.8 废弃物处理源和其他排放源

废弃物处理源包括城市固体废物填埋、垃圾焚烧和堆肥、废水处理以及烟气脱硝过程副产物, 污染物排放量采用公式(1)进行估算, 活动水平数据包括场地信息、废弃物处理量、污水处理量、废弃物处理脱硫、脱氮和除尘效率, 来自企业调研和晋城市环境统计局. 其他排放源包括餐饮油烟源, 其估算方法采用排放因子法, 活动水平点源数据通过发放电子问卷搜集, 包括餐饮行业的地理位置与固定灶头数; 面源活动水平数据参考文献^[30]中的经验值, 详见表 8.

表 8 不同规模餐饮企业烟气排放速率、年总经营时间经验值

企业规模 Enterprise scale	大型餐饮企业 Large catering enterprises	中型餐饮企业 Medium-sized catering enterprises	小型餐饮企业 Small catering enterprises
烟气排放 速率/(m ³ ·h ⁻¹)	2500	2000	1500
年总经营时间/h	2000	1800	1600

1.4 空间分配

准确的空间分配对于建立高分辨率排放清单至关重要. 基于数据的可获得性, 通过 ArcGIS 软件, 采用合适的空间表征参数进行插值分配, 将其划分到 1 km×1 km 的网格单元中, 以反映污染物空间分布特征的差异性. 各排放源的详细空间分配表征参数如表 9 所示.

表 9 排放源空间分配情况

排放源 Emission source	分配原则 Distribution principle	空间代理参数 Spatial agent parameters
化石燃料固定燃烧源	点源/面源	经纬度、人口密度
工艺过程源	点源	经纬度
移动源	面源/线源	土地类型、道路长度
溶剂使用源	点源/面源	经纬度、人口密度、GDP、土地类型
扬尘源	点源/面源/线源	经纬度、道路长度、土地类型
生物质燃烧源	点源/面源	经纬度、农村居民点
储存运输源	点源/线源	经纬度、道路长度
废弃物处理源	点源	经纬度
其他排放源	点源/面源	经纬度、人口密度

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 污染物排放情况

晋城市 2020 年污染物年排放量计算结果见表 10. SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放总量分别为 43736.24、54522.10、494967.08、35912.37、46275.92、24314.39 t.

2.2 污染源排放贡献

各类排放源对总排放量的贡献如图 2 所示. 固定燃烧源是晋城 SO₂ 排放的主要污染来源, 占全市 SO₂ 排放量的 79.8%. 煤炭、天然气等化石能源的消耗主要与火力电厂发电和民用燃烧行为有关. 2020 年, 晋城规模以上工业发电量达到 262 亿千瓦时^[29], 其燃烧过程贡献了固定燃烧源 SO₂ 排放量的 24.7%, 对于民用燃烧, 尽管晋城近年来加强了集中供暖的力度以及散煤的整治, 但在农村仍然存在燃煤取暖的行为, 这是造成固定燃烧源对 SO₂ 排放高贡献率的重要因素. 此外, 工艺过程源作为 SO₂ 的第二贡献来源, 其排放主要来自钢铁冶金、水泥生产以及其他工业制造等.

与 SO₂ 来源类似, 晋城 NO_x 的排放主要来自固定燃烧源的贡献, 占比高达 46.7%, 煤炭、石油等燃料的燃烧会产生大量的 NO_x. 移动源对 NO_x 的贡献率仅次于固定燃烧源, 占 NO_x 总排放量的 29.7%. 其中, 道路移动源主要来自重型柴油货车、轻型柴油货车和小型汽油客车, 非道路移动源主要贡献来自

拖拉机和挖掘机. 2020 年末晋城机动车保有量 50.2 万辆, 比 2019 年增长 7.5%^[29], 机动车数量的急剧增加是大气污染物排放日趋增加的重要原因之一. 通过控制车辆保有量、限制重点路段的交通流量以及推广新能源汽车是很好的减排选择.

表 10 晋城市大气污染物排放清单(t)

Table 10 Air pollutant emission inventory of Jincheng

排放源 Emission source	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}
化石燃料固定燃烧源	34892.31	25436.25	188526.66	8875.14	10519.79	7726.07
工艺过程源	8041.03	12325.22	266108.56	9357.71	15034.83	8586.42
移动源	657.28	16194.97	34276.66	11240.55	1596.49	1502.38
溶剂使用源				3426.34		
扬尘源					17340.44	4858.79
生物质燃烧源	145.62	565.66	6055.20	1837.02	1666.27	1546.24
储存运输源				943.25		
废弃物处理源				83.55		
其他源				148.81	118.10	94.48
总计	43736.24	54522.10	494967.08	35912.37	46275.92	24314.39

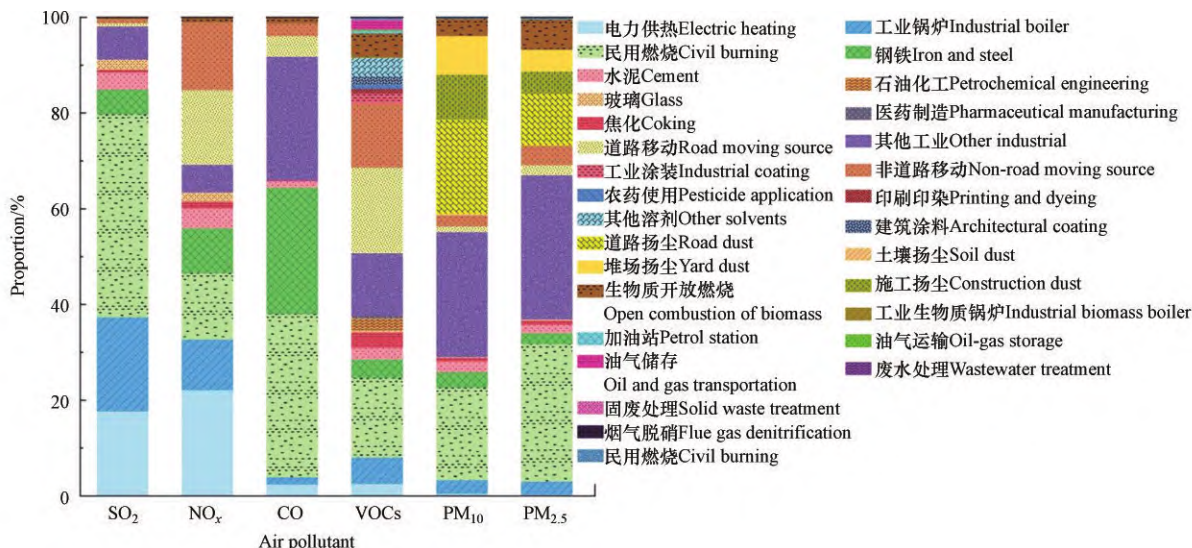


图 2 晋城市各类源排放贡献情况

Fig.2 Emission contribution of various sources in Jincheng city

晋城大气环境中 CO 的人为源排放主要来自化石燃料燃烧和工艺制造过程, 分别贡献 CO 总排放量的 38.1% 和 53.8%. 其中, 民用燃烧和钢铁生产加工过程的贡献达到 34.1% 和 26.4%. 农业活动往往会产生大量的农业废弃物, 这些废弃物的处置仍然是一个难题, 在 2020 年, 晋城农作物种植面积达到 175.9 千公顷^[29], 意味着更多的作物秸秆可能被用来焚烧, 这种低燃烧效率的处置方式导致高的排放因子, 进而造成民用燃烧对 CO 排放的高贡献率. 由于工艺水平的限制, 钢铁制造业在吹氧冶炼过程中产生相当一部分的 CO 不能被回收利用, 既造成能源浪费, 又带来环境污染.

VOCs 作为细颗粒物和 O₃ 的重要前体物, 是目前大气污染控制的重点研究对象, 主要来自工艺过程源、移动源和化石燃料燃烧源, 分别贡献 VOCs 总排放量的 31.3%、26.1% 和 24.7%. 工艺过程源中 VOCs 主要来源于钢铁冶炼、焦化以及其他工业行业; 民用燃烧、小型汽油客车和挖掘机也是 VOCs 排放的主要贡献源. 中国是世界涂料生产和消费的第一大国, 且涂料产量在逐年稳定增长, 目前由于低 VOC 排放涂料领域的大力发展, 溶剂使用源仅占晋城全市 VOCs 排放量的 9.5%.

扬尘源是 PM₁₀ 的最大贡献源, 分担率高达 37.5%. 截止到 2020 年, 晋城公路里程达到 9652 km^[29],

道路交通的高速发展以及机动车保有量的连年攀升,使道路扬尘对 PM_{10} 的贡献率远高于其它扬尘源。工艺过程源是 PM_{10} 的第二大贡献源,占比 32.5%,主要来自钢铁冶炼、铸造及烧结工序、水泥及其它工业制造。由于扬尘源中的颗粒物排放多为粗粒子,因而对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献相对较低,仅为 20.0%,工业制造过程和化石燃料燃烧对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献最高,分别为 35.3% 和 31.8%。

2.3 城市排放贡献

图 3 展示了晋城市各区县大气污染物排放量贡献。海拔较低的泽州、阳城和高平分别是 SO_2 和 NO_x 排放量较高的 3 个区县,占全市 SO_2 和 NO_x 总排放量的 88.6% 和 71.0%,3 个地区以化石燃料利用为主的工业企业分布密集,大量使用煤炭等能源导致高的 SO_2 和 NO_x 负担,高的污染物浓度和低海拔地区较弱的大气扩散条件,极易形成严重污染事件,危害人体健康;城区位于盆地最中心部位,其 NO_x 排放明显高于其他 5 个地区,排放主要来自移动源,这是由于城区机动车保有量居晋城首位,且柴油车的 NO_x 排放因子较高,从而导致高 NO_x 的释放; CO 的排放主要来自泽州、高平和城区的工艺过程,泽州、高平是晋城主要的钢铁产地,在烧结和高炉炼铁过程会产生大量的 CO 。此外,泽州、高平、阳城和陵川的固定燃烧源也对 CO 排放量有较大贡献,共占 CO 总排放量的 85.6%; VOCs 排放主要集中在城区、泽州、高平和阳城。其中,城区的 VOCs 主要来自移动源的机动车尾气排放,高平的 VOCs 来自工艺过程源的石油化工及钢铁铸造等行业,泽州和阳城的 VOCs 则来自于化石燃料燃烧源、工艺过程源、移动源等其他源,陵川和沁水对 VOCs 的贡献率亦较为突出,主要来自移动源;泽州、高平是 PM_{10} 的首要贡献地区,贡献率分别为 26.6% 和 25.5%,两区县的 PM_{10} 排放源也较为相似,依次是工艺过程源、扬尘源和固定燃烧源等,城区的扬尘源对 PM_{10} 贡献高达 62.6%,这是因为市中心交通路网密集,道路扬尘载荷大,同时大规模的基础设施建设也导致粉尘的大量排放,此外,阳城、陵川和沁水的扬尘源对 PM_{10} 的贡献也较为突出;不同地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染源同 PM_{10} 相一致,泽州和高平对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率分别为 26.3% 和 29.9%,排放源依次为工艺过程、化石燃料燃烧和扬尘源等,阳城和陵川的化石燃料燃烧对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献较高,城区的工艺过程是首要 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源,扬尘源次之。

2.4 污染物空间分布特征

图 4 展示了 6 类大气污染物的空间分布情况。 SO_2 在城区、高平、泽州中部和北部、阳城东部、沁水东南方向有广泛的分布,在高平和泽州的交界附近形成一个显著的高值污染带,主要为电、热力生产、钢铁、砖瓦以及其他生产企业燃料燃烧过程的排放; NO_x 集中分布在城区、泽州北部、阳城东部和高平等工业密集、能源消耗量大的地区,排放量较为突出的网格不仅来自于火电厂等较大的点源,机动车排放对其分布也有显著影响,在网格中呈现出沿道路网格向外延伸分布的特征; CO 的排放与燃料和生物质燃烧、道路移动呈高度正相关,分布特征与 NO_x 类似,但 CO 的点源分布更为明显; VOCs 的排放呈从阳城、泽州、高平中心低海拔地带向四周高海拔地带辐散减弱的趋势; PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现出相似的空间分布特征,受扬尘、非金属产品制造和燃料燃烧的影响,均集中于泽州、高平和阳城路网密集、施工强度较高的地区以及部分工业园区内。

晋城盆地各项大气污染物主要集中分布在 285—750 m 的低海拔地区,而在盆地边缘 750—2200 m 的中高海拔地区,排放源较为分散且污染物排放量低。在柯伯俊^[70]建立的四川盆地排放清单中,位于盆地底部(海拔<500 m)的成都、自贡等 15 个城市大气污染严重,坡区的雅安、巴中等污染次之,而位于边缘高海拔地带的阿坝藏族自治州和甘孜藏族自治州(海拔约 3000 m)污染最轻,污染物的浓度随着海拔的增加呈下降的趋势。张凯等^[24]编制了兰州盆地大气污染物排放清单,结果表明 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放主要集中于兰州盆地中央海拔较低的“西固区-七里河区-城关区”一带。总体而言,四川、兰州盆地大气污染物排放量较高的区域均集中在低海拔地区,而在盆地边缘高海拔地区污染物排放量低,与晋城盆地的空间分布一致。

2.5 排放清单不确定性分析

在清单建立的过程中,由于监测误差、活动数据代表性不足和排放因子的地区差异等原因导致总排放量的最终结果存在不确定性,识别和量化这些不确定性是保证清单编制结果准确性的重要手段。该研究采用基于概率统计的 Monte Carlo 模拟,通过 Oracle Crystal Ball 软件对晋城盆地 2020 年大气污染物排放量的不确定性进行量化分析。

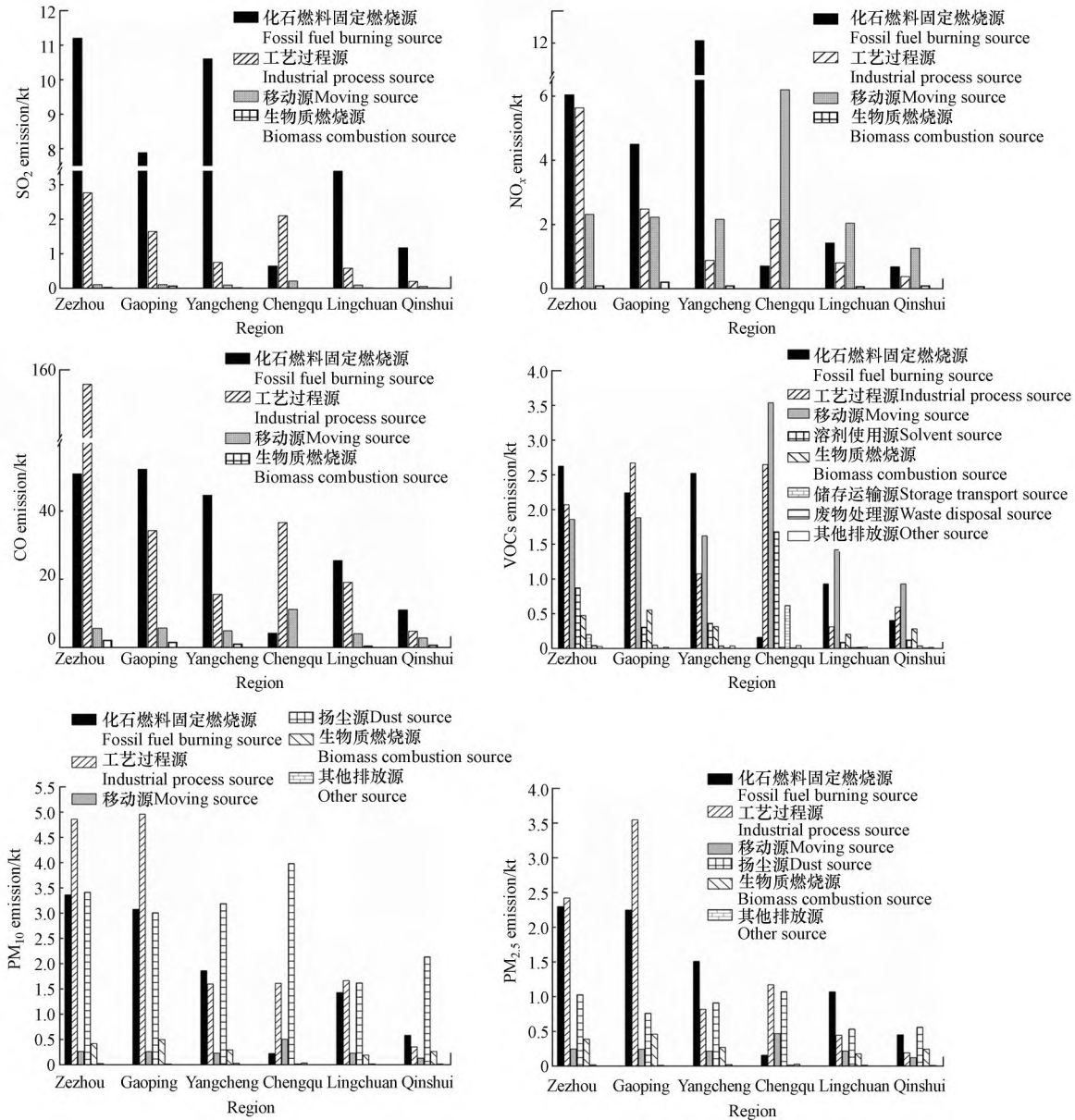


图3 晋城市各县区污染物排放量
Fig.3 Emission contribution of Jincheng County

模拟的排放因子概率分布呈正态分布、三角分布和均匀分布. 变异系数(CV) 处于 5%—20% 范围内, 在 95% 置信区间内设定随机抽样次数 10000 次, SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 6 种污染物排放量的不确定性范围为: -14.76%—17.14%、-17.65%—18.56%、-15.59%—15.52%、-27.31%—26.77%、-21.30%—21.52% 和 -22.09%—23.22%。可以发现, SO₂、NO_x 和 CO 的不确定性较低, 因为这 3 种污染物的贡献源主要为点源, 企业生产规模、生产工艺、产品产量、污染控制设施等基础信息收集充分, 对于民用散煤燃烧等面源, 采用调查问卷方式获取, 经统计后去掉无效问卷并计算县级人均燃料消耗量, 与统计年鉴进行比对修正以提高准确度. 相比之下, VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放存在较高的不确定性, 主要受溶剂使用、道路移动和扬尘等因素的影响, 其中, 溶剂使用源和扬尘源的组成分散且复杂, 有统计不完整等情况存在, 道路移动源的不确定性则是由模拟数据计算的排放因子存在一定的误差造成的. 虽然该清单存在一些不确定性, 但污染物排放量的计算值与模拟均值误差较小, Monte Carlo 模拟分析表明本清单整体可信度高, 可为盆地城市空气质量建模和减排策略发布提供不可或缺的数据基础.

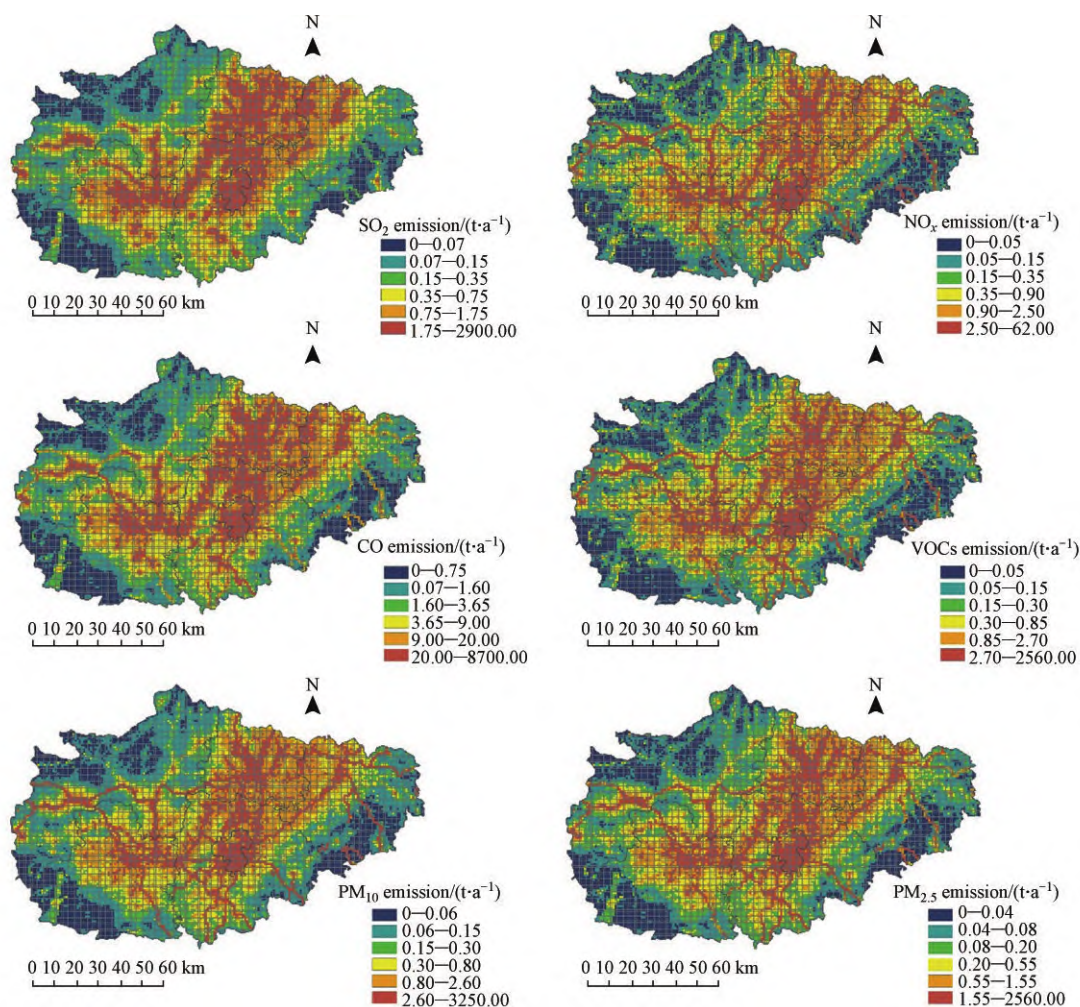


图 4 大气污染物空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of air pollutants

3 结论与展望(Conclusion and prospect)

(1) 2020年晋城市6种大气污染物SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀和PM_{2.5}的年排放总量分别为43736.24、54522.10、494967.08、35912.37、46275.92、24314.39 t。

(2) 从污染源贡献来看,化石燃料固定燃烧源是SO₂和NO_x的最大排放贡献源,同时,道路移动也排放大量NO_x,CO的高排放源依次为工艺过程、化石燃料燃烧和移动源,VOCs主要来自移动源和工艺过程源,工艺过程和扬尘是主要的颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})贡献源。

(3) 晋城市大气污染物的空间特征表明,大气污染物的分布主要集中在泽州、高平、阳城等盆地中央285—750 m的低海拔、缓坡度地区,而在盆地边缘750—2200 m的陵川和沁水中高海拔地区排放较少,这是因为高密度人口带、工农业产区等主要分布在低海拔地区,人为污染排放集中。

(4) Monte Carlo模拟结果显示,CO的不确定性最小为-15.59%—15.52%,VOCs的不确定性最大为-27.31%—26.77%,该结果表明本清单整体可信度较高。

(5) 城市人为活动排放的大气污染物浓度与人口过早死亡呈显著正相关,由于盆地地区是严重雾霾天气高发地,因此当地居民面临的健康问题更为严峻.我们应该拓展对地形复杂、大气扩散条件差的盆地地区的研究,为盆地城市大气污染防治工作提供科学依据,尤其是在以煤炭为主要能源利用类型的重工业城市.此外,在未来研究中,应将污染物的时间分布同空间分布协同研究,以提升排放清单的精细程度。

参考文献 (References)

- [1] WANG W J, CHEN C, LIU D, et al. Health risk assessment of PM_{2.5} heavy metals in County units of Northern China based on Monte Carlo simulation and APCS-MLR [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156777.
- [2] 肖凯, 任学昌, 陈仁华, 等. 典型西北钢铁城市冬季大气颗粒物重金属来源解析及健康风险评估: 以嘉峪关为例 [J]. *环境化学*, 2022, 41(5): 1649-1660.
XIAO K, REN X C, CHEN R H, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in air particulates of typical northwest steel cities in winter: A case study in Jiayuguan [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(5): 1649-1660(in Chinese).
- [3] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 367-371.
- [4] TILT B. China's air pollution crisis: Science and policy perspectives [J]. *Environmental Science & Policy*, 2019, 92: 275-280.
- [5] LI Q, WANG E R, ZHANG T T, et al. Spatial and temporal patterns of air pollution in Chinese cities [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(3): 1-22.
- [6] ZHAO B, WANG P, MA J Z, et al. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(1): 481-501.
- [7] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市道路移动源排放清单与空间分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 79-91.
ZHOU Z H, DENG Y, WU K Y, et al. On-road mobile source emission inventory and spatial distribution characteristics in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 79-91(in Chinese).
- [8] LI T K, DONG W, DAI Q L, et al. Application and validation of the fugitive dust source emission inventory compilation method in Xiongan New Area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149114.
- [9] LI M, LIU H, GENG G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: A review [J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [10] WU L, SU H, KALASHNIKOVA O V, et al. WRF-Chem simulation of aerosol seasonal variability in the San Joaquin Valley [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(12): 7291-7309.
- [11] YIM S H L, FUNG J C H, NG E Y Y. An assessment indicator for air ventilation and pollutant dispersion potential in an urban canopy with complex natural terrain and significant wind variations [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 297-306.
- [12] LI X J, HUSSAIN S A, SOBRI S, et al. Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129502.
- [13] HIGGINBOTHAM N, FREEMAN S, CONNOR L, et al. Environmental injustice and air pollution in coal affected communities, Hunter Valley, Australia [J]. *Health & Place*, 2010, 16(2): 259-266.
- [14] GUSTIN M S, FINE R, MILLER M, et al. The Nevada Rural Ozone Initiative (NVROI): Insights to understanding air pollution in complex terrain [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 530/531: 455-470.
- [15] 向怡, 史学峰, 吴玉生. 大同盆地复杂地形下近场大气污染物扩散模型选取研究 [J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(1): 45-50.
XIANG Y, SHI X F, WU Y S. Study on the selection of near-field air pollutants diffusion model in complex terrain of Datong Bason [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(1): 45-50(in Chinese).
- [16] 胡洵, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 关中盆地近地面风场和大气输送特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 2020, 25(6): 637-648.
HU X, CAI X H, SONG Y, et al. Diagnostic analysis of wind fields and atmospheric transport pathways in the Guanzhong Basin [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(6): 637-648(in Chinese).
- [17] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
GUO X M. Observed and simulated research on climate characteristic of air quality and the topographic induced effects in Sichuan Basin [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016(in Chinese).
- [18] 王小兰, 王雁, 闫世明, 等. 晋中盆地主要城市冬季PM_{2.5}传输特征分析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3423-3438.
WANG X L, WANG Y, YAN S M, et al. Analysis of PM_{2.5} transmission characteristics in main cities of Jinzhong Basin in winter [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3423-3438(in Chinese).
- [19] 杨显玉, 吕雅琼, 邵平, 等. 四川盆地大气氨与氮氧化物排放对细颗粒物污染的影响及减排潜力 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3502-3511.
YANG X Y, LV Y Q, SHAO P, et al. Impact of ammonia and nitrogen oxides emissions on particle matter pollution and mitigation potential over the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3502-3511(in Chinese).
- [20] CHEN K Y, WANG P F, ZHAO H, et al. Summertime O₃ and related health risks in the North China plain: A modeling study using two anthropogenic emission inventories [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 246: 118087.
- [21] ZHANG Y, DORE A J, MA L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 490-501.
- [22] SIMAYI M, SHI Y Q, XI Z Y, et al. Understanding the sources and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136692.
- [23] SUN Y, NIU T, HE J J, et al. Classification of circulation patterns during the formation and dissipation of continuous pollution weather over the Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 223: 117244.
- [24] 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 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*, 2017, 37(4): 1227-1242.
ZHANG K, YU Z S, GAO H, et al. Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric

- pollutants in Lanzhou valley [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1227-1242(in Chinese).
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 中国生态环境状况公报[R]. 2020.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Ecological and Environmental Status Bulletin of China* [R]. 2020 (in Chinese).
- [26] SUN D, FANG J, SUN J Q. Health-related benefits of air quality improvement from coal control in China: Evidence from the Jing-Jin-Ji region [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 416-423.
- [27] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [28] BP. BP statistical review of world energy 2021 [M]. London: BP, 2021.
- [29] 晋城市统计局. 晋城统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Jincheng City Bureau of Statistics. *Jincheng Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [30] 贺克斌. 城市大气污染源排放清单编制技术手册[R]. 北京: 清华大学, 2018.
HE K B. *Technical manual for compiling urban air pollutant emission inventory* [R]. Beijing: Tsinghua University, 2018 (in Chinese).
- [31] STREETS D G, BOND T C, CARMICHAEL G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2003, 108(D21): 8809.
- [32] ZHAO Y, WANG S X, DUAN L, et al. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8442-8452.
- [33] LIU H J, WU B B, LIU S H, et al. A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding five provinces of North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 181: 20-33.
- [34] 中华人民共和国环境保护部. 锅炉大气污染物排放标准[EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Boiler air pollutant emission standard* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
- [35] 中华人民共和国环境保护部. 燃煤电厂污染防治最佳技术指南(试行)[EB/OL]. [2022-06-01]. 2010,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Coal-fired power plants pollution prevention best technology guide (Trial)* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2010,
- [36] LIU F, ZHANG Q, TONG D, et al. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(23): 13299-13317.
- [37] ZHANG Q, STREETS D G, HE K B, et al. NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2007, 112(D22): D22306.
- [38] TIAN H Z, LIU K Y, ZHOU J R, et al. Atmospheric emission inventory of hazardous trace elements from China's coal-fired power plants: Temporal trends and spatial variation characteristics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(6): 3575-3582.
- [39] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆CO人为源排放清单 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1580-1585.
WANG L T, ZHANG Q, HAO J M, et al. Anthropogenic CO emission inventory of China's mainland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12): 1580-1585(in Chinese).
- [40] 张强. 中国区域细颗粒物排放及模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
ZHANG Q. *Regional Fine Particle Emissions and Simulation in China* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005(in Chinese).
- [41] 王艳. 中国氮氧化物排放及污染时空分布特征研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
WANG Y. *Spatial and temporal distribution characteristics of nitrogen oxide emissions and pollution in China* [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011(in Chinese).
- [42] WANG X P, MAUZERALL D L, HU Y T, et al. A high-resolution emission inventory for Eastern China in 2000 and three scenarios for 2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(32): 5917-5933.
- [43] 中华人民共和国环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Technical Guide for Compilation of Emission Inventory of Volatile Organic Compounds from Atmosphere (Trial)* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
- [44] BAI L, LU X, YIN S S, et al. A recent emission inventory of multiple air pollutant, PM_{2.5} chemical species and its spatial-temporal characteristics in central China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122114.
- [45] LIU S H, HUA S B, WANG K, et al. Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Henan of China: Localized emission inventory, WRF/Chem simulations and potential source contribution analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 396-406.
- [46] 中华人民共和国环境保护部. 民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. [2022-06-01]. 2016,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Technical Guide for Compilation of Air Pollutant Emission Inventory of Civil Coal (Trial)* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2016,
- [47] 中华人民共和国环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Technical Guide for Compilation of Atmospheric Fine Particulate Matter Emission Inventory from Primary Sources (Trial)* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
- [48] 中华人民共和国环境保护部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *Technical Guide for Compilation of Primary Source Emission Inventory of Atmospheric Inhalable Particulate Matter (Trial)* [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,

- [49] WANG K, TIAN H Z, HUA S B, et al. A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: Temporal trends and spatial variation characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 7-14.
- [50] ZHAO Y, NIELSEN C P, MCELROY M B, et al. CO emissions in China: Uncertainties and implications of improved energy efficiency and emission control [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49: 103-113.
- [51] HUA H, JIANG S Y, SHENG H, et al. A high spatial-temporal resolution emission inventory of multi-type air pollutants for Wuxi City [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 278-288.
- [52] HUA S B, TIAN H Z, WANG K, et al. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: Temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 128: 1-9.
- [53] LEI Y, ZHANG Q, NIELSEN C, et al. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(1): 147-154.
- [54] ZHAO Y, QIU L P, XU R Y, et al. Advantages of a city-scale emission inventory for urban air quality research and policy: the case of Nanjing, a typical industrial city in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(21): 12623-12644.
- [55] 孟琛琛, 倪爽英, 陆雅静, 等. 河北省工业源大气污染物排放清单及减排潜力 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(S2): 186-193.
MENG C C, NI S Y, LU Y J, et al. Emission inventory and emission reduction potential of typical industrial sources in Hebei Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(Sup 2): 186-193(in Chinese).
- [56] ZHAO Y, ZHANG J, NIELSEN C P. The effects of recent control policies on trends in emissions of anthropogenic atmospheric pollutants and CO₂ in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(2): 487-508.
- [57] QIU P P, TIAN H Z, ZHU C Y, et al. An elaborate high resolution emission inventory of primary air pollutants for the Central Plain Urban Agglomeration of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 86: 93-101.
- [58] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 48-55.
CHEN Y, YE D Q, LIU X Z, et al. Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(1): 48-55(in Chinese).
- [59] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 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*, 2015, 35(9): 2655-2669.
PAN Y Y, LI N, ZHENG J Y, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9): 2655-2669(in Chinese).
- [60] KLIMONT Z, STREETS D G, GUPTA S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(8): 1309-1322.
- [61] ZHOU M M, JIANG W, GAO W D, et al. Anthropogenic emission inventory of multiple air pollutants and their spatiotemporal variations in 2017 for the Shandong Province, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117666.
- [62] ZHANG Q J, YANG L, MA C, et al. Emission characteristics and chemical composition of particulate matter emitted by typical non-road construction machinery [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(4): 679-685.
- [63] 何向东, 黄兴宇, 张传兵, 等. 焦作市人为源挥发性有机物排放清单 [J]. *环境化学*, 2019, 38(9): 1998-2007.
HE X D, HUANG X Y, ZHANG C B, et al. Emission inventories of anthropogenic VOCs in Jiaozuo City [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(9): 1998-2007(in Chinese).
- [64] 陈小方, 张伟霞, 陈柄旭, 等. 江门市人为源挥发性有机物排放清单 [J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 600-607.
CHEN X F, ZHANG W X, CHEN B X, et al. Emission inventory of anthropogenic VOCs in Jiangmen City [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 600-607(in Chinese).
- [65] 中华人民共和国环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. [2022-06-01]. 2014, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical Guide for Compilation of Particulate Matter Emission Inventory from Dust Sources (Trial) [EB/OL]. [2022-06-01]. 2014,
- [66] 宋立来, 李廷昆, 毕晓辉, 等. 京津冀地区高空间分辨率土壤扬尘清单构建及动态化方法 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(8): 1771-1781.
SONG L L, LI T K, BI X H, et al. Construction and dynamic method of soil fugitive dust emission inventory with high spatial resolution in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(8): 1771-1781(in Chinese).
- [67] LI T K, BI X H, DAI Q L, et al. Improving spatial resolution of soil fugitive dust emission inventory using RS-GIS technology: An application case in Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 191: 46-54.
- [68] ZHANG Q Q, PAN Y P, HE Y X, et al. Bias in ammonia emission inventory and implications on emission control of nitrogen oxides over North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 214: 116869.
- [69] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 [J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4086-4093.
YAN Y L, PENG L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi Province [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4086-4093(in Chinese).
- [70] 柯伯俊. 四川省大气污染源排放清单研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
KE B J. Research of an air pollutant emission inventory for Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014(in Chinese).