郑佳琳,薄 宇,徐晨曦,等.陕西大气污染物与 CO_2 排放清单及协同减排效应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):4872-4887.
Zheng J L, Bo Y, Xu C X, et al. Emission inventory of atmosphericpollutants and CO_2 in Shaanxi and synergistic emission reduction effect [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):4872-4887.

陕西大气污染物与 CO_2 排放清单及协同减排效应

郑佳琳[1],薄 宇[2*],徐晨曦[3],郭梦婕[3],张露瑶[3],张润草[1],高 飞[4],石梦双[5],彭 林[6],贺克斌[1,7] (1.清华大学环境学院,北京 100084；2.中国科学院大气物理研究所,北京 100029；3.清华大学地球系统科学系,北京 100084；4.陕西省环境监测中心站,陕西 西安 710054；5.智联万维科技有限公司,北京 100084；6.北京交通大学环境学院,北京 100044；7.清华大学碳中和研究院,北京 100084)

摘要：基于陕西省 2022 年环境统计数据及部门调研数据,通过自下而上和自上而下相结合的方法建立陕西省 2022 年大气污染物和 CO_2 排放清单.结果发现,SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC、OC 和 CO_2 排放总量分别为:64.0×10^3, 31.2×10^4, 19.3×10^5, 21.5×10^4, 34.0×10^4, 67.9×10^4, 20.8×10^4, 11.7×10^3, 24.0×10^3, 33.1×10^7t.SO_2 的最大排放源是电力供热;NO_x 和 BC 的最大排放源是柴油车;CO 的最大排放源是钢铁行业;VOCs 的最大排放源是焦化行业;NH_3 的最大排放源是畜禽养殖;PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的最大排放源是道路扬尘;OC 的最大排放源是生物质炉灶.榆林、西安和渭南是主要的 SO_2 和 PM_{10} 排放城市;榆林、西安和韩城是主要的 $PM_{2.5}$ 排放城市;西安、榆林和咸阳是主要的 NO_x 排放城市;西安、榆林和延安是主要的 VOCs 排放城市;韩城、榆林和西安是主要的 CO 排放城市;榆林、渭南和宝鸡是主要的 NH_3 排放城市;榆林、西安和咸阳是主要的 BC 排放城市;榆林、西安和渭南是主要的 OC 排放城市.在此基础上分析了大气污染物和 CO_2 减排措施的减污降碳效应,发现民用能源清洁化、电厂清洁能源发电以及燃煤锅炉整治措施均有减污降碳效应,且电厂清洁能源发电的减污降碳协同效应最高.

关键词：排放清单；陕西省；大气污染物；排放特征；减污降碳
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-4872-16

Emission inventory of atmosphericpollutants and CO_2 in Shaanxi and synergistic emission reduction effect. ZHENG Jia-lin[1], BO Yu[2*], XU Chen-xi[3], GUO Meng-jie[3], ZHANG Lu-yao[3], ZHANG Run-cao[1], GAO Fei[4], SHI Meng-shuang[5], PENG Lin[6], HE Ke-bin[1,7] (1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China；2.Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China；3.Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing100084, China；4.Shaanxi Provincial Environmental Monitoring Center Station, Xi'an 710054, China；5.Env IOT Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China；6.School of Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China；7.Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：4872~4887

Abstract：Based on the environmental statistics data and departmental survey data of Shaanxi Province in 2022, the emission inventory of atmospheric pollutants and CO_2 of Shaanxi Province in 2022 was established by a combination method of bottom-up and top-down. The results indicate that the total emissions of SO_2, NO_x, CO, VOCs, NH_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC and CO_2 were 64.0×10^3, 31.2×10^4, 19.3×10^5, 21.5×10^4, 34.0×10^4, 67.9×10^4, 20.8×10^4, 11.7×10^3, 24.0×10^3, 33.1×10^7 tons, respectively. The primary source of SO_2 was electricity generation and heating supply; the primary source of NO_x and BC was diesel vehicles; the primary source of CO was the iron and steel industry; the primary source of VOCs was the coking industry; the primary source of NH_3 was livestock and poultry farming; the primary source of PM_{10} and $PM_{2.5}$ was the road dust; and the primary source of OC was biomass stoves. Yulin, Xi'an and Weinan were the major cities with SO_2 and PM_{10} emissions; Yulin, Xi'an and Hancheng were the major cities with $PM_{2.5}$ emissions; Xi'an, Yulin and Xianyang were the major cities with NO_x emissions; Xi'an, Yulin and Yan'an were the major cities with VOCs emissions; Hancheng, Yulin and Xi'an were the major cities with CO emissions; Yulin, Weinan and Baoji were the major cities with NH_3 emissions; Yulin, Xi'an and Xianyang were the major cities with BC emissions; Yulin, Xi'an and Weinan were the major cities with OC emissions. On this basis, the pollution and carbon reduction effects of air pollutants and CO_2 emission reduction measures were analyzed, and it was found that the cleanification of civil energy, the electricity generation of cleaner power energyin power plants and the renovation of coal-fired boilers all have pollution and carbon reduction effects,while the electricity generation of cleaner power energyin power plants have the highest synergistic effect.

Key words：emission inventory；Shaanxi province；atmospheric pollutants；emission characteristics；pollution and carbon reduction

收稿日期：2025-02-13
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3709504)

* 责任作者，高级工程师, boyu@mail.iap.ac.cn

大气污染物和CO_2排放是环境问题的重要组成部分,对气候变化、空气质量和人类健康有深远影响,编制大气污染物和CO_2排放清单是应对空气污染和气候变化的重要工具.大气污染源排放清单是指在特定时间范围和空间区域内,各类污染源向大气中排放的污染物的汇总.大气污染物排放清单不仅能够提供大气污染物排放源的基本信息[1],助力大气污染防治决策的制定,还能为空气质量模式模拟提供基础数据[2-3],排放清单的准确性也会极大程度上影响大气污染决策的有效性及模型建模的准确性.大气污染物排放清单是空气质量预报预警的重要基础,也是制定污染控制策略的根本依据[4-5].基于排放系数与活动水平计算各种污染源、各项大气污染物排放量,是构建排放清单的主要方法[6].CO_2 排放清单是对特定区域、行业或组织在一定时间内排放的 CO_2 进行系统记录和汇总的工具.它涵盖各种排放源,如能源消耗、工业生产、交通运输等,是应对气候变化、制定减排政策的重要依据,编制准确的CO_2排放清单是实现减排的第一步.

陕西省近年来在治理大气污染方面投入了大量资源,空气质量有所改善,2023 年 1~12 月,全省国考 10 个设区市 $PM_{2.5}$ 平均浓度 38μg/m^3,同比下降2.6%;平均优良天数282.9d,同比增加3.2d[7].按照《陕西省人民政府关于印发铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案》的要求[8],陕西省提出要紧紧围绕全省大气污染防治工作科技需求,加快建立高效的大气环境监测网络,提升大气污染防控预警能力,逐步构建较为完善的生态环境科技支撑体系.在支持城市空气质量管理决策的技术体系中,构建准确、完整、更新及时的大气污染源排放清单是识别污染来源的基础环节.

国内大部分排放清单研究主要集中在京津冀、长三角和珠三角等地区[9],多是构建的城市尺度人为源大气污染物排放清单[10-13],部分学者研究了省级尺度人为源大气污染物排放清单[14-16].现有研究中以陕西省典型区域为对象的大气污染物排放清单研究中,大多集中在省级尺度[17-18]、关中地区[19-21],以及城市尺度典型污染源[22-33],已有研究[34]建立了陕西省企业级高分辨率空气污染物和CO_2工业排放清单,但其是以 2017 年为基准年,而缺乏近年来陕西省级尺度全面的人为源大气污染物排放清单,不足以为全省大气污染防控提供全面的科学依据.有关 CO_2 排放的清单,基本是全国或者个别省份早年的排放,尚无最近年份关于陕西省 CO_2 排放的研究.2023 年 1~12 月,陕西省咸阳、西安、渭南 3 个城市空气质量排名在全国后 20 位,陕西省空气质量差,需要编制省级尺度大气污染物和CO_2排放清单为改善空气质量做支撑,另一方面,陕西省地形复杂,需要用以点源为支撑的排放清单做精准管控.因此,本研究构建陕西省全面的人为源大气污染物和CO_2排放清单,以期能为陕西省大气污染防治与减污降碳提供科学支撑.

本研究以陕西省为研究对象,通过全面、细致的部门调研和重点排放源实地调查,全面收集陕西省全省范围内各类大气污染源基础信息、活动水平和排放系数等相关资料和数据,选用本地化排放因子,建立陕西省 2022 年大气污染物和 CO_2 排放清单,为陕西省优化产业结构、推进转型升级以及制定大气污染防治措施提供数据支持.以期能为陕西省天气预报和空气质量模拟提供基础数据和科学支撑.

1　材料与方法

1.1　研究对象及范围

本研究以 2022 年为基准年,研究范围涵盖陕西省 12 个市(西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市、渭南市、延安市、榆林市、汉中市、安康市、商洛市、韩城市、杨凌示范区),人为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、废弃物处理源以及餐饮油烟源 10 类,污染物包括二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、挥发性有机物(VOCs)、氨(NH_3)、颗粒物(PM_{10}和$PM_{2.5}$)、黑碳(BC)和有机碳(OC).本研究中工业源活动水平数据获取途径为陕西省 2022 年环境统计数据、重点企业现场调研,移动源和面源数据主要来源于各部门调研.活动水平数据采集过程中,开展全流程数据质控.其中,环境统计数据中重点行业产品产量、燃料消耗与同年份统计年鉴进行对比验证;筛选重点行业典型企业开展现场调研.基于陕西省工业部门已调研数据,制定现场调研规则:(1)重点行业.针对重点污染物,选取排放总量大且属于“十四五”规划重点管控的行业以及环境统计与统计年鉴产品产

量数据存疑的行业,包括钢铁、焦化、石化与化工、电力、工业涂装、水泥、陶瓷、化工化纤、医药制造、热力供应.(2)典型企业.在重点行业内,选择环境统计等多个数据来源排放量差异大的企业.(3)代表城市.调研企业主要分布在关中地区(作为污染管控重点区域),同时确保陕南、陕北和关中地区均有企业入选.筛选表 1 中 32 家陕西省重点行业代表性企业进行现场调研,获得了校正后的活动水平数据,调研后的结果显著降低了排放清单的不确定性,并且可以支持进一步根据时间廓线构建日尺度排放清单.实地获取产排污数据,并进一步进行污染排放估算;移动源、面源采用调研表形式从各管理部门获取相应数据,并将从部门获取的数据与同年份统计年鉴作对比验证.整体而言,采取“自上而下”和“自下而上”相结合,多源数据融合、交叉验证构建完善的本地化活动水平数据库.并进一步按照“城市大气污染源排放清单编制技术手册”(简称:《手册》)[35]以及《城市大气污染源排放清单编制技术指南》团体标准[36],编制陕西省 SO_2,NO_x,CO,PM_{10},$PM_{2.5}$,BC,OC,VOCs,NH_3 这 9 种大气污染物和 CO_2 排放清单.

1.2 排放源定量表征方法

本研究综合采用物料衡算法和排放因子法构建陕西省 2022 年大气污染物和 CO_2 排放清单,其中 SO_2 排放以及燃煤源(燃料为各类煤炭、焦炭和煤矸石)的 SO_2 和颗粒物采用物料衡算法(公式 1~4),NO_x 的产生系数大小与燃煤锅炉装机容量大小、燃烧技术以及燃煤品种等因素密切相关,计算中基于装机容量进行选取,其他污染物排放采用排放因子法(公式 5).

$$\mathrm{EF_{SO2}} = 2 \times S \times (1 - \mathrm{sr}) \tag{1}$$

$$\mathrm{EF_{PM}} = \mathrm{Aar} \times (1 - \mathrm{ar}) \times f_{\mathrm{PM}} \tag{2}$$

$$\mathrm{EF_{BC}} = \mathrm{EF_{PM2.5}} \times f_{\mathrm{BC}} \tag{3}$$

$$\mathrm{EF_{OC}} = \mathrm{EF_{PM2.5}} \times f_{\mathrm{OC}} \tag{4}$$

式中:S 为平均燃煤收到基硫分;sr 为硫分进入底灰比例;Aar 为平均燃煤收到的基灰分;ar 为灰分进入底灰比例;f_{PM} 为排放源产生某粒径范围颗粒物(如 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10})占总颗粒物比例;f_{BC} 和 f_{OC} 分别是 BC 和 OC 占 $PM_{2.5}$ 比例.

$$E = A \times \mathrm{EF} \times (1 - \eta) \tag{5}$$

式中:A 为第四级排放源对应的活动水平,对于点源,A 为逐条生产线活动水平;对于面源,A 为清单中最小行政单元活动水平;EF 为各污染物产生系数,单位为 g/kg;η 为污染控制技术对污染物的去除效率.

在 CO_2 排放中,本清单计算的是化石燃料燃烧中的 CO_2 排放量,CO_2 排放计算方法见公式(6).

$$E = \sum_{i=1}^{n} (\mathrm{FC}_i \times C_i \times \mathrm{OF}_i \times \frac{44}{12}) \tag{6}$$

式中:FC_i 为第 i 种化石燃料的消耗量;C_i 为收到基元素碳含量;OF_i 为碳氧化率.

结合各类排放源特征,分别对各类排放源排放因子选取进行阐述.

化石燃料固定燃烧源中电力、热力生产和供应业、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、储存运输源、生物质燃烧源、废弃物处理源、其他排放源的污染物产生系数依据《手册》进行选取,电力供热和工业燃烧源污染物排放系数来自《手册》,工艺过程源的污染物产生系数依据《手册》和文献中的排放因子测试结果进行选取,部分产品污染物排放系数见表 2.

表 1 重点行业典型企业名单

Table 1 List of typical enterprises in key industries

序号	行业	城市	序号	行业	城市
企业 1	钢铁	韩城	企业 17	电力	杨凌
企业 2	钢铁	渭南	企业 18	石化与化工	咸阳
企业 3	钢铁	宝鸡	企业 19	石化与化工	渭南
企业 4	钢铁	韩城	企业 20	石化与化工	渭南
企业 5	钢铁	汉中	企业 21	热力供应	西安
企业 6	焦化	宝鸡	企业 22	热力供应	韩城
企业 7	焦化	渭南	企业 23	热力供应	西安
企业 8	焦化	韩城	企业 24	工业涂装	西安
企业 9	焦化	韩城	企业 25	水泥	安康
企业 10	焦化	延安	企业 26	水泥	汉中
企业 11	电力	宝鸡	企业 27	陶瓷	韩城
企业 12	电力	西安	企业 28	化工化纤	西安
企业 13	电力	榆林	企业 29	化工化纤	安康
企业 14	电力	延安	企业 30	化工化纤	榆林
企业 15	电力	汉中	企业 31	医药制造	汉中
企业 16	电力	商洛	企业 32	其他工业	商洛

化石燃料固定燃烧源结合公式(1−5)计算污染物排放量.工艺过程源、农业源、其他排放源结合公式(5)计算污染物排放量.

道路移动源结合公式(7)计算污染物排放量,非道路移动源结合公式(8)计算污染物排放量.

$$E = P \times \mathrm{EF} \times \mathrm{VKT} \tag{7}$$

式中:P 是机动车保有量;EF 是基于行驶里程排放因

子;VKT 是年均行驶里程.

$$E = A \times \mathrm{EF} \tag{8}$$

式中:A 为第四级排放源对应的活动水平.对于飞机,A 为起飞着陆循环次数;对于其他非道路移动源,A 为燃油消耗量;EF 为污染物排放系数.

溶剂使用源结合公式(9)计算污染物排放量.

$$E = Q \times \mathrm{EF} \tag{9}$$

式中:Q 为油墨、燃料、建筑涂料表观、家电、机床设备、农药施用量等产品消费量或产量;EF 为生产或消费单位产品对应的 VOCs 排放因子.

扬尘源分别结合道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘和土壤扬尘污染物排放量计算公式(10~13)进行估算.

$$W_{Ri} = E_{Ri} \times L_R \times N_R \times (1 - \frac{n_r}{365}) \times 10^{-6} \tag{10}$$

式中:W_{Ri} 为道路扬尘源中颗粒物 PM_i 的总排放量,t/a;E_{Ri} 为道路扬尘源中 PM_i(空气动力学粒径在 0~iμm 间的颗粒物,下同)平均排放系数,g/(km•辆);LR 为道路长度,km;NR 一定时期内车辆在该段道路上的平均车流量,辆/a;n_r 为不起尘天数,通过实测(统计降水造成的路面潮湿的天数)得到;本次工作中采用一年中降水量大于 0.25mm/d 的天数表示.

$$W_{Ci} = E_{Ci} \times A_C \times t \tag{11}$$

式中:W_{Ci} 为施工扬尘源中 PM_{10} 总排放量,t;E_{Ci} 为施工扬尘源中 PM_{10} 的排放速率,t/(m^2•h);A_C 为施工区域面积,m^2;t 为工地施工小时数,h.$PM_{2.5}$ 和 TSP 的排放量基于 PM_{10} 排放结果使用粒度乘数进行估算.

$$W_Y = \sum_{i=1}^{m} E_h \times G_{Yi} \times 10^{-3} + E_w \times A_Y \times 10^{-3} \tag{12}$$

式中:W_Y 为堆场扬尘源中颗粒物总排放量,t/a;E_h 为堆场装卸运输过程的扬尘颗粒物排放系数,kg/t;m 为每年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;E_w 为料堆受到风蚀作用的颗粒物排放系数,kg/m^2;A_Y 为料堆表面积,m^2.

表 2　工艺过程源污染物排放系数(g/kg 产品)

Table 2　Emission factors of pollutants from technologyprocess sources (g/kg product)

产品	技术	SO_2	NO_x	CO	VOCs	$PM_{2.5}$	PM_{10}	BC	OC
铸铝件	不分技术	0	0	—	—	1.88[40]	2.62[40]	—	—
铸铁件	不分技术	0.18	0.21[42-43]	—	—	3.31[37-38]	4.2[37-38]	—	—
铜铸件	不分技术	0.12	0.2[42-43]	—	—	2.15	3	—	—
氧化铝	不分技术	0.22	0.61	—	—	2.5	2.647	—	—
镀件	—	0	0	—	—	0.27	0.3	—	—
其他有色冶炼	—	0	0.18	—	—	3.87	5.4	1.79	—
焦炭	机械炼焦	1.08	1.7	1.6[45]	2.96	5.22[44]	8.79[44]	1.57	1.83
焦炭	土法炼焦	2.79	1.7	15.60	5.36	5.22	8.79	1.57	1.83
水泥	不分技术	0.16	1	3.7	0.04	2.22[39]	3.5[39]	0	0
橡胶	不分技术	0	0	0	7.17	0	0	0	0
陶瓷	不分技术	2.23	5[41]	0	29.22	0.67	2.43	0	0
玻璃制品	不分技术	0	0	0	0.4	2.94	3.07	0	0
石灰	不分技术	0.34	0.2	30.95	0.18	1.4	13.4	0.03	0.01
泡沫塑料	不分技术	0	0	0	770	0	0	0	0
医药制造	不分技术	0	0	0	8	0	0	0	0

注:数据来源于《城市大气污染源排放清单编制技术手册》,以及文献[37−45].

$$W_{Si} = E_{Si} \times A_S \tag{13}$$

式中:W_{Si} 为土壤扬尘中 PM_i 排放总量,t/a;E_{Si} 为土壤扬尘源的 PM_i 排放系数,t/(m^2•a);A_S 为土壤扬尘源的面积,m^2.

储存运输源结合公式(14)计算污染物排放量.

$$E_{i,j} = \sum_m \mathrm{EF}_{i,j,m} \times Q_{i,j} \tag{14}$$

式中:i 为油气储运源的排放子源;j 为各市;m 代表第三级排放源的技术和工艺;EF 为排放源可挥发性有机物实际排放系数;Q 为油气运输量或储存量.

生物质燃烧源结合公式(5)和(8)计算污染物排放量.

废弃物处理源结合公式(8)计算污染物排放量.

重点行业活动水平数据调研主要基于公开资料调研、管理部门调研、典型企业现场调研等多途径获取,并采用“自上而下”和“自下而上”相结合,多

源数据融合、交叉验证的方式构建完善的活动水平数据库.其中,重点行业现场调研时,针对典型企业的全部工艺工序过程进行现场调研和实地勘察,逐工艺设备、生产工序收集重点行业企业的产排污相关数据,包括企业生产规模、生产工序组成、生产工艺设备、原燃料使用量和成分、产品产量、物料平衡、排放单元、污染治理设备参数、排放监测数据等,并和部门调研资料进行充分对比核实,以确保活动水平数据获取的合理性、准确性.

排放因子的选择,本研究中首先基于陕西省污染源基础数据,结合区域发展水平和污染源特征,优先选择本地基于实测的排放因子、国家清单编制指南给出的排放因子,以确保排放因子的合理性和本地化代表性.同时收集科技文献《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》、《美国环境保护总署推荐的 AP-42 排放系数手册推算》调研、权威排放因子数据共享、文献调研等方式获取各类污染源的排放系数.

1.3 数据来源

1.3.1 化石燃料固定燃烧源 电力供热行业以机组为单位获取活动水平数据,获取的活动水平数据包括企业基本信息、排污设施经纬度、各机组的装机容量、锅炉类型、燃料类型、逐月发电量/供热量、年燃料消耗总量和逐月燃料消耗量、硫分、灰分、污染物控制设施类型、投运率、去除效率等.工业锅炉以设备为单位收集活动水平数据,获取的信息包括企业基本信息、行业类别、排污设施经纬度、各锅炉设备的燃料类型、锅炉类型、燃料消耗量、燃料消耗逐月信息、灰分、硫分、污染控制设施类型、投运率、去除率等.

1.3.2 工艺过程源 工艺过程源主要包括黑色金属冶炼行业、有色金属冶炼行业、石化与化工行业、建材行业以及其他工业等,综合采用城市污染源部门调研数据、2022 年环境统计数据等多源数据,获取重点工业企业逐企业的污染源基本信息、活动水平及行业和企业生产设施类型、生产规模、产品产量及原、辅料使用信息、末端管控措施及效率等.

1.3.3 移动源 移动源包括道路移动源和非道路移动源,道路移动源车辆技术分布情况来自环境统计数据截止到2022年12 月31 日注册机动车信息,其中车型需覆盖大型客车、中型客车、小型客车、微型客车、重型货车、中型货车、轻型货车、微型货车、低速货车、三轮汽车、轻便摩托车和普通摩托车等 12 类.非道路移动机械包括工程机械、农业机械、船舶、小型通用机械、铁路内燃机和飞机.工程机械保有量数据基于部门调研获取,工程机械燃油消耗量从陕西省能源平衡表中获取,并根据工程机械保有量将燃油消耗量分配至各城市.农业机械分城市保有量和耗油量数据从统计年鉴调研获取.船舶数据来自 2022 年统计年鉴中提供省内、省际船舶公司客货运船舶调查表(水路客货运周转率).铁路内燃机数据来自陕西省统计年鉴,根据工程机械保有量分配至各城市.机场活动水平数据来自中国民航局发布的 2022 民航机场飞机起降次数.民航飞机起飞着陆循环次数基于起降架次获取,一次起飞着陆循环等于两个起飞架次,起降架次从民用航空管理部门获取.

1.3.4 溶剂使用源 溶剂使用源包括印刷印染、表面涂层、农药使用和其他溶剂使用.溶剂使用源中印刷印染企业生产设施类型、生产规模、产品产量及原、辅料使用信息、含挥发性有机物的溶剂使用量等数据来自陕西省2022年环境统计数据.表面涂层按照涂层施用对象分为建筑涂料、汽车喷涂和其他表面涂层.建筑涂料分为建筑内墙涂料和建筑外墙涂料;其他表面涂层包括饮料罐涂层、漆包线涂层、金属家具涂层、家电涂层、装修木器、木制家具、机床涂层、设备制造涂层等.表面涂层企业生产设施类型、生产规模、产品产量及原、辅料使用信息、含挥发性有机物的溶剂使用量等来自陕西省2022年统计年鉴.针对表面涂层中建筑涂料使用消耗数据,主要采用2022年陕西省统计年鉴和陕西省住建厅等提供的建筑面积进行折算,获取陕西省建筑涂料中内外墙涂料等消耗数据.农药使用活动水平来自陕西省农业农村厅部门调研数据.其他溶剂使用源中活动水平主要为人口数据和汽修、干洗企业数量,主要采用2022年陕西省统计年鉴和陕西省市场监管局等提供的常驻人口数据和汽修、干洗企业数量,沥青铺路量的数据从陕西省公路局获取,包括各城市的沥青铺路的道路长度、宽度和铺设厚度或层数.

1.3.5 农业源 农业源包括氮肥施用、畜禽养殖、人体粪便、土壤本底、固氮植物和秸秆堆肥,农业源

活动水平数据来自陕西省 2022 年统计年鉴及陕西省农业农村厅部门调研数据.

1.3.6　扬尘源　扬尘源包括道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘和土壤扬尘,道路扬尘源活动水平数据按面源方式获取.排放计算需要的活动水平数据包括分城市各类型道路长度以及对应的车流量信息,数据来自陕西省 2022 年统计年鉴及陕西省住房和城乡建设厅部门调研数据.

1.3.7　储存运输源　储存运输源活动水平数据主要来源陕西省统计年鉴和交通运输厅提供的数据,其中储油库、加油站活动水平按照陕西省统计年鉴中汽柴油消耗量和公开资料、机动车保有量等数据获取,并按照各地市机动车保有量数据进行分配获取,油罐车活动水平按照陕西省交通运输厅提供天然气、汽油、柴油等运输量获取.

1.3.8　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,生物质锅炉企业的燃料类型、燃料年用量、燃煤收到基灰分、硫分和治理措施等来自 2022 年环境统计和 2022 年陕西省锅炉统计汇总表.生物质炉灶按面源收集活动水平,燃料消耗信息主要来自陕西省农业厅、2022 年陕西省统计年鉴等,计算陕西省 2022 年秸秆、薪柴等生物质能源信息.生物质开放燃烧秸秆产生量从农业农村厅获取.

1.3.9　废弃物处理源　废弃物处理源包括污水处理、固体废弃物处理和烟气脱硝,其中,污水处理活动水平来自住房和城乡建设厅,固废处理活动水平来自陕西省生态环境厅.

1.3.10　其他排放源　餐饮油烟活动水平是烟气排放量,全省各市不同规模餐饮企业灶头数及餐饮油烟净化措施数据来自陕西省市场监管局.

陕西省电力、工业、交通、扬尘、农业、生活等污染源活动水平数据见图 1.

1.4　数据一致性分析

活动水平数据中主要产品产量及施工面积、机动车保有量数据与环境统计和统计年鉴数据之间的对比如表 3 所示.本研究经过现场调研核实以及部门调研后的活动水平数据中,生铁产量、粗钢产量、水泥产量、机动车保有量与统计年鉴的差异比例在 10%以内,本研究采用经现场调研和部门调研后与环境统计结合的数据进行计算.对于平板玻璃,本研究按照环境统计数据进行计算.对于误差较大的焦炭产量,本研究主要使用经现场调研和环境统计结合的数据,由于环统数据中产品分类、产品单位与标准统计的产品名称及单位有一定区别,在归类产品及单位换算过程中会存在一定误差.

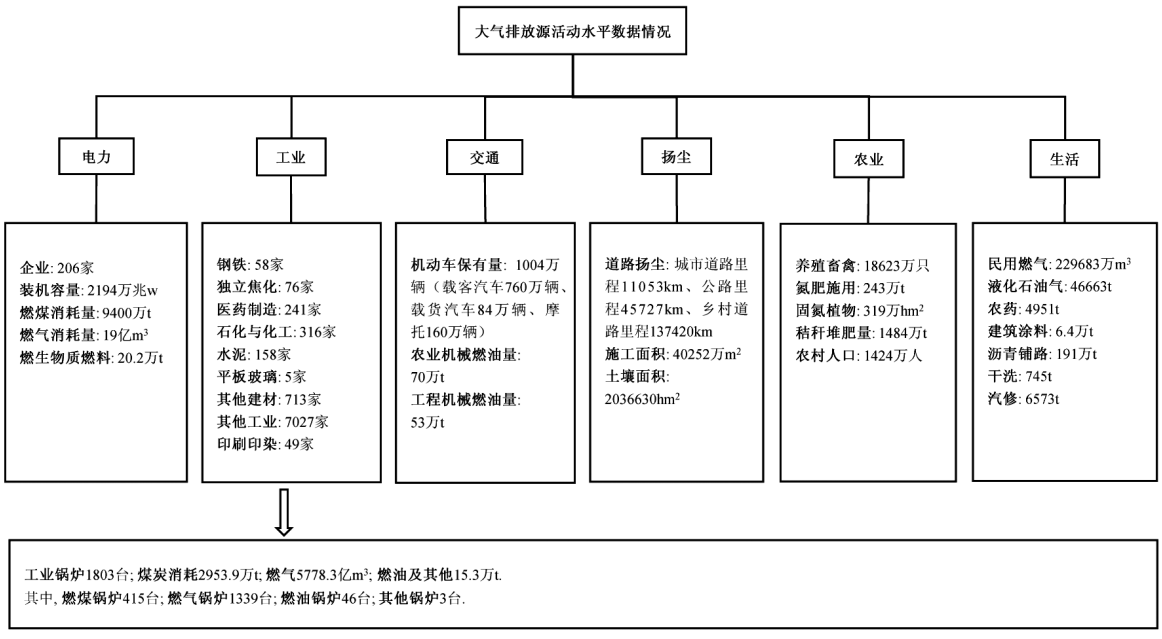


图 1　陕西省电力、工业、交通、扬尘、农业、生活等污染源活动水平数据

Fig.1　Activity level data for electricity generation, industry, transportation, dust, agriculture, and domestic sources in Shaanxi Province

表 3 主要活动水平数据对比

Table 3 Comparison of data on major activity levels

活动水平	2022 年环境统计数据	本研究数据	2022 年统计年鉴数据	本研究活动水平数据与环境统计和统计年鉴的差异比例
生铁产量(万 t)	90	1103	1188	−7.1%~1125%
粗钢产量(万 t)	1209	1422	1475	−3.6%~17.6%
平板玻璃(万 t)	128	128	108	0~18.5%
水泥产量(万 t)	5280	6824	6553	4.1%~29.2%
焦炭产量(万 t)	3059	3604	4735	−23.4%~17.8%
施工面积(万 m^2)	−	40252	40252	0
机动车保有量(万辆)	−	1004	1060	−5.2%

2 结果与讨论

2.1 陕西省大气污染物和 CO_2 排放清单

基于上述数据和计算方法得到陕西省 2022 年大气污染物和 CO_2 排放清单(表 4).SO_2 排放总量为 64.0×10^3t,NO_x 排放总量为 31.2×10^4t,CO 排放总量为 19.3×10^5t,VOCs 排放总量为 21.5×10^4t,NH_3 排放总量为 34.0×10^4t,PM_{10} 排放总量为 67.9×10^4t,$PM_{2.5}$ 排放总量为 20.8×10^4t,BC 排放总量为 11.7×10^3t,OC 排放总量为 24.0×10^3t,CO_2 排放总量为 33.1×10^7t.

2.2 排放源贡献率分析

图 2(a)展示了主要排放源的排放贡献率.化石燃料固定燃烧源是 SO_2 的首要排放贡献源,占 SO_2 排放总量的 54%;移动源是 NO_x 和 BC 的首要贡献源,分别占 NO_x 和 BC 排放总量的 65%和 42%;溶剂使用源是 VOCs 的首要贡献源,占 VOCs 排放总量的 32%;农业源是 NH_3 的首要贡献源,占 NH_3 排放总量的 92%;扬尘源是 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的首要贡献源,分别占 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放总量的 74%和 48%;生物质燃烧源是 OC 的首要贡献源,占 OC 排放总量的 54%.

从图 2(b)污染物排放的角度分析,在化石燃料固定燃烧源中,电力供热为 SO_2、NO_x、CO、$PM_{2.5}$ 排放的首要来源,占化石燃料固定燃烧源中 SO_2、NO_x、CO、$PM_{2.5}$ 排放的比例分别为 48%、64%、72%、39%.

图 2(c)工艺过程源 SO_2 排放量主要来自焦化、水泥行业,占工艺过程源 SO_2 排放量的 49%、11%;NO_x 排放量同样主要来自焦化、水泥行业,占工艺过程源 NO_x 排放量的 40%、35%;CO 主要来自钢铁、水泥、陶瓷、砖瓦等建材行业,钢铁行业 CO 排放量占工艺过程源总量的 51%,建材行业 CO 排放量占工艺过程源总量的 40%;VOCs 主要来自焦化行业,占工艺过程源 VOCs 排放量的 52%;TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 主要来自钢铁、建材、焦化行业,钢铁行业 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排放量分别占工艺过程源总量的 30%和 37%;BC、OC 主要来自焦化行业,焦化行业对工艺过程源 BC、OC 排放贡献分别为 61%、49%.焦化行业 SO_2、NO_x、VOCs、BC、OC 的排放在工艺过程源中占比在 40%~61%范围内,而企业数量占工艺过程源企业总数的 5%左右,呈现单家企业排放量高的情况.可见,陕西省工艺过程源中重点控制的行业为焦化、建材(水泥、陶瓷、砖瓦等)、石化与化工、钢铁等.

表 4 陕西省 2022 年大气污染物和 CO_2 排放清单(t)

Table 4 Emission inventory of atmospheric pollutants and CO_2 of Shaanxi Province in 2022 (t)

排放源	SO_2	NO_x	CO	VOCs	NH_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC	CO_2
固定燃烧源	34536	70936	262396	8239	130	47935	20950	54	20	224714451
工艺过程源	19379	31185	1075307	65811	0	86892	52847	3448	5050	58093143
移动源	5577	203619	384915	50684	3678	8803	8263	4909	1748	41968339
溶剂使用源	0	0	0	52993	0	0	0	0	0	0
农业源	0	0	0	0	313519	0	0	0	0	0
扬尘源	0	0	0	0	0	505349	98931	0	0	0
储存运输源	0	0	0	3507	0	0	0	0	0	0
生物质燃烧源	4520	5634	204481	27857	3767	22242	21037	3175	12846	5908026
废弃物处理源	10	797	140	78	19318	90	61	1	5	52406
其他排放源	0	0	0	5363	0	7661	6129	124	4290	0
总计	64022	312171	1927239	214533	340412	678971	208217	11712	23958	330736365

根据图 2(d)道路移动源中各类型机动车的排放贡献来看,重型载货汽车是 SO_2,NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的主要排放源,分担率分别为 62%,61%和 42%;SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放的第二大来源是小型客车,排放占比分别是 20%和 21%;NO_x 的第二大排放来源是轻型货车,排放占比 17%.小型载客汽车是

VOCs 和 CO 的主要排放源,排放分担率分别为 55%和 59%.

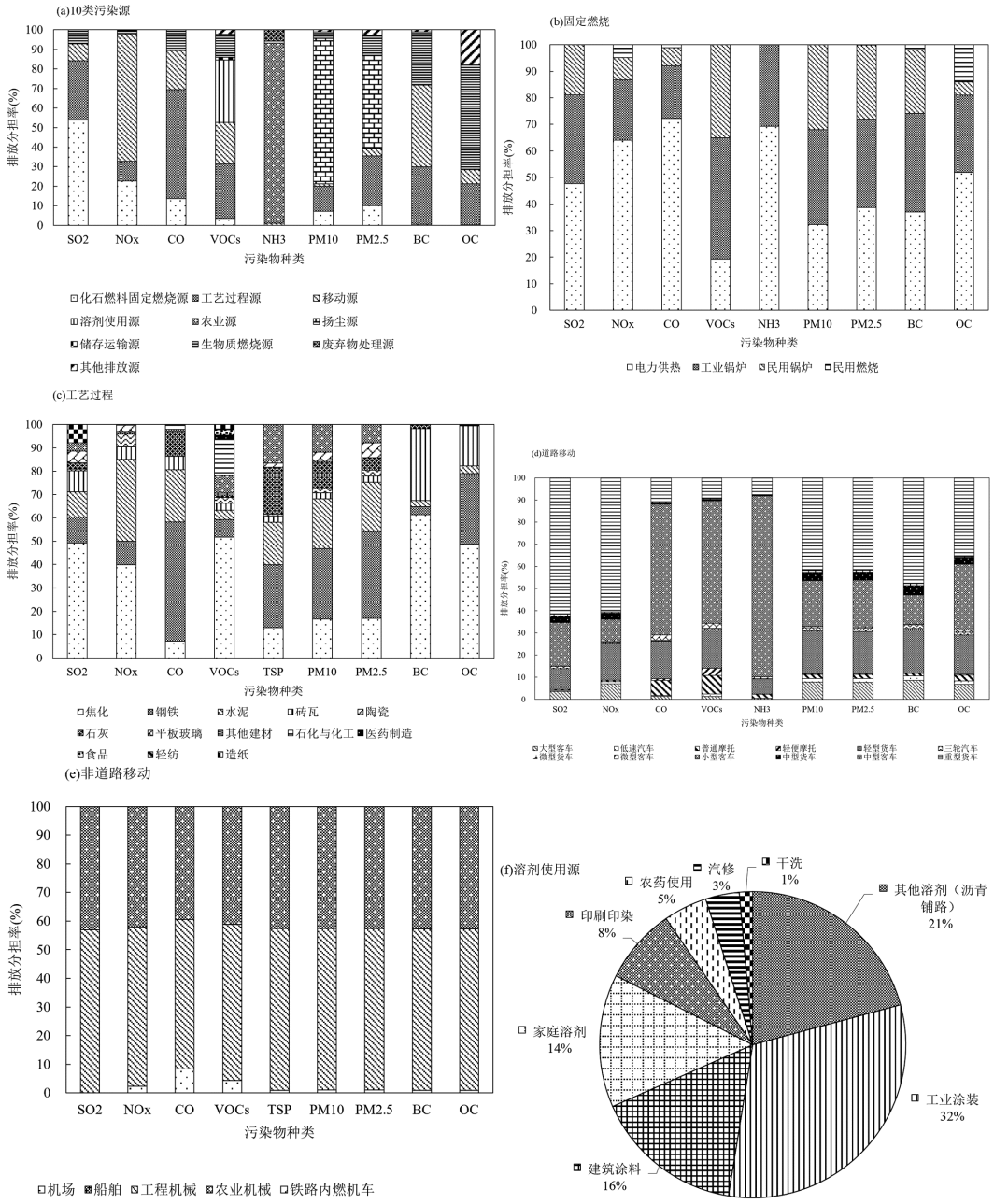


图 2　陕西省主要污染源大气污染物排放分担率

Fig.2　Sharing ratios of atmospheric pollutant emissions from major sources in Shaanxi Province

由图 2(e)可以看出,工程机械是陕西省非道路移动源中污染物排放的主要贡献源,在各类污染排放中占比分别在 52%~57%范围内,其次是农业机械,在各类污染排放中占比分别在 39%~43%范围内.机场、船舶和铁路内燃机各污染物排放在非道路移动源中占比较小.

图 2(f)溶剂使用源中工业涂装、沥青铺路、建筑涂料、家庭溶剂、印染印刷、农药使用、汽修、干洗排放分别占溶剂使用源 VOCs 排放总量的 32%、21%、16%、14%、8%、5%、3%和 1%.

2.3　城市排放分布特征

由图 3 陕西省各市各污染源 SO_2、NO_x、VOCs、$PM_{2.5}$、BC、OC 排放情况可知,榆林的化石燃料固定燃烧源、工业源、交通源的排放贡献突出.西安、榆林、延安、渭南的溶剂使用源的排放贡献较高.同时,西安的交通源的排放贡献突出,榆林、西安、

韩城扬尘源贡献突出.渭南生物质燃烧排放的贡献相对突出.

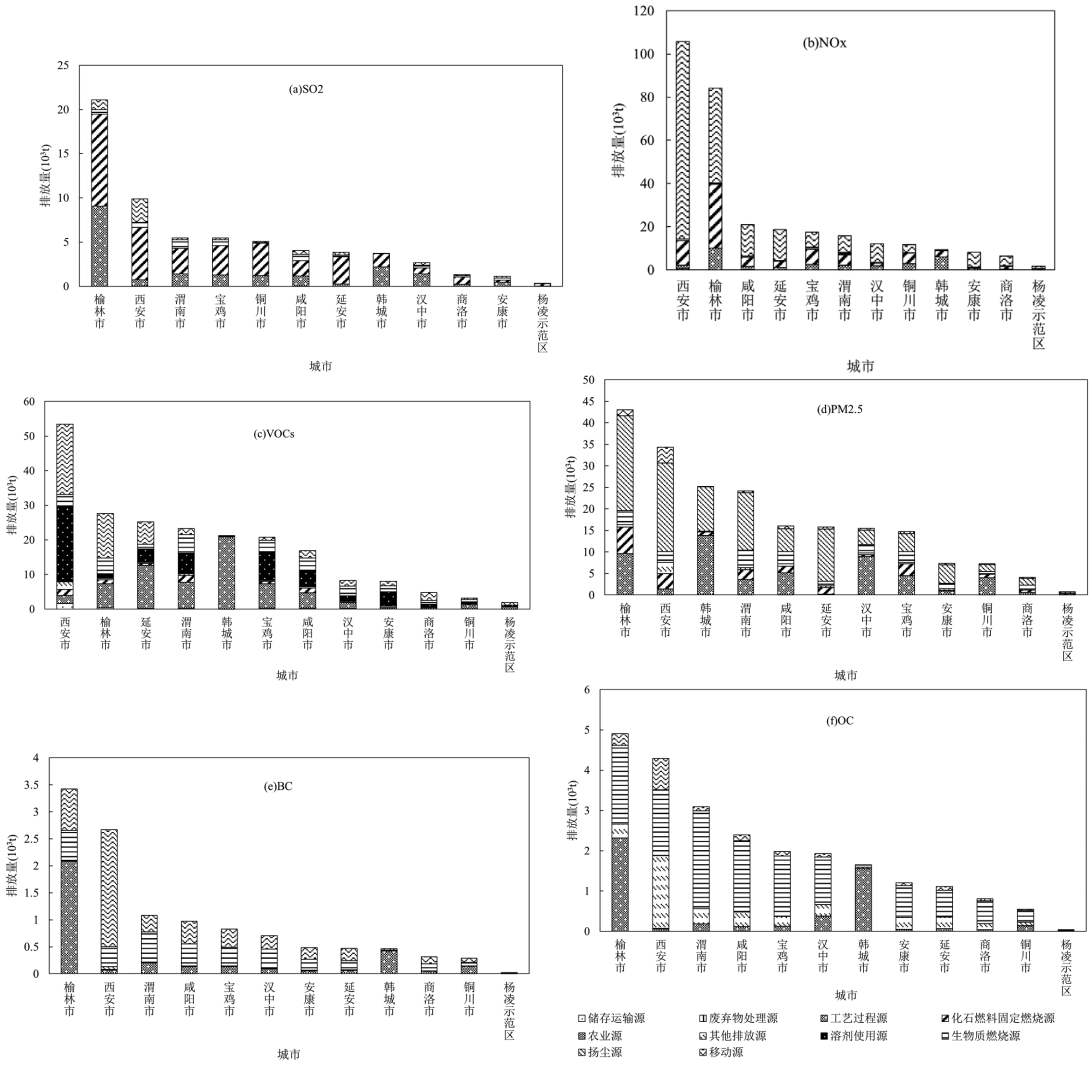


图 3 各市各污染源主要污染物排放量

Fig.3 Emissions of major pollutants from various sources in each municipalities

榆林、西安和渭南是主要的 SO_2 排放城市,SO_2 排放量分别为 21089,9866,5485t,分别占全省 SO_2 总排放的 33%、15%和 9%.西安、榆林和咸阳是主要的 NO_x 排放城市,NO_x 排放量分别为 105692,84155,21001t,分别占全省 NO_x 总排放的 34%、27%和 7%.西安、榆林和延安是主要的 VOCs 排放城市,VOCs 排放量分别为 53398,27669,25175t,分别占全省 VOCs 总排放的 25%、13%和 12%.榆林、西安和韩城是主要的 $PM_{2.5}$ 排放城市,$PM_{2.5}$ 排放量分别为 43027,34333,25171t,分别占全省 $PM_{2.5}$ 总排放的 21%、16%和 12%.榆林、西安和渭南是主要的 BC 排放城市,BC 排放量分别为 3421,2670,1082t,分别占全省 BC 总排放的 29%、23%和 9%.榆林、西安和渭南是主要的 OC 排放城市,OC 排放量分别为 4907,4290,3093t,分别占全省 OC 总排放的 20%、18%和 13%.

整体而言,陕西省主要污染物排放主要集中在关中地区(西安、咸阳、铜川、渭南、宝鸡、韩城、杨凌示范区),其次是陕北地区(榆林、延安),陕南地区(商洛、汉中、安康)各污染物排放占全省的比例较小,主要原因在于关中地区企业数量最多,主要为电力、水泥和建材行业,此外,该地区是陕西省乃至中国西北地区的经济中心,工业发达,交通流量高,人口密度高,主要污染物排放在全省占比较大,污染物排放聚集在西安、渭南、咸阳、宝鸡;陕北地区污染排放以工业为主,主要为电力、焦化、石化与化工行

业,污染物排放聚集在榆林市;陕南地区各污染物排放占比较小,主要为电力、水泥和建材行业.

2.4　工业企业污染物排放特征

从图 4 行业分布情况来看,榆林工业企业 SO_2 排放主要来自电力企业和焦化企业,分别排放了 7166 和 8363t;铜川工业企业 SO_2 排放主要来自水泥企业,排放了 2551t;渭南工业企业 SO_2 排放主要来自电力、水泥企业,分别排放了 1207 和 1066t.榆林市 SO_2 排放占全省工业企业总量的 41%,渭南市和铜川市 SO_2 排放量分别占全省工业企业总量的 9%,10%.榆林工业企业 NO_x 排放主要来自电力、焦化、石化与化工企业,分别排放了 22637,7913,5713t;韩城工业企业 NO_x 排放主要来自电力、焦化、其他建材企业,分别排放了 2752,2524,1433t;宝鸡工业企业 NO_x 排放主要来自电力、水泥企业,分别排放了 4314,2037t.榆林市 NO_x 排放占全省工业企业总量的 42%,宝鸡市、韩城市、西安市 NO_x 排放量分别占全省工业企业总量的 10%、9%、9%.韩城工业企业 VOCs 排放主要来自焦化和钢铁企业,分别排放了 16601,3982t;西安工业企业 VOCs 排放主要来自工业涂装、印刷印染、其他工业企业,分别排放了 10486,4227,1372t;延安工业企业 VOCs 排放主要来自焦化、石化与化工企业,分别排放了 7199,5177t;宝鸡工业企业 VOCs 排放主要来自焦化、工业涂装企业,分别排放了 3637,3594t.韩城市 VOCs 排放占全省工业企业总量的 22%,西安市、延安市、宝鸡市 VOCs 排放量分别占工业企业总量的 18%、13%、13%.榆林工业企业 $PM_{2.5}$ 排放主要来自焦化、电厂、石化与化工工业企业,分别排放了 7351,3134,2670t;韩城工业企业 $PM_{2.5}$ 排放主要来自钢铁、焦化企业,分别排放了 11874,1178t;汉中工业企业 $PM_{2.5}$ 排放主要来自钢铁、水泥企业,分别排放了 7505,935t;宝鸡工业企业 $PM_{2.5}$ 排放主要来自水泥、其他建材、电力企业,分别排放了 2904,2112,1070t.榆林市 $PM_{2.5}$ 排放占全省工业企业总量的 23%,韩城市、汉中市、宝鸡市 $PM_{2.5}$ 排放量分别占全省工业企业总量的 21%、14%、9%.

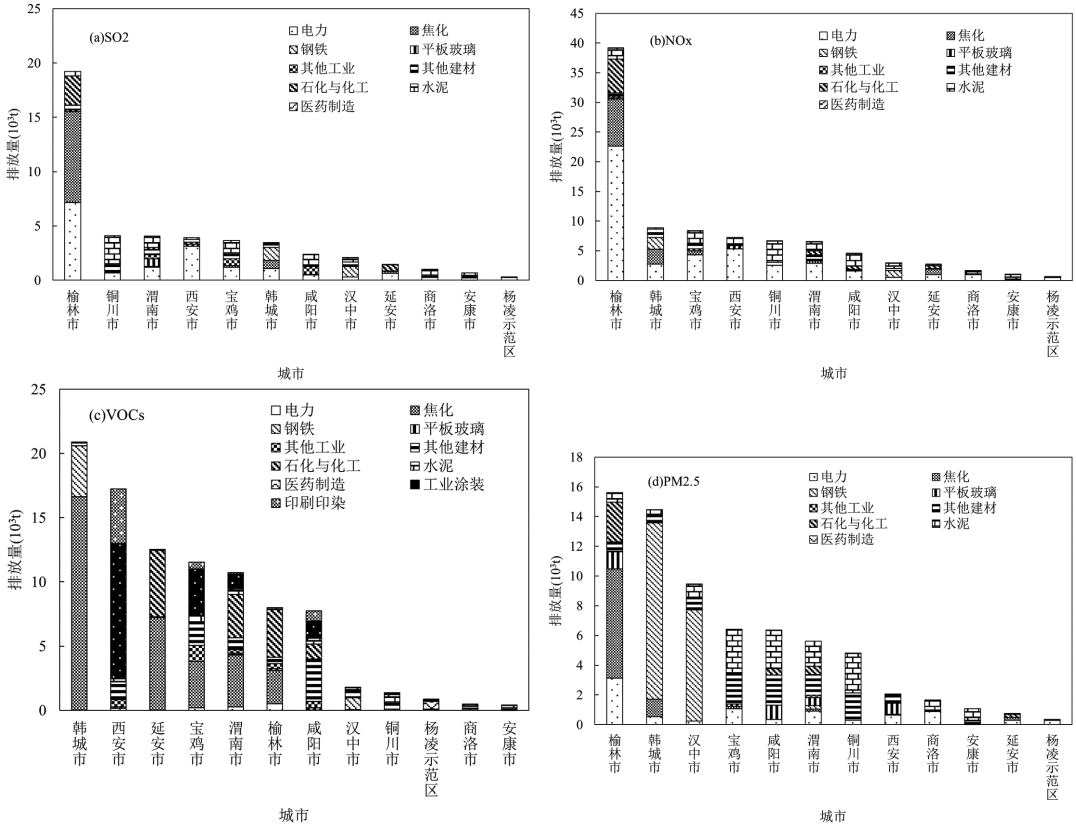


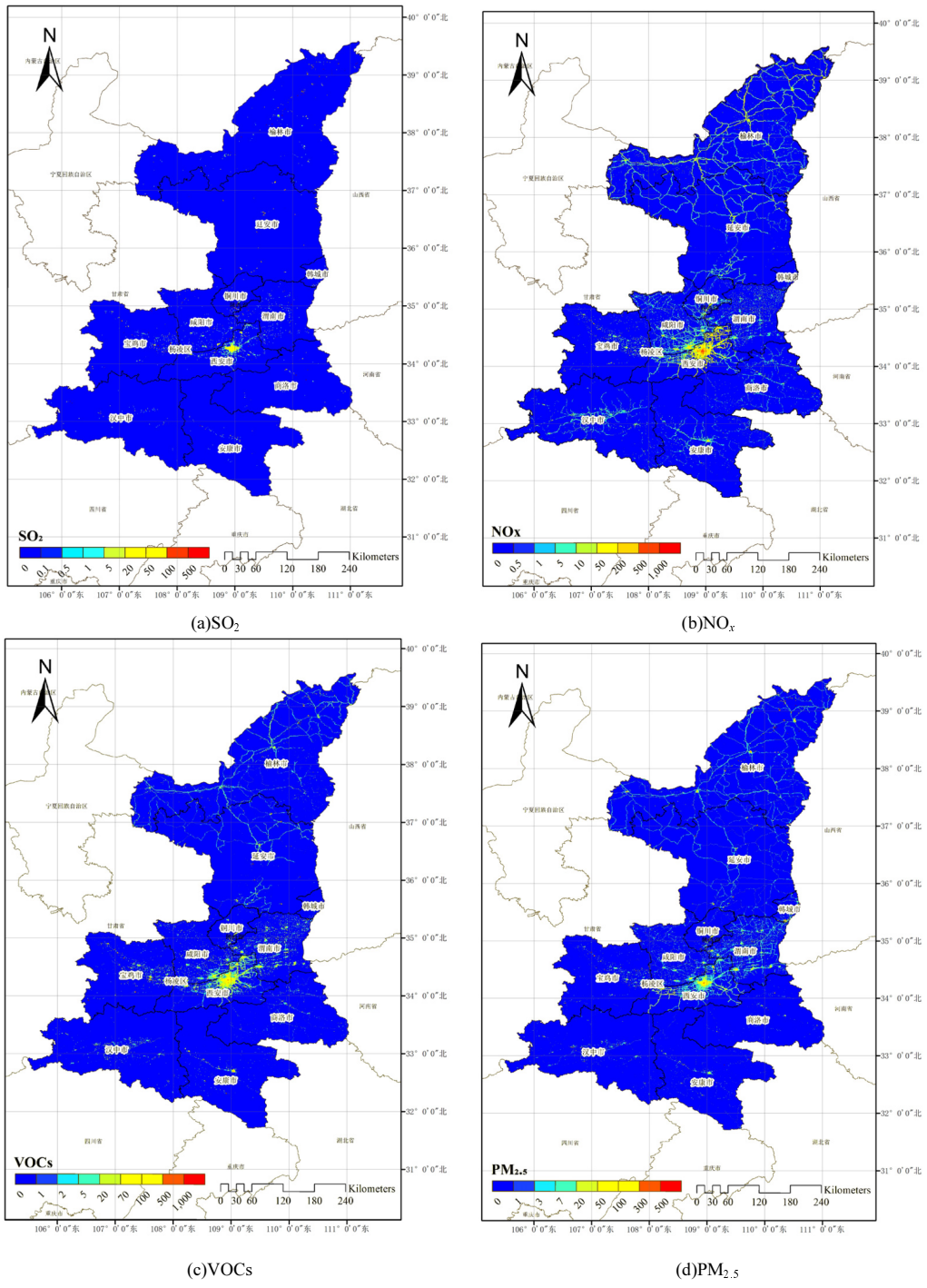
图 4　各市工业企业主要污染物排放量

Fig.4　Emissions of major pollutants from industrial enterprises in each municipalities

2.5　人为源主要大气污染物排放空间分布

对 SO_2、NO_x、VOCs 和 $PM_{2.5}$ 这 4 种常规的大

气污染物进行空间分布分析发现(图 5),SO_2 高值主要集中在榆林市北部、西安市中部、渭南市南部,榆林市有较多的电厂.NO_x 高值在西安市、榆林市和咸阳市南部.VOCs 高值在西安市、延安市西部和渭南市.$PM_{2.5}$ 高值在榆林市北部、西安市北部、韩城市和渭南市西部.



(a)SO_2 (b)NO_x

(c)VOCs (d)$PM_{2.5}$

图 5 陕西省人为源主要大气污染物排放空间分布

Fig.5 Spatial distribution of major atmosphericpollutant emissions from anthropogenic sources in Shaanxi Province

2.6 清单结果比较

为说明本研究清单结果的可靠性,本研究收集了陕西省近年来相关研究结果,并进行了结果比对,见表 5,并结合近年来的政策实施效果进行分析,探讨不同污染物排放变化的可能原因.结果显示,2022 年陕西省 SO_2 和 NO_x 排放量与 2020 年的排放量结

果相近,2016~2017 年排放结果存在一定差异.其中 2022 年 SO_2 排放量较 2016 年和 2017 年显著下降,表明近年来《“打赢蓝天保卫战”三年行动计划》[48]、《陕西省人民政府关于印发铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案》[8]等政策中提出的拆改燃煤锅炉、燃煤脱硫、锅炉整治、散煤治理等措施实施效果良好,有效推动了 SO_2 排放强度的持续下降;相较之下,2022 年 NO_x 排放量无明显的降低趋势,甚至略高于 2017 和 2020 年排放,这一现象主要与移动源排放的持续增长有关:陕西省 NO_x 排放主要来自移动源,近年来随着城镇化水平提高和交通基础设施的快速发展,陕西省机动车保有量大幅增加,车辆尾气排放导致 NO_x 排放量增加,尽管工业锅炉低氮燃和脱硝装置等到了广泛推广,工业 NO_x 排放得到一定控制,但是移动源排放的快速增长在一定程度上抵消了该部分减排量,导致 NO_x 排放仍然出现升高.

表 5　不同年份陕西省大气污染物与 CO_2 排放量结果对比 (万 t)

Table 5　Comparison of atmospheric pollutants and CO_2 emissions in Shaanxi Province in different years (10^4t)

年份	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$	VOCs	CO_2	文献
2016	15.66	12.7	/	/	/	/	[46]
2017	23.8	28.5	22.3	10.2	/	/	[47]
2020	9.4	26.6	/	/	16.18	30700	[46]
2022	6.4	31.2	67.9	20.8	21.5	33100	本研究

颗粒物方面,本研究中 2022 年颗粒物排放较 2017 年大幅增加,其原因主要与统计数据有关.一般而言,颗粒物排放主要来自于扬尘,在 2017 年研究中,扬尘源仅考虑了建筑施工无组织扬尘和无组织扬尘面源,覆盖范围相对有限;而在本研究中的扬尘源总和考虑了道路扬尘、施工扬尘、裸土和堆场等多个类别,排放源分类更加全面、精细,因此计算结果较前人研究显著偏高,更具有准确性和代表性.

VOCs 方面,2022 年 VOCs 排放量和 2020 年排放量相比,稍有升高,分析其原因在于 2020 年 VOCs 排放量是基于第二次全国污染源普查所得,本研究较 2020 年相比,排放源核算更为全面,因此计算结果稍高.

此外,本研究中 2022 年 CO_2 排放量相较 2020 年前人研究中 CO_2 排放量增长了 2400 万 t,根据陕西省 2022 年统计年鉴数据显示,2022 年陕西省能源消费总量较 2020 年增长 16%,因此本研究中 2022 年 CO_2 排放量较 2020 年略微升高的趋势符合实际能源消费变化趋势,具有合理性.

由于目前国内外针对陕西省大气污染物排放情况的研究主要集中在较早年份,针对近年来排放情况的工作不足,且涉及污染物种类较少,因此本研究还将陕西省 2022 年大气污染物排放清单与 MEIC 清单中 2020 年陕西省大气污染物排放情况进行比较,进一步确保清单结果的可靠性,结果见图 6.

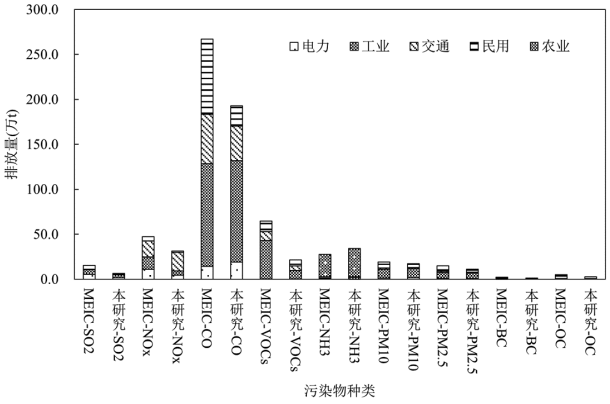


图 6　陕西省大气污染物排放清单结果对比

Fig.6　Comparison of the results of the air pollutant emission inventory in Shaanxi Province

工业部门:排放源类别包括工业燃烧源、工艺过程源和有机溶剂使用源(工业涂装、印刷印染);民用部门包括其他溶剂使用(含干洗)、民用锅炉、民用燃烧、餐饮油烟、加油站、农药使用、建筑涂料、油气储运、储油库、民用燃烧、汽修、生物质炉灶、生物质开放燃烧、废水处理、固废处理等二级源;交通部门:排放源类别包括道路移动源和非道路移动源

结果显示除了 NH_3 之外,MEIC 清单中其他污染物排放均高于本清单,主要原因一方面在于清单计算中获取的各类排放源活动水平数据不同,另一方面是排放因子选取的不一致.本研究中工业源企业名单、活动水平、污染控制措施及效率主要来自《2022 年陕西省环境统计数据》,其他面源活动水平信息主要来自陕西省 2022 年统计年鉴等,而 MEIC 清单年份为 2020 年,企业名单为 2017 年二污普企业名单,并未将近几年关停的企业进行删除,且治理设施信息未进行及时更新.

2.7　数据质控

数据质量控制流程旨在确保大气污染物及 CO_2 排放清单数据的准确性和可靠性,遵循分阶段递进式逻辑.在数据收集阶段,执行源数据三重核查:包括

(1)完整性检查,确保活动水平、排放因子等关键参数无缺失;(2)规范性验证,统一数据单位、时间范围及格式;(3)逻辑校验,识别矛盾数据(如煤炭消耗量不得超过能源总量).进入数据处理阶段,首先进行数据清洗,剔除重复记录并修正单位错误(如“万 t”误填为“t”);随后进行数据转化,标准化单位(如汽油消耗量 L 与 t 的转换)及计算方法(采用 IPCC 或省级指南公式).在异常值识别与处理环节,运用统计方法(箱线图、Z 分数、标准差)识别偏离行业均值、历史趋势或物理限值的异常数据,并建立明确处理路径:数据错误则溯源修正,技术合理则备注保留,无效值则替换为行业均值或模型估算值.为进一步验证数据质量,实施交叉验证,通过多源数据比对(如企业自报数据、统计年鉴、能源平衡表)来检验数据一致性.最后,形成审核与反馈闭环,重点审核钢铁、化工等高排放行业数据,并将异常值处理结果反馈至数据报送方确认,确保整个处理过程可追溯.该流程通过源头核查-技术处理-多方验证-反馈修正的闭环机制,有力保障了排放清单的准确性和可靠性.

2.8 不确定性分析

排放清单编制过程中,由于活动水平和排放因子获取方式不同,清单结果难以避免会存在不确定性.电力供热、工业企业活动水平来自现场调研、部门调研、2022 年环境统计等多源数据,数据来源较为可靠,不确定性较低;机动车保有量来自交通部门,数据较为可靠,不确定性较低;工程机械、农业机械活动水平数据来自陕西省能源平衡表和统计年鉴,并分配到各个城市,存在不确定性.溶剂使用源中工业涂装活动水平数据来自 2022 年环境统计数据,数据较为可靠,不确定性较低;其它污染源如农业、扬尘等活动水平数据分别来自统计年鉴及部门调研数据,数据较为可靠,不确定性较低.排放因子主要依据《手册》和现有文献,工艺过程源部分排放因子依据现有研究成果,由于工艺技术和末端控制技术水平的差异,存在一定的不确定性.

2.9 减污降碳协同效应分析

大气污染物和 CO_2 排放具有同根同源性,明晰陕西省不同措施对大气污染物和 CO_2 减排协同度,是确立减污降碳协同重点行业、筛选气候环境协同治理措施的关键[49].本研究通过讨论减污降碳措施的协同性来明确未来减污降碳实施路径,要避免片面追求治污效果而导致大量碳排放,增强污染治理与碳排放控制的协调性.一方面将环境污染物与温室气体的共同来源作为协同控制的重要落脚点;另一方面,以推进节能降耗、调整能源结构、优化产业结构、推动形成绿色生产生活方式等根源性、结构性措施作为主要抓手,实现减污与降碳源头减排相协同[50].定义大气污染物和 CO_2 的减排协同度为单位大气污染物减排量可实现的 CO_2 减排量,如公式(15)所示:

$$\mathrm{CER}=\frac{\mathrm{ER}_{m,\mathrm{CO_2}}}{\mathrm{ER}_{m,p}} \tag{15}$$

式中:CER 为大气污染物和 CO_2 减排协同度;m 为措施名称;p 为大气污染物类别;ER 为由措施 m 带来的 CO_2 或污染物 p 的减排量.

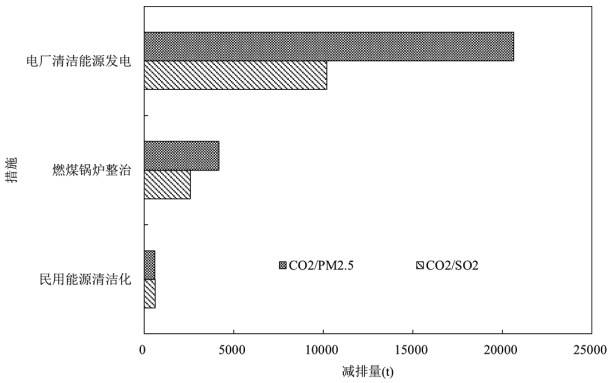


图 7 各措施每吨污染物减排协同的 CO_2 减排量

Fig.7 Synergistic CO_2 reduction amount achievedvia reduction of each ton of pollutants for each measure

经总结,陕西省多项减排措施中,脱硫脱硝技术、VOCs 末端治理技术等超低排放措施减少了相应污染物排放但增加能耗和间接 CO_2 排放;钢铁、水泥等高碳行业的 CCUS 技术单一碳减排但经济性不佳;燃气锅炉低氮燃烧改造显著降低工业 NO_x 排放和不完全燃烧产生的 VOCs,但能源消费总量不变仍会增加整体碳排放;电池生产和充电依赖高碳电力导致交通结构调整中的清洁能源替代矛盾.因而能源结构转型类措施的减污降碳协同效应优于工业过程优化、交通领域优化等措施.如图 7 所示,陕西省减污降碳效应最显著的措施有散煤整治(民用能源清洁化)、电厂清洁能源发电以及燃煤锅炉整治.电厂清洁能源发电、燃煤锅炉整治和民用能源清洁化措施中每吨的 $PM_{2.5}$ 减排分别可协同实现 20630t、

4176t、610t 的 CO_2 减排.电厂清洁能源发电、燃煤锅炉整治和民用能源清洁化措施中每吨的 SO_2 减排分别可协同实现 10208t、2593t、632t 的 CO_2 减排.电厂清洁能源发电措施具有最高的减污降碳协同效应,无论是 CO_2-$PM_{2.5}$ 还是 CO_2-SO_2 的协同减排效率均显著高于其他措施.从减污降碳的协同角度来看,应优先推动电厂清洁能源的转型,其次是加强燃煤锅炉的整治和民用能源清洁化的推广.

3　结论

3.1　2022 年陕西省人为源 SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC、OC 和 CO_2 排放总量分别为:64.0×10^3, 31.2×10^4, 19.3×10^5, 21.5×10^4, 34.0×10^4, 67.9×10^4, 20.8×10^4, 11.7×10^3, 24.0×10^3, 33.1×10^7t.其中,化石燃料固定燃烧源是 SO_2 的首要排放贡献源,移动源是 NO_x 和 BC 的首要贡献源,溶剂使用源是 VOCs 的首要贡献源,农业源是 NH_3 的首要贡献源,扬尘源是 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的首要贡献源,生物质燃烧源是 OC 的首要贡献源.

3.2　电力供热为固定燃烧源中除 VOCs 之外其它污染物排放的主要贡献源,焦化行业是工艺过程中 VOCs 排放的主要贡献源,钢铁、建材、焦化行业是工艺过程中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放的主要贡献源,重型载货汽车是移动源中 NO_x 排放的主要贡献源,沥青铺路和工业涂装是溶剂使用源中 VOCs 排放的主要贡献源.

3.3　陕西省人为源大气污染物排放主要集中在关中地区,其次是陕北地区,陕南地区各污染物排放占全省的比例较小.榆林、西安和渭南是主要的 SO_2、BC 和 OC 排放城市,西安、榆林和咸阳是主要的 NO_x 排放城市,西安、榆林和延安是主要的 VOCs 排放城市,榆林、西安和韩城是主要的 $PM_{2.5}$ 排放城市.从各城市行业分布来看,榆林、韩城电力和焦化行业是 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放的主要行业,渭南电力行业是 SO_2 排放的主要行业,宝鸡水泥行业是 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放的主要行业,西安工业涂装和印刷印染是 VOCs 排放的主要行业,延安焦化和石化与化工行业是 VOCs 排放的主要行业.

3.4　从减污降碳的协同角度来看,短期可通过优化燃煤电厂污染控制措施,中长期可通过提高可再生能源(如风能、太阳能、水电)和核能在电力生产中的占比;其次是加强燃煤锅炉的整治和民用能源清洁化的推广,加快淘汰高耗能、低效率的小型燃煤锅炉,推广高效锅炉和天然气锅炉.推广电采暖、天然气采暖等清洁能源取暖方式,特别是在农村地区,鼓励居民逐步减少散煤的使用.关中地区可对钢铁、化工等高耗能企业实施超低排放改造,推广余热回收、碳捕集(CCUS)技术.在西安、宝鸡等地布局新能源装备(氢能电池、光伏组件)等低碳产业.陕北地区可通过能源清洁高效利用、建设风光火储一体化等新能源基地,配套储能电站和绿氢项目,替代传统火电.陕南地区可通过推广生物质能(秸秆制沼气)、屋顶光伏,替代散煤和薪柴等措施实现清洁能源利用.

参考文献:

[1] 马　强,宫密秘,杨晓霞,等.嘉兴市人为源大气污染物排放清单研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):660-665.
Ma Q, Gong M M, Yang X X, et al. Air pollutants emission inventory of anthropogenic sources in Jiaxing [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(6):660-665.

[2] 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, 2003,108(D21):3001-3023.

[3] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009,9(14):5131-5153.

[4] 王书肖,邱雄辉,张　强,等.我国人为源大气污染物排放清单编制技术进展及展望 [J]. 环境保护, 2017,45(21):21-26.
Wang S X, Qiu X H, Zhang Q, et al. Developing anthropogenic air pollutant emission inventory in China: Progress and outlook [J]. Environmental Protection, 2017,45(21):21-26.

[5] 吴志军,王志立,张　强,等.气候协同的区域空气质量精细化调控战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022,24(6):164-172.
Wu Z J, Wang Z L, Zhang Q, et al. Strategical research on refined regulations for regional air quality with climate synergy [J]. Strategic Study of CAE, 2022,24(6):164-172.

[6] Zhao Y, Nielsen C P, Lei Y, et al. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(5):2295-2308.

[7] 陕西省生态环境厅.2023 年 12 月及 1~12 月全省环境空气质量状况[EB/OL].[2024-01-25].https://sthjt.shaanxi.gov.cn/xxgk/fdnr/hjzl/dqzl/202401/t20240125_2980274.html.
Department of Ecology and Environment of Shaanxi Province. Ambient air quality status of Shaanxi Province in December 2023 and January-December 2023[EB/OL].[2024-01-25].

[8] 陕西省人民政府.陕西省人民政府关于印发铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020 年)(修订版)的通知 [EB/OL]. [2018-12-11]. https://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/zfgb/2018_3966/d22q_3988/201812/t20181211_1637789.html.

People's Government of Shaanxi Province. The People's Government of Shaanxi Province issued the notice on the revised three-year action plan for winning the blue sky war through iron-fisted smog control (2018-2020) [EB/OL]. [2018-12-11].

[9] 崔建升,雷团团,伯 鑫,等.海南省大气污染源排放清单及环境影响研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):651-665.
Cui J S, Lei T T, Bo X, et al. Studies on air pollutant emission inventory and environmental impact in Hainan Province [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(6):651-665.

[10] 蒋争明,陈吟晖,彭海辉,等.中山市人为源大气污染物排放清单及特征研究 [J]. 广东化工, 2023,50(8):137-140.
Jiang Z M, Chen Y H, Peng H H, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Zhongshan [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023,50(8):137-140.

[11] 周君蕊,黄 宇,邱培培,等.武汉市大气污染源排放清单及分布特征研究 [J]. 南京信息工程大学学报, 2018,010(5):599-605.
Zhou J R, Huang Y, Qiu P P, et al. Air pollutant emission inventory and distribution characteristics in Wuhan city [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2018,10(5):599-605.

[12] 陈 军,李 楠,谭 菊,等.长沙市人为源大气污染物排放清单及特征研究 [J]. 环境科学学报, 2017,37(3):833-843.
Chen J, Li N, Tan J, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Changsha [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(3):833-843.

[13] 付柳淑,邱国良,刘 顺,等.衡阳市人为源大气污染物排放清单及特征研究 [J]. 中国环保产业, 2020,11:40-45.
Fu L S, Qiu G L, Liu S, et al. Research on emission inventory and characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Hengyang City [J]. China Environmental Protection Industry, 2020,11:40-45.

[14] 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 pollutantsources in Guangdong province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(9):2655-2669.

[15] 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.
Yuan M C, Zu B, Zhang Q X, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Liaoning Province [J]. ActaScientiae Circumstantiae,2018,38(4):1345-1357.

[16] 周子航,邓 也,谭钦文,等.四川省人为源大气污染物排放清单及特征 [J]. 环境科学, 2018,39(12):5344-5358.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2018,39(12):5344-5358.

[17] 马丽萍,曹国良,郝国朝.陕西省民用散煤燃烧颗粒物排放因子测定及分析 [J]. 环境工程, 2018,36(10):161-164.
Ma L P, Cao G L, Hao GZ. Measurement and analysis of emission factors of particles from residential coal combustion for Shaanxi Province [J]. Environmental Engineering, 2018,36(10):161-164.

[18] 雍佳乐,谢元礼,郭慧琳,等.陕西省天然源挥发性有机物排放清单及时空分布特征研究 [J]. 环境科学学报, 2023,43(8):235-247.
Yong J L, Xie Y L, Guo H L, et al. Inventory and spatiotemporal distribution characteristics of emissions of biogenic volatile organic compounds in Shaanxi Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(8):235-247.

[19] 卢 攀,李光华,张 帅,等.关中地区道路移动源细颗粒物排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2023,43(8):265-272.
Lu P, Li G H, Zhang S, et al. Study on emission characteristics of fine particle matter from on-road mobile sources in Guanzhong region, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(8):265-272.

[20] 郝艳召,邓顺熙,邱兆文,等.关中地区机动车颗粒物排放清单 [J]. 环境工程学报, 2017,11(3):1646-1652.
Hao Y Z, Deng S X, Qiu Z W, et al. Vehicle emission inventory of particulate matter in the Guanzhong region,China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(3):1646-1652.

[21] 王静晞,曹国良,韩 蕾,等.关中地区人为源大气污染物排放清单研究 [J]. 安全与环境学报, 2015,15(5):282-287.
Wang J X, Cao G L, Han L, et al. Probe to the anthropogenic air pollutant emission inventory in Guanzhong Region, Shaanxi [J]. Journal of Safety and Environment, 2015,15(5):282-287.

[22] Zhou Q S, Yun J, Li X P, et al. Vehicle emissions in a megacity of Xi'an in China: A comprehensive inventory, air quality impact, and policy recommendation [J]. Urban Climate, 2023,52.101740.10.1016/j.uclim.2023.101740.

[23] Li J, Deng S, Li G,et al.VOCs characteristics and their ozone and SOA formation potentials in autumn and winter at Weinan, China [J]. Environmental Research, 2021(D3):111821.

[24] 杨乃旺,宋文斌,闫东杰,等.基于积尘负荷的西安市铺装道路扬尘排放研究 [J]. 环境科学学报, 2021,41(4):1259-1266.
Yang N W, Song W B, Yan D J, et al. Emission characteristics of pavement road dust in Xi'an based on dust load method [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(4):1259-1266.

[25] 李光华,高 健,邓顺熙,等.渭南市道路移动源高分辨温室气体排放清单及特征研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(12):332-340.
Li G H, Gao J, Deng S X, et al. A study on high temporal-spatial resolution emission inventory and its characteristics of greenhouse gas for on-road mobile source in Weinan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(12):332-340.

[26] 李 琦,桂 丽,刘 明,等.西安人为源 VOCs 排放特征及其对 O_3 和 SOA 生成潜势的影响 [J]. 环境科学研究, 2019,32,2:253-262.
Li Q, Gui L, Liu M, et al. Emission characteristics of anthropogenic VOCs in Xi'an City and Its contribution to ozone formation potential and secondary organic aerosols formation potential [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(2):253-262.

[27] 张 帅,李光华,邓顺熙,等.西安市典型道路扬尘排放清单及化学组分 [J]. 环境科学学报, 2022,42(6):318-328.
Zhang S, Li G H, Deng S X, et al. Emission inventory and chemical compositions of fugitive dust sources at typical roads in Xi'an, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(6):318-328.

[28] 汪晶发,宋 慧,巴利萌,等.西安市机动车污染物排放清单与空间分布特征 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):666-677.
Wang J F, Song H, Ba L M, et al. Study on the vehicle emission inventory and spatial distribution characteristics in Xi'an [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(6):666-677.

[29] 吕梦菲,吴其重,杨晓春,等.西安市加油站挥发性有机物排放及其影

响的数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(5):109-118.
LÜ M F, Wu Q Z, Yang X C, et al. Numerical simulation study on volatile organic compounds emissions and its effects from gasstations in Xi'an [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(5):109-118.

[30] 肖　晗,杨晓春,吴其重,等.西安市建筑施工扬尘排放的模型估算 [J]. 环境科学学报, 2019,39(1):222-228.
Xiao H, Yang X C, Wu Q Z, et al. Estimate emissions of construction fugitive dust in Xi'an [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(1): 222-228.

[31] 苏　航,闫东杰,黄学敏,等.西安市人为源大气氨排放清单及特征 [J]. 环境科学, 2016,37(11):4117-4123.
Su H, Yang D J, Huang X M, et al. Inventory and characteristics of anthropogenic ammonia emission in Xi'an [J]. Environmental Science, 2016,37(11):4117-4123.

[32] 闫东杰,苏　航,黄学敏,等.西安市人为源挥发性有机物排放清单及研究 [J]. 环境科学学报, 2017,37(2):446-452.
Yan D J, Su H, Huang X M, et al. VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Xi'an [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(2):446-452.

[33] 闫东杰,丁毅飞,玉　亚,等.西安市人为源一次 $PM_{2.5}$ 排放清单及减排潜力研究 [J]. 环境科学研究, 2019,32(5):813-820.
Yan D J, Ding Y F, Yu Y, et al. Inventory and reduction potential of anthropogenic $PM_{2.5}$ emission in Xi'an City [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(5):813-820.

[34] Bo X, You Q, Sang M J, et al. The impacts of clean energy policies on air pollutants and CO_2 emission reduction in Shaanxi, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023,14.101937.10.1016/j.apr.2023.101937.

[35] 贺克斌,王书肖,张　强,等.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, Wang S X, Zhang Q, et al. Technical guide for developing urban air pollutant emission inventories [R]. Beijing: Tsinghua University, 2018.

[36] T/CSES 144—2024　城市大气污染源排放清单编制技术指南 [S].
T/CSES 144—2024　Technical guideline on city-level air pollutant emission inventory development [S].

[37] Zheng B, Cheng J, Geng G N, et al. Mapping anthropogenic emissions in China at 1km spatial resolution and its application in air quality modeling [J]. Science Bulletin, 2021,66(6):612-620.

[38] He K B. Multi-resolution emission inventory for China (MEIC): model framework and 1990~2010 anthropogenic emissions [C]. Beijing: International Global Atmospheric Chemistry Conference, 2012:17-21

[39] 雷　宇,贺克斌,张　强,等.基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单 [J]. 环境科学, 2008,29(8):2366-2371.

[40] Lei Y, He K B, Zhang Q, et al. Technology-based emission inventory of particulate matters (PM) from cement industry [J]. Environmental Science, 2008,29(8):2366-2371.

[41] Lei Y, Zhang Q, He K B, et al. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990~2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(3):931-954.

[42] 田贺忠,郝吉明,陆永琪.中国商品能源消耗导致的氮氧化物排放量 [J]. 环境科学, 2001,22(6):24-28.
Tian H Z, Hao, J M, Lu Y Q. Nitrogen oxides emissions arising from commercial energy consumption in China [J]. Environmental Science, 2001,22(6):24-28.

[43] 田贺忠.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, 2003.
Tian H Z. Studies on present and future emissions of nitrogen oxides and its comprehensive control policies in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

[44] Zhang Q, Streets D G, He K B. NO_x emission trends for China, 1995~2004: The view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 2007,112(D22): D22306.

[45] 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. Research on regional fine particulate matter emission and simulation in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.

[46] 汤　铃,贾　敏,伯　鑫,等.中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1493-1506.
Tang L, Jia M, Bo X, et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1493-1506.

[47] 刘大为,江　川,郭　巍,等.基于大气污染防治目标的陕西省“十四五”能源结构和产业结构布局调整对策研究 [R]. 西安:陕西省环境科学研究院, 2022.
Liu D W, Jiang C, Guo W, et al. Study on the countermeasures of energy structure and industrial layout adjustment in Shaanxi Province during the "14th Five-year Plan" period based on the goal of air pollution prevention and control [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Environmental Science, 2022.

[48] 王　田.陕西省大气污染物排放现状及减排潜力研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
Wang T. Study on the present situation of air pollutants emissions and reduction potential in Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

[49] 国务院.国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知 [EB/OL]. [2018-07-03].https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.
The State Council of the People's Republic of China. The state council issued the "three-year action plan to win the blue sky defence war"[EB/OL]. [2018-07-03].

[50] 毛显强,邢有凯,高玉冰,等.温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划 [J]. 中国环境科学, 2021,41(7):3390-3398.
Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, et al. Study on GHGs and air pollutants co-control: assessment and planning [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3390-3398.

[51] 郑逸璇,宋晓晖,周　佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究 [J]. 中国环境管理, 2021,13(5):45-51.
Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: Pathway and policy [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021,13(5):45-51.

作者简介：郑佳琳(1990-),女,河南新乡人,博士,主要从事环境管理研究.发表论文 6 篇.1454121916@qq.com.