DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2018.05.010

周君蕊[1] 黄宇[1] 邱培培[1] 刘浩[1] 肖凯[1]

武汉市大气污染源排放清单及分布特征研究

摘要

以武汉市为研究区域,基于实地调查获得典型行业污染源活动水平,以大气污染物排放清单编制技术指南为参考,利用排放因子法建立2014年武汉市大气污染源排放清单,并结合经纬度、人口密度分布、土地利用类型、道路长度等数据将排放清单进行了3 km×3 km网格化处理.结果表明,2014年武汉市SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、BC、OC、VOCs和NH_3排放量分别为10.3、17.0、16.3、7.1、63.1、0.6、0.4、19.8和1.6万t.固定燃烧源为SO_2排放的主要来源,其贡献率约64%;移动源为NO_x的主要来源,其贡献率约51%;颗粒物排放主要来源于扬尘源和工艺过程源;CO和VOCs主要来源于工艺过程源,BC和OC排放均以移动源和生物质燃烧源为主,NH_3排放主要来自农业源.污染物排放主要集中在青山区至新洲区一带.

关键词

排放清单;大气污染物;排放特征;武汉

中图分类号 X511

文献标志码 A

收稿日期 2018-08-07

资助项目 武汉市2013年重大科技攻关攻专项"武汉市大气灰霾成因与来源研究"

作者简介

周君蕊,女,硕士,主要研究方向为大气污染控制.whzhoujunrui@163.com

邱培培(通信作者),女,博士,助理研究员,主要研究方向为空气质量模型和排放清单.qpp040821@163.com

1 武汉市环境保护科学研究院,武汉,430015

0 引言

大气污染物排放清单是基于一定空间范围和时间尺度对影响空气质量的污染物排放量的估算,是描述污染物排放特征的有效方法,也是制定城市大气污染控制措施、开展污染防治工作的重要依据.近年来,国内学者对大气污染物排放情况开展了大量相关研究,区域覆盖中国各大城市、城市群,污染物涵盖大气常规污染物、挥发性有机物、重金属等[1-5].

武汉市以$PM_{2.5}$、O_3为特征的区域性复合型大气污染日益突出,灰霾现象频繁发生.2017年武汉市PM_{10}、$PM_{2.5}$平均浓度分别为88、53 μg/m^3,分别超过国家二级标准25.7%、51.4%;全市O_3污染超标天数为26 d.同时,武汉市环境空气污染具有明显的季节特征,冬季颗粒物污染较重,夏季臭氧污染突出.为了研究武汉市空气污染状况和确立合适的减排方案,建立完善的高分辨率大气污染源清单十分重要.

本研究以2014年为基准年,以大气污染物排放源清单编制技术指南为参考,建立了武汉市9种大气污染物排放清单,并通过3 km×3 km网格化分析了污染物排放的区域分布特征.

1 研究方法

1.1 编制范围

本研究基准年为2014年,区域覆盖范围为武汉市全市域8 494 km^2,涵盖13个行政区和4个功能区.清单污染物类别为SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、BC、OC、VOCs和NH_3.主要排放源类别分为点源、线源和面源3个类型;一级污染源10类,分别为化石固定燃烧源、工艺过程源(含储存运输源)、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、废弃物处理源、餐饮源和储存运输源(表1).

1.2 排放量估算方法

参考大气污染物排放源清单编制技术指南,化石燃料固定燃烧源SO_2、PM_{10}和$PM_{2.5}$排放估算主要采用物料衡算法估算,其他污染源SO_2、PM_{10}和$PM_{2.5}$及其他污染物排放量估算采用排放因子进行估算[6-9]:

$$E_{SO_2} = A \times 2 \times S \times (1 - r_s) \times (1 - \eta), \quad (1)$$

$$E_{PM} = A \times A_{ar} \times (1 - r_a) \times f_{PM} \times (1 - \eta), \quad (2)$$

$$E_{其他} = A \times F_E \times (1 - \eta), \quad (3)$$

其中,E 为各污染物排放量(t),A 为排放源活动水平,S 为平均燃煤收到基硫分,r_s 为硫分进入底灰比例,A_{ar}为平均燃煤灰分,r_a 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($PM_{2.5}$和 PM_{10})占总颗粒物比例,F_E 为排放因子,η 为污染控制措施对污染物的去除效率.

1.3 活动水平数据收集

1.3.1 点源

1)化石燃料固定燃烧源和工艺过程源.活动水平数据的收集主要通过发放调查表格和实地调研的方式进行,共收集了 400 家工业企业及 34 家茶炉的活动水平数据.调查内容包括燃料消耗量、燃料含硫率、灰分、产品产量、燃烧设施类型、工艺方式、污染控制措施类型及效率等.2014 年武汉市燃料煤消耗总量为 1 221.89 万 t,其中电力行业煤耗量最大;煤气消耗总量为 3 499 947.64 万 m^3,主要来源于黑色金属加工及制造业.黑色金属冶炼及加工行业生产焦炭 643 万 t、烧结矿 1 839 万 t、生铁 1 651 万 t、粗钢 1 818 万 t、钢材 2 200 万 t.非金属矿物制品生产平板玻璃 105 万 t、水泥 365 万 t.

2)溶剂使用源和储存运输源.本研究对武汉市涉及 VOCs 排放的 562 家工业企业、大型油库及加油站进行了专项调查.石化化工行业生产化肥 41 万 t、乙烯 83 万 t、化学原料药 8 万 t、原油 593 万 t.2014 年武汉市加油站汽油消耗量约 57.5 万 t、柴油消耗量约 59.4 万 t.

3)废弃物处理源.自 2007 年以来,武汉先后建成 5 座生活垃圾焚烧发电厂.2014 年,全市生活垃圾无害化处理能力为 6 500 t/d,全年处理量为 237.25 万 t/d.根据《2015 武汉市市政基础设施年度报告》,2014 年污水实际处理量为 73 476.19 万 t.

1.3.2 线源

1)道路移动源.从武汉市交通管理局获取机动车活动水平,包括各类机动车车型、保有量、燃料类型、排放标准等.2014 年,武汉市机动车保有量为 189.9 万辆,其中载客汽车保有量 147.7 万辆、载货汽车 17 万辆、摩托车 25 万辆;汽油车占 88.60%、柴油车占 11.11%;国Ⅲ前排放标准的机动车占 31.95%.

2)非道路移动源.工程机械的燃油消费量通过收集武汉市建筑工地数量、建筑面积等信息估算,工地月消耗柴油约 21 639 t;船舶燃油量通过查阅《2015 年武汉市统计年鉴》货运周转量估算,总油耗约为 443 935 t;农用运输车 80 563 台,铁路机车年燃油消耗量约 21 万 t,飞机着陆循环次数约 78 006 次.

1.3.3 面源

1)扬尘源.施工、砂石料堆的个数及面积、不同土地类型的面积通过解译遥感影像及现场核实获取,建筑工地面积约 93 km^2,砂石料堆总面积约 11.5 km^2;车流量通过现场调查获取,城区快速路、主干路、次干路和支路的平均车流量分别为 3 853、3 102、1 435、318 辆/h.

2)燃烧面源.各作物产量通过《2015 年武汉市统计年鉴》获取,结合草谷及实地调研焚烧比例估算燃烧秸秆总量为 34 万 t;民用源煤炭消费量来自环保统计数据,约 100 万 t.

3)农业源.从《2015 年武汉市统计年鉴》获取总氮肥施用量,进一步结合武汉市农作物类型对不同氮肥类型进行细致划分.尿素、碳铵、硝铵、复合肥使用量分别约 36 464、13 674、2 279、52 952 t;畜禽养殖活动水平从《2015 年武汉市统计年鉴》获取,耕牛、乳牛、母猪、肉猪和家禽分别约 17.2、1.2、18.1、198 万头和 5 802 万只.

4)餐饮源.餐饮源的活动水平是餐饮业油烟烟气排放量(m^3).采用下面的公式进行计算:

$$A = n \times V \times H, \quad (4)$$

式中,n 为固定炉头数,V 为烟气排放速率(m^3/h),H 为年总经营时间(h).假设大型餐饮企业的炉头数为 6,中型餐饮企业的炉头数为 4,小型餐饮企业的炉头数为 2.

根据武汉市统计局调研数据,将 741 家限额以上餐饮企业按规模进行划分,大型餐饮企业共 557 家、中型餐饮企业 129 家,剩余的均归入小型餐饮企业,合计约 3.03 万家.

1.4 排放因子选取

排放因子的获取基于大气污染物排放清单编制技术指南,结合文献调研进行综合考虑.

1.5 排放清单空间分配

通过地理信息系统将排放清单进行 3 km×3 km 网格化处理,其中点源通过经纬度信息定位到对应网格,线源及面源通过道路长度、人口密度分布、土地类型等为权重进行网格化处理[10-11],如表 1 所示.

表 1 排放源类别及空间分配参数

Table 1 Emission source classification and spatial distribution location parameter

一级	二级	排放源性质	空间分配参数
化石燃料固定燃烧源	火电行业	点源	经纬度
	制造业	点源	经纬度
	生活燃烧源	面源	人口密度分布
工艺过程源	黑色金属冶炼及加工、非金属矿物制品、石化工业、化学原料和化学制品制造业、橡胶和塑料制品业、食品制造业、纺织业	点源	经纬度
废弃物处理源	废水处理、固废处理、烟气脱硝	点源	经纬度
移动源	道路移动源	线源	道路长度
	非道路移动源(工程机械、农业机械、铁路内燃机车、船舶和民航飞机)	线源	土地类型
生物质燃烧源	秸秆燃烧	面源	土地类型
	生物质锅炉	点源	经纬度
扬尘源	道路扬尘	面源	道路长度
	施工扬尘、堆场扬尘、土壤扬尘	面源	土地类型
餐饮源	炊事油烟	面源	人口分布密度
溶剂使用源	印刷印染、表面涂层、其他溶剂使用	点源	经纬度
农业源	氮肥施用、土壤本底、固氮植物、畜禽养殖、人体粪便	面源	土地类型
储存运输源	加油站和油库	点源	经纬度

2 结果与讨论

2.1 2014 年武汉市大气污染物排放清单

基于排放清单估算方法,得到 2014 年大气污染物排放清单,如表 2 所示.2014 年武汉市大气污染物 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、BC、OC、VOCs 和 NH_3 排放量依次分别为 10.3、17.0、16.3、7.1、63.1、0.6、0.4、19.8 和 1.6 万 t.

2.2 排放源分担率与特征

2014 年武汉市各大气污染物排放源分担率如图 1、2 所示.

1)黑色金属冶炼及加工工业、电力行业和未纳入的统计工业是 SO_2 排放的主要贡献源,3 个排放源排放量分别为 28 984、26 718 和 20 015 t,分别占总排放量的 28%、26%和 20%.黑色金属冶炼及加工工业的 SO_2 排放主要来自工艺过程源,占该行业排放的 98%以上,其中主要的排污环节为钢压延和烧结过程.

2)道路移动源、非道路移动源、电力生产和黑色金属冶炼及加工业是 NO_x 排放的主要贡献源,分别贡献了 31%、21%、13%和 12%.道路移动源排放 NO_x 约为 51 944 t,其中货车贡献最大,排放量占道路移

表 2 2014 年武汉市一级排放源大气污染物排放清单

Table 2 Emissions of atmospheric pollutants in Wuhan in 2014 t

污染源	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$	CO	BC	OC	VOCs	NH_3
固定燃烧源	65 254	44 693	24 408	10 774	94 842	1 938	1 067	8 593	/
工艺过程源	34 698	34 639	40 925	31 107	370 049	925	740	76 923	415
废弃物处理	773	3 344	21	18	2 999	1	0	1 732	3 396
移动源	1 631	86 983	5 093	4 735	147 358	2 553	834	51 984	821
生物质燃烧源	343	1 063	2 263	2 162	15 694	342	1 309	2 885	212
开放扬尘源	/	/	88 795	21 418	/	/	/	/	/
餐饮源	/	/	1 313	1 050	/	10	340	919	/
溶剂使用源	/	/	/	/	/	/	/	43 555	/
储存运输	/	/	/	/	/	/	/	11 406	/
农业源	/	/	/	/	/	/	/	/	11 343
总计	102 699	170 197	162 818	71 263	630 941	5 768	4 290	197 996	16 187

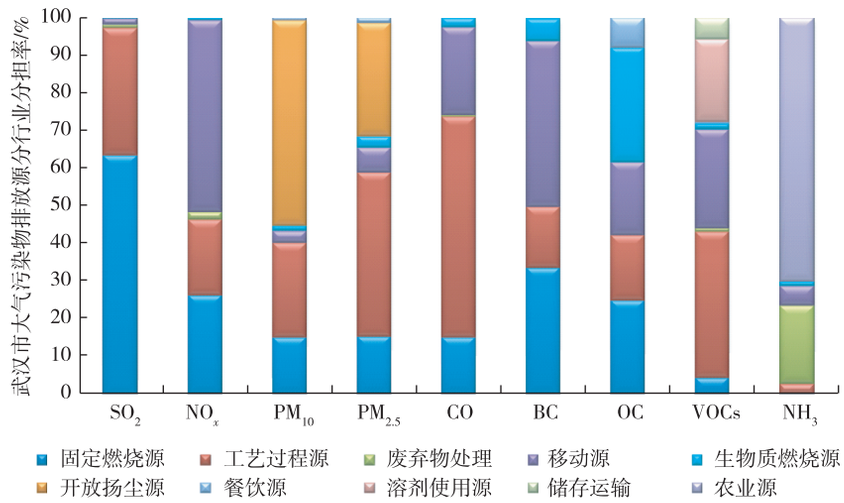


图 1　2014 年武汉市一级污染源贡献

Fig. 1　Emission contributions of fist level atmospheric pollutants source categories of Wuhan in 2014

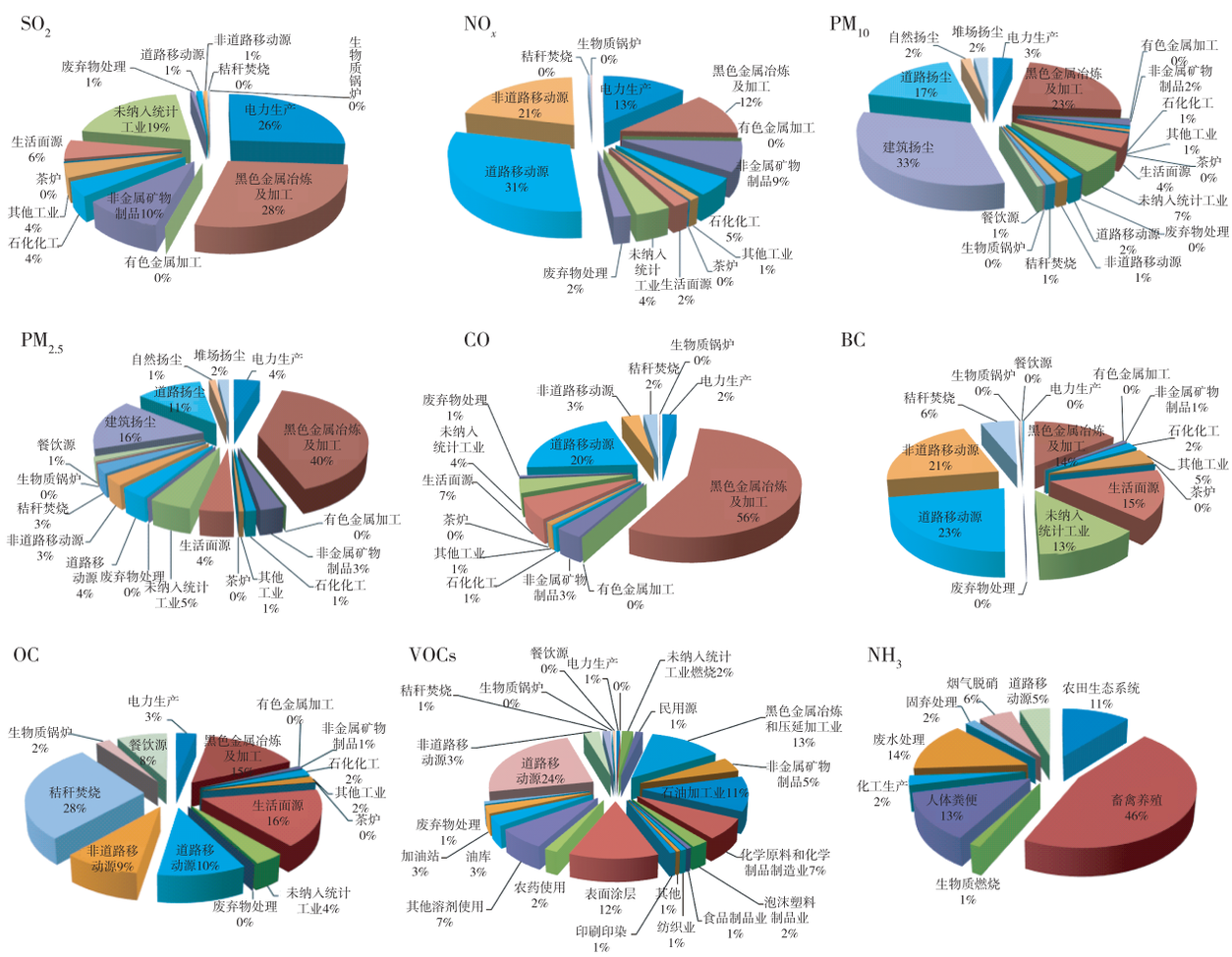


图 2　2014 年武汉市污染源排放清单分行业贡献

Fig. 2　Emission contributions of second level atmospheric pollutants source categories of Wuhan in 2014

动源排放量的 30%.非道路移动源 NO_x 排放量为 35 038 t,船舶排放为最主要的来源,主要是因为武汉为中国中部地区重要的货运港口,年货运周转量巨大.而黑色金属冶炼及加工业 NO_x 的主要排放环节为烧结和炼焦过程.

3)建筑扬尘是 PM_{10}排放的主要贡献源,贡献了 33%,其次为黑色金属冶炼及加工业和道路扬尘源,分别贡献了 23%和 17%.2014 年武汉市建筑扬尘源 PM_{10}的排放量为 53 548.8 t,江夏区、洪山区及蔡甸区建筑施工面积较大,其排放分别占总排放量的 24.08%、18.43%、12.56%.黑色金属冶炼及加工业的 PM_{10}排放主要来自烧结、炼铁和炼钢的无组织排放.

4)黑色金属冶炼及加工业是 $PM_{2.5}$排放的主要贡献源,贡献了 40%,其次为建筑扬尘和道路扬尘源,分别贡献了 16%和 11%.3 大排放源的主要排放环节和特征与 PM_{10}类似.

5)道路移动源、黑色金属冶炼和压延加工业、表面涂层、石油加工业等是主要的 VOCs 排放源.其中,道路移动源、黑色金属冶炼和压延加工业、表面涂层、石油加工业的 VOCs 排放量占全市 VOCs 总排放量的 60%.

6)武汉市 CO 排放主要来自黑色金属冶炼及加工业,其排放量为 352 087 t,其中工艺过程源排放量为 351 712 t,排放主要来自于烧结过程,烧结过程排放约 294 224 t.黑色金属冶炼及加工业 CO 排放量占武汉市 CO 总排放量的 56%.

7)武汉市大气 NH_3 排放最大排放源为畜禽养殖排放源,其排放量约 7 422 t,占 NH_3 总排放的 46%,其中的后续施肥过程(2 979 t)贡献率最大.第二大排放源为废水处理,排放占 NH_3 排放总量的 14%.

8)武汉市 BC 的最大排放源为道路移动源和非道路移动源,分别贡献了 23%和 21%.而 OC 主要贡献源为秸秆燃烧排放源,其排放占 OC 总排放量的 28%.

2.3 武汉市大气污染物排放空间分布

应用 ArcGIS 软件将武汉市分成 3 km×3 km 的网格,计算出每个网格内的污染物排放量,得到武汉市 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放 3 km×3 km 网格空间分布(图 3).武汉市大气污染物 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放强度高的地方主要聚集在污染物排放量大的企业所占的网格.全市污染最严重的区域集中在青山区至新洲区一带,这与该区域重工业及电厂较集中的现状相符.

2.4 不确定性分析

排放清单估算过程中,不确定性主要来自 3 个方面:活动水平、排放因子以及末端污染控制措施的去除效率的选取.本研究中排放因子的选取是基于环保部公布的排放清单编制技术指南以及相关研究结果,因此其非本地化特征是不确定性的主要来源之一.活动水平方面,化石燃料燃烧源最大的不确定性来源于生活源和未纳入统计工业源活动水平的收集,由于缺乏详尽的信息(如煤炭燃烧类型、硫分、灰分等),污染物排放核算过程中部分参数(硫分、灰分)采用了平均值进行估算,不可避免会带来较大的误差;移动源最大的不确定性来源于非道路移动源数量的统计,由于工程机械数量、油耗量等数据无相关部门统计,均采用估算的方式获取,因此会带来较大的不确定性;扬尘源的不确定性主要来自堆场扬尘的估算,在堆场扬尘排放量估算中需要大量的参数,例如堆场面积、高度等,这些数据难以准确获取,因此采用遥感解译以及一定的假设和估算计算堆料质量,必然会带来很大的不确定性.因此后续工作中还需开展重点污染源排放因子本地化的工作,加强排放源基础活动水平的研究,进一步提高武汉市大气污染源排放清单的准确性.

3 结论

1)2014 年武汉市 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、BC、OC、VOCs 和 NH_3 排放量分别为 10.3、17.0、16.3、7.1、63.1、0.6、0.4、19.8 和 1.6 万 t.

2)黑色金属冶炼及加工是 SO_2、$PM_{2.5}$和 CO 的重点排放源,对 SO_2、$PM_{2.5}$和 CO 的贡献分别为 28%、40%和 56%;黑色金属冶炼及加工对 PM_{10}排放贡献约为 23%.道路移动源和非道路移动源是 NO_x 排放的主要贡献源,二者合计达 52%.建筑扬尘是 PM_{10}排放的最大贡献源,贡献了 33%;对 $PM_{2.5}$的排放贡献约为 16%.道路移动源是 VOCs 排放的主要贡献源,贡献率约为 24%.畜禽养殖是 NH_3 排放的主要贡献源,其排放量占全市 NH_3 排放总量的 46%;其次为废水处理排放源.移动源是武汉 BC 最大的排放源,秸秆焚烧是 OC 最大排放源.

3)SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放集中在重工业及电厂较集中的青山区至新洲区一带.

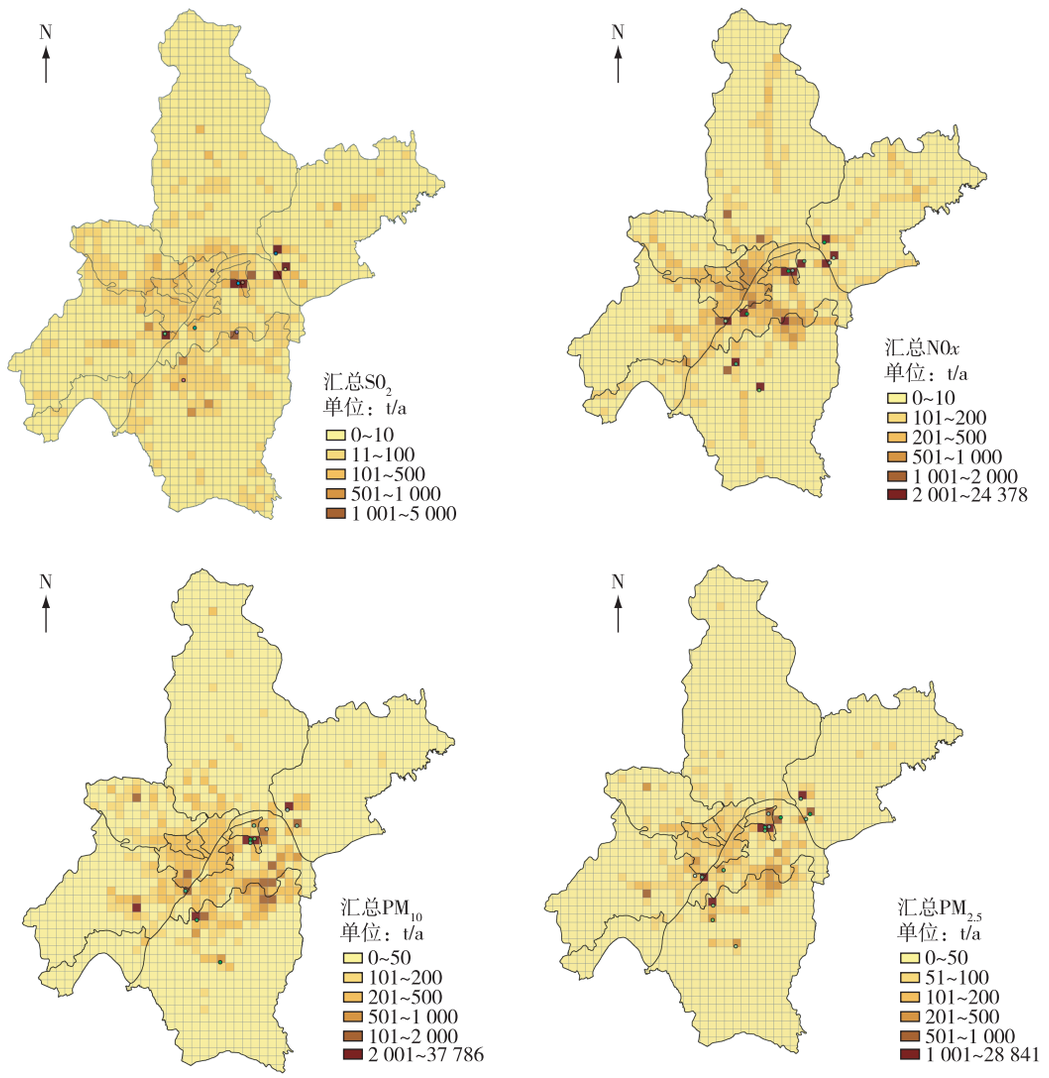


图 3　2014 年武汉市 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放网格空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$ emissions of Wuhan in 2014

参考文献

References

[1] 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 Yueyun,LI Nan,ZHENG Junyu,et al.Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong province[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(9):2655-2669

[2] 赵斌,马建中.天津市大气污染源排放清单的建立[J].环境科学学报,2008 28(2):368-375
ZHAO Bin, MA Jianzhong. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008 28(2):368-375

[3] 郑君瑜,郑卓云.珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征[J].中国环境科学,2009,29(4):345-350
ZHENG Junyu, ZHENG Zhuoyun. Biogenic VOCs emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the Pearl River Delta area[J].China Environmental Science,2009,29(4):345-350

[4] 王堃,滑申冰,田贺忠,等.2011 年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单[J].中国环境科学,2015,35(10):2934-2938
WANG Kun, HUA Shenbing, TIAN Hezhong, et al. Atmospheric emission inventory of typical heavy metals from iron and steel industry in China, 2011[J]. China Environmental Science,2015,35(10):2934-2938

[5] Tian H, Cheng K, Wang Y, et al. Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China[J]. Atmospheric Environment,2012,50(1):157-163

[6] 中华人民共和国环境保护部.城市大气污染物排放清单编制技术手册(试行)[R].2014
Ministry of Ecology and Environment of the People's Re-

public of China.Calculation manual of atmospheric pollutants emission inventory of cities(Trial use)[R].2014
[7] 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)[R].2014
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.Calculation manual of VOCs emission inventory(Trial use)[R].2014
[8] 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)[R].2014
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.Calculation manual of PM emission inventory from fugitive dust source(Trial use)[R].2014
[9] 中华人民共和国环境保护部.大气氨排放清单编制技术指南(试行)[R].2014
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.Calculation manual of NH_3 emission inventory(Trial use)[R].2014
[10] 杨柳林,曾武涛,张永波,等.珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J].中国环境科学,2015,35(12):3521-3534
YANG Liulin,ZENG Wutao,ZHANG Yongbo,et al.Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region[J].China Environmental Science,2015,35(12):3521-3534
[11] 叶贤满,徐昶,洪盛茂,等.杭州市大气污染物排放清单及特征[J].中国环境监测,2015,31(2),DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2015.02.002
YE Xianman,XU Chang,HONG Shengmao,et al.Emission inventory and characteristics of air pollutants in Hangzhou[J].Environmental Monitoring in China,2015,31(2),DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2015.02.002

Air pollutant emission inventory and distribution characteristics in Wuhan city

ZHOU Junrui[1] HUANG Yu[1] QIU Peipei[1] LIU Hao[1] XIAO Kai[1]
1 Wuhan Environmental Protection Sciences Research Institute,Wuhan 430015

Abstract The amounts of nine atmospheric pollutants emitted in Wuhan in 2014 were calculated by a comprehensive investigation of pollution sources and analyzing atmospheric pollutants emission factors as per the public manual and literature.A 3 km × 3 km gridded emission inventory was developed based on distribution parameters such as coordinates,population,land types,and road network.The results showed that the total emissions of SO_2,NO_x,PM_{10},$PM_{2.5}$,CO,BC,OC,VOCs,and NH_3 in Wuhan in 2014 were 103 thousand,170 thousand,163 thousand,71 thousand,631 thousand,6 thousand,4 thousand,198 thousand,and 16 thousand tons,respectively.Fuel combustion sources contributed the most to SO_2 emissions,accounting for 64% of the total.Mobile sources contributed the most to NO_x emissions,accounting for 51% to the total.The major emission sources of PM_{10} and $PM_{2.5}$ were fugitive dust and industrial production.Industrial production also served as a major emissions contributor of CO and VOCs.BC and OC emissions were mainly attributed to mobile sources and biomass burning.NH_3 emissions mainly resulted from agricultural sources.Air pollutant emissions were typically concentrated from the Qingshan to the Xinzhou administrative regions.

Key words emission inventory;air pollutants;emission characteristics;Wuhan