

江苏省人为源 VOCs 排放清单 及其对臭氧生成贡献

夏思佳 刘倩 赵秋月

(江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036)

【摘要】基于江苏省工业、能源、环境等活动水平数据, 结合排放因子法和源成分谱研究成果, 建立了江苏省分市、分行业、分物种人为源 VOCs 排放清单, 利用最大增量反应活性(MIR)估算了其对于臭氧的生成贡献。结果显示, 江苏省 2015 年 VOCs 人为源排放量为 192.78 万 t, 化石燃料燃烧、工业过程源、有机溶剂使用源、生物质燃烧源、移动源、有机溶剂储运源排放质量分数分别为 7.38%、27.93%、39.56%、3.55%、16.18%、5.39%。苏州、南京、徐州 3 市 VOCs 排放量居全省前三位, 均超过 20 万 t。56 种臭氧前驱物所产生的臭氧生成潜势(OFP)总量为 542.95 万 t, 行业分布与 VOCs 排放总量的行业分布相似, 机械设备制造、交通工具制造、建筑装饰等涂装行业对 OFP 的贡献比例是 VOCs 排放总量贡献比例的 1.3~1.6 倍, 控制喷涂行业等量的 VOCs 会产生更大的 OFP 削减。对 OFP 贡献大的前 10 位物种分别是间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1, 3-丁二烯、甲苯、邻-二甲苯、1-丁烯、乙苯、1, 2, 4-三甲苯、对-乙基甲苯, 对总 OFP 的贡献为 75.63%。

【关键词】挥发性有机物; 江苏省; 排放清单; 排放因子; 源成分谱; 臭氧生成潜势

【中图分类号】X511

【文献标识码】A

【文章编号】0250-3301(2018)02-0592-08

VOCs 是形成 PM_{2.5}、O₃ 污染的重要前体物, 引起灰霾、光化学烟雾的关键因子^[1, 2]。近年来, 我国重点地区臭氧污染问题日益突出。有研究表明, 北京城近郊的 O₃ 生成主要受 VOC 控制, 而远郊区县和农村地区 O₃ 生成则受 NO_x 控制^[3]; 上海、南京地区的 O₃ 主要受 VOC 控制^[4~7], 削减 NO_x 有可能增大 O₃ 的浓度, 开展 VOCs 污染控制是解决我国大气复合污染问题的关键途径之一, 因此研究 VOCs 排放清单及其对臭氧的贡献对解决重点地区臭氧污染问题具有很大的指导意义。江苏省是石化、化工以及装备制造大省, VOCs 排放行业众多、特征复杂, 目前对江苏省 VOCs 排放清单编制已有部分研究^[8~11], 但普遍存在源分类不完善、活动水平数据收集不全面、可靠性不足等问题, 并且已有研究仅针对 VOCs 排放总量, 对排放中活性物种和来源的研究甚少, 而制定基于臭氧生成贡献的 VOCs 减排措施对控制臭氧污染更为重要。本研究以 2015 年为基准年, 基于较为完善的源分类体系, 以及详细的工业、能源、环境等活动水平数据, 同时考虑近几年的 VOCs 污染控制措施与效果, 结合排放因子和源成分谱研究成果, 建立了江苏省分市、分行业人为源 VOCs 排放清单, 计算了主要组分排放量, 并利用最大增量反应活性(MIR)研究了其对臭氧的生成贡献, 识别了关键活性物种及其来源, 以期对江苏省 VOCs、O₃ 污染控制提供支撑。

1 材料与方法

1.1 源清单编制方法

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201502)

作者简介: 夏思佳(1986~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 VOCs 污染控制、大气环境管理, E-mail: xsjshb@163.com

针对江苏省产业结构特点和 VOCs 排放特征，构建污染源分类系统，包括化石燃料燃烧源、工业过程源、溶剂使用源、移动源、有机溶剂储运源、生物质燃烧源 6 大类，细分行业共计 37 个子行业。本研究中人为源 VOCs 排放量估算采用排放因子法，估算公式如下：

$$E_i = P_i \times EF_i \times (1 - \eta_i) \quad (1)$$

式中， i 为源类别， E 为 VOCs 排放量， P 为排放源的活动水平， EF 为源排放因子， η 为源排放处理效率。

1.1.1 活动水平来源

本研究中使用的活动水平数据主要通过 3 种途径获得，一是江苏省及各省辖市统计年鉴、统计部门、政府部门网站公布的数据；二是 2015 年江苏省污染源统计数据；三是调研江苏省相关行业协会和重点企业获得的数据。

(1) 化石燃料燃烧源化石燃料燃烧源分为电力、工业、民用三类。活动水平主要为煤炭、燃料油、天然气、液化石油气等各类能源消耗量，主要来源于 2016 年江苏省统计年鉴和中国能源年鉴^[12, 13]。

(2) 工业过程源工业过程源包括石化、化工、医药、塑料、皮革制造等，VOCs 排放主要来自于化学产品的制造或分解过程。活动水平为各类产品 2015 年产量，主要来源于行业统计年鉴^[14]与统计部门资料。江苏省石化、化工产业产品门类众多，统计年鉴与统计局掌握的化工产品门类有限，本研究根据部分城市开展的化工企业“一企一策”调查数据，完善石化、化工行业活动水平。

(3) 溶剂使用源溶剂使用源包括交通设备制造、机械装备制造、电子设备制造、家具制造、木材加工、印刷包装、干洗、汽车修补、建筑喷涂、农药施用等，VOCs 排放来源于使用涂料、油墨、胶黏剂等有机溶剂使用过程中的挥发，活动水平为各类有机溶剂的使用量。一是来源于 2015 年环境统计数据中各企业使用量的统计，二是行业协会和典型企业的单位产量有机溶剂使用量的调研结果^[15]，三是根据全国消费量与江苏省所占比例分摊。

(4) 移动源移动源分为道路机动车、非道路移动源、有机溶剂储运源。道路机动车包括客车、货车、摩托车等，活动水平指不同车型、不同排放标准的机动车保有量与行驶里程数，来自公安部门资料。非道路移动源包括铁路、飞机、船舶、农业机械、工程机械，活动水平指消费燃料、保有量等。

(5) 有机溶剂储运源包括化石燃料、化学品的储存与运输过程排放，活动水平包括各类有机溶剂的储运量，来自统计年鉴与港口管理部门。

(6) 生物质燃烧源生物质燃烧源分为生物质露天燃烧与秸秆、薪柴作为燃料燃烧。活动水平包括小麦、水稻、玉米等农作物产品产量以及薪柴量、秸秆综合利用率、能源化率。来自农业统计年鉴^[16]与农业管理部门。

1.1.2 排放因子

排放因子大部分来源于国内外相关文献的最新研究成果，交通设备制造行业排放因子来源于企业或行业的调研结果，如表 1 所示。

表1 各行业 VOCs 活动水平与排放因子

Table 1 VOCs activity levels and emission factors of various emission sources

行业	污染源	燃料或产品类型	排放因子	单位	活动水平
化石燃料燃烧源	工业	煤	0.18 ^[17]	kg·t ⁻¹	燃料消费量
	火力发电	煤	0.15 ^[17]	kg·t ⁻¹	燃料消费量
		天然气	0.088 ^[17]	g·m ⁻²	燃料消费量
	供热	煤	0.18 ^[17]	kg·t ⁻¹	燃料消费量
		煤	0.67 ^[18]	kg·t ⁻¹	燃料消费量
		生活燃料燃烧	液化石油气	104 ^[17]	g·m ⁻²
		天然气	0.13 ^[19]	g·m ⁻²	燃料消费量
工业过程源	石油炼制	储罐/转运/泄漏/废水	0.5/3/0.8/0.12 ^[20]	kg·t ⁻¹	原油加工量
	合成材料	合成树脂	5.60 ^[21]	kg·t ⁻¹	产品产量
		合成橡胶	7.60 ^[22]	kg·t ⁻¹	产品产量
	基础化学原料制造	苯/甲醇/乙烯/合成氨/甲醛	0.55/5.55/0.5/4.72/5.95 ^[17]	kg·t ⁻¹	产品产量
	化学纤维制造	涤纶/锦纶/维纶/氨纶	3.39/3.75/7.7/40 ^[23]	kg·t ⁻¹	产品产量
	食品制造	植物油加工	2.45 ^[17]	kg·t ⁻¹	产品产量
		白酒/啤酒/发酵酒精	16.26/0.43/32.1 ^[17]	g·L ⁻¹	产品产量
	医药		114.14 ^[23]	kg·t ⁻¹	产品产量
	金属冶炼		0.36 ^[24]	kg·t ⁻¹	产品产量
	轮胎制造		0.28 ^[22]	kg·个 ⁻¹	产品产量
	焦炭生产		1.25 ^[17]	kg·t ⁻¹	产品产量
	固体废物处理	焚烧/填埋	7.4/1.56 ^[25]	kg·t ⁻¹	废物处理量
	污水处理		0.0011 ^[25]	kg·t ⁻¹	污水处理量
溶剂使用源	家具制造		0.4000 ^[17]	kg·件 ⁻¹	家具产量
	机械设备制造	卷材/防腐/其他	455/440/235 ^[26]	kg·t ⁻¹	涂料使用量
	汽车制造		470 ^[27]	kg·t ⁻¹	涂料使用量
	船舶制造		422	kg·t ⁻¹	涂料使用量
	电子制造业	覆铜板	0.10 ^[26]	g·m ⁻¹	产品产量
	包装印刷	传统/新型	7.50 ^[27]	kg·t ⁻¹	油墨使用量
	制鞋		23 ^[28]	g·双 ⁻¹	产品产量
	合成革制造		245 ^[27]	kg·t ⁻¹	产品产量
	纺织印染		98 ^[27]	kg·t ⁻¹	印染料及助剂使用量
	木材加工		90 ^[26]	kg·t ⁻¹	胶黏剂用量
	干洗	四氯乙烯	1000 ^[17]	kg·t ⁻¹	溶剂用量
	日用品		3 ^[17]	kg·人 ⁻¹	城镇人口
	建筑装饰	水性/溶剂型	120/450 ^[29]	kg·t ⁻¹	涂料使用量
餐饮油烟		3.5 ^[30]	g·人 ⁻¹	城镇人口	
农药使用		470 ^[17]	kg·t ⁻¹	农药施用量	
生物质燃烧	露天燃烧	水稻	6.1 ^[18]	kg·t ⁻¹	秸秆燃烧量
		小麦/玉米/其他	7.48/10.4/8.45 ^[31]	kg·t ⁻¹	秸秆燃烧量
	秸秆燃料		5.30 ^[32]	kg·t ⁻¹	秸秆燃烧量
	薪柴燃料		3.13 ^[32]	kg·t ⁻¹	薪柴燃烧量
有机溶剂储运源	VOCs 的储存与运输	原油/汽油/有机溶剂	0.88/4.54/3.6 ^[27]	kg·t ⁻¹	储存运输量
移动源	非道路移动机械	轮船/农业机械/建筑机械	6.2/3.4/3.4 ^[25]	kg·t ⁻¹	燃料使用量

1.1.3 污染控制水平

2010 年以来,江苏省开展了大量 VOCs 污染治理工作,尤其是苏南地区,经过多轮化工园区综合整治,VOCs 排放控制水平有一定提高,与苏北地区差异显著,本研究基于化工园区、行业协会、重点地区及环保管理部门的广泛调研,确定了基于行业

的 2015 年 VOCs 污染控制水平。主要包括:江苏省目前基本完成加油站、油罐车、储油库油气回收;石化行业基本完成 LDA R, 初步完成综合治理, 治理效率按 20%计;苏南地区化工、医药、电子等行业基本完成第一轮治理, 治理效率按 20%计。

1.2 分物种排放量计算

基于国内外各行业的源成分谱研究成果, 对江苏各行业 VOCs 排放量进行物种分配。主要行业源成分谱如表 2 所示。

表 2 VOCs 源成分谱来源

Table 2 Summary of VOCs source profiles

行业	排放源	物种数/种	文献
溶剂使用	家具喷涂	56	[32]
	机械喷涂	263	[33]
	汽车喷涂	55	[34]
	船舶喷涂	56	[35]
	印刷包装	263	[33]
	建筑装饰	55	[34]
	餐饮油烟	56	[36]
工业过程	石油炼制	56	[35]
	基础化工	56	[35]
	化学纤维	27	[37]
	医药制造	50	[38]
	食品制造	50	[38]
化石燃料燃烧	纺织印染	12	[39]
	工业燃煤	92	[40]
生物质燃烧	火力发电	107	[41]
	露天燃烧	92	[42]
移动源	薪柴燃烧	92	[42]
	汽油车	70	[43, 44]
	柴油车	63	[45]
	摩托车	69	[46]

1.3 臭氧生成潜势计算

不同 VOCs 物种的光化学反应活性差异较大, VOCs 对臭氧生成的贡献由浓度水平及其反应活性共同决定, 为识别江苏省 VOCs 排放中关键活性物种及来源, 本研究使用臭氧生成潜势 (OFP) 的方法研究 VOCs 排放的臭氧生成贡献, 公式如下:

$$OFP_i = E_i \times MIR_i \quad (2)$$

式中, OFP_i 为第 i 种 VOCs 的 OFP 值 (以 O_3 计), 万 t; E_i 为第 i 种 VOCs 的排放量, 万 t, MIR_i 为第 i 种 VOCs 的臭氧最大反应活性, 以 $O_3/VOCs$ 计, $g \cdot g^{-1}$ 。将各污染源中 VOCs 物种的 OFP 加和, 即获得该污染源总臭氧生成潜势。

2 结果与分析

2.1 江苏省 2015 年 VOCs 排放清单

江苏省 2015 年人为源 VOCs 排放量为 192.78 万 t，化石燃料燃烧、工业过程源、有机溶剂使用源、移动源、有机溶剂储运源、生物质燃烧源排放所占质量分数分别为 7.38%、27.93%、39.56%、16.18%、5.39%、3.55%。有机溶剂使用源排放量占比最大，居前三位的行业是机械装备制造、印刷包装、建筑装饰，排放量分别为 15.70、9.60、9.59 万 t，共占有有机溶剂使用行业排放量的 45.74%，占 VOCs 排放总量的 18.10%。其次是工业过程源，其中石油炼制与有机化工行业 VOCs 排放量为 29.06 万 t，占工业过程源的 53.96%，占 VOCs 排放总量的 15.10%。

分市、分行业 VOCs 排放量如表 3 所示。可见，苏州、南京、徐州这 3 市 VOCs 排放量居全省前三位，均超过 20 万 t。其中，苏州、徐州煤炭消费量大，化石燃料燃烧源排放量居全省前列，南京、苏州石化、化工行业发达，工业过程源排放居全省前列；徐州市木材加工、钢结构制造，以及苏州市的印刷包装、机械设备制造行业排放量大，两市有机溶剂使用源排放量居全省前列。

表 3 江苏省各市分部门 VOCs 排放量 $\times 10^4/t$

Table 3 VOCs emission of different sectors in Jiangsu province $\times 10^4/t$

地区	化石燃料燃烧源	工业过程源	有机溶剂使用源	移动源	有机溶剂储运源	生物质燃烧源	合计
江苏省	142 298	538 510	762 729	311 860	103 996	68 423	1 927 817
南京市	18 150	111 693	52 456	27 438	20 130	1 966	231 833
无锡市	12 026	37 076	72 028	23 449	10 694	1 180	156 452
徐州市	20 975	47 152	93 753	31 470	3 577	9 796	206 723
常州市	7 503	30 954	51 752	16 210	6 568	1 864	114 849
苏州市	26 464	73 969	105 836	78 552	15 508	1 517	301 846
南通市	11 794	23 375	79 553	28 277	10 385	5 683	159 066
连云港	4 532	51 698	39 478	12 448	6 844	6 724	121 722
淮安市	6 631	21 516	45 692	17 058	2 940	7 627	101 464
盐城市	8 431	33 755	41 621	20 004	4 289	13 279	121 379
扬州市	6 435	15 993	48 145	16 622	4 963	4 689	96 847
镇江市	9 529	21 498	25 246	10 698	7 723	1 804	76 498
泰州市	6 685	41 896	44 373	17 024	8 847	5 309	124 135
宿迁市	3 146	27 934	62 797	12 612	1 529	6 985	115 003

2015 年江苏省人为源 VOCs 排放物种分布如图 1 所示，烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、含氧 VOCs 物种的比例分别为 26.79%、14.74%、1.86%、39.23%、4.84%、12.53%。居前 5 位的物种分别为甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、乙烷、丙烷。

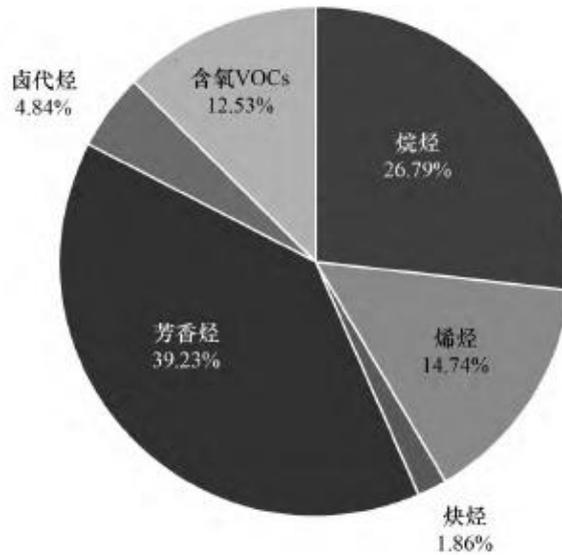


图 1 江苏省人为源 VOCs 物种分布
Fig. 1 VOCs species of emission in Jiangsu

2.2 臭氧生成潜势

以 56 种臭氧前驱物计算 OFP，结果如表 4 所示，2015 年江苏省人为源 VOCs 排放 OFP 共计 542.95 万 t。化石燃料燃烧、工业过程源、有机溶剂使用源、移动源、有机溶剂储运源、生物质燃烧源对 OFP 的贡献分别为 5.05%、29.29%、42.00%、16.15%、3.55%、3.97%。溶剂使用源对 OFP 贡献最大，其中，机械设备制造、交通工具制造、建筑装饰等喷涂行业对 OFP 的贡献比例是 VOCs 排放总量贡献比例的 1.3~1.6 倍，控制喷涂行业等量的 VOCs 会产生更大的 OFP 削减。

OFP 居前 10 位的物种分别是间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1, 3-丁二烯、甲苯、邻-二甲苯、1-丁烯、乙苯、1, 2, 4-三甲基苯、对-乙基甲苯，前 10 位物种对总 OFP 的贡献为 75.63%，其中，间/对-二甲苯、乙烯、丙烯的贡献均超过了 10%。前 10 位物种的行业分布和 OFP 值如图 2 所示，间/对-二甲苯主要来自有机溶剂使用源(75.65%)，乙烯主要来自生物质燃烧源(27.91%)、移动源(27.31%)，丙烯主要来自工业过程源(28.24%)、有机溶剂储运源(31.31%)。1, 3-丁二烯主要来自有机溶剂储运源(59.45%)、工业过程源(37.00%)，甲苯主要来自工业过程源(45.40%)、有机溶剂使用源(35.75%)，邻-二甲苯与乙苯主要来自有机溶剂使用源(68.81%~76.28%)，1-丁烯与 1, 2, 4-三甲基苯主要来自有机溶剂使用源(43.59%~46.55%)、工业过程源(24.90%~24.17%)，对-乙基甲苯主要来自工业过程源(62.89%)、有机溶剂使用源(23.53%)。

表 4 江苏省 VOCs 排放量与 OFP 分行业贡献

Table 4 Source contribution to VOCs emissions and ozone formation potential (OFP) in Jiangsu

行业	VOCs 排放量/t	占比/%	OFP/t	占比/%
化石燃料燃烧	142 298	7.38	273 952	5.05
工业	38 746	2.01	120 973	2.23
发电	60 866	3.16	38 367	0.71
供热	5 407	0.28	29 867	0.55
生活	37 280	1.93	85 081	1.57
工业过程源	538 510	27.93	1 590 045	29.29
石化	100 602	5.22	269 733	4.97
化工	190 635	9.89	623 603	11.49
食品制造	62 944	3.27	225 667	4.16
医药	29 792	1.55	47 894	0.88
其他	154 536	8.02	423 148	7.79
溶剂使用源	762 729	39.56	2 280 131	42.00
机械设备制造	156 995	8.14	608 780	11.21
交通设备制造	51 046	2.65	229 552	4.23
印刷包装	96 016	4.98	280 848	5.17
木材加工	58 749	3.05	47 214	0.87
建筑装饰	95 900	4.97	351 971	6.48
餐饮油烟	45 807	2.38	112 044	2.06
生活与商业	132 779	6.89	388 379	7.15%
其他	125 437	6.51	261 342	4.8
移动源	311 860	16.18	876 839	16.15
道路移动源	289 648	15.02	824 312	15.18
非道路移动源	22 212	1.15	52 527	0.97
有机溶剂储运源	103 996	5.39	192 579	3.55
生物质燃烧源	68 423	3.55	215 562	3.97
露天燃烧	35 423	1.84	119 891	2.21
燃料燃烧	33 000	1.71	95 671	1.76

1)表中黑体字为该类别子行业的总和

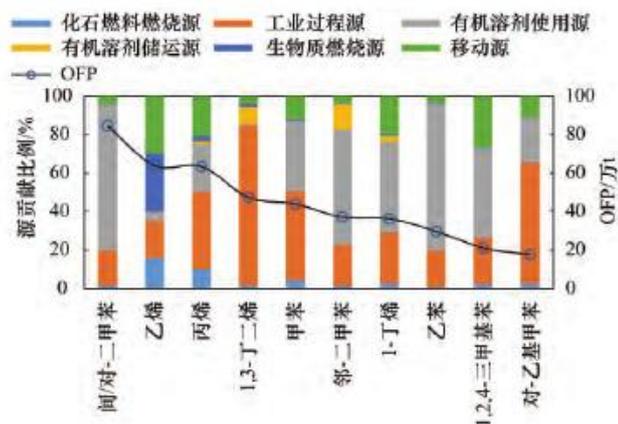


图 2 OFP 前 10 位物种排放行业分布

Fig. 2 Source contributions of the 10 species contributing the most OFP

3 讨论

3.1 不确定性分析

排放清单和臭氧生成潜势估算不确定性的主要来源包括:①活动水平的获取主要来自行业数据与统计年鉴,统计口径为规模以上企业,江苏省化工行业发达,小微企业数量众多,虽然研究基于地方调查数据对活动水平进行了补充,但大部分城市未开展全面调查,数据未得到更新.建筑装饰、印刷包装等行业的活动水平基于全国数据分配至各市,带来活动水平的不确定性.②排放因子的选取,本文中排放因子主要来自国外文献,但我国企业工艺装备、污染控制水平与国外差异较大,苏南、苏北地区间差异较为显著,本研究考虑了苏南、苏中与苏北地区部分行业污染控制的差异,但较为粗糙,需要更为详实的数据支撑.③本研究采用的 VOCs 源谱主要来自国内外文献,而 VOCs 源谱受企业生产原辅料、工艺设备、产品等影响显著,尤其是化工、医药行业,不同产品的源谱特征差异很大,带来源谱的不确定性.解决上述问题,需要开展更为全面细致的活动水平调查,建立江苏省本地化 VOCs 排放因子与源成分谱库.

3.2 与其它研究成果对比

为反映本研究成果与相关研究之间的差异,选取 2005 年、2010 年针对江苏省 VOCs 排放清单研究与本研究进行对比,如表 5 所示,本研究排放总量比其他研究略高,主要表现为工业过程源和溶剂使用源排放量较高,可能与江苏省近年来装备制造、化工、医药高速发展有关.

4 结论

(1)江苏省 2015 年人为源 VOCs 排放总量为 192.78 万 t,其中溶剂使用源和工业过程源排放量最大,分别占排放总量的 27.93%、39.56%,工业源中重点行业包括石油化工、有机化工、机械装备、印刷包装,排放量均超过 9 万 t.苏州、南京、徐州这 3 市 VOCs 排放量居全省前三位,均超过 20 万 t.扬州、镇江排放量最小,均小于 10 万 t.

(2)人为源排放中,烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、含氧 VOCs 物种的比例分别为 26.79%、14.74%、1.86%、39.23%、4.84%、12.53%.排放量居前 5 位的物种分别为甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、乙烷、丙烷.

(3)以 56 种臭氧前驱物计算 OFP,2015 年江苏省人为源 VOCs 排放 OFP 共计 542.95 万 t,溶剂使用源对 OFP 贡献最大.化石燃料燃烧、工业过程源、有机溶剂使用源、移动源、有机溶剂储运源、生物质燃烧源对 OFP 的贡献分别为 5.05%、29.29%、42.00%、16.15%、3.55%、3.97%.(4)OFP 居前 10 位的物种分别是间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、1,3-丁二烯、甲苯、邻-二甲苯、1-丁烯、乙苯、1,2,4-三甲基苯、对-乙基甲苯,前 10 位物种对总 OFP 的贡献为 75.63%.

参考文献:

[1] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, et al. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (1) :512-518.

[2] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京:高等教育出版社,2006. 70-78.

[3] 王雪松,李金龙,张远航,等. 北京地区臭氧污染的来源分析 [J]. 中国科学 B 辑:化学,2009,39(6):548-559.

- Wang X S, Li J L, Zhang Y H, et al. Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing, China [J]. Science in China Series B: Chemistry, 2009, 52 (8) :1270-1280.
- [4] Geng F H, Tie X X, Xu J M, et al. Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(29) : 6873-6883.
- [5] 唐文苑, 赵春生, 耿福海, 等. 上海地区臭氧周末效应研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(1) : 99-105.
- Tang W Y, Zhao C S, Geng F H, et al. Study of ozone “weekend effect” in Shanghai [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(9) : 1354-1360.
- [6] 胡海波, 谢旻, 彭珍. 南京地区光化学污染及其控制对策研究 [EB / OL]. [http: // www. paper. edu. cn / releasepaper / content / 201202-310](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201202-310).
- Hu H B, Xie M, Peng Z, et al. A study on tropospheric photochemistry over Nanjing and the countermeasure for ozone control [EB / OL]. [http: // www. paper. edu. cn / releasepaper / content / 201202-310](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201202-310).
- [7] 李锦菊, 伏晴艳, 吴迺名, 等. 上海大气面源 VOCs 排放特征及其对 O₃ 的影响 [J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(5) : 54-57.
- Li J J, Fu Q Y, Wu Y M, et al. Characteristic of VOCs emission from atmospheric area sources in Shanghai and its contribution to O₃ [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009, 21(5) : 54-57.
- [8] Wei W, Wang S X, Chatani S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(20) : 4976-4988.
- [9] Huang C, Chen C H, Li L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(9) : 4105-4120.
- [10] 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等. 江苏省人为源挥发性有机物排放清单 [J]. 环境科学研究, 2014, 27(2) : 120-126.
- Xia S J, Zhao Q Y, Li B, et al. Anthropogenic source VOCs emission inventory of Jiangsu Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(2) : 120-126.
- [11] 毛攀, 吴秀才, 赵瑜. 南京市化工行业非甲烷挥发性有机物排放清单研究 [J]. 中国科技论文, 2015, 10 (12) : 1424-1430.
- Mao P, Wu X C, Zhao Y. Study on emission inventory of non-methane volatile organic compounds for chemical industry in Nanjing [J]. China Science Paper, 2015, 10(12) : 1424-1430.
- [12] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [13] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[14] 中国石油和化学工业联合会. 中国化学工业年鉴 2014 [M]. 北京: 中国化工信息中心, 2015.

[15] 中国涂料工业协会. 中国涂料工业年鉴 2015 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

China Coating Industrial Association. China paint and coatings industry annual 2015 [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[16] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

Rural social and Economic Research Bureau of National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.

[17] US EPA. Emissions factors and AP42 compilation of air pollutant emission factors [EB / OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors>.

[18] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, 76:189-199.

[19] Tsai S M, Zhang J F, Smith K R, et al. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13) : 2869-2877.

[20] 羌宁. 全国石化行业 VOCs 排放特征研究报告 [R]. 上海: 同济大学, 2010.

[21] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook-2013 [EB / OL]. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>, 2015-03-28.

[22] 陈颖. 我国工业源 VOCs 行业排放特征及未来趋势研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

Chen Y. Study on current and future industrial emissions of volatile organic compounds in China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[23] 台湾环境保护署. 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 [R]. 台北: 台湾环境保护署, 2009.

[24] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, et al. Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 157(2-3) : 569-578.

[25] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.

Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.

[26] 吴洪杰, 刘玲英, 蔡慧华, 等. 珠江三角洲制鞋行业挥发性有机化合物排放系数研究 [J]. 中国环境监测, 2013, 29(4) :

74-78.

Wu H J, Liu L Y, Cai H H, et al. Study on the emission coefficient of VOCs from shoe-making industry in the Pearl River Delta Region [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(4) : 74-78.

[27] 杨利娴. 我国工业源 VOCs 排放时空分布特征与控制策略研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

Yang L X. Study on temporal-spatial characteristic and control strategy of industrial emissions of volatile organic compounds in China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[28] GB 18582-2008, 室内装饰装修材料 内墙涂料中有害物质限量 [S].

[29] 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 [EB/OL]. [http://www. zhb. gov. cn /gkml/hbb/bgg /201408 / t20140828288364. htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828288364.htm), 2014-08-20.

[30] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17) : 6052-6058.

[31] 中华人民共和国环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南 [EB /OL]. [http: / /www. zhb. gov. cn/gkml/hbb / bgg /201408 / t20140828288364. htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828288364.htm), 2014-08-20.

[32] Wang H L, Qiao Y Z, Chen C H, et al. Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from solvent use in Shanghai, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014, 14(1) : 301-310.

[33] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, et al. Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2013, 456- 457: 127-136.

[34] Yuan B, Shao M, Lu S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(15) : 1919-1926.

[35] Mo Z W, Shao M, Lu S H, et al. Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 533: 422-431.

[36] 史建武. 中国北方城市大气挥发性有机物活性及来源研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.

Shi J W. Study on chemical reactivity and source apportionment of atmospheric VOCs in northern cities [D]. Tianjin: Nankai University, 2010.

[37] Hsu Y C, Chen S K, Tsai J H, et al. Determination of volatile organic profiles and photochemical potentials from chemical manufacture process vents [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(6) : 698-704.

[38] 王刚, 魏巍, 米同清, 等. 典型工业无组织源 VOCs 排放特征 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(7) : 1957-1964.

Wang G, Wei W, Mi T Q, et al. Characteristics of VOCs emitted from typical industrial fugitive [J]. China Environmental Science, 2015, 35(7) : 1957-1964.

[39] 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 等. 典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 [J]. 环境科学, 2014, 35(3) : 847-852.

Xu Z R, Wang P, Wang Z M, et al. Study on the Emission characteristics and potential environment hazards of the heat-setting machine of the typical dyeing and finishing enterprise [J]. Environmental Science, 2014, 35(3) : 847-852.

[40] Liu Y, Shao M, Fu L, et al. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I [J]. Atmospheric Environment. 2008, 42(25) : 6247-6260.

[41] Shi J W, Deng H, Bai Z P, et al. Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 515-516: 101-108.

[42] 李兴华, 王书肖, 郝吉明. 民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 [J]. 环境科学, 2011, 32(12) : 3515-3521.

Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from biofuel combustion in China [J]. Environmental Science, 2011, 32(12) : 3515-3521.

[43] Wang J, Jin L M, Gao J H, et al. Investigation of speciated VOC in gasoline vehicular exhaust under ECE and EUDC test cycles [J]. Science of the Total Environment, 2013, 445-446: 110-116.

[44] Dai P P, Ge Y S, Lin Y M, et al. Investigation on characteristics of exhaust and evaporative emissions from passenger cars fueled with gasoline / methanol blends [J]. Fuel, 2013, 113: 10-16.

[45] Tsai J H, Chang S Y, Chiang H L. Volatile organic compounds from the exhaust of light-duty diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2012, 61: 499-506.

[46] Yao Y C, Tsai J H, Wang I T. Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend [J]. Applied Energy, 2013, 102: 93-100.

[47] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(23) : 7297-7316.