

四川省加油站挥发性有机物排放及控制现状*

王继钦^{1,2,3} 陈军辉^{1#} 韩丽¹ 王波^{1,2} 徐晨曦^{1,2} 李英杰^{1,2}

(1.四川省生态环境科学研究院,四川 成都 610041;2.四川省环保科技工程有限责任公司,四川 成都 610041;
3.西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010)

摘要 四川省汽车保有量2017年位列全国第7位,油品储运销过程中挥发性有机物(VOCs)排放压力巨大。利用排放因子法,结合四川省4492座加油站的油品销售量,编制了四川省2017年加油站VOCs排放清单。另一方面,对四川省不同片区的VOCs排放特征及油气回收关键参数进行了现场实测。结果表明:四川省加油站VOCs排放量共12294.54t,排放区域主要集中在成都市、绵阳市和宜宾市等地区;四川省四大片区VOCs排放浓度,加油环节攀西片区最高,达到7076.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,卸油环节川东北片区最高,达到9638.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均是其他片区的2~3倍,加油和卸油环节排放的异戊烷最高占比(质量分数)可分别达到70.1%和67.4%;四川省油气回收系统达标情况仍然比较严峻,不达标率高达47%,密闭性和气液比不达标率尤为显著,集中式油气回收系统不达标率高于分散式。

关键词 四川省 加油站 挥发性有机物 排放清单 成分谱 油气回收

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.06.004

Emission and control of volatile organic compounds in service stations in Sichuan WANG Jiqin^{1,2,3}, CHEN Junhui¹, HAN Li¹, WANG Bo^{1,2}, XU Chenxi^{1,2}, LI Yingjie^{1,2}. (1. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu Sichuan 610041; 2. Sichuan Environmental Protection Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041; 3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010)

Abstract: The number of motor vehicles in Sichuan ranked seventh in China, and the emission pressure of volatile organic compounds (VOCs) in the storage, transportation and marketing of oil products was huge. By using the emission factor method, combining the oil product sales volume of 4492 service stations in Sichuan, the VOCs emission inventory of service stations for Sichuan in 2017 was established. On the other hand, the field measurement of VOCs emission characteristics and key parameters of vapor recovery in different areas of Sichuan was carried out. The results showed that the emission of VOCs from service stations was 12294.54 t, mainly concentrated in Chengdu, Mianyang and Yibin. Among the four major areas in Sichuan, during refueling link Panxi area owned the highest concentration of VOCs, reaching 7076.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and during unloading link northeast Sichuan area owned the highest, reaching 9638.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was 2-3 times of the other areas. The highest mass proportion of isopentane emission from the refueling and unloading processes could reach 70.1% and 67.4%, respectively. The monitoring result of vapor recovery system was still serious, with the rate of failure to meet the standard as high as 47%, particularly vapor recovery system tightness and air to liquid volume ratio. The rate of failure to meet the standard of centralized vapor recovery system was higher than that of dispersed.

Keywords: Sichuan; service station; VOCs; emission inventory; composition spectrum; vapor recovery

挥发性有机物(VOCs)广泛存在于近地面大气中,其种类繁多、结构复杂,是城市大气光化学氧化剂和有机气溶胶的重要前体物,对臭氧和细颗粒物的生成起到重要作用,是引起能见度下降、臭氧超标的重要前体物^[1-9]。此外,大量相关研究报道,我国大部分地区近地面臭氧的生成主要受VOCs控制^[10-12]。邵敏等^[13]报道北京市2002—2003年大气

VOCs中15%(质量分数,下同)的烯烃化合物来源于汽车尾气和汽油挥发,其贡献了约75%的大气化学活性。加油站汽油销售量与机动车保有量成正比关系,加油站油气挥发已成为VOCs重要来源之一。截至2017年12月,四川省汽车保有量为894万辆,全国排名第7^[14]。油气回收是我国最早实施的加油站VOCs排放控制措施,在2003年和2007年,北京

第一作者:王继钦,男,1988年生,博士研究生,主要从事挥发性有机物控制技术研究。*通讯作者。

*四川省环境保护科技计划项目(No.2018HB03);四川省重大科技专项(No.2019YFS0499)。

市及原环境保护部先后制定了《加油站油气排放控制和限值》(DB11/208—2003)和《加油站大气污染物排放标准》(GB 20952—2007),为全国加油站污染控制提供了重要保障。

近些年来,对于人为源 VOCs 的研究主要集中在排放量估算与典型行业(如石化、化工、制药、工业涂装、印刷等)成分谱测试^{[15]5350-5354,[16],[17]4538-4539}。而对于加油站 VOCs 排放量估算、排放浓度测试、油气回收实施情况研究却非常有限。沈旻嘉等^[18]使用排放因子法估算我国 2002 年加油站 VOCs 排放量约为 18.76 万 t。YANG 等^[19]使用排放因子法估算 2010 年我国加油站 VOCs 排放达到 18.5 万 t。黄玉虎等^{[20]620}利用北京市本地化的排放因子估算北京市副中心(通州区)2015 年加油站 VOCs 排放量为 97.8 t。韩丽等^{[17]4538}利用排放因子法估算四川省 2011 年加油站 VOCs 排放量为 1.25 万 t。周子航等^{[15]5350}利用排放因子法估算四川省 2015 年储存运输源的 VOCs 排放量为 1.03 万 t。然而,四川省的加油站排放清单空间分辨率不高,加油及卸油 VOCs 的排放浓度水平及组分情况尚不清楚,且油气参数的达标情况鲜有报道。因此,本研究在 2017 年加油站的相关活动水平基础上,利用《VOCs 排放源清单与控制技术指南》建立了四川省加油站

VOCs 高分辨率排放清单;对四川省成都平原、川东北、川南和攀西四大主要片区典型城市加油站加油及卸油排放情况进行了监测,获得了加油站加油及卸油的排放浓度水平及组分占比情况;最后对四川省四大主要片区典型城市加油站油气密闭性、液阻和气液比参数进行了测试,获取了四川省加油站控制现状,以期为四川省下阶段加油站 VOCs 的控制提供对策和技术支撑。

1 方 法

1.1 四川省加油站活动水平

本研究采用 2017 年加油站活动水平,获得了四川省 21 个市(州)的加油站个数以及汽油和柴油销售量情况,具体见表 1。四川省加油站共 4 492 座,其中成都市、绵阳市和南充市位列前三;四川省汽油 2017 年销售量约 715.49 万 t,其中成都市、绵阳市和宜宾市位列前三;四川省柴油 2017 年销售量约 418.40 万 t,其中成都市、宜宾市和泸州市销售量位列前三。四川省加油站油气回收系统安装情况中,全省共 97%的加油站安装有油气回收系统,3%加油站未安装油气回收系统,处于一次油气回收阶段的加油站占比为 8%,处于二次油气回收阶段的加油站占比为 89%。

表 1 2017 年四川省加油站活动水平数据
Table 1 Activity level data of service stations in Sichuan in 2017

项目	加油站 /座	处于无油气 回收阶段/座	处于一次油气 回收阶段/座	处于二次油气 回收阶段/座	汽油销售量 /t	柴油销售量 /t
成都市	772	39	28	705	2 962 580.28	1 168 388.08
绵阳市	347	1	43	303	370 681.46	204 938.56
南充市	276	1	14	261	295 409.87	174 103.48
德阳市	274	4	7	263	285 989.30	206 809.36
乐山市	262	9	21	232	236 134.64	161 847.40
宜宾市	256	4	12	240	352 250.85	223 797.66
达州市	244	8	47	189	256 376.34	207 267.24
泸州市	229	1	0	228	268 372.80	208 826.46
眉山市	220	2	15	203	221 756.36	129 254.46
凉山州	207	8	40	159	248 062.81	182 347.23
广元市	189	6	20	163	176 748.71	156 676.30
内江市	176	0	25	151	197 899.97	115 583.86
广安市	140	8	13	119	155 176.52	176 260.00
自贡市	136	0	57	79	167 089.52	90 701.77
巴中市	133	21	5	107	150 534.03	110 743.50
遂宁市	132	0	1	131	167 377.05	114 037.22
甘孜州	112	2	2	108	100 722.12	115 265.12
雅安市	103	6	6	91	174 622.07	145 609.47
资阳市	102	13	20	69	118 379.60	89 606.31
阿坝州	94	1	2	91	109 176.49	95 704.09
攀枝花市	88	3	2	83	139 601.75	106 183.29
总计	4 492	137	380	3 975	7 154 942.54	4 183 950.86

1.2 加油站 VOCs 排放量估算方法

加油站 VOCs 排放量估算采用排放因子法,鉴于目前四川省油气治理水平难以达到国内发达城市水平,因此四川省汽油排放因子采用《VOCs 排放源清单与控制技术指南》的产污因子,柴油排放因子参考上海市产污因子,计算方法见式(1)。

$$E = (A_1 \times EF_1 (1 - \eta) + A_2 \times EF_2) / 1\,000 \quad (1)$$

式中: E 为加油站 VOCs 排放量, t ; A_1 为汽油销售量, t ; EF_1 为汽油 VOCs 产污因子,取 $3.243\text{ kg}/t$; η 为加油站各环节油气排放综合控制效率,取 50% ; A_2 为柴油销售量, t ; EF_2 为柴油产污因子,取 $0.08\text{ kg}/t$ 。

1.3 油气组分分析方法

本研究共选取 22 座不同区域、不同品牌的加油站开展汽油油气样品采集和挥发组分分析,共采集了 37 个典型样本。采用气相色谱—质谱联用法 (GC/MS) 对样品中的 VOCs 进行组分分析,使用 PAMS 系列标气和 TO15 系列标气对 106 种组分定量分析。加油和卸油采样点采用苏玛罐采样,加油过程采样点位于加油岛中间,距离地面 1.5 m ,卸油过程中的采样点位于压力控制阀下风向 1.0 m 处,距离地面 1.5 m 。鉴于卸油时间一般是连续 0.5 h 左右,卸油区采样频次为限流阀连续采集 0.5 h ,加油区采样频次为限流阀连续采集 1 h ,样品常温下保存,从开始采样到开始分析间隔不超过 7 d 。每次采样前,实验室的苏玛罐、气袋都进行空白背景值测试。对于苏玛罐样品,每批样品至少分析 1 个运输空白。分析了高浓度样品后,预浓缩 GC/MS 必须增加高纯 N_2 空白分析,以防残留。

1.4 油气回收系统检测方法

在成都平原(成都市和绵阳市)、川东北(南充市)、川南(泸州市)及攀西(攀枝花市)4 个片区,按照 GB 20952—2007 共选取 25 座加油站进行密闭性、液阻和气液比检测。

2 结果与讨论

2.1 四川省加油站排放清单

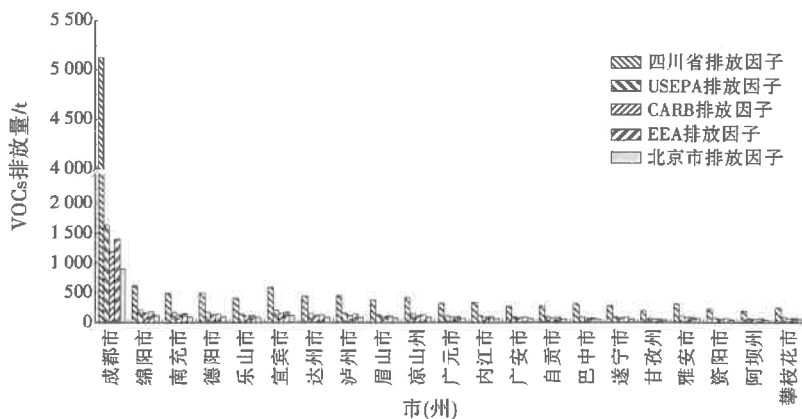
四川省加油站 VOCs 排放量空间分布见图 1。四川省加油站 VOCs 排放共 $12\,294.54\text{ t}$,其中汽油排放占 97% ,柴油排放占 3% 。从区域分布来看,成都市、绵阳市和宜宾市排放占比最高,排放量分别为 $5\,121.26$ 、 617.95 、 589.59 t ,质量占比分别为 41.7% 、 5.0% 和 4.8% 。四川省 2011 年加油站的排放量为 1.25 万 t ^{[17]4538},2015 年储存运输源的 VOCs 排放量为 1.03 万 t ^{[15]5350}。因此,尽管油气回收治理设施安装率增高,但同时机动车保有量的增长导致加油站油气挥发量也在快速增长,再结合 USEPA、CARB、EEA、北京市排放因子的核算结果也可知,四川省加油站的 VOCs 排放形势依然严峻。

四川省加油站 VOCs 排放占比见表 2。加油站 VOCs 排放量占 VOCs 排放总量的 1.77% ,其中甘孜州、阿坝州、巴中市、成都市、广安市和凉山州加油站 VOCs 排放占比较高,均高于 2% 。

2.2 加油和卸油环节 VOCs 排放特征

2.2.1 VOCs 排放浓度水平空间分布

四川省不同片区加油和卸油排放浓度水平见图 2。成都平原、川东北、川南及攀西 4 个片区加油环节 VOCs 排放质量浓度分别为 $2\,044.04$ 、 $3\,714.89$ 、 $2\,847.86$ 、 $7\,076.86\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,卸油环节



注:美国环保署(USEPA)^[21]、加州空气资源委员会(CARB)^[22]、欧洲环境署(EEA)^[23]和北京市^{[20]620}等均开展了排放因子研究。为进行比较,分别采用了 USEPA、CARB、EEA 和北京市排放因子进行四川省 VOCs 排放量核算。

图 1 四川省加油站 VOCs 排放量空间分布

Fig.1 VOCs emission spatial distribution of service stations in Sichuan

表 2 四川省加油站 VOCs 排放占比
Table 2 VOCs emission ratio of service stations in Sichuan

项目	VOCs 排放 总量/t	加油站 VOCs 排放量/t	加油站 VOCs 排放占比/%
甘孜州	5 235.95	184.70	3.53
阿坝州	5 374.56	184.79	3.44
巴中市	9 510.77	301.69	3.17
成都市	209 224.84	5 121.26	2.45
广安市	12 301.00	268.44	2.18
凉山州	19 762.47	418.80	2.12
达州市	22 205.99	441.04	1.99
自贡市	15 331.52	278.20	1.81
绵阳市	38 374.63	617.95	1.61
宜宾市	36 850.84	589.59	1.60
资阳市	13 857.26	218.62	1.58
广元市	20 206.66	311.85	1.54
南充市	33 220.83	493.07	1.48
乐山市	28 794.44	405.64	1.41
雅安市	21 804.67	301.67	1.38
眉山市	27 467.62	370.11	1.35
遂宁市	24 758.18	280.52	1.13
攀枝花市	22 634.47	238.89	1.06
德阳市	46 236.08	485.33	1.05
泸州市	43 881.06	452.24	1.03
内江市	38 434.11	330.14	0.86
总计	695 467.95	12 294.54	1.77

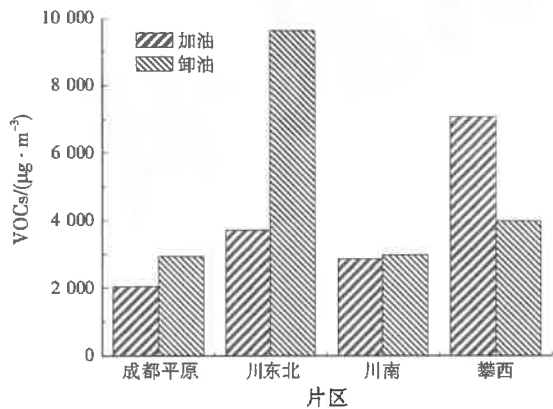


图 2 四川省不同片区加油和卸油 VOCs 排放质量浓度水平
Fig.2 VOCs emission mass concentration levels of refueling and unloading in different areas of Sichuan

表 3 四川省加油站加油环节 VOCs 成分谱¹⁾
Table 3 The composition spectrum of VOCs during refueling of service stations in Sichuan

序号	化合物名称	最高占比/%	最低占比/%	平均占比%	标准偏差/%
1	异戊烷	70.10	11.90	34.90	14.42
2	正戊烷	16.60	3.90	8.60	3.04
3	正丁烷	19.70	ND	7.80	5.30
4	3-甲基戊烷	15.00	0.30	6.90	3.53
5	2-甲基戊烷	12.40	1.80	6.30	2.19
6	异丁烷	13.30	ND	6.10	4.95
7	甲苯	ND	0.10	5.00	2.49
8	甲基环戊烷	3.70	ND	2.30	0.89
9	正己烷	3.30	ND	2.10	0.81

注: ¹⁾ 占比以质量分数计,表中仅列出平均占比超过 2% 的 VOCs 组分,表 4 同;ND 表示未检出,不参与平均占比与标准偏差的计算。

VOCs 排放质量浓度分别为 2 930.36、9 638.53、2 977.84、3 978.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除攀西片区外,其他片区卸油 VOCs 的排放浓度总体高于加油,川东北和攀西片区加油和卸油的 VOCs 排放浓度高于其他片区,一方面是攀西和川东北采样时的温度较高,另一方面可能是与片区油气回收管控情况有关。史小春等^[24]研究发现,2011 年上海市加油站卸油环节中油罐车卸油管与地下油罐进油管接口外侧的 VOCs 质量浓度为 30~80 mg/m^3 。因此,四川省 2017 年卸油环节 VOCs 的管控与上海市 2011 年水平相比,有较大改善。

2.2.2 不同排放阶段 VOCs 排放成分谱

各加油站加油和卸油排放的 VOCs 主要组分分别见表 3 和表 4。加油环节,异戊烷、正戊烷和正丁烷的占比排名前三。异戊烷最高占比为 70.10%,平均为 34.90%;正戊烷最高占比为 16.60%,平均为 8.60%;正丁烷最高占比为 19.70%,平均为 7.80%。卸油环节,异戊烷、正丁烷和异丁烷的占比排名前三。异戊烷最高占比为 67.40%,平均为 34.80%;正丁烷最高占比为 16.20%,平均为 11.10%;异丁烷最高占比为 15.60%,平均为 10.90%。

2.3 四川省加油站油气回收系统检测情况

本研究共选取 25 座加油站,合计进行 25 次密闭性检测,37 次液阻检测和 92 次气液比检测。检测结果显示,密闭性、液阻和气液比的不达标率分别为 32%、4%和 28%,3 项指标综合的不达标率达 47%。由此可见,四川省加油站的油气回收不达标率仍然偏高,尤其需关注密闭性和气液比的达标情况。

图 3 为集中式和分散式油气回收系统达标率对比。分散式油气回收系统的密闭性达标率为 71%,集中式为 64%;分散式油气回收系统的液阻达标率为 93%,集中式为 100%;分散式油气回收系统的气

表4 四川省加油站卸油环节 VOCs 成分谱
Table 4 The composition spectrum of VOCs during unloading of service stations in Sichuan

序号	化合物名称	最高占比/%	最低占比/%	平均占比/%	标准偏差/%
1	异戊烷	67.40	23.30	34.80	12.27
2	正丁烷	16.20	3.10	11.10	3.88
3	异丁烷	15.60	3.00	10.90	3.69
4	正戊烷	10.60	4.60	7.70	1.73
5	2-甲基戊烷	8.30	2.10	6.30	1.78
6	3-甲基戊烷	7.20	0.90	5.10	1.83
7	甲苯	8.20	1.20	3.80	2.02
8	甲基环戊烷	4.50	0.20	2.60	1.22
9	正己烷	3.30	0.10	2.10	0.86

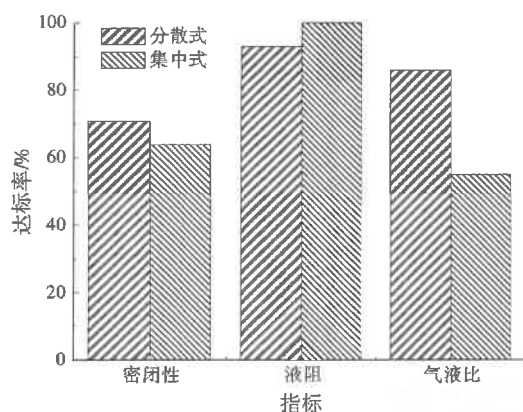


图3 四川省加油站不同油气回收系统的达标情况
Fig.3 Compliance status of different vapor recovery systems of service stations in Sichuan

液比达标率为 86%，集中式为 55%。结果表明，分散式油气回收系统的达标率总体略高于集中式，其中气液比达标率差异最明显。

图4为不同片区3项指标达标情况。成都平原片区3项指标达标率均较高，密闭性、液阻和气液比达标率分别为85%、100%和85%；川东北片区密闭性、液阻和气液比达标率分别为50%、100%和75%；川南片区密闭性、液阻和气液比达标率分别为50%、75%和75%；攀西片区密闭性、液阻和气液比达标率分别为50%、100%和25%。攀西、川东北和

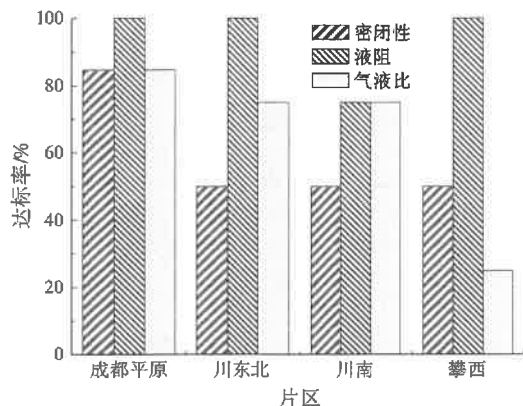


图4 四川省不同片区达标情况
Fig.4 Compliance status of different areas in Sichuan

川南片区密闭性和气液比的合格率相对较低，其中攀西片区最低；且攀西、川东北和川南片区加油环节 VOCs 的浓度相对较高。

3 结论与建议

(1) 2017 年四川省加油站 VOCs 排放共 12 294.54 t，其中汽油排放占 97%，柴油排放占 3%。排放主要集中在成都市、绵阳市和宜宾市等地区。

(2) 加油环节攀西片区 VOCs 排放质量浓度最高，达到 7 076.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，卸油环节川东北片区最高，达到 9 638.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均为其他片区的 2~3 倍。从 VOCs 组分来看，异戊烷、正戊烷、正丁烷和异丁烷的质量浓度占比较高，其中加油和卸油环节异戊烷的最高占比分别可达到 70.10% 和 67.40%。因此应对 VOCs 排放浓度较高片区的加油和卸油环节加强 VOCs 排放控制。

(3) 四川省油气回收系统不达标率高达 47%。密闭性和气液比不达标率尤为显著，集中式油气回收系统不达标率高于分散式。因此，四川省加油站的油气回收治理管控形势仍然比较严峻，对于不达标企业或者新改造企业，油气回收系统建议采用分散式。

参考文献:

- [1] 杨辉,朱彬,高晋徽,等.南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J].环境科学,2013,34(12):4519-4528.
- [2] YURDAKUL S, CIVAN M, TUNCCEL G. Volatile organic compound in suburban Ankara atmosphere, Turkey: sources and variability[J]. Atmospheric Research, 2013, 120: 298-311.
- [3] 徐晨曦,陈军辉,韩丽,等.成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J].环境科学,2019,32(4):619-626.
- [4] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [5] HALLQUIST M, WENGER J C, BALTENSBERGER U, et

- al. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5155-5236.
- [6] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. *太原理工大学学报*, 2016, 47(3): 331-335.
- [7] CARLTON A G, WIEDINMYER C, KROLL J H. A review of secondary organic aerosol (SOA) formation from isoprene[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 4987-5005.
- [8] LOU Y F, DAREN L, ZHOU X J, et al. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D13): 14501-14513.
- [9] CHEN Y, XIE S D. Temporal and spatial visibility trends in the Sichuan Basin, China, 1973 to 2010[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 112: 25-34.
- [10] SHAO M, LU S H, LIU Y, et al. Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground-level ozone formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D2): D00G06.
- [11] TANG G, WANG Y, LI X, et al. Spatial-temporal variations in surface ozone in Northern China as observed during 2009-2010 and possible implications for future air quality control strategies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(5): 2757-2776.
- [12] XUE L K, WANG T, GAO J, et al. Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13175-13188.
- [13] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2005, 35(增刊1): 123-130.
- [14] 环境保护部. 中国机动车环境管理年报(2017)[R]. 北京: 环境保护部, 2018.
- [15] 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).
- [16] 何敏, 王幸锐, 韩丽. 四川省大气固定污染源排放清单及特征[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 3127-3137.
- [17] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(12).
- [18] 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制[J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1473-1478.
- [19] YANG X F, LIU H, CUI H Y, et al. Vehicular volatile organic compounds losses due to refueling and diurnal process in China: 2010-2050[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 33: 88-96.
- [20] 黄玉虎, 胡玮, 李贝贝, 等. 北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单[J]. *环境科学*, 2018, 39(2).
- [21] USEPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 5.2: transportation and marketing of petroleum liquids[R]. Washington D.C.: USEPA, 2008.
- [22] CARB. Revised emission factor for gasoline marketing operations at California gasoline dispensing facilities[R]. Sacramento: CARB, 2013.
- [23] EEA. EMEP/EEA emission inventory guidebook: distribution of oil products[R]. Copenhagen: EEA, 2013.
- [24] 史小春, 钱华, 戴海夏, 等. 上海加油站各环节油气排放情况[J]. *三峡环境与生态*, 2011, 33(6): 51-56.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2019-09-17)

(上接第 671 页)

- [3] GONG M, YIN S, GU X, et al. Refined 2013-based vehicle emission inventory and its spatial and temporal characteristics in Zhengzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 1149-1159.
- [4] 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.
- [5] ZHANG S, NIU T, WU Y, et al. Fine-grained vehicle emission management using intelligent transportation system data[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 1027-1037.
- [6] LIU Y, MA J, LI L, et al. A high temporal-spatial vehicle emission inventory based on detailed hourly traffic data in a medium-sized city of China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 324-333.
- [7] RASMUSSEN R A, KHALIL M A. Atmospheric trace gases and distributions over the last decade[J]. *Science*, 1986, 232(4758): 1623-1624.
- [8] 黄少妮, 袁媛, 井宇, 等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J]. *干旱气象*, 2016, 34(6): 1037-1046.
- [9] LAU C F, RAKOWSKA A, TOWNSEND T, et al. Evaluation of diesel fleet emissions and control policies from plume chasing measurements of on-road vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 171-182.
- [10] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [11] ZHENG J, ZHANG L, CHE W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(32): 5112-5122.
- [12] KOTA S H, ZHANG H, CHEN G, et al. Evaluation of on-road vehicle CO and NO_x national emission inventories using an urban-scale source-oriented air quality model[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 85: 99-108.
- [13] FAMELI K M, ASSIMAKOPOULOS V D. Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: effects of important parameters[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 770-786.
- [14] USEPA. MOVES 2014a user guide[R]. Washington, D.C.: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality, 2015.
- [15] ROBERTSON G P, VITOUSEK P M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34: 97-125.
- [16] 张建才. 车用柴油机有害排放物机内净化技术应用研究[J]. *甘肃科技*, 2015, 31(14): 45-48.
- [17] 郝艳召, 邓顺熙, 邱兆文, 等. 基于 MOVES 模型的西安市机动车排放清单研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(3): 227-235.
- [18] 王静晔. 关中地区人为源大气污染物排放清单研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [19] ZHUO Y, HENG W, PERUGU H, et al. Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 1(2): 81-96.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2019-10-18)