

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 郝郑平(477)

我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中 VOCs 污染特征 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

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(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市 PM_{2.5} 时空分布特征及其与 PM₁₀ 关系的时空变异特征 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面 CH₄ 冒泡通量的观测 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难凝聚有机物的臭氧化特性 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 孟晓荣,王隽桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 迟菘琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 严骁,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799, 908, 934)

北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单

黄玉虎^{1,2}, 胡玮², 李贝贝³, 纪旋⁴, 肖宇⁵, 任碧琪^{2*}, 秦建平²

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 北京市环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 4. 北京市通州区环境保护局, 北京 101100; 5. 北京市机动车排放管理中心, 北京 100176)

摘要: 通州区作为北京城市副中心, 面临着加油站 VOCs 排放量快速增长的巨大压力, 本研究以通州区为例, 建立了一套自下而上的加油站 VOCs 排放清单估算方法, 利用北京市本地化加油站 VOCs 排放因子, 结合每座加油站油品销售量, 编制了通州区 2015~2022 年高时空分辨率加油站 VOCs 排放清单. 结果表明: ①北京市加油站卸油、加油和罐压控制措施的基础上增加在线监控系统(OVS), 汽油 VOCs 排放因子由 190 mg·L⁻¹ 降至 115 mg·L⁻¹, 再叠加 50% 车载油气回收系统, 排放因子分别降至 131 mg·L⁻¹ 和 96 mg·L⁻¹; 加油站柴油 VOCs 排放因子(13 mg·L⁻¹) 是汽油未控制排放因子(1 552 mg·L⁻¹) 的 0.8%; ②通州区 2015 年加油站 VOCs 排放量为 97.8 t·a⁻¹, 汽油和柴油 VOCs 排放量分别为 96.2 t·a⁻¹ 和 1.6 t·a⁻¹, 分别占 98.4% 和 1.6%, 排放主要集中在北京市政府新址周边区域; ③实施《北京市 2013~2017 年清洁空气行动计划》油气回收要求后, 考虑油品销售量增长, 通州区 2017 年和 2022 年加油站 VOCs 排放量相比 2015 年减排 9% 和 6%, 假设 2022 年底前在 28 座 2 000~5 000 t·a⁻¹ 的加油站也安装 OVS, 加油站 VOCs 排放量相比 2015 年减排 13%; ④2014 年 APEC 期间单双号限行措施使加油站每日排放量减少了(22±12)%; ⑤建议加强北京市政府新址周边区域加油站和夏季以及中午加油闲时的油气回收监管工作.

关键词: 北京城市副中心; 加油站; VOCs; 油气回收; 排放清单

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0618-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702037

VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing

HUANG Yu-hu^{1,2}, HU Wei², LI Bei-bei³, JI Xuan⁴, XIAO Yu⁵, REN Bi-qi^{2*}, QIN Jian-ping²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Control Technology and Applications, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Beijing Tongzhou District Environmental Protection Bureau, Beijing 101100, China; 5. Beijing Vehicle Emission Management Centre, Beijing 100176, China)

Abstract: As a subcenter of the city of Beijing, Tongzhou District is faced with enormous pressure from the rapid growth of VOCs emissions from service stations. In this study, a set of bottom-up VOCs inventory estimation methods for service stations in Tongzhou District is established. Using local VOCs emission factors of service stations in Beijing, combined with gasoline and diesel sales from every service station, a high resolution VOCs emission inventory of service stations in Tongzhou District from 2015 to 2022 was established. The results showed the following. ①An online monitoring system (OMS) based on unloading, refueling, and tank pressure vapor emission control measures can reduce the VOCs emission factor from 190 mg·L⁻¹ to 115 mg·L⁻¹, and when the percent onboard refueling vapor recovery system (ORVR) Penetration reaches to about 50%, the emission factors can be reduced to 131 mg·L⁻¹ and 96 mg·L⁻¹, respectively. The VOCs emission factor (13 mg·L⁻¹) of diesel from the service station is 0.8% of the uncontrolled emission factor (1 552 mg·L⁻¹) of gasoline. ②The amount of VOCs emissions from service stations in Tongzhou District was 97.8 t·a⁻¹ in 2015, and the emissions of gasoline and diesel were 96.2 t·a⁻¹ and 1.6 t·a⁻¹, respectively, accounting for 98.4% and 1.6%. The emissions were mainly concentrated in the area surrounding the new Beijing Municipal Government site. ③After implementation of the vapor recovery requirements of "Beijing's Clean Air Action Plan from 2013-2017," considering the increase in oil sales from 2017 to 2022, VOCs emissions of gasoline and diesel from service stations will decrease by 9% and 6%, respectively, compared to those of 2015 in Tongzhou District. Assuming that the OVS will also be installed at 28 (2 000-5 000) t·a⁻¹ service stations by the end of 2022, VOCs emissions of service stations will be reduce by 13% compared to those of 2015. ④The measure of restricting the number of vehicles in operation by 50% can reduce VOCs emissions of service stations by (22±12)% every day during

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0211803); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B02); 北京市环境保护科学研究院基金项目(2014-B-03)

作者简介: 黄玉虎(1978~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: huangyuhu@sina.com

* 通信作者, E-mail: renbqi89@sina.com

2014 Asia-Pacific Economic Cooperation conference (APEC). ⑤ It is suggested to strengthen vapor recovery supervision on service stations in the area surrounding the new Beijing Municipal Government site, and in summer and refueling idle such as in noon.

Key words: sub-center of Beijing city; service station; VOCs; vapor recovery; emission inventory

2015年7月,中共北京市委11届7次全会审议通过了《京津冀协同发展规划纲要》,通州区正式成为北京市行政副中心^[1]. 2016年4月5日《人民日报海外版》提出通州区成为北京城市副中心. 2015年,北京市空气中细颗粒物($PM_{2.5}$)年平均浓度值为 $80.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过国家标准1.30倍;臭氧(O_3)日最大8h滑动平均第90百分位浓度值为 $202.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过国家标准0.27倍^[2]. 通州区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度值为 $92.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,全市排名倒数第4,仅比最大值低5%,比全市平均值高15%^[2],空气质量与北京城市副中心的形象极不相符. 通州区随着城市副中心的职能和人口不断增加,大气污染物排放量势必不断增加,因此建立通州区大气污染源排放清单并制订大气污染控制方案显得尤为重要.

挥发性有机物(VOCs)是 O_3 和 $PM_{2.5}$ 中二次有机气溶胶(SOA)的前体物^[3,4],加油站汽油挥发是VOCs的重要来源之一^[5,6],而且油气中含有苯、甲苯、乙苯、二甲苯等有毒有害物质^[7]. 油气回收是美国加州最早实施的VOCs控制措施,20世纪80年代,加州空气资源委员会(CARB)在 O_3 浓度未达标区全面实施第一代油气回收法规(VR),2000年CARB通过了增强型油气回收法规(EVR)^[8],2010年全面实施EVR. 自1975年以来,加州在汽油使用量增长了近50%的情况下,油气排放量却下降了80%. 油气回收也是中国最早实施的VOCs控制措施,2003年北京市率先制定了DB 11/208-2003《加油站油气排放控制和限值》,并开展了加油站油气回收技术^[9]、排放特征^[10]、排放清单^[11-14]和检测方法^[15]研究.

Yang等^[13]利用国外排放因子建立了中国加油站加油VOCs排放清单,黄玉虎等^[14]建立了北京市1990~2030年加油站汽油VOCs排放清单,这些排放清单存在3点不足:①缺乏加油站柴油VOCs排放清单;②缺乏北京市加油站本地化VOCs排放因子;③不是高时空分辨率的加油站VOCs排放清单. 本文以通州区为例,利用实测的北京市汽油加油站VOCs排放因子,以及CARB推荐的加油站汽油VOCs排放因子和美国环保署(US EPA)推荐的加油站柴油VOCs排放因子,结合每座加油站填报的年

汽、柴油销售量,典型加油站填报的月、日、小时汽油和柴油销售量,建立自下而上具有高时空分辨率的北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单,采用蒙特卡罗方法定量评估加油站VOCs排放量的不确定性范围,并评估机动车单双号限行措施对加油站VOCs排放量的影响,以期通州区制订下一阶段的加油站VOCs控制对策提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 通州区加油站活动水平

加油站活动水平包括经纬度、汽油销售量、柴油销售量和油气控制水平. 辖区内加油站可以填报经纬度和具有时空分布特征的汽、柴油消费量,统计局提供的汽、柴油消费量不能作为加油站活动水平. 《北京市通州区统计年鉴(2016)》中“全区能源消费总量(2005~2015年)”只提供了2015年汽、柴油合计消费量($33.0 \text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$)^[16];北京市统计局提供了通州区汽、柴油消费量分别为 $24.8 \text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $8.2 \text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$. 以通州区2015年汽油数据为例,市统计局统计消费量($24.8 \text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$)是加油站填报销售量($38.3 \text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$)的0.65倍,低估了约35%. 图1是通州区2015年加油站汽油和柴油销售量空间分布.

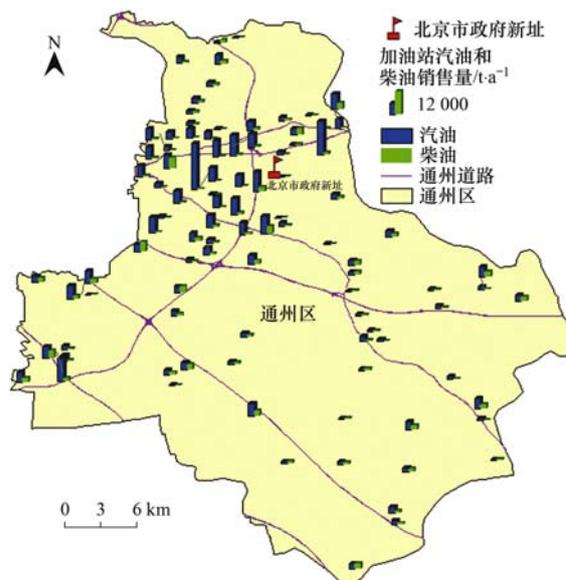


图1 通州区2015年加油站汽油和柴油销售量空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of gasoline and diesel sales of service stations in Tongzhou District

通州区 2015 年有 96 座在营加油站, 包括 91 座经营性和 5 座非经营性加油站, 其中 91 座经营性加油站包括 45 座中石化、18 座中石油和 28 座社会加油站, 汽油销售量 $\geq 5000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $\geq 2000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的加油站分别有 36 座和 64 座, 汽油销售量分别占全区的 64% 和 81%。通州区油气回收治理过程和全市保持一致; 2008 年, 100% 加油站完成了卸油油气回收 (S1) 和加油油气回收 (S2); 2013 年, 累计 24 座加油站安装了油气处理装置 (VRU), 汽油销售量占全区的 38%; 2015 年按照文献 [17] 的要求, 3 座加油站试点了在线监控系统 (OMS); 2017 年底前 36 座 $5000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上的加油站安装 OMS; 2022 年约有 50% 的机动车达到京六标准, 即具有车载油气回收 (ORVR) 功能 [18]。

1.2 加油站 VOCs 排放因子

US EPA、欧洲环境署 (EEA)、CARB 和中国都开展了加油站汽油 VOCs 排放因子研究 [19~21], 排放因子 (单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 指每转移 1 L 汽油排放 VOCs 的质量 (mg), 黄玉虎等 [14] 结合北京实际情况, 综合比较后选取 CARB 排放因子估算北京市 1990 ~ 2030 年加油站汽油 VOCs 排放清单。黄玉虎等 [22] 对北京市加油站汽油加油 VOCs 排放因子进行了实

测, 得到冬夏季加油 UEF (未控制排放因子) 分别为 $(525 \pm 42) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(963 \pm 174) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 夏季是冬季的 1.83 倍, 平均值是 CARB 加油 UEF 的 0.74 倍, 本文按照以上倍数对 CARB 加油站汽油排放因子进行校正。结合通州区加油站治理过程, 得到加油站不同控制水平下 VOCs 排放因子如表 1 和图 2 所示, 控制水平包括以下 4 级: ① S1 + S2; ② S1 + S2 + VRU; ③ S1 + S2 + OMS; ④ S1 + S2 + VRU + OMS, 对应的排放因子分别为 196、190、121 和 115 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 以及这 4 级与 50% ORVR 的组合, 排放因子分别为 137、131、102 和 96 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中, S2 的加油油气回收效率取值 85% [20]。

加油站柴油不进行油气回收, US EPA [23] 参考 AP-42 文件中 (石油液体运输和销售) 的公式 (1) 计算柴油 VOCs 排放因子 [19], 代入 AP-42 文件中 (有机液体储罐) 的 2 号柴油 70 °F 的真实蒸气压和油气分子量 [24], 计算卸油和加油排放因子时, 饱和因子取 1.45, 计算储罐呼吸排放因子时, 饱和因子取 1.0, 得到卸油、加油和储罐呼吸 VOCs 排放因子分别为 4.8、4.8 和 3.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 排放因子合计为 13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是汽油未控制排放因子 ($1552 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 (S1 + S2) 排放因子 ($196 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 0.8% 和 6.6%。

表 1 北京市加油站不同控制水平下 VOCs 排放因子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 VOCs emission factors of service stations at different control levels in Beijing/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

排放环节	汽油 (非 ORVR)					汽油 (50% ORVR)				柴油
	未控制	S1 + S2	S1 + S2 + VRU	S1 + S2 + OMS	S1 + S2 + VRU + OMS	S1 + S2	S1 + S2 + VRU	S1 + S2 + OMS	S1 + S2 + VRU + OMS	
卸油	682	34	34	34	34	34	34	34	34	4.8
加油	744	112	112	37	37	53	53	18	18	4.8
储罐呼吸	67	8	2	8	2	8	2	8	2	3.3
油枪滴油	54	37	37	37	37	37	37	37	37	NA
胶管渗透	5	5	5	5	5	5	5	5	5	NA
合计	1552	196	190	121	115	137	131	102	96	13

1.3 加油站 VOCs 排放量估算与预测

加油站 VOCs 排放量计算公式如下:

$$E = A \times \sum_{i=1}^m [\text{UEF}_i \times (1 - \eta_i)] + B \times \sum_{j=1}^n \text{UEF}_j \quad (1)$$

式中, E 为加油站 VOCs 排放量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; A 为加油站汽油销售量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; UEF_i 为加油站汽油各环节 VOCs 排放因子, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$; η_i 为汽油各环节 VOCs 排放控制效率; B 为加油站柴油销售量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; UEF_j 为加油站柴油各环节 VOCs 排放因子, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

本文依据通州区加油站填报的 2013 ~ 2015 年

汽油和柴油销售量, 以及 2013 ~ 2015 年常驻人口数, 建立了油品销售量和常驻人口的线性关系式。2016 年 4 月 5 日《人民日报海外版》指出, 2017 年底前启动市属行政事业单位向北京城市副中心转移, 远期将带动约 40 万人疏散至通州, 同时通州向外疏散 10 万人。为避免通州建设重蹈“大城市病”, 通州人口容量不要超过 200 万。预测 2017 和 2022 年通州区人口分别为 147.4 万和 167.8 万, 预测 2017 和 2022 年汽油销售量分别为 45.2 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 59.9 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 柴油销售量分别为 12.3 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 16.4 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 根据对应的排放因子计算加油站

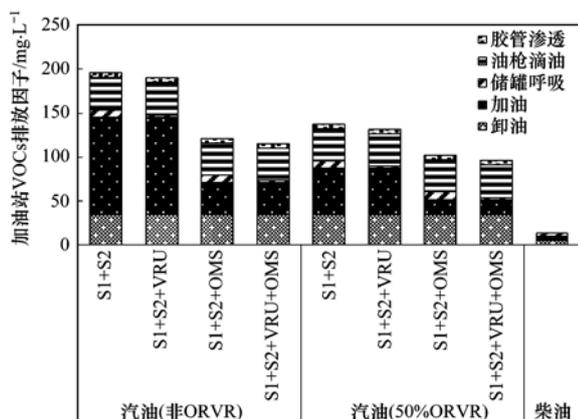


图2 不同控制水平的加油站 VOCs 排放因子

Fig. 2 VOCs emission factors of service stations at different control levels

VOCs 排放清单.

2 结果与讨论

2.1 2015 年加油站 VOCs 排放量

通州区 2015 年加油站 VOCs 排放量为 $97.8 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 汽油和柴油 VOCs 排放量分别为 $96.2 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.6 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别占 98.4% 和 1.6%, 柴油 VOCs 排放量可以忽略不计. 图 3 是通州区 2015 年加油站 VOCs 排放量空间分布, 可以看出, 加油站 VOCs 排放量主要集中在北京市政府新址(地铁 6 号线郝家府站附近)和通州区空气质量监测站点(市政府新址西侧 6km 处的潞河中学)所属区域, 该区域加油站数量多且单站汽油销售量大, 通州区应该加强对该区域加油站油气回收系统的检查和检测.

影响加油站 VOCs 排放清单的不确定性因素较多, 包括活动水平的可靠性及 VOCs 排放因子的适用性和准确性^[25,26]. 采用蒙特卡罗不确定性分析方法对加油站 VOCs 排放清单潜在的不确定度进行量化, 通过重复抽样的方法, 活动水平和排放因子不确定度通过模拟方程给出, 从而获得排放清单的不确定性范围(95% 的置信区间), 2015 年北京市加油站 VOCs 的不确定性范围分别为 $-58\% \sim 66\%$.

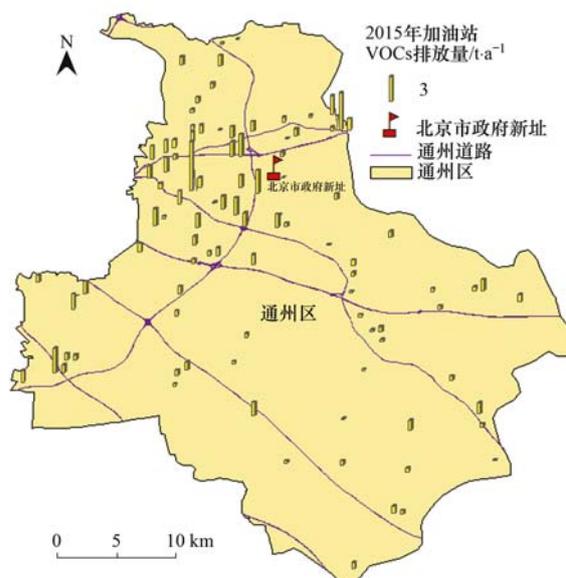


图3 通州区 2015 年加油站 VOCs 排放量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of VOCs emission of service stations in Tongzhou district in 2015

2.2 2017 和 2022 年加油站排放量预测

按照文献[17]的要求, 2017 年底前在通州区 36 座 $5000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上的加油站安装 OMS; 2022 年约有 50% 的机动车达到京六标准, 即具有车载油气回收(ORVR)功能. 表 2 是假设通州区 2017 和 2022 年油品(汽油和柴油)销售量不变或增加情景下的加油站 VOCs 排放量, 图 4 是通州区 2017 和 2022 加油站 VOCs 排放量空间分布, 可以看出, 假设油品销售量不变, 2017 年和 2022 年加油站 VOCs 排放量相比 2015 年减排 22% 和 40%; 如果考虑油品销售量增长, 2017 年和 2022 年加油站 VOCs 排放量相比 2015 年减排 9% 和 6%; 假设 2022 年底前在通州区 28 座 $2000 \sim 5000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的加油站也安装 OMS, 油品销售量不变和增长情况下, 加油站 VOCs 排放量相比 2015 年减排 43% 和 11%.

2.3 加油站汽油加油量不均匀系数

为了得到满足空气质量模型输入要求的加油站 VOCs 小时排放清单, 本文研究了通州区和西城区

表 2 通州区 2017 和 2022 年加油站 VOCs 排放量

Table 2 VOCs emission of service stations in Tongzhou district in 2017 and 2022

年份	新增控制措施	油品销售量不变					油品销售量增加				
		销售量 $\times 10^4 / \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$		VOCs 排放量 $/ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$			销售量 $\times 10^4 / \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$		VOCs 排放量 $/ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$		
		汽油	柴油	汽油	柴油	合计	汽油	柴油	汽油	柴油	合计
2015	现状; SI + S2 + VRU	38.3	10.5	96.2	1.6	97.8	38.3	10.5	96.2	1.6	97.8
2017	$> 5000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 实施 OMS	38.3	10.5	74.2	1.6	75.8	45.2	12.3	87.6	1.9	89.5
2022	50% ORVR	38.3	10.5	57.2	1.6	58.8	59.9	16.4	89.8	2.5	92.3
	$> 2000 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 实施 OMS	38.3	10.5	52.7	1.6	54.3	59.9	16.4	82.8	2.5	85.3

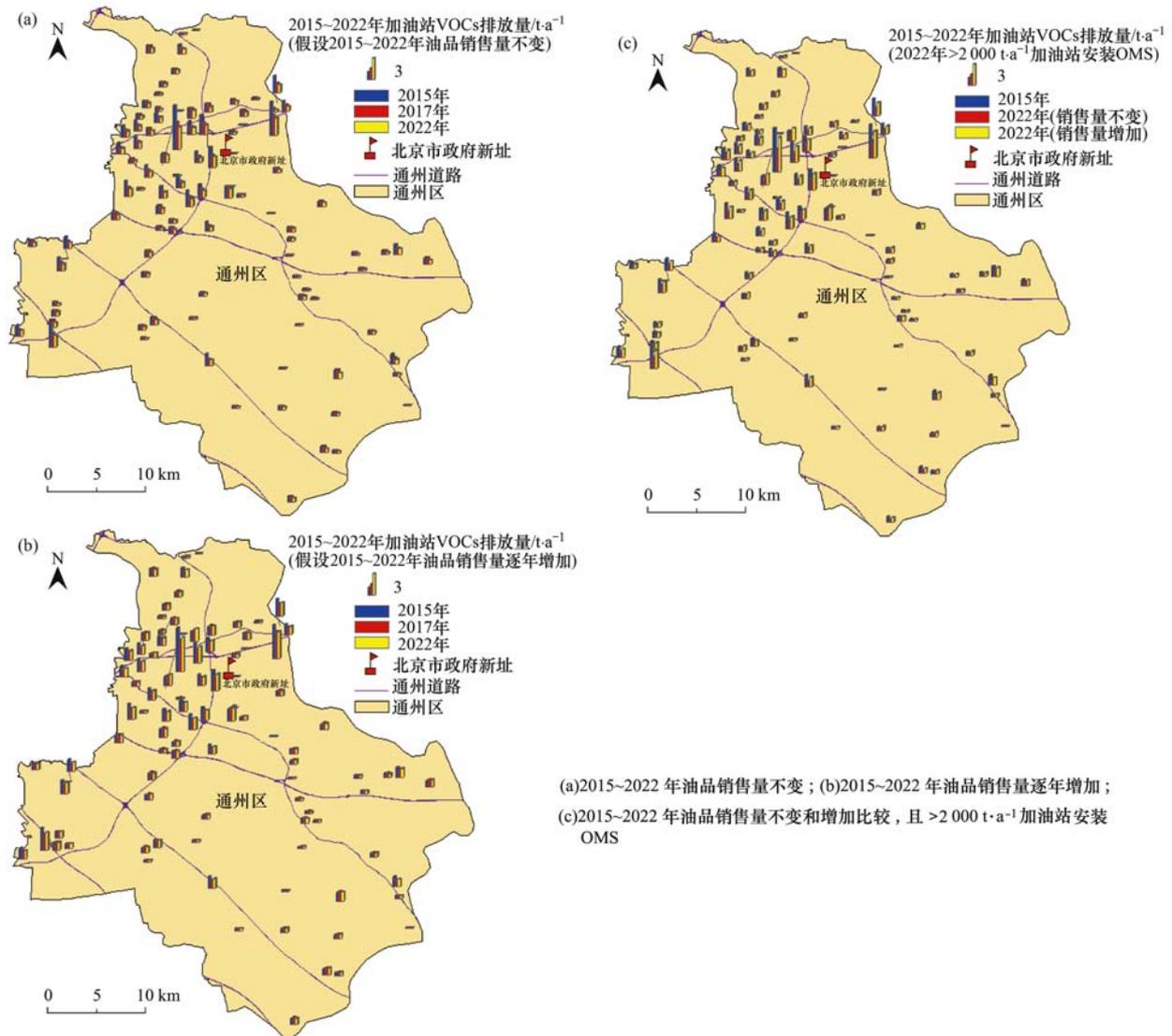


图4 通州区2017和2022加油站VOCs排放量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of VOCs emission of service stations in Tongzhou district in 2017 and 2022

加油站汽油加油量不均匀系数，包括1年12月、1周内7d、以及1天24h的不均匀系数，为估算加油站VOCs排放不均匀性系数提供基础数据。在北京研究加油站VOCs排放时间不均匀系数尤其重要，因为自2011年4月10日以来，北京市一直在实施工作日（因法定节假日放假调休而调整为上班的周六、周日除外）高峰时段区域限行交通管理措施，将按要求限行的机动车车牌尾号（含临时号牌）分为5组，每13周轮换一次限行日。本文从通州区和西城区的中石油、中石化和社会企业加油站中各选取1座加油站（汽油销售量约为 $5000 t \cdot a^{-1}$ ），统计2013年连续12月、2016年某一周连续7d和某一工作日连续24h的汽油销售量，统计期间没有出现空气重污染即未实施机动车单双号限行。

图5是北京市加油站汽油加油量不均匀系数，可以看出，①通州区和西城区都在7~8月出现峰值，2月出现低值，月不均匀系数分别为0.093和0.068，其他月份为0.083，因为夏季机动车空调运行会增加汽油销售量，2月正值春节，车流量大幅降低会减少汽油销售量。②通州区在一周内的日不均匀系数较平均，西城区在周六出现1次峰值，周六和其他日不均匀系数分别为0.153和0.141，因为通州区不实施机动车尾号限行，而西城区周末不实施。③通州区早晚高峰的时间都比西城区提前约1h，其早高峰（07:00~09:00）、工作时间（10:00~16:00）和晚高峰（17:00~19:00）时段的小时不均匀系数是夜间（20:00~06:00）时间的2.2、1.9和2.5倍。综上所述，鉴于北京市 O_3 超标出现在4

~10月, 全日高浓度时段主要集中在下午到傍晚^[2]. 而且黄玉虎等^[22]在加油站测试发现夏季加油排放因子大于冬季, 回收效率小于冬季. 因此, 建议通州区加油站在夏季和中午加油闲时加强油气回收系统日常检查.

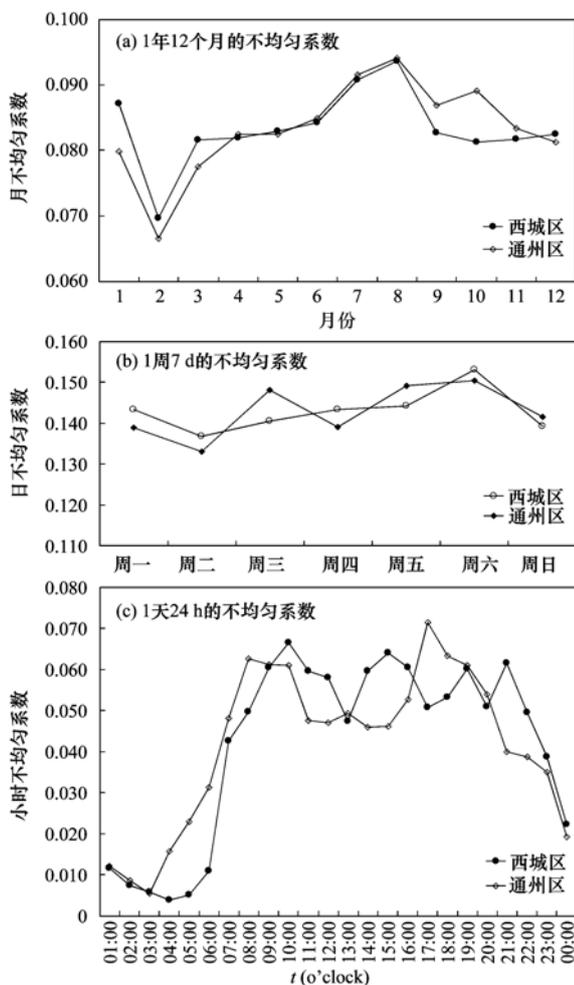


图5 北京市加油站汽油加油量不均匀系数

Fig. 5 Time nonuniformity coefficient of gasoline refueling volume of service stations in Beijing

2.4 单双号限行对加油站排放的影响

北京市2014年发布PM_{2.5}源解析结果表明, 机动车排放占本地排放源的31.1%^[27]. 因此, 北京市重大活动期间空气质量保障措施和空气重污染红色预警应急预案中都包括机动车单双号限行措施^[28]. 2007年至今, 本市共实施6次单双号限行措施, 分别是2007年好运北京测试赛、2008年奥运会、2014年APEC期间(11月3~12日, 共10d)、2015年世锦赛和阅兵期间(8月20日至9月3日, 共15d)以及2015年12月2次空气重污染红色预警期间(12月8~10日以及12月19~22日, 共6d). 本文从通州区和西城区的中石油、中石化

和社会企业加油站中各选取1座加油站(汽油销售量约为5000 t·a⁻¹), 统计2014~2015年逐月的汽油销售量, 以该措施实施前后各1个月的汽油销售量为基数, 分析单双号限行措施对汽油销售量的影响. 月不均匀系数表明7~8月加油量会出现峰值, 9~12月加油量较平稳, 2015年世锦赛和阅兵期间正值8~9月, 对评估单双号限行效果有影响, 因此本文只评估2014年APEC和2015年12月红色预警期间单双号限行对加油站排放的影响(见图6).

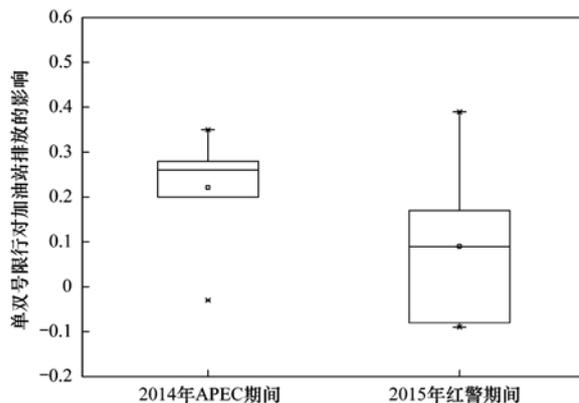


图6 机动车单双号限行对加油站VOCs排放的影响

Fig. 6 Effect of restricting the number of vehicles in operation by 50% on VOCs emission of service stations

由图6可以看出, 2014年APEC期间单双号限行措施使加油站每日排放量减少了(22±12)%, 2015年红色预警期间单双号限行措施的减排(9±16)%, 其减排效果只有2014年APEC减排效果的40%, 因为2015年12月红色预警期间单双号限行执行时间为2个相差10d的3d, 共6d, 而2014年APEC是连续的10d, 说明单双号限行措施执行时间越长, 加油站VOCs减排效果越明显, 预计2015年世锦赛和阅兵期间的减排效果接近25%.

3 结论

(1)北京市加油站在卸油、加油和罐压控制措施的基础上增加在线监控系统, 汽油VOCs排放因子可由190 mg·L⁻¹降至115 mg·L⁻¹, 再叠加50%车载油气回收系统, 排放因子可以分别降至131 mg·L⁻¹和96 mg·L⁻¹; 加油站柴油VOCs排放因子(13 mg·L⁻¹)是汽油未控制排放因子(1552 mg·L⁻¹)的0.8%.

(2)通州区2015年加油站VOCs排放量为97.8 t·a⁻¹, 汽油和柴油VOCs排放量分别为96.2 t·a⁻¹和1.6 t·a⁻¹, 分别占98.4%和1.6%, 排放主要集中在北京市政府新址周边区域; 实施《北京市2013

~2017年清洁空气行动计划》油气回收要求后,考虑油品销售量增长,通州区2017年和2022年加油站VOCs排放量相比2015年减排9%和6%,假设2022年底前在28座(2000~5000) $t \cdot a^{-1}$ 的加油站也安装OMS,加油站VOCs排放量相比2015年减排13%。

(3)加油站加油量和VOCs排放量具有较强的月、日和小时不均匀特征,加油站在7~8月、周六、上下班高峰期间都会出现加油量峰值。2014年APEC期间单双号限行措施使加油站每日排放量减少了(22±12)%。

(4)建议通州区加强北京市政府新址周边区域加油站和夏季以及中午加油闲时的油气回收监管工作。

参考文献:

- [1] 中国共产党中央委员会. 中发[2015]16号京津冀协同发展规划纲要[R]. 北京, 2015.
- [2] 北京市环境保护局. 2015年北京市环境状况公报[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2016.
- [3] Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, *et al.* The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor[J]. *Science*, 1997, **276**(5309): 96-99.
- [4] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气VOCs对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [5] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3560-3565.
Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Pollution and source of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3560-3565.
- [6] 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 等. 世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4151-4158.
Wang H L, Chen C H, Huang H Y, *et al.* Emission strength and source apportionment of volatile organic compounds in Shanghai during 2010 EXPO[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4151-4158.
- [7] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 机动车排放及汽油中VOCs成分谱特征的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(4): 507-511.
Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Study on the characteristics of VOCs source profiles of vehicle exhaust and gasoline emission [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(4): 507-511.
- [8] California Air Resources Board. CP-201 certification procedure for vapor recovery systems at gasoline dispensing facilities[R]. Sacramento, CA: CARB, 2003.
- [9] 朱玲, 陈家庆, 张宝生, 等. 膜分离法处理加油站油气的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3704-3709.
Zhu L, Chen J Q, Zhang B S, *et al.* Experimental research of oil vapor pollution control for gas station with membrane separation technology[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3704-3709.
- [10] 陈家庆, 张男, 王金惠, 等. 机动车加油过程中气液两相流动特性的CFD数值模拟[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3710-3716.
Chen J Q, Zhang N, Wang J H, *et al.* CFD numerical simulation onto the gas-liquid two-phase flow behavior during vehicle refueling process[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3710-3716.
- [11] 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.
Shen M J, Hao J M, Wang L T. VOC Emission situation and control measures of gas station in China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(8): 1473-1478.
- [12] 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.
Shi X C, Qian H, Dai H X, *et al.* Gasoline vapor emissions in the various aspects section of gasoline filling stations in Shanghai city[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011, **33**(6): 51-56.
- [13] 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.
- [14] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 北京市1990—2030年加油站汽油VOCs排放清单[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(7): 945-951.
Huang Y H, Chang Y Q, Ren B Q, *et al.* Emissions inventory of gasoline VOCs from service stations in Beijing from 1990 to 2030 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(7): 945-951.
- [15] 黄玉虎, 秦建平, 任碧琪, 等. 加油站气液比检测方法及其影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(6): 2633-2638.
Huang Y H, Qin J P, Ren B Q, *et al.* Test method of air to liquid volume ratio and its influence in service station [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(6): 2633-2638.
- [16] 北京市通州区统计局. 北京市通州区统计年鉴(2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [17] 北京市人民政府. 京政发[2013]27号北京市2013—2017年清洁空气行动计划[R]. 北京, 2013.
- [18] 艾毅. 北京拟2017年底实施京六排放标准[N]. *中国环境报*, 2015-12-01(11).
- [19] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 5.2 transportation and marketing of petroleum liquids [R]. Washington DC: US EPA, 2008.
- [20] European Environmental Agency. EMEP/EEA emission inventory guidebook, 1. B. 2. a. v distribution of oil products [R]. Copenhagen of Denmark: European Environmental Agency, 2013.
- [21] California Air Resources Board. Revised emission factor for gasoline marketing operations at California gasoline dispensing facilities[R]. California: Sacramento, CA: CARB, 2013.

- [22] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4103-4109.
Huang Y H, Chang Y Q, Ren B Q, *et al.* Study and application of test method for VOCs emission factor of refueling in service station[J]. Environmental Sciences, 2016, **37**(11): 4103-4109.
- [23] US EPA. Potential to Emit Calculator for Gasoline Dispensing Facilities (Final rule) [EB/OL]. <https://www.epa.gov/tribal-air/5-source-categories-gasoline-dispensing-facilities-final-rule>, 2015-03-23.
- [24] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 7.1 organic liquid storage tanks [R]. Washington DC: US EPA, 2006.
- [25] 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 Physical, 2011, **11**(5): 2295-2308.
- [26] 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.
- [27] 北京市大气环境 PM_{2.5} 污染现状及成因研究[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2014.
- [28] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1593-1601.
Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1593-1601.



CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes .....	..... TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaoju Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)