

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势

刘镇, 朱玉凡, 郭文凯, 刘晓, 陈强*

(兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 随着我国工业的快速发展和城市化进程的加快, 化石燃料的大量使用造成了严重的二氧化硫、颗粒物和挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 等大气污染。目前, 对化石燃料燃烧排放挥发性有机物环境影响的研究较少, 本文计算了兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 及其相应的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 和二次有机气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosols formation potential, SOAFP), 其中水泥制造业的 OFP 和 SOAFP 占比最大, 分别为 45.3%、50.9%; 其次为砖瓦制造业, 但其吨标煤燃烧排放 VOCs 的 OFP 和 SOAFP 值最高, 折为吨标煤后天然气燃烧产生 VOCs 的 O_3 和 SOA 最小。兰州市主城区化石燃料燃烧源 OFP 和 SOAFP 主要为电力和热力的生产供应以及西固区工业企业排放 VOCs 的贡献, 其它地区为水泥制造业、砖瓦制造业、钢铁冶炼业等高能耗的行业的贡献为主。芳香烃是化石燃料燃烧源排放 VOCs 中对 OFP 和 SOAFP 均贡献最大的一类物质, 占比分别为 40.0% 和 67.2%, 并且在生成潜势贡献前 10 的物种中芳香烃为主要物种。与生物质燃烧源相比, 化石燃料燃烧源具有较强的 O_3 和 SOA 生成能力 ($2.58 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $3.16 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。

关键词: 化石燃料; 挥发性有机物 (VOCs); 空间分布; 臭氧生成潜势 (OFP); 二次有机气溶胶生成潜势 (SOAFP)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2069-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809129

Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City

LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, LIU Xiao, CHEN Qiang*

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the rapid development of China's industry and the acceleration of urbanization, the massive use of fossil fuels has increased the concentration of air pollutants such as sulfur dioxide, particulate matter, and volatile organic compounds (VOCs) in the cities. However, there is little research on the environmental impact of volatile organic compounds from fossil fuel combustion emissions. In this paper, ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol formation potential (SOAFP) of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou city were calculated. The OFP and SOAFP of the cement industry were the largest, representing 45.3% and 50.9%, respectively, followed by brick and tile industries. However, when the calculations were based on tons of standard coal equivalent, the largest contributors to OFP and SOAFP of VOCs emitted from combustion were the brick and tile industries, and the smallest was the natural gas industry. VOCs from fossil fuel combustion of power plants and industry enterprises in the Xigu District are the main contributors to the OFP and SOAFP in the urban district of Lanzhou city. The contribution rates of the aromatic hydrocarbons from fossil fuel to OFP and SOAFP account for 40.0% and 67.2%, respectively. Aromatic hydrocarbons are also the main component in the top 10 species that contribute to OFP and SOAFP. The mass ratio of OFP and SOAFP per VOCs from fossil fuel combustion ($2.58 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$, $3.16 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) is larger than those from biomass combustion ($2.22 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$, $1.38 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$).

Key words: fossil fuel; volatile organic compounds (VOCs); spatial distribution; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosols formation potential (SOAFP)

随着我国工业的快速发展和城市化进程的加快, 作为主要能源的化石燃料被大量使用, 在其燃烧过程中产生的 SO_2 、 NO_x 、颗粒物和挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 等是造成我国城市环境空气污染的重要污染物^[1]。近年来, 随着脱硫和除尘等一系列严格治理措施的实施, SO_2 和颗粒物污染得到了有效的控制, 然而对 NO_x 和 VOCs 的排放控制相对滞后, 国内很多地区以高浓度臭氧 (O_3) 或细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 为特征的复合型污染问题逐步加剧^[2,3]。VOCs 是对流层 O_3 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosols, SOA) 的重要前体

物^[4,5]。目前国内研究者普遍关注交通尾气、生物质燃烧、石油化工过程等 VOCs 排放源的影响^[6~10], 对化石燃料燃烧排放的挥发性有机物对环境影响的研究相对较少。我国已建立的全国人为源排放清单中化石燃料燃烧源占比可达 12%^[11], Wang 等^[12]对北京地区 VOCs 组分研究表明, 北京市冬季化石燃料燃烧源对大气中 VOCs 贡献可达 26%~39%,

收稿日期: 2018-09-16; 修订日期: 2018-11-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2017-kb02)

作者简介: 刘镇 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: liuzh2016@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenqh@lzu.edu.cn

仅次于移动源. 朔州市的 VOCs 源解析结果显示, 煤炭燃烧是其大气中 VOCs 的主要来源^[13], 同时相关研究也显示化石燃料燃烧源排放的 VOCs 具有较强的 O₃ 和 SOA 生成能力^[14,15].

近几年来兰州市环境空气中 O₃ 和 PM_{2.5} 污染逐渐加剧, 其作为我国西北重工业城市, 化石燃料燃烧排放的影响不容忽视^[16]. 张凯等^[17]建立了兰州市人为源 VOCs 排放清单, 但对化石燃料燃烧源的空间分配仅依据 GDP 和人口分布进行插值处理, 未按企业计算排放量, 不利于制定“一企一策”的污染控制方案. 因此, 本文通过调查相关部门数据和实地调研, 获取兰州市工业企业和集中供暖锅炉的位置和燃料消耗量, 利用排放系数法建立了 2016 年兰州市化石燃料燃烧源的 VOCs 排放清单, 根据国内外研究中实测 VOCs 成分谱以及臭氧的最大增量反应活性 (maximum incremental reaction, MIR) 和气溶胶生成系数 (aerosol formation coefficient, FAC) 对 OFP 和 SOAFP 进行了估算, 利用 Arcgis 软件实现兰州市化石燃料燃烧源的空间分配, 了解其排放对区域大气环境质量的影响, 以期为区域 O₃ 和 PM_{2.5} 防控对策的制定提供依据和基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与研究对象

根据国民经济行业分类标准 (GB/T 4754-2017) 以及对兰州市企业调查结果, 由于兰州市有色金属冶炼制造业只有电解铝行业, 不涉及化石燃料的燃烧过程, 同时国内外文献未见到关于电解铝行业 VOCs 排放数据, 因此本研究中不考虑该部分 VOCs 排放. 兰州市涉化石燃料燃烧行业主要包括制造业和电力、热力、燃气及水生产和供应业, 其中 2016 年兰州市电力、热力生产和供应行业煤炭消耗量占规模以上工业企业煤炭消耗量 (除电解铝行业外) 的 65.3%. 制造业化石燃料燃烧主要有非金属矿物制品业 (主要为水泥制造业、砖瓦制造业) 和黑色金属冶炼及压延行业 (主要为钢铁冶炼业) 占总煤炭消耗量的 19.5%, 其它化石燃料燃烧分为其它工业. 因此, 本文将兰州市 2016 年化石燃料燃烧源分为电力生产供应、热力生产供应、砖瓦制造业、水泥制造业、钢铁冶炼业以及其它工业. 为研究不同化石燃料燃烧的影响, 结合实际调查结果进一步将热力生产供应分为热力生产供应 (煤炭) 和热力生产行业 (天然气), 将其它工业进一步划分为其它工业 (煤炭)、其它工业 (燃料油) 以及其它工业 (天然气). 研究区域包括城关区、安宁区、七里

河区、西固区、红古区、皋兰县、皋兰县、永登县和兰州新区.

1.2 VOCs 排放量计算

获取兰州市 2016 年各企业化石燃料消耗量, 对兰州市集中供暖锅炉采用实地调研的方式获取供暖锅炉燃料类型以及其相应的化石燃料消耗量, 进一步计算其 VOCs 排放量.

计算公式如下:

$$E_{i,j} = EF_j \times Q_{i,j} \quad (1)$$

式中, $E_{i,j}$ 为 j 行业中 i 企业在全年的 VOCs 排放量; $Q_{i,j}$ 为 j 行业中 i 企业相对应的活动水平 (对于砖瓦制造业、水泥制造业、钢铁冶炼业为其相对应的产品产量), EF_j 为该活动水平所相对应的排放系数来源于文献^[18].

1.3 VOCs 的空间和物种分配

利用获取的企业地理坐标, 通过 Arcgis 建立化石燃料燃烧企业的地理信息数据库, 以点源形式标明各个电力或热力生产供应以及制造业位置, 相关结果如图 1 所示.

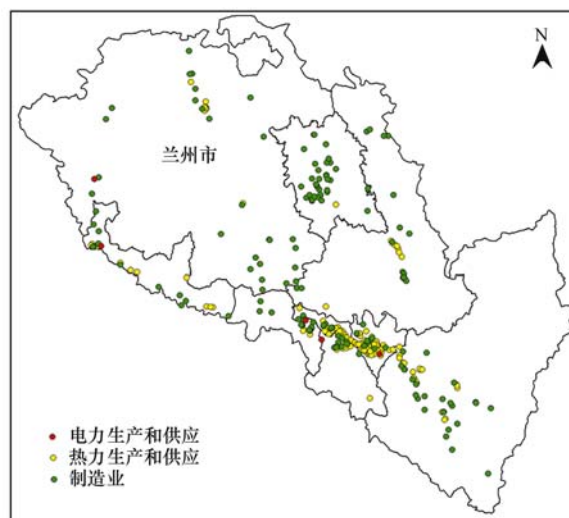


图 1 兰州市电力和热力生产供应及制造业的分布

Fig. 1 Distribution of power plants, boilers, and industrial kilns in Lanzhou City

为进一步计算各类源排放 VOCs 对 O₃ 和 SOA 的影响, 需要了解相应源排放 VOCs 的组分, 对国内外已有研究和数据库资料进行收集, 其中电力生产供应、热力生产供应 (煤炭)、钢铁冶炼业源成分谱信息来自文献^[19]; 砖瓦制造业相应源成分谱数据来自文献^[20]; 热力生产供应 (天然气)、水泥制造业、其它工业 (煤炭)、其它工业 (燃料油)、其它工业 (天然气) 源成分谱数据来自 EPA 的 SPECIATE 4.5 数据库^[21].

1.4 O₃ 和 SOA 生成潜势计算

最大增量反应活性 (maximum incremental

reaction, MIR)法、OH 消耗速率法和光化学臭氧生成潜势(photochemical ozone creation potential, POCP)等方法研究 VOCs 物种对 O_3 生成影响的主要方法^[22,23]. MIR 计算 O_3 生成潜势用 OFP 表示,反映了 VOC 物种在最佳反应条件下对 O_3 生成贡献^[24],其广泛用于评估 VOCs 在某一地区臭氧生成中的作用^[25,26],计算公式如下:

$$OFP = \sum_i VOC_i \times MIR_i \quad (2)$$

式中, VOC_i 为化石燃料燃烧源中第 i 种 VOCs 的排放量; MIR_i 为第 i 种 VOCs 生成 O_3 的最大增量反应活性系数; MIR 值来自于 Carter^[27,28] 的研究成果.

目前估算 SOA 的主要方法包括 OC/EC 比值法、WSOC 法、气溶胶生成系数法(FAC)等^[29~31],其中, Grosjean 等^[32,33]在综合大量烟雾箱实验和大气化学动力学数据的基础上整理了一套气溶胶生成

系数,在二次有机气溶胶生成潜势(secondary organic aerosol formation potential, SOAFP)的估算中得到了广泛地应用^[34,35],本文采用该方法计算 SOA 生成潜势,公式如下:

$$SOAFP = \sum_i VOC_i \times FAC_i \times F_{VOC_i} \quad (3)$$

式中, VOC_i 为工业化燃料燃烧源中第 i 种 VOCs 的排放量; FAC_i 为第 i 种 VOCs 生成 SOA 的生成系数; F_{VOC_i} 为第 i 种 VOCs 参与反应的质量分数,%, FAC_i 和 F_{VOC_i} 均来自于 Grosjean 等^[32,33]大量的烟雾箱实验数据.

2 结果与讨论

2.1 兰州市化石燃料燃烧源 VOCs 排放量

通过 1.2 节中的方法建立了兰州市各县区各行业化石燃料燃烧源 VOCs 源清单,其中各县区及各行业 VOCs 排放量如图 2 所示.

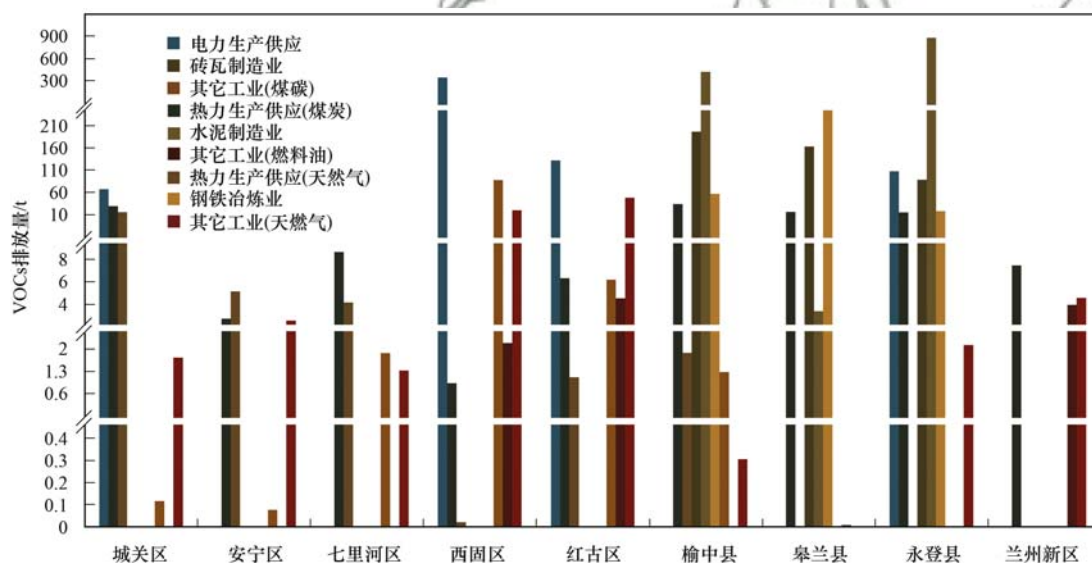


图 2 兰州各县区化石燃料燃烧源各子源 VOCs 排放量

Fig. 2 VOCs emissions from fossil fuel combustion sources in various counties and regions of Lanzhou City

兰州市 2016 年化石燃料燃烧源 VOCs 排放总量为 3 067.6 t,永登县排放量最大为 1 108.9 t (36.2%),其中水泥制造业占比最高.榆中县和西固区次之,排放量分别为 710.6 t (23.2%) 和 457.6 t (14.9%),其占比最高的分别为水泥制造业和电力生产供应.对于全市化石燃料燃烧源而言,水泥制造业是对 VOCs 排放量贡献最大的源,其年排放量为 1 303.4 t,贡献率为 42.5%;电力生产供应、钢铁制造业、砖瓦制造业等高耗能行业 VOCs 排放量分别为 653.2、447.1 和 329.3 t,贡献率分别为 21.3%、14.6% 和 10.7%;其它行业 VOCs 排放量均小于 10%.

2.2 化石燃料燃烧源排放 VOCs 的 OFP

兰州市各行业化石燃料燃烧源和其吨标煤^[36]燃

烧排放 VOCs 的 OFP 如图 3 所示,其中水泥制造业排放 VOCs 的 OFP 最高为 3 589.7 t;其次为砖瓦制造业、电力生产供应、热力生产供应(煤炭)和钢铁冶炼业,燃烧产生的 VOCs 对应的 OFP 分别为 1 231.2、1 191.2、821.5 和 398.9 t. 为更好地评估各企业化石燃料产生 VOCs 对 O_3 的影响,计算各企业化石燃料折为吨标煤燃烧产生 VOCs 的 OFP,其中砖瓦制造业最高为 $4.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,其次为水泥制造业、钢铁冶炼业、其它工业(煤炭)以及热力生产供应(煤炭),分别为 3.8 、 3.5 、 1.6 和 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,热力生产供应(天然气)和其它工业(天然气)最小,为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

2.3 化石燃料燃烧源排放 VOCs 的 SOAFP

兰州市各行业化石燃料燃烧所引起的 SOAFP

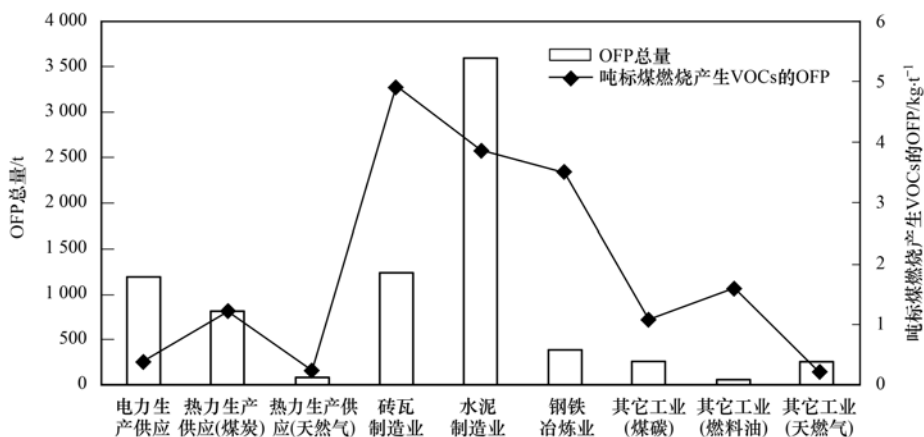


图 3 化石燃料燃烧源各子源 OFP 总量及吨标煤燃烧产生 VOCs 的 OFP

Fig. 3 OFP of total VOCs and of VOCs emitted from combustion calculated as the ton of standard coal from each fossil fuel combustion source

和折为吨标煤燃烧排放 VOCs 的 SOAFP 如图 4 所示,通过气溶胶生成系数(FAC)计算得出的兰州市化石燃料燃烧源 SOAFP 总量为 9.7 t,其中水泥制造业 SOAFP 最大为 4911.7 kg,其次为砖瓦制造业、热力生产供应(煤炭)、电力生产供应以及钢铁冶炼业,SOAFP 分别为1 684.6、1 117.9、985.4 和

536.5 kg;根据折为吨标煤燃烧排放 VOCs 的 SOAFP 计算结果,砖瓦制造业最高为 $6.7 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,其次为水泥制造业、钢铁冶炼业、热力生产供应(煤炭)和其它工业(煤炭),分别为 5.5、4.7、1.7 和 $1.4 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,热力生产供应(天然气)、其它工业(天然气)最小,均为 $0.03 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

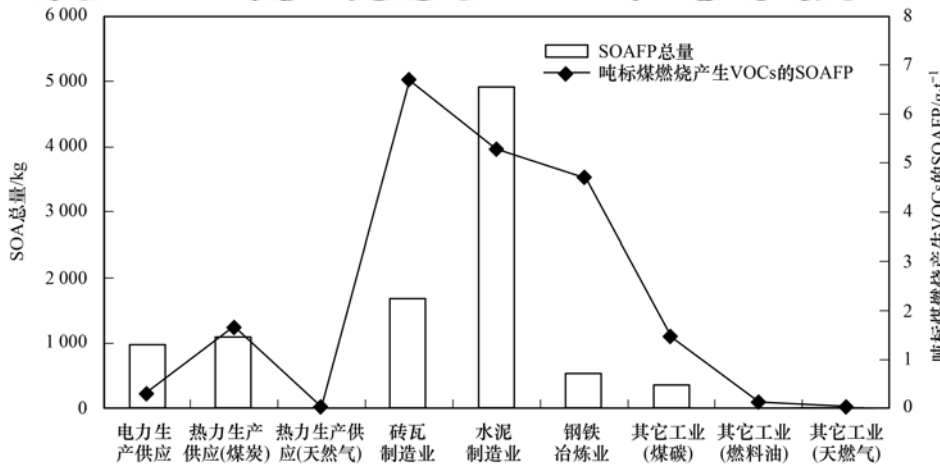


图 4 化石燃料燃烧源各子源 SOAFP 及吨标煤燃烧产生 VOCs 的 SOAFP

Fig. 4 SOAFP of total VOCs and of VOCs emitted from combustion calculated as the ton of standard coal from each fossil fuel combustion source

2.4 基于时间分配的物种贡献

由于化石燃料燃烧源存在明显的时间差异,依据各个企业采暖期和非采暖期的化石燃料消耗量占比进行分配,最终各时期各类物种贡献结果如图 5 所示.其中化石燃料燃烧源排放 VOCs 中全年均以烷烃为主,其次为芳香烃,采暖期相对于非采暖期来说,芳香烃、OVOCs 和卤代烃占比增大,而烷烃和炔烃占比减小,烯烃基本保持不变.在全年各个时期芳香烃对 OFP 贡献占比均最大,全年为 40.0%,其次为烷烃(26.1%)和烯烃(20.5%);SOAFP 中芳香烃贡献占比最大,采暖季可达到 71.2%;全年占比为 67.2%,远高于烷烃(26.7%)和烯烃(6.0%)。

采暖期和非采暖期各物种 OFP 和 SOAFP 占比前 10 位物种如图 6 所示,其中非采暖期和采暖期 OFP 前 4 位均为对,间-二甲苯、1-丁烯、甲苯和乙苯,后 6 位存在差异,非采暖期为乙炔、正己烷、丙烯以及正丁烷、甲基环戊烷,采暖期为正己烷、乙炔、二氯丙烯、正丁烷和丙烯. SOAFP 占比中,采暖期和非采暖期前 4 位均为甲基环戊烷、对,间-二甲苯、甲苯和乙苯,但后 6 位存在差异,非采暖期为 1-己烯、苯、4-乙基甲苯、邻-二甲苯、苯乙烯和反式-2-戊烯,采暖期为 1,2,3-三甲苯、间-乙基甲苯、1-己烯、正丙苯、邻-乙基甲苯、苯.其中非采暖期前 10 位物种 OFP 总占比为 84.8%,SOAFP 总占比为 98.2%;采暖期前 10 位物种 OFP 总占比

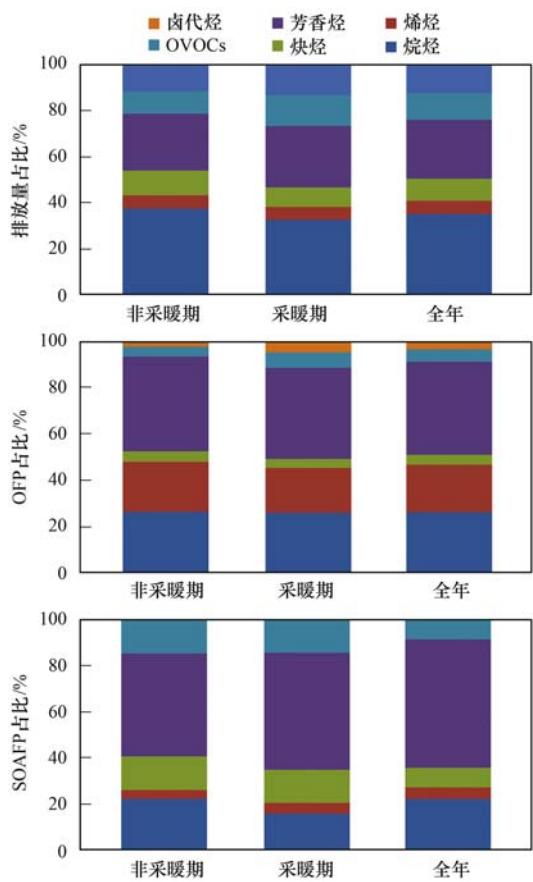


图5 不同时期化石燃料燃烧源的物种对O₃和SOA的生成潜势占比

Fig. 5 OFP and SOAFP of VOCs speciated emissions from fossil fuel combustion in different periods

为77.6%，SOAFP总占比为93.8%。

2.5 O₃和SOA生成潜势的空间分配

各县区化石燃料燃烧VOCs排放量和OFP及

SOAFP占比如图7，其中各县区OFP分布顺序和排放量顺序基本一致，永登县最高、其次为榆中县、西固区、皋兰县、红古区、城关区。对于SOAFP，永登县最高、其次为榆中县、皋兰县、西固区、红古区、城关区，这主要是由于城区天然气普及率更高，天然气燃烧过程中对芳香烃的贡献远小于煤碳，而SOA的主要前体物就为芳香烃^[34,37,38]。

各个区县各个行业化石燃料燃烧排放VOCs的OFP和SOAFP如图8和图9所示，各区县化石燃料燃烧源排放VOCs的OFP和SOAFP中，城关区、安宁区、七里河区以及兰州新区热力生产供应(煤炭)占比最高；西固区和红古区电力生产供应行业占比最高；榆中县和永登县水泥制造业占比最高；皋兰县砖瓦制造业对该县化石燃料燃烧源排放VOCs的OFP贡献最大，钢铁冶炼业对该县化石燃料燃烧源排放VOCs的SOAFP贡献最大。结合图2可知，各区县各行业化石燃料燃烧源VOCs比重与其相应的OFP和SOAFP的比重存在明显的差别，单纯的VOCs排放量无法为决策者对区域污染问题提供正确的防控对策。

为进一步研究兰州市化石燃料燃烧源对O₃和SOA的生成潜势贡献的空间分布，对化石燃料燃烧源按照3 km×3 km的网格进行空间分配(如图10)，其中高值区分布在永登县、榆中县等区域，并且该区域OFP及SOAFP分布较为分散，而兰州市主城区相对密集，主要集中于西固和城关区。为进一步直观分析，利用Arcgis对O₃和SOA贡献

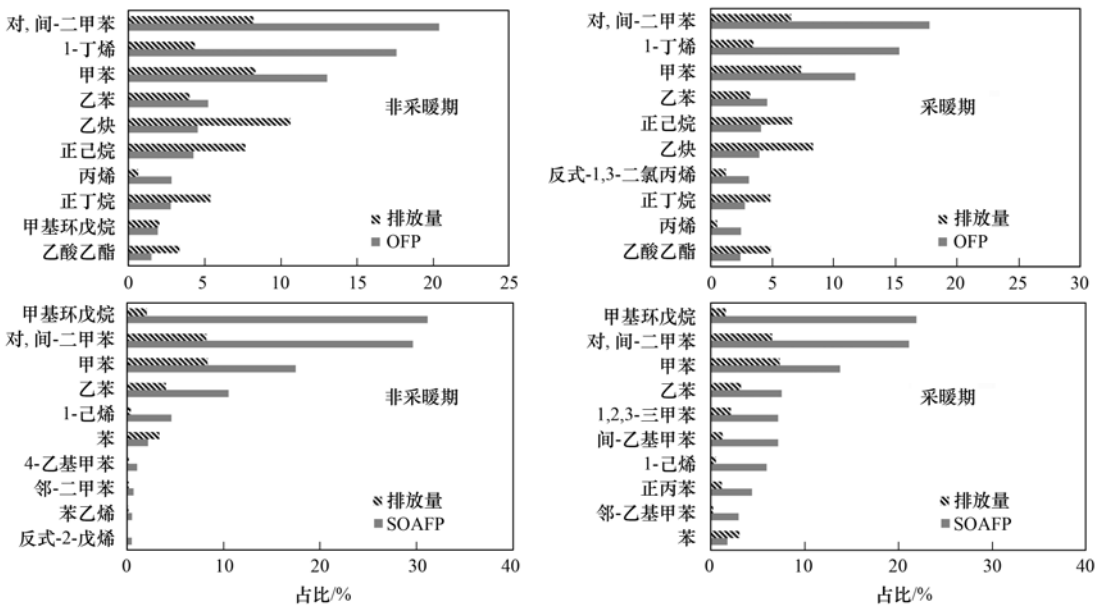


图6 不同时期O₃和SOA的生成潜势贡献前10物种

Fig. 6 Key contributing species to OFP and SOAFP in different periods

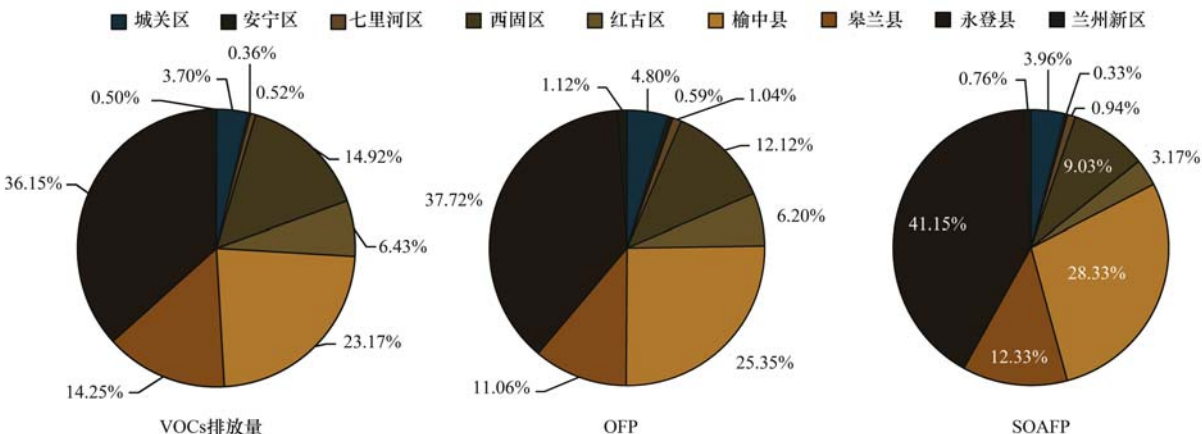


图 7 不同县区化石燃料燃烧源 VOCs 排放量、OFP 和 SOAFP 的占比

Fig. 7 Emissions and OFP and SOAFP of VOCs from fossil fuel combustion in different areas

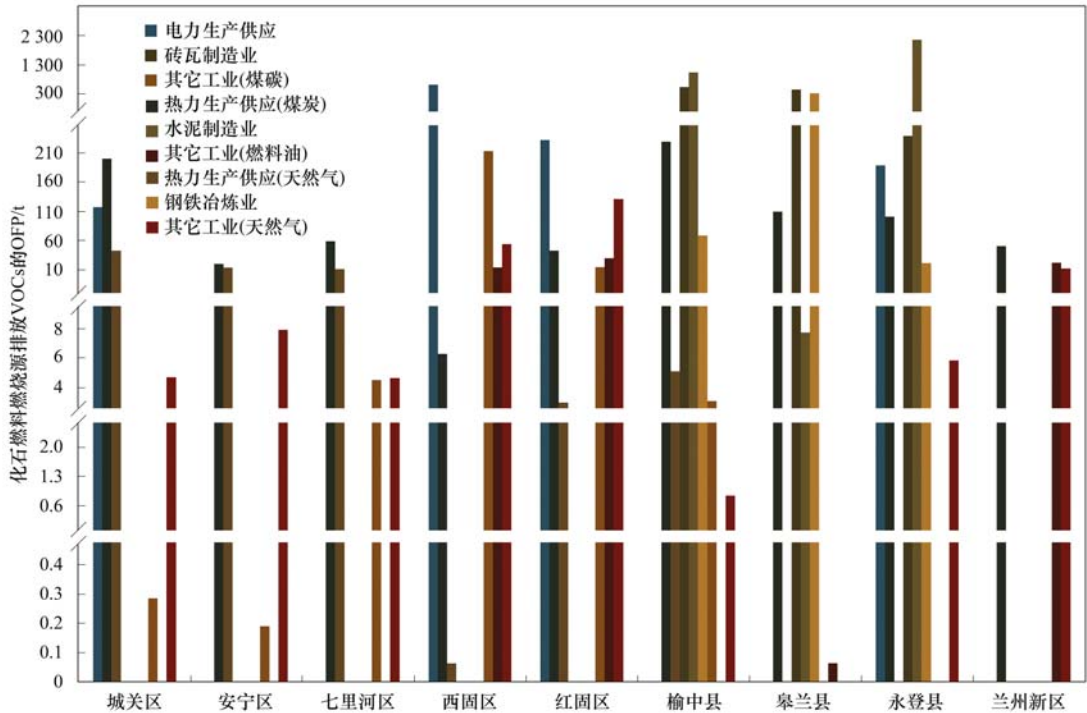


图 8 各县区各行业化石燃料燃烧源排放 VOCs 的 OFP

Fig. 8 OFP of VOCs from fossil fuel combustion of different sources in various counties and regions

较大的企业进行空间管理(图 11), 其中化石燃料燃烧源对 O_3 和 SOA 贡献较大的企业主要分布于永登县、榆中县、皋兰县和西固区等区域, 行业主要为水泥制造业、钢铁冶炼业和电力生产供应等; 砖瓦制造业主要分布于榆中县、永登县、皋兰县等地, 企业化石燃料燃烧对 O_3 和 SOA 的生成潜势贡献较小, 但其数量较多, 分布较广, 总体来看, 其影响不容忽视. 对于兰州市主城区, 其 O_3 和 SOA 的生成潜势贡献较大的企业主要分布于西固的工业集中区域, 以电力生产供应行业和石油化工行业为主.

2.6 化石燃料源与其它源排放 VOCs 的 OFP 及 SOAFP 对比

将兰州市化石燃料燃烧源 OFP 和 SOAFP 与兰州市生物质燃烧源^[39]和移动源^[40]进行比较, 结果如图 12 所示. 移动源 OFP 和 SOAFP 最高, 生物质燃烧源 OFP 高于化石燃料燃烧源, 但化石燃料燃烧源 SOAFP 略高于生物质燃烧源. 相关研究中使用单位 VOCs 反应生成 O_3 和 SOA 的量来表示该污染源所对应的 O_3 和 SOA 的生成能力^[36,37], 兰州市移动源 OFP/VOCs 和 SOAFP/VOCs 值最高, 化石燃料燃烧源大于生物质燃烧源, 说明化石燃料燃烧源具

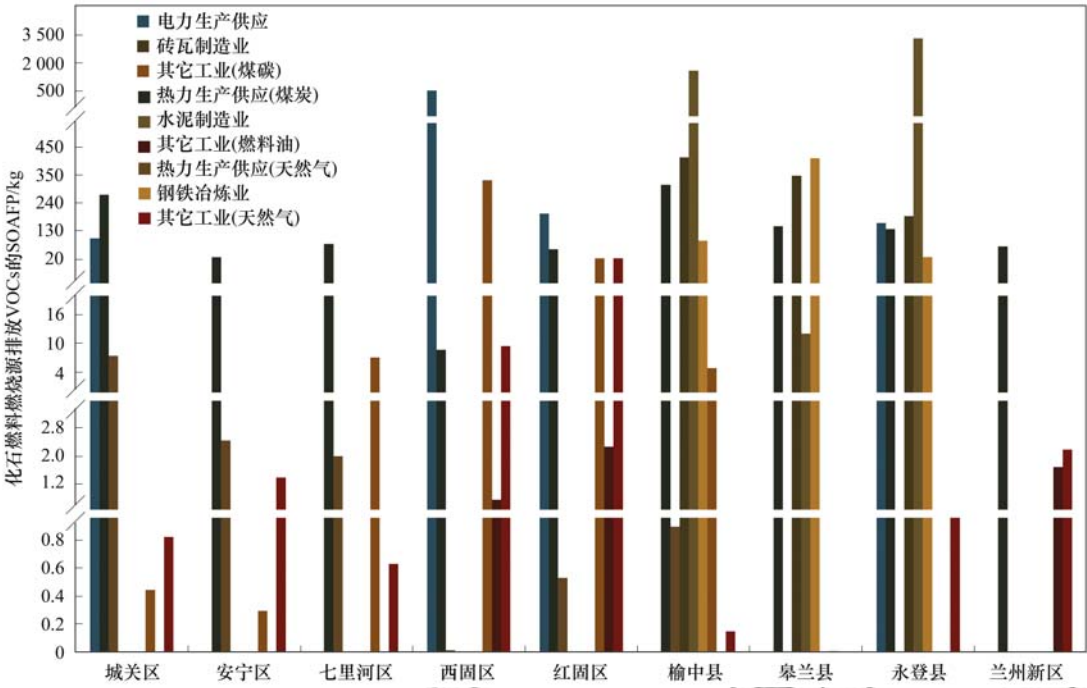


图 9 各县区各行业化石燃料燃烧源排放 VOCs 的 SOAFP

Fig. 9 SOAFP of VOCs from fossil fuel combustion of different sources in various counties and regions

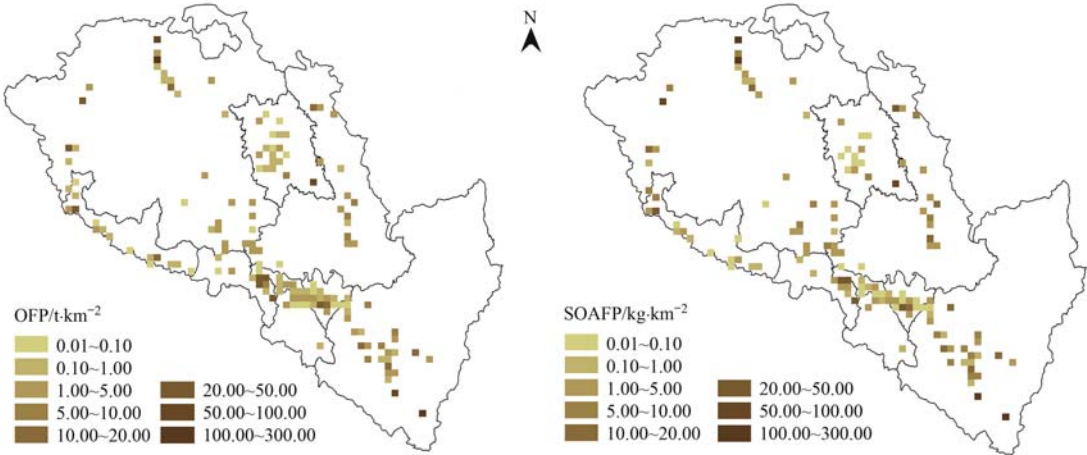


图 10 化石燃料燃烧源 O₃ 和 SOA 生成潜势网格化空间分配

Fig. 10 Spatial distribution of OFP and SOAFP of VOCs from fossil fuel combustion

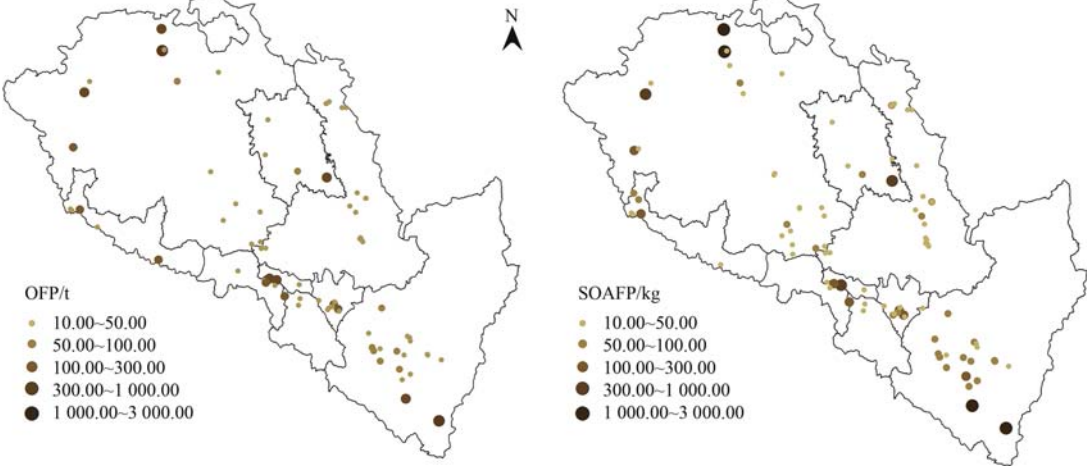


图 11 化石燃料燃烧源 OFP 和 SOAFP 主要贡献企业分布

Fig. 11 Distribution of major enterprises' OFP and SOAFP from fossil fuel combustion

有较强的 O_3 和 SOA 生成能力。

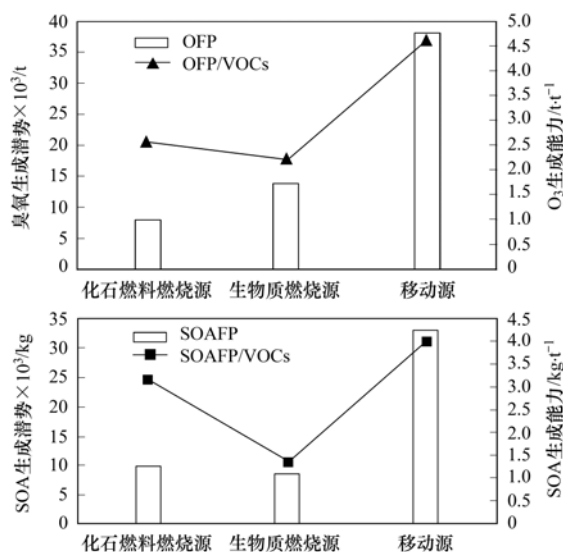


图 12 兰州市各 VOCs 排放源的 OFP 和 SOAFP 贡献值及其相应的生成能力

Fig. 12 OFP and SOAFP and the respective VOCs generating capacity from different sources

3 结论

(1) 兰州市 2016 年化石燃料燃烧源 VOCs 排放量为 3067.6 t, 排放呈现明显的空间和行业的分布特征, 排放量小于生物质燃烧源和交通源, 但其具有较强的臭氧和二次有机气溶胶的生成能力, 其中芳香烃对 O_3 和 SOA 生成潜势贡献最大. 折为吨标煤天然气燃烧产生 VOCs 的 O_3 和 SOA 生成潜势远小于煤炭, 说明用天然气替代燃煤的能源结构调整有利于减少 O_3 和 SOA 的污染。

(2) 各区县各行业化石燃料燃烧源 VOCs 占比与其相应的 OFP 和 SOAFP 的占比存在明显的差别. 对于 OFP 以及 SOAFP 而言, 城区主要为热力生产供应(煤炭)以及电力生产供应的贡献, 其它地区为水泥制造业、砖瓦制造业、钢铁冶炼业等高能耗产业的贡献; 从企业空间分布而言, 除主城区外各县区贡献较大的企业均远离城区, 且分布较为分散, 在城区中 O_3 和 SOA 的生成潜势贡献较大的企业主要分布于西固区, 以电厂和化工企业为主。

参考文献:

- [1] Gaffney J S, Marley N A. The impacts of combustion emissions on air quality and climate-from coal to biofuels and beyond[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 23-36.
- [2] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 257-269.
Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 257-269.
- [3] Chan K L, Wang S S, Liu C, *et al.* On the summertime air

quality and related photochemical processes in the megacity Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 974-983.

- [4] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [5] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(17): 8815-8832.
- [6] Wang H L, Jing S A, Lou S R, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 253-261.
- [7] Li L Y, Chen Y, Zeng L M, *et al.* Biomass burning contribution to ambient volatile organic compounds (VOCs) in the Chengdu-Chongqing Region (CCR), China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 403-410.
- [8] Wang H L, Lou S R, Huang C, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds from biomass burning in Yangtze River Delta, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(3): 818-828.
- [9] 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.
- [10] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, northwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 225-236.
- [11] 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.
- [12] Wang M, Shao M, Lu S H, *et al.* Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, **24**(9): 829-832.
- [13] Yan Y L, Lin P, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [14] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 592-599.
Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 592-599.
- [15] 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): 4535-4542.
Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [16] 岳立. 兰州市大气污染治理的经济学分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
Yue L. An economic analysis on control of air pollution in Lanzhou City[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [17] 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1227-1242.

- Zhang K, Yu Z S, Gao H, *et al.* Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Lanzhou valley [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1227-1242.
- [18] 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) [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.
- [19] 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.
- [20] Stockwell C E, Christian T J, Goetz J D, *et al.* Nepal ambient monitoring and source testing experiment (NAMASte): emissions of trace gases and light-absorbing carbon from wood and dung cooking fires, garbage and crop residue burning, brick kilns, and other sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(17): 11043-11081.
- [21] U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA). SPECIATE version 4.5 through 4.0 [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-version-45-through-40>, 2016-09.
- [22] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 373-380.
- Lu X Q, Han M, Ran L, *et al.* Characteristics of nonmethane organic compounds and their ozone formation potentials in downtown Tianjin in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 373-380.
- [23] Lam S H M, Saunders S M, Guo H, *et al.* Modelling VOC source impacts on high ozone episode days observed at a mountain summit in Hong Kong under the influence of mountain-valley breezes [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 166-176.
- [24] Carter W L P. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales [R]. California: University of California, 2010.
- [25] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [26] 徐敬, 马建中. 北京地区有机物种人为源排放量及 O₃ 生成潜势估算 [J]. *中国科学: 化学*, 2013, **43**(1): 104-115.
- Xu J, Ma J Z. Estimation of anthropogenic emissions and ozone formation potential of speciated VOCs in Beijing area [J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2013, **43**(1): 104-115.
- [27] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [28] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. Sacramento, California: California Air Resources Board, 2010.
- [29] Turpin B J, Huntzicker J J, Larson S M, *et al.* Los Angeles summer midday particulate carbon: primary and secondary aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(10): 1788-1793.
- [30] Weber R J, Sullivan A P, Peltier R E, *et al.* A study of secondary organic aerosol formation in the anthropogenic-influenced southeastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2007, **112**(D13): D13302, doi: 10.1029/2007jd008408.
- [31] Barthelmie R J, Pryor S C. Secondary organic aerosols: formation potential and ambient data [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**(2-3): 167-178.
- [32] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [33] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [34] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 976-986.
- Lin X, Zhu B, An J L, *et al.* Potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the northern suburb of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 976-986.
- [35] 陈小方, 张嘉妮, 张伟霞, 等. 化工园区挥发性有机物排放清单及其环境影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- Chen X F, Zhan J N, Zhang W X, *et al.* VOCs emission inventory of a chemical industry park and its influence on atmospheric environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [36] GB/T 2589-2008, 综合能耗计算通则 [S].
- GB/T 2589-2008, General principles for calculation of the comprehensive energy consumption [S].
- [37] 杨笑笑, 汤莉莉, 胡丙鑫, 等. 南京城区夏季大气 VOCs 的来源及对 SOA 的生成研究——以亚青和青奥期间为例 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 2896-2902.
- Yang X X, Tang L L, Hu B X, *et al.* Sources apportionment of volatile organic compounds VOCs in summertime Nanjing and their potential contribution to secondary organic aerosols (SOA) [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2896-2902.
- [38] 虞小芳, 程鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜势的研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 830-837.
- Yu X F, Cheng P, Gu Y G, *et al.* Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 830-837.
- [39] 郭文凯, 刘镇, 刘文博, 等. 兰州生物质燃烧 VOCs 排放特征及其大气环境影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(1): 40-49.
- Guo W K, Liu Z, Liu W B, *et al.* The characteristics of VOCs emission from biomass burning and its influence on atmospheric environment in Lanzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 40-49.
- [40] 刘晓, 陈强, 郭文凯, 等. 移动源排放 VOCs 特征及臭氧生成潜势研究——以兰州市为例 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 3220-3228.
- Liu X, Chen Q, Guo W K, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from mobile sources: a pilot study in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(8): 3220-3228.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)