

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



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势

卢轩¹, 张瑞芹¹, 韩磊^{2*}

(1. 郑州大学化学学院, 环境科学研究院, 郑州 450001; 2. 河南省广播电视台 102 台, 郑州 450002)

摘要: 基于人为源挥发性有机物 (VOCs) 活动水平统计和源成分谱梳理, 采用排放因子法, 建立了郑州市 2016 年 VOCs 组分排放清单, 评估了各类源臭氧生成潜势 (OFP). 结果表明, 2016 年郑州市人为源 VOCs 排放总量为 96 215.3 t, 排放量最高的是道路移动源 (29.7%), 其次是有机溶剂使用源 (28.1%); 排放量最高的组分是烷烃 (29.8%), 其次是芳香烃 (29.0%). 郑州市人为源 VOCs 的 OFP 为 341 291.0 t, 贡献最高的排放源是道路移动源 (30.5%), 其次是溶剂使用源 (28.8%), 其中轻型汽油车、内墙涂料使用、机动车表面涂层、加油站装卸油和非金属矿物制造是 OFP 的主要次级排放源, 也是郑州市降低臭氧污染时需重点管控的 VOCs 排放源. 对于 VOCs 种类而言, 贡献较高的是芳香烃 (42.8%), 其次是烯烃 (38.9%), 未来应加强对间/对-二甲苯、丙烯和乙烯等物种排放来源的控制.

关键词: 郑州市; 挥发性有机物 (VOCs); 排放清单; 臭氧生成潜势 (OFP); 组分清单

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4426-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912192

Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential

LU Xuan¹, ZHANG Rui-qin¹, HAN Luo-kai^{2*}

(1. Research Institute of Environmental Science, College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Broadcasting System 102, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this study, according to the activity levels of volatile organic compounds (VOCs) sources and source profiles, a 2016-based inventory of the speciation emission of the VOCs was established and the ozone formation potential (OFP) were estimated in Zhengzhou. The results showed that the total VOCs emission in Zhengzhou in 2016 was 96 215.3 t. The highest emission source was on-road mobile source (29.7%) followed by solvent use sources (28.1%). The species that contributed the highest emission was alkanes (29.8%) followed by aromatics (29.0%). The OFP in Zhengzhou in 2016 was 341 291.0 t with the highest contributing source as on-road mobile (30.5%) followed by solvent use source (28.8%). Moreover, the light duty gasoline vehicle, use of interior wall coatings, vehicle surface coating, gas station loading and unloading, and manufacture of non-metallic mineral were the major secondary emission sources of OFP, which needed to be controlled for reducing ozone pollution in Zhengzhou. For VOCs species group, the higher contribution groups were aromatics (42.8%) and alkenes (38.9%). The sources that produced *m/p*-xylene, propylene, ethylene, and other species should be paid more attention.

Key words: Zhengzhou; volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; ozone formation potential (OFP); speciation emission

近年来随着政府和人民的关注, PM_{2.5} 质量状况日益改善, 但是臭氧污染却有所恶化. 文献[1]显示, 全国 338 地级市中, 2016 年重污染天气以臭氧为首要污染物的天数占比仅 0.9%, 2017 年和 2018 年却上升至 5.9% 和 3.6%, 2012 年全国第一批实施新空气质量标准的 74 个城市, 2016~2018 年臭氧作为首要污染物的天数占比分别为 30.6%、43.1% 和 43.5%, 臭氧为首要污染物的天气也逐年上升.

挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 和 NO_x 等在大气环境中发生大气光化学反应, 是臭氧生成的重要前体物^[2]. VOCs 排放来源十分复杂, 主要可分为天然源和人为源^[3]. 天然源主要来源于植被排放, 人为源相对广泛, 如溶剂 (涂料、油墨等) 的使用和挥发, 燃料的不完全燃烧, 汽油和柴油等液体燃料的挥发, 机动车和非道路机械

尾气排放和工业的排放等^[4]. 与 SO₂、NO_x 和 NH₃ 等污染物不同的是, VOCs 作为一个整体, 包含数百种有机物, 每个物质又以不同的速率参与不同的大气光化学反应^[5], 意味着不同组分对臭氧生成的影响有所不同. 因此, 在以降低臭氧污染为前提控制 VOCs 排放时, 控制高反应活性组分含量高的排放源会比仅控制高排放量的排放源会更有效^[6]. 国内一些城市的研究表明, 各个城市由于产业结构等各方面的差异^[7~9], VOCs 的排放存在很大差异, 因此, 本地化 VOCs 组分排放清单的研究对于当地臭氧的管控具有非常十分重要的意义.

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-04-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212401); 河南省第二次全国污染源普查入户调查及数据汇总阶段技术服务项目 (豫财磋商采购-2018-471)

作者简介: 卢轩 (1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气挥发性有机物排放清单编制, E-mail: 1282903486@qq.com
* 通信作者, E-mail: 61179734@qq.com

郑州市是河南省省会,地处中华腹地,自然资源储量丰富,交通便利,是全国普通铁路和高速铁路网中唯一的“双十字”中心^[10]. 然而,郑州市环境空气质量在 74 个新标准第一阶段监测实施城市常年排倒数十位. 根据文献[11],自 2016 年以来,郑州市臭氧年 90 百分位数浓度连续 3 a 超二级标准,2017 年和 2018 年甚至达到了 $199\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $194\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可以看出,现阶段郑州市臭氧污染形势严峻,急需摸清其前体物 VOCs 排放特征及组分构成.

本研究参考国内外近年来研究成果,对郑州市 VOCs 排放量进行估算,并结合各排放源化学成分谱的梳理及各组分最大增量反应活性(maximum increment reactivity, MIR),计算郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP),以期对郑州市臭氧治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 排放清单估算

1.1.1 研究对象及排放源分类

本研究以 2016 年为基准年,研究区域为整个郑州市(图 1). 参考国内外学者研究^[12~14],并结合本地实际情况,将 VOCs 人为排放源分为固定燃烧源、溶剂使用源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源、存储与运输源、生物质燃烧源和其他排放源.

1.1.2 估算方法

采用排放因子法,对郑州市 VOCs 排放清单进行估算. 除道路移动源外,其余排放源采用文献[15]中估算方法,估算公式为:

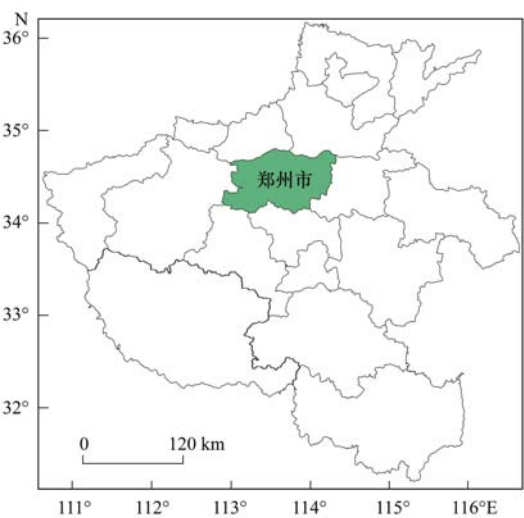


图 1 郑州市在河南省地理位置示意
Fig. 1 Location of Zhengzhou in Henan

$$E_y = \sum_{i,k} [A_{i,k} \times EF_k \times (1 - \eta)] \quad (1)$$

式中, E_y 是 VOCs 排放总量(t); i 是各类排放源; k 表示排放源 i 中次级源 k ; EF 是排放源 k 的排放因子; A 是排放源 k 的活动数据; η 是控制设施的平均去除效率.

对于道路移动源,采用的估算方法如下^[16]:

$$E_z = \sum_m P_m \times EF_m \times VKT_m \quad (2)$$

式中, E 是 VOCs 排放总量(t); z 是道路移动源; m 是车型; P 是汽车保有量; VKT 是行驶里程(km).

1.1.3 活动水平及排放因子收集

根据不同排放源的排放特征,首先确定其活动水平(表1),其次选取合适的排放因子(表2). 其

表 1 各排放源活动水平及其来源

Table 1 Activity data and reference source for each source			
排放源	排次级源	活动水平	文献
固定燃烧源	电厂	燃料用量	郑州市发改委
	工业燃烧	燃料用量	[19]
	民用燃烧	燃料用量	[19]
工艺过程源		产品产量	[19]
溶剂使用源	民用溶剂	人口、溶剂用量	[19]
	建筑溶剂	溶剂用量	[19]
	工业溶剂	产品产量、溶剂用量	[19]
	铺路沥青	溶剂用量	[19]
非道路移动源	飞机	起降架次	[20]
	铁路运输	燃料用量	[19]
	内河运输	燃料用量	[19]
	农用机械	燃料用量	[19]
	农用运输车	燃料用量	[19]
	建筑机械	燃料用量	[21]
生物质燃烧源	露天焚烧	秸秆用量	[22]
	秸秆家用	秸秆用量	[23]
	薪柴家用	薪柴用量	[19]
存储与运输源	加油站	油品销售量	[21]
	油品运输及存储	油品中转量	[21,23]
其他排放源	香烟	香烟销售量	[19]
	污水处理	污水处理量	[19]
	垃圾处理	垃圾处理量	[19]

表 2 各排放源的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 2 Emission factors of each source/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

行业	排放源	燃料或产品	排放因子	行业	排放源	燃料或产品	排放因子		
固定燃烧源	火力发电	煤炭 ^[24]	0.04	工业溶剂使用	工业溶剂使用	人造板 ^[15]	0.5 ¹⁾		
		重油 ^[15]	0.13			印染布 ^[15]	10		
		生物质 ^[15]	5.3			家具喷涂 ^[15]	0.4 ⁴⁾		
		洁净燃气 ^[24]	0.02 ¹⁾			机动车表面涂层			
		垃圾 ^[25]	0.74			轿车 ^[15]	2.43 ²⁾		
	工业燃烧	煤炭 ^[15]	0.39				客车 ^[15]	21.2 ²⁾	
		燃料油 ^[15]	0.35				货车 ^[15]	21.2 ²⁾	
		柴油 ^[26]	0.12				改装汽车 ^[15]	21.2 ²⁾	
		洁净燃气 ^[27]	0.18 ¹⁾			制鞋 ^[15]	0.059 ⁵⁾		
		焦炭 ^[24]	0.04			印刷 ^[29]	320		
民用燃烧	煤炭 ^[27]	0.6	溶剂使用源	家用溶剂	城市人口 ^[33]	0.5 ³⁾			
	液化石油气 ^[28]	0.19			农村人口 ^[33]	0.1 ³⁾			
	天然气 ^[27]	0.18 ¹⁾							
工艺过程源	非金属矿物制品业	水泥 ^[29]	0.18	民用溶剂使用	民用溶剂使用	农药使用 ^[34]	0.95		
		陶瓷 ^[30]	0.215			去脂脱污 ^[15]	0.044 ³⁾		
		耐火材料 ^[29]	0.18			烹饪 ^[15]	0.003 5 ³⁾		
		烧结砖 ^[29]	0.18			干洗 ^[15]	1 000		
		石墨 ^[29]	0.18	建筑溶剂使用	建筑溶剂使用	内墙涂料 ^[15]	120		
		玻璃 ^[15]	3.15			外墙水性涂料 ^[15]	120		
						外墙溶剂涂料 ^[15]	450		
	化学原料制造	涂料生产 ^[15]	15	沥青	沥青	铺路沥青 ^[15]	353		
		颜料生产 ^[15]	81.4						
	其他工艺过程	酒类制造 ^[15]	酒类制造 ^[15]	0.25	非道路移动源	非道路移动源	飞机 ^[15]	2.89 ⁶⁾	
造纸 ^[31]			2.6	铁路运输 ^[35]			4		
橡胶塑料 ^[26]			2.2	内河运输 ^[35]			3		
化学纤维 ^[15]			14.5	农用机械 ^[36]			9.38		
食品制造		大豆油 ^[15]	2.45				农用运输车 ^[37]	12.58	
		菜籽油 ^[15]	8.75				建筑机械 ^[32]	7.76	
		花生油 ^[15]	10.35						
		其他食用油 ^[15]	9.257 5						
油品储运		汽油 ^[32]	0.74	露天焚烧			露天焚烧	水稻 ^[38]	15.7
		柴油 ^[32]	0.05					玉米 ^[39]	10
			小麦 ^[39]		7.5				
			其他 ^[38]		15.7				
加油站	汽油 ^[32]	2.76	生物质燃烧源	生物质燃烧源	水稻 ^[40]	8.4			
其他排放源	香烟 ^[15]	6	家用秸秆	家用秸秆	玉米 ^[40]	7.34			
	污水厂 ^[15]	0.001 1			小麦 ^[40]	9.37			
	焚烧 ^[15]	0.74			其他 ^[40]	7.97			
	生活固废	填埋 ^[15]			0.23	薪柴家用 ^[40]	3.13		
		堆肥 ^[15]			0.74				

1)单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2)单位为 $\text{kg}\cdot\text{辆}^{-1}$, 3)单位为 $\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}$, 4)单位为 $\text{g}\cdot\text{件}^{-1}$, 5)单位为 $\text{g}\cdot\text{双}^{-1}$, 6)单位为 $\text{kg}\cdot\text{LTO}^{-1}$, LTO 为飞机活动水平起降架次的单位

中,活动水平根据不同的排放源,综合参考各类统计信息数据,一部分无法直接获取,通过一些已有研究中提到的方法进行折算,具体说明如下。

非道路移动源铁路和船舶活动水平根据文献[17]中所提到方法计算;建筑机械则从全国建筑溶剂使用量通过建筑竣工面积推估;生物质燃烧源中各类秸秆薪柴使用量通过文献[18]中方法推估;存储与运输源中汽柴油的存储与运输活动水平,参考珠三角的方法^[14]进行推估。

1.2 组分清单建立

1.2.1 估算方法

组分排放清单是在 VOCs 排放量估算基础上,借助各类排放源化学成分谱,对排放总量进行组分

排放量核算,具体公式如下:

$$E_m = \sum_{n,m} (E_n \times P_{n,m}) \tag{3}$$

式中, E_m 表示组分 m 的排放量, E_n 表示排放源 n 的 VOCs 排放量, $P_{n,m}$ 表示排放源 n 中 m 组分占 VOCs 排放总量的比例因子。

1.2.2 所选源谱及来源

本研究优先选取国内学者研究所建立的源成分谱,此外,还参考了美国环保署(USEPA)的 Speciate Database 数据库^[41],共采用了 59 种不同排放源的成分谱,具体来源如表 3 所示。

1.3 臭氧生成潜势(OFP)计算

OFP是被广泛应用于评估VOCs排放对臭氧生

表 3 本研究排放源所用源谱来源
Table 3 Source profiles used in this study

排放源	源谱数量	文献	排放源	源谱数量	文献
固定燃烧源	9	[41]	道路移动源	1	[41]
	1	[42]		1	[48]
	1	[43]		1	[49]
工艺过程源	6	[41]		2	[43]
	1	[44]		2	[50]
	1	[45]		1	[51]
溶剂使用源	7	[41]	非道路移动源	4	[41]
	2	[46]		1	[43]
	3	[44]		1	[52]
	2	[47]	生物质燃烧源	1	[53]
	1	[42]		3	[43]
存储与运输源	2	[43]	其他排放源	5	[41]

成的贡献的指标,每种 VOCs 组分的 OFP 可通过将其排放量乘以 MIR 计算出来.某一 VOCs 组分的 MIR 值是指在该组分 VOCs 在对臭氧生成最为敏感的反应条件下 (most sensitive to VOCs emissions),每增加一单位的 VOCs 臭氧产量的增加量,单位为 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 对于每种 VOCs 组分的臭氧生成潜势,计算公式是:

$$\text{OFP}_i = E_i \times \text{MIR}_i \quad (4)$$

式中, OFP_i 表示组分 i 的臭氧生成潜势, E_i 表示组分 i 的排放量, MIR_i 表示组分 i 的最大增量反应活性.

各类组分的排放量即为上文所得到的组分排放清单中的量,而各组分的 MIR 值则参考 Carter 等^[54]的研究.本研究共评估了 196 种组分的 OFP,并选取其中排放量较高的 75 种组分进行汇总整理,其余组分按照组分类型加和.

2 结果与讨论

2.1 郑州市 2016 年 VOCs 排放清单

郑州市 2016 年 VOCs 排放总量为 96 215.3 t,排放量最高的是道路移动源 (28 552.1 t),占排放总量的 29.7%,其次是溶剂使用源 (27 059.1 t) 和工艺过程源 (23 270.1 t),分别贡献了排放总量的 28.1% 和 24.2% (表 1 和图 2). 道路移动源的高排放与郑州市人口以及机动车保有量有关,郑州市 2016 年常住人口高达 988.0 万人,各类民用汽车的保有量达到了 342.8 万辆. 机动车的高保有量伴随着大量汽柴油消耗,因而油品存储与运输源也有较高的 VOCs 排放. 而郑州市 2016 年第二产业 GDP 高达 3 796.9 亿元,发达的工业也伴随着工艺过程源 (23 270.1 t) 和工业有机溶剂使用源 (9 622.4 t) 的较高 VOCs 排放.

进一步分析主要次级排放源贡献 (表 4),道路

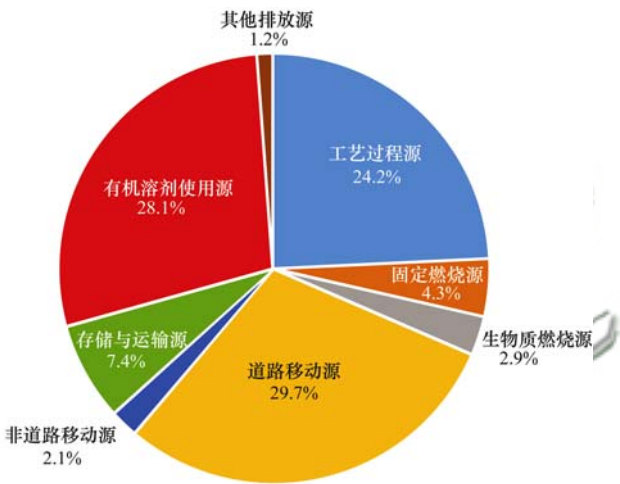


图 2 郑州市各排放源 VOCs 排放贡献
Fig. 2 Contribution of VOCs emission sources in Zhengzhou

移动源当中,对 VOCs 排放量贡献最高的是轻型汽油车,共排放了 16 826.5 t VOCs,轻型汽油车主要构成是私家车,私家车保有量较多,郑州市 2016 年非营运轿车保有量高达 153.8 万辆,因此对道路移动源的 VOCs 排放贡献很高;此外,工艺过程源中的非金属矿物制品业 (13 436.5 t)、溶剂使用源当中的工业溶剂使用 (9 622.4 t) 和建筑溶剂使用 (6 191.7 t) 都对郑州市 VOCs 的排放有较高的贡献. 而众多的人口对住房的需求较大,2016 年郑州市房屋竣工面积 4 829.4 万 m^2 ,因此对建筑溶剂的需求较大,建筑溶剂排放量较高.

2.2 郑州市 VOCs 组分排放特征

郑州市 2016 年排放的 VOCs 中,排放量最高的物种是烷烃 (28 679.3 t),占排放总量的 29.8%,其次是芳香烃 (27 898.4 t) 和含氧 VOCs (16 206.9 t),分别排放占排放总量的 29.0% 和 16.8%.

从各类 VOCs 的贡献来源可以看出 (图 3),烷烃主要来源于道路移动源 (43.1%),道路移动源的

表 4 郑州市各排放源 VOCs 排放量¹⁾/t

Table 4 VOCs emissions of each sub-source in Zhengzhou/t

排放源	排放量	排放源	排放量
火力发电	1 377.7	大型汽油车	557.5
工业燃烧源	2 473	轻型汽油车	16 826.5
民用燃烧源	309.9	摩托车汽油	7 251.3
固定燃烧源	4 160.6	大型柴油车	1 352.8
工业溶剂使用	9 622.4	轻型柴油车	637.5
民用溶剂使用	5 898.5	低速柴油车	392.8
建筑表面涂层	6 191.7	客车其他能源	1 533.7
沥青铺路	5 346.7	道路移动源	28 552.1
有机溶剂使用	27 059.2	飞机	477.2
非金属制品	13 436.5	铁路机车	74.1
化学原料制造业	2 707.4	内河运输	25.1
酒类生产	210.9	农业机械	551.8
造纸	5 533.8	农用运输车	91.9
橡胶塑料	880.6	建筑机械	815.4
食品制造	500.9	非道路移动源	2 035.5
工艺过程源	23 270.1	油品运输与仓储	2 442.9
秸秆家用	1 237.9	加油站	4 713
薪柴家用	419.8	存储与运输源	7 155.9
秸秆露天焚烧	1 165.6	香烟	99.6
森林火灾	3.3	污水处理	833.2
生物质燃烧	2 826.6	垃圾处理	222.4
		其他排放源	1 155.2

1) 表中加粗字体表示各个分项的加和

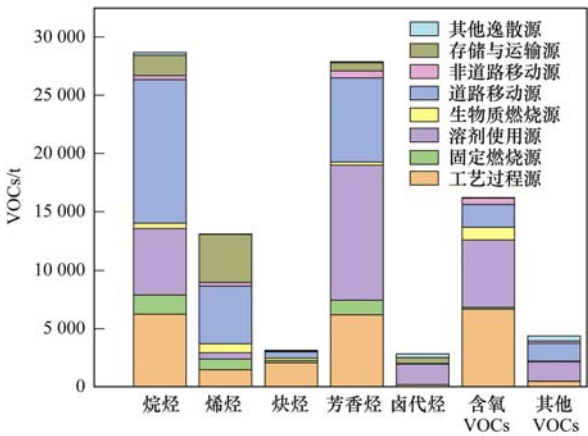


图 3 郑州市 2016 年各类 VOCs 排放量及贡献来源

Fig. 3 Emissions and contribution of each VOCs groups in Zhengzhou, 2016

高额的 VOCs 排放量 (28 552.1 t) 和源谱中烷烃的高额占比 (43.2%) 是主要原因; 芳香烃的主要来源是溶剂使用源 (41.4%), 这是由于芳香烃在各类溶剂中的含量较高 (42.7%); 含氧 VOCs 的主要来源是工业排放, 工艺过程源 (41.2%) 与溶剂使用源 (35.8%) 都有较高的贡献; 烯烃的主要来源则是道路移动源 (37.8%) 和存储与运输源 (31.4%), 这是由于汽油当中的不饱和烃含量较高。

此外, 根据本研究结果统计, 郑州市 2016 年 VOCs 排放量较高的组分分别是甲苯、间/对-二甲苯、乙烷、乙苯、乙烯、乙炔、丙烯、丙烷、邻-二甲苯和

1,3-丁二烯。这 10 类 VOCs 组分排放总量为 34 332.2 t, 占郑州市 2016 年 VOCs 排放总量的 35.7%。

2.3 郑州市臭氧生成潜势及臭氧管控建议

郑州市 2016 年 VOCs 的 OFP 为 341 291.0 t, 贡献最高的 VOCs 是芳香烃 (146 116.5 t), 占郑州市总 OFP 的 42.8%, 其次是烯烃 (132 919.5 t), 占 38.9%, 这两类 VOCs 的贡献高达郑州市总 OFP 的 80.0%。从源上看, OFP 贡献最高的来源是道路移动源 (104 157.9 t), 占郑州市总 OFP 的 30.5%; 其次是溶剂使用源 (98 131.6 t), 占 28.8%, 这两大排放源贡献了郑州市 OFP 的近 60%。

从各排放源各类 VOCs 的 OFP 可以看出 (图 4), 溶剂使用源的芳香烃具有最高的贡献, 达到了 78 584.8 t, 占郑州市总 OFP 的 23.0%; 此外, 道路移动源的烯烃和芳香烃都有较高的 OFP 贡献, 分别占郑州市总 OFP 的 13.1% 和 11.1%。存储与运输源的烯烃也对郑州市 OFP 有较高贡献 (14.1%)。

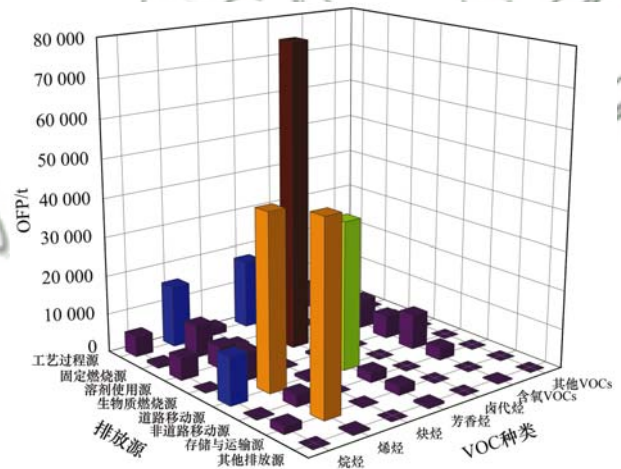


图 4 各排放源各类 VOCs 臭氧生成潜势

Fig. 4 Ozone formation potential of different VOCs groups from various emission sources

此外, 从单一组分的贡献来看 (图 5), 郑州市 2016 年 OFP 较高的 10 种组分分别是: 间/对-二甲苯、丙烯、乙烯、1,3-丁二烯、邻-二甲苯、甲苯、1-丁烯、1,2,4-三甲基苯、乙苯和 1,3,5-三甲基苯。这 10 种组分的 OFP 贡献占郑州市总 OFP 的 67.2% (表 5)。间/对-二甲苯、邻-二甲苯和乙苯主要来源于溶剂使用源的排放; 乙烯、甲苯、1,2,4-三甲基苯和 1,3,5-三甲基苯主要来源于道路移动源的排放; 丙烯和 1,3-丁二烯主要来源于存储与运输源的排放; 1-丁烯主要来源于工艺过程源的排放。

进一步从次级源上分析, 轻型汽油车是道路移动源当中乙烯、甲苯、1,2,4-三甲基苯和 1,3,5-三甲基苯排放量最高次级排放源, 也是道路移动源中

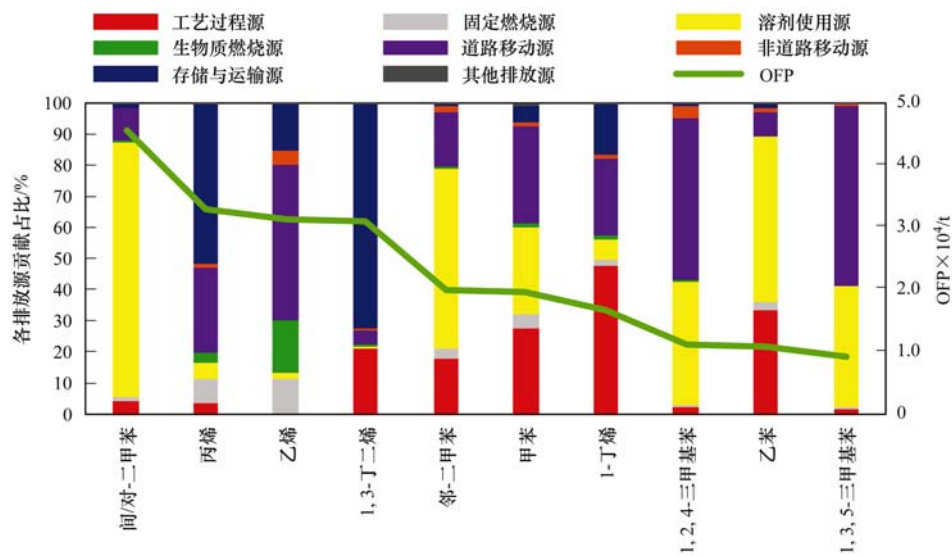


图 5 OFP 贡献最高 10 种组分来源

Fig. 5 Sources of the top ten species contributing to OFP

表 5 各排放源组分臭氧生成潜势/t

Table 5 Ozone formation potential of each species in each group/t

成分	工艺过程源	固定燃烧源	溶剂使用源	生物质燃烧源	道路移动源	非道路移动源	存储与运输源	其他排放源	总计
乙烷	671.6	127.3	32.8	42.2	108.7	2.4	61.3	2.3	1 048.6
丙烷	342.5	89.4	157.2	20.1	478.9	2.3	207.2	1.1	1 298.7
异丁烷	497.1	5.8	334.2	1.6	220.8	8.5	407.5	1.3	1 476.8
正丁烷	988.1	45.3	166.2	7.3	878.6	1.9	213.1	0.8	2 301.4
环戊烷	3.2	0.2	70.1	0.0	227.7	0.7	472.0	0.0	774.1
异戊烷	243.5	52.4	209.8	2.0	1 960.7	41.0	161.9	0.2	2 671.6
正戊烷	209.2	50.2	289.1	4.8	668.2	8.6	78.7	0.3	1 309.0
甲基环戊烷	856.6	14.0	100.2	0.0	533.6	4.9	148.9	0.3	1 658.4
环己烷	1.4	5.2	271.0	0.0	428.7	0.6	32.2	0.1	739.1
2,2-二甲基丁烷	0.0	0.1	21.8	0.7	268.5	0.8	3.3	0.2	295.4
2,3-二甲基丁烷	2.9	2.8	30.0	0.0	140.8	0.5	3.5	0.0	180.5
2-甲基戊烷	20.7	22.2	253.3	8.2	751.2	9.1	47.2	0.1	1 112.1
3-甲基戊烷	22.2	8.4	241.1	0.0	696.5	2.2	24.5	0.0	995.0
正己烷	1 328.7	116.5	208.0	6.0	268.3	5.6	18.6	0.2	1 952.0
甲基环己烷	3.7	3.7	281.2	0.0	142.8	2.1	8.5	0.1	442.1
2,3-二甲基戊烷	0.0	10.6	78.9	0.0	545.4	1.1	21.1	0.0	657.0
2,4-二甲基戊烷	0.0	72.0	21.1	0.0	305.6	0.9	1.1	0.3	401.0
2-甲基己烷	1.3	3.8	527.9	0.0	351.4	1.9	8.5	0.0	894.8
3-甲基己烷	2.2	0.1	202.5	0.0	738.3	4.5	18.4	0.0	966.0
正庚烷	4.1	42.0	386.0	12.8	311.3	7.6	11.5	0.1	775.4
2,2,4-三甲基戊烷	0.0	0.0	15.8	0.0	566.4	3.2	0.9	0.0	586.3
2,3,4-三甲基戊烷	0.0	0.0	6.8	0.0	118.3	0.7	0.7	0.0	126.6
2-甲基庚烷	3.5	12.0	71.6	0.0	123.8	1.1	1.5	0.0	213.4
3-甲基庚烷	1.7	5.0	143.7	0.0	146.7	1.0	1.8	0.0	299.9
正辛烷	14.4	17.8	302.7	0.8	148.3	1.4	3.9	0.1	489.4
正壬烷	17.5	9.1	413.6	0.0	72.1	3.4	2.2	0.0	517.9
正癸烷	8.8	8.7	316.8	0.0	64.8	9.7	2.9	0.0	411.8
正十一烷	1.8	7.9	585.3	0.0	163.0	80.2	2.6	0.0	840.7
乙烯	0.0	3 686.8	482.2	5 340.5	15 848.2	1 473.0	4 611.3	122.7	31 564.8
丙烯	1 210.0	2 625.9	1 740.9	1 122.4	9 023.4	497.6	16 929.6	59.9	33 209.7
1,3-丁二烯	6 663.9	19.4	192.2	169.4	1 480.9	107.7	22 414.6	4.1	31 052.2
1-丁烯	7 959.1	413.9	1 066.1	204.4	4 115.2	196.4	2 736.3	5.0	16 696.4
顺-2-丁烯	0.0	636.2	460.5	65.6	2 447.5	41.6	642.0	5.1	4 298.6
反-2-丁烯	0.0	383.4	549.0	89.3	1 562.3	23.4	466.5	8.9	3 082.8
异戊二烯	6.1	9.4	7.0	59.0	476.6	373.3	151.8	117.8	1 201.0
1-戊烯	0.0	132.5	285.1	8.0	944.9	45.0	25.8	2.4	1 443.7

续表 5

成分	工艺过程源	固定燃烧源	溶剂使用源	生物质燃烧源	道路移动源	非道路移动源	存储与运输源	其他排放源	总计
顺-2-戊烯	0.0	102.2	724.3	4.4	1 248.1	4.0	14.9	1.5	2 099.4
反-2-戊烯	0.0	18.3	66.5	30.7	1 978.1	5.4	15.1	2.1	2 116.2
1-己烯	0.0	215.8	80.0	8.4	941.4	25.6	3.9	2.6	1 277.7
乙炔	1 978.6	162.0	0.0	203.3	488.7	44.3	76.1	1.2	2 954.2
苯	371.4	329.3	230.7	114.9	462.8	20.6	195.3	8.6	1 733.6
甲苯	5 426.7	898.2	5 578.1	195.4	6 219.3	289.5	958.9	176.8	19 742.9
间/对-二甲苯	2 132.9	533.0	37 420.3	52.4	4 791.6	80.8	607.0	1.5	45 619.4
乙苯	3 656.7	318.2	5 800.1	24.3	869.7	111.6	178.4	1.1	10 960.1
邻-二甲苯	3 637.0	634.8	11 510.6	82.6	3 589.9	398.9	114.8	2.1	19 970.7
苯乙烯	961.7	4.9	261.7	22.4	303.2	129.7	14.9	1.1	1 699.6
1,2,3-三甲基苯	191.2	66.6	2 601.5	29.6	2 330.9	226.5	42.8	0.0	5 489.2
1,2,4-三甲基苯	266.6	86.3	4 488.8	20.2	5 908.1	421.4	63.5	3.6	11 258.4
1,3,5-三甲基苯	165.6	38.3	3 700.0	11.5	5 421.0	77.5	16.8	0.6	9 431.3
异丙苯	113.9	1.4	346.1	0.3	212.6	32.7	7.2	0.1	714.3
间-乙基甲苯	616.2	55.6	2 688.4	11.5	1 804.2	16.2	31.7	0.6	5 224.6
正丙苯	0.0	4.3	304.2	1.4	647.6	182.8	4.4	0.1	1 144.8
邻-乙基甲苯	101.4	20.1	1 784.9	1.0	1 121.8	266.6	12.0	0.6	3 308.3
对-乙基甲苯	139.4	15.2	629.2	2.3	436.5	2.1	9.5	1.0	1 235.3
间-二乙基苯	13.5	15.1	580.9	0.0	1 494.5	210.4	5.1	0.0	2 319.5
对-二乙基苯	31.2	26.2	657.9	0.0	196.3	40.0	12.7	0.0	964.3
四氯化碳	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
氯仿	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.3
二氯甲烷	0.4	0.0	1.7	0.1	0.0	0.0	7.6	3.6	13.4
氯甲烷	0.0	0.0	0.1	1.4	0.0	0.0	2.3	0.0	3.8
四氯乙烯	0.0	0.0	24.9	0.0	0.0	0.0	0.1	2.2	27.2
氯乙烯	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2
甲醛	164.9	360.8	233.5	2 137.5	4 219.0	1 978.1	0.0	62.5	9 156.3
乙醛	614.9	98.3	33.9	1 248.7	2 930.0	543.7	0.0	59.1	5 528.6
丙烯醛	1.2	22.0	0.2	345.2	308.7	88.8	0.0	4.7	770.7
丙醛	0.0	7.5	14.8	243.2	473.1	115.4	0.0	4.3	858.4
丁醛	0.0	45.5	12.8	28.4	356.5	148.6	0.0	2.5	594.3
戊醛	0.0	3.0	0.0	61.7	173.6	7.9	0.0	0.0	246.3
异戊醛	0.0	1.0	0.0	7.9	161.9	15.7	0.0	0.1	186.6
苯甲醛	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
己醛	28.1	0.8	3.4	65.9	172.4	15.3	0.0	1.3	287.3
丙酮	47.8	11.3	24.0	22.7	34.1	26.0	0.0	1.4	167.5
甲基乙基酮/丁酮	152.6	3.3	419.2	48.8	29.2	13.4	0.0	0.9	667.3
异丙醇	8.3	0.0	1 283.3	0.0	1.2	0.0	0.0	3.5	1 296.3
乙酸乙酯	549.1	0.0	744.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1 293.7
其他烷烃	0.0	8.4	0.0	2.7	655.2	4.7	0.0	26.7	697.7
其他烯烃	45.5	58.7	51.0	72.4	4 481.1	167.3	0.0	1.1	4 877.1
其他炔烃	0.0	0.0	0.0	0.1	192.3	0.0	0.0	0.0	192.4
其他芳香烃	0.0	2 792.5	1.5	5.3	2 063.7	55.2	0.0	382.0	5 300.2
其他卤代烃	8.8	0.0	570.4	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	587.6
其他含氧 VOCs	4 456.1	48.6	4 735.6	1 684.2	110.6	167.6	0.0	83.4	11 286.1
其他 VOCs	0.7	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
总计	46 968.3	15 647.6	98 131.6	13 957.7	104 157.9	8 900.4	52 338.7	1 188.9	341 291.0

对 OFP 贡献最高的排放源;内墙涂料的使用和机动车表面涂层是溶剂使用源中间/对-二甲苯、邻-二甲苯和乙苯主要来源;加油站装卸油过程的 VOCs 排放是油品存储与运输源中丙烯和 1,3-丁二烯的主要来源;工艺过程源中的非金属矿物制造是 1-丁烯的主要来源.上述次级排放源的 VOCs 排放量为 43 592.5 t,占郑州市 VOCs 排放总量的 45.3%,而这

些排放源对郑州市 OFP 的贡献达到179 445.8 t,占郑州市总 OFP 的 52.6%.从控制臭氧的污染角度,应加强对郑州市轻型汽油车、内墙涂料的使用、机动车表面涂层、加油站装卸油和非金属矿物制造这几个排放源的 VOCs 管控.

2.4 不确定性分析

在组分排放清单的编制过程中,由于排放源的

活动水平的缺失以及估算方法的局限性等原因,会存在一定的不确定性:①活动水平方面,本研究的活动水主要来源于年鉴、发改委、官网等,由于年鉴所统计的工业行业当中对于规下企业的缺失,不可避免地会造成一定的不确定性。②对于排放因子的选取所带来的不确定性,采用蒙特卡罗模拟对清单的不确定性进行定量分析。结果显示,郑州市 VOCs 排放估算在 95% 置信区间不确定范围为 $[-35.38\%, 33.88\%]$ 。结果当中,工业相关的排放源,如工艺过程源、固定燃烧源、存储与运输源以及溶剂使用源当中的工业溶剂使用源有较大的不确定性。而其他的排放源如废弃物及污水处理、溶剂使用源当中的民用溶剂以及生物质燃烧源的不确定性则相对较低。③组分清单和 OFP 的估算方面,本研究所采用的国内学者的研究和 EPA 的源成分谱,不能完全反映本地 VOCs 的实际排放情况,因此会存在一定的不确定性。

3 结论

(1) 郑州市 2016 年 VOCs 排放总量为 96 215.3 t,固定燃烧源、道路移动源、非道路移动源、工艺过程源、溶剂使用源、存储运输源、生物质燃烧源和其他排放源排放占比分别为 4.3%、29.7%、2.1%、24.2%、28.1%、7.4%、2.9% 和 1.2%。

(2) VOCs 组分排放最高的是烷烃,占郑州市 2016 年 VOCs 排放总量的 29.8%。排放量较高物种是:甲苯、间/对-二甲苯、乙烷、乙苯、乙烯、乙炔、丙烷、丙烷、邻-二甲苯和 1,3-丁二烯。

(3) 郑州市 2016 年 VOCs 排放 OFP 为 341 291.0 t,贡献最高的 VOCs 种类和排放源分别是芳香烃和道路移动源,贡献最高的 10 种组分分别是:间/对-二甲苯、丙烯、乙烯、1,3-丁二烯、邻-二甲苯、甲苯、1-丁烯、1,2,4-三甲基苯、乙苯和 1,3,5-三甲基苯。

(4) 轻型汽油车、内墙涂料的使用、机动车表面涂层、加油站装卸油和非金属矿物制造是郑州市 OFP 的主要贡献源。从降低臭氧污染的角度来说,应加强上述排放源的 VOCs 管控。

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>, 2020-03-03.

[2] Geng F, Tie X, Xu J, *et al.* Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(29): 6873-6883.

[3] Field R A, Goldstone M E, Lester J N, *et al.* The sources and behaviour of tropospheric anthropogenic volatile hydrocarbons [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, **26**(16): 2983-2996.

[4] Mukund R, Kelly T J, Spicer C W. Source attribution of ambient air toxic and other VOCs in Columbus, Ohio [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(20): 3457-3470.

[5] Zheng J, Shao M, Che 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.

[6] Ou J, Zheng J, Li R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.

[7] 陈小方, 张伟霞, 陈柄旭, 等. 江门市人为源挥发性有机物排放清单 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 600-607.

Chen X F, Zhang W X, Chen B X, *et al.* Emission inventory of anthropogenic VOCs in Jiangmen City [J]. *Environment Science*, 2018, **39**(2): 600-607.

[8] 郝欢, 万梅, 戎宇, 等. 嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4892-4900.

Hao H, Wan M, Rong Y, *et al.* VOCs emission inventory of anthropogenic Sources in Jiaxing [J]. *Environment Science*, 2018, **39**(11): 4892-4900.

[9] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 533-542.

Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. *Environment Science*, 2018, **39**(2): 533-542.

[10] 郑州市人民政府. 全景郑州 [EB/OL]. <http://www.zhengzhou.gov.cn/view1.jhtml>, 2020-05-28.

[11] 郑州市生态环境局. 2018 年郑州市环境质量状况公报, [EB/OL]. <http://www.zhengzhou.gov.cn/zlbgs/1779814.jhtml>, 2020-03-03.

[12] USEPA. National emission inventory database (NEI). [DB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2014-national-emissions-inventory-nei-data>, 2019-12-10.

[13] European Environment Agency (EEA). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-2006 [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2006. Report nr Technical Report No. 11/2006. 2019. 12. 10.

[14] 卢清. 珠江三角洲地区人为源 VOCs 排放特征及时空分配改进研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

Lu Q. Study on anthropogenic VOCs emission characteristics and improvement of its temporal and spatial allocation for the Pearl River Delta Region [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[15] 中华人民共和国生态环境部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2020-05-28.

[16] Gu X, Yin S, Lu X, *et al.* Recent development of a refined multiple air pollutant emission inventory of vehicles in the Central Plains of China [J]. *Journal of the Environmental Sciences*, 2019.

[17] 中华人民共和国生态环境部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>, 2020-05-28.

[18] 中华人民共和国生态环境部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588071383.pdf>, 2020-05-28.

[19] 郑州市统计局. 郑州市统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计

- 出版社, 2017.
- [20] 搜狐网. 2016 年民航机场起降架次排行榜 [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/127897302_620243, 2020-03-03.
- [21] 中国国家统计局. 中国能源统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国国家统计局, 2017.
- [22] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [23] 河南省统计局. 河南统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [24] Liu H, Wu B, Liu S, *et al.* A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding five provinces of North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **181**: 20-33.
- [25] 杜维鲁. 城市生活垃圾焚烧电厂主要大气污染物产排污系数研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009
Du W. Study on the production and discharge coefficients of main air pollutants in municipal solid waste incineration power plant [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2009.
- [26] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **35**(9): 2655-2669.
- [27] 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.
- [28] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 1858-1871
Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* 2011. Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **31**(9): 1858-1871.
- [29] 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**: 7297-7316.
- [30] USEPA (United States Environment Protection Agency), 2009. AP-42: Compilation of Air Emissions Factors. [DB/OL] <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, 2019-12-11.
- [31] 魏巍. 中国人为源挥发性有机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.
- [32] Yin S S, Zheng J Y, Lu Q, *et al.* A refined 2010-based VOC emission inventory and its improvement on modeling regional ozone in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **514**: 426-438.
- [33] 王丽涛. 北京地区空气质量模拟和控制情景研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
Wang L. Study on air quality simulation and control scenarios in Beijing region [D]. Beijing: Peking University, 2006.
- [34] EEA (European Environment Agency), 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. [DB/OL] <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>, 2020-03-03.
- [35] Wei W, Wang S, 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.
- [36] 樊守彬, 聂磊, 阚睿斌, 等. 基于燃油消耗的北京农用机械排放清单建立 [J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(1): 145-148.
Fan S B, Nie L, Kan R B, *et al.* Fuel consumption based exhaust emissions estimating from agriculture equipment in Beijing [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(1): 145-148.
- [37] Yao Z L, Huo H, Zhang Q, *et al.* Gaseous and Particulate emissions from rural vehicles in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**: 3055-3061.
- [38] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [39] Li X, Duan L, Wang S, *et al.* Emission Characteristics of Particulate Matter from Rural Household Biofuel Combustion in China [J]. *Energy & Fuels*, 2007, **21**(2): 845-851.
- [40] Qiu P, Tian H, Zhu C, *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**: 93-10.
- [41] USEPA (United States Environment Protection Agency), 2009. SPECIATE 4.5. [DB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>, 2020-03-03.
- [42] 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.
- [43] Mo Z, Shao M, Lu S. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Wang H, Qiao Y, Chen C, *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**: 301-310.
- [47] Yuan B, Shao M, Lu S, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [48] Wang J, Jin L, Gao J, *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.
- [49] 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**(2): 93-100.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Yao Z, Wu B, Shen X, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from rural vehicles and their ozone formation potential in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **105**: 91-96.
- [53] 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]. *Environment Science*, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- [54] Carter, William P. L. Reactivity Estimates for Selected Consumer Product Compounds [R]. California: Center for Environmental Research and Technology, College of Engineering, University of California. February 19, 2008.

欢迎订阅 2021 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjx@rcees.ac.cn;网址:www.hjx.ac.cn

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)