

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

河南省 2016 ~ 2019 年机动车大气污染物排放清单及特征

高丹丹¹, 尹沙沙^{2*}, 谷幸珂¹, 卢轩¹, 张欢¹, 张瑞芹², 王玲玲³, 齐艳杰¹

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 3. 河南省生态环境监测中心, 郑州 450004)

摘要: 基于城市机动车保有量和高速公路交通流量, 结合行驶里程和 VOCs 源谱, 采用排放因子法建立了河南省 2016 ~ 2019 年城市和 2016 年高速公路机动车高分辨率大气污染物排放清单. 结果表明, 2016 年小型客车和普通摩托车等汽油车是 CO、VOCs 和 NH₃ 的主要贡献源, SO₂、NO_x 和 PM 主要来自重型和轻型柴油货车, 国 1、国 3 和国 4 标准车对污染物排放贡献突出, 郑州、周口和南阳的排放量较大; 高速公路 8 ~ 10 月的车流量较高, 11 月最低, 城市主干道周变化和日变化分别呈现出明显的周末效应和双峰特征; 排放高值区集中在交通网密集、交通流量大的城市中心及市区附近向外辐射的道路上, 连霍高速和京港澳高速是高排放道路; 轻型汽油车对臭氧生成潜势 (OFP) 贡献最大, 乙烯和丙烯等 5 个物种对 VOCs 排放量和 OFP 贡献均较大; 2016 ~ 2019 年机动车保有量年均增长率为 5.7%; 与 2016 年相比, 2019 年 VOCs 排放增加 2.8%, SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、NH₃、CO 和 NO_x 的降幅分别为 76.3%、51.7%、50.3%、43.1%、16.7% 和 5.9%; 2019 年各污染物在控制政策下的实际排放量相对基准情景的减排比例在 15.6% ~ 82.4% 之间.

关键词: 机动车; 高速公路; 时空分布; 臭氧生成潜势 (OFP); 趋势分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3663-13 DOI: 10.13227/j.hjks.202011125

Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019

GAO Dan-dan¹, YIN Sha-sha^{2*}, GU Xing-ke¹, LU Xuan¹, ZHANG Huan¹, ZHANG Rui-qin², WANG Ling-ling³, QI Yan-jie¹

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Based on the collected urban motor vehicle activity ownership and traffic flow of highways, combined with the mileage and source profiles of VOCs, using the emission factor method, we established high-resolution emission inventories from 2016 to 2019 for urban and 2016-based highway motor vehicles, respectively, in Henan Province, China. The results showed that gasoline vehicles, particularly minibuses and ordinary motorcycles, were the main contributors of CO, VOCs, and NH₃, whereas heavy-duty and light-duty diesel trucks emitted SO₂, NO_x, and PM. Vehicles with China 1, China 3, and China 4 emission standards contributed significantly to pollutant emissions in the fleet. The temporal variation in traffic flow was consistent with the changes in freight and passenger traffic, with higher coefficients of variation for highways from August to October and the lowest in November. The weekly and daily changes in urban trunk roads showed distinct weekend effects and clear double-peak features, respectively. High-value emission areas were concentrated in urban centers with dense transport networks and high traffic volumes and on roads radiating outward from urban areas. The Lianhuo Expressway and the Beijing-Hong Kong-Macau Expressway were high-emission roads. Light-duty gasoline vehicles made the largest contribution to the ozone formation potential (OFP) of VOCs from motor vehicles. Five species, such as ethylene and propylene, contributed significantly to VOC emissions and OFP. The average annual growth rate of vehicle ownership from 2016 to 2019 was 5.7%. Compared with 2016, VOC emissions increased by 2.8% in 2019, whereas emissions of other pollutants showed decreasing trends of different degrees, with decreases of 76.3%, 51.7%, 50.3%, 43.1%, 16.7%, and 5.9% for SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, NH₃, CO, and NO_x, respectively. The emission reduction percentage of each pollutant in 2019 under the control policies relative to the baseline scenario ranged from 15.6% to 82.4%.

Key words: motor vehicles; expressway; spatial and temporal distribution; ozone formation potential (OFP); trend analysis

随着社会经济的快速发展和城市化进程加快, 中国民用汽车数量从 1990 年的 551 万辆增加到了 2016 年的 1.86 亿辆^[1], 机动车污染问题日益突出, 已成为我国许多大型城市灰霾和光化学烟雾等大气污染的主要来源之一^[2]. 特别是北京和上海等特大型城市以及东部人口密集区, 机动车对环境 PM_{2.5} 浓度的贡献高达 20% ~ 40%, 在极端不利条件下, 贡献

率高达 50% 以上^[2]. 机动车也是城市 O₃ 污染前体物 (NO_x 和 VOCs) 的重要来源, 对上海、南京和杭州

收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2021-02-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41907187); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212401)

作者简介: 高丹丹 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 1632751378@qq.com

* 通信作者, E-mail: shashayin@zzu.edu.cn

等城市 2015 年夏季 O_3 浓度的贡献高达 30% ~ 50%^[3]. 同时, 机动车多行驶在人口密集区域, 尾气扩散区域和人们的呼吸高度较为接近, 对人体造成的伤害更严重^[4].

机动车大气污染物排放清单一直是研究热点, 活动水平一般有机动车保有量和道路交通流量. 以保有量等历史统计资料为活动水平, 可建立不受时间和地区范围限制的排放清单. 如, 宋翔宇等^[5]和 Jia 等^[6]分别建立了国家尺度 2002 年和 2011 ~ 2015 年的机动车排放清单; 在区域尺度, Sun 等^[7]和 Lv 等^[8]分别估算了山东和云南的省级尺度机动车污染物排放; 以及刘永红等^[9]和 Song 等^[10]分别对珠三角和长三角进行了研究; Zhang 等^[11]和张海炜等^[12]分别对北京和西安城市污染物排放特征开展研究. 基于实时监测交通流量的研究受区域影响较大, 已有研究集中于城市、道路等中观及微观层次. 如城市层面, 潘玉瑾等^[13]基于道路交通流信息对成都市 2019 年 5 月工作日的机动车污染物排放进行研究; 道路层面, 王人洁等^[14]基于年均监测数据计算了 2015 年我国国道和省道机动车的排放清单.

生态环境部发布的中国机动车环境管理年报显示, 2011 ~ 2015 年河南省机动车保有量均位于全国第六名^[15], 2016 年已跃居全国第三. 而关于机动车清单的研究多关注国家尺度和发达地区, 对于河南省城市尺度研究还相对较少, 基于交通流量对道路尺度清单的研究及对机动车排放的 VOCs 的臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)以及排放趋势等的研究也较为缺乏.

本文以河南省道路移动源为研究对象, 建立 2016 ~ 2019 年河南省城市和 2016 年高速公路机动车污染物排放清单, 并进行精细化时空分配和 VOCs 排放的臭氧生成潜势研究, 以期为区域空气质量管理提供基础数据.

1 材料与方法

图 1 为研究区域, 涵盖河南省 18 地市及路网分布. 基准年为 2016 ~ 2019 年, 包含的污染物有 SO_2 、 NO_x 、CO、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、VOCs[VOCs-运行(运行排放)、VOCs-Evap(蒸发排放)]和 NH_3 .

1.1 估算方法

1.1.1 基于机动车保有量

根据文献[16], 污染物排放量基于机动车保有量、排放因子和年均行驶里程由公式(1)计算:

$$E_{i,h} = \sum_j \sum_k P_{i,j,k} \times EF_{i,j,k,h} \times VKT_j \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, E 为排放量, t; P 为机动车保有量, 辆; EF 为

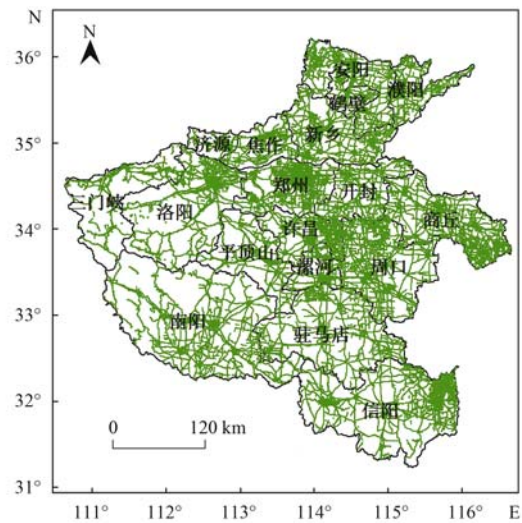


图 1 研究区域及路网示意

Fig. 1 Study area and its road network

本地化排放因子, $g \cdot km^{-1}$; VKT 为年平均行驶里程, km; i 代表城市; j 是车辆类型, 包括 9 种柴油车、11 种汽油车和 4 种其他燃料类型车; k 为机动车排放标准; h 为目标污染物.

1.1.2 基于车流量

污染物排放量基于不同路段的日均车流量、排放因子和道路长度估算如公式(2):

$$E_h = \sum_m \sum_r \sum_k VP_{m,r,k} \times EF_{r,h,k} \times L_{m,r} \times 366 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, VP 为机动车日均车流量, 辆 $\cdot d^{-1}$; EF 为本地化排放因子, $g \cdot km^{-1}$; L 为道路长度, km; m 和 r 分别为道路类型和机动车类型.

1.2 数据来源

1.2.1 活动水平来源和处理

(1) 保有量 本研究从文献[17, 18]中获取各城市历年分车型机动车保有量和新注册量, 使用 Huo 等^[19]的回溯法对历年机动车保有量进行修正, 其中机动车存活率参考 Huo 等^[20]的研究. 再基于调研获取的河南省车队燃料比例获得分燃料的机动车保有量. 最后, 按照中国机动车排放标准判定方法, 假设新的排放标准实施后当年注册的新车严格符合最新的排放标准, 得到 2016 ~ 2019 年不同排放标准下各地市机动车保有量.

(2) 车流量 调研获取 2016 年 12 个月 437 段河南省高速公路日均车流量, 包括大客车、中小客车、集装箱车、特大货车、大型货车、中型货车和小型货车, 结合载客载货量及调研的车队燃料比例对其进行分类.

1.2.2 排放因子本地化

排放因子由基础排放因子^[16]结合 2016 ~ 2019

年河南省气象、交通工况和燃料质量等信息进行本地化修正,包括:气象修正因子(各城市的温度、湿度和海拔);平均速度修正系数;劣化修正系数;其他修正系数,包括汽油和柴油的硫含量,汽油中无乙醇掺杂,柴油车载重系数(50%)。

1.2.3 行驶里程

本研究中大型、中型、轻型和小型客车、出租车和公交车行驶里程来自郑州市环境保护局对 157 505 条机动车样本信息为期 1 a 的调研结果,其余车型行驶里程参考文献[16]的推荐值。

1.3 精细化时空分布

参考郑君瑜等^[21]提出的“标准道路长度”法,先基于 ArcGIS 将研究区域处理成 3 km × 3 km 分辨率的网格,再结合各城市道路长度、车流量以及排放强度(此处指排放量与道路长度的比值)等将每个城市的排放量分配到网格中。

污染物日变化和周变化的时间分布系数基于郑州市交警支队提供的郑州市 2016 年 6 条主干道、6 条次干道和 6 条支路上工作日和周末交通流量数据;月变化分布系数来自河南省高速公路管理局提供的 2016 年 12 个月 437 段高速公路日均车流量。

1.4 臭氧生成潜势

根据文献[22,23]并结合美国 EPA 的

SPECIATE v4.5^[24]数据库获得每种车型分燃料的 VOCs 源成分谱,将 VOCs 排放细化到不同组分,采用最大增量反应活性(maximum increment reactivity, MIR)法量化 VOCs 对 O₃ 的贡献,见公式(3):

$$OFP = \sum_{j,k} E_{j,x} \times MIR_x \tag{3}$$

式中, E 为 VOCs 组分的排放量,t; MIR 是 VOCs 组分的 MIR 值,来自 Cater 等^[25]的研究成果, $g \cdot g^{-1}$; x 为组分种类,共 180 种。

2 结果与讨论

2.1 河南省机动车污染物排放清单

河南省 2016 年机动车 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs-运行、VOCs-Evap 和 NH₃ 的排放量分别为:8.9、486.3、1 110.9、20.0、18.4、136.2、33.1 和 10.2 kt(表 1)。从燃料类型看,柴油车是 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 主要贡献源,贡献比例分别为 68.2%、86.3%、89.0% 和 88.3%。其中,重型柴油货车保有量虽仅占 2.8%,但对 SO₂、NO_x 和 PM 排放的贡献却最大,贡献比例均在 50% 左右;其次为轻型柴油货车,保有量占比仅为 3.3%,但对 NO_x、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的贡献比例却均不低于 10%。CO、VOCs 和 NH₃ 的排放则主要来自汽油车(小型客车和摩托车),这两种车型在车队中保有量占比较

表 1 河南省 2016 年机动车排放清单/kt
Table 1 Vehicle emission inventory for Henan Province in 2016/kt

燃料类型	车型	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs-运行	VOCs-Evap	NH ₃
汽油	大型客车	0.0	0.6	7.5	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0
	中型货车	0.0	0.7	11.5	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
	中型客车	0.0	0.4	4.7	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0
	轻型货车	0.1	8.0	106.9	0.2	0.2	10.6	0.6	0.3
	微型货车	0.0	0.2	2.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
	小型客车	2.6	30.1	514.1	1.3	1.3	56.0	14.6	6.8
	微型客车	0.1	2.8	56.3	0.1	0.1	5.0	0.9	0.2
	普通摩托	0.0	3.8	169.0	0.3	0.3	23.3	14.3	2.0
	轻便摩托	0.0	0.1	3.9	0.0	0.0	2.0	0.4	0.0
	出租车	0.0	0.3	5.6	0.0	0.0	0.7	0.1	0.1
	公交车	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
柴油	大型客车	0.5	42.6	27.3	2.5	2.3	2.1	0.4	0.1
	重型货车	4.1	267.7	116.1	10.7	9.6	15.3	1.7	0.5
	中型货车	0.4	20.0	10.5	1.3	1.1	2.3	0.0	0.0
	中型客车	0.2	6.3	4.4	0.5	0.5	1.4	0.0	0.0
	轻型货车	0.7	65.9	39.2	2.2	2.0	7.8	0.0	0.1
	微型货车	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	低速货车	0.1	7.4	5.2	0.3	0.4	2.3	0.0	0.0
	公交车	0.2	9.1	4.6	0.4	0.3	0.3	0.0	0.0
	出租车	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
其他燃料	出租车	0.0	0.3	3.8	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
	公交车	0.0	10.0	8.5	0.1	0.1	2.2	0.0	0.0
	大型客车	0.0	9.2	8.3	0.1	0.1	1.9	0.0	0.0
	中型客车	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
总计		8.9	486.3	1 110.9	20.0	18.4	136.2	33.1	10.2

大,合计占比达 87.6%,对 4 种污染物的贡献合计高达 61.5%、58.2%、87.5% 和 86.3%。因此,控制小型客车和非电动摩托车数量、完善各类油品蒸发排放管控标准^[26]等是减少 CO、VOCs 和 NH₃ 排放的重要策略。

不同排放标准机动车污染物排放分担率如图 2。由于自然报废和实施淘汰黄标车政策等原因,2016 年河南省国 1 标准车保有量在车队中占比已低至 12.9%,但却是 CO、VOCs 和蒸发 VOCs 的主要贡献车型。因此,淘汰老旧车在中短期内仍可有效削减 CO 和 VOCs。国 3 排放标准车是 NO_x、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的主要贡献车型,占比分别高达 46.3%、42.9% 和 42.2%,这 3 类污染物主要来自柴油车,在柴油车中国 3 标准的柴油车占比最大。所以,逐步提前淘汰国 3 柴油车并合理推进货运车运输结构调整^[27]可有效减少这 3 种污染物的排放^[28]。另外,在车队中保有量占比最大的国 4 排放标准车对 SO₂、VOCs-Evap 和 NH₃ 排放贡献最大,贡献比例分别为 41.9%、25.1% 和 51.9%。

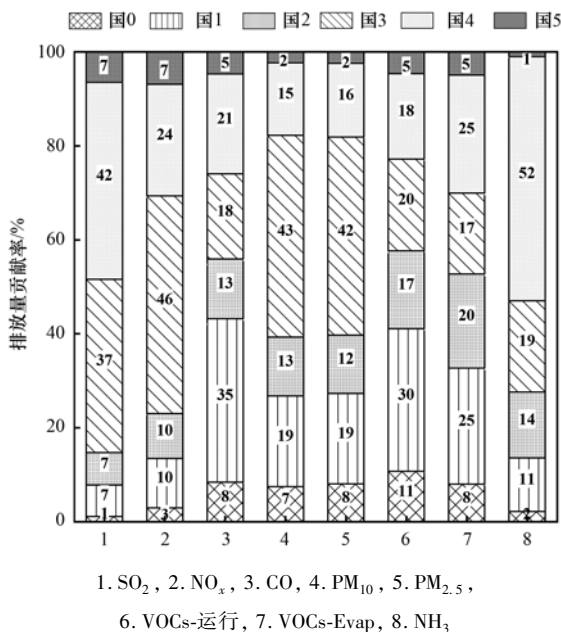


图 2 2016 年河南省机动车排放构成

Fig. 2 Composition of vehicle emissions in Henan Province, 2016

各城市分车型排放贡献及各污染物的省级尺度车型构成如图 3。可明显看出,重型和轻型货车是 SO₂、NO_x 和 PM 的主要贡献车型,小型客车和摩托车是 CO、VOCs 和 NH₃ 的主要来源。由于城市经济发展程度的差异,各市机动车排放构成呈现出不同特征。其中,郑州市各类污染物排放量在 18 个城市中最高,主要因为郑州市是省会城市和重要的交通枢纽,经济发达、机动车保有量大且路网密集。此外,重型货车保有量最多的周口市,对 SO₂、NO_x 和 PM

的贡献仅次于郑州;机动车保有量居全省第二的南阳市,对 CO、VOCs 和 NH₃ 排放量贡献也居全省第二。而机动车保有量相对较低的鹤壁、漯河和济源,机动车各类污染物排放量也较低,对各污染物的贡献占比均低于 3.0%。

2.2 时空分布特征

2.2.1 时间分布

图 4(a) 为机动车月时间分布系数,其中高速公路 8~10 月的变化系数明显高于其他月份,11 月最低,主要受客运和货运变化的影响。除日常上班,客运量主要与人们的旅行等密切相关,因此节假日多和适宜旅游的 8~10 月交通量增大。货运主要受天气的影响,天气恶劣且不宜出行的冬季交通流量减少。另外,以郑州市为例,图 4(b) 为不同道路类型、不同车型周变化。主干道和次干道的周变化幅度小于分支道路,尤其是支路大车的周变化,主要由于分支道路的不可预测性和不确定性较大。此外,主干道周六的日变化系数有明显下降,次干道和支路则在周日明显下降,均显示出明显的周末效应。如图 4(c) 所示,交通流量日变化整体上有明显的双峰特征,其中主干道和次干道工作日早晚高峰时段均分别为 08:00~10:00 和 17:00~19:00,而支路工作日早高峰时段为 07:00~10:00,均在 12:00 出现了低谷。主干道和次干道周末早高峰比工作日晚 1 h 出现,支路则晚 2 h 出现;而周末晚高峰均比工作日提前 1 h 出现。

2.2.2 空间分布

从图 5 可以看出,各污染物排放高值区集中在交通网密集、交通流量大的城市中心及市区附近向外辐射的道路上,排放强度由市区向郊区逐渐降低,且高值区主要位于河南省中北部地区。

由于主要贡献车型的不同,不同污染物之间空间分布存在差异。CO 和 VOCs 的排放集中在城区,与其主要贡献车型小型客车在路网密集的城区活动水平大有关。而以重型和轻型等柴油货运车辆为主要贡献车型的 NO_x 和 PM 在郊区的排放高于城区,这些车型的活动范围主要为省道、国道和县道等主要运输干道。

2.2.3 空间分布特征对比

高速公路可减轻交通压力,是区域连接的纽带,识别其机动车污染物空间分布特征很有必要。采用两种方式对其空间分布进行对比。第一种方式活动水平为城市机动车保有量。基于最新高速公路属性,结合各个车型在每条道路上排放强度及车流量,将每个城市的机动车污染物排放量分配至有道路属性

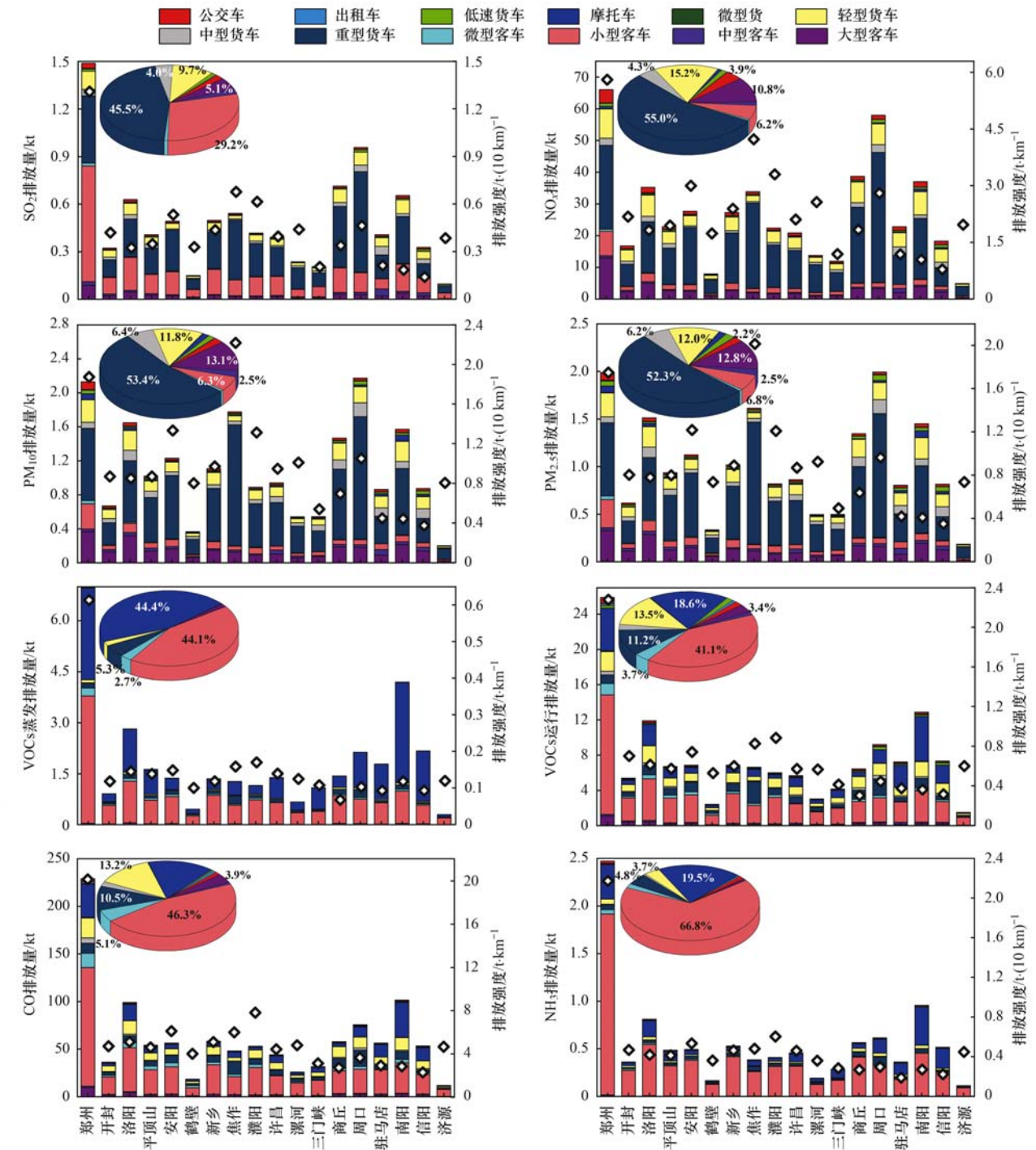


图3 不同污染物车型贡献和各城市排放强度

Fig. 3 Pollutant contribution of different vehicles and emission intensity in each city

的各个网格中,仅保留高速公路上的排放,获得其空间分布.第二种方式活动水平为道路车流量.将高速公路上 437 个路段机动车污染物排放量汇总至 29 条贯穿河南区域的高速公路,结合每条高速公路上各种车型排放强度和平均车流量,将污染物分配至网格,获得其空间分布.

2.3 高速公路污染物排放特征

2.3.1 污染物排放量

根据每段道路的所属城市,将其交通量划分至

该城市,得到每个城市交通量和机动车污染物排放量(表 2). 2016 年河南省高速公路机动车 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 NH_3 的排放量分别为 1.3、86.3、96.4、4.4、8.1、13.3 和 0.6 kt. 受交通量和道路长度影响,郑州、驻马店和开封是污染物排放量较高的城市. 污染物排放主要来自重型柴油货车、小型汽油客车和中型柴油货车(图 6),可能因为高速公路主要承担长途客运和货运. 以 NO_x 和 VOCs 为例,高速公路上 NO_x 排放主要来自重型柴

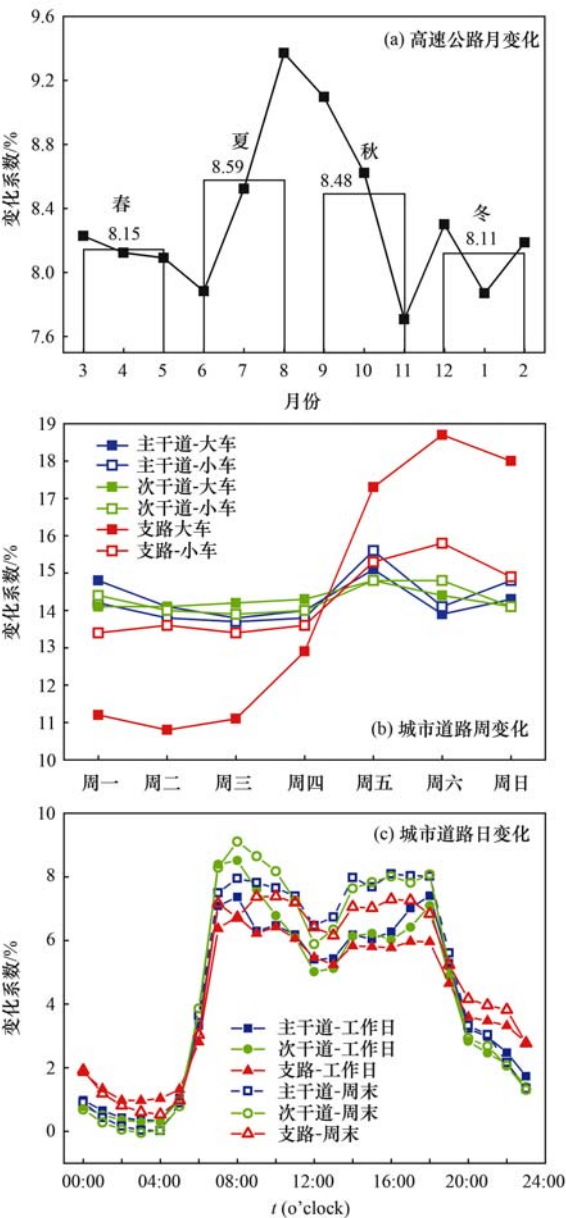


图4 车流量时间变化特征

Fig. 4 Time variation characteristics of traffic flow

油货车和中型柴油货车,而 VOCs 排放主要来自小型汽油客车和重型柴油货车.

2.3.2 空间分布特征对比

高速公路可减轻交通压力,是区域连接的纽带,识别其机动车污染物空间分布特征很有必要. 采用两种方式对其空间分布进行对比. 第一种方式活动水平为城市机动车保有量. 基于最新高速公路属性,结合各个车型在每条道路上排放强度及车流量,将每个城市的机动车污染物排放量分配至有道路属性的各个网格中,仅保留高速公路上的排放,获得其空间分布. 第二种方式活动水平为道路车流量. 将高速公路上 437 个路段机动车污染物排放量汇总至 29 条贯穿河南区域的高速公路,结合每条高速公路上各种车型排放强度和平均车流量,将污染物分配至网格,获得其空间分布.

图 7 以 NO_x 和 VOCs 为例,对比两种分配方式获得的 空间分布特征. 第一种分配方式中城市间差异明显,郑州、焦作、周口和三门峡是高排放城市;第二种分配方式呈现出道路之间差异,连霍高速和京港澳高速是高排放道路. 两种分配方式均有优缺点:①第一种分配方式的高速公路各污染物排放量比第二种方式低,可以说明以保有量为活动水平会低估高速公路上机动车污染物排放,可能由于重型货车、大型客车等高排放车辆在高速公路上的行驶比例比在其他道路上多;②第一种分配方式能更好地呈现出交叉路口由于机动车换道拥挤而产生的高值排放量;③对于 NO_x ,其排放主要来自多用于长途运输的重型和中型柴油货车,活动范围多为高速路,故第二种分配方式更符合 NO_x 空间分布;而 VOCs 排放主要来自小型汽油客车,考虑到小客车行驶范围多为城区,第一种分配方式更合适.

表 2 河南省高速公路机动车交通量及污染物排放量/kt

Table 2 Vehicle traffic and pollutant emissions on expressways/kt

城市	道路长度/km	交通量/百万辆	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
郑州	573.5	733	0.2	11.4	17.0	0.6	1.4	2.2	0.1
开封	453.0	197	0.1	7.2	8.3	0.4	0.7	1.1	0.1
洛阳	359.1	161	0.1	5.0	5.2	0.3	0.4	0.7	0.0
平顶山	375.9	103	0.1	4.1	4.7	0.2	0.4	0.6	0.0
安阳	304.6	94	0.1	3.6	3.9	0.2	0.3	0.5	0.0
鹤壁	76.5	49	0.0	1.9	2.3	0.1	0.2	0.3	0.0
新乡	206.5	131	0.1	5.4	6.0	0.3	0.5	0.8	0.0
焦作	193.5	95	0.0	2.6	3.0	0.1	0.3	0.4	0.0
濮阳	168.5	50	0.0	2.2	2.3	0.1	0.2	0.3	0.0
许昌	291.8	157	0.1	4.5	5.4	0.2	0.5	0.7	0.0
漯河	138.4	69	0.1	3.6	3.7	0.2	0.3	0.5	0.0
三门峡	298.2	60	0.1	5.4	4.2	0.3	0.4	0.6	0.0
商丘	491.0	112	0.1	4.2	5.3	0.2	0.4	0.7	0.0
周口	444.0	135	0.1	5.4	6.4	0.3	0.5	0.9	0.0
驻马店	436.9	132	0.1	8.7	7.4	0.4	0.6	1.1	0.0
南阳	510.6	103	0.1	5.1	5.6	0.3	0.5	0.8	0.0
信阳	448.4	88	0.1	5.4	5.1	0.3	0.4	0.7	0.0
济源	88.7	13	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0
合计	5 859.1	2 481	1.3	86.3	96.4	4.4	8.1	13.3	0.6

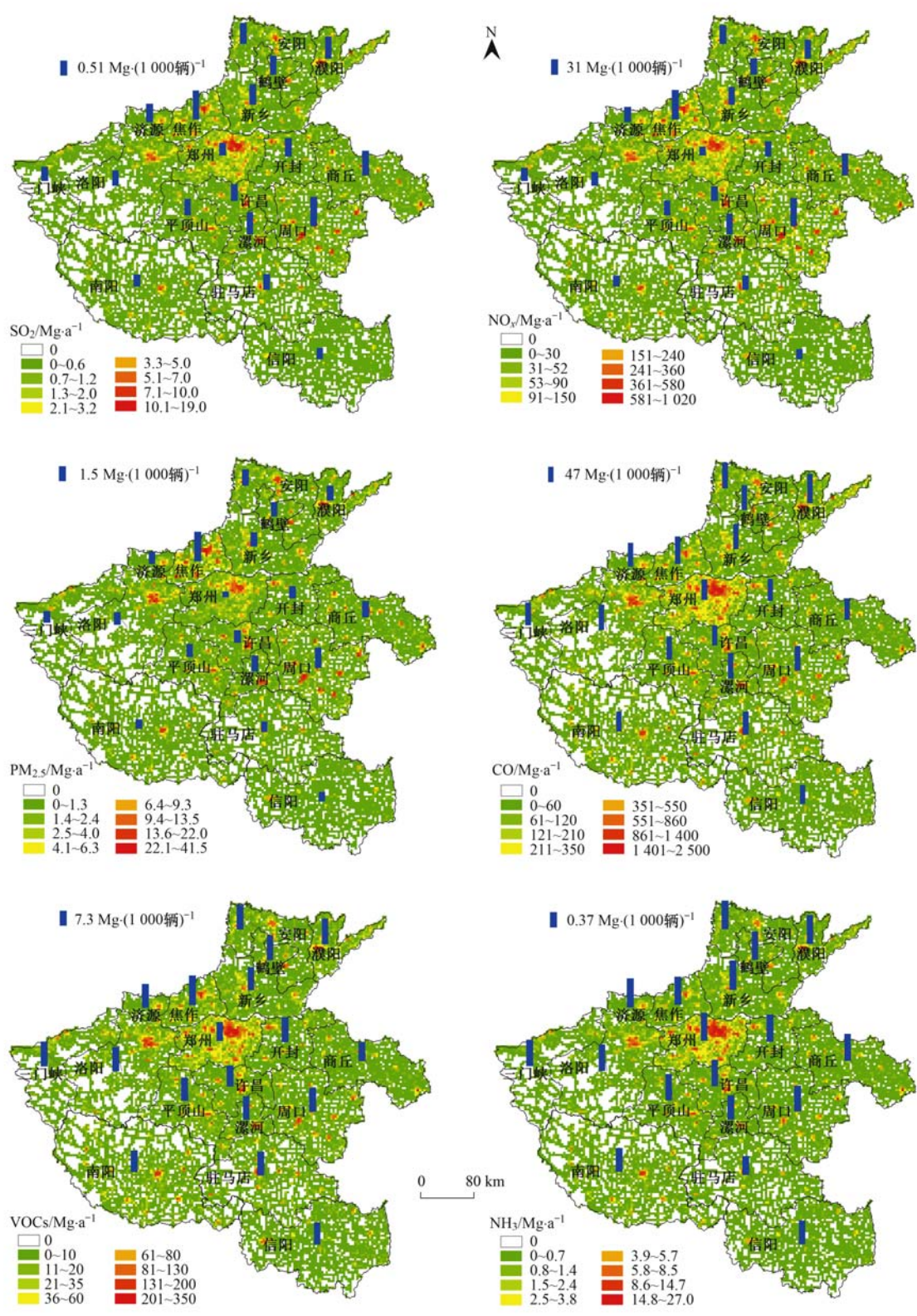


图 5 河南省机动车污染物排放空间分布(3 km×3 km)

Fig. 5 Spatial distribution of pollutant emissions from road vehicles in Henan Province(3 km×3 km)

2.4 VOCs 组分排放清单及臭氧生成潜势

2016 年河南省机动车排放的 VOCs 的 OFP 为 663.6 kt,不同车型中各物种对 VOCs 排放量和 OFP 的贡献特征如图 8. 将 VOCs 物种划分成烷烃、芳香烃、烯烃、含氧 VOCs、炔烃、卤代烃和其他 VOCs,它们的排放量贡献分别为 40.0%、23.9%、17.7%、

11.1%、3.4%、0.7% 和 3.5%,对 OFP 的贡献分别为 10.7%、32.2%、41.8%、14.5%、0.9%、0.03% 和 0. 从车型贡献来看,轻型汽油车对 OFP 贡献最大,贡献率高达 40.9%,其次是蒸发排放、大型柴油车和汽油摩托车. 其中,轻型汽油车、蒸发排放和汽油摩托车对应的 VOCs 排放量也较大,且其中反应

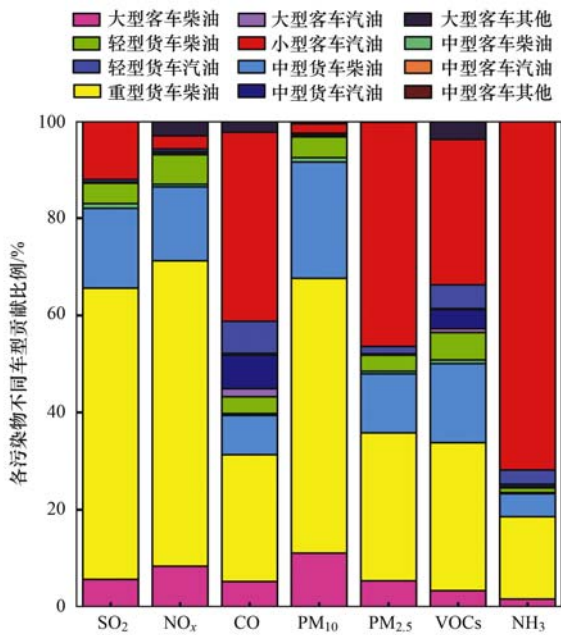


图6 高速公路污染物车型贡献

Fig. 6 Contributions of vehicles to pollutants on highways

活性较强的芳香烃和烯烃贡献较大. 而大型柴油车中排放量最大的却是含氧 VOCs, 占比高达 52.0%, 同时由于其具有高反应活性, 对应的 OFP 贡献高达 59.0% .

图9 为 VOCs 排放量和 OFP 贡献排名前十物种对应的 OFP 和排放量贡献率及 MIR 值. 排放量贡献前十的物种合计贡献率为 34.9%, 假设这些物种可全被消除, 则对应的 O_3 可减少 41.1%. 而 OFP 贡献前十的物种合计贡献了 55.1% 的 OFP, 而对应的排放量占比仅为 25.4%. 若这些物种被完全控制, 仅需削减 25.4% 的 VOCs 排放量便可以使 O_3 减少 55.1%. 因此, 基于 OFP 的 VOCs 控制措施更高效. 同时考虑 NO_x 对 O_3 的影响及 O_3 和 $PM_{2.5}$ 之间的复杂关系^[29], 应因地制宜地合理减排机动车排放的 VOCs 和 NO_x .

乙烯、丙烯、甲醛、甲苯和间/对-二甲苯是对排放量和 OFP 贡献均排名前十的物种, 但它们对排放量和 OFP 的贡献和排名均存在差异, 高 OFP 贡献物

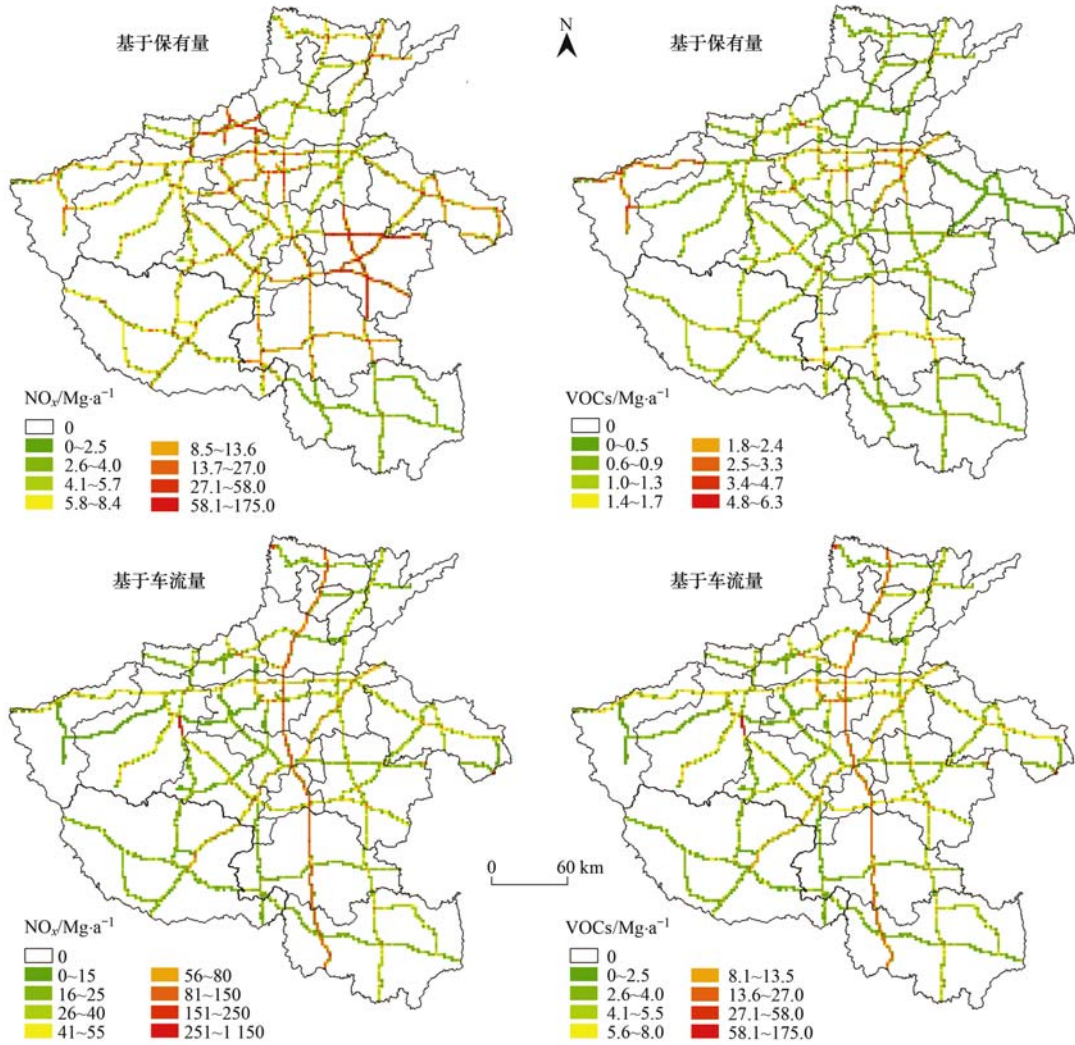


图7 河南省高速公路机动车典型污染物空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of typical motor vehicle pollutants on highways in Henan Province

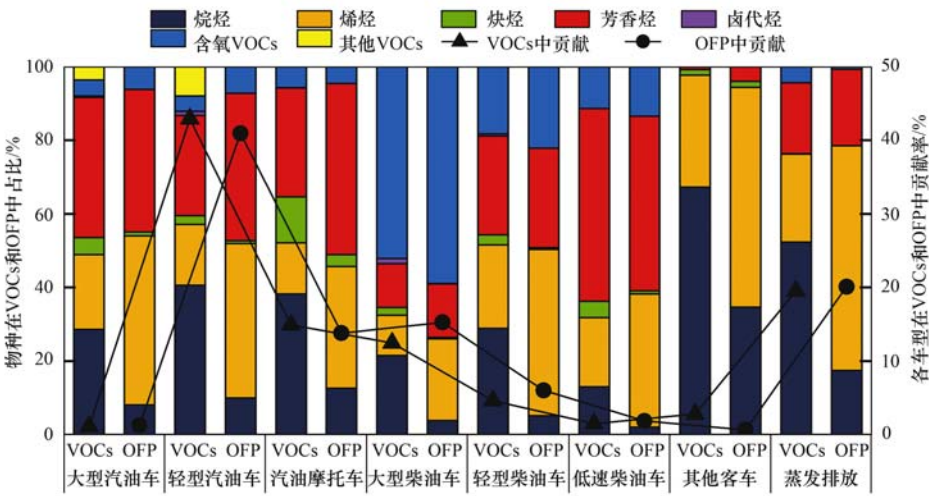
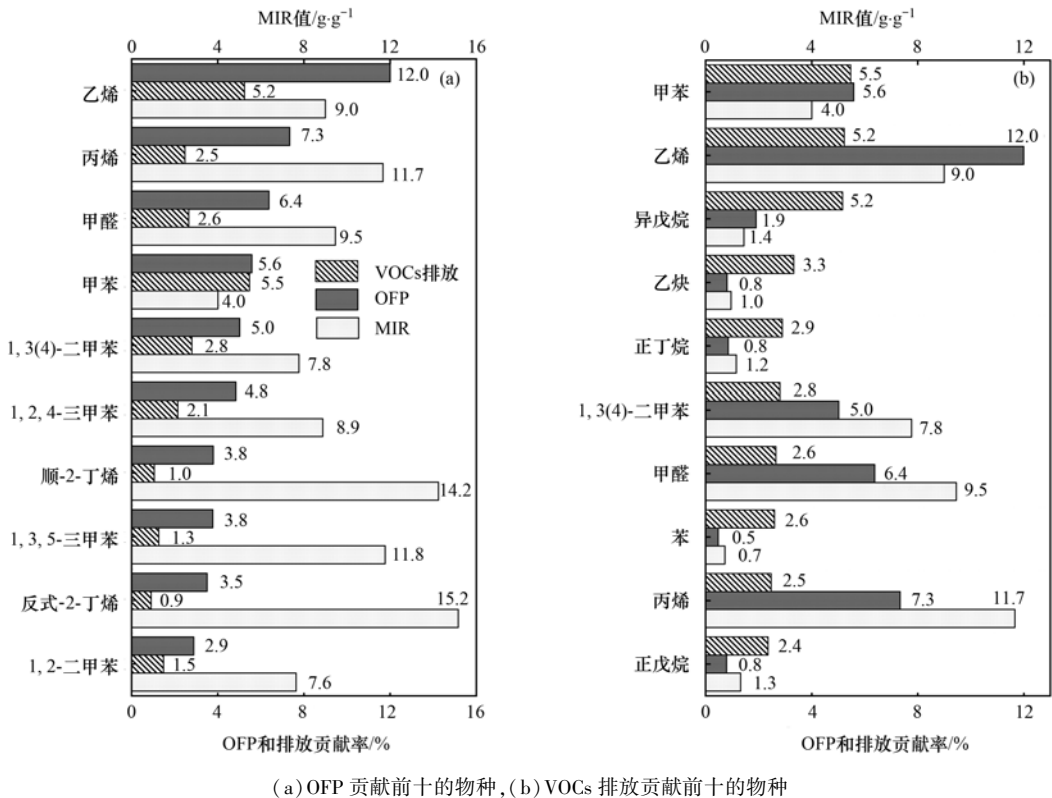


图 8 不同车型中各物种对 VOCs 和 OFP 的贡献特征

Fig. 8 Contribution characteristics of species to VOCs and OFP for different vehicles



(a) OFP 贡献前十的物种, (b) VOCs 排放贡献前十的物种

图 9 OFP 和 VOCs 排放量贡献前十物种对比

Fig. 9 Comparison of the top ten species contributed by OFPs and VOCs emissions

种对排放贡献不一定具有相同的重要性. 以丙烯为例, 其对排放量的贡献率为 2.5%, 排名第 9, 但因其反应活性大, MIR 值高达 11.66, 故其对 OFP 贡献较大(7.3%), 并在基于 OFP 的贡献排名中提升至第 2.

2.5 2016 ~ 2019 年河南省机动车保有量和排放量变化

2.5.1 保有量变化

2016 ~ 2019 年, 河南省机动车保有量由 1 529 万辆增长到 1 805 万辆, 平均增长率为 5.7%, 低于全国

平均增长率(11.0%). 其中, 小型客车、普通摩托车、轻型货车和重型货车是历年机动车保有量贡献较大的 4 种车型, 2016 ~ 2019 年平均占比分别为 69.7%、18.2%、5.9% 和 3.0%. 另外, 小型客车、轻型货车和重型货车的年均增长率均高于全省总的机动车年均增长率, 分别为 15.0%、12.3% 和 10.8%, 主要驱动力来自 2016 年以来河南省经济增长带来的消费能力提升和货运新增需求增长; 而微型货车、摩托车、低速货车、中型货车、微型客车和中型客车的年均增长率则在 -8.7% ~ -37.6% 之间, 保有

量呈下降趋势且下降速度较快。

不同排放标准的机动车保有量占比和变化趋势如图 10(b) 所示, 2016 ~ 2019 年国 3、国 4 和国 5 排放标准的机动车是主要贡献车型; 国 0 ~ 国 3 排放标准机动车保有量自 2016 年逐渐降低, 年均下降率分别为 15.7%、21.3%、20.4% 和 7.0%; 国 4 排放标准机动车保有量年均增长率 4.6%; 国 5 排放标准机动车保有量增长幅度最大, 年均增长率高达 48.9%; 2019 年开始出现国六排放标准机动车, 占比为 5.1%。与 2016 ~ 2019 年河南省机动车排放标准不断提升和执行淘汰黄标车及老旧车政策, 即 2016 年 11 月 1 日和 2019 年 7 月 1 日起在全省范围内分别提前实施国 5 及国 6 排放标准^[30,31] 和 2017 年全部淘汰黄标车^[32,33] 有关。整体来看, 保有量的变化趋势和国内已有研究具有较好的一致性^[34,35]。

2.5.2 污染物排放量变化

由表 3 可知, 与 2016 年相比, 2019 年 VOCs 增加 2.8%, 其他污染物排放量均呈不同程度的下降趋势。SO₂ 降幅最大, 降幅达 76.3%, 主要由于 2016 年 11 月 1 日和 2018 年 7 月 1 日起河南省分别将汽柴油由国 4 提升到国 5 并从国 5 提升为国 6 标准, 汽柴油硫含量下降 80%^[36, 37]; 其次为 PM_{2.5}、PM₁₀ 及 NH₃, 降幅分别为 51.7%、50.3% 和 43.1%; NO_x 和 CO 降幅较小, 分别为 5.9% 和 16.7%。由于河南省提升燃油品质、加严机动车排放标准以及淘汰黄标车和老旧车等政策的落实, 虽然 2016 ~ 2019 年机动车保有量以 5.7% 的平均增长率增长, 机动车污染物排放量整体上并没有与保有量成正比, 反而以不同程度下降。各污染物的排放量和排放趋势与中国统计年报中 2016 ~ 2019 年结果基本一致。

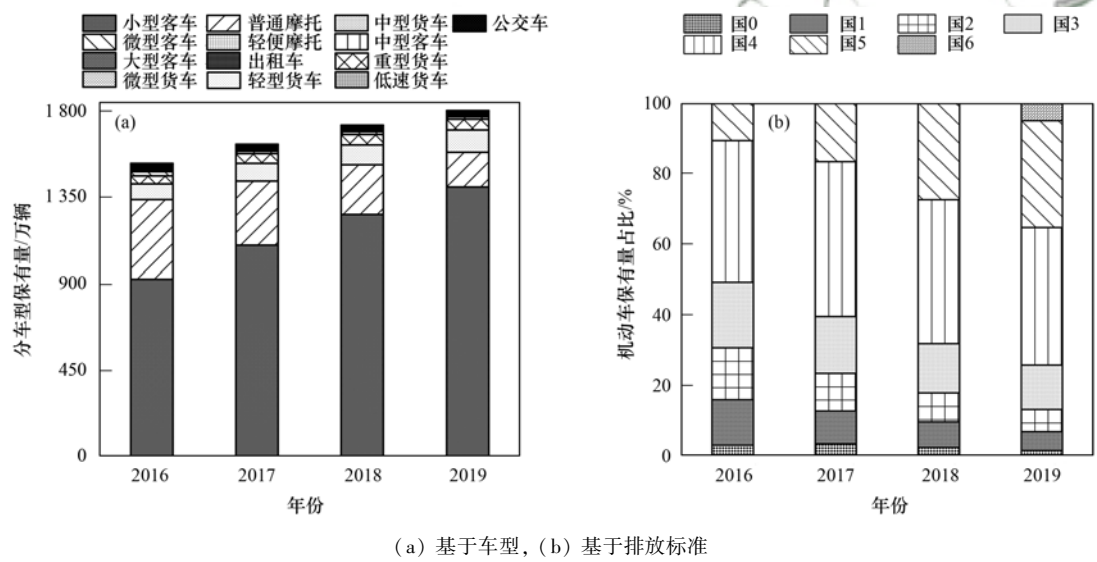


图 10 2016 ~ 2019 年河南省机动车保有量变化趋势

Fig. 10 Trends in vehicle ownership in Henan Province from 2016 to 2019

表 3 河南省 2016 ~ 2019 年机动车污染物排放量/kt

Table 3 Vehicle pollutant emissions in Henan province from 2016 to 2019/kt

年份	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
2016	8.9	486.3	1 110.9	20.0	18.4	169.2	10.2
2017	1.9	434.0	1 042.2	12.2	11.1	223.8	7.2
2018	2.0	439.8	976.9	10.4	9.6	203.1	7.0
2019	2.1	457.6	925.4	9.9	8.9	173.9	5.8

以 2016 年为基准年, 仅考虑保有量变化, 获得 2017 ~ 2019 年机动车各污染物排放量作为基准情景, 对比实际排放量与基准情景下排放量得到机动车污染控制措施对污染排放的控制效果, 如图 11 所示。整体上, 各污染物 2019 年实际排放量相对基准情景下的降幅均比 2017 年大。即随着时间的推移, 燃油品质的提升、排放标准加严和黄标车及老旧车淘汰等控制政策的减排效果更加明

显。2019 年 SO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 的实际排放量相对基准情景的减排比例分别达 82.4%、27.3%、31.9%、61.2%、15.6% 和 55.1%。若未执行相关的控制措施, 2019 年 SO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 的排放量将分别达到 12.0、629.6、1359.4、23.0、206.0 和 12.9 kt, 分别比实际排放量高 9.9、172.0、434.0、14.0、32.1 和 7.1 kt。

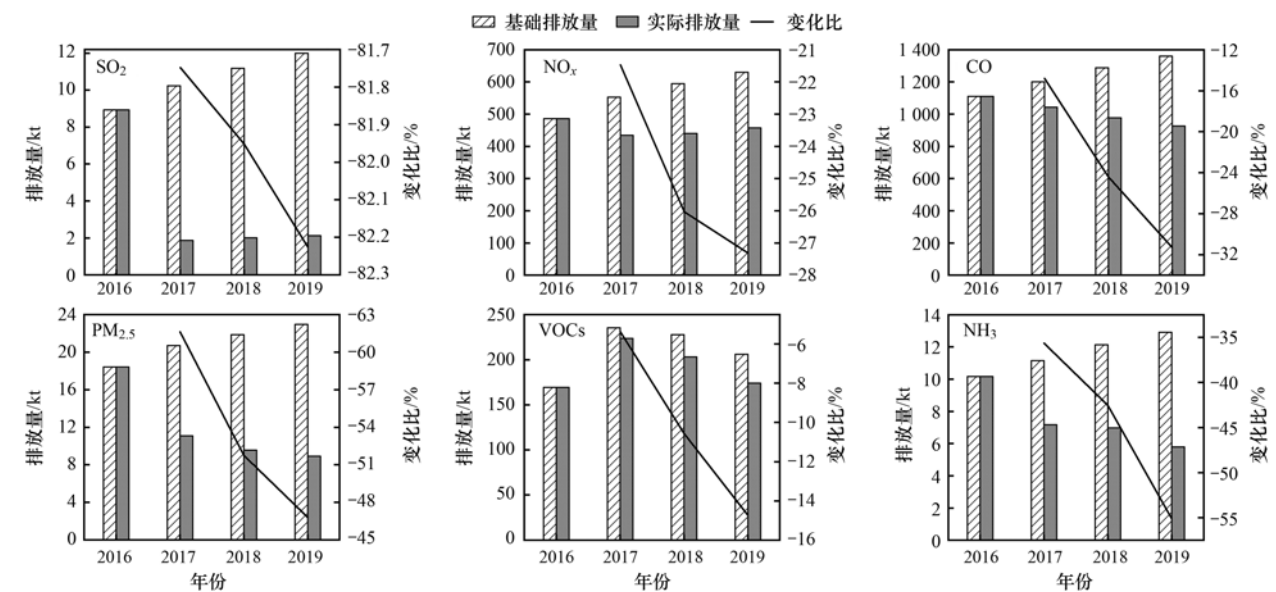


图 11 基准情景和实际情况污染物排放量对比

Fig. 11 Comparison of pollutant emissions between the baseline scenario and the actual situation

2.5.3 VOCs 的组分排放量和 OFP 变化

2016 ~ 2019 年河南省机动车排放的 VOCs 中不同类别的组分排放量及对应可能生成的 OFP 如图 12 所示. 2016 ~ 2019 年 OFP 可能排放量依次为 663.6、872.3、796.6 和 680.3 kt, 排放量较大的组分中烷烃、烯烃、芳香烃和含氧 VOCs 在 2016 ~ 2019 年的平均占比分别为 39.5%、24.8%、17.3% 和 10.0%; 对 OFP 贡献较大的烯烃、芳香烃和含氧 VOCs, 2016 ~ 2019 年对 OFP 的平均贡献率分别为 41.0%、34.0%、13.6% 和 10.3%. 从趋势来看, 烷烃、烯烃和芳香烃的排放量占比和 OFP 贡献率基本不变, 含氧 VOCs 则呈下降趋势.

2.6 不确定性分析

本研究排放清单和 OFP 估算过程中, 保有量数据来自官方统计年鉴, 不确定性较小^[38]; 排放因子参考文献[16]对基础排放因子进行了本地化修正, 大部分车型行驶里程来源于本地区实地调研, 多数车型的 VOCs 源成分谱是国内实测数据, 均可降低结果的不确定性. 但受数据可得性限制, 不可避免地仍存在一定的不确定性, 比如: 燃料类型和排放标准的详细数据需通过推估得到; 因缺乏集装箱车、大货车和特大货车的排放因子, 将它们统一采用重型货车的排放因子; 仍有部分车型的行驶里程采用文献[16]推荐值, 因经济水平、交通条件等的差异存在不确定性^[28].

3 结论

(1) 2016 年河南省小型客车和普通摩托车等汽油车是 CO、VOCs 和 NH₃ 主要贡献源; SO₂、NO_x 和 PM 主要来自重型和轻型柴油货车; 国 1、国 3 和国 4 排放标准车对污染物贡献突出; 污染物排放量较大的城市有郑州、周口和南阳.

(2) 2016 年高速公路 8 ~ 10 月的变化系数高于其他月份, 11 月最低; 城市道路周变化和日变化分别有明显的周末效应和双峰特征. 污染物排放高值区集中在城市中心及市区附近向外辐射的道路上; 高值区主要位于河南省中北部地区.

(3) 2016 年机动车排放的 VOCs 的 OFP 为 663.6 kt, 主要来自轻型汽油车. 芳香烃、烯烃和含氧 VOCs 是 OFP 的重要贡献物种; 乙烯、丙烯、甲醛、甲苯和 1,3(4)-二甲苯是排放量和 OFP 贡献均

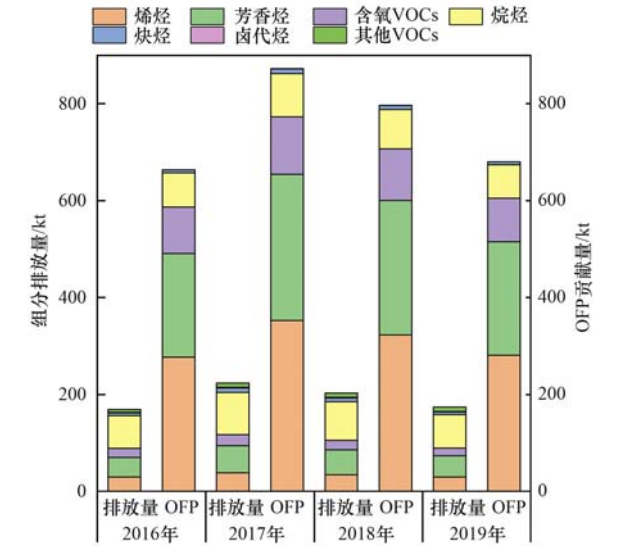


图 12 2016 ~ 2019 年 VOCs 组分排放量和 OFP 变化趋势

Fig. 12 Trends in VOCs component emissions and OFP from 2016 to 2019

较大的物种. 2017 ~ 2019 年 OFP 分别为 872.3、796.6、680.3 kt.

(4)2016 ~ 2019 年机动车保有量年均增长率为 5.7%; 与 2016 年相比, 2019 年 VOCs 排放增加 2.8%, 其他污染物排放量均有不同程度的下降; 2019 年各污染物的实际排放量相对基准情景的减排比例在 15.6% ~ 82.4% 之间.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/201706/P020170605550637870889.pdf>, 2020-11-16.
- [3] Li L, An J Y, Huang L, *et al.* Ozone source apportionment over the Yangtze River Delta region, China; investigation of regional transport, sectoral contributions and seasonal differences[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **202**: 269-280.
- [4] Zheng X, Wu Y, Zhang S J, *et al.* Characterizing particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from diesel vehicles using a portable emissions measurement system[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-09822-w.
- [5] 宋翔宇, 谢绍东. 中国机动车排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- Song X Y, Xie S D. Development of vehicular emission inventory in China[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- [6] Jia T, Li Q, Shi W Z. Estimation and analysis of emissions from on-road vehicles in Mainland China for the period 2011-2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 500-512.
- [7] Sun S D, Jiang W, Gao W D. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 190-199.
- [8] Lv W D, Hu Y L, Li E P, *et al.* Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **207**: 814-825.
- [9] 刘永红, 姚达文, 黄建彰. 珠三角地区机动车排放清单建立与来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(S1): 458-463.
- Liu Y H, Yao D W, Huang J Z. Vehicle exhaust emissions inventory and characteristics in the Pearl River Delta region[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **38**(S1): 458-463.
- [10] Song X W, Hao Y P, Zhang C, *et al.* Vehicular emission trends in the Pan-Yangtze River Delta in China between 1999 and 2013[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **137**: 1045-1054.
- [11] Zhang S J, Wu Y, Wu X M, *et al.* Historic and future trends of vehicle emissions in Beijing, 1998-2020: a policy assessment for the most stringent vehicle emission control program in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 216-229.
- [12] 张海伟, 张云伟, 顾兆林. 西安市机动车尾气排放特征分析[J]. *环境工程*, 2015, **33**(S1): 393-397.
- Zhang H W, Zhang Y W, Gu Z L. Emission Characteristics of vehicle exhausts in Xi'an City[J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(S1): 393-397.
- [13] 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 等. 基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3581-3590.
- Pan Y J, Li Y, Chen J H, *et al.* Method for high-resolution emission inventory for road vehicles in Chengdu based on traffic flow monitoring data[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3581-3590.
- [14] 王人洁, 王堃, 张帆, 等. 中国国道和省道机动车尾气排放特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3553-3560.
- Wang R J, Wang K, Zhang F, *et al.* Emission characteristics of vehicles from national roads and provincial roads in China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3553-3560.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 2012-2016 年中国机动车环境管理年报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/>, 2020-11-16.
- [16] 贺克斌, 王书肖, 张强. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1116/8107025055001133.shtm>, 2020-11-16.
- [17] 市统计局. 郑州市/安阳市/鹤壁市/新乡市/濮阳市/焦作市/洛阳市/开封市/三门峡市/许昌市/平顶山市/周口市/商丘市/漯河市/南阳市/驻马店市/信阳市/济源市统计年鉴(2001 ~ 2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002-2020.
- [18] 河南省统计局. 河南统计年鉴(2001 ~ 2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2019.
- [19] Huo H, Wang M, Johnson L, *et al.* Projection of chinese motor vehicle growth, oil demand, and CO₂ emissions through 2050[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, **2038**(1): 69-77.
- [20] Huo H, Wang M. Modeling future vehicle sales and stock in China[J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 17-29.
- [21] 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(4): 815-821.
- Zheng J Y, Che W W, Wang Z L. Traffic flow and road network-based spatial allocation of regional mobile source emission inventories[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(4): 815-821.
- [22] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [23] 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.
- [24] EPA. SPECIATE[EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>, 2020-11-16.
- [25] Carter W P L. SAPRC atmospheric chemical mechanisms and VOC reactivity scales[EB/OL]. <https://intra.engr.ucr.edu/~carter/SAPRC/>, 2020-11-16.
- [26] Man H Y, Liu H, Xiao Q, *et al.* How ethanol and gasoline formula changes evaporative emissions of the vehicles[J]. *Applied Energy*, 2018, **222**: 584-594.
- [27] Deng F Y, Lv Z F, Qi L J, *et al.* A big data approach to improving the vehicle emission inventory in China[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 2801.
- [28] 孙世达, 金嘉欣, 吕建华, 等. 基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2018-2029.
- Sun S D, Jin J X, Lv J H, *et al.* Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2018-2029.
- [29] Xiang S L, Liu J F, Tao W, *et al.* Control of both PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117777.

- atmosenv. 2020. 117259.
- [30] 河南省生态环境厅, 河南省工业和信息化厅, 河南省公安厅, 等. 河南省生态环境厅公告[2019]5 号河南省实施国家第六阶段机动车排放标准的公告[EB/OL]. <http://sthjt.henan.gov.cn/2019/04-29/1323608.html>, 2019-04-29.
- [31] 河南省人民政府. 11 月 1 日起河南省实施机动车排放国五标准[EB/OL]. <http://www.henan.gov.cn/jrhn/system/2016/10/23/010678342.shtml>, 2016-10-23.
- [32] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅关于印发河南省淘汰黄标车工作方案的通知[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2014/09-30/246466.html>, 2014-09-30.
- [33] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅关于印发 2016 年河南省淘汰黄标车和老旧车工作方案的通知[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2016/07-08/248029.html>, 2016-07-08.
- [34] 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 等. 2010~2017 年四川省机动车污染物排放趋势分析[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 643-652. Li Y, Shi J C, Chen J H, *et al.* Trends in vehicle emissions in Sichuan Province, 2010-2017 [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 643-652.
- [35] Sun S D, Zhao G, Wang T, *et al.* Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. Atmospheric Environment, 2019, 209: 182-191.
- [36] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅关于印发河南省推广使用国家第五阶段标准车用乙醇汽油车用柴油质量升级工作方案的通知[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2016/09-30/248302.html>, 2016-09-30.
- [37] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅, 关于印发河南省推广使用国家第六阶段标准车用乙醇汽油车用柴油工作方案的通知[EB/OL]. <http://m.henan.gov.cn/2018/07-06/662874.html>, 2018-07-06.
- [38] 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 等. 天津市 2017 年移动源高时空分辨率排放清单[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4470-4481. Liu G, Sun S D, Sun L N, *et al.* Mobile source emission inventory with high spatiotemporal resolution in Tianjin in 2017 [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4470-4481.



CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)