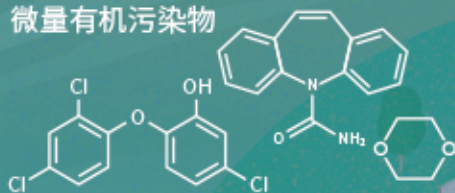


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算

王娜萍¹, 李海萍^{1*}, 张帆²

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 二次有机气溶胶(SOA)是大气污染的主要成分之一,估算汽车尾气所生成的 SOA 对交通大气污染治理具有重要意义。本文基于国家干线公路交通量调查数据,根据监测站点和代表路段长度建立了中原城市群干线路网线性参考系统,并以车流量为基础数据,采用排放系数法测算出中原城市群干线道路 VOCs 排放量,再根据气溶胶生成系数对 SOA 的生成潜势进行估算,并经核密度计算后转换为线性连续分布,进行交通 SOA 的空间定量分布研究。结果表明:①甲苯的 SOA 生成潜势最高,但 1,4-二乙基苯的 SOA 生成能力最强,芳香烃的 SOA 生成能力总体高于烷烃;②中小型汽油客车是最大的 SOA 生成源,占 SOA 生成量的 1/3 左右,但 SOA 生成能力最强的是小型汽油货车;③汽油车的 SOA 生成能力高于柴油车,客车的 SOA 生成能力略微高于货车;④中原城市群的 SOA 排放强度具有明显的以郑州为中心的高强度聚集现象,汽油车的分布与总体相似,但柴油车的强度和聚集性明显下降,以郑州为中心,南北干线上的排放强度高于东西方向。

关键词: 中原城市群; 国家干线公路; VOCs 排放量; SOA 生成潜势; 空间分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2721-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011255

Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration

WANG Na-ping¹, LI Hai-ping^{1*}, ZHANG Fan²

(1. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. China Communications Construction Company, Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Secondary organic aerosols (SOAs) are among the main components of air pollution. Accurately estimating SOAs formed from automobile exhaust is crucial for controlling and mitigating traffic air pollution. Sufficient monitoring data is difficult for regional analysis owing to limited monitoring data over a small area or few observation stations. Indirect methods may be used to estimate SOA using data on the number and types of vehicles. A linear reference system of Central Plains urban agglomeration was built from the national trunk line network system and the traffic survey data of transportation. The numbers of different types of vehicles were assigned to road segments as the traffic flow according to the represented length between monitoring stations. Then, VOCs emissions were calculated through the emission coefficient method based on the previous traffic flow data. Moreover, further estimations of the SOA formation potential were made by the fractional aerosol coefficient approach. Through kernel density analysis, discrete point data of the observer station were transformed into line segments and expanded to a continuous spatial distribution for quantitative and spatial variation analysis of the SOA in the study area. The results show that ① toluene has the highest SOA generation potential, 1,4-diethylbenzene has the strongest ability to form SOA, and aromatic hydrocarbons exhibit higher SOA formation capacity than alkanes; ② small and medium gasoline passenger cars generate the most SOA and account for about 1/3 of the total SOA, but small gasoline trucks exhibit the strongest capacity for SOA formation; ③ regarding the capacity of SOA formation for vehicles using different fuel types, gasoline vehicles have a higher capacity than diesel vehicles, and passenger cars have a slightly higher capacity than trucks; ④ in Central Plains urban agglomeration, the spatial distribution of SOA intensity data shows a trend of convergence to the center of Zhengzhou city. Gasoline vehicles exhibit a similar pattern overall, but diesel vehicles exhibit a weaker trend that decreases distinctly. SOA intensity along the north-south direction is much higher than that of the east-west direction around the center of Zhengzhou crossing.

Key words: Central Plains urban agglomeration; national trunk highway; VOCs emissions; SOA formation potential; spatial distribution

大气污染是重要的环境问题之一,其中交通污染的贡献不可小觑。机动车尾气排放所造成的大气污染一般占城市大气污染的 60% 以上,最高可达 90%^[1]。

大气气溶胶是大气污染物的重要组成,而有机气溶胶(organic aerosol, OA)又是大气气溶胶的主要成分,更是重要的细颗粒物,约占其总量的 20%~90%^[2],按照来源,有机气溶胶分为初次有机气溶胶(primary organic aerosol, POA)和二次有机气溶胶(second organic aerosol, SOA)。其中的 SOA 或是天

然源直接排放,或由人类生产活动产生的挥发性或半挥发性有机化合前体物经一系列的氧化过程和气粒分配形成的悬浮于大气中的固态或液态微粒^[3],对有机气溶胶的贡献高达 20%~80%^[4]。

SOA 可在空气中停留较长时间,并作为有害物

收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2021-01-04

基金项目: 中国人民大学中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项

作者简介: 王娜萍(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为交通和环境 GIS, E-mail: wangnaping1213@163.com

* 通信作者, E-mail: lhp@ruc.edu.cn

质的载体,沉积在人体的不同部位从而危害人类健康^[5],此外,SOA 还通过影响地球的辐射平衡而影响气候变化^[6],并降低区域大气能见度^[7]. SOA 因全球总产额较大而危害严重,同时又因其生成过程极为复杂而成为近些年的研究重点^[8]. 挥发性苯系物是人为源排放 SOA 的重要前体物^[9],而城市内苯系物的主要来源则是机动车排放^[10].

目前,有关机动车的大气污染研究主要针对一次污染物^[11~13]和臭氧^[14~17],对 SOA 的研究相对较少,已有研究多基于仪器实测数据,而由于测量仪器及监测时间的限制,实测数据点位通常较少,以单一城市内部总体 SOA 为对象进行短期监测的研究居多^[18~20],对具体来源及更大尺度区域的 SOA 研究明显不足.

因此,本文从公路交通污染的角度,基于国家干线机动车交通调查数据,通过其 VOCs 排放量来估算中原城市群的交通 SOA 生成潜势,避免了实测数据点位不足的局限性,并将交通 SOA 污染的研究尺度扩展至城市群的区域范围,通过核密度分析方法将 SOA 排放强度扩充至带状区域,便于提供相应的理论参考和科学依据,对中原城市群重点污染区域、车型及燃油类型等采取更具针对性的治理措施.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

文献[21]中所界定的中原城市群包括了河南全省 17 个地级市和一个直辖县级市,山西省长治、晋城、运城市,河北省邢台、邯郸市,山东省聊城、菏泽市和安徽省淮北、蚌埠、宿州、阜阳、亳州市等 5 省共 30 个城市,总面积 28.7 万 km²^[21]. 中原城市群介于东西部经济梯度的中间,又是南北气候的过渡区域,还是全国“三纵两横”城市化战略格局中欧亚陆桥与京广通道的交汇点,交通位置十分重要,现已成为我国经济的第四增长极,并逐渐形成了以郑州为核心的“一核四轴四区”的城市群空间网络格局^[22],区域概况如图 1.

1.2 数据来源

交通量数据:本文采用文献[23]收录的国家干线公路间隙式和连续式观测站全年小时尺度断面监测数据(截止 2015 年底),其中包含了各高速与国道线路名称、观测站名称及桩号、代表长度和各车型车流量等内容. 中原城市群涉及其中 13 条国家高速和 16 条普通国道,里程长度 7 689.86 km,共有 383 个监测站点.

路网线性参考系统:行政区划矢量图来自于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平



图 1 中原城市群区域范围与地形特征

Fig. 1 Area and topography of Central Plains urban agglomeration

台,采用高斯克吕格投影 CGCS2000_GK_Zone_20,利用 ArcBruTile 插件和 ArcGIS 软件基于高德地图创建矢量路网,通过线性参考系统和动态分段技术^[24]进行存储管理,生成中原城市群的路网线性参考系统,如图 2 所示.

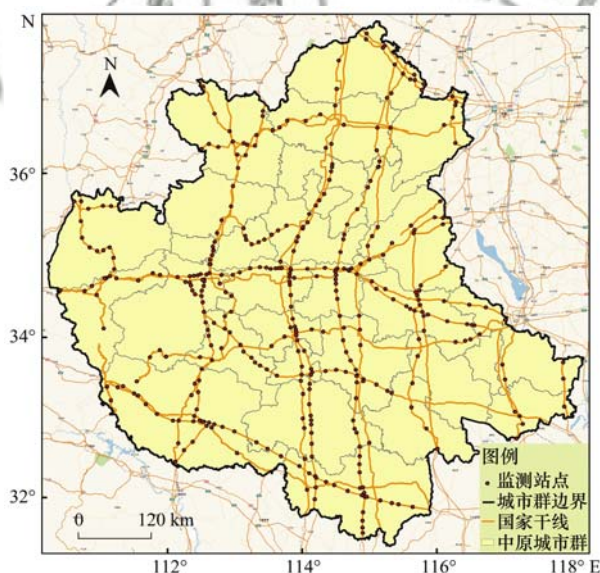


图 2 中原城市群路网线性参考系统

Fig. 2 Linear reference system of road network in Central Plains urban agglomeration

1.3 研究方法

将本研究所涉及的 383 个监测站日均数据赋予代表路段,根据各代表路段车型及车流量确定不同地区的综合排放系数,通过计算国家干线 VOCs 排放量,并基于气溶胶生成系数法估算 SOA 生成潜势,采用 GIS 核密度分析法,将中原城市群的 SOA 排放强度转换为空间连续量,据此研究其空间特征

及强度差异.

1.3.1 VOCs 综合排放系数与排放量

本文所研究的机动车包括客货两类,参考文献[25]将排放源分为三级,全国第三级车型排放标准占比参考文献[26]中 2015 年各类机动车保有量情况.不同地区的不同车型 VOCs 综合排放系数也不同,具体计算公式如下:

$$EF_{i,j} = BEF_i \times \varphi_j \times \gamma_j \times \lambda_i \tag{1}$$

式中, $EF_{i,j}$ 表示*i*类车在*j*地区的综合排放系数; BEF_i 表示*i*类车的综合基准排放系数; φ_j 表示*j*地区的环境修正因子; γ_j 表示*j*地区的平均速度修正因子; λ_i 表示*i*类车的劣化因子修正.

基于多项中国机动车尾气排放 VOCs 成分谱实测数据研究^[27~30]和美国环保署 SPECIATE5.0 数据库,同时参考了其他学者的研究成果^[31~33],选取了最为全面、普适性较高的 138 种 VOCs 源成分谱,并根据每日车流量数据,计算出 VOCs 的年排放量^[14,34],公式如下:

$$E = \sum_i \sum_j \sum_k P_{i,j,k} \times VKT_{i,j,k} \times EF_{i,j,k} \times 365 \times 10^{-6} \tag{2}$$

式中, E 为 VOCs 年排放量(t); P 为日均车流量(辆); i 、 j 和 k 分别为路段编号、车型和燃油类型; VKT 为日均行驶里程(km); EF 为综合排放系数($g \cdot km^{-1}$).

1.3.2 SOA 生成潜势估算

在已有 VOCs 排放清单的情况下,最为便捷的 SOA 生成潜势估算方法为气溶胶生成系数法(fractional aerosol coefficient, FAC)^[35,36],此方法不仅计算简单,还可反映出各前体物对总生成潜势的贡献率,是由 Grosjean^[35]于 1992 年提出,他假设 VOCs 只与·OH在白天发生反应生成 SOA,在此基础

上,结合大气动力学数据,通过大量的烟雾箱实验模拟,之后得到 SOA 生成系数 FAC 和 VOCs 物种中参与反应的比例 R ,虽然忽略了 VOCs 与 NO₃ 自由基与 O₃ 的反应,使得 FAC 值低于实际值,但仍旧是目前最受认可、使用最多的 FAC 值. SOA 生成潜势估算公式如下:

$$P = c_0 \times FAC \tag{3}$$

式中, P 为 SOA 生成潜势(t); c_0 为 VOCs 初始排放量(t); FAC 为 SOA 生成系数(%).

式(1)中所采用的是 VOCs 初始排放量,而本文所得到的 VOCs 年排放量是经过氧化后的 VOCs,因此还需要反推出 VOCs 的初始排放量^[37~39],两者关系如下:

$$c_t = c_0 \times (1 - R) \tag{4}$$

式中, c_t 为直接计算出的监测点 VOCs 排放量,即氧化后的排放量(t); c_0 为排放源的 VOCs 初始排放量(t); R 为物质参与反应的比例(%).

在众多 VOCs 中,并非所有前体物都对 SOA 生成有贡献,因此,基于现有研究观测结果,总结出 25 种 SOA 前体物^[35~39],并据此估算 SOA 的生成潜势.

1.3.3 SOA 生成能力

与臭氧生成能力类似,以单位质量 VOCs 生成的 SOA 代表各子源与前体物的生成能力^[40,41],即:

$$G = E_{i,j}/P_{i,j} \tag{5}$$

式中, G 为 SOA 生成能力($t \cdot t^{-1}$), $E_{i,j}$ 为子源*j*中第*i*类前体物的 SOA 生成潜势(t), $P_{i,j}$ 为子源*j*中第*i*类前体物的排放量(t).

2 结果与讨论

2.1 各城市 SOA 生成潜势空间差异

根据公式(1)的计算方法,得到 2015 年不同车型的 VOCs 综合排放系数,结果如表 1 所示.

表 1 VOCs 综合排放系数/ $g \cdot (km \cdot vehicles)^{-1}$

Table 1 VOCs comprehensive emission factor/ $g \cdot (km \cdot vehicles)^{-1}$

车型	客车			货车						
	中小型		大型	小型		中型		大型	特大型	集装箱
	汽油	柴油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	柴油	柴油	柴油
综合排放系数	0.077 2	0.025 4	0.177 9	0.284 8	0.323 8	0.570 3	0.208 1	0.209 6	0.209 6	0.209 6

由表 1 得到的综合排放系数,结合交通量数据,得到 VOCs 年排放量,进而由气溶胶生成系数得到中原城市群内 30 个城市的 SOA 生成潜势及其占比,结果见图 3.

图 3 显示,30 个城市中,郑州因其交通枢纽地位而具有较大的车流量,故年 SOA 生成潜势最高,为 7.82 t,对 SOA 生成总量的贡献率高达 9.14%,其次是南阳和驻马店,两市的生成量接近,分别为 5.36 t 和

5.34 t,占总量的 6.27% 和 6.24%,之后是邢台、长治、周口和洛阳,这 7 个城市的 SOA 生成潜势均在 4 t 以上,对总的 SOA 生成潜势的贡献率达 43.3%.其他 23 个城市的贡献率则低于 5%.亳州、鹤壁、焦作、济源和淮北这 5 个城市的贡献率更是不足 1%,淮北市的 SOA 生成量最少,仅为 0.03 t,占比 0.04%.

分析所选的 25 种前体物,以探求不同前体物的 SOA 生成潜势及差异性,结果见图 4.

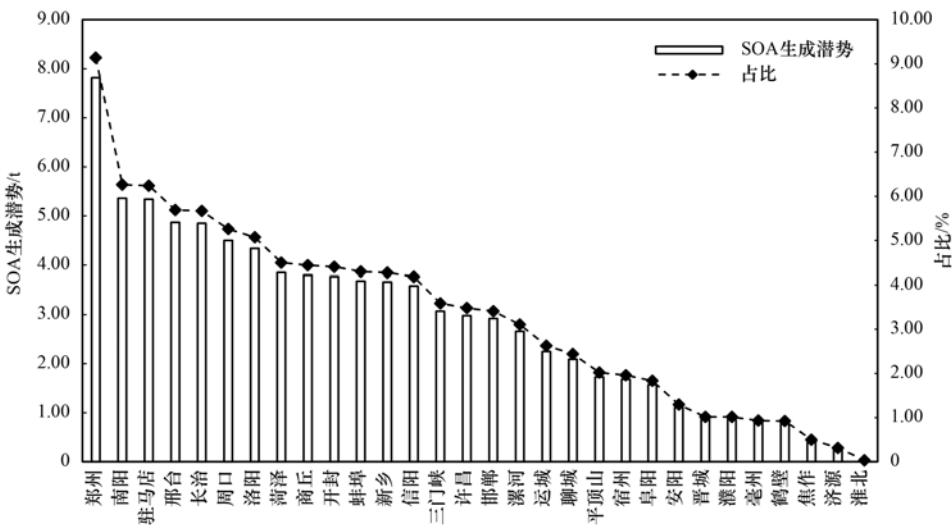


图3 各城市 SOA 年生成潜势及其占比

Fig. 3 Annual SOA formation potential and its proportion in each city

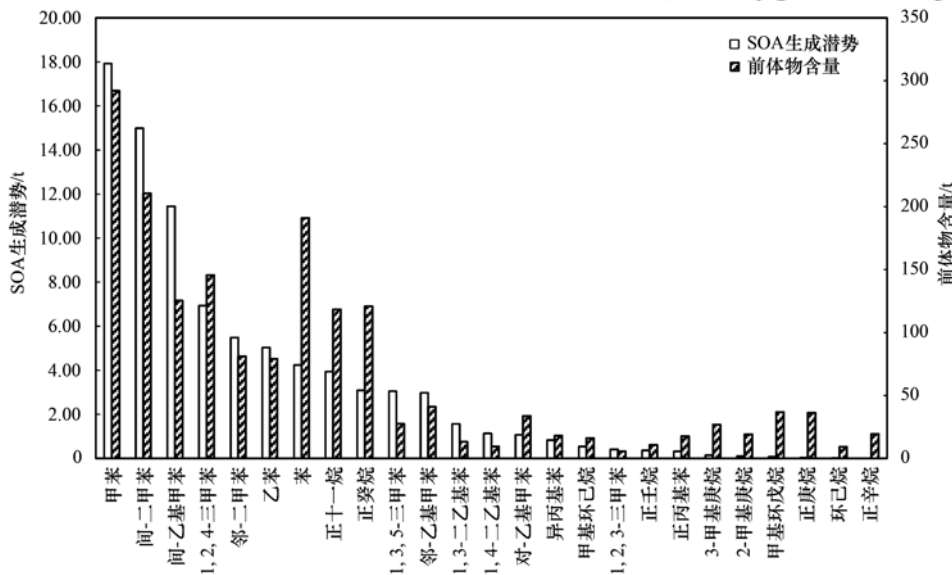


图4 不同前体物年排放量及其 SOA 生成潜势

Fig. 4 Annual emission and SOA formation potential of different precursors

结果显示, 25 种 VOCs 前体物中, 甲苯不仅含量最高, 其 SOA 生成潜势也最高, 达 17.92 t, 占总生成量 20.91%, 紧随其后的是间-二甲苯和间-乙基甲苯, 生成潜势分别为 14.99 t 和 11.44 t, 贡献率均在 10% 以上, 前三者的总贡献率达 51.74%。其它前体物的生成潜势均在 10 t 以下, 且总贡献率也均不足 10%。SOA 生成潜势最大的 7 种前体物均为芳香烃物质, 最小的 8 种则均为烷烃类, 芳香烃的 SOA 总生成潜势为 77.39 t, 而烷烃类仅 8.32 t, 是芳香烃类的 1/9 左右。总贡献率低于 1% 的 11 种前体物总和仅 3.33%, 正辛烷最低, 仅 0.01 t, 但其含量并非最低, 此外, 正十一烷、正癸烷等烷烃的含量也高于生成潜势较高的一些芳香烃。总体来看, 前体物含量对 SOA 生成潜势影响较大, 但并非绝对的正相关关

系, 说明前体物的 SOA 生成能力也十分重要。

除前体物间的差异外, 车型及其燃油性质也会影响 SOA 的生成潜势, 因此有必要对不同车型和燃油性质间的 SOA 生成潜势进行深入分析。此外, 车型相同时, 车流量则成为主要影响因素, 故进一步对车型及年车流量间的差异进行分析, 由于数据数量级相差较大, 为突出不同车型间的差异对比, 在数据数量级变化较大处进行了分割, 如图 5。

图 5 显示, 汽油车的 SOA 生成潜势远高于柴油车, 总生成潜势达 64.31 t, 而柴油车仅为 21.25 t, 这与汽油车的车流量远高于柴油车密切相关。汽油车中, 中小型客车和中型货车的生成潜势接近, 分别为 27.19 t 和 21.01 t, 小型货车稍弱, 为 16.11 t; 柴油车最高的是特大型货车, 也是唯一的生成潜势在 10

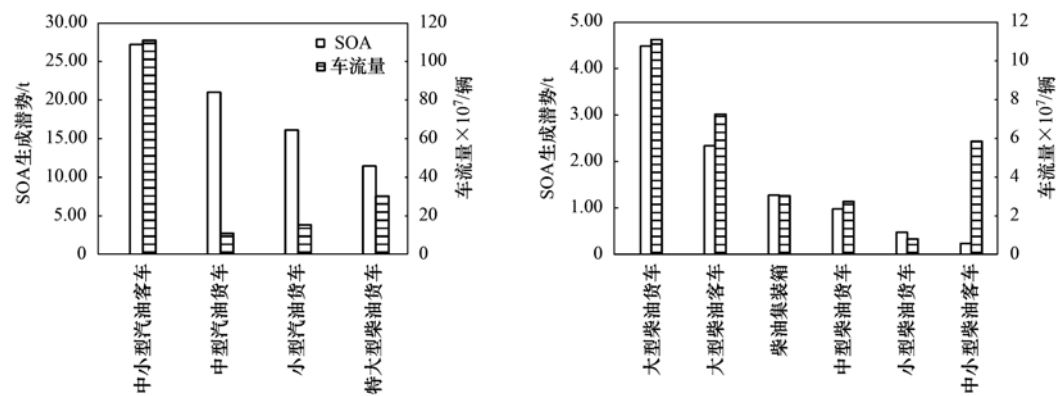


图5 不同燃油的各车型 SOA 生成潜势及车流量对比

Fig. 5 Comparison of SOA formation potential and traffic volume of vehicles with different fuels

t 以上(11.45 t)的车型. 中小型汽油客车是最大的 SOA 贡献者,客车的总 SOA 生成潜势为 29.77 t, 占总量的 34.79%,超过了 1/3; 货车的总生成潜势为 55.79 t,其中中小型汽油货车的贡献尤其突出,占货车总量的 2/3.

尽管车流量在很大程度上影响了 SOA 生成潜势的多少,但二者并非完全正相关,因此需要从当量车辆方面做进一步的分析,结果见图 6.

对比图 5 与图 6 发现,当量车辆的 SOA 生成潜势与各车型的总生成潜势大不相同,货车的当量生成潜势明显高于客车,汽油车的当量生成潜势则高于柴油车. 而生成潜势最高的中小型汽油客车的当量生成潜势反而位列倒数第二,中型汽油货车的当量 SOA 生成潜势最高,高于小型汽油货车和特大型货车,这也恰好解释了图 5 的中型汽油货车车流量 < 小型汽油货车 < 特大型货车,但总 SOA 生成潜势却相反的原因.

2.2 SOA 生成能力对比

前述分析表明,不仅前体物含量影响 SOA 生成

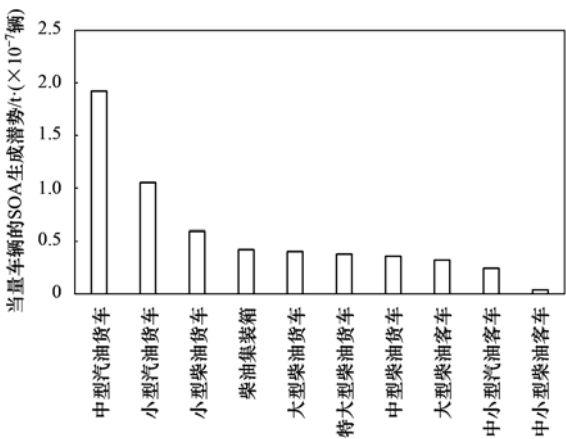


图6 当量车辆的 SOA 生成潜势对比

Fig. 6 Comparison of SOA formation potential of equivalent vehicles

潜势,不同的前体物类型及车型的 SOA 生成能力也很重要,进一步对不同前体物的 SOA 生成能力进行分析,结果见图 7.

所有前体物中,1,4-二乙基苯的 SOA 生成能力最强,达 0.12 t·t⁻¹,SOA 生成潜势排名前三的甲苯、间-二甲苯和间-乙基甲苯的生成能力则分别为

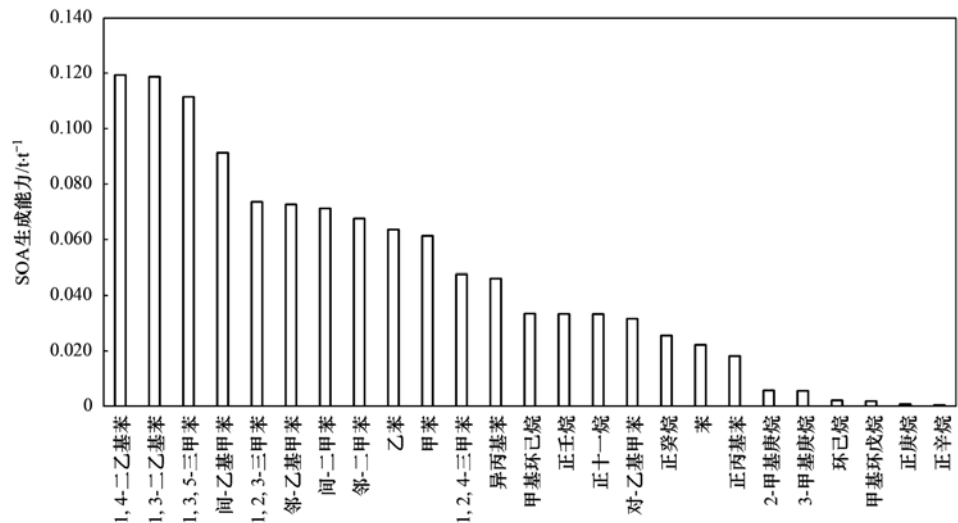


图7 不同前体物的 SOA 生成能力

Fig. 7 SOA formation capability of different precursors

0.061、0.071 和 $0.091 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$. 生成能力高于 $0.1 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 的仅 3 种,其余多数前体物的生成能力都低于 $0.1 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$. 从大类看,排在前 12 位的均为芳香烃类,说明此类前体物的 SOA 生成能力相对较高,平均达 $0.068 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,而烷烃类的平均生成能力在 $0.014 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 左右,其中最强的甲基环己烷也仅为 $0.033 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,正辛烷依旧最弱.

探究各车型的 SOA 生成能力对 SOA 生成潜能的影响大小,从而有针对性地控制不同类型的车辆以减少 SOA 污染也十分必要,分析结果如图 8.

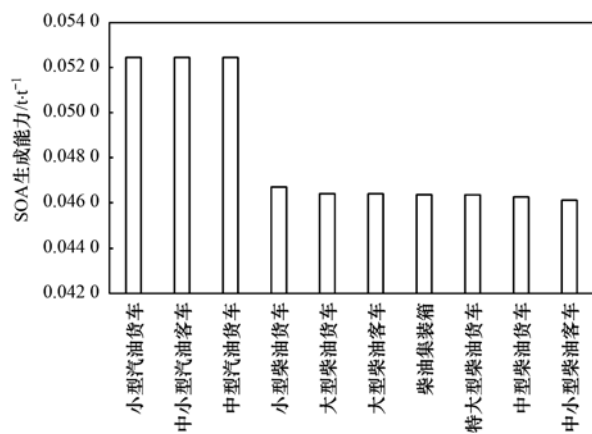


图 8 各车型的 SOA 生成能力

Fig. 8 SOA generation capability of different vehicles

由图 8 可见,各车型的 SOA 生成能力差异较小,最强的小型汽油货车与最弱的中小型柴油客车间仅相差 $0.0063 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$. 客货车的平均生成能力分别为 $0.0483 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $0.0481 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,差别极小;此外,汽油车的生成能力都在 $0.05 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 以上,高于柴油车.

进一步探究其原因,发现汽油车燃料的混合气在发动机燃烧室外进行,点燃前要经过进气和压缩,因而与空气混合得比较均匀,燃烧速度较快,燃烧后产物高温解离的倾向高,排放物种也会含有较多的 CO 和 HC 化合物,而柴油车燃料的混合气在发动机燃烧室内进行,柴油经高压喷入压缩,着火后边喷边燃烧,因而柴油与空气混合的不够均匀燃烧室内始终存在富余的空气,高温条件下容易产生氮氧化物,但不易形成 CO 和 HC 化合物^[42]. 可见,发动机结构和混合气形成方式的不同是汽油车中挥发性有机化合物含量高于柴油车的主要原因,故汽油车的 SOA 生成能力相比柴油车强.

除此而外,道路拥堵时不仅造成车辆频繁启动和刹车,还使车辆长时间处于怠速状态,从而导致汽油和柴油燃烧不充分,从而大大增加了 CO 的排放,HC 化合物的排放也有所增加,进一步导致汽油车的 SOA 生成能力高于柴油车.

2.3 SOA 空间连续分布特征

为了进一步探求中原城市群 SOA 的空间分布状况,以每公里日均 SOA 排放强度为权重,并兼顾细节刻画与总体特征,经实验后采用 8 km 的搜索半径进行核密度计算^[43],从而将交通站点数据及其代表路段的 SOA 污染强度扩充至空间带状区域,不仅考虑了污染扩散的距离衰减效应,也可以反映出较近站点间的叠加效应,使结果更符合交通污染的状态分布和空间叠加特征,见图 9.

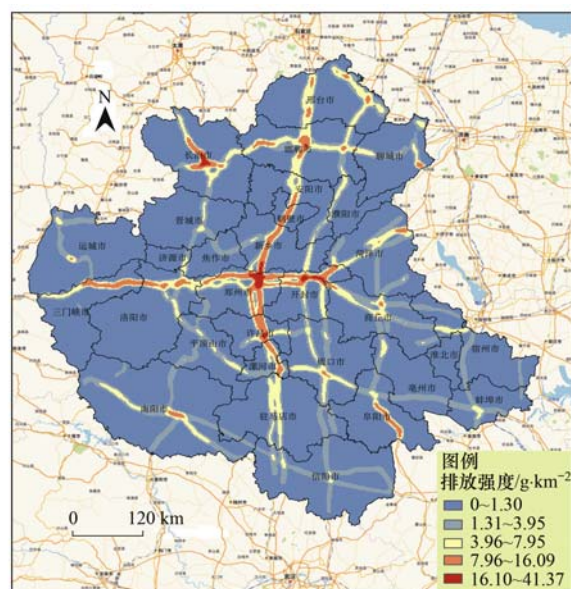


图 9 SOA 排放强度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of SOA emission density

从图 9 可见,整体上,SOA 排放强度呈明显的中心高强度聚集分布,并从中心到边缘逐步减弱.此外,有 3 个较明显的高强度区域,郑州因车流量最大,因而成为 SOA 排放强度和范围均最大的区域,并位于其十字交叉的河南境内干线上;开封市是第二个高强度排放区,与其车流量排名第三密切相关;长治市是第三个高强度排放区,但空间范围较小,究其原因,与常村监测站 G208 干线路段的车流量较大有很大关系,该监测站的车流量明显高于周围路段,接近以郑州为中心的代表路段车流量,从而形成了以常村监测站为中心的小范围高强度区.邯郸和许昌是两个次级高强度区,因在极小范围内有多条干线交汇,从而成为小的枢纽节点,邯郸是 G4、G107、G309 和 G22 这 4 条干线的交汇点,许昌则是 G4、G107 和 G311 的交汇点.

进一步对柴、汽油车辆的 SOA 排放强度进行核密度计算,以便与总体空间分布特征进行对比并分析其差异,结果见图 10.

图 10(a)显示,柴油车排放强度的空间分布与总体空间分布有较大差别,中心的聚集性明显下降,

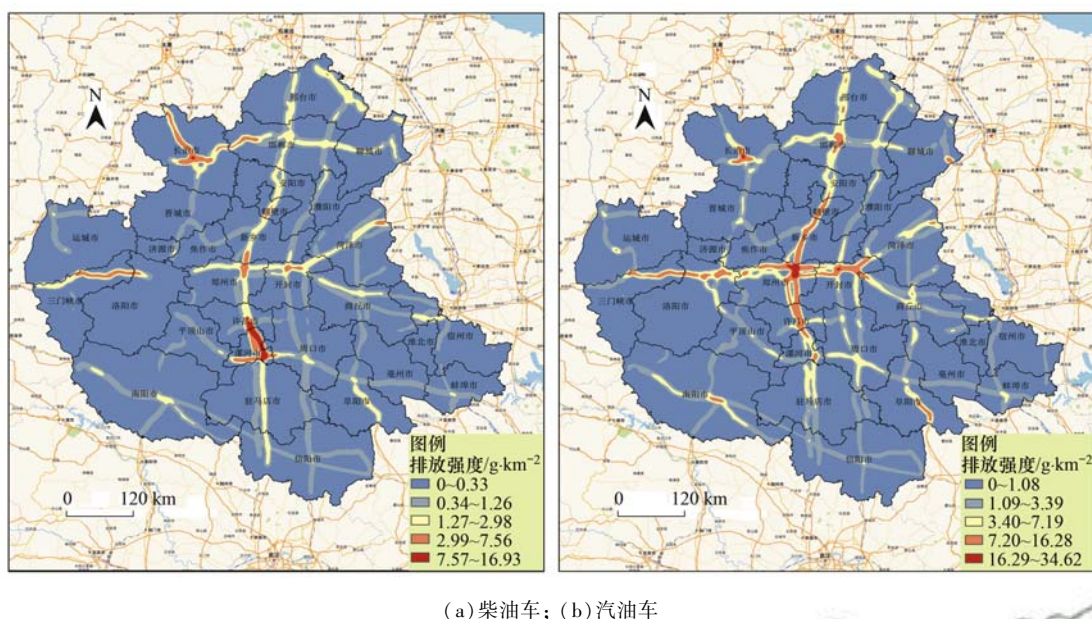


图 10 不同燃油车型的 SOA 排放强度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of SOA emission intensity from vehicles by fuel type

但以郑州为中心的南北干线上的高排放强度仍十分明显并聚集在 G4 干线经由许昌和漯河的几个代表路段内,此路段内,大型柴油货车的车流量较大,是该路段 SOA 排放强度高的重要原因。长治市仍旧是一处高强度区,以常村监测站为中心,小型柴油货车的日均车流量高达 8000 辆以上,是其他多数地区的几倍甚至部分地区的几十倍,而小型货车是柴油车中生成能力最强的。

图 10 (b) 中可见,汽油车的排放强度空间分布状况与总体空间分布较为相似,中心高强度聚集现象甚至比总体更明显,3 个高强度区中以郑州市的范围最大,长治市的高强度区也依旧由常村监测站路段的大车流量造成,开封市的高强度区则与 G30、G45、G220 和 G310 干线在此交汇所形成的大车流量相关,汽油车排放强度与总体空间分布特征的一致性也印证了汽油车是主导 SOA 排放强度的重要车型。

2.4 讨论

因指南中未区分特大型货车和集装箱,故无法得到两种车型的具体参数,而是将两者按照大型货车规格进行计算,从而造成结果的部分偏差。除柴油和汽油之外的其他燃料类型,如清洁能源车型等,由于占比较小,数据中并未统计,因而在进行计算时也未纳入考虑。文中采用的 VOCs 源成分谱质量分数是由国内其他地区实测数据结合美国环保署数据库得到的,与研究区实际情况存在一定差异。部分 SOA 前体物在空气中的浓度过低,尚未达到可检出的水平,因而也未曾被现有研究所记录。此外,也许存在着被检测到的 VOCs 没有被认定为是 SOA 前体

物的情况,因而本文选取了 25 种前体物进行计算,理论上存在一定的遗漏现象,势必导致本文对 SOA 生成潜势的估算结果低于实际情况,但根据目前已有研究,大气中 SOA 前体物在 25 ~ 31 种之间,因而文中选取的前体物比例应不低于实际的 80.65%,对总体特征影响较小。

3 结论

(1) 25 种前体物中,甲苯的 SOA 生成潜势最高,但 SOA 生成能力最强的是 1,4-二乙基苯。芳香烃的 SOA 生成能力总体高于烷烃,对总的 SOA 生成潜势贡献也更高。

(2) 中小型汽油客车是最大的 SOA 生成源,约占 SOA 总量的 1/3,而 SOA 生成能力最强的是小型汽油货车。汽油车的 SOA 生成能力总体强于柴油车,客车的平均 SOA 生成能力略微高于货车,但也基本持平。

(3) 中原 30 个城市中,郑州的 SOA 生成潜势高居首位,占总量的 9.14%。整个中原城市群的 SOA 排放强度具有明显的聚集性,并呈现以郑州为高强度中心,向四周逐渐减弱的空间特征。

(4) 汽油车和柴油车的排放强度空间分布具有一定的差异性,汽油车因总量较大,因而分布状况与区域的整体空间特征基本一致,柴油车的中心聚集强度较低,但以郑州为中心的南北干线排放强度仍然较高。

参考文献:

- [1] 宋丹林. 成都市中心城区机动车尾气排放对空气质量的影响研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2010.

- Song D L. Analysis of vehicle emission to air quality in Chengdu urban area[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2010.
- [2] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, *et al.* Organic aerosol and global climate modelling: a review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(4): 1053-1123.
- [3] Jacobson M C, Hansson H C, Noone K J, *et al.* Organic atmospheric aerosols: review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(2): 267-294.
- [4] Carlton A G, Wiedinmyer C, Kroll J H. A review of secondary organic aerosol (SOA) formation from isoprene[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 4987-5005.
- [5] Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles [J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 804-806.
- [6] Leitão A. Bioeconomy: the challenge in the management of natural resources in the 21st century[J]. *Open Journal of Social Sciences*, 2016, **4**(11): 26-42.
- [7] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(2): 779-799.
- [8] 方文政. 大气氧化及光氧化挥发性有机物生成二次有机气溶胶的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
Fang W Z. The studies of secondary organic aerosols formed from the atmospheric oxidation and photooxidation of volatile organic compounds[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [9] Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, *et al.* Aromatics, reformulated gasoline, and atmospheric organic aerosol formation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(7): 1890-1897.
- [10] 沈如琴. 我国大气二次有机气溶胶分布与来源的初步研究 [D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
Shen R Q. Preliminary study in secondary organic aerosol in China: spatial distribution and source apportionment [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2015.
- [11] 袁磊, 宛杨, 何成. 基于 CFD 模拟的高密度街区交通污染物分布[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2019, **36**(3): 274-280.
Yuan L, Wan Y, He C. Distribution of traffic pollutants in high-density blocks based on CFD simulation[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2019, **36**(3): 274-280.
- [12] 李海萍, 赵颖, 傅毅明. 京津冀国家干线公路污染空间特征分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3515-3526.
Li H P, Zhao Y, Fu Y M. Spatial distribution of air pollutant emissions from national trunk highway in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3515-3526.
- [13] 张帆, 程水源, 王人洁, 等. 京津冀区域国家干线公路机动车大气污染影响研究[J]. *公路交通科技*, 2017, **34**(6): 144-150.
Zhang F, Cheng S Y, Wang R J, *et al.* Study on effect of atmospheric pollution from motor vehicles on national trunk highway of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, **34**(6): 144-150.
- [14] 魏冰, 李海萍, 杜佳琪, 等. 国家干线公路移动源 VOCs 排放及臭氧生成潜势研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4043-4053.
- Wei B, Li H P, Du J Q, *et al.* Emission and ozone formation potential of VOCs from mobile sources of national trunk highway [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4043-4053.
- [15] 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.
- [16] 段丽菊, 刘桐瑞, 赵凝秋, 等. 郑州市区和郊区道路交通高峰期臭氧浓度分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2016, **29**(6): 26-28.
Duan L J, Liu T R, Zhao N Q, *et al.* Ozone concentration in downtown and suburb of Zhengzhou city during traffic peak hours [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2016, **29**(6): 26-28.
- [17] 段丽菊, 王海雪, 高留闯, 等. 郑州市区春季道路交通高峰期大气臭氧浓度分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2013, **26**(5): 37-39.
Duan L J, Wang H X, Gao L C, *et al.* Atmospheric Ozone concentration of road traffic peak hou of Zhengzhou in spring [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2013, **26**(5): 37-39.
- [18] 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, China[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 830-837.
- [19] 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.
- [20] 王扶藩, 朱乔, 冯凝, 等. 深圳大气中 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(10): 2449-2457.
Wang F P, Zhu Q, Feng N, *et al.* The generation potential of secondary organic aerosol of atmospheric VOCs in Shenzhen[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(10): 2449-2457.
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 打造中部崛起新支撑, 拓展经济发展新空间——国家发展改革委地区经济司负责人解读《中原城市群发展规划》[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201701/t20170106_1051520.html, 2017-01-06.
- [22] 陈硕, 张维阳, 高建华. 铁路交通流视角下中原城市群城市体系演变: 基于城市中心性与中介性的分析[J]. *人文地理*, 2019, **34**(6): 62-70, 90.
Chen S, Zhang W Y, Gao J H. Urban system evolution of central plains from the lens of railway traffic flow: an empirical analysis on cities' centrality and intermediacy [J]. *Human Geography*, 2019, **34**(6): 62-70, 90.
- [23] 中国交通部公路规划设计院. 国家干线公路交通量手册 [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部规划研究院, 2016.
- [24] 王金宏, 朱军, 尹灵芝, 等. 基于线性参照系统的虚拟高速铁路场景建模方法[J]. *地球信息科学学报*, 2014, **16**(1): 23-30.

- Wang J H, Zhu J, Yin L Z, *et al.* Virtual high-speed railway scene modeling method based on the linear referencing system [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, **16**(1): 23-30.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车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/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.
- [26] 中华人民共和国生态环境部. 2016 年中国机动车环境管理年报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201606/t20160602_353152.htm, 2016-06-02.
- [27] 傅晓钦, 翁燕波, 钱飞中, 等. 行驶机动车尾气排放 VOCs 成分谱及苯系物排放特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1056-1062.
- Fu X Q, Weng Y B, Qian F Z, *et al.* Study of the VOC source profile and benzene compounds emission of various motor vehicles [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(6): 1056-1062.
- [28] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [29] 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.
- [30] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [31] Montero L, Duane M, Manfredi U, *et al.* Hydrocarbon emission fingerprints from contemporary vehicle/engine technologies with conventional and new fuels [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(18): 2167-2175.
- [32] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [33] Fanick E R, Merritt P M, Eng K D. Development of a synthetic diesel exhaust [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2008, **1**(1): 65-70.
- [34] 高戈, 李海萍, 魏冰, 等. 珠江三角洲干线公路夏季臭氧污染特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(3): 929-937.
- Gao G, Li H P, Wei B, *et al.* Ozone pollution characteristics of nation trunk highway in Pearl River Delta during summer [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(3): 929-937.
- [35] 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.
- [36] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [37] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [38] 王倩, 王红丽, 周末东, 等. 成都市夏季大气挥发性有机物污染及其对二次有机气溶胶生成的贡献[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(7): 6-12.
- Wang Q, Wang H L, Zhou L D, *et al.* Pollution of volatile organic compounds and their contribution to the secondary organic aerosol formation in summer of Chengdu [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, **37**(7): 6-12.
- [39] 吕子峰, 郝吉明, 段菁春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 969-975.
- Lü Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 969-975.
- [40] 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.
- [41] 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 等. 长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 461-468.
- You X Y, Luo D T, Liu Z, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from anthropogenic source in Chang-Zhu-Tan Region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 461-468.
- [42] 黄粉莲, 田茂盛, 申立中, 等. 柴油/汽油反应活性控制压燃发动机机油协调控制与排放特性研究[J]. *内燃机工程*, 2020, **41**(2): 54-61.
- Huang F L, Tian M S, Shen L Z, *et al.* Study on dual-fuel injection coordination control and emission performance of diesel-gasoline reactivity controlled compression ignition engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2020, **41**(2): 54-61.
- [43] 黄迎春, 杨伯钢, 林静静, 等. 基于核密度分析的无障碍设施分析[J]. *北京测绘*, 2020, **34**(1): 12-18.
- Huang Y C, Yang B G, Lin J J, *et al.* Analysis of barrier-free facilities based on kernel density function [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2020, **34**(1): 12-18.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)