

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体神累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

南京市交通甲烷排放特征

张雪^{1,2}, 胡凝^{1,2}, 刘寿东^{1,2*}, 王淑敏^{1,2}, 高韵秋^{1,2}, 赵佳玉^{1,2}, 张圳^{1,2}, 胡勇博^{1,2}, 李旭辉^{1,2}, 张国君^{1,2}

(1. 南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 城市交通是 CH₄ 等温室气体重要排放源, 而 CH₄ 排放的观测研究是定量分析城市碳排放的基础。本研究考虑城市交通的周变化和日变化特点, 于 2014 年 10 月 17 日、18 日、20 日、23 日每日 5 个时段在南京市主城区三条交通主干道上和 2015 年 9 月 11 日的早晚时段在南京长江隧道内, 观测大气 CH₄ 和 CO₂ 浓度, 分析交通 CH₄ 排放特征及其影响因素。结果表明: ① 南京城区交通主干道的 CH₄ 平均浓度均大于背景大气 CH₄ 浓度。受交通车流量的影响, ΔCH₄ 浓度的空间差异显著。ΔCH₄ 浓度的日变化呈现倒“W”型, 在交通早晚高峰时出现峰值。② 由于隧道内“活塞风”的作用, 长江隧道内的 CH₄ 浓度从入口到出口逐渐增大, 出入口浓度差在 $0.21 \times 10^{-6} \sim 0.38 \times 10^{-6}$ (摩尔分数, 下同) 之间。③ 大气 CH₄ 浓度与 CO₂ 浓度之间线性相关。交通主干道上的 ΔCH₄: ΔCO₂ 值平均为 0.009 1; 隧道内的 ΔCH₄: ΔCO₂ 值仅为 0.000 47 ~ 0.001 4。④ 影响南京城区道路大气 ΔCH₄ 浓度和 ΔCH₄: ΔCO₂ 值的主要因素分别是车流量和天然气车占车流量的比例。

关键词: 城市交通; 主干道; 隧道; ΔCH₄ 浓度; ΔCH₄: ΔCO₂

中图分类号: X501 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0469-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201606090

Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing

ZHANG Xue^{1,2}, HU Ning^{1,2}, LIU Shou-dong^{1,2*}, WANG Shu-min^{1,2}, GAO Yun-qiu^{1,2}, ZHAO Jia-yu^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, HU Yong-bo^{1,2}, LEE Xu-hui^{1,2}, ZHANG Guo-jun^{1,2}

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation of Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Urban traffic is an important source of greenhouse gases such as CH₄. The observations on CH₄ are the basis for quantitative analysis of urban carbon emissions. Taken into consideration the weekly and daily changing characteristics of urban traffic, we conducted experiments to analyze the features of traffic CH₄ emission and its influential factors. The experiments were conducted on 3 main roads in Nanjing on Oct. 17, 18, 20, 23, 2014 with 5 periods of observation per day, and in Nanjing Yangtze River tunnel in the morning and at night of Sep. 11 2014. The results showed that: ① The average concentration of CH₄ on the urban main road of Nanjing city was greater than that of the background atmosphere. Affected by traffic conditions, the spatial difference of ΔCH₄ concentration was significant on three typical main roads. ΔCH₄ concentration's diurnal variation showed inverted “W” type, and its peak appeared in the morning and evening rush hours. ② Due to the “piston wind” in the tunnel, the CH₄ concentration in Nanjing Yangtze River tunnel gradually increased from the inlet to the outlet and the difference of concentration between the inlet and the outlet was $0.21 \times 10^{-6} \sim 0.38 \times 10^{-6}$. ③ There was a good linear correlation between CH₄ concentration and CO₂ concentration. The atmospheric ΔCH₄: ΔCO₂ value of urban main road in Nanjing was 0.009 1 and the atmospheric ΔCH₄: ΔCO₂ value of Nanjing Yangtze River Tunnel was 0.000 47~0.001 4. ④ Traffic volume and the proportion of natural gas vehicles were the main factors influencing atmospheric ΔCH₄ concentration and ΔCH₄: ΔCO₂.

Key words: urban traffic; main road; tunnel; ΔCH₄ concentration; ΔCH₄: ΔCO₂

甲烷(CH₄)是仅次于CO₂的重要的温室气体^[1]。尽管大气中CH₄含量比CO₂少,但其全球增温潜势是CO₂的28倍^[2]。自工业革命以来,全球大气中的CH₄含量(以摩尔分数计,下同)从 0.7×10^{-6} 增加到了 1.9×10^{-6} ,并以每年20%的速度持续增长^[3]。

在全球范围内,交通CH₄的排放量微不足道^[4]。但在城市尤其是交通繁忙的地区,CH₄排

量甚至达到了区域CH₄排放量的30%^[5]。2000年以后,全球天然气车辆(natural gas vehicle, NGV)迅速增加,目前NGV已达到2 233.5万辆^[6];

收稿日期: 2016-06-14; 修订日期: 2016-09-18

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201410300106, 201610300167)

作者简介: 张雪(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为城市大气环境与温室气体, E-mail: 543698376@qq.com

* 通信作者, E-mail: lsd@nuist.edu.cn

我国 NGV 保有量也从 1999 年的不足 1 万辆增长到 441.1 万辆,居世界前列^[6,7]. 有研究指出,不足汽车保有量 1% 的天然气出租车的 CH_4 排放量高达机动车总排放量的 23.42%^[8]. 这说明 NGV 的增加将进一步加剧城市交通 CH_4 排放.

现有 CH_4 排放量主要估算方法是 IPCC 排放清单方法 (IPCC Greenhouse Gas Inventories, IPCC 方法),该方法给每种类别的排放源指定一个排放系数,再根据各排放源的活动数据统计 CH_4 的排放量,是一种“自下而上”的估算方法. 但是这种方法应用到城市交通方面存在很大的困难. 与 CO_2 不同,我国机动车 CH_4 排放的相关研究较少,目前所使用的 CH_4 排放系数大多是由 MOBILE 或 COPERT 等模型计算得到的^[9,10],这些模型是基于欧美国家车辆的尾气排放标准和交通数据资料建立并验证的,与我国车辆排放实况有所不同^[8,11]. 其次,不同燃料类型机动车的 CH_4 排放系数差别很大^[12,13],受车型、车龄和行驶状况等的影响,这个差距会更大^[11,14,15]. 这些原因均导致城市 CH_4 排放量的计算结果不够准确.

CH_4 和 CO_2 这两种气体都是惰性气体,在大气扩散过程中基本不发生化学反应,因此大气 CH_4 和 CO_2 浓度变化量的比值 (即大气 ΔCH_4 : ΔCO_2 值) 保留着排放源的信号^[16]. 对于某个特定的排放源来说,大气 ΔCH_4 : ΔCO_2 值相对稳定^[17],可以间接地反映排放源的排放特征. 大气浓度观测法就是利用大气 ΔCH_4 : ΔCO_2 值,由不确定性比较小的 CO_2 作为示踪气体,间接地估测这种痕量气体的排放情况^[18~21]. 这是一种“自上而下”的方法,不仅可以减小 IPCC 方法在城市尺度上不确定性^[16,22],还可以反映城市尺度机动车的 CH_4 排放特征.

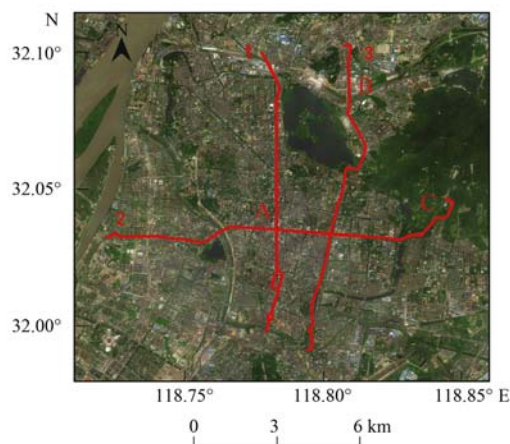
南京是长三角地区的第二大城市,人口约 821.61 万. 南京又是重要的综合性工业生产基地,是温室气体排放的高强度地区之一,碳排放总量位居江苏省第二位^[23]. 其次,南京的天然气出租车和公交车发展迅速,目前几乎所有的出租车和 33.6% 的公交车以天然气作为车辆能源. 因此,南京城市交通 CH_4 的排放特征研究十分必要. 本研究在南京城区 3 条交通主干道及长江隧道内开展车载移动观测试验,高频率在线观测大气 CH_4 和 CO_2 浓度,分析南京交通 CH_4 浓度和大气 ΔCH_4 : ΔCO_2 值的时空变化特征,以期为城市尺度温室气体排放清单的编制提供参考,也可为城市节能减排政策措施的制定

提供依据.

1 材料与方法

1.1 车载移动观测试验

车载移动观测试验先后开展了 2 次. 第 1 次观测于 2014 年 10 月 17、18、20、23 日在城市三条交通主干道上进行 (见图 1),观测路线贯穿了南京的整个主城区,包括鼓楼区、玄武区、建邺区、秦淮区和雨花台区. 其中 10 月 18 日为周六,其余均为工作日. 3 条交通主干道观测同步进行,每天观测 5 个时段,观测车辆出发时间分别为 06:00、07:30、11:30、17:30、22:00 (06:00、07:30、11:30、17:30、22:00 时段),每次观测的持续时间约 40 min. 第 2 次观测于 2015 年 9 月 11 日在长江隧道内往返进行,在 07:25 ~ 08:00 观测车辆往返 2 次、在 22:40 ~ 22:55 往返 1 次,单程时间约 4 ~ 6 min. 试验期间,观测车辆尽量保持匀速行驶,行驶速度控制在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右. GPS (Garmin GPSMAP 62SC) 记录观测路线的经纬度和长度,摄像头安装在观测车辆的前方,实时录制附近的车流状况.



底图为百度卫星图像,红线为行车路线,1、2 和 3 表示道路 1、道路 2、道路 3,A、B、C 表示典型路段新街口、红山街和陵园路

图 1 南京城区 CH_4 浓度观测线路示意

Fig. 1 Image of the observation route of CH_4 concentration in urban region of Nanjing

试验采用便携式 $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (型号 915-0011, Los Gatos Research, Mountain View, CA, USA) 以 1Hz 的采样频率沿途观测大气 CH_4 和 CO_2 浓度. 这是目前世界上最先进的同时测量 CH_4 、 CO_2 和 H_2O 的仪器,可直接输出 CH_4 和 CO_2 干空气浓度,测量精度为: CO_2 浓度 $< 0.1 \times 10^{-6}$, CH_4 浓度 $< 0.6 \times 10^{-9}$. 分析仪连接内径 1/4 英寸的特氟龙管作为采

气管,伸到天窗外距地面 2.5 m 处,采气管末端安装过滤器(Swagelok, USA)和漏斗,防止大颗粒污染物和雨水进入分析仪. 为了控制数据误差,每次观测前利用高纯 N_2 和浓度为 490×10^{-6} 的 CO_2 标准气体对分析仪进行 1 次零值和标准值的校准.

1.2 背景大气 CH_4 浓度的观测

大气 CH_4 的背景浓度观测在南京信息工程大学校园内进行. 观测仪器为同位素气体分析仪(型号 G1101-i, Picarro, Sunnyvale, CA, USA), 该仪器采用基于波长扫描光腔衰荡光谱(WS-CRDS)技术,利用在线标定系统可以保证长期观测的精度. 仪器放置在距地面高约 34 m 的气象楼观测室,通过伸到窗外的采气口进行气体采集. 后向轨迹分析表明,正午 CH_4 浓度的贡献区与南京城市区域相当,午夜的 CH_4 浓度的贡献区主要落在南京及邻近省份^[24].

2 结果与讨论

2.1 交通主干道上大气 CH_4 浓度的变化特征

大气 CH_4 浓度的变化不仅取决于源、汇强度,还受制于光化学汇的日变化和边界层高度的调节等多重因素影响^[25,26]. 因此,本研究利用主干道的大气 CH_4 浓度与背景大气 CH_4 浓度的差值(ΔCH_4 浓度)来消除背景大气 CH_4 浓度波动的影响,反映出主干道上机动车的 CH_4 排放特征. 图 2 是不同主干道上、不同时间的 ΔCH_4 统计结果. 结果显示,除 10 月 23 日道路 1 的 22:00 时段 ΔCH_4 浓度为负值(-0.11×10^{-6})以外,其他主干道上的大气 CH_4 浓度均大于背景大气 CH_4 浓度(ΔCH_4 浓度为 $0.31 \times$

$10^{-6} \sim 2.09 \times 10^{-6}$). 可见,主干道交通是城市 CH_4 的重要排放源.

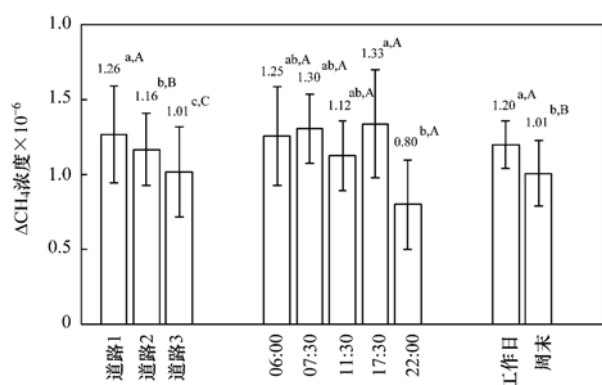
不同主干道上 ΔCH_4 分布的结果显示(图 2): ΔCH_4 值的空间变异性非常大,两两之间的差异均达到 0.01 显著水平. 其中道路 1 是一条南北方向、贯穿城市中心的主干道,它的 ΔCH_4 浓度的平均值最高,为 $1.26 \times 10^{-6} (\pm 0.32 \times 10^{-6})$. 道路 3 与道路 1 几乎平行,是南京市主城区一条快速城市道路的辅路,它的 ΔCH_4 浓度的平均值在所有观测路段中最低,为 $1.01 \times 10^{-6} (\pm 0.30 \times 10^{-6})$. 道路 2 为东西走向,东段位于钟山风景区、西段临近长江,它横贯东西与道路 1 交叉在城市中心——新街口,这条道路的 ΔCH_4 浓度平均值介于道路 1 和道路 3 之间,为 $1.16 \times 10^{-6} (\pm 0.30 \times 10^{-6})$.

不同时间主干道上 ΔCH_4 变化的结果显示(见图 2): ΔCH_4 平均浓度的日变化呈现倒“W”型. 高值出现在早晚交通高峰时期,分别为 $1.30 \times 10^{-6} \pm 0.23 \times 10^{-6}$ 和 $1.33 \times 10^{-6} \pm 0.36 \times 10^{-6}$. 最小值出现在夜间 22:00 时段,为 $0.80 \times 10^{-6} \pm 0.30 \times 10^{-6}$. 这明显不同于本底站^[25,27]的单峰型或“U”型分布特征. 其次, ΔCH_4 平均浓度的周变化是工作日明显高于周末. 其中,工作日的 ΔCH_4 浓度平均值为 $1.20 \times 10^{-6} \pm 0.16 \times 10^{-6}$,周末的 ΔCH_4 浓度平均值为 $1.01 \times 10^{-6} \pm 0.22 \times 10^{-6}$,两者相差 $0.28 \times 10^{-6} \sim 0.45 \times 10^{-6}$. 上述结果表明,主干道上的大气 CH_4 浓度极大受交通状况的影响.

图 3 为 2014 年 10 月 20 日中午在 3 条交通主干道上大气 CH_4 和 CO_2 浓度观测结果的时间序列. 从中可见,主干道上大气 CH_4 浓度的波动明显,大气 CH_4 和 CO_2 浓度的变化趋势基本一致, CH_4 浓度的峰值也往往是 CO_2 浓度的峰值.

为了分析 CH_4 浓度升高的原因,共提取了 10 个 CH_4 浓度大于 4×10^{-6} 的时段. 由影像资料发现,图 3 中⑩正好处于九华山隧道出口附近,旁边 4 辆公交先后经过移动观测车. 南京几乎所有的出租车和约 1/3 的公交车以天然气为燃料,没有完全燃烧的 CH_4 从尾气中排出,使得以天然气为燃料的机动车尾气的 CH_4 排放强度远高于其他燃料的机动车. 而其余 90% 的 CH_4 峰值都处于红灯或堵车的空挡怠速及刚启动加速时段. 这与其他研究者的结果一致,机动车在空挡怠速、刚启动加速或频繁加速减速状态下排放气体浓度将升高^[28].

为了进一步研究燃料类型对于机动车 CH_4 排



上标表示方差分析的显著水平,其中小写字母表示 5% 显著水平,大写字母表示 1% 显著水平

图 2 交通主干道上大气 CH_4 浓度与背景大气 CH_4 浓度差值(ΔCH_4)的统计结果

Fig. 2 Bar graph of mean ΔCH_4 concentration on the traffic main road

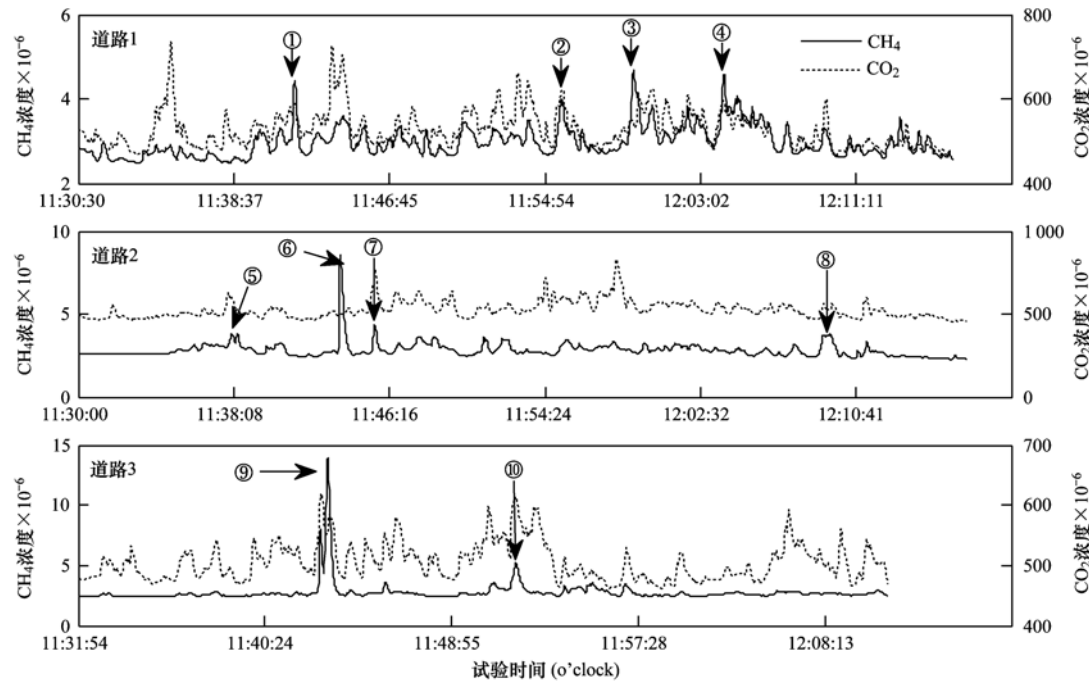


图3 2014年10月20日11:30时段的交通主干道上大气CH₄浓度和CO₂浓度的时间序列图

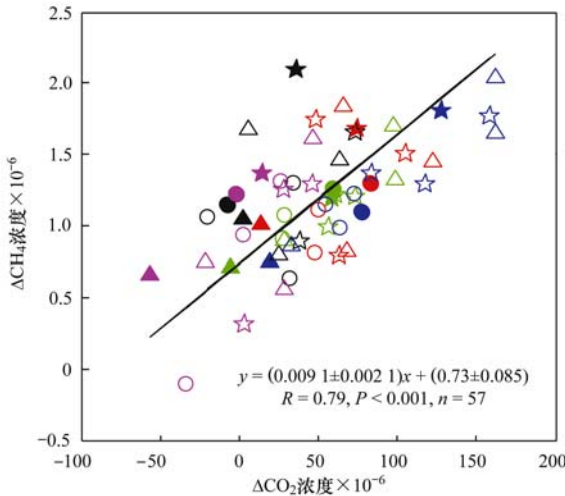
Fig. 3 Time series of CH₄ and CO₂ concentrations on the traffic main road in the 11:30 period of October 20, 2014

放的影响,本研究计算了大气 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值. 由图4可见,大气CH₄浓度与CO₂浓度之间的线性关系显著, $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值平均为0.009 1. 其中,道路1、道路2和道路3的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值分别为0.008 5、0.006 0、0.009 3. $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值的日变化呈现明显的U型分布,主要表现为早晚时段的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值较高为0.019 8 (06:00)、0.010 7 (22:00); 白天 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值低且变化幅度较小,分别为0.008 3 (07:30)、0.007 8 (11:30)、0.008 0 (17:30). 工作日 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值为0.008 0,略低于周末(0.008 9).

上述结果与李相贤等^[29]在广州城市道路观测得到的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值(0.008 45)非常接近. 但与MOBILE或COPERT等模型计算的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值(0.000 69~0.001 5)相比^[11, 12, 14, 30],后者明显偏小. 显然,由模型计算的CH₄排放系数存在明显的低估,这会进一步导致城市机动车CH₄排放量的低估.

2.2 隧道内的大气CH₄浓度的变化特征

隧道是一个相对封闭的特殊环境,可以排除非机动车排放源的影响,因此隧道出口与入口的CH₄浓度差(ΔCH_4 浓度)可以反映出机动车的CH₄排放特征. 图5是长江隧道内CH₄和CO₂浓度观测结果的时间序列图. 结果可见,由于机动车行驶在隧道内会产生“活塞风”^[31],且隧道内车流方向与“活塞风”方向一致^[32],导致隧道内的CH₄浓度呈现从入



○、△和☆分别代表道路1、2、3; 黑色、红色、绿色、蓝色和粉色分别代表06:00、07:30、11:30、17:30和22:00时段; 空心 and 实心表示工作日和周末

图4 交通主干道上大气CH₄浓度、CO₂浓度与背景大气浓度的差值(ΔCH_4 和 ΔCO_2)的相关关系

Fig. 4 Correlation between mean ΔCH_4 concentration and mean ΔCO_2 concentration on the traffic main road

口到出口逐渐增大的变化趋势,这与其他一些隧道大气成分特征的观测结果一致^[33]. 交通早高峰时段 ΔCH_4 浓度为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 0.38 \times 10^{-6}$,高于夜间的 ΔCH_4 浓度($0.21 \times 10^{-6} \sim 0.22 \times 10^{-6}$). 但是,在07:56:13~07:56:55,CH₄浓度出现了一个明显的突变,而此时的CO₂浓度却没有异常. 根据影像资

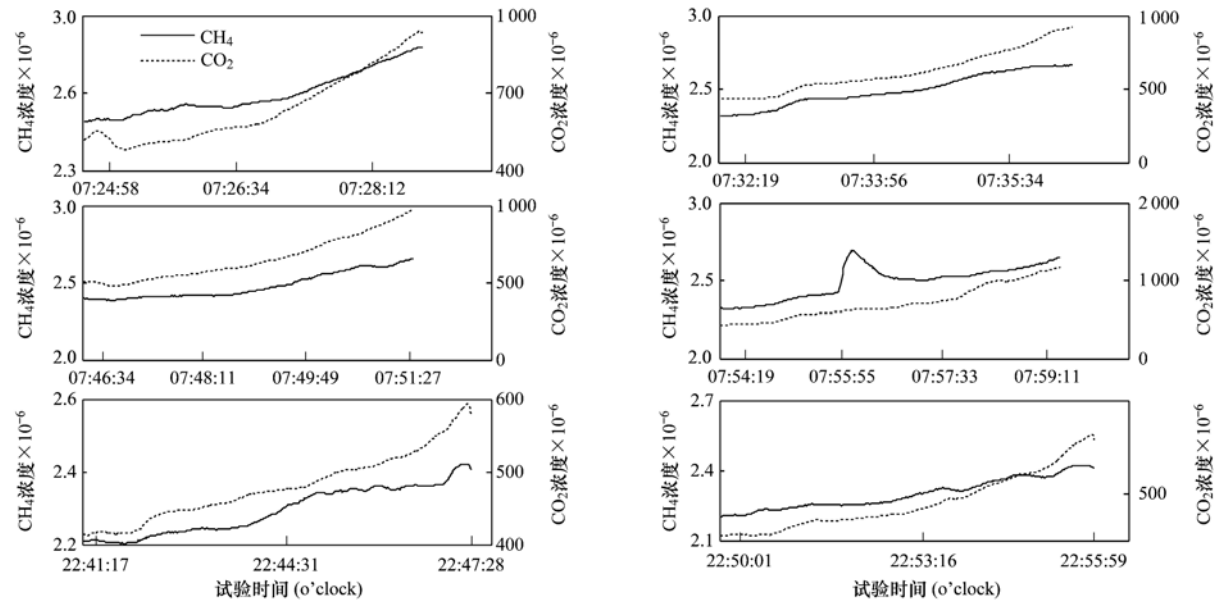


图5 长江隧道内大气CH₄浓度与CO₂浓度的时间变化序列图

Fig. 5 Time series of CH₄ concentration and CO₂ concentration in Nanjing Yangtze River Tunnel

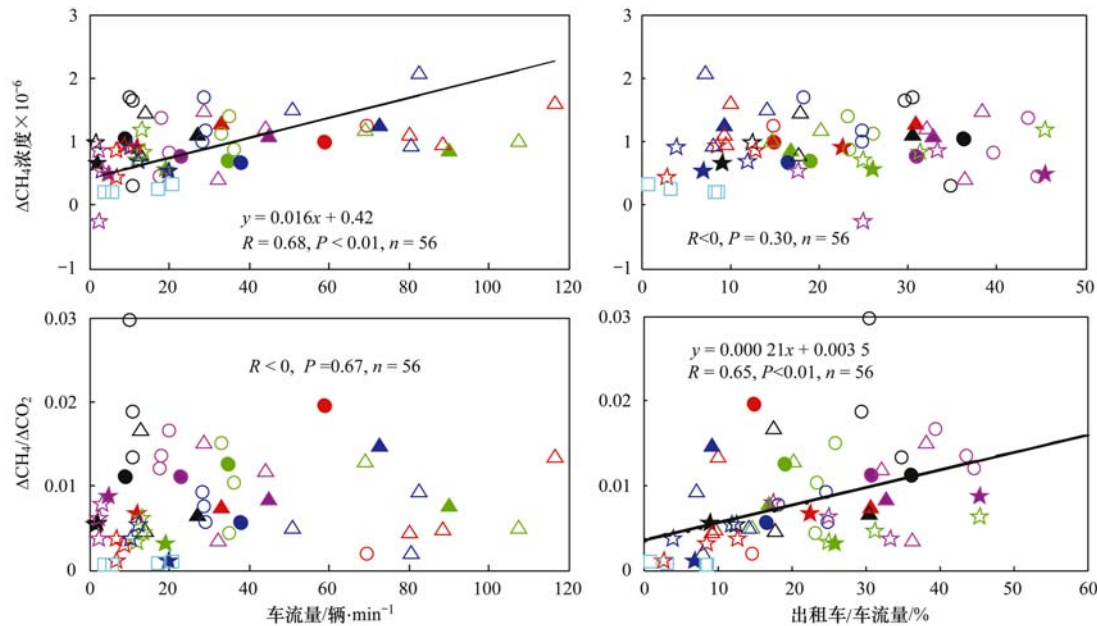
料判断,这个突变是由于天然气公交车尾气排放所引起的.

隧道内的大气CH₄浓度与CO₂浓度的相关分析表明,隧道内的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值明显低于交通主干道,仅为0.000 47~0.001 44.从日变化来看,白天的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值为0.000 47~0.000 79,低于夜间的 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 值(0.001 07~0.001 44).该结果是Popa等^[17]在瑞士公路隧道内观测得到的 ΔCH_4 :

ΔCO_2 值(0.000 046)的18倍以上,这表明我国的机动车排放标准要远远低于欧美国家.

2.3 影响城市道路CH₄时空分布的因素

为了进一步分析影响城市道路大气CH₄浓度时空分布的因素,本研究选择了商业中心道路(新街口)、普通城市道路(红山街)、风景区道路(陵园路)和城市隧道(长江隧道)这4种典型路段(图6).这4个典型路段的车流量差异显著,平均车流



○、△、☆、□分别代表红山街、新街口、中山陵和长江隧道;黑色、红色、绿色、蓝色和粉色分别代表06:00、07:30、11:30、17:30和22:00时段;空心和实心表示工作日和周末

图6 典型路段 ΔCH_4 浓度、 $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ 与车流量、出租车占车流量比例的关系

Fig. 6 Relationship between ΔCH_4 , $\Delta\text{CH}_4:\Delta\text{CO}_2$ and traffic volume, taxi/traffic volume on the typical road

量新街口 ($57.5 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$) > 红山街 ($31.8 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$) > 陵园路 ($8.6 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$), 长江隧道为 $11.8 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$. 从燃料类型看, 长江隧道内以汽油为燃料的私家车居多, 观测期间共出现 6 辆出租车, 1 辆公交车, 分别占总车流量的 3.0% 和 0.38%. 而主干道路段上的天然气出租车占车流量的比例在 0 ~ 44.62% 范围内. 对这 4 个典型路段的 ΔCH_4 浓度、 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值与车流量及天然气出租车占车流量比例进行相关分析, 结果见图 6 所示.

首先, ΔCH_4 浓度与车流量的相关系数达到 0.68, 达到 0.01 的显著水平, 但与出租车占车流量的比例不相关. 这说明, 相比较于燃料类型, 车流量是造成城市交通大气 CH_4 浓度时空差异的主要因素. ΔCH_4 浓度与车流量的关系为 $y = 0.016x + 0.42$. 由此推测, 车流量每分钟增加 10 辆, 道路上的大气 CH_4 浓度将增加 0.16×10^{-6} . 其次, 尽管 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值与车流量的关系不显著, 但 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值与天然气出租车占车流量的比例的相关系数达到 0.65, $P < 0.01$. 可见, 机动车燃料类型的差异是导致大气 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值变化的主要原因, 天然气类型的机动车会加大交通 CH_4 的排放强度. $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值与出租车占车流量比例的关系式为 $y = 0.00021x + 0.0035$. 由此推测, 天然气车的 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值为 0.0243, 与何立强等^[8,12,13] 的实测结果 (0.0033 ~ 0.0827) 一致, 是汽油车 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值的 20 余倍. 目前, 南京市天然气车的比例为 0.936%, 若忽略天然气车, 南京城市交通 CH_4 排放量将会被低估 5% 左右; 如果天然气车的比例继续升高, 低估将更加严重.

3 结论

(1) 城市交通是 CH_4 的重要排放源, 主干道上的 CH_4 平均浓度均大于背景大气 CH_4 浓度. 受交通状况的影响, ΔCH_4 浓度的空间变异性非常大; ΔCH_4 浓度的日变化呈现倒“W”型, 工作日的 ΔCH_4 浓度高于周末.

(2) 隧道是一个相对封闭的特殊环境, 可以排除非机动车排放源的影响. 由于机动车行驶在隧道内会产生“活塞风”, 因此隧道内的 CH_4 浓度总是从入口到出口逐渐增大.

(3) 大气 CH_4 浓度与 CO_2 浓度之间线性相关. 交通主干道上的 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值平均为 0.0091; 日变化呈现明显的 U 型分布, 早晚高、白天低; 工作日略低于周末. 隧道内的 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值明显低于交

通主干道, 仅为 0.00047 ~ 0.00144, 且白天低于夜间.

(4) 影响南京城区道路大气 ΔCH_4 浓度的主要因素是车流量. 车流量每分钟增加 10 辆, 道路上的大气 CH_4 浓度将增加 0.16×10^{-6} . 影响大气 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值的主要因素是天然气车占车流量的比例, 天然气车的 $\Delta\text{CH}_4 : \Delta\text{CO}_2$ 值为 0.0243. 目前, 南京市天然气车的比例为 0.936%, 忽略天然气车, 南京城市交通 CH_4 排放量将会被低估 5% 左右.

参考文献:

- [1] 乐群, 张国君, 王铮. 中国各省甲烷排放量初步估算及空间分布[J]. 地理研究, 2012, **31**(9): 1559-1570.
Le Q, Zhang G J, Wang Z. Preliminary estimation of methane emission and its distribution in China [J]. Geographical Research, 2012, **31**(9): 1559-1570.
- [2] 刘建功. 气候变化背景下中国自然湿地生态系统甲烷排放的时空变化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] Thomas G, Zachariah E J. Ground level volume mixing ratio of methane in a tropical coastal city[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(4): 1857-1863.
- [4] Nam E K, Jensen T E, Wallington T J. Methane emissions from vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(7): 2005-2010.
- [5] Nakagawa F, Tsunogai U, Komatsu D D, et al. Automobile exhaust as a source of ^{13}C - and D-enriched atmospheric methane in urban areas[J]. Organic Geochemistry, 2005, **36**(5): 727-738.
- [6] 萧芦. 天然气汽车和加气站数量及天然气消费量分国别统计[J]. 国际石油经济, 2015, (6): 94-96.
Xiao L. Quantity and natural gas consumption of natural gas vehicles and gas stations by country[J]. International Petroleum Economics, 2015, (6): 94-96.
- [7] 张沛. CNG 汽车是天然气利用的重要发展途径[J]. 石油与天然气化工, 2008, **37**(1): 23-26, 47.
Zhang P. Developing way of using natural gas by CNG vehicle [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2008, **37**(1): 23-26, 47.
- [8] 何立强, 胡京南, 解淑霞, 等. 2010 年中国机动车 CH_4 和 N_2O 排放清单[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(1): 28-35.
He L Q, Hu J N, Xie S M, et al. CH_4 and N_2O emission inventory for motor vehicles in China in 2010[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(1): 28-35.
- [9] Cai H, Xie S D. Temporal and spatial variation in recent vehicular emission inventories in China based on dynamic emission factors[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, **63**(3): 310-326.
- [10] 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(2): 36-38.
Li W, Fu L X, Hao J M, et al. Emission inventory of 10 kinds of air pollutants for road traffic vehicles in China [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, **16**(2): 36-38.
- [11] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(3): 319-326.
Cai H, Xie S D. Determination of emission factors from motor

- vehicles under different emission standards in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(3): 319-326.
- [12] 何立强. 中国机动车温室效应污染物排放清单及其削减潜力研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2014.
- [13] 何立强, 宋敬浩, 胡京南, 等. 轻型汽油车 CH_4 和 N_2O 排放因子研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4489-4494.
- He L Q, Song J H, Hu J N, *et al.* CH_4 and N_2O emission factors of light-duty gasoline vehicles [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4489-4494.
- [14] 曾雪兰, 李红霞, 程晓梅, 等. 佛山市机动车尾气排放清单及特征分析[J]. *环境污染与防治*, 2013, **35**(11): 51-55.
- Zeng X L, Li H X, Cheng X M, *et al.* Study on traffic exhaust emissions and characteristics of Foshan city[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, **35**(11): 51-55.
- [15] 姚志良, 王岐东, 王新彤, 等. 典型城市机动车非常规污染物排放清单[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(3): 96-101.
- Yao Z L, Wang Q D, Wang X T, *et al.* Emissions inventory of no-regulated pollutants for motor vehicles in typical cities [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(3): 96-101.
- [16] Shen S H, Yang D, Xiao W, *et al.* Constraining anthropogenic CH_4 emissions in Nanjing and the Yangtze River Delta, China, using atmospheric CO_2 and CH_4 mixing ratios[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, **31**(6): 1343-1352.
- [17] Popa M E, Vollmer M K, Jordan A, *et al.* Vehicle emissions of greenhouse gases and related tracers from a tunnel study: $\text{CO}:\text{CO}_2$, $\text{N}_2\text{O}:\text{CO}_2$, $\text{CH}_4:\text{CO}_2$, $\text{O}_2:\text{CO}_2$ ratios, and the stable isotopes ^{13}C and ^{18}O in CO_2 and CO [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(4): 2105-2123.
- [18] Lee X, Bullock Jr O R, Andres R J. Anthropogenic emission of mercury to the atmosphere in the northeast United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(7): 1231-1234.
- [19] Hsu Y K, VanCuren T, Park S, *et al.* Methane emissions inventory verification in southern California [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(1): 1-7.
- [20] Wang Y, Munger J W, Xu S, *et al.* CO_2 and its correlation with CO at a rural site near Beijing: implications for combustion efficiency in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(18): 8881-8897.
- [21] Bakwin P S, Hurst D F, Tans P P, *et al.* Anthropogenic sources of halocarbons, sulfur hexafluoride, carbon monoxide, and methane in the southeastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D13): 15915-15925.
- [22] Bun R, Hamal K, Gusti M, *et al.* Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty[J]. *Climatic Change*, 2010, **103**(1-2): 227-244.
- [23] 肖翔. 江苏城市 15 年来碳排放时空变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [24] 杨栋. 南京市和长三角 CH_4 人为排放量估算研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [25] 欧向军, 薛丽芳. 瓦里关大气 CH_4 浓度变化及其潜在源区分析[J]. *科技导报*, 2000, **18**(8): 27-30.
- Ou X J, Xue L F. Analysis of changes in Waliguan atmospheric CH_4 concentration and its potential source region[J]. *Science & Technology Review*, 2000, **18**(8): 27-30.
- [26] 张芳. 大气 CO_2 、 CH_4 和 CO 浓度资料再分析及源汇研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.
- [27] 方双喜, 周凌晞, 许林, 等. 我国 4 个 WMO/GAW 本底站大气 CH_4 浓度及变化特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2917-2923.
- Fang S X, Zhou L X, Xu L, *et al.* CH_4 concentrations and the variation characteristics at the four WMO/GAW background stations in China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 2917-2923.
- [28] Maness H L, Thurlow M E, Mcdonald B C, *et al.* Estimates of CO_2 traffic emissions from mobile concentration measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(5): 2087-2102.
- [29] 李相贤, 高闽光, 徐亮, 等. 基于 OP-FTIR 法监测城市交通排放 CO 、 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体[J]. *红外技术*, 2011, **33**(8): 473-476, 482.
- Li X X, Gao M G, Xu L, *et al.* Monitoring of transport gases $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$ and CH_4 emissions in urban area by OP-FTIR [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(8): 473-476, 482.
- [30] Cai H, Xie S D. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(39): 8963-8979.
- [31] 张浩. 城市地下道路污染物排放与扩散特性反问题研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2015.
- [32] 陈玉远, 甘甜. 自然通风在城市道路隧道中的应用研究[J]. *隧道建设*, 2012, **32**(3): 350-354.
- Chen Y Y, Gan T. Study on application of natural ventilation in highway tunnels in urban areas [J]. *Tunnel Construction*, 2012, **32**(3): 350-354.
- [33] Zhang Y L, Wang X M, Li G H, *et al.* Emission factors of fine particles, carbonaceous aerosols and traces gases from road vehicles: recent tests in an urban tunnel in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 876-884.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Mineralization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172