

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                |                                                      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 近20年来中国典型区域PM <sub>2.5</sub> 时空演变过程            | 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)                          |
| 西安市PM <sub>2.5</sub> 健康损害价值评估                  | 魏国茹,史兴民 (3014)                                       |
| 河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析                      | 江琪,王飞,孙业乐 (3022)                                     |
| 南京北郊秋季PM <sub>2.5</sub> 碳质组分污染特征及来源分析          | 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)      |
| 临安夏季霾和清洁天气PM <sub>2.5</sub> 化学组成特征比较           | 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)                 |
| 盘锦市秋冬季节PM <sub>2.5</sub> 中碳组分特征及来源解析           | 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)                      |
| 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应                          | 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)                                     |
| 夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量                   | 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)                            |
| 太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源                            | 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)                        |
| 杭州地区大气CO <sub>2</sub> 体积分数变化特征及影响因素            | 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)                            |
| 典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征                           | 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090) |
| 地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例            | 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)                                    |
| 青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价                         | 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)                           |
| 轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究                           | 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)                                     |
| 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价                            | 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)                  |
| 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析                        | 石栋奇,卢新卫 (3126)                                       |
| 三峡库区主要河流秋季pCO <sub>2</sub> 及其影响因素              | 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)                                    |
| 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素                         | 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)                                  |
| 生物滞留对城市地表径流磷的去除途径                              | 李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)                                |
| 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系                       | 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)                          |
| 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系                        | 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)               |
| 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响                           | 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)                             |
| 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响                       | 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)                        |
| Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能                    | 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)                           |
| Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制                        | 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)                            |
| 铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制                    | 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)                             |
| 铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验                               | 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)                            |
| 制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法              | 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)                                 |
| 电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响                | 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)                            |
| 不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求                           | 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)                           |
| 基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响                       | 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)                         |
| 采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除                | 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)                        |
| 间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性                            | 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)                         |
| 基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析                       | 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)                              |
| 纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响            | 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)                                   |
| 气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响                      | 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)                                |
| 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较                               | 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)                                    |
| 耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性                      | 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)                                 |
| PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性                | 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)                            |
| 采油井场土壤微生物群落结构分布                                | 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)                              |
| 铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征                        | 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)                                |
| 广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险                             | 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)                         |
| 邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析                    | 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)                            |
| 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素                         | 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)                  |
| 塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性          | 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)                             |
| 塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系       | 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)                              |
| 高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制                          | 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)                                |
| 施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响                               | 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)                              |
| 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析                  | 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)                    |
| 南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估                      | 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)                                  |
| 三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析                     | 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)                          |
| 人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性                           | 时红蕾,王文昌,李倩 (3434)                                    |
| COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 对青霉素菌渣厌氧消化影响 | 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)                                    |
| 果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征                       | 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)                         |
| 曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH <sub>3</sub> 挥发的影响            | 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)                            |
| 《环境科学》征订启事(3141)                               |                                                      |
| 《环境科学》征稿简则(3202)                               |                                                      |
| 信息(3229, 3433, 3451)                           |                                                      |

# 杭州地区大气 CO<sub>2</sub> 体积分数变化特征及影响因素

浦静姣<sup>1</sup>, 徐宏辉<sup>1\*</sup>, 姜瑜君<sup>1</sup>, 杜荣光<sup>2</sup>, 齐冰<sup>2</sup>

(1. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008; 2. 杭州市气象局, 杭州 310051)

**摘要:** 选取 2015 年 8 月至 2016 年 9 月杭州城区、远郊地区在线观测 CO<sub>2</sub> 体积分数, 分析杭州地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的城郊差异, 并结合风向、CO<sub>2</sub> 体积分数周末效应、二十国集团(G20)峰会期间 CO<sub>2</sub> 体积分数变化过程分析, 探讨杭州城市对 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响程度。结果表明, 杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的日变化分布以单峰型形态为主, 植物光合作用/呼吸作用和大气输送条件的日变化是主要的影响因素; 城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数差值表现为双峰形态, 人为排放对城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数差值的日变化分布存在重要影响。CO<sub>2</sub> 体积分数日变化幅度在春夏季节远郊地区大于城区, 秋季则反之。杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化趋势基本一致, 均表现为冬、春季高, 夏季低; 城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数差值冬季最高, 夏季最低。杭州地区 CO<sub>2</sub> 体积分数高值的输送方向与周边城市区域的分布方向一致。杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数均呈现周末效应, 尤其在城区, 机动车排放对工作日-周末 CO<sub>2</sub> 体积分数的日变化分布存在影响。杭州城区 CO<sub>2</sub> 平均体积分数比远郊地区高  $9.3 \times 10^{-6}$ , G20 峰会期间人为源排放的减少有效地降低了大气 CO<sub>2</sub> 体积分数, 尤其对市区的削减效果更为明显。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 影响因素; 杭州; 城区; 远郊

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3082-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708258

## Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in Hangzhou

PU Jing-jiao<sup>1</sup>, XU Hong-hui<sup>1\*</sup>, JIANG Yu-jun<sup>1</sup>, DU Rong-guang<sup>2</sup>, QI Bing<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Meteorological Science Institute, Hangzhou 310008, China; 2. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** In situ measurement of CO<sub>2</sub> concentration (volume fraction) was carried out in both urban and rural areas of Hangzhou from August 2015 to September 2016. The characteristics of CO<sub>2</sub> concentration at the urban site were compared to those at the rural site, and the factors affecting CO<sub>2</sub> concentration in Hangzhou were analyzed via wind direction, weekday-weekend difference in CO<sub>2</sub> concentration, and evolution of CO<sub>2</sub> concentration during the G20 summit. The results revealed that the diurnal variation of CO<sub>2</sub> concentration in both the urban and rural areas presented a single peak curve most of the time, which resulted from the daily evolution of plant photosynthesis/respiration and atmospheric transport conditions. The diurnal variation of the difference in CO<sub>2</sub> concentration observed at the urban and rural sites showed a bimodal peak curve, because anthropogenic emissions played a more important role. The diurnal amplitude of CO<sub>2</sub> concentration in rural area was higher than that in urban area in spring and summer, but lower in autumn. The seasonal variation of CO<sub>2</sub> concentration in both the urban and rural areas showed the same trend, with higher values appearing in winter and spring and lower values in summer. The difference in CO<sub>2</sub> concentration observed at the urban and rural sites reached its highest level in winter, and dropped to its lowest in summer. The wind direction induction of high CO<sub>2</sub> concentration was consistent with the location of the surrounding urban areas. A weekday-weekend difference in CO<sub>2</sub> concentration was observed in Hangzhou, especially in urban area, as traffic emissions had an impact on the weekday-weekend difference in diurnal distribution of CO<sub>2</sub> concentration. The average volume fraction of CO<sub>2</sub> in urban area of Hangzhou was  $9.3 \times 10^{-6}$  higher than that in rural area, and the reduction of anthropogenic emissions during the G20 summit reduced the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration effectively, especially in urban area.

**Key words:** CO<sub>2</sub>; influence factor; Hangzhou; urban area; rural area

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是一种长寿命温室气体, 美国国家海洋大气管理局(NOAA)公布的年度温室气体指数显示, 1990~2015 年长寿命温室气体的辐射强迫增加了 37%, 其中 CO<sub>2</sub> 的作用约占该增量的 80%, 2015 年全球 CO<sub>2</sub> 体积分数首次达到  $400 \times 10^{-6}$ <sup>[1]</sup>。人类活动排放是导致大气 CO<sub>2</sub> 增加的直接原因, 化石燃料燃烧、水泥生产和土地利用变化等对大气 CO<sub>2</sub> 体积分数具有重要影响<sup>[2-4]</sup>。城市地区

人口密集, 污染物排放强度大, 城市化带来的土地利用变化也会对 CO<sub>2</sub> 体积分数产生重要影响<sup>[5-7]</sup>。城市区域排放的 CO<sub>2</sub> 已占据总排放量的 70% 以上<sup>[8,9]</sup>。通过研究 CO<sub>2</sub> 体积分数的城郊梯度分布发

收稿日期: 2017-08-31; 修订日期: 2017-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201900); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91544229)

作者简介: 浦静姣(1981~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: pujingjiao@hotmail.com

\* 通信作者, E-mail: fonsnow@126.com

现,与城市热岛分布类似,城市地区的 CO<sub>2</sub> 体积分数亦明显高于农村地区,城市地区气温和 CO<sub>2</sub> 体积分数的升幅与全球短期气候变化的预测结果相当,可以用于研究未来气候变化对生态系统的影响<sup>[10~15]</sup>。此外,城市地区较高的 CO<sub>2</sub> 体积分数分布,会对局地气温、大气稳定度、水汽、风、降水等气象条件产生影响,进而可能加剧局地臭氧(O<sub>3</sub>)和颗粒物的污染水平,从而对人体健康产生危害<sup>[16]</sup>。因此对比研究城市、郊区 CO<sub>2</sub> 体积分数的分布差异,可以了解城市对大气 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响程度,对应气候变化、制定碳减排措施、改善城市大气环境具有重要意义<sup>[17, 18]</sup>。

目前,在中国的很多地区均开展了 CO<sub>2</sub> 体积分数观测研究<sup>[19~26]</sup>,但主要关注城市地区或者区域大气本底站,对城市与郊区 CO<sub>2</sub> 体积分数的对比研究相对较少,仅在南京、上海、厦门等地开展过短期的相关研究<sup>[5, 14, 15, 21, 27, 28]</sup>。为了更好地反映我国城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数的差异特征,本研究以杭州市为例,选取 2015 年 8 月至 2016 年 9 月杭州城区与远郊地区在线观测 CO<sub>2</sub> 体积分数,分析杭州地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的城郊分布差异,并结合风向、CO<sub>2</sub> 体积分数周末效应分析、G20 峰会期间 CO<sub>2</sub> 体积分数变化过程分析,探讨杭州地区城市对 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

城区观测站点设在上城区杭州国家基准气候站内(120.17°E, 30.23°N, 海拔 43.2 m, 见图 1),位于杭州市区南部馒头山上,站址西面毗邻西湖风景区,其余三面为杭州主城区,站点的西南至东北向紧邻钱塘江。2015 年年末杭州主城区总人口为 365.96 万,人口密度 5 358 人·km<sup>-2</sup><sup>[29]</sup>。远郊观测站点设在临安区域大气本底站(120.73°E, 30.30°N, 海拔 138.6 m),位于临安市区以北 6.5 km 处,距离东南面杭州市直线距离约 60 km,距离东北方向的上海市直线距离约 150 km。站址四周以丘陵、林地和农田为主,植被覆盖良好,周围 3 km 范围内无大型村落。临安站盛行风向以东北风和西南风为主,特殊天气现象和逆温的出现频率较低,具有典型的亚热带季风区的气候和大气环流特征。

### 1.2 观测方法

远郊站、城区站的 CO<sub>2</sub> 体积分数在线观测分别采用美国 Picarro 公司 G2401 CO/CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O 分

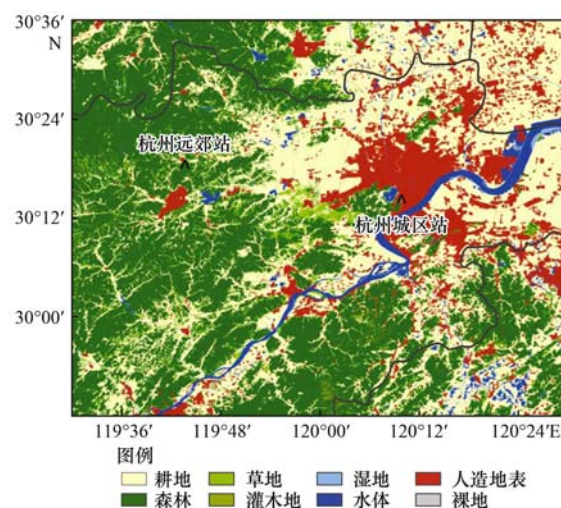


图 1 采样地点地理位置及周边土地覆盖分布

Fig. 1 Locations of measurement sites and surrounding land cover

析仪和 G2301 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪,详细的观测系统设计参见文献<sup>[26]</sup>。仪器基于波长扫描光腔衰荡光谱技术(WSCRDS),当激光二极管发射出的单频断源光束进入含有三面高反射率镜子的腔室进行反射时,光强度以指数级迅速衰减至零,若将吸收激光的目标气体导入腔室,相比空腔新增的损耗必然缩短激光的衰荡时间,且空腔与充满目标气体的衰荡时间差与目标气体的体积分数呈线性相关,Picarro 分析仪通过自动连续计算和比较空腔或充满目标气体的衰荡时间来测量目标气体体积分数。该仪器的 CO<sub>2</sub> 测量精度  $<0.05 \times 10^{-6} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$ ,最大漂移峰峰值  $0.5 \times 10^{-6} \cdot \text{month}^{-1}$ ,测量间隔 4 s。

### 1.3 数据处理与质量控制

将采集的观测数据整理后计算 5 min 体积分数均值,并结合台站值班记录和气象要素观测进行质量控制,剔除测量过程中的异常值(仪器故障,包括进气管故障、停机维护、标定仪器等;人为活动因素,包括机动车上山、人员参观等;自然因素,如强风、暴雨等);然后采用可溯源世界气象组织(WMO)国际 CO<sub>2</sub> 标准的一级标气定期标定的工作标气对系统进行标定,根据每 6 h 测量的一组工作标气响应值,获得标准曲线对 5 min 平均体积分数进行校准,进而计算得到 CO<sub>2</sub> 体积分数小时均值。将每日不少于 18 h 的体积分数时均值取算术平均值求得有效日均值,计算每月内有效日均值的平均值得到体积分数月均值,每月的有效日数在 22~31 d 之间。这里采用的数据时段为 2015-08-01 至

2016-07-31. 此外, G20 峰会期间的  $\text{CO}_2$  体积分数特征分析采用 2016-08-11 至 2016-09-30 时段的数据.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{CO}_2$ 体积分数的日变化分布

2015 年 8 月至 2016 年 7 月, 杭州城区、远郊地区的  $\text{CO}_2$  体积分数日变化分布在春、夏、秋三季均为单峰型形态, 低值出现在午后 15:00, 高值出现在清晨 06:00 ~ 07:00; 冬季城区  $\text{CO}_2$  体积分数呈双峰型分布, 高值分别出现在 08:00 ~ 09:00、18:00 ~ 22:00, 低值出现在 14:00 ~ 15:00, 远郊地区则仍为单峰型分布 (见图 2). 在春、夏、秋三季, 杭州城区站  $\text{CO}_2$  体积分数分布与厦门城区秋季的观测结果较为类似<sup>[22]</sup>, 午后受到植物光合作用和较好的对流层输送条件影响, 体积分数值较低, 日落后随着光合作用减弱以及大气扩散条件变差,  $\text{CO}_2$  在近地层大气中积累, 体积分数逐渐升高, 至日出前达到峰值, 日出后又逐渐下降, 但与北京、上海夏季以及杭州华家池春夏秋冬三季的观测结果不同<sup>[20, 24, 30]</sup>, 在晚高峰的 18:00 ~ 22:00 时段并未出现明显的体积分数次高峰, 这可能是由于杭州的城市规模比北京、上海小, 晚高峰期间的人为排放影响没有北京、上海显著, 并且本研究中的杭州城区站位于气象观测站内, 相对于杭州华家池观测站, 站点海拔高度更高, 站址周边更为开阔, 局地的扩散条件相对更好, 受到晚高峰期间人为活动排放的直接影响的相对更小, 因此未出现明显的晚高峰峰值; 在冬季, 城区  $\text{CO}_2$  体积分数亦在晚高峰时段出现明显峰值, 并一直持续到 22:00 才开始逐渐下降, 至凌晨 06:00 随着早高峰的到来, 体积分数又逐渐回升, 出现早高峰峰值, 与北京冬季、杭州华家池冬季的观测结果类似<sup>[20, 24]</sup>, 这可能是由于冬季整个杭州地区大气扩散条件均较差, 使得晚高峰期间的人为活动影响更为明显. 在远郊地区, 远离人口密集区, 受到人类活动的影响较小, 且大气扩散条件较好, 因此  $\text{CO}_2$  体积分数日变化在 4 个季节均表现为单峰型分布. 4 个季节的  $\text{CO}_2$  城郊体积分数差值在 08:00 ~ 10:00、17:00 ~ 20:00 均出现峰值, 反映出城区早、晚高峰排放对城市  $\text{CO}_2$  体积分数存在重要影响, 但与南京夏季城市中心-城市森林体积分数差值最大出现在 13:00 ~ 14:00 不同<sup>[15]</sup>, 这可能是由于南京地区的研究采样时间较短, 且两个采样点的距离较近. 可见, 在杭州城区和远郊地区, 植物光合作用/呼吸作用和

大气输送条件的日变化是影响  $\text{CO}_2$  体积分数日变化的主要因素, 人为排放对城郊  $\text{CO}_2$  体积分数差值的日变化分布存在重要影响.

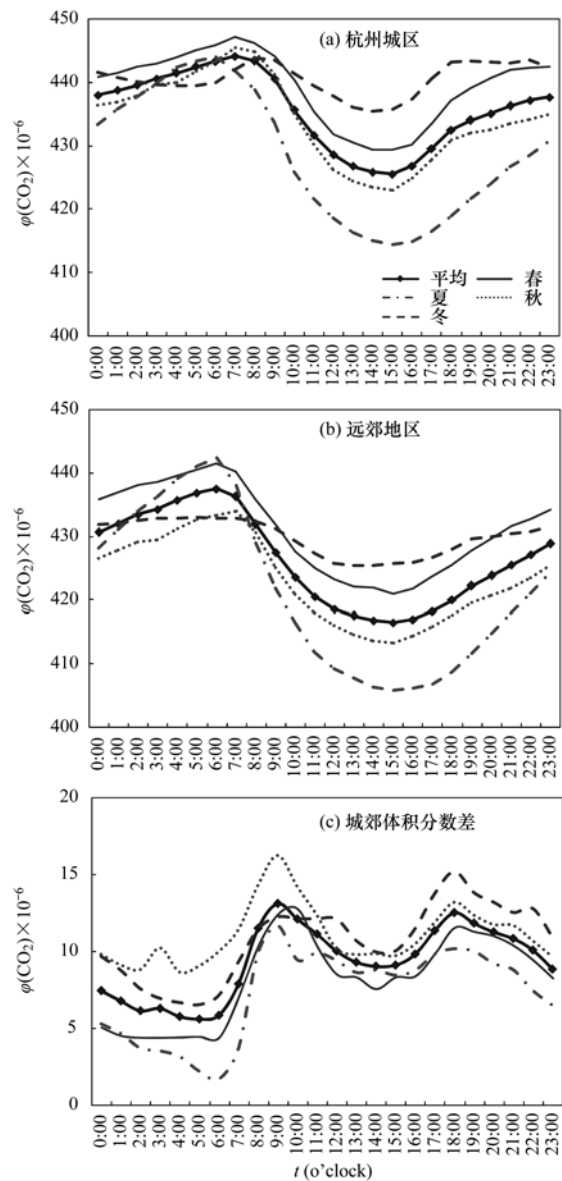


图 2 2015 年 8 月至 2016 年 7 月杭州城区、远郊地区  $\text{CO}_2$  体积分数的日变化分布

Fig. 2 Diurnal variation of  $\text{CO}_2$  concentration in both the urban and rural areas of Hangzhou from August 2015 to July 2016

杭州城区  $\text{CO}_2$  体积分数的日变化幅度春、夏、秋、冬四季依次为  $17.9 \times 10^{-6}$ 、 $29.7 \times 10^{-6}$ 、 $22.4 \times 10^{-6}$ 、 $8.4 \times 10^{-6}$ , 远郊地区则分别为  $20.4 \times 10^{-6}$ 、 $36.4 \times 10^{-6}$ 、 $20.7 \times 10^{-6}$ 、 $7.7 \times 10^{-6}$ , 即春夏两季远郊地区日变化幅度大于城区, 秋季反之, 冬季两者接近. 植被覆盖率是影响近地面  $\text{CO}_2$  体积分数的重要因素<sup>[4, 5, 21]</sup>, 远郊地区植被覆盖较好, 因此受到植物光合作用/呼吸作用日变化的影响更大, 春夏

季大部分植物进入生长期,尤其夏季植物生长旺盛,气温较高,白天对 CO<sub>2</sub> 的吸收作用更强,夜晚较强的呼吸作用则向大气释放出更多的 CO<sub>2</sub>,从而导致夏季远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数日变化幅度远大于城区;冬季,植物生长代谢减弱,对大气 CO<sub>2</sub> 的影响作用变小,因此城区和远郊地区的 CO<sub>2</sub> 体积分数日变化幅度均明显减小,但是在城区由于受到人为活动排放日变化的影响,CO<sub>2</sub> 体积分数日变化幅度略高于远郊地区。

## 2.2 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化

2015 年 8 月至 2016 年 7 月,杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化趋势基本一致(图 3),均表现为冬、春季高,夏季低,其中 11 月~次年 1 月、4 月较高,7~9 月较低,与北京城区、江西千烟洲、上甸子、龙凤山区域本底站等地的季节分布特征均较为相似,与地处偏远、远离人口稠密区的瓦里关全球本底站春季高、夏季低的特征不同<sup>[20, 25, 26]</sup>。杭州地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化主要受到 CO<sub>2</sub> 源汇和大气输送扩散条件的季节变化影响,11 月~次年 1 月,月日照总时数不足 100 h (图 4),不利于植物进行光合作用,导致 CO<sub>2</sub> 汇较

弱,且冬季气温较低,人为活动产生的 CO<sub>2</sub> 排放量增加,但大气扩散条件较差,导致 CO<sub>2</sub> 体积分数较高;2 月日照总时数明显升高,有利于植物进行光合作用,并且由于春节期间人为活动明显减弱,CO<sub>2</sub> 排放量减少,CO<sub>2</sub> 体积分数出现明显降低;3~4 月日照总时数逐月减少,CO<sub>2</sub> 体积分数又出现上升;5~9 月植物生长旺盛,大气扩散条件较好,且夏季受到海洋性气团的影响,CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐下降,8~9 月 CO<sub>2</sub> 体积分数达到全年最低。

杭州城区 CO<sub>2</sub> 体积分数各月均明显高于远郊地区,与南京、上海、厦门等地区的研究结果一致<sup>[5, 15, 21, 27, 28]</sup>,春、夏、秋、冬四季城郊体积分数差值分别为  $8.5 \times 10^{-6}$ 、 $7.3 \times 10^{-6}$ 、 $9.2 \times 10^{-6}$ 、 $10.7 \times 10^{-6}$ ,同期城区 AQI 比远郊地区分别偏高 7.3、19.1、10.5、11.8。夏季城区污染以二次污染物 O<sub>3</sub> 为主,使得城郊 AQI 差值较大,但 CO<sub>2</sub> 体积分数差值较小;在其余 3 个季节中,CO<sub>2</sub> 体积分数城郊差值与 AQI 差值呈现正相关。可见,城区与远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的差异与空气污染的季节差异较为一致,均是由城区较大的人为源排放和相对较差的大气扩散条件所致。全年杭州城区 CO<sub>2</sub> 平均体积分数比远郊地区高  $9.3 \times 10^{-6}$ ,远小于上海地区的城郊体积分数差<sup>[5, 21]</sup>,与厦门地区的观测结果接近<sup>[27]</sup>,这可能是由于杭州、厦门的城市规模比上海小,因此城市对大气 CO<sub>2</sub> 的影响程度亦相对较小。

## 2.3 风对城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响

由图 5 中 CO<sub>2</sub> 体积分数随风速风向的分布来看,在杭州城区,当风速低于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,CO<sub>2</sub> 体积分数较高;风速大于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,偏西风方向上的体积分数较低,偏北风方向上的体积分数较高。城区站西部为西湖风景区,植被覆盖良好,人为活动相对较少,因此体积分数相对较低;在站点北部主要是

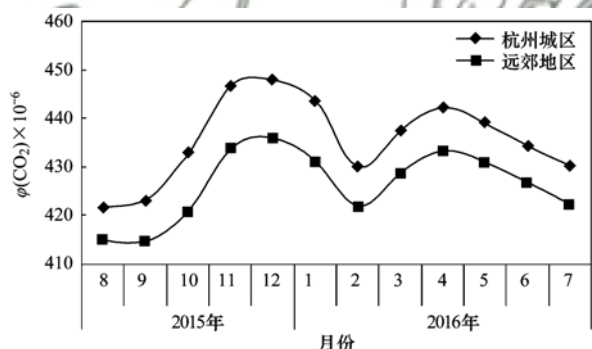


图 3 2015 年 8 月至 2016 年 7 月杭州地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的月际分布

Fig. 3 Monthly variation of CO<sub>2</sub> concentration in both the urban and rural areas of Hangzhou from August 2015 to July 2016

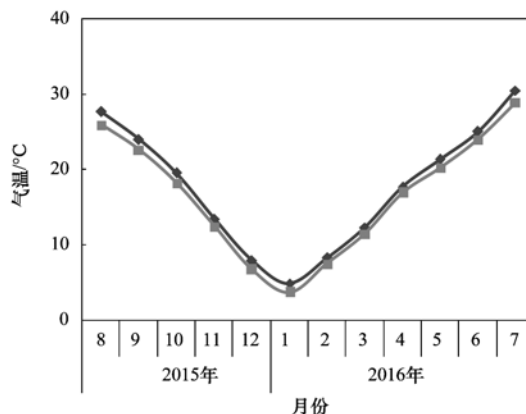
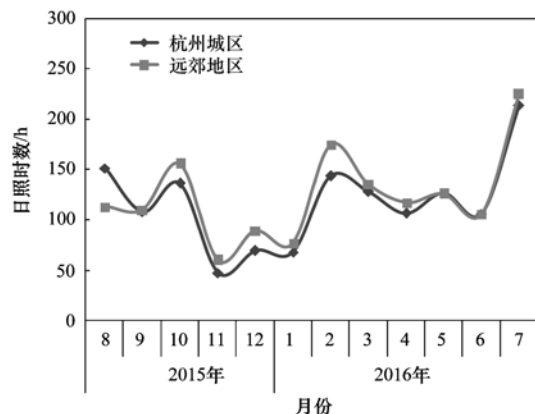


图 4 2015 年 8 月至 2016 年 7 月杭州地区日照时数和气温的月际分布

Fig. 4 Monthly amount of sunshine and air temperature in Hangzhou from August 2015 to July 2016

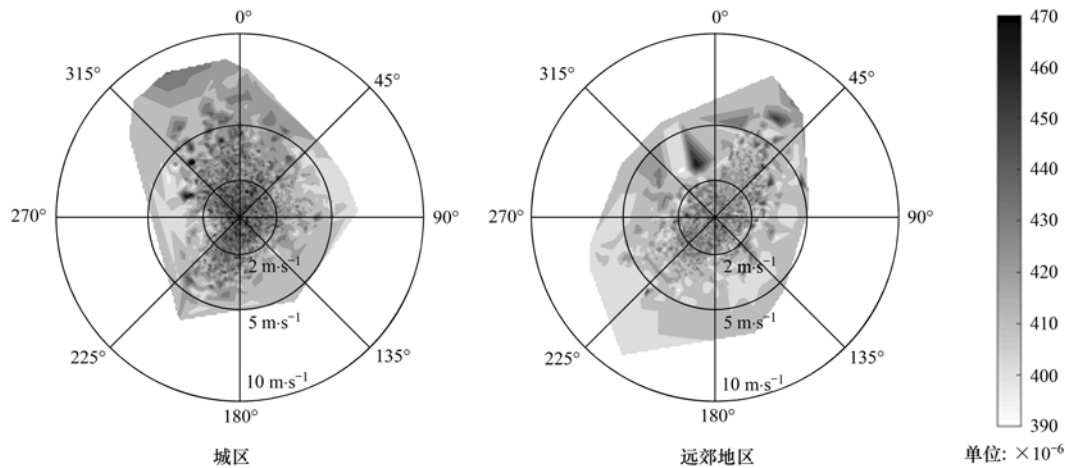


图5 2015年8月至2016年7月杭州城区、远郊地区CO<sub>2</sub>体积分数随风速风向的分布

Fig. 5 Relationship between CO<sub>2</sub> concentration and wind direction and speed in Hangzhou from August 2015 to July 2016

杭州城区,人口密集,植被覆盖相对较少,因此多出现高体积分数分布;偏东、偏南风向上虽然亦为杭州主城区,但是受到钱塘江的影响,CO<sub>2</sub>体积分数值低于偏北风向。在远郊地区,风速在2 m·s<sup>-1</sup>以下时,CO<sub>2</sub>体积分数亦较高;当风速较大时,CO<sub>2</sub>高值主要分布在偏北、东北风向上,与远郊站周边的大城市分布方向一致。可见,在杭州城区和远郊地区,当风速较低时,大气扩散条件较差,易造成CO<sub>2</sub>累积,体积分数值较高;当风速较大时,大气输送条件较好,周边城市分布和人为活动的影响较大,这与厦门、江西千烟洲地区的观测结果一致<sup>[22, 25]</sup>。

#### 2.4 城郊CO<sub>2</sub>体积分数的周末效应

2015年8月至2016年7月,杭州城区工作日的日均CO<sub>2</sub>体积分数为435.5 × 10<sup>-6</sup>,略高于周末日均值434.5 × 10<sup>-6</sup>;远郊地区工作日的日均值为426.4 × 10<sup>-6</sup>,亦略高于周末日均值425.2 × 10<sup>-6</sup>;城郊CO<sub>2</sub>体积分数差值在工作日与周末时段接近。全球大部分城市的研究结果显示<sup>[4, 6, 31~34]</sup>,机动车排放是城区CO<sub>2</sub>的重要来源,因为CO<sub>2</sub>通量的峰值

与工作日的交通流量峰值对应,而周末则会出现明显的削减。在杭州地区,城郊CO<sub>2</sub>体积分数差值在工作日早晚高峰期间出现的峰值在周末时段亦出现削减(见图6);且在杭州城区,工作日的道路拥堵指数为5.0,高于周末的拥堵指数2.7(<http://www.hzjtydzs.cn/web/>),这可能导致工作日的机动车排放量亦高于周末,但是根据EDGARv4.2 2010年源排放清单<sup>[35]</sup>,杭州市区道路机动车源在总CO<sub>2</sub>排放中的占比仅为0.33%,因此对CO<sub>2</sub>体积分数的影响较小,工作日的日均CO<sub>2</sub>体积分数仅略高于周末时段。在日变化分布上,周末城区CO<sub>2</sub>体积分数总体上均低于工作日,仅在11:00~16:00周末高于工作日;远郊地区的CO<sub>2</sub>体积分数亦呈现类似的分布状况,但11:00~16:00周末体积分数值仅略高于工作日(见图6)。与杭州市区的交通指数日变化相对应,在11:00~16:00时段,周末市区交通拥堵程度要大于工作日,即该时段内的人为活动在周末有所增强,人为排放增加,导致该时段CO<sub>2</sub>体积分数周末大于工作日;在远郊地区,由于距离较远,人为活

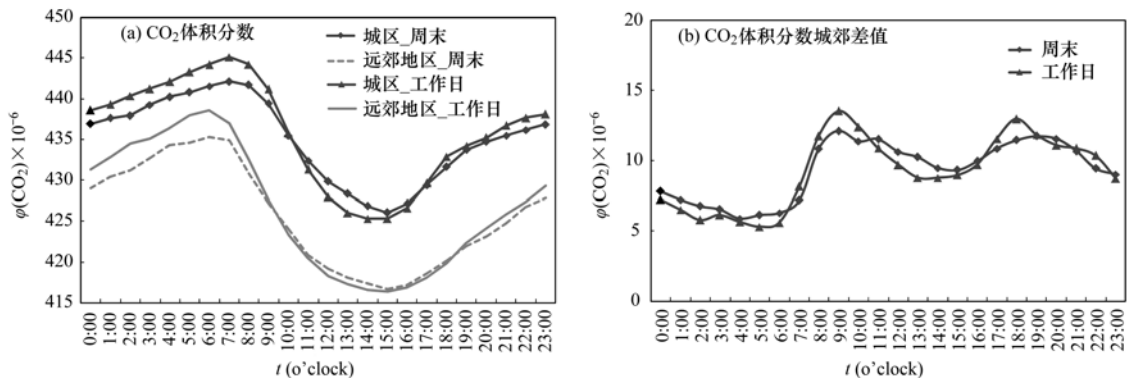


图6 CO<sub>2</sub>体积分数在周末与工作日的日变化分布

Fig. 6 Diurnal variation of CO<sub>2</sub> concentration for weekdays and weekends

动的影响明显减弱。此外,城区 CO<sub>2</sub> 体积分数日最高值在工作日比远郊地区推后 1 h 出现,与市区交通早高峰出现的时间几乎吻合。这可能是由于远郊地区受到植物光合作用/呼吸作用和大气输送条件的日变化影响,在 06:00~07:00 出现体积分数日最大值,在城区由于早高峰期间人为活动的增强,增加了 CO<sub>2</sub> 的排放量,因此 07:00~08:00 时段内 CO<sub>2</sub> 体积分数仍然在增长。可见,在杭州地区, CO<sub>2</sub> 体积分数分布存在一定程度的周末效应。

## 2.5 G20 峰会期间的 CO<sub>2</sub> 体积分数分布

为进一步了解城市地区人为源排放对 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响程度,选取 2016 年杭州 G20 峰会期间的 CO<sub>2</sub> 体积分数进行分析。G20 期间,杭州从 8 月 28 日 00:00 至 9 月 6 日 24:00 采取临时交通管制,全市工厂停产放假,人口大量外出,人为活动明

显减少。由图 7 可知,2016 年 8 月 27 日至 9 月 6 日,杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数均较 2015 年同期出现明显下降,降幅分别达到  $15.6 \times 10^{-6}$ 、 $9.6 \times 10^{-6}$ ,且城区 CO<sub>2</sub> 体积分数比远郊地区仅偏高  $2.9 \times 10^{-6}$ ,小于 2015 年同期的城郊差值  $8.9 \times 10^{-6}$ ; 9 月 7~10 日,随着交通逐渐恢复,工厂复产,人口集中回流,人为活动明显增加,杭州城区 CO<sub>2</sub> 体积分数均较 2015 年同期上升约  $17 \times 10^{-6}$ ; 9 月 11 日之后人为活动恢复常态,与 8 月 11~26 日 G20 峰会前类似,杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数与 2015 年同期差值均在  $2 \times 10^{-6}$  以内。可见,与北京奥运、南京青奥期间采取交通管制、节能减排措施的结果类似<sup>[2, 19, 36]</sup>,人类活动的减弱,可以有效地减少人为 CO<sub>2</sub> 排放,降低大气 CO<sub>2</sub> 体积分数,尤其是对城区 CO<sub>2</sub> 体积分数的削减效果更为明显。

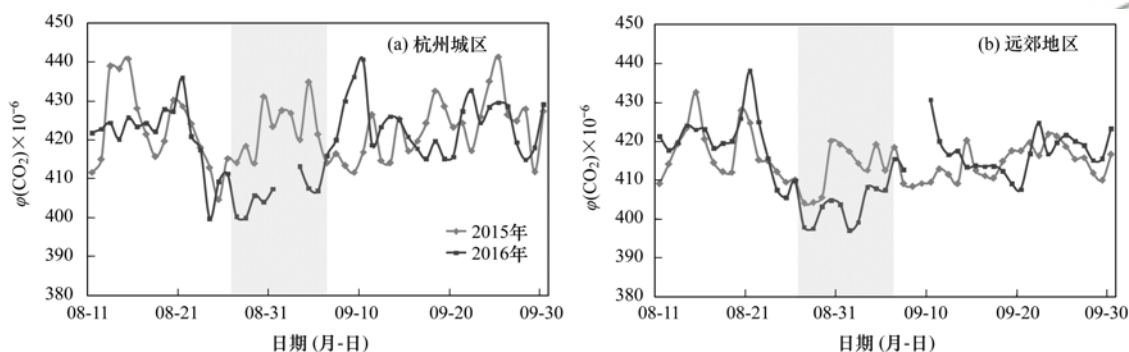


图 7 2015、2016 年 8 月 11 日至 9 月 30 日杭州地区 CO<sub>2</sub> 日均体积分数分布

Fig. 7 Daily concentration of CO<sub>2</sub> in Hangzhou during the period of August 11 to September 30 in 2015 and 2016

## 3 结论

(1) 通过分析 2015 年 8 月至 2016 年 9 月杭州城区、远郊地区在线观测 CO<sub>2</sub> 体积分数,发现杭州城郊 CO<sub>2</sub> 体积分数的日变化分布形态在春、夏、秋 3 个季节基本一致,在冬季则明显不同,城区表现为双峰型形态,远郊地区仍为单峰型形态; 4 个季节 CO<sub>2</sub> 城郊体积分数差值均为双峰型分布。

(2) 杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化趋势一致,均表现为冬、春季高,夏季低。4 个季节杭州城区 CO<sub>2</sub> 体积分数均明显高于远郊地区, CO<sub>2</sub> 城郊体积分数差值冬季最高,夏季最低,全年平均偏高  $9.3 \times 10^{-6}$ 。

(3) 杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数高值的输送方向与周边城市区域的分布方向一致。杭州城区、远郊地区 CO<sub>2</sub> 体积分数均呈现周末效应,且城区 CO<sub>2</sub> 体积分数日变化分布的周末效应比远郊更明显。

(4) G20 峰会期间的交通管制、节能减排等措施有效减少 CO<sub>2</sub> 人为源排放,降低大气 CO<sub>2</sub> 体积分数,尤其是对杭州城区的削减效果更为明显。

致谢: 感谢浙江省气象局临安区域大气本底站为本研究提供观测数据。

## 参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. WMO greenhouse gas bulletin [EB/OL]. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/GHGbulletin.html>, 2016-10-24.
- [2] 徐家平, 李旭辉, 肖薇, 等. 青奥会期间基于  $\delta^{13}\text{C}$  观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4514-4523.  
Xu J P, Li X H, Xiao W, et al.  $^{13}\text{C}$ -based sources partitioning of atmospheric CO<sub>2</sub> during Youth Olympic Games, Nanjing [J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4514-4523.
- [3] Ciais P, Sabine C, Bala G, et al. Carbon and other biogeochemical cycles[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al (Eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

- [4] Bergeron O, Strachan I B. CO<sub>2</sub> sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(8): 1564-1573.
- [5] 潘晨, 朱希扬, 贾文晓, 等. 上海市近地面 CO<sub>2</sub> 浓度及其与下垫面特征的定量关系[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(7): 2123-2130.  
Pan C, Zhu X Y, Jia W X, *et al.* Near surface CO<sub>2</sub> concentration and its quantitative relationship with character of underlying surface in Shanghai City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 2123-2130.
- [6] 窦军霞, 刘伟东, 苗世光, 等. 北京城郊地区二氧化碳通量特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(15): 5228-5238.  
Dou J X, Liu W D, Miao S G, *et al.* Carbon dioxide fluxes in a suburban area of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(15): 5228-5238.
- [7] Ward H C, Kotthaus S, Grimmond C S B, *et al.* Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **198**: 186-200.
- [8] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2016-towards sustainable urban energy systems [EB/OL]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/>, 2016-06-01.
- [9] Rosenzweig C, Solecki W, Hammer S A, *et al.* Cities lead the way in climate-change action[J]. *Nature*, 2010, **467**(7318): 909-911.
- [10] George K, Ziska L H, Bunce J A, *et al.* Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature across an urban-rural transect[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(35): 7654-7665.
- [11] Kilkki J, Aalto T, Hatakka J, *et al.* Atmospheric CO<sub>2</sub> observations at Finnish urban and rural sites[J]. *Boreal Environment Research*, 2015, **20**(2): 227-242.
- [12] Briber B M, Hutrya L R, Dunn A L, *et al.* Variations in atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratios across a Boston, MA urban to rural gradient[J]. *Land*, 2013, **2**(3): 304-327.
- [13] Hutrya L R, Duren R, Gurney K R, *et al.* Urbanization and the carbon cycle: current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective[J]. *Earth's Future*, 2014, **2**(10): 473-495.
- [14] Pan C, Zhu X Y, Wei N, *et al.* Spatial variability of daytime CO<sub>2</sub> concentration with landscape structure across urbanization gradients, Shanghai, China[J]. *Climate Research*, 2016, **69**(2): 107-116.
- [15] 赵德华, 欧阳琰, 齐家国, 等. 夏季南京市中心-郊区-城市森林梯度上的近地层大气特征[J]. *生态学报*, 2009, **29**(12): 6654-6663.  
Zhao D H, Ouyang Y, Qi J G, *et al.* Near-surface atmospheric properties along an urban center-suburban-urban forest gradient in summer in Nanjing City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(12): 6654-6663.
- [16] Jacobson M Z. Enhancement of local air pollution by urban CO<sub>2</sub> domes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2497-2502.
- [17] Kumar M K, Nagendra S M S. Characteristics of ground level CO<sub>2</sub> concentrations over contrasting land uses in a tropical urban environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 286-294.
- [18] Ru M Y, Tao S, Smith K, *et al.* Direct energy consumption associated emissions by rural-to-urban migrants in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(22): 13708-13715.
- [19] 夏玲君, 周凌晞, 刘立新, 等. 北京上甸子站大气 CO<sub>2</sub> 及  $\delta^{13}\text{C}$ (CO<sub>2</sub>) 本底变化[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1248-1255.  
Xia L J, Zhou L X, Liu L X, *et al.* Monitoring atmospheric CO<sub>2</sub> and  $\delta^{13}\text{C}$ (CO<sub>2</sub>) background levels at Shangdianzi Station in Beijing, China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1248-1255.
- [20] 刘晓曼, 程雪玲, 胡非. 北京城区二氧化碳浓度和通量的梯度变化特征——I 浓度与虚温[J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(5): 1502-1512.  
Liu X M, Cheng X L, Hu F. Gradient characteristics of CO<sub>2</sub> concentration and flux in Beijing urban area part I: concentration and virtual temperature[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(5): 1502-1512.
- [21] 朱希扬, 潘晨, 刘敏, 等. 上海春季近地面大气 CO<sub>2</sub> 浓度空间分布特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(9): 1443-1450.  
Zhu X Y, Pan C, Liu M, *et al.* Spatial characteristics of near surface CO<sub>2</sub> concentration and analysis on its influencing factors in spring in Shanghai City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(9): 1443-1450.
- [22] 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 等. 厦门秋季近郊地面 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 2018-2024.  
Li Y L, Mu C, Deng J J, *et al.* Near surface atmospheric CO<sub>2</sub> variations in autumn at suburban Xiamen, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 2018-2024.
- [23] 高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 等. 南京夏季城市冠层大气 CO<sub>2</sub> 浓度时空分布规律的观测[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2367-2373.  
Gao Y Q, Liu S D, Hu N, *et al.* Direct observation on the temporal and spatial patterns of the CO<sub>2</sub> concentration in the atmospheric of Nanjing urban canyon in summer[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2367-2373.
- [24] 陈超, 杨乐, 徐鸿, 等. 杭州市主要温室气体浓度变化特征[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(1): 69-72, 96.  
Chen C, Yang L, Xu H, *et al.* Concentration variety characteristics of main greenhouse gases in Hangzhou[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, **36**(1): 69-72, 96.
- [25] 谭鑫, 朱新胜, 谢旻, 等. 江西千烟洲区域大气二氧化碳浓度观测研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(6): 859-865.  
Tan X, Zhu X S, Xie M, *et al.* Monitoring of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere over Qianyanzhou Area, Jiangxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(6): 859-865.
- [26] 方双喜, 周凌晞, 臧昆鹏, 等. 光腔衰荡光谱(CRDS)法观测我国4个本底站大气 CO<sub>2</sub>[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 624-629.  
Fang S X, Zhou L X, Zang K P, *et al.* Measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratio by cavity ring-down spectroscopy (CRDS) at the 4 background stations in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(3): 624-629.
- [27] 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 等. 移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO<sub>2</sub> 的时空分布[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1671-1679.

- Li Y L, Xing Z Y, Mu C, *et al.* Spatial and temporal variations of near surface atmospheric CO<sub>2</sub> with mobile measurements in fall and spring in Xiamen, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1671-1679.
- [28] Liu M, Zhu X Y, Pan C, *et al.* Spatial variation of near-surface CO<sub>2</sub> concentration during spring in Shanghai [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(1): 31-39.
- [29] 杭州市统计局. 2016 年杭州统计年鉴[EB/OL]. <http://tjj.hangzhou.gov.cn/>, 2016-09-23.
- [30] 高松. 夏季上海城区大气中二氧化碳浓度特征及相关因素分析[J]. *中国环境监测*, 2011, **27**(2): 70-76.  
Gao S. Analysis of characteristics and affecting factors of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in urban area in summer, Shanghai [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, **27**(2): 70-76.
- [31] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **106**: 139-149.
- [32] Liu H Z, Feng J W, Järvi L, *et al.* Four-year (2006-2009) eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> flux over an urban area in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(17): 7881-7892.
- [33] Crawford B, Grimmond C S B, Christen A. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(4): 896-905.
- [34] Lietzke B, Vogt R. Variability of CO<sub>2</sub> concentrations and fluxes in and above an urban street canyon [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 60-72.
- [35] European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.2 FT2010 [EB/OL]. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42FT2010>, 2013-10.
- [36] Worden H M, Cheng Y F, Pfister G, *et al.* Satellite-based estimates of reduced CO and CO<sub>2</sub> emissions due to traffic restrictions during the 2008 Beijing Olympics [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(14): L14802.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                  |                                                                |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial-Temporal Change Evolution of PM <sub>2.5</sub> in Typical Regions of China in Recent 20 Years                                                                            | LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>                | (3003) |
| Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM <sub>2.5</sub> Particulate in Xi'an City                                                                                     | WEI Guo-ru, SHI Xing-min                                       | (3014) |
| Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province                                                                         | JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le                                  | (3022) |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM <sub>2.5</sub> During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing                                              | XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>                   | (3033) |
| Comparison of Chemical Components Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an                                                | LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>     | (3042) |
| Characteristics and Sources of Carbon Components in PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Panjin City                                                                    | ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>                 | (3051) |
| Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing                                                                                   | HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun                             | (3057) |
| Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer                                                       | LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>               | (3067) |
| Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China                                                                             | YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>           | (3075) |
| Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in Hangzhou                                                                                   | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>         | (3082) |
| Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources                                                                      | JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>        | (3090) |
| Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City                               | HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can                                | (3096) |
| Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production                                                                        | GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3102) |
| Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles                                                                                                      | HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun                               | (3110) |
| Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing                                                                                      | TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> | (3118) |
| Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China                                                             | SHI Dong-qi, LU Xin-wei                                        | (3126) |
| pCO <sub>2</sub> in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors                                                                                    | LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue                              | (3134) |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River                                                                        | KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>                 | (3142) |
| Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems                                                                                                                 | LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>           | (3150) |
| Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai                                      | YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>             | (3158) |
| Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake                                                                      | LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>           | (3168) |
| Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface                                                                                              | WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>         | (3179) |
| Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland                                                       | XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>           | (3187) |
| Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone                                                                       | ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>        | (3194) |
| Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate                                                                        | LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>             | (3203) |
| Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets                                                                                  | KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>                   | (3212) |
| Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter                                                                  | CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>          | (3222) |
| Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing                                                         | ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>            | (3230) |
| Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell                                               | LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>           | (3240) |
| COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations                                                                       | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>            | (3247) |
| Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor                                                                  | ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>              | (3254) |
| Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor                                          | FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>          | (3262) |
| Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration                                                                                 | GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>                | (3271) |
| Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing                                                                                      | HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>                  | (3279) |
| Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion                                  | SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang                         | (3286) |
| Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process                          | ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>            | (3297) |
| Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge                                                                                     | SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping                           | (3306) |
| Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97                                         | CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>                    | (3314) |
| Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil                        | ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>             | (3321) |
| Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site                                                                                                           | CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>                 | (3329) |
| Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam                                                 | WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>           | (3339) |
| Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi                                                                    | GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>             | (3349) |
| Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City                                                                                                 | YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>           | (3358) |
| Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain                                                                                   | LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>            | (3365) |
| Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin | ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>            | (3373) |
| Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin                              | AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>               | (3382) |
| Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil                                                                                   | TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>     | (3391) |
| Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings                                                                                                        | ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>                 | (3400) |
| Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland                                 | HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>         | (3409) |
| Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China                                                                                | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>                 | (3418) |
| Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors                                                | CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>                 | (3426) |
| Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces                                                                                                          | SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian                         | (3434) |
| Effect of COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues                                                                        | QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu                             | (3443) |
| Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application                                                                                              | HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>           | (3452) |
| Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure                       | PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>           | (3460) |