

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征

刘鹏, 张国庆, 王剑琼, 吴昊, 李宝鑫, 王宁章

(青海省气象局, 中国大气本底基准观测台, 西宁 810001)

摘要: 于2009~2010对瓦里关山大气二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)进行了连续观测. 结果表明, 瓦里关山夏季频繁受到区域排放的影响, 大约17%的 CO_2 浓度标识为污染浓度. 2009~2010年 CO_2 平均浓度 390.72×10^{-6} , 较1995~2008年高 17.4×10^{-6} ; 2009~2010年 CH_4 中位浓度为 1851.11×10^{-9} , 较2002~2006年高 16×10^{-9} , 意味着区域内 CO_2 和 CH_4 的排放仍在不断增加. 利用遗传算法改进的神经网络模型插补数据获得了完整的空气温度、风速、 CO_2 和 CH_4 浓度时间序列, 并对时间序列展开了傅立叶分析. 在天时间尺度, 由于太阳活动的逐日变化, 气象因子、 CO_2 和 CH_4 功率谱在24 h和12 h有着非常明显的谱峰. 在月时间尺度, CO_2 浓度在30 d的周期内有明显的谱隙, 意味着气象和物候因素在这个时间尺度上对 CO_2 浓度的影响并不明显.

关键词: 二氧化碳; 甲烷; 傅立叶分析; 功率谱; 瓦里关

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3256-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.003

Temporal Variation of Background Atmospheric CO_2 and CH_4 at Mount Waliguan, China

LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, WU Hao, LI Bao-xin, WANG Ning-zhang

(Chinese Global Atmosphere Watch Baseline Observatory, Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001, China)

Abstract: In this paper, the continuous (2009-2010) measurement of atmospheric CO_2 and CH_4 from the Mount Waliguan Baseline Observatory of Western China are presented. The results show that about 17% of CO_2 observations are classified as polluted due to more frequently influence of regional emission on local measurement in summer time. The mean concentration of CO_2 measured at the period of 2009 to 2010 was 390.72×10^{-6} which was 17.4×10^{-6} higher than that measured from 1995 to 2008, and the median concentration of CH_4 was 1851.11×10^{-9} which was 16×10^{-9} higher than that from 2002 to 2006, which implied that the regional emission of CO_2 and CH_4 was continuously increased. The unavailable data were filled by back propagation neural network (BPNN) and optimized by genetic algorithm (GA), which were analyzed by the Fourier analysis of time series of air temperature, wind speed, concentration of CO_2 and CH_4 . At the daily time scale, strong spectrum peak occurred and concentration recorded at periods of 12 and 24 hours, due to the daily sun activity changes. At the monthly time scale, the spectrum gap occurred in CO_2 concentration at periods of 30 day suggesting that the effect of meteorological and phenological factors on the variation of CO_2 concentration was insignificant.

Key words: carbon dioxide; methane; Fourier analysis; power spectrum; Waliguan

二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)作为主要的温室气体是《京都议定书》规定需要减排的气体之一. 政府间气候变化委员会报告指出: 过去100年, 由于人类活动(如: 化石燃料使用、土地利用、农业生产)等影响, 大气中许多温室效应气体浓度急剧上升, 其中最主要的当属 CO_2 .

大气本底研究一般针对较大尺度范围内大气物理化学性质的平均状况及长期变化, 各国有关学者自20世纪50年代末开始了温室气体本底浓度的监测与研究, 并相继在全球不同经纬度地区建立本底监测站网^[1]. 我国青海瓦里关自1994年开始大气 CO_2 和 CH_4 的连续在线观测, 长期连续的观测为了解我国温室气体长期变化趋势提供了可能^[2]. 基于早期观测数据, Zhou等^[3~5]分析了瓦里关1994~2000年间大气 CO_2 浓度的季节和长期趋势以及年

度和年际间变化特征, 此外Zhou等^[3,4]分析了风向对本底 CO_2 浓度的影响, 并且通过风场资料过滤了受外来高浓度气体影响的 CO_2 浓度资料. 近年来瓦里关的 CO_2 浓度数据根据新的WMO×2007方案^[6]进行了校正, Zhang等^[7]利用校正的数据集分析了1995~2008年的本底 CO_2 浓度变化特征, 并且对比两种数据处理方法的差异; 通过上述观测Zhang等^[7]估计了区域的 CO_2 排放的年均增长率为 $3.9\% \cdot \text{a}^{-1}$ (1995~2008年)并在2000年后呈现出加速增长的趋势($6.2\% \cdot \text{a}^{-1}$). 早期的瓦里关大气 CH_4 浓度的研究集中在本底浓度变化特征分析,

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 青海省气象局气象科学研究技术项目; 中国气象局气候变化专项(CCSF201324)

作者简介: 刘鹏(1978~), 男, 工程师, 主要研究方向为大气成分及温室气体, E-mail: liupeng_wlg@163.com

Zhou 等^[8]和周凌晔等^[9]发现瓦里关大气 CH_4 在冬季和夏季受人为源传输的影响呈现明显的波动. 利用提出的局部近似回归法^[10], 张芳等^[11]对 2002 ~ 2006 年瓦里关大气 CH_4 时间序列本底值进行了筛分, 将时间序列区分为本底浓度、污染浓度和吸收汇浓度, 阐明了瓦里关大气 CH_4 受到较强的局地源或者汇的影响.

本研究拟利用瓦里关站 2009 ~ 2010 年大气 CO_2 和 CH_4 连续在线观测资料, 分析瓦里关大气温室气体本底浓度、污染浓度等的时间序列变化, 并与先前的观测相比较, 揭示其现在的变化范围, 以期对温室源汇反演估算提供新的数据集. 此外通过谱分析技术, 讨论在人为活动不断加强的条件下, 瓦里关大气温室气体周期变化特征.

1 材料与方法

1.1 采样站位及采样时间

瓦里关全球本底站(36°17'N, 100°55'E, 海拔高度 3 816 m)是全球大气观测站网 27 个全球本底站之一(WDCGG, 2010), 也是目前欧亚大陆腹地唯一的大陆型全球本底站. 瓦里关全球本底站地处青海省海南藏族自治州共和县境内瓦里关山顶, 瓦里关山呈西北-东南走向, 与山底的相对高差约 600 m^[11]. 瓦里关山及周围地区自然环境以高原草甸和沙洲居多, 全区以牧业为主. 瓦里关站位于亚洲大陆腹地, 具明显的高原大陆性气候, 受高海拔条件制约, 气温较低. 瓦里关站点具有高海拔和大地形特点, 因此观测结果代表了大尺度混合均匀的自由对流层大气季节性变化信息^[12], 可反映出欧亚大陆重要的源汇信息^[4,5]. 对瓦里关站点的地形、地貌以及气候信息的详细描述可参见文献[3,11].

1.2 测定方法

瓦里关山大气 CO_2 、 CH_4 浓度测量由美国 Picarro 公司生产的 G1301 型 $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪测量, 该仪器以 ppbv 级的超高灵敏度测量大气中 CO_2/CH_4 的浓度. 该设备采用独一无二的波长扫描光腔衰荡光谱(WS-CRDS)技术, 通过高精度特定识别的传感器测量有效路径可达 20 km 的激光衰荡时间差. 专利的高精度波长监视器确保了只有特定的吸收光谱可以被监测到, 这大大减少了分析仪对干扰气体的灵敏度, 从而确保在混合气体中超痕量测量, 与早期应用在瓦里关的气相色谱法^[13]相比, 该系统精度较高, 分析迅速, 无需众多支持气, 操作维护非常简便^[14]. 其系统的采样口设在瓦里关 89

m 采样塔的 80 m(CO_2 、 CH_4)高度处. 有关该系统构成、运行、国际国内标定和比对、测量精度、数据处理及质量控制等的描述参见文献[7,15]. 整个 2009 ~ 2010 年观测期内, 由于仪器故障, 站点修缮停机以及标定等原因, CO_2 和 CH_4 的数据获取率分别为 83% 和 82%.

2 结果与讨论

2.1 大气 CO_2 和 CH_4 的时间序列变化

大气本底观测反映的是大气混合均匀状态下, 不受区域或局地污染源影响时所观测的气体的浓度值, 可反映其长期变化趋势和季节变化特征. 但是多数本地观测站经常受到局地或者区域源排放的影响^[10], 这时观测的结果不能很好地代表本底大气的状况. 因此对长时间序列的资料进行本底值的筛分是本底大气观测分析的重要工作. 通过采用非线性二次叠加谐波变换拟合, 将远离拟合曲线(残差较大值)的观测值过滤掉, 反复逼近回归, 保留的值即区分为具本底特征的值, 而过滤掉的值为非本底值^[7,10]. 本研究将局部近似回归法(robust estimation of background signal, REBS)应用到瓦里关大气 CO_2 和 CH_4 时间序列本底值筛分研究中, 其中 REBS 算法及 R 语言程序包下载可参见文献[10,16]. 图 1 显示的是采用 REBS 方法筛分后的 CO_2 和 CH_4 浓度时间序列(2009 ~ 2010 年). 可以看出, 瓦里关站点大气 CH_4 频繁受到局地或者区域排放源的影响, 而且这种影响没有明显的季节变化, 各个季节污染气体浓度比例相互可比[图 1(b)], 春、夏、秋和冬季污染浓度占各自季节有效观测数据的比例在 28% ~ 33%. 夏季明显增加 CH_4 排放源(局地放牧强度的加强); 主导风向上人为活动所释放 CH_4 的长程输送^[11]使得污染浓度在夏季最高(1.9×10^{-9}). 与 CH_4 不同, CO_2 污染浓度的比例在夏季最高, 占季节有效观测数据的 17%, 而在冬、春和秋季, 其比例均小于 10%, 考虑到任意时刻所观测的 CH_4 与 CO_2 均来自同一流场, 两种气体污染浓度所占比例的不同说明其排放源有着各自不同的空间分布. 总体上, 整个观测期内 CO_2 和 CH_4 的本底浓度占有效观测数据的比例分别为 87% 和 54%(表 1), 其中 CH_4 本底浓度比例略低于 2002 ~ 2006 年的 58%^[11], 说明这一时期受外来排放源的影响没有明显变化. 然而值得注意的是, 尽管较以前受外来排放源影响次数减少, 但是瓦里关站 CH_4 本底浓度却明显增加, 其中位浓度较 2002 ~ 2006 年的

$1\,831.8 \times 10^{-9}$ 高 16×10^{-9} ^[11],考虑到瓦里关站点能够反映出欧亚大陆的源汇信息^[4,5],此结果暗示着区域尺度的 CH₄ 排放强度在不断增加. 类似的,区域尺度 CO₂ 排放强度的增加也可以从与早期的观测对比中看出,采用与本研究一致的数据处理方法,Zhang 等^[17]报道了 1995~2008 年平均浓度为 373.3×10^{-6} ,较本研究(2009~2010 年)低 17.4×10^{-6} . 这种排放强度不断增加的趋势还

可以从 2009 和 2010 年 CO₂ 污染浓度在夏季的差异看出[图 1(a)];夏季站点 CO₂ 浓度受东南方向西宁和兰州等城市区域人类活动的排放影响最大^[17],当 2009 和 2010 年夏季东南方向的气流占总来流的比例基本一致的情况下(2009 和 2010 年分别为 34.4% 和 34.0%),2 年间源于此方向的夏季大气 CO₂ 平均污染浓度分别为 393×10^{-6} 和 398×10^{-6} ,2010 较 2009 年增加了 5×10^{-6} .

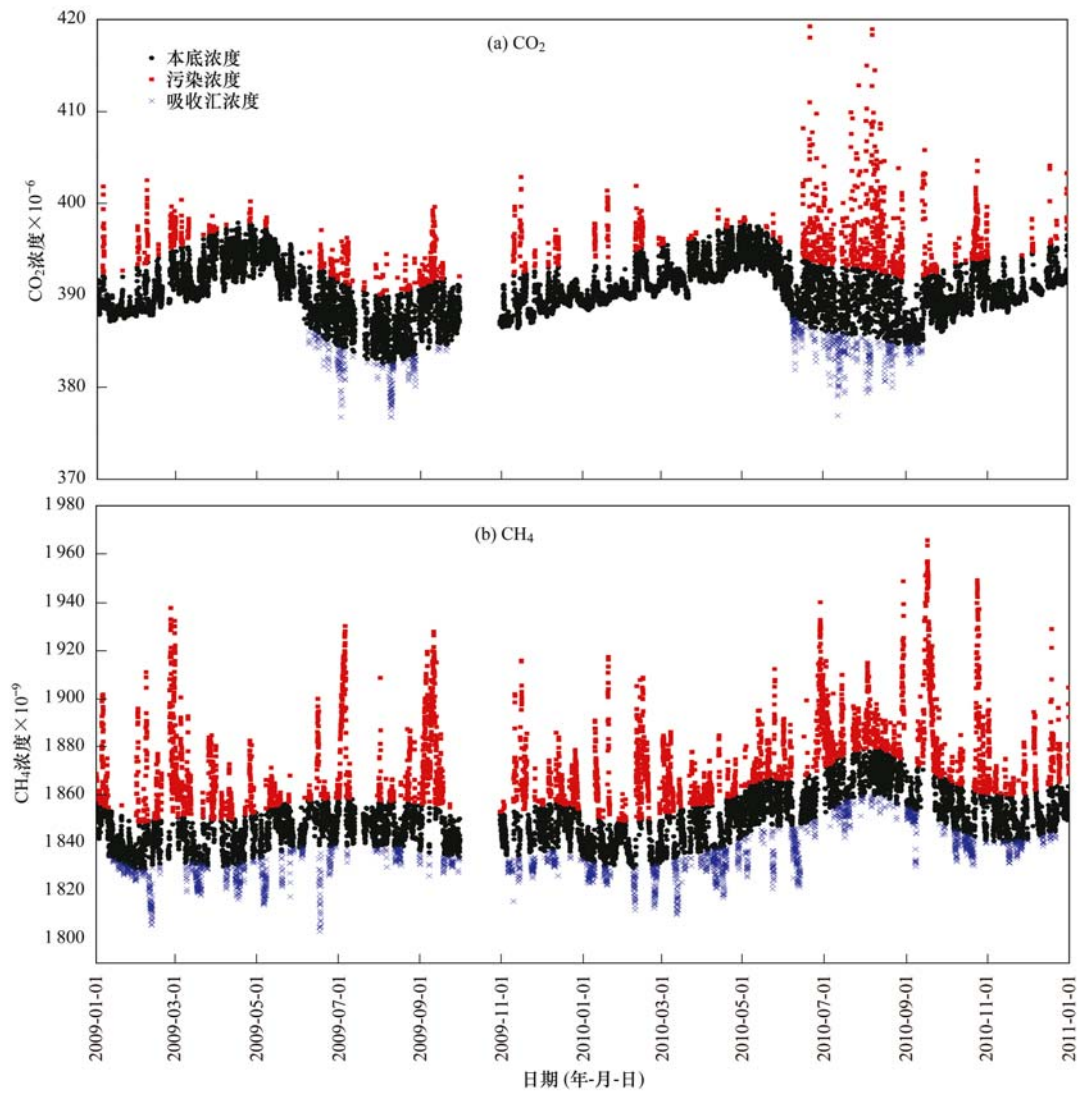


图 1 瓦里关大气 CO₂ 和 CH₄ 时间序列

Fig. 1 Time series of CO₂ and CH₄ concentrations measured at Mount Waliguan during 2009 and 2010

表 1 观测期内 CO₂ 和 CH₄ 不同浓度构成的比较

Table 1 Comparison among background, polluted and uptake CO₂ and CH₄ concentrations during the measurement period

项目	CO ₂			CH ₄		
	比例/%	中位浓度 $\times 10^{-6}$	平均浓度 $\times 10^{-6}$	比例/%	中位浓度 $\times 10^{-9}$	平均浓度 $\times 10^{-9}$
本底浓度	87	390.20	390.45	54	1 847.78	1 848.58
污染浓度	9	395.80	396.53	29	1 870.72	1 875.63
吸收汇浓度	4	383.71	383.87	16	1 831.48	1 832.78
原始浓度	100	390.40	390.72	100	1 851.11	1 853.94

2.2 大气 CO₂ 和 CH₄ 的功率谱

2.2.1 快速傅立叶变换和数据插补

对瓦里关站点而言, CO₂、CH₄ 等温室气体的时间变化模态受到与其生物化学过程相关的温度、风速和辐射等环境变量的影响. 以 CO₂ 为例, 其浓度变化对环境因素的响应具有不同的时间尺度. 短期 (<1 h) 的冠层 CO₂ 浓度的变化与光合、气孔导度和呼吸有关. 通常, 光合和气孔导度对不同的太阳辐射变化的响应各不相同, 根据不同的辐射变化情形, 光合和气孔导度建立新的平衡所需时间在几秒和十几分钟之间变化. 日尺度 (24 h) 的 CO₂ 浓度变化受到太阳辐射、湿度、空气和土壤温度逐日变化的影响, 比如夜间植被释放而在白天吸收 CO₂. 大气 CO₂ 浓度周尺度的波动可以归咎于天气的变化. 首先高低压系统和锋面的变化导致晴天、多云等天气现象, 这些不同的天气进而改变了用于植被光合作用的辐射量. 此外周尺度的天气系统中降水等因素还对 CO₂ 从土壤的释放有着明显影响. CO₂ 浓度月或者季节尺度的波动主要受太阳位置的变动, 包括辐射和地表温度变化对物候的影响. 谱分析可以作为一种定量化的工具来评价长时间序列的复杂的时变化模态. 傅立叶分析可以将随机时间序列变换为一系列周期性的正弦波的和, 因此可以量化与特定的周期或者频率相联系的方差的大小. 本研究使用谱分析在多个时间尺度上来描述温室气体和其气象驱动因子的变化模态, 量化有多少谱强与不同的时间尺度, 比如小时或者日尺度相联系.

本研究采用快速傅立叶分析的方法^[18]来计算一年时间长度的功率谱. 根据快速傅立叶变换的要求, 计算选取 8 192 (2¹³) 个数据, 代表了一年中 93.5% 的时间长度, 这样使用快速傅立叶分析能分辨的最低频率是 0.000 244 h⁻¹, 能够分辨的最高频率为采样频率的一半, 亦即纽奎斯特 (Nyquist frequency) 频率为 2 h. 对用于快速傅立叶分析的原始数据, 首先进行了趋势去除以减小红噪声的干扰^[19], 其次使用 Hamming 窗以降低与离散时间序列相关的谱折叠现象^[20]. 最后使用谱平滑和块平均以降低谱图的离散程度和在高频处功率谱的混淆^[21]. 详细的功率谱的计算方法可参见文献^[22].

傅立叶分析需要观测期内完整的时间序列. 考虑到观测中仪器故障, 站点修缮停机以及标定等原因, 人们不可能获得完整的数据集, 因此对数据进行插补是必要的. 对于本研究, 笔者采用遗传算法 (GA) 优化了初始权重和阈值的神经网络 (BPNN)

模型来插补数据. 神经网络技术在自然和城市生态系统 CO₂ 通量数据插补中已得到广泛应用^[23,24], 而在浓度数据插补的应用并不多见. GA-BPNN 模型的输入参数有风速、风向、温度和时间, 为了避免不同参数的量级的差异影响输出结果, 所有输入参数都预先归一化处理 (最小 -1, 最大 +1). GA-BPNN 模型的详细描述可参见文献^[24]. 对于 CH₄ 而言, 在高浓度区间, 模型不能很好的模拟实际浓度, 模拟值明显高于观测值 (图 2), 这可能是因为 CH₄ 浓度升高的情况下, 模型的输入参数的变化并不明显, 从而使模型对于高浓度变化的响应并不敏感. 对于 CO₂ 而言, 模型对低浓度条件下的模拟并不理想, 模拟值高于观测值 (图 3), 这可能是由于缺乏用于网络训练的低浓度数据 (表 1, 吸收汇浓度仅占总数据的 4%), 从而降低了模型对于极端条件下的模拟能力. 整体上, CO₂、CH₄ 模拟值与观测值有着良好的一致性 (斜率分别为 0.86 和 0.84, R² 分别为 0.49 和 0.5), 这说明模型能够较好地模拟实际浓度的时间变化模态, 能够满足谱分析的要求. 因此, GA-BPNN 模型可用于数据插补.

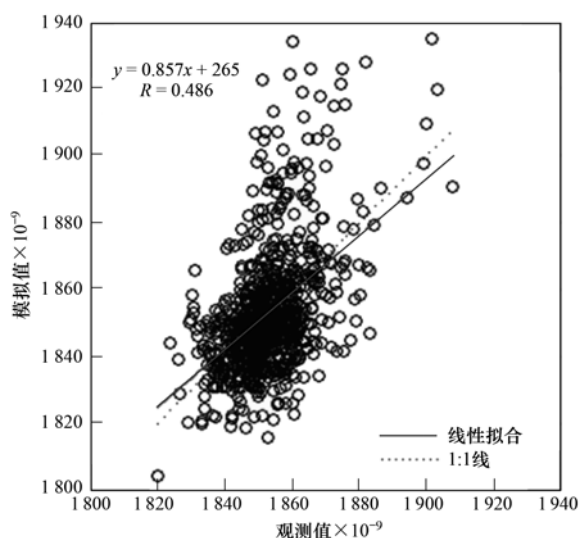


图 2 CH₄ 观测值与 GA-BPNN 模型模拟值的线性回归曲线

Fig. 2 Linear regressions between measured and GA-BPNN modeled CH₄ concentration

2.2.2 气象因子的功率谱

为了解 CO₂ 和 CH₄ 在年时间长度上的谱特征, 需要了解与其紧密相关的环境驱动因子的谱特征. 图 4 显示了 2009 年空气温度的功率谱, 图中的功率谱乘以自然频率 (n) 并且通过除以其方差进行了归一化处理, 这样处理的好处在于在双对数坐标系内, 其值在 0 至无穷上的积分为 1^[19]. 从气温功

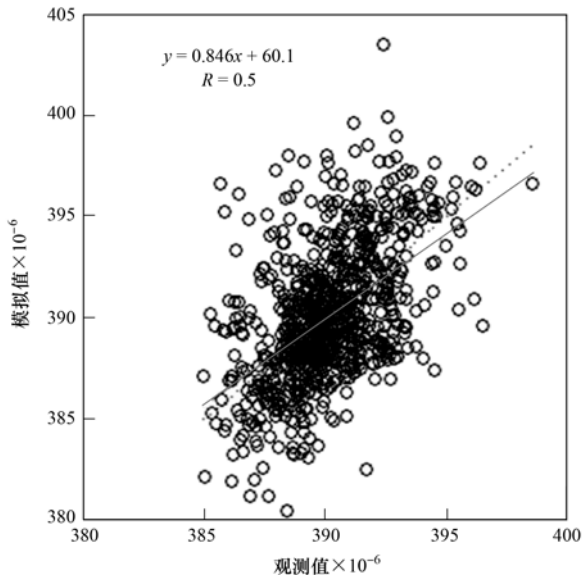
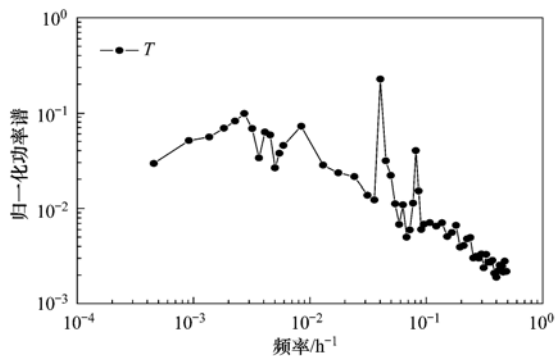


图3 CO₂ 观测值与 GA-BPNN 模型模拟值的线性回归曲线

Fig. 3 Linear regressions between measured and GA-BPNN modeled CO₂ concentration



功率谱通过除以其方差进行了归一化处理,下同

图4 归一化处理的年时间序列空气温度(*T*)功率谱

Fig. 4 Power spectrum of air temperature for a year-long time series

率谱(*T*)可以看出在高频存在明显的谱峰,其谱峰具有 12 h (0.084 6 h⁻¹) 和 24 h (0.042 5 h⁻¹) 周期性(频率的倒数)。在低频谱峰较宽,其跨度在季节到 2 周尺度(0.000 45 ~ 0.002 7 h⁻¹)。昼夜交替和地球自转的逐日变化对应着温度功率谱在高频的谱峰,冬夏等季节的交替则对应着功率谱在季节时间尺度上的谱峰,考虑到不同地区气候的差异,不同地区季节尺度的谱峰的位置应该有所差异。温度谱在 2 周尺度和日尺度之间存在着一个比较明显的谱隙,整体上,这个谱隙与周时间尺度相联系,其范围在 8 ~ 7 d 之间,这个结果说明与周尺度变化联系的天气系统并没有明显改变站点地区温度的模式。

与温度谱相比,风速功率谱(*U*)有着不同的变化特征(图 5),这与 Baldocchi 等的结果类似^[22],本

研究并没有观察到 12 h 的谱峰,而且也没有观察到风速谱在 2 ~ 3 h 周期范围内存在明显的谱隙,这与原先认为的结果并不相同^[25]。与温度谱相似的地方在于风速功率谱也称存在 24 h 的周期性。在风速功率谱的中端,也就是 7 d (0.005 8 h⁻¹) 具有次高的谱峰值,这与其他地区观测到的有所不同^[22],这说明瓦里关地区天气系统包括高低压系统和锋面的变化使得风速的变化十分明显。

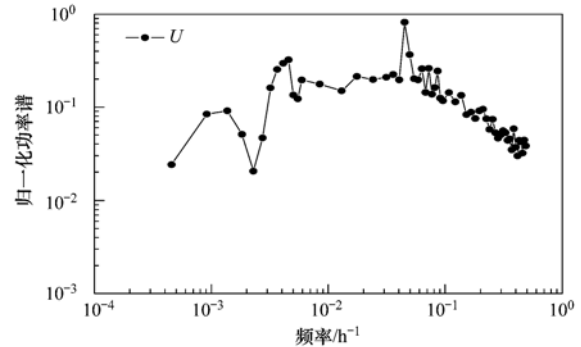


图5 归一化处理的年时间序列风速(*U*)功率谱

Fig. 5 Power spectrum of wind speed (*U*) for a year-long time series

2.2.3 CO₂ 和 CH₄ 的功率谱

2009 年大气 CO₂ 浓度的功率谱如(图 6)所示,可以看出在 0.000 4 h⁻¹,也就是 90 d 处存在一个较高的谱强度,这与温度谱在此频率的谱峰相对应,反映了 CO₂ 浓度的变化具有明显的季节变化,这与早先的研究结果相一致^[26];随着频率的增加在 0.001 4 h⁻¹处出现了一个明显的谱隙,此频率恰好对应着 30 d 的周期,月尺度的谱隙说明温度、风速等气象因素以及其他生态学因素(植被生长状态)可能在这个周期内对这个站点地区大气 CO₂ 浓度

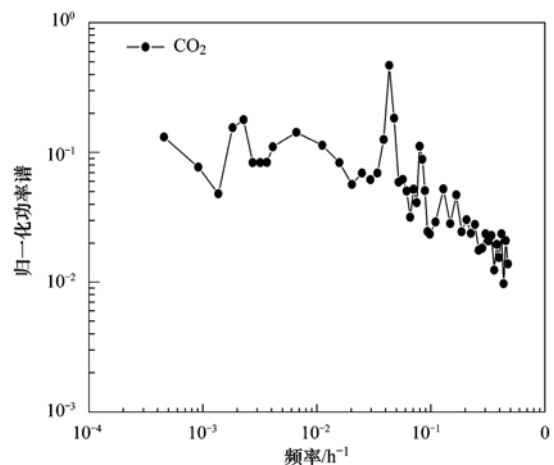


图6 归一化处理的年时间序列大气 CO₂ 浓度功率谱

Fig. 6 Power spectrum of CO₂ concentration for a year-long time series

的变化并没有明显影响. 这种时间尺度的谱隙在 CO_2 浓度数据插补方面也有一定的参考意义, 例如以月为基准进行插补的数据足以反映浓度数据的信息. CO_2 浓度功率谱的下一个谱峰对应的频率为 0.0027 h^{-1} (15 d), 这与温度谱在这个频率上的谱峰相对应说明天气系统在 15 d 的周期内的变化(晴天与阴天的转变)导致的温度变化可能影响 CO_2 浓度变化模态. 随着频率的增加, 可以看出 CO_2 浓度功率谱在 24 h (0.0425 h^{-1}) 和 12 h (0.0846 h^{-1}) 有着非常明显的谱峰, 这个现象验证了 CO_2 浓度存在明显的日变化^[3,4].

2009 年大气 CH_4 浓度的功率谱如(图 7)所示, 与 CO_2 不同的是 CH_4 浓度谱在 0.0004 h^{-1} (90 d) 处并没有明显谱峰, 表明 CH_4 浓度没有明显的季节变化, 这与瓦里关的 2002~2006 年的观测结果有所不同, Zhao 等^[6]发现 CH_4 浓度有着明显的季节变化, 并将其变化的最主要原因归咎于自然放牧强度的季节变化. 本研究中 CH_4 浓度没有明显季节变化的原因可能是随着人为源排放的不断增加, 在季节尺度上相对一致的外来长程输送掩盖了自然放牧的季节变化. 与 CO_2 类似, CH_4 浓度功率谱在频率为 0.0027 h^{-1} (15 d) 存在一个谱峰, 尽管与温度谱的谱峰相对应, 但考虑到温度对 CH_4 排放的影响可以忽略^[11], CH_4 的谱峰可能与天气系统变化导致的风向改变相联系, 观测站点不同风向对应着不同的 CH_4 排放源^[11], 任何主导风向的变化都会改变站点 CH_4 的信息. CH_4 浓度功率谱在 24 h (0.0425 h^{-1}) 处的谱强说明 CH_4 浓度则有明显的日变化, 这与瓦里关的长期观测结果相一致, 说明人为源的变化尚

不能在日尺度上改变 CH_4 浓度的变化模态.

3 结论

(1) 与以前的观测结果相比, 2009~2010 年瓦里关站 CH_4 和 CO_2 浓度明显增加, 其中二氧化碳本底浓度比 1995~2008 年高 17.4×10^{-6} , 甲烷本底浓度较 2002~2006 年高 16×10^{-9} ^[6], 意味着区域尺度的 CH_4 和 CO_2 排放强度不断增加.

(2) 温度、风速等气象因素以及其他生态学因素(植被生长状态)可能在月尺度周期内对瓦里关地区大气 CO_2 浓度的变化并没有明显影响. 季节尺度上, CH_4 浓度谱没有明显的谱峰, 其原因可归咎于随着人为源排放的不断增加, 在季节尺度上相对一致的外来长程输送掩盖了自然放牧的季节变化.

参考文献:

- [1] 周凌晞, 李金龙, 温玉璞, 等. 瓦里关山大气 CO_2 及其 $\delta^{13}\text{C}$ 本底变化[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(3): 295-300.
- [2] 周秀骥. 中国大气本底基准现象台进展总结报告[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 18-19.
- [3] Zhou L X, Tang J, Wen Y P, et al. The impact of local winds and long-range transport on the continuous carbon dioxide record at Mount Waliguan, China [J]. Tellus B, 2003, **55**(2): 145-158.
- [4] Zhou L X, Conway T J, White J W C, et al. Long-term record of atmospheric CO_2 and stable isotopic ratios at Waliguan Observatory: background features and possible drivers, 1991-2002 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(3), GB3021, doi: 10.1029/2004GB002430.
- [5] Zhou L X, White J W C, Conway T J, et al. Long-term record of atmospheric CO_2 and stable isotopic ratios at Waliguan Observatory: seasonally averaged 1991-2002 source/sink signals, and a comparison of 1998-2002 record to the 11 selected sites in the Northern Hemisphere [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, **20**, GB2001, doi: 10.1029/2004GB002431.
- [6] Zhao C L, Tans P P. Estimating uncertainty of the WMO mole fraction scale for carbon dioxide in air [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111**(D8), doi: 10.1029/2004GB002430.
- [7] Zhang F, Zhou L X, Conway T J, et al. Short-term variations of atmospheric CO_2 and dominant causes in summer and winter: Analysis of 14-year continuous observational data at Waliguan, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 140-148.
- [8] Zhou L X, Worthy D E J, Lang P M, et al. Ten years of atmospheric methane observations at a high elevation site in Western China [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(40): 7041-7054.
- [9] 周凌晞, 李金龙, 汤洁, 等. 瓦里关山大气 CH_4 本底变化 [J]. 环境科学学报, 2004, **24**(1): 91-95.

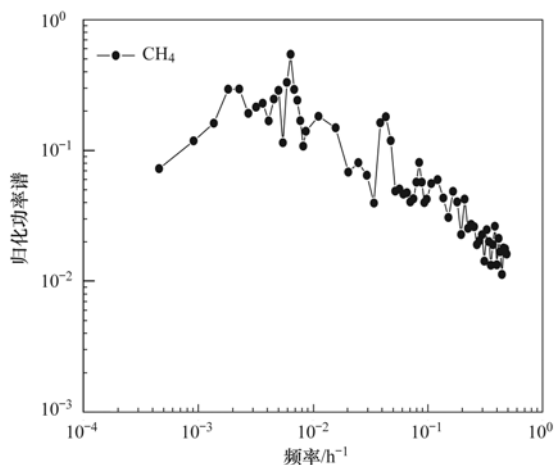


图7 归一化处理的年时间序列大气 CH_4 浓度功率谱

Fig. 7 Power spectrum of CH_4 concentration for a year-long time series

- [10] Ruckstuhl A F, Henne S, Reimann S, *et al.* Robust extraction of baseline signal of atmospheric trace species using local regression [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5** (11): 2613-2624.
- [11] 张芳, 周凌晞, 许林. 瓦里关大气 CH₄ 浓度变化及其潜在源区分析[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2013, **43** (4): 536-546.
- [12] 刘立新, 周凌晞, 张晓春, 等. 我国 4 个国家级本底站大气 CO₂ 浓度变化特征[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39** (2): 222-228.
- [13] 张芳, 周凌晞, 刘立新, 等. 瓦里关气相色谱法大气 CO₂ 和 CH₄ 在线观测数据处理分析[J]. *环境科学*, 2010, **31** (10): 2267-2272.
- [14] 方双喜, 周凌晞, 许林, 等. 我国 4 个 WMO/GAW 本底站大气 CH₄ 浓度及变化特征[J]. *环境科学*, 2012, **33** (9): 2917-2923.
- [15] 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 CO₂ [J]. *环境科学学报*, 2011, **31** (3): 624-629.
- [16] Ruckstuhl A F, Unteraehrer T, Locher R. IDPmisc: Utilities of Institute of Data Analyses and Process Design [EB/OL]. <http://CRAN.R-project.org/package=IDPmisc/index.html>, 2012-11-02.
- [17] Zhang F, Zhou L X. Implications for CO₂ emissions and sinks changes in western China during 1995-2008 from atmospheric CO₂ at Waliguan [J]. *Tellus B*, 2013, **65**: 19576.
- [18] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, *et al.* Numerical recipes in C: the art of scientific computing [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 994-995.
- [19] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Netherlands: Springer, 1988. 332-333.
- [20] Hamming R W. Digital Filters [M]. New York: Dover, 1988. 284.
- [21] Kaimal J C, Finnigan J J. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement [M]. Oxford: Oxford University Press, 1994. 289.
- [22] Baldocchi D, Falge E, Wilson K. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **107** (1): 1-27.
- [23] Melesse A M, Hanley R S. Artificial neural network application for multi-ecosystem carbon flux simulation [J]. *Ecological Modeling*, 2005, **189** (3-4): 305-314.
- [24] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **106**: 139-149.
- [25] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications [M]. New York: Wiley, 1984. 284.
- [26] 周凌晞, 周秀骥, 张晓春, 等. 瓦里关温室气体本底研究的主要进展[J]. *气象学报*, 2007, **65** (3): 458-468.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人