

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III) 吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究

王敬, 陆小兰, 杨桂朋*, 徐冠球

(中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

摘要: 于 2013 年 7 月对东海和南黄海海水中 CO 的浓度分布、时空变化、海-气通量和表层海水中 CO 微生物消耗进行了研究. 夏季东海和南黄海大气中 CO 的体积分数范围为 $68 \times 10^{-9} \sim 448 \times 10^{-9}$, 平均值为 117×10^{-9} ($SD = 68 \times 10^{-9}$, $n = 36$), 呈现出近岸高、远海低的特点. 夏季东海和南黄海表层海水中 CO 的浓度范围为 $0.23 \sim 7.10 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.49 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($SD = 2.11$, $n = 36$), CO 的浓度受太阳辐射影响明显; 不同站位 CO 浓度的垂直分布特征基本相同, CO 浓度最大值一般出现在表层, 随深度增加 CO 浓度迅速减小. 夏季东海和南黄海海水中 CO 浓度具有明显的周日变化, 最大值是最小值的 6~40 倍. 各层最大值基本出现在中午, 最小值基本上出现在凌晨前后. CO 明显的周日变化特征进一步证明海水中 CO 主要由光化学产生. 调查期间东海和南黄海表层海水中 CO 相比大气处于过饱和状态, 过饱和系数变化范围为 1.99~99.18, 平均值为 29.36 ($SD = 24.42$, $n = 29$), 表明调查海域是大气中 CO 的源. 调查期间 CO 的海-气通量变化范围为 $0.37 \sim 44.84 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 平均值为 $12.73 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ($SD = 11.40$, $n = 29$). 调查海域 CO 的微生物消耗培养实验中, CO 的浓度随时间增长呈指数降低, 消耗过程符合一级反应的特点, 微生物消耗速率常数 K_{CO} 范围为 $0.12 \sim 1.45 \text{ h}^{-1}$, 平均值为 0.47 h^{-1} ($SD = 0.55$, $n = 5$), 微生物消耗速率与盐度之间有一定的相关性.

关键词: 一氧化碳; 浓度分布; 海-气通量; 日变化; 微生物消耗; 中国东海和南黄海

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4085-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.007

Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer

WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, XU Guan-qiu

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Carbon monoxide (CO) concentration distribution, sea-to-air flux and microbial consumption rate constant, along with atmospheric CO mixing ratio, were measured in the East China Sea and the South Yellow Sea in summer. Atmospheric CO mixing ratios varied from 68×10^{-9} – 448×10^{-9} , with an average of 117×10^{-9} ($SD = 68 \times 10^{-9}$, $n = 36$). Overall, the concentrations of atmospheric CO displayed a decreasing trend from the coastal stations to the offshore stations. The surface water CO concentrations in the investigated area ranged from 0.23 – $7.10 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $2.49 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($SD = 2.11$, $n = 36$). The surface water CO concentrations were significantly affected by sunlight. Vertical profiles showed that CO concentrations rapidly declined with depth, with the maximum values appearing in the surface water. CO concentrations exhibited obvious diurnal variations in the study area, with the maximum values being 6–40 folds higher than the minimum values. Minimal concentrations of CO all occurred before dawn. However, the maximal concentrations of CO occurred at noon. Marked diurnal variation in the concentrations of CO in the water column indicated that CO was produced primarily by photochemistry. The surface CO concentrations were oversaturated relative to the atmospheric concentrations and the saturation factors ranged from 1.99–99.18, with an average of 29.36 ($SD = 24.42$, $n = 29$). The East China Sea and the South Yellow Sea was a net source of atmospheric CO. The sea-to-air fluxes of CO in the East China Sea and the South Yellow Sea ranged 0.37 – $44.84 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, with an average of $12.73 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ($SD = 11.40$, $n = 29$). In the incubation experiments, CO concentrations decreased exponentially with incubation time and the processes conformed to the first order reaction characteristics. The microbial CO consumption rate constants (K_{CO}) in the surface water ranged from 0.12 to 1.45 h^{-1} , with an average of 0.47 h^{-1} ($SD = 0.55$, $n = 5$). A negative correlation between K_{CO} and salinity was observed in the present study.

Key words: carbon monoxide; concentration distribution; sea-to-air flux; diurnal variation; microbial consumption; East China Sea and South Yellow Sea

一氧化碳(CO)是大气中重要的痕量气体,影响大气对流层中羟基自由基的浓度^[1,2],进而影响对流层的氧化能力,间接影响大气中温室气体的存留时间,加剧温室效应.因此这些年CO受到越来越多的关注,对海洋中的CO研究始于20世纪七八十年

收稿日期: 2014-04-29; 修订日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40976043); 教育部“长江学者”奖励计划项目; 山东省“泰山学者”建设工程项目

作者简介: 王敬(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋生源活性气体, E-mail: wangjing19890505@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gpyang@mail.ouc.edu.cn

代,人们观测到海洋是大气中 CO 的源^[3-5]. 但不同的研究者对海洋向大气释放 CO 中 C 的估算(3.7 ~ 600 Tg·a⁻¹)各不相同^[4,6-10]. 海水中的 CO 主要是由海水中有色溶解有机物质 (colored/chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 光照产生的^[4,9,11], 次要途径由暗反应产生,即溶解有机物 (dissolved organic matter, DOM) 热力学降解; CO 消耗途径主要为微生物消耗^[4,11], 约占大洋海水中 CO 总消耗量的 86%^[11], 次要途径为海-气界面扩散^[5,11,12]. 在化学、生物和物理的共同作用下海水中 CO 浓度呈现出复杂的时空变化.

近年来,研究区域主要集中在开阔大洋,而受陆源影响较大的近岸海域,与开阔海洋相比,其海-气交换和微生物消耗以及光生产等存在许多不同^[11,13-20],有待于深入研究. 目前我国已经开展了关于中国近海大气和海水中 CO 的浓度分布、海-气通量的调查,并且在部分海域进行了 CO 的光化学生产和微生物消耗的研究^[13-19]. 本课题组近几年主要开展了春季和秋季东海和黄海^[17,18]、春季黄海

和渤海^[19] CO 分布、通量、微生物消耗和光化学研究,以及胶州湾 CO 分布、通量和光化学的研究^[13-16]. 目前的研究仅限于局部海域、个别季节的海洋调查,尚未开展有关夏季 CO 分布的研究. 本研究于 2013 年夏季对我国东部陆架海区——东海和南黄海进行了大面调查和现场模拟实验,旨在分析和探讨夏季该海域 CO 的浓度分布、海-气通量、日变化及其微生物消耗,进一步完善中国近海 CO 的研究内容.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2013-07-14 ~ 2013-07-28 随“东方红 2 号”对东海和南黄海进行了现场调查,调查区域及采样站位如图 1. 现场调查中,不同深度的海水样品由东方红 2 调查船上配备直读式温盐深仪的尼斯金采水器采集获得,然后通过硅胶管和三通阀在无气泡的条件下注入到 50 mL 经 10% HCl-Milli-Q 水洗过的玻璃注射器中,注射器事先用海水润洗 2

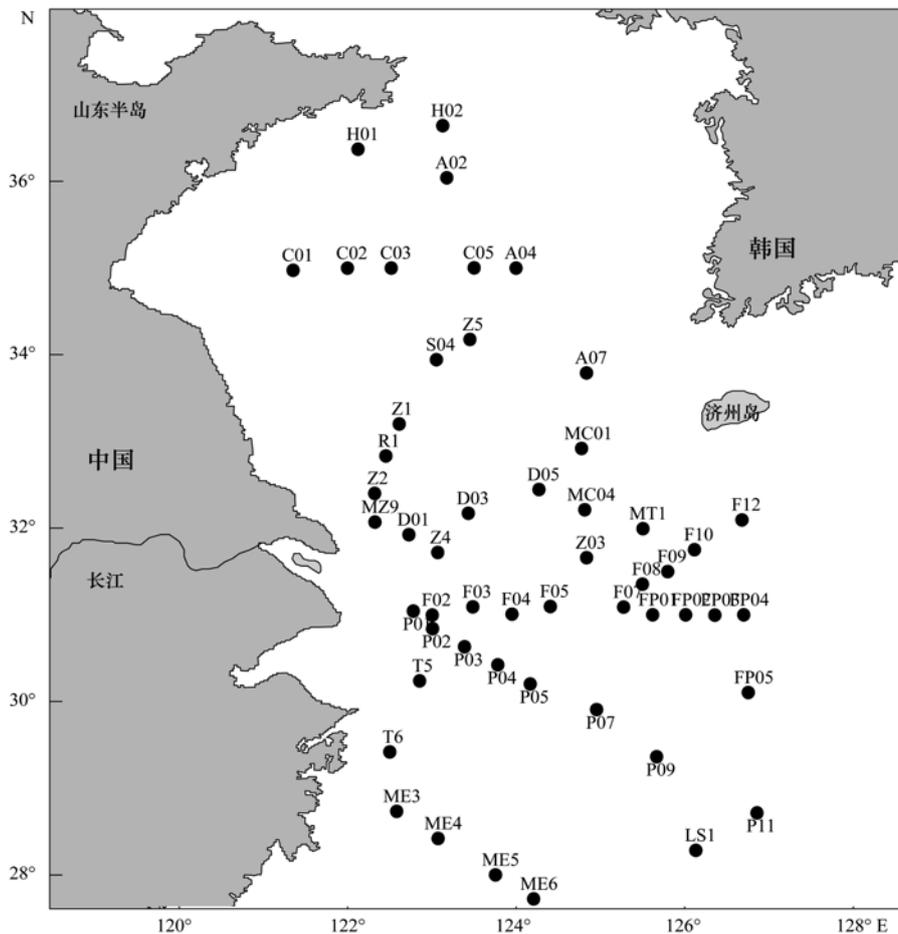


图 1 东海和南黄海采样站位示意

Fig. 1 Locations of the sampling stations in the East China Sea and the South Yellow Sea

~3 次, 勿留有气泡, 再将该注射器用聚四氟乙烯三通密封。

为降低船上释放气体污染, 应在船走航时用 50 mL 注射器在距海面 10 m 处的甲板上迎风处取大气样品。

1.2 分析方法

1.2.1 一氧化碳浓度测定

海水样品的测定采用顶空平衡法: 将现场采集的样品体积控制至 44 mL, 然后通过三通阀向注射器内注入 6 mL 高纯氮气, 最后将该注射器用聚四氟乙烯三通密封, 通过摇摆试验机(广东塘厦飞蝗高精仪器有限公司)以 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度进行振荡, 时间为 5 min^[21], 再将达到气液平衡的顶空气体通过阻水滤膜(0.2 μm Nuclepore Teflon filter, Φ 13 mm)注入到 Ta3000 痕量气体分析仪进行测定。大气样品采集后直接通过阻水滤膜注入到 Ta3000 痕量气体分析仪(美国 Ametek 公司)进行测定。仪器采用 CO 标准气体(972×10^{-9} , 大连大特气体有限公司)进行校正。该方法测量的相对标准偏差 $< 4.4\%$, 方法的最低检出限为 $0.02 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[21]。

1.2.2 CO 微生物消耗的测定

本研究采用黑暗培养法^[22, 23]测定 CO 微生物消耗速率: 使用经 10% HCl-Milli-Q 水洗过的 300 mL 玻璃注射器采集表层海水, 采集前应先用水润洗 2~3 次, 采样完成时注射器内不应留有气泡。然后将该注射器置于表层海水循环水浴中进行现场避光培养。使用 50 mL 玻璃注射器通过三通从 300 mL 注射器内抽取水样进行 CO 浓度测定, 抽取过程中要防止大气进入注射器内。样品采集后立即测定 CO 浓度作为第一个时间点的 CO 浓度, 约 30 min 后测定 CO 浓度作为第二个时间点的浓度, 然后根据消耗速度的不同, 每隔 30 min 至 1 h 的时间间隔测定一次 CO 的浓度, 整个时间系列一般测定 5 个点左右。CO 微生物消耗速率的测定站位具体见表 1。

1.3 海-气通量和饱和系数的计算方法

CO 的海-气交换通量 F [$\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 可以通过下式求得^[24]:

$$F = k([\text{CO}]_{\text{surf}} - [\text{CO}]_{\text{eq}}) \quad (1)$$

式中, k 为气体交换常数 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$); $[\text{CO}]_{\text{surf}}$ 为现场测得的表层海水中 CO 的浓度 ($\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{CO}]_{\text{eq}}$ 为与大气中 CO 相平衡时, 海水中 CO 的浓度 ($\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$)。

气体交换常数 k 采用 Wanninkhof 建立的模型进行计算^[24], 求得的 k 值需要乘以 $(S_c/660)^{-0.5}$ 进行校正, S_c 值可通过下式求得^[12]:

$$S_c = -0.0553t^3 + 4.3825t^2 - 140.07t + 2124 \quad (2)$$

式中, t 为海水的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

海水 CO 浓度 $[\text{CO}]_{\text{surf}}$ 可通过顶空气体中 CO 的测定值求得^[25]:

$$[\text{CO}]_{\text{surf}} = pm_a(\beta pV_w + V_a)/(RTV_w) \quad (3)$$

式中, p 为大气压力 (atm); m_a 为气液平衡后顶空气体中 CO 的体积分数; β (buseen solubility coefficient) 为 CO 在海水中的溶解度常数, 与海水的温度和盐度有关^[26]; V_w 为海水样品的体积 (mL); V_a 为顶空气体的体积 (mL); R 为气体常数 [$0.08206 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$]; T 为现场的海水温度 (K)。

与大气中 CO 相平衡时, 海水中 CO 的浓度 $[\text{CO}]_{\text{eq}}$ 可通过下式求得^[27]:

$$[\text{CO}]_{\text{eq}} = ([\text{CO}]_{\text{atm}} \times \beta)/M \quad (4)$$

式中, $[\text{CO}]_{\text{atm}}$ 是现场测得的大气中 CO 的体积分数; M 为标准压力和温度下 CO 的摩尔体积 $25.0941 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[10, 28]。

海水中 CO 的过饱和系数 α 可通过下式求得^[27]:

$$\alpha = \frac{[\text{CO}]_{\text{surf}}}{[\text{CO}]_{\text{eq}}} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 大气中 CO 的含量

大气中 CO 的体积分数为 $68 \times 10^{-9} \sim 448 \times 10^{-9}$, 平均值为 117×10^{-9} ($\text{SD} = 68 \times 10^{-9}$, $n = 36$), 最大值为最小值的 6.6 倍。大气中 CO 的最大值出现在近岸站位 C01, 最小值出现在调查海域的远海站位 FP01。大气中 CO 的水平分布见图 2, 从中可以看出大气中 CO 的浓度总体上从近岸向远海逐渐降低。研究结果低于文献[17, 18]报道值, 春季东海和黄海大气中 CO 浓度平均值分别为 190×10^{-9} ^[17], 秋季东海和南黄海大气中 CO 浓度平均值分别为 297×10^{-9} ^[18]。这是由于东海和南黄海大气中 CO 主要受陆源输入的影响, 春季和秋季我国北方温度较低, 化石燃料的使用, 产生大量的 CO, 使得春季和秋季大气中 CO 浓度高于夏季值。

2.2 海水中 CO 的浓度

2.2.1 CO 的水平分布

调查海域表层海水中 CO 的浓度范围为 $0.23 \sim$

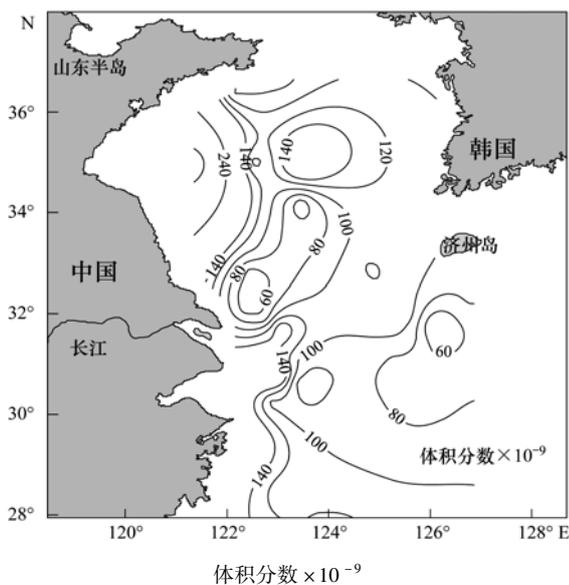


图2 大气CO的水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of the atmospheric CO concentrations

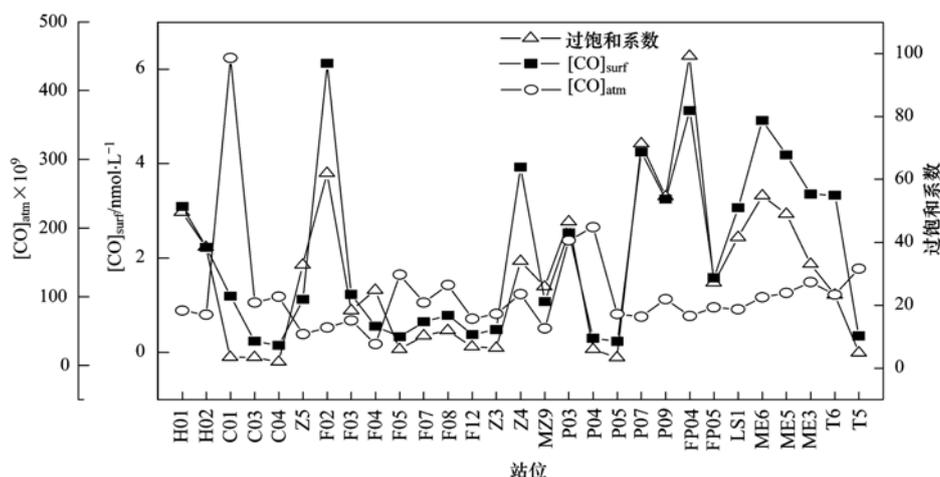


图3 海水、大气中CO浓度和过饱和系数

Fig. 3 Concentration of CO in surface water and oversaturation factor

是多方面造成的,包括不同季节太阳辐射的强度、CO海-气通量和微生物消耗的变化。

2.2.2 CO的日变化

本次调查中,笔者对MT1连续站白天每隔2h、晚上每隔3h采集标准层海水,对水体中CO浓度的日变化特征进行了考察,研究结果如图4。

调查结果显示,夏季东海和南黄海海水中CO浓度具有明显的日变化,最大值是最小值的6~40倍。Jones^[29]报道表层海水中CO的浓度有明显的日变化,并指出中午的最高浓度是凌晨的最低浓度的2~20倍;Stubbins等^[30]也曾作出相关报道,发现最高浓度是最低浓度的5~7倍。各层最大值基本出现在13:00左右,最小值基本上出现在凌晨前后。

7.10 nmol·L⁻¹,平均值为2.49 nmol·L⁻¹ (SD = 2.11, n = 36),最大值为最小值的30.4倍。各站位表层海水中CO的浓度见图3。表层海水中CO浓度的最大值(7.10 nmol·L⁻¹)出现在站位P01,取样时间10:59;CO浓度的最小值(0.23 nmol·L⁻¹)出现在站位P05,取样时间02:39。表层水具有明显的时空变化,CO浓度基本从近岸向远海逐渐降低。这主要是我国东部沿海人为活动对近岸海域生态环境的影响。但是部分断面表层海水中CO的浓度与采样时间有较好的一致性,表现为中午前后浓度高,凌晨前后浓度低,因此陆源输入和太阳光照强度会共同影响表层海水中CO浓度,从而使CO浓度值产生较大变化。本研究结果高于春季和秋季的调查结果^[17,18],春季东海和黄海海水中CO浓度平均值分别为2.24 nmol·L⁻¹^[17],秋季东海和南黄海CO浓度平均值分别为0.68 nmol·L⁻¹^[18]。这种季节的差异

与Conrad等^[31]在大西洋和Ohta^[32]在太平洋的研究结果以及春季黄海和渤海^[17]、秋季东海和南黄海^[18]海水中CO日变化特征是一致的。CO明显的日变化特征进一步证明海水中CO主要由光化学产生。夏季表层日变化的最大值均比春季黄海和渤海、秋季东海和南黄海表层最大值高,可能因为夏季海水温度较高,太阳光照较强,海水中CDOM吸收的太阳光较多造成的。

2.2.3 CO的垂直分布

本航次中,还对部分站位CO的垂直分布进行了调查见图5。从中可以看出,海水中CO浓度最大值出现在表层,随深度增加CO浓度迅速减小。这主要是由于表层海水接收到的太阳光最多,在太阳光

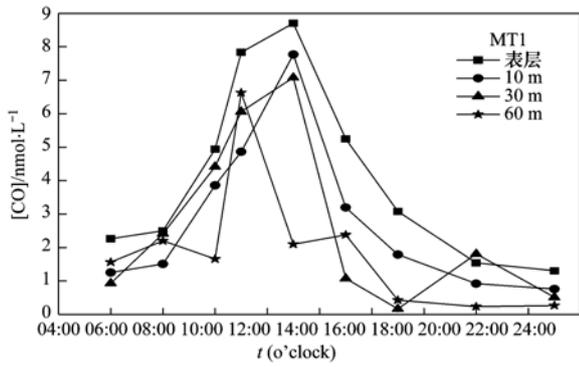


图4 MT1 站点 CO 的日变化
Fig. 4 Diurnal variation of CO concentration in the seawater at anchor station MT1

的作用下, CDOM 降解产生大量的 CO, 随深度增加, 太阳光被海水及海水中的颗粒物吸收和散射, 导致 CDOM 接受到的太阳光逐渐减少, CO 浓度降低^[27]. 春季东海和黄海^[17] 以及秋季东海和南黄海^[18] 也发现相似的规律. 另外还考察了在垂直分布中 CO 与叶绿素 (Chl-a) 的关系. 在站点 D05 Chl-a 最大浓度出现在表层, 随深度增加表现出先减小后增大再减小的变化规律; 站点 P11 的 Chl-a 最大浓度出现在

50 m 左右, CO 和叶绿素在垂直分布上没有表现出相关性, 该结果与文献报道相一致^[22, 32].

2.2.4 典型断面 CO 的垂直分布

C 断面重合北纬 35°, 横跨南黄海冷水团. 该断面水深较浅, 最深处只有 80 m 左右. P 断面通过长江冲淡水区, 并横切冲绳海槽与黑潮水系主轴, 从长江口一直外延到陆架东海外部外海. 夏季 C、P 断面温度、盐度和 CO 浓度的垂直分布如图 6.

夏季, C 断面处于黄海冷水团的控制^[33], 底层水温明显偏低. 此时处于黄海冷水团的鼎盛期, 存在较强的温跃层, 抑制了海水的上下对流, 使跃层以下仍能保持冬季底层海水的特征. CO 浓度在垂直方向上基本符合表层最高, 随深度增加 CO 浓度降低的趋势. 但在 C05 站位, 表层至 30 m CO 浓度逐渐降低, 从 50 m 以下, CO 浓度又增大, 与秋季东海和黄海调查结果一致^[27]. 其原因尚有待于进一步调查.

P 断面温度和盐度在垂直方向呈现明显的层化现象, P01 站海水温度和盐度均较低, 同时出现 CO 浓度较高的现象, 可能主要是受到长江冲淡水的影

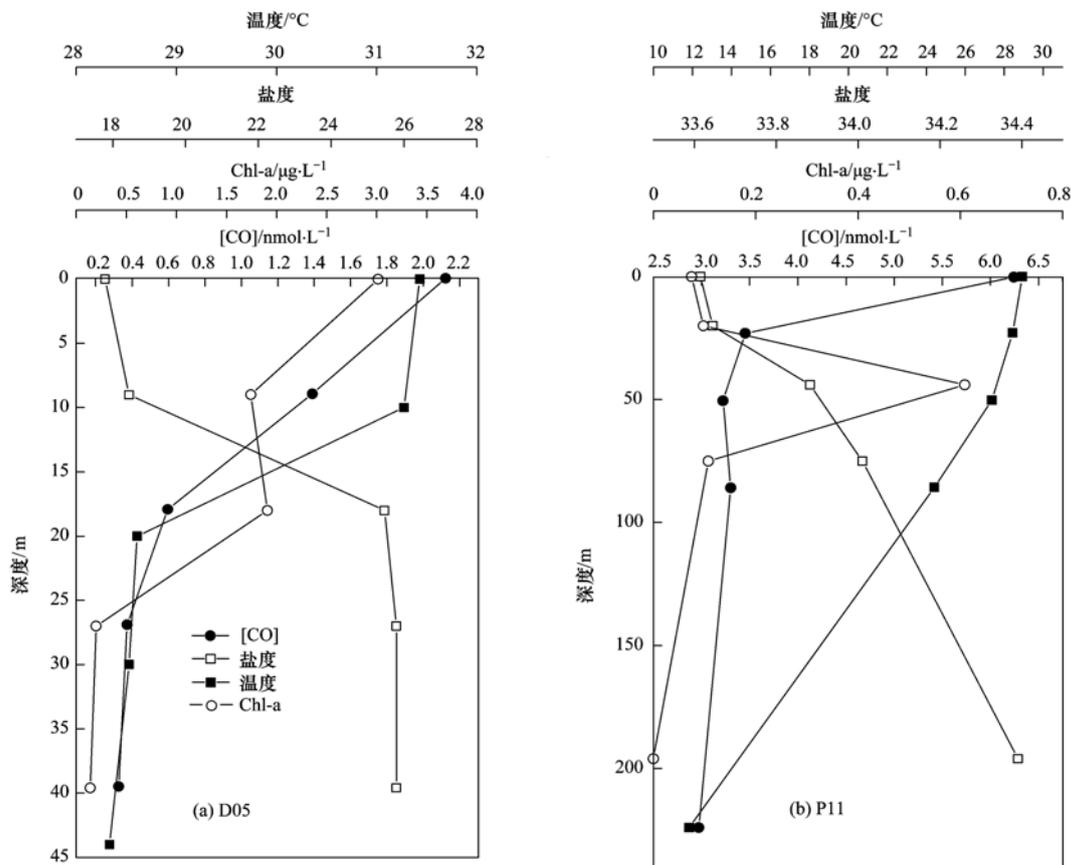


图5 D05 和 P11 CO 浓度、温度、盐度和叶绿素的垂直分布

Fig. 5 Vertical profile of CO concentrations, temperature, salinity, and concentration of Chl-a at stations D05 and P11

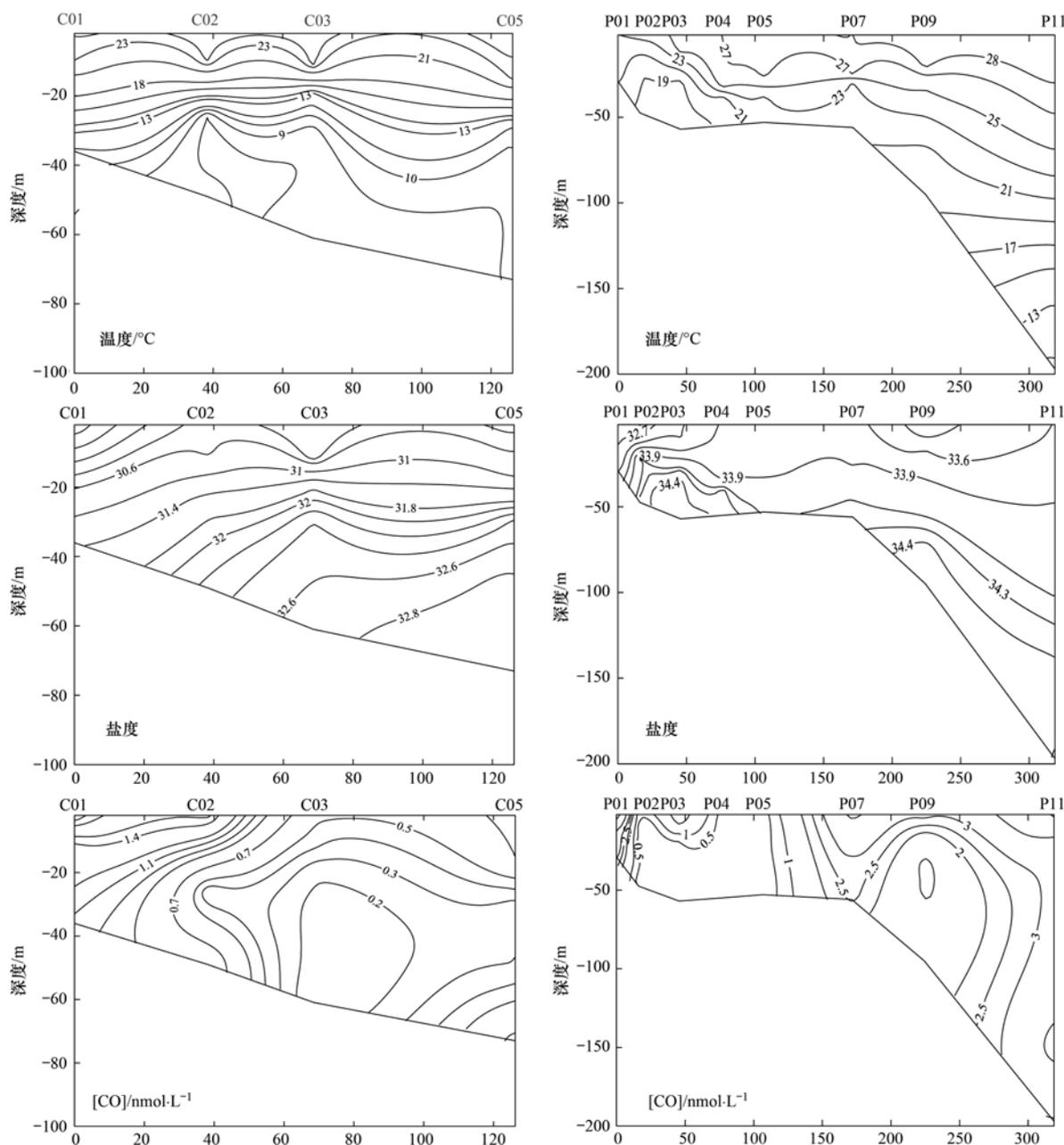


图 6 C 断面和 P 断面温度、盐度和 CO 浓度的垂直分布

Fig. 6 Vertical profile of temperature, salinity, and CO concentration along transects C and P

响. 在该断面每个站位的垂直分布中, CO 浓度基本上都随海水深度的加深而降低. 但个别站如 P03 ~ P11, 随深度增加先降低后增加. 主要原因可能是黑潮次表层水的入侵在夏季最强^[34], 使底层水有黑潮次表层水的特性(夏季其水温约为 17 ~ 20°C, 盐度约为 34.30 ~ 34.50), 较陆架上的海水而言, 底层水出现低温高盐区^[34,35]. CO 浓度最大值一般出现在表层, 但在个别站位中(如 P04、P05), CO 浓度的最大值出现在下方 10 m 层. 原因可能是采样时风速较大, 海面波破碎造成表层 CO 通过海气界面扩散到大气中.

2.3 CO 的海-气通量

各个站位 CO 的过饱和系数见图 3, CO 的过饱和系数变化范围为 1.99 ~ 99.18, 平均值为 29.36 (SD = 24.42, $n = 29$), 说明在调查期间整个调查海域, 海水中 CO 相对于大气都是过饱和的, 表明所调查的东海和南黄海是大气 CO 的源. 调查结果高于春季和秋季调查结果^[17,18], 春季东海和黄海过饱和系数平均值为 16.00^[17], 秋季东海和南黄海过饱和系数平均值为 3.34^[18]. 由图 3 及春季^[17]和秋季^[18]调查结果可以看出过饱和系数的变化趋势与表层海水中 CO 浓度变化基本一致, 表明过饱和系数主要

受到表层海水中 CO 浓度的影响,表层海水 CO 主要由光化学产生. 调查结果表明夏季表层海水中 CO 浓度大于春季和秋季,夏季大气中 CO 浓度低于春季和秋季,因此夏季过饱和系数大于春季和秋季.

CO 的海-气通量与风速、过饱和系数关系见图 7,可以看出,CO 的海-气通量与风速变化一致,说明风速是影响海-气通量的一个重要因素. 海-气通量变化范围为 $0.37 \sim 44.84 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,平均值为 $12.73 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ($\text{SD} = 11.40, n = 29$). 最大值出现在站点 ME5,该站点 CO 的过饱和系数(49.03)和风速($10.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)都比较大;最小值出现在站点 C03,该站点 CO 的过饱和系数(3.47)和风速($5.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)都比较小,海-气通量受海水中

CO 过饱和程度和风速大小的共同影响.

Zafiriou 等^[12]在 Sargasso 海域春季的调查结果为 $6.54 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,Xie 等^[36]报道 Beaufort 海春季海-气通量为 $(6.20 \pm 6.43) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,春季东海和黄海调查结果为 $6.67 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[17],秋季东海和南黄海的调查结果为 $1.82 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[18],春季黄海和渤海调查结果为 $2.13 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[19]. 可以看出夏季东海和南黄海海-气通量值处在较高的水平,这主要是由于夏季海水中 CO 的过饱和程度和风速都较大的原因.

东海和南黄海的海域面积为 $107.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[37],由此估算出夏季东海和南黄海向大气输送 C(以¹²C计)的速率为 $1.65 \times 10^8 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$.

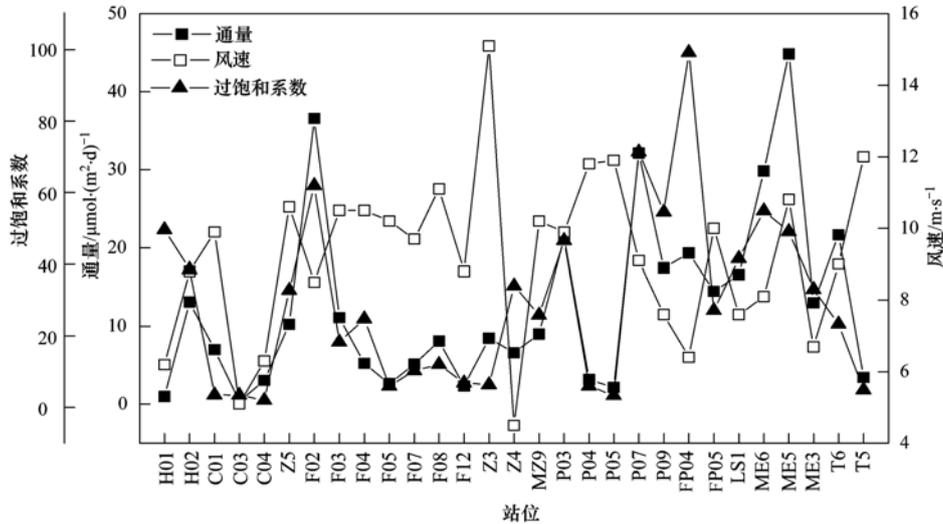


图 7 CO 海-气通量、风速、过饱和系数

Fig. 7 Sea-to-air flux of CO, wind speed and oversaturation factor

2.4 CO 微生物消耗

本研究采用黑暗培养法^[22, 23]测量了 CO 微生物消耗,典型站位的 CO 微生物消耗曲线见图 8. 调查结果显示,CO 浓度随时间增大呈指数型降低,符合一级反应的特点,各个站位的 CO 微生物消耗速率的相关系数(R^2)、消耗速率常数(K_{CO})、周转时间($\tau_{\text{CO}} = 1/K_{\text{CO}}$)和 Chl-a 浓度见表 1. 所选站位的 CO 微生物消耗速率常数范围为 $0.12 \sim 1.45 \text{ h}^{-1}$,平

均值为 0.47 h^{-1} ($\text{SD} = 0.55, n = 5$),高于东海和黄海春季和秋季的 CO 消耗速率常数分别为 0.22 h^{-1} 和 0.16 h^{-1} ^[27]. 主要是因为夏季海水中 Chl-a 浓度较高,使微生物数量增加^[38, 39]. 另外,夏季海水温度较高,微生物活动也较活跃^[40]. K_{CO} 的最大值出现在站点 R1,该站点具有较大的叶绿素值 ($7.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和较低的盐度值; K_{CO} 的最小值出现在站点 P07,该站点具有较高的盐度值.

表 1 各培养实验站位的 CO 消耗速率(K_{CO})、周转时间(τ_{CO})、微生物消耗速率的相关系数(R^2)、温度、盐度和叶绿素数据

Table 1 Microbial CO consumption rate constant (K_{CO}), biological turnover time (τ_{CO}), regression coefficient between CO concentration and incubation time (R^2), temperature, salinity and Chl-a concentrations at some typical stations

站点	R^2	$K_{\text{CO}}/\text{h}^{-1}$	$\tau_{\text{CO}}/\text{h}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度	Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
F02	0.989 1	0.287	3.485	24.18	31.93	4.52
ME3	0.970 0	0.217	4.604	26.43	33.63	— ¹⁾
P07	0.963 3	0.129	7.711	27.97	33.76	0.10
T6	0.974 6	0.271	3.687	24.13	33.13	6.84
R1	0.974 3	1.454	0.688	25.21	29.20	7.25

1) “—”表示没有相关数据

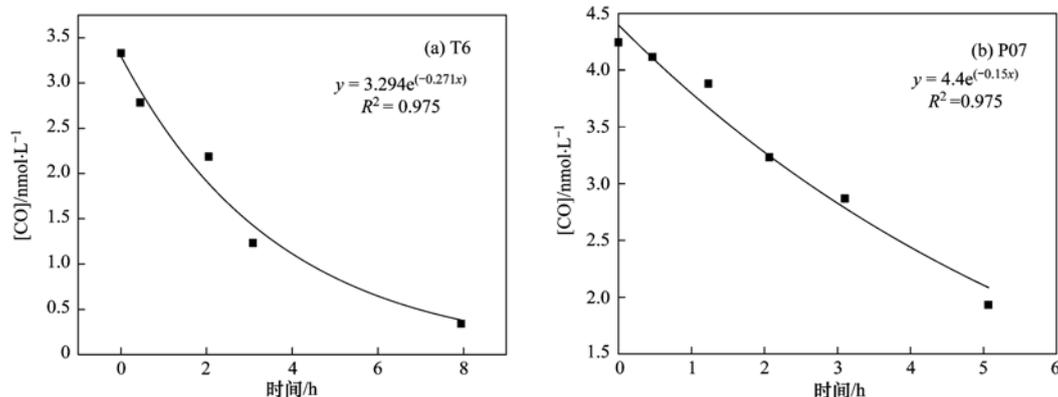
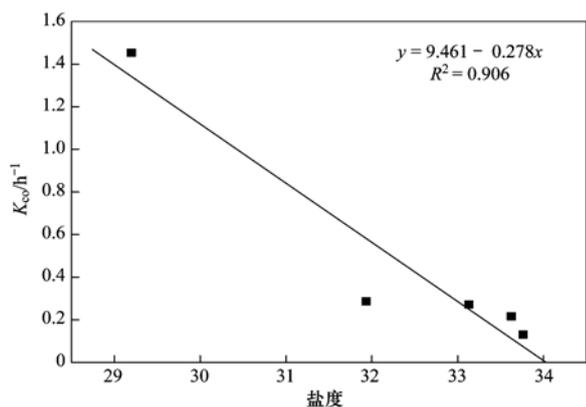


图 8 典型站位 CO 微生物消耗曲线

Fig. 8 Typical [CO] versus incubation time at stations T6 and P07

进行微生物消耗研究的站位中,表层海水的盐度变化范围为 29.20 ~ 33.76,盐度与消耗速率常数 K_{CO} 关系如图 9,可见 K_{CO} 与盐度值之间存在较好的相关性, K_{CO} 随盐度值的增大而减小 ($R^2 = 0.906$, $n = 5$, $P = 0.0125$),该结果与文献报道结果相一致^[18,27,41]. Xie 等^[41]的研究发现,在盐度为 0 ~ 19 时, K_{CO} 随盐度增大而升高;在盐度大于 19 时, K_{CO} 随盐度增大而降低.

CO 的微生物消耗是一个比较复杂的过程,其微生物消耗速率 K_{CO} 不仅受到叶绿素、微生物数量、微生物的种类、供给微生物的有机质的影响,无机营养盐、温度、盐度和 pH 等因素也会影响到微生物消耗速率 K_{CO} ^[42~44].

图 9 K_{CO} 与盐度的关系Fig. 9 Correlation between K_{CO} and salinity

3 结论

(1) 夏季东海和南黄海大气中 CO 的体积分数范围为 $68 \times 10^{-9} \sim 448 \times 10^{-9}$,平均值为 117×10^{-9} ,呈现出近岸高、远海低的特点.

(2) 从水平分布上看,海水中 CO 浓度范围为

0.23 ~ 7.10 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 2.49 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,CO 浓度值受太阳辐射影响明显.东海和黄海海水中 CO 浓度的垂直分布在不同的断面和站位均呈现近似分布,CO 浓度最大值一般出现在表层,随深度增加,CO 浓度逐渐降低.海水中 CO 与 Chl-a 之间无明显相关性.

(3) 东海和南黄海海水中 CO 浓度均具有明显的周日变化,最大值是最小值的 6 ~ 40 倍.其中,各层 CO 浓度最小值均出现在凌晨前后,最大值出现在中午.CO 明显的周日变化进一步证明了海水中 CO 主要是由光化学产生的.

(4) 东海和南黄海表层海水中的 CO 处于过饱和状态,东海和南黄海是大气 CO 的源,海-气通量平均值为 12.73 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

(5) 东海和南黄海夏季 CO 微生物消耗速率常数范围为 0.12 ~ 1.45 h^{-1} ,平均值为 0.47 h^{-1} .研究表明,微生物消耗速率与盐度之间有一定的相关性.

参考文献:

- [1] Thompson A M. The oxidizing capacity of the Earth's atmosphere: probable past and future changes [J]. Science, 1992, **256**(5060): 1157-1165.
- [2] Derwent R G. Air chemistry and terrestrial gas emissions: A global perspective [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1995, **351**(1696): 205-217.
- [3] Swinnerton J W, Linnenbom V J, Lamontagne R A. The ocean: a natural source of carbon monoxide [J]. Science, 1970, **167**(3920): 984-986.
- [4] Conrad R, Seiler W, Bunse G, et al. Carbon monoxide in seawater (Atlantic Ocean) [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, **87**(C11): 8839-8852.
- [5] Bates T S, Kelly K C, Johnson J E, et al. Concentrations and fluxes of dissolved biogenic gases (DMS, CH₄, CO, CO₂) in the equatorial Pacific during the SAGA 3 experiment [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, **98**(D9): 16969-

- 16977.
- [6] Erickson III D J. Ocean to atmosphere carbon monoxide flux: Global inventory and climate implications [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1989, **3**(4): 305-314.
- [7] Khalil M A K, Rasmussen R A. The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance [J]. *Chemosphere*, 1990, **20**(1-2): 227-242.
- [8] Bates T S, Kelly K C, Johnson J E, *et al.* Regional and seasonal variations in the flux of oceanic carbon monoxide to the atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D11): 23093-23101.
- [9] Zuo Y, Jones R D. Formation of carbon monoxide by photolysis of dissolved marine organic material and its significance in the carbon cycling of the oceans [J]. *Naturwissenschaften*, 1995, **82**(10): 472-474.
- [10] Linnenbom V J, Swinnerton J W, Lamontagne R A. The ocean as a source for atmospheric carbon monoxide [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(24): 5333-5340.
- [11] Zafriou O C, Andrews S S, Wang W. Concordant estimates of oceanic carbon monoxide source and sink processes in the Pacific yield a balanced global "blue-water" CO budget [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**(1): 1015-1027.
- [12] Zafriou O C, Xie H X, Nelson N B, *et al.* Diel carbon monoxide cycling in the upper Sargasso Sea near Bermuda at the onset of spring and in midsummer [J]. *Journal of Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(2): 835-850.
- [13] 任春艳, 陆小兰, 杨桂朋, 等. 胶州湾海水中溶解有色物质的光脱色对光致生成一氧化氮速率的影响 [J]. *海洋学报*, 2010, **32**(2): 66-72.
- [14] 陆小兰, 张聪, 杨桂朋, 等. 胶州湾海水中一氧化氮光致生成影响因素的研究 [J]. *海洋学报*, 2012, **34**(4): 77-83.
- [15] 王为磊, 陆小兰, 杨桂朋, 等. 胶州湾海水中一氧化氮的分布与海-气通量研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, **40**(6): 121-126.
- [16] Ren C Y, Yang G P, Lu X L. Autumn photoproduction of carbon monoxide in Jiaozhou Bay, China [J]. *Oceanic and Coastal Sea Research*, 2014, **13**(3): 428-436.
- [17] Yang G P, Ren C Y, Lu X L, *et al.* Distribution, flux, and photoproduction of carbon monoxide in the East China Sea and Yellow Sea in spring [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(C2), doi: 10.1029/2010JC006300.
- [18] Yang G P, Wang W L, Lu X L, *et al.* Distribution, flux and biological consumption of carbon monoxide in the Southern Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2010, **122**(1-4): 74-82.
- [19] 张聪, 陆小兰, 杨桂朋, 等. 春季黄海与渤海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和光生产的研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2204-2211.
- [20] Tolli J D, Taylor C D. Biological CO oxidation in the Sargasso Sea and in Vineyard Sound, Massachusetts [J]. *American Society of Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(4): 1205-1212.
- [21] 陆小兰, 杨桂朋, 王晓蒙, 等. 顶空法测定海水中一氧化氮 [J]. *分析化学*, 2010, **38**(3): 352-356.
- [22] Xie H X, Zhang Y, Lemarchand K, *et al.* Microbial carbon monoxide uptake in the St. Lawrence estuarine system [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, **389**: 17-29.
- [23] Johnson J E, Bates T S. Sources and sinks of carbon monoxide in the mixed layer of the tropical south Pacific Ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(2): 347-359.
- [24] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [25] Xie H X, Andrews S S, Martin W R, *et al.* Validated methods for sampling and headspace analysis of carbon monoxide in seawater [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(2): 93-108.
- [26] Wiesenburg D A, Guinasso N L Jr. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1979, **24**(4): 356-360.
- [27] 任春艳. 中国东海和黄海一氧化氮的生物地球化学研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. 25-72.
- [28] Lide D R. *The Handbook of Chemistry and Physics* [M]. Florida: CRC Press, 1992.
- [29] Jones R D. Carbon monoxide and methane distribution and consumption in the photic zone of the Sargasso Sea [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1991, **38**(6): 625-635.
- [30] Stubbins A, Uher G, Kitidis V, *et al.* The open-ocean source of atmospheric carbon monoxide [J]. *Deep-Sea Research II*, 2006, **53**(14-16): 1685-1694.
- [31] Conrad R, Seiler W. Utilization of traces of carbon monoxide by aerobic oligotrophic microorganisms in ocean, lake and soil [J]. *Archives of Microbiology*, 1982, **132**(1): 41-46.
- [32] Ohta K. Diurnal variations of carbon monoxide concentration in the equatorial Pacific upwelling region [J]. *Journal of Oceanography*, 1997, **53**(2): 173-178.
- [33] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析 [J]. *海洋学报*, 2006, **28**(5): 26-34.
- [34] 赵瑞祥, 刘志亮. 台湾东北部黑潮次表层水入侵的季节变化规律 [J]. *海洋学报*, 2014, **36**(1): 20-27.
- [35] 郭炳火, 林葵, 宋万先. 夏季东南南部海水流动的若干问题 [J]. *海洋学报*, 1985, **7**(2): 143-153.
- [36] Xie H X, Simon Belanger, Serge Demers, *et al.* Photobiogeochemical cycling of carbon monoxide in the southeastern Beaufort Sea in spring and autumn [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(1): 234-249.
- [37] 孙湘平. *中国近海区域海洋* [M]. 北京: 海洋出版社, 2006. 1-3.
- [38] Markager S. Dark uptake of inorganic ^{14}C in oligotrophic oceanic waters [J]. *Journal of Plankton Research*, 1998, **20**(9): 1813-1836.
- [39] Sherr E B, Sherr B F, Cowles T J. Mesoscale variability in bacterial activity in the Northeast Pacific Ocean off Oregon, USA

- [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2001, **25**(1): 21-30.
- [40] Zhang Y, Xie H X, Chen G H. Factors affecting the efficiency of carbon monoxide photoproduction in the St. Lawrence estuarine system (Canada). *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(24): 7771-7777.
- [41] Xie H X, Zafiriou O C, Umile T P, *et al.* Biological consumption of carbon monoxide in Delaware Bay, NW Atlantic and Beaufort Sea [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, **290**: 1-14.
- [42] Ducklow H W, Carlson C A. Oceanic bacterial production [J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1992, **12**: 113-167.
- [43] Rivkin R B, Anderson M R, Lajzerowicz C. Microbial processes in cold oceans. I. Relationship between temperature and bacterial growth rate [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1996, **10**(3): 243-254.
- [44] Rivkin R B, Anderson M R. Inorganic nutrient limitation of oceanic bacterioplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 730-740.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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