

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙莺, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	信息(4180, 4219, 4225, 4275)
编辑征稿通知(4172)	

闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征

杨平, 仝川*, 何清华, 黄佳芳

(福建师范大学亚热带湿地研究中心, 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 湿地围垦养殖是人类对于滨海湿地的主要干扰方式之一。以闽江口鳊鱼滩湿地围垦养虾塘和鱼虾混养塘为研究对象, 利用悬浮箱-气相色谱法对养殖塘秋季水-大气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量日进程进行了观测并同步测定了地面气象及表层水的物理、生物和化学指标。养虾塘和鱼虾混养塘水-大气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量均具有明显的日变化特征, 2种养殖塘整体上均表现为吸收 CO_2 的汇, CO_2 通量平均值分别为 $-48.79 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $-105.25 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 排放 CH_4 的源, CH_4 通量平均值分别为 $1.00 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $5.74 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 鱼虾混养塘水-大气界面 CH_4 排放量和 CO_2 吸收量均高于养虾塘。养殖塘水-大气界面温室气体通量受到诸多环境因子的影响, 多元逐步回归分析结果表明, 对于养虾塘, 叶绿素 a 是影响其水-大气界面 CO_2 通量日变化的主要环境因子, PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-} 是影响水-大气界面 CH_4 通量日变化的主要环境要素; 鱼虾混养塘水-大气界面 CO_2 通量主要受到水温、叶绿素 a 的影响, 而溶解氧、 PO_4^{3-} 和 pH 是影响其 CH_4 通量的主要环境因子。

关键词: CH_4 ; CO_2 ; N_2O ; 养殖塘; 水-大气界面; 日变化; 闽江口

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4194-11

Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary

YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, HUANG Jia-fang

(Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal Universities, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Wetland reclamation and aquaculture is one of the main disturbance types in coastal wetlands. Diurnal variations of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes at the water-air interface were determined using a floating chambers + gas chromatography method in a shrimp pond, and a mixed culture pond of fish and shrimp in October in the Shanyutan Wetland of the Min River estuary, southeast China. Meanwhile, the meteorological indicators in ground surface and physical, chemical and biological indicators of surface water were also measured. CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes at the water-air interface all demonstrated distinct diurnal variations. Both shrimp pond and mixed culture pond of fish and shrimp functioned as a sink of CO_2 [the diurnal averaged CO_2 fluxes were -48.79 and $-105.25 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively], and a source of CH_4 [the diurnal averaged CH_4 fluxes were 1.00 and $5.74 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively]; the diurnal averaged CO_2 and CH_4 fluxes at the water-air interface of the mixed culture of fish and shrimp pond were higher than that of the shrimp pond. Greenhouse gas fluxes at the water-air interface from the aquaculture ponds were influenced by many factors. Multiple stepwise regression analysis showed that the concentration of Chlorophyll was the major factor affecting the CO_2 fluxes, and the concentrations of SO_4^{2-} and PO_4^{3-} were the major factors affecting the CH_4 fluxes at the water-air interface of the shrimp pond; whereas water temperature and Chlorophyll were the major factors affecting the CO_2 fluxes, and dissolved oxygen, PO_4^{3-} and pH were the major factors affecting the CH_4 fluxes at the water-air interface of the mixed culture pond of fish and shrimp.

Key words: CH_4 ; CO_2 ; N_2O ; aquaculture ponds; water-air interface; diurnal variations; Min River estuary

大气中温室气体浓度急剧增加是导致全球气候变暖的主要原因之一。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 作为大气中最重要的3种温室气体,其源/汇问题早已成为国内外学者的研究热点^[1~4]。水体系统的碳、氮循环和碳蓄积是全球碳、氮循环变化研究的重要组成部分,水-大气界面及水-沉积物界面的温室气体通量不可忽视。目前,国内外关于水体生态系统温室气体通量的研究主要集中于湖泊^[5~9]、人工水库^[10~12]、河流^[13,14]等水体系统,而对于沿海河口、海湾区域潮汐湿地遭受人类围垦后形成的水产养殖

塘温室气体通量的研究尚鲜见相关文献报道。

我国海岸线长达18 000 km,具有众多的河口、海湾、浅海和滩涂湿地,在这些区域海洋渔场面积为 $8.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中浅海和滩涂面积为 $1.33 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[15],其水-气界面、沉积物-大气界面及水-沉积

收稿日期: 2012-02-25; 修订日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071148); 福建省科技厅重点项目(2010Y0019); 福建师范大学地理科学学院研究生科技创新项目

作者简介: 杨平(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向湿地生物地球化学循环, E-mail: yangping528@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

物界面的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 交换通量对于大气中温室气体浓度的影响不容忽视。因此积极开展我国沿海区域水产养殖塘温室气体通量研究,对于了解水产养殖塘温室气体通量变化规律,综合评价水产养殖塘对区域气候变化的影响,完善水体生态系统温室气体排放通量清单的编制均具有一定的理论参考价值和实际意义。

本研究于 2011 年 10 月 20 ~ 21 日对闽江河口区口外海滨段鳝鱼滩湿地滩涂水产养殖塘水-气界面的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 交换通量进行了连续 24 h 原位观测和研究,可以在一定程度上反映我国东南沿海潮汐湿地围垦后形成的水产养殖塘水-气界面温室气体交换通量日变化特征,以期今后深入开展水产养殖塘温室气体通量特征及其机制研究提供基础数据和参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域与观测点

研究区域位于闽江口鳝鱼滩湿地。闽江河口区气候暖热湿润,年降水日数 153 d,年平均降水量 1 346 mm,降水多集中在 3 ~ 9 月^[16]。潮汐属典型的半日潮,水源包括天然降水、河水和潮水。研究样地设在鳝鱼滩湿地中偏西部五门闸附近堤坝内侧的 2 个水产养殖塘,1 个为养虾水塘 (26°01'25.99"N, 119°37'56.26"E), 1 个为鱼虾混合养水塘 (26°01'37.05"N, 119°37'40.44"E)。养虾塘距离堤坝约 160 m,面积为 330 m²,平均水深为 0.8 m,每天施加 2 次饵料,1 次施加量为 20 ~ 40 kg,虾饲养量约 0.3 万尾。鱼虾混养塘距离堤坝约 250 m,面积为 650 m²,平均水深为 1 m,每天施加 3 次饵料,1 次施加量为 40 ~ 80 kg,鱼虾饲养量约 0.5 万尾(其中鱼: 0.3 万尾,海虾: 0.2 万尾)。施加饵料的营养成分构成:水分 11%、蛋白质 42%、粗脂肪 4.0%、粗纤维 3.0%、粗灰分 15.0%、钙 1.0% ~ 3.0%、总磷 1.0%、食盐 0.5% ~ 2.5%、赖氨酸 2.3%。

1.2 气样采集与测定

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量测定气样采集运用静态悬浮箱-气相色谱仪法。采样点均布设在养殖塘的中央(养虾塘采样点水深 1 m,鱼虾混养塘采样点水深 1.05 m),4 个重复一线排开(各静态悬浮箱间距约为 30 cm)。采样时乘小木船抵达采样点进行作业,在具体采集气样前,提前 30 min 布设好所有悬浮箱。采样箱的主体设备主要由透明的有机玻璃箱组成(直径 25 cm,高 40 cm 的圆筒);箱上安装一个

通风管用于平衡箱内外的压力,通风管一般是细长小管,绕于箱体的顶部使箱内外空气直接相通;箱内顶部安装 1 个小风扇混合箱内气体,侧面安装有电源插头和气体采样接口。采样前让箱口朝上,以便箱内充满空气;采样时将采样箱箱口朝下悬挂于固定在由泡沫制作成的载体物上。同时,采样时为了确保箱内空气与外界隔绝,需将采样箱置于水面,使箱口侵入水中,侵入的深度需根据采样时的风浪状况来定。

试验观测时间为 2011 年 10 月 20 ~ 21 日,第 1 次通量采样开始时间为上午 07:00,在 45 min 内每隔 15 min 采集 1 次气样(共采集 4 个气样),采集利用 100 mL 注射器,气样采集后立刻注射到 1 L 铝箔采样袋中(大连德霖气体包装有限公司),之后每隔 3 h 进行 1 次通量观测。

样品采集后立刻送回实验室用 GC-2010 和 GC-2014 气相色谱仪(岛津, Japan)分析测定 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 气体浓度。 CO_2 和 CH_4 测定的检测器均为 FID(火焰离子检测器),载气为氮气,流速为 30 mL·min⁻¹;氢气为燃气,流速为 47 mL·min⁻¹;空气为助燃气,流速为 400 mL·min⁻¹;检测器温度为 200℃,柱箱温度为 45℃。 N_2O 采用的检测器是 ECD 检测器,载气为 5% 的 CH_4 和 95% 的 Ar 混合气体,流速为 70 mL·min⁻¹。

1.3 水样采集与测定

与气样采集同步,在每个悬浮箱采样点附近采集水体表层(10 cm 深)的水样。采集的水样立刻装进 100 mL 聚乙烯瓶中并带回实验室,采用紫外-可见分光光度计(岛津 UV-2450, Japan)测定水样中的叶绿素 a 含量;用流动注射分析仪(SKALAR San⁺⁺, Netherlands)分析水样中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} 等水体理化指标;采用铬酸钼分光光度法测定水样中的 SO_4^{2-} 。

1.4 气象因子和水环境因子测定

气压、风速、气温采用便携式气象仪(Kestrel-3500, USA)测定;光照强度采用 3415F 手持光量子计(Quantum Light meter, USA)测定,测定高度为距水面 1.5 m。水温、pH 值、氧化还原电位和电导率分别采用 IQ150 便携式 pH/氧化还原电位/温度计(IQ Scientific Instruments, USA)和 2265FS 便携式电导盐分计(Spectrum Technologies Inc, USA)原位同步测定,测量深度为水面下 10 cm;水中的透明度、溶解氧和盐度用多参数水质监测仪(HORIBA, Japan)测量,深度同样为水面下 10 cm。大气气压、

总辐射和光合有效辐射数据来自闽江河口鳊鱼滩湿地生态定位站自动气象站(LSI-LASTEM, Italy).

1.5 气体通量计算

水-气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量 [F , $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 计算公式^[17]为:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dc}{dt}$$

式中, F 为气体交换通量; V 为箱内空气体积; ρ 为标准状态下气体的密度; A 为采样箱覆盖面积; P 为采样点处的气压; T_0 和 P_0 为标准状态下的空气绝对温度(273.15 K)和气压(1 013.25 hPa); T 为采样点时该点得绝对温度, dc/dt 为浮箱内气体浓度变化率. 浮箱内的气体浓度变化率通过对每次采集的 4 个气样所测的各气体含量进行线性回归分析获得, 测量的浓度数据只有在线性回归系数 $R^2 > 0.9$ 才视为有效数据^[18]. 通常, 气体交换通量是正值表示气体从水体进入大气(即排放), 负值表示气体从大气进入水体中(即吸收).

1.6 数据处理

采用 Excel 2003 对原始数据进行平均值及标准误差的计算. 2 个养殖塘间 CO_2 通量及 CH_4 通量日进程的差异性检验采用 SPSS 17.0 软件中的重复测量的方差分析(Repeated measures ANOVA) 进行统计分析, 统计分析中每个养殖塘的 CO_2 通量或 CH_4 通量在日进程中的 9 次测量数据(每次测量 4 个通量值, 共 36 个通量数据) 为重复测量变量数据; 温室气体通量与环境因子间相关关系采用 SPSS 17.0 软件中 Pearson 相关分析进行统计分析; 利用 SPSS 17.0 软件中的多元逐步回归分析法探讨分析影响养殖塘水-气界面温室通量的主要环境因子.

2 结果与分析

2.1 水-大气界面温室气体通量的日变化

2 个养殖塘水-大气界面 CO_2 通量均具有明显的日变化特征[图 1(a)]. 养虾塘水-气界面 CO_2 日平均通量为 $-48.48 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 吸收峰 [$-113.01 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 出现在 10:00 时, 排放峰 [$67.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 出现于次日 07:00 时, 全天整体表现为 CO_2 的汇. 鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 日平均通量为 $-105.25 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 吸收峰值 [$-218.85 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 出现在 16:00 时, 排放峰 [$65.67 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 出现于 20 日 07:00 时, 全天整体同样表现为 CO_2 的汇.

养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面 CH_4 通量亦具

有明显的日变化特征, 均表现为大气中 CH_4 的排放源[图 1(b)]. 养虾塘水-气界面 CH_4 日平均排放通量为 $1.00 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 最大值出现于上午 10:00 时 [$1.63 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 最小值出现于下午 16:00 时 [$0.44 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. 对于鱼虾混养塘, 其 CH_4 的日平均排放通量为 $5.74 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最大值出现于观测初始时刻的早上 07:00 时 [$9.62 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 最小值出现于 20 日下午 16:00 [$2.44 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$].

鱼虾混养塘水-气界面 N_2O 通量日进程特征如图 1(c) 所示, 通量值日变化范围为 $2.25 \sim 8.59 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 平均排放通量为 $4.59 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 日最大值出现于夜间 19:00 时, 为 $8.59 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 最小值于次日凌晨 04:00 时, 为 $2.25 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 全天表现为大气中 N_2O 的排放源. 白天鱼虾混养塘水-气界面 N_2O 通量平均值为 $4.16 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 夜间为 $5.12 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 白天稍低于夜间, 但差异性不显著 ($P > 0.05$). 养虾塘气样测定数据绝大多数线性回归系数 $R^2 < 0.9$, 因此养虾塘水-气界面 N_2O 通量无法计算.

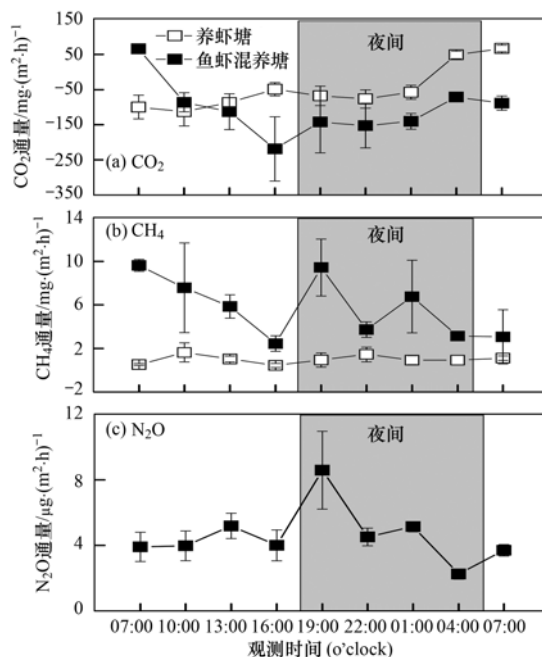


图 1 2 个水产养殖塘水-气界面温室气体通量的日进程

Fig. 1 Diurnal variations of greenhouse gases fluxes at the water-air interface of the two aquaculture ponds

2.2 气象因子和水环境因子的日变化

2.2.1 气象因子的日变化

测定日的气温和风速具有明显的日变化特征(图 2). 气温在观测期间呈现先上升后下降的变化趋势, 日变化范围为 $19.63 \sim 22.67^\circ\text{C}$, 平均气温

21.8℃,最低和最高值分别出现于上午 07:00 和下午 16:00 时。风速呈现出增加-下降-增加的日变化趋势,波动性较大,平均值为 $3.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,日变化范围为 $1.46 \sim 4.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大和最小风速分别出现于 20 日上午 07:00 和夜间 21:00 时。气温与风速呈负相关,但相关性不显著($P > 0.05$)。

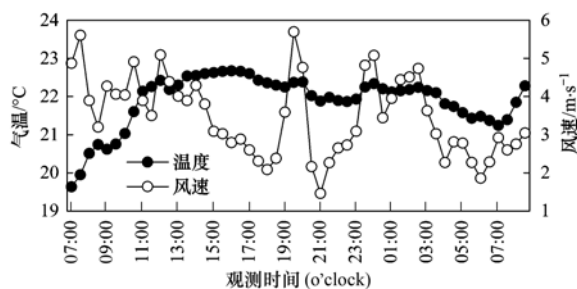


图 2 测定日气温和风速的日变化规律

Fig. 2 Diurnal variations of the air temperature and wind speed at the sampling date

2.2.2 表层水环境因子的日变化

养虾塘和鱼虾混养塘 pH 值均呈碱性,日变化范围分别为 $8.48 \sim 8.95$ 和 $8.69 \sim 9.04$ [图 3(a)], Eh 变幅分别为 $-87.20 \sim -114.63 \text{ mV}$ 和 $-99.28 \sim -125.65 \text{ mV}$ [图 3(b)], 2 个养殖塘表层水 pH

与 Eh 均呈现显著的负相关关系($n = 9, P < 0.01$)。 NH_4^+-N 变化范围分别为 $1.01 \sim 1.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.95 \sim 1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(c)], NO_3^--N 变化范围分别为 $0.06 \sim 0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.44 \sim 0.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(d)], 2 个养殖塘表层水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的日变化趋势基本一致。 SO_4^{2-} 变化范围分别为 $130.41 \sim 189.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $182.59 \sim 247.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(e)], PO_4^{3-} 日变化范围分别为 $0.48 \sim 0.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \sim 0.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(f)]。鱼虾混养塘表层水体除 Eh、 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-} 浓度低于养虾塘外,其它理化环境指标 (EC、pH、 NO_3^--N 、 SO_4^{2-}) 均高于养虾塘,2 个观测点表层水盐度没有呈现出明显地时间变化特征,盐度分别保持为 5.2‰ 和 5.3‰ 。

2 个养殖塘表层水温的日变化特征如图 4 所示,养虾塘表层水温平均值为 20.3°C ,日变化范围为 $19.5 \sim 20.6^\circ\text{C}$; 鱼虾混养塘表层水温变化范围为 $20.0 \sim 20.6^\circ\text{C}$,日平均水温为 20.5°C 。

2 个养殖塘表层水 (10 cm) 溶解氧和叶绿素 a 质量浓度的日变化特征如图 5 所示,养虾塘和鱼虾混养塘表层水溶解氧质量浓度平均值分别为 $4.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (日变化范围为 $2.48 \sim 8.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和

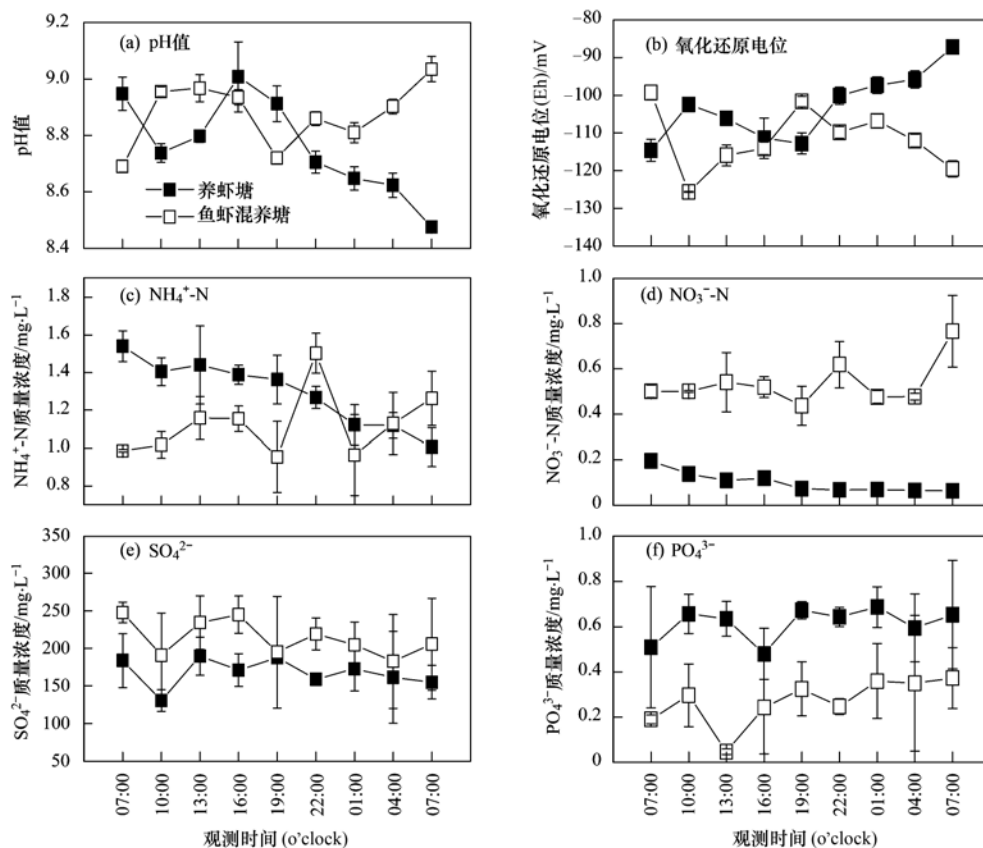


图 3 2 个水产养殖塘表层水环境因子的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of the water environmental factors in the two aquaculture ponds

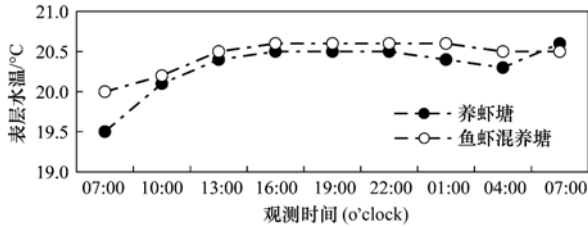


图 4 2 个水产养殖塘表层水水温的日变化特征
Fig. 4 Diurnal variation in the surface temperature of the two aquaculture ponds

5.82 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (日变化范围为 2.73 ~ 8.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 叶绿素 a 质量浓度的平均值分别为 28.54 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (日变化范围为 21.84 ~ 35.49 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 545.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (日变化范围为 363.77 ~ 607.43 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 日变化观测期间, 养虾塘与鱼虾混养塘表层水体中溶解氧和叶绿素 a 质量浓度的差异性均呈现出极显著水平[溶解氧: $F(1, 70) = 94.789, P < 0.01$; 叶绿素 a: $F(1, 50) = 1968.734, P < 0.01$].

2.3 2 种养殖塘水-气界面温室气体通量的比较

在本研究中, 日时间尺度上鱼虾混养塘 CO_2 吸

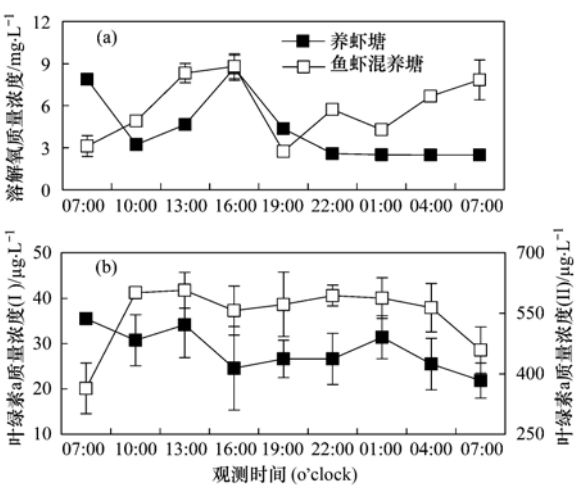


图 5 2 个水产养殖塘表层水溶解氧和叶绿素 a 质量浓度的日变化特征

Fig. 5 Diurnal variations in the concentrations of dissolved oxygen and Chla in the two aquaculture ponds

收通量显著高于养虾塘 ($F = 38.18, P < 0.05$), 同时, 鱼虾混养塘对于 CH_4 排放通量也显著高于养虾塘 ($F = 480.34, P < 0.01$), 见表 1.

表 1 2 个养殖塘水-大气界面 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 通量的比较¹⁾

Table 1 Comparison of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes at the water-air interface of the two types of aquaculture ponds

采样点	气体	最大值 $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	最小值 $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	平均值 $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	标准差 $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	变异系数 $\%$
养虾塘	CO_2	67.05	-113.01	-48.48	63.58	131.16
	CH_4	1.63	0.44	1.00	0.38	38.52
	N_2O	—	—	—	—	—
鱼虾混养塘	CO_2	65.67	-218.85	-105.25	78.07	74.18
	CH_4	9.62	2.44	5.74	2.78	30.30
	N_2O	8.58	2.24	4.58	1.41	30.81

1) 养虾塘 N_2O 测定数据绝大多数线性回归系数 $R^2 < 0.9$, 因此, 无养虾塘的水-气界面 N_2O 通量数据; 表中不同气体通量单位分别是以 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 计量

2.4 温室气体通量与主要环境因子的关系

2.4.1 与温度、风速的关系

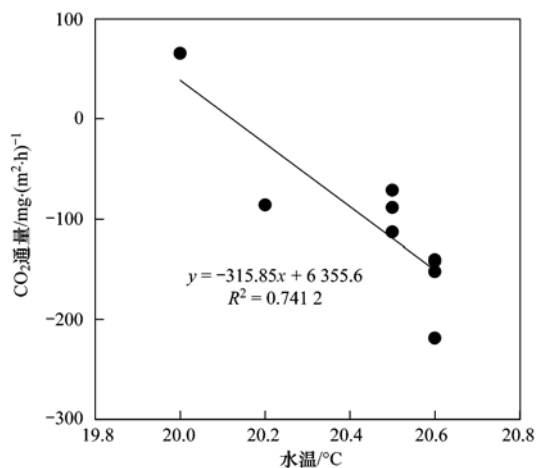
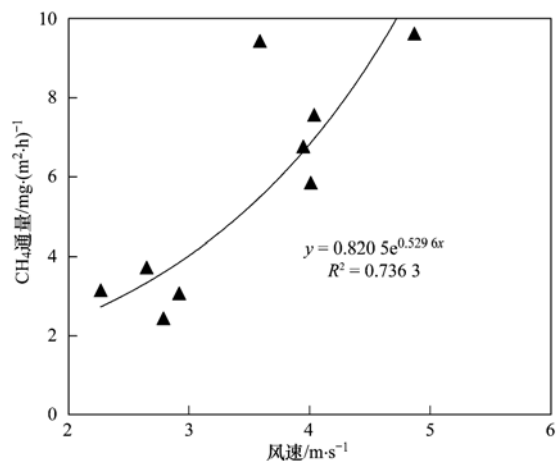
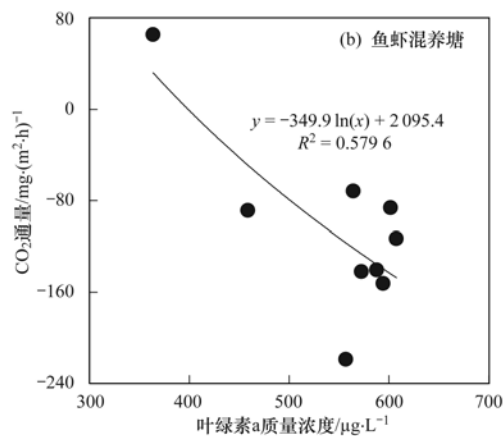
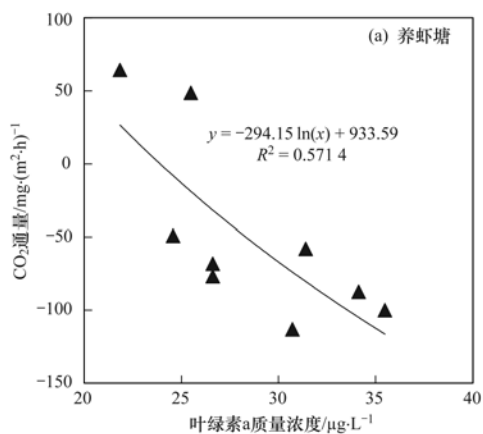
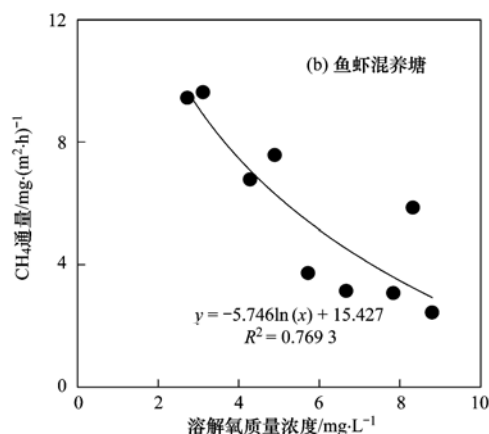
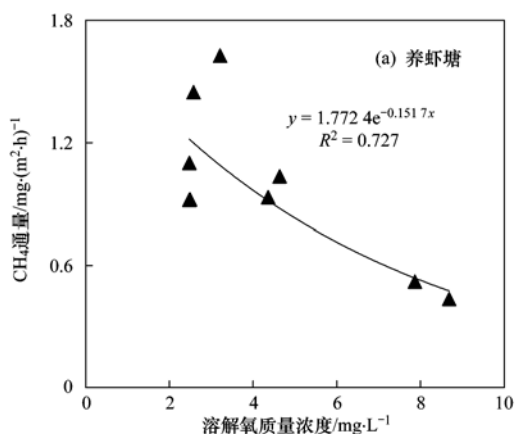
温度、风速与 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的相关分析表明, 养虾塘水-气界面 CO_2 和 CH_4 通量与气温、表层水温以及风速均无相关关系 ($n = 9, P > 0.05$). 鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 通量与水温存在极显著负相关 ($n = 9, P < 0.01$; 图 6), 与气温、风速无显著相关关系 ($n = 9, P > 0.05$); 水-气界面 CH_4 通量与风速呈现极显著的指数正相关关系 ($n = 9, P < 0.01$; 图 7), 与气温、水温均无相关关系 ($n = 9, P > 0.05$). 此外, 鱼虾混养塘水-气界面 N_2O 通量与气温、表层水温以及风速也均无相关关系 ($n = 9, P > 0.05$).

2.4.2 与叶绿素 a、溶解氧的关系

养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 通量与水体中叶绿素 a 含量均呈显著对数负相关关系 [$n = 9, P < 0.05$; 图 8(a) 和 8(b)], CH_4 通量与水体中溶解氧含量分别呈显著 [$n = 9, P < 0.01$; 图 9(a)], 或极显著 [$n = 9, P < 0.01$; 图 9(b)] 的对数或指数负相关关系.

2.4.3 其它环境因子

养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量与水体 pH、Eh 等其它环境因子的相关性分析结果如表 2 所示, 在日时间尺度上, 养虾塘水-气界面 CO_2 通量与 Eh 和 NH_4^+ 分别表现出显著正相关和负相关 ($n = 9, P < 0.05$); CH_4 通量与 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 分别呈显著负相关和正相关 ($n = 9, P < 0.05$). 鱼虾混养塘水-气界面 CH_4 排放通量与 pH、 NH_4^+ 均呈

图6 水-大气界面 CO₂ 通量与水温的相关关系Fig. 6 Relationship between CO₂ flux and water temperature图7 水-大气界面 CH₄ 通量与风速的相关关系Fig. 7 Relationship between CH₄ flux and wind speed图8 养殖塘水-气界面 CO₂ 通量与叶绿素 a 的相关关系Fig. 8 Relationship between CO₂ flux and Chlorophyll a in the two aquaculture ponds图9 养殖塘水-气界面 CH₄ 通量与溶解氧的相关关系Fig. 9 Relationship between CH₄ fluxes and dissolved oxygen in the two aquaculture ponds

现出显著的负相关关系 ($n = 9$, $P < 0.05$); CO₂ 和 N₂O 通量与 pH 等其它环境因子均无相关关系 ($n = 9$, $P > 0.05$).

2.4.4 影响养殖塘水-气界面温室通量的主要水环境因子分析

为了探讨以上各水环境因子对于温室气体通量

表 2 养殖塘水-气界面 CO₂、CH₄和 N₂O 通量与环境因子的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficient between CO₂, CH₄, N₂O fluxes and environment factors

采样点	气体	pH	Eh	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
养虾塘	CO ₂	0.641	0.709 *	-0.829 *	-0.598	-0.148	0.043
	CH ₄	-0.543	0.472	-0.211	-0.306	-0.671 *	0.725 *
鱼虾混养塘	CO ₂	-0.351	0.268	-0.298	-0.020	-0.083	—
	CH ₄	-0.717 *	0.484	-0.705 *	-0.542	0.002	—
	N ₂ O	-0.470	0.425	-0.315	-0.319	-0.048	—

1) * 代表相关性达到 0.05 显著性水平, ** 代表相关性达到 0.01 极显著性水平; “—”表示文中没有相关数据

影响的贡献的大小,利用多元回归中的逐步回归分析法分别建立 2 种养殖塘 CO₂ 和 CH₄ 通量(Y)与各水环境因子(水温、pH、EC、Eh、溶解氧、叶绿素 a、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、SO₄²⁻、PO₄³⁻)间的最优回归方程:

$$\begin{aligned} Y_{\text{CO}_2} &= 65.784 - 4.807 X_{\text{叶绿素a}} \quad (\text{养虾塘}) \\ Y_{\text{CO}_2} &= 6355.556 - 315.846 X_{\text{水温}} \quad (\text{鱼虾混养塘}) \\ Y_{\text{CH}_4} &= 0.871 + 3.193 X_{\text{PO}_4^{3-}} - 0.011 X_{\text{SO}_4^{2-}} \quad (\text{养虾塘}) \\ Y_{\text{CH}_4} &= -41.068 - 1.430 X_{\text{溶解氧}} - \\ &16.576 X_{\text{PO}_4^{3-}} + 6.642 X_{\text{pH}} \quad (\text{鱼虾混养塘}) \end{aligned}$$

多元回归中逐步回归分析结果表明,在以上各水环境因子中,养虾塘水体叶绿素 a 质量浓度是影响 CO₂ 通量的主要水环境因子; PO₄³⁻ 和 SO₄²⁻ 质量浓度是影响 CH₄ 通量的主要水环境因子,它们之间的复相关系数均达到显著性水平(CO₂: R² = 0.929, P < 0.01; CH₄: R² = 0.879, P < 0.05). 鱼虾混养塘水温是影响 CO₂ 通量的主要水环境因子;而溶解氧、PO₄³⁻ 和 pH 是影响其 CH₄ 通量的主要水环境因子,它们之间的复相关系数也均呈现出显著性水平(CO₂: R² = 0.741, P < 0.01; CH₄: R² = 0.985; P < 0.05). 对于鱼虾混养塘 N₂O 通量,没有变量被引入回归方程中.

3 讨论

3.1 2 种养殖塘水-气界面温室气体通量日变化特征

闽江口滩涂养虾塘秋季白天水-气界面 CO₂ 和 CH₄ 通量平均值分别为 - 56.42 和 0.94 mg·(m²·h)⁻¹, 夜间分别是 - 38.55 和 1.06 mg·(m²·h)⁻¹, CO₂ 通量的吸收峰值和排放峰值分别出现于上午 10:00 和次日 07:00, CH₄ 通量的排放峰值出现于下午 10:00 和夜间 22:00 时. 鱼虾混养塘白天水-气界面 2 种温室气体通量白天 CO₂ 和 CH₄ 通量平均值分别为 - 88.19 和 5.71 mg·(m²·h)⁻¹, 夜间分别是 - 126.56 和 5.76 mg·(m²·h)⁻¹. 测定日养虾塘和鱼虾混养塘整体上

表现大气中 CO₂ 的吸收汇, CH₄ 的排放源,这与以往的研究认为水体生态系统是大气中 CO₂ 的吸收汇^[19,20] 和 CH₄ 的排放源^[8,21] 的结论一致.

水温和叶绿素 a 是影响水体 CO₂ 通量日变化的主要环境因子^[12,14,22,23]. 水温通过影响水体中微生物活性对有机质的分解^[14,24] 和气体在水中的溶解度^[12],来影响水-气界面 CO₂ 和 CH₄ 交换通量的昼夜变化. Rantakari 等^[24] 研究指出,水温的增加可以通过促进水体内的初级生产并且加快有机质降解过程来促进水体对大气中 CO₂ 的吸收. 本研究中,鱼虾混养塘水-气界面 CO₂ 交换通量日变化呈现出夜间吸收值大于白天的特征,这与夜间每个观测时刻的水温(夜间平均水温为 20.6℃)均要高于白天(平均水温为 20.4℃)有着显著的关系(图 4 和图 6). 水体中的初级生产力状况是由水中藻类等水生生物的光合与呼吸作用共同决定的,叶绿素 a 浓度是水体中初级生产力的主要指标^[14],其昼夜变化对于水体与大气间 CO₂ 交换通量的昼夜变化也具有重要影响. 冉景江等^[25] 研究发现:①在自养状态下,水中藻类等水生生物的光合初级生产大于呼吸消耗,碳被固定,导致水体 CO₂ 分压降低,从而使得水体吸收大气中的 CO₂,其吸收能力与水中叶绿素呈现正相性;②在异养状态下,水中藻类等水生生物的呼吸作用较强,CO₂ 的分压增加,将会增加水体中的 CO₂ 进入大气中. 本研究中,养虾塘水-气界面 CO₂ 交换通量呈现出白天吸收值大于夜间的昼夜变化特征,与白天水体中叶绿素 a 质量浓度(平均值为 29.35 μg·L⁻¹)高于夜间(平均值为 27.66 μg·L⁻¹)有着显著的相关关系[图 5(b)和 8(a)].

水体中溶解氧质量浓度是影响水体与大气间 CH₄ 通量日变化的主要环境因子^[26]. 水体中溶解氧浓度的高低不仅影响到产甲烷菌对碳源利用的程度,而且还影响到水体的厌氧环境,最终影响到水体甲烷排放通量. Schrier-Uijl 等^[26] 研究指出,水体环境中 CH₄ 排放量变化与水体氧含量变化有着显著

的关系,通常情况下氧含量低的时候水体排放的 CH_4 要大于氧含量高的时候. 本研究中,养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面 CH_4 通量均呈现出夜间排放值大于白天的昼夜变化特征,这与 2 个养殖塘水体中溶解氧浓度夜间(平均值分别为 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)均要小于白天(平均值分别为 $5.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)有着显著的相关关系[图 5 (a)和图 9].

3.2 2 种水产养殖塘水-气界面温室气体通量的差异性

通过对 2 种养殖塘水-气界面温室气体日交换通量与水环境因子的相关分析,将 2 种养殖塘中的水环境因子进行差异性检验,结果表明,养虾塘与鱼虾混养塘之间水-气界面温室气体通量日变化差异性与 2 种养殖塘水体中 pH、氧化还原电位 Eh、初级生产力(叶绿素 a)及营养盐的差异性存在很密切的关系.

水体向大气中吸收或排放 CO_2 是其内部新陈代谢的结果,水体中浮游植物利用 CO_2 的光合作用以及水体中微生物利用有机质进行的产生 CO_2 的呼吸作用对水-气界面 CO_2 交换通量起重要影响^[9]. 研究发现,初级生产力高的富营养型水体对 CO_2 吸收能力要强于初级生产力低的水体^[9,27]. 因为初级生产力高的水体,可以通过水生生物的光合作用来固定更多的 CO_2 ,减少水-气界面排放的 CO_2 ,进而会增强水体对大气中 CO_2 汇的作用^[14]. 本研究中,养虾塘与鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 日交换通量的平均值分别为 -48.48 和 $-105.26 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 后者的通量值是前者的 2.17 倍,通过对 2 种养殖塘水体中叶绿素 a 质量浓度和 CO_2 交换通量进行分析. 结果表明:①养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 交换通量与水体中叶绿素 a 质量浓度均存在显著的负相关关系(图 8);②鱼虾混养塘表层水体中叶绿素 a 浓度在每个观测时刻均要极显著的高于养虾塘 [$F(1, 52) = 1968.734, P < 0.01$],说明 2 种养殖塘之间叶绿素 a 质量浓度的差异是引起养殖塘间水-气界面 CO_2 通量差别的重要因素. 水体中 pH 值的高低是造成养虾塘与鱼虾混养塘之间 CO_2 交换通量产生差异的另一个重要因素. 水体中 pH 值的高低直接影响到水体中碳酸盐的平衡状况,当 pH 值较高时,水体中游离的 CO_2 容易溶于水中形成碳酸盐,水中 CO_2 分压将会降低,导致水中溶解的 CO_2 处于不饱和状态,从而会促进大气中 CO_2 进入水体;反之,pH 值较低时,有利于 CO_2 由水体向大气

中扩散^[23]. 本研究中,养虾塘与鱼虾混养塘在整个日变化观测期间整体均表现为大气中 CO_2 的吸收汇,且鱼虾混养塘水体对于 CO_2 的吸收能力要强于养虾塘,这与鱼虾混合养殖塘水体 pH 值(均值为 8.88)高于养虾塘(均值为 8.76)有着很大关系.

CH_4 是在严格厌氧环境下产甲烷菌作用于产甲烷基质的产物^[28],水中氧化还原电位是影响水体 CH_4 排放通量重要的因素之一. 本研究在观测 CH_4 排放通量的同时,也对养虾塘和鱼虾混养塘表层水体 10 cm 氧化还原电位 Eh 进行了测定. 测定结果表明,鱼虾混养塘表层水体氧化还原电位 Eh(平均值为 -110.57 mV)显著低于养虾塘(平均值为 -103.09 mV)[图 3(b)],由于甲烷产生量与氧化还原电位 Eh 成反比^[29~31],氧化还原电位 Eh 愈低愈有利于甲烷的产生,进而会促进甲烷排放,这是导致鱼虾混养塘水体向大气中排放的 CH_4 比养虾塘多的重要原因. 除了氧化还原电位 Eh 外,水中营养物质浓度的高低和初级生产力大小也是导致 2 种养殖塘间 CH_4 排放通量存有差异的重要影响因素. Huttunen 等^[10]对 Lokka 和 Porttipahta 水库的研究指出,淹没的植被和水中高浓度的营养物质和高的初级生产力是导致 Lokka 水库拥有更高 CH_4 排放量的主要驱动因子. 湿地环境中甲烷的产生过程依赖于有机质的数量和性质,产甲烷菌的活性以及电子受体的有效性和性质,因此甲烷潜在产生量以及排放量与有机物质含量呈在正相关^[32]. 本研究中,鱼虾混养塘饲养的鱼虾数量和施加的饵料均是养虾塘的近一倍,生物量多,有机物排泄量大,进而导致水体中具有较高的营养物质和初级生产力,从而造成鱼虾混养塘甲烷产生量和排放量要大于养虾塘.

3.3 水产养殖塘水-气界面温室气体通量的主要影响因素

3.3.1 温度和风速

通常情况下,水-气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量在长时间尺度(如季节变化、年际变化等)上其时间变异性与温度、风速存有很大关系^[33,34],但在短时间尺度上(如日变化)与温度或风速的依存关系较为复杂^[26],并且 3 种温室气体对于温度和风速的响应也不尽相同. 有研究显示,水-气界面温室气体通量日变化主要受水温 and 风速控制,且与水温 and 风速分别存有显著的负相关^[35]和正相关关系^[36];而另一些研究则表明,水体与大气之间温室气体排放通量主要受控于气温,且与气温存有显著的正相关^[21];也有研究发现,水-气界面温室气体排放通量

与温度和风速均无显著相关性^[26]. 本研究结果表明, 养虾塘水-气界面的 CO_2 和 CH_4 通量和鱼虾混养塘水-气界面的 N_2O 通量与气温、表层水温以及风速均无显著相关关系 ($n=9$, $P>0.05$); 而鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 通量与水温呈极显著负相关 ($n=9$, $P<0.01$; 图 6), CH_4 通量与风速呈现极显著的指数正相关关系 ($n=9$, $P<0.01$; 图 7), 研究进一步证实了在水体水-气界面温室气体通量与温度、风速的关系较为复杂, 并且 3 种主要温室气体对于温度和风速变化的响应也不尽一致.

3.3.2 叶绿素 a 和溶解氧

水生生物的生物泵^[37] 依靠水生生物 (尤其是浮游植物) 的光合作用将水体中溶解的无机碳转化为有机碳以及通过呼吸作用释放 CO_2 来影响水体与大气之间的 CO_2 分压状况, 进而对水-气界面 CO_2 通量产生影响. 水体中叶绿素 a (Chla) 是植物进行光合作用的色素之一, 也是水体中浮游植物数量的重要表征, 其质量浓度的高低可在一定程度上反映光合作用水平^[9]. 养虾塘与鱼虾混养塘表层水体叶绿素 a 质量浓度差异较大, 原因主要是: ①为了确保池塘中海虾在生长过程中有较为清洁的海水, 养殖户会定期 (一般为 7 d) 进行虾塘水体的更换, 在本试验开展的前一天, 养虾塘水体正好更换过 1 次海水; ②鱼虾混养塘在施加的饵料, 饲养的生物量方面几乎是养虾塘的 1 倍, 此外, 鱼虾混养塘更换水体的周期长 (通常为 15 d), 从而导致水体中富营养化较为严重, 池塘中水藻类植物较多. 本研究中的 2 个养殖塘水-气界面 CO_2 交换通量与 Chla 之间均存在显著负相关 (图 8), 与 Xing 等^[8]、吕迎春等^[9] 对湖泊和水库的研究结果相一致.

水中溶解氧含量是影响水产养殖塘 CH_4 排放的一个重要环境因子. 溶解氧通过影响甲烷产生菌产甲烷所需要的厌氧环境程度来影响甲烷产生量, 从而引起甲烷排放通量的变化. Schrier-Uijl 等^[26] 在对荷兰的 5 个浅水淡水湖泊和 14 个排水沟的研究中发现, 不同水体环境 CH_4 排放量与水体氧含量变化有着显著的关系, 通常情况下氧含量低的水体环境其 CH_4 的排放量要大于氧含量高的水体. 本研究中, 两种养殖塘水-气界面 CH_4 排放通量与水体中溶解氧含量的拟合关系较好 (图 9), 分别呈显著的指数及极显著的对数负相关关系 (养虾塘: $R^2 = 0.727$, $n=9$, $P=0.019$; 鱼虾混养塘: $R^2 = 0.769$, $n=9$, $P=0.004$), 反映了水体中溶解氧含量对滩涂湿地养殖塘水-气界面 CH_4 排放通量日变化具有重

要影响.

3.3.3 其它环境因子对水-气界面温室气体通量的影响

pH 对水体与大气之间碳通量交换有着不可忽略的影响. pH 变化不仅会影响到水中有机物质的合成、分解, 而且还会影响到水体以及沉积物中微生物的活性, 从而致使水体中温室气体排放通量受到影响. 在湿地土壤中, 微生物活性的最适 pH 值一般为 6~8, 超出这个范围时, 微生物活性会显著降低, 从而使得温室气体的排放大幅度下降^[38]. 但对于水体环境来说, 由于产甲烷菌以及水体浮游生物等微生物活性与 pH 之间的关系较为复杂, 从而造成水体与大气之间温室气体排放通量对于 pH 的响应也具有一定的复杂性, 有的研究认为两者之间呈正相关^[35] 或负相关^[26,39], 也有研究认为没有相关性^[20]. Inubushi 等^[40] 研究指出, 在水体环境中 CO_2 和 CH_4 排放通量与 pH 存在负相关关系, 但当 $\text{pH} < 7$ 时通常呈现出正相关性. 本研究结果显示, 只有鱼虾混养塘中的 CH_4 排放通量 pH 呈显著相关关系 (表 2).

NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 也是影响湿地温室气体排放的重要环境因子. Conrad 等^[41] 在进行稻田 CH_4 排放与 NH_4^+ 关系的研究中发现, 由于 NH_4^+ 可以对甲烷氧化菌产生抑制作用, 因此使得甲烷氧化量减少, 进而会促进稻田甲烷的排放. Schrier-Uijl 等^[26] 在对荷兰的湖泊和排水沟研究中也发现, 两种水体环境下 CH_4 、 CO_2 排放通量均随着 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的增加而增加, 并且 CH_4 排放通量与 PO_4^{3-} 呈现出显著正相关. 本研究中, 尽管闽江口滩涂养殖塘水-气界面 CH_4 排放通量和 PO_4^{3-} 之间的相关关系与 Schrier-Uijl 等^[26] 研究结果基本一致; 但 CO_2 和 CH_4 通量与 NH_4^+ 之间的关系与已有研究结论正好相反, 并且养虾塘 CO_2 通量和鱼虾混养塘 CH_4 通量与 NH_4^+ 之间的负相关关系均到达显著性水平. 实际上, 在水体中除了 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 时间尺度上的变化会影响到水体温室气体通量外, 其它因子如 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的变化也会影响到水体中温室气体的吸收或排放. 本研究发现, 养殖塘水-气界面温室气体通量日变化在绝大多数情况下与 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的日时间尺度变化存在负相关关系, 但相关性不显著 (除养虾塘 CH_4 排放通量与 SO_4^{2-} 呈显著相关性).

本研究只对 2 个养殖塘水-气界面温室气体通量和有关环境因子秋季日变化特征的观测, 因此只

是反映了闽江口滩涂水产养殖塘秋季水-气界面温室气体通量的日变化特征和环境因子对其温室气体通量的影响,而在不同季节随着养殖塘水体深度的变化,各环境因子的数值也在发生变化,其对养殖塘温室气体通量的影响程度也在变化,因此,在今后研究中可以从如下 3 方面开展更加深入的研究:①加强对养殖塘温室气体通量在不同季节变化的观测研究;②考虑测定水体不同深度的环境因子数值,分析其对于养殖塘水-气界面温室气体通量的影响;③开展养殖塘水体廓线不同深度上的温室气体浓度与水面上方温室气体浓度梯度间的内在联系的研究。

4 结论

(1)闽江河口滩涂养虾塘和鱼虾混合养殖塘秋季水-气界面 3 种温室气体通量均具有显著的日变化特征,日变化观测期间,2 个养殖塘全天整体上表现为大气中 CO_2 的吸收“汇”, CH_4 和 N_2O 的排放“源”。

(2)每个养殖塘水-气界面 3 种温室气体通量的日变化对于各个监测环境因子的响应不尽一致:养虾塘水-气界面 CO_2 通量的日变化主要受到叶绿素 a 质量浓度的影响, CH_4 通量主要受到 PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-} 的影响;对于鱼虾混合养殖塘,其水-气界面 CO_2 通量主要受到水温、叶绿素 a 的影响,而溶解氧、 PO_4^{3-} 和 pH 是影响 CH_4 通量的主要水环境因子。

(3)水温和叶绿素 a 分别是导致养虾塘和鱼虾混养塘水-气界面 CO_2 交换通量呈现出昼夜变化差异的主要环境因素;2 个养殖塘水-气界面 CH_4 排放通量昼夜变化差异均与水中溶解氧质量浓度的变化存在显著的关系。

(4)养虾塘与鱼虾混养塘之间叶绿素 a 和 pH 值的差异性是导致 2 个养殖塘之间 CO_2 通量差异的主要影响因素;而 2 个养殖塘间 CH_4 通量的差异主要是受到水体中氧化还原电位和营养物质及初级生产力的影响。

致谢:本研究样品分析过程中得到福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室的杨柳明老师的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Behera N, Joshi S K, Pati D P. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa, India[J]. Forest Ecology and Management, 1990, **36**(2-4): 125-134.

[2] Thomas K L, Benstead J, Davies K L, *et al.* Role of wetland plants in the diurnal control of CH_4 and CO_2 fluxes in peat[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, **28**(1): 17-23.

[3] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 1-6.

[4] Yashiro Y, Kadir W R, Okuda T, *et al.* The effects of logging on soil greenhouse gas (CO_2 , CH_4 , N_2O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(5): 799-806.

[5] Rudd J W M, Hamilton R D. Methane cycling in a eutrophic shield lake and its effects on whole lake metabolism [J]. Limnology and Oceanography, 1978, **23**(2): 337-348.

[6] Juutinen S, Rantakari M, Kortelainen P, *et al.* Methane dynamics in different boreal lake types [J]. Biogeosciences, 2009, **6**(2): 209-223.

[7] Casper P, Maberly S C, Hall G H, *et al.* Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere [J]. Biogeochemistry, 2000, **49**(1): 1-19.

[8] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(30): 5532-5540.

[9] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2674-2681.

[10] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH_4 , CO_2 , and N_2O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**(1): 1033.

[11] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**: GB3022.

[12] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2377-2384.

[13] 晏维金, 王蓓, 李新艳, 等. 河流溶存 N_2O 的环境化学过程及其在水-气界面交换过程的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 15-22.

[14] 赵炎, 曾源, 吴炳芳, 等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测[J]. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.

[15] 李振雄, 吴万夫. 中国渔业 60 年辉煌成就[J]. 中国水产, 2009, (10): 14-16.

[16] 郑彩虹, 曾从盛, 陈志强, 等. 闽江河口区湿地景观格局演变研究[J]. 湿地科学, 2006, **4**(1): 29-34.

[17] 张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究[J]. 生态环境, 2004, **13**(2): 27-33.

[18] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, *et al.* Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(5): 737-748.

[19] 嵇晓燕, 崔广柏, 杨龙元, 等. 太湖水-气界面 CO_2 交换通量观测研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1479-1486.

[20] Zhu R B, Liu Y S, Xu H, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica [J].

- Atmospheric Environment, 2010, **44**(3): 304-311.
- [21] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, **52**(3): 609-621.
- [22] St. Louis V L, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate [J]. Bioscience, 2000, **50**(9): 766-775.
- [23] 王跃思, 王迎红. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 2592-2721.
- [24] Rantakari M, Kortelainen P. Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes [J]. Global Change Biology, 2005, **11**(8): 1368-1380.
- [25] 冉景江, 林初学, 郭劲松, 等. 水库温室效应研究进展与主要影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(2): 197-202.
- [26] Schrier-Uijl A P, Veraart A J, Leffelaar P A, *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands [J]. Biogeochemistry, 2011, **102**(1-3): 265-279.
- [27] Cole J J, Pace M L, Carpenter S R, *et al.* Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(8): 1718-1730.
- [28] 葛瑞娟, 宋长春, 王丽丽. 湿地甲烷生物化学过程及影响因素的研究进展 [J]. 土壤通报, 2011, **42**(1): 229-235.
- [29] West A E, Schmidt S K. Acetate stimulates atmospheric CH₄ oxidation by an alpine tundra soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**(12): 1649-1655.
- [30] Dunfield P, Knowles R, Dumont R, *et al.* Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, **25**(3): 321-326.
- [31] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 三江平原沼泽湿地与稻田 CH₄ 排放对比研究 [J]. 地理科学, 2002, **22**(4): 500-503.
- [32] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12**(5): 726-733.
- [33] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. Ecological Engineering, 2005, **25**(5): 542-551.
- [34] Repo M E, Huttunen J T, Naumov A V, *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia [J]. Tellus, 2007, **59**(5): 788-796.
- [35] 李香华, 胡维平, 杨龙元, 等. 太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量日变化观测研究 [J]. 生态学杂志, 2005, **24**(12): 1425-1429.
- [36] Clough T J, Buckthought L E, Kelliher F M, *et al.* Diurnal fluctuations of dissolved nitrous oxide (N₂O) concentrations and estimates of N₂O emissions from a spring-fed river: implications for IPCC methodology [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(5): 1016-1027.
- [37] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇 [J]. 生态学报, 2001, **21**(5): 827-833.
- [38] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展 [J]. 中国农业气象, 2002, **23**(4): 47-52.
- [39] 陈永根, 李香花, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 CO₂ 通量 [J]. 生态环境, 2006, **15**(4): 665-669.
- [40] Inubushi K, Otake S, Furukawa Y, *et al.* Factors influencing methane emission from peat soils: comparison of tropical and temperate wetlands [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, **71**(1): 93-99.
- [41] Conrad R, Rothfuss F. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium [J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, **12**(1): 28-32.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行