

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气PM ₁₀ 和PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH_4 和 N_2O 通量日变化特征

杨平^{1,2}, 谭立山¹, 黄佳芳^{1,2,3}, 何清华¹, 仝川^{1,2,3*}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007; 3. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007)

摘要: 排水活动是河口区养殖塘鱼、虾捕获后的重要管理方式之一。为探讨排水活动对河口区养殖塘温室气体通量的影响, 采用静态(悬浮)箱-气相色谱法对初冬时期闽江河口区的未排干和排干养殖塘温室气体(CH_4 和 N_2O) 通量日变化特征进行原位观测。结果表明, ①未排干与排干养殖塘 CH_4 通量范围分别介于 $0.04 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $14.04 \sim 33.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值分别为 $(0.07 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(24.74 \pm 2.33) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均表现为大气库中 CH_4 释放源, 呈现夜高昼低的特征; ②未排干养殖塘 N_2O 通量范围和均值分别介于 $-0.027 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.002 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 整体上呈现昼低夜高的特征, 而排干养殖塘 N_2O 通量范围和均值分别介于 $0.59 \sim 1.76 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(1.07 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 整体上呈现昼高夜低的特征。以上研究结果初步揭示, 排干初期的河口区养殖塘排水活动不仅显著增加温室气体(CH_4 和 N_2O) 排放强度, 也可以显著改变养殖塘温室气体通量的日动态特征。

关键词: 浅水池塘; 温室气体; 排水活动; 日变化; 环境因素; 河口区

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0300-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705166

Diurnal Variations of CH_4 and N_2O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter

YANG Ping^{1,2}, TAN Li-shan¹, HUANG Jia-fang^{1,2,3}, HE Qing-hua¹, TONG Chuan^{1,2,3*}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Ecogeographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China; 3. Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Annual drainage is a typical management activity practiced by operators as a way to export aquaculture effluent, accelerate aerobic decomposition of bottom soils, and avoid eutrophication during the non-culture period after harvest. Drainage activities can cause large changes in hydrology, nutrient cycling, sediment physicochemical properties, and even broad ecosystem functions. In order to understand the effects of drainage on the diurnal variation characteristics and magnitude of greenhouse gas (CH_4 and N_2O) fluxes from the aquaculture ponds of the estuaries, a 24-hour continuous monitoring was conducted from one undrained pond (UDP) and one drained pond (DP) during early winter in the Minjiang River estuary on the southeast coast of China. Over the entire study period, the fluxes of CH_4 from the UDP and DP ranged from 0.04 to $0.10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and 14.04 to $33.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, with means of $(0.07 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(24.74 \pm 2.33) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. The CH_4 flux was lower during the day and higher at night with a net flux as the sources of the CH_4 . The fluxes of N_2O from the UDP ranged from -0.027 to $0.011 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, and the average fluxes of $(0.002 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ showed "weak absorption by day and emission at night." The N_2O fluxes from the DP were emitted all day (ranging from 0.59 to $1.76 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) with the average fluxes of N_2O (1.07 ± 0.15) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ indicating higher fluxes at night and lower fluxes during the day. Our research demonstrated that drainage would significantly enhance CH_4 and N_2O release from the aquaculture ponds. The study also preliminarily confirms that the undrained pond converted to a drained pond considerably alter the diurnal variation characteristics of the CH_4 and N_2O emissions during early winter. Clearly, future measurements *in situ* at high frequency over a long time and at different spatial scales would be worth researching from drained aquaculture ponds.

Key words: shallow ponds; greenhouse gases; drainage activity; diurnal variations; environmental factors; estuary

近年来,大气库中温室气体增温效应加强引起 的全球气候变暖已成为国际社会公认的全球性问题

收稿日期: 2017-05-17; 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671088, 41371127); 福建师范大学亚热带河口生物地球化学创新团队项目(IRT1205); 福建师范大学地理科学学院研究生出国(境)访学资助计划项目(GY201601)

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

* 通信作者, E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

之一^[1]. 甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气中2种重要的温室气体,自1750年以来,其浓度分别增加了150%和20%,达到了目前的 $1\,803\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $324\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[1]. 由于两种温室气体在大气库中快速地增加和较高的辐射增温潜势,不同地表生态系统 CH_4 和 N_2O 排放通量的研究一直是全球变化研究的焦点和核心内容之一^[2~4].

陆地水生生态系统作为全球重要生态系统之一,已被证实是大气库中 CH_4 的重要来源,在全球温室气体排放中居于重要地位^[5,6]. 小型池塘作为一类重要的水生生态系统,其总面积仅占全球水体分布总面积的8.6%,但其 CH_4 排放比例却占到内陆水体总 CH_4 排放的40%^[7]. 基于以上原因,小型池塘逐渐成为温室气体排放的研究热点^[8,9]. 但目前已有相关研究主要聚集在水位相对较高时期的水-气界面 CH_4 和 N_2O 通量方面^[8~12],对于一些处于低水位时期或短暂排干的池塘,特别是受人类活动显著影响的陆基水产养殖塘的关注甚少.

据 Verdegem 等的估算^[13],全球咸、淡水养殖塘面积约为 $1.11\times 10^5\text{ km}^2$,其中中国水产养殖塘总面积约为 $0.59\times 10^5\text{ km}^2$,位居世界第1位. 由于养殖过程中,养殖生物的排泄物、残存饵料和生物尸体等有机物会沉积池底,加上池中的有机碎屑、死亡的藻类等,会造成池底老化、水质恶化^[14]. 因此,为确保一个良好的水产养殖环境,诸多水产养殖塘中的水体往往在一个养殖周期结束后被排出,进行短暂的自然晒塘、清淤等管理活动^[14]. 排水活动引起的池塘水位急剧下降势必会对其内部的营养物质循环、沉积物理化性质及整个系统功能产生显著影响. 显然,这种影响对养殖池塘沉积物中温室气体产生与排放过程的改变亦具有不可忽视的作用. 对农田和湿地的研究发现^[15~19],排水活动引起的水位降低可显著减少 CH_4 排放但能够显著增加 N_2O 释放. 然而,对于排水后的陆基水产养殖 CH_4 和 N_2O 释放情况并不知晓. 积极开展该方面的研究,以期今后深入认识水产养殖塘碳氮循环、完善温室气体清单编制、相应减排措施制定和气候预测模型的改良提供数据支撑和科学依据. 因此,本研究于2012年12月中旬在闽江河口区选取一个未排干养殖塘和排干养殖塘为研究对象,对其 CH_4 和 N_2O 交换通量进行了连续24 h原位观测,主要探讨以下两个问题:①排干初期,日变化观测尺度上的养殖塘排水活动是否会显著减少 CH_4 排放并可显著增加 N_2O 释放;②排干初期,排水后的养殖塘 CH_4 和 N_2O 通

量日变化特征与未排干养殖是否存在差异.

1 材料与方法

1.1 采样站位和采样时间

研究区域位于闽江河口鳝鱼滩湿地,地理坐标为 $26^\circ 00' 36''\text{ N} \sim 26^\circ 03' 42''\text{ N}$, $119^\circ 34' 12''\text{ E} \sim 119^\circ 40' 40''\text{ E}$ (图1). 气候为中亚热带和南亚热带海洋性季风气候的过渡区,温暖湿润,多年平均气温和降水量分别为 19.7°C 和 $1\,346\text{ mm}$,年降水日数为153 d,主要集中于3~9月^[20]. 该区是典型的开放式感潮河口,潮汐属于典型半日潮,土壤以潮汐盐土为主. 土著物种芦苇(*Phragmites australis*)、短叶茳芏(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl.)和外来入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)为该区域主要的优势植物群落. 陆基池塘养殖是区域内的主要农业生产活动,其水源包括天然降水、河水和潮水.

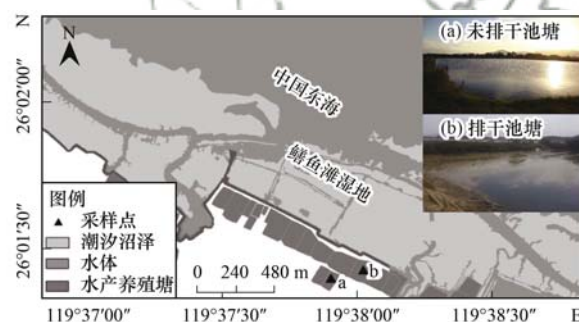


图1 研究区域和采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampled ponds in the Minjiang River estuary

1.2 研究样地与实验设计概况

研究样地选取在鳝鱼滩湿地中偏西部五门闸附近堤坝内侧的养殖池塘进行. 该区域养殖塘类型主要有鱼虾混合养殖塘和养虾塘两种. 通常,鱼虾混养塘在5月初投放虾苗和鱼苗,11月中旬左右将虾全部捕获,2月底鱼被全部捕获,随后池塘水全部释放至附近的海域;养虾塘于5月初投放虾苗,11月中旬左右虾被全部捕获,12月初开始将池塘水释放至附近海域,进行短暂晒塘处理. 本研究在获得养殖户准许情况下,分别选择了一个未排干的鱼虾混养塘和已排干的养虾塘为研究对象(两种养殖塘底部均未出现水生植物生长现象),以此开展养殖塘排干活动对温室气体通量日变化的影响. 鱼虾混养塘平均水深为 1.35 m ,面积为 $1\,100\text{ m}^2$,养殖对象为草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和白对虾(*Litopenaeus vannamei*),鱼养殖密度为 $5\text{ 尾}\cdot\text{m}^{-2}$ 和虾 $35\text{ 尾}\cdot\text{m}^{-2}$,每天07:00、11:00和17:00进行饵

料投喂,投喂的饵料为人工配置饵料(粤海牌,广州,中国),投放强度(冬季养殖期间)范围介于为 $20 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$; 养虾塘面积为 1200 m^2 , 研究期间的水深约 0.15 m , 池塘的日常管理活动(如饵料投喂、水体增氧等)因虾全部被捕获和池塘水被释放而停止. 在上述每种类型池塘,布设 4 个样品采样点,采样时间于 2012 年 12 月 18 日 07:00 至 19 日 07:00 完成. 鉴于人员不足(野外采样仅有两个人)和安全问题,样品采集在白天设定每间隔 3 h 进行 1 次,在夜间设定每间隔 4 h 进行 1 次.

气样采集运用目前国际上通用的箱法来完成. 未排干的养殖塘是利用悬浮箱进行气样采集,规格为直径 $25 \text{ cm} \times$ 高 40 cm 的底部开口圆筒,主体部分为透明有机玻璃材质;排干的养殖塘是利用静态箱进行气样采集,箱体由顶箱(35 cm 长 $\times 35 \text{ cm}$ 宽 $\times 60 \text{ cm}$ 高)和带有边槽的底座(35 cm 长 $\times 35 \text{ cm}$ 宽 $\times 35 \text{ cm}$ 高)两部分组成,材质分别为透明有机玻璃和 PVC 材料. 底座需要在样品采集前一周埋进沉积物中,埋入的深度为 30 cm ,出露沉积物表面约 5 cm . 每个采集箱内部的顶部安装 1 个小风扇用于混匀箱内气体,侧面安装一个气体采样口. 气样用 100 mL 带有三通阀的注射器从箱内抽取 50 mL , 1 个通量测定共抽气 4 次,分别在采样箱覆盖后第 0、15、30 和 45 min 采集,并将抽取的气体注入 50 mL 气体采集袋中(德林, 大连),遮光保存运回实验室待测定分析.

1.3 气样分析与通量估算

气袋中的 CH_4 与 N_2O 分别采用 GC-2010 和 GC-2014 气相色谱仪(岛津, Japan)测定分析,并根据以下公式计算养殖塘与大气库之间的 CH_4 和 N_2O 交换通量 [F , $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] [10]:

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

式中, ρ 为标准状态下温室气体的密度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 和 A 分别为箱内空气体积 (m^3) 和采样箱覆盖面积 (m^2); P 和 T 分别为采样点处的实测气压值 (hPa) 和采样时刻的箱内绝对温度 (K); T_0 和 P_0 为标准状态下的空气绝对温度 (273.15 K) 和气压值 (1013.25 hPa); dc/dt 为采样期间箱内某种温室气体的浓度变化率. 气体通量是负值时,表示气体由大气库进入养殖塘中;正值时,表示气体从养殖塘释放到大气库中.

1.4 水样采集与测定分析

与气样采集同步,在未排干养殖塘的每个悬浮

箱附近利用 100 mL 注射器采集表层水体 (10 cm 深) 3 份: 1 份水样用于水体 N、P 营养盐浓度的测定分析, 1 份水样用于水体叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl-a) 浓度的测定分析, 1 份水样用于水体中 SO_4^{2-} 浓度的测定分析. 用于营养盐和 SO_4^{2-} 浓度分析的水样均分别装入 100 mL 白色聚乙烯瓶,用于水体叶绿素 a 浓度分析的水样需装入 100 mL 棕色聚乙烯塑瓶中. 以上水样装入相应样品瓶后,需立刻加入饱和 HgCl_2 溶液 1 mL ,用于抑制水样中的微生物活性 [21,22]. 水样中营养盐浓度的测定需用孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 滤纸过滤,过滤的水样装置于清洁的 100 mL 白色聚乙烯瓶中,运用流动注射分析仪 (SKALAR San⁺⁺, Netherlands) 分析测定水样中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} 指标. 水体叶绿素 a 浓度分析的样品先经过丙酮(纯度 90%)浸提,然后将提取液通过紫外-可见分光光度计(岛津 UV-2450, Japan)测定分析上清液吸光值. 叶绿素 a 浓度计算公式参见文献 [23~25], 最终结果以 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示. 采用铬酸钡分光光度法测定水样中的 SO_4^{2-} 浓度.

1.5 环境因子原位测定

在每个采样时刻,采用便携式仪器对主要气象参数(气温、气压和风速)和表层沉积物 10 cm 深的温度、pH 值、氧化还原电位 Eh 和电导率 EC 进行原位测定. 气温、气压和风速采用便携式气象仪 (Kestrel-3500, USA) 测定; 沉积物温度、pH 值和氧化还原电位 Eh 采用 IQ150 便携式 pH/氧化还原电位/温度计 (IQ Scientific Instruments, USA); 沉积物电导率采用 2265FS 便携式电导/温度计 (Spectrum Technologies Inc, USA) 测定. 水中溶解氧采用多参数水质监测仪 (HORIBA, Japan) 测量,测定深度为水面下 10 cm .

1.6 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 对原始数据进行均值及标准误的计算处理. 利用 SPSS 17.0 统计软件包中重复测量方差分析法 (Repeated measures ANOVA) 检验未排干与排干养殖塘之间的温室气体通量、环境因子差异性. CH_4 或 N_2O 交换通量与各个测定环境因子间的相关关系利用 SPSS 17.0 中的 Pearson 相关分析法进行统计分析. 文中所有数据作图均通过 OriginPro 7.5 完成.

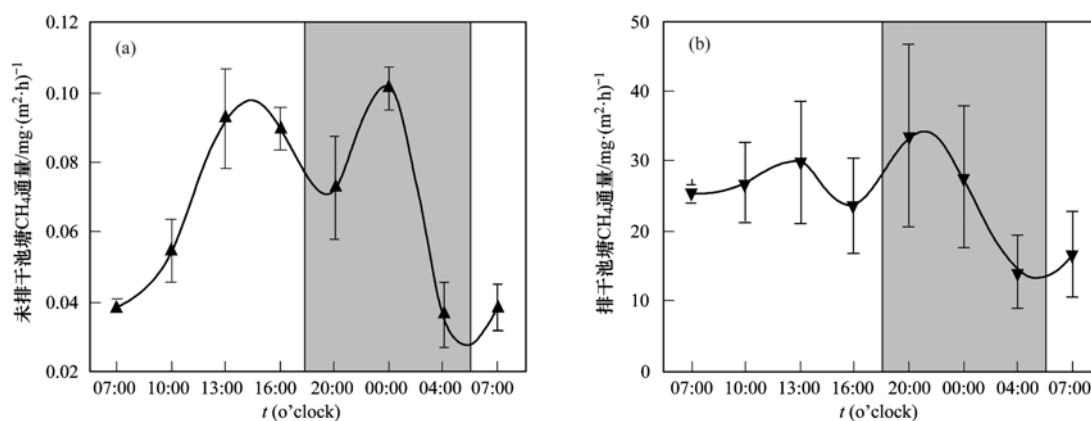
2 结果与分析

2.1 养殖塘排干对 CH_4 通量日变化的影响

观测期间,未排干和排干养殖塘均是大气库中

CH_4 释放源, 日变异系数 (coefficient of variation, CV) 分别为 61% 和 46%, 呈现出明显的日变化特征 (图 2). 在白天, 未排干与排干养殖塘向大气库释放 CH_4 , 通量强度随时间推移表现出基本一致的变化趋势, 即从观测初始时刻 07:00 开始增加, 至下午 13:00 达到最大值, 随后开始降低; 但在夜间, 未排干与排干池塘向大气库释放 CH_4 通量强度表现出不同的时间变化趋势, 其中未排干池塘释放 CH_4 通量强度呈现先增加后降低的特征 [图 2(a)], 而排干池塘呈现随时间推移逐渐降低的趋势 [图 2

(b)]. 在日变化尺度上, 未排干池塘与排干池塘释放 CH_4 通量的变化范围分别介于 $(0.04 \pm 0.01) \sim (0.10 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 2(a)] 和 $(14.04 \pm 5.24) \sim (33.72 \pm 13.07) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 2(b)], 均值分别为 $(0.07 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(24.74 \pm 2.33) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 重复测量方差分析结果显示, 排干养殖塘在各个观测时段向大气库释放 CH_4 通量均极显著高于未排干养殖塘 ($P < 0.01$), 表明冬季养殖塘排干活动可以显著增加其 CH_4 的释放强度.



图中阴影部分表示夜间,下同

图 2 初冬时期未排干与排干养殖塘 CH_4 通量日变化特征

Fig. 2 Diurnal variations of CH_4 fluxes from the undrained and drained aquaculture pond in early winter

2.2 养殖塘排干对 N_2O 通量日变化的影响

图 3 显示, 未排干与排干养殖塘 N_2O 通量表现出不一样的昼夜变化规律. 观测期间, 未排干养殖塘与大气库 N_2O 通量强度从观测初始时刻 07:00 开始增加, 至 13:00 达到最大值, 随后开始降低, 至 16:00 以后又开始增加, 但增幅较小, 整体上呈现出夜间通量高于白天的特征 [$(0.006 \pm 0.003) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(-0.001 \pm 0.007) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 图 3(a)]; 排干池塘与大气库 N_2O 通量强度从观测初始时刻 07:00

开始增加, 至 13:00 达到高峰值, 之后随时间推移而逐渐降低, 整体上表现出白天释放通量显著高于夜间的特征 [$(1.20 \pm 0.21) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.84 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, $P < 0.05$, 图 3(b)]. 在日变化尺度上, 未排干池塘与排干池塘 N_2O 通量的变化范围分别介于 $(-0.027 \pm 0.011) \sim (0.011 \pm 0.003) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 3(a)] 和 $(0.59 \pm 0.13) \sim (1.76 \pm 0.30) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值分别为 $(0.002 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 (1.07 ± 0.15)

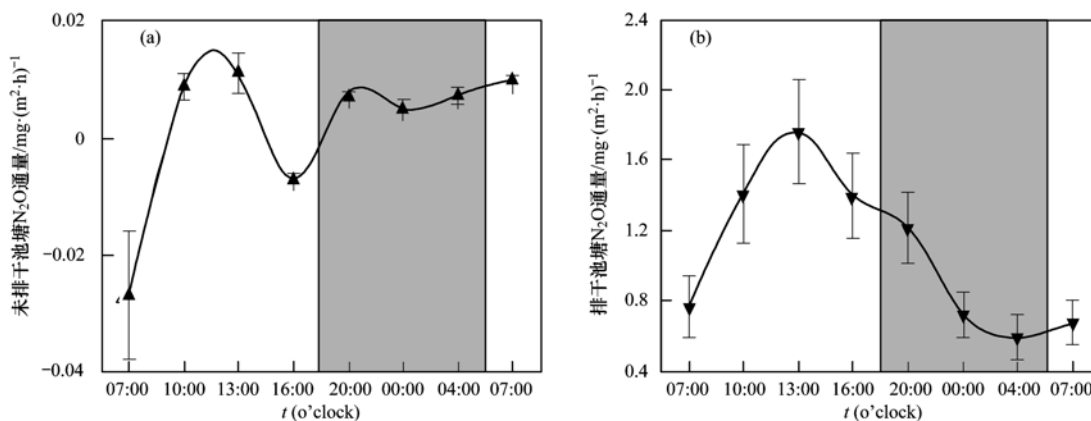


图 3 初冬时期未排干与排干养殖塘 N_2O 通量日变化特征

Fig. 3 Diurnal variations of N_2O fluxes from the undrained and drained aquaculture pond in early winter

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 3(b)], 前者呈现出吸收-排放交替的特征, 后者全天表现大气库 N_2O 释放源. 重复测量方差分析结果显示, 排干养殖塘在各个观测时段向大气库释放 N_2O 通量均极显著高于未排干养殖塘 ($P < 0.01$), 表明冬季养殖塘排干活动亦可以显著增加其 N_2O 的释放.

2.3 环境因子及其与温室气体通量相关关系

观测期间, 研究样地气象参数、未排干池塘水体营养盐浓度及 SO_4^{2-} 浓度的日变化特征分别见图 4 和图 5. 养殖塘所在区域的气温变化随观测时间推移呈现先增加, 至 13:00 达到最大值, 随后开始降低的特征, 而风速和气压随时间推移具有较明显的波动变化特征 (图 4). 未排干池塘水体 NO_3^- -N 浓度从观测初始时刻 07:00 至第二天 04:00 呈现随时间推移而降低的趋势, 随后开始增加 [图 5(a)]; 水体 NH_4^+ -N 浓度从观测初始时刻至 16:00 随时间推移呈现下降趋势, 之后时刻 NH_4^+ -N 出现增加, 但波动性较小 [图 5(a)]; 水体 PO_4^{3-} -P 浓度在观测期间随时间变化波动性较大, 呈现增加-降低-增加-降低的特征 [图 5(b)]; 水体 SO_4^{2-} 浓度从观测初始时刻 07:00 ~ 00:00 随时间变化较小, 之后出现较大幅度的降低 [图 5(b)]. 图 6 为未排干与排干养殖塘沉积物温度等环境因子日变化特征. 观测期间, 两类养殖塘沉积物温度、pH 值、氧化还原电位 Eh 和电导率 EC 均表现出较为明显的日变化动态, 其中未排干池塘上述环境因子指标波动幅度较排干养殖塘大. 差异性分析结果显示, 未排干与排干养

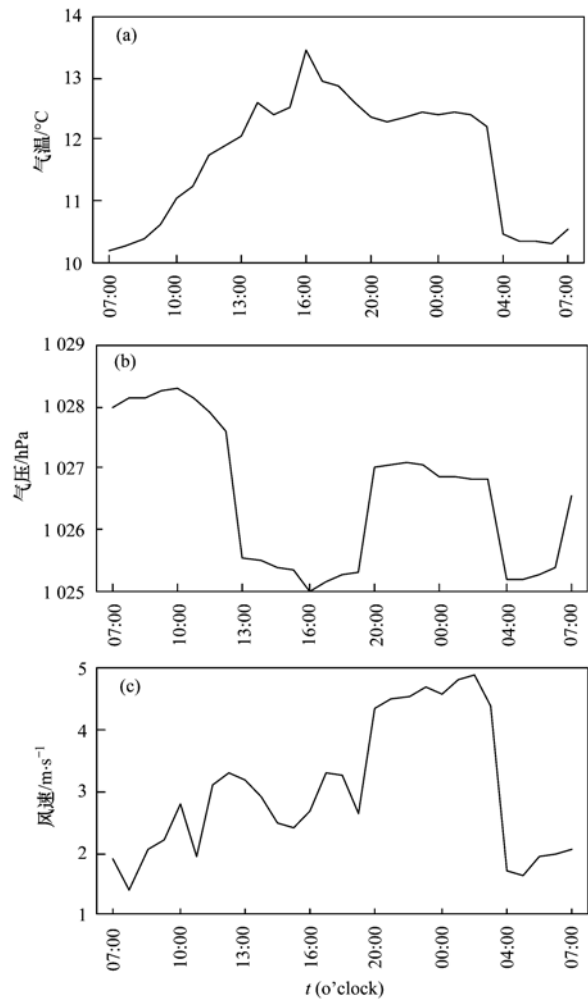


图 4 初冬时期养殖塘气象参数日变化特征

Fig. 4 Diurnal variations of meteorological parameters from the aquaculture pond in early winter

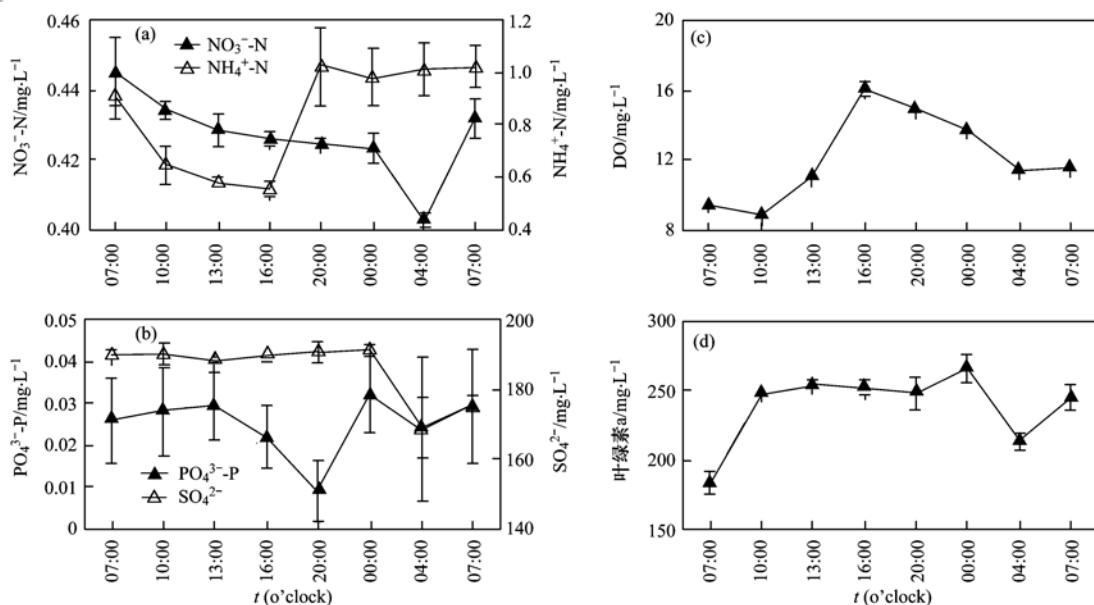


图 5 初冬时期未排干养殖塘水体营养盐、 SO_4^{2-} 、溶解氧 (DO) 和叶绿素 a 浓度日变化特征

Fig. 5 Diurnal variations of water nutrients, SO_4^{2-} , dissolved oxygen, and Chl-a concentration from the undrained aquaculture ponds in early winter

养殖塘沉积物温度在观测期间差异不显著 ($P > 0.05$), 但沉积物 pH 值和电导率 EC 均呈现未排干养殖塘显著高于排干养殖塘 ($P < 0.05$), 沉积物氧化还原电位呈现前者显著低于后的特征 ($P < 0.05$) (图 6).

相关分析结果显示 (表 1 和表 2), 未排干池塘 CH₄ 释放通量与气温、风速和沉积物温度均呈现出极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与沉积物电导率 EC 呈现极显著负相关关系 ($P < 0.01$), N₂O 通量只与

沉积物温度呈现显著正相关关系 ($P < 0.05$), 但与其它环境因子相关性未达到显著水平 ($P > 0.05$); 排干池塘 CH₄ 释放通量与各测定的环境因子相关性均不显著 ($P > 0.05$), N₂O 通量分别与气温、沉积物温度和氧化还原电位 Eh 呈现显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系; 综合两个养殖塘发现, CH₄、N₂O 通量均与 pH、电导率呈现出极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与氧化还原电位 Eh 呈现极显著正相关关系 ($P < 0.01$).

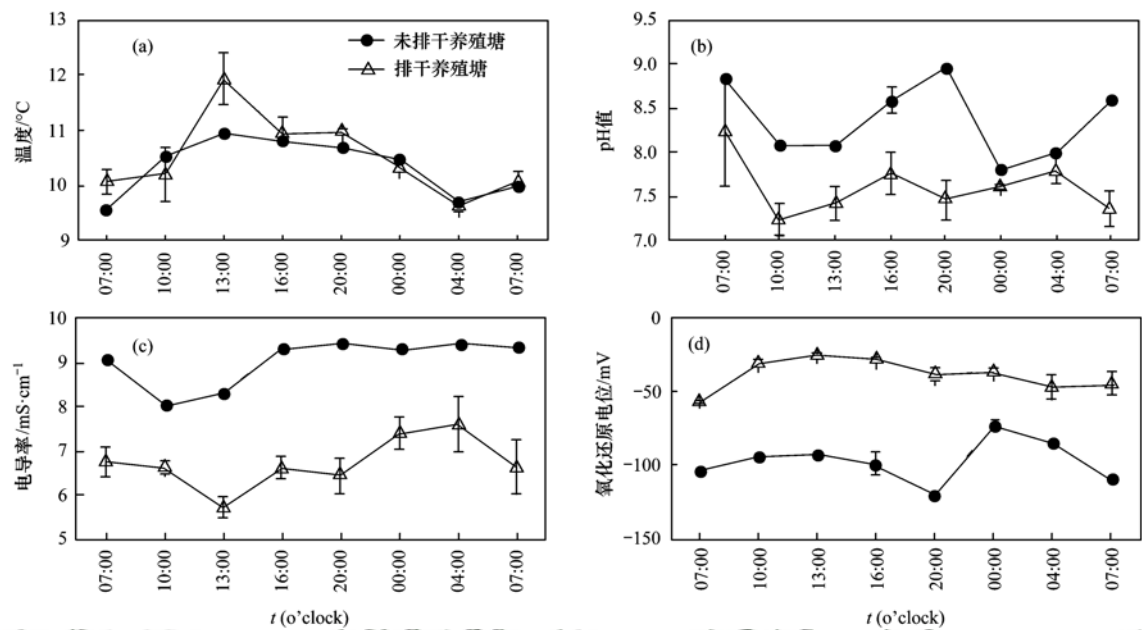


图 6 初冬时期养殖塘沉积物温度、pH、电导率 (EC) 和氧化还原电位 (Eh) 日变化特征

Fig. 6 Diurnal variations of sediment temperature, pH, conductivity, and redox potential from the aquaculture ponds in early winter

表 1 养殖塘 CH₄ 通量与环境因子的相关分析¹⁾

Table 1 Correlation coefficient between CH₄ fluxes and environmental factors

类型	气象参数			沉积物理化性质				水体营养盐浓度			
	气温	气压	风速	温度	pH 值	Eh	电导率	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SO ₄ ²⁻
未排干	0.659 **	-0.267	0.581 **	0.702 **	-0.179	0.181	-0.686 **	0.222	-0.206	0.106	0.327
排干	0.227	0.132	0.297	0.311	0.052	0.204	-0.250	—	—	—	—
综合	0.105	0.060	0.136	0.270 *	-0.519 **	0.626 **	-0.650 **	—	—	—	—

1) ** 在置信度 (双侧) 为 0.01 时, 相关性极显著; * 在置信度 (双侧) 为 0.05 时, 相关性显著; “—” 表示没有数据参与统计分析, 下同

表 2 养殖塘 N₂O 通量与环境因子的相关分析

Table 2 Correlation coefficient between N₂O fluxes and environmental factors

类型	气象参数			沉积物理化性质				水体营养盐浓度			
	气温	气压	风速	温度	pH 值	Eh	电导率	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SO ₄ ²⁻
未排干	0.287	-0.269	0.225	0.388 *	-0.347	0.348	-0.199	0.313	-0.007	-0.080	-0.193
排干	0.425 *	-0.145	0.115	0.649 **	-0.182	0.485 *	-0.028	—	—	—	—
综合	0.179	-0.062	0.050	0.432 *	-0.625 **	0.700 **	-0.588 **	—	—	—	—

3 讨论

3.1 排水活动对河口区养殖塘温室气体通量的影响

CH₄ 是由土壤或沉积物中多种细菌形成的复杂

食物网对土壤或沉积物中有机物进行厌氧分解, 在最终形成 CH₄ 产生底物的情况下, 由多种厌氧产甲烷古菌协助生成^[26]. 水位 (水深) 条件作为影响湿地生态系统土壤或水生生态系统沉积物氧化/还原

状况的重要因子,其变化对土壤中微生物参与下的有机物分解和甲烷代谢过程(如甲烷产生与排放)具有显著影响^[18,27]。对自然湿地和农田生态系统的诸多研究表明,排水活动引起的系统水位下降能显著减少土壤向大气库中释放 CH_4 ^[15~19]。这是因为排水活动或其它因素引起的系统水位下降可有效增加大气环境中氧气扩散渗透至土壤,引起土壤从一个厌氧向好氧环境转变,进而导致甲烷产生菌活性降低,最终造成较低的 CH_4 生成^[28,29]。然而,本研究发现,排水后的养殖塘在日观测尺度上向大气库释放 CH_4 强度均显著高于持续淹水的养殖塘,表明排水活动引起水位降低可显著提高养殖塘的 CH_4 释放能力。分析其原因,主要跟以下两个方面的综合作用有关:一是,养殖塘水体虽被排出,水位发生了急剧降低,但此时为排水初期,池塘底部还滞留约 0.15 m 深的水体,渗透扩散到沉积物中的氧气有限[图 6(d)],并且仅有的氧气对表层沉积物影响较大,而池塘深处的沉积物还处在一个低氧环境,对整个沉积物的 CH_4 产生和排放贡献较大;二是,已有研究表明, CH_4 在从沉积物经过水体向大气库传输过程中,因水体溶解氧的存在而时常被氧化,并且 CH_4 被氧化程度随水体深度增加而提高^[12,30,31]。就本研究而言,实验期间未排干池塘由于保持着增氧活动,其水体溶氧水平呈现出显著高于排干池塘的特征 $[(11.34 \pm 0.75) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ 与 } (6.16 \pm 0.44) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$,均值是基于白天的观测值计算获得,夜间数据未采用是因为溶氧仪在进行排干池塘测定时未能稳定读数,且未排干池塘的平均水深为 1.35 m 显著高于排干池塘水深的 0.15 m。因此,引起排水后的养殖塘释放 CH_4 强度显著高于持续淹水养殖塘,也跟排水池塘水体中较低的溶解氧水平以及较低水位(水深 0.15 m)使得 CH_4 由沉积物向大气的传输过程中经过水体的路径缩短,被水体氧化的机会和程度降低有关^[30,32,33]。

硝化和反硝化是土壤(或沉积物)中 N_2O 生成的两个主要的微生物过程,其 N_2O 产生能力与排放强度也因不同水文条件下具体微生物过程不同而呈现显著差异^[34~36]。诸多研究发现,在持续淹水或水位较高环境中,沉积物中因较低的含氧量和丰富的碳、氮营养物质使得反硝化作用成为 N_2O 产生的主要来源,保持着相对较低的 N_2O 排放量^[18,27,34,36,37];然而,在水位较低或含水量不饱和的土壤环境中,土壤因时常呈好气状态,硝化过程是其 N_2O 产生的主要来源,拥有相对较高的 N_2O 排放量^[18,35,38,39]。本研究

中,未排干与排干养殖塘在日变化观测尺度上的 N_2O 通量均值分别为 $(0.002 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(1.07 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,后者高出前者约 500 倍,表明排水活动引起养殖塘水位降低亦可显著提高 N_2O 的释放,这与上述研究结果基本一致。就本研究而言,排水活动之所以会显著提高养殖塘 N_2O 释放,其很大程度上可能跟 N_2O 生成的两个主要微生物过程的共同作用有关。一方面,研究期间的排干池塘水深介于 10~15 cm,相比未排干池塘,其较低水深环境有利于大气中部分氧气渗透至池塘表层沉积物中,加上表层沉积物中残留着大量生物残体、虾排泄物和饵料残体,可促使沉积物表层微生物参与下的硝化作用产 N_2O 进行。另一方面,正如前文所述,排干池塘残留的部分水体可阻止大气中氧气向沉积物深层渗透,进而为深层沉积物反硝化作用产 N_2O 进行提供了适宜低氧环境。

从日变化特征来看,排干与未排干养殖塘 CH_4 通量随时间变化整体趋势基本一致(图 2),这一结果表明,排水活动引起水位降低对养殖塘 CH_4 通量日变化动态的改变影响较小,但对养殖塘释放通量大小的改变影响较大。对 N_2O 而言,本研究发现未排干与排干养殖塘 N_2O 通量随时间变化的趋势在白天趋同,但在夜间呈现相反的变化趋势(图 3),表明排水活动引起水位降低不仅可以改变养殖塘 N_2O 通量释放强度,而且也会对养殖塘 N_2O 通量夜间变化趋势产生影响。

3.2 河口区养殖塘初冬时期温室气体通量日变化特征及主要影响因素

研究期间,未排干和排干养殖塘 CH_4 释放通量随时间推移虽均呈现较大波动,但整体上均表现为昼低夜高的特征(图 2),这与相关研究得到的结果相似^[9,40]。本研究中,未排干养殖塘 CH_4 的释放值夜高昼低,一方面是由于夜间水体浮游藻类的光合作用消失,池塘鱼虾及微生物进行呼吸作用时会消耗水体中大量氧气^[40,41],有利于降低 CH_4 在水体扩散传输过程中被氧化消耗的量;另一方面,由于养殖塘平均水深仅有 1.2 m,水深较浅,白天相对强烈的太阳辐射会引起养殖塘表层水温略高于底层水温的稳定热力层结状态,不利于池塘 CH_4 向大气环境扩散,而在夜间水体辐射冷却引起水体呈现表层水温略低于底层水温的不稳定热力层结情况,上下水层较容易混合,有利于池塘 CH_4 向大气环境扩散^[40,42]。此外,排干养殖塘水-气界面 CH_4 通量与风

速的显著正相关关系表明,夜间相对较高的风速条件也是引起其 CH_4 通量高于白天的一个重要原因。这是由于夜间较高的风速环境有利于上下层水体得到充分交换^[9],有利于降低水-气界面的气体扩散阻力,进而有利于提高水体中 CH_4 向外扩散^[43,44]。对于排干养殖塘而言,由于本研究中只测定了土温、pH 值、电导率 EC 和 Eh 等 4 个理化指标,且这些指标与 CH_4 通量的相关关系均较弱,所以引起其 CH_4 释放值夜高昼低的具体原因尚不清楚。但通过对氧化还原电位 Eh 分析发现[图 6(d)],养殖塘夜间沉积物的厌氧条件较白天高,该结果表明夜间沉积物环境维持相对较高的 CH_4 产生能力是引起其 CH_4 释放通量较白天高的一个潜在影响因素。

未排干和排干养殖塘 N_2O 释放通量随时间推移亦均呈现较大波动,整体上分别表现为昼低夜高和昼高夜低的特征(图 3)。未排干养殖塘 N_2O 释放通量呈现上述变化特征,分析其原因,很大程度上亦是由于夜间养殖塘水体在较大风力扰动影响下和水体辐射冷却作用下,上下层水体得到充分交换,水-气界面的气体扩散阻力降低而引起。对于排干养殖塘而言,本研究发现,其 N_2O 释放通量变化轨迹与全天气温、沉积物温度的变化轨迹基本一致[图 3、图 4(a)和图 6(a)],且 N_2O 释放通量与温度亦呈现出显著正相关关系,表明温度是引起排干养殖塘 N_2O 通量呈现上述日动态的重要因素。类似研究结果也呈现在对湿地^[31,45]和农田^[46]的研究中,并且认为其作用机制跟沉积物中参与硝化-反硝化作用的微生物活性对不同环境温度的响应存在差异性有关。此外,本研究还发现,养殖塘表层 10 cm 深处沉积物氧化还原电位 Eh 在观测期间呈现白天高于夜间[图 6(a)],且与 N_2O 释放通量亦具有显著正相关关系(表 2),表明白天养殖塘表层沉积物中相对较弱的厌氧环境所引起的相对较高的硝化作用是造成其通量高于夜间的另一个重要原因。

4 结论

(1)从释放强度角度来看,排干养殖塘在各个观测时刻释放 CH_4 和 N_2O 通量强度均极显著高于未排干养殖塘($P < 0.01$),表明排干初期的排水活动可显著增强养殖塘释放 CH_4 和 N_2O 的能力。

(2)从时间变化特征来看,未排干与排干养殖塘 CH_4 和 N_2O 释放通量随时间推移在白天表现出基本一致的变化趋势,但在夜间两者的时间变化趋势显著不同;整体上,未排干和排干养殖塘 CH_4 释放

通量均表现为昼低夜高的特征,而 N_2O 释放通量分别表现为昼低夜高和昼高夜低的特征。

致谢:本研究在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、彭园珍老师的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 等. 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4032-4042.
Li J H, Pu J B, Sun P A, et al. Summer greenhouse gases exchange flux across water-air interface in three water reservoirs located in different geologic setting in Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- [3] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review[J]. Wetlands, 2010, **30**(1): 111-124.
- [4] Song H L, Liu X T. Anthropogenic effects on fluxes of ecosystem respiration and methane in the Yellow River Estuary, China[J]. Wetlands, 2016, **36**(S1): 113-123.
- [5] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate[J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(6): 2298-2314.
- [6] Bastviken D, Tranvik L J, Downing J A, et al. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink[J]. Science, 2011, **331**(6013): 50.
- [7] Holgersson M A, Raymond P A. Large contribution to inland water CO_2 and CH_4 emissions from very small ponds[J]. Nature Geoscience, 2016, **9**(3): 222-226.
- [8] Holgersson M A. Drivers of carbon dioxide and methane supersaturation in small, temporary ponds[J]. Biogeochemistry, 2015, **124**(1-3): 305-318.
- [9] 赵佳玉, 张弥, 肖薇, 等. 基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 41-51.
Zhao J Y, Zhang M, Xiao W, et al. Greenhouse gas fluxes at water-air interface in small pond using flux-gradient method based on spectrum analyzer[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 41-51.
- [10] Yang P, He Q H, Huang J F, et al. Fluxes of greenhouse gases at two different aquaculture ponds in the coastal zone of southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **115**: 269-277.
- [11] Martinez-Cruz K, Gonzalez-Valencia R, Sepulveda-Jauregui A, et al. Methane emission from aquatic ecosystems of Mexico City[J]. Aquatic Sciences, 2017, **79**(1): 159-169.
- [12] 龙丽, 肖尚斌, 张成, 等. 亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4552-4559.
Long L, Xiao S B, Zhang C, et al. Characteristics of methane flux across the water-air interface in subtropical shallow ponds

- [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4552-4559.
- [13] Verdegem M C J, Bosma R H. Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use[J]. *Water Policy*, 2009, **11**(S1): 52-68.
- [14] 李生, 朱旺明, 周萌. 南美白对虾高效养成新技术与实例[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [15] MacDonald J A, Fowler D, Hargreaves K J, *et al.* Methane emission rates from a northern wetland; response to temperature, water table and transport[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(19): 3219-3227.
- [16] Kang G D, Cai Z C, Feng X Z. Importance of water regime during the non-rice growing period in winter in regional variation of CH₄ emissions from rice fields during following rice growing period in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**(1-2): 95-100.
- [17] Blodau C, Moore T R. Experimental response of peatland carbon dynamics to a water table fluctuation[J]. *Aquatic Sciences*, 2003, **65**(1): 47-62.
- [18] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, *et al.* Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms[J]. *Plant and Soil*, 2009, **318**(1-2): 229-242.
- [19] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 冬季水分管理和水稻覆膜栽培对川中丘陵地区冬水田 CH₄ 排放的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(4): 1095-1103.
- Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al.* Effects of water management in winter and of plastic film mulching during rice cultivation on CH₄ emission from paddy field in a hilly region of Central Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 1095-1103.
- [20] 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): 29-35.
- Zheng C H, Zeng C S, Chen Z Q, *et al.* A study on the changes of landscape pattern of estuary wetlands of the Minjiang River [J]. *Wetland Science*, 2006, **4**(1): 29-35.
- [21] Zhang L, Wang L, Yin K D, *et al.* Pore water nutrient characteristics and the fluxes across the sediment in the Pearl River estuary and adjacent waters, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **133**: 182-192.
- [22] 杨平, 金宝石, 谭立山, 等. 九龙江河口区养虾塘沉积物-水界面营养盐交换通量特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(1): 192-203.
- Yang P, Jin B S, Tan L S, *et al.* Temporal variation of nutrients fluxes across the sediment-water interface of shrimp ponds and influencing factors in the Jiulong River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(1): 192-203.
- [23] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations[J]. *Limnology and Oceanography*, 1967, **12**(2): 343-346.
- [24] Jeffrey S W, Humphrey G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton[J]. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, **167**(2): 191-194.
- [25] 张莹, 王玉珏, 王跃启, 等. 2013 年夏季渤海环境因子与叶绿素 *a* 的空间分布特征及相关性分析[J]. *海洋通报*, 2016, **35**(5): 571-578.
- Zhang Y, Wang Y J, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and correlation of environmental factors and chlorophyll *a* concentrations in the Bohai Sea during the summer of 2013[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, **35**(5): 571-578.
- [26] 张坚超, 徐锦钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理[J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6592-6603.
- Zhang J C, Xu Y Q, Lu Y H. Microbial mechanisms of methane production and oxidation in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6592-6603.
- [27] Yang J S, Liu J S, Hu X J, *et al.* Effect of water table level on CO₂, CH₄ and N₂O emissions in a freshwater marsh of Northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **61**: 52-60.
- [28] Lombardi J E, Epp M A, Chanton J P. Investigation of the methyl fluoride technique for determining rhizospheric methane oxidation[J]. *Biogeochemistry*, 1997, **36**(2): 153-172.
- [29] Strack M, Waddington J M, Tuitila E S. Effect of water table drawdown on northern peatland methane dynamics: implications for climate change[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(4): GB4003.
- [30] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al.* Fates of methane from different lake habitats: connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113**(G2): G02024.
- [31] 盛宣才, 吴明, 邵学新, 等. 模拟水位变化对杭州湾芦苇湿地夏季温室气体日通量的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(15): 4792-4800.
- Sheng X C, Wu M, Shao X X, *et al.* Effects of simulated water levels on diurnal variation in the emission of three greenhouse gases in reed wetlands in summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4792-4800.
- [32] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies[J]. *Biogeochemistry*, 1989, **7**(1): 33-53.
- [33] Hu Z Q, Wu S, Ji C, *et al.* A comparison of methane emissions following rice paddies conversion to crab-fish farming wetlands in southeast China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1505-1515.
- [34] Martikainen P J, Nykänen H, Crill P, *et al.* Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands[J]. *Nature*, 1993, **366**: 51-53.
- [35] Xu H, Xing G X, Cai Z C, *et al.* Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**(1-3): 23-28.
- [36] 李英臣, 宋长春, 刘德燕. 湿地土壤 N₂O 排放研究进展[J]. *湿地科学*, 2008, **6**(2): 124-129.
- Li Y C, Song C C, Liu D Y. Advances in studies of N₂O emission in wetland soils[J]. *Wetland Science*, 2008, **6**(2): 124-129.
- [37] Kudo Y, Noborio K, Shimoozono N, *et al.* The effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **186**: 77-85.
- [38] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. *土壤*, 2009, **41**(1): 1-7.
- Li X L, Xu H, Cai Z C. Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field: a review[J]. *Soils*, 2009, **41**(1): 1-7.
- [39] Mander Ü, Maddison M, Soosaar K, *et al.* The Impact of pulsing hydrology and fluctuating water table on greenhouse gas emissions

- from constructed wetlands[J]. *Wetlands*, 2011, **31**(6): 1023-1032.
- [40] 汪国骏, 胡明明, 王雨春, 等. 蓄水初期三峡水库草堂河水-气界面 CO_2 和 CH_4 通量日变化特征及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 696-704.
- Wang G J, Hu M M, Wang Y C, *et al.* Diurnal variation and influencing factors of carbon dioxide and methane emissions at water-air interface of Caotang River, Three Gorges Reservoir in the initial impoundment period[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 696-704.
- [41] 杨平, 全川, 何清华, 等. 闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4194-4204.
- Yang P, Tong C, He Q H, *et al.* Diurnal variations of greenhouse gas fluxes at the water-air interface of aquaculture ponds in the Min River estuary[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4194-4204.
- [42] Bartlett K B, Crill P M, Bonassi J A, *et al.* Methane flux from the Amazon River floodplain: emissions during rising water[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, **95**(D10): 16773-16788.
- [43] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- [44] 黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 等. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1270-1276.
- Huang W M, Zhu K X, Zhao W, *et al.* Diurnal changes in greenhouse gases at water-air interface of Xiangxi river in autumn and their influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1270-1276.
- [45] 卢妍, 宋长春, 徐洪文. 沼泽湿地草甸 N_2O 排放通量日变化规律研究[J]. *上海环境科学*, 2009, **28**(4): 139-142, 148.
- Lu Y, Song C C, Xu H W. Studies of diurnal variation of nitrous oxide emission fluxes from marsh wetland meadow[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2009, **28**(4): 139-142, 148.
- [46] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N_2O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2005, **26**(1): 7-10.
- Xie J F, Li Y E. Effect of soil temperature on N_2O emission in upland farm of Beijing[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, **26**(1): 7-10.



CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F ₂ O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)