

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳烃化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气气液传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评估 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性

刘硕^{1,2}, 甄晓杰³, 刘钢⁴, 冯兆忠^{2,5*}

(1. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 江苏天诺基生态科技有限公司, 无锡 214135; 4. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 5. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 近年来关于碳排放研究的内容越来越受到重视,我国提出了在 2030 年实现碳达峰的战略目标,因此对我国温室气体排放监测的研究显得非常重要. 基于涡度相关法对我国长江中下游区域典型稻田生长季的 CO₂ 和 CH₄ 通量进行监测分析,结果发现整个观测阶段稻田 CO₂ 通量呈“U”型曲线,整体表现为汇,分蘖期开始出现负值,抽穗期降到最低,通量平均值为 $-3.33 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. CH₄ 通量与 CO₂ 通量趋势大致相反,先增加后减少,在分蘖期和拔节期迅猛上升,孕穗期从峰值降低到谷,通量平均值为 $0.11 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,通量最大值为 $0.40 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,出现在拔节期末端孕穗期初. CO₂ 通量从 07:00 开始下降,在 13:00 左右达到最低约 $-16.01 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,白天通量值为负,晚上通量值为正. CH₄ 通量为晚上低白天高,06:00 开始增加,14:00 左右达到峰值约 $0.16 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,夜间通量较平稳. 整个观测阶段,空气温度与 CH₄ 通量呈指数相关,饱和水汽压差与 CH₄ 通量呈线性相关,且拔节期最为显著,但两因子与 CO₂ 通量的响应关系相对较弱. 不同尺度分析表明,日变化尺度上的 CO₂ 和 CH₄ 通量与两因子的响应关系要好于季节尺度,白天的响应关系要好于晚上. CH₄ 通量在日变化尺度上随着 CO₂ 通量的增加而显著降低,但在季节尺度上两者相关性不明显. 人为施肥过程减缓了稻田 CH₄ 排放.

关键词: 稻田; 长江中下游平原; 涡度相关; CO₂ 和 CH₄ 通量; 环境因子

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2151-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107103

Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China

LIU Shuo^{1,2}, ZHEN Xiao-jie³, LIU Gang⁴, FENG Zhao-zhong^{2,5*}

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Jiangsu Tynoo Corporation, Wuxi 214135, China; 4. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In recent years, carbon emission research has been receiving increasing attention. China has put forward the strategic goal of achieving a carbon emission peak by 2030. Hence this research is very important for the measurement of greenhouse gas emissions in China. CO₂ and CH₄ fluxes from a paddy field in the middle-lower Yangtze Plain in China were analyzed based on the eddy covariance technique. The CO₂ flux showed an “U” curve during the observation period, with an average flux of $-3.33 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, which was a sink. Negative values appeared at the tillering stage, and the minimum was shown at the heading period. The CH₄ flux trend was roughly opposite to the that of the CO₂ flux, which first increased and then decreased. It raised rapidly during the tillering and jointing stages and then dropped rapidly from the peak to the trough during the booting stage, and only a slight increase was found in the blooming stage. The maximum flux [$0.40 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] appeared at the beginning of the booting stage and the end of the jointing stage, and the average flux was $0.11 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. The CO₂ flux was positive at night and negative during the day. It decreased from 07:00 and reached a minimum around 13:00 at $-16.01 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. The CH₄ flux was low at night and high during the daytime. It increased at 06:00 and reached a peak around 14:00, at approximately $0.16 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. An exponential correlation was found between air temperature and CH₄ flux. The vapor pressure deficit showed a linear correlation with CH₄ flux. The response of environmental factors on CO₂ fluxes and CH₄ fluxes on a diurnal scale was greater than that on a seasonal scale, and the daytime response was greater than that at night. CH₄ flux decreased significantly with the increase in CO₂ flux on the diurnal scale, but the correlation was not obvious on the seasonal scale. The increased CH₄ flux slowed down after fertilizing.

Key words: paddy field; middle-lower Yangtze Plain; eddy covariance; CO₂ and CH₄ flux; environmental factors

近年来,我国关于控制碳排放,实现绿色发展的内容越来越受到重视,提出了要在 2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和的长远战略目标^[1]. 为实现中国的高质量持续健康发展,建设“美丽中国”,今年的政府工作报告更是对“十四五”期间实现碳达峰制定了明确方案要求. 因此,对我国温室气体排放变化的研究显得非常重要. 我国是一个农业大国,共

有农用地约 64 545.68 万 hm^2 ^[2], 农业已成为我国重要的温室气体排放源^[3]. 中国的稻田面积占全球稻田总面积的 22%^[4], 从 20 世纪 80 年代,我国开始

收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2021-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209703)

作者简介: 刘硕(1992~),男,博士,主要研究方向为温室气体监测分析, E-mail: shenna963@163.com

* 通信作者, E-mail: zhaozhong.feng@nuist.edu.cn

陆续对稻田 CH_4 排放进行研究^[5,6], 例如不同区系植被^[7,8]、不同节水、施肥和耕作措施^[9,10] 对 CH_4 排放的影响. 有研究发现稻田 CH_4 通量有着明显的日变化与季节变化特征, 容易受到稻田生物与环境因子影响, 例如空气温度和土壤水含量等^[11,12]; 稻田水分较多时, 土壤处于厌氧状态导致 CH_4 容易产生; 而土壤氧充足时, 甲烷氧化菌就将 CH_4 氧化为 CO_2 ^[13-15]; 一些人为农业活动措施(如灌水和施肥等)也会显著影响稻田 CH_4 通量变化^[16].

涡度相关法(eddy covariance)是最主要的陆地生态系统微气象通量测量技术, 可以对较大空间尺度的地气交换过程进行长期连续观测^[17]. 涡度相关法的主要优点有: ①从气象学角度首次实现对通量的直接观测, 灵敏度和精度高^[17,18]; ②可进行连续、长期和非破坏性的定点监测, 结果区域代表性强, 工作开展便利^[19]; ③测量步长短, 可在短期内获得大量高时间分辨率的通量和环境数据^[20,21]; ④结合气象学和生态学, 实现对多要素如水、气和热的实时同步观测和循环过程的耦合研究^[18,22]. 国内基于涡度相关法对稻麦轮作农田的研究起步较晚^[23,24], 江苏省扬州市地处长江下游平原地带, 是我国典型的稻麦轮作农田生态系统区, 该地区主要种植冬小麦和夏水稻, 尚未有基于涡度相关法对相关区域农田进行 CO_2 和 CH_4 通量同时观测研究的报道. 本文利用涡度相关法监测了该区域典型农田生态系统 CO_2 和 CH_4 通量, 分析了其通量动态变化规律, 与环境要素响应关系等, 以期为我国典型农田生态系统温室气体通量变化以及未来碳排放估算等研究提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本实验区位于江苏省扬州市江都区小纪镇(北纬 $32^{\circ}35'54''$, 东经 $119^{\circ}42'23''$, 海拔 5 m, 图 1). 该地区每年有两次收获(冬小麦和夏水稻轮作), 属亚热带海洋性气候, 年均降雨量约 980 mm. 在整个通量观测期间(2020 年 5 月 25 日至 10 月 25 日), 日气温平均值为 24.8°C , 饱和水汽压差平均值为 9.2 hPa . 马凌村位于通量站的西南约 250 m, 居住人口约 500 人. 该区域于 5 月 30 日进行小麦收割, 6 月 9 日进行农田灌水, 6 月 20 日进行水稻幼苗插秧, 10 月 25 日水稻收割. 期间, 在 6 月 29 号, 进行了水稻施肥(尿素)约 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 7 月 9 号, 施肥(复合肥)约 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 8 月 6 号施肥(尿素)约 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

1.2 观测仪器

该区域安装的涡度相关通量观测系统的主风向为 120° , 距地面 3 m. 观测塔上分别安装了三维超

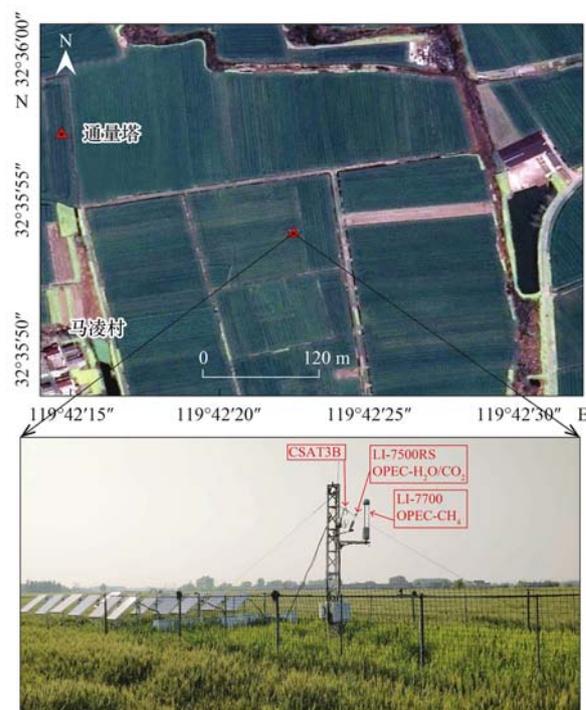


图 1 研究区地理位置和通量观测塔

Fig. 1 Geographical location of the site and the flux tower

声风速仪(CSAT3B, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA, CSI), 测量三维风速、水平风向和超声虚温; 采用开放式红外气体分析仪(LI-7500RS 和 LI-7700, LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA), 测量水、 CO_2 和 CH_4 浓度; 以及温湿度传感器(HMP155A, Vaisala, Inc., HKI, Finland) 和雨量计(TYJ-2, Jiangsu Tynoo Corp., Wuxi, JS, China) (表 1). 其中三维风速、超声温度、 $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 密度和气压采样频率为 10 Hz, 空气温度和相对湿度采样频率为 5 s. 实时观测数据通过数据采集器(CR6, Campbell Scientific, Inc., USA) 的在线处理程序 EasyFlux-DL 完全校正后全部输出, 包括 CH_4 通量、 CO_2 通量、 H_2O 通量、动量通量、潜热通量和显热通量等, 存储在工业级 8 GB 存储卡内. 所有设备电力由太阳能板提供.

1.3 通量数据计算

通量数据处理通过 EddyPro 软件(version 7.0.4, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA) 的标准程序处理. 然后根据环境要素, 剔除降雨期间观测数据, 剔除质量等级低于 3 的观测数据, 剔除摩擦风速小于 $0.12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据, 剔除 0.5 h 的缺失率大于 10% 的数据. 最后对观测期内的数据进行插补, 其中相对湿度(relative humidity, RH)、空气温度(air temperature, T_a) 和饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD) 采用固定窗口平均昼夜变化法(MDV) 7 d 时间窗插补完整; 对于通量数据, 先用 3 d 的滑动 MDV 窗插补, 依

然缺失的数据采用 7 d 窗口的查表法, 插补完整. 根据水稻的生理生长形态, 对水稻的各个生长期也进行

了划分: 包括田闲休耕期、营养生长各时期、生殖生长各时期以及成熟收割期.

表 1 江都站涡度相关通量观测仪器

Table 1 Measurement instruments of the flux tower at Jiangdu site

观测指标	公司	型号	高度/m
CH ₄ 摩尔分数	LI-COR	LI-7700	3.5
CO ₂ 和 H ₂ O 密度、气温和气压	LI-COR	LI-7500RS	3.5
三维风速、水平风向和超声温度	Campbell Scientific	CSAT3B	3.5
环境温度和相对湿度	Vaisala	HMP155A	3.5
数据采集器	Campbell Scientific	CR6	1.5

2 结果与分析

2.1 水稻整个生长阶段 CO₂ 和 CH₄ 通量季节变化

图 2 展示了稻麦轮作农田水稻整个生长阶段的环境要素, 包括 T_a 、VPD 以及 CO₂ 和 CH₄ 通量的季节变化情况. 可以看出, 各要素的季节变化十分明显, T_a 呈现先增高后下降的趋势, 大约在抽穗期, 8

月 10 ~ 25 日左右达到峰值. 整个观测阶段, T_a 最高值为 32.12 °C, 最小值为 13.45 °C, 平均值为 24.84 °C (表 2). VPD 也表现出明显的季节变化, 呈现先降低后升高再降低的趋势. 整个观测阶段, VPD 的最大值、最小值和平均值分别为 19.02、1.17 和 9.24 hPa. 从小麦收割开始, VPD 整体呈现降低趋势, 在拔节期其均值首次降到最低, 约 3.53 hPa, 在抽穗期

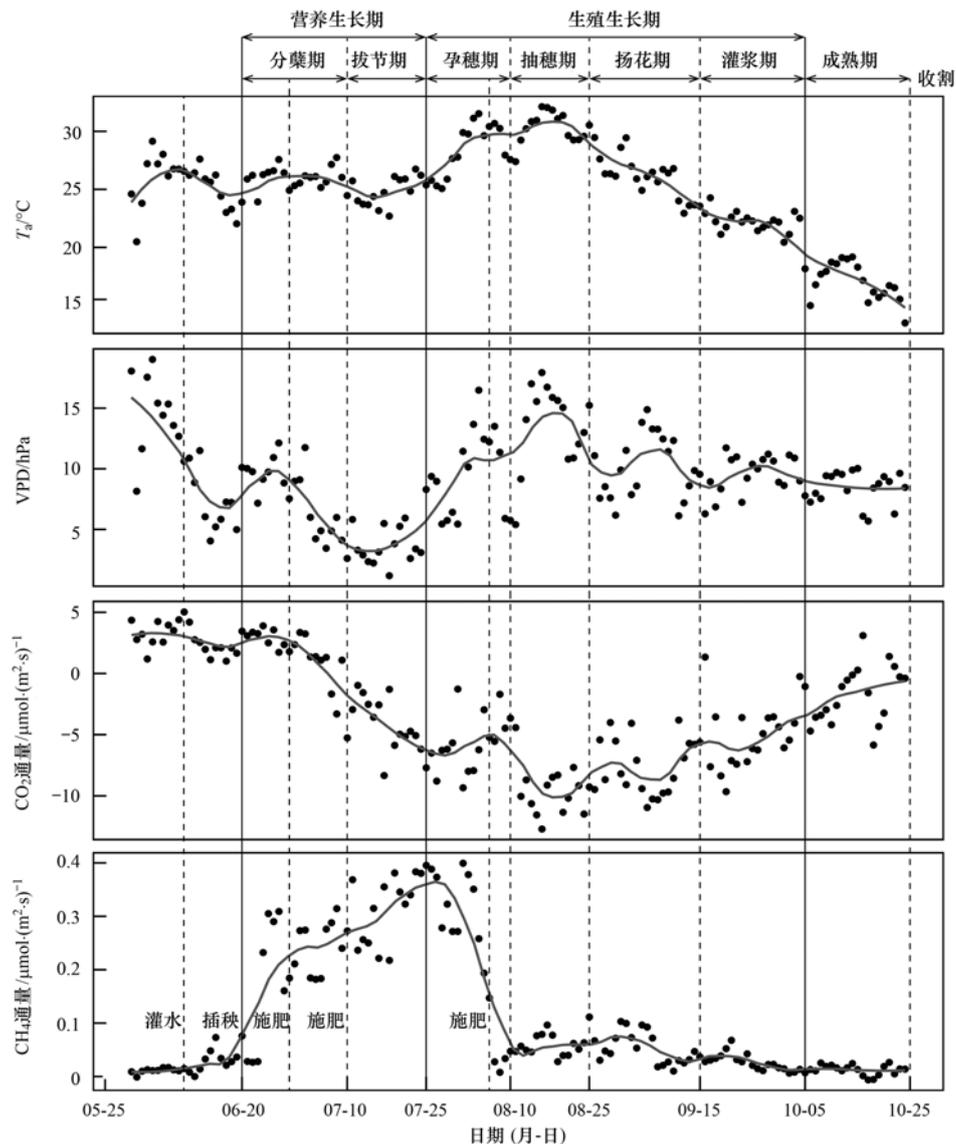


图 2 T_a 、VPD 以及 CO₂ 和 CH₄ 通量的季节波动

Fig. 2 Seasonal variations in T_a , VPD, CO₂, and CH₄ fluxes

再次升高到最高(12.99 hPa),之后又开始降低.可以发现,在多个生长期中,VPD 都呈现先升高后降低的波动趋势.整个观测阶段的 CO_2 通量也出现明显的季节特征,呈“U”型曲线,最大值、最小值和平均值分别为 5.02 、 -12.71 和 $-3.33 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,明显受到水稻光合和呼吸作用的影响.自小麦收割后, CO_2 通量开始逐渐降低,在分蘖期开始出现负值,在抽穗期平均值降到最低,为 $-9.17 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,之后便开始持续上升.整个观测阶段的 CH_4 通量变化趋势也非常明显,呈现与 CO_2 通量大致相反的趋势,先增加后减少.自灌水后, CH_4 通量值开始慢慢上升,在分蘖期和拔节期呈现迅猛上升(营养生长阶段),之后又急速下降,在孕穗期几乎从峰值下降到低谷,扬花期有一个微小的增加,之后便持续降低到接近 0.营养生长阶段的 CH_4 通量 [$0.25 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 要明显大于生殖生长阶段 [$0.09 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]. 整个观测期间通量最大值出现在拔节期末孕穗期初,为 $0.40 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,平均值为 $0.11 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 各阶段的环境要素及通量平均值见表 2. 另外,对施肥时间点的分析可以看出,前两次施肥后, CH_4 通量的

增长有减缓的趋势.

2.2 水稻不同生长阶段 CO_2 和 CH_4 通量日变化

图 3 展示了整个观测期不同生长阶段的 T_a 、VPD 以及 CO_2 和 CH_4 通量的日变化波动规律.可以明显地看出,整个生长阶段,各要素的日变化都十分显著, T_a 、VPD 和 CH_4 通量都呈现先增加后减少的“n”型单峰曲线, CO_2 通量呈现先降低后升高的“U”型曲线.从整个阶段尺度分析发现, T_a 在早上 06:00 开始升高,在 15:30 左右达到峰值. VPD 日变化趋势与 T_a 相同. CO_2 通量晚上(00:00 ~ 07:00 和 18:00 ~ 00:00)都为正值,而白天(07:00 ~ 18:00)都为负值,整体从 07:00 开始下降,在中午 13:00 左右达到最低,约 $-16.01 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,之后开始增加.晚上通量值比较平稳,约 $2 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. CH_4 通量为晚上低白天高,从早上 06:00 开始增加,在中午 14:00 左右达到峰值,约 $0.16 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,晚上的通量比较平稳,约 $0.07 \sim 0.09 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$.

T_a 和 VPD 的日变化在各个阶段都很明显, CO_2 和 CH_4 通量日变化在各阶段表现不同. CO_2 通量日变化在休耕期和分蘖期几乎无波动,从拔节期开始

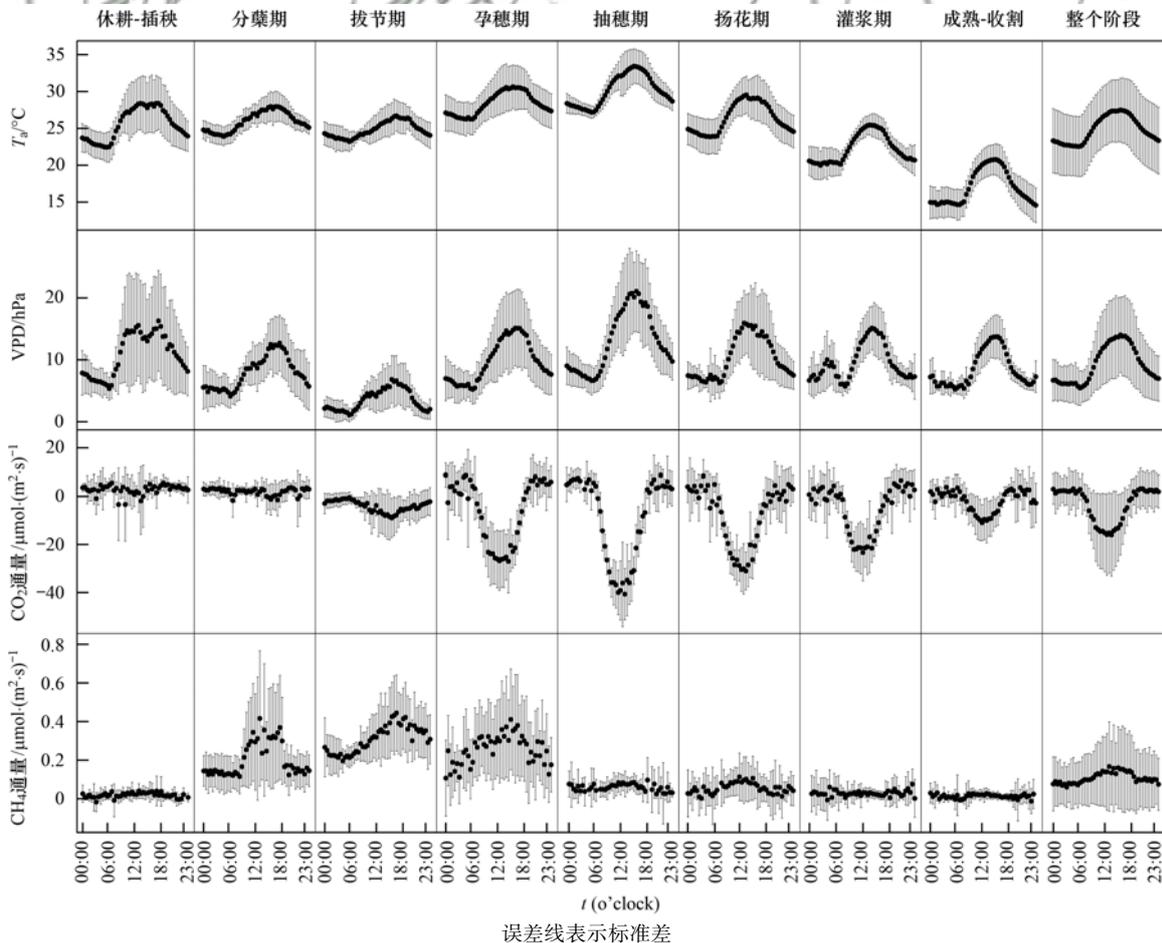


图 3 不同生长阶段 T_a 、VPD 以及 CO_2 和 CH_4 通量的日变化

Fig. 3 Diurnal variations in T_a , VPD, CO_2 , and CH_4 fluxes during different periods

出现稍微的日变化趋势,之后十分明显,在抽穗期波动最大,波动范围为 $-40.68 \sim 8.71 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. CH_4 通量日变化波动明显的阶段

只出现在分蘖期、拔节期、孕穗期和扬花期,其它时期日通量比较平稳,其中分蘖期的日振幅最大,波动范围为 $0.12 \sim 0.42 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

表 2 不同生长阶段 T_a 、VPD 以及 CO_2 和 CH_4 通量统计

Table 2 Statistics of T_a , VPD, CO_2 , and CH_4 fluxes during different periods

不同阶段	$T_a/^\circ\text{C}$			VPD/hPa			CO_2 通量/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$			CH_4 通量/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
休耕	29.14	20.49	25.59	19.02	4.04	10.87	5.03	1.01	2.83	0.07	0.00	0.02
插秧分蘖	27.74	23.90	25.96	12.12	3.44	7.93	3.89	-3.30	1.96	0.31	0.03	0.20
拔节	26.75	22.70	24.82	5.93	1.18	3.53	-0.97	-8.34	-4.07	0.38	0.22	0.31
孕穗	31.52	25.07	28.38	16.48	5.44	9.80	-1.28	-9.34	-5.86	0.40	0.01	0.26
抽穗	32.12	27.39	30.16	17.93	5.40	12.99	-3.65	-12.71	-9.17	0.10	0.03	0.06
扬花	30.54	22.94	26.41	15.23	6.12	10.34	-3.81	-10.96	-7.71	0.11	0.01	0.06
灌浆	24.27	20.44	22.27	11.72	6.28	9.57	1.34	-9.66	-5.17	0.07	0.01	0.03
成熟收割	19.18	13.49	17.05	10.03	5.68	8.41	3.10	-5.85	-1.73	0.03	-0.01	0.01
营养生长	27.74	22.70	25.47	12.12	1.18	6.05	3.89	-8.34	-0.62	0.38	0.03	0.25
生殖生长	32.12	20.44	26.48	17.93	5.40	10.56	1.34	-12.71	-6.90	0.40	0.01	0.09
整个阶段	32.12	13.45	24.84	19.02	1.17	9.24	5.02	-12.71	-3.33	0.40	-0.006	0.11

2.3 稻田 CO_2 和 CH_4 通量排放与环境要素关系

通过整个生长阶段的季节变化与日变化结果,可以看出 T_a 和 VPD 与 CO_2 和 CH_4 通量存在一定的相关关系.图 4 展示了基于季节尺度的 CO_2 和 CH_4 通量变化与环境因子响应关系.可以看出,在季节尺度下 T_a 和 VPD 与 CO_2 和 CH_4 通量之间关系较弱,

几乎不存在明显的作用关系.其中 CO_2 通量的线性拟合度 R^2 仅为 $0.05 \sim 0.07$, CH_4 通量的 R^2 在 0.1 左右.图 5 进一步分析了整个观测阶段下,基于日变化尺度的相关关系结果,可以看出 T_a 和 VPD 与 CH_4 通量呈现显著的正相关关系 ($R^2 = 0.8$),与 CO_2 通量出现显著负相关关系 ($R^2 = 0.5$).两因子对

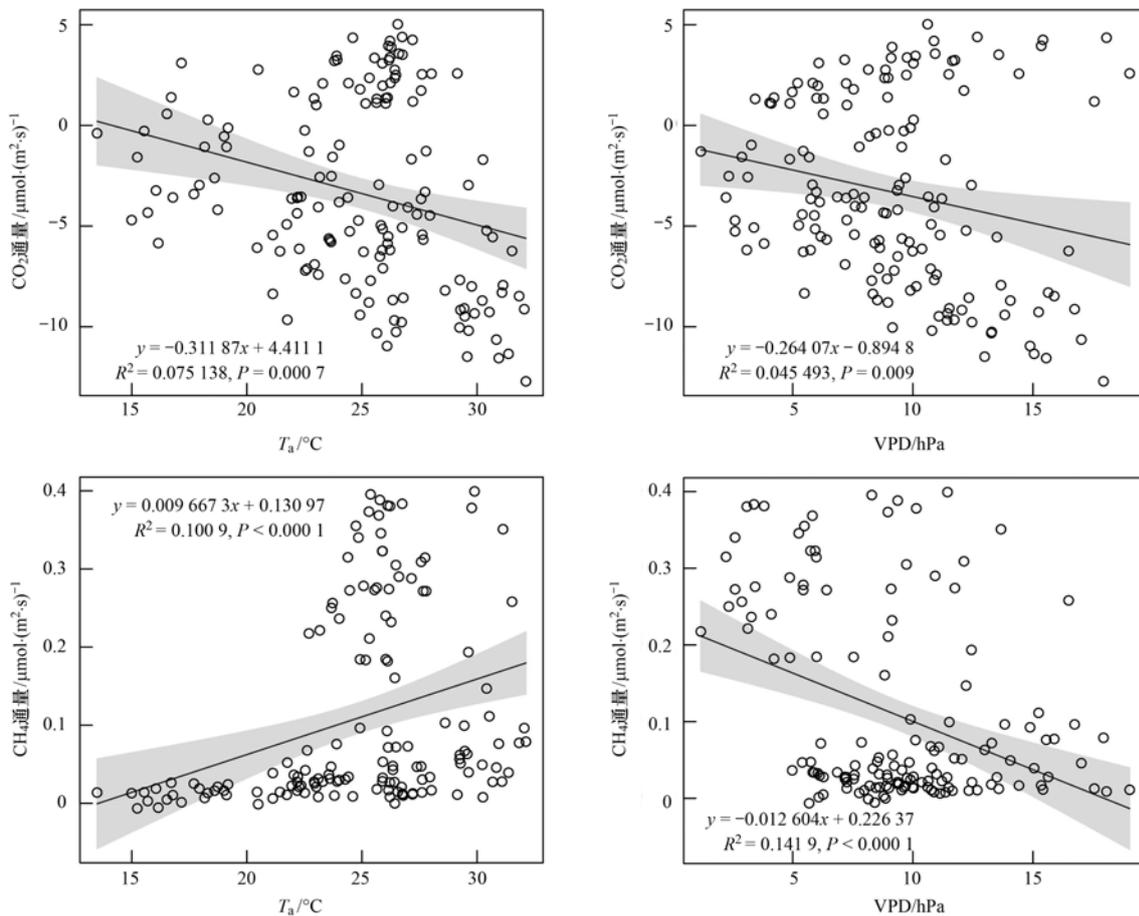


图 4 基于季节尺度的 T_a 和 VPD 与 CO_2 和 CH_4 通量间关系

Fig. 4 Relationship between T_a and VPD with CO_2 and CH_4 fluxes on a seasonal scale

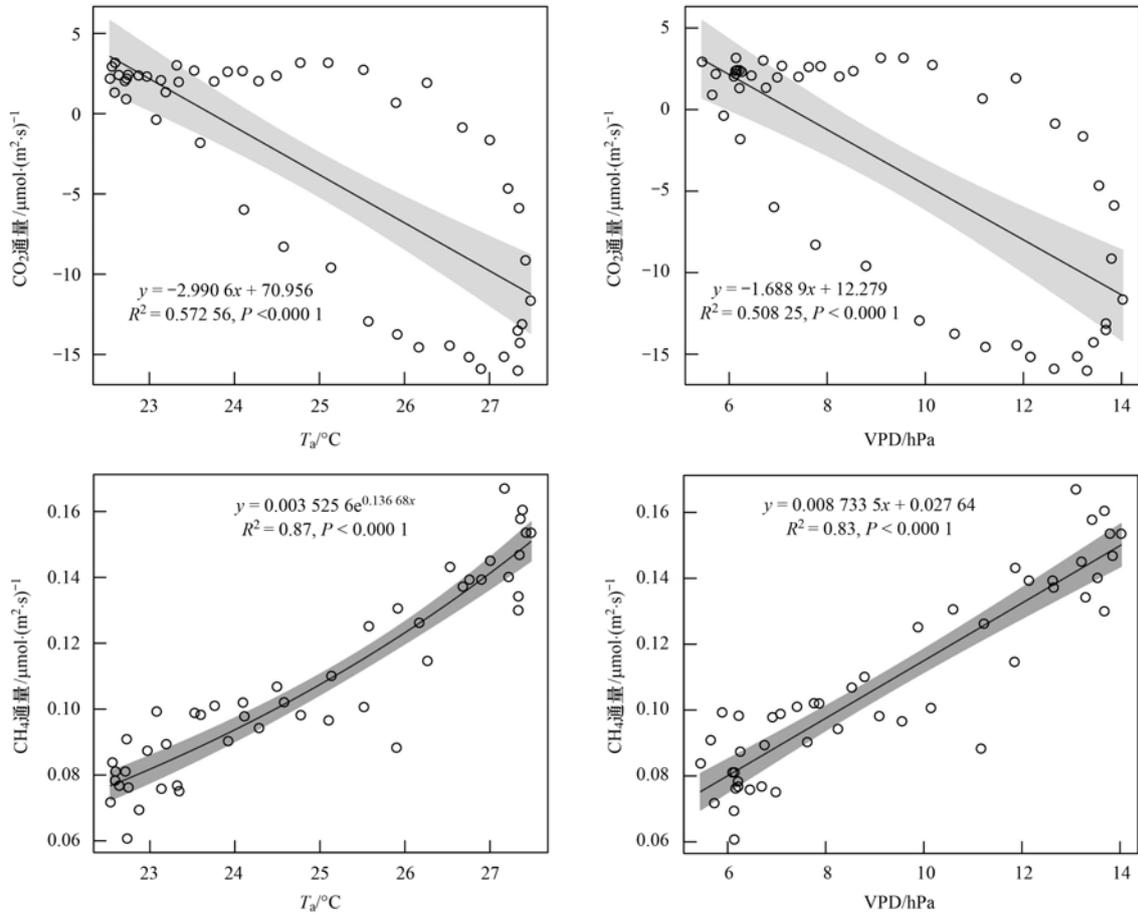


图 5 基于日变化尺度的 T_a 和 VPD 与 CO_2 和 CH_4 通量间关系

Fig. 5 Relationship between T_a and VPD with CO_2 and CH_4 fluxes on a diurnal scale

CH_4 通量作用关系更明显,其中 T_a 与 CH_4 通量的关系为指数相关, CH_4 通量 = $0.00353 e^{0.137x}$ ($R^2 = 0.87, P < 0.0001$), VPD 与 CH_4 通量呈现明显的线性相关, CH_4 通量 = $0.00873x + 0.0276$ ($R^2 = 0.83, P < 0.0001$).

基于以上结果可以看出,日变化尺度下的 VPD

和 T_a 对 CO_2 和 CH_4 通量存在一定影响,特别是对 CH_4 通量的影响十分明显.因此,本研究进一步对通量昼夜排放与环境因子的响应关系进行了分析(图 6).结果表明, CO_2 通量在白天与 T_a 和 VPD 的响应关系 ($P < 0.01$) 要明显好于晚上,晚上不存在明显相互关系,这说明稻田 CO_2 通量明显受到光照的影

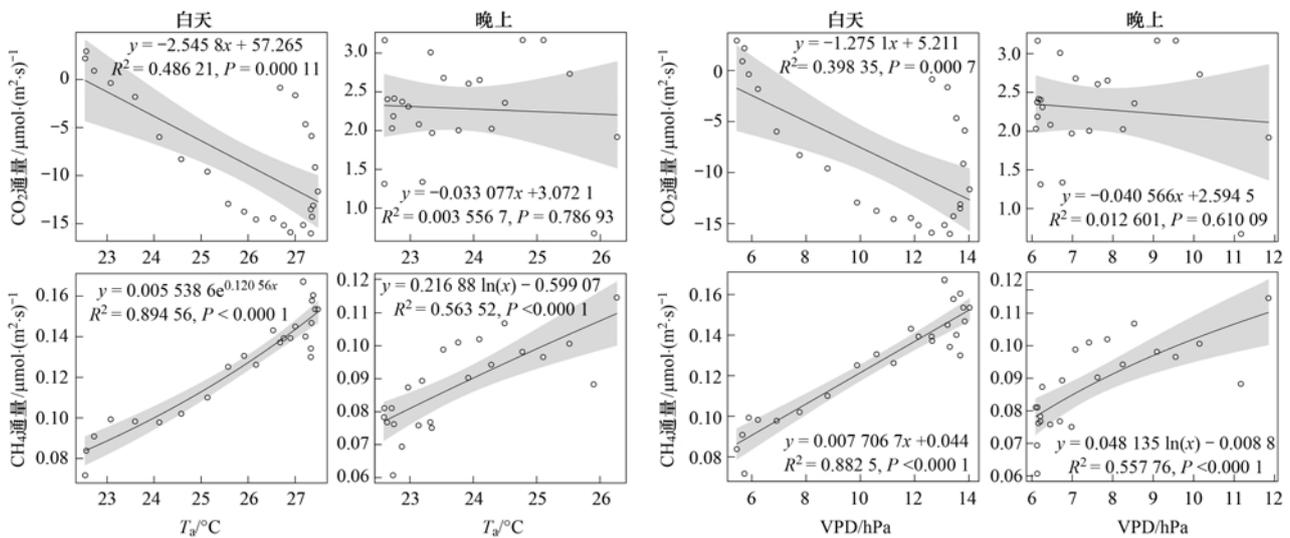


图 6 基于日变化尺度的昼夜 T_a 和 VPD 与 CO_2 和 CH_4 通量间关系

Fig. 6 Relationship between daytime and nighttime T_a and VPD with CO_2 and CH_4 fluxes on a diurnal scale

响. CH_4 通量的昼夜变化与 T_a 和 VPD 的响应关系都很明显, 白天 CH_4 通量与 T_a 呈指数相关, 与 VPD 呈线性关系, R^2 达到了 0.88 ~ 0.89, 晚上较弱于白天, 呈对数相关, R^2 为 0.56.

2.4 不同生长期下的 CO_2 和 CH_4 通量波动与环境要素响应关系

基于日变化尺度, 进一步对水稻不同生长阶段的 CH_4 通量与环境因子影响关系进行了分析 (图

7). 结果表明 T_a 对 CH_4 通量影响最强的阶段为拔节期 ($R^2 = 0.83$), 分蘖期、孕穗期和扬花期影响相对较强, 其它时期影响较弱, 灌浆期影响不显著, 甚至出现了负影响趋势. 对 VPD 的研究也发现了类似的结果, VPD 对 CH_4 通量影响最强的阶段为拔节期 ($R^2 = 0.65$), 分蘖期、孕穗期和扬花期相对较强, 其它时期影响较弱, 成熟收割期和灌浆期影响不显著, 灌浆期甚至出现负影响趋势.

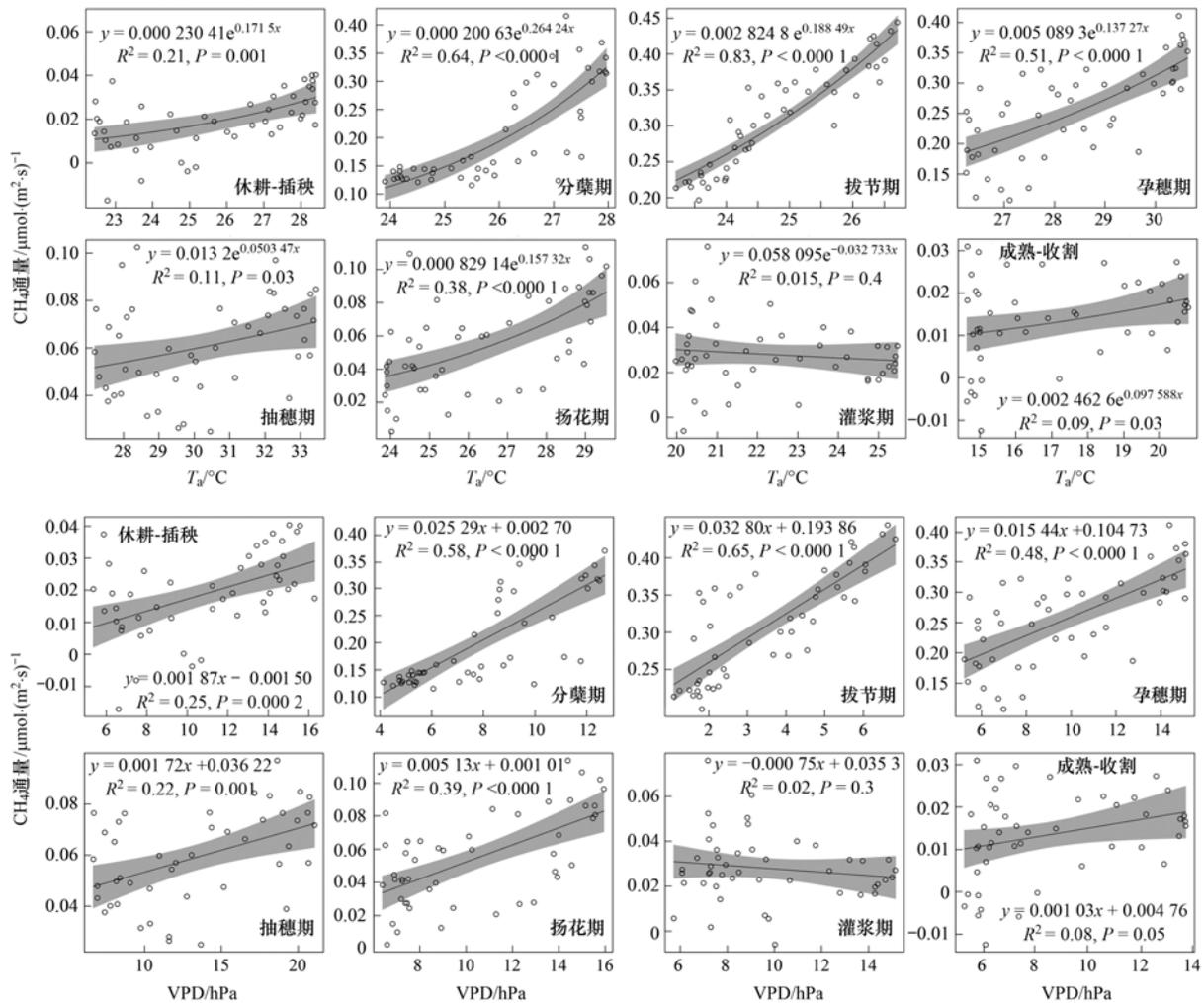


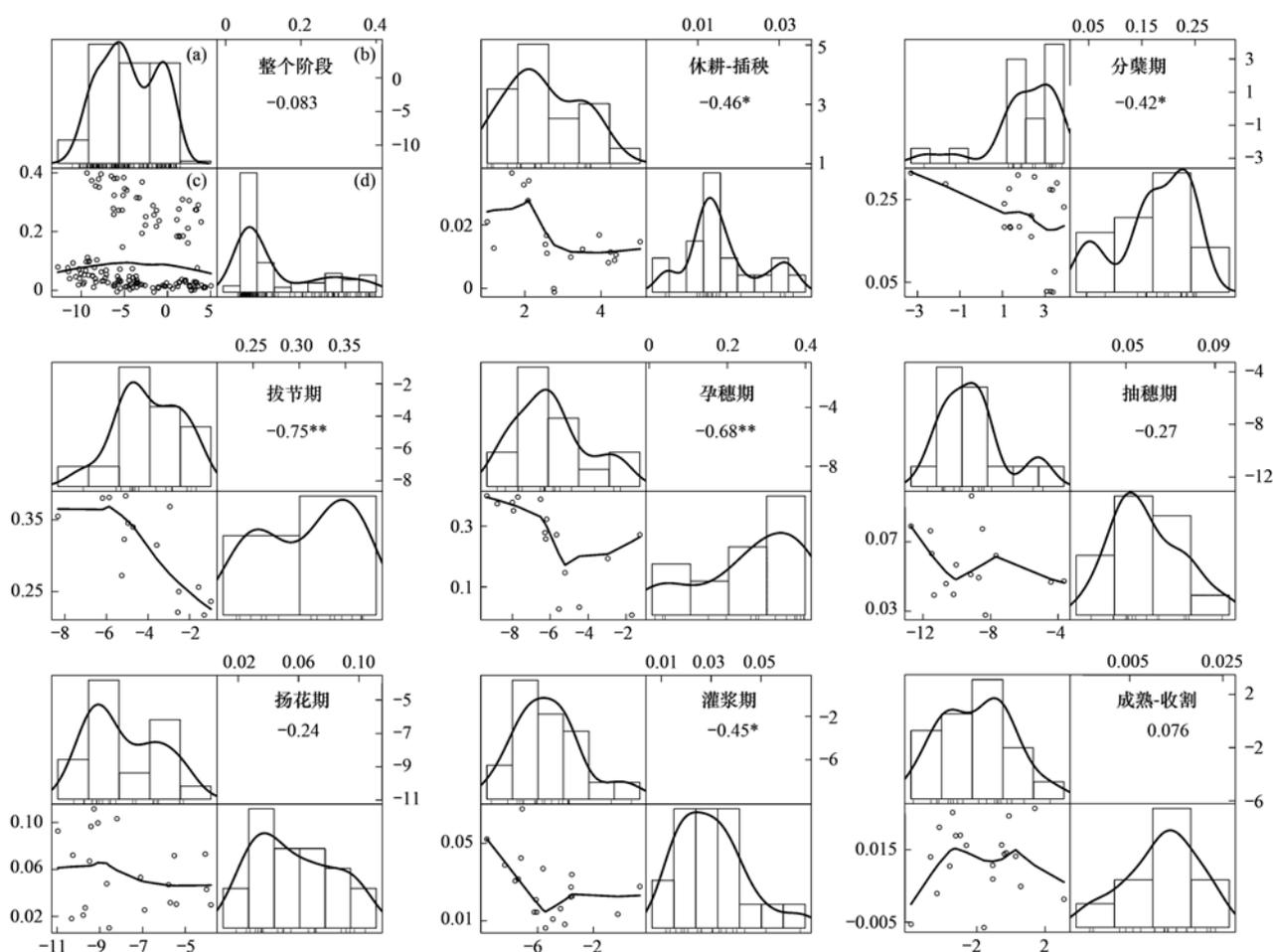
图7 基于日变化尺度的不同生长阶段 T_a 和 VPD 与 CH_4 通量间关系

Fig. 7 Relationship between T_a and VPD with CH_4 fluxes during different periods on a diurnal scale

本研究最后分析了在季节尺度和日变化尺度下, 水稻不同生长阶段 CO_2 和 CH_4 通量间的相关性 (图8和图9). 可以看出, 在整个观测阶段, 季节尺度上的 CO_2 和 CH_4 通量间相关关系不明显; 而日尺度上, CO_2 和 CH_4 通量呈现极显著负相关, CH_4 通量随着 CO_2 通量的增加而显著降低 ($r = -0.8$, $P < 0.001$). 季节尺度上, 负相关关系显著的时期主要在拔节期和孕穗期, 其它时期不明显; 而日尺度上, 除了休耕-插秧期和灌浆期, 其它时期 CO_2 和 CH_4 通量都呈现出极显著负相关.

3 讨论

本研究得出的通量日变化波动结果与先前的稻田研究结果相似^[11,13,23,25]. 苏荣瑞等^[26]的研究发现湖北荆州稻田 CO_2 通量在白天 08:00 ~ 17:00 递减, 为负值, 在夜间 18:00 ~ 07:00 持续递增, 为正值. 杨智等^[27]的研究发现云南大理区域稻田在日出后 CO_2 通量不断降低, 日落后开始增加, 白天为负夜间为正, 最低值出现在 13:00. 白天的 CO_2 通量吸收主要是水稻光合作用造成的, 而晚上排放增加主要



每个生长期的4个分面图含义相同,以整个阶段为例:(a)和(d)分别为CO₂和CH₄日通量平均值的数据分布;(c)为具有拟合线的CH₄日通量平均值数据(纵坐标)对CO₂日通量平均值数据(横坐标)的散点图,单位为 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$;(b)显示的CO₂和CH₄日通量平均值间的皮尔逊相关系数以及显著性水平;*为 $P<0.05$,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$,下同

图8 基于季节变化尺度的不同生长阶段CO₂通量与CH₄通量相关关系

Fig. 8 Relationship between CO₂ fluxes and CH₄ fluxes during different periods on a seasonal scale

是由于植被和土壤呼吸作用增强导致. Alberto 等^[11]的研究发现稻田CH₄通量从08:00增加,最高值在13:00~15:00,之后19:00出现最低值. Dai 等^[23]的研究也发现了稻田CH₄通量显著的日变化规律,发现峰值出现在13:00~16:00,而且在休耕期,稻田CH₄通量非常小,日变化不明显,这也与本研究区域的CH₄通量日变化结果一致.

本研究区域水稻生长季的整个观测阶段,总的表现为CH₄的源,CO₂的汇.CO₂通量的“U”型曲线与以往其它区域稻田,如江苏、湖南和云南等的研究结果一致^[26~28].稻田的CO₂排放主要受灌溉和植被生长等影响,稻田灌水后,温度降低,土壤CO₂排放因此开始逐步减弱;而随着植被的生长,在抽穗期水稻生长旺盛,光合作用强烈,出现了最大吸收通量^[26~28].CH₄排放则呈现几乎相反趋势,在灌水后,随淹水时间增长,水稻快速生长,甲烷厌氧菌活动频繁,土中大量残茬和有机质不断分解,土壤排放

逐渐增强;到生殖生长阶段后,水稻生长减缓,加上后期烤田,厌氧菌活动受抑,CH₄排放迅速减少^[29~32].Li 等^[24]的研究发现,稻田CH₄在营养和生殖生长阶段排放特征明显,峰值出现在营养生长的中后期,之后便开始下降,而成熟期的CH₄排放量很小,该结果与本研究结果一致.宋朝清等^[13]的研究对水稻营养和生殖生长阶段的CH₄通量进行了对比分析,发现通量平均值分别为 $0.53 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $0.29 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,其大小趋势与本研究的结果一致.本研究的人工施肥措施对CH₄通量的减缓趋势与以往施肥研究结果相似^[33~36].田伟等^[33]的研究表明,常规施肥、优化施肥、优化施肥与缓控释肥配施使海南稻田CH₄累计排放量大量减少;王永明等^[36]的研究表明稻田CH₄排放对施肥处理的响应会受水分管理模式的影响,间隙灌溉下施肥使排放增加,控制灌溉下施肥会减缓排放.这主要是因为控水和高施肥量下甲烷氧

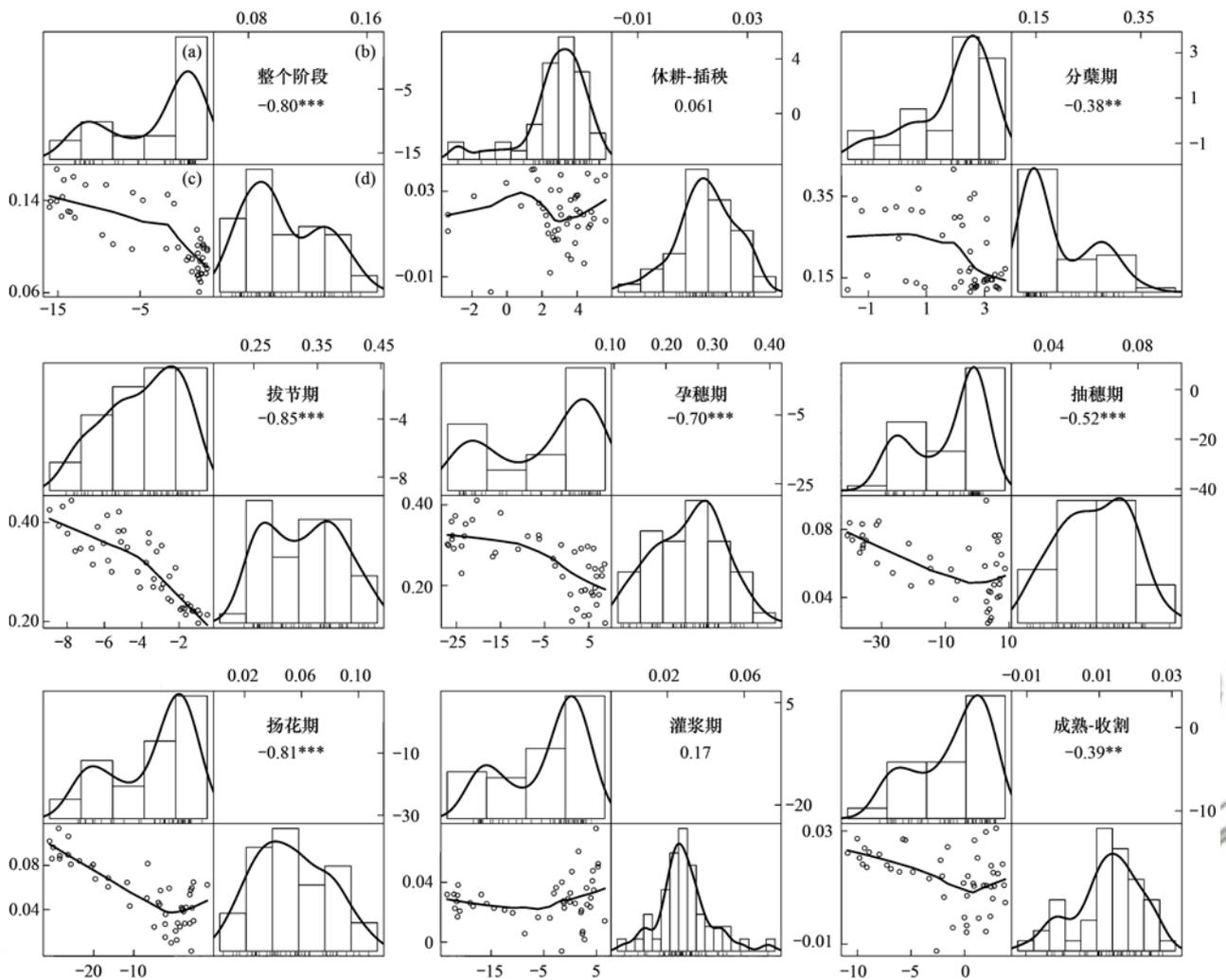


图9 基于日变化尺度的不同生长阶段 CO_2 通量与 CH_4 通量变化关系

Fig. 9 Relationship between CO_2 fluxes and CH_4 fluxes during different periods on a diurnal scale

化菌的活性增高,最终抑制了 CH_4 排放^[36~38]. CO_2 通量与 CH_4 通量的负相关关系,主要归因于稻田水分较多时,土壤处于厌氧状态, CH_4 排放强烈,而当后期排水使土壤氧充足时,甲烷氧化菌将 CH_4 氧化为 CO_2 ^[13,14,39,40].

稻田 CH_4 排放一般有 3 条途径:①通过水稻植株的中空结构. 土壤中生成的甲烷先要进入植株,如果根系氧化能力强,大部分甲烷就会在根际被氧化,能进入植株的量就减少. ②土面扩散. 当烤田后土壤变得沉实,表层形成致密层,会导致扩散几乎不能再生,这可能是拔节期后,甲烷通量出现急速下降的重要原因. ③气泡排放. 烤田后稻田土壤不能再形成气泡,这可能导致了甲烷排放的迅速降低^[29,36,41]. 因此,稻田 CH_4 通量迅速降低的动态特征受烤田影响的作用关系有待进一步研究. 另外, CH_4 通量季节性变化也会受到温度等多种因素的显著影响,例如在抽穗期前温度持续升高,可能促进 CH_4 的排放,抽穗期后温度就开始持续降低, CH_4 排放减

弱^[23,39,42,43].

环境因子 T_a 和 VPD 对稻田 CO_2 通量的响应关系相对较弱,对 CH_4 通量影响明显,而且日变化尺度上的环境因子响应关系要明显好于季节尺度,主要是因为温室气体通量在季节波动上会受到环境因子、气候变化和人为管理等多重因子的综合影响,环境因子单独的响应关系就会被削弱,而日尺度的短期波动就更容易受到环境因子的驱动^[13,28,32]. 白天的响应关系要明显好于晚上,可归因于白天受温度、光照等影响,植被生长、光合作用和土壤呼吸等更为强烈,从而表现出强相互作用,晚上则相对趋于平稳,尤其是 CO_2 通量,受昼夜光照差异影响明显. 蔡祖聪等^[29]的研究表明水稻生长期温度变化是导致稻田 CH_4 排放量年际变化的主要因素. Dai 等^[23]的研究表明,水稻在抽穗前后时期, T_a 和土壤温度都对 CH_4 排放产生了显著影响,抽穗期前的影响呈线性相关,抽穗期后呈指数相关. Li 等^[24]的研究认为稻田 CH_4 通量与 T_a 或土壤温度存在指数相

关. Ge 等^[25]的研究发现稻田 CH₄ 通量的日变化和土壤温度也具有很好相关性. 宋朝清等^[13]的研究发现稻田 CH₄ 通量与 T_a 和 VPD 呈现显著的正相关关系. Alberto 等^[11]的研究表明,土壤温度、空气温度、CO₂ 排放和能量通量等都会影响稻田 CH₄ 通量变化. 相关区域稻田研究结果都与本区域研究结果相符,这说明 T_a 和 VPD 会显著影响 CH₄ 通量的季节和日变化动态特征. 温度对 CH₄ 排放和吸收的影响主要是改变了甲烷氧化菌和生成菌的活性,稻田 CH₄ 通量在中午达到峰值,受温度升高后产甲烷菌活性加强的影响^[23,44,45],而 VPD 的变化会影响水稻与大气间的传输过程,进而影响了 CH₄ 通量波动^[13,23,46].

4 结论

长江中下游平原稻田生长季 CO₂ 通量呈“U”型曲线,表现为汇,在分蘖期开始出现负值,抽穗期降到最低. CH₄ 通量与 CO₂ 通量趋势大致相反,先增加,在拔节期后出现极速下降,主要受烤田后土壤沉实,表层形成致密层,气体不再扩散的影响. CO₂ 通量晚上为正值,白天为负值,CH₄ 通量是晚上低白天高,明显受到植被光合作用和日环境因子波动的影响. 环境因子 T_a 和 VPD 对稻田 CO₂ 通量的影响相对较弱,对 CH₄ 通量影响明显,拔节期最为显著. 日变化尺度上,CO₂ 和 CH₄ 通量对 T_a 和 VPD 的响应关系要明显好于季节尺度,白天的响应关系要明显好于晚上. 其中, T_a 与 CH₄ 通量呈现显著指数相关,主要受温度升高后产甲烷菌活性加强的影响; VPD 与 CH₄ 通量呈现线性相关,VPD 的变化会明显影响水稻与大气间的传输过程进而影响 CH₄ 通量. 在季节尺度上,CO₂ 和 CH₄ 通量间相关关系不明显,但在日尺度上两者呈现极显著负相关,CH₄ 通量随着 CO₂ 通量的增加而显著降低.

参考文献:

- [1] 陈菡, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(10): 12-18.
Chen H, Chen W Y, He J K. Pathway to meet carbon emission peak target and air quality standard for China [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, **30**(10): 12-18.
- [2] 自然资源部. 中国国土资源公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2016.
- [3] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(5): 493-503.
Li C S, Xiao X M, Frolking S, *et al.* Greenhouse gas emissions from croplands of China [J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(5): 493-503.
- [4] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 980-988.
Huang Y, Zhang W, Zheng X H, *et al.* Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(4): 980-988.
- [6] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. 土壤, 1999, **31**(5): 266-269.
- [7] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学, 2003, **27**(4): 740-749.
Li J, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, **27**(4): 740-749.
- [8] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 2049-2053.
Jia Z J, Cai Z C. Effects of rice plants on methane emission from paddy fields [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(11): 2049-2053.
- [9] 李琳, 胡立峰, 陈阜, 等. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(S2): 707-710.
Li L, Hu L F, Chen F, *et al.* Effects of different long-term fertilization on emission of CH₄ and N₂O from paddy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, **25**(S2): 707-710.
- [10] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 9-13.
Peng S Z, Li D X, Xu J Z, *et al.* Effect of water-saving irrigation on the law of CH₄ emission from paddy field [J]. Environmental Science, 2007, **28**(1): 9-13.
- [11] Alberto M C R, Wassmann R, Buresh R J, *et al.* Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer [J]. Field Crops Research, 2014, **160**: 12-21.
- [12] Meijide A, Manca G, Godeo I, *et al.* Seasonal trends and environmental controls of methane emissions in a rice paddy field in Northern Italy [J]. Biogeosciences, 2011, **8**(12): 3809-3821.
- [13] 宋朝清, 刘伟, 陆海波, 等. 基于通量测量的稻田甲烷排放特征及影响因素研究[J]. 地球科学进展, 2019, **34**(11): 1141-1151.
Song C Q, Liu W, Lu H B, *et al.* Characteristics and drivers of methane fluxes from a rice paddy based on the flux measurement [J]. Advances in Earth Science, 2019, **34**(11): 1141-1151.
- [14] Weller S, Kraus D, Ayag K R P, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **101**(1): 37-53.
- [15] Neue H U. Methane emission from rice fields [J]. Bioscience, 1993, **43**(7): 466-474.
- [16] Yuan J, Yuan Y K, Zhu Y H, *et al.* Effects of different fertilizers on methane emissions and methanogenic community structures in paddy rhizosphere soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 770-781.
- [17] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future [J]. Global Change Biology, 2003, **9**(4): 479-492.
- [18] 李思恩, 康绍忠, 朱治林, 等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(9): 2720-2726.

- Li S E, Kang S Z, Zhu Z L, *et al.* Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41** (9): 2720-2726.
- [19] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**(1-4): 159-183.
- [20] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, **36**(S1): 1-21.
- [21] 聂道平, 徐德应, 王兵. 全球碳循环与森林关系的研究——问题与进展[J]. *世界林业研究*, 1997, **10**(5): 34-41.
Nie D P, Xu D Y, Wang B. The relation between global CO₂ balance and forests-problems and developments [J]. *World Forestry Research*, 1997, **10**(5): 34-41.
- [22] 耿绍波, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 基于涡度相关技术测算地表碳通量研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010, **23**(3): 24-28.
Geng S B, Lu S W, Rao L Y, *et al.* Research progress of measurement of land surface carbon budget based on eddy covariance technology[J]. *World Forestry Research*, 2010, **23** (3): 24-28.
- [23] Dai S P, Ju W M, Zhang Y G, *et al.* Variations and drivers of methane fluxes from a rice-wheat rotation agroecosystem in eastern China at seasonal and diurnal scales[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 973-990.
- [24] Li H, Guo H Q, Helbig M, *et al.* Does direct-seeded rice decrease ecosystem-scale methane emissions? -A case study from a rice paddy in southeast China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **272-273**: 118-127.
- [25] Ge H X, Zhang H S, Zhang H, *et al.* The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **249**: 228-238.
- [26] 苏荣瑞, 刘凯文, 耿一风, 等. 江汉平原稻-油连作系统冠层 CO₂ 通量变化特征[J]. *中国农业气象*, 2012, **33**(3): 362-367.
Su R R, Liu K W, Geng Y F, *et al.* CO₂ flux variation over canopy rice-rape succession system in jiangnan plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, **33**(3): 362-367.
- [27] 杨智, 孙绩华, 徐安伦. 稻田 CO₂ 和 CH₄ 通量特征及碳平衡研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2013, **35**(S2): 291-295.
Yang Z, Sun J H, Xu A L. Analyses of the characteristics of CO₂ and CH₄ fluxes and carbon balance over the rice field [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2013, **35**(S2): 291-295.
- [28] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758-764.
Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(6): 758-764.
- [29] 蔡祖聪, 谢德体, 徐华, 等. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(5): 705-709.
Cai Z C, Xie D T, Xu H, *et al.* Factors influencing CH₄ emissions from a permanently flooded rice field during rice growing period[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(5): 705-709.
- [30] Knox S H, Matthes J H, Sturtevant C, *et al.* Biophysical controls on interannual variability in ecosystem-scale CO₂ and CH₄ exchange in a california rice paddy[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(3): 978-1001.
- [31] Iwata H, Mano M, Ono K, *et al.* Exploring sub-daily to seasonal variations in methane exchange in a single-crop rice paddy in central Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **179**: 156-165.
- [32] Long K D, Flanagan L B, Cai T. Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern canadian peatland measured by eddy covariance[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(9): 2420-2435.
- [33] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻田田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2426-2434.
Tian W, Wu Y Z, Tang S R, *et al.* Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2426-2434.
- [34] 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 等. 水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3458-3471.
Li J Q, Shao X H, Gou G L, *et al.* Effects of water and fertilization management on CH₄ and N₂O emissions in double-rice paddy fields in tropical regions[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3458-3471.
- [35] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1741-1750.
Jiang S S, Pang B K, Zhang J S, *et al.* Effects of reduced nitrogen and combined application of different fertilizers on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1741-1750.
- [36] 王永明, 徐永记, 纪洋, 等. 节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6025-6037.
Wang Y M, Xu Y J, Ji Y, *et al.* Coupling effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer (CRF) application on CH₄ and N₂O emission in single cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **42**(12): 6025-6037.
- [37] Meijide A, Gruening C, Goded I, *et al.* Water management reduces greenhouse gas emissions in a mediterranean rice paddy field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **238**: 168-178.
- [38] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7668-7678.
Tang H M, Xiao X P, Tang W G, *et al.* Effects of long-term fertilizer treatments on CH₄ fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7668-7678.
- [39] Jia Q Y, Yu W Y, Zhou L, *et al.* Methane emissions from typical paddy fields in Liaohe plain and Sanjiang plain, northeast China[J]. *Environmental Research Communications*, 2019, **1** (1), doi: 10.1088/2515-7620/ab06e5.
- [40] 于海洋, 张广斌, 马静, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对大气 CO₂ 浓度升高响应的研究进展[J]. *土壤*, 2021, **53**(3): 458-467.
Yu H Y, Zhang G B, Ma J, *et al.* Response of CH₄ and N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration from rice fields: A review[J]. *Soils*, 2021, **53**(3): 458-467.
- [41] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5546-5555.

- Qin X B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5546-5555.
- [42] 孙小静, 侯玉兰, 王东启, 等. 崇明岛稻麦轮作生态系统主要温室气体排放特征及影响因素分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 832-841.
- Sun X J, Hou Y L, Wang D Q, *et al.* Emission characteristics and effect factors of major greenhouse gases from rice-wheat rotation system in Chongming island [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 832-841.
- [43] 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 等. 稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4701-4710.
- Chen Y D, Zhao Y, Gao D J, *et al.* Effects of different rotation patterns of oil-rice on methane and nitrous oxide emissions in rice fields [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4701-4710.
- [44] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- Fu Z Q, Long P, Liu Y Y, *et al.* Effects of water and nitrogenous fertilizer coupling on CH₄ and N₂O emission from double-season rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- [45] 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 等. 耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3472-3481.
- Yang Y H, He H, Mi T Z, *et al.* Community characteristics of methanogens and methanogenic pathways in salttolerant rice soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3472-3481.
- [46] Song W M, Wang H, Wang G S, *et al.* Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: Neglected but vital contribution of the nongrowing season[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(8): 1475-1490.

环 境 科 学

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)