

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文桦, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响

胡玉麟¹, 汤水荣¹, 陶凯², 何秋香¹, 田伟¹, 秦兴华¹, 伍延正^{1*}, 孟磊^{1*}

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 三亚市南繁科学技术研究院, 三亚 572000)

摘要: 选择海南典型的水稻-豇豆轮作系统进行氧化亚氮(N_2O)和甲烷(CH_4)排放的原位监测, 探究不同施肥模式下该系统土壤温室气体排放特征. 试验设当地常规施肥对照(CON)、优化施肥量(OPT)、有机无机配施(ORG)、缓控肥替代优化(SCOPT)及不施氮对照(CK)共5个处理, 采用静态箱-气相色谱法监测整个种植季土壤 N_2O 和 CH_4 排放, 并估算增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI). 结果表明, 各处理水稻季 N_2O 累积排放量为 $0.19 \sim 1.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相较于CON处理, 优化施肥处理 N_2O 减排50%~86%; 豇豆季 N_2O 累积排放量为 $1.29 \sim 3.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 除ORG增加14%, 其他处理减排16%~59%. 各处理水稻季 CH_4 累积排放量为 $4.67 \sim 14.23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CK、OPT和ORG处理分别较CON增加116%、22%和102%, 而SCOPT减少了29%; 豇豆季 CH_4 累积排放量为 $0.03 \sim 0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间出现 CH_4 吸收. 比较两个作物季和休闲期对农田土壤直接排放的温室气体GWP的贡献率, 豇豆季在 CH_4 排放极低的情况下, 仍有44.7%~54.5%的占比; 两种温室气体比较中, N_2O 对GWP的贡献率为66.7%~77.2%. SCOPT处理的GWP和两季作物GHGI均显著低于CON处理. 3个优化施肥处理中, SCOPT的增产减排效果最显著, 为最优的施肥方案.

关键词: 优化施肥; 热带地区; 水稻-豇豆轮作; N_2O ; CH_4 ; 增温潜势

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5182-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905095

Effects of Optimizing Fertilization on N_2O and CH_4 Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China

HU Yu-lin¹, TANG Shui-rong¹, TAO Kai², HE Qiu-xiang¹, TIAN Wei¹, QING Xing-hua¹, WU Yan-zheng^{1*}, MENG Lei^{1*}

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Sanya Science and Technology Academy for Crop Winter Multiplication, Sanya 572000, China)

Abstract: In-situ measurement of nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) emissions in a typical paddy-cowpea rotation system in Southern Hainan was conducted to determine the characteristics of greenhouse gas emissions under different optimum fertilization treatments. The experiment consisted of 5 treatments: conventional farming fertilization (CON), optimized fertilization (OPT), organic-inorganic fertilization (ORG), slow-controlled optimization fertilization (SCOPT), and no nitrogen as the control (CK). The N_2O and CH_4 emissions were measured using static chamber-gas chromatography during the all the paddy-cowpea rotation seasons. Global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were also estimated in this study. The cumulative N_2O emission during the rice growth season was $0.19 \sim 1.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with the CON treatment, other treatments reduced N_2O emission by 50% to 86%. The cumulative N_2O emission during the cowpea growth season was $1.29 \sim 3.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. In addition, N_2O emission increased by 14% as a result of the ORG treatment, whereas that of the remaining treatments decreased by 16% to 59%. The cumulative CH_4 emissions during the paddy growth season were $4.67 \sim 14.23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The CH_4 emissions following the CK, OPT, and ORG treatments were higher by 116%, 22%, and 102%, respectively, whereas that of SCOPT was lower by 29%, than that following the CON treatment. Moreover, the cumulative CH_4 emission during the cowpea growth season was $0.03 \sim 0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and CH_4 absorption occurred during the same period. With regard to the contribution rate of different periods to GWP, the cowpea growth season still had a proportion of 44.7%~54.5%, despite extremely low CH_4 emission. Regarding the two greenhouse gases, N_2O contributed 66.7%~77.2%. During the entire rotation system, both GWP and GHGI processed by SCOPT were significantly lower than those of the CON treatments. To sum up, the SCOPT treatment was determined to be the optimal fertilization scheme in this study and had the most significant effects on increasing production and reducing greenhouse gas emissions.

Key words: optimizing fertilization; tropical region; paddy-cowpea rotation; N_2O ; CH_4 ; global warming potential

工业革命后, 全球变暖的温室效应日益严重, 过去一个多世纪里地球表面温度上升了($0.6 \pm$

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200305); 海南省重大科技专项(ZDKJ2017002); 国家自然科学基金项目(41661051, 41807022); 海南省自然科学基金项目(317070)

作者简介: 胡玉麟(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境与生态修复, E-mail: yaredaiyulin@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: wyz198712@163.com; menglei@hainanu.edu.cn

0.2)℃^[1]. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)估计,因温室气体排放增加将导致全球平均气温每10 a上升0.2℃. N₂O和CH₄是两种重要的温室气体,其百年尺度的全球增温潜势(global warming potential, GWP)分别是CO₂的298倍和25倍^[1]. 一般认为,农田是N₂O和CH₄产生的重要来源^[2,3]. 不同的气候类型、土壤类型、作物种类、耕作方式、施肥模式等都可能产生较大差异^[2],而合理的耕作栽培管理措施能较大程度实现温室气体的减排. 据估计,到2030年全球农业活动的温室气体减排潜力可达5.5~6.0 Pg(CO₂-eq, 1 P=2²⁰),主要通过减少N₂O和CH₄排放及增加土壤碳固定来实现^[4].

海南省地处热带,冬季温度适合瓜菜类作物生长,逐渐形成了水稻-冬季瓜菜轮作的种植模式^[5]. 豇豆具有耐高温不耐低温的习性,一季可多次采摘. 为了延长其采摘周期,农户施肥量和施肥频率都较高,往往超过豇豆生长需求. 据统计,一季豇豆仅纯氮用量可达225~750 kg·hm⁻²^[6]. 以往研究表明,水旱轮作种植可能存在较高的N₂O和CH₄排放^[7,8]. 相对于国内其他地区水旱轮作过程的气体排放而言,海南具有气温高、瓜菜季化肥投入量大而有利于N₂O产生等典型的地域特点,但关于热带地区稻菜轮作系统的N₂O和CH₄排放研究目前鲜有报道.

国家统计局数据显示,2015年我国化肥农用量为5 416万 t,是全球平均用量的3.4倍. 盲目大量

地使用化学肥料造成严重的资源浪费和环境污染,化肥减量增效是农业绿色发展的必然趋势. 诸多研究表明,减少化肥施用能够减少相关温室气体排放^[9,10],却并未导致作物减产^[11,12]. 实现增产减排的减肥措施包括科学配置养分^[10]、有机无机配施^[13]以及新型缓控释肥料的应用^[14]等. 海南稻菜轮作过程中,土壤水分变化差异较大,各优化措施对温室气体排放的影响可能与前人的研究存在差异,筛选最优的增产减排措施对热带地区温室气体排放研究具有重要意义.

为此,本试验选择琼南地区水稻-豇豆轮作系统为研究对象. 在当地农户常规施肥的基础上设置3个优化施肥处理,以及不施氮的空白,监测整个种植季的N₂O和CH₄排放,并结合作物产量和GWP,确定较优的施肥模式. 本研究可以填补我国热带地区水稻-冬季瓜菜这一主要轮作模式中温室气体排放的空白.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于海南省三亚市吉阳区南繁科学技术研究院基地内(109°35'52" E, 18°17'16" N, 1.0 m),属热带季风气候,年平均气温25.5℃,年均降水量1 347.5 mm,全年日照时间超过2500 h. 土壤类型为潜育型水稻土,基本理化性质见表1. 本试验期间气温与降水量变化见图1.

表1 土壤背景值

Table 1 Background value of soils

项目	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
参数	5.91	13.42	1.72	77.54	81.64	36.21	44.27	19.51

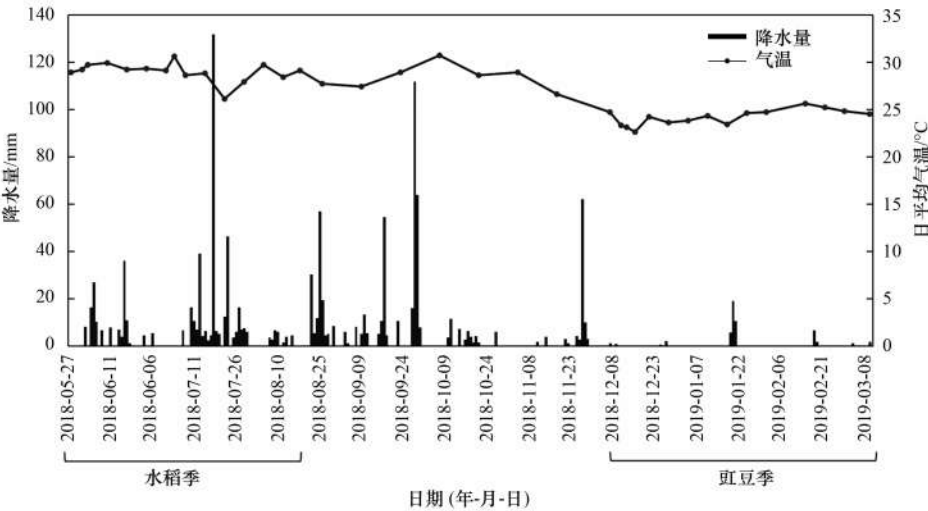


图1 采样期间气温与降水量变化

Fig. 1 Dynamics of air temperature and precipitation during the sampling period

1.2 试验设计

试验按照不同施肥模式设置 5 个处理,分别为:不施氮肥的空白对照(CK);按当地农户习惯的常规施肥对照(CON);优化施肥处理,施入常规对照 80% 的纯养分量(OPT);有机无机配施,减施且当季第一次施肥中一半的纯氮由有机肥提供(ORG);缓控优化,减施且当季第一次施肥的氮由缓控释肥提供(SCOPT). 具体施肥方案见表 2(以纯养分计). 每个处理 3 个重复,一共 15 个小区. 试验小区随机区组排列,每个小区面积 46.2 m² (11.0 m×4.2 m),各小区边界起垄,并用地膜覆盖,地膜两边埋入地下 50 cm,防止窜水窜肥.

水稻于 2018 年 5 月初育苗,5 月中旬整地布置试验装置,5 月 27 日插秧移栽,6 月 2 日第一次施肥,之后保持田面水进入分蘖期,7 月 3 日施入追

肥,晒田两周以减少无效分蘖,抽穗后进行灌溉至灌溉结束落干,8 月 18 日收获测产. 水稻收获后适逢三亚雨季休耕 3 个月. 12 月 7 日在小区内翻耕起垄施基肥,播种,豇豆生长至 20 cm 后搭网架,次年 1 月中旬开始采摘,豇豆每隔 2~4 d 采摘一次计产,期间 1 月 23 日和 2 月 10 日进行追肥以补充养分,采摘持续一个半月,视为豇豆季结束. 其他田间农事管理与当地一致.

本试验使用的肥料氮、磷、钾分别由尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)和氯化钾(含 K₂O 60%)提供. 有机肥为 N:P₂O₅:K₂O=1.93:0.54:1.69 的商品有机肥. 缓控释肥为添加了 8‰ NAM^[13] 的尿素, NAM 为脲酶抑制剂和硝化抑制剂组合而成的复合增效剂,由中国科学院沈阳应用生态研究所提供.

表 2 试验施肥方案
Table 2 Fertilization schemes

处理	水稻季(追肥+追肥)			豇豆季(基肥+追肥+追肥)		
	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²
CK	— ¹⁾	75+30	90+60	—	90+0+0	105+45+45
CON	120+60	75+30	90+60	135+30+30	90+0+0	105+45+45
OPT	96+48	60+24	72+48	108+24+24	72+0+0	84+36+36
ORG	96(48) ²⁾ +48	60(13.5)+24	72(42)+48	108(54)+24+24	72(15)+0+0	84(47)+36+36
SCOPT	96+48	60+24	72+48	108+24+24	72+0+0	84+36+36

1) “—”表示未施入氮肥; 2) 括号内为有机肥提供的养分量

1.3 样品采集与测定

气体样品采集用静态箱法,装置包括 PVC 材料的箱体(30 cm×30 cm×30 cm)、同规格的中间组合层和带凹槽的底座. 箱内设有小风扇混匀空气、防止升温过快,箱顶设有温度计和带三通阀的采气口,底座固定在小区内. 为防止采样时的踩踏改变土壤结构,设计了从田埂伸入小区的木桥,水稻生长中后期增加中间层箱体以适应水稻高度. 采气时间为上午 08:00~10:00,采集频率为一周一次,施肥后第 2、5 和 8 d 加密采样. 采集气体时使箱体内部及底座周边空气充分流动,给凹槽注水后将箱体置于凹槽内形成密封环境,于盖上采气箱的 0、10、20 和 30 min 使用 100 mL 针筒混匀后抽取 30 mL 气体,注入抽成真空的 20 mL 玻璃瓶(NICHIDEN-RIKA GLASS CO. LTD.)中. 采集的气体带回实验室由气相色谱仪(岛津 GC-2014)分析, N₂O 检测器为 ECD,载气为氩甲烷; CH₄ 检测器为 FID,载气为高纯氮,检测器温度 300℃. 标准气体由中国计量科学研究院提供.

水稻季采气同时使用便携式 Eh 计(Bante 220)测定 5 cm 土温和 Eh. 豇豆季采集土壤样品,用靛

酚蓝比色法(625 nm)和紫外双波长法(275 nm 和 220 nm)分别测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量.

1.4 数据处理与分析方法

N₂O 和 CH₄ 排放通量计算公式:

$$F = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T}$$

式中, F 为排放通量, F_{N_2O} 单位为 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, F_{CH_4} 单位为 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 N₂O-N 和 CH₄-C 的密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); h 为采样箱高度 (m); $\Delta c/\Delta t$ 为采样过程中箱内气体摩尔分数变化速率; T 为采样时箱内平均温度 (°C).

累积排放量 (f , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 计算公式:

$$f = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right]$$

式中, n 和 i 为采样次数, t 为采样天数 (d).

100 a 尺度的农田土壤直接排放的 N₂O 和 CH₄ 的增温潜势 (GWP_{GHGS} , CO₂-eq, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 计算公式:

$$\text{GWP}_{\text{GHGS}} = f_{N_2O} \times 298 + f_{CH_4} \times 25$$

温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI, CO_2 -eq, $kg \cdot kg^{-1}$) 计算公式:

$$GHGI = GWP/Y$$

式中, Y 为作物产量 ($kg \cdot hm^{-2}$).

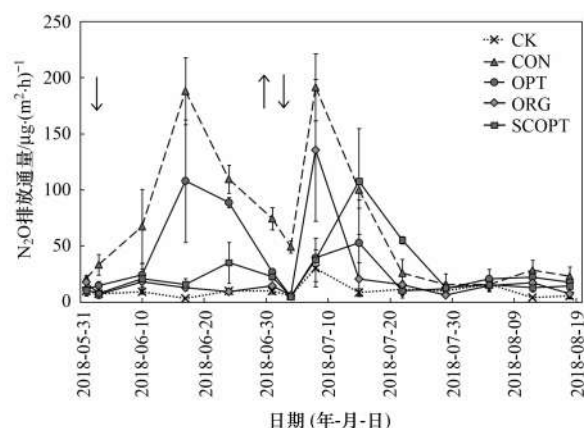
使用 SPSS 23.0 和 Excel 2016 进行数据统计分析与制图.

2 结果与分析

2.1 水稻季不同处理气体排放通量及累积排放量

水稻季 N_2O 排放峰出现在施肥或晒田后两周土壤干湿交替时, CON 和 ORG 处理在分蘖期和抽穗期都分别出现了峰值, OPT 和 SCOPT 处理只在抽穗期有排放峰 (图 2). 各处理 N_2O 累积排放量高低顺序为: CON > OPT > SCOPT > ORG > CK, 3 个优化施肥处理显著低于 CON ($P < 0.05$, 下同). 相较于 CON 对照, 3 个优化处理的 N_2O 排放总量分别减少 50%、70% 和 59% [图 3(a)].

水稻季 CH_4 的排放水平较低, 仅在灌浆期 (7 月 29 日) 出现排放峰 (图 4). 各处理 CH_4 累积排放量高低顺序为: CK > ORG > OPT > CON > SCOPT, CK 和 ORG 处理显著高于 CON [图 3(b)].



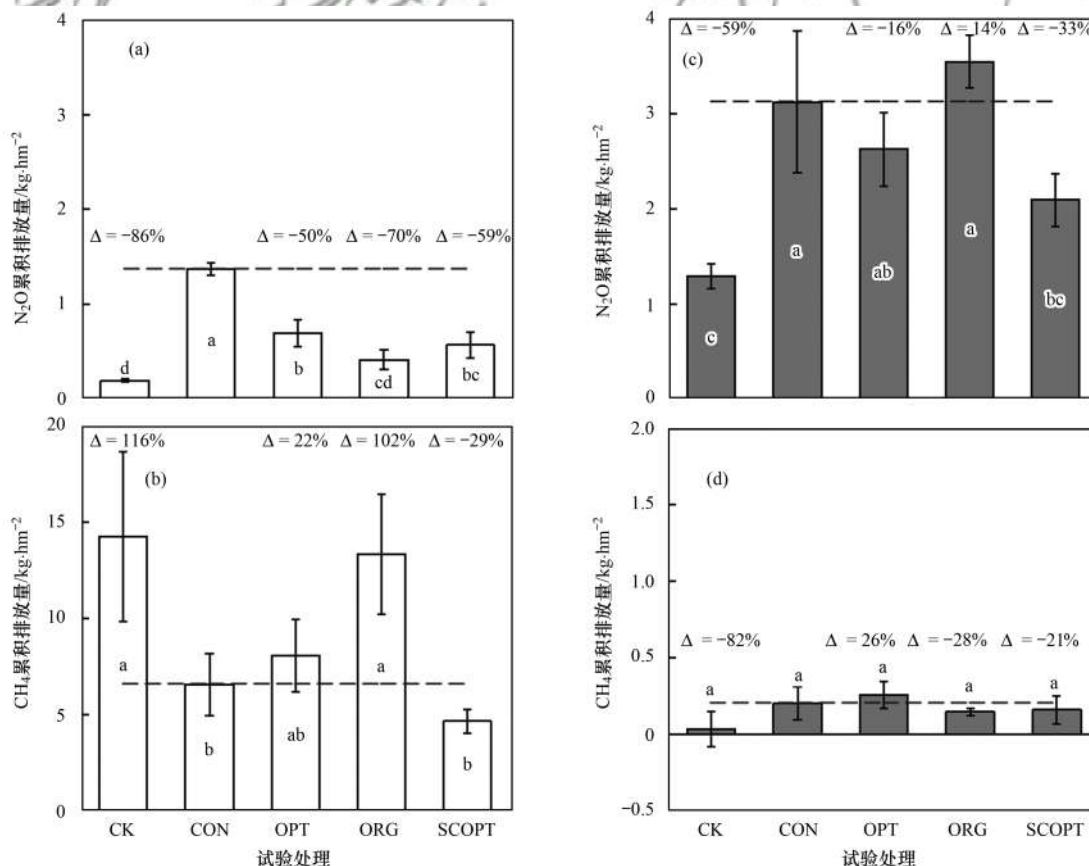
↓ 表示施肥, ↑ 表示晒田, 下同

图 2 不同处理水稻季 N_2O 排放变化

Fig. 2 Dynamics of N_2O emission fluxes in paddy growing seasons in different treatments

2.2 豇豆季不同处理气体排放通量及累积排放量

豇豆季 N_2O 排放峰也在施肥后出现, 3 次施肥后的一周内, 各处理都出现了峰值 (图 5). 其中 CON 处理的 3 次排放峰都是最高的, 其次是 OPT 和 ORG, CK 处理的峰最低. ORG 处理的 N_2O 排放峰出现时间最靠前, 其对施肥的响应最迅速. 各处



(a) 水稻季 N_2O , (b) 水稻季 CH_4 , (c) 豇豆季 N_2O , (d) 豇豆季 CH_4 ;

同一图中不同小写字母表示差异显著, Δ 表示处理与 CON 对照的比较

图 3 作物季 N_2O 和 CH_4 累积排放量

Fig. 3 Cumulative emissions of N_2O and CH_4 during the rotation system in different treatments

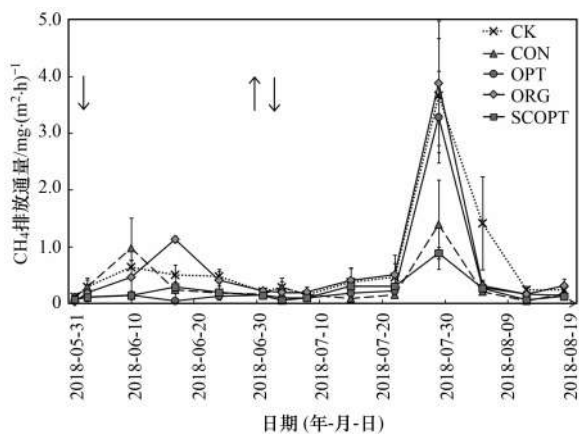


图 4 不同处理水稻季 CH₄ 排放变化

Fig. 4 Dynamics of CH₄ emission fluxes in paddy growing seasons in different treatments

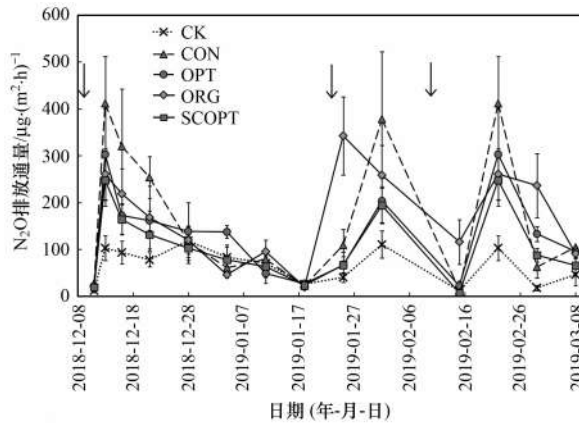


图 5 不同处理豇豆季 N₂O 排放变化

Fig. 5 Dynamics of N₂O emission fluxes in cowpea growing seasons in different treatments

理 N₂O 累积排放量高低顺序为: ORG > CON > OPT > SCOPT > CK. SCOPT 处理显著低于 CON [图 3(c)].

豇豆季 CH₄ 排放通量极低, 在零值上下波动. 监测过程发现, 土壤对 CH₄ 的吸收和排放处在一个相对平衡的状态 (图 6). 各处理 CH₄ 累积排放量差异不显著 ($P > 0.05$) [图 3(d)].

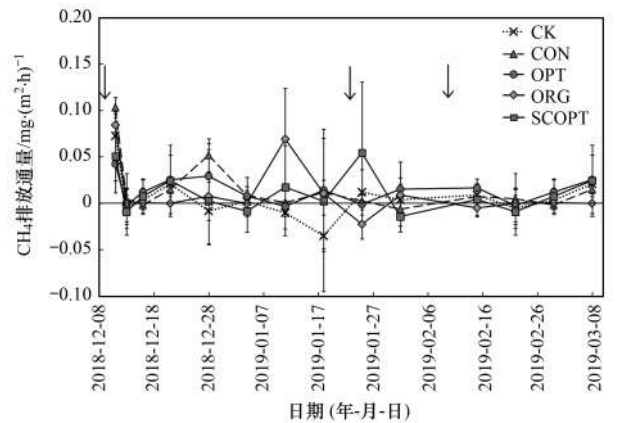


图 6 不同处理豇豆季 CH₄ 排放变化

Fig. 6 Dynamics of CH₄ emission fluxes in cowpea growing seasons in different treatments

2.3 环境因子与 N₂O、CH₄ 排放的关系

在可能影响气体排放的环境因子中, 通过逐步回归分析确定了水稻季 Eh 值和 5 cm 土温为主要限制因子. 相关分析结果显示, N₂O 排放通量与 Eh 值和 5 cm 土温相关性均不显著 ($P > 0.05$, 下同); 而 CH₄ 排放通量与 Eh 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 下同), 与 5 cm 土温相关性不显著 (表 3).

表 3 不同处理水稻季 N₂O 和 CH₄ 排放通量与 Eh 和 5 cm 土温的相关性¹⁾

处理	N ₂ O 排放				CH ₄ 排放			
	Eh 值		5 cm 土温		Eh 值		5 cm 土温	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
CK	-0.12	0.70	0.40	0.16	-0.97 **	<0.01	-0.34	0.23
CON	0.36	0.21	0.06	0.83	-0.86 **	<0.01	-0.19	0.51
OPT	0.21	0.47	-0.12	0.68	-0.96 **	<0.01	-0.31	0.27
ORG	0.18	0.53	0.23	0.44	-0.97 **	<0.01	-0.37	0.20
SCOPT	-0.06	0.84	-0.22	0.46	-0.70 **	<0.01	-0.40	0.16

1) * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01 水平显著, 下同

豇豆季则确定了土壤 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 为主要限制因子. 相关分析结果显示, CK 处理 N₂O 排放通量与 NO₃⁻-N 含量呈极显著负相关, CH₄ 排放与 NH₄⁺-N 含量呈显著正相关; CON 处理 CH₄ 排放通量与 NH₄⁺-N 含量呈极显著正相关 (表 4).

2.4 作物产量、增温潜势和气体排放强度

如表 5 所示. 各处理水稻产量 SCOPT > OPT > CON > ORG > CK, 豇豆产量 SCOPT > CON > OPT > ORG > CK. 与 CON 相比, 3 个优化施肥处理均没有显著性差异. 在 100 a 尺度下比较对整个水稻-豇豆

轮作系统总增温潜势的贡献率, 除 CK 外, 其他处理中豇豆季贡献了 44.7% ~ 54.5% (按作物季分), N₂O 贡献了 66.7% ~ 77.2% (按气体分). SCOPT 处理总 GWP 和两作物季的 GHGI 均显著低于 CON 处理.

3 讨论

3.1 N₂O 排放特征

农田生态系统产生和排放 N₂O 的过程是极其复杂的. 一般认为, 硝化作用和反硝化作用是土壤

表 4 不同处理豇豆季N₂O和 CH₄ 排放通量与土壤NH₄⁺ -N和NO₃⁻ -N的相关性

Table 4 Correlations of N₂O and CH₄ fluxes in the cowpea growing seasons with concentrations of NH₄⁺ -N and NO₃⁻ -N in soil in different treatments

处理	N ₂ O排放				CH ₄ 排放			
	NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
CK	-0.24	0.46	-0.76**	<0.01	0.66*	0.02	0.16	0.61
CON	-0.15	0.65	-0.10	0.76	0.88**	<0.01	-0.24	0.45
OPT	0.10	0.75	-0.21	0.52	0.04	0.91	-0.15	0.65
ORG	-0.08	0.80	-0.13	0.68	0.53	0.08	0.15	0.65
SCOPT	0.40	0.20	-0.18	0.57	-0.11	0.72	-0.27	0.40

表 5 不同处理水稻、豇豆产量，N₂O与 CH₄ 总增温潜势和温室气体排放强度(100 a)¹⁾

Table 5 Yields of paddy and cowpea fields, global warming potential, and greenhouse gas intensity (100 a) in different treatments

处理	产量/kg·hm ⁻²		总增温潜势 GWP (CO ₂ -eq) /kg·hm ⁻²	GWP 贡献率/%					水稻季	豇豆季
	水稻	豇豆		作物季			气体		GHGI	GHGI
				水稻季 83 d	休耕期 115 d	豇豆季 87 d	N ₂ O	CH ₄	(CO ₂ -eq) /kg·kg ⁻¹	(CO ₂ -eq) /kg·kg ⁻¹
CK	4 178c	15 512b	2 179.4b	25.9	46.3	27.8	43.3	56.7	0.14a	0.04b
CON	5 753ab	22 790a	3 107.9a	27.6	25.0	47.3	77.2	22.8	0.15a	0.07a
OPT	5 820ab	22 338a	2 769.3ab	21.3	33.9	44.8	66.7	33.3	0.11ab	0.06ab
ORG	5 572b	21 437a	3 064.0a	20.7	24.8	54.5	70.4	29.6	0.11ab	0.08a
SCOPT	6 043a	23 368a	2 206.5b	19.0	36.2	44.7	69.5	30.5	0.07b	0.04b

1) 表中小写字母表示不同处理产量、增温潜势、温室气体排放强度的差异

N₂O产生的主要过程^[15]，两个过程的相对重要程度取决于环境条件。土壤水分处于田间持水量以下时，硝化作用为N₂O的主要来源^[16]；而当水分饱和时，以反硝化产生的N₂O为主^[17]。本研究的水稻-豇豆轮作系统中各处理的N₂O排放通量有明显的季节变化规律，产生峰值的主要原因是施肥^[18]。水稻季N₂O累积排放量为0.19~1.37 kg·hm⁻²，这与Bhattacharyya等^[19]长期监测的印度东部克塔克中央水稻研究所中水稻田的N₂O排放量为0.58~1.82 kg·hm⁻²的结果接近。但低于田伟等^[5]监测的琼北晚稻0.44~3.40 kg·hm⁻²的N₂O排放量，可能是因为本试验水稻种植期间受当地雨季影响，在生长中后期丰富的降雨形成较强的还原环境，不利于N₂O的产生^[20]。豇豆季N₂O累积排放量为1.29~3.55 kg·hm⁻²，高于水稻季。Mathieu等^[21]的研究表明，通气条件下硝化作用是土壤N₂O的主要产生途径，而温度是影响硝化作用的重要因素，较高的温度有利硝化细菌的活性^[22]。王飞等^[23]研究的水稻-蚕豆轮作中也测得土壤硝化细菌、纤维素菌、固氮菌的数量升高。本试验豇豆季平均土温为20.9~25.6℃，硝化作用强度高，因此有较高的N₂O排放。

各处理中，CK的N₂O排放水平最低，CON最高。优化施肥模式的对比中，水稻季ORG处理的N₂O排放低于OPT；而豇豆季ORG处理的N₂O排放高于OPT，且对施肥的响应更迅速。Meng等^[24]的研究表明，夏玉米季有机肥的使用不会增加N₂O排

放。Rizhiya等^[25]则发现由牧草或小麦秸秆为原料的有机肥能抑制N₂O排放，施入C/N较低的有机物料反而会促进N₂O的排放。不同报道结果的差异性是由于不同C/N的有机肥矿化后改变了土壤中微生物群落结构，影响硝化、反硝化过程^[26]，导致N₂O的排放差异。本研究的结果可能是水稻季残留秸秆和有机肥快速矿化导致土壤铵态氮含量升高，加上豆科植物本身的固氮作用，使硝化作用与反硝化作用底物浓度始终维持在较高水平，土壤C/N降低，导致更多的N₂O排放^[27]，以及更快地响应速度。SCOPT处理添加的NAM可以同时抑制脲酶水解过程和硝化过程^[28]，从而减少整个种植季的N₂O排放^[29]。

3.2 CH₄ 排放特征

一般认为，农田生态系统产生CH₄有两种途径，一种是土壤中大量的产甲烷菌利用微生物分解的有机酸来产生CH₄，另一种是有机物在细菌分解下直接产生的CO₂和H₂被还原^[30]。本研究CH₄排放主要集中在水稻季和休耕期，豇豆季各处理CH₄排放贡献仅为0.11%~0.94%，这是因为豇豆季土壤多数时间并非厌氧环境，诸多研究也表明，好气土壤中生物氧化作用使得旱地经常被视为大气CH₄的汇而非排放源^[17,31]。

有机无机配施的ORG处理在水稻季有较高的CH₄排放，施入有机肥会加剧土壤的厌氧环境形成，同时为产甲烷菌提供充足的底物，进而导致更

多的 CH_4 排放^[32]；而豇豆季因为土壤厌氧环境难以形成，有机肥的施入会增加甲烷氧化菌的数量^[33]，进而减少了 CH_4 的排放。SCOPT 处理由于添加了复合增效剂，铵态氮始终处于较高的水平，加剧了 CH_4 在土壤大气界面的氧化^[34]，使 CH_4 排放降低^[35,36]。

Eh 值是反映土壤氧化还原状态的重要指标，水稻季各处理 CH_4 排放通量与 Eh 值极显著负相关（表 3）。有研究表明，强还原状态下土壤 CH_4 排放增加^[5,37]，而 ORG 处理中有机肥的施入使得更低的土壤 Eh 环境形成，导致 CH_4 排放升高。温度主要通过使土壤中产甲烷菌的优势菌种发生更替来改变土壤 CH_4 的产生能力^[38]。本试验位于三亚市，全年无低温，产甲烷菌的群落结构可能并未因此改变， CH_4 排放与 5 cm 土温的相关性不显著。

值得注意的是，水稻季各处理 CH_4 排放通量与 N_2O 排放呈现出了此消彼长的趋势^[39]。 N_2O 排放最低的 CK 处理 CH_4 排放最高， N_2O 排放最高的 CON 处理 CH_4 排放反而很低。这是因为 CH_4 和 N_2O 的产生对土壤水分的要求不同， CH_4 的产生需要持续的厌氧淹水环境，长期淹水的稻田 CH_4 产生和排放量更高^[40]；而干湿交替处理的土壤能有效降低 CH_4 的排放^[41]。本试验水稻季降水较多而气温高，田间水分变化频繁，Eh 未能降至 -150 mV 以下，因此 CH_4 整体排放水平较低，这与 Mohanty 等^[42]研究的克塔克中央水稻研究所的稻田 CH_4 排放情况具有相似性。

3.3 增温潜势与气体排放强度

大气中温室气体浓度的升高，使大气层对红外辐射的吸收能力增强，地面温度上升。由于 N_2O 的单分子温室效应和大气中存续寿命都远高于 CH_4 ，考虑农田土壤直接排放的温室气体产生的温室效应时，需要计算它们的总增温潜势才能了解整个系统的贡献。董艳芳等^[41]研究的水稻田 CH_4 对增温潜势贡献率占绝对优势，傅志强等^[40]进一步阐述了长期淹水条件对稻田增温潜势的巨大贡献。而本研究中对 GWP 的贡献率是豇豆季高于水稻季和休耕期， N_2O 高于 CH_4 ，可能是热带地区雨季水分变化频繁、轮作系统养分残留以及豇豆季过高的施肥量等共同影响的结果。SCOPT 处理通过优化施肥量并增加氮肥增效剂 NAM 更是显著减少了水稻-豇豆轮作系统的 N_2O 排放，降低增温潜势。

本试验中 3 个优化处理都能保证产量，与谢义琴等^[10]、方畅宇等^[13]和田发祥等^[14]的研究结果一致。刘红江等^[43]的研究发现，施用有机肥能提高作

物产量，同时会增加 CH_4 的排放而升高增温潜势，但气体排放强度不会升高；刘昭兵等^[44]的研究表明，添加 NAM 能有效减少 N_2O 和 CH_4 排放，降低增温潜势。Zhang 等^[45]进一步表明，有机无机配施和缓控优化处理在提高作物产量的同时降低温室气体排放，显著降低温室气体排放强度，但生态系统经济预算净额（net ecosystem economic budget, NEEB）的计算考虑到有机肥料成本，有机无机配施不是一个最优的选择。在本研究中，增温潜势主要由豇豆季和 N_2O 贡献，这说明豇豆季的施肥是一个重要的影响因素，在水稻-豇豆轮作系统中应当减少施肥量或选择缓控释肥以达到增产减排的目的。同时本研究中休耕期由于持续时间较长，水热条件较好，对增温潜势的贡献不可忽略。

4 结论

(1) 海南水稻-豇豆轮作系统 N_2O 排放峰值出现在施肥后，排放集中在豇豆季，NAM 的施用有效降低轮作系统的 N_2O 排放。而系统 CH_4 排放水平整体较低，集中在水稻季，在厌氧环境形成时剧烈排放。

(2) 3 个优化施肥处理都能保证水稻、豇豆两季作物产量。轮作系统由于气体排放产生的增温潜势主要在豇豆季的 N_2O 排放过程。

(3) 添加复合增效剂的 SCOPT 处理在提高产量的同时降低了 N_2O 和 CH_4 排放，从两个方面降低了气体排放强度，是一种值得推广的增产、减施、减排的施肥模式。

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 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [3] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(1): 25-50.
- [4] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492): 789-813.
- [5] 田伟, 伍延正, 孟磊, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2426-2434.
- [6] Tian W, Wu Y Z, Meng L, 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.
- [7] 耿建梅, 蒋红香, 刘艳艳. 海南稻菜轮作休闲期适宜填闲作物初筛 [J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 76-80.
- [8] Geng J M, Jiang H X, Liu Y Y. Selecting for suitable catch crop

- during the fallow period of rice-vegetable rotation in Hainan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(1): 76-80.
- [7] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(10): 2053-2060.
- Chen S T, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, **38**(10): 2053-2060.
- [8] 钟川, 杨滨娟, 张鹏, 等. 基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH_4 、 N_2O 排放的影响[J]. 核农学报, 2019, **33**(2): 379-388.
- Zhong C, Yang B J, Zhang P, *et al.* Effect of paddy-upland rotation with different winter corps on rice yield and CH_4 and N_2O emissions in paddy fields [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, **33**(2): 379-388.
- [9] 雍太文, 陈平, 杨文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响[J]. 作物学报, 2018, **44**(10): 1485-1495.
- Yong T W, Chen P, Yang W Y, *et al.* Effects of reduced nitrogen on soil ammonification, nitrification, and nitrogen fixation in maize-soybean relay intercropping systems [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, **44**(10): 1485-1495.
- [10] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(3): 578-584.
- Xie Y Q, Zhang J F, Jiang H M, *et al.* Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(3): 578-584.
- [11] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, *et al.* Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields [J]. Science of the Total Environment, 2016, **565**: 420-426.
- [12] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, **45**(5): 915-924.
- [13] 方畅宇, 屠乃峰, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(3): 462-468.
- Fang C Y, Tu N M, Zhang Q Z, *et al.* Effects of fertilization modes on available nutrient contents of reddish paddy soils and rice yields [J]. Soils, 2018, **50**(3): 462-468.
- [14] 田发祥. 湖南双季稻专用稳定性复混肥料的氮抑制剂及其配比研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Tian F X. Study on N-inhibitor and its ratio of special stable compound for double-rice in Hunan province [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [15] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 N_2O 和 NO 产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(5): 712-718.
- Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: A review [J]. Soils, 2012, **44**(5): 712-718.
- [16] 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅. 稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4275-4283.
- Liu R X, He J Z, Zhang L M. Response of nitrification/denitrification and their associated microbes to soil moisture change in paddy soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4275-4283.
- [17] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 966-975.
- Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, **19**(4): 966-975.
- [18] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.* N_2O flux in winter and its affecting factors under different land use patterns [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- [19] Bhattacharyya P, Nayak A K, Mohanty S, *et al.* Greenhouse gas emission in relation to labile soil C, N pools and functional microbial diversity as influenced by 39 years long-term fertilizer management in tropical rice [J]. Soil and Tillage Research, 2013, **129**: 93-105.
- [20] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China [J]. Chemosphere, 2012, **89**(7): 884-892.
- [21] Mathieu O, Hénault C, Lévêque J, *et al.* Quantifying the contribution of nitrification and denitrification to the nitrous oxide flux using ^{15}N tracers [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 933-940.
- [22] Guntiñas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, *et al.* Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, **48**: 73-80.
- [23] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(5): 1469-1476.
- Wang F, Li Q H, Lin C, *et al.* Influence of paddy rice-upland crop rotation of cold-waterlogged paddy field on crops production and soil characteristics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(5): 1469-1476.
- [24] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2037-2045.
- [25] Rizhiya E Y, Boitsova L V, Buchkina N P, *et al.* The influence of crop residues with different C: N ratios on the N_2O emission from a loamy sand soddy-podzolic soil [J]. Eurasian Soil Science, 2011, **44**(10): 1251-1259.
- [26] Mueller T, Jensen L S, Nielsen N E, *et al.* Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(5): 561-571.
- [27] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1264-1268.
- Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* Effect of organic material incorporation in rice season on N_2O emissions from following winter wheat growing season [J]. Environmental Science, 2006, **27**(7): 1264-1268.
- [28] 王玲莉, 古慧娟, 石元亮, 等. 尿素施施添加剂 NAM 对三江平原白浆土氮素转化和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 34-38.
- Wang L L, Gu H J, Shi Y L, *et al.* Soil nitrogen transformation

- and corn yield as affected by combination of urea and fertilizer additive NAM in Sanjiang plain of China [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2012, (2): 34-38.
- [29] Jiang J Y, Hu Z H, Huang Y, *et al.* Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3): 216-225.
- [30] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 稻田甲烷产生途径研究进展[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 6-11.
Zhang G B, Ma J, Xu H, *et al.* Advances on methanogenic pathways in rice fields[J]. *Soils*, 2011, 43(1): 6-11.
- [31] 倪雪, 江长胜, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 CH₄ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2404-2412.
Ni X, Jiang C S, Chen S J, *et al.* Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on CH₄ emissions from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2404-2412.
- [32] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 162-169.
Wu J M, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 162-169.
- [33] 郑聚锋, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4864-4872.
Zheng J F, Zhang P J, Pan G X, *et al.* Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4864-4872.
- [34] Xu X K, Wang Y S, Zheng X H, *et al.* Methane emission from a simulated rice field ecosystem as influenced by hydroquinone and dicyandiamide[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 263(1-3): 243-253.
- [35] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2005, 26(3): 21-24.
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al.* Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from different paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 21-24.
- [36] 郭晨, 徐正伟, 王斌, 等. 缓/控释尿素对稻田周年 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1489-1495.
Guo C, Xu Z W, Wang B, *et al.* Effects of slow/controlled release urea on annual CH₄ and N₂O emissions in paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1489-1495.
- [37] 王小淇, 索龙, 季雅岚, 等. 添加几种秸秆并淹水对海南土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 4004-4010.
Wang X Q, Suo L, Ji Y L, *et al.* Effect of addition of several types of straws on N₂O and CH₄ emissions from soil under flooding condition in Hainan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10): 4004-4010.
- [38] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 604-608.
Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 604-608.
- [39] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系及其减排措施[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2123-2130.
Li X L, Xu H, Cai Z C. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2123-2130.
- [40] 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.
- [41] 董艳芳, 黄景, 李伏生, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 578-588.
Dong Y F, Huang J, Li F S, *et al.* Emissions of CH₄ and N₂O under different irrigation methods and nitrogen treatments [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 578-588.
- [42] Mohanty S, Swain C K, Sethi S K, *et al.* Crop establishment and nitrogen management affect greenhouse gas emission and biological activity in tropical rice production [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 80-98.
- [43] 刘红江, 郭智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配比比例对稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 808-814.
Liu H J, Guo Z, Zhang L P, *et al.* Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH₄ and N₂O emissions in paddy season [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 808-814.
- [44] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 919-925.
Liu Z B, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of nitrogen amount and inhibitor ratio on greenhouse gas emission during double-rice growing season [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 919-925.
- [45] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144: 274-281.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)