

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响

陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:以位于西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内的稻-油轮作作为研究对象, 采用静态箱/气相色谱法, 对覆膜和对照(不覆膜)处理下稻油轮作 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放特征进行了为期 1 a 的原位观测. 结果表明, 稻-油轮作农田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量均呈现出明显的季节变化, 且 2 种处理下这 3 种温室气体的季节变化模式相似. 覆膜处理下稻-油轮作农田全年 CH_4 排放量为 $(46.14 \pm 13.40) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相比于对照处理下的 $(18.61 \pm 2.05) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 提高了 147.93% ($P < 0.05$), 但覆膜对 CO_2 和 N_2O 的排放影响并不显著, 覆膜及对照处理下 CO_2 年排放量分别是 $(-47.54 \pm 2.11) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(-47.60 \pm 2.19) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_2O 年排放量分别是 $(18.94 \pm 4.74) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(23.14 \pm 3.68) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 覆膜和对照处理下 GWP 值分别为 $-41.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $-40.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表现为大气温室气体的吸收汇, 但差异并不显著.

关键词:稻-油轮作; 地膜覆盖; 温室气体; 排放通量; 全球增温潜势(GWP)

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4213-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901037

Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland

CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, LI Xiao-xi, HAO Qing-ju*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: A field experiment was conducted at the Key Field Station for Monitoring of Eco-Environment of Purple Soil of the Ministry of Agriculture of China at the farm of Southwest University in Chongqing. In the study, static chamber and gas chromatography methods were used to study the effects of plastic film mulching treatment on CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions from rice-rapeseed rotation in situ for one year. A control experiment was also conducted without using the film. The CO_2 , CH_4 , and N_2O emission fluxes of the rotation showed obvious seasonal changes, and the seasonal variation patterns of these three greenhouse gases were similar under the two treatments. The CH_4 emission of the rotation under the plastic film mulching treatment was $(46.14 \pm 13.40) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, or 147.93% ($P < 0.05$), compared with $(18.61 \pm 2.05) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for the control. However, the impact of plastic film mulching on CO_2 and N_2O emissions was not significant. The annual CO_2 emissions under the plastic film treatment and the control were $(-47.54 \pm 2.11) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $(-47.60 \pm 2.19) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, and the annual emissions of N_2O were $(18.94 \pm 4.74) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $(23.14 \pm 3.68) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The rice-rapeseed rotation in the two experiments showed absorption and sinking of atmospheric greenhouse gases, although the difference was not significant. The global warming potential (GWP) values with the plastic film treatment and the control were $-41.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $-40.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively.

Key words: rice-rapeseed rotation; plastic film mulching; greenhouse gas; flux; global warming potential (GWP)

随着大气温室气体浓度的不断升高, 特别是 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度的增加, 全球气温不断攀升, 并成为当今全球面临的一个重大挑战, 因此如何采取有效的温室气体减排措施也成为了当今各国学者的研究重点和热点^[1]. 农田作为大气温室气体的一个重要排放源, 开展如何减少农田温室气体的排放研究具有重要意义^[2].

覆膜是一种常用的农业管理措施, 已经被广泛应用于各种农业生产活动中. 目前已有大量研究报道了覆膜的优点, 如抑制杂草生长, 控制植物营养素的浸出^[3], 提高土壤温度和土壤含水率, 降低土壤表面水分蒸发^[4], 改善土壤营养元素的可利用性^[5], 促进作物生长和提高作物产量等^[6], 而土壤环境的改变可能会影响温室气体的产生和排放, 但目前国内外有关覆膜对农田温室气体排放的影响研

究还较为少见^[3,7]. 在我国, 有关覆膜对农田温室气体排放的影响研究主要集中在西北干旱和半干旱地区^[7,8], 而在西南地区有关覆膜对农田温室气体排放的影响还鲜见报道^[9]. 已有的研究报道有关覆膜对农田温室气体排放的影响并不完全一致, 有研究表明覆膜提高了旱地 N_2O 和 CH_4 的排放^[3,7,8], 但也有研究表明覆膜降低了旱地 CO_2 、 N_2O 或水田 CH_4 的排放^[10~12]. 因此, 本文以西南地区典型稻-油轮作体系为研究对象, 探索地膜覆盖对稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放的影响, 以期合理减排西南地区稻-油轮作温室气体提供更多的理论依据.

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2019-04-14

基金项目: 重庆市基础研究与前沿探索专项 (cstc2018jcyjAX0476); 国家自然科学基金项目 (41275160, 40975095)

作者简介: 陈世杰(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 1334474898@qq.com

* 通信作者, E-mail: haoqingju@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验区位于西南大学重庆紫色土研究基地(东经 $106^{\circ}26'$, 北纬 $30^{\circ}26'$, 海拔 230 m), 该区域是典型的亚热带季风湿润气候; 实验期间(2015-05 ~ 2016-04)气温和降水见图 1, 实验观测期间降水量为 917.13 mm, 主要集中在 5 ~ 9 月, 占全年降水的 76.70%; 日均气温为 $0.27 \sim 32.50^{\circ}\text{C}$, 年均气温为 18.39°C , 最高气温出现在 8 月, 最低气温出现在 1 月. 年均日照为 1 276.7 h, 年均无霜期为 334 d. 土壤是紫色砂岩岩石母质上发育的中性紫色水稻土, 土壤基本理化性质为: pH 6.83, 有机质 $23.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总氮 $0.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $78.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 $521.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $8.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全钾 $8.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总磷 $65.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

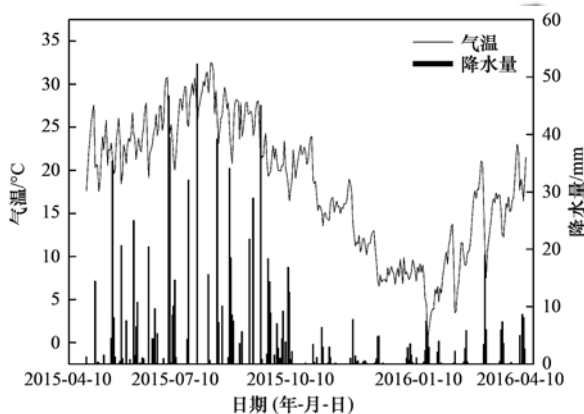


图 1 日平均气温和降雨量的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes in daily for precipitation and daily mean air temperature

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

本实验进行了为期 1 a(2015-05 ~ 2016-04)的观测, 设有覆膜和不覆膜(对照)两种处理, 并分别设置 3 个重复. 在实验前先将小区内的土壤深翻 3 遍, 并平整地块, 垄长 2.5 m, 垄宽 0.8 m, 高 0.15 m, 垄间距为 0.3 m. 覆膜处理采用一整块 0.005 mm 厚聚乙烯透明膜覆盖在实验区, 然后在每个垄面四周用泥土压实, 水稻和油菜的生育期均全程覆盖, 在休闲期则是收割水稻后没有将地膜移出稻田, 等到油菜季对稻田进行翻耕时才移出地膜. 2015 年 4 月 22 日, 对实验小区依次进行翻耕、施肥、覆膜和蓄水之后, 在每个小区的中间两垄上分别按“品”字型埋入 3 个长 50 cm, 宽 50 cm, 高 20 cm 的不锈钢底座(水稻季底座内栽培 4 窝水稻, 每窝两株; 油菜季底座内栽培两窝油菜, 每窝 1 株), 底座上端有宽、深各 3 cm 的密封水槽. 2015

年 4 月 22 日, 对实验小区依次进行翻耕、施肥、覆膜、蓄水之后, 在每个小区的中间两垄上分别按“品”字型埋入 3 个长 50 cm, 宽 50 cm, 高 20 cm 的不锈钢底座(水稻季底座内栽培 4 窝水稻, 每窝两株; 油菜季底座内栽培两窝油菜, 每窝 1 株), 底座上端有宽、深各 3 cm 的密封水槽. 已有研究表明, 垄上是温室气体主要排放源, 占据了温室气体排放量的 80% ~ 90%, 而垄间温室气体排放量较少^[12,13]; 另外由于本研究的采样箱底座尺寸为 50 cm × 50 cm × 20 cm, 而本研究根据当地的耕作方式, 垄沟只有 30 cm 宽, 不足以放置采样箱底座, 因而未在垄沟放置采样箱. 覆膜处理的实验小区在埋设底座时, 先将地膜铺好, 然后将需要埋设底座的地方留褶并在四周挖深约 20 cm 的细沟, 将留有多余的地膜小心整理放入细沟, 然后小心将底座压在地膜上, 用土壤将底座周围压实, 同时底座中央在覆膜前也需要多堆放一定的土, 待底座放好后, 隔着地膜将底座内土推平, 使底座与垄面齐平. 在水稻(或油菜)种植后, 用适量的土壤将覆膜的破口处封住, 垄面地膜(含底座内)除每窝水稻(或油菜)处留有十字小口以外, 其余地方均保持平整完好, 直到作物换茬时, 重新将小区内土壤翻耕, 并按照前面的方法铺设地膜. 2015 年 4 月 24 日移栽长势均匀的水稻幼苗, 移栽行间距为 25 cm × 20 cm; 2015 年 8 月 2 日, 收割水稻. 2015 年 10 月 24 日, 对稻田进行翻耕(稻茬还田)、施肥、覆膜以及安放底座, 覆膜和安放底座均与移栽水稻的操作一致. 2015 年 10 月 25 日移栽长势均匀的油菜幼苗, 移栽行间距为 25 cm × 30 cm; 2016 年 4 月 11 号收割油菜. 水稻和油菜季均以尿素作为氮肥、过磷酸钙作为磷肥、氯化钾作为钾肥, 按照本地的耕作习惯, 将 3 种肥料混合均匀后一次性均匀撒播, 施肥量设置为: 纯氮 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; P_2O_5 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; K_2O $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

1.2.2 气体采集与分析

本实验采用静态箱法来采集 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体样品. 在利用箱法采集陆地生态系统 CH_4 和 N_2O 气体时, 为了避免罩箱期间温度过快升高对气体通量的不利影响, 通常采用暗箱法^[14]. 而观测的 CO_2 通量是净交换通量, 需要植物同时进行光合作用和呼吸作用, 因而应用明箱进行箱内气体的采集^[15,16]. 静态暗箱(图 2)设计成分节组合式标准箱, 由顶箱, 延长箱和底座组成, 其顶箱和延长箱均由不锈钢制成, 箱体尺寸为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 同时为防止太阳辐射致使箱内温度升高, 在箱

体外面覆盖一层白色棉被. 静态明箱由聚碳酸酯制成的一个整体采样箱(气体采样口位置与带有延长箱的暗箱相同), 尺寸为 50 cm × 50 cm × 100 cm, 与文献[15]中设计的箱体高度(65 cm × 65 cm × 90 cm)相似, 与文献[17, 18]中的设计高度相同. 两种采样法的顶箱上部均安装有两个轴流扇, 用于充分混合箱内气体, 侧面装有电源插头和气体样品采集口. 在进行气体样品采集前先将顶箱安放在不锈钢底座上(在采集 N₂O 和 CH₄ 气体样品时, 视植株的生长情况而适当地增加延长箱), 底座四周的凹槽用水密封. 同时为了避免因过多的人为活动影响实验区环境而影响采样, 因此在采样点周围搭建木桥, 在进行气体样品采集时使用特氟龙 F46 采气管, 站在木桥上进行采样.

CO₂ 与 N₂O 和 CH₄ 气体样品在同一天进行采集, 每周采样一次(如遇下雨等天气视情况延期采样时间), 采样时间均为早上 09:00 ~ 11:00, 先使用静态暗箱法采集 N₂O 和 CH₄ 气体, 在 30 min 的时间内每隔 10 min 采集一次样品, 共采集 4 个气体样品^[19]. 然后再使用静态明箱法采集 CO₂ 气体, 并通过缩短采样时间来消除罩箱期间温度快速升高对 CO₂ 通量的不利影响. 由于冬夏季节温度差异较大, 因而在不同季节采用不同的采样时间间隔^[16, 18, 20, 21], 夏季每隔 1.5 min 采集一次样品, 冬季每隔 2 min 采集一次样品, 共采集 4 个气体样品. 样品全部采集完成后立即带回实验室, 并在 24 h 之内用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行分析测定, CO₂ 和 CH₄ 用 FID 检测器测定浓度, N₂O 用 ECD 检测器测定浓度, 具体分析方法及工作条件参见文献[22].

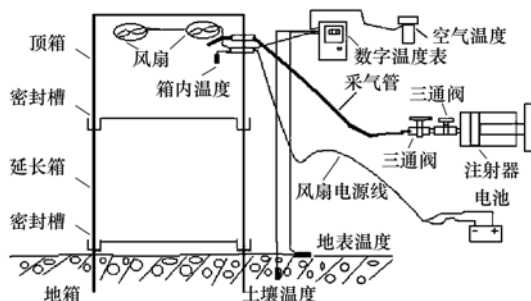


图2 温室气体采样过程示意

Fig. 2 Greenhouse gas sampling process

1.2.3 气体排放通量及累积排放量

气体排放通量用公式表示:

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{p}{p_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为排放通量[CO₂ 和 CH₄, mg·(m²·h)⁻¹; N₂O, μg·(m²·h)⁻¹], H 为箱内气体高度(cm), T

为采样期间箱内平均温度(°C), p 为采样时的大气压(Pa), p_0 标准状况下的大气压(Pa), ρ 为被测气体的密度(g·m⁻³), dc/dt 为采样期间箱内气体浓度变化速率, 正值代表排放, 负值代表吸收.

通过内插累积法求得 N₂O、CO₂ 和 CH₄ 的季节和全年排放总量^[23].

1.2.4 全球增温潜势(GWP)

衡量不同温室气体(GHGs)对全球变暖的相对影响可用全球增温潜势(GWP)来进行估算. IPCC (2013)提供的数据表明, 在 100a 的时间尺度上, CH₄ 和 N₂O 全球增温潜势分别是 CO₂ 的 28 和 265 倍(IPCC, 2013).

$GWP = 28f(\text{CH}_4) + 265f(\text{N}_2\text{O}) + f(\text{CO}_2)$ (2)
式中, $f(\text{CH}_4)$ 为 CH₄ 净排放量(kg), $f(\text{N}_2\text{O})$ 为 N₂O 净排放量(kg), $f(\text{CO}_2)$ 为 CO₂ 净排放量(kg).

1.2.5 数据处理

运用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 覆膜及对照处理下 N₂O、CO₂ 和 CH₄ 的排放通量差异显著性采用配对 t 检验分析, 季节排放总量差异采用单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 净排放通量的季节变化特征

从全年来看, 覆膜处理和对照处理的 CO₂ 排放通量的季节变化趋势基本趋于一致(图3). 在水稻季, 两种处理的 CO₂ 吸收呈现出单峰型的变化趋势, 表现为在水稻生长前期, 吸收量较小; 随着水稻的生长发育和气温的逐渐升高, 吸收量逐渐增大, 在水稻生长后期吸收量又降低, 甚至在对照处理的水稻生长后期还呈现出对大气 CO₂ 的净排放. 覆膜处理和对照处理在 7 月对大气 CO₂ 的吸收达到最大, 分别为 (-2347.82 ± 369.55) mg·(m²·h)⁻¹ 和 (-1969.01 ± 228.23) mg·(m²·h)⁻¹. 在休闲季, 由于收割水稻时先只是将稻穗收割, 而植株依然生长在稻田中, 两周以后再将植株移出, 因此在水稻收割后的两周内, CO₂ 排放通量仍然呈现为负值. 在油菜季, 覆膜处理下的 CO₂ 的排放通量变化为 $(-2110.33 \pm 158.12) \sim (270.18 \pm 90.83)$ mg·(m²·h)⁻¹, 对照处理的 CO₂ 的排放通量变化为 $(-2039.53 \pm 89.47) \sim (313.37 \pm 58.71)$ mg·(m²·h)⁻¹. 两种处理下的 CO₂ 排放通量均呈现出脉冲式变化, 在油菜生长前期, CO₂ 吸收通量较小, 尔后快速升高, 但在油菜越冬的这段时间, CO₂ 吸收通量迅速降低, 甚至还出现弱的净排放, 越冬过后又逐渐升高, 但在油菜生长后期又逐渐减小.

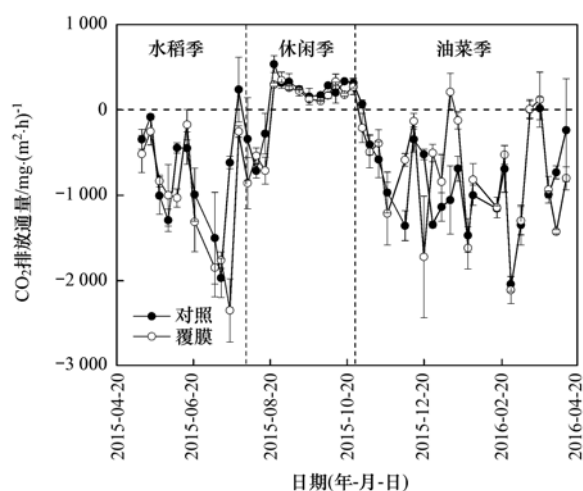
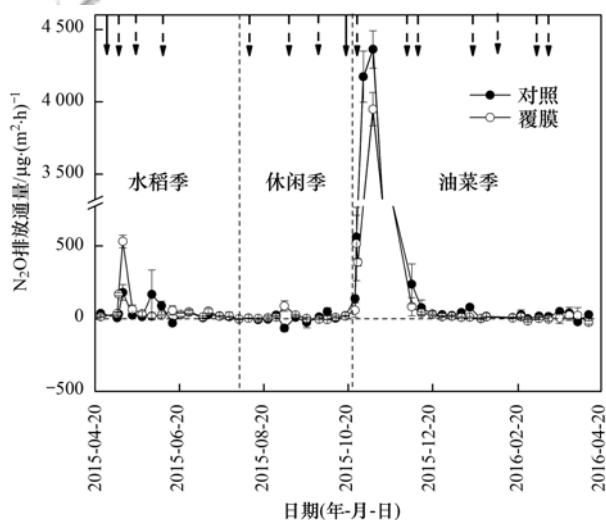


图3 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 CO_2 净排放通量

Fig. 3 Net ecosystem CO_2 exchange from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.2 N_2O 排放通量的季节变化特征

从全年来看, 两种处理下 N_2O 通量具有相似的时间变化趋势(图4), 在水稻季和油菜季均呈现为明显的单峰型, 且峰值均出现在水稻和油菜生长前期, 大约施肥后两周左右. 在水稻季, 覆膜及对照处理下, N_2O 通量峰值分别为 $(530.66 \pm 43.48) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(183.36 \pm 53.49) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 在油菜季, 峰值分别为 $(3949.25 \pm 815.32) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(4362.32 \pm 829.45) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而在其它时期, N_2O 通量都处于一个较低的排放水平, 偶尔出现 N_2O 吸收现象.



实线箭头表示施肥, 虚线箭头表示降水

图4 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 N_2O 排放通量

Fig. 4 N_2O fluxes from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.3 CH_4 排放通量的季节变化特征

从全年来看, 覆膜处理和对照处理下的 CH_4 排放通量季节变化形式基本一致, 但覆膜处理下的

CH_4 排放通量高于对照(图5). 在水稻季, 覆膜和对照处理下 CH_4 排放通量均呈现双峰型, 主峰出现在成熟期, CH_4 通量分别为 $(1.96 \pm 0.64) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.85 \pm 0.31) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 次峰均出现在分蘖期, CH_4 通量分别为 $(0.72 \pm 0.58) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.68 \pm 0.33) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在休闲季, 对照处理下 CH_4 排放通量处于一个较低水平, 变化范围为 $(0.038 \pm 0.01) \sim (0.25 \pm 0.12) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而覆膜处理下 CH_4 排放通量则呈现出一个相对较高的排放水平, 变化范围为 $(0.22 \pm 0.04) \sim (1.00 \pm 0.25) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在油菜季, 在油菜移栽后的第13 d, 覆膜及对照处理均出现一个明显的 CH_4 排放峰, 峰值分别为 $(2.82 \pm 0.44) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.53 \pm 0.23) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 但是对照处理在油菜移栽后的第83 d 又出现了一个更高的排放峰值 $(1.13 \pm 0.13) \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 而在油菜的其它生长时期, 两种处理 CH_4 排放通量波动较小, 排放通量也较低.

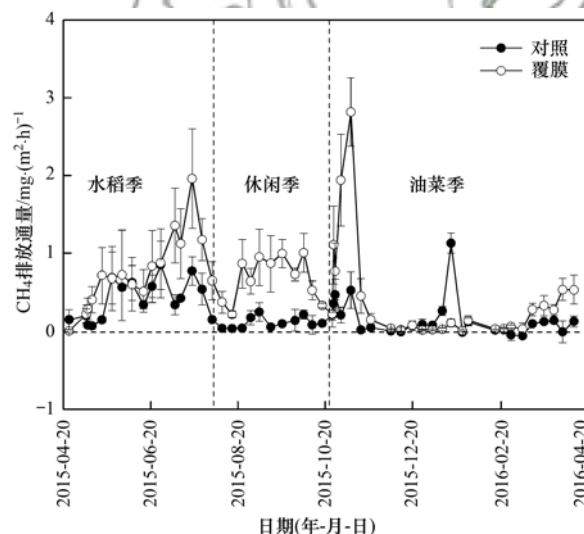


图5 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 CH_4 排放通量

Fig. 5 CH_4 fluxes from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.4 不同时期 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放总量

不论是在水稻季、休闲季还是油菜季, 覆膜和对照处理下 CO_2 及 N_2O 排放量均无显著性差异 ($P > 0.05$, 表1). 水稻季和油菜季均表现为对大气 CO_2 的吸收, 而休闲季则表现为对大气 CO_2 的排放. 在全年时间尺度上, 水稻-油菜轮作农田表现为 CO_2 的汇, 覆膜和对照处理下年 CO_2 吸收量分别为 $(47.54 \pm 2.11) \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(47.60 \pm 2.19) \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 稻-油轮作农田在水稻季、休闲季和油菜季均表现为对大气 N_2O 的排放, N_2O 的排放主要集中在油菜季, 覆膜和对照处理油菜季 N_2O 的排放分别占全年

排放的 90.50% 和 94.81%。覆膜和对照处理下 N₂O 年排放量分别为 (18.94 ± 4.74) kg·hm⁻² 和 (23.14 ± 3.68) kg·hm⁻²。同 N₂O 相似, 覆膜与对照处理在水稻季、休闲季及油菜季均表现为对大气 CH₄ 的排放。全年 CH₄ 排放量分别为 (48.62 ± 15.39) kg·hm⁻² 和 (18.61 ± 7.05) kg·hm⁻²。覆膜较对照处理在水稻季、

休闲季、油菜季和全年 CH₄ 排放量分别提高了 78.28%、567.09%、147.23% 和 147.93% (*P* < 0.05), 且覆膜处理改变水稻季、休闲季、油菜季的 CH₄ 排放量间的季节差异性; 在对照处理下, CH₄ 排放主要集中在水稻季, 而在覆膜处理下, 水稻季、休闲季和油菜季间均没有显著性差异。

表 1 不同覆膜处理下全年及各时期 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量¹⁾

Table 1 Seasonal and annual accumulative emissions of CO₂, CH₄, and N₂O from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

时期	CO ₂ /t·hm ⁻²		N ₂ O/kg·hm ⁻²		CH ₄ /kg·hm ⁻²	
	对照	覆膜	对照	覆膜	对照	覆膜
水稻季	-16.59 ± 0.55Ba	-18.54 ± 2.10Aa	1.04 ± 0.29Ba	1.45 ± 0.11Ba	10.82 ± 1.76Bb	19.41 ± 8.54Aa
休闲季	2.50 ± 1.02Ca	0.72 ± 0.09Ba	0.16 ± 0.05Ba	0.35 ± 0.04Ba	2.37 ± 0.33Bb	15.81 ± 5.27Aa
油菜季	-33.50 ± 1.85Aa	-29.72 ± 4.04Aa	21.94 ± 3.64Aa	17.14 ± 4.80Aa	5.42 ± 0.08Bb	13.40 ± 1.58Aa
全年	-47.60 ± 2.19a	-47.54 ± 2.11a	23.14 ± 3.68a	18.94 ± 4.74a	18.61 ± 7.05b	48.62 ± 15.39a

1) 不同小写字母表示同种气体同一时期不同处理间的显著性差异, 不同大写字母表示同种气体同一处理在不同时期的显著性差异 (*P* < 0.05), 下同

2.5 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的 GWP 和作物产量

表 2 为 2015 ~ 2016 年稻-油轮作农田全年及各时期 CO₂、N₂O 和 CH₄ 在 100a 的时间尺度上所引起的 GWP。水稻季和油菜季均体现为对温室气体的净吸收, 而休闲季则表现为对温室气体的净排放,

在全年时间尺度上, 覆膜和对照处理的 GWP 值分别为 -41.16 t·hm⁻² 和 -40.95 t·hm⁻², 覆膜较对照处理 GWP 吸收量有所增加, 但没有达到显著性差异。另外, 尽管未达到显著性差异水平, 覆膜仍提高了水稻季和油菜季的作物产量。

表 2 不同覆膜处理下稻-油轮作农田作物产量和 GWP

Table 2 Crop yields and GWP in the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

处理	时期	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	GWP	产量
覆膜	水稻季	0.54Aa	0.39Ba	-18.54Aa	-17.61a	12.58a
	休闲季	0.44Aa	0.92Ba	0.72Ba	1.25a	—
	油菜季	0.38Aa	4.54Aa	-29.72Aa	-24.80a	1.95a
	全年	1.36a	5.02a	-47.54a	-41.16a	14.53a
对照	水稻季	0.30Bb	0.27Ba	-16.59Bb	-16.02a	11.45a
	休闲季	0.06Bb	0.43Ba	2.50Ca	2.61a	—
	油菜季	0.15Bb	5.81Aa	-33.50Aa	-27.54a	1.90a
	全年	0.52b	6.13a	-47.60a	-40.95a	13.34a

3 讨论

3.1 地膜覆盖对 CO₂ 吸收的影响

在水稻季, 覆膜和对照处理的 CO₂ 吸收通量的峰值出现的时间均在 7 月, 吸收峰值出现的原因一方面是水稻植株在这段时间生长较为旺盛; 另外一方面是丰沛的降水和较高气温, 为水稻植株的光合作用提供了良好的条件^[18,20]。在休闲季前期稻田表现为 CO₂ 的净吸收, 这是因为水稻收获后, 植株并未移除稻田, 仍能进行光合作用; 而后期植株移除稻田后, 缺少了植株的光合作用, 则表现为对大气 CO₂ 的净排放。在油菜季, 两种处理 CO₂ 通量变化呈现脉冲式排放, 这可能主要是因为油菜生长季天气变化较大所致, 虽然整个冬季温度较低, 但仍会出现温度较高的时候(图 1), 油菜在冬季时对大气

CO₂ 的吸收受温度影响较大, 所以 CO₂ 吸收通量在冬天产生较大波动^[18,24]。虽然油菜生长后期已是春天, 气温逐渐回升, 但油菜此时已进入成熟期, 生理活动逐渐减弱, 因而对大气 CO₂ 的吸收又逐渐降低。

有大量研究表明, 土壤含水率、地下 5 cm 温度、太阳辐射量以及生物量是影响 CO₂ 净通量主要影响因素^[18,25,26], 本研究中覆膜处理与对照处理下土壤含水率(覆膜: 33.77% ± 1.68%; 对照: 33.64% ± 0.69%)、地下 5 cm 温度(覆膜: 18.77℃ ± 1.80℃; 对照: 18.65℃ ± 1.74℃)以及生物量(覆膜: 32.10 t·hm⁻² ± 1.53 t·hm⁻²; 对照: 30.80 t·hm⁻² ± 2.76 t·hm⁻²)均没有显著性差异, 另外, 覆膜与对照处理均在同一块试验田中进行, 太阳辐射量相同, 因而导致地膜覆盖对稻油轮作全年及各

季 CO_2 排放并没有太大影响。

3.2 地膜覆盖对 N_2O 排放的影响

覆膜和对照处理的 N_2O 排放峰值出现的时间均为施肥后两周左右, 这与肖乾颖等^[27] 在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站的研究结果相同, 一方面, 田间水分含量充足, 氮肥施用过后, 为土壤中微生物的硝化和反硝化作用提供了充足的底物; 另一方面, 水稻和油菜在这一生育阶段内作物群小, 生长缓慢, 吸收氮肥能力较弱^[28,29], 因而 N_2O 在这段时间排放较高。休闲季 N_2O 的排放量比水稻季和油菜季低很多, 可能是因为没有氮肥施加的缘故, 导致土壤中微生物的硝化和反硝化反应缺乏底物。

覆膜和对照处理下 N_2O 的排放主要集中在油菜季, 这主要与温度和土壤水分含量有关。郑循华等^[30] 的研究指出温度低于 5°C 会抑制土壤微生物的硝化和反硝化作用, 本研究实验地点处于亚热带地区, 冬天气温较高(如图1), 基本都在 5°C 以上, 因而不会抑制土壤微生物的活性; 同时在油菜季田间土壤水分含量适中, 适合土壤微生物的硝化和反硝化作用的进行, 因而有利于土壤 N_2O 的产生和排放。而水稻季时, 稻田处于长期淹水状态, 由于土壤孔隙充满水分, O_2 供应过低, 而严格的厌氧环境则使反硝化作用进行彻底, 从而生成 N_2 , 如图4所示, 在水稻季出现多次 N_2O 负值, 表现出对大气 N_2O 的吸收^[31,32]。本研究发现地膜覆盖降低了作物全年 N_2O 的排放量, 但没有达到显著差异, 与 Li 等^[7] 在阜康的研究结果不同, 这主要是因为其研究地点处于干旱地带, 地膜覆盖具有良好的保湿作用, 而且在作物生育期进行了多次灌溉, 从而对土壤理化性质产生了较大影响, 进而改变了 N_2O 排放。而在本研究中油菜季虽为旱作, 但未进行灌溉, 而且本研究处于亚热带地区, 地膜覆盖的保湿作用也不明显。农田管理方式以及气候的差异可能导致两种研究的结果不同。本实验结果表明覆膜与对照处理的地下 5 cm 温度、土壤含水率、土壤无机氮 [$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (覆膜: $17.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 1.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 对照: $18.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 1.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (覆膜: $19.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 对照: $18.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)] 均没有显著差异, 这可能是造成本研究不同覆膜处理下 N_2O 的排放量未有显著差异的主要原因。

3.3 地膜覆盖对 CH_4 排放的影响

本研究中 CH_4 在水稻分蘖期出现排放峰值, 这与很多研究结果一致^[33-35], 一方面水稻在这一时期生长较为旺盛, 水稻根际分泌大量的分泌物, 为

产甲烷菌提供了大量的新鲜基质, 另一方面是水稻地上部分和地下部分良好的生长为土壤中产生的 CH_4 排放提供了通道。另外, 在水稻成熟期也出现了 CH_4 排放峰, 这与张军科等^[36] 和于海洋等^[37] 的研究结果一致, 这主要是因为水稻植株在这一时期处于成熟老化阶段, 水稻植株根皮老化脱落, 为产甲烷菌提供了丰富的新鲜有机碳源。在油菜季, 两种处理都在油菜生长前期出现了一个排放峰值, 可能是因为这个时期土壤水分含量充足, 气温也较高, 从而为甲烷的产生和排放创造了良好的条件。对照处理在油菜移栽后的第 83d 又出现了一个更高的峰值, 这可能是因为在此次采样前连续几天的降雨, 使得对照处理的土壤含水率大幅度上升(覆膜: $33.42\% \pm 0.24\%$, 对照: $38.46\% \pm 2.31\%$; $P < 0.05$), 造成了较为强烈的局部厌氧环境^[38], 而在覆膜条件下, 降雨对土壤表面扰动较小, 土壤水分变化缓慢, 因此覆膜处理的 CH_4 排放较为平缓。

地膜覆盖显著提高了全年及各季 CH_4 排放量, 这与张怡等^[39] 在水稻季显著降低 CH_4 排放量不同, 他们的研究指出, 地膜覆盖有利于 O_2 向根际的输送, 而且他们还发现覆膜处理下土壤微生物生物量 (MBC) 含量高于对照处理, 意味着覆膜处理的好氧微生物生物量的增加, 从而促进了 CH_4 在土壤中的氧化, 因而降低了 CH_4 的排放, 但本研究中 MBC (覆膜: $254.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 25.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对照: $315.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 40.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 结果与其相反, 这可能就是本研究与其研究结果不同的主要原因。而在旱季时与 Cuello 等^[3] 地膜覆盖显著提高 CH_4 排放量的研究结果一致。覆膜处理在水稻季、休闲季和油菜季的 CH_4 排放量较对照处理要高, 且达到了显著差异性 ($P < 0.05$), 在水稻季主要是因为覆膜显著提高有机质含量 (覆膜: $30.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 对照: $25.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $P < 0.05$), 为产甲烷细菌提供了反应底物。在休闲季, 对照处理仍然表现为大气 CH_4 的排放源, 这主要是因为水稻收获后, 没有立即翻耕土壤, 排水条件较差, 而重庆在 8 月时处于一个高温多雨的时节, 降水丰沛, 在 10 月又处于一个“华西秋雨”时节, 同样也有丰沛的降水, 使得土壤含水率较高, 这有利于形成厌氧微区^[40]。对于覆膜处理, 由于水稻收割后地膜依然覆盖在土壤表面, 排水则更加困难, 从而可能导致厌氧微区形成数量和面积更大, 因而 CH_4 排放量显著高于对照处理。尽管是旱作, 但覆膜及对照处理下油菜季都表现为对大气 CH_4 的排放, 这与目前已有的大量的研究结果是相反的, 通常, 在水旱轮作模式下旱季农田都表现为对大气

CH₄ 的吸收^[41,42]. 对于覆膜处理, 造成这种现象的一个可能的原因就是油菜季地膜重新铺设后, 地膜阻碍土壤与大气之间的气体交换, 随着土壤呼吸作用不断在封闭地膜内进行, 降低了 O₂ 浓度, 形成厌氧环境, 促进产甲烷菌的生长和繁殖, 而抑制甲烷氧化菌的活动, 从而为 CH₄ 的产生创造良好的条件, 特别是在油菜生长前期(图 5), CH₄ 的排放呈现出上升趋势^[3,43]. 但对于对照处理, 目前还未找到合理的解释, 有待于进一步研究.

4 结论

(1) 不论是在水稻季、休闲季还是油菜季, 覆膜和对照处理下 CO₂ 及 N₂O 排放量均无显著差异性, 表明地膜覆盖对 CO₂ 和 N₂O 排放并没有显著影响.

(2) 地膜覆盖显著增加了全年以及各季 CH₄ 的排放量, 表明覆膜会提高 CH₄ 的排放.

(3) 覆膜与对照处理下全年 GWP 值以及作物产量并无明显差异, 表明覆膜对温室气体排放以及作物产量无显著影响.

参考文献:

- [1] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, intergovernmental panel on climate[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)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 CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975.
- [3] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, et al. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91: 48-57.
- [4] Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 362-367.
- [5] Li F M, Wang J, Xu J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1): 9-20.
- [6] Braun M, Bai Y G, McConkey B, et al. Greenhouse gas flux in a temperate grassland as affected by landform and disturbance [J]. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 709-723.
- [7] Li Z, Zhang R, Wang X, et al. Effects of plastic film mulching with drip irrigation on N₂O and CH₄ emissions from cotton fields in arid land[J]. The Journal of Agricultural Science, 2014, 152(4): 534-542.
- [8] Nan W G, Yue S C, Huang H Z, et al. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 451-464.
- [9] 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4790-4799.
Shi J L, Hao Q J, Feng D, et al. Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rape seed crop rotation[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4790-4799.
- [10] Berger S, Kim Y, Kettering J, et al. Plastic mulching in agriculture—friend or foe of N₂O emissions? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 167: 43-51.
- [11] Gao B, Ju X T, Su F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 112-124.
- [12] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 935-941.
Zhang Y, Lü S H, Ma J, et al. Effect of high-yield rice planting technique integrated with plastic mulching for water saving on methane emission from rice fields [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 935-941.
- [13] Yu Y X, Jia H T, Zhao C Y. Evaluation of the effects of plastic mulching and nitrapyrin on nitrous oxide emissions and economic parameters in an arid agricultural field[J]. Geoderma, 2018, 324: 98-108.
- [14] 王跃思, 王跃红. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 20-22.
- [15] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 透明箱法监测稻田生态系统 CO₂ 通量的研究[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 8-14.
Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, et al. Estimation of CO₂ fluxes from rice paddies based on transparent chamber measurement [J]. Environmental Science, 2005, 26(6): 8-14.
- [16] Gao M Y, Kong F L, Xi M, et al. Effects of environmental conditions and aboveground biomass on CO₂ budget in *Phragmites australis* wetland of Jiaozhou Bay, China [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(4): 539-551.
- [17] 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 等. 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 392-400.
Feng X, Jiang C S, Peng X L, et al. Effects of the crop rotation on greenhouse gases from flooded paddy fields [J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 392-400.
- [18] Zhang L H, Song C C, Nkrumah P N. Responses of ecosystem carbon dioxide exchange to nitrogen addition in a freshwater marshland in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Environmental Pollution, 2013, 180: 55-62.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 842-844.
- [20] Niu S L, Wu M Y, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe [J]. New Phytologist, 2008, 177(1): 209-219.
- [21] Aeschlimann U, Nösberger J, Edwards P J, et al. Responses of net ecosystem CO₂ exchange in managed grassland to long-term CO₂ enrichment, N fertilization and plant species [J]. Plant, Cell & Environment, 2005, 28(7): 823-833.
- [22] 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3451-3462.
Zhang K L, Hao Q J, Feng D, et al. Effect of plastic film mulching on methane emission from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3451-3462.
- [23] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide

- emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181-195.
- [24] Chen C, Li D, Gao Z Q, *et al.* Seasonal and interannual variations of carbon exchange over a rice-wheat rotation system on the North China Plain[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, **32**(10): 1365-1380.
- [25] Zhao L, Li Y N, Xu S X, *et al.* Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(10): 1940-1953.
- [26] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 283-288.
- Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, *et al.* Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(2): 283-288.
- [27] 肖乾颖, 黄有胜, 胡廷旭, 等. 施肥方式对紫色土农田生态系统 N₂O 和 NO 排放的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(2): 203-213.
- Xiao Q Y, Huang Y S, Hu T X, *et al.* Effects of fertilization regimes on N₂O and NO emissions from agro-ecosystem of purplish soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(2): 203-213.
- [28] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 控释肥料对覆膜栽培稻田 N₂O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(3): 769-775.
- Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al.* Effect of controlled release fertilizer on nitrous oxide emission from paddy field under plastic film mulching cultivation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 769-775.
- [29] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(5): 598-602.
- Huang Y, Jiao Y, Zong L G, *et al.* N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physico-chemical properties [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(5): 598-602.
- [30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, **18**(5): 1-5.
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(5): 1-5.
- [31] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(6): 1524-1530.
- Sun Z Q, Hao Q J, Jiang C J, *et al.* Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(6): 1524-1530.
- [32] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 207-213.
- Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al.* Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a Central Sichuan hilly area of Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(2): 207-213.
- [33] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, *et al.* Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, **9**(4): 403-411.
- [34] 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.
- [35] Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(8): 825-834.
- [36] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1979-1986.
- Zhang J K, Jiang C S, Hao Q J, *et al.* Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from agro-ecosystems in a purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1979-1986.
- [37] 于海洋, 杨玉婷, 马静, 等. 硝化抑制剂对覆膜稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(3): 461-467.
- Yu H Y, Yang Y T, Ma J, *et al.* Effect of nitrification inhibitor application on CH₄ and N₂O emissions from plastic mulching rice fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(3): 461-467.
- [38] Xu H, Cai Z C, Tsuruta H. Soil moisture between rice-growing seasons affects methane emission, production, and oxidation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(4): 1147-1157.
- [39] 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.
- [40] Takahashi S, Uenosono S, Ono S. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions [J]. *Plant and Soil*, 2003, **251**(2): 291-301.
- [41] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH₄、N₂O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, *et al.* Emission characteristics of CH₄ and N₂O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [42] 吕锦慧, 武均, 张军, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤 CH₄、CO₂ 排放特征及其影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(12): 26-33.
- Lv J H, Wu J, Zhang J, *et al.* Characteristics and influencing factors of soil CH₄ and CO₂ emissions under different tillage measures[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(12): 26-33.
- [43] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5246-5256.
- Luo X Q, Zhang A F, Chen H X, *et al.* Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5246-5256.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jin-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)