

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

地膜覆盖和施氮对菜地 CH₄ 排放的影响

倪雪¹, 江长胜¹, 陈世杰¹, 李晓茜¹, 石孝均^{1,2}, 郝庆菊^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 2. 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地, 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辣椒-萝卜轮作菜地为研究对象, 采用静态暗箱/气相色谱法, 进行为期 2 a 的田间原位观测, 探讨地膜覆盖和不同施氮处理对菜地 CH₄ 排放的影响. 本实验设置 8 个处理, 分别为对照常规(NN0)、对照覆膜(FN0), 低 N 常规(NN1)、低 N 覆膜(FN1), 中 N 常规(NN2)、中 N 覆膜(FN2), 高 N 常规(NN3)、高 N 覆膜(FN3), 研究地膜覆盖和施氮对菜地 CH₄ 的排放特征和影响因素以及土壤碳氮组分的变化规律. 结果表明, 覆膜与常规两种种植方式对于菜地 CH₄ 的排放没有明显差异. 2014 年 5 月~2016 年 4 月, 覆膜种植下无氮、低氮、中氮和高氮菜地 CH₄ 年均累积吸收量分别为 28.96、51.90、43.43 和 34.41 mg·m⁻², 常规种植下 CH₄ 年均累积吸收量分别为 40.76、63.56、62.77 和 21.92 mg·m⁻². 不同施氮梯度对于菜地 CH₄ 的排放没有显著影响. 菜地 CH₄ 的吸收量与土壤温度呈显著正相关关系, 与土壤含水率则呈现为显著负相关关系. 地膜覆盖在辣椒季加速了土壤碳素的矿化, 而在萝卜季则没有显著影响.

关键词: CH₄ 排放; 地膜覆盖; 不同施氮; 土壤碳素; 菜地

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2404-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201809045

Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH₄ Emissions from a Vegetable Field

NI Xue¹, JIANG Chang-sheng¹, CHEN Shi-jie¹, LI Xiao-xi¹, SHI Xiao-jun^{1,2}, HAO Qing-ju^{1*}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. National Purple Soil Fertility and Fertilizer Efficiency Monitoring Base, Chongqing 400716, China)

Abstract: To investigate the effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on CH₄ emissions from a vegetable field, static opaque and gas chromatography methods were applied, and *in situ* field observations of a chili-radish rotation system, from May 2014 to April 2016, were carried out in the Key Field Station for Monitoring of Eco-Environment of Purple Soil of the Ministry of Agriculture of China in the farm of Southwest University in Chongqing. Eight treatments were set up in the field experiment: control routine (no N application and no plastic film mulching) (NN0), control mulching (FN0), low N routine (NN1), low N mulching (FN1), conventional N routine (NN2), conventional N mulching (FN2), high N routine (NN3), and high N mulching (FN3). The characteristics and influencing factors of CH₄ emissions and the changes of soil carbon and nitrogen composition from all treatments were studied. The results showed that there was no significant difference in the CH₄ emissions from the vegetable fields between the mulching methods. From May 2014 to April 2016, the annual average cumulative absorption of CH₄ in nitrogen-free, low-nitrogen, medium-nitrogen, and high-nitrogen vegetable fields under film-mulching cultivation was 28.96, 51.90, 43.43, and 34.41 mg·m⁻², respectively. The average annual cumulative uptake of CH₄ under conventional planting was 40.76, 63.56, 62.77, and 21.92 mg·m⁻², respectively. Different nitrogen application gradients had no significant effect on CH₄ emissions from vegetable fields. There was a significant positive correlation between CH₄ uptake and soil temperature, and a significant negative correlation between CH₄ and soil water content. Plastic film coverage accelerated the mineralization of soil carbon in the pepper season, but there was no significant effect in the radish season.

Key words: CH₄ emission; plastic film mulching; nitrogen application; soil carbon; vegetable field

甲烷是一种化学活性气体, 参与许多重要的大气化学过程, 还是一种重要的温室气体, 对全球温室气体的贡献达到了 20%^[1], 其增温效应是 CO₂ 的 15~30 倍^[2], 远远大于 CO₂ 的增温潜势. 近几十年来, CH₄ 在大气的体积分数持续上升, 目前的年增长率为 0.8%^[3]. 大气中新增加的 CH₄ 约 70%~90% 来自于生物源, 其中相当一部分来自于农田生态系统^[4]. 农田覆盖是一种历史悠久的作物栽培技术, 而地膜覆盖是广大旱区作物增产最显著的技

术^[5]. 地膜覆盖具有显著的保水效果还具有增温效应^[6]. 长期施用氮肥能提高作物产量, 但也会改变土壤中氮素含量及其生物性状^[7], 直接影响农田中 CH₄ 的排放. 地膜覆盖和氮肥施用作为最普遍的增

收稿日期: 2018-09-06; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0476); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013)

作者简介: 倪雪(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 619325164@qq.com

* 通信作者, E-mail: haoqingju@163.com

产措施常常综合使用. 目前, 国内外有不少关于地膜覆盖和施氮对旱地土壤温室气体排放影响的研究报道^[8-10]. 张凯莉等指出^[11], 地膜覆盖能在一定程度上削弱菜地作为大气 CH₄ 汇的能力. 王旭燕等^[12]的研究表明, 旱作农田土壤 CH₄ 累积吸收通量随施氮量的增加而降低. 李晓莎则认为^[13], 氮肥对旱作农田土壤 CH₄ 的排放没有特定规律. 然而, 地膜覆盖和不同施氮同时作用对菜地温室气体的排放有何综合影响? 有关该方面的研究还未见报道. 因此, 本文以西南地区常见的辣椒-萝卜菜地轮作系统为研究对象, 采用静态暗箱/气相色谱法进行了为期两年原位观测, 探讨地膜覆盖和不同施氮处理下农田土壤 CH₄ 的排放规律及影响因素.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

本实验地点位于西南大学试验场的农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测站(106°26'E, 30°26'N)内, 该站海拔 230 m, 年均气温 18.3°C, 为亚热带季风气候, 年均降水量为 1105 mm, 年均相对湿度多在 70%~80%, 在全国属于高湿区. 年日照时数 1276.7 h, 无霜期年均约 334 d. 土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的灰棕紫泥, 土壤 pH 在 6.8 左右, 其它主要理化性质有: 有机质 22.5 g·kg⁻¹, 速效磷 0.78 g·kg⁻¹, 黏粒 506.7 g·kg⁻¹, 全氮 1.74 g·kg⁻¹, 碱解氮 120.1 mg·kg⁻¹, CEC 23.46 cmol·kg⁻¹.

1.2 实验设计与方法

田间试验于 2014 年 5 月至 2016 年 3 月进行, 以西南地区常见菜地(辣椒-萝卜轮作)为研究对象, 采用的地膜为 0.005 mm 聚乙烯透明薄膜, 在平地起垄, 单垄长 280 cm、垄宽 70 cm、高 15 cm, 垄间距 30 cm. 设置地膜覆盖和不覆盖两种方式, 其中覆膜处理选用 120 cm 宽的地膜覆于垄上, 两边用细土压实, 作物生育期以及休闲期全程覆膜. 覆膜和不覆膜方式下均设置 4 个施氮梯度(高、中、低以及不施氮对照), 共 8 个处理, 所有处理均设置 3 个重复. 辣椒季高、中、低 N 菜地分别施氮 450、300、150 kg·hm⁻², 萝卜季则分别为 300、200、100 kg·hm⁻². 作物栽培品种和农田管理等均按当地习惯进行, 所有实验小区施入相同的 K 肥(100 kg·hm⁻²)和 P 肥(150 kg·hm⁻²), 均在翻耕栽种(播种)前一次性施入耕作层中, 氮肥则按基肥追肥比为 1:1 分别施入土中, 追肥时将尿素溶解于水中, 通过定量灌溉施入. N 肥为尿素(“泸天化”牌, TN ≥ 46.4%, 四川泸天化股份有限公司生产), P 肥为过磷酸钙(“腾升”牌, 合格晶 II, 有效 P₂O₅ ≥ 12%, 中华重庆涪陵化工有限公司生产), K 肥为氯化钾(“中化”牌, K₂O ≥ 60%, 中化化肥有限公司生产).

整个采样期间, 作物的田间管理时间如图 1 所示. 在第一年萝卜-辣椒轮作周期内, 于 2014 年 5 月 18 日移栽辣椒苗(龙椒一号, 重庆龙胜种子经营部), 2014 年 7 月 5 日追施 N 肥, 辣椒分批收获, 2014 年 9 月 23 日移除辣椒并翻耕, 农闲期

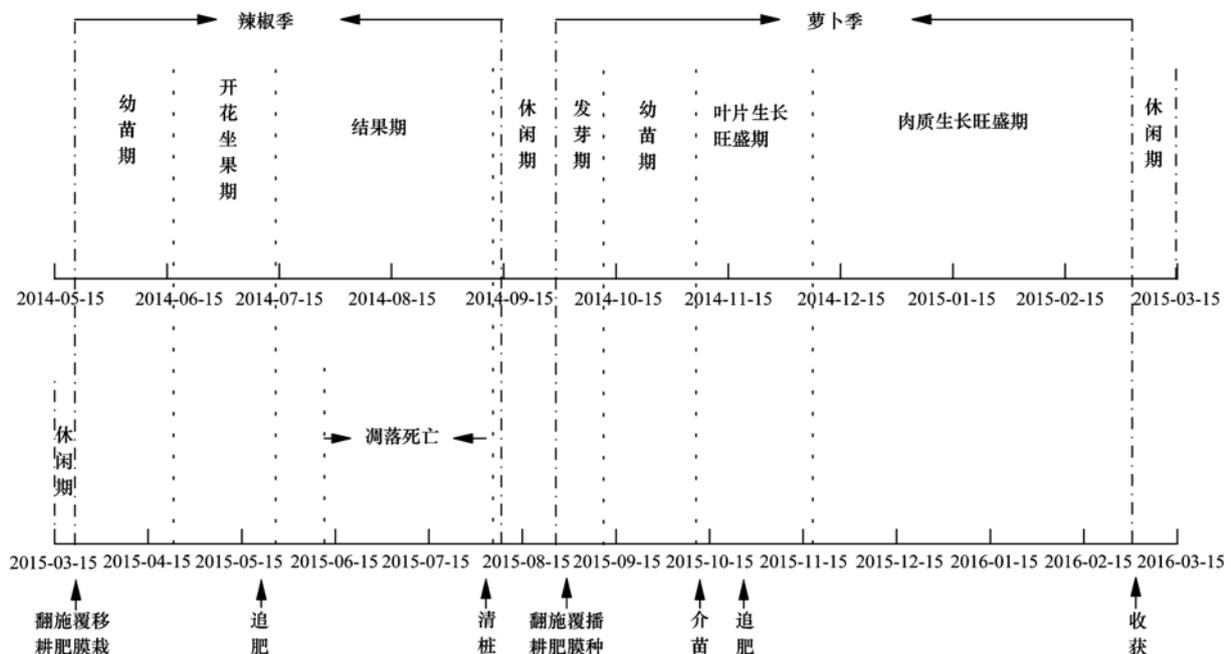


图 1 不同生长季作物生长期及农作处理时间序列

Fig. 1 Time series of crop growth and farming processing

间照常采样. 2014 年 10 月 1 日进行翻耕、施肥、覆膜和点种萝卜籽(九斤王, 广西横县子龙种业有限公司), 2014 年 11 月 28 日追肥, 于 2015 年 3 月 16 日一次性收获. 第二年种植期间, 于 2015 年 3 月 23 日移栽辣椒苗(科润一号, 徐州市金种子有限公司), 5 月 27 日追肥, 由于该年辣椒受到虫害入侵, 于 6 月初逐渐掉落死亡, 而采样照常进行. 2015 年 8 月 22 日开始第二年萝卜(九斤王, 广西横县子龙种业有限公司)的种植, 并于 2016 年 2 月底一次收获.

1.3 气体样品的采集和分析

1.3.1 气体样品的采集

土壤 CH₄ 排放通量的测定采用静态暗箱法. 箱体设计制作成分节组合式标准箱, 由底座、延长箱和顶箱组成, 具体材料及尺寸参见文献[14]. 用于垄沟气体采集的装置为不锈钢圆桶(直径 20 cm, 高 25 cm), 在箱顶中间位置装有连接气体样品的接口. 采样时安插的不锈钢底座(长 50 cm, 宽 50 cm, 高 15 cm), 上端有深 3 cm、宽 2 cm 的密封水槽, 采样时将顶箱或延长箱扣在底座上, 用适量的水密封. 底座(长 50 cm、宽 50 cm、高 20 cm)架设在每个处理小区的中间, 对于地膜覆盖处理, 在埋设底座时, 先将地膜铺好, 在埋放底座的位置将地膜留好褶皱并在四周挖好约 15 cm 深的细沟, 将底座小心压放在地膜上并在底座外四周用细土压实, 同时底座中央在覆膜前也多堆放一定土, 待底座放入后, 隔着地膜将底座内土推平. 在作物生长期底座都固定在采样点上. 每个底座内均有 2 窝辣椒(或萝卜), 每窝 2 株, 在辣椒(或萝卜)种植后, 于覆膜破口处用适量土封住. 采样时将采样箱扣在底座上, 并且用水密封. 为了减少采样时对箱内外植物的损坏, 在植物生长季内通过安置铁丝框把采样箱与植物隔离开. 垄上气体每周采集一次, 垄沟气体每两周采集一次, 采样时间在上午 09:00 ~ 11:00. 从采样箱密封笼罩开始用 60 mL 注射器采集第 1 个气体样品, 之后每间隔 10 min 采样一次, 一共采集 4 个气样.

1.3.2 气体样品分析

采集的气体样品立即送回实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪测定 CH₄ 含量, 根据下式计算各处理 CH₄ 排放通量, 气体通量表示单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化, 公式如下:

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt}$$

式中, F 为排放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; H 为箱内气室高度 (cm); T 为采样器期间箱内平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);

p 为采样时的大气压 (Pa); p_0 为标准状况下的大气压 (Pa); ρ 为被测气体的密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); dc/dt 为采样期间箱内 CH₄ 含量变化速率. F 为负值时表示吸收, 正值时为排放.

1.3.3 土壤各指标的测定方法

土壤温度: 在气体样品采集的同时, 观测箱内、外气温以及土壤温度, 温度由 JM624 型便携式测温计测定.

土壤含水率: 在每次采集气体之后, 多点采样法(5 个点)分别采集覆膜和常规两个处理垄上 0 ~ 20 cm 深土样, 用烘干法 ($105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) 测定土壤含水率. 每个样品做 3 个重复.

在覆膜和不覆膜小区, 在作物生长季, 每周采集一次土壤样品, 采样深度为 0 ~ 20 cm, 样品带回实验室放入 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存. 测定的指标有: 易氧化有机碳 (ROC)、微生物生物量碳 (SMBC) 和可溶性有机碳 (DOC), 测定的方法见表 1.

表 1 土壤测定的指标及其方法^[15]

测定指标	方法
易氧化有机碳	KMnO ₄ 氧化法测定
微生物生物量碳	用氯仿熏蒸提取, Multi N/C 2100 分析仪测定滤液中的有机碳和全氮
可溶性有机碳	用去离子水提取, 用 Multi N/C 2100 分析仪测定滤液中碳、氮浓度

1.4 数据整理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 将原始实验数据汇总整理后, 用 Origin 9.0 进行作图, 再利用 SPSS 20.0 软件进行显著性和相关性分析.

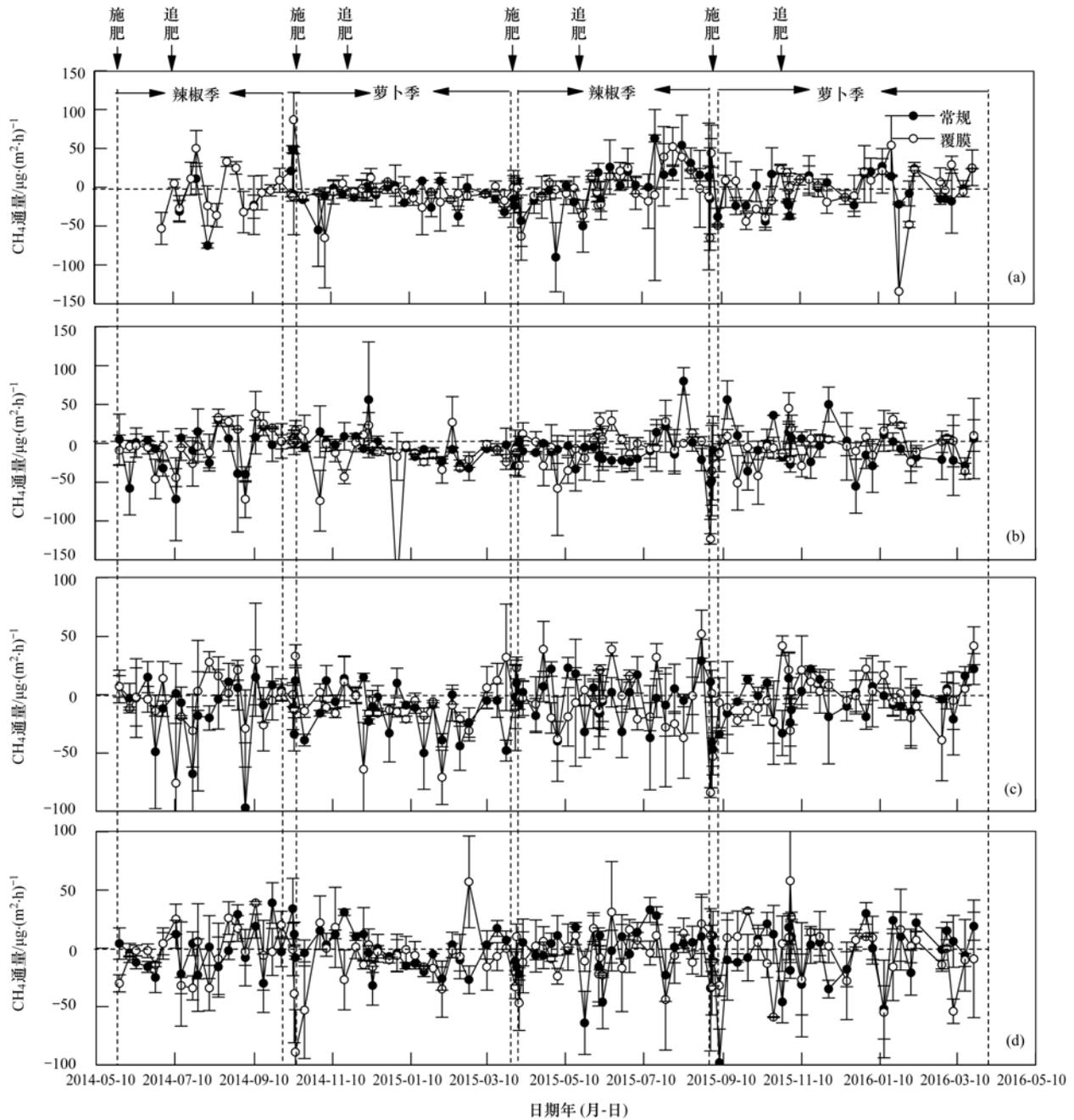
2 结果与分析

2.1 地膜覆盖对菜地 CH₄ 排放的影响

不同种植季 CH₄ 排放通量的季节变化见图 2. 从中可以看出, 整个观测周期内辣椒和萝卜季的 CH₄ 排放通量均无较大波动, 基本呈现为吸收状态. 高、中、低、无氮菜地覆膜种植下 CH₄ 的最大吸收速率分别为 89、84、123 和 134 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 常规种植分别为 98、68、187 和 75 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在整个观测期间, 不同施氮下覆膜和常规菜地在辣椒季和萝卜季的 CH₄ 平均排放通量见表 2. 配对 t 检验结果表明, 辣椒季和萝卜季, 不同施氮量处理下覆膜与常规菜地间的 CH₄ 排放通量均无明显差异 ($P > 0.05$).

2.2 覆膜和常规种植下 CH₄ 的累积排放量

从表 3 可以看出, 2014-05 ~ 2016-04 各处理菜地的 CH₄ 累积排放量均呈现负值, 表现为 CH₄



(a) 无氮菜地, (b) 低氮菜地, (c) 中氮菜地, (d) 高氮菜地

图 2 不同种植季 CH₄ 排放通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CH₄ flux during the crops growing seasons

表 2 不同施氮下覆膜和常规种植菜地 CH₄ 排放量¹⁾/μg·(m²·h)⁻¹

Table 2 CH₄ fluxes at different N application levels under mulching and no mulching treatments/μg·(m²·h)⁻¹

时间(年-月)	生长季	无氮		低氮		中氮		高氮	
		常规	覆膜	常规	覆膜	常规	覆膜	常规	覆膜
2014-05 ~	辣椒季	-5.00Aa	-1.13Aa	-7.88Aa	-3.96Aa	-7.47Aa	-4.10Aa	-1.29Aa	-2.70Aa
2016-04	萝卜季	-5.96Aa	-5.78Aa	-8.52Aa	-8.77Aa	-8.64Aa	-6.76Aa	-3.98Aa	-5.76Aa

1) 表中大写字母表示同一施氮水平下各生长季覆膜和常规种植 CH₄ 通量差异, 小写字母表示同一种植方式下各生长季不同施氮梯度 CH₄ 通量差异

的吸收. 2014-05 ~ 2015-04 除高氮萝卜季外, 其它施氮菜地 CH₄ 累积吸收量基本呈现为覆膜小于常规, 其中高氮组覆膜萝卜季 CH₄ 累积吸收量为常规

菜地的 3.6 倍.

2015-05 ~ 2016-04 辣椒季和萝卜季各处理 CH₄ 累积吸收量呈现出不规律的状态, 除辣椒季

的无氮菜地 CH_4 呈现为弱排放, 其余施氮组菜地依然呈现为吸收. 配对 t 检验结果显示, 在整个观测期间, CH_4 累积吸收量均表现为萝卜季显

著大于辣椒季 ($P < 0.05$), 从辣椒季、萝卜季以及全年来看, CH_4 累积排放量常规与覆膜没有明显差异 ($P > 0.05$).

表 3 各施氮处理覆膜和常规种植下 CH_4 的累积排放量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

Table 3 Cumulative CH_4 emissions of different N application levels under mulching and no mulching treatments/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

时间(年-月)	观测时间	无氮		低氮		中氮		高氮	
		常规	覆膜	常规	覆膜	常规	覆膜	常规	覆膜
2014-05 ~ 2015-04	辣椒季	-29.49Aa	-13.14Aa	-31.63Aa	-12.08Aa	-35.06Aa	-13.05Aa	-7.21Aa	-7.13Aa
	萝卜季	-43.18Ba	-27.83Ba	-48.59Ba	-49.72Ba	-52.54Ba	-45.20Ba	-7.70Ba	-27.49Ba
	总计	-72.67a	-40.97a	-80.22a	-61.80a	-87.60a	-58.25a	-14.91a	-34.62a
2015-05 ~ 2016-04	辣椒季	1.04Aa	6.73Aa	-19.63Aa	-13.65Aa	-13.53Aa	-13.61Aa	-1.18Aa	-10.43Aa
	萝卜季	-9.89Ba	-23.67Ba	-27.26Ba	-28.35Ba	-24.40Ba	-15.00Ba	-27.74Ba	-23.76Ba
	总计	-8.85a	-16.94a	-46.89a	-42.00a	-37.93a	-28.61a	-28.92a	-34.19a

1) 表中大写字母表示每年所有处理辣椒季和萝卜季 CH_4 累积排放量差异, 小写字母表示辣椒季、萝卜季以及全年尺度上各施氮组常规和覆膜菜地 CH_4 累积排放量差异

2.3 不同施氮量对菜地 CH_4 排放的影响

各种种植季覆膜和常规方式下不同施氮量菜地 CH_4 的平均排放通量见表 2. 从中可以看出, 两种种植方式下的低氮、中氮菜地 CH_4 吸收量均高于无氮、高氮菜地, 并且辣椒季覆膜组和常规组的 CH_4 吸收量均小于萝卜季. 辣椒季和萝卜季所有菜地处理的 CH_4 排放量都显示为负值, 即 CH_4 的汇. 单因素方差分析结果表明, 在辣椒季和萝卜季, 覆膜和常规两种种植方式下, 不同施氮菜地的 CH_4 排放量均无明显差异 ($P > 0.05$).

2.4 覆膜和施氮对菜地 CH_4 排放的交互影响

利用 SPSS 进行双因子方差分析, 结果表明, 在辣椒季, 覆膜和施氮梯度对 CH_4 排放均无显著影

响 ($P > 0.05$), 其交互作用对 CH_4 排放也无显著影响 ($P > 0.05$), 萝卜季和辣椒季情况一致.

2.5 环境因子对 CH_4 排放的影响

表 4 为整个观测期间覆膜和常规种植下不同施氮菜地 CH_4 排放通量与各环境因子的 Pearson 相关性分析. 结果表明, 温度方面, 只有辣椒季常规种植下低氮菜地的 CH_4 排放量与 5 cm 地温呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 其他处理菜地的 CH_4 排放量与 5 cm 地温和地表温度均无显著相关关系. 含水率方面, 辣椒季覆膜低氮菜地 CH_4 排放量与土壤含水率呈显著负相关 ($P < 0.05$), 萝卜季覆膜中氮 CH_4 排放量与土壤含水率呈极显著负相关 ($P < 0.01$).

表 4 环境因子与土壤 CH_4 排放通量相关关系¹⁾

Table 4 Relationship between environmental factors and soil CH_4 emission flux

时间(年-月)	观测时间	观测项目	常规				覆膜			
			无氮	低氮	中氮	高氮	无氮	低氮	中氮	高氮
2014-05 ~ 2016-04	辣椒季	5 cm 地温	0.200	0.320*	0.001	0.115	0.268	0.272	0.052	0.054
		地表温度	0.292	0.257	0.089	0.119	0.274	0.207	-0.062	0.030
		含水率	0.046	-0.220	-0.167	-0.040	-0.093	-0.351*	-0.137	-0.112
	萝卜季	5 cm 地温	0.062	0.219	-0.062	-0.069	0.012	-0.179	-0.036	-0.072
		地表温度	0.098	0.202	-0.076	-0.110	-0.039	-0.192	-0.055	-0.086
		含水率	-0.043	-0.127	0.077	0.030	-0.085	-0.105	-0.368**	0.223

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)显著相关

2.6 地膜覆盖对土壤碳素的影响

从图 3 可以看出, 在整个观测期间, 两种种植方式下土壤 TOC(总有机碳)和 DOC(可溶性有机碳)的含量变化趋势比较相似, 在第一年辣椒季, 常规菜地均出现了一个明显的高峰并远远高于覆膜菜地, 随后的种植季则趋于平稳. 配对 t 检验结果表明, 两年辣椒季土壤 TOC 和 DOC 的含量均表现为常规显著大于覆膜 ($P < 0.05$), 平均值也表现为

常规大于覆膜(第一年辣椒季: TOC $70.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 30.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DOC $166.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 74.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 第二年辣椒季: TOC $42.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 27.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DOC $69.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 46.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 两年萝卜季土壤 TOC 和 DOC 含量则均表现为常规与覆膜没有明显差异, 平均值表现为覆膜略高于常规(第一年萝卜季: TOC $37.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 36.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DOC $95.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 90.90$

mg·kg⁻¹; 第二年萝卜季: TOC 34.27 mg·L⁻¹ > 32.50 mg·L⁻¹, DOC 55.32 mg·kg⁻¹ > 50.26 mg·kg⁻¹).

覆膜和常规种植下土壤 MBC 含量在第一年的两个种植季均没有太大波动, 并呈现较为一致的趋势, 在第二年的两个种植季则出现了较大波动. 配对 *t* 检验显示, 只有在第一年的萝卜季土壤 MBC 含量呈现为覆膜显著大于常规 ($P < 0.05$), 其它种植季均表现为覆膜和常规没有较大差异. 从平均值的水平上来看, 土壤 MBC 含量在第一年辣椒季和萝卜季均呈现为覆膜大于常规 (辣椒季: 296.48 mg·kg⁻¹ > 279.85 mg·kg⁻¹, 萝卜季: 276.99 mg·kg⁻¹ > 219.93 mg·kg⁻¹), 在第二年辣椒季和萝卜季则呈现为常规大于覆膜 (辣椒季: 217.29 mg·kg⁻¹ > 208.94 mg·kg⁻¹, 萝卜季: 292.56 mg·kg⁻¹ > 283.96 mg·kg⁻¹). 由此可见, 覆膜和常规种植下土壤 MBC 含量变化并没有明显的规律.

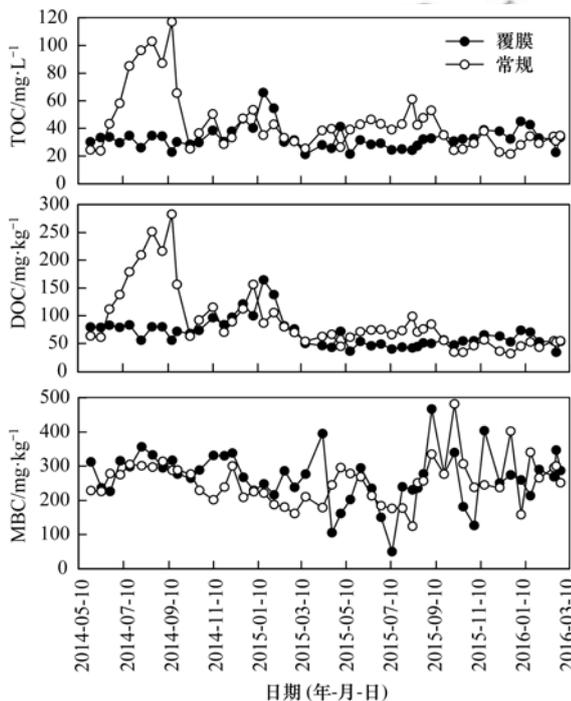


图3 覆膜和常规菜地土壤碳素在各种种植季的变化
Fig. 3 Changes in soil carbon under mulching and no mulching treatments in each growing season

2.7 菜地垄沟 CH₄ 排放通量

从图4可以看出, 覆膜和常规菜地垄沟的 CH₄ 排放通量趋势较为一致. 在整个观测期间, 覆膜菜地 CH₄ 通量范围为 -18.44 ~ 52.67 μg·(m²·h)⁻¹, 平均通量为 -1.90 μg·(m²·h)⁻¹; 常规菜地 CH₄ 通量范围为 -13.09 ~ 62.70 μg·(m²·h)⁻¹, 平均通量为 1.94 μg·(m²·h)⁻¹. 配对 *t* 检验结果显示, 覆膜与常规菜地垄沟 CH₄ 排放通量无显著差异 ($P >$

0.05). 由此可见, 两种种植方式的垄沟对 CH₄ 的通量有一定的影响, 但是影响不大.

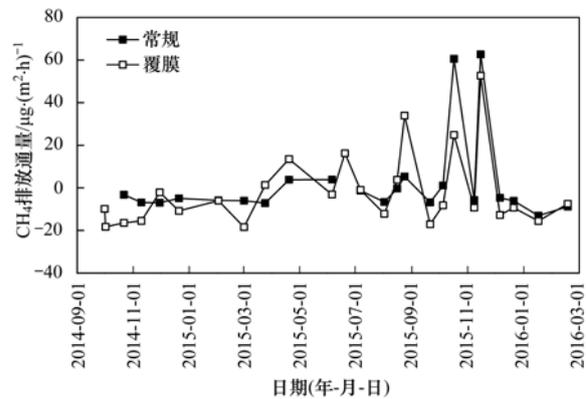


图4 覆膜和常规两种种植方式的垄沟 CH₄ 排放量

Fig. 4 Ditch CH₄ emissions from both film and conventional planting methods

3 讨论

3.1 地膜覆盖对菜地 CH₄ 排放的影响

从表2可以看出, 在辣椒季, 常规处理菜地的 CH₄ 吸收量高于覆膜菜地, 说明覆膜在一定程度上能削弱旱地土壤作为 CH₄ 汇的能力. 配对 *t* 检验分析显示, 在辣椒季和萝卜季, 不同施氮组覆膜和常规处理间的 CH₄ 排放均无明显差异 ($P > 0.05$). 本研究发现, 覆膜对于 CH₄ 排放量的影响不大, 这与众多学者研究结果一致^[11,16]. 农田 CH₄ 的产生主要是由于土壤中产甲烷菌的存在, 在厌氧的环境中, 产甲烷菌可以通过利用土壤微生物分解的有机酸来产生 CH₄. 然而土壤产生的 CH₄ 并不会全部排放到大气中, 其中一部分会在土壤或者水层中被氧化^[13]. CH₄ 消耗减少主要是发生在土壤表面, 因其是与大气交换最迅速的界面^[17], 土壤中的甲烷氧化菌主要生活在好氧环境, 因此多存活于土壤表面. 本实验建立在旱地的基础上, 旱地土壤通气性良好, 氧气易于扩散到土壤中, 促进土壤中甲烷氧化微生物和甲烷氧化酶的活性, 增强了土壤吸收氧化大气中 CH₄ 的能力^[18]. 覆膜在一定程度上阻隔了土壤的气体流通, 阻碍 O₂ 进入土壤, 形成土壤厌氧环境, 创造了有利于产甲烷菌活动的土壤条件, 限制了甲烷氧化菌的活动, 但覆膜的保温作用利于甲烷消耗, 保水作用不利于 CH₄ 扩散, 加之覆膜并没有完全阻隔大气, 大气中的 CH₄ 还是可以扩散到土壤中, 因此覆膜和常规种植下的 CH₄ 排放量无显著差异. 然而有研究表明^[19,20], 地膜覆盖处理显著减少了农田土壤对 CH₄ 的吸收. 这可能是作物种类和土壤理化性质的差异所带来的影响, 从而使

覆膜对大气 CH_4 扩散到土壤中所产生的阻碍作用掩盖了其保水保温效应引起的甲烷消耗, 导致地膜覆盖显著减少了土壤对 CH_4 的吸收。

从表 2 可以看出, 辣椒季和萝卜季所有处理均呈现为 CH_4 的吸收. 这与高琳^[21] 和李志国等^[22] 的研究结果相同. 不仅因为土壤中甲烷氧化菌本身的氧化作用, 还因为 CH_4 的产生条件受到了限制. 旱地土壤的有机质分解速率高, 不易于有机碳的积累, 从而不易产生厌氧环境, 因而影响土壤氧化还原电位和产 CH_4 微生物的产生^[23]. 除此之外, 通过观察两种植季的 CH_4 排放量可以发现, 萝卜季的 CH_4 吸收量普遍多于辣椒季. 原因有 3 个, 第一, 萝卜季土壤温度比辣椒季低, 土壤温度通过影响微生物种群的数量、种群的结构和酶活性等影响有机质分解、 CH_4 产生及氧化过程^[24], 从而与产甲烷菌相比, CH_4 氧化菌对温度的适应范围更宽, 能够忍耐更低的温度而保持较强的 CH_4 氧化能力^[25], 这就导致萝卜季相对于辣椒季而言, CH_4 的产生速率降低, 而 CH_4 氧化速率变化不大; 第二, 在本实验中, 萝卜季的生长期要比辣椒季长, 使萝卜季土壤吸收 CH_4 的时间比辣椒季长; 第三, 本实验中, 萝卜季土壤含水率较辣椒季高, 土壤水分含量高会减缓 CH_4 的扩散速率, 从而使萝卜季的 CH_4 吸收量要大于辣椒季. 当然, 这其中也不排除作物种类的关系。

3.2 不同施氮量对 CH_4 排放的影响

本实验中, 辣椒季和萝卜季, 覆膜和常规处理下不同施氮梯度菜地的 CH_4 排放量均表现为无显著差异 ($P > 0.05$). 从图 2 的观察中也可以发现, 施氮前后也并没有对 CH_4 的排放造成太大的波动. 而王旭燕等^[12] 的研究指出, CH_4 排放量随着施氮的增加而显著减少, 丁维新等^[26] 也指出, 在高氮情况下, 甲烷氧化菌氧化大气的稳定状态被破坏, 有机质层所含有有机质增大, 从而抑制 CH_4 的吸收. 郑聚锋等^[27] 研究也发现, 长期使用氮肥为主的化肥显著降低了土壤对 CH_4 的氧化能力, 同时显著降低了稻田土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度. 这与本实验的结果不符. 这可能是因为, 土壤中产甲烷菌和甲烷氧化菌以及硝化和反硝化细菌存在竞争, 而旱地土壤通气性良好, 利于硝化作用的进行, 硝化细菌将 NH_4^+ 转化成了 NO_3^- , 削弱了 NH_3 和 CH_4 在甲烷单氧酶氧化上的竞争关系. 本实验研究的是旱地辣椒-萝卜轮作系统, 而前面所提到的学者主要研究的是旱地小麦田或者水稻田. 另外, 前面所提学者所做研究均为短期实验, 短期实验和年际间重复实验的缺乏也会带来误差^[28].

3.3 环境因子对 CH_4 排放的影响

Pearson 相关性分析显示, 除辣椒季常规低氮菜地 CH_4 的排放量与 5 cm 地温有显著正相关关系以外 ($P < 0.05$), 其余处理均没有显著的相关关系 (见表 4). 这与 Priemé 等^[29] 的研究结果不一致. 土壤产甲烷必须具备有机物和水分, 厌氧环境, 适于发酵菌和产甲烷菌生存和繁殖的温度. 而且产甲烷菌确实受到温度的影响. 产甲烷菌的最适温度在 30 ~ 40℃, 土壤温度过低时, 产甲烷菌的活性会受到抑制, 产甲烷过程的其他微生物活性也会降低^[30], 然而土壤 CH_4 排放和土壤温度之间的关系较为复杂, 经常受到多种其他因素的共同影响, 加之 CH_4 氧化菌对温度的敏感较低, 因此在复杂的农田生态系统下存在多个环境因素制约时, 土壤温度与 CH_4 排放通量的关系并不明显, 常常被水分、氮肥等因素所掩盖^[31]. 对含水率的相关性分析显示, 辣椒季覆膜低氮菜地 CH_4 排放量与含水率呈显著负相关 ($P < 0.05$), 萝卜季覆膜中氮菜地 CH_4 排放量与含水率呈极显著负相关 ($P < 0.01$). 丁维新等认为^[32], 甲烷氧化速率与土壤湿度呈负相关, 这是因为甲烷氧化菌氧化甲烷的能力大于甲烷由大气向土壤扩散的能力^[33]. 李志国等^[34] 的研究认为地膜覆盖阻止了土壤水分的蒸发以及土壤易氧化有机质的分解, 在一定程度上会导致土壤厌氧环境的形成, 促使 CH_4 排放. 但当土壤低于最适土壤含水率时, 土壤 CH_4 排放通量会随着土壤含水率而降低^[35].

3.4 地膜覆盖对土壤碳素的影响

土壤 DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源^[36], 具有一定的溶解性, 在土壤中移动较快, 易分解矿化, 因而极易流失. 本研究结果表明, 在辣椒季, 地膜覆盖会导致土壤 TOC 和 DOC 的流失, 而萝卜季则没有显著影响. 地膜覆盖可以增加土壤微生物的活性, 而这意味着土壤矿化速度的增加^[37]. 本实验为旱作农田, DOC 的降解速率较快, 对土壤的环境响应更快, 地膜覆盖使土壤温度升高, 更利于 DOC 的降解. Wang 等^[38] 和 Liu 等^[39] 在测定地膜覆盖对玉米秸秆腐解速率的影响时发现, 地膜覆盖显著促进埋置的玉米秸秆碳的流失, 间接说明地膜覆盖促进土壤有机碳矿化. 雷利国^[40] 的研究也发现地膜覆盖可以减少旱作菜地土壤 DOC 含量。

土壤 MBC 是土壤有机碳中最活跃的组分, 与土壤碳的转化有密切关系, 其含量的高低是衡量土壤肥力的重要指标^[41]. 在本研究中, 第一年土壤 MBC 含量呈现为覆膜大于常规, 而第二年则变为常规大于覆膜, 但是差异都不显著. 覆膜对于土壤

MBC 含量的影响也出现了多种研究结果. 梁贻仓等^[42]的研究表明地膜覆盖土壤 MBC 含量较对照差异不明显. 李世朋等^[43]的研究表明, 不同施肥条件下地膜覆盖土壤 MBC 含量均低于常规种植. 黄哲^[44]通过两年的研究结果也表明, 覆膜只在第一年秋冬季显著增加了土壤 MBC 的含量, 而另外 3 个季节没有影响.

4 结论

(1) 地膜覆盖对菜地 CH₄ 排放通量没有显著影响, 并且在覆膜和常规种植下, CH₄ 呈现一定的季节规律, 菜地生态系统为 CH₄ 的汇, 其中萝卜季 CH₄ 的平均吸收速率高于辣椒季.

(2) 不同施氮量对菜地 CH₄ 排放的影响无显著差异, 但低、中氮菜地 CH₄ 吸收量要高于无、高氮菜地.

(3) 菜地 CH₄ 的吸收量与土壤含水率则呈现为显著负相关关系, 与土壤温度没有很大的相关性.

(4) 地膜覆盖在辣椒季加速了土壤碳素的矿化, 在萝卜季则没有显著影响.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 40-45.
- [2] IPCC. Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Iserman K. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share [J]. Environmental Pollution, 1994, **83**(1-4): 95-111.
- [5] 胡亚瑾, 吴淑芳, 冯浩, 等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响 [J]. 中国农业气象, 2015, **36**(6): 699-708. Hu Y J, Wu S F, Feng H, *et al.* Effects of different mulching models on soil moisture and summer maize yields [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, **36**(6): 699-708.
- [6] 程俊珊. 渭源地区旱地玉米覆膜种植增温效应及高产增效研究初报 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, **24**(1): 39-42. Cheng J S. Effects of film mulch on ground temperature and production of corn on dryland in Weiyuan county [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, **24**(2): 39-42.
- [7] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [J]. Ecology, 2000, **81**(9): 2359-2365.
- [8] 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.
- [9] 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]. Journal of Agricultural Science, 2014, **152**(4): 534-542.
- [10] 朱永莉, 吴金水, 韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 N₂O 释放的影响 [J]. 农业工程学报, 2004, **20**(3): 222-225. Zhu Y L, Wu J S, Han J G. Effects of clear plastic film mulching on soil N₂O discharge flux [J]. Transactions of the CSAE, 2004, **20**(3): 222-225.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李晓莎. 覆膜与施氮对旱作春玉米农田温室气体排放的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. 12-64. Li X S. Effect of plastic film mulching and nitrogen applying on greenhouse gases emissions in dryland maize field [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. 12-64.
- [14] Jiang C S, Wang Y S, Hao Q J, *et al.* Effect of land-use change on CH₄ and N₂O emissions from freshwater marsh in northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(21): 3305-3309.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, *et al.* Emission of N₂O and CO₂ and uptake of CH₄ in soil from a Satsuma mandarin orchard under mulching cultivation in central Japan [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2007, **76**(4): 279-287.
- [17] Keller M, Mitre M E, Stallard R F. Consumption of atmospheric methane in soils of central panama: effects of agricultural development [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1990, **4**(1): 21-27.
- [18] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3227-3238. Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(11): 3227-3238.
- [19] 阎佩云. 黄土旱塬旱作玉米农田不同栽培模式温室气体排放特征及影响因素 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. Yan P Y. Dry farmland greenhouse gases emission characteristics and its influencing factors of corn fields under different cultivation model on the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [20] 王立为. 旱地马铃薯田温室气体减排与增产协同机制和模式研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015. Wang L W. The coordination mechanism and pattern of greenhouse gas reduction and yield increase in potato field [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [21] 高琳. 不同农作措施对旱地农田温室气体排放的影响 [D]. 安徽: 安徽农业大学, 2016. 11-66.

- Gao L. Effect of different farming measures on greenhouse gases emission in arid areas farmland[D]. Anhui: Anhui Agricultural University, 2016. 11-66.
- [22] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田 CH_4 和 N_2O 排放通量研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 924-934.
- Li Z G, Zhang R H, Lai D M, *et al.* CH_4 and N_2O fluxes from cotton fields different in farming practices in northwestern China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(5): 924-934.
- [23] 张中杰, 朱波, 江长胜, 等. 川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放特征[J]. 生态学报, 2005, **24**(2): 131-135.
- Zhang Z J, Zhu B, Jiang C S, *et al.* CO_2 , N_2O and CH_4 emission from dry-land wheat ecosystem in hilly area of central Sichuan basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(2): 131-135.
- [24] 陈冠雄, 商曙辉, 于克伟, 等. 植物释放 N_2O 的研究[J]. 应用生态学报, 1990, **1**(1): 94-96.
- [25] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH_4 的影响[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(3): 54-58.
- Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on atmospheric CH_4 oxidation in soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(3): 54-58.
- [26] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤氧化大气甲烷影响的机制[J]. 农村生态环境, 2001, **17**(3): 30-34.
- Ding W X, Cai Z C. Mechanisms of nitrogen fertilizer suppressing atmospheric methane oxidation by methanotrophs in soils[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, **17**(3): 30-34.
- [27] 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.
- [28] Mei BL, Zheng XH, Xie BH, *et al.* Characteristics of multiple-year nitrous oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116** (D12): D12113, doi: 10.1029/2010JD015059.
- [29] Priemé A, Christensen S. Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**(8): 1165-1172.
- [30] 陶佳丽, 王凤新, 顾小小. 覆膜滴灌对温室气体产生及排放的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(3): 17-23.
- Tao J L, Wang F X, Gu X X. Advance in studies on effect of mulched drip irrigation on production and emission of greenhouse gas [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(3): 17-23.
- [31] Svensson B H, Rosswall T. In situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire [J]. *Oikos*, 1984, **43**(3): 341-350.
- [32] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, **11**(1): 94-97.
- Ding W X, Cai Z C. Mechanism of methane oxidation by methanotrophs and Effect of soil moisture content on their activity [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, **11**(1): 94-97.
- [33] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils [J]. *Chemosphere*, 1993, **26**(1-4): 715-720.
- [34] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和 CO_2 净交换通量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(4): 1018-1024.
- Li Z G, Zhang R H, Lai D M, *et al.* Effects of drip irrigation with plastic mulching on the net primary productivity, soil heterotrophic respiration, and net CO_2 exchange flux of cotton field ecosystem in Xinjiang, North-West China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(4): 1018-1024.
- [35] Gullledge J, Schimel J P. Moisture control over atmospheric CH_4 consumption and CO_2 production in diverse Alaskan soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(8-9): 1127-1132.
- [36] Guggenberger G, Kaiser K. Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation [J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 293-310.
- [37] 李小刚, 李凤民. 旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(23): 4630-4638.
- Li X G, Li F M. Soil organic carbon balance and nitrogen cycling in plastic film mulched croplands in rainfed farming systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(23): 4630-4638.
- [38] Wang Y P, Li X G, Hai L, *et al.* Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, **60**(4): 486-498.
- [39] Liu X E, Li X G, Hai L, *et al.* Film-mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**(4): 1434-1441.
- [40] 雷利国. 地膜覆盖对菜地 CO_2 和 CH_4 排放的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Lei L G. Study of effect of plastic film mulching on CO_2 and CH_4 emissions from a vegetable field [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [41] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报, 2015, **35**(23): 7625-7633.
- Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, *et al.* Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang plain, Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(23): 7625-7633.
- [42] 梁贻仓, 王俊, 刘全全, 等. 地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, **32**(5): 161-167.
- Liang Y C, Wang J, Liu Q Q, *et al.* Effects of soil surface mulching on soil organic carbon and its fractions in a wheat field in loess plateau, China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, **32**(5): 161-167.
- [43] 李世朋, 蔡祖聪, 杨浩, 等. 长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2489-2498.
- Li S P, Cai Z C, Yang H, *et al.* Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(5): 2489-2498.
- [44] 黄哲. 地膜覆盖和氮肥施用对菜地生态系统 CO_2 和 CH_4 排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- Huang Z. Effect of plastic film mulching and nitrogen application on CO_2 and CH_4 emissions from a vegetable field [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)