

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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

地膜覆盖和施氮对菜地 N_2O 排放的影响

倪雪¹, 郝庆菊¹, 陈世杰¹, 李晓茜¹, 石孝均^{1,2}, 江长胜^{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: 为了探讨地膜覆盖和不同施氮处理对菜地 N_2O 排放的影响, 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. 试验设置 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 N_2O 的排放特征和影响因素. 结果表明, 覆膜与常规两种种植方式对于菜地 N_2O 的排放体现出明显差异, 表现为辣椒季常规显著大于覆膜($P < 0.05$), 萝卜季为覆膜显著大于常规($P < 0.05$). 2014 年 5 月至 2016 年 4 月观测期间, 覆膜种植下无氮、低氮、中氮和高氮菜地 N_2O 年均累积排放量分别为 244.91、730.49、903.32 和 1 867.45 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 常规种植下 N_2O 年均累积排放量为 221.48、840.33、1 256.50 和 1 469.67 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 不同施氮梯度对于菜地 N_2O 的排放呈现为随施氮量增加 N_2O 的排放随之增加. 通过计算 N_2O 排放系数可知, 覆膜可以一定程度上降低辣椒季 N_2O 的排放系数, 而萝卜季则没有明显规律. 2014 年 5 月至 2015 年 4 月, 辣椒季常规和覆膜种植下均为低氮菜地的 N_2O 排放系数最高, 在萝卜季则显示为高氮排放系数最高; 2015 年 5 月至 2016 年 4 月, 则显示辣椒季为高氮菜地 N_2O 排放系数最高, 而萝卜季低氮菜地最高. N_2O 的排放通量和土壤氮素含量以及土壤温度呈显著相关关系, 而地膜覆盖可一定程度地增加土壤中氮素的含量, 进而影响菜地 N_2O 的排放通量.

关键词: N_2O 排放; 地膜覆盖; 不同施氮; 菜地

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0893-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806139

Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N_2O Emissions from a Vegetable Field

NI Xue¹, HAO Qing-ju¹, CHEN Shi-jie¹, LI Xiao-xi¹, SHI Xiao-jun^{1,2}, JIANG Chang-sheng^{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; 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 N_2O emissions from a chili-radish rotation system, field observations were conducted *in situ* from May 2014 to April 2016 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. Static opaque and gas chromatography was used to determine emissions. 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 N_2O emissions and the changes of soil carbon and nitrogen composition across all treatments were examined. The results demonstrated significant differences in N_2O emissions from the vegetable fields between mulching and no mulching treatments. The mean N_2O flux under no mulching was significantly greater than that of mulching during the chili growing season ($P < 0.05$), but the opposite was true during the radish growing season ($P < 0.05$). During the experimental period, the average annual cumulative N_2O emissions from nitrogen-free, low-nitrogen, medium-nitrogen, and high-nitrogen vegetable plots under mulching treatment were 244.91, 730.49, 903.32, and 1865.45 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively; the average annual cumulative N_2O emissions under no mulching treatment were 221.48, 840.33, 1256.50, and 1469.67 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The N_2O emissions from vegetable plots with different N application gradients showed an increase in N_2O emissions from vegetable plots as N application increased. By calculating the N_2O emissions coefficient, it was determined that the N_2O emissions coefficient was reduced to a certain extent under mulching treatment during the chili season, while there was no obvious trend in the radish season. From May 2014 to April 2015, the N_2O emissions coefficients of low-nitrogen application under two mulching treatments were both the highest under the same mulching levels during the chili growing season, but they were both the highest in the high-nitrogen application under two mulching levels during the radish growing season. From May 2015 to April 2016, the highest N_2O emissions coefficient was observed in the high-nitrogen application under two mulching treatments during the chili season; however, the lowest values were observed in the

收稿日期: 2018-06-14; 修订日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160); 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: jiangsc@126.com

low-nitrogen application under two mulching treatments during the radish growing season. Such results may be related to the duration of plastic film mulching and the type of plant. The N_2O fluxes were both significantly positively correlated to the content of soil N and soil temperature. Plastic film mulching can increase the soil N to a certain extent and can therefore can affect N_2O emissions.

Key words: N_2O emissions; plastic film mulching; nitrogen application; vegetable field

气候变暖作为全球性的环境问题之一,已经对人类的生产和生活及经济发展产生了巨大的影响,而温室效应是其产生的主要原因。 N_2O 是一种长期有效的温室气体,在100a的时间跨度中, N_2O 在对流层的增温效应比 CO_2 强300倍^[1]。 N_2O 含量占温室气体总量的比例相对较小,只有7.1%,但其全球增温潜力相对较大^[2]。大气中的 N_2O 浓度每年以0.2%~0.3%的速度增加,到2050年,大气中 N_2O 浓度将达到 $3.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3]。由此可见,减少 N_2O 的排放,有助于缓解气候变化。

农田生态系统目前被认为是 N_2O 的主要来源,约有84%的 N_2O 来自于农业活动^[4]。地膜覆盖与氮肥施用作为有效的作物增产措施,被广泛运用于农业生产中。中国是世界上地膜生产和使用量最多的国家^[5],同时氮肥的生产及消费量均居世界首位。地膜覆盖可以改善土壤的水热性质,从而对土壤中养分的有效性和微生物的活性产生影响,进而促进作物的生长和提高产量^[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 N_2O 的排放。目前,国内外有不少关于地膜覆盖及施氮分别作用对旱地土壤温室气体排放的研究报道^[8~10]。王乐^[11]的研究指出,半干旱黄土高原旱作覆膜玉米农田中,覆膜是土壤速效氮含量和 N_2O 浓度间关系中最关键的因素。王旭燕等^[12]的研究表明,旱作农田土壤 N_2O 累积排放通量随施氮量的增加而增大。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研究,探讨地膜覆盖和不同施氮处理下农田土壤 CH_4 和 N_2O 的排放规律及影响因素。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验地点位于西南大学试验农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℃,为亚热带季风气候,年均降水量为1 105 mm,年均相对湿度多在70%~80%,在全国属于高湿区。年日照时数1 276.7 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,其他主要理化性质有:有机质 $22.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $0.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,黏粒 $506.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $120.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CEC $23.46 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计与方法

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 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,萝卜季则分别为300、200、100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。作物栽培品种和农田管理等均按当地习惯进行,所有试验小区施入相同的K肥(100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以 K_2O 计)和P肥(150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以 P_2O_5 计),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, $\text{TN} \geq 46.4\%$,四川泸天化股份有限公司生产),P肥为过磷酸钙(“腾升”牌,合格品Ⅱ,有效 $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 12\%$,中华重庆涪陵化工有限公司生产),K肥为氯化钾(“中化”牌, $\text{K}_2\text{O} \geq 60\%$,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。

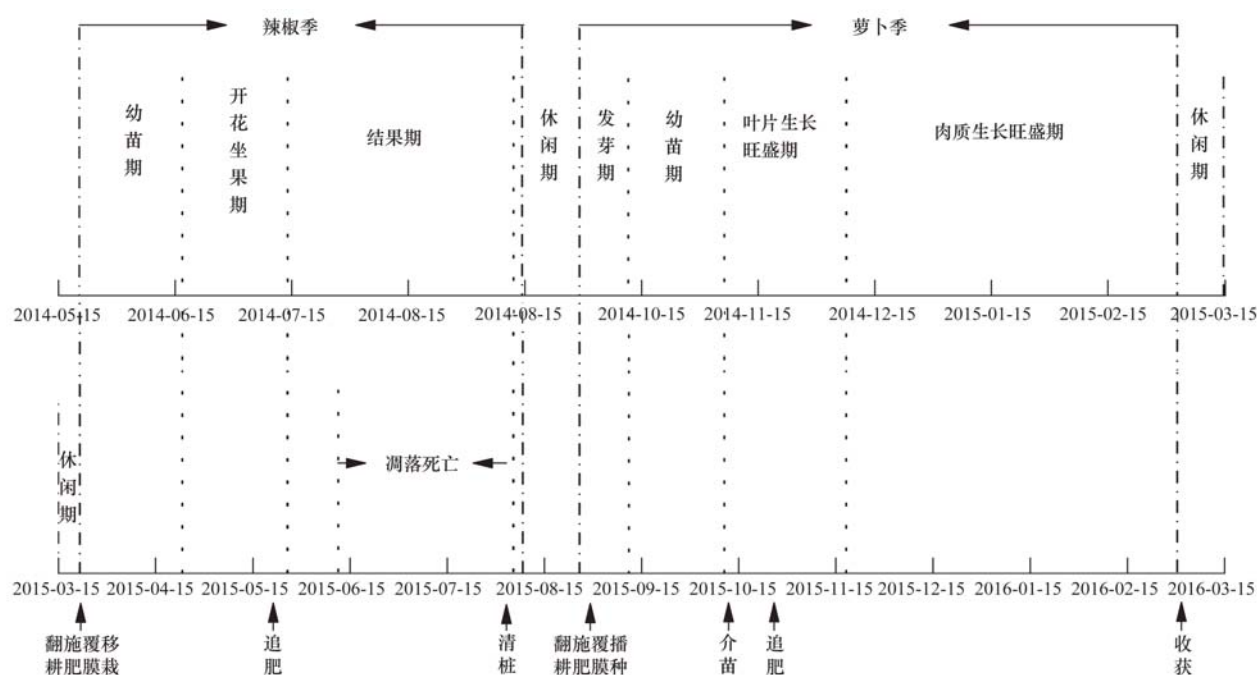


图1 不同生长季作物生长期及农作处理时间序列

Fig. 1 Timeline of crop growth and the harvesting

1.3 气体样品的采集和分析

1.3.1 气体样品的采集

土壤 N_2O 排放通量的测定采用静态暗箱法。箱体设计制作为分节组合式标准箱,由底座、延长箱和顶箱组成,具体材料及尺寸参见文献[13]。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。在作物生长期间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。每周采集一次气体样品,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 N_2O 含量,根据公式(1)计算各处理 N_2O 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:

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为排放通量 $[mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}]$; H 为箱内气室高度(cm); T 为采样器期间箱内平均温度($^{\circ}C$); 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 $(g \cdot cm^{-3})$; dc/dt 为采样期间箱内 N_2O 含量变化速率。 F 为负值时表示吸收,正值时为排放。

N_2O -N排放系数表示以 N_2O -N形式排入大气的氮素所占施入农田的氮肥的质量分数,公式如下:

$$N_2O\text{-N 排放系数} = (T_n - T_0) / \text{施氮量} \times 100\%$$

(2)

式中, T_n 为施氮处理 N_2O -N排放总量; T_0 为不施氮处理 N_2O -N排放总量。

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,要观测箱内外气温、土壤温度,温度由JM624型便携式测温计测定,作物生长期每天下午17:30左右记录覆膜和常规处理各小区10、20、30 cm深土壤温度和气温。分析温度与气体通量,以及分析覆膜对地温影响时采用的是气体采集时同步测定的气温与地温。

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($105^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$)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 $^{\circ}C$ 冰箱保存。测定的指标有:土壤含水率、土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、铵态氮、硝

态氮、碱解氮、易氧化有机碳(ROC)、微生物生物量碳(SMBC)、微生物生物量氮(SMBN)、可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)、可溶性全氮(DTN)、脲酶等,测定的方法见表1。

表 1 土壤测定的指标及其方法^[14]

Table 1 Analytical methods of various soil indicators			
测定指标	方法	测定指标	方法
全氮	凯氏定氮法	微生物生物量碳、氮	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
铵态氮、硝态氮	流动注射分析法	可溶性有机碳、氮	用去离子水提取, 用 Multi N/C 2100 分析仪测定滤液中碳、氮浓度
碱解氮	碱解扩散法	脲酶	苯酚钠-次氯酸钠比色法
易氧化有机碳	KMnO ₄ 氧化法测定		

1.4 数据整理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 将原始试验数据汇总整理后, 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N₂O排放的影响

图2展示了不同施氮处理下覆膜与常规菜地N₂O通量的季节变化。可以看出, 高、中、低施氮处理下, 覆膜与常规菜地N₂O通量均在观测初期出现一个大的峰值, 随着时间推移, N₂O通量趋于平缓, 无氮处理下的覆膜与常规菜地不仅在观测初期出现了一次峰值, 还在第二年的萝卜季初期出现了一次明显的峰值。高、中、低、无氮菜地覆膜种植下N₂O

的最大排放通量分别为1 433.53、1 444.18、1 036.58和274.45 μg·(m²·h)⁻¹, 常规种植下分别为1 477.63、1 707.60、1 348.54和191.45 μg·(m²·h)⁻¹。

从图2的表观上来看, 不同施氮处理下覆膜与常规的N₂O通量没有很大差异, 进一步进行配对t检验, 结果表明, 2014年5月至2016年4月辣椒季, 低、中、无氮组的N₂O排放通量常规种植均显著高于覆膜种植(P<0.05), 高氮组覆膜和常规种植间则无显著差异(P>0.05); 2014~2016年萝卜季, 中、高氮组N₂O排放通量覆膜均显著大于常规(P<0.05), 无、低氮组覆膜和常规间则无显著差异(P>0.05)。整个观测期间, 不同施氮处理下覆膜与常规菜地在各生长季的N₂O平均排放通量见表2。

表 2 不同施氮下覆膜和常规种植菜地N₂O排放通量/μg·(m²·h)⁻¹

Table 2 N ₂ O fluxes of different N application levels and mulching treatments from May 2014 to April 2016/μg·(m ² ·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
2014-05~2016-04	辣椒季	32.01	26.84	182.59	143.38	298.16	161.27	336.27	313.88
	萝卜季	30.25	38.68	55.38	59.35	64.44	85.10	84.48	190.19

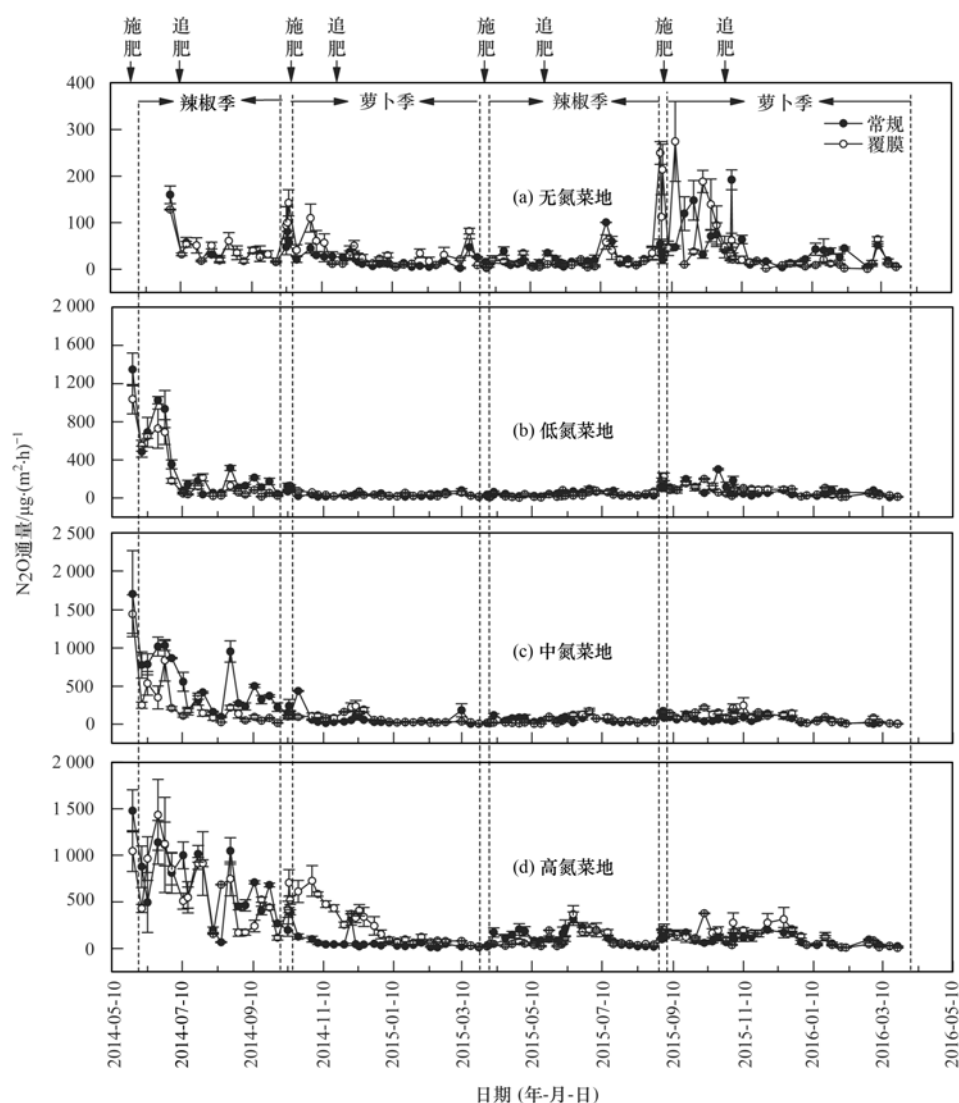
2.2 覆膜和常规种植下N₂O的累积排放量

从表3来看, 各处理菜地N₂O的累积排放量都呈现为正值, 表现为N₂O的排放。2014年5月至2015年4月的辣椒季, 各施氮处理菜地N₂O累积排放量均表现为常规大于覆膜, 萝卜季各施氮组菜地N₂O累积排放量则与辣椒季相反, 表现为覆膜大于常规, 其中高氮组菜地覆膜处理的N₂O累积排放量

高出常规处理4倍之多。2015年5月至2016年4月, 辣椒季和萝卜季各处理N₂O累积排放量趋势与第一年度相同, 各施氮组常规与覆膜处理N₂O累积排放量相差不大。配对t检验结果显示, 第一年度, N₂O累积排放量辣椒季显著大于萝卜季(P<0.05), 辣椒季、萝卜季以及全年的N₂O累积排放量常规和覆膜无显著差异; 第二年度则与前一年结果不同,

表 3 各施氮处理覆膜和常规种植下N₂O的累积排放量/mg·m⁻²

Table 3 Cumulative N ₂ O emissions in different N application levels under mulching and no mulching treatments/mg·m ⁻²									
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
2014-05~2015-04	辣椒季	93.21	89.70	1 036.22	826.51	1 724.95	869.69	1 740.04	1 685.75
	萝卜季	75.26	135.44	136.97	158.18	282.52	303.96	270.97	1 038.34
	总计	168.47	225.14	1 173.19	984.69	2 007.47	1 173.65	2 011.01	2 724.09
2015-05~2016-04	辣椒季	80.51	55.71	151.35	106.02	214.31	179.19	447.06	355.72
	萝卜季	193.98	208.97	356.11	370.27	291.21	453.80	481.26	655.08
	总计	274.49	264.68	507.46	476.29	505.52	632.99	928.32	1 010.80
全观测期总计		442.96	489.82	1 680.65	1 460.98	2 512.99	1 806.64	2 939.33	3 734.89

图2 不同种植季 N_2O 排放通量的季节变化Fig. 2 Seasonal changes in N_2O flux during the during the growing seasons of crops

N_2O 累积排放量表现为辣椒季显著小于萝卜季($P < 0.05$), 常规与覆膜种植下的辣椒季 N_2O 累积排放量表现为常规显著大于覆膜($P < 0.05$), 而萝卜季以及全年的 N_2O 累积排放量常规和覆膜则表现为无显著差异. 从整个观测期各处理菜地的累积排放量来看, 无氮和高氮菜地表现为覆膜大于常规, 低氮和中氮菜地则为常规大于覆膜. 配对 t 检验显示, 全观测期 N_2O 累积排放量常规和覆膜无显著差异.

2.3 不同施氮量对菜地 N_2O 排放的影响

施氮对于 N_2O 的排放影响较大. 从图3可以看出, 整个观测期间, 覆膜组和常规组在辣椒季和萝卜季的 N_2O 排放量均呈现为高氮 > 中氮 > 低氮 > 无氮, 且辣椒季常规组的 N_2O 排放量大于覆膜组, 而萝卜季覆膜组的 N_2O 排放量大于常规组. 单因素方差分析结果表明, 在辣椒季和萝卜季, 覆膜和常规种植下高氮菜地的 N_2O 排放量均显著高于无氮、低氮、中氮菜地($P < 0.05$). 在辣椒季, 常规种植下

的中氮菜地 N_2O 排放量还显著高于无氮和低氮菜地($P < 0.05$); 在萝卜季, 覆膜种植下中氮菜地 N_2O 排放量显著高于无氮菜地($P < 0.05$), 常规种植下低氮、中氮菜地 N_2O 排放量均显著高于无氮菜地($P < 0.05$).

表4为各处理菜地的 N_2O 排放系数, 配对 t 检验结果表明, 在两个观察年度的辣椒季和萝卜季, 常规与覆膜处理 N_2O 排放系数均无显著相关关系, 但两个年度的辣椒季 N_2O 排放系数都显示为常规略大于覆膜, 而萝卜季则没有明显的规律, 说明辣椒季覆膜能一定程度上降低 N_2O 的排放系数. 2014-05 ~ 2015-04 的辣椒季, 常规和覆膜种植下均为低氮菜地的 N_2O 排放系数最高, 在萝卜季则显示为高氮排放系数最高; 2015-05 ~ 2016-04 的辣椒季则显示为高氮菜地 N_2O 排放系数最高, 萝卜季显示为低氮菜地最高. 这可能与降水情况和种植季时间跨度长短有关, 具体原因则需要进一步进行研究.

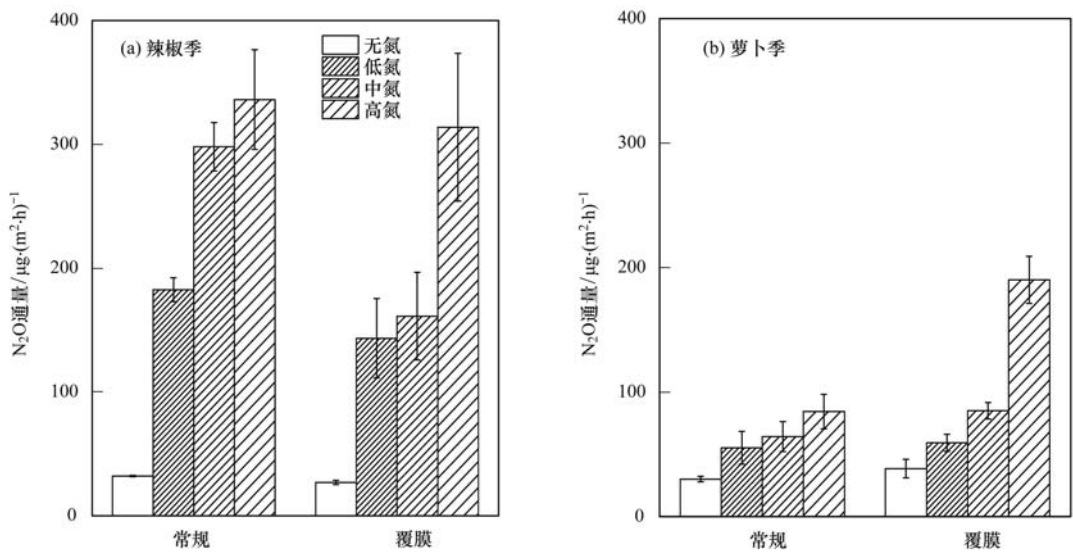


图 3 各种植季覆膜和常规种植下不同施氮菜地的N₂O排放通量

Fig. 3 Average N₂O flux in different N application levels under mulching and no mulching treatments

表 4 常规和覆膜种植下各施氮处理的N₂O排放系数/%

Table 4 N₂O emission factors of different N application levels under mulching and no mulching treatments/%

时间(年-月)	生长季	低氮		中氮		高氮	
		常规	覆膜	常规	覆膜	常规	覆膜
2014-05 ~ 2015-04	辣椒季	6.29	4.91	5.44	2.60	3.66	3.55
	萝卜季	0.62	0.23	1.04	0.84	0.65	3.01
2015-05 ~ 2016-04	辣椒季	0.47	0.34	0.45	0.41	0.81	0.67
	萝卜季	1.62	1.61	0.49	1.22	0.96	1.49

2.4 地膜覆盖对土壤温度的影响

从图 4 可以看出,覆膜和常规菜地的地下 5 cm 温度在整个观测期间具有相同的变化趋势,两年辣椒季的温度均高于萝卜季. 配对 *t* 检验结果表明,常规和覆膜菜地地下 5 cm 温度并没有显著差异. 对各种植季进行分析,发现只有第一年的辣椒季常规和覆膜菜地呈现出显著差异,表现为覆膜显著大于常规($P<0.05$),其他种植季均无显著差异. 这表明覆膜在辣椒季可以一定程度使地下 5 cm 温度升高.

2.5 环境因子对N₂O排放的影响

土壤N₂O的排放量与土壤理化性质息息相关,表 5 将众多土壤因子与N₂O排放量进行 Pearson 相关性分析. 结果表明,整个观测期间,常规菜地的N₂O排放量与温度、碱解氮和铵态氮呈极显著正相关($P<0.01$),覆膜菜地的N₂O排放量与温度呈显著正相关关系($P<0.05$),与铵态氮呈极显著正相关关系($P<0.01$),与 TN 呈极显著负相关关系($P<0.01$).

表 5 2014 ~ 2016 年土壤环境因子与N₂O排放通量相关关系¹⁾

Table 5 Relationship between soil environmental factors and N₂O flux from 2014 to 2016

	含水率	地下温度	有机质	碱解氮	硝氮	铵态氮	脲酶活性	ROC	TN	DOC
常规菜地	0.039	0.296 **	0.100	0.507 **	0.172	0.685 **	0.058	0.179	-0.253	0.270
覆膜菜地	0.119	0.227 *	-0.032	0.261	-0.020	0.441 **	-0.250	-0.060	-0.391 **	0.073

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

进一步对土壤环境因子进行主成分分析,结果如表 6 所示,常规菜地N₂O排放量的影响因素由 4 个主因子构成,累积贡献率达到 79.27%,主因子 1 包括温度、有机质、碱解氮、脲酶活性、TN、DOC、MBN 组成,贡献率达到 32.89%,一定程度上代表了土壤的营养状况和土壤微生物活性;主因子 2 由含水率、有机质、MBC 组成,贡献率达到 18.18%,

主要代表了土壤微生物活性状况;主因子 3 由硝氮、铵态氮、DON 组成,贡献率达 16.02%,代表土壤氮素的分布情况;主因子 4 由碱解氮、ROC 组成,代表了土壤氮素和碳素的分布. 覆膜处理菜地N₂O排放通量的影响因素也由 4 个主因子构成,累积贡献率达到 72.74%,其中主因子 1 由温度、有机质、硝氮、TN 和 DOC 组成,贡献率达到

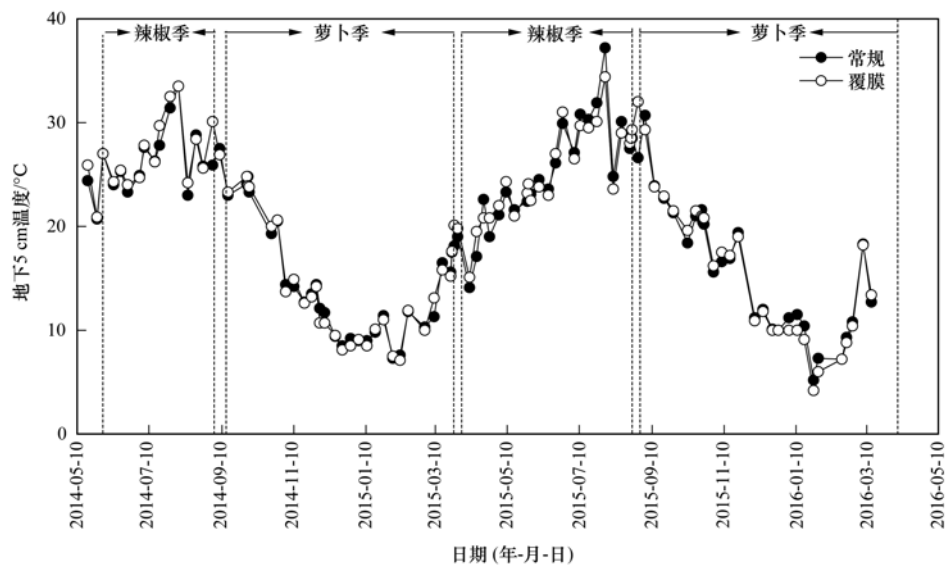


图4 各种植季覆膜和常规菜地的地下5 cm 温度

Fig. 4 Underground 5cm temperature of film and conventional vegetable fields in each growing season

25.37%，一定程度上代表了土壤的营养状况和氮素的分布；主因子2由碱解氮、铵态氮、DON组成，贡献率达到16.21%，基本都是典型的土壤氮素的指标；主因子3由ROC、DOC、MBN组成，贡献率

达到16.01%，一定程度上代表了土壤微生物的活性和土壤碳素的分布；主因子4由含水率、脲酶活性、MBC组成，贡献率达到15.14%，主要反映了土壤微生物活性。

表6 两种处理下菜地N₂O排放通量影响因素的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of the influencing factors of N₂O flux under two treatments

影响因素	常规处理				覆膜处理			
	主因子1	主因子2	主因子3	主因子4	主因子1	主因子2	主因子3	主因子4
含水率	-0.185	-0.796	-0.041	0.188	-0.151	0.078	0.137	0.826
温度	0.902	0.164	-0.028	0.056	0.938	-0.045	-0.113	0.042
有机质	0.627	0.561	0.344	-0.102	0.747	-0.307	0.344	-0.35
碱解氮	-0.566	-0.134	0.201	0.681	-0.042	0.906	-0.272	0.145
硝氮	0.256	0.11	0.885	-0.214	0.733	0.094	0.332	-0.294
铵态氮	0.394	0.273	0.54	0.474	0.476	0.78	-0.167	0.107
脲酶活性	0.905	0.232	0.031	-0.178	-0.164	0.024	0.4	-0.637
ROC	0.033	-0.061	-0.137	0.733	0.218	-0.066	0.646	-0.21
TN	0.752	0.382	0.319	-0.049	0.807	0.238	0.045	-0.139
DOC	0.712	0.417	-0.114	-0.264	-0.529	0.117	-0.576	-0.208
DON	0.223	0.272	-0.822	-0.096	0.113	-0.694	-0.174	0.246
MBC	-0.138	-0.892	0.145	-0.089	-0.228	-0.079	0.092	0.659
MBN	-0.73	0.193	-0.122	-0.377	-0.055	-0.062	0.877	0.191
贡献率/%	32.89	18.18	16.02	12.19	25.37	16.21	16.01	15.14

2.6 地膜覆盖对土壤氮素的影响

从图5可以看出，除DON(可溶性氮)和MBN(微生物生物量氮)之外，其它氮指标，包括土壤硝态氮、铵态氮、碱解氮和TN(总氮)在整个观测期间的覆膜和常规种植方式下具有基本一致的变化趋势。TN、碱解氮、铵态氮和硝态氮在第一年辣椒季初期都出现了较高的峰值，且都表现为覆膜大于常规(TN: 186.5 mg·L⁻¹ > 149.69 mg·L⁻¹，碱解氮: 212.31 mg·kg⁻¹ > 127.32 mg·kg⁻¹，铵态氮: 312.32 mg·kg⁻¹ > 237.58 mg·kg⁻¹，硝态氮: 172.17 mg·kg⁻¹ > 139.51 mg·kg⁻¹)。配对t检验显

示，此种植季，TN和铵态氮含量呈现为覆膜显著大于常规(P<0.05)，硝态氮和碱解氮含量覆膜和常规无显著差异。在第二年辣椒季，只有硝态氮和TN两个氮素指标在种植季初期出现了明显的峰，同样也表现为覆膜大于常规(硝态氮: 416.04 mg·kg⁻¹ > 128.31 mg·kg⁻¹，TN: 192.14 mg·kg⁻¹ > 69.79 mg·kg⁻¹)，配对t检验显示，硝态氮和TN两个指标的含量呈现为覆膜显著大于常规(P<0.05)，碱解氮和铵态氮则无明显差异。结合两年辣椒季情况来看，覆膜能显著提高土壤TN的含量，对碱解氮含量则无显著影响；硝态氮和铵态氮含量只在其中

一年的辣椒季呈现出显著影响,并表现为覆膜大于常规,但是其平均值在两年的辣椒季均表现为覆膜大于常规(第一年辣椒季:硝态氮 $82.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 53.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $119.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 55.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 第二年辣椒季:硝态氮 $251.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 120.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $27.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 25.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明覆膜在辣椒季可以一定程度提高土壤中铵态氮和硝态氮的含量. 在一年的萝卜季,覆膜

和常规两种种植方式下硝态氮、TN、铵态氮和碱解氮含量均没有明显差异,而在第二年的萝卜季均呈现显著差异并表现为覆膜大于常规($P < 0.05$). 从两年萝卜季各指标的平均值来看,除第一年萝卜季碱解氮含量表现为覆膜略小于常规(碱解氮: $67.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < 69.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其余均表现为覆膜大于常规,证明覆膜在萝卜季可以一定程度提高土壤中硝态氮, TN, 碱解氮和铵态氮的含量.

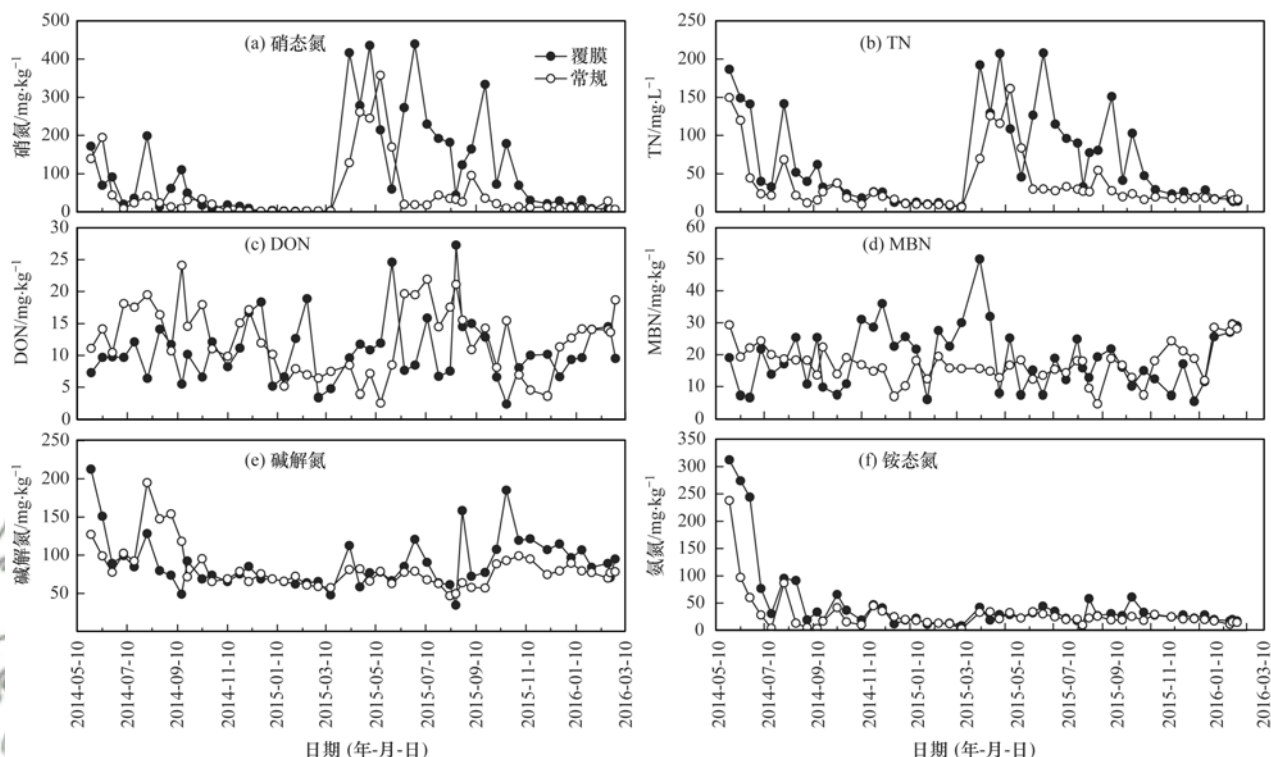


图5 覆膜和常规菜地土壤氮素在各种植季的变化

Fig. 5 Changes in soil N under mulching and no mulching treatments during the growing seasons of chili and radish

土壤中 DON 和 MBN 的含量变化并没有明显的规律,从图 5 可以看出, DON 和 MBN 的变化趋势呈锯齿形,且覆膜和常规两种种植方式也没有呈现较为一致的趋势. 配对 t 检验表明,土壤中 DON 的含量只在第一年辣椒季呈现为覆膜显著小于常规($P < 0.05$),其余种植季覆膜和常规并没有显著差异,但是各种植季土壤中 DON 的平均含量均表现为常规大于覆膜(第一年辣椒季: $15.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 9.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第一年萝卜季: $10.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 10.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第二年辣椒季: $13.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 12.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第二年萝卜季: $11.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 10.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 土壤中 MBN 含量则只在第一年萝卜季呈现出覆膜显著大于常规($P < 0.05$),其余种植季覆膜和常规也没有明显差异,各种植季土壤 MBN 平均含量在覆膜和常规种植两种方式下也没有明显规律,在第一年的辣椒季和第二年的萝卜季呈现为常规大于覆膜(第一年辣椒季: 20.59

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 15.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第二年萝卜季: $18.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 17.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在第一年的萝卜季和第二年的辣椒季呈现为覆膜大于常规(第一年萝卜季: $22.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 14.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第二年辣椒季: $19.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} > 15.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

3 讨论

3.1 地膜覆盖对菜地 N_2O 排放的影响

本试验研究结果表明,在辣椒季,无氮、低氮、中氮组常规处理菜地的 N_2O 排放量显著高于覆膜处理菜地($P < 0.05$);在萝卜季,中氮、高氮组覆膜处理菜地的 N_2O 排放量显著高于常规处理菜地($P < 0.05$). 由此可以看出,覆膜对于 N_2O 的排放是有明显影响的,这与众多学者的研究结果一致^[5, 6]. 土壤中 N_2O 的产生主要是通过硝化和反硝化作用进行. 硝化过程是在通气条件下,亚硝化和硝化微生物将铵盐转化为硝酸盐的过程;反硝化过程则是在

缺氧条件下, 由反硝化细菌将土壤中的硝酸盐或硝态氮还原成氮气或氧化氮的过程^[15]. 在辣椒季, 常规种植的 N_2O 排放量普遍高于覆膜种植, 主要是因为覆膜进一步推进了反硝化的进程. 有研究发现, 地膜覆盖可以使作物生育期提前, 并增加作物的产量^[16], 而作物的生育期可以对土壤的反硝化产生影响, 作物生长旺盛将增加土壤的反硝化能力. 作物生长旺盛时根部呼吸加快, 大量消耗土壤中 O_2 , 有利于反硝化, 根系周围存在大量的有机物质, 也利于土壤反硝化微生物活性增强. 土壤被地膜覆盖后, 在一定程度上可以阻隔或减缓土壤气体 N_2O 向大气的扩散和释放, 加之地膜覆盖可以使膜下土壤局部产生厌氧状态, 更加剧了土壤的反硝化作用, 使滞留在土壤中的 N_2O 在厌氧微生物的作用下更有机会进一步转化为 N_2 . 辣椒季高氮组常规和覆膜处理 N_2O 排放量无显著差异, 可能是因为高氮菜地中, NH_4^+ 的含量过高, 致使氨化细菌活跃并积累大量的 NO_2^- , 导致缺氧环境的产生, 引诱异养反硝化细菌的反硝化作用并产生 N_2O ^[17], 此时地膜覆盖产生的减缓 N_2O 排放的效应远不及氮肥施入导致的排放效应, 从而使得高氮菜地覆膜与常规处理 N_2O 排放量无显著差异. 萝卜季, 中氮、高氮组覆膜处理菜地的 N_2O 排放量显著高于常规菜地, 可能是因为萝卜季温度较低, 硝化与反硝化细菌受低温影响导致活跃度降低, 此时覆膜导致的作物生长旺盛和其所产生的厌氧环境虽促进了反硝化进程, 却又因温度等因素限制无法进一步反硝化为 N_2 . 另外, 在冬季, 覆膜的保温作用会使覆膜菜地的微生物活动较常规菜地活跃, 有利于反硝化细菌产生 N_2O , 加之覆膜使菜地含水率增高, 高水分会刺激反硝化进程^[18], 从而导致覆膜的 N_2O 排放量显著高于常规; 无氮、低氮菜地的覆膜和常规处理 N_2O 排放量无显著差别, 可能是因为本身土壤中的 NH_4^+ 底物不足, 地膜覆盖营造的反硝化环境影响不大, 故而无显著差别.

从表 2 可以看出, 各处理下辣椒季的 N_2O 排放量普遍要大于萝卜季. 主要原因有以下 3 点: 第一, 辣椒季土壤温度要高于萝卜季, 硝化和反硝化细菌比较活跃, 促进硝化和反硝化进程, 而两种进程都会产生 N_2O ; 第二, 辣椒季温度较高会促进土壤呼吸, 降低土壤 O_2 含量, 并促进厌氧区域的形成, 有利于反硝化反应进行; 第三, 作物类型对农田 N_2O 排放具有显著影响, 冯迪等^[6]的研究发现, 萝卜在生长过程中会消耗土壤中大量的氮素, 使微生物活动缺乏基质, 会使 N_2O 的生成受阻.

3.2 不同施氮量对菜地 N_2O 排放的影响

本试验研究结果表明, 辣椒季和萝卜季, 覆膜和常规种植下均表现出了高氮菜地 N_2O 排放量显著高于其他菜地($P < 0.05$), 这与众多学者的研究一致^[12, 19]. 辣椒季常规种植中氮菜地 N_2O 排放量显著高于低氮、无氮菜地($P < 0.05$); 萝卜季覆膜种植方式下中氮菜地 N_2O 排放量显著高于无氮菜地($P < 0.05$), 常规种植下低氮、中氮菜地 N_2O 排放量显著高于无氮菜地($P < 0.05$). 由此可以看出, 施氮与不施氮相比, N_2O 还是有显著变化的, 在低施氮量时对 N_2O 的排放影响较小. 农田施氮是非常重要的—种农作方式, 施用氮肥可以提高作物的产量, 同时也为土壤硝化反硝化提供了氮源. 有研究发现^[20], 土壤随着氮肥施用量的增加, N_2O 排放量与氮肥施用量会呈现非线性的关系, N_2O 排放量会随氮肥施用量增加而呈现指数形式增长, 特别是当施氮量超过作物产量最大需氮量时.

通过对图 3 的观察可以发现, 各处理菜地均在整个观测初期出现了一个峰值, 往后便趋于平缓. 观测初期正是在施肥之后, 可以说明施肥会导致 N_2O 出现一个大的排放. Ju 等^[21]在密集管理的低碳钙质土壤进行的田间试验中也证实, N_2O 排放的高峰总是由在土壤中施用大量的 NH_4^+ 或尿素肥料后的第一周, 在其他时期没有强烈的排放, 即使土壤中硝酸盐的浓度很高, 也仅占全年 N_2O 排放量的一小部分.

3.3 环境因子对 N_2O 排放的影响

相关分析结果表明, 常规处理菜地的 N_2O 排放通量与温度、碱解氮、铵态氮均呈极显著正相关($P < 0.01$), 覆膜处理菜地 N_2O 排放量与温度呈显著正相关($P < 0.05$), 与铵态氮呈极显著正相关($P < 0.01$), 与 TN 呈极显著负相关($P < 0.01$). 进一步进行主成分分析后发现, 土壤 N_2O 排放通量主要与土壤营养状况和土壤氮素有关. 土壤温度方面, 有大量研究认为农田 N_2O 的产生随温度升高而增加^[22, 23]. 然而温度升高并不会对田间土壤 N_2O 排放产生大的影响, 但在水分和底物不是限制因子时, 温度则能极大促进 N_2O 的排放. 土壤营养状况和氮素分布对于 N_2O 排放的主要影响在于能够为土壤中的微生物提供能量, 而且为反硝化过程提供了反应底物. 相关性分析可以看出, 无机氮素形态对 N_2O 的排放影响较大. 土壤微生物将 NH_4^+ 氧化为 NO_3^- 的硝化过程中、将 NO_3^- 、 NO_2^- 转化成低价氮的氧化物的反硝化过程中, 都会有 N_2O 的产生^[6]. 另外土壤中的碳素对于 N_2O 排放的影响也不可忽视. 王丽

媛等^[24]的研究认为,一般土壤微生物适宜的有机质 C/N 比值为(25~30)/1. 如果 C/N 大于这个值,则有机质分解缓慢,微生物活性弱, N₂O 排放受到抑制,反之,则会促进 N₂O 的排放. C/N 低的有机物分解时所排放的 N 超过分解有机质微生物的需要,从而有利于 N₂O 的生成.

3.4 地膜覆盖对土壤氮素的影响

氮素是植物生长和发育所必须的元素,维持土壤中氮素的高水平可以保证作物产量. 本试验研究表明,地膜覆盖可以一定程度上增加土壤中硝态氮、铵态氮和 TN 的含量,对于碱解氮的增加则不太明显,并且在施肥后一段时间,覆膜和常规两种种植方式下土壤硝态氮、铵态氮和 TN 的含量都出现了明显的高峰. 这说明氮肥能够很好地补充土壤中的氮素,而地膜覆盖可以减少土壤中的氮素流失. 这是因为地膜覆盖使土壤微生物增加,增强了微生物的活性,可以加速土壤有机质的分解和转化. 除此之外,地膜覆盖还有阻隔作用,可以减少土壤中氮素的挥发,同时还可以防止雨水冲刷导致的土壤氮素的淋溶损失. 李桢等^[25]对西南地区辣椒地氮素分布的研究发现,地膜覆盖可以增加土壤中 TN, 硝态氮, 铵态氮和碱解氮的含量; 宋文元^[26]对玉米地氮素分布的研究发现,覆膜处理的氮素含量远远高于不覆膜的氮素含量,然而氮素变化并不呈现一定的规律; 汪景宽等^[27]的研究发现,长期地膜覆盖对棕壤全氮影响较小,碱解氮的含量有所下降,土壤上层的硝态氮含量明显增加. 由此可见,地膜覆盖对于土壤氮素的增加并没有普遍的规律. 土壤氮素的投入主要依赖于施肥补给,包括氮素化肥和有机肥^[28]. 土壤氮素的循环还要受到固氮、氨化、硝化和反硝化作用的影响. 因此,地膜覆盖对于土壤氮素含量变化的影响机制还需要从施肥种类、蔬菜种类以及土壤类型等方面进行进一步的研究.

在本试验中,土壤中 DON 和 MBN 的含量变化并没有明显的规律,且覆膜和常规两种种植方式也没有呈现较为一致的趋势. 覆膜在一定程度上减少了土壤中 DON 的含量,对于土壤中 MBN 的含量则没有产生明显的影响. 土壤氮素可以很好地反映土壤的营养状况,而土壤微生物量能够预示土壤有机质等土壤理化性质的变化趋势^[29]. 土壤微生物态氮是土壤潜在氮库中最重要的氮源^[30]. 付鑫等^[31]在玉米田进行的研究发现,覆膜可以增加土壤中微生物氮的含量; 张帆等^[32]的研究发现长期地膜覆盖能够显著提高 0~30 cm 土层的土壤养分、微生物量碳、氮含量和物质间的转化速度. 结合本研究

结果来看,地膜覆盖对于土壤微生物量氮的影响可能跟覆膜时间长短,作物种类等因素有关,故而本试验并没有取得与其他学者一致的结果.

4 结论

(1) 地膜覆盖对 N₂O 排放通量有显著影响. 春夏季覆膜可显著减少 N₂O 的排放量,秋冬季则相反. 覆膜和常规种植下, N₂O 的排放呈现一定的季节规律,菜地生态系统为 N₂O 的源,辣椒季 N₂O 的平均排放通量高于萝卜季.

(2) 不同施氮量对 N₂O 排放的影响呈现为随施氮量增加, N₂O 排放量随之增加. 因此施氮时应避免氮的过度施入.

(3) N₂O 的排放通量和土壤氮素含量以及土壤温度呈显著相关关系,而地膜覆盖可以一定程度上增加土壤中氮素的含量,进而影响菜地 N₂O 的排放通量.

参考文献:

- [1] IPCC. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007 [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.
Yi Q, Pang Y W, Yang S H, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(8): 1432-1437.
- [3] Rodhe H. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. Science, 1990, 248(4960): 1217-1219.
- [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, 2006, 363(1492): 789-813.
- [5] 郑磊, 江长胜, 孙丽娟, 等. 地膜覆盖对菜园紫色土壤环境因子及 N₂O 排放的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(30): 82-87.
Zheng L, Jiang C S, Sun L J, et al. Effects of plastic film mulching on the environmental factors and nitrous oxide emissions in purple soil of vegetable fields [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(30): 82-87.
- [6] 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 等. 地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4380-4389.
Feng D, Hao Q J, Zhang K L, et al. Effects of plastic film mulching on nitrous oxide emissions from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4380-4389.
- [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 emission from cotton fields in arid land [J]. The Journal of Agricultural Science, 2014, 152(4): 534-542.
- [10] 朱咏莉, 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 N_2O discharge flux [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, **20**(3): 222-225.
- [11] 王乐. 半干旱黄土高原旱作覆膜玉米农田氧化亚氮排放特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. 26-46.
- Wang L. Nitrous oxide flux characteristics of maize fields with plastic mulching in semiarid Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. 26-46.
- [12] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4 、 N_2O 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 CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [13] Jiang C S, Wang Y S, Hao Q J, *et al.* Effect of land-use change on CH_4 and N_2O emissions from freshwater marsh in northeast China[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(21): 3305-3309.
- [14] 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.
- [15] 时亚文, 李宙炜, 阳剑, 等. 农田系统氨挥发与温室气体排放研究进展[J]. 作物研究, 2011, **25**(4): 621-625.
- Shi Y W, Li Z W, Yang J, *et al.* Research progress on ammonia volatilization and greenhouse gas emissions in farmland system [J]. Crop Research, 2011, **25**(4): 621-625.
- [16] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(2): 205-210.
- Wang J, Li F M, Song Q H, *et al.* Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(2): 205-210.
- [17] Yang L Q, Zhang X J, Ju X T. Linkage between N_2O emission and functional gene abundance in an intensively managed calcareous fluvo-aquic soil [J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 43283, doi: 10.1038/srep43283.
- [18] Mei B L, Zheng X H, Xie B H, *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.
- [19] 柴雪思. 地膜覆盖和氮肥施用对菜地生态系统 N_2O 排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- Chai X S. Effect of plastic film mulching and nitrogen application on nitrous oxide emission from a vegetable field[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [20] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[A]. 见: 中国气象学会2008年会议论文集[C]. 北京: 中国气象学会, 2008.
- [21] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: a case study on the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2011, **124**(3): 450-458.
- [22] 吕佩毓. 不同施氮水平对玉米农田生长季 CO_2 、 N_2O 排放通量的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- Lü P Y. The effects of nitrogen application on CO_2 and N_2O emission flux in the growing season of the maize field [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011.
- [23] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, **39**(1): 1-8.
- Xu W B, Liu W P, Liu G S. Effect of temperature on N_2O emissions from sub-tropical upland soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(1): 1-8.
- [24] 王丽媛, 孙洁梅, 徐荣. 植物残体施用对土壤排放 N_2O 的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2006, **29**(3): 26-30.
- Wang L Y, Sun J M, Xu R. Effect of plant residual application on N_2O emission [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, **29**(3): 26-30.
- [25] 李桢, 王佳玮, 雷利国, 等. 地膜覆盖对辣椒地土壤氮素的影响[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(21): 134-140.
- Li Z, Wang J W, Lei L G, *et al.* Effect of plastic film mulching on soil nitrogen in pepper field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, **32**(21): 134-140.
- [26] 宋文元. 地膜覆盖对土壤氮素矿化的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Song W Y. Effects of plastic film mulching on soil nitrogen mineralization[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [27] 汪景宽, 张继宏, 须湘成, 等. 长期地膜覆盖对土壤氮素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, **2**(2): 125-130.
- Wang J K, Zhang J H, Xu X C, *et al.* Effect of long-term covering with plastic film on characteristics of nitrogen in soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1996, **2**(2): 125-130.
- [28] 李凤霞, 王长军. 土壤氮素转化及相关微生物过程研究[J]. 宁夏农林科技, 2018, **59**(4): 37-40.
- Li F X, Wang C J. Study on soil nitrogen transformation and the related microbial process[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, **59**(4): 37-40.
- [29] Powlson D S, Prookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, **19**(2): 159-164.
- [30] Tu C, Ristaino J B, Hu S J. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems-Effects of organic inputs and straw mulching[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(2): 247-555.
- [31] 付鑫, 王俊, 赵丹丹. 地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(3): 239-243.
- Fu X, Wang J, Zhao D D. Effects of plastic film mulching on soil carbon and nitrogen fractions in a dryland spring maize field on the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(3): 239-243.
- [32] 张帆, 王晨冰, 赵秀梅, 等. 果园垄膜覆盖对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. 核农学报, 2018, **32**(7): 1448-1455.
- Zhang F, Wang C B, Zhao X M, *et al.* Effect of the ridge film mulching on soil microbial biomass carbon and nitrogen and soil basal respiration in dryland apple orchard[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, **32**(7): 1448-1455.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Heath Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)