

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

地膜覆盖对菜地生态系统 N_2O 排放的影响

冯迪¹, 郝庆菊¹, 张凯莉¹, 石将来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 400715; 2. 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地, 重庆 400715)

摘要: 为了探讨地膜覆盖对菜地 N_2O 的排放通量、土壤剖面 N_2O 浓度以及土壤温度和湿度的影响, 选取西南地区常见菜地(辣椒-萝卜轮作)为研究对象, 采用静态暗箱/气相色谱法, 进行了为期1 a的野外观测实验. 结果表明, 在辣椒季, 常规处理(不覆膜) N_2O 的平均排放通量为 $1000.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜处理为 $400.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜显著低于常规处理($P < 0.05$); 而在萝卜季, N_2O 的平均排放通量则表现为覆膜处理 $[128.1 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$ 高于常规处理 $[107.8 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$, 但两者差异未达到显著水平($P > 0.05$). 覆膜和常规菜地土壤中 N_2O 含量均基本随土层深度的增加而增加, 表现为: $30 \text{ cm} > 20 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$, 相同处理各层次土壤 N_2O 含量间均呈显著相关, 不同处理相同深度处的土壤 N_2O 含量间也存在显著的正相关关系. 对不同土层中的 N_2O 含量与地表 N_2O 排放通量的相关性分析可得出, 常规处理各土层处的 N_2O 含量与地表 N_2O 排放通量呈显著正相关关系. 覆膜处理的 N_2O 排放通量仅与 30 cm 深土壤中的 N_2O 含量存在显著正相关关系. 通过对土壤湿度和温度的观测可以得出, 地膜覆盖对土壤的增温效应在夏季更加明显, 对土壤的保水作用在秋冬季更加突出. 相关性分析和主成分分析结果表明, 土壤中氮素形态是决定农田 N_2O 排放最重要的因素, 其中常规菜地 N_2O 排放主要受土壤中总氮含量的影响, 而覆膜菜地 N_2O 的排放对土壤中无机态氮含量的变化更加敏感.

关键词: 西南地区; 地膜覆盖; 菜地; N_2O 排放; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4380-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702002

Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field

FENG Di¹, HAO Qing-ju¹, ZHANG Kai-li¹, SHI Jiang-lai¹, 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 400715, China; 2. National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400715, China)

Abstract: Considering the common cropping system (chili-radish rotation) in Southwest China, the objective of this study is to explore the effect of plastic film mulching on N_2O flux, N_2O concentrations in the soil profile, soil temperature, and humidity from a vegetable field. The method of the static opaque chamber was used and the experimental period lasted for one year. The results showed that the average flux of N_2O was $1000.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ in the conventional treatment and $400.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ in the film mulching treatment during the chili growing period. The N_2O flux of the film mulching treatment was significantly lower than that of conventional treatment ($P < 0.05$). However, in the radish growing season, the N_2O flux of the film mulching treatment was higher than that of conventional treatment, but the difference between the two treatments was not significant ($P > 0.05$). N_2O concentrations in the soil profile of the two treatments both increased with the increase in soil depth. The N_2O concentrations showed significant correlations among the different soil profiles of each treatment; meanwhile, there was also a significant correlation between soil N_2O concentrations at the same soil depth in different treatments. There was a significant positive correlation between the N_2O concentration in different profiles and N_2O fluxes in surface soils in the conventional treatment, but the N_2O flux under the plastic mulching film treatment was only positively correlated with the N_2O concentrations of 30 cm deep soil. The soil moisture and temperature observations showed that the effect of plastic film mulching on soil temperature was more significant in summer and the soil moisture was more prominent in autumn and winter. However, the results of the correlation analysis and principal component analysis showed that N_2O emissions were mainly determined by the distribution of nitrogen in the soil and were affected by the change in soil total nitrogen content in the conventional treatment but N_2O emissions were more sensitive to the variation in soil inorganic nitrogen in the film mulching treatment.

Key words: Southwestern China; plastic film mulching; vegetable field ecosystem; N_2O emissions; influencing factors

地膜覆盖被称为是农业耕作史上的“白色革命”^[1-4], 地膜覆盖可以改善土壤的水热性质, 而对土壤中养分的有效性和微生物的活性产生变化, 并促进作物的生长和提高农作物产量. 2014年

收稿日期: 2017-02-02; 修订日期: 2017-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2013A009)

作者简介: 冯迪(1993~), 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: 1577648947@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangcs@126.com

我国地膜覆盖面积近 3 亿亩,地膜投入量 144 万 t 以上,应用区域已从北方干旱、半干旱区域扩展到南方的高山、冷凉地区,覆盖作物种类也从经济作物扩大到大宗粮食作物.我国西南地区每年春旱严重,为了提高土壤的保水、耐旱能力,同时防止倒春寒,当地农民往往采用地膜覆盖方法种植蔬菜、烟草和油菜等.据统计,2013 年重庆市和四川省的薄膜使用总量分别达到了 4.1 万 t 和 12.7 万 t^[5].氧化亚氮(N_2O)是一种重要的温室气体,其在大气中的停留时间长达 121 a,100 a 时间尺度单位质量的 N_2O 引起的温室效应约是同质量 CO_2 的 298 倍^[6]. N_2O 的排放源主要有化石燃料的燃烧、土壤释放、生物物质燃烧等^[7],其中农业是一个非常重要的排放源,施氮是影响农田生态系统 N_2O 排放的最重要影响因子之一^[8].杨俊等^[9]对川渝地区农业生态系统 N_2O 排放研究认为,川渝地区农田旱作对川渝地区农田 N_2O 直接排放量的贡献量最大,占农田 N_2O 直接排放总量的 81.4%.

从目前的研究结果来看,地膜覆盖对农田生态系统 N_2O 的排放具有显著影响.Nishimura 等^[10]研究发现,覆膜创造出的高温高湿低氧环境有利于 N_2O 产生, N_2O 排放通量明显增大;而 Berger 等^[11]则认为覆膜会促进植物的 N 吸收,减少土壤无机 N 含量,抑制土壤微生物的硝化和反硝化作用,使 N_2O 排放减少.国内则主要是在西北地区作了少量研究,朱咏莉等^[12]研究表明,与不覆膜相比,覆膜条件下地表和耕层 10、20 cm 土层处 N_2O 排放通量显著增加;而阎佩云等^[13]则认为覆膜对土壤 N_2O 排放没有显著影响.由于地膜的覆盖,改变了土壤的基本性质,对土壤水分、温度、微生物和养分等产生变化,而这些性质的变化将对土壤内在的平衡体系造成什么样的影响?因此,本文以西南地区采用较多的菜地为研究对象,采用静态箱/气相色谱法,原位对辣椒-萝卜轮作菜地进行了覆膜条件下 N_2O 排放及其环境因子的观测研究.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验地点选在位于西南大学实验农场的农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站(106°26' E, 30°26' N),海拔 230 m,年均气温 18.3℃,为亚热带季风气候.年平均降水量为 1 105 mm,年平均相对湿度多在 70%~80%,在全国属高湿区.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 值在 6.8 左右,其他主要理化性质有:有机质 25.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 1.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 56.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总磷 646.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 5.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总钾 9.44 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效钾 102.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 实验设计与方法

本实验田间种植作物为辣椒-萝卜轮作,辣椒品种为龙椒一号,重庆龙胜种子经营部购买;萝卜品种为九斤王,广西横县子龙商贸有限公司购买.实验地膜选用 0.005 mm 聚乙烯透明薄膜.本实验设置覆膜和不覆膜两种种植方式,样地总面积为 15 m×8 m,实验前深翻 3 遍,并平整地块,使样地耕层土壤尽可能均匀,样地平整.在样地内平地起垄,垄长 2.8 m、宽 0.8 m、高 0.15 m,垄间距为 0.4 m,覆膜和常规种植各设置 10 个小区.两种种植方式田间管理均一致,种植之前磷钾肥(过磷酸钙、氯化钾)作为基肥一次性施入,氮肥(尿素)则在基肥和追肥时各施一半,辣椒季氮肥施用总量为 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,萝卜季为 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.两种处理各选择 3 个不相邻的小区内分别埋入 1 个长 50 cm,宽 50 cm,高 15 cm 的不锈钢底座,底座与样地齐平(底座内辣椒季栽 2 窝辣椒苗,每窝 2 株;萝卜季播种 2 窝萝卜籽,每窝 4~5 株,定苗后控制在 2 株),上端有深、宽各 3 cm 的密封水槽.

2014 年 5 月 18 日移栽辣椒苗,2014 年 7 月 5 日追施氮肥,辣椒分批收获,于 2014 年 9 月 23 日移除辣椒枝并翻耕菜地土壤,农闲期间照常采样.2014 年 10 月 1 日进行菜地翻耕、施肥、覆膜和点种萝卜籽,2014 年 11 月 28 日追肥,于 2015 年 3 月 16 日一次性收获.除基肥和追肥外,农地不再施用其他化学品,每次施基肥、追肥和大雨后均连续监测 3 d.所有农事活动见图 1.

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].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. 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.

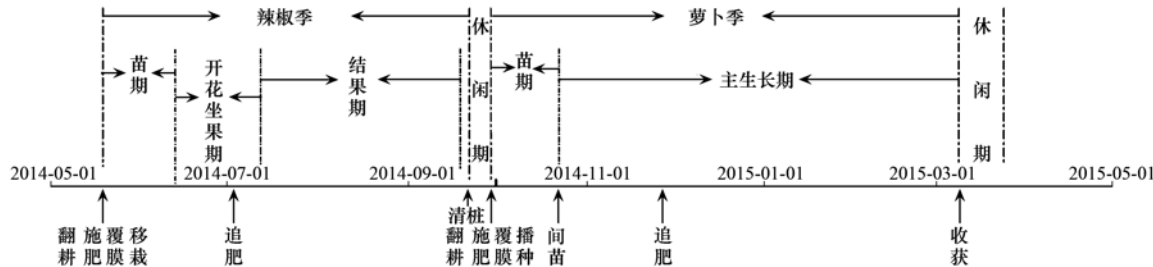


图 1 两生长季作物生长期及农作处理时间示意

Fig. 1 Growth and development of crops and the management of fields

覆膜和常规(不覆膜)两个处理土壤剖面 N_2O 浓度测定采用扩散法. 该气体扩散系统由 4 部分组成:集气管、导气管、橡胶塞和三通阀. 集气管是一根圆柱形的 PVC 管(直径 5 cm, 容积 $1\,000\text{ cm}^3$), 管端有橡胶塞, 导气管是一根聚乙烯塑料管(内径 1mm). 集气管管壁上钻有 4 排每排有 20 个直径均为 3 mm 的孔洞, 便于土壤空气与集气管内空气的交换, 两端用橡胶塞密封后洞口朝下埋在土里, 导气管一端穿过橡胶塞伸到集气管中央, 另一端垂直伸出地表并在顶端配有一个三通阀. 在实验开始前一个月, 将这套装分别埋设在 10、20 和 30 cm 深的土里以使集气管内气体浓度达到平衡. 采样时, 用 60 mL 注射器依次从各深度的气体扩散系统中抽取气体, 并及时送到实验室进行分析 N_2O 浓度. 测定完毕后关闭三通阀, 使漏斗内气体与大气处于不可交换状态, 直至下一次测定. 每个处理设 4 个重复.

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, 并计算各处理排放通量. N_2O 采用 ECD 检测器, 载气为高纯 N_2 , 具体分析及工作条件见文献[15]. 气体的通量表示单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化, 根据 4 个气样浓度随采样时间的变化速率计算^[16], 用公式表示为:

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

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

采样期间采样箱内 N_2O 的含量变化速率. F 为负值时表示吸收, 为正值时表示排放.

1.3.3 其他影响因子

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 ($105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) 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°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(LOC)、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^[17].

表 1 土壤测定的指标及其方法

Table 1 Methods of determination of various indicators of soil	
测定指标	方法
全氮	凯氏定氮法
铵态氮、硝态氮	流动注射分析仪
碱解氮	碱解扩散法
易氧化有机碳	KMnO_4 氧化法测定
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
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
脲酶	苯酚钠-次氯酸钠比色法

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 8.1 进行作图, 再利用 SPSS 16.0 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 N_2O 排放通量的影响

图 2 展示了在不同处理下 N_2O 排放通量季节变化。从中可知, 在辣椒季, 常规处理下 N_2O 的平均排放通量为 $1\,000.0\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜处理为 $400.6\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜处理 N_2O 排通量显著低于常规处理($P < 0.05$)。在萝卜季, 常规处理 N_2O 的平均排放通量为 $107.8\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜处理为 $128.1\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜处理 N_2O 排通量与常规处理下 N_2O 排放通量差异不大($P > 0.05$)。辣椒季常规处理下 N_2O 累积排放量为 $30.03\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 覆膜处理为 $11.22\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 覆膜处理 N_2O 累积排放量显著低于常规处理($P < 0.05$)。萝卜季常规处理 N_2O 累积排放量为 $3.83\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 覆膜处理为 $4.45\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 常规处理 N_2O 累积排放量小于覆膜处理。全年覆膜处理 N_2O 累积排放量为 $15.67\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 常规处理 N_2O 累积排放量为 $33.86\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。覆膜处理 N_2O 累积排放量显著低于常规处理($P < 0.05$)。

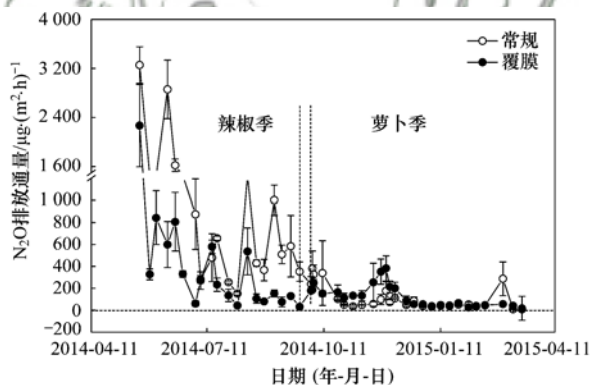


图 2 施氮处理下覆膜和常规菜地 N_2O 排放通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in N_2O emissions from mulching and conventional farmlands under nitrogen fertilizer

2.2 地膜覆盖对菜地土壤剖面 N_2O 含量的影响

图 3 展示了不同土层深度 N_2O 含量季节变化。从中可知, 辣椒季土壤剖面的 N_2O 含量表现为: 10 cm 和 20 cm 深度处覆膜处理基本高于常规处理, 30 cm 深度处覆膜处理土壤 N_2O 含量小于常规处理土壤的 N_2O 含量。 N_2O 含量基本随土层深度的增加而增大。在 2014 年 5 月 17 日施肥后约一周覆膜和

常规农田的 N_2O 含量均出现了极高值; 尤其在 2014 年 7 月 5 日追肥后一周覆膜农田的 N_2O 含量明显高过常规处理($P < 0.05$)。萝卜季时覆膜和常规处理农田各土壤剖面的 N_2O 含量均较低, 各土层深度处覆膜和常规处理土壤的 N_2O 含量差异并不明显($P > 0.05$)。

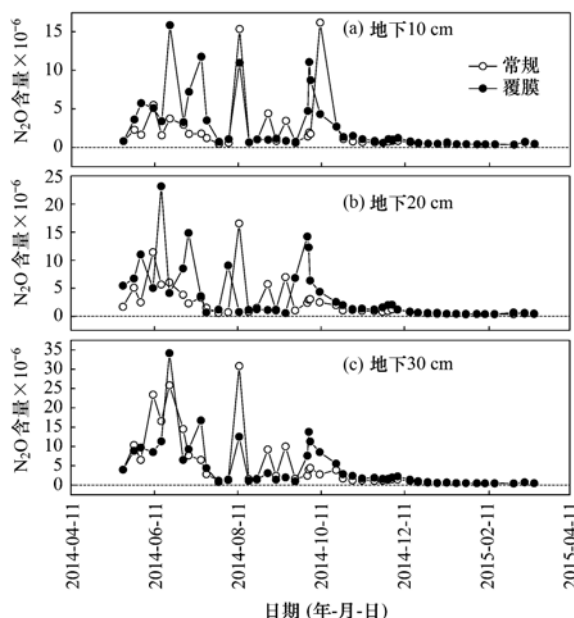


图 3 土壤剖面上覆膜和常规菜地的 N_2O 含量

Fig. 3 N_2O concentrations in mulch-treated and conventional farmlands

表 2 展示了不同土层 N_2O 含量间相关关系。从中可知, 无论常规还是覆膜菜地, 各处理 10、20 和 30 cm 深土壤中 N_2O 含量间均存在极显著正相关关系。对覆膜和常规处理菜地同一土层深度土壤中 N_2O 含量进行相关性分析可知, 不同处理同一土层深度土壤中 N_2O 含量间依然存在显著的相关关系, 10 cm 处覆膜和常规处理间 $r = 0.57$ ($P < 0.01$), 20 cm 处覆膜和常规处理间 $r = 0.52$ ($P < 0.01$), 30 cm 处覆膜和常规处理间 $r = 0.71$ ($P < 0.01$), 说明覆膜和常规处理土壤剖面中 N_2O 含量具有相似的变化趋势。

表 3 展示了土壤剖面的 N_2O 含量与 N_2O 排放量间的相关关系。从中可知, 常规处理的 N_2O 排放与 10 cm 土壤剖面的 N_2O 含量存在显著性相关关系, 与 20 cm、30 cm 土壤剖面的 N_2O 含量呈极显著正相关关系; 覆膜处理的 N_2O 排放仅与 30 cm 土壤剖面的 N_2O 含量存在显著正相关关系; 说明常规处理的 N_2O 排放与土壤剖面的 N_2O 含量间变化一致, 关系密切。

表 2 菜地土壤剖面的N₂O含量相关关系¹⁾

土壤深度	常规处理			覆膜处理		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm
10 cm	1			1		
20 cm	0.70 **	1		0.97 **	1	
30 cm	0.58 **	0.92 **	1	0.94 **	0.96 **	1

1) * * 代表在 0.01 水平上达到显著

表 3 菜地土壤剖面的N₂O含量与N₂O排放间的相关关系¹⁾

Table 3 Correlations between N ₂ O concentrations and N ₂ O emissions of different soil profiles		
项目	常规处理N ₂ O排放	覆膜处理N ₂ O排放
10 cm 处N ₂ O含量	0.32 *	0.22
20 cm 处N ₂ O含量	0.63 **	0.24
30 cm 处N ₂ O含量	0.68 **	0.29 *

1) * 代表在 0.05 水平上达到显著, * * 代表在 0.01 水平上达到显著

2.3 地膜覆盖对土壤温度和水分的影

图 4 展示了常规和覆膜处理下土壤湿度和温度的季节变化. 从中可知, 辣椒季常规和覆膜处理土壤含水率差异不大, 都于 2014 年 8 月 4 日达到含水率最低值 6.41% 和 7.35%, 刚好与最高土壤温度对应; 萝卜季覆膜处理的土壤含水率基本略高于常规处理. 覆膜和常规两个处理的土壤温度变化趋势基本一致, 夏季土壤温度都高于冬季; 辣椒季覆膜处理的土壤温度全部都高于常规处理, 在 2014 年 8 月 4 日覆膜和常规处理的温度都达到最大峰值, 分别是 33.50℃ 和 26.95℃, 萝卜季时覆膜和常规处理的土壤温度间并无明显差异, 于 2015 年 2 月 1 日分别达到最低温度 7.50℃ 和 7.30℃.

2.4 覆膜和不覆膜菜地N₂O排放的影响因素分析

2.4.1 影响因素的相关性分析

农田N₂O的排放常常受到土壤各种理化性质的制约, 将众多土壤因子与对应的N₂O排放通量进行相关性分析, 结果如表 4 所示. 覆膜处理农田的N₂O排放与土壤 TN、DTN 和铵态氮含量呈极显著正相关关系; 而常规处理农田的N₂O排放则与 TN、DTN 和地下温度呈显著正相关, 与土壤硝态氮含量呈极显著正相关.

2.4.2 影响因素的主成分分析

单纯由相关性分析提取主要影响因素的结果, 并不能完全表明各环境因素与农田N₂O排放的关系. 继续对两种处理下各项环境因素进行主成分分析, 结果如表 5 所示. 影响常规菜地N₂O排放的有三类主要因子, 累积贡献比达到 79.46%, 其中主

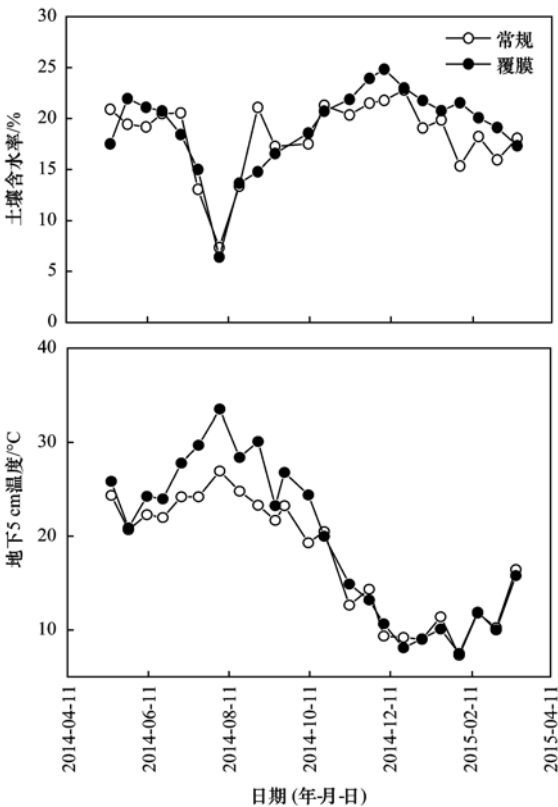


图 4 地膜覆盖对菜地土壤含水率和温度影响
Fig. 4 Effects of film mulching on soil moisture and temperature in farmlands

因子 1 由 TN、DTN、氨氮、硝氮、碱解氮、SMBN 和地下 5 cm 温度组成, 基本都是代表土壤各类氮素分布情况的指标, 贡献比为 38.78%; 主因子 2 由含水率、SOC、DOC、DON、SMBC 和地下 5 cm 温度组成, 主要是表征农田土壤内部各种碳素分布情况的指标, 贡献比达到 28.99%; 主因子 3 仅由 SMBN 和有机质组成, 贡献率为 11.68%, 可以在一定程度上指示土壤的微生物活性. 对覆膜菜地的各项环境因素进行主成分分析, 影响覆膜菜地N₂O排放的有四类主要因子, 累积贡献比达到 83.42%, 其中主因子 1 是由土壤含水率、SOC、TN、DTN、氨氮、硝氮、碱解氮、DOC、地下 5 cm 温度和土壤有机质组成, 可以看作是代表了农田土壤各类氮素分布情况和土壤营养状况的指标, 贡献比为 47.17%; 主

表 4 常规和覆膜处理菜地的土壤环境因子与 N₂O 排放的线性相关关系¹⁾

Table 4 Correlations between soil factors and N₂O emissions in conventional and mulch-treated farmlands

环境因子	常规农田	覆膜农田
含水率	0.153	-0.004
SOC	-0.166	-0.209
TN	0.447 *	0.609 **
DOC	-0.160	-0.172
DTN	0.457 *	0.633 **
铵态氮	0.278	0.752 **
硝氮	0.583 **	0.273
碱解氮	0.379	0.368
DON	0.122	0.041
SMBC	0.086	0.035
SMBN	0.329	-0.249
地下温度	0.478 *	0.247
有机质	0.487	0.212
脲酶	0.216	-0.194
ROC	0.563	0.235

1) * 代表N₂O排放通量与某项环境因子在 0.05 水平上显著相关, ** 代表在 0.01 水平上显著相关

因子 2 由 SOC、DOC、SMBC 和 SMBN 组成, 主要是代表土壤有机碳源和土壤微生物状况的各类指标, 贡献比达到 17.67%; 主因子 3 是由含水率、SMBC 和 SMBN 组成, 也是用于表征土壤微生物活性的指标, 贡献率为 10.80%; 主因子 4 则由 SOC 和 DON 构成, 贡献比为 7.78%, 表示农田土壤的有机碳、氮情况.

3 讨论

3.1 地膜覆盖对菜地N₂O排放通量的影响

本研究中辣椒季覆膜处理N₂O累积排放量小于常规处理. 其原因可能是由于不同处理辣椒植株从土壤中吸收的氮素不同, 导致残存在土壤中的氮素含量不同所致. 覆膜土壤中的氮素被辣椒吸收的量大于常规处理土壤中的氮素被辣椒吸收的量, 使覆膜处理残存在土壤中的氮素含量比不覆膜少, 导致覆膜处理N₂O累积排放量减少. 覆膜处理辣椒生物量为 2.41 kg·m⁻², 含氮量为 72.33 g·kg⁻¹; 常规处

表 5 两种处理下菜地N₂O排放影响因素的主成分分析¹⁾

Table 5 Principal component analysis on the influencing factors of N₂O emissions from conventional farmlands

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 1	主因子 2	主因子 3	主因子 4
含水率	-0.19	-0.55 **	0.26	-0.55 *	0.43	0.47 *	-0.40
SOC	-0.10	0.92 **	-0.20	-0.64 **	0.54 *	0.03	0.46 *
TN	0.97 **	-0.15	-0.17	0.90 **	0.37	0.18	-0.04
DTN	0.96 **	-0.19	-0.17	0.88 **	0.40	0.23	-0.07
氨氮	0.91 **	-0.26	-0.19	0.75 **	0.55 *	0.26	-0.13
硝氮	0.87 **	-0.17	-0.12	0.88 **	0.07	0.08	0.02
碱解氮	0.80 **	0.13	-0.16	0.78 **	0.13	0.30	0.30
DOC	-0.13	0.90 **	-0.23	-0.69 **	0.53 *	0.13	0.40
DON	0.23	0.74 **	-0.06	-0.30	-0.15	0.40	0.47 *
SMBC	0.21	0.81 **	0.08	0.35	-0.74 **	0.45 *	0.19
SMBN	0.70 **	0.03	0.45 *	-0.34	-0.51 *	0.66 **	-0.15
地下 5 cm 温度	0.55 **	0.65 **	0.40	0.80 **	-0.30	-0.33	0.24
有机质	-0.07	0.11	0.92 **	-0.69 **	0.06	0.06	-0.17
贡献率%	38.78	28.99	11.68	47.17	17.67	10.80	7.78

1) * 代表N₂O排放通量与某项环境因子在 0.05 水平上显著相关, ** 代表在 0.01 水平上显著相关

理辣椒的生物量为 2.21 kg·m⁻², 含氮量为 63.84 g·kg⁻¹, 覆膜处理一平方米面积下辣椒中氮的量为 109.82 g, 常规处理辣椒中氮的量为 88.88 g·m⁻². 在对照组中, 覆膜处理辣椒生物量为 1.12 kg·m⁻², 含氮量为 40.01 g·kg⁻¹; 常规处理辣椒的生物量为 0.97 kg·m⁻², 含氮量为 45.23 g·kg⁻¹, 覆膜处理辣椒中氮的量为 28.23 g·m⁻², 常规处理辣椒中氮的量为 27.64 g·m⁻². 从以上数据可以得出本实验中覆膜处理 1 m² 面积下辣椒从土壤中吸收的氮的量 (81.59 g) 大于常规处理 1 m² 面积下辣椒从土壤中

吸收的氮的量 (61.24 g). 除此之外, 降雨事件的发生也是促进土壤N₂O排放的重要因子^[18], 有学者利用二项分布统计对超过 5 mm 的降雨量和土壤N₂O 的排放进行研究, 发现降雨和N₂O排放峰间存在 100% 的耦合关系, 即降雨是土壤N₂O排放重要的驱动因子之一. 图 5 展示了实验区从 2014 年 5 月到 2015 年 5 月的平均气温和日降水量. 在辣椒季降雨比较频繁, 降水量较大, 地膜的覆盖阻挡了一部分雨水的进入, 所以在短期内降雨对常规处理土壤N₂O排放的促进作用更加明显. 在 2014 年 8 月

11 日连续大雨后,覆膜处理 N_2O 的排放通量 $536.58 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 低于常规处理的 N_2O 排放通量 $1499.60 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

而在萝卜季,覆膜处理 N_2O 累积排放量大于常规处理,覆膜处理萝卜生物量为 $15.31 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,含氮量为 $67.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;常规处理萝卜的生物量为 $15.84 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,含氮量为 $87.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 通过计算可得覆膜处理一平方米面积下萝卜从土壤中吸收氮的量(82.35 g)小于常规处理一平方米面积下萝卜从土壤中吸收氮的量(121.85 g).

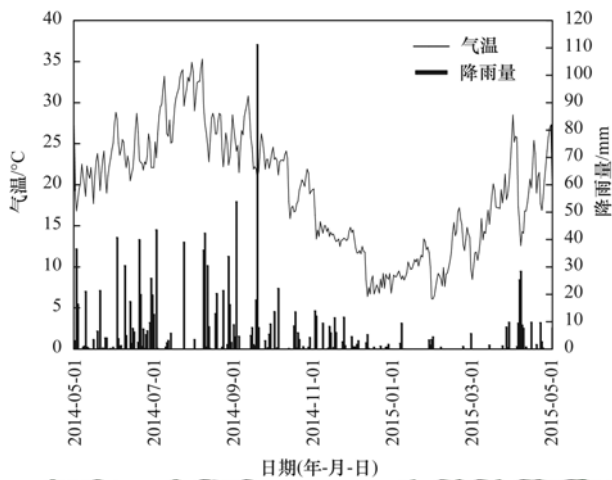


图5 采样区日平均气温和降雨量的季节变化

Fig. 5 Seasonal changes in daily totals of precipitation and daily mean air temperature

覆膜和常规处理 N_2O 排放均呈现出辣椒季高于萝卜季,原因可能有两个,一是秋冬时节由于气温的降低,影响到土壤中微生物的活性,使得 N_2O 排放降低;二是作物类型对农田 N_2O 排放具有影响,萝卜在生长的过程中消耗了土壤中大量的氮素,使得微生物活动缺乏基质, N_2O 的生成受阻. 陈书涛等^[19]研究表明,作物类型显著影响农田 N_2O 排放. 作物类型是决定农田 N_2O 排放的主要因素,熊正琴等^[20]就发现豆科作物 N_2O 的排放量显著高于非豆科作物. 作物对土壤 N_2O 排放的影响是一个复杂的过程,研究证实某些作物可以吸收溶解土壤中的 N_2O 并能通过浓度梯度将体内 N_2O 释放到大气中,同时作物根系在土壤内部的呼吸作用和根系分泌物分解形成的根区厌氧环境能够提高农田土壤反硝化微生物的活性,从而增加 N_2O 的产生和排放^[21,22]. 三是土壤中 C/N 的影响,本研究中辣椒季土壤中 C/N 在(16~26):1,萝卜季土壤中 C/N 在(24~47):1. 有学者研究发现,微生物生长最适宜的 C/N 在(25~30):1,此时土壤微生物既不吸收也不释

放无机氮;当土壤 C/N 大于该比例时,会导致有机碳分解过程中微生物吸收同化无机氮,使土壤中的无机氮含量下降,同时加速了土壤好氧层和根际氧的消耗,减少土壤中可以发生硝化作用的微生物区系,降低土壤 N_2O 的排放;而土壤 C/N 小于(25~30):1时,土壤中氮素含量相对较高,微生物对土壤速效氮的暂时固定作用减弱,从而农田土壤中无机氮以 N_2O 形式损失的量也相应较高^[23]. 节气与农田 N_2O 排放也有关,于亚军等^[24]对菜地的 N_2O 排放总量的季节分配调查结果表明,夏秋季蔬菜生长期约占农田 N_2O 排放总量的 64%,而冬春季蔬菜生长期的 N_2O 排放仅占了 34%,并认为这主要与土壤水热条件有关.

3.2 地膜覆盖对菜地土壤剖面 N_2O 含量影响

无论常规还是覆膜菜地,各处理 10、20 和 30 cm 深土壤中 N_2O 含量间均存在极显著正相关关系. 在整个观测周期内,覆膜与常规处理下土壤剖面 N_2O 含量均随土层深度的增加而增大,这与贾俊香等^[25]研究小白菜菜地土壤剖面(7、15、30 和 50 cm)间的土壤 N_2O 含量关系的结论相符合. 土壤中气体的产生、消耗以及传输过程最终决定了其排放量,而不同土层的环境条件则是决定土壤 N_2O 生成的关键因子,通过对各个土层 N_2O 含量与该土层土壤温度进行分析发现,各土层 N_2O 含量与其对应的土层温度均具有较好的线性相关关系($P < 0.01$),说明温度对土壤剖面 N_2O 含量影响较大,本研究中菜地土壤剖面温度表现为从上到下递增,并且有学者认为温度在 20~23℃ 时更利于硝化反应的进行,从而能促使土壤产生更多的 N_2O ;同时,较深土层处土壤含水量较高,并且土壤温度的变化程度不如上层土壤强烈,在土壤营养基质较多时也会更有利于土壤中反硝化微生物的活动,从而使得土壤中 N_2O 大量产生,并且深层土壤由于其充气孔隙度较小与大气之间的气体交流强度较弱,气体向外的传输速率十分缓慢,由土壤产生或从地表扩散而来的 N_2O 会被大量截留在土壤孔隙中,使得深层土壤 N_2O 含量较高.

Kusa 等^[26]对 0~30 cm 灰色低地土与火山灰土的土壤剖面 N_2O 含量分布的研究证实,表土层对从土壤释放到大气中的 N_2O 贡献率最大,分别达 86% 和 100%. 梁东丽等^[27]在对黄土性土壤剖面不同层次 N_2O 含量的原位监测中发现表土层 N_2O 含量较低. 从图 3 中还可以看出在常规处理 N_2O 含量随着土壤剖面深度的增加变化得比较明显,说明覆膜处

理的剖面 N_2O 含量较常规处理的更为均匀,地膜覆盖措施更有利于气体在土壤内部的纵向混合。

Nishimura 等^[28]对农田土壤的 N_2O 含量与 N_2O 排放的相关性分析表明,农田土壤各土层处的 N_2O 含量与 N_2O 排放呈显著正相关关系。这与本研究中常规处理的结果一致,通过相关性分析可知覆膜处理的 N_2O 排放仅与 30 cm 处土壤剖面的 N_2O 含量存在显著正相关关系。在土壤剖面 30 cm 处,覆膜处理的 N_2O 含量小于常规处理 N_2O 含量,所以造成了覆膜处理土壤剖面 N_2O 含量总体较高,但排放到大气的排放量反而低的现象。

3.3 地膜覆盖对土壤温度和水分的影

土壤水分含量是决定土壤氮素转化的总体方向,是影响土壤 N_2O 排放的最主要因素之一。当土壤水分含量有利于硝化反硝化作用同时进行,会促进大量的 N_2O 生成。已有大量研究发现地膜覆盖能够改善土壤的含水率。Arora 等^[29]对在生育期的玉米覆膜 60 d 后发现其 0 ~ 15 cm 的土壤含水量较对照提高了 4.85%。高翔等^[30]研究发现,在玉米生育期的前期和中期,地膜覆盖会使土壤水分含量达到了 22.6%。陈林等^[31]研究发现覆膜对农田蒸散和作物的生长过程等具有重要影响,能提高生物产量和水分的利用效率。地膜覆盖能有效地减少裸露在外的地表面积,加大土壤热梯度,不断提取深层的土壤水分;而且地膜的不透气、不透水特性还能阻止土壤水分向大气蒸发^[32],最终使得覆膜处理菜地的土壤含水量要比不覆膜处理土壤的含水量高。

土壤温度主要是通过影响土壤微生物的活性来影响硝化、反硝化速率,从而影响农田 N_2O 的产生。伍延正等^[33]研究发现在一定的温度范围内土壤 N_2O 的排放通量与土壤温度有显著的指数相关性。地膜是透光的,对太阳辐射的反射作用非常小,土壤能有效地接收太阳辐射的热量,同时由于膜下存在着大量的凝结水珠及膜下空气中有较高的含水量,阻隔了土壤向大气的长波辐射,加热了膜下的水汽和水滴,使膜下地面温度高于常规地面温度。整个实验期间,常规农田的平均土壤温度为 17.57℃,覆膜处理的为 19.25℃。郑磊等^[34]对同一地区的紫色土覆膜和不覆膜萝卜地的研究表明,覆膜农田在地下 5 cm 处的土壤温度显著升高,说明地膜的使用对农田土壤确实具有一定的保墒效果。地膜对土壤的覆盖造成了一个相对独立的水分循环系统,这个系统与大气之间也存在着热量和水分的

交换,只是对水分交换和热量交换进行了有效地控制。地膜覆盖对温度和水分的影是使土壤中 N_2O 排放通量发生变化的关键因子,二者共同影响着土壤中 N_2O 的传输、产生和消耗过程,决定了土壤中 N_2O 的排放量和排放强度。

3.4 覆膜和不覆膜菜地 N_2O 排放的影响因素

覆膜和常规菜地的 N_2O 排放主要都来自土壤微生物的硝化和反硝化过程,大量关于农田 N_2O 排放影响因素的研究结果显示,土壤微生物、土壤动物、作物种类、土壤 pH 值、土壤营养状况、土壤的水热条件、外加氮源的施用及管理措施等都是与农田 N_2O 排放密切相关的重要因素。有研究表明^[35],土壤温度是影响 N_2O 排放的主要因子,在土壤湿度适宜的条件下, N_2O 排放与土壤温度呈指数正相关关系。蔡延江等^[36]研究认为土壤质地会影响土壤的水分含量、通透性以及氧化还原电位,从而影响土壤硝化作用和反硝化作用以及 N_2O 的排放。与粗质地土壤相比,细质地土壤具有更高的 N_2O 产生潜力。

由覆膜和常规菜地的 N_2O 排放与环境因素间的相关性分析、主成分分析的结果可知,土壤的氮素分布情况是决定农田 N_2O 排放的最重要因素。总的来说,常规农田的 N_2O 排放受土壤中总氮含量变化的影响更大,而覆膜农田的 N_2O 排放对土壤中无机态氮含量的变化更加敏感。农田的 N_2O 排放不管是在覆膜还是不覆膜条件下都与土壤中的氮素分布息息相关,但区别在于主要影响农田 N_2O 排放的是无机氮素形态。存在于土壤中的硝态氮和铵态氮是硝化和反硝化微生物在硝酸盐呼吸过程中不可或缺的电子受体与产物,直接参与并影响着土壤的硝化和反硝化作用,在土壤微生物将 NH_4^+ 氧化为 NO_3^- 的硝化过程中和将 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。朱咏莉等^[12]对覆膜小麦 N_2O 排放的影响因素研究表明,土壤氨氮浓度的变化解释了覆膜小麦地表处 76.48% 的 N_2O 排放变异,与本研究结果一致。综合覆膜和常规菜地的主成分分析结果来看,不论覆膜与否,农田土壤的氮素分布情况、碳素分布情况、营养状况和微生物活性都是决定土壤 N_2O 排放情况的主要因素,其中以土壤氮素情况影响最为重要,其次是土壤碳素和微生物活性。总的来说,常规农田的 N_2O 排放受土壤中总氮含量变化的影响更大,而覆膜农田的 N_2O 排放对土壤中无机态氮含量的变化更加敏感。

4 结论

(1) 全年覆膜处理菜地 N_2O 排放量小于常规处理, 说明了菜地覆膜能够有效地减少 N_2O 的排放量。

(2) 覆膜和常规菜地土壤中 N_2O 含量基本随土层深度的增加而增加, 无论常规还是覆膜菜地, 各处理 10、20 和 30 cm 深土壤中 N_2O 含量间均存在极显著正相关关系。对农田土壤的 N_2O 含量与 N_2O 排放的相关性分析表明, 地膜覆盖改变了农田的土壤环境、物化性质和生物活动, 使得 N_2O 排放受到更多因素的综合影响, 而与土壤剖面的 N_2O 含量的相关性减弱。

(3) 辣椒季, 覆膜处理的土壤温度高于常规处理, 而土壤含水率二间差异不大; 萝卜季, 两者间的土壤温度无明显差异, 但土壤含水率则覆膜略高于常规, 说明地膜覆盖对土壤的增温效应在夏季更加明显, 对土壤的保水作用则在秋冬季更加突出。

(4) 由覆膜和常规菜地的 N_2O 排放与环境因素间的相关性分析和主成分分析结果可知, 土壤的氮素形态是决定农田 N_2O 排放的最重要因素, 土壤氮素是 N_2O 排放的物质基础, 各种氮素形态间的相互转化和含量水平对农田土壤的 N_2O 排放都起着至关重要的决定性作用。

参考文献:

- [1] 陈奇恩. 中国塑料薄膜覆盖农业[J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 12-15, 21.
Chen Q E. Mulching agriculture using thin plastic film in China [J]. Engineering Science, 2002, 4(4): 12-15, 21.
- [2] Ramakrishna A, Tam H M, Wang S P, *et al.* Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. Field Crops Research, 2006, 95(2-3): 115-125.
- [3] Ngouajio M, Wang G Y, Goldy R. Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch [J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 285-291.
- [4] Bilek A P, Grossmann M V E, Yamashita F. Biodegradable mulch films for strawberry production [J]. Polymer Testing, 2010, 29(4): 471-476.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [6] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, *et al.* Anthropogenic and Natural Radiative Forcing [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis [C]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [7] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 中国农田主要温室气体排放特征与控制技术[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 159-165.
- [8] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, *et al.* Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in eastern Canada [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(1): 53-72.
- [9] 杨俊, 韩圣慧, 李富春, 等. 川渝地区农业生态系统氧化亚氮排放[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2684-2693.
Yang J, Han S H, Li F C, *et al.* N_2O Emissions from agricultural ecosystem in Sichuan-Chongqing region [J]. Environmental Science, 2009, 30(9): 2684-2693.
- [10] Nishimura S, Komada M, Takebe M, *et al.* Nitrous oxide evolved from soil covered with plastic mulch film in horticultural field [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(7): 787-795.
- [11] Berger S, Kim Y, Kettering J, *et al.* Plastic mulching in agriculture-friend or foe of N_2O emissions? [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 167: 43-51.
- [12] 朱咏莉, 吴金水, 韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 N_2O 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 CSAE, 2004, 20(3): 222-225.
- [13] 阎佩云, 刘建亮, 沈玉芳, 等. 黄土旱塬旱作覆膜春玉米农田 N_2O 排放通量及影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2278-2285.
Yan P Y, Liu J L, Shen Y F, *et al.* Nitrous oxide emissions and its influencing factors in spring corn fields mulched with plastic film on the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2278-2285.
- [14] 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.
- [15] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 842-844.
- [16] Huang Y, Jiang J Y, Zong L G, *et al.* Comparison of field measurements of CH_4 emission from rice cultivation in Nanjing, China and in Texas, USA [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(6): 1121-1130.
- [17] 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.
- [18] Chen H X, Liu J J, Zhang A F, *et al.* Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: a field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 814-824.
- [19] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响及其驱动因子[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 147-155.
Chen S T, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from croplands with different crops and driving factors [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(2): 147-155.

- [20] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 中国农业科学, 2002, **35**(9): 1104-1108.
Xiong Z Q, Xing G X, Tsuruta H, *et al.* The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**(9): 1104-1108.
- [21] Knops J M H, Bradley K L, Wedin D A. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling [J]. *Ecology Letters*, 2002, **5**(3): 454-466.
- [22] Guo G X, Deng H, Qiao M, *et al.* Effect of long-term wastewater irrigation on potential denitrification and denitrifying communities in soils at the watershed scale [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(7): 3105-3113.
- [23] Lin S, Lqbal J, Hu R G, *et al.* Nitrous oxide emissions from yellow brown soil as affected by incorporation of crop residues with different carbon-to-nitrogen ratios: A case study in central China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, **65**(2): 183-192.
- [24] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地 N_2O 排放的对比研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(1): 96-103.
Yu Y J, Gao M R, Zhu B. Comparison study on N_2O emissions from field under wheat-maize rotation system and field under vegetable cultivation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(1): 96-103.
- [25] 贾俊香, 熊正琴. 典型菜地土壤剖面 N_2O 、 CH_4 与 CO_2 分布特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(12): 1536-1543.
Jia J X, Xiong Z Q. Distribution characteristics of nitrous oxide, methane and carbon dioxide along soil profile in typical vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(12): 1536-1543.
- [26] Kusa K, Sawamoto T, Hu R G, *et al.* Comparison of N_2O and CO_2 concentrations and fluxes in the soil profile between a Gray Lowland soil and an Andosol [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, **56**(1): 186-199.
- [27] 梁东丽, 吴庆强, 李生秀, 等. 黄土性土壤剖面不同层次 N_2O 浓度的原位监测[J]. 生态学报, 2009, **29**(3): 1421-1427.
Liang D L, Wu Q Q, Li S X, *et al.* In-situ measurement of N_2O concentration from profile of loess soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(3): 1421-1427.
- [28] Nishimura S, Komada M, Takebe M, *et al.* Contribution of nitrous oxide emission from soil covered with plastic mulch film in vegetable field[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2014, **70**(2): 117-125.
- [29] Arora S, Bhatt R. Impact of improved soil and in-situ water conservation practices on productivity in rainfed foothill region of North-west India[A]. In: 15th International Congress of ISCO [C]. Budapest: ISCO, 2008. 355-374.
- [30] 高翔, 龚道枝, 顾峰雪, 等. 覆膜抑制土壤呼吸提高旱作春玉米产量[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(6): 62-70.
Gao X, Gong D Z, Gu F X, *et al.* Inhibiting soil respiration and improving yield of spring maize in fields with plastic film mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(6): 62-70.
- [31] 陈林, 杨新国, 翟德革, 等. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(2): 108-115.
Chen L, Yang X G, Zhai D P, *et al.* Effects of mulching with Caragana powder and plastic film on soil water and maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(2): 108-115.
- [32] 郑险峰, 周建斌, 王春阳, 等. 覆盖措施对夏玉米生长和养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, **27**(2): 80-83, 98.
Zheng X F, Zhou J B, Wang C Y, *et al.* Effects of different mulching methods on the growth and nutrients absorption of maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, **27**(2): 80-83, 98.
- [33] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2968-2974.
Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.* N_2O flux in winter and its affecting factors under different land use patterns [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- [34] 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 N_2O 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 field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(30): 82-87.
- [35] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 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 N_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(5): 1-5.
- [36] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N_2O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, **44**(6): 881-887.
Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: a review[J]. *Soils*, 2012, **44**(6): 881-887.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)