

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响

张凯莉¹, 郝庆菊¹, 冯迪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 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, 通过1 a的田间原位观测, 研究地膜覆盖对菜地生态系统土壤的水热条件、CH₄排放通量及各土层CH₄剖面浓度的影响。结果表明, 地膜覆盖能显著提高春夏辣椒种植季的土壤温度($P < 0.01$), 而在秋冬萝卜种植季则改变不明显($P > 0.05$); 覆膜种植土壤含水率在萝卜季显著高于常规种植($P < 0.05$), 而在辣椒季则差异不显著($P > 0.05$); 在整个观测周期内, 覆膜和常规种植条件下, 土壤CH₄的排放通量均无明显变化规律, CH₄排放通量的均值分别为 $-7.64 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $-9.00 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 整个观测期CH₄净吸收量分别为 $0.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明地膜覆盖在一定程度上能削弱土壤作为CH₄汇的能力。在各土层CH₄浓度观测方面, 发现两种种植方式在整个观测周期内各土层CH₄浓度变化趋势大致相同, 表现为: $10 \text{ cm} > 20 \text{ cm} > 30 \text{ cm}$, 覆膜土壤CH₄浓度在20 cm、30 cm深土层显著低于常规种植($P < 0.05$), 而在10 cm土层差异不显著($P > 0.05$)。相关性分析结果表明, 覆膜种植土壤CH₄的排放通量与5 cm地温显著正相关($P < 0.05$), 与土壤含水率之间显著负相关($P < 0.05$), 而在常规种植条件下, CH₄排放通量与地表温度、5 cm地温及土壤含水率均无相关性; 两处理10 cm、20 cm土层CH₄浓度均与地表CH₄浓度呈显著正相关($P < 0.01$), 30 cm土层CH₄浓度与地表温度及5 cm地温均呈显著正相关, 各土层CH₄浓度与土壤含水率无显著相关关系。

关键词: 地膜覆盖; 菜地; 土壤温度; 土壤含水率; CH₄剖面浓度; CH₄通量

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3451-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701002

Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field

ZHANG Kai-li¹, HAO Qing-ju¹, FENG Di¹, SHI Jiang-lai¹, SHI Xiao-jun^{1,2}, JIANG Chang-sheng^{1*}

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

Abstract: Using the static opaque chamber method and choosing a chili-radish cropping system, a field experiment, located 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, was conducted *in situ* for one year. Mulching and non-mulching treatments were set in the field, and the seasonal variation of CH₄ flux and CH₄ concentrations in the soil profile and the seasonal changes in soil moisture and temperature were observed for different treatments to explore the effect of plastic film mulching on soil moisture and temperature. The results showed that plastic film mulching can significantly improve the surface soil temperature during the pepper growing season in spring and summer ($P < 0.01$), but no significant difference was seen during the radish growing season in autumn and winter ($P > 0.05$). The soil moisture of the plastic film mulching treatment was significantly higher than that of no mulching in the radish growing season ($P < 0.05$), but no significant difference was observed for the pepper growing season ($P > 0.05$). During the whole observation period and under the condition of plastic film mulching and conventional planting, the CH₄ flux from soil had no significant seasonal variation under all treatments, and the mean CH₄ fluxes were $-7.64 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $-9.00 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The cumulative CH₄ emissions for plastic film mulching and conventional planting were $-0.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $-0.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, in the whole observation period, and all the treatments showed a net absorption of CH₄ for the whole observation period. The results showed that the plastic film mulching could weaken the ability of CH₄ as a sink of the CH₄ for the whole observation period. The CH₄ concentrations in different soil profiles were in the order $10 \text{ cm} > 20 \text{ cm} > 30 \text{ cm}$, and the concentrations of CH₄ change patterns in different soil layers were almost identical during the whole observation period. The CH₄ concentrations at the depths of 20 cm and 30 cm under the plastic film mulching soil were significantly lower than those under no mulching soil ($P < 0.05$), but no significant difference was observed for the depth of 10 cm ($P > 0.05$). Correlation analysis showed that, under the plastic film mulching conditions, CH₄ flux and the 5 cm geothermal showed significant positive correlation ($P < 0.05$), but CH₄ flux and soil moisture showed significant negative correlation ($P < 0.05$). However, under the conventional cultivation conditions, there were no correlations between CH₄ flux and the 5 cm

收稿日期: 2017-01-01; 修订日期: 2017-03-14

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: 张凯莉(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: 879502890@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangcs@126.com

geothermal or soil moisture. There was also significant positive correlation between CH_4 concentration in the 10 cm and 20 cm depth soil layers with the CH_4 concentration in surface soil ($P < 0.01$), and the CH_4 concentration in the 30 cm depth soil layer had significant positive correlation with the surface soil temperatures and the 5 cm geothermal. There was no significant correlation between soil CH_4 concentration and soil water content.

Key words: plastic film mulching; vegetable field; soil temperature; soil moisture; CH_4 concentration in soil profile; CH_4 flux

甲烷(CH_4)作为重要的温室气体之一,不断受到人们的关注. 其在大气中具有较长的化学寿命,并且具有很强的红外线吸收能力及增温效应^[1]. 2013年IPCC科学报告表明, CH_4 在大气中的生命周期为12.4 a, 100 a尺度单位质量 CH_4 的增温潜势是 CO_2 的28倍^[2]. 土壤是温室气体重要排放源^[3],据估计,大气中每年大约有15%~30%的 CH_4 来自于土壤^[4],而农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,全球耕地面积大约为1369 Mhm²,其面积占全球陆地面积的10.5%^[5].

近年来,人类对土地利用方式的改变以及各种农业管理措施的实施^[6],改变了田间土壤环境,影响农田土壤 CH_4 的产生和吸收^[1],而地膜覆盖是一种常见的农业管理措施,在世界各地已经广泛应用,特别是在干旱地区^[7]. 有研究发现,地膜覆盖能减少土壤蒸发,提高土壤温度和水分以及土壤养分的可用性,促进作物生长和产量的提高^[7,8]. 此外,地膜覆盖可影响植物根系分布及微生物矿化作用. 有研究表明,地膜覆盖下的土壤微生物矿化速度更快,能促进温室气体的排放^[9],还能影响温室气体的产生、积累和运输^[10]. 因此,研究地膜覆盖对温室气体排放的影响有重要意义. 目前,对温室气体排放的研究大都集中在土壤与大气之间的排放通量的观测,而对温室气体在土壤剖面的行为研究较少^[11],对地膜覆盖下土壤 CH_4 剖面浓度特征的研究甚是鲜见. Xu等^[12]研究对比传统淹水灌溉稻田和旱作覆膜稻田 CH_4 的季节排放,发现旱作覆膜稻田可减少 CH_4 的排放. 李欣^[13]研究发现,覆膜处理可以增加土壤对大气 CH_4 的吸收. 贾俊香等^[11]在研究菜地温室气体的土壤剖面浓度变化特征中,发现 CH_4 和 CO_2 浓度均随土层深度的增加而增加. Okuda等^[14]对果园土壤温室气体排放的研究发现,地膜覆盖对 CH_4 排放没有影响. 目前,关于地膜覆盖对土壤 CH_4 排放特征报道还不一致,仍然存在许多争议. 因此,开展地膜覆盖对菜地 CH_4 排放通量的影响及土壤剖面 CH_4 浓度的季节变化特征研究,有助于揭示其在土壤中产生、累积、传输以及向大气排放的生物和物理过程^[11]. 本研究采用静

态箱/气相色谱法,原位对辣椒-萝卜轮作菜地进行覆膜和常规条件下 CH_4 排放及其环境因子的观测研究,探讨了地膜覆盖对菜地土壤水热条件、 CH_4 的排放通量及土壤剖面浓度季节变化特征及影响因子,以期今后制定农田土壤温室气体减排措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点选在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试验站(106°26'E, 30°26'N),海拔230 m,年平均气温为18.3℃,亚热带季风气候. 年平均降水量为1105 mm,年平均相对湿度多在70%~80%,在全国属高湿区. 年日照时数1276.7 h,无霜期年均约334 d. 试验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中性紫色土. 试验期土壤理化性质:有机质25.29 g·kg⁻¹、全氮1.35 g·kg⁻¹、碱解氮56.62 mg·kg⁻¹、总磷646.00 mg·kg⁻¹、有效磷5.94 mg·kg⁻¹、总钾9.44 g·kg⁻¹、有效钾102.47 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计与方法

本试验田实行辣椒-萝卜轮作制,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. 试验覆盖的薄膜,选用0.005 mm厚的聚乙烯透明薄膜. 本试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,试验前深翻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,宽高平行,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 kg·hm⁻²,萝卜季为200 kg·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 日移除辣椒并翻耕农田,休闲期间照常采样. 2014 年 10 月 1 日进行农地翻耕、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,具体作物生长期及农作处理时间参见图 1. 除基肥和追肥外,农地不再施用其他化学品,每次施基肥、追肥后均连续监测 3 d.



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

1.3 气体样品的采集和分析

1.3.1 气体样品的采集

菜地土壤 CH_4 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[15]. 每次采样时间为 09:00 ~ 11:00 进行,采样频率为每周一次,采样时罩箱时间为 30 min,每次间隔为 10 min.

覆膜和常规两处理土壤剖面 CH_4 浓度测定采用扩散法(图 2). 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 50 mm, 容积 1 000 cm^3),管端有橡胶塞,导气管是一根聚乙烯塑料管(内径 1 mm). 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. 集气管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. 在试验开始前一个月,将这套装置分别埋设在 10、20 和 30 cm 深的土层,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 CH_4 浓度测定和分析. 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. 每个处理土深设 2 个平行. 每次采样时间为 09:00 ~ 11:00 进行,采样频率为每周一次.

1.3.2 气体样品分析

CH_4 浓度的测定仪器为 Agilent 7890A 气相色谱仪,具体分析及工作条件见文献[16]; CH_4 的通量根据 4 个气样浓度随采样时间的变化速率计算^[17]. 气体排放通量用公式表示为:



图 2 扩散箱法示意

Fig. 2 Schematic diagram of the diffusion chamber technique

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

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 为样采样时的大气压 (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 CH_4 的浓度变化速率.

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、地表和 5 cm 地温,温度测定采用 JM624 型便携式测温计;在作物生长期,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. 土壤含水率:在每次采集气体之后,分别在覆膜和常规种植设有底座的相邻小区内多点采样土壤,采样深度为 1 ~ 20 cm,土样混合均匀,每次采集约 150 g,带回实验室用烘干法 (105 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 测定土壤含水率.

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 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 地膜覆盖对土壤水热条件的影响

2.1.1 地膜覆盖对各土层土壤温度的影响

由图 3 可以看出,在整个生长季,覆膜与常规种

植各土层温度变化趋势基本相同,并与日平均气温的变化保持一致(图4),覆膜条件下10、20、30 cm 土层平均地温分别为21.8、21.6、21.1℃,而常规种植条件下,各土层平均地温分别为20.7、20.4、20.0℃. 成对 t 检验结果表明,覆膜种植各土层温度均极显著高于常规种植($P < 0.01$);其中,辣椒种植季,覆膜和常规种植各土层土壤温度季节变化趋势大致相同,均大致表现出先增加后降低的变化趋势,覆膜种植10、20、30 cm 土层平均地温分别为32.2、31.5和29.7℃,分别比常规种植土壤高2.3℃、2.8℃和2.0℃,成对 t 检验表明,不同处理

下10、20、30 cm 土层地温差异均达到极显著水平($P < 0.01$);在萝卜种植季,两种种植方式各土层温度季节变化趋势则均表现为先降低后增加,在此生长季覆膜种植条件下10、20、30 cm 土层平均地温分别为14.4、14.6、15.0℃,而常规种植条件下10、20、30 cm 土层平均地温分别为14.1、14.4、14.4℃,在此生长季,覆膜种植各土层温度比常规种植各土层略高, t 检验结果表明,各土层温度差异不显著($P > 0.05$). 综上所述,与常规种植相比,地膜覆盖可以提高菜地土壤各土层温度,并且在辣椒季增温效应较萝卜季高.

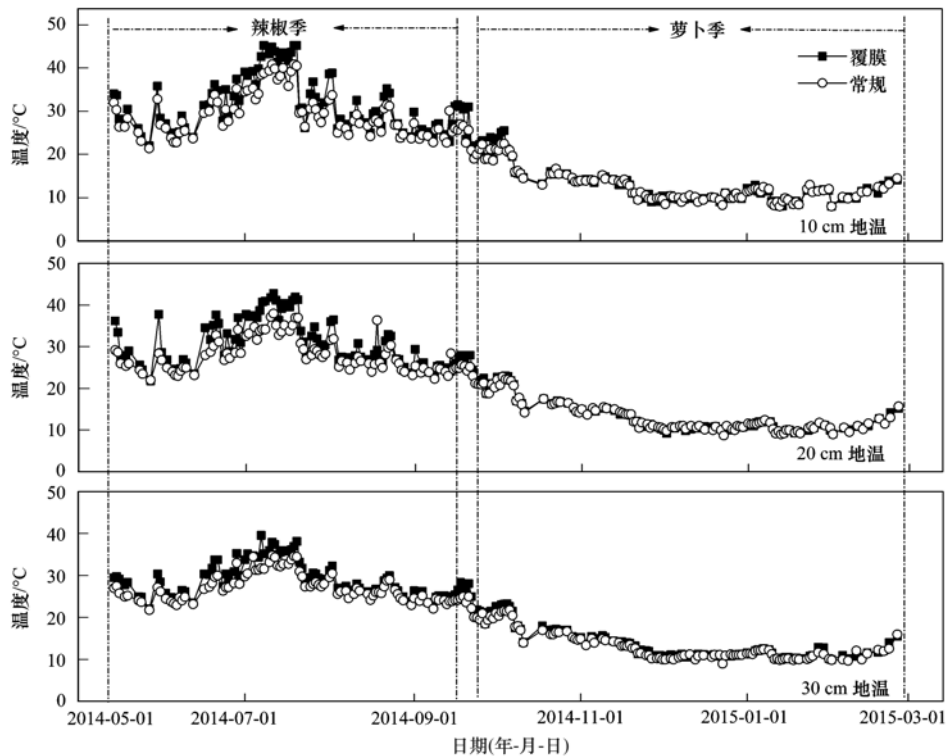


图3 两种植季各土层温度的季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of temperature in different soil layers under the two planting conditions

2.1.2 地膜覆盖对土壤含水率的影响

由图5可以看出,在整个种植周期,覆膜和常规种植土壤含水率的变化趋势大致相同,土壤含水率的变化范围分别为6.41%~24.84%、7.35%~22.81%,平均含水率为:覆膜(19.19%)>常规(18.23%). t 检验结果表明,覆膜种植土壤含水率显著高于常规种植($P < 0.05$);在两个生长季,土壤含水率也表现出一定的差异,辣椒季覆膜和常规种植的土壤含水率波动较萝卜季两种处理大;在辣椒生长季,土壤平均含水率为:覆膜(16.26%)<常规(16.92%),而在萝卜季土壤平均含水率则为:覆膜(21.74%)>常规(19.36%). t 检验结果表明,

辣椒生长季覆膜和常规种植条件下土壤含水率差异不显著($P > 0.05$),而萝卜生长季则覆膜显著高于常规种植($P < 0.05$). 综上所述,与常规种植相比,覆膜种植具有一定的保水作用.

2.2 地膜覆盖对菜地 CH_4 排放的影响

2.2.1 两种植季覆膜与常规菜地 CH_4 排放通量的变化

由图6可以看出,在整个观测周期内覆膜和常规种植菜地 CH_4 排放通量均无明显的变化规律,但从表观上看,在辣椒生长季 CH_4 排放通量的波动较大,在萝卜季波动较小. 在整个观测周期内,覆膜和常规种植菜地基本均呈现吸收状态,个别呈现 CH_4

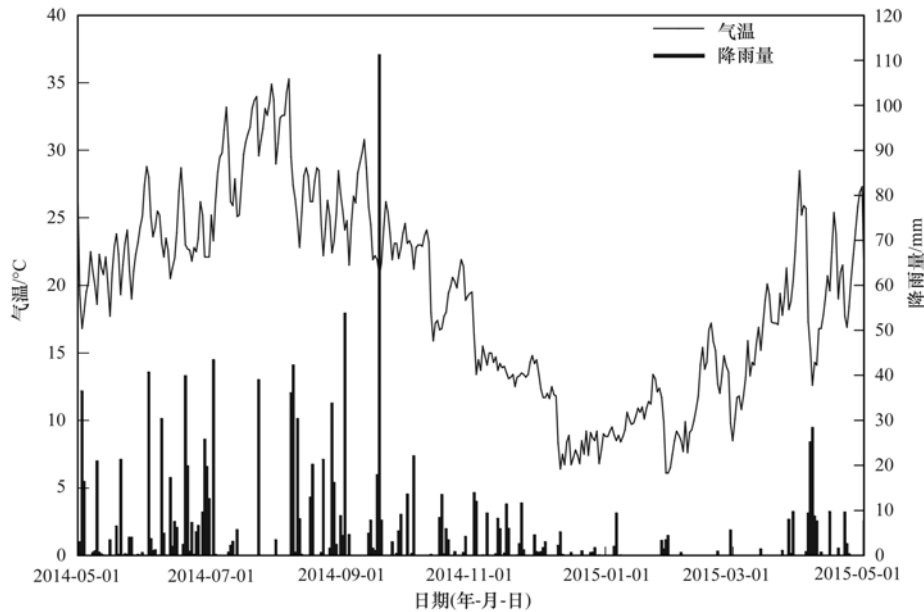


图4 采样区日平均气温和降雨量的季节变化

Fig. 4 Seasonal course of daily totals for precipitation and daily mean air temperature

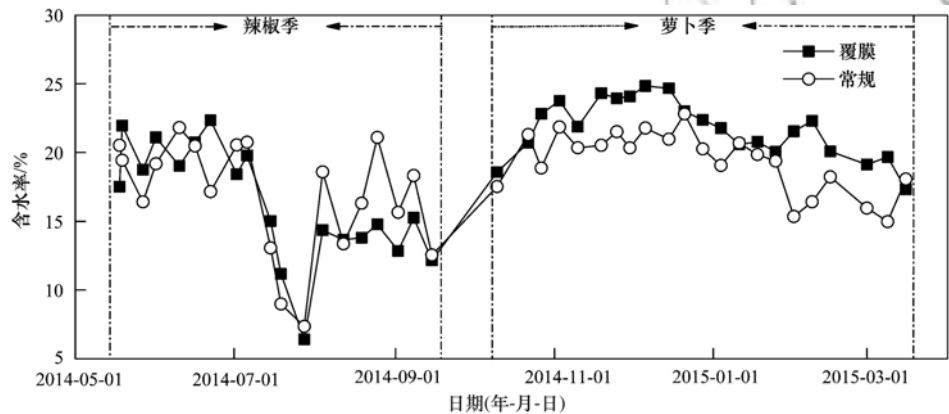


图5 两种植季土壤含水率的季节变化

Fig. 5 Seasonal dynamics of soil moisture under the two planting conditions

的释放. 覆膜种植下对 CH_4 的最大值吸收速率为 $72.24 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 常规种植下对 CH_4 的最大吸收速率为 $121.84 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 覆膜和常规种植条件下 CH_4 平均吸收速率分别 $7.64 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $9.00 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 整个观测期土壤对 CH_4 累计吸收值分别为 $0.54 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.64 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 配对 t 检验结果表明, 覆膜和常规种植条件下 CH_4 排放通量差异不显著.

在辣椒季, 覆膜和常规种植条件下 CH_4 排放通量均值分别为 $-0.15 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.13 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 此生长季 CH_4 累计排放量分别为 $-0.004 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.004 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 配对 t 检验结果表明, 覆膜和常规种植条件下 CH_4 排放通量差异不显著. 在萝卜季, 覆膜和常规种植条件下, CH_4 排

放通量变化趋势较为平缓, CH_4 排放通量均值分别为 $-16.64 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $-16.00 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 整个观测期 CH_4 累计吸收值分别为 $0.55 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 各处理土壤在整个观测期内对 CH_4 均表现为净吸收, 表现为 CH_4 的弱汇. 配对 t 检验分析结果表明, 在此生长季覆膜和常规种植条件下 CH_4 排放通量差异不显著.

2.2.2 两种植季覆膜与常规土壤 CH_4 剖面浓度特征

由图 7 可知, 在辣椒生长季, 覆膜种植 10、20、30 cm 土层中 CH_4 浓度分别为 2.27、2.21、2.05 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 常规种植各土层 CH_4 浓度分别为 2.24、2.24、2.19 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 在萝卜生长季, 覆膜种植 10、20、30 cm 土层中 CH_4 浓度分别为 2.15、1.95、1.61 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而常规种植三者的 CH_4 浓度分别为

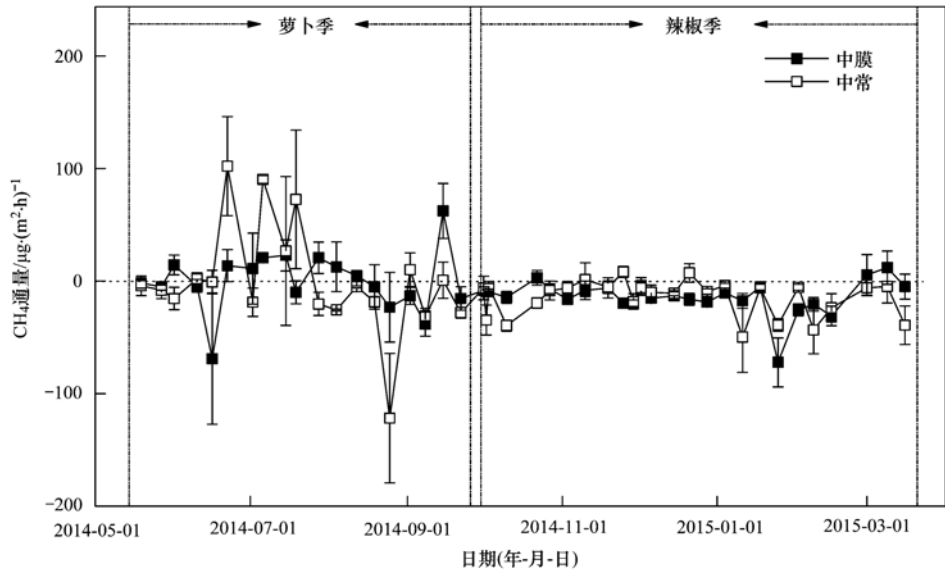


图 6 两种植季 CH₄ 排放通量的季节变化特征

Fig. 6 Seasonal variation of CH₄ emission flux under the two planting conditions

2.14、2.08、1.68 mg·m⁻³. 覆膜和常规种植条件下,各土层 CH₄ 浓度无明显季节变化特征. 配对 *t* 检验结果表明,在辣椒生长季,常规种植条件下 30 cm 土层 CH₄ 浓度显著高于覆膜种植 ($P < 0.05$); 萝卜生长季,常规种植土壤 CH₄ 浓度在 20 cm 土层显著高于覆膜种植 ($P < 0.05$).

2.2.3 环境因子对菜地 CH₄ 排放通量和 CH₄ 剖面浓度的影响

表 1 为覆膜和常规处理菜地 CH₄ 排放通量与各环境因子的 Pearson 相关性分析. 结果表明,覆膜种植条件下,地表温度与 CH₄ 排放通量之间无相关性,而 CH₄ 排放通量与 5 cm 地温呈现显著正相关性,

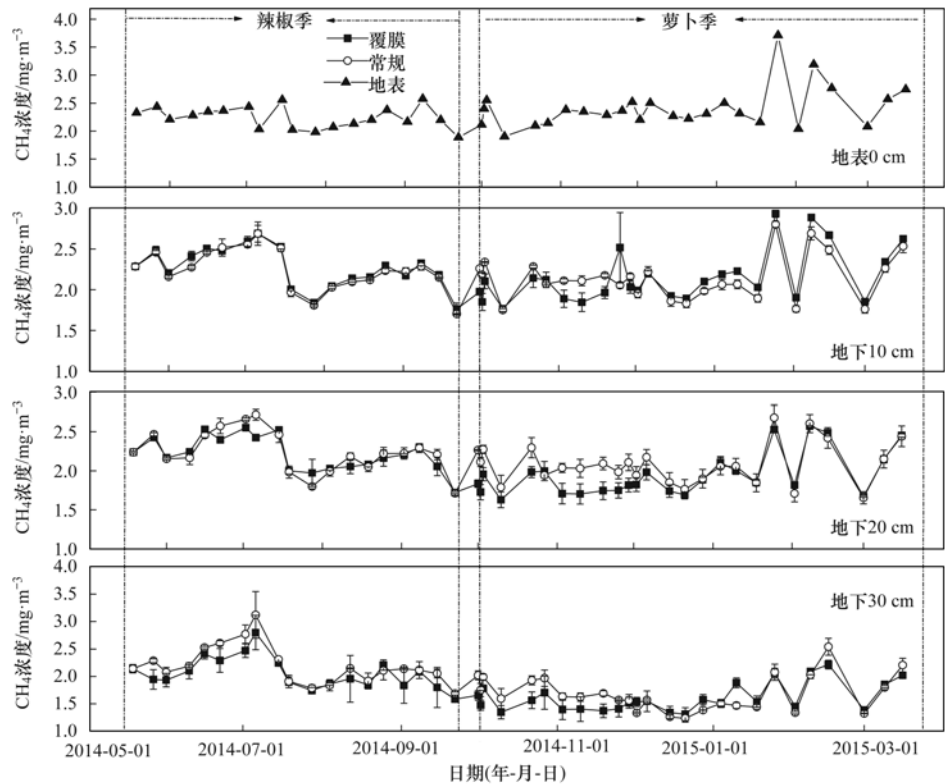


图 7 两种植季 CH₄ 剖面浓度的季节动态

Fig. 7 Seasonal variation of CH₄ concentrations in soil profiles under the two planting conditions

($P < 0.05$), 与土壤水分呈现显著负相关 ($P < 0.05$); 在常规种植条件下, CH_4 排放通量与地表温度、5 cm 地温及土壤水分均无相关性。

表 1 环境因子与土壤 CH_4 排放通量相关关系¹⁾

Table 1 Correlations between environmental factors and soil CH_4 flux			
环境因子	样本数(<i>n</i>)	覆膜	常规
地表温度	45	0.285	0.068
5 cm 地温	45	0.303 *	0.091
土壤水分	45	-0.347 *	-0.164

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关

表 2 为覆膜和常规两种处理各土层 CH_4 浓度与各环境因子的 Pearson 相关性分析结果。分析结果表明,两处理 10 cm、20 cm 土层 CH_4 浓度均与地表 CH_4 浓度呈显著正相关 ($P < 0.01$), 30 cm 土层 CH_4 浓度与 5 cm 地温及地表温度均呈显著正相关, 各土层 CH_4 浓度与土壤水分无显著相关关系。由此可以看出,土壤 10 cm、20 cm 土层 CH_4 浓度主要受地表 CH_4 浓度的影响,而 30 cm 土层 CH_4 浓度则主要受环境温度的影响。

表 2 环境因子与土壤 CH_4 浓度相关关系¹⁾

Table 2 Correlations between environmental factors and soil CH_4 concentrations							
环境因子	样本数 (<i>n</i>)	覆膜			常规		
		10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm
地表 CH_4 浓度	45	0.703 **	0.547 **	0.276	0.694 **	0.599 **	0.196
5 cm 地温	45	-0.080	0.188	0.417 **	0.066	-0.087	0.491 **
地表温度	45	0.084	0.174	0.528 **	0.047	0.226	0.458 **
土壤水分	45	0.049	-0.222	-0.311	0.139	0.088	-0.101

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

3 讨论

3.1 地膜覆盖对土壤温度和含水率的影响

本研究结果表明,在整个观测期,覆膜种植 10、20、30 cm 各土层土壤温度分别比常规种植高 2.3、2.8、2.0℃,表明地膜覆盖有明显的土壤增温效果,能显著提高耕层土壤的温度,这与目前众多研究结果一致^[18-20]。地膜覆盖能够增加土壤温度的原因表现在两个方面,一方面是由于薄膜的阻隔作用,隔绝了土壤与外界水分的交换以及气体的自由扩散,从而抑制了潜热散失;另一方面是因为夜晚膜下的水汽和 CO_2 吸收向外辐射的长波辐射^[21],薄膜阻断了热能以长波形式向外辐射,减少了水分蒸发时所需的热能^[22,23],从而减缓了土壤温度的下降。在本研究中,对比辣椒季覆膜对不同土层土壤温度的影响,发现在地下 10 cm 和 20 cm 深土壤的增温效应比在 30 cm 深处大,这与侯晓燕等^[24]及王桂清等^[25]的研究结果一致。造成这一现象的原因主要与土壤中热量由地表向下传递过程以及土壤不同层次的导热效率有关,土壤自身的导热性决定土壤在吸收一定热量后,一部分用于自身升温,一部分传递给临近土层,土壤颗粒间的热量再分配,膜间能量向膜下横向传输^[18],最终导致深层土壤的增温较小。地膜覆盖对土壤的增温效果与日照长短、土壤含水率和陆地土壤温度等有关^[26]。在本研究中,萝卜种植季地膜覆盖并未表现出显著增温效应,造成这一

现象的主要原因是重庆秋冬季多阴天,光照天数甚少,光照强度较低,土壤本身接受能量较少;此外,萝卜植株较大的叶面,进一步削弱了阳光对农田的照射^[27];并且在萝卜块茎膨大期,块茎膨大需要较大的水分,地膜覆盖通过保持较高土壤水分,降低温度来促进块茎的膨大^[28,29],这与水分和土壤介质热容量的差异有关^[30],因此在此生长季覆膜条件下并没有明显的高温优势,土壤温度变化不大。

在耕作层土壤含水率方面,在整个种植周期内,覆膜和常规种植其变化趋势大致相同,表现为:覆膜 > 常规(分别为 19.19%、18.23%),覆膜种植显著高于常规种植,这与王敏等^[27]及胡亚瑾^[31]的研究结果一致。导致覆膜种植土壤含水率高于常规种植的原因,主要是由于覆膜种植在膜的物理阻隔作用下,可以有效地减少土壤水分的蒸发,同时因为膜内较高的温度,加大了土壤热梯度的差异,进而使更深层的土壤水分向上转移,形成提水上升的保墒效应,膜内水汽进而增加,到夜间遇冷凝结在膜内壁上,之后落入土壤中,从而提高了土壤湿度^[19,21]。分别对比不同种植季发现,辣椒季土壤含水率,覆膜种植小于常规种植,并且覆膜和常规种植条件下土壤含水率差异不显著($P > 0.05$),而萝卜生长季覆膜种植土壤含水率显著高于常规种植($P < 0.05$)。这可以理解为在秋冬萝卜季覆膜种植具有一定的保水作用,而在春夏辣椒季并未体现出保水作用,这与马树庆等^[20]的研究结果一致。造成此现象的原因可能

是因为地膜覆盖改变了土壤的水热耦合特性^[18],春夏季,干湿交替,降雨量较小时,由于地膜的阻隔,使降雨无法进入土壤;而秋冬季,阴雨连绵,土壤整体湿地相对较大,地膜内土壤能通过壤中流进入地膜内土壤。

综上所述,从整个生长季土壤平均含水率和各土层平均温度来看,地膜覆盖对土壤水热条件的改善主要体现在土壤的增温保湿作用。从不同生长季来看,地膜覆盖在春夏辣椒季种植季保温作用较明显,而在秋冬季保水作用较明显。

3.2 地膜覆盖对菜地 CH₄ 排放通量的影响

在整个观测周期内覆膜和常规种植土壤 CH₄ 排放通量均无明显变化规律,覆膜和常规种植条件下菜地 CH₄ 的排放通量分别为 $-7.64 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $-9.00 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,整个观测期 CH₄ 累计吸收值分别为 $0.54 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.64 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各处理土壤在整个观测期内对 CH₄ 均表现为净吸收,这与众多学者研究结果一致^[15,32,33]。在本研究中地膜覆盖一定程度上削弱土壤作为 CH₄ 汇的能力。配对 *t* 检验结果表明,覆膜和常规种植条件下 CH₄ 排放通量差异不显著,这与 Okuda 等的研究结果一致^[14],主要是因为地膜覆盖虽然在一定程度上阻碍了土壤与大气间的气体流通,但并不与大气完全阻隔,大气中 CH₄ 还是可以通过薄膜上的孔洞扩散到土壤;干旱地区农田土壤基本都是大气 CH₄ 的汇,一方面,因为干旱区农田土质干燥,具有良好的土壤通气状况, O₂ 易于扩散到土壤中,促进土壤 CH₄ 氧化微生物和 CH₄ 氧化酶的活性^[34],加强了土壤吸收氧化大气 CH₄ 的能力;另一方面,产 CH₄ 微生物如产 CH₄ 细菌,在有氧气或氧化性物质存在时,催化还原小分子有机物形成 CH₄ 的过程会受到影响^[35]。然而,也有研究发现^[36],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,在一定程度上形成土壤厌氧环境,创造了有利于 CH₄ 产生的土壤条件,促使一定量 CH₄ 的产生。

对不同种植季覆膜和常规种植土壤 CH₄ 进行分析发现,辣椒季和萝卜季覆膜种植和常规种植条件下,两种植季不同处理土壤对 CH₄ 均呈现净吸收,并且两种植季的两种处理的 CH₄ 通量均无显著差异,各处理并未表现出明显的季节变化特征,这说明土壤 CH₄ 的通量并不只受温度的影响。辣椒季覆膜和常规种植土壤 CH₄ 排放通量均值分别为 $-0.15 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.13 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,整个观

测期 CH₄ 累计排放量分别为 $-0.004 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.004 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明地膜覆盖一定程度上抑制了 CH₄ 的排放,覆膜种植表现为对 CH₄ 的净吸收,常规种植对 CH₄ 表现为微弱排放,但其作为 CH₄ 汇的作用不明显,这与梁巍等人的研究结果一致^[34];而在萝卜季,覆膜和常规种植条件下,CH₄ 排放通量变化趋势较为平缓,CH₄ 排放通量均值分别为 $-16.64 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $-16.00 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,整个观测期 CH₄ 累计吸收值分别为 $0.55 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 各处理土壤在整个观测期内对 CH₄ 均表现为净吸收,表现为 CH₄ 的弱汇,这与李志国等^[1]和 Xu 等^[12]的研究结果一致。综合分析两种植季发现,吸收值有一定季节规律,秋冬萝卜季吸收值较高,而春夏辣椒季较低。这与孙向阳^[37]的研究结果相反,这可能与土壤类型和作物类型等有关。2014 年 6 月 22 日测定 CH₄ 排放通量,发现常规种植土壤 CH₄ 出现一个强的释放,信息记录发现在 6 月 17 日施撒农药,这可能是导致常规种植土壤 CH₄ 释放的主要原因,由于没有地膜覆盖,杀虫剂直接喷洒在土壤上,造成土壤表层微生物的死亡,当然其中包括甲烷氧化菌,从而减弱了 CH₄ 的氧化,对外表现出排放 CH₄^[38,39]。在 2014 年 7 月 5 日追肥之后,覆膜种植和常规种植土壤均出现 CH₄ 释放,排放通量分别为 $20.68 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $90.34 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,常规种植明显大于覆膜种植土壤 CH₄ 的排放通量;这主要是因为施用氮肥后,增加了土壤中 NH₄⁺ 的浓度,由于 NH₄⁺ 和 CH₄ 的分子结构类似,都可以被 CH₄ 氧化的关键催化酶——甲烷单氧化酶所氧化,因而 NH₄⁺ 的存在对 CH₄ 的氧化造成竞争性抑制^[38,40],从而促使覆膜和常规处理均产生 CH₄ 的释放,而覆膜种植由于地膜的物理阻隔以及温度和含水率的交互作用^[41,42],使其释放小于常规种植。在 2015 年 3 月 4 日萝卜收获之后,CH₄ 通量有一个下降,这可能与作物的生育期有关,植物功能群和生物量也是影响 CH₄ 排放通量的重要因子^[43]。

3.3 地膜覆盖对菜地 CH₄ 土壤剖面浓度的影响

在本研究中,发现两种植植方式在整个观测周期内各土层 CH₄ 浓度变化趋势大致相同,并且从整个生长周期来看,覆膜种植和常规种植两处理,各土层 CH₄ 浓度均表现为:10 cm > 20 cm > 30 cm,由此可以看出两种处理土层中 CH₄ 浓度均随土层深度的加深而降低。这与 Wang 等^[44]及王长科等^[45]的研究结果相似。主要原因有以下几个方面:第一,浅

层土壤 CH_4 的浓度主要依靠大气中 CH_4 的扩散以及土壤中 CH_4 氧化菌的氧化能力^[7,44];其次, CH_4 被土壤吸收氧化的过程,在土层中自上而下一层层被氧化^[7],并且随着土层的加深 CH_4 的扩散阻力也越大,而使 CH_4 浓度自上而下呈梯度分布;第三,可能由于本研究中深层土壤厌氧环境未达到产甲烷细菌活动的条件,而甲烷氧化菌起主导作用,土壤自身产 CH_4 能力较弱,最终导致深层土壤 CH_4 浓度较低.但杨波等^[46]的研究结果却表明,在小麦生长季土壤 CH_4 浓度则随着土层深度的增加而增加.也有学者研究发现, CH_4 剖面浓度随土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势^[47].另在本研究中发现,在整个观测周期内,覆膜和常规处理土壤 CH_4 浓度在 10 cm 土层深差异不显著,而在土层 20 cm、30 cm 深处显著低于常规处理,这与 Nan 等^[7]的研究结果相似.这可能与覆膜条件下土壤温度升高有关,因为温度升高直接影响了 CH_4 的迁移^[37],加速了 CH_4 的氧化^[48],且地膜的阻滞作用一定程度上阻挡了土壤对地表空气中 CH_4 的吸收.此外,本研究还发现地表 CH_4 浓度极显著高于覆膜和常规处理各土层 CH_4 浓度 ($P < 0.01$),主要是因为土壤颗粒和地膜对 CH_4 扩散的阻滞,土壤自身产 CH_4 能力以及土壤中甲烷氧化菌对 CH_4 的氧化作用.张怡等^[49]研究也表明覆膜栽培可通过改善土壤通气性,减少 CH_4 产生,增加 CH_4 氧化.

分析两种植季,发现覆膜和常规种植条件下各土层 CH_4 浓度无明显季节变化特征,这与刘芳等^[47]的研究结果一致.而配对 t 检验发现,在辣椒生长季,常规种植在 30 cm 土深 CH_4 浓度显著高于覆膜种植 ($P < 0.05$);在萝卜生长季,常规种植土壤 CH_4 浓度在 20 cm 土深显著高于覆膜种植 ($P < 0.05$);导致这一现象的原因一方面是因为覆膜种植为土壤尤其深层土壤创造了一个好的厌氧环境,在深层土壤处甲烷氧化菌氧化 CH_4 的作用受到抑制;另一方面,在较低的 CH_4 浓度条件下,甲烷氧化菌不能完全地吸收氧化 CH_4 ^[50].

3.4 环境因子对土壤 CH_4 排放通量和 CH_4 剖面浓度影响

在本研究中,常规种植条件下, CH_4 排放通量与地表温度、5 cm 地温及土壤水分均无相关性;覆膜种植条件下, CH_4 排放通量与地表温度之间无相关性,但与 5 cm 地温呈现显著正相关 ($P < 0.05$),这与众多学者的研究结果一致^[13,51],该结果证明本试

验田土壤甲烷氧化菌的氧化和分解主要受土壤中氧气扩散的限制^[7];但也有研究结果发现, CH_4 排放的季节动态并不能直接归咎于温度的季节变化^[52].徐华等^[35]对 CH_4 排放的季节变化的研究中发现,在整个生长周期中,土壤温度和水稻排放通量之间没有相关性,造成温度对 CH_4 排放通量影响的多样性的原因,可能是因为产甲烷菌和甲烷氧化菌的活性均有一个最适范围,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^[53];本研究中覆膜种植条件下 5 cm 土壤平均地温为 21℃,处于甲烷氧化的最佳温度范围 20 ~ 30℃,有研究发现当温度达到最佳范围并且进一步升高时,土壤中其他微生物,比如硝化细菌活性增强,会使甲烷氧化菌的氧气供应不足,最终甲烷氧化量下降^[54],从而促进 CH_4 的排放.另外本研究发现, CH_4 排放通量与土壤水分呈现显著负相关 ($P < 0.05$);这与众多学者研究结果一致,主要是因为水分填充了土壤孔隙,阻碍了甲烷的扩散和迁移^[55],引起了 CH_4 排放的滞后,且淹水的土壤生态系统一般认为是大气 CH_4 的源,在厌氧条件矿化发酵产生 CH_4 ,而旱作农田一般被认为是 CH_4 的汇,因此 CH_4 产生量很大程度上就取决于土壤水分条件,有氧土壤中,甲烷氧化菌的活性会随着土壤水分的增加而提高^[54~56],从而抑制 CH_4 的排放.

在各土层 CH_4 浓度方面,本研究发现覆膜和常规种植条件下,10 cm、20 cm 深土层 CH_4 浓度均主要受地表 CH_4 浓度的影响,而 30 cm 土层则主要受环境温度的影响,这主要是因为旱作菜地土壤为不饱和土壤,其表层土壤中 CH_4 气体主要来源于大气中 CH_4 的吸收和扩散作用^[57],对于较深土层,除了吸收大气中 CH_4 外,其相对较强的厌氧环境为产甲烷微生物产 CH_4 创造了一定的条件,而温度是影响 CH_4 的重要因子.土壤对吸收或排放 CH_4 情况与土壤的含水率之间有密切的相关性,过高或者过低的土壤含水率,均不利于土壤甲烷氧化菌的活动,当土壤水分处于过饱和时,甲烷氧化菌受到抑制,而产甲烷细菌活动增强,土壤成为 CH_4 的排放源^[58];封克等^[59]的研究表明,土壤对 CH_4 吸收状况与土壤含水率显著相关;而在本研究中发现,覆膜和常规种植各土层 CH_4 浓度与土壤含水率均无相关性,这与李欣^[13]的研究结果一致,这可能与该地土壤含水量相对较低有关^[60].9月中旬到次年2月中旬,各土层 CH_4 浓度有所下降,这与降雨量和气温的变化保持

一致,主要原因是因为受土壤水热条件的限制,从而影响土壤中的气体扩散及土壤中各类微生物的活性,最终各类效应的耦合叠加导致的^[61]。

4 结论

(1)与常规种植相比,本研究菜地覆膜表现出一定的保温和保湿的效果,并且在春夏季(辣椒季)保温作用较明显,而在秋冬季(萝卜季)保水作用较明显。

(2)覆膜和常规种植条件下,菜地生态系统均表现为 CH_4 的弱汇,地膜覆盖一定程度上削弱了菜地作为 CH_4 汇的能力;综合分析两种植季发现,吸收值有一定季节规律,秋冬萝卜季吸收值较高,而春夏辣椒季较低。

(3)地膜覆盖分别不同程度地降低了土壤各土层 CH_4 的浓度,在整个观测期覆膜种植和常规种植两处理, CH_4 浓度随土层深度的加深而降低; 10 cm、20 cm 深土层 CH_4 浓度主要受地表 CH_4 浓度的影响,而 30 cm 深土层 CH_4 浓度主要受环境温度的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] IPCC. Myhre G, Shindell D, Bréon F M, *et al.* Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T F, Qin D, Plattner G K, M. *et al.* (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [3] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2173-2176.
- [4] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国农业生态学报, 2011, **19**(4): 966-975.
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(4): 966-975.
- [5] FAO. Agricultural: Towards 2015/30. Technical interim report April 2000 [R]. Rome, Food and Agriculture Organization, 2001.
- [6] 白小琳, 张海林, 陈阜, 等. 耕作措施对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(1): 282-289.
Bai X L, Zhang H L, Chen F, *et al.* Tillage effects on CH_4 and N_2O emission from double cropping paddy field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, **26**(1): 282-289.
- [7] Nan W G, Yue S C, Huang H Z, *et al.* Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO_2 , CH_4 and N_2O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**(2): 451-464.
- [8] Liu J L, Zhu L, Luo S S, *et al.* Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 20-28.
- [9] 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.
- [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] 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]. 中国农业生态学报, 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.
- [12] Xu Y C, Shen Q R, Li M L, *et al.* Effect of soil water status and mulching on N_2O and CH_4 emission from lowland rice field in China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, **39**(3): 215-217.
- [13] 李欣. 半干旱黄土高原旱作覆膜玉米农田土壤甲烷通量特征 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013. 26-46.
Li X. Methane flux characteristics of maize field with plastic mulching in semiarid Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. 26-46.
- [14] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, *et al.* Emission of N_2O and CO_2 and uptake of CH_4 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.
- [15] 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]. 生态学杂志, 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.
- [16] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [17] 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.
- [18] 张治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律 [J]. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 44-51.
Zhang Z, Tian F Q, Zhong R S, *et al.* Spatial and temporal

- pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(1): 44-51.
- [19] 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.
- [20] 马树庆, 王琪, 郭建平, 等. 东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律[J]. 农业工程学报, 2007, **23**(8): 66-71.
- Ma S Q, Wang Q, Guo J P, *et al.* Geographical change law of effects of corn plastic mulching on increasing temperature and production in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, **23**(8): 66-71.
- [21] 龙攀, 黄璜. 作物覆膜温室效应研究进展[J]. 作物研究, 2012, **24**(1): 52-54.
- Long P, Huang H. Research progress of greenhouse effect of crop film mulching[J]. Crop Research, 2012, **24**(1): 52-54.
- [22] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(5): 1069-1075.
- Pu Y S, Miao G Y, Zhou N J, *et al.* Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(5): 1069-1075.
- [23] Ramakrishna A, Tam H M, Wani 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.
- [24] 侯晓燕, 王凤新, 康绍忠, 等. 西北旱区民勤绿洲滴灌马铃薯揭膜效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, **26**(4): 88-93.
- Hou X Y, Wang F X, Kang S Z, *et al.* Effects of uncovering plastic film mulch on drip-irrigated potato in arid Minqin oasis, Northwest China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, **26**(4): 88-93.
- [25] 王桂清, 王利凤, 赵方昉, 等. 旱地覆膜马铃薯效应试验研究[J]. 内蒙古农业科学, 2000, (增刊): 10-11.
- Wang G Q, Wang L F, Zhao F F, *et al.* Study on potato effect of film mulching in dryland [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2000, (S): 10-11.
- [26] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖增温机制的研究[J]. 中国农业科学, 1991, **24**(3): 74-78.
- Wang S S, Deng G Y. A study on the mechanism of soil temperature in creasing under plastic mulch [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1991, **24**(3): 74-78.
- [27] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水湿效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报, 2011, **37**(7): 1249-1258.
- Wang M, Wang H X, Han Q F, *et al.* Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, **37**(7): 1249-1258.
- [28] 刘鸿高, 李建宾, 顾才上, 等. 间作马铃薯覆盖不同地膜对土壤温湿度和产量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, **32**(1): 44-51.
- Liu H G, Li J B, Gu C S, *et al.* Effects of plastic film mulching intercropping potato on soil temperature, moisture and its yield [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, **32**(1): 44-51.
- [29] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 5215-5226.
- Wang H L, Zhang X C, Yu X F, *et al.* Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 5215-5226.
- [30] 陈恒洪. 地膜覆盖对旱地小麦土壤温度的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012. 5-12.
- Chen H H. Effect plastic film mulching of wheat on soil temperature in dryland [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012. 5-12.
- [31] 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.
- [32] Win K T, Nonaka R, Toyota K, *et al.* Effects of option mitigating ammonia volatilization on CH₄ and N₂O emissions from a paddy field fertilized with anaerobically digested cattle slurry [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, **46**(6): 589-595.
- [33] 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.
- [34] 梁巍, 张颖, 岳进, 等. 长效氮肥施用对黑土水旱田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(3): 44-48.
- Liang W, Zhang Y, Yue J, *et al.* Effect of slow-releasing nitrogen fertilizers on CH₄ and N₂O emission in maize and rice fields in black earth soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, **23**(3): 44-48.
- [35] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土甲烷产生、氧化和排放过程的相互影响——以水分历史处理为例[J]. 土壤, 2006, **38**(6): 671-675.
- Xu H, Cai Z C, Bamu Y X. Interactions among CH₄ production, oxidation and emission in paddy soil—a case study of Soils with different water history[J]. Soils, 2006, **38**(6): 671-675.
- [36] Seneviratne G, van Holm L H J. CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a wetted tropical upland soil following surface mulch application[J]. Soil Biology Biochemistry, 1998, **30**(12): 1619-1622.
- [37] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH₄ 排放通量的研究[J]. 土壤与环境, 2000, **9**(3): 173-176.
- Sun X Y. CH₄ emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, **9**(3): 173-176.
- [38] 孙善彬. 华北平原典型农田甲烷通量及其影响因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. 21-47.
- Sun S B. Methane fluxes and the influential factors in the typical farmlands in the north China plain[D]. Beijing: Beijing Forestry

- University, 2006. 21-47.
- [39] Boeckx P, Van Cleemput O, Meyer T. The influence of land use and pesticides on methane oxidation in some Belgian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**(3): 293-298.
- [40] Chan A S K, Steudler P A. Carbon monoxide uptake kinetics in unamended and long-term nitrogen-amended temperate forest soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **57**(3): 343-354.
- [41] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 等. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 206-213.
- Sun B, Zheng X Q, Hu F, *et al.* Effect of temperature, rainfall and soil properties on farmland soil nitrification [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 206-213.
- [42] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3174-3180.
- Zhang F, Guo S L, Zou J L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization, soil moisture and soil temperature on soil respiration during summer fallow season[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3174-3180.
- [43] Kao-Kniffin J, Freyre D S, Balser T C. Methane dynamics across wetland plant species[J]. *Aquatic Botany*, 2010, **93**(2): 107-113.
- [44] Wang Y Y, Hu C S, Ming H, *et al.* Concentration profiles of CH₄, CO₂ and N₂O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **164**: 260-272.
- [45] 王长科, 吕宪国, 蔡祖聪, 等. 东北三江平原土壤氧化 CH₄ 研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 939-941.
- Wang C K, Lv X G, Cai Z C, *et al.* Methane uptake in the soils of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(5): 939-941.
- [46] 杨波, 陈照志, 周自强, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对稻麦轮作系统土壤剖面甲烷分布的影响[J]. *中国科技论文*, 2014, **9**(9): 985-990.
- Yang B, Chen Z Z, Zhou Z Q, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration and temperature on methane distribution characteristics within soil profile in rice-wheat annual rotation system[J]. *China Sciencepaper*, 2014, **9**(9): 985-990.
- [47] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 等. 喀斯特地区土壤剖面 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度的相关关系[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(4): 717-723.
- Liu F, Liu C Q, Wang S L, *et al.* Correlations among CO₂, CH₄, and N₂O concentrations in soil profiles in central Guizhou Karst area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(4): 717-723.
- [48] Hart S C. Potential impacts of climate change on nitrogen transformation and greenhouse gas fluxes in forests: a soil transfer study[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(6): 1032-1046.
- [49] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(6): 935-941.
- Zhang Y, Lv S H, Ma J, *et al.* Effect of high-yield rice planting technique integrated with plastic mulching for water saving on methane emission from rice fields [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(6): 935-941.
- [50] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, *et al.* Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(5): 773-787.
- [51] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田土壤中的 CH₄ 产生[J]. *地球科学进展*, 1993, **8**(5): 1-12.
- Shangguan X J, Wang M X, Chen D Z, *et al.* Methane production in rice paddy fields[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, **8**(5): 1-12.
- [52] 黄耀. 地气系统碳氮交换: 从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 5-48.
- [53] 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.
- [54] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH₄ 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 CH₄ oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(3): 54-58.
- [55] Dunfield P F, Topp E, Archambault, *et al.* Effect of nitrogen fertilizers and moisture content on CH₄ and N₂O fluxes in a humisol: measurements in the field and intact soil cores[J]. *Biogeochemistry*, 1995, **29**(3): 199-222.
- [56] 何婷婷, 华璐, 张振贤, 等. 影响农田土壤有机碳释放的因子及固碳措施[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2007, **28**(1): 66-72.
- He T T, Hua L, Zhang Z X, *et al.* Factors influence agricultural soil releases SOC and measures fix C [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, **28**(1): 66-72.
- [57] Butterbach-Bahl K, Breuer L, Gasche R, *et al.* Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands; 1. Fluxes of N₂O, NO/NO₂ and CH₄ at forest sites with different N-deposition [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **167**(1-3): 123-134.
- [58] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林地表 CH₄ 通量[J]. *生态环境*, 2005, **14**(3): 333-335.
- Zhou C Y, Zhou G Y, Wang Y H, *et al.* CH₄ fluxes from soil of coniferous broad-leaved mixed forest in Dinghu Mountain [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(3): 333-335.
- [59] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. *土壤学进展*, 1995, **23**(6): 35-42.
- [60] Stewart K J, Brummell M E, Coxson D S, *et al.* How is nitrogen fixation in the high arctic linked to greenhouse gas emissions[J]. *Plant and Soil*, 2013, **362**(1-2): 215-229.
- [61] Gullledge J, Schimel J P. Moisture control over atmospheric CH₄ consumption and CO₂ production in diverse Alaskan soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(8-9): 1127-1132.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)