

王小非, 沈仕洲, 尹高飞, 等. 沼液灌溉对冬小麦-夏玉米轮作农田 CO₂、N₂O 排放规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 783–792.

WANG Xiao-fei, SHEN Shi-zhou, YIN Gao-fei, et al. Effects of biogas slurry irrigation on CO₂ and N₂O emission from winter wheat–summer maize rotation farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 783–792.

沼液灌溉对冬小麦-夏玉米轮作农田 CO₂、N₂O 排放规律的影响

王小非^{1,2}, 沈仕洲², 尹高飞², 闫建华², 杜会英², 张克强^{2*}

(1. 沈阳农业大学土壤与环境学院, 沈阳 110866; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为探究沼液灌溉对冬小麦-夏玉米轮作农田 CO₂ 和 N₂O 排放特征及土壤理化性质的影响, 设置不同的灌溉模式, 即空白对照处理 CK、常规施肥处理 CF、灌溉两次(小麦季一次+玉米季一次)2:1 沼液处理 T1、灌溉三次(小麦季两次+玉米季一次)2:1 沼液处理 T2 与灌溉三次(小麦季两次+玉米季一次)2:1 沼液处理 T3 共五个处理, 采用静态箱-气相色谱法, 研究沼液灌溉条件下冬小麦-夏玉米轮作农田土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放特征, 同时监测气象条件、土壤铵态氮、硝态氮、土壤可溶性有机碳等因子以及作物产量, 分析并探讨了轮作周期内农田土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放特征及相关影响因子。试验结果表明, 沼液灌溉没有改变轮作周期内土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的季节性变化规律, 但会造成灌溉后短期内 CO₂ 和 N₂O 排放通量增加; 轮作周期内沼液灌溉处理在一定程度上提高了 CO₂ 的排放水平, 但除 T3 处理外, 差异性均未达到显著水平; 沼液灌溉处理没有明显提高 N₂O 排放水平。沼液灌溉提高了土壤可溶性有机碳含量, 施用化肥会降低土壤可溶性有机碳含量; 与常规施肥处理 CF 相比, T2、T3 处理作物籽粒产量无明显差异, T1 处理严重减产。综合考虑作物籽粒产量与 CO₂ 和 N₂O 累积排放量, T2 处理为本试验条件下最合理的沼液灌溉模式。

关键词:沼液灌溉; 冬小麦-夏玉米轮作; CO₂; N₂O; 累积排放量; 作物产量

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)04-0783-10 doi:10.11654/jaes.2016-1535

Effects of biogas slurry irrigation on CO₂ and N₂O emission from winter wheat–summer maize rotation farmland

WANG Xiao-fei^{1,2}, SHEN Shi-zhou², YIN Gao-fei², YAN Jian-hua², DU Hui-ying², ZHANG Ke-qiang^{2*}

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: To investigate the effects of biogas slurry irrigation on CO₂ and N₂O emissions and soil physicochemical properties, in winter wheat–summer maize rotation system, five different irrigation modes were set up, including blank control (CK), fertilization treatment (CF), 2:1 biogas slurry irrigation for two times (one time in wheat season and one time in corn season) (T1), 2:1 biogas slurry irrigation for three times (two times in wheat season and one time in corn season) (T2) and 1:1 biogas slurry irrigation for three times (two times in wheat season and one time in corn season) (T3). In the study, Static-Gas Chamber method was applied to study the soil CO₂ and N₂O emission from winter wheat–summer maize rotation cropping system under the condition of marsh fluid biogas irrigation. The meteorological condition, soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, soil soluble organic carbon and crop yield were also monitored. The characteristics of CO₂ and N₂O emissions from cropland soil and their influencing factors were analyzed and discussed, and a reasonable biogas slurry irrigation model was

收稿日期: 2016-12-01

作者简介: 王小非(1992—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体排放的研究。E-mail: xf_wang92@126.com

* 通信作者: 张克强 E-mail: kqzhang68@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371481); “十二五”科技支撑计划课题(2012BAD15B02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371481); The National Medical Science and Technology Foundation During the 12th Five-Year Plan Period of China(2012BAD15B02)

put forward. The results showed that the biogas irrigation did not affect the seasonal variation of soil CO₂ and N₂O emission flux during the rotation cycle, however, it could cause the short-term emission increase after irrigation. The CO₂ emission level was increased by different biogas slurry irrigation treatments in a certain extent, but the difference was not significant except T3. The biogas irrigation treatments did not improve the N₂O emission level significantly. The content of soil soluble organic carbon was increased by biogas slurry irrigation treatments and was decreased with the application of chemical fertilizers. Compared with conventional fertilization treatment, there was no significant difference between the crop yield of T2 and T3, but the yield of T1 was significantly decreased. Considering the crop yield and CO₂ and N₂O accumulated emissions, T2 treatment was the most reasonable biogas slurry irrigation mode under this study condition.

Keywords: biogas slurry irrigation; winter wheat–summer maize rotation; CO₂; N₂O; cumulative emission; crop yield

随着集约化、规模化畜禽养殖业的迅速发展,大量的养殖废水得不到及时处理,会对周边环境造成严重的污染。研究表明,养殖废水中含有大量的有机态氮、磷,经过固液分离、厌氧消化和灭菌处理变为沼液后,化学需氧量(COD)去除率可达85%~90%,有机态的N、P转化为易被植物吸收利用的形态^[1]。沼液既能作为水源,又能充当肥源,利用其灌溉可提高土壤肥力和生产力水平^[2]。另外,沼液灌溉农田,还解决了养殖废水的消纳难题,有效地实现了废弃物的资源化利用^[3]。

目前,国内外已经展开了大量关于沼液灌溉农田的研究,但大多集中在对土壤、地下水、作物的影响研究^[4-8],对沼液灌溉后农田温室气体排放的研究还较少,缺乏沼液量化灌溉对农田温室气体排放规律的影响。国内外针对固体有机肥对土壤CO₂和N₂O排放的研究已有很多,沼液作为一种液态有机肥,其成分与固体有机肥有很多相同和相似之处,但其养分形态及含量与固体有机肥又有所差异。因此,开展沼液灌溉对温室气体排放影响的研究具有一定的必要性与现实意义。本研究通过监测沼液灌溉对冬小麦–夏玉米轮作农田CO₂和N₂O排放水平与土壤理化因子,分析了沼液量化灌溉对温室气体排放及土壤环境的影响,不但有助于解决养殖废水的有效消纳问题,而且在种养结合的新模式下,可为确定合理的沼液灌溉模式,减少沼液灌溉对温室气体排放与土壤环境的不良影响提供实践指导与理论依据。

1 材料方法

1.1 试验区概况

试验地点为河北省徐水县梁家营村(38°09′~

39°09′N, 115°19′~115°46′E),位于河北省中部、太行山东麓,属东部季风暖温带半干旱气候区,大陆季风性气候特点显著,四季分明,光照充足,年平均气温11.9℃,年无霜期平均184d,年均降水量546.9mm,年平均日照时数2744.9h。试验地降水季节分配不均,夏季降水占全年降水量的74.7%,年平均相对湿度65%,年平均风速2.2m·s⁻¹,年平均蒸发量1623.8mm,属于华北平原典型的农业种植区^[9]。试验地0~20cm层土壤容重1.51g·m⁻³,总氮(TN)1.44g·kg⁻¹,硝态氮(NO₃-N)16.45mg·kg⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N)19.94mg·kg⁻¹,总磷(TP)0.80g·kg⁻¹,有效磷(AP)22.53mg·kg⁻¹,可溶性有机碳(DOC)27.22mg·kg⁻¹。

徐水县种植制度以冬小麦–夏玉米轮作为主,小麦季降雨量偏低,土壤水分不能满足作物生长的需求,需要灌水补给,整个小麦季灌水3~4次;玉米季降雨量充足,除播种后灌溉出苗水外,一般无需再进行灌溉。当地奶牛养殖业发达,养殖规模较大,是典型的奶牛养殖区,目前有大小牛场41座,牛存栏数达到2.5万头,每年产生沼液约50万t^[9]。该地区的种植制度与养殖特点为本试验的开展奠定了良好的基础。

1.2 试验设计

1.2.1 试验田供试沼液基本理化性质

供试沼液来自秸秆和奶牛场粪污厌氧发酵,牛场采用干粪清便工艺,挤奶厅的污水及奶牛粪便进入厌氧发酵罐经过厌氧发酵后排放到沼液池中贮存,然后经过不同比例稀释后通过PVC管道输送到农田用于灌溉。供试沼液水质特征如表1所示。

1.2.2 试验设计

本试验供试小麦品种为济麦22,玉米品种为郑

表1 供试沼液水质基本特征

Table 1 The basic water quality characteristics of biogas slurry

TN/mg·L ⁻¹	NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	pH
329~417.1	1.8~6.4	203.9~302.8	50.6~69.95	2185~3762	7.4~8.4

丹 958。小麦播种时间为 2014 年 10 月 7 日,耕作时间为 10 月 6 日,收获时间为 2015 年 6 月 15 日;小麦收获后种植玉米,播种方式均为条播,玉米播种时间为 2015 年 6 月 18 日,收获时间为 2015 年 9 月 30 日。本试验灌溉时间分别为 2014 年 12 月 5 日(越冬期)、2015 年 4 月 4 日(拔节期)、2015 年 5 月 5 日(抽穗期)、2015 年 5 月 26 日(灌浆期)、2015 年 6 月 15 日(玉米播种后)。本试验设置不施肥+清水灌溉(CK)、常规施肥+清水灌溉(CF)、不施肥+小麦季灌溉 2:1(清水:沼液)沼液一次及清水三次+玉米种植后灌溉 2:1 沼液一次(T1)、不施肥+小麦季灌溉 2:1 沼液二次及清水二次+玉米种植后灌溉 2:1 沼液一次(T2)、不施肥+小麦季灌溉 1:1 沼液二次及清水二次+玉米种植后灌溉 1:1 沼液一次(T3)共五个处理(表 2),每次灌溉所用沼液均在专门的混凝土池里,用清水与沼液按体积比例配比,沼液配比好之后用水泵通过 PVC 地下管道施入农田。常规施氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,沼液来自试验田附近牛场沼液储存池。灌水时间为小麦季越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期、玉米播种后,所有处理灌水量及灌水次数一致,每次灌水定额为 830 m³·hm⁻²,利用超声波管式流量计计量灌水量,灌溉误差在 1%以内。每个小区面积为 51 m²(长 8.5 m×宽 6 m),四周 1 m 土体内用防水塑料布隔开,小区之间设置 1 m 保护行,3 次重复,小区随机分布。试验设计如表 2 所示。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 气体样品采集与分析

气体采集时间分布在整个小麦-玉米轮作期,小麦季采样频率为每两周一次。由于小麦越冬期至返青期这段时间田间气温较低,作物、微生物的活性相对较低,CO₂、N₂O 排放量较低^[10-11],在这段时间 CO₂、N₂O 排放量变化不明显,可减少采样次数,每个月采样一次,采样时间主要选择在灌溉前后一周之内,玉米季采样则选择在每次降雨之后。本试验没有考虑 CH₄ 的

排放,原因在于受试沼液为经厌氧发酵生产沼气之后的沼液,监测结果表明,沼液灌溉后农田 CH₄ 的排放会短暂地变为正值,但大部分时间处于负排放水平,且排放通量较低。本试验采样时间集中在灌水后一周,玉米季降雨量充沛,选择在雨后进行采样。每天的采样时间为上午 8:00—11:00,严格记录采样时间、箱内温度、0 cm 地温、5 cm 地温。气体观测采用静态箱-气相色谱法,静态箱由 PVC 制成,小麦季由于行距较小,静态箱规格为长 20 cm×宽 10 cm×高 10 cm,底座规格为长 20 cm×宽 10 cm×高 10 cm;玉米季行间距较大,静态箱规格为长 30 cm×宽 20 cm×高 20 cm,底座规格为长 30 cm×宽 20 cm×高 10 cm。箱体顶部设有采样口和温度计,底座安放于行间,底座内无作物,插入地下 5 cm,底座上设置水槽,用于采集气体时加水密封。每天的采样时间为上午 8:00—11:00,严格记录采样时间,采样前将底座水槽中加水密封,取样时将箱体罩在事先安好的基座上,用 20 mL 一次性注射器插入箱体的采样口,于 0、10、20、30 min 采集气体 4 次,贮存于 20 mL 的真空集气瓶中,同时记录箱内温度、0 cm 地温、5 cm 地温。

气体样品带回实验室用 Thermo Trace 1300 型气相色谱仪测定,CO₂ 检测器为热导检测器(TCD),载气为高纯氢气。N₂O 检测器为 63Ni 电子捕获检测器(ECD),色谱柱为 80/100 目 Porapak Q 填充柱,进样器、检测器以及填充柱的温度分别为 100、300、65 °C,载气为 95% 氩气+5% 甲烷混合气,流速为 40 mL·min⁻¹。高纯氮气作为反吹气。通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体的浓度。通过气体浓度随时间变化来计算单位面积的气体排放通量。计算公式^[10]为:

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T) \times k$$

式中: F 为排放通量,CO₂ 排放通量单位为 kg·hm⁻²·d⁻¹,N₂O 排放通量单位为 g·hm⁻²·d⁻¹; ρ 为标准状态下气体密度,kg·m⁻³; V 是采集箱内有效空间体积,m³; A 为采集箱覆盖的土壤面积,m²; Δc 为气体浓度差; Δt 为时

表 2 冬小麦-夏玉米轮作试验设计

Table 2 Winter wheat-summer maize rotation experiment design

处理	小麦季灌溉				小麦季养分输入/kg·hm ⁻²		玉米季灌溉	玉米季养分输入/kg·hm ⁻²	
	越冬期	拔节期	抽穗期	灌浆期	N	P ₂ O ₅	播种后	N	P ₂ O ₅
CK	清水	清水	清水	清水	0	0	清水	0	0
T1	2:1 沼液	清水	清水	清水	105	39	2:1 沼液	105	39
T2	2:1 沼液	2:1 沼液	清水	清水	210	78	2:1 沼液	105	39
T3	1:1 沼液	1:1 沼液	清水	清水	317	117	1:1 沼液	159	59
CF	清水	清水	清水	清水	300	120	清水	120	60

间间隔, h ; $\Delta c/\Delta t$ 为 4 次采样样品浓度数据斜率; T 为采样时箱内温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为 $\text{mg CO}_2/\text{N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 与 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $\text{g N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间的单位换算常数。

1.3.2 土壤样品采集与分析

每次采集气体的同时,在基座附近随机选取 3 个点,采集土样制成混合样,带回实验室尽快测定,来不及测定的置于 4°C 冰柜中保存备用。含水量测定采用传统烘干法,即准确称取土样 20.0 g 于 105°C 烘干的铝盒中, 105°C 烘干 12 h 后,取出,在干燥器中冷却至室温,立即称重。土壤中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的测定采用吉天流动注射分析仪(中国, FIA-6000+),即称取新鲜土样 10.0 g , 于 250 mL 振荡瓶中,加入 50 mL $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液, $220\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h 后马上过滤,滤液上流动注射分析仪进行测定。土壤 DOC 含量采用 Elementar TOC 仪(德国, Vario)测定,即准确称取 10.0 g 新鲜土壤样品于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 超纯水, $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h , 在离心机上以 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min , 取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,滤液直接上 TOC 仪进行测定。

1.4 数据分析

数据用 Excel 2007 计算并作图, ANOVA 采用 SPSS 软件,应用 Duncan 方法分析各处理间平均数在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 轮作期内气温与土壤孔隙含水率(WFPS)动态变化

整个轮作期内气温变化幅度较大,范围为 $3.0\sim 44.0^{\circ}\text{C}$, 平均为 23.36°C (图 1)。灌水、降雨及温度变化引起了土壤 WFPS 较大幅度的变化,范围为 $12.57\%\sim 83.00\%$, 小麦越冬期温度较低,作物生长缓

慢,水分蒸发与作物耗水量较少,土壤 WFPS 维持在较高水平且下降缓慢,自小麦返青期之后,随着气温的回升,作物生长速度加快,耗水量及蒸发量较大,土壤 WFPS 下降较快。数据分析结果表明,大气温度与土壤 WFPS 有着极显著的相关性($P<0.01$)。由图 1 还可以看出,降水集中在 4、5、7、8、9 月,这个时间段也是试验田气温高、蒸发量大、作物需水量高的时期,所以土壤 WFPS 变化较大。

2.2 轮作期内不同处理土壤 CO_2 与 N_2O 排放通量的动态变化

沼液灌溉没有改变整个轮作期内 CO_2 的排放规律, CO_2 排放通量均为正值,土壤是 CO_2 的排放源(图 2)。在灌溉前后一周的时间尺度上, CO_2 排放通量出现了峰值,该峰值一般出现在灌后 1 d 。从整个轮作期来看,灌溉与施肥对土壤 CO_2 排放通量没有显著影响,但各个处理出现了季节性排放规律。从小麦返青期开始, CO_2 排放通量逐渐增加,到玉米季出现了整个轮作期的排放峰值, CK、CF、T1、T2、T3 处理的 CO_2 排放通量分别为 18.65 、 21.54 、 18.59 、 18.42 、 $24.46\text{ kg CO}_2\text{-C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 各处理间差异极显著($P<0.01$)。

沼液灌溉处理土壤 N_2O 的排放规律与 CK 和 CF 基本一致(图 2),在整个轮作期内各处理(CK、CF、T1、T2、T3) N_2O 的排放通量变化范围分别为 $-0.17\sim 4.92$ 、 $0.48\sim 6.61$ 、 $0.59\sim 5.25$ 、 $0.49\sim 5.45$ 、 $0.57\sim 6.34\text{ g N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 各个处理的峰值主要出现在小麦季越冬期、拔节期、灌浆期和玉米播种后、玉米季雨后这五个时期,主要是由氮肥投入、灌水和降雨造成的,说明氮素与水分的输入导致了土壤 N_2O 排放的增加。在越冬期气温较低,土壤温度也较低(出现冻土现象),土壤微生物活性大为减弱,从而导致在灌溉后土壤不能及时

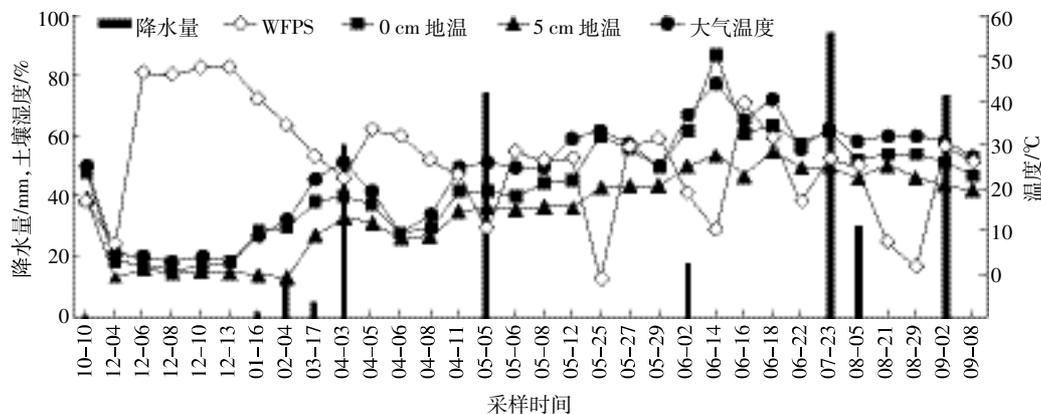
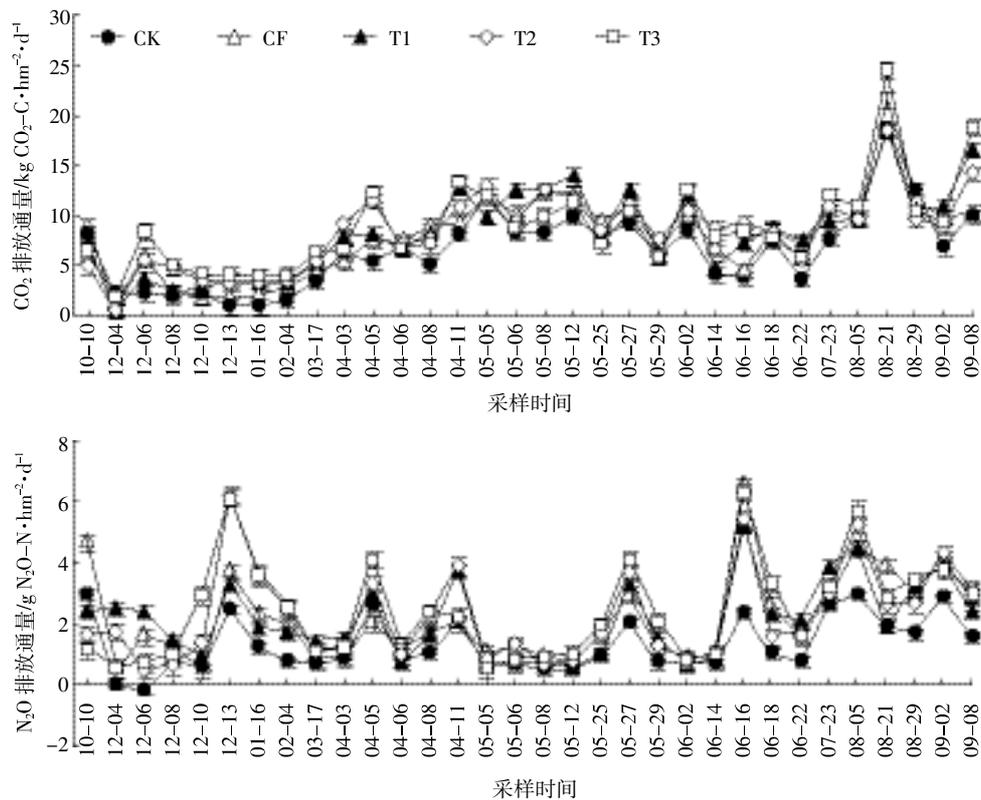


图 1 试验田土壤 WFPS、大气温度、降水量及 0 cm、5 cm 地温动态变化

Figure 1 Dynamic changes of soil WFPS, air temperature, soil temperature at 0 cm and 5 cm and amount of precipitation in experimental plot

图2 轮作周期内 N₂O、CO₂ 排放通量的动态变化Figure 2 Dynamic changes of N₂O and CO₂ emission flux during the rotation period

排放 N₂O,随着冻土的融化,N₂O 渐渐释放。另外,在玉米播种后,除 CK 外,各个处理 N₂O 的排放出现了明显高于其他时期的峰值,CF、T1、T2、T3 处理的峰值分别为 6.61、5.25、5.45、6.34 g N₂O-N·hm⁻²·d⁻¹。在整个轮作期内 CK 处理 N₂O 排放通量普遍低于其他处理,甚至在越冬期出现了负排放的现象。这是由于 CK 处理没有氮肥的输入,导致在整个轮作期都处于一个较低的 N₂O 排放水平。T2、T3 处理的 N₂O 排放通量明显高于 T1 处理,即灌溉两次沼液后 N₂O 的排放通量高于灌溉一次。

2.3 不同处理 CO₂、N₂O 累积排放量与 N₂O 产量标尺的比较

在整个轮作期内,各处理间的 CO₂ 累积排放量表现为 T3>T1>T2>CF>CK(图 3),其中 T3 处理 CO₂ 累积排放量最高,与其他处理达到了显著性差异。这可能是由于 T3 处理比 T1、T2 处理多施了一次沼液, T1、T2 处理 CO₂ 累积排放量高于 CF,但差异不显著,说明沼液灌溉在一定程度上会引起 CO₂ 累积排放量的提高。T1、T2、T3、CF 处理 CO₂ 累积排放量高于 CK 处理,且均达到显著水平,说明沼液与化肥均明显增加了农田 CO₂ 累积排放量。轮作周期内,T1、T2、T3 处

理的 N₂O 累积排放量高于 CF 处理,但均未达到显著水平,说明与常规施肥相比,沼液灌溉并没有明显提高农田 N₂O 排放水平;T1、T2、T3 处理之间差异性不显著,表明不同的灌溉次数与沼液浓度没有明显增加轮作农田土壤的 N₂O 累积排放量;T1、T2、T3、CF 处理与 CK 处理相比,N₂O 累积排放量差异达到显著性差异,说明沼液与化肥显著提高了农田 N₂O 的排放水平。

从图 3 可以看出,各个处理的小麦及玉米产量存在差异,且达到极显著水平($P<0.01$),小麦季产量高低表现为 T3>CF>T2>T1>CK,玉米季表现为 T3>T2>CF>T1>CK,但 T2、T3、CF 处理的小麦及玉米产量差异未达到显著性水平,即灌溉三次(小麦季两次+玉米季一次)2:1 沼液的处理(T2)与灌溉三次(小麦季两次+玉米季一次)1:1 沼液的处理(T3)之间产量无显著差异。这说明 T2、T3 处理均不会造成作物减产,但 T2、T3、CF 与 T1 处理的小麦及玉米产量差异显著($P<0.01$),T1 处理会造成作物严重减产。由此表明本试验条件下,灌溉次数的不同显著影响了作物的产量,且灌溉次数的增加提高了作物产量。单位作物籽粒产量所产生的 N₂O 累积量能够权衡作物产量与

N_2O 排放代价, N_2O 累积量与作物籽粒产量的比值可称为 N_2O 产量标尺。由图 3 可以看出, 各处理产量标尺大小依次为 $CK>T1>T2>T3>CF$, 其中 $T2$ 、 $T3$ 、 CF 处理明显低于 CK 、 $T1$ 处理, 差异性显著 ($P<0.05$); $T2$ 、 $T3$ 、 CF 处理产量标尺分别为 54.53、50.48、48.65 $g N_2O-N \cdot t^{-1}$, 三者差异不显著。由于 $T2$ 与 $T3$ 处理在作物产量、 N_2O 累积排放量上差异不显著, 均优于 $T1$ 处理, 考虑到 $T2$ 处理 CO_2 累积排放量显著低于 $T3$ 处理, 且沼液浓度低, 输入养分较低, 可选择灌溉三次 (小麦季两次+玉米季一次) 2:1 沼液的处理 ($T2$) 作为本试验条件下最合理的灌溉模式。

2.4 不同处理土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^-N 、DOC 含量动态变化

不同的灌溉模式下, NH_4^+-N 、 NO_3^-N 、DOC 含量的变化也存在差异 (图 4)。土壤在小麦越冬期, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 处理在灌溉沼液后, 土壤 NH_4^+-N 出现了峰值, 分别为 20.47、28.22、39.27 $mg \cdot kg^{-1}$, 且明显高于 CK 、 CF 处理, 然后在一周后逐渐下降。这是由于沼液中含有大量 NH_4^+-N , 低温环境不易使 NH_4^+-N 转化为其他形式的 N 。而 CF 处理施入的尿素在低温环境中不能转化成 NH_4^+-N , 经相关性分析, 土壤 NH_4^+-N 与温度极显

著相关 ($P<0.01$), 这可能是该时期施肥处理的土壤 NH_4^+-N 并不高的关键原因。在小麦的拔节期灌水前后各处理 NH_4^+-N 出现了一定的波动, 是由于气温回升促进了作物的吸收利用与土壤中微生物活动, 各个生化反应恢复正常。玉米播种后的一次灌水使 CF 、 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 处理的土壤 NH_4^+-N 出现峰值, 与小麦越冬期不同的是, CF 处理也出现了 NH_4^+-N 明显增加的现象, 并且出现了峰值 (25.10 $mg \cdot kg^{-1}$)。造成这种现象的原因是由于小麦收获后, 试验田地表没有作物覆盖, 高温环境中施入的尿素不能被作物吸收利用, 在微生物作用下转化成 NH_4^+-N 。由图 4 还可以看出, 土壤 NO_3^-N 的变化受 N 素输入的影响较大, 每次输入 N 素后都会导致土壤 NO_3^-N 的增加, 但施肥与灌溉沼液没有改变土壤 NO_3^-N 的变化规律。 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 与 CF 处理的土壤 NO_3^-N 含量无明显差异, 即灌溉沼液与施化肥处理对土壤 NO_3^-N 含量没有造成明显影响。在整个轮作期内, 土壤 NH_4^+-N 与 NO_3^-N 的变化规律正好相反, 两者基本上是此消彼长的趋势。

在灌溉沼液后, 土壤 DOC 含量迅速增加, 可能与沼液中含有大量的有机物有关, 1 d 之后 DOC 又逐渐降低 (图 4)。整个轮作期内, 各个处理土壤 DOC 含量具有明显的差异, $T3>T2>T1>CK>CF$, 表明灌溉沼液提高了土壤 DOC 含量, 且随着灌溉次数与浓度的增加, 土壤 DOC 含量也增加, 施化肥处理 (CF) 反而降低了土壤 DOC 含量。

3 讨论

3.1 沼液灌溉对土壤 CO_2 与 N_2O 排放水平的影响

本试验轮作期内 CO_2 排放通量范围 0.59~24.46 $kg CO_2-C \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, 低于潘莹等^[12]研究中得出的 1.31~63.31 $kg CO_2-C \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$ 的排放水平。叶丹丹等^[13]在华北典型农田 N_2O 与 CO_2 排放通量的研究中发现, CO_2 排放通量范围为 2.38~13.84 $kg CO_2-C \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, 张甲坤等^[14]、秦越等^[15]在其研究中也得出了相同的结果。郭树芳等^[16]在研究不同灌溉方式对华北平原冬小麦 N_2O 、 CO_2 排放通量的影响试验中得出, 在漫灌方式下小麦季 CO_2 排放通量范围为 6.43~37.92 $kg CO_2-C \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, 高于本试验的 CO_2 排放通量。这是由于本试验土壤 DOC 范围为 9.10~134.65 $mg \cdot kg^{-1}$, 低于我国东部土壤的 DOC 平均值 159 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[14], 在表 3 中也可以看出 CO_2 排放通量与土壤 DOC 显著正相关 ($P<0.05$)。本试验结果显示, 各处理的 CO_2 排放水平大小顺序为 $T3>T1>T2>CF>CK$ (图 3), 表明与常规施

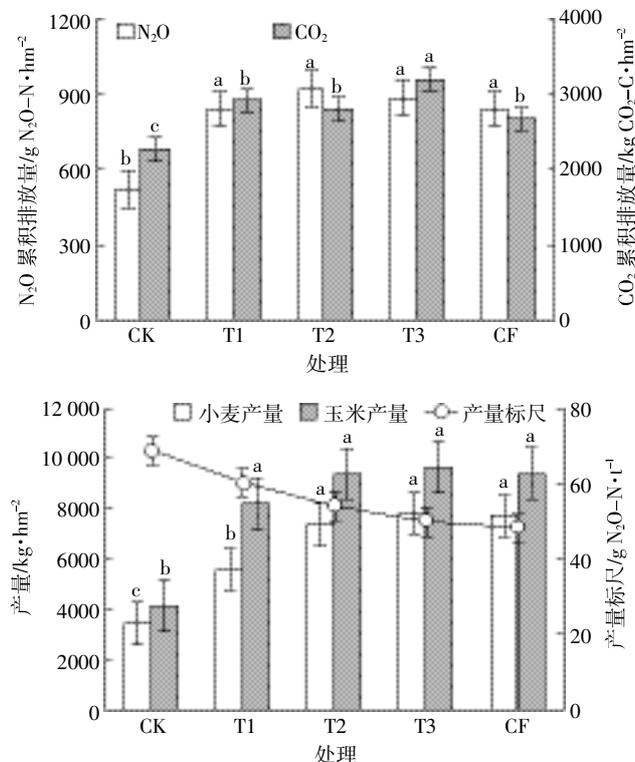


图 3 不同处理 CO_2 、 N_2O 累积排放量与籽粒产量之间的比较
Figure 3 Comparisons of CO_2 and N_2O cumulative emissions and seed yield from different treatments

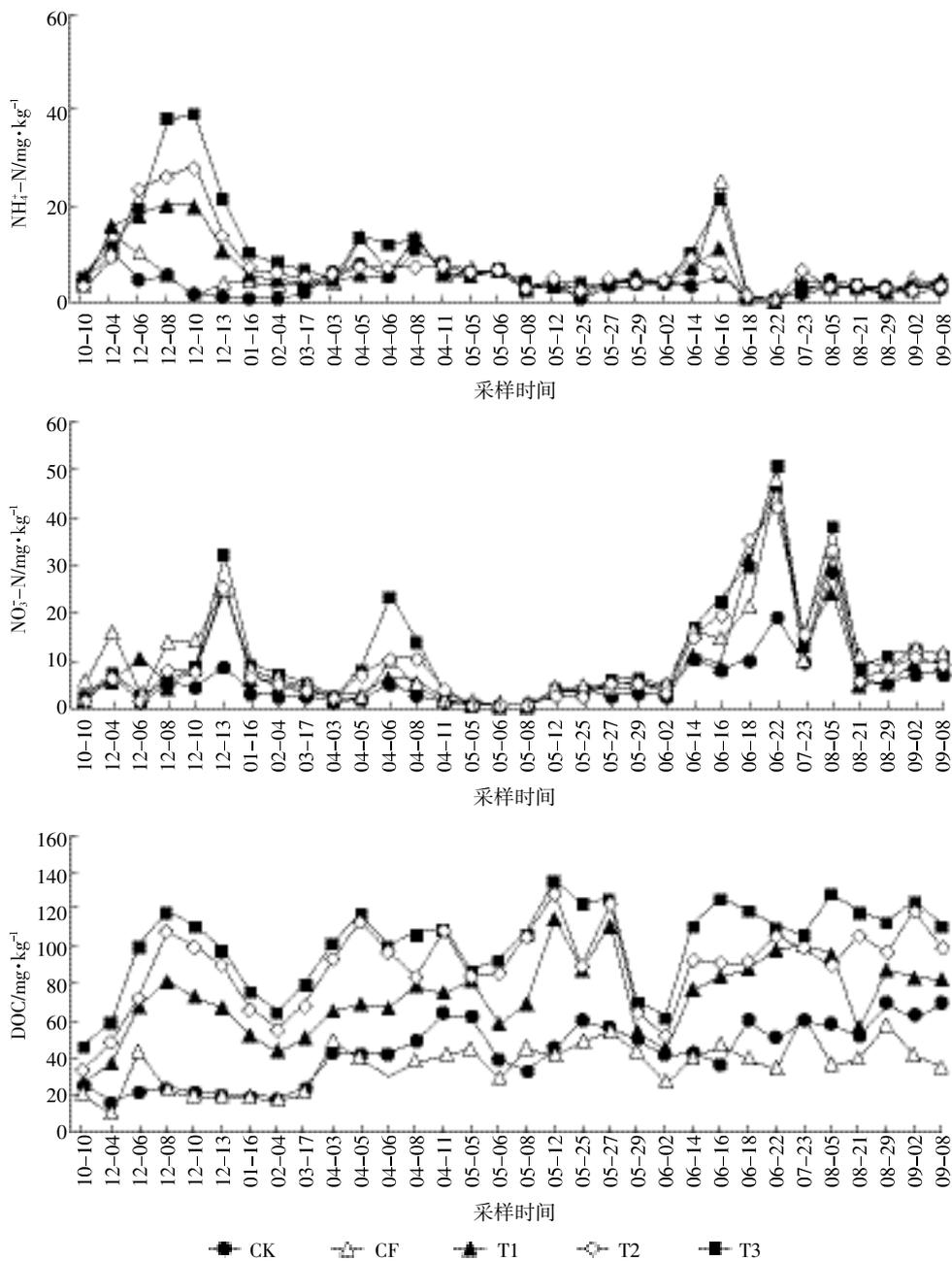


图 4 轮作周期内土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DOC 的动态变化

Figure 4 Dynamic changes of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N and DOC in the rotation period

肥处理相比,沼液灌溉会增加 CO₂ 的排放水平,但差异性除 T3 处理达到显著外,T1、T2 处理均未达到显著水平。这是由于沼液中含有大量的有机物,进入农田后使土壤 DOC 含量升高,而 CO₂ 排放通量与土壤 DOC 显著正相关(表 3),T3 处理沼液浓度较高,是所有处理中输入养分最多的,可能正因为如此,T3 处理的 CO₂ 排放水平才会明显高于其他处理。

本试验条件下,N₂O 排放通量范围为-0.17~6.61 g N₂O-N·hm⁻²·d⁻¹,基本处于我国旱地 N₂O 排放通量

范围 0.48~14.4 g N₂O-N·hm⁻²·d⁻¹ 之间^[17],但略小于黄淮海地区小麦/玉米轮作农田(N₂O 排放通量范围为 9.96~16.37 g N₂O-N·hm⁻²·d⁻¹)。整个轮作期内,在各个生育期灌溉后分别出现了 N₂O 排放峰值,说明氮素与水分的输入导致了土壤 N₂O 排放的增加,与前人的研究^[18-20]结果是一致的。在小麦季越冬期灌水 1 d 后各处理 N₂O 排放通量没有明显升高,而是在灌后第 7 d 达到了峰值,与各个时期的规律不一致。这是由于温度同时限制了 N₂O 的排放,温度是影响 N₂O 排放季

节性变化的关键因子^[18]。本研究结果表明,施沼液可增加土壤 N_2O 的排放水平,与其他研究^[21-24]的结果一致,沼液中不但含有大量的 N 素,同时造成土壤厌氧状态使反硝化作用底物充足,促进反硝化作用,使得 N_2O 排放水平提高。孙国峰等^[25]在其研究中得出沼液完全替代化肥处理的 N_2O 排放通量范围为 $-2.96 \sim 19.09 \text{ g } N_2O-N \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 高于本试验的 N_2O 排放水平。本试验条件下,各处理的 N_2O 排放水平大小顺序为 $T2 > T1 > T3 > CF > CK$ (图 3), 但 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 CF 处理间差异均未达到显著水平,表明与常规施肥处理(CF)相比,沼液没有显著增加农田 N_2O 的排放水平, N_2O 的产生过程包括硝化过程与反硝化过程, NH_4^+-N 与 $NO_3^- -N$ 均可作为氮源参与反应,而 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 与 CF 处理的土壤 NH_4^+-N 与 $NO_3^- -N$ 没有显著性差异,可能是灌溉沼液与施肥处理的 N_2O 排放水平无显著性差异的原因所在。这主要是因为含有大量 N 素的沼液灌溉使土壤处于短暂的厌氧状态,加剧了反硝化过程,所以本试验中灌溉沼液处理 N_2O 排放偏高,当然影响土壤 N_2O 排放水平的因素还应考虑土壤 pH、生物因素、土壤水分等。

本研究主要考察沼液灌溉对 CO_2 与 N_2O 排放的影响,由于 CO_2 与 N_2O 的排放是土壤微生物、土壤养分、酶活性等众多因素共同影响的结果,今后还需监测土壤中微生物活动、土壤酶活性等多因素对两者排放的影响及相关性。另外,本试验的采样频率并未覆盖整个轮作期,而是在主要生育期采样,这势必会造成监测结果的误差,今后研究应增加采样频率;本试验静态箱体积偏小,也会对试验结果造成影响,今后研究应增加静态箱体积。

3.2 沼液灌溉下土壤 CO_2 与 N_2O 排放通量与土壤理化因子的相关性

在本试验条件下,土壤 CO_2 、 N_2O 排放通量与土壤理化因子之间存在着一定的相关性(表 3)。

土壤 CO_2 排放通量与土壤 DOC 显著正相关($P < 0.05$),表明土壤 DOC 与土壤 CO_2 排放通量有着密切联系,是由于土壤有机碳决定着土壤碳库的大小,从而影响 CO_2 的排放。土壤 CO_2 排放通量与大气温度极显著正相关($P < 0.01$),说明大气温度对土壤 CO_2 排放影响极大,是由于温度影响着土壤微生物活动与土壤酶的活性。研究表明,在一定范围内,土壤温度升高可加速土壤中有机质的分解和微生物活性,从而增加土壤中 CO_2 浓度^[25]。土壤 N_2O 排放通量与土壤 DOC 显著正相关($P < 0.05$),说明土壤 DOC 与土壤 N_2O 排

表 3 各因子之间的相关性

Table 3 Correlations between the various factors

因子	N_2O-N	CO_2-C	DOC	NH_4^+-N	$NO_3^- -N$	大气温度
CO_2-C	0.096					
DOC	0.410*	0.365*				
NH_4^+-N	0.097	-0.384*	0.0691			
$NO_3^- -N$	0.491**	-0.136	0.297	-0.045		
大气温度	0.083	0.491**	0.305	-0.669**	0.120	
WFPS	0.326	-0.321	0.075	0.629**	0.105	-0.551**

注:WFPS 代表土壤孔隙含水率;* 表示 $P < 0.05$ 显著水平,** 表示 $P < 0.01$ 显著水平。

Note:WFPS indicates soil pore water content;* indicates $P < 0.05$ significance level,** indicates $P < 0.01$ significance level.

放通量也存在着密切关系。土壤 N_2O 排放通量与土壤 $NO_3^- -N$ 含量极显著正相关性($P < 0.01$),整个轮作期内, N_2O 排放通量与土壤 $NO_3^- -N$ 含量表现出高度的一致性。可见,土壤 DOC 与土壤 $NO_3^- -N$ 同时影响着 N_2O 的排放。这可能是由于土壤有机碳激活了土壤微生物的呼吸作用,加快了土壤中氧的消耗,从而加速了土壤厌氧环境的形成,间接增强了土壤反硝化作用。另外,有机碳矿化率直接影响着土壤反硝化作用强度;土壤 $NO_3^- -N$ 作为反硝化细菌进行反硝化作用的底物,直接影响着土壤反硝化强度;土壤 DOC 与土壤 $NO_3^- -N$ 也影响着土壤的 C/N 值,土壤的 C/N 比可以直接影响土壤微生物的活性,从而影响到土壤的硝化与反硝化过程,最后影响土壤 N_2O 排放^[26-27]。本研究还发现,施化肥处理(CF)会降低土壤 DOC 的含量,其他研究^[28-29]也得到了相同的结论。这可能是由于化肥能降低木质素酶活性^[30],抑制土壤有机碳的矿化,从而使土壤中 DOC 含量降低。

4 结论

(1)沼液灌溉没有使轮作周期内土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量的季节性变化规律发生改变,但会造成灌溉后短期内排放通量的增加。

(2)沼液灌溉处理在一定程度上提高了 CO_2 的排放水平,但除 $T3$ 处理外,差异性均未达到显著水平;沼液灌溉处理没有明显提高 N_2O 排放水平。

(3)灌溉沼液提高了土壤 DOC 含量,且随着灌溉次数与浓度的增加,土壤 DOC 含量也增加,施化肥反而会降低土壤 DOC 含量。

(4)本试验条件下,土壤 CO_2 排放通量与土壤 DOC 含量和大气温度显著正相关;土壤 N_2O 排放通量与土壤 DOC 和 $NO_3^- -N$ 含量显著正相关。

(5)综合考虑轮作季作物产量和 CO₂、N₂O 累积排放量及土壤理化因子,灌溉三次(小麦季灌溉两次+玉米季灌溉一次)2:1 沼液的处理(T2)为本试验条件下的最合理灌溉模式。

参考文献:

- [1] 王 风,张克强,黄治平. 废水灌溉农田研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1485-1488.
WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping. Development and expectation of research on wastewater irrigation in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1485-1488.
- [2] 石亚楠,张克强,王 风,等. 猪场厌氧肥水灌溉对设施油菜产量及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 190-195.
SHI Ya-nan, ZHANG Ke-Qiang, WANG Feng, et al. Yield and quality of lettuce irrigated with anaerobic effluent from swine farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 190-195.
- [3] 张俊峰,陈 超,宋金龙,等. 规模化沼气工程沼液与有机肥及其组合在小白菜上的应用效果比较[J]. 中国沼气, 2013, 31(3): 61-64.
ZHANG Jun-feng, CHEN-chao, SONG Jin-long, et al. Effects of biogas slurry and organic fertilizer and their combination on *Brassica chinensis* L.[J]. *China Biogas*, 2013, 31(3): 61-64.
- [4] 王卫平,陆新苗,朱凤香,等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2300-2305.
WANG Wei-ping, LU Xin-miao, ZHU Feng-xiang, et al. Influence of applying biogas slurry on yield and quality of citrus and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2300-2305.
- [5] 陈 瑶,石秋萍,陈玉成. 沼液连续浇灌对旱作和水田土壤养分及重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 76-80.
CHEN Yao, SHI Qiu-ping, CHEN Yu-cheng. Effects of continuous irrigation of biogas slurry on nutrient and heavy metal content in soil of dry land and paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 76-80.
- [6] 邓 蓉,陈玉成,石秋萍. 模拟沼液淋溶灌溉对土壤下渗水的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 68-71.
DENG Rong, CHEN Yu-cheng, SHI Qiu-ping. Effects of simulated biogas slurry leaching irrigation on soil infiltration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 68-71.
- [7] 吴华山,郭德杰,常志州,等. 猪粪沼液施用对土壤氨挥发及玉米产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 163-168.
WU Hua-shan, GUO De-jie, CHANG Zhi-zhou, et al. Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 163-168.
- [8] 杜臻杰,樊向阳,齐学斌,等. 猪场沼液灌溉对冬小麦生长和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 547-554.
DU Zhen-jie, FAN Xiang-yang, QI Xue-bin, et al. Growth and grain quality of winter wheat irrigated with biogas liquid from a swine farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 547-554.
- [9] 郭海刚,杜会英,张克强,等. 规模化牛场废水灌溉对冬小麦土壤速效氮迁移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 21-25.
GUO Hai-gang, DU Hui-ying, ZHANG Ke-qiang, et al. Effects of dairy wastewater irrigation on migration of soil available nitrogen[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4): 21-25.
- [10] 万运帆,李玉娥,林而达,等. 田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2495-2500.
WAN Yun-fan, LI Yu-e, LIN Er-da, et al. Field managements affect yield, soil carbon, and greenhouse gases emission of winter-wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2495-2500.
- [11] 宋利娜,张玉铭,胡春胜. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297-307.
SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297-307.
- [12] 潘 莹,胡正华,吴扬周,等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2771-2776.
PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, et al. Effects of conservation tillage on soil CO₂ and N₂O emission during the following winter-wheat season[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2771-2776.
- [13] 叶丹丹,谢立勇,郭李萍,等. 华北平原典型农田 CO₂ 和 N₂O 排放通量及其与土壤养分动态和施肥的关系[J]. 中国土壤与肥料, 2011(3): 15-20.
YE Dan-dan, XIE Li-yong, GUO Li-ping, et al. The emission-flux of CO₂ and N₂O and its relationship with soil nutrient dynamic and fertilization in typical upland fields in North China Plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2011(3): 15-20.
- [14] 张甲坤,陶 澍,曹 军. 中国东部土壤水溶性有机物含量与地域分异[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 308-314.
ZHANG Jia-shen, TAO Shu, CAO Jun. Spatial distribution pattern of water soluble organic carbon in Eastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 308-314.
- [15] 秦 越,李彬彬,武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO₂ 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1442-1449.
QIN Yue, LI Bin-bin, WU Lan-fang. Dynamics and interrelationship of CO₂ emission and dissolved organic carbon in soils with crop residue retention under different tillage practices[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1442-1449.
- [16] 郭树芳,齐玉春,董云社,等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1880-1890.
GUO Shu-fang, QI Yu-chun, DONG Yun-she, et al. Effects of different irrigation methods on soil CO₂ and N₂O fluxes in winter wheat field in North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1880-1890.
- [17] 宋文质,王少彬,张玉铭,等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 85-88.

- SONG Wen-zhi, WANG Shao-bin, ZHANG Yu-ming, et al. Agricultural activities and emissions of greenhouse gases in China region[J]. *Environmental Science*, 1996, 17(1):85-88.
- [18] 郑循华, 王明星, 王跃思. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5):1-5.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si. Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5):1-5.
- [19] 张振贤, 华 璐, 尹逊霄. 农田土壤 N₂O 的发生机制及其主要影响因素[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(3):114-120.
- ZHANG Zhen-xian, HUA Luo, YIN Xun-xiao. N₂O emission from agricultural soil and some influence factors[J]. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2005, 26(3):114-120.
- [20] 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. *农业环境与发展*, 2011, 28(5):42-46.
- ZHU Xiao-hong, MA You-hua, YANG Shu-yun, et al. Effects of fertilization on greenhouse gas emission from farmland[J]. *Agro-Environment & Development*, 2011, 28(5):42-46.
- [21] 陈永根, 彭永红, 宋哲岳. 沼液施用对土壤温室气体排放的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, 30(1):32-37.
- CHEN Yong-gen, PENG Yong-hong, SONG Zhe-yue. Biogas slurry application with greenhouse gas emission in agricultural soils[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2013, 30(1):32-37.
- [22] 刘平丽, 张啸林, 熊正琴. 不同水旱轮作体系稻田土壤剖面 N₂O 的分布特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9):2363-2369.
- LIU Ping-li, ZHANG Xiao-lin, XIONG Zheng-qin. Distribution characteristics of profile nitrous oxide concentration in paddy fields with different rice-upland crop rotation systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9):2363-2369.
- [23] Almaraz J J, Mabood F, Zhou X M. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, 73(1):113-119.
- [24] Jantalia C P, Santo H P, Urquiaga S. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil [J]. *Nutr Cycl Agroecos*, 2008, 82(2):161-173.
- [25] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 沼液替代化肥对麦季 CH₄、N₂O 排放及温室效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8):1654-1661.
- SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of chemical fertilizers substitution by biogas slurry on CH₄ and N₂O emissions and their greenhouse effects in wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1654-1661.
- [26] Baggs E, Rees R, Castle K, et al. Nitrous oxide release from soils receiving N-rich crop residues and paper mill sludge in eastern Scotland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(2):109-123.
- [27] Frimpong K, Baggs E. Do combined applications of crop residues and inorganic fertilizer lower emission of N₂O from soil[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(4):412-424.
- [28] 郭 锐, 汪景宽, 李双异. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤水溶性有机碳的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(9):2672-2673.
- GUO Rui, WANG Jing-kuan, LI Shuang-yi. Effects of long-term mulching and different fertilization treatments on dissolved organic carbon in Brown Soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(9):2672-2673.
- [29] 李彬彬, 马军花, 武兰芳. 土壤溶解性有机物对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(16):4690-4697.
- LIN Bin-bin, MA Jun-hua, WU Lan-fang. Effects of soil dissolved organic matter on CO₂ and N₂O emission[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16):4690-4697.
- [30] Meijide A, Cárdenas L M, Sánchez-Martín L, et al. Carbon oxide and methane fluxes from a barley field amended with organic fertilizers under Mediterranean climatic conditions[J]. *Plant and Soil*, 2010, 328(1/2):353-367.