

尹高飞, 王小非, 沈仕洲, 等. 沼液替代化肥对小麦-玉米轮作温室气体排放及温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1408–1419.
YIN Gao-fei, WANG Xiao-fei, SHEN Shi-zhou, et al. Effects of biogas slurry substituting fertilizer on greenhouse gas emission and greenhouse effect of wheat-corn crop rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1408–1419.

沼液替代化肥对小麦-玉米轮作温室气体排放及温室效应的影响

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

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 河南省农业科学院, 郑州 450002)

摘要: 本文采用密闭箱-气相色谱法研究不同沼液灌溉模式, 小麦-玉米轮作条件下温室气体的排放特征, 并运用全球增温潜势(GWP)和气体排放强度(GHGI)对小麦-玉米排放的温室效应进行估算。研究表明, 在冬小麦-夏玉米轮作周期中, 以清/沼比2:1配比的沼液灌溉, 小麦灌3次, 玉米灌溉1次的处理(T3)和小麦灌溉4次, 玉米灌溉1次的处理(T4)与常规施肥(CF)相比, GWP连续两年没有显著性差异, T3、T4和CF在2016年的GWP为2 990.82±285.00、3 235.48±307.05、3 047.35±315.11; T3、T4和CF在2017年的GWP为2 865.61±296.44、3 069.10±318.44和2 741.70±284.37。但小麦季灌溉1次, 玉米灌溉1次处理(T1)和与小麦灌溉2次, 玉米灌溉1次的处理(T2)的GWP比CF处理相比显著降低。T1和T2处理在2016年和2017年的GWP分别为2 578.57±279.39、2 586.13±263.01; 2 702.59±300.75、2 733.19±260.81, T1和T2处理2016年比CF处理降低了15.38%和11.31%; 2017年比CF处理降低了5.67%和0.31%。针对产量进行分析, T2、T3、T4和CF处理连续两年差异性不显著, 其中T4处理在2016年产量比CF处理提高了4.12%。T3、T4的温室气体排放强度与常规施肥处理(CF)连续两年差异性不显著, 2016年T1和T2处理与CF处理相比显著降低了0.56%, 2017年T2处理和CF处理相比差异性不显著。综合考虑GWP与作物产量的因素, T2处理(小麦季2:1沼液灌溉2次, 玉米季2:1沼液灌溉1次, 施氮量为315 kg·hm⁻²)为最优选择, 所以T2处理是可以替代化肥且较合理的灌溉模式。

关键词: 沼液; 小麦玉米; 温室气体; 全球增温潜势; 气体排放强度

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)06-1408-12 doi:10.11654/jaes.2018-0657

Effects of biogas slurry substituting fertilizer on greenhouse gas emission and greenhouse effect of wheat-corn crop rotation

YIN Gao-fei¹, WANG Xiao-fei², SHEN Shi-zhou¹, DU Hui-ying¹, BA Shi-di¹, ZHANG Ke-qiang^{1*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Henan Academy of Agriculture Science, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Greenhouse gas emissions under biogas slurry irrigation from the wheat-maize rotations were measured in situ using the method of static chambers and gas chromatographic techniques, and the greenhouse effects were assessed by using Global Warming Potential (GWP) and Greenhouse Gas Emissions Intensity (GHGI). The results showed that during winter wheat-summer maize rotation period, the GWP of T3 (3 times in wheat season and 1 time in maize season of 2:1 biogas slurry irrigation) and T4 (4 times in wheat season and 1 time in maize season of 2:1 biogas slurry irrigation) for the year 2017 were not significantly different from those for the year 2016 unlike the GWP with conventional fertilization (CF). The GWP of T3, T4 and CF in 2016 were 2 990.82±285.00, 3 235.48±307.05, 3 047.35±315.11, respectively; while, the GWP of T3, T4 and CF in 2017 were 2 865.61±296.44, 3 069.10±318.44, 2 741.70±284.37, respectively. But the

收稿日期: 2018-05-20 录用日期: 2018-10-22

作者简介: 尹高飞(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农田温室气体排放与减排。E-mail: yin_honey@126.com

*通信作者: 张克强 E-mail: kqzhang68@126.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371481); 公益性行业(农业)科研专项(201503106)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371481); The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China(201503106)

GWP was significantly reduced by T1(1 time in wheat season and 1 time in maize season of 2:1 biogas slurry irrigation) and T2(2 times in wheat season and 1 time in maize season of 2:1 biogas slurry irrigation) treatments compared with the GWP by CF treatment. The GWP of T1 and T2 in 2016 and 2017 were $2\,578.57 \pm 279.39$ and $2\,586.13 \pm 263.01$; $2\,702.59 \pm 300.75$ and $2\,733.19 \pm 260.81$ respectively. Compared with CF, T1 and T2 treatment reduced GWP by 15.38% and 11.31% in 2016 and by 5.67% and 0.31% in 2017. In terms of yield analysis, T2, T3, T4 and CF treatment did not show significant difference in two consecutive years, the yield of T4 treatment was 4.12% higher than that of CF treatment in 2016. The GHGI of T3, T4 and CF treatments were not significantly different for two consecutive years. Compared with CF treatment, the GHGI by T1 and T2 treatments significantly decreased by 0.56% in 2016, while T2 and CF treatments had shown no significant difference in 2017. Comprehensively, with the consideration of GWP and crop yield factors, the T2 treatment(2 times in wheat season and 1 time in maize season of 2:1 biogas slurry irrigation, and $315\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) might be the optimal choice. Therefore, T2 treatment is a reasonable irrigation mode instead of the application of chemical fertilizer.

Keywords: biogas slurry; wheat-maize; greenhouse gas; GWP; GHGI

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是最重要的3种温室气体,它们对全球变暖的贡献率分别达到60%、15%和5%^[1]。据估算,大气中每年有5%~20%的 CO_2 、15%~30%的 CH_4 和80%~90%的 N_2O 来源于土壤^[2-3]。除了气候条件和土壤特性外,农业管理措施例如施肥、水分管理方式、种植方式和耕作方式也是影响农田温室气体排放的重要因素^[4-7]。

目前,在华北地区普遍存在通过高灌水量($90 \sim 690\text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)^[8]和高施肥量($500 \sim 700\text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[9]来维持作物产量的现象,而过量用水和过度施肥对温室气体的排放会产生较大影响。有机肥作为化肥的一种替代形式,其因能够改善土壤的理化性质和提高作物产量而被广泛应用^[10]。沼液作为一种含有大量氮、磷、钾等营养元素的液态有机肥^[11],速效养分含量高,不仅可以使养殖废弃物得到有效利用,且其中含有大量可溶性有机碳^[12],还可以增加土壤有机质含量。除此以外,沼液中99%都是液体,施入土壤的同时可以增加土壤水分^[13]。

目前已有许多学者研究了沼液施用对农田温室气体排放规律的影响^[14-17],如孙国峰等^[14]研究表明猪粪沼液替代化肥降低了稻田 N_2O 的排放,但稻田的全球增温潜势显著增加;黄红英等^[13]将施用沼液与化学氮肥相比,发现沼液施用提高了稻田 N_2O 的排放量;靳红梅等^[15]研究发现追施猪粪沼液后, CH_4 和 N_2O 排放速率和总量增加;另有学者研究发现沼液替代化肥处理分别降低了25.39%的麦季全球增温潜势^[16];也有学者仅仅研究了沼液施用条件下 CO_2 和 N_2O 的排放^[17]。而针对沼液连续灌溉华北平原小麦-玉米轮作条件下土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 3种温室气体排放的全面研究则鲜有报道。

为此,本研究开展了为期两年的沼液完全替代

化肥试验,对沼液施用后华北平原小麦-玉米轮作体系的土壤理化性质、农田温室气体排放规律及综合增温潜势(GWP)进行测定,并计算了温室气体排放强度(GHGI),以期来确定合理的沼液灌溉模式来保证作物产量。本文旨在为建立高产高效的、具有良好经济和生态效益的综合农业管理措施提供实践指导和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年10月至2017年10月在河北省徐水县梁家营村($38^\circ 56' \text{N}$, $115^\circ 32' \text{E}$)进行,该区属东部季风暖温带半干旱气候区,气候温和,四季分明,年平均温度 11.9°C ,年平均降水量 546.9 mm ,年平均日照时数为 $2\,744.9\text{ h}$,年无霜期平均 184 d ,该区域主要种植作物体系为冬小麦-夏玉米两熟制轮作。

试验田土壤类型为潮褐土,耕层土壤质地为砂壤土。试验前耕层($0 \sim 20\text{ cm}$)土壤容重 $1.51\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,总氮为 $1.44\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总磷为 $0.70\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷为 $22.53\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮为 $16.45\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮为 $1.02\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可溶性有机碳为 $9.42\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置6个处理,具体操作方式见表1。每个处理3次重复,小区面积 51 m^2 ($8.5\text{ m} \times 6\text{ m}$),小区间田埂宽 1 m 。实验设计如表1所示。试验供试小麦为济麦22,玉米品种为郑丹958。采用人工条播,供试沼液是试验田附近的奶牛场养殖废水厌氧发酵的,清水与沼液按体积比例配比,沼液配比后用水泵通过PVC地下管道施入农田。习惯施肥处理(CF)中,N肥为尿素,磷肥为过磷酸钙。小麦期在种植前施用底肥,施N量为 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期

表1 冬小麦-夏玉米轮作试验设计

Table 1 Winter wheat – summer maize rotation experiment design

处理 Treatments	小麦季灌溉 Wheat season irrigation				养分输入 Nutrient inputs/kg·hm ⁻²		玉米季灌溉 Corn season	养分输入 Nutrient inputs/kg·hm ⁻²	
	越冬期 Wintering period	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	N	P ₂ O ₅	播种后 After sowing	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	2:1沼液	2:1沼液	2:1沼液	清水	315	117	2:1沼液	105	39
T4	2:1沼液	2:1沼液	2:1沼液	2:1沼液	420	156	2:1沼液	105	39
CF	清水	清水	清水	清水	300	120	清水	120	60

注:2:1沼液为2份清水与1份沼液混合。

追施N肥 150 kg·hm⁻²;玉米根据当地农民的习惯只施用基肥没有追肥。灌水时间(表2)为小麦季越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期,玉米种植后,所有处理灌水量及灌水次数相同,灌溉量为 83 mm,用超声波管式流量计来精确控制灌水量,灌溉误差在 1% 以内。试验小区内病虫害及杂草防治按当地一般农田管理方式进行。

供试沼液来自奶牛场粪污厌氧发酵,牛场采用干清粪清便工艺,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,经过 2:1 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 3 所示。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 气体采集及测定

采用静态箱-气相色谱法,采样箱由 PVC 制成,规格为长 20 cm×宽 10 cm×高 10 cm,底座规格为长 20 cm×宽 10 cm。采样时间为上午的 8:00—11:00,

表2 2015—2017年冬小麦-夏玉米轮作耕作时间

Table 2 Crop management details for all treatments in 2015—2017

作物轮作时间 Crop rotation time	种植时间 Planting time	收获时间 Harvest time	灌水时间 Fertilization time
2015—2016小麦	2015.10.07	2016.06.15	2015.12.05
			2016.04.04
			2016.05.05
			2016.05.26
2016玉米	2016.06.18	2016.09.30	2016.06.15
2016—2017小麦	2016.10.07	2017.06.15	2016.12.03
			2017.04.07
			2017.05.05
			2017.05.28
2017玉米	2017.06.18	2017.09.30	2017.06.15

表3 供试沼液水质基本特征(稀释前)

Table 3 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

采样前将采样箱垂直安放在底座 5 cm 深的凹槽内加水密封,采样箱内设置风扇用来混匀箱内气体,用 20 mL 一次性注射器分别于 0、10、20、30 min 采集气体 4 次贮存于 20 mL 的真空顶空瓶中。每次施肥前 1 d、施肥后 1、3、7 d 进行样品采集,之后每两周监测一次。CO₂、N₂O 和 CH₄ 等浓度用 Thermo Trace 1300 型气相色谱仪测定,CO₂ 和 CH₄ 检测器为热导检测器(TCD),N₂O 检测器为 63Ni 电子捕获检测器(ECD),色谱柱为 80/100 目 PorapakQ 填充柱,进样器、检测器以及填充柱的温度分别为 100、300 ℃和 65 ℃,载气为 95% 氩气+5% 甲烷混合气,流速为 40 mL·min⁻¹。

气体排放通量计算公式:

$$F=\rho\times V/A\times\Delta c/\Delta t\times273/(273+T)$$

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,CH₄ 排放通量单位为 g·hm⁻²·d⁻¹; ρ 为标准状态下气体密度,kg·m³; 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 为时间间隔,h; $\Delta c/\Delta t$ 通过 4 次采样样品浓度数据斜率; T 为采样时箱内温度,℃。

1.3.2 土壤样品的采集测定

土壤样品与气体样品采集同时进行,小区内随机采集 3 处表层 5 cm 土壤样品进行混匀并进行测定。土壤含水量采用烘干法进行测定,土壤氨态氮、硝态氮采用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾浸提用吉田流动注射分析仪

测定(中国, FIA-6000+);土壤可溶性有机碳采用Elementar TOC仪(德国, Vario)测定。

1.4 数据分析与处理

气体累积排放量计算公式为:

$$E_c = (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中: E_c 为气体累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F 为 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的排放速率或吸收速率, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; i 代表采样次数, t 为采样时间。

全球增温潜势(GWP)计算公式:

$$\text{GWP}(\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}) = \int \text{CO}_2 \times 12/48 + \int \text{N}_2\text{O} \times 44/28 \times 265 + \int \text{CH}_4 \times 16/12 \times 28$$

式中: $\int \text{CO}_2$ 为 CO_2 累积排放总量, $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$; $\int \text{N}_2\text{O}$ 为 N_2O 累积排放总量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; $\int \text{CH}_4$ 为 CH_4 累积排放总量, $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

温室气体排放强度计算公式:

$$\text{GHGI}(\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ grain}) = \text{GWP}/Y$$

式中: GWP 为全球增温潜势, $\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$; Y 为单位面积平均产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

本文数据用Excel计算,应用Origin作图,ANOVA应用SPSS 18.0软件进行各影响因素相关性分析以及方差分析,采用最小显著法(LSD)进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 轮作期土壤温度、大气温度以及WFPS动态变化

从图1中可以看出,小麦-玉米轮作期内温度变化较大,小麦越冬期温度较低,WFPS达到80%~90%左右。小麦返青后,温度逐渐升高,水分蒸发量加大,

且随着作物生长需要大量水分,WFPS逐渐下降,但每次沼液灌溉后,WFPS也逐渐上升。玉米季温度较高,水分一部分被蒸发,一部分被作物吸收利用,所以玉米季WFPS较低。

2.2 沼液灌溉对农田土壤温室气体排放通量的动态变化

不同处理对小麦-玉米生育期内 CO_2 排放通量随时间的变化如图2(a)所示。不同处理 CO_2 排放规律基本一致,沼液灌溉并没有明显改变土壤 CO_2 排放规律。与CK相比,沼液灌溉处理均提高了 CO_2 的排放。小麦越冬期,各处理之间差异不显著,2014—2016年平均排放通量为 $1.45 \sim 3.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。随着温度的上升, CO_2 的排放通量在小麦的灌浆期达到排放高峰,且各处理之间 $T4 > T3 > T2 > T1 > CF > CK$ 。 CO_2 排放高峰均出现在小麦、玉米季沼液灌溉后第1 d以及7、8月份玉米季(高温多雨)。小麦季在2015年、2016年各处理中 CO_2 排放通量变化范围分别为 $1.39 \sim 21.00$ 、 $1.49 \sim 25.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。玉米季高温多雨, CO_2 排放通量明显高于小麦季,7、8月份 CO_2 的排放通量达到最大值,玉米季在2015年、2016年排放通量变化范围分别为 $3.46 \sim 23.82$ 、 $3.88 \sim 25.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

小麦季在2016、2017年各处理中 N_2O 排放通量变化范围分别为 $-3.01 \sim 19.99$ 、 $0.23 \sim 11.87 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从图2(b)中可以看出小麦季 N_2O 随时间的变化呈现出明显的季节变化规律。小麦越冬期,各处理之间 N_2O 的排放没有显著性差异,但是随着温度的升高,沼液灌溉处理中 N_2O 的排放显著高于CF处理高于CK处理,小麦季 N_2O 的排放高峰出现在4月份,CF、T1、T2、T3、T4处理在2016年的峰值分别为13.09、8.20、14.69、18.46、19.99、13.09 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,2017年分

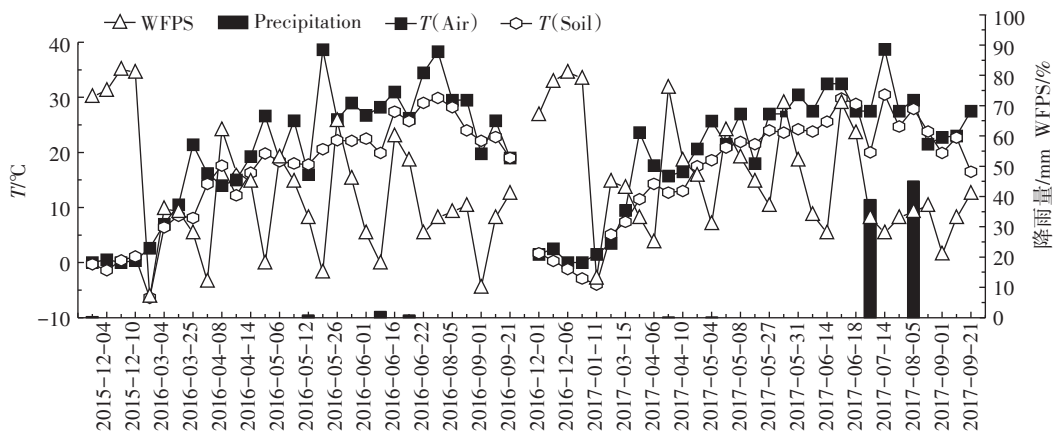


图1 土壤WFPS、大气温度、土壤温度、降雨量动态变化

Figure 1 Dynamic changes of soil WFPS, air temperature, soil temperature and amount of precipitation

别为 10.54、8.59、13.55、16.76、18.56 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。玉米季农田土壤 N_2O 在 2016、2017 年中各处理 N_2O 排放通量变化范围分别为 0.43~16.54、0.9~18.55 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。玉米季 N_2O 的排放峰在灌溉后的第 1 d, 玉米季 N_2O 的排放高于小麦季, 从整体来看, T4 处理高于其他处理。

2015 年和 2016 年小麦生育期 CH_4 吸收通量的波

动范围在 -0.15~0.52、-0.24~0.48 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。由图 2(c) 可知, 每次沼液灌溉后都伴随着 CH_4 不同程度的排放, CH_4 排放高峰出现在沼液灌溉后 1 d, 随后逐渐降低, 从整个生长季来看, 施肥对各处理 CH_4 排放通量没有显著的影响, 整体表现为土壤对 CH_4 的吸收。2015 年、2016 年玉米季 CH_4 排放通量变化范围分别为 -0.15~0.50、-0.19~0.55 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

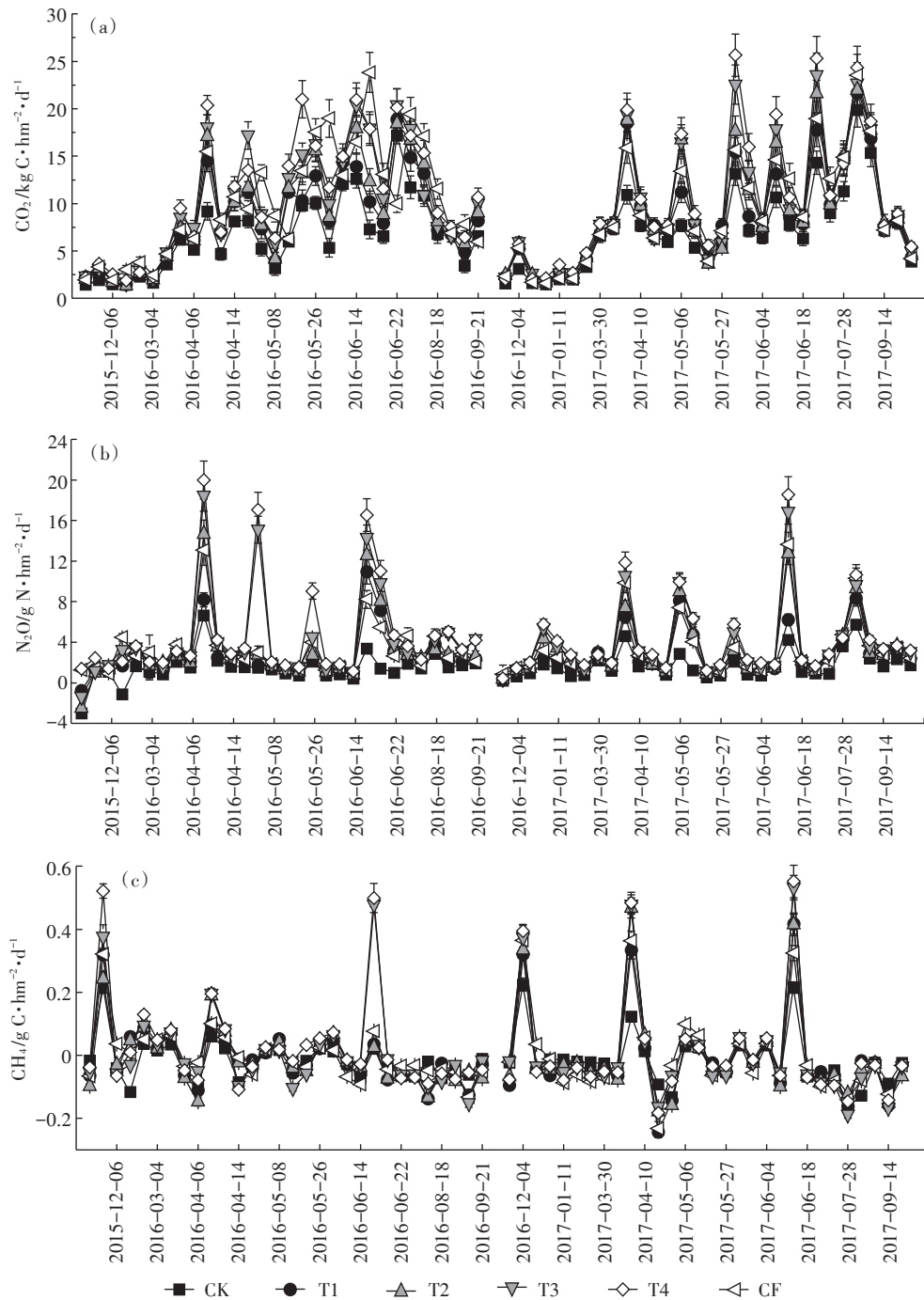


图2 2015—2017年小麦-玉米轮作温室气体排放通量的动态变化

Figure 2 Dynamic changes of greenhouse gas emissions of wheat-maize rotations in 2015–2017

2.3 不同处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 含量的动态变化

图3(a)中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量不同处理间表现出一定的差异性。2015年和2016年小麦的越冬期,沼液灌溉处理显著高于CK和CF处理,其他时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量差异性不显著,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量随着灌溉次数增加而增加但均低于小麦越冬期。2015、2016年各

处理土壤平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量范围为 2.4~5.38、2.45~6.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图3(b)中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化受N素输入影响较大,各处理中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量随着时间推移而逐渐增加。小麦越冬期和拔节期,常规施肥处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量高于沼液灌溉处理,但随着小麦的生长,T3和T4处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量逐渐上升;玉米季各处理间没有显著性

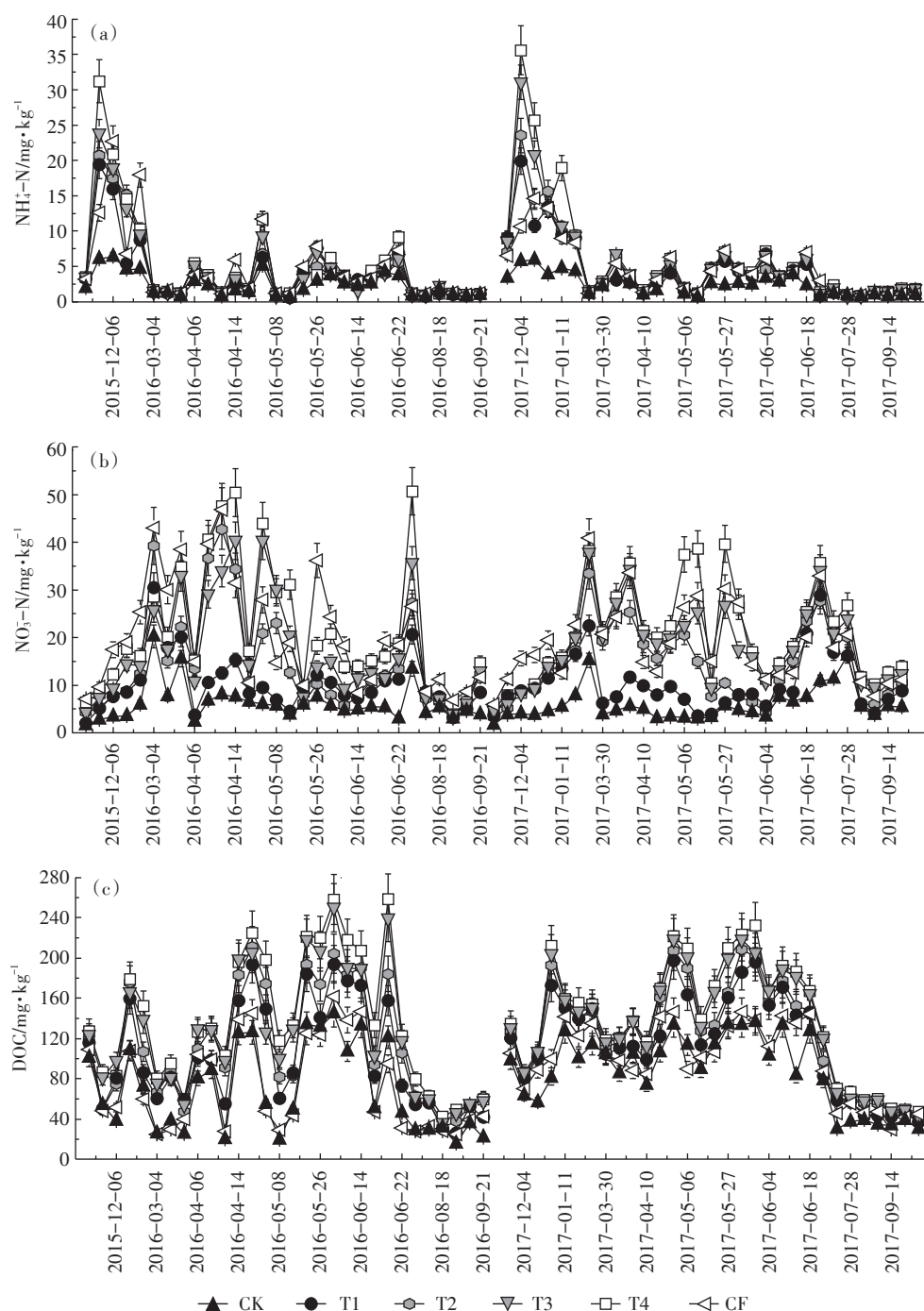


图3 2015—2017年小麦-玉米 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and DOC of wheat-maize rotation in 2015—2017

差异。2015、2016年各处理土壤平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量范围为6.13~22.19、5.82~20.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整个轮作期内, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈现出此消彼长的趋势。

沼液灌溉后土壤DOC含量迅速增加,小麦-玉米轮作期内,各处理DOC含量 $\text{T4}>\text{T3}>\text{T2}>\text{T1}>\text{CK}>\text{CF}$,沼液灌溉处理明显增加土壤DOC含量,而施用化肥处理(CF)显著降低了土壤DOC含量。

2.4 温室气体排放与各影响因子之间的相关性分析

通过Pearson相关性分析表明(表4), CO_2 排放量与大气温度和土壤DOC含量($P=0.395$)呈显著正相关,和土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量($P=-0.440$)呈显著负相关; N_2O 排放通量和WFPS($P=0.293$)、大气温度($P=0.313$)、土壤DOC($P=0.332$)、土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量($P=0.280$)呈显著

正相关; CH_4 和WFPS($P=0.325$)呈显著相关性。

2.5 沼液灌溉对温室气体累积排放量的影响

从表5中可以看出,在冬小麦-夏玉米轮作周期中,T3和T4处理与CF相比全球增温潜势(GWP)没有显著性差异,T1和T2处理和常规施肥相比显著降低了GWP,2016年T1和T2处理分别降低了15.39%和11.32%;2017年分别降低了5.67%和0.31%;针对产量进行分析,2016年和2017年产量T2、T3、T4和CF处理相比差异性不显著,其中T4处理在2016年产量比CF处理提高了4.12%;温室气体排放强度T3、T4和CF连续两年差异性不显著,2016年T1和T2处理与CF处理相比显著降低了0.56%,2017年T2处理和CF处理相比差异性不显著。

表4 3种温室气体排放通量与各因子之间的相关性

Table 4 Correlation between three greenhouse gas emission fluxes and various factors

温室气体 Greenhouse gas	大气温度 Air temperature	WFPS	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	DOC
CO_2	0.705**	-0.053	-0.440**	0.107	0.395*
N_2O	0.313*	0.293*	-0.145	0.280**	0.332*
CH_4	-0.155	0.325*	0.235	0.131	0.002

注:**表示 $P<0.01$ 显著水平,*表示 $P<0.05$ 显著水平。

Note: ** represent significant at 0.01 level,*represent significant at 0.05 level.

表5 2015—2017年不同处理温室气体累积排放量、全球增温潜势及温室气体排放强度

Table 5 The cumulative effect of different treatment of greenhouse gas emissions, global warming potential, and greenhouse gas emission intensity in 2015—2017

处理 Treatments	CO_2 累积排放量 CO_2 cumulative emissions/ $\text{g C}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 累积排放量 N_2O cumulative emissions/ $\text{g N}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH_4 累积排放量 CH_4 cumulative emissions/ $\text{g C}\cdot\text{hm}^{-2}$	GWP/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	产量 Yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	GHGI/ $\text{kg CO}_2\text{ eq}\cdot\text{hm}^{-2}$
2015—2016						
CK	1 985.13±187.03b	437.36±62.94b	-2.32±0.35a	2 036.12±213.50c	6 428.90±245.28c	0.32a
T1	2 424.55±234.75a	736.50±119.41b	-1.45±0.46b	2 578.57±279.39b	10 462.53±1 335.77b	0.25b
T2	2 576.42±250.50a	700.88±140.94b	-2.13±0.46a	2 702.59±300.75b	15 814.63±515.04a	0.17c
T3	2 759.88±250.40a	1 018.12±79.07a	-1.39±0.49b	2 990.82±285.00a	16 220.87±2 387.79a	0.18c
T4	2 893.79±264.45a	1 315.67±109.55a	-0.25±0.48c	3 235.48±307.05a	17 189.40±2 601.48a	0.19c
CF	2 797.6±262.15a	1 090.77±168.15a	-1.41±0.40b	3 047.35±315.11a	16 509.5±683.45a	0.18c
2016—2017						
CK	2 129.44±196.15b	518.52±44.32b	-3.34±0.34b	2 173.37±217.43c	5 906.3±769.19c	0.37a
T1	2 519.31±229.46b	782.89±74.79b	-5.02±0.49a	2 586.13±263.01b	9 954.47±907.69b	0.26b
T2	2 616.67±224.23a	938.46±88.21b	-4.47±0.47b	2 733.19±260.81b	15 778.63±770.89ab	0.17c
T3	2 707.24±259.99a	1 036.62±94.35a	-4.15±0.41b	2 865.61±296.44a	16 025.40±434.34a	0.18c
T4	2 903.58±271.72a	1 133.27±122.56a	-4.81±0.51a	3 069.10±318.44a	16 195.23±303.27a	0.19c
CF	2 636.66±238.42a	896.80±115.39b	-4.74±0.55a	2 741.70±284.37a	16 645.13±498.27a	0.16c

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$).

3 讨论

3.1 沼液灌溉对农田温室气体排放的影响

农田 CO_2 的排放实际是土壤中生物代谢和生物化学过程等所有因素的综合产物^[18]。试验 CO_2 排放速率均为正值,是 CO_2 的源,这与其他学者在华北平原得到的结果一致^[19]。本试验小麦季 CO_2 排放通量范围是 $1.39\sim 25.65 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,和其他学者在华北平原研究结果 ($1.31\sim 63.31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 基本一致^[19-21],但略低于其研究结果主要原因是试验区域的 DOC 含量较低,相关性分析表明,土壤中的 CO_2 排放与土壤 DOC 含量呈显著正相关 ($P<0.05$)。部分研究表明施用有机肥会增加 CO_2 的排放^[22-24],本研究表明沼液灌溉和施用化肥处理之间差异性不明显,这与陈永根等^[25]的研究结果一致。温度是影响 CO_2 的重要影响因素,主要表现在对土壤微生物和根际呼吸酶活性上,从而影响土壤的生化反应速率^[26-27],相关研究表明,土壤释放的 CO_2 有 85%~90% 是由于土壤微生物活动产生。小麦越冬期由于温度较低,土壤微生物活性较弱, CO_2 排放通量较小,各处理间差异不明显。2015 年和 2016 年小麦越冬期 CO_2 排放速率分别为 $1.45\sim 3.81 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.56\sim 3.53 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。4 月小麦进入拔节期,此时 CO_2 的排放随着温度的升高而升高,随着沼液的施入促进了作物快速生长和根系活动, CO_2 达到第一个排放高峰。5 月和 6 月达到了小麦季的第二个和第三个排放高峰。2016 年和 2017 年小麦季的排放高峰分别为 $19.89 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $25.65 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。 CO_2 排放通量的季节性变化与温度的季节性变化规律极度吻合,玉米季高温多雨, CO_2 排放通量明显高于小麦季。随着玉米的生长,尽管此时没有养分的输入,但是到 8 月份时 CO_2 的排放通量达到最大值,生长后期一直维持在一个较高水平。到成熟期,由于死亡的根系和植株地上、地下部凋落物的增加,为微生物活动提供了较多的有机质,因此收获期间的 CO_2 排放通量会出现一个小的排放峰。

农田 N_2O 是在微生物作用下通过硝化和反硝化产生的^[28],这些过程主要受施肥、灌溉、土壤理化性质和气候条件的影响。本试验 N_2O 的排放通量分别为 $-3.01\sim 11.87 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,与陈永根等^[25]、刘平丽等^[29]针对沼液灌溉后 N_2O 排放研究结果基本一致,主要是因为沼液中不仅含有大量的 N 素,同时沼液灌溉使土壤处于厌氧状态,为反硝化作用提供充足底物且处于适宜的反应条件。2015 年小麦越冬期出现了土壤

N_2O 吸收的现象,数值范围为 $-3.01\sim -0.77 \text{ g N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,相关研究表明,当土壤处于一种 N 素含量较低的干燥环境中,会出现土壤对 N_2O 吸收的现象^[30];也有研究发现在较低的矿质 N 及较高的土壤水分含量条件下,硝化与反硝化过程中产生的 N_2O 会进一步被还原为 N_2 ,因而会出现 N_2O 吸收现象^[31-32]。从图中可以看出,施肥和灌溉可以显著提高 N_2O 的排放,这主要是由于施肥为作物生长提供了需要的养分,而灌溉为反硝化微生物创造了良好的厌氧环境,提高了 N_2O 的排放。Keller 等^[33]的研究指出,在 50%~80%WFPS 的范围内, N_2O 排放通量随着 WFPS 呈对数增长的模式,丁军军等^[34]研究发现 WFPS 在 70% 的水分条件下排放的 N_2O 显著高于 WFPS 在 50% 的情况,这与本实验得到的结果相似,通过相关性分析得知, N_2O 的排放与 WFPS 显著相关。研究表明氮肥和水分是农田 N_2O 排放的最主要影响因素^[35],其中有机质也是 N_2O 产生的驱动因子^[22]。除越冬期外,各处理灌溉后的第 1 d,土壤 N_2O 排放水平均出现显著性差异 ($P<0.01$),说明沼液中的 N 肥可以促进农田 N_2O 的排放。夏季 N_2O 排放通量会大于冬季,这是由于反硝化过程与细菌、真菌以及有关酶活性等密切相关^[36-40],从而促进 N_2O 的排放。小麦进入返青期,追肥和灌溉后很快出现了第一个 N_2O 的排放高峰,这是因为在此期间高灌溉量和 N 素的输入使土壤有丰富的 N 源和适宜的水分含量,土壤处于适宜排放 N_2O 的水平。2016 年和 2017 年小麦季的排放高峰分别为 $19.99 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $11.87 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,但随着时间的推移各处理 N_2O 排放水平逐渐降低,表明 N 肥和水分的输入只会造成 N_2O 排放水平的短暂性升高并不会产生长期影响。之后的抽穗期和灌浆期小麦生长迅速,土壤中的 N 素不断被小麦植株吸收,土壤 N_2O 排放通量比较低。且抽穗期和灌浆期 N_2O 排放峰值均低于返青期,这是由于在此期间是清水灌溉,没有带入大量的营养元素。夏玉米生育期土壤温度普遍高于小麦季,排放高峰也同样是发生在灌溉后,玉米季的 N_2O 排放通量在灌溉后第 3 d 依然保持在较高水平,施入的沼液使土壤中的有机氮矿化增加^[41-42],在适宜的土壤水分条件下 N_2O 排放较高。

当土壤中 CH_4 浓度低于大气中 CH_4 浓度时,在浓度梯度作用下引起 CH_4 的负排放,本试验结果表明华北平原的土壤为 CH_4 的“汇”,与宋丽娜等^[19]、齐玉春等^[43]、张雪松等^[44]得到的结果一致。这主要是由于 CH_4 在土壤中的排放和吸收受到施肥、灌溉、耕作、土

壤理化特性、气候季节性变化规律的影响^[45-46]。小麦越冬期进行了第一次沼液灌溉,一方面使土壤处于厌氧环境,另一方面土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量迅速增加抑制土壤对 CH_4 的吸收^[47],从而促进了 CH_4 的排放。但随后逐渐降低,由于温度条件的限制,越冬期 CH_4 的排放处于较低水平,各处理之间差异不大。4月小麦进入拔节期后,随着沼液第二次的输入以及温度的回升, CH_4 出现第二个排放高峰,此时 CH_4 的排放峰值达到 $0.05 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。当小麦进入生长后期,由于水分和N素的消耗, CH_4 的排放高峰低于小麦的拔节期。玉米季由于沼液的施入, CH_4 又出现一个排放高峰,玉米生长后期,各处理之间没有显著性差异。

3.2 沼液灌溉对土壤理化性质的影响

小麦-玉米轮作周期内,不同处理中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 由于养分输入的含量与时间的不同表现出一定的差异性。2015年和2016年小麦的越冬期,沼液灌溉处理显著高于CK和CF处理,这是因为沼液中含有大量的N营养元素,其中氨态氮所占的比例较高^[48]。2016年沼液灌溉处理和施用化肥处理差异性不明显可能是由于尿素转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较快。其他时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量均低于小麦越冬期,是因为小麦进入快速生长时期,对N素及各种养分的吸收利用也进入快速吸收阶段,所以土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也较低。另外在除沼液灌溉的其他时期也会出现不同程度的低高峰,这是由于不同程度的降雨导致土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加,华北平原地区以氨态氮沉降为主,沉降量为 $3.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[49]。施肥和沼液灌溉后土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量没有迅速上升,而是在第7 d后达到最大值,这是因为N素主要是以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式进入土壤,通过土壤微生物活动和各种生化反应 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 逐渐向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化。由于沼液中含有大量的有机物,因此沼液灌溉后土壤中DOC含量迅速增加,各处理中DOC含量具有显著差异性, $\text{T4}>\text{T3}>\text{T2}>\text{T1}>\text{CK}>\text{CF}$,表明沼液灌溉可以显著提高土壤DOC含量,多数研究表明有机肥为土壤微生物提供碳源,因而能够明显提高土壤溶解性有机碳的含量,且效果优于单施化肥^[50-53]。本研究表明施用化肥会降低土壤DOC含量,这是因为单施化肥会加速土壤有机碳的分解,降低土壤中的碳氮比^[54],加速土壤原有有机碳的分解,使土壤中有机碳的矿化受到抑制,并减弱微生物活性,从而使土壤中可溶性有机碳含量较低^[55];有研究表明^[56],单施化肥会造成作物的根茬残留量较低,使土壤易氧化有机质和难氧化有机

质均有所消耗,造成有机质总量下降。

3.3 沼液灌溉对作物产量以及农田温室效应的影响

农田水肥管理是在保证产量的前提下对温室气体进行合理减排^[57-58]。本研究表明,沼液灌溉处理和常规施肥相比产量没有显著性差异,且沼液灌溉可以明显提高土壤有机质含量以及养分含量,为作物生长提供充足的能源。GWP主要以 N_2O 为主,它在大气中存在时间较长,且增温潜势远高于 CH_4 ,华北平原旱地土壤 CH_4 主要以吸收为主,对环境是有利的。沼液含有丰富的氮磷钾等营养元素和微量元素等营养物质,能够满足作物正常生产。同时沼液作为有机肥可以将作物未吸收利用的N素转化为有机氮,当作物需N量增加时,微生物群体释放出所固定的N素供作物生长^[59-60],从而提高作物产量^[61]。本试验针对作物产量进行分析,发现沼液灌溉和常规施肥处理差异性不大,因此本试验条件下沼液可以替代化肥施用于农田。温室气体排放强度(GHGI)是将温室效应与作物产量相结合来评价综合温室效应。本研究中,T2处理连续两年的GWP低于常规施肥处理,产量和常规施肥处理没有显著性差异,且2016年GHGI与常规施肥没有显著性差异,在2017年显著降低。由此可见,T2处理(小麦季2:1沼液灌溉2次,玉米季2:1沼液灌溉1次,施N量为 $315 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为最优选择,在保证产量的前提下,GWP也没有显著增加,所以T2处理能够实现作物产量与环境效应的统一,可作为华北平原农田推荐的一种管理模式。

4 结论

(1)沼液灌溉没有改变轮作周期内土壤温室气体排放通量的季节性变化规律,但会造成短时期内排放通量的增加。

(2)沼液灌溉处理提高了土壤可溶性碳和氨态氮的含量,为作物生长提供所需能源,而施用化肥会造成土壤可溶性碳降低。

(3)针对作物产量进行分析,沼液灌溉处理(T2、T3、T4)和常规施肥处理没有显著性差异;全球增温潜势中,T3和T4处理与常规施肥(CF)没有显著性差异,T1和T2与常规施肥(CF)处理相比显著性降低;温室气体排放强度T3、T4和常规施肥处理连续两年差异性不显著,T1和T2处理与常规施肥(CF)相比显著性降低。

(4)综合考虑GWP与作物产量的因素,T2处理(小麦季2:1沼液灌溉2次,玉米季2:1沼液灌溉1次,

施N量为 $315\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为最优选择。

参考文献:

- [1] Le T, Somerville R, Cubasch U, et al. Historical overview of climate change science[R]. IPCC, 2007.
- [2] Nakicenovic N, Swart R. Special report on emissions scenarios[J]. *Soil Science*, 2000, 559(2):612.
- [3] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Encyclopedia of Language & Linguistics*, 2007, 12(1):171-175.
- [4] 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.
- [5] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4):740-749.
- LI Jing, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4):740-749.
- [6] 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]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4):966-975.
- ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, 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.
- [7] Yao Z S, Zheng X H, Xie B H, et al. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(10):2131-2140.
- [8] Wang E, Yu Q, Wu D, et al. Climate, agricultural production and hydrological balance in the North China Plain[J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(14):1959-1970.
- [9] Zhen L, Zoebisch M A, Chen G, et al. Sustainability of farmers' soil fertility management practices: A case study in the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(4):409-419.
- [10] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2004(5):12-16.
- WANG Li-gang, LI Wei-jiong, QIU Jian-jun, et al. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(5):12-16.
- [11] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):291-296.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 27(1):291-296.
- [12] 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 Xiao-lin, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu, et al. Tillage effects on CH_4 and N_2O from double cropping paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):282-289.
- [13] 黄红英, 曹金留, 靳红梅, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11):2353-2361.
- HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, JIN Hong-mei, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2353-2361.
- [14] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(5):124-131.
- SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of chemical fertilizers substitution by biogas slurry on CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effects in wheat field[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(5):124-131.
- [15] 靳红梅, 常志州. 追施沼液对不同pH土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(8):1648-1655.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou. Effect of soil pH on CH_4 and N_2O emissions after topdressing digested pig slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1648-1655.
- [16] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 沼液替代化肥对麦季 CH_4 、 N_2O 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 CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effects in wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1654-1661.
- [17] 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 CO_2 、 N_2O 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 CO_2 and N_2O emission from winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):783-792.
- [18] Singh S, Singh J S, Kashyap A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N fertilization[J]. *Biochem*, 1999, 31:1219-1228.
- [19] 宋丽娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 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, et al. Greenhouse gas emission and comprehensive greenhouse effect of winter wheat soil in high-yielding agricultural areas of north China plain[J]. *Journal of China Ecological Agriculture*, 2013, 21(3):297-307.
- [20] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 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):65-70.
- WAN Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Effects of field management on soil carbon and greenhouse gas emissions in winter wheat production in north China plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):65-70.
- [21] 张贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3):653-

659.
ZHANG He, GUO Li-ping, XIE Li-yong, et al. Effects of different management measures on soil CO₂ and N₂O emissions in winter wheat fields of north China plain[J]. *Soil Bulletin*, 2013, 44(3): 653-659.
- [22] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381-4389.
LI Yan-qing, TANG Ji-wei, CHE Sheng-guo, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381-4389.
- [23] 韩继明, 潘根兴, 刘志伟, 等. 减氮条件下秸秆炭化与直接还田对旱地作物产量及综合温室效应的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(6): 986-995.
HAN Ji-ming, PAN Gen-xing, LIU Zhi-wei, et al. Contrasting effect of straw return and its biochar on changes in crop yield and integrated global warming effects under different nitrogen levels[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(6): 986-995.
- [24] 孙海泥, 岳善超, 王仕稳, 等. 有机肥及补充灌溉对旱地农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 2055-2065.
SUN Hai-ni, YUE Shan-chao, WANG Shi-wen, et al. Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 2055-2065.
- [25] 陈永根, 彭永红, 宋哲岳, 等. 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, et al. Effects of biogas slurry application on soil greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural and Forestry University*, 2013, 30(1): 32-37.
- [26] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B, et al. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming[J]. *Soil Science*, 1999, 61: 475-481.
- [27] Andrews J A, Matamala R, Westover K M, et al. Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the delta C-13 of soil-respired CO₂[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(5): 699-706.
- [28] 陈素英, 胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. 生态农业研究, 1997, 5(2): 42-46.
CHEN Su-ying, HU Chun-sheng. Soil respiration rate of farmland ecosystem in the piedmont of Taihang mountains[J]. *Ecological Agriculture Research*, 1997, 5(2): 42-46.
- [29] 刘平丽, 张啸林, 熊正琴, 等. 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, et al. Distribution characteristics of soil profile N₂O in paddy fields in different water-drought rotation systems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2363-2369.
- [30] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1122-1128.
WANG Yu-ying, HU Chun-sheng. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1122-1128.
- [31] Beare M H, Gregorich E G, St-Georges P. Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(3): 611-621.
- [32] Barton L, Kiese R G, David, et al. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 177-192.
- [33] Keller M, Reinert W A. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8: 399-410.
- [34] 丁军军, 张薇, 李玉中, 等. 不同灌溉量对华北平原菜地 N₂O 排放及其来源的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2269-2276.
DING Jun-jun, ZHANG Wei, LI Yu-zhong, et al. Effects of different irrigation amounts on N₂O emissions and sources of vegetable plots in North China Plain[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2269-2276.
- [35] 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(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(5): 42-46.
- [36] 高旺盛. 农业宏观分析方法与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社.
GAO Wang-sheng. Agricultural macro analysis methods and applications[M]. Beijing: China Agricultural University Press.
- [37] 冯伟, 管涛, 王永华, 等. 沼液与尿素配施对冬小麦光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(8): 1401-1408.
FENG Wei, GUAN Tao, WANG Yong-hua, et al. Effects of biogas slurry combined with urea on photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(8): 1401-1408.
- [38] Marls T, Lithour Gidis A S, Gagianas A A. Effects of injected liquid cattle manure on growth and yield of winter wheat and soil characteristics[J]. *Agron J*, 2003(95): 592-596.
- [39] Shangguan Z P, Shao M, DyCKmans J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2000, 156: 46-51.
- [40] 吕汶霖. 沼液农用对小麦产量、品质及土壤质量的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
LÜ Wen-lin. Effect of agricultural usage of biogas slurry on wheat yield, quality and environmental quality of soil[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [41] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2041-2049.
WU Jin-shui, GUO Sheng-li, DANG Ting-hui. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2041-2049.
- [42] 沈玉芳, 李世清, 邵明安. 水肥空间组合对冬小麦生物学性状及生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1822-1829.

- SHEN Yu-fang, LI Shi-qing, SHAO Ming-an. Effects of water and fertilizer spatial coupling on biological characteristics and biomass of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8):1822-1829.
- [43] 齐玉春,董云社,章申.华北平原典型农业区土壤甲烷通量研究[J].农村生态环境,2002,18(3):56-58,60.
- QI Yu-chun, DONG Yun-she, ZHANG Shen. Methane fluxes of typical agricultural soil in the North China Plain[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(3):56-58, 60.
- [44] 张雪松,申双和,李俊,等.华北平原冬麦田土壤CH₄的吸收特征研究[J].南京气象学院学报,2006,29(2):181-188.
- ZHANG Xue-song, SHEN Shuang-he, LI Jun, et al. Soil CH₄ uptake in winter wheat field in the North China Plain[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(2):181-188.
- [45] 徐星凯,周礼恺.土壤源CH₄氧化的主要影响因子与减排措施[J].生态农业研究,1999,7(2):20-24.
- XU Xing-kai, ZHOU Li-kai. Main factors affecting soil-borne methane oxidation and measurements for reducing CH₄ flux[J]. *Eco-agriculture Research*, 1999, 7(2):20-24.
- [46] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37:25-50.
- [47] 孙海泥,岳善超,王仕稳,等.有机肥及补充灌溉对旱地农田温室气体排放的影响[J].环境科学学报,2018,38(5):2055-2065.
- SUN Hai-ni, YUE Shan-chao, WANG Shi-wen, et al. Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5):2055-2065.
- [48] 张全国,杨群发,李随亮.猪粪沼液中氨态氮含量的影响因素实验研究[J].农业工程学报,2005,21(6):114-117.
- ZHANG Quan-guo, YANG Qun-fa, LI Sui-liang, et al. Influence of fermentation conditions on the content of ammonia nitrogen in anaerobic fermentation slurry[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(6):114-117.
- [49] 徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):83-90.
- XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, RAN Wei. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):83-90.
- [50] 王慎强,李欣,徐富安,等.长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J].中国生态农业学报,2001,9(2):77-78.
- WANG Shen-qiang, LI Xin, XU Fu-an, et al. Effects of long-term application of fertilizers and organic fertilizers on the physical properties of moist soil[J]. *Journal of Ecological Agriculture of China*, 2001, 9(2):77-78.
- [51] 迟继胜,李杰,黄丽芬,等.长期定位施肥对作物产量及土壤理化性质的影响[J].辽宁农业科学,2006(2):20-23.
- CHI Ji-sheng, LI Jie, HUANG Li-fen, et al. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical and chemical properties[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2006(2):20-23.
- [52] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, et al. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station UK[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50:401-412.
- [53] Rasmussen P E, Rohde C R. Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on organic nitrogen carbon in semiarid soil[J]. *Soil Science Soc Amer*, 1988, 52(4):1114-1117.
- [54] 王玄德,石孝均,宋光煜.长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(3):302-307.
- WANG Xuan-de, SHI Xiao-jun, SONG Guang-yu. Effects of long-term rice straw returning on the fertility and productivity of purplish paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(3):302-307.
- [55] 孙星,刘勤,王德建,等.长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(3):587-592.
- SUN Xing, LIU Qin, WANG De-jian, et al. Effects of long-term application of straw on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):587-592.
- [56] 韩志卿,张电学,陈洪斌,等.长期定位施肥小麦-玉米轮作制度下土壤有机质质量演变规律[J].河北科技师范学院学报,2003,17(4):10-14.
- HAN Zhi-qing, ZHANG Dian-xue, CHEN Hong-bin, et al. Evolution rule of soil organic matter quality under long-term fertilization wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science and Technology*, 2003, 17(4):10-14.
- [57] 白震,张明,宋斗妍,等.不同施肥对农田黑土微生物群落的影响[J].生态学报,2008,28(7):3244-3253.
- BAI Zhen, ZHANG Ming, SONG Dou-yan, et al. Effect of different fertilization on microbial community in an arable molisol[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3244-3253.
- [58] 秦晓波,李玉娥,万运帆,等.耕作方式和稻草还田对双季稻田CH₄和N₂O排放的影响[J].农业工程学报,2014,30(11):216-224.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11):216-224.
- [59] Christoph M, Ronald J L, Peter C, et al. Effects of repeated fertilizer and cattle slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6):1362-1371.
- [60] Nannen D U, Herrmann A, Loges R, et al. Recovery of mineral fertilizer N and slurry N in continuous silage maize using the ¹⁵N and difference methods[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(2):269-280.
- [61] Lalor S T J, Schröder J J, Lantinga E A, et al. Nitrogen fertilizer replacement value of cattle slurry in grassland as affected by method and timing of application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(2):362-373.