

炭输入及生化调控对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响

王琳¹, 尹兴¹, 王伟², 张琳³, 张丽娟^{1*}

(1.河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000; 2.河北农业大学国土资源学院, 河北 保定 071000; 3.唐山市滦县八里王官营村党支部, 河北 唐山 063707)

摘要:本研究以河北永清蔬菜基地设施菜田土壤为研究对象,控制温度(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 和土壤含水量(70%WFPS),采用静态培养方法,通过监测培养期间土壤 N_2O 排放通量、无机氮含量及土壤中酶活性的变化情况,研究炭输入及生化调控对设施菜田 N_2O 排放及氮素转化的影响。结果表明,土壤添加尿素后, N_2O 排放峰值达到 $644.11 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,添加双氰胺(DCD)和石灰氮(CaCN_2)的土壤 N_2O 排放峰值分别为 $101.47 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $36.74 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,对于 N_2O 减排效果好,且能有效抑制亚硝态氮的产生;施用控释尿素、添加黑炭或有机肥能减少 N_2O 排放,而添加石灰氮闷棚显著增加了 N_2O 排放。控释尿素、秸秆、黑炭、DCD 和 CaCN_2 均对铵态氮向硝态氮的转化有一定抑制作用,施加石灰氮或有机肥有助于减少硝态氮向亚硝态氮的转化。相关分析表明,土壤中硝态氮和亚硝态氮含量增加,有助于反硝化过程的进行,增加了 N_2O 排放的风险。

关键词:设施菜田; N_2O ;秸秆;黑炭;DCD;石灰氮

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)05-0416-09

doi: 10.13254/j.jare.2016.0034

引用格式:

王琳,尹兴,王伟,等.炭输入及生化调控对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(5):416-424.

WANG Lin, YIN Xing, WANG Wei, et al. Effects of Carbon Addition and Biochemical Control on N_2O Emission from Facility Vegetable Soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):416-424.

Effects of Carbon Addition and Biochemical Control on N_2O Emission from Facility Vegetable Soil

WANG Lin¹, YIN Xing¹, WANG Wei², ZHANG Lin³, ZHANG Li-juan^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.College of Land Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 3.Party Branch of Baliwangguanying Village, Luan County of Tangshan City, Tangshan 063707, China)

Abstract: The experiment was carried out with soil of greenhouse in Yongqing, Hebei Province, under constant temperature (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ and soil moisture (70%WFPS), using the static incubation method to study the effect of different management controls, i.e. urea, controlled release urea, straw, biochar, dicyandiamide (DCD), CaCN_2 , straw and CaCN_2 while covering the shed, organic fertilizer, on N_2O emission and nitrogen transformation. The results showed that the N_2O emission peaks reached $644.11 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ with the addition of urea in soil, while the addition of DCD or CaCN_2 not only reduced the N_2O emission to $101.47 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ or $36.74 \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ relatively, but also inhibited the production of nitrite nitrogen effectively. Controlled release urea, biochar or organic fertilizer could play a role to reduce N_2O emission, while adding CaCN_2 and covering the shed significantly increased the N_2O emission. Controlled release urea, straw, biochar, DCD and CaCN_2 inhibited the transformation from ammonium to nitrate nitrogen. CaCN_2 and organic fertilizer could reduce the transformation from nitrate to nitrite. Correlation analysis showed that the increase of the content of nitrate or nitrite in soil contributed to the process of denitrification and N_2O emissions.

Keywords: facility vegetable soil; N_2O ; straw; biochar; dicyandiamide (DCD); calcium cyanamide

设施蔬菜具有全年生产、产量高、效益好等优点,已成为我国蔬菜生产发展的重要方式之一。然而在实

际生产中菜农往往通过施用大量氮肥来获得高产,使得过量施氮现象十分普遍^[1-2]。华北平原设施蔬菜集中种植区肥料用量超过推荐量的10倍以上,氮肥过量施用现象严重^[3-4]。这不仅影响蔬菜的产量和品质,造成严重的资源浪费,还会引起诸多环境问题^[5-7]。氮素主要以 NO_3^- -N 形式淋溶至土壤深层或地下水中,引起土壤酸化、盐渍化,使地表水及地下水源受到污染,

收稿日期:2016-01-27

基金项目:农业部“948”项目(2012-Z36);河北省科技计划(14227305D);

研究生优秀课题创新项目(1099009)

作者简介:王琳(1992—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事土壤环境质量评价与监控研究。E-mail: wlandxf@126.com

*通信作者:张丽娟 E-mail: lj_zh2001@163.com

或以气态形式进入大气^[8-11]。其中,N₂O 是一种重要的温室气体,其全球增温潜势值是 CO₂ 的 298 倍,并且在大气中停滞时间长,参与光化学反应,破坏平流层臭氧,间接对人体产生危害^[12-13]。因此,保证蔬菜作物产量持续提高的同时,主动应对全球生态环境的挑战,加强对温室菜田 N₂O 排放和施氮损失的控制已迫在眉睫。

目前很多研究集中于不同调控措施对氮素转化利用的影响上。氮肥配施双氰胺(DCD)对减少土壤中 N₂O 的排放有显著效果,并能有效抑制硝态氮向下层土壤的淋洗^[14-16];加入秸秆可增强大田土壤酶活性,改善土壤酸化现象,促进土壤中的碳氮转化^[17-19];生物黑炭施入土壤后,能促进土壤对 NH₄⁺-N 的吸附作用,减少 CH₄、NO_x 的排放,同时对土壤微生物数量及活性也有一定影响^[20-21];控释肥料能有效抑制土壤铵态氮向硝态氮的转化,减少土壤硝态氮的累积和淋洗损失^[22-23];有机肥能够提高土壤酶活性,增加土壤氮素流失的潜势^[24-25]。对于这些炭输入方式和生化调控措施的研究多集中在大田、露地作物生产中,应用在设施菜田相对较少,且调控措施之间对于 N₂O 减排效果和无机氮转化影响的比较研究也较少。氰氨化钙(又名石灰氮,CaCN₂)是一种缓效氮肥,而且能促进秸秆的分解,提高土壤酶活性,减少土壤和蔬菜中硝酸盐的积累^[26-27]。另外,CaCN₂ 常被用于温室土壤的消毒剂,与秸秆一起施用,能有效地防治蔬菜连作病虫害,缓解土壤酸化和盐渍化,改善土壤物理结构,增强微生物活性^[28-29],但是这种措施对 N₂O 排放和土壤氮素转化的影响尚不明悉。

本试验通过室内静态培养,监测培养期间土壤 N₂O 排放通量、无机氮含量及土壤中酶活性的变化情况,研究设施蔬菜种植体系中不同调控措施对土壤氮素转化的影响,探索阻控 N₂O 排放和降低氮素损失的

调控技术措施,从而筛选出减排效果最佳的措施,为我国北方设施蔬菜温室气体减排、提高氮肥利用效率和建立综合优化氮素管理体系提供理论指导及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2013 年 4 月 12 日—5 月 18 日在实验室进行。选用河北省廊坊市永清县大辛阁乡北岔口村蔬菜棚(种植年限 10 年以上,前茬作物为番茄)耕层土壤作为供试土壤,土壤类型为砂质黏壤土,容重为 1.32 g·cm⁻³,pH 值(水:土=2.5:1) 7.97,全氮 0.95 g·kg⁻¹,硝态氮 94.75 mg·kg⁻¹,铵态氮 3.65 mg·kg⁻¹,有机质 37.53 g·kg⁻¹,速效磷 111.13 mg·kg⁻¹,速效钾 422.60 mg·kg⁻¹。试验前土壤去除草根和杂物,过 2 mm 筛,在 (25±1)℃下避光培养 1 周。

1.2 试验设计

试验采用室内静态培养方法,共设置 9 个处理,每个处理 9 次重复(表 1)。除 N0 外,其他处理的氮肥用量为 100 mg N·kg⁻¹,含水量均为 70%WFPS。按试验处理将添加物与土壤充分混合后,装入 1 L 广口瓶,为接近土壤实际容重和含水量,对土壤进行压实并喷洒定量去离子水。盖上 Parafilm 膜,将广口瓶裹上黑色塑料袋,随机放置于 (25±1)℃的培养箱中,培养期为 36 d。培养期间广口瓶每周进行称重,通过补加去离子水使其保持与培养时相同重量。

传统施氮+秸秆与石灰氮闷棚处理在正式培养的前 15 d 进行闷棚。将土壤与秸秆、石灰氮混合均匀,装入 1 L 广口瓶,按田间实际容重和含水量,对土壤进行压实并喷洒定量去离子水,盖上 Parafilm 膜。将广口瓶放入 (50±1)℃的培养箱中,培养 7 d。为保持固定含水量,每日对广口瓶称重并喷洒去离子水。闷棚

表 1 试验设计

Table 1 The design of the experiment

处理	简称	备注	氮肥用量/mg N·kg ⁻¹	WFPS/%
对照	N0	—	0	70
传统施氮	N1	氮肥为尿素,下同	100	70
当地常用控释尿素	N2	控释尿素含氮量为 43%	100	70
传统施氮+小麦秸秆	N1+Straw	秸秆按 100%还田量计算	100	70
传统施氮+黑炭	N1+BC	黑炭含量为 40 kg·hm ⁻²	100	70
传统施氮+双氰胺	N1+DCD	DCD 添加量为施氮量的 15%	100	70
传统施氮+石灰氮	N1+CaCN ₂	石灰氮添加量为施氮量的 50%	100	70
传统施氮+秸秆与石灰氮闷棚	N1+M	秸秆按 100%还田量计算,石灰氮施用量为施氮量的 20%	100	70
传统施氮+有机肥	N1+OF	有机肥选用鸡粪,施用量为 1.43 m ³ ·hm ⁻² 湿鸡粪	100	70

结束后,在 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下避光培养 1 周,之后培养过程同其他处理。

1.3 样品采集与测定

传统施氮+秸秆与石灰氮闷棚处理在闷棚的第 1、2、3、5、7 d 采集瓶内气体,测定 N_2O 通量。在正式培养第 1、2、3、5、7、9、11、13、15、20、30、36 d 采集气体样品,测定 N_2O 排放量。取气时,揭开 Parafilm 膜 5 min,充分通气,然后塞上连有三通阀的橡皮塞,以此为 t_0 时刻。通过注射器与三通阀连接,采集广口瓶顶部空间的气样,连续采集 0–10–20 min 的气样,每次 20 mL,同时记录采集时间和温度。气体样品 12 h 内使用气相色谱仪(Agilent 6820)测定 N_2O 。检测器为电子捕获检测器(ECD),分离柱内填充料为 80~100 目 PorpakQ,载气为 N_2 , CO_2 作补气,流量 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,检测器温度 330°C ,分离柱温度 55°C ;

培养第 0、1、3、5、7、15、20、36 d 进行破坏性取样,测定土壤硝态氮、铵态氮、亚硝态氮的含量及硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性。用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液按 1:10 土水比浸提土壤无机氮,振荡 30 min,滤液使用连续流动分析仪(TRACCS2000)测定土壤硝态氮、铵态氮含量。亚硝态氮采用盐酸萘乙二胺比色法测定。通过土壤反应前后生成亚硝态氮的含量测定硝酸还原酶活性,通过反应前后亚硝态氮的含量测定亚硝酸还原酶活性。

1.4 数据计算与统计分析

N_2O 排放通量计算公式^[30]为:

$$F=273/(273+T)\times m\times 60\times 24\times 10^{-3}\times V\times dc/dt/22.4/0.465\ 67$$

式中: F 为 N_2O 排放通量($\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), T 为瓶内温度, m 为每 mol N_2O 分子中 N 的质量数, V 为土壤表面上方气体体积(L), c 为气体浓度($\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$), t 为相对时间(min), dc/dt 为广口瓶内气体浓度的时间变化率($\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$),22.4 为温度为 273 K 时的气体的摩尔体积($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

试验数据处理采用 Microsoft Excel, 统计分析采用 SPSS 16.0 统计软件进行单因素方差分析, 选用 LSD($P<0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同调控措施对土壤 N_2O 排放的影响

2.1.1 培养期间土壤 N_2O 排放通量动态变化

N1+M 处理闷棚期间的 N_2O 通量变化见图 1 的小图部分。 N1+M 处理在闷棚第 2 d 出现高峰值,峰值为 $4\ 110.08\ \mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于 N1 的峰值,表明秸秆和石灰氮闷棚显著增加了 N_2O 排放风险。

在正式培养期间(图 1),与对照相比,施氮显著增加了土壤 N_2O 排放,最高峰值分别为:644.11、362.72、562.00、354.85、101.47、36.74、617.86、120.40 $\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。 N1+M 处理 N_2O 排放高峰出现在培养后的第 20 d。 N1+OF 处理排放峰值出现在培养后的第 1 d 和第 7 d,整体排放量呈现先降低后升高再降低的趋势。其他施氮处理均呈现先升高后降低的趋势,高峰值出现在正式培养后的第 2~4 d。

2.1.2 培养期间土壤 N_2O 累积排放量

培养期间土壤 N_2O 累积排放量如图 2。各处理累积排放量分别为 36.88、1 363.48、667.36、1 386.85、

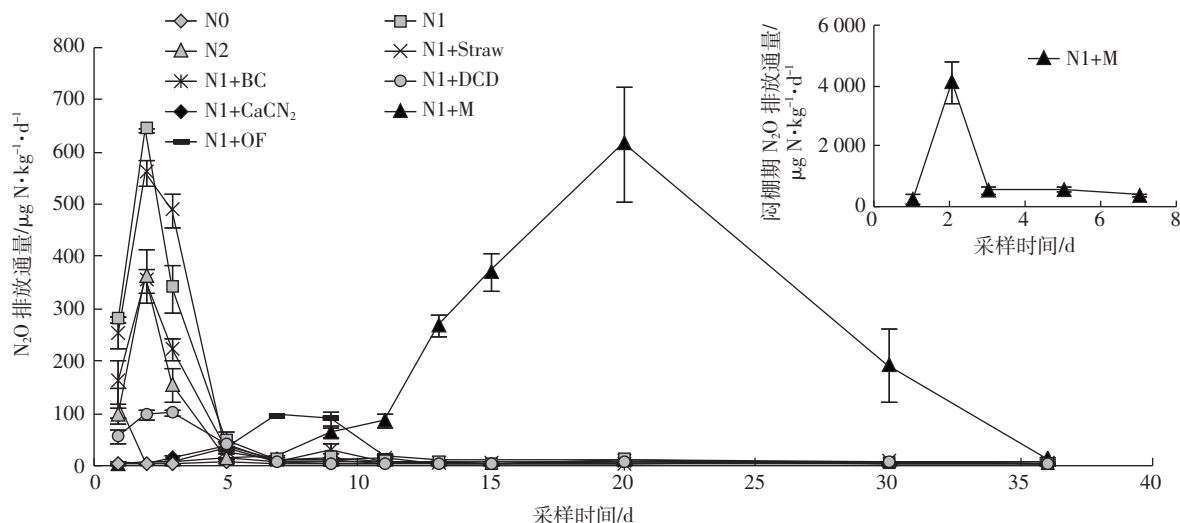


图 1 培养期间土壤 N_2O 的排放通量的动态变化

Figure 1 Temporal dynamics of soil N_2O flux during incubation

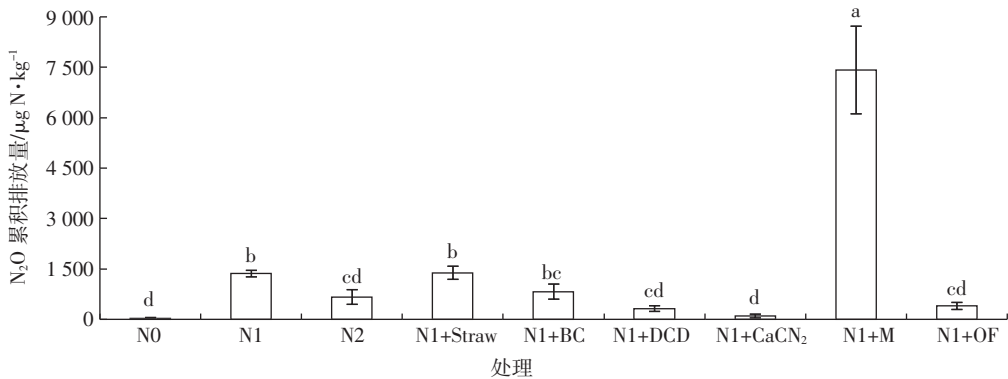


图 2 培养期间土壤 N₂O 累积排放量

Figure 2 Total amounts of soil N₂O emission during incubation

826.18、323.30、100.36、7 420.57 $\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 400.74 $\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。N1+M 的 N₂O 累积排放量显著高于其他处理;与 N1 处理相比,N2、N1+BC、N1+DCD、N1+CaCN₂ 和 N1+OF 处理的 N₂O 累积排放量分别下降了 51.05%、39.41%、76.29%、92.64%、70.61%, 均显著降低了土壤 N₂O 排放。添加秸秆后土壤 N₂O 累积排放几乎未受影响,闷棚则显著增加了 N₂O 排放,高达 5 倍。

2.2 培养期间土壤无机氮动态变化

培养期间土壤硝态氮和铵态氮含量变化见表 2。N1+M 和 N1+OF 处理铵态氮含量显著高于其他处理 ($P<0.05$),其中,闷棚处理的铵态氮含量的减少缓慢;

添加有机肥后第 7 d 铵态氮含量降为对照水平。N1+CaCN₂ 处理的铵态氮含量在前 7 d 较为稳定,在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,第 15 d 以后基本与 N0 处理持平。其他施氮处理均呈下降趋势,在培养后的第 3 d 铵态氮含量接近于不施氮水平。培养前期(1~3 d)土壤中氮主要以铵态氮形式为主,随后大多转化为其他形式。

与铵态氮含量对应,N1+M 处理硝态氮含量在后期逐渐增加,培养结束后其硝态氮含量显著高于其他处理。N1+OF 处理整体硝态氮含量低于其他处理,表明有机肥在培养期间显著抑制了铵态氮向硝态氮的转化。其余施氮处理的硝态氮含量均出现两个高峰,第一个出现在培养的第 3~5 d, 范围为 99.29~176.38

表 2 培养期间土壤中铵态氮和硝态氮的含量变化

Table 2 The change of ammonium and nitrate nitrogen in soils during incubation

含量	处理	第 0 d	第 1 d	第 3 d	第 5 d	第 7 d	第 15 d	第 20 d	第 36 d
铵态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	N0	3.75g	2.30f	10.42de	3.00d	9.85e	2.45e	2.43b	2.37b
	N1	81.72d	53.05de	3.05e	3.08d	2.76d	2.58c	3.53b	1.97b
	N2	71.48e	69.69c	10.87de	3.22d	2.77d	2.10e	3.27b	1.64b
	N1+Straw	85.61cd	47.72e	3.65e	4.11d	2.72d	2.61e	2.54b	1.92b
	N1+BC	89.89cd	59.35d	2.56e	2.93d	2.52d	2.21c	2.42b	1.83b
	N1+DCD	93.57c	70.32c	16.15d	2.12d	1.68d	2.25c	2.96b	1.91b
	N1+CaCN ₂	45.79f	50.11e	54.47c	51.02c	53.64b	2.95c	4.28b	2.12b
	N1+M	264.66a	318.39a	307.41a	300.47a	292.86a	242.42a	171.51a	10.36a
	N1+OF	236.76b	228.07b	203.26b	189.74b	7.31cd	6.30b	4.95b	10.94a
硝态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	N0	82.03b	87.94bc	99.29b	91.42b	92.93b	127.69d	108.57e	109.44e
	N1	99.97ab	123.68a	175.22a	176.38a	152.99a	180.77ab	189.61ab	184.10b
	N2	106.15ab	139.24a	153.98a	169.16a	149.55a	171.07abc	177.93bc	169.97bc
	N1+Straw	22.47c	118.48ab	167.30a	166.21a	136.66a	169.35abc	149.91d	160.63cd
	N1+BC	114.15a	133.73a	148.38a	163.22a	148.57a	186.41a	192.87ab	172.31bc
	N1+DCD	94.83ab	113.94ab	160.43a	170.97a	152.06a	182.17ab	190.20ab	184.26b
	N1+CaCN ₂	98.93ab	87.91bc	91.29b	100.45b	96.01b	152.81bcd	171.62c	148.38d
	N1+M	82.06b	84.42c	94.41b	73.95b	74.68b	147.86cd	204.71a	387.60a
	N1+OF	96.23ab	8.69d	10.08c	10.52c	46.28c	8.16e	29.19e	63.67e

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;第二个高峰出现在 15 d 或者第 20 d。除 N1+OF 外,其他处理培养结束后的硝态氮含量均高于培养开始时的含量。

由图 3 可知,N1、N2、N1+Straw 和 N1+BC 处理的亚硝态氮含量在培养后的第 1 d 达到峰值,约为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第 3 d 以后几乎接近于 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。N1+DCD 和 N1+CaCN₂ 处理仅在培养前 3 d 测定到少量的亚硝态氮。N1+M 处理呈现先升高后降低的趋势,峰值显著高于其他处理,有 N₂O 高排放的风险。N1+OF 处理在培养后第 7 d 出现高峰。

2.3 不同调控措施对土壤酶活性的影响

培养期间土壤中硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性见表 3。N1+Straw 处理硝酸还原酶活性最高,范围为 $4.15 \sim 5.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;N1+OF 的硝酸还原酶活性仅在第 0 d 达到 $5.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,此后小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,低于其他处理;此外 N1+CaCN₂ 的硝酸还原酶活性也相对较低,表明施加石灰氮或有机肥对硝态氮向亚硝态氮的转化有一定的抑制作用;N1+M 处理出现两个高峰,分别为 $3.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $4.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,与亚硝态氮的高峰时间相对应(第 5 d 和第 15 d)。其他处理整体呈现先降低后升高的趋势,除 N1+BC 外,最低点均出现在培养后的第 7 d。

培养期间各处理的亚硝酸还原酶均在第 1 d 达到一个活性高峰,峰值范围为 $0.48 \sim 0.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,N1 处理的活性最高,之后亚硝酸还原酶的活性降低。在培养的第 7 d,N1 和 N1+Straw 达到第二个活性高峰,其他处理的第二个高峰出现在培养的第 15 d,峰值范围为 $0.53 \sim 0.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,N1 和 N1+M 的亚硝

酸还原酶活性高于其他处理。N2 和 N1+OF 处理的亚硝酸还原酶活性相对较低,表明缓效氮肥或添加有机肥能较好抑制亚硝态氮向气态氮的转化。

2.4 土壤无机氮与氮素气态损失及酶活性的相关性分析

由表 4 可知,在整个培养期间,硝态氮含量与 N₂O 排放通量在培养初期(第 1~3 d)呈极显著正相关,培养后期(第 5~36 d)不具有显著性。土壤亚硝态氮含量与 N₂O 排放通量呈极显著正相关,表明土壤亚硝态氮含量增加,显著增加了 N₂O 排放的风险。土壤硝态氮含量、亚硝态氮含量分别与硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性呈极显著正相关,表明硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性对底物的浓度变化有很好的响应,分别随着土壤中硝态氮或亚硝态氮含量的增加而增加。

3 讨论

从整个培养期间无机氮变化来看,除添加有机肥外,其他各处理土壤 NH_4^+-N 含量减少, NO_3^--N 含量增加,表明设施菜田土壤排放的 N₂O 主要是由土壤微生物的硝化作用产生的。施用尿素显著增加了设施菜田土壤 N₂O 排放。季加敏等^[16]对华北平原典型农田土壤进行了培养研究,土壤 N₂O 排放量为 $122 \mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于本试验中设施菜田土壤的 N₂O 排放量($1363.48 \mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$),表明设施菜田的 N₂O 排放是不容忽视的。控释尿素添加的 N 量虽与尿素相同,但由于其氮素缓释效果,其 N₂O 排放量显著低于施用尿素的土壤,这符合 N₂O 排放量随施氮量的增加而增大^[31]

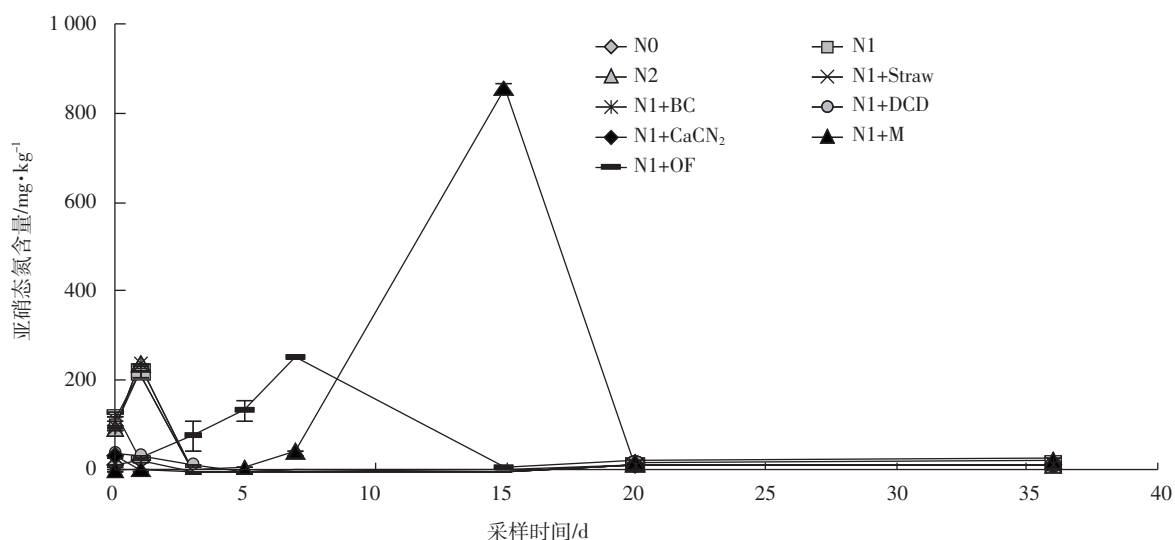


图 3 培养期间土壤亚硝态氮含量的动态变化

Figure 3 Temporal dynamics of nitrite contents in soils during incubation

表 3 培养期间不同处理间硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性
Table 3 The activity of nitrate reductase and nitrite reductase in soils of different treatments during incubation

还原酶	处理	第 0 d	第 1 d	第 3 d	第 5 d	第 7 d	第 15 d	第 20 d	第 36 d
硝酸还原酶/ mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹	N0	3.70c	2.64d	2.45cd	2.34c	1.59c	2.12c	1.89e	2.05c
	N1	3.87c	4.02b	2.37cd	2.60c	2.19b	2.32c	2.91b	2.71b
	N2	4.34bc	3.98b	3.22b	2.59c	2.10b	2.63c	2.56c	2.58b
	N1+Straw	4.88b	5.33a	5.10a	4.44a	4.15a	4.22b	4.16a	4.58a
	N1+BC	4.17bc	3.56bc	2.81bc	2.73c	2.10b	2.09c	2.75bc	2.60b
	N1+DCD	4.21bc	3.34c	2.78c	2.39c	2.01b	2.35c	2.21d	2.51b
	N1+CaCN ₂	3.70c	2.22d	2.04d	1.80d	0.92d	1.13d	1.76e	2.25c
	N1+M	1.12d	2.10d	2.80bc	3.27b	1.38c	4.74a	1.67e	0.83d
	N1+OF	5.43a	0.12e	0.84e	0.39e	0.28e	0.34e	0.36f	0.21e
亚硝酸还原酶/ mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹	N0	0.41bc	0.56cde	0.34e	0.42de	0.55c	0.61b	0.52cde	0.54bc
	N1	0.40bcd	0.78a	0.68a	0.68a	0.78a	0.78a	0.72a	0.72a
	N2	0.36e	0.48f	0.35e	0.38f	0.49d	0.53c	0.43f	0.53bc
	N1+Straw	0.43b	0.60c	0.41cd	0.48c	0.68b	0.62b	0.58bc	0.57b
	N1+BC	0.38de	0.55de	0.40d	0.45cd	0.56c	0.63b	0.51de	0.55bc
	N1+DCD	0.39cd	0.55e	0.43c	0.42de	0.57c	0.62b	0.54cd	0.53bc
	N1+CaCN ₂	0.42b	0.59cd	0.40cd	0.45cd	0.58c	0.64b	0.54cd	0.54bc
	N1+M	0.57a	0.69b	0.51b	0.56b	0.68b	0.78a	0.61b	0.43d
	N1+OF	0.36e	0.52e	0.31f	0.40ef	0.55c	0.57c	0.47ef	0.51c

表 4 土壤无机氮与 N₂O 排放及酶活性的相关性分析
Table 4 The correlation between soil inorganic nitrogen and N₂O emissions, enzyme activity during incubation

变量	N ₂ O 排放		硝酸还原酶	亚硝酸还原酶
	培养初期	培养后期		
硝态氮	0.530 9**	0.078 1	0.347 6**	—
亚硝态氮	0.369 0**		—	0.391 8**

的基本规律。

在整个监测期间,添加 DCD 显著降低了设施菜田土壤 N₂O 排放,减少累积排放量 78.41%。在大田和露天菜地中,氮肥配施 DCD 后土壤 N₂O 累积排放量分别降低 30%和 50%左右^[32-33],表明 DCD 在 N₂O 高排放的设施菜田土壤上具有很好的减排效果。添加 DCD 和 CaCN₂ 的土壤除在培养的前 3 d 测定到极少量的亚硝态氮外,其余时间几乎未检测到亚硝态氮,表明 DCD 和 CaCN₂ 的使用有效抑制氮素在转化过程中亚硝态氮的产生,这与石美等^[34]研究结果一致。

姜宁宁等^[17]试验结果表明,添加秸秆后明显增加了设施菜田土壤 N₂O 排放,比未施秸秆增加 1 倍多,而本试验中秸秆的添加对设施菜田土壤 N₂O 的排放影响不明显。有研究表明秸秆还田促进了小麦-玉米轮作土壤 N₂O 排放^[16,35];而在小麦-水稻轮作体系中,秸秆全量还田和半量还田能降低单位产品生产的

N₂O 排放量,显著降低农田温室气体综合增温效应^[36]。秸秆对于大田土壤 N₂O 排放的不同影响,可能与秸秆的不同 C/N 比和伴随的施氮水平有关^[37-38],对设施蔬菜种植体系的影响及因素需进一步试验探明。

本试验中,添加 CaCN₂ 显著降低了设施菜田土壤 N₂O 排放,而在石灰氮和秸秆闷棚期间有大量 N₂O 排放,可能是由于反硝化作用产生的。一方面,高温会增强土壤的反硝化能力^[39];另一方面,秸秆中大量碳的加入不仅为反应提供了大量底物,且促进了微生物的呼吸,消耗土壤 O₂,进一步促进反硝化进行^[40]。N1+M 处理在培养前期,土壤中氮素主要以 NH₄⁺-N 存在,由石灰氮分解产生的双氰胺抑制了硝化作用的进行,但这种抑制效果逐渐减弱,这与郭艳杰^[41]对于 DCD 的研究结果一致,出现了 N₂O 排放高峰,且土壤中 NO₃⁻-N 含量增加。

添加有机肥后,土壤 NO₃⁻-N 含量一直处于最低,培养结束后无机氮含量降低,主要是由于有机肥添加到土壤后,为土壤微生物提供了大量的碳源和氮源,促进了微生物的活动,使得一部分氮素被固持在微生物体内,从而减少了氮素淋失风险和气体损失^[42-43]。

除第 0 d 以外,N1+OF 的硝酸还原酶活性在整个培养期间显著低于其他处理,N1+CaCN₂ 的也相对较

低,表明施加石灰氮或有机肥能减少反硝化过程中硝态氮向亚硝态氮的转化;添加秸秆后,土壤硝酸还原酶的活性则相对较高,表明秸秆相对促进了此过程的进行。从相关性分析来看,土壤硝态氮含量与硝酸还原酶活性呈极显著正相关,表明土壤硝态氮含量增加,显著增加了硝酸还原酶的活性,有助于硝态氮向亚硝态氮的转化。

在整个培养期间,N1+OF 和 N2 土壤的亚硝酸还原酶相对较低,表明添加有机肥或施用缓效氮肥能够较好地抑制亚硝酸还原酶的活性,从而减少亚硝态氮向气态氮的转化。土壤亚硝态氮含量与亚硝酸还原酶活性呈极显著正相关,表明土壤亚硝态氮含量增加,显著增加了亚硝酸还原酶的活性,有助于反硝化过程中亚硝态氮向气态氮的转化,此过程增加了 N₂O 排放的风险。

4 结论

添加 DCD 和 CaCN₂ 可以有效抑制硝化过程或反硝化过程中亚硝态氮的产生,对 N₂O 减排效果最好;添加控释尿素、秸秆、黑炭、DCD 和 CaCN₂ 调控措施对铵态氮向硝态氮的转化有一定抑制作用;施加石灰氮或有机肥有助于减少反硝化过程中硝态氮向亚硝态氮的转化。相关分析表明,土壤中硝态氮和亚硝态氮含量增加,有助于反硝化过程的进行,增加了 N₂O 排放的风险。

参考文献:

- [1] 郭艳杰,李博文,张丽娟,等.不同水氮条件下双氰胺对设施番茄生长发育和土壤氮素淋失的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):6-11.
GUO Yan-jie, LI Bo-wen, ZHANG Li-juan, et al. Effect of dicyandiamide on tomato growth and nitrogen leaching from soil in intensive greenhouse under different irrigation and nitrogen managements [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 6-11. (in Chinese)
- [2] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese)
- [3] 贾树龙,孟春香,杨云马,等.华北平原区农田优化施肥技术防治立体污染效果研究[J].中国土壤与肥料,2010(2):1-6.
JIA Shu-long, MENG Chun-xiang, YANG Yun-ma, et al. Effect of optimized fertilization on agricultural tridimension pollution control in northern China plain[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2010(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] Topcu S, Kirda C, Dasgan Y, et al. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26: 64-70.
- [5] 张福锁,马文奇.肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J].土壤与环境,2000,9(2):154-157.
ZHANG Fu-suo, MA Wen-qi. The relationship between fertilizer input level and nutrient use efficiency [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2): 154-157. (in Chinese)
- [6] 黄东风,王果,李卫华,等.不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及模拟土柱氮素淋失的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):48-52.
HUANG Dong-feng, WANG Guo, LI Wei-hua, et al. Effects of using different fertilization modes on growth of vegetable, utilization of nitrogenous fertilizer and loss of nitrogen from simulative soil columniation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 48-52. (in Chinese)
- [7] 余海英,李廷轩,张锡洲,等.温室栽培条件下土壤碳库变化特征及其与养分有效性的关系[J].中国农学通报,2010,26(12):316-320.
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Soil carbon pool and nutrient status and their relationship under greenhouse cultivation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12): 316-320. (in Chinese)
- [8] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- [9] Ju M, Shi W M, Xing G X, et al. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2011, 91: 31-39.
- [10] 张丽娟,巨晓棠,刘辰琛,等.北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析——以山东省惠民县为例[J].中国农业科学,2010,43(21):4427-4436.
ZHANG Li-juan, JU Xiao-tang, LIU Chen-chen, et al. A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetables-growing fields: A case study in Huimin County, Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21): 4427-4436. (in Chinese)
- [11] 刘兆辉,江丽华,张文君,等.设施菜地土壤养分演变规律及对地下水威胁的研究[J].土壤通报,2008,39(2):293-298.
LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Changes of soil nutrients in vegetable-greenhouse and its pollution to underground water[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2): 293-298. (in Chinese)
- [12] 林森,郭李萍,谢立勇.菜田土壤 N₂O 产生机理及影响因素研究进展[J].山东农业大学学报,2013,44(2):313-316.
LIN Miao, GUO Li-ping, XIE Li-yong. Vegetable soil N₂O production mechanism and affecting research[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2013, 44(2): 313-316. (in Chinese)
- [13] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea nitrogen loss and their effect on methane flux [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 1105-1111.
- [14] 聂文静,李博文,郭艳杰,等.氮肥与双氰胺配施对棚室黄瓜生长及

- 土壤氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 13-22.
- NIE Wen-jing, LI Bo-wen, GUO Yan-jie, et al. Effects of nitrogen fertilizer and DCD on cucumber growth and nitrate leaching loss from soil in greenhouse[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 13-22. (in Chinese)
- [15] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China plain[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 47(1): 91-99.
- [16] 季加敏, 喻瑶, 陆星, 等. 肥料添加剂降低 N₂O 排放的效果与机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1434-1440.
- JI Jia-min, YU Yao, LU Xing, et al. The effects and mechanism of fertilizer additives on reduction of N₂O emission[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1434-1440. (in Chinese)
- [17] 姜宁宁, 李玉娥, 华路, 等. 不同氮源及秸秆添加对菜地土壤 N₂O 排放影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 219-223.
- JIANG Ning-ning, LI Yu-e, HUA Luo, et al. Effect of different nitrogen sources and straw adding on N₂O emission from vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 219-223. (in Chinese)
- [18] 马欣, 周连仁, 王晓巍, 等. 秸秆对根区土壤酶活性无机氮及呼吸量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 27-33.
- MA Xin, ZHOU Lian-ren, WANG Xiao-wei, et al. Effect of straw on enzyme activity, inorganic nitrogen and CO₂ respiration of root zone soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(4): 27-33. (in Chinese)
- [19] 单鹤翔, 卢昌艾, 张金涛, 等. 不同肥力土壤下施氮与玉米秸秆还田对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 35-41.
- SHAN He-xiang, LU Chang-ai, ZHANG Jin-tao, et al. Effect of maize straw applied with N fertilizer on nitrogen adsorption of winter wheat under different soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 35-41. (in Chinese)
- [20] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [21] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typic Kandiodult[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3-4): 281-288.
- [22] 杨俊刚, 徐凯, 佟二健, 等. 控释肥料与普通氮肥混施对春白菜产量、品质和氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3147-3153.
- YANG Jun-gang, XU Kai, TONG Er-jian, et al. Effects of applying controlled-release fertilizer blended with conventional nitrogen fertilizer on Chinese cabbage yield and quality as well as nitrogen losses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3147-3153. (in Chinese)
- [23] 张文新, 张成军, 赵同科, 等. 缓释氮肥减少菜田土壤硝酸盐淋溶研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 166-170.
- ZHANG Wen-xin, ZHANG Cheng-jun, ZHAO Tong-ke, et al. Research on controlled release nitrogen fertilizer reducing nitrate leaching in vegetable fields[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2010, 25(5): 166-170. (in Chinese)
- [24] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 525-533.
- SONG Zhen-zhen, LI Xu-hua, LI Juan, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(3): 525-533. (in Chinese)
- [25] 杜晓玉, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 华北地区施用有机肥对土壤氮组分及农田氮流失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 13-19.
- DU Xiao-yu, XU Ai-guo, JI Hong-jie, et al. Effects of manure on soil nitrogen components and nitrogen loss from farmland in North China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(6): 13-19. (in Chinese)
- [26] 张卫东, 王崇旺, 秦岭. 保护地草莓使用太阳能+石灰氮+秸秆高温闷棚土壤消毒的方法与效果[J]. 北京农业, 2010, S1: 177-178.
- ZHANG Wei-dong, WANG Chong-wang, QIN Ling. Effect of the disinfect method by covering shed under high temperature with solar energy + calcium cyanamide + straw on strawberry protected land[J]. *Beijing Agriculture*, 2010, S1: 177-178. (in Chinese)
- [27] 田永强, 曹之富, 张雪艳, 等. 不同农艺措施下温室土壤酶活性的动态变化及其相关性分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 857-864.
- TIAN Yong-qiang, CAO Zhi-fu, ZHANG Xue-yan, et al. Changes of soil enzyme activities under different agricultural treatments in greenhouse and its correlation analysis[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 857-864. (in Chinese)
- [28] 卢树昌, 王小波, 刘慧芹, 等. 设施菜地休闲期施用石灰氮防控根结线虫对土壤 pH 及微生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 258-262.
- LU Shu-chang, WANG Xiao-bo, LIU Hui-qin, et al. Effect of application of calcium cyanamid on soil pH and microbial biomass in vegetable greenhouse infected by root-knot nematode in fallow season[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(22): 258-262. (in Chinese)
- [29] 孙金利, 程智慧, 韩玲, 等. 大棚黄瓜连作土壤的日光消毒技术效果比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 121-127.
- SUN Jin-li, CHENG Zhi-hui, HAN Ling, et al. Comparison of efficacy of successive soil's solar disinfection of continuous cropping of cucumber in plastic covering[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University(Natural Science edition)*, 2010, 38(4): 121-127. (in Chinese)
- [30] 马银丽. 华北平原典型农田土壤 N₂O 产生机理及影响因素研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- MA Yin-li. Study on mechanism and factors of nitrous oxides in North China Plain[D]. Baoding: The Agricultural University of Hebei, 2012. (in Chinese)
- [31] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6): 881-887.
- CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Factors controlling N₂O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. *Soils*, 2012, 44(6): 881-887. (in Chinese)
- [32] 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 等. 氮素配施双氰胺对冬小麦-夏玉米轮

- 作系统 N_2O 排放的影响及效益分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1999–2006.
- WANG Yan-qun, LI Ying-chun, PENG Zheng-ping, et al. Effects of dicyandiamide combined with nitrogen fertilizer on N_2O emission and economic benefit in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1999–2006. (in Chinese)
- [33] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3188–3192.
- QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions in vegetable system by treating soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor[J]. *Environment Science*, 2011, 32(11): 3188–3192. (in Chinese)
- [34] 石 美, 张妹婷, 沈 锋, 等. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其对亚硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 500–506.
- SHI Mei, ZHANG Mei-ting, SHEN Feng, et al. Effects of nitrification inhibitors on nitrification inhibition and nitrite accumulation in calcareous soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 500–506. (in Chinese)
- [35] 徐 钰, 江丽华, 孙 哲, 等. 玉米秸秆还田和施氮方式对麦田 N_2O 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 552–558.
- XU Yu, JIANG Li-hua, SUN Zhe, et al. Effects of corn straw returning and nitrogen fertilizer application methods on N_2O emission from wheat growing season[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(6): 552–558. (in Chinese)
- [36] 杨 娟, 王昌全, 白根川, 等. 秸秆还田下“麦-稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 196–204.
- YANG Juan, WANG Chang-quan, BAI Gen-chuan, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of wheat-rice rotation system with straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 196–204. (in Chinese)
- [37] 徐新超, 伏广农, 谢小茜, 等. 农田氧化亚氮排放的主要影响因素及其作用机制[J]. 广东农业科学, 2013, 11: 171–176.
- XU Xin-chao, FU Guang-nong, XIE Xiao-xi, et al. Main influence factors and mechanisms of N_2O emissions in agricultural soils[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 11: 171–176. (in Chinese)
- [38] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 840–844.
- WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 840–844. (in Chinese)
- [39] Castaldi S. Responses of nitrous oxide, dinitrogen and carbon dioxide production and oxygen consumption to temperature in forest and agricultural light-textured soils determined by model experiment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(1): 67–72.
- [40] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 34(6): 375–389.
- [41] 郭艳杰. 温室菜田施氮损失的双氰胺控制效应规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- GUO Yan-jie. Study on regulation rules of a nitrification inhibitor, dicyandiamide(DCD) on fertilizer nitrogen losses from a greenhouse vegetable soil[D]. Baoding: The Agricultural University of Hebei, 2012. (in Chinese)
- [42] 刘益仁, 郁 洁, 李 想, 等. 有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 989–994.
- LIU Yi-ren, YU Jie, LI Xiang, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbiological characteristics in a wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 989–994. (in Chinese)
- [43] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282–288.
- ZHU Cai-hong, DONG Cai-xia, SHEN Qi-rong, et al. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 282–288. (in Chinese)