

有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响

孙雅杰 吴文良 刘原庆 孟凡乔*

(中国农业大学 资源与环境学院/北京市生物多样性与有机农业北京市重点实验室,北京 100193)

摘要 为研究有机肥以及化肥对氮素利用以及损失的影响,针对当前蔬菜生产中面积较大和产量较高的番茄进行盆栽控制性试验,设置等氮条件下3个肥料处理,即有机肥(M)、化肥(U)、有机肥和化肥各半(MU),以及对照CK(不施氮肥、种植作物)和CKN(不施氮肥、不种作物),对番茄产量、氨挥发、 N_2O 排放等进行监测分析。结果表明,MU、U、M 3个处理产量无显著差异。与U、MU相比,M能够降低氨挥发损失62%和57%,降低 N_2O 排放量53%和69%。土壤中残留的肥料氮量为 $M(64.9\%) > MU(36.7\%) > U(23.7\%)$,且3个处理间差异显著($P < 0.05$)。结合氮素损失和作物产量,说明施用有机肥能在一定程度上保证番茄高产、降低氮素损失以及保证较高的氮素后茬利用率。考虑到气候条件、作物品种、肥料类型等的复杂性,还需要对有机肥和化肥配施的环境影响进行更多比较研究,从而进一步优化当前集约化蔬菜生产中的肥料管理。

关键词 氮肥;番茄; N_2O 排放; NH_3 挥发

中图分类号 S14;S641.2

文章编号 1007-4333(2017)04-0037-10

文献标志码 A

Effects of organic and mineral fertilizers on nitrogen utilization and losses

SUN Yajie, WU Wenliang, LIU Yuanqing, MENG Fanqiao*

(Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming/College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to elevate the tomato yield, nitrogen losses by ammonia volatilization and N_2O emissions under the different types of N fertilizers, a tomato plot experiment was carried out on three equal amount of nitrogen fertilizer treatments, i. e., manure (M), Urea (U) and combined application of manure and chemical fertilizer (MU) and two control treatments, CK (plant with no fertilizer) and CKN (no plant and no fertilizer). The results indicated that there was no significant difference of yield among M, MU and U treatments. Compared with U, the NH_3 volatilization of M treatment reduced by 62% and N_2O emissions 53%. Compared with MU, the NH_3 volatilization and N_2O emissions of M treatment reduced by 57% and by 69%, respectively. The amount of residual N fertilizer in the soil was in the order of M (64.9%) > MU (36.7%) > U (23.7%) and there was significant difference among them ($P < 0.05$). Considering of the nitrogen loss and crop yield, it was concluded that the organic fertilizer ensured high tomato yield and decreased nitrogen loss, which could be used as technical extension in tomato production. Due to the complexities of climate conditions, crop and fertilizer types, more comparative studies of environmental impact and crop yield of combined application of organic with chemical fertilizers need to be undertaken to further optimize the intensive vegetable production.

Keywords nitrogen; tomato; N_2O emissions; NH_3 volatilization

近年来,我国蔬菜产业得到迅猛发展,生产面积已达0.2亿 hm^2 [1]。由于蔬菜生产需肥(氮)量大且复种指数高,其环境影响呈现出面广、量大的特点。

蔬菜生产中氮素的去向大致可以分为1)作物吸收,2)残留在土壤中,3)通过不同机制和途径损失[2],如氨挥发、 N_2O 、NO和 N_2 排放等[3]。氮素的损失不

收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201200);国家科技支撑项目(2012BAD15B01)

第一作者:孙雅杰,硕士研究生,E-mail:sunyajie29@163.com

通讯作者:孟凡乔,副教授,主要从事农田生态系统碳氮循环方面研究,E-mail:mengfq@cau.edu.cn

仅造成肥料利用率降低,且对环境产生较大负面影响。 N_2O 排放量占全球肥料氮的3.5%~4.5%^[4]。由于耕作条件、施肥方式等不同,通过氨挥发损失的氮量占肥料氮的1%~47%。

目前对于蔬菜生产中氮素损失途径的研究较多,特别是近年来,养殖业的快速发展和有机肥的推广应用,使得肥料类型对氮素的转化影响成为新的生产需求和研究热点。然而有关有机肥、化肥的施用对氮素利用率、氨挥发、 N_2O 排放的影响结论并不完全一致。有研究表明有机肥的施用能增加土壤对氮的固持,减少氮素损失,提高肥料利用率^[5-6]。其他一些研究表明有机肥的施入减少了作物对氮素的吸收^[7]。肥料类型也是影响 N_2O 排放以及氨挥发的重要因素。普遍认为,有机肥比化肥对反硝化促进作用更明显^[8],有机肥 N_2O 排放量比单施尿素要高^[8-10]。张秀君^[11-12]则指出,在普通的大田试验中,有机肥和化肥混施,可以降低 N_2O 的累积排放量。施用化肥促进氨挥发,而有关有机肥的影响并未取得一致结论,有研究表明有机无机肥配施能明显降低氨挥发,也有研究认为有机质能增加 NH_4^+ 有效性,从而提高氨挥发^[13]。大多研究只关注氮素某一转化途径,如 N_2O 或者 NH_3 的排放,也有些研究重视氮肥利用率和产量等,但结合蔬菜生产的经济和环境效应进行综合评估的研究尚不多见。这些结论的不一致与氮素转化的复杂性及大田环境条件的多变性密切相关,盆栽试验便于控制条件,更加精准,在研究养分循环与管理方面发挥着重要作用。

本研究通过对番茄进行盆栽控制性试验,评估不同氮肥类型对于盆栽番茄系统中氮素转化途径以及番茄产量的影响,旨在为当前集约化番茄生产肥料管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 处 理

本试验共设置5个处理,分别为对照组1)不施肥不种作物(CKN)、2)不施肥(CK)、试验组3)施化肥(U)、4)施有机肥(M)和5)1/2化肥+1/2有机肥(MU),每个处理4个重复,共20盆。有机肥施用量按24 t/hm²计算,化肥施用量根据有机肥中N、P、K含量确定。

1.2 材料及作物管理

供试土壤采自北京市密云县汇源生态农业有限责任公司蔬菜基地,土壤类型为棕壤。土壤全氮0.047%,有机质1.19%,有效磷为2.46 mg/kg,速

效钾30.8 mg/kg。将采集的土样风干、挑去杂质,过2 mm筛,备用。试验用盆直径30 cm,高30 cm,每盆装土10 kg。试验所用番茄为泰科粉冠品种(农新泰科农业技术有限公司)。5月中旬育苗30 d后定植。化肥为尿素,有机肥为腐熟的鸡粪(N、P和K含量分别为0.92%、1.31%和1.62%),磷肥和钾肥分别为过磷酸钙(全磷6.99%)和硫酸钾(全钾43.3%)。为避免水体中的氮素对试验产生干扰,番茄生长过程中用去离子水进行浇灌,所有处理的浇水时间保持一致,并用负压计控制各处理的浇水量,确保浇水过后各处理的土壤含水量一致,大约维持在土壤最大田间持水量的60%~80%。

1.3 土壤 NH_3 挥发测定

土壤挥发的 NH_3 用通气法进行采集^[14]。试验装置由内外2层环形硬质塑料管制成,内环直径为10 cm,外环直径为30 cm。将2块厚度为2 cm、直径与环形装置相吻合的海绵均匀浸以15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL磷酸+40 mL丙三醇,定容至1 L)后,置于硬质塑料管中,上层的海绵与装置顶部相平,下层的海绵与上层的海绵相平。内层海绵用于吸收土壤挥发的 NH_3 ,外层海绵防止外界气体污染。采气结束后,将装置下层的海绵取出,同时换上另一块海绵。上层海绵带回实验室后,立即用1 mol/L的KCl溶液浸提,浸提液中的铵态氮用连续流动分析仪测定。上层的海绵视其情况3~7 d更换一次。第1周,每天取样1次;第2~3周,视测到的挥发氨的数量多少,每1~3 d取样1次,以后取样间隔可延长到7 d,直至监测到各处理氨挥发量与对照基本相同时为止。以下公式计算田间土壤的氨挥发速率:

$$N(\text{mg/d}) = M/(A \times D) \quad (1)$$

式中: M ,通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH_3 -N,mg); A ,捕获装置的横截面积占土壤表面积的比例,%; D ,每次连续捕获的时间,d。

1.4 土壤 N_2O 采集及测定

对土壤中排放的 N_2O 采用静态箱法进行采集。采气所使用的采样箱为SUS 304薄不锈钢板,板厚1 mm。采样箱采用分节组合式标准箱,由底座、中段箱和顶箱组成。中段箱和顶箱容积相同,500 mm×500 mm×500 mm。 N_2O 采集前,先在底座水槽中加入密封水,用50 mL注射器进行采气。以采样箱盖好时开始为“0”时刻,采用五针采气法分别在盖好箱子的0、8、16、24和32 min时用注射器抽取30 mL箱内气体用于测定排放速率。番茄移栽后

的第1周, N₂O 排放的监测频率为 1 d 1 次, 第2周和第3周降为 3 d 1 次, 此后为 7 d 1 次, 检测直至各处理 N₂O 排放通量无明显差别。注射器内的气体样品采用气相色谱仪(Agilent GC6820)在 24 h 内进行测定。N₂O 排放通量及累积量的计算公式如下:

1) N₂O 排放速率计算^[15]

$$F = \rho \times P \times (V/A) \times \Delta C/\Delta t \times 273/(273 + T) \quad (2)$$

式中: F , N₂O 排放通量, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; ρ , 气体在 0 °C 和 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下的密度; P , 采样时大气压, Pa; V , 箱体体积, m^3 ; A , 箱体的底面积, m^2 ; $\Delta C/\Delta t$, 箱体内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率; T , 采样时箱体内气体温度, °C。

2) 气体累计排放量计算

通过线性插值法估算 2 次测定期间未采样日的排放量, 然后将每天的排放量求和来计算作物生长季排放总量即累计排放量^[16]。

3) N₂O 排放系数(Emission factor, EF)作为评价各处理氮素投入量与 N₂O 累积排放量之间关系的一个重要指标, 在分析由施肥类型所造成的 N₂O-N 损失时, 具有更加直观的作用。其计算公式如下:

$$EF =$$

$$\frac{AE_i/\text{mg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N}) - AE_0/\text{mg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})}{\text{N Rate}_i/\text{mg}(\text{N})} \times 100\% \quad (3)$$

式中: AE_i 表示 i 处理中 N₂O 的累积排放量, AE_0 表示对照处理 CK 的 N₂O 累积排放量, N Rate 表示 i 处理中氮素的投入量。

1.5 土壤及植物相关指标的测定

番茄幼苗移栽前以及试验结束后, 采集相关部位并测定相关的土壤指标。土壤样品经风干、磨碎、过筛后用于测定土壤全氮。新鲜的土壤样品带回实验室后立即用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提, 浸提液用于测定无机氮含量。待番茄成熟后采集所有样品, 带回实验室后立即清洗, 进行根、茎、叶的分离并及时杀青、烘干、磨细, 用于测定全氮。

1.6 指标计算及数据分析

相关指数计算公式如下^[17-18]:

$$\text{氮肥利用率(NUE, \%)} =$$

$$[\text{施肥区地上植株氮积累量} - \text{不施肥区地上植株氮积累}] \div \text{施氮量} \times 100$$

$$\text{氮收获指数(NHI, \%)} =$$

$$(\text{籽粒中氮积累量} \div \text{成熟期总氮积累量}) \times 100$$

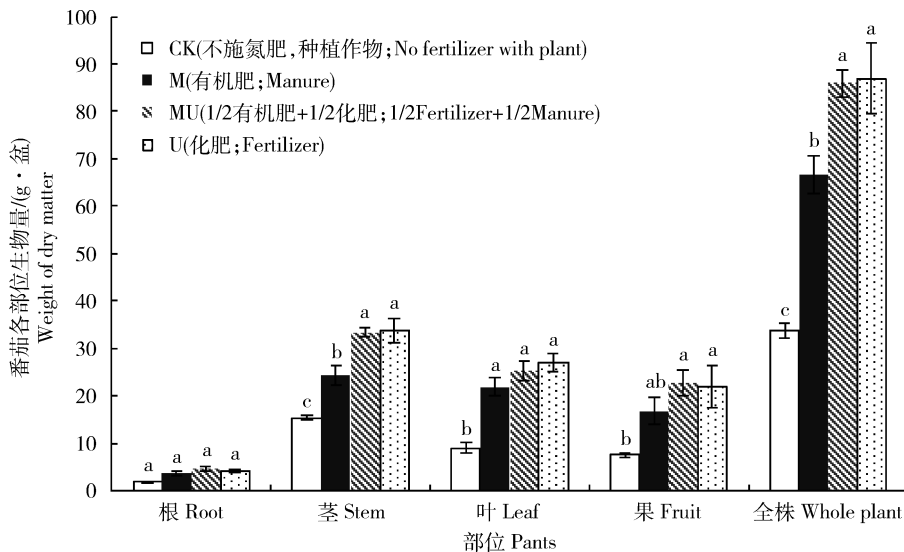
数据分析采用 SAS (Version 8.2) 软件完成, 作图采用 Excel 2010 软件完成。

2 结果与分析

2.1 氮肥类型对番茄生物量和全氮含量的影响

2.1.1 对番茄生物量的影响

图 1 为番茄收获后, 不同处理植株各部位的生



图中数值为平均值±标准误(n=4)。不同小写字母表示同时期该部位各处理有显著差异(P<0.05)。

Data are means±SE (n=4). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same stage.

图 1 不同肥料处理番茄干物质质量

Fig. 1 Dry matter of the tomato for the different fertilization experiment treatments

物量(干物质量)。施肥处理(M、MU、U)各部位的生物量都显著高于不施肥处理(CK)。对于全株生物量, $U \approx MU > M > CK$, 其他各器官生物量的差异以茎最为明显, 其次为果、叶, 各处理根生物量无明显差异。

2.1.2 对番茄全氮含量的影响

对于番茄同部位的含氮量, 不同处理间差异明显, 即 $U > MU > M$, 说明化肥处理植物吸收氮量最高, 即肥料形态对于转化吸收有较大影响。对同一肥料处理, 植株各器官全氮含量为根 < 茎 < 叶 < 果(表1)。

表1 不同氮肥处理番茄各部位含氮量和氮收获指数(NHI)

Table 1 Total nitrogen content for different parts of the tomato and NHI

处理 Treatment	根/(g/盆) Root	茎/(g/盆) Stem	叶/(g/盆) Leaf	果/(g/盆) Fruit	氮收获指数/% NHI
M	1.68±0.20 c	1.92±0.11 c	2.4±0.11 c	2.57±0.20 b	30.3±2.5 a
MU	2.01±0.18 ab	2.57±0.09 b	2.87±0.16 b	3.27±0.22 a	30.6±3.7 a
U	2.48±0.38 a	3.02±0.12 a	3.55±0.09 a	3.82±0.19 a	28.1±4.0 a

注: 图中数值为平均值±标准误($n=4$)。不同小写字母表示该部位各处理有显著差异($P<0.05$)。

Note: Data are means±SE ($n=4$). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments.

2.2 不同类型氮肥对 NH_3 挥发的影响

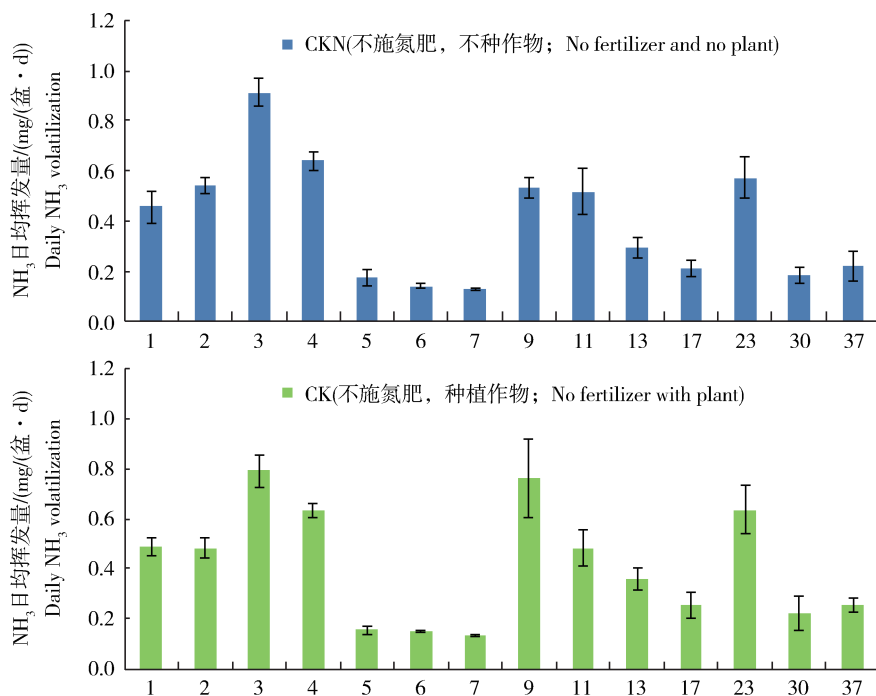
2.2.1 土壤 NH_3 挥发排放规律

从图2可以看出, 各肥料处理 NH_3 挥发的高峰期主要出现在施肥后的一周时间内, 持续时间大约为25~30 d。 NH_3 挥发呈现先强后弱的排放趋势。CK、CKN处理的排放量始终处于较低水平。U处理的排放峰最高且持续时间最长。M处理 NH_3 排

放在3个肥料处理中处于较低的水平。MU处理的排放峰始终处于U、M之间。30 d后各处理的 NH_3 挥发曲线趋于一致, 可以认为土壤中的 NH_3 挥发过程基本结束。

2.2.2 番茄生育期间 NH_3 的累积排放量

图3为番茄生长期间 NH_3 的累积排放量。不施肥处理的CK和CKN累积排放量一直处于较低



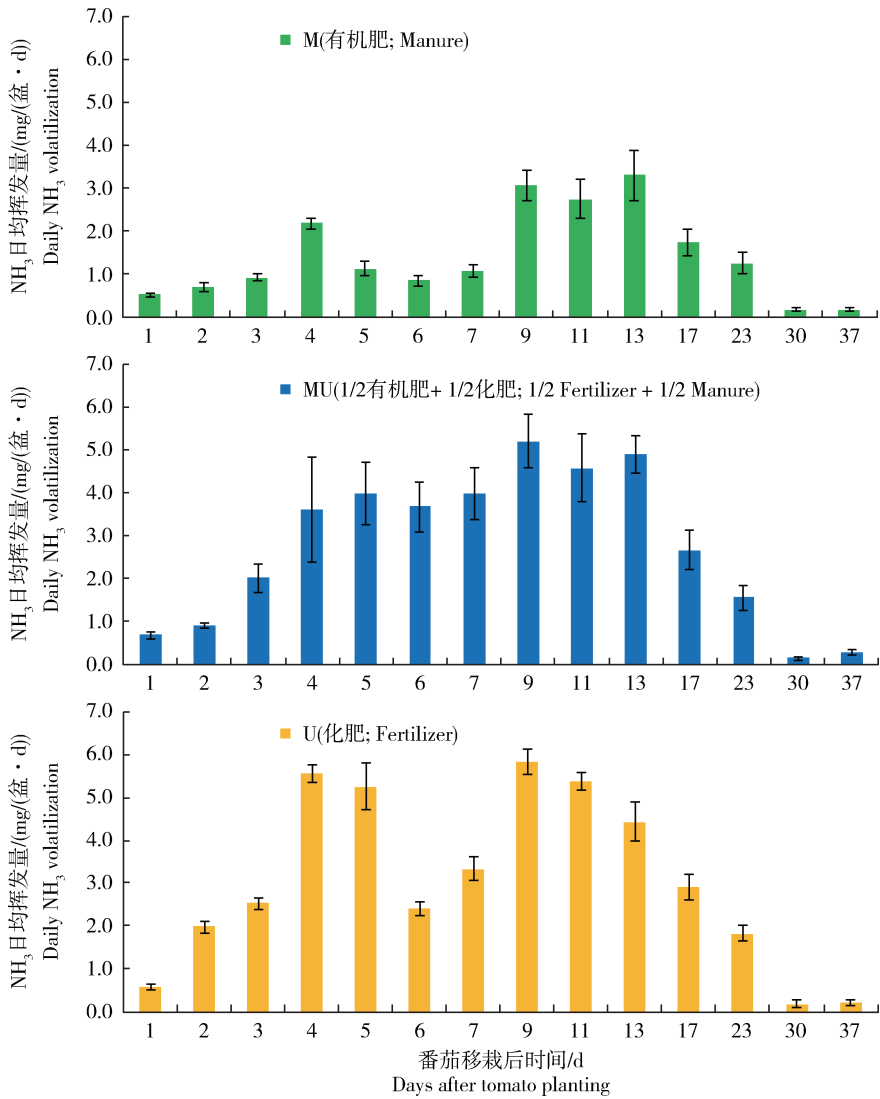


图 2 不同肥料处理土壤 NH_3 挥发规律

Fig. 2 NH_3 volatilization under different fertilization treatments

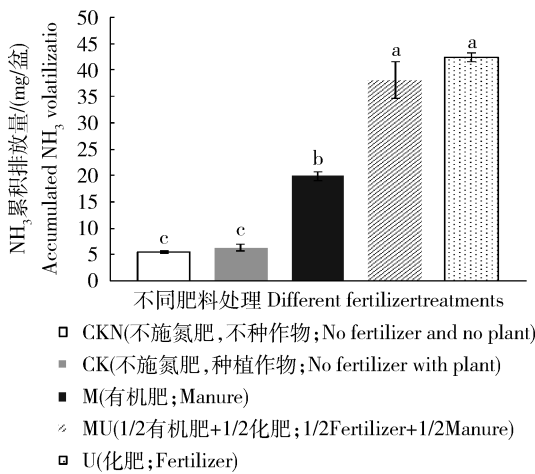


图 3 不同肥料处理土壤 NH_3 挥发累积量

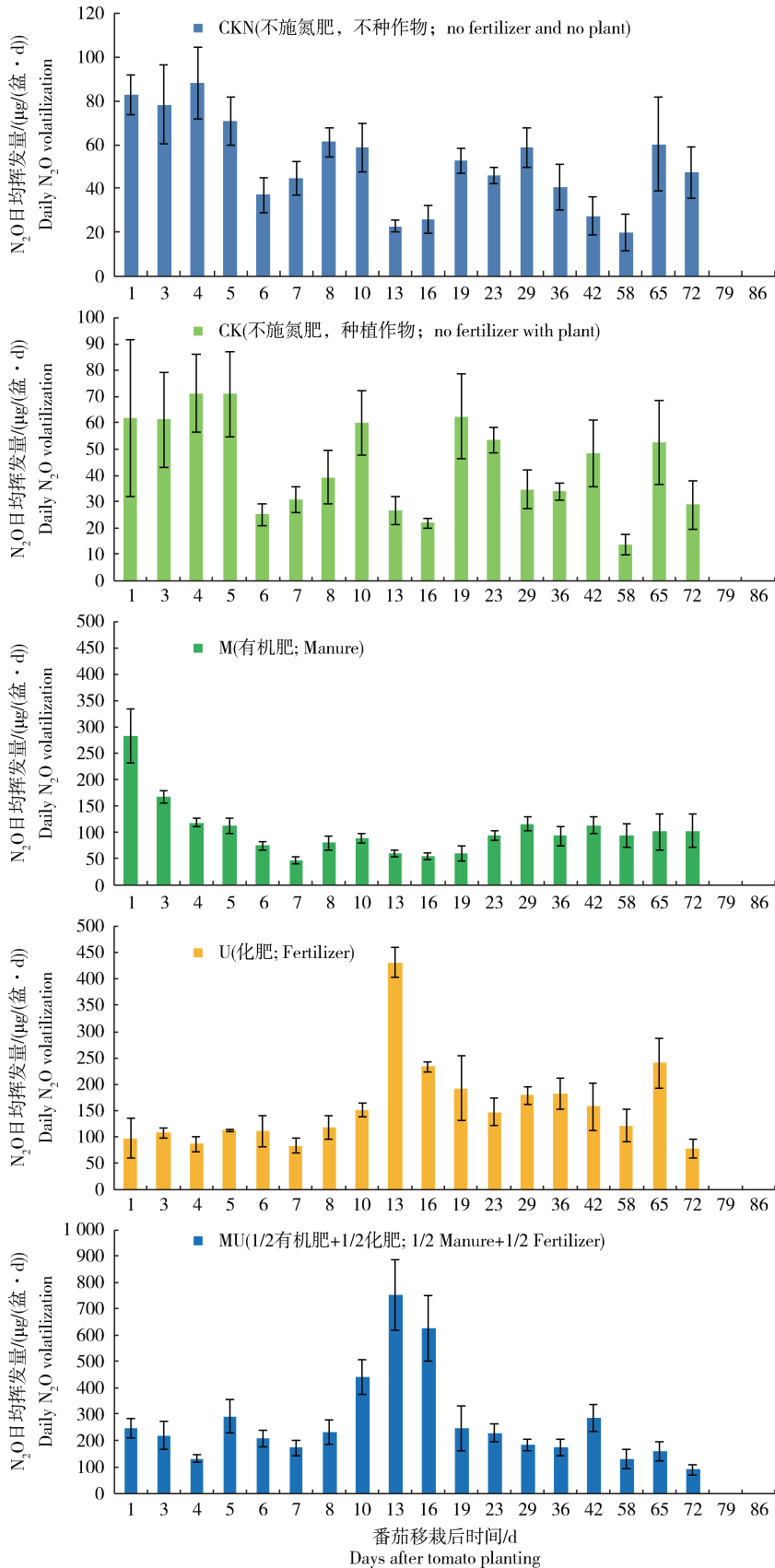
Fig. 3 Accumulated NH_3 volatilization during tomato production

的水平。在施氮量一致的情况下，不同施肥类型导致 NH_3 挥发总损失量的大小顺序为 $U > MU > M$ ，施用化肥的 NH_3 挥发损失量最大。

2.3 氮肥类型对 N_2O 排放的影响

2.3.1 N_2O 排放通量

图 4 为番茄生长期间各处理土壤 N_2O 排放通量的变化情况。前 15 d，各处理土壤 N_2O 排放通量呈快速增长状态，移栽 15 d 后迅速下降，20 d 后各处理的排放通量逐渐趋于平缓。 N_2O 排放高峰出现的时间各处理不同，在番茄幼苗移栽并大量浇水后的第 1 天，M、MU 处理即出现了 N_2O 排放的小高峰。移栽 13 d 时，MU、U 处理均到达排放最高峰。70 d 后，各处理的 N_2O 排放通量趋于一致，均小于 $100 \mu\text{g}/(\text{盆} \cdot \text{d})$ 。

图4 不同肥料处理土壤 N₂O 排放通量趋势Fig. 4 Soil N₂O fluxes under different fertilization treatments

2.3.2 土壤 N₂O 累积排放量以及排放系数

从图 5 可以看出,有机肥和化肥配施(MU)处理

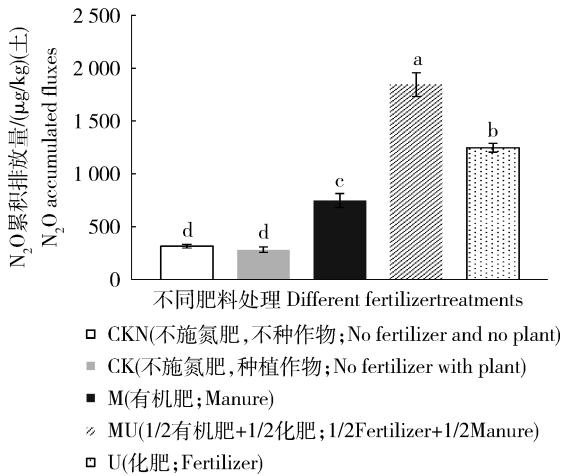


图 5 不同处理 N₂O 累积排放量

Fig. 5 Cumulative N₂O emissions under different treatments

N₂O 的累积排放量最高,其次为 U 处理,最小为 MU,3 个处理之间差异显著($P < 0.05$)。化肥和有机肥混施(MU)N₂O 累积排放量分别是单施化肥(U)或单施有机肥(M)处理的 1.4 和 2.5 倍。对照 KKN 和 CK 的 N₂O 累积排放量相对较低,且二者之间并无显著差异。各处理的排放系数(EF)大小为 MU(0.52%) > U(0.32%) > M(0.16%)。

2.4 土壤-番茄系统中的氮肥去向分析

由于氮素肥料类型不同,在土壤-番茄系统中,肥料利用、残留以及气体损失部分各不相同(表 2)。MU 与 U 处理 NH₃ 挥发数量相近,但显著高于 M 处理。对于 N₂O 排放,MU 处理最高,显著高于 U 和 M 处理。土壤残留的氮量可在一定程度上反映土壤固持氮的能力,3 个肥料处理中土壤残留氮量 M > MU > U,即有机肥处理土壤能够固持更多的氮。

表 2 不同施肥处理土壤-番茄系统中氮肥去向

Table 2 Nitrogen fate within soil-tomato system in different fertilization treatments

处理 Treat- ment	产量/g Yield	NH ₃ 排放	N ₂ O 排放	氮素残留 量/mg N left in the soil	占施肥量的比例/%			氮肥利用 率/% NUE
		量/mg Accumulated	量/mg N ₂ O		Percent of fertilizer amount			
		NH ₃ volatilization	accumulated fluxes		NH ₃	N ₂ O	土壤 N N left in soil	
M	16.8 ± 2.9 ab	13.6 ± 0.9 b	4.5 ± 0.7 c	1 948 ± 76.6 a	0.48 ± 0.06 b	0.15 ± 0.04 c	64.9 ± 3.6 a	30.3 ± 2.9 b
MU	22.8 ± 2.7 a	31.8 ± 4.0 a	14.8 ± 1.1 a	1 101 ± 50.8 b	1.08 ± 0.26 a	0.49 ± 0.07 a	36.7 ± 5.8 b	60.9 ± 4.3 a
U	22.0 ± 2.1 a	36.0 ± 1.0 a	9.7 ± 0.4 b	709 ± 99.1 c	1.23 ± 0.37 a	0.32 ± 0.15 b	23.7 ± 1.3 c	77.6 ± 6.8 a

注:图中数值为平均值±标准误(n=4)。不同小写字母表示该部位各处理有显著差异(P<0.05)。

Note: Data are means ± SE (n = 4). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments.

3 讨论

3.1 氮肥类型对于土壤 NH₃ 挥发的影响

肥料类型对氨挥发有重要影响。肥料类型主要通过影响土壤中铵态氮浓度,进而影响氨挥发^[19]。从峰值出现的时间看,本研究中各处理氨挥发峰值出现的时间几乎相同,这是由于试验中施入的有机肥最初带入的 NH₄⁺ 较少,并没有形成排放峰。而经 2~4 d 后有机肥和尿素均释放大量的 NH₄⁺,才形成排放峰。从排放量上讲,有机肥的施入减少了氨挥发量,但 MU 与 U 处理的氨挥发量并无显著差异,这与他人^[20-21] 研究结果不完全一致。Matsushima 等^[20] 利用¹⁵N 示踪技术在温室培养条件下研究了不同肥料组成在不同时间段的 NH₃ 挥发量,得出不同的有机和无机肥配比对 NH₃ 挥发量

有显著的影响。葛顺峰等^[21] 研究发现有机肥处理最大氨挥发速率出现时间明显早于无机肥处理,而且有机无机肥配施可以有效减少氨挥发损失。从氨挥发比例分析,本研究发现化肥挥发损失(1.2%)较低,这与本试验中采取的是肥料与土壤混合均匀的施肥方式有关,此施肥方式相当于肥料的深施,对 NH₃ 挥发过程有一定的抑制作用^[11,22]。

3.2 氮肥类型对于土壤 N₂O 排放的影响

土壤 N₂O 主要由硝化与反硝化过程产生,与土壤中含有的微生物种类和数量、土壤有机质、NO₃-N 含量以及土壤的水分条件等密切相关^[23-24],N₂O 的排放高峰一般出现在施肥或者降雨后^[25-27]。有机肥中存在部分 NH₄⁺,在移栽浇水后的第一天便出现高峰。化肥处理的高峰出现在第 13 天,是由于尿素需要在脲酶的水解作用下才可以生成以无机氮形式

存在的 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 和 NH_4OH 。浇水后土壤水分瞬间升高,高水分条件下,土壤中的 NH_4^+ 很难被硝化细菌转化利用,只能以 NH_4^+ 的形式存在于土壤溶液中或是被土壤中的有机质所吸附^[31]。而此时土壤中 NO_3^- 含量有限,反硝化细菌的数量少活性差,导致短时间内没有产生 N_2O 。此外, N_2O 的排放与施肥量以及土壤耕作方式相关^[28-29]。本试验土壤为常年未经耕种的荒坡深层土,土壤全碳、全氮含量均显著低于常规耕作土壤,土壤中微生物的种类、数量及活性相对较低,导致施肥后高强度的硝化或反硝化过程的滞后。

肥料类型是影响 N_2O 排放量的重要因素。Aguilera^[30]也指出通过水分条件的控制,有机肥的施用可以减少 N_2O 的排放。本试验中M处理相比于其他2个处理,明显降低了 N_2O 的排放。MU处理的 N_2O 累积排放量显著高于其他处理,和很多研究结果一致^[8-10]。本研究有机肥与化肥的配比为1:1,也是造成较高 N_2O 排放量的原因^[31]。华北地区农田 N_2O 的排放系数为0.1%~1.3%^[32-35],本试验中的排放系数在这一范围较低水平内。另外,和其他肥料相比,尿素肥料排放系数较低,也是造成本研究排放系数低的原因^[36]。

3.3 氮肥类型对氮素迁移转化及利用的影响

本研究发现,使用化肥处理(U、MU)番茄生物量比M有少高,表明短期内化肥的肥效要高于有机肥。化肥氮分解快,而有机肥分解较慢,随着作物的生长,植物对氮吸收量增大。李娟等研究发现,充足的氮营养可以提高叶片光合速率和叶绿素含量,生产较多干物质^[36]。Evans等^[37]指出,根是主要的养分吸收器官,土壤中的铵态氮和硝态氮必需通过根系的吸收和转运才能进入植物体内的地上部分,所以根部的含氮量较低。而植物体茎部虽然含有一定的叶绿素,但是硝态氮在茎部无法充分被还原利用,大部分硝态氮在叶部被还原合成有机物。果期积累在茎叶中的大量氮源开始向番茄的果实转运。Yuan等^[38]研究表明,在高量(300 kg/hm²(N))氮素投入水平的情况下,芸苔含氮量的大小顺序为有机肥+化肥>化肥>有机肥;在中剂量和低剂量氮素投入水平的情况下,反而是单施化肥的处理最高,其次为有机肥+化肥处理和单施有机肥处理。本试验土壤一直没有使用过肥料,氮素投入偏低,因此单施化肥植物各部位氮素含量高于有机肥

处理。

从产量和氮收获指数(NHI,表征氮素分配到果实的比例)比较,施肥处理(U、MU和M)之间差异不显著。由于试验中农药使用较少,所以各处理的果实产量较低。Evans等^[37]指出,果实是主要的氮库,而氮素向果实的转运与施肥时间关系密切。施氮时间越晚,氮素向果实的迁移分配率越低,氮肥的NHI就越低。本试验的施肥为一次性施入基肥,因此NHI在各施肥处理之间相近。和大田生产比较,本试验番茄产量较低,也出现了后期缺肥、影响了氮素向果实运转的现象^[40]。

使用化肥的2个处理(MU、U)氮素利用效率(NUE)无显著差异,均处于较高水平,且高于M处理。有研究表明高水高肥下,N肥利用率可达50%以上,中水N及低水低N次之,为29%~40%左右,高水低N或低水高N下利用率最低为22%左右^[41]。对于M处理,有机物的降解促进了微生物对土壤氮的固持^[42],即在土壤中残留更多,被植物吸收或者损失的数量都较小^[17]。

一般认为有机肥对调节土壤的供氮水平、减少损失具有较好作用^[5-6]。被固持的有机肥中的氮素后期释放可以供作物吸收利用^[25-26],进而促进氮素吸收和提高产量^[27,43]。本研究也充分证明了这一点。

4 结论

针对保持蔬菜如番茄高产和降低环境污染为综合目标的肥料管理,是今后我国蔬菜生产中将重点关注的课题。本试验的研究结果说明,化肥虽然当季氮肥利用效率较高(77.6%),但其 NH_3 排放最高, N_2O 排放也处于较高水平,加上其他损失数量较高,导致在土壤中残留量只有有机肥处理的36%,即下茬利用量最低。施用有机肥,除了可以保证较高的番茄产量外,当季氮素利用效率和土壤残留量都处于较高水平,可以作为今后番茄生产的重点推广措施。需要说明的是,本研究土壤长期没有耕种和施肥,结果有效性和普遍性还需要进一步结合其他研究进行验证。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 2015. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexch.htm>

- State Statistics Bureau China Statistical Yearbook, 2015[M]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexch.htm>
- [2] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197
- Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192-197 (in Chinese)
- [3] 朱兆良, 文启孝. 我国农业生态系统中氮素的循环和平衡[M]. 南京: 江苏科学与技术出版社, 1992
- Zhu Z L. *The Cycle and Balance of Nitrogen in Agricultural Ecosystem* [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- [4] Crutzen P J, Mosier A R, Smith K A, Winiwarter W. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(2): 389-395
- [5] de Vries F T, van Groenigen J W, Hoffland E, Bloem J. Nitrogen losses from two grassland soils with different fungal biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 997-1005
- [6] Mcswiney C P, Snapp S S, Gentry L E. Use of N immobilization to tighten the N cycle in conventional agroecosystems[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(3): 648-662
- [7] Choi W, Jin S, Lee S, Ro H M, Yoo S H. Corn uptake and microbial immobilization of ¹⁵N-labeled urea-N in soil as affected by composted pig manure[J]. *Plant and Soil*, 2001, 235(1): 1-9
- [8] 邹建文, 黄耀. 农业管理措施对 N₂O 排放的影响[J]. 农村生态环境, 2002(1): 46-49
- Zou J W, Huang Y. Effect of agricultural management practices on N₂O emission of farmlands[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002(1): 46-49 (in Chinese)
- [9] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 张磊. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005(5): 83-88
- Dong Y H, Ou Y Z, Li Y S, Zhang L. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005(5): 83-88 (in Chinese)
- [10] 阎宏亮. 菜地土壤 N₂O 排放特征、产生途径及其影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014
- Yan H L. The characteristics, sources and impact factors of N₂O emissions from vegetable fields [D]. Beijing: *Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation*, 2014 (in Chinese)
- [11] 刘红梅, 庞凤梅, 赖欣, 杨殿林. 供氮水平和有机无机配施对麦田土壤氨挥发的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7119-7122
- Liu H M, Pang F M, Lai X, Yang D L. Effect of nitrogen fertilizer rate and combined application of organic manure and chemical fertilizer on soil ammonia volatilization in winter-wheat field[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2012, 40(12): 7119-7122 (in Chinese)
- [12] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L)-wheat (*Triticum aestivum* L) cropping system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(3): 207-214
- [13] 曹凑贵, 李成芳, 寇志奎, 杨金花, 汪金平. 不同类型氮肥和耕作方式对稻田土壤氨挥发的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(5): 881-886
- Cao C G, Li C F, Kou Z K, Yang J H, Wang J P. Effect of N source and Tillage on NH₃ volatilization from paddy soils[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(5): 881-886 (in Chinese)
- [14] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 尹斌. 两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1090-1095
- Zhou W, Tian Y H, Cao Y S, Yin B. A comparative study on two methods for determination of ammonia volatilization[J]. *Soil Science*, 2011, 48(5): 1090-1095 (in Chinese)
- [15] Zheng X, Mei B, Wang Y, Xie B H, Wang Y S, Dong H B, Xu H, Chen G X, Cai Z C, Jin Y, Gu J X, Su Fang, Zou J W, Zhu J G. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 211-234
- [16] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, Liu X J. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1584-1598
- [17] Montemurro F. Are organic N fertilizing strategies able to improve lettuce yield, use of nitrogen and N status? [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33(13): 1980-1997
- [18] Šturm M, Kacjan-Maršič N, Zupanc V, Bračić-Železnik B, Lojen S, Pintar, M. Effect of different fertilisation and irrigation practices on yield, nitrogen uptake and fertiliser use efficiency of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(2): 103-109
- [19] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review[J]. *Annals of Applied Biology*, 2013, 162(2): 145-173
- [20] Matsushima M, Lim S, Kwak J, Park H J, Lee S I, Lee D S, & Choi W J. Interactive effects of synthetic nitrogen fertilizer and composted manure on ammonia volatilization from soils[J]. *Plant and Soil*, 2009, 325(1/2): 187-196
- [21] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 房祥吉, 王海宁, 东明学, 刘建才. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010(5): 199-203
- Ge S F, Jang Y M, Peng F T, Fang X J, Wang H N, Dong M X, Liu J C. Effect of chemical fertilizer application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010(5): 199-203 (in Chinese)
- [22] 曹兵, 李新慧, 张琳, 邹国元, 高祥照, 赵春江. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氨挥发的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(2): 83-86
- Cao B, Li X H, Zhang L, Zou G Y, Gao X Z, Zhao C J. Effect of different basal-dressing application methods on soil ammonia volatilization from wheat field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(2): 83-86 (in Chinese)

- [23] Lee K, Bong Y, Lee D, Kim Y, Kim K. Tracing the sources of nitrate in the Han River watershed in Korea, using $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3$ values[J]. *Science Total Environment*, 2008, 395(2/3):117-124
- [24] Wang Y, Hu C, Ming H, Oenema O, Schaefer D A, Dong W, Zhang Y M, Li X X. Methane, Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in soil profile under a winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. *Plos One*, 2014, 9(6): e98445
- [25] 王海飞. 不同土地利用方式红壤温室气体产生机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
Wang H F. Study on the production mechanism and influencing factors of greenhouse gas in different land use of red soil [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [26] 严英. 华北平原不同轮作体系土壤[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
Yan Y. The characteristics of greenhouse gas emissions in different crop rotation systems on North China Plain [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [27] Qin S P, Wang Y Y, Hu C S, Oenema O, Lia X X, Zhang Y M, Wenxu Dong W X. Yield-scaled N_2O emissions in a winter wheat-summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55:240-244
- [28] Tellez-Rio A, Garcia-Marco S, Navas M, López-Solanilla, E Tenorio J L, Vallejo A. N_2O and CH_4 emissions from a fallow, wheat rotation with low N input in conservation and conventional tillage under a Mediterranean agroecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 508:85-94
- [29] Zhang Y, Sheng J, Wang Z, Chen L, Zheng J. Nitrous oxide and methane emissions from a Chinese wheat-rice cropping system under different tillage practices during the wheat-growing season[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146:261-269
- [30] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, Garnier J, Vallejo A. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems: A review [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164:32-52
- [31] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 金继运, 黄绍文, 唐继伟, 张志强. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012(5):1073-1085
Hao X Y, Gao W, Wang Y J, Jin J Y, Huang S W, Tang J W, Zhang Z Q. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012(5):1073-1085 (in Chinese)
- [32] Ding W, Cai Y, Cai Z, Yagi K, Zheng X. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2):501-511
- [33] Zhang Y, Liu J, Mu Y, Pei S, Lun X, Chai F. Emissions of nitrous oxide, nitrogen oxides and ammonia from a maize field in the North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(17):2956-2961
- [34] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 巨晓棠, 江荣风, 张福锁. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(1):117-128
Hu X K, Huang B X, Su F, Ju X T, Jiang R F, Zhang F S. Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China Plain[J]. *Science China: Chemistry*, 2011, 41(1):117-128 (in Chinese)
- [35] Gao B, Ju X, Su F, Meng Q F, Oenema O, Christia P, Chen X P, Zhang F S. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472:112-124
- [36] 李娟, 赵秉强, 李秀英, So H B. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008(1):144-152
Li J, Zhao B Q, Li X Y, So H B. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(1):144-152 (in Chinese)
- [37] Evans R D, Bloom A J, Sukrapanna S S, Ehleringer J R. Nitrogen isotope composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* MillcvT-5) grown under ammonium or nitrate nutrition[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1996, 19(11):1317-1323
- [38] Yuan Y, Zhao M, Zhang Z, Chen T, Yang G, Wang Q. Effect of different fertilizers on nitrogen isotope composition and nitrate content[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(6):1456-1460
- [39] Cabello M J, Castellanos M T, Tarquis A M, Cartagena, M C, Arce, A, Ribas, F. Determination of the uptake and translocation of nitrogen applied at different growth stages of a melon crop (*Cucumis melo* L) using ^{15}N isotope[J]. *Scientia Horticultural*, 2011, 130(3):541-550
- [40] Brito L M, Monteiro J M, Mourão I, Coutinho J. Organic lettuce growth and nutrient uptake response to lime, compost and rock phosphate[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(7):1002-1011
- [41] 何华, 赵世伟, 陈国良. 不同水肥条件对马铃薯肥料 N 利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2000(2):235-239
He H, Zhao S W, Chen G L. Effect of different watering and fertilization on N utilization efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000(2):235-239 (in Chinese)
- [42] Geisseler D, Horwath W R, Joergensen R G, Joergensen R G, Ludwig B. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12):2058-2067
- [43] Horváth L, Grosz B, Machon A, Tuba Z, Nagy Z, Czöbel S Z, Balogh J, Péli E, Fóti S Z, Weidinger T, Pintér K, Führ E. Estimation of nitrous oxide emission from Hungarian semi-arid sandy and loess grasslands; effect of soil parameters, grazing, irrigation and use of fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1/2):255-263