

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

引用本文:

王方斌, 刘凯, 殷星, 等. 清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2354–2362.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001–2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李烨, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363–2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>

洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子

梁启斌, 侯磊, 李能发, 陈鑫, 王克勤

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1585–1593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1324>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王方斌, 刘凯, 殷星, 等. 清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2354–2362.

WANG Fang-bin, LIU Kai, YIN Xing, et al. Effects of liquid fertilizer on NH_3 volatilization and N_2O emissions in drip-irrigated cotton fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2354–2362.



开放科学 OSID

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安*

(石河子大学农学院资环系/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为研究清液肥对滴灌棉田氮素气态损失的影响, 试验共设5个处理: 不施氮肥(N0)、常规化肥施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (TN300) 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (TN240)、清液肥施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LN300) 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LN240)。结果表明: 施用氮肥会显著增加滴灌棉田土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放, 各施氮处理 NH_3 挥发总损失量较 N0 处理增加 1.7~3.8 倍, N_2O 累积排放量较 N0 处理增加 1.8~2.7 倍。常规施氮水平下, LN300 处理较 TN300 处理 NH_3 挥发损失降低 42.4%, N_2O 排放减少 14.1%; 同一减氮水平下, LN240 处理 NH_3 挥发损失和 N_2O 排放分别减少 29.5% 和 18.9%。等量氮肥投入下, 施用清液肥可显著降低土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量, 土壤脲酶活性和反硝化酶活性也显著降低。相关性分析表明土壤 NH_3 挥发总量和 N_2O 累积排放量与 0~20 cm 土壤 NH_4^+ -N 含量、 NO_3^- -N 含量、土壤脲酶活性和硝酸还原酶呈显著正相关, 与土壤亚硝酸还原酶和羟胺还原酶无显著性相关。与常规化肥施氮相比, TN240、LN300 和 LN240 处理棉花籽棉产量较 TN300 处理分别增加 12.6%、9.1% 和 24.5%, LN240 处理棉花籽棉产量较 TN240 处理提高 10.6%。综上, 清液肥施氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可显著减少滴灌棉田氮素气态损失, 提高棉花产量, 是一种值得推荐的施肥措施。

关键词: 清液肥; 滴灌棉田; NH_3 挥发; N_2O 排放; 酶活性; 籽棉产量

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2354-09 doi:10.11654/jaes.2020-0067

Effects of liquid fertilizer on NH_3 volatilization and N_2O emissions in drip-irrigated cotton fields

WANG Fang-bin, LIU Kai, YIN Xing, LIAO Huan, SUN Jia-lin, MIN Wei, HOU Zhen-an*

(Department of Resources and Environmental Science / Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Corps, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: It is of great importance for agricultural green production to study the effects of liquid fertilizer on nitrogen loss in drip irrigation cotton fields. The experiment consisted of five treatments: no nitrogen fertilizer (N0), $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (TN300) conventional fertilizer, $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (TN240) conventional fertilizer, $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LN300) liquid fertilizer, and $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LN240) liquid fertilizer. The results showed that application of nitrogen fertilizer significantly increased soil NH_3 volatilization and N_2O emissions in drip irrigation cotton fields, and the total losses of NH_3 volatilization in each nitrogen treatment were 1.7~3.8 times higher than in the N0 treatment. The cumulative N_2O emissions were 1.8~2.7 times higher than in the N0 treatment. The LN300 treatment reduced the NH_3 volatilization loss by 42.4% and the N_2O emissions by 14.1% compared to the TN300 treatment at the conventional nitrogen application level; at the same nitrogen reduction level, the LN240 treatment reduced NH_3 volatilization losses and N_2O emissions by 29.5% and 18.9%, respectively. With the same amount of nitrogen fertilizer input, the application of liquid fertilizer significantly reduced the contents of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in the soil, and the activities of UR and denitrifying enzymes in the soil were also significantly decreased. Correlation analysis showed that the total amount of soil NH_3 volatilization and N_2O emissions were significantly positively correlated with 0~20 cm soil NH_4^+ -N content, NO_3^- -N content, UR activity, and NR activity, but not with soil nitrite reductase, hydroxylamine reductase, Ni R activity, or Hy R

收稿日期: 2020-01-15 录用日期: 2020-03-16

作者简介: 王方斌(1996—), 男, 四川大竹人, 硕士研究生, 研究方向为新型肥料与现代施肥技术。E-mail: wfbaxx@163.com

*通信作者: 侯振安 E-mail: hzaty@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200100, 2018YFD0800800)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0200100, 2018YFD0800800)

activity. Compared to applying nitrogen with conventional fertilizers, the seed cotton yields of the TN240, LN300, and LN240 treatments increased by 12.6%, 9.1%, and 24.5%, respectively, and seed cotton yield increased by 10.6% in the LN240 treatment compared to the TN240 treatment. In summary, the application of $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen to liquid fertilizer can significantly reduce nitrogen losses in drip irrigation cotton fields and can increase cotton yield, making it a recommended fertilization measure.

Keywords: liquid fertilizer; drip-irrigated cotton fields; NH_3 volatilization; N_2O emissions; enzymatic activity; seed cotton yield

氮肥投入在农业生产中起着重要的作用。随着人口的增加,我国每年的氮素投入随之增加。目前我国年氮肥消耗量为3.1亿t,占全球的31.7%,而氮肥利用率普遍为30%~40%^[1]。随着氮肥零增长的提出,国家开始注重减氮增效的研究,但不合理的施氮现象仍相当普遍^[2]。过量施氮并不会提高作物单产,同时会降低作物氮肥利用率,易引发一系列环境问题。 NH_3 挥发和 N_2O 排放是农业生产中氮肥气态损失的主要途径^[3],有研究表明氨气是雾霾形成的前体,形成机制为 NH_3 结合二氧化硫和氮氧化物发生反应,形成的 $\text{PM}_{2.5}$ 结合其他污染物进而形成雾霾^[4-6]。 N_2O 作为温室气体的一种,其温室效应是 CO_2 的265倍,对全球气候变化的影响突出^[7]。据统计,每年 NH_3 挥发损失占氮肥总投入量的1%~47%;因氮肥施用造成土壤排放的 N_2O 占土壤 N_2O 总排放量的25%~82%^[8-9]。因而既能提高作物单产,同时又可降低环境污染成了未来农业的发展目标。

滴灌作为高效的节水灌溉技术,相较于传统的非滴灌模式能更好地抑制土壤氮素转化,有效减少 NH_3 挥发损失及 N_2O 排放^[10]。但也有研究表明滴灌模式下,土壤干湿交替频繁,为土壤硝化反硝化等氮素转化提供适宜的环境,引发显著的氮肥气态损失^[11]。国内外学者针对滴灌条件下温室气体减排大多基于氮肥用量的研究,关于不同氮肥类型下的氮肥气态损失的研究较少。对滴灌马铃薯地的研究表明,减量施氮加脲酶抑制剂可在保证产量的同时降低 NH_3 挥发和 N_2O 排放^[12];设施菜地的研究表明,滴灌条件下较常规施氮量,适量减氮可在稳产保质的前提下降低 N_2O 排放^[13]。而在非滴灌条件下的不同氮肥类型研究表明,与常规化肥施用相比,控释肥配施无机肥能够降低 NH_3 挥发损失和 N_2O 排放,提高氮素吸收利用率和水稻产量^[14];有机肥与化肥配施下可保证产量同时减少玉米地氮素气态损失^[15];液体肥减氮15%可在不减产的前提下,有效降低土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放^[16];ABR绿色液体肥部分替代化肥可有效提高蔬菜质量和产量,同时具备较低的 N_2O 排放通量^[17]。由此可知,合理选用氮肥可以在增加或保证作物产量的同

时,降低环境污染风险。

新疆是我国主要棉产区,棉花生产对于推动国民经济发展起着重要作用。而目前滴灌棉田氮肥施用不合理现象普遍存在,致使产量降低,氮素损失严重^[18];同时农田体系常用的氮肥产品多为酰胺态氮肥(尿素)^[19],存在较大的 NO_3^- 淋洗、 NH_3 挥发损失风险,加重了环境负担。因此,本试验通过探讨一种新型络合物清液肥对新疆滴灌棉田氮素气态损失和棉花产量的影响,为进一步减少 NH_3 挥发和 N_2O 排放,实现氮肥绿色增产增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在新疆石河子市天业生态园进行,土壤类型为灌耕灰漠土,质地为壤土。该地区年平均降水量为210 mm,年平均蒸发量1 600 mm,0~20 cm土层的土壤基本理化性质如下:pH为8.55,容重 $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,全氮 $1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $28.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $421.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $18.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试常规化肥使用尿素(含N 46.4%)、磷酸一铵(含N 11%,含 P_2O_5 61%)、氯化钾(含 K_2O 57%)、磷酸二氢钾(含 P_2O_5 52%,含 K_2O 34%);清液肥购自新疆福来克斯农业有限公司,不同配方N- P_2O_5 - K_2O 养分百分含量分别为20%-12%-0、19%-9%-2%和19%-5%-5%。供试作物为棉花(新陆早45)。

1.2 试验设计

试验设5个处理,分别为:(1)不施氮肥(N0);(2)常规化肥(TN300,农民习惯施肥,施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);(3)常规优化(TN240,减氮20%,施氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);(4)清液肥(LN300,施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);(5)清液肥优化(LN240,施氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。每个处理重复3次,共15个试验小区,小区面积 70 m^2 。

棉花采用膜下滴灌,一膜三管六行,行距配置为(66+10) cm,株距为10 cm,毛管间距为76 cm。棉花于2019年4月20日播种,采用“干播湿出”的方式,播种后滴40 mm出苗水。棉花生长期共灌水9次,总灌水量450 mm。灌水周期为7~10 d,从开花前开始

至吐絮前结束。试验中,氮、磷、钾肥全部作追肥,在棉花生长期间分6次随水滴施。各处理磷、钾肥施用量相同,均为 P_2O_5 105 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;因清液肥为固定养分配比,无法保证每次施肥与常规化肥磷钾用量一致,磷钾不足用KCl和 KH_2PO_4 补齐,不同时期比例分配见表1。其他管理措施与当地大田生产保持一致。

表1 不同施肥时期比例分配(%)
Table 1 Proportional distribution of different fertilization periods (%)

项目 Item	施肥次数及分配比例 Proportional distribution					
	1	2	3	4	5	6
N	15.00	20.00	20.00	20.00	15.00	10.00
P_2O_5	13.33	13.33	20.00	20.00	20.00	13.33
K_2O	10.00	20.00	20.00	20.00	20.00	10.00

1.3 测试指标及方法

土壤 NH_3 挥发:采用密闭室法^[20],以0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_2SO_4 作为吸收液收集。在棉花追肥期间(6月20日—8月16日)进行土壤 NH_3 挥发全程监测。每个试验小区布置2个 NH_3 挥发监测装置,分别在棉花宽行(66 cm)和窄行(10 cm)内各安装1个。在每次灌水施肥前1 d放入装置,并于下一次灌水施肥前1 d取回装置,监测周期为7~10 d。追肥期间,共取样6次。采用靛酚蓝比色法测定吸收液,计算 NH_3 挥发损失量。

土壤 N_2O 排放:采用静态箱-气相色谱法^[21],于棉花追肥期间进行 N_2O 排放的监测。采样箱由底座(长×宽为60 cm×60 cm)和顶箱(高90 cm)组成,每个小区放置2个采样箱(膜间和膜内各1个)。底座于第一次施肥前放入,并长期固定于大田中。每次采样前往底座中注水,将顶箱扣至底座上,以防底座与顶箱结合处漏气。箱体由不锈钢钢架构成,由硬质塑料膜密封,外层包裹薄海绵和锡纸,用于防止温度变化幅度过大影响气体测定结果。箱体内置小风扇和温度计,用于混匀箱内气体和观测箱内温度变化。箱体中部安置抽气孔,采样时按照0、10、20、30 min时间间隔进行气体收集,收集完毕后直接用7890A型气相色谱仪(GC)进行测定。每次 N_2O 气体采集在灌水施肥后的第3 d进行,整个追肥期间共取样6次,取样时间为早上8:00—12:00。

N_2O 排放通量计算公式如下^[22]:

$$F=\rho\times(V/A)\times(P/P_0)\times273/(273+T)\times(dc/dt) \quad (1)$$

式中: F 为 N_2O 排放通量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下 N_2O 的密度,1.25 $\text{mg}\cdot\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$; V 为静态箱体积, cm^3 ; A 为

静态箱底座表面积, cm^2 ; P 为静态箱内气压,Pa; P_0 为试验地环境气压,1.013×10⁵ Pa,一般 $P/P_0\approx1$; T 为采样时箱内平均气温, $^{\circ}\text{C}$; dc/dt 为 N_2O 排放速率, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

N_2O 累积排放量 T 计算公式如下^[23]:

$$T=\sum[(F_{i+1}+F_i)/2]\times(D_{i+1}-D_i)\times24/10^5 \quad (2)$$

式中: T 为 N_2O 累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时的 N_2O 平均排放通量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时间,d; 24为1 d的小时数;10⁵为单位转换系数。

土壤无机态氮及酶活性:每次气体收集完毕后,同步采集0~20 cm土层土壤样品,用于测定表层土壤无机态氮含量及酶活性。 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量采用2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl浸提后使用连续流动分析仪测定。土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、羟胺还原酶活性测定参照文献[24]。

棉花籽棉产量:在棉花收获前测定棉花产量,最后实收计产。

1.4 数据处理与分析

数据计算和绘图使用Microsoft Excel 2003软件进行。方差分析和数据变异用SPSS 21.0统计分析软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤无机态氮变化

棉花不同追肥期内0~20 cm土壤 NH_4^+ -N含量如图1(a)。整体上不同处理土壤 NH_4^+ -N含量变化在1.4~6.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内。各个施肥周期内,土壤 NH_4^+ -N含量始终以TN300处理最高,较TN240处理增加12.3%~75.5%。同一施氮水平下,清液肥处理土壤 NH_4^+ -N含量均低于常规化肥处理,降低了4.5%~32.9%。

各处理中棉花追肥期间土壤 NO_3^- -N含量始终以N0处理最低,为4.1~9.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各施氮处理土壤 NO_3^- -N含量表现为TN300>LN300, TN240>LN240。常规施氮水平下, LN300处理土壤 NO_3^- -N含量较TN300处理降低9.4%~49.0%; 减氮20%水平下, LN240处理土壤 NO_3^- -N含量较TN240处理降低12.8%~37.8%。

2.2 土壤 NH_3 挥发

2.2.1 土壤 NH_3 挥发动态

土壤 NH_3 挥发动态见图2。整个追肥期间内, N0处理土壤 NH_3 挥发量变化波动不大,整体在0.1~0.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同处理土壤 NH_3 挥发量表现为:TN300>

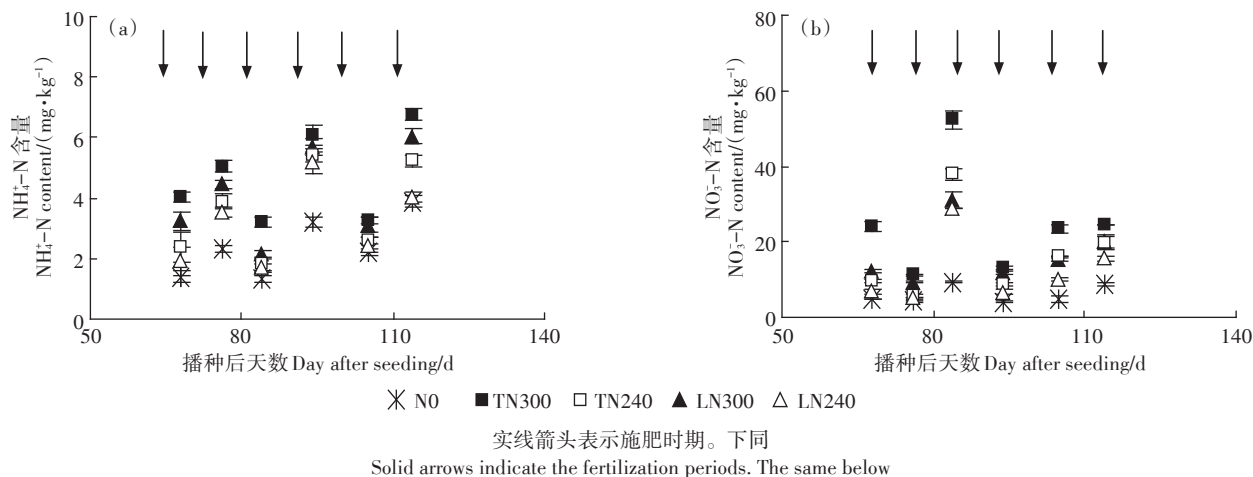
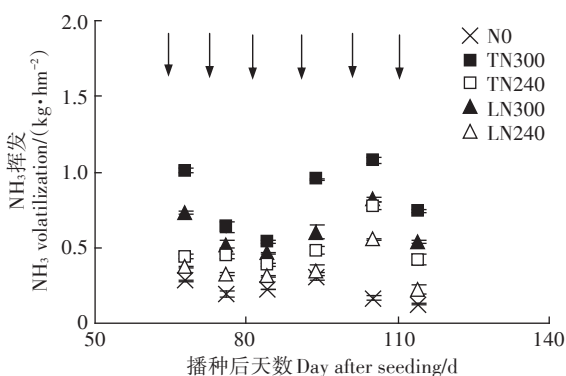


图1 追肥期间0~20 cm土壤无机态变化

Figure 1 Inorganic changes to the 0~20 cm soil during topdressing

图2 不同追肥期间土壤NH₃挥发量变化Figure 2 Variation in NH₃ volatilization during different topdressing periods

LN300>TN240>LN240>N0。与常规化肥相比,不同追肥时期 LN300 处理土壤 NH₃ 挥发量降低 14.3%~27.5%; LN240 处理土壤 NH₃ 挥发量 TN240 处理降低 15.2%~46.5%。

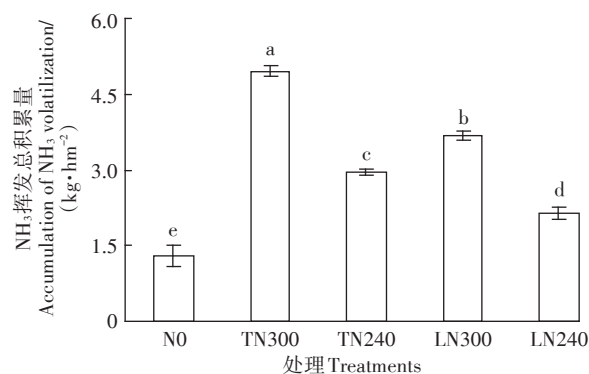
2.2.2 土壤 NH₃ 挥发累积量

不同处理对滴灌棉田追肥期间土壤 NH₃ 挥发累积量影响显著(图3)。各施氮处理 NH₃ 挥发总累积量为 1.3~5.0 kg·hm⁻², 较 N0 处理增加 165.0%~382.9%。施用清液肥可显著降低土壤 NH₃ 挥发损失, 与常规施氮相比, LN300 处理土壤 NH₃ 挥发总累积量降低 25.9%, LN240 处理土壤 NH₃ 挥发损失量较 TN240 处理降低 27.6%。

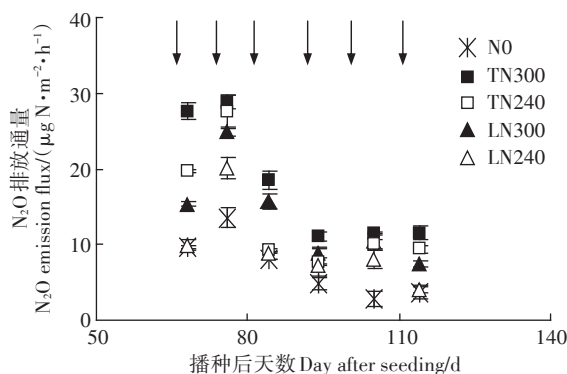
2.3 土壤 N₂O 排放

2.3.1 N₂O 排放通量

棉花不同追肥期内, 土壤 N₂O 排放通量整体在 2.9~29.8 μg N·m⁻²·h⁻¹(图4)。前3次追肥不同处理土



图内不同字母表示不同处理差异达显著水平($P<0.05$)。下同
Different letters in the figure indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same as below

图3 不同处理追肥期间土壤NH₃挥发累积量
(6月20日—8月16日)Figure 3 Accumulation of NH₃ volatilization during topdressing under different treatments (June 20—August 16)图4 棉花不同追肥时期N₂O排放通量变化Figure 4 Change in N₂O emission flux during different topdressing periods

壤 N_2O 排放通量较后3次追肥更高。各处理 N_2O 排放通量表现为: $\text{TN300} > \text{LN300}$; $\text{TN240} > \text{LN240}$ 。同施氮量下,清液肥处理 N_2O 排放通量较常规化肥处理降低了3.5%~56.0%。

2.3.2 N_2O 累积排放量

增施氮肥会显著增加土壤 N_2O 排放(图5)。与不施氮肥相比,各施氮处理土壤 N_2O 累积排放量增加78.5%~174.7%。与农民习惯施肥相比, TN240 、

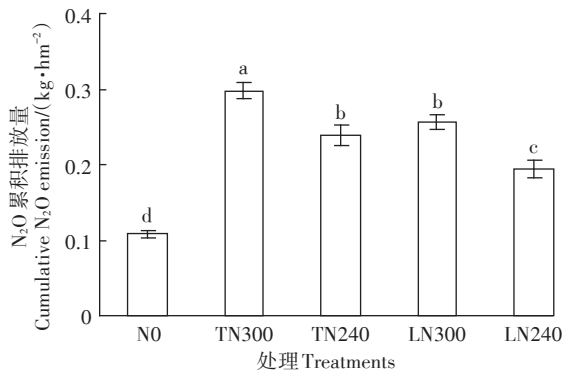


图5 不同处理棉花追肥期间 N_2O 累积排放量
(6月20日—8月16日)

Figure 5 Cumulative N_2O emissions during topdressing under different treatments (June 20—August 16)

LN300 和 LN240 处理 N_2O 累积排放量分别降低19.9%、14.1%和35.0%。 LN240 处理 N_2O 累积排放量较 TN240 处理降低18.9%。

2.4 土壤酶活性

施氮量显著影响土壤酶活性(图6)。常规施氮水平处理较减氮处理硝酸还原酶活性增加1.7%~2.2%;亚硝酸还原酶活性增加1.6%~11.9%;羟胺还原酶活性增加4.8%~5.1%;脲酶活性增加6.1%~9.2%。

与常规化肥处理相比,同施氮量下施用清液肥可显著降低土壤硝酸还原酶、土壤亚硝酸还原酶、土壤羟胺还原酶和脲酶活性。 LN240 处理土壤脲酶活性较 TN240 处理降低4.2%;硝酸还原酶活性较 TN240 处理降低5.5%;土壤亚硝酸还原酶活性较 TN240 处理降低26.6%;土壤羟胺还原酶活性较 TN240 处理降低6.0%。

2.5 相关性分析

追肥期间土壤气态氮损失量与土壤无机态氮和酶活性的相关性分析见表2。土壤 NH_3 挥发总量、 N_2O 累积排放量、 NO_3^--N 含量、 NH_4^+-N 含量、脲酶活性以及硝酸还原酶活性两两之间呈极显著正相关关系,与亚硝酸还原酶活性和羟胺还原酶活性

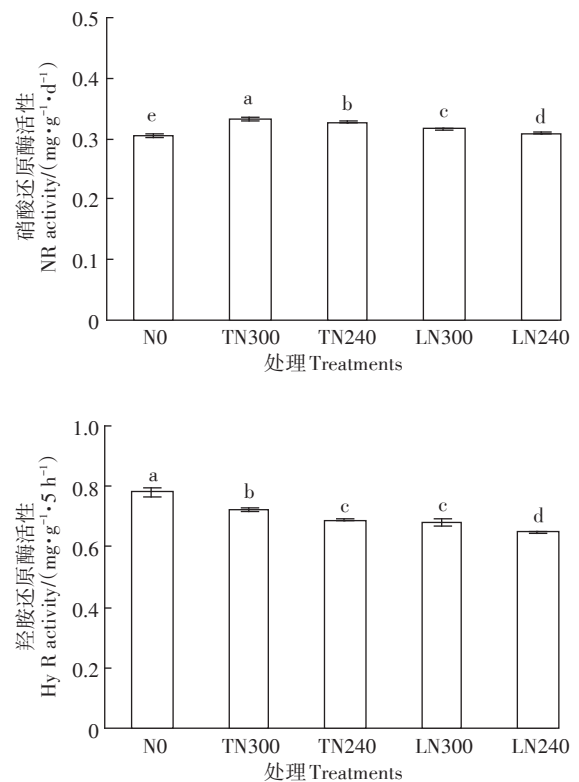
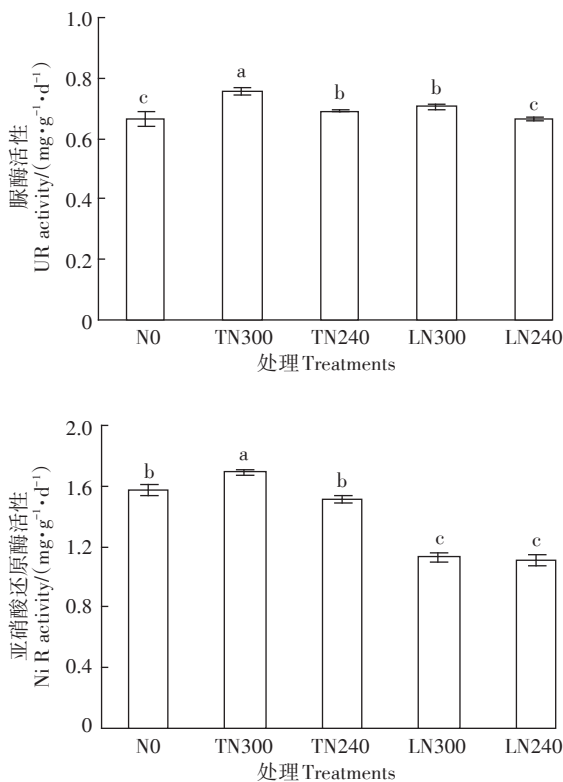


图6 不同处理对土壤酶活性的影响

Figure 6 Effects of different treatments on soil enzyme activity

无显著性相关。土壤亚硝酸还原酶活性与羟胺还原酶活性呈极显著正相关。

2.6 籽棉产量

施用氮肥对棉花籽棉产量的影响显著(图7),各施氮处理棉花籽棉产量较N0处理提高39.3%~73.5%。与农民习惯施氮相比,TN240、LN300和LN240处理棉花籽棉产量增加12.6%、9.1%和24.5%。同一减氮水平下,LN240处理棉花籽棉产量较TN240处理提高10.6%。

3 讨论

农田NH₃挥发受农田灌溉方式、施氮水平和氮肥

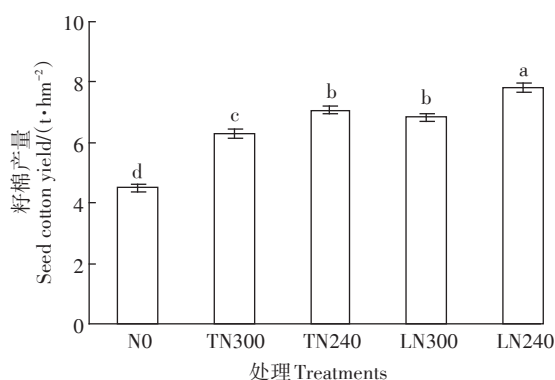


图7 不同处理棉花籽棉产量

Figure 7 Seed cotton yield under different treatments

类型等多种因素影响。不同研究表明滴灌施肥较常规漫灌施肥可显著降低土壤NH₃挥发损失^[25-26]。氮肥减量施用也可以显著降低NH₃挥发^[27-28],这与本研究常规施氮水平处理(TN300和LN300)的NH₃挥发量均高于减氮处理(TN240和LN240)的结果相符合。本研究发现,与常规化肥处理相比,同等施氮量下清液肥处理可显著降低NH₃挥发损失,产生这种现象的原因是清液肥降低了土壤NH₄⁺-N含量和脲酶活性,进而减少了NH₃挥发损失。一般认为NH₃挥发是氮肥在脲酶作用下水解的产物,因此脲酶活性越高,土壤保持的NH₄⁺-N含量越高,NH₃挥发的可能性越大^[29]。同时有研究表明常规氮肥溶解过程中,会加快土壤胶体吸附的NH₄⁺离子向土壤溶液中的游离态转化,促进NH₃挥发过程^[30]。络合物对于养分释放和供肥强度具有一定的调控作用,研究表明施用络合物肥料可显著抑制土壤脲酶的活性,使得氮素分解为氨的速率极大降低^[31]。本试验中清液肥中也含有络合物,对减少氨挥发也会产生作用。

合理的农田管理措施对于降低环境污染至关重要。研究表明与非滴灌施肥相比,滴灌施肥技术可有效减少温室气体N₂O排放^[13];但随施氮量的增加,N₂O的累积排放量也随之增大^[32]。本研究中采用滴灌施肥减氮20%的处理较常规施氮处理降低了19.9%~

表2 气态氮损失量与0~20 cm土层土壤无机态氮和酶活性的相关性

Table 2 Correlation between gaseous nitrogen loss and inorganic nitrogen and enzyme activity in 0~20 cm soil

	NH ₄ ⁺ -N 含量 NH ₄ ⁺ -N content	NO ₃ ⁻ -N 含量 NO ₃ ⁻ -N content	脲酶活性 UR activity	硝酸还原酶活性 NR activity	亚硝酸还原酶活性 Ni R activity	羟胺还原酶活性 Hy R activity	NH ₃ 挥发总量 Accumulation of NH ₃ volatilization	N ₂ O 累积排放量 N ₂ O cumulative emission
NH ₄ ⁺ -N 含量 NH ₄ ⁺ -N content	1							
NO ₃ ⁻ -N 含量 NO ₃ ⁻ -N content	0.947**	1						
脲酶活性 UR activity	0.725**	0.802**	1					
硝酸还原酶活性 NR activity	0.904**	0.946**	0.892**	1				
亚硝酸还原酶活性 Ni R activity	0.376	0.166	0.049	0.158	1			
羟胺还原酶活性 Hy R activity	-0.047	-0.307	-0.319	-0.297	0.695**	1		
NH ₃ 挥发总量 Accumulation of NH ₃ volatilization	0.949**	0.972**	0.861**	0.983**	0.212	-0.214	1	
N ₂ O 累积排放通 N ₂ O cumulative emission	0.846**	0.929**	0.902**	0.980**	0.030	-0.442	0.947**	1

注:**代表指标间具有极显著相关性。

Note: ** indicates significant difference between indexes.

24.4%的 N_2O 排放,与前人研究结果一致。此外本研究发现等量氮肥投入下,施用清液肥处理较常规化肥处理可降低14.1%~18.9%的 N_2O 排放,说明清液肥具有更好的 N_2O 减排效果。土壤氮素转化均是在其相关微生物与酶的驱动下完成的,通过对其关键酶活性的大小分析可以间接反映土壤中氮素的转化强度^[33]。土壤硝化反硝化是农田 N_2O 产生的主要途径,其中硝化-反硝化酶活性的大小对 N_2O 排放的影响显著^[34]。不同研究表明,土壤硝化反硝化酶活性越高,产生的 N_2O 排放越多^[35-37]。本研究中同施氮量下清液肥处理较常规化肥处理均显著降低了土壤硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性以及羟胺还原酶活性。此外,肥料特性也是影响 N_2O 排放的重要因素,研究表明络合物肥料有助于促进作物对氮素的吸收,从而避免交换性铵和硝态氮在土壤中的过量累积^[38],进而有效降低了底物 NO_3^- -N含量,减少了 N_2O 排放。

在一定范围内,作物的产量随着氮肥用量的增加而增加,当到达一定施氮量时,不仅氮素资源损失加重,还会导致作物减产。本研究发现施氮 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理棉花产量显著高于施氮 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理,说明较当地常规施氮量减氮20%可显著提高棉花产量。也有研究表明当滴灌棉田的施氮量为 $225\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,棉花具有较高的结铃密度和产量^[39],这种差异产生的主要原因是不同地区土壤状况,施氮方式有所不同。在玉米的优化施氮研究中,当氮肥用量为传统高产的1/3时,产量提高了1倍^[40],说明适宜的施氮量是获得较高产量的基础。与此同时,滴灌施肥精准的养分供应,更有利于促进作物根系的吸收。研究表明少量多次的施肥方式可显著促进棉花氮素吸收,提高棉花产量;同时根据棉花不同时期需肥特性进行合理调控,可促进棉花增产^[41-42]。此外,本研究还发现清液肥可显著提高棉花产量,同等施氮水平下较传统化肥提高了9.1%~10.6%,对农业生产来说具有重要意义。不同研究表明施用液体肥可更好地促进棉花养分吸收,利于棉花铃的形成^[43-44],这可能是施用清液肥产量提高的原因。

4 结论

同一施氮水平下,施用清液肥较常规化肥可显著降低0~20 cm土层土壤无机态氮含量、脲酶活性、硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性和羟胺还原酶活性,有效减少滴灌棉田 NH_3 损失和 N_2O 排放。与常规施氮水平相比,减氮20%均可显著提高棉花产量,其

中施用清液肥棉花增产效果更优。

参考文献:

- [1] 易博. 稻田土壤厌氧氨氧化协同铁还原为途径的气态氮素损失过程及其机理的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
YI Bo. Nitrogen losses through iron reduction coupled with anaerobic ammonia oxidation from paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [2] 金书秦, 张惠, 付饶, 等. 化肥零增长行动实施状况中期评估[J]. 环境保护, 2019, 47(2):39-43.
JIN Shu-qin, ZHANG Hui, FU Rao, et al. Mid-term evaluation on the implementation of zero growth action of chemical fertilizers[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(2):39-43.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):259-273.
ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2):259-273.
- [4] 巨晓棠, 谷保静, 蔡祖聪. 关于减少农业氨排放以缓解灰霾危害的建议[J]. 科技导报, 2017, 35(13):11-12.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing, CAI Zu-cong. Recommendations on reducing agricultural ammonia emissions to mitigate haze damage[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(13):11-12.
- [5] Wu Y, Gu B, Erisman J W, et al. $\text{PM}_{2.5}$ pollution is substantially affected by ammonia emissions in China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:86-94.
- [6] 罗伟. 日光温室栽培不同水氮处理气态氮排放研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
LUO Wei. Gaseous nitrogen emission under variable water and nitrogen input in solar greenhouse system in Losses Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [7] Ameloot N, Maenhout P, Neve S D, et al. Biochar-induced N_2O emission reductions after field incorporation in a loam soil[J]. *Geoderma*, 2016, 267:10-16.
- [8] 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.
- [9] 肖娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):2011-2018.
XIAO Jiao, FAN Jian-ling, YE Gui-ping, et al. Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):2011-2018.
- [10] 周爽, 王广帅, 高阳, 等. 滴灌对农田 N_2O 排放影响的研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2010:1-8.
ZHOU Shuang, WANG Guang-shuai, GAO Yang, et al. Effects of

- drip irrigation on soil N₂O emissions from farmland: A review[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010; 1-8.
- [11] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1764-1773.
- QI Yu-chun, GUO Shu-fang, DONG Yun-she, et al. Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1764-1773.
- [12] 王伟帆. 尿素不同用量及处理措施对马铃薯田温室气体排放和氨挥发影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- WAN Wei-fan. Effects of different amounts of urea and treatments on greenhouse gas emissions and ammonia volatilization in potato fields [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [13] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. 北京设施菜地 N₂O 和 NO 排放特征及滴灌优化施肥的减排效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 591-600.
- XIE Hai-kuan, JIANG Yu-qian, LI Hu, et al. N₂O and NO emissions from greenhouse vegetable fields and the mitigation efficacy of the optimized fertigation in Beijing[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 591-600.
- [14] 张星星. 氮肥类型对免耕稻田 NH₃ 挥发与 N₂O 排放及氮肥利用率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- ZHANG Xing-xing. Effects of nitrogen types on NH₃ volatilization and N₂O emissions and nitrogen utilization in no-tillage paddy fields of central China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [15] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 134(11): 1835-1846.
- LI Yan-qing, WEN Yan-chen, LIN Zhi-an, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 134(11): 1835-1846.
- [16] 李占台. 京郊设施蔬菜园区生产现状与液体肥应用评价[D]. 张家口: 河北北方学院, 2019.
- LI Zhan-tai. Production status and application evaluation of liquid fertilizer in Beijing suburb facility vegetable park[D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2019.
- [17] 马双龙. 甘薯淀粉废水厌氧处理制备液态有机肥及其对蔬菜的促生作用[D]. 开封: 河南大学, 2014.
- MA Shuang-long. Making liquid organic fertilizer by anaerobic treating starch wastewater and its growth-promoting effect on vegetables [D]. Kaifeng: Henan University, 2014.
- [18] 吕冬青, 孙瀚, 张铭谷, 等. 棉花生产上新型肥料研究进展[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(1): 174-182.
- LÜ Dong-qing, SUN Han, ZHANG Ming-gu, et al. Application progress of new fertilizers in cotton production[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(1): 174-182.
- [19] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015.
- [20] 李琦, 廖娜, 张妮, 等. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1987-1994.
- LI Qi, LIAO Na, ZHANG Ni, et al. Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1987-1994.
- [21] 巴闯, 杨明, 邹洪涛, 等. 包膜/抑制剂联合调控对农田土壤 N₂O 排放和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1291-1299.
- BA Chuang, YANG Ming, ZOU Hong-tao, et al. Combined effects of coating / inhibitors on N₂O emission and ammonia volatilization in farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1291-1299.
- [22] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6): 1837-1846.
- [23] 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.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- GUAN Song-yin. Soil enzymes and research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1987.
- [25] 常菲, 红梅, 武岩, 等. 灌溉方式和改良措施对河套灌区盐渍土氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 38-45.
- CHANG Fei, HONG Mei, WU Yan, et al. Effects of irrigation methods and improvement measures on ammonia volatilization of saline soil in Hetao Irrigation area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2): 38-45.
- [26] 常菲. 内蒙古后套平原盐渍土几种改良措施的对比研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- CHANG Fei. Comparative study on several improvement measures of saline soil in Houtao plain of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [27] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1858-1865.
- SHAN Nan, ZHAO Tong-ke, BI Xiao-qing, et al. Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, 33(9): 1858-1865.
- [28] 王成, 陈波浪, 玉素甫江·玉素音, 等. 施氮量对库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 157-164.
- WANG Cheng, CHEN Bo-lang, YUSUFUJIANG · Yu-su-yin, et al. Effect of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrous oxide emission in Korla fragrant pear orchard[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 157-164.
- [29] 陈利军, 武志杰, 姜勇, 等. 与氮转化有关的土壤酶活性对抑制剂施用的响应[J]. 应用生态学报, 2002(9): 1099-1103.
- CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, JIANG Yong, et al. Response of N transformation related soil enzyme activities to inhibitor applications[J].

- Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(9):1099-1103.
- [30] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.
- LI Yan-qing. Agronomic and environmental effects of different types of organic fertilizers and chemical fertilizers[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [31] 欧阳洮, 陆长青. 新型尿素——微量元素络合肥料的原理和效应[J]. 土壤, 1995(4):210-212.
- OUYANG Tao, LU Chang-qing. New type of urea—principle and effect of trace element complex fertilizer[J]. *Soil*, 1995(4):210-212.
- [32] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1432-1437.
- YI Qiong, PANG Yu-wan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1432-1437.
- [33] 李君. 氮肥增效剂(NBPT/Nitrapyrin)对土壤氮素转化及滴灌麦田 N_2O 排放的影响[D]. 石河子:石河子大学, 2014.
- LI Jun. Response of soil N transformation and nitrous oxide emission to nitrapyrin and NBPT on drip irrigated calcareous soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014.
- [34] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10):1781-1798.
- CAO Wen-chao, SONG He, WANG Ya-jing, et al. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10):1781-1798.
- [35] 白红英, 韩建刚, 赵一萍. 不同土层土壤理化生性状与反硝化酶活性 N_2O 排放通量的相关性研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3):193-196.
- BAI Hong-ying, HAN Jian-gang, ZHAO Yi-ping. Correlation between soil physicochemical properties and denitrifying enzyme N_2O emission flux in different soil layers[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3):193-196.
- [36] 方泽涛, 李伏生, 刘靖雯, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田 N_2O 排放与反硝化酶活性的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(6):1059-1066.
- FANG Ze-tao, LI Fu-sheng, LIU Jing-wen, et al. Relationship between N_2O emission and denitrification enzyme activity in paddy soil under different irrigation modes and nitrogen treatments[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(6):1059-1066.
- [37] 奚雅静, 汪俊玉, 李银坤, 等. 滴灌水肥一体化配施有机肥对土壤 N_2O 排放与酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20):3611-3624.
- XI Ya-jing, WANG Jun-yu, LI Yin-kun, et al. Effects of drip irrigation water and fertilizer integration combined with organic fertilizers on soil N_2O emission and enzyme activity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20):3611-3624.
- [38] 刘方春. 褐煤腐殖酸肥料的养分缓释机理及其肥效研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.
- LIU Fang-chun. Nutrient slow-release mechanism of humic acid fertilizer extracted from brown coal and its effects[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [39] 杨宝平. 施氮量对棉花生长发育及土壤性质时空变异特征的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- YANG Bao-ping. Effects of nitrogen application on cotton growth and characteristics of spatial and temporal variation of soil properties[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [40] 杨华, 祁生林, 彭云峰. 玉米优化施氮高产高效生理机制[J]. 农业工程, 2016, 6(2):127-129, 109.
- YANG Hua, QI Sheng-lin, PENG Yun-feng. Mechanisms of high maize yield and nitrogen use efficiency under optimized nitrogen management[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 6(2):127-129, 109.
- [41] 李和平, 李国振, 田长彦. 塔里木河-孔雀河中下游地区棉花膜下滴灌施肥量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006(5):184-188.
- LI He-ping, LI Guo-zhen, TIAN Chang-yan. Test of drop irrigation and fertilizer application to cotton grown in mid-lower of Tarim river and Peacock river[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006(5):184-188.
- [42] 马兴旺, 杨涛, 牛新湘, 等. 精细化水氮运筹对棉花适宜机采性状的调控效果[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(9):1587-1594.
- MA Xing-wang, YANG Tao, NIU Xin-xiang, et al. Regulating effects of fine management of irrigation and nitrogen split application on characters of machine-harvested cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(9):1587-1594.
- [43] 徐海东, 董合林, 苏丽丽, 等. 液态有机肥对滴灌棉花光合特性及产量形成规律的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20):71-77.
- XU Hai-dong, DONG He-lin, SU Li-li, et al. Effect of liquid organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield formation of cotton under drip irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(20):71-77.
- [44] 闫嘉欣, 常青, 杨治平, 等. 黄腐酸液体配方肥对大棚黄瓜产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10):47-51.
- YAN Jia-xin, CHANG Qing, YANG Zhi-ping, et al. Fulvic acid formulated liquid fertilizer: Effect on greenhouse cucumber yield and quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(10):47-51.