

不同氮肥在石灰性潮土中的转化及 ATS 对尿素氮转化的调控效应

王 硕^{1,2}, 孙梦宇^{1,2}, 李长青^{1,2}, 孙志梅^{1*}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071000; 2. 河北省农田生态环境重点实验室, 保定 071000)

摘 要: 根据氮肥施入土壤后的转化特性进行氮肥的高效调控和管理是提高氮肥利用效率、缓解氮肥污染的重要措施。为探究不同氮肥在石灰性潮土中的转化特性差异及硫代硫酸铵(ammonium thiosulfate, ATS)作为氮肥调控剂对尿素氮转化的影响, 该研究采用室内土壤培养(土壤水分含量为田间持水量的 60%, 温度 25℃)试验方法, 以尿素、硫酸铵、氯化铵和 ATS 作为供试肥料, 比较 4 种氮肥施入石灰性潮土后的转化特性差异, 并以 ATS 作为氮素调控剂, 以单施尿素作为对照, 探究尿素配施不同用量 ATS 对尿素氮转化的影响。结果表明, 4 种供试氮肥在石灰性潮土中的转化过程明显不同。尿素在石灰性潮土中的水解速率最快, 硝化作用强度也最高, 硫酸铵其次; 氯化铵由于 Cl^- 的硝化抑制作用, 土壤表观硝化率在 7~21 d 显著低于尿素和硫酸铵 ($P<0.05$); ATS 施入土壤后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的速率最高, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的速率最低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤中的存留时间最长, 出现峰值之后也一直保持最高的含量, 表观硝化率最低。将 ATS 作为氮素调控剂与尿素配合施用, 当其用量在 60 mg/kg (含 S 量) 以上时, 既表现出了明显的抑制尿素水解的作用效果, 也表现出了显著的硝化抑制作用 ($P<0.05$), 且随着 ATS 用量的增加, 抑制效应明显增强。这对于减少氮素损失, 提高氮肥利用效率具有积极意义。但供试 4 种氮肥施入土壤后均出现了亚硝酸盐的累积, 其中 ATS 处理的累积量显著高于尿素、硫酸铵和氯化铵 ($P<0.05$), 累积持续时间也最长。ATS 作为氮素调控剂调控氮素转化, 也出现了类似的结果, 且随着 ATS 用量增加, 亚硝酸盐在土壤中存留时间明显延长, 含量和峰值明显提高, 出现峰值的时间也明显延后。

关键词: 土壤; 氮肥; 氮素转化; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 硫代硫酸铵 (ATS)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309155

中图分类号: S143.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-24-0100-09

王硕, 孙梦宇, 李长青, 等. 不同氮肥在石灰性潮土中的转化及 ATS 对尿素氮转化的调控效应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 100-108. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309155 <http://www.tcsae.org>

WANG Shuo, SUN Mengyu, LI Changqing, et al. Transformation characteristics of different nitrogen fertilizers and the regulatory effect of ATS on urea-N transformation in calcareous-fluvo-aquic soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(24): 100-108. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309155 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤氮素是植物所需氮素的主要来源, 也是决定农业生产水平的重要限制因素^[1], 化学氮肥又是农田土壤氮素的主要来源, 约占氮素输入总量的 81%^[2]。科学的氮肥投入可以实现作物增产和养分增效, 同时保护生态环境^[3]。针对不同土壤性质、气候条件以及作物体系等选择适宜的氮肥种类是科学施用氮肥的重要方面。当前氮肥的主导品种是酰胺态氮肥尿素, 其次还有铵态氮肥硫酸铵、氯化铵、硫代硫酸铵(ammonium thiosulfate, ATS)等。不同氮肥种类在不同类型土壤中的转化特性不同, 在不同作物体系中的适宜施用方法和施用效果也不同。已有研究表明, 氯化铵中的 Cl^- 由于具有硝化抑制作用, 与尿素配施不仅可以延长尿素肥效, 而且可以减

少氮素损失和高氯毒害^[4-5]; 黄容等^[6]研究表明, 紫色土比表面积在施用尿素后显著高于硫酸铵处理, 而土壤表面电荷密度和电场强度硫酸铵处理显著高于尿素, 由此导致不同氮肥施入土壤后对土壤养分的保蓄性和有效性影响不同; 齐欣等^[7]研究发现尿素、硝酸铵、硫酸铵、硝酸钙和氯化铵 5 种氮肥在潮土、黄褐土和砂浆黑土 3 种土壤上对小麦产量和氮素利用的影响不同, 并提出了小麦生产中适宜于不同土壤类型的氮肥种类。ATS 不仅含有植物必需的氮, 还含有硫, 且硫兼具速效和缓效双重特性^[8], 作为液体肥料在发达国家经济作物上已经有了广泛应用^[9-10], 在国内外作为疏花剂也已受到关注^[11-12], 但国内市场上以硫代硫酸盐为主要原料的液体肥料还很少见, 对 ATS 作为肥源施入土壤中的转化特性以及与其他肥料种类的比较研究鲜有报道。因此, 全面了解氮肥品种的转化特性, 对氮肥资源的科学调控与高效管理至关重要。

通过添加氮肥调控剂调控肥料氮素转化, 减缓尿素的水解和铵的硝化过程, 是实现氮肥高效管理与利用的有效途径^[13-15]。氮肥调控剂包括脲酶抑制剂和硝化抑制剂两类, 传统的抑制剂种类较多, 现已有数百种在自然

收稿日期: 2023-09-19 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901004)

作者简介: 王硕, 研究方向为养分资源高效管理与利用。

Email: 15830667051@163.com

*通信作者: 孙志梅, 教授, 博士生导师, 研究方向为养分资源高效管理、植物营养调控。Email: sunzhm2002@163.com

界中存在或由人工合成的具有或强或弱抑制能力的化合物，目前市场上推广应用的主要有脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酸三胺、氢醌和硝化抑制剂 3, 4-二甲基吡唑磷酸盐、双氰胺^[13,16]等。但普遍存在着成本高、调控效果受环境影响较大、施用效果不稳定等问题。因此，筛选适宜于中国典型土壤的成本低廉、高效，并且对环境友好的抑制剂十分必要^[13]。ATS 作为一种含有氮和硫的化合物，除了可以作为肥源应用外，还具有抑制土壤脲酶活性和硝化作用的功效，因此也被认为是一种有效的氮肥调控剂^[9, 17-18]。对 ATS 调控氮素转化的机理研究发现，ATS 进入土壤后很容易被氧化为连四硫酸盐，与脲酶中的-SH 反应生成硫的衍生物，通过特定的化学作用抑制酰胺态氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化过程，从而更有利于氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式保存于土壤中^[17, 19]。但对 ATS 作为氮肥调控剂的研究多集中在上世纪八九十年代，且从相关研究结果看，ATS 具体用量以及在不同类型土壤上对氮转化的调控效果均不明确。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil							
供试土壤 Tested soil	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{NO}_3^-\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
氮转化试验供试土壤	9.37	0.61	4.90	10.20	13.10	117.80	8.13
氮调控试验供试土壤	8.22	0.58	3.35	8.05	9.37	132.14	8.27

1.2 试验设计

1.2.1 不同氮肥在石灰性潮土中的转化特性比较

土壤预培养：首先测定土壤含水量，并调节土壤水分含量为田间持水量的 60%，恒温培养箱（25℃）内培养 5 d，以恢复土壤的生物活性。预培养结束后，进行试验。以不施氮肥的处理作为对照（CK），设置尿素、硫酸铵、氯化铵和 ATS 4 种氮肥作为肥源，按纯 N 用量 0.15 g/kg 施用肥料，总计 5 个处理，每个处理 3 次重复。

将称好的肥料与折合 500 g 风干土的鲜土混匀装入塑料盒中，并盖好带有通气孔的盖子，以保持好气条件，随机置于 25℃ 恒温培养箱中进行培养。培养期间每隔两天通过称重法调节土壤含水量，使其保持在田间持水量的 60%。分别于培养后的第 1、2、3、4、5、7、10、14、17、21、28 天采集土壤样品，测定土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

1.2.2 ATS 作为氮肥调控剂的调控效果

按照 1.2.1 方法将供试土壤预培养结束后，以尿素为氮源，设置如下处理（见表 2）。每个处理 3 次重复，纯 N 用量为 0.15 g/kg（添加 ATS 的处理，纯 N 用量 0.15 g/kg 为尿素提供的纯 N 量与 ATS 提供的纯 N 量之和）。培养试验开始后分别于施肥后的第 1、3、5、7、10、14、21、28 天采集土壤样品，测定土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

1.3 测定方法

采集的土壤样品立即用 0.01 mol/L 氯化钙溶液浸提， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用靛酚蓝比色-分光光度法， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 测定

基于此，本研究采用室内土壤培养试验方法，以华北平原代表性土壤石灰性潮土为供试土壤，以尿素、硫酸铵、氯化铵、ATS 为氮源，分析不同种类氮肥施入土壤后的转化特征，并以 ATS 作为氮素调控剂，探讨其与尿素配施对氮素转化的调控效果，旨在为今后生产中氮肥资源的高效管理与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤：两批培养试验用土壤均采自冀中平原小麦/玉米轮作田 0~20 cm 耕层，带回实验室后过 2 mm 筛，除去枯枝落叶、残留根系等杂物后备用。土壤为石灰性潮土，基本理化性质见表 1。供试肥料尿素（N 46%）、硫酸铵（N 21.21%）和氯化铵（N 26.17%）均采用分析纯试剂，ATS（N 10.72%，S 24.45%）由河北双兴摄影化学有限公司提供。培养试验用塑料盒规格为上口直径 14.5 cm，底部直径 10.4 cm，高 9 cm，塑料盒盖上有通气口，以保持培养试验期间充分的好氧环境。

采用磺胺/盐酸萘乙二胺显色-分光光度法， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定采用紫外分光光度法（型号：UV-00PC 型，产地：上海美谱达仪器有限公司），同时用烘干法测定土壤水分含量^[20]和威尔科克斯法测定土壤田间持水量^[21]。

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design	
处理 Treatment	含义 Meaning
CK	空白对照，不施氮肥
U	单施尿素
U+ATS1	ATS 用量按含 S 量 30 mg/kg 添加
U+ATS2	ATS 用量按含 S 量 60 mg/kg 添加
U+ATS3	ATS 用量按含 S 量 90 mg/kg 添加

注：ATS，硫代硫酸铵。
Note: ATS, ammonium thiosulfate.

1.4 数据处理及统计分析

利用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和作图，采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析，Duncan 法进行多重比较（ $P<0.05$ ）。

1) 土壤表观硝化率= $(B+C) / (A+B+C) \times 100\%$ ^[22]
式中 A 为土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量（mg/kg），B 为土壤 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量（mg/kg），C 为土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量（mg/kg）。

2) 土壤硝化速率= $(C_1-C_0) / (t_1-t_0)$ ^[23]
式中 C_0 和 C_1 的含义：在计算 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的硝化速率时，分别表示培养前后土壤 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量（mg/kg），在计算 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的硝化速率时，则分别表示培养前后土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量（mg/kg）；t 变量为培养时长。

3) 硝化抑制率 = $(D-E)/D \times 100\%$ [24]

式中 D 为添加尿素处理的土壤 NO_3^- -N 含量 (mg/kg); E 为尿素配施 ATS 处理的土壤 NO_3^- -N 含量 (mg/kg)。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥在石灰性潮土中的转化特征

2.1.1 土壤中各形态氮含量比较

1) 土壤 NH_4^+ -N 含量比较

图 1a 表明, 不施氮肥的处理 (CK) 土壤 NH_4^+ -N 含量始终保持在最低水平, 整个培养期间基本稳定在 $0.2 \sim 12.0 \text{ mg/kg}$ 之间。各施肥处理的 NH_4^+ -N 含量则随培养时间的延长呈现先升后降趋势, 并均在第 3 天达到峰值,

其中氯化铵处理 NH_4^+ -N 峰值 (111.7 mg/kg) 显著高于其他氮源处理 ($P < 0.05$)。培养后的前 7 d 内, 均以氯化铵处理的土壤 NH_4^+ -N 含量最高, 尿素和硫酸铵差异不显著; ATS 处理在培养后的第 1 天和第 2 天 NH_4^+ -N 含量分别显著低于尿素 9.7% 和 8.5% ($P < 0.05$), 显著低于硫酸铵 8.0% 和 8.1% ($P < 0.05$), 在培养的 1~7 d 内显著低于氯化铵 5.7%~14.7% ($P < 0.05$); 7 d 以后则以 ATS 处理的 NH_4^+ -N 含量最高, 其次分别是氯化铵、硫酸铵和尿素; 而尿素和硫酸铵在培养的第 1~5 天内以及培养 17 d 之后含量差异均不大, 仅在培养第 5~17 天硫酸铵处理 NH_4^+ -N 含量显著高于尿素处理 8.2%~298.2% ($P < 0.05$)。各处理在培养第 24 天后 NH_4^+ -N 含量基本持平。

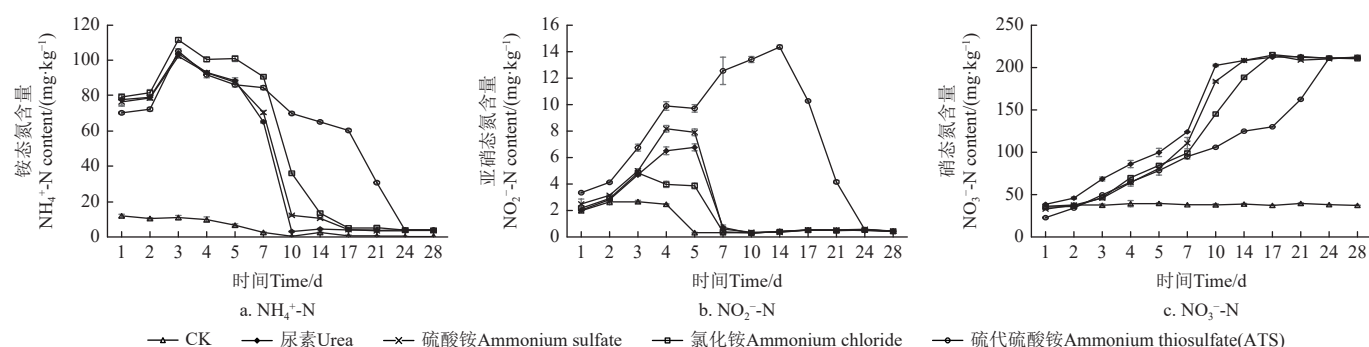


图 1 土壤中各形态氮含量比较

Fig.1 Comparison of nitrogen content of different forms in soil

2) 土壤 NO_2^- -N 含量比较

与 NH_4^+ -N 的动态变化趋势相似, 随培养时间延长各处理土壤 NO_2^- -N 含量也呈现出先升后降趋势 (图 1b), 但峰值大小及其出现时间因氮肥种类不同而不同。ATS 处理土壤 NO_2^- -N 含量在培养前 14 d 呈现逐渐增加趋势, 第 14 天达到峰值 (14.4 mg/kg) 后迅速下降, 24 d 以后与 CK 处理基本持平, 但在 24 d 前土壤 NO_2^- -N 含量显著高于尿素、硫酸铵和氯化铵 ($P < 0.05$); 施用尿素和硫酸铵的土壤 NO_2^- -N 含量分别于第 5 天和第 4 天出现峰值, 之后迅速下降, 7 d 后土壤 NO_2^- -N 含量接近于 CK 并保持基本稳定。硫酸铵处理 NO_2^- -N 含量峰值 (8.2 mg/kg) 显著高于尿素 (6.8 mg/kg) 17.2% ($P < 0.05$); 氯化铵处理的土壤 NO_2^- -N 含量在前 3 d 缓慢上升, 3 d 时达到峰值, 且峰值显著低于尿素、硫酸铵和 ATS ($P < 0.05$)。第 3~5 天 NO_2^- -N 含量缓慢下降, 第 5 天后开始迅速下降, 第 7 天接近于 CK 水平。而不施用氮肥的情况下, 在培养前 5 d 内, 也会出现 NO_2^- -N 的低量积累, 5 d 以后则一直稳定在 0.5 mg/kg 左右的较低水平。

3) 土壤 NO_3^- -N 含量比较

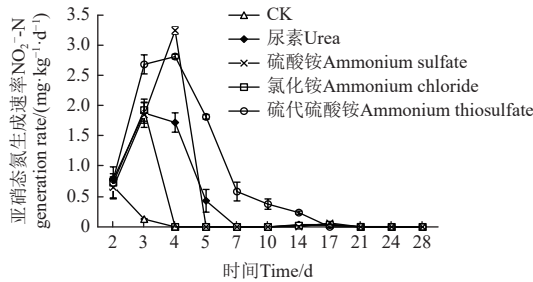
如图 1c 所示, 与 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的动态变化趋势不同, CK 处理土壤 NO_3^- -N 含量一直稳定在 $36.2 \sim 39.6 \text{ mg/kg}$ 范围内, 而各施肥处理均随培养时间的延长呈现逐渐上升趋势, 后均稳定在 210.0 mg/kg 左右 (图 1c), 但尿素、硫酸铵、氯化铵和 ATS 达到峰值的时间分别出

现在了培养后的第 10、14、17 和 24 天。在达到峰值之前, 基本均以尿素处理的土壤 NO_3^- -N 含量最高, 培养前 5 d 内, 硫酸铵、氯化铵和 ATS 三者的 NO_3^- -N 含量差异不大, 5 d 以后至达到峰值之前, NO_3^- -N 含量由高到低依次为硫酸铵、氯化铵、ATS。在第 10 天尿素 NO_3^- -N 含量达到峰值时, ATS 的 NO_3^- -N 含量显著低于尿素 47.7% ($P < 0.05$), 培养至 21 d 时, 仍分别显著低于尿素、硫酸铵和氯化铵 23.7%、22.2% 和 23.4% ($P < 0.05$)。

2.1.2 不同氮肥处理的 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 生成速率比较

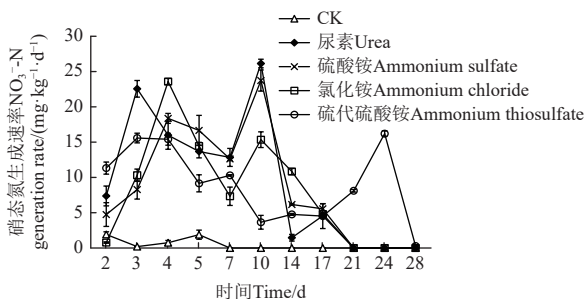
1) NO_2^- -N 生成速率比较

由图 2 可见, CK 处理的 NO_2^- -N 生成速率在整个培养期间始终稳定在 0.7 mg/(kg·d) 以下水平, 尿素、硫酸铵和氯化铵的 NO_2^- -N 生成速率则均呈现出先上升后下降的趋势, 但是各处理达到峰值的时间不同。尿素、硫酸铵、氯化铵分别在第 3、4 和 3 天达到峰值 1.9、3.2 和 1.9 mg/(kg·d) , 并分别在第 7、5 和 4 天降低到与 CK 基本相当的水平, 且氯化铵处理的 NO_2^- -N 生成速率在前 7 d 内显著低于尿素、硫酸铵和 ATS ($P < 0.05$); ATS 作氮源时生成 NO_2^- -N 的速率在第 4 天达到峰值 2.8 mg/(kg·d) , 且在培养后的第 17 天才接近于 CK 水平。与尿素和氯化铵相比较, ATS 处理 NO_2^- -N 的生成速率峰值出现时间延迟了 1 d, 且在培养 17 d 内, 始终显著高于二者 ($P < 0.05$); 而 ATS 与硫酸铵相比, 二者最大速率出现时间同步, 且除最大速率低于硫酸铵 11.3% 外, 其他时间的 NO_2^- -N 生成速率均显著高于硫酸铵 ($P < 0.05$)。

图 2 不同处理土壤的 NO_2^- -N 生成速率Fig.2 Generation rate of NO_2^- -N under different treatments

2) NO_3^- -N 生成速率比较

如图 3 所示, 不施氮肥 (CK) 的土壤 NO_3^- -N 生成速率始终稳定在 $1.9 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 以下的较低水平。尿素、硫酸铵和氯化铵 3 种氮肥随时间延长 NO_3^- -N 生成速率的变化趋势基本相似, 即在肥料施入土壤后的 14 d 内均出现了 2 次峰值, 第一次峰值尿素、硫酸铵和氯化铵分别出现在了第 3 天 ($22.6 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$)、第 4 天 ($18.4 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$) 和第 4 天 ($23.6 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$)。第二次峰值则均出现在第 10 天, 峰值分别为 26.1、23.7 和 $15.3 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。除了第 3~4 天尿素处理的 NO_3^- -N 生成速率分别比硫酸铵和氯化铵显著降低 13.0% 和 32.2% 外 ($P < 0.05$), 在肥料施入土壤后的前 10 d 内, 均表现为尿素处理的 NO_3^- -N 生成速率高于或基本相当于硫酸铵, 硫酸铵处理的 NO_3^- -N 生成速率又高于氯化铵。也正因为氯化铵前 10 d 的 NO_3^- -N 生成速率相对较慢, 因此, 第 14 天 NO_3^- -N 仍显著高于尿素 6.4 倍和硫酸铵 75.8% ($P < 0.05$)。17 d 时三者 NO_3^- -N 生成速率才基本相当, 并于 17 d 后均基本接近了 CK 水平。ATS 施入土壤后的 NO_3^- -N 生成速率则与其他三种氮肥表现截然不同, 虽然第 1~2 天的 NO_3^- -N 生成速率即显著高于尿素、硫酸铵和氯化铵, 第 2~3 天显著高于硫酸铵和氯化铵 ($P < 0.05$), 但此后直到培养的第 17 天, 与尿素、硫酸铵和氯化铵相比, ATS 基本保持着比较低的 NO_3^- -N 生成速率, 第 10 天出现低谷, 之后又开始呈现出逐渐提高的趋势, 并于施入土壤后的第 24 天达到第 2 个生成速率峰值 ($16.2 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$), 之后迅速降低, 28 d 时才接近于 CK 水平。

图 3 不同处理的土壤 NO_3^- -N 生成速率Fig.3 Generation rate of NO_3^- -N under different treatments

2.1.3 土壤表观硝化率的差异分析

土壤表观硝化率体现土壤氮的硝化作用强度。由图 4 可见, 前 10 d 内 CK 处理的土壤氮表观硝化率明显高于各施用氮肥的处理, 且随培养时间延长总体呈现上升趋势, 10 d 后达到最高, 基本接近 100%。尿素、氯化铵和

硫酸铵处理的土壤表观硝化率变化趋势基本相同, 均表现为第 1~7 天缓慢上升, 第 7~10 天表观硝化率明显加快, 第 14 天接近 100%。ATS 处理的表观硝化率则在第 17 天前均表现为缓慢升高的趋势, 17 d 时表观硝化率才达到 70%, 在 17 d 后表观硝化率迅速提高, 至第 24 天时才接近于 100%。

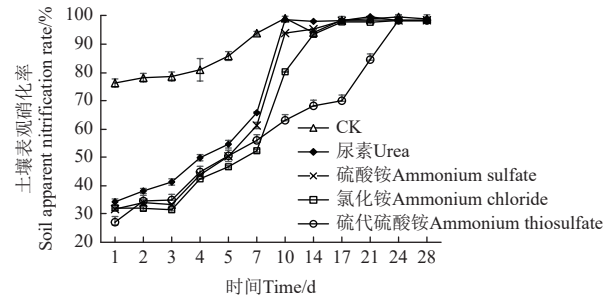


图 4 不同处理土壤的表观硝化率变化趋势

Fig.4 Variation trend of apparent nitrification rate under different treatments

2.2 ATS 对尿素氮转化的调控效果

2.2.1 ATS 调控对土壤各形态氮含量的影响

1) 对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响

由图 5a 可知, CK 处理的土壤 NH_4^+ -N 一直保持在 $8.2 \text{ mg}/\text{kg}$ 以下的较低水平, 而施肥各处理的土壤 NH_4^+ -N 含量在 0~28 d 内整体表现为先增加后降低的趋势。U、U+ATS1、U+ATS2 处理 NH_4^+ -N 含量均在施肥后第 3 天达到峰值, 但 U+ATS1 和 U+ATS2 处理分别显著低于 U 处理 (峰值 $102.5 \text{ mg}/\text{kg}$) 28.3% 和 30.5%, 而 U+ATS2 处理显著低于 U+ATS1 处理 3.1% ($P < 0.05$), 第 10 天后 3 处理土壤 NH_4^+ -N 含量趋于稳定; 而 U+ATS3 处理的 NH_4^+ -N 含量在第 3 天分别显著低于 U、U+ATS1、U+ATS2 37.8%、13.3% 和 10.5% ($P < 0.05$), 第 5 天达到峰值 $64.0 \text{ mg}/\text{kg}$, 在培养前 21 d 均显著高于 U、U+ATS1 和 U+ATS2, 21 d 时 3 个 ATS 不同用量处理的土壤 NH_4^+ -N 含量基本持平, 但仍显著高于尿素处理 1.3~1.9 倍 ($P < 0.05$), 28 d 时各施肥处理的土壤 NH_4^+ -N 含量才基本接近于 CK 水平。

2) 对土壤 NO_2^- -N 含量的影响

如图 5b 所示, CK 处理土壤 NO_2^- -N 含量在整个培养期间始终保持在 $0\sim 0.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 的水平。各施肥处理的土壤 NO_2^- -N 含量则在 0~28 d 内基本均表现为先增加后降低的趋势。U 处理土壤 NO_2^- -N 含量在第 3 天达到峰值 $7.6 \text{ mg}/\text{kg}$, 之后迅速下降, 第 5 天接近于 CK 水平; U+ATS1 处理的 NO_2^- -N 含量在第 3~5 天升至 $8.1\sim 9.1 \text{ mg}/\text{kg}$, 之后迅速降低, 7 d 后接近于 CK 水平; U+ATS2 和 U+ATS3 处理的 NO_2^- -N 含量则在培养后的 10 d 内均随培养时间的延长迅速升高, 第 10 天分别达到峰值 24.5 和 $31.2 \text{ mg}/\text{kg}$, 之后呈现迅速降低趋势, 并分别于处理后的第 21 天和 28 天接近于 CK。土壤 NO_2^- -N 含量表现出了随 ATS 用量增加在土壤中存留时间延长, 含量和峰值明显提高, 出现峰值的时间也随之明显延后的特征。

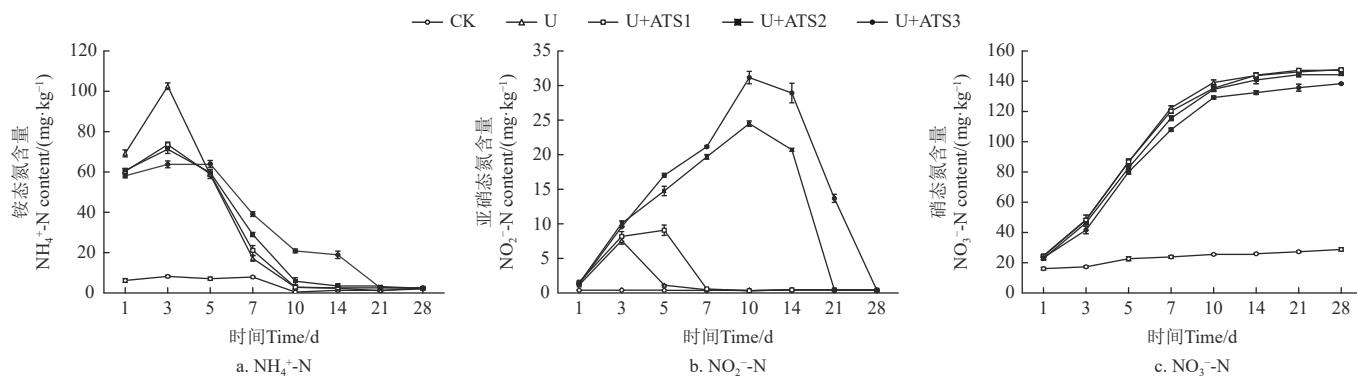


图5 土壤中各形态氮含量比较

Fig.5 Comparison of nitrogen content of different forms in soil

3) 对土壤 NO_3^- -N 含量的影响

由图 5c 可以看出, 不施氮肥的 CK 处理土壤 NO_3^- -N 含量在整个培养期间变化幅度不大, 而各施肥处理的土壤 NO_3^- -N 含量整体呈现“S”型变化趋势。在整个培养期间 U 与 U+ATS1 处理的 NO_3^- -N 含量始终无显著差异, 但 U+ATS2 和 U+ATS3 的 NO_3^- -N 含量始终显著低于 U 和 U+ATS1 处理 ($P < 0.05$), U+ATS3 处理也始终显著低于 U+ATS2 处理 ($P < 0.05$), 培养第 28 天时 U+ATS2、U+ATS3 处理的 NO_3^- -N 含量分别为 144.6 和 138.4 mg/kg, 仍显著低于 U 处理 2.1% 和 6.3% ($P < 0.05$)。

2.2.2 土壤硝化抑制率的差异分析

如图 6 所示, 随着 ATS 用量增加, 硝化抑制效应显著增强。在整个培养期间, U+ATS1 处理的硝化抑制率一直保持在较低水平, 而 U+ATS2 和 U+ATS3 处理分别显著高于 U+ATS1 处理 0.3~51.3 倍和 2.0~225.3 倍 ($P < 0.05$), U+ATS3 又显著高于 U+ATS2 处理 0.7~3.3 倍 ($P < 0.05$), 第 28 天培养结束时硝化抑制率仍达 5.9%。

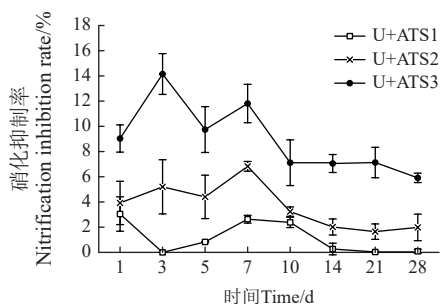


图6 不同处理下土壤硝化抑制率变化趋势

Fig.6 Variation trend of nitrification inhibition rate of soil under different treatments

3 讨论

3.1 不同氮肥在石灰性潮土中的转化特性差异分析

不同类型土壤由于其理化和生物学性质不同, 其养分保蓄和供应能力存在明显差异。而不同种类的氮肥施入土壤后, 由于电解质体系类型和浓度差异, 也会通过影响土壤胶体的比表面积、表面电荷数、电荷密度以及电场强度等^[6], 影响土壤胶体对阳离子的吸附强度, 并进而影响土壤养分的保蓄和供应能力^[25-26]。因此, 探明不同种类氮肥在土壤中的转化过程, 并进行针对性的调

控, 是氮肥高效管理与利用的重要方面。早在上世纪 90 年代前后, 就有学者关注到 Cl^- 对硝化过程的抑制作用, 也不断有学者关注不同氮肥种类在作物上的施用效果^[6-7, 27], 但尿素、硫酸铵、氯化铵以及硫代硫酸铵在石灰性潮土中的转化过程还不明确。石灰性潮土典型特点之一是 pH 值高, 铵态氮肥 (如硫酸铵、氯化铵) 和酰胺态氮肥 (如尿素) 施入土壤后由于 NH_4^+ 短时间内的大量累积, 极易造成氨的挥发损失和氮肥利用率的下降, 并对大气环境产生影响; 另一个特点是土壤氮的硝化强度高, 铵态氮肥和酰胺态氮肥施入土壤后形成的 NH_4^+ 很容易被硝化为亚硝酸盐, 并迅速氧化为硝酸盐。而硝酸盐如果不能及时被作物吸收利用, 就很容易随水进入地表水或者地下水污染水体, 或通过反硝化过程污染大气。因此, 延缓酰胺态氮肥施入土壤后的水解过程以及 NH_4^+ -N 的硝化和反硝化过程是减少氮素损失和环境污染、提高氮肥利用效率的关键技术。

本研究结果表明, 尽管尿素施入土壤后需要一个水解过程才能转化为 NH_4^+ , 而硫酸铵、氯化铵和 ATS 可以直接电离出 NH_4^+ , 但在肥料施入土壤后的前 3 d 内, 各处理土壤 NH_4^+ -N 变化趋势基本一致, 均在第 3 天达到峰值。分析其原因, 试验供试土壤为华北平原典型的石灰性潮土, 铵态氮肥施入土壤后迅速电离出 NH_4^+ , 而短时间内 NH_4^+ 的高量累积一方面会造成氨挥发损失的迅速增加^[28], 同时形成的 NH_4^+ 也被迅速氧化为 NO_2^- -N, 由此出现了 NH_4^+ -N 在短时间内并没有显著高于尿素的结果。3 种铵态氮肥处理的土壤 NO_2^- -N 含量在前 3 d 内均高于尿素的结果也进一步证实了肥料施入土壤后 NH_4^+ -N 的迅速硝化以及瞬时的高 NH_3 累积抑制了土壤亚硝酸盐氧化细菌的活性^[29]。鲍俊丹等^[30] 研究也发现了在 pH 值较高的潮土中施用硫酸铵, 由于暂时的高铵累积和高土壤 pH 值, 造成土壤亚硝酸盐累积的结果。尿素处理土壤 NO_3^- -N 含量和表观硝化率分别于施肥后前 10 d 和 14 d 内显著高于 3 种铵态氮肥 ($P < 0.05$), 说明尿素在石灰性潮土中的水解速率很快, 硝化作用强度也很高。而铵态氮肥施入石灰性土壤后由于较强的硝化作用以及高铵的瞬时累积, 易造成氨的挥发损失和亚硝酸盐的暂时累积。

氯化铵施入土壤后, NO_3^- -N 含量在施肥后前 7 d 内,

与硫酸铵差异不大, 但显著低于尿素, 7~14 d 显著低于尿素和硫酸铵, 14 d 之后三者 NO_3^- -N 含量才基本接近。此结果进一步证实了 Cl^- 对土壤硝化作用的抑制, 与前人在其他类型土壤上的结果一致^[4-5]。今后生产中如何在规避 Cl^- 毒害的情况下, 发挥 Cl^- 的硝化抑制作用, 同时降低施肥成本是值得关注的技术问题。

ATS 作为一种同时含有氮和硫的化合物, 施入土壤后表现出了其独特的转化特性。ATS 施入土壤后的前 7 d 内, NH_4^+ -N 含量显著低尿素、硫酸铵和氯化铵 ($P < 0.05$), 这对于降低石灰性土壤氮肥施用初期的氨挥发损失具有积极作用。7~21 d 内结果恰好相反, ATS 处理的土壤 NH_4^+ -N 含量高于尿素 7.4~21.8 倍, 高于硫酸铵 4.7~13.5 倍, 高于氯化铵 0.9~10.9 倍, 培养 21 d 后各施肥处理的土壤 NH_4^+ -N 才基本持平。而 NO_3^- -N 含量达到峰值的时间比尿素、硫酸铵和氯化铵分别延迟了 14、10 和 7 d。24 d 之前, NO_3^- -N 含量比尿素降低了 21.5%~47.7%, 土壤表观硝化强度降低了 7.5%~36.0%。但 ATS 处理的 NO_2^- -N 含量显著高, 在较长时间内一直保持着较高的 NO_2^- -N 生成速率和较低的 NO_3^- -N 生成速率, 整个培养期间的表观硝化率也明显低于尿素、硫酸铵和氯化铵。ATS 前期较低的 NH_4^+ -N 含量可能与 ATS 施入土壤后的 NH_3 挥发以及电离出的 NH_4^+ 被迅速硝化为 NO_2^- 有关, 而显著低的 NO_3^- -N 含量又证明了 NO_2^- 向 NO_3^- 的转化受到了抑制, 由此导致了较低的表现硝化率。尽管有研究表明, ATS 的施用对微生物量碳影响不大^[31], 而且当施用量达到 1000 mg/kg 以上时才会影响到种子的萌发和幼苗的生长^[32], 但这个特殊的转化过程可能导致的环境效应还是值得关注, 其转化过程中造成的 NO_2^- -N 累积在田间实际生产条件下的影响如何, 还有待于进一步探讨。

3.2 ATS 作为氮肥调控剂对石灰性潮土中尿素氮转化的影响

向化学氮肥中添加脲酶/硝化抑制剂来调控氮在土壤中的转化进程, 是提高氮肥利用率、减少环境风险的重要措施之一, 已在农业生产中被广泛应用。早在上世纪八九十年代, 就有研究发现了 ATS 具有抑制土壤脲酶活性和硝化作用的功效^[17-19]。本研究结果也表明, 在石灰性潮土上, 与单施尿素的 U 处理相比, ATS 配合尿素施入土壤后的第 1 天, U+ATS1、U+ATS2 和 U+ATS3 的土壤 NH_4^+ -N 含量分别降低了 12.9%、12.2% 和 16.0%; 第 3 天分别降低了 28.3%、30.5% 和 37.8%, U、U+ATS1 和 U+ATS2 均于第 3 天达到峰值, 分别为 102.5、73.6 和 71.3 mg/kg, 而 U+ATS3 的峰值 (64.0 mg/kg) 延迟到了第 5 天。此结果说明 ATS 对石灰性潮土上尿素的水解可以起到明显的抑制效应, 且随 ATS 用量的增加抑制效应显著增强 ($P < 0.05$)。此抑制效应可能与 ATS 施入土壤中迅速发生水解, 其水解产物 SO_3^{2-} 在好气条件下易生成氧化程度更高的连四硫酸根 ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$) 和硫酸根 (SO_4^{2-}), 而 $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 与脲酶中的 -SH 反应生成硫的衍生

物, 从而抑制了脲酶活性有关^[17, 19]。而较低的 NH_4^+ -N 峰值对于减少石灰性土壤中的氨挥发损失是有利的。在土壤 NH_4^+ -N 含量达到峰值以后, 则随着 ATS 用量的增加, NH_4^+ -N 含量显著提高。与单施尿素的 U 处理相比, U+ATS1、U+ATS2 和 U+ATS3 处理 7~14 d 的 NH_4^+ -N 含量分别提高了 3.3%~23.2%、47.8%~109.5% 和 128.3%~707.5%。但 U+ATS1 的土壤 NO_3^- -N 含量与 U 处理相比差异始终不显著 ($P > 0.05$), U+ATS2 和 U+ATS3 处理的土壤 NO_3^- -N 含量则在整个培养期间分别显著降低了 1.3%~7.5% 和 5.2%~14.2% ($P < 0.05$)。说明当 ATS 施用量达到 60 mg/kg (含 S 量) 以上时, 可以显著抑制土壤氮的硝化作用过程 ($P < 0.05$)。MARGON 等^[31]研究也发现了类似的结果。但土壤 NO_2^- -N 含量也表现出随着 ATS 用量增加而显著增加, 且在土壤中存留时间延长, 出现峰值的时间明显延后的特征, 当 ATS 用量达到 90 mg/kg (含 S 量) 时, 土壤 NO_2^- -N 含量在培养的第 28 天才接近土壤的本底值, 与 JANZEN 等^[18]研究结果相似。

综上, ATS 既可以作为肥源提供氮和硫的营养, 又可以作为氮肥调控剂调控氮的转化, 但在本研究条件下, 其调控过程伴随着明显的 NO_2^- -N 累积, 可能会带来一定的环境风险。

4 结 论

本研究结果表明, 尿素、硫酸铵、氯化铵、ATS 作为氮源施入石灰性潮土后中的转化过程存在明显差异。在本研究供试条件下, 尿素的水解速率很快, 施肥后的第 3 天 NH_4^+ -N 含量即达到峰值; 硝化作用强度也最高, NO_3^- -N 峰值出现在了施肥后的第 10 天。硫酸铵、氯化铵和硫代硫酸铵的硝化作用强度明显低于尿素 ($P < 0.05$), NO_3^- -N 峰值分别比尿素延迟了 4、7 和 14 d。供试 4 种氮肥施入土壤后均有 NO_2^- -N 的生成, 但 ATS 作为氮源时 NO_2^- -N 的累积量最高, 累积持续时间最长, 其次依次为尿素、硫酸铵和氯化铵。

将 ATS 作为氮素调控剂与尿素配合施用, 当其用量在 60 mg/kg (含 S 量) 以上时, 尿素水解的 NH_4^+ -N 达到峰值的时间明显延后, 峰值明显降低, 表现出了明显抑制尿素水解的作用效果; 尿素水解达到峰值之后, 随 ATS 用量的增加, 土壤 NH_4^+ -N 含量显著提高, NO_3^- -N 含量显著降低, 表现出了对硝化作用的显著抑制效果 ($P < 0.05$)。因此, ATS 与尿素配合施用, 可以对尿素氮转化的全过程进行调控, 发挥脲酶抑制和硝化抑制的双重抑制效果。

但本研究结果是通过水分和温度可控条件下的培养试验获得, 而实际生产中存在着很多不可控因素, 环境条件变异也比较大, ATS 作为氮源或作为氮素调控剂与尿素配施在大田中的实际应用效果如何, 以及适宜施用区域、施用方法及其环境效应等均有待于进一步研究探讨。

[参 考 文 献]

- [1] GUO Y X, CHEN Y F, SEARCHINGER T D, et al. Air quality, nitrogen use efficiency and food security in China are improved by cost-effective agricultural nitrogen management[J]. *Nature Food*, 2020, 1(10): 648-658.
- [2] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 684-697. ZHAO Rongfang, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo. Nitrogen cycling and balance in winter-wheat-summer-maize rotation system in Northern China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684-697. (in Chinese with English abstract)
- [3] VARINDERPAL S, KUNAL, GOSAL S K, et al. Improving nitrogen use efficiency using precision nitrogen management in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2021, 184(3): 371-377.
- [4] 刘康, 殷欧. 氯化铵硝化抑制效应的初步研究[J]. *土壤肥料*, 1990(1): 21-23. LIU Kang, YIN Ou. Preliminary study on the nitrification inhibitory effect of ammonium chloride[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1990(1): 21-23. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周丕东, 石孝均, 毛知耘. 氯化铵中氯的硝化抑制效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 397-403. ZHOU Pidong, SHI Xiaojun, MAO zhiyun. Effect of chlorine of ammonium chloride on restraining nitrification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2001, 7(4): 397-403. (in Chinese with English abstract)
- [6] 黄容, 高明, 王子芳, 等. 不同种类氮肥对紫色土表面电化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 726-733. HUANG Rong, GAO Ming, WANG Zifang, et al. Effect of nitrogen fertilizer on surface electrochemical properties of purple soil relative to type of the fertilizer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 726-733. (in Chinese with English abstract)
- [7] 齐欣, 司玉坤, 赵亚南, 等. 不同氮肥在不同土壤中对小麦氮素利用及产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(7): 172-181. QI Xin, SI Yukun, ZHAO Yanan, et al. Impacts of nitrogen forms on nitrogen utilization and yield of wheat in different types of soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(7): 172-181. (in Chinese with English abstract)
- [8] 沈玉文, 石璟, 徐钰, 等. 硫代硫酸盐肥料研究应用进展及在我国的应用前景[J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37(12): 16-20. SHEN Yuwen, SHI Jing, XU Yu, et al. Research and application progress of thiosulfate fertilizer and its application prospect in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2022, 37(12): 16-20.
- [9] GRAZIANO P L. Improvement of nitrogen efficiency by addition of ammonium thiosulfate in the liquid fertilization of maize[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 24: 111-114.
- [10] HE Y X, PRESLEY D R, TATARKO J. Liquid N and S fertilizer solutions effects on the mass, chemical, and shear strength properties of winter wheat (*Triticum Aestivum*) residue[J]. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2017, 60(3): 671-682.
- [11] 孟海凤, 张春香, 韩雪平, 等. 硫代硫酸铵对红富士苹果的疏花效应[J]. *果树学报*, 2023, 40(1): 60-66.
- [12] AYUB R A, BAUCHROWITZ I M, SILVA C M D, et al. Ammonia thiosulfate in Japanese plum tree thinning[J]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2019, 41(5): 543.
- [13] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1389-1395. SUN Zhimei, WU Zhijie, CHEN Lijun, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1389-1395. (in Chinese with English abstract)
- [14] 金玉文, 芦远闯, 许华森, 等. Meta 分析养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积淋溶阻控效应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 103-111. JIN Yuwen, LU Yuanchuang, XU Huasen, et al. Inhibiting effects of nutrient managements on nitrate accumulation and leaching in vegetable soil: A meta-analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(3): 103-111. (in Chinese with English abstract)
- [15] 顾艳, 吴良欢, 胡兆平. 土壤 pH 值和含水量对土壤硝化抑制剂效果的影响 (英文) [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 132-138. GU Yan, WU Lianghuan, HU Zhaoping. Inhibitory effect of soil pH value and moisture on soil nitrification by nitrpyrin application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(8): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾科, 王书伟, 朱文彬, 等. 施氮方式与添加脲酶/硝化抑制剂对稻季 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 220-231. ZENG Ke, WANG Shuwei, ZHU Wenbin, et al. Effects of nitrogen application methods combined with urease/nitrification inhibitor on decreasing NH_3 volatilization and N_2O emission in rice season[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 220-231. (in Chinese with English abstract)
- [17] GOOS R J. Identification of ammonium thiosulfate as a nitrification and urease inhibitor[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 232-235.
- [18] JANZEN H H, BETTANY J R. Influence of thiosulfate on

- nitrification of ammonium in soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 803-806.
- [19] 陶运平, Adams W A. 硫代硫酸铵对土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 467-474.
TAO Yunping, ADAMS W A. Effect of ammonium thiosulfate on soil nitrification[J]. Acta Pedologica Sinica. 1997, 34(4): 467-474. (in Chinese with English abstract)
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [21] 江培福, 雷廷武, 刘晓辉, 等. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 1-5.
JIANG Peifu, LEI Tingwu, LIU Xiaohui, et al. Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(7): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘建涛, 许靖, 孙志梅, 等. 氮素调控对不同类型土壤氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2901-2906.
LIU Jiantao, XU Jing, SUN Zhimei, et al. Effects of different nitrogen regulators on nitrogen transformation in different soil types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2901-2906. (in Chinese with English abstract)
- [23] KHANOM A, AZAD K A M, ALI M M, et al. Plants and microbes' responses to the net nitrification rates of chemical fertilizers in vegetable soils[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 158: 103783.
- [24] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1352-1360.
LI Xuehong, LI Dongpo, WU Zhijie, et al. Effect of urease/nitrification inhibitor on urea nitrogen conversion in black soil and cinnamon soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1352-1360. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王军, 陈世正. 四川紫色水稻土胶体比表面及其主要影响因素研究[J]. 西南农业大学学报, 1991, 13(3): 64-69.
WANG Jun, CHEN Shizheng. Studies of specific surface area (SSA) of Sichuan purple paddy soil colloids and the factors affecting it[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1991, 13(3): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨昌富, 王好圆, 覃双结, 等. 氮肥形态及用量对坡耕地红壤 pH 的影响机理[J]. 植物营养与肥科学报, 2023, 29(6): 1168-1180.
YANG Changfu, WANG Haoyuan, QIN Shuangjie, et al. Mechanisms of nitrogen fertilizer types and rates on pH of red soil in sloping farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(6): 1168-1180. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051-3058.
ZHOU Wei, LV Tengfei, YANG Zhiping, et al. Research advances on regulating soil nitrogen loss by the type of nitrogen fertilizer and its application strategy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 3051-3058. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈海潇. 不同类型土壤氨挥发特性和硝态氮累积的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
CHEN Haixiao. Ammonia volatilization characteristics and nitrate nitrogen accumulation of different types of soils[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.
- [29] SMITH R V, BURNS L C, DOYLE R M, et al. Free ammonia inhibition of nitrification in river sediments leading to nitrite accumulation[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26: 1049-1055.
- [30] 鲍俊丹, 吴雄平, 张妹婷, 等. 石灰性土壤中亚硝态氮的累积机理和条件[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 145-150.
BAO Jundan, WU Xiongping, ZHANG Meiting, et al. Mechanisms and conditions of nitrite accumulation occurring in calcareous soil[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(6): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [31] MARGON A, PARENTE G, PIANTANIDA M, et al. Novel investigation on ammonium thiosulphate (ATS) as an inhibitor of soil urease and nitrification[J]. Agricultural Sciences, 2015, 6(12): 1502-1512.
- [32] MCCARTY G W, BREMNER J M, KROGMEIER M J. Evaluation of ammonium thiosulfate as a soil urease inhibitor[J]. Fertilizer Research, 1990, 24: 135-139.

Transformation characteristics of different nitrogen fertilizers and the regulatory effect of ATS on urea-N transformation in calcareous-fluvo-aquic soil

WANG Shuo^{1,2}, SUN Mengyu^{1,2}, LI Changqing^{1,2}, SUN Zhimei^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;

2. Key Laboratory of Farmland Ecology and Environment of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: High-efficient regulation and management of nitrogen fertilizers based on their transformation characteristics in soil is one of the most important measures to enhance fertilizer utilization efficiency for less pollution. In this study, two incubation experiments (with soil moisture content at 60% of field water holding capacity and temperature at 25 °C) were conducted to explore the transformation of different nitrogen fertilizers in the calcareous-fluvo-aquic soil and the effects of ammonium thiosulfate (ATS) as a regulator on urea-N transformation. Four types of nitrogen fertilizers (namely urea, ammonium sulfate, ammonium chloride, and ammonium thiosulfate (ATS)) were used as nitrogen sources. Soil samples were collected at regular intervals to determine the contents of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. At the same time, five treatments were set to investigate the regulatory effect of ATS on urea-N transformation: 1) CK (no nitrogen fertilizer applied); 2) U (urea only); 3) U+ATS1 (ATS added at 30 mg/kg sulfur content); 4) U+ATS2 (ATS added at 60 mg/kg sulfur content); 5) U+ATS3 (ATS added at 90 mg/kg sulfur content). Finally, an analysis was performed on the dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. The results showed that there were significant differences in the transformation process among different types of nitrogen fertilizers in calcareous-fluvo-aquic soil. Among them, urea performed the highest hydrolysis rate and nitrification intensity, followed by ammonium sulfate. The soil treated with ammonium chloride shared a lower apparent nitrification rate than that of urea and ammonium sulfate ($P < 0.05$) from 7 to 21 days, due to the inhibitory effect of Cl^- on soil nitrification. However, the ATS treatment showed the lowest $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content within the first 7 days of incubation, which should be beneficial to reduce ammonia volatilization in the initial period of fertilizer application. While the opposite result was found after 7 days of incubation. Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the treatment with ATS was higher by 7.4 to 21.8 times than that of urea, 4.7 to 13.5 times than that of ammonium sulfate, and 0.9 to 10.9 times than that of ammonium chloride during 10 to 21 days, which was equivalent to CK value until to 24 days of incubation. The peak time of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content was delayed by 14, 10, and 7 days, compared with the urea, ammonium sulfate, and ammonium chloride, respectively. Soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content and the apparent nitrification intensity were reduced by 21.5% to 47.7% and 7.5% to 36.0%, respectively, during the 24 days of incubation, compared with the urea. When ATS was used in combination with urea as a nitrogen regulator at a dosage above 60 mg/kg (calculated using sulfur content), there were inhibitory effects on urea hydrolysis and nitrification, which increased with the ATS amount increasing. There were positive implications to reduce the nitrogen loss for the high fertilizer utilization efficiency. However, nitrite accumulation occurred after all four nitrogen fertilizers were applied into soil. The ATS treatments demonstrated a significantly higher accumulation and longer duration than urea, ammonium sulfate, and ammonium chloride. Similar trends were observed when ATS was used as a nitrogen regulator. The increasing ATS dosages resulted in the longer nitrite retention time, higher content and peak values in soil, as well as the delayed peak occurrence. The field application effects of ATS and scientific application methods, as well as its environmental effects are need to further study.

Keywords: soils; nitrogen fertilizer; nitrogen transformation; urease inhibitor; nitrification inhibitor; ammonium thiosulfate(ATS)