

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.008

疏晴, 王香琪, 齐永波, 等. 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对砂姜黑土氮素转化的影响. 土壤, 2021, 53(5): 945–951.

尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对砂姜黑土氮素转化的影响^①

疏晴, 王香琪, 齐永波, 穆静, 张富源, 朱荣, 章力干*, 郜红建

(农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 研究尿素与缓释尿素配施添加硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸(DMPP)对砂姜黑土氮素转化的影响, 为田间速效与缓释氮的合理配施提供理论依据。采用室内恒温、恒湿培养试验方法, 试验设不施肥(CK)、单施尿素(N)、单施缓释尿素(S)、60% 尿素+40% 缓释尿素(NS)、尿素+DMPP(ND)、缓释尿素+DMPP(SD)、60% 尿素+40% 缓释尿素+DMPP(NSD)共 7 个处理, 通过测定不同处理土壤中不同形态氮素含量, 探究添加 DMPP 在单施尿素、单施缓释尿素及尿素与缓释尿素配施上对土壤氮素转化的不同影响。ND 处理在培养第 1~35 天内铵态氮含量均显著高于 N 处理, 并有效延缓了铵态氮向硝态氮转化的时间。SD 处理较之 S 处理在显著提高土壤中铵态氮含量的同时, 也能有效抑制硝化作用, 其硝化抑制有效作用时间在 49 d 左右, 并且在此期间内能降低表观硝化率, 提高硝化抑制率。与 NS 处理相比, NSD 处理不仅能够显著提高土壤铵态氮含量, 使铵态氮半衰期延长至 18.6 d, 硝化抑制率显著提高, 表观硝化作用有效抑制时间延长了 32 d 左右。综合分析表明, 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 在抑制氨氧化作用中效果明显, 显著提高硝化抑制率, 降低表观硝化率, 有效延长了铵态氮在土壤中停留的时间, 该措施为有效阻控农田氮素损失提供了科学依据。

关键词: 缓释尿素; DMPP; 氨氧化; 硝化作用; 砂姜黑土

中图分类号: S143.1⁺6 **文献标志码:** A

Effects of Combined Application of Urea and Slow-release Urea Plus DMPP on Nitrogen Transformation in Lime Concretion Black Soil

SHU Qing, WANG Xiangqi, QI Yongbo, MU Jing, ZHANG Fuyuan, ZHU Rong, ZHANG Ligan*, GAO Hongjian

(Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: A indoor constant temperature and humidity incubation experiment was conducted in which the dynamic changes of soil nitrogen forms during a 63 d incubation period was studied to explore the influences of the combined application of urea and slow-release urea plus 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrogen transformation in lime concretion black soil. Seven treatments were designed, which included: 1) CK (without fertilization), 2) N (only urea), 3) S (only slow-release urea), 4) NS (60% urea and 40% slow-release urea), 5) ND (urea plus DMPP), 6) SD (slow-release urea plus DMPP), and 7) NSD (60% urea and 40% slow-release urea plus DMPP). The results showed that: 1) the content of ammonia nitrogen was significantly higher in ND than that in N during prior 35 d incubation period, which indicated that the addition of DMPP could effectively delay the process of ammonium oxidation. 2) Similarly, ammonia nitrogen content was higher in SD than that in S. Moreover, oxidation of ammonium was inhibited up to day 49 with reduced apparent nitrification rate, while the nitrification inhibition rate was enhanced. 3) Compared to NS, the content of ammonia nitrogen was significantly higher and the half-life of ammonia was extended up to 18.6 d in NSD. In addition, the nitrification inhibition rate in NSD increased significantly and the inhibition continued up to day 32. In conclusion, the ammonia oxidation processes were significantly inhibited and the residence time of ammonium in soil were significantly prolonged by the addition of DMPP in the treatment of urea combined application with slow-release urea, which exhibited a relative higher nitrification inhibition rate and a relative lower apparent nitrification rate. These findings provide

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800301)、安徽省重点研发计划项目(1804a07020113)和安徽农业大学人才基金项目(yj2018-30)资助。

* 通讯作者(zhligan@ahau.edu.cn)

作者简介: 疏晴(1995—), 女, 安徽池州人, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与新型肥料研发。E-mail: 2048163256@qq.com

scientific reference for application of urea and slow-release urea to prevent loss of nitrogen in farmland.

Key words: Slow-release urea; DMPP; Ammoxidation; Nitrification; Lime concretion black soil

肥料是保障我国粮食安全的关键因素,在作物生长中发挥着不可替代的作用^[1]。随着农业生产的发展,氮肥施用量迅速增加,但是氮素在土壤中容易转化,导致很大一部分氮素不能被作物完全吸收利用,而以多种形式释放到环境中^[2],引起地表和地下水硝酸盐污染、水体富营养化、大气温室效应等一系列的环境问题^[3]。新型缓释肥通过延缓肥料养分在土壤中的转化和释放,使其与作物吸收同步的方式,成为提高肥料利用率、增加作物产量的有效途径^[4-6]。可若全量投入纯缓释肥会显著增加施肥成本,不利于大面积的推广与应用^[7]。有研究表明,缓释尿素与普通尿素混施既能满足作物生育期内对养分的需求,又能实现高产高效的简化施肥目标^[8-10]。目前缓释尿素与普通尿素配施已成为一种较为常见的施肥模式。

基于在砂姜黑土区所做田间试验得出的结果:小麦季秸秆还田条件下配施缓控释肥处理表层土壤铵态氮含量随生育期不断增加,在抽穗期达到峰值,为 21.28 mg/kg,显著高于同期的秸秆还田条件下的推荐施肥处理(7.00 mg/kg)。但在成熟期时,秸秆还田条件下配施缓控释肥处理表层土壤硝态氮含量(48.28 mg/kg)显著高于同期的推荐施肥处理(33.11 mg/kg)和秸秆还田条件下的推荐施肥处理(24.91 mg/kg),增加了氮素淋失的风险(未发表数据)。这表明缓控释肥配施在作物生长前期通过延缓氮素的释放,显著增加土壤铵态氮含量,但后期随着缓释作用减弱,土壤中硝态氮不断累积,则增大氮素流失风险。

对铵态氮肥及能形成铵的氮肥来说,抑制或延缓其硝化作用,是减少损失、提高肥料利用率和降低环境影响的重要途径之一^[11]。硝化抑制剂是目前最为有效且常用的调节硝化作用的措施^[12-13],在减少硝态氮淋失、氮氧化物排放^[14-16]等方面效果显著。白杨等^[17]认为施用缓释掺混氮肥配施抑制剂能延迟土壤铵态氮高峰的出现以及后续向硝态氮的转化,提高固氮作用,从而提高作物产量和氮肥利用率。3,4-二甲基吡唑磷酸(DMPP)作为一种新型硝化抑制剂,具有硝化抑制作用时间长、用量少、硝化抑制率高^[18]、移动性相对较小不易发生淋洗、与植物相容性好^[19]等优势。Yu 等^[20]发现 DMPP 添加在有机的和无机氮组合施肥中延长了铵态氮在土壤中的滞留期,显著降低了土壤硝酸盐和亚硝酸盐氮的浓度。并且 DMPP 可以间接有效控制无机氮淋失,最大限度降低地下水硝酸盐

污染的风险^[21]。

目前对于 DMPP 的研究多基于在单一施用普通尿素、氯化铵等氮肥的条件下,关于尿素与缓释尿素配施模式下添加 DMPP 对土壤氮素转化的影响研究相对较少。本文通过在尿素、缓释尿素以及尿素与缓释尿素配施的基础上,添加 DMPP 进行室内培养试验,探究不同处理下的硝化抑制效果,以期在砂姜黑土区速效与缓释氮肥的合理配伍、提高氮肥利用率及减少土壤硝态氮的流失提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试剂

供试土壤为砂姜黑土,采自安徽省宿州农科院试验站,土壤经自然风干后过 2 mm 筛。供试土壤的基本理化性质:pH 7.55,土壤有机质含量 25.33 g/kg,全氮含量 1.61 g/kg,碱解氮含量 91.39 mg/kg,有效磷含量 59.21 mg/kg,速效钾含量 272 mg/kg。

供试尿素、3,4-二甲基吡唑磷酸(DMPP $\geq 97\%$)为分析纯试剂,缓释尿素含氮 46%,由茂施公司生产。

1.2 试验方法

试验共设 7 个处理,分别为不施肥(CK)、单施尿素(N)、单施缓释尿素(S)、60% 尿素+40% 缓释尿素(NS)、尿素+DMPP(ND)、缓释尿素+DMPP(SD)、60% 尿素+40% 缓释尿素+DMPP(NSD)。氮素添加量为 N 0.5 g/kg 干土,DMPP 添加量为施氮量的 1%。采用 200 ml 塑料杯开展室内土壤培养试验,每杯装风干土 100 g,用去离子水调节土壤含水率至田间最大持水量的 60%。供试尿素和 DMPP 溶解于去离子水施入土壤,缓释尿素按 0.5 g/kg 均匀混入土壤,然后以封口膜封口,用针均匀扎孔以保证通气,每个处理 33 瓶,一共 231 瓶。将其放于 25 °C 培养箱中培养 63 d。培养期间,每隔 2 d 通过称量法补足损失的水分,并在培养的第 1、3、7、14、21、28、35、42、49、56、63 天取样。

1.3 测定与计算方法

土壤铵态氮、硝态氮采用 1 mol/L KCl 溶液浸提($V_{(KCl)} : m_{(\pm)} = 10 : 1$,振荡 30 min),用 SKALAR 连续流动分析仪测定。土壤 pH(用无 CO₂ 蒸馏水, $V_{(蒸馏水)} : m_{(\pm)} = 2.5 : 1$ 浸提,pH 计测定)。土壤含水量用烘干称重法测定。土壤酶活性采用酶活试剂盒(SUE-1-Y,苏州科铭生物技术有限公司)测定。

经过回归分析得到氨氧化速率和培养时间之间的函数表达式：

$$y = a \times e^{-kt} \quad (1)$$

式中： y 是土壤中的 NH_4^+ 含量(mg/kg)， t 是培养的时间(d)， k 为氨氧化速率常数， a 为常数。

$$\text{土壤表观硝化率}(\%) = (\text{NO}_3^- - \text{N} / \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{硝化抑制率}(\%) = (A - B) / A \times 100 \quad (3)$$

式中： A 为添加尿素培养后土壤硝态氮含量(mg/kg)； B 为添加缓释尿素、DMPP 培养后土壤硝态氮含量(mg/kg)。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 19 和 Origin 2019 软件进行数据统计分析与作图。处理间差异性比较采用单因素方差分析，多重比较采用最小显著法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤铵态氮含量和氨氧化速率的影响

2.1.1 土壤铵态氮含量变化 各处理的土壤铵态氮含量在整个培养时期内总体呈下降趋势，其中 S 与 SD 处理呈现先上升后下降的趋势(图 1)。N 处理的土壤铵态氮含量在培养的第 21 天就已经下降了 99.2%，而 ND 处理则在培养的第 35 天土壤铵态氮含量下降了 99.4%，并且其在第 35 天之前的各培养时间里铵态氮含量均显著高于 N 处理($P < 0.05$)。尿素添加 DMPP 处理(ND)较之单施尿素处理(N)能有效抑制氨氧化的作用，延缓了铵态氮向硝态氮转化的时间。S 与 SD 处理后，土壤铵态氮含量在整个培养时间里呈现先上升后下降的趋势，S 处理铵态氮含量在培养的第 14 天达到峰值(4.87 mg/kg)，而 SD 处理则在培养的第 35 天达到峰值(31.92 mg/kg)，并且在第 14 ~ 42 天内铵态氮含量均能保持较高水平。缓释尿素添加 DMPP 处理与单施缓释尿素处理相比，在有效延长抑制硝化作用时间的同时，还能有效提高土壤铵态氮含量。NS 处理在培养的第 28 天铵态氮含量下降了 97.6%，NSD 处理则在培养的第 56 天铵态氮含量下降了 98.0%，并在培养的前 28 d 内铵态氮含量均保持较高水平，显著高于 NS 处理($P < 0.05$)，且其最小铵态氮含量出现时间较 NS 滞后了 28 d。尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 不仅能够显著提高土壤铵态氮含量($P < 0.05$)，还能延长抑制硝化作用的时间。

2.1.2 氨氧化速率常数和半衰期变化 表 1 为不

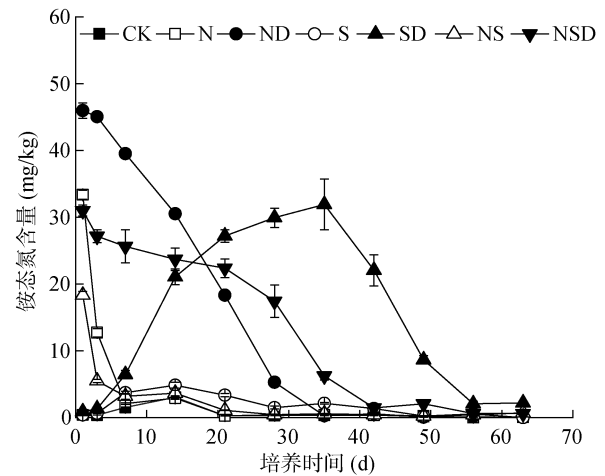


图 1 不同处理土壤铵态氮含量的变化

Fig. 1 Changes of soil NH_4^+ -N contents under different treatments

同处理氨氧化速率常数和铵态氮半衰期，可以看出，施用 DMPP 的处理均能显著降低氨氧化速率常数并相应地延长铵态氮的半衰期($P < 0.05$)。与 N 处理(铵态氮半衰期 1.5 d)相比，施用 DMPP 处理土壤中铵态氮的半衰期延长至 11.5 ~ 18.6 d，说明施用硝化抑制剂 DMPP 能够有效抑制氨氧化作用的进程。NS 处理较之 N 处理氨氧化速率常数有所提高，且铵态氮半衰期缩短了 0.1 d，差异不显著。NSD 处理氨氧化速率常数低于其他 3 个处理，并且铵态氮半衰期延长至 18.6 d，明显高于其他处理，这表明尿素与缓释尿素配施，再添加 DMPP 后在抑制氨氧化作用上效果显著，能够有效延长土壤中铵态氮的滞留时间。

表 1 添加 DMPP 对氨氧化速率常数及铵态氮半衰期的影响

处理	氨氧化速率常数	铵态氮半衰期(d)	R^2
N	0.474 9	1.5	0.993 8
ND	0.060 1	11.5	0.956 4
S	-	-	-
SD	-	-	-
NS	0.512 4	1.4	0.952 1
NSD	0.037 3	18.6	0.890 7

2.2 不同处理对土壤硝态氮含量的影响

所有处理土壤硝态氮含量在整个培养期内呈上升的趋势(图 2)，但土壤硝态氮含量前期在 N 处理中急速上升，而在其他施肥处理中上升缓慢。N 处理在培养前 14 d 中硝态氮含量显著高于其他处理，硝化作用强烈($P < 0.05$)。在第 1 ~ 28 天中，N 处理硝态氮含量显著高于 ND 处理($P < 0.05$)，在第 49 天时，N

处理硝态氮含量达到峰值(88.96 mg/kg), 而 ND 处理则在培养的第 56 天达到峰值(86.98 mg/kg)。S 处理硝态氮含量在培养前期呈缓慢增加趋势, 但在第 28 天后硝态氮增加速度加快, 显著高于 N 处理($P<0.05$)。在培养的 1~49 d, SD 处理的硝态氮含量显著低于 S 处理($P<0.05$), 表明缓释尿素添加 DMPP 具有较好的硝化抑制效果, 并且其硝化抑制有效作用时间在 49 d 左右。NS 处理硝态氮含量在第 14 天后迅速增加, 而后其硝态氮含量一直保持较高的水平。在第 1~42 天, NSD 处理硝态氮含量显著低于 NS 处理($P<0.05$), 并且其硝态氮含量的增加也较为缓慢。在培养的第 1~3 天, 添加 DMPP 的 3 个处理中 NSD 处理硝态氮含量低于 ND 和 SD 处理, 第 7~35 天, SD 处理硝态氮含量显著低于 ND 和 NSD 处理($P<0.05$), 第 42~63 天, ND 处理显著低于 SD 和 NSD 处理($P<0.05$)。

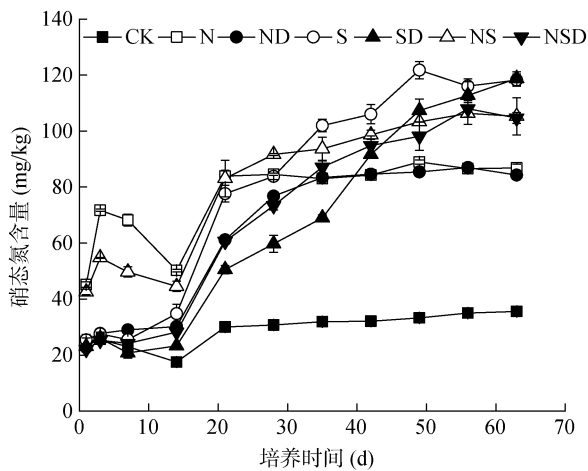
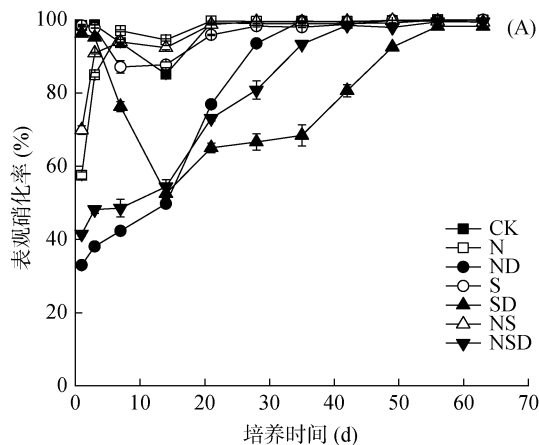


图 2 不同处理土壤硝态氮含量的变化

Fig. 2 Changes of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents under different treatments



2.3 不同处理对土壤表观硝化率的影响

由图 3A 可见, 随培养时间的增加, 不同处理土壤表观硝化率呈增加趋势。在培养的第 21 天, N 处理表观硝化率达到 99.7%, 而 ND 处理则到培养的第 35 天达到 99.7%, 并且在第 1~28 天, ND 处理表观硝化率都显著低于 N 处理($P<0.05$), 表明添加 DMPP 在培养前期能有效抑制氨氧化作用。S 处理的表观硝化率一直维持一个较高的水平, 只在第 7~14 天有所降低; 而 SD 处理在培养的第 7~42 天表观硝化率显著低于 S 处理($P<0.05$), 表明缓释尿素添加 DMPP 能有效延长抑制氨氧化作用的时间。NS 处理在培养的第 3 天表观硝化率就达到 90.9%, 并随着培养时间不断升高。NSD 处理则在培养的第 35 天硝化抑制率达到 93.3%, 较之 NS 处理其抑制硝化作用时间延长了 32 d 左右, 并且在培养的 1~56 d 表观硝化率均显著低于 NS 处理($P<0.05$), 表明尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 较之单一的配施不仅可以延长抑制硝化作用的时间, 还能有效降低硝化作用的强度。

2.4 不同处理对土壤硝化抑制率的影响

图 3B 表明, 各处理硝化抑制率整体呈先上升后逐渐降低的趋势, 在培养的前 7 d 内, ND、S、NS、NSD 处理的硝化抑制能力达到较高的水平, SD 处理的硝化抑制率则在培养的第 35 天达到最高。ND 处理的硝化抑制率在培养的第 21 d 中一直保持一个较高水平(27%~50%); S 处理硝化抑制率在前 7 d 内增幅较快, 并在第 7 天达到峰值(62.5%), 随后则快速下降。SD 处理硝化抑制率在培养的第 35 天达到峰值(34.9%), 并且在第 21~56 天内均显著高于其他处理

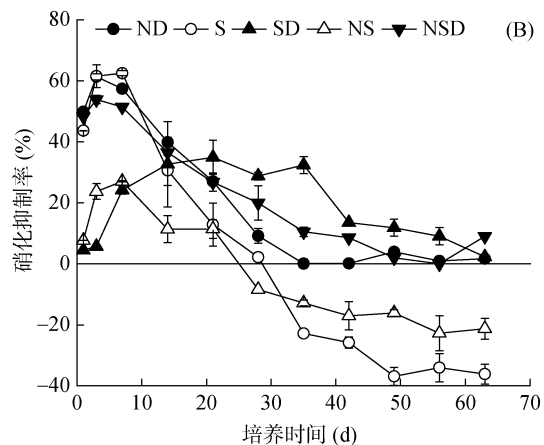


图 3 不同处理土壤表观硝化率(A)、硝化抑制率(B)的变化

Fig. 3 Changes of soil apparent nitrification rates (A) and nitrification inhibition rates (B) under different treatments

($P < 0.05$), 表明缓释尿素添加 DMPP 较之单施缓释尿素能够较好地抑制土壤铵硝化。NS 处理硝化抑制率在第 7 天达到峰值(27.0%)之后开始缓慢下降, 第 28 天之后快速下降, 而 NSD 处理硝化抑制率较之 NS 处理则在整个培养时期内都维持了一个较高的水平, 表明在尿素与缓释尿素配施的基础上添加 DMPP 能有效提高硝化抑制率, 增加对土壤铵硝化过程的抑制强度。

2.5 不同处理对土壤 pH 的影响

尿素施入土壤中, 土壤 pH 会随着尿素水解而短暂升高, 随后发生的硝化作用则导致土壤 pH 的下降^[22]。由图 4 可知, 除 N 和 NS 处理外, 其他施肥处理 pH 在培养的第 3 天达到最高值, N 和 NS 处理则在培养的第 7 天升至最高值, 而后各处理随培养时间呈下降趋势, 并在培养 21 d 后逐渐稳定。在培养过程中, N 处理 pH 始终维持在较低水平, ND 处理 pH 在培养前 21 d 前均显著高于 N 处理($P < 0.05$)。S 处理 pH 在培养前 21 d 一直高于 SD 处理, 而在培养的第 28 ~ 42 天内 SD 处理 pH 则高于 S 处理。培养前期, NSD 处理 pH 高于 NS 处理, 但在第 28 天之后 NSD 处理与 NS 处理间 pH 无显著性差异。

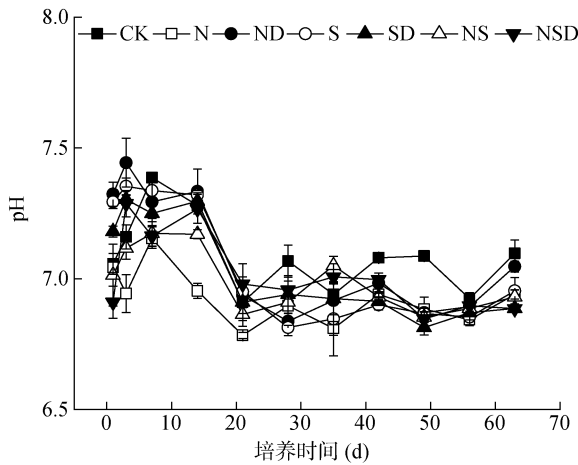


图 4 不同处理土壤 pH 的变化
Fig. 4 Changes of soil pH under different treatments

2.6 不同处理对土壤脲酶活性的影响

脲酶是参与尿素水解的专用酶, 它的活性可以表征土壤氮素状况^[23]。由图 5 可以看出, 在整个培养期间, 各处理脲酶活性变化幅度不大, 呈现缓慢上升的趋势。N 处理土壤脲酶活性在培养的第 49 天出现活性高峰, 达到 785.30 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$, ND 处理在培养的第 14 ~ 49 天均低于 N 处理, 表明尿素添加 DMPP 在此期间能抑制土壤脲酶活性, 减缓尿素水解的速度。在培养的前 28 d, SD 处理脲酶活性均低于 S 处理,

缓释尿素添加 DMPP 在培养前期能起到降低土壤脲酶活性的作用。NS 处理与 NSD 处理在整个培养期间脲酶活性均无显著性差异。

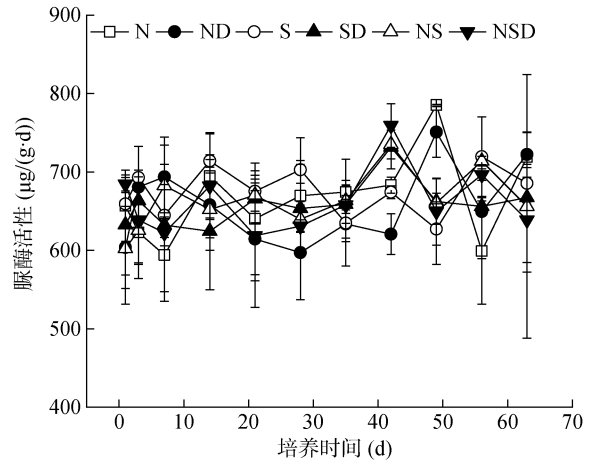


图 5 不同处理土壤脲酶活性的变化
Fig. 5 Changes of soil urease activities under different treatments

3 讨论

3.1 缓释尿素添加 DMPP 对土壤氮素转化的影响

缓释尿素具有控制肥料养分释放的作用, 本研究中单施缓释尿素处理较之单施尿素处理能利用其缓释作用减慢尿素水解的速度, 使硝化细菌因缺乏底物而减少了硝态氮的形成, 在培养的前 21 d 内作用显著($P < 0.05$, 图 2), 这与任先顺等^[24]研究结果相一致。缓释尿素添加 DMPP 处理与单施缓释尿素处理相比, 显著提高土壤中铵态氮含量($P < 0.05$, 图 1), 其硝化抑制有效作用时间在 49 d 左右(图 3), 且抑制硝化作用效果明显。李玉等^[25]研究也发现含有硝化抑制剂涂层的包膜尿素能明显抑制土壤铵态氮的硝化, 降低土壤铵态氮的表现硝化率, 从而减少土壤硝态氮的淋溶损失。

尿素水解时产生的 OH^- 会导致土壤 pH 短暂升高, 随后的硝化作用则会使土壤 pH 降低^[22]。在培养的第 1 ~ 21 天内, 单施缓释尿素处理与缓释尿素添加 DMPP 处理的土壤 pH 显著高于单施尿素处理 pH($P < 0.05$, 图 4), 表明缓释尿素与 DMPP 的施用, 能抑制硝化作用, 使土壤中较长时间保持较高的铵态氮含量和较低硝态氮含量, 造成土壤 pH 的升高^[26]。

单施尿素、缓释尿素处理的脲酶活性与施用 DMPP 的各处理之间无显著性差异(图 5), 这与华建峰等^[27]研究结果一致, 说明尿素的水解过程受硝化抑制剂的影响较小, 脲酶活性与硝化抑制剂的施用无显著关系^[28]。

3.2 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对土壤氮素转化的影响

尿素与缓释尿素配施是目前常见的一种轻简化施肥模式,本研究发现,尿素与缓释尿素配施后并没有因为缓释氮的配伍而增加土壤铵态氮的供给(图 1),反而因配施缓释尿素较之单施尿素处理提高了氨氧化速率常数,缩短了铵态氮半衰期(表 1),表明尿素与缓释尿素配施较单一尿素处理加快了铵态氮向硝态氮的转化,并导致土壤中硝酸盐的累积增加。这与我们在砂姜黑土区的田间试验结果一致:在小麦季成熟期时,秸秆还田条件下配施缓控释肥处理表层土壤硝态氮含量(48.28 mg/kg)显著高于同期的推荐施肥处理(33.11 mg/kg)和秸秆还田条件下的推荐施肥处理(24.91 mg/kg),尽管缓释氮肥配伍能够增加小麦生长中后期土壤硝态氮的供给,但也存在增加麦田中后期氮素淋失的风险。李泽丽等^[29]研究也表明,控释尿素较尿素处理可避免小麦越冬期氮素过剩造成的资源浪费,但同时也会显著增加返青后土壤中硝态氮含量。在供氧充足的条件下,铵的硝化作用加剧,会造成硝态氮、亚硝态氮的累积,在作物不能充分吸收利用的情况下会增大硝态氮的淋失风险^[3]。

本研究中,尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 不仅能够显著提高土壤铵态氮含量,还能延长抑制硝化作用的时间(图 1)。且配施添加 DMPP 在抑制氨氧化作用上效果明显,能够有效延长土壤中铵态氮的停留时间,同时,硝化抑制率得到显著提高,抑制表观硝化作用有效时间延长了 32 d 左右(图 3)。

土壤 pH 是影响硝化作用的一个重要因素^[3,30],与硝化速率呈显著正相关^[31]。尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 处理土壤 pH 在培养的第 3~21 天随硝化作用的进行呈下降趋势(图 4),与其硝化抑制率的变化趋势相同(图 3),即培养 21 d 天前的硝化抑制率高于 25%,同时也与配施添加 DMPP 有效降低氨氧化速率,使铵态氮半衰期延长至 18.6 d 的结果相印证(表 1)。这与石美等^[16]研究结果相一致,但在田间实际应用中 DMPP 添加方式、效应时间及其对土壤无机氮形态转化的影响还需要进一步深入研究。

此外,本研究中,尿素与缓释尿素配施处理与配施添加 DMPP 处理的土壤脲酶活性无显著性差异(图 5),表明脲酶活性与硝化抑制剂的施用无显著关系^[28]。这可能与 DMPP 是通过抑制氨氧化细菌(AOB)的生长而抑制硝化作用有关^[32]。在土壤中添加适量的硝化抑制剂,能有效抑制土壤 AOB 的增值,并在施用前期,会为微生物生长提供可利用的碳源或

能源,刺激土壤三大微生物群落的生长^[33]。通过抑制土壤 AOB 的生长,抑制氨氧化作用,延长铵态氮在土壤中停留时间,刺激微生物活性,利用微生物的固持作用,使得更多的铵态氮被固定在土壤中,减少土壤中硝酸盐的累积。关于 DMPP 对氨氧化细菌的活性的影响还需要进一步的试验验证。

4 结论

1) 缓释尿素添加 DMPP 能有效抑制硝化作用,显著提高土壤中铵态氮含量,且硝化抑制有效作用时间达 49 d 左右。

2) 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对氨氧化过程有较强的抑制作用,可有效延长铵态氮在土壤中停留的时间,减少硝化作用,提高氮素利用率,减少硝态氮淋失风险,为砂姜黑土上速效氮与缓释氮的优化配伍以及作物一次性施肥技术提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘建涛,许靖,孙志梅,等.氮素调控剂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.
- [3] 田发祥,纪雄辉,官迪,等.氮肥增效剂的研究进展[J].杂交水稻,2020,35(5):7-13.
- [4] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等.我国新型肥料发展战略研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.
- [5] 许仙菊,马洪波,宁运旺,等.缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):307-316.
- [6] 麻井彪,高洁,张建菲.缓释肥对紫色土油菜生长和养分吸收利用的影响[J].土壤学报,2020,57(4):1040-1050.
- [7] 张木,唐拴虎,黄巧义,等.缓释尿素配施普通尿素对双季稻养分的供应特征[J].中国农业科学,2018,51(20):3985-3995.
- [8] 徐久凯,李絮花,李伟,等.缓释尿素与普通尿素配施对氨挥发和土壤氮素动态变化过程的影响[J].中国土壤与肥料,2015(6):23-27.
- [9] 司贤宗,韩燕来,王宜伦,等.缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦-夏玉米施肥效果的研究[J].中国农业科学,2013,46(7):1390-1398.
- [10] 李玉浩,何杰,王昌全,等.控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J].土壤,2018,50(3):469-475.
- [11] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [12] 宁建凤,崔理华,艾绍英,等.两种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):144-151.

- [13] 余光辉, 张杨珠, 王大娟. 几种硝化抑制剂对土壤和小白菜硝酸盐含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 247-250.
- [14] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季田面水及渗漏液氮素动态变化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 434-441.
- [15] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 54-61.
- [16] 石美, 梁东丽, 满楠, 等. 不同浓度 DMPP 和 DCD 对石灰性土壤中氮素转化的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4635-4642.
- [17] 白杨, 杨明, 陈松岭, 等. 掺混氮肥配施抑制剂对土壤氮库的调控作用[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3804-3810.
- [18] 俞巧钢, 殷建祯, 马军伟, 等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1057-1066.
- [19] 杨剑波, 李学超, 徐晶晶, 等. 两种硝化抑制剂在不同土壤中的效果比较[J]. 土壤, 2014, 46(2): 319-324.
- [20] Yu Q G, Ma J W, Sun W C, et al. Evaluations of the DMPP on organic and inorganic nitrogen mineralization and plant heavy metals absorption[J]. Geoderma, 2018, 312: 45-51.
- [21] Yu Q G, Chen Y X, Ye X Z, et al. Evaluation of nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns[J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 872-878.
- [22] Cabrera M L, Kissel D E, Bock B R. Urea hydrolysis in soil: Effects of urea concentration and soil pH[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(12): 1121-1124.
- [23] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2059-2063.
- [24] 任先顺, 谢德全, 于婷婷, 等. 3,4-二甲基吡唑磷酸盐和双氰胺在黑钙土中对尿素氮转化的作用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 126-133.
- [25] 李玉, 贺明荣, 代兴龙, 等. 氮素与抑制剂双控释尿素的制备及其对土壤供氮能力和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1612-1624.
- [26] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611-1618.
- [27] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 94-99.
- [28] Venkatesan S, Sudhahar V, Senthurpandian V K, et al. Urea hydrolysis of tea soils as influenced by incubation period, soil pH, and nitrification inhibitor[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(17/18): 2295-2307.
- [29] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 959-968.
- [30] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 等. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 169-179.
- [31] 鲍俊丹, 石美, 张妹婷, 等. 中国典型土壤硝化作用与土壤性质的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1390-1398.
- [32] 张文学, 杨成春, 王少先, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 417-424.
- [33] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 3,5-二甲基吡唑(DMP)施用后土壤硝化作用潜势及微生物群落动态变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1518-1523.