

NBPT和DMPP对氮肥在喀斯特土壤中迁移规律的影响

田 媛^{1,2,3}, 张嘉佳^{1,2,3}, 谢富金^{1,2,3}, 蔡秋亮^{1,2,3*}, 陆海姣⁴, 熊小琼⁴

¹广西芒果生物学重点实验室, 广西 百色

²百色学院农业与食品工程学院, 广西 百色

³亚热带特色农业产业学院, 广西 百色

⁴那坡县农业农村局, 广西 百色

收稿日期: 2022年12月8日; 录用日期: 2023年1月9日; 发布日期: 2023年1月16日

摘 要

为了明确不同抑制剂对氮肥在喀斯特土壤迁移规律的影响, 通过室内模拟土柱实验, 在常温、30%水分条件下, 本试验研究了尿素、氯化铵、硝酸钾与脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)和硝化抑制剂3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)的不同组合配施下, 土壤中可溶性氮含量和可溶性氮含量转换率的变化。结果表明: 尿素 + NBPT、尿素 + DMPP、尿素 + NBPT + DMPP可溶性氮曲线分别在8 cm、11.5 cm、8.5 cm处开始下降, 在可溶性氮含量上90天 > 30天 > 15天; 氯化铵 + NBPT、氯化铵 + DMPP、氯化铵 + NBPT + DMPP相比与单施氯化铵可溶性氮含量分别增加14.7%、21.9%、1.9%; 可溶性氮转换率尿素 + NBPT + DMPP最高达到13%, 较单施尿素平均增加2%、氯化铵 + DMPP较单施氯化铵平均增加12.8%、单施硝酸钾可溶性氮转换率最高为16%。通过该试验结果可明确, 施用一定量的抑制剂可以使土壤中可溶性氮的含量增加, 延长氮素在土壤中分解的时间, 增加迁移距离。

关键词

氮肥, 硝化抑制剂, 脲酶抑制剂, 可溶性氮, 迁移

Effects of NBPT and DMPP on the Migration of Nitrogen Fertilizer in Karst Soil

Yuan Tian^{1,2,3}, Jiajia Zhang^{1,2,3}, Fujin Xie^{1,2,3}, Qiuliang Cai^{1,2,3*}, Haijiao Lu⁴, Xiaoqiong Xiong⁴

¹Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise Guangxi

²Agriculture and Food Engineering College, Baise University, Baise Guangxi

³Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Baise Guangxi

⁴Napo County Agricultural and Rural Bureau, Baise Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 田媛, 张嘉佳, 谢富金, 蔡秋亮, 陆海姣, 熊小琼. NBPT 和 DMPP 对氮肥在喀斯特土壤中迁移规律的影响[J]. 土壤科学, 2023, 11(1): 1-10. DOI: 10.12677/hjss.2023.111001

Abstract

In order to understand the effect of different inhibitors on the migration of nitrogen fertilizer in karst soil, the indoor simulated soil column experiment was conducted, this experiment studied the changes in soluble nitrogen content and its conversion rate in soil under different combinations of urea, ammonium chloride, potassium nitrate and N-Butylthiophosphoryl Triamide (NBPT), a urease inhibitor, and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP), a nitrification inhibitor. The results showed that the soluble nitrogen curves of urea + NBPT, urea + DMPP and urea + NBPT + DMPP began to decline at 8cm, 11.5cm and 8.5cm respectively, 90 days > 30 days > 15 days in soluble nitrogen content; the soluble nitrogen content of ammonium chloride + NBPT, ammonium chloride + DMPP and ammonium chloride + NBPT + DMPP increased by 14.7%, 21.9% and 1.9% respectively compared with that of ammonium chloride alone; the highest soluble nitrogen conversion rate of urea + NBPT + DMPP was 13%, which was 2% higher than that of urea alone, 12.8% higher than that of ammonium chloride alone, and 16% higher than that of potassium nitrate alone. The results of this experiment can be clear that the application of a certain amount of inhibitors can increase the content of soluble nitrogen in the soil, prolong the decomposition time of nitrogen in the soil, and increase the migration distance.

Keywords

Nitrogen Fertilizer, Nitrification Inhibitor, Urease Inhibitor, Soluble Nitrogen, Migration

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国氮肥施用增速加快,已成为世界上氮素化肥生产和消费大国[1]。据资料研究统计,从2000年以来,我国氮肥的使用率每年都呈现逐步增长态势,消耗量已经达到每年3000万吨,占世界氮肥总消费量的30%左右[2][3]。氮肥在施入土壤之后,会通过水解、氨挥发、淋溶、硝化和反硝化作用[4]等途径流失,不仅会带来水体污染、大气污染[5]等环境问题,而且会降低氮肥的利用率。

为了提高氮肥利用率,在农业生产过程中向氮肥中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂成为了一项非常重要的措施[6]。脲酶抑制剂主要通过抑制土壤中脲酶的活性来延缓尿素的水解,从而降低铵态氮的挥发和硝化[7][8][9]。郑福丽等在非酸性土壤中使用1%的不同品种抑制剂与尿素混施实验表明,NBPT可以使尿素水解时间推迟最长达5d;赵略等测试在NBPT的不同浓度下土壤脲酶的活性,表明NBPT抑制土壤脲酶的有效浓度为0.1%~1%,且施用浓度增大,抑制作用增强。硝化抑制剂主要通过抑制氮肥在土壤中的硝化作用[10][11][12][13]来降低硝酸盐的淋溶和N₂O的损失。许超等用好气培养法证明DMPP可以使土壤中铵态氮和硝态氮的含量随时间而变化,铵态氮含量先减少后略升高,硝态氮含量先增高后减少。大量研究结果表明,脲酶抑制剂和硝化抑制剂同时施用[14][15][16][17]时,可以延缓尿素的水解,使土壤中的氮素以铵态氮的形式存留较长的时间,增加土壤肥力和作物对养分的吸收[18][19][20]。根据于光辉的研究,表明施加抑制剂可以降低农作物体内的硝酸盐含量[21][22],对发展绿色无公害食品有重要意

义。因此,如何减少氮肥施用量,降低氮素在土壤中的损失,并且保证农产品的产量和品质,已成为生产过程中迫切需要解决的问题之一。石宁等通过添加控释肥试验得出,减少 20% 施氮量不仅可以降低土壤中硝态氮的累积和迁移,同时可以减少氮肥损失;鲁艳红等通过用减少氮肥施用量和添加抑制剂的研究得出,在氮肥减少 20% 的条件下添加抑制剂,可以有效提高氮素利用率[23];刁金根等使用室内土柱实验总结出,氮肥在土壤中的移动性硝态氮肥 > 尿素 > 铵态氮肥。这些均为单一肥料的氮素迁移率的研究,但针对多种肥料与抑制剂混施在喀斯特土壤中氮素迁移与可溶性氮迁移距离对比的相关研究尚未见报道。本文为了明确氮肥在喀斯特土壤中的迁移规律,通过氮肥和抑制剂混施的方式,选择我国西南地区的喀斯特土壤,了解土壤中可溶性氮含量转换率的规律,综合分析出氮肥在土壤中的迁移速率,以便为氮肥在喀斯特土壤寻找最合适的施肥位点。

2. 材料与方法

2.1. 试供土壤

广西壮族自治区百色市田阳区距地面深度 2 cm~3 cm 的喀斯特土壤,其特征是具有富钙、偏碱的化学环境[24] [25],土壤的生成速率缓慢、土层覆盖浅薄且厚度不均一,生态环境脆弱,耕种条件不佳,土壤养分极易流失。

2.2. 实验设计

2.2.1. 土柱制作

将采集土壤经风干、过筛、研磨等处理;装入土壤样品袋(高 25 cm, 宽 10 cm);装入土壤 850 g (高度 21 cm),对土壤进行注水处理,保持土壤湿度为 30%,静置 24 h。将 3 种肥料(尿素、硝酸钾、氯化铵)各 12 g,分别与 NBPT (2 g)、DMPP (2 g)、NBPT (1 g) + DMPP (1 g) 进行组合配施。加入肥料后覆土层 135 g (高度 3 cm),注水使土壤湿度达到 30% (模拟添加肥料后经过雨水或人工加水后土壤湿度情况)。为确保湿度,防止水分散失,进行扎带捆绑,并扎孔保证土壤通气。常温下分别培养 15 天、30 天、90 天,每份不同处理土柱为 3 组重复。

2.2.2. 实验处理和采样方法

土壤样品到达处理时间后,对土柱进行水平垂直切割。在袋口下 2 cm 处开始切割,每隔 1 cm 采集共 8 份土样,后每隔 2.5 cm 采集共 4 份土样,余下不做处理(如图 1 所示)。土样分装后进行风干、研磨、过筛(20 目筛网),最终得到 12 份土样,标记后进行测定。

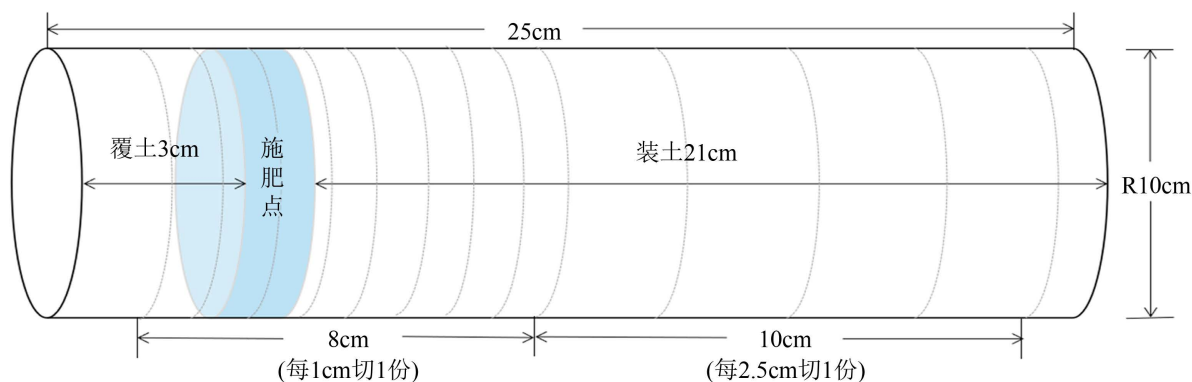


Figure 1. Schematic diagram of soil column cutting
图 1. 土柱切割示意图

2.2.3. 分析方法

可溶性无机氮分为铵态氮($\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$)。

铵态氮：采用钠氏试剂比色法测定[26]，每份称取 1 g 土样，加入 2 mol/L 氯化钾溶液 10 ml 浸提过滤，取 0.3 ml 加入 100 g/L 酒石酸钾钠溶液 1 ml、1.5 ml 纳氏试剂，定容至 50 ml，混匀，放置 30 min 后，在 420 nm 处比色记录数据。

硝态氮：采用紫外分光光度法测定[27]，每份土样称取 1 g，加入 2 mol/L 氯化钾溶液 10 mL 浸提过滤，取 3 mL 稀释定容至 50 ml，在 220 nm 和 275 nm 处比色记录数据。

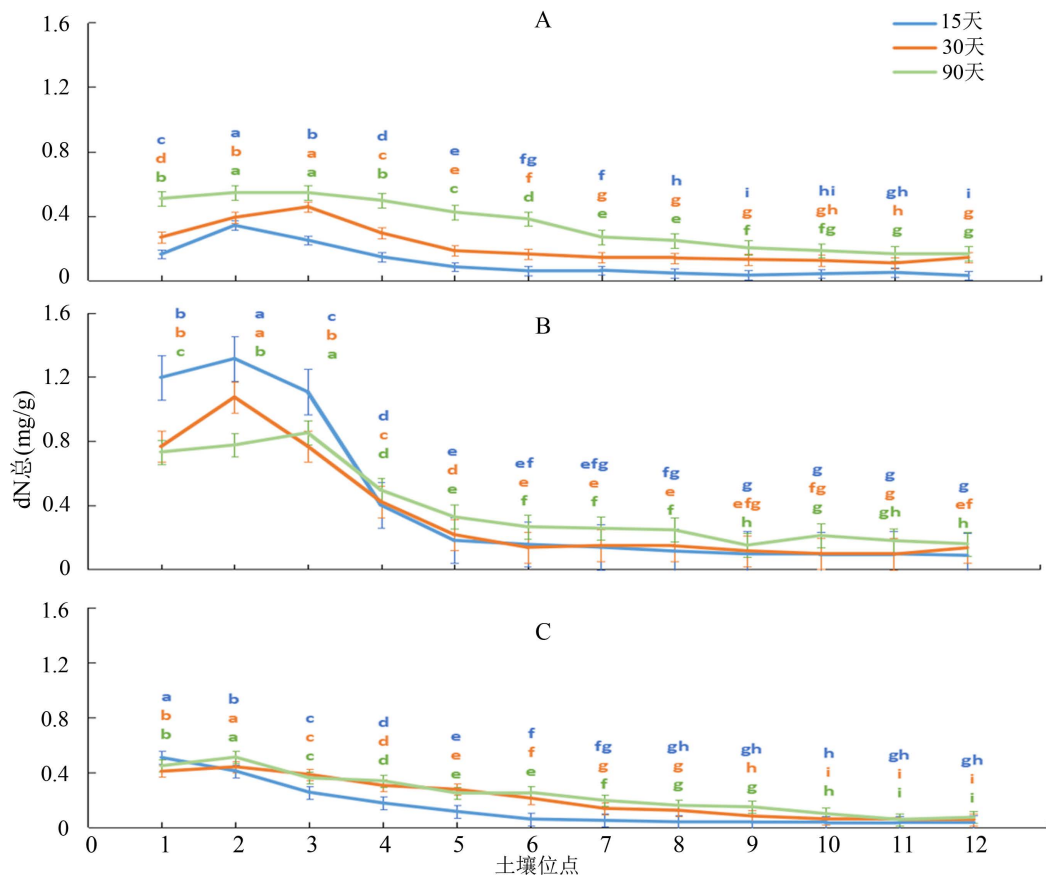
2.2.4. 数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 统计分析数据，根据每克土壤中铵态氮、硝态氮含量，计算出可溶性氮含量和可溶性氮含量的转换率，用 SPSS 统计软件进行数据分析，采用 LSD、S-N-K、Duncan 法多重比较，显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ ，采用 Microsoft Power Point 2021 软件作图。

3. 结果与分析

3.1. 可溶性氮的含量

3.1.1. 不施肥条件下土壤中可溶性氮的含量



Note: (A) NBPT + blank; (B) DMPP + blank; (C) NBPT + DMPP + blank.

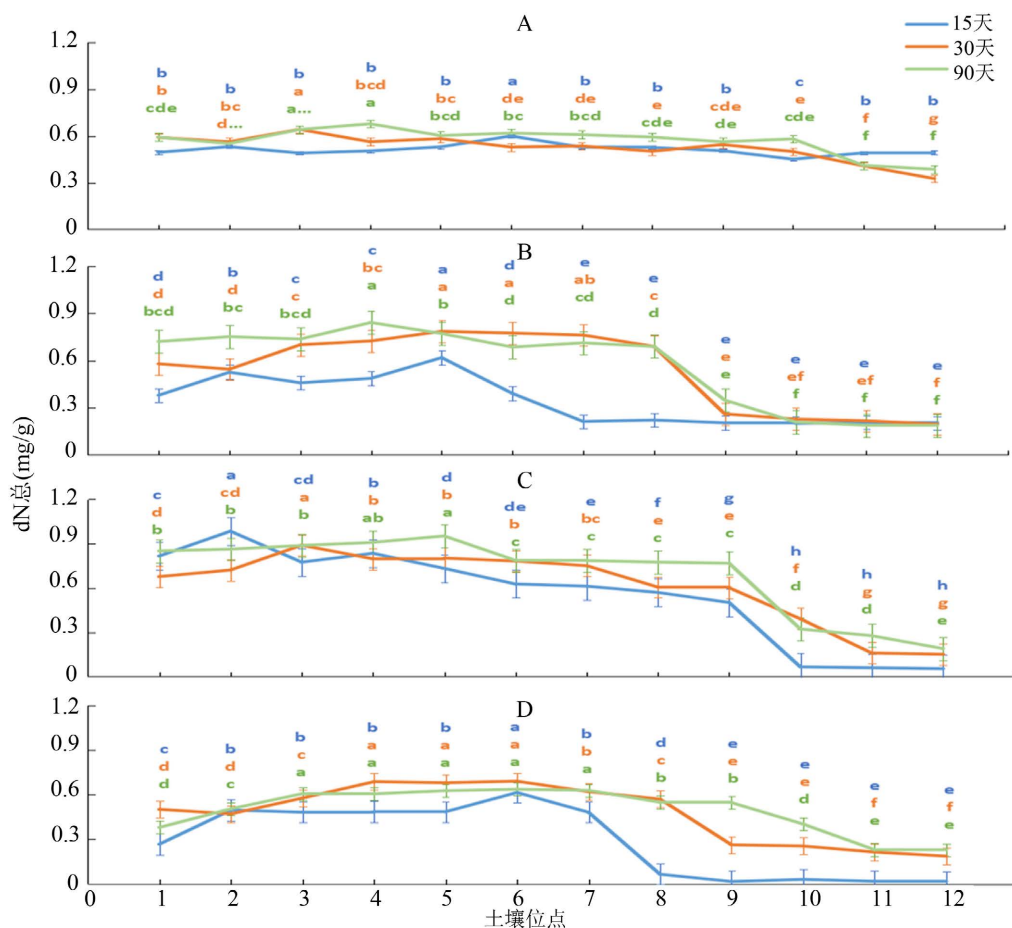
注: (A) NBPT + 空白; (B) DMPP + 空白; (C) NBPT + DMPP + 空白。

Figure 2. Content of soluble nitrogen in soil without fertilization

图 2. 不施肥条件下土壤中可溶性氮的含量

不施肥条件下土壤可溶性氮含量曲线总体呈下降趋势, 其变化是土壤中有有机氮矿化、硝化、反硝化及生物固定作用的综合表现。图 2(A)中, 根据含量曲线高低可知, 含量最高为 90 天, 开始升高至第 2 点为 0.545 mg/g, 3~5 点开始下降, 6~12 点保持在 0.3 mg/g 左右。图 2(B)培养 15 天含量变化最大, 第 2 点最高为 1.316 mg/g, 2~5 点大幅度下降至 0.18 mg/g; 培养 90 天最高点 3 为 0.853, 在第 6 点 0.265 后基本保持平缓, 1~4 点 15 天含量曲线最高, 5~12 点 90 天最高, 原因可能为 DMPP 在短时间内分解较快且移动距离短, 长时间移动距离加长但效果变差。图 2(C)的可溶性氮含量较低, 原因可能是土壤固定态铵吸附-解吸作用的影响。综上所述, DMPP 作用于不加肥料的土壤中效果较好, 其中培养 90 天最佳。

3.1.2. 施用尿素条件下土壤中可溶性氮的含量



Note: (A) Urea; (B) Urea + NBPT; (C) Urea + DMPP; (D) Urea + NBPT + DMPP.

注: (A) 尿素; (B) 尿素 + NBPT; (C) 尿素 + DMPP; (D) 尿素 + NBPT + DMPP。

Figure 3. Content of soluble nitrogen in soil under the condition of applying urea

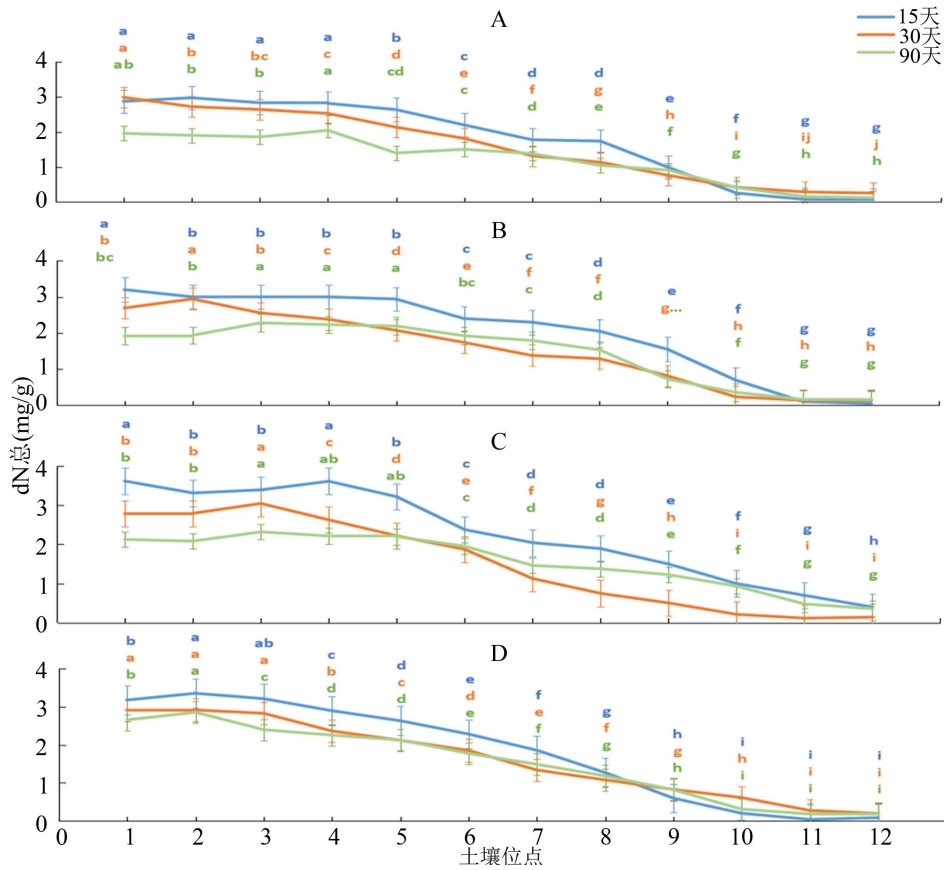
图 3. 施用尿素条件下土壤中可溶性氮的含量

在施用尿素曲线图中(图 3), 加入抑制剂可以使可溶性氮含量的下降点后移, 延长氮素迁移距离。单施尿素其可溶性氮含量缓慢下降, 最高 0.6 mg/g 左右之至最低 0.35 mg/g, 总体变化较小。尿素与 NBPT 配施可增加土壤中可溶性氮的含量, 1~8 点平均含量为 0.72 mg/g 左右, 较单施氮肥增加 0.18 mg/g, 8~9 点快速下降至 0.2 mg/g; 尿素与 DMPP 配施, 总体平均含量 90 天最高, 1~5 升最高至 0.952 mg/g, 较单施尿素最高点增加了 0.274 mg/g, 5~9 点缓慢下降至 0.767 mg/g, 第 9 点下降加剧; 尿素与 NBRT 和 DMPP

配施, 和单施尿素相比 30 天、90 天含量相差极小而 15 天含量远低于单施尿素。总体可知, 加入抑制剂 DMPP 培养 90 天效果最佳, 含氮量最高, 且随着培养时间的延长, 迁移前期与后期可溶性氮含量差距在减少。

3.1.3. 施用氯化铵条件下土壤中可溶性氮的含量

单施氯化铵土壤中可溶性氮含量总体呈下降趋势, 根据含量高低可知培养 15 天效果最佳, 从第 2 点含量最高 2.967 mg/g 开始下降至第 10 点 0.225 mg/g 后平缓。因 NBPT 只对土壤中脲酶有抑制作用, 所以氯化铵和 NBPT 配施与单施氯化铵无明显差距。氯化铵和 DMPP 混施与单施氯化铵相比, 前期(1~5 点)平均每点增加 0.5 mg/g, 中期(6~8 点)平均每点增加 0.2 mg/g, 后期(9~12 点)平均增加 0.45 mg/g; 且图 4(A)可溶性氮含量曲线在第 10 点后趋于平缓; 图 4(B)中 15 天曲线在第 11 点后平缓, 30、90 天在第 10 点后平缓; 图 4(D)中曲线在第 11 点后平缓; 说明 DMPP 不仅可以增加可溶性氮含量还可以延长可溶性氮的迁移距离。



Note: (A) Ammonium chloride; (B) Ammonium chloride + NBPT; (C) Ammonium chloride + DMPP; (D) Ammonium chloride + NBPT + DMPP.

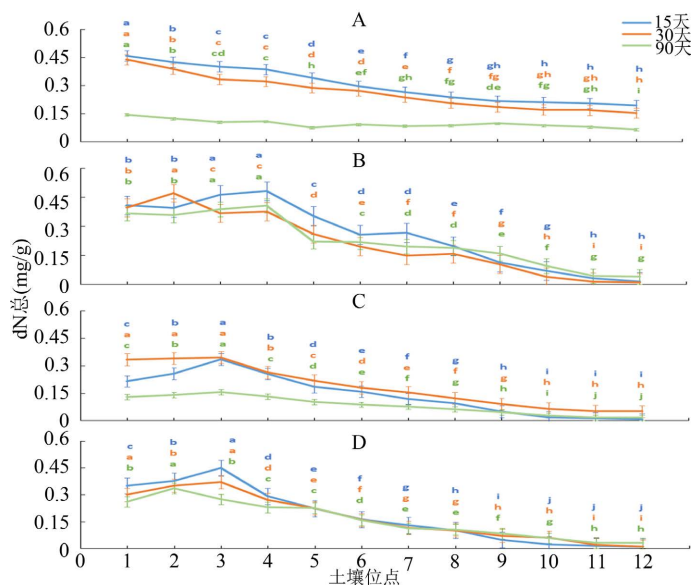
注: (A) 氯化铵; (B) 氯化铵 + NBPT; (C) 氯化铵 + DMPP; (D) 氯化铵 + NBPT + DMPP。

Figure 4. Content of soluble nitrogen in soil under the condition of applying ammonium chloride
图 4. 施用氯化铵条件下土壤中可溶性氮的含量

3.1.4. 施用硝酸钾条件下土壤中可溶性氮的含量

从图 5 可看出, 单施硝酸钾时 15 天与 30 天折线平缓下降, 最高点 1 点是最低点 12 点的 2.5 倍, 90 天因硝酸钾时间久挥发失效, 土壤中可溶性氮含量较少。在加入抑制剂后前三点曲线有上升趋势, 可能为抑制剂影响了原本土壤中可溶性氮的转换, 第 4 点后均呈下降趋势, 且含量明显低于不施加抑制剂,

可知 NBPT 和 DMPP 对硝酸钾的分解无影响。

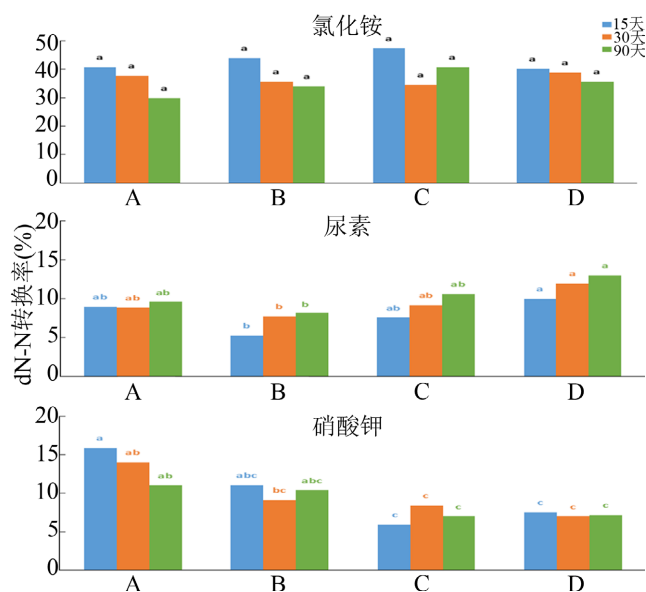


Note: (A) Potassium nitrate; (B) Potassium nitrate + NBPT; (C) Potassium nitrate + DMPP; (D) Potassium nitrate + NBPT + DMPP.

注: (A) 硝酸钾; (B) 硝酸钾 + NBPT; (C) 硝酸钾 + DMPP; (D) 硝酸钾 + NBPT + DMPP 硝制剂。

Figure 5. Content of soluble nitrogen in soil under the condition of applying potassium nitrate
图 5. 施用硝酸钾条件下土壤中可溶性氮的含量

3.2. 不同肥料的 dN-N 转换率



Note: (A) Fertilizer; (B) Fertilizer + NBPT; (C) Fertilizer + DMPP; (D) Fertilizer + NBPT + DMPP.

注: (A) 肥料; (B) 肥料 + NBPT; (C) 肥料 + DMPP; (D) 肥料 + NBPT + DMPP。

Figure 6. DN-N conversion rate under different fertilizer conditions
图 6. 施加不同肥料条件下的 dN-N 转换率

从图6可看出,单施氮肥条件下,可溶性氮转换率分别平均为氯化铵 36.3%、尿素 9.3%、硝酸钾 13.7%,且因氯化铵与硝酸钾易分解,所以转换率随时间增加而减少。在加肥料氯化铵中,DMPP 施用平均转换率最高,15 天转换率最大为 47%,因为铵态氮无法进行硝化,可溶性氮累积加多。尿素在加两种抑制剂后平均转换率最高,随着时间增加转化率增大,最高 90 天为 13%,因为时间增长,抑制剂的作用降低,无法有效抑制铵态氮、硝态氮的转换。因为硝酸钾分解后只含有硝态氮,两种抑制剂对硝态氮无作用,且硝酸钾极易分解,培养 15 天可溶性氮的转换率最高为 16%。

4. 讨论

本研究通过土柱实验模拟喀斯特土壤在施用不同肥料情况下计算出土壤中可溶性氮的含量和可溶性氮含量的转换率[28],对喀斯特地区水土界面的氮循环转化机制[29]有进一步的认识,也对西南喀斯特地区农业耕作施肥方式的改进措施提供理论依据。在氮肥与不同抑制剂组合配施处理中,合理配施 NBPT 和 DMPP 能够显著提高土壤中可溶性氮的含量,减少氮素淋溶损失[30]。但由于影响土壤氮素变化的因素[31][32]众多,部分结果仍需进行进一步研究与验证。

本实验研究结果表明,不同氮肥处理间土柱整体土壤中可溶性氮含量差异明显。其中,不施氮肥对照可溶性氮含量整体变化不大,但施加 DMPP 后土壤中前三点可溶性氮含量明显高于施加 NBPT,第 4 点后与其他两条曲线无明显差异。DMPP 抑制土壤中硝态氮的生成与积累,前三点可溶性氮含量较高是因为土壤中的铵态氮不能转化为硝态氮,且铵态氮不易流失易被吸附;后期可能因为 DMPP 效果减弱,无法强烈抑制硝化作用。

本实验中氯化铵可溶性氮含量研究中,加入 DMPP 可提高可溶性氮的含量,加入两种抑制剂后反而含量降低,这与崔磊[33]的研究相一致,氯化铵中添加 DMPP,硝化抑制率最高,显著提高土壤中铵态氮含量,降低硝态氮含量,而 NBPT 与 DMPP 一同使用会降低氮肥增效剂的效果。油伦成等[34]研究表明,氯化铵和 DMPP 培养 60~90 天,在碱性褐色土中硝化反应较显著;而本实验中平均培养 15 天可溶性氮含量最高,DMPP 作用最明显,时间差距可能是因为本实验所用的喀斯特土壤偏酸性。

俞巧钢等[35]报道,DMPP 能有效抑制土壤中铵氧化反应的发生,表层土壤水中铵态氮的含量明显增加,且主要集中在 20 cm 以上的耕作层土壤;应用 DMPP 抑制剂,40 d 内能显著降低土壤水硝态氮浓度,减少硝态氮的淋溶迁移。本实验中尿素与 DMPP 混合配施下,可溶性氮含量在 10.5 cm 处开始下降,平均培养 90 天可溶性氮含量最高,这与其报道一致。李君[36]研究指出,尿素与 10%脲酶抑制剂组合配施下,土壤铵态氮含量分别在第 7、15、21 天达到峰值,土壤铵态氮含量呈线性缓慢上升趋势。但本实验中,尿素与 NBPT 混施可溶性氮含量峰值在 30 天,其原因可能是 NBPT 添加剂量较少,抑制效果不明显。董怡华等[37][38][39]研究指出,尿素与 NBPT、DMPP 混施效果最佳,可以减少氨挥发,提高氮肥利用率。但本实验尿素与 DMPP 混施可以使可溶性氮含量 1~9 点平均提高 0.2 mg/g,其产生差异的原因可能由于土壤孔隙度不同,通气情况受到影响,从而影响微生物对有机氮底料的活性作用;其次,土壤的粘粒含量也不同,从而导致抑制脲酶活性速率下降[40]。

本实验研究表明,氯化铵与 DMPP 混施在培养 15 天情况下氮素转化率最高,达 47%,而崔磊等[41]研究表明,氯化铵与 DMPP 处理红壤中铵态氮含量提高 56%~62%,不仅促进作物对氮素的吸收,大大提高了作物产量和氮肥利用率。与其结果相差的原因可能是土壤的种类不同所含有有机质不同,对硝化作用有一定影响。尿素与 NBPT 和 DMPP 一起作用转换率最高为 13%,这与苏壮[42]的报道一致,NBPT 和 DMPP 组合,能对尿素水解产物和铵态氮转化过程的双重抑制作用所致,抑制剂通过抑制土壤中尿素水解产物向铵态氮、硝态氮的转化,在降低铵态氮、硝态氮富集的同时,使铵态氮在土壤中较长时间内保持较高的水平,从而影响了土壤中有效态氮的动态变化。单施硝酸钾土壤中氮素转换率最高为 16%,因

为 NBPT、DMPP 对硝酸钾的分解无影响。尿素与硝酸钾的可溶性氮含量转换率平均较氯化铵低，其原因可能是氮素被土壤吸附，且硝酸钾分解会产生含氮气体挥发。

5. 结论

硝化抑制剂可以使加入氯化铵土壤中的可溶性氮含量增加，作用时间 15 天内效果最佳。

尿素与抑制剂配施可以延长可溶性氮在土壤中迁移的距离，硝化抑制剂 < 脲酶抑制剂 < 脲酶抑制剂 + 硝化抑制剂，时间越久，可溶性氮在土壤中迁移距离越长，且含量增加。

硝酸钾挥发转化速度快，施入土壤后短期内效果明显。两种抑制剂对硝酸钾可溶性氮含量的转化无明显影响。

基金项目

广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA297123)；广西大学生创新创业训练计划项目(202110609060)；广西一流学科建设项目资助(农业资源与环境)。

参考文献

- [1] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [2] 刘艳香, 姜春玲, 张晓英. 我国氮肥的施用现状及对策[J]. 农业开发与装备, 2021(10): 101-102.
- [3] Kharbach, M. and Chfadi, T. (2021) General Trends in Fertilizer Use in the World. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, Article No. 2577. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08889-0>
- [4] 陆宇燕, 李丕鹏. 氮肥污染的危害[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(1): 1-5.
- [5] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 刘永刚. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 782-786.
- [6] 倪秀菊, 李玉中, 徐春英, 李巧珍. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 145-149.
- [7] 郑福丽, 李彬, 李晓云, 石元亮. 脲酶抑制剂的作用机理与效应[J]. 吉林农业科学, 2006, 31(6): 25-28.
- [8] Matczuk, D. and Siczek, A. (2021) Effectiveness of the Use of Urease Inhibitors in Agriculture: A Review. *International Agrophysics*, **35**, 197-208. <https://doi.org/10.31545/intagr/139714>
- [9] 赵略, 孙庆元, 于英梅, 马国宝. 脲酶抑制剂 nBTP 对土壤脲酶活性和脲酶产生菌的影响[J]. 大连轻工业学院学报, 2007, 26(1): 24-27.
- [10] Shi, X., Hu, H.-W., Müller, C., et al. (2016) Effects of the Nitrification Inhibitor 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate on Nitrification and Nitrifiers in Two Contrasting Agricultural Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, **82**, 5236-5248. <https://doi.org/10.1128/AEM.01031-16>
- [11] de Paulo, E.N., Galindo, F.S., Rabêlo, F.H.S., et al. (2021) Nitrification Inhibitor 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate Improves Nitrogen Recovery and Accumulation in Cotton Plants by Reducing NO₃⁻ Leaching under ¹⁵N-Urea Fertilization. *Plant and Soil*, **469**, 259-272. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05169-4>
- [12] 许超, 吴良欢, 冯涓, 张福锁. 硝化抑制剂 DMPP 对菜园土壤铵态氮与硝态氮含量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(5): 388-390.
- [13] 郭松, 喻华, 陈琨, 等. 稳定性尿素对川中丘陵区小麦/玉米轮作制度下作物产量及氮肥利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 1006-1012.
- [14] 隽英华, 陈利军, 武志杰, 史云峰. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 773-780.
- [15] 孙爱文, 石元亮, 张德生, 郭爱民. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 357-361.
- [16] 张文学, 王少先, 夏文建, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤硝化、反硝化功能菌的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(6): 897-909.
- [17] 陈利军, 史奕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 368-372.

- [18] 马芬, 杨荣全, 郭李萍. 控制氮肥施用引起的活性氮气体排放: 脲酶/硝化抑制剂研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 908-922.
- [19] 李树营. 氮肥减施条件下脲酶和硝化抑制剂对露地蔬菜产量、养分吸收与淋溶的影响[D]: [硕士学位论文]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2020.
- [20] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 添加 NBPT/DMPP/CP 的高效稳定性尿素在黑土和褐土中的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 957-968.
- [21] 唐其展, 孔德工, 田忠孝, 等. 施用氮肥对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 西南农业学报, 2005, 18(2): 149-152.
- [22] Yu, G., Zhang, Y. and Wan, D. (2006) Effects of Nitrification Inhibitors on Nitrate Content in Soil and Pakchoi and on Pakchoi Yield. *The Journal of Applied Ecology*, **17**, 247-250.
- [23] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
- [24] 王倩, 曹迅, 唐皓, 等. 广西百色喀斯特地貌土壤产铁载体细菌的分离和鉴定[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(5): 1955-1964.
- [25] 罗焱霞. 不同施肥模式对喀斯特农田土壤氮形态、转化速率及酶活性的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [26] 弓晓峰, 张静, 张振辉, 周云. 纳氏试剂比色法测定土壤铵态氮的研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(1): 43-44+117.
- [27] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 288-293.
- [28] 侯彦林, 周燕, 周炜. 氮利用率和氮转化率评价氮肥肥效比较研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 28-36.
- [29] 任奕蒙. 喀斯特流域水土界面氮循环转化机制研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [30] 周旋, 吴良欢, 董春华, 贾磊. 氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1804-1814.
- [31] Zhang, Y., Wu, H., Yao, M., *et al.* (2021) Estimation of Nitrogen Runoff Loss from Croplands in the Yangtze River Basin: A Meta-Analysis. *Environmental Pollution*, **2021**, Article ID: 116001. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116001>
- [32] Zhou, W., Lyu, T.F., Yang, Z.P., *et al.* (2016) Research Advances on Regulating Soil Nitrogen Loss by the Type of Nitrogen Fertilizer and Its Application Strategy. *The Journal of Applied Ecology*, **27**, 3051-3058.
- [33] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 用于黑土的稳定性氯化铵的适宜硝化抑制剂和氮肥增效剂组合[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2178-2188.
- [34] 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2113-2121.
- [35] 俞巧钢, 陈英旭, 张秋玲, 等. DMPP 对氮素垂直迁移转化及淋溶损失的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 813-818.
- [36] 李君. 氮肥增效剂(NBPT/Nitrapyrin)对土壤氮素转化及滴灌麦田 N₂O 排放的影响[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2014.
- [37] 张妹婷, 石美, 梁东丽, 等. 不同硝化抑制剂对尿素转化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 178-184.
- [38] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氮挥发特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2943-2949.
- [39] 张艳艳, 张本强, 吴坤, 宗浩. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮转化影响[J]. 江西农业, 2016(18): 27.
- [40] 李京京, 刘文, 任天宝, 等. 不同土壤质地和含水率对炭基肥料氮素矿化的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 40-46.
- [41] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3953-3960.
- [42] 苏壮. 脲酶/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及其生物有效性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 230-232.