

# 聚天门冬氨酸钙盐对水稻田面水中三氮动态变化的影响

董世杰<sup>1</sup>, 鲁屹<sup>1</sup>, 唐婉莹<sup>1</sup>, 刘琪<sup>1</sup>, 程梦笛<sup>1</sup>, 张庆国<sup>2</sup>, 杨书运<sup>1</sup>, 马友华<sup>1</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036)

**摘要:** 利用桶栽试验探究不同浓度水平的聚天门冬氨酸钙盐(PASP-Ca)对水稻田面水中铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )和总氮(TN)浓度动态变化的影响。结果表明,施氮后,田面水中 TN、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  分别于第 1, 3, 9 天达到最大值,随后逐渐降低。 $\text{NO}_3^-/\text{TN}$  多在 0.1 以下,  $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)/\text{TN}$  多在 0.5 以上。因此,可以将  $\text{NH}_4^+$  和 TN 作为农田水污染防治的主要监测指标,  $\text{NO}_3^-$  作为辅助指标。添加一定浓度的 PASP-Ca 能对田面水中氮素浓度的变化起到缓释作用,其中 0.3% 浓度水平的 PASP-Ca 效果相对较好,田面水中  $\text{NH}_4^+$  和 TN 的下降速率分别为 3.452, 4.806 mg/(L·d),与单施氮肥(CK)相比,分别降低了 11.68% 和 16.25%;同时,  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度为 6.999 mg/L,较 CK 低了 3.88%;  $\text{NO}_3^-$  的平均浓度为 0.396 mg/L,较 CK 低了 24.83%; TN 的平均浓度为 20.077 mg/L,较 CK 提升了 3.10%。施氮后田面水中 TN 浓度随时间呈对数递减,而  $\text{NH}_4^+$  浓度在施氮后 3 天内随时间呈对数增加,之后随时间呈对数递减趋势。施氮后的 9 天内是防止稻田田面水中氮素流失的关键时期。

**关键词:** 聚天门冬氨酸钙盐; 水稻田面水; 三氮; 动态变化

中图分类号: X52; S511 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)06-0208-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.030

## Effects of Polyaspartic Acid Calcium Salt on the Dynamic Changes of $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ and Total Nitrogen in Surface Water of Paddy Field

DONG Shijie<sup>1</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, TANG Wanying<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, CHENG Mengdi<sup>1</sup>,

ZHANG Qingguo<sup>2</sup>, YANG Shuyun<sup>1</sup>, MA Youhua<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University,

Hefei 230036; 2. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** A barrels planted experiment was conducted to study the effects of PASP-Ca with different concentration levels on the dynamic changes of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  and total nitrogen (TN) concentrations in surface water of paddy field. The result showed that the concentrations of TN,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  in the surface water of paddy field reached the maximum within 1 day, 3 days and 9 days respectively after nitrogen application.  $\text{NO}_3^-/\text{TN}$  was less than 0.1 and  $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)/\text{TN}$  was more than 0.5. Therefore,  $\text{NH}_4^+$  and TN could be used as the main monitoring indicators, and  $\text{NO}_3^-$  as an auxiliary indicator for the prevention and control of farmland water pollution. Adding a certain concentration of PASP-Ca had slow release effects for the changes of nitrogen concentrations in surface water of paddy field, while the effects of PASP-Ca at 0.3% concentration level was relatively better, the reduction rates of  $\text{NH}_4^+$  and TN in surface water of paddy field were 3.452 mg/(L·d) and 4.806 mg/(L·d) respectively. Compared with apply nitrogen only (CK), the reduction rates by 11.68% and 16.25%. Meanwhile, the average concentration of  $\text{NH}_4^+$  was 6.999 mg/L, which was 3.88% lower compared with CK. The average concentration of  $\text{NO}_3^-$  was 0.396 mg/L, which was 24.83% lower compared with CK. The average concentration of TN was 20.077 mg/L, which was 3.10% higher compared with CK. The dynamic changing trends of  $\text{NH}_4^+$  and TN concentrations with time could be expressed by logarithmic equations. After nitrogen application, the TN concentrations in paddy field decreased logarithmically with time, while the concentrations of  $\text{NH}_4^+$  increased logarithmically in 3 days, and then decreased logarithmically with time. 9 days after nitrogen application was the key stage

收稿日期: 2018-07-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800503)

第一作者: 董世杰(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事应用气象研究。E-mail: dongshijiework@163.com

通信作者: 杨书运(1972—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业气象研究。E-mail: yangshy@ahau.edu.cn

to prevent nitrogen loss in surface water of paddy field.

**Keywords:** PASP—Ca; surface water of paddy field;  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  and total nitrogen; dynamic change

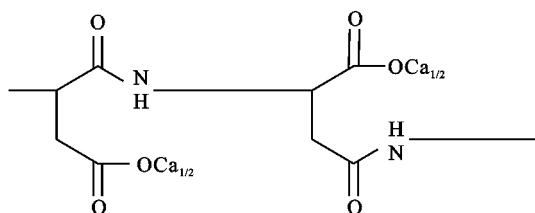
我国是全球最大的稻米生产国和消费国,水稻土地面积达 3.8 亿  $\text{hm}^2$ ,占世界水稻土地面积的 23%,占我国粮食耕地面积的 29%,年产量和消费量均占全球的 30%<sup>[1-2]</sup>。水稻是我国的第二大粮食作物,60%以上的人口以稻米为主食<sup>[1,3-5]</sup>。随着人口不断增长所带来的对粮食需求量的不断增加,很大程度促进了水稻田的氮肥施用量,从而引发一系列农业环境污染问题。因此,研究水稻田面水中氮素浓度的动态变化对改变我国“大药、大水、大肥”的传统农业种植方式,实现稳定和提高水稻产量、减少农业面源污染、实现农业可持续发展具有重要意义。

我国作为全球第一氮肥生产和消费大国,以世界 8%的耕地面积消耗了世界 30%以上的氮肥,粮食年总产量从 1980 年初的 3.25 亿 t 增加到 2008 年的 5.29 亿 t,增加了 63%,而氮肥施用量却增加近 2 倍。根据施氮对产量效应的报酬递减规律,大量氮肥的投入并没有使产量大幅度提高。我国的氮肥当季利用率仅为 33.3%,比发达国家低 10~15 个百分点<sup>[6-8]</sup>。氮肥的大量投入在提高粮食作物产量和农民经济收益的同时,也给环境带来了一些不利的影 响,特别是在集约化农业生产中,氮肥的过量投入所导致的经济损失和环境问题日益严重<sup>[4]</sup>。水稻生长多处于泡田状态,施氮后氮素在短期内很难被水稻充分吸收,当遭遇强降水或过量灌溉等情况时,田面水迅速上升,极易造成水稻田面水流失,导致大量氮素损失到环境中,从而造成巨大的经济损失,引起一系列环境问题,如温室气体排放、水体富营养化和土壤酸化等<sup>[9-11]</sup>。氮素流失是稻田面源污染的主要贡献者<sup>[12]</sup>。目前针对不同肥力条件下施氮后水稻田面水中氮素流失的动态变化特征,国内外学者进行了大量的研究,而一些可生物降解、环境友好型新肥料在水稻种植上的应用研究开展较少。

聚天门冬氨酸 (polyaspartic-acid, PASP),天然存在于软体动物和蜗牛类的壳中,是由天门冬氨酸单体的氨基和羧基缩水而成的聚合物,具有类似蛋白质的酰胺键结构,可完全生物降解,无毒无污染,是一类环境友好型绿色聚合物<sup>[13-16]</sup>。PASP 自 1850 年首次人工合成以来<sup>[17]</sup>,就逐渐受到各国农业部门的关注,其中以美国、德国、日本等国对 PASP 的研究最为活跃,而国内起步较晚,只是在近几年才开始对此方面进行研究<sup>[18-19]</sup>。水溶性聚天门冬氨酸具有阻垢、缓蚀、分散、螯合、保湿等多种功能,在农业上,可以作为

一种肥料增效剂,将水分中的营养元素富集到农作物根系周围,减少养分流失,并起到缓释、促进作物吸收、提高肥料利用率的作用<sup>[15,20]</sup>。

本研究以水稻“南粳 9108”为试验材料,分析 3 种浓度的 PASP—Ca 对施基肥后水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  和 TN 的浓度变化的影响,筛选出最优浓度的 PASP—Ca,为控制稻田氮素流失、保护水体环境提供科学参考。本研究所用 PASP—Ca 为德赛化工有限公司生产,黏度为 0.062,分子量为 6 934.51,结构为:



## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地点为安徽农业大学农萃园,采用桶栽水稻的方式。桶的直径 30 cm,高 40 cm。每桶供试土壤 15 kg,土壤为采自巢湖市烔炀镇的水稻土,PH 6.95,土壤有机质含量 21.22 g/kg,全氮含量 0.92 g/kg,全磷含量 0.41 g/kg,全钾含量 18.60 g/kg,有效磷含量 20.73 mg/kg,速效钾含量 141.67 mg/kg。

试验设 5 个处理,每个处理 4 次重复。试验处理分别为:空白处理(CK0);对照处理,单施尿素(CK);尿素+0.3% PASP—Ca(T1);尿素+0.6% PASP—Ca(T2);尿素+1% PASP—Ca(T3)。除 CK0 外,各处理均施用氮肥且施氮量相等,按照巢湖地区粮食丰产工程最优经济产量的施氮量,施基肥折合尿素 6  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。试验选择 3 种浓度水平的 PASP—Ca 为控源材料,添加量分别为 0.3%,0.6%,1.0%,即每 100 g 氮添加 PASP—Ca 为 0.3,0.6,1.0 g。将 PASP—Ca 于插秧前 1 天与氮肥混入田面水中,并搅拌均匀,1 天后选择长势良好,且一致的秧苗进行插秧,每盆 3 穴,呈三角形分布,苗间距 15 cm。水稻品种为“南粳 9108”,2017 年 6 月 13 日移栽,9 月 28 日收获。

### 1.2 监测与分析方法

田面水采集:在常规田间管理情况下,分别于施基肥当天(未开始施肥时)采集基础水样(作为第 0 天),以及施基肥后第 1,2,3,5,7,9,12,15 天的田面水样,每天早晨 10:00 进行采集。采集方法:采用医用注射器,每次抽取田面水样 50 mL,不扰动土层,注入塑料瓶中待测。

采用德国 AA3 连续流动分析仪测定田面水中总氮(TN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )的指标。

本试验数据统计分析和作图采用 Microsoft Excel 2010 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 PASP—Ca 对田面水中 N 素浓度变化的影响

2.1.1 PASP—Ca 对田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度变化的影响 由图 1 可知,各处理施氮后田面水  $\text{NH}_4^+$  浓度变化特点基本一致,即前 3 天快速上升,3 天后呈对数规律下降,最大值出现在第 3 天,在第 9 天达到相对稳定水平。但不同处理的上升速率和下降速率均因添加 PASP—Ca 浓度的不同而存在差异。

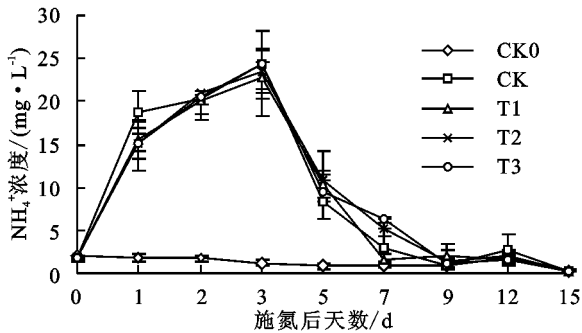


图 1 施氮后田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的动态变化

在施氮后 0~3 天, T1~T3 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度上升速率均低于 CK, 其中 T1 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度上升速率最慢, 为  $7.040 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 较 CK 降低  $6.36\%$ ; 其次是 T2 处理,  $\text{NH}_4^+$  浓度上升速率为  $7.217 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 较 CK 降低  $4.00\%$ ; 而 T3 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度上升速率与 CK 基本相同, 为  $7.514 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 仅比 CK 降低  $0.06\%$ 。试验表明, PASP—Ca 对施用基肥后水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的变化具有缓释作用, 可以有效地降低  $\text{NH}_4^+$  浓度上升速率, 但随着 PASP—Ca 浓度的增加, 其效果逐渐减弱, 添加  $0.3\%$  浓度水平的 PASP—Ca (T1 处理) 效果相对较好。

在施氮后 3~9 天, T1~T3 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度下降速率均低于 CK, 其中 T1 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度下降速率为  $3.452 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 较 CK 降低  $11.68\%$ ; 其次是 T2 处理,  $\text{NH}_4^+$  浓度下降速率为  $3.663 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 较 CK 降低  $6.30\%$ ; 而 T3 处理  $\text{NH}_4^+$  浓度下降速率与 CK 基本相同, 为  $3.879 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 仅比 CK 降低了  $0.78\%$ 。试验表明, PASP—Ca 对水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的变化具有缓释作用, 可以有效地降低  $\text{NH}_4^+$  浓度的下降速率, 但随着 PASP—Ca 浓度的增加, 其效果逐渐减弱, 添加  $0.3\%$  浓度水平的 PASP—Ca (T1 处理) 效果相对较好。

在施氮后 15 天内, 各施氮处理中, T1 处理  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度最低, 为  $6.999 \text{ mg}/\text{L}$ , 较 CK 低了  $3.88\%$ , 而

T2 处理和 T3 处理  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度高于 CK 处理。表明要想降低水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度, 必须合理控制 PASP—Ca 的添加量, 在 3 种浓度水平中,  $0.3\%$  浓度水平的 PASP—Ca (T1 处理) 效果相对较好。

同时, 将施氮后 15 天内各施氮处理的  $\text{NH}_4^+$  浓度值减去 CK0 处理的  $\text{NH}_4^+$  浓度值, 可作为消除外在条件对田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的影响。在施氮后第 9 天, 各施氮处理的  $\text{NH}_4^+$  浓度与 CK0 的  $\text{NH}_4^+$  浓度的差值接近于 0, 表明此时  $\text{NH}_4^+$  浓度接近空白水平, 从而消除施氮对其影响。

$\text{NH}_4^+$  变化的原因: 施氮后, 尿素水解需要一定的时间, 故施氮 3 天后  $\text{NH}_4^+$  的浓度达到最大值, 在水稻的吸收作用、氮素下渗、硝化作用和氨挥发等的共同作用下,  $\text{NH}_4^+$  浓度随时间而下降, 这与王强等<sup>[10]</sup>的研究一致。同时, PASP—Ca 对田面水中的氮素具有缓释作用, 故 T1、T2、T3 处理田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的动态变化速率低于 CK 处理。

运用方差分析检验了各施氮处理与空白处理 (CK0) 之间田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度的差异。结果表明, 各施氮处理田面水中  $\text{NH}_4^+$  的浓度显著高于 CK0 ( $P < 0.05$ ), 且与单施氮肥 (CK,  $0.027$ ) 相比, 添加 PASP—Ca 的处理 T1、T2、T3 分别为  $0.026$ ,  $0.017$ ,  $0.020$ , 显著性差异较大, 其中添加  $0.6\%$  浓度水平的 PASP—Ca (T2 处理) 差异最大。

2.1.2 PASP—Ca 对田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度变化的影响 由图 2 可知, 田面水中  $\text{NO}_3^-$  的浓度与  $\text{NH}_4^+$  相比, 相对较低, 最大值不超过  $2 \text{ mg}/\text{L}$ , 各处理施氮后田面水  $\text{NO}_3^-$  的浓度变化特点基本一致, 即呈现出波动且缓慢上升趋势, 最大值出现在第 9 天。T1~T3 处理  $\text{NO}_3^-$  浓度的最大值均低于 CK, 与 CK 相比, 降低了  $3.69\% \sim 5.37\%$ 。但各施氮处理与 CK0 (空白处理) 田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度的差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 这与王强<sup>[21]</sup>的研究一致, 原因可能是试验土壤本身肥力较高, 且基肥施用量相对较少, 施用尿素对提高水体中硝态氮的能力较弱, 致使施用施氮提高的硝态氮浓度大大减小。

在施氮后 15 天内, 各施氮处理中, T1 处理  $\text{NO}_3^-$  的平均浓度最低, 为  $0.396 \text{ mg}/\text{L}$ , 较 CK 低了  $24.83\%$ ; 其次是 T2 处理,  $\text{NO}_3^-$  的平均浓度为  $0.430 \text{ mg}/\text{L}$ , 较 CK 低了  $18.47\%$ ; 而 T3 处理与 CK 基本相同, 仅比 CK 低了  $2.28\%$ 。表明 PASP—Ca 可以有效地降低水稻田面水中  $\text{NO}_3^-$  的浓度, 但随着 PASP—Ca 浓度的增加, 其效果逐渐减弱, 添加  $0.3\%$  浓度水平的 PASP—Ca (T1 处理) 效果相对较好。同时, 将施氮后 15 天内各施氮处理的  $\text{NO}_3^-$  浓度值减去 CK0 处

理的  $\text{NO}_3^-$  浓度值,可作为消除外在条件对田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度的影响。在施氮后第 9 天,各施氮处理的  $\text{NO}_3^-$  浓度与 CK0 的  $\text{NO}_3^-$  浓度的差值接近于 0,表明此时  $\text{NO}_3^-$  浓度接近空白水平,从而消除施氮对其影响。

$\text{NO}_3^-$  变化的原因为:施氮后,尿素水解所形成的  $\text{NH}_4^+$  在硝化作用下逐渐转化为  $\text{NO}_3^-$ ,但最初硝化形成的  $\text{NO}_3^-$  的浓度与反硝化作用消耗的  $\text{NO}_3^-$  的浓度相差较小,故  $\text{NO}_3^-$  较低;当尿素大量分解为  $\text{NH}_4^+$  时,硝化作用强烈,田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度迅速增加,于施氮后第 9 天达到最大值;随后,由于田面水中  $\text{NH}_4^+$  和 TN 的浓度降低,硝化作用形成的  $\text{NO}_3^-$  减少,故  $\text{NO}_3^-$  随之下降,这与施泽升等<sup>[9]</sup>的观点一致;同时,PASP—Ca 对田面水中的氮素具有缓释作用,故 T1、T2、T3 处理田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度低于 CK 处理。

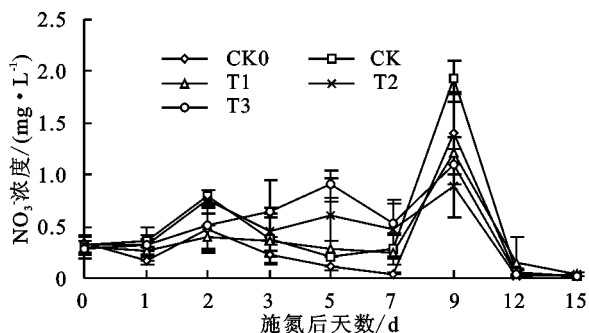


图 2 施氮后田面水中  $\text{NO}_3^-$  浓度的动态变化

2.1.3 PASP—Ca 对田面水中 TN 浓度的变化的影响 由图 3 可知,各处理施氮后田面水 TN 浓度变化特点基本一致,即:施氮后第 1 天达到最大值,随后迅速降低,在第 9 天达到相对稳定水平。但不同处理的下降速率以及最大值均因添加 PASP—Ca 浓度的不同而存在差异。

在施氮后 9 天内,T1~T3 处理 TN 浓度下降速率和最大值均低于 CK。其中,T1 处理 TN 浓度下降速率最慢,为  $4.806 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,较 CK 低了 16.25%,最大值为  $43.903 \text{ mg}/\text{L}$ ,较 CK 低了 13.14%;其次是 T2 处理,TN 浓度下降速率为  $4.981 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,较 CK 低了 13.20%,最大值为  $45.229 \text{ mg}/\text{L}$ ,较 CK 低了 10.52%;T3 处理 TN 浓度下降速率为  $5.104 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,较 CK 低了 11.07%,最大值为  $46.023 \text{ mg}/\text{L}$ ,较 CK 低了 8.95%。表明添加 PASP—Ca 可以有效地降低水稻田面水中 TN 浓度的下降速率和最大值,但随着 PASP—Ca 浓度的增加,PASP—Ca 所表现出的氮素缓释效果逐渐减弱,添加 0.3% 浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)效果相对较好。

在施氮后 15 天内,与 CK 相比,T1~T3 处理 TN 的平均浓度分别为  $20.077, 21.065, 21.324 \text{ mg}/\text{L}$ ,与 CK 相比,分别提升了 3.10%,5.48%,6.14%,

表明添加 PASP—Ca 可以提高水稻田面水中 TN 的平均浓度,随着 PASP—Ca 浓度的增加,其效果逐渐增强。

同时,将施氮后 15 天内各施氮处理的 TN 浓度值减去 CK0 处理的 TN 浓度值,可作为消除外在条件对田面水中 TN 浓度的影响。在施氮后第 9 天,各施氮处理的 TN 浓度与 CK0 的 TN 浓度的差值接近于 0,表明此时 TN 浓度接近空白水平,从而消除施氮对其影响。

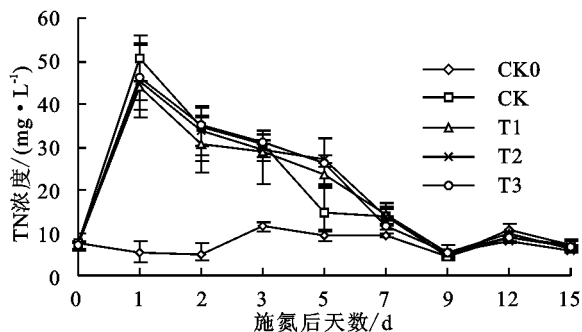


图 3 施氮后田面水中 TN 浓度的动态变化

运用方差分析检验了各施氮处理与空白处理(CK0)之间田面水中 TN 浓度的差异,结果表明,各施氮处理田面水中 TN 的浓度显著高于 CK0( $P < 0.05$ ),且与单施氮肥(CK,0.044)相比,添加 PASP—Ca 的处理 T1、T2、T3 分别为 0.024,0.026,0.027,显著性差异较大,其中添加 0.3% 浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)差异最大。

2.1.4 水稻田面水中 N 素浓度的动态变化模拟

根据现有的研究,适用于水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$  和 TN 浓度随时间的动态变化的模拟公式大多为非线性,具体为指数、对数、二次多项式和乘幂。根据模型比较,采用对数模型对田面水中  $\text{NH}_4^+$  和 TN 浓度随时间的动态变化进行拟合,拟合结果见表 1 和表 2。而  $\text{NO}_3^-$  浓度随时间的动态变化虽然可以确定其模拟公式为非线性,但难以应用上述公式进行拟合。从表 1 和表 2 的拟合公式可知,在水稻生长吸收氮素、氨挥发、硝化和反硝化作用等的共同影响下,施氮后田面水中 TN 的浓度随时间呈对数递减,而  $\text{NH}_4^+$  的浓度在施氮后 3 天内随时间呈对数增加,之后又随时间呈对数递减的趋势,这与王强等<sup>[10]</sup>、王小治等<sup>[22]</sup> 和张玉树等<sup>[23]</sup> 的研究结果一致。这种田面水氮素浓度随时间呈非直线型拟合模式的特征与水稻田净化田间循环用水中氮素滞留时间(RT)的特征曲线相类似<sup>[24]</sup>。

由表 1 可知, $\text{NH}_4^+$  浓度的上升过程中(0~3 天),CK~T3 的模拟公式中常数项差异不大,表明施氮肥前各处理  $\text{NH}_4^+$  初始浓度相似。CK~T3 的模拟公式中  $\ln(x)$  的系数均为正值,且添加 PASP—Ca 的处理中仅 T1 系数小于 CK;在  $\text{NH}_4^+$  浓度的下降

过程中(3~15天),CK~T3的模拟公式中常数项差异也不大, $\ln(x)$ 的系数均为负值,且T1系数最大,而 $\ln(x)$ 是单调增函数,表明添加0.3%浓度水平的PASP—Ca对 $\text{NH}_4^+$ 浓度的上升和下降过程起到了缓释作用。在3种浓度水平的PASP—Ca中,添加0.3%浓度水平的PASP—Ca(T1处理)效果相对较好,与前文结论相同。

表 1 施氮后田面水中  $\text{NH}_4^+$  浓度变化的动态模拟

处理	上升过程		下降过程	
	模拟公式	$R^2$	模拟公式	$R^2$
CK	$y=15.945\ln(x)+3.6338$	0.928	$y=-9.252\ln(x)+21.225$	0.883
T1	$y=15.392\ln(x)+2.8234$	0.972	$y=-8.969\ln(x)+20.679$	0.904
T2	$y=15.995\ln(x)+2.5837$	0.982	$y=-9.221\ln(x)+21.825$	0.952
T3	$y=16.337\ln(x)+2.4757$	0.991	$y=-9.500\ln(x)+22.241$	0.941

由表 2 可知,TN 浓度在施氮后呈对数递减趋势。与 CK 相比,T1~T3 的模拟公式中常数项较小,表明在相同施氮条件下,添加 PASP—Ca 可以有效地降低施氮后田面水中 TN 的初始浓度,但随着 PASP—Ca 浓度的增加,T1~T3 的模拟公式中常数项逐渐增大,初始浓度上升,逐渐接近单施尿素 CK 的常数值;同时,CK~T3 模拟公式中  $\ln(x)$  的系数均为负值,且与 CK 相比,T1~T3 模拟公式中  $\ln(x)$  的系数较大,表明在相同施氮条件下,添加 PASP—Ca 可以有效地降低施氮后田面水中 TN 浓度的下降速率,但随着 PASP—Ca 浓度的增加,T1~T3 的系数逐渐变小,下降速率上升,并逐渐接近单施尿素 CK 的系数值。所以,添加 PASP—Ca 可以有效地降低田面水中 TN 的初始浓度和下降速率,但并不意味着 PASP—Ca 浓度越高越好,0.3%浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)效果相对较好,与前文结论相同。

表 2 施氮后田面水中 TN 浓度变化的动态模拟

处理	模拟公式	$R^2$
CK	$y=-16.86\ln(x)+47.465$	0.936
T1	$y=-14.30\ln(x)+43.043$	0.949
T2	$y=-15.48\ln(x)+45.705$	0.941
T3	$y=-15.86\ln(x)+46.574$	0.940

## 2.2 PASP—Ca 对水稻田面水中 N 素分配的影响

### 2.2.1 水稻田面水中 $\text{NH}_4^+$ /TN 动态变化特征

$\text{NH}_4^+$  是施氮后尿素转化的关键物质,因此, $\text{NH}_4^+$ /TN 可以反映氮素转化与流失潜力的相对水平<sup>[24]</sup>。由图 4 可知,施氮后 15 天内, $\text{NH}_4^+$ /TN 约在施氮后第 3 天达到最大值,随后逐渐下降,这意味着水稻田面水中  $\text{NH}_4^+$  的相对流失潜力表现为逐渐减小,这时应重点监测 TN 的浓度。施氮后 15 天内,各处理比值的均值顺序为:CK0(0.185)<CK(0.362)<T3(0.365)<T2(0.368)<T1(0.371),表明施氮能够显著增加 TN 中

$\text{NH}_4^+$  的比重,且在相同施氮条件下,添加 0.3%浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)效果相对较好。

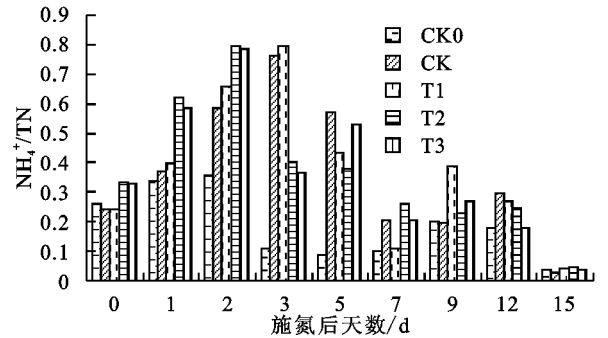


图 4 施氮后田面水中  $\text{NH}_4^+$ /TN 动态变化特征

### 2.2.2 水稻田面水中 $\text{NO}_3^-$ /TN 动态变化特征

由图 5 可知,施氮后 15 天内, $\text{NO}_3^-$ /TN 在施氮后呈波动且缓慢上升,在 9 天达到最大值后下降。这是因为施氮后期田面水中  $\text{NH}_4^+$  积累量增多,在硝化作用下大量转化为  $\text{NO}_3^-$ 。施氮后 15 天内, $\text{NO}_3^-$ /TN 几乎均在 0.1 以下,这说明  $\text{NO}_3^-$  不是施氮后污染水体的主要氮素形态,这与王强等<sup>[25]</sup>的观点一致。各处理比值的均值顺序为:T1(0.039)<T2(0.041)<T3(0.047)<CK(0.061)<CK0(0.068),表明施氮能够降低 TN 中  $\text{NO}_3^-$  的比重,且在相同施氮条件下,添加 0.3%浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)效果相对较好。

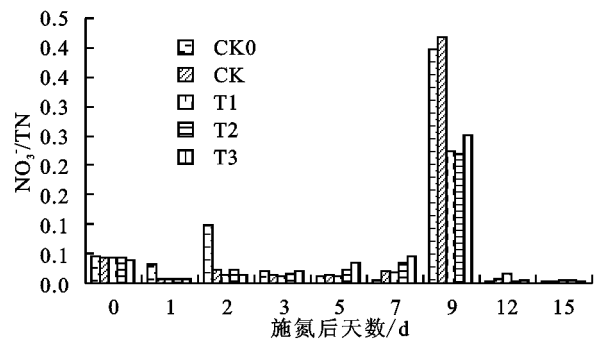


图 5 施氮后田面水中  $\text{NO}_3^-$ /TN 动态变化特征

### 2.2.3 水稻田面水中 $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$ /TN 动态变化特征

$\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  是当前农业面源污染监测的主要氮素形态,研究  $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$ /TN 的动态变化具有重要的意义。由图 6 可知,施氮后 15 天内, $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$ /TN 变化的总体趋势是先升后降,约在施氮后第 3 天达到最大值,且所有比值多数处于 0.5 以上,这与  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  是当前水体污染的主要氮素形态观点一致。施氮 15 天内,所有比值的均值顺序为:CK0(0.248)<T1(0.392)<T3(0.415)<T2(0.419)<CK(0.422),表明施氮能够增加 TN 中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的比重,但在相同施氮条件下,添加 PASP—Ca 可以有效的降低 TN 中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的比重,且 0.3%浓度水平的 PASP—Ca(T1 处理)效果相对较好。

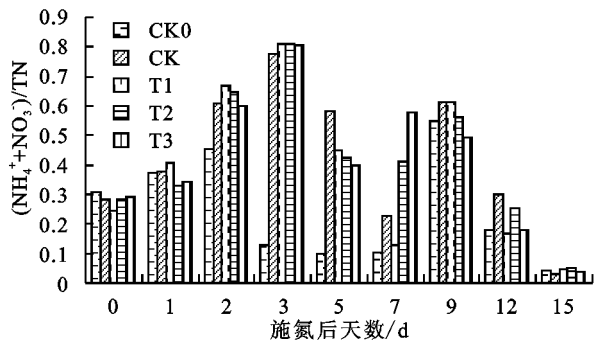


图 6 施氮后田面水中 $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)/\text{TN}$ 动态变化特征

### 3 结论

(1)施氮后,田面水中 $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 分别于第1,3,9天达到最大值,随后逐渐降低。 $\text{NH}_4^+/\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-/\text{TN}$ 和 $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)/\text{TN}$ 的变化趋势也是先升后降。

(2) $\text{NH}_4^+$ 浓度的最大值为 $24.338 \text{ mg/L}$ , $\text{TN}$ 浓度的最大值为 $50.546 \text{ mg/L}$ ,而 $\text{NO}_3^-$ 浓度的最大值仅为 $1.933 \text{ mg/L}$ ,且 $\text{NO}_3^-/\text{TN}$ 多在0.1以下, $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)/\text{TN}$ 多在0.5以上。因此,可以将 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{TN}$ 作为农田水污染防治的主要监测指标, $\text{NO}_3^-$ 作为辅助指标。

(3)施氮后15天内,添加一定浓度的PASP—Ca能够对田面水中氮素浓度的变化起到缓释作用,其中0.3%浓度水平的PASP—Ca效果相对较好,田面水中 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{TN}$ 的下降速率分别为 $3.452 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 和 $4.806 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,与单施氮肥相比,降低了11.68%和16.25%。同时, $\text{NH}_4^+$ 的平均浓度为 $6.999 \text{ mg/L}$ ,较CK低了3.88%。 $\text{NO}_3^-$ 的平均浓度为 $0.396 \text{ mg/L}$ ,较CK低了24.83%。 $\text{TN}$ 的平均浓度为 $20.077 \text{ mg/L}$ ,较CK提升了3.10%。

(4)施氮后,田面水中 $\text{TN}$ 浓度随时间呈对数递减,而 $\text{NH}_4^+$ 浓度在施氮后3天内随时间呈对数递增,之后又随时间呈对数递减趋势, $\text{NO}_3^-$ 浓度随时间的动态变化虽然可以确定其模拟模式为非直线型,但并未找到适合模拟模式进行拟合。

(5)施氮后9天内田面水中三氮的含量较高,如遇突发暴雨,极易产生地表径流,造成农业面源污染。在施氮后第9天,各施氮处理的三氮浓度与CK0浓度的差值接近于0,可认为此时三氮浓度接近空白水平,从而消除施氮对其影响。因此,可将施氮后9天内作为预防稻田氮素流失的关键期。

### 4 讨论

本文以桶栽试验的方式分析了3种浓度水平的PASP—Ca对施基肥后水稻田面水中三氮浓度变化的影响,但在试验开展过程中,未进行试验设计去除其他影响因素。温度、风速和降水等气象因素对稻田氮素流失有一定的影响<sup>[22]</sup>,同时,PASP—K、

PASP—Zn和PASP— $\text{NH}_4^+$ 等对稻田氮素流失也有一定的影响<sup>[26]</sup>。因此,在以后的试验设计中可以相应增加几种PASP处理,同时适当加入气象因素的监测,并结合田间试验进行验证。

#### 参考文献:

- [1] 方福平,程式华. 水稻科技与产业发展[J]. 农学报, 2018,8(1):92-98.
- [2] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Optimized nitrogen managements and polyaspartic acid urea improved dry matter production and yield of *indica* hybrid rice[J]. Soil and Tillage Research, 2015,145(1):1-9.
- [3] 刘珍环,李正国,唐鹏钦,等. 近30年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. 地理学报, 2013,68(5):680-693.
- [4] 赵宏伟,沙汉景. 我国稻田氮肥利用率的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2014,45(2):116-122.
- [5] 袁隆平. 发展超级杂交水稻保障国家粮食安全[J]. 杂交水稻, 2015,30(3):11-12.
- [6] 梁晓红,刘静,曹雄. 施氮量对酿造高粱产量和氮素利用率的影响[J]. 华北农学报, 2017,32(2):179-184.
- [7] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
- [8] 朱筱婧,李晓明,张雪. 低碳农业背景下提高肥料利用率的技术途径[J]. 江苏农业科学, 2010(4):15-17.
- [9] 施泽升,续勇波,雷玉坤,等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013,32(4):838-846.
- [10] 王强,杨京平,沈建国,等. 稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2003,17(3):51-54.
- [11] 张亚莉,陈德州,徐梅宣,等. 施肥量和降雨对水稻田氮流失影响的试验研究[J]. 现代农业装备, 2015(2):32-36.
- [12] 赵峥,吴淑杭,周德平,等. 基于DNDC模型的稻田氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016,35(12):2405-2412.
- [13] Lü S, Chen F, Gao C, et al. Multifunctional environmental smart fertilizer based on L-aspartic acid for sustained nutrient release[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016,64(24):4965-4974.
- [14] 李建刚,韩卫红,马翔龙,等. 不同品牌“聚天门冬氨酸”在玉米上研究初报[J]. 中国农村小康科技, 2007(2):74-75.
- [15] 杨玉华,徐建宝,王小龙,等. 多元聚天门冬氨酸水处理的合成及阻碳酸钙垢性能研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013,32(3):150-154.
- [16] 张小燕. 聚天门冬氨酸对紫花苜蓿的生长、产量和品质的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2010.
- [17] Schwamborn M. Chemical synthesis of polyaspartates: A biodegradable alternative to currently used polycarbonate homo- and copolymers[J]. Polymer Degradation and Stability, 1998,59(1):39-45.

- 土壤硝态氮和铵态氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 68-71.
- [10] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 627-633.
- [11] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- [12] Li M, Wang D Z, Guo X S, et al. Effects of controlled-release nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(4): 607-610.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-58.
- [14] Singh R P, Srivastava H S. Increase in glutamate synthase (NADH) activity in maize seedlings in response to nitrate and ammonium nitrogen [J]. *Physiologia Plantarum*, 1986, 66(3): 413-416.
- [15] 吴良欢, 蒋式洪, 陶勤南. 植物转氨酶(GOT和GPT)活度比色测定方法及其应用[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 41-43.
- [16] Loulakakis C A, Roubelakis-Angelakis K A. Intracellular localization and properties of NADH-glutamate dehydrogenase from *Vitis vinifera* L.; Purification and characterization of the major leaf isoenzyme[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(231): 1223-1230.
- [17] 苏琳, 董志新, 邵国庆, 等. 控释尿素施用方式及用量对夏玉米氮肥效率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 915-920.
- [18] 朱宝国, 张春峰, 于忠和, 等. 控释尿素和普通尿素配施对土壤氮含量及大豆产量和品质影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 140-143.
- [19] 刘敏, 宋付朋, 卢艳艳. 硫膜和树脂膜控释尿素对土壤硝态氮含量及氮素平衡和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 541-548.
- [20] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706.
- [21] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 控释尿素与常规尿素配施比例对甜玉米产量和氮肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 622-631.
- [22] Zhao B, Dong S T, Wang K J, et al. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [23] 闫童, 丁文峰, 曹永贞, 等. 控释氮肥对夏玉米氮素积累及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 60-64.
- [24] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 190-195.
- [25] 王永军, 孙其专, 杨今胜, 等. 不同地力水平下控释尿素对玉米物质生产及光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2233-2240.
- [26] Kobayashi A, Fujisawa E, Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods; 2. Release of nutrients affected by the permeability of water vapor through coating material [J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 68: 14-22.
- [27] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.
- (上接第213页)
- [18] 张侃. 聚天门冬氨酸的合成与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [19] 张小燕, 马晖玲, 马政生. 聚天门冬氨酸对紫花苜蓿生物学性状及产量的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 114-118.
- [20] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 30-38.
- [21] 王强. 稻田分次施氮对田面水和渗漏水中氮素变化特征的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [22] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 等. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 852-856.
- [23] 张玉树, 丁洪, 秦胜金, 等. 农业生态系统中氮素反硝化作用与 $N_2O$ 排放研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 253-259.
- [24] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system [J]. *Water Research*, 1997, 31(11): 2685-2692.
- [25] 王强, 杨京平, 陈俊, 等. 非完全淹水条件下稻田表面水体中三氮的动态变化特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1182-1186.
- [26] 陈秉翼. 聚天门冬氨酸/盐(PASP)尿素与改性尿素对农作物增效机制研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.