徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 等. 聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1696-1703.
XU Jia-yi, NIU Shi-wei, SUI Shi-jiang, et al. Effects of polyaspartic-acid/salt on nitrogen loss from paddy surface water and nutrients utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1696-1703.

聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响

徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 张 鑫, 叶 鑫, 蔡广兴, 王 娜*

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161)

摘 要: 为探究聚天门冬氨酸/盐(PASP)对稻田氮素流失及水稻养分利用的调控作用,本研究以普通聚天门冬氨酸钙/锌盐和改性聚天门冬氨酸钙/锌盐为供试材料,在干旱棚条件下,通过水稻桶栽试验研究了PASP对水稻田面水氮浓度变化和水稻生长、氮磷钾养分吸收及土壤养分的影响。结果表明,与常规尿素对照处理相比,各聚天门冬氨酸/盐处理降低了田面水氮素浓度,尤其在施肥后第3 d和第5 d,铵态氮和硝态氮浓度显著降低了16.8%~44.7%和20.4%~42.8%。聚天门冬氨酸/盐的施用有利于水稻生长及产量提高,水稻株高、有效穗数、秸秆产量和籽粒产量以及氮、磷、钾养分吸收量均表现出增加趋势,其中改性聚天门冬氨酸钙盐处理显著增加了水稻株高(12.0%)、有效穗数(13.8%)、秸秆产量(9.26%)及籽粒氮含量(8.32%),氮肥表观利用率提高了8.4%,但差异不显著。聚天门冬氨酸/盐处理土壤氮含量也有所增加,尤其是NH_4^+-N含量显著增加,但土壤有效磷和速效钾含量受影响不大。综合水稻产量、养分吸收利用以及田面水氮素流失风险,改性聚天门冬氨酸/盐处理效果优于普通聚天门冬氨酸/盐,且改性聚天门冬氨酸钙盐处理最好。田间应用效果有待进一步验证。

关键词: 聚天门冬氨酸/盐(PASP);水稻;田面水氮;养分利用

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)08-1696-08 doi:10.11654/jaes.2019-0229

Effects of polyaspartic-acid/salt on nitrogen loss from paddy surface water and nutrients utilization

XU Jia-yi, NIU Shi-wei, SUI Shi-jiang, ZHANG Xin, YE Xin, CAI Guang-xing, WANG Na*

(Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: To investigate the effects of polyaspartic-acid/salt(PASP) on paddy nitrogen(N) loss and nutrients utilization, PASP-Ca/Zn and modified PASP-Ca/Zn were used for pot experiments conducted in a rainproof tank. We evaluated the impacts of PASP on N concentrations in surface water, rice growth and its N, P, K uptake, and soil nutrients. The results showed that PASP treatments decreased NH_4^+-N, NO_3^--N, and TN concentrations of surface water, with 16.8%~44.7% lower NH_4^+-N and 20.4%~42.8% lower NO_3^--N in PASP than the control in day 3 d and 5 d after fertilization, respectively. Addition of PASP promoted rice growth and yield; modified PASP-Ca/Zn significantly increased rice height(12.0%), productive tillers(13.8%), straw yield(9.26%), and grain N concentration(8.32%), with 8.4% higher N use efficiency. NH_4^+-N concentrations in paddy soil were significantly increased by 28.4%~62.2% in PASP treatments compared to the control, whereas no significant difference in soil available P and K was observed. Considering rice yield, nutrients utilization, and N loss risk of surface water, modified PASP-Ca/Zn was more effective than PASP-Ca/Zn. In this study, modified PASP-Ca treatment was evaluated to be the best, with grain yield 9.21% greater and NH_4^+-N of the surface water 44.7% lower than the control. However, PASP application effects need to be verified further by field experiments.

Keywords: polyaspartic-acid/salt(PASP); paddy rice; nitrogen of paddy surface water; nutrient utilization

收稿日期: 2019-03-05 **录用日期:** 2019-05-17

作者简介: 徐嘉翼(1989—),女,辽宁沈阳人,助理研究员,主要从事农业面源污染防控研究。E-mail:x_jy0906@163.com

***通信作者:** 王 娜 E-mail:wnsxh1999@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800506);中央引导地方科技发展专项(2019416031)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0800506);The National Government Guiding Local Science and Technology Development Program(2019416031)

我国是世界第一大氮肥消费国，也是全球水稻生产大国。我国水稻生产中氮肥消耗量约占世界氮肥消耗总量的7%[1]，远超其他国家稻田施肥水平，然而我国水稻氮肥当季利用率仅为30%左右，低于世界平均水平[2]。研究表明，稻田施氮后，短期内氮素很难被水稻秧苗充分吸收，田面水氮素浓度迅速上升[3-4]，加大氨挥发流失风险，若遭遇连续强降水或过量灌溉，极易引发水稻田面水氮素流失，这不仅造成氮肥经济损失，而且影响水稻生长及产量，还会导致温室气体排放、农田面源污染等一系列环境问题[5-6]。面对我国耕地不断减少而粮食需求量却不断增加的严峻形势，研究如何提高氮肥的增产效果及作物利用率、减少氮肥向环境流失，对实现农业可持续发展及生态环境改善具有重要意义。

聚天门冬氨酸/盐（PASP）是一种环境友好型绿色聚合物，由天门冬氨酸单体的羧基和氨基进行分子间脱水缩合而成，具有良好的螯合、分散和吸附等性能，在农业生产中常被用作肥料增效剂和缓释剂[7-8]。普通PASP性能有限，通过化学改性将PASP分子链上引入官能团，使原来主链上无活性基团的聚合物功能化，或者改变PASP分子链的空间分布，延长分子链或形成三维网状结构[9-11]，合成后的改性PASP效能显著增强。作为肥料增效剂，PASP可富集土壤中氮、磷、钾等养分供给植物，有利于作物养分吸收，促进作物生长，提高产量与肥料利用率[8]。研究发现，与普通尿素相比，等量的PASP螯合尿素可使玉米盆栽生物产量增加13.4%[12]，且PASP螯合尿素减量30%条件下，玉米产量不减反而略有增加，增产0.9%~3%[13]。在小麦、生菜和黄瓜等多种作物上的应用也表明[14-16]，PASP促进了作物养分吸收，改善了作物养分平衡，提高了肥料利用率，对于产量提高和品质改善具有明显效果。目前，关于PASP对农作物的产量效应及养分增效机制已有较多研究，但是针对PASP应用于农田面源污染的研究较少。董世杰等[17]研究了不同浓度水平的聚天门冬氨酸钙盐对田面水氮素浓度变化的影响，发现0.3%浓度水平的聚天门冬氨酸钙盐对田面水氮素浓度的控制效果较好。陈秉翼[14]通过室内土柱淋溶模拟的方法研究了PASP对氮淋溶的影响，研究发现PASP处理有效降低了土壤铵态氮的淋溶浓度及流失量，同时抑制了铵态氮向硝态氮转化，延缓了硝态氮的淋溶发生。然而，PASP在主要粮食作物水稻种植上，尤其是经过化学改性合成的高性能PASP，能否起到增产减排的作用效果尚未清楚。为此，本研究选用0.3%普通聚天门冬氨酸钙/锌盐和0.3%改性聚天门冬氨酸钙/锌盐，在干旱棚条件下通过桶栽水稻试验研究PASP对水稻生长、养分吸收利用及田面水氮素动态变化和土壤肥力的影响，旨在为肥料增效剂PASP应用于水稻生产及氮素面源污染防控上提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为水稻土，取自盘锦市盘山县坝墙子镇水稻田，耕层（0~20 cm）土壤理化性质为总氮1.58 g·kg^{-1}，总磷1.17 g·kg^{-1}，总钾28.7 g·kg^{-1}，碱解氮71.0 mg·kg^{-1}，有效磷18.9 mg·kg^{-1}，速效钾154 mg·kg^{-1}，有机质17.7 g·kg^{-1}，pH 7.8。供试氮肥为尿素（N 46%），磷肥为过磷酸钙（P_2O_5 12%），钾肥为硫酸钾（K_2O 50%）。选用德赛化工有限公司生产的PASP-Ca和PASP-Zn作为普通PASP材料，并在此基础上由实验室合成改性PASP-Ca和改性PASP-Zn。栽种水稻品种为盐丰47号。塑料桶规格为直径30 cm、高40 cm，底部密封。

1.2 试验设计

本试验采用桶栽水稻的方式，于2018年5月至10月在辽宁省农业科学院室外盆栽场干旱棚中进行，降雨时期干旱棚起到防雨遮蔽作用，避免了降雨对田面水水深及氮浓度的影响，而在非降雨时期，所有处理均处于自然光照与气温条件下。试验所在地区位于辽河平原中部，属于暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温8.2 ℃，年均降雨量706 mm，年平均日照时数2482 h。试验设置6个处理（表1），T1为无氮空白处理，T2为常规尿素处理，T3为常规尿素+普通聚天门冬氨酸钙盐，T4为常规尿素+普通聚天门冬氨酸锌盐，T5为常规尿素+改性聚天门冬氨酸钙盐，T6为常规尿素+改性聚天门冬氨酸锌盐，每个处理4次重复，共24桶，随机排列。氮、磷、钾肥均按照田间施肥量（N 270 kg·hm^{-2}、P_2O_5 90 kg·hm^{-2}、K_2O 90 kg·hm^{-2}）的2.5倍一次性基施，每桶化肥用量为N 4.5 g，P_2O_5 1.5 g，K_2O 1.5 g，其中T1处理仅施磷、钾肥。所有PASP盐添加量均按尿素施用量的0.3%计算。

将化肥与15.0 kg风干水稻土混匀后装入桶中，立即灌水浸泡，然后加入PASP盐溶液并均匀搅拌表层水土（0~5 cm）。静置1 d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。采用常规水分管理，即5月9日至6月25日保

表1 试验处理

Table 1 Experiment treatments

编号 Number	处理描述 Treatments description
T1(CK)	无氮空白
T2(N)	常规尿素
T3(N+PASP-Ca)	常规尿素+0.3%普通聚天门冬氨酸钙盐
T4(N+PASP-Zn)	常规尿素+0.3%普通聚天门冬氨酸锌盐
T5(N+MPASP-Ca)	常规尿素+0.3%改性聚天门冬氨酸钙盐
T6(N+MPASP-Zn)	常规尿素+0.3%改性聚天门冬氨酸锌盐

持3 cm水层，6月25日至7月10日采用干湿交替方式，7月10日至9月20日保持浅水层(2~3 cm)，9月20日之后自然落干，且各处理田面水高度须保持一致。

1.3 样品采集与测定

施肥后第1、2、3、5、7、9、12、15 d每日上午10:00使用注射器对田面水进行取样(25 mL)，水样经0.45 μm滤膜过滤后采用AA3流动分析仪(Bran Luebbe，德国)测定总氮、铵态氮、硝态氮浓度。水稻成熟后，沿土表收割地上部分，测量每桶水稻株高、有效穗数、秸秆生物量和籽粒生物量，并烘干粉碎秸秆和籽粒样品，采用凯氏定氮法测定全氮、钼锑抗比色法测定全磷、火焰光度法测定全钾含量。水稻收获后，采用3点混合法采集0~15 cm土层土样，土壤鲜样采用紫外分光光度计法测定硝态氮，靛酚蓝比色法测定铵态氮，风干土壤样品通过凯氏定氮法测定全氮，$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定速效磷，NH_4OAC浸提-火焰光度计法测定速效钾[18]。每桶水稻的氮肥表观利用率依据下式计算[19]：

氮肥表观利用率=(施氮处理水稻氮吸收量-不施氮处理水稻氮吸收量)/施氮量×100%

1.4 数据处理与分析

采用SigmaPlot 13.0软件进行数据处理与作图，并采用SAS软件对不同处理组之间的数据进行差异显著性分析，即采用方差分析法(ANOVA)处理数据并通过Tukey test检验数据的显著性差异($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 PASP对水稻田面水氮素浓度的影响

2.1.1 PASP对水稻田面水NH_4^+-N浓度的影响

各施氮处理田面水NH_4^+-N浓度均在施肥后第3 d达到峰值，而后迅速下降，于第9 d降至峰值的15.1%~24.1%后趋于稳定(图1)。施肥后一周内，添加PASP处理(T3~T6)田面水NH_4^+-N浓度比常规尿素处理(T2)降低5.82%~55.3%；尤其在NH_4^+-N峰值期，T3、T4、T5和T6处理NH_4^+-N浓度比T2处理显著减少了16.8%、21.8%、44.7%和39.9%，说明添加PASP有效降低了田面水NH_4^+-N浓度，这可能是因为PASP分子中的羧基基团可与NH_4^+发生螯合，延缓了施肥后田面水NH_4^+-N浓度过快升高。

不同PASP处理之间，改性PASP处理田面水NH_4^+-N浓度低于普通PASP处理。施肥后一周内，T5处理田面水NH_4^+-N浓度比T3处理减少了4.92%~45.9%，T6处理田面水NH_4^+-N浓度比T4处理减少了18.5%~42.2%，说明改性PASP处理比普通PASP处理更有利于降低田面水NH_4^+-N浓度，这可能是因为改性PASP分子结构更复杂，螯合性能更强。

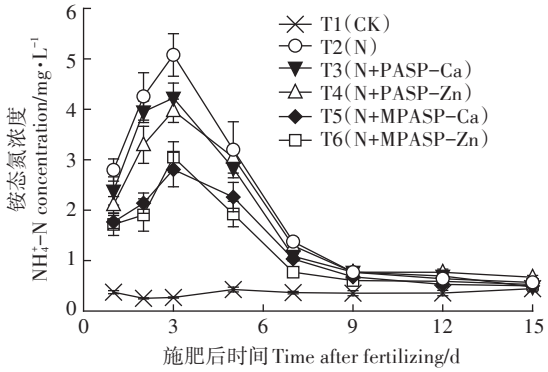

图1 施肥后田面水NH_4^+-N浓度变化

Figure 1 NH_4^+-N concentrations in the surface water after fertilization

2.1.2 PASP对水稻田面水NO_3^--N浓度的影响

与田面水NH_4^+-N浓度变化趋势不同，各施氮处理田面水NO_3^--N浓度峰值出现时间相对滞后，于施肥后第5 d达到峰值，这与PASP抑制硝化作用有关，而后逐渐下降趋于平稳(图2)。施肥后第3 d，常规尿素处理(T2)田面水NO_3^--N浓度高达峰值的94.5%，而添加PASP处理(T3~T6)田面水NO_3^--N浓度为峰值的66.1%~76.8%，说明PASP抑制了田面水NO_3^--N浓度过快升高。

施肥后一周内，T3、T4、T5、T6处理田面水NO_3^--N浓度比T2处理降低了20.4%~57.2%；尤其在NO_3^--N峰值期，T3、T4、T5和T6处理比T2处理显著减少了22.4%、20.4%、42.8%和39.1%，说明添加PASP有效降低了田面水NO_3^--N浓度。不同PASP处理之间，改性PASP处理田面水NO_3^--N浓度低于普通PASP处理。施肥后一周内，T5处理田面水NO_3^--N浓度比T3处理减少了3.00%~26.4%，T6处理田面水NO_3^--N浓度比T4处理减少了10.9%~32.7%，说明改性PASP处理比普

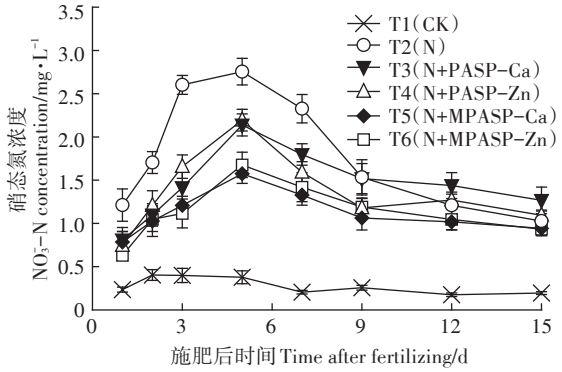

图2 施肥后田面水 NO_3^--N 浓度变化

Figure 2 NO_3^--N concentrations in the surface water after fertilization

通PASP处理更有利于降低田面水 NO_3^--N浓度。

2.1.3 PASP对水稻田面水TN浓度的影响

各施氮处理TN浓度在施肥后第1 d迅速升至峰值的75.4%~84.2%，并在第3 d达到峰值，而后迅速下降，至第9 d后趋于稳定（图3）。施肥后一周内，T3、T4、T5和T6处理田面水TN浓度比T2处理降低了9.50%~25.8%、5.42%~22.7%、8.36%~38.4%和2.96%~30.6%。改性PASP处理田面水TN浓度低于普通PASP处理，施肥后5 d内，T5处理田面水TN浓度比T3处理减少了16.5%~24.8%，T6处理田面水TN浓度比T4处理减少了6.51%~16.2%。试验表明，添加PASP能够降低田面水TN浓度，且改性PASP处理效果更好。

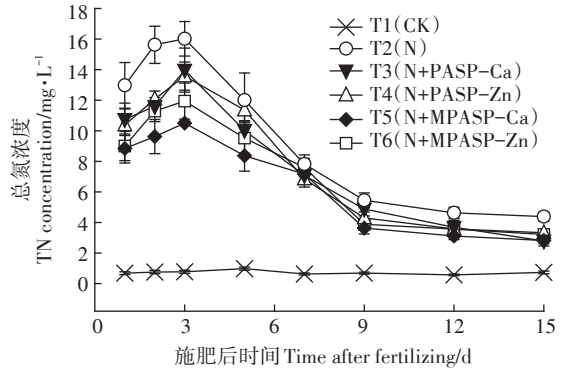

图3 施肥后田面水TN浓度变化

Figure 3 TN concentrations in the surface water after fertilization

2.2 PASP对水稻生长及产量的影响

施肥处理（T2、T3、T4、T5、T6）水稻株高、有效分蘖数、秸秆产量和籽粒产量均显著高于无氮空白组（T1）（表2），说明施用氮肥是水稻增产的关键因素。聚天门冬氨酸/盐处理（T3、T4、T5、T6）水稻株高、有效分蘖数、秸秆产量和籽粒产量均高于常规尿素处理（T2），说明聚天门冬氨酸/盐促进了水稻生长及产量提高。

与T2相比，T3处理显著增加了水稻株高（8.26%）和有效分蘖数（12.0%），秸秆和籽粒产量也有所提高（无显著差异）；T5处理不仅显著增加了水稻株高（12.0%）和有效分蘖数（13.8%），而且秸秆产量也显著提高了9.26%。这表明，不论添加普通还是改性的聚天门冬氨酸钙盐均显著提高了水稻株高和有效分蘖数，虽未实现籽粒显著增产，但仍有助于水稻地上部生物量增加。T4和T6处理水稻生长及产量指标均高于T2，其中T6处理秸秆产量最高，这可能因为本试验水稻土有效锌含量（0.88 mg·kg^{-1}）较低，施用聚天门冬氨酸锌盐能够补充土壤 Zn^{2+} 养分供给不足，为水稻生长提供所需营养。

改性PASP处理（T5、T6）水稻生长及产量指标优于普通PASP处理（T3、T4），其中T5处理水稻秸秆和籽粒产量比T3增加了5.36%和5.56%，T6处理水稻秸秆和籽粒产量比T4增加了5.26%和4.09%，且T5处理水稻生长指标总体表现最好，说明改性聚天门冬氨酸/盐更有利于促进水稻生长及产量提高，尤其是改

表2 不同处理水稻株高、有效分蘖数及产量

Table 2 Rice height, effective tiller number, and yield among the different treatments

处理 Treatments	株高 Height/cm	有效分蘖数 Productive tillers/穗·株$^{-1}$	秸秆产量 Straw yield/g·pot^{-1}	籽粒产量 Grain yield/g·pot^{-1}
T1(CK)	72.0±3.16c	3.33±0.33c	62.5±4.33c	55.1±6.45b
T2(N)	87.8±4.79b	16.7±0.88b	135±4.66b	152±14.6a
T3(N+PASP-Ca)	95.0±1.41a	18.7±1.15a	140±10.0ab	158±21.0a
T4(N+PASP-Zn)	92.8±5.74ab	17.4±1.17ab	143±6.61ab	154±25.1a
T5(N+MPASP-Ca)	98.3±5.32a	19.0±0.58a	148±4.33a	166±11.3a
T6(N+MPASP-Zn)	94.8±2.50a	17.9±1.26ab	150±10.0a	160±19.0a

注：同列不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Notes: The different letters in a column indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

性聚天门冬氨酸钙盐的效果最好。

2.3 PASP对水稻养分吸收及氮肥利用率的影响

聚天门冬氨酸/盐处理水稻籽粒和秸秆氮含量比常规尿素处理有所增加，尤其是T5处理籽粒氮含量显著增加了8.32%（表3）；T3、T4、T5处理水稻籽粒和秸秆磷含量也有所增加，这表明在聚天门冬氨酸/盐的施用下，水稻氮、磷含量呈现出增加趋势，尤其改性聚天门冬氨酸钙盐显著增加了籽粒氮含量，而水稻钾含量受影响不大。水稻氮、磷、钾吸收量也呈现出相似趋势，T3、T4、T5、T6处理籽粒氮、磷、钾吸收量比T2增加了7.18%~18.9%、3.75%~17.3%、1.34%~5.38%，秸秆氮、磷、钾吸收量也有所增加（图4），说明聚天门冬氨酸/盐有利于水稻养分吸收利用。聚天门冬氨酸/盐的施用提高了水稻氮吸收量，氮肥表观利用率相应地有所提高，T3、T4、T5、T6处理氮肥表观利用率比T2提高了2.5%~8.4%，但未达到显著水平（图5）。T5处理水稻氮、磷、钾吸收量最高，且氮肥表观利用率最高（41.7%）。这表明聚天门冬氨酸/盐具有提高氮肥表观利用率的潜力，且改性聚天门冬氨酸钙盐在促进水稻营养吸收和改善氮肥利用率方面潜力最大。

2.4 PASP对水稻土壤养分含量的影响

施肥处理（T2、T3、T4、T5、T6）土壤TN、NH_4^+-N和NO_3^--N含量均高于无氮空白组（T1），见表4。与常规尿素（T2）相比，PASP处理（T3、T4、T5、T6）土壤NH_4^+-N含量显著增加了28.4%~62.2%，这可能与PASP对土壤养分离子吸附密切相关。土壤NH_4^+-N含量增加为水稻提供了更多养分，正如2.2和2.3结果显示PASP处理水稻产量及养分吸收量均呈现增加趋势；土壤TN、NO_3^--N含量增加了0.69%~9.72%和5.81%~12.1%，但未达到显著水平。

与土壤氮素养分变化不同，各处理间土壤有效磷和速效钾养分含量无显著差异，且与T1、T2处理相比，PASP处理（T3、T4、T5、T6）土壤有效磷和速效钾养分含量有所降低，这可能是因为添加PSAP促进了水稻生长及磷钾养分吸收，加快了水稻对土壤有效磷、速效钾养分的消耗利用，但总体上添加PASP处理对土壤有效磷和速效钾养分含量无显著影响。

3 讨论

施氮处理田面水氮素浓度（NH_4^+-N、NO_3^--N和TN）显著高于无氮空白处理，说明氮肥投入是水稻田面水氮素增加的直接原因[20-21]。水稻施肥后，田面水TN、NH_4^+-N和NO_3^--N浓度分别在第3 d和5 d达到峰值，而后下降至第9 d趋于稳定，可将施肥后9 d内设为控制水稻田面水氮素流失的关键时期，这与前人[17,22]研究结果一致。

表3 不同处理水稻氮、磷、钾养分含量（$g\cdot kg^{-1}$）

Table 3 Nitrogen（N），phosphorus（P），and potassium（K）concentrations in rice（$g\cdot kg^{-1}$）

处理 Treatments	籽粒养分含量Grain nutrients concentrations			秸秆养分含量Straw nutrients concentrations		
	氮	磷	钾	氮	磷	钾
T1（CK）	8.80±0.74c	4.03±0.27a	4.05±0.11a	4.76±0.62b	2.46±0.30b	13.9±2.17a
T2（N）	9.97±0.38b	4.01±0.19a	4.13±0.09a	5.72±0.63a	2.70±0.18ab	15.4±0.85a
T3（N+PASP-Ca）	10.3±0.34ab	4.28±0.10a	4.08±0.06a	5.95±0.50a	2.83±0.10ab	15.3±2.02a
T4（N+PASP-Zn）	10.5±0.44ab	4.23±0.06a	4.15±0.40a	5.58±0.69a	2.97±0.27ab	14.9±2.14a
T5（N+MPASP-Ca）	10.8±0.42a	4.32±0.19a	3.99±0.13a	5.82±0.17a	3.16±0.37a	15.3±2.27a
T6（N+MPASP-Zn）	10.3±0.50ab	3.96±0.34a	3.95±0.20a	5.73±0.39a	2.70±0.15ab	16.0±1.43a

表4 不同处理水稻土壤养分含量

Table 4 Soil nutrients concentrations among the different treatments

处理 Treatments	全氮/$g\cdot kg^{-1}$ TN	铵态氮/$mg\cdot kg^{-1}$ NH_4^+-N	硝态氮/$mg\cdot kg^{-1}$ NO_3^--N	有效磷/$mg\cdot kg^{-1}$ Available P	速效钾/$mg\cdot kg^{-1}$ Available K
T1（CK）	1.42±0.03a	0.53±0.07d	6.88±0.58b	27.0±3.11a	178±9.90a
T2（N）	1.45±0.01a	0.75±0.06c	12.0±2.26a	26.9±2.33a	183±12.7a
T3（N+PASP-Ca）	1.55±0.04a	0.96±0.04b	12.7±2.30a	24.9±2.69a	174±3.54a
T4（N+PASP-Zn）	1.44±0.08a	1.21±0.12a	12.7±2.79a	23.5±0.57a	168±3.54a
T5（N+MPASP-Ca）	1.58±0.25a	1.19±0.08a	13.5±2.16a	26.0±1.13a	180±6.36a
T6（N+MPASP-Zn）	1.52±0.16a	1.22±0.09a	13.3±2.51a	24.1±2.62a	171±8.49a

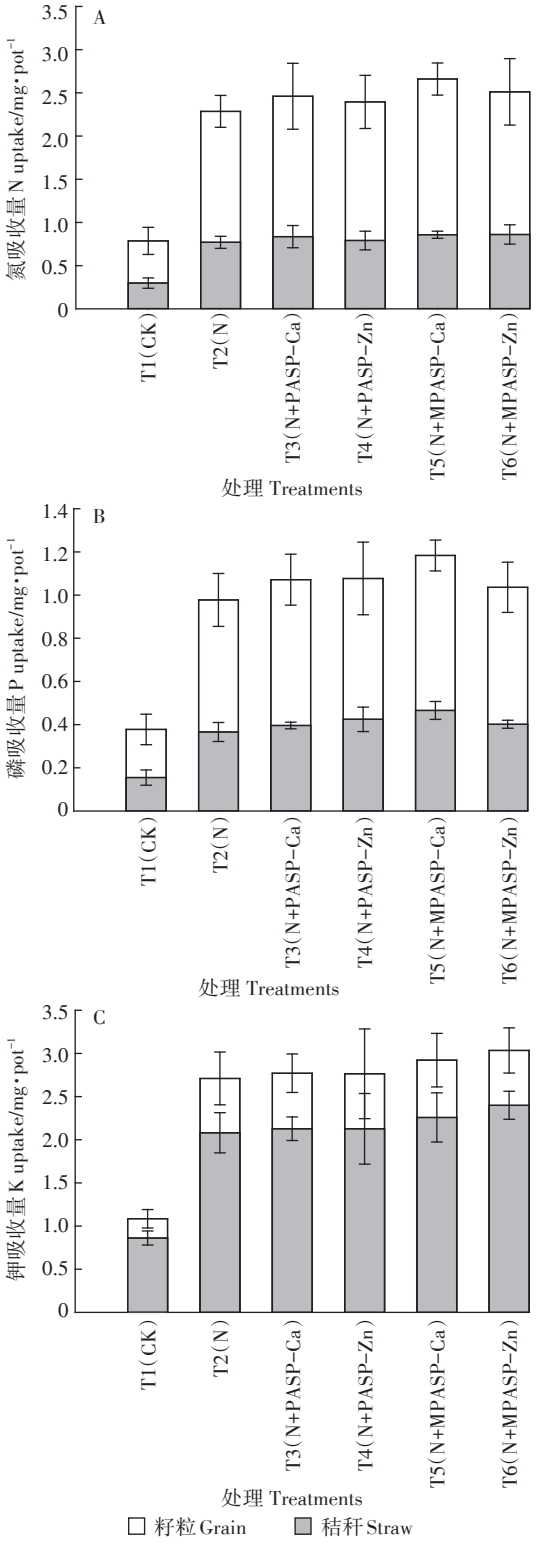

图4 不同处理水稻氮、磷、钾养分吸收量

Figure 4 N, P, and K uptake by rice among the different treatments

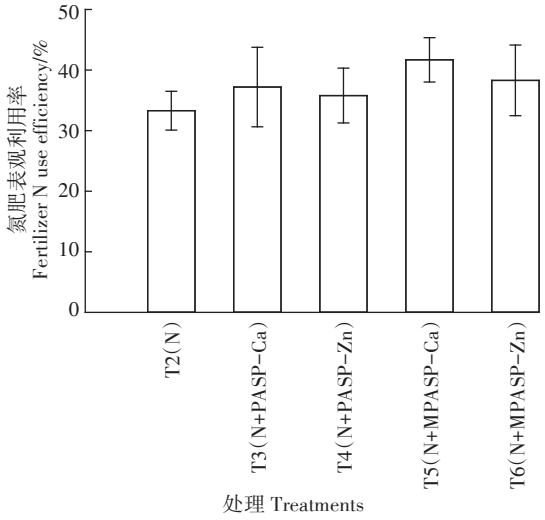

图5 不同处理水稻氮肥表观利用率

Figure 5 Fertilizer N use efficiency among different treatments

施肥后两周内，PASP处理田面水氮素浓度总体低于常规尿素处理，这可能是因为PASP分子中含有大量的氨基和羧基基团，对阴阳离子具有较强的结合作用，可与NO_3^-和NH_4^+发生螯合，减缓田面水氮素浓度过快升高[17]。PASP处理田面水NO_3^--N平均浓度比NH_4^+-N低26.7%，且峰值出现时间相对滞后，这可能与PASP对硝化作用产生抑制有关[14]。尿素施入土壤中首先水解成NH_4^+，随后在硝化作用下转化成NO_3^-，一方面PASP分子中的羧基与NH_4^+发生螯合作用，使硝化反应中NH_4^+底物浓度降低，减少NH_4^+转化成NO_3^-；另一方面，PASP分子中的羧基可与硝化反应过程中所必需的胺氧化酶活性位点上的铜离子相结合[23]，致使酶活性受到抑制，延缓硝化反应，起到缓释作用。

与田面水氮素所受影响不同，PASP处理土壤氮素含量有所增加，尤其是土壤NH_4^+-N含量比常规尿素处理显著提高了28.4%~62.2%，这可能与PASP极强的吸附能力密切相关[24]。PASP对养分离子的交换吸附力约为土壤胶体的100倍[8]，它能够将固定在土壤中的NH_4^+吸附解离，使土壤NH_4^+-N含量增加。这为作物生长提供了更多养分，且PASP与尿素水解的NH_4^+及土壤解离的NH_4^+进行螯合，可形成植物易吸收利用形态[25]，有利于水稻养分吸收，PASP的环状多孔结构还能够富集更多养分供植物利用[8,26-28]，促进水稻生长，正如本试验结果显示，PASP处理水稻株高、有效穗数、秸秆产量、籽粒产量及水稻氮、磷、钾养分吸收量比常规尿素处理均有所增加。水稻产量及养分吸收量的增加还与PASP-Ca/Zn携带中微量营养元素有关。

改性PASP是在普通PASP分子链上引入官能团，使原来主链上无活性基团的聚合物功能化，或者改变普通PASP分子链的空间分布，延长分子链或形

成三维网状结构，使其特性增强[9-11]。在本试验中，与普通PASP处理相比，改性PASP处理田面水氮素浓度下降，土壤氮素养分含量增加，水稻生长指标、养分吸收量、产量及氮肥利用率也得到了提升，这是因为改性PASP具有更复杂的分子结构，其分子量增大、分子链延长，羧基含量相应增加，螯合、吸附等特性进一步加强，使其螯合更多NO_3^-和NH_4^+，抑制氮素过快释放，降低田面水氮素流失风险，同时还能吸附富集更多的土壤养分，利于水稻营养吸收，促进水稻生长及产量提高。在本试验中，无论在控制田面水氮素浓度，还是促进水稻生长方面，改性PASP-Ca处理均呈现出最佳效果，这一方面与改性PASP特性功能增强有关，另一方面Ca是植物必需的矿质营养元素之一，其需求量仅次于氮、磷、钾，是植物代谢和发育的主要调控者[29]，对促进水稻生长发育、增强抗逆性、提高产量和品质等具有重要作用[29-30]。陈秉翼[14]在玉米和生菜的盆栽试验中也发现了PASP-Ca的增产效果更显著。就本研究而言，可认为改性PASP-Ca应用在水稻中能够实现氮素流失风险降低及氮肥利用率提高的双重效益，同时兼具经济效益。以盘锦地区为例，稻田常规施氮量为270 kg·hm^{-2}，按照普通尿素（N 46%）与聚天门冬氨酸尿素（N 46%，PASP 0.3%）的市场价格计算，施用聚天门冬氨酸尿素每公顷稻田投入成本增加47元；根据本试验研究结果（改性PASP-Ca处理水稻增产8.32%），以该地区水稻平均产量12 000 kg·hm^{-2}和每公斤1.6元市场单价计算，每公顷稻田水稻收益增加1597元。据估算，施用聚天门冬氨酸尿素可增加净收益1550元·hm^{-2}，在农业生产实际中具有经济可行性。但由于本研究采用的是桶栽试验，相关结论在推广应用前还有待进一步在田间验证。

4 结论

（1）施肥两周内，聚天门冬氨酸/盐处理水稻田面水氮素浓度总体低于常规尿素处理，尤其在施肥后第3 d和5 d，田面水NH_4^+-N和NO_3^--N浓度显著降低，且改性聚天门冬氨酸/盐处理更有利于田面水氮素浓度降低。

（2）聚天门冬氨酸/盐处理提高了水稻土壤氮素含量，尤其是NH_4^+-N含量显著增加，但对土壤有效磷和速效钾含量影响不大。

（3）聚天门冬氨酸/盐的施用促进了水稻生长和养分吸收，有利于提高水稻产量及氮肥利用率，且改性聚天门冬氨酸/盐处理效果更加突出。

（4）综合来看，改性聚天门冬氨酸钙盐处理促进了水稻生长，有效降低了水稻施肥后田面水氮素浓度，并能提升土壤肥力，在所有处理中表现最佳，对于稻田氮素面源污染控制具有应用潜力。

参考文献：

[1] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Res*, 2006, 96：37-47.

[2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5)：915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Fertilizer use efficiency of major crops and improving ways in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5)：915-924.

[3] 吴 俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9)：1561-1566.
WU Jun, FAN Jian-bo, HE Yuan-qiu, et al. Dynamics of nitrogen and runoff loss in ponding water of paddy field under different fertilization practices[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9)：1561-1566.

[4] 李 娟, 李松昊, 邬奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5)：23-33.
LI Juan, LI Song-hao, WU Qi-feng, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5)：23-33.

[5] 侯朋福, 薛利祥, 俞映倞, 等. 稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7)：1353-1361.
HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, et al. Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7)：1353-1361.

[6] 孟祥海. 稻田氮素利用与损失及其对环境影响研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学, 2012.
MENG Xiang-hai. Research on utilize and loss of nitrogen and impact on environment in rice field[D]. Harbin：Northeast Agricultural University, 2012.

[7] 杨晋辉, 刘 泰, 陈艳雪, 等. 聚天门冬氨酸/盐的合成、改性及应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(11)：1852-1862.
YANG Jin-hui, LIU Tai, CHEN Yan-xue, et al. Synthesis, modification and application of polyaspartic acid/salt：The state-of-art technological advances[J]. *Materials Review*, 2018, 32(11)：1852-1862.

[8] 杜中军, 杨 浩, 王树昌, 等. 农用聚天门冬氨酸同源多肽研究进展[J]. 热带作物学报, 2011, 32(12)：2381-2384.
DU Zhong-jun, YANG Hao, WANG Shu-chang, et al. Advance of homologous polypeptides polyaspartic acids for agriculture[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(12)：2381-2384.

[9] 胡志光, 王 昕, 张玉玲, 等. 改性聚天冬氨酸研究最新进展[J]. 应用化工, 2014, 43(2)：360-362.
HU Zhi-guang, WANG Xin, ZHANG Yu-ling, et al. Latest research

development of modified polyaspartic acid[J]. *Applied Chemical Industry*, 2014, 43(2):360-362.

[10] Chaussemier M, Pourmohtasham E, Gelus D, et al. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling[J]. *Desalination*, 2015, 356:47-55.

[11] Gao Y H, Fan L H, Ward L, et al. Synthesis of polyaspartic acid derivative and evaluation of its corrosion and scale inhibition performance in seawater utilization[J]. *Desalination*, 2015, 365:220-226.

[12] 冷一欣, 芮新生, 何佩华. 施用聚天冬氨酸增加玉米产量的研究[J]. 玉米科学, 2005, 13(3):100-102.
LENG Yi-xin, RUI Xin-sheng, HE Pei-hua. Study of the yield increasing of maize by using polyaspartic acid[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(3):100-102.

[13] 唐会会, 许艳丽, 王庆燕, 等. 聚天门冬氨酸螯合氮肥减量基施对东北春玉米的增效机理[J]. 作物学报, 2019, 45(3):431-442.
TANG Hui-hui, XU Yan-li, WANG Qing-yan, et al. Increasing spring maize yield by basic application of PASP chelating nitrogen fertilizer in northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3):431-442.

[14] 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.
CHEN Bin-yi. Study on the synergy mechanism of polyaspartic-acid/salt(PASP) urea and modified urea to the crops[D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University, 2016.

[15] 孙克刚, 和爱玲, 张运红, 等. 聚天门冬氨酸包裹尿素对冬小麦增产效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4):128-130.
SUN Ke-gang, HE Ai-ling, ZHANG Yun-hong, et al. Yield-increasing effect of wheat by application of PASP urea[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(4):128-130.

[16] 王连祥, 张学杰. 聚天门冬氨酸在黄瓜上的应用效果[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(3):26-28.
WANG Lian-xiang, ZHANG Xue-jie. Application effect of polyaspartic acid on cucumber[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2017, 32(3):26-28.

[17] 董世杰, 鲁 屹, 唐婉莹, 等. 聚天门冬氨酸钙盐对水稻田面水中三氮动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):208-213.
DONG Shi-jie, LU Yi, TANG Wan-ying, et al. Effects of polyaspartic acid calcium salt on the dynamic changes of NH_4^+, NO_3^- and total nitrogen in surface water of paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6):208-213.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemistrical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[19] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义—兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):921-933.
JU Xiao-tang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio-discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):921-933.

[20] 田玉华, 贺发云, 尹 斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6):727-733.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field[J]. *Soils*, 2006, 38(6):727-733.

[21] 宫 亮, 隽英华, 王建忠, 等. 稻田田面水氮磷素动态特征研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20):168-174.
GONG Liang, JUAN Ying-hua, WANG Jian-zhong, et al. Study on the variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of paddy field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(20):168-174.

[22] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 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.
SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):838-846.

[23] Shears J H, Wood P M. Spectroscopic evidence for a photosensitive oxygenated state of ammonia mono-oxygenase[J]. *Biochem*, 1985, 226(2):499-507.

[24] Hasson D, Shemer H, Sher A. State of the art of friendly "green" scale control inhibitors: A review article[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50(12):7601-7607.

[25] 杜中军, 杨 浩, 王永造, 等. 聚天门冬氨酸同源多肽的水稻产量效应和磷素营养吸收效应研究[J]. 现代农业科技, 2012(18):12-15.
DU Zhong-jun, YANG Hao, WANG Yong-zao, et al. Effects on yield and phosphorus nutrition absorbing for rice using homologous polypeptides of polyaspartic acids[J]. *Modern Agriculture Science Technology*, 2012(18):12-15.

[26] Gyarmati B, Krisch E, Szilagyi A. In situ oxidation-induced gelation of polyaspartic acid thiomers[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2014, 84:29.

[27] 黄 毅, 李衍素, 贺超兴, 等. 根施聚天门冬氨酸对日光温室黄瓜生长、产量及矿质元素吸收的影响[J]. 中国蔬菜, 2018(1):44-49.
HUANG Yi, LI Yan-su, HE Chao-xing, et al. Effect of polyaspartic acid root application on growth, yield and mineral elements absorption of cucumber grown in solar greenhouse[J]. *China Vegetables*, 2018(1):44-49.

[28] 谢方淼, 李东坡, 李健强, 等. 聚天冬氨酸尿素对土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(4):8-12.
XIE Fang-miao, LI Dong-po, LI Jian-qiang, et al. Effects of polyaspartic urea (PASP-Urea) on soil microbial biomass carbon and nitrogen under incubation and pot experiment[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(4):8-12.

[29] 王学武. 水稻钙积累分布规律与调控研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2007.
WANG Xue-wu. Studies on the characters of calcium accumulation and distribution of rice and its regulation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.

[30] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5):971-976.
JIANG Ting-hui, ZHAN Xin-hua, XU Yang-chun, et al. Roles of calcium in stress-tolerance of plants and its ecological significance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5):971-976.