



**聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响**

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

引用本文:

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 等. 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 96-103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响**

曹兵, 倪小会, 陈延华, 邹国元, 王甲辰, 杨友庆, 陈立娟, 刘杰, 王学霞

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(5): 695-701 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0428>

**控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响**

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(2): 153-160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

**稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响**

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

*农业资源与环境学报*. 2015(6): 559-564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

**应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对--以宁夏引黄灌区为例**

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

*农业资源与环境学报*. 2015(2): 175-184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>

**秸秆还田与氮肥管理对稻田杂草群落和水稻产量的影响**

陈浩, 张秀英, 吴玉红, 李厚华, 郝兴顺, 王艳龙, 王薇, 张春辉

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(6): 500-507 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0074>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 等. 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 96-103.

WANG Na, XU Jia-yi, ZHANG Xin, et al. Effects of polyaspartic acid urea on rice yield and nitrogen concentrations in paddy field ponding water[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 96-103.



开放科学 OSID

## 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟\*

(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(PASP)尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响,以聚天门冬氨酸钙盐(PASP-Ca)与尿素复配为供试材料,通过水稻大田试验研究基于减量施氮下PASP-Ca尿素对水稻生长、氮吸收利用及田面水氮素浓度变化的影响,并利用灰色关联度法评价PASP-Ca尿素的控污效果。结果表明,与常规施氮量处理相比,减量施氮处理降低了水稻田面水氮素浓度,尤其在施基肥、蘖肥后第1 d,田面水总氮(TN)浓度降低了12.70%、17.23%。减量施氮后,水稻产量增加了0.78%、氮累积吸收量增加了0.39%,氮肥表观利用率提高了9.35个百分点,差异不显著。减量施氮处理满足了水稻生长的养分需求,节约了氮肥,保证了水稻稳产。与常规尿素处理相比,减量施氮下各PASP-Ca尿素处理降低了田面水氮素浓度,尤其施基肥1~7 d内,基、蘖肥和穗肥施氮比例50%、30%和20%处理的田面水铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )浓度降低了24.94%~68.66%,其中第5、7 d显著降低。施蘖肥1~7 d内,基、蘖肥施氮比例80%、20%处理的田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低了2.72%~51.30%。施用PASP-Ca尿素有利于水稻生长、养分吸收及产量提高,使水稻产量增加了0.87%~7.27%,氮累积吸收量增加了7.05%~35.20%,氮肥表观利用率提高了6.11~30.26个百分点,其中基、蘖肥施氮比例80%、20%处理的籽粒氮吸收量显著增加了30.08%,秸秆氮吸收量显著增加了46.27%,氮肥表观利用率显著提高了30.26个百分点。综合评价水稻产量、氮吸收量、氮肥利用率以及田面水氮素浓度,减量施氮处理效果优于常规施氮量,减量施用PASP-Ca尿素处理效果优于常规尿素,且最佳基、蘖肥施氮比例为80%、20%。

**关键词:**聚天门冬氨酸/盐(PASP);水稻产量;田面水氮素;灰色关联度法

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)01-0096-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0072

### Effects of polyaspartic acid urea on rice yield and nitrogen concentrations in paddy field ponding water

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

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

**Abstract:** To investigate the effects of polyaspartic acid salt (PASP) urea on rice yield and nitrogen (N) concentrations in the ponding water of paddy fields, a field experiment was conducted. We determined the effects of PASP-Ca urea on rice growth, N-uptake and utilization, and N concentrations in paddy field ponding water. In addition, Grey Relational Analysis was used to evaluate the effects of PASP-Ca urea on water pollution. The results showed that N concentrations in the ponding water were lower in the reduced-N treatment test than they were in the conventional-N treatment test. In particular, TN concentrations were 12.70% and 17.23% lower in the reduced-N treatment test than in the control on the first day after basal fertilization and topdressing. The reduction of N application was beneficial to rice growth, with a 0.78% higher yield, 0.39% higher cumulative N-uptake, and 9.35 percent points higher efficiency in N use ( $P>0.05$ ). N concentrations in the field ponding water were lower with the PASP-Ca urea treatment than with the conventional urea treatment, with  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration decreasing by 24.94%~68.66% (N fertilization ratio of basal : tillering : panicle=5 : 3 : 2) and 2.72%~51.30%

收稿日期:2020-02-26 录用日期:2020-03-30

作者简介:王娜(1977—),女,辽宁营口人,硕士,研究员,主要研究方向为农业生态环境。E-mail:wnsxh1999@126.com

\*通信作者:牛世伟 E-mail:niushiwei@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800506,2016YFD0800504);中央引导地方科技发展专项(2019416031)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800506, 2016YFD0800504); The National Government Guiding Local Science and Technology Development Program(2019416031)

(N fertilization ratio of basal:tillering=8:2) with the PASP-Ca urea treatment during one week after basal fertilization. The application of PASP-Ca urea was beneficial to rice growth, nutrient absorption, and yield promotion, with a 0.87%~7.27% higher yield, a 7.05%~35.20% higher accumulated N-uptake, and a 6.11~30.26 percent points higher N use-efficiency, compared to the control. In particular, the PASP-Ca urea treatment, with a N fertilization ratio of 8:2 (basal:tillering), enhanced N uptake in grain (30.08%), N absorption in straw (46.27%) and N use-efficiency (30.26 percent points). Considering rice yield, the N absorption rate of paddy field ponding water, and its resulting N concentration, the reduced-N treatment was more effective than the conventional-N treatment, and the PASP-Ca urea treatment was better than the treatment using conventional urea. Moreover, the optimal N application ratio, of base fertilizer to tillering fertilizer, was 8:2, and the effects of field application needed to be further verified.

**Keywords:** polyaspartic acid salt (PASP); rice yield; nitrogen of the paddy field ponding water; Grey Relational Analysis

水稻是我国重要的粮食作物,总产量约占全国粮食总产量的40%,其稳产高产对于保障国家粮食安全具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。大量施用氮肥是获得水稻高产的重要措施之一,然而我国水稻氮肥当季利用率仅为20%~35%,低于世界平均水平<sup>[3-6]</sup>。氮肥除少部分被水稻吸收外,大部分通过氨挥发、淋溶或径流等方式流失到环境中,对大气和水体环境造成污染<sup>[7-10]</sup>,特别是在施肥初期或者雨季,氮肥流失量更大<sup>[11]</sup>。因此,农田氮肥高投入、低利用率的传统型农业生产模式造成的资源浪费及其引起的农业面源污染已经得到了广泛关注<sup>[12]</sup>。

尿素具有成本低、养分供应快等特点,被广泛应用于农业生产中。在水稻生产中,尿素是最主要的氮素来源,尿素的转化直接关系到氮素的利用和损失<sup>[13]</sup>,因此研发缓释型尿素对于控制氮肥流失十分重要。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,除具有缓慢释放养分的优点外,还具有良好的螯合、解离和吸蓄等性能,能够螯合游离的阴离子和阳离子,解离土壤固定的养分,并吸蓄养分,形成利于作物吸收的形态,提高肥料利用率,减少养分流失,因此在农业生产中常被用作肥料增效剂和缓释剂<sup>[14-15]</sup>。PASP与尿素复配,其包裹在尿素表面,通过自身缓慢降解逐渐释放尿素,同时PASP还可吸附、螯合水和土壤中的养分,并富集到作物根系周围,有利于作物养分吸收,减少氮素流失,提高作物产量与肥料利用率<sup>[16-17]</sup>。苗方<sup>[18]</sup>研究发现PASP与尿素复配能提高玉米、棉花等多种作物产量,推荐添加量为0.01%~1.5%。孙克刚等<sup>[19]</sup>研究不同添加量PASP与尿素复配和减量施氮对小麦产量的影响,发现添加0.3%PASP结合20%减量施氮可使冬小麦增产1.3%,说明尿素中添加PASP可以减少氮肥使用量,且作物不减产。陈秉翼<sup>[20]</sup>研究了PASP尿素对农作物的增效机制,表明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尿素的研究主要集中在对旱作区作物增产效果和增产机制等方面,而关于PASP尿素对水稻产量和田面水氮素变化等方面的作用效果尚不清楚,尤其关于控污效果综合评价未见报道。为此,本研究选用0.3%聚天门冬氨酸钙盐(PASP-Ca)与尿素复配,通过水稻大田试验研究基于减量施氮下PASP-Ca尿素对水稻生长、氮吸收利用及田面水氮素浓度变化的影响,并利用灰色关联度法评价PASP-Ca尿素的控污效果,旨在获得PASP-Ca尿素的最佳施肥模式,为水稻合理施肥、控制面源污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于辽宁省盘锦市盘山县坝墙子镇烟李村。地处辽河三角洲中心地带,位于辽河、大辽河入海口交汇处,是滨海盐土和盐渍化土壤分布区。属于温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度8.4℃,无霜期174d,年均降水量612mm。供试土壤为水稻土,中等肥力。0~20cm土壤基础理化性质为全氮1.58g·kg<sup>-1</sup>、全磷17.7g·kg<sup>-1</sup>、全钾28.7g·kg<sup>-1</sup>、水解氮71mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷18.96mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾154mg·kg<sup>-1</sup>、有机质17.7g·kg<sup>-1</sup>、全盐量1.17g·kg<sup>-1</sup>、pH7.8。

### 1.2 试验材料

供试氮肥为大颗粒尿素(N46%)和聚天门冬氨酸尿素(PASP-Ca与尿素复配,添加量为尿素施用量的0.3%)。磷肥为磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>46%、N18%),钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O60%)。供试水稻品种为盐丰47号。2018年5月15日施基肥旋耕,5月20日泡田,5月22日插秧,插秧密度为30cm×16.5cm,9月30日收获水稻。

### 1.3 试验设计

试验设置6个处理:CK0为不施肥空白处理;CK1

为常规尿素+常规施氮量;T1为常规尿素+减量施氮;T2~T4为聚天门冬氨酸尿素+减量施氮(各时期施氮比例见表1)。常规施氮量为270 kg·hm<sup>-2</sup>,减量施氮量为210 kg·hm<sup>-2</sup>。磷肥和钾肥用量分别为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 90 kg·hm<sup>-2</sup>,磷钾肥全部基施。大区试验面积为400 m<sup>2</sup>,每个处理3次重复,共18个小区,小区间田埂用薄膜覆盖,防止串灌串排。田间管理与当地相同。

表1 试验处理设置

Table 1 Experiment treatments

处理 Treatments	处理描述 Treatments description	施氮比例 Nitrogen ratio/%		
		基肥 Basal fertilizer	蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer
CK0	N 0 kg·hm <sup>-2</sup>	0	0	0
CK1	N 270 kg·hm <sup>-2</sup>	80	20	0
T1	N 210 kg·hm <sup>-2</sup>	80	20	0
T2	N 210 kg·hm <sup>-2</sup> +PASP-Ca	80	20	0
T3	N 210 kg·hm <sup>-2</sup> +PASP-Ca	50	30	20
T4	N 210 kg·hm <sup>-2</sup> +PASP-Ca	80	0	20

1.4 样品采集与测定

施肥后第1、3、5、7、10、15 d每日上午10:00采集田面水,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(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)浓度。水稻成熟后,每个小区采用3点取样法沿土表收割水稻地上部分,每点收割1 m<sup>2</sup>样方,测籽粒和秸秆生物量,并从中随机选取10穴测定水稻株高、有效分蘖数,并烘干粉碎籽粒和秸秆样品,采用凯氏定氮法测定全氮含量,计算水稻的氮素累积吸收量、氮肥表观利用率。

$$\text{氮素累积吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\text{籽粒产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times$$

$$\text{氮素含量}(\%)+\text{秸秆产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times\text{氮素含量}(\%)$$

$$\text{氮肥表观利用率}=(\text{施氮处理氮吸收量}-\text{不施氮处理氮吸收量})/\text{施氮量}\times 100\%^{[21]}$$

1.5 数据处理与分析

1.5.1 数据处理与作图

采用Microsoft Excel 2013软件进行数据处理与作图,使用SPSS 19.0软件进行差异显著性检验。

1.5.2 灰色关联度分析

应用灰色关联度法<sup>[22]</sup>对不同施肥处理的控污效果进行综合评价。正向指标籽粒和秸秆产量、氮吸收量及氮肥表观利用率值越高越好,逆向指标基肥期TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度峰值越低越好。因此选择这些指标中的最优值构建一个相对理想的“参考处理”,以“参考处理”各项指标值所构成的数列作为参考数列。以本研究中不同施肥处理下水稻产量、田面水氮素等各单项指标所构成的数列作为比较数列,计算关联系数及关联度。关联度值越高,与理想“参考处理”关联越密切,关联度值越低,与理想“参考处理”关联越远。

2 结果与分析

2.1 水稻田面水总氮动态变化

从图1可以看出,不施肥CK0处理田面水TN浓度一直处于较低水平,且相对稳定。施入基、蘖肥后,常规尿素的各施肥处理田面水TN浓度均高于CK0处理,且在第1 d即达到峰值,之后迅速下降,于第10 d降至峰值的11.82%~16.01%、17.86%~22.69%后趋于稳定。在各施肥期1~7 d,基肥期的田面水TN浓度高于蘖肥期,尤其在施肥后第1 d,基肥期的CK1处理田面水TN浓度最高为45.07 mg·L<sup>-1</sup>,蘖肥期TN浓度显著低于基肥期68.35%,这说明基肥期氮素流失风险高于蘖肥期。同时在峰值期,各施肥期T1处理田面

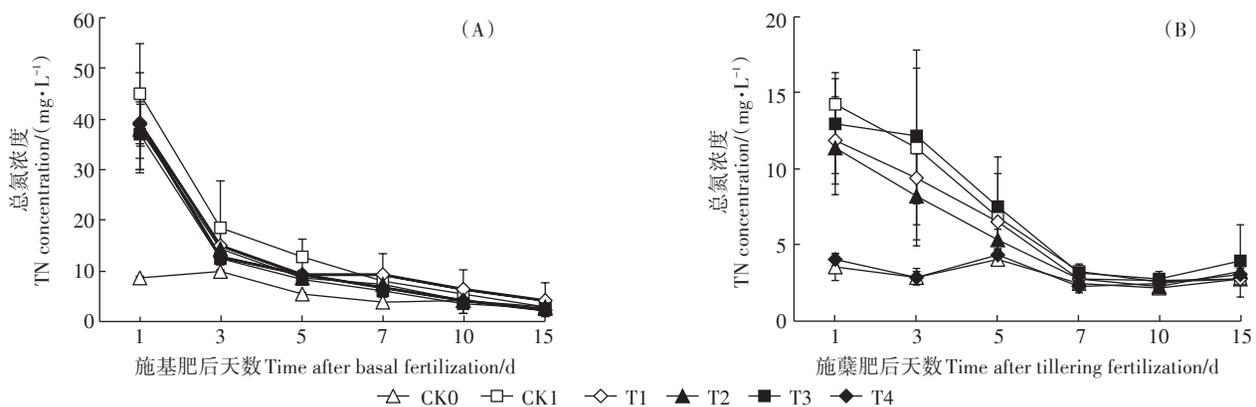


图1 施肥后田面水TN浓度变化

Figure 1 TN concentrations in the ponding water after fertilization

水 TN 浓度分别低于 CK1 处理 12.70%、17.23%, 差异不显著, 这说明减量施肥能够降低田面水 TN 浓度。

施基肥 1~7 d 内, 添加 PASP-Ca 的 T2、T3 和 T4 处理田面水 TN 浓度均低于 T1 处理, 其中 T3 处理 TN 浓度降低了 5.60%~34.17%, 差异不显著。施基肥 1~7 d 内, 在等施氮量情况下, T3 处理田面水 TN 浓度最高, 高出 T1 处理 9.79%~30.25%, 而 T2 处理 TN 浓度最低, 低于 T1 处理 1.60%~18.74%, 差异不显著, 这表明添加 PASP-Ca 能够降低田面水 TN 浓度, 且随着施氮比例增大, 田面水 TN 浓度呈增加趋势。

### 2.2 水稻田面水铵态氮动态变化

从图 2 可以看出, CK0 处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度一直处于较低水平, 且相对稳定。常规尿素的各施肥处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度均高于 CK0 处理, 且在第 3 d 达到峰值后迅速下降, 于第 10 d 降至峰值的 3.11%~4.32%、3.32%~5.89% 后趋于稳定。

施基肥 1~7 d 内, T2、T3 和 T4 处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度低于 T1 处理, 其中 T3 处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度较 T1 处理降低了 24.94%~68.66%, 尤其在第 5、7 d 差异

显著。施基肥 1~7 d 内, T2 处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度降低了 2.72%~51.30%, 尤其在第 3 d 峰值期, T2 处理田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度较 T1 处理降低了 43.58%, 这说明添加 PASP-Ca 能够延缓田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度过快增加。

### 2.3 水稻田面水硝态氮动态变化

从图 3 可以看出, CK0 处理田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度一直处于较低水平, 且相对稳定。在施基肥后, 所有施肥处理的田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度第 1 d 达到峰值后迅速下降, 于第 10 d 降至峰值的 8.39%~21.64% 后趋于稳定。其中, CK1 处理田面水 TN 浓度峰值最高, 为  $11.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其次为 T1 处理  $8.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。所有 PASP-Ca 处理田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均低于常规尿素处理, 在第 1 d 峰值期, 与 T1 处理相比, T2、T3 和 T4 处理田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度分别降低 8.28%、11.57% 和 6.63%, 差异不显著。在施基肥后, 所有施肥处理的田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度第 5 d 达到峰值后迅速下降, 于第 10 d 降至峰值的 16.65%~61.48%。此时期 PASP-Ca 处理田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度低于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度, 且峰值出现时间相对滞后。在第 5 d 峰值期, T2、T3 处理田面

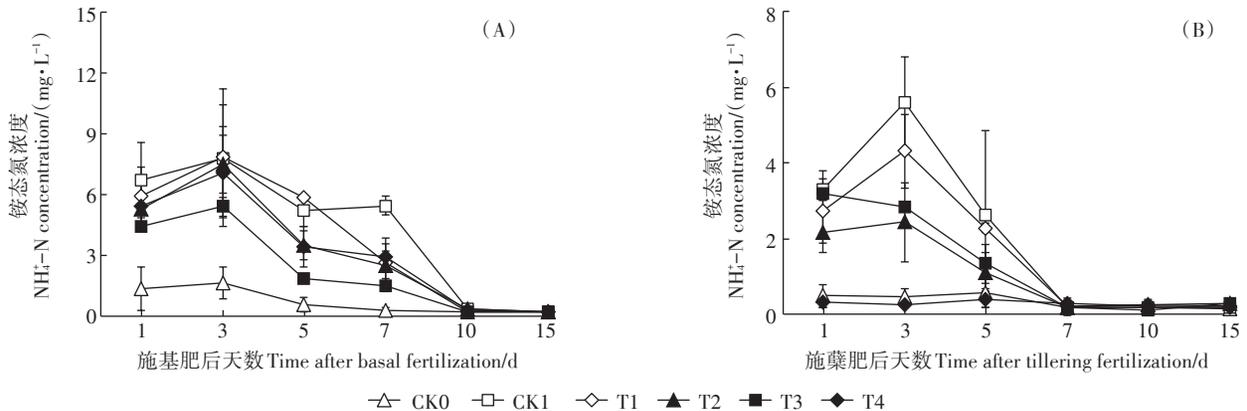


图 2 施肥后田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化

Figure 2  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations in the ponding water after fertilization

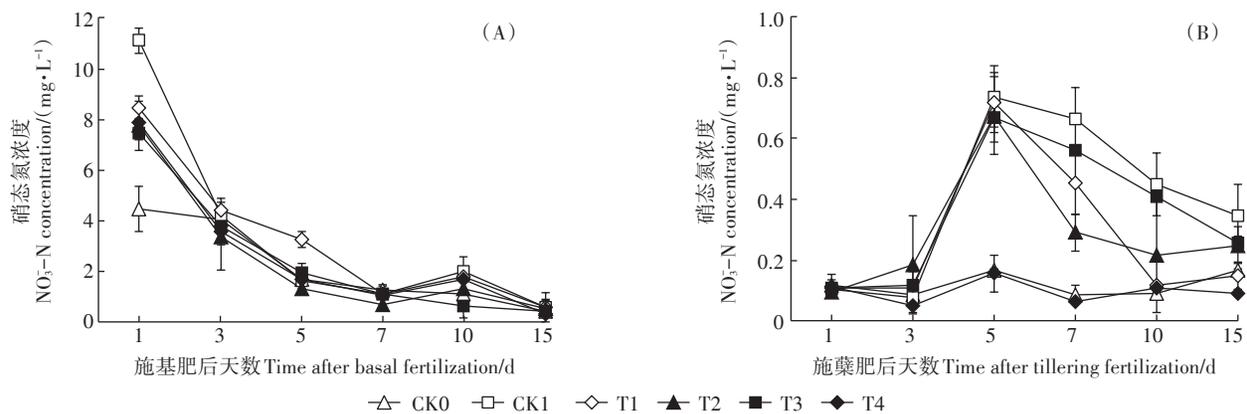


图 3 施肥后田面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度变化

Figure 3  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations in the ponding water after fertilization

水 NO<sub>3</sub>-N 浓度分别低于 T1 处理 5.98%、7.05%，差异不显著。

#### 2.4 不同处理对水稻产量及构成因素的影响

如表 2 所示,所有施肥处理水稻株高、有效分蘖数、秸秆产量和籽粒产量均显著高于 CK0 处理,这说明施用氮肥是水稻增产的关键因素,且施氮量、肥料种类、施肥方式均影响增产效果。

T1 处理水稻株高、有效分蘖数、秸秆产量和籽粒产量与 CK1 处理无显著差异,说明减量施肥能够满足水稻生长养分需求。与 T1 处理相比,T2、T3 处理增加了水稻有效分蘖数、秸秆产量和籽粒产量,差异不显著,这说明添加 PASP 可有效促进水稻生长和分蘖,使水稻增产 0.87%~7.27%,且施肥时期和比例对水稻生长及产量有一定影响。

#### 2.5 不同处理对水稻氮素吸收量和氮肥利用率的影响

如图 4 和图 5 所示,所有施肥处理水稻籽粒和秸秆氮吸收量均显著高于不施肥 CK0 处理。与常规施肥 CK1 相比,减量施氮 T1 处理的水稻氮累积吸收量增加了 0.39%,氮肥表观利用率提高了 9.35 个百分点,但差异不显著,这说明减量施肥可促进养分吸收,提高氮肥利用率,节约了肥料,降低了因过量施肥而引起的氮素流失风险。

与 T1 处理相比,所有 PASP-Ca 处理均增加了水

稻籽粒和秸秆氮吸收量,氮累积吸收量增加了 7.05%~35.20%,尤其 T2 处理籽粒、秸秆氮吸收量显著增加了 30.08% 和 46.27%,表明添加 PASP-Ca 能够增加水稻氮含量。所有 PASP-Ca 处理均提高了氮肥表观利用率,氮肥表观利用率提高了 6.11~30.26 个百分点,尤其 T2、T3 处理利用率为 71.98%、55.63%,较 T1 处理分别显著提高了 30.26、14.63 个百分点,这表明添加 PASP-Ca 能够提高氮肥表观利用率,且施氮比例影响氮素吸收利用。

#### 2.6 不同施肥处理控污效果综合评价

利用灰色关联度法分析不同施肥处理对田面水氮素和水稻产量、氮素吸收量以及肥料利用率等指标的综合影响并筛选出最佳的施肥模式。如表 3 所示,在各单一指标关联度中,籽粒产量关联度最大为 0.855 4,其次基肥期田面水 TN 浓度峰值关联度为 0.851 6,表明不同施肥处理对水稻产量和田面水 TN 浓度的影响较大。通过比较各单一指标的关联系数,发现 T2 处理对水稻的籽粒、秸秆产量和氮吸收量及氮肥利用率影响最大,T3 处理对基肥期田面水的 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度峰值影响最大。从综合评价结果与排序来看,所有 PASP-Ca 尿素处理关联度均高于 T1 处理,其中 T2 处理关联度较高,其次是 T3 处理,常规施肥 CK1 处理关联度最低。

表 2 不同处理水稻株高、有效分蘖数及产量

Table 2 Plant height, effective tiller number, and rice yield under the different treatments

处理 Treatments	株高 Height/cm	有效分蘖数/(穗·株 <sup>-1</sup> ) Productive tillers/(panicle·plant <sup>-1</sup> )	秸秆产量 Straw yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK0	79.17±1.44c	15.46±2.14c	5 356.2±430.2c	6 791.25±626.55b
CK1	95.33±4.91a	22.47±0.50ab	9 893.85±682.2a	11 591.7±201.9a
T1	91.50±2.18ab	23.13±0.76ab	9 287.4±841.5ab	11 682.6±413.85a
T2	88.67±1.53b	24.87±2.39a	10 136.4±860.4a	12 531.45±866.25a
T3	89.50±2.65b	23.27±0.61ab	9 307.65±349.65ab	11 864.55±796.65a
T4	90.00±6.69b	19.60±3.30b	8 074.8±700.8b	11 783.7±386.25a

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Notes: The different letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05 level.

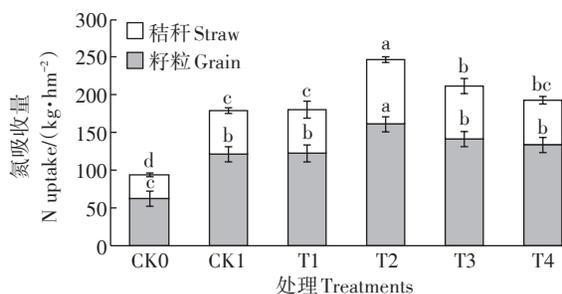


图 4 不同处理水稻氮吸收量

Figure 4 N uptake by rice under the different treatments

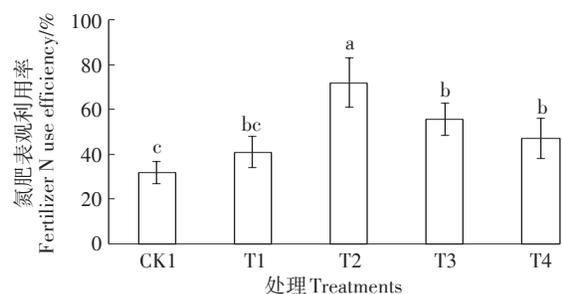


图 5 不同处理水稻氮肥表观利用率

Figure 5 Fertilizer N use efficiency under the different treatments

表3 关联系数、关联度及综合评价排序

Table 3 The correlation coefficients, correlation degree, and comprehensive evaluation sorting

处理 Treatments	关联系数 Correlation coefficients							综合指标关联度 Correlation degree of comprehensive index	排序 Sorting index
	基肥期 TN 峰值 TN peak at basal fertilizer stage	基肥期 NH <sub>4</sub> -N 峰值 NH <sub>4</sub> -N peak at basal fertilizer stage	籽粒 产量 Grain yield	秸秆 产量 Straw yield	籽粒 氮吸收量 N uptake of grain	秸秆 氮吸收量 N uptake of straw	氮肥 表观利用率 Fertilizer N use efficiency		
CK1	0.621 4	0.485 0	0.793 9	0.923 5	0.546 0	0.484 1	0.342 1	0.599 4	5
T1	0.837 3	0.483 5	0.810 0	0.775 2	0.555 4	0.477 2	0.405 3	0.620 6	4
T2	0.936 2	0.507 6	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.920 5	1
T3	0.999 7	0.998 1	0.844 4	0.779 4	0.697 5	0.653 5	0.568 3	0.791 6	2
T4	0.863 7	0.548 4	0.828 8	0.586 8	0.640 4	0.493 2	0.460 1	0.631 6	3
单指标关联度	0.851 6	0.604 5	0.855 4	0.813 0	0.687 8	0.621 6	0.555 2	—	—

### 3 讨论

#### 3.1 不同处理对田面水氮素动态的影响

了解田面水中不同形态氮素动态变化,有助于准确评价氮素流失风险及控污效果。本试验中,各施氮肥处理田面水 TN 浓度均高于不施肥 CK0 处理,这说明氮肥是田面水氮素浓度增加的主要来源。施肥后田面水 TN 浓度在第 1 d 即达到峰值,随后迅速下降,至第 10 d 后趋于稳定,可见施肥 10 d 内是控制氮素流失的关键时期,这与杨坤宇等<sup>[23]</sup>、唐敏等<sup>[24]</sup>研究结果一致。各施肥期 T1 处理田面水 TN 浓度均低于 CK1 处理,其峰值期分别低于 CK1 处理 12.70%、20.82%,这说明减量施肥能够降低田面水 TN 浓度,进而降低施肥对农田生态系统造成的环境风险。在减量施氮情况下,添加 PASP-Ca 的 T2 处理田面水 TN 浓度低于 T1 处理,这可能是由于 PASP-Ca 延缓尿素水解及向田面水释放养分,从而降低了田面水 TN 浓度。T3 处理基肥期田面水 TN 浓度低于 T2 处理,而蘖肥期高于 T2 处理,这说明施肥比例对田面水 TN 浓度有影响,随着施氮比例的增大而增加,因此要合理施肥以满足不同时期水稻生长养分需求,减少稻田养分流失。基肥期的田面水 TN 浓度高于蘖肥期,尤其是施入基肥后第 1 d,这表明泡田期是稻田氮素流失的主要风险期,因此要合理灌溉,严禁排泡田水。

NH<sub>4</sub>-N 是尿素施入田间后不同形态氮素转化的关键形态。在本试验中,所有 PASP-Ca 处理的 NH<sub>4</sub>-N 浓度低于常规尿素处理,这是由于常规尿素易水解,引起田面水中 NH<sub>4</sub>-N 浓度迅速升高,而 PASP-Ca 尿素缓慢释放尿素,使田面水 NH<sub>4</sub>-N 浓度缓慢升高。这是因为 PASP-Ca 经微生物降解后,缓慢释放尿素,延缓了尿素分解过程<sup>[14]</sup>;另一方面 PASP 本身具有羧

基阴离子(COO<sup>-</sup>),对阳离子有较强的化学键结合作用,而且络合基团的成环性对离子具有环绕作用,形成了作物易吸收的形态,能够促进作物养分吸收,降低田面水 NH<sub>4</sub>-N 浓度<sup>[15]</sup>。

田面水中 NO<sub>3</sub>-N 主要是由 NH<sub>4</sub>-N 硝化作用转化而来,出现峰值的时间滞后于 NH<sub>4</sub>-N。本试验中,在施肥初期产生高浓度 NO<sub>3</sub>-N,这可能是由于施肥后,稻田未立即进行灌溉,待灌溉后取水样,尿素在土壤里已进行了分解,因此田面水 NO<sub>3</sub>-N 浓度在施肥后第 1 d 即达到峰值。蘖肥期,田面水 NO<sub>3</sub>-N 在施肥后第 5 d 达到峰值,且所有施肥处理田面水中 NO<sub>3</sub>-N 浓度低于 NH<sub>4</sub>-N 浓度,尤其是 PASP-Ca 处理。这一方面是由于 NO<sub>3</sub>-N 主要由 NH<sub>4</sub>-N 硝化作用形成,而 NH<sub>4</sub>-N 通过植株吸收、氨挥发和淋失等损失,可转化为 NO<sub>3</sub>-N 的数量相对较少,同时由于淹水条件下硝化作用较弱、反硝化作用增强,导致田面水中 NO<sub>3</sub>-N 浓度较低<sup>[25]</sup>。另一方面可能是由于 PASP 分子中的羧基与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>发生螯合作用,使硝化反应中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>底物浓度降低,减少 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>转化成 NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sup>[26]</sup>。再者,PASP 分子中的羧基可与硝化反应过程中所必需的铵氧化酶活性位点上的铜离子相结合,使酶活性受到抑制,延缓硝化反应,起到缓释作用<sup>[27]</sup>。可见,尿素施入稻田后,铵态氮是田面水氮素流失的主要形态,可作为稻田水体污染监测的主要氮素指标,要实时监测和严格控制田面水 NH<sub>4</sub>-N 浓度,降低氨挥发,防止地表径流发生风险。

#### 3.2 不同处理对水稻产量、氮素吸收量及氮肥利用率的影响

本试验中,所有施肥处理的水稻产量均高于不施肥处理,这说明稻田自然环境中氮供给不足,因此水稻生产中人为补充氮肥是必要的。氮肥使用量由 270 kg·hm<sup>-2</sup> 减至 210 kg·hm<sup>-2</sup>,可促进水稻增产

0.78%,增加水稻养分吸收量0.39%,提高氮肥表观利用率9.35个百分点,这说明在保证水稻稳产情况下,适量减少施肥量,实施源头控制,可以降低氮肥流失风险。

减量施肥增产效果不显著,因此在减量施肥基础上添加了PASP-Ca。与常规尿素相比,所有PASP-Ca尿素处理使水稻增产0.87%~7.27%,氮累积吸收量增加了7.05%~35.20%,氮肥表观利用率提高了6.11~30.26个百分点,可见添加PASP-Ca实现了氮肥减施、水稻增产和肥料高效利用等综合效果。这一方面是由于添加PASP-Ca抑制了氮素过快释放,延长了尿素肥效,实现了养分释放与水稻生长需肥规律协调一致,提高了肥料利用率。另一方面,PASP-Ca能够吸附、螯合田面水和土壤中的养分,形成可利用形态氮,富集到水稻根系附近,有利于水稻养分吸收和干物质积累,促进水稻增产。

### 3.3 不同施肥处理控污效果的综合评价

利用灰色关联度法对上述与稻田控污相关的主要指标进行综合评价,筛选出控污效果最佳的施肥模式,克服了利用单一指标评价控污效果的弊端,能真实地反映不同施肥处理的实际控污效果。选择田面水氮素浓度、水稻产量和氮素吸收量以及肥料利用率等为主要比较指标,应用灰色关联度法对不同施肥处理的控污效果进行综合评价是可行的。本试验中,应用灰色关联度法对各单一指标进行关联分析,发现籽粒产量关联度最大,其次是基肥期田面水TN浓度,因此推荐水稻籽粒产量和田面水TN浓度作为不同施肥处理控污效果的主要评价指标。通过比较各单一指标的关联系数,T2处理对籽粒产量、秸秆产量和氮吸收量及氮肥利用率影响最大,T3处理对基肥期田面水TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值影响最大,这表明T2处理施氮比例和时期所供给养分与水稻需肥规律一致,有利于水稻养分吸收和干物种积累,促进水稻增产,提高氮肥利用率,而T3处理施氮比例和时期有利于降低田面水不同形态氮浓度。从综合评价结果与排序来看,所有PASP-Ca尿素处理关联度均高于T1处理,其中T2处理关联度最高,其次是T3处理,常规施肥CK1处理关联度最低,这表明添加PASP-Ca和减量施氮对于稻田氮素流失具有较好的防控作用,其中PASP-Ca是影响水稻控污效果的主要因素,减量施肥是次要因素,施肥比例是一般因素。综上所述,应用灰色关联度法对不同施肥处理的控污效果进行综合评价,筛选出T2处理为最佳的施肥模式,兼顾水稻增产和肥

料减施,对于保护粮食安全和环境安全具有双重意义。本研究仅是一年大田试验结果,有待于进一步开展多年田间熟化验证,以保证该技术模式的推广应用效果。

## 4 结论

(1)减量施氮处理降低了田面水氮素浓度,尤其在施肥后第1d,田面水TN浓度显著降低,节约了肥料,保证了水稻稳产。

(2)减量施用PASP-Ca尿素,基、蘖肥施氮比例为80%、20%,能够有效降低田面水氮素浓度,尤其显著降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,是值得推荐的一种控污施肥模式。

(3)减量施用PASP-Ca尿素能够有效增加水稻籽粒、秸秆产量和氮素吸收量,促进水稻增产,提高氮肥利用率。

(4)PASP-Ca尿素能够在一定程度上保障水稻产量,降低田面水氮素浓度,是辽宁省稻区面源污染防治中值得推广的一种技术模式。

### 参考文献:

- [1] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 713-718. LIU Hong-jiang, GUO Zhi, ZHENG Jian-chu, et al. Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 713-718.
- [2] 章秀福, 王丹英, 方福平, 等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究, 2005, 26(2): 86-88. ZHANG Xiu-fu, WANG Dan-ying, FANG Fu-ping, et al. Food safety and rice production in China [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(2): 86-88.
- [3] 李云春, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 控释氮肥对水稻产量、养分吸收及氮肥利用率的影响[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 46-51. LI Yun-chun, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, et al. Effects of controlled-release urea on yield, nutrient uptaking and nitrogen use efficiency of rice [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(3): 46-51.
- [4] 杜君, 孙克刚, 张云红, 等. 控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 134-141. DU Jun, SUN Ke-gang, ZHANG Yun-hong, et al. Effects of controlled release urea on physiological characteristics and nitrogen use efficiency of rice and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 134-141.
- [5] 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.
- [6] 冯轲, 田晓艳, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 329-335. FENG Ke, TIAN Xiao-yan, WANG Li-xia, et al. Influence of combined syn-

- thetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):329-335.
- [7] 岳玉波,沙之敏,赵峥,等.不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(12):1424-1432. YUE Yu-bo, SHA Zhi-min, ZHAO Zheng, et al. Effects of rice cultivation patterns on nitrogen and phosphorus leaching and runoff losses[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(12):1424-1432.
- [8] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141:66-73.
- [9] 汪玉,赵旭,王磊,等.太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J].农业环境科学学报,2014,33(5):829-835. WANG Yu, ZHAO Xu, WANG Lei, et al. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):829-835.
- [10] 宋立芳,王毅,吴金水,等.水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J].环境科学,2014,35(1):150-156. SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, et al. Impact of rice agriculture on nitrogen and phosphorus exports in streams in hilly red soil earth region of central subtropics[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1):150-156.
- [11] 张志剑,王珂,朱荫湄,等.水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究[J].中国水稻科学,2000,14(1):55-57. ZHANG Zhi-jian, WANG Ke, ZHU Yin-mei, et al. Dynamic characteristics of phosphorus in surface water of paddy field and its potential environmental impact[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2000, 14(1):55-57.
- [12] 石敦杰,杨兰,荣湘民,等.控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J].江苏农业科学,2018,46(11):44-47. SHI Dun-jie, YANG Lan, RONG Xiang-min, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer and nitrogen and phosphorus reduction on rice yield and nitrogen and phosphorus loss of surface water[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(11):44-47.
- [13] 刘小纶.氮量和氮肥种类对寒地稻田氮素转化和氨挥发影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2014. LIU Xiao-lun. Effect of nitrogen fertilizing rates and sources on N transformation and ammonia volatilization of paddy soil in cold area[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2014.
- [14] 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.
- [15] 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 poly-peptides polyaspartic acids for agriculture[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(12):2381-2384.
- [16] 柳建良,崔英德,尹国强,等.聚天门冬氨酸的合成及其在农业上的应用[J].仲恺农业技术学院学报,2008,21(2):52-56. LIU Jian-liang, CUI Ying-de, YIN Guo-qiang, et al. Progress in the synthesis and agricultural application of polyaspartic acid[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology*, 2008, 21(2):52-56.
- [17] 郭明海.尿素增效剂聚天门冬氨酸的分子量及其分布测定[J].大氮肥,2006,29(1):29-31. GUO Ming-hai. Measurement of absolute molecular weight and its distribution of polyaspartic acid as urea synergic agent[J]. *Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry*, 2006, 29(1):29-31.
- [18] 苗方.多肽尿素生产技术与发展前景[J].化肥工业,2013,40(6):29-31. MIAO Fang. Production technology and development prospect of polypeptide urea[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2013, 40(6):29-31.
- [19] 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.
- [20] 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 Bing-yi. Study on the synergy mechanism of polyaspartic-acid/salt (PASP) urea and modified urea to the crops[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [21] 巨晓棠.氮肥有效率的观念及意义——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.
- [22] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987. DENG Ju-long. Grey system basic method[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [23] 杨坤宇,王美慧,王毅,等.不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1723-1734. YANG Kun-yu, WANG Mei-hui, WANG Yi, et al. Characteristics and determinants of nitrogen and phosphorus runoff losses under different agronomic measures in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1723-1734.
- [24] 唐敏,许文来,郭宗会.施肥过程中尿素的迁移与转化研究[J].绿色科技,2017(6):59-61. TANG Min, XU Wen-lai, GUO Zong-hui. Study on urea migration and transformation during fertilization[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(6):59-61.
- [25] 官亮,隗英华,王建忠,等.盘锦地区稻田田面水氮素动态变化及化学氮肥投入阈值研究[J].农业资源与环境学报,2013,30(6):96-100. GONG Liang, JUAN Ying-hua, WANG Jian-zhong, et al. Variations of nitrogen in surface water body of a paddy field and input threshold of chemical N fertilizer in Panjin City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(6):96-100.
- [26] 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.
- [27] Shears J H, Wood P M. Spectroscopic evidence for a photosensitive oxygenated state of ammonia mono-oxygenase[J]. *Biochem*, 1985, 226(2):499-507.