

# 生化抑制剂和浒苔多糖配施的稳定性尿素 在黑土中的肥料效果

张艺籍<sup>1,2</sup>,李东坡<sup>1,6</sup>,肖富容<sup>1,2</sup>,李永华<sup>3</sup>,杜艳娣<sup>4</sup>,  
薛妍<sup>1</sup>,宋玉超<sup>1</sup>,张可<sup>1,2</sup>,张金明<sup>5</sup>,崔永坤<sup>5</sup>

(1. 中国科学院 沈阳应用生态研究所,辽宁 沈阳 110016;2. 中国科学院大学,北京 100049;  
3. 北方华锦化学工业集团有限公司,辽宁 盘锦 124021;4. 朝阳县农业技术推广中心,辽宁 朝阳 122000;  
5. 锦西天然气化工有限责任公司,辽宁 葫芦岛 125001;6. 辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站,辽宁 沈阳 110107)

**摘要:**为提高传统稳定性尿素肥料的有效性,将生物刺激素浒苔多糖与生化抑制剂配合制成新型稳定性增效尿素肥料,采用田间盆栽试验探究其在黑土水稻种植中的施用效果,设置以不施氮肥(CK)、单独施用尿素肥料(N)为对照组,将浒苔多糖(E)、在尿素肥料中分别添加了 N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、2-氯-6-三甲基吡啶(CP)和浒苔多糖,共设置 9 个处理,研究其在黑土中的氮素转化特性、水稻植株生理和生物学、植物吸氮量和氮肥吸收利用率等指标。结果表明,在黑土上栽培水稻,相比于单施尿素,浒苔多糖显著提高水稻分蘖期土壤铵态氮含量,促进水稻植株生长发育,显著提高籽粒产量、氮肥利用率。浒苔多糖与 NBPT 具有协同增效作用,二者结合显著提高黑土铵态氮含量,但浒苔多糖施用促进了 NBPT 的分解,两者结合未对产量及氮肥利用率造成显著影响。浒苔多糖与 DMPP 结合显著降低水稻籽粒产量、氮肥利用率,二者结合难以产生良好效果。CP 与浒苔多糖结合处理在水稻分蘖期铵态氮含量最高,二者配合具有协同作用,黑土表观硝化速率显著低于 CP 处理,同时铵态氮的提高能促进水稻分蘖,增加成穗率,显著提高水稻的籽粒产量。

**关键词:**黑土;水稻;生化抑制剂;生物刺激素;浒苔多糖;籽粒产量

中图分类号:S143.1 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2023)05-0139-09

doi:10.7668/hbxb.20193937



## Fertilization Effect of Stable Urea Formulated with Biochemical Inhibitors and *Enteromorpha* Polysaccharide in Black Soil

ZHANG Yiji<sup>1,2</sup>, LI Dongpo<sup>1,6</sup>, XIAO Furong<sup>1,2</sup>, LI Yonghua<sup>3</sup>, DU Yandi<sup>4</sup>,  
XUE Yan<sup>1</sup>, SONG Yuchao<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinming<sup>5</sup>, CUI Yongkun<sup>5</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. North Huajin Chemical  
Industries Group Corporation, Panjin 124021, China; 4. Agricultural Technology Extension Center  
of Chaoyang County, Chaoyang 122000, China; 5. Jinxi Natural Gas Chemical Co. Ltd.,  
Huludao 125001, China; 6. National Field Observation and Research  
the National Field Station of Agro-ecosystem, Shenyang 110107, China)

**Abstract:** In order to improve the use effect of ordinary stable urea fertilizer, develop biostimulant and biochemical inhibitor combined high-efficiency, stable and synergistic urea fertilizer. A field pot test was carried out to investigate the effect of urea fertilizer with the biological stimulator *Enteromorpha* polysaccharide and various biological inhibitors on rice cultivation in black soil. The control group in the experiment consisted of no nitrogen fertilizer (CK) and only urea fertilizer(N). In the treatment group, urea was supplemented with *Enteromorpha* polysaccharide (E), the biochemical inhibitor N-butyl thiophosphate triamine (NBPT), 3,4-dimethylpyrazole phosphate

收稿日期:2023-04-17

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA28090200);国家自然科学基金项目(31971531);辽宁省揭榜挂帅项目(2021JH1/10400039-2)

作者简介:张艺籍(1997—),男,重庆人,硕士,主要从事植物营养与新型高效肥料研究。

通信作者:李东坡(1964—),男,辽宁锦州人,研究员,博士,主要从事植物营养与新型高效肥料研究。

(DMPP), and 2-chloro-6-trimethylpyridine (CP). Additionally, a combination of *Enteromorpha* polysaccharide and a biochemical inhibitor was also added to urea. Nine treatments were set up to study the nitrogen conversion characteristics, physiological and developmental biological indexes of rice, nitrogen uptake by plants, and efficiency of nitrogen absorption and utilization from fertilizers. When urea was applied alone, the addition of *Enteromorpha* polysaccharide reduced ammonia volatilization loss in black soil, significantly increased ammonium nitrogen content in soil at the tillering stage, promoted plant growth, and then significantly increased grain yield and nitrogen use efficiency. The combination of *Enteromorpha* polysaccharide and NBPT significantly increased ammonium nitrogen content in black soil, but the application of *Enteromorpha* polysaccharide promoted the decomposition of NBPT, resulting in no significant effect on rice yield and nitrogen use efficiency. In black soil cultivation rice, the combination of *Enteromorpha* prolifera polysaccharide and DMPP significantly reduced rice grain yield and nitrogen use efficiency, and the application of stable urea fertilizer combined with both was not conducive to yield increase and efficiency increase. The combination of tillering stage CP rice plants and *Enteromorpha* polysaccharides had the highest ammonium nitrogen content in black soil, and had a synergistic effect on the process of inhibiting urea nitrogen conversion to nitrate nitrogen. The apparent nitrification rate of black soil treated with the two was significantly lower than that of CP alone, while the increase in ammonium nitrogen promoted rice tillering, increased panicle percentage, and thus significantly increased rice grain yield.

**Key words:** Black soil; Rice; Biochemical inhibitor; Biostimulant; *Enteromorpha* polysaccharide; Grain yield

氮是植物必需的大量营养元素之一,在粮食生产中起到关键性的作用,施用肥料增产提供了约全球一半人口的粮食,而全球人口仍在不断增长,对粮食的需求必将不断地增加<sup>[1]</sup>。在现代农业生产中,施肥是确保作物充分生长,保证粮食产量的必不可少的手段<sup>[2]</sup>。但是施入土壤中的氮肥大部分通过氨挥发、硝酸盐淋溶、硝化/反硝化等手段损失<sup>[3]</sup>,导致土壤质量下降<sup>[4]</sup>、温室气体排放增多<sup>[5]</sup>、水体富营养化<sup>[6]</sup>,对环境带来极大的潜在威胁<sup>[7]</sup>。

为应对上述问题,采取向化学氮肥中添加生化抑制剂(脲酶抑制剂和硝化抑制剂)的举措,调控化肥氮在环境中的转变速度,以减轻氮素流失对环境的损害,提高粮食作物产量<sup>[8]</sup>。研究证实,生化抑制剂能够在粮食作物增产<sup>[9]</sup>、降低土壤温室气体排放<sup>[5]</sup>、及增加氮肥使用率<sup>[10]</sup>等方面具有积极作用,但是生化抑制剂的有效性受诸多环境因素和管理因素的影响<sup>[11]</sup>,因此,研发更高效、环境友好的新型稳定性氮素肥料是未来高效氮肥发展的重要趋势之一。

近年来,随着全球生物刺激素产业的不断壮大与发展,化肥领域对生物刺激素的关注度也在与日俱增<sup>[12]</sup>。不同于传统意义上的肥料与农药,生物刺激素具有用量小、增产幅度大等特点。2019年,欧盟颁布的最新肥料法中对生物刺激素定义为:“生物刺激素是不依赖于植物营养成分的产物,可以促进生长的自然过程,可以提高对植株营养的有效吸收率,可以提高植株养分利用效率,可以增强植株抵抗非生物胁迫的能力,可以提高作物品质,可以提高

植株对土壤表面及根际的营养有效吸收率等”<sup>[13]</sup>。国际上将生物刺激素主要分成5种,即海藻和草本植物萃取液、微生物制剂和提纯物质、水解和消化过的动物残体、胡敏酸和富里酸、无机和生物合成物质<sup>[14]</sup>。其中,海藻提取物已成为最主要的生物刺激素之一,在农业领域也获得了应用<sup>[15]</sup>。

自2007年起,我国近海面、沙滩堆积大量的浒苔,对海洋生态环境造成了不良影响,对浒苔危害的治理引起了人们的高度关注,如何解决环境问题,并利用浒苔造福农业生产,成了海洋生物相关研究的方向之一。研究发现,浒苔多糖在农业生产中表现出良好的应用效果<sup>[16]</sup>。浒苔多糖作为有机肥、叶面肥、水溶肥施用,对黄瓜、白菜、草莓等作物具有较好的施用效果,如提升作物产量、改善作物果实品质<sup>[17-19]</sup>。柳嘉怡等<sup>[20]</sup>研究表明,在水稻育苗中将浒苔多糖当作有机肥使用,能够提高水稻植株中的氮素含量,促进叶绿素的合成,增强光合作用强度,从而提高可溶性糖的含量,进而增强水稻长势。浒苔多糖作为一类应用效果良好的生物刺激素,其与生化抑制剂结合添加到尿素肥料中制成新型稳定性氮肥的作用效果值得探究。水稻是全球约百分之五十人口的主要粮食作物,对于保障全球粮食安全具有重要意义<sup>[21]</sup>。近年来中国水稻氮肥的利用率仅为39%<sup>[22]</sup>,一半以上的肥料氮素损失至大气、水体等环境中。因而,本研究选取当前农业生产中使用较为普遍的脲酶抑制剂 NBPT,硝化 DMPP、CP 与浒苔多糖结合添加在尿素肥料中制成高效稳定性增效

尿素肥料,在黑土进行水稻种植试验,研究新型稳定尿素肥料的氮转化特性和生物功效,为新型高效稳定协同肥料的研发提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

土壤样品采自吉林省农安县永安乡的农田耕作层,土壤特性:有机质含量(32.19 g/kg)、全氮(1.68 g/kg)、铵态氮(11.15 mg/kg)、硝态氮(59.73 mg/kg)、全磷(0.79 g/kg)、可利用磷(78.88 mg/kg)、全钾(50.50 g/kg)、可利用钾(322.15 mg/kg)和 pH 值 6.23。试验使用的肥料为尿素,由国药集团提供,含氮量为 46%;重超磷酸由云天化集团有限责任公司提供,含  $P_2O_5$  量为 43%;氯化钾产自俄罗斯,含  $K_2O$  量为 60%;尿素酶抑制剂 N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)由麦科林生物技术提供;硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和 2-氯-6-三甲基吡啶(CP)由玛雅试剂生物科技公司提供,以上生化抑制剂均为分析纯。海藻多糖(E)由中国某公司供应,含有 7.45% 的海藻多糖、7.21% 的藻酸盐、7.30% 的有机物质, pH 值 6。试验作物为粳稻,品种为美丰 1 号。

### 1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,依次是:①不施尿素(CK);②单施尿素(N);③添加浒苔多糖尿素(E);④添加 NBPT 尿素(NBPT);⑤添加 DMPP 尿素(DMPP);⑥添加 CP 尿素(CP);⑦添加 NBPT 和浒苔多糖尿素(NBPT + E);⑧添加 DMPP 和浒苔多糖尿素(DMPP + E);⑨添加 CP 和浒苔多糖尿素(CP + E)。每个处理 3 次重复。浒苔多糖用量为尿素用量的 6%,NBPT、DMPP、CP 添加比例依次为尿素用量的 0.25%、0.50%、0.25%。各处理施磷量为 0.12 g/kg,施钾量为 0.15 g/kg,除 CK 处理外,其他处理所施氮量均为 0.7 g/kg。进行水稻盆栽试验,塑料盆高 28 cm,直径 26 cm。每盆装土量相当于干土 6 kg,每盆定植 5 穴水稻,每穴 3 株,一次施肥,在水稻生长期不再追肥。

进行水稻盆栽时,准备好土壤。经过预处理的土壤均匀地铺在塑料布上。准备肥料,依次称重尿素、浒苔多糖和生化抑制剂,并将它们混合均匀。先将浒苔多糖和生化抑制剂混合,再与尿素混合。将配制好的肥料样品与少量土壤混合,确保均匀分布。人工将所有土壤充分混合。将混合好的土壤转移到盆中,并向盆栽浇水形成 2 cm 水面,用于插秧。在水稻生长期,需要手动浇水,并且确保每个盆的水

量相同。此外,还需按照当地田间的常规操作管理水稻的生长,包括施肥、除草、病虫害防治等。

### 1.3 样品采集

试验于 2020 年 5 月 20 日开始,装盆插秧,在 10 月 7 日进行水稻收获。在水稻生长期,采用五点采样法采集土壤样品。采样时间分别是水稻的 4 个生长期:分蘖期、抽穗开花期、灌浆期和成熟期。在每个生长期结束后,去除了细根杂物等,将采集的土壤样本混合均匀备用。此外,在水稻灌浆初期,测量水稻植株的叶面积和叶片叶绿素含量。在水稻成熟期,收获整盆水稻植株,并进行了风干处理。计算水稻籽粒产量、生物产量和根生物量等指标。同时,收集了水稻籽粒、秸秆和植株根部样本,并进行了全氮含量分析。通过试验设计和数据收集,得到关于水稻生长过程中叶面积、叶片叶绿素含量、产量指标以及土壤和植物样本的全氮含量等方面的数据。

### 1.4 测定指标及方法

土壤中尿素氮的测定包括测量土壤样本中的铵和硝酸盐含量。将这些样品与氯化钾溶液(2 mol/L;土壤与水的比例为 1:10)混合,并以 160 r/min 的转速振荡约 1 h。然后过滤混合物,收集洗脱液,再用 AA3 流量分析仪分析其中的铵和硝酸盐含量。

在稻米灌浆早期阶段,使用叶绿素仪或叶面积仪测量稻叶的叶绿素含量和叶面积。在成熟期时确定分蘖数和植株高度,并在收割后对稻株进行考种。然后,将稻谷、茎叶和根在 70 °C 下烘干至恒定质量,使用粉碎机碾碎,并通过 0.5 mm 筛子过滤,然后利用 VARIO MACRO 元素分析仪测定稻谷、茎叶、稻秆和根的氮含量,进而计算出稻株的总氮含量。

### 1.5 计算方法

$$\text{硝化抑制率} = (a - b) / a \times 100\%$$

式中, $a$  为只施普通尿素处理的土壤硝态氮含量(mg/kg), $b$  为添加抑制剂或/和生物刺激素尿素处理土壤硝态氮含量(mg/kg)<sup>[23]</sup>。

土壤表观硝化速率 = 土壤硝态氮含量 / (土壤铵态氮含量 + 土壤硝态氮含量) × 100%<sup>[24]</sup>。

参照肖富容等<sup>[25]</sup>的方法进行以下指标计算:

水稻植物吸氮量(g/株) = 水稻含氮量(g/g) × 水稻干物质质量(g/株);

水稻氮肥吸收利用率 = (施氮处理水稻植株氮积累量(g) - 不施氮肥处理水稻植株氮积累量(g)) / 施氮量(g) × 100%;

水稻氮肥偏生产力(g/g) = 施用化肥处理水稻稻谷产量(g) / 施氮量(g);

水稻氮肥农学效率(g/g) = (施氮处理水稻籽

粒产量(g) - 不施氮处理水稻籽粒产量(g))/施氮量(g);

肥料氮贡献率 = (施氮处理水稻稻谷产量(g) - 不施氮处理水稻稻谷产量(g))/施氮水稻稻谷产量(g) × 100%。

### 1.6 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2020 和 SPSS 25.0等软件进行,图表制作使用 Origin 2023 软件,差异性显著检验采用 Duncan 最小显著极差法进行。对于浒苔多糖和生化抑制剂对水稻植株特性的影响,进行了单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理黑土中氮素变化特征

在水稻的分蘖期,经过对各处理下的黑土进行检测,未发现任何尿素态氮的存在。这表明,在此阶段施入黑土的尿素态氮已经完全转化。因此,在之后的3个时期中,不再对土壤样品进行尿素态氮含量的测定。

2.1.1 不同处理黑土铵态氮变化特征 各处理的土壤铵态氮含量随着水稻的生长呈下降趋势,分蘖期土壤铵态氮含量最高,施氮处理铵态氮均高于CK处理;浒苔多糖与氮肥配施铵态氮含量显著高于CK和单独施用氮肥(图1)。

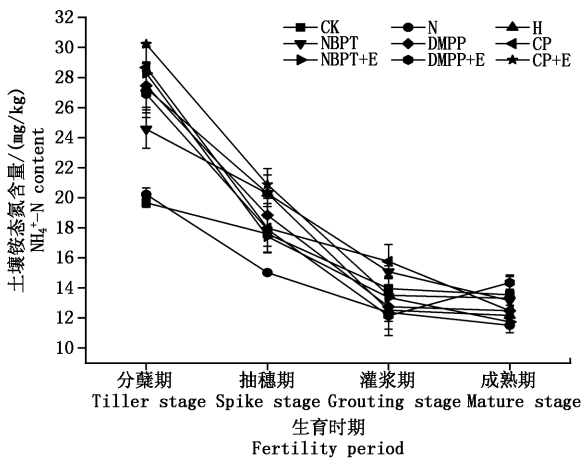


图1 不同处理水稻各生育时期黑土铵态氮含量

Fig.1 Ammonium nitrogen content of black soils at various fertility periods in rice with different treatments

单独施用生化抑制剂以及生化抑制剂结合浒苔多糖土壤铵态氮含量均显著高于单施尿素。NBPT + E 土壤铵态氮显著高于 NBPT 单独添加;相比 DMPP 处理,DMPP + E 与 DMPP 土壤铵态氮均无显著性差异;CP 与浒苔多糖配施土壤铵态氮含量最高,为 30.22 mg/kg;从抽穗期起,CK 处理的土壤铵态氮含量均显著高于单施氮肥(图1),这是由于自施肥起,与其他处理对比,CK 水稻植株吸收

的铵态氮含量较少,但随水稻植株的生长,对土壤营养的需要不断提高,而CK处理土壤中的养分不能满足水稻植株的生长发育,生长愈加缓慢和弱小,会降低植株对土壤中养分的吸收能力,吸收土壤铵态氮的能力减弱,从而导致土壤铵态氮含量的累积。抽穗期,土壤铵态氮含量最高仍为CP + E,为20.88 mg/kg。NBPT + E 处理土壤铵态氮含量显著低于NBPT处理,CP + E 处理配施土壤铵态氮含量显著高于CP处理(图1)。灌浆期和成熟期土壤铵态氮含量逐渐减少,各处理土壤铵态氮含量趋于一致(图1)。

2.1.2 不同处理黑土硝态氮变化特征 水稻土壤长期被淹没,土壤为厌氧状态,土壤硝化作用相对较弱,因而所有处理黑土硝态氮含量总体较低。在水稻生长期,硝态氮含量呈先升高后降低而后再升高的趋势。水稻分蘖期和抽穗期,E 的土壤硝酸盐含量显著高于其他处理。E 的硝酸盐含量在生长后期有所下降,随后逐渐趋于与其他处理一致(图2),说明浒苔多糖增加了黑土硝态氮的积累。水稻分蘖期,E 的土壤硝态氮含量显著高于其他处理,为3.40 mg/kg;CP + E 土壤硝态氮含量显著低于其他处理,为1.36 mg/kg(图2)。抽穗期至灌浆期,CK 处理土壤硝态氮含量与铵态氮含量呈现一致规律(图2)。成熟期,各处理硝态氮含量均高于CK处理(图2),与试验结果相反;抽穗期,相应处理之间没有明显差异。E 处理在水稻生长初期的土壤硝酸盐含量明显高于其他处理,但是浒苔多糖与生化抑制剂结合,减少了土壤硝态氮含量,相比添加硝化抑制剂处理,土壤硝态氮含量更低,其中CP和浒苔多糖配合最具代表性,且具有显著性差异(图2)。

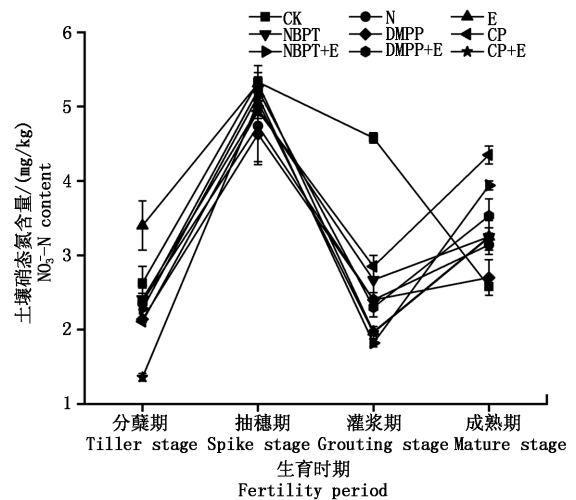


图2 不同处理水稻各生育时期黑土硝态氮含量

Fig.2 Nitrate nitrogen content of black soils at various stages of rice fertility in different treatments

## 2.2 不同处理黑土表观硝化速率

水稻生育期内,土壤表观硝化速率先上升后下降再上升(表1)。分蘖期,NBPT与浒苔多糖表观硝化速率显著低于NBPT单独施用;CP+E表观硝化速率最低,为4.32%,且显著低于CP;抽穗期,E显

著低于N,NBPT+E、DMPP+E、CP+E表观硝化速率分别显著高于NBPT、DMPP、CP(表1)。说明浒苔多糖结合NBPT、DMPP、CP能在一定程度上增强生化抑制剂抑制黑土的硝化作用。

表1 水稻不同时期黑土的表观硝化速率

Tab.1 Apparent nitrification rate of black soil at different periods in rice

处理 Treatments	分蘖期 Tiller stage	抽穗期 Spike stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Mature stage
CK	11.80 ± 1.03a	23.30 ± 1.31a	24.70 ± 0.63a	16.05 ± 1.36e
N	10.00 ± 0.21a	23.90 ± 1.79a	16.30 ± 0.84b	21.45 ± 0.83b
E	11.10 ± 0.88a	20.80 ± 1.37bed	13.60 ± 0.59c	21.10 ± 0.81bc
NBPT	8.90 ± 0.44b	19.70 ± 1.22cd	15.01 ± 0.95b	19.85 ± 0.78c
DMPP	7.20 ± 0.36c	19.70 ± 0.70d	15.80 ± 0.59b	17.82 ± 1.51de
CP	6.90 ± 0.34c	21.60 ± 2.08abc	15.40 ± 0.91b	25.85 ± 0.53a
NBPT + E	7.50 ± 0.71c	22.80 ± 1.27ab	12.00 ± 0.41c	25.11 ± 0.34a
DMPP + E	8.12 ± 0.95bc	22.60 ± 1.19ab	16.00 ± 0.84b	19.73 ± 0.55c
CP + E	4.32 ± 0.17d	19.50 ± 0.23cd	12.70 ± 1.02c	19.58 ± 1.68cd

注:同一时期不同字母表示不同处理差异达5%显著水平。表2同。

Note: Different letters indicate significant differences between different treatments at a significance level of 5% during the same period. The same as Tab.2.

## 2.3 不同处理水稻植株生理和生物学指标特征

相比生化抑制剂单独施用,生化抑制剂和浒苔多糖配施水稻生物学指标影响较大,DMPP处理生物产量最高,显著高于其他处理,为363.89 g/株,DMPP+E配施,相比DMPP施用,生物产量显著降低12.57%;而DMPP+E以及E处理根生物量最高,均显著高于其他处理,分别为54.79,54.61 g/株,浒苔多糖与NBPT、DMPP结合提高了根生物量,其中DMPP浒苔多糖配施显著提高了13.74%(表2)。与CK处理相比,单独施用尿素可显著提高谷物产量、生物产量、根生物量、叶绿素含量和分蘖数(表2),说明氮肥的施用对水稻的增产效果明显。相比单施尿素,浒苔多糖显著提高水稻籽粒产量、生物产量、根生物量、分蘖数,分别提高27.2%,9.23%,27.1%,17.65%,但叶绿素含量和叶面积指数无显著差异(表2);DMPP处理水稻籽粒产量最高,为111.24 g/株,相

比单施生化抑制剂,NBPT与浒苔多糖结合提高水稻籽粒产量1.17%,DMPP结合浒苔多糖降低7.37%,CP结合浒苔多糖提高10.40%,均具有显著差异(表2);浒苔多糖与DMPP、NBPT配施降低了水稻的叶绿素含量,特别是在DMPP+E,相比DMPP处理,浒苔多糖的添加导致叶绿素含量显著降低10.53%。相比单独施用生化抑制剂处理,添加浒苔多糖导致叶面积指数一定程度的降低,其中CP结合浒苔多糖显著减少了13.40%(表2)。综合叶绿素含量降低和叶面积指数降低分析,浒苔多糖的添加会使水稻的光合作用在一定程度上减少。相比生化抑制剂单独施用,浒苔多糖的施用使水稻分蘖数均有所提高。NBPT和CP结合浒苔多糖水稻分蘖数分别显著提高了17.37%,9.24%(表2)。结果表明,浒苔多糖和生化抑制剂结合,利于提高水稻产量。

表2 不同处理水稻植株生理、生物学指标特征

Tab.2 Characteristics of physiological and biological indicators of rice plants in different treatments

处理 Treatments	籽粒产量/ (g/株) Grain yield	生物产量/ (g/株) Total biomass	根生物量/ (g/株) Root biomass	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶面积 指数/cm <sup>2</sup> Leaf area	分蘖数 Tiller number	株高/cm Plant height
CK	58.76 ± 1.33e	182.91 ± 4.23d	27.75 ± 3.53d	7.43 ± 0.31d	24.33 ± 2.46d	7.53 ± 0.31e	71.98 ± 1.94c
N	76.29 ± 2.22d	306.12 ± 15.77c	39.81 ± 1.41c	19.52 ± 0.07bc	25.56 ± 0.83cd	10.27 ± 0.31d	84.32 ± 1.20a
E	104.80 ± 5.59abc	337.26 ± 18.68b	54.61 ± 3.97a	20.19 ± 1.14abc	27.85 ± 2.50bcd	12.47 ± 0.31ab	83.59 ± 1.64a
NBPT	99.82 ± 2.29c	317.63 ± 14.62bc	43.86 ± 2.41bc	20.95 ± 0.14ab	29.92 ± 3.78b	10.47 ± 0.81d	82.67 ± 2.25ab
DMPP	111.24 ± 2.26a	363.89 ± 5.28a	47.26 ± 0.87b	21.27 ± 0.88a	30.13 ± 0.41b	11.53 ± 0.61bc	79.06 ± 0.59b
CP	98.74 ± 5.61c	329.38 ± 2.12b	44.31 ± 2.19bc	19.86 ± 0.04abc	34.45 ± 1.85a	11.13 ± 0.61cd	84.20 ± 0.21a
NBPT + E	101.00 ± 3.72c	324.62 ± 2.75bc	46.83 ± 2.69b	20.09 ± 0.82abc	29.12 ± 0.81bc	12.67 ± 0.42a	84.92 ± 1.48a
DMPP + E	103.61 ± 5.37bc	323.26 ± 9.63bc	54.79 ± 4.39a	19.25 ± 0.97c	28.06 ± 2.59bcd	11.80 ± 0.72abc	83.31 ± 5.28a
CP + E	110.21 ± 0.80ab	326.72 ± 12.53bc	44.30 ± 0.75bc	20.38 ± 1.75abc	30.38 ± 1.83b	12.27 ± 0.23ab	84.07 ± 0.39a

## 2.4 不同处理水稻吸氮量及氮肥利用效率

2.4.1 不同处理水稻稻谷吸氮量、茎叶吸氮量、根吸氮量 DMPP 处理水稻稻谷吸氮量最高,为 1.36 g/株,显著高于只施氮和 CK 处理。DMPP、CP 处理茎叶吸氮量最高,为 1.19 g/株。DMPP 结合浒苔多糖根吸氮量最高,为 0.50 g/株。施氮处

理的稻谷吸氮量、茎叶吸氮量、根吸氮量显著高于 CK 处理。E 与 N 处理相比,水稻稻谷吸氮量、根吸氮量有显著提高,而茎叶吸氮量没有显著变化,这与水稻叶面积指数无明显变化有关。浒苔多糖和生化抑制剂配施与 CP 处理相比,CP + E 显著提高 10.63% 稻谷吸氮量,其他指标无显著差异(表 3)。

表 3 不同处理植株吸氮量与肥料氮贡献率

Tab. 3 N uptake and fertilizer N contribution of plants in different treatments

处理 Treatments	稻谷吸氮量/ (g/株) Grain N uptake	茎叶吸氮量/ (g/株) Nitrogen uptake by stems and leaves	根吸氮量/ (g/株) Root nitrogen uptake	总吸氮量/ (g/盆) Total N uptake	水稻氮肥吸 收效率/% NUE	氮肥偏 生产力/(g/g) NPFP	水稻氮肥农学 效率/(g/g) NAE
CK	0.66 ± 0.05f	0.43 ± 0.03c	0.19 ± 0.02c	1.28 ± 0.09d	-	91.46 ± 2.12d	-
N	0.90 ± 0.08e	1.14 ± 0.03ab	0.36 ± 0.03b	2.39 ± 0.04c	26.54 ± 1.03c	153.06 ± 7.88c	29.33 ± 3.75c
E	1.26 ± 0.09abcd	1.03 ± 0.12ab	0.46 ± 0.01a	2.75 ± 0.17b	34.96 ± 3.95b	168.63 ± 9.34b	36.75 ± 4.45b
NBPT	1.15 ± 0.01d	1.13 ± 0.12ab	0.39 ± 0.02b	2.67 ± 0.12b	33.19 ± 2.88b	158.81 ± 7.31bc	32.08 ± 3.48bc
DMPP	1.36 ± 0.05a	1.19 ± 0.01a	0.47 ± 0.02a	3.01 ± 0.05a	41.20 ± 1.28a	181.95 ± 2.64a	43.09 ± 1.26a
CP	1.17 ± 0.11cd	1.19 ± 0.05a	0.38 ± 0.02b	2.73 ± 0.10b	34.46 ± 2.47b	164.69 ± 1.06b	34.87 ± 0.50b
NBPT + E	1.22 ± 0.02bcd	1.14 ± 0.15ab	0.46 ± 0.02a	2.82 ± 0.14ab	36.64 ± 3.43b	162.31 ± 1.38bc	33.74 ± 0.66bc
DMPP + E	1.27 ± 0.05abc	0.98 ± 0.12b	0.50 ± 0.04a	2.76 ± 0.16b	35.13 ± 3.91b	161.63 ± 4.82bc	33.42 ± 2.29bc
CP + E	1.30 ± 0.01ab	1.06 ± 0.05ab	0.39 ± 0.02b	2.75 ± 0.07b	35.04 ± 1.59b	163.36 ± 6.27bc	34.24 ± 2.98bc

2.4.2 不同处理氮肥吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率 浒苔多糖处理的氮肥吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率均显著高于单施尿素处理,说明浒苔多糖的添加促进水稻对土壤养分的吸收,促进水稻产量的提升。相比生化抑制剂,浒苔多糖结合 NBPT、CP 与单独施用 NBPT、CP 水稻氮肥吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率无显著差异(表 3),DMPP + E 相比 DMPP 处理水稻氮肥吸收效率、氮肥偏生产力和农学效率显著降低。由表 2 可知,虽然水稻植株根生物量显著提高有助于水稻吸收土壤养分,但是由于土壤养分可能流失到其他部位,导致叶绿素含量的显著降低,最终植株光合作用下降。

的非生物保护,从而降低其挥发损失,导致水稻分蘖期土壤铵态氮含量显著提高<sup>[26]</sup>,其作用效果与 NBPT 类似,因而二者配合能进一步提高黑土铵态氮含量,但是在水稻抽穗期,浒苔多糖结合 NBPT 黑土铵态氮含量显著降低,因为浒苔多糖中的海藻多糖疏通土壤结构可以促进土壤微生物的活性,使得黑土微生物活性增加<sup>[27]</sup>,同时浒苔多糖中有机质的加入为微生物提供营养,促进微生物生长、繁殖,最终降解 NBPT 的速率加快,导致分蘖期后黑土 NBPT 作用效果消失,氨挥发增加,抽穗期后黑土铵态氮显著降低,水稻吸收养分降低;DMPP 在高有机质土壤中分解速率会提高<sup>[28]</sup>,而浒苔多糖的配施也增加了土壤有机质含量,促进土壤微生物活性,导致黑土土壤加快降解 DMPP,所以分蘖期土壤铵态氮含量降低,而硝化作用底物的减少会导致硝化作用减弱,因而表观硝化速率相比 DMPP 单独施用显著降低。已有研究证明,CP 是抑制氨氧化过程,减少 N<sub>2</sub>O 的产生,使黑土铵态氮含量增加<sup>[29]</sup>,而 CP 与浒苔多糖配施两者分别抑制了黑土氨氧化和尿素水解,对抑制脲态氮向硝态氮转化的过程具有协同作用,因此,两者结合水稻分蘖期黑土表观硝化速率显著低于 CP 单独处理。

浒苔多糖与尿素配施增加黑土铵态氮含量,极大促进了黑土铵态氮的硝化作用,导致水稻分蘖期添加浒苔多糖的处理黑土硝态氮含量最高;而浒苔多糖和生化抑制剂配施各处理,水稻分蘖期黑土硝

## 3 结论与讨论

### 3.1 浒苔多糖与生化抑制剂结合在黑土中对尿素肥料氮转化的影响

根据研究结果发现,脲酶抑制剂能显著延缓尿素态氮向铵态氮转化,硝化抑制剂能够有效抑制铵态氮向硝态氮转化的生物化学过程,这与在黑土上的过往研究结果一致<sup>[11]</sup>。研究表明,NBPT 能降低约 20%~50% 的稻田氨挥发损失<sup>[5]</sup>,但由于稻田土壤长时间处于淹水状态,硝化作用较弱,铵态氮在土壤中留存时间较长,因此,NBPT 的加入提高了分蘖期土壤铵态氮含量;NBPT 与浒苔多糖配施显著提高黑土铵态氮含量,由于浒苔多糖含有海藻酸,其中的部分官能团可络合土壤中的铵根离子,给予一定

态氮相比添加浒苔多糖处理显著降低,表明生化抑制剂有较强的硝化抑制作用,与前人研究一致<sup>[30]</sup>。而生化抑制剂和浒苔多糖配施与生化抑制剂相比,只有浒苔多糖结合 CP 相比单独 CP 处理黑土硝态氮含量显著降低,研究表明<sup>[31]</sup>,浒苔多糖的添加会促进土壤中反硝化细菌(枯草芽孢杆菌(BS)、恶臭假单胞菌(PS)和恶臭假单胞菌(PP))的活性,促进反硝化作用,减少土壤硝态氮含量。水稻虽然是喜铵作物,但是也会吸收一定的硝态氮<sup>[32]</sup>,CP 处理水稻根系生长发育较好,吸收土壤硝态氮含量较多,硝态氮显著减少。浒苔多糖处理相比单施尿素显著提高黑土铵态氮的含量,虽然浒苔多糖对土壤硝化作用有明显的抑制效果,但是土壤铵态氮含量的提高也会促进硝化作用,最终导致单施尿素、尿素结合浒苔多糖 2 个处理水稻分蘖期黑土表观硝化速率无显著性差异。

### 3.2 浒苔多糖与生化抑制剂结合在黑土中对水稻生物学指标和氮肥效率的影响

相关研究表明,土壤铵态氮增加会提高水稻分蘖数,从而提高水稻的稻谷产量<sup>[33]</sup>,而浒苔多糖配施尽管 NBPT 显著提高水稻分蘖期黑土土壤铵态氮含量、水稻植株的分蘖数,但是 NBPT 作用效果是抑制土壤脲酶活性,可能浒苔多糖的施用提高土壤微生物活性,导致 NBPT 分解加速,造成抽穗期后土壤铵态氮显著降低,土壤可供水稻吸收氮素养分数量降低,最终导致水稻植株发育减缓,水稻叶绿素含量、叶面积指数、稻谷产量、氮肥吸收利用率、水稻氮肥偏生产力、水稻氮肥农学效率均无显著差异。DMPP 与浒苔多糖结合相比单施 DMPP 植株稻谷产量、叶绿素含量显著降低,可能是因为土壤养分的减少导致植株生长发育迟缓,叶片合成叶绿素减少。DMPP 结合浒苔多糖相较于 DMPP 单独使用,水稻植株的稻谷产量、生物产量、叶绿素含量、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率均显著降低,可能是因为土壤养分的减少导致植株生长发育减弱,因此,DMPP 与浒苔多糖结合不利于水稻增产以及提高氮肥利用效率。CP 和浒苔多糖结合,由于浒苔多糖可以增强 CP 对土壤氨氧化细菌的抑制<sup>[29]</sup>,这与试验结果黑土表观硝化速率显著降低、分蘖期铵态氮含量最高相一致,显著提高黑土铵态氮含量,促进水稻分蘖,增加分蘖成穗数量;并且浒苔多糖的添加能使水稻叶面积提高,与单独施用浒苔多糖的研究结果相同,说明浒苔多糖结合 CP 的稳定性增效尿素肥料更能促进水稻植株的叶片生长,促进植物光合作用,从而提高水稻的稻谷产量。

添加浒苔多糖尿素肥料能提高稻田黑土铵态

氮、硝态氮含量,水稻氮肥利用效率、根生物量、水稻分蘖数和产量;CP 与浒苔多糖结合的稳定性尿素肥料极大程度提高 CP 的作用效果,显著降低黑土表观硝化速率,延缓黑土铵态氮向硝态氮转化,促进水稻分蘖数增加,提高水稻产量;NBPT 与浒苔多糖结合的稳定性尿素肥料能促进脲酶抑制剂 NBPT 的分解,黑土氮素养分流失加快,水稻产量无显著变化;DMPP 与浒苔多糖结合稳定性尿素肥料降低水稻氮肥利用率和产量。在黑土上栽培水稻,建议采用浒苔多糖与 CP 结合的新型高效稳定性增效尿素肥料。

### 参考文献:

- [1] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, Klimont Z, Winiwarte W. How a century of ammonia synthesis changed the world [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (10): 636-639. doi:10.1038/geo325.
- [2] Good A G, Beatty P H. Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons [J]. *PLoS Biology*, 2011, 9 (8): e1001124. doi:10.1371/journal.pbio.1001124.
- [3] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, 418 (6898): 671-677. doi:10.1038/nature01014.
- [4] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 张桃林, 赵其国. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 656-660. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2004.04.055.  
Huang G Q, Wang X X, Qian H Y, Zhang T L, Zhao Q G. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 656-660.
- [5] 武开阔, 张丽莉, 宋玉超, 李玉华, 宫平, 武志杰, 杨立杰, 李东坡. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1287-1294. doi:10.13287/j.1001-9332.201904.026.  
Wu K K, Zhang L L, Song Y C, Li Y H, Gong P, Wu Z J, Yang L J, Li D P. Effects of stabilized N fertilizer combined with straw returning on rice yield and emission of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in a paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1287-1294.
- [6] 全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日) [J]. *环境教育*, 2014 (6): 8-10.  
Report on the national general survey of soil contamination (2014-04-17) [J]. *Environmental Education*, 2014 (6): 8-10.
- [7] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 李春俭, 陈新平. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687-694. doi:10.3969/j.issn.1674-3466.2007.06.001.  
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, Li C J, Chen X P. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687-694.
- [8] Akiyama H, Yan X Y, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16 (6): 1837-1846. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x.
- [9] 李学红, 李东坡, 武志杰, 崔磊, 肖富容, 李永华, 郑野, 张金明. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1352-1360. doi:10.13287/j.1001-9332.202104.023.  
Li X H, Li D P, Wu Z J, Cui L, Xiao F R, Li Y H, Zheng

- Y, Zhang J M. Effect of urease/nitrification inhibitor on urea nitrogen conversion in black soil and cinnamon soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (4): 1352-1360.
- [10] Rose T J, Wood R H, Rose M T, Van Zwieten L. A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 69-73. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.008.
- [11] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, Guardia G, Vallejo A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 136-144. doi: 10.1016/j.agee.2014.03.036.
- [12] 谢尚强, 王文霞, 张付云, 尹恒. 植物生物刺激素研究进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35 (3): 487-496. doi: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2019.03.017.
- Xie S Q, Wang W X, Zhang F Y, Yin H. Research progress of plant biostimulants [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (3): 487-96.
- [13] 陈晓岚, 涂霞艺. 生物刺激素在欧美的最新管理进展 [J]. *世界农药*, 2020, 42 (2): 29-32. doi: 10.16201/j.cnki.en10-1660/tq.2020.02.06.
- Chen X L, Tu X Y. An introduction to the latest regulatory management of biostimulants in the US and EU [J]. *World Pesticides*, 2020, 42 (2): 29-32.
- [14] 自由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (1): 1-8. doi: 10.11674/zwyf.16460.
- Bai Y L. Challenges and opportunities of fertilizer industry in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23 (1): 1-8.
- [15] El Boukhari M E M, Barakate M, Bouhia Y, Lyamlouli K. Trends in seaweed extract based biostimulants; Manufacturing process and beneficial effect on soil-plant systems [J]. *Plants*, 2020, 9 (3): 359. doi: 10.3390/plants9030359.
- [16] 王盼, 孙占一, 申培丽. 浒苔多糖的制备及应用研究进展 [J]. *现代食品*, 2020 (21): 70-72. doi: 10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2020.21.022.
- Wang P, Sun Z Y, Shen P L. The study of the preparation and application of *Enteromorpha* polysaccharides [J]. *Modern Food*, 2020 (21): 70-72.
- [17] 刘松, 李冰, 邢荣娥, 李克成, 于华华, 李鹏程. 浒苔提取物对黄瓜产量及生物性状的影响 [C]. 中国海洋湖沼学会, 中国科学院海洋研究所. 中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会论文集, 青岛, 2012: 85-86.
- Liu S, Li B, Xing R E, Li K C, Yu H H, Li P C. Effects of *Enteromorpha prolifera* extracts on the yield and biological characteristics of cucumber [C]. Proceedings of the tenth National Congress and Academic Seminar of China Marine Limnology Society, Qingdao, 2012: 85-86.
- [18] 李秀珍, 宋海妹, 单俊伟, 梁云波. 浒苔海藻肥在白菜上的增产效果研究 [J]. *现代农业科技*, 2011 (20): 292-292, 295. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2011.20.190.
- Li X Z, Song H M, Shan J W, Liang Y B. Study on yield-increasing effect of *Enteromorpha prolifera* seaweed fertilizer on cabbage [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011 (20): 292-292, 295.
- [19] 马栋, 刘海燕, 单俊伟, 仝星星, 李建强. 海带与浒苔混合提取液对草莓生长及品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (5): 129-134. doi: 10.11838/sfsc.20170522.
- Ma D, Liu H Y, Shan J W, Tong X X, Li J Q. Effects of mixed extracts of *Laminaria japonica* aresch and *Enteromorpha prolifera* on the growth and quality of strawberry [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017 (5): 129-134.
- [20] 柳嘉怡, 高文逸, 王海华. 浒苔多糖及浒苔多糖铁对水稻育苗生长的影响 [J]. *现代农业科技*, 2022 (6): 1-3, 9. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2022.06.001.
- Liu J Y, Gao W Y, Wang H H. Effects of *Enteromorpha prolifera* polysaccharide and *Enteromorpha prolifera* polysaccharide iron on rice seedling growth [J]. *XianDai NongYe KeJi*, 2022 (6): 1-3, 9.
- [21] 朱德峰, 程式华, 张玉屏, 林贤青, 陈惠哲. 全球水稻生产现状与制约因素分析 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43 (3): 474-479. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.03.005.
- Zhu D F, Cheng S H, Zhang Y P, Lin X Q, Chen H Z. Analysis of status and constraints of rice production in the world [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (3): 474-479.
- [22] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析 [J]. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1311-1324. doi: 10.11766/trxb201501270058.
- Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1311-1324.
- [23] 肖富容, 李东坡, 薛妍, 宋玉超, 张可, 张艺籍, 李永华, 郑野, 张金明, 崔永坤. 海带多糖与生化抑制剂结合的稳定性尿素在黑土和黄土水稻上的施用效果 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36 (3): 352-360. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.050.
- Xiao F R, Li D P, Xue Y, Song Y C, Zhang K, Zhang Y J, Li Y H, Zheng Y, Zhang J M, Cui Y K. Effect of stability urea combined with laminarin and biochemical inhibitor on rice in black soil and loess [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (3): 352-360.
- [24] 林江辉, 李辉信, 胡锋, 赵海燕. 干土效应对土壤生物组成及矿化与硝化作用的影响 [J]. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 924-930. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2004.06.013.
- Lin J H, Li H X, Hu F, Zhao H Y. Effects of rewetting on soil biota structure and nitrogen mineralization, nitrification in air-dried red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6): 924-930.
- [25] 肖富容, 李东坡, 薛妍, 宋玉超, 张可, 张艺籍, 李永华, 郑野, 张金明, 崔永坤. 添加腐植酸与生化抑制剂尿素在黄土水稻栽培中施用效果 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41 (9): 1717-1725. doi: 10.13292/j.1000-4890.202209.001.
- Xiao F R, Li D P, Xue Y, Song Y C, Zhang K, Zhang Y J, Li Y H, Zheng Y, Zhang J M, Cui Y K. Effects of urea added with humic acid and biochemical inhibitors on rice cultivation in loess [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41 (9): 1717-1725.
- [26] 朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 郜红建. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40 (9): 1935-1943. doi: 10.11654/ja.2021-0104.
- Zhu R, Liu L L, Qi Y B, Mu J, Jiang D, Zhang L G, Gao H J. Responses of ammonia volatilization and grain yield to nitrogen reduction with synergistic compound fertilizer in a paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40 (9): 1935-1943.
- [27] 谭习羽, 程雄, 黄淑芬, 刘丽辉, 宋桐慧, 区宇程, 谭志远, 彭桂香. 海藻肥在水稻上最新应用进展 [J]. *农学学报*, 2018, 8 (10): 23-27. doi: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2017.06.01.
- Tan X Y, Cheng X, Huang S F, Liu L H, Song T H, Ou Y C, Tan Z Y, Peng G X. Application of seaweed fertilizer in rice: Recent advances [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8 (10): 23-27.



- [28] 薛妍, 武志杰, 张丽莉, 官平, 董欣欣, 聂彦霞. 土壤含水量、pH 及有机质对 DMPP 硝化抑制效果的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2663-2669.  
Xue Y, Wu Z J, Zhang L L, Gong P, Dong X X, Nie Y X. Inhibitory effect of DMPP on soil nitrification as affected by soil moisture content, pH and organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2663-2669.
- [29] 张忠庆, 高强. 硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶在农业中应用研究进展及其影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 249-258. doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21002.  
Zhang Z Q, Gao Q. Effects of nitrification inhibitor nitrapyrin application in agricultural ecosystems and influencing factors: A review[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(4): 249-258.
- [30] 王薇, 李东坡, 王术, 武志杰, 张玉兰. 缓/控释尿素在稻田土壤中养分释放与转化特点及脲酶响应[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 116-121, 145. doi: 10.3321/j.issn:1001-7216.2008.02.009.  
Wang W, Li D P, Wang S, Wu Z J, Zhang Y L. Nutrient release and transformation characteristics of slow/controlled release urea fertilizers and response of urease in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 116-121, 145.
- [31] Zhang H, Song L, Chen X L, Li P C. An exploration of seaweed polysaccharides stimulating denitrifying bacteria for safer nitrate removal[J]. *Molecules*, 2021, 26(11): 3390. doi: 10.3390/molecules26113390.
- [32] 段英华, 张亚丽, 沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 803-809. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2004.05.021.  
Duan Y H, Zhang Y L, Shen Q R. Nitrification in rice rhizosphere and the nitrate nutrition of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 803-809.
- [33] 田广丽, 周毅, 孙博, 张瑞卿, 周新国, 郭世伟. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 896-904. doi: 10.11674/zw-yf.17395.  
Tian G L, Zhou Y, Sun B, Zhang R Q, Zhou X G, Guo S W. Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 896-904.

## 欢迎订阅 2023 年《北方农业学报》

《北方农业学报》是内蒙古自治区农牧业科学院主管与主办的综合性农业学术期刊, 主要服务于农业高等院校师生和农业科研机构的研究人员, 为中国农林核心期刊(2020 版)、全国优秀农业期刊、中国期刊方阵“双效”期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》来源期刊、美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsweb)收录期刊、英国《食品科技文摘》(FSTA)收录期刊、美国艾博思科(EBSCO)学术数据库全文收录期刊、英国《国际农业与生物科学研究中心数据库(CABI)》来源期刊。国内统一连续出版物号: CN 15-1375/S, 国际标准连续出版物号: ISSN 2096-1197。双月刊, 双月 20 日出版, 国际标准大 16 开本, 134 页, 每期定价 15.00 元, 全年 90.00 元。邮发代号: 16-70。全国各地邮局均可订阅。

本刊栏目: (1) 作物遗传育种、作物栽培、种质资源、分子生物学; (2) 生理生化、土壤肥料、节水灌溉; (3) 植物保护、农业生态环境、农业气象; (4) 园艺、草业; (5) 水产、农产品加工; (6) 农业经济、农业信息技术。

本刊欢迎广大农业科研工作者、学者踊跃投稿, 稿件一经被本刊录用, 将随本刊在相关网络媒体传播(不同意的作者请在投稿时向本刊编辑部声明), 并在纸质期刊发表时一次性支付稿酬 200 ~ 500 元/篇(优稿优酬)。本刊面向全国诚邀各栏目审稿专家, 审稿费 100 元/篇, 有意向者请与本刊编辑部联系。

**欢迎投稿, 欢迎订阅!**

**通信地址:** 呼和浩特市玉泉区昭君路 22 号内蒙古自治区农牧业科学院《北方农业学报》编辑部

**邮 编:** 010031

**电 话:** 0471-5297032 5900622

**E-mail:** bfnxb@126.com

**微信公众号:** 北方农业学报

**网 址:** <http://nmgn.chinajournal.net.cn>

<http://bfnxb.imaaahs.ac.cn>