

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

肖富容^{1,2}, 李东坡^{1,5}, 薛妍¹, 宋玉超¹, 张可^{1,2},
张艺籍^{1,2}, 李永华³, 郑野⁴, 张金明⁴, 崔永坤⁴

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 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.锦西天然气化工有限责任公司, 辽宁 葫芦岛 125001; 5.辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 沈阳 110107)

摘要: 为研发在黑土及黄土上种植水稻专用的新一代高效稳定性尿素肥料, 采用盆栽试验研究添加生物刺激素海带多糖与不同种生化抑制剂的施用效果。试验以不施氮肥(CK)及单独施用尿素肥料(N)为对照, 将海带多糖(L)、N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)及海带多糖与2种生化抑制剂的组合, 分别添加至尿素肥料中制成5种新型高效稳定性尿素肥料作为试验处理, 研究不同配方的高效稳定性尿素肥料在黑土和黄土中的氮素转化特征、水稻生长指标、产量及氮肥利用效率。结果表明: 海带多糖的添加能在一定程度上抑制土壤硝化作用, 使黑土及黄土的水稻生物产量分别提高13.88%, 1.21%, 籽粒产量分别提高42.18%, 25.83%, 氮肥利用效率也有所提高。海带多糖与NBPT抑制土壤硝化作用具有良好的协同效应, 相比NBPT单一施用, 黑土及黄土的水稻生物产量分别降低6.87%, 1.30%, 籽粒产量分别降低8.15%, 4.11%, 氮肥利用效率也均有所降低。相比DMPP单独施用, 海带多糖的添加具有促进水稻生长的效果, 在黄土中二者配合施用, 水稻生物与籽粒产量分别提高0.63%, 2.64%, 有利于植株对氮素的吸收及氮肥利用效率的提高, 在黑土中二者配合施用, 水稻生物产量及籽粒产量分别降低10.52%, 1.50%, 植株吸氮量及氮肥利用效率也有所降低, 黑土中二者配合施用存在负效应。建议在黄土地区种植水稻将DMPP与海带多糖结合制成高效稳定性尿素肥料施用, 有利于水稻增产及氮肥利用效率的提高。

关键词: 水稻; 黑土; 黄土; 生物刺激素; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0352-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.050

Effect of Stability Urea Combined with Laminarin and Biochemical Inhibitor on Rice in Black Soil and Loess

XIAO Furong^{1,2}, LI Dongpo^{1,5}, XUE Yan¹, SONG Yuchao¹, ZHANG Ke^{1,2},

ZHANG Yiji^{1,2}, LI Yonghua³, ZHENG Ye⁴, ZHANG Jinming⁴, CUI Yongkun⁴

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. North Huajin Chemical Industries Group Corporation, Panjin, Liaoning 124021; 4. Jinxi Natural Gas Chemical Co. Ltd., Huludao, Liaoning 125001; 5. National Field Observation and Research Station of Shenyang Agro-ecosystems, Shenyang 110107)

Abstract: In order to develop a new type of high efficiency and stability urea suitable for rice in black soil and loess, field pot tests were conducted to investigate effects of urea combined by biostimulant laminarin and different biochemical inhibitors on rice in black soil and loess. In this study, blank (CK) and urea (N) were set as controls, and laminarin (L), N-butyl thiophosphate-triamine (NBPT), 3,4-dimethyl-pyrazolate phosphate (DMPP), and laminarin were respectively combined with two biochemical inhibitors to urea fertilizer to form five treatments, nitrogen transformation characteristics, rice growth index, yield and apparent utilization rate of nitrogen fertilizer of different high efficiency and stability urea fertilizers in black soil and loess were studied. The results showed that the addition of laminarin could inhibit soil nitrification to a certain ex-

收稿日期: 2021-11-09

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200707)

第一作者: 肖富容(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事植物营养与新型高效肥料研究。E-mail: xiaofurong0911@163.com

通信作者: 李东坡(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与新型高效肥料研究。E-mail: lidp@iae.ac.cn

tent, total biomass of rice in black soil and loess increased by 13.88% and 1.21%, grain yield increased by 42.18% and 25.83%, apparent utilization rate of nitrogen also increased. Laminarin and NBPT had a good synergistic effect on soil nitrification inhibition, compared with NBPT alone, total biomass in black soil and loess decreased by 6.87% and 1.30%, grain yield decreased by 8.15% and 4.11%, apparent utilization rate of nitrogen also decreased. Compared with DMPP alone, the addition of laminarin could promote the growth of rice, total biomass and grain yield increased by 0.63% and 2.64% in loess, nitrogen uptake and apparent utilization rate of nitrogen were also increased, however the total biomass and grain yield decreased by 10.52%, 1.50% in black soil, and nitrogen uptake and apparent utilization rate of nitrogen were also decreased, the combination of laminarin and DMPP had a negative effect in black soil. The addition of laminarin and DMPP is recommended for urea fertilizer application on rice in loess areas, and will improve rice yield and apparent utilization rate of nitrogen.

Keywords: rice; black soil; loess; biostimulant; urease inhibitor; nitrification inhibitor; nitrogen use efficiency

施入土壤中的肥料养分释放速率是否与植株吸收养分速率相符是决定肥料利用率高低的關鍵因素。氮肥对于水稻的生长及产量的形成起着至关重要的作用,而尿素作为我国水稻种植中最为常用的氮素肥料^[1],在施入土壤后会迅速水解,通过氨挥发,硝化—反硝化及淋洗等方式损失,仅有少量养分能被植物吸收利用^[2],同时,损失的氮素会进入到水体及大气环境中,造成水体富营养化及温室效应等环境问题^[3],因此,研发新型高效肥料,提高我国水田氮肥利用率是实现水稻绿色生产的关键所在。

已有研究^[4]表明,脲酶抑制剂及硝化抑制剂能有效抑制尿态氮转化为铵态氮,进而向硝态氮转化的生物化学进程,延缓肥料氮在土壤中的释放与转化,降低氮素在土壤中的损失,促进水稻对肥料氮的吸收,以脲酶抑制剂及硝化抑制剂为核心制成的稳定性肥料也已受到广泛关注,对其应用效果也进行了大量研究。Wallace 等^[5]研究发现,NBPT、DMPP 与尿素配合施用能有效减少肥料氮的损失,提高作物产量及氮素利用率;Abalos 等^[6]通过 meta 分析统计表明,生化抑制剂的添加能有效降低氮素损失,平均提高氮肥利用率达 12.9%。生化抑制剂的施用效果受多种土壤因素的影响^[7],在不同土壤中调控尿素氮转化的作用效果有较大差异,单一生化抑制剂的施用难以适用于不同种土壤或作物,因此,针对不同土壤类型研制专用高效稳定性肥料以提升传统稳定性肥料的施用效果是未来稳定性肥料的发展方向。

海藻作为海洋中储量最大的生物资源,含较多陆地上所缺乏的营养物质,长期以来在农业生产中被用以改良土壤性质及促进植物生长^[8]。近年来,伴随着生物刺激素研究的不断深入,海藻提取物作为主流生物刺激素之一也已经被应用于农业领域中。海藻提取物已经被证实具有改善作物品质、提高产量^[9]、提高植株抗旱能

力^[10]、促进植株根毛及次生根伸长^[11]及改良土壤理化性质、提高土壤通气性的作用,对土壤重金属污染的修复具有积极影响^[12]。海带多糖是褐藻提取物的主要活性物质之一,主要包括海带淀粉、海带胶、藻酸等多糖类物质,能有效诱导植株抗逆反应^[13],对有机磷农药残留有明显的降解作用^[14],抑制植株叶片中叶绿素的降解,维持较高的根系活力^[15],进而促进植株生长发育,促进产量的形成。在当前农业生产中,海带多糖通常与单一元素化肥或复合肥结合制成海藻肥料被应用,对于海带多糖与生化抑制剂结合研制高效稳定性增效肥料的研究较少,海带多糖与生化抑制剂结合的高效稳定性增效肥料相比传统稳定性肥料施用效果是否有明显提高,海带多糖与哪些生化抑制剂结合能产生正效应,哪些会产生负效应,在何种土壤中二者结合能够发挥较好功效等问题有待深入研究。因此,本试验在黑土和黄土 2 种典型土壤上探究海带多糖与不同种生化抑制剂相结合的高效稳定性增效尿素肥料在水稻种植中的施用效果,为研制新一代高效稳定性尿素肥料,解决我国水田种植中氮肥利用率低下的问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2020 年 5—10 月在中国科学院沈阳农田生态实验站(41°49′N,123°33′E)进行,供试土壤为黑土、黄土。黑土采集自吉林省农安县永安乡(125°49′E,43°51′N)0—20 cm 土层土壤,黄土采自陕西省咸阳市长武县(107°48′E,34°59′N)的农田 0—20 cm 土层土壤。黑土土壤 pH 为 6.23,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 32.19,1.68,0.79,50.50 g/kg,铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量分别为 11.15,59.73,78.88,322.15 mg/kg。黄土土壤 pH 为 8.01,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 31.26,1.14,0.67,40.45 g/kg,铵态

氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量分别为 9.17, 10.70, 11.45, 257.37 mg/kg。供试尿素肥料为国药集团生产, 含氮量为 46%, 重过磷酸钙由云天化集团有限责任公司生产, 含 P_2O_5 43%, 氯化钾由俄罗斯生产, 含 K_2O 60%; 本试验所用脲酶抑制剂 N—丁基硫代磷酸三胺(NBPT)由 Macklin 生物科技公司生产, 硝化抑制剂 3, 4—二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)由 Maya Reagent 生物科技公司生产, 以上生化抑制剂均为分析纯。供试生物刺激素海带多糖(L)为国内某公司提供, 含海藻多糖 7.18%, 海藻酸 7.18%, K_2O 7.26%, 有机质 7.40%。供试作物为粳稻, 品种为“美锋 1 号”。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理, 分别为: (1) 不施氮肥(CK); (2) 单施尿素(N); (3) 添加海带多糖的尿素(L); (4) 添加 NBPT 的尿素(NBPT); (5) 添加 DMPP 的尿素(DMPP); (6) 添加 NBPT 和海带多糖的尿素(NBPT+L); (7) 添加 DMPP 和海带多糖的尿素(DMPP+L)。所有处理均施磷钾肥料, 所有处理均设 3 次重复, 生化抑制剂 NBPT、DMPP 添加量为尿素量的 0.25%, 0.5%, 生物刺激素海带多糖添加量为尿素量的 6%。每盆土壤折合干土重为 6 kg, 各处理施氮量、施磷量(P_2O_5)、施钾量(K_2O)分别为 0.70, 0.12, 0.15 g/kg, 每盆定植水稻 5 穴, 每穴 3 株, 水稻生育期内按当地常规田间管理办法进行。

盆栽种植方法: 将风干的土壤过 2 mm 筛, 将筛好的土壤称重后平铺在塑料布上, 将提前称重好的海带多糖与生化抑制剂充分混合后, 与尿素按比例均匀混合制成高效稳定性增效尿素肥料, 连同称好的磷、钾肥料再与土壤混合均匀。将混合后的土壤转移至高度为 28 cm、直径为 26 cm 的塑料盆中, 浇水使土壤含水量为田间最大持水量的 60%。水稻生育期内采用人工浇水的方式, 各盆浇水量保证一致, 水稻生育期内不再追肥。

1.3 试验样品采集

试验于 2020 年 5 月 12 日装盆插秧, 10 月 7 日收获。于水稻 4 个生育时期(分蘖期, 抽穗开花期, 灌浆期, 成熟期)采用 5 点取样法采集盆中土壤样品, 采集的土壤样品混合均匀, 去除细根杂物等。成熟期收获整盆植株样品, 收集籽粒、茎叶及根系, 风干后测定籽粒产量、生物产量及根生物量。同时进行籽粒、秸秆及根系样品全氮含量分析。

1.4 测定指标及方法

土壤尿素态氮含量测定: 将土壤样品用 2 mol/L 氯化钾—乙酸苯汞溶液浸提(土: 水为 1: 10), 在 160 r/min 条件下振荡 1 h, 过滤土壤得浸提液, 滤液用 AA3 型流动分析仪测定; 土壤铵态氮、硝态氮含量

测定: 将土壤样品用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提(土: 水为 1: 10), 在 160 r/min 条件下振荡 1 h, 过滤土壤得浸提液, 用 AA3 型流动分析仪测定^[16]。

在水稻抽穗末期使用叶绿素仪(CCM—200 型号)及叶面积仪(YMJ—B 型号)测定水稻叶片叶绿素含量、叶面积指数; 成熟期测定水稻分蘖数及株高, 对水稻样品进行考种, 将籽粒、茎叶秸秆、根系置于烘箱之中, 70 °C 烘至恒重, 用粉碎机粉碎, 过 0.5 mm 筛, 使用 VARIO MACRO 元素分析仪测定植株全氮含量。

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水稻土壤硝态氮含量(mg/kg); b 为添加硝化抑制剂尿素处理土壤硝态氮含量(mg/kg)^[16]。

$$\text{土壤表观硝化速率}(\%) = \text{土壤硝态氮含量} / (\text{土壤铵态氮含量} + \text{土壤硝态氮含量}) \times 100\% \quad [17]$$

参照葛均筑等^[18]的方法进行指标的计算:

$$\text{水稻植株吸氮量}(g) = \text{水稻植株含氮量} \times \text{水稻植株干物质重}$$

$$\text{水稻表观氮肥吸收利用率}(\%) = (\text{施氮处理水稻氮积累量} - \text{不施氮肥处理水稻氮积累量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

$$\text{水稻氮肥偏生产力}(g/g) = \text{施氮处理水稻籽粒产量} / \text{施氮量}$$

$$\text{水稻氮肥农学效率}(g/g) = (\text{施氮处理水稻籽粒产量} - \text{不施氮处理水稻籽粒产量}) / \text{施氮量}$$

1.6 数据处理

使用 Excel 2010, SPSS 21.0 软件进行统计分析, Origin 9.1 软件作图, 采用 Duncan 最小显著极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤尿素态氮、铵态氮及硝态氮含量的影响

水稻分蘖期, 所有处理土壤中尿素态氮含量均为 0, 此后的 3 个时期所有处理土壤均没有检测尿素态氮含量。

2.1.1 不同处理土壤铵态氮含量变化特征 由图 1 可知, 2 种类型土壤中, 随水稻生育期的进行, 各处理土壤铵态氮含量呈降低趋势, 分蘖期土壤铵态氮含量最高。2 种土壤中施氮处理水稻分蘖期土壤铵态氮含量均高于 CK 处理, 而后各处理之间趋于一致。

黑土中, 相比单独添加尿素, 海带多糖的添加显著提高了水稻生育前期土壤铵态氮含量($P < 0.05$), 铵态氮含量在 19.29 mg/kg 以上, 灌浆期后由于海带多糖效果的降低而与单独添加尿素处理铵态氮含量趋于一致; 相比 NBPT 单独添加, 海带多糖的添加提高了水稻分蘖期铵态氮含量, 在抽穗开花期, 铵态氮

含量显著降低;相比 DMPP 单独添加,海带多糖的添加显著降低生育前期土壤铵态氮含量,表明海带多糖的添加会降低 DMPP 的硝化抑制效果。灌浆期后水稻植株对养分吸收能力降低,各处理黑土中铵态氮含量趋于一致。

黄土中,相比单独添加尿素,海带多糖的添加并未对水稻生育期内土壤铵态氮含量造成显著影响 ($P<0.05$)。水稻分蘖期添加 DMPP 处理土壤铵态

氮含量均处于较高水平,在 20.81 mg/kg 以上;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加提高了生育前期土壤铵态氮含量,铵态氮含量达 18.00 mg/kg,海带多糖的添加有利于铵态氮含量的提高;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加显著提高水稻分蘖期至抽穗开花期铵态氮含量,同时,水稻生育后期黄土中铵态氮含量也有所提高,海带多糖的添加能显著提高 DMPP 的硝化抑制效果。

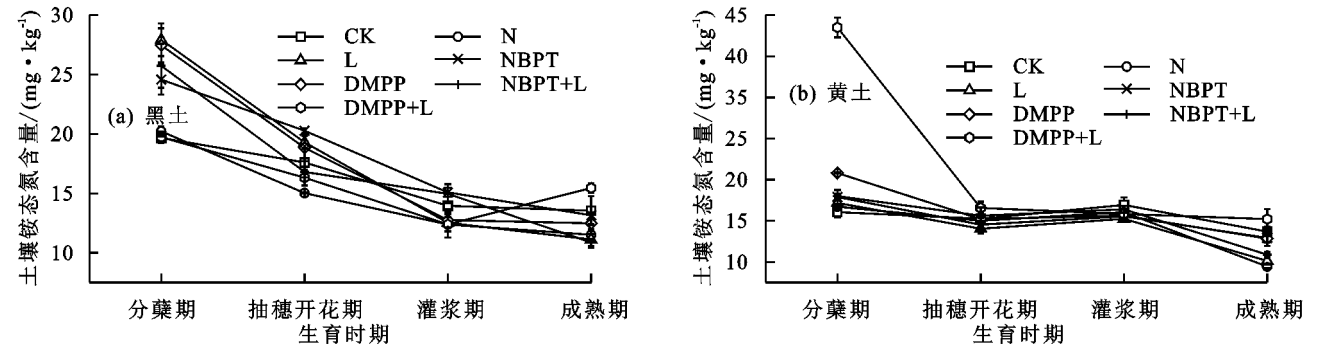


图1 水稻不同生育时期各处理土壤中铵态氮含量

2.1.2 不同处理土壤硝态氮含量变化特征 由图2可知,水稻土壤长期处于淹水环境下,氧气含量较低,土壤硝化作用较弱,2 种类型土壤中,各处理土壤硝态氮含量均处于较低水平,CK 处理与施氮处理硝态氮含量并未表现出明显差异,随水稻生育期的进行,各处理土壤硝态氮含量呈现先升高后降低而后又升高的趋势。

黑土中,水稻分蘖期至抽穗开花期,L 处理土壤硝态氮含量均显著高于其他处理 ($P<0.05$),硝态氮在 4.05 mg/kg 以上,相比单独添加尿素,海带多糖的添加显著提高生育前期硝态氮含量,随着生育期的进行而与单施氮素处理硝态氮含量趋于一致;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加显著降低分蘖期黑土中硝态氮含量,结合铵态氮含量变化规律,海带多糖与 NBPT 结合在水稻分蘖期能起到抑制硝化作用的效果;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加并未对水稻生育前期黑土中硝态氮含量造成显著影响。

黄土中,相比单独添加尿素,海带多糖及生化抑制剂 NBPT、DMPP 的添加均降低水稻生育前期土壤硝态氮含量,表明海带多糖及生化抑制剂的添加均具有减少水稻黄土中硝态氮含量的效果;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加降低了生育期内黄土中硝态氮含量;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加显著提高了分蘖期黄土硝态氮含量 ($P<0.05$),结合铵态氮含量变化规律分析,可能是较高的铵态氮含量导致了土壤硝化作用强度的提高,致使黄土中硝态氮含量的累积。

结合 2 种类型土壤中速效氮含量变化规律,海带多糖均表现出提高水稻生育前期土壤铵态氮含量的作用。黑土海带多糖的添加能提高水稻生育前期土壤速效氮含量;NBPT 与海带多糖配合施用相比 NBPT 单独施用,生育前期土壤铵态氮含量均有提高;相比 DMPP 单独施用,黄土中海带多糖的添加显著提高了生育前期铵态氮含量,与黑土中结果相反。

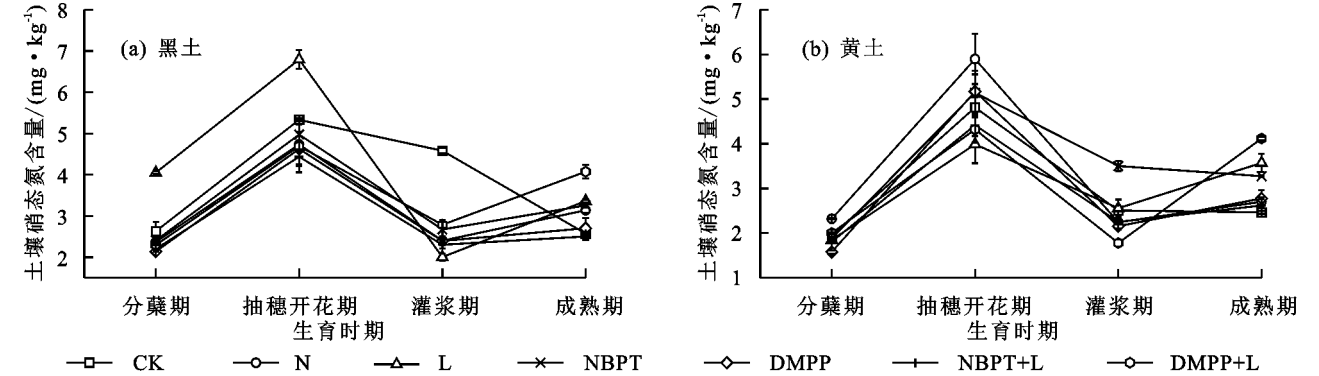
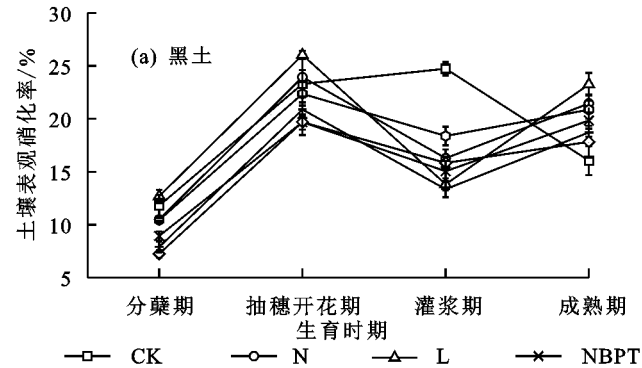


图2 水稻不同生育时期各处理土壤硝态氮含量

2.2 不同处理对土壤表观硝化率的影响

由图 3 可知,在黑土及黄土中,随水稻生育期的进行,土壤表观硝化率呈先升高后降低,而后又升高的趋势,与速效氮含量变化规律相一致。

黑土中,相比单独添加尿素处理,海带多糖的添加显著提高水稻生育前期黑土表观硝化速率($P<0.05$),生育前期表观硝化率达 12.68% 以上,是由于海带多糖能够提高土壤微生物活性导致,添加生化抑制剂处理表观硝化率均低于单施尿素处理,表明生化抑制剂的添加均能在一定程度上抑制土壤硝化作用的进行;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加显著降低水稻分蘖期表观硝化率,二者配合能进一步抑制土壤硝化作用的进行;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加提高了生育期内土壤表观硝化率,海带多糖的添加降低了 DMPP 的硝化抑制效果,结合速效氮



含量变化分析可知,海带多糖的添加缩短了 DMPP 在土壤中的硝化抑制时间。

黄土中,相比单施尿素处理,海带多糖及生化抑制剂的添加均显著降低水稻生育前期表观硝化率;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加降低了生育期内表观硝化率;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加降低生育前期表观硝化率,提高了 DMPP 的硝化抑制效果。

结合黑土及黄土 2 种类型土壤表观硝化率变化规律分析,黑土中海带多糖的添加提高了生育前期水稻土壤表观硝化率,与黄土中结果相反;2 种土壤中 NBPT 与海带多糖配合,相比 NBPT 单一施用均起到降低表观硝化率的作用;相比 DMPP 单独施用,黑土中海带多糖的添加提高了土壤表观硝化率,在黄土中土壤表观硝化率有所降低,二者结果相反。

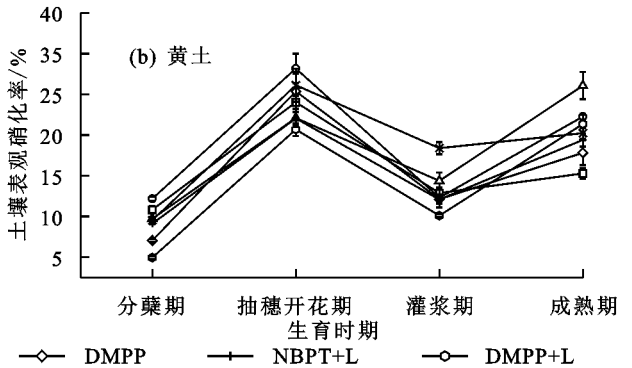


图 3 水稻不同生育时期各处理土壤表观硝化率

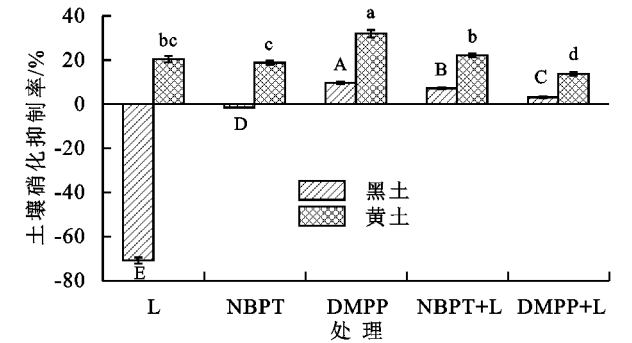
2.3 不同处理对水稻分蘖期土壤硝化抑制率的影响

由图 4 可知,水稻分蘖期黑土中 DMPP 处理土壤硝化抑制率最高,为 9.69%,显著高于其他处理($P<0.05$)。海带多糖及 NBPT 的添加在黑土中未表现出硝化抑制效果,反而促进了硝化作用的进行;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加显著提高硝化抑制率,二者结合能有效抑制土壤硝化作用的进行;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加显著降低黑土硝化抑制率,降低了 DMPP 的硝化抑制效果,与速效氮含量及表观硝化率变化规律相一致。

黄土中,海带多糖及生化抑制剂的添加在水稻分蘖期均表现出抑制土壤硝化作用的效果,DMPP 处理硝化抑制率最高,为 31.98%,显著高于其他处理($P<0.05$);相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加显著提高硝化抑制率;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加显著降低黄土硝化抑制率,结合铵态氮含量分析,是由于黄土有着较高浓度的铵态氮,硝化作用底物浓度较高,硝化作用较强烈,相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加导致黄土硝化抑制率显著降低。

结合 2 种类型土壤硝化抑制率变化规律分析,分蘖期海带多糖的添加在 2 种土壤中对硝化作用的抑

制表现出明显差异;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加均起到抑制土壤硝化作用的效果;相比 DMPP 单独施用,2 种土壤中海带多糖的添加均降低了水稻生育前期土壤硝化抑制率,其中黑土中 DMPP 与海带多糖配合不利于抑制水稻分蘖期土壤硝化作用的进行,而黄土中则是由于硝化作用底物浓度较高而导致此现象。



注:图柱上方不同大写字母表示黑土上处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示黄土上处理间差异显著($P<0.05$)。

图 4 不同处理水稻分蘖期土壤硝化抑制率

2.4 不同处理对水稻生物学指标的影响

由表 1 可知,相比 CK 处理,氮肥的添加均提高了水稻分生长指标、产量及根生物量,除叶面积指数

外其余指标均显著提高,表明氮肥的添加能有效促进水稻的生长,起到显著的增产效果($P<0.05$)。

黑土中,相比尿素单独施用,海带多糖的添加提高了水稻分蘖数、叶绿素 SPAD 值、叶面积指数、生物产量、籽粒产量及根生物量,分别提高 16.88%,4.90%,7.64%,13.88%,42.18%,23.48%;相比生化抑制剂 NBPT、DMPP 单独施用,海带多糖的添加均提高了水稻分蘖数、株高、叶绿素 SPAD 值、叶面积指数及根生物量,表明在黑土中生化抑制剂与海带多糖配合使用能起到促进水稻生长及根系发育的效果;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加显著降低了水稻生物产量及籽粒产量,分别降低 6.87% 及 8.15% ($P<0.05$);相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加降低了水稻生物产量及籽粒产量,其中生物产量受到显著影响。

黄土中,相比单独施用尿素,添加海带多糖的增效尿素处理水稻分蘖数、株高、叶绿素 SPAD 值、叶面积指数、生物产量、籽粒产量及根生物量均有所提高,分别提高 7.41%,4.50%,78.91%,10.92%,

1.21%,25.83%,6.63%;相比生化抑制剂单独添加,海带多糖的添加均提高了水稻分蘖数、株高、叶面积指数及根生物量,叶绿素 SPAD 值均有所降低;相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加降低了水稻生物产量及籽粒产量,其中籽粒产量受到显著影响,结合 NBPT+L 处理根生物量分析,可能是海带多糖的添加促进了养分向水稻植株根系的转运,而造成籽粒产量的降低,进而造成经济效益的下降;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加提高了水稻生物产量及籽粒产量,分别提高 0.63%,2.64%,与土壤速效氮含量及表观硝化率变化规律相一致。

在黑土及黄土中,海带多糖均起到促进水稻生长,提高产量的作用;2 种土壤中相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加均不利于水稻产量的提高;相比 DMPP 单独施用,黑土中海带多糖的添加降低了水稻产量,而在黄土中水稻产量有所提高,DMPP 与海带多糖配合施用在 2 种土壤中表现出相反的效果,与土壤铵态氮含量及表观硝化率变化规律相一致。

表 1 不同处理 2 种土壤水稻生长指标、产量及根生物量

土壤类型	处理	分蘖数/ 个	株高/ cm	叶绿素 SPAD 值	叶面积 指数/cm ²	生物 产量/g	籽粒 产量/g	根生 物量/g
黑土	CK	7.53±0.31d	71.98±1.94c	7.43±0.31d	24.33±2.46c	182.91±4.23e	58.76±1.33e	27.75±3.53e
	N	10.27±0.31c	84.32±1.20a	19.52±0.07c	25.56±0.83c	306.12±15.77cd	76.29±2.22d	39.81±1.41d
	L	12.00±0.40ab	83.77±1.51a	20.48±0.40b	27.52±1.80bc	348.60±6.38a	108.48±2.09a	49.16±0.65b
	NBPT	10.47±0.81c	82.67±2.25ab	20.95±0.14ab	29.92±3.78ab	317.63±14.62bc	99.82±2.29b	43.86±2.41c
	DMPP	11.53±0.61bc	79.06±0.59b	21.27±0.88a	30.13±0.41ab	363.89±5.28a	111.24±2.26a	47.26±0.87b
	NBPT+L	11.47±1.21bc	85.33±1.21a	21.37±0.39a	30.18±0.77ab	295.82±7.64d	91.68±2.50c	44.10±0.51c
	DMPP+L	12.80±0.60a	83.55±4.81a	21.44±0.23a	31.69±0.24a	325.60±5.65b	109.58±2.22a	62.96±0.74a
黄土	CK	3.87±0.31d	56.01±1.09b	3.95±0.21d	7.17±0.62c	48.10±0.93d	17.23±0.68e	9.11±0.08c
	N	10.80±0.60bc	81.93±0.90a	9.39±0.16c	24.99±2.43b	280.51±20.30c	77.62±4.09d	42.63±2.92b
	L	11.60±0.20a	85.61±3.08a	16.80±0.89b	27.72±0.79a	283.90±10.69bc	97.68±2.09c	45.45±0.54b
	NBPT	10.47±0.31c	84.44±1.90a	16.18±0.13b	28.91±2.21a	295.98±7.20abc	104.29±2.68b	43.01±0.51b
	DMPP	11.33±0.23ab	82.75±2.84a	18.71±0.54a	29.69±2.15a	302.50±3.54ab	116.15±2.71a	43.44±1.16b
	NBPT+L	11.33±0.12ab	85.00±3.99a	15.92±0.66b	29.50±0.17a	292.15±6.00abc	100.00±1.82c	45.48±1.60b
	DMPP+L	11.67±0.50a	86.29±0.43a	16.30±0.89b	29.82±0.16a	304.42±11.11a	119.22±1.27a	51.04±3.06a

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.5 不同处理对水稻吸氮量及氮肥利用效率的影响

由表 2 可知,相比尿素肥料单独施用,添加海带多糖及生化抑制剂处理水稻吸氮量及氮肥利用效率指标均有所提高,二者添加能有效促进水稻植株对养分的吸收,提高氮肥利用效率。

黑土中,相比生化抑制剂 NBPT、DMPP 单独施用,除根系吸氮量外,与海带多糖配合施用处理水稻植株吸氮量及氮肥利用效率指标均有所降低,表明黑土中海带多糖与生化抑制剂 NBPT、DMPP 配合不能得到良好效果。

黄土中,相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加提高了水稻植株总吸氮量,根系吸氮量及氮肥利用率,分别提高 0.22%,11.10%,0.26%,籽粒吸氮量、氮肥偏生产力及农学效率有所降低,分别降低 1.44%,4.11%,4.93%,各指标之间均无显著差异($P<0.05$);相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加提高了水稻植株总吸氮量、籽粒吸氮量、根系吸氮量、氮肥利用率、偏生产力及农学效率,分别提高 0.53%,3.59%,19.96%,0.60%,2.64%,3.10%。

黑土及黄土 2 种类型土壤中,海带多糖的添加

均有利于植株对氮素的吸收,提高氮肥利用效率;相比 NBPT单独施用,黑土中海带多糖的添加降低了植株吸氮量,显著降低氮肥利用效率,而黄土中海带多糖的添加并未造成显著差异;相比 DMPP 单

独施用,2 种土壤中海带多糖的添加表现出相反效果,黑土中 DMPP 与海带多糖配合不利于植株对氮素养分的吸收及氮肥利用率的提高,而在黄土中结果相反。

表 2 不同处理 2 种土壤水稻吸氮量及氮肥利用效率指标

土壤类型	处理	植株吸氮量/g	籽粒吸氮量/g	根系吸氮量/g	氮肥利用率/%	氮肥偏生产力/(g·g ⁻¹)	氮肥农学效率/(g·g ⁻¹)
黑土	CK	1.28±0.09f	0.66±0.05d	0.19±0.02f	—	—	—
	N	2.39±0.04e	0.90±0.08c	0.36±0.03e	26.54±1.03e	18.17±0.53d	4.17±0.53d
	L	3.15±0.02a	1.35±0.04a	0.45±0.03bc	44.43±0.46a	25.83±0.50a	11.84±0.50a
	NBPT	2.67±0.12cd	1.15±0.01b	0.39±0.02de	33.19±2.88c	23.77±0.55b	9.78±0.55b
	DMPP	3.01±0.05b	1.36±0.05a	0.47±0.02b	41.20±1.28b	26.49±0.54a	12.50±0.54a
	NBPT+L	2.57±0.03d	1.11±0.04b	0.42±0.02cd	30.64±0.60d	21.83±0.60c	7.84±0.60c
	DMPP+L	2.71±0.03c	1.28±0.04a	0.61±0.01a	34.03±0.80c	26.09±0.53a	12.10±0.53a
黄土	CK	0.33±0.03d	0.16±0.01d	0.08±0.02d	—	—	—
	N	2.03±0.14c	0.84±0.04c	0.37±0.02c	40.41±3.36c	18.48±0.97d	14.38±0.97d
	L	2.45±0.08b	1.10±0.05b	0.41±0.04bc	50.57±1.94b	23.26±0.50c	19.15±0.50c
	NBPT	2.39±0.09b	1.20±0.08b	0.39±0.02bc	49.13±2.08b	24.83±0.64b	20.73±0.64b
	DMPP	2.68±0.16a	1.39±0.09a	0.40±0.04bc	56.05±3.74a	27.66±0.64a	23.55±0.64a
	NBPT+L	2.40±0.06b	1.18±0.07b	0.44±0.01b	49.26±1.49b	23.81±0.43bc	19.71±0.43bc
	DMPP+L	2.70±0.18a	1.44±0.13a	0.49±0.03a	56.38±4.33a	28.39±0.30a	24.28±0.30a

3 讨论

3.1 海带多糖与生化抑制剂配合使用在不同土壤中对尿素肥料氮转化的影响

已有研究^[19]表明,相比单施尿素,海带多糖的添加均能提高生育前期土壤铵态氮含量,是由于海藻多糖降解后能生成部分海藻寡糖,含有羟基等带负电荷官能团,能够与铵态氮发生络合作用,抑制其进一步转化,黄建林等^[20]研究发现,海藻提取物与尿素配合施用,二者能通过氢键的相互作用力形成 α—螺旋或者高分子网格结构的载肥体系,使得尿素具备一定的缓释性能,2 方面共同作用下,海带多糖的添加提高了铵态氮含量。在黑土和黄土中,海带多糖单独添加对土壤表观硝化率及分蘖期硝化抑制率起到相反的效果,可能是相比黄土,黑土具有更高的土壤肥力及微生物活性,海带多糖中的可溶性有机碳能进一步促进微生物的繁殖,提高微生物活性及丰度^[21];另一方面,海带多糖对植株根系生长的促进作用也会导致水稻根系分泌物的增多^[22],促进微生物生长繁殖^[23],2 方面共同作用导致土壤硝化作用加剧。而在微生物活性及丰度较低的黄土中,海带多糖的添加在抑制土壤硝化作用方面起到的正效应大于负效应,因此,起到了一定的硝化抑制效果。

相比尿素单独施用,黑土和黄土中,NBPT 的添加均提高了水稻生育前期铵态氮含量,降低表观硝化率,

黑土中 NBPT 处理硝化抑制率为负值,远低于黄土土壤硝化抑制率,造成这种现象的原因可能是相比黑土,黄土具有较高的 pH,土壤氨挥发损失强烈,而氨挥发损失又是稻田氮素流失的主要途径^[24],黄土中铵态氮损失较多,NBPT 的添加显现出更好的硝化抑制效果。DMPP 的添加在 2 种土壤中均表现出较好的硝化抑制效果,相比黄土,黑土中 DMPP 单独添加硝化抑制效果较差,是由于黑土中具有较高的有机质含量,有机质含量的提高会降低 DMPP 的抑制效果^[25],导致 DMPP 在黑土中的硝化效果弱于在黄土的效果。

在黑土和黄土中,相比 NBPT 单独施用,海带多糖的添加均提高了水稻生育前期土壤铵态氮含量,降低了表观硝化率,起到了较好的硝化抑制效果,表明二者在抑制土壤硝化作用方面具有协同效果,因此,二者配合施用能够有效抑制土壤硝化作用的进行;相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加在黑土和黄土中表现出相反效果。在黑土中,海带多糖的添加降低了 DMPP 的硝化抑制效果,可能是海带多糖的添加能有效改良土壤性状,提高有机质含量^[26],同时,海藻提取物能与土壤中金属离子结合生成高分子复合物,具有良好的吸水性及保水性^[27],造成土壤含水量的提高,薛妍等^[25]研究表明,DMPP 的硝化抑制效果与土壤有机质含量及含水量呈负相关关系,黑土中海带多糖与 DMPP 结合会降低其硝化抑制能力,而黄土自身有

机质含量较低,具有较弱的保水保肥性,水稳性团聚体数量较少,海带多糖的添加对于土壤理化性质提升有限,因此,在黄土中 DMPP 与海带多糖配合施用起到的正效应高于负效应,导致在黑土和黄土中 DMPP 与海带多糖配合施用呈现相反效果。

3.2 海带多糖与生化抑制剂配合使用在不同土壤中对水稻生物学指标及氮肥利用效率的影响

相比单独施用尿素肥料,海带多糖及生化抑制剂 NBPT、DMPP 的添加均促进了水稻产量的形成,提高氮肥利用效率,与先前研究^[5-6]结果相一致。相比 NBPT 单独施用,黑土和黄土中海带多糖的添加均表现出增加水稻根系生物量等营养生长的效果,与已有研究^[11]结果相符,但水稻生殖生长均有不同程度的降低,可能是海带多糖的添加提高了土壤微生物活性,促进微生物的生长繁殖^[21-23],而 NBPT 在土壤中降解较快,半衰期仅为 6.5~7.6 天,微生物代谢活动的加快会进一步促进 NBPT 的降解^[28],因此,海带多糖的添加缩短了 NBPT 作用时间,造成氮素损失量的增加,进而降低产量。已有研究^[29]表明,相比 NBPT 单独施用,黑土中海带多糖的添加显著降低了氮肥利用效率,但在黄土中并无显著影响,可能黄土自身微生物活性低于黑土,NBPT 的降解速率与土壤 pH 呈现负相关关系。导致在黄土中,海带多糖与 NBPT 配合施用并未对氮肥利用效率产生显著影响。黑土中,相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加促进了水稻生长及根系发育,然而产量、植株吸氮量及氮肥利用效率均有所降低,表明二者配合施用能促进水稻营养生长,结合尿素氮转化规律分析,二者配合会造成氮素损失量的增加,海带多糖添加后土壤有机质含量的提高也会造成 DMPP 有效作用时间缩短^[30],造成水稻生殖生长时期土壤养分供应量下降,不利于产量的增加及氮肥利用效率的提高。黄土中,海带多糖与 DMPP 配合对于抑制土壤硝化具有协同增效作用,由于黄土自身有机质含量较低,保水性较差,海带多糖添加后产生的负效应低于正效应,提高水稻产量及氮肥利用效率。本研究发现,相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加显著降低了水稻叶片叶绿素 SPAD 值,是由于二者的配合降低了水稻生育期内土壤硝态氮的含量,而硝态氮含量的高低是影响叶片叶绿素合成的重要因素,通过影响叶片结构及叶绿素合成途径关键酶基因表达量以维持叶绿素含量^[31],因而,导致水稻叶片叶绿素的降低。

4 结论

(1)相比单独添加尿素,海带多糖的单独添加能在

一定程度上抑制土壤硝化作用,有效促进水稻生长,在黑土及黄土水稻种植中,生物产量分别提高 13.88%,1.21%,籽粒产量分别提高 42.18%,25.83%,植株吸氮量及氮肥利用效率也均有所提高。

(2)海带多糖的添加在抑制土壤硝化作用方面与 NBPT 之间表现出了协同效果,但在黑土及黄土中,二者配合会导致水稻产量的降低,生物产量分别降低 6.87%,1.30%,籽粒产量分别降低 8.15%,4.11%,植株吸氮量及氮肥利用效率也均有所降低,在水稻生产实践中不建议将二者配合施用。

(3)在黑土和黄土中,相比 DMPP 单独施用,海带多糖的添加对水稻的生长均能起到良好的促进作用,在 2 种土壤中对于尿素氮在土壤中的转化、水稻产量的形成及氮肥利用效率的提高表现出了相反的效果,在黄土中,二者配合有利于水稻产量的增加及氮肥利用效率的提高,生物产量及籽粒产量分别提高 0.63%,2.64%;在黑土中,二者配合会降低水稻产量及氮肥利用效率,生物产量及籽粒产量分别降低 10.52%,1.50%,在水稻种植中,在黑土上不建议将海带多糖与 DMPP 配合施用,在黄土上建议将二者与尿素结合制成新型高效稳定性增效尿素肥料施用,能有效提高稳定性尿素肥料性能,具有显著增产效果。

(4)海带多糖及其与生化抑制剂配合在黑土及黄土土壤上效果的差异性主要是由于 2 种土壤 pH、有机质含量、团粒结构及微生物活性的不同导致的,因此,对于其他种类型土壤及作物类型,海带多糖与生化抑制剂的配合效果仍需进一步探究。

参考文献:

[1] 于春晓,张丽莉,杨立杰,等.抑制剂和猪粪对尿素氮在稻田土壤中转化的影响[J].应用生态学报,2020,31(6): 1851-1858.

[2] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2002,63(2/3):117-127.

[3] Beeckman F, Motte H, Beeckman T. Nitrification in agricultural soils: Impact, actors and mitigation [J]. Current Opinion in Biotechnology,2018,50:166-173.

[4] Qiao C L, Liu L L, Hu S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input [J]. Global Change Biology,2015,21(3):1249-1257.

[5] Wallace A J, Armstrong R D, Grace P R, et al. Nitrogen use efficiency of N-15 urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors [J].Nutrient

Cycling in Agroecosystems, 2020, 116(1): 41-56.

- [6] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 189: 136-144.
- [7] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611-1618.
- [8] Craigie J S. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture [J]. Journal of Applied Phycology, 2011, 23(3): 371-393.
- [9] del Buono D. Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond [J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: e141763.
- [10] Trivedi K, Anand K G V, Vaghela P, et al. Differential growth, yield and biochemical responses of maize to the exogenous application of Kappaphycus alvarezii seaweed extract, at grain-filling stage under normal and drought conditions [J]. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, 2018, 35: 236-244.
- [11] Mukherjee A, Patel J S. Seaweed extract: Biostimulant of plant defense and plant productivity [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 17(1): 553-558.
- [12] du Jardin P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 3-14.
- [13] Zvyagintseva T N, Shevchenko N M, Popivnich I B, et al. A new procedure for the separation of water-soluble polysaccharides from brown seaweeds [J]. Carbohydrate Research, 1999, 322(1/2): 32-39.
- [14] 陈振德, 汪东风, 王文娇, 等. 海藻多糖稀土配合物对蔬菜有机磷农药残留的降解作用[J]. 生态毒理学报, 2008(2): 183-188.
- [15] Garcia A B, Engler J D, Iyer S, et al. Effects of osmoprotectants upon NaCl stress in rice [J]. Plant Physiology, 1997, 115(1): 159-169.
- [16] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 添加 NBPT/DMPP/CP 的高效稳定性尿素在黑土和褐土中的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 957-968.
- [17] 林江辉, 李辉信, 胡锋, 等. 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.
- [18] 葛均筑, 徐莹, 袁国印, 等. 覆膜对长江中游春玉米氮肥利用效率及土壤速效氮素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 296-306.
- [19] 刘航, 尹恒, 张运红, 等. 褐藻胶寡糖生物活性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(增刊 1): 201-204, 228.
- [20] 黄建林, 王德汉, 刘承昊, 等. 载体尿素的研制及其释放机理研究初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 451-453, 458.
- [21] 朱霞, 韩晓增, 乔云发, 等. 外加可溶性碳氮对不同热量带土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2637-2644.
- [22] Kumar R, Trivedi K, Anand K G V, et al. Science behind biostimulant action of seaweed extract on growth and crop yield: Insights into transcriptional changes in roots of maize treated with Kappaphycus alvarezii seaweed extract under soil moisture stressed conditions [J]. Journal of Applied Phycology, 2020, 32(1): 599-613.
- [23] Meier I C, Finzi A C, Phillips R P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 106: 119-128.
- [24] Ding W C, He P, Zhang J J, et al. Optimizing rates and sources of nutrient input to mitigate nitrogen, phosphorus, and carbon losses from rice paddies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: e120603.
- [25] 薛妍, 武志杰, 张丽莉, 等. 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.
- [26] Yuan M T, Xiao H J, Wang R S, et al. Effects of changes in precipitation pattern and of seaweed fertilizer addition on plant traits and biological soil crusts [J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(6): 3791-3802.
- [27] Khan W, Rayirath U P, Subramanian S, et al. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 28(4): 386-399.
- [28] 李涛, 石元亮, 李学文, 等. NBPT 在土壤中的降解及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1082-1086.
- [29] Engel R E, Towey B D, Gravens E. Degradation of the urease inhibitor NBPT as affected by soil pH [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(6): 1674-1683.
- [30] 俞巧钢, 殷建祯, 马军伟, 等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1057-1066.
- [31] 文滨滨, 张新昊, 沈红艳, 等. 硝态氮对组培‘嘎拉 3’叶绿素合成及相关基因表达的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 179-185.