

施用生物刺激剂对空心菜种植增效减排效应研究

许纪元, 郝雅琼, 孙海军, 董刚强, 闵炬, 施卫明

引用本文:

许纪元, 郝雅琼, 孙海军, 董刚强, 闵炬, 施卫明. 施用生物刺激剂对空心菜种植增效减排效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2073–2081.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0087>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115–1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

作物-鱼共作对淡水养殖系统 N_2O 排放的影响

鲍婷, 王梦杰, 吴俊男, 刘耀斌, 李凤博, 冯金飞, 方福平

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1344–1353 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1367>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李烨, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

卢九斤, 聂易丰, 魏娇娇, 盛海彦, 华明秀, 许米聪, 王永亮

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 210–220 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0702>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许纪元, 郝雅琼, 孙海军, 等. 施用生物刺激剂对空心菜种植增效减排效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2073–2081.
XU J Y, HAO Y Q, SUN H J, et al. Effects of biostimulants on efficiency increase and emission reduction in water spinach cultivation[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(9): 2073–2081.



开放科学 OSID

施用生物刺激剂对空心菜种植增效减排效应研究

许纪元¹, 郝雅琼¹, 孙海军², 董刚强³, 闵炬^{1*}, 施卫明¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京林业大学林学院, 南京 210037; 3. 安利(中国)植物研发中心, 江苏 无锡 214115)

摘要:通过观测不同生物刺激剂对空心菜产量及对菜地氮环境排放的影响,初步筛选出有利于空心菜种植氮利用增效与环境减排的生物刺激剂种类。开展设施菜地土壤土柱模拟试验,两季种植空心菜,设置8个处理:不施氮(CK),常规施氮(N)和常规施氮分别添加黄腐酸类物质(N+HA)、海藻提取物(N+AE)、壳聚糖(N+CT)、鱼蛋白(N+FPH)、大豆蛋白水解物(N+PPH)、微生物菌剂(N+FC)处理。观测不同生物刺激剂对空心菜产量、氮肥利用率、土壤NH₃挥发和N₂O排放的影响。两季种植结果表明:与N处理相比,添加不同生物刺激剂均可促进空心菜地上部氮吸收并提高产量,增产效果从高到低依次为N+HA、N+AE、N+CT、N+FC、N+FPH、N+PPH,其中,N+HA、N+AE和N+CT两季平均增幅分别达29.2%、26.5%和15.0%,氮表观利用率从13.7%分别提高到22.2%、21.1%和19.2%;NH₃挥发损失平均削减率从大到小依次为N+AE、N+HA、N+CT、N+FPH、N+PPH,其中,N+HA、N+AE和N+CT两季平均分别降低16.1%、24.2%和9.6%。与N处理相比,6种生物刺激剂处理均增加了土壤N₂O排放,增幅为8.4%~29.8%。研究表明,氮肥配施HA、AE和CT这3种生物刺激剂可以显著提高空心菜产量和氮肥利用率,并显著减少NH₃挥发排放,此外,不同种类生物刺激剂的施用均存在N₂O排放增加的风险。

关键词:生物刺激剂;菜地;氮挥发;氧化亚氮;产量;氮肥利用率

中图分类号:X71;S636.9 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)09-2073-09 doi:10.11654/jaes.2022-0087

Effects of biostimulants on efficiency increase and emission reduction in water spinach cultivation

XU Jiyan¹, HAO Yaqiong¹, SUN Haijun², DONG Gangqiang³, MIN Ju^{1*}, SHI Weiming¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Forestry University, College of Forestry, Nanjing 210037, China; 3. Amway (China) Botanical R&D Center, Wuxi 214115, China)

Abstract: By observing the effects of different biostimulants on the yield of cabbage and the environmental emission of nitrogen (N) in vegetable field, the species of biostimulants, which are beneficial to the utilization efficiency and environmental emission reduction of CABBAGE planting N, were preliminarily screened out. A soil column simulation experiment was carried out in a vegetable plot facility, and water spinach was planted for two consecutive years. Eight treatments were set up: No N (CK), conventional N (N), and conventional N were combined with fulvic acid (N+HA), algae extracts (N+AE), chitosan (N+CT), fish protein hydrolysates (N+FPH), soy protein hydrolysates (N+PPH), and microbial agent (N+FC). The effects of different biostimulants on yield, N fertilizer efficiency, soil NH₃ volatilization, and N₂O emission were observed. Compared with the N treatment, different biostimulants promoted N absorption and increase the yield of water spinach shoots, and the increasing effect from high to low was as follows: N+HA, N+AE, N+CT, N+FC, N+FPH, and N+PPH. The average yield of N+HA, N+AE and N+CT in two years increased by 29.2%, 26.5%, and 15.0%, respectively, and the apparent

收稿日期:2022-01-22 录用日期:2022-05-09

作者简介:许纪元(1991—),男,江苏扬州人,博士,主要从事蔬菜氮素营养与环境效应研究。E-mail:yzxu_jiyan@issas.ac.cn

*通信作者:闵炬 E-mail:jmin@issas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31872185);企业合作项目(Am20210407RD)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31872185); Enterprise Cooperation Projects(Am20210407RD)

utilization rate of N increased from 13.7% to 22.2%, 21.1%, and 19.2%, respectively. The average reduction rate of NH_3 volatilization loss was in the following order: N+AE, N+HA, N+CT, N+FPH, and N+PPH. The average reduction rate of N+HA, N+AE, and N+CT in two years was 16.1%, 24.2%, and 9.6%, respectively. Compared with the N treatment, six biostimulant treatments increased soil N_2O emission by 0.16~0.56 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, with an increase rate of 8.4%~29.8%. The synergistic and emission reduction effects of different biostimulants on water spinach were comprehensively analyzed. N fertilizer combined with HA, AE, and CT significantly improved the yield and N fertilizer utilization rate of cabbage and significantly reduced NH_3 volatilization emission. In addition, the application of different kinds of biostimulants had the risk of increased N_2O emission.

Keywords: biostimulants; vegetable field; NH_3 volatilization; N_2O ; yield; N use efficiency

我国蔬菜产量占世界蔬菜总产量的50%,已成为世界上最大的蔬菜生产国^[1]。蔬菜高产离不开肥料(特别是化肥)的投入。集约化蔬菜种植体系为追求高产,常投入大量氮肥,但氮肥利用率仅为18%左右^[2-3]。未被作物吸收利用的氮素可通过 NH_3 挥发损失,或在氮转化的硝化-反硝化过程中产生 N_2O 气体等,从而造成一系列环境问题^[4]。因此,亟需发展蔬菜种植体系增效减排的高效施肥技术。

生物刺激剂是指促进植物生长、提升作物品质、提高植物抗逆性的一大类非养分物质^[5-6]。已报道的生物刺激剂包括黄腐酸类物质、海藻提取物、壳聚糖类物质、蛋白质水解物与多肽类物质、微生物菌剂等多种类型^[7]。生物刺激剂对植物产生的生长促进作用主要通过根系生长的促进效果^[8-10]、对养分吸收的维持和促进效果^[11-14]、对土壤微生物群落的改良作用^[15-16]等途径来实现。生物刺激剂的促生作用并非依靠自身的养分作用,而是通过其关键成分决定,且生物刺激剂主要成分与其种类显著相关。叶面喷施某种蛋白质水解物可使菜豆增产25%,同时提高菜豆32%的豆荚种子数量和38%的平均株高^[17];黄腐酸类物质的使用可提高菠菜的养分吸收效率和菠菜体内养分运输速率^[18];壳聚糖可提高长豆角豆荚可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和维生素C含量,并增加了单果质量、单株结荚数和单位面积产量^[19];微生物菌剂施用可使番茄总产量和前期产量分别提高34.4%和42.4%^[20]。目前生物刺激剂的应用研究多集中于其对作物产量的影响,而对蔬菜种植的增效减排效应的评价尚缺乏。为此,本研究通过两季(2018年和2019年)的空心菜土柱试验,选取有代表性的6种生物刺激剂(黄腐酸类物质、海藻提取物、壳聚糖、鱼蛋白、大

豆蛋白水解物、微生物菌剂)与氮肥配施,观测不同生物刺激剂对空心菜产量、氮肥利用率、 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响,为提高菜地氮素利用率、减少氮环境排放提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地概况

供试空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk)品种为港种大白骨通心菜310特选种,由深圳市范记种子有限公司提供。生物刺激剂包括黄腐酸(HA,山东兴禾生物科技股份有限公司)、海藻提取物(AE,深圳神宝农业科技有限公司,纯度为50%)、壳聚糖(9012-76-4)(CT,国药集团化学试剂有限公司)、鱼蛋白(FPH,山东省田旺生物有限公司)、大豆蛋白水解物(PPH,江苏长晶生物工程有限公司)、微生物菌剂(FC,山东绿陇生物科技有限公司)。

供试土壤取自江苏省宜兴市周铁蔬菜种植基地(31°16'N, 119°54'E)的设施菜地,根据《中国土壤系统分类检索》^[21],供试土壤类型为普通肥熟旱耕人为土。土壤基础理化性质如表1所示,其中土壤pH测定时的土水比为1:2.5($m:V$),土壤电导率测定采用风干土,土水比为1:5($m:V$)。

江苏省宜兴市年平均降雨量1 177 mm,年平均气温15.7℃,气候为亚热带季风气候,试验期间当地的降雨和气温变化如图1所示。

1.2 试验设计

试验于2018年6—7月(第一季)和2019年8—9月(第二季)在光照通风正常的空地上开展。采用土柱模拟试验,土柱直径为35 cm,高度为60 cm,底部放入20 cm深珍珠岩,后填入50 kg过2 mm筛的风干

表1 供试菜地土壤基础理化性质

Table 1 Soil type and major characteristics(0~20 cm) of the field site

土壤质地 Soil texture	pH	有机质 Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	电导率 EC/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)
砂壤土	6.5	10.6	0.66	458.6	56.0	1.0

设施菜地土壤,压实、灌水,调节土柱内土壤水分含量至当地菜地田间持水量水平,土壤容重 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。于土柱内均匀移栽6棵2片真叶时期的空心菜,生长35 d后采收。

试验设置8个处理:不施氮对照处理(CK)、常规施氮处理(N),以及常规施氮分别配施6种生物刺激剂处理(N+HA、N+AE、N+CT、N+FPH、N+PPH、N+FC),每个处理3次重复。除CK处理不施氮肥外,其余所有处理的氮、磷、钾肥投入均保持一致。其中氮肥采用尿素,氮肥(N)用量为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,相当于 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分两次施用,基肥、追肥分配比为1:1。磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)用量为 $0.38 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,相当于 $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥采用磷酸二氢钾,钾肥采用过硫酸钾和磷酸二氢钾,均一次性基施。6种生物刺激剂分别与氮肥同时添加,将肥料与生物刺激剂溶于水中,根部浇灌,2个肥期用量分配比为1:1。生物刺激剂的总用量如表2所示,均换算自推荐用量。两季基肥分别于2018年6月25日和2019年8月20日施入,追肥分别于2018年7月10日和2019年9月6日施入。定期浇水使土壤始终保持湿润状态。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 产量与氮肥表观利用率

试验结束后,收获空心菜,称取地上部生物量计算产量,然后在 105°C 下杀青30 min,继续在 75°C 下

烘干72 h至恒质量。随后用植物粉碎机将样品粉碎,通过浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮并采用凯氏定氮法^[22]测定植株样品氮含量并计算吸氮量。

利用氮肥的表观利用率(RE_N)来比较不同生物刺激剂处理的氮利用效率,计算公式如下:

$$RE_N = \frac{\text{施氮区氮吸收量} - \text{不施氮区氮吸收量}}{\text{氮肥施用量}} \times 100\%$$

1.3.2 NH_3 挥发

采用海绵吸收法^[23]收集装置内的 NH_3 挥发通量,采样装置为聚氯乙烯硬质塑料管,内径15 cm,高20 cm。采样时分别将两块厚度为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL磷酸甘油溶液,下层海绵(样品)置于塑料管中部,上层海绵(隔离空气中的 NH_3)与塑料管顶部齐平。各处理施基肥后分别于2018年6月25、27、29日和2019年8月20、22、24、26日更换下层海绵;追肥后分别于2018年7月10、12、14、16日和2019年9月6、8、10、12日更换下层海绵;基肥期采样结束后至追肥开始之前的时间段内(2018年6月29日—7月10日和2019年8月26日—9月4日),放置海绵吸收土壤挥发的 NH_3 ,直至追肥前更换下层海绵。海绵样品中的 NH_3 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提,靛酚蓝比色法测定。用以下公式计算 NH_3 挥发通量, NH_3 挥发累积排放量为 NH_3 挥发通量之和:

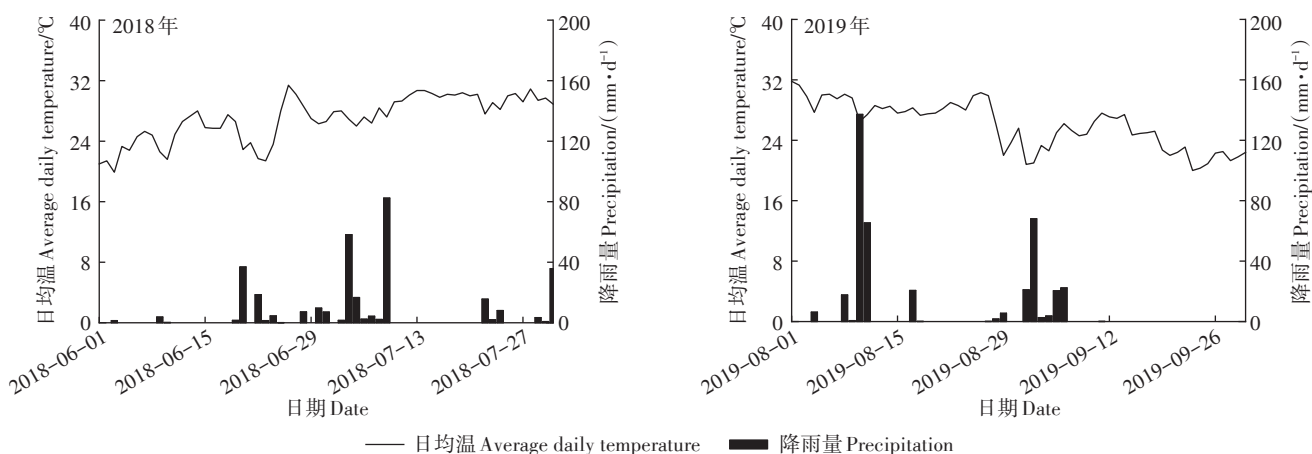


图1 两季试验期(2018年和2019年)试验点的日均温和降雨量

Figure 1 Average daily temperature and rainfall at the experimental site during the experiment periods (2018 and 2019)

表2 生物刺激剂的单季总用量($\text{mg} \cdot \text{盆}^{-1}$)

Table 2 Total amount of biostimulants to per vegetable season($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)

黄腐酸 Fulvic acid	海藻提取物 Algae extract	壳聚糖 Chitosan	鱼蛋白 Fish protein hydrolysate	大豆蛋白 Soy protein hydrolysate	枯草芽孢杆菌 Bacillus subtilis
144	96	76.8	96	96	115.2

$$F_{\text{NH}_3} = \frac{M}{A \times D} \times 10^{-2}$$

式中: F_{NH_3} 为 NH_3 挥发通量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; M 为单个装置采集到的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的量, mg ; A 为采样装置覆盖土壤的面积, m^2 ; D 为该样品连续捕获的时间, d 。

1.3.3 N_2O 排放

采用静态箱-气相色谱法^[24]测定 N_2O 排放通量, 取样时将方盖 PVC 静态箱 ($40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$) 置于水槽底座中形成一密闭空间, 然后在密闭 15、30 min 和 45 min 时采集箱内气体样品, 每次施肥后 0、2、4 d 和 6 d 采集样品, 用气相色谱仪 (HP7820A, Agilent Technologies, CA, USA) 分析其 N_2O 浓度。通过以下公式计算 N_2O 排放通量, 采用累积加和法计算空心菜季的 N_2O 累积排放量:

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T}$$

式中: $F_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准大气压下 N_2O 气体的密度, $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为静态箱高度, cm ; $\Delta c/\Delta t$ 为静态箱单位时间内的气体浓度变化量, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为采样时的绝对温度, K 。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行基础统计分析, 采用 SPSS 20.0 对不同处理地上部氮吸收、产量、 NH_3 挥发和 N_2O 排放进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 及 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$)。图形采用 Origin 16.0 绘制, 图中所有数据均为每个处理 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同生物刺激剂处理对地上部氮吸收的影响

由图 2 可以看出, 添加生物刺激剂可提高空心菜地上部氮吸收量, 两季试验地上部氮吸收量从高到低均依次为 N+HA、N+AE、N+CT、N+FPH、N+FC、N+PPH, 与 N 处理相比, N+HA 和 N+AE 处理显著提高了空心菜地上部 20.4%~63.2% 和 21.4%~54.6% 的氮吸收。N+CT 处理显著促进了第一季空心菜地上部氮吸收 (37.0%), 第二季也表现为促进作用, 但差异不显著。其余生物刺激剂处理不同程度地促进了空心菜的地上部氮吸收, 但与 N 处理相比无显著的统计学差异。

2.2 不同生物刺激剂处理对产量的影响

不同生物刺激剂处理下的空心菜产量如图 3 所示, 两季试验中生物刺激剂处理均可以增加空心菜产

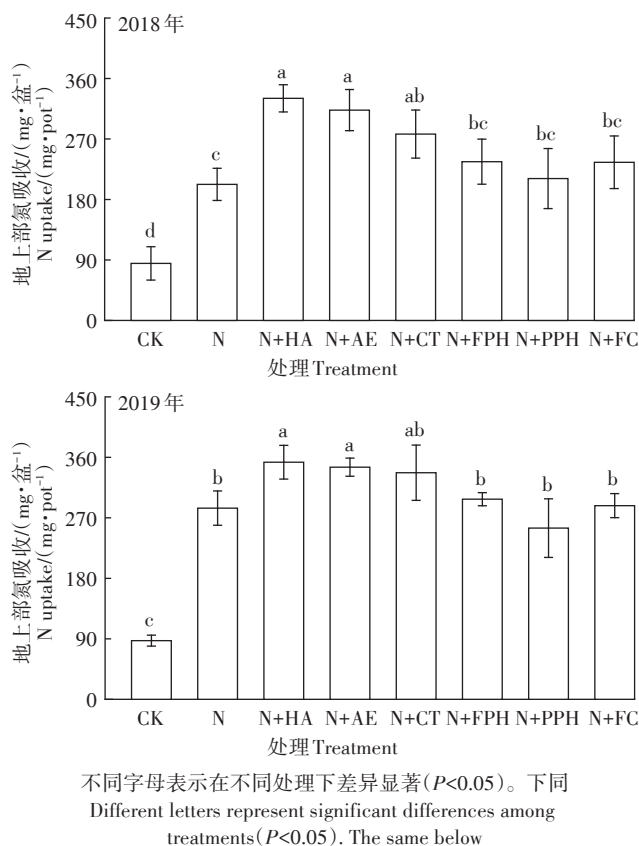


图2 不同生物刺激剂处理对两茬空心菜地上部氮吸收的影响
Figure 2 Response of N uptake of water spinach to different biostimulant treatments

量, 2018年增产效果从高到低依次为 N+HA、N+AE、N+CT、N+FC、N+FPH、N+PPH, 2019年依次为 N+AE、N+HA、N+CT、N+FC、N+FPH、N+PPH。其中, 与 N 处理相比, N+HA 和 N+AE 处理显著增加了两季试验中空心菜的产量, 分别增长 26.8%~32.9% 和 24.1%~28.0%, N+CT 处理与 N 处理相比增产效果不显著, 但两季的产量均值增长幅度仍达到 11.7%~17.1%。N+FPH、N+PPH 和 N+FC 处理对空心菜产量没有显著影响。结果表明, 两季试验中的 N+HA、N+AE 和 N+CT 处理相较于其他生物刺激剂处理更能促进空心菜产量增加, 增产幅度达到 11.7%~32.9%, 这与其对地上部氮吸收的促进效果相一致 (图 2)。

2.3 不同生物刺激剂处理对氮肥表观利用率的影响

图 4 表明, 生物刺激剂可提高空心菜氮肥的表观利用率。两季试验的 RE_N 从高到低均依次为 N+HA、N+AE、N+CT、N+FPH、N+FC、N+PPH。与 N 处理相比, N+HA 和 N+AE 处理显著提高了空心菜的 RE_N , 增幅为 34.7%~108.9% 和 30.9%~94.0%。N+CT 处理显著促进了第一季的 RE_N , 增幅为 63.6%, 第二季增幅为

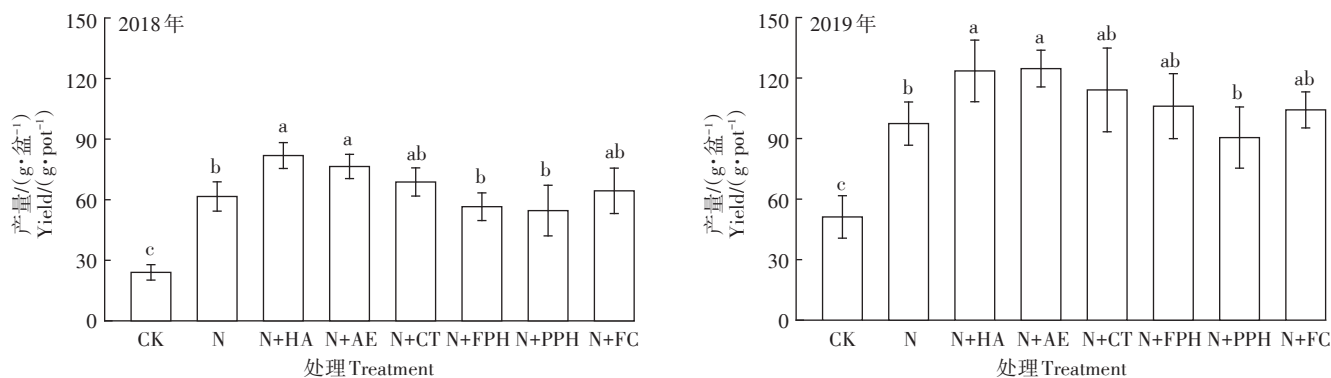


图3 不同生物刺激剂处理对两茬空心菜产量的影响

Figure 3 Impacts of biostimulant amendments on water spinach yields during two seasons

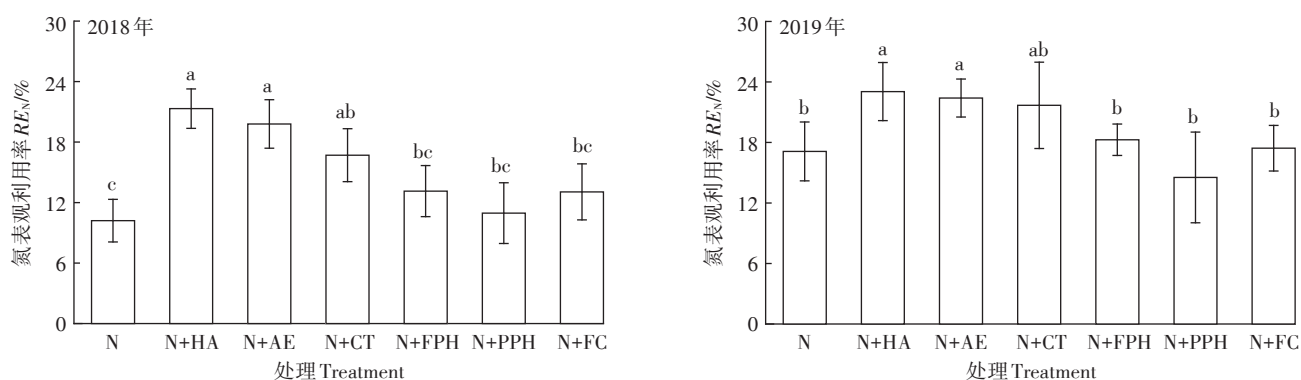


图4 不同生物刺激剂处理对空心菜氮素表观利用率的影响

Figure 4 Impacts of biostimulant amendments on the RE_N of water spinach

26.7%,但与N处理相比差异不显著。N+FPH和N+FC处理促进了空心菜 RE_N ,但与N处理相比无显著差异。N+PPH处理提高了第一季空心菜 RE_N ,增幅为7.3%,但降低了第二季的 RE_N ,降幅为15.1%

2.4 不同生物刺激剂处理对土壤 NH_3 挥发的影响

如图5所示,不同处理 NH_3 挥发通量变化趋势基本一致,添加氮肥明显增加了肥期的 NH_3 挥发通量。施肥后的2~4 d内土壤 NH_3 挥发通量达到峰值,之后逐渐下降,基肥期的 NH_3 挥发通量峰值高于追肥期。不同生物刺激剂对土壤 NH_3 挥发通量的影响有差异,与N处理相比,除了N+FC处理之外,其余处理在每次施肥后都减小了 NH_3 挥发通量,其中,N+HA和N+AE处理 NH_3 挥发通量减小最为明显。

本研究中,两季施氮处理 NH_3 挥发累积排放量分别为2.32~3.70 kg·hm⁻²(以N计,下同)和2.76~4.62 kg·hm⁻²,占氮素投入量的1.9%~3.1%和2.3%~3.8%,且不同生物刺激剂处理对空心菜季设施土壤 NH_3 挥发累积排放量有不同影响(图6)。其中,与N处理相比,N+HA和N+AE处理分别显著降低 NH_3 挥发损失的15.0%~17.2%和21.3%~27.4%;N+CT处理可显著

降低第二季 NH_3 挥发损失(19.8%),而对第一季 NH_3 挥发损失影响不显著;N+FPH处理显著降低第一季 NH_3 挥发损失(12.6%),而对第二季 NH_3 挥发损失影响不显著;N+PPH处理与N处理相比无显著差异,即对土柱 NH_3 挥发损失无显著影响。综合两季空心菜种植期 NH_3 挥发监测结果可知,与N处理相比,N+AE和N+HA处理的 NH_3 挥发减排效果最好,N+CT和N+FPH处理具有 NH_3 挥发减排的潜力,N+FC处理可能会导致 NH_3 挥发增加。可见,生物刺激剂会显著影响设施蔬菜土壤 NH_3 挥发,其影响效果与生物刺激剂类型有关。

2.5 不同生物刺激剂处理对土壤 N_2O 排放的影响

如图7所示,不同处理 N_2O 排放速率变化趋势基本一致,添加氮肥处理明显增加了 N_2O 排放速率。施肥后的2~3 d,土壤 N_2O 排放速率达到峰值,不同生物刺激剂对土壤 N_2O 排放速率的影响有所差异。与N处理相比,生物刺激剂处理总体上不同程度地提高了土壤 N_2O 排放速率,尤其是提高了第一次施肥期的 N_2O 排放速率,第一季和第二季第一次施肥后的 N_2O 排放速率峰值分别增加了274.6~576.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (以

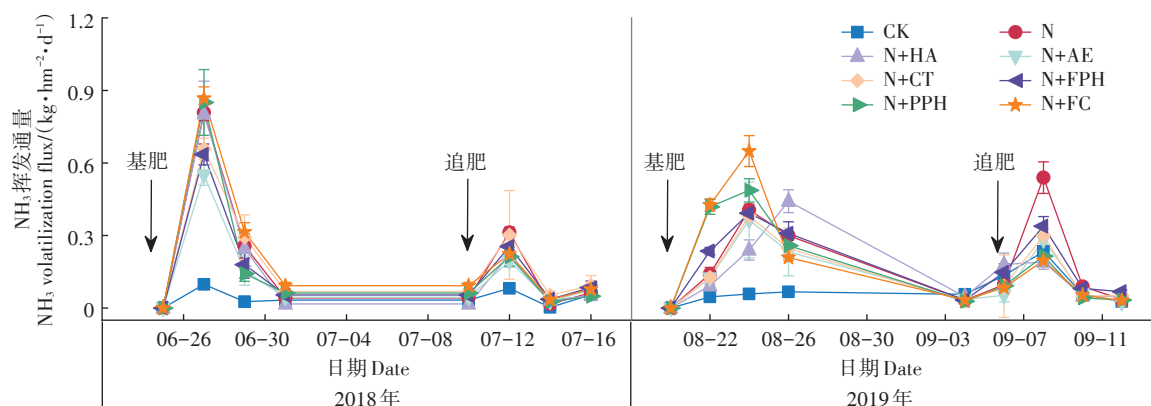


图5 不同生物刺激剂处理下的NH₃挥发通量

Figure 5 NH₃ volatilization fluxes under different biostimulants treatments

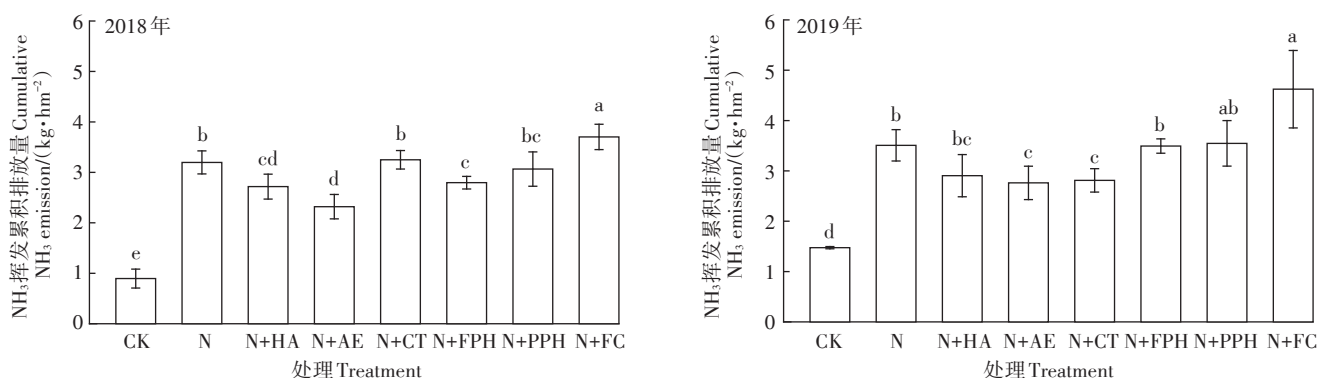


图6 不同生物刺激剂处理对空心菜种植设施菜地土壤NH₃挥发的影响

Figure 6 Impacts of biostimulant amendments on NH₃ volatilization from intensive vegetable soil planted with water spinach

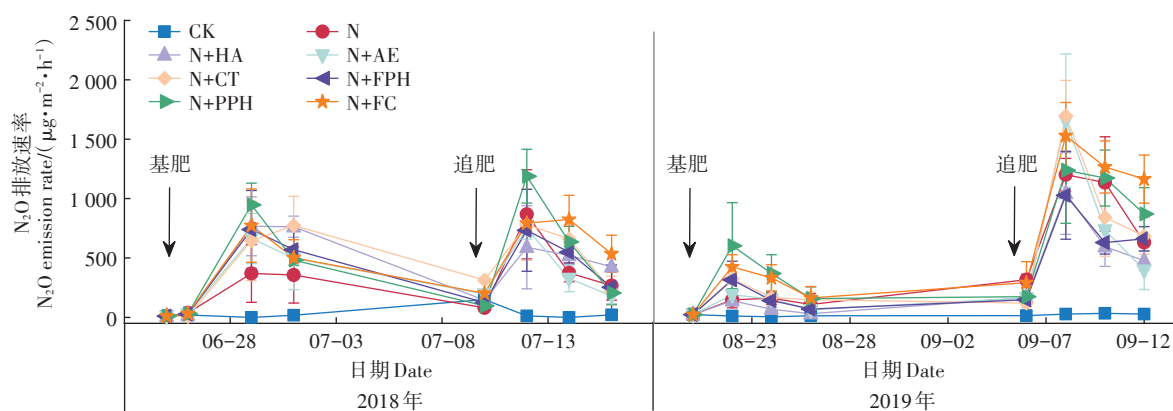


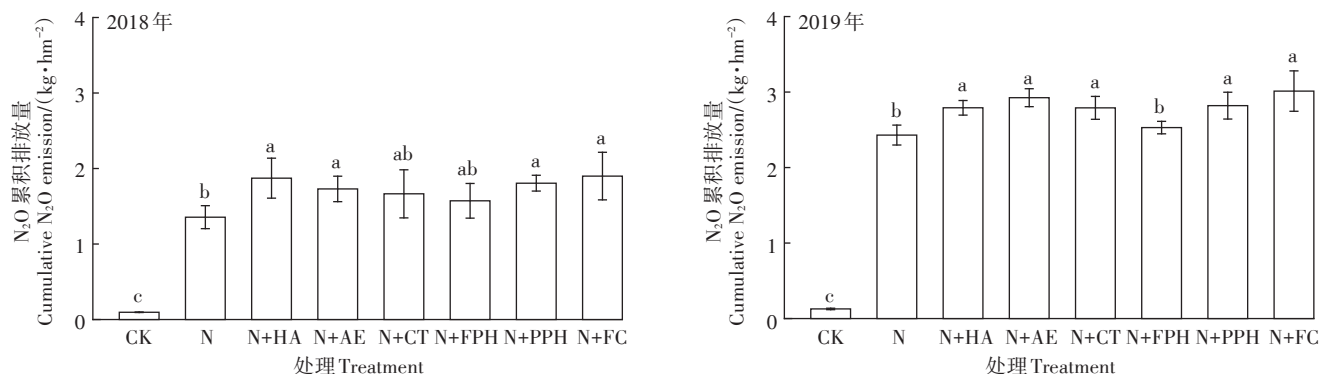
图7 不同生物刺激剂处理下的N₂O排放速率

Figure 7 N₂O emission rates under different biostimulants treatments

N计,下同)和 $42.6\sim 455.4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,这可能是生物刺激剂影响下土壤N₂O排放总量增高的原因之一。

本研究中,两季施氮处理N₂O累积排放量分别为 $1.36\sim 1.90\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以N计,下同)和 $2.43\sim 3.01\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占氮素投入量的 $1.12\%\sim 1.58\%$ 和 $2.02\%\sim 2.51\%$,如图8所示,不同生物刺激剂处理均促进了土

壤N₂O累积排放量。其中N+HA、N+AE、N+PPH和N+FC处理均显著提高了两季空心菜试验期间的N₂O排放,与N处理相比,分别增加了 $0.36\sim 0.52$ 、 $0.37\sim 0.49$ 、 $0.39\sim 0.45$ 、 $0.54\sim 0.58\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。N+CT处理显著促进了第二季空心菜种植土壤N₂O的排放($0.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),但对第一季N₂O的排放无显著影响。N+FPH

图8 不同生物刺激剂处理对空心菜种植设施菜地土壤N₂O排放的影响Figure 8 N₂O emissions from intensive vegetable soil planted with water spinach following biostimulant amendments

处理对两季空心菜的N₂O排放均无显著影响。综上所述,生物刺激剂添加会影响设施菜地土壤N₂O排放,具体影响效果与生物刺激剂种类有关。

3 讨论

3.1 不同生物刺激剂处理增产增效效果

本研究中,施用黄腐酸、海藻提取物和壳聚糖类生物刺激剂对空心菜有显著的增产效果。与常规施氮相比,添加黄腐酸类物质(N+HA)、海藻提取物(N+AE)、壳聚糖(N+CT)处理显著提高了空心菜产量(15.0%~29.2%),同时提高了地上部氮吸收(26.2%~40.3%)及氮表观利用率(40.5%~62.4%)。因此,施用生物刺激剂促进空心菜产量提升的主要原因之一是其增加了空心菜对氮的吸收,提高了氮利用率。SMOLEN^[18]发现黄腐酸类物质能够显著提高水培条件下菠菜(*Spinacia oleracea* L.)叶和根的生物量,KOCIRA等^[25]发现喷施海藻提取物可以显著提高大豆产量(9.2%),以上均与本研究结果一致。此外,不同生物刺激剂还存在其他促生机制。黄腐酸类物质可以通过调控根区细胞质膜H⁺离子泵活性促进根区细胞内蛋白质合成及细胞自身分化和生长,从而显著促进玉米苗期根系生长^[26-27];海藻提取物类物质含有的大量海藻酸、海藻多糖及多种植物促生物质(如抗氧化剂、藻类蛋白、藻类萜和植物生长激素等)^[28]可显著提高生菜早期的总根长(40%~83%)^[29];壳聚糖类物质可定向改变番茄苗根际微生物群落丰富度和多样性,提高毛单胞菌科 *Pelomonas* 属、假单胞菌科纤维弧菌属、根瘤菌科根瘤菌属和亚硝化单胞菌科亚硝化螺菌属等促进植物生长的根际微生物活性^[30]。因此,生物刺激剂添加后作物产量的增加可能是多种因素共同作用的结果。

与常规施氮相比,添加鱼蛋白(N+FP)、大豆蛋

白水解物(N+PPH)、微生物菌剂(N+FC)处理下空心菜产量和氮表观利用率均没有显著提高。这与COLLA等^[9]和NGUYEN等^[31]的研究结果不一致,前者发现蛋白质水解物类物质可以通过促进植物根系硝化还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性及不定根的生长来提高植物的养分吸收,进而提高作物产量,后者研究发现 *BamGB03*、*BmeSNji* 和 *Abr65B* 3种微生物菌剂可在各个阶段促进大麦生长,提高其产量。生物刺激剂的促产机理较为复杂,易受多种因素的影响。有研究发现,微生物菌剂能够显著提高低氮投入条件下生菜作物地上部氮的吸收,而在高氮投入条件下对氮吸收的影响不显著^[4],土壤氮水平的差异可能导致生物刺激剂促生效果的差异。有研究证明生物刺激剂施用方式不同(叶施或根施)对金鱼草生长的影响存在差异^[32],不同于前人研究中的叶面喷施方式,本试验采用的根部施肥方式更易受到植物生长所处根系环境的影响,从而可能改变生物刺激剂的作用效果,导致促生效果存在差异。

3.2 不同生物刺激剂处理的环境减排效果

生物刺激剂对设施菜地土壤NH₃挥发的影响与刺激剂类型有关。与常规施氮相比,添加黄腐酸类物质(N+HA)、海藻提取物(N+AE)、壳聚糖(N+CT)处理降低了9.6%~24.2%的NH₃挥发量。上述3种生物刺激剂的添加,提高了空心菜地上部氮吸收和氮表观利用率,减少了氮损失,这可能是NH₃挥发降低的原因。而添加微生物菌剂(N+FC)处理显著提高空心菜季土壤NH₃挥发。微生物菌剂类物质可能是通过提升土壤中的NH₄⁺-N含量进而导致空心菜季菜地土壤NH₃挥发增加^[33]。此外,微生物菌剂类物质可能通过直接影响土壤微生物群落组成及其丰度,或间接影响植物根系次分泌物的组成以改变根际氮转化微生物群落^[34],导致本研究中微生物菌剂类物质与其他生物刺

激剂对土壤氮转化过程的影响不同。

与常规施氮处理相比,6种生物刺激剂处理均增加了土壤 N_2O 排放,增幅为8.4%~29.8%。生物刺激剂可以直接调控土壤氮转化微生物的活性,或通过调节土壤pH、提供有机碳源、刺激根系分泌物等调节根际微生物,从而控制土壤硝化反硝化过程,促进 N_2O 排放^[35-38]。本研究结果与SOUZA等^[34]的研究结果一致,其研究发现某种含氮转化微生物的生物刺激剂添加导致土壤 N_2O 排放显著增加32%。此外,黄腐酸类物质可以通过耦合土壤中铁、锰等活性金属介导土壤氮的转化,促进土壤 N_2O 的形成及排放^[39],还可以通过介导土壤 NO_3^- 的氧化还原转化影响土壤中氮的去向^[40]。本研究中,生物刺激剂添加导致的 N_2O 排放损失量为 $0.16\sim 0.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,仅占氮肥投入量的0.1%~0.5%,处于较低水平。在应用生物刺激剂时,联合其他 N_2O 减排措施(如添加硝化抑制剂、生物质炭)、有机肥代替化肥等,可以有效控制 N_2O 排放^[41-44]。

4 结论

(1)两季种植结果表明,与常规施氮相比,氮肥配施黄腐酸类物质、海藻提取物和壳聚糖处理增产增效最为显著,增产幅度为15.0%~29.2%,氮表观利用率提高40.5%~62.4%。

(2)与常规施氮相比,氮肥配施黄腐酸类物质、海藻提取物和壳聚糖可降低土壤 NH_3 挥发损失9.6%~24.2%。此外,生物刺激剂施用存在 N_2O 排放增加的风险,建议在配施生物刺激剂的同时实施 N_2O 减排措施,以便降低温室气体排放。

(3)综合考虑6种生物刺激剂在产量、氮肥表观利用率和 NH_3 、 N_2O 排放上的效果,发现在空心菜等叶菜上应用黄腐酸类、海藻提取物、壳聚糖类生物刺激剂与氮肥配施,可促进产量、提高氮肥利用率并减少 NH_3 挥发。

参考文献:

[1] 王鸣,穆月英. 中国对东盟蔬菜出口贸易:基于引力模型的实证研究[J]. 中国蔬菜, 2018(12): 54-60. WANG M, MU Y Y. China's vegetables export trade to ASEAN: An empirical study based on gravity model[J]. *China Vegetables*, 2018(12): 54-60.

[2] 徐丽萍,巨昇容,王远,等. 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1106-1114. XU L P, JU S R, WANG Y, et al. Efficiency and emission reduction of a one-time basal application of controlled release nitrogen fertilizer in intensive vegetable production in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 1106-1114.

[3] MIN J, ZHAO X, SHI W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21: 464-472.

[4] 闵炬,孙海军,陈贵,等. 太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2418-2426. MIN J, SUN H J, CHEN G, et al. The practice of technologies for nitrogen emission reduction and efficiency increase in intensive farmland of Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2418-2426.

[5] DOBBSS L B, MEDICI L O, PERES L E P, et al. Changes in root development of *Arabidopsis* promoted by organic matter from oxisols[J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 151: 199-211.

[6] YAKHINO I, LUBYANOV A A, YAKHIN I A, et al. Biostimulants in plant science: A global perspective[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7: 2049.

[7] DU JARDIN P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 3-14.

[8] JI R T, DONG G Q, SHI W M, et al. Effects of liquid organic fertilizers on plant growth and rhizosphere soil characteristics of chrysanthemum[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 841.

[9] COLLA G, HOAGLAND L, RUZZI M, et al. Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2202.

[10] LUCINI L, ROUPHEAL Y, CARDARELLI M, et al. A vegetal biopolymer-based biostimulant promoted root growth in melon while triggering brassinosteroids and stress-related compounds[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 472.

[11] 周金燕,纪荣婷,董刚强,等. 壳聚糖类有机水溶肥对抗白菊苗期生长影响及其机制研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 789-795. ZHOU J Y, JI R T, DONG G Q, et al. Effects and mechanism of chitosan organic water-soluble fertilizer on growth of chrysanthemum[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 789-795.

[12] XU J Y, MIN J, SUN H J, et al. Biostimulants decreased nitrogen leaching and NH_3 volatilization but increased N_2O emission from plastic-shed greenhouse vegetable soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 6093-6102.

[13] GEMIN L G, MÓGOR Á F, DE DLIVEIRA AMATUSSI J, et al. Microalgae associated to humic acid as a novel biostimulant improving onion growth and yield[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108560.

[14] FIORENTINO N, VENTORINO V, WOO S L, et al. *Trichoderma*-based biostimulants modulate rhizosphere microbial populations and improve N uptake efficiency, yield, and nutritional quality of leafy vegetables[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 743.

[15] POVEDA J, HERMOSA R, MONTE E, et al. The *Trichoderma harzianum* kelch protein ThKEL1 plays a key role in root colonization and the induction of systemic defense in Brassicaceae plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1478.

[16] LUZIATELLI F, FICCA A G, COLLA G, et al. Foliar application of vegetal-derived bioactive compounds stimulates the growth of beneficial bacteria and enhances microbiome biodiversity in lettuce[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 60.

[17] KOCIRA S. Effect of amino acid biostimulant on the yield and nutritional potential of soybean[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2019, 79: 17-25.

- [18] SMOLEŃ S, LEDWOŻYŃ W-SMOLEŃ I, SADY W. The role of exogenous humic and fulvic acids in iodine biofortification in spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. *Plant and Soil*, 2015, 402:129-143.
- [19] 吴黄铭, 陈惠萍. 壳聚糖对长豆角品质和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11):6347-6348, 6385. WU H M, CHEN H P. Effect of chitosan on the quality and yield of *Vigna sinensis* (L.) Savi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(11):6347-6348, 6385.
- [20] 王明友, 杨秀凤, 郑宪和, 等. 复合微生物菌剂对番茄的光合特性及产量品质的影响[J]. 土壤肥料, 2004(4):37-39. WANG M Y, YANG X F, ZHENG X H, et al. The effect of tomato photosynthesis characteristic and yield and quality by using biological bacterial manure[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(4):37-39.
- [21] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Soil Systematic Classification Research Group, Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Classification of soil in China[M]. 3rd Edition. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.
- [22] BREMNER J M. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1960, 55:11-33.
- [23] 王远, 闵炬, 史培华, 等. 稻麦轮作体系两种氨挥发监测方法比较研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(12):1990-2001. WANG Y, MIN J, SHI P H, et al. Comparison of two monitoring methods for ammonia volatilization based on rice-wheat rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12):1990-2001.
- [24] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂影响小麦产量、 N_2O 与 NH_3 排放的研究[J]. 土壤, 2017, 49(5):876-881. SUN H J, MIN J, SHI W M, et al. Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield, N_2O emission and NH_3 volatilization[J]. *Soils*, 2017, 49(5):876-881.
- [25] KOCIRA A, ŚWIECA M, KOCIRA S, et al. Enhancement of yield, nutritional and nutraceutical properties of two common bean cultivars following the application of seaweed extract (*Ecklonia maxima*) [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25:563-571.
- [26] CONSELVAN G B, PIZZEGHELLO D, FRANCIRSO O, et al. Biostimulant activity of humic substances extracted from leonardites[J]. *Plant and Soil*, 2017, 420:119-134.
- [27] SHAH Z H, REHMAN H M, AKHTAR T, et al. Humic substances: Determining potential molecular regulatory processes in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:263.
- [28] MICHALAK I, CHOJANCKA K. Algae as production systems of bioactive compounds[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2015, 15:160-176.
- [29] TORRES P, NOVAES P, FERREIRA L G, et al. Effects of extracts and isolated molecules of two species of *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta) on early growth of lettuce[J]. *Algal Research*, 2018, 32:142-149.
- [30] 董春娟, 李亮, 王玲玲, 等. 壳聚糖对番茄穴盘苗根际细菌群落结构的改良作用[J]. 园艺学报, 2017, 44(8):1505-1516. DONG C J, LI L, WANG L L, et al. Improvement effects of chitosan on rhizosphere bacterial community structure of tomato plug seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(8):1505-1516.
- [31] NGUYEN M L, SPAEPEN S, DU JARDIN P, et al. Biostimulant effects of rhizobacteria on wheat growth and nutrient uptake depend on nitrogen application and plant development[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 65:58-73.
- [32] CRISTIANO G, PALLOZZI E, CONVERSA G, et al. Effects of an animal-derived biostimulant on the growth and physiological parameters of potted snapdragon (*Antirrhinum majus* L.)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:861.
- [33] LUCINI L, COLLA G, MIRAS MORENO M B, et al. Inoculation of *Rhizoglyphus irregularis* or *Trichoderma atroviride* differentially modulates metabolite profiling of wheat root exudates[J]. *Phytochemistry*, 2019, 157:158-167.
- [34] SOUZA E F C, ROSEN C J, VENTERA R T. Contrasting effects of inhibitors and biostimulants on agronomic performance and reactive nitrogen losses during irrigated potato production[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240:143-153.
- [35] FIORENTINO N, VENTORINO V, WOO S L, et al. Trichoderma-based biostimulants modulate rhizosphere microbial populations and improve N uptake efficiency, yield, and nutritional quality of leafy vegetables[J]. *Front Plant Science*, 2018, 9:743.
- [36] BUCKLAND K, REEVE J R, ALSTON D, et al. Effects of nitrogen fertility and crop rotation on onion growth and yield, thrips densities, Iris yellow spot virus and soil properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 177:63-74.
- [37] ZHOU G, QIU X, ZHANG J, et al. Effects of seaweed fertilizer on enzyme activities, metabolic characteristics, and bacterial communities during maize straw composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286:121375.
- [38] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, BONINI P, et al. Synergistic action of a microbial-based biostimulant and a plant derived-protein hydrolysate enhances lettuce tolerance to alkalinity and salinity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8:131.
- [39] ZHU-BARKER X, CAVAZOS A R, OSTROM N E, et al. The importance of abiotic reactions for nitrous oxide production[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 126:251-267.
- [40] VALENZUELA E I, PADILLA-LOMA C, GÓMEZ-HERNÁNDEZ N, et al. Humic substances mediate anaerobic methane oxidation linked to nitrous oxide reduction in wetland sediments[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11:587.
- [41] LU Y, ZHANG X, JIANG J, et al. Effects of the biological nitrification inhibitor 1, 9-decanediol on nitrification and ammonia oxidizers in three agricultural soils[J]. *Soil Biol & Biochem*, 2019, 129:48-59.
- [42] SUN H, FENG Y, VITHANAGE M, et al. Floating duckweed mitigated ammonia volatilization and increased grain yield and nitrogen use efficiency of rice in biochar amended paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 237:124532.
- [43] SUN H, ZHANG Y, YANG Y, et al. Effect of biofertilizer and wheat straw biochar application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization from paddy soil[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275:116400.
- [44] MIN J, SUN H, KRONZUCKER H J, et al. Comprehensive assessment of the effects of nitrification inhibitor application on reactive nitrogen loss in intensive vegetable production systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 307:10227.

(责任编辑:宋潇)