

雷 菲,王 莉,刘海林,等. 腐殖酸缓释氮肥对糯玉米产量、氮肥利用率及土壤细菌多样性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):271-275.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.044

# 腐殖酸缓释氮肥对糯玉米产量、氮肥利用率 及土壤细菌多样性的影响

雷 菲<sup>1</sup>,王 莉<sup>2</sup>,刘海林<sup>2</sup>,林清火<sup>2</sup>,吴宇佳<sup>1</sup>,张冬明<sup>1</sup>

(1. 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所/农业农村部海南耕地保育科学观测实验站/海南省耕地保育重点实验室,海南海口 571100;

2. 中国热带农业科学院橡胶研究所/农业农村部橡胶树生物学与遗传资源利用重点实验室/

中国热带农业科学院土壤肥料研究中心,海南海口 571101)

**摘要:**通过糯玉米田间小区试验,研究腐殖酸缓释氮肥对糯玉米产量、氮肥利用率以及土壤细菌多样性的影响,以期为新型腐殖酸氮肥的研制提供理论与实践依据。结果表明,一次性施用腐殖酸缓释氮肥可显著增加糯玉米鲜穗产量、干物质量、氮素吸收量以及氮肥利用效率,其糯玉米鲜穗产量较普通尿素处理增加了 14.98%,干物质量和氮素吸收量较普通尿素处理分别增加了 27.91 和 0.31 g/株,氮肥利用率较普通尿素处理提升了 41.49%。腐殖酸缓释氮肥处理 0~20 cm 土壤全氮含量高于普通尿素处理,20~40、40~60 cm 土壤全氮含量低于普通尿素处理,但差异均不显著。而且腐殖酸缓释氮肥对糯玉米根系区域土壤细菌多样性无明显影响,各处理土壤细菌群落结构组成类似,均为酸杆菌门、变形菌门、绿弯菌门的总占比在 60% 以上。可见,在供试条件下,一次性施用腐殖酸缓释氮肥对糯玉米具有增产、促进氮素吸收和提高氮素利用率等效果,但对土壤细菌群落组成无明显影响。

**关键词:**腐殖酸缓释氮肥;糯玉米;产量;氮肥利用率;细菌多样性

**中图分类号:** S143.1<sup>+</sup>5;S513.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)17-0271-05

肥料是农业生产中极为关键的生产物资<sup>[1]</sup>,肥

料对作物增产的贡献率接近 50%<sup>[2]</sup>,其中氮肥的贡献率约 30%<sup>[3]</sup>。我国是世界主要的氮肥产销国,氮肥生产量超过了消费量,消费量超过作物最高产量需求量<sup>[3]</sup>。由于氮肥易通过挥发、淋溶等途径损失<sup>[4]</sup>,肥料过量施用将导致养分利用率低,且容易造成环境污染<sup>[5-6]</sup>。而通过使用新材料、新工艺或者新技术赋予常规肥料新功能和特性,研制新型肥料被认为是提高肥料利用率、减少养分损失的有

收稿日期:2021-09-03

基金项目:海南省省属科研院所技术开发专项(编号:KYYS-2019-10);海南省耕地保育重点实验室开放课题(编号:GDBY202001)。

作者简介:雷 菲(1988—),女,江西抚州人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养研究工作。E-mail:leifeicau@163.com。

通信作者:张冬明,硕士,副研究员,主要从事土壤改良与植物营养研究工作。E-mail:dongming\_03@163.com。

[20]薛 冬,姚槐应,黄昌勇. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(2):84-87.

[21]Lin Y X, Ye G P, Kuzyakov Y, et al. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 134:187-196.

[22]徐玉宏. 氮肥污染与防治[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3):174-175.

[23]Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968):1008-1010.

[24]颜明娟,林 琼,吴一群,等. 不同施氮措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3):452-456.

[25]张 昆,孙永明,王雅静,等. 江西茶园有机肥化肥配施对茶叶产量品质和土壤肥力的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(5):57-61.

[26]李萍萍,林永锋,胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):64-69.

[27]吴志丹,尤志明,江福英,等. 配施有机肥对茶园土壤性状及茶叶产质量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5):874-879.

[28]吴道铭,傅友强,于智卫,等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. 土壤, 2013, 45(4):577-584.

[29]王小兵,骆永明,李振高,等. 长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响 I. 酸度[J]. 土壤学报, 2011, 48(1):98-102.

[30]山 楠,赵同科,毕晓庆,等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1858-1865.

[31]李 倩,王 玉,侯君合,等. 崂山绿茶品质及其与土壤肥力关系的研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5):1101-1104.

[32]刘 扬,孙丽莉,廖 红. 养分管理对安溪茶园土壤肥力及茶叶品质的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4):917-927.

效方法之一<sup>[7-8]</sup>。腐殖酸是一种结构复杂的天然高分子有机聚合物, 含有大量的羧基、酚羟基和羰基等活性基团<sup>[9]</sup>。腐殖酸具有促进作物生长、调控肥料养分转化以及提高肥料利用率等优点, 在我国农业生产中起到了重要作用<sup>[10]</sup>。目前, 腐殖酸已被广泛用于制备新型氮肥, 大量研究也表明腐殖酸氮肥可起到减少氨挥发<sup>[11-14]</sup>、提高氮肥利用率和促进作物增产<sup>[12,15-21]</sup>等作用。当前腐殖酸氮肥主要通过腐殖酸与尿素的络合反应制备, 而腐殖酸-尿素-甲醛共聚物由于速效和缓效相结合, 也被认为是很有开发前景的缓释氮肥<sup>[22]</sup>, 但是关于腐殖酸-尿素-甲醛共聚物施用效果的研究少有报道。本研究将缓释与增效结合, 以腐殖酸、尿素、甲醛为原料, 利用腐殖酸类物质中存在的大量羧基和酚羟基等活性基团, 与尿素、甲醛在一定工艺条件下反应制备腐殖酸-尿素-甲醛共聚物(腐殖酸缓释氮肥), 通过田间微小区试验, 研究腐殖酸缓释氮肥对糯玉米产量、氮肥利用率以及土壤细菌多样性的影响, 以期为新型腐殖酸氮肥的研制提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试糯玉米品种为海玉糯 2000, 来源于海南海亚南繁种业有限公司。

供试肥料: 腐殖酸缓释氮肥, 自制, 含氮量 31.16%, 冷水不溶氮含量为 17.80%, 热水不溶氮含量为 7.87%, 活性系数为 55.79% (参照中国化工行业标准 HG/T 4137—2010《脲醛缓释肥料》的方法测定); 腐殖酸脲, 自制, 含氮量 41.22%; 普通尿素(U), 含氮量 46.4%; 过磷酸钙, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%; 氯化钾, K<sub>2</sub>O 60%。其中, 腐殖酸缓释氮肥是将风化煤、尿素和甲醛在一定 pH 值溶液中分阶段反应、干燥制备而成, 腐殖酸脲工艺参数与腐殖酸缓释氮肥一致, 但不添加 37% 甲醛溶液。

供试土壤: 中国热带农业科学院橡胶研究所土壤肥料试验基地砖红壤, 土壤具体理化性质见表 1。

表 1 试验点土壤理化性质

土层深度 (cm)	全氮含量 (g/kg)	速效磷 含量 (mg/kg)	速效钾 含量 (mg/kg)	有机质 含量 (g/kg)	pH 值
0~20	0.69	31.04	124.68	12.28	5.58
20~40	0.41	12.02	60.01	7.22	5.21
40~60	0.27	1.92	32.71	6.66	5.14

1.2 试验设计

试验布置于中国热带农业科学院橡胶研究所土壤肥料试验基地, 试验时间为 2017 年 11 月至 2018 年 3 月。试验设 4 个处理, 分别为不施氮肥处理(CK)、普通尿素处理(U)、腐殖酸脲处理(UHA)、腐殖酸缓释氮肥处理(NF), 施肥量为 N 210 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 210 kg/hm<sup>2</sup>, 采用田间微小区试验, 每个处理重复 3 次, 共 12 个微小区(1 m×1 m), 每个小区种植 9 株糯玉米, 各小区周围均种植糯玉米作为保护行。试验中氮肥为尿素、腐殖酸脲、腐殖酸缓释氮肥, 各处理磷肥和钾肥均为过磷酸钙和氯化钾, 普通尿素、腐殖酸脲、过磷酸钙和氯化钾均分为 2 次施用(基肥和追肥), 第 1 次作为基肥施肥, 第 2 次施肥为在糯玉米大喇叭口期作为追肥施用, 而腐殖酸缓释氮肥则作为基肥一次性施用。糯玉米种植其余管理措施与日常管理保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 糯玉米产量和生物量测定 糯玉米成熟期采集各微小区收获的玉米穗, 计算各小区糯玉米鲜穗产量。然后将玉米根系、茎、叶分开, 和玉米穗一起洗净, 在 105 ℃ 下杀青, 然后烘干至恒质量, 称量。

1.3.2 植株氮含量和土壤氮含量测定 将烘干的玉米根系、茎、叶和玉米穗样品粉碎, 用于测定植株氮含量。采集各微小区 0~20、20~40、40~60 cm 土壤, 每个小区采集 5 个点, 混合作为一个土样, 风干, 用于测定土壤全氮含量, 土壤和植株样品均采用常规方法分析测定。

1.3.3 糯玉米氮肥利用率 氮素利用效率相关参数<sup>[23]</sup>计算方法:

氮收获指数 = 鲜穗氮吸收量/地上部氮吸收量×100%;

氮肥偏生产力(kg/kg) = 施肥区玉米鲜穗产量/施氮量;

氮肥利用率 = (施肥区氮吸收量 - 对照区氮吸收量)/施氮量×100%。

1.3.4 土壤细菌群落结构 在糯玉米植株根系区域(距玉米茎 5~10 cm 处)用土钻取 0~20 cm 土层的土壤样品用于测定土壤细菌多样性, 土壤总 DNA 采用 DNA 提取试剂盒进行提取, PCR 扩增采用细菌 16S rRNA 区域引物(5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3', 5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3')进行目的基因扩增。PCR 扩增后产物进行纯化, 将纯化后的

样品送至上海凌恩生物科技有限公司利用 Illumina PE250 高通量测序技术进行测序。Illumina PE250 测序得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接,同时对序列质量进行质控和过滤,区分样本后进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析,基于 OTU 聚类分析结果对 OTU 进行多种多样性指数分析以及对测序深度的检测;基于分类学信息在门水平上进行细菌群落结构的统计分析。

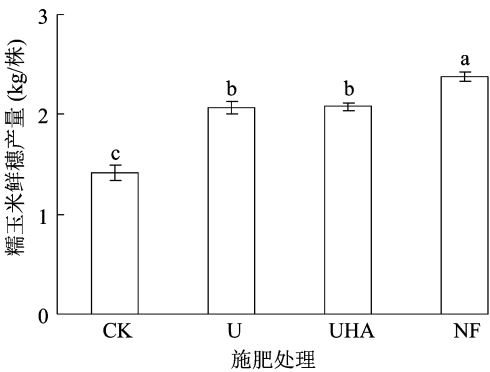
1.4 数据分析处理

采用 Excel 2007 对原始数据进行整理计算、绘制图表,采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 腐殖酸缓释氮肥对糯玉米鲜穗产量的影响

由图 1 可知,施肥可以显著增加糯玉米鲜穗产量,U、UHA、NF 处理的糯玉米鲜穗产量分别较 CK 增加了 46.81%、47.52% 和 68.79%。UHA 处理的糯玉米鲜穗产量较 U 处理仅增加了 0.48%,这 2 个处理间差异不显著。NF 处理的糯玉米鲜穗产量显著大于 U、UHA 处理,较 U 处理增加了 14.98%,而且腐殖酸缓释氮肥处理是一次性施用,可节省劳动成本投入。



柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同  
图1 不同施肥处理对微小区糯玉米鲜穗产量的影响

2.2 腐殖酸缓释氮肥对糯玉米氮素吸收量的影响

从图 2 可见,UHA、NF 处理的根系氮素吸收量

显著小于 U 处理,UHA 处理与 NF 处理差异不显著。3 个施肥处理糯玉米茎的氮素吸收量均显著大于 CK,但是 3 个施肥处理间差异不显著。3 个施肥处理糯玉米叶氮素吸收量均大于 CK,但是仅 UHA 处理显著大于 CK。NF 处理玉米穗的氮素吸收量显著大于其他处理,CK 和 U 处理分别增加了 0.79、0.32 g/株。

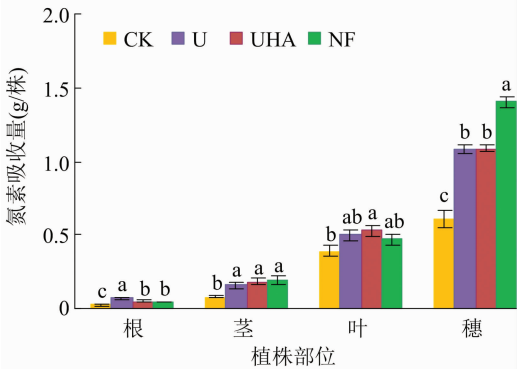


图2 不同施肥处理对糯玉米氮素吸收量的影响

2.3 腐殖酸缓释氮肥对氮肥利用率的影响

由表 2 可知,NF 处理糯玉米干物质累积量和氮素吸收量均显著大于 U、UHA 处理,糯玉米干物质累积量较 U 处理增加了 27.91 g/株,氮素吸收量增加了 0.31 g/株,而 U 处理与 UHA 处理的干物质累积量和氮素吸收量均差异不显著。UHA、NF 处理的氮收获指数、氮肥偏生产力、氮肥利用率均高于 UHA 和 U 处理,但 UHA 处理与 U 处理之间差异不显著。NF 处理的氮收获指数、氮肥偏生产力分别达到 67.89%、113.39 kg/kg,氮肥利用率为 44.81%,较 U 处理提升了 41.49%。

2.4 腐殖酸缓释氮肥对土壤全氮含量的影响

从图 3 可见,3 个施肥处理糯玉米收获后的 0 ~ 20 cm 土壤全氮含量均大于 CK,各处理 0 ~ 20 cm 土壤全氮含量大小顺序为 NF > UHA > U > CK,其中 UHA、NF 处理 0 ~ 20 cm 土壤全氮含量显著高于 CK,但与 U 处理差异不显著。各处理 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土壤全氮含量均无显著差异。

表 2 不同施肥处理糯玉米氮肥吸收利用效率

处理	干物质累积量 (g/株)	氮素吸收量 (g/株)	氮收获指数 (%)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥利用率 (%)
CK	110.15 ± 6.18c	1.10 ± 0.08c	54.68 ± 1.56c	—	—
U	142.77 ± 9.26b	1.80 ± 0.08b	62.40 ± 1.33b	98.46 ± 2.83b	31.67 ± 3.45b
UHA	144.97 ± 1.77b	1.85 ± 0.04b	60.43 ± 2.03b	99.09 ± 1.80b	33.74 ± 1.92b
NF	170.68 ± 8.65a	2.11 ± 0.05a	67.89 ± 1.63a	113.39 ± 2.61a	44.81 ± 1.85a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 5% 水平差异显著。表 3 同。

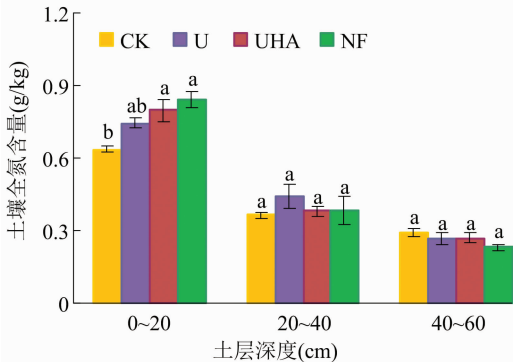


图3 不同施肥处理对土壤全氮含量的影响

2.5 腐殖酸缓释氮肥对土壤细菌群落结构的影响

从表 3 可知,4 个处理的糯玉米根系区域土壤细菌的测序深度指数均在 0.986 2 以上,且处理间差异不显著。Chao1 指数代表细菌群落丰富度,数值越大表明物种丰度越高;Shannon 指数表示细菌群落多样性,数值越大表明细菌群落多样性越高。由表 3 可见,各处理的 Chao1 和 Shannon 指数在统计上均无显著差异,说明腐殖酸缓释氮肥对糯玉米根系区域土壤细菌多样性无显著性影响。由图 4 可知,在基于门分类水平上,4 个处理的优势细菌门类类似。主要包括酸杆菌门、变形菌门、绿弯菌门、放线菌门、浮霉菌门、芽单胞菌门、GAL15 门、拟杆菌门、己科河菌门、硝化螺旋菌门,其中 4 个处理土壤中的酸杆菌门、变形菌门、绿弯菌门的总占比均在 60% 以上。

表 3 不同施肥处理对土壤细菌多样性指数的影响

处理	测序深度指数	Chao1 指数	Shannon 指数
CK	0.990 8a	1 720.65a	6.07a
U	0.989 4a	1 693.87a	6.17a
UHA	0.988 6a	1 734.58a	6.05a
NF	0.986 2a	1 681.53a	6.02a

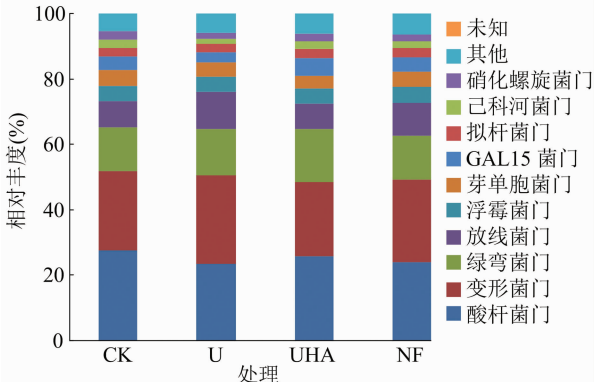


图4 不同施肥处理对土壤细菌群落结构的影响

3 讨论与结论

尿素是我国应用最广泛、用量最大的氮肥,以尿素与腐殖酸制备腐殖酸尿素可以减缓尿素在土壤中的分解速率,提高氮肥利用率<sup>[24-26]</sup>。在本研究中,通过将尿素与腐殖酸,尿素、腐殖酸与甲醛在一定工艺条件下反应制备腐殖酸氮肥,在糯玉米上施用后可提高糯玉米鲜穗产量,增加糯玉米氮素吸收量,提高氮肥利用率。腐殖酸脲和腐殖酸缓释氮肥处理糯玉米鲜穗产量分别较普通尿素处理增加了 0.48% 和 14.98%,而氮素吸收量分别为 1.85、2.11 g/株,氮肥利用率分别达到了 33.74% 和 44.81%,均高于普通尿素处理。其中,腐殖酸脲具有一定增效作用的原因可能在于腐殖酸的各种活性基团与尿素之间发生反应,形成了大量氢键和络合配位键,而这些化学键具有较高的化学稳定性<sup>[27]</sup>。但是,从本研究结果发现,腐殖酸脲处理虽能够提高糯玉米氮素吸收量和氮肥利用率,却与普通尿素处理差异不显著,而腐殖酸缓释氮肥处理糯玉米鲜穗产量、氮素吸收量和氮肥利用率均显著大于普通尿素处理。其原因可能是腐殖酸缓释氮肥是由尿素、腐殖酸与甲醛制备而成,除含有腐殖酸和腐殖酸尿素外,还含有腐殖酸-尿素-甲醛共聚物(本研究中自制的腐殖酸缓释氮肥含有 17.80% 冷水不溶氮和 7.87% 热水不溶氮)。腐殖酸-尿素-甲醛共聚物为微溶性或缓溶性有机氮肥,从而使得腐殖酸缓释氮肥性质类似于最早实现商业化的缓释氮肥-脲甲醛,是由速效氮和缓释氮 2 个部分组成,施入土壤后,缓释氮需要通过微生物的分解,转化成被作物吸收利用的氮素形态<sup>[28]</sup>,且主要受土壤性质、温度和微生物活性等因素影响<sup>[29-30]</sup>。由于腐殖酸缓释氮肥不仅含有腐殖酸,同时氮素能够速效和缓效相结合,腐殖酸-尿素-甲醛共聚物在微生物作用下缓慢供氮,能够使肥料氮素更好地供给糯玉米生长发育,从促进糯玉米对氮素的吸收,提高氮肥利用率。

本研究中,虽然腐殖酸脲和腐殖酸缓释氮肥处理糯玉米吸收氮量高于普通尿素处理,但在糯玉米收获后,0~20 cm 土壤全氮含量仍高于普通尿素处理,各处理 0~20 cm 土壤全氮含量大小顺序为 NF>UHA>U>CK,而腐殖酸脲和腐殖酸缓释氮肥处理 20~40、40~60 cm 土壤全氮含量低于普通尿素处理。说明腐殖酸氮肥可以在一定程度上减少

氮损失,提高表层土壤肥料氮残留量,这也与张水勤等的研究结果<sup>[17-18]</sup>相似,而且本研究的腐殖酸缓释氮肥为一次性施用,腐殖酸脲和普通尿素均分2次施用,更体现了腐殖酸缓释氮肥的优势。另外,本研究还发现腐殖酸缓释氮肥对糯玉米根系区域土壤细菌多样性无明显影响,各处理土壤细菌群落结构组成类似,均是酸杆菌门、变形菌门、绿弯菌门的总占比在60%以上。

#### 参考文献:

- [1] 白由路. 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.
- [2] 林葆,李家康. 我国化肥的肥效及其提高的途径:全国化肥试验网的主要结果[J]. 土壤学报,1989,26(3):273-279.
- [3] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [4] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.
- [5] Zhang W F, Cao G X, Li X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. Nature, 2016, 537(7622):671-674.
- [6] Hendricks G S, Shukla S, Roka F M, et al. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 74(2):160-171.
- [7] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.
- [8] 樊小林,刘芳,廖照源,等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [9] 成绍鑫,武丽萍,柳玉琴,等. 腐殖酸:脲络合物的工艺开发[J]. 腐植酸,1994(4):29-32.
- [10] 张水勤,袁亮,林治安,等. 腐殖酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):1065-1076.
- [11] 刘增兵,赵秉强,林治安. 腐殖酸尿素氨挥发特性及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):208-213.
- [12] 许俊香,邹国元,孙钦平,等. 腐殖酸尿素对土壤氨挥发和玉米生长的影响[J]. 土壤通报,2013,44(4):934-939.
- [13] 李伟,袁亮,赵秉强,等. 增值尿素的氨挥发特征及其对土壤微生物量碳和脲酶活性的影响[J]. 腐植酸,2013(6):15-20.
- [14] Shen Y W, Lin H T, Gao W S, et al. The effects of humic acid urea and polyaspartic acid urea on reducing nitrogen loss compared with urea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12):4425-4432.
- [15] 庄振东,李絮花. 腐殖酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1232-1239.
- [16] 刘艳丽,丁方军,张娟,等. 活化腐殖酸-尿素施用对小麦-玉米轮作土壤氮肥利用率及其控制因素的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(10):1310-1319.
- [17] 张水勤,袁亮,李伟,等. 腐殖酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(5):1207-1214.
- [18] 李军,袁亮,赵秉强,等. 腐殖酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):524-530.
- [19] 袁天佑,冀建华,王俊忠,等. 腐殖酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(3):365-372.
- [20] Zhang S Q, Yuan L, Li W, et al. Effects of urea enhanced with different weathered coal-derived humic acid components on maize yield and fate of fertilizer nitrogen[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(3):656-666.
- [21] Liu M L, Wang C, Wang F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 142:147-154.
- [22] 成绍鑫. 腐殖酸类物质的活化与钝化及其在绿色肥料中的应用[J]. 腐植酸,2003(5):1-14.
- [23] 黄巧义,唐拴虎,张发宝,等. 控释尿素与常规尿素配比比例对甜玉米产量和氮肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(3):622-631.
- [24] 梁宗存,成绍鑫. 腐殖酸与尿素作用机理研究进展[J]. 腐植酸,1997(2):1-4,7.
- [25] 李兆君,马国瑞. 腐殖酸尿素的制造及其增产作用机理的研究近况[J]. 土壤通报,2004,35(6):799-801.
- [26] 薄录吉,李冰,李彦,等. 腐殖酸尿素在农业生产和面源污染防治控制中的研究与应用[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):240-251.
- [27] 梁宗存,成绍鑫,武丽萍. 煤中腐殖酸与尿素相互作用机理的研究[J]. 燃料化学学报,1999,27(2):176-181.
- [28] Christianson C B, Carter M F, Holt L S. Mineralization and nitrification of ureaform fertilizers[J]. Fertilizer Research, 1988, 17(1):85-95.
- [29] Sasson P. Evaluation of ureaform activity in soil[J]. Soil Science, 1979, 128(5):285-290.
- [30] Jahns T, Kaltwasser H. Mechanism of microbial degradation of slow-release fertilizers[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2000, 8(1):11-16.