

添加腐植酸与生化抑制剂的稳定性增效尿素在黑土中的施用效果

肖富容^{1, 2}, 李东坡^{1, 5*}, 薛妍¹, 宋玉超¹, 张可^{1, 2}, 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, 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. 锦西天然气化工有限责任公司,
辽宁 葫芦岛 125001; 5. 中国科学院沈阳生态实验站, 辽宁 沈阳 110107)

摘要: 研究同时添加生化抑制剂与生物刺激素腐植酸的稳定性增效尿素在黑土中的施用效果, 明确在黑土中生物刺激素腐植酸与生化抑制剂结合对尿素态氮转化的调控作用, 为研究适宜黑土的生物刺激素腐植酸与生化抑制剂结合的稳定性增效尿素专用配方提供理论依据。试验以不施氮肥(CK)及施用普通尿素(N)为对照, 在尿素中分别添加腐植酸(H)、脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、硝化抑制剂3, 4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、2-氯-6(三氯甲基)-吡啶(CP)以及各生化抑制剂与腐植酸组合, 共9个处理。通过盆栽试验, 监测不同处理的土壤铵态氮、硝态氮、玉米生物学指标、产量, 计算土壤硝化抑制率、玉米籽粒吸氮量、玉米植株总吸氮量及尿素肥料氮利用率等指标。结果表明, 相比单独施用尿素肥料, 腐植酸及生化抑制剂NBPT、DMPP、CP的添加均能显著提高玉米产量、吸氮量、氮肥利用效率等, 同时对土壤铵态氮及硝态氮含量有显著影响($P<0.05$)。施用添加腐植酸与NBPT尿素处理相比单独添加NBPT尿素处理显著提高了玉米苗期黑土硝化抑制率、玉米株高及叶片叶绿素含量, 分别提高14.03%、6.31%、3.22%, 但玉米产量、植株吸氮量、氮肥利用效率、玉米茎粗及叶面积均有所下降。施用添加腐植酸与DMPP的尿素处理相比单独添加DMPP尿素处理的玉米株高、叶绿素含量分别提高7.97%、20.17%, 显著降低玉米苗期黑土硝化抑制率、玉米产量、经济系数、籽粒吸氮量、叶面积, 同时植株总吸氮量、氮肥利用率及茎粗有所降低($P<0.05$)。施用添加腐植酸与CP的尿素处理相比单独添加CP尿素处理显著提高玉米产量、叶绿素含量、总吸氮量、氮肥利用效率($P<0.05$), 玉米株高、玉米籽粒吸氮量也均有提高, 但玉米茎粗及叶面积有所下降($P<0.05$)。在黑土中, 施用添加腐植酸与CP的尿素处理可以提高玉米产量、植株吸氮量、玉米株高、叶片叶绿素含量和肥料利用率。施用添加NBPT、DMPP与腐植酸配合的尿素处理降低玉米产量、植株吸氮量、氮肥利用效率, 不利于玉米产量的增加及肥料利用率的提高。在黑土玉米种植区, 氮肥管理建议将腐植酸与CP结合制成新型高效稳定性增效尿素肥料施用, 有利于玉米的增产及尿素肥料利用率的提高, 避免将腐植酸与NBPT、DMPP配合使用。

关键词: 生物刺激素; 腐植酸; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 氮肥利用率

随着世界人口的快速增加, 在农业生产中需要投入大量氮肥才能保障农产品产量的增长与人口的快速增长保持同步^[1-2], 然而随着氮肥施入量不断加大, 导致氮肥利用率降低^[3]。通常施入到土壤中的氮肥仅有不到50%被作物吸收利用, 其余氮

素通过氨挥发、表观硝化-反硝化、淋洗等途径损失^[4], 导致水体富营养化、温室效应等许多环境问题出现。因此, 减少肥料氮的损失, 提高肥料利用率, 进而减少氮肥的投入量是解决施氮肥所带来环境问题的关键所在。

稳定性氮素肥料作为一种新型肥料, 由于其良好的农学效益与环境效益而备受关注^[5], 已经在我国多地推广使用并已取得良好效果^[6]。相比传统肥料, 生化抑制剂的添加已经被证实具有抑制土壤硝化作用、减少土壤氧化亚氮排放^[7]、提高作物产量及氮肥利用率^[8-11]等效果。然而当前单一生

收稿日期: 2021-05-19; 录用日期: 2021-07-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200707)。

作者简介: 肖富容(1997-), 硕士研究生, 研究方向为植物营养与新型肥料。E-mail: xiaofurong0911@163.com。

通讯作者: 李东坡, E-mail: lidp@iae.ac.cn。

化抑制剂的施用仍然存在许多问题,其施用效果会受到多种土壤因素的影响^[12-13],不同抑制剂或配方在不同土壤中的作用效果差异很大。为进一步提高肥料利用率,减少化学肥料的施用量,需要不断提高稳定性氮肥的性能,研制专用而更为高效稳定的新型稳定性氮素肥料。

近年来,生物刺激素行业在国际上快速发展壮大,2010年以来受到国内肥料研究领域广泛关注。2016年中国生物刺激素发展联盟成立,获得了国内优秀生物刺激剂企业的大力支持,极大地推动了生物刺激素生产、研发的发展。与此同时,多种类型生物刺激素被应用于农业领域中。行业中大多将生物刺激素分为8种,分别是腐植酸、游离氨基酸、抗蒸腾剂、甲壳素、海藻提取物、无机盐、有益化学元素及复杂有机材料,其中应用较为广泛的当属腐植酸,已经被证实具有促进作物生长发育^[14-15]、根系伸长及增加侧根生长点数量^[16]、增强植物抗逆性^[17]等功能,通常以与肥料相结合的方式在农业生产中应用。相比传统肥料,腐植酸肥料可以起到提高作物地上部干物质重、增加作物产量、提高果实品质、促进作物对氮素的吸收、提高氮素利用率等作用^[18-21]。当前在农用领域,关于叶面肥、水溶肥中添加腐植酸的研究报道较多,对于二者结合效果有较为明确的结论。然而腐植酸与稳定性氮素肥料的结合效果研究却鲜有报道。对于腐植酸与哪些生化抑制剂配合施用能够起正效应,与哪些生化抑制剂配合施用起负效应,腐植酸与生化抑制剂结合对尿素氮素转化的调控作用影响如何,还没有明确的结论。因此,针对腐植酸与生化抑制剂结合制成的高效稳定性增效尿素,在农业生产中的有效性研究十分必要,随着生物刺激素产品的广泛应用,这一工作迫在眉睫。本试验以尿素为研究对象,通过研究腐植酸与不同种生化抑制剂配合添加到尿素中制成稳定性尿素肥料在黑土中的施用效果,为新一代黑土专用高效稳定性增效尿素肥料的研制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为黑土,采自吉林省农安县永安乡玉米茬0~20 cm耕层。土壤有机质为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,有效磷78.88 mg/kg,全钾50.50 g/kg,速效钾322.15 mg/kg,pH值6.23。供试尿素为国药集团生产,含氮量46%;重过磷酸钙由云天化集团有限责任公司生产,含P₂O₅43%;氯化钾由俄罗斯生产,含K₂O60%;本试验所用脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)由Macklin生物科技有限公司生产,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)均由Maya Reagent生物科技有限公司生产,以上生化抑制剂均为分析纯。所用生物刺激素腐植酸(H)由国内某公司提供,含腐植酸70%。供试作物为春玉米,品种为“东单6531”。

1.2 试验设计

试验共设9个处理,分别为:(1)不施用氮肥、只施磷钾肥料(CK);(2)单施尿素(N);(3)添加腐植酸尿素(H);(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和腐植酸尿素(NBPT+H);(8)添加DMPP和腐植酸尿素(DMPP+H);(9)添加CP和腐植酸尿素(CP+H)。每个处理3次重复,其中腐植酸的添加量为尿素量的6‰,NBPT、DMPP、CP添加量分别为尿素量的0.25%、0.5%、0.25%。上述各处理施氮量均为0.7 g/kg,施磷量P₂O₅为0.12 g/kg,施钾量K₂O为0.15 g/kg。采用玉米盆栽试验,每盆装土量折合干土6 kg,每盆定植1株玉米。

具体盆栽方法:将经过预处理过2 mm筛的土壤平铺在塑料布上,将提前称好的生化抑制剂与生物刺激素充分混合均匀,再与尿素肥料混合均匀,制成高效稳定性增效尿素肥料,再与土壤混合,经过充分混合后,将土壤转移至高28 cm、直径26 cm的塑料盆中,浇水至土壤含水量为田间持水量的60%。将盆埋于玉米田间,盆上沿高出地面5 cm,每盆播入5粒玉米种子,出苗后在玉米三叶期每盆定植为1株。在玉米的生育过程中人工浇水,浇水量为保证玉米正常生长但水分不流失为宜,在玉米生育期内不再追肥。

1.3 样品采集

试验于2020年5月12日装盆播种,10月6日收获。分别在玉米4个生育时期(苗期、大喇叭口期、灌浆期、成熟期)采集土壤样品,采用5点取样法,将采集到的土壤样品混合均匀,去除细根、杂物等,过2 mm筛备用。于玉米成熟期测量玉米

株高、茎粗,收获整盆植株样品,收集玉米籽粒、茎叶、秸秆及根系,风干后测定玉米的籽粒产量、生物产量。同时采集玉米籽粒、秸秆及根系样品进行全氮含量分析。

1.4 测定指标与方法

土壤尿素态氮测定,混匀土壤样品用 2 mol/L 氯化钾-乙酸汞溶液浸提(土:水=1:10),在 160 r/min 条件下振荡 1 h,过滤土壤得到浸提液,滤液用 AA3 型流动分析仪测定;土壤铵态氮和硝态氮含量测定,混匀土壤样品用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提(土:水=1:10),在 160 r/min 条件下振荡 1 h,过滤土壤得到浸提液,用 AA3 型流动分析仪测定,两者之和称为土壤速效氮含量。

在玉米抽雄吐丝期选取玉米棒三叶(棒上叶、棒叶、棒下叶),使用叶绿素仪及叶面积仪测定叶片叶绿素含量、叶面积,计算平均值。成熟期对玉米进行考种,将玉米籽粒、茎叶、秸秆、根系置于烘箱之中,70℃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土壤硝态氮含量(mg/kg), b 为添加硝化抑制剂或与腐植酸尿素处理的土壤硝态氮含量(mg/kg)^[22]。

玉米经济系数 = 玉米籽粒产量 / 玉米生物产量;

玉米植株氮积累量(g/株) = 玉米植株含氮量 × 玉米植株干物质重。

根据葛均筑等^[23]的方法进行以下指标的计算:

玉米氮收获指数 = 玉米籽粒氮积累量 / 玉米植株氮积累量;

玉米氮肥吸收利用率(%) = (施氮处理玉米植株氮积累量 - 不施氮肥处理玉米植株氮积累量) / 施氮量 × 100;

玉米氮肥农学效率(g/g) = (施氮处理玉米籽粒产量 - 不施氮处理玉米籽粒产量) / 施氮量;

玉米氮肥偏生产力(g/g) = 施氮处理玉米籽粒产量 / 施氮量;

肥料氮贡献率(%) = (施氮处理玉米籽粒产量 - 不施氮处理玉米籽粒产量) / 施氮玉米籽粒产量 × 100。

1.6 数据处理

数据使用 Excel 2010、SPSS 21.0 进行统计分

析, Origin 9.0 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 不同处理黑土尿素态氮、铵态氮与硝态氮变化特征

2.1.1 不同处理黑土尿素态氮变化特征

玉米苗期土壤尿素态氮的测定结果表明,玉米苗期黑土中的尿素态氮为零,说明在玉米苗期黑土中的尿素态氮已经不存在,苗期以后黑土更没有尿素态氮存在。

2.1.2 不同处理黑土铵态氮变化特征

黑土土壤铵态氮含量随玉米生育时期的进行呈现下降趋势(图 1),苗期土壤铵态氮含量最高。苗期 CP+H 处理铵态氮含量为 336.47 mg/kg,显著高于其他各处理(图 1)($P < 0.05$)。其次是 CP 处理较高,说明 CP 在玉米苗期具有较好的硝化抑制效果,同时腐植酸与 CP 结合可以更好地抑制黑土硝化作用的进行。再次是添加 DMPP 处理的铵态氮含量较高($P < 0.05$);除 2 个对照处理外, H 处理铵态氮最低,表明腐植酸的单独添加不能起到抑制黑土硝化作用的效果。大喇叭口期添加 CP 处理铵态氮含量较高,在 54.61 mg/kg 以上。灌浆期添加腐植酸及生化抑制剂处理中, CP 处理铵态氮含量最高,显著高于其他处理。成熟期多数处理的铵态氮含量趋于一致(图 1)。

上述分析表明, CP 硝化抑制效果好于 DMPP,能使玉米前期黑土中铵态氮含量保持较高水平。生育前期 CP+H 处理比单独添加 CP 处理显著提高黑土铵态氮含量。

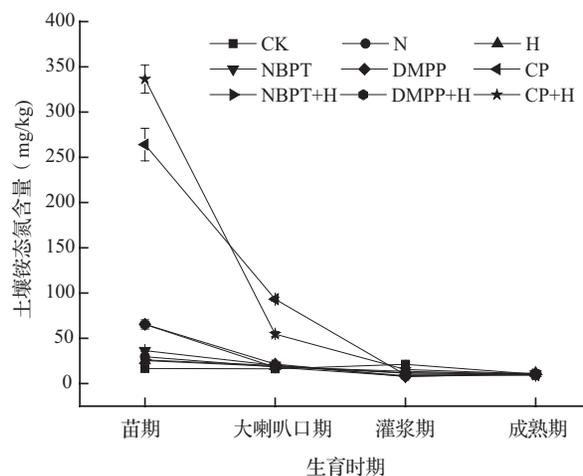


图 1 不同处理玉米不同生育时期黑土铵态氮含量

2.1.3 不同处理黑土硝态氮变化特征

黑土硝态氮含量随玉米生育时期呈现先降低后升高再降低的趋势，主要是由于大喇叭口期植株大量吸收氮素导致土壤硝态氮含量降低，生育后期玉米对氮素吸收速度降低又导致土壤氮素积累所致，苗期土壤硝态氮含量最高（图2）。

前3个生育时期，CK处理硝态氮含量均低于施氮处理，至成熟期由于腐植酸及生化抑制剂作用效果的减弱而与H、NBPT、NBPT+H处理之间无显著差异，显著高于N处理（图2）。

苗期，NBPT处理土壤硝态氮含量最高，显著高于其他处理；H处理硝态氮含量显著高于N处理，说明腐植酸的单独添加能够促进土壤硝态氮的累积；DMPP+H处理显著高于DMPP处理，表明腐植酸的添加降低玉米苗期DMPP的硝化抑制效果（ $P<0.05$ ）。大喇叭口期添加NBPT的处理硝态氮含量较高，在9.83 mg/kg以上，说明NBPT的添加能使生育前期玉米土壤硝态氮含量保持较高水平；其次是DMPP+H处理，显著高于DMPP处理（ $P<0.05$ ）；添加CP处理硝态氮含量较低，其中CP与CP+H处理之间无显著差异。灌浆期起由于玉米植株对土壤氮素的吸收导致多数处理土壤硝态氮趋于一致。（图2）。

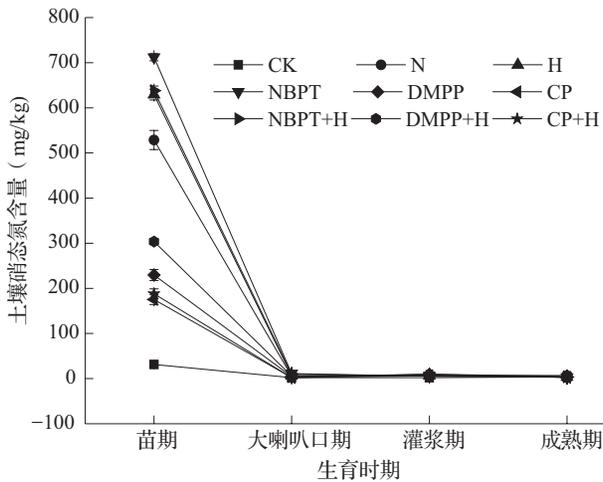


图2 不同处理玉米不同生育时期黑土硝态氮含量

上述分析表明CP具有较强的硝化抑制作用，使黑土硝态氮保持较低水平时间较长。施用添加生物刺激素腐植酸的尿素比单独施用尿素显著提高黑土硝态氮含量，可能是腐植酸能够促进黑土土壤硝化作用所致。NBPT+H处理比NBPT处理显著降低黑土硝态氮含量。DMPP+H、CP+H处理分别比

DMPP、CP处理的黑土硝态氮含量均有提高。

2.2 不同处理对玉米苗期黑土硝化抑制率的影响

添加DMPP、CP尿素玉米苗期均具有硝化抑制效果，硝化抑制率分别为56.58%、66.85%（图3）。CP处理硝化抑制率最高，为66.85%，与CP+H处理无显著差异，显著高于其他处理（ $P<0.05$ ）；NBPT处理硝化抑制率最低，为-34.69%（图3）。相比普通尿素，添加生物刺激素腐植酸没有硝化抑制效果，反而促进黑土的硝化作用。单独添加NBPT不具有硝化抑制效果，然而NBPT+H处理比NBPT处理显著提高了硝化抑制率，说明两者结合能够起到抑制黑土土壤硝化作用的效果。DMPP+H处理比DMPP处理显著降低了硝化抑制率，黑土中腐植酸与DMPP结合会降低DMPP的硝化抑制效果。CP+H处理与CP处理硝化抑制率无显著差异（ $P<0.05$ ）。

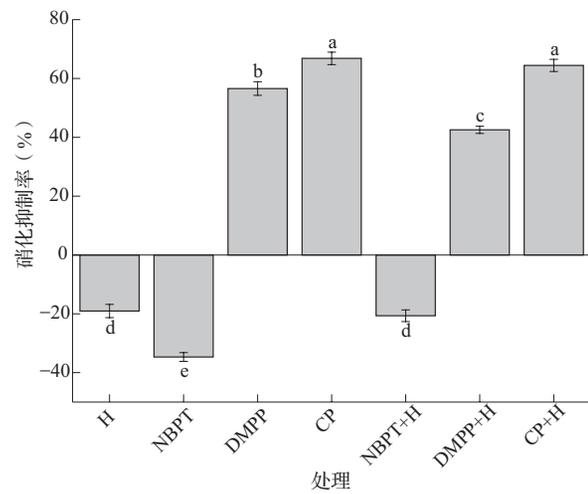


图3 不同处理玉米苗期黑土硝化抑制率

注：柱上字母不同表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

2.3 不同处理对玉米株高、茎粗、叶片叶绿素含量及叶面积的影响

CK玉米株高、茎粗、叶片叶绿素含量、叶面积均显著低于施氮处理，说明施氮处理可以显著增加玉米株高、茎粗、叶片叶绿素含量、叶面积（表1）（ $P<0.05$ ）。

添加腐植酸与NBPT、DMPP、CP比单独添加NBPT、DMPP、CP处理玉米株高分别提高6.30%、7.97%、0.25%（表1）（ $P<0.05$ ），同时添加腐植酸与NBPT、DMPP、CP处理比单独添加NBPT、DMPP、CP处理玉米茎粗分别降低4.28%、3.00%、8.50%，且各处理间均无显著差异（ $P<0.05$ ）。

研究发现, 添加腐植酸及生化抑制剂尿素处理玉米叶片叶绿素含量均显著高于单独施氮处理, 说明腐植酸及生化抑制剂的添加可以显著提高玉米叶片叶绿素含量 ($P<0.05$) (表 1)。添加腐植酸与 NBPT、DMPP、CP 尿素比单独添加 NBPT、DMPP、CP 尿素玉米叶绿素含量分别提高 3.22%、20.17%、35.59% ($P<0.05$)。NBPT+H、DMPP+H、CP+H 处理比 NBPT、DMPP、CP 处理玉米叶片叶面积分别

降低 12.30%、18.34%、5.46% ($P<0.05$)。

添加腐植酸与 NBPT、DMPP、CP 尿素比单独添加 NBPT、DMPP、CP 尿素玉米株高及叶绿素含量均有所增高, 玉米茎粗及叶面积均呈现降低趋势, 可能是腐植酸具有促进作物生长、叶绿素合成等功能, 同时相比单独添加腐植酸或生化抑制剂, 二者配合使用会导致玉米植株茎粗及叶面积的降低。

表 1 不同处理玉米株高、茎粗、叶绿素含量、叶面积

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶绿素含量	叶面积 (cm ²)
CK	243.33 ± 13.50d	17.28 ± 1.57c	25.88 ± 2.88e	352.49 ± 9.12d
N	260.33 ± 3.79c	22.03 ± 0.35b	35.81 ± 2.53d	518.95 ± 31.34c
H	266.33 ± 4.04bc	24.04 ± 1.57ab	62.36 ± 2.36a	638.65 ± 26.39a
NBPT	259.00 ± 6.08c	23.35 ± 2.02ab	58.94 ± 3.69ab	588.53 ± 14.17b
DMPP	263.33 ± 8.50bc	23.65 ± 2.94ab	46.37 ± 2.36c	661.64 ± 22.50a
CP	270.00 ± 7.00c	25.39 ± 1.42a	45.82 ± 4.45c	581.12 ± 12.83b
NBPT+H	275.33 ± 5.03ab	22.35 ± 0.34ab	60.84 ± 1.32ab	516.14 ± 18.47c
DMPP+H	284.33 ± 2.89a	22.94 ± 2.09ab	55.72 ± 5.75b	540.29 ± 17.95c
CP+H	270.67 ± 5.03bc	23.23 ± 1.19ab	62.13 ± 3.82ab	549.41 ± 31.31bc

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.4 不同处理对玉米生物产量、籽粒产量及经济系数的影响

由表 2 可知, 施氮处理玉米生物产量、籽粒产量均显著高于 CK 处理, 说明氮肥的施用能够起到显著增产的效果, 然而 CK 玉米经济系数与 N 处理并无显著差异, 说明施氮与否不会对黑土玉米经济

系数造成显著影响 (表 2)。相比普通尿素, 添加腐植酸及生化抑制剂显著提高了玉米生物产量和籽粒产量, 平均提高 0.79 和 0.78 倍。H 处理玉米生物产量及籽粒产量均最高, 表明腐植酸的添加对玉米有明显的增产效果。

添加腐植酸与 NBPT、DMPP 比单独添加

表 2 不同处理玉米植株生物量、籽粒产量、经济系数

处理	生物产量 (g/盆)	籽粒产量 (g/盆)	经济系数
CK	200.38 ± 3.12f	91.76 ± 2.54f	0.46 ± 0.01ab
N	255.53 ± 3.78e	115.30 ± 1.56e	0.45 ± 0.01ab
H	504.15 ± 16.11a	230.58 ± 16.96a	0.46 ± 0.02ab
NBPT	469.18 ± 10.13b	208.91 ± 18.14bc	0.44 ± 0.03b
DMPP	431.18 ± 9.56cd	209.45 ± 14.66bc	0.49 ± 0.02a
CP	444.31 ± 11.42c	191.10 ± 2.22cd	0.43 ± 0.01bc
NBPT+H	433.91 ± 10.07cd	197.54 ± 15.83c	0.45 ± 0.03ab
DMPP+H	419.94 ± 7.16d	173.00 ± 3.76d	0.41 ± 0.01c
CP+H	494.75 ± 7.48a	224.98 ± 8.49ab	0.45 ± 0.01ab

NBPT、DMPP 处理玉米籽粒产量及生物产量均有所降低, 结合先前分析结果表明腐植酸的添加能够促进硝化作用, 造成硝态氮生成速率加快, 而相比铵态氮, 硝态氮不易被土壤吸附, 且易流失, 因此认为腐植酸的添加提高了肥料氮的损失量, 进而导致产量有所降低。CP+H 处理比 CP 处理显著提高了玉米生物产量及籽粒产量, 可能是腐植酸的添加能够提高 CP 作用效果, 提高黑土中速效氮含量, 进而起到增产效果。

2.5 不同处理对玉米植株吸氮量、氮肥利用效率指标的影响

CK 处理玉米籽粒吸氮量、总吸氮量均显著低于施氮处理, 表明氮肥的添加能够显著提高植株体内氮素的积累量。相比普通尿素, 添加腐植酸及生化抑制剂能够显著提高玉米籽粒吸氮量、植株总吸氮量、氮肥利用率、农学效率、偏生产力、肥料氮贡献率, 平均提高 0.69、0.68、2.74、3.81、0.78、1.59 倍, 腐植酸及生化抑制剂均具有提高肥料吸收利用率及植株吸氮量的作用效果 (表 3)。H 处理籽粒吸氮量、总吸氮量、氮肥利用率、农学效率、

偏生产力、氮肥贡献率均最高, 表明腐植酸的添加能够有效促进玉米植株对氮素的吸收, 进而提高氮肥利用效率。同时相比生化抑制剂单独施用, 腐植酸的添加均未对玉米植株吸氮量造成显著影响 (表 3)。

添加腐植酸与 NBPT 比单独 NBPT 尿素玉米籽粒吸氮量、氮收获指数、肥料氮贡献率显著降低, 其他指标无显著差异 ($P < 0.05$)。添加腐植酸与 DMPP 比单独 DMPP 尿素玉米籽粒吸氮量、氮收获指数、氮肥农学效率、氮肥偏生产力显著降低, 其他指标无显著差异, 但均有所下降, 腐植酸与 DMPP 配合添加会降低 DMPP 的硝化抑制效果, 造成植株对肥料氮的吸收减少, 进而降低氮肥利用率。添加腐植酸与 CP 比单独添加 CP 尿素显著提高了玉米植株总吸氮量、氮肥利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、肥料氮贡献率, 但显著降低了氮收获指数, 其余指标无显著差异。腐植酸与 CP 配合添加可以提高尿素肥料性能, 有效促进黑土玉米植株对氮的吸收, 提高肥料利用率。

表 3 不同处理玉米植株氮素累积吸收量及氮肥效率指标

处理	籽粒吸氮量 (g/株)	植株总吸氮量 (g/株)	氮收获指数	氮肥利用率 (%)	氮肥农学效率 (g/g)	氮肥偏生产力 (g/g)	肥料氮贡献率 (%)
CK	1.19 ± 0.05f	2.01 ± 0.05e	0.59 ± 0.01bcd				
N	1.60 ± 0.08e	2.67 ± 0.06d	0.60 ± 0.04bcd	15.65 ± 1.41d	5.61 ± 0.37d	27.45 ± 0.37d	21.57 ± 1.15e
H	3.30 ± 0.29a	5.00 ± 0.29a	0.66 ± 0.02a	71.03 ± 6.96a	33.05 ± 4.04a	54.90 ± 4.04a	60.23 ± 1.26a
NBPT	2.95 ± 0.26b	4.66 ± 0.27b	0.63 ± 0.02ab	63.01 ± 6.44b	27.89 ± 4.32ab	49.74 ± 4.32ab	57.28 ± 0.93b
DMPP	2.75 ± 0.22bc	4.13 ± 0.22c	0.67 ± 0.02a	50.27 ± 5.16c	28.02 ± 3.49ab	49.87 ± 3.49ab	53.51 ± 1.04cd
CP	2.47 ± 0.06cd	4.08 ± 0.13c	0.61 ± 0.01bc	49.27 ± 3.19c	23.65 ± 0.53bc	45.50 ± 0.53bc	54.88 ± 1.14c
NBPT+H	2.59 ± 0.21c	4.59 ± 0.14b	0.56 ± 0.03cde	61.43 ± 3.26b	25.18 ± 3.77b	47.03 ± 3.77b	53.80 ± 1.06cd
DMPP+H	2.25 ± 0.17d	4.02 ± 0.14c	0.56 ± 0.03de	47.70 ± 3.38c	19.34 ± 0.90c	41.19 ± 0.90c	52.27 ± 0.81d
CP+H	2.64 ± 0.11bc	4.85 ± 0.03ab	0.54 ± 0.02e	67.54 ± 0.71ab	31.72 ± 2.02a	53.57 ± 2.02a	59.49 ± 0.61a

3 讨论

3.1 腐植酸与不同生化抑制剂结合对尿素氮转化的影响

试验研究发现, 腐植酸的添加能够提高土壤无机氮含量, 是由于腐植酸与尿素之间能发生络合作用, 形成腐脲^[24], 抑制尿素态氮向铵态氮的转化, 同时腐植酸可以有效抑制土壤中脲酶活性^[25], 其

共同作用延缓土壤中尿素态氮向铵态氮的转化, 减少因大量铵态氮累积造成氨挥发损失, 进而提高土壤无机氮的含量。

施用添加腐植酸与 NBPT 尿素比单独添加 NBPT 尿素, 显著提高 NBPT 的硝化抑制效果, 可能是腐植酸与 NBPT 都可抑制尿素态氮向铵态氮的转化, 降低了硝化作用底物铵态氮浓度的结果, 两者结合能够起到抑制黑土硝化作用的效果。施用添

加腐植酸与 DMPP 尿素比单独添加 DMPP 尿素, 显著降低 DMPP 的硝化抑制效果, 可能是腐植酸本身是土壤有机质的组成成分^[15], 腐植酸的添加能够增加土壤有机质^[26], 在高有机质土壤中 DMPP 降解速率会加快, 作用时间较短; 另一方面, 腐植酸的添加会增加土壤中水稳性团聚体的数量^[27], 改善土壤结构^[28], 会有更多的 DMPP 被土壤吸附, 也会降低其作用效果。施用添加腐植酸与 CP 尿素比单独添加 CP 尿素, 显著增加玉米生育前期黑土铵态氮含量, 同时增加黑土无机氮含量, 这可能是腐植酸与 CP 结合后抑制尿素态氮向铵态氮转化的作用强度, CP 又可以抑制铵态氮向硝态氮的转化, 两者对于抑制黑土中尿素态氮向硝态氮的转化作用显著增强。

3.2 腐植酸与不同生化抑制剂结合对玉米生长指标、产量及氮肥利用率的影响

单独添加生化抑制剂处理中, CP 处理玉米株高最高, 其次是 DMPP 处理, 再其次是 NBPT 处理, 这是由于尿素态氮在施入土壤后转化较快, 在田间盆栽试验中, 氮素损失主要是通过氨挥发途径及表观硝化-反硝化途径, 研究发现氨挥发损失约占施氮量的 11%, 而表观硝化-反硝化损失约占 34%^[29]。NBPT 的添加能够有效抑制尿素态氮向铵态氮的转化, 进而减少氨挥发损失, 而 DMPP、CP 的添加能够有效抑制铵态氮向硝态氮的转化, 减少表观硝化-反硝化损失, 因此 NBPT 处理相比 DMPP、CP 处理肥料氮总损失量更高, 因此 NBPT 处理玉米株高低于 DMPP、CP 处理。本试验研究发现, 黑土中 CP 的硝化抑制效果好于 DMPP, 因此较 CP 处理, DMPP 处理肥料氮的表观硝化-反硝化损失更高, 因此 DMPP 处理玉米株高低于 CP 处理。与单独添加生化抑制剂尿素相比, 腐植酸加入均提高了玉米株高及叶片叶绿素含量, 但玉米植株茎粗及叶片叶面积均有所降低, 可能是腐植酸可以促进植物组织合成及对氮素的利用^[30], 因此添加腐植酸的稳定性尿素玉米株高有所增加, 同时腐植酸能够促进植株光合作用^[31], 致使叶片叶绿素增加。研究发现, 环境胁迫压力会造成植株生理形态的改变, 如植株叶片大小、茎伸长及根系形态的改变^[32], 在玉米生长过程中, 腐植酸能够促进作物根系发育, 增强植株吸收养分能力, 减轻环境胁迫压力, 但在相对较低环境胁迫压力下, 玉米抗倒伏能力呈现降低趋势, 因此相比尿素, 添加腐

植酸反而造成玉米茎粗有不同程度的降低, 而另一方面玉米叶片叶绿素的增加, 标志着单位面积叶片光合作用增强, 相比施用只添加生化抑制剂尿素, 较少的玉米叶面积就可以满足植株光合作用的需要, 因此相比单独施用只添加生化抑制剂尿素, 腐植酸与生化抑制剂结合反而导致玉米叶片叶面积减少。

黑土施用添加腐植酸与 NBPT 尿素比单独添加 NBPT 尿素降低了玉米产量、植株吸氮量及氮肥利用效率, 是因腐植酸能增强土壤微生物活性^[33], 微生物活跃的条件下, NBPT 会被较快水解^[34], 两者配合施用加快了 NBPT 的水解速率, 缩短其有效作用时间, 氮素损失增加, 导致玉米产量及肥料利用率等诸多指标下降。施用添加腐植酸与 DMPP 尿素比单独添加 DMPP 尿素降低了玉米产量、经济系数、植株吸氮量及氮肥利用效率等, 与腐植酸降低 DMPP 硝化抑制效果相一致, 也与 DMPP+H 处理硝化抑制率及黑土氮素变化特征相符, 黑土中两者结合使用没有正效应, 不利于玉米植株增产及肥料利用率的提高。施用添加腐植酸与 CP 尿素比单独添加 CP 尿素显著提高玉米产量、叶片叶绿素含量、植株吸氮量、氮肥利用效率, 玉米经济系数、株高、籽粒吸氮量也均有所提高, 是由于腐植酸抑制黑土尿素态氮向铵态氮转化, 与 CP 配合使用可以有效抑制黑土尿素态氮向硝态氮转化及减少尿素氮损失, 增加了黑土氮素含量, 这与 CP+H 处理黑土速效氮变化规律相符; 同时腐植酸促进玉米植株对土壤氮素吸收, 提高尿素氮素利用率, 以及起到增产的作用。

4 结论

在黑土中施用添加腐植酸与 CP 尿素可以提高玉米产量、经济系数、植株吸氮量、肥料利用效率、玉米株高及叶片叶绿素含量; 施用添加腐植酸与 NBPT 尿素, 腐植酸与 NBPT 抑制黑土铵态氮硝化具有协同作用, 能显著增加玉米株高及叶片叶绿素含量; 施用添加腐植酸与 DMPP 尿素显著降低 DMPP 的硝化抑制效果, 降低玉米产量、经济系数、植株吸氮量、肥料利用效率、玉米茎粗及叶面积, 但玉米株高及叶片叶绿素含量有所提高。黑土栽培玉米, 最适合的生物刺激素腐植酸与生化抑制剂结合配方为 CP 与腐植酸的组合, 尿素中添加这一配方制成的稳定性增效尿素, 其作用效果明显强

于生物刺激素腐植酸或硝化抑制剂 CP 单独添加到尿素中的稳定性尿素。在黑土中栽培玉米, 将 CP 与腐植酸配合添加到尿素中制成新型高效稳定性增效尿素肥料施用效果最好。避免将 NBPT、DMPP 与腐植酸同时添加尿素中制成稳定性肥料, 不利于提高玉米产量和氮肥肥料的利用率。

参考文献:

- [1] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107 (26): 12052-12057.
- [2] Wang H T, Kobke S, Dittert K, et al. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: 11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1614-1621.
- [6] 张蕾, 王玲莉, 房娜娜, 等. 稳定性肥料在中国不同区域的施用效果及施用量 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (2): 215-230.
- [7] Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils: a review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178 (2): 171-188.
- [8] Alonso-Ayuso M, Gabriel J L, Quemada M. Nitrogen use efficiency and residual effect of fertilizers with nitrification inhibitors [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80: 1-8.
- [9] Wallace A J, Armstrong R D, Grace P R, et al. Nitrogen use efficiency of ¹⁵N urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 116 (1): 41-56.
- [10] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 用于黑土的稳定性氯化铵的适宜硝化抑制剂和氮肥增效剂组合 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (12): 2178-2188.
- [11] 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 & Environment*, 2014, 189: 136-144.
- [12] Vitale L, Ottaiano L, Polimeno F, et al. Effects of 3, 4-dimethylphosphazone phosphate-added nitrogen fertilizers on crop growth and N₂O emissions in southern Italy [J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59 (11): 517-523.
- [13] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (20): 106-115.
- [14] Asli S, Neumann P M. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development [J]. *Plant and Soil*, 2010, 336 (1-2): 313-322.
- [15] Nardi S, Pizzeghello D, Muscolo A, et al. Physiological effects of humic substances on higher plants [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 (11): 1527-1536.
- [16] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植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.
- [17] Garcia A C, Santos L A, Izquierdo F G, et al. Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 203-208.
- [18] Tahir M M, Khurshid M, Khan M Z, et al. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils [J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (1): 124-131.
- [19] Yildirim E. Foliar and soil fertilization of humic acid affect productivity and quality of tomato [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2007, 57 (2): 182-186.
- [20] 张水勤, 袁亮, 李伟, 等. 腐植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.
- [21] 庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、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.
- [22] 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (12): 2113-2121.
- [23] 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.
- [24] 闫双堆, 刘利军, 洪坚平. 腐植酸-尿素络合物对尿素转化及氮素释放的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2008 (1): 109-112.
- [25] Dong L, Cordova-Kreylos A L, Yang J, et al. Humic acids buffer the effects of urea on soil ammonia oxidizers and potential nitrification [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (8): 1612-1621.
- [26] 张务帅, 张建青, 谷端银, 等. 腐植酸复合肥对苹果生长及土壤肥力的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (2): 177-182.
- [27] 穆金丽, 谭钧, 刘国顺, 等. 腐植酸和氮肥用量及其互作对植烟土壤质量的影响 [J]. *土壤*, 2017, 49 (1): 27-32.
- [28] Ouni Y, Ghnaya T, Montemurro F, et al. The role of humic

- substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity [J]. *International Journal of Plant Production*, 2014, 8 (3): 353-374.
- [29] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 778-783.
- [30] Vaccaro S, Ertani A, Nebbioso A, et al. Humic substances stimulate maize nitrogen assimilation and amino acid metabolism at physiological and molecular level [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2015, 2 (1): 1-12.
- [31] 刘敏, 李絮花, 刘文博, 等. 腐植酸对番茄苗期氮素代谢的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (3): 327-331.
- [32] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29 (1): 185-212.
- [33] 毕军, 夏光利, 毕研文, 等. 腐殖酸生物活性肥料对冬小麦生长及土壤微生物活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (1): 99-103.
- [34] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酸脲类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (12): 4003-4012.

Effect of high efficiency and stability urea added with humic acid and biochemical inhibitors in black soil

XIAO Fu-rong^{1, 2}, LI Dong-po^{1, 5*}, XUE Yan¹, SONG Yu-chao¹, ZHANG Ke^{1, 2}, LI Yong-hua³, ZHENG Ye⁴, ZHANG Jin-ming⁴, CUI Yong-kun⁴ (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 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 Research Station of Shenyang Agroecosystems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110107)

Abstract: The application and regulation effects of adding biochemical inhibitors and biostimulant humic acid to the high efficiency and stability urea on fertilizer nitrogen transformation in black soil were studied to provide a theoretical basis for the study of the special formulation of high efficiency and stability urea combined with biostimulant humic acid and biochemical inhibitor in the black soil. A pot experiment was conducted with 9 treatments, blank (CK) and urea (N) were set up as controls, and humic acid (H), N-butyl thiophosphate-triamine (NBPT), 3, 4-dimethyl-pyrazolate phosphate (DMPP) and 2-chloro-6-trimethyl-pyridine (CP) and their combinations were added to urea fertilizer, respectively. The effects of urea fertilizers with different biochemical inhibitors and humic acid on soil available nitrogen contents, biological index and yield of maize were determined, and the nitrification inhibition rate, grain nitrogen uptake, total nitrogen uptake, urea fertilizer use efficiency were calculated. The results showed that compared with urea alone treatment, the combined application of humic acid and biochemical inhibitors NBPT, DMPP and CP significantly increased maize yield, nitrogen uptake, nitrogen use efficiency, and had significant effects on soil available nitrogen contents ($P < 0.05$). Compared with the application of biochemical inhibitor NBPT alone, urea with humic acid and NBPT addition significantly increased the nitrification inhibition rate of black soil in maize seeding stage, plant height and chlorophyll content by 14.03%, 6.31% and 3.22%, but the maize yield, nitrogen uptake, nitrogen use efficiency, stems thickness and leaf area all decreased. Compared with the application of biochemical inhibitor DMPP alone, urea with humic acid and DMPP addition increased plant height and chlorophyll content by 7.97% and 20.17%, and significantly decreased the nitrification inhibition rate of black soil in maize seeding stage, maize yield, economic coefficient, grain nitrogen uptake, leaf area, total nitrogen uptake, urea fertilizer apparent utilization rate and stems thickness decreased ($P < 0.05$). Compared with the application of biochemical inhibitor CP alone, urea with humic acid and CP addition significantly increased the maize yield, chlorophyll content, total nitrogen uptake, nitrogen use efficiency ($P < 0.05$), and the plant height, grain nitrogen uptake were also increased, but the stem thickness and leaf area were decreased ($P < 0.05$). In conclusion, in black soil, urea with humic acid and CP addition could increase the maize yield, nitrogen uptake, plant height, chlorophyll content and urea fertilizer use efficiency. Urea with humic acid and NBPT, DMPP addition could decrease maize yield, nitrogen uptake, nitrogen use efficiency, which is not conducive to the increase of yield and the improvement of urea fertilizer use efficiency. In black soil maize planting area, it is suggested to combine humic acid and CP to make the new high-efficiency and stability urea to increase the maize yield and improve urea fertilizer apparent utilization rate, and avoid using humic acid with NBPT and DMPP.

Key words: biostimulant; humic acid; urease inhibitor; nitrification inhibitor; nitrogen use efficiency