

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21316

尿素氮在不同类型土壤中转化特征及其施用效果对生化抑制剂的响应

李学红^{1, 4, 5}, 李东坡^{1, 5*}, 薛妍¹, 宋玉超¹, 张可^{1, 4}, 肖富容^{1, 4}, 李永华², 郑野³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 北方华锦化学工业股份有限公司化工研究院, 辽宁 盘锦 124021; 3. 锦西天然气化工有限责任公司, 辽宁 葫芦岛 125001; 4. 中国科学院大学, 北京 100049, 5. 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 110016)

摘要: 通过盆栽试验, 研究脲酶抑制剂正丙基硫代磷酰三胺 (NPPT)、硝化抑制剂双氰胺 (DCD) 及其组合对黑土、棕壤、褐土中尿素氮素形态和玉米产量等因子的影响, 为适宜黑土、棕壤、褐土的高效稳定性尿素肥料的研发提供理论依据。试验共设不施尿素 (U0)、普通尿素 (U)、尿素 + 脲酶抑制剂 (UN)、尿素 + 硝化抑制剂 (UD)、尿素 + 脲酶抑制剂 + 硝化抑制剂 (UND) 5 个处理。在玉米苗期、大喇叭口期、灌浆期、成熟期采集土壤样品, 测定尿素氮、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量, 计算氮素表观利用率等指标。在玉米灌浆初期, 测定玉米棒三叶叶面积和叶绿素含量, 收获后考种, 采集植物样品测定玉米植株生物量和全氮含量。试验结果表明, 黑土中抑制剂处理较 U 处理玉米能够增产, 且 UD 处理增产幅度最大, 为 U 处理的 1.50 倍, 氮素表观利用率提高 2.12 倍, 黑土中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著提高 62.11% ~ 121.21%; 棕壤中 UN、UD 处理玉米增产显著, 且 UD 处理增产幅度最大, 为 U 处理的 0.36 倍, 氮素表观利用率提高 2.79 倍, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著提高 43.13% ~ 131.31%; 褐土中抑制剂处理明显增产, 且 UND 处理增产最多, 为 U 处理的 1.51 倍, 氮素表观利用率提高 4.08 倍, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量提高 19.08% ~ 262.25%。黑土和棕壤种植玉米应选择添加 DCD 制成的高效稳定性尿素肥料, 褐土种植玉米应选择添加 NPPT 和 DCD 配施制成的高效稳定性尿素。

关键词: 尿素; 土壤; 玉米; 生化抑制剂; 氮素利用率

与植物其他营养物质相比, 氮肥在农业生产中应用最多, 2018 年我国氮肥实物产量达到 3457.12 万 t, 尿素约占 67.78% (数据来源于中华人民共和国国家统计局, <https://data.stats.gov.cn/index.htm>, 2018)。与其他氮肥相比, 尿素具有含氮量高 (45% ~ 46%) 和生产成本低等优点^[1]。然而, 施用普通尿素会导致大量氮素损失, 降低氮的回收率和利用率^[2]。氮素损失既是一个经济问题 (供作物吸收利用的养分减少, 影响产量), 也是一个环境问题 (地表水体富营养化、地下水硝酸盐富集、形成酸雨, 破坏臭氧层等)^[3-4]。因此, 提高农业生产中尿素氮利用率是目前亟待解决的问题。

在尿素中添加生化抑制剂 (脲酶抑制剂和硝化抑制剂) 制成稳定性肥料是最具实用价值和广阔应用前景的措施, 可以有效延缓尿素水解、抑制铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 的硝化进程, 增加和延长氮素肥料在土壤中的有效供给时间, 保证作物后期养分供应^[5-6], 并减少温室气体排放^[7], 提高氮的利用率。目前已筛选出 100 多种具有抑制脲酶活性的无机物和有机物, 但实际用于农业生产的却很少, 主要有 N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT)、正丙基硫代磷酰三胺 (NPPT)、苯基磷酰二胺 (PPD) 和氢醌 (HQ), 其抑制效果依次为 NPPT>NBPT>PPD>HQ^[8]。Dawar 等^[9] 研究证明, 脲酶抑制剂 NBPT 在尿素施用后的前 7 d 有效延缓尿素水解, 增加作物根系附近氮的含量。周旋等^[10] 研究证明, NPPT 在不同类型土壤中的作用效果与 NBPT 相似, 能显著降低脲酶活性。硝化抑制剂双氰胺 (DCD) 因其本身具有无毒、高效、抑制时间长、价格低等优势在国内外广泛应用。DCD 能够抑制氨氧化细菌活

收稿日期: 2021-05-27; 录用日期: 2021-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200707)。

作者简介: 李学红 (1994-), 硕士研究生, 主要从事高效稳定性氮肥研究。E-mail: lixh2121@163.com。

通讯作者: 李东坡, E-mail: lidp@iae.ac.cn。

性,延缓土壤铵的氧化,减少硝态氮(NO_3^- -N)累积和 N_2O 排放,提高氮肥利用率^[11]。王艳群等^[12]研究表明,合理施肥量添加DCD可以有效增加小麦-玉米产量,提高经济效益。Ding等^[13]研究表明,施用DCD能够显著减少田间玉米土壤 N_2O 总排放量,增加玉米产量。王雪薇等^[14]研究表明,硫酸铵添加DCD可显著抑制土壤 NH_4^+ -N向 NO_3^- -N转化,提高小青菜品质和产量。生化抑制剂的作用效果不仅受自身物理、化学性质的影响,还受土壤类型、湿度、温度、酸碱度等多种因素的影响^[15-16]。黑土、棕壤和褐土是东北地区粮食作物主产区的典型土壤类型,不同生化抑制剂在这3种类型土壤中的作用效果存在差异。本文采用玉米盆栽试验对NPPT和DCD及其组合在黑土、棕壤和褐土中调控尿素氮转化特征及抑制效果进行研究,探讨不同抑制剂与尿素配施对不同类型土壤氮素形态和玉米产量的影响,为适合黑土、棕壤和褐土的高效稳定性尿素肥料研制与应用提供理论依据。

表1 土壤基本理化性质

土壤类型	有机碳 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
黑土	16.24	1.45	19.59	26.95	43.07	310.66	6.20
棕壤	8.64	0.98	16.27	11.86	18.42	258.95	5.02
褐土	11.12	1.10	10.95	15.85	15.52	320.49	7.99

1.3 试验设计

试验在2019年5~10月进行,共设5个处理,3次重复,(1)不施尿素(U0);(2)单施尿素(U);(3)尿素+脲酶抑制剂(UN);(4)尿素+硝化抑制剂(UD);(5)尿素+脲酶抑制剂+硝化抑制剂(UND)。采用盆栽试验,各处理施氮 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,施磷(P_2O_5) $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,施钾(K_2O) $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。抑制剂NPPT、DCD施用量分别为尿素量的0.25%、2.00%,与尿素充分混匀后再与土壤混匀,装入盆中。将盆随机排列埋入田间土壤中,使盆中土面与地面保持水平,盆高出地面2~3 cm,玉米苗三叶期每盆定植1株,其管理措施同常规大田玉米生产栽培。

1.4 测定指标与方法

在玉米苗期、大喇叭口期、灌浆期、成熟期采集土壤样品,测定土壤尿素氮、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量。用小土钻在盆中5点取样,混匀后,分别

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地位于中国科学院沈阳应用生态试验站,属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,干冷同期,降雨集中。年均气温 8°C 左右,年均降水量 659.60 mm ,年日照时数 2527 h 。2019年6~8月,该区平均降水量比历年同期多2~3成,且降水比较集中,连续降雨较多。

1.2 试验材料

供试尿素,由国药集团化学试剂有限公司生产,含氮量46%;硝化抑制剂双氰胺(DCD)、脲酶抑制剂正丙基硫代磷酰三胺(NPPT),为分析纯,均由Macklin生物科技有限公司生产。试验土壤为吉林省长春市农安县的黑土、辽宁省铁岭市昌图县的棕壤、辽宁省朝阳市朝阳县的褐土,分别取耕层0~20 cm土壤,挑出杂物,并混合均匀,经自然风干后过2 mm筛,备用。土壤基本理化性质见表1。

用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾乙酸苯汞、 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾浸提(土:液=1:10),滤液采用AA3连续流动分析仪测定尿素氮、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量。灌浆初期用叶面积仪和叶绿素仪测量玉米棒三叶叶面积和叶绿素含量,取其平均值。玉米收获期进行考种和测产,用VARIO MACRO元素分析仪测定植株全氮含量。

1.5 计算与分析方法

表观硝化率(%)=硝态氮含量/(铵态氮含量+硝态氮含量) $\times 100$;

经济系数=玉米产量/玉米生物产量;

氮素收获指数=玉米籽粒氮素累积量/玉米植株氮素累积量;

氮素表观利用率(%)=(施氮玉米地上部氮素累积量-不施氮玉米地上部氮素累积量)/施氮量 $\times 100$;

氮肥农学效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)=(施氮玉米籽粒产量-

不施氮玉米籽粒产量) / 施氮量;

肥料氮贡献率 (%) = (施氮玉米产量 - 不施氮玉米产量) / 施氮玉米产量 × 100。

采用 Excel 2010 进行数据分析、SPSS 19.0 进行方差分析, 采用 Duncan 最小显著极差法进行差异性检验 ($P < 0.05$), 运用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量动态的变化

在玉米苗期末检测到土壤中含有尿素氮, 故后 3 个采样时期均未测定。

由图 1 可知, 随着玉米生育时期的推进, U、UN、UD、UND 处理在黑土、棕壤、褐土中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈下降趋势。与 U 处理相比, 添加抑制剂提高土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量, 而硝化抑制剂作用效果好于 UN 处理。黑土和棕壤 UD 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量始终保持最高水平, 苗期分别为 81.09、63.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次是 UND 处理, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 U 和 UN 处理。大喇叭口期, 土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量快速下降, 黑土中 UD 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 26.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于 UN、UND 处理; 棕壤中 UN、UD、UND 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在 24.27 ~ 25.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 且各处理间无显著差异, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比 U 处理平均提高 1.11 倍。灌浆期和成熟期, 黑土、棕壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均在 9.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 处理间差异不明显。而褐土中 UND 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量维持较高水平, 其次是 UD 处理。苗期 UND 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 78.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 U 处理提高 2.62 倍。大喇叭口期, UD、UND 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 16.80、19.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理。灌浆期和成熟期, 各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均在 7.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 且差异不明显。

3 种类型土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化规律一致, 苗期添加硝化抑制剂处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量都显著低于单施尿素和只添加脲酶抑制尿素处理, 表明硝化抑制剂 DCD 可以有效抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化, 降低土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。随着玉米生育时期的推进, 硝化抑制剂作用效果减弱, 土壤中存留的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 加快向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化。大喇叭口期, 黑土、褐土中 UD 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量很高, 分别为 24.37、28.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但与 U 处

理无显著差异, 显著高于 UN、UND 处理。棕壤中 UND 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最高, 为 30.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于 UN、UD 处理, 但与 U 处理无显著差异。灌浆期和成熟期, 3 种土壤中各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量趋于一致, 且处理间差异不显著 (图 1)。

2.2 不同处理对土壤表观硝化率的影响

由图 2 可知, 各处理土壤表观硝化率存在显著差异, 添加生化抑制剂处理的表观硝化率小于单施尿素处理, 表明抑制剂有效抑制土壤硝化反应, 且硝化抑制剂作用效果好于单独添加脲酶抑制处理。

在 3 种土壤中, 添加抑制剂的 3 个处理中, UN 处理抑制土壤表观硝化率最弱, 玉米苗期, 黑土表观硝化率最高, 为 83.98%, 没有体现出抑制硝化作用; 棕壤表观硝化率为 77.31%, 与 U 处理无显著差异; 褐土表观硝化率为 70.70%, 显著低于 U 处理, 但高于硝化抑制剂的处理。大喇叭口期 UN 处理土壤表观硝化率呈显著下降的趋势, 其中黑土和棕壤表观硝化率降至最低, 分别为 29.19% 和 34.76%。可能是脲酶抑制剂 NPPT 作用时间较短, 对土壤硝化作用没有抑制效果, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 积累量较少。褐土 UN 处理土壤表观硝化率为 57.21%, 显著高于 UND 处理, 但与 UD 处理无显著差异。灌浆期和成熟期, 3 种土壤表观硝化率均在 53.53% ~ 76.57% 之间, 各处理间差异不大。

UD 和 UND 处理能有效抑制土壤硝化作用, 降低土壤表观硝化率。在黑土中, UD 和 UND 处理表观硝化率呈逐渐上升的趋势, 抑制剂作用效果随时间的延长逐渐减弱。苗期 UD 处理土壤表观硝化率最低, 为 46.25%。大喇叭口期 UD 和 UND 处理土壤表观硝化率分别为 48.06% 和 44.87%, 与 U 处理无显著差异。灌浆期之后, UD 处理土壤表观硝化率维持在 62.91% 以下, 显著低于其他处理。棕壤中 UD 处理一直处于较低水平, 在 46.25% ~ 54.95 之间, 显著低于 UND 处理。褐土中 UD、UND 处理苗期土壤表观硝化率分别为 37.63%、40.88%, 显著低于 U、UN 处理。大喇叭口期 UND 处理土壤表观硝化率最低, 为 46.81%。灌浆期和成熟期各处理间土壤表观硝化率差异不大 (图 2)。

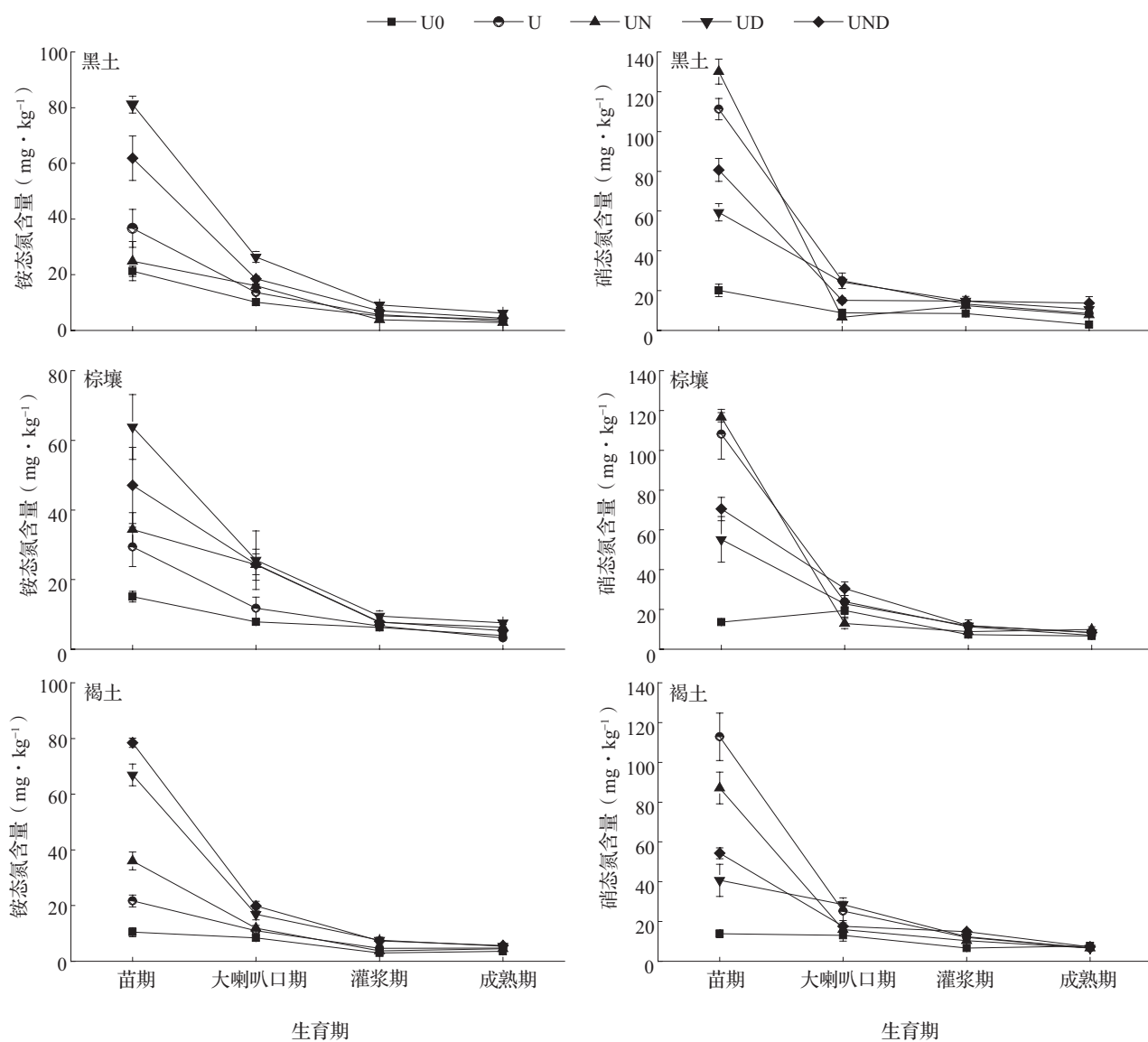


图1 不同处理土壤铵态氮、硝态氮含量变化

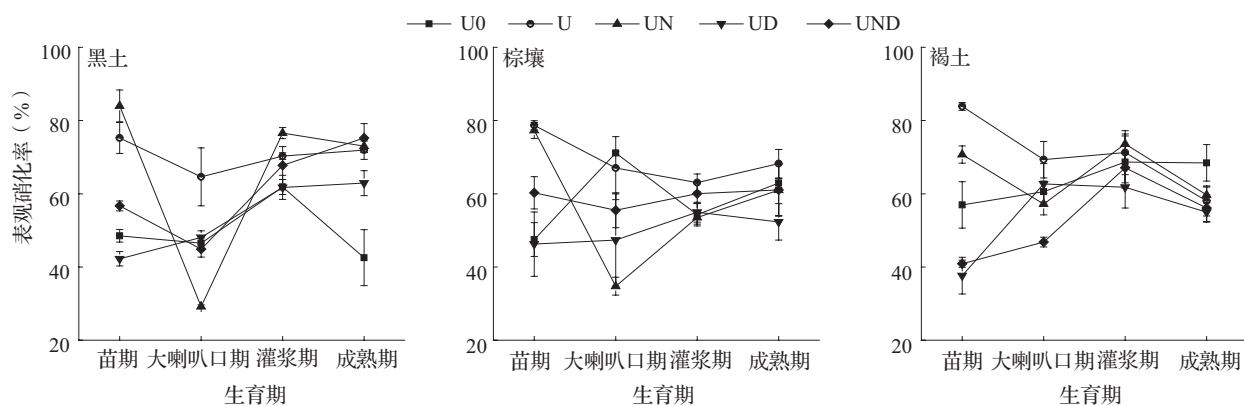


图2 玉米不同生育时期各处理土壤表观硝化率

2.3 不同处理对玉米叶面积的影响

由图 3 可知,在黑土和褐土中,施用尿素处理的玉米叶面积高于不施尿素的处理,添加尿素 + 抑制剂的处理玉米叶面积高于单施尿素处理(除棕壤 UD 处理外)。黑土中 UN 处理叶面积最大,为 987.67 cm^2 ,显著高于 U0 处理,但与 U、UD、UND 处理无显著差异。棕壤中施用尿素及尿素 +

抑制剂处理与 U0 处理无显著差异,其中 UN 处理叶面积最大,为 869.95 cm^2 ,UD 叶面积最小,为 733.21 cm^2 。褐土中,U 处理叶面积为 807.14 cm^2 ,显著高于 U0 处理,但与添加抑制剂处理无显著差异 ($P < 0.05$)。施用尿素、尿素 + 抑制剂可以使玉米植株获得更大的叶面积,从而更好地吸收利用太阳光,提高产量。

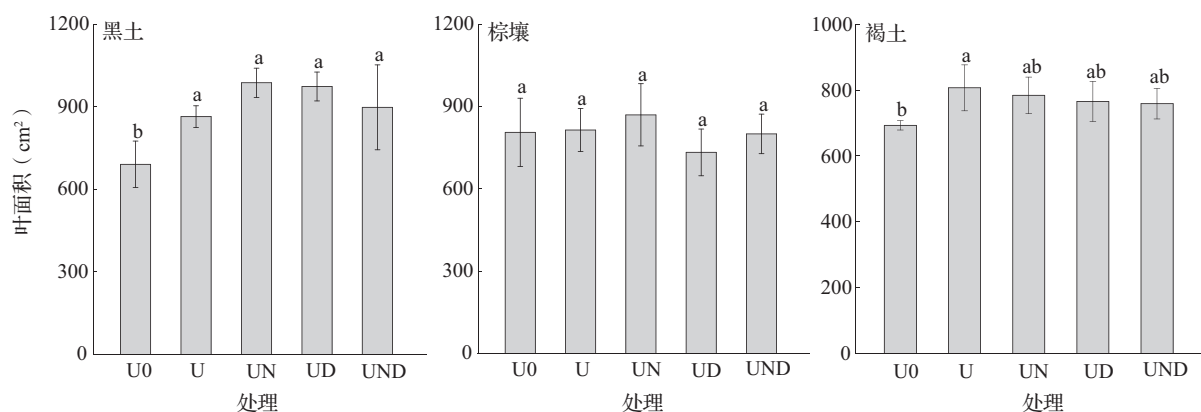


图 3 不同处理玉米叶面积

注:图柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同处理对玉米叶绿素含量的影响

由图 4 可以看出,3 种土壤中施用尿素处理玉米叶绿素含量高于不施尿素处理,其中黑土、褐土中施用抑制剂处理玉米叶绿素含量要显著高于不施尿素处理,棕壤除 UN 处理外,其他处理叶绿素含量显著高于不施尿素的处理。黑土中 UD 处理玉米叶绿素含量最高,为 49.63,其次是 UND 处理,显

著高于 UN 处理。棕壤中 UD 处理玉米叶绿素最高,为 53.18,显著高于 UN 处理,但与 UND 处理无显著差异。褐土中 UND 处理玉米叶绿素含量最高,与 UN、UD 处理无显著差异,SPAD 均在 33.33 以上,显著高于 U0 和 U 处理。表明施用生化抑制剂能提高玉米叶片叶绿素含量,通过光合作用合成更多的有机物,从而增加玉米产量。

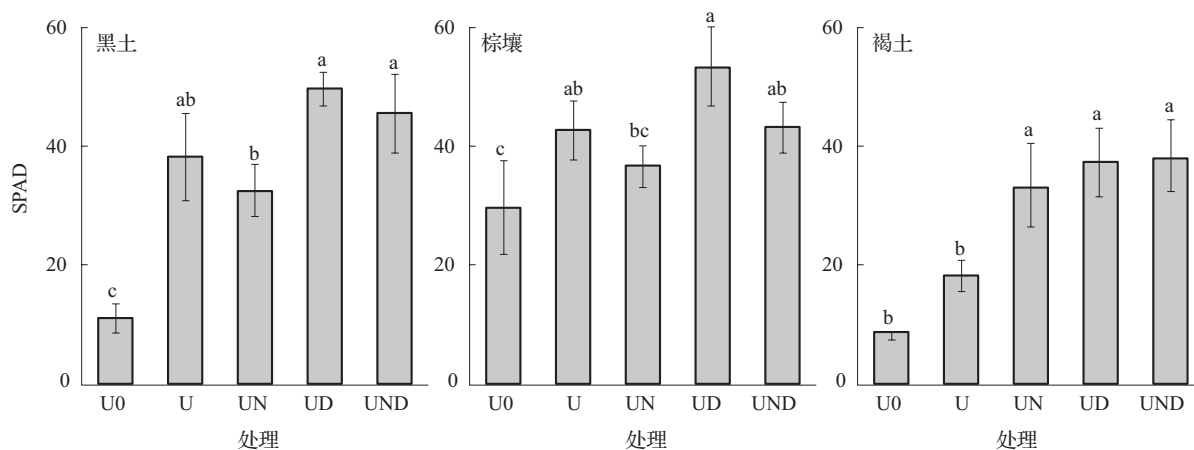


图 4 不同处理玉米叶片叶绿素含量 (SPAD)

2.5 不同处理对玉米产量及产量构成因素的影响

2.5.1 不同处理对玉米产量构成因素的影响

黑土中 UND 处理玉米穗长最长, 为 20.17 cm, 显著高于 U0 处理, 但与其他施用抑制剂处理无显著差异。UN 处理株高为 281.67 cm, 与 UD 处理无显著差异, 显著高于其他处理。UND 处理株高为 240.00 cm, 显著高于 U0 和 U 处理。UD 处理玉米穗粗为 4.51 cm, 显著高于 U0、UN 处理, 但与 U、UND 处理无显著差异 (表 2)。

棕壤中所有处理玉米穗长无显著差异, 其中 U 处理穗长最长, 为 19.98 cm, 其次是 UD 处理, 穗长为 19.90 cm, U0、UN、UND 处理穗长在 18.87 cm 以下。UD 处理株高最高, 为 270.00 cm, 显著高于 U0 处理, 但与其他处理无显著差异 ($P<0.05$)。UN 处理株高也较高, 为 263.33 cm, 与 U、UND 处理无显著差异。UD 处理穗粗最粗, 为 4.66 cm, 其次是 UND 处理, 穗粗为 4.22 cm, 与其他处理无显著差异。

褐土中 UD、UND 处理玉米穗长最长, 均为 19.73 cm, 其次是 U 处理, 穗长为 16.10 cm, 各

处理间无显著差异。UD 处理玉米株高最高, 为 268.67 cm, 其次是 UN 处理, 株高为 257.33 cm, 与 UND 处理无显著差异, 显著高于 U0 和 U 处理。UND 处理穗粗最大, 为 4.44 cm, 其次是 UD 处理, 穗粗为 4.12 cm, 各处理间无显著差异。

2.5.2 不同处理对玉米产量的影响

在黑土、棕壤、褐土上种植玉米, 与单施尿素相比, 施用尿素 + 抑制剂可以提高玉米产量, 黑土中平均增产 1.1 倍, 棕壤中平均增产 0.21 倍, 褐土中平均增产 0.89 倍。黑土中 UD 处理玉米产量最高, 为 $172.78 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其次是 UND 处理, 玉米产量为 $155.01 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 显著高于其他处理 ($P<0.05$)。棕壤中 UD 处理玉米产量最高, 为 $164.00 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, U、UN、UND 处理玉米产量分别为 120.45、127.18、 $115.66 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 高于 U0 处理。褐土中 UND 处理玉米产量最高, 为 $172.44 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其次是 UD 处理, 玉米产量为 $125.19 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 显著高于 U0 和 U 处理。在 3 种土壤上种植玉米, 添加硝化抑制剂 DCD 作用效果要好于单独添加脲酶抑制剂 NPPT, 且增产效果明显。

表 2 不同处理玉米产量及产量构成因素

土壤类型	处理	穗长 (cm)	株高 (cm)	穗粗 (cm)	粒重 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)
黑土	U0	$14.97 \pm 0.80\text{b}$	$171.00 \pm 13.89\text{d}$	$3.07 \pm 0.22\text{c}$	$63.94 \pm 4.78\text{d}$
	U	$19.00 \pm 1.31\text{a}$	$195.67 \pm 14.05\text{c}$	$4.37 \pm 0.55\text{ab}$	$69.16 \pm 2.23\text{d}$
	UN	$18.80 \pm 2.42\text{a}$	$281.67 \pm 7.23\text{a}$	$3.61 \pm 0.34\text{bc}$	$99.63 \pm 8.41\text{c}$
	UD	$18.63 \pm 0.85\text{a}$	$277.67 \pm 9.29\text{a}$	$4.51 \pm 0.39\text{a}$	$172.78 \pm 12.44\text{a}$
	UND	$20.17 \pm 1.07\text{a}$	$240.00 \pm 15.00\text{b}$	$4.35 \pm 0.43\text{ab}$	$155.01 \pm 7.21\text{b}$
棕壤	U0	$18.74 \pm 1.56\text{a}$	$175.00 \pm 7.81\text{b}$	$3.78 \pm 0.58\text{a}$	$96.56 \pm 12.51\text{c}$
	U	$19.98 \pm 1.02\text{a}$	$238.00 \pm 25.53\text{a}$	$3.93 \pm 0.46\text{a}$	$120.45 \pm 5.82\text{b}$
	UN	$18.87 \pm 1.51\text{a}$	$263.33 \pm 14.50\text{a}$	$4.08 \pm 0.72\text{a}$	$127.18 \pm 15.79\text{b}$
	UD	$19.90 \pm 2.12\text{a}$	$270.00 \pm 15.10\text{a}$	$4.66 \pm 0.30\text{a}$	$164.00 \pm 10.24\text{a}$
	UND	$18.47 \pm 1.78\text{a}$	$248.00 \pm 19.29\text{a}$	$4.22 \pm 0.50\text{a}$	$115.66 \pm 7.75\text{bc}$
褐土	U0	$14.53 \pm 0.70\text{a}$	$142.33 \pm 1.53\text{c}$	$3.01 \pm 0.20\text{a}$	$54.92 \pm 4.50\text{c}$
	U	$16.10 \pm 0.70\text{a}$	$217.00 \pm 14.11\text{b}$	$3.20 \pm 1.37\text{a}$	$68.75 \pm 2.02\text{c}$
	UN	$12.43 \pm 10.93\text{a}$	$257.33 \pm 11.93\text{a}$	$3.76 \pm 0.98\text{a}$	$89.87 \pm 13.20\text{bc}$
	UD	$19.73 \pm 2.48\text{a}$	$268.67 \pm 9.29\text{a}$	$4.12 \pm 0.72\text{a}$	$125.19 \pm 25.41\text{b}$
	UND	$19.73 \pm 1.18\text{a}$	$255.33 \pm 10.79\text{a}$	$4.44 \pm 0.28\text{a}$	$172.44 \pm 37.35\text{a}$

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.6 不同处理对玉米氮素累积吸收量及氮肥利用率的影响

从表 3 可以看出, 添加生化抑制剂影响玉米植株吸氮量、氮素收获指数、氮肥表观利用率、农学效率、肥料贡献率, 不同土壤类型抑制剂的作用效

果明显不同, 各处理籽粒含氮量、总含氮量存在差异, 添加抑制剂的处理要高于单施尿素处理。黑土中 UD 处理籽粒含氮量为 $2.26 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 显著高于 UN 处理, 但与 UND 处理无显著差异。UD 处理总含氮量最高, 为 $3.36 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 显著高于 UN 处理,

其次是UND处理植株总含氮量为 $3.22 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，与其他处理差异显著。棕壤UD处理籽粒含氮量最高，为 $2.23 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，显著高于U0、U、UND处理，其次是UN处理，籽粒含氮量为 $2.08 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，比U处理提高0.46倍。UD植株总含氮量最高，为 $3.99 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，与UN处理无显著差异，显著高于UND处理。褐土中UND处理籽粒含氮量最高，为 $2.23 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，与UD处理无显著差异，显著高于其他处理。UND处理植株总含氮量为 $3.61 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，显著高于未添加抑制剂的处理，其次是UD处理，植株总含氮量为 $3.36 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，与UN处理无显著差异。

在黑土中，添加抑制剂处理氮素收获指数高于单施尿素处理，UD处理氮素收获指数最高，为0.71，与UN、UND处理间无显著差异。与U处理

相比，UD处理氮素表观利用率、氮肥农学效率、肥料贡献率最高，分别为57.30%、 $36.58 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、62.86%，其次是UND处理，显著高于UN处理。在棕壤中，U0处理氮素收获指数最高，为0.66，其次是UN处理，各处理间无显著差异。UD处理氮素表观利用率、氮肥农学效率、肥料贡献率最高，分别为59.35%、 $22.67 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、40.97%。UN处理氮素表观利用率、氮肥农学效率、肥料贡献率较高，分别为43.10%、 $10.29 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、23.31%，显著高于U处理。褐土中，UND处理氮素收获指数为0.65，与UD处理无显著差异，显著高于其他处理。UN、UD、UND处理氮素表观利用率显著高于U处理，UND处理氮肥农学效率和肥料贡献率均最高，分别为 $39.50 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、67.24%，显著高于U和UN处理。

表3 不同处理玉米氮素效率指标

土壤类型	处理	籽粒含氮量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	秸秆含氮量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	总含氮量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	氮素收获指数	氮素表观利用率 (%)	氮肥农学效率 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	肥料贡献率 (%)
黑土	U0	$0.80 \pm 0.11\text{c}$	$0.69 \pm 0.08\text{c}$	$1.56 \pm 0.15\text{c}$	$0.53 \pm 0.03\text{c}$	—	—	—
	U	$0.89 \pm 0.07\text{c}$	$1.15 \pm 0.01\text{a}$	$2.21 \pm 0.10\text{b}$	$0.44 \pm 0.02\text{b}$	$18.37 \pm 2.05\text{b}$	$1.76 \pm 0.75\text{d}$	$7.49 \pm 2.93\text{c}$
	UN	$1.31 \pm 0.03\text{b}$	$0.60 \pm 0.03\text{c}$	$2.04 \pm 0.06\text{b}$	$0.69 \pm 0.00\text{a}$	$13.94 \pm 1.78\text{b}$	$12.00 \pm 2.83\text{c}$	$35.51 \pm 5.57\text{b}$
	UD	$2.26 \pm 0.22\text{a}$	$0.94 \pm 0.09\text{b}$	$3.36 \pm 0.33\text{a}$	$0.71 \pm 0.01\text{a}$	$57.30 \pm 10.25\text{a}$	$36.58 \pm 4.18\text{a}$	$62.86 \pm 2.76\text{a}$
	UND	$2.05 \pm 0.26\text{a}$	$0.96 \pm 0.10\text{b}$	$3.22 \pm 0.31\text{a}$	$0.68 \pm 0.04\text{a}$	$51.20 \pm 9.16\text{a}$	$30.61 \pm 2.42\text{b}$	$58.70 \pm 1.87\text{a}$
棕壤	U0	$1.25 \pm 0.50\text{b}$	$0.65 \pm 0.23\text{c}$	$2.13 \pm 0.71\text{b}$	$0.66 \pm 0.04\text{a}$	—	—	—
	U	$1.42 \pm 0.10\text{b}$	$0.95 \pm 0.11\text{bc}$	$2.65 \pm 0.09\text{b}$	$0.60 \pm 0.04\text{a}$	$15.66 \pm 3.01\text{b}$	$8.03 \pm 1.95\text{b}$	$19.71 \pm 3.88\text{b}$
	UN	$2.08 \pm 0.23\text{a}$	$1.10 \pm 0.18\text{ab}$	$3.46 \pm 0.39\text{a}$	$0.65 \pm 0.01\text{a}$	$43.10 \pm 13.78\text{a}$	$10.29 \pm 5.31\text{b}$	$23.31 \pm 9.25\text{b}$
	UD	$2.23 \pm 0.25\text{a}$	$1.44 \pm 0.29\text{a}$	$3.99 \pm 0.50\text{a}$	$0.61 \pm 0.03\text{a}$	$59.35 \pm 16.93\text{a}$	$22.67 \pm 3.44\text{a}$	$40.97 \pm 3.62\text{a}$
	UND	$1.39 \pm 0.03\text{b}$	$0.78 \pm 0.08\text{bc}$	$2.36 \pm 0.05\text{b}$	$0.64 \pm 0.03\text{a}$	$8.53 \pm 1.91\text{b}$	$6.42 \pm 2.60\text{b}$	$16.27 \pm 5.44\text{b}$
褐土	U0	$0.75 \pm 0.09\text{c}$	$0.76 \pm 0.03\text{b}$	$1.62 \pm 0.13\text{b}$	$0.49 \pm 0.02\text{b}$	—	—	—
	U	$1.03 \pm 0.04\text{c}$	$0.85 \pm 0.04\text{b}$	$2.02 \pm 0.07\text{b}$	$0.55 \pm 0.01\text{b}$	$12.49 \pm 2.34\text{b}$	$4.65 \pm 0.68\text{c}$	$20.07 \pm 2.34\text{c}$
	UN	$1.63 \pm 0.13\text{b}$	$1.40 \pm 0.19\text{a}$	$3.25 \pm 0.18\text{a}$	$0.54 \pm 0.05\text{b}$	$50.99 \pm 5.24\text{a}$	$11.75 \pm 4.44\text{bc}$	$37.98 \pm 9.38\text{b}$
	UD	$2.00 \pm 0.23\text{ab}$	$1.17 \pm 0.15\text{a}$	$3.36 \pm 0.38\text{a}$	$0.63 \pm 0.00\text{a}$	$55.86 \pm 12.84\text{a}$	$23.62 \pm 8.54\text{b}$	$54.97 \pm 8.65\text{a}$
	UND	$2.23 \pm 0.48\text{a}$	$1.16 \pm 0.12\text{a}$	$3.61 \pm 0.37\text{a}$	$0.65 \pm 0.07\text{a}$	$63.43 \pm 12.30\text{a}$	$39.50 \pm 12.56\text{a}$	$67.24 \pm 6.33\text{a}$

3 讨论

3.1 抑制剂及其组合对土壤无机氮的影响

戴宇等^[17]研究表明，硝化抑制剂DCD能够显著提高玉米、水稻产量，改善作物品质。本研究

尿素添加NPPT、DCD及其组合，可以延长 NH_4^+-N 在土壤中的存留时间，增加 NH_4^+-N 在无机氮中的比例，降低 NO_3^--N 的浓度。Aleem等^[18]研究表明，硝化细菌在碱性条件下更为敏感。玉米苗期，褐土中U处理的 NO_3^--N 含量较黑土、棕壤更高，而除

黑土的 UN 处理外, 黑土、棕壤、褐土添加抑制剂处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 U 处理, 表明抑制剂 NPPT 和 DCD 可以抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化。大喇叭口期, UN、UD、UND 处理土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量仍保持较高水平, 由于脲酶抑制剂 NPPT 作用时间较短, 对尿素水解后产物调控作用较小, 甚至会促进其他途径氮素的损失^[19], 所以 UN 处理中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量相对较少, 而 UD、UND 处理中 DCD 仍有较强的抑制效果, 使土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 仍维持在较低水平, 满足玉米生长氮素需求, 实现养分供应与吸收同步。随玉米生长时期的推进, 在灌浆期和成熟期, DCD 逐渐降解, 抑制土壤硝化作用减弱, 加上玉米对土壤中氮素的吸收利用, 使各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量趋于一致, 差异不明显。

3.2 抑制剂及其组合对土壤表观硝化率的影响

黑土、棕壤、褐土单施尿素土壤呈现活跃的硝化反应, 其中褐土的硝化作用强度高于黑土和棕壤, 可能是因为褐土 pH 值高^[20] 以及 3 种土壤有机质含量和微生物数量不同, 从而影响相关酶活性。同一抑制剂处理在 3 种土壤中作用效果不同, 褐土中 UND 处理土壤表观硝化率最低, 为 40.88%, 显著低于其他 2 种土壤。在大喇叭口期, 黑土、棕壤各处理土壤表观硝化率有所下降, 可能是玉米在此时期吸收大量无机氮所致^[21], 且玉米喜硝^[22], DCD 能显著抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化, 故土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量占比上升。灌浆期, 添加抑制剂处理的土壤表观硝化率显著上升, 表明抑制剂作用效果减弱, 甚至没有抑制效果。

3.3 抑制剂及其组合对玉米产量以及氮素利用的影响

3 种类型的土壤, 经尿素配施 NPPT、DCD 及其组合处理后, 显著促进玉米植株的生长和氮素的吸收, 增加了玉米叶面积和叶绿素含量, 最终提高籽粒产量, 这与孙传范等^[23] 研究结果相似。Byrnes 等^[24] 研究表明, 添加 NBPT 能够增加稻谷的产量, 但未达到显著水平。本研究中, 添加脲酶/硝化抑制剂或两者配施均可提高玉米产量, 而棕壤、褐土单独施用 NPPT, 产量增加不显著。与单施尿素处理相比, 黑土添加抑制剂, 玉米产量平均提高 1.06 倍; 棕壤玉米产量平均提高 0.13 倍; 褐土玉米产量平均提高 0.88 倍, 表明在 3 种土壤上种植玉米, 施用尿素配合抑制剂, 具有增产效果明显、氮素利用率提高等优势, 产生良好的经济、

生态效益。在氮素利用方面, 与 U 处理相比, 黑土、棕壤、褐土添加抑制剂的处理植株含氮量提高 0.31 ~ 0.79 倍, 其中黑土 UN 处理和棕壤 UND 处理植株含氮量低于 U 处理。在黑土中, 添加抑制剂能显著提高玉米氮素收获指数、氮肥农学效率、肥料贡献率, 且分别提高 0.56 ~ 0.62、5.83 ~ 19.84、3.73 ~ 7.39 倍; 氮素表观利用率 UD 和 UND 处理分别提高 2.12 和 1.79 倍, 其中 UD 作用效果最好。在棕壤中, UN、UD 处理均能提高氮素收获指数、氮素表观利用率、氮肥农学效率和肥料贡献率, 其中以尿素与 DCD 配施效果最好, 分别提高 0.01、2.79、1.82 和 1.08 倍。在褐土中, 抑制剂处理比单施尿素处理显著提高了玉米氮素表观利用率、氮肥农学效率和肥料贡献率, 分别提高 3.08 ~ 4.08、1.53 ~ 7.50 和 0.89 ~ 2.35 倍, 尤其以 NPPT 和 DCD 配施效果最为显著, 两者的协同作用提高了土壤中氮素的存留时间以及对玉米的持续供应。

4 结论

硝化抑制剂 DCD 对黑土和棕壤中尿素氮的转化均表现出显著的抑制作用, 提高土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量, 降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量, 同一抑制剂对黑土中尿素氮转化的调控效果较棕壤更为明显。脲酶抑制剂 NPPT 和硝化抑制剂 DCD 配施对褐土中氮素转化协同抑制效果更好, 保持土壤较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和较低的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量时间更长, 满足玉米整个生育期对养分的需求, 且提高了其产量。在玉米栽培时, 在黑土和棕壤上建议采用添加 DCD 尿素肥料, 在褐土上建议添加 NPPT+DCD 尿素肥料。

参考文献:

- [1] Cantarella H, Otto R, Soares J R, et al. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review [J]. *Journal of Advanced Research*, 2018, 13: 19-27.
- [2] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42 (6): 1635-1642.
- [3] Sutton M A, Erisman J W, Dentener F, et al. Ammonia in the environment: from ancient times to the present [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156 (3): 583-604.
- [4] Zaman M, Saggar S, Blennerhassett J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2009, 41 (6): 1270–1280.
- [5] 方玉凤, 王晓燕, 庞荔丹, 等. 硝化抑制剂对春玉米氮素利用及土壤 pH 值和无机氮的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015 (6): 18–22.
- [6] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 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.
- [7] Abbasi M A, Adams W A. Gaseous N emission during simultaneous nitrification–denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32 (8–9): 1251–1259.
- [8] Bremner J M, Chai H S. Effects of phosphoroamides on ammonia volatilization and nitrite accumulation in soils treated with urea [J]. Biology and Fertility of Soils, 1989, 8: 227–230.
- [9] Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47 (2): 139–146.
- [10] 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.
- [11] O' callaghan M, Gerard E M, Carter P E, et al. Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42 (9): 1425–1436.
- [12] 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 等. 氮素配施双氰胺对冬小麦–夏玉米轮作系统 N_2O 排放的影响及效益分析 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (7): 1999–2006.
- [13] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 47 (1): 91–99.
- [14] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 54–61.
- [15] 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.
- [16] 黄强, 郑顺林, 郭函, 等. 尿素配施硝化/脲酶抑制剂对春季和秋季马铃薯产量及土壤矿质氮的影响 [J]. 西北农业学报, 2019, 28 (9): 1499–1507.
- [17] 戴宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (1): 279–286.
- [18] Aleem M L H, Aleocander M. Nutrition and physiology nitrobaeber agibis [J]. Appl Microbiol, 1960, 8: 80–84.
- [19] Gioacchini P, Nastri A, Marzadori C, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36 (2): 129–135.
- [20] 余冻, 高明, 慈恩, 等. 不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19 (3): 733–738.
- [21] 冯小杰, 战秀梅, 王颖, 等. 稳定性氮肥减施对春玉米氮素吸收及土壤无机氮供应的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (7): 1216–1225.
- [22] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 六种作物不同生育期吸收铵、硝态氮的特性 [J]. 作物学报, 1999, 25 (2): 221–226.
- [23] 孙传范, 戴廷波, 曹卫星. 不同施氮水平下增铵营养对小麦生长和氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (1): 33–38, 49.
- [24] Byrnes B H, Ferney J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics [J]. Fertilizer Research, 1995, 42: 251–259.

Transformation characteristics of urea nitrogen in different types of soil and the response of its application effect to biochemical inhibitors

LI Xue-hong^{1, 4, 5}, LI Dong-po^{1, 5*}, XUE Yan¹, SONG Yu-chao¹, ZHANG Ke^{1, 4}, XIAO Fu-rong^{1, 4}, LI Yong-hua², ZHENG Ye³ (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016; 2. North Huajin Chemical Industries Group Corporation, Panjin Liaoning 124021; 3. Jinxi Natural Gas Chemical Co. Ltd., Huludao Liaoning 125001; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 5. National Field Observation and Research Station of Shenyang Agroecosystems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016)

Abstract: A pot experiment was conducted to explore the effect of urease inhibitor n-propyl thiotriamine (NPPT), nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) and their combinations on nitrogen form and maize yield in black soil, brown soil and cinnamon soil. Five treatments were set up, including without urea fertilizer (U0), urea without inhibitors (U), urea+ urease inhibitor (UN), urea+ nitrification inhibitor (UD), and urea+ urease inhibitor+ nitrification inhibitor (UND). The contents of urea nitrogen, ammonium nitrogen (NH_4^+-N) and nitrate nitrogen (NO_3^--N) in soil were measured at seedling stage, big trumpet stage, grouting stage and maturity stage of corn, and the nitrification inhibition rate, nitrogen apparent use efficiency were calculated correspondingly. The area and chlorophyll content of the three leaves of the rod were measured at the initial stage of corn filling, and the biomass and nitrogen content of the corn were measured after harvest. Compared with U treatment, maize yield in black

soil could be increased by inhibitor treatment, and UD yield increased by 1.5 times as much as that in U treatment, nitrogen apparent use efficiency increased by 2.12 times, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in black soil significantly increased by 62.11% ~ 121.21%. In brown soil, the yield increased significantly under UN and UD treatment, and UD treatment had the largest yield increase, which was 0.36 times higher than that under U treatment. Nitrogen apparent use efficiency increased by 2.79 times, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in soil increased significantly by 43.13% ~ 131.31%. Inhibitor treatment significantly increased the yield in cinnamon soil, and UND treatment increased the yield by 1.51 times as much as U treatment, nitrogen apparent use efficiency increased by 4.08 times, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in soil increased by 19.08% ~ 262.25%. DCD had a significant effect on the nitrification inhibition of urea nitrogen in black soil and brown soil. The high efficiency and stability urea fertilizer added with DCD should be selected in the black soil and brown soil planting corn. The combined application of NPPT and DCD had a good synergistic effect on the conversion of urea nitrogen in the cinnamon soil. The high efficiency and stability urea fertilizer added with the combination of NPPT and DCD should be selected for the corn planting in the cinnamon soil.

Key words: urea; soil; corn; biochemical inhibitors; nitrogen efficiency