

应用 ^{15}N 标记尿素研究硝化抑制剂 对设施番茄氮素去向的影响

许纪元^{1,2} 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, 江苏 南京 210008;

² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为明确硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶(简称 CP)在设施蔬菜上的应用效果及其增效机制,本研究采用田间微区试验,应用 ^{15}N 稳定性同位素示踪技术研究了在推荐施氮量($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和习惯施氮量($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下,CP 对设施番茄氮素去向的影响,并进行了其增效机制的初探。结果表明,在施氮量为 180 和 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,施用 CP 可增加番茄产量 17.3% 和 31.4%,肥料氮回收率分别增加 8.6 和 9.2 个百分点,氮挥发排放增加了 2.47 和 $3.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其他损失合计减少了 15.5 和 $27.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。添加 CP 促进了氮素从茎和叶向果实的转移,且减少了氮素损失,提高了氮素利用率,这可能是其增效的机制之一。施用 CP 带来的经济效益显著高于其成本,在蔬菜生产上值得应用与推广。

关键词:同位素示踪;2-氯-6-三氯甲基吡啶;蔬菜;氮损失

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.12.2793

随着我国人均生活水平的提高以及城市化进程的加快,人们对蔬菜消费的需求日益增加。由于设施蔬菜相对于其他粮食作物具有较高的附加值,近年来全国种植面积日益增加,截止 2018 年,全国设施蔬菜种植面积达 $2.04\times 10^7\text{ hm}^2$ 。在实际生产中蔬菜的增产主要依赖氮肥的大量投入^[2]。随着大量单施化肥与土体富营养化,大棚蔬菜作物及土壤对投入氮肥的敏感性降低,相应肥效降低,造成增肥不增产,致使在原有施肥结构下产量难以维持和提高^[3-5]。

硝化抑制剂是一类进入土壤后能够影响土壤生化环境的物质,可以调节某些土壤酶活性,抑制亚硝化细菌生长、控制土壤中 NH_4^+ 向 NO_2^- 、 NO_3^- 转化^[6-7]。有研究表明,应用硝化抑制剂可有效提高肥料利用率、降低氮素损失,并且硝化抑制剂适合与各种铵态氮肥或尿素配施^[8]。2-氯-6-三氯甲基吡啶(6-chloro-2-trichloromethyl pyridine, CP)为国际公认的无毒有效的硝化抑制剂^[9],主要应用于我国大田作物如小麦、玉米和棉花等,并取得了较好的增产效果,已进行一定范围的推广^[10-13]。CP 被认为可阻控土壤中氮素的硝化

和反硝化过程,使得施入土壤中更多的氮素以铵态氮形态存在,可减少 N_2O 的排放^[14]。目前,针对硝化抑制剂的研究多集中在应用效果方面^[15-18],应用于蔬菜地尤其应用于设施菜地的研究报道较少,增产效果和机制尚不十分清楚。为有效提高氮肥利用率,确保蔬菜作物高产和最小环境污染,深入研究在不同施氮量下,施用硝化抑制剂后肥料氮在植物-土壤-大气系统中的行为和去向十分必要。鉴于此,本研究利用 ^{15}N 稳定性同位素示踪技术,应用 ^{15}N 标记尿素,在田间微区研究了推荐施氮量($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和习惯施氮量($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下,添加硝化抑制剂 CP 对设施番茄氮素去向的影响及其可能的增效机理,以期为硝化抑制剂在蔬菜生产上的大面积推广应用提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地概况

供试作物为番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.),品种为东圣一号,购自陕西东圣有限责任公司。试验用硝

收稿日期:2020-02-22 接受日期:2020-04-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201001),江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1005)

作者简介:许纪元,男,主要从事蔬菜氮素营养与环境效应的研究。E-mail: yzxu_jiyuan@issas.ac.cn

* 通讯作者:闵炬,女,副研究员,主要从事农田养分循环和环境效应研究。E-mail: jmin@issas.ac.cn

化抑制剂的有效成分为 CP,在乳液成品中含量为 24%,由浙江奥复托化工有限公司提供。按照有效成分为尿素质量 0.25%的比例喷施该产品于尿素表面。供试标记尿素 ^{15}N 丰度为 10.17%,购自上海化工研究院。

试验于江苏省宜兴市农业科技示范园大棚蔬菜生产基地进行,试验大棚为钢管塑料大棚。该地区位于中亚热带北缘过渡地带,年平均气温 15.7℃,无霜期平均 239 d,年均降水量 1 158 mm。土壤类型为湖白土,质地为砂壤土。移栽前 0~20 cm 耕层土壤理化性质为:土壤 pH 值 5.56,土壤有机质、全氮、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、速效磷、速效钾含量分别为 22.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、202.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、16.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、110.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 72.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为:①研究区域推荐化肥氮用量处理^[1,19],设置施氮量为 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (U180);②U180 基础上添加硝化抑制剂 CP 处理 (U180+CP);③农户习惯化肥氮用量处理,施氮量为 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (U300);④U300 基础上添加硝化抑制剂 CP 处理 (U300+CP)。每处理设 3 次重复,共计 12 个小区,小区面积为 20 m^2 (5 m×4 m),各小区随机区组排列。各小区之间以埋设有 PVC 板(埋深 60 cm)的田埂(宽 60 cm,高 40 cm)隔开,防止小区间串水串肥,并实现各小区单灌单排的管理目的。在施氮小区内设计一个施氮量一致的 ^{15}N 试验微区,由 6 mm 厚 PVC 材料焊接成直径 80 cm、高 80 cm、面积 0.5 m^2 的圆筒状,并分别在距桶上沿 20 cm 和 40 cm 处两侧对称打孔(配橡胶塞),以实现微区内外水分交换和单独灌排水的需求。于微区试验开始前半年埋入圆筒,埋深 60 cm,留上部 20 cm 以阻断微区内外水肥串流。

番茄春茬栽培,于 2 月 13 日播种育苗,3 月 20 日移栽定植,7 月 24 日收获完毕;栽培方式为传统的畦栽,畦面宽 60 cm,沟宽 40 cm,每畦两行,间距 30 cm,株距 40 cm,植株留 4 穗果。本研究中化肥氮(普通尿素和微区使用的标记尿素)分 3 次施用,分别在移栽前做基肥、开花期和第 1 穗果膨大期做追肥施入,施入肥料运筹为 2:1:1,标记尿素按微区面积折算用量施用;商品有机肥、磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾)在每季作物的基肥中一次施入,施用量分别为 78 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N)、60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P_2O_5) 和 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (K_2O),微区中按面积折算用量施肥。水分与农药管理措施同当地农户习惯。田间水分管理采用当地农民传统的浇灌方法,通常在移栽当天及随后的 3~4 d 灌水,或视土壤干湿状况而定,水源为试验区附近河水,追肥时尿

素撒施后灌水。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 番茄产量 番茄果实产量按整个小区收获计产。

1.3.2 番茄各器官生物量 番茄成熟后,将 0.5 m^2 微区内植株地上部按茎、叶和果实分器官收获,于 105℃杀青 30 min 后,75℃烘干至恒重,称重后记录各器官干重。

1.3.3 ^{15}N 吸收与利用率 取 1.3.2 称重后样品粉碎过 100 目筛,采用同位素质谱法测定番茄茎、叶和果实中全氮含量和 ^{15}N 丰度,同时计算肥料 ^{15}N 植株吸收量和 ^{15}N 利用效率,具体测定方法和计算公式均参照文献[20]。

1.3.4 肥料标记氮素土壤残留量和土壤硝态氮含量 在番茄收获后,于微区内分别采集 0~15、15~30、30~45 和 45~60 cm 土层土壤样品,每土层取 6 个点,土样混匀后风干,磨细过 100 目筛,采用同位素质谱法测定土壤全氮含量和 ^{15}N 丰度(测定方法同 1.3.3)。根据公式计算肥料 ^{15}N 土壤残留量:

$$\text{肥料}^{15}\text{N 土壤残留量} = 2.25 \times 10^6 \times C_N \times (^{15}\text{N}_{\text{atm}} - 0.3663) / (10.17 - 0.3663) \quad (1)$$

式中,2.25×10⁶ 为土壤重量,kg·hm⁻²;C_N 为土壤全氮含量,%; $^{15}\text{N}_{\text{atm}}$ 为土壤样品 ^{15}N 丰度;10.17 为供试标记尿素 ^{15}N 丰度;0.3663 为 ^{15}N 自然丰度。

小区内分别采集 0~15、15~30、30~45 和 45~60 cm 土层鲜土样,压碎过 3 mm 孔筛后,立即用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液(水土比为 10:1)浸提,振荡 1 h 后过滤。滤液用连续流动分析仪(San++ System 荷兰 skalar 仪器公司)测定土壤硝态氮含量。

1.3.5 肥料 NH_3 - ^{15}N 排放量 采用连续动力抽气-密闭室法观测氨挥发排放,测定方法及氨挥发量计算均参照文献[21]:

$$\text{肥料 } \text{NH}_3 \text{-}^{15}\text{N 排放量} = N \times (^{15}\text{N}_{\text{atm}} - 0.3663) / (10.17 - 0.3663) \quad (2)$$

式中,N 为硼酸吸收液中的全氮含量,kg·hm⁻²; $^{15}\text{N}_{\text{atm}}$ 为硼酸吸收液中 ^{15}N 丰度;10.17 为供试标记尿素 ^{15}N 丰度;0.3663 为 ^{15}N 自然丰度。

1.3.6 肥料 ^{15}N 其他途径损失量 采用 ^{15}N 平衡账法^[21]。

$$\text{肥料}^{15}\text{N 其他途径损失量} = \text{肥料}^{15}\text{N 投入量} - \text{地上部}^{15}\text{N 累计吸收量} - \text{肥料}^{15}\text{N 土壤残留量} - \text{肥料 } \text{NH}_3 \text{-}^{15}\text{N 排放量} \quad (3)。$$

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析,对各处理之间差异性进行方差分析和 Duncan 多重比较($P < 0.05$)。

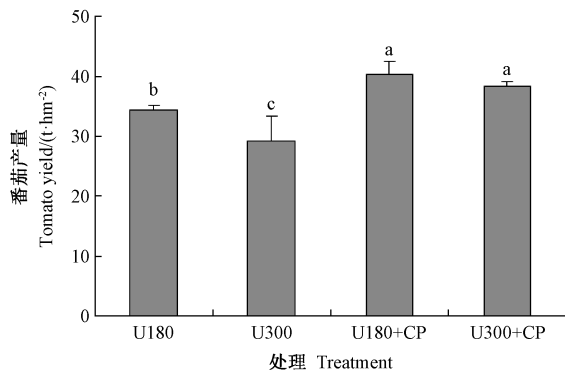
2 结果与分析

2.1 设施番茄产量

由图 1 可知,试验区农户习惯施氮量(U300)的设施番茄果实产量显著低于推荐施肥量(U180)($P<0.05$),表明试验区设施番茄可适当减施氮 40%且不会造成减产。推荐施肥添加 CP(U180+CP)和习惯施肥添加 CP(U300+CP)处理间番茄产量无显著差异。与 U180 和 U300 相比,U180+CP 和 U300+CP 的产量分别增加了 17.3%和 31.4%,表明在不同施氮量下施用硝化抑制剂均可有效提高设施番茄产量。

2.2 标记尿素氮在地上部各器官的分配

由表 1 可知,在 U180 和 U300 处理下 45.8%和 41.2%的标记尿素氮被吸收累积在叶片中,高于在茎和果实中的累积吸收量。在 U180+CP 和 U300+CP 处理下,38.9%和 39.4%的标记尿素氮被吸收累积在叶片中,仍高于在茎和果实中的累积吸收量能占比。与 U180 和 U300 相比,U180+CP 和 U300+CP 茎和叶中标记尿素¹⁵N 占总施氮量的比例分别减少了 3.5 和



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

图 1 不同施氮量和添加硝化抑制剂处理对设施番茄产量的影响

Fig.1 Effect of the N rate and the nitrification inhibitor on tomato yields

3.6 个百分点(茎)、6.9 和 1.8 个百分点(叶),果实中标记尿素氮占施氮量的比例分别增加了 10.4 和 5.4 个百分点。表明施用 CP 可使氮素的分配从茎和叶片向果实转移,增加施用氮肥对果实的贡献。

表 1 标记尿素氮在设施番茄植株地上部各器官的分配
Table 1 Distribution of N from ¹⁵N labeled urea in aboveground organs in tomatoes

| 处理 Treatment | 标记尿素累积吸收量 Labeled urea N uptake/(kg·hm ⁻²) | | | 标记尿素氮各器官分配 Distribution of labeled urea N/% | | |
|-----------------|---|----------|-----------|--|-----------|-----------|
| | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果实 Fruit | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果实 Fruit |
| U180 | 5.1±1.7a | 7.6±2.8a | 3.8±0.5bc | 31.1±0.3a | 45.8±0.6a | 23.1±0.1d |
| U300 | 3.1±0.6a | 4.6±1.4a | 3.4±0.8c | 27.7±0.2b | 41.2±0.5b | 31.1±0.3c |
| U180+CP | 5.5±1.8a | 7.7±2.3a | 6.7±2.1ab | 27.6±0.3b | 38.9±0.4c | 33.5±0.3b |
| U300+CP | 5.3±0.8a | 8.6±3.3a | 8.0±2.2a | 24.1±0.1c | 39.4±0.5c | 36.5±0.3a |

注:表中数据为平均值±标准差($n=3$),不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: The results are mean ± standard deviation ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level among treatments. The same as following.

2.3 土壤氮残留

由表 2 可知,不同处理下标记尿素氮主要残留在 0~15 cm 土层。与 U180 和 U180+CP 相比,U300 和 U300+CP 的 0~15 cm 土层土壤残留氮量显著增加,表明施氮量增加促进了氮素在表层土壤的累积。在 15~30、30~45 和 45~60 cm 土层,不同处理下标记尿素氮的土壤残留量分别仅为 7.3~20.1、4.5~11.4 和 4.7~7.7 kg·hm⁻²。与 U180 和 U300 相比,相同施氮量下 U180+CP 和 U300+CP 各土层的土壤残留氮量均无显著差异,表明添加 CP 可能不会促进氮素的淋洗。

由图 2 可知,与 U180 和 U300 相比,相同施氮量

下 U180+CP 和 U300+CP 土壤剖面中硝态氮含量无显著差异($P<0.05$)。土壤硝态氮在 0~15 cm 土层大量累积,土壤硝态氮含量在 59.2~110.6 mg·kg⁻¹之间;然而在 15 cm 以下土层硝态氮含量显著降低($P<0.05$),15~60 cm 土层中硝态氮含量仅在 2.8~24.2 mg·kg⁻¹之间。

2.4 氨挥发量

由图 3 可知,与 U180 和 U300 相比,U180+CP 和 U300+CP 中设施番茄生长季标记尿素总的氨挥发量分别增加了 178.6%和 83.7%,其中,在基肥和第 1 次追肥后标记尿素氮的氨挥发量增加最明显,增加了

表 2 土壤剖面标记氮素残留氮量
Table 2 Residual nitrogen of labeled urea nitrogen in soil profile / (kg·hm⁻²)

| 土层 Soil depth/cm | 处理 Treatment | | | |
|---------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | U180 | U300 | U180+CP | U300+CP |
| 0~15 | 100.1±24.3b | 186.7±14.2a | 105.6±19.8b | 194.3±39.0a |
| 15~30 | 7.3±2.9b | 20.1±3.2a | 15.0±5.0ab | 15.1±1.6ab |
| 30~45 | 4.5±1.7b | 8.0±1.9ab | 5.1±1.6ab | 11.4±4.0a |
| 45~60 | 4.7±0.9a | 6.9±3.3a | 4.8±1.4a | 7.7±1.5a |
| 0~60 | 116.6±29.8b | 221.6±22.6a | 130.5±27.8b | 228.5±46.1a |

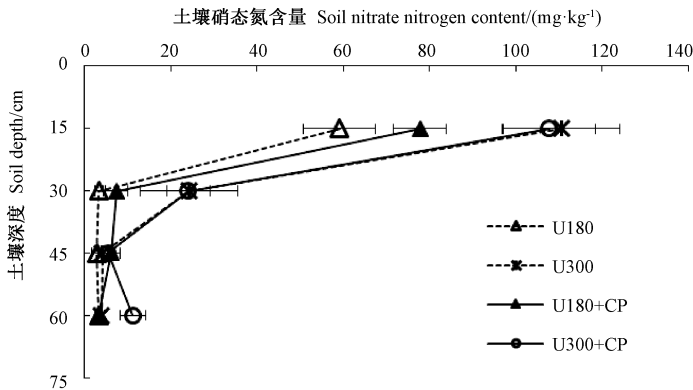
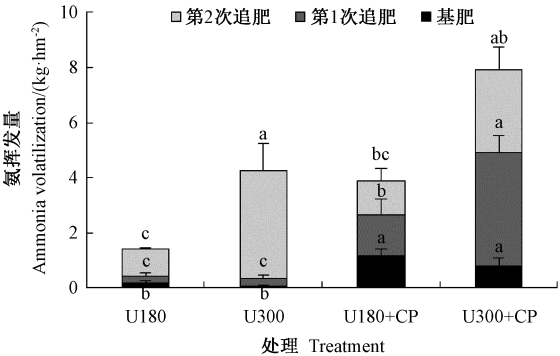


图 2 土壤剖面中硝态氮含量
Fig.2 Nitrate nitrogen content in soil profile

5~15 倍;在第 2 次追肥后,与 U180 相比,U180+CP 该阶段的氨挥发量增加了 24.5%,而 U300+CP 该阶段的氨挥发量较 U300 略有降低,但差异不显著。



注:图中不同小写字母分别表示基肥、第 1 次追肥和第 2 次追肥后不同处理间氨挥发量差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference in ammonia volatilization between different treatments after basal dressing, the first dressing and the second dressing at 0.05 level, respectively.

图 3 标记尿素氮的氨挥发量

Fig.3 The ammonia volatilization of labeled urea nitrogen

2.5 标记尿素氮去向和损失分析

由表 3 可知,与 U180 和 U300 相比,U180+CP 和

U300+CP 对标记尿素的总回收分别提高了 8.6 和 9.2 个百分点;其地上部作物氮素吸收比例分别增加了 0.9 和 3.6 个百分点;标记尿素的土壤残留比例分别增加了 7.7 和 5.6 个百分点。在标记尿素的氮素损失上,施用硝化抑制剂增加了氨挥发排放,较单施尿素处理增加了 1~2 倍。

3 讨论

设施番茄施用添加 CP 的标记尿素(简称 CP 尿素),分别在推荐施氮量 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和习惯施氮量 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 条件下增产 17.3% 和 31.4% (图 1)。这与前人研究结果相近,有报道表明 CP 可使水稻增产 15.2%^[22],玉米增产 15%~23%^[18]。从经济效益来看,CP 尿素比普通尿素价格高约 $0.38 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,每公顷成本仅增加 100 元左右,而施用 CP 后设施番茄果实产量可增加 $6.0 \sim 9.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,每公顷增加收入 1.2~1.8 万元(按每千克番茄 2.0 元计)。

同位素¹⁵N 示踪法能精确定量分析肥料氮的利用率^[23-24]。本研究中,布设在各小区内的¹⁵N 同位素示踪微区试验结果表明,与单施尿素相比,施用 CP 尿素后设施番茄茎和叶中标记尿素氮占总标记氮素施用量

表 3 标记尿素氮的去向(占施氮量百分比)
Table 3 Fate of labeled urea nitrogen (percentage of applied urea-N)

| 处理 Treatment | 地上部作物吸收 Recovery in aboveground plant | 土壤残留 Recovery in soil | 总回收率 Total N recovery rate | 氨挥发 Ammonia volatilization | 其他损失 Other N loss |
|-----------------|--|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| U180 | 10.2 | 64.8 | 75.0 | 0.8 | 24.2 |
| U300 | 3.7 | 73.9 | 77.6 | 1.4 | 21.0 |
| U180+CP | 11.1 | 72.5 | 83.6 | 2.2 | 14.2 |
| U300+CP | 7.3 | 79.5 | 86.8 | 2.6 | 10.6 |

的比例分别减少了 3.5、3.6 和 6.9、1.8 个百分点,设施番茄果实中则增加了 10.4 和 5.4 个百分点。水稻盆栽试验结果表明,基肥施用 CP 尿素,水稻后期增施穗肥能促进基肥氮素从茎叶向籽粒转移^[9];春小麦的盆栽试验也表明,施用 CP 可促进氮素由小麦茎叶向籽粒转移^[19]。由此推测,施用 CP 改变了设施番茄地上部各器官中的氮素分配,促使氮素由茎和叶片向果实转移,增加氮肥对果实的贡献,这可能是其在设施番茄上增效的机制之一。

本研究表明施用 CP 可增加肥料氮的回收,减少氮素损失(表 3)。设施番茄生长季在推荐施氮量和习惯施氮量下,与单施尿素处理相比,施用 CP 尿素使标记尿素氮的总回收率分别从 75% 和 77.6% 增加至 83.6% 和 86.8%。这与 Freney 等^[25]报道的增施 CP 可使棉花对肥料氮的回收率由 57% 提高至 74% 的结论相似。在推荐施氮量和习惯施氮量下,CP 的施用使设施番茄标记尿素氮的利用率分别从 10.2% 和 3.7% 增加至 11.1% 和 7.3%。在该试验区相同施氮量下通过差减法计算得到的设施番茄氮素利用率分别为 19.0% 和 15.4%。示踪法测得的氮肥利用率一般低于差减法,因为前者仅包括作物吸收的¹⁵N 标记化肥氮,而未计入作物对通过交换作用所释出的那一部分土壤氮的吸收,因而低估了施用氮肥后作物氮素营养水平的提高程度^[26-27]。本研究结果表明,0~60 cm 土层中残留的标记尿素氮有 80.9%~85.8% 残留在 0~15 cm 土层。这可能与施肥方式有关,该试验区设施番茄追肥一般为表施。有研究表明,施用硝化抑制剂可降低土壤硝态氮含量,提高土壤氨态氮含量^[15, 28-29]。在本研究中,CP 的施用未显著增加标记尿素氮在土壤中的残留量,这可能是由于加入¹⁵N 标记尿素氮后发生“激发效应”,即土壤氮与加入¹⁵N 标记尿素氮之间发生了微生物交换作用,增加了土壤氮素的矿化量,而通过示踪法未能检测到这部分增加量。与普通尿素相比,施用 CP 尿素显著增加了氨挥发排放,在施氮量为 180 和 300 kg·hm⁻² 处理下分别增加了 2.47 和 3.65

kg·hm⁻² 的氨排放,占总 N 投入量的 1.4% 和 1.2% (表 3),该结果与应用在水稻上的效果类似^[10,30]。氨挥发和 N₂O 排放均会影响环境的增温潜势(global warming potentials, GWP_s),大量研究已表明,CP 与氮肥配施可抑制玉米^[31]、棉花^[32]、小麦玉米轮作^[15]以及菜地^[14]的 N₂O 排放。氨挥发的 GWP_s 计算系数约为 N₂O 的 1/100^[2],因此根据文献调研的结果估算,综合氨挥发和 N₂O 排放的影响,氮肥配施 CP 相比单施化肥可能会降低环境总体的 GWP_s。此外,通过平衡帐法计算¹⁵N 标记尿素的其他损失量,施用 CP 尿素后在推荐施氮量和习惯施氮量下氮素损失分别减少了 10.0 和 10.4 个百分点(表 3),这与其他硝化抑制剂研究结果相似^[33-34]。

综上所述,CP 的施用通过提高番茄氮素吸收效率,减少 N 损失,从而提高了蔬菜种植体系的效率,这也可能是其增效的机制之一。

4 结论

设施番茄施用磷化抑制剂(CP)可显著提高果实产量,可增加约 12% 的肥料氮回收率,土壤标记尿素残留氮量无显著增加。添加 CP 改变了地上部各器官中的氮素分配,促进氮素由茎和叶向果实转移。与单施尿素处理相比,添加 CP 后氨挥发排放增加,但其他途径的氮素损失合计数减少。综合分析表明,CP 的应用有助于设施蔬菜维持高产,并可实现环境减排,在蔬菜生产上值得广泛推广。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018
- [2] Min J, Lu K P, Sun H J, Xia L L, Zhang H L, Shi W M. Global warming potential in an intensive vegetable cropping system as affected by crop rotation and nitrogen rate[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2016, 44(7): 766-774
- [3] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and

- salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73–84
- [4] 田效琴, 李卓, 刘永红. 施氮量和播种密度对不同熟期油菜干物质质量和产量的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 798–807
- [5] 郭增鹏, 董坤, 朱锦惠, 董艳. 施氮和间作对蚕豆锈病发生及田间微气候的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(11): 2294–2302
- [6] Vogel C, Sekine R, Huang J, Steckenmesser D, Steffens D, Huthwelker T, Borca C N, Pradas D R A, Castillo-Michel H, Adam C. Effects of a nitrification inhibitor on nitrogen species in the soil and the yield and phosphorus uptake of maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136895
- [7] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000(1): 1–6
- [8] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 张丽梅. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2077–2083
- [9] 彭根元, 王福钧, 吴肖菊, 苏宝林. 应用¹⁵N 研究液氮及硝化抑制剂对水稻的增产作用[J]. *北京农业大学学报*, 1984(2): 183–187
- [10] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 祝介贵. 硝化抑制剂影响小麦产量、N₂O 与 NH₃ 排放的研究[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 876–881
- [11] 刘洪亮, 梁永超, 刘涛, 褚贵新. 新型硝化抑制剂对膜下滴灌棉田抑制效果及棉花产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(11): 2200–2204
- [12] 吴雪娜, 彭智平, 涂玉婷, 杨林香, 林志军, 黄继川. 2-氯-6-三氯甲基吡啶对甜玉米产量和农艺性状的影响[J]. *广东农业科学*, 2016, 43(11): 86–91
- [13] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啶在农业和环境保护中的应用[J]. *土壤与环境*, 2001(4): 323–326
- [14] 熊舞, 夏永秋, 周伟, 颜晓元. 菜地氮肥用量与 N₂O 排放的关系及硝化抑制剂效果[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 743–751
- [15] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 254–262
- [16] 赵欧亚, 张春锋, 孙世友, 张国印, 侯利敏, 耿暖, 茹淑华, 王凌. 含硝化抑制剂型水溶肥对温室黄瓜产量和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(S1): 233–238
- [17] 吴得峰, 姜继韶, 高兵, 刘燕, 王蕊, 王志齐, 党廷辉, 郭胜利, 巨晓棠. 添加 DCD 对雨养区春玉米产量、氧化亚氮排放及硝态氮残留的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 30–39
- [18] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 王宇, 汤文光. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 95–104
- [19] 史奕, 徐星凯, 周礼恺, O. Van Cleemput. 抑制剂及其组合对尿素¹⁵N 在小麦土壤系统中的行为和归宿的影响[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 168–170
- [20] 戴良香, 张智猛, 张冠初, 张杨, 慈敦伟, 秦斐斐, 丁红. 氮肥用量对花生氮素吸收与分配的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(2): 370–375
- [21] Sun H J, Zhang H L, Wu J S, Jiang P K, Shi W M. Laboratory lysimeter analysis of NH₃ and N₂O emissions and leaching losses of nitrogen in a rice-wheat rotation system irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. *Soil Science*, 2013, 178(6): 316–323
- [22] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 冯彦房, 李卫正, 初磊. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氮挥发的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1027–1033
- [23] 魏颖娟, 夏冰, 赵杨, 邹应斌. ¹⁵N 示踪不同施氮量对超级稻产量形成及氮素吸收的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(4): 783–791
- [24] 韦剑锋, 宋书会, 梁振华, 韦冬萍, 韦巧云, 梁和. 供氮方式对冬马铃薯氮肥利用效率及氮素去向的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(1): 178–183
- [25] Freney J R, Chen D L, Mosier A R, Rochester I J, Constable G A, Chalk P M. Use of nitrification inhibitors to increase fertilizer nitrogen recovery and lint yield in irrigated cotton[J]. *Fertilizer Research*, 1993, 34(1): 37–44
- [26] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783
- [27] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 151–157
- [28] 黄强, 郑顺林, 郭函, 龚静, 熊湖, 袁继超, 胡建军. 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
- [29] 黄运湘, 吴名字, 张杨珠, 王翠红. 有机无机肥配施及硝化抑制剂对菜园生态系统硝酸盐污染的调控效应[J]. *湖南农业科学*, 2012(7): 51–54
- [30] 张文学, 孙刚, 何萍, 梁国庆, 王秀斌, 刘光荣, 周卫. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氮挥发的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1411–1419
- [31] Omonode R A, Vyn T J. Tillage and nitrogen source impacts on relationships between nitrous oxide emission and nitrogen recovery efficiency in corn[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(2): 421–429
- [32] Liu T, Liang Y C, Chu G X. Nitrapyrin addition mitigates nitrous oxide emissions and raises nitrogen use efficiency in plastic-film-mulched drip-fertigated cotton field[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e176305
- [33] 杨涵博, 赖睿特, 张克强, 沈丰菊, 李佳佳, 高文萱, 罗艳丽, 王凤. 硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1751–1758
- [34] 潘斐燕, 薛利红, 卢萍, 董元华, 马资厚, 杨林章. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5): 928–936

Effects of Nitrification Inhibitor on Nitrogen Fate of Labeled ^{15}N -Urea in Tomato Cultivation Under Greenhouse Condition

XU Jiyuan^{1,2} MIN Ju^{1,*} SHI Weiming¹

(¹State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: To determine the effects and synergistic mechanism of nitrification inhibitor 2-chloro-6-trichloromethylpyridine (CP) on greenhouse vegetable production, field experiments were carried out and the ^{15}N stable isotope tracer technique was used to study the effects of CP on nitrogen fate and synergistic mechanism in tomato cultivation under the treatments of recommended ($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and conventional ($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) nitrogen application rates. The results showed that the tomato yields were increased by 17.3% and 31.4%, the nitrogen recovery rates were increased by 8.6 and 9.2 percent; the ammonia volatilization emissions were increased by $2.47\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $3.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; other nitrogen losses were altogether reduced by $15.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $27.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ by in the treatments of the nitrogen rate of 180 and $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ with CP applications. The use of CP promoted the transfer of nitrogen from stem and leaf to fruit, reduced nitrogen losses and increased nitrogen utilization efficiency, which may be one of the mechanisms of its synergistic effect. The economic benefit brought by CP is significantly higher than its cost, which is worthy of application and promotion in vegetable production.

Keywords: isotopic tracer, 2-chloro-6-trichloromethylpyridine, vegetable, nitrogen loss