

UAN 添加氮肥抑制剂对生菜产量、品质及土壤氮平衡的影响

杨俊刚^{1, 2}, 李艳梅^{1, 2}, 孙焱鑫^{1, 2}, 廖上强^{1, 2}, 邹国元^{1, 2}, 顾红艳³

(1. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 新型肥料研究与应用创新团队, 北京 100097;

2. 北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 索尔维中国公司, 上海 201108)

摘要:设施蔬菜生产中过量施氮的现象十分普遍, 其高强度的水肥投入和不断扩大的种植面积, 对环境的影响和面源污染的贡献越来越大。施用新型肥料是当前实现减肥增效的一个重要技术途径。尿素硝酸铵溶液 (UAN) 是近年来我国开始施用的一种新型液体氮肥, 其在设施蔬菜中的高效应用与技术方法尚不明确。将 UAN 与脲酶抑制剂 (NBPT) 和硝化抑制剂 (DCD) 组成的双效抑制剂配施, 设置田间试验, 不同施氮组合分别为: 不施氮 CK、UAN、UAN+5 kg/t 双效抑制剂 (ND5)、UAN+8 kg/t 双效抑制剂 (ND8)、UAN+10 kg/t 双效抑制剂 (ND10)。采用滴灌施肥, 全生育期共施肥 2 次, 总氮量 144 kg/hm², 滴灌 4 次, 总灌水量 140 mm。结果表明, 在 UAN 中添加氮肥抑制剂对生菜产量、品质和环境均有显著影响, 生菜产量比 UAN 处理增加 10% ~ 21%, 其中 ND8 处理产量最高, 添加双效抑制剂的处理其叶片硝酸盐含量有降低趋势, 土壤剖面硝态氮残留量也出现下降, 有利于减少硝态氮的淋洗损失, 减轻环境负荷。施肥增加了氮素表观损失, 与 UAN 处理相比, 添加中高量抑制剂有降低表观损失的趋势。随抑制剂添加量增加, 经济收入先增加后降低, 施用高量抑制剂产投比下降, 经济效益变差。本试验中, 液体氮肥 UAN 添加中等用量 (8 kg/t) 的双效抑制剂为兼顾生菜产量、品质与环境经济效益的适宜用量。

关键词: 双效氮肥抑制剂; 土壤氮残留; 氮素表观损失; 经济效益

华北、黄淮是我国设施蔬菜生产的主产区, 约占我国设施蔬菜总面积的 60% 以上^[1], 随着这一区域内京津冀一体化发展进程加快, 蔬菜产业的发展也面临着一些突出问题: (1) 普通蔬菜季节性供过于求, 民众普遍对绿色、有机等优质蔬菜有了更多的需求; (2) 设施生产中劳动者高龄化问题十分突出, 用工成本较高, 迫切需要降低用工数量和劳动强度; (3) 华北地区水资源日益短缺, 过量水肥投入造成的资源环境问题仍然十分严重。发展资源节约、高效安全的蔬菜生产体系成为当前的必然趋势。采用新型肥料与滴灌配合的水肥一体化技术正逐步成为推动蔬菜产业提质增效的关键技术措施^[2-3]。

水肥一体化技术因其显著提升水氮利用效率和降低劳动强度, 在农业生产中的发展十分迅速。随

着水肥一体化进程的推进, 水溶肥料的应用也越来越普遍。然而, 当前的水溶肥料还是以固体肥为主, 溶解性好的价格高, 溶解性差的经常堵塞管路, 有的农户甚至用普通复合肥或尿素随水施用, 降低了水氮耦合的效果, 影响了滴灌施肥技术的推广和大面积应用。在欧美等发达国家, 液体肥的使用非常普遍, 有的使用率高达 40% 以上^[4-5]。液体肥分散快, 施用方便, 不易堵塞管路滴头, 是促进水肥一体化发展的一种理想产品。随着我国农业规模化经营和水肥一体化的快速发展, 以及液体肥生产企业产能产量的不断提升, 液体肥将发挥重要的作用。尿素硝酸铵溶液 (urea and ammonia nitrate, UAN, 也称氮溶液) 是目前最主要的一种液体氮肥, 也是世界各国使用最多的一种液体肥^[6], 其在北美地区小麦、玉米、番茄等作物上都表现出良好的应用效果^[7-9]。UAN 由溶解的尿素和硝酸铵水溶液组成, 氮含量在 28% ~ 32% 之间, 含有 3 种氮素形态 (酰胺态氮:硝态氮:铵态氮 = 2 : 1 : 1), 产品无需经过造粒与干燥工艺过程, 生产成本较尿素有所降低, 三废排放也较少, 是一种相对环保的肥料产品。但 UAN 在国内的应用还很少, 一些技术

收稿日期: 2019-03-15; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800405, 2016YFD0201010); 北京市叶类蔬菜创新团队, 北京市农委农业科技推动项目“京郊设施蔬菜轻简优质生产技术提升与示范”; 北京市农林科学院青年基金项目 (QNJ201611)。

作者简介: 杨俊刚 (1975-), 男, 内蒙古土左旗人, 副研究员, 硕士, 主要从事植物营养与新型肥料研发。E-mail: jungangyang@163.com。

环节和施用效果还有待进一步验证和完善^[10]。为此,本试验采用UAN加氮肥抑制剂的组合通过滴灌施肥验证其在设施生菜种植中的农学及环境效应,以期为高效施用UAN提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于北京市大兴区长子营镇北蒲州农业试验站的温室内(116° 34' 49'' N, 39° 39' 46'' E)进

行,供试土壤为壤质潮土,其主要理化性状见表1。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,雨热同季,多年平均降水量为585 mm,主要集中在6~8月,设施蔬菜种植制度多为一年二季,冬春茬和秋冬茬连作。该试验站主要种植生菜,一年4季周年供应,冬春2茬,秋冬2茬,试验前上茬作物为散叶生菜,本季试验为结球生菜,品种为“射手101”。常规日光温室,三面砖墙,顶覆聚乙烯薄膜,长70 m,宽8 m,东西走向。

表1 播前土壤理化性状

土层 (cm)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH 值 (1:2.5)	EC (1:10)
0 ~ 20	43.5	2.71	13.0	18.4	88.3	7.60	0.51
20 ~ 40	4.7	0.26					
40 ~ 60	14.3	0.01					
60 ~ 80	33.3	0.35					
80 ~ 100	20.3	0.01					

1.2 试验设计

采用小区试验,共设5个处理,分别为:1)不施氮(CK);2)施用尿素硝铵溶液(UAN):用量N 144 kg/hm²,滴灌施肥,分别在移栽后第33 d和第42 d追肥,每次用量为总氮量的50%;3)UAN添加双效氮肥抑制剂5 kg/t(ND5):抑制剂在追肥前加入,用量2.25 kg/hm²,分2次添加,每次50%,UAN用量及施肥方法同UAN处理;4)UAN添加双效抑制剂8 kg/t(ND8):抑制剂追肥前添加,用量3.60 kg/hm²,分2次添加,每次50%,UAN用量及施肥方法同UAN处理;5)UAN添加双效抑制剂10 kg/t(ND10),抑制剂追肥前添加,用量4.50 kg/hm²,分2次添加,每次50%,UAN用量及施肥方法同UAN处理。每个处理设3次重复,小区面积为16 m²,同一处理的3个小区相邻排列成一组,方便共用施肥罐进行滴灌施肥,5组随机排列。

试验用UAN由化肥公司提供(N 32%),含酰胺氮16%,NO₃-N 8.0%,NH₄⁺-N 8.0%。氮肥抑制剂由公司提供,为蓝色水溶性液体,含水0.5%,含固定比例的脲酶抑制剂正丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂氢醌(DCD)。各处理的磷钾肥和有机肥用量均一致,磷肥以P₂O₅计为90 kg/hm²,钾肥以K₂O计150 kg/hm²,有机肥以实物计7.5 t/hm²(N+P₂O₅+K₂O≥4%,其中N含量1.78%)。磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,与有机肥一起全部做基

肥,翻耕施入。

生菜于2017年4月8日移栽,6月10日收获。移栽前东西向起垄覆膜,畦面宽55 cm,沟宽25 cm,垄上双行交错定植,行距30 cm,株距35 cm,密度为10株/m²。全试验区安装滴灌系统,采用压差式施肥罐控制氮肥用量和种类,每个处理安装一个施肥罐,每个垄的膜下铺一根滴灌管,滴头流量1.5 L/h,滴头间距20 cm。生育期共灌水4次,2次与施肥同时进行,2次单独灌水,主管路安装水表记录灌溉量,每次灌溉量分别为50、35、30、25 mm,总量140 mm。其他农艺管理与病虫害防治同习惯。灌溉水硝态氮含量N 3.56 mg/L。

1.3 测定项目与方法

土壤矿质氮:生菜收获后,每个小区分层取土,取样深度为0~100 cm,分5层,每层20 cm,每个土样测定硝态氮、铵态氮。新鲜土样带回实验室后立即过5 mm筛,充分混匀后取20 g放入铝盒中,105℃下烘干测定土壤水分,另取12 g鲜土,加入100 mL 0.01 mol/L CaCl₂浸提液振荡60 min,过滤后采用流动分析仪(TRAACS 2000, Bran and Luebbe, 德国)测定土壤矿质氮(硝态氮和铵态氮)含量。

叶片SPAD值:于第一次追肥完成后和第二次追肥前,用SPAD 502测定植物生长点以下第二片完全展开叶的SPAD值,监测叶绿素含量。

产量测定：收获期一次性采收，每小区收 3 m²，称量总生物量（毛菜总重）、单棵重及净菜总重，净菜由毛菜统一去掉外侧一层叶片所得。净菜率用以下公式计算：

净菜率（%）= 净菜重 / 毛菜重 × 100

生菜品质：收获同时取样测定净菜中的硝酸盐、Vc、可溶性糖以及全氮含量。硝酸盐含量、Vc、可溶性糖分别采用紫外分光光度法、2, 6- 二氯酚酚滴定法、硫酸蒽酮法测定^[11]，全氮采用半微量凯氏定氮法测定^[12]。

1.4 数据计算与分析

氮素表观损失 = 氮素输入 - 氮素输出

氮素输入（N kg/hm²）= 0 ~ 40 cm 播前土壤矿质氮 + 化肥氮用量 + 灌溉水带入氮 + 有机肥氮

氮素输出（N kg/hm²）= 0 ~ 40 cm 收获后土壤矿质氮 + 作物吸收氮

叶类蔬菜根系分布较浅，大部分集中在 0 ~ 40 cm 土层，养分分布超出 40 cm 后很难再利用，因此本文表观平衡分析以 0 ~ 40 cm 土壤为基础进行计算。

产投比 = 总收入 / 总投入

采用 SAS 9.1 中 ANOVA 程序对数据进行单因素方差分析，LSD 检验，5% 显著水平。

2 结果与分析

2.1 生菜产量与品质

添加氮肥抑制剂显著增加了生菜产量（表 2），与未添加抑制剂的 UAN 处理相比，添加双效抑制剂的处理（ND5，ND8，ND10）增产幅度较大，达到 18% ~ 21%。净菜产量也有相同趋势，添加抑制剂的处理与 UAN 处理相比，均达到显著增产水平，说明添加抑制剂对生菜产量的增产作用比较明显。随抑制剂数量增加，产量呈现先增加后降低的规律，当抑制剂用量达到 10 kg/t 时，产量出现下降，ND8 处理净菜产量显著高于 ND10 处理，增幅为 10%。单棵重是形成产量的重要基础，从表 2 可见，UAN 处理的单棵重显著低于其他处理，添加抑制剂处理之间无显著差异。净菜率以 ND8 处理最高，显著高于 UAN 和 ND10 处理，净菜率是提升经济收益的关键指标，ND8 处理净菜率达到 82%，比 UAN 处理提升 7 个百分点，有利于提高收入。

表 2 生菜产量、单棵重与净菜率

处理	毛菜重 (t/hm ²)	单棵重 (kg)	净菜 (t/hm ²)	净菜率 (%)
CK	59.9 ab	0.69 b	43.8 c	73.2 c
UAN	54.9 b	0.64 c	41.3 c	75.3 bc
ND5	65.0 a	0.75 a	52.8 ab	81.1 ab
ND8	66.2 a	0.77 a	54.3 a	82.0 a
ND10	64.9 a	0.76 a	49.1 b	75.6 bc

注：同列数据后不同小写字母表示差异达到 P<0.05 显著水平，下同。

不同处理间生菜品质指标差异显著（表 3）。与 CK 相比，UAN 处理和 ND5 处理的硝酸盐含量表现为增加，其中 ND5 处理达到显著水平，而 ND8 和 ND10 处理与 CK 相比，没有显著差异。说明随着双效抑制剂添加量的增加，生菜硝酸盐含量出现下降，而添加 0.5% 的抑制剂（ND5 处理）几乎没有降低硝酸盐含量的作用。施氮和添加抑制剂均可以增加叶片 Vc 含量，其中 ND10 处理的 Vc 含量显著高于 CK，说明添加抑制剂到一定水平可以显著升高 Vc 含量。施氮和添加抑制剂对生菜可溶性糖含量的影响不明显，但随着抑制剂用量的增加，ND10 处理的可溶性糖含量显著高于 ND5 处理。造成 ND5 处理可溶性糖含量较低的原因是否与其较高的硝酸盐含量有关，有待研究。施氮和添加抑制剂均能增加生菜全氮含量，其中 ND8 处理显著高于 CK。综合各项指标来看，ND10 处理对生菜品质的改善比较明显，其次是 ND8 处理，而 UAN 处理和 ND5 处理对品质的改善很少。一般而言，叶用蔬菜中硝酸盐含量是评价产品安全性最重要的指标，对于农产品品质起着决定性作用，因此降低硝酸盐含量是施肥措施首先要考虑的，基于这一点来看，在 UAN 中添加合适比例的双效抑制剂是一种非常有效而且安全的措施，其中以 ND8 和 ND10 处理的综合品质较好，不仅硝酸盐含量最低，而且其他品质也得以改善。

表 3 生菜品质与全氮含量

处理	硝酸盐 (mg/kg)	Vc (mg/100 g)	可溶性糖 (%)	全氮含量 (%)
CK	2 934 b	14.0 b	3.12 ab	3.24 b
UAN	3 358 a	16.6 ab	3.33 a	3.43 ab
ND5	4 216 a	16.6 ab	2.84 b	3.53 ab
ND8	2 984 b	16.6 ab	3.14 ab	3.64 a
ND10	2 569 b	21.9 a	3.33 a	3.56 ab

2.2 生菜叶片叶绿素含量

叶片叶绿素含量可以表征作物生长状况和氮素供应情况。从第一次追肥后第 9 d 的叶片 SPAD 值 (图 1) 可以看出, 不同处理之间存在显著差异, 施氮增加了叶片叶绿素含量, 添加双效抑制剂有增加叶绿素含量的作用, 但不同处理效果不同。与 UAN 处理相比, ND5 处理的 SPAD 值显著增加, 而 ND8、ND10 处理相比 UAN 则未达到显著水平, 说明抑制剂不同添加数量对氮素及叶绿素含量产生了影响, 较低浓度的添加量 (5 kg/t) 对氮供应和叶片 SPAD 影响最大, 继续增加抑制剂浓度, 叶片 SPAD 值不再增加。可以看出, 不同抑制剂添加量改变了氮素的供应强度, 对叶绿素含量产生影响, 但这种影响与增产和品质改善不是完全呈正相关关系。

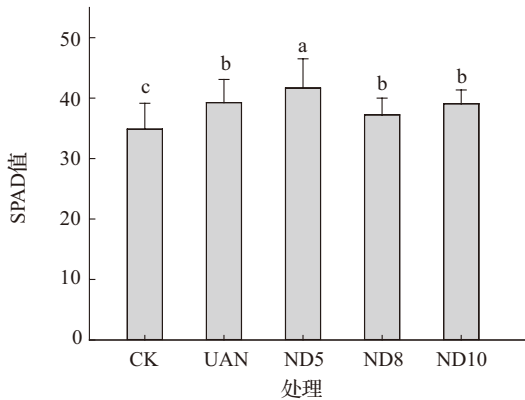


图 1 生菜第一次追肥后叶片 SPAD 值

注: 图柱上不同小写字母表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。下同。

2.3 收获后土壤剖面矿质氮变化

生菜收获后 0 ~ 100 cm 土壤不同土层中硝态氮和铵态氮的分布见图 2。剖面残留氮素以硝态氮为主, 铵态氮的比例较小, 占比不到 5%。不同土层之间, 表层 (0 ~ 20 cm) 硝态氮和铵态氮分布较多, 尤其是表层铵态氮含量是下层的 2 倍甚至 3 倍以上。不同处理间的硝态氮不仅在表层存在较大的差异, 而且在下层也出现较大的变化, UAN 处理在 20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm 3 个土层中硝态氮含量均较高, 其中在 60 ~ 80 cm 土层显著高于其他处理, 存在着较大的淋洗损失风险 (图 2a)。同时 UAN 处理表层铵态氮含量显著高于 ND5 处理, 进一步说明添加抑制剂可以改变氮素的供应形态, 导致氮素残留形态发生变化 (图 2b)。下层铵态氮含量较少, 处理间的差异也在变小, 其中 20 ~ 40 和 60 ~ 80 cm 土层内处理间未见显著差异。CK、UAN、ND5、ND8、ND10 各处理 0 ~ 100 cm 土壤硝态氮残留总量分别为 261、631、429、511、519 kg/hm², 添加抑制剂的处理硝态氮降幅为 18% ~ 31%, 减小了硝态氮淋洗损失的风险。

2.4 生育期氮素表观平衡

生菜属于浅根系作物, 大部分根系集中在土壤 30 cm 之内, 氮素分布超出 40 cm 之下, 很难被作物吸收。因此本试验计算了 0 ~ 40 cm 土层的氮素输入输出平衡, 两者差值一般视为氮素表观损失 (表 4)。输入项中, 除 CK 外, 其他处理的氮素总输入均为 380 kg/hm², 其中灌溉水带入氮 4.98 kg/hm²,

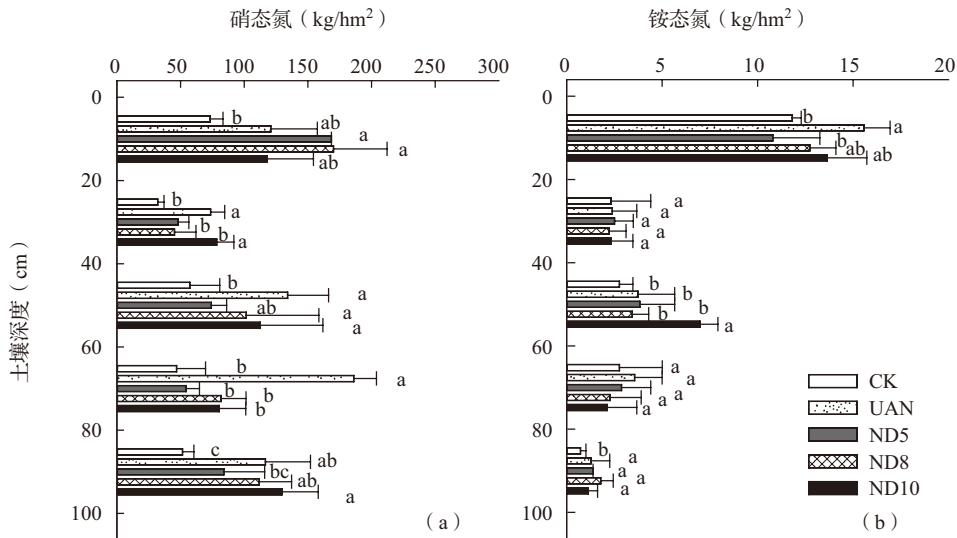


图 2 收获后不同土层硝态氮和铵态氮的含量

由于优化的滴灌量和水中较低的确态氮含量，灌水带入氮量占比较小。不同处理间氮素输出存在显著差异，施氮处理的吸氮量与 CK 相比有增加趋势，其中 ND8 处理达到显著水平。施氮处理 0 ~ 40 cm 土壤矿质氮累积量均显著高于 CK，各施氮处理间未出现显著差异。不同处理的表现损失介于 55.3 ~ 112

kg/hm² 之间，除 ND8 之外，其他施氮处理的氮损失均显著高于 CK，施氮处理中，ND5 的表现损失显著高于 ND8 处理，但未与 UAN 处理形成差异。综合来看，ND8 处理促进了氮素的吸收，维持了较低氮素损失风险。

表 4 生菜生育期氮素表观平衡 (N kg/hm²)

项目	CK	UAN	ND5	ND8	ND10
氮输入					
播前 0 ~ 40 cm 土壤矿质氮	137	137	137	137	137
化肥氮用量	0	144	144	144	144
灌溉水带入氮	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98
有机肥氮用量	93.5	93.5	93.5	93.5	93.5
氮输出					
作物吸收氮	60.8 b	61.9 ab	63.7 ab	72.3 a	71.1 ab
收获后 0 ~ 40 cm 土壤矿质氮	120 b	212 a	204 a	230 a	212 a
表观损失 = 氮输入 - 氮输出	55.3 c	105 ab	112 a	76.9 bc	96.2 ab

2.5 经济效益分析

以氮肥和抑制剂为基础，计算了 4 个施肥处理的投入产出情况（表 5）。投入项上，添加氮肥抑制剂成本增加 124 ~ 248 元/hm²，与不添加抑制剂相比，成本增幅为 10.2% ~ 20.4%。收入上，施用氮肥抑制剂与 UAN 的组合实现增收 0.93 万 ~ 1.37

万元/hm²，增幅达到 18.8% ~ 31.5%，实现了产投比的提升。随着抑制剂添加量的增加，成本增加较多，ND10 处理的产投比出现下降，说明较大的添加量在经济上不再合算。而 ND5 和 ND8 处理的产投比均高于 UAN 处理，增幅为 13.0% ~ 15.8%，表现出较好的经济效益。

表 5 投入产出分析

处理	UAN 成本 (元/hm ²)	增效剂成本 (元/hm ²)	总投入 (元/hm ²)	成本增加 (%)	总收入 (万元/hm ²)	增收额 (万元/hm ²)	增收比 (%)	产投比	产投比 (%)
UAN	1 215	0	1 215	—	4.96	—	—	40.8	—
ND5	1 215	124	1 339	10.2	6.33	1.37	27.6	47.3	15.8
ND8	1 215	198	1 413	16.3	6.52	1.56	31.5	46.1	13.0
ND10	1 215	248	1 463	20.4	5.89	0.93	18.8	40.3	-1.3

注：UAN，2 700 元/t；增效剂，55 元/kg；生菜市场价，1.2 元/kg。

3 讨论与结论

3.1 UAN 添加氮肥增效剂对产量、品质和土壤环境的综合影响

UAN 具有多种氮肥形态，与尿素相比，玉米施用 UAN 可促进增产并提高氮肥利用率^[10]，但氮肥的活性普遍较强，易发生各种损失，研究表明配施抑制剂可进一步提高氮素吸收，降低氮肥损失及其对大气的污染^[13]。本试验表明在 UAN 中添加

双效氮肥抑制剂可以促进增产和品质改善，同时减少了土壤剖面确态氮的残留，有利于协调生菜产量、品质和环境保护的关系。添加不同用量的抑制剂，与 ND8 处理相比，ND5 处理的叶片硝酸盐含量显著增加，ND10 处理净菜产量和净菜率显著降低，综合来看，以 ND8 处理的表现最好。究其原因，添加氮肥抑制剂延缓了氮素形态的转换速度和强度，降低了氮肥的供应强度，与作物的吸收更加匹配，提高了作物的吸收效率。本试验中的氮肥

抑制剂为硝化抑制剂 DCD 与脲酶抑制剂 NBPT 的复合制剂,理论上对氮肥形态的延缓具有双重作用。研究表明,硝化抑制剂与氮肥配合施用可以抑制硝化细菌的活性,使施入土壤中的 N 较长时间以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形态存在,促进对氮素的吸收^[14]。尿素配施 NBPT 可以增加土壤有效氮的积累量,提高作物氮素回收率^[15],进而提高作物的产量^[16]。UAN 液体肥含有硝态氮、铵态氮和酰胺态氮 3 种形态,与抑制剂相伴进入土壤中,硝态氮可以直接被根系吸收,而铵态氮和酰胺态氮则会延缓硝化和水解,在时间维度上的氮素供应更加平缓,同时由于铵态氮存在的时间延长,改变了土壤中的铵硝比例,对根系生长和养分吸收具有促进作用。前人研究表明,铵硝配施供应较硝态氮单独供应增加了娃娃菜根系的伤流强度,表明根系活力增强^[17],通过分根试验也得出,铵硝混合氮源生长的植物根系要优于单一供给铵态氮或硝态氮^[18-19]。添加氮肥抑制剂使得 UAN 氮肥中不同形态氮素在时间维度上更加合理的供应,与常规尿素前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度过高,随后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 大量形成相比,氮素供应更加平稳,比例更加合理,是实现作物增产和提高利用效率的可能原因。但目前关于抑制剂的研究主要集中在大田作物上,尤其是玉米和水稻^[15, 20-21],有的也没有出现增产,大田和设施在生产环境上存在较大的差异,其增产的效果仍需更多的试验支持。本试验中单独施用 UAN 的处理和 CK 之间的产量差异并不显著。虽然 CK 处理没有追施化肥,但底肥施用了有机肥,播前矿质氮含量也较高,保证了氮素的供应,甚至略有盈余(表 4)。设施土壤养分含量较高,往往当季不施肥不会造成减产,但连续多季不施肥则产量下降^[22]。因此合理施肥并提高利用效率是必要的,在本试验中添加了氮肥抑制剂使氮肥效率提高,均表现出增产。

3.2 氮肥增效剂添加比例与环境、经济效益的协同

氮肥与抑制剂配合施用可以增加粮食产量和降低净温室气体排放^[23]。Qiao 等^[24]对全球不同地区施用硝化抑制剂的试验进行了分析,发现施用硝化抑制剂可以使 N_2O 和 NO 的排放降低 44% 和 24%,减少硝酸盐淋溶损失 48%,增加氨挥发 20%,总计可减少净氮排放 16.5%,同时能够增产增收。Guardia 等^[25]在滴灌施肥中添加氮肥抑制剂显著降低了 N_2O 和 NO 的排放,并维持玉米的产

量不降低。目前来看氮肥抑制剂的增产或稳产的效果以及降低氮素损失的效果均得到证明,但氮肥抑制剂属于化工成品,生产成本均较高,其高效低成本的应用仍需进一步加强。田间条件下,DCD 的添加比例为氮素的 10% 时,可以达到协调产量与减少氮素损失的目的^[21, 26]。脲酶抑制剂用量相对 DCD 较小,NBPT 或 NBPT 与 DMPP 组合的用量为尿素的 0.5%^[14, 20]。盆栽条件下添加氮素 3% 的 DCD 是一个适宜数量^[27]。本试验中 ND5、ND8 和 ND10 处理中抑制剂添加量分别为氮素的 1.6%、2.5% 和 3.1%,其中大于 3% 产投比不再增加,在经济效益上不再提高,同时土壤剖面硝态氮含量上升,0 ~ 40 cm 土层氮素表观损失有增加趋势。而当添加量为 1.6% 时,虽然经济效益最高,但表观损失没有降低,且叶片硝酸盐含量显著增加,因此本试验中以添加 2.5% 的 ND8 处理为协调产量、品质和环境经济效益的较好组合。本试验中以较少的抑制剂添加量和较低的成本实现增产和环境效益协同,除了双效抑制剂和合理搭配外,施用液体形态的氮肥与液体型抑制剂也非常重要,液体状态下有利于充分发挥二者的相溶性和快速分散性。以往的试验多以尿素为基础添加固体态的抑制剂,固体与固体间的混匀往往比较难,尤其是比例悬殊的混配,两种物质难以全面接触,抑制剂的作用无法充分发挥,如果提高抑制剂添加比例则成本增加。现代新型抑制剂的添加量往往很少,而液体氮肥与液体抑制剂间的混匀则非常容易,一旦混合均匀,抑制剂与氮肥的组合更容易发挥作用,也更利于提高效率,降低成本。

添加抑制剂延缓了 UAN 氮素形态的改变,尤其是脲酶抑制剂增加了铵态氮在土壤中的存留时间,在北方石灰性土壤中有可能增加氨挥发损失的几率。关于施用抑制剂与氨挥发损失还没有定论,已有研究表明大田作物上使用固体氮肥和抑制剂的组合会增加氨挥发的数量^[24],而随着抑制剂添加量的增加,氨挥发损失有继续增加的可能^[28]。但也有研究表明施用抑制剂可降低氨挥发的损失^[15]。本试验采用了液体肥与抑制剂滴灌施用的方式,氮肥与抑制剂均匀分散性和设施环境中经常湿润的土壤状态有利于减少氨气的排放,与大田相比有减少氨挥发的可能性^[26],但目前设施生产中的数据较少,仍需进一步研究。同时,本试验对象为生菜,叶类蔬菜叶片硝酸盐容易累积,因此硝酸盐含

量是评价其品质的重要指标,但茄果类蔬菜的硝酸盐含量没有叶菜累积明显,添加低量抑制剂对果菜品质的影响如何值得进一步探讨。

综上,液体氮肥UAN中添加中等用量(8 kg/t)的双效抑制剂,不仅可以增加生菜的产量,而且可以减少叶片中硝酸盐含量,改善品质,还可以减少土壤剖面中硝态氮含量,降低氮素淋洗的风险。较低的添加量(5 kg/t)对叶片硝酸盐含量没有显著改善,但增产增收效益较好,较高的添加量(10 kg/t)经济效益较低。因此建议以添加中量的双效抑制剂为兼顾产量与环境经济效益的适宜用量。

参考文献:

- [1] 喻景权,周杰. “十二五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2016, (1): 18-30.
- [2] 袁洪波,程曼,庞树杰,等. 日光温室水肥一体灌溉循环系统构建及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (12): 72 - 78.
- [3] 高祥照,杜森,钟永红,等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015, (2): 14-19, 63.
- [4] 赵云莉. 水肥一体化技术与液体肥料[J]. 氮肥技术, 2013, 34 (5): 46-48.
- [5] 李玉顺,高继光,刘伟,等. 浅析液体肥发展现状与存在问题[J]. 氮肥技术, 2016, 37 (3): 48-50.
- [6] 宋磊. 尿素硝铵溶液产品生产技术开发及市场推广[J]. 化工管理, 2017, (1): 160.
- [7] Cahili S, Osmond D, Crozier C, et al. Winter wheat and maize response to urea ammonium nitrate and a new urea formaldehyde polymer fertilizer [J]. Agronomy Journal, 2007, 99 (6): 1645-1653.
- [8] Kennedy T L, Suddick E C, Six J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 170: 16-27.
- [9] Abalos D, Jeffery S, Drury C F, et al. Improving fertilizer management in the U. S. and Canada for N₂O mitigation: Understanding potential positive and negative side-effects on corn yields [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 221: 214-221.
- [10] 王寅,徐卓,李博凝,等. 尿素硝铵溶液对黑土区春玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51 (4): 718-727.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [12] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 338-343.
- [13] Tian D, Zhang Y Y, Zhou Y Z, et al. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2017, 201, 598: 87-96.
- [14] 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.
- [15] 张文学,孙刚,何萍,等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报. 2013, 19 (6): 1411-1419.
- [16] 鲁艳红,聂军,廖育林,等. 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.
- [17] 苏金昌,何志强,李杰,等. 铵态氮和硝态氮肥施对娃娃菜养分吸收利用及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (4): 45-53.
- [18] Marcus S, Boy F, Peter S. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplies with ammonium and nitrate in a split-root system [J]. Annals of Botany, 1993, 72: 107-115.
- [19] Liu M, Qiao N, Zhang Q, et al. Cropping regimes affect NO₃⁻ versus NH₄⁺ uptake by Zea mays and Glycine max [J]. Plant and Soil, 2018, 426, (1-2): 241-251.
- [20] 张文学,杨成春,王少先,等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31 (4): 417-424.
- [21] 吴得峰,姜继韶,高兵,等. 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.
- [22] Ren T, Christie P, Wang J G, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment [J]. Sci Horti, 2010, 125: 25-33.
- [23] 赵自超,韩笑,石岳峰,等. 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.
- [24] Qiao C L, Liu L L, Hu S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input [J]. Global Change Biology, 2015, 21 (3): 1249-1257.
- [25] Guardia G, Cangani M T, Andreu G, et al. Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize [J]. Field Crops Research, 2017, 204: 135-145.
- [26] Guo Y J, Li B W, Di H J, et al. Effects of dicyandiamide (DCD) on nitrate leaching, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide in a greenhouse vegetable production system in northern China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58: 647-658.
- [27] 串丽敏,赵同科,安志装,等. 添加硝化抑制剂双氰胺对油菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (5): 870-874.
- [28] 张惠,王志国,张晴雯,等. 抑制剂NBPT/DCD不同组合对灌区碱性灌淤土中氨挥发及有效氮积累量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (3): 606-612.

Effects of urea ammonium nitrate (UAN) with N inhibitor on lettuce yield, quality and soil N balance

YANG Jun-gang^{1, 2}, LI Yan-mei^{1, 2}, SUN Yan-xin^{1, 2}, LIAO Shang-qiang^{1, 2}, ZOU Guo-yuan^{1, 2}, GU Hong-yan³ (1. Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forest Science, New fertilizer Research and Application Innovation Team, Beijing 100097; 2. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-release Fertilizer, Beijing 100097; 3. Solvay, China, Shanghai 201108)

Abstract: Excessive nitrogen (N) application is still very common in the greenhouse vegetable cultivation, where high-intensity inputs of water and fertilizers, and increasing planting area result in more and more serious environmental impacts and non-point source pollution. Increasing fertilizer efficiency and reducing the application rate has become a national mission. Urea ammonium nitrate (UAN) is a new type of liquid N fertilizer which is applied in China recently with the increase of fertigation facilities in greenhouses, but how to using UAN efficiently in greenhouse systems is not clear. Here we conducted a field experiment with UAN and a mixed-type N inhibitor composed of urease inhibitor (NBPT) and nitrification inhibitor (DCD) applied on lettuce, and five treatments were CK (no N applied), UAN, UAN plus the mixed inhibitor at 5 kg per ton of UAN (ND5), UAN plus the mixed inhibitor at 8 kg per ton of UAN (ND8), UAN plus the mixed inhibitor at 10 kg per ton of UAN (ND10). Drip irrigation and fertigation were used, two times of fertigation with total N of 144 kg/hm², four times of irrigation with total irrigation water of 140 mm for the whole growing stage. The results showed that adding the mixed-inhibitor to UAN had significant effects on the yield, quality of lettuce, and environment. The yields of ND5, ND8 and ND10 were 10% ~ 21% higher versus UAN treatment, and the highest was from the ND8 treatment; the leaf nitrate concentration and soil residual nitrate were also reduced with the mixed-inhibitor, which resulting in less nitrate leaching and lower environmental load. Applying N fertilizer increased apparent N losses, however, there was a decline trend on the apparent N losses in the ND8 and ND10 treatments compared with the UAN treatment. With the increment of the mixed-inhibitor, economic outputs rose firstly then fell, and the output-input ratio became lower at the higher rate of the mixed-inhibitor. Based on this study, the mixed-inhibitor at 8 kg/t UAN is the optimal dosage for improving lettuce yield, quality while reducing environmental impacts.

Key words: mixed N inhibitor; soil residual nitrate; apparent N losses; economic outputs