中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究

肖强，李鸿雁，衣文平，邹国元，李丽霞，孙世友

引用本文:
肖强, 李鸿雁, 衣文平, 等. 改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1200–1209.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190811

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮肥配施生化抑制剂对黄泥田土壤钾素淋溶特征的影响

Effects of combined nitrogen fertilization with biochemical inhibitors on leaching characteristics of soil potassium in yellow clay soils

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 737–745 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170766

新型缓释尿素肥效与功能材料添加量的关系

Effects of adding proportions of functional absorption materials on performance of new slow–release urea

中国生态农业学报. 2017, 25(5): 740–748 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161006

外加氮源在 Cd 超标菜地上的应用效果

Effects of nitrogen addition on above–standard Cd–contaminated soils in vegetable fields

中国生态农业学报. 2016(2): 218–225 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151111

RZWQM模拟小麦–玉米轮作系统氮素运移及损失特征

RZWQM simulation of nitrogen transport and loss under winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(2): 150–158 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140934

施氮模式对玉–麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响

Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (Zea mays)–winter wheat (Triticum aestivum)rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1682–1694 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190223

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 8 月 第 28 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2020, 28(8): 1200−1209

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190811

肖强, 李鸿雁, 衣文平, 邹国元, 李丽霞, 孙世友. 改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1200−1209

XIAO Q, LI H Y, YI W P, ZOU G Y, LI L X, SUN S Y. Effects of modified urea ammonium nitrate solution topdressing on ammonia volatilization and leaching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1200−1209

改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究*

肖 强[1], 李鸿雁[1], 衣文平[1], 邹国元[1], 李丽霞[1**], 孙世友[2**]

(1. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所/北京市缓控释肥料工程技术研究中心 北京 100097;
2. 河北省农林科学院农业资源环境研究所 石家庄 050051)

摘 要: 为了提高肥料的利用率, 以尿素硝酸铵溶液为原料、聚氨酸为保护剂, 复合抑制剂 NBPT(N-丁基硫代磷酰三胺)和 DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)为材料, 开发出改性尿素硝酸铵溶液(YUL1 和 YUL2), 研究其对华北平原夏玉米追肥过程中的氨挥发和淋溶损失的调控效果。田间试验设置 6 个处理: 不施氮肥(CK)、农民习惯追施尿素(CN)、优化追施尿素(CNU)、优化追施尿素硝酸铵溶液(UAN)、优化追施改性尿素硝酸铵溶液(YUL1)和优化追施改性尿素硝酸铵溶液(YUL2)。采用扫描电镜和能谱仪分析相关指标变化, 在夏玉米喇叭口期追施氮肥后 15 d 内进行田间原位连续动态观测氨挥发和土壤铵态氮和硝态氮变化, 并在玉米成熟期测定产量, 计算经济效益。结果表明, 改性尿素硝酸铵溶液清澈无杂质, 流延后成膜表面光滑、致密, 抑制剂在膜表面分布均匀; 能谱测试膜层表面磷硫含量增高, 证明复合抑制剂与尿素硝酸铵溶液达到有效融合。在同等优化施氮量下: 与 CNU 相比, YUL1 氨挥发总量显著降低 19.3%, YUL2 增加 9.6%; 与 UAN 相比, YUL1、YUL2 分别显著降低 57.3%和 42.0%。与其他施氮处理相比, YUL1 和 YUL2 夏玉米季生长中后期 0~20 cm 土层依然保持相对较高的氮素含量水平, 夏玉米收获后土壤硝态氮含量分别比 CNU 高 46.0%和 43.4%, 比 UAN 高 45.6%和 44.7%; 180~200 cm 土层硝态氮含量显著低于其他处理。在保证产量和净收益的同时, 改性尿素硝酸铵肥料显著降低了氮素的氨挥发和淋溶损失浓度, 尿酶抑制剂含量相对较高的 YUL1 抑制氨挥发的效果更好, 硝化抑制剂含量相对高的 YUL2 硝态氮向下淋失的风险更小。

关键词: 复合抑制剂; 尿素硝酸铵溶液; 追施; 氨挥发; 淋溶

中图分类号: S145.6 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of modified urea ammonium nitrate solution topdressing on ammonia volatilization and leaching*

XIAO Qiang[1], LI Hongyan[1], YI Wenping[1], ZOU Guoyuan[1], LI Lixia[1**], SUN Shiyou[2**]

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-release Fertilizer, Beijing 100097, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

* 国家重点研发计划课题(2017YFD0800604)、北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20200418)、河北省重点研发计划项目(20323601D)、河北省农林科学院创新工程项目(2019-1-03)和国家玉米产业技术体系项目(CARS-02)资助

** 通信作者: 李丽霞, 主要从事施肥与环境研究, E-mail: ashleyllx@163.com; 孙世友, 主要从事施肥与环境研究, E-mail: sunshiyou@126.com
肖强, 主要从事新型肥料研究。E-mail: xqiang1978@163.com

收稿日期: 2019-11-18 接受日期: 2020-01-08

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0800604), the Science and Technology Innovation Capacity Building Project of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences (KJCX20200418), the Key Research and Development Project of Hebei Province (20323601D), the Innovation Project of Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences (2019-1-03) and China Agriculture Research System (CARS-02).

** Corresponding authors: LI Lixia, E-mail: ashleyllx@163.com; SUN Shiyou, E-mail: sunshiyou@126.com

Received Nov. 18, 2019; accepted Jan. 8, 2020

Abstract: In this study, with urea ammonium nitrate solution as raw material, NBPT (n-butyl thiophosphoric triamide) and DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) were used as inhibitors, and polyurethane as a protective agent to develop two modified urea ammonium nitrate solutions (YUL1 and YUL2). And their effects on ammonia volatilization and leaching loss in summer maize in the North China Plain were studied. In the field experiment, six treatments were set up: 1) no urea application (CK), 2) farmers' traditional urea application (CN), 3) optimized urea application (CNU), 4) application of optimized urea ammonium nitrate solution (UAN), 5) and 6) optimized modified urea ammonium nitrate solution 1 (YUL1) and 2 (YUL2) application. The effects of nitrogen regulation characteristics were systematically evaluated. The properties of the products were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and energy disperse spectroscopy (EDS). The in-situ continuous dynamic observation of ammonia volatilization and nitrogen transformation was carried out within 15 days after nitrogen application (which occurred at bell mouth stage of summer maize); the yield and economic benefits were measured and calculated at the maturity stage of maize. The results showed that the modified urea ammonium nitrate solution was clear and free of impurities, the film surface was smooth and dense after casting, and the inhibitors were evenly distributed on the film surface. The content of phosphorus and sulfur on the film surface was increased by energy spectrum test, which proved that the composite inhibitors and urea ammonium nitrate solution achieved effective fusion. Under the same optimized nitrogen application rate, compared with CNU, the total amount of ammonia volatilization of YUL1 decreased significantly by 19.3% and YUL2 increased by 9.6%. Compared with UAN, YUL1 and YUL2 decreased the total amount of ammonia volatilization significantly by 57.3% and 42.0%, respectively. Compared with other nitrogen application treatments, the soil layer of 0–20 cm in the middle and late period of summer maize growth of YUL1 and YUL2 treatments still maintained relatively higher nitrogen contents. After harvest, the soil nitrate nitrogen contents of YUL1 and YUL2 were 46.0% and 43.4%, respectively, higher than that of CNU, and 45.6% and 44.7% higher than that of UAN in the 0–20 cm soil layer; in the soil layer of 180–200 cm, they were significantly lower than those of other treatments. With regard to ensuring the yield and net income of summer maize, the modified urea ammonium nitrate solution significantly reduced ammonia volatilization and leaching loss of nitrogen.

Keywords: Compound inhibitors; Urea ammonium nitrate solution; Topdressing; Ammonia volatilization; Leaching

小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)是我国主要的粮食作物，年产量3.36亿t，占粮食总产量的55.3%。黄淮海地区是我国冬小麦和夏玉米的主产区，播种面积分别占全国小麦玉米产区的62.6%和57.8%[1-2]。然而，目前该区冬小麦-夏玉米轮作体系中氮肥过量施用相当严重。在山东地区，夏玉米的传统施氮量为259 kg·hm^{-2}，高于推荐施氮量的57%[3]；河南超高产夏玉米施氮量多在450~600 kg·hm^{-2}，也远高于最佳施氮量225 kg·hm^{-2}[4]。过量施肥不仅不会达到作物高产的目的，还会降低氮肥的利用率[5-6]。该区目前氮肥损失量已高达20%~55%，玉米氮肥利用率仅为26.1%，远低于国际水平[7-8]。再加上我国传统氮肥(如尿素)具有速溶、速散特性，且玉米生长期正值高温多雨季节，降水量大且较集中，极易造成氮素淋失，尤其是追肥撒施能引发严重的农业面源污染等环境问题[9-11]。因此，提高肥料利用率、降低肥料施用量、开发高效环保类的新型肥料已成为现代农业科学发展的重大课题。在黄淮海地区冬小麦-夏玉米轮作体系中，尤其在一些微喷灌设施较好的大型园区里，目前已采用尿素硝酸铵溶液(UAN)进行追肥。有学者认为UAN具有产品中性、腐蚀性低、复配性好等优点，可通过管道运输及液体储存罐保存，不仅能降低造粒、包装、运输等环节的能耗和氮素损失，而且较固体颗粒肥料更易施入耕层，从而降低氮素损失，提高其利用效率[12]，具有良好的应用前景。徐传银等[13]在水稻(*Oryza sativa*)上研究显示，用UAN喷施代替相应追施分蘖肥、促花肥和保花肥，较配方施肥有所增产，有效穗数、穗粒数、结实率和千粒重均有不同程度提高。孙克刚等[14]采用同等用量UAN处理比优化施肥技术普通尿素处理冬小麦增产5.0%，比常规施氮肥(尿素)每公顷肥料减少45 kg，增产8.3%，说明施用UAN可以减量施肥且稳定冬小麦产量。侯峰[15]研究UAN对玉米各器官氮吸收和利用的影响，茎、叶、苞叶、轴、籽粒氮吸收量均不同程度提高。姚海燕等[16]在玉米上施用UAN比施用尿素可以提高玉米的氮肥吸收量、株高、百粒重和穗粒数，且籽粒和秸秆产量均明显提高，增产效果明显。

UAN的优点是比普通尿素更能提高农作物的产量和品质，但实际上UAN由于是液体氮肥，主要成分是尿素和硝酸铵，其特点决定了随水喷施后产生的氨挥发和淋溶损失很严重。然而，国内外对其环境效应方面的研究尚少见，还未形成一定的重视，对其施用后的养分动态变化也不清楚。因此，本文

通过多年试验，对UAN肥料进行了改性研究，首先筛选出目前只有市场化的脲酶抑制剂和硝化抑制剂，进行有机组配，实现其优势互补，增加抑制剂稳定性；同时，筛选出有机酸类的保护剂，通过液肥生产工艺与两种抑制剂有机结合，最终开发出综合性能较好的液体追肥用尿素硝酸铵肥料，并进行了试验验证，以期为同类研究提供新的思路，为我国小麦、玉米的安全高效生产提供技术借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试材料

肥料原料为尿素硝酸铵溶液(UAN，含30%纯氮，河北冀衡赛瑞化工有限公司生产)。生化抑制剂：脲酶抑制剂为N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、硝化抑制剂为3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)，两种抑制剂的含量均为97%(北京百灵威科技有限公司生产)。

1.2 改性尿素硝酸铵溶液肥料制备与检测

1.2.1 制备工艺和保护剂(聚氨酸类)

按照肖强等[17]的方法，称取一定量的组合生化抑制剂(YUL1：NBPT和DMPP分别占UAN重量的0.12%和0.03%; YUL2: NBPT和DMPP分别占UAN重量的0.06%和0.06%)，YUL1和YUL2各自按照比例组合后，慢慢加入到保护剂(聚氨酸类，占UAN重量的0.18%)中，不断搅拌30 min，同时保持材料温度30~40 ℃，静止后常温下分别将上述溶液加入到定量的UAN里，继续不断搅拌，保持转数为240 转·min^{-1}，之后将上述溶液静置，分别得到无杂质澄清溶液YUL1和YUL2，即为改性尿素硝酸铵溶液肥料YUL1和YUL2。

1.2.2 包膜肥料的外观与剖面结构及能谱分析方法

将改性尿素硝酸铵溶液肥料采用流延法成膜，利用S-450型扫描电镜(SEM)观察包膜肥料表面和断面膜结构、成膜特点等形态信息。采用X射线能谱分析仪(EDS)分析肥料及材料表面、内部的能谱特征。

1.3 田间效果评价

1.3.1 试验处理及布置

试验地点设置在河北省农林科学院大河实验站，位于石家庄市鹿泉市大河镇大河村，属于黄淮海半湿润平原区气候，四季分明。供试土壤为壤质潮土，土壤肥力水平中等，0~20 cm 土层有机质 16.292 g·kg^{-1}、全氮 0.702 g·kg^{-1}、全磷 0.061 g·kg^{-1}、全钾 1.817 g·kg^{-1}、有效磷 5.4 mg·kg^{-1}、速效钾 62 mg·kg^{-1}，pH 8.34。

供试夏玉米品种为‘郑丹 958’。试验设置 6 个处理(表 1)，3 次重复。试验田分为微区和小区，各 18 个。每个微区面积为 2 m^2，长 2 m，宽 1 m，四周用PVC 板隔开，PVC 板埋深 0.6 m；每个小区面积为 12 m^2，长 4 m、宽 3 m，四周起垄，小区间隔 0.5 m。微区内部各处理、小区内部各处理随机排列。小区和微区的夏玉米植株都是行距 50 cm、株距 25 cm。每个微区内种植夏玉米棵数相同，苗期定植 12 棵(3 排 4 行)；每个小区内玉米播种采用机播。

微区夏玉米于 2017 年 6 月 26 日播种，追肥于小喇叭口期进行，目的为检测改性尿素硝酸铵溶液肥料的氮素释放机制以及氨挥发时间、挥放量。在此基础上，小区夏玉米试验于 2018 年 6 月 24 日播种，追肥于小喇叭口期进行，供测产及计算氮素利用率。当地习惯施肥量为 225 kg(N)·hm^{-2}、75 kg(P_2O_5)·hm^{-2}、90 kg(K_2O)·hm^{-2}。所有处理施磷钾量相同，均为一次性底施。根据当地长期定位试验和测土配方施肥结果，优化施氮量为 157.5 kg(N)·hm^{-2}。所有施肥处理的施氮量基施/追施为 1∶1，所有施氮处理基施肥料均为普通尿素，追施肥料品种如表 1 所示。固体尿素采用条施的习惯方式，液体肥料随水施入，所有处理均采用微喷灌方式灌水(喇叭口期)，灌水量一致。

表 1 各处理的追肥氮肥种类和施氮总量

Table 1 Types of topdressing fertilizer and total nitrogen amounts of basic fertilization and topdressing of different treatments

处理 Treatment	追肥肥料品种 Topdressing fertilizer	总施氮量(基肥+追肥) Total N amount [kg(N)·hm^{-2}]
CK	—	0
CN	普通尿素 Conventional urea	225.0
CNU	普通尿素 Conventional urea	157.5
UAN	尿素硝酸铵溶液 Urea ammonium nitrate solution	157.5
YUL1	改性尿素硝酸铵溶液 1 Modified urea ammonium nitrate solution 1	157.5
YUL2	改性尿素硝酸铵溶液 2 Modified urea ammonium nitrate solution 2	157.5

基肥均为尿素。基肥：追肥的施氮量比为 1∶1。The base fertilizer is urea. The N ratio of base fertilizer to topdressing was 1∶1.

1.3.2　取样及数据处理

在微区内, 夏玉米施追肥后约 15 d 内测定氨挥发, 直到氨挥发速率痕量为止, 同时取 0~40 cm 土层土样测定硝态氮、铵态氮指标。土壤氨挥发的捕获方法采用通气法[18-20], 测定采用凯氏定氮法。在施肥当天开始进行土壤氨挥发气体的收集, 施肥后第 2 d 8:00 取样; 试验开始第 1~2 周, 每天取样 1 次; 第 2 周之后, 约间隔 10 d 取样 1 次, 直至监测不到氨挥发时为止。

田间土壤氨挥发通量的计算公式为:

土壤氨挥发通量($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)=所测氨量/(捕获面积×每次连续捕获时间)　　(1)

小区在收获期进行测产和取0~200 cm土层土壤分析氮素淋失情况。测产时每个小区取整3行玉米植株测产, 收获后用土钻取土样, 0~20 cm为一层, 采用连续流动分析仪(TRAACS 2000, Bran and Luebbe)法测定硝态氮和铵态氮, 采用烘干法测定土壤质量含水量[21]。

图表制作、数据计算与处理及相关分析等采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行; 方差分析和多重比较采用 SPSS 17.0 软件进行。

2　结果与分析

2.1　改性 UAN 液体肥料的外观与能谱分析

改性 UAN 清澈, 无杂质, 保护剂起到了一定的作用, 产品配方易于多角度调节。采用流延法将其成膜后, 在扫描电镜下可看出, 产品表面光滑、致密, 说明抑制剂在 UAN 内分布均匀, 呈现较理想的液体肥料状态(图 1)。能谱分析表明, 保护剂含 C、N、O、Na (图 2A), 加入组合抑制剂后发现, 磷的含量出现(图 2B), 由于只有抑制剂中含有磷, 进一步说明复合抑制剂与尿素硝酸铵溶液已有机融合。

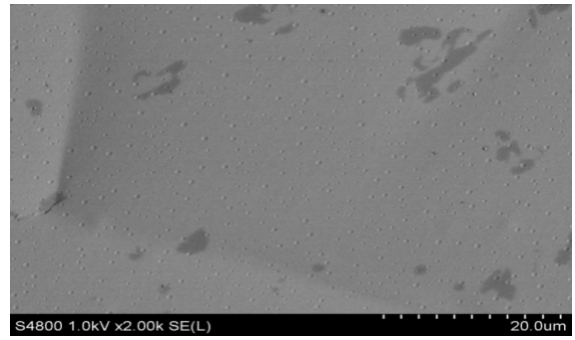

图 1　改性尿素硝酸铵溶液的成膜表观分析

Fig. 1　Apparent analysis of film formation of modified urea ammonium nitrate solution

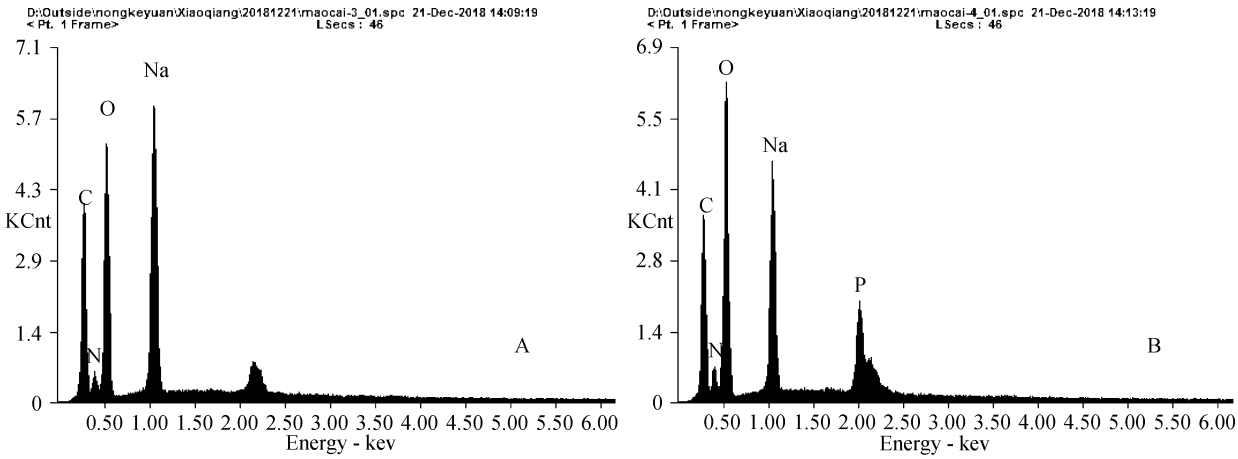

图 2　尿素硝酸铵溶液**(UAN) (A)**与改性 **UAN(B)**能谱分析

Fig. 2　Energy spectrum analysis of urea ammonium nitrate solution (UAN) (A) and modified UAN (B)

2.2　追施改性尿素硝酸铵溶液后土壤氨挥发特征

追肥后氨挥发速率如图 3 所示。施肥后 10 d 内, 是施氮处理氨挥发的集中阶段。CN 处理由于无抑制剂和控释技术且施氮量最多, 氨挥发在施肥后的第 2 d 就达到峰值, 为 13.22 $kg(N) \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, 显著高于其他处理, 到第 8 d 时 CN 处理氨挥发基本完成, 整个过程呈现迅速升高后又迅速下降趋势, 变化幅度、剧烈强度最大。优化施氮量中, UAN 处理变化趋势与 CN 处理相似, 氨挥发峰值最大, 为 5.06 $kg(N) \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$, 高于其他优化施氮肥料处理但不显著, 不过在第 3 d 之后, UAN 处理显著高于 YUL1 处理, 第 5 d 后显著高于其他优化施氮处理。CNU、YUL1 和 YUL2 处理氨挥发变化趋势类似, 之间差异不显著, 但 YUL1 峰值出现在第 3 d, 说明改性后延缓了尿素硝酸铵溶液的氨挥发速度。

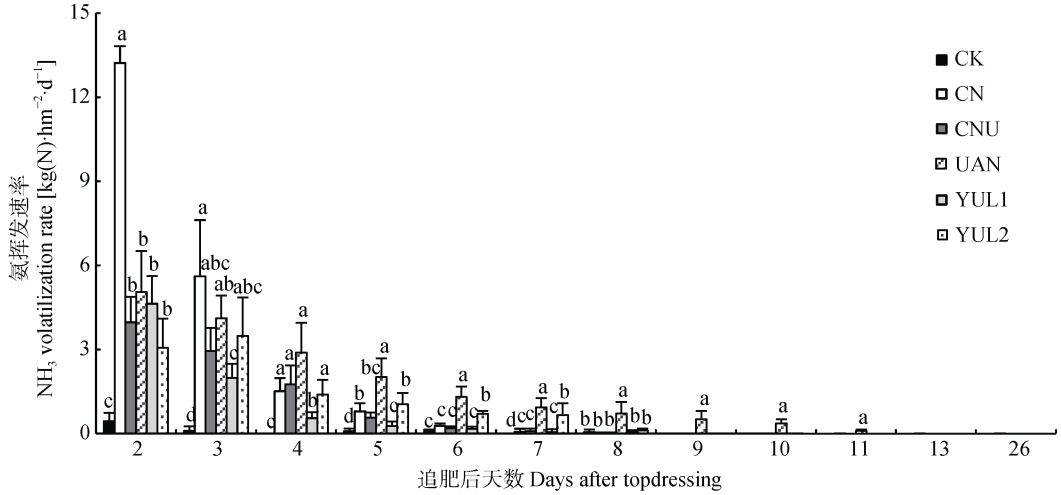

图 3 追肥施氮后不同肥料处理瞬时氨挥发率的变化

Fig. 3 Changes of instantaneous NH_3 volatilization in different fertilizer treatments after topdressing

不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters mean significant differences among treatments in the same time (P<0.05).

从累积氨挥发量可看出(图 4), CN 处理显著高于其他处理, 施氮后累积氨挥发为 21.47 kg(N)·hm^{-2}, 其次为 UAN 处理, 为 18.04 kg(N)·hm^{-2}。CNU 虽然与 UAN 处理施用的都是速效氮肥且施氮量相同, 但 UAN 为液体, 原料中本身就有铵态氮, 喷施后氨挥发速度快于 CNU, 累积氨挥发量比 CNU 处理显著高 88.9%; 而 YUL1 和 YUL2 分别比 UAN 显著降低 57.3%和 42.0%, 分别比 CNU 显著降低 19.3%和增加 9.6%, 二者作用不同, 说明改性的功能不同, 可能原因是 YUL1 比 YUL2 延缓尿素硝酸铵溶液向铵态氮转化的作用更强, 减弱了氨挥发速度。

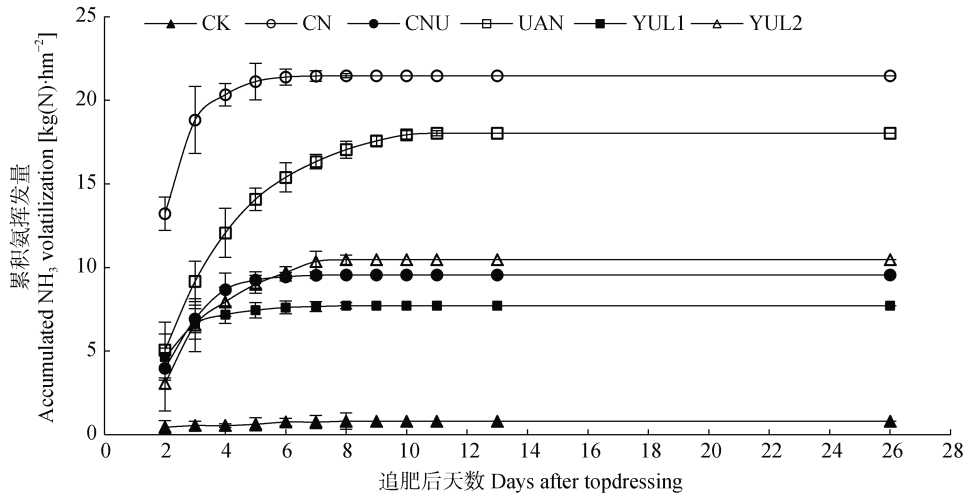

图 4 追肥施氮后不同肥料处理累积氨挥发的变化

Fig. 4 Changes of accumulated NH_3 volatilization in different fertilizer treatments after topdressing

2.3 追施改性尿素硝酸铵溶液对土壤铵态氮和硝态氮的影响

2.3.1 土壤铵态氮和硝态氮的动态变化

延缓氮素向下淋失速度、减少淋溶损失是评价肥料效果优劣的主要因素之一。本试验在追肥后, 0~20 cm 土层 CN、CNU 和 UAN 处理的土壤铵态氮含量呈现由高到低的趋势, 峰值出现在第 2 d, 分别为 12.35 mg·kg^{-1}、6.48 mg·kg^{-1} 和 9.46 mg·kg^{-1}(图 5A)。CN 处理下降的幅度最大, 说明损失或转化的最多; 处理 CNU 峰值低于 UAN, 可能是因为处理 UAN 为普通的尿素硝酸铵溶液, 本身含有一部分铵离子的原因, 但随着时间延长, 二者铵态氮浓度差异不显著。YUL1 和 YUL2 处理虽然峰值也出现在第 2 d, 分别为 6.04 mg·kg^{-1} 和 7.66 mg·kg^{-1}, 在所有

施氮处理中前者最低, 后者仅比 CNU 高, 但二者在追肥之后的 5~25 d 铵态氮浓度逐渐呈现高于其他施氮处理的趋势, 尤其 YUL2 处理在后期与 CNU 和 UAN 处理达到显著差异, YUL1 与 CNU 差异显著, 说明二者具有延缓铵态氮释放的作用。YUL1 和 YUL2 相比, 硝化抑制剂含量相对高的 YUL2, 其土壤铵态氮浓度相对高, 脲酶抑制剂高的 YUL1 相对阻碍了氮素向铵态氮的转化, 可能是因为脲酶抑制剂抑制了尿素的水解, 同时硝化抑制剂抑制了铵态氮硝化的结果。

由于硝态氮在土壤中更易淋失, 因此, 调控硝态氮对环境意义更大。从 0~20 cm 土层硝态氮的变化可看出(图 5B), 所有施氮处理整体趋势呈现低-高-低的变化。CN 处理在第 6 d 达到峰值(71.6 mg·kg^{-1}), 之后含量迅速下降。CNU 处理硝态氮的变化规律与 CN 处理的近似, 虽然施氮量少, 但峰值比 CN 高 15.0 mg·kg^{-1}(P>0.05)。UAN 处理追肥后前期土壤硝态氮的含量显著高于处理 CNU, 硝态氮的峰值虽然与 CN 和 CNU 同期出现, 但峰值显著低于前两者(16.0~31.0 mg·kg^{-1}), 在峰值前和峰值后两段时间内, 这 3 个处理硝态氮的含量差异不显著。YUL1 和 YUL2 处理硝态氮的变化略有不同, 追肥后硝态氮含量前期缓慢上升, 在达到峰值前低于同期其他施氮处理, 峰值出现在第 7 d, 分别为 63.80 mg·kg^{-1} 和 72.76 mg·kg^{-1},虽然低于 CN 和 CNU 峰值, 但显著高于同期相同施氮量的 CNU 和 UAN 处理, 且从 7~26 d 整体呈现高于后两者的趋势。在第 26 d, YUL2 显著高于 CN、CNU 和 UAN 处理, YUL1 与这三者差异不显著, YUL2 与 YUL1 差异不显著。

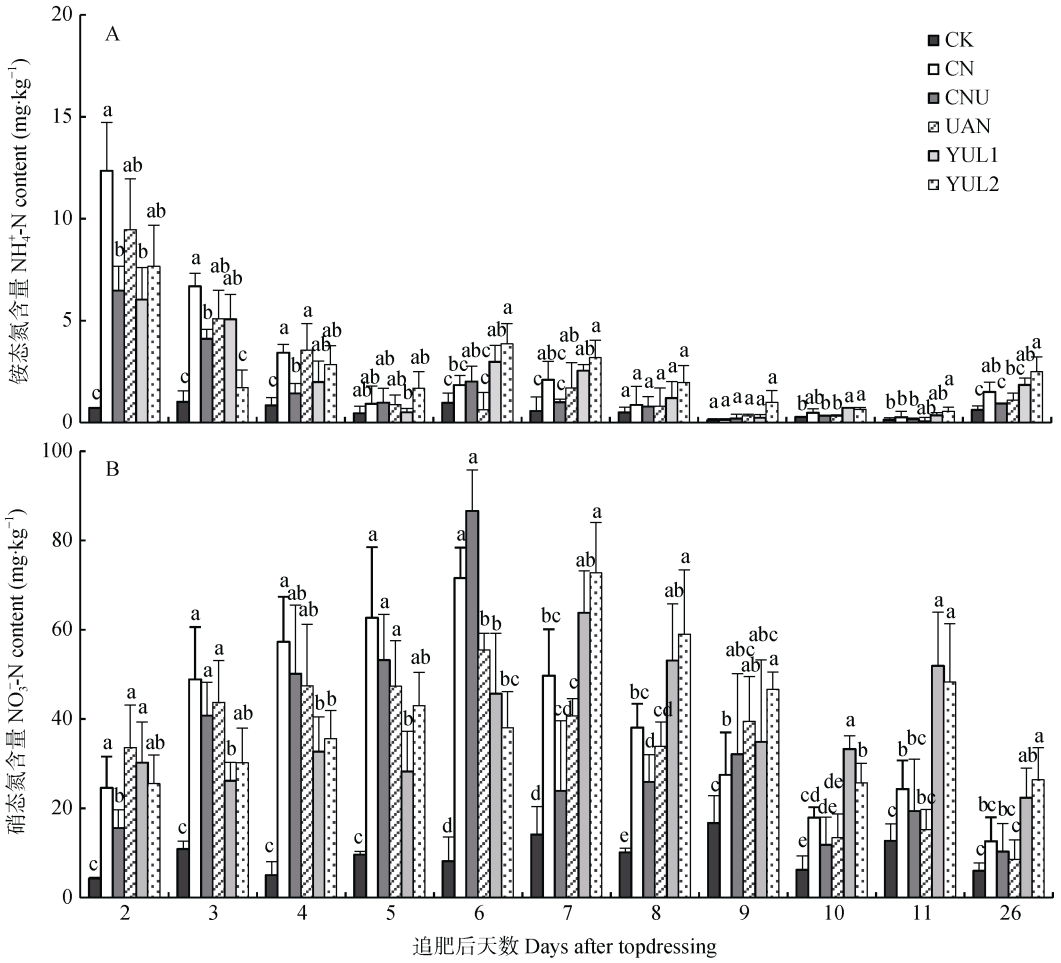

图 5　追肥施氮后不同肥料处理土壤铵态氮(a)和硝态氮(b)含量(0~20 cm 土层)

Fig. 5　NH_4^+-N (a) and NO_3^--N (b) contents of 0–20 cm soil in different fertilizer treatments

2.3.2　玉米收获期土壤铵态氮和硝态氮的剖面分布

夏玉米收获后, 不同追氮处理 0~200 cm 土层铵态氮分布情况如图 6A 所示, 铵态氮的变化分两个阶段: 0~120 cm 和 120~200 cm, 整体含量小于 3.5 mg·kg^{-1}, 淋溶较弱。从表层 0~20 cm 到 100~120 cm 铵态氮含量逐渐升高并达到最大值, 但是 120~

180 cm 铵态氮含量急剧下降。0~80 cm 土层内 YUL1 和 YUL2 处理铵态氮含量相对较高：在 60 cm 土层上下，YUL2 显著高于其他施氮处理；在 80 cm 土层上下，YUL1 和 YUL2 显著高于其他施氮处理；在 120 cm 土层上下，YUL1 和 YUL2 显著低于其他施氮处理；从 120~180 cm 土层铵态氮含量在各个追肥肥料处理间差异不显著。说明 YUL1 和 YUL2 稳定铵态氮的能力更强。

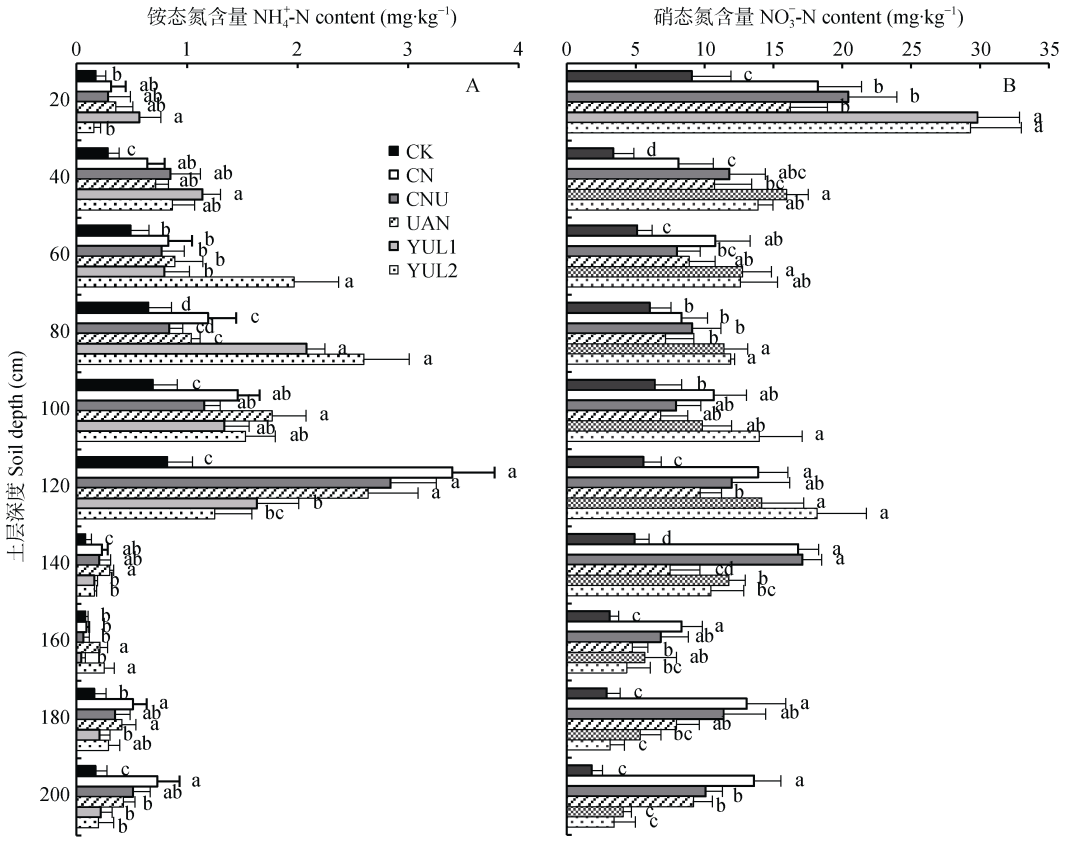

图 6 收获期不同施肥处理土壤剖面铵态氮(A)和硝态氮(B)分析

Fig. 6 Analysis of NH_4^+-N (A) and NO_3^--N (B) contents in soil of different treatments in harvest period

收获期 CN 处理土壤剖面硝态氮呈现明显地向下淋溶的趋势(图 6B)，在 0~20 cm 和 120~140 cm 土层处含量较高，140 cm 处为 16.8 mg·kg^{-1}，在 180~200 cm 土层处为各处理含量最高，达 13.6 mg·kg^{-1}，显著高于其他施氮处理。CNU 和 UAN 处理相比，各土层硝态氮含量差异不显著(120~140 cm 土层除外)，两者峰值均出现在 0~20 cm 土层，分别为 20.43 mg·kg^{-1} 和 16.21 mg·kg^{-1}。YUL1 和 YUL2 处理，硝态氮含量峰值出现在 0~20 cm 土层，分别为 29.82 mg·kg^{-1} 和 29.30 mg·kg^{-1}，二者之间差异不显著，但均显著高于其他施氮处理，比 CNU 高 46.0% 和 43.4%，比 UAN 高 45.6%和 44.7%，可能是 YUL1 和 YUL2 处理延缓了硝态氮的释放时间，保留了更多的硝态氮在耕层；从耕层到 120 cm 处，YUL1 和 YUL2 处理硝态氮的含量均高于其他肥料处理，120 cm 土层以下，随土层加深逐渐低于其他施氮处理，在 180~200 cm 土层达到显著差异。在同等施氮量条件下，YUL1 和 YUL2 处理显著降低了硝态氮的淋失风险，YUL1 和 YUL2 之间硝态氮含量差异不显著。

2.4 追施改性尿素硝酸铵溶液对玉米产量、氮肥利用率及经济效益的影响

YUL2 处理夏玉米产量显著高于不施氮处理，其他施氮处理与不施氮处理差异不显著(表 2)，施氮处理间差异不显著，优化施肥没有降低夏玉米产量。从趋势上看，YUL2 比 CN、CNU 和 UAN 处理分别高出 7.37%、7.98%和 6.8%。在氮素利用率方面，CNU 和 UAN 比 CN 分别高 3.04 和 5.1 个百分点，但差异不显著；而 YUL1 和 YUL2 比 CN 显著高 8.17 和 9.72 个百分点。从经济效益情况看，由于减少氮的用量，优化施氮处理比习惯施氮处理效益增加 79~875 元·hm^{-2}；优化施氮处理中，YUL1 和 YUL2 分别比 CNU 增加 123 元·hm^{-2} 和 783 元·hm^{-2}，比 UAN 增加 136 元·hm^{-2} 和 796 元·hm^{-2}，说明 YUL1

表 2　不同处理的氮素利用率及经济效益

Table 2　Nitrogen recovery and economic benefits of different fertilizer treatments

处理 Treatment	氮素利用率 N recovery (%)	产量 Yield ($kg\cdot hm^{-2}$)	产值 Production value ($¥\cdot hm^{-2}$)	氮肥用量 N application rate [$kg(N)\cdot hm^{-2}$]		氮肥成本 Cost of N fertilizer ($¥\cdot hm^{-2}$)	净收入 Net income ($¥\cdot hm^{-2}$)
				基肥 Basal	追肥 Topdressing		
CK		6 986±710b	10 479	0			10 479
CN	29.41b	8 221±811ab	12 332	112.5	112.50	1 076	11 255
CNU	32.45ab	8 174±1 072ab	12 262	112.5	78.75	915	11 347
UAN	34.51ab	8 264±679ab	12 397	112.5	78.75	1 063	11 334
YUL1	37.58a	8 391±781ab	12 587	112.5	78.75	1 117	11 470
YUL2	39.13a	8 827±965a	13 241	112.5	78.75	1 110	12 130

表内数据以 2018 年市场价计。玉米是 1 500 $元\cdot t^{-1}$, 普通尿素是 2 200 $元\cdot t^{-1}$, UAN 是 2 000 $元\cdot t^{-1}$, NBPT 和 DMPP 均为 90 000 $元\cdot t^{-1}$。根据 1.2.1 中各种成分的比例, 计算出 YUL1 是 2 207 $元\cdot t^{-1}$ (其中 NBPT 108 元, DMPP 27 元, 聚氨酸 72 元, UAN 2 000 元), YUL2 是 2 180 $元\cdot t^{-1}$ (其中 NBPT 54 元, DMPP 54 元, 聚氨酸 72 元, UAN 2 000 元)。不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the table are calculated based on average market price in 2018. The price of maize is 1 500 $¥\cdot t^{-1}$, conventional urea is 2 200 $¥\cdot t^{-1}$, UAN is 2 000 $¥\cdot t^{-1}$, NBPT and DMPP all are 90 000 $¥\cdot t^{-1}$. According to the proportions of various components of YUL1 and YUL2, price of YUL1 is 2 207 $¥\cdot t^{-1}$ (NBPT is 108 ¥, DMPP is 27 ¥, polyglutamic acid is 72 ¥, UAN is 2 000 ¥), and YUL2 is 2 180 $¥\cdot t^{-1}$ (NBPT is 54 ¥, DMPP is 54 ¥, polyglutamic acid is 72 ¥, UAN is 2 000 ¥). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level.

和 YUL2 具有增收的趋势和调控氮素的效果。从减少氨挥发量和稳定铵态氮、硝态氮的效果看, YUL2 比 YUL1 好, 可能也是导致净收入前者高于后者的原因。

3　讨论

相同施氮量下, 普通尿素硝酸铵溶液(UAN)氨挥发量显著高于普通尿素(CNU), 而改性后的尿素硝酸铵溶液YUL2与CNU差异不显著, YUL1氨挥发量显著降低, 说明改性起到了降低氨挥发的作用。但同是改性的尿素硝酸铵溶液, 对氨挥发的影响结果不同, 其可能原因是加入的抑制剂配方不同导致的, YUL1比YUL2脲酶抑制剂的含量高、硝化抑制剂的成分低, 调控氨挥发的效果好, 稳定硝态氮的效果相对弱。这从不同层次土壤硝态氮和铵态氮的含量变化及分布情况初步可以判断出, 深层土壤硝态氮YUL1比YUL2高, 表层土壤夏玉米生长后期也是如此。因此, YUL1调控铵态氮的转化能力更强一些, YUL2抑制硝态氮生成的能力更强一些。刘敏等[22]、Reza等[23]的研究结果也表明, 与常规追氮方式相比, 添加硝化抑制剂减少N_2O排放的同时, 增加了NH_3的挥发; 苏芳等[24]研究结果表明, 在相同施氮量条件下, 尿素的氨挥发损失为25.7%, 但添加DMPP后氨挥发损失为27.6%, 比尿素高出1.9个百分点; 硫硝酸铵的氨挥发损失为18.6%, 添加DMPP后为20.6%, 增加2.0个百分点; 都与本文的研究结果相类似。说明硝化抑制剂含量高, 氨挥发相应的高。有学者[24]建议在条施覆土基础上添加硝化抑制剂, 有可能同时降低N_2O排放和NH_3挥发损失, 但此推论值得进一步研究。

另外, 尿酶抑制剂浓度及用量不同, 抑制氨挥发的量也不同。本文中尿素硝酸铵溶液比普通尿素显著高出88.9%, 改性尿素硝酸铵溶液YUL1比普通尿素降低了 19.3%, YUL2 却增加了 9.6%。Liu 等[25]在尿素硝酸铵溶液中加入 0.3%不同浓度的 NBPT, 在玉米上的试验表明, 施氮后 20 d 内, 氨挥发损失分别减少 29.1%~78.8%、35.4%~81.9%、77.3%~87.4%和 59.1%~83.3%, 与 YUL1 结果相类似。YUL1 比 YUL2 的 NBPT 用量高, 抑制氨挥发效果好, 但 Liu 等[25]表明, NBPT 对氨挥发的抑制作用不随 NBPT 浓度的增加而增强, 含有脲酶抑制剂或脲酶与硝化复合抑制剂的尿素硝酸铵溶液表施时, 仅比未处理的尿素硝酸铵溶液玉米产量高 16.5~16.6%。在免耕条件下, 在尿素氮损失明显的地区和年份, 表施含有脲酶抑制剂的尿素肥料, 可以提高玉米的利用效率和生产性能[25]。

本文的改性尿素硝酸铵溶液肥料, 成本有所增加, 但从总的经济效益来看, 并没有减少, 而且尚未考虑到产生的生态环境效益。说明改性尿素硝酸铵溶液肥料前景看好, 可以进一步的优化和完善。

4　结论

与施用普通尿素、普通尿素硝酸铵溶液相比, 改性的尿素硝酸铵溶液氨挥发量显著减少, 其中尿酶抑制剂含量相对较高的改性尿素硝酸铵溶液表现效果最好。在同等优化施氮量下, 与施用普通尿素相比, 施肥后 26 d 内, 改性尿素硝酸铵溶液处理夏玉米季生长中后期表层土壤依然保持相对较高的氮

素水平，至收获期硝态氮浓度均比普通尿素、普通尿素硝酸铵溶液处理含量高。两种改性的尿素硝酸铵溶液相比，硝化抑制剂含量相对高的 YUL2，土壤铵态氮和硝态氮含量较高，硝态氮向下淋失的风险更小。改性尿素硝酸铵肥料在降低氮素的氨挥发和淋溶损失浓度的同时，既保证了产量又增加了净收益。

参考文献 References

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 2–80
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018: 2–80

[2] 徐钰, 刘兆辉, 张建军, 等. 不同氮肥管理措施对华北地区夏玉米田增产减排的效果分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 9–15
XU Y, LIU Z H, ZHANG J J, et al. Effect of different nitrogen management measures on yield and nitrous oxide emission of summer maize field in North China Plain[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018, (1): 9–15

[3] HUANG J K, XIANG C, JIA X P, et al. Impacts of training on farmers' nitrogen use in maize production in Shandong, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 67(4): 321–327

[4] 张运红, 姚健, 宝德俊, 等. 尿素硝酸铵溶液对玉米产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 113–121
ZHANG Y H, YAO J, BAO D J, et al. Effects of ammonium nitrate solution on yield, quality and nutrient uptake in maize[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 113–121

[5] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483–2491
WANG Y L, LIU T X, ZHAO P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2483–2491

[6] 薛长亮, 张克强, 张国印, 等. 应用RZWQM模型模拟华北玉米土壤剖面水氮迁移及淋溶特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2179–2186
XUE C L, ZHANG K Q, ZHANG G Y, et al. Simulating migration and leaching of water and nitrogen in maize soil profile in North China Plain with RZWQM model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2179–2186

[7] 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
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924

[8] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285–293
ZHONG Q, JU X T, ZHANG F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(3): 285–293

[9] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501–1514
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501–1514

[10] 段然, 汤月丰, 王亚男, 等. 不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1815–1822
DUAN R, TANG Y F, WANG Y N, et al. Effects of different fertilization modes on rice yield and nitrogen loss in paddy soils under double cropping rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1815–1822

[11] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 236–245
YANG B J, SHANG J, YU F W. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 236–245

[12] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 232–238
LIU H, CHEN M M, SUN Z M, et al. Effects of different nitrogen management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(1): 232–238

[13] 徐传银, 刘巧, 陆其通, 等. 水稻不同生育期喷施尿素硝铵溶液对产量和经济性状的影响[J]. 现代农业科技, 2015, (18): 17–18
XU C Y, LIU Q, LU Q T, et al. Effects of spraying urea-ammonium nitrate solution at different growth stages on yield and economic characteristics of rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, (18): 17–18

[14] 孙克刚, 张琨, 杨焕焕, 等. 尿素硝酸铵肥料在冬小麦上增产效果及氮肥利用率研究[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8): 1317–1320
SUN K G, ZHANG K, YANG H H, et al. Study on increasing yield and nitrogen use efficiency of urea-ammonium nitrate fertilizer in winter wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 1317–1320

[15] 侯峰. 尿素硝酸铵溶液对玉米氮吸收与利用的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(12): 2047–2050
HOU F. Effect of urea ammonium nitrate solution on nitrogen uptake and utilization in maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 2047–2050

[16] 姚海燕, 杨淑华. 尿素硝铵溶液(UAN)对玉米生长及产量的影响[J]. 中国农业信息, 2017, (13): 44–45
YAO H Y, YANG S H. Effects of urea and ammonium nitrate solution (UAN) on growth and yield of maize[J]. China

Agricultural Information, 2017, (13): 44–45

[17] 肖强, 李鸿雁, 李丽霞, 等. 控释抑制剂包膜尿素及其制备方法与应用: 中国, 201711143356.0[P]. 2018-04-06
XIAO Q, LI H Y, LI L X, et al. Controlled-release inhibitor coated urea and its preparation method and application: CN, 201711143356.0[P]. 2018-04-06

[18] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209
WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205–209

[19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 359–365
WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. In situ determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 359–365

[20] MARTINS M R, SANT'ANNA S A C, ZAMAN M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N_2O and NH_3 emissions, fertilizer-^{15}N recovery and maize yield in a tropical soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 247: 54–62

[21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 156–163
LU R K. Methods of Agrochemical Analysis of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 156–163

[22] 刘敏, 张翀, 何彦芳, 等. 追氮方式对夏玉米土壤 N_2O 和 NH_3 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 19–29
LIU M, ZHANG C, HE Y F, et al. Impact of fertilization method on soil nitrous oxide emissions and ammonia volatilization during summer maize growth period[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 19–29

[23] REZA K A, LIN R Y, MOHAMMED Y A, et al. Agronomic effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4130–4139

[24] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. 土壤, 2006, 38(6): 682–686
SU F, HUANG B X, DING X Q, et al. Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizer types[J]. Soils, 2006, 38(6): 682–686

[25] LIU S L, WANG X H, YIN X H, et al. Ammonia volatilization loss and corn nitrogen nutrition and productivity with efficiency enhanced UAN and urea under no-tillage[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 6610